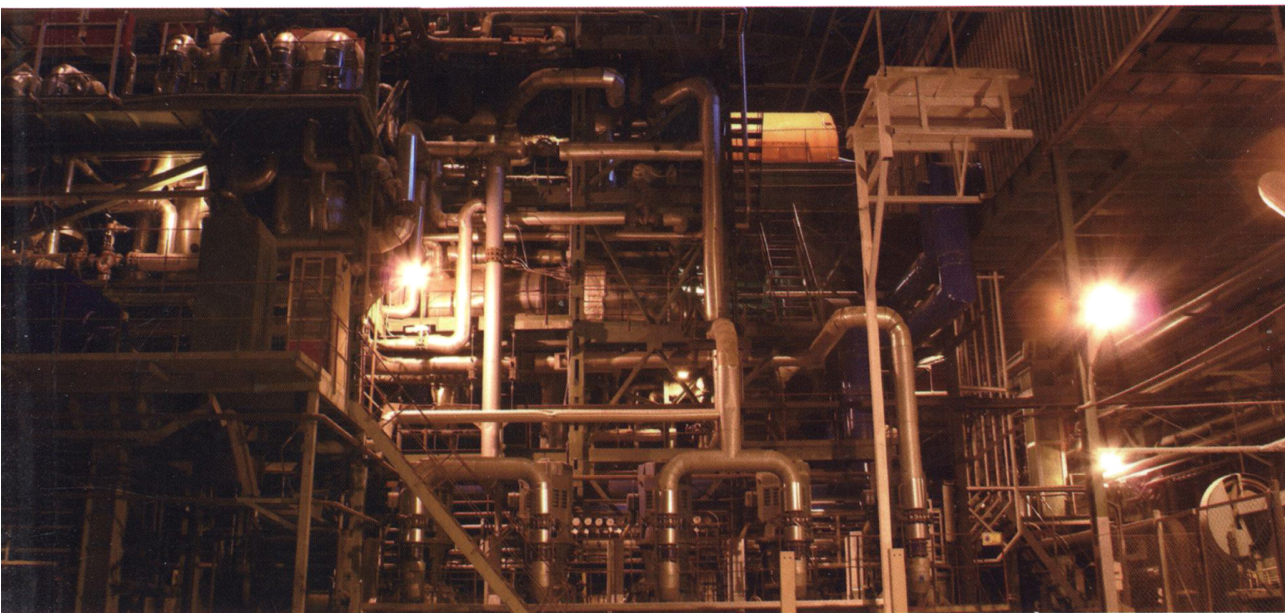




节能减排技术丛书

J I E N E N G J I A N P A I



# 工业锅炉烟气湿法 脱硫实用技术设计

吴安 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



**吴安** 环境工程、热能动力工程教授级高级工程师。曾任中国兵器工业专家委员会委员、中国兵工环保劳保学会副主任委员、中国兵器工业环境保护研究所所长、总工程师、五环环境工程技术公司总经理等职。

1960年毕业于清华大学动力机械系燃气轮机专业，后在中国兵器工业第五设计研究院和环境保护研究所从事热能动力工程设计、大气污染控制工程设计和科学研究工作。

获奖项目有：“PW型平面旋风除尘器研制”获全国科学大会奖状、“火炸药厂稀硫酸浓缩尾气净化研究”获国防科工委重大科技进步奖、“锅炉烟气喷雾干燥脱硫技术研究”获兵器部科技进步奖、“工业锅炉烟气气流喷雾干燥脱硫技术”获环境保护部最佳实用技术奖。

曾编著出版“工业锅炉房设计”部分章节、“火炸药厂稀硫酸浓缩尾气的热力学性质”“纤维除雾器”“粉尘浓度的连续监测”“锅炉 烟气喷雾干燥脱硫技术研究”“兵器工业环境保护设计手册”“锅炉烟气氧化镁湿法脱硫工业试验研究”“氧化镁湿法同石灰石湿法脱硫技术比选”等书刊论文。

作者邮箱:wuan1@263.net  
mobile:13701067419



节能减排技术丛书

# 工业锅炉烟气湿法脱硫 实用技术设计

吴 安 编著



机械工业出版社

本书在收集参考国内、外脱硫技术新资料的基础上,结合作者 20 多年从事大气污染控制科研设计的经验,简明、扼要地阐述了煤的燃烧和大气污染,锅炉烟气脱硫设计条件的确定,气体吸收概论等有关锅炉烟气脱硫设计的技术基础性知识;比较系统全面地从脱硫设计角度阐述了工业及供热锅炉烟气湿法脱硫实用工艺设计。

根据脱硫设计需要,适当介绍了脱硫装置腐蚀环境和防腐蚀设计,阐述了锅炉烟气脱硫技术及工艺比较选择,介绍了工业锅炉烟气脱硫自控设计方案,阐述了工业锅炉湿法脱硫主要设备和湿法脱硫系统调试。为了对工业及供热锅炉烟气湿法脱硫实用工艺设计有更具体、更清楚的了解,本书对每种实用脱硫工艺都以 220t/h 热电锅炉湿法脱硫设计方案和投资估算进行了示例。为了脱硫设计方便,本书摘录了有关脱硫设计中常用的主要设备及脱硫设计和运行中相关的技术规定标准规范。

本书对工业及供热锅炉湿法脱硫技术的论述,从基础理论到生产实践、从国外到国内、从技术到经济、从定性到定量、从生产经验数据到数理分析计算、从设计方法到设计示例,内容丰富、层次分明、重点突出、实用性强。本书既可供从事工业及供热锅炉房设计及运行人员、大气污染控制科研及设计人员、环境保护管理人员、环境监测人员、环境保护工程技术公司专业人员参考阅读,也可供高等院校环境工程、热能工程师生参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

工业锅炉烟气湿法脱硫实用技术设计/吴安编著. —北京:机械工业出版社, 2013. 9

ISBN 978-7-111-43981-3

I. ①工… II. ①吴… III. ①工业锅炉—煤烟污染—湿法脱硫—烟气脱硫 IV. ①X701.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 212217 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:曲彩云 责任编辑:曲彩云 庞 晖

版式设计:霍永明 责任校对:刘怡丹

封面设计:赵颖喆 责任印制:李 洋

三河市国英印务有限公司印刷

2014 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·28.5 印张·2 插页·637 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-43981-3

定价:86.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版



# 前 言

对于人类，具有如此美好的生存环境和丰富资源的地球只有一个。地球环境需要人类珍惜和保护。否则，破坏了地球的生态平衡也就是破坏了人类自己健康生活的要素。

保护环境维持地球的生态平衡是人类生存的需要和持续发展的需要，是人类高度文明与智慧的表现，也是人类的共同愿望和义不容辞的责任。可是随着经济的发展，大量燃料燃烧后的烟气排向大气，产生了严重的大气污染和环境问题。当前迫切需要解决和改善的重要环境问题是：

## 1. 全球气候变暖

由于  $\text{CO}_2$  的大量排放，导致全球气候变暖。在过去的一个世纪里全球表面平均温度已上升  $0.3 \sim 0.6^\circ\text{C}$ ，全球海平面上升了  $10 \sim 25\text{cm}$ 。目前在地球大气中的二氧化碳含量已由工业革命（1750 年）之前的  $280\text{ppm}^\ominus$  增加到近  $360\text{ppm}$ 。1996 年政府间气候变化小组发表的评估报告表明：如果世界能源消费的格局不发生根本变化，那么到 21 世纪中叶，大气中的二氧化碳含量将达到  $560\text{ppm}$ ，全球平均温度可能上升  $1.5 \sim 4^\circ\text{C}$ 。同时可能出现的影响和危害有：一是海平面上升；二是影响农业和自然生态系统；三是加剧洪涝、干旱及其他气象灾害；四是影响人类健康。

## 2. 臭氧层破坏和损耗

自 1985 年南极上空出现臭氧层空洞以来，地球上空臭氧层被损耗的现象一直有增无减。到 1994 年，南极上空的破坏面积已达  $2400\text{万 km}^2$ 。大气中的臭氧含量仅一亿分之一，分布在离地面  $20 \sim 30\text{km}$  的平流层中，它可以有效地挡住来自太阳的紫外线侵袭。有害紫外线的增加会使皮肤癌和白内障患者增加，损坏人的免疫力，使传染病增加；其次是破坏生态系统。

## 3. 酸雨污染

酸雨，也被称为空中的死神。其是指酸性物质以湿沉降或酸性颗粒物的形式，从大气转移到地面上。酸雨中绝大部分是硫酸和硝酸，主要来源于人类使用化石燃料，向大气排放了大量的二氧化硫和氮氧化物。欧洲是世界上一大酸雨区，美国和加拿大东部也是一大酸雨区。亚洲的酸雨区主要集中在东亚，其中我国南方是酸雨严重的地区。

---

$\ominus 1\text{ppm} = 10^{-6}$ 。

酸雨,通常指 pH 低于 5.6 的降水。其危害主要表现为损害生物和自然生态系统,腐蚀建筑材料及金属结构。2008 年,我国二氧化硫排放量为 2321 万 t。我国目前每年因酸雨和二氧化硫污染,对生态环境损害和人体健康影响造成的经济损失在 1100 亿元人民币左右。即每吨二氧化硫造成的经济损失约 4740 元。

目前我国在用的工业锅炉有 60 万台左右,工业炉窑有 12 万台左右。年耗煤 4 亿 t 左右,约占全国煤炭消耗量的 1/4。年排放二氧化硫 1000 万 t,约占全国二氧化硫排放总量的 45%。

目前,我国对电站锅炉、工业锅炉和炉窑都发布了烟气脱硫除尘排放标准,有 GB 13223—2003《火电厂大气污染物排放标准》,GB 13271—2001《锅炉大气污染物排放标准》。此外,还有一些地方标准,如北京市发布的北京市地方标准,DB 11/139—2007《锅炉污染物综合排放标准》。这表明我国已经严格按相关国家排放标准来控制电站锅炉与工业锅炉和工业炉窑烟气污染物排放。凡新建锅炉或在用锅炉和改建扩建锅炉都必须安装脱硫装置,这对控制  $\text{SO}_2$  污染起到了强制性作用,并推动锅炉烟气脱硫进入一个新阶段。自 2001 年,我国开展电站脱硫和工业锅炉脱硫以来,上了一大批脱硫项目。这对削减  $\text{SO}_2$  排放量收到了明显效果。在 2009 年,我国政府工作报告中明确公布了 2008 年  $\text{SO}_2$  排放量比 2007 年下降了 5.95%。

2009 年 3 月 6 日国家环境保护部发布了《工业锅炉及炉窑湿法烟气脱硫工程技术规范》(HJ 462—2009),更好地规范了工业锅炉脱硫工程设计。该规范适用于蒸发量  $\geq 20\text{t/h}$  (14MW) 或蒸发量  $< 400\text{t/h}$  的燃煤热电锅炉及相当烟气量的炉窑脱硫工程。这个适用范围涵盖锅炉吨位跨度较宽,从一般的  $20\text{t/h}$  工业锅炉至相当于 10 万 kW 火力发电厂锅炉 ( $410\text{t/h}$  电站锅炉)。所以在设计脱硫系统的工艺流程和自控水平时,应该区别对待。对于  $\leq 35$  (40)  $\text{t/h}$  的锅炉,采用相对简化的脱硫系统;对于接近  $410\text{t/h}$  的锅炉采用较完备的脱硫系统。

为了更好地促进工业锅炉与工业炉窑烟气脱硫,作者在总结以往工业锅炉烟气脱硫设计工作基础上,广泛收集国内外资料,编写了本书。

本书较系统地阐述了烟气脱硫技术设计中用到的基础理论及计算方法,锅炉烟气湿法脱硫实用技术,烟气脱硫工艺参数及自动控制,烟气脱硫防腐材料,烟气脱硫常用脱硫塔,烟气脱硫系统主要设备。此外,介绍了烟气脱硫系统的调试和脱硫工艺技术经济比较与选择。

作者希望能使读者比较系统地了解工业锅炉烟气湿法脱硫实用技术,了解烟气湿法脱硫工艺和自控设计,为做好工业及供热锅炉脱硫技术的经济比



较与选择，做好烟气脱硫技术设计提供一些必要、实用的技术资料。并希望  
对工业及供热锅炉烟气脱硫工作能有所帮助。

本书摘编了部分对于脱硫设计常用的资料，在此向这些资料的编著者表示  
感谢。

本书中有关自控方面设计摘编了李国祥、周晴同志在某个项目设计中的  
部分说明。在此表示深谢！

由于水平所限，书中存在的缺失和不足之处恳请读者批评指正。

编者

# 目 录

## 前言

第 1 章 煤的燃烧与大气污染	1
1.1 煤的组成、成分分析及其分类	1
1.1.1 煤的元素分析	1
1.1.2 煤的工业分析	1
1.1.3 煤的成分基准及换算	2
1.2 煤燃烧产生的污染物	4
1.3 煤的燃烧和烟气组成成分	5
1.3.1 碳的燃烧	5
1.3.2 氢的燃烧	6
1.3.3 硫的燃烧	6
1.3.4 煤燃烧的理论空气量	6
1.3.5 煤燃烧产生的烟气量	7
1.3.6 空气和烟气的焓	9
1.4 工业及热水锅炉烟尘原始排放浓度	10
第 2 章 锅炉烟气脱硫设计条件	12
2.1 脱硫设计常用的标准及规范	12
2.2 脱硫设计的原始资料	12
2.3 脱硫装置设计要求	13
2.4 脱硫装置设计条件	13
2.5 锅炉排烟的 $\text{SO}_2$ 含量	15
2.6 锅炉排烟的 $\text{NO}_x$ 含量	15
2.7 脱硫装置的设计脱硫效率	16
2.8 烟气含湿量	16
2.9 烟气露点	16
2.10 烟气的升温 and 降温	17
第 3 章 气体吸收概论	20
3.1 气体扩散	20
3.1.1 扩散速率方程式	20
3.1.2 扩散系数	21
3.2 气体吸收原理	21
3.2.1 亨利定律	22
3.2.2 双膜理论	22
3.2.3 传质速率方程式	23
3.2.4 脱硫塔传质单元数	24



3.2.5 脱硫塔吸收区高度 .....	26
<b>第4章 锅炉烟气湿法脱硫实用工艺设计 .....</b>	<b>28</b>
4.1 湿式石灰法脱硫 .....	28
4.1.1 基本原理与化学反应式 .....	28
4.1.2 湿式石灰法脱硫工艺流程 .....	30
4.1.3 脱硫工艺流程说明 .....	32
4.1.4 湿式石灰法脱硫工艺参数 .....	34
4.1.5 脱硫产物的用途 .....	37
4.1.6 脱硫过程水平衡 .....	37
4.1.7 湿式石灰法脱硫废水处理 .....	42
4.1.8 湿式石灰法脱硫特点 .....	43
4.1.9 湿式石灰法脱硫设计注意事项 .....	44
4.1.10 湿式石灰法烟气脱硫设计方案及投资估算 .....	46
4.2 湿式石灰石法脱硫 .....	55
4.2.1 基本原理与化学反应式 .....	56
4.2.2 湿式石灰石法脱硫工艺流程 .....	57
4.2.3 湿式石灰石法脱硫工艺参数 .....	59
4.2.4 脱硫产物的用途 .....	60
4.2.5 湿式石灰石法脱硫特点 .....	60
4.2.6 湿式石灰石法脱硫设计注意事项 .....	60
4.2.7 湿式石灰石法烟气脱硫设计方案及工程投资估算 .....	61
4.3 湿式氧化镁法脱硫 .....	67
4.3.1 基本原理与化学反应式 .....	67
4.3.2 湿式氧化镁法脱硫工艺流程 .....	68
4.3.3 脱硫系统组成 .....	68
4.3.4 湿式氧化镁法脱硫工艺参数 .....	70
4.3.5 湿式氧化镁法脱硫废水及处理方案 .....	72
4.3.6 湿式氧化镁法脱硫技术特点 .....	74
4.3.7 湿式氧化镁法脱硫设计注意事项 .....	74
4.3.8 湿式氧化镁法烟气脱硫除尘方案及工程投资估算 .....	76
4.4 钠碱法脱硫 .....	81
4.4.1 基本原理与化学反应式 .....	82
4.4.2 钠碱法脱硫工艺流程 .....	83
4.4.3 亚硫酸钠法 .....	84
4.4.4 钠碱法脱硫工艺参数 .....	85
4.4.5 钠碱法脱硫废水量及处理方案 .....	85
4.4.6 钠碱法脱硫技术特点 .....	88
4.4.7 钠碱法脱硫设计注意事项 .....	89
4.4.8 钠碱法锅炉烟气脱硫方案及投资估算 .....	89
4.5 双碱法脱硫 .....	95

4.5.1	基本原理与化学反应式	96
4.5.2	双碱法工艺流程	96
4.5.3	双碱法脱硫工艺参数	97
4.5.4	双碱法中钠碱的再生回用	98
4.5.5	双碱法中钠碱的损耗	98
4.5.6	双碱法脱硫废水处理	99
4.5.7	双碱法脱硫技术特点	101
4.5.8	双碱法脱硫设计注意事项	102
4.5.9	双碱法烟气脱硫方案及投资估算	103
4.6	湿式氨法脱硫工艺	110
4.6.1	基本原理与化学反应式	110
4.6.2	湿式氨法脱硫工艺流程及参数	111
4.6.3	湿式氨法脱硫的 pH 值控制	115
4.6.4	湿式氨法脱硫产物的用途	115
4.6.5	湿式氨法脱硫工艺技术特点	116
4.6.6	湿式氨法脱硫设计注意事项	116
4.6.7	湿式氨法烟气脱硫设计方案及投资估算（氨—亚硫酸铵法脱硫工艺）	118
4.7	工业锅炉简易湿法脱硫	125
4.8	工业及供热锅炉湿法烟气脱硫设计实例	128
4.8.1	2×40t/h 锅炉湿式氧化镁法烟气脱硫设计	128
4.8.2	2×35t/h 锅炉烟气钠碱法脱硫设计	138
第5章	锅炉烟气脱硫技术简介及工艺比较和选择	144
5.1	烟气脱硫技术简介	144
5.1.1	煤燃烧前脱硫技术	144
5.1.2	煤燃烧中脱硫技术	144
5.1.3	煤燃烧后烟气脱硫技术	144
5.1.4	常用脱硫工艺和性能	152
5.2	锅炉烟气脱硫工艺的比较和选择	153
5.2.1	湿式石灰石法脱硫工艺	153
5.2.2	双碱法脱硫工艺	154
5.2.3	湿式氧化镁法脱硫工艺	154
5.2.4	循环流化床烟气脱硫方案	156
5.2.5	双碱法、石灰石法、氧化镁法经济指标对比	156
5.3	脱硫工艺方案比选意见	158
第6章	脱硫剂选择和浆液制备	159
6.1	脱硫剂的选择	159
6.1.1	脱硫剂价格和比价	159
6.1.2	脱硫剂产地	159
6.1.3	脱硫剂的脱硫工艺特性	159
6.2	脱硫剂制备流程	161



6.2.1 全封闭脱硫剂制备系统 .....	162
6.2.2 半封闭脱硫剂制备系统 .....	162
6.2.3 简易脱硫剂制备系统 .....	163
6.3 脱硫剂浆液制备设计条件 .....	164
6.3.1 脱硫剂用量 .....	164
6.3.2 脱硫剂储仓 .....	164
6.3.3 搅拌槽（池） .....	165
6.4 脱硫剂浆液制备设计示例 .....	167
<b>第7章 锅炉烟气湿法脱硫常用脱硫塔 .....</b>	<b>170</b>
7.1 空心喷雾脱硫塔（洗涤塔、吸收塔） .....	170
7.2 多孔板塔（无溢流多孔板塔、泡沫塔） .....	172
7.3 文丘里洗涤塔 .....	172
7.4 喷雾、多孔板塔 .....	175
7.5 旋流板塔 .....	175
7.6 液柱塔 .....	176
7.7 其他脱硫塔 .....	177
7.8 常用脱硫塔性能 .....	178
<b>第8章 锅炉烟气湿法脱硫自动控制设计 .....</b>	<b>179</b>
8.1 控制系统概述 .....	179
8.2 自控设计采用的标准及规范 .....	180
8.3 自控设计范围和内容 .....	180
8.4 自动控制回路 .....	180
8.5 测量仪表选型 .....	181
8.6 烟气排放连续监测系统（CEMS） .....	181
8.7 工业锅炉脱硫自动控制设计技术方案示例 .....	181
8.7.1 130t/h 供热锅炉脱硫自控和电气方案设计 .....	181
8.7.2 锅炉烟气脱硫浆液制备自控设计 .....	183
<b>第9章 工业锅炉烟气湿法脱硫主要设备 .....</b>	<b>187</b>
9.1 脱硫增压风机 .....	187
9.2 脱硫循环泵 .....	189
9.3 罗茨鼓风机 .....	191
9.4 喷雾喷嘴 .....	191
9.4.1 喷嘴的性能 .....	192
9.4.2 喷雾的覆盖率 $f_p$ .....	195
9.4.3 喷嘴的固定方法 .....	195
9.4.4 喷嘴的材料 .....	196
9.5 除雾器 .....	196
9.6 水力旋流器 .....	206
9.7 真空带式过滤机 .....	209
9.8 板框压滤机 .....	210

9.9 离心分离机 .....	212
9.10 烟气加热器 .....	213
9.11 烟气挡板 .....	216
9.12 烟道 .....	218
9.13 管道和阀门 .....	220
<b>第10章 脱硫系统烟道设计及烟气升温 .....</b>	<b>222</b>
10.1 烟道设计 .....	222
10.2 阻力计算 .....	224
10.3 脱硫系统增压风机设计示例 .....	227
10.4 增压风机风压 $H_{zy}$ (Pa) 和风量 $Q_{zy}$ ( $m^3/h$ ) 的确定 .....	231
10.5 脱硫排烟加热方案 .....	231
<b>第11章 烟气脱硫防腐蚀设计及材料 .....</b>	<b>236</b>
11.1 烟气脱硫装置的腐蚀 .....	236
11.2 腐蚀环境划分和材料选用 .....	237
11.3 常用非金属防腐材料 .....	238
11.4 常用金属防腐材料 .....	242
<b>第12章 锅炉烟气湿法脱硫系统调试 .....</b>	<b>247</b>
12.1 脱硫系统调试任务与目的 .....	247
12.2 系统调试的一般规定 .....	247
12.3 调试运行组织工作 .....	248
12.4 系统调试 .....	255
12.5 脱硫系统运行与性能测试 .....	257
<b>第13章 常用设计资料 .....</b>	<b>259</b>
13.1 锅炉燃煤资料及燃烧数据 .....	259
13.2 蒸汽及热水、烟气的热力性质 .....	262
13.3 常用化合物及脱硫剂 .....	272
13.4 常用物理单位换算 .....	275
13.5 烟风道异径管局部阻力系数 .....	283
13.6 各国不锈钢耐酸钢牌号对照 .....	292
13.7 常用数据 .....	295
13.7.1 常用钢材的许用应力 .....	295
13.7.2 常用材料的力学性能、物理性能 .....	303
13.8 常用材料 .....	307
13.8.1 型材 .....	307
13.8.2 管材 .....	319
13.8.3 钢塑复合管 .....	344
13.8.4 ABS 塑料管 .....	345
13.8.5 板材 .....	346
13.9 常用设备 .....	347
<b>参考文献 .....</b>	<b>443</b>

# 第 1 章 煤的燃烧与大气污染

## 1.1 煤的组成、成分分析及其分类

煤是由有机物和无机物组成的复杂碳氢固体燃料。煤是远古植物因地壳变动被埋入深层地下，长期处在温度和压力较高的环境下，植物中纤维木质素脱水，含氧量减少，碳质增加，逐渐形成化学稳定、含碳量高的固体化合物。由于埋入地下的深度和时间不同，以及地质作用的强弱不同，形成褐煤、烟煤和无烟煤三大类。

根据用途，将用于炼焦、锻造和化工的燃料称为工艺燃料，用于锅炉的燃料称为动力燃料。

### 1.1.1 煤的元素分析

全面测定煤中全部化学成分的分析叫做元素分析。煤中所含化学元素达 30 多种，一般将煤中不可燃烧的物质计入灰分，所以煤的元素分析成分包括碳、氢、氧、氮、硫、灰分和水分，各化学元素成分用质量分数表示，即

$$C + H + O + N + S + A + M = 100\% \quad (1-1)$$

碳是煤中含量最多的可燃元素，发热量大，纯碳的发热量为  $32.7 \times 10^3 \text{ kJ/kg}$ 。煤中的碳一部分与氢、氧、氮和硫结合成挥发性有机物，其燃点较低。而对于呈单质状态的碳，其燃点较高，不易着火和燃尽。

氢在煤中含量较少，一般为 3% ~ 6%（质量分数），氢的发热量最高为  $120 \times 10^3 \text{ kJ/kg}$ ，氢的燃点低，容易着火。

煤中的氧和氮是不可燃物质，其含量较少。但氮在高温时易生成氮氧化物  $\text{NO}_x$ ，它是污染大气的酸性气体，也是形成酸雨的有害物质。

硫在煤中含量也很少，通常以有机硫、硫化铁、硫酸盐形式存在。前两种硫化物可燃，称为可燃硫；后一种硫酸盐则归入灰分，称为固定硫。计算烟气中的硫氧化合物  $\text{SO}_x$  时，可近似采用全硫分来代替可燃硫。硫的燃烧产物  $\text{SO}_2$  和  $\text{SO}_3$  是酸性气体，有害于人体健康，也是产生酸雨的元凶，能腐蚀金属设备和建筑物，也会破坏树木、植被和农作物，是当前大气污染控制的主要污染物之一。

### 1.1.2 煤的工业分析

在实验室中对煤样进行分析，得出水分、挥发分、固定碳和灰分这四种成分的质量分数，称为工业分析。

将自然干燥后的煤样取 1g 左右放入预先加热至  $(145 \pm 5)^\circ\text{C}$  的干燥箱中干燥 1h 后，

试样质量减轻的量占原质量的百分数即为空气干燥基水分的质量分数。

将失去水分的煤样在隔绝空气的条件下放入 920℃ 电炉中加热 7min，放入干燥器内冷却至室温后称重，可得出空气干燥基挥发分的质量分数，即

$$V_{\text{ad}} = \frac{G - G_1}{G} \times 100\% - M_{\text{ad}} \quad (1-2)$$

式中  $G$ ——原煤样质量 (g)；

$G_1$ ——加热后剩余质量 (g)；

$M_{\text{ad}}$ ——空气干燥基水分的质量分数 (%)。

在加热过程中，煤中有机物质分解而析出的气体物质是挥发分，它主要是由各种碳氢化合物、氢、一氧化碳、硫化氢等可燃气体组成，另外还有少量的氧、二氧化碳、氮等不可燃气体。

由于煤的碳化程度不同，其挥发分的析出温度不相同，挥发分的成分及含量也不同。由于挥发分燃点低，容易着火，因此对锅炉运行影响较大，是煤的重要特性，挥发分的含量常作为煤分类的重要依据。

煤在失去水分和挥发分后就成为了焦炭，它包括固定碳和灰分。将煤样放在高温炉中，按规定升温到  $(815 \pm 10)^\circ\text{C}$ ，并加热 1h，冷却至室温后称重，剩余质量占原煤样质量的百分数即为空气干燥基灰分的质量分数。将原煤样中水分、灰分、挥发分扣除后，即为空气干燥基固定碳的质量分数。

### 1.1.3 煤的成分基准及换算

由于煤中的水分和灰分易受外界条件的影响而变化，单位质量的煤中其他可燃物质的质量百分数也随之而变。因此，根据煤存在的条件或根据需要而规定的“成分组合”称为基准。

#### 1. 常用基准

(1) 收到基 (原应用基) 以收到状态的煤为基准，计算煤中全部组成成分的组合称为收到基，其中包括全部水分，收到基以下角标 ar 表示。它相当于原来的应用基 y。

$$C_{\text{ar}} + H_{\text{ar}} + O_{\text{ar}} + N_{\text{ar}} + S_{\text{ar}} + A_{\text{ar}} + M_{\text{ar}} = 100\% \quad (1-3)$$

(2) 空气干燥基 (原分析基) 煤样在实验室规定的温度下自然干燥失去外部水分后，其余的成分组合是空气干燥基，以下角标 ad 表示。它相当于原来的分析基 f。

$$C_{\text{ad}} + H_{\text{ad}} + O_{\text{ad}} + N_{\text{ad}} + S_{\text{ad}} + M_{\text{ad}} = 100\% \quad (1-4)$$

(3) 干燥基 以假想无水状态的煤为基准，以下角标 d 表示，原表示符为 g。由于已不受水分的影响，灰分含量相对比较稳定，可以用于比较两种煤的含灰量。

$$C_{\text{d}} + H_{\text{d}} + O_{\text{d}} + N_{\text{d}} + S_{\text{d}} + A_{\text{d}} = 100\% \quad (1-5)$$

(4) 干燥无灰基 (原可燃基) 以假想无水、无灰状态的煤为基准，以下角标



daf 表示。它相当于原来的可燃基 r。由于不受水分、灰分的影响，干燥无灰基常用于比较两种煤中的碳、氢、氧、氮、硫成分含量的多少。

$$C_{\text{daf}} + H_{\text{daf}} + O_{\text{daf}} + N_{\text{daf}} + S_{\text{daf}} = 100\%$$

(1-6)

四种基准还可以用于煤的工业分析。元素分析成分和工业分析成分的关系如图 1-1 所示。

2. 煤成分分析不同基准间的换算

对于同一种煤，各基准间可进行换算，其换算关系见表 1-1，公式为

$$x = Kx_0$$

(1-7)

表 1-1 不同基准的换算系数 K

<div><div><div><math>x_0</math></div><div><math>x</math></div></div></div>	收到基	空气干燥基	干燥基	干燥无灰基
收到基	1	$\frac{100 - M_{\text{ad}}}{100 - M_{\text{ar}}}$	$\frac{100}{100 - M_{\text{ar}}}$	$\frac{100}{100 - M_{\text{ar}} - A_{\text{ar}}}$
空气干燥基	$\frac{100 - M_{\text{ar}}}{100 - M_{\text{ad}}}$	1	$\frac{100}{100 - M_{\text{ad}}}$	$\frac{100}{100 - M_{\text{ad}} - A_{\text{ad}}}$
干燥基	$\frac{100 - M_{\text{ar}}}{100}$	$\frac{100 - M_{\text{ad}}}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A_{\text{d}}}$
干燥无灰基	$\frac{100 - M_{\text{ar}} - A_{\text{ar}}}{100}$	$\frac{100 - M_{\text{ad}} - A_{\text{ad}}}{100}$	$\frac{100 - A_{\text{d}}}{100}$	1

表 1-1 中换算系数 K 不仅可以用于各基准间百分数的换算，也可以用于各基准的发热量之间的换算，但是，不能用于水分间的换算。水分之间换算可用下式，即

$$M_{\text{ar}} = M_{\text{f}} + M_{\text{ad}} \frac{100 - M_{\text{f}}}{100}$$

式中  $M_{\text{f}}$ ——外部水分的质量分数（%）。

3. 煤的分类

我国煤的分类方法是采用表征煤化程度的干燥无灰基挥发分的质量分数  $V_{\text{daf}}$  作为分类指标，并将煤分为褐煤、烟煤和无烟煤。一般  $V_{\text{daf}} \leq 10\%$  的煤为无烟煤， $V_{\text{daf}} \geq 37\%$  的煤为褐煤， $V_{\text{daf}}$  介于两者之间的煤为贫煤和烟煤。

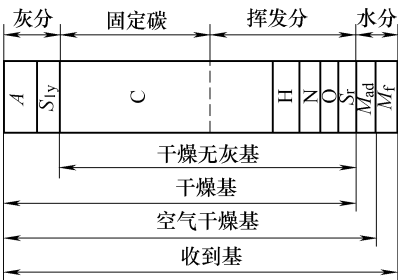


图 1-1 煤的基准划分  
 $M_{\text{f}}$ —外部水分  $M_{\text{ad}}$ —内部水分  
 $S_{\text{r}}$ —可燃硫（或称全硫）  
 $S_{\text{ly}}$ —硫酸盐硫（已归入灰分）

## 1.2 煤燃烧产生的污染物

煤中的可燃成分主要为碳、氢、硫，它们燃烧后分别生成二氧化碳、水蒸气和二氧化硫（或三氧化硫，很少量）。煤中的氮和空气中的氮，在较高温度下生成氮氧化物。煤中含有少量的氟和氯，燃烧后也会在烟气中带有氯化氢和氟化氢。煤炭燃烧产生的微量元素污染物已越来越引起人们的重视。微量元素污染物主要指汞、砷等微量重金属和氟、氯等卤素。煤炭燃烧还会造成颗粒物污染。

### 1. 煤中碳燃烧产生的二氧化碳

大量二氧化碳排向大气，会导致地球大气层温度缓慢升高，所以把二氧化碳称为温室气体。随着气候变暖，北极冰川融化，造成海平面上升，会淹没一些岛屿，造成严重自然灾害，所以节能减排也是保持地球生态平衡的一项重要战略措施。

煤中碳燃烧产生二氧化碳按式（1-8）计算：



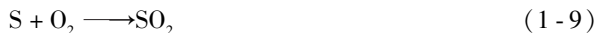
燃烧 1kg C 需要  $x = 2.666\text{kgO}_2$ ，生成  $y = 3.666\text{kgCO}_2$ 。

燃烧 1kg C 需要  $1.866\text{Nm}^3\ominus\text{O}_2$ ，生成  $1.866\text{Nm}^3\text{CO}_2$ 。

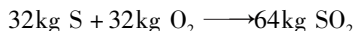
### 2. 煤中硫燃烧产生的 $\text{SO}_2$

它是大气污染物，是形成酸雨的主要原因之一，也是本书所论述烟气脱硫的对象。

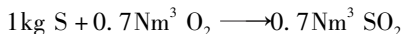
煤中硫燃烧产生二氧化硫按式（1-9）计算：



可得



即



煤在完全燃烧时，除生成  $\text{SO}_2$  之外，约有 0.5% ~ 2.0% 的  $\text{SO}_2$  将进一步氧化成  $\text{SO}_3$ 。虽然  $\text{SO}_3$  含量很少，但它与烟气中的水汽结合形成硫酸雾，会在低温受热面上凝结，严重腐蚀设备。

硫酸蒸汽开始凝结的温度称为露点。露点同烟气中  $\text{SO}_3$  浓度有关， $\text{SO}_3$  浓度高，露点也高。在设计脱硫设备时，当烟气温度降低到低于露点时，会有冷凝硫酸形成，具有强腐蚀性，这时必须采用强耐腐蚀材料。

### 3. 煤燃烧过程中产生的 $\text{NO}_x$

煤中含有少量的氮（一般在 1% 左右），在煤燃烧过程中生成  $\text{NO}$  和  $\text{NO}_2$  称为燃料

⊖  $1\text{Nm}^3$  表示标准状态下的  $1\text{m}^3$ 。

$\text{NO}_x$ 。煤燃烧时进入空气中的氮，在高温状态同氧化合生成氮的氧化物，统称热力  $\text{NO}_x$ 。以上两项合起来就是煤燃烧生成的  $\text{NO}_x$ 。

$\text{NO}_x$  的生成过程比较复杂。热力  $\text{NO}_x$  的生成速率依赖反应温度，同  $\text{N}_2$  浓度和  $\text{O}_2$  浓度的平方根及停留时间成正比。燃料  $\text{NO}_x$  的生成主要取决于过量空气系数，在缺氧状态下可以减少  $\text{NO}_x$  的生成。

降低  $\text{NO}_x$  可采用低  $\text{NO}_x$  燃烧技术，在炉内减少  $\text{NO}_x$  的形成；在炉后采用选择性催化还原脱氮或选择性非催化还原烟气脱氮技术。

我国 2012 年 1 月 1 日实施的 GB 13223—2011《火电厂大气污染排放标准》已规定了氮氧化物最高允许排放浓度限值，即对于  $V_{\text{daf}} > 20\%$  的燃煤锅炉， $\text{NO}_x$  最高允许排放浓度为  $450\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

#### 4. 煤燃烧产生的微量元素污染

煤中存在的微量元素主要有氟、氯、汞、砷、铅、镉、铬等。其中氟、氯、汞等元素主要以气体状态存在于锅炉排烟中，其他如铅、镉、铬主要存在于飞灰中。氟、氯等是设计湿法 FGD 系统需要处理的有害成分。铅、镉、铬由飞灰带入 FGD 系统浆液中，会影响脱硫排放水的水质。

煤中含氟量一般为  $0.01\% \sim 0.05\%$ ，但有时则高达  $0.1\%$ 。大多数煤中含氯量不大于  $0.05\%$ ，少数煤中可达  $0.05\% \sim 0.15\%$ 。

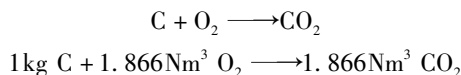
氟、氯都是易挥发元素。煤燃烧时，绝大部分氟化物和氯化物在高温下分解成 HF、HCl 气态物。它们是强酸性气体，绝大部分被碱性吸收剂吸收进入脱硫循环浆液中，含有  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{F}^-$  的循环浆液有很强的腐蚀性。这要求脱硫装置材质具有强耐蚀性，同时也必须限定脱硫循环浆液中  $\text{Cl}^-$  离子的浓度。脱硫排水中的  $\text{F}^-$  也是脱硫废水处理时要求达标的污染物。

### 1.3 煤的燃烧和烟气组成成分

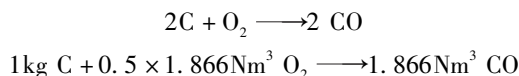
煤燃烧是煤中碳、氢、硫等可燃元素同氧进行激烈的连锁反应，产生光和热的过程，煤中的氮和微量元素也参与反应，转化为相应元素的氧化物，所以燃煤烟气组成是  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{SO}_3$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、HCl、HF、颗粒物、微量金属氧化物、未燃尽的碳氢化合物等多种组分的混合气体。通常，烟气在热力学计算时，可以假设为理想气体。

#### 1.3.1 碳的燃烧

完全燃烧时：

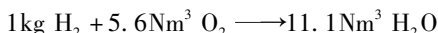
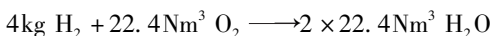
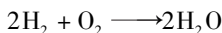


不完全燃烧时：



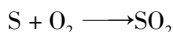
上两个反应式说明 1kg C 在完全燃烧时需要  $1.866\text{Nm}^3$  的  $\text{O}_2$ ，并产生  $1.866\text{Nm}^3$  的  $\text{CO}_2$ 。1kg C 在不完全燃烧时需要  $0.933\text{Nm}^3$  的  $\text{O}_2$ ，并产生  $1.866\text{Nm}^3$  的  $\text{CO}$ 。

### 1.3.2 氢的燃烧

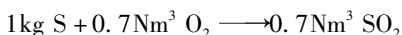
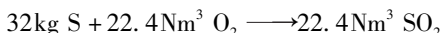


即 1kg  $\text{H}_2$  燃烧需要  $5.6\text{Nm}^3$  的  $\text{O}_2$ ，产生  $11.1\text{Nm}^3$  的水蒸气。

### 1.3.3 硫的燃烧



可得



表示每燃烧 1kg S 需要  $0.7\text{Nm}^3$  的  $\text{O}_2$ ，并生成  $0.7\text{Nm}^3$  的  $\text{SO}_2$ 。

### 1.3.4 煤燃烧的理论空气量

在进行锅炉烟气脱硫工程设计时，最重要的设计数据之一是锅炉烟气排放量。比较可靠的方法是在锅炉运行中实际测定排烟量，也可以根据锅炉型号和燃烧方式、耗煤量及燃煤全分析资料，计算锅炉在运行负荷下的排烟量。耗煤量同锅炉负荷密切相关。有些锅炉运行负荷设计为 90%。锅炉烟气量的计算步骤如下。

#### 1. 理论空气量

理论空气量是指煤在完全燃烧时，在最理想的供氧情况下（无需过量供氧）所需的最低空气量，也是按燃烧化学反应式计算出的所需空气量，其代表符号为  $V_0$ 。在上文已求出 1kg C、H、S 完全燃烧所需的氧气量，就可折算成相应的空气量。所以，可以推导出以下结果：

1kg 收到基煤中含碳  $\frac{C_{\text{ar}}}{100}\text{kg}$ ，完全燃烧时需氧气  $1.866 \frac{C_{\text{ar}}}{100}\text{Nm}^3$ 。

1kg 收到基煤中含氢  $\frac{H_{\text{ar}}}{100}\text{kg}$ ，完全燃烧时需氧气  $5.56 \frac{H_{\text{ar}}}{100}\text{Nm}^3$ 。

1kg 收到基煤中含硫  $\frac{S_{\text{ar}}}{100}\text{kg}$ ，完全燃烧时需氧气  $0.7 \frac{S_{\text{ar}}}{100}\text{Nm}^3$ 。

由于 1kg 收到基煤本身含氧  $\frac{O_{\text{ar}}}{100}\text{kg}$ ，在标准状态下它的容积为  $\frac{22.4}{32} \times \frac{O_{\text{ar}}}{100}\text{Nm}^3 =$

$0.7 \frac{O_{\text{ar}}}{100}\text{Nm}^3$ ，所以 1kg 收到基煤完全燃烧需要的氧气量（ $\text{Nm}^3$ ）

$$1.866 \frac{C_{\text{ar}}}{100} + 5.56 \frac{H_{\text{ar}}}{100} + 0.7 \frac{S_{\text{ar}}}{100} - 0.7 \frac{O_{\text{ar}}}{100}$$

空气是多种气体的混合物,工程应用中认为空气中  $O_2 = 21\%$ 、 $N_2 = 79\%$ ,其他少量组分忽略不计。所以,1kg 煤燃烧所需理论空气量  $V_0^o$  ( $Nm^3$ ) 为

$$V_0^o = \frac{1}{0.21} \left( 1.866 \frac{C_{ar}}{100} + 5.55 \frac{H_{ar}}{100} + 0.7 \frac{S_{ar}}{100} - 0.7 \frac{O_{ar}}{100} \right) \\ = 0.0889 (C_{ar} + 0.375 S_{ar}) + 0.264 H_{ar} - 0.0333 O_{ar} \quad (1-10)$$

由质量表示的理论空气量  $L_0$  (kg) 为

$$L_0 = 1.293 V_0^o \\ = 0.115 (C_{ar} + 0.375 S_{ar}) + 0.342 H_{ar} - 0.0431 O_{ar} \quad (1-11)$$

## 2. 实际空气量和过量空气系数

煤在锅炉炉膛中燃烧时,很难同鼓入的空气混合得均匀、适宜,因此,在锅炉实际运行时,必须鼓入大于理论空气量的空气,超过的部分叫过量空气量。实际空气量  $V_k$  与理论空气量  $V^o$  之比称为过量空气系数,用  $\alpha$  表示,即

$$\alpha = \frac{V_k}{V_0^o} \quad (1-12)$$

$$\Delta V_g = V_k - V_0^o = V_0^o (\alpha - 1)$$

式中  $\Delta V_g$ ——过量空气量 ( $m^3$ )。

## 3. 漏风系数

对于负压运行的锅炉,外界空气会从锅炉不严密处漏入炉膛及烟道中,使烟气中的过量空气增加。相对于 1kg 燃煤,漏入的空气量  $\Delta V$  与理论空气量  $V_0^o$  之比称为漏风系数,以  $\Delta\alpha$  表示,即

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta V}{V_0^o} \quad (1-13)$$

### 1.3.5 煤燃烧产生的烟气量

#### 1. 理论烟气量

参加燃烧的空气中的干空气量(除去水蒸气)等于理论空气量时,完全燃烧 1kg 煤所产生的烟气量称为理论烟气量,记为  $V_y^o$ 。组成理论烟气量的成分有  $CO_2$ 、 $SO_2$ 、 $N_2$ 、 $H_2O$ ,其相应的含量记为  $V_{CO_2}$ 、 $V_{SO_2}$ 、 $V_{N_2}$ 、 $V_{H_2O}^o$ 。

$$V_y^o = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O}^o \quad (1-14)$$

式中  $V_y^o$ ——理论烟气量 ( $Nm^3/kg$ );

$$V_{CO_2} \text{——} CO_2 \text{ 理论烟气量 } (Nm^3/kg), V_{CO_2} = 1.866 \frac{C_{ar}}{100};$$

$$V_{SO_2} \text{——} SO_2 \text{ 理论烟气量 } (Nm^3/kg), V_{SO_2} = 0.7 \frac{S_{ar}}{100};$$

$$V_{N_2}^o \text{——} N_2 \text{ 理论烟气量 } (Nm^3/kg), V_{N_2}^o = 0.8 \frac{N_{ar}}{100} + 0.79 V^o;$$

$V_{\text{H}_2\text{O}}^0$ —— $\text{H}_2\text{O}$  理论烟气量 ( $\text{Nm}^3/\text{kg}$ ),  $V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 11.1 \frac{H_{\text{ar}}}{100} + 1.24 \frac{M_{\text{ar}}}{100} + 1.61d_k V^0$ 。

于是, 可得

$$V_y^0 = 1.866 \frac{C_{\text{ar}}}{100} + 0.7 \frac{S_{\text{ar}}}{100} + 0.8 \frac{N_{\text{ar}}}{100} + 0.79V^0 + 11.1 \frac{H_{\text{ar}}}{100} + 1.24 \frac{M_{\text{ar}}}{100} + 1.61d_k V^0$$

式中  $V^0$ ——燃烧 1kg 煤所需理论空气量 ( $\text{Nm}^3/\text{kg}$ );

$C_{\text{ar}}$ ——收到基碳分;

$S_{\text{ar}}$ ——收到基硫分;

$H_{\text{ar}}$ ——收到基氢分;

$N_{\text{ar}}$ ——收到基氮分;

$M_{\text{ar}}$ ——收到基水分;

$1.61d_k$ —— $1\text{m}^3$  空气所含水蒸气体积 ( $\text{m}^3$ );

$d_k$ ——湿空气的绝对湿度。

## 2. 实际烟气量

煤在完全燃烧时产生的实际烟气量, 把烟气假设为理想气体, 所以

$$V_y = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} \quad (1-15)$$

式中  $V_y$ ——实际烟气量 ( $\text{Nm}^3/\text{kg}$ );

$V_{\text{N}_2}$ —— $\text{N}_2$  实际烟气量 ( $\text{Nm}^3/\text{kg}$ ),  $V_{\text{N}_2} = V_{\text{N}_2}^0 + 0.79(\alpha - 1)V^0$ ;

$V_{\text{O}_2}$ —— $\text{O}_2$  实际烟气量 ( $\text{Nm}^3/\text{kg}$ ),  $V_{\text{O}_2} = 0.21(\alpha - 1)V^0$ ;

$V_{\text{H}_2\text{O}}$ —— $\text{H}_2\text{O}$  实际烟气量 ( $\text{Nm}^3/\text{kg}$ ),  $V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + 1.61d_k(\alpha - 1)V^0$ 。

如果用  $V_{\text{gy}}$  表示干烟气的体积, 则

$$V_{\text{gy}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} \quad (1-16)$$

则

$$V_y = V_{\text{gy}} + V_{\text{H}_2\text{O}} \quad (1-17)$$

## 3. 燃煤烟气中的飞灰含量

$$\mu = \frac{A_{\text{ar}}\alpha_{\text{fh}}}{100m_y} \quad (1-18)$$

式中  $\mu$ ——飞灰含量, 每 kg 烟气中飞灰质量 ( $\text{kg}/\text{kg}$ );

$m_y$ ——1kg 煤的烟气质量 ( $\text{kg}$ );

$A_{\text{ar}}$ ——煤的收到基灰分;

$\alpha_{\text{fh}}$ ——烟气携带出炉膛的飞灰占总灰分的质量分数。

其中

$$\begin{aligned} m_y &= 1 - \frac{A_{\text{ar}}}{100} + (1 + d_k) \times 1.293\alpha V^0 \\ &= 1 - \frac{A_{\text{ar}}}{100} + 1.306\alpha V^0 \end{aligned} \quad (1-19)$$

式中  $d_k$ ——湿空气的绝对湿度, 一般  $d_k$  取  $0.01\text{kg}/\text{kg}$ ;



$\alpha$ ——过量空气系数；

$V^0$ ——理论空气量（湿空气）（kg）。

$\mu$  是脱硫系统设计的原始资料，由于  $\alpha_m$  同锅炉种类型号及运行工况、操控水平有关，因此通常飞灰含量是通过现场实测确定或者由锅炉生产厂提供（对于新建锅炉房）。

### 1.3.6 空气和烟气的焓

#### 1. 概述

在烟气脱硫系统设计中，会采用烟气冷却降温或烟气被加热升温来满足脱硫工艺设计的需要。当烟温较高时，对材质耐热性要求高，同时烟气腐蚀性增强，对材质耐蚀要求也就提高，因此必须采用较好的耐热耐蚀材料，但这会增加脱硫成本。若把烟气冷却降温后就可以选用相对便宜的材料，同时也可延长使用寿命。

在采用湿法脱硫时，出脱硫塔时的烟温已到达烟气中水蒸气的饱和凝结温度。此时烟气中的酸和水都冷凝出来，形成湿烟气，具有强烈的腐蚀性。如果不把烟气加热升温，则要把脱硫排烟道和烟囱设计成耐强腐蚀材质的。同时烟温在 50℃ 左右时烟气呈白色，烟气中含大量水蒸气，会严重影响烟气的抬升和扩散。采用烟气加热升温可以使烟气消除，减少冷凝酸、水泄出，并有较好的抬升扩散性。

在烟气冷却降温或加热升温的传热计算中，都要用到空气和烟气的焓。

#### 2. 焓的物理概念与意义

焓是一个热力学参数，一般用  $H$  表示，其单位为焦（J）或千焦（kJ）

$$H = U + pV \text{ (焓 = 内能 + 推动功)}$$

$$H = C_v T + RT = C_p T$$

焓是流动工质所有的内能和推动功之和。焓是系统状态函数，即一个系统的焓取决于系统的状态。 $p$  是系统的压力， $V$  是系统的体积。焓的微分

$$dH = dU + d(pV)$$

$dH$  表示一个系统焓的微小变化。

当一个系统的状态发生变化时，其状态参数值也相应改变，系统的内能和推动功相应也有一个微小变化。

根据热力学第一定律，对一个热力体系：

$$dQ = dU + pdV$$

即加给体系的热能，应等于体系内能的增量和体系对外界所做功之和。

因为

$$H = U + pV$$

$$dH = dU + pdV + Vdp$$

$$dH = dQ + Vdp$$

等压过程中， $dp = 0$ ，所以

$$dQ = dH, \Delta Q = \Delta H = H_2 - H_1 \quad (1-20)$$

把脱硫烟气加热或冷却过程，假设为等压过程且烟气没有对外界做功，烟气接收或传出的热量变为烟气的焓差。只要利用烟气流量和烟气的焓值，就可求得烟气升温所要

求传入的热量或烟气冷却降温所需要传出的热量。

计算时用到的烟气焓值可查表 13 - 11。

1.4 工业及热水锅炉烟尘原始排放浓度

1. 工业锅炉产品系列（见表 1 - 2）

表 1 - 2 工业锅炉产品

蒸发量/(t/h)	排烟量(m <sup>3</sup> /h)	锅炉类型	排尘浓度(mg/Nm <sup>3</sup> )
2	6000	链条炉排	<2000
4	12000	链条炉排	<2000
6	18000	链条炉排	<2000
10	30000	链条炉排	<2000
20	60000	链条炉排	<2000
35	105000	链条炉排	<2000

注：对于锅炉原始排尘浓度，国家相关环保标准中规定小于 1800mg/m<sup>3</sup>。但由于锅炉燃煤种类，运行管理水平、锅炉负荷都会影响排尘浓度，因此只能根据实际情况确定。为了留有适当余量，建议按 <2000mg/m<sup>3</sup>，供参考。

2. 热水锅炉产品系列（见表 1 - 3）

表 1 - 3 热水锅炉产品

额定功率/MW	烟气量/(m <sup>3</sup> /h)	烟气温度/℃	锅炉类型	排尘浓度/(mg/Nm <sup>3</sup> )
4.2	18000	150 ~ 160	链条炉	<2000
7.0	30000	150 ~ 160	链条炉	<2000
14	60000	150 ~ 160	链条炉	<2000
29	105000	150 ~ 160	链条炉	<2000
41	17000	150 ~ 160	链条炉	<2000
68	230000	150 ~ 160	链条炉	<2000
116	390000	150 ~ 160	链条炉	<2000

3. 供热电站锅炉产品系列（见表 1-4）

表 1-4 供热电站锅炉产品

蒸发量/(t/h)	烟气量/(m <sup>3</sup> /h)	烟气温度/℃	锅炉类型	排尘浓度/(mg/Nm <sup>3</sup> )
65(75)	100000(115000)	130	12MW 电站燃煤粉锅炉	<20000
130	170000	130	25MW 电站燃煤粉锅炉	<20000
220	290000	130	50MW 电站燃煤粉锅炉	<20000
410	480000	130	100MW 电站燃煤粉锅炉	<20000
670	720000	130	200MW 电站燃煤粉锅炉	<20000

注：1. 表中烟气量、烟温及烟气、排尘浓度同锅炉燃煤、操控水平、锅炉负荷密切相关。一般应由锅炉生产厂提供设计煤种、设计烟气量和产品环保排放原始浓度。如果是已运行锅炉，应由用户提供上述资料作为脱硫装置设计原始资料。

2. 表中烟气量用 Nm<sup>3</sup>/h 表示，根据烟温可折算到工作状态烟气量（m<sup>3</sup>/h）。

$$Q = Q_0 \frac{t + 273^{\circ}\text{C}}{273^{\circ}\text{C}}$$

式中  $Q_0$ ——标准状态烟气量（Nm<sup>3</sup>/h）；

$t$ ——烟气温度（℃）。

由于烟气压力变化不大，所以引起烟气体积流量变化忽略不计。

## 第2章 锅炉烟气脱硫设计条件

### 2.1 脱硫设计常用的标准及规范

GB 12348—2008 《工业企业厂界噪声标准》  
GB 13223—2011 《火电厂大气污染物排放标准》  
GB 13271—2001 《锅炉大气污染物排放标准》  
GB 18599—2001 《一般工业固体废物贮存、处置场污染控制标准》  
GB 20426—2006 《煤炭工业污染物排放标准》  
GB 50016—2006 《建筑设计防火规范》  
GB 50040—1996 《动力机器基础设计规范》  
GBJ 87—1985 《工业企业噪声控制设计规范》  
DB 11/139—2002 《锅炉污染物综合排放标准》（北京市地方标准）  
DL/T 414—2004 《火电厂环境监测技术规范》  
DL/T 901—2004 《火力发电厂烟囱（烟道）内衬防腐材料》  
DL/T 943—2005 《烟气湿法脱硫用石灰石粉反应速率的测定》  
DL/T 986—2005 《湿法烟气脱硫工艺能效检测技术规范》  
DL/T 5403—2007 《火电厂烟气脱硫工程调整试运及质量验收评定规程》  
DL/T 5196—2004 《火力发电厂烟气脱硫设计技术规程》  
HJ/T 56—2000 《固定污染源排气中二氧化硫的测定 碘量法》  
HJ/T 57—2000 《固定污染源排气中二氧化硫的测定 定电位电解法》  
HJ/T 75—2007 《固定污染源烟气排放连续监测技术规范（试行）》  
HJ/T 179—2005 《火电厂烟气脱硫工程技术规范 石灰石/石灰—石膏法》  
HJ 462—2009 《工业锅炉及炉窑湿法烟气脱硫工程技术规范》

### 2.2 脱硫设计的原始资料

- 1) 厂区工程地质资料：土层类别、性质、地基土允许承载力。
- 2) 水文地质资料：地下水位、地下水特性。
- 3) 地震资料：地震基本烈度、地区历史地震情况。
- 4) 锅炉房有关资料：锅炉房设计平面图、剖面图，可供脱硫装置使用的场地。锅炉参数、台数、型号、制造厂。锅炉现用除尘器类型，排尘浓度。变电所装机容量及可供脱硫使用的功率。脱硫装置安装区（脱硫岛）上、下水管管径和可供脱硫使用的

水量。

- 5) 引风机型号及流量、风压、转速、功率。
- 6) 燃料耗量、燃料成分分析, 包括发热量、 $C_{ar}$ 、 $H_{ar}$ 、 $O_{ar}$ 、 $N_{ar}$ 、 $S_{ar}$ 、 $M_{ar}$ 、 $A_{ar}$  等及产地、矿名。
- 7) 燃料含氟、氯量 (尽可能收集)。
- 8) 锅炉排烟量及排烟温度。
- 9) 烟气含尘量、 $SO_2$  浓度、 $NO_x$  含量。
- 10) 烟囱高度、直径。
- 11) 经济分析资料: 电价、气价、水价、人工费、脱硫剂价格、设备折旧率、贷款利息、偿还方式和期限。
- 12) 该电站 (锅炉房) 或企业是否有污水处理站。

## 2.3 脱硫装置设计要求

- 1) 脱硫要求达到的烟尘、 $SO_2$  排放浓度、烟气黑度 (或要求达到的国家或地方的排放标准)。
- 2) 脱硫后烟气温度是否要求加热升温。
- 3) 脱硫装置每年运行时间及使用寿命。
- 4) 对  $NO_x$  的处理要求。
- 5) 脱硫装置的建设周期。

## 2.4 脱硫装置设计条件

锅炉排烟量是最重要的脱硫装置设计条件之一, 它决定了脱硫装置的规模和相应配套辅机的规模, 对选择脱硫工艺也是重要因素, 一般用下述方法确定。

1) 由脱硫装置招标单位或使用单位提供所需设计条件, 包括排烟量、排烟温度、排尘浓度、 $SO_2$  及  $NO_x$  排放浓度。使用单位提供的数据可向锅炉厂索取锅炉设计排烟量和设计煤种时的锅炉污染物排放量。如果实际燃用的不是锅炉设计煤种, 用户应根据锅炉运行时实测的排烟量及污染物排放浓度提供给工程设计及承包单位。

2) 有的使用单位会提供锅炉型号及燃煤元素分析资料、燃煤耗量。此时, 可以用式 (1-15) 计算锅炉烟气量。

例如, 某热电厂提供的煤的元素分析如下:

$C_{ar}$ : 54.16%	$H_{ar}$ : 3.34%
$O_{ar}$ : 3.80%	$N_{ar}$ : 0.94%
$S_{ar}$ : 1.75%	$M_{ar}$ : 11.14%
$A_{ar}$ : 24.87%	$V_{daf}$ : 19.77%

收到基低位发热量  $Q_{dw}$ : 21960 kJ/kg

锅炉型号: CG 130/9.81 - M

燃煤量  $G$ : 22 t/h

计算锅炉出口烟气体积  $V_y$ , 设计温度  $T = 130^\circ\text{C}$ 。

按式 (1-15):

$$V_y = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$V_{\text{CO}_2} = 1.866 \times \frac{54.16}{100} \text{Nm}^3/\text{kg} = 1.0106 \text{Nm}^3/\text{kg}$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0.70 \times \frac{1.75}{100} \text{Nm}^3/\text{kg} = 0.0123 \text{Nm}^3/\text{kg}$$

$$\begin{aligned} V^o &= 0.0889 \times (C_{\text{ar}} + 0.375S_{\text{ar}}) + 0.264H_{\text{ar}} - 0.0333O_{\text{ar}} \\ &= [0.0889 \times (54.16 + 0.375 \times 1.75) + 0.264 \times 3.34 - 0.0333 \times 3.80] \text{Nm}^3/\text{kg} \\ &= (0.0889 \times 54.82 + 0.8817 - 0.1265) \text{Nm}^3/\text{kg} \\ &= (4.873 + 0.8817 - 0.1265) \text{Nm}^3/\text{kg} \\ &= 5.63 \text{Nm}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{\text{N}_2}^o &= 0.8 \frac{N_{\text{ar}}}{100} + 0.79V^o \\ &= \left( 0.8 \times \frac{0.94}{100} + 0.79 \times 5.63 \right) \text{Nm}^3/\text{kg} \\ &= 4.455 \text{Nm}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

$$\alpha = 1.25$$

$$\begin{aligned} V_{\text{N}_2} &= V_{\text{N}_2}^o + 0.79 \times (\alpha - 1) V^o \\ &= (4.455 + 0.79 \times 0.25 \times 5.63) \text{Nm}^3/\text{kg} \\ &= (4.455 + 1.112) \text{Nm}^3/\text{kg} \\ &= 5.567 \text{Nm}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{\text{O}_2} &= 0.21(\alpha - 1) V^o \\ &= 0.21 \times 0.25 \times 5.63 \text{Nm}^3/\text{kg} \\ &= 0.296 \text{Nm}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{\text{H}_2\text{O}}^o &= 11.1 \times \frac{H_{\text{ar}}}{100} + 1.24 \times \frac{M_{\text{ar}}}{100} + 1.61d_k V^o \\ &= 11.1 \times \frac{3.34}{100} + 1.24 \times \frac{11.4}{100} + 1.61d_k V^o \\ &= (0.370 + 0.138 + 1.61 \times 0.01 \times 5.63) \text{Nm}^3/\text{kg} \\ &= 0.599 \text{Nm}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{\text{H}_2\text{O}} &= V_{\text{H}_2\text{O}}^o + 1.61d_k(\alpha - 1) V^o \\ &= (0.599 + 1.61 \times 0.01 \times 0.25 \times 5.63) \text{Nm}^3/\text{kg} \\ &= (0.599 + 0.02266) \text{Nm}^3/\text{kg} \\ &= 0.622 \text{Nm}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

$$V_y = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}$$



$$= (1.0106 + 0.0123 + 5.567 + 0.296 + 0.622) \text{ Nm}^3/\text{kg}$$
$$= 7.50 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

排烟量  $Q_o = V_y \times G = 7.50 \text{ Nm}^3/\text{kg} \times 22000 \text{ kg/h}$ 
$$= 165000 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

烟温  $T = 130^\circ\text{C}$ ,  $Q = \frac{130 + 273}{273} \times Q_o$  (烟气压力变化对烟气体积流量变化忽略不计)
$$= 1.476 \times 165000 \text{ Nm}^3/\text{h}$$
$$= 243540 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

排烟量  $Q = 243540 \text{ Nm}^3/\text{h}$

3) 对于蒸发量≤35t/h 的工业锅炉和功率≤29MW 的供热锅炉，当采用前述两种确定烟气量条件的条件都不具备时，可用锅炉排烟量的经验值来设计。可参照表 1-2。

2.5 锅炉排烟的 SO<sub>2</sub> 含量

排烟的 SO<sub>2</sub> 浓度是脱硫装置设计的重要原始资料，是锅炉大气污染物排放标准控制排放的主要指标。排烟 SO<sub>2</sub> 量同燃煤含硫量密切相关。其计算公式如下：

$$M_{\text{SO}_2} = 2KB_g \left( 1 - \frac{q_4}{100} \right) \frac{S_{\text{ar}}}{100} \tag{2-1}$$

式中  $M_{\text{SO}_2}$ ——锅炉排烟中 SO<sub>2</sub> 的质量流量 (kg/h)；  
 $K$ ——燃料燃烧中硫的转化率：循环流化床锅炉在未加固硫剂时取  $K = 0.75 \sim 0.80$ ，层燃炉取  $K = 0.80 \sim 0.85$ ，煤粉炉取  $K = 0.90$ ；  
 $B_g$ ——锅炉额定负荷时的燃煤量 (kg/h)；  
 $q_4$ ——锅炉机械未完全燃烧时的热损失 (%)，见表 2-1；  
 $S_{\text{ar}}$ ——燃料的收到基硫分 (%)。

把  $M_{\text{SO}_2}$  除以锅炉排烟流量  $Q_o$  就得排烟的 SO<sub>2</sub> 浓度 (mg/Nm<sup>3</sup>)。

$$C_s = \frac{M_{\text{SO}_2}}{Q_o}$$

表 2-1  $q_4$  取值

锅炉类型	手烧炉	抛煤机炉	链条炉	煤粉炉	循环流化床
$q_4/\%$	8 ~ 15	6 ~ 13	5 ~ 12	4 ~ 8	—

2.6 锅炉排烟的 NO<sub>x</sub> 含量

燃料燃烧时生成 NO<sub>x</sub> 的过程比较复杂，它同炉膛温度、燃料含氮量、过量空气系数、烟气停留时间等因素有关。目前还没有能基本准确计算 NO<sub>x</sub> 的方法。设计脱氮时

只能采用现场实测的数据。对于新建锅炉房可以参照同类型锅炉、同类煤种在额定负荷时的  $\text{NO}_x$  排放量。

为了对  $\text{NO}_x$  的排放量有个感性认识, 下面列举一些锅炉  $\text{NO}_x$  的排放量。

固态排渣煤粉锅炉 ( $\text{O}_2 = 6\%$ ):  $600 \sim 1200 \text{mg/Nm}^3$ ;

液态排渣煤粉锅炉 ( $\text{O}_2 = 6\%$ ):  $850 \sim 1500 \text{mg/Nm}^3$ ;

燃油锅炉 ( $\text{O}_2 = 3\%$ ):  $720 \sim 1680 \text{mg/Nm}^3$ ;

燃煤链条锅炉:  $300 \sim 500 \text{mg/Nm}^3$ 。

## 2.7 脱硫装置的设计脱硫效率

脱硫效率是脱硫装置最重要的设计条件之一。脱硫效率是选择脱硫工艺的依据, 是  $\text{SO}_2$  达标排放的保证, 与脱硫装置投资和脱硫运行费用密切相关。通常脱硫效率用下述方法确定:

1) 根据锅炉烟气  $\text{SO}_2$  排放标准和脱硫锅炉的烟气  $\text{SO}_2$  浓度, 计算脱硫效率。如:

已知: 脱硫锅炉烟气  $\text{SO}_2$  浓度  $C_{\text{IS}} = 500 \text{mg/Nm}^3$ ;

烟气达标  $\text{SO}_2$  浓度  $C_{2\text{S}} = 100 \text{mg/Nm}^3$ ;

脱硫装置严密不漏风, 则达标所要求的脱硫效率为

$$\eta_s = \frac{C_{\text{IS}} - C_{2\text{S}}}{C_{\text{IS}}} = \frac{500 - 100}{500} = 80\%$$

2) 用根据环境保护要求, 为了尽可能减少  $\text{SO}_2$  的排放量, 提出脱硫装置必须达到的脱硫效率值。如有的项目, 用户要求达到 90% 或 95% 的脱硫效率。

## 2.8 烟气含湿量

烟气含湿量是烟气含  $\text{H}_2\text{O}$  蒸汽 (水蒸气) 的量, 它是煤中氢元素燃烧与煤中含水分和煤外表面所带水分和空气中水分在煤燃烧时蒸发混合在烟气中的湿度。可以用仪器测定。也可通过煤的元素分析和煤的含水量计算烟气的含湿量  $V_{\text{H}_2\text{O}}$ , 如:

$$\begin{aligned} V_{\text{H}_2\text{O}} &= V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + 1.61d_k(\alpha - 1)V^0 \\ &= 11.1 \frac{H_{\text{ar}}}{100} + 1.24 \frac{M_{\text{ar}}}{100} + 1.61d_k V^0 + 1.61d_k(\alpha - 1)V^0 \end{aligned}$$

式中  $d_k$ ——湿空气的绝对湿度 ( $\text{kg/kg}$ );

$\alpha$ ——过量空气系数;

$V^0$ ——理论空气量 (湿空气) ( $\text{Nm}^3/\text{kg}$ )。

## 2.9 烟气露点

煤燃烧产生的烟气中包含  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{SO}_3$ 、 $\text{HCl}$ 、 $\text{HF}$ 、烟尘、

微量元素 Hg 和 As 等。其中  $\text{SO}_3$  和  $\text{H}_2\text{O}$  结合生成硫酸蒸汽，如果烟汽温度降低到硫酸蒸汽的饱和状态，硫酸蒸汽开始冷凝成硫酸或亚硫酸。此时的烟气温度称为露点。它同  $\text{SO}_3$  含量、 $\text{SO}_2$ 、HCl 和  $\text{H}_2\text{O}$  有关。经过研究， $\text{SO}_2$  在一个相当大的浓度范围内对露点温度的影响较小，在工程设计应用时可忽略不计。同样 HCl 对露点的影响也可忽略不计。真正影响烟气露点的是烟气中的  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{SO}_3$  的含量。

在同样的  $\text{H}_2\text{SO}_4$  浓度下水蒸气含量变化时，露点也随之变化。当水蒸气含量从 10% 增加到 15% 时，露点增加  $5^\circ\text{C}$ 。当水蒸气含量从 10% 减到 5% 时，露点下降  $8^\circ\text{C}$ 。

因为在炉膛内  $\text{SO}_3$  的生成机理较为复杂，用经验公式计算会有一定误差，所以最为可靠的是测量露点温度。一般认为导电式露点仪是一种较好的测量烟气露点的仪器。

如果不具备测量条件，则只能利用前人总结的计算公式。作者选用苏联 98 标准推荐公式：

$$t_{\text{ld}} = t_{\text{se}} + \frac{200 \times \sqrt[3]{S_{\text{ar, zs}}}}{1.25 \alpha_{\text{fh}} A_{\text{ar, zs}}} \quad (2-2)$$

式中  $t_{\text{ld}}$ ——烟气露点温度 ( $^\circ\text{C}$ )；

$t_{\text{se}}$ ——相同分压力下水蒸气的露点温度 ( $^\circ\text{C}$ )；

$S_{\text{ar, zs}}$ ——收到基折算硫分；

$A_{\text{ar, zs}}$ ——收到基折算灰分；

$\alpha_{\text{fh}}$ ——飞灰系数。

## 2.10 烟气的升温 and 降温

在脱硫设计中，有时会发生锅炉排烟温度偏高或工业炉窑排烟温度较高的情况。这时，可以使用烟气冷却降温，使脱硫装置材质耐温度的要求有所下降，以达到降低成本、减少腐蚀、延长使用寿命的目的。

锅炉排烟湿法脱硫后，一般烟温降到  $48^\circ\text{C}$  左右（随烟气中含硫量、水蒸气含量而变），这时烟气中的冷凝酸和冷凝水具有强腐蚀性，对脱硫装置下游设备、烟道、烟囱都有强腐蚀性。所以为了改变烟气的热力状态就给烟气加热升温。但把烟气升温到多少度合适，则取决于烟气的露点温度。

在 2.9 节中介绍了影响烟气露点温度的相关因素。在工程设计中为了准确，一般还是应该实测确定。计算露点温度可以确定一个量级。有关国家对脱硫后烟气温度的规定如下：

德国：烟囱出口处温度  $> 72^\circ\text{C}$ ；

英国：烟囱排烟温度为  $80^\circ\text{C}$ ；

日本：将烟气加热到  $90 \sim 110^\circ\text{C}$ 。

烟气加热升温的另一个重要理由是为了有利于污染物的抬升扩散，所以有些地方环保法规要求烟温升至  $90^\circ\text{C}$ 。

烟气升温降温计算。

根据式 (1-20), 在流动烟气的加热或放热过程可以视为等压过程, 那么可以用公式:

$$dQ = dH$$

即烟气加热或放热过程中, 加给烟气的热量等于烟气的焓差。烟气降温时, 烟气放出的热量也等于烟气的焓差:

$$\Delta Q = H_2 - H_1 \quad (2-3)$$

式中  $\Delta Q$ ——烟气升温所加入的热量 (kJ/h);

$H_1$ ——烟气在温度  $t_1$  时的焓 (kJ/h);

$H_2$ ——烟气在温度  $t_2$  时的焓 (kJ/h)。

$H_1$ 、 $H_2$  的值可用烟气热力性质和烟气成分和流量查表 13-11、表 13-12 计算而得。

例: 某热电厂 130t/h 的煤粉锅炉排烟量  $V_y$  为 240000m<sup>3</sup>/h, 烟气温度 130℃, 采用湿法脱硫后, 烟气温度降到 48℃。如果采用蒸汽为热源加热烟气使烟温升到 80℃, 要消耗多少吨饱和蒸汽?

已知: 烟气成分  $V_{\text{CO}_2} = 1.01 \text{ Nm}^3/\text{kg}$

$$V_{\text{SO}_2} = 0.0123 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

$$V_{\text{N}_2} = 5.57 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

$$V_{\text{O}_2} = 0.296 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0.553 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

烟气是以上组分的混合气体, 在热力学计算时, 可把烟气作为理想气体, 所以烟气的焓等于其组分焓的和。

$$h = \sum_{i=1}^n x_i h_i$$

式中  $x_i$ ——烟气中某一组分占有的比值质量分数或体积分数;

$h_i$ ——烟气中某一组分的比焓, 或体积焓 (kJ/kg 或 kJ/Nm<sup>3</sup>);

即

$$h = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_y} h_{\text{CO}_2} + \frac{V_{\text{SO}_2}}{V_y} h_{\text{SO}_2} + \frac{V_{\text{N}_2}}{V_y} h_{\text{N}_2} + \frac{V_{\text{O}_2}}{V_y} h_{\text{O}_2} + \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_y} h_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$\begin{aligned} V_y &= V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} = (1.01 + 0.0123 + 5.57 + 0.296 + 0.553) \text{ Nm}^3/\text{kg} \\ &= 7.44 \text{ Nm}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

当  $T = 130^\circ\text{C}$  时:

$$h_{130} = \frac{1.01}{7.44} h_{\text{CO}_2} + \frac{0.012}{7.44} h_{\text{SO}_2} + \frac{5.57}{7.44} h_{\text{N}_2} + \frac{0.296}{7.44} h_{\text{O}_2} + \frac{0.553}{7.44} h_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$h_{130} = 0.136 h_{\text{CO}_2} + 0.0016 h_{\text{SO}_2} + 0.749 h_{\text{N}_2} + 0.04 h_{\text{O}_2} + 0.07 h_{\text{H}_2\text{O}}$$

又因为:  $h_i = u_i + p v_i = c_{vi} T + RT = c_{pi} T$

式中  $u_i$ ——烟气中某一组分的内能 (kJ/kg 或 kJ/Nm<sup>3</sup>);

$v_i$ ——烟气中某一组分的比体积 (Nm<sup>3</sup>/kg);

$p$ ——烟气的压力 (Pa 或 kPa);

$c_{vi}$ ——烟气中某一组分的比定容热容 [kJ/(kg·℃)];

$c_p$ ——比定压热容 [kJ/(kg·℃)]。

则也可采用

$$h_i = c_{pi} T \quad (2-4)$$

计算焓值。

当  $T = 80^\circ\text{C}$  时, 查烟气热力性质表 (见表 13-12), 知:

$$c_{p\text{CO}_2} = 1.6802 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$c_{p\text{N}_2} = 1.2956 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$c_{p\text{O}_2} = 1.3153 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$c_{p\text{H}_2\text{O}} = 1.5030 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$c_{p\text{SO}_2} = 1.6802 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}) \quad (c_{p\text{CO}_2} \approx c_{p\text{SO}_2})$$

$$\begin{aligned} \text{所以} \quad h_{80} &= (0.136 \times 1.6802 \times 80 + 0.749 \times 1.2956 \times 80 + 0.04 \times \\ &\quad 1.3153 \times 80 + 0.07 \times 1.5030 \times 80 + 0.0016 \times 1.6802 \times 80) \text{ kJ}/\text{m}^3 \\ &= 108.75 \text{ kJ}/\text{m}^3 \end{aligned}$$

当  $T = 48^\circ\text{C}$  时,

$$c_{p\text{CO}_2} = 1.6480 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$c_{p\text{N}_2} = 1.2952 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$c_{p\text{O}_2} = 1.3070 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$c_{p\text{H}_2\text{O}} = 1.4995 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$c_{p\text{SO}_2} = 1.6480 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}) \quad (c_{p\text{CO}_2} \approx c_{p\text{SO}_2})$$

$$\begin{aligned} h_{48} &= (0.136 \times 1.6480 \times 48 + 0.749 \times 1.2952 \times 48 + 0.04 \times 1.3070 \times 48 + \\ &\quad 0.07 \times 1.4995 \times 48 + 0.0016 \times 1.6480 \times 48) \text{ kJ}/\text{m}^3 \\ &= 10.758 + 46.57 + 2.50 + 5.04 + 0.126 \\ &= 64.994 \text{ kJ}/\text{m}^3 \approx 65 \text{ kJ}/\text{m}^3 \end{aligned}$$

$$\Delta h = h_{80} - h_{48} = (108.75 - 65) \text{ kJ}/\text{m}^3 = 43.75 \text{ kJ}/\text{m}^3$$

$$T = 80^\circ\text{C} \text{ 时, } H_{80} = h_{80} \times \frac{273 + 80}{273 + 130} \times V_y$$

$$= 108.75 \times 0.876 \times 240000 \text{ kJ}/\text{h} = 22863600 \text{ kJ}/\text{h} \quad (\text{烟气压力变化忽略}$$

不计)

$$H_{48} = h_{48} \times \frac{273 + 48}{273 + 130} \times V_y = 65 \times 0.797 \times 240000 \text{ kJ}/\text{h} = 12433200 \text{ kJ}/\text{h}$$

$$Q = H_{80} - H_{48} = (22863600 - 12433200) \text{ kJ}/\text{h} = 10430400 \text{ kJ}/\text{h}$$

1kg 饱和蒸汽的供热为 2268kJ/kg, 则

$$G_2 = \frac{Q}{2268} = \frac{10430400}{2268} \text{ kg}/\text{h} = 4560 \text{ kg}/\text{h} \approx 4.6 \text{ t}/\text{h}$$

因此, 对于  $240000 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $130^\circ\text{C}$  的烟气脱硫后, 烟温降到  $48^\circ\text{C}$ , 将其升温到  $80^\circ\text{C}$ , 要消耗饱和蒸汽 4.6t/h。

## 第3章 气体吸收概论

烟气脱硫过程的实质是用碱性溶液（或浆液）吸收烟气（混合气体）中的  $\text{SO}_2$ 。有关气体吸收过程的基本理论适用于烟气脱硫。虽然烟气脱硫的实际过程很复杂，但是，经过理论分析则可帮助理解。气体吸收理论、传质理论从物理和化学基本原理研究了吸收过程，帮助了解吸收过程的机理和概念及有关的计算方法；把理论和设计结合起来，使我们能运用理论分析脱硫工艺参数影响脱硫的过程，判断可以采取的提高脱硫效率和稳定脱硫运行的措施，指导做好脱硫设计。

下面简要介绍气体吸收基本概念。

### 3.1 气体扩散

气体的质量传递是通过气体扩散过程实现的。扩散过程包括分子扩散和湍流扩散。物质在静止或垂直于浓度梯度方向作层流流动的流体中的传递，是由分子运动引起的，称为分子扩散；物质在湍流流体中的传递，除了由于分子运动外，更主要的是由于流体中质点的运动而引起的，称为湍流扩散。扩散的结果是使气体从浓度较高的区域转移到浓度较低的区域。

#### 3.1.1 扩散速率方程式

对于稳定状态的扩散（即系统各部分的组成不随时间而变化），单位时间内扩散的物质质量（扩散速率）为定值。气相扩散速率方程为

$$N_{AG} = \frac{D_{AG} p}{RTZ p_{Bm}} (p_{A1} - p_{A2}) \quad (3-1)$$

式中  $N_{AG}$ ——组分 A 在气相的扩散速率  $[\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ ；

$D_{AG}$ ——组分 A 在气相中的扩散系数  $(\text{m}^2/\text{s})$ ；

$p$ ——气体总压力  $(\text{kPa})$ ；

$R$ ——通用气体常数， $R = 8314 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ ；

$T$ ——气相的温度  $(\text{K})$ ；

$Z$ ——扩散的距离  $(\text{m})$ ；

$$p_{Bm} \text{——组分 B 在 1、2 两点分压的对数平均值, } p_{Bm} = \frac{p_{B2} - p_{B1}}{\ln \frac{p_{B2}}{p_{B1}}};$$

$(p_{A1} - p_{A2})$ ——组分 A 在 1、2 两点的分压压力差  $(\text{kPa})$ 。

液相扩散速率方程式：



$$N_{AL} = \frac{D_{AL}(c_A + c_B)}{Z c_{Bm}} (c_{A1} - c_{A2})$$

(3-2)

式中  $N_{AL}$ ——组分 A 在液相中的扩散速率 [kmol/(m<sup>2</sup>·s)]；  
 $D_{AL}$ ——组分 A 在液相中的扩散系数 (m<sup>2</sup>/s)；  
 $Z$ ——扩散的距离 (m)；  
 $(c_{A1} - c_{A2})$ ——组分 A 在 1、2 两点的物质的量浓度差 (kmol/m<sup>3</sup>)；  
 $c_{Bm}$ ——组分 B 在 1、2 两点的物质的量浓度的对数平均值， $c_{Bm} = \frac{(c_{B2} - c_{B1})}{\ln \frac{c_{B2}}{c_{B1}}}$ 。

3.1.2 扩散系数

扩散速率方程中， $D_{AG}$ 和  $D_{AL}$ 都是物理特性常数，表示物质在某介质中的扩散能力。扩散系数须由实验方法求得，它随扩散物质和介质的种类和温度而不同，并在一定程度上随压力和浓度而变化，也可在相关手册中查到。

气体的扩散系数见表 3-1。

表 3-1 气体的扩散系数 (cm <sup>2</sup> /s)		
气体	在空气中(1atm <sup>①</sup> ,0℃)	在水中
H <sub>2</sub>	0.611	5.0 × 10 <sup>-5</sup> (20℃)
N <sub>2</sub>	0.132	2.6 × 10 <sup>-5</sup> (20℃)
O <sub>2</sub>	0.178	2.10 × 10 <sup>-5</sup> (25℃)
CO <sub>2</sub>	0.138	1.92 × 10 <sup>-5</sup> (25℃)
SO <sub>2</sub>	0.103	1.66 × 10 <sup>-5</sup> (21℃)
HCl	0.130	2.3 × 10 <sup>-5</sup> (12℃)
SO <sub>3</sub>	0.095	—
NH <sub>3</sub>	0.170	1.64 × 10 <sup>-5</sup> (12℃)
H <sub>2</sub> O	0.220	—

① 1atm = 101325Pa。

3.2 气体吸收原理

气体吸收是用液体处理气体混合物，而使气体混合物分离的单元操作，是根据气体混合物中各组分在液体中溶解度的不同，有选择地使气相中一个或一个以上组分溶解于液体中，实现气体混合物分离的质量传递过程，因此也可以认为吸收过程是吸收质从气相传递到液相的过程。

### 3.2.1 亨利定律

当气相总压力不太高时，在一定温度下，当气、液两相达到平衡时，对于稀溶液，溶质在气相中的平衡分压力与它在溶液中的含量成正比，即

$$p^* = Ex \quad (3-3)$$

$$p^* = Hc$$

式中  $p^*$ ——溶质在气相中的平衡分压力 (kPa)；

$x$ ——溶质在液相中的摩尔分数；

$E$ ——亨利系数 (kPa)；

$c$ ——溶质在液相中的溶解度 (kmol/m<sup>3</sup>)；

$H$ ——亨利系数 [kPa/(kmol·m<sup>-3</sup>)]。

亨利系数 ( $E$  或  $H$ ) 值一般随温度上升而增大，亨利系数 ( $E$  或  $H$ ) 值大表示气体难溶。两种形式的亨利系数彼此相关，其换算关系为

$$E = C_0 H$$

式中  $C_0$ ——溶液的总浓度 (kmol/m<sup>3</sup>)。

气体在液体中的溶解度 ( $x$ ) 如图 3-1 所示。

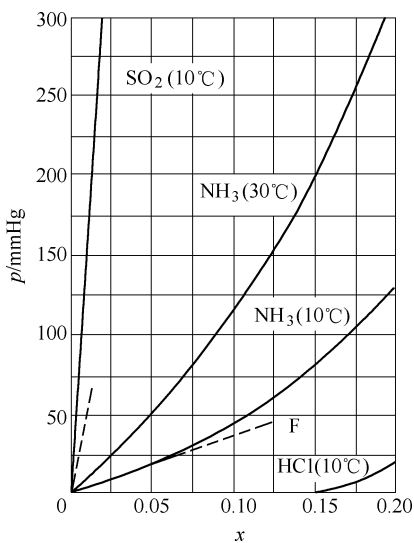


图 3-1 气体在液体中的溶解度

### 3.2.2 双膜理论

双膜理论模型如图 3-2 所示。

双膜理论模型的假设如下：

1) 当气液两相接触时，气液两相间有一个相界面，在界面两侧分别存在着呈层流状态流动的气膜和液膜，即气相侧的气膜和液相侧的液膜。

2) 吸收质（如 SO<sub>2</sub>）必须以分子扩散方式从气相主体连续通过此两层膜而进入液相主体。气液两相自身速度的大小会影响膜的厚度。

3) 在相界面上，气液两相的浓度总是互相平衡的，即气液两相的界面上不存在传质阻力。

4) 在膜层以外的气相和液相主体内一般是湍流状态，吸收质的浓度基本上是均匀的，主体流内没有浓度梯度存在，浓度梯度全部集中在液膜和气膜内。当组分（如 SO<sub>2</sub>）从气相主体传递到液相主体时，所有阻力仅存在于两层层流膜中。通过层流气膜的浓度（分压）降  $\Delta c(\Delta p)$  就等于气相平均浓度（分压）与界面气相平衡浓度（分压）之差  $c - c_i$  ( $p - p_i$ )；通过层流液膜的浓度降 ( $\Delta c$ ) 就等于界面液相平衡浓度与液相平均浓度之差 ( $c_i - c$ )。

双膜模型把复杂的气液两相间的传质过程简化为通过气液两层层流膜的分子扩散，

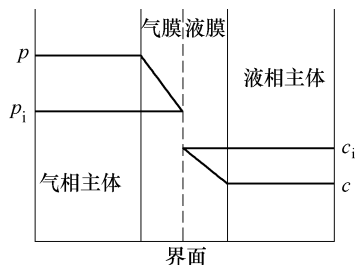


图 3-2 双膜理论模型

通过这两层膜的分子扩散阻力就是相际传质过程的总阻力。这样的简化模型为求取相际传质速率提供了方便。

### 3.2.3 传质速率方程式

在吸收过程中，单位时间通过单位相际传质面积所能传递的物质质量（kg 或 kmol）即为传质速率（即吸收速率）它可以反映吸收的快慢程度。

气膜传质速率：

$$N_A = \frac{G_A}{S} = k_G(p - p_i) \quad (3-4)$$

$$k_G = \frac{D_G p}{\delta_G R T p_{Bm}}$$

式中  $N_A$ ——气膜中的传质速率 [ $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ];

$G_A$ ——单位时间被传质的组分量 ( $\text{kmol}/\text{s}$ );

$S$ ——相际接触面积 ( $\text{m}^2$ );

$p$ 、 $p_i$ ——组分  $A$  在气相主体及相界面上的分压 ( $\text{kPa}$ );

$(p - p_i)$ ——气相传质推动力 ( $\text{kPa}$ );

$k_G$ ——气膜传质分系数 [ $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kPa})$ ];

$D_G$ ——组分  $A$  在气相中的分子扩散系数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ );

$\delta_G$ ——气膜的厚度 ( $\text{m}$ );

$T$ ——温度 ( $\text{K}$ );

$p$ ——气相主体的压力 ( $\text{kPa}$ );

$R$ ——通用气体常数,  $R = 8314 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ ;

$p_{Bm}$ ——组分  $B$  在气膜  $\delta_G$  两侧 1、2 两点分压的对数平均值,  $p_{Bm} = (p_{B2} - p_{B1}) / \ln \frac{p_{B2}}{p_{B1}}$ 。

液膜吸收速率：

$$N_A = \ln \frac{G_A}{S} = k_L(c_i - c) \quad (3-5)$$

式中  $c_i$ 、 $c$ ——组分  $A$  在液相主体及相界面上的浓度 ( $\text{kmol}/\text{m}^3$ );

$(c_i - c)$ ——液相传质推动力 ( $\text{kmol}/\text{m}^3$ );

$$k_L = \frac{D_L}{\delta_L} \times \frac{c_A + c_B}{c_{Bm}}$$

式中  $D_L$ ——组分  $A$  在液相中的扩散系数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ );

$\delta_L$ ——液膜厚度 ( $\text{m}$ );

$k_L$ ——液膜传质分系数 ( $\text{m}/\text{s}$ );

$c_A$ 、 $c_B$ ——组分  $A$  和组分  $B$  的浓度 ( $\text{kmol}/\text{m}^3$ );

$c_{Bm}$ ——组分  $B$  在液膜  $\delta_L$  两侧 1、2 两点浓度的对数平均值。

$$c_{Bm} = \frac{c_{B2} - c_{B1}}{\ln c_{B2}/c_{B1}}$$

式中  $(c_{B2} - c_{B1})$  ——组分  $B$  在 1、2 两点的浓度之差 ( $\text{kmol}/\text{m}^3$ )。

从传质速率方程可得, 气膜传质速率与气膜传质分系数和气相传质推动力成正比, 液膜传质速率与液膜传质分系数和液相传质推动力成正比。

在气液两相界面处,  $\text{SO}_2$  浓度已达到平衡, 可认为相界面处没有任何传质阻力。在气膜和液膜以外的气、液两相主体流中, 由于处于湍流状态, 所以  $\text{SO}_2$  在两相主体流中的浓度是均匀的, 不存在扩散阻力和浓度差。

$\text{SO}_2$  气体靠湍流扩散从气相主流到气膜边界, 靠分子扩散通过气膜到达两相边界; 在界面上  $\text{SO}_2$  溶入液相, 再靠分子扩散通过液膜到液膜边界; 靠湍流扩散进入液相主体, 完成了脱硫浆液对  $\text{SO}_2$  的传质过程。

从上文描述可知,  $\text{SO}_2$  吸收的总阻力集中在气膜和液膜中, 即气液两相的传质速率主要取决于气膜和液膜的分子扩散速率。减小气膜、液膜的厚度对提高传质速率有利, 这一点在传质系数的表达式中也得到印证 (气膜厚度  $\delta_g$ , 液膜厚度  $\delta_l$  都在传质系数的分母上)。提高气流速度可以减小气膜厚度, 但是要全面考虑利弊, 选用合理的气速。此外, 气流温度低对传质速率也是有利的。

吸收气液界面的形成与脱硫塔的类型和性能有关, 如喷雾塔的气液界面是烟气与喷雾液滴表面的界面, 多孔板塔 (筛板塔) 是烟气通过多孔板时, 塔板上的脱硫循环液发生鼓泡产生泡沫而形成的界面, 填料塔则是烟气与被淋湿的填料表面形成的界面等。

根据双膜理论, 可以推导出脱硫塔传质单元数与传质系数传质总面积的关系式, 传质单元数与脱硫效率的关系式。

### 3.2.4 脱硫塔传质单元数

脱硫塔性能是保证脱硫成功达标的关键因素。了解脱硫塔性能初步从理论分析找到影响脱硫效率的参数。这里引入传质单元数  $N_{OG}$ , 它表示气相侧单位平均传质推动力所能获得的  $\text{SO}_2$  浓度降低值。

在图 3-3 所示吸收区内, 根据双膜理论, 气相传给液相的溶质 ( $\text{SO}_2$ ) 等于气相所失溶质, 等于液相所得溶质。图中  $y_b$  是  $\text{SO}_2$  进口摩尔分数,  $y_a$  是  $\text{SO}_2$  出口摩尔分数。 $x_a$  是入塔脱硫液的摩尔分数,  $x_b$  是出塔脱硫液的摩尔分数。在低浓度  $\text{SO}_2$  中, 当气体流率  $G$ 、液体流率  $L$  都为常量时, 通过脱硫塔任一截面上有

$$G(y - y_a) = L(x - x_a)$$

对上式微分运算, 得

$$d[G(y - y_a)] = d[L(x - x_a)]$$

即

$$Gdy = Ldx \quad (3-6)$$

在脱硫塔取微小面积的传质界面上, 式 (3-6) 可表示为

$$N_A dA = G dy$$

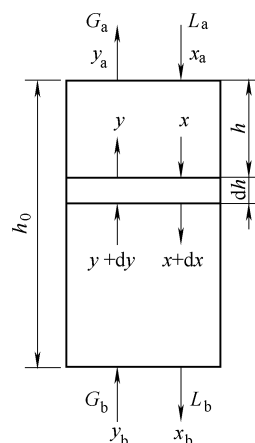


图 3-3 通过吸收塔微元高度的浓度变化

$$K'_G(y - y^*) dA = G dy$$

对传质界面积分：

$$\int_0^A K'_G dA = \int_{y_a}^{y_b} G \frac{dy}{(y - y^*)}$$
$$K'_G A = G \int_{y_a}^{y_b} \frac{dy}{(y - y^*)}$$

设

$$N_{OG} = \int_{y_a}^{y_b} \frac{dy}{(y - y^*)} \tag{3-7}$$

$$N_{OG} = \frac{K'_G A}{G} \tag{3-8}$$

- 式中  $N_{OG}$ ——传质单元数；  
 $K'_G$ ——用  $(y - y^*)$  表示的总推动力下的气相总传质系数 [kmol/m<sup>2</sup> · s]；  
 $A$ ——气相总传质界面面积 (m<sup>2</sup>)；  
 $G$ ——烟气流率 (kmol/s)；  
 $y_a$ ——烟气出口 SO<sub>2</sub> 的摩尔分数；  
 $y_b$ ——烟气入口 SO<sub>2</sub> 的摩尔分数；  
 $y^*$ ——SO<sub>2</sub> 在气膜侧的平衡摩尔分数。

$$\int_{y_a}^{y_b} \frac{dy}{(y - y^*)} = \ln \frac{y_b}{y_a} = N_{OG}$$

上式适用于吸收液吸收的 SO<sub>2</sub> 不再产生蒸气压。对大多数湿法脱硫装置，吸收液上方 SO<sub>2</sub> 平衡分压较之入口和出口 SO<sub>2</sub> 分压小得多，所以上式是基本正确的。

$$N_{OG} = -\ln \frac{y_a}{y_b} = -\ln (1 - \eta_s) \tag{3-9}$$

由式 (3-9) 可知  $N_{OG}$  是脱除 SO<sub>2</sub> 效率的函数。不同的脱硫效率可以计算出不同的传质单元数 ( $N_{OG}$ )，见表 3-2。

表 3-2 不同脱硫效率所需传质单元数

脱硫效率/%	$N_{OG}$	脱硫效率/%	$N_{OG}$
30	0.35	80	1.60
50	0.69	85	1.90
60	0.92	90	2.30
70	1.2	95	3.0
75	1.39	99	4.6

从式 (3-8)、式 (3-9) 可知，在相同  $G$  (烟气流率) 条件下，要提高脱硫效率，就要提高  $A$ ，增大  $K'_G$ 。而增大有效传质面积 ( $A$ ) 可采取增大液气比  $L/G$ 、减小雾化粒

度、增加筛板上鼓泡的表面积等措施来实现。

由于相际传质总推动力的表达不同,相际的总传质系数亦不同。用  $(y - y^*)$  表示的总推动力,则相际总传质系数为  $K'_G$ ,即  $N_A = K'_G(y - y^*)$ ,  $K'_G$  的单位为  $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; 用  $(p - p^*)$  表示的总推动力,则相际总传质系数为  $K_G$ ,即  $N_A = K_G(p - p^*)$ ,  $K_G$  的单位为  $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kPa})$ 。两者关系为

$$K'_G = K_G p$$

式中  $p$ ——气相的主体压力 (kPa)。

气相总传质系数  $k_G$ , 则可通过气膜和液膜传质分系数  $k_G$  和  $k_L$  来表示, 即

$$\begin{aligned} \frac{1}{k_G} &= \frac{1}{k_G} + \frac{H}{k_L} \\ k_G &= \frac{D_G}{\delta_G} \times \frac{p}{RT p_{Bm}} \\ k_L &= \frac{D_L}{\delta_L} \times \frac{c_A + c_B}{c_{Bm}} \end{aligned} \quad (3-10)$$

$k_G$ 、 $k_L$  是  $\text{SO}_2$  扩散系数和气膜、液膜厚度等变量的函数。例如采用提高气液之间相对流速和加强气液之间的扰动来减薄液膜, 或提高浆液的碱度来提高  $K_G$ 。用碱性吸收剂吸收易溶于水的  $\text{SO}_2$  时,  $H$  很小,  $H/k_L$  项可忽略不计, 则  $K_G \approx k_G$ , 也就是吸收过程的总传质速率主要是气膜扩散速率。这种情况属于气膜控制过程。CaO 湿法、MgO 湿法、Na 碱法、氨法等脱硫基本属于这种类型。而对于石灰石脱硫, 由于石灰石极难溶于水, 因此为了提高  $\text{CaCO}_3$  的溶解速度, 吸收液呈弱酸性,  $H/k_L$  不能忽略, 即  $\text{CaCO}_3$  的溶解速度控制了吸收过程的总速率。所以石灰石脱硫主要是液膜控制过程。

### 3.2.5 脱硫塔吸收区高度

确定吸收区高度, 能保证吸收塔的有效传质面积, 满足脱除  $\text{SO}_2$  的需要。通过理论计算脱硫塔高度, 找到影响脱硫效率的参数。

在图 3-3 所示的吸收区微元高度  $dh$  内, 气相传给液相的溶质, 等于气相所失溶质, 等于液相所得溶质, 即

$$G(y - y_a) = L(x - x_a)$$

对式两边微分, 可得

$$\begin{aligned} d[G(y - y_a)] &= d[L(x - x_a)] \\ G dy &= L dx \end{aligned}$$

对于  $dh$  小段脱硫塔内, 横截面积为  $F_h$ , 单位时间气相传入液相的  $\text{SO}_2$  为:

$$N_A \cdot a \cdot F_h \cdot dh = G dy$$

以  $N_A = K_{Ga}(y - y^*)$  代入

从塔顶到塔底积分  $h = 0$ ,  $y = y_a$ ,  $h = h_0$ ,  $y = y_b$ , 于是

$$\int_0^{h_0} dh = \int_{y_a}^{y_b} \frac{G}{K_{Ga} \cdot F_h (y - y^*)} dy$$



$$h_0 = \frac{G}{K_{Ga} \cdot a \cdot F_h} \int_{y_a}^{y_b} \frac{dy}{(y - y^*)}$$

$$h_0 = \frac{G}{K_{Ga} \cdot a \cdot F_h} N_{OG} \quad (3-11)$$

式中  $h_0$ ——吸收区高度 (m);

$K_{Ga}$ ——气相总体积传质系数 [ $\text{kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ];

$a$ ——单位体积吸收塔中的有效传质面积 ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ );

$F_h$ ——吸收塔横截面积 ( $\text{m}^2$ );

$G$ ——通过吸收塔气体流量 ( $\text{kmol/s}$ );

$N_{OG}$ ——吸收塔传质单元数。

由式 (3-11) 可知, 所需吸收区高度与  $h_0 N_{OG}$  成正比, 与  $K_{Ga}$  和  $F_h$  成反比。根据表 3-2, 如果要达到 95% 的脱硫效率,  $N_{OG}$  传质单元数为 3, 代入式 (3-11) 算出相应的  $h_0$  值。由于  $K_{Ga}$  数据不易准确获得, 因而难以用式 (3-11) 计算吸收区高度  $h_0$ 。

当气液两相的平衡线为直线时, 经运算,  $N_{OG}$  可以下式表示:

$$N_{OG} = \int_{y_a}^{y_b} \frac{dy}{(y - y^*)} = \frac{y_b - y_a}{\Delta y_b - \Delta y_a} \int_{\Delta y_a}^{\Delta y_b} \frac{d(\Delta y)}{\Delta y}$$

$$= \frac{y_b - y_a}{\Delta y_b - \Delta y_a} \ln \frac{\Delta y_b}{\Delta y_a}$$

令

$$\Delta y_m = \frac{\Delta y_b - \Delta y_a}{\ln \left( \frac{\Delta y_b}{\Delta y_a} \right)}$$

代表塔顶、塔底推动力的对数平均值, 则有

$$N_{OG} = \int_{y_a}^{y_b} \frac{dy}{(y - y^*)} = \frac{y_b - y_a}{\Delta y_m} \quad (3-12)$$

从式 (3-12) 可知, 传质单元数表达的是脱硫塔进出口  $\text{SO}_2$  的含量 (摩尔分数) 差 ( $y_b - y_a$ ) 与气侧平均传质推动力  $\Delta y_m$  之比, 它也表示单位推动力产生的脱除  $\text{SO}_2$  的含量 (摩尔分数) 差值, 即表明该脱硫塔脱硫能力的强弱。

将式 (3-12) 代入式 (3-11), 则有

$$G(y_b - y_a) = K_{Ga} \cdot a \cdot h_0 \cdot F_h \cdot \Delta y_m \quad (3-13)$$

由此可知, 吸收塔吸收  $\text{SO}_2$  的量取决于气相总体积传质系数  $K_{Ga}$ 、吸收区高度  $h_0$  和横截面积  $F_h$ , 单位体积吸收塔中有效传质面积  $a$  和气侧平均传质推动力  $\Delta y_m$ 。

气相总体积传质系数  $K_{Ga}$  与浆液性质、液滴大小、气液相对流速等有关。有效传质面积与脱硫塔类型、性能和液气比、液滴大小等因素有关。

吸收区高度表示烟气在塔内进行吸收过程的时间和行程。提高气相总体积传质系数  $K_{Ga}$  适当增大脱硫塔横截面积  $F_h$ 、增大传质平均推动力  $\Delta y_m$  和有效传质面积  $a$  可降低吸收区高度。

## 第4章 锅炉烟气湿法脱硫实用工艺设计

湿法脱硫的脱硫过程是在脱硫剂浆液或溶液中进行的。脱硫循环液和脱硫产物均为湿态。脱硫塔内吸收  $\text{SO}_2$  的过程是气、液两相进行扩散、传质、传热和化学反应的过程。

本章所讲的脱硫实用工艺是指在工业生产中成熟应用、有较多运行经验的脱硫工艺，也是技术上先进、经济上合理的工艺。

烟气脱硫是把烟气中的  $\text{SO}_2$  同脱硫液中的碱金属化合生成硫酸盐，所以脱硫是一个化工的系统工程。工业锅炉脱硫规模大小不一，小规模的一天产生数十公斤硫酸盐，大规模的工业热电站一天生产数百吨石膏。

工业锅炉脱硫规模相对较小，但是麻雀虽小，五脏俱全。小锅炉脱硫也不会投入大量资金，这对脱硫设计技术提出了更高的要求。小规模脱硫工程通常要进行一定的简化，但简化不适当，就会在运行时出现问题。所以，在设计时必须考虑周全，尽量做到简而精。

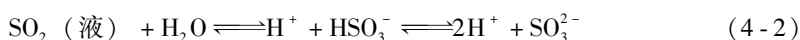
目前，国内外开发使用较多的烟气湿法脱硫工艺有石灰法、石灰石法、钠碱法、钠钙双碱法、氧化镁法、氨法等。下面对湿法脱硫实用工艺逐一详细介绍。

### 4.1 湿式石灰法脱硫

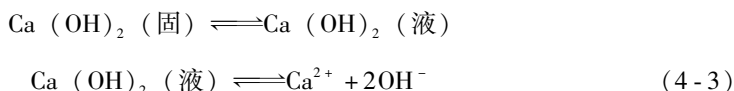
湿式石灰法烟气脱硫是有悠久历史的脱硫工艺，早在 20 世纪 30 年代就已开始应用，到 20 世纪 60 年代日本、苏联建成了大型工业装置，20 世纪 70 年代在美国推广应用，当时我国也开始试验研究。至今已在工业锅炉上大量采用。

#### 4.1.1 基本原理与化学反应式

烟气中的  $\text{SO}_2$  进入脱硫塔后同脱硫剂浆液接触， $\text{SO}_2$  先溶解于吸收液中，然后离解成  $\text{H}^+$  和  $\text{HSO}_3^-$ ：



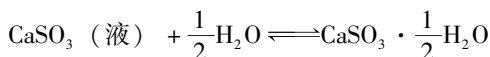
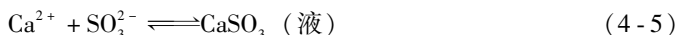
氢氧化钙溶解：



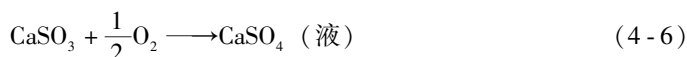
两者中产生的  $\text{H}^+$  和  $\text{OH}^-$  发生中和反应：



亚硫酸钙盐随之生成：



亚硫酸钙氧化成硫酸钙，可分为强制氧化和自然氧化。在脱硫塔底部循环槽中强制鼓入氧化空气，使  $\text{CaSO}_3$  强制氧化成  $\text{CaSO}_4$ ，称为强制氧化工艺。利用烟气中的剩余氧气使  $\text{CaSO}_3$  氧化成  $\text{CaSO}_4$ ，称为自然氧化工艺。



上面的化学反应中， $\text{SO}_2$  从气相扩散进入液相，通过气膜和液膜的扩散过程，需要一定的反应时间。

式 (4-2) 表示溶解于水的  $\text{SO}_2$  离解成  $\text{H}^+$  和  $\text{SO}_3^{2-}$ ，式 (4-3) 表示  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  离解成  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{OH}^-$ ，式 (4-4) 表示  $\text{H}^+$  离子与  $\text{OH}^-$  产生中和反应，式 (4-5) 表示亚硫酸钙的生成，式 (4-6) 表示亚硫酸钙氧化成硫酸钙（石膏）。

脱硫化学反应速率取决于  $\text{SO}_2$  吸收速率、 $\text{HSO}_3^-$  氧化速率、石灰溶解速率和石膏的结晶速率。要提高脱硫效率，就要使上述 6 个化学反应式能快速向右侧进行。如何才能做到这一点呢？前人进行了许多研究。脱硫是气体吸收，是溶质（如  $\text{SO}_2$ ）从气相传递到液相（如脱硫循环浆液）的过程。对于吸收机理的解释已有多种理论，如双膜理论、溶质渗透理论、表面更新理论等。其中双膜理论模型简明易懂，应用较广。

根据第 3 章介绍双膜理论，烟气中的  $\text{SO}_2$  进入脱硫循环液要通过气膜扩散和液膜扩散。这是式 (4-1)、式 (4-2) 所表示的过程，也是控制湿式石灰法脱硫吸收速率的主要因素。根据双膜理论可知，通过脱硫塔吸收的  $\text{SO}_2$  为：

$$G(y_b - y_a) = K_{\text{Ga}} a F_h h_0 \Delta y_m \quad (4-7)$$

式中  $G$ ——通过吸收塔的烟气流量 ( $\text{kmol/s}$ )；

$(y_b - y_a)$ ——通过吸收塔进出口， $\text{SO}_2$  的摩尔分数；

$K_{\text{Ga}}$ ——气相总体积传质系数 [ $\text{kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ]；

$a$ ——单位体积吸收塔中有效传质面积 ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )；

$F_h$ ——吸收塔的横截面积 ( $\text{m}^2$ )；

$h_0$ ——吸收区高度 (m)；

$\Delta y_m$ ——气侧吸收推动力的对数平均值。

因为

$$\frac{1}{K_{\text{Ga}}} = \frac{1}{k_{\text{Ga}}} + \frac{H}{k_L}$$

当用石灰吸收液吸收  $\text{SO}_2$  时，亨利系数 ( $H$ ) 值很小，则  $H/k_L$  可忽略不计，即  $K_{\text{Ga}} \approx$

$k_{Ga}$ 。表明吸收过程总传质速率主要取决于气膜扩散速率。这类脱硫过程属于气膜控制过程。其脱硫效率  $\eta_s = f(K_{Ga} a F_h h_0 \cdot \Delta y_m)$  是气相总体积传质系数、吸收塔横断面积、脱硫吸收区高度, 吸收推动力对数平均值和吸收塔单位体积中有效传质面积的函数。目前还没有此函数的解析式。但可从式 (4-7) 得出提高脱硫效率的途径:

1) 提高  $k_{Ga}$  可以提高  $\eta_s$ 。由于  $k_{Ga}$  正比于  $D_G/(\delta_G \cdot T)$ , 所以增大气液两相相对速度  $u$  可以减小  $\delta_G$ , 可以提高  $k_{Ga}$  但增大  $u$  要在合理范围。从  $k_{Ga}$  正比  $\frac{1}{T}$  可知降低温度  $T$  也可提高  $k_{Ga}$  值。

2) 增大吸收塔横断面积  $F_h$  和  $a$  可提高脱硫效率。为了提高  $a$  值, 可采用提高吸收塔液气比、减小雾化粒径或增大塔板上的鼓泡液膜面积等方法。

3) 增高吸收区高度  $h_0$ , 可以增大总的有效传质面积, 可以增加气液两相吸收  $SO_2$  的时间, 所以可以提高脱硫效率。

4) 增大吸收推动力对数平均值  $\Delta y_m$  可以提高吸收效率。增大液气比、提高浆液碱度、增强液侧吸收推动力、降低平衡浓度可以提高  $\Delta y_m$ 。

#### 4.1.2 湿式石灰法脱硫工艺流程

脱硫系统位于锅炉除尘器后面, 一般应包括脱硫增压风机 (引风机)、烟气挡板、脱硫塔、烟气换热器 (GGH)、脱硫排烟道、烟囱。工艺流程简图如图 4-1 所示。

脱硫流程是从锅炉脱硫增压风机送来的热烟气, 进入烟气换热器与脱硫塔出口冷烟气进行热交换后进入脱硫塔。烟气在塔内上升过程中与脱硫循环液雾化而成的液滴和在塔板上鼓泡而成的液沫 (膜) 相接触, 进行烟气、雾粒 (泡沫)、石灰的气、液、固三相之间碰撞、接触、交换混合, 激烈地进行传质、吸收、传热过程。烟气中的  $SO_2$  通过气相主流湍流扩散到液体表面的气膜, 通过分子扩散穿过气膜到气液界面, 从气相到液相。在液相中进行式 (4-1) ~ 式 (4-6) 所示化学反应。 $SO_2$  与  $Ca(OH)_2$  化合生成  $CaSO_3$  和  $CaSO_4$ 。 $SO_2$  被吸收除去并生成稳定的硫酸盐。脱硫液在循环泵作用下输送到多层 (一般为 3~4 层) 喷嘴组合, 经喷嘴雾化成细小雾粒, 下落到脱硫塔循环槽内。循环槽内组分主要有水、 $CaSO_3$ 、 $Ca(HSO_3)_2$ 、 $CaSO_4$ 、 $Ca(OH)_2$ 、氯化物、氟化物、重金属和尘等, 并且不断重复进行脱硫循环。

脱硫塔可分为三个工作区, 如图 4-2 所示。第一区是  $SO_2$  吸收区。这个区内, 主要是  $SO_2$  等酸性成分被浆液中的水吸收溶解,  $SO_2$  和水反应生成  $HSO_3^-$ , 再同石灰浆液进行化合反应生成  $CaSO_3$ 、 $CaSO_4$ 。第二区是循环槽的氧化区。脱硫循环液全部贮存在循环槽中, 供脱硫循环使用通过鼓风机鼓入空气并加上搅拌, 使亚硫酸盐氧化成硫酸盐。循环槽内循环液要停留足够时间进行氧化、结晶等化学反应, 并保持合适的 pH 值和浆液浓度。从脱硫塔抽出的脱硫产物石膏或亚硫酸钙浆液被泵送到脱水系统。第三区是烟气除雾区在吸收塔的上部安装两层高效除雾器, 脱除烟气中夹带的雾滴, 以保证烟气换热器安全使用。脱硫塔出口烟气同塔入口烟气通过烟气换热器 (GGH) 升温后经烟道入烟囱排放。

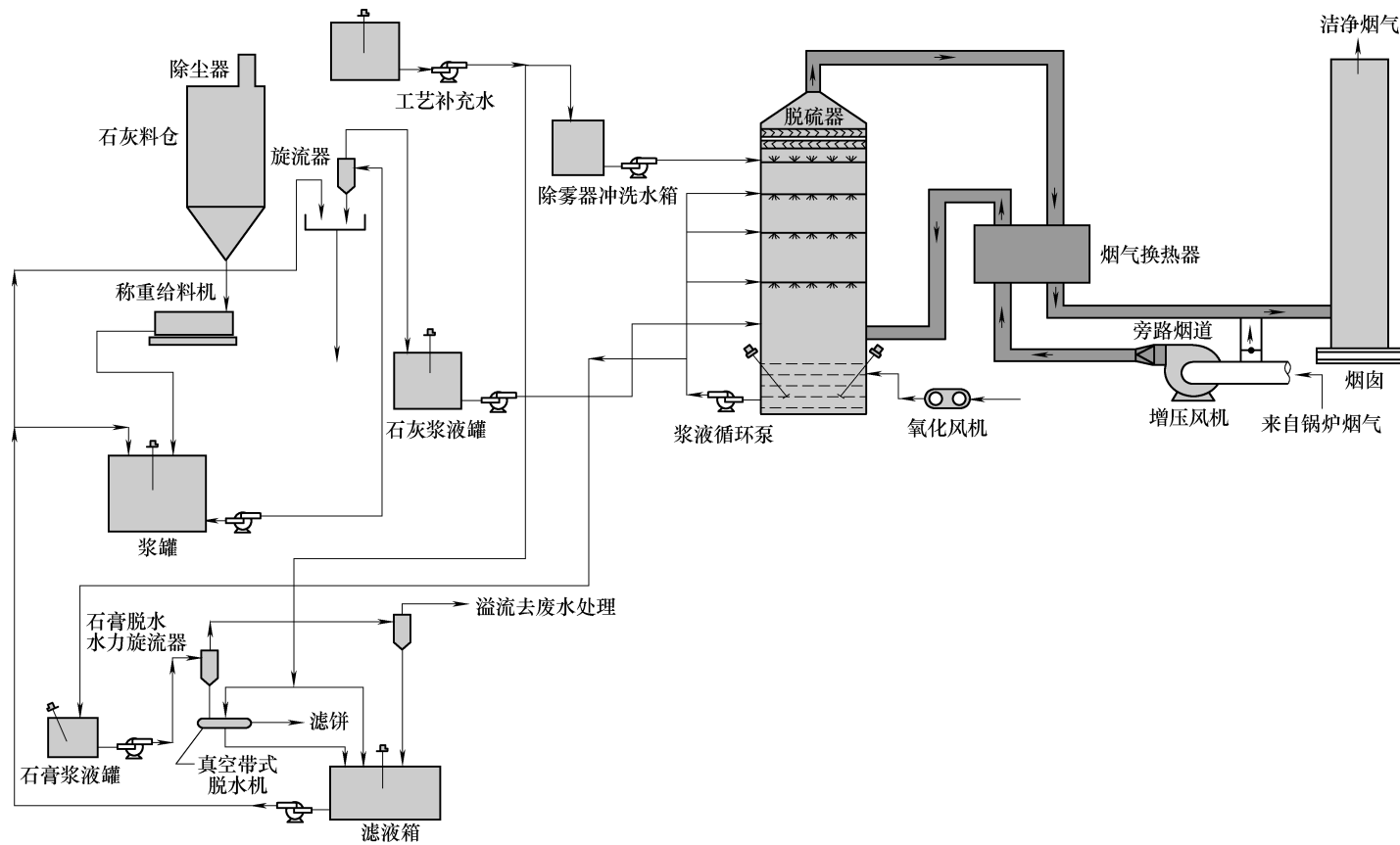


图 4 - 1 湿式石灰法脱硫工艺流程图

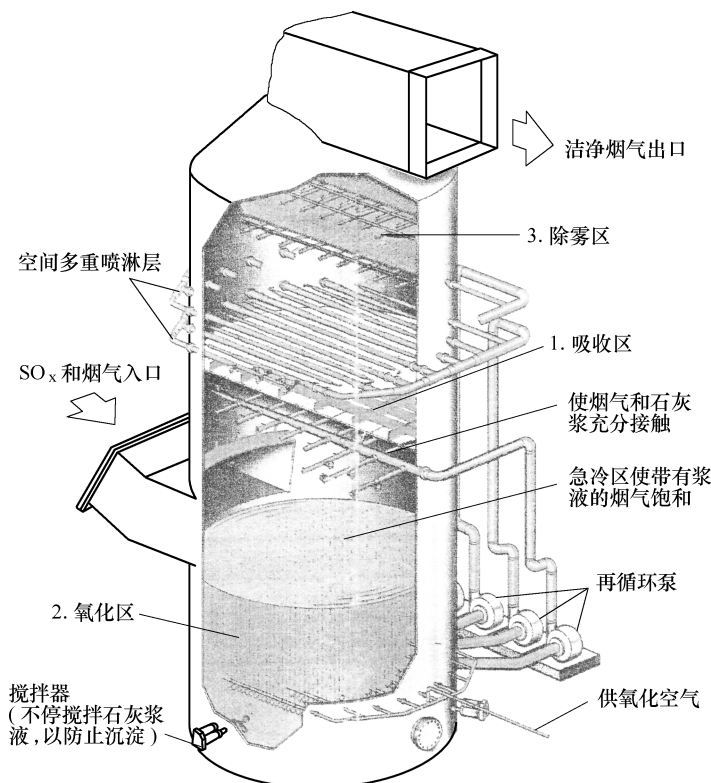


图 4-2 B&amp;W 脱硫塔构造简图

### 4.1.3 脱硫工艺流程说明

#### 1. 主要工质流向

(1) 脱硫烟气 来自锅炉引风机的烟气→烟道挡板→烟气换热器→脱硫塔。脱硫排烟→烟气换热器→烟道挡板→烟道→烟囱→大气。

(2) 脱硫剂 石灰粉→叶轮给料机→粉体计量装置→搅拌罐→旋流分离器→乳液泵→脱硫塔。

(3) 脱硫产物（硫酸钙或亚硫酸钙）浆液 脱硫塔→排浆泵→脱硫浆液旋流器→贮浆罐→脱水过滤机→脱硫产物（硫酸钙或亚硫酸钙）滤饼→脱硫产物库。

(4) 脱硫废水 脱硫产物旋流器顶流及脱硫塔排水→汇集池→废水处理站。

#### 2. 脱硫系统组成

① 脱硫剂贮存及浆液制备系统 满足 HJ 462—2009《工业锅炉及炉窑湿法烟气脱硫工程技术规范》中有关石灰质量要求的石灰粉通过密封罐车及风力输送泵风送到石灰贮仓中，石灰仓的容积一般不少于 3 天的使用量。详细设计在第 7 章介绍。贮仓顶上设仓顶除尘器，仓底设流态化板和热风送入装置，使石灰保持干燥，并有良好流动性（防止堵塞）。

石灰贮仓下料管接叶轮给料机，通过溜管接到粉体计量装置，再通过溜管将石灰粉

送入消化池。消化池设搅拌器和灰浆泵，通过自控仪表制备含量为10%~20%的石灰浆，用灰浆泵输送到贮浆池供脱硫塔使用。

② 烟气系统 锅炉排烟经过静电除尘器（或其他除尘器）后的引风机进入烟道。在烟道上设挡板。如果引风机的全压能满足脱硫除尘系统及锅炉排烟的需要，可以不设增压风机，否则要增设一台脱硫增压风机。

如果脱硫烟气要加热升温，增压风机出口烟气则进入烟气换热器与脱硫塔出口冷烟气进行热交换，冷烟气升到80~90℃，即可将升温后的烟气经过烟道送至烟囱排入大气。

烟道装设脱硫系统在线检测仪表及运行控制仪表。

③ SO<sub>2</sub> 吸收系统 经过烟气换热器加热升温后的烟气进入脱硫塔，在上升过程中同从上向下喷雾的脱硫剂雾粒碰撞、传质、换热、发生化学反应。烟气在上升过程中很快达到露点。

脱硫塔内吸收SO<sub>2</sub>的过程要求烟气分布均匀、上升速度合理、有进行化学反应的充足时间（要求有足够的吸收区高度）、适宜的雾化粒径分布、合适的浆液物化性质和pH值。

塔内脱硫上升的烟气夹带较多脱硫浆液雾滴，直接排放会产生较多的害处（如结垢堵塞、腐蚀等），因此必须经过除雾器除雾。一般在脱硫塔上部设置两层高效除雾器。每层除雾器上、下都装冲洗喷嘴组。由电动冲洗阀自动定时冲洗除雾器。

④ 脱硫产物浆液处理系统 湿式石灰法脱硫产物浆液主要包括硫酸钙、亚硫酸钙、亚硫酸氢钙、氢氧化钙和水等。塔底浆液通过排浆泵排至水力旋流器，排浆管线设有密度计测量密度，设有pH计测量塔内pH值。要求设排浆流量控制装置，根据烟气中SO<sub>2</sub>含量、吸收塔内液位、脱硫塔内浆液密度调节排浆流量。

塔内浆液pH值通过pH计控制自动注入石灰浆液调节pH值。

塔内浆液浓度通过调节排浆泵排出量、除雾器冲洗水量、脱硫剂液加入量来控制。

塔内液位根据进口烟气温度、烟气流量、烟气进出口SO<sub>2</sub>浓度以及脱硫浆液浓度等参数，调节排浆泵排出量、除雾器冲洗水量来控制。

脱硫产物浆液经过水力旋流器，粗颗粒浆液在离心力作用下沉降到器壁向下旋转到锥体底，以浓浆渣形式排出。较细颗粒浆液在中心管中上升，从旋流器上部排出。水力旋流器对浆液起到浓缩的作用。一般脱硫塔排出浆液的浓度约为12%。旋流器底流含固量约为50%。排浆泵出口含固量小于12%时，底流应反流回塔。

水力旋流器顶流流到废水旋流器，经过旋流器浓缩的浆液返回脱硫塔。废水旋流器顶流送至废水处理池。

脱硫产物浆液经脱水浓缩后，含固量约为50%，通过浓浆泵输送到真空带式过滤器（或其他过滤机械）把脱硫产物（石膏或亚硫酸钙）脱水。脱水后的脱硫滤饼用运输机械运输到仓库存放。

⑤ 事故处理排空系统 当脱硫系统或锅炉需要紧急停车时，石灰制浆设备及管线、脱硫塔循环槽及循环泵、管线要进行排空和事故处理，所以要设置紧急事故脱硫剂浆液排放池及脱硫塔循环浆液排放池，这样可保存石膏晶种，以便在较短时间内重新开车。



4.1.4 湿式石灰法脱硫工艺参数

脱硫过程工艺参数的确定是脱硫工艺设计的关键因素，应根据锅炉及炉窑容量和负荷变化、燃料品质、锅炉烟气排放标准、环境影响评价，经全面分析优化后确定。

1. 烟气量  $G$

烟气量是根据锅炉种类和型号、燃料全分析数据和锅炉负荷率确定的。一般应将锅炉满负荷时的排烟量作为脱硫装置的设计烟气量。烟气量决定了脱硫装置的规模，对选择脱硫工艺也是重要因素。对于电站锅炉，负荷率一般是稳定的和可调控的。通过调配锅炉负荷，使大部分锅炉处于满负荷运行状态，相应脱硫装置也基本在设计烟气量范围内运行。对于工业及供暖锅炉，是会随生产用热和供暖用热变负荷运行，也可通过调配负荷来尽可能减少变负荷运行的锅炉。一般锅炉不应该超负荷运行。变负荷可能是减负荷，锅炉出力打个折扣，此时烟气量减小。根据式（3-11）可知， $N_{oc}$ 则增加，脱硫效率 $\eta_s$ 也随之增加。但烟气量减少时，会使烟气在塔内流速 $u$ 降低，此时气膜厚度 $\delta_c$ 增加，使气相传质系数 $K_c$ 减小，这又会降低脱硫效率。但塔内流速降低还会增加烟气在塔内停留时间，这又有利于脱硫。因此通过实际运行经验可知，对于喷淋塔，在其他工艺参数不变的情况下，在允许的降低负荷范围内，脱硫效率略有提高。对多孔板塔或泡沫塔，减小烟气量，在允许的降低负荷范围内，脱硫效率略有下降。

2. 钙硫比  $Ca/S$

钙硫比是指脱硫剂消耗量与脱硫装置脱除  $SO_2$  的量的摩尔比值。理论上脱除 1mol 的  $SO_2$  需要 1mol 的  $CaO$ ，但在实际脱硫塔中，化学吸收反应条件并不处于理想状态，因此需要超过理论值的  $Ca/S$  比值。

不同的脱硫剂要求的达到脱硫率 95% 以上的钙硫比（钠硫比、镁硫比、氨硫比等）是不同的（这是因为钾、钠、钙、镁、铵等都是强碱，但其强碱程度有所差异，尤其是它们与  $SO_2$  的反应速度各不相同），同时，钙硫比与脱硫剂的利用率密切相关， $Ca/S$  比为 1.05 时，钙利用率为 95%； $Ca/S$  比为 1.1 时，钙利用率为 90%。

现把湿式石灰法及其他湿法的钙硫比列于表 4-1 中，并附带各种湿法脱硫装置的主要技术指标。

表 4-1 脱硫装置主要技术指标

序号	脱硫效率/%	脱硫工艺	液气比/(L/m <sup>3</sup> )	钙(镁)硫比	循环液 pH
1	>90 ~ 95	湿式石灰法	6 ~ 8	1 ~ 1.03	7.5
2	>90 ~ 95	钠碱吸收法	3 ~ 4	1.0 ~ 1.03	6.5
3	>90 ~ 95	氧化镁法	3 ~ 5	1.0 ~ 1.03	6.5
4	>90 ~ 95	石灰石法	15 ~ 25	1.05 ~ 1.10	5.6
5	>90 ~ 95	双碱法	3 ~ 4	1.0 ~ 1.03	6.5
6	>95	氨法	3	1.0	5.3



### 3. 液气比 $L/G$

液气比是指进入脱硫塔的每标准立方米的烟气中所要喷淋的循环吸收液的体积数。 $L$ 是喷淋脱硫液的体积， $G$ 是标准状态下的烟气量。各种湿式脱硫方法，对于特定的吸收塔，都要绘制脱硫效率  $\eta_s$  同液气比  $L/G$  之间的关系曲线图供设计使用。

湿式石灰法的  $\eta_s - L/G$  曲线如图 4-3 所示。

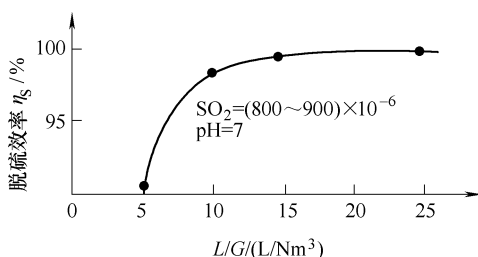


图 4-3  $L/G$  与脱硫效率的关系

液气比的确定既要能达到所需的脱硫效率，又要尽可能减少循环液量。一般根据该脱硫工程  $SO_2$  达标排放所必需的脱硫效率，查找  $\eta_s - L/G$  的曲线图或其他已投入运行的相同脱硫装置的  $L/G$ ，也可根据可靠的经验数据来确定  $L/G$ 。 $L/G$  确定后就可计算出脱硫塔循环液量，并配置循环泵。如果液气比  $L/G$  增大，则脱硫循环液量也增大，循环泵、循环管径和循环泵房都随之增大，这必然增加建设投资。

液气比  $L/G$  增大，则循环浆液量增大，这就使喷淋浆液吸收  $SO_2$  的表面积增大。此外，液气比  $L/G$  增大，也就增加了吸收  $SO_2$  的总碱量，并能增加总气相传质系数  $K_G$ 。另外，液气比  $L/G$  大，可以防止结垢，因为当循环浆液浓度一定时，单位循环浆液吸收的  $SO_2$  量越少，石膏的过饱和度就越低，也就越有助于防止石膏硬垢的生成。

液气比  $L/G$  与脱硫系统的技术、经济性能的关系很大，是在脱硫设计中必须合理选定的重要工艺参数。

### 4. 烟气中 $SO_2$ 浓度

烟气脱硫设计就是把锅炉燃煤烟气中所含  $SO_2$  吸收到锅炉烟气排放标准许可的指标，所以确定烟气中  $SO_2$  浓度是重要的设计条件之一，也是脱硫工艺重要的参数之一。 $SO_2$  浓度数值可以通过实验测定，也可通过燃煤量及含硫量计算，见式 (4-8)：

$$M_s = 2KB_g \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) \frac{S_{ar}}{100} \quad (4-8)$$

式中  $M_s$ ——烟气中  $SO_2$  的质量流量 (kg/h)。

$K$ ——煤中硫分的转化率：

循环流化床锅炉  $K = 0.75 \sim 0.80$ ；

层燃锅炉  $K = 0.80 \sim 0.85$ ；

煤粉锅炉  $K = 0.90$ 。

$B_g$ ——锅炉额定负荷时的燃煤量 (kg/h)。

$q_4$ ——锅炉机械未完全燃烧的热损失 (%)。

$S_{ar}$ ——燃料的收到基硫分 (%)。

通过计算得到了烟气中的  $SO_2$  质量流量, 可用式 (4-9) 计算烟气中  $SO_2$  的浓度  $c_s$ 。

$$c_s = \frac{M_s}{Q_0} \quad (4-9)$$

式中  $Q_0$ ——烟气在标准状态下的体积流量 ( $Nm^3/h$ )。

$$Q_0 = Q \times \frac{T_0}{T} \times \frac{p}{p_0} \quad (4-10)$$

式中  $Q$ ——烟气在压力  $p$  (kPa) 和温度  $T$  (K) 时的体积流量 ( $m^3/h$ )。

一般因为  $p/p_0 \approx 1$ ,  $T_0 = 273K$ , 所以式 (4-10) 简化为

$$Q_0 = Q \frac{T_0}{T} = Q \frac{273}{T}$$

烟气中  $SO_2$  的浓度同燃料中的含硫量和燃料消耗量密切相关。为了稳定脱硫装置的运行工况和使锅炉烟气  $SO_2$  排放达标, 必须控制燃煤中含硫量符合脱硫装置设计的燃煤中的含硫量。如果含硫量有较大变化, 则必须调整脱硫装置的运行参数, 以保证烟气中  $SO_2$  的达标排放。如果脱硫系统有完备的脱硫工艺参数在线监测系统和达标排放自动调整控制系统, 那么随着脱硫塔进口  $SO_2$  浓度变化会相应调整石灰乳液加入量、循环液量和氧化空气量, 以满足脱硫的需要。如果不能自动调整, 就要根据  $SO_2$  浓度变化重新设定脱硫工艺参数并进行调整, 以保证脱硫系统正常达标运行。

## 5. 脱硫浆液的 pH 值控制

脱硫循环吸收浆液的 pH 值表示浆液的酸碱性, pH 值越大则表示浆液中  $OH^-$  离子浓度越高, 碱性越强。pH > 7 时浆液呈碱性。在脱硫浆液 (或溶液中),  $OH^-$  浓度高, 则与它结合的  $Ca^{2+}$  或  $Na^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $NH_4^+$  等离子浓度也高, 即碱性物质的浓度高。这样吸收  $SO_2$  的能力就强, 脱硫效率就高。当 pH < 7 时, 浆液呈酸性, pH 值越小, 则表示  $H^+$  离子浓度越高, 酸性越强。在脱硫浆液中,  $HSO_3^-$  离子多, 则与其结合生成的  $Ca(HSO_3)_2$  或  $NaHSO_3$  也多, 浆液吸收  $SO_2$  能力就弱, 脱硫效率就低。湿式石灰法脱硫的效率  $\eta_s$  与 pH 值的关系曲线如图 4-4 所示。

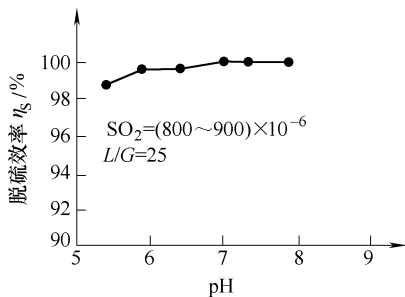


图 4-4  $\eta_s$  与 pH 值的关系曲线

但是 pH 值也并非越高越好。pH 值的高低会影响亚硫酸氢钙与亚硫酸钙的比例。如果 pH 值高到浆液中亚硫酸氢钙全部转化成亚硫酸钙时, 那么浆液的碱就能吸收烟气中的  $CO_2$ , 反应生成  $CaCO_3$  沉淀析出, 并进入脱硫产物中, 增加了吸收剂耗量和脱硫产物量, 同时  $CaCO_3$  沉淀在脱硫塔内器壁表面会结垢, 容易造成堵塞。

由于脱硫过程化学反应很复杂, 不同的 pH 值对反应过程和脱硫效率均有一定影

响。只有合适的 pH 值才能使脱硫系统正常运行并获得较高的脱硫效率。不同的脱硫剂要求控制的 pH 值是不同的。对于湿式石灰法，要求脱硫塔循环槽内浆液的 pH 值控制在 7.5 左右。

### 6. 脱硫循环浆液浓度

脱硫塔循环槽中的循环浆液吸收  $\text{SO}_2$  不断生成亚硫酸盐、亚硫酸氢盐和硫酸盐。浆液浓度越来越高。当脱硫产物在浆液中的溶解量超过其溶解饱和度时，将发生沉淀。当沉淀物的过饱和度高于某一定值时，就可能在脱硫塔内的零部件上结垢，所以保持浆液适当含量既可以提高脱硫效率又可以防止结垢。此外，过高浆液浓度对泵、管道阀门、搅拌器产生较大磨损。稳定浆液含量就要控制循环槽浆液排出量，适当返回产物过滤液、水力旋流器顶流和补充工艺用水。维持浆液浓度有利于稳定脱硫效率和防止结垢。湿式石灰法脱硫的浆液浓度为 12% ~ 15%。

### 7. 脱硫浆液在循环槽中停留时间

循环槽浆液体积 ( $\text{m}^3$ ) 除以循环浆液总流量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) 即浆液在循环槽中的停留时间。循环槽中要完成氧化、中和和沉淀析出反应。循环液出塔至循环泵经循环浆液管、喷嘴喷雾再回到循环槽，这个循环过程需要一定时间。循环槽内浆液能满足多少时间循环泵的循环喷雾运转。这也是脱硫系统设计的一个重要参数。停留时间过长，循环槽体积太大；停留时间过短，脱硫化学反应时间不够，也会影响脱硫效率。对于湿式石灰法，停留时间一般为 6 ~ 8min。

## 4.1.5 脱硫产物的用途

脱硫浆液吸收  $\text{SO}_2$  产生脱硫产物。湿式石灰法又可分为抛弃法和回收法。

(1) 抛弃法 脱硫产物主要是亚硫酸钙和少量自然氧化的硫酸钙。这种脱硫产物目前还没有适当的用途，且亚硫酸钙化学性质不稳定，在空气中可进一步氧化成硫酸钙。这类脱硫产物基本上没什么重要用途，只能作为固体废渣抛弃或作为回填土使用。

(2) 回收法 脱硫产物主要是硫酸钙，可作为建材使用。

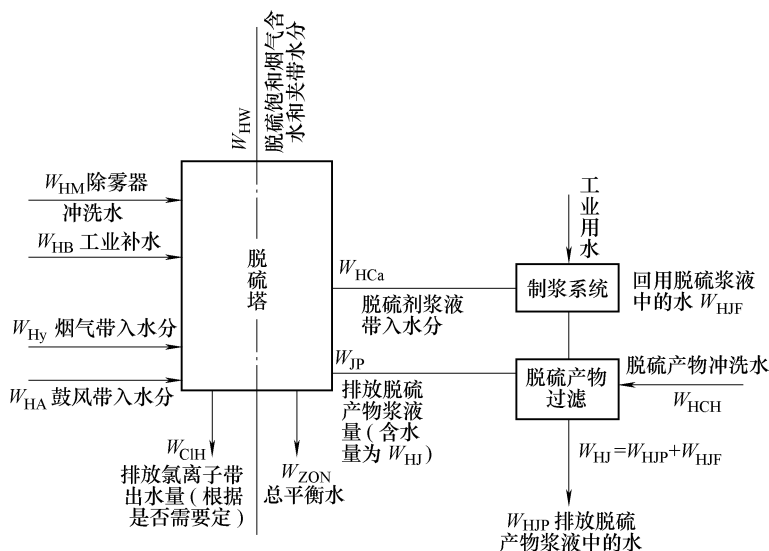
## 4.1.6 脱硫过程水平衡

脱硫过程中，对进入脱硫塔的水量排出脱硫塔的水量，包括烟气带入水分，脱硫饱和烟气带走的水分，专门调控浆液浓度  $\text{Cl}^-$  离子浓度等必须排出的水量，脱硫产物  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  浆液排放所带出水分和结晶水分，氧化鼓入空气所带入水分，添加脱硫剂乳液加入水分，冲洗除雾器加入水分等进行逐项统计计算称为水平衡计算。经过水平衡计算，可知脱硫过程要排放多少废水。至于废水的组分，应通过分析检测确定。图 4-5 为脱硫过程水平衡分析图。

进、出脱硫塔的水量有：

烟气带入脱硫塔水量  $W_{\text{Hy}}$ ；

冲洗除雾器带入水量  $W_{\text{HM}}$ ；



注：石膏冲洗水 = 0.5 石膏重量  
烟气夹带水约 0.75g/m<sup>3</sup>

图 4-5 水平衡分析图

添加脱除剂带入水量  $W_{HCa}$ ；

鼓风带入水量  $W_{HA}$ （鼓入空气量不大时可不计入）；

向脱硫塔补入工业用水  $W_{HB}$ （如果有需要）；

冲洗脱硫产物所返回水量  $W_{HCH}$ （如果有冲洗）；

排放脱硫产物浆液（溶液）带出水量  $W_{HJ}$ ；

脱硫产物过滤液回收部分水量  $W_{HJF}$ （没有回收利用就不计）；

脱硫饱和烟气带出水量  $W_{HW}$ ；

排放氯离子带出水量  $W_{CHI}$ （如果有必要时）。

$W_{HJ}$ 中排出的水分为  $W_{HJF}$ ， $W_{HJ} = W_{HJF} + W_{HJP}$ ；

脱硫塔总平衡水量为  $W_{ZON}$

$$W_{ZON} = W_{HY} + W_{HM} + W_{HCa} + W_{HA} + W_{HCH} - W_{HJP} + W_{HJF} - W_{HW} - W_{CHI}$$

经过水平衡计算  $W_{ZON}$  是正值则说明每小时向脱硫塔加进的水量。为了维持脱硫塔水位稳定也必须排出相等量的水。实际上排放的是脱硫浆液，需要折算到排浆量。这部分排水是废水的一部分，此外脱硫产物排放水  $W_{HJ}$  能回流多少，排出多少，其排出部分  $W_{HJP}$  也是废水的组成部分。脱硫产物处理，如冲洗滤饼等水如果不回流也计入废水量。当然应尽可能回流，但必须满足 Cl 离子浓度  $\leq 20\text{g/L}$ 。

所以， $W_{FEI} = W_{ZON} + W_{HJP}$ 。

经计算后，如果为保持 Cl 离子浓度  $\leq 20\text{g/L}$ ，则需要排放  $W_{CHI}$ ，但是要看  $W_{ZON}$  总平衡排水量，如果  $W_{ZON} > W_{CHI}$ ，则

$$W_{FEI} = W_{ZON} + W_{HJP}$$

如果  $W_{ZON} < W_{CIH}$ , 则

$$W_{FEI} = W_{ZON} + (W_{CIH} - W_{ZON}) + W_{HJP}$$

即  $W_{FEI} = W_{CIH} + W_{HJP}$ 。

湿式石灰法脱硫过程水平衡计算示例。

例：某供热厂 130t/h 供热锅炉，烟气量  $V_y = 240000 \text{ m}^3/\text{h}$ ，温度  $T = 130^\circ\text{C}$ ；烟气水

汽含量  $x_H = \frac{V_{H_2O}}{V_y} = 0.07$ ， $c_{S_1} = 1000 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ ， $c_{S_2} = 100 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ ，经计算相关耗水量，除雾

器 (ME) 冲洗水  $W_{HM}$ ，脱硫用 10% 浓度  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  石灰乳液  $W_{Ca}$

排出脱硫产物浆液  $W_{JP}$

脱硫烟气带入水分  $W_{Hy}$

脱硫烟气带出水分  $W_{HW}$

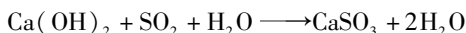
脱硫液气比  $L/G = 5 \text{ L}/\text{Nm}^3$ ；

脱硫塔为三层喷淋加一层大孔板组合塔。

$D = 5000 \text{ mm}$ ， $H = 18300 \text{ mm}$ ，钢衬玻璃鳞片塔体内置部件材质为 S316L 不锈钢，循环槽设置强制氧化曝气区。塔顶设置两层折流板除雾器。

进、出脱硫塔的水量计算如下：

(1) 脱硫产物排出塔外的排浆量  $W_{JP}$  脱硫产物生成量  $W_{Ca4}$  以硫酸钙表示。



脱除  $\text{SO}_2$  量为

$$W_S = (c_{S_1} - c_{S_2}) \times V_y \times \frac{273}{273 + T} = (1000 - 100) \times 240000 \times \frac{273}{273 + 130} \text{ kg/h} = 146.3 \text{ kg/h}$$

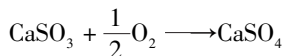
生成的  $\text{CaSO}_3$  量为

$$W_{Ca3} = \frac{M_{Ca3} \times W_S}{M_{SO_2}} = \frac{120 \times 146.3}{64} \text{ kg/h} = 274.3 \text{ kg/h} = 0.274 \text{ t/h}$$

式中  $M_{Ca3}$ —— $\text{CaSO}_3$  的相对分子质量；

$M_{SO_2}$ —— $\text{SO}_2$  的相对分子质量。

强制氧化反应，使亚硫酸转化为硫酸钙



此时生成的  $\text{CaSO}_4$  量为

$$W_{Ca4} = \frac{W_{Ca3} \times M_{Ca4}}{M_{Ca3}} = \frac{274.3 \times 136}{120} \text{ kg/h} = 311 \text{ kg/h} = 0.311 \text{ t/h}$$

式中  $M_{Ca4}$ —— $\text{CaSO}_4$  的相对分子质量。

把脱硫产物排出塔外所需排浆量  $W_{JP}$  的浆液质量为 12%。

$$W_{JP} = \frac{W_{Ca4}}{0.12} = \frac{311}{0.12} \text{ kg/h} = 2591 \text{ kg/h} \approx 2.6 \text{ t/h}$$

又因为

$$\frac{W_{Ca4}}{W_{Ca4} + W_{HJ}} = 0.12$$

$$\begin{aligned}\text{所以其中含水 } W_{HJ} &= \frac{W_{Ca4} - W_{Ca4} \times 0.12}{0.12} = \frac{311 - 37.3}{0.12} \text{ kg/h} \\ &= 2280 \text{ kg/h} \\ &\approx 2.3 \text{ t/h}\end{aligned}$$

(2) 脱硫烟气带入塔内的水分  $W_{Hy}$

$$\begin{aligned}W_{Hy} &= V_y \rho_{130} x_H = 240000 \times 0.8894 \times 0.07 \text{ kg/h} \\ &= 14942 \text{ kg/h} = 14.94 \text{ t/h}\end{aligned}$$

(3) 除雾器冲洗水  $W_{HM} = 3.3 \text{ t/h}$  对于垂直布置的除雾器, 第一级正面冲洗水量为  $60 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ , 第一级背面和第二级正面冲洗水量  $24 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 。第一级正面每 30min 冲洗一次, 持续冲洗 1min。第一级背面及第二级正面每 1h 冲洗一次, 每次冲洗 1min。

$$\begin{aligned}\text{第一级正面 } W_{M1Z} &= F_M \times 60 = \frac{\pi}{4} D^2 \times 60 \\ &= 0.785 \times 5^2 \times 60 \text{ L/min} \\ &= 1178 \text{ L/min}\end{aligned}$$

第一级背面和第二级正面

$$\begin{aligned}W_{M1P} W_{M2Z} &= F_M \times 24 = \frac{\pi}{4} D^2 \times 24 \\ &= 0.785 \times 5^2 \times 24 \text{ L/min} \\ &= 471 \text{ L/min}\end{aligned}$$

每小时总冲洗水量  $W_{HM}$

$$\begin{aligned}W_{HM} &= 2 \times W_{M1Z} + W_{M1P} + W_{M2Z} \\ &= (2 \times 1178 + 471 + 471) \text{ L/min} \\ &= 3298 \text{ L/min} \\ W_{HM} &= 3.3 \text{ t/min}\end{aligned}$$

因为每次冲洗持续时间为 1min, 所以顺序冲洗折算到小时冲洗水量仍可为:

$$W_{HM} = 3.3 \text{ t/h}$$

(4) 脱硫注入 10%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  乳液 1.99t/h, 带入水量

$$W_{H\text{Ca}} = (1.99 - 1.99 \times 10\%) \text{ t/h} = 1.79 \text{ t/h} \approx 1.8 \text{ t/h}。$$

(5) 控制氯离子浓度的排水  $W_{H\text{Cl}}$  脱硫浆液中氯化物来自燃煤工业补加水和脱硫剂。一般石灰中含氯量较少, 工业用水中含氯  $< 150 \text{ mg/L}$ , 我国大多数煤中含氯量  $\leq 0.05\%$ 。

浆液中过高的氯离子含量会降低浆液碱度而影响脱硫效率和增强腐蚀性。应该把氯离子控制在适当范围内, 我国电站脱硫浆液  $\text{Cl}^-$  离子浓度的设计值不超过  $20 \text{ g/L}$ 。

如果浆液中超过此值, 那么通过排浆和补水, 使循环槽浆液中  $\text{Cl}^-$  离子浓度稳定在  $\leq 20 \text{ g/L}$ 。

我国现在的燃煤全分析资料中，一般没有给出氯和氟的数据，这就无法计算烟气中含 HCl 和 HF 数据。最终也无法计算浆液中每小时增加的氯和氟的含量。也无法计算为了维持  $20\text{g/LCl}^-$  离子浓度需要排放的废水量。

现以大多数煤中含氯量  $0.05\%$  计算，以  $130\text{t/h}$  煤粉炉耗煤量 ( $B_g$ ) 为  $18\text{t/h}$ ；烟气量为  $240000\text{m}^3/\text{h}$ ， $T=130^\circ\text{C}$ ；计算烟气中含 Cl 量  $M_{\text{Cl}}$ 。

$$\begin{aligned} M_{\text{Cl}} &= 0.0005 \times B_g \times K \times (1 - q_4) \\ &= 0.0005 \times 18000 \times 0.9 \times \left(1 - \frac{4}{100}\right) \text{kg/h} \\ &= 7.8 \text{kg/h} \end{aligned}$$

其中  $K=0.9$ ， $q_4=4\%$ ， $B_g=18000\text{kg/h}$

如果燃烧煤产生的 HCl，以  $100\%$  进入脱硫浆液，那么每小时进入浆液的 HCl 有  $7.8\text{kg/h}$ 。如果把  $M_{\text{Cl}}$  折算到浓度  $C_{\text{ClY}}$ 。

$$\begin{aligned} C_{\text{ClY}} &= \frac{M_{\text{Cl}}}{Q_0} = \frac{7.8}{24 \times 10^4 \times 0.677} \text{kg/Nm}^3 = 0.00048 \text{kg/Nm}^3 \\ &= 48 \text{mg/Nm}^3 \end{aligned}$$

通过上述计算，可以知道烟气中含氯浓度一般约为  $48\text{mg/Nm}^3$ ，进入脱硫浆液中的氯离子约为  $7.8\text{kg/h}$ 。

如果要维持浆液中氯离子允许浓度  $M_{\text{OCl}}$  为  $20\text{g/L}$ ，每小时则要排出  $7.8\text{kg}$  氯离子。排浆量  $W_{\text{ClJ}}$ ，

$$W_{\text{ClJ}} = \frac{M_{\text{Cl}}}{M_{\text{OCl}}} = \frac{7.8 \times 10^3}{20} \text{L/h} = 390 \text{L/h} = 0.39 \text{m}^3/\text{h}$$

也就是说如果只考虑烟气中进入循环槽中的  $\text{Cl}^-$ ，那么每小时脱硫外排  $390\text{L}$  浆液就可以维持脱硫塔循环槽中的  $\text{Cl}^-$  浓度为  $20\text{g/L}$ 。

前面已计算出，为了排出脱硫产物和维持脱硫浆液浓度为  $12\%$ ，每小时必须排放浆液量  $W_{\text{JP}}=2.6\text{t/h}$ ，其中实际排水量  $W_{\text{HP}}=2.3\text{t/h}$ 。此时即已满足排氯的要求。全面的浆液中  $\text{Cl}^-$  的平衡计算将在 4.5.6 中详述。

(6) 脱硫烟气带出的水分 即烟气中水蒸气达到饱和时烟气的含湿量。

$$\begin{aligned} W_{\text{HW}} &= V_y \times \rho_{130} \times (1 - x_{\text{H}_2\text{O}}) \times x_{\text{tw}} = 240000 \times 0.8894 \times 0.93 \times x_{48\text{w}} \\ &= 19514 \times 0.078 \text{kg/h} = 15484 \text{kg/h} \approx 15.5 \text{t/h} \end{aligned}$$

式中  $x_{\text{tw}}$ ——饱和状态烟气含湿量 [ $\text{kg/kg}$  (干烟气)]，可从本书表 13-14 中查得。

水平衡计算时，进塔的水为“+”，出塔的水为“-”。

$$\begin{aligned} W_{\text{ZON}} &= W_{\text{HJP}} + W_{\text{HM}} + W_{\text{HCa}} + W_{\text{Hy}} + W_{\text{HW}} \\ &= (-2.3 + 3.3 + 1.8 + 14.9 - 15.5) \text{t/h} = 1.8 \text{t/h} \end{aligned}$$

由此可知，脱硫过程中每小时需向塔内加进  $1.8\text{t}$  水。同时，为了维持塔内液位稳定，必须每小时排  $1.8\text{t}$  的水。因为脱硫产物过滤液是排放到废水池，由于  $W_{\text{HJP}}=2.3\text{t/h}$ ，

$$W_{\text{FEI}} = W_{\text{ZON}} + W_{\text{HJP}} = (1.8 + 2.3) \text{t/h} = 4.1 \text{t/h}$$



4.1.7 湿式石灰法脱硫废水处理

废水主要来自脱硫产物脱水的排水和脱硫塔排水。对于强制氧化工艺，脱硫浆液组成主要是  $\text{CaSO}_4$ 、 $\text{CaSO}_3$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$  等。具体的组分与工艺操作条件和 pH 值控制有关。由于煤中含有的微量元素经燃烧后也进入烟气，脱硫浆液洗涤烟气，这些微量元素也进入脱硫浆液中。脱硫废水中微量元素的含量随煤质的不同而变化。设计脱硫废水装置应该先收集废水中组分，该工作由废水处理专业工程师承担。对于小型工业锅炉，一般废水量较小，与企业其他排水混合后一起处理。

现摘录某电厂湿式石灰法脱硫废水中的组成成分，以供参考，见表 4-2。

表 4-2 废水成分分析

项 目		1 号废水	2 号废水	3 号废水
流量/(t/h)		9.7	10.8	10.9
运行时间/(h/d)		24	24	24
温度/℃		45	—	<40
pH		5.0~6.5	6~8	6~9
含量/ (mg/L)	COD	≤195	≤100	≤100
	悬浮物(SS)	≤2000	≤50	≤70
	油	—	—	≤10
	氟(F)	≤55	≤15	≤10
	铜(Cu)	≤3.2	≤0.5	≤0.5
	锌(Zn)	≤10.4	≤2	≤2
	锰(Mn)	≤52	≤2	≤2
	磷(P)	—		≤0.1
	汞(Hg)	≤7.8	≤0.05	≤0.05
	镉(Cd)	—	≤0.1	≤0.1
	铬(Cr)	—	≤1.5	≤1.5
	六价铬(Cr <sup>+6</sup> )	—	≤0.5	≤0.5
	砷(As)	≤44	≤0.5	≤0.5
相对密度		1.0	1.0	1.0

注：COD 表示用重铬酸钾法测定的化学需氧量。

如果企业有集中污水处理厂，则可以直接送至污水处理厂；否则电厂应设置废水处理站。

由表 4-2 可以看出 1 号废水的悬浮物较多，且其他水质指标也较高，因此它可能来自水力旋流器底流；2 号、3 号废水则可能来自水力旋流器顶流和脱硫产物的过滤排水。



把所列废水水质指标同 GB 8978—1996 《污水综合排放标准》，对照可知，1 号废水中：第一类污染物总汞超标 156 倍，砷超标 88 倍；第二类污染物，pH 偏低，悬浮物含量超过二级标准 10 倍，COD 基本达到二级标准，氟是二级标准的 2.75 倍，铜是 3.2 倍，锌是 2 倍，锰是 26 倍。

综合来看，1 号废水主要是悬浮物和重金属超标，可采用加药混凝沉淀的方法去除重金属离子和悬浮物，使废水达标排放。

废水处理一般流程如图 4-6 所示，包括中和、絮凝、沉淀、砂滤和污泥脱水。

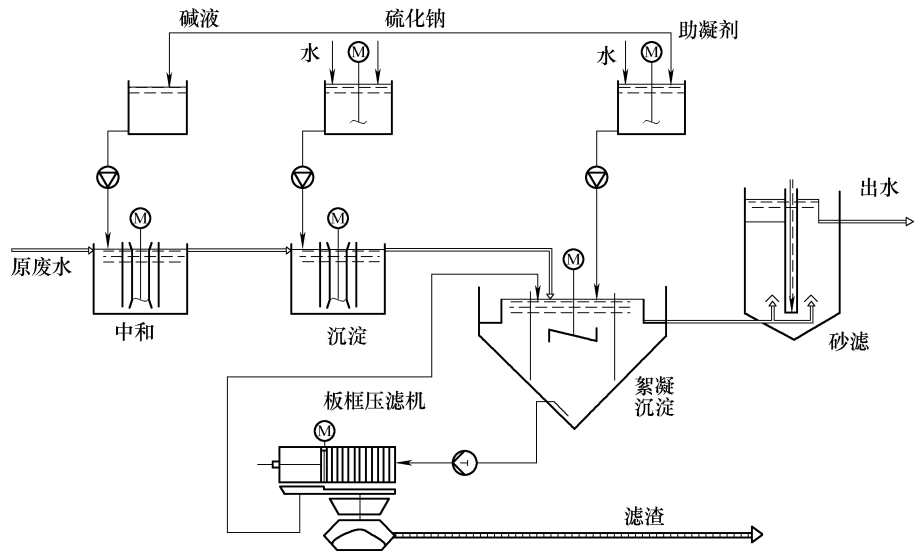


图 4-6 废水处理流程示意图

4.1.8 湿式石灰法脱硫特点

- 1) 湿式石灰法脱硫是最古老的脱硫方法，早在 1931 年国外就建成第一套用于电站的湿式石灰法脱硫装置。但它又是现代较流行的脱硫方法，至今国内外先进的液柱喷射塔仍用石灰（或石灰石）做脱硫剂。日本最早开发的 CT-121 型喷射鼓泡脱硫塔也是用石灰（或石灰石）做脱硫剂。在中国，大部分工业锅炉都采用简易湿式石灰法脱硫。
- 2) 湿式石灰法脱硫还是最经济的脱硫方法，因为石灰属于便宜的脱硫剂。几乎在全国各个城市都可采购到。
- 3) 石灰属于强碱，它与 SO<sub>2</sub> 的化合反应速度很快，所以 Ca/S 比较低（1~1.03），从而石灰的利用率高且具有较高的脱硫效率（一般为 90%~95%）。
- 4) 可以采用较低的液气比 L/G（相对石灰石法），一般取 3~8，这样可节省脱硫循环泵电耗和运行费用。
- 5) 脱硫循环液是浆液，所以宜采用喷雾塔或液柱喷射塔；不宜采用塔内零部件较多的脱硫塔，以免挂灰结垢堵塞。

6) 脱硫运行中, 要将脱硫塔循环浆液 pH 值严格控制在 7.0 ~ 7.5。这是因为过高的 pH 值会生成  $\text{CaCO}_3$  硬垢, 这是脱硫液中 Ca 同烟气中  $\text{CO}_2$  化合反应所致。当 pH 值更高 ( $\text{pH} > 9$ ) 时会生成  $\text{CaSO}_3$  软垢。较低的 pH 值 ( $\text{pH} = 5.5$ ) 则可能生成  $\text{CaSO}_4$  硬垢。

湿式石灰法的缺点是易发生结垢堵塞。要克服这个缺点, 必须控制好脱硫塔循环槽内浆液 pH 值 ( $\text{pH} = 7.5$ )。

7) 为了防止  $\text{CaSO}_3$  沉积生成软垢, 宜采用强制氧化法, 把亚硫酸盐氧化成硫酸盐。

8) 对于工业及采暖锅炉, 由于规模和吨位比较小, 一般脱硫产物都同锅炉炉渣灰混堆后一起处理, 可以作为低档建材的原料之一, 如炉渣砖块等制品。

#### 4.1.9 湿式石灰法脱硫设计注意事项

1) 采用新鲜活性强的 CaO, 其 CaO 含量宜达到 85% 左右。粉料细度不低于 200 目。脱硫使用时, 制备成约 10% 的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  悬浮浆液。不宜采用由已熟化的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  粉料加水调配的浆液。因为  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  粉料长期存放会与空气中水分和  $\text{CO}_2$  反应而降低活性。

2) 制备成约 10% 的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  浆液要过滤掉少量的杂质和渣, 否则这些渣会沿浆液输送管沉淀而发生堵塞。可用水力旋流器分离浆液中的渣。

3)  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  浆液输送管应设计成循环管网, 即从浆液储槽用浆液泵抽出输送到使用点, 并把剩余部分再返回到浆液贮槽, 这样  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  浆液始终在管道中循环流动, 不会因静止而沉淀, 进而引起堵塞。

4) 浆液输送管转弯时, 应使用大半径转弯, 以免浆液被阻、搭桥堵塞。

5) 浆液管应设清水冲洗管。停用较长时间时, 放空浆液管并用清水冲洗浆液管, 以免残留浆液干化挂在管壁有碍正常运行。

6) 防止脱硫系统结垢堵塞, 是湿式石灰法脱硫设计的重要课题。为此必须严格控制循环槽中浆液 pH 值约为 7.5。

7) 为了防止  $\text{CaSO}_3$  软垢堵塞, 应采用强制氧化工艺使  $\text{CaSO}_3$  氧化成  $\text{CaSO}_4$ 。应在脱硫塔循环槽设氧化区, 并鼓入所需氧化空气。

8) 禁止脱硫浆液在高 pH 值运行。否则容易产生  $\text{CaCO}_3$  结垢。既妨碍安全运行, 又浪费脱硫剂。

9) 为了达到所需要的脱硫效率, 应选定相应的液气比  $L/G$ 。可参考湿式石灰法脱硫效率与  $L/G$  的曲线或有关资料, 一般  $L/G$  为 6 ~ 8。

10) 为了防止硫酸钙结垢, 应使浆液中  $\text{CaSO}_4$  的浓度处于不饱和状态, 这样  $\text{CaSO}_4$  不会结晶并附着在脱硫塔器壁及零部件上。

11) 湿式石灰法、石灰石法各种脱硫装置的比较见表 4-3。

12) 湿式石灰法、石灰石法大型烟气脱硫装置中, 各种工艺流程的洗涤器及操作条件见表 4-4。

表 4-3 石灰法、石灰石法各种脱硫装置的比较

形式	SO <sub>2</sub> 含量(%)		吸收率 /%	烟气量 /[kg/(m <sup>2</sup> ·h)]	液体量 /[kg/(m <sup>2</sup> ·h)]	液气比 /(L/m <sup>3</sup> )	传质单元数 ( <i>N</i> <sub>OG</sub> )	总体积传质系数 <i>K</i> /[kmol/(m <sup>3</sup> ·h·atm)]	压力降 /mmH <sub>2</sub> O <sup>③</sup>	备注
	入口	出口								
栅条 填充塔	0.128 ~ 0.144	0.01 ~ 0.04	70 ~ 92	5000 ~ 10500	4800 ~ 13600	0.5 ~ 1.5	1.2 ~ 2.4	30 ~ 110	< 25	十字栅格 10% Ca- CO <sub>3</sub> 料浆
	0.08	0.006	93	11000	32000	3.2	2.4	24	76	12m × 18m, 高 30m, 英国班克赛德 电站
文氏管 洗涤器	0.13 ~ 0.14	0.02 ~ 0.08	36 ~ 86	60m/s <sup>①</sup>	—	0.4 ~ 2.1	0.5 ~ 2.0	500 ~ 2200	330 ~ 620	10% CaCO <sub>3</sub> 料浆
喷雾塔	0.3	0.03	90	1460	7600	5.5	2.3	11	—	直径 6.4m, 高 11m, 喷嘴 139 个, 6% Ca(OH) <sub>2</sub> 料浆
MCF 洗涤器 <sup>②</sup>	0.13 ~ 0.14	0.01 ~ 0.05	80 ~ 92	15000 ~ 23000	5000 ~ 10000	0.3 ~ 0.6	—	430 ~ 650	150 ~ 200	10% CaCO <sub>3</sub> 料浆

① 文氏管洗涤器的 60m/s 是指喉颈处风速。

② MCF 洗涤器为三菱错流式洗涤器的简称。

③ 1mmH<sub>2</sub>O = 9.80665Pa。

表 4-4 各种工艺流程的洗涤器及操作条件

工艺流程	洗涤器	吸收剂	液气比 /(L/m <sup>3</sup> )	化学计算量	料浆浓度 /%	保证脱硫率 /%
开米柯	2 级文氏 管喷雾塔	CaO CaCO <sub>3</sub>	5.3 ~ 10.6	0.8 ~ 1.3	12	90
			10.6	1.3 ~ 1.5	10 ~ 12	75
燃烧工程	1 段或 2 段 玻璃弹子床层	CaO CaCO <sub>3</sub>	3.4 ~ 4.0	1.0	7 ~ 10	符合排 放标准
			3.4 ~ 4.0	1.2 ~ 1.3	7 ~ 10	
巴勃科克 - 威尔科克斯	激冷器及 板式吸收塔	CaO CaCO <sub>3</sub>	5.3 ~ 6.7	1.1	5 ~ 8	90
			5.3 ~ 6.7	1.2 ~ 1.3	5 ~ 8	80
皮博迪工程	文氏管及 喷雾塔	CaO CaCO <sub>3</sub>		1.1	15	90
				1.2 ~ 1.3	15	85
环球油品 - 空气调节	湍动塔 (3 段)	CaO CaCO <sub>3</sub>	5.3	1.25	10	90
			5.3	1.50	10	85
联合燃烧 设备公司	文氏管及 喷雾塔	CaO CaCO <sub>3</sub>	8.0	1.1 ~ 1.3	8 ~ 12	90
			10.6	1.2 ~ 1.4	8 ~ 12	80 ~ 85
科特雷耳 研究公司	多段接触 吸收塔	CaCO <sub>3</sub>	13.4 ~ 16.0	1.1 ~ 1.3	10 ~ 15	90

4.1.10 湿式石灰法烟气脱硫设计方案及投资估算

1. 工程概况

北京市 × × 环保公司根据国家 SO<sub>2</sub> 总量控制要求和锅炉污染物排放标准和业主要求，拟对山东 × × 纸业集团热电厂的三台 75t/h 煤粉锅炉烟气实施脱硫工程。本项目实施后将对周围环境，特别对大气污染物的控制治理以及改善周围地区的空气质量起到至关重要的作用，可获得巨大的环境效益和一定的经济效益。北京市 × × 环保公司采用湿式 CaO 法烟气脱硫工艺，提出该厂的脱硫技术方案。

2. 脱硫方案设计技术原则

1) 从技术成熟、经济合理及装置运行稳定、可靠方面考虑，采用湿式 CaO 法脱硫工艺，保证系统脱硫效率在 91% 以上，达到国家及地方的锅炉大气污染物排放标准。

2) 采用 200 目 CaO 粉作为脱硫剂，价格低廉，货源充足，脱硫产物 CaSO<sub>4</sub> 可综合利用，运行费用较低。

3) CaO 是强碱，与 SO<sub>2</sub> 进行化学反应速度很快，可选定较低的液气比，节省运行费用和投资。

4) 采用喷雾洗涤方式可以获得较大的液气接触面积,进而获得较高的脱硫除尘效率。喷雾空心塔有较好的防堵塞性,塔内防腐层较好施工,反应塔内壁、管道、泵、搅拌器、储罐内壁、烟道等部位都采用性能良好的防腐材料或防腐衬里。

5) 保证本脱硫装置连续运行,年运行时间可满足业主要求,同时,设置旁路烟道以保证锅炉及脱硫系统的安全生产和正常检修。

6) 为确保整个系统连续可靠运行,应采用优良可靠的辅机设备,以确保脱硫系统的可靠运行。

7) 按现有场地条件布置脱硫系统设备,因地制宜力求紧凑合理,尽可能减小脱硫烟道的长度,节约用地,节省投资。

8) 最大限度地循环利用脱硫水,但是由于洗涤烟气的浆液中含有一定浓度的盐和  $\text{Cl}^-$  离子,脱硫浆液部分水分蒸发,因此形成循环水中盐和  $\text{Cl}^-$  离子的积累。由于过高的盐和  $\text{Cl}^-$  离子浓度会降低脱硫效率和腐蚀装置及结垢,所以必须达标排放少量的脱硫循环水,并补充少量工业用水。

9) 脱硫废水排至本厂废水处理站,按 GB 8978《污水综合排放标准》的指标,处理后达标排放,无二次污染。

10) 脱硫产物为  $\text{CaSO}_4$ ,从脱硫塔排至本厂石膏系统,综合利用。

### 3. 设计条件

1) 烟气量:  $Q_y = 450000 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

2) 烟气温度:  $T = 130^\circ\text{C}$ 。

3) 烟尘浓度:  $C_1 = 400 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 。

4)  $\text{SO}_2$  浓度:  $S_1 = 1600 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 。

5) 烟气湿度:  $x_{\text{H}_2\text{O}} = 6.5\%$ 。

6) 现场锅炉引风机型号、风量、风压、电动机功率。

7) 利用已有循环沉淀池:长×宽×深,循环水管网尺寸,循环泵型号、台数、流量、扬程、电动机功率。

8) 提供使用的场地面积及方位。

注:如无法提供第4)条数据,可改为提供燃料消耗量和燃料含硫量来进行估算;新建项目则不必提供第6)、7)条内容。

### 4. 要求达到的排放标准

1) 烟尘浓度:  $C_2 = 50 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 。

2)  $\text{SO}_2$  浓度:  $S_2 = 150 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 。

3) 烟气黑度为 1。

### 5. 脱硫除尘工艺流程及说明

工艺流程如图 4-7 所示。脱硫工艺说明如下:

(1) 脱硫系统运行参数

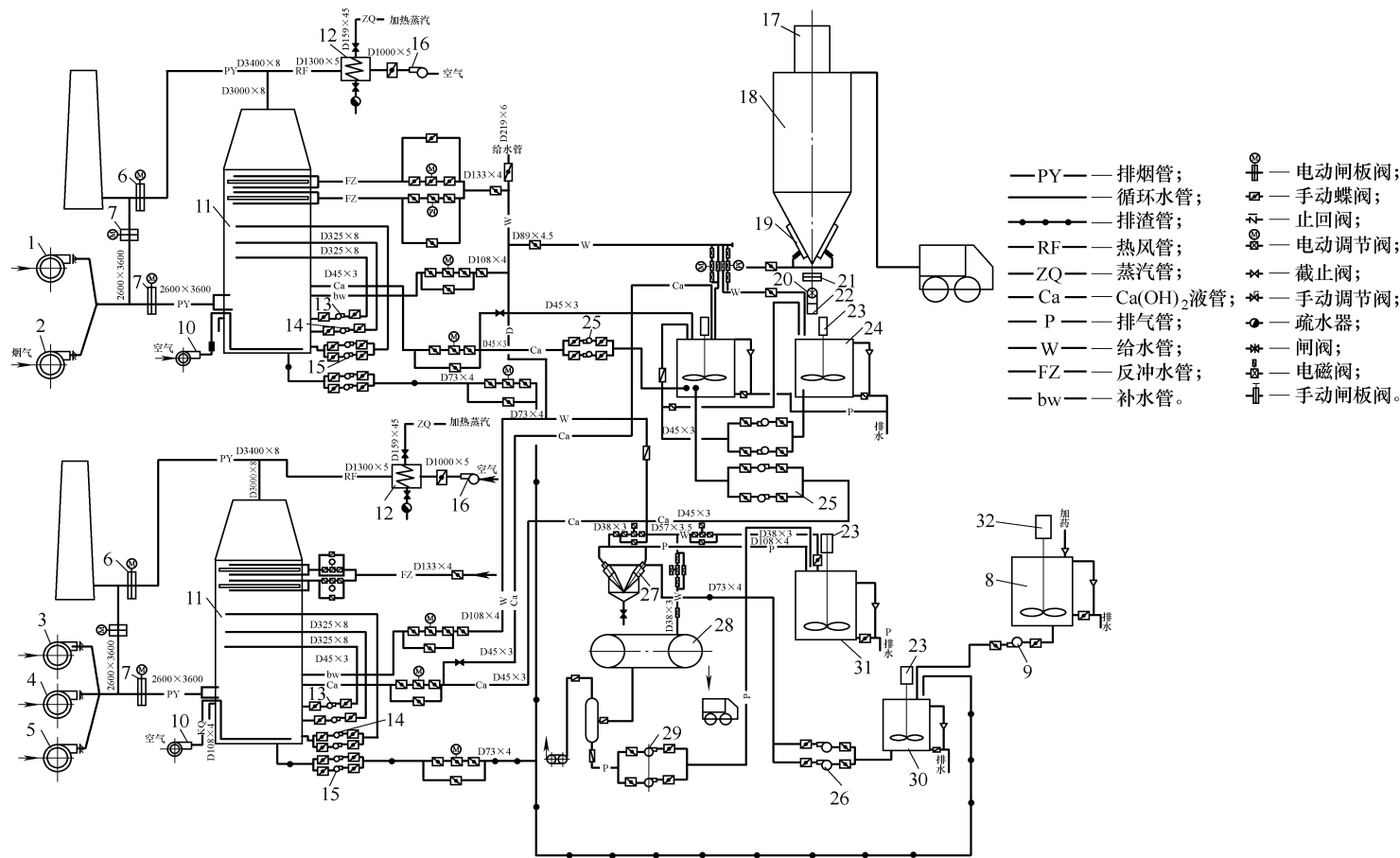
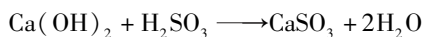


图 4-7 CaO 湿法脱硫流程图

1~5—引风机 6、7—电动闸阀 8—加药槽 9—定量泵 10—鼓风机 11—脱硫塔 12—汽气加热器 13、14—循环泵 15—排浆泵  
 16—送风机 17—除尘器 18—粉体仓 19—流化板 20—旋转给料器 21—插板阀 22—流量计 23—搅拌机 24—乳液槽  
 25—给料泵 26—旋流泵 27—旋流器 28—真空带式过滤机 29—回水泵 30—混凝槽 31—集水槽 32—搅拌机

1) 通过脱硫化学反应式, 计算实际  $\text{CaO}$  耗量  $W_{\text{CaO}}$



脱除的  $\text{SO}_2$  ( $W_{\text{SO}_2}$ )

$$\begin{aligned} W_{\text{SO}_2} &= (S_1 - S_2) \times Q_y \times \frac{273}{273 + T} \\ &= (1.6 - 0.15) \text{ g/m}^3 \times 450000 \text{ m}^3/\text{h} \times \frac{273}{273 + 130} = 442016 \text{ g/h} \\ &= 442 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

因为

$$W_{\text{HS}_3} = \frac{M_{\text{HS}_3}}{M_{\text{SO}_2}} \times W_{\text{SO}_2} = \frac{82}{64} \times 442 \text{ kg/h} = 566.3 \text{ kg/h}$$

所以

$$W_{\text{CaOH}} = \frac{M_{\text{CaOH}}}{M_{\text{HS}_3}} \times W_{\text{HS}_3} = \frac{74}{82} \times 566.3 \text{ kg/h} = 511 \text{ kg/h}$$

因此需要使用的纯度为 0.85 的  $\text{CaO}$  ( $W_{\text{CaO}}$ ) 为

$$W_{\text{CaO}} = \frac{M_{\text{CaO}}}{M_{\text{CaOH}}} \times W_{\text{CaOH}} = \frac{56}{74} \times 511 \text{ kg/h} = 386.7 \text{ kg/h}$$

式中  $W_{\text{HS}_3}$ ——吸收的亚硫酸 ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ );

$W_{\text{CaOH}}$ ——需要的氢氧化钙 [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ];

$M_{\text{CaOH}}$ —— $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的相对分子质量;

$M_{\text{HS}_3}$ —— $\text{H}_2\text{SO}_3$  的相对分子质量。

由于  $\frac{\text{Ca}}{\text{S}}$  比为 1.03 且  $\text{CaO}$  纯度为 0.85, 所以实际使用  $\text{CaO}$  的重量 ( $W_{\text{CaO}}$ ) 为

$$W_{\text{CaO}} = \frac{W_{\text{CaO}} \times 1.03}{0.85} = \frac{386.7 \text{ kg/h} \times 1.03}{0.85} = 469 \text{ kg/h}$$

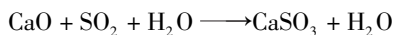
2) 循环浆液  $G_x$  计算如下:

$$\begin{aligned} G_x &= Q_y \times \frac{273}{273 + T} \times L/G = 450000 \text{ m}^3/\text{h} \times \frac{273}{273 + 130} \times 8 \text{ L/m}^3 \\ &= 450000 \text{ m}^3/\text{h} \times 0.677 \times 8 \text{ L/m}^3 = 2437200 \text{ L/h} = 2437 \text{ m}^3/\text{h} \end{aligned}$$

根据脱硫效率 90% ~ 95%, 查图 4-3 可知,  $L/G$  取值为  $8 \text{ L/Nm}^3$ 。

3)  $\text{CaSO}_3$  强制氧化曝气量 ( $Q_k$ )。

根据脱硫反应式



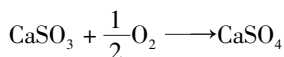
可知  $\text{CaSO}_3$  的生成量 ( $W_{\text{Ca}_3}$ ) 为

$$W_{\text{Ca}_3} = \frac{M_{\text{Ca}_3}}{M_{\text{SO}_2}} \times W_{\text{SO}_2} = \frac{120}{64} \times 442 \text{ kg/h} = 829 \text{ kg/h}$$

式中  $M_{\text{SO}_2}$ —— $\text{SO}_2$  的相对分子质量;

$M_{\text{Ca}_3}$ —— $\text{CaSO}_3$  的相对分子质量。

再根据强制氧化反应式



$$W_{O_2} = \frac{\frac{1}{2}M_{O_2}}{M_{CaS}} \times W_{CaS} = \frac{16}{120} \times 829 \text{ kg/h} = 110.5 \text{ kg/h}$$

式中  $M_{O_2}$ —— $O_2$  的相对分子质量。

折算到空气

$$Q_k = \frac{W_{O_2}}{0.21} = \frac{110.5}{0.21} \text{ kg/h} = 526 \text{ kg/h}$$

温度为  $20^\circ\text{C}$  的空气密度为  $1.205 \text{ kg/m}^3$ ，曝气的氧化利用率为 0.25 时，曝气需用空气量  $Q_k$

$$Q_{k20} = \frac{Q_k}{1.205 \text{ kg/m}^3 \times 0.25} = \frac{526}{0.301} \text{ m}^3/\text{h} = 1748 \text{ m}^3/\text{h} = 29 \text{ m}^3/\text{min}$$

#### 4) 废水处理量:

对脱硫过程进行水平衡计算如下:

##### ① 烟气进脱硫塔带入水分 $W_{Hy}$

$$W_{Hy} = Q_y \times \rho_1 \times x_{H_2O} = 450000 \text{ m}^3/\text{h} \times 0.8894 \text{ kg/m}^3 \times 0.065 = 26015 \text{ kg/h} = 26 \text{ t/h}$$

##### ② 冲洗除雾器进塔水分 $W_{HM}$

第一层下面 30min 冲一次，每次 1min，冲洗强度  $P = 60 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ ；第一层上面每小时冲一次，每次 1min， $P = 24 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ ；第二层上、下面每小时冲一次，每次 1min， $P = 12 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 。

$W_M = F_M \times P = 0.785 \times 7.6^2 \times (60 + 60 + 24 + 12) \text{ L/min} = 7073.2 \text{ L/min} = 7.1 \text{ t/min}$ ，由于这是 1min 内按序轮流冲洗水量，所以每小时实际冲洗水量为 7.1t。

##### ③ 注入塔内 10% 的脱硫石灰浆液 4690kg/h，带入水分 $W_{HCa} = 4.2 \text{ t/h}$ 。

④ 排出脱硫产物石膏 1073kg/h，要排出石膏浆液  $W_{JP} = \frac{1073}{0.12} = 8.94 \text{ t/h}$ ，其中排出水分  $W_{HJ}$  为 7.86t/h。(0.12 为石膏浆浓度)

⑤ 根据 4.1.6 节脱硫过程水平衡计算，在没有煤中 Cl 元素分析资料时，以大多数煤中  $\text{Cl}^-$  含量为 0.05% 计算，每标准立方米烟气进入脱硫浆液的  $\text{Cl}^-$  离子约为 48mg。为了保持脱硫浆液中的  $\text{Cl}^-$  离子浓度不大于 20g/L。通过排出脱硫产物石膏所带出水分已可满足要求。

##### ⑥ 脱硫后烟气已达饱和状态，排出塔外所带出水分 $W_{HW}$

$$\begin{aligned} W_{HW} &= V_y \rho_1 x_{tw} = 450000 \times 0.8894 \times (1 - x_{H_2O}) \times x_{50w} \\ &= 450000 \times 0.894 \times 0.935 \times 0.087 \text{ kg/h} = 32556 \text{ kg/h} = 32.6 \text{ t/h} \end{aligned}$$

##### ⑦ $W_{ZON} = W_{Hy} + W_{HM} + W_{HC} + W_{HJ} + W_{HW} = (26 + 7.1 + 4.2 - 7.86 - 32.6) \text{ t/h} = -3.2 \text{ t/h}$

根据水平衡计算可知，脱硫过程每小时净向塔外排水 1.76t，即为了塔内水平衡每小时应加进水 3.2t，而排放石膏每小时带出水分 7.86t，其中 3.93t 回用制备浆液， $W_{HJP} = 3.2 \text{ t}$ ， $W_{HJP} = 3.93 \text{ t/h}$  外排，所以废水处理量为  $W_{FEI} = W_{ZON} + W_{HJP} = W_{HJP} = 3.93 \text{ t/h}$ 。

(2) 脱硫剂制备 外购 200 目、纯度 85% 的 CaO 粉储存在低位料仓内，用抓斗吊



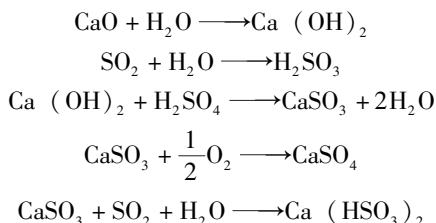
车抓至消化罐上方,由漏槽进入消化罐中,加水搅拌配成10%的浆液,再由乳液泵送至乳液槽,搅拌均匀供脱硫使用,一般每次配制可供4h使用的乳液量。

(3) 脱硫塔及脱硫过程 脱硫塔的类型为逆流喷雾空心洗涤塔,由于采用空心塔抗堵塞性较好,采用喷雾方式可获得较大的液气接触面积,进而获得较高的脱硫效率。由于CaO的碱性强且反应速度快,所以液气比 $L/G$ 一般可选8。锅炉排烟经过静电除尘器后,通过增压风机送入喷雾脱硫塔,烟气首先经过三层喷嘴组的喷雾洗涤吸收,由于洗涤液被特制的喷嘴雾化成比表面积极大的雾滴,可以与烟气进行充分的传质、吸收、涤尘过程,喷雾吸收液由吸收塔循环泵供给。净化后的烟气再经过两层折流板除雾器脱水,经过喷雾吸收的烟气中夹带着一定的水滴,在进入烟道、引风机、烟囱前必须进行脱水,为此在脱硫塔内要设置除雾脱水段,也可在塔外设计一个除雾脱水器,脱除水雾后的烟气方可进入烟道及烟囱。经过上述烟气净化后烟尘和 $SO_2$ 均可达标排放。

由于经过湿法洗涤后烟气温度已到达露点(约 $50^{\circ}C$ ),流经烟道引风机和烟囱会不断产生冷凝水,腐蚀沿途设施并产生白烟。一般应进行烟气再加热。本方案采用蒸汽加热空气至 $250^{\circ}C$ ,与 $50^{\circ}C$ 烟气混合后,温度升至约 $80^{\circ}C$ 。

#### (4) 脱硫反应

脱硫过程主要化学反应如下:



洗涤吸收液吸收 $SO_2$ 后,pH值迅速下降,通过pH计检测控制注入 $Ca(OH)_2$ 悬浊液,调整洗涤吸收液的pH值至7.5左右后循环使用。

(5) 脱硫废液废渣的处理 脱硫塔中生成的反应产物 $CaSO_4$ ,可回收利用,本厂有石膏浆液的系统,脱硫塔排浆到本厂的 $CaSO_4$ 浆液系统,经过沉淀过滤脱水后可得到 $CaSO_4$ 。脱硫除尘的排水拟直接排送到本厂水处理站统一处理。

#### (6) 脱硫系统主要控制回路

1) 循环浆液pH值控制脱硫剂添加量。通过pH值传感器控制电动调节阀,实现脱硫剂添加量的控制。

2) 脱硫塔内液位控制补水量。通过液位传感器输出信号控制电磁阀,实现补水量的自动调节。

3) 随着脱硫过程进行循环浆液中 $CaSO_4$ 浓度不断增加,需及时地外排部分浆液。通过浆液密度传感器与电动调节阀的联锁实现对浆液外排量的控制。

4) 烟气温度在线监测及控制。为保证脱硫塔的安全运行,在塔的进出口位置设有温度传感器。

5) 在塔内烟气入口位置设有温度传感器。

6) 除雾器反冲洗定时控制。设定反冲洗时间。

7) CaO 搅拌槽液位控制。槽内设上、下液位节点传感器控制电磁阀的开启和关断;保持液位正常。

8) 浆液储存槽内液位控制。槽内设上、下液位节点传感器控制脱硫剂输送泵的停止和起动。

9) 脱硫系统控制,设计自动和手动两种方式。

(7) 加热过程需要的蒸汽量

50℃的脱硫烟气与用蒸汽加热器加热到 250℃的空气相混合后,升温到 80℃。按式(4-11)即可求出 250℃的热空气流量( $Q_{k250}$ )。

$$\begin{aligned} Q_{y50} \times c_{py50} \times (273 + t_y) + Q_{k250} \times c_{pk250} \times (273 + t_k) \\ = (Q_{y50} + Q_{k250}) \times (273 + t_{ys}) \cdot c_{py80} \end{aligned} \quad (4-11)$$

式中  $Q_{y50}$ ——50℃的脱硫后烟气体积流量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ );

$c_{py50}$ ——50℃的脱硫后烟气的比定压热容 [ $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ];

$c_{pk250}$ ——250℃热空气比定压热容 [ $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ];

$t_y$ ——脱硫后烟气的温度,  $t_y = 50^\circ\text{C}$ ;

$t_k$ ——加热后空气温度,  $t_k = 250^\circ\text{C}$ ;

$t_{ys}$ ——空气和烟气混合后的温度,  $t_{ys} = 80^\circ\text{C}$ ;

$Q_{k250}$ ——250℃空气的体积流量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ );

$c_{py50}$ ——烟气在 50℃时的比定压热容 [ $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ];

$c_{pk250}$ ——空气在 250℃时的比定压热容 [ $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ];

$c_{py80}$ ——烟气在 80℃时的比定压热容 [ $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ]。

关于比定压热容的数据,可以从烟气热物理性质表 13-13 查得。不同组成成分的烟气其数据不同,但烟气组成成分相差不大时可近似应用。如果能获得烟气组成成分,则可查表 13-12 中烟气各成分的比定压热容,再用下列公式计算烟气比定压热容。

$$c_{yp} = x_{\text{CO}_2} \cdot c_{p\text{CO}_2} + x_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{p\text{H}_2\text{O}} + x_{\text{N}_2} \cdot c_{p\text{N}_2} + x_{\text{O}_2} \cdot c_{p\text{O}_2}$$

式中

$x_{\text{CO}_2}$ ——烟气中  $\text{CO}_2$  所占比值;

$x_{\text{H}_2\text{O}}$ ——烟气中  $\text{H}_2\text{O}$  所占比值;

$x_{\text{N}_2}$ ——烟气中  $\text{N}_2$  所占比值;

$x_{\text{O}_2}$ ——烟气中  $\text{O}_2$  的比值;

$c_{p\text{CO}_2}$ 、 $c_{p\text{H}_2\text{O}}$ 、 $c_{p\text{N}_2}$ 、 $c_{p\text{O}_2}$ —— $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$  气体的比定压热容 [ $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ]。

$$Q_{y50} = Q_y \times \frac{273}{273 + T} = 450000 \times \frac{273}{273 + 130} \text{m}^3/\text{h} = 304830 \text{m}^3/\text{h}$$

$c_{py50} = 1.3645 \text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$  (查表 13-13 用内插法计算得)

$c_{pk250} = 1.3371 \text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$  (查表 13-12)

$c_{py80} = 1.3698 \text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$  (查表 13-13)

上述查得数据代入(4-11)即可求出

$$Q_{k250} = 60409 \text{m}^3/\text{h}$$

20℃空气加热到 250℃,需要消耗蒸汽热量  $\Delta Q$

$$Q_{k250} = 60409\text{m}^3/\text{h}$$

根据

$$\frac{Q_{k250}}{Q_{k20}} = \frac{T250 + 273}{T20 + 273}$$

得  $Q_{k20} = Q_{k250} \times \frac{T20 + 273}{T250 + 273} = 60409\text{m}^3/\text{h} \times \frac{273 + 20}{273 + 250} = 60409\text{m}^3/\text{h} \times 0.56 = 33829\text{m}^3/\text{h}$

查表 3 - 11 ,

$h_{k250} = 334.5\text{kJ}/\text{m}^3$  (查表 13 - 11)

$h_{k20} = 26.4\text{kJ}/\text{m}^3$  (查表 13 - 11 的 100℃ 时  $h_k$  推算)  
= (60409 × 334.5 - 33829 × 26.4) kJ/h  
= 19313725kJ/h

又因为  $\Delta Q = H_{k250} - H_{k20} = Q_{k250} \times h_{k250} - Q_{k20} \times h_{k20}$

式中  $H_{k250}$ ——温度为 250℃ 空气的总焓 (kJ/h) ;

$H_{k20}$ ——温度为 20℃ 空气的总焓 (kJ/h) ;

$h_{k250}$ ——温度为 250℃ 空气的比焓 (kJ/m<sup>3</sup>) ;

$h_{k20}$ ——温度为 20℃ 空气的比焓 (kJ/m<sup>3</sup>) 。

这时用 0.3MPa、300℃ 过热蒸汽加热空气时, 需用的蒸汽量 ( $W_z$ ) 为

$$W_z = \frac{\Delta Q}{q_{z300}} = \frac{19313725}{3070}\text{kg}/\text{h} = 6297\text{kg}/\text{h} \approx 6.3\text{t}/\text{h}$$

式中  $q_{z300}$ ——0.3MPa、300℃ 过热蒸汽的质量焓, 取 3070kJ/kg。

6. 主要脱硫及配套设备报价

序号	名称	型号及规格	数量/台	价格/万元
1	脱硫塔	φ7600mm × 26m( 钢衬玻璃鳞片 )	1	300
2	循环泵	800m <sup>3</sup> /h H = 38m N = 132kW	3 + 1	4 × 10
3	脱水器	折流板式 φ7300mm	2	
4	氧化风机	Q = 30m <sup>3</sup> /min N = 55kW H = 58842Pa	1 + 1	2 × 6
5	烟道闸板	L × B = 4m × 2m	2	24
		D = 3m	1	12
6	循环水管	φ402mm × 9mm, 100m( 衬高密度乙烯 )	1	38
7	排水池	3m × 4m × 2m	1	2.4
8	排烟道	D = 3m, L = 50m( 衬高密度聚乙烯 )	1	40
9	电气设备	电控柜、电缆、电气设备等	1	25
10	自控设备	pH 计、重度计、电动调节阀、仪表等	1	40
11	排水管	φ57mm × 3.5mm 50m( S304 )	1	1
12	排水泵	Q = 20m <sup>3</sup> /h H = 30m N = 5.5kW	2	2 × 0.4
13	增压风机	Q = 150000m <sup>3</sup> /h, H = 2524Pa N = 165kW	3	3 × 13
14	烟气加热器 ( 汽/气 )	34000m <sup>3</sup> /h, 20℃/250℃	1	40
15	侧搅拌器	N = 15kW, S316L	12	4 × 12
	送风机	60500m <sup>3</sup> /h N = 30kW	1	7
合计				669.2

7. 脱硫工程估价

序号	类别	名称	计算价格/万元
1	(一) 直接费用	脱硫及配套设备	604.2
2		电气及自控	65
3		土建	30
4		设备安装费	$(1+2+3) \times 15\% = 104.9$
5		运杂费	$(1+2) \times 3\% = 20.1$
6		设备调试及培训费	$(1+2) \times 5\% = 33.5$
合计			857.7
7	(二) 间接费用	工程及非标设计费	$(一) \times 5.5\% = 47.2$
8		税金	$(一+7) \times 5.5\% = 49.8$
9		不可预见费	$(一+7) \times 5\% = 45.2$
合计			142.2
总计			$(一+二) = 999.9$

8. 运行费用（按一年运行 7000h 计）

1) 脱硫剂 CaO 粉的费用：

$$469\text{kg/h} \times 7000\text{h} \times 100 \text{ 元/t} = 32.8 \text{ 万元/年}$$

2) 电费：

$$960.4\text{kW} \times 7000\text{h} \times 0.5 \text{ 元 (kW} \cdot \text{h)} = 336.1 \text{ 万元/年}$$

3) 水费：

$$15\text{m}^3/\text{h} \times 7000\text{h} \times 1 \times 1 \text{ 元/m}^3 = 10.5 \text{ 万元/年}$$

4) 人工费：

$$4 \text{ 人} \times 12000 \text{ 元/ (年} \cdot \text{人)} = 4.8 \text{ 万元/年}$$

5) 每年回收石膏 7000t，收入 28 万元。因此，全年运行费用合计  $(32.8 + 336.1 + 10.5 + 4.8 - 28)$  万元 = 356.2 万元。

所以每千克 SO<sub>2</sub> 脱除费用 =  $3562000 \text{ 元} \div 3094000 = 1.15 \text{ 元}$ 。

9. 经济效益及社会效益

1) 每年可削减 SO<sub>2</sub> 排放 3094t。

2) 每年可少交排污费 371.28 万元。

3) 每年可减少 SO<sub>2</sub> 污染引起的综合经济损失为  $3094\text{t} \times 4300 \text{ 元/t} = 1330 \text{ 万元}$ 。

注：4300 元/t 是根据国家环保局 2005 年公布的排放 SO<sub>2</sub>2549 万 t/年，产生经济损失 1100 亿元计算而得。

10. 脱硫设计方案编制说明

1) 由于设计是方案阶段，所以脱硫工程的投资属于估算，与实际工程投资会有一

定误差。

- 2) 本方案的报价是前几年做的，会有物价变化引起的差价。
- 3) 所有标准设备，如引风机、水泵、鼓风机等均可向有关厂方询价。
- 4) 脱硫塔是由工程总承包单位现场建造的小型脱硫塔也可向有关生产厂订货。脱硫塔是工程报价中的主件和大件。现把本方案脱硫塔制作成本核算见表 4-5。

表 4-5     $\phi 7600\text{mm} \times 26000\text{mm}$  脱硫塔成本核算

序号	部件名称 (工艺名称)	规格	材料	数量	单重/t	总重/t	单价	总价/万元	备注
1	塔体	$\phi 7600\text{mm} \times 26000\text{mm}$ , $\delta = 16\text{mm}$	Q235A	1	83.6	—	1.0 万元/t	83.6	
2	防腐	$665.8\text{m}^2$	玻璃鳞片	1	—	—	600 元/ $\text{m}^2$	40	外协
3	塔板	$\delta = 6$ $44\text{m}^2$	316L	1	2	—	40000 元/t	8	外购
4	钻孔费	—	—	1	—	—	—	7.2	
5	喷嘴	DN = 3/4in	S316L	$2 \times 84$ (= 168)	—	—	600 元/个	10	外购
6	脱水器	折流板	玻璃钢	2 层	—	—	—	$2 \times 15$ (= 30)	外购
7	曝气管	$\phi 219\text{mm} \times 6\text{mm}$ , 14m $\phi 73\text{mm} \times 4\text{mm}$ , 42m	S316L	1 套	—	0.860	60000 元/t	5.2	
8	喷嘴支架	$\phi 273\text{mm} \times 7\text{mm}$ , 8m $\phi 89\text{mm} \times 4.5\text{mm}$ , 42m	—	2 套	0.9	1.8	60000 元/t	$2 \times 5.4$ (= 10.8)	
9	动态 曝气头	—	S316L	90 个	—	—	380 元/个	3.42	外购
合计								198.22	

- 5) 自控和电气的报价，是准备用于此的资金，主要自控回路见本节 5. 中 (6)。
- 6) 土建费用包括设备基础、脱硫工房、管道支架、地沟、池子等建筑物构筑物。其报价也是准备支出的费用。
- 7) 主要工艺和设备、烟道、循环管径不会有变化，但管道长度和阀门等附件要做完施工图设计才能确定。建筑物、构筑物也要做完施工图后，才能确定。这也是会影响工程报价的因素。

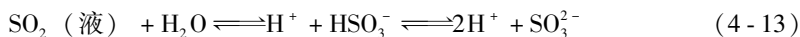
4.2    湿式石灰石法脱硫

现有运行的湿法烟气脱硫中，约 70% 用石灰石作吸收剂，16% 用石灰作吸收剂，剩下的用其他吸收剂。石灰石比石灰便宜很多，只要符合脱硫使用要求的天然石灰石，一旦破碎至需要的细度，就可作为脱硫剂使用。从脱硫工艺性上比较，石灰与石灰石各

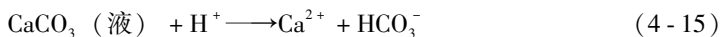
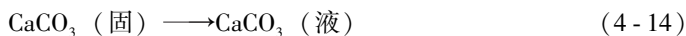
有特点,并不能说由谁替代谁。在不同的使用条件下,可以作出不同的选择。如大型电站多使用石灰石作脱硫剂,但工业锅炉多用石灰作脱硫剂。双碱法脱硫工艺再生 NaOH 的工质多数也采用石灰,制备成  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  浆液。在防止结垢方面,作为脱硫剂,无论是石灰还是石灰石都要严格控制脱硫剂浆液的 pH 值。这是防止结垢的关键因素。石灰的吸湿性很好,易结块,使得石灰在贮存及输送时可能发生堵塞问题。石灰石则基本没有这些问题,这也是常选用石灰石作脱硫剂的原因之一。

#### 4.2.1 基本原理与化学反应式

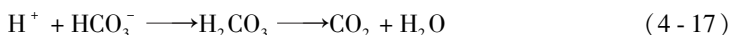
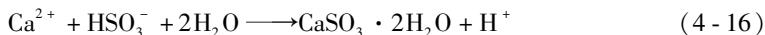
烟气中的  $\text{SO}_2$  进入脱硫塔后同脱硫剂浆液接触  $\text{SO}_2$  先溶解于吸收液中,然后离解成  $\text{H}^+$  和  $\text{HSO}_3^-$ :



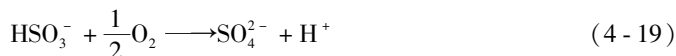
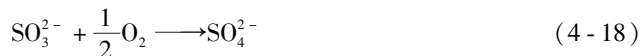
$\text{CaCO}_3$  进入脱硫浆液,同  $\text{H}^+$  作用,溶解产生  $\text{Ca}^{2+}$ ,



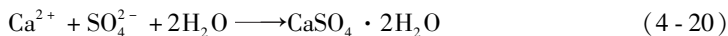
$\text{Ca}^{2+}$  同浆液中亚硫酸反应生成亚硫酸钙



为了把亚硫酸钙氧化成可以利用的硫酸钙(石膏),采用强制氧化方法,对脱硫塔循环槽内氧化区鼓入适量空气,发生氧化反应:



而后结晶析出



从上述反应式可知,石灰石法中  $\text{Ca}^{2+}$  的产生与  $\text{H}^+$  的浓度有关。而在石灰法中,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  可分解生成  $\text{Ca}^{2+}$  和  $2\text{OH}^-$ 。这是石灰法和石灰石法脱硫的重要区别。

再用气体吸收的双膜理论分析石灰石脱硫过程。 $\text{SO}_2$  气体从气相扩散到气液界面,要穿过气膜进入液膜,靠分子扩散穿过液膜进入液相。而脱硫剂  $\text{CaCO}_3$  极难溶于水,只有在适当 pH 值( $\text{H}^+$  浓度)下,才能溶解于水。 $\text{Ca}^{2+}$  要进入液相也必须穿过液膜,所以  $\text{CaCO}_3$  的溶解速度和  $\text{Ca}^{2+}$  通过液膜的速度影响了吸收  $\text{SO}_2$  过程的总速率。

从总传质系数  $K$  分析

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{k_g} + \frac{H}{k_L}$$

由于  $\text{CaCO}_3$  极难溶于水,因此液相扩散系数  $k_L$  很小,而亨利系数  $H/k_L$  的值对  $K$  影响较大。所以石灰石脱硫的过程主要是液膜控制过程。



提高石灰石法脱硫效率的方法，主要是加快  $\text{CaCO}_3$  的溶解速度，这就要有适当的  $\text{H}^+$  浓度。通过试验发现，当脱硫浆液 pH 值约为 5.6 时较合适。同时必须采用较高的  $L/G$  液气比（推荐值一般为  $15 \sim 25 \text{L}/\text{Nm}^3$ ），同时  $\text{Ca}/\text{S}$  比约为 1.05。

### 4.2.2 湿式石灰石法脱硫工艺流程

脱硫系统位于锅炉除尘器的后面，一般应包括脱硫增压风机（引风机）烟气挡板、脱硫塔、烟气加热器、循环水泵、鼓风机曝气风机、脱硫产物排送及脱水过滤机械等。脱硫剂浆液制备部分有专门章节阐述。煤燃烧后烟气脱硫（FGD）装置立体图如图 4-8 所示。FGD 工艺流程如图 4-9 所示。

脱硫流程是从锅炉引风机送来的热烟气，经烟气换热器与脱硫塔出口的冷烟气进行传热交换后，进入脱硫塔。烟气在塔内的上升过程中与脱硫循环液雾化而成的下降雾滴或在塔板上鼓泡而成的液沫（膜）相接触，烟气、雾粒（泡沫）、石灰石、气、液、固三相之间碰撞、接触交换混合，激烈地进行传质、吸收、传热过程。烟气中的  $\text{SO}_2$  通过气相主流、湍流扩散到液体表面的气膜，通过分子扩散穿过气膜到气液界面，从气相到液相。在液相中进行式（4-12）～式（4-20）所示的化学反应。 $\text{SO}_3^{2-}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  与  $\text{Ca}^{2+}$  化合生成  $\text{CaSO}_3$  和  $\text{CaSO}_4$ 。 $\text{SO}_2$  被吸收并生成稳定的硫酸盐。脱硫液在循环泵作用下输送到多层喷嘴组合（一般为 3～4 层）经喷嘴雾化成细小雾粒，下落到脱硫塔循环槽内。循环槽内组分，主要有水、 $\text{CaSO}_3$ 、 $\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$ 、 $\text{CaSO}_4$ 、 $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、粉尘等，并且不断重复循环。

脱硫塔分为三个工作区，如图 4-2 所示，各区功能详见 4.1.2 节。

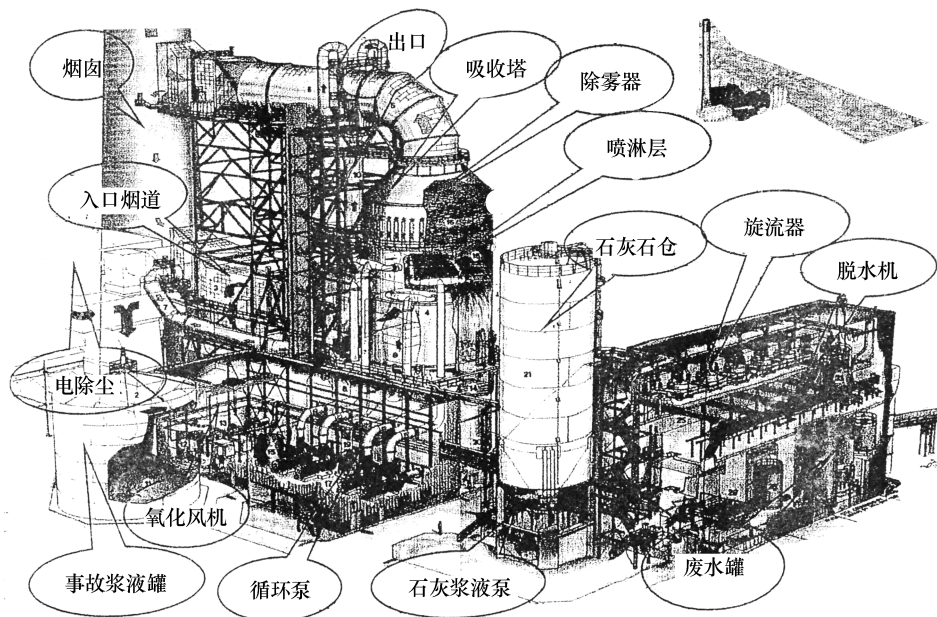


图 4-8 FGD 装置立体图

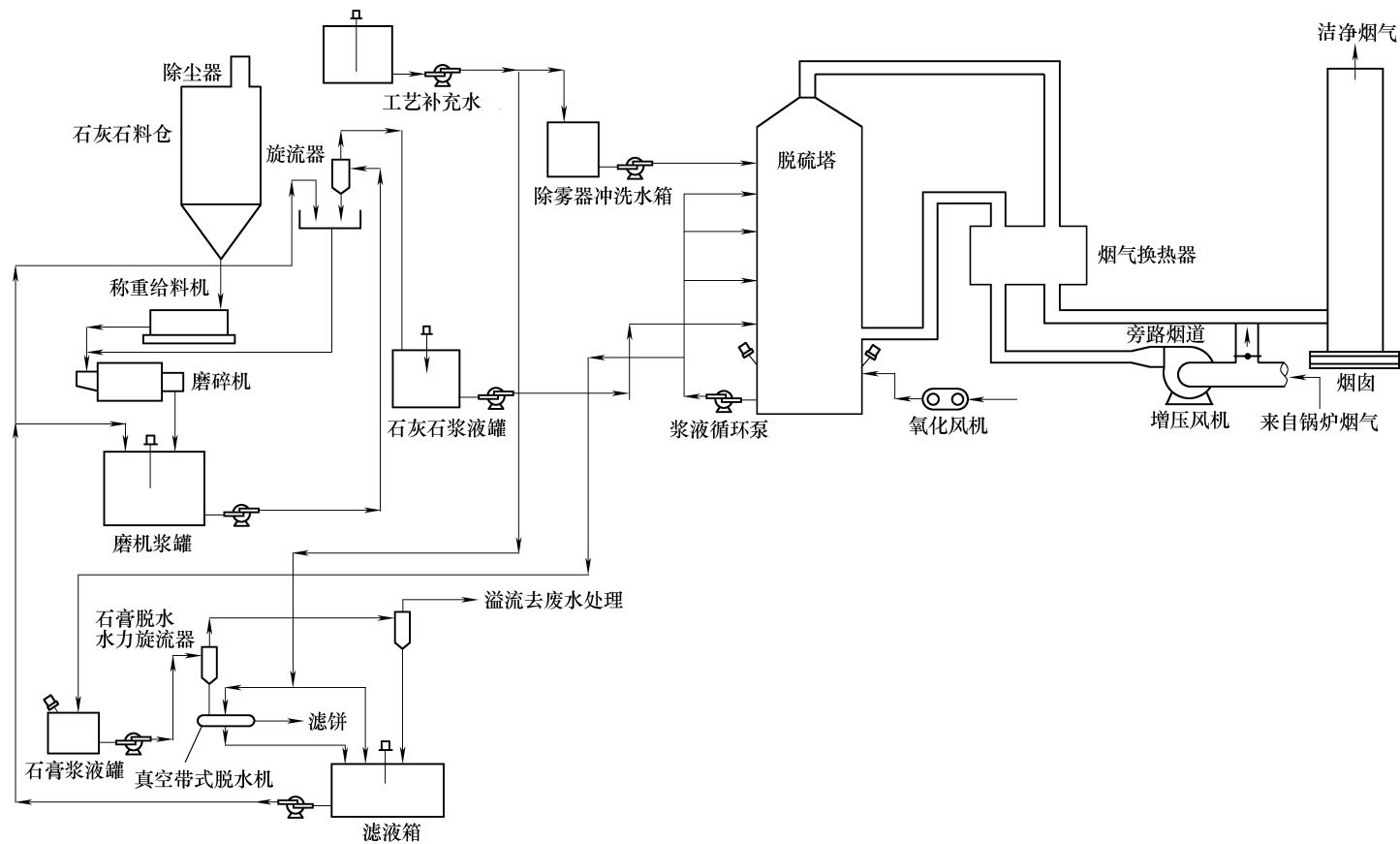


图4-9 湿式石灰石法脱硫工艺流程图



### 4.2.3 湿式石灰石法脱硫工艺参数

湿式石灰石法脱硫工艺参数确定的方法和原则与湿式石灰法脱硫是一致的，但既有共同点也有差异点，现在主要表述湿式石灰石法脱硫工艺参数与湿式石灰法脱硫不同的那部分参数。

(1) 钙硫比  $\text{Ca}/\text{S}$  由于石灰具有较强的碱性，与水接触能较快反应生成  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  悬浊液，同时生成部分  $\text{Ca}^{2+}$  离子。它与  $\text{SO}_2$  能较快进行化合反应，所以湿式石灰法的  $\text{Ca}/\text{S}$  比一般是  $1.0 \sim 1.03$ 。而湿式石灰石法由于  $\text{CaCO}_3$  很难溶解于水中，也只有在  $\text{H}^+$  离子存在的作用下才能生成  $\text{Ca}^{2+}$ ，所以石灰石法的  $\text{Ca}/\text{S}$  比一般要求为  $1.05 \sim 1.10$ 。

(2) 液气比 湿式石灰石法脱硫用  $\text{CaCO}_3$  作脱硫剂，而  $\text{CaCO}_3$  细颗粒浆液的 pH 值约为 5.6 时，才能生成  $\text{Ca}^{2+}$ ，再与  $\text{SO}_2$  反应生成硫酸盐，所以湿式石灰石法脱硫要在较高的液气比时，才能获得较高的脱硫效率。

湿式石灰石法脱硫的  $\eta_s - L/G$  曲线如图 4-10 所示。可供设计及运行时参考。

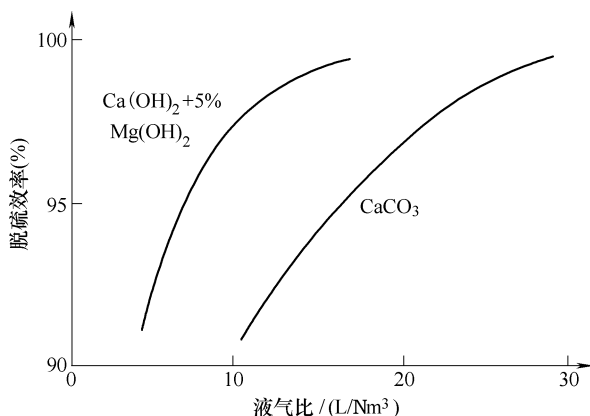


图 4-10 湿式石灰石法脱硫  $\eta_s - L/G$  曲线

从湿式石灰石法  $\eta_s - L/G$  曲线中可知，要达到 90% 的脱硫率，其液气比  $L/G$  为 10。而用湿式石灰法脱硫时的液气比  $L/G$  要低得多。

(3) 石灰石脱硫剂 石灰石脱硫剂的品质要求是纯度  $\geq 85\%$ 、颗粒度 325 目。

(4) 石灰石脱硫浆液的 pH 值控制 在阐述石灰法 pH 控制时，已讲过 pH 值表示脱硫浆液的酸碱度，一般 pH 值高，脱硫效率也高。但是每一种脱硫剂都有适合它的安全运行的 pH 值控制范围。对于难溶于水的  $\text{CaCO}_3$ ，其中的  $\text{Ca}^{2+}$  只能溶解到呈酸性的水中， $\text{CaCO}_3 + \text{H}^+ \longrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^-$ 。在有  $\text{H}^+$  离子时， $\text{Ca}^{2+}$  离子才能生成并与  $\text{HSO}_3^-$  结合生成  $\text{CaSO}_3$ 。为了维持脱硫浆液生成足够的  $\text{Ca}^{2+}$  离子，一般控制石灰石法脱硫浆液的 pH 值约为 5.6。

(5) 脱硫循环浆液浓度 在讲述湿式石灰法脱硫浆液浓度时，已说明了浆液含量与脱硫过程的关系，在此不重复。湿式石灰石法脱硫浆液浓度也取  $12\% \sim 15\%$ 。

(6) 脱硫浆液在循环槽中停留时间 脱硫浆液在循环槽中的停留时间主要需满足

完成氧化和中和及沉淀反应的时间。同时也要保证循环槽中的浆液能使循环泵运行一定时间,即如果没有浆液返回循环槽时,循环泵抽吸空循环槽中浆液的运行时间。对于石灰石法脱硫,脱硫浆液在循环槽中停留时间约为 6~8min。

#### 4.2.4 脱硫产物的用途

脱硫浆液吸收  $\text{SO}_2$  生成  $\text{CaSO}_3$  和  $\text{CaSO}_4$  产物。对于湿式石灰石法脱硫,又可分为抛弃法和回收法两种工艺方法。

(1) 抛弃法 脱硫产物主要是亚硫酸钙和少量自然氧化的硫酸钙。这类脱硫产物目前还没有适当有价值的用途,只能作为回填土使用。所以称其为抛弃法。

(2) 回收法 脱硫产物主要是硫酸钙。在脱硫塔循环槽中设计鼓风曝气装置用鼓风机鼓入氧化空气,使吸收循环浆液中的  $\text{HSO}_3^-$  几乎全部强制氧化成  $\text{SO}_4^{2-}$ 。脱硫产物为石膏  $\text{CaSO}_4$ 。它可作为建筑材料使用。脱硫产生的石膏可以出售,回收资金。

#### 4.2.5 湿式石灰石法脱硫特点

1) 湿式石灰石法脱硫是湿法脱硫中使用最多的脱硫方法;是湿法脱硫中技术最成熟的脱硫,是各国大型电站目前的首选脱硫工艺;是脱硫产物得到较好利用的脱硫方法,也是脱硫剂最便宜且最易获得的脱硫工艺。

2) 它属于较经济的脱硫方法(特别是运行费用和脱硫产物回收利用)。

3) 石灰石极难溶解于水,只有在水的 pH 为 5~6 时,在  $\text{H}^+$  离子的作用下才能溶解,产生  $\text{Ca}^{2+}$  离子,所以石灰石法脱硫的 Ca/S 比一般约为 1.05。

4) 由于脱硫浆液控制 pH 为 5.6,为了获得 90% 以上的脱硫效率, L/G 液气比一般在 10~25L/Nm<sup>3</sup>。当脱硫效率要求较高时,为 15~25L/Nm<sup>3</sup>。

5) 由于脱硫循环液是浆液,宜用空心喷雾塔或液柱喷射塔。不宜采用塔内零部件较多的脱硫塔,如筛板塔、填料塔等。

6) 脱硫运行中要严格控制脱硫循环浆液 pH 值约为 5.6,这样能防止结垢。过高的 pH 会生成  $\text{CaCO}_3$  硬垢,较高 pH 也会生成  $\text{CaSO}_3$  软垢。

7) 湿式石灰石法的不足之处是要用高液气比才能获得高的脱硫率。由此带来了循环泵的高电耗、大容量泵和大口径管道和大的循环槽,它们都会增加投资费用和运行费用。

#### 4.2.6 湿式石灰石法脱硫设计注意事项

1) 采用  $\text{CaCO}_3$  粉料,细度 325 目,含量宜达到 85% 以上。脱硫使用时,制备成含量约 15% 的  $\text{CaCO}_3$  悬浮浆液。该浆液要滤除粗颗粒的渣子。否则这些渣子会沿浆液输送管沉淀而发生堵塞。一般可用水力旋流器分离。

2)  $\text{CaCO}_3$  浆液输送管应设计成循环管道,即从浆液贮槽,用浆液泵抽出输送到使用点并把剩余部分,再返回到浆液储槽。这样  $\text{CaCO}_3$  浆液始终在管道中流动,不会因静止而发生沉淀,进而引起堵塞。

- 3) 浆液输送管转弯时,应用大半径转弯,以免浆液被阻,搭桥堵塞。
- 4) 浆液管应设清水冲洗管。停用时,放空浆液管,并用清水冲洗浆液,以免残留浆液干化挂在管壁有碍正常运行。
- 5) 防止脱硫系统结垢堵塞是湿式石灰石法脱硫设计的重要课题。为此,必须严格控制循环槽中浆液 pH 值为 5.6。
- 6) 为了防止  $\text{CaSO}_3$  软垢堵塞应采用强制氧化工艺,使  $\text{CaSO}_3$  氧化成  $\text{CaSO}_4$ 。应在脱硫塔循环槽设氧化区并鼓入所需氧化空气。
- 7) 严禁脱硫浆液在高 pH 值运行。否则容易产生  $\text{CaCO}_3$  硬垢。既妨碍安全运行,又浪费脱硫剂。
- 8) 为了达到所需要的脱硫效率,应选定相应的液气比  $L/G$ 。一般  $L/G = 10 \sim 25 \text{ L/Nm}^3$ 。
- 9) 为了防止硫酸钙结垢,应使浆液中  $\text{CaSO}_4$  的浓度处于不饱和状态,  $\text{CaSO}_4$  就不会结晶,也不会附着在脱硫塔器壁及零部件上。

## 4.2.7 湿式石灰石法烟气脱硫设计方案及工程投资估算

### 1. 工程概况

北京市××环保公司根据国家  $\text{SO}_2$  总量控制要求和锅炉污染物排放标准和业主要求,拟对北京××集团热电厂两台 220t/h 煤粉锅炉烟气实施脱硫工程。本项目实施后将对周围环境,特别是对大气污染物的控制治理以及改善周围地区的空气质量起到至关重要的作用,可获得巨大的环境效益和一定的经济效益。北京市××环保公司采用湿式  $\text{CaCO}_3$  法烟气脱硫工艺,提出该厂的脱硫技术方案。

### 2. 脱硫方案设计技术原则

- 1) 从技术成熟、经济合理及装置运行稳定、可靠上,考虑采用湿式  $\text{CaCO}_3$  法脱硫工艺,既保证系统脱硫效率在 90%,又保证达到国家及地方的锅炉大气污染物排放标准。
- 2) 采用 325 目  $\text{CaCO}_3$  粉料作为脱硫剂,价格低廉,货源充足。脱硫产物  $\text{CaSO}_4$  可综合利用,运行费用较低。
- 3)  $\text{CaCO}_3$  难溶于水,在 pH 约为 5.6 才能正常溶解,所以它同  $\text{SO}_2$  进行化学反应速度受溶解速度影响。因此,脱硫剂  $\text{Ca}/\text{S}$  比选定 1.05,脱硫液气比  $L/G$  选定 12。
- 4) 严格自动控制循环槽脱硫浆液 pH 值在 5.6,维持脱硫系统安全运行,防止系统结垢堵塞。
- 5) 采用喷雾洗涤方式可以获得较大的液气接触面积,进而获得较高的脱硫除尘效率。喷雾空心塔有较好的防堵塞性,塔内防腐层较好施工,反应塔内壁、管道、泵、搅拌机、储罐内壁、烟道等部位都采用性能良好的防腐材料或防腐衬里。
- 6) 保证本脱硫装置连续运行,年运行时间可满足业主要求。同时,设置旁路烟道以保证锅炉及脱硫系统的安全生产和正常检修。

7) 为确保整个系统连续可靠运行, 应采用优良可靠的辅机设备, 以确保脱硫系统的可靠运行。

8) 按现有场地条件布置脱硫系统设备, 因地制宜, 力求紧凑合理, 尽可能减少脱硫烟道的长度, 节约用地, 节省投资。

9) 最大限度地循环利用脱硫水, 但是由于洗涤烟气的浆液中含有一定浓度的盐和  $\text{Cl}^-$  离子, 脱硫浆液中部分水分蒸发, 因此形成循环水中盐和  $\text{Cl}^-$  离子的积累。由于过高的盐和  $\text{Cl}^-$  离子浓度会降低脱硫效率和腐蚀装置及结垢, 所以必须达标排放少量的脱硫循环水并补充少量工业用水。

10) 脱硫废水排至本厂废水处理站, 按 GB 8978 《污水综合排放标准》的指标处理后达标排放。

11) 脱硫产物为  $\text{CaSO}_4$ , 从脱硫塔排至本厂石膏系统, 综合利用。

### 3. 设计条件

1) 烟气量:  $Q = 400000 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

2) 烟气温度:  $T = 160^\circ\text{C}$ 。

3) 烟尘浓度:  $C_1 = 400 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 。

4)  $\text{SO}_2$  浓度:  $S_1 = 2000 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 。

5) 烟气含湿量比:  $X_{\text{H}_2\text{O}} = 10\%$ 。

6) 现场锅炉引风机型号、风量、风压、电动机功率。

7) 利用已有循环沉淀池: 长 × 宽 × 深, 循环水管网尺寸, 循环泵型号、台数、流量、扬程、电动机功率。

8) 提供使用的场地面积及方位。

注: 如无法提供第 4) 条数据, 可改为提供燃料消耗量和燃料含硫量来进行估算; 新建项目则不必提供第 6)、7) 条内容。

### 4. 要求达到的排放标准

1) 烟尘浓度:  $C_2 = 200 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 。

2)  $\text{SO}_2$  浓度:  $S_2 = 700 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 。

3) 烟气黑度: 1。

### 5. 脱硫除尘工艺流程及说明

湿式  $\text{CaCO}_3$  法烟气脱硫流程如图 4-7 所示。在此工艺中, 该图的 -Ca- 表示  $\text{CaCO}_3$  浆液管。

(1) 脱硫系统运行参数 (计算方法 4.1.10 的 5. 条) 根据设计条件, 本工程除尘效率必须达到  $\eta_d = (Q_0 C_1 - Q_0 C_2)/(Q_0 C_1) = (400000 \times 0.0630 \times 0.40 - 400000 \times 0.630 \times 0.10)/(400000 \times 0.630 \times 0.4) = 75\%$ 。脱硫效率必须达到  $\eta_s = (Q_0 S_1 - Q_0 S_2)/(Q_0 S_1) = (400000 \times 0.630 \times 2.0 - 400000 \times 0.630 \times 0.2)/(400000 \times 0.630 \times 2.0) = 90\%$ 。根据图 4-10 湿法  $\text{CaCO}_3$  脱硫的脱硫效率与液气比关系的试验曲线和已运行脱硫工程的操作条件及达到 90% 的脱硫效率, 选定液气比  $L/G = 12$ ,  $\text{Ca}/\text{S} = 1.05$ 。

计算过程参照 4.1.10 的 5.。

1) 通过脱硫化学反应式计算, 脱硫系统要脱除的  $\text{SO}_2$  量为  $454\text{kg/h}$ , 要消耗的纯度为 0.85 的  $\text{CaCO}_3$  量为  $834\text{kg/h}$ , 又因为  $\text{Ca/S} = 1.05$ , 实用  $\text{CaCO}_3$  量为  $876\text{kg/h}$ 。

2) 循环浆液量计算如下:

$$\begin{aligned} G_x &= Q_o \times [273/(273 + T)] \times 12 = 400000 \times \frac{273}{273 + 160} \times 12\text{m}^3/\text{h} \\ &= 400000 \times 0.630 \times 12 = 3026\text{m}^3/\text{h}, \end{aligned}$$

3) 强制氧化曝气量:

根据脱硫反应生成的  $\text{CaSO}_3$  的量  $851\text{kg/h}$ , 脱硫系统  $\text{O}_2 = 851\text{kg/h} \times 16/120 = 113.5\text{kg/h}$ , 折算到空气  $Q_k = 113.5\text{kg/h}/0.21 = 540.50\text{kg/h}$ ,  $t = 20^\circ\text{C}$  空气的相对密度 1.205, 氧化利用率为 0.25,  $Q_k = 540.5/1.205 \times 0.25\text{m}^3/\text{h} = 1794\text{m}^3/\text{h} = 30\text{m}^3/\text{min}$ 。

4) 废水处理量:

对脱硫过程进行水平衡计算如下:

① 烟气进脱硫塔带入水分  $W_{\text{Hy}}$

$$W_{\text{Hy}} = Q_y \times \rho_1 \times x_{\text{H}} = 400000 \times 0.8288 \times 0.10\text{kg/h} = 33152\text{kg/h} = 33.2\text{t/h}$$

② 冲洗除雾器进塔水分  $W_{\text{HM}}$

第一层下面 30min 冲一次, 每次 1min, 冲洗强度  $P = 60\text{L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ ; 第一层上面每小时冲一次, 每次 1min,  $P = 36\text{L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ ; 第二层下面每小时冲一次, 每次 1min,  $P = 12\text{L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 。

$W_{\text{M}} = F_{\text{M}} \times P = 0.785 \times 7.6^2 \times (60 + 60 + 36)\text{L}/\text{min} = 7073\text{L}/\text{min} = 7.1\text{t}/\text{min}$ , 由于这是 1min 内按序轮流冲洗水量, 所以每小时实际冲洗水量 7.1t。

③ 注入塔内 10% 的脱硫石灰石浆液  $8340\text{kg/h}$ , 带入水分  $W_{\text{HCa}} = 7.5\text{t/h}$ 。

④ 排出脱硫产物石膏  $965\text{kg/h}$ , 要排石膏浆液  $W_{\text{JP}} = 8\text{t/h}$ , 其中排出水分  $W_{\text{HJ}}$  为  $7.35\text{t/h}$ 。

⑤ 根据 4.1.6 节的水平衡计算, 在没有煤中  $\text{Cl}^-$  元素的分析资料时, 以大多数煤中  $\text{Cl}^-$  含量为 0.05% 计算, 每标准立方米烟气进入脱硫浆液的  $\text{Cl}^-$  离子约为  $48\text{mg}$ 。为了保持脱硫浆液中的  $\text{Cl}^-$  离子浓度不大于  $20\text{g/L}$ , 通过排出脱硫产物石膏所带出水分已可满足要求。

⑥ 脱硫后烟气已达饱和状态, 排出塔外所带出水分  $W_{\text{HW}}$ 。

$$\begin{aligned} W_{\text{HW}} &= V_y \times \rho_1 \times (1 - x_{\text{H}_2\text{O}}) \times x_{\text{tw}} = 400000 \times 0.8288 \times 0.9 \times x_{50\text{w}} \\ &= 400000 \times 0.746 \times 0.086\text{kg/h} = 25662\text{kg/h} = 25.7\text{t/h} \end{aligned}$$

⑦  $W_{\text{ZON}} = W_{\text{Hy}} + W_{\text{HM}} + W_{\text{HCa}} + W_{\text{HJ}} + W_{\text{HX}} = (33.2 + 7.1 + 7.5 - 7.35 - 25.7 - 10.55)\text{t/h} = 4.2\text{t/h}$

根据水平衡计算可知, 脱硫过程每小时净向塔内加水 4.2t, 为了塔内水平衡每小时应排放水 4.2t, 由于排放石膏浆液至本厂石膏浆系统  $W_{\text{HP}} = 0$ , 所以总共排出废水

$$W_{\text{FEI}} = W_{\text{ZON}} + W_{\text{HP}} = (4.2 + 0)\text{t/h} = 4.2\text{t/h}$$

(2) 脱硫剂制备 外购 325 目、纯度 85% 的  $\text{CaCO}_3$  粉贮存在低位料仓内, 用抓斗

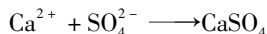
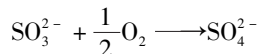
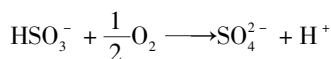
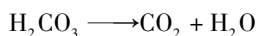
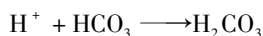
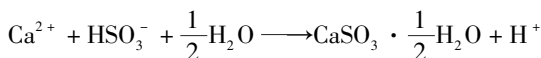
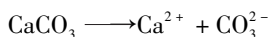
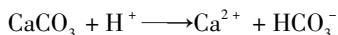
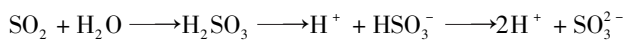
吊车抓至搅拌罐上方,由溜槽进入搅拌罐中,加工业用水搅拌配成 10% 的浆液,再由浆液泵送至储存槽,搅拌均匀后供脱硫使用,一般每次配制可供 4h 使用的浆液量。可以根据使用量,适时搅拌并输送到储存槽。

### (3) 脱硫塔及脱硫过程

脱硫塔的类型为逆流喷雾空心洗涤塔,因为采用空心塔的抗堵塞性较好,采用喷雾方式可获得的液气接触面积较大,进而获得较高的脱硫效率。由于  $\text{CaCO}_3$  脱硫要求液气比  $L/G$  一般在 10~25 (本方案选定 12)。锅炉排烟经过静电除尘器后,通过增压风机送入喷雾脱硫塔,烟气首先经过三层喷嘴组的喷雾洗涤吸收,由于洗涤液被特制的喷雾雾化成比表面积极大的雾滴,可以与烟气进行充分的传质、吸收、涤尘。喷雾吸收液由吸收塔循环泵供给。净化后的烟气再经过两层折流板除雾器除雾,经过喷雾吸收的烟气中夹带着一定的雾滴,在进入烟道、引风机、烟囱前必须进行脱水,为此在脱硫塔内要设置除雾脱水段,也可在塔外设计一个除雾脱水器,脱除水雾后的烟气方可进入烟道及烟囱。经过上述烟气净化后烟尘和  $\text{SO}_2$  均可达标排放。

由于经过湿法洗涤后烟气温度已到达露点 (约  $50^\circ\text{C}$ ),流经烟道引风机和烟囱会不断产生冷凝水,腐蚀沿途设施并产生白烟。一般应进行烟气再加热,本方案采用蒸汽加热空气至  $250^\circ\text{C}$  与  $50^\circ\text{C}$  烟气混合后烟温升至  $80^\circ\text{C}$  左右。

### (4) 脱硫反应 脱硫过程主要化学反应如下:



洗涤吸收液吸收  $\text{SO}_2$  后, pH 值迅速下降,通过 pH 计检测控制注入  $\text{CaCO}_3$  浆液,调整洗涤吸收液的 pH 值为 5.6 后循环使用。

(5) 脱硫废液废渣的处理 脱硫塔中生成的反应产物  $\text{CaSO}_4$ ,可回收利用,本厂有石膏浆液的系统,脱硫塔排浆到本厂的  $\text{CaSO}_4$  浆液系统,经过沉淀过滤脱水后可得到  $\text{CaSO}_4$ 。脱硫除尘的排水拟直接排送到本厂水处理站统一处理。

### (6) 脱硫系统主要控制回路

1) 循环浆液 pH 值控制脱硫剂添加量。通过 pH 值传感器控制电动调节阀,实现脱硫剂添加量的控制。



2) 脱硫塔内液位控制补水量。通过液位传感器输出信号控制电磁阀, 实现补水量的自动调节。

3) 随着脱硫过程的进行循环浆液中  $\text{CaSO}_4$  浓度的不断增加, 需及时地外排部分浆液。通过浆液密度传感器与电动调节阀的联锁实现对浆液外排量的控制。

4) 烟气温度在线监测及控制。为保证脱硫塔的安全运行, 在塔的进出口位置设有温度传感器。

5) 在塔内烟气入口位置设有温度传感器。

6) 除雾器反冲洗定时控制, 设定反冲洗时间。

7)  $\text{CaO}$  搅拌槽液位控制。槽内设上、下液位节点传感器 (YW2、YW3), YW2 控制电磁阀的开启和关断; 以保持液位正常。

8) 浆液储存槽内液位控制。槽内设上、下液位节点传感器控制脱硫剂输送泵的开启和停止。

9) 脱硫系统控制, 设计自动和手动两种方式。

6. 主要脱硫及配套设备报价 (报一台的价)

序号	名称	型号及规格	数量/台	价格/万元
1	脱硫塔	$\phi 7600\text{mm} \times 26\text{m}$ (钢衬玻璃鳞片)	1	300
2	循环泵	$1000\text{m}^3/\text{h}$ $H=38\text{m}$ $N=160\text{kW}$	3 + 1	$4 \times 12 (=48)$
3	脱水器	折流板式, $\phi 7300$	2	
4	氧化风机	$Q=30\text{m}^3/\text{min}$ $N=55\text{kW}$ $H=58842\text{Pa}$	1 + 1	$2 \times 6 (=12)$
5	烟道闸板	$L \times B=4\text{m} \times 2\text{m}$	2	24
		$D=3\text{m}$	1	12
6	循环水管	$\phi 402\text{mm} \times 9\text{mm}$ , 100m (衬高密度乙烯)	1	40
7	排水池	$3\text{m} \times 4\text{m} \times 2\text{m}$	1	2.4
8	排烟道	$D=3\text{m}$ , $L=50\text{m}$ (衬高密度聚乙烯)	1	40
9	电气设备	电控柜、电缆、电气设备等	1	25
10	自控设备	pH 计、重度计、电动调节阀、仪表等	1	40
11	排水管	$\phi 57\text{mm} \times 3.5$ 50m (S304)	1	1
12	排水泵	$Q=20\text{m}^3/\text{h}$ $H=30\text{m}$ $N=5.5\text{kW}$	2	$2 \times 0.4 (=0.8)$
13	增压风机	$Q=420000\text{m}^3/\text{h}$ $H=2766\text{Pa}$ $N=475\text{kW}$	1	35
14	汽/气加热器	$34000\text{m}^3/\text{h}$ , $20^\circ\text{C}$ 升至 $250^\circ\text{C}$	1	40
15	侧搅拌器	$N=15\text{kW}$ , S316L	12	$4 \times 12 (=48)$
16	加热风机	$60500\text{m}^3/\text{h}$ , $N=30\text{kW}$	1	7
合计				675.2

7. 脱硫工程估价

序号	类别	名称	计算价格（万元）
1	（一） 直接费用	脱硫及配套设备	675.2
2		电气及自控	65
3		土建	30
4		设备安装费	$(1+2) \times 15\% = 111$
5		运杂费	$(1+2) \times 3\% = 22.2$
6		设备调试及培训费	$(1+2) \times 5\% = 37$
合计			940.4
7	（二） 间接费用	工程及非标设计费	$(一) \times 5.5\% = 51.7$
8		税金	$(一+7) \times 5.5\% = 54.6$
9		不可预见费	$(一+7) \times 5\% = 49.6$
合计			155.9
总计			$(一+二) = 1096.3$

8. 运行费用 (按一年运行 7000h 计)

1) 脱硫剂  $\text{CaCO}_3$  粉的费用

$$876\text{kg/h} \times 7000\text{h} \times 90 \text{ 元/t} = 55.2 \text{ 万元/年}$$

2) 电费

$$964\text{kW} \times 7000\text{h} \times 0.5 \text{ 元/(kW} \cdot \text{h)} = 337.4 \text{ 万元/年}$$

3) 水费

$$15\text{m}^3/\text{h} \times 7000\text{h} \times 1 \times 1.0 \text{ 元/m}^3 = 10.5 \text{ 万元/年}$$

4) 人工费

$$4 \text{ 人} \times 12000 \text{ 元/年} \cdot \text{人} = 4.8 \text{ 万元/年}$$

5) 每年回收石膏 6755t, 收入 27 万元。因此全年运行费用合计  $(55.2 + 337.4 + 10.5 + 4.8 - 27) \text{ 万元} = 380.9 \text{ 万元}$

$$\text{所以每千克 SO}_2 \text{ 脱除费用} = 3809000 \text{ 元} \div 3178000 = 1.21 \text{ 元。}$$

9. 经济效益及社会效益

1) 每年可削减  $\text{SO}_2$  排放 3178t。

2) 每年可少交排污费 381 万元。

3) 每年可减少  $\text{SO}_2$  污染引起的综合经济损失为  $3178\text{t} \times 4300 \text{ 元/t} = 1366 \text{ 万元}$ 。



### 4.3 湿式氧化镁法脱硫

氧化镁俗称镁石灰，以此名来区别于氧化钙（俗称石灰）。它与水会发生剧烈反应，生成  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 。

氧化镁的活性度比氧化钙大，它们同属于中强碱。由于氢氧化镁中  $\text{Mg}^{2+}$  离子的半径比氢氧化钙中  $\text{Ca}^{2+}$  的小， $\text{Mg}^{2+}$  的电离势比  $\text{Ca}^{2+}$  的大， $\text{Mg}^{2+}$  的极化程度和碱性比  $\text{Ca}^{2+}$  离子的强，所以氧化镁吸收  $\text{SO}_2$  的程度比氧化钙强、吸收速度比氧化钙快，在脱硫工艺性上具有许多优点。

湿式氧化镁法脱硫由于其反应速度快和活性度高，脱硫  $\text{Mg}/\text{S}$  比可选在  $1 \sim 1.01$ 。液气比  $L/G$  为 5 时便可获得 90% 以上的脱硫效率。脱硫产物  $\text{MgSO}_4$  的溶解度在常温下可达 30% 以上。脱硫循环液中大部分是溶解的  $\text{MgSO}_4$  溶液。所以氧化镁法不易结垢堵塞，这是一个重要的优点。氧化镁价格约为碳酸钙的三倍，但是它的相对分子质量之比  $\text{MgO}/\text{CaCO}_3 = 0.40$ ，脱硫  $\text{Mg}/\text{S} = 1$ ，而用  $\text{CaCO}_3$  粉料的脱硫  $\text{Ca}/\text{S} = 1.05$ ，所以脱除同样数量  $\text{SO}_2$  时使用的氧化镁粉料是石灰石粉料的 38%。从脱硫剂费用上看，使用氧化镁是石灰石粉料的 114%。又由于氧化镁法脱硫液气比为  $3 \sim 5$ ，比石灰石法的  $15 \sim 25$  低得多，所以综合考虑脱硫运行费用的话，氧化镁法要优于石灰石法。

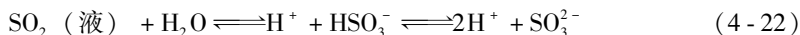
氧化镁法脱硫工艺也是技术上成熟经济合理、运行可靠的工艺，已在我国工业及供热锅炉上获得了许多的应用。

氧化镁也是仅次于氧化钙（石灰）的廉价碱，我国已经查明储量约为 80 亿 t，居世界首位，生产量居世界第一。氧化镁资源分布在辽宁、山东、四川、河北等地。辽宁海城、山东莱州等都是丰富产地。因此使用  $\text{MgO}$  粉料的国家和地区都从我国进口。

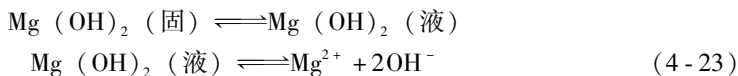
#### 4.3.1 基本原理与化学反应式

其脱硫工艺流程与石灰法相似。氧化镁法脱硫和石灰法脱硫只是采用不同的脱硫剂。烟气流经设备和系统组成相似，但是在脱硫工艺性上各有特点。

氧化镁法脱硫化学反应式：



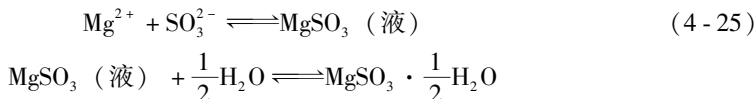
氢氧化镁溶解

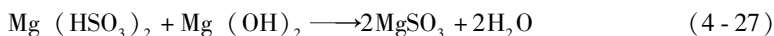


$\text{H}^+$  和  $\text{OH}^-$  中和反应



亚硫酸镁的生成





亚硫酸镁氧化成硫酸镁可分为强制氧化和自然氧化。在脱硫塔底部循环槽中鼓入空气,使  $\text{MgSO}_3$  氧化  $\text{MgSO}_4$  称为强制氧化工艺。利用烟气中的剩余氧使  $\text{MgSO}_3$  氧化成  $\text{MgSO}_4$  称为自然氧化工艺。



$\text{MgSO}_3$  是难溶于水的,在  $t=20^\circ\text{C}$  时的溶解度为 0.5%。而  $\text{CaSO}_3$  在  $t=20^\circ\text{C}$  时的溶解度为 0.004%。 $\text{MgSO}_4$  在  $t=20^\circ\text{C}$  水中的溶解度为 25%, $\text{CaSO}_4$  在  $t=20^\circ\text{C}$  水中的溶解度为 0.20%。可见  $\text{CaSO}_3$  和  $\text{CaSO}_4$  比  $\text{MgSO}_3$  和  $\text{MgSO}_4$  更容易沉淀或结晶,从而在脱硫装置内部件上产生结垢。

由于  $\text{MgSO}_4$  是易溶于水的,所以脱硫循环液中的  $\text{MgSO}_3$  采用强制氧化,形成  $\text{MgSO}_4$  那么脱硫循环液基本是溶液,这对脱硫塔的工作条件是大有好处,也不容易产生浆液堵塞,使氧化镁脱硫有可能采用穿流板塔或喷淋泡沫塔。穿流板塔是指不设溢流管的高开孔率多孔板塔。这类塔的吸收工作性能优于喷雾脱硫塔。

### 4.3.2 湿式氧化镁法脱硫工艺流程

湿式氧化镁法脱硫工艺流程如图 4-11 所示。

氧化镁法脱硫流程内容和组成与氧化钙(石灰)法是基本相同的。这里仅再作简要阐述。

从锅炉增压风机送来已经过除尘的热烟气进入脱硫塔或进入烟气换热器(GGH)与脱硫塔出口冷烟气进行传热交换后进入脱硫塔 [ $\text{Mg}(\text{OH})_2$  法可用大开孔率多孔板塔或泡沫塔]。烟气在塔内上升过程中与脱硫循环液雾粒和塔板上鼓泡而成的泡沫(膜)相接触。进行烟气、泡沫(膜)雾粒、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$  气液固三相之间碰撞、接触交换混合,激烈地进行传质、吸收、传热过程。烟气中的  $\text{SO}_2$  通过气相主流,湍流扩散到液体表面的气膜,通过分子扩散穿过气膜到气液界面,从气相到液相。在液相中完成式(4-21)~式(4-28)的脱硫化学反应。脱硫产物有  $\text{MgSO}_4$ 、 $\text{MgSO}_3$ 、 $\text{Mg}(\text{HSO}_3)_2$ 。循环液内除前述三种硫酸镁盐外,主要还有  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  和烟尘、氯化物、氟化物、重金属离子等,不断重复进行脱硫循环。

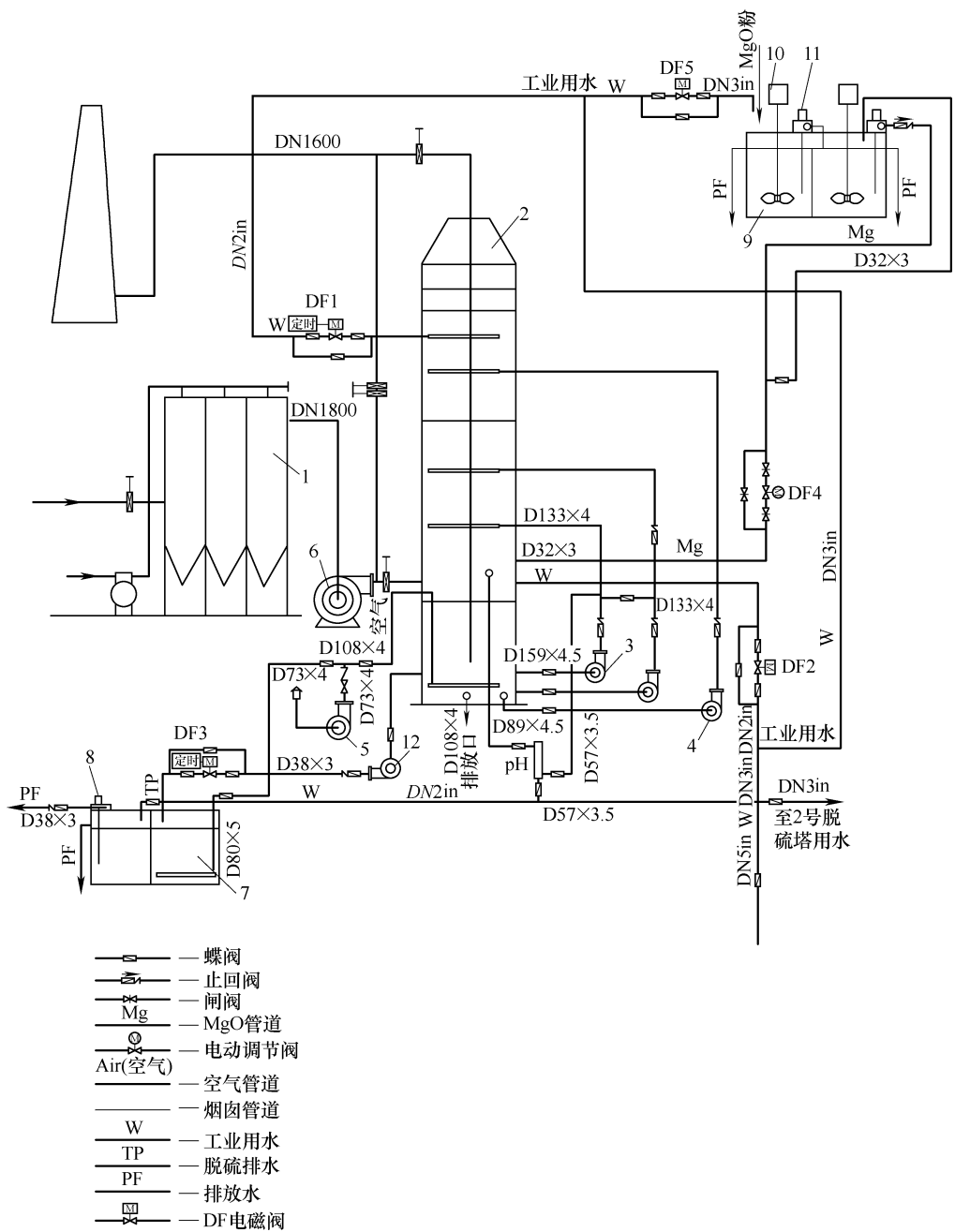
### 4.3.3 脱硫系统组成

#### 1. 脱硫剂储存和制备、烟气系统、 $\text{SO}_2$ 吸收系统

与石灰法、石灰石法脱硫基本相同,可参阅 4.1.2 节的有关内容。

#### 2. 氧化镁法脱硫产物及浆液处理系统

1)  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  与  $\text{SO}_2$  进行化学反应后生成  $\text{MgSO}_3$ ,经过强制氧化后大部分  $\text{MgSO}_3$  被氧化成  $\text{MgSO}_4$ ,硫酸镁在常温下,就能溶解于水。 $\text{MgSO}_4$  是一种有广泛用途的化学产品,在食品、医药、化工、轻纺、日化都需要用到。在农业上可作镁肥,用在粮食、水

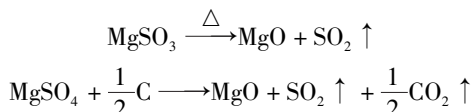


产、烟草等都有增产优质作用。脱硫生成的  $\text{MgSO}_4$  可以开发制作镁肥和复合肥，进行综合利用。

2) 对于小规模脱硫系统，由于生成的  $\text{MgSO}_4$  溶液产量有限，可以按 GB 8978《污水综合排放标准》适当处理后，达标排放；也可以作为绿化灌溉水。如果锅炉房有水力除灰系统可作为水力除灰循环水的补充水；也可用作炉渣灰排放处的降温涤尘用水。

3) 脱硫塔循环槽中  $\text{MgSO}_4$  含量可在 6% ~ 12%。pH 值控制在 6.5 左右。要从脱硫排放水中回收  $\text{MgSO}_4$ ，就要浓缩使  $\text{MgSO}_4$  达到过饱和才能结晶析出；一般使用蒸发器来浓缩脱硫液达到过饱和，结晶析出  $\text{MgSO}_4$ 。

4) 国外氧化镁脱硫曾做过从  $\text{MgSO}_3$  和  $\text{MgSO}_4$  中回收  $\text{MgO}$  再用于脱硫，以及回收  $\text{SO}_2$  制造硫酸的再生工艺。这是符合变废为宝、综合利用的循环经济政策的。采用的方法是煅烧分解还原  $\text{MgSO}_3$ 、 $\text{MgSO}_4$ 。



煅烧过程在 900℃ 以上进行，同时加入少量焦炭。煅烧分解出的  $\text{MgO}$  可作为脱硫剂使用， $\text{MgO}$  回收利用率为 80% ~ 90%；煅烧分解含  $\text{SO}_2$  气 10% ~ 13%，可用于制造硫酸，如图 4-12 所示。

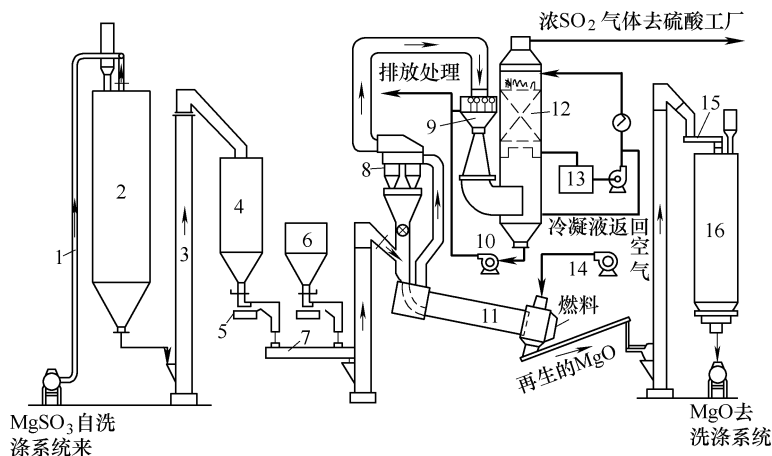


图 4-12 氧化镁再生工艺流程图

- 1、15—运输机 2— $\text{MgSO}_3$  储槽 3—提升机 4— $\text{MgSO}_4$  储斗 5—计量加料机  
6—焦炭储斗 7—带式运输机 8—尘分离器 9—洗涤器 10—循环泵  
11—煅烧炉 12—冷却器 13—循环槽 14—鼓风机 16—再生的  $\text{MgO}$  储槽

#### 4.3.4 湿式氧化镁法脱硫工艺参数

脱硫过程工艺参数是脱硫工艺设计的关键因素，应根据锅炉及炉窑容量和负荷变

化、燃料品质、锅炉烟气排放标准、环境影响评价，经全面分析优化后确定。

(1) 烟气量  $G$  包括烟气温度  $T$ 、烟气湿度、烟尘浓度、 $\text{SO}_2$  浓度、锅炉大气污染物排放标准，是脱硫工艺设计的基本条件和必需的原始资料。

(2)  $\text{Mg}/\text{S}$  比 相当于石灰法的  $\text{Ca}/\text{S}$  比，它与选用的脱硫剂种类和要求达到的脱硫效率、脱硫剂利用率有关。对于氧化镁法， $\text{Mg}/\text{S}$  比可选  $1.0 \sim 1.01$ 。

(3) 液气比  $L/G$  液气比是指喷入脱硫塔的脱硫循环液流量  $L$ ，与所要脱硫的烟气流量  $G$  的比值  $L/G$ 。

湿式氧化镁法脱硫  $\eta_s - L/G$  曲线如图 4-13 所示。

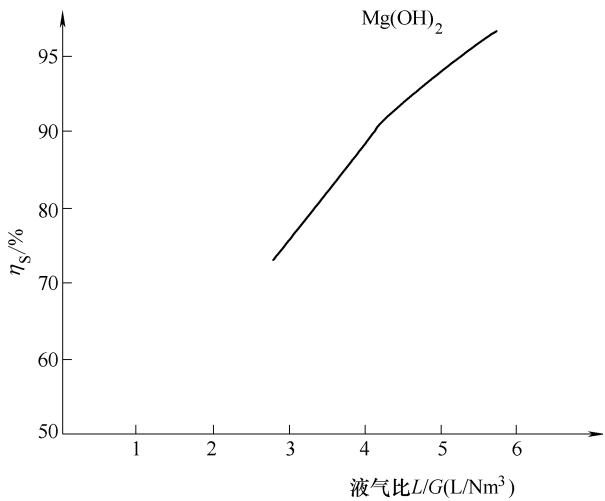


图 4-13 湿式氧化镁法  $\eta_s - L/G$  曲线图

$\eta_s - L/G$  是根据脱硫烟气进口的  $\text{SO}_2$  浓度  $1500\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，使用喷雾 - 多孔板组合塔测定。由于脱硫塔设计参数与脱硫效率关系密切，故数据仅供参考。

液气比与脱硫效率、脱硫阻力、设备投资、运行费用直接相关，在设计中必须综合考虑、合理选定该参数。

由图 4-13 可知，如果要求脱硫效率达到  $90\% \sim 95\%$ ， $L/G$  应选在  $4.5 \sim 5.5$ 。

(4) 脱硫浆液的 pH 值控制 脱硫循环浆液的 pH 值，表示浆液的酸碱度。pH 越大，则表示浆液中  $\text{OH}^-$  离子浓度越高，碱性越强，吸收  $\text{SO}_2$  的能力越强，脱硫效率越高。但并非 pH 值越高越好。因为烟气中含有大量的  $\text{CO}_2$ ，所以在 pH 过高时，碱性物首先会与  $\text{CO}_2$  发生反应生成碳酸盐。既浪费脱硫剂，又会引起结垢，只有合适的 pH 值，才能使脱硫正常运转。对于  $\text{MgO}$  法脱硫，控制循环槽内  $\text{pH} = 6.5$ ，当  $\text{pH} < 6.5$  时，自动向脱硫塔加注  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  浆液。当  $\text{pH} > 6.5$  时，自动关闭浆液电动调节阀。

(5) 脱硫循环槽中硫酸镁含量 脱硫塔循环槽中硫酸镁含量是脱硫操作时必须确定的参数。脱硫循环液中硫酸镁含量与脱硫效率和排出硫酸镁的浆液量有关。湿式氧化镁法脱硫工艺循环液中硫酸镁的含量一般控制在  $6\% \sim 12\%$ 。

氧化镁法循环浆液的主要组分，实际上主要由  $\text{MgSO}_4$ 、 $\text{MgSO}_3$ 、 $\text{MgHSO}_3$  等组成。

循环浆液中  $\text{MgSO}_4$ 、 $\text{MgSO}_3$ 、 $\text{Mg}(\text{HSO}_3)_2$  的比例与浆液的 pH 值有关, 如图 4-14 所示。

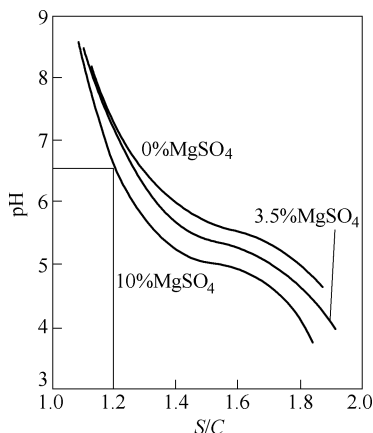
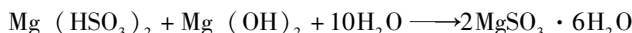
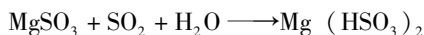
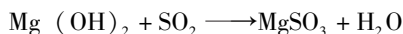


图 4-14  $\text{MgSO}_4$  和  $\frac{\text{Mg}(\text{HSO}_3)_2}{\text{MgSO}_3}$  比率与 pH 的关系

从图 4-14 可知, pH 值决定了脱硫循环液的组成。当循环液在  $25 \sim 70^\circ\text{C}$  和  $0\% \sim 10\%$  的  $\text{MgSO}_4$  范围内, pH 值为  $3.82 \sim 8.70$ 。

图中 S 表示浆液中  $\text{SO}_2$  的物质的量 (mol), C 表示浆液中活性氧化镁的物质的量 (mol),  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  吸收  $\text{SO}_2$  的反应实际是:



$\text{Mg}(\text{HSO}_3)_2$  是酸式盐, 并不具有吸收  $\text{SO}_2$  的能力, 是由浆液中的  $\text{MgSO}_3$  吸收  $\text{SO}_2$  形成的, 这时浆液 pH 值下降, 然后注入  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  使  $\text{Mg}(\text{HSO}_3)_2$  再转变为  $\text{MgSO}_3$ 。

#### 4.3.5 湿式氧化镁法脱硫废水及处理方案

在脱硫过程中, 对烟气带入脱硫塔的水分  $W_{\text{Hy}}$ , 冲洗除雾器进入脱硫塔水分  $W_{\text{HM}}$ 、排放脱硫产物浆液带出水  $W_{\text{HP}}$ 、添加脱硫剂带入水分  $W_{\text{HCa}}$ 、强制氧化空气带入水分  $W_{\text{HA}}$ 、脱硫饱和烟气带出水分  $W_{\text{HW}}$ 、脱硫产物所带结晶水分  $W_{\text{HMg}}$ 、排放氯子水分  $W_{\text{HCl}}$  等进行水平衡计算。可以得知脱硫过程产生的废水量。

湿式氧化镁法脱硫过程水平衡计算例题。

某供热厂  $130\text{t/h}$  锅炉, 烟气量  $240000\text{m}^3/\text{h}$ ,  $T = 130^\circ\text{C}$

$x_{\text{H}} = V_{\text{H}_2\text{O}}/V_{\text{y}} = 0.07$   $C_{\text{Sl}} = 1000\text{mg}/\text{Nm}^3$ ,  $C_{\text{S2}} = 100\text{mg}/\text{Nm}^3$

脱硫塔  $D = 5000\text{mm}$ 。塔顶装两层折流板除雾器。

水平衡计算如下:

1) 脱硫烟气带入塔内的水分  $W_{\text{Hy}}$ :

$$W_{Hy} = V_y \times \rho_{130} \times x_H = 240000 \times 0.8894 \times 0.07 \text{ kg/h} \\ = 14942 \text{ kg/h} = 14.94 \text{ t/h}$$

2) 冲洗除雾器水  $W_{HM}$  :

$$W_{HM} = 2W_{M1Z} + W_{M1P} + W_{M2Z} \\ = (2 \times 1178 + 471 + 471) \text{ t/h} \\ = 3.3 \text{ t/h}$$

3) 排出脱硫产物所带出水分:

$$\text{脱除 SO}_2 \quad W_{SO_2} = (C_{S1} - C_{S2}) \times V_y \times \frac{273}{273 + 7} \\ = (1000 - 100) \times 240000 \times \frac{273}{273 + 130} \text{ kg/h} = 146.3 \text{ kg/h}$$

$$\text{生成 MgSO}_3 \quad W_{Mg3} = \frac{M_{Mg3}}{M_{SO_2}} \times W_{SO_2} = \frac{104 \times 146.3}{64} \text{ kg/h} = 238 \text{ kg/h}$$

$$\text{强制氧化生成 MgSO}_4 \quad W_{Mg4} = \frac{M_{Mg4} \times W_{Mg3}}{M_{SO_2}} = \frac{238 \times 136}{104} \text{ kg/h} = 311 \text{ kg/h}$$

式中  $M_{Mg3}$ —— $\text{MgSO}_3$  的相对分子质量;

$M_{SO_2}$ —— $\text{SO}_2$  的相对分子质量;

$M_{Mg4}$ —— $\text{MgSO}_4$  的相对分子质量。

按脱硫浆液含量 10% 计算。

$$W_{JP} = W_{Mg4} / 0.1 = 3110 \text{ kg/h}$$

$$\text{排出水分: } W_{HJP} = \frac{W_{Mg4} - W_{Mg3} \times 0.10}{0.10} = \frac{311 - 31.1}{0.10} \text{ kg/h} = 2799 \text{ kg/h} \approx 2.8 \text{ t/h}$$

4) 脱硫注入 10%  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  浆液 1080 kg/h 带入水量  $W_{HMg} = 0.97 \text{ t/h}$

5) 脱硫烟气带出水分  $W_{HW}$  :

$$W_{HW} = V_y \times \rho_{130} \times (1 - x_{H_2O}) \times x_{tw} + V_0 \times 0.075 \text{ g/m}^3 \\ = \left( 240000 \times 0.8894 \times 0.93 \times 0.078 + 240000 \times \frac{273}{403} \times 0.075 \right) \text{ kg/h} \\ = 15512 \text{ kg/h} \approx 15.5 \text{ t/h}$$

式中 0.075——经验数据, 脱硫出口烟气夹带水分  $0.075 \text{ g/Nm}^3$ 。

$x_{tw}$ ——48℃ 饱和状态烟气含湿量, 查表 13-14 为  $0.078 \text{ kg/kg}$  (干烟气)。

6) 强制氧化空气带入水分  $W_{HA}$  :

$$Q_a = 12 \text{ m}^3/\text{min} \times 60 = 720 \text{ m}^3/\text{h}$$

$t = 20^\circ\text{C}$  时饱和空气含湿量  $x_{tw} = 14.7 \text{ g/kg}$  (干空气)

$$W_{HA} = x_{tw} \times Q_a \times \rho_{20} = 14.7 \times 720 \times 1.195 \text{ g/h} = 12648 \text{ g/h} \approx 12.6 \text{ kg/h}$$

式中  $x_{tw}$ —— $t = 20^\circ\text{C}$  时饱和空气含湿量  $x_{tw} = 14.7 \text{ g/kg}$  (干空气);

$\rho_{20}$ —— $t = 20^\circ\text{C}$  时饱和空气密度, 取值  $1.195 \text{ kg/m}^3$ 。

7)  $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  脱硫产物带走的结晶水  $W_{HJJ}$  :

$$\begin{aligned}
 W_{\text{HJJ}} &= \frac{6M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{Mg}^{2+}}} \times W_{\text{Mg}^{2+}} = \frac{108}{120} \times 311 \text{ kg/h} = 280 \text{ kg/h} \\
 W_{\text{ZON}} &= W_{\text{Hy}} + W_{\text{HM}} - W_{\text{HJP}} + W_{\text{HMg}} - W_{\text{HW}} + W_{\text{HA}} - W_{\text{HJJ}} \\
 &= (14.94 + 3.3 - 2.8 + 0.97 - 15.5 + 0.012 - 0.28) \text{ t/h} \\
 &= 0.64 \text{ t/h}
 \end{aligned}$$

经过水平衡计算可知,脱硫塔内每小时增加水量 0.64t。为了维持水平衡必须每小时排出工业用水 0.64t。而排出脱硫产物  $\text{MgSO}_4$  的水不能返回制浆系统,必须外排。即  $W_{\text{HJP}} = 2.8 \text{ t/h}$ 。

脱硫废水  $W_{\text{FEI}} = W_{\text{HJP}} + W_{\text{ZON}} = 2.8 \text{ t/h} + 0.64 \text{ t/h} = 3.4 \text{ t/h}$ 。

8) 废水处理方案:

- ① 如果锅炉房有水力除灰系统可作为补充水,排至水力除灰沉渣池。
- ② 调整 pH 值至 7 左右,作为绿化浇灌水,  $\text{MgSO}_4$  可起镁肥的作用。
- ③ 按 GB 8978《污水综合排放标准》处理达标排放。采用加药、混凝、沉淀、过滤去除有害物和重金属,再经曝气处理后达标排放。

#### 4.3.6 湿式氧化镁法脱硫技术特点

- 1) 氧化镁脱硫反应速度快于氧化钙,脱硫效率可达 98%。
- 2) 氧化镁脱硫在同等脱硫效率,液气比是石灰石法的三分之一,节省电能和运行费用。
- 3) 脱除等量的  $\text{SO}_2$ ,  $\text{MgO}$  的消耗量仅为石灰石的 41%。脱硫塔体积和配套辅机都比石灰石法小。工程投资比石灰石法低。
- 4) 副产品  $\text{MgSO}_3/\text{MgSO}_4$  可用作肥料或其他工业用途。使用价值较高。如果副产品开发成功,会有可观收入。
- 5) 氧化镁脱硫工艺技术成熟、运行可靠、不易结垢堵塞,都是它的突出优点。
- 6) 由于氧化镁工艺低,液气比和脱硫剂耗量仅为石灰石的 41%,所以该方法脱除每千克  $\text{SO}_2$  的费用低于石灰石-石膏法。
- 7) 我国  $\text{MgO}$  资源丰富,储藏量占世界首位,产量第一。但矿藏多数分布在辽宁和山东,不便于其他地区的使用,需支付较高运费。

#### 4.3.7 湿式氧化镁法脱硫设计注意事项

- 1) 采用新鲜、活性强的  $\text{MgO}$  粉,纯度 85% 左右,细度不低于 200 目。
- 2) 制备成 10% ~ 15% 的  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  浆液,要经过过滤除去少量杂质和渣,以免这些渣子沿输送管沉积而发生堵塞。
- 3)  $\text{MgO}$  细粉也极易吸湿,输送过程注意防潮。在储料罐内要设热风搅动和流化板以免下料过程产生阻塞。
- 4)  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  浆液输送管应设计成循环管网,即从浆液储槽用浓浆泵抽出输送到脱硫塔再回到浆液储槽。这样  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  浆液始终在管道中流动,不会因静止而产生



沉淀,进而引起堵塞。

5) 浆液输送管转弯时,应用大圆弧转弯,一般转弯半径  $R > 2DN$  (管道公称直径),以免浆液阻塞管道。

6) 在寒冷地区(即冬季国家规定可以供暖的地区),脱硫剂制备应设计在工房内,并按设计规范采暖。

7) 浆液管应设清水冲洗管。较长时间停用,应放空浆液管,并用清水冲洗浆液管,以免残留浆液干化挂壁,有碍正常运行。

8) 湿式氧化镁法脱硫不易发生系统结垢堵塞,但是同样要求准确控制脱硫循环槽内吸收液的 pH 值为 6.5。pH < 6.5 时,向脱硫塔注入  $Mg(OH)_2$  浆液。

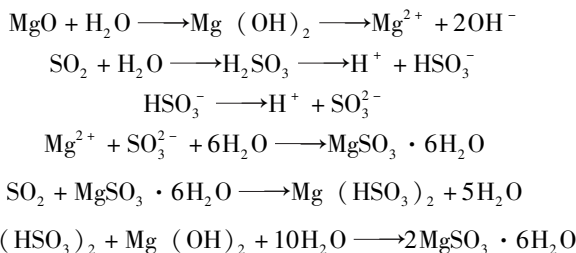
9) 冬季气温较低时,有条件的锅炉房宜设热水制备  $Mg(OH)_2$  浆液。配制浆液水温不低于  $20^{\circ}C$ 。

10) 氧化镁法脱硫液气比一般为 5,脱硫效率达 90% 以上。 $Mg/S$  比可选 1 ~ 1.01。

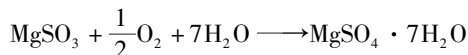
11) 锅炉烟气先经过静电或袋式除尘后(一般热电厂锅炉都必须用静电除尘,北京地方标准较严,必须用静电或袋式除尘器)进入脱硫塔。经过除尘后的烟气方可通过穿流板塔、旋流板塔、泡沫塔,不然烟尘沾在塔板上堵塞孔眼,有碍安全正常运行。

12) 氧化镁法脱硫工艺一般都用强制氧化工艺,在脱硫循环槽内鼓风曝气使浆状  $MgSO_3$  氧化成溶解状  $MgSO_4$ ,大为改善脱硫塔工作条件。同时可以向脱硫塔外排放  $MgSO_4$  脱硫产物,并控制循环槽内的  $MgSO_4$  含量在 6% ~ 10% 内。

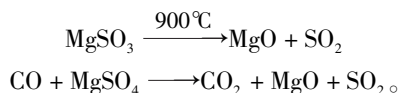
13) 氧化镁法脱硫也可以把脱硫产物做成  $MgSO_3$ 。再把  $MgSO_3$  分离出来加热分解再生为  $MgO$ 。



副反应



氧化镁的再生



这种氧化镁浆液吸收及再生工艺的优点是  $MgSO_3$  较易沉淀分离出来。 $MgSO_3$  可以加热分解回收  $MgO$  和  $SO_2$ , 脱硫产物得以很好利用。

在脱硫操作过程中,需抑制  $MgSO_3$  的氧化,才能尽可能多地回收  $MgO$  和  $SO_2$ 。抑

制剂包括苯酚、对苯二酚等。氧化镁浆液吸收系统如图 4-15 所示。

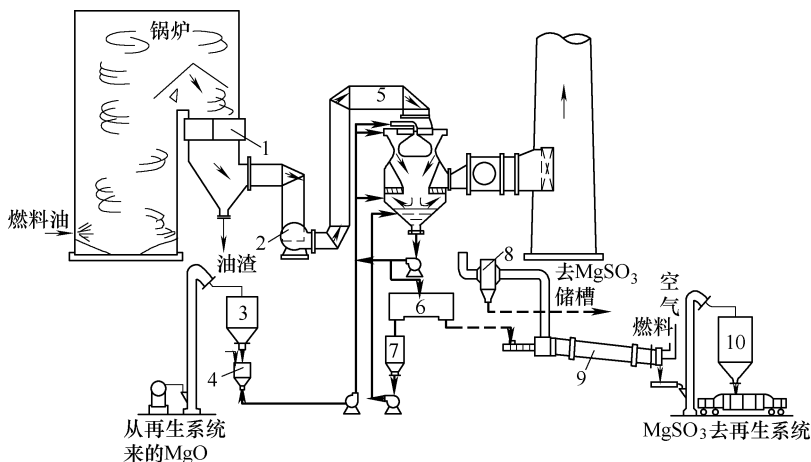


图 4-15 氧化镁浆液吸收系统

- 1—空气加热器 2—热鼓风机 3—MgO 储槽 4—料浆槽 5—SO<sub>2</sub> 吸收洗涤器  
6—离心分离器 7—母液槽 8—集尘器 9—结晶干燥器 10—MgSO<sub>3</sub> 储槽

### 4.3.8 湿式氧化镁法烟气脱硫除尘方案及工程投资估算

#### 1. 工程概况

××环境工程公司根据国家 SO<sub>2</sub> 总量控制要求和锅炉污染物排放标准和业主要求，拟对东北××热电厂的一台 220t/h 煤粉锅炉烟气实施脱硫工程。本项目实施后将对周围环境，特别是对大气污染物的控制治理和改善周围地区的空气质量起到至关重要的作用，可获得巨大的环境效益和一定的经济效益。本公司采用 MgO 喷淋泡沫塔烟气脱硫技术，提出该烟气处理的解决方案。

#### 2. 方案设计技术原则

1) 从技术、经济及装置运行稳定性、可行性上考虑，采用 MgO 作为脱硫剂，保证系统脱硫效率在 90% 以上。达到国家和地方的锅炉烟气排放标准。

2) 采用 MgO 作为脱硫剂，可以从根本上避免产生结垢堵塞现象，并且根据国家相关的政策法规，低浓度的 MgSO<sub>4</sub> 溶液没有限制排放，故采用 MgO 法进行脱硫可直接获得少量达标排放脱硫废水，进而简化脱硫工艺系统，减少一次性投资。

3) 采用喷淋泡沫洗涤方式，可在较小的液气比下获得较大的液气接触面积，进而获得较高的脱硫除尘效率；并且较小的液气比可以减少循环液量，从而减少循环泵的数量或型号，降低运行成本。考虑整个系统的防腐措施，反应塔内壁、管道、泵、搅拌机、储罐内壁、烟道等部分都采用性能良好的防腐材料进行防腐处理。

4) 保证本脱硫装置连续运行，每年运行时间满足业主要求。同时，设置旁路烟道，以保证锅炉及脱硫系统的安全生产和正常运行。

5) 为确保整个系统连续可靠运行,应采用优良可靠的设备,以确保脱硫系统的可靠运行。

6) 按现有场地条件布置脱硫系统设备,因地制宜,力求紧凑合理,节约用地。

7) 最大限度地循环利用脱硫水,但是由于烟气中含有一定浓度的盐和  $\text{Cl}^-$  离子,反应塔内水分蒸发,因此形成循环水中盐和  $\text{Cl}^-$  离子的积累,由于过高的盐和  $\text{Cl}^-$  离子浓度会降低脱硫效率和腐蚀反应装置,所以必须排放少量的脱硫水,并补充少量工业用水。

### 3. 设计条件

本热电厂锅炉烟气参数如下:

1) 烟气温度:  $160^{\circ}\text{C}$ 。

2) 烟气量:  $400000\text{m}^3/\text{h}$  ( $252200\text{Nm}^3/\text{h}$ )。

3) 烟尘浓度:  $400\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

4)  $\text{SO}_2$  浓度:  $2000\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

5) 烟气含湿量: 0.07。

6) 现场锅炉引风机型号: Y4-73NO: 22F; 风量:  $264600\text{m}^3/\text{h}$ , 风压:  $2195\text{Pa}$ ,  $N=280\text{kW}$ 。

7) 利用已有循环沉淀池: 长×宽×深, 循环水管网尺寸, 循环泵型号、台数、流量、扬程、电动机功率。

8) 提供使用的场地面积及方位。

9) 配套静电除尘器型号: GB 1000-3。

注: 如无法提供第4)条数据,可改为提供燃料消耗量和燃料含硫量来进行估算; 新建项目则不必提供第6)、7)条内容。

### 4. 可达到的排放标准

1) 烟尘浓度:  $100\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

2)  $\text{SO}_2$  浓度:  $200\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

3) 烟气黑度: 1级。

4) 烟气温度:  $80^{\circ}\text{C}$ 。

### 5. 脱硫除尘工艺流程说明

MgO 法脱硫工艺流程如图 4-16 所示。

(1) 脱硫除尘系统运行参数

1) MgO 耗量:  $334\text{kg}/\text{h}$ 。

2) 循环液量:  $1200\text{m}^3/\text{h}$ 。

3) 曝气量:  $25\text{m}^3/\text{min}$ 。

4) 待处理水量:  $6.8\text{m}^3/\text{h}$  (见本方案 6. 水平衡计算)。

(2) 脱硫剂制备 外购 200 目左右的 MgO 粉储存在低位料仓内,用抓斗吊车抓至消化罐上方,由漏槽进入消化罐中,加水搅拌配成 10% 左右的浆液,再由乳液泵送至乳液槽,搅拌均匀供脱硫使用,一般每次配制可供 4h 使用的乳液量。

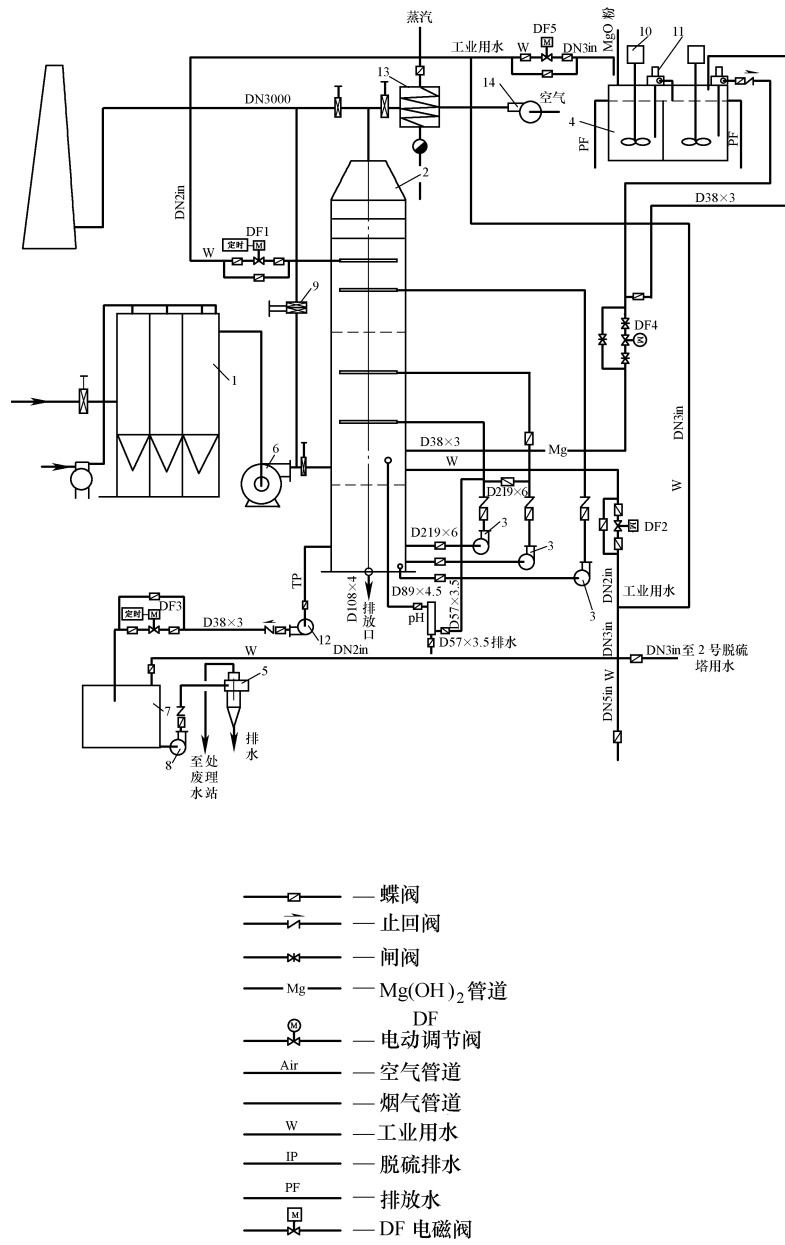


图 4-16  $MgO$  法脱硫工艺流程图

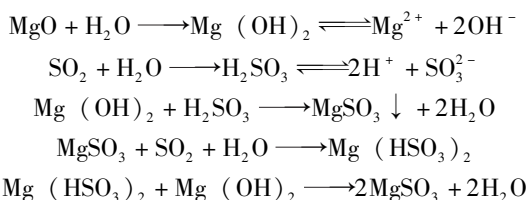
- 1—静电除尘器 2—脱硫塔 3—循环泵 4— $Mg(OH)_2$  乳液槽 5—旋流器  
6—增压风机 7—集水箱 8—旋流泵 9—烟道闸板 10—搅拌机 11—立式乳液泵  
12—脱硫排水泵 13—蒸汽/空气换热器 14—加热风机

(3) 吸收塔及脱硫过程 吸收塔的结构为逆流喷淋泡沫洗涤塔，由于采用  $MgO$  吸收和自冲洗塔板不会发生结垢堵塞，所以采用喷雾加泡沫塔板方式可在较小的液气比下

获得较大的液气接触面积,进而获得较高的脱硫除尘效率;并且较小的液气比可以减少循环液量,从而减少循环泵的数量或型号,降低运行成本。锅炉排烟经过静电除尘器后,通过增压风机送入泡沫脱硫除尘塔吸收段下部,由塔顶部排出。烟气首先经过两层喷嘴组的喷雾洗涤吸收,由于洗涤液被特制的螺旋喷嘴雾化成比表面积极大的雾滴,可以同烟气进行充分的传质、吸收、除尘过程,喷淋吸收液由吸收塔循环泵供给。净化后的烟气再经过一层塔板鼓泡液膜吸收洗涤发生二次脱硫除尘过程。同时,泡沫塔板对烟气具有一定的脱水作用,可减少烟气带水量。经过喷雾吸收洗涤及泡沫吸收洗涤的烟气中夹带有一定的水滴,在进入烟道、引风机、烟囱前必须进行脱水,为此在脱硫塔内要设置除雾脱水段,也可在塔外设计一个除雾脱水器,脱除水雾后的烟气方可进入引风机、烟道及烟囱。经过上述烟气治理,可以达到4.中要求的排放标准。

由于经过湿法洗涤后,烟气温度已低于露点(约50℃),流经烟道引风机和烟囱后,会不断产生冷凝水,腐蚀沿途设施并产生白烟。一般应进行烟气再加热,用蒸汽加热20℃空气到250℃。再同净化后的烟气混合加热升温。使烟气排放温度升至80℃。否则,对于在露点以下温度排放的烟气,烟道、引风机、烟囱都必须进行防水、防酸腐蚀的措施。

(4) 脱硫反应 脱硫过程主要化学反应如下:



洗涤吸收液吸收 $\text{SO}_2$ 后,pH值迅速下降,通过pH计检测控制注入 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 悬浊液,调整到合适pH值后循环使用。

(5) 脱硫废液废渣的处理 脱硫塔中生成的反应产物,经过沉淀脱水后可与锅炉炉渣一同处理利用。由于进行强制氧化后生成的 $\text{MgSO}_4$ 具有较大的溶解度(最大可生成约30%的溶液),实际上,很少有固体废渣产生。只要通过维持循环液中约10% $\text{MgSO}_4$ 含量,就可以循环使用。对于本套工艺,外排水量(见脱硫水平衡计算)实际控制在 $6.8\text{m}^3/\text{h}$ 左右,脱硫除尘废水拟直接排送到电厂水力冲渣池作为补充用水(或经混凝、沉淀、曝气可保证其色度、pH、SS、COD、重金属等指标均能达标排放)。

## 6. 湿式氧化镁法脱硫水平衡

1) 烟气带入水分 $W_{\text{Hy}}$ :

$$W_{\text{Hy}} = 400000 \times \rho_{160} \times x_{\text{H}} = 400000 \times 0.8288 \times 0.07\text{kg/h} = 23206\text{kg/h} = 23.2\text{t/h}$$

2) 除雾器冲洗水 $W_{\text{HM}}$ :

$$\begin{aligned}W_{\text{HM}} &= 0.785 \times 6.4^2 \times (60 + 60 + 24 + 24)\text{kg/h} = 32.15 \times 168\text{kg/h} \\ &= 5401\text{kg/h} \approx 5.4\text{t/h}\end{aligned}$$

3) 加注 $\text{MgO}$ 浆液2970kg/h带入水分 $W_{\text{HMg}}$ :

$$W_{\text{HMg}} = \frac{W_{\text{Mg}} - 0.1W_{\text{Mg}}}{0.1} = \frac{297 - 29.7}{0.1}\text{kg/h} = 2.67\text{t/h}$$

4) 脱硫产物  $\text{MgSO}_4$  含量 10% , 排出量  $W_{\text{JP}} = 7570\text{kg/h}$  所排出水量  $W_{\text{HJP}}$ 。

$$W_{\text{HJP}} = \frac{W_{\text{Mg}^4} - 0.1 W_{\text{Mg}^4}}{0.1} = \frac{757 - 75.7}{0.1} \text{kg/h} = 6.8 \text{t/h}$$

5) 鼓入空气  $Q_k = 25\text{m}^3/\text{min} \times 60 = 1500\text{m}^3/\text{h}$  带入水分  $W_{\text{HA}}$

$$W_{\text{HA}} = x_{\text{tw}} \times Q_a \times \rho_{20} = 14.7 \times 1500 \times 1.195 \text{kg/h} = 26349 \text{kg/h} \approx 26.3 \text{kg/h}$$

式中  $x_{\text{tw}}$ —— $t = 20^\circ\text{C}$  时饱和空气含湿量, 为  $14.7\text{g/kg}$  (干空气);

$\rho_{20}$ —— $t = 20^\circ\text{C}$  饱和空气的密度, 为  $1.195\text{kg/m}^3$ 。

6)  $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  产物结晶水带出水分  $W_{\text{HJJ}}$

$$W_{\text{HJJ}} = 6M_{\text{H}_2\text{O}}/M_{\text{Mg}^4} \times W_{\text{Mg}^4} = \frac{108}{120} \times 757 \text{kg/h} = 681 \text{kg/h}$$

7) 烟气带出脱硫塔水分  $W_{\text{HW}}$

$$W_{\text{HW}} = V_y \times \rho_{160} \times (1 - x_{\text{H}_2\text{O}}) \times x_{\text{tw}} = 400000 \times 0.8288 \times 0.93 \times 0.087 \text{kg/h} \\ = 26823 \text{kg/h} \approx 27 \text{t/h}$$

$$W_{\text{ZON}} = W_{\text{Hy}} + W_{\text{HM}} + W_{\text{HMg}} - W_{\text{HJP}} + W_{\text{HA}} - W_{\text{HJJ}} - W_{\text{HW}} \\ = (23.2 + 5.4 + 2.67 - 6.8 + 0.026 - 0.681 - 27) \text{t/h} \approx -3.2 \text{t/h}$$

经过水平衡计算脱硫塔, 每小时减少 3.2t 水。为了维持脱硫塔水位稳定, 应向塔内补充 3.2t/h 工业用水。但是排放脱硫产物  $\text{MgSO}_4$  的排水  $W_{\text{HJP}} = 6.8\text{t/h}$ , 是应处理的脱硫废水。所以  $W_{\text{FEI}} = W_{\text{HJP}} + W_{\text{ZON}} = 6.8\text{t/h} + 0 = 6.8\text{t/h}$ 。向塔内补水, 即没有排水。

7. 主要脱硫及配套设备报价

序号	名 称	型号及规格	数量/台	价格/万元
1	脱硫塔	φ6400mm×26m ( 钢衬玻璃鳞片 )	1	262
2	循环泵	$Q = 500\text{m}^3/\text{h}$ $N = 75\text{kW}$ $H = 37.5\text{m}$	2 + 1	$3 \times 7.5 ( = 22.5 )$
3	脱水器	折流板	2	已计入脱硫塔内
4	氧化风机	$Q = 25\text{m}^3/\text{min}$ $N = 37\text{kW}$ $H = 58842\text{Pa}$	1 + 1	$2 \times 5 ( = 10 )$
5	烟道闸板	$4 \times 2\text{m}$	2	24
		$D = 3\text{m}$	1	12
6	循环水管	φ299mm×8m, 100m ( 衬高密度乙烯 )	1	22.8
7	排水池	3m×4m×2m	1	2.4
8	排烟道	$D = 3\text{m}$ , $L = 50\text{m}$ ( 衬玻璃鳞片 )	1	40
9	电气设备	电控柜、电缆、电气设备等	1	25
10	自控设备	pH 计、重度计、电动调节阀、仪表等	1	40
11	排水管	φ57mm×3.5mm, 50m ( S304 )	1	1
12	排水泵	$Q = 20\text{m}^3/\text{h}$ $H = 30\text{m}$ $N = 5.5\text{kW}$	2	$2 \times 0.4 ( = 0.8 )$
13	增压风机	$Q = 200000\text{m}^3/\text{h}$ , $H = 2790\text{Pa}$ $N = 250\text{kW}$	2	$2 \times 20 ( = 40 )$
14	汽/气加热器	$Q = 34000\text{m}^3/\text{h}$ , $20^\circ\text{C}/250^\circ\text{C}$	1	40
15	加热风机	$60500\text{m}^3/\text{h}$ $N = 30\text{kW}$	1	7
合计				549.5

8. 脱硫工程估价

序号	类别	名称	计算价格(万元)
1	(一) 直接费用	脱硫及配套设备	484.5
2		电气及自控	65
3		土建	30
4		设备安装费	$(1+2) \times 15\% = 82.4$
5		运杂费	$(1+2) \times 3\% = 16.5$
6		设备调试及培训费	$(1+2) \times 5\% = 27.5$
合计			705.9
7	(二) 间接费用	工程及非标设计费	$(一) \times 5.5\% = 38.8$
8		税金	$(一+7) \times 5.5\% = 41$
9		不可预见费	$(一+7) \times 5\% = 37.2$
合计			117
总计			$(一+二) = 822.9$

9. 运行费用（按一年运行 7000h 计一台 220t/h 锅炉计算）

1) 脱硫剂 MgO 粉：

$334\text{kg/h} \times 7000\text{h} \times 400 \text{ 元/t} = 93.5 \text{ 万元/年}$

2) 电费：

$464\text{kW} \times 7000\text{h} \times 0.5 \text{ 元/(kW} \cdot \text{h)} = 162.4 \text{ 万元/年}$

3) 水费：

$15\text{m}^3/\text{h} \times 7000\text{h} \times 1 \text{ 元/m}^3 = 10.5 \text{ 万元/年}$

4) 人工费：

$4 \text{ 人} \times 12000 \text{ 元/年} \cdot \text{人} = 4.8 \text{ 万元/年}$

因此全年运行费用合计  $(93.52 + 162.4 + 10.5 + 4.8) \text{ 万元} = 271.2 \text{ 万元}$ 。

所以每千克 SO<sub>2</sub> 脱除费用  $= 2712000 \text{ 元} \div 3177000 = 0.85 \text{ 元}$ 。

10. 经济效益及社会效益

1) 每年可削减 SO<sub>2</sub> 排放 3177t。

2) 每年可少交排污费 339 万元。

3) 每年可减少 SO<sub>2</sub> 污染引起的综合经济损失为 3177 吨  $\times 4300 \text{ 元/t} = 1366 \text{ 万元}$ 。

4.4 钠碱法脱硫

钠碱法脱硫是采用 NaOH 或 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 为脱硫剂的湿法脱硫工艺。NaOH 和 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 都是较贵的碱。用氢氧化钠或碳酸钠作脱硫剂，脱硫产物 Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> 或硫酸都是有用的产品，且具有较高的价值，但是要回收并加工到合格产品还需增加中和浓缩、结晶离心分离、干

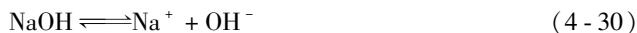
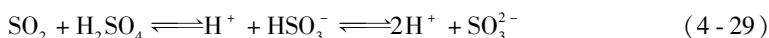
燥、成品包装等工序，等同于建立  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  的生产线。这样对于小规模工业及采暖锅炉，在经济上是不可行的。一般只能做成抛弃法。但由于脱硫成本太高，所以采用的不太多，只是在低硫煤和  $2\text{t/h}$  以下锅炉采用。这样碱的使用量不大，业主还可以承受。有的化工企业本身有钠碱也有在较大规模锅炉上使用的。如北京  $\times \times$  化工厂  $2 \times 65\text{t/h}$  锅炉上使用钠碱法脱硫。

我国湖南 300 电厂做过烟气量  $50000\text{m}^3/\text{h}$  规模的钠碱法回收  $\text{SO}_2$  的脱硫，每年回收  $1300\text{t}$ ，99.8% 的纯液态  $\text{SO}_2$ 。脱硫效率 90%。

钠碱是强碱，与  $\text{SO}_2$  反应速度快，吸收能力强。 $\text{Na}_2\text{SO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  都有较大的溶解度，脱硫循环液是溶液，不易结垢堵塞，脱硫液气比一般  $3 \sim 4$ ， $\text{Na/S}$  比可取 1，这些都是钠碱脱硫突出的优点。

#### 4.4.1 基本原理与化学反应式

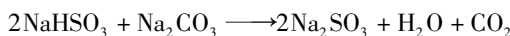
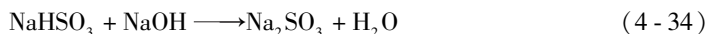
与其他湿法相似，用碱溶液洗涤含  $\text{SO}_2$  的气体时，首先是  $\text{SO}_2$  与水相互反应生成亚硫酸，部分亚硫酸离解成  $\text{H}^+$ 、 $\text{HSO}_3^-$  及少量的  $\text{SO}_3^{2-}$  离子。同时水溶液中的碱则离解成  $\text{Na}^+$  离子和  $\text{OH}^-$  离子。生成  $\text{OH}^-$  离子时，通过中和反应而使  $\text{H}^+$  离子量减少。



$\text{H}^+$  和  $\text{OH}^-$  中和反应



亚硫酸钠的生成

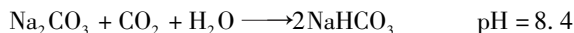
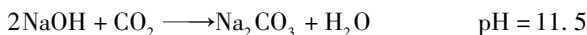


副反应

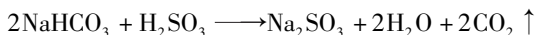
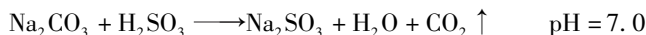


通过  $\text{NaOH}$  溶液吸收  $\text{SO}_2$  时， $\text{pH}$  值变化可分为如下几个阶段：

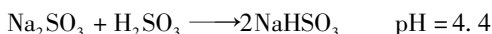
$\text{pH}$  值自 13.0 降至 8.4 的变化，是吸收烟气中大量  $\text{CO}_2$  的反应所致：



$\text{pH}$  值自 7.6 至 5.6 的变化是吸收  $\text{SO}_2$  之故。



然后再与过剩的  $\text{SO}_2$  反应。



$\text{pH} = 4.4$  时， $\text{Na}_2\text{SO}_3$  全部变为  $\text{NaHSO}_3$ ，就不可能继续吸收  $\text{SO}_2$  了。



pH 值与  $\text{Na}_2\text{SO}_3 - \text{NaHSO}_3$  溶液浓度关系  
如图 4-17 所示。

从图 4-17 可知  
pH = 4.4 时, 100%  $\text{NaHSO}_3$ ,  $S/C = 1$   
pH = 7.5 时, 90%  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ,  $S/C = 0.55$   
pH = 9.5 时, 100%  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ,  $S/C = 0.5$   
式中  $S$ ——每升溶液中硫的总物质的量 (mol);  
 $C$ ——每升溶液中碱的总有效物质的量 (mol)。

钠碱法脱硫一般控制循环槽内 pH 约为 6.5。此时溶液中约 60% 的  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ , 40% 的  $\text{NaHSO}_3$ ,  $S/C = 0.70$ 。

从图 4-18 可知, 当 pH 为 7.1 时,  $\text{SO}_2$  浓度为  $10 \times 10^{-6}$  此时吸收液中 20% 是  $\text{NaHSO}_3$ 、80% 是  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ,  $S/C = 0.6$ 。

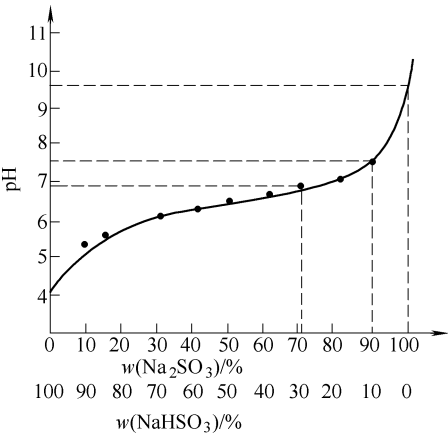


图 4-17 pH 与  $\text{Na}_2\text{SO}_3 - \text{NaHSO}_3$  的关系

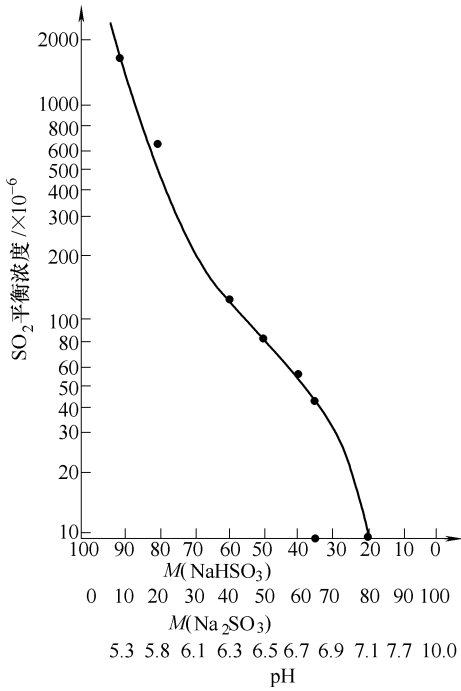


图 4-18  $\text{SO}_2$  平衡浓度与  $\text{Na}_2\text{SO}_3 - \text{NaHSO}_3$  及 pH 的关系

4.4.2 钠碱法脱硫工艺流程

如图 4-19 所示。  
钠碱法脱硫工艺流程与其他湿法脱硫不同的是, 脱硫剂  $\text{NaOH}$  是液态的, 它制备成

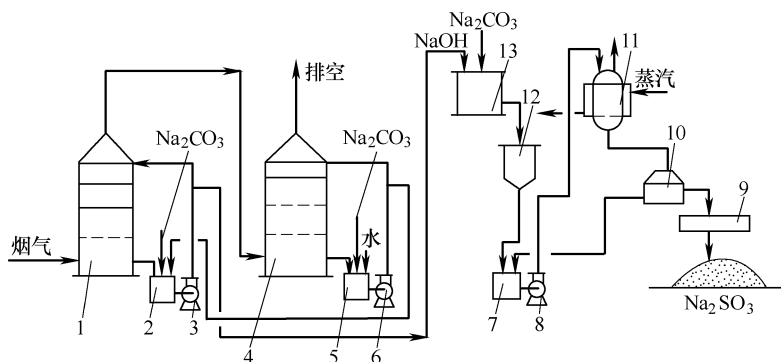


图 4-19 钠碱法工艺流程图

1、4—吸收塔 2、5—循环槽 3、6、8—循环泵 7—中和液储槽 9—干燥器  
10—离心机 11—蒸发器 12—中和液过滤器 13—中和槽

10%~20% 的氢氧化钠溶液而不是浆液，在储存、输送过程中都比较方便、安全，不易产生堵塞等故障。

对于吨位不大的工业及采暖锅炉，脱硫产物  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  或  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  达不到规模产量时，难有经济效益。宜用抛弃法。

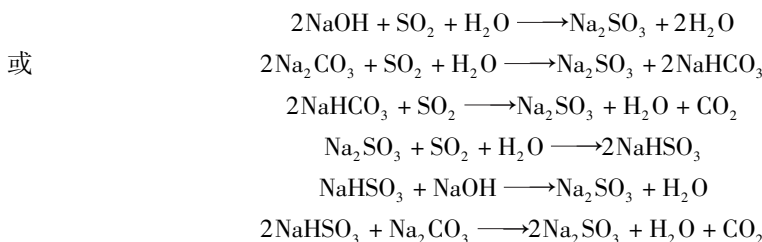
钠碱法脱硫塔可采用高效的板式塔，如筛板塔、穿流板塔、泡沫塔、旋流板塔等。它们的体积比喷雾塔小。

钠碱法在液气比为 3~4 时，可以获得 95% 的脱硫效率。 $\text{Na}/\text{S}$  比可选为 1，是最高效的脱硫方法之一。

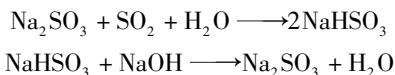
对于大型电站锅炉，有采用亚硫酸钠法脱硫效率达 99%，脱硫产物为  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  的实例。它可作为织物、化纤、造纸工业的漂白剂及脱氯剂、照相显影材料的还原剂。还可用于农药生产中的脱氯剂。

#### 4.4.3 亚硫酸钠法

用  $\text{NaOH}$  或  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液吸收烟气中  $\text{SO}_2$ ，同时副产亚硫酸钠，其化学反应式如下：



脱硫塔内主要反应式：



$\text{Na}_2\text{SO}_3$  不断循环吸收  $\text{SO}_2$  生成  $\text{NaHSO}_3$ 。亚硫酸氢钠加  $\text{NaOH}$  再转化成  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ 。

为了尽可能阻止  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  氧化成  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ，在循环液中加入阻氧化剂对苯二胺和对苯二酚，加入量为循环液质量的 0.025% ~ 0.05%。

亚硫酸钠法脱硫工艺回收  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  的方法是从脱硫塔来的吸收液进入中和结晶器，并加入 50% 的  $\text{NaOH}$  以析出亚硫酸钠，经分离后，在干燥器内用热风进行干燥。自干燥器出来的热风，经旋风分离器及除尘塔排空。捕集液及分离出的滤液均返回脱硫系统。干燥后的  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  由包装机包装成袋。

#### 4.4.4 钠碱法脱硫工艺参数

脱硫过程工艺参数是工艺设计的关键因素。工艺参数中属于设计条件的包括：烟气量、烟气温度、烟气湿度、烟尘浓度、 $\text{SO}_2$  浓度、锅炉大气污染物排放标准，要求达到的除尘效率、脱硫效率等。它们可以作为设计原始资料收集确定。要求达到的除尘效率、脱硫效率可以根据设计条件经过计算得到。此外还有一些调控脱硫工艺过程的参数。

(1)  $\text{Na}/\text{S}$  比 相当于石灰石法的  $\text{Ca}/\text{S}$  比。它与脱硫剂吸收  $\text{SO}_2$  的能力和反应速度密切相关。它的选定与脱硫效率和脱硫剂利用率有关。每种脱硫工艺都有推荐的经验数据供选用。对于钠碱法脱硫， $\text{Na}/\text{S}$  比可选 1.0。

(2) 液气比  $L/G$  液气比是指喷入脱硫塔的脱硫液流量  $L$ ，同脱硫烟气在标准状态的流量  $G$  的比值  $L/G$ 。

由于脱硫效率除了与脱硫剂和工艺密切相关外，还与脱硫塔类型、结构和设计参数密切相关。

$L/G$  还与脱硫阻力、设备投资、运行费用等直接相关。在设计中，必须综合考虑，合理选定。钠碱法脱硫  $L/G$  一般约 3 ~ 5，当要求脱硫效率在 95% 以上时， $L/G$  取较高的值。

(3) 脱硫吸收液的 pH 值控制 4.4.1 中已有阐述，当吸收液 pH 值在 13.0 ~ 8.4 之间时，吸收液是吸收了烟气中大量  $\text{CO}_2$  生成  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 。pH 值自 8.4 至 4.4 之间时是吸收了  $\text{SO}_2$  生成  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  和  $\text{NaHSO}_3$ 。为了高效、经济、安全地脱硫，各种脱硫工艺都有各自要求的 pH 值控制范围。钠碱法控制脱硫塔循环槽内吸收液的 pH 值为 6.5。当循环槽内吸收液  $\text{pH} < 6.5$  时，pH 计传感器发出控制信号，打开电动调节阀向脱硫塔内注入脱硫液  $\text{NaOH}$  溶液，到  $\text{pH} > 6.5$  时，关闭电动调节阀。

(4) 脱硫循环槽中硫酸钠盐浓度 脱硫塔循环槽中的组分主要有  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ 、 $\text{NaHSO}_3$  和  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 。 $\text{Na}_2\text{SO}_3$  和  $\text{NaHSO}_3$  的比例与 pH 值有关，可查图 4-17。 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  与亚硫酸盐的氧化程度有关。

硫酸钠盐的浓度与脱硫吸收液吸收能力相关，同硫酸钠盐饱和和结晶有关。为了获得较高的脱硫效率和控制硫酸钠盐过饱和，一般选定循环槽中硫酸钠 - 亚硫酸钠 - 亚硫酸氢钠总浓度约在 10% ~ 20%。吸收液中钠盐总浓度还与排出脱硫产物的循环液量有关。钠盐总浓度为 12% 时，每排出  $1\text{m}^3/\text{h}$  脱硫循环液，就可以带出  $120\text{kg}/\text{h}$  硫酸钠盐。脱硫循环液中硫酸钠盐总浓度对工艺过程影响在双碱法脱硫工艺中将进一步论述。

#### 4.4.5 钠碱法脱硫废水量及处理方案

钠碱法脱硫过程产生的废水量及经过脱硫过程进、出脱硫塔的水分，进行水平衡计

算可以得知。

下面对进、出脱硫塔的水分分类表述：

烟气带入脱硫塔水分  $W_{Hy}$ ；

除雾器冲洗带入水分  $W_{HM}$ ；

添加脱硫剂带入水分  $W_{HNa}$ ；

鼓风带入水分  $W_{HA}$ ；

向脱硫塔补进工业用水  $W_{HB}$ （如果有需要）；

冲洗脱硫产物所返回水分  $W_{HCH}$ （如果有）；

排放脱硫产物浆液（溶液）带出水分  $W_{HJ}$ ；

排出脱硫产物所带结晶水分  $W_{HJJ}$ ；

脱硫饱和烟气带出水分  $W_{HW}$ ；

排放氯子带出水分  $W_{ClH}$ （如果有必要时）；

废水排放量  $W_{FEI}$ 。

$$W_{ZON} = W_{Hy} + W_{HM} + W_{HNa} + W_{HA} + W_{HB} + W_{HCH} - W_{HJ} - W_{HJJ} - W_{HW} - W_{ClH}$$

$$W_{FEI} = W_{ZON} + W_{HJP}$$

经过水平衡计算，总平衡水量  $W_{ZON}$  是正值则说明每小时向脱硫塔加进了多少吨水，为了维持脱硫塔水位稳定，必须排出相等量的水。这部分排水是废水的一部分。此外脱硫产物排放水  $W_{HJ}$  和结晶水  $W_{HJJ}$  能回流多少，排出多少，其排出部分也是废水组成部分。脱硫产物处理，如冲洗滤饼等的水，如果不回流也计入废水量。当然应尽可能回流，但也必须满足  $Cl^-$  离子浓度  $\leq 20g/L$ 。

钠碱法脱硫水平衡计算示例。

某供热厂 130t/h 锅炉，烟气量  $V_y = 240000m^3/h$ ， $T = 130^\circ C$

$$\text{含湿量比 } x_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_y} = 0.07, C_{S1} = 1000mg/Nm^3$$

$$C_{S2} = 100mg/Nm^3, \text{脱硫塔直径 } D = 5000mm$$

两层折流板除雾器。

水平衡计算如下：

1) 脱硫烟气带入塔内水量  $W_{Hy}$ ：

$$W_{Hy} = V_y \times \rho_{130} \times x_H = 240000 \times 0.8894 \times 0.07kg/h = 14941kg/h \approx 14.94t/h$$

2) 冲洗除雾器水  $W_{HM}$ ：

$$W_{HM} = 2W_{M1Z} + W_{M1P} + W_{M2Z}$$

$$= (2 \times 1178 + 471 + 471)kg/h = 3298kg/h \approx 3.3t/h$$

3) 排出脱硫产物带出水量  $W_{HJ}$ ：

脱除  $SO_2$  的重量

$$W_{SO_2} = (C_{S1} - C_{S2}) \times V_y \times \frac{273}{273 + T}$$

$$= (1000 - 100) \times 240000 \times \frac{273}{273 + 130}mg/h = 146322580mg/h \approx 146.3kg/h$$

生成  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  量为  $W_{\text{Na3}}$

$$W_{\text{Na3}} = \frac{M_{\text{Na3}}}{M_{\text{SO}_2}} \times W_{\text{SO}_2} = \frac{126}{64} \times 146.3 \text{ kg/h} = 288 \text{ kg/h}$$

式中  $M_{\text{Na3}}$  ——  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  的相对分子质量；

$M_{\text{SO}_2}$  ——  $\text{SO}_2$  的相对分子质量。

强制氧化成  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  量为  $W_{\text{Na4}}$

$$W_{\text{Na4}} = \frac{M_{\text{Na4}}}{M_{\text{Na3}}} \times W_{\text{Na3}} = \frac{142}{126} \times 288 \text{ kg/h} = 325 \text{ kg/h}$$

式中  $M_{\text{Na4}}$  ——  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  的相对分子质量。

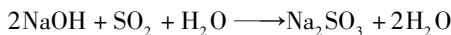
按脱硫吸收液浓度 10% 计算，脱硫产物排放量  $W_{\text{JP}}$

$$W_{\text{JP}} = \frac{W_{\text{Na4}}}{0.1} = \frac{325}{0.1} \text{ kg/h} = 3250 \text{ kg/h}$$

$$\text{带出水分 } W_{\text{HJ}} = \frac{W_{\text{Na4}} - W_{\text{Na4}} \times 0.1}{0.1} = \frac{325 - 32.5}{0.1} \text{ kg/h} = 2925 \text{ kg/h} \approx 2.9 \text{ t/h}$$

4) 脱硫注入 20%  $\text{NaOH}$  溶液带入水分  $W_{\text{HNa}}$ ：

计算脱硫需用  $\text{NaOH}$  的重量  $W_{\text{Na}}$



$$W_{\text{Na}} = \frac{M_{\text{Na}}}{M_{\text{SO}_2}} \times W_{\text{SO}_2} = \frac{80}{64} \times 146.3 \text{ kg/h} = 182.9 \text{ kg/h}$$

式中  $M_{\text{Na}}$  ——  $\text{NaOH}$  的相对分子质量；

$M_{\text{SO}_2}$  ——  $\text{SO}_2$  的相对分子质量。

脱硫注入 20%  $\text{NaOH}$  溶液重量  $W_{\text{Na}}$

$$W_{\text{Na}} = \frac{W_{\text{Na}}}{0.2} = \frac{182.9}{0.2} \text{ kg/h} = 914.5 \text{ kg/h}$$

$$\text{带入水分 } W_{\text{HNa}} = \frac{W_{\text{Na}} - 0.2 W_{\text{Na}}}{0.2} = \frac{182.9 - 0.2 \times 182.9}{0.2} \text{ kg/h} = 732 \text{ kg/h}$$

5) 强制氧化空气带入水量  $W_{\text{HA}}$ ：

$$\text{鼓风量 } Q_k = 10 \text{ m}^3/\text{min} \times 60 = 600 \text{ m}^3/\text{h}$$

$t = 20^\circ\text{C}$  时，饱和空气含湿量为  $14.7 \text{ g/kg}$ （干空气）（查表 13-14）

$$W_{\text{HA}} = x_{\text{tw}} \times Q_k \times \rho_{20} = 14.7 \times 600 \times 1.195 \text{ g/h} = 10539 \text{ g/h} = 10.5 \text{ kg/h}$$

式中  $x_{\text{tw}}$  ——  $t = 20^\circ\text{C}$  饱和空气含湿量，为  $14.7 \text{ g/kg}$ （干空气）；

$\rho_{20}$  ——  $t = 20^\circ\text{C}$  饱和空气密度，为  $1.195 \text{ kg/m}^3$ 。

6) 脱硫产物带走的结晶水  $W_{\text{HJ}}$ ：

在室温下结晶生成  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 。

$$W_{\text{HJ}} = \frac{10M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{Na4}}} \times W_{\text{Na4}} = \frac{180}{142} \times 325 \text{ kg/h} = 412 \text{ kg/h}$$

7) 脱硫后饱和烟气带出水量  $W_{\text{HW}}$

$$W_{\text{HW}} = V_y \times \rho_{130} \times (1 - x_{\text{H}_2\text{O}}) \times x_{\text{tw}} + V_{\text{Oy}} \times 0.075$$

$$= \left( 240000 \times 0.8894 \times 0.93 \times 0.078 + 240000 \times \frac{273}{403} \times 0.075 \right) \text{kg/h}$$

$$= (15.5 + 0.012) \text{t/h} = 15.5 \text{t/h}$$

式中  $\rho_{130}$ ——烟气在露点  $130^\circ\text{C}$  时的密度 ( $\text{kg/m}^3$ );

$x_{\text{tw}}$ ——饱和状态  $t_{\text{cl}} = 48^\circ\text{C}$  烟气含湿量, 查表 13 - 14 为  $0.078 \text{kg/kg}$  (烟气);

$V_{0y}$ ——标准状态下的烟气流量 ( $\text{Nm}^3/\text{h}$ );

$0.075$ ——每  $\text{Nm}^3$  烟气夹带水雾 ( $\text{g/Nm}^3$ )。

带入为“+”带出为“-”。

$$W_{\text{ZON}} = W_{\text{Hy}} + W_{\text{HM}} + W_{\text{HP}} + W_{\text{HNa}} + W_{\text{HA}} + W_{\text{HJ}} + W_{\text{HW}}$$

$$= (14.94 + 3.3 - 2.9 + 0.73 + 0.01 - 0.41 - 15.5) \text{t/h} = 0.17 \text{t/h}$$

经过水平衡计算可知, 脱硫过程每小时增加  $0.17 \text{t}$  水, 为了保持脱硫塔水位稳定, 每小时向塔外排放  $0.17 \text{t}$  工业用水。

排出脱硫产物带出水量  $W_{\text{HJ}} = 2.9 \text{t/h}$ , 其中经过滤后,  $50\%$  返还制浆槽。 $10\%$  含在  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  粉体内, 经干燥后与结晶水一起蒸发掉。还有  $40\%$  为排放废水, 所以  $W_{\text{HJP}} = 0.4 W_{\text{HJ}} = 0.4 \times 2.9 \text{t/h} = 1.16 \text{t/h}$ 。所以  $W_{\text{FEI}} = W_{\text{ZON}} + W_{\text{HJP}} = (0.17 + 1.16) \text{t/h} \approx 1.3 \text{t/h}$

循环槽中的氯离子, 主要是从烟气中进入吸收液的, 在 4.1.4 中 (5) 已有阐述, 为了单纯排出烟气中进入吸收液的氯离子, 没有其他过滤液回流脱硫塔带入氯离子, 为了保持  $\text{Cl}^-$  离子  $\leq 20 \text{g/L}$ , 只要排出  $W_{\text{ClH}} = 0.39 \text{t/h}$  水就够了。上例虽然有  $1.45 \text{t/h}$  脱硫产物过滤液返回制浆槽, 但其中  $\text{Cl}^-$  离子含量是控制在  $\leq 20 \text{g/L}$  的, 所以不会增加脱硫塔内循环吸收液的  $\text{Cl}^-$  离子浓度。

8) 废水处理方案:

① 如果锅炉房有水力除灰系统, 可作为补充水排至水力除灰沉渣池。

② 按 GB 8978《污水综合排放标准》处理达标排放。一般采用加药混凝沉淀过滤去除重金属和有害物再曝气处理后排放。

③ 由于废水量较小, 可与企业内的其他污水混合稀释后排放。

#### 4.4.6 钠碱法脱硫技术特点

1) 脱硫效率很高, 一般为  $95\%$ , 甚至可达  $98\%$  以上。

2) 钠碱是强碱, 它与  $\text{SO}_2$  的亲合力相当高, 吸收反应速度快。脱硫液气一般为 3, 要达到  $98\%$  的脱硫率时可选 4。低液气比可以节省运行费用和设备投资。

3) 钠碱法循环吸收液、脱硫产物  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  和  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  都是溶解物, 具有良好的工艺条件, 长期运行脱硫系统无结垢堵塞现象。脱硫塔可用穿流板塔、泡沫塔、旋流板塔等。

4) 能适应脱硫负荷变化, 脱硫效率不降, 操作稳定。

5) 脱硫系统阻力适中, 从增压风机至烟囱阻力损失为  $2000 \text{Pa}$ 。

6) 脱硫副产物  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  纯度高, 当烟气中氧浓度为  $2\% \sim 7\%$  时, 产品纯度为  $90\% \sim 97\%$ , 加入阻氧剂后, 即使在高氧气浓度下, 也能得到高纯度产品。一般阻氧剂隔  $15 \sim 16$

天添加一次。 $\text{Na}_2\text{SO}_3$  用途广泛。

7) 钠碱法做成抛弃法在经济上是难承受的。一般都应做成回收  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  和  $\text{SO}_2$ , 副产品 (或硫酸) 来弥补运行费用。

8) 亚硫酸钠法的操作参数如下:

- ① 吸收塔出口吸收液的 pH 值应保持在约 6.5, 以防止烟气中的  $\text{CO}_2$  被吸收下来。
- ② 吸收塔进口吸收液的成分 15%  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ 、8%  $\text{NaHSO}_3$ , 总亚硫酸盐浓度为 23%。
- ③  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  占总亚硫酸盐的 65%,  $\text{NaHSO}_3$  占 35%。此时  $S/C=0.655$ ,  $\text{pH}=6.5$ 。
- ④ 使用阻氧剂为对苯二胺和对苯二酚, 使用量为 0.025% ~ 0.05%。

#### 4.4.7 钠碱法脱硫设计注意事项

1) 钠碱法脱硫剂可用  $\text{NaOH}$  或  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 。采用的液态  $\text{NaOH}$  一般最高浓度为 60%,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  为细粉料。它们在水中有较大溶解度, 可以制备成 20% 左右的溶液供脱硫使用。

2) 钠碱有较强的腐蚀性, 储存罐、输送泵、管道都应采用防钠碱腐蚀的。详见第 11 章烟气脱硫防腐设计和材料。

3) 由于钠碱脱硫剂制备成溶解液体, 从储存、制备、输送都比较方便、可靠。这在设计上简便, 且节省投资。

4) 钠碱法脱硫不易发生系统结垢堵塞, 但是应严格控制脱硫循环槽内吸收液 pH 值为 6.5。

5) 钠碱法脱硫液气比  $L/G$  一般为 3, 脱硫效率为 90%,  $\text{Na}/\text{S}$  可选 1。

6) 对于热电厂  $\geq 65\text{t/h}$  锅炉, 一般都配装静电除尘器, 可在其后设增压风机后, 再把烟气送脱硫塔, 对于要求烟尘浓度  $\leq 30\text{mg}/\text{Nm}^3$  的项目, 也必须先经袋式除尘或静电除尘后, 再进入脱硫塔。经过除尘后的烟气方可采用穿流板塔、泡沫塔、旋流板塔。不然烟尘沾在塔板上堵塞孔眼, 有碍安全正常运行。

7) 钠碱法回收  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  或硫酸 (或  $\text{SO}_2$ ), 一般都不采用强制氧化工艺, 反而要添加对苯二胺、对苯二酚阻氧剂, 以减少  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  的生成获得更高的  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  的产出率。

#### 4.4.8 钠碱法锅炉烟气脱硫方案及投资估算

##### 1. 工程概况

北京市 × × 环保公司根据国家  $\text{SO}_2$  总量控制要求和锅炉污染物排放标准及业主要求, 拟对山西 × × 厂一台 220t/h 燃煤锅炉烟气实施脱硫工程。本项目实施后将对周围环境特别是对大气污染物的控制治理以及改善周围地区的空气质量起到至关重要的作用, 可获得巨大的环境效益和一定的经济效益。北京市 × × 环境公司采用钠碱法脱硫工艺和喷淋旋流塔烟气脱硫技术, 提出该烟气处理的解决方案。

##### 2. 方案设计技术原则

1) 从技术、经济及装置运行稳定性、可靠性上, 考虑采用  $\text{NaOH}$  作为脱硫剂, 保证系统脱硫效率在 95% 以上。达到国家和地方的锅炉烟气排放标准。



2) 采用 NaOH 碱作为脱硫剂, 可以从根本上避免产生结垢堵塞现象, 并且根据国家相关的政策法规, 低浓度的  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  溶液没有限制排放。故采用钠碱法进行脱硫可简化脱硫工艺系统, 减少一次性投资。

3) 采用喷淋旋流洗涤方式可在较小的液气比下获得较大的液气接触面积, 进而获得较高的脱硫除尘效率; 并且, 较小的液气比可以减少循环液量, 从而减少循环泵的数量或型号, 降低运行成本。对整个系统都考虑了防腐措施, 反应塔内壁、管道、泵、搅拌器、储罐内壁、烟道等部位都采用性能良好的防腐材料进行防腐处理。

4) 保证本脱硫装置连续运行, 年运行时间满足业主要求。同时, 设置旁路烟道, 以保证锅炉及脱硫系统的安全生产和正常运行。

5) 为确保整个系统连续可靠运行, 应采用优良可靠的辅机设备, 以确保脱硫系统的可靠运行。

6) 按现有场地条件, 因地制宜布置脱硫系统设备, 力求紧凑合理, 节约用地。

7) 最大限度地循环利用脱硫液, 但是由于烟气中含有一定浓度的盐和  $\text{Cl}^-$  离子, 反应塔内部分水分蒸发, 因此形成循环液中盐和  $\text{Cl}^-$  离子的积累, 由于过高的盐和  $\text{Cl}^-$  离子浓度会降低脱硫效率和腐蚀反应装置, 所以必须达标排放少量的脱硫液, 并补充少量工业用水。

8) 由于脱硫产物亚硫酸钠产量较小, 且回收要建回收设备, 增加一次投资。故本项目选用抛弃法。

### 3. 设计条件

锅炉烟气参数如下:

- 1) 烟气温度:  $150^\circ\text{C}$ ;
- 2) 烟气量:  $400000\text{m}^3/\text{h}$  ( $258000\text{Nm}^3/\text{h}$ );
- 3) 烟尘浓度:  $500\text{mg}/\text{Nm}^3$ ;
- 4)  $\text{SO}_2$  浓度:  $2000\text{mg}/\text{Nm}^3$ ;
- 5) 现场锅炉引风机型号;
- 6) 循环沉淀池;
- 7) 提供使用的场地面积及方位。

注: 如无法提供第 4) 条数据, 可改为提供燃料消耗量和燃料含硫量来进行估算; 新建项目则不必提供第 5)、6) 条内容。

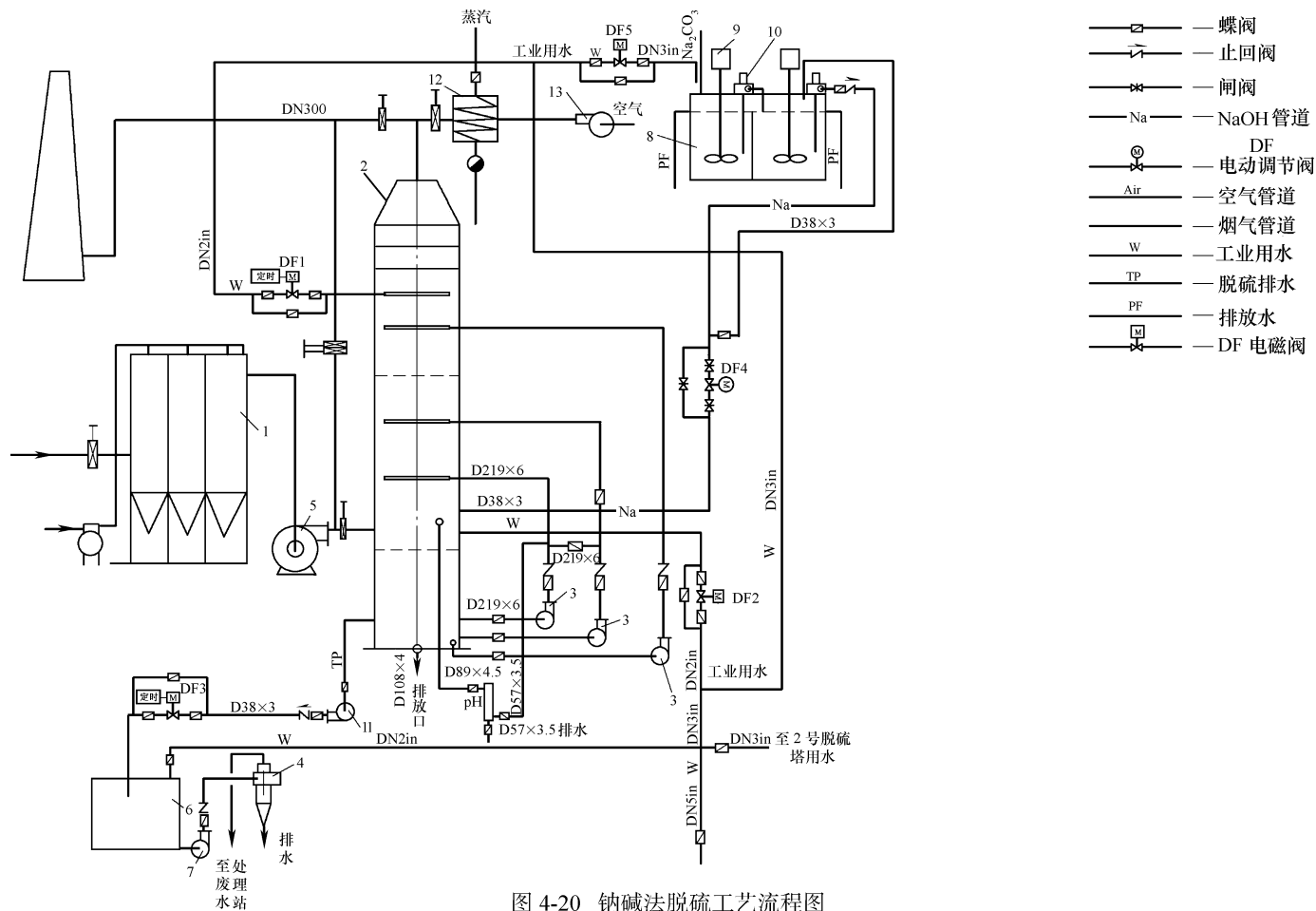
### 4. 要求达到的排放标准

- 1) 烟尘浓度:  $100\text{mg}/\text{Nm}^3$ ;
- 2)  $\text{SO}_2$  浓度:  $100\text{mg}/\text{Nm}^3$ ;
- 3) 烟气黑度: 1 级;
- 4) 烟气温度: 加热至  $80^\circ\text{C}$ 。

### 5. 脱硫除尘工艺流程说明

钠碱法脱硫工艺流程如图 4-20 所示。





## (1) 脱硫除尘系统运行参数

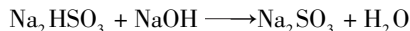
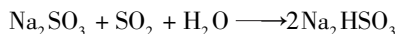
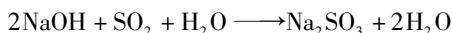
- 1) NaOH 耗量 613kg/h;
- 2) 循环吸收液亚硫酸盐浓度 15%;
- 3) 取  $L/G=3$ , 循环吸收液量  $774\text{m}^3/\text{h}$ ;
- 4) 循环吸收液不曝气处理;
- 5) 废水量为  $1\text{m}^3/\text{h}$ 。

(2) 脱硫剂制备 厂方自有的 NaOH 溶液用碱液泵打入稀释罐中, 加水搅拌成 15% 的溶液, 再由碱液泵送至脱硫使用, 每次配制可供 4h 使用量。

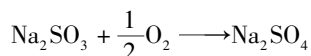
(3) 吸收塔及脱硫过程 吸收塔的结构为逆流喷雾泡沫洗涤塔, 由于采用 NaOH 吸收不易发生结垢堵塞, 采用喷雾泡沫方式可在较小的液气比下获得较大的液气接触面积, 进而获得较高的脱硫除尘效率; 并且较小的液气比可以减少循环液量, 从而减少循环泵的数量, 降低运行成本。锅炉排烟经布袋除尘器 (北京地方标准要求) 约可除去 99% 烟尘后进入脱硫除尘器, 用特制喷嘴喷雾洗涤进行第一次除尘脱硫。烟气接着上升经过第二层喷嘴组的喷雾洗涤吸收。由于洗涤液被特制的螺旋喷嘴雾化成比表面积极大的雾滴, 可以同烟气进行充分的传质、吸收、涤尘过程, 喷淋吸收液由吸收塔循环泵供给。净化后的烟气再上升经过一层泡沫板, 再一次进行脱硫和旋流脱水后进入烟道。

由于经过湿法洗涤后烟气温度已达露点温度 (约  $48^\circ\text{C}$ ), 流经烟道引风机和烟囱时, 会不断产生冷凝水, 腐蚀沿途设施及产生白烟。一般应进行烟气再加热, 将烟气从  $48^\circ\text{C}$  加热到  $80^\circ\text{C}$ 。本方案采用蒸汽加热器将  $20^\circ\text{C}$  空气加热到  $250^\circ\text{C}$ 。再同脱硫后烟气混合达到  $80^\circ\text{C}$ 。这种烟气升温方案比用烟气余热加热系统在防止加热器腐蚀和系统运行可靠性方面要优越, 比较适用于工业锅炉脱硫后烟气的加热升温。否则, 对于在露点温度下排放的烟气, 烟道, 引风机, 烟囱都必须采取防水和防酸腐蚀的措施。即在烟囱和烟道, 内喷涂防水耐酸涂层。引风机也是应选用耐腐蚀的。

## (4) 脱硫反应 脱硫过程主要化学反应如下:



副反应:



洗涤吸收液吸收  $\text{SO}_2$  后, pH 值迅速下降, 通过 pH 计检测控制注入 NaOH 溶液调整到 pH 为 6.5 后循环使用。

(5) 脱硫废液废渣的处理 脱硫塔中生成的反应产物亚硫酸钠和硫酸钠, 有较大溶解度, 实际上吸收液中除了烟尘外, 很少有固体脱硫废渣产生。只要控制循环液中  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  含量在 10% ~ 12% 就可以。对于本方案的废水处理量实际控制在  $5.5\text{m}^3/\text{h}$  左右, 经混凝, 曝气沉淀处理可使其色度、pH、SS、COD、重金属等指标均能达标排放。本厂脱硫除尘废水也可直接排送到工厂废水处理站。

(6) 烟气升温蒸汽耗量 烟气量  $Q_0 = 258000\text{Nm}^3/\text{h}$ ,  $T = 48^\circ\text{C}$  加热至  $80^\circ\text{C}$ , 求需要加热量和饱和蒸汽耗量加热量  $\Delta Q = H_{80} - H_{48}$ , 烟气的焓可以查表 13 - 11 或用  $C_p T$  计算得到。

烟气成分  $V_{\text{CO}_2} = 1.01\text{Nm}^3/\text{kg}$ ,  $V_{\text{SO}_2} = 0.0123\text{Nm}^3/\text{kg}$ ,  $V_{\text{N}_2} = 5.57\text{Nm}^3/\text{kg}$ ,  $V_{\text{O}_2} = 0.296\text{Nm}^3/\text{kg}$   
 $V_{\text{H}_2\text{O}} = 0.553\text{Nm}^3/\text{kg}$ ,  $V_y = (1.01 + 0.0123 + 5.57 + 0.296 + 0.553)\text{Nm}^3/\text{kg} = 7.44\text{Nm}^3/\text{kg}$   
 $h = (1.01/7.44) h_{\text{CO}_2} + (0.012/7.44) h_{\text{SO}_2} + (5.57/7.44) h_{\text{N}_2} + (0.296/7.44) h_{\text{O}_2} +$   
 $(0.553/7.44) h_{\text{H}_2\text{O}}$

$h_{80} = 0.136 \times 1.6802 \times 80 + 0.749 \times 1.2956 \times 80 + 0.04 \times 1.3153 \times 80 + 0.07 \times 1.5030 \times$   
 $80 + 0.0016 \times 1.6802 \times 80 = 108.75\text{kJ}/\text{m}^3$

$h_{48} = 65\text{kJ}/\text{m}^3$

$H_{80} = h_{80} \times 258000 \times (353/273) = 108.75 \times 333604 = 36279435\text{kJ}/\text{h}$

$H_{48} = h_{48} \times 258000 \times (321/273) = 65 \times 303363 = 19718571\text{kJ}/\text{h}$

$\Delta Q = \Delta H = H_{80} - H_{48} = 36279435 - 19718595 = 16560864\text{kJ}/\text{h}$

蒸汽耗量  $G = \Delta Q/h'' = 16560864/3070 = 5394 = 5.4\text{t}/\text{h}$  ( $h''$ 查表 13 - 9 得)

6. 主要脱硫及配套设备报价

序号	名称	型号及规格	数量/台	价格 (万元)
1	脱硫塔	φ6400mm×26000mm (花岗岩)	1	262
2	循环泵	$Q = 250\text{m}^3/\text{h}$ $N = 45\text{kW}$ $H = 39\text{m}$	4	4×4(=16)
3	脱水器	内置		含脱硫塔内
4	循环水管, 阀门, 附件	φ219mm×6mm, 200m	1	22.8
5	烟道闸板	4m×2m, $D = 3\text{m}$	2+1	36
6	排烟道	φ3000mm, 50m (铸石涂层防腐)	1	40
7	电气自控设备	电控柜、电缆、电气设备、自控仪表设备等	1	65
8	排水管	φ57mm×3.5mm, 50m (S304)	2	1
9	排水泵	$Q = 10\text{m}^3/\text{h}$ $H = 30\text{m}$ $N = 3\text{kW}$	2	2×0.4(=0.8)
10	加热送风机	$60500\text{m}^3/\text{h}$ , $N = 37\text{kW}$	1	7
11	碱液泵	$Q = 10\text{m}^3/\text{h}$ $H = 30\text{m}$ $N = 4\text{kW}$	2	1
12	空气加热器	$34000\text{m}^3/\text{h}$ , 20/250℃	1	40
13	排水池	3m×4m×2m	1	2.4
14	增压风机	$Q = 200000\text{m}^3/\text{h}$ $N = 250\text{kW}$	2	40
合计				534

7. 脱硫工程估价

序号	类别	名称	计算价格(万元)
1	(一) 直接费用	脱硫及配套设备	464
2		电气及自控	65
3		土建	30
4		设备安装费	$(1+2) \times 15\% = 79.3$
5		运杂费	$(1+2) \times 3\% = 15.9$
6		设备调试及培训费	$(1+2) \times 5\% = 26.4$
合计			680.6
7	(二) 间接费用	工程及非标设计费	$(一) \times 5.5\% = 37.4$
8		税金	$[(一)+7] \times 5.5\% = 39.5$
9		不可预见费	$[(一)+7] \times 5\% = 35.9$
合计			112.8
总计			$(一+二) = 793.4$

8. 运行费用（按一年运行 7000h 计，一台 220t/h 锅炉计算）。

1) 脱硫剂 NaOH 的费用：

$$613\text{kg/h} \times 7000\text{h} \times 1820 \text{ 元/t} = 781 \text{ 万元/年}$$

2) 电费：

$$559\text{kW} \times 7000\text{h} \times 0.4 \text{ 元/(kW} \cdot \text{h)} = 156.5 \text{ 万元/年}$$

3) 水费：

$$10\text{m}^3/\text{h} \times 7000\text{h} \times 1 \text{ 元/m}^3 = 7 \text{ 万元/年}$$

4) 人工费：

$$4 \text{ 人} \times 1.2 \text{ 万元/年} \cdot \text{人} = 4.8 \text{ 万元/年}$$

因此全年运行费用合计  $(781 + 156.5 + 7 + 4.8) \text{ 万元} = 949.3 \text{ 万元}$ 。

所以每千克 SO<sub>2</sub> 脱除费用  $= 9493000 \text{ 元} \div 3431000 = 2.77 \text{ 元}$

9. 经济效益及社会效益

1) 每年可削减 SO<sub>2</sub> 排放 3431t。

2) 每年可少交排污费 412 万元。

3) 每年可减少 SO<sub>2</sub> 污染引起的综合经济损失  $3431\text{t} \times 4300 \text{ 元/t} = 1475.3 \text{ 万元}$

10. 钠碱法脱硫水平衡计算

已知： $Q = 400000\text{m}^3/\text{h}$ ， $T_1 = 150^\circ\text{C}$ ， $x_H = 0.07$

$$C_{S1} = 2000\text{mg/Nm}^3, C_{S2} = 100\text{mg/Nm}^3$$

脱硫后烟气温度 48℃，达到饱和状态。

脱硫塔直径  $D = 3500\text{mm}$

1) 脱硫烟气带入塔内的水量  $W_{\text{Hy}}$ ：

$$W_{\text{Hy}} = V_y \times \rho_{150} \times x_{\text{H}} = 400000 \times 0.8490 \times 0.07\text{kg/h} = 23772\text{kg/h} = 23.8\text{t/h}$$

2) 冲洗除雾器水  $W_{\text{HM}}$ ：

$$W_{\text{HM}} = 2 \times 0.785 \times 3.5^2 \times 1\text{L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2) \times 60 = 1154\text{L}/\text{min} = 1.2\text{t}/\text{min}$$

3) 排出脱硫产物带出水量  $W_{\text{HP}}$ ：

$$\text{脱除 } \text{SO}_2 \quad W_{\text{SO}_2} = (2000 - 100) \times 400000 \times \frac{273}{423}\text{kg/h} = 490.4\text{kg/h}$$

$$\text{生成 } \text{Na}_2\text{SO}_3 \quad W_{\text{Na}_3} = \frac{M_{\text{Na}_3} \times W_{\text{S}}}{M_{\text{SO}_2}} = \frac{126 \times 490.4}{64}\text{kg/h} = 965.5\text{kg/h}$$

按脱硫吸收液浓度 15% 计算排液量  $W_{\text{JP}}$

$$W_{\text{JP}} = \frac{W_{\text{Na}_3}}{0.15} = \frac{965.5}{0.15}\text{kg/h} = 6436\text{kg/h} = 6.4\text{t/h}$$

$$\text{排出水量 } W_{\text{HJP}} = \frac{W_{\text{Na}_3} - W_{\text{Na}_3} \times 0.15}{0.15} = \frac{965.5 - 965.5 \times 0.15}{0.15}\text{kg/h} = 5471\text{kg/h} = 5.5\text{t/h}$$

4) 注入 15% NaOH 钠溶液  $W_{\text{Na}} = 4087\text{kg/h}$  带入水量  $W_{\text{HNa}} = 3474\text{kg/h}$

5) 脱硫烟气带出水量  $W_{\text{HW}}$ ：

$$W_{\text{HW}} = V_y \times \rho_{48} \times x_{\text{H}} = 400000 \times \frac{321}{423} \times 1.1294 \times 0.076\text{t/h} = 26\text{t/h}$$

$$W_{\text{ZON}} = W_{\text{Hy}} + W_{\text{HM}} - W_{\text{HJP}} + W_{\text{HNa}} - W_{\text{HW}} = (23.8 + 1.2 - 5.5 + 3.47 - 26)\text{t/h} = -3.0\text{t/h}$$

经过计算可知，脱硫过程每小时脱硫塔减少水量为 3.0t。为了保持塔内液位稳定，脱硫塔必须每小时补充工业用水 3.0t。由于本示例是钠碱抛弃法，脱硫排出脱硫产物的排水 5.5t/h，不再返回脱硫塔。所以废水量  $W_{\text{FEI}} = 5.5\text{t/h}$ 。循环吸收液  $\text{Cl}^-$  离子浓度主要是烟气中转入循环吸收液，经过 4.1.6 中 5. 条的计算，为了维持循环槽中氯离子  $\leq 20\text{g/L}$ ，每小时排出 0.39t/h 循环液并补充相等工业用水就能满足要求。所以排放  $W_{\text{FEI}} = 5.5\text{t/h}$ 。

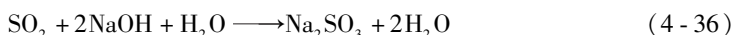
## 4.5 双碱法脱硫

石灰法和石灰石法脱硫虽然脱硫剂较便宜，但容易结垢。钠碱法脱硫效率高，运行可靠，不易结垢，但钠碱较贵。回收脱硫产品  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  或硫酸要建设回收产品的生产线，需要较大的资金投入。于是就想到钠碱法脱硫吸收液中生成的  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  和  $\text{NaHSO}_3$ ，用  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  再生  $\text{NaOH}$ 。再用于脱硫并获得  $\text{CaSO}_3$ ，再氧化生成  $\text{CaSO}_4$  石膏。由于回收石膏的系统相对较简单，操作较容易。双碱法便把钠碱法和石灰石-石膏法两个脱硫方法的优点结合起来，把两种方法的缺点相互弥补，成为一种很有发展前途的脱硫工艺。主要课题则是要减少  $\text{NaOH}$  的补充量或阻止  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  的生成量。

### 4.5.1 基本原理与化学反应式

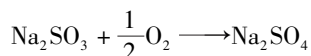
双碱法采用 NaOH 或 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 溶液（第一碱）吸收烟气中 SO<sub>2</sub>，再用石灰（第二碱）再生。再生后的溶液继续循环使用，再生得到 CaSO<sub>3</sub> 强制氧化成石膏，即 CaSO<sub>4</sub>。

吸收过程的化学反应与亚硫酸钠法相同。



吸收开始时，主要按（4-36）进行生成 Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>，进而 Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> 继续吸收 SO<sub>2</sub> 生成酸式盐 NaHSO<sub>3</sub>。实际吸收反应以（4-37）为主。

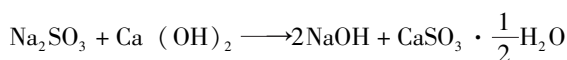
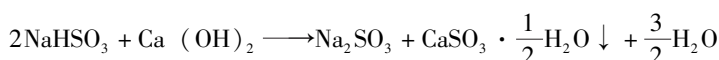
由于烟气中有 O<sub>2</sub> 存在，将产生副反应：



由上述反应可知，在一般情况下，循环吸收液中均含有 Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>、NaHSO<sub>3</sub> 和 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>，但 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 含量较少，因而吸收液的主要成分为 Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> 和 NaHSO<sub>3</sub>。NaHSO<sub>3</sub> 是酸式盐，不再具有吸收 SO<sub>2</sub> 的能力，而吸收液中的 Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> 能吸收 SO<sub>2</sub>。吸收溶液中 NaHSO<sub>3</sub> 和 Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> 的比例关系通常以 S/C 表示。S 为每升吸收溶液中硫的总摩尔数；C 则为吸收液中钠的有效摩尔数，即与亚硫酸盐和亚硫酸氢盐结合的钠的总摩尔数。当吸收液全部为 Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> 时，S/C = 0.5，对 SO<sub>2</sub> 的吸收能力最大，当吸收液中的 Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> 全部转化为 NaHSO<sub>3</sub> 时，S/C = 1.0，对 SO<sub>2</sub> 没有吸收能力。

因此，当循环吸收液中 NaHSO<sub>3</sub> 含量达到一定值（S/C = 0.9）时，吸收液就应进行再生。

再生过程的化学反应为：



将再生过程的亚硫酸钙（CaSO<sub>3</sub> ·  $\frac{1}{2}$ H<sub>2</sub>O）氧化，可制得石膏（CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O）。

### 4.5.2 双碱法工艺流程

双碱法脱硫工艺流程如图 4-21 所示。

锅炉排烟经过静电除尘器除去 99% 的烟尘后进入脱硫增压风机增压后，再进入喷淋泡沫脱硫塔。该塔为两层喷雾和一层喷淋多孔板泡沫塔板组合而成。塔体上部设旋流板除雾器或折流板除雾器。经过二次除尘和脱硫后的烟气采用混合升温法把烟气从 48℃ 加热到 80℃。把空气加热到 250℃，用鼓风机鼓入脱硫后烟道内热源采用锅炉自产过热蒸汽。经过计算把 41800m<sup>3</sup>/h 的常温空气鼓入蒸汽加热器升温到 220℃，与 286000m<sup>3</sup>/h 48℃ 烟气混流及其温度为 80℃。升温到 80℃ 主要是为了节省能量，同时烟

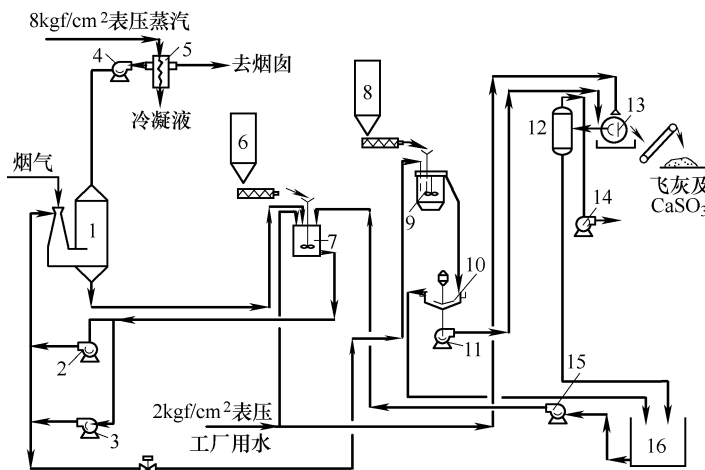


图 4-21 双碱法脱硫工艺流程图

- 1—洗涤器 2—循环泵 3—备用泵 4—风机 5—再热器 6—纯碱储斗  
7—循环槽 8—石灰储斗 9—石灰反应器 10—增稠器 11—增稠器底流泵 12—过滤液受槽  
13—回转过滤器 14—过滤器真空泵 15—滤液返回泵 16—中间槽

气已是远离饱和状态的干烟气，其腐蚀性已大为降低，白烟状态已基本消失。

脱硫用 NaOH 溶液浓度为 20%，由 NaOH 溶液搅拌槽和储存槽制备，由碱液泵送脱硫塔使用。

脱硫循环吸收液浓度为 15%，比石灰法稍高。因为 NaOH 有较大溶解度， $\text{NaHSO}_3$  和  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  有较大溶解度。钠碱具有很强吸收  $\text{SO}_2$  的能力，可以取较高的吸收液含亚硫酸钠盐的浓度，也不至于影响脱硫效率。

双碱法脱硫与钠碱法脱硫的不同之处是钠碱法的脱硫产物是亚硫酸钠或硫酸（或  $\text{SO}_2$ ）。而双碱法是把脱硫生成的  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  和  $\text{NaHSO}_3$ ，用  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  再生还原出 NaOH 溶液，再用于脱硫。所以在工艺流程中要设 NaOH 再生器，和  $\text{CaSO}_3$  和  $\text{CaSO}_4$  浓缩并经脱水过滤设备。

双碱法脱硫过程中，要尽可能减少  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  氧化成  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ，因为  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  是不能再生出 NaOH 的，这部分 Na 碱要用新 NaOH 来补充，就会增加运行费用。

### 4.5.3 双碱法脱硫工艺参数

双碱法脱硫工艺参数是工艺设计的关键因素。工艺参数中属于设计条件的包括烟气流、烟气温度  $T$ 、烟尘浓度、 $\text{SO}_2$  浓度、锅炉烟气污染物排放标准，要求达到的除尘效率、脱硫效率等。它们可以作为设计原始资料收集确定。要求达到的除尘效率、脱硫效率可以根据设计条件经过计算得到。此外还有一些调控工艺过程的参数。

(1) 钠碱吸收的 Na/S 比 相当于石灰的 Ca/S 比。由于钠碱具有强的吸收  $\text{SO}_2$  能力和很快的反应速度，Na/S 比可选 1.0。

(2) 液气比  $L/G$  液气比是指喷入脱硫塔的脱硫循环液流量  $L$  与要脱硫的烟气流量  $G$  的比值  $L/G$ 。 $L/G$  一般应根据工业应用实测的  $\eta_s - L/G$  曲线选用, 在缺少该资料时, 可参照同类工艺已运行的脱硫数据选定。对于钠碱双碱法  $L/G$  一般可取 3。

$L/G$  是一个对脱硫有多方面影响的参数, 如阻力、设备投资、运行费用等。在设计中必须综合考虑, 合理选定。

(3) 脱硫吸收液 pH 值控制 在钠碱法脱硫工艺中已说明, 当吸收液 pH 值在 13.0 ~ 8.4 之间, 吸收液吸收的是烟气中大量的  $\text{CO}_2$  生成  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 。pH 值 8.4 ~ 4.4 之间, 吸收  $\text{SO}_2$  生成  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  和  $\text{NaHSO}_3$ 。为了高效、经济、安全地脱硫, 各种脱硫工艺都有各自的 pH 值控制范围。对于钠碱双碱法脱硫的吸收过程类同于钠碱法, 脱硫吸收液在循环槽内的 pH 值控制在 6.5。

在再生过程中, 再生反应器中的浆液 pH 值控制在 8.5, 温度  $50^\circ\text{C}$ , 再生反应能在几分钟内完成。

(4) 脱硫循环槽中亚硫酸钠盐浓度 脱硫循环槽中亚硫酸盐浓度值把双碱法脱硫划分为浓碱法和稀碱法。当吸收液中活性钠浓度低于或等于  $0.15\text{mol/L}$  时, 为稀碱法; 当吸收液中活性钠浓度  $\geq 0.45\text{mol/L} \sim 1\text{mol/L}$  时, 为浓碱法。

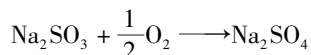
稀碱法和浓碱法都使用, 一般浓碱法适用于希望氧化率相当低的场合, 而稀碱法则适用于希望氧化率较高的场合。燃用高硫煤的锅炉采用浓碱法有利, 燃用低硫煤锅炉则采用稀碱法有利。浓度高的亚硫酸盐 - 亚硫酸氢盐能阻止亚硫酸盐的氧化, 因此在相同条件下, 浓碱法的氧化率比稀碱法低。浓碱法设备小, 处理液量少, 所以其设备投资、操作费用较低。浓碱法的脱硫废水及沉渣处理比稀碱法要多。

#### 4.5.4 双碱法中钠碱的再生回用

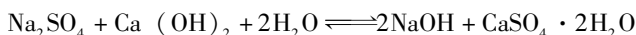
双碱法脱硫过程吸收液中,  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  和  $\text{NaHSO}_3$  达到规定的浓度后, 要及时排放到再生反应器。再生反应 pH 值控制在 8.5, 温度为  $40 \sim 50^\circ\text{C}$ 。再生反应时间长有利于反应的进行彻底, 但再生反应器体积大, 所以一般停留时间约为 20min。为了使再生反应能快速进行, 再生反应器安装电动搅拌机。再生反应完成后的吸收液经水力旋流器分离浓缩的底流  $\text{CaSO}_3$  泥浆, 用泵送入板框压滤机脱水, 旋流器顶流进入废水处理旋流器, 底流返回脱硫塔, 旋流器顶流去废水处理站处理。

#### 4.5.5 双碱法中钠碱的损耗

由于钠碱双碱法脱硫烟气中含有过剩氧气, 脱硫生成的  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  会自然氧化成硫酸钠。



而



这反应是可逆反应, 所以再生 NaOH 较困难。因此氧化成  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  的钠碱就是损耗的钠碱, 也就是要补充的钠碱。为了阻止  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  的自然氧化, 可以在吸收液中加阻氧化剂



对苯二胺和对苯二酚，加入量为 0.025% ~ 0.05% 的吸收液质量，每隔 15 天加一次， $\text{Na}_2\text{SO}_4$  产生量约为 5%。

对苯二胺在山东的报价 18600 元/t，江西也有报 9000 元/t 的。按 130t/h 锅炉、钠碱双碱法脱硫循环槽  $V_{\text{sum}} = 98\text{m}^3$  计算。阻氧剂  $G_{\text{ZY}} = 98 \times 2.5 \times 10^{-4}\text{kg} = 24.5\text{kg}$ ，需要花费 456 元，可用半个月，经济上可以承受。

### 4.5.6 双碱法脱硫废水处理

#### 1. 双碱法脱硫废水量 $W_{\text{FEI}}$

某供热厂 130t/h 锅炉烟气量  $V_y = 240000\text{m}^3/\text{h}$   $T = 130^\circ\text{C}$  含湿量比  $x_{\text{H}} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_y} =$

0.07,  $C_{\text{S1}} = 1000\text{mg}/\text{Nm}^3$   $C_{\text{S2}} = 100\text{mg}/\text{Nm}^3$  脱硫塔直径  $D = 5000\text{mm}$ ，两层折板除雾器。

脱硫过程水平衡计算如下：

(1) 脱硫烟气带入塔内水量  $W_{\text{Hy}}$

$$W_{\text{Hy}} = V_y \times \rho_{130} \times x_{\text{H}} = 240000 \times 0.8894 \times 0.07\text{kg/h} = 14941\text{kg/h} = 14.94\text{t/h}$$

(2) 冲洗除雾器水  $W_{\text{HM}}$

$$W_{\text{HM}} = 2W_{\text{MIZ}} + W_{\text{MIP}} + W_{\text{MZZ}} = (2 \times 1178 + 471 + 471)\text{kg/h} = 3298\text{kg/h} \approx 3.3\text{t/h}$$

(3) 脱硫注入 10% NaOH 溶液  $W_{\text{NaOH}} = 1830\text{kg/h}$  带入水量

$$W_{\text{HNa}} = \frac{W_{\text{Na}} - 0.2W_{\text{Na}}}{0.2} \frac{183 - 0.1 \times 183}{0.1}\text{kg/h} = 1647\text{kg/h} = 16.5\text{t/h}$$

(4) 排出脱硫产物带出水量  $W_{\text{HJ}}$

$$\text{脱除 } \text{SO}_2 \quad W_{\text{SO}_2} = (1000 - 100) \times 240000 \times \frac{273}{273 + 130}\text{mg/h} = 146322580\text{mg/h} = 1463\text{kg/h}$$

$$\text{生成 } \text{Na}_2\text{SO}_3 \quad W_{\text{Na}_3} = \frac{M_{\text{Na}_3} \times W_{\text{S}}}{M_{\text{SO}_2}} = \frac{126 \times 146.3}{64}\text{kg/h} = 288\text{kg/h}$$

按浓碱法脱硫循环液浓度 15% 计算

$$W_{\text{JP}} = \frac{W_{\text{Na}_3}}{0.15} = \frac{288}{0.15}\text{kg/h} = 1920\text{kg/h}$$

$$W_{\text{HJP}} = W_{\text{JP}} \times 0.85 = 1920 \times 0.85 = 1632\text{kg/h} = 1.63\text{t/h}$$

(5) 脱硫后饱和烟气带出水量  $W_{\text{HW}}$

$$\begin{aligned} W_{\text{HW}} &= V_y \times \rho_{130} \times (1 - x_{\text{H}_2\text{O}}) \times x_{\text{tw}} + V_0 \times 0.075 \\ &= \left( 240000 \times 0.8894 \times 0.93 \times 0.078 + 240000 \times \frac{273}{403} \times 0.075 \right)\text{t/h} \\ &= (15.5 + 0.012)\text{t/h} = 15.5\text{t/h} \end{aligned}$$

式中  $\rho_{130}$ ——烟气在饱和温度  $130^\circ\text{C}$  时的密度，为  $0.8894\text{kg}/\text{m}^3$ ；

$x_{\text{tw}}$ ——饱和状态下  $48^\circ\text{C}$  时烟气含湿量，查表 13-14 得  $0.078\text{kg}/\text{kg}$ （烟气）；

$V_0$ ——标准状态烟气流量（ $\text{Nm}^3/\text{h}$ ）；

0.075——脱硫后烟气出塔每  $\text{Nm}^3$  烟气带水雾（ $\text{g}/\text{Nm}^3$ ）。

$$W_{\text{ZON}} = W_{\text{Hy}} + W_{\text{HM}} + W_{\text{HJP}} + W_{\text{HNa}} + W_{\text{HW}} \\ = (14.94 + 3.3 - 1.63 + 1.65 - 15.5) \text{ t/h} = 2.76 \text{ t/h}$$

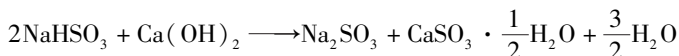
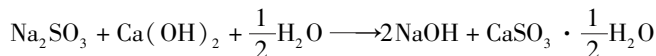
吸收过程中, 脱硫塔每小时增加 2.76t/h 脱硫水, 为了保持塔内水位稳定每小时排出 2.76t 脱硫水。

每小时排出需要再生的脱硫循环液 1920kg 进入再生反应器再生 NaOH。为了减少 NaOH 的损失, 在脱硫循环槽, 加进 0.025% 的对苯二胺抗氧化剂, 使  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  生成量尽可能少。可使 NaOH 补充量尽可能少。因为  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  是很难再生的。

#### (6) 再生过程水平衡

再生过程水平衡计算如下:

1) 15% 的脱硫循环液 1920kg/h 进入再生反应器停留 20min。



一般控制循环槽的 pH=6.5, 此时吸收液 60% 为  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ , 40% 为  $\text{NaHSO}_3$ ,  $S/C=0.7$ 。

2) 经过计算得到再生反应结果:

因脱硫塔中吸收  $\text{SO}_2$  146.3kg/h 使用 NaOH 182.9kg/h 在脱硫吸收液中生成  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  172.8kg/h、 $\text{NaHSO}_3$  115.2kg/h, 再生出 NaOH 154kg/h, 再生率 0.85, 再生使用  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  150kg/h, ( $\text{Ca}/\text{Na}=1.05$ )。生成  $\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$  248.3kg/h。

需要再生的脱硫循环液  $W_{\text{JP}}=1920\text{kg/h}$ , 含水  $W_{\text{HJ}}=1632\text{kg/h}$  加进 20%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  浆液  $W_{\text{Ca}}=750\text{kg/h}$ , 含水  $W_{\text{HCa}}=600\text{kg/h}$ 。再生出 NaOH,  $W_{\text{NaOH}}=156\text{kg/h}$ , 经水力旋流器顶部流出。再生产物  $\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ , 248.3kg/h, 其浓度为 50% 浆液  $W_{\text{Ca3}}=497\text{kg/h}$ , 从旋流器底部流出后进入板框压滤机 (或真空带式过滤机) 进一步脱水为含水 10% 的滤饼, 运至渣场, 板框压滤机排放过滤液为  $W_{\text{HJP}}$ 。

$$W_{\text{HJP}} = W_{\text{Ca3}} \times 0.45 = 497 \times 0.45 = 224\text{kg/h} = 0.224\text{t/h}$$

为了控制吸收液中钙离子和 Cl 离子, 这部分过滤液排入废水处理系统。

再生得到 NaOH,  $W_{\text{NaOH}}=156\text{kg/h}$ , 从水力旋流器顶部流出并返回 NaOH 制备槽回用。因水力旋流器顶部排水量为  $W_{\text{HJF}} = W_{\text{HJ}} + W_{\text{HCa}} - W_{\text{HJP}} = (1632 + 600 - 224) \text{ kg/h} = 2008\text{kg/h}$ 。所以返回再生 NaOH 溶液浓度约为 8%。

钠碱双碱法脱硫废水由两部分工艺过程产生, 即吸收过程和再生过程产生。如果脱硫循环液中氯离子浓度大于 20g/L, 则还要排放循环槽中循环液, 并向循环槽补充工业用水, 以使循环槽中  $\text{Cl}^-$  浓度为 20g/L。

#### 3) 核算循环液中氯离子浓度

从烟气中带入循环液中的  $\text{Cl}^-$  同煤中含  $\text{Cl}^-$  量有关, 在没有确切资料时, 可认为大多数煤中含 Cl 量为 0.05% 来计算得出烟气中含 Cl 浓度  $C_{\text{ClY}}=48\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。工业用水氯离子含量平均为  $C_{\text{ClW}}=80\text{mg}/\text{L}$ 。液态 NaOH 中 Cl 离子含量 2 级指标为 1% 现计算如下:

① 烟气中 Cl 全部进入吸收液  $W_{\text{ClY}}$

$$W_{\text{ClY}} = Q_y \times \frac{273}{273 + 130} \times C'_{\text{ClY}} = 240000 \times 0.677 \times 48 \text{ mg/h} = 7799040 \text{ mg/h} = 7.8 \text{ kg/h}$$

② 补充脱硫剂  $\text{NaOH}$  27.4 kg/h 带入的  $\text{Cl}^-$  量和回用液  $W_{\text{HJP}}$  的  $\text{Cl}^-$  量

$$W_{\text{ClNa}} = W_{\text{Na}} \times 0.01 + (W_{\text{HJP}} \times 20) = (27.4 \times 0.01 + 2.008 \times 20) \text{ kg/h} \\ = (0.27 + 40.16) \text{ kg/h} = 40.4 \text{ kg/h}$$

③ 20% 的再生剂  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 150 kg/h 的  $\text{Cl}^-$  包括  $\text{CaO}$  和  $\text{H}_2\text{O}$  中的  $\text{Cl}^-$

$$W_{\text{ClCaO}} = W_{\text{CaO}} \times C_{\text{ClCa}} = 150 \times 0.0001 \text{ kg/h} = 0.015 \text{ kg/h}$$

$$W_{\text{ClH}_2\text{O}} = W_{\text{H}_2\text{O}} \times C_{\text{ClW}} = 600 \times 80 \text{ mg/h} = 48000 \text{ mg/h} = 0.048 \text{ kg/h}$$

$$W_{\text{ClCaOH}} = W_{\text{ClCaO}} + W_{\text{ClW}} = 0.015 + 0.048 = 0.06 \text{ kg/h}$$

④ 冲洗除雾器带入  $\text{Cl}$  为  $M_{\text{CIM}}$

$$M_{\text{CIM}} = W_{\text{HM}} \times 80 = 3300 \times 80 \text{ mg/h} = 0.264 \text{ kg/h}$$

脱硫塔排出  $\text{Cl}$ : 可按照水平衡计算结果计算排水量乘以其氯离子浓度得到。

本示例脱硫总排水量  $W_{\text{ZP}}$ , 为  $W_{\text{ZON}} = 1.66 \text{ t/h}$  和排出过滤脱硫产物的水  $W_{\text{HJP}}$

$$W_{\text{ZP}} = W_{\text{ZON}} + W_{\text{HJP}} = (2.76 + 0.22) \text{ t/h} = 2.98 \text{ t/h}$$

脱硫塔运行 1h 循环槽增加的  $\text{Cl}^-$   $W_{\text{XUCl}}$ :

$$W_{\text{XUCl}} = W_{\text{ClY}} + W_{\text{ClNa}} + W_{\text{ClCaOH}} + W_{\text{CIM}} = (7.8 + 40.5 + 0.304 + 0.06) \text{ kg/h} = 48.7 \text{ kg/h}$$

脱硫塔运行每小时排水中的  $\text{Cl}^-$  为  $W_{\text{XUHP}}$

$$W_{\text{XUJP}} = W_{\text{ZON}} \times C_{\text{XUCP}} = 2.98 \times 20 \text{ kg/h} = 59.6 \text{ kg/h}$$

脱硫塔运行每小时排出脱硫浆液  $W_{\text{JP}} = 1920 \text{ kg/h}$  的  $\text{Cl}^-$  为  $W_{\text{XUJP}}$

$$W_{\text{XUJP}} = W_{\text{JP}} \times 20 = 1.92 \times 20 \text{ kg/h} = 38.4 \text{ kg/h}$$

脱硫塔运行 1h 净增  $\text{Cl}^-$  量  $\Delta W_{\text{Cl}}$

$$\Delta W_{\text{Cl}} = W_{\text{XUCl}} - W_{\text{XUCP}} = W_{\text{XUCl}} - W_{\text{XUHP}} - W_{\text{XUJP}} = (48.7 - 59.6 - 38.4) \text{ kg/h} = -49.3 \text{ kg/h}$$

循环槽中每运行 1h, 减少 49.3 kg/h 的  $\text{Cl}^-$ , 所以不需要为  $\text{Cl}^- \leq 20 \text{ g/L}$  再排放循环槽中水。

所以废水  $W_{\text{FEI}} = W_{\text{ZON}} + W_{\text{HJP}} = (2.98 + 0.22) \text{ t/h} = 3.2 \text{ t/h}$ 。

## 2. 钠碱双碱法废水处理原则方案

钠碱双碱法废水组分与钠碱法和石灰法相似需要调整处理的有 pH 值 COD 悬浮物、氟重金属汞、砷等。处理原则方案是加药混凝沉淀曝气后是可以达标排放的。

### 4.5.7 双碱法脱硫技术特点

1) 双碱法脱硫吸收液及脱硫产物都是溶液, 所以不像石灰石-石膏法那样易结垢堵塞, 这是一个很大的优点。

2) 双碱法脱硫可用  $L/G$  为 3, 比石灰石法的 10~15 小得多, 使脱硫循环槽、循环泵、循环吸收液管径都比石灰石法小得多。相应的运行电费、设备费比石灰石法省。

3) 脱硫产物亚硫酸钠或硫酸价值比石膏高, 现工业级  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  每吨 1800 元, 工业级  $\text{H}_2\text{SO}_4$  每吨 400 元。

4) 脱硫系统运行可靠性高、故障率低。再生系统在脱硫塔外独立的再生反应器内

完成，是一个相对独立的操控设备。

5) 无论是吸收系统还是再生系统，要求严格控制 pH 值，见 4.5.3 中 (3) pH 值控制。

6) 双碱法脱硫系统不仅吸收率要高，而且再生反应的产出率也要高，才能发挥双碱法的优势，所以要求控制好工艺参数和条件。要求设计较好的自控系统。

7) 控制  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  的氧化率十分必要。只有控制住了  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  的生成量，才能有更多 NaOH 再生出来。所以在吸收系统中加入阻止氧化剂是必要的。

8) 结合脱硫项目特点，适当选择采用浓碱法或稀碱法。

9) 双碱法脱硫可以获得 95% 以上的脱硫效率。

#### 4.5.8 双碱法脱硫设计注意事项

1) NaOH 工业用碱有固体包装和液体桶装两种。脱硫使用液态 NaOH 比较方便，可以用槽罐车运到脱硫站用碱泵输送到 NaOH 储槽。

2) 浓碱液罐可用钢衬聚丙烯（或高密度聚乙烯），碱液泵可用钢衬高密度聚乙烯的泵，也可采用 S304 不锈钢。低浓度（ $\leq 30\%$ ）的稀碱液可用普通碳钢管道和泵。

3) 吸收液循环槽 pH 值控制在 6.5 左右。再生器内 pH 值控制在 8.5。有条件的项目，再生器内温度控制在  $50^\circ\text{C}$  左右。

4) 工业及供热锅炉一般宜用浓碱法，因为它适用于低氧化率和含硫稍高的燃煤。脱硫产物排出处理液量少，设备投资及操作费用较低。

5) 再生反应器设计，对双碱法是关键的一步。其再生功能完成的效果决定双碱法的成败。应该选取适当的停留时间，一般为 20 ~ 30min。在反应器内保证  $\text{NaSO}_3$ 、 $\text{NaHSO}_3$ 、同  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  充分接触混合，不留死角。所以应很好搅拌，组织好流场，并保证 pH 值和温度，这样才能较好完成再生任务。

6) 双碱法液气比可以根据脱硫效率推算，但为了尽可能发挥钠双碱法脱硫效率高的优点，一般宜选  $L/G$  为 3， $\text{Na}/\text{S}$  为 1。

7) 为了尽可能再生回用 NaOH，宜在脱硫吸收液中加阻氧剂对苯二胺和对苯二酚，加入量按吸收液质量的 0.025% ~ 0.05%。

8) 双碱法再生排出  $\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$  在量不大时，只能抛弃；在成批量时，可考虑再强制氧化成石膏。

9) 经过再生的脱硫吸收液主要由 NaOH、 $\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ 、未再生的  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  和  $\text{NaHSO}_3$ 、少量已氧化成的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、少量过剩的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和工业用水等组成。其中呈溶解状态的是 NaOH、 $\text{Na}_2\text{SO}_3$ 、 $\text{NaHSO}_3$  和  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 。而  $\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  是沉淀或悬浮物。可以用固液分离设备分离。通常先用水力旋流器把再生液分成浆液（浓度约 50%）和上清液。水旋器底流再经过真空带式过滤器脱水成含 10% 水分的  $\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$  渣，经水旋器顶流则返回 NaOH 槽回用。

10) 由于氧化副反应生成的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ，不能经再生反应生成  $\text{NaOH}$ 。所以吸收液中  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  会不断增加，会影响脱硫效率。所以要设法从循环吸收液中去除  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ，使吸收液中的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  控制在 5%。

当钠双碱法加阻氧化剂后，假设还有 5% 的氧化率，则从 4.5.6 所示例算，130t/h 锅炉碱耗为 154kg/h，其 5% 氧化产生 7.7kg/h 的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ，如果  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  浓度允许为 5%（即 50g/L），则每小时排放 154L 脱硫液，所以只要每小时从脱硫塔排出 0.154t/h 吸收液就可保持循环槽内  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  为 5%。现本示例排放废水 1.88t/h 是满足要求的。

#### 4.5.9 双碱法烟气脱硫方案及投资估算

##### 1. 工程概况

北京 × × 环保公司根据国家  $\text{SO}_2$  总量控制的要求和同时满足烟尘与  $\text{SO}_2$  排放达到《火电厂大气污染物排放标准》。拟对山东 × × 热电厂一台 220t/h 锅炉实施烟气脱硫工程。本项目运行后，将对周围环境，特别是对大气污染物的控制治理和改善周围地区空气质量起到至关重要的作用，获得很好的环境效益和一定的经济效益。本公司拟采用喷雾泡沫脱硫除尘器和双碱法脱硫工艺技术，提出该烟气处理的技术设计。

##### 2. 技术设计原则

1) 从技术、经济及装置运行可靠性上考虑，采用氢氧化钠作为脱硫剂和氢氧化钙作为再生剂的双碱法脱硫，保证系统脱硫效率可达 95%，保证达到国家和地方的排放标准。

2) 采用双碱法脱硫工艺，可以从根本上避免产生结垢堵塞现象，减少昂贵  $\text{NaOH}$  的耗量和运行费用。

3) 采用喷雾泡沫洗涤方式可在较小的液气比下获得较大的液气接触面积，进而获得较高的脱硫除尘效率；并且，较小的液气比可以减少循环液量，从而减少循环泵的数量或型号，降低运行成本。对整个系统都考虑了防腐措施，反应塔内壁、管道、泵、搅拌器、储罐内壁、烟道等部位都采用性能良好的防腐材料进行防腐处理。

4) 保证本脱硫装置连续运行，年运行时间满足业主要求。同时，设计了脱硫后湿烟气的加热系统，可防止烟囱烟道引风机被腐蚀，保证烟囱安全和烟气的扩散抬升和消除白烟。

5) 为确保整个系统连续可靠运行，应采用优良可靠的辅机设备，以确保脱硫系统的良好运行。

6) 按现有场地条件因地制宜布置脱硫系统设备，力求紧凑合理，节约用地。

7) 最大限度地循环利用脱硫吸收液，由于脱硫过程产生的硫酸盐，脱硫塔内水分蒸发，形成循环吸收液中硫酸盐和  $\text{Cl}^-$  离子的积累。由于过高的盐分和  $\text{Cl}^-$  离子浓度，会降低脱硫效率和腐蚀脱硫装置，所以为了控制脱硫循环液硫酸盐和氯离子，不得不排放少量脱硫循环液，并补充少量工业用水。排放的脱硫液按 GB 8978《污水综合排放标准》处理达标排放。

8) 本项目达标要求的脱硫效率为 95%，所以脱硫液气比选 3， $\text{Na}/\text{S}=1$ 。

9) 为了减少亚硫酸钠氧化为硫酸钠，采用在吸收液中加对苯二胺或对苯二酚，加

入量为 0.04%，一般每十五天加一次。

10) 再生产物亚硫酸钙由于量相对较小，作为副产品的话还未达到规模产量，所以不再回收石膏。

### 3. 设计条件

- 1) 烟气温度 150℃；
- 2) 烟气量 400000m<sup>3</sup>/h；
- 3) 计算 SO<sub>2</sub> 浓度 2000mg/Nm<sup>3</sup>；
- 4) 锅炉引风机型号 Y-73-NO: 14D 2 × 130390m<sup>3</sup>/h, 2097Pa, N = 132kW；
- 5) 静电除尘器排烟尘浓度 150mg/Nm<sup>3</sup>。

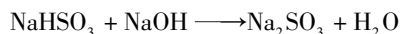
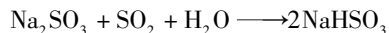
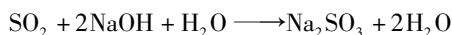
### 4. 要求达到的排放标准

- 1) 烟尘浓度：30mg/Nm<sup>3</sup>；
- 2) SO<sub>2</sub> 浓度：200mg/Nm<sup>3</sup>；
- 3) 烟气黑度：1 级；
- 4) 烟气温度：~80℃。

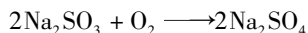
### 5. 双碱法脱硫工艺流程说明

1) 双碱法脱硫工艺流程如图 4-22 所示。锅炉排烟经过静电除尘器，除去大部分的烟尘后，进入喷雾泡沫脱硫除尘器。喷雾是用两层特制的螺旋喷嘴，然后通过 1 层泡沫塔板，使进入脱硫塔内的烟气经过二次喷雾除尘和脱硫，然而上升。在泡沫板中与脱硫液进行激烈传质吸收和涤尘过程，再上升到脱水器，脱除夹带水滴后，把湿烟气与高温空气混合加热到 80℃ 进入烟道经烟囱排入大气。

2) 循环液从脱硫塔底循环槽用循环泵输送到喷嘴层和泡沫塔板，经过脱硫除尘后从上向下流回循环槽。吸收液吸收 SO<sub>2</sub> 化学反应如下：

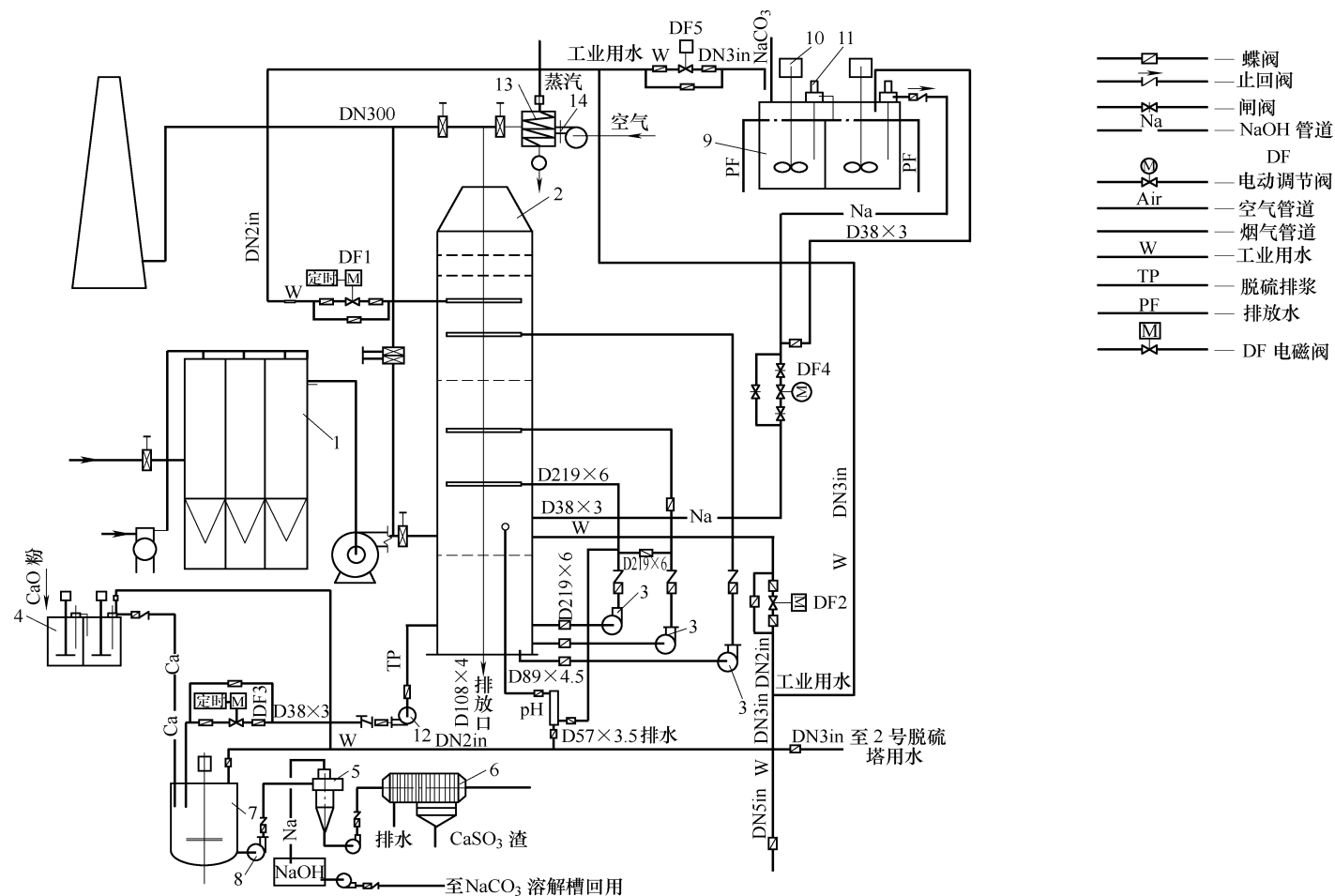


副反应如下：



由于硫酸钠是很难再生还原的，一旦生成就需要补充 NaOH。

3) 再生过程。烟气中的 SO<sub>2</sub> 与 NaOH 反应生成 Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> 和 NaHSO<sub>3</sub>，双碱法要用第二种碱 Ca(OH)<sub>2</sub> 加到再生反应器中，再生吸收液。这样可节省昂贵的 NaOH，要把再生反应彻底进行，必须控制好再生反应的条件，即再生液 pH 值为 8.5，温度约 50℃，搅拌混合充分均匀。停留时间一般约为 20-30min，再生产物 CaSO<sub>3</sub>，当产量不大时只得抛弃；产量较大时可回收石膏，即把亚硫酸钙送入氧化曝气池，鼓入空气把亚硫酸钙氧化成 CaSO<sub>4</sub>，脱硫吸收液中再生得到的 NaOH 可重复使用，由于反应不彻底和副反应损失的 NaOH，必须及时补充到 NaOH 制备槽中。需要说明的是，因为锅炉烟气中有大量氧气且温度较高，所以副反应会发生，也就是说必须要补充一定量的氢氧化钠。





向再生反应器中加  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  控制 pH 值为 8.5 和向循环槽中加 NaOH 控制 pH 值为 6.5, 都是通过 pH 计测定 pH 值后, 自动加入碱液, 达到脱硫工艺要求的 pH 值。

#### 4) 脱硫工艺参数:

NaOH 耗量  $613\text{kg/h}$ ;

$\text{Ca}(\text{OH})_2$   $667\text{kg/h}$ ;

循环液量  $L/G \times Q_0 = 3\text{L/Nm}^3 \times 258000\text{Nm}^3/\text{h} = 774\text{m}^3/\text{h}$ ;

循环槽内亚硫酸及硫酸盐的总浓度为 12%。

### 6. 脱硫渣和废水处理

本工艺的脱硫渣为  $\text{CaSO}_3$ , 与炉渣一起处理, 一般可做炉渣砖的原料。

脱硫循环液中的  $\text{Cl}^-$  离子和硫酸钠长期循环后必然积聚, 通过排出少量循环液是可以把  $\text{Cl}^-$  控制在  $\leq 20\text{g/L}$  把硫酸钠控制在  $\leq 5\%$  的, 任何脱硫工艺都有其控制要求的, 本项目的废水量, 在 4.5.6 节计算得到  $W_{\text{FeI}} = 1.88\text{m}^3/\text{h}$ , 脱硫废水处理按 GB 8978《污水综合排放标准》经加药混凝沉淀可去除悬浮物和重金属, 再经曝气处理可达标排放。详细技术应有废水处理工程师设计。

### 7. 烟气加热系统

可供选择的加热方案有:

1) 用 GGH 烟气换热器加热脱硫后烟气至  $80^\circ\text{C}$ , 这是大型电站常用的方案, 其优点是节能, 但据有关单位调查, 在用的 GGH 堵塞故障率达 48%, 且引起脱硫系统故障, 换热器价格较高, 湿烟气对换热器腐蚀较严重, 换热器寿命较短, 维修费用高。现有些行业内人士倾向于与其花大钱买来一堆问题, 还不如用湿烟囟。

2) 用蒸汽加热升温一定量的空气, 同烟气混合到  $80^\circ\text{C}$ 。但要消耗蒸汽, 优点是加热器不流过强腐蚀介质, 寿命长, 投资低, 较适合工业及供热锅炉脱硫系统采用。Babcock and Wilcox 公司电站脱硫也采用这种烟气升温方案。

3) 用过热蒸汽换热器加热烟气。因为过热蒸汽可以使用  $300^\circ\text{C}$  高温, 换热器体积大为缩小, 设备投资大为减少。但低温湿烟气对换热器腐蚀同样严重。

### 8. 加热烟气升温到 $80^\circ\text{C}$ 的过热蒸汽耗量

本示例烟气流速  $Q_0 = 303546\text{Nm}^3/\text{h}$   $T = 48^\circ\text{C}$  加热到  $80^\circ\text{C}$  求需要的加热量

$\Delta Q$  和蒸汽量  $G_z$

$\Delta Q = H_{80} - H_{48}$ , 烟气热焓可以查表 13-12 或用  $C_p T$  计算得到。

烟气成分  $V_{\text{CO}_2} = 1.01\text{Nm}^3/\text{kg}$ ,  $V_{\text{SO}_2} = 0.0123\text{Nm}^3/\text{kg}$ ,  $V_{\text{N}_2} = 5.57\text{Nm}^3/\text{kg}$ ,

$V_{\text{O}_2} = 0.296\text{Nm}^3/\text{kg}$ ,  $V_{\text{H}_2\text{O}} = 0.553\text{Nm}^3/\text{kg}$

$V_y = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} = (1.01 + 0.0123 + 5.57 + 0.296 + 0.553) \text{Nm}^3/\text{kg}$   
 $= 7.44\text{Nm}^3/\text{kg}$

$h = (V_{\text{CO}_2}/V_y)h_{\text{CO}_2} + (V_{\text{SO}_2}/V_y)h_{\text{SO}_2} + (V_{\text{N}_2}/V_y)h_{\text{N}_2} + (V_{\text{O}_2}/V_y)h_{\text{O}_2} + (V_{\text{H}_2\text{O}}/V_y)h_{\text{H}_2\text{O}}$

$h_{80} = 0.136 \times 1.6802 \times 80 + 0.749 \times 1.2956 \times 80 + 0.04 \times 1.3153 \times 80 + 0.07 \times 1.5030 \times 80 + 0.0016 \times 1.6802 \times 80 = 108.75\text{kJ/m}^3$



$$h_{48} = 65 \text{ kJ/m}^3$$

$$H_{80} = h_{80} \times 400000 \times (353/423) = 108.75 \times 333806 = 36301403 \text{ kJ/h}$$

$$H_{48} = h_{48} \times 400000 \times (321/423) = 65 \times 303546 = 19730490 \text{ kJ/h}$$

$$\Delta Q = \Delta H = H_{80} - H_{48} = 36301403 - 19730490 = 16570913 \text{ kJ/h}$$

$$\text{蒸汽耗量 } G = \Delta Q / h'' = 16570913 / 3070 \text{ kg/h} = 5398 \text{ kg/h} = 5.4 \text{ t/h} \quad (h'' \text{查表 13-9 得})$$

式中  $h''$ ——0.3 MPa、300℃时过热蒸汽焓，为 3070 kJ/kg。

## 9. 混合高温空气量

1) 烟气流  $V_y = 303546 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ， $T = 48^\circ\text{C}$ ，高温空气量  $V_k$ ， $T = 250^\circ\text{C}$ ，两股气流混合后温度  $T_H = 80^\circ\text{C}$ ，求  $V_k$  值。为了简便，用空气比热近似代替烟气比热（见表 13-12）（即当做理想气体来计算）

$$V_y \times c_{pk48} \times 48 + V_k \times c_{pk250} \times 250 = (V_y + V_k) c_{pk80} \times 80$$

$$303546 \times 1.3217 \times 48 + V_k \times 1.3371 \times 250 = (303546 + V_k) \times 1.3233 \times 80$$

$$19257444 + 334.28 V_k = 105.86 V_k + 32134594$$

$$(334.28 - 105.86) \times V_k = (32134594 - 19257444)$$

$$228.42 V_k = 13295315$$

$$V_k = \frac{13295315}{228.42} \text{ m}^3/\text{h} = 58206 \text{ m}^3/\text{h}$$

2) 加热风机风量  $V_k = 58206 \text{ m}^3/\text{h}$ ，风压要根据加热换热器的阻力决定，在施工图设计时选定。

3) 上述计算为理想状态，如果更严格地计算，要用烟气比热、空气比热分别乘入对应项。

现验证，用烟气比热（见表 13-12）详细计算  $V_k$ 。烟气比热计算如下：

$$c_{py80} = 0.136 \times 1.6802 + 0.749 \times 1.2956 + 0.04 \times 1.3153 + 0.07 \times 1.5030 + 0.0016 \times 1.6802 = 1.3594 \text{ kJ/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$c_{py48} = 0.136 \times 1.6480 + 0.749 \times 1.2952 + 0.04 \times 1.3070 + 0.07 \times 1.4995 + 0.0016 \times 1.6480 = 1.3541 \text{ kJ/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$c_{pk250} = 1.3370 \text{ kJ/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$V_s \times c_{py48} \times 48 + V_k \times c_{pk250} \times 250 = (V_s + V_k) \times c_{py80} \times 80$$

$$303546 \times 1.3541 \times 48 + V_k \times 1.3370 \times 250 = 303546 \times 1.3594 \times 80 + V_k \times 1.3594 \times 80$$

$$334.25 V_k - 108.75 V_k = 33011235 - 19729519$$

$$V_k = 13281716 / 225.5 \text{ m}^3/\text{h} = 58899 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{两种算法高温空气流量相差 } \Delta V_k = (58899 - 58206) \text{ m}^3/\text{h} = 693 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{相对误差} = \Delta V_k / V_k = 693 / 58899 = 0.01 = 1\% , \text{ 这点误差是允许的。}$$

## 10. 脱硫剂制备方案

氧化钙用封闭翻斗车运到厂，倒入储备池加水搅拌成浓浆，用浓浆泵送到  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  池，通过仪表测定浓度，加水调配到 10% 左右。桶装粒状氢氧化钠，运到碱池边倒入

NaOH 池子中，通过仪表测定浓度，加水调配到 10% 左右，供脱硫使用。

11. 脱硫及配套设备表报价

经过计算原引风机，全压已不够克服脱硫系统阻力，必须增加脱硫增压风机。

序号	名称	型号及规格	数量/台	价格/万元
1	脱硫塔	DN = 6400mm, H = 26000mm( 钢衬玻璃鳞片)	1	262
2	脱硫专用循环泵	$Q = 160\text{m}^3/\text{h}$ , $H = 39\text{m}$ $N = 45\text{kW}$	4	16
3	搅拌器	$B = 400$ , $H = 1300$ , $n = 88\text{r}/\text{min}$ , $N = 3\text{kW}$	1	1
4	再生反应器	$D = 1200\text{mm}$ , $H = 1500$ S304	1	1.5
5	折流板脱水器	内置		含在塔价内
6	搅拌器	$B = 1100$ , $H = 2350$ , $n = 81\text{r}/\text{min}$ , $N = 15\text{kW}$	3	3
7	Ca( OH) <sub>2</sub> 池	$3\text{m} \times 6\text{m} \times 2.5\text{m}$ ( $= 45\text{m}^3$ ) 隔成两个池	1	4.5
8	NaOH 池	$4\text{m} \times 4\text{m} \times 2.5\text{m}$ ( $= 40\text{m}^3$ )	1	4
9	立式泵	$Q = 10\text{m}^3/\text{h}$ , $H = 30\text{m}$ , $N = 3\text{kW}$	3	2.25
10	增压引风机	$200000\text{m}^3/\text{h}$ , 2790Pa $N = 250\text{kW}$	2	40
11	加热器	$34000\text{m}^3/\text{h}$ , 20℃/250℃	1	40
12	加热风机	$60500\text{m}^3/\text{h}$ , $N = 55\text{kW}$	1	7
13	排烟道	$D = 3000\text{mm}$ , 50m( 衬高密度聚乙烯)	1	40
14	循环水管及附件	DN200mm, 100m 钢衬高密度聚乙烯	2	22.8
15	电器设备	电控柜、电器、电缆	1	25
16	自控设备	电控柜, 元件, pH 计、调节阀、仪表等	1	40
17	烟道闸板	$D = 3.0\text{m}$	3	36
18	排水泵	$Q = 10\text{m}^3/\text{h}$ , $H = 25\text{m}$ , $N = 2.2\text{kW}$	2	0.8
合计				545.85

12. 机泵选型说明

1) 增设增压锅炉引风机, 是因为喷雾泡沫脱硫除尘器本体阻力为 1200 ~ 1400Pa, 而锅炉烟气脱硫系统增加的阻力应约为 2200Pa, 所以要新增脱硫增压风机。

2) 循环泵选用耐磨耐腐蚀砂浆泵, 钢衬超高分子量聚乙烯, 这类泵性价比较好。水泵参数是根据脱硫效率确定液气比, 再根据烟气量算出水泵的流量。

3) 选用空气加热器的理由已在本节 7. 中说明。

13. 电气自控系统说明

1) 电气设计包括引风机、加热风机、所有水泵的配电及控制柜和泵房照明。

2) 脱硫所用的碱液是通过 pH 自动控制仪表加到脱硫塔循环槽。

3) 氢氧化钠溶液池和 Ca( OH)<sub>2</sub> 乳液池都设有高低液位自动控制。低位时打开乳液

泵,高位时关闭乳液泵。这两个碱液池都装有浓度检测仪表,供调配浓度使用。

4) 脱硫再生液由脱硫塔循环槽内浓度自控仪表控制排放。当循环液中亚硫酸和硫酸盐浓度超过 12% 时,自动排放脱硫液到再生反应液接受池。

14. 脱硫工程价估算

序号	类别	名称	价格/万元
1	(一) 直接费用	脱硫及配套设备	480.85
2		电器及自控仪表	65
3		土建	40
4		设备安装费	$(1+2) \times 0.15 = 81.9$
5		运杂费	$(1+2) \times 0.03 = 16.4$
6		设备调试、培训费	$(1+2) \times 0.05 = 27.3$
合计			711.45
7	(二) 间接费用	工程及非标设计费	$(一) \times 0.055 = 39.1$
8		税金	$[(一)+7] \times 0.055 = 41.3$
9		不可预见费	$[(一)+7] \times 0.05 = 37.5$
合计			117.9
总计			$[(一)+(二)] = 829.35$

注：1 台 220t/h 锅炉相当 50000kW 电厂的锅炉，本项目脱硫工程投资 166 元/kW。该价格处于脱硫装置国产化价的中端。

15. 运行费用（按一台锅炉每年运行 7000h 计算）

1) 脱硫剂 NaOH，按 10% 的消耗量补充：

$61\text{kg/h} \times 7000\text{h} \times 1.82\text{kg} = 77.7 \text{ 万元}$

2) CaO 的费用：

$667\text{kg/h} \times 7000\text{h} \times 0.10 \text{ 元/kg} = 46.7 \text{ 万元}$

3) 电费：

$595\text{kW} \times 7000\text{h} \times 0.5 \text{ 元/(kW} \cdot \text{h)} = 208.3 \text{ 万元}$

4) 水费：

$10\text{m}^3/\text{h} \times 7000 \times 1 \text{ 元/m}^3 = 7 \text{ 万元}$

5) 人工费：

$4 \times 1.2 \text{ 万元/年} = 4.8 \text{ 万元}$     合计 = 344.5 万元

因此全年运行费用合计  $(77.7 + 46.7 + 208.3 + 7 + 4.8) \text{ 万元} = 344.5 \text{ 万元}$

6) 每年脱硫 3431 吨。

所以每千克 SO<sub>2</sub> 的脱除费用为  $3445000 \text{ 元} \div 3431000 = 1.0 \text{ 元}$ 。其中约 0.4 元是脱硫增压风机所消耗的电费，占脱硫费用的 40%。但是有的脱硫系统不设增压风机，而是由一台锅炉引风机的全压包含了脱硫系统所需要的压降，由于不好划分出脱硫的电耗，

所以在计算脱硫运行费时，有些就忽略了此项费用。因此在看每千克  $\text{SO}_2$  的脱除费用时，就要注意是否包括脱硫增压电费。对于该问题也有不同观点，有人认为锅炉引风机是锅炉房运行设备，其电费计入锅炉运行费用，要从中划出脱硫电费，不太好计量，所以可能有增压风机的就计入电费，不设增压风机就不计入了。

#### 16. 经济效益与环境效益

- 1) 每年可减少  $\text{SO}_2$  排放 3431t。
- 2) 每年可免交  $\text{SO}_2$  排污费 411.7 万元。
- 3) 每年可减少  $\text{SO}_2$  污染引起的综合经济损失为：  
 $3431\text{t} \times 4300 \text{ 元/t} = 1475.3 \text{ 万元}$ 。

## 4.6 湿式氨法脱硫工艺

氨极易溶于水，氨的水溶液具有很强的吸收  $\text{SO}_2$  的能力和很快的吸收速率。这与氨的分子结构有关。氮原子有 5 个价电子，其中有 3 个未成对，当它与氢原子化合时，每个氮原子可以和 3 个氢原子通过极性共价键结合成氨分子，氨分子里的氮原子还有一个孤电子对。氨溶于水时，氨分子的孤电子对通过氢键结合成一水合氨  $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ，一水合氨能小部分电离成铵离子和氢氧根离子，所以氨水呈碱性。

氨是一种优良的脱硫剂，其碱性强于钙基吸收剂。用氨吸收  $\text{SO}_2$  是气液吸收或气相吸收，反应速率快，吸收剂利用率高，吸收设备体积较小。

氨是化工原料，目前工业液氨（纯度 99%）价格约为 2000 元/t，基本与 NaOH 相当。作为工业及供热锅炉，使用  $\text{NH}_3$  脱硫剂比石灰、石灰石、氧化镁贵得多，但是脱硫产物硫酸铵可制备复合肥，在某些地区硫酸铵还可作为农用肥料。如果回收脱硫产品的收入能补偿氨法脱硫运行的部分费用，那么采用氨法脱硫在经济上就可行。

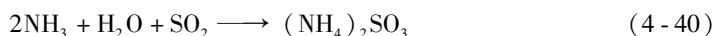
氨法脱硫效率可以很高，但特别要注意脱硫后烟气中氨蒸气烟雾，要控制好脱硫排烟中氨的含量。更要保证使用氨时的防火和防爆措施。

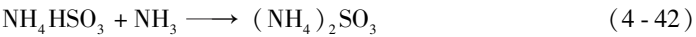
### 4.6.1 基本原理与化学反应式

氨法，在这里是指氨湿法脱硫。氨法还包括半干法和干法脱硫。

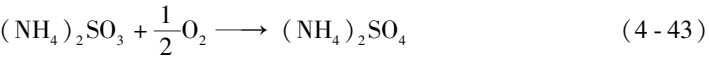
用氨作为吸收剂吸收  $\text{SO}_2$  与其他碱类一样，氨与亚硫酸化合反应速率很快，同时是气液和气相吸收。吸收塔的工作条件比液固反应要优越。吸收液及脱硫产物都是溶液，不会造成沉淀结垢堵塞。氨与  $\text{SO}_2$  反应生成亚硫酸铵、硫酸铵可以作为肥料使用，但氨易挥发，一定要控制好吸收液碱度。碱度高，吸收率高，但挥发氨量大，这样会造成环境污染并增加氨的消耗量。

氨法脱硫化学反应式如下：





副反应：



在氨吸收法中，因回收脱硫副产品的种类不同而形成不同的脱硫方法，其中以氨－酸法、氨－亚硫酸铵法和氨－硫酸铵法较为成熟。氨－酸法是将吸收 SO<sub>2</sub> 后的脱硫液用硫酸分解，可制得浓 SO<sub>2</sub> 气体和硫酸铵化肥；氨－亚硫酸铵法是将吸收 SO<sub>2</sub> 后的脱硫液直接加工为亚硫酸铵产品；氨－硫酸铵法则是将脱硫后的吸收液氧化制得硫酸铵产品。作为工业及供热锅炉比较适用的是氨－亚硫酸铵工艺。该法工艺流程简单，可节约硫酸并减少氨的消耗，而且氨气、氨水及固体碳酸氢铵均可作为脱硫剂使用，既可生产液体亚硫酸铵，也可制取固体亚硫酸铵。

4.6.2 湿式氨法脱硫工艺流程及参数

该工艺使用固体状碳酸氢铵作为脱硫剂。固体碳酸氢铵比液氨、氨水、氨气更不易挥发而造成氨气臭味污染。固体亚硫酸铵工艺流程如图 4-23 所示。

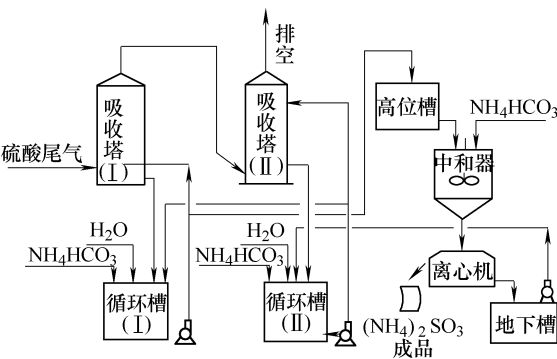
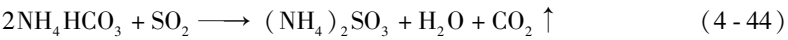


图 4-23 固体亚硫酸铵脱硫工艺流程图

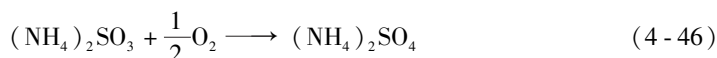
制取固体亚硫酸铵的工艺流程可分为吸收、中和、分离三部分。为了制取固体亚硫酸铵，吸收 SO<sub>2</sub> 后引出去中和的吸收液必须是高浓度 NH<sub>4</sub>HSO<sub>3</sub> 溶液，吸收液 S/C 值应维持高值，以提高固体亚硫酸铵结晶的产率。要使吸收 SO<sub>2</sub> 效率高，吸收液 S/C 值应维持低值，即碱度较高，因而吸收系统采用两段吸收法。

固体亚硫酸铵法化学反应式：



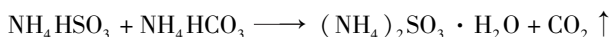
吸收过程实际上以反应式 (4-45) 为主，而 NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub> 在吸收过程中只是补入吸收系统，使部分 NH<sub>4</sub>HSO<sub>3</sub> 再生为 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>，以此保持脱硫吸收液碱度基本稳定（即 S/C 不变）。

因烟气中含有氧，就会发生以下副反应：



所以吸收液中含有少量硫酸铵。

吸收  $\text{SO}_2$  的脱硫液中含有  $\text{NH}_4\text{HSO}_3$  的组分，呈酸性，加固体碳酸氢铵中和后，使  $\text{NH}_4\text{HSO}_3$  转变为  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ ：



此化学反应为吸热反应，溶液温度不经冷却即可降到  $0^\circ\text{C}$  左右。由于  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$  比  $\text{NH}_4\text{HSO}_3$  在水中的溶解度小（见表 4-6），因此生成的  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  过饱和而从溶液中结晶析出。用离心机分离此悬浮液，便可制得固体亚硫酸铵结晶体。

表 4-6  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3 - \text{NH}_4\text{HSO}_3 - \text{H}_2\text{O}$  系统内的溶解度

温度/ $^\circ\text{C}$	饱和溶液的成分/%		
	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$	$\text{NH}_4\text{HSO}_3$	$\text{H}_2\text{O}$
0	10	60	30
20	12	65	23
30	13	67	20

(1) 吸收 含  $\text{SO}_2$  的烟气依次经过两个串联的吸收塔。在第一吸收塔中，吸收  $\text{SO}_2$  的吸收液应尽可能维持较高浓度和尽量提高吸收液的  $S/C$  值，以便生成较多的  $\text{NH}_4\text{HSO}_3$ ，并不断导出部分溶液送至中和工序，以制取固体亚硫酸铵。一般可控制吸收液的总亚盐含量为  $700\text{g/L}$ 。碱度为 10 滴度左右（ $S/C$  为  $0.88 \sim 0.9$ ），折算到  $\text{pH}$  值为  $5.36 \sim 5.28$ 。

第二吸收塔的吸收液则应维持较高的碱度（ $S/C$  值低）和较低浓度，以保证有较高的  $\text{SO}_2$  去除率，使排烟中  $\text{SO}_2$  浓度达到环保排放标准，同时不断引出部分吸收溶液串入第一吸收塔。吸收液总亚硫酸盐含量应控制在  $350\text{g/L}$  左右，碱度控制在  $13 \sim 15$  滴度，以满足系统串液时的水平衡，同时降低氨的消耗。为保持各塔循环液的碱度不变，分别在各塔循环槽中加入  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  和水。

(2) 中和 由第一吸收塔引出的高浓度  $\text{NH}_4\text{HSO}_3$  溶液，在中和器内与加入的固体碳酸氢铵经搅拌进行反应。 $\text{NH}_4\text{HSO}_3$  转变为  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ ，由于过饱和而有大量结晶析出，溶液呈黏稠悬浮状，终温可达  $0^\circ\text{C}$  左右。

(3) 分离 由中和器底部引出的含  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  晶体的悬浮液进入离心机，分离出固体亚硫酸铵作为产品，滤液进入母液储槽由泵送入第二吸收塔的循环槽中，继续循环吸收  $\text{SO}_2$ 。

(4) 副反应及处理 吸收液吸收  $\text{SO}_2$  的过程中，由于烟气中有较多的氧，会把  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$  氧化成  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 。氧化率与吸收塔型式和操作条件有关，一般可达  $5\% \sim 14\%$ 。当循环吸收液中  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  含量积累到一定浓度时，如果不及时除去，不仅降

低  $\text{SO}_2$  吸收率, 而且硫酸铵会从溶液中结晶析出而堵塞设备, 所以必须抑制亚硫酸铵氧化。通常可在吸收液中加入阻氧化剂, 如对苯二胺、对苯二酚等。加入阻氧剂, 使发生氧化的量为减少, 但仍无法避免吸收液中硫酸铵的积累上升。可采用 7% ~ 8%  $\text{SO}_2$  气体处理吸收液, 使吸收液转变成  $\text{NH}_4\text{HSO}_3$  饱和溶液。由于溶解度相差较大, 所以吸收液中  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  会结晶出来, 可从吸收液中除去。

亚硫酸铵结晶在空气中容易氧化。为了防止潮湿的亚硫酸铵氧化, 应把亚硫酸铵干燥制成无水亚硫酸铵。

亚硫酸铵可用于制浆造纸, 也可用于感光材料、日用化工染料中间体等。

为了控制脱硫后烟气中的氨含量, 一般应控制好吸收液的碱度, 即控制好吸收液的 pH 值, 使进入吸收塔的氨全部快速吸收  $\text{SO}_2$ , 生成  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$  和  $\text{NH}_4\text{HSO}_3$ 。这就要求选用高效吸收塔, 一般可用筛板塔或泡沫塔等。

特别要注意的是氨吸收法与其他碱类的吸收不同,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3 - \text{NH}_4\text{HSO}_3$  水溶液的阳离子和阴离子皆有挥发性。 $S/C$  值小时, 平衡  $p_{\text{SO}_2}$  分压小, 即  $\text{SO}_2$  的吸收率高, 但同时平衡  $p_{\text{NH}_3}$  的分压高, 即随脱硫烟气排空的氨量也多。工业上所用的吸收液的组成需兼顾  $\text{SO}_2$  和  $\text{NH}_3$  的分压 (表示  $\text{NH}_3$  的含量), 因而发展两段法或多段法吸收。

图 4-24 所示为南京化学工业集团有限公司磷肥厂的实测数据。当控制  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3/\text{NH}_4\text{HSO}_3$  为 0.3 (即  $S/C$  为 0.85) 时, 则吸收率可达 92% ~ 94%, 排烟中氨损失为 0.1 ~ 0.2  $\text{g}/\text{Nm}^3$ 。

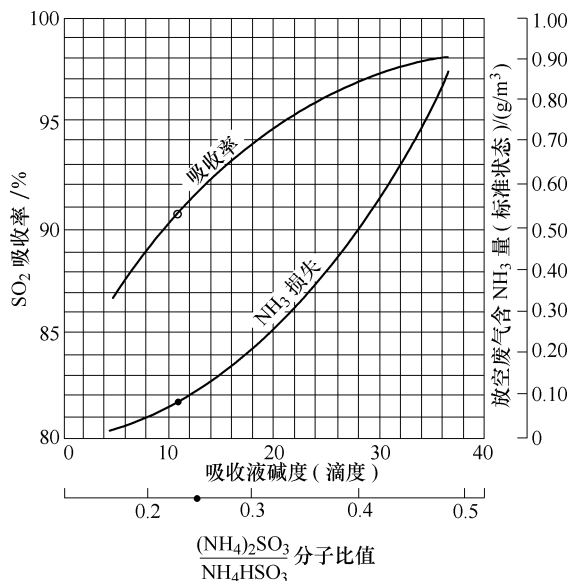


图 4-24 吸收液碱度与  $\text{SO}_2$  吸收率及  $\text{NH}_3$  损失关系

pH 值对  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3 - \text{NH}_4\text{HSO}_3$  水溶液的影响, 俄罗斯学者提出了  $S/C$  为 0.5 ~ 0.95 时, pH 值经验公式:

$$\text{pH} = -4.0(S/C) + 8.88$$

pH - S/C 曲线如图 4-25 所示。

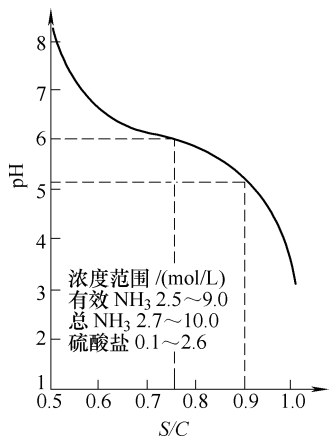


图 4-25 pH - S/C 曲线

图 4-26 所示为  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3 - \text{NH}_4\text{HSO}_3$  水溶液中，根据 pH 值、温度、S/C 表示出的  $\text{NH}_3$  分压值。

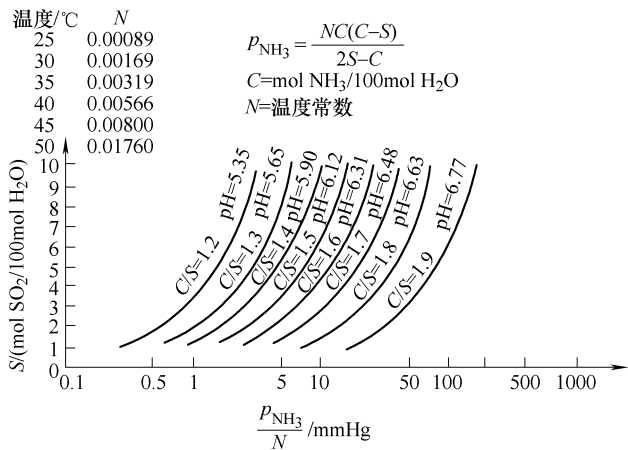


图 4-26 pH、S/C、T 对  $p_{\text{NH}_3}$  的曲线图

图 4-27 所示为  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3 - \text{NH}_4\text{HSO}_3$  水溶液中，根据 pH 值、温度、S/C 表示出的  $\text{SO}_2$  分压值。

在氨法脱硫设计时，我们可以利用图 4-24 估算出  $\text{SO}_2$  吸收率与吸收液碱度（滴度）和  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3/\text{NH}_4\text{HSO}_3$  分子比值的关系，以及与氨气损失的关系。利用图 4-25，可以估计出 pH 值与 S/C 的关系，以及吸收液中  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$  和  $\text{NH}_4\text{HSO}_3$  的组成。

滴度也是表示溶液碱度的单位。1 个滴度的碱度表示铵盐溶液中的  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$  含 5.8g/L。



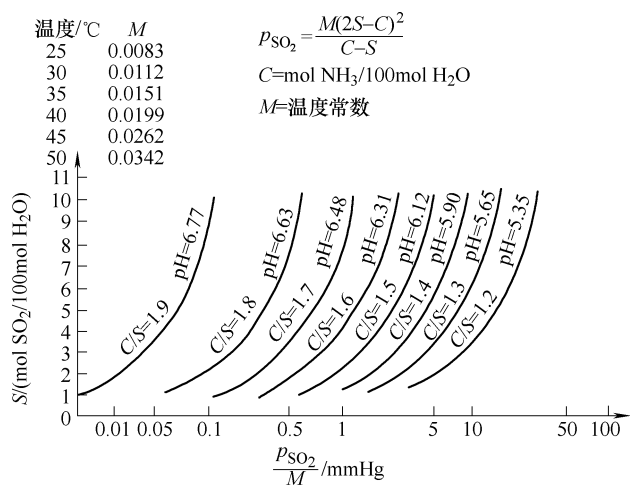


图 4-27 pH、S/C、T 对  $p_{SO_2}$  的曲线图

4.6.3 湿式氨法脱硫的 pH 值控制

吸收液 pH 值是脱硫过程重要的调控参数。pH 值决定了吸收液的酸碱度，决定了吸收液中亚硫酸氢铵和亚硫酸铵的比值，决定了 S/C 的值，还直接与脱硫效率相关。pH 值过高，会使氨与烟气中的 CO<sub>2</sub> 化合生成碳酸铵，致使这部分氨没有为脱硫作贡献。氨法脱硫 pH 控制不当，还会造成排烟中夹带氨气。

对于湿式氨法，一般要求两段法吸收，可用两个塔吸收，也可用一塔双循环吸收。对于用双塔吸收的流程。第一个塔尽可能得到高浓度的 NH<sub>4</sub>HSO<sub>3</sub>，所以也叫浓缩塔。第一塔吸收液的碱度要求维持在 10 滴度左右，S/C 为 0.91，总亚硫酸盐含量为 650 ~ 700g/L，见表 4-7。

我们可按 S/C 为 0.91 时计算吸收液的 pH 值为 5.24。

表 4-7 氨法两吸收塔工作条件

吸收温度/℃	一塔液成分			二塔液成分		
	总亚盐/(g/L)	碱度/滴度	pH	总亚盐/(g/L)	碱度/滴度	pH
25	650 ~ 700	< 10	5.24	350	13 ~ 15	5.28 ~ 5.30

第二个塔要保证 SO<sub>2</sub> 排放浓度和达到排放标准，要求高的吸收效率，所以第二个塔也叫吸收塔。

为了获得高的吸收效率，通常吸收液保持高的碱度与低的浓度，但是碱度高，SO<sub>2</sub> 吸收率高，相应 NH<sub>3</sub> 的分压也高，导致逸出氨气增加，所以要兼顾两者，碱度控制在 13 ~ 15 滴度，总亚硫酸铵盐控制在 350g/L 左右。

4.6.4 湿式氨法脱硫产物的用途

氨法脱硫按回收脱硫副产品的种类不同可分为氨-酸法、氨-亚硫酸铵法和氨-硫

酸铵法脱硫工艺。从上述氨法脱硫方法名称中就可知道，氨-酸法的副产品是硫酸。硫酸是化工原料，许多化工产品都必须以硫酸为原料。

氨-亚硫酸铵法的副产品是亚硫酸铵。亚硫酸铵可以做成固体的，也可以做成液体的。固体亚硫酸铵结晶易氧化，应把亚硫酸铵结晶干燥制成无水亚硫酸铵。粉状亚硫酸铵一般用编织袋包装运往使用场所。液态亚硫酸铵用桶装或槽罐车运往使用单位，灌装到用户储存槽中。

亚硫酸铵可代替烧碱制浆造纸，可以解决烧碱供应紧张问题。亚硫酸铵也可用做感光材料和日用化工染料中间体。

氨-硫酸铵法的副产品是硫酸铵。硫酸铵可作农业肥料。由于土壤的性状，许多地方不适宜用硫酸铵作农肥，目前普遍使用尿素作氮肥。但硫酸铵可作为复合肥料的组分之一添加到复合肥料中，如磷酸铵-硫酸铵复合肥等。

#### 4.6.5 湿式氨法脱硫工艺技术特点

1) 氨是一种很好的脱硫剂，其吸收液是溶液，脱硫产物是溶解物，吸收过程是气液或气气吸收，吸收塔具有很好的工作条件，不像气固吸收过程那样易发生沉淀堵塞等问题，所以氨法脱硫可靠性较高。

2) 氨与  $\text{SO}_2$  化合反应速率快，吸收  $\text{SO}_2$  能力强，氨脱硫能达到很高的脱硫效率和相对较小的吸收塔。

3) 氨比较容易挥发，pH 值是  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3 - \text{NH}_4\text{HSO}_3$  水溶液组成的单值函数，工业上通过控制吸收液 pH 值来获得稳定的吸收液的组分。吸收液的平衡蒸气分压与溶液组分有关，所以控制吸收液 pH 值可决定吸收效率和  $\text{NH}_3$  的消耗。控制好脱硫排烟中的氨的浓度，使它能达标排放。

4) 氨法脱硫产物亚硫酸铵、硫酸铵和硫酸都是有用的化工产品，都有较高的价格，都是应该回收利用的脱硫副产品。

5) 为了更多地回收脱硫产物和更高效率地脱硫，氨法脱硫工艺一般要设计成两塔吸收或一塔两段（双循环）。第一个塔获得高浓度亚硫酸氢铵，以便能中和取得更多亚硫酸铵。第二个塔则尽可能高效吸收  $\text{SO}_2$ ，完成脱硫达标任务。一般称第一个塔为浓缩塔，第二个塔为吸收塔。

6) 氨本身是比较贵的产品，一般工业及供热锅炉很少会用氨脱硫，除非企业自己生产氨或有廉价氨来源。如果要回收脱硫副产品补偿脱硫费用，要求副产品达到批量规模并落实使用单位。

7) 氨-亚硫酸铵法回收固体亚硫酸铵采用中和槽是比较简单和节省的工艺，比较适用于中、小规模脱硫采用。

8) 氨法脱硫较易泄漏氨而造成臭味污染，一定要做好氨系统的密闭性。

#### 4.6.6 湿式氨法脱硫设计注意事项

1) 氨法脱硫剂制备一般要用密闭系统，如液氨槽罐车、密封储槽、液氨泵、管道

都不允许有泄漏。

2) 对于工业锅炉及供热锅炉,宜采用氨-亚硫酸铵法,此法回收亚硫酸铵副产品设备简单,节省资金,易于实施。如果采用氨-亚硫酸铵法,一定要落实亚硫酸铵的用途及接受使用的单位。

3) 氨法为了尽可能多地回收副产品,一般宜用两塔或一塔两段(双循环)吸收。第一塔吸收液 pH 值控制在 5.24 左右,总亚硫酸盐含量 650~700g/L,第二塔吸收液 pH 值控制在 5.29 左右,总亚硫酸盐含量 350g/L。

4) 根据国家对化工行业的氨气排放标准,当排气筒高度  $H \geq 25\text{m}$  时,氨的允许排量为 14kg/h。可以估算 65t/h 和 130t/h 锅炉脱硫排烟中,允许夹带的氨气含量  $C_{\text{NH}_3}$ 。

$$C_{\text{NH}_3}^{65} = \frac{14000000}{Q_0^{65}} = \frac{14000000}{115161} = 121.5 \text{ mg/Nm}^3$$

$$C_{\text{NH}_3}^{130} = \frac{14000000}{Q_0^{130}} = \frac{14000000}{162581} = 86 \text{ mg/Nm}^3$$

可以用这个数据估算一塔、二塔控制 pH 值的数据。查图 4-24。  $C_{\text{NH}_3}^{130} = 86 \text{ mg/m}^3$ , 画水平线与  $\text{NH}_3$  损失曲线相交,在交点作垂直线与吸收率曲线相交,从交点作水平线可得  $\text{SO}_2$  吸收率为 90%~91%。同时可得  $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3/\text{NH}_4\text{HSO}_3] = 0.23$ 。即  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3 = 0.23 \times \text{NH}_4\text{HSO}_3$ 。如果二塔总亚硫酸盐含量为 350g/L。可计算出  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$  含量为 65.4g/L,  $\text{NH}_4\text{HSO}_3$  含量为 284.6g/L。

$$S/C = \frac{65.4}{350} \times 0.5 + \frac{284.6}{350} \times 1 = 0.9065$$

$$\text{pH} = -4 (S/C) + 8.88 = -4 \times 0.9065 + 8.88$$

$$\text{pH} = -3.626 + 8.88 = 5.25$$

先计算二塔,是因为要保证氨排放量  $C_{\text{NH}_3}^{65} \leq 86 \text{ mg/Nm}^3$ 。然后再算一塔的控制 pH 值。因为一塔要求总亚硫酸盐为 700g/L,生成尽可能多的  $\text{NH}_4\text{HSO}_3$ ,以便能中和得到尽可能多的亚硫酸铵,这就要求吸收液低碱度,根据表 4-8,查得一塔吸收液要求碱度为 10 滴度,脱硫效率为 90%,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3/\text{NH}_4\text{HSO}_3$  为 0.22。可计算出吸收液  $S/C$  为 0.909, pH 值为 5.24,吸收液中亚硫酸氢铵的含量为 574g/L。两个吸收塔总脱硫效率  $\eta_s$  为:

$$\eta_s = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) = 1 - 0.1 \times 0.09 = 0.99 = 99\%$$

从上述计算可以得知,如果只用一个吸收塔,脱硫效率仅为 90%~91%。 $\text{NH}_4\text{HSO}_3$  含量仅为 284.6g/L,采用两塔吸收或一塔两段双循环吸收,这样  $\text{NH}_4\text{HSO}_3$  的含量可达 574g/L,脱硫效率 99%。

5) 如果设计项目锅炉燃用低硫煤,烟气中的  $\text{SO}_2$  浓度不高,在脱硫效率为 90%,  $\text{SO}_2$  排放已可达标时,也可只采用一个吸收塔,吸收操作参数就采用一塔的数据,即吸收液 pH 值约为 5.24,亚硫酸盐含量为 700g/L,脱硫效率为 90%,吸收液中  $\text{NH}_4\text{HSO}_3$  为 574g/L,脱硫排烟中  $\text{NH}_3$  含量为 8.6mg/Nm<sup>3</sup>。由于燃用低硫煤的总亚硫酸铵产量较少,所以脱硫副产品的成本相对会偏高。

6) 氨-亚硫酸铵法,在我国中小硫酸厂推广过程中出现的问题。这些问题在工业及供热锅炉脱硫设计中要处理好。

①  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  结晶暴露在空气中容易氧化。吸收过程中也会有不同程度的氧化。在吸收过程吸收液中,加入 0.05% 的对苯二胺和对苯二酚阻氧化剂。在吸收液循环吸收过程产生的  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  可采用 7% ~ 8% 浓度的  $\text{SO}_2$  处理吸收液,使吸收液转变成  $\text{NH}_4\text{HSO}_3$  饱和溶液。由于溶解度的不同,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  会结晶析出,可用过滤机除去。

② 固液分离设备。由于亚硫酸铵在吸收液中结晶析出,要用固液分离设备分离。在分离过程中,会引起亚硫酸铵氧化。要减少氧化,就要尽可能减少亚硫酸铵与空气接触的界面和时间。经过工业实践,采用连续的卧式离心机可降低含水量,减少氧化率提高产品质量。此外要把  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  尽快干燥脱水,加工成干燥的无水  $(\text{NH}_4)_2 \cdot \text{SO}_3$ 。

#### 4.6.7 湿式氨法烟气脱硫设计方案及投资估算 (氨-亚硫酸铵法脱硫工艺)

##### 1. 工程概况

××环境工程公司根据国家  $\text{SO}_2$  总量控制要求和锅炉污染物排放标准、业主要求,拟对××热电厂的一台 220t/h 煤粉锅炉烟气实施脱硫工程。本项目实施后将对环境,特别是对大气污染物的控制治理,以及改善周围地区的空气质量起到至关重要的作用,可获得巨大的环境效益和一定的经济效益。本公司采用氨-亚硫酸铵法脱硫技术,提出该烟气脱硫方案。

##### 2. 方案设计技术原则

1) 从技术、经济及装置运行稳定性、可靠性上,考虑采用  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  作为脱硫剂,保证系统脱硫效率在 95%,并达到国家和地方的锅炉烟气排放标准。同时满足烟囱高于 60m 时,脱硫排烟中氨气不超过 GB 14554—1993《恶臭污染物排放标准》中的要求,即 75kg/h, 297mg/Nm<sup>3</sup>。

2) 采用氨-亚硫酸铵脱硫工艺,可以从根本上避免产生结垢堵塞现象,脱硫副产品亚硫酸铵可回收供给造纸厂制浆使用。该脱硫工艺系统简单,副产品回收系统简便,可相对减少一次性投资。

3) 采用喷雾泡沫洗涤塔可在较小的液气比下获得较大的液气接触面积,进而获得较高的脱硫除尘效率;而且较小的液气比可以减少循环液量,从而减少循环泵的数量或减小型号,降低运行成本。对整个系统都考虑了防腐措施,反应塔内壁、管道、泵、搅拌器、储罐内壁、烟道等部位,都采用性能良好的防腐材料进行防腐处理。

4) 保证本脱硫装置连续运行,年运行时间满足业主要求。同时,设置旁路烟道以保证锅炉及脱硫系统的安全生产和正常运行。

5) 为确保整个系统连续可靠运行,应采用优良可靠的设备,以确保脱硫系统的可靠运行。

6) 按现有场地条件布置脱硫系统设备,因地制宜,力求紧凑合理,节约用地。

7) 最大限度地循环利用脱硫液,但是由于烟气中含有一定浓度的硫酸盐和  $\text{Cl}^-$  离子,且反应塔内部分水分蒸发,因此形成循环液中盐和  $\text{Cl}^-$  离子的积累,由于过高的盐和  $\text{Cl}^-$  离子浓度会降低脱硫效率和腐蚀脱硫装置,所以必须排放少量的脱硫液并补充少量工业用水。把  $\text{Cl}^-$  离子控制在 20g/L,亚硫酸盐控制在氨-亚硫酸铵工艺所要求的数

值范围内。

### 3. 设计条件

某热电厂锅炉烟气参数如下：

- 1) 烟气温度：160℃。
  - 2) 烟气量：400000m<sup>3</sup>/h (252200Nm<sup>3</sup>/h)。
  - 3) 烟尘浓度：400mg/Nm<sup>3</sup>。
  - 4) SO<sub>2</sub> 浓度：2000mg/Nm<sup>3</sup>。
  - 5) 烟气中水蒸气体积比  $x_{H_2O} = 0.07$
  - 6) 现场锅炉引风机两台，型号：Y4 - 73. NO：22F；风量：264600m<sup>3</sup>/h；风压：2195Pa；N = 280kW。
  - 7) 利用已有循环沉淀池：长×宽×深，循环水管网尺寸，循环泵型号、台数、流量、扬程、电动机功率。
  - 8) 提供使用的场地面积及方位。
  - 9) 配套静电除尘器型号：GB 1000 - 3。
- 注：如无法提供第4) 条数据，可改为提供燃料消耗量和燃料含硫量来估算；新建项目则不必提供第6)、7) 条内容。

### 4. 可达到的排放标准

- 1) 烟尘浓度：100mg/Nm<sup>3</sup>；
- 2) SO<sub>2</sub> 浓度：100mg/Nm<sup>3</sup>；
- 3) 烟气黑度：1 级；
- 4) 烟气温度：~80℃。

### 5. 脱硫除尘工艺流程说明

亚硫酸铵法脱硫工艺流程如图4-28所示。

#### (1) 脱硫除尘系统运行参数

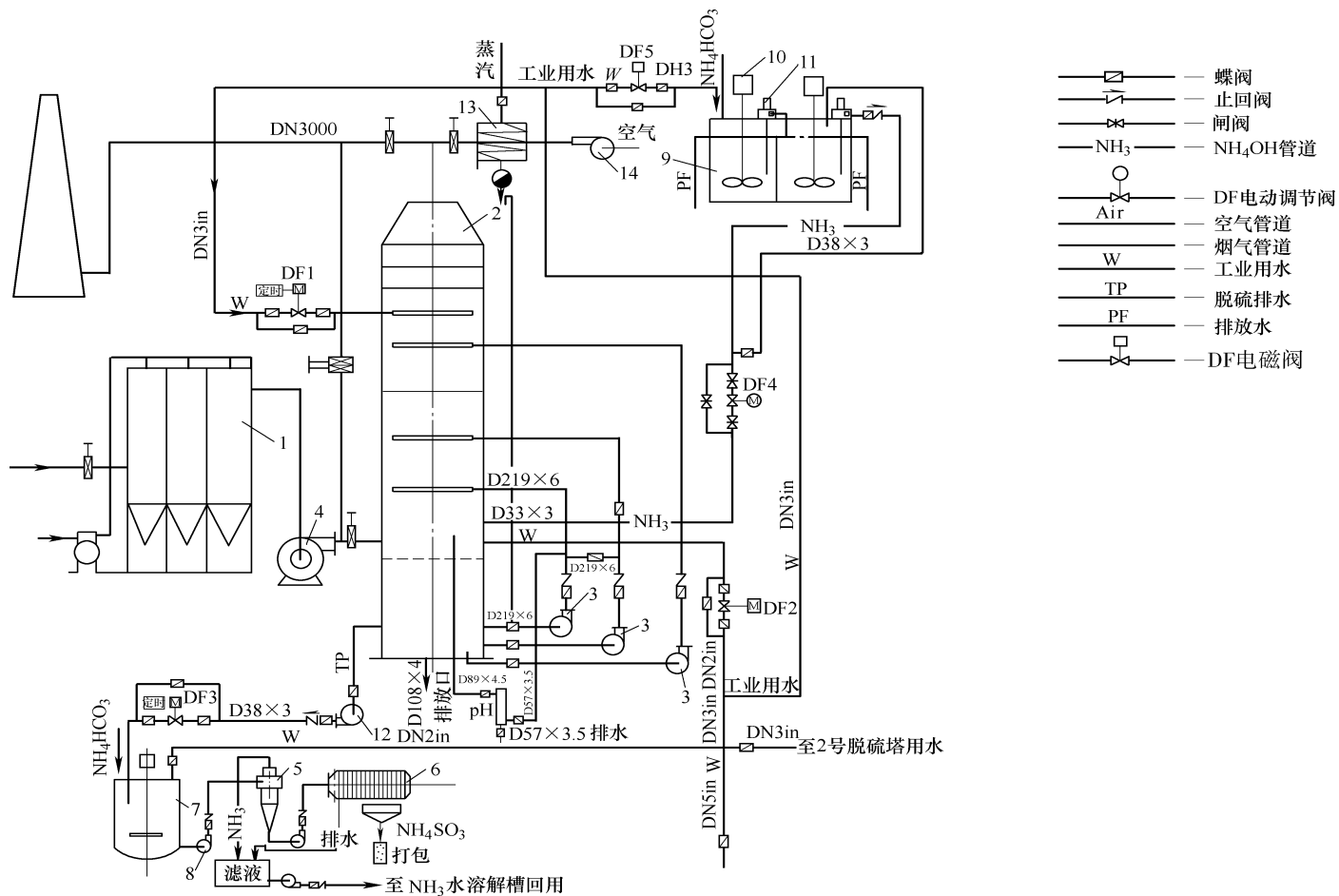
- 1) NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub> 耗量  $G_A = 2M_{NH_3} \times G_{SO_2}/M_{SO_2} = 34 \times 479/64 = 255\text{kg/h}$   
式中  $G_{SO_2}$ ——脱除 SO<sub>2</sub> 的重量，479kg/h。
- 2) 循环液量  $G_L = L/G \times Q_0 = 3 \times 252200\text{Nm}^3/\text{h} = 757\text{Nm}^3/\text{h}$ ，脱硫效率  $\eta_s = 95\%$ 。
- 3) 吸收液亚硫酸盐含量  $G_{YA} = 500\text{g/L}$ ，pH 值控制在 5.38 左右。
- 4) 脱硫产物亚硫酸铵产量  $W_{NH_4} = (\text{亚硫酸铵分子量/碳酸氢铵分子量}) \times \text{吸收碳酸氢铵量} = (116/36) \times 479\text{kg/h} = 868\text{kg/h}$

$$5) \text{ 排出亚硫酸铵溶液 } W_{JP} = \frac{W_{NH_4}}{G_{NH_4}} = \frac{868}{500} \text{m}^3/\text{h} = 1.74\text{m}^3/\text{h}$$

$$\text{由于吸收液密度 } \rho_{JP} = \frac{W_{NH_4} + W_{H_2O}}{V_{H_2O}} = \frac{500 + 1000}{1000} \text{t/m}^3 = 1.5\text{t/m}^3$$

$$\text{排出吸收液, } W_{JP} = 1.74 \times \rho_{JP} = 1.74 \times 1.5\text{t/h} = 2.61\text{t/h}$$

$$\text{其中排出水 } W_{HJ} = W_{JP} - W_{NH_4} = (2.61 - 0.87)\text{t/h} = 1.74\text{t/h}$$





(2) 吸收塔及脱硫过程 吸收塔的结构为逆流喷雾泡沫吸收塔, 由于采用氨吸收和自冲洗塔板, 因此不会发生结垢堵塞。采用喷雾加泡沫塔板组合方式, 可在液气比  $L/G=3$  时, 获得较大的液气接触面积, 进而获得较高的气相吸收总传质系数  $K_G$ , 因而获得高的脱硫效率, 并且小的液气比可以减少循环液量, 从而减少循环泵的数量或大小, 降低运行成本。

锅炉排烟经过静电除尘器后, 通过增压风机送入喷雾泡沫脱硫塔。烟气首先经过二层喷嘴组的喷雾洗涤吸收, 由于洗涤液被特制的螺旋喷嘴雾化成比表面积极大的雾滴, 可以与烟气进行充分的传质、吸收、除尘过程, 喷雾吸收液由吸收塔循环泵供给。净化后的烟气再经过一层鼓泡塔板液膜吸收洗涤, 进行二次脱硫除尘过程。同时, 泡沫塔板对烟气具有一定的脱水作用, 可减少烟气带水量。经过喷雾吸收洗涤及泡沫吸收洗涤的烟气中夹带着一定的水滴, 在进入烟道、引风机、烟囱前必须进行脱水, 为此在脱硫塔内要设置两层折流板除雾器。也可在塔外设计一个除雾脱水器, 脱除水雾后的烟气方可进入引风机、烟道及烟囱。烟气经过上述处理后, 可以达到要求的排放标准。

还必须说明的是, 根据国家臭气排放标准, 对 60m 以上烟囱, 脱硫排烟中的氨含量不能超过  $75\text{kg/h}$ , 本示例折算后, 排氨浓度不能超过  $300\text{mg/Nm}^3$ 。为此可参考图 4-24, 得到在排烟中允许夹带的氨气量时吸收液的碱度为 22 滴度, 亚硫酸铵对亚硫酸氢铵的比值为 0.34, 吸收效率为 95.3%。可以计算吸收液的  $S/C$  为 0.873, 吸收液控制 pH 值为 5.38, 吸收液总亚硫酸盐浓度为  $500\text{g/L}$ 。这样的工艺参数可用于单塔吸收流程。

由于经过湿法洗涤后, 烟气温度已低于露点 (约  $48^\circ\text{C}$ ), 流经烟道、引风机和烟囱后, 会不断产生冷凝水, 腐蚀沿途设施并产生白烟。一般应进行烟气再加热, 把烟温升到  $80^\circ\text{C}$ 。由于烟气换热器 (GGH) 使用中存在的问题较多, 所以不少业内人士经调查研究后提出, 在没有很好解决存在的问题之前, 也可用其他方案加热升温烟气温度。本项目采用蒸气加热空气到  $250^\circ\text{C}$ , 再同湿烟气混合把湿烟气升温到  $\sim 80^\circ\text{C}$  的方案。

### (3) 升温所需热量 $Q$

$$1) Q = \Delta H = H_{80} - H_{48} = V_{80} \times h_{80} - V_{48} \times h_{48}$$

烟气成分  $V_{\text{CO}_2} = 1.01\text{Nm}^3/\text{kg}$ ,  $V_{\text{N}_2} = 5.57\text{Nm}^3/\text{kg}$ ,  $V_{\text{O}_2} = 0.296\text{Nm}^3/\text{kg}$ ,  $V_{\text{H}_2\text{O}} = 0.553\text{Nm}^3/\text{kg}$ ,  $V_{\text{SO}_2} = 0.0123\text{Nm}^3/\text{kg}$

$$V_y = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{SO}_2} = (1.01 + 5.57 + 0.296 + 0.553 + 0.0123)\text{Nm}^3/\text{kg} \\ = 7.44\text{Nm}^3/\text{kg}$$

$$h = (1.01/7.44)h_{\text{CO}_2} + (5.57/7.44)h_{\text{N}_2} + (0.296/7.44)h_{\text{O}_2} + (0.553/7.44)h_{\text{H}_2\text{O}} + \\ (0.012/7.44)h_{\text{SO}_2}$$

$$h_{80} = 0.136 \times 1.6802 \times 80 + 0.749 \times 1.2956 \times 80 + 0.04 \times 1.3153 \times 80 + 0.0016 \times \\ 1.6802 \times 80 + 0.07 \times 1.5030 \times 80 = 108.75\text{kJ/m}^3$$

$$h_{48} = 65\text{kJ/m}^3$$

$$H_{80} = 400000 \times (353/433) \times h_{80} = 326097 \times 108.75 = 35463049 \text{ kJ/h}$$

$$H_{48} = 400000 \times (321/433) \times h_{48} = 296536 \times 65 = 19274840 \text{ kJ/h}$$

$$Q = \Delta H = H_{80} - H_{48} = 35463049 - 19274840 = 16188209 \text{ kJ/h}$$

2) 蒸汽耗量  $G = \Delta H/3070 = 16188209/3070 \text{ kg/h} = 5273 \text{ kg/h} = 5.3 \text{ t/h}$  (当用  $p = 0.3 \text{ MPa}$ ,  $T = 300^\circ\text{C}$  过热蒸汽加热时, 查表 13-9,  $h'' = 3070 \text{ kJ/kg}$ )

3) 计算用  $250^\circ\text{C}$  热空气混合加热湿烟气的热空气量  $V_k$ , 在 4.5.7 已用公式:

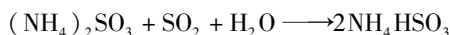
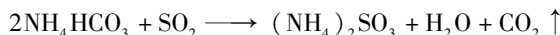
$$V_s \times c_{py48} \times 48 + V_k \times c_{k250} \times 250 = (V_s + V_k) c_{py80} \times 80$$

$$400000 \times (321/433) \times 1.3541 \times 48 + V_k \times 1.3370 \times 250 = 400000 \times (353/433) \times 1.3594 \times 80 + 1.3594 \times 80 \times V_k$$

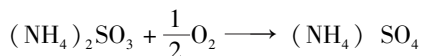
$$19273891 + 334.25 V_k = 35463701 + 108.75 V_k$$

$$V_k = \frac{35463701 - 19273891}{(334.25 - 108.75)} \text{ m}^3/\text{h} = \frac{16189810}{225.5} \text{ m}^3/\text{h} = 717.95 \text{ m}^3/\text{h}$$

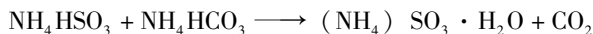
(4) 脱硫反应 脱硫过程主要化学反应如下:



副反应:



(5) 加碳酸氢铵中和反应



此化学反应为吸热反应, 溶液温度不经冷却即可降到  $0^\circ\text{C}$  左右, 由于亚硫酸铵比亚硫酸氢铵在水中的溶解度小, 所以亚硫酸铵会过饱和而从溶液中结晶析出。

(6) 分离 由中和反应器底部, 引出的含亚硫酸铵结晶的悬浮液, 进入离心机, 分离出固体亚硫酸铵产品。滤液进入母液槽, 继续循环吸收  $\text{SO}_2$ 。

洗涤吸收液吸收  $\text{SO}_2$  后, pH 值迅速下降, 通过 pH 计检测, pH 值低于 5.38 时, 向脱硫塔加进氨液, 调整好吸收液的 pH 值后循环使用。

(7) 脱硫产物和废水处理 脱硫塔中生成的脱硫产物亚硫酸铵结晶, 经过离心机分离过滤脱水后, 经过干燥包装入库。对于本套工艺, 废水量计算如下: 脱硫除尘废水拟经混凝沉淀曝气, 保证其色度、pH、SS、COD、重金属等指标均能达标排放。

1) 脱硫排水量:

① 脱硫烟气带入水量

$$W_{Hy} = V_y \times \rho_{160} \times X_H = 400000 \times 0.8288 \times 0.07 \text{ t/h} = 23.2 \text{ t/h}$$

② 冲洗除雾器带入水量

$$W_{HM} = 2W_{MIZ} + W_{MIP} + W_{MZZ} = (2 \times 1.69 + 1 + 1) \text{ t/h} = 5.4 \text{ t/h}$$

③ 吸收用 20% 碳酸氢铵的溶液注入量

$$W_{HA} = 1.27 \text{ t/h}, \text{ 带入水量 } W_{HNNH4} = (255 - 255 \times 0.2)/0.2 \text{ kg/h} = 1.02 \text{ t/h}$$

④ 排放脱硫产物带出水量

$$W_{HJP} = W_{JP} - W_{NNH4} = (2.61 - 0.87) \text{ t/h} = 1.74 \text{ t/h}$$



⑤ 脱硫排烟带出水量

$$W_{HW} = V_y \times \rho_{160} \times x_{tw} = 400000 \times 0.8288 \times (1 - x_{H_2O}) \times 0.078t/h$$
$$= 331520 \times 0.93 \times 0.078t/h = 24t/h$$

$$W_{ZON} = W_{Hy} + W_{HM} - W_{HJP} + W_{HNH4} + W_{HW} = (23.2 + 5.4 + 1.02 - 1.74 - 24)t/h = 3.9t/h$$

经过水平衡计算，脱硫塔净加进水 3.9t/h，为了保持水位稳定每小时排水 3.9t/h。排放脱硫产物的水  $W_{HJP} = 1.74m^3/h$ ，经过离心分离的滤液可考虑一部分回用于氨水制备系统。如果考虑一半回用，另一半排放，那么  $0.87m^3/h$  的排水应计入废水处理量。

对于回流使用的  $0.87m^3/h$  滤液，其中氯离子含量为 20g/L，带入吸收液中的氯离子  $M_{CLV} = 0.87m^3/h \times 20kg/m^3 = 17.4kg/h$ 。

2) 核算循环吸收液中氯离子浓度：

脱硫排放的水还不一定就是要处理的废水，要核算吸收液中氯离子是否超过 20g/L。如果超过了，还要为吸收液氯离子达标再排放需要的水量，废水处理量则加上氯离子达标的排水量  $W_{CLP}$ 。

① 当燃煤中氯的含量未给出时，可按大多数煤含氯约为 0.05% 计算，烟气中的氯全部进入吸收液的质量经过 4.5.6 计算为： $W_{CLY} = 7.8kg/h$ 。

② 工业用水中的氯，可在水质资料查到  $C_{CLW} = 80mg/L$ （因水源不同而异）。当循环槽体积  $V_{XUN} = 176m^3$  时， $W_{CLW} = 176 \times 80 \times 10^3mg = 14080 \times 10^3mg \approx 14kg = 14kg$ 。

③ 碳酸氢铵氨标准中无含氯量，只有残留物，对合格品为 0.8%，但其中含多少氯不好确定，按理想状态全是氯时， $W_{CLA} = 255 \times 0.004kg/h = 1.02kg/h$

④ 氨水中的水带入的氯， $W_{CLNH} = 80 \times 1.02kg/h = 0.08kg/h$

⑤ 回用滤液带入的氯离子  $W_{CLV} = 17.4kg/h$

其中①、③、④、⑤四项是每小时进入吸收液的氯，循环槽中水含氯是可以包含在  $\leq 20g/L$  的指标值内，这样总含氯量  $M_{ZCL} = (7.8 + 1.02 + 0.08 + 17.4)kg/h = 26.3kg/h$ 。要保持  $Cl^- \leq 20g/L$ ，脱硫塔的排水量为： $W_{CLP} = 26.3/20 = 1.32t/h$ ，由于脱硫塔每小时已有 3.9t 排水，已能满足  $Cl^-$  的排出。所以，废水处理量  $W_{FEI} = W_{ZON} + 0.5W_{HJP} = (3.9 + 0.87)t/h = 4.77t/h$ 。

6. 主要脱硫及配套设备报价

序号	名称	型号及规格	数量/台	价格/万元
1	脱硫塔	φ6400mm×26m（钢衬玻璃鳞片）	1	262
2	脱水器	折流板	2	已计入脱硫塔内
3	中和反应器	D=1000mm，H=1200mm N=1.5kW	1	1.5
4	烟道闸板	4m×2m D=3m	2 1	24 12
5	循环水管、附件	φ219mm×6mm 100m，φ159mm×4.5mm 等	1	22.8
6	排水池	3m×4m×2m	1	2.4
7	排烟道	D=3m，L=50m（衬玻璃鳞片）	1	50

(续)				
序号	名称	型号及规格	数量/台	价格/万元
8	电气设备	电控柜、电缆、电气设备等	1	25
9	自控设备	pH计、重度计、电动调节阀、仪表等	1	40
10	排水管	$\phi 57\text{mm} \times 3.5\text{mm}$ 50m (S304)	1	1
11	排水泵	$Q = 20\text{m}^3/\text{h}$ $H = 30\text{m}$ $N = 5.5\text{kW}$	2	$2 \times 0.4 (= 0.8)$
12	增压风机	$Q = 200000\text{m}^3/\text{h}$ $H = 2790\text{Pa}$ $N = 250\text{kW}$	2	$2 \times 20 (= 40)$
13	空气加热风机	$Q = 71795\text{m}^3/\text{h}$ $N = 55\text{kW}$	1	7
14	空气/蒸汽 换热器	$20^\circ\text{C}/250^\circ\text{C}$ $40000\text{m}^3/\text{h}$	1	40
15	卧式离心机	$Q = 2.5\text{m}^3/\text{h}$ $N = 22\text{kW}$	1	10
16	干燥机	$G = 1\text{t}/\text{h}$ $N = 10\text{kW}$	1	10
17	粉料包装机	$G = 1\text{t}/\text{h}$ $N = 3\text{kW}$	1	5
18	循环水泵	$Q = 250\text{m}^3/\text{h}$ , $H = 39\text{m}$ , $45\text{kW}$	4	16
合计				569.5

7. 脱硫工程估价

序号	类别	名称	计算价格/万元
1	(一) 直接费用	脱硫及配套设备	504.5
2		电气及自控	65
3		土建	50
4		设备安装费	$(1+2) \times 15\% = 85.4$
5		运杂费	$(1+2) \times 3\% = 17.1$
6		设备调试及培训费	$(1+2) \times 5\% = 28.5$
合计			750.5
7	(二) 间接费用	工程及非标设计费	$(一) \times 5.5\% = 41.3$
8		税金	$[(一)+7] \times 5.5\% = 43.5$
9		不可预见费	$[(一)+7] \times 5\% = 39.6$
合计			124.4
总计			$(一)+(二) = 874.9$

8. 运行费用（按一年运行 7000h 计，一台 220t/h 锅炉计算）

1) 脱硫剂碳酸氢铵的费用：

$$1183\text{kg}/\text{h} \times 7000\text{h} \times 0.6 \text{ 元}/\text{kg} = 496.8 \text{ 万元}/\text{年}$$

2) 电费：

$$586\text{kW} \times 7000\text{h} \times 0.425 \text{ 元}/\text{kW} \cdot \text{h} = 174.3 \text{ 万元}/\text{年}$$

3) 水费:

$9\text{m}^3/\text{h} \times 7000\text{h} \times 0.65 \text{ 元}/\text{m}^3 = 4.1 \text{ 万元}/\text{年}$

4) 人工费:

$4 \text{ 人} \times 12000 \text{ 元}/\text{年} \cdot \text{人} = 4.8 \text{ 万元}/\text{年}$

5) 回收亚硫酸铵 5786t, 计价 180 元/t, 共计 104 万元

因此全年运行费用合计  $(496.8 + 174.3 + 4.1 + 4.8 - 104) = 576 \text{ 万元}$

所以每千克 SO<sub>2</sub> 脱除费用为  $5760000 \text{ 元} \div 3353000 = 1.72 \text{ 元}$

9. 经济效益及社会效益

- 1) 每年可削减 SO<sub>2</sub> 排放 3353t。
- 2) 每年可少交排污费 402 万元。
- 3) 每年可减少 SO<sub>2</sub> 污染引起的综合经济损失  $3353\text{t} \times 4300 \text{ 元}/\text{t} = 1441 \text{ 万元}$ 。

4.7 工业锅炉简易湿法脱硫

由于工业锅炉吨位相对较小, 脱硫工程规模小, 投资少, 场地条件差, 于是就对脱硫系统进行简化, 形成了既可以达到脱硫排放标准的指标, 又能节约资金的简易湿法脱硫。

下面就以简易湿法石灰脱硫和简易湿法氧化镁脱硫为例。脱硫工艺的简化体现在以下几方面:

(1) 脱硫剂制备系统 由于工业锅炉脱硫剂使用量较小, 故可以采用人工制备。利用一个搅拌槽或一个搅拌槽加一个储液槽, 人工开包加灰、加水搅拌而成。但要注意操作工人的工业卫生, 必须戴防尘口罩和现场通风除尘, 如图 4-29 所示。

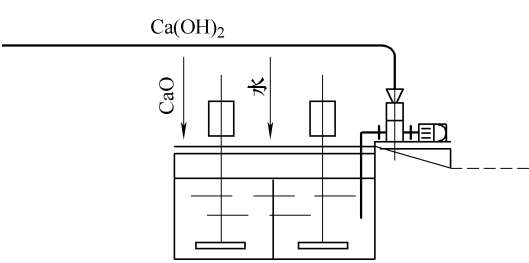


图 4-29 人工制备脱硫剂

(2) 脱硫自控系统 一般操作采用手动按电源开关启动或关闭、停车。脱硫塔添加脱硫浆液采用 pH 值控制自动注入脱硫塔的循环槽。脱硫系统的自动控制只做 pH 控制添加脱硫浆液, 其他操作运行都采用人工操作的方式。这样简化, 保证了最重要脱硫工序的自动控制, 不会影响脱硫过程, 只是增加了人工操作量。如图 4-30 所示。

(3) 利用改造的原湿法除尘沉淀池 把原有湿法除尘系统的沉淀池、清水池改造成脱硫系统的循环池、沉淀池, 把脱硫产物的沉淀分离在该池中完成。如图 4-31 所示。

把脱硫塔的循环槽改成地下循环沉淀池的简化, 脱硫塔也就简化了, 循环沉淀池也不必新建, 可以利用原来麻石湿法除尘的沉淀池。由于循环沉淀池体积大得多, 一般脱硫塔循环槽只能使脱硫循环液在槽内停留 6 ~ 8min, 而改造后的脱硫循环沉淀池可以设法做到停留 1h 左右。这样不仅有足够的时间完成脱硫化学反应, 而且脱硫产物的固体

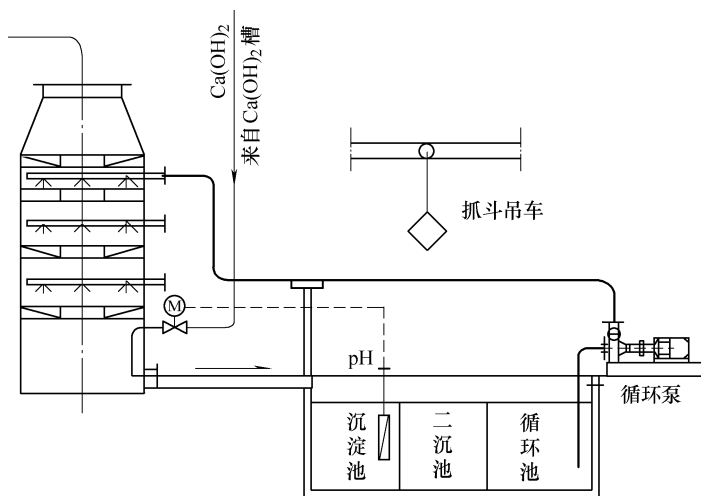


图 4-30 脱硫 pH 值控制

颗粒和尘粒绝大部分能沉淀分离，同时省掉了脱硫产物的浓缩、过滤分离设备，简化了脱硫工艺流程。由于循环沉淀池水容量大，硫酸钙不易过饱和，不易产生硫酸钙硬垢，而且循环沉淀池与脱硫塔分离，所以也便于维修。

由于大部分工业锅炉都采用湿法麻石除尘器，所以可把麻石除尘器改造成麻石脱硫除尘器。基本的改造措施是：

1) 改造原文丘里管。兼顾脱硫功能，使文丘里管既能除尘又有一定的脱硫功能，扩大文丘里管喉部面积。对于用于工业锅炉的麻石除尘器文丘里管，其喉部流速  $v_T$  约为  $40\text{m/s}$ 。喉速  $v_T$  越大，阻力越大除尘效率越高，能捕集的尘粒越小。但是阻力大还意味着能耗高，而且实际允许的压力损失制约了喉速的增大。不同的使用场合有相应的合适  $v_T$ 。对于气体吸收  $v_T = 20 \sim 25\text{m/s}$ 。以此  $v_T$  来改造文丘里管。并在文丘里管喉部前安装除尘、吸收液喷嘴，如图 4-32 所示。

## 2) 改造麻石除尘器为脱硫除尘器

降低筒体流速，在筒体内的适当位置安装脱硫喷嘴和旋流板，强化麻石除尘器的脱硫功能。或者重新设计喷雾旋流麻石脱硫除尘器。

一般麻石除尘器筒体上升流速  $v_{\perp}$  约为  $5.5\text{m/s}$ ，与吸收塔筒体流速  $2.5 \sim 3\text{m/s}$  相差较大。如果不把  $v_{\perp}$  降到  $3\text{m/s}$  左右，势必会影响吸收效率或烟气带水量大。降低筒体流速方案有：

拆掉原麻石除尘器，重新用麻石砌筑一麻石喷雾旋流脱硫除尘器；或者拆掉上一半，安装一钢衬铸石防腐耐磨层的喷雾旋流脱硫除尘筒体。如图 4-33 所示。

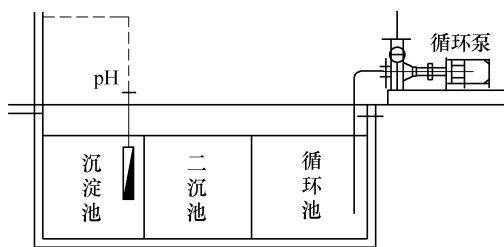


图 4-31 改造后的循环沉淀池

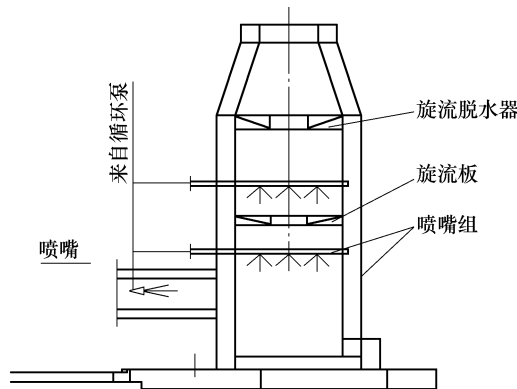


图 4-32 文丘里管改造

对于有一级干式除尘的系统，采用氧化镁脱硫时，可以采用麻石喷雾多孔板脱硫除尘器。如图 4-34 所示。

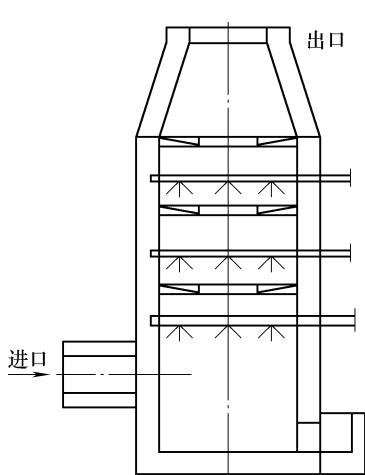


图 4-33 喷雾旋流除尘器

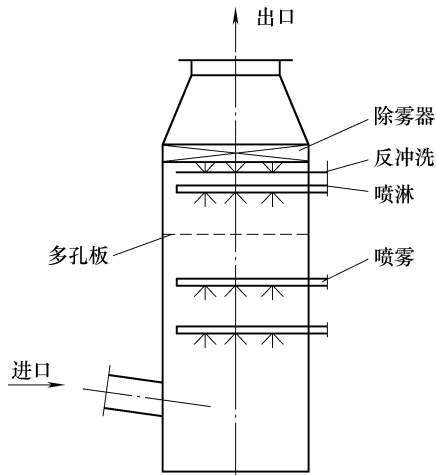


图 4-34 喷雾多孔板脱硫除尘器

(4) 简易湿法石灰（氧化镁）脱硫 简易湿法石灰脱硫系统流程如图 4-35 所示，由图可知：

- 1)  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  浆液制备利用地下搅拌池，每搅拌一池  $10\% \text{Ca}(\text{OH})_2$  浆液可用 4h。人工加灰、加水搅拌。
- 2) 脱硫塔采用麻石喷雾旋流脱硫除尘器。三层喷嘴、四层旋流板、顶层旋流板是除雾板。
- 3) 脱硫循环液通过沉淀池、二沉池把脱硫产物与脱硫循环液分离排出。用细网衬里抓斗抓到渣场。
- 4) 通过 pH 计检测，控制循环液 pH 值为 7.5；低于 7.5 时，向脱硫塔添加  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  浆液调整 pH 值到 7.5。

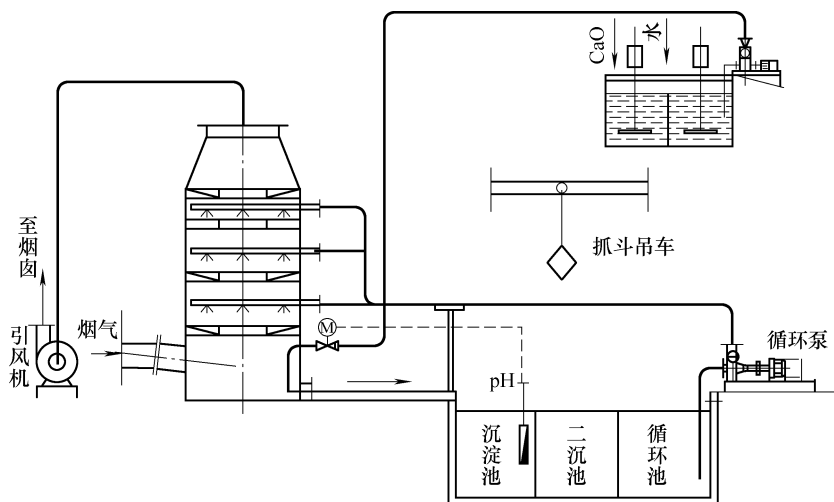


图 4-35 简易湿法石灰脱硫流程

5)  $L/G$  比为 3, 除尘效率约为 98% ~ 99%, 脱硫效率为 70% ~ 80%, 脱硫塔阻力为 1500Pa。

6) 为了防止结垢, 一定要严格控制 pH 值。同时要反冲洗旋流板, 把沾在板上的浆液颗粒及时冲洗下来。

7) 废水排放和处理量通过水平衡计算得到。在 4.8 的示例项目中详述。

8) 脱硫产物为  $\text{CaSO}_3$ , 同炉渣一起处理, 一般可以作为炉渣制砖原料或回填料使用。

#### (5) 简易湿法脱硫特点

1) 脱硫工艺流程简单, 主要是脱硫塔、循环沉淀池和循环泵。操作简易方便。

2) 适用于工业锅炉脱硫, 简易脱硫投资节省, 与工业锅炉投资相协调, 经济上合理。

3) 简易脱硫工艺合理选定设计工艺参数, 按规程运行可以获得理想的脱硫效果。

4) 我国工业锅炉当前采用的大多是简易脱硫工艺。运行中有不少成功的经验, 但也出现了一些问题, 分析其原因, 大多是设计或运行不当造成的。如引风机带水, 主要是由于脱硫塔除雾器脱水能力小于烟气带水量, 也有可能是脱硫塔筒体的上升流速过大而导致烟气大量带水。又如结垢堵塞问题, 可能是由于脱硫液在低液气比、高 pH 值下运行, 设备和管道很快结垢; 又或者由于脱硫循环液长期零排放循环使用, 硫酸盐过饱和和结晶析出结垢堵塞。再如设备及管道腐蚀损坏, 主要是由于防腐材料选用不当, 不能抵抗住恶劣腐蚀环境的强烈腐蚀所致。

## 4.8 工业及供热锅炉湿法烟气脱硫设计实例

### 4.8.1 $2 \times 40\text{t/h}$ 锅炉湿式氧化镁法烟气脱硫设计

#### 1. 工程概况

本公司根据国家  $\text{SO}_2$  总量控制要求和锅炉污染物排放标准、业主要求, 拟对北京  $\times \times$  供

热厂 2×40t/h 燃煤锅炉烟气实施脱硫工程。本项目实施后将对周围环境，特别是对大气污染物的控制治理以及改善周围地区的空气质量起到至关重要的作用，可获得巨大的环境效益和一定的经济效益。本公司采用袋式除尘加 MgO 喷淋泡沫塔烟气脱硫技术达到烟气排放标准。

## 2. 脱硫技术设计技术原则

1) 从技术、经济及装置运行稳定性、可行性上，考虑采用 MgO 作为脱硫剂，保证系统脱硫效率在 95% 以上，达到 SO<sub>2</sub> 的排放标准。

2) 采用 MgO 作为脱硫剂，可以从根本上避免产生结垢堵塞现象，并且根据国家相关的政策法规，低浓度的 MgSO<sub>4</sub> 溶液没有限制排放的要求，故采用 MgO 法进行脱硫可处理达标少量排放 MgSO<sub>4</sub> 溶液，进而简化脱硫工艺系统，减少一次性投入。

3) 采用喷淋泡沫洗涤方式，可在较小的液气比下获得较大的液气接触面积，进而获得较高的脱硫除尘效率；而且，较小的液气比可以减少循环液量，从而减少循环泵的数量或型号，降低运行成本。对整个系统都考虑了防腐措施，反应塔内壁、管道、泵、搅拌器、储罐内壁、烟道等部位都采用性能良好的防腐材料进行防腐处理。

4) 保证本脱硫装置连续运行，年运行时间大于 7000h。同时，保证锅炉及脱硫系统的安全生产和正常运行。

5) 为确保整个系统连续可靠运行，应采用优良可靠的低噪声辅机设备，以确保脱硫系统的可靠运行。

6) 按现有场地条件布置脱硫系统设备，力求紧凑合理，节约用地。

7) 最大限度地循环利用脱硫水，但是由于烟气中含有一定浓度的盐和 Cl<sup>-</sup> 离子，反应塔内部分水分蒸发，因此形成循环水中盐和 Cl<sup>-</sup> 离子的积累，由于过高的盐和 Cl<sup>-</sup> 离子浓度会降低脱硫效率和腐蚀反应装置，所以必须处理达标排放少量的脱硫水，并补充少量工业用水。

## 3. 设计条件

(公司名) 锅炉烟气参数如下：

- 1) 烟气温度：160℃；
- 2) 烟气量：120000m<sup>3</sup>/h；
- 3) 布袋除尘后烟尘浓度：50mg/Nm<sup>3</sup>；
- 4) SO<sub>2</sub> 浓度：800mg/Nm<sup>3</sup>；
- 5) 提供使用的场地面积及方位。

## 4. 可达到的排放标准

- 1) 烟尘浓度：30mg/m<sup>3</sup>；
- 2) SO<sub>2</sub> 浓度：50mg/m<sup>3</sup>；
- 3) 烟气黑度：<1 级；
- 4) 烟气温度：50℃。

## 5. 脱硫除尘工艺流程说明（见图 4-36 ~ 图 4-41 8LBY001-0）

(1) 脱硫除尘系统运行参数（单台锅炉）



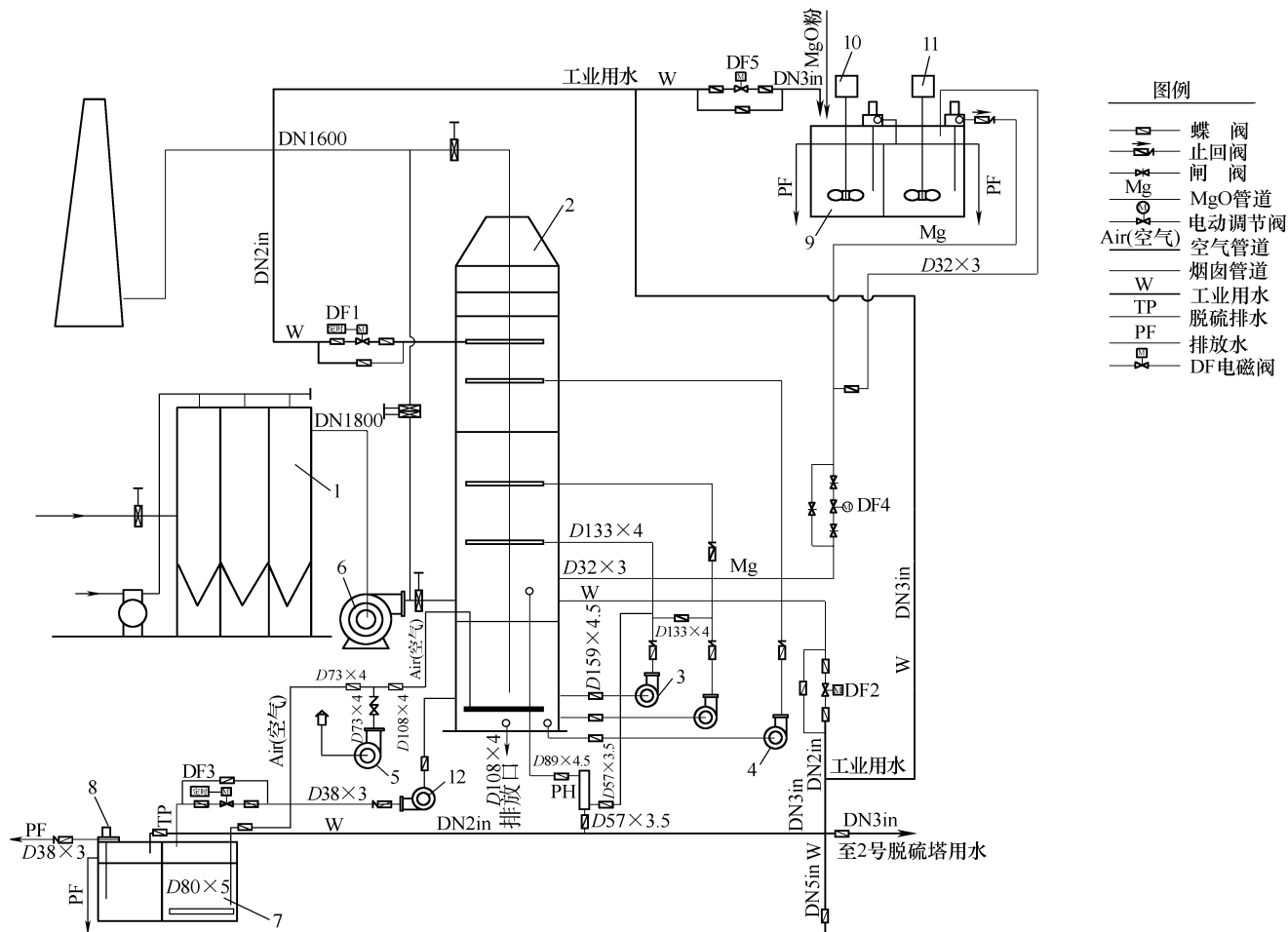
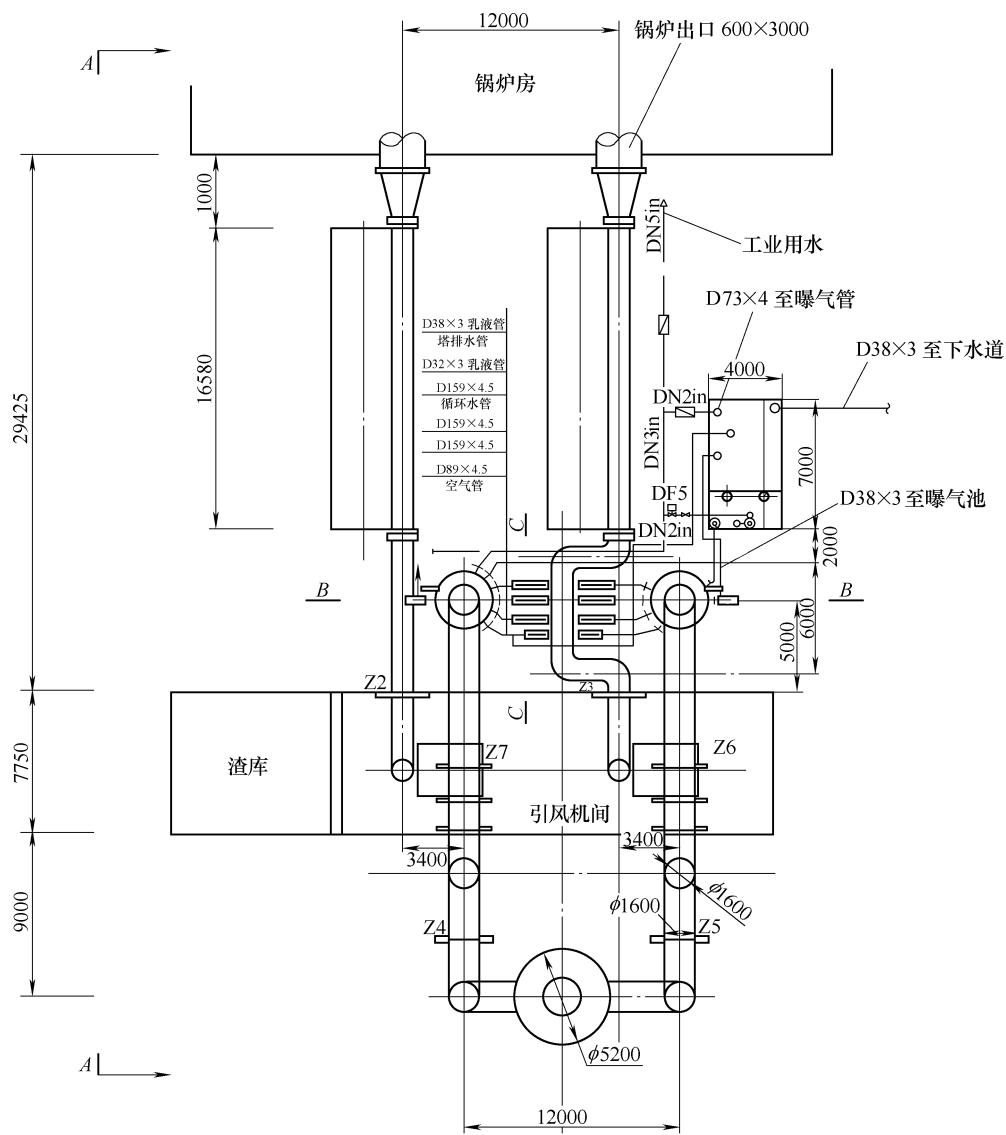


图4-36 2×40t/h锅炉脱硫除尘工艺流程图

1—袋式除尘器 2—脱硫塔 3、4—循环泵 5—罗茨鼓风机 6—引风机  
7—氧化沉淀池 8—立式排水泵 9—MgO浆液池 10—搅拌机 11—立式乳液泵 12—脱硫排水泵



注：1. 管道安装走向见流程图和有关剖面图。  
2. Z2~Z7 为管道支架。  
3. 烟道进引风机入口处应设支架支承。

图 4-37 2 × 40t/h 锅炉脱硫除尘平面布置图

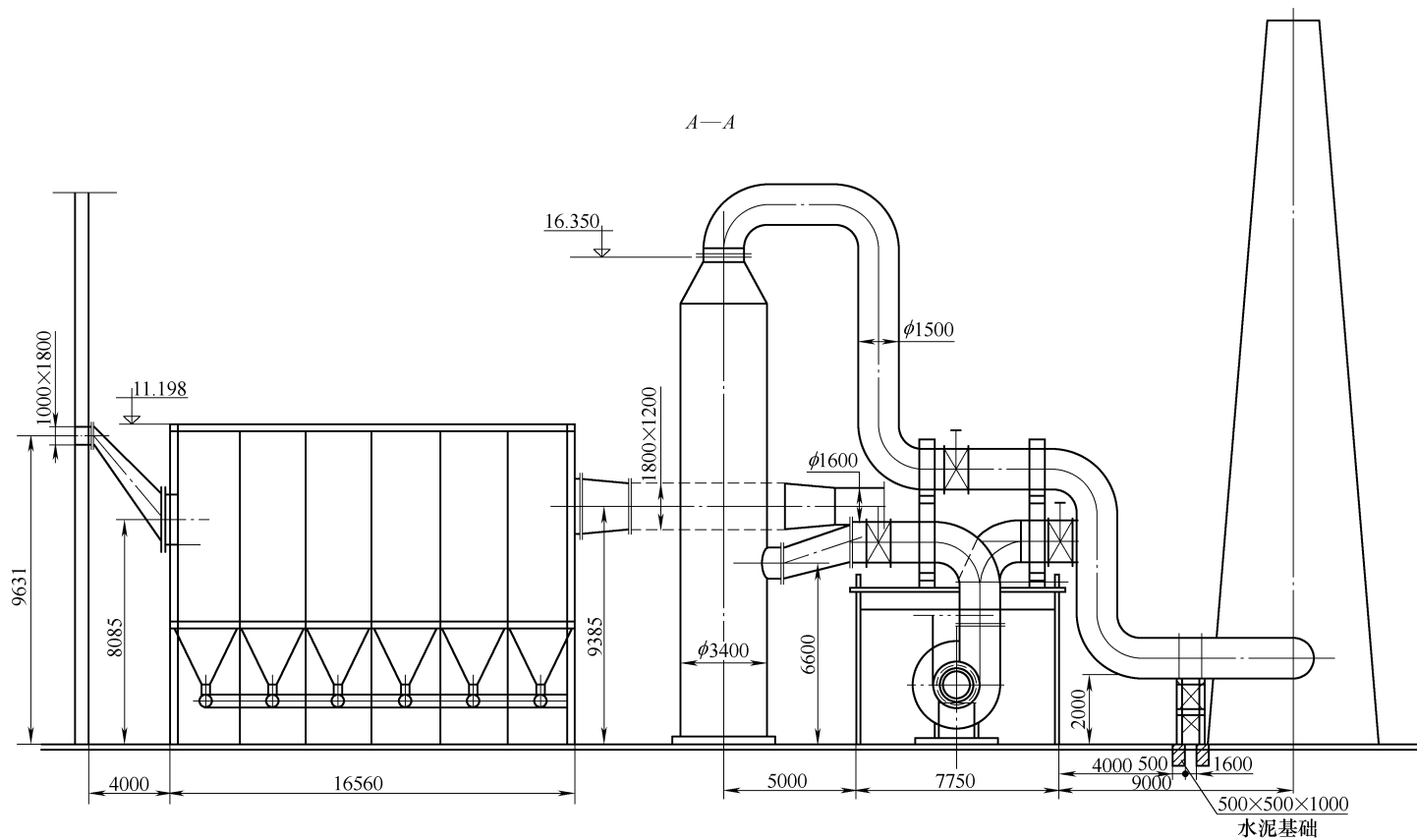


图4-38 2×40t/h锅炉脱硫除尘A—A剖面图

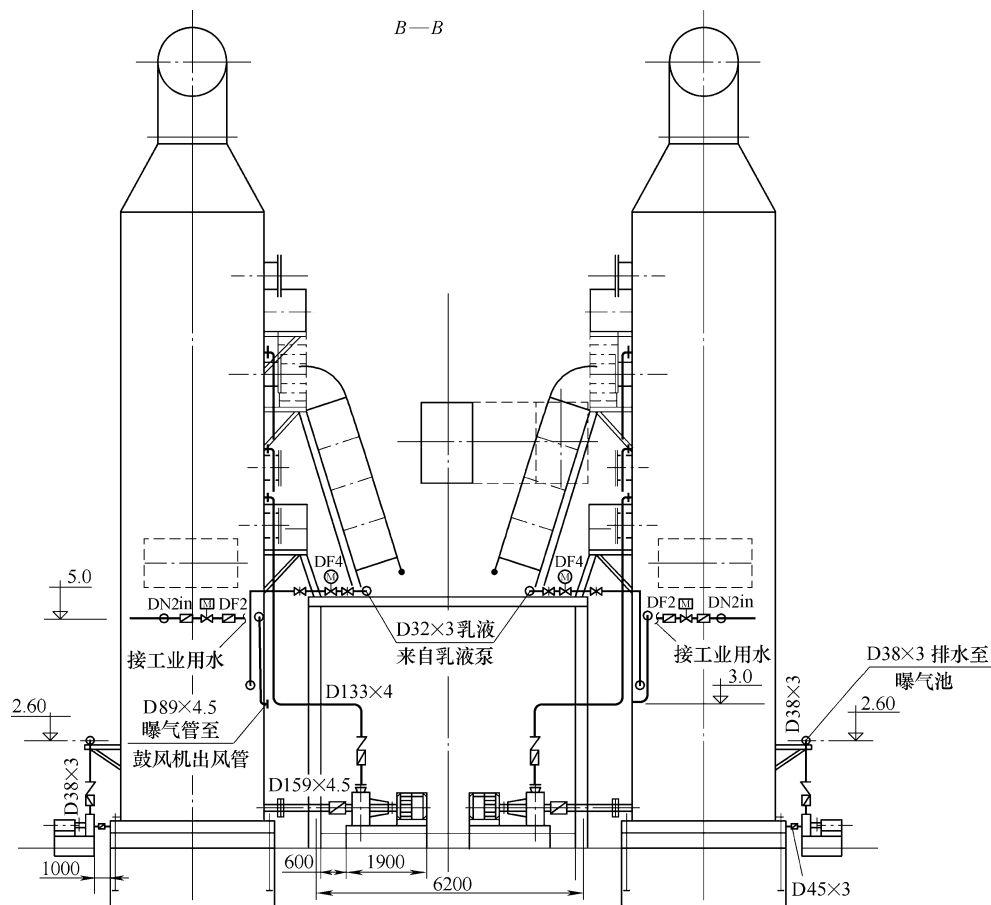


图 4-39 2 × 40t/h 锅炉脱硫除尘 B—B 剖面图

MgO 耗量：40kg/h；

循环液量：360m<sup>3</sup>/h；

曝气量：4m<sup>3</sup>/min；

待处理水量：2m<sup>3</sup>/h。

(2) 脱硫剂制备 外购 200 目左右的 MgO 粉储存在灰棚内，用人工小车运至浆液池旁倒入浆液池，加水搅拌配成 10% 左右的浆液，再由乳液泵送至乳液槽，搅拌均匀供脱硫使用，一般每次配制可供 4 ~ 8h 使用的乳液量。本方法优点是简单可靠，避免了使用气力输送 MgO 粉至储粉斗，以及储粉斗至乳液槽的管道输送过程中的搭桥、吸湿等因素导致堵塞。

(3) 吸收塔及脱硫过程 吸收塔的结构为逆向喷淋泡沫洗涤塔，由于采用 MgO 吸收和自冲洗大孔塔板不会发生结垢堵塞，所以采用喷雾加泡沫塔板方式可在较小的液气比下获得较大的液气接触面积，进而获得较高的脱硫除尘效率。工业实验及工业实用表

明, 在液气比为 5 时, 脱硫率达 95% 左右; 并且较小的液气比可以减少循环液量, 从而减少循环泵的数量或型号, 降低运行成本。锅炉排烟经过袋式除尘器后, 通过增压风机送入脱硫塔使烟气经两层喷嘴组的喷淋洗涤吸收, 由于洗涤液被特制的螺旋喷嘴雾化成比表积极大的雾滴, 可以与烟气进行充分的传质、吸收、涤尘过程。喷淋吸收液从喷淋布水器及喷嘴喷出, 从上到下流入塔底循环池中, 由循环泵再循环使用。净化后的烟气再经过一层塔板鼓泡液膜吸收发生二次脱硫除尘过程。同时, 泡沫塔板对烟气具有一定的脱水作用, 可减少烟气带水量。经过喷雾吸收洗涤及泡沫吸收洗涤的烟气中夹带着一定的水滴, 在进入烟道、引风机、烟囱前必须进行脱水, 为此在脱硫塔内要设置除雾脱水段, 脱除水雾后的烟气方可进入烟道及烟囱。经过上述烟气治理, 可达标排放。脱硫前段采用袋式除尘可有 99% 的除尘效率, 保证了除尘达标。

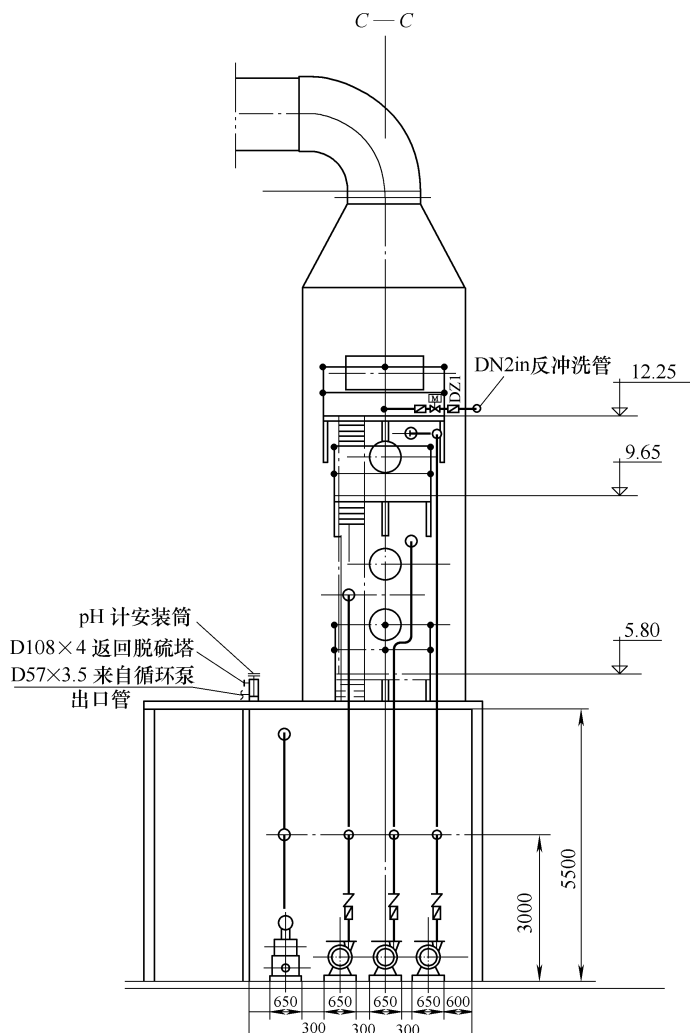


图 4-40 2×40t/h 锅炉脱硫除尘 C—C 剖面图

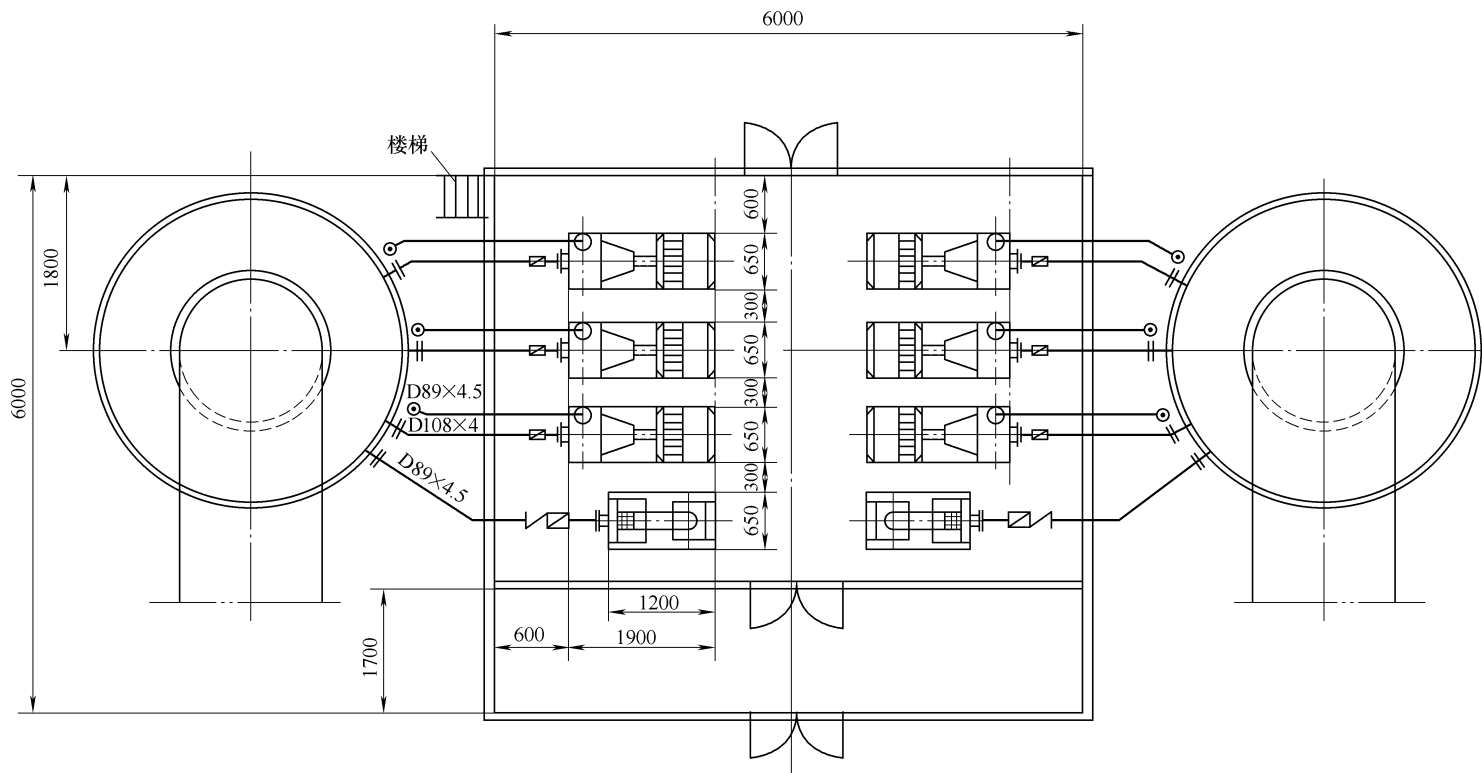
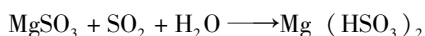
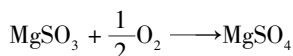
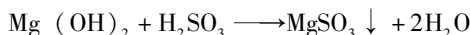
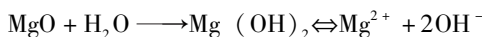


图4-41 2×40t/h锅炉脱硫除尘泵房平面布置图

由于经过湿法洗涤后烟气温度已到露点（约 50℃），因此流经烟道引风机和烟囱后，会不断产生冷凝水，对于在露点以下温度排放的烟气，烟道和烟囱都必须进行防水腐蚀、防酸腐蚀的措施。

(4) 脱硫反应 脱硫过程主要化学反应如下：



洗涤吸收液吸收  $\text{SO}_2$  后，pH 值迅速下降，通过 pH 计检测控制注入  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  悬浊液，调整到 pH=6.5 后循环使用。

(5) 脱硫废液废渣的处理 脱硫塔中生成的反应产物，对于工业和采暖锅炉一般不作回收利用，只经过沉淀脱水后即可与锅炉炉渣一起处理。由于进行强制氧化后生成的  $\text{MgSO}_4$  具有较大的溶解度（最大可生成约 30% 的溶液）所以实际上很少有固体废渣产生。只要通过维持循环液中 6%~10% 的  $\text{MgSO}_4$  含量就可以循环使用。对于本套工艺，每台脱硫塔的实际处理水量控制在  $2\text{m}^3/\text{h}$  左右，经曝气混凝沉淀可保证其色度、pH、SS、COD、重金属等指标均能达标排放。

(6) 关于锅炉烟气脱氮 烟气脱氮也是大气污染控制的重要课题，该项目没有提出脱氮要求，但是随着环境质量的不断提高，必然会要求实施烟气脱氮。可供采用的脱氮技术有低氮燃烧技术、炉内喷射脱氮剂脱氮，如尿素溶液，也可在锅炉后安装脱氮反应器。为此也将增加可观的投资。

(7) 脱硫塔（见图 4-42）

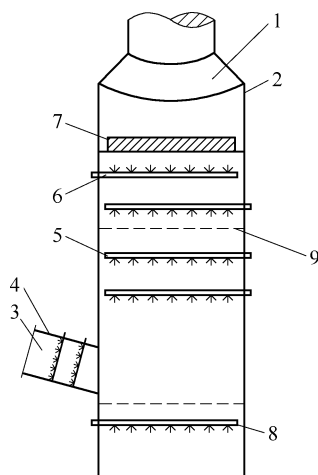


图 4-42 脱硫塔简图

1—脱硫塔本体采用碳钢衬玻璃鳞片防腐层 2—耐热玻璃鳞片防腐层 3—烟气进口  
4—特种耐高温耐腐蚀衬里 5—特种喷嘴组合 6—反冲洗喷嘴组 7—脱水器 8—塔内曝气组合 9—塔板



正常维修时应适时更换易损件，设备寿命为 20 年。

6. 主要控制回路 [见图 4-43 (见全文后插页)]

1) 循环浆液 pH 值控制脱硫剂添加量。通过 pH 值传感器控制电动调节阀 (DF4)，实现脱硫剂添加量的控制。

2) 脱硫塔内液位控制补水量。通过液位变送器 (LF1) 输出信号控制电磁阀 (DF2)，实现补水量的自动调节。

3) 随着脱硫过程的进行循环浆液中的  $\text{MgSO}_4$  浓度不断增加，需及时地外排部分浆液。通过定时器 KC2 与电磁阀 (DF3) 的联锁实现对浆液外排量的控制。

4) 烟气温度在线监测及控制。为保证脱硫塔的安全运行，在塔的出口位置设有温度传感器 (T12)。

5) 在塔内烟气入口位置设有温度传感器 (T11)。

6) 除雾器反冲洗定时控制。通过 KC1 时间继电器设定反冲洗时间，通过 DF-1 电磁阀控制。

7) 一号  $\text{MgO}$  熟化池液位控制。池内设液位传感器 (LT2)，LT2 控制电磁阀 (DF5) 的开关和搅拌机的开关。

8) 二号浆液储池内液位控制。罐内设液位传感器 (LT3)，LT3 控制脱硫浆液输送泵的开停和控制浆液搅拌机的启停。

9) 脱硫系统控制，设计自动和手动两套方式。

7. 主要脱硫及配套设备报价

序号	名称	型号及规格	数量/台	价格/万元
1	脱硫塔	$\phi 3400\text{mm} \times 16\text{m}$ (钢衬玻璃鳞片)	2	60
2	循环泵	$Q = 100\text{m}^3/\text{h}$ $N = 22\text{kW}$ $H = 27\text{m}$	6	7.5
3	氧化风机	$Q = 7\text{m}^3/\text{min}$ $N = 11\text{kW}$ $H = 58842\text{Pa}$	2	3.0
4	烟道闸板	$1000\text{mm} \times 1400\text{mm}$ $D = 1600\text{mm}$	4	5.0
			2	3.0
5	循环水管, 阀门, 附件	$DN150, DN125$ 钢衬胶 100m	1	6.0
6	排烟道	$D = 1500\text{m}, L = 60\text{m}$ (防腐)	1	6.0
7	电气设备	电控柜、电缆、电气设备等	2	5.0
8	自控设备	pH 计、电动调节阀、仪表等	2	16
9	进烟道	$\phi 1600\text{mm}$ 40m	1	4.0
10	立式排水泵	$Q = 15\text{m}^3/\text{h}, H = 15\text{m}, N = 2.2\text{kW}$	1	1
11	立式乳液泵	$17\text{m}^3/\text{h}, 25\text{m}, 3\text{kW}$	2	1.2
12	排水泵	$15\text{m}^3/\text{h}, 15\text{m}, 2.2\text{kW}$	2	1.0
13	氧化缓冲池	$52\text{m}^3$	1	2.6
14	$\text{MgO}$ 浆液池	$20\text{m}^3$	1	1.2
15	搅拌机	$n = 90\text{r}/\text{min}, N = 5.5\text{kW}$	2	2.5
合计				125

### 8. 运行费用（按一年运行 2880h 计，一台 40t/h 锅炉计算）

#### 1) 脱硫剂 MgO 粉费用：

$40\text{kg/h} \times 2880\text{h} \times 300\text{元/t} = 3.45\text{万元/年}$

#### 2) 电费：

$67\text{kW} \times 2880\text{h} \times 0.5\text{元}/(\text{kW} \cdot \text{h}) = 9.64\text{万元/年}$

#### 3) 水费：

$5\text{m}^3/\text{h} \times 2880\text{h} \times 2\text{元}/\text{m}^3 = 2.88\text{万元/年}$

#### 4) 人工费：

$4\text{人} \times 4000\text{元/季} \cdot \text{人} = 1.6\text{万元/年}$

因此一年运行费用合计  $(3.45 + 9.64 + 2.88 + 1.6)\text{万元} = 17.57\text{万元}$ 。

所以每千克  $\text{SO}_2$  脱除费用为  $175700\text{元} \div 163200 = 1.076\text{元}$

### 9. 经济效益及社会效益

#### 1) 每年可削减 $\text{SO}_2$ 排放 163.2t。

#### 2) 每年可少交排污费 19.6 万元。

#### 3) 每年可减少 $\text{SO}_2$ 污染引起的综合经济损失 $163.2\text{t} \times 4300\text{元/t} = 70.2\text{万元}$

## 4.8.2 $2 \times 35\text{t/h}$ 锅炉烟气钠碱法脱硫设计

### 1. 工程概况

北京市 × × 公司根据国家  $\text{SO}_2$  总量控制要求和锅炉污染物排放标准、业主要求，拟对 × × 厂的两台 35t/h 燃煤锅炉烟气实施脱硫工程。本项目实施后将对周围环境，特别是对大气污染物的控制治理，以及改善周围地区的空气质量起到至关重要的作用，可获得巨大的环境效益和一定的经济效益。北京市 × × 环保公司采用喷淋旋流塔烟气脱硫技术，提出该烟气处理的解决方案。

### 2. 方案设计技术原则

1) 从技术、经济及装置运行稳定性、可行性上，和业主确定 NaOH 作为脱硫剂，保证系统脱硫效率在 90% 以上。

2) 采用 Na 碱作为脱硫剂，可以从根本上避免产生结垢堵塞现象，并且根据国家相关的政策法规，低浓度的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液没有限制排放。故采用 Na 法进行脱硫可简化脱硫工艺系统，减少一次性投入。

3) 采用喷淋旋流洗涤方式可在较小的液气比下获得较大的液气接触面积，进而获得较高的脱硫除尘效率；而且较小的液气比可以减少循环液量，从而减少循环泵的数量或型号，降低运行成本。对整个系统都考虑了防腐措施，反应塔内壁、管道、泵、搅拌器、储罐内壁、烟道等部位，都采用性能良好的防腐材料进行防腐处理。

4) 保证本脱硫装置连续运行，年运行时间满足业主要求。同时，设计了脱硫后湿烟气的加热系统，可防止烟囱烟道被腐蚀，保证烟囱安全和烟气的扩散抬升和消除白烟。

5) 为确保整个系统连续可靠运行,应采用优良可靠的设备,以确保脱硫系统的可靠运行。

6) 按现有场地条件布置脱硫系统设备,力求紧凑合理,节约用地。

7) 最大限度地循环利用脱硫水,但是由于烟气中含有一定浓度的盐和  $\text{Cl}^-$  离子,反应塔内部分水分蒸发,因此形成循环水中盐和  $\text{Cl}^-$  离子的积累,由于过高的盐和  $\text{Cl}^-$  离子浓度会降低脱硫效率和腐蚀反应装置,所以必须排出少量的脱硫水并补充少量工业用水。

### 3. 设计条件

(公司名) 锅炉烟气参数如下:

- 1) 烟气温度:  $140^{\circ}\text{C}$ 。
- 2) 烟气量:  $69255\text{m}^3/\text{h}$ 。
- 3) 烟尘浓度(布袋后):  $50\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。
- 4)  $\text{SO}_2$  浓度:  $1800\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。
- 5) 现场锅炉引风机型号: GY35T-1ANO; 13D。
- 6) 提供使用的场地面积及方位。

### 4. 可达到的排放标准

- 1) 烟气浓度:  $30\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。
- 2)  $\text{SO}_2$  浓度:  $100\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。
- 3) 烟气黑度: 1 级。
- 4) 烟气温度: 加热至  $70^{\circ}\text{C}$ 。

### 5. 脱硫除尘工艺流程说明

流程图如图 4-44 (WYTG-4) 所示。

#### (1) 脱硫除尘系统运行参数

NaOH 耗量:  $34\text{kg}/\text{h}$ ;

循环液量:  $200\text{m}^3/\text{h}$ ;

曝气量:  $5\text{m}^3/\text{min}$ ;

待处理水量:  $2\text{m}^3/\text{h}$ 。

(2) 脱硫剂制备 厂方自备的 NaOH 溶液开桶后倒入稀释罐中,加水搅拌成 10% 左右的溶液,再由溶液泵送至脱硫使用,每次配制可供 4~6h 使用量。

(3) 吸收塔及脱硫过程 吸收塔的结构为逆流喷淋旋流洗涤塔,由于采用 NaOH 吸收不易发生结垢堵塞,所以采用喷雾加旋流方式可在较小的液气比下获得较大的液气接触面积,进而获得较高的脱硫除尘效率;并且较小的液气比可以减少循环液量,从而减少循环泵的数量,降低运行成本。锅炉排烟经布袋除尘器约可除去 99% 烟尘后进入脱硫除尘器,用螺旋喷嘴喷雾洗涤进行第一次除尘脱硫。烟气接着螺旋上升经过第二层喷嘴组的喷雾洗涤吸收。由于洗涤液被特制的螺旋喷嘴雾化成比表面积极大的雾滴,可以同烟气进行充分的传质、吸收、涤尘过程,喷淋吸收液由吸收塔循环泵供给。净化后的烟气再上升经过旋流板再一次进行脱硫和旋流脱水后进入副筒。

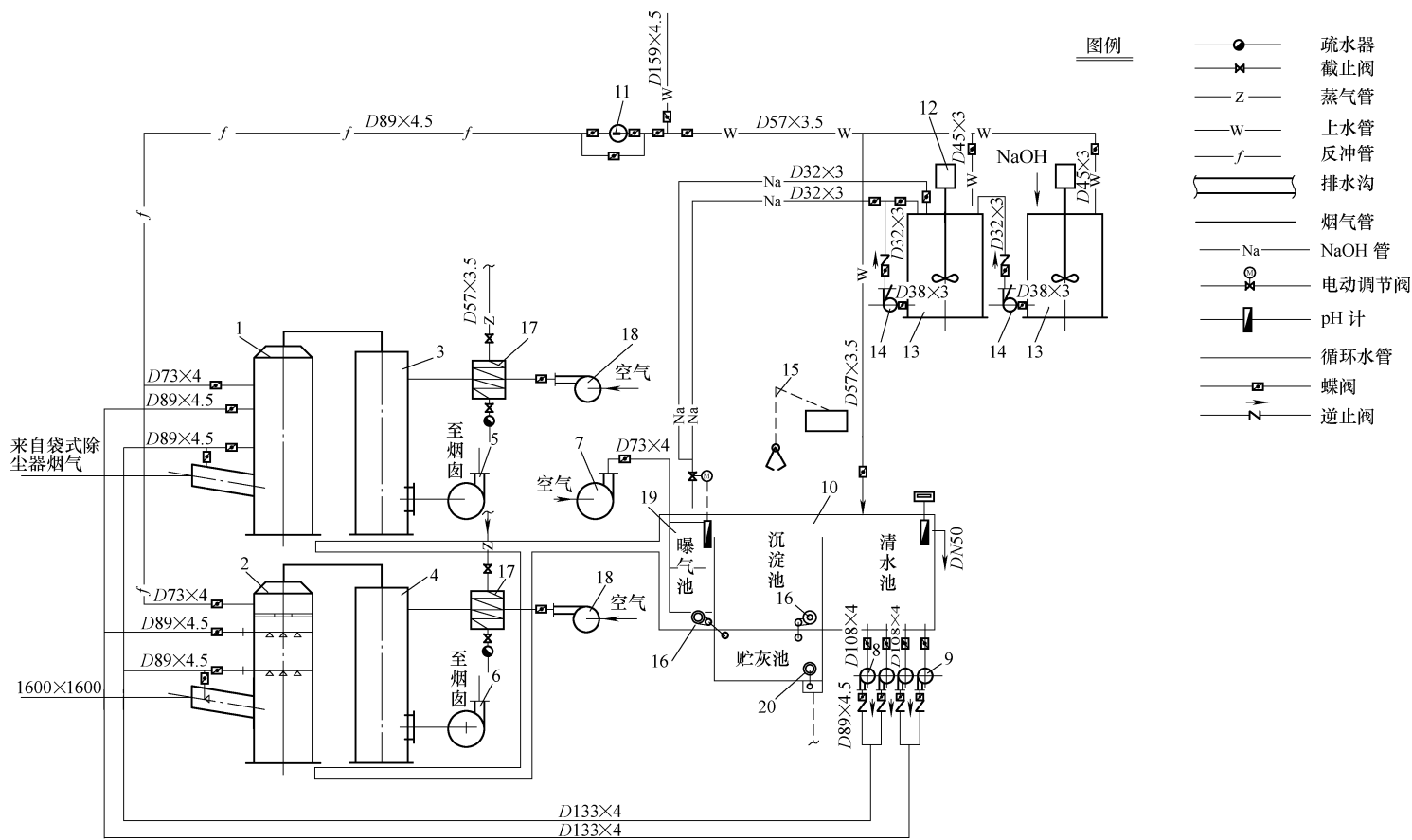
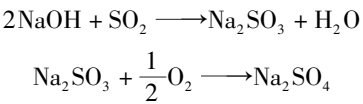


图4-44 2×35t/h锅炉脱硫除尘流程图

1、2—脱硫除尘器 3、4—副筒 5、6—引风机 7—鼓风机 8、9—循环泵 10—沉淀池 11—管道泵 12—搅拌机  
 13—碱液槽 14—碱液泵 15—旋转抓斗 16—液下污泥泵 17—空气加热器 18—加热风机 19—钢制暖气片 20—移动液下泵

由于经过湿法洗涤后烟气温度已低于露点（约 50℃），流经烟道引风机和烟囱时，会不断产生冷凝水，腐蚀沿途设施并产生白烟。一般应进行烟气再加热。再加热系统包括送风机和蒸气加热器，把烟气加热到约 65℃，这比用烟气余热加热系统在防止加热器腐蚀和系统运行可靠性方面要优越。否则，对于在露点下排放的烟气，烟道、引风机、烟囱都必须采取防水腐蚀和防酸腐蚀的措施。即在烟囱和烟道，内喷涂防水耐酸涂层。引风机也应选用耐腐蚀的。

(4) 脱硫过程 脱硫过程主要化学反应如下：



脱硫曝气是为了使  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  氧化成  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  的稳定产物，不再会分解出  $\text{SO}_2$ 。洗涤吸收液吸收  $\text{SO}_2$  后，pH 值迅速下降，通过 pH 计检测控制注入 NaOH 溶液，把循环水调整到合适 pH 值后，循环使用。烟尘经过循环沉淀池沉淀后，用液下污泥泵打入石灰池，灰沉淀后人工清理。

(5) 脱硫废液废渣的处理

脱硫塔中生成的反应产物，对于工业锅炉一般不作回收利用，只经过沉淀脱水后可同锅炉炉渣一同处理。由于在循环池中进行强制氧化后生成的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  具有较大的溶解度（最大可生成约 30% 的溶液），实际上除了烟尘处，很少有固体脱硫废渣产生。只要维持循环液中一定的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  含量就可供脱硫循环使用了。对于本套工艺，处理水量实际控制在  $2\text{m}^3/\text{h}$  左右，经混凝沉淀可保证其色度、pH、SS、COD、重金属等指标均能达标。

6. 主要脱硫及配套设备报价

序号	名称	型号及规格	数量/台	价格/万元
1	脱硫塔	φ3500mm × 15200mm(花岗岩)	2	2 × 25( = 50)
2	循环泵	100HUB - ZK, $Q = 100\text{m}^3/\text{h}$ $N = 30\text{kW}$ $H = 40\text{m}$	4	4 × 1.25( = 5)
3	氧化风机	$Q = 5\text{m}^3/\text{min}$ $N = 7.5\text{kW}$ $H = 48842\text{Pa}$	1 + 1	2 × 1.5( = 3)
4	循环水管	DN150, DN125, DN80, DN65, DN50, DN40, S304, Q235A	380m	5.25
5	阀门	DN40 ~ DN150,	41	1.5
6	排烟道	1000 × 1400 防腐	30m	4.8
7	液下污泥泵	50YW15 - 15, $Q = 15\text{m}^3/\text{h}$ , $H = 15\text{m}$ , $N = 1.5\text{kW}$	2	2 × 0.5( = 1)
8	空气加热器	SRZ	2	5
9	加热送风机	$9870\text{m}^3/\text{h}$ , $N = 7.5\text{kW}$	2	2 × 2( = 4)
10	碱液泵	50HUB - ZK $Q = 10\text{m}^3/\text{h}$ , $H = 30\text{m}$ , $N = 4\text{kW}$	2	2 × 0.35( = 0.7)
11	进烟道	1600mm × 1600mm, Q235A, 35m	1	4.5
12	液下泵	$Q = 10\text{m}^3/\text{h}$ , $H = 10\text{m}$ , $P = 1.1\text{kW}$ 移动式	1	0.2
13	碱液槽	φ1400mm × 2000mm, 搅拌 $n = 91\text{r}/\text{min}$ , $N = 4\text{kW}$	2	2 × 1.7( = 3.4)
合计				88.35

7. 脱硫工程估价

序号	类别	名称	计算价格/万元
1	(一) 直接费用	脱硫及配套设备	88.35
2		电气及自控	12
3		土建	25.6
4		设备安装费	(1+2)×8.5% =8.53
5		运杂费	(1+2)×2.5% =2.51
6		设备调试及培训费	(1+2)×2.5% =2.51
合计			139.5
7	(二) 间接费用	工程及非标设计费	(一)×3% =4.2
8		不可预见费	(一)×2.5% =3.5
合计			7.7
总计			(一)+(二) =147.2

8. 运行费用（按一年运行 5700h 计 一台 35t/h 锅炉计算）。

1) 脱硫剂 NaOH 的费用：

$$34\text{kg/h} \times 5700\text{h} \times 800 \text{ 元/t} = 15.5 \text{ 万元/年}$$

2) 电费：

$$32\text{kW} \times 5700\text{h} \times 0.4 \text{ 元/(kW} \cdot \text{h)} = 7.2 \text{ 万元/年}$$

3) 水费：

$$4\text{m}^3/\text{h} \times 5700\text{h} \times 1 \text{ 元/m}^3 = 2.28 \text{ 万元/年}$$

4) 人工费：

$$4 \text{ 人} \times 1 \text{ 万元/年} \cdot \text{人} = 4 \text{ 万元/年}$$

因此全年运行费用合计  $(15.5 + 7.2 + 2.28 + 4) = 29 \text{ 万元}$

所以每千克 SO<sub>2</sub> 脱除费用为  $290000 \text{ 元} \div 339000 = 0.85 \text{ 元}$

9. 经济效益及社会效益

1) 每年可削减 SO<sub>2</sub> 排放 339t。

2) 每年可少交排污费 20.34 万元。

3) 每年可减少 SO<sub>2</sub> 污染引起的综合经济损失  $339\text{t} \times 42 \text{ 万元/t} = 14238 \text{ 万元}$ 。

10. 土建部分

1) 土建设计包括 6×12×3.5 循环沉淀池、脱硫除尘器基础、循环泵、鼓风机、碱液槽、加热器等的基础。

2) 地下泵房、鼓风机间、碱液间都采用快装结构建筑。

3) 脱硫后烟气中湿度增加，如果烟囱内没有做防水防腐衬里，应用钢箍加固烟囱。

4) 泵房、鼓风机房、碱液间都应采暖。

### 11. 电气自控部分

1) 电气设计包括所有风机、水泵的配电及控制柜和工房的照明。

2) 脱硫过程的碱液是通过 pH 自动控制仪表加到循环池。pH < 6.5 时, 打开电动调节阀加碱液, pH > 9 时关闭调节阀。

3) 碱液槽均设高低液位自动控制。当碱液储备槽到低位时, 自动启动输送泵, 把制备槽中碱液打到储备槽的高位时自动停泵。

4) 制备槽中每 4h 加 200kg 纯碱液配制用水, 是按液位自动开启或关闭水管上的电动阀。

## 第5章 锅炉烟气脱硫技术简介 及工艺比较和选择

目前开发成功的脱硫技术有数十种，通常可分为煤燃烧前脱硫、燃煤炉内脱硫和炉后烟气脱硫。炉后烟气脱硫又可分为干法脱硫、半干法脱硫和湿法脱硫。建设脱硫工程时采用哪种脱硫技术最合适呢？要回答这个问题，就要对脱硫工艺的技术经济属性进行分析、比较和选择。为了对脱硫技术有个初步认识，下面简要介绍锅炉烟气脱硫技术。

### 5.1 烟气脱硫技术简介

#### 5.1.1 煤燃烧前脱硫技术

又称煤脱硫，是通过对煤净化，除去煤中的硫分、灰分等杂质，通常有以下几种方法：

- 1) 煤炭物理脱硫技术，即各种选煤技术，如水选、磁选等。
- 2) 煤炭化学脱硫技术，包括碱法脱硫、气体脱硫、热解与氢化法脱硫等。
- 3) 煤炭生物脱硫技术，即在微生物的作用下，无机硫氧化、溶解而脱除。

目前许多热电站采用低硫煤，有些低硫煤是经过选煤后获得的。

#### 5.1.2 煤燃烧中脱硫技术

煤在燃烧过程中加入石灰石或白云石粉作为脱硫剂时，受热分解出  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ ，与烟气中的  $\text{SO}_2$  反应生成硫酸盐。我国在煤燃烧中的脱硫技术主要有：

##### 1. 型煤固硫技术

将不同的原料经筛选后按一定的比例配煤，粉碎后与经过预处理的黏结剂和固硫剂混合，经机械设备挤压成型并干燥，即可得到工业固硫型煤。固硫剂可分为钙系、钠系及其他类型，一般固硫型煤的固硫率低于 50%。

##### 2. 循环流化床锅炉内脱硫技术（见图 5-1）

流化床燃烧技术具有煤种适应性宽、易于实现炉内脱硫和低  $\text{NO}_x$  排放等优点。循环流化床锅炉内的脱硫率由于流化技术、固硫剂活性、运行管理水平不同而有很大差异，各种条件较好时可达 70% ~ 80%，一般只能达到 50%。它的优点是只要设置脱硫剂制备和注入炉内系统，因此节省投资和场地。

#### 5.1.3 煤燃烧后烟气脱硫技术

煤燃烧后烟气脱硫技术（简称 FGD）是目前世界上唯一大规模商业化应用的脱硫技术，按脱硫过程又可分为湿法、半干法、干法三类。



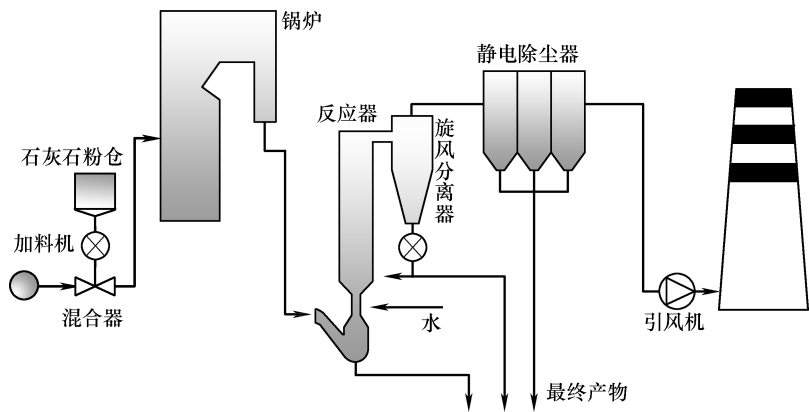


图 5-1 循环流化床烟气脱硫工艺原理图

1. 干法烟气脱硫

干法烟气脱硫是指加入的脱硫剂是干态的，脱硫的最终反应物都是干态的。该工艺与湿法相比有以下优点：投资费用较低；脱硫产物呈干态，并与飞灰相混；无需装设除雾器及烟气再热器；设备不易腐蚀，不易发生结垢及堵塞。该工艺的缺点是：吸收剂的利用率低；脱硫效率较低；飞灰与脱硫产物相混可能影响综合利用；对干燥过程控制要求很高。干法脱硫可分为炉内喷钙、管道喷射、混合喷射及电子束照射法、脉冲电晕等离子体法、荷电干粉喷射脱硫等。

(1) 炉内喷钙烟气脱硫技术（工艺流程见图 5-2） 向炉内喷射吸收剂是一种非常简单的烟气脱硫技术。干态的吸收剂  $\text{CaCO}_3$  或  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  喷射到炉膛内，在  $700^\circ\text{C}$  以上的有氧环境下  $\text{CaCO}_3$  和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  分解生成生石灰（ $\text{CaO}$ ）， $\text{CaO}$  与  $\text{SO}_2$  反应生成  $\text{CaSO}_3$ ，部分再氧化为  $\text{CaSO}_4$ 。

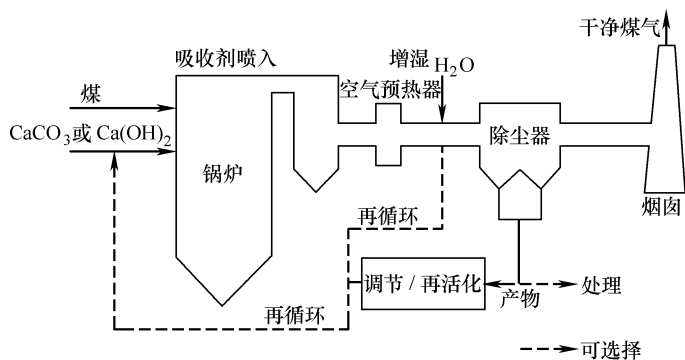


图 5-2 炉内喷钙烟气脱硫工艺流程示意图

石灰石  $\text{CaCO}_3$  在最优运行工况喷入炉膛，当  $\text{Ca}/\text{S}$  摩尔比为  $2 \sim 3$  时，脱硫效率可达 50% 左右。

为了提高炉内喷钙的脱硫率，可在炉后安装喷水活化器和飞灰再循环系统，能使脱

硫效率提高到 80% 左右。

炉内喷钙脱硫时，无需在炉膛内设脱硫反应塔，占地面积小，系统简单，节省投资，但是脱硫效率中等， $\text{Ca}/\text{S}$  比高达 1.5 ~ 2.5，运行费用高，锅炉排尘浓度加大，增加电除尘器负荷。

(2) 荷电干式吸收剂喷射脱硫技术（工艺流程见图 5-3） 荷电干式脱硫使用钙基吸收剂高速流过喷射单元产生的高压静电电晕充电区，使吸收剂得到强大的静电荷（通常是负电荷）。吸收剂颗粒中同种电荷相斥，很快在烟气中扩散，形成均匀的悬浮状态，与  $\text{SO}_2$  的反应会大大加快，且荷电吸收剂离子的活性大大提高，都有效地提高了  $\text{SO}_2$  的脱除率。在  $\text{Ca}/\text{S}$  比为 1.5 时，脱硫效率为 60% ~ 70%。

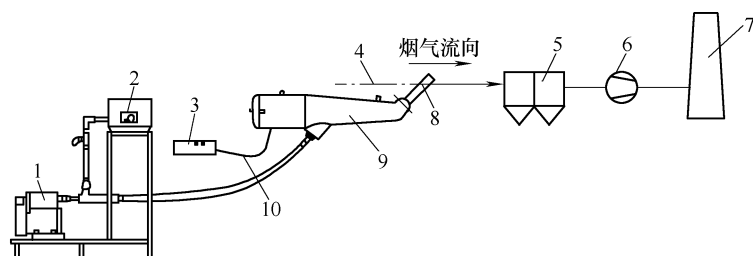


图 5-3 荷电干式吸收剂喷射脱硫系统图

1—反馈式鼓风机 2—干粉给料机 3—高压电源发生器 4—烟气管道  
5—除尘器 6—引风机 7—烟囱 8—安装板 9—喷枪主体 10—高压包电缆

荷电干式脱硫技术占地面积小，工艺简单，投资适中。

(3) 电子束照射烟气脱硫技术（工艺流程见图 5-4） 电子束照射脱硫已有工业应用，主要特点是干法处理过程，不产生废水、废渣；能同时脱硫、脱硝，并可达到 90% 以上的脱硫率和 80% 以上的脱硝率；系统简单、操作方便、过程易于控制；对于不同含硫量和烟气量的变化有较好的适应性；副产品为硫酸铵和硝酸铵混合物。但该法耗电量较大，约占电厂总功率的 1.19%，脱硫系统投资约占电厂总投资的 11% ~ 16%。

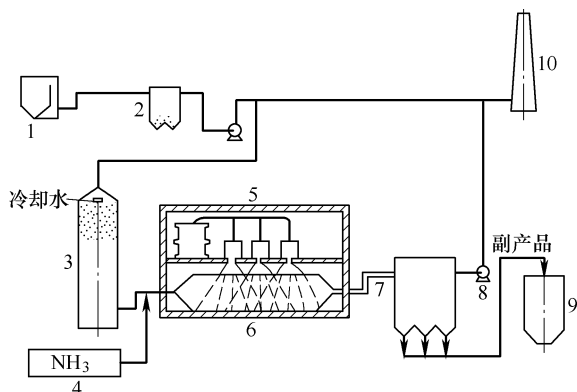


图 5-4 电子束烟气脱硫脱硝工艺流程图

1—锅炉 2、7—静电除尘器 3—冷却塔  
4—氨储罐 5—电子加速器 6—反应器  
8—引风机 9—副产品储罐 10—烟囱

在高能电子束照射下， $\text{SO}_2$  被氧化成  $\text{SO}_3$ ，生成硫酸， $\text{NO}$  氧化成  $\text{NO}_2$ ，生成硝酸，硫酸和硝酸与氨反应生成硫酸铵和硝酸铵。

## 2. 半干法烟气脱硫技术

主要包括喷雾干燥脱硫、烟气循环流化床脱硫和 NID 法脱硫。

(1) 喷雾干燥脱硫技术（工艺流程见图5-5） 1980年首先在美国燃煤电厂获得商业应用，如今在烟气脱硫市场占有一定地位。喷雾干燥脱硫是利用吸收剂喷入吸收塔后，一方面吸收剂与烟气中的  $\text{SO}_2$  发生化学反应，生成固体产物；另一方面烟气将热量传递给吸收剂，使之不断干燥，在塔内脱硫反应后形成的产物为干粉，一部分在塔内分离，另一部分随脱硫后烟气进入电除尘器收集。

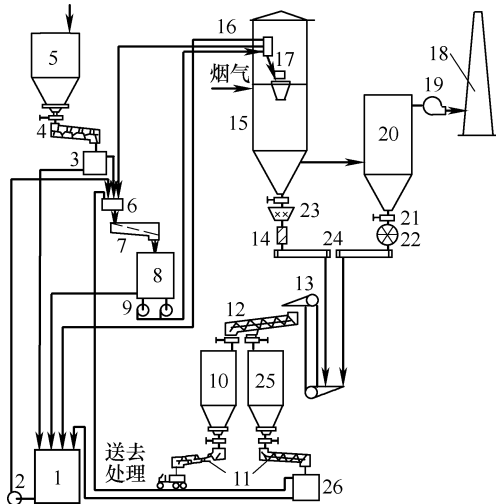


图 5-5 喷雾干燥烟气脱硫工艺流程图

- 1—储存槽 2—泵 3—消化槽 4、11、12、24—螺旋输送机  
5—石灰仓 6—延时箱 7—筛 8—吸收罐 9—供给泵  
10—终产物仓Ⅱ 13—斗式提升机 14—双片阀 15—吸收塔  
16—高位槽 17—雾化器 18—烟囱 19—风机 20—除尘器  
21—阀 22—调节阀 23—产物调节器 25—终产物仓Ⅰ  
26—再循环浆池

(2) NID 脱硫技术 (工艺流程见图 5-6) 为了克服喷雾干燥

脱硫的不足之处, 对其进行改进, 采用增湿灰循环脱硫技术, 即 NID 脱硫技术。该技术取消了制浆和喷浆系统, 实行 CaO 的消化、循环、增湿一体化设计。这不仅克服了单独消化时出现的漏风、堵管等问题, 并能利用消化时产生的蒸汽增加烟气的相对湿度, 对脱硫有利, 实行脱硫灰多次循环, 循环倍率高达 50 倍, 使脱硫剂的利用率提高到 95%, 同时提高了脱硫效率, 用 90% 纯度的 CaO 作脱硫剂, 当 Ca/S = 1.2 ~ 1.3 时, 脱硫效率可达 90% 以上, 但由于进口技术设备较贵, 一般适用于大中型电站。

(3) 烟气循环流化床脱硫技术（工艺流程见图 5-7） 烟气吸收剂和水进入循环流化床反应塔，通过吸收剂的多次再循环，延长接触时间，以达到提高脱硫效率和提高吸收剂利用率的目的。脱硫效率可达 90% 以上，脱硫产物为干粉，便于处理，没有废水产生，不腐蚀脱硫设备，资金成本与喷雾干燥法相当，但由于  $\text{Ca}/\text{S}$  比较高，排尘浓度较高，加重反应器后电除尘的除尘负荷，会影响除尘器的排尘浓度，一般也适用于电站锅炉。

### 3. 湿法烟气脱硫技术

特点是整个脱硫系统位于燃煤锅炉烟道的末端除尘器之后, 脱硫过程在溶液或浆液

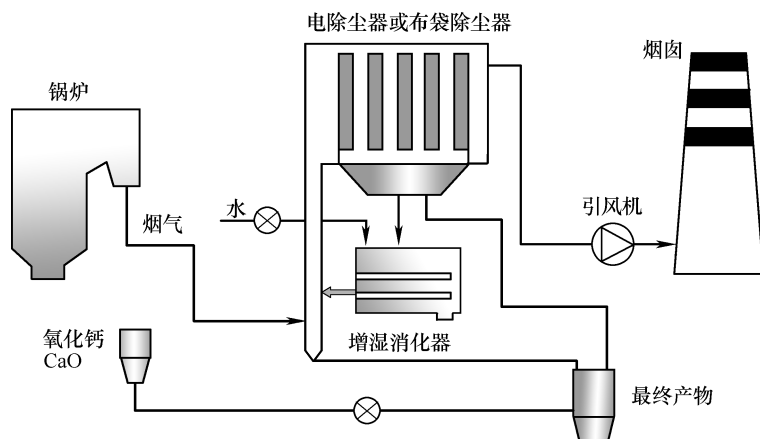


图 5-6 NID 烟气循环流化床脱硫技术工艺原理图

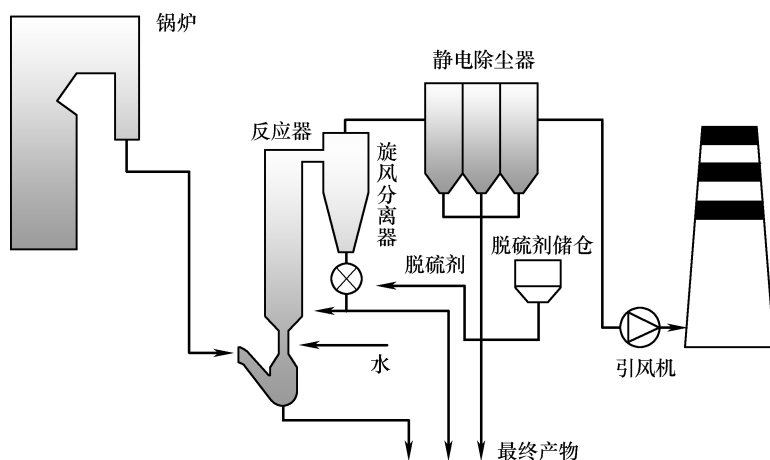


图 5-7 烟气循环流化床脱硫技术（CFB-FGD）工艺原理图

中进行，脱硫剂和脱硫生成物均为湿态。湿法烟气脱硫过程是气液和气固反应，脱硫化学反应速度快，脱硫效率高，技术成熟，Ca/S 比低，运行可靠，操作简单，但脱硫产物的处理比较麻烦，烟气湿度较大，工艺比较复杂，占地面积和投资较大。

已商业化的湿式脱硫工艺包括湿式石灰石/石灰-石膏法脱硫、湿式氧化镁脱硫、湿式钠碱法脱硫、湿式氨法脱硫、双碱法脱硫、海水脱硫等多种工艺。由于在第 4 章中已详细讲述了湿法脱硫工艺，现再归纳简述如下：

（1）湿式石灰石/石灰-石膏法脱硫工艺（工艺流程见图 5-8）该工艺优点是：脱硫效率高达 90%~95%，吸收剂利用率高；技术成熟，运行稳定，吸收剂资源广泛、价格低廉，副产品是石膏，可综合利用。该工艺的缺点是：系统复杂，占地面积大，一次性投资大，运行管理问题较多，要防止系统结垢、堵塞和腐蚀，运行费用高，尤其是液气比高达 15~20L/Nm<sup>3</sup>，循环水耗电量。

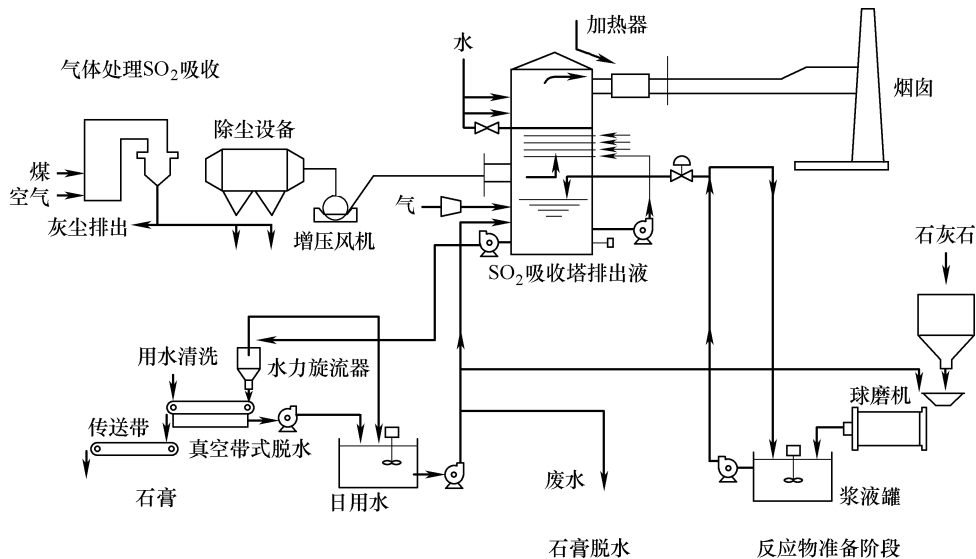


图 5-8 湿式石灰石/石灰 - 石膏法脱硫流程图

(2) 湿式氧化镁法脱硫工艺（工艺流程见图 5-9） 该工艺优点是：镁基脱硫反应速度高于钙基，脱硫效率在 95% 以上；脱硫等量的  $\text{SO}_2$  时，所需  $\text{MgO}$  质量仅为石灰石的 41%，且液气比仅为  $5\text{L}/\text{Nm}^3$ ，仅为湿式石灰石/石灰石 - 石膏法的  $1/3 \sim 1/4$ ，所以循环水量及耗电量少，反应塔直径、高度比湿式石灰石/石灰石 - 石膏法的脱硫塔小，设备投资省、系统简单、运行可靠、不易结垢和堵塞；脱硫技术成熟，运行费用较低。副产品  $\text{MgSO}_3/\text{MgSO}_4$  可用于肥料， $\text{MgSO}_3$  可用于造纸。为简化流程，少量  $\text{MgSO}_4$  溶解于排水中，可以做到达标排放。

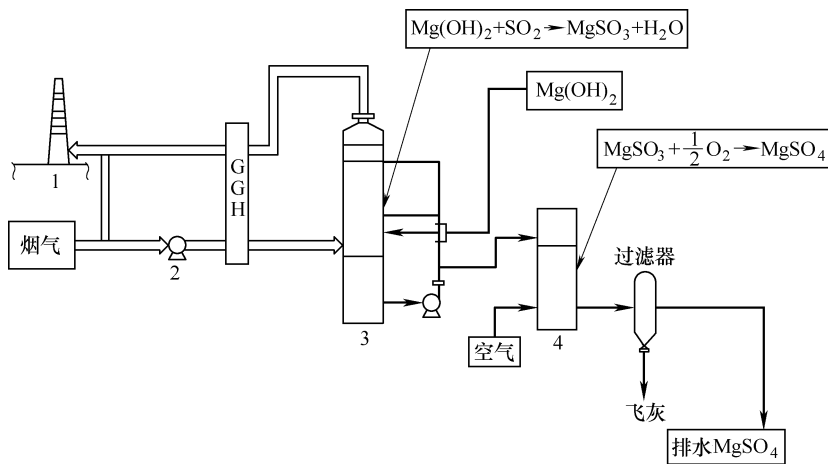


图 5-9 湿式氧化镁法烟气脱硫工艺流程图

1—烟囱 2—增压风机 3—吸收塔 4—氧化塔

2NH<sub>3</sub>+SO<sub>2</sub>+1/2O<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O→(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

烟气

1

G/G/H

※1

氨(NH<sub>3</sub>)

3

空气

4

※1

5

6

空气

7

8

排水

硫酸 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

1—烟囱 2—增压风机 3—吸收塔 4—喷射器 5—脱水机 6—干燥机 7—过滤器 8—硫酸铵结晶器

1—吸收塔 2—喷淋装置 3—除雾装置 4—瀑布幕 5—缓冲箱 6—浓缩器 7—过滤器  
8— $\text{Na}_2\text{CO}_3$  吸收液 9—石灰仓 10—中间仓 11—熟化器 12—石灰反应器

(5) 湿式钠碱吸收法脱硫工艺 (工艺流程见图 5-12) 用 NaOH 作为吸收剂, 与烟气中的  $\text{SO}_2$  反应生成  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ , 亚硫酸钠再吸收二氧化碳生成亚硫酸氢钠, 此时再加入氢氧化钠, 亚硫酸氢钠又转化为亚硫酸钠。该法副产品为亚硫酸钠, 亚硫酸钠用水溶解后可返回吸收系统使用。钠碱法的优点是脱硫效率很高, 不易结垢堵塞, 脱硫剂制备简易; 问题是 NaOH 较贵, 脱硫费用较高。亚硫酸钠是化工原料, 可用于造纸、纺织、显影材料等多个行业。

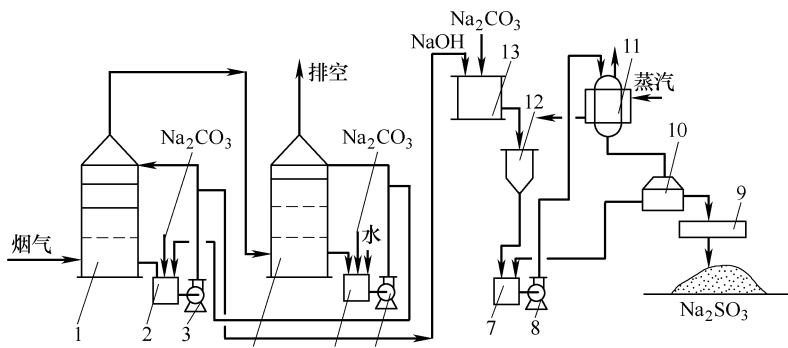


图 5-12 湿式钠碱吸收法脱硫流程图

1、4—吸收塔 2、5—循环槽 3、6、8—泵 7—中和液贮槽 9—干燥器  
10—离心机 11—蒸发器 12—中和液过滤器 13—中和槽

(6) 海水脱硫工艺 (工艺流程见图 5-13) 用海水中碱作吸收剂, 进入吸收塔吸收烟气中  $\text{SO}_2$ 。该工艺技术成熟, 工艺简单, 系统运行可靠, 脱硫效率高; 但液气比一般都在  $25\text{L}/\text{m}^3$  以上, 大量海水要曝气处理后放回大海, 所以运行耗电量较高。脱硫循环水排入海中对海洋环境的影响也有待取得可靠的结论。

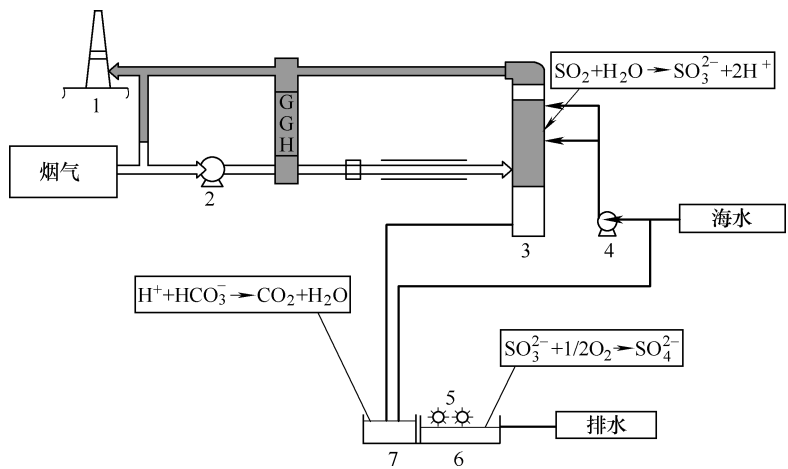


图 5-13 海水脱硫

1—烟囱 2—BUF 风机 3—吸收塔 4—泵 5—氧化空气吹入装置  
6—氧化反应槽 7—中和反应槽

5.1.4 常用脱硫工艺和性能

常用脱硫工艺和性能见表 5-1。

表 5-1 常用脱硫方法的种类和概要

序号	脱硫方法	分类	概要	技术特点	经济特性	脱硫剂	副产品
1	湿式石灰石法	湿式	用石灰石粉与水混合后的泥浆向烟气中喷雾	目前最为普及，可取得高脱硫率（90%以上），但动力消耗较大	设备建设费用比较高，但能取得高脱硫率，脱硫剂便宜，单位硫的去除成本较低	石灰石价格便宜，也容易购买	石膏可有效回收，用做水泥原料和建筑材料，利用价值较高
2	氧化镁法	湿式	采用氧化镁与水混合后的浆液向烟气中喷雾	技术上已经成熟，脱硫效率高，不易结垢、堵塞，能耗较低	设备建设费用较低，脱硫剂的价格稍高，但耗能较低，单位硫的去除成本较低	氧化镁资源丰富，有发展前途	产物为硫酸镁或亚硫酸镁，可抛弃，也可回收作镁肥
3	流化床锅炉炉内脱硫法	干式	向流化床锅炉内同时投入煤粉与石灰石粉，在燃烧的同时进行脱硫	脱硫效率随着燃烧温度而变化（最佳温度约 850℃）	设备建设费用低，只需在流化床锅炉增设石灰石投入系统即可，动力消耗低	石灰石价格便宜，也容易购买，应用前景比较好	产物是亚硫酸钙、煤灰与未反应石灰石的混合物，利用价值较低
4	炉内喷钙和尾部增湿活化法	干式 + 半干式	向炉内喷石灰粉的同时在后段向烟气中喷水	需要喷射石灰石和喷水装置，根据原有装置的情况，需要改动锅炉，脱硫效率中等	设备建设费用较低，但由于石灰石在炉内烧制时吸热，使锅炉效率稍有降低，另外石灰石有效利用率也降低	石灰石价格便宜，也容易购买，但需要磨成细粉	产物是硫酸钙、煤灰与未反应石灰石的混合物，利用价值较低
5	钠碱吸收法	湿式	用 NaOH 溶液吸收 SO <sub>2</sub>	钠碱与 SO <sub>2</sub> 的亲合力强，脱硫效率可达 95% 以上，不易结垢、堵塞	脱硫剂费用高，单位硫的去除成本较高	NaOH 的价格较高，碱液制备系统简单	副产品为可溶性盐，可处理后达标排放
6	双碱法	湿式	用 NaOH 或 Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 溶液吸收 SO <sub>2</sub> ，反应产物用 Ca（OH） <sub>2</sub> 再生 NaOH，大部分钠可再生利用	脱硫效率高，不易结垢、堵塞，但工艺较为复杂，对控制系统要求较高	设备建设费用较高，单位硫的去除成本同钠的损失率相关	采用钠碱再生工艺，降低了脱硫剂费用，但钠损失率是关键	副产品可为亚硫酸盐，亦可氧化为石膏，但大规模商业应用实践还不多



(续)							
序号	脱硫方法	分类	概要	技术特点	经济特性	脱硫剂	副产品
7	烟气循环流化床脱硫法	半干法	吸收剂、烟气、水、飞灰在流化床反应塔内多次再循环吸收SO <sub>2</sub>	脱硫效率达90%，不产生废水，不腐蚀设备，脱硫产物为干粉，系统控制要求高，对电除尘器要求高，占地面积小，但控制系统要求高	建设费用比湿法低，运行费用较低。如果要换原静电除尘器才能达标，则投资会高于湿法脱硫	Ca(OH) <sub>2</sub> 价格便宜，货源充足	副产品 CaSO <sub>3</sub> 、CaSO <sub>4</sub> 及飞灰、干态灰粉，可同炉渣一同处理利用
8	氨法	湿式	用NH <sub>3</sub> 作吸收剂，产物为(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> 和(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	脱硫效率高，运行费高，产物利用价值高，工艺系统简单，技术成熟，不会堵塞	脱硫剂价高，产物价值高，要用副产品补偿运行费用才有采用可能	液氨2100元/t	亚硫酸铵1级 1500元/t 硫酸铵，部分地区可作肥料

5.2 锅炉烟气脱硫工艺的比较和选择

根据锅炉排放标准和业主对脱硫除尘治理的要求，在有可能达到治理目标的脱硫工艺中进行技术经济比选，从中优选出适合本项目的脱硫除尘方案。现以1台220t/h锅炉从电除尘器后引风机出口烟道，进入脱硫系统为例，把可能选用的脱硫工艺进行技术经济分析比较如下：

5.2.1 湿式石灰石法脱硫工艺

该工艺流程参见图4-7，此工艺中，该图的—Ca—表示CaCO<sub>3</sub>浆液管。

1) 该脱硫技术最成熟，脱硫效率可达90%以上，运行可靠，使用普遍，在电站烟气脱硫市场中占有率80%左右。

2) 石灰石资源丰富，价格便宜，货源充足。

3) 脱硫产物石膏可以回收利用做建材或水泥添加剂。

4) 液气比一般为15~25L/Nm<sup>3</sup>，循环水量大，耗电量大，增加了运行费用。

5) 脱硫系统包括石膏制备，占地面积大，一次性投资较大。

6) 220t/h锅炉石灰石法脱硫，烟气SO<sub>2</sub>浓度C<sub>si</sub> = 2000mg/Nm<sup>3</sup>，脱硫后C<sub>s2</sub> = 200mg/Nm<sup>3</sup>，脱硫效率90%，每年运行7000h。主要经济指标如下：

CaCO <sub>3</sub> 粉（纯度0.85）	0.876t/h	6132t/a	55.2万元/a
电耗	964kW·h	6748000kW·h/a	337.4万元/a
水耗	15m <sup>3</sup> /h	105000m <sup>3</sup> /a	10.5万元/a
石膏	0.965t/h	6755t/a	-27万元/a
人工费			4.8万元/a

直接费用

380.9 万元/a

削减  $\text{SO}_2$  3178t

每消减 1kg  $\text{SO}_2$  的直接费用为  $3809000 \text{ 元} \div 3178000 = 1.2 \text{ 元}$

### 5.2.2 双碱法脱硫工艺

其工艺流程见图 5-11，双碱法吸收塔中 Na (K、 $\text{NH}_4$  等) 碱性溶液 (第一碱) 吸收烟气中  $\text{SO}_2$ ，再用第二碱 [一般为  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ] 再生吸收液生成  $\text{CaSO}_3$  和 NaOH，实现 Na 的回收利用。

1) 用 Na 作吸收剂，可获得 95% 以上的脱硫率。

2) 由于用碱性溶液作吸收剂，化学反应速率快，一般液气比  $L/G$  为 3 ~ 5L/ $\text{m}^3$ ，能耗较低。

3) 由于吸收塔空塔流速略高于喷雾塔，所以在相同负荷下，吸收塔计算空塔面积约为喷雾塔的 83%。

4) 用双碱法处理锅炉烟气时，由于大量  $\text{O}_2$  使  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  很容易氧化成  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  而很难再生。 $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2\text{NaOH} + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  的化学反应是一个可逆反应，这样循环液中会浓缩大量  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ，影响脱硫率，同时增加了 NaOH 的消耗量，增加了运行费用。根据现有锅炉烟气双碱法脱硫运行经验， $\text{Na}_2\text{SO}_3$  的氧化率较高，高硫时约为 10%，中低硫时会更高些。

5) 双碱法流程比石灰石法流程多了一个 Na - Ca 离子再生反应器和一个再生产物  $\text{CaSO}_3$  氧化器。再生反应要彻底，氧化反应率要高，必须严格控制工艺条件。这样再生反应器中要加  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  升高 pH 值，在氧化反应器中要加酸降低 pH 值。两个反应器中均要加热升温。这样操作控制要求较高，自控投资自然增加。

6) 双碱法一般采用穿流板塔、泡沫塔或旋流板塔。当再生反应器中再生反应不彻底时，会有较多 Ca 离子存在于循环吸收液中，也要注意 Ca 的结垢堵塞问题。

7) 双碱法系统复杂、设备多、控制严格、投资较大、占地面积大，现在国外大型电站脱硫中很少用，在我国，近几年大型电站脱硫中也很少使用。

8) 以 220t/h 锅炉双碱法脱硫，设计条件与石灰石法相同，主要经济指标如下：

NaOH (补充消耗)	61kg/h	427t/a	77.7 万元/a
CaO (纯度 0.85)	667kg/h	4669t/a	46.7 万元/a
电	595kW · h	4165000kW · h/a	208.3 万元/a
工业用水	10m <sup>3</sup> /h	70000m <sup>3</sup> /a	7 万元/a
人工费			4.8 万元/a

直接运行费用 344.5 万元，消减  $\text{SO}_2$  3431t/a。

1kg $\text{SO}_2$  的费用为 1.0 元。

### 5.2.3 湿式氧化镁法脱硫工艺

工艺流程图如图 5-9 所示，用 MgO 粉制备成  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  乳液作为湿法脱硫吸收剂。

脱硫反应生成  $\text{MgSO}_3$ ，经曝气氧化成  $\text{MgSO}_4$ ，溶解度达 30%，所以脱硫吸收塔是溶液循环，氧化镁法工艺特点如下：

1) 氧化镁法脱硫工艺也是成熟工艺。目前日本及我国台湾地区应用较多，国内近几年也有较多项目采用氧化镁法脱硫。

2) 脱硫效率可达 90% ~ 95%。

3) 脱除等量的  $\text{SO}_2$  时， $\text{MgO}$  消耗量仅为  $\text{CaCO}_3$  的 40%。

4) 要达到 90% 的脱硫率，液气比约为  $5\text{L}/\text{Nm}^3$ ， $\text{CaCO}_3$  工艺的一般约为  $15\text{L}/\text{Nm}^3$ 。由此产生循环浆液，电耗、循环管网、泵的容量均为 1:3。

5) 氧化镁法脱硫工艺系统简单，脱硫塔排水中溶解少量脱硫产物  $\text{MgSO}_4$  可直接排至锅炉水力除灰渣池、麻石除尘器沉淀池或废水处理站。

6) 我国已查明  $\text{MgO}$  储量约 80 亿 t，居世界首位，产量居世界第一位，资源分布在辽宁海城、营口一带及山东莱州、河北邢台大河、四川甘洛岩岱、甘肃肃北别盖等地。

7) 轻烧镁  $\text{MgO} \geq 85\%$ ，粒度 200 目，购进价约 400 元/t 已可满足脱硫使用。随着  $\text{MgO}$  纯度的提高和粒度的变细，价格会有所上升。

8) 以 220t/h 锅炉氧化镁法脱硫，设计条件与石灰石法相同，主要经济指标如下：

$\text{MgO}$	334kg/h	2338t/a	93.5 万元/a
电耗	464kW · h	3248000kW · h/a	162.4 万元/a
水耗	$15\text{m}^3/\text{h}$	$70000\text{m}^3/\text{a}$	10.5 万元/a
人工费	4 人		4.8 万元/a
直接运行费			271.2 万元/a
削减 $\text{SO}_2$		3178t	
每削减 1kg $\text{SO}_2$ 为 0.85 元			

9) 氧化镁法同石灰石法和双碱法脱硫技术经济性对比见表 5-2。

表 5-2 三种常用湿法脱硫技术经济性对比

性能	石灰石法	氧化镁法	双碱法
技术成熟性	最成熟	成熟	成熟
脱硫效率/%	90 ~ 95	90 ~ 95	95
液气比/( $\text{L}/\text{m}^3$ )	12	5	3
脱硫剂费用/(万元/a)	55.2	93.52	124.4
脱硫剂费用比	1	1.7	2.3
运行可靠性	可靠	更可靠	可靠
运行电费/(万元/a)	337.4	162.4	208.3
运行电费比	1	0.48	0.62
一次性投资/万元	1096.3	822.9	829.35

(续)

性能	石灰石法	氧化镁法	双碱法
一次性投资比	1	0.76	0.77
每千克 SO <sub>2</sub> 脱除费/元	1.2	0.85	1.00
每千克 SO <sub>2</sub> 脱除费比	1	0.7	0.83
脱硫副产品	石膏	MgSO <sub>4</sub> , MgSO <sub>3</sub>	CaSO <sub>3</sub>
副产品市场	已开发,有市场	待开发	—

注：脱硫剂制备投资未计入，在第六章叙述。

石灰石法  $\text{Ca/S} = 1.05$ ，氧化镁法的  $\text{Mg/S}$  为 1.0， $\text{MgO}$  价格为  $\text{CaCO}_3$  的 4.4 倍， $\text{MgO}$  耗量为  $\text{CaCO}_3$  的 40%。双碱法的  $\text{Na/S} = 1.0$ 。

通过对比可以看出，总的运行费用氧化镁法、双碱法比石灰石法省，但石灰石法可回收利用石膏  $\text{CaSO}_4$ ，目前脱硫石膏的价格约 40 元/t。

5.2.4 循环流化床烟气脱硫方案

烟气进入循环流化床反应塔，通过吸收剂的多次再循环，延长接触时间以达到提高脱硫率和吸收剂利用率，是一种半干法工艺。其工艺特点如下：

- 1) 脱硫效率与出塔烟气温度、 $\text{Ca/S}$  比有关。当出塔烟温为 70 ~ 80℃， $\text{Ca/S} = 1.2 \sim 1.4$  时，脱硫效率达 90%。
- 2) 脱硫产物是干状态  $\text{CaSO}_3$ ， $\text{CaSO}_4$  与烟尘的混合物，利用价值不高。
- 3) 脱硫塔是干式运行，无酸性腐蚀，但由于是烟尘石灰流化循环，故要求塔壁耐磨。
- 4) 工艺简单，运行可靠，维修量少，投资较省。
- 5) 排烟温度一般为 70 ~ 80℃，脱硫及烟气无需再加热。
- 6) 由于要控制排烟温度、乳液喷入量、水喷入量和烟尘回流量，要保持高效运行必须有优良的自动控制系统，会增加投资。
- 7) 由于循环流化床锅炉排尘浓度已较高，再加上烟气循环流化床脱硫，又会大量增加粉尘浓度，因此最终烟尘浓度很高。
- 8) 由于烟气循环流化床脱硫要求烟气先进入流化床，再进入静电除尘器。而流化床反应器只能装在静电除尘器后面，又由于场地紧张使烟管来回穿梭，是致使本方案脱硫设备布置较困难。

5.2.5 双碱法、石灰石法、氧化镁法经济指标对比

- 1) 双碱法经济核算：（年工作 7000h，220t/h 锅炉脱硫）见表 5-3。

表 5-3 双碱法经济核算

项目	数量	每小时/元	每年 7000h/万元
电费	595kW · h	297. 5	208. 3
NaOH ( 补充损耗)	61kg/h	111	77. 7
CaO	667kg/h	66. 7	46. 7
水费	10m <sup>3</sup> /h	10	7
人工费			4. 8
回收 CaSO <sub>4</sub>			
削减 SO <sub>2</sub>	3431t/a		
运行费用			344. 5
削减 1kgSO <sub>2</sub>	1. 06 元		

2) 石灰石法经济核算 ( 年工作 7000h, 220t/h 锅炉脱硫) 见表 5-4。

表 5-4 石灰石法经济核算

项目	数量	每小时/元	每年 7000h/万元
电费	964kW · h	482	337. 4
水费	15m <sup>3</sup> /h	15	10. 5
CaCO <sub>3</sub>	0. 876t/h	78. 84	55. 2
人工费	4 人		4. 8
削减 SO <sub>2</sub>	454kg/h		3178t/a
回收 CaSO <sub>4</sub>	965kg/h		6755t/a
运行费用			407. 9 - 27( 回收石膏) = 380. 9
削减 1kgSO <sub>2</sub>	1. 20 元		

3) 氧化镁法经济核算 ( 年工作 7000h, 220t/h 锅炉脱硫) 见表 5-5。

表 5-5 氧化镁法经济核算

项目	数量	每小时/元	每年 7000h/万元
电费	464kW · h	232	162. 4
MgO 粉费	334kg/h	133. 6	93. 52
水费	15m <sup>3</sup> /h	15	10. 5
人工费	4 人		4. 8
削减 SO <sub>2</sub>	3178t/a		
运行费用			271. 2
削减 1kgSO <sub>2</sub>	0. 85 元		

注：1. 纯度≤0. 85、200 目左右的轻烧 MgO 粉购进价为 400 元/t。  
2. 运行费用中，未计入废水处理费用。

### 5.3 脱硫工艺方案比选意见

经过对可能采用的石灰石法、双碱法和氧化镁法三种方案的技术特点、经济指标的计算分析和对一次投资的比较分析,可以得出以下结论:

1) 一次性投资。氧化镁法最省,其次为双碱法,最后为石灰石法。这是由于石灰石法脱硫塔体积大、液气比  $L/G$  高、循环液量大、循环管径大、设备投资大。

2) 运行费用。氧化镁法最低,双碱法第二,石灰石法最高。这是由于石灰石法液气比  $L/G$  数值大,导致脱硫剂循环量大、耗电量大、运行费用高。双碱法则是由于 NaOH 的损耗较大,而 NaOH 价格又高,所以运行费用高于氧化镁法。

3) 运行可靠性。氧化镁法最可靠,因为脱硫塔是溶液循环,不产生固态脱硫渣。而双碱法有  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  制备及再生 NaOH 系统和制备石膏系统,其可靠性与石灰石法同级。

4) 运行维修方面。氧化镁法最佳,石灰石法第二,双碱法最差,因为石灰石法是浆液,吸收脱硫产物都是难溶解固体,并有一定黏度,易产生结垢堵塞。双碱法则是因为流程复杂,又有回收石膏设备,控制要求高。

从以上分析来看,对于工业锅炉脱硫方案选择的顺序应是①氧化镁法②石灰石法③双碱法。

# 第 6 章 脱硫剂选择和浆液制备

## 6.1 脱硫剂的选择

选用哪种脱硫剂，是设计、建设脱硫工程首先要确定的问题之一。选定了脱硫剂也就基本选定了脱硫工艺，所以选择脱硫剂应与选择脱硫工艺结合起来。就脱硫剂本身而言，有下列要素要进行比选。

### 6.1.1 脱硫剂价格和比价

脱硫剂价格包括脱硫剂出厂价和运费。脱硫剂有固体、液体或气体。固体有粉状、块状，可以用编织袋包装、桶装、罐装、瓶装。粉料、块料也可以散装。各种包装价格不相同。如果用量大，可以散料用粉体车运到厂，再用气力输送到粉料储仓，就可省掉包装费，减少工业废弃物。

比价是指脱硫剂与石灰或石灰石价格的比值。石灰和石灰石是目前已知最廉价的脱硫剂，也是使用最普遍的脱硫剂。

### 6.1.2 脱硫剂产地

是当地产还是外地产，能否大量长期供货，要支付多少运费等，是选用的关注点之一。

### 6.1.3 脱硫剂的脱硫工艺特性

主要指 Ca/S 比、液气比  $L/G$ 、在水中的溶解度、脱硫产物用途、价值等（见表 6-1）。

表 6-1 常用脱硫剂综合性能表

参 数 种 类	价格/(元/t) (比价)	产地 产量	脱硫率 90% 时 $L/G$ 比	脱硫产物 及用途	吸收液 性状	脱硫剂 Ca/S	吸收液 pH 控制	脱硫产物 价格
石灰 (CaO)	100 (相比基数)	全国各地， 产量丰富	6 ~ 8	CaSO <sub>3</sub> 无用， CaSO <sub>4</sub> 用于 建材	浆液	1 ~ 1.03	循环槽 7.5	工业石灰 100 元/t 脱硫石膏 40 元/t
石灰石 (CaCO <sub>3</sub> )	100 (相比基数)	全国各地， 产量丰富	15 ~ 25	CaSO <sub>4</sub> 可作 建材	浆液	1.05 ~ 1.10	循环槽 5.6	工业石灰石 粉 100 元/t 脱硫石膏 40 元/t

(续)								
参 数 种 类	价格/(元/t) (比价)	产地 产量	脱硫率90% 时 L/G 比	脱硫产物 及用途	吸收液 性状	脱硫剂 Ca/S	吸收液 pH 控制	脱硫产物 价格
氧化镁 (MgO)	350 ~ 400 (3.5 ~ 4)	辽宁、山东、 河北邢台等, 储、产量世 界第一	3 ~ 5	MgSO <sub>4</sub> 可 作镁肥	MgSO <sub>4</sub> 溶液, MgSO <sub>3</sub> 难溶	1	循环槽 6.5	
火碱 (NaOH)	1820 (18)	化工产品, 满足需求	3 ~ 4	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> 在 造纸、轻纺 行业有用途	溶液	1	循环槽 6.5	工业级 1800 元/t
纯碱 (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	1200 (12)	化工产品, 满足需求	3 ~ 4	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> 在 造纸、轻纺 行业有用途	溶液	1	循环槽 6.5	工业级 1800 元/t
液氨 (NH <sub>3</sub> )	2100 (21)	化工产品, 满足需求	3	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> 可作肥料	溶液	1	循环槽 5.30	工业级 750 元/t

再根据各种湿法脱硫工艺经济数据表（表 6-2）进行综合比较，选定最适合使用的脱硫剂和脱硫工艺。

表 6-2 脱硫工艺运行、投资比价

参 数 种 类	工程规 模/kW	脱硫效 率(%)	液气比 L/G (L/Nm <sup>3</sup> )	脱硫 产物	工程自 控程度	烟气再 热温度 /℃	工程总 投资 /万元	年运行 费用 /万元	年脱硫 SO <sub>2</sub> /t	脱除 1kg SO <sub>2</sub> /元	单位 kW 工程造 价/元
石灰石法 (石灰法)	50000	90	15	石膏 6755t/年	脱硫塔自 控,脱硫 液制备半 自控	~ 80	1096.3	380.9	3178	1.2	219
氧化镁 法	50000	90	5	MgSO <sub>3</sub> (MgSO <sub>4</sub> ) 抛弃	脱硫塔自 控,脱硫 剂半自控	~ 80	822.9	271.2	3178	0.85	164.5
钠碱 法	50000	95	3	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 抛弃	脱硫塔自 控,脱硫 剂半自控	~ 80	793.4	949.3	3431	2.77	158.7
双碱 法	50000	90	3	CaSO <sub>3</sub> 抛弃	脱硫塔自 控,脱硫 剂半自控	~ 80	829.35	344.5	3431	1.0	165.8
氨 - 亚 硫酸铵 法	50000	95	3	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> 5786t/a	脱硫塔自 控,脱硫 剂半自控	~ 80	874.9	576	3353	1.72	175



在比选时，着重结合脱硫项目的特点，在需要着重控制的方面进行分析比较。

- 1) 着重对一次投资和运行费用比选，即要求一次投资省，运行费用低。从表 6-2 可知氧化镁法是较好的选择。
- 2) 着重分析脱硫产物综合利用，要节省投资，并对环境保护发挥更好效益，根据表 6-2 分析可选用双碱法。再把  $\text{CaSO}_3$  强制氧化为  $\text{CaSO}_4$  回收利用。
- 3) 如果特别要求脱硫系统可靠性、减少故障和维修时间，再兼顾投资省运行费用低，由表 6-1 和 6-2 上分析比较可知，采用氧化镁是较好选择。
- 4) 如果特别关注脱硫产物的用途和价值，那么从表 6-1 和表 6-2 上分析比较，可选用氨-亚硫酸铵法或亚硫酸钠法，可用回收脱硫产物费用补偿一部分运行费用。
- 5) 如果着重就地取材，方便回收脱硫产品，同时方便出售脱硫副产品，且有较低的运行费用，就可以选用石灰法、石灰石法脱硫。

6.2 脱硫剂制备流程

大型电站脱硫剂制备系统是脱硫工程设计的重要组成部分。每小时消耗石灰石粉十多吨，直接外购几乎不可能，只能由电厂自己采购合格的石灰石进行破碎磨粉，再制备成浆液。浆液制备流程如图 6-1 所示。

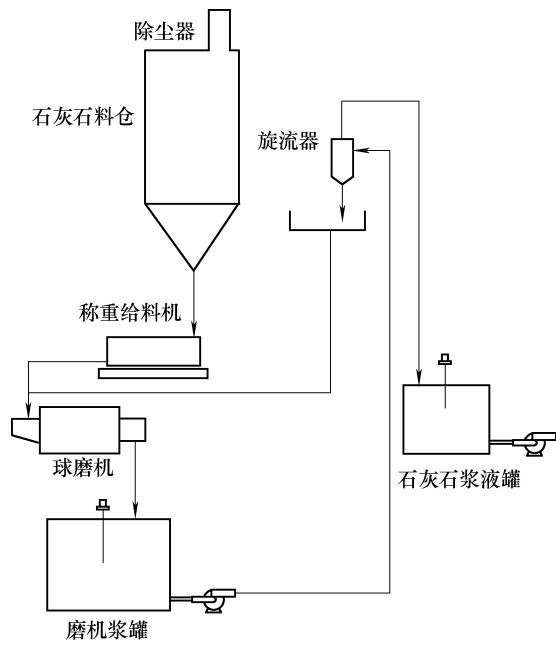


图 6-1 脱硫剂浆液制备流程图

对于大型火电站，脱硫浆液制备包括脱硫剂运输→卸料→储仓→日用仓→计量→球磨制浆→水力旋液分离→浆液密度检测→浆液储存罐→脱硫塔。

工业及供热锅炉的最大吨位界定在  $<400\text{t/h}$ ，其单台小时脱硫剂使用量一般为  $1 \sim 2\text{t}$ 。这样的使用量可以通过定点购进脱硫剂粉料。这样脱硫剂制备则较为简便。下面介绍几种脱硫剂制备系统。

### 6.2.1 全封闭脱硫剂制备系统

制备流程如图 6-2 所示。脱硫剂粉体罐车一般有  $50\text{t}$  左右，把脱硫剂粉料运到脱硫剂储仓旁，用车上的气力输送泵，把粉体吹送到储仓内，吹送空气经仓顶袋式除尘器除下粉料后排空。

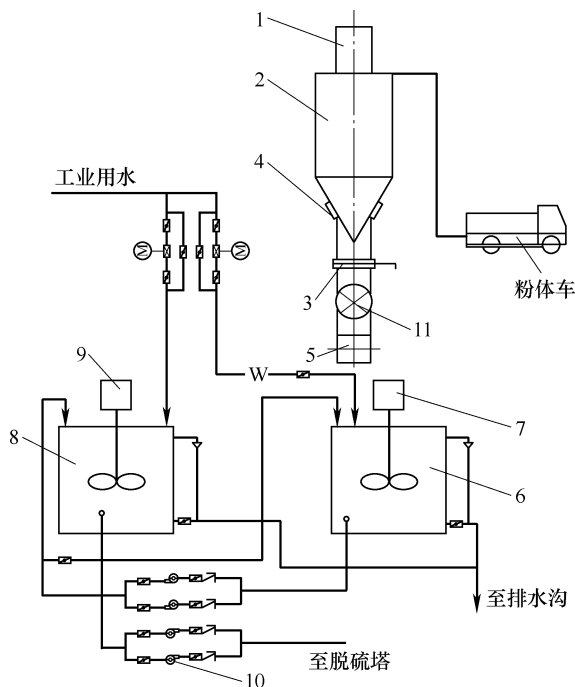


图 6-2 全封闭脱硫剂制备流程

1—仓顶袋式除尘器 2—脱硫剂储仓 3—插板阀 4—流化板 5—粉体流量计  
6、8—乳液槽 7、9—搅拌机 10—乳液泵 11—旋转给料机

为了防止脱硫剂吸湿，仓内设置加热去湿装置。为了防止粉体搭桥阻塞仓内，设置流化板和压缩空气喷吹装置。粉体下流经插板阀、旋转给料器和粉体电子流量计定量给料到浆液搅拌槽。工业用水经流量计量后进入搅拌槽，搅拌成需要浓度的浆液，由浆液泵送到储存槽。储存槽浆液由浆液泵送至脱硫塔使用。多余浆液回流到储存槽。搅拌槽和储存槽都设置浆液重度探头。当浓度偏离设计值时，可加水或粉料调整。

凡 2 台  $410\text{t/h}$  锅炉或 2 台  $220\text{t/h}$  锅炉，都可以采用这种脱硫剂浆液制备封闭系统。

### 6.2.2 半封闭脱硫剂制备系统

半封闭脱硫剂制备如图 6-3 所示。不具备条件使用大型粉体车运送并同储仓对接

气力输送脱硫剂进入储仓的，通常可用翻斗车运送脱硫剂到脱硫站，把粉体在尽可能减少扬尘的条件下卸入斗式提升机或抓斗起重机的受料斗仓，然后由斗式提升机、抓斗起重机或螺旋输送机把粉体输送到脱硫剂储仓。这种半封闭系统，粉体要倒一次仓。汽车把粉体送到斗式提升机或抓斗起重机受料仓，再输送到脱硫剂储仓。中间有敞开扬尘点，会有一定的粉尘飞扬，但只要注意操作尽可能在室内卸车是可以把扬尘控制在最低限度的。在脱硫剂使用量 1~2t/h 时，可考虑采用半封闭制备流程。

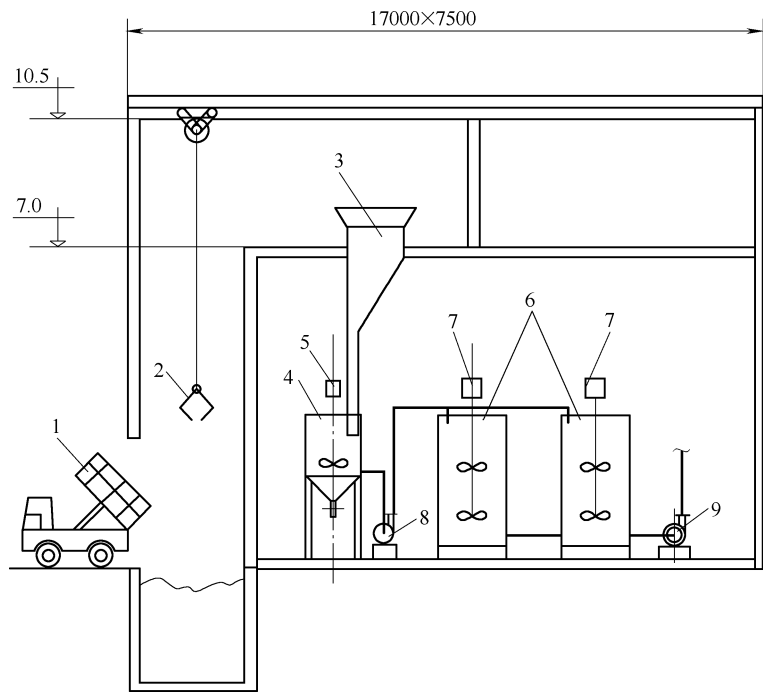


图 6-3 半封闭脱硫制备

- 1—翻斗汽车 2—单轨抓斗 3—溜槽 4—搅拌槽  
5、7—搅拌器 6—乳液槽 8—输送泵 9—乳液泵

6.2.3 简易脱硫剂制备系统

当锅炉吨位较小，脱硫剂使用量为 100~200kg/h 时，可购进桶装或袋装脱硫剂，使用时用小车推到浆液制备池边，开包倒入搅拌池，也可倒入螺旋输送机受料斗，再输送到搅拌池，如图 6-4 所示。当采用地下搅拌池和地下储存池时，也可用小型铲斗车推送脱硫剂进搅拌池。

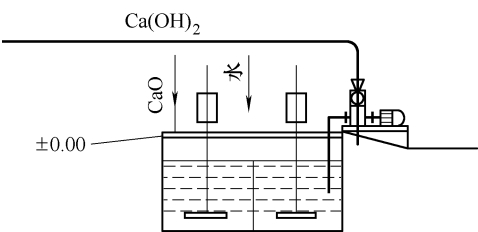


图 6-4 简易脱硫剂制备流程

## 6.3 脱硫剂浆液制备设计条件

脱硫使用的粉状脱硫剂为石灰、氧化镁粉料时，通常规定纯度 $\geq 85\%$ ，细度 200 目。采用石灰石时，细度应达到 325 目左右，才有利于吸收化学反应的较快进行。

制备浆液浓度一般为 10% ~ 20%。使用量大时，配制浓一点，使用量小时配制稀一点，总之，要利于均匀有序地把脱硫浆液输送到脱硫塔。浆液浓，输送量小，不好调控，浆液稀，输送量太大，会增加脱硫塔加进的水量，同时增加排水量和废水量。

### 6.3.1 脱硫剂用量

1) 根据脱硫工艺化学反应式计算，可知每小时吸收多少 kg 的  $\text{SO}_2$ ，要消耗多少脱硫剂、 $G_{\text{Ca}}$ 、 $G_{\text{Mg}}$ 、 $G_{\text{Na}}$  等。

2) 选定合适浓度  $n = 10\%$ 、 $15\%$ 、 $20\%$  等。

3) 如果  $G_{\text{Ca}} = 500\text{kg/h}$ ，配制  $n_{\text{Ca}} = 15\%$  浓度浆液则每小时浆液量  $Q_J$ ，

$$Q_J = \frac{G_{\text{Ca}}}{n_{\text{Ca}}} = \frac{500}{0.15} \text{kg/h} = 3333 \text{kg/h}$$

$$\rho_J = \frac{Q_J}{W_J} = \frac{3333}{3333 \times (1 - 15\%)} \frac{3333}{2833} \text{kg/m}^3 = 1.176 \text{kg/m}^3$$

$$V_J = \frac{Q_J}{\rho_J} = 2.83 \text{m}^3/\text{h}$$

式中  $\rho_J$ ——浆液密度 ( $\text{kg/m}^3$ )；

$W_J$ ——浆液配制加水量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )。

### 6.3.2 脱硫剂储仓

脱硫剂储仓体积  $V_{\text{ch}}$  根据脱硫剂供应地的距离，储存 3 ~ 5 天的使用量 (kg)：

$$V_{\text{ch}} = (3 \sim 5) G_d$$

(1) 圆柱塔储仓 通常储存脱硫剂粉体料的是圆柱塔形储仓，其优点是节省占地面积，下料时利用自身重量下溜出料比较方便，是脱硫广泛采用的储仓 (见图 6-5)。

圆塔仓的  $H/D$  一般取 2 ~ 3 为宜，主要考虑有较好的稳定性。圆柱筒下接圆锥体宜为  $55^\circ$  角，有利于粉体下滑而不滞留。一般生石灰粉安息角约为  $45^\circ$ 。

为了防止潮湿搭桥阻塞，在锥体下部设置加热流化板，在塔内出口易堵部位设空气喷吹环，在阻塞时可喷吹疏通。出口装插板阀 (闸板) 和定量下料器。

(2) 普通室内粉体库 存放袋装、桶装或散装料。散装粉

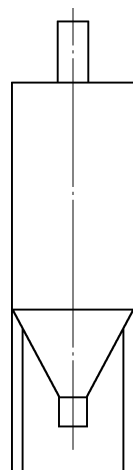


图 6-5 圆柱塔储仓

料宜覆盖毡布防止尘土飞扬。

(3) 半敞开料棚 宜把粉料放入矮围墙圈内，上面盖毡布防止尘土飞扬。同样可存放袋装、桶装、散装脱硫剂。

6.3.3 搅拌槽（池）

1. 定义

搅拌槽是把粉体加水搅拌成浆液的设备。要确定它的体积  $V_{ja}$ ，就要选定每搅拌一罐用多少时间。搅拌槽可以连续运行，也可间歇运行。它可以不断把搅拌好的浆液输送到浆液储存槽。一般浆液制备可设一个搅拌槽，一个到两个储存使用槽。为了不使储存槽体积过大，可以设计供 2~4/h 浆液用量的储存槽。

2. 搅拌槽搅拌器设计选用

搅拌槽要把浆液通过搅拌器叶轮的推动力悬浮起来，基本不产生沉淀。就必须选用合适的搅拌器和搅拌槽结构。

选用搅拌器与搅拌槽体积  $V_{ja}$ 、搅拌液体黏度、密度、搅拌转速、搅拌叶轮尺寸、线速度、槽内流体的流动型式等有关。若用流体力学理论来计算它属于三元黏性流动，是较复杂的问题。

我们只要求搅拌槽、储存槽搅拌器能在合理、节能条件下，把浆液中的颗粒悬浮起来。要确定的是选用搅拌器的叶轮类型、直径  $D$ 、旋转速度  $n$ 、轴长度  $L$ 、搅拌器功率  $N$ 。选用搅拌器对搅拌槽结构的要求有：槽内挡板设计、槽的形状、尺寸比例等。可以参照搅拌器选用手册或指南。详见表 6-3。

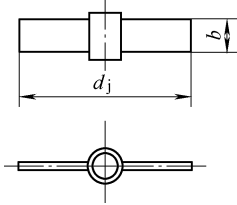
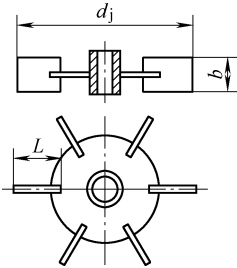
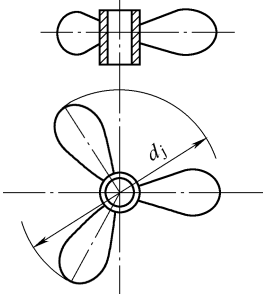
表 6-3 各类搅拌器参数

搅拌器型式 参 数	推进式	涡轮式	桨叶式
适用液体粘度/cP	500 ~ 3000	2000 ~ 25000	1500
叶轮径/槽直径( $d/D$ )	$\frac{1}{3} \sim \frac{1}{4}$	$\frac{1}{3} \sim \frac{1}{4}$	$\frac{1}{3} \sim \frac{2}{3}$
叶轮外端切线速度 $U_1$ (m/s)	5 ~ 15	3 ~ 8	1.5 ~ 3
转速 $n$ /(r/min)	300 ~ 600	150 ~ 400	20 ~ 80
搅拌叶离底高度 $h_i$ /m	$d$	$\frac{1}{2}d \sim d$	$\frac{d}{3} \sim \frac{d}{2}$
单位槽体积功率 $N_e$ /kW	0.5 ~ 0.7	0.8 ~ 1	0.6 ~ 0.7
阻流板宽 $W_b$ /m	$\frac{D}{10} \sim \frac{D}{20}$	$\frac{D}{10} \sim \frac{D}{20}$	$\frac{D}{10} \sim \frac{D}{20}$
阻流板数 $Z$	4	4	4

搅拌器可细分为：推进式，形状性能如船舶的推进叶轮，它主要是轴向推动液体循环；涡轮式，它在圆盘上装上叶片，就像一个原始的涡轮转盘。它转动时，轴向、径向

都会有流动，与叶片的尺寸、角度有关。桨式搅拌器，它像飞机的螺旋桨，它的流型是径向和切向。桨叶倾斜时，会有轴向流动。桨式搅拌器还派生出平直或倾斜叶片式搅拌器、框式搅拌器、锥式搅拌器等。见表 6-4。

表 6-4 常见搅拌器的结构型式及重要参数

型式	特性参数	流体流动的特点	结构示意图
平直叶桨式	$d_j/b = 4 \sim 10$ $Z = 2$ $n = 1 \sim 100\text{r/min}$ $v = 1 \sim 5\text{m/s}$	低速时，主要为环向流，高速时为径向流	
平直叶圆盘涡轮式	$d_j : L : b = 20 : 5 : 4$ $Z = 6$ $n = 10 \sim 300\text{r/min}$ $v = 4 \sim 10\text{m/s}$	低速时，为环向流，高速时为径向流，剪切作用很强烈	
推进式	$S/d_j = 1$ $Z = 3$ $n = 100 \sim 500\text{r/min}$ 最大可达 $n_{\text{max}} = 1500\text{r/min}$ $v = 3 \sim 15\text{m/s}$ 最大可达 $v_{\text{max}} = 25\text{m/s}$	产生的作用主要为轴向流，循环速度高，剪切力小	

注：Z——桨叶个数；  
n——转速；  
v——桨叶端点线速度；  
S——螺距。

当  $Re > 10000$  时

$$N = 6.1 \rho n^3 D^5$$

根据液体性质和搅拌的作用及搅拌容器的体积就可选出搅拌器型式、尺寸和功率。接着进行搅拌功率  $N$  核算，二者取大的功率值。

3. 核算搅拌器功率

当  $Re < 10$  时,

$$Re = \frac{D^2 n \rho}{\mu}$$

式中  $D$ ——搅拌桨叶轮 (m),  
 $n$ ——搅拌器转速 (r/s),  
 $\rho$ ——液体密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  
 $\mu$ ——液体黏度 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )。

$$N = 71 \mu n^2 D^3$$

当  $10 < Re \leq 10000$  时,

$$N = \phi \rho n^3 D^5$$

式中  $\phi$ ——搅拌功率函数, 参考图 6-6 (有挡板) 和图 6-7 (无挡板) 取值。

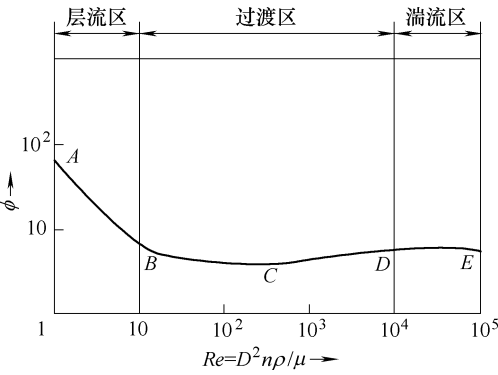


图 6-6 搅拌功率函数（有挡板）

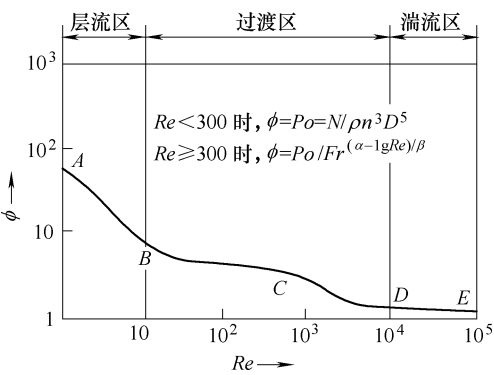


图 6-7 搅拌功率函数（无挡板）

6.4 脱硫剂浆液制备设计示例

以  $(3 \times 75 + 130)$  t/h 锅炉湿式氧化镁法脱硫乳液制备。

1. 设计条件

- 1)  $\text{MgO}$  粉, 200 目, 纯度 0.85, 用量 1.64t/h。
- 2) 制备 10%  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  乳液, 16.4t/h。

2.  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  乳液制备流程 (见图 6-2)

从流程图上可以看出,  $\text{MgO}$  粉用自带气泵粉体运输车, 气力输送到粉体仓, 送料风经仓顶布袋除尘器除尘后排入大气。 $\text{MgO}$  粉从粉体仓经旋转给料机和电子流量计计量后, 送到搅拌槽中, 与搅拌槽中的定量工业用水搅拌成 10% 浓度的悬浊乳液。搅拌槽中的乳液, 经乳液泵送至乳液槽, 再经乳液泵送脱硫塔使用。本方案计量准确, 控制方便, 封闭运行, 清洁卫生, 可通过调控乳液流量来增减氧化镁投入量。

3. 主要设备及报价

- 1)  $\text{MgO}$  粉体仓  $D=4\text{m}$ ,  $H=6.0\text{m}$ , 下带  $60^\circ$  锥体,  $V=119\text{m}^3$ , 可供 72h 的脱硫使用。
- 2) 消化搅拌槽  $D=3.5\text{m}$ ,  $H=4.0\text{m}$ , 下带  $45^\circ$  锥角,  $V=38\text{m}^3$ , 搅拌功率  $N=30\text{kW}$ , 1 台。
- 3) 储液槽  $D=3.5\text{m}$ ,  $H=4.0\text{m}$ ,  $V=38\text{m}^3$ , 搅拌功率  $N=30\text{kW}$ , 2 台槽中的乳液, 可供 4h 的脱硫使用。
- 4) 主要设备及报价:

序号	设备名称	规格	数量/台	总价/万元
1	仓顶除尘器		1	2
2	粉体仓	$D=4\text{m}, H=6.0\text{m}$ , 锥度 $60^\circ$	1	20
3	流化板、插板阀、给料器、螺旋输送机	190×190 型、300×300 型、300×300 型	各 1	5
4	空气加热管	DRK-15	2	1
5	电子流量计	DLP10 型	1	10
6	消化槽	$D=3.5\text{m}, H=4.0\text{m}$ , 锥角 $45^\circ$ , $V=38\text{m}^3$	1	4
7	电动搅拌器	$B=900, L=3500, n=75\text{r/min}, N=30\text{kW}$	1	2.5
8	储液槽	$D=3.5\text{m}, H=4\text{m}, V=38\text{m}^3$	1	4
9	电动搅拌器	$B=900, L=3500, n=75\text{r/min}, N=30\text{kW}$	1	2.5
10	乳液泵	$Q=20\text{m}^3/\text{h}, H=30\text{m}, N=5.5\text{kW}$	4	$4 \times 0.8 (=3.2)$
11	乳液管	$\phi 57\text{mm} \times 3.5\text{mm}, 200\text{m}$	1	2
12	钢平台	8t	1	8
13	乳液工房	$20 \times 9 = 180\text{m}^2$	1	21.6
合计				85.8

4. 乳液制备系统的自控设计（见乳液制备的自控设计部分）

工艺过程描述如下:

- 1) 粉体仓上料时, 粉体车同料仓上料管对接, 车上自带气泵风送粉料到仓内, 料位到达要控制的低位时, 低位信号灯亮。继续上料, 料位超过低位时信号灯熄灭。上料到料仓高位时, 高位信号灯亮, 完成上料过程。
- 2) 配制乳液时, 打开工业用水管电动阀门, 向搅拌槽上水到高位时, 自动停止上水。打开搅拌器, 打开料仓定量给料器, 向搅拌槽内加定量  $\text{MgO}$  粉, 搅拌成  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  乳液。通过搅拌槽自测密度, 并自动调整加水或加粉达到要求的乳液密度时, 自动关闭加水或加粉电动阀门。把乳液泵送到乳液储槽, 通过脱硫工艺过程的控制, 把乳液送到脱硫塔或加药池。



5. 乳液设备布置平面图、剖面图

如图 6-8 所示。

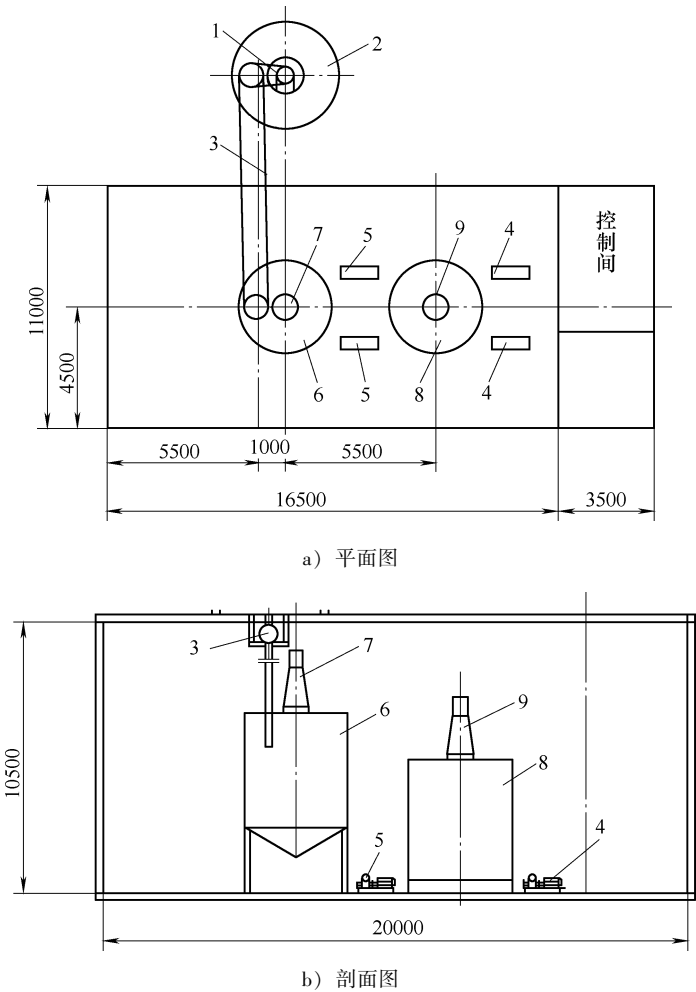


图 6-8 乳液制备系统

1—除尘器 2—粉体仓 3—螺旋输送机 4、5—乳液泵 6—消化槽 7、9—搅拌机 8—储液槽

6. 本乳液制备系统工程报价

包括两部分：工艺部分和自控部分。工艺部分工程总价为 85.8 万元，自动控制部分工程总价为 53.4 万元，两部分总计 139.2 万元。

## 第 7 章 锅炉烟气湿法脱硫常用脱硫塔

脱硫塔是脱除烟气中  $\text{SO}_2$  的装置，在化工行业通常称吸收塔。常用脱硫塔是指广为采用且有较好适用性的脱硫塔。常用脱硫塔一般指空心喷雾塔、多孔板塔（筛板塔、泡沫塔、穿流板塔等）、文丘里洗涤塔、喷雾泡沫塔、旋流板塔、喷雾旋流板塔、液柱塔、喷射鼓泡塔、填料塔等。

脱硫塔一般由下列区域组成：

(1) 进口急冷区 烟气入塔后，大量浆液滴喷入烟气中，水分蒸发后烟气迅速降温，达到饱和状态。

(2) 吸收区 由多层喷嘴组、多层塔板或多层喷嘴加大孔径塔板（盘）组成，主要功能是吸收  $\text{SO}_2$ 。

(3) 除雾区 由两层除雾器和反冲洗喷嘴组成，主要功能是除去烟气中夹带的浆液雾滴。

(4) 吸收液循环槽（即浆液储存区） 在脱硫塔底部通常有侧向搅拌器、氧化曝气装置和吸收塔底部容器，主要功能是储存吸收液进行循环吸收和对吸收液进行强制氧化处理。

有关脱硫塔脱硫过程基本理论在本书第 3 章气体吸收概论中讲过，不再赘述。下面简述常用吸收塔特性。

### 7.1 空心喷雾脱硫塔（洗涤塔、吸收塔）

喷雾塔是较简单、最常用、最古老，而今后还要采用的脱硫塔。常用的是逆流喷雾塔，其特性如下：

1) 结构简单，主体是一个空心圆柱，不易引起阻塞，阻力损失小，如图 7-1 所示。

2) 吸收区由多层喷嘴组组成（一般为 3~6 层），塔内部件少，抗堵性能良好，比较适用于浆液循环吸收的脱硫工艺，如石灰、石灰石法等。

3) 喷雾塔的空塔流速一般为  $2.5 \sim 3\text{m/s}$ ，此时烟气夹带的雾粒径  $230 \sim 330\mu\text{m}$ 。风速提高会有更多雾粒被带出，超过  $2.5\text{m/s}$  后，烟气带水明显增加。

4) 吸收区每个喷淋层都装有多多个雾化喷嘴，交叉布置，喷雾覆盖率达  $200\% \sim 300\%$ 。

5) 吸收区高度为  $5 \sim 15\text{m}$ ，如按塔内流速  $2.5\text{m/s}$  计算，接触反应时间为  $2 \sim 6\text{s}$ 。

6) 空心喷雾塔用于石灰或石灰石法脱硫液气比  $L/G$  一般在  $15 \sim 25\text{L/Nm}^3$  时，可获得  $90\%$  以上的脱硫效率。

7) 脱硫塔循环槽容积，一般要求吸收液停留时间为  $6 \sim 8\text{min}$ 。内装强制氧化喷嘴组和侧搅拌器。

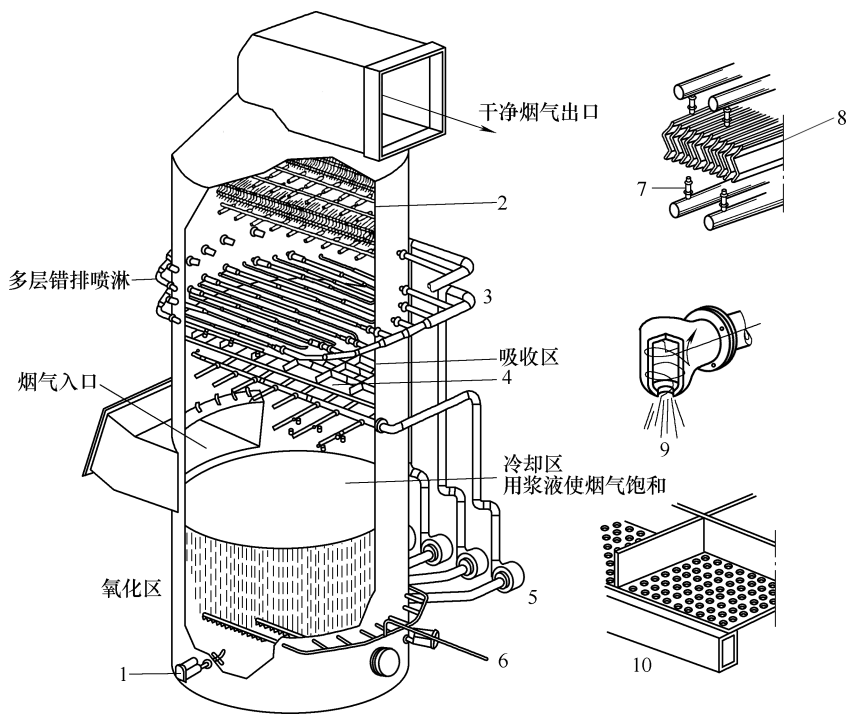


图 7-1 空心喷雾塔

1—搅拌器 2、8—除雾器 3—错排喷淋管 4—托盘 5—循环泵 6—氧化空气集管  
7—水清洗喷嘴 9—碳化硅浆液喷嘴 10—合金多孔托盘

8) 吸收区上部应设置折流板除雾器。对于石灰或石灰石浆液雾粒，会有许多细灰黏附在折流板上，必须用高速水流冲刷才能冲下。应按照除雾器反冲洗要求及时反冲洗。

9) 喷雾塔主要适用于浆液循环的脱硫工艺，如石灰、石灰石和氧化镁法（不设强制氧化工艺）、脱硫烟气中含较多灰尘和黏性物的条件使用。

10) 喷嘴是喷雾塔最关键的部件。喷嘴种类和特性后面有专门叙述。选用时应注意雾化压力和流量、喷距、雾化角的关系。喷嘴雾化液谱是非常有用的数据，可以用于估算在设计液气比下的喷雾塔理论传质界面面积和在空塔流速下，带走的吸收液量。要特别注意用于浆液雾化喷嘴的磨损和使用寿命。

11) 对于浆液循环的脱硫塔，为了使脱硫剂颗粒不会沉淀下去，都必须采用搅拌器搅拌。由于循环槽上面是脱硫塔主体，无法安装立式搅拌器，所以只能安装侧向搅拌器使槽内浆液有序上下流动，当颗粒沉降下来又被旋流带上去。

12) 凡是需要强制氧化的工艺，如石灰或石灰石-石膏法，在循环槽内设置曝气头组成氧化区，用曝气鼓风机鼓入空气，使  $\text{CaSO}_3$  氧化成  $\text{CaSO}_4$ 。曝气量与曝气头的氧气利用率有关。实际运行数据，对于大型常用喷雾塔， $\text{O}_2/\text{SO}_2$  比是  $1.5\text{mol} : 1\text{mol}$ ，空气利用率约为  $20\% \sim 30\%$ 。

## 7.2 多孔板塔（无溢流多孔板塔、泡沫塔）

如图 7-2 所示，多孔板塔是无溢流的高开孔率筛板塔，它主要可用于氧化镁法、钠碱法、双碱法、氨法脱硫工艺。它的优点是脱硫能力优于喷雾塔，单位气相传质推动力所获得的吸收  $\text{SO}_2$  的质量较大，即气相传质单元数 ( $N_{\text{OG}}$ ) 大。它不适合在烟气中含尘浓度较高时使用，必须经过高效除尘后才能使用该塔脱硫。不适用于湿式石灰法、湿式石灰石法脱硫，因为容易引起塔板结垢堵塞。

多孔板塔特性如下：

1) 多孔板塔吸收性能好，脱硫效率高，气相传质总系数  $K$  大。

2) 多孔板塔结构简单，塔板上按设计开孔率打孔，建设成本低。

3) 空塔流速高，一般为  $3\text{m/s}$ 。塔径相对小，设备紧凑，能适合不同规模脱硫使用。

4) 运行稳定，能适应负荷在一定范围变化，效率基本稳定。

5) 阻力损失适中，一般约为  $1200\text{Pa}$ 。

6) 不需要使用喷嘴，循环吸收液压力较低，节省电能。

7) 穿流板塔内气流分布均匀，不易产生偏流。

8) 穿流板塔适用于溶液吸收，如钠碱、氨法、强制氧化的氧化镁法等，要求烟气先经过除尘后再进脱硫塔，因为烟尘和浆液颗粒都会堵塞孔板。

9) 穿流板塔的分区与喷雾塔相同，在吸收区用塔板代替喷嘴组。一般用 3~4 层塔板如图 7-2 所示。

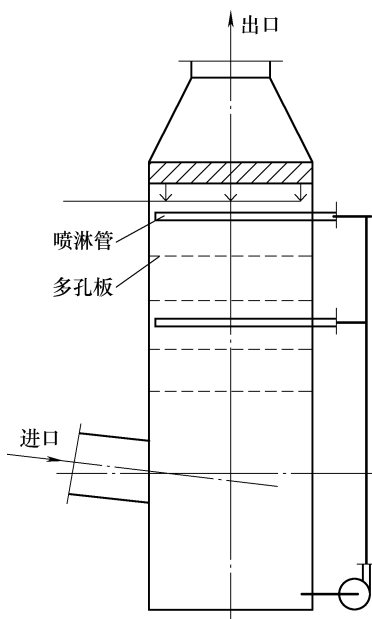


图 7-2 多孔板塔

## 7.3 文丘里洗涤塔

如图 7-3 所示，文丘里洗涤塔由一个文丘里管和洗涤塔组成。它是一种高效湿式洗涤器，常用在高温烟气降温和除尘上，也可用于气体吸收、烟气脱硫上。文丘里管有降温、除尘、吸收功能，这取决于它喉部的气速。它的工作原理是烟气进入文丘里管后先在收缩段加速，然后进入喉管，烟气速度达到所要功能的速度值，如除尘时， $v_t$  约为  $35\text{m/s}$ ；气体吸收时， $v_t = 20 \sim 23\text{m/s}$ 。在喉部前喷入除尘水或脱硫吸收液，借助喉部高速气流使吸收液与烟气进行充分混合、激烈碰撞和传质、传热、涤尘、吸收过程。经过喉部后，烟气逐渐减速，由于粒子大小惯性不同，相互进行碰撞凝聚成较大颗粒而有利

于捕集和吸收，最后进入除雾器或洗涤塔。文丘里管后面也可接其他吸收塔，可以获得很高的吸收率。

文丘里洗涤器的特性：

1) 文丘里洗涤器可用于除尘、脱硫，也适用于高温烟气降温，可用于带有黏稠性组分的烟气。

2) 具有较高的脱硫除尘效率。它的喉部气流速  $v_T$  直接与效率和阻力相关（见图 7-4），应合理选定。 $v_T$  约为 35m/s 时，用于烟气除尘； $v_T$  约为 90m/s 时，用于亚微米除尘； $v_T$  为 20~23m/s 时，用于气体吸收。

3) 文丘里管液气比  $L/G$  也与用途和净化率密切相关。一般除尘脱硫  $L/G$  为 1~2，用于烟气脱硫，对应 CaO 浆液浓度 5%； $L/G$  为 5.4 时，脱硫效率为 65%，对应 MgO 浆液浓度 5%； $L/G$  为 5.4 时，脱硫效率为 91%。

4) 文丘里洗涤器更适用于作为烟气脱硫预处理级，可以用于降温、除尘或去除黏稠性组分，同时脱除大部分  $SO_2$ ，为下一级脱硫创造良好工作条件。

5) 文丘里洗涤器结构尺寸比如下：

进口直径同烟气管道相匹配；

收缩段收缩角  $\alpha_1 = 23^\circ \sim 25^\circ$ ；喉管长度与直径  $L_T/D_T = 0.8 \sim 1.5$ 。

喉管直径  $D_T$  根据  $v_T$  计算；

扩散管段，扩散角  $\alpha_2 = 6^\circ \sim 8^\circ$ 。有了  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ ，根据相应进口、喉管尺寸、出口管尺寸就可计算出收缩段、扩散段长度。

6) 文丘里洗涤器的阻力与喉部速度、结构尺寸、加工精度、喷雾方式、液气比等有关。要准确计算一个文丘里管的阻力是比较困难的，但是可以根据使用经验得到阻力经验数据。可用图 7-4 进行估算。

图 7-5 表示喉管气流速、空气动力分割粒径与分级通过率及阻力的曲线。

从曲线可找到在液气比  $L/G = 1L/m^3$ ， $f = 0.25$ ， $t = 25^\circ C$  时，空气动力直径  $d_a$  的大小。采用  $v_T$  值可找到  $\Delta p$ ，再找到分级通过率  $P$ ，也可推算分级效率  $\eta_d = 1 - P$ 。

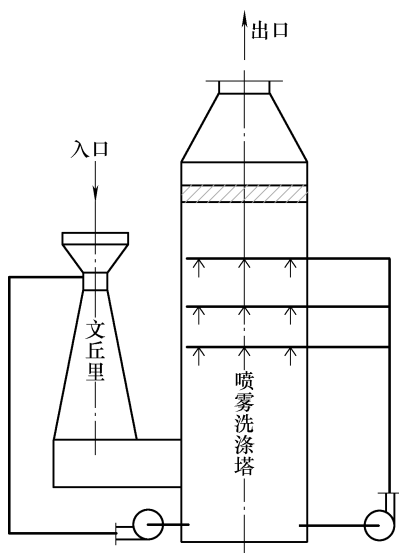


图 7-3 文丘里洗涤塔简图

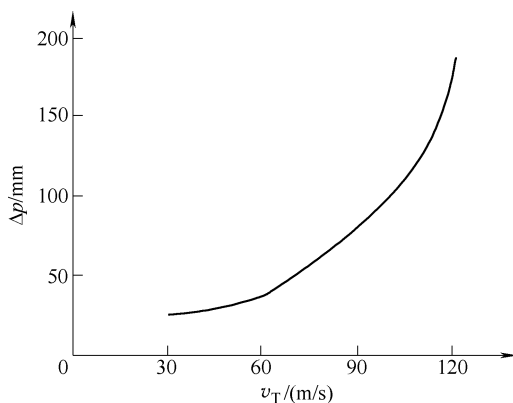


图 7-4 文丘里洗涤器喉速  $v_T$  与压降  $\Delta p$  曲线  
( $\Delta p - v_T$  曲线) 图

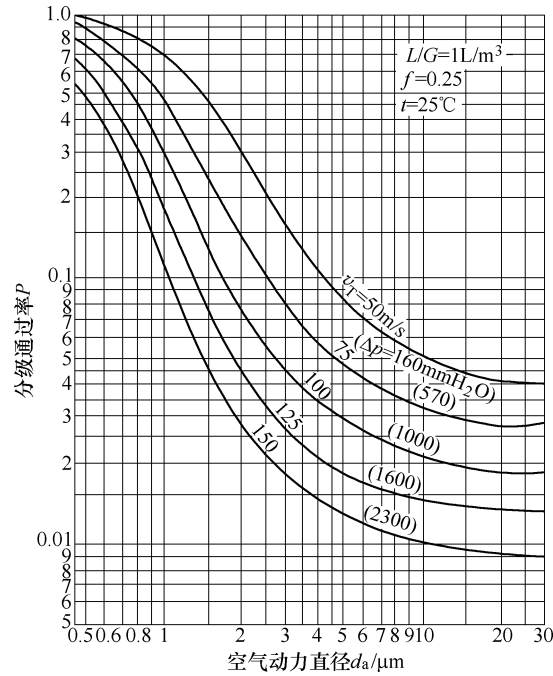


图 7-5 分级通过率  $P-d_a$  曲线

图 7-6 表示，不同液气比和不同  $v_T$  下的总除尘效率  $\eta$  和阻力损失。

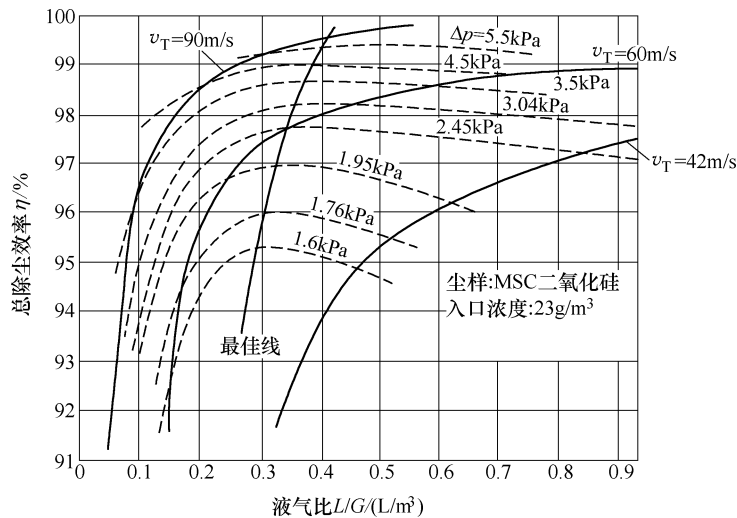


图 7-6  $L/G-\eta$  曲线

7) 在工业锅炉脱硫除尘中，应用文丘里麻石除尘器极为普遍。改造文丘里管，使其兼顾除尘和吸收  $\text{SO}_2$ ，并在麻石主筒内加装喷雾和旋流板脱硫，取得了阶段成果。除尘效率约为 95% ~ 98%，脱硫效率在 80% 左右，阻力在 1600Pa 左右， $L/G=0.5 \sim 1.5\text{L}/\text{m}^3$ 。

## 7.4 喷雾、多孔板塔（见图 7-7）

把喷雾和多孔板组合在一个吸收塔内，塔下面是两层喷嘴组，往上是一层多孔板塔板。这样组合后既有喷雾塔的优点又具备多孔板塔的特性，能够优势互补。喷雾塔不易堵塞、阻力低，但吸收能力不如板式塔，并且容易夹带雾沫，多孔板塔抗堵性不如喷雾塔，但吸收效率高，不易夹带雾沫。烟气进塔后先经过两层喷嘴组洗涤、吸收、脱硫、除尘，经过净化的烟气再经上层多孔板洗涤吸收，可以获得很高的脱硫除尘效率。对于链条炉排锅炉排烟，通过工业试验及工程实用，除尘效率 98% ~ 99%，脱硫效率 90% ~ 95%，均能达到国家和地方的排放标准。

喷雾、多孔板塔的特性如下：

- 1) 喷雾、多孔板塔脱硫除尘效率高，一般除尘效率约为 98%，脱硫效率为 90% ~ 95%。
- 2) 结构简单，吸收区由两层喷嘴组加一层多孔板塔板，其他分区都与喷雾塔相同。
- 3) 喷雾、多孔板塔适用于氧化镁法、钠碱法、双碱法、氨法脱硫工艺。
- 4) 喷雾、多孔板塔空塔流速  $v_0$  约为 3m/s，阻力损失在 1200Pa 左右。阻力损失适中。
- 5) 具有较好负荷适应性，在低负荷下运行，性能基本稳定。
- 6) 喷雾、多孔板塔的液气比  $L/G$  为 5 时，其脱硫除尘性能均达到高值。
- 7) 喷嘴选用与吸收液相关，如果用于溶液吸收，一般可用实心螺旋喷嘴，用于浆液吸收应采用浆液喷嘴。
- 8) 塔内气流分布均匀，不易产生偏流。

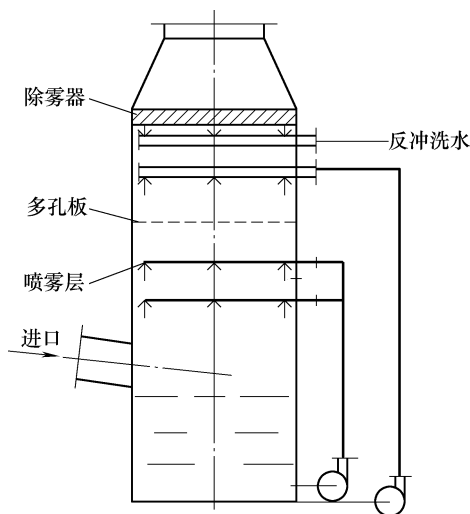


图 7-7 喷雾多孔板塔简图

## 7.5 旋流板塔

旋流板塔是在塔中安装若干块旋流板，如图 7-8 所示。

所谓旋流板，就是气体（烟气）通过此板后产生旋转运动。实际上，它不是一个板，而更像一个固定的叶轮。叶轮中间是内环，上有封板。在外环和内环之间安装定角度倾斜的导流板（见图 7-9）烟气通过旋流板时，被强制导流改变方向，产生沿旋流板圆周切线方向的旋转运动。吸收液在旋流板中心部位注入，由旋转气流分散飞向外环，同时与上旋气流经过多次激烈碰撞、切割，进行吸收、传质、除尘过程。由于旋流板塔可以安装多层旋流板，所以总的除尘脱硫效率较高。

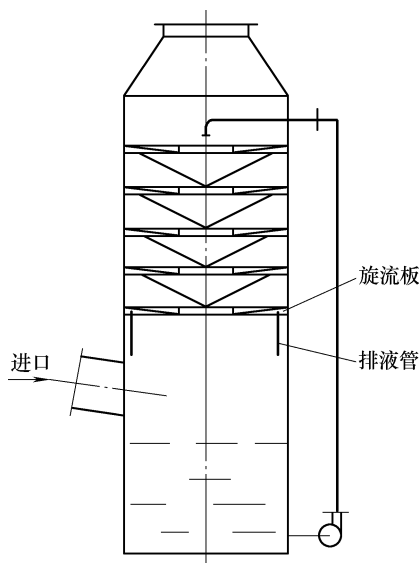


图 7-8 旋流板塔简图

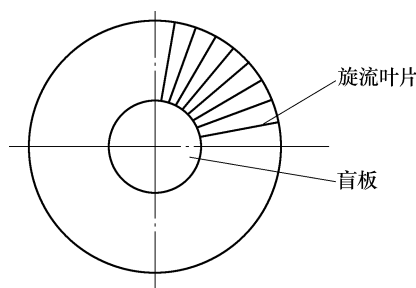


图 7-9 旋流板简图

旋流板塔的特性如下：

- 1) 旋流板塔具有很好的除尘和脱硫功能，可以实现除尘、脱硫一体化，更适用于链条锅炉的脱硫除尘一体化。除尘效率为 98%，脱硫效率约为 90%。
- 2) 旋流板塔塔内零部件较多，与其他板式塔一样，更适用于双碱法、氧化镁法、氨法等溶液循环吸收的脱硫工艺，能发挥它的优势。
- 3) 旋流板塔的液气比是同样工艺条件下较低的，可以节省运行费用。
- 4) 旋流板做成外向型可用于除雾。这类塔一般不再用折流板除雾器，就可减小阻力，降低造价。
- 5) 旋流板已作为一种强化脱硫除尘的措施被加到洗涤塔中。如麻石除尘器改造成脱硫除尘器，塔内加用旋流板是常用方案。

## 7.6 液柱塔

液柱塔（见图 7-10）是在吸收塔内吸收区下端安装低压喷嘴组，将吸收浆液均匀向上喷出形成密集有规律分布的液柱，喷到一定高度就散开下落，在下落过程又与上喷的液柱碰撞，在塔内形成高浓度液滴层，气液接触非常充分。液滴上升、下落的速度较大，有利于提高气相传质系数。由于液柱从下向上喷，再从上到下落，走了两倍吸收区高度，延长一倍吸收接触时间。这是液柱塔的优点，使其具有较高的吸收传质能力和脱硫效率。

液柱塔的特性如下：

- 1) 液柱塔内气液两相充分分散、混合、接触，形成巨大的两相界面，吸收液滴从



下到上，再从上落到下，有两倍于同高度喷雾塔的吸收时间，所以具有很高的脱硫效率。

2) 液柱塔是空心塔，阻力损失小，抗堵性好，适用于浆液吸收脱硫工艺。

3) 液柱塔空塔流速相对较高，体积较小。

4) 液柱塔结构简单、维修方便。

5) 液柱塔负荷适应性好，低负荷时脱硫效率稳定。

6) 用于石灰石 - 石膏法脱硫工艺的液气比  $L/G$  为  $15\text{L}/\text{Nm}^3$ ，脱硫效率为 95%。

7) 液柱塔运行可靠性高、性能良好。

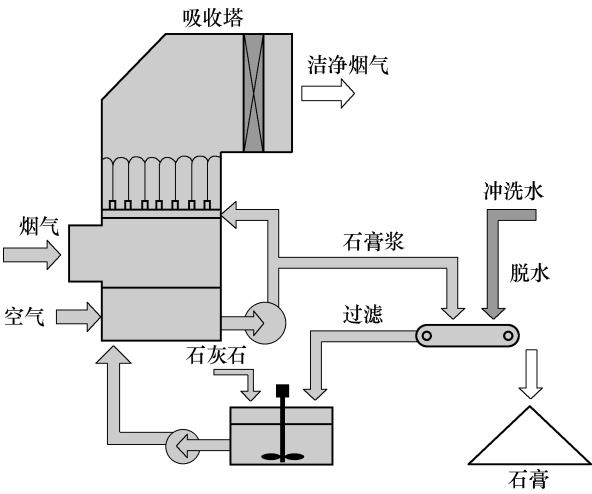


图 7-10 液柱塔简图

7.7 其他脱硫塔

实用的脱硫塔还有喷射鼓泡反应器、喷雾旋流麻石、脱硫除尘器、气动乳化脱硫除尘器等，在脱硫和除尘上都取得了较好的环境效益。在此就不一一介绍。图 7-11 所示为喷雾旋流脱硫除尘器。

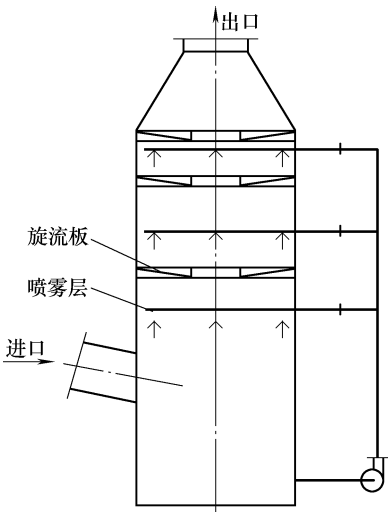


图 7-11 喷雾旋流脱硫除尘器简图

## 7.8 常用脱硫塔性能

见表 7-1。

表 7-1 常用脱硫塔性能

参数 名称	除尘效率 /%	脱硫效率 /%	阻力 /Pa	空塔 流速 $v_0$ /(m/s)	特 点
喷雾塔	90	80 ~ 95	800 ~ 1000	2.5 ~ 3	抗堵性好,可用于浆液循环
多孔板塔	95 ~ 99	90 ~ 95	1200	3	吸收率高,液气比低,不宜用于浆液吸收
文丘里洗涤塔	95 ~ 99	90 ~ 95	1400	3	多功能,抗堵性好
喷雾多孔板塔	95 ~ 99	90 ~ 95	1200	3	吸收率高, $L/G$ 低,不宜用于浆液循环
旋流板塔	95 ~ 99	90 ~ 95	1200	3	吸收率高,液气比低
喷雾旋流板塔	95 ~ 99	90 ~ 95	1200	3	吸收率高,液气比低
液柱塔	95 ~ 99	90 ~ 95	1400	3	吸收率高,抗堵性好,可用于浆液循环

## 第 8 章 锅炉烟气湿法脱硫自动控制设计

本章编写的是工业及热电锅炉脱硫自动控制，与大型电站锅炉脱硫的自动控制有所区别。工业锅炉一般为 10 ~ 35t/h 蒸发量，热电锅炉则按 HJ 462—2009 中适用蒸发量 < 400t/h 的燃煤热电锅炉。在自控标准、范围、要求方面，都比电站锅炉的自控有所精简。

### 8.1 控制系统概述

为了发挥脱硫系统各个设备作用，满足各段工艺要求，对工艺设备和参数进行准确控制，以达到较高的脱硫效率以及安全、稳定、连续运行的目的。为了提高自动化管理水平，并尽量减少频繁的人工操作，拟对工业及热电锅炉湿法脱硫采用比较先进的控制方法，即由 PLC 构成的集散控制系统，作为脱硫的监控系统。

控制系统自下而上，由以下部分组成：

现场控制仪表及用电设备；

现场设备（电机）控制柜；

PLC 控制站；

计算机监控系统。

PLC 控制器接受现场设备或仪表的开关状态信号，接受温度压力、pH 值、浆液密度等传感器模拟量信号（4 ~ 20mA），并对设备运行控制。PLC 通过通信网络与上位机连接可实时查询各个设备的运行状态和工艺参数，并对其进行控制。

现场设备控制柜控制现场设备的启、停及调节，监测设备的运行、停止或故障状态。在自动方式下，可根据 PLC 程序的要求启动或停止电动机，从而进一步控制电动机所驱动的设备的运行状态。在手动方式下，可在现场直接控制这些设备的状态。PLC 将实时监测这些设备的运行状态。

上位监控管理机根据 PLC 采集到的信息，建立各类信息库并对工艺参数值，做出趋势曲线，供技术人员比较，找到较佳运行规律。

操作站以人 - 机对话的形式指导操作，在自动状态下，可用键盘或鼠标对有关设备进行操作，实现远程控制。

操作站显示屏（CRT）可以显示工作区平面图及各工艺流程单体剖面图、剖面图上有动态实时参数显示，机泵运行状态显示和事故报警信息显示。自动生成生产报表和故障记录报表，供管理使用。

计算机系统本身可在线诊断各类故障发生的部位并报警。

## 8.2 自控设计采用的标准及规范

HG/T 20638—1998 《自控专业工程设计文件深度的规定》

HG/T 20639.1—1998 《自控专业工程设计用典型表格》

HG/T 20639.2—1998 《自控专业工程设计用典型条件表》

HG/T 20639.3—1998 《自控专业工程设计用标准目录》

HG/T 20573—2012 《分散型控制系统工程设计规定》

HG/T 20507—2000 《自动化仪表选型设计规定（附条文说明）》

HG/T 20508—2000 《控制室设计规定（附条文说明）》

HG 20509 ~ 20515—2000 《化工自控设计规定（二） 仪表供电设计规定 [合订本]》

除以上各标准规范外，还包括其他与湿法烟气脱硫工程相关的标准，如 HJ 462—2009 《工业锅炉及炉窑湿法烟气脱硫工程技术规范》。

## 8.3 自控设计范围和内容

1) 工艺系统热工检测和控制：

① 烟气系统：烟气流量  $V_y$ 、烟气温度  $T_y$ 、烟气压力  $p_y$ 、烟气压差  $\Delta p_y$ 、烟气  $\text{SO}_2$  浓度、 $\text{NO}_x$  含量、烟尘浓度、烟气湿度。

② 浆液系统：脱硫塔液位测量控制、脱硫塔浆液密度及控制、脱硫循环浆液 pH 值及控制。

③ 脱硫工业用水流量测定及控制、脱硫塔补水及控制、脱硫浆液用水计量控制、除雾器反冲洗水计量控制、废水排放计量控制。

④ 脱硫剂系统：储仓粉料料位测量控制、粉料计量控制、搅拌槽液位测量及控制、浆液密度测量及控制、浆液 pH 值测量及控制。

2) 脱硫工艺流程及设备的安全、协调、稳定运行。

## 8.4 自动控制回路

在脱硫系统运行过程中的主要控制回路：

1) 循环浆液（溶液）pH 值检测及控制。通过 pH 值传感器控制电动调节阀的启闭调节脱硫剂添加量。

2) 脱硫塔内液位，控制补水量或排水量。

3) 脱硫产物排出控制。脱硫产物生成使脱硫浆液浓度不断增加，达到设计浓度时，密度传感器发出信号，控制电动调节阀启闭，控制外排脱硫产物浆液。

4) 脱硫塔超温保护。为了脱硫塔的安全运行，在塔进、出口处设置温度传感器，超过安全温度，发出声光信号，并开启降温，喷嘴组喷雾降温。达到危险温度

(或极限允许温度)应立即自动开启旁路烟道,让高温烟气旁路进入烟囱,以保护脱硫塔安全使用。

5) 定时控制除雾器反冲洗时间和强度。

6) 浆液储存槽液位控制。设上、下液位节点传感器控制脱硫剂输送泵启停。浆液搅拌槽设浆液密度传感器和工业用水流量计调整浆液浓度。

7) 料仓料位控制。粉体车与料仓上料管对接,车上自带气泵气力输送粉料到仓内。料位到控制低位时,低位信号灯开启,继续上料,料位超过低位后,低位信号灯熄灭,上料到料仓高位时高位信号灯开启并发出声响信号,完成上料。关闭气力输送泵。

8) 烟气流量测量。在进烟管上安装烟气流量计和  $\text{SO}_2$  连续检测仪,在线检测烟气流量和  $\text{SO}_2$  浓度。

9) 配制浆液控制。打开工业用水管电动阀门向搅拌槽上水到高位时,自动停止上水。打开搅拌器打开料仓定量给料器,用粉料电子计量仪表,向搅拌槽定量给料,搅拌成浆液。通过搅拌槽自测密度,自动调整加粉或当加粉达到要求密度时,自动关闭加水 and 加粉电动调节阀。把浆液输送到储存槽供脱硫使用。

## 8.5 测量仪表选型

1) 选用仪表要用质量过关,达到使用精度的仪表。国内有产品的可选用国产的。国外仪表尽量选用国内仪表厂引进组装的仪表。

2) 一般温度、压力、液体流量、液位等,可采用符合要求的国产仪表。浆液密度测量宜用进口射线密度仪。

3) 在仪表选型时,要注意其使用的腐蚀环境和仪表运行过程防堵。

4) 浆液管路上的电动调节阀、电动蝶阀要用适合于泥浆的电子式电动蝶阀。

## 8.6 烟气排放连续监测系统 (CEMS)

1) 脱硫装置应按照《污染源自动监控管理办法》的规定,安装烟气连续监测系统,并与当地环保部门联网。连续监测系统的技术要求、安装部位、监测方法、数据传输等应符合 HJ/T 75—2007 和 HJ/T 76—2007 的规定。

2) 设计选用时,应与当地环保部门联系,一般都会有具体规定。

## 8.7 工业锅炉脱硫自动控制设计方案示例

### 8.7.1 130t/h 供热锅炉脱硫自控和电气方案设计

脱硫系统控制流程如图 8-1 (见全文后插页) 所示。

现就电气和自控两部分分别进行阐述：

### 1. 电气部分

此系统总用电量约为 219.07kW，由甲方提供 380/220V 总电源引至脱硫系统控制室。控制柜 3 台，控制箱 1 个，控制台 1 个。采用研华或康泰克计算机，采用三菱 PLC 控制器，完成所有设备的监控及信号的采集，根据现场情况，初步设定两个 PLC 控制器，主控室设在锅炉控制室内或泵房内，与甲方协商后确定。本脱硫控制系统与二期工程 DCS 系统相兼容，施工设计时，与二期工程设计相沟通。

电缆敷设原则上为室内穿管暗敷、室外自埋或电缆沟（或架空）敷设，可根据现场实际情况确定。上位监控管理机可以监视所有被控设备的工作状态；设备故障时报警，所有采集的参数实时显示，并绘制趋势图，供工程技术及管理人员参考，做出判断。具体用电设备如下：

- 1) 循环泵 B1、B2、B3，两用一备，连续运行。
- 2) 脱硫剂输送泵（B5a、B5b）一用一备，间断运行。
- 3) 脱硫剂供给泵（B6a、B6b）一用一备，连续运行。
- 4) 预冷喷淋泵（B4a、B4b）一用一备，连续运行。
- 5) 斗式提升机一台，间断运行。
- 6) 给料装置（振动料斗等）一套，间断运行。
- 7) 搅拌装置（2kW/h）一套，间断运行。
- 8) 搅拌装置（4kW/h）一套，连续运行。
- 9) 电动葫芦一台，间断运行。
- 10) 电动通风调节阀（V1、V2、V3）三台，间断运行。
- 11) 罗茨鼓风机，一用一备，连续运行。

### 2. 自控部分

采用可编程序控制器（PLC）系统进行控制，运行人员可在彩色显示器的 PLC 主控制屏前监测和控制相关设备的运行状况。主要的控制回路：

1) 循环浆液 pH 值控制脱硫剂添加量。通过 pH 值传感器控制电动调节阀（DF4），实现脱硫剂加入量的控制。

2) 脱硫塔内液位控制补水量。通过液位传感器（YW1）输出信号控制电磁阀（DF2），实现补水量的自动调节。

3) 循环浆液密度或电导率控制浆液外排。随着过程的进行，循环浆液中的  $\text{MgSO}_4$  浓度不断增加，需及时外排部分浆液。通过密度传感器与电动调节阀（DF3）的联锁，实现对浆液外排量的控制。

4) 烟气温度在线监测及控制。为保证脱硫塔的安全运行，在塔的出口位置设有温度传感器（WG2）。当异常情况出现而导致出口烟气温度升高时，位于脱硫塔入口段及旁通烟道上的电动通风蝶阀（V1、V2、V3）将自动进行切换，将热烟气由旁通烟道排出。

5) 在塔内烟气入口位置布置温度传感器（WG1），并与电动通风蝶阀（V1、V2、

V3) 连锁。如预喷淋段和紧急喷水喷头遇故障, 为保护脱硫塔防腐材料不被破坏, 将即时切换电动通风蝶阀, 将热烟气由旁通烟道导出。

6) 除雾器反冲洗定时控制。设定反冲洗时间为 12 次/天, 4min/次, 平均用水量为 2.2t/h。

7) MgO 熟化罐内液位控制。罐内设上、下液位节点传感器 (YW2、YW3), YW2 控制电磁阀 (DF5) 和给料装置的关断; YW3 控制电磁阀 (DF5)、给料装置和搅拌机的开启。

8) MgO 浆液池内液位控制。池内设上、下液位节点, 传感器 (YW4、YW5); YW4 控制脱硫液输送泵的停止; YM5 控制脱硫液输送泵的启动。

## 8.7.2 锅炉烟气脱硫浆液制备自控设计

### 1. 概述

为了满足工艺要求和提高自动化水平, 确保控制精度, 采用可编程序控制 (PLC) 系统。PLC 控制器可实时接收到现场检测设备的开关量和模拟量信号, 按工艺要求进行必要的处理和计算, 实施控制与调节, 并通过 RS232C 通信接口与上位 DCS 主机相连, 实现总体监控和管理。与 PLC 配套使用的触摸屏可用来显示本系统工艺流程、实时动态参数以及全部执行设备 (泵、电动阀、电动蝶阀、给料机、搅拌器等) 的运行状态, 并发出事故报警信号。

### 2. 主要控制回路 (见图 8-2)

#### (1) MgO 粉料仓料位控制

粉料仓由粉体输送车自带泵向粉料仓送料。其高低料位分别控制输送泵的启停, 其运行状态可动态显示在触摸屏上。

#### (2) 旋转给料机的运行控制

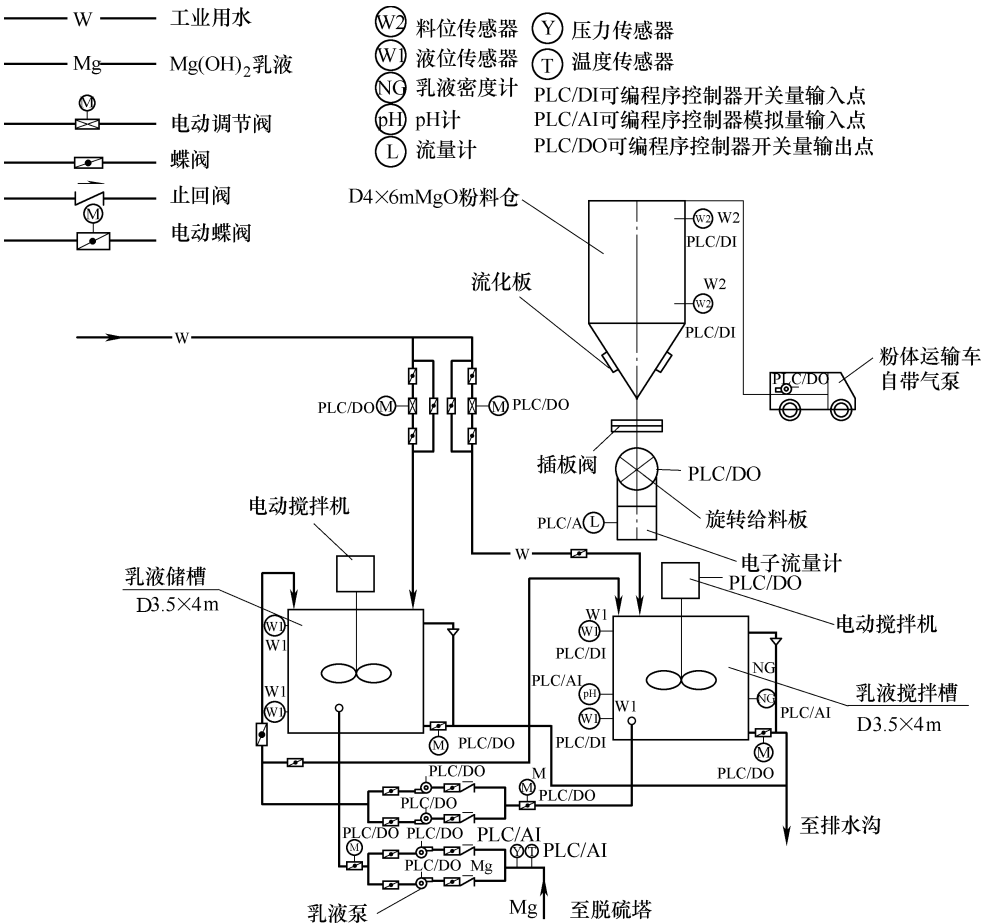
旋转给料机可由粉料仓高料位信号或由操作人员手动启动运行。同时装于其上的电子流量计开始计量, 流量信号送至 PLC, 并进行计算, 当达到预设需要量时, 停止给料机运转, 中止向搅拌槽下料。

#### (3) 乳液搅拌槽和乳液储槽的控制

1) 当给料机开始向搅拌槽中给料时, 同时打开给水管路上的电动阀向搅拌槽加水, 并同时开启搅拌机进行搅拌, 当达到搅拌槽高水位时, 关闭加水电动阀。

2) 当乳液储槽中的液位到达低水位时, 启动两槽间管路上的输液泵, 同时开启其上的电动蝶阀, 乳液即开始向储槽中输送, 当达到搅拌槽低水位或储槽高水位时, 停泵关阀, 中止乳液输送。

3) 装在搅拌槽中的密度计和 pH 计连续检测乳液密度和 pH 值, 并实时动态显示在触摸屏上。当加水、加料全停, 而检测到密度不符合要求时, 则可开启搅拌槽底部的用于排空的电动蝶阀, 定时排出一部分乳液, 此时如果乳液密度大于预定要求值时, 则加水使其密度降低, 直至符合要求为止。反之, 当密度小于要求值时, 则定时启动加料, 使之达到要求。如此精细控制可确保乳液密度达到预设精度要求。



4) 自脱硫塔送来的要料信号（开关量，PLC/DI），可启动其输送管路中的乳液泵，同时打开一侧的电动蝶阀，实现向脱硫塔输送乳液。当脱硫塔发来停止送料信号或储槽液位达到低水位时，停泵关阀，中止向脱硫塔送料。

(4) 至脱硫塔乳液泵出口温度压力检测

装在至脱硫塔乳液泵出口的温度、压力变送器，将其检测结果送至 PLC，并实时动态显示在触摸屏上。

3. 自控参数及设备（见图 8-3）

为了实现 PLC 控制，所有现场检测设备的模拟量输入量均为 4 ~ 20mA，开关量输入为干接点形式，开关量输出为继电器形式。总计 I/O 点为：DI：6，AI：5，DO：20。

自控设备见表 8-1。

水泵、电动阀、电动蝶阀、给料机、搅拌机现场执行机构均设有手动、自动两种工作方式，以供选择。



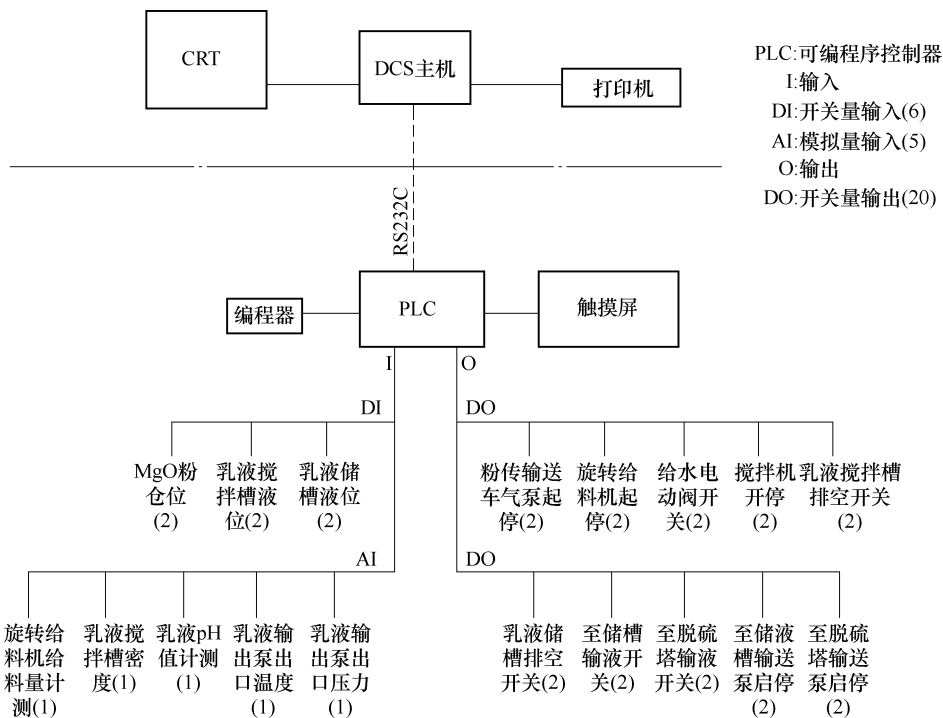


图 8-3 控制系统原理框图

表 8-1 自控设备一览表

序号	名称	型号规格	数量	单价/元	总价/元	备注
1	乳液 pH 计	PHICA subniersion	1	28000	28000	
2	乳液密度计	2LB5441 型	1	65000	65000	放射式
3	电子流量计	DLP10 型	1	80000	80000	
4	压力变送器	DDM34-1-3M,0~10kg/cm <sup>2</sup>	1	5000	5000	
5	温度变送器	热电阻 0~100℃	1	3000	3000	
6	乳液槽液位计 (储槽)	UDM-3-4-A-2-2M	2	4000	8000	静压式、高低限输出带显示
7	乳液槽液位计 (搅拌槽)	UDM 超声式	2	6000	12000	超声式、高低限输出带显示
8	MgO 仓料位计	UDM-4-6-3-A-M	2	4000	8000	电容式、高低限输出带显示
9	电动阀		2	30000	60000	
10	电动蝶阀	ZDR(L) 型	4	25000	100000	

(续)

序号	名称	型号规格	数量	单价/元	总价/元	备注
11	可编程序控制系统	欧姆龙 CPM2AH-60CDR-A	1 套	18084	18084	带触摸屏、编程器
12	控制屏		1	50000	50000	包含所需配电设备
13	安装费				96750	
	合计				533834	

# 第 9 章 工业锅炉烟气湿法脱硫主要设备

锅炉烟气脱硫系统由一系列设备组成，其中最主要的是脱硫塔。脱硫系统设备如图 9-1 所示。此外还包括循环泵、增压风机、鼓风曝气机、除雾器、喷嘴、烟气加热器、浆液搅拌器、固液分离设备等。本章主要对上述设备的特性及使用要求进行介绍，并摘编关于在工业及供热锅炉脱硫中可采用的上述设备设计资料，供设计选用。脱硫塔的内容已在第 7 章中专门介绍，本章不再赘述。

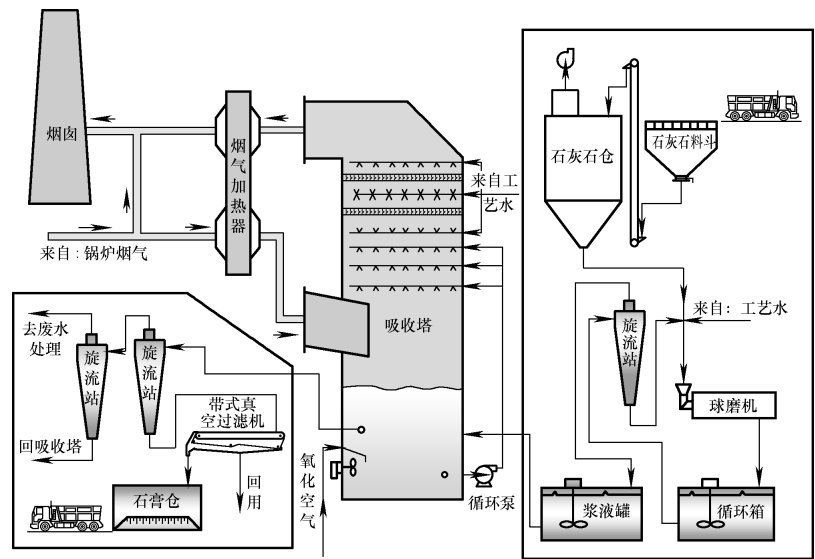


图 9-1 脱硫系统工艺流程图

## 9.1 脱硫增压风机（见图 9-2）

用来克服在锅炉除尘器后面安装脱硫系统所增加的设备和烟道的阻力。通常包括脱硫塔、除雾器、烟气加热器、烟气管道等。选用本设备应注意以下事项：

- 1) 增压风机安装位置宜在脱硫塔前。增压的是除尘器排出的锅炉原烟气，所以可以使用碳素钢制造的锅炉引风机。不宜使用鼓风机或其他通风机。因为烟气中含有一定量的粉尘，有可能黏结在风机叶轮上引起振动。锅炉引风机的叶轮和轴承座就是考虑了引风机的工作状态和可能引起的振动，非锅炉引风机则不然。一旦振动就可能被迫停机。
- 2) 注意使用增压风机的特性曲线来确定运行工作点的风压和风量，并核定是否能满足脱硫系统增压和排烟需要。如图 9-3 所示。
- 3) 注意选用引风机的使用状态温度同设计指定状态： $p_a = 101300\text{Pa}$ ， $t = 200^\circ\text{C}$ ，

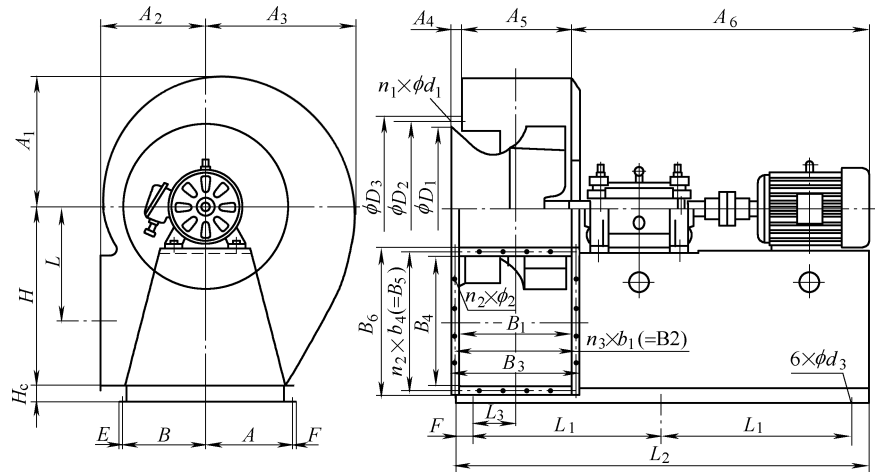


图 9-2 脱硫增压风机

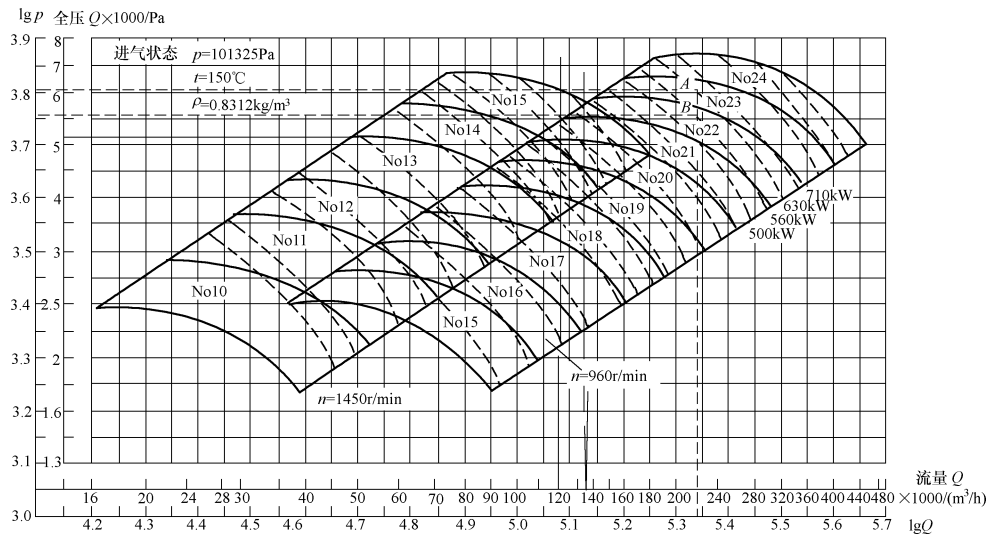


图 9-3 风机特性曲线

气体密度  $\rho = 0.745 \text{ kg/m}^3$ 。不同时要换算到指定状态参数。

4) 对于大多数工业及供热锅炉，选用 Y4-73 系列引风机能满足增压风机要求。该型引风机性能参数列于第 13 章。

5) 如果需要选用高压头增压引风机，可用 GDGY 系列高压低噪声流化床锅炉引风机，其全压范围为 1000 ~ 9000Pa，风量为 16000 ~ 480000  $\text{m}^3/\text{h}$ 。叶轮材质为 Q345 钢，在易磨损部位堆焊耐磨材料，耐磨性好。耐蚀性比碳素钢制的引风机优良。见第 13 章。

6) 增压风机一般布置在静电除尘器后、脱硫塔前。增压的是干烟气。一般不需防

腐设计。如果由于某些原因确实要布置在脱硫塔后，那么增压风机的工作介质是湿烟气。在选择防腐材质时，应顾及以下腐蚀特性：

- ① 湿烟气夹带的冷凝酸液；
- ② 湿烟气夹带液  $\text{Cl}^-$  离子腐蚀；
- ③ 烟气中水滴引起侵蚀；
- ④ 烟气中固体颗粒引起的磨蚀。

因此必须使用能耐受上述腐蚀环境的材料。对于静止部件，可以用碳钢衬胶或衬高密度聚乙烯。风机转子可以采用 C22 或 C276 合金。采用单板叶片在易磨损部位堆焊耐磨材料。

## 9.2 脱硫循环泵

循环泵一般采用卧式离心泥浆泵。它的工作介质，脱硫循环液具有较强的磨损性和腐蚀性。如图 9-4 所示。

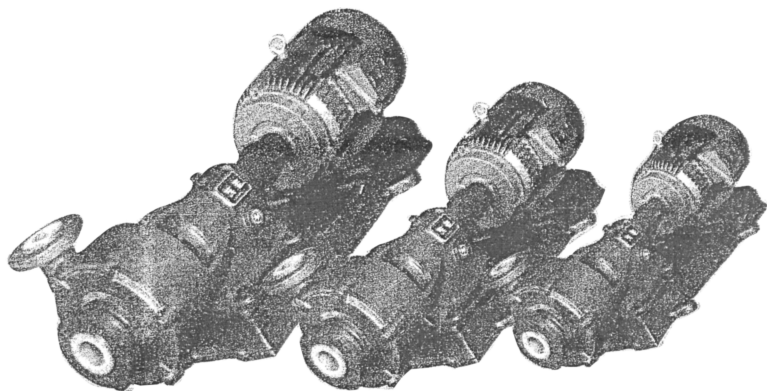


图 9-4 卧式离心泵

循环浆液中的含固量较高，如石灰石法脱硫浆液浓度达 12% 左右，因此要求泵使用耐磨材质。循环浆液中 pH 较低，如石灰石法的浆液 pH 约为 5.6，有较强的腐蚀性，特别是循环浆液中的氯离子含量。一定要通过检测来了解实际运行中的  $\text{Cl}^-$  离子含量是否满足所选用循环泵的要求。对于可用于烟气脱硫的循环泵已采用耐磨、耐腐蚀材质，但要注意其适用条件，尤其是  $\text{Cl}^-$  离子浓度。如国内生产的脱硫泵采用模压耐磨、耐腐蚀橡胶衬里和球墨铸铁外壳。能适应 pH 为 2.5 - 13，氯化物含量为 8g/L 的浆液。如果要耐更高  $\text{Cl}^-$  离子浓度的腐蚀，那么泵的叶轮应采用 Ni、Cr、Mo 合金材料制造，如 C22 等。

循环池设计在地下，如麻石脱硫除尘器，通常都这样设计，但需要注意循环泵的吸程，如吸程不足，可采用虹吸管吸水或将泵房也设计为地下布置。

注意循环泵的运行特性、扬程 ( $H$ ) 对流量 ( $Q$ ) 的关系和相应的轴功率 ( $N_e$ )，并核算实际运行工况是否满足要求。一般循环泵样本会提供该泵性能曲线，如图 9-5 所示。

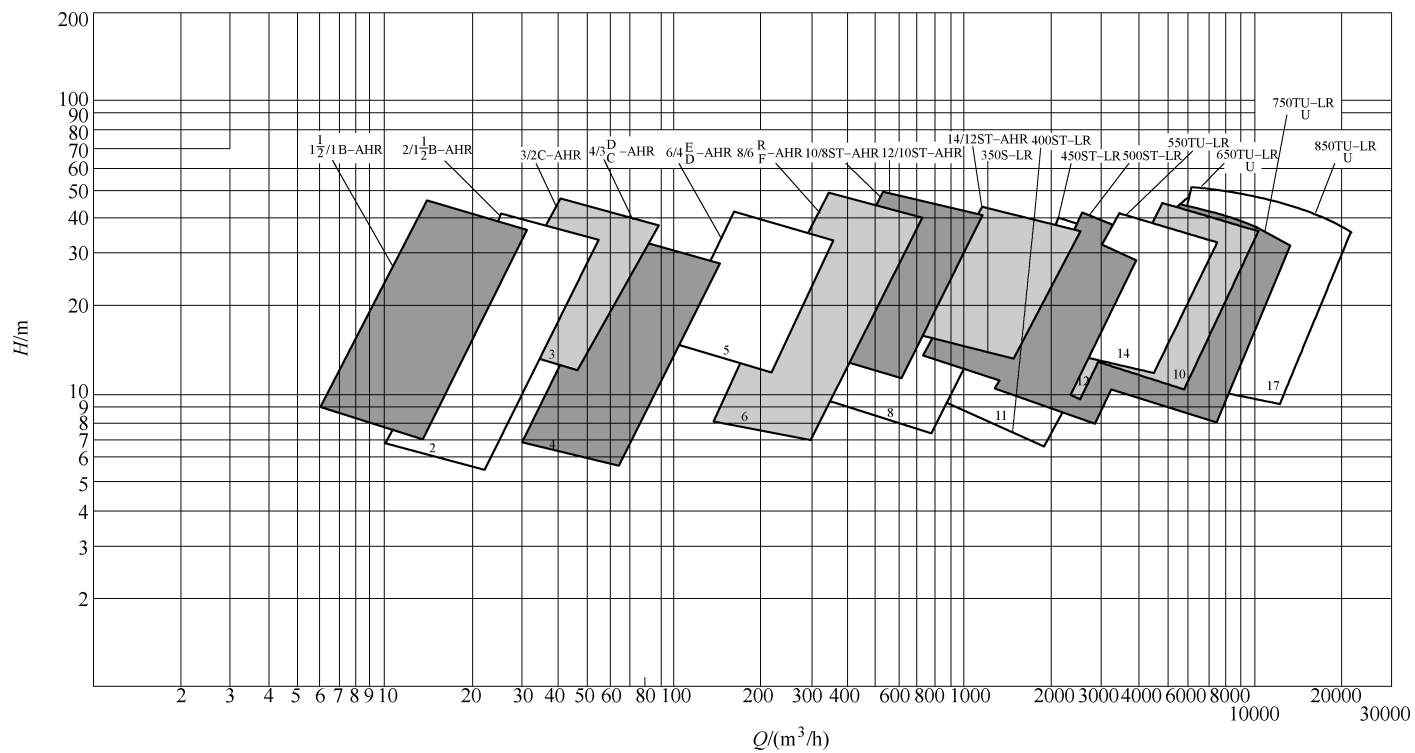


图9-5 离心泵特性曲线

有关国内常用衬胶泵和衬高密度乙烯浓浆泵参数和特性见第13章。  
大流量循环泵要使用密封水，耗水量由泵厂提供。

### 9.3 罗茨鼓风机（见图9-6）

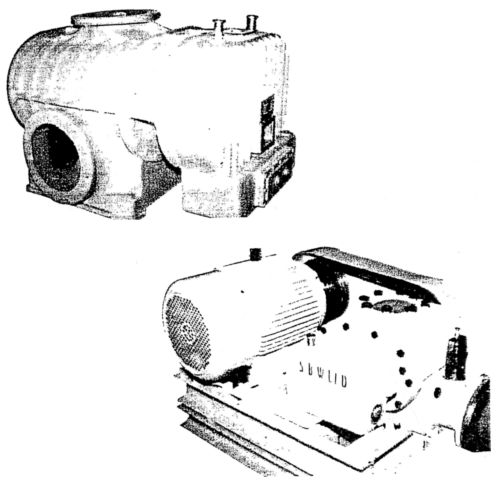


图9-6 罗茨鼓风机

脱硫剂吸收  $\text{SO}_2$  后，一般生成  $\text{CaSO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_3$ 、 $\text{MgSO}_3$  等，但是脱硫工艺要求回收可利用产品，如  $\text{CaSO}_4$ 、 $\text{MgSO}_4$  和  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  等。除了利用烟气中的过量氧自然氧化这些亚硫酸盐外，通常采用强制氧化，即向氧化区鼓入足够量的空气，一般采用罗茨鼓风机。这类鼓风机的工作介质是空气，工作状态为常温，使用碳钢材料就可满足使用要求，风量、风压由脱硫工艺确定，风压一般在 6000Pa 左右。

罗茨鼓风机转速较高，它鼓出的空气压力比一般风机高，所以它的噪声、振动比较大。为了降低噪声和振动，宜选用三叶型叶轮罗茨鼓风机。转速（ $n$ ）尽可能选用低值。罗茨鼓风机进气口和出气口一般都配置消声器。此外，在鼓风机基础设计时采用减振措施，如出风口接减振硬橡胶接头。

### 9.4 喷雾喷嘴

喷嘴是喷雾脱硫塔重要零件，喷嘴性能的优劣直接影响喷雾脱硫塔吸收  $\text{SO}_2$  的效率，所以有专门的公司研究开发用于各种用途的喷嘴。喷嘴按用途分为冲洗喷嘴、涤尘喷嘴、脱硫（吸收）喷嘴、冷却（降温）喷嘴、雾化喷嘴等。喷嘴按喷雾性状分为实心喷嘴、空心喷嘴、偏心喷嘴。喷嘴按工作机理分为压力喷嘴、离心喷嘴、双流体喷嘴、高速旋转离心喷嘴等（见图9-7）。喷嘴的功能是把液体介质分散成雾粒、液滴。

它的性能包括喷雾压力、流量、喷口直径、喷雾角、喷距和喷雾液粒直径。喷嘴的大小以与它相配的管道英制直径标定，如 Dn1in、Dn2in 等。

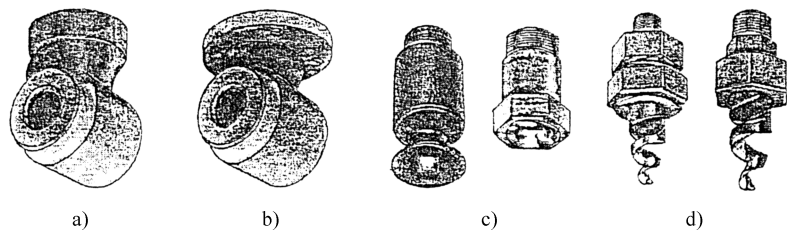


图 9-7 喷嘴类型

a) 空心锥切线型 b) 实心锥切线型 c) 实心锥型 d) 螺旋型

大型陶瓷喷嘴的液谱如图 9-8。其液粒粗大，能防止气流夹带逸出。

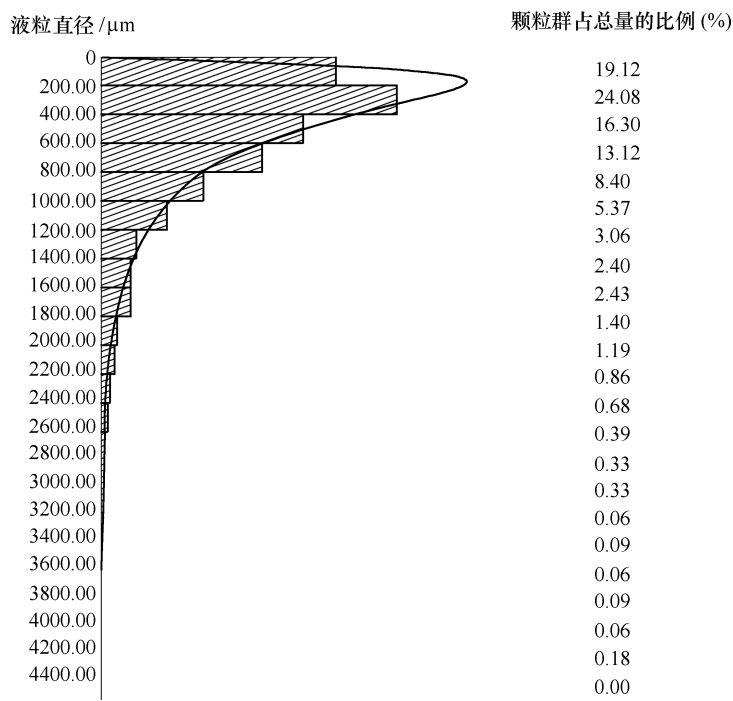


图 9-8 大型陶瓷喷嘴的液谱

清洗喷嘴的液谱如图 9-9 所示，其喷雾液粒细小，但也不能过细，以保证在清洗面的液滴仍有足够的动能。

9.4.1 喷嘴的性能

用管子连接或法兰连接的实心螺旋喷嘴性能见表 9-1 和表 9-2，两种实心螺旋喷嘴如图 9-10、图 9-11 所示。



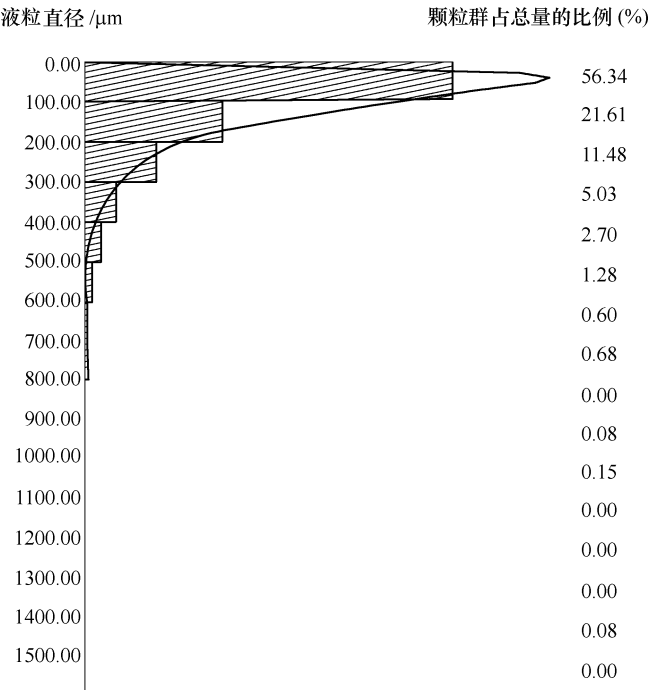
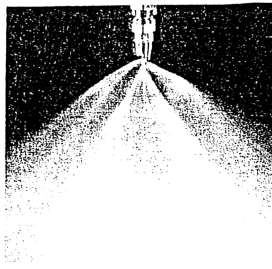
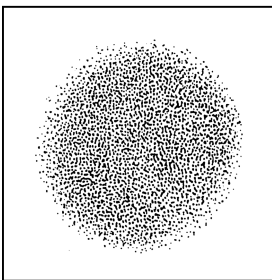


图 9-9 清洗喷嘴的液谱

表 9-1 管子连接喷嘴性能

 	管子尺寸 NPT 或 BSPT(外) /in	喷流角度(0.7bar 时)					流量 大小	喷孔 孔径 /mm	自由 畅通 直径 /mm	流量/(L/min)				
		60°	90°	120°	150°	170°				0.7 bar	1.5 bar	3 bar	7 bar	25 bar
1/4	●	●	●		●	07	2.4	2.4	2.6	3.9	5.5	8.4	16	
	●	●	●	●	●	13	3.2	3.2	4.9	7.3	10.3	15.7	30	
	●	●	●	●	●	20	4.0	3.2	7.6	11.2	15.8	24	46	
3/8	●					07	2.4	2.4	2.6	3.9	5.5	8.4	16	
	●					13	3.2	3.2	4.9	7.3	10.3	15.7	30	
	●					20	4.0	3.2	7.6	11.2	15.8	24	46	
	●	●	●	●	●	30	4.8	3.2	11.4	16.7	24	36	68	
	●	●	●	●	●	40	5.6	3.2	15.1	22	32	48	91	
	●	●	●	●	●	53	6.4	3.2	20	30	42	64	121	
	●	●	●	●	●	82	7.9	3.2	31	46	65	99	187	
1/2	●	●	●	●	●	120	9.5	4.8	45	67	95	145	270	
	●	●	●	●	●	164	11.1	4.8	62	92	129	198	370	
3/4	●	●	●	●	●	210	12.7	4.8	80	117	166	255	480	
1	●	●	●	●	●	340	15.9	6.4	130	190	270	410	775	
	●	●	●	●	●	470	19.1	6.4	179	260	370	565	1070	
1½	●	●	●	●	●	640	22.2	7.9	245	355	505	770	1460	
	●	●	●	●	●	820	25.4	7.9	310	455	645	990	1870	
	●	●	●	●	●	960	28.6	7.9	365	535	755	1160	2190	
2	●	●	●	●	●	1400	34.9	11.1	535	780	1105	1690	3190	
	●	●	●	●	●	1780	38.1	11.1	680	995	1405	2150	4060	
3	●	●	●			2560	44.5	14.3	980	1430	2020	3090	5830	
	●	●	●			3360	50.8	14.3	1280	1880	2650	4050	7660	
4	●	●	●			5250	63.5	15.9	2000	2930	4140	6330	11960	

注：1bar = 0.1MPa；1in ≈ 25.4mm。

表 9-2 法兰连接喷嘴性能

	接头 大小	喷流角度(0.7bar)					流量 大小	喷孔 孔径 /mm	自由 畅通 直径 /mm	流量/(L/min)					备注
		60°	90°	120°	150°	170°				0.7 bar	1.5 bar	3 bar	7 bar	25 bar	
	2in 凸缘	• •	• •	• •	• •	• •	1400 1780	34.9 38.1	11.1 11.1	535 680	780 995	1105 1405	1690 2150	3190 4060	标准材料 带纤维增 强 聚 酯 (F. R. P) 凸缘的反 应连接碳 化硅。 材料代码 SILCRB = 反应连 接碳化硅
	3in 凸缘	• •	• •	• •			2560 3360	44.5 50.8	14.3 14.3	980 1280	1430 1880	2020 2650	3090 4050	5830 7660	
	4in 凸缘	• •	• •	• •			5250	63.5	15.9	2000	2930	4140	6330	11960	

螺纹形 / 六角形，  
1/4~2in NPT 或 BSPT( 外 )



螺纹形 / 平台形，  
1/4~4in NPT 或 BSPT( 外 )



螺纹形 / 圆形，  
1/4~4in NPT 或 BSPT( 外 )



图 9-10 管子连接的实心螺旋喷嘴



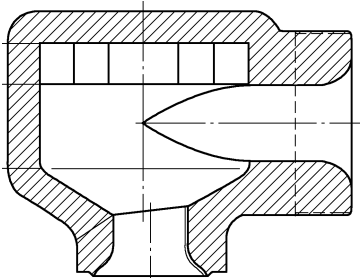
图 9-11 法兰连接的实心螺旋喷嘴

脱硫循环液是浆液时，采用适合浆液的大孔径喷嘴，如图9-12所示。若要特别耐磨和耐腐蚀，一般采用陶瓷材料或碳化硅制作。

除雾器冲洗喷嘴如图9-13所示。

9.4.2 喷雾的覆盖率 $f_p$

每一层喷雾层的所有喷嘴，离喷嘴出口一定距离处（通常为1m），喷出的雾粒覆盖面积之和与距喷嘴1m处吸收塔横断面面积的比值，称为吸收塔喷雾覆盖率



偏心实心锥面型喷嘴  
图9-12 脱硫浆液喷嘴

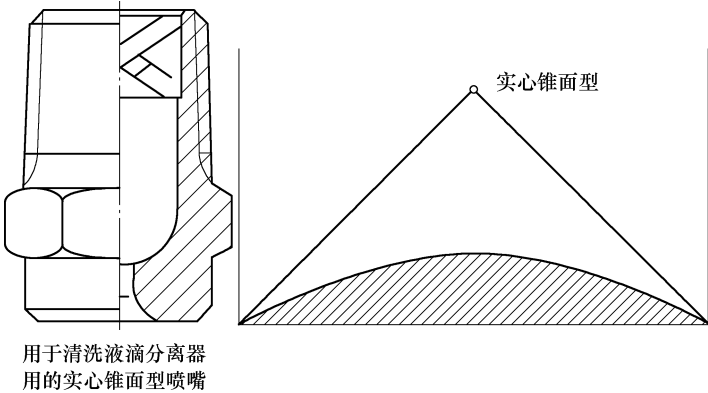


图9-13 冲洗喷嘴

$$f_p = \frac{n_p A_p}{A_{xi}} \times 100\%$$

式中  $n_p$ ——喷嘴数量；  
 $A_p$ ——距喷嘴出口1m处，每个喷嘴雾粒覆盖面积（ $m^2$ ）；  
 $A_{xi}$ ——距喷嘴1m处的吸收塔横断面积（ $m$ ）<sup>2</sup>。

喷雾覆盖率高，喷雾浆液分布均匀，不易产生喷雾死角，使烟气短路影响脱硫效率。

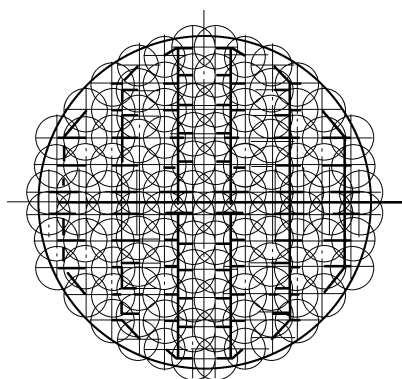
喷嘴覆盖率如图9-14所示。

对于填料塔布水喷嘴，除雾器冲洗喷嘴， $f_p$ 通常为200%~300%。

9.4.3 喷嘴的固定方法

（1）螺纹连接 一般喷嘴上的螺纹是英制外螺纹，喷嘴座上是内螺纹，如图9-15所示。

（2）法兰连接 常用在大型脱硫塔喷嘴连接上，如图9-11所示。由于脱硫塔的腐蚀环境，一般采用镍基合金螺栓、垫圈和螺母。



喷淋层下 1m 处测得的覆盖率

图 9-14 喷嘴覆盖率

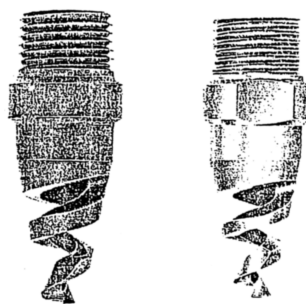


图 9-15 螺纹联接喷嘴

#### 9.4.4 喷嘴的材料

喷嘴喷雾流速较高，再加上浆液中固体颗粒物磨损较厉害。脱硫烟气的高温及酸性要求喷嘴材料具备耐磨性和耐蚀性，同时喷嘴要具有准确的形状尺寸、精度和表面粗糙度，要求材料有较好的机械加工性。通常使用材料如下：

(1) 合金钢 合金钢喷嘴多用于除雾器冲洗及事故冷却喷水。合金钢喷嘴用于浆液喷雾时，使用寿命较短。对于循环吸收液是溶液的喷嘴，如钠碱法、氨法、氧化镁法等，可用 S316L 或 S317LM 制造。

(2) 陶瓷（碳化硅） 烧结碳化硅或烧结氧化铝的喷嘴，能受脱硫浆液冲刷磨损与腐蚀。这种喷嘴较脆，易被打碎。在连接时，较多采用粘接。螺纹连接在拆装过程中很容易损坏喷嘴。一般吸收液是浆液的脱硫工艺，就采用这种材料的喷嘴。

(3) 其他材料 喷嘴有用聚氨酯、聚四氟乙烯、聚丙烯和玻璃钢等制作。聚氨酯喷嘴有较好耐磨性，用它可作为吸收塔浆液喷嘴。这种喷嘴比陶瓷喷嘴的耐磨性差，但不容易破碎，要在适宜温度中使用，一般使用温度  $\leq 60^{\circ}\text{C}$ 。

### 9.5 除雾器

除雾器是脱硫塔重要部件。除雾器的功能是把在喷雾吸收过程中，烟气夹带的雾粒、浆液滴捕集下来。除雾器的效率不仅与自身的结构有关而且与雾粒的重度和粒径有关。喷嘴雾化粒径与吸收液黏度、喷雾压力和喷嘴结构有关。把除雾器性能和雾粒直径匹配好，才能取得好的除雾效果。

如果除雾不好，烟气夹带浆液会带到下游设备，如烟气加热器、引风机（工业锅炉脱硫常用）、烟道，进而引起堵塞、引风机严重振动、烟道严重腐蚀、结垢等，从而被迫停运。

目前工业锅炉脱硫运行中,烟气带水问题较多,引风机挂灰较普遍,叶轮腐蚀、磨损严重,碳钢叶轮用一个采暖季就要更换,这都是除雾不好所致。

按颗粒物的性状划分,固体的称为尘(dust),液态的称为雾(mists)。雾的粒径一般为 $0.05 \sim 50 \mu\text{m}$ 。对于 $10 \sim 50 \mu\text{m}$ 的液态颗粒有的也称为沫。对于 $10 \sim 50 \mu\text{m}$ 的尘或沫相对较容易捕集,而对于 $<1 \mu\text{m}$ 的雾较难捕集。

不论固态或液态的微粒,其直径 $<0.05 \mu\text{m}$ ,分布于以空气作为胶体溶液的固体分散介质,更确切的名称是“气溶胶”(Aerosol)。一般要用静电过滤器或纤维过滤器才能有效捕集。

大型陶瓷喷嘴的液谱如图9-8所示。

由图9-8可知,这类喷嘴喷出的雾粒直径的算术平均值 $D = 655.88 \mu\text{m} = 0.655 \text{mm}$ 。

$D_d = 0 \sim 200 \mu\text{m}$ 的,占雾粒中的19.12%;

$D_d = 200 \sim 400 \mu\text{m}$ 的,占雾粒中的24.08%;

$D_d = 400 \sim 600 \mu\text{m}$ 的,占雾粒中的16.30%;

$D_d = 600 \sim 800 \mu\text{m}$ 的,占雾粒中的8.4%;

$D_d = 800 \sim 1000 \mu\text{m}$ 的,占雾粒中的5.37%;

因此 $<1 \text{mm}$ 的 $D_d$ 占雾粒中的73.27%。

这种喷嘴喷出的绝大部分是 $>0.2 \text{mm}$ 的液滴,还是比较容易捕集的。

大型陶瓷喷嘴一般用于大型火电厂石灰石法脱硫装置,通常采用二级折流板除雾器。

对于工业锅炉脱硫中常用的螺旋喷嘴,是实心锥型喷嘴。其喷雾液粒直径为 $\text{VMD}850 \mu\text{m}$ 。VMD为体积中位直径,表示喷雾液体中50%是小于该数值的液滴,如图9-16所示。

在脱硫初始阶段,许多喷雾喷嘴采用离心型压力喷嘴。这是空心锥型喷嘴。它的 $\text{VMD}300 \mu\text{m}$ 相对实心螺旋喷嘴小许多。要捕集这种雾粒,就要有较高效率的除雾器。现把除雾器种类划分如下:

### 1. 折流板式除雾器

折流板除雾器如图9-17所示。

其性能指标:

分离效率 $>40 \mu\text{m}$ : 99.9%;

分离效率 $>20 \mu\text{m}$ : 97%;

阻力降(两级):  $120 \sim 200 \text{Pa}$ ;

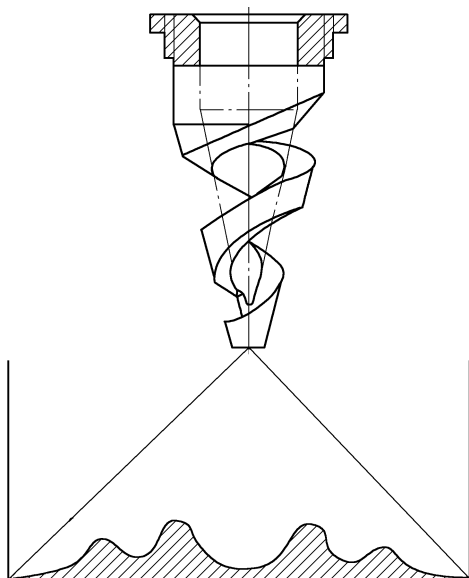


图9-16 螺旋喷嘴液滴分布

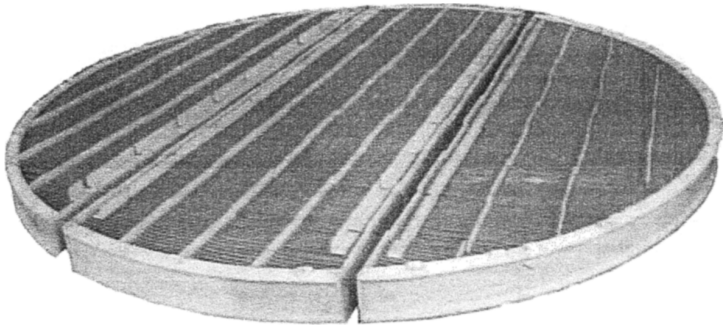


图 9 - 17 折流板除雾器

操作弹性范围（临界破膜速度）： $3.2 \sim 6.0 \text{ m/s}$ ；

烟气出口端含水量： $75 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ （干态）。

折流板除雾器是利用雾粒在运动气流中具有惯性，通过突然改变含雾气流的流动方向，雾粒在惯性作用下偏离气流的流向，撞击在折流板上而被分离（除去）。含雾气流是在折流板作用下而改变流动方向的，是利用雾粒惯性分离雾粒，类似于惯性除尘器。

折转角度大、气流速度高、折流板间距小，则除雾效率高，但阻力损失大。此外速度太大把已捕集雾粒二次夹带入气流中。这些因素相匹配协调才能获得一个适用高效的折流板除雾器。

（1）折流板除雾性能 由图 9 - 18 可知：折流板间距为  $30 \text{ mm}$ ，当烟气流速  $v_y = 3 \text{ m/s}$  时，能捕集  $d_p = 32 \mu\text{m}$  的液滴；当  $v_y = 4 \text{ m/s}$  时，能捕集  $d_p = 27.5 \mu\text{m}$  的液滴。 $3 \text{ m/s}$  下的压力损失  $\Delta p_3 = 20 \text{ Pa}$ ， $4 \text{ m/s}$  下的压力损失  $\Delta p_4 = 36 \text{ Pa}$ ，一般这个间距用于前置除雾器，而后置除雾器用间距为  $25 \text{ mm}$  的折流板，当  $v_y = 3 \text{ m/s}$  时，能捕集  $d_p = 25.5 \mu\text{m}$  的液滴；当  $v_y = 4 \text{ m/s}$  时，能捕集  $d_p = 22.5 \mu\text{m}$  的液滴。 $\Delta p_3 = 23 \text{ Pa}$ ， $\Delta p_4 = 40 \text{ Pa}$ 。

折流板压力损失如图 9 - 19 所示。

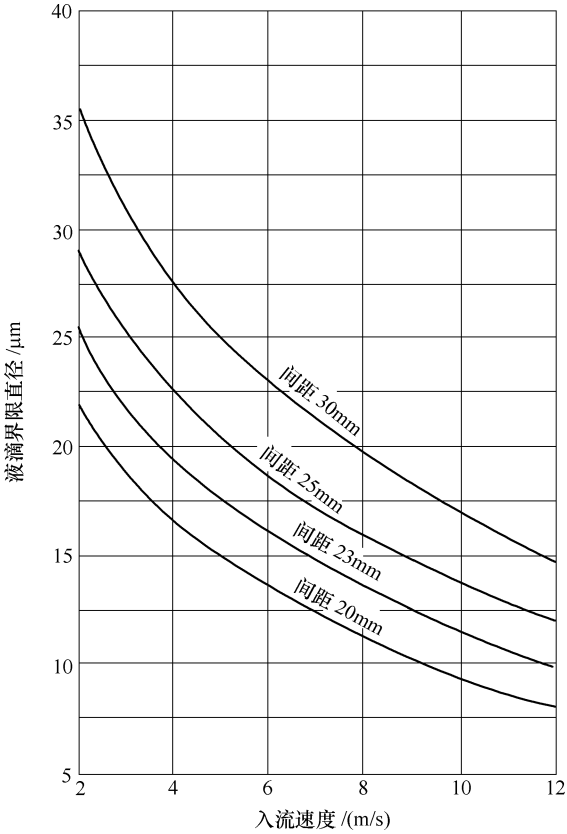


图 9 - 18 折流板除雾性能

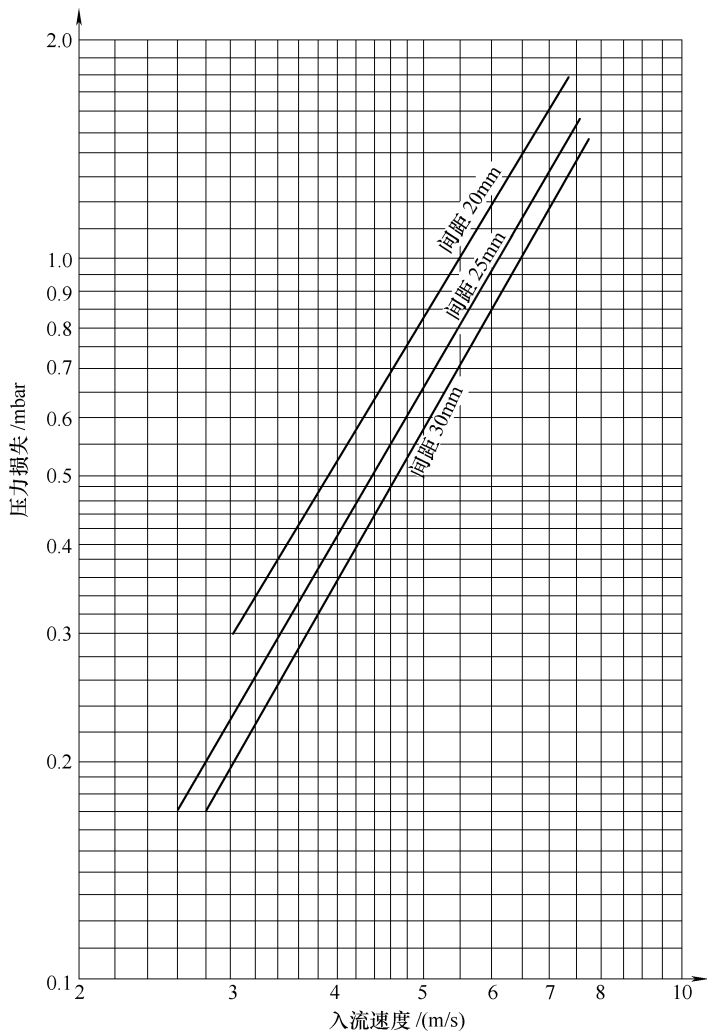


图 9-19 折流除雾器阻力

(2) 折流板除雾器安装方式

1) 水平安装如图 9-20 所示。烟气垂直流动。

优点：安装方便占空间少；上下可布置反冲洗喷头冲洗，浆液和水一起流入循环反应槽；阻力损失小， $v=3.4\text{m/s}$  时， $\Delta p=180\text{Pa}$ 。

缺点：由于烟气垂直向上流过，容易二次夹带烟气，向上流速一般  $3\sim5\text{m/s}$ 。

2) 垂直安装如图 9-21 所示。烟气水平方向流动。

优点：烟气流动在水平方向，捕集雾粒液体垂直向下流动，不易产生二次夹带，烟气流速可达  $6\sim7\text{m/s}$ 。除雾元件可以布置在水平烟道内，节省脱硫塔空间及高度。

缺点：垂直安装占用较多空间。

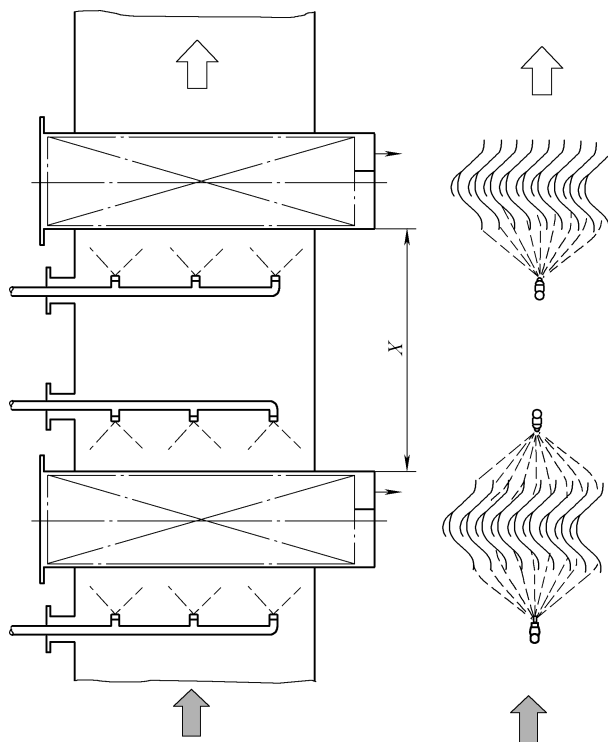


图 9-20 水平安装

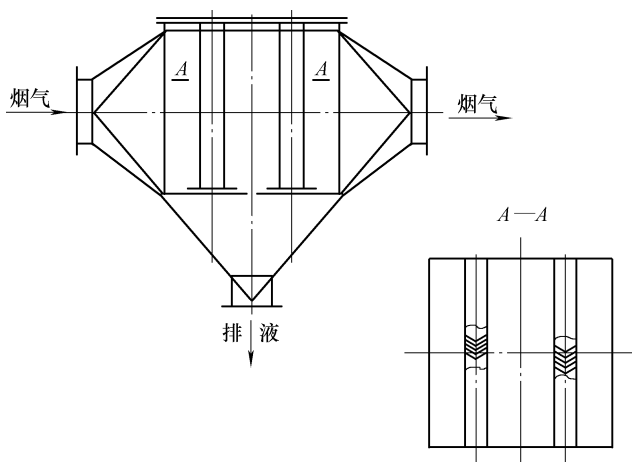


图 9-21 垂直安装

3) V 字形安装, 烟气成  $45^\circ$  方向流入除雾器, 如图 9-22 所示。这种布置介于水平与垂直之间。



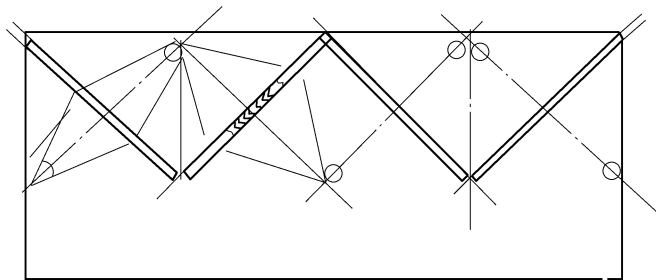


图9-22 V字形安装

优点：改进了液体的排放路径，减少了二次夹带，同时提高了入口流速。

缺点：冲洗系统比水平布置复杂，安装的除雾元件也比水平安装的复杂。

(3) 折流板除雾器的冲洗 由于脱硫吸收循环液中含有吸收剂颗粒、烟尘、脱硫产物等颗粒，所以折流板捕集雾粒时就会粘上这些颗粒而逐渐结垢堵塞。

为了保持除雾通道清洁畅通、不增阻力、不堵塞、能持续运行，必须定时有效地冲洗除雾器。有效是指反冲洗水流能冲下除雾折流板上的沉积物。定时是指要控制好反冲洗节奏。沉淀物多了，不但增加除雾器阻力，而且增加冲洗干净的难度。这个冲洗周期与除雾器结构、雾粒黏度、冲洗水压力、喷嘴性能等多种因素有关，一般通过模拟试验和较多的运行经验而获得。

除雾器冲洗水还是脱硫塔重要的补充水，要适当控制冲洗水量，以免引起过多水耗和废水处理量。主要注意以下几点：

1) 选用冲洗专用喷嘴，一般采用实心轴向喷嘴。注意喷嘴布置覆盖率，约为200%。折流板进口（正面）和出口（反面）都要冲洗。

2) 冲洗水压一般要在200~400kPa，通常结合喷嘴性能来确定。水压高，喷射流速度高，动能大，冲刷效果好。但喷速高又会导致喷雾粒小，使被烟气带走的水雾量增加。

3) 冲洗水量、时间和周期

冲洗水量用 $L/(s \cdot m^2)$ 表示，即每 $m^2$ 折流板除雾器每秒钟的冲洗水量。除雾器冲洗水量 $W_{HM}$ 是脱硫塔水平衡的进水量之一，大量冲洗水进循环槽会给脱硫塔造成正水平衡，给循环槽浆液浓度控制带来困难。这也会使烟气水雾夹带增大。

对于火电厂石灰石法脱硫除雾器，其冲洗经验为：垂直流第一级除雾器的迎风面冲洗水量为 $1L/(s \cdot m^2)$ ，冲洗周期为30min冲洗一次，每次持续45~60s。第一级背面和第二级迎风面的冲洗水量为 $0.34L/(s \cdot m^2)$ ，第一级除雾器背面，30~60min冲洗一次，每次持续45~60s。第二级迎风面每60min冲洗一次，每次持续45~60s，第二级背面只在启动、停机时进行冲洗。

对于水平流除雾器推荐冲洗水量，第一级迎风面为 $1L/(s \cdot m^2)$ ，第一级背面和第二级迎风面为 $0.7L/(s \cdot m^2)$ 。持续时间与垂直流除雾器相同。

以上冲洗数据可以作为工业锅炉石灰法脱硫冲洗除雾器参考。但是对于氧化镁法脱硫工艺，由于液气比较低和循环液接近溶液、固体颗粒较少，所以冲洗水量和时间都可以减少。

4) 冲洗喷嘴组的布置应距离除雾器表面  $0.6 \sim 1\text{m}$ ，如图 9-23 所示。

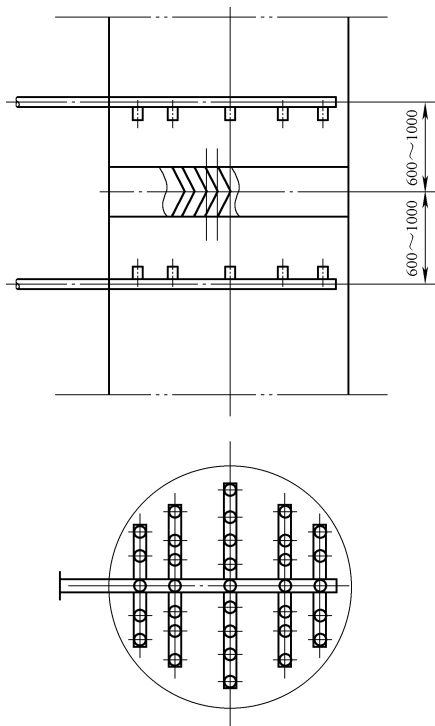


图 9-23 冲洗喷嘴布置

(4) 除雾器材料 除雾器选材要考虑耐腐蚀、耐磨损、可能的烟气温度波动或短时间的超温。一般采用耐温玻璃钢、聚丙烯、聚矾及 S316L、S317LM 不锈钢。饱和烟气温度一般约为  $50^{\circ}\text{C}$ 。考虑了各种可能因素，一般应采用能耐  $80^{\circ}\text{C}$ 、除雾器腐蚀环境（强酸性、 $\text{Cl}^-$  离子浓度  $>10\text{g/L}$ ）的材料。

## 2. 旋流叶轮除雾器

(1) 旋流叶轮除雾器构造 如图 9-24 所示，由旋流板（旋流叶轮）、挡环、除雾器外壳排液管组成。

(2) 旋流叶轮除雾器工作原理 烟气进入旋流叶轮，在旋流板的导向下会偏转一个角度  $\beta$ ，一般为  $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 。这个  $v_{\beta}$  可以分解轴向速度  $v_z$  和切向速度  $v_u$ 。于是烟一边沿轴向前进，一边按切向速度  $v_u$  旋转。烟气中的粗雾粒直接碰在旋流板上被截留，再慢慢甩到旋流除雾器壁。烟气中夹带的细雾在不断的旋转和前进中，被离心力推到除雾器内壁而被捕集。

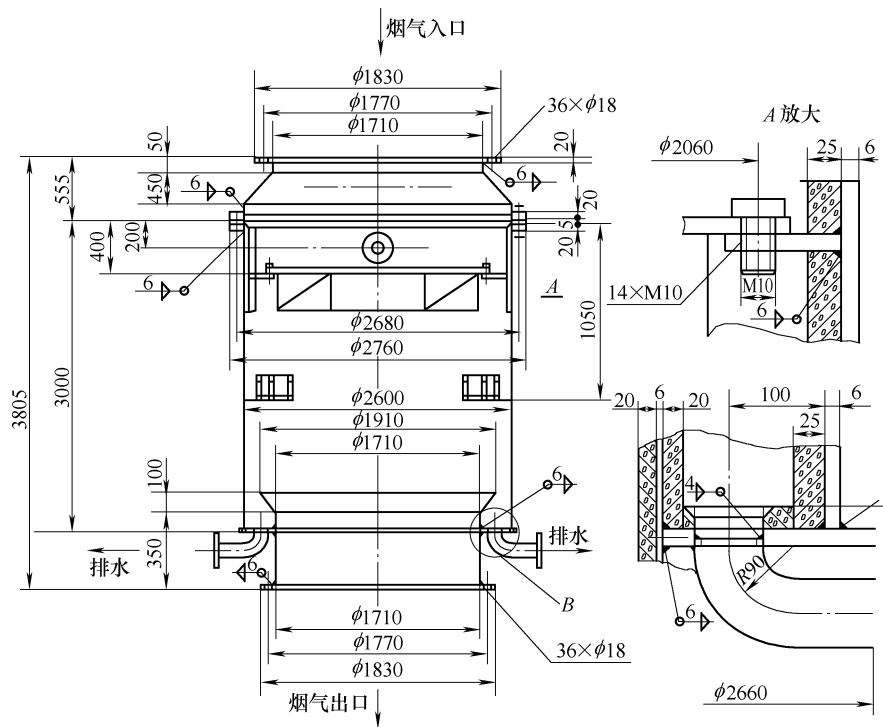


图 9-24 旋流叶轮除雾器

(3) 旋流叶轮除雾器的性能 除雾效率高，它与折流板和丝网除雾器在流速为 3m/s 的比较见表 9-3。

表 9-3 除雾效率比较

除雾器型式	折流板	丝网	旋流叶轮
除雾效率 (%)	85	98	99
压降/Pa	150	250	200

1) 优点：结构比较简单，包括旋流叶轮、挡环、外壳，都可以自制。允许比较高的空塔流速， $v = 5\text{m/s}$ 。因而仍然保持高的除雾效率。当叶片仰角 $\beta = 25^\circ \sim 30^\circ$ 时，旋流叶轮除雾器的阻力与折流板除雾器类似，比丝网除雾器的低。

可以放在脱硫塔顶部，也可做成独立的除雾器。

2) 缺点：当叶轮直径大时，离心力有所下降，且安装有难度。锅炉低负荷运行时，由于烟气量降低，而使旋流速度减小，除雾效率降低。旋流叶轮除雾器较适用于工业锅炉脱硫塔除雾。

旋流叶轮上方要求具有 2m 以上的除雾段高度。除雾器高度  $H$  与除雾效果关系见表 9-4。

表 9-4

除雾器高度/m	0.5	1.0	1.5	4	6
捕集粒径 $d/\mu\text{m}$	350	242	198	121	100

(4) 旋流叶轮除雾器实例 [见图 9-25, (见全文后插页)]。

3. 复挡除雾器

(1) 复挡除雾器构造 如图 9-26 所示, 它类似于旋风除尘器, 利用烟气切线进入产生的旋转运动, 使烟气中的雾粒产生离心力, 逐渐甩向器壁而被捕集。雾粒运动轨迹如图 9-27 所示。

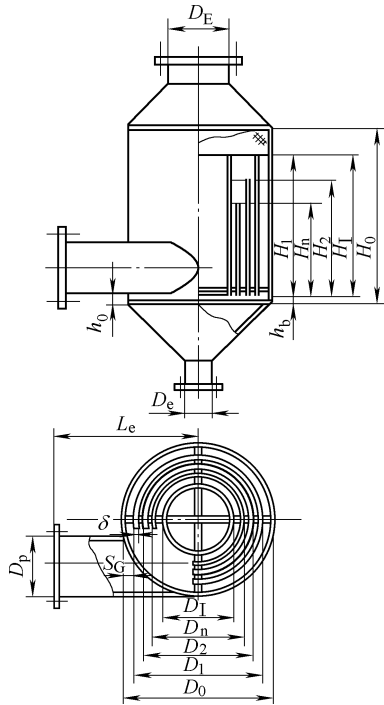


图 9-26 复挡除雾器

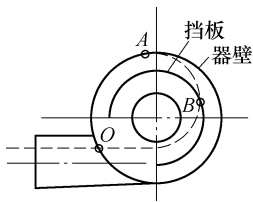


图 9-27 雾粒运动轨迹

(2) 复挡除雾器特性

1) 优点:

除雾效率高, 利用多层环形挡板使烟气旋转分离雾粒, 其除雾效率接近旋风分离器。对大于  $10\mu\text{m}$  的颗粒有较高的去除率。

阻力适中, 当进口速度  $v$  为  $25\text{m/s}$  时,  $\Delta p$  约为  $250\text{Pa}$ 。

可以单独作为一个除雾设备使用, 不影响脱硫塔的运行。

2) 缺点:

一般要设计 4 个以上环形挡板, 加工制造安装相对复杂。

设备材料要求耐蚀、耐磨,因为复挡内烟气流速较高。复挡筒体可以用钢内衬铸石水玻璃涂层,但环形挡板只能用 S317LM 或 S316L 合金钢板制造。

锅炉低负荷运行时,由于复挡除雾器的进口流速下降较多而使除雾效率降低。

(3) 复挡除雾器实例(见图 9-28)

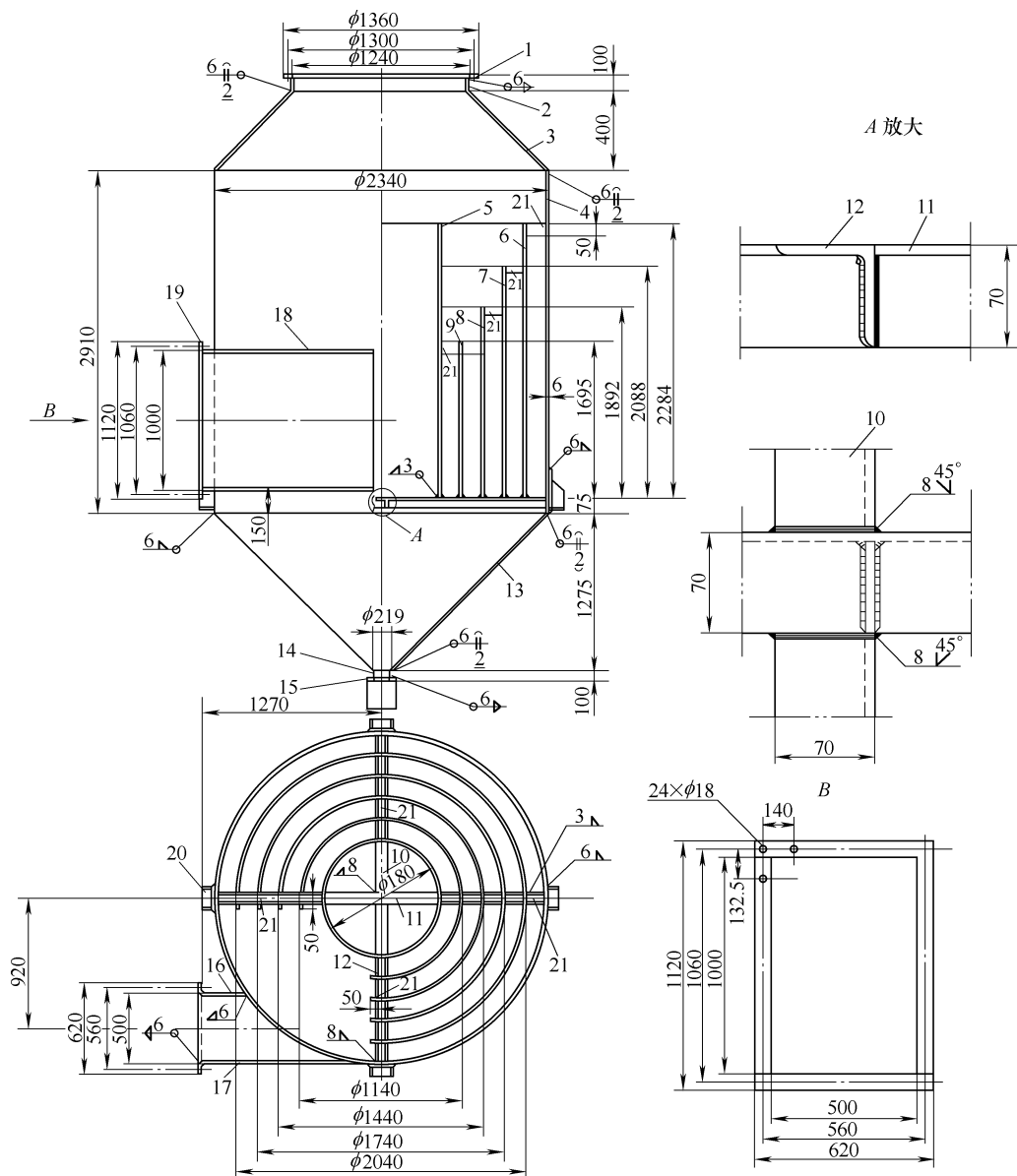


图 9-28 复挡除雾器施工简图

- 1—出口法兰 2—出口直段 3—上锥体 4—脱水器体 5—芯 6~9—挡水环  
10~12—支架 13—下锥体 14—排水管 15—平焊钢法兰 16—进口内板  
17—进口外板 18—进口上、下板 19—进口法兰 20—支耳 21—连接筋板

## 9.6 水力旋流器

水力旋流器是利用流体旋转运动产生离心力而分离或浓缩浆液的设备。在脱硫系统中，常用于浆液颗粒尺寸控制和脱硫产物浆液浓缩或一级脱水。

图 9-29 是旋流器简图。

泥浆泵把浆液送入旋流器的切向进口，在旋流器体腔内产生高速旋转运动。密度大的颗粒在离心力的作用下，沿径向运动的同时向下运动形成外旋涡流场。浓浆液由底部口排出，密度小的颗粒在轴线中心区形成一个向上的内旋涡，稀浆液由上面溢流口排出，形成溢流液。浆液通过旋流器后，就分离成浓浆和稀浆或上清液。浓浆可经过过滤机、离心机等进一步脱水成为滤饼、滤渣。

### 1. 旋流器性能

旋流器性能参数包括流量、最小分离粒径、压力损失、给料浓度、材料和使用寿命等。

当处理浆液流量较大时，可以使用旋流器组，即把多个旋流器并联组合。因为旋流器直径小，所以相对分离效率高，旋流器组则可以基本不影响分离效率而加大旋流器处理流量，如图 9-30 所示。

在脱硫系统中，使用旋流器浓缩脱硫产物浆液，把脱硫产物从浆液中初步分离出来，浓缩浆液、流量缩小，为后续进一步脱水做好准备。旋流器上部溢流可回流至脱硫系统或去废水处理池。

在石灰石法脱硫中，石膏一级脱水浆液浓度一般约为 15%，旋流器底流浆液浓度约为 50%。而溢流液浓度约为 4%。一般旋流器一级处理后的浆液浓缩到 50% 左右（基本与重力沉淀浓缩池相当）送至二级固液分离设备进一步脱水，如真空带式过滤机或离心机。

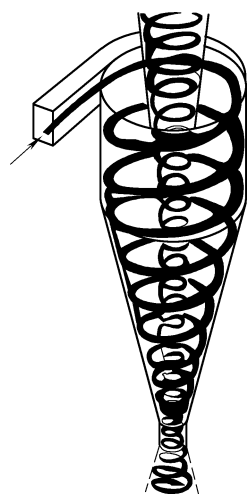


图 9-29 旋流器

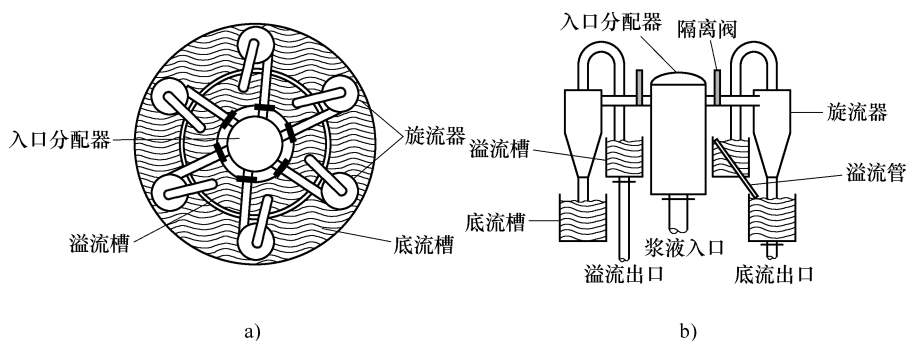


图 9-30 旋流器组

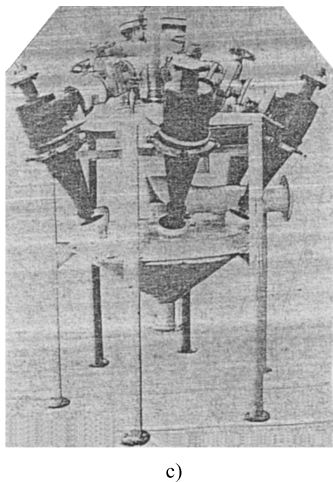


图 9-30 旋流器组（续）

一般在一级旋流器下游安装废水旋流器，采用高效率的二级旋流器从浆液中除去更细的颗粒。二级旋流器底流中含有细小脱硫剂颗粒，送回吸收塔循环槽。含有很细的烟尘、飞灰颗粒的二级旋流器溢流液送往废水处理站。这样可以减少废水处理负荷和废水处理污泥量，如图 9-31。

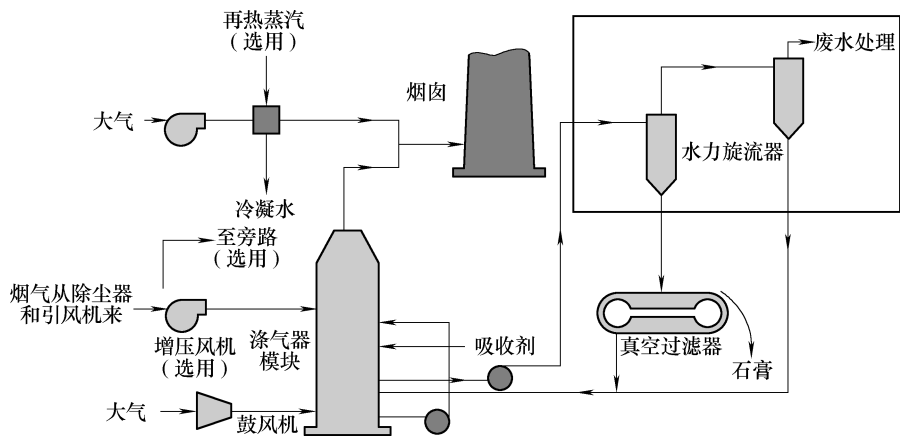


图 9-31 二级旋流器流程

2. 旋流器设计选用注意事项

- 1) 按旋流器性能参数或性能曲线选用所需分离出的最小粒径  $D_{min}$ 。即大于或等于  $D_{min}$  的颗粒全部分离出来。
- 2) 按需要处理流量选择单个或组合旋流器，一般单个够用则选单个，单个不够用时才选组合，一般要有 1.2 倍流量富余量。
- 3) 选好旋流器给料泵，流量、压力。一般压力要乘以 1.2 系数，流量乘以 1.1 系

数，留有一定富余量。

4) 旋流器有一个允许最大给料粒度。可以从旋流器性能表（表 13-9）中查到。这是为了防止由于大颗粒的进入，而引起堵塞流道，进而引发故障。

5) 旋流器入口管道与旋流器进口管的直径相同，旋流器溢流管与旋流器溢流口的直径相同。

6) 注意旋流器的适用介质。如果介质不适合，则会与旋流器样本性能参数值产生误差，或者因旋流器材料不合用而影响使用效果。

7) 注意旋流器的安装要求、使用注意事项和使用寿命。如材料允许使用温度、Cl<sup>-</sup>离子含量和耐磨性。不同材料有不同的要求。

3. 旋流器材料

旋流器内流速较高，有较大的磨蚀性。使用介质有较强的腐蚀性。一般采用钢衬防剥蚀材料，也可采用玻璃钢做壳体衬耐磨耐蚀材料，如天然橡胶（低温使用）、聚氨酯、铬合金和陶瓷。橡胶用在磨蚀较弱和中等的区域，在进口段及下锥体磨蚀厉害的地方，通常采用陶瓷材料，如碳化硅和氧化铝（刚玉）。

我国威海就有生产聚氨酯弹性体水力旋流器的企业。有关磨损和成本对比见表 9-5、表 9-6。

表 9-5 各种合成材料磨耗值

材料名称	磨耗量/mg	材料名称	磨耗量/mg	材料名称	磨耗量/mg
聚氨酯弹性体	0.5 ~ 3.5	丁腈橡胶	44	增塑聚氯乙烯	187
尼龙 610	16	尼龙 66	49	丁基橡胶	205
聚酯薄膜	18	低密度聚乙烯	70	ABS	275
尼龙 11	24	高冲击聚氯乙烯	122	氯丁橡胶	280
超高分子量聚乙烯	28	天然橡胶	146	聚苯乙烯	321
高密度聚乙烯	29	耐冲击聚氯乙烯	160		
聚四氟乙烯	42	丁苯橡胶	177		

注：磨耗条件为 CS17 轮，1000g/轮，5000r/min，23℃。

表 9-6 旋流器寿命成本对比

项 目 材 质	平均磨损率 /(mm/100h)	使用寿命 /h	单 价 /元	单只单位时间成本 /(元/h)
丁腈橡胶	2.797	150	384	2.56
高铬铸钢	0.672	250	180	0.72
浇注型聚氨酯	0.276	1500	450	0.3



9.7 真空带式过滤机

真空带式过滤机是一种浆液过滤型脱水设备。真空过滤机一般用来过滤旋流器或浓缩器浓缩后的浆液。通常作为 FGD 副产物的最后一级脱水设备。

真空带式过滤机工作原理是浆液供给过滤机，由真空泵透过滤布抽出副产物（浆液中的液体），而固体颗粒留在滤布上。真空带式过滤机工艺流程如图 9-32 所示。

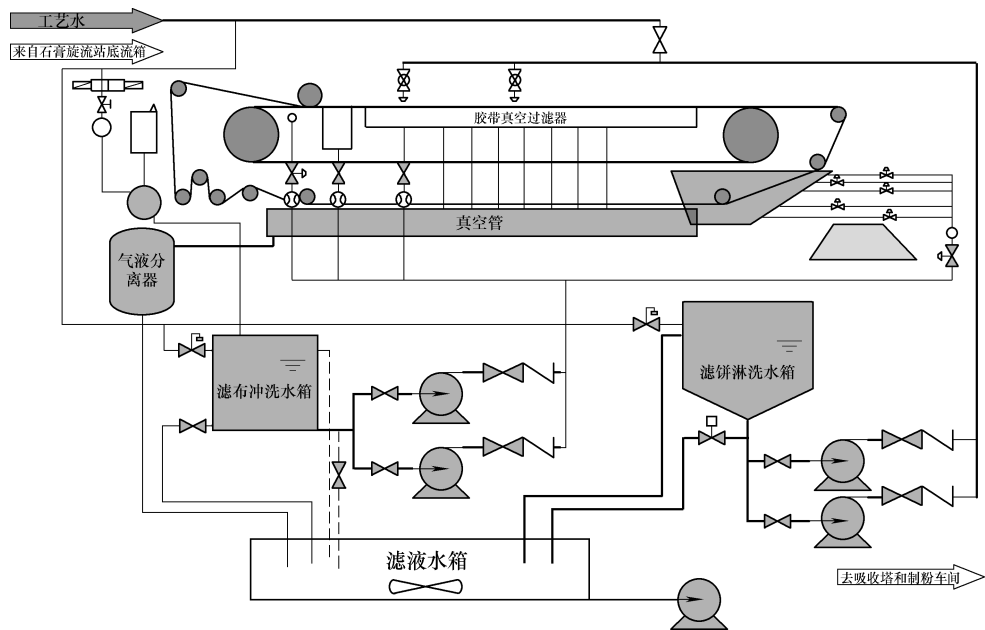


图 9-32 真空带式过滤机工艺流程

真空带式过滤机分为水平带式过滤机、旋转滚筒真空过滤机、滚动带式真空过滤机。

1. 水平带式过滤机

图 9-32 所示即为水平带式过滤机。水平带式过滤机是用多孔带支撑滤布，多孔带沿着上部是平底的真空室移动。浆液由给料箱均匀地分配在水平滤布上。在另一端，滤布和支撑带分开，滤布绕过小直径滚筒时，从滤布上刮下石膏饼。支撑带绕大滚筒旋转，在绕过真空室返回到给料端后，多孔带和滤布重新叠合在一起。

水平带式过滤机优点：

- 1) 采用环形橡胶带，抗拉强度大，使用寿命长。
- 2) 真空盒和胶带间设有环形摩擦带，并以水进行密封和润滑，可维持较高的真空度，并有利于减小橡胶带的磨损。
- 3) 胶带采用气垫或水膜支承，减少了运行阻力，有利于延长胶带的使用寿命。

- 4) 整体结构采用了模块化设计,可灵活组装,且便于运输和安装。
- 5) 设有真空平衡自动排液罐装置或气水分离器,可以实现零位差自动排液或高位差排液,以满足各种工况条件的要求。
- 6) 设有气囊式自动纠偏装置,可确保滤布稳定运行。
- 7) 控制系统应用了分散控制系统(DCS)技术,可实现现场和远程自动控制,并设有物位检测仪,可有效控制滤饼的厚度。

## 2. 旋转滚筒真空过滤机

这种过滤机是将浆液送到设备底部的浆液箱,浆液箱中装有一个摆动叶片形搅拌器,保持固体颗粒处于悬浮状态。滤布贴在旋转空心滚筒上,滚筒划分成几个扇形区,每个分区表面有一个浅槽,从滚筒内部使一个或多个分区形成真空,从而将浆液箱中的浆液抽到滚筒浸没部分的表面上,浆液中的固体颗粒被捕获到滤布表面形成滤饼,浆液中的液体“滤液”透过滤饼和滤液被抽出,排往过滤机和真空泵之间的滤液箱,如图9-33所示。

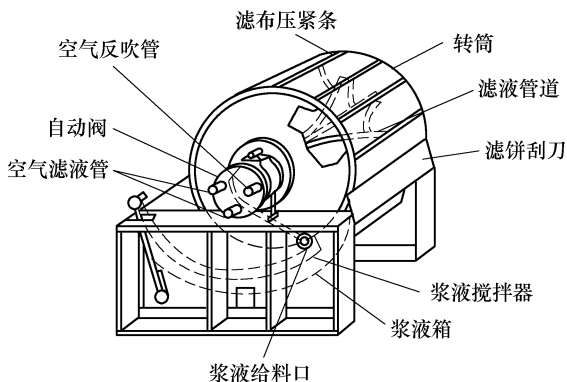


图 9-33 滚动真空过滤机

## 3. 滚动带式真空过滤机

图9-34所示为滚筒带式过滤机。

本过滤机的滤布由多孔带托着,多孔带贴在滚筒表面上移动,在旋转到末端时,多孔带和滤布与转筒分开,当多孔带和滤布通过小直径转筒拐弯时,把滤饼卸下。在滤饼卸料端和进行一个循环之前可以对滤布进行冲洗。如果浆液中含有大量易堵塞滤布的细颗粒,则容易粘在滤布上堵塞滤布孔,增加过滤阻力,通过冲洗滤布将滤布上的细颗粒冲掉,恢复滤布过滤能力。

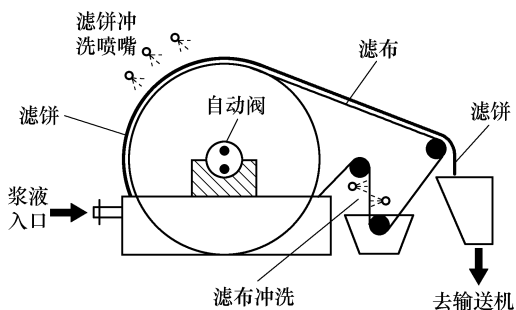


图 9-34 滚筒带式过滤机

# 9.8 板框压滤机

## 1. 工作原理

如图9-35所示,板框压滤机是由滤框、滤板和滤布组成的过滤主件和对过滤主件进行压紧过滤的机架组成的。它是进行固液分离的设备。

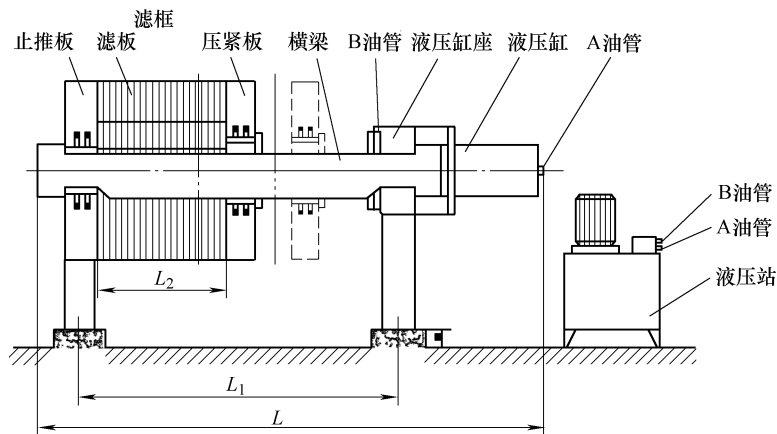


图 9-35 板框压滤机

板框压滤机由交替排列的滤板和滤框构成滤室。由供料泵将悬浮液压入滤室，在滤布上形成滤饼，直至充满滤室。滤液穿过滤布并沿滤板沟槽流至板框边角通道，集中排出。过滤完毕，可通入清洁洗涤水洗涤滤渣。洗涤后，还可以通入压缩空气除去剩余的洗涤液。随后打开压滤机卸下滤饼、清洗滤布、重新压紧板框，开始下一工作循环，如图 9-36 所示。

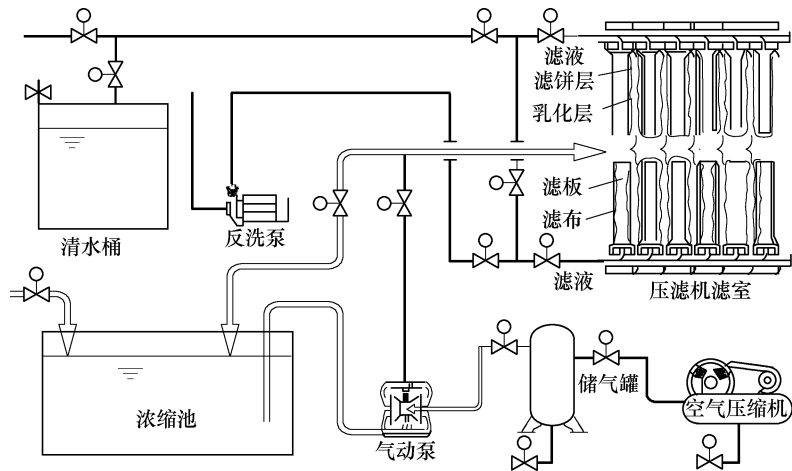


图 9-36 板框压滤机流程图

板框压滤机对于滤饼的压缩适应性好，悬浮液浓度一般为 10% 以下。操作压力一般为 0.3 ~ 0.6 MPa。过滤面积有 1 ~ 1200 m<sup>2</sup> 可供选用，较适合工业及供热锅炉脱硫固废分离。

2. 板框压滤机选择

1) 板框压滤机有自动、手动、液压式等。滤液排放有明流、暗流，以及可冲洗滤饼和不冲洗滤饼等类型。可根据工艺设计选定。一般宜选用液压自动型，以减少人工操

作量。

## 2) 机型及过滤面积选择。

主要考虑过滤液、温度、腐蚀性、浓度、流量、黏度等因素。主要根据使用经验类推法或实验法确定。

在设计造型时，可与制造厂需求结合，选定计算过滤面积数据，其中操作周期为

$$\theta_c = \theta + \theta_w + \theta_R$$

式中  $\theta_c$ ——一个操作周期的时间 (s)；

$\theta$ ——过滤时间 (s)；

$\theta_w$ ——洗涤时间 (s)；

$\theta_R$ ——卸渣、重装等辅助时间 (s)。

而过滤机生产能  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$  或  $\text{m}^3/\text{h}$ ) 为

$$Q = \frac{V}{\theta_c} = \frac{V}{\theta + \theta_w + \theta_R}$$

式中  $V$ ——过滤液体积 ( $\text{m}^3$ )

在计算时， $Q$  是要求分离的悬浮液量，是已知的。 $\theta_c$  可根据介质试验获得或使用已得到的数据。求得  $V$  后，即可间接计算出压滤机面积。

$$V = \frac{F_k}{C}$$

式中  $F_k$ ——板框内总容积 ( $\text{m}^3$ )；

$C$ ——滤饼体积与滤液体积之比。

得到  $F_k$  后，可在板框压滤机样本中找到合用机型的  $F_k$  及其相应的过滤面积。

## 3) 板和框的材料有钢、不锈钢、增强聚丙烯橡胶等可供选择。

# 9.9 离心分离机

离心分离机也是常用的固液分离机械。一般也用于脱硫副产品的二级脱水，可以分离出残留含水量为 5% ~ 10% 的副产物。简称离心机。

离心机如图 9-37 所示。

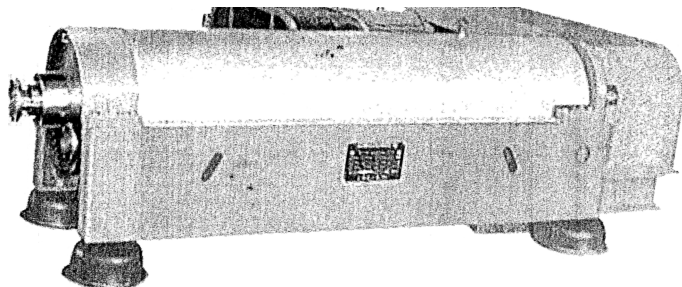


图 9-37 卧式离心机

1. 离心机的工作原理

利用转鼓高速旋转带动转鼓内悬浮液高速旋转产生的离心力，来达到悬浮液及乳浊液中固液、液液分离的方法。在脱硫工艺中，采用的是沉降分离式离心机。离心机是连续过滤设备，即一边进悬浮液，一边出滤渣和滤液。

离心机转速一般为 2500 ~ 5000r/min，能适应小于或等于 30% 的浓度和 5 ~ 100μm 的颗粒尺寸的分离。

悬浮液由中部进料管进入全速运转的转鼓内，由于离心力场的作用，使悬浮液中密度较大的颗粒（重相）沉积在转鼓的内壁上，而密度较小的沉清液（轻相）则处于沉积层的内侧。沉渣由螺旋输送向转鼓的锥段，通过沉渣排出口排出。沉清液则通过螺旋的叶片所形成的螺旋形通道，流向转鼓的柱段，由溢流口溢出。从而实现密度相差的液 - 固两相的分离。

2. 离心机材料选择

由于旋转速度高的机器一般用钢材或不锈钢制造，因此，用于脱硫系统的离心机，一般用 316L、317LM 或 6M。不锈钢制造。

3. 过滤机和离心机的比较

过滤机与离心机的比较见表 9-7。

表 9-7 过滤机与离心机的比较

过滤设备	处理量 t/h	残余含水量(%)	冲洗水量	滤液	石膏晶粒应力	分离粒径 μm	耗电	价格
真空带式过滤机	[1.0t/(m <sup>2</sup> ·h)] 最大 20	8 ~ 10	低	清	很低	—	低	低
真空筒式过滤机	[1.0t/(m <sup>2</sup> ·h)] 最大 20	10 ~ 12	中	清	很低	—	很低	低
板框压滤机	—	≤10	低	清	高	—	低	低
卧式离心机	20	7 ~ 10	高	混浊	很高	≥5	中	高

9.10 烟气加热器

锅炉烟气湿法脱硫时，烟气从脱硫塔进口时的 130 ~ 160℃，降到烟气饱和温度（约 50℃ 左右）。这时烟气中水蒸气已到露点，随时有酸性冷凝水泄出，具有极强的腐蚀性。同时 50℃ 左右烟气的抬升扩散状态较差，致使烟气污染物扩散落地浓度较高，这些都是不利于环保的。

为此，一般都要求把脱硫后的烟气加热升温到 80 ~ 90℃，然后从烟囱排放，上述两大问题得以大大改善，同时可以消除白龙。

烟气加热器是利用锅炉排出的高温烟气，一般为 130 ~ 160℃，通过换热器加热脱硫塔

排出湿冷烟气，一般  $50^{\circ}\text{C}$  左右。加热后湿烟气升温至  $80^{\circ}\text{C}$ ，原热烟气降温至  $100 \sim 110^{\circ}\text{C}$ 。

### 1. 回转式气 - 气加热器

1) 原理：蓄热介质被高温烟气蓄热升温后，回转到低温烟气部分，加热低温烟气。然后再回转到高温烟气部分。由于回转必定留有缝隙，所以会有漏烟，如图 9-38 所示。

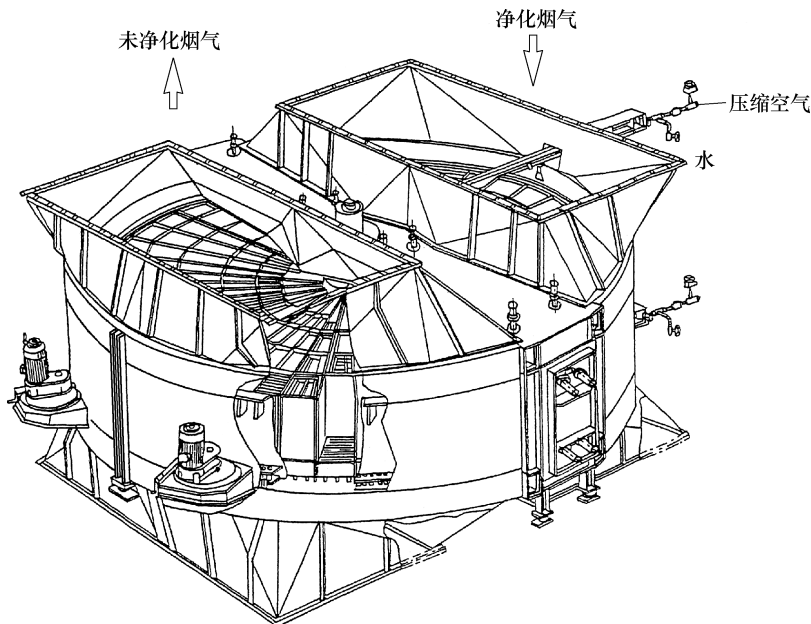


图 9-38 回转式气 - 气加热器

烟气再加热器通常有蓄热式和非蓄热式两种形式。蓄热式工艺利用未脱硫的热烟气进行加热。

2) 回转式气 - 气加热器安装示意如图 9-39 所示。

3) 回转式气 - 气加热器特性：漏风量较大，约为  $0.5\%$ ；占地面积大，投资大；维护修理工作量较大；由于漏风，会降低脱硫效率和除尘效率；加热器结构紧凑；回转传热面为外涂搪瓷。

### 2. 多管气 - 气加热器

1) 多管气 - 气加热器原理：强制管内热介质循环在高温侧及低温侧之间。在高温侧介质吸热，烟气从  $130^{\circ}\text{C}$  左右降温至  $90 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 。热介质升温后再循环到低温侧，低

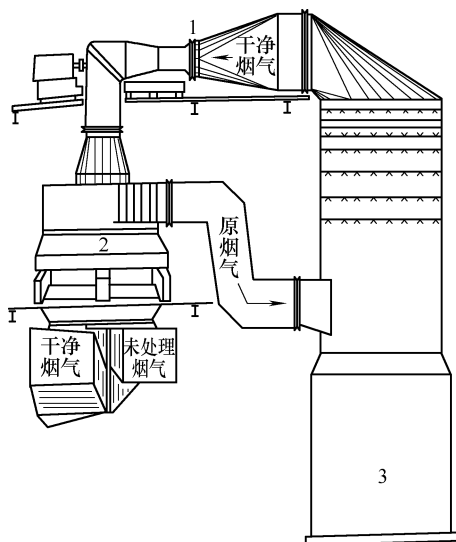


图 9-39 回转式气 - 气加热安装示意图

1—风机 2—烟气加热器 3—喷雾塔

温烟气被加热到 80℃。介质温度下降后，再循环到高温侧吸热升温。如此往复循环把冷烟气升温到 80℃。如图 9-40 所示。

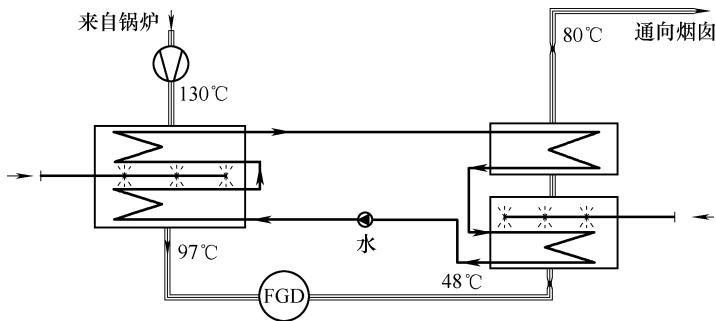


图 9-40 多管气 - 气加热器

2) 多管气 - 气加热器特性：没有烟气泄漏；没有干、湿和温度的反复变化，因而不易粘灰尘、堵塞；由控制流向低温侧加热器的辅助加热蒸汽量来控制被加热烟气的温度。

热介质循环管和在低温侧的加热器要用耐较强腐蚀的材料制造。

3. 蒸汽 - 烟气加热器

1) 蒸汽 - 烟气加热器原理：利用蒸汽来加热烟气，如图 9-41 所示。

2) 蒸汽 - 烟气加热器特性：没有烟气泄漏；没有冷、热和干、湿变化，不易堵塞；在低温侧接触湿烟气，要用耐强腐蚀材料制造；由通入蒸汽量来控制加热烟气的温度，消耗额外能源。

4. 烟气加热器的选择

1) 蒸汽 - 烟气加热器要消耗蒸汽，经济性差，一般都不采用。如果对于工业及供热锅炉，可以用蒸汽加热空气再与烟气混合升温，见 10.5 节。

2) 回转气 - 气加热器，除漏风量大外，堵塞问题多、阻力变大、腐蚀严重、故障较多，在没有好的解决办法之前，应慎重采用。

3) 多管气 - 气加热器，如果冷烟气侧加热器选用耐蚀材料，则是一种可行的选择。

5. 烟气加热器材料

锅炉烟气经过湿法洗涤脱硫后，烟气降温，烟气中水分到达饱和状态，烟气中的

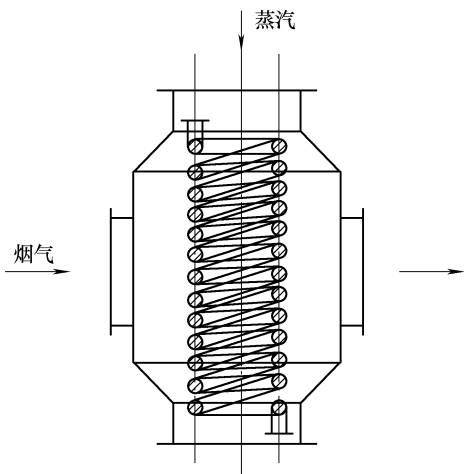


图 9-41 蒸汽 - 烟气加热器示意图



SO<sub>2</sub> 已达到露点而析出冷凝酸，烟气中的水蒸气已到达饱和状态，而析出酸性冷凝水。脱硫后的湿烟气具有强烈的腐蚀性。所以烟气加热器的材料应针对不同的腐蚀环境，选用相适应的耐腐蚀材料。

回转式气 - 气加热器通常用玻璃鳞片酚醛环氧乙烯基酯树脂涂料衬壳体。当然采用钢衬镍基合金薄板更为理想。对于玻璃鳞片酚醛环氧乙烯酯树脂在湿状态使用温度不宜超过 120℃。回转式气 - 气加热器蓄热板采用碳钢板涂搪瓷。

对于多管式气 - 气加热器的换热管束可采用 S316L 不锈钢。也有采用碳钢管涂聚四氟乙烯涂料的耐蚀性较好，使用温度达 260℃。国内也有用 ND 钢 (09CrCuSb) 做翅片管材，但使用寿命有待观察。

## 9.11 烟气挡板

烟气挡板是开启让烟气流入或关闭把烟气阻断的一个大阀门。由于烟道尺寸较大，一般习惯上称为挡板，如图 9-42 所示。

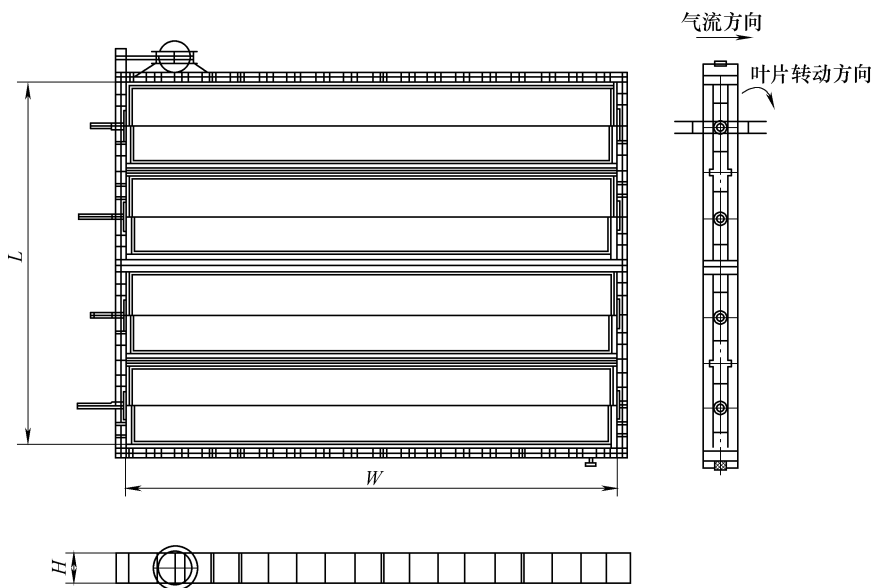


图 9-42 烟气挡板

烟气挡板的作用是隔离、控制烟气流量和排空烟气。安装隔离挡板目的是可以在不影响锅炉运行的情况下停运脱硫系统。挡板安装位置如图 8-1 所示。

### 1. 挡板类型

(1) 闸板式挡板 简称闸板门，具有一个板状的阻断挡板。当闸板从烟道内完全抽出时，烟道全开。当闸板完全下放至挡板框内时，烟道被关闭。这是一种几乎没有泄漏的挡板。



闸板沿挡板框槽插入到挡板框底。整个挡板框内充高压密封空气。密封空气大于烟气侧的压力，挡板框形成一个充高压空气的密封室，以防止烟气漏入。

闸板的驱动有链条、齿条及液压气动等方式。闸板式挡板如图9-43所示。

(2) 百叶窗挡板 百叶窗挡板由多个叶片组成。通过旋转叶片来开启或关闭烟道。叶片始终在烟道中。

单叶片百叶窗挡板门也称为蝶形挡板。这类挡板一般用于密封空气风道。

百叶窗挡板如图9-44所示。

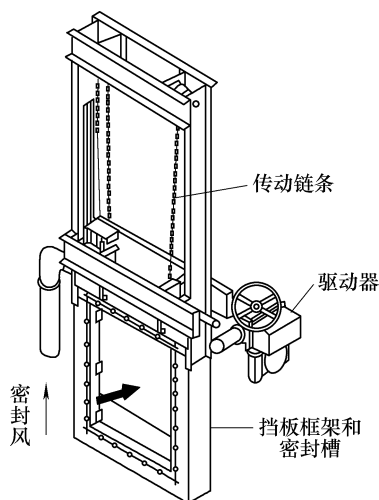


图9-43 闸板式挡板

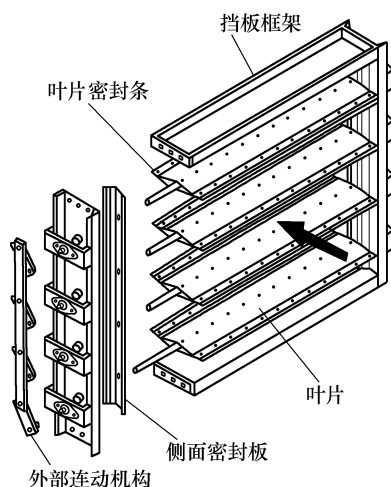


图9-44 百叶窗挡板

百叶窗挡板的叶片通过挡板框侧面的联动机构连接在一起，一般由一个电动机来驱动联动机构，带动所有叶片旋转。每个叶片边缘都设计有密封条，在挡板门关闭时，它在叶片之间起相互密封的作用。门框的密封布置在门框边缘上，侧面密封是防止烟气从叶片两端泄漏。

有时，由于密封性的要求，要尽可能减少漏烟量，可以在同一个位置安装一个反向叶片挡板和—个平行挡板。上游侧的平行叶片挡板起隔离作用，下游侧的反向叶片挡板则用来控制流量，如图9-45b所示。

在要求没有漏烟的条件时，可以采用两个平行叶片百叶窗挡板串联的办法，在两挡板门间鼓入密封空气。如图9-45a所示。

为了加强密封性并节省占用空间，设计了单轴双百叶窗挡板，如图9-46所示。

单轴双百叶窗挡板由两块间距150mm的平行钢板构成，并绕同一轴转动。两块挡板间形成空气密封室，由于密封室空间较小，所以可以节省密封空气量。

## 2. 挡板的特性

(1) 闸板式挡板 密封性好，基本没有泄漏，对于下游的检修人员，能保障其人身安全；结构相对简单，使用安装方便；开启、关闭时间较慢，运动速度一般为1.3~2m/min。

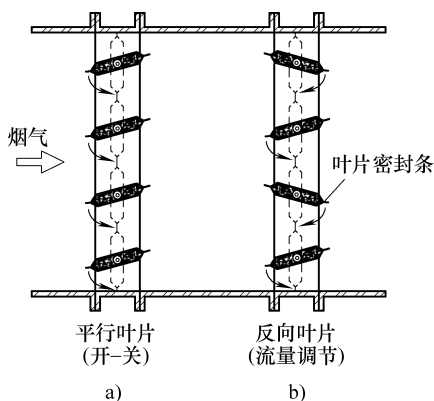


图 9-45 平行叶片和反向叶片串联密封

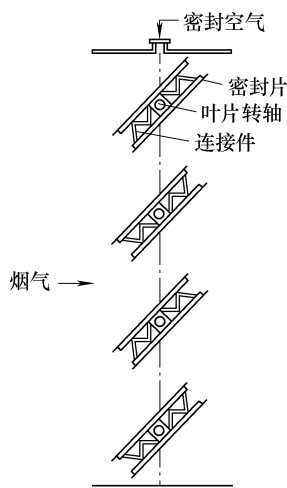


图 9-46 单轴双百叶窗挡板

(2) 百叶窗挡板 开启关闭速度快；通常旁路烟道百叶窗要求快开时间为 10 ~ 25s；单个百叶窗的挡板密封性不如闸板式挡板，如果安装两个串联百叶窗挡板，两挡板间充密封空气，则可以有较好密封性。也可采用单轴双百叶窗挡板，具有较好的密封性。

### 3. 挡板材料选择

挡板选用材料，要根据挡板所处腐蚀环境来确定。大致划分如下：

1) 在原烟气管道上使用的挡板，采用碳钢制造。因为原烟气的腐蚀环境采用碳钢完全可以承受。

2) 在湿烟气管道上使用的挡板，因为湿烟气具有较强的腐蚀性，以及考虑 FGD 系统中浆液的氯离子浓度。所以当  $\text{Cl}^-$  离子浓度  $< 10\text{g/L}$  时，挡板材料通常采用碳钢覆盖 317LM 或 904L 等钢板。当  $\text{Cl}^-$  离子浓度  $> 10\text{g/L}$  时，通常采用碳钢覆盖合金 625 或 C-276 合金钢板。

## 9.12 烟道

烟道是脱硫系统的重要组成部分。在第 10 章和第 11 章中将详细介绍。这里先系统归纳一下：

### 1. 脱硫装置烟道系统

脱硫烟道系统如图 9-47 所示。

脱硫烟道系统工作状态划分见表 9-8。GGH 安装在脱硫塔前，旁路烟道设计在增压风机入口前至 GGH 出口后的 H-I 段烟道之间。

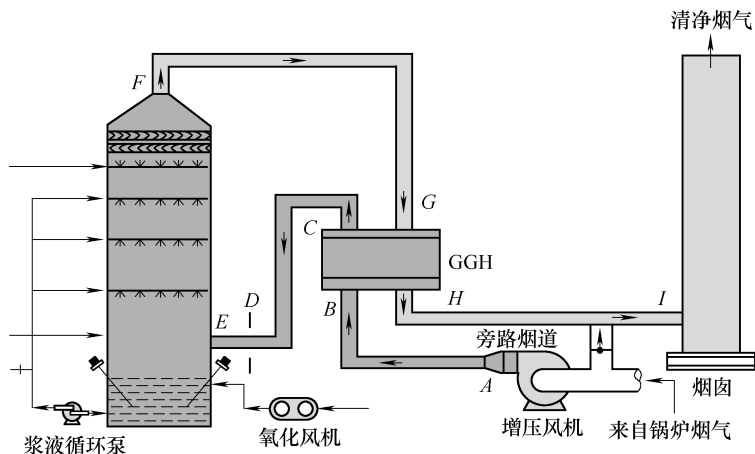


图 9-47 脱硫烟道系统

表 9-8 烟道工作状态划分

烟道位置	烟气状态	腐蚀环境	选用材料	说明
A - B 段 GGH 进口烟道	约 130℃ 干 烟气	与锅炉排烟相同	碳钢	从增压风机出口 至 GGH 进口
C - D 段 脱硫塔进口	约 100 ~ 110℃ 已达酸露 点的烟气	较高温度和冷凝酸泄 出,有较强腐蚀	高温玻璃鳞片乙烯基树 脂涂层、C 合金薄板衬里	烟气中 SO <sub>2</sub> 、SO <sub>3</sub> 等已达露点,泄出 冷凝酸
D - E 段 干湿混合段	110℃ 左右酸 和水混合	温度较高,有酸性强 腐蚀	耐高温玻璃鳞片树脂涂 层或 C 级合金薄板衬里	除较高温度和冷 凝酸外,还有吸收 液渗入
F - G 段 脱硫塔出口	约 50℃ 湿烟 气夹带冷凝酸 和水	由于温度相对较低, 腐蚀性相对减缓	玻璃鳞片乙烯基树脂涂 层、或 6% Mo 不锈钢薄板 衬里	温度较低、酸腐 蚀减缓
H - I 段 GGH 出口	烟气升温到 80 ~ 90℃ 夹带酸 和水	由于温度升高了,酸 和酸性水腐蚀性加强	耐高温玻璃鳞片树脂涂 层或钢衬合金 625 或 C - 276 薄板	升温后烟气腐蚀 性较湿烟气强
旁路烟道	挡板前为热干 烟气,挡板后为 升温后的湿烟气	挡板前同锅炉排烟 道,挡板后同 H - I 段 烟道	挡板前用碳钢,挡板后 耐高温玻璃鳞片树脂涂层 或衬 C - 22、C - 276 薄板	特别要做好旁路 挡板密封性

烟道可划分为：A - B 段，增压风机出口至 GGH 进口，干热烟气段；C - D 段，GGH 出口 C 至干湿交界点 D，中温烟气段；D - E 段为干湿混合段；F - G 段为湿烟气段；H - I 段为升温后湿烟气段；旁路烟道，挡板前为干热烟气，挡板后为升温后湿烟气段。

## 2. 烟道热膨胀及膨胀补偿器

金属烟道被流过烟气加热升温后，产生热膨胀，其伸长量  $\Delta L(m)$ ：

$$\Delta L = \alpha L(t_2 - t_1)$$

式中  $\alpha$ ——管材的线膨胀系数 ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) 对于钢,  $\alpha = 12 \times 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;

$t_1$ ——管道安装温度 ( $^{\circ}\text{C}$ );

$t_2$ ——介质温度 ( $^{\circ}\text{C}$ );

$L$ ——计算烟道长度 (m)。

如果烟道的热伸长量得不到补偿，烟道会产生热推力和热应力。由于热伸长推力巨大，会使设备产生位移或受到破坏。烟道热膨胀产生的伸长量  $\Delta L$  得不到补偿，会产生热应力，严重时会使烟道受损。

热补偿方式有利用管道自身的弹性变形来补偿（自然补偿）；利用各种补偿器来补偿，如方形补偿器、套管补偿器、波形补偿器、球形补偿器等。在烟道上常用的是波形（波纹）补偿器（膨胀节）。

波形补偿器（膨胀节）如图 9-48 所示。

波形补偿器的作用是吸收烟道之间

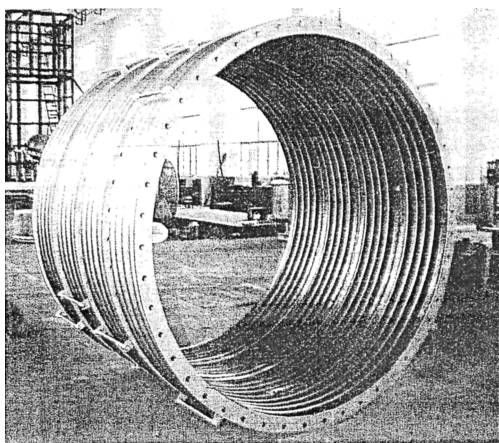


图 9-48 波形补偿器

注：图为 PN 5200 涵洞用大口径波纹管，具有承载强度高、安装方便、施工周期短等特点。

以及烟道与脱硫塔之间的相对位移。耐腐蚀和抗扭曲是波形补偿器遇到的主要问题。所以 FGD 烟道中所用的补偿器材料多为加强氟聚合物胶板。有的衬聚四氟乙烯，具有较好的耐蚀性。使用中应注意补偿器允许伸缩量和正确安装及使用注意事项。

## 9.13 管道和阀门

FGD 中管道按工作系统划分为：

- 1) 脱硫塔循环泵输送吸收浆液的管道；
- 2) 脱硫产物排出管道；
- 3) 脱硫产物固液分离澄清液（旋流器或浓缩器溢流液）；
- 4) 脱硫剂浆液管；
- 5) 各种工艺用水，包括除雾器冲洗水、脱硫塔补水、脱硫剂浆（溶）液制备水、消防用水、清洗水、各种疏水等；
- 6) 输送空气管道：氧化空气管道，仪器仪表用空气管道，杂用空气管道。

1. FGD 中管道工作条件及材料选择（表 9-9）

表 9-9 管道工作条件

管道种类	流体含固浓度/%	温度/℃	磨损性	腐蚀介质	选用材料
循环浆液管	12 ~ 15	< 50	强	Cl <sup>-</sup> ≤20g/L pH5.6 ~ 6.5	碳钢衬胶、衬高密度聚乙烯管、玻璃钢管
脱硫产物浆液管	12 ~ 15	< 50	强	Cl <sup>-</sup> ≤20g/L pH5.6 ~ 6.5	碳钢衬橡胶、衬高密度聚乙烯管、玻璃钢管
脱硫剂浆液管	10 ~ 15	< 50	强	pH8 ~ 12	碳钢衬胶管、衬高密度聚乙烯管
浓缩器/旋流器澄清液	< 10	< 30	中	pH6.5 ~ 7	碳钢衬胶或衬高密度聚乙烯
除雾器冲洗水	≈0	< 30	无	pH7	碳钢管
工艺用水	≈0	< 30	无	pH7	碳钢管

2. 阀门

根据 FGD 中阀门的用途，主要有截止阀、调节阀、止回阀、减压阀、安全阀、闸阀、蝶阀等。使用较多的是截止阀和调节阀。

截止阀起到开通和隔断作用。调节阀用来调节介质流量和压力。

在 FGD 中，较多采用蝶阀及球阀。在有调节流量用途时一般采用球阀或蝶阀（见图 9-49）。

蝶阀防腐、耐磨可采用钢衬胶。阀盘、阀杆最低要求采用 S316L。有条件时采用合金材料。

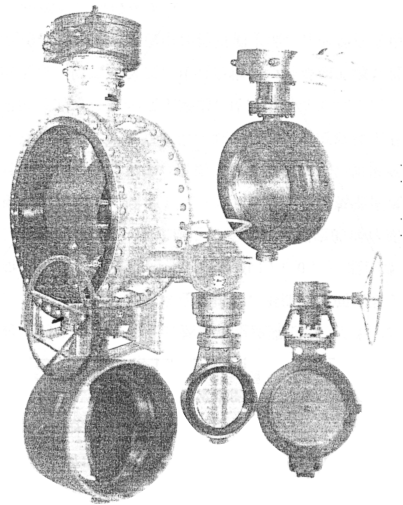


图 9-49 蝶阀

## 第 10 章 脱硫系统烟道设计及烟气升温

锅炉烟气脱硫，进入脱硫塔前是干烟气，虽然烟气中也有水蒸气，但没有达到饱和状态。所以进入脱硫塔前的烟道采用碳钢就能满足使用要求。在湿法脱硫塔内，烟气经过大量吸收液喷雾洗涤，烟气迅速降温，大量水分蒸发，此时烟气中水蒸气已达到饱和状态，烟气温度约为 50℃。烟气流经烟道会有酸性、强腐蚀性冷凝水泄出。脱硫后烟气也称湿烟气，湿烟气流经的引风机、烟道、换热器、烟囱等都必须做好抗腐蚀设计。否则用不了多久就会腐蚀损坏。

凡已建锅炉烟气脱硫，一般都要增加一个脱硫增压风机（Booster up Fan，BUF）。把静电除尘器出口的烟气增压后送入烟气换热器（Gas Gas Heater GGH）从 GGH 出来的烟气进入脱硫塔，从脱硫塔出来的低温湿烟气再进入 GGH 的另一端加热升温后，经过烟道流入烟囱排入大气。在设计中，就要确定增压风机风压和风量。包括烟道、弯头、挡板、GGH、脱硫塔的阻力。烟道设计包括断面尺寸、长度、阻力损失、材质等。

### 10.1 烟道设计

#### 1. 烟道设计要点

本节所指烟道是脱硫系统烟道，即锅炉除尘器出口至增压风机的部分。如果采用 GGH 升温，除尘器出来的热烟气先进入 GGH 加热，脱硫塔出来的冷烟气再从 GGH 出来（热烟气降温后），进入脱硫塔。经过脱硫塔洗涤后，烟气降温到饱和状态（温度在 50℃ 左右）已成为湿烟气，再进入 GGH 被加热升温，从 GGH 出来经烟道进入烟囱。此时不同部位烟道流经的烟气状态不同，有热烟气，也有湿烟气，它们要求的耐腐蚀程度不同，所以将烟道划分如下（见图 9-47）：

（1）干热烟气烟道 脱硫增压风机出口 A 至 GGH 进口 B 之间 A—B 段烟道。A—B 段烟道内是 130℃ 左右干热烟气。这与锅炉原排烟气状态相同，该烟道可用普通碳钢制作。

（2）湿烟气烟道 脱硫塔出口 F 至 GGH 进口 G 之间的 F—G 段烟道内，流经的是湿烟气。由于温度在 50℃ 左右，腐蚀性较经过升温的湿烟气缓和，一般采用玻璃鳞片，乙烯基树脂涂层或 6% Mo。不锈钢薄板衬里。

（3）干/湿交界烟道 从 GGH 出口 C 至脱硫塔入口前 2m 处 D 干湿交界处。C—D 段烟道是低温硫酸露点腐蚀区，属较强腐蚀区，通常采用高温玻璃鳞片乙烯基酯树脂、625 合金或 C 合金薄板衬里。

脱硫塔入口前 2m 处 D，至入口处 E 的 D—E 段烟道内，是高温 130℃ 左右的干湿交

界混合段，具有强腐蚀性。这段烟道应用碳钢衬耐高温玻璃鳞片树脂、625 合金、C - 22 合金薄板或 C 级合金复合钢板制作。

(4) 中温烟道 GGH 升温侧出口 *H* 至烟囱进口 *I* 之间的 *H—I* 段烟道，是 80 ~ 90℃ 中温烟道，由于烟气中酸性液滴的再加热升温，增强了腐蚀性。液滴加热蒸发浓缩了酸性溶解物，加剧了腐蚀性，所以用 GGH 加热升温后的湿烟气，其腐蚀性比湿烟气强。*H—I* 段烟道应用耐高温玻璃鳞片树脂涂层、钢衬合金 625 或合金 C - 276 薄板。

在工业及供热锅炉脱硫的湿烟道或加热升温后的湿烟气或干湿交界的高温烟气，曾采用花岗岩砌筑烟道或钢衬铸石粉水玻璃配钢丝网加强涂层，取得了满意的防腐蚀效果。

(5) 旁路烟道 如果不用 GGH，则比较简单。脱硫塔进口前有一段 2m 左右干/湿交界烟道其余是热烟道。脱硫塔后为湿烟道。旁路烟道挡板前是原烟气，挡板后烟道有湿烟气扩散进入宜作为湿烟道设计。

挡板前接触原烟气，挡板后接触 GGH 升温后湿烟气，具有较强腐蚀性，采用玻璃鳞片树脂衬里或 C 合金薄板衬里。

烟道布置宜平、直少转弯，要气密性好、阻力小。

高温烟道要安装膨胀节，以补偿热膨胀量。

2. 烟气流速及断面尺寸的确定

烟气流速见表 10 - 1。

表 10 - 1 烟气流速

烟道材料	烟气流速/(m/s)	备注
金属制	10 ~ 15	大型装置取 15
麻石(砖)混凝土	8	—

$$v = \frac{V_y}{3600F} \tag{10 - 1}$$

式中 *v*——烟气流速 (m/s)；

*V<sub>y</sub>*——烟气流量 (m<sup>3</sup>/h)；

*F*——管道面积 (m<sup>2</sup>)。

对于圆形管道，已知直径 *D* (m)。

$$F = \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 \tag{10 - 2}$$

对于矩形管道，其面积

$$F = HB \tag{10 - 3}$$

式中 *H*、*B*——矩形的长、宽 (m)。

10.2 阻力计算

1. 烟气管道阻力 ( $\Delta H_{yd}$ ) 计算

$$\Delta H_{yd} = \Delta h_m + \Delta h_f$$

(1) 管道沿程摩擦阻力  $\Delta h_m$  (Pa)

$$\Delta h_m = A \frac{v^2}{2} \rho \tag{10-4}$$

式中  $A$ ——阻力系数;  
 $v$ ——烟气流速 (m/s);  
 $\rho$ ——烟气密度,  $\rho = \rho_0 \times \frac{273}{273 + t}$  (kg/Nm<sup>3</sup>);  
 $\rho_0$ ——标准状态下的气体密度 (kg/Nm<sup>3</sup>), 空气为 1.293kg/Nm<sup>3</sup>, 烟气约为 1.34kg/Nm<sup>3</sup>。

$$A = \lambda \frac{L}{d} \tag{10-5}$$

式中  $\lambda$ ——摩擦阻力系数, 见表 10-2;  
 $L$ ——管段长度 (m);  
 $d$ ——管段直径 (m)。

表 10-2 摩擦阻力系数  $\lambda$  值

管道型式	$\lambda$ 值	管道型式	$\lambda$ 值
纵向冲刷锅炉管束	0.03	砖砌混凝土管道	0.04
金属管道	0.02	烟囱	0.03

对于非圆形管道, 可用当量直径  $d_d$  代替  $d$

$$d_d = \frac{4F}{u} \tag{10-6}$$

式中  $F$ ——管道截面积 (m<sup>2</sup>);  
 $u$ ——周长 (m)。

对于边长为  $a$ 、 $b$  的矩形管道, 则为

$$d_d = \frac{2ab}{a + b} \tag{10-7}$$

(2) 管道局部阻力  $\Delta h_f$  (Pa)

$$\Delta h_f = \zeta \frac{v^2}{2} \rho \tag{10-8}$$

式中  $\zeta$ ——局部阻力系数, 可由表 13-39 查得。

2. 锅炉本体总阻力  $\Delta H_{bt}$

$$\sum \Delta H_{bt} = \Delta h_l + \Delta h_{bt} + \Delta h_{sm} + \Delta h_{ky} \tag{10-9}$$



式中  $\Delta h_l$ ——炉膛负压，有鼓风时一般为 20 ~ 40Pa；  
 $\Delta h_{bt}$ ——锅炉本体受热面阻力（Pa），见表 10-3；  
 $\Delta h_{ky}$ ——空气预热器阻力（Pa），由制造厂计算书查得；  
 $\Delta h_{sm}$ ——省煤器阻力（Pa），从厂方阻力计算书中查得。

表 10-3 锅炉本体风、烟道阻力

吨位 名称	≤4t/h	6t/h	10t/h	20t/h	35t/h	14MW
风道阻力/Pa	800 ~ 1000	1000 ~ 1500	1900 ~ 2300	1600 ~ 2200	1600 ~ 2200	1300 ~ 1500
烟道阻力/Pa	600 ~ 800	700 ~ 1000	500 ~ 1000	650 ~ 1100	1000 ~ 1400	850 ~ 1000

当采用外径为 76mm 的方形肋片标准铸铁省煤器时，其阻力为：

$$\Delta h_{sm} = 0.2nw_{pj}^2\rho_{pj} \tag{10-10}$$

式中  $n$ ——沿气流方向的管子排数；  
 $w_{pj}$ ——烟气在省煤器中平均流速（m/s）；  
 $\rho_{pj}$ ——烟气在省煤器中平均密度（kg/m<sup>3</sup>）。

3. 烟囱阻力（ $\Delta H_{yc}$ ）

$$\Delta H_{yc} = \Delta h_{yc}^m + \Delta h_{yc}^c \tag{10-11}$$

其中，烟囱摩擦阻力（Pa）：

$$\Delta h_{yc}^m = \lambda \frac{Hv_{pj}^2}{d_{pj}2\rho_{pj}} \tag{10-12}$$

式中  $\lambda$ ——烟囱摩擦阻力系数， $\lambda = 0.04$ ；  
 $d_{pj}$ ——烟囱平均直径、烟囱入口、出口内径平均值（m）；  
 $H$ ——烟囱高度（m）；  
 $v_{pj}$ ——烟气平均速度，（m/s）；  
 $\rho_{pj}$ ——烟气平均密度，（kg/m<sup>3</sup>）。

烟囱的局部阻力（Pa）：

$$\Delta h_{yc}^c = \zeta \frac{v_c^2}{2}\rho_c \tag{10-13}$$

式中  $\zeta$ ——烟囱出口阻力系数， $A = 1.0$ ；  
 $v_c$ ——烟囱烟气出口流速，（m/s）；  
 $\rho_c$ ——烟囱出口处烟气密度（kg/m<sup>3</sup>）。

4. 烟囱抽力计算

烟囱高度  $H(m)$  与抽力  $S(Pa)$  关系

$$S_y = H\left(\rho_k^0 \frac{273}{273 + t_k} - \rho_y^0 \frac{273}{273 + t_{pj}}\right) \tag{10-14}$$

式中  $\rho_y^0$ ——标准状态下烟气的密度 ( $\text{kg}/\text{Nm}^3$ )；  
 $\rho_k^0$ ——标准状态下空气的密度 ( $\text{kg}/\text{Nm}^3$ )；  
 $t_k$ ——外界空气温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )；  
 $t_{pj}$ ——烟囱内烟气平均温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )；  
以  $\rho_k^0 = 1.293\text{kg}/\text{Nm}^3$ ,  $\rho_y^0 = 1.34\text{kg}/\text{Nm}^3$ , 计算烟囱每米高度所产生的抽力  $S_0$  可查表 10-4。

表 10-4 烟囱每 m 的抽力  $S_0$  (Pa)

$t_{pj}/^{\circ}\text{C}$ $t_k/^{\circ}\text{C}$	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
0	2.675	3.989	4.39	4.76	5.08	5.40	5.68	5.95	6.18	6.42
10	2.25	3.57	3.97	4.34	4.66	4.98	5.26	5.52	5.76	5.99
20	1.81	3.12	3.53	3.9	4.22	4.54	4.82	5.09	5.32	5.56
30	1.45	2.76	3.17	3.54	3.86	4.18	4.46	4.72	4.96	5.19

烟囱内烟气平均温度  $t_{pj}$ , 可由式 (10-15) 求得

$$t_{pj} = t_j - \frac{1}{2}\Delta tH \tag{10-15}$$

式中  $t_j$ ——烟囱进口处烟气温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )。  
 $\Delta t$ ——烟气在烟囱内每米高的温度降,  $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。

$$\Delta t = \frac{A}{\sqrt{D}}$$

其中  $D$ ——在最大负荷下, 烟囱负担各锅炉的蒸发量之和 ( $\text{t}/\text{h}$ )；  
 $A$ ——不同烟囱的修正系数。

- 无衬铁烟囱  $A = 2$ ；
- 有衬铁烟囱  $A = 0.8$ ；
- 砖烟囱壁厚  $< 0.5\text{m}$ ,  $A = 0.4$ ；
- 壁厚  $> 0.5\text{m}$ ,  $A = 0.2$ 。

5. 除尘器阻力  $\Delta H_{ce}$

除尘器阻力与除尘器类型有关, 也与它的运行状态有关, 由设计生产除尘器厂家提供资料。一般旋风除尘器阻力约为  $800\text{Pa}$ , 多管除尘器约为  $1000\text{Pa}$ , 水膜除尘器约为  $1200\text{Pa}$ , 静电除尘器约为  $300\text{Pa}$  袋式除尘器为  $1200\text{Pa}$ 。

6. 脱硫塔阻力  $\Delta H_u$

它与脱硫塔类型有关, 也与脱硫塔运行状态有关。一般脱硫塔阻力由设计生产脱硫塔厂家提供资料。一般湿法脱硫塔本体阻力 (不包括除雾器) 约为  $1200\text{Pa}$ 。除雾器阻力约为  $200\text{Pa}$ , 合计约为  $1400\text{Pa}$ 。

7. GGH 的阻力  $\Delta H_{gg}$

GGH 目前运行问题较多, 其中腐蚀严重、易积灰、阻力增大是问题之一。一般

GGH 清洁状态的阻力约为 1000Pa。严重污染时可达 1700Pa。

8. 锅炉排烟系统总阻力  $\Delta H_{pz}$  (Pa)

$$\Delta H_{pz} = \Delta H_{bt} + \Delta H_{yd} + \Delta H_{cc} + \Delta H_{tl} + \Delta H_{gg} + \Delta H_{yc} \tag{10-16}$$

9. 锅炉引风机风压（包括脱硫）计算  $H_{ly}$  (Pa)

$$H_{ly} = 1.2 \left( \Delta H_{pz} - S_y \right) \frac{1.293}{\rho_y^0} \times \frac{273 + t_{py}}{273 + t_y} \times \frac{101.32}{b} \tag{10-17}$$

式中  $\Delta H_{pz}$ ——排烟系统总阻力 (Pa)；  
 $S_y$ ——烟囱抽力 (Pa)；  
 $t_y$ ——引风机使用温度 (℃)；  
 $\rho_y^0$ ——101.32kPa 时烟气的密度 ( $\text{kg/m}^3$ )， $\rho_y^0 = 1.34\text{kg/m}^3$ ；  
 $t_{py}$ ——排烟温度 (℃)；  
 $b$ ——当地大气压 (kPa) 见表 10-5。

表 10-5 大气压力与海拔的关系

海拔/m		≤200	300	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800
大气 压力	kPa	101.32	97.33	96	93.7	91.9	89.5	87.5	85.6	83.7	81.8
	mmHg	760	730	720	703	689	671	656	642	628	614

上面是一个引风机承担锅炉排烟除尘脱硫烟气加热升温时的风机风压计算。有时在锅炉除尘器后设置脱硫系统，原锅炉引风机照常运行。新设计增压风机负责克服脱硫系统阻力损失。只要利用式 (10-16) 删去无关阻力项，即得

$$\Delta H_{pz} = \Delta H_{bt} + \Delta H_{yd} + \Delta H_{tl} + \Delta H_{gg} + \Delta H_{yc} \tag{10-18}$$

然后用公式 (10-18) 计算增压风机风压。

10.3 脱硫系统增压风机设计示例

1. 设计条件

烟气量：130000m<sup>3</sup>/h；  
烟气温度：170℃，脱硫后烟气不升温。  
在原锅炉引风机后设增压风机。  
烟气管道布置图如图 10-1 所示。  
已知的烟道直径及流速：  
1) 管道直径  $D_1 = 1.8\text{m}$ ， $v_1 = 14.2\text{m/s}$ ；  
 $D_2 = 1.8\text{m}$ ， $v_2 = 14.2\text{m/s}$ ；  
 $D_3 = 1.8\text{m}$ ， $v_3 = 14.2\text{m/s}$ ；  
 $D_4 = 2.3\text{m}$ ， $v_4 = 17.4\text{m/s}$ 。

- 2) 钢制烟气管道, 钢筋混凝土烟囱高  $H = 80\text{m}$ 。
- 3) 烟囱内径入口处  $D_{\text{Cl}} = 5.0\text{m}$ , 出口处  $D_{\text{C2}} = 2.2\text{m}$ 。
- 4) 环境温度  $t_k = 30^\circ\text{C}$ 。

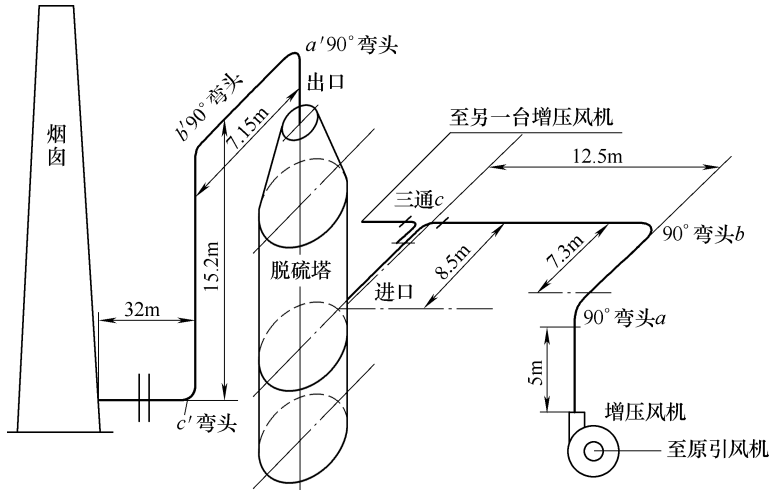


图 10-1 烟道布置图

## 2. 烟管阻力计算

(1) 直管段阻力  $\Delta h_1$  (计算 No. 1 引风机直管段)

$l_1$  (风机出口至弯头  $a$ ) = 5m,  $D_1 = 1.8\text{m}$ ,  $v_1 = 14.2\text{m/s}$ ;

$l_2$  (弯头  $a$  至弯头  $b$ ) = 7.3m,  $D_2 = 1.8\text{m}$ ,  $v_2 = 14.2\text{m/s}$ ;

$l_3$  (弯头  $b$  至三通  $c$ ) = 12.5m,  $D_3 = 1.8\text{m}$ ,  $v_3 = 14.2\text{m/s}$ ;

$l_4$  (三通  $c$  至塔入口) = 8.5m,  $D_4 = 2.3\text{m}$ ,  $v_4 = 17.4\text{m/s}$ ;

直管段阻力  $\Delta h_{11}$

$$\Delta h_{11} = \lambda \cdot \frac{\rho v_{11}^2}{2} \times l_1 = 0.02 \times \frac{0.825 \times 14.2^2}{2} \times 5\text{Pa}$$

$$= 1.663 \times 5\text{Pa} = 8.3\text{Pa}$$

$\lambda$  查表 10-2。  $\rho = \rho_0 \frac{273}{273 + t}$ ,  $\rho_0 = 1.34\text{kg/m}^3$

$$\Delta h_{12} = 1.663 \times 7.3\text{Pa} = 12.1\text{Pa}$$

$$\Delta h_{13} = 1.663 \times 12.5\text{Pa} = 21\text{Pa}$$

$$\Delta h_{14} = \lambda \frac{\rho v_1^2}{2} \times l_4 = 0.02 \times \frac{0.825 \times 17.4^2}{2} \times 8.5\text{Pa}$$

$$= 2.5 \times 0.5\text{Pa} = 21\text{Pa}$$

$$\Delta h_1 = \Delta h_{11} + \Delta h_{12} + \Delta h_{13} + \Delta h_{14}$$

$$= (8.3 + 12.1 + 21 + 21)\text{Pa} = 62.4\text{Pa}$$

(2) 烟管局部阻力  $\Delta h_2$  有  $a$ 、 $b$  90°弯头和三通  $c$ 。

$$\Delta h_2 = \Delta h_{2a} + \Delta h_{2b} + \Delta h_{2c}$$

弯头  $a$ :  $\beta = 90^\circ$ ,  $D = 1.8\text{m}$ ,  $v_a = 14.2\text{m/s}$ 。

$$\Delta h_{2a} = \zeta \frac{\rho v_a^2}{2}$$

$\zeta$  查表 13-39,  $\zeta = 0.7$

$$\Delta h_{2a} = 0.7 \times \frac{0.825 \times 14.2^2}{2} \text{Pa} = 58.2 \text{Pa}$$

弯头  $b$ :  $\beta = 90^\circ$ ,  $D = 1.8\text{m}$ ,  $v_b = 14.2\text{m/s}$ 。

$$\Delta h_{2b} = 0.7 \times \frac{0.825 \times 14.2^2}{2} \text{Pa} = 58.2 \text{Pa}$$

三通  $c$ :  $\zeta = 1$ ,  $v_c = 17.4\text{m/s}$ 。

$$\Delta h_{2c} = 1 \times \frac{0.825 \times 17.4^2}{2} \text{Pa} = 125 \text{Pa}$$

$$\Delta h_2 = \Delta h_{2a} + \Delta h_{2b} + \Delta h_{2c} = (58.2 + 58.2 + 125) \text{Pa} = 241.4 \text{Pa}$$

(3) 脱硫塔入口阻力  $\Delta h_3$

$$\Delta h_3 = \zeta \frac{\rho v_3^2}{2} = 0.64 \times \frac{0.825 \times 15^2}{2} \text{Pa} = 125 \text{Pa}$$

(4) 脱硫塔入口前烟道总阻力  $\Delta H_1$

$$\begin{aligned} \Delta H_1 &= \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 \\ &= (62.4 + 241.4 + 125) \text{Pa} = 428.8 \text{Pa} \end{aligned}$$

(5) 脱硫塔出口后烟管沿程阻力  $\Delta h_5$

直管段阻力:

$l'_1$  (出口弯头  $a'$  至弯头  $b'$ ) =  $7.15\text{m}$ ,  $D_1 = 2.5\text{m}$ ,  $v'_1 = 10.8\text{m/s}$ 。

$$\begin{aligned} \Delta h_{51} &= \lambda \times \frac{\rho \times v_1^2}{2} = 0.02 \times \frac{1.11 \times 10.8^2}{2} \times 7.15 \text{Pa} \\ &= 1.3 \times 7.15 \text{Pa} = 9.3 \text{Pa} \end{aligned}$$

$l'_2$  (弯头  $b'$  至弯头  $c'$ ) =  $15.2\text{m}$ ,  $D_2 = 2.5\text{m}$ ,  $v'_2 = 10.8\text{m/s}$ 。

$$\Delta h_{52} = 0.02 \times \frac{1.11 \times 10.8^2}{2} \times 15.2 \text{Pa} = 1.3 \times 15.2 \text{Pa} = 20 \text{Pa}$$

$l'_3$  (弯头  $c'$  出口至烟囱进口) =  $32\text{m}$ ,  $D_3 = 2.5\text{m}$ ,  $v'_3 = 10.8\text{m/s}$ 。

$$\Delta h_{53} = 0.02 \times \frac{1.11 \times 10.8^2}{2} \times 32 \text{Pa} = 1.3 \times 32 \text{Pa} = 42 \text{Pa}$$

$$\Delta h_5 = \Delta h_{51} + \Delta h_{52} + \Delta h_{53} = (9.3 + 20 + 42) \text{Pa} = 71.3 \text{Pa}$$

(6) 脱硫塔出口后烟管局部阻力  $\Delta h_6$

弯头  $a'$ :  $\beta = 90^\circ$ ,  $D = 2.5\text{m}$ ,  $v_a = 10.8\text{m/s}$ 。

$$\Delta h_{6a} = \zeta \times \frac{\rho \times v_a^2}{2} = 0.7 \times \frac{1.11 \times 10.8^2}{2} \text{Pa} = 45.3 \text{Pa}$$

弯头  $b'$  局部阻力:  $\beta = 90^\circ$ ,  $D = 2.5\text{m}$ ,  $v_b = 10.8\text{m/s}$ 。

$$\Delta h_{6b} = 0.7 \times \frac{1.11 \times 10.8^2}{2} \text{Pa} = 45.3 \text{Pa}$$

弯头  $c'$  局部阻力,  $\beta = 90^\circ$ ,  $D = 2.5 \text{m}$ ,  $v'_c = 10.8 \text{m/s}$

$$\Delta h_{6c} = \zeta \times \frac{\rho \times v_c^2}{2} = 0.7 \times \frac{1.11 \times 10.8^2}{2} \text{Pa} = 45.3 \text{Pa}$$

$$\begin{aligned} \Delta h_6 &= \Delta h_{6a} + \Delta h_{6b} + \Delta h_{6c} \\ &= (45.3 + 45.3 + 45.3) \text{Pa} = 136 \text{Pa} \end{aligned}$$

(7) 脱硫塔出口至烟囱入口烟管 (烟道) 总阻力  $\Delta H_2$

$$\Delta H_2 = \Delta h_5 + \Delta h_6 = (71.3 + 136) \text{Pa} = 207.3 \text{Pa}$$

(8) 脱硫烟管 (道) 阻力  $\Delta H_{yd}$

$$\Delta H_{yd} = \Delta H_1 + \Delta H_2 = (428.8 + 207.3) \text{Pa} = 636.1 \text{Pa}$$

### 3. 烟囱阻力计算 $\Delta H_{yc}$

烟囱  $D_1 = 5 \text{m}$  (进口处),  $D_2 = 2.2 \text{m}$  (出口处), 高  $H_c = 80 \text{m}$ ,

(1) 烟囱摩擦阻力  $\Delta h_{71}$   $v_c = 5 \text{m/s}$ 。

$$\begin{aligned} \Delta h_{71} &= \lambda \frac{\rho v_c^2}{2} \times H_c = 0.04 \times \frac{1.11 \times 5^2}{2} \times 80 \text{Pa} \\ &= 0.555 \times 80 \text{Pa} = 44.4 \text{Pa} \end{aligned}$$

(2) 烟囱局部阻力 出口流速  $v_{ch} = 14 \text{m/s}$ 。

$$\rho_{ch} \text{ 用 } t_{pj} = t_j - \frac{1}{2} \Delta t H$$

$$= 50 - \frac{1}{2} \frac{A}{\sqrt{D}} \times 80$$

$$= \left( 50 - \frac{1}{2} \times \frac{0.2 \times 80}{\sqrt{130}} \right) ^\circ \text{C} = \left( 50 - \frac{1}{2} \times \frac{0.2 \times 80}{11.40} \right) ^\circ \text{C}$$

$$= (50 - 0.009 \times 80) ^\circ \text{C}$$

$$= 49 ^\circ \text{C}$$

$$\rho_{ch} = 1.34 \times \frac{273}{322} = 1.13 \text{kg/m}^3$$

$$\Delta h_{72} = \zeta \times \frac{\rho_{ch} v_{ch}^2}{2} = 1.0 \times \frac{\rho_{ch} \times 14^2}{2} = \frac{1.13 \times 196}{2} \text{Pa} = 110.2 \text{Pa}$$

烟囱阻力,  $\Delta h_7 = \Delta h_{71} + \Delta h_{72} = (44.4 + 110.2) \text{Pa} = 154.6 \text{Pa}$

(3) 烟囱的抽力  $\Delta h_8$

烟气平均温度  $49 ^\circ \text{C}$ ,  $t_k = 30 ^\circ \text{C}$

$$\begin{aligned} \Delta h_8 &= 80 \times \left( \rho_k^0 \frac{273}{273 + t_k} - \rho_y^0 \frac{273}{273 + t_{pj}} \right) \\ &= 80 \times \left( 1.29 \times \frac{273}{303} - 1.34 \times \frac{273}{322} \right) \text{Pa} \\ &= 80 \times (1.164 - 1.136) \text{Pa} = 2.24 \text{Pa} \end{aligned}$$

(4) 烟囱实际阻力  $\Delta H_{yc}$

$$\Delta H_{yc} = \Delta h_7 - \Delta h_8 = (154.6 - 2.24) \text{ Pa} = 152.4 \text{ Pa}$$

4. 脱硫塔本体加除雾阻力  $\Delta H_{tl}$

$$\Delta H_{tl} = \Delta H_{tlb} + \Delta H_{tlm} = (1250 + 250) \text{ Pa} = 1500 \text{ Pa}$$

5. 排烟系统总阻力  $\Delta H_{pz}$

$$\begin{aligned}\Delta H_{pz} &= \Delta H_{yd} + \Delta H_{tl} + \Delta H_{yc} \\ &= (636.1 + 1500 + 152.4) \text{ Pa} \\ &= 2288.5 \text{ Pa} \approx 2289 \text{ Pa}\end{aligned}$$

## 10.4 增压风机风压 $H_{zy}$ (Pa) 和风量 $Q_{zy}$ (m<sup>3</sup>/h) 的确定

$$H_{zy} = 1.2 \Delta H_{pz} \times \frac{1.293}{\rho_y^0} + \frac{273 + t_{py}}{273 + t_y} \times \frac{101.32}{b} \quad (10-19)$$

式中  $\Delta H_{pz}$ ——排烟系统总阻力 (Pa);

$t_{py}$ ——排烟温度 (°C);

$t_y$ ——增压风机设计使用温度 (°C);

$\rho_y^0$ ——烟气在标准状态密度, 取  $1.34 \text{ kg/Nm}^3$ 。

增压风机风量是接受前面除尘器排出风量, 应该是锅炉在额定负荷排烟量乘储备系数 1.1。

$$Q_{zy} = 1.1 \times B_J \times V_y \times \frac{273 + t_{py}}{273} \times \frac{101.32}{b} \quad (10-20)$$

式中  $B_J$ ——燃煤耗量 (kg/h);

$V_y$ ——排烟量 (Nm<sup>3</sup>/kg);

$t_{py}$ ——排烟温度 (°C);

$b$ ——当地大气压, 当海拔小于 200m 时,  $b = 101.32 \text{ kPa}$ 。

10.3 的示例中,

$$\begin{aligned}H_{zy} &= 1.2 \times 2289 \times \frac{1.293}{1.34} \times \frac{273 + 170}{273 + 250} \times \frac{101.32}{101.32} \\ &= 1.2 \times 2289 \times 0.965 \times 0.847 \text{ Pa} = 2245.1 \text{ Pa} \\ Q_{zy} &= 130000 \text{ m}^3/\text{h}\end{aligned}$$

因此增压风机按风量  $Q_{zy} = 130000 \text{ m}^3/\text{h}$ 、风压  $H_{zy} = 2245 \text{ Pa}$  选配。

## 10.5 脱硫排烟加热方案

锅炉排烟经过湿法脱硫后, 烟气中水蒸气达到饱和状态, 烟气温度约为 50°C。沿

烟道流程有冷凝酸性水泄出，具有极强腐蚀性。此外 50℃ 左右的烟温，烟囱抽力很小，烟气抬升扩散能力较差。会给烟囱周围造成一定污染（见图 10-2）。所以就要把烟气温度升到 80 ~ 90℃。温度低了就可能还有酸会凝结下来腐蚀下游设备。因为酸的冷凝温度比水蒸气冷凝温度高得多。

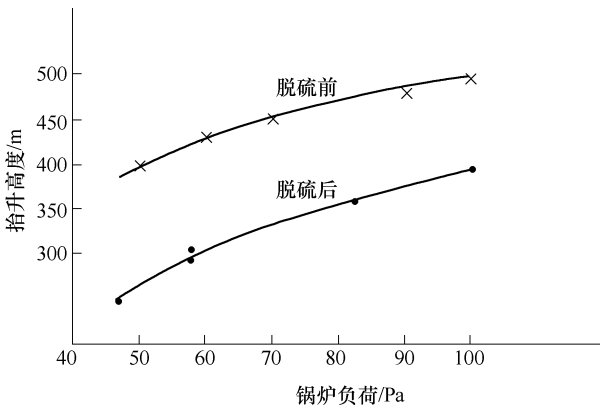


图 10-2 脱硫前、后烟气抬升高度

1. 用回转式 GGH 加热升温

用回转式 GGH 烟气换热器

加热。脱硫后，烟气由进脱硫塔前的烟气提供热源，把脱硫后烟气升温到 80℃，其优点是节省能源，符合当前节能减排潮流和低碳循环经济方略。（见图 9-48）。其缺点是 GGH 故障较多，易阻塞、易腐蚀，经常停车检修，影响 FGD 可靠性，GGH 价格贵（占 FGD 系统设备费的 10% ~ 17%），阻力较高（约为 1000Pa）。

设计选型：这类 GGH 由大型锅炉厂生产，已用在国内 200MW、300MW、600MW 电站。如需采用可提供使用参数，由制造厂设计制造供货。

2. 用蒸汽/烟气换热器加热升温（见图 10-3）

其优点是蒸汽温度高，换热器体积可比烟气为热源的小，可降低换热器价格。在安装空间有限时，采用蒸汽加热换热器较有利。其缺点是消耗蒸汽，运行费用高。换热器低温侧的腐蚀仍然是个问题。工作性能与管式 GGH 类似。

设计选型：将蒸汽/烟气换热器的使用条件，烟气流量、温度、水蒸气含量，SO<sub>2</sub> 浓度，升温温度、使用寿命提供给制造厂，进行设计制造供货。

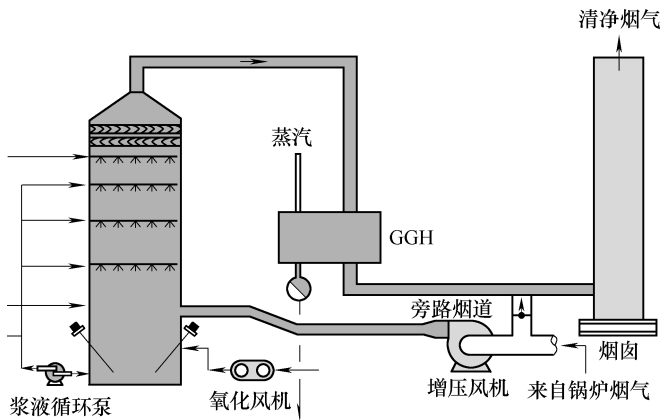


图 10-3 蒸汽/烟气加热升温系统



### 3. 热空气混合加热冷烟气（见图 10-4）

用蒸汽换热器加热空气至 250℃，然后直接与冷烟气混合升温。高温热空气与冷烟气的比约 1: (6~7)。

其优点是换热器可用碳钢制造，没有腐蚀问题，运行可靠性高。设备投资省。运行中一般没有故障。而缺点是要耗费过热蒸汽，增加运行费用。

该法在 Babcock & Wilcox 公司电站脱硫系统中选用。比较适合于工业及供热锅炉脱硫使用。工业及工业锅炉吨位小，能耗相对小，支付费用数额尚可承受，一次投资费用不高。

设计选型：用蒸汽/空气换热器把空气升温到 250℃。该换热器可由锅炉厂或锅炉辅机厂制造设计。用户可提供使用条件资料。

脱硫设计时，要计算出需要混合的高温空气量 ( $V_k$ ) ( $\text{m}^3/\text{h}$ )，其计算公式由

$$V_s \times c_{p48} \times 48 + V_k \times c_{k250} \times 250 = (V_s + V_k) \times c_{p80} \times 80$$

导出

$$V_k = \frac{(80c_{p80} - 48c_{p48}) V_s}{(250c_{pk250} - 80c_{p80})} \quad (10-21)$$

式中  $V_s$ ——湿烟气流量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )；

$V_k$ ——高温 250℃ 空气流量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )；

$c_{p48}$ ,  $c_{p80}$ ——烟气在 48℃ 和 80℃ 的比定压热容 [ $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ]；

$c_{pk250}$ ——空气在 250℃ 时的比定压热容，[ $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ]。

$$\text{如 } V_s = 400000 \times \frac{321}{423} \text{m}^3/\text{h} = 303546 \text{m}^3/\text{h}$$

查表 13-12 按烟气成分计算。

湿烟气 48℃  $c_{p48} = 1.3541 \text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$

升温至 80℃  $c_{p80} = 1.3594 \text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$

加热空气至 250℃  $c_{pk250} = 1.3370 \text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$

由式 (10-21) 可得

$$\begin{aligned} V_k &= \frac{(80c_{p80} - 48c_{p48}) V_s}{(250c_{pk250} - 80c_{p80})} \\ &= \left( \frac{80 \times 1.3594 - 48 \times 1.3541}{250 \times 1.3370 - 80 \times 1.3594} \right) \times 303546 \text{m}^3/\text{h} \end{aligned}$$

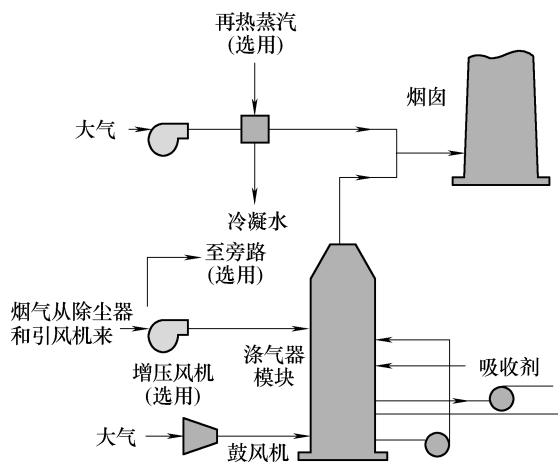


图 10-4 热空气烟气混合加热系统

$$= \frac{43.75}{225.5} \times 303546 \text{ m}^3/\text{h} = 58892 \text{ m}^3/\text{h}$$

所需要混合高温空气占烟气量的比例为

$$\frac{V_k}{V_s} = \frac{58892}{303546} = 19.4\%$$

#### 4. 用燃气或天然气燃烧室（热风室）加热烟气

一般可以采用基本无硫的天然气。经过燃烧后，高温烟气再送入混合烟道。计算高温烟气量及天然气耗量，如图 10-5 所示。

$V_y = 400000 \text{ m}^3/\text{h}$ ，脱硫后烟温  $t_2 = 48^\circ\text{C}$ ，加热升温到  $80^\circ\text{C}$ 。估算天然气耗量。

用式 (10-21) 可计算  $V_{jy}$ ，以燃烧烟气温度为  $600^\circ\text{C}$  计算。

$$\begin{aligned} V_{jy} &= \frac{(80c_{p80} - 48c_{p48})}{(600c_{py600} - 80c_{p80})} \times V_s \\ &= \frac{80 \times 1.3594 - 48 \times 1.3541}{600 \times 1.3830 - 80 \times 1.3594} \times V_s \\ &= \frac{(108.75 - 65)}{829.8 - 108.3} \times \frac{43.75 V_s}{721.5} \\ &= 0.06 \times 400000 \times \frac{321}{423} \text{ m}^3/\text{h} = 18213 \text{ m}^3/\text{h} \end{aligned}$$

式中  $V_{jy}$ ——天然气燃烧后的高温烟气 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )。

天然气耗量  $G_r$  按下式计算

$$\begin{aligned} G_r &= \frac{Q}{0.95 \times Q_r} = \frac{\Delta H}{0.95 \times 39000} \\ &= \frac{16712671}{37050} \text{ m}^3/\text{h} = 451 \text{ m}^3/\text{h} \end{aligned}$$

式中  $Q_r$ ——天然气平均热值，取  $39000 \text{ kJ/m}^3$ ；

0.95——热风室热效率。

利用燃烧室产生热风再与湿烟气混合的优点是只要控制好天然气燃烧的状态，产生高温烟气。注意燃气安全生产，烟气升温运行比较简便，不易发生故障。该方法是一种简便有效的烟气升温方法。其缺点是消耗一定的燃料，运行费用较高，要注意天然气的安全使用。如果企业没有燃气或天然气供气管线，需要专门建供气设施就不宜采用了。

#### 5. 旁路一小部分烟气与脱硫后湿烟气混合升温

本方法以实例说明。

设原烟气温  $T_1 = 130^\circ\text{C}$ ，烟气流量  $G$ ，湿烟气温度  $T_2 = 50^\circ\text{C}$ ，若要混合升温到  $70^\circ\text{C}$ ，需要旁路多少烟气  $G_p$ ？

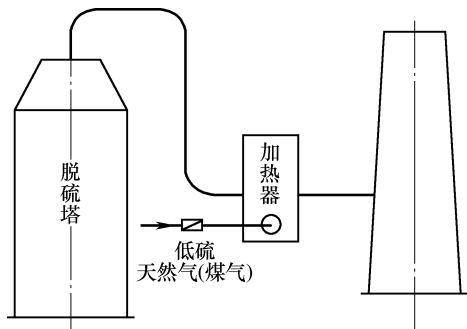


图 10-5 低硫天然气加热

$$G_p \times 130 + (G - G_p) \times 50 = G \times 70$$

$$130G_p + 50G - 50G_p = 70G$$

$$130G_p - 50G_p = 70G - 50G$$

$$80G_p = 20G$$

$$G_p = \frac{20}{80}G = \frac{1}{4}G$$

即需要旁路 1/4 的烟气量。

如果烟气  $\text{SO}_2$  浓度  $C_{1s} = 1000\text{mg/m}^3$ ，按脱硫率为 90%，则可知

$$C_{2s} = 100\text{mg/m}^3$$

旁路升温后， $C_{3s}$  浓度则可按下式导出

$$\frac{1}{4}G \times 1000 + \frac{3}{4}G \times 100 = G \times C_{3s}$$

$$250G + 75G = C_{3s}G$$

$$C_{3s} = 325\text{mg/m}^3$$

因此混合后的脱硫效率  $\eta_H$  为

$$\eta_H = \frac{C_{1s} - C_{3s}}{C_{1s}} = \frac{1000 - 325}{1000} = 67.5\%$$

由该例可看出，旁路后的脱硫效率仅为 67.5%，因此此方法适合于脱硫效率要求不高的项目采用。

## 第 11 章 烟气脱硫防腐蚀设计及材料

湿法烟气脱硫过程中，煤或燃料燃烧产生的  $\text{SO}_x$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{HCl}$ 、 $\text{HF}$  等几乎都在脱硫洗涤吸收过程中转移到脱硫吸收循环液，再加上脱硫循环液中脱硫剂颗粒及液滴的冲刷、磨蚀和烟气高温的作用，使湿法脱硫循环液具有强烈的腐蚀性和磨蚀性，就使脱硫装置的防腐蚀设计成为脱硫设计的大课题。脱硫装置被腐蚀会导致发生故障停运，已成为我国工业及供热锅炉脱硫装置运行中的频发问题。防腐蚀、防磨蚀应该在设计中高度重视；并在选材上采取有效的措施，使腐蚀和磨蚀控制在允许的范围内。

### 11.1 烟气脱硫装置的腐蚀

#### 1. 腐蚀的基本概念

材料在外部介质的化学或电化学作用下引起的破坏，称为腐蚀。

根据腐蚀机理，腐蚀可分为化学腐蚀和电化学腐蚀。

材料在介质的化学作用下引起的腐蚀，称为化学腐蚀。金属在非电解质溶液（如甲苯、酒精）中的破坏就是化学腐蚀。化学腐蚀时，在材料的破坏过程中不产生电流。

金属与介质发生电化学反应而发生的腐蚀，称为电化学腐蚀。金属在电解质溶液（主要是酸、碱、盐溶液）中发生的腐蚀就是电化学腐蚀。电化学腐蚀时，在金属破坏过程中，电子从金属的一区域传到金属的另一区域，即产生电流。使用两种不同金属直接接触，并放在电解液中，它们之间就会产生电流，而其中一种金属就会逐渐溶解到电解质中，也就是被腐蚀。一种金属与另一种金属互相接触的地方以及金属表面不均匀的地方（如铆接、焊缝、裂缝、伤痕、凸凹不平处等），往往会腐蚀得特别严重。

一般情况下，非金属材料的破坏大多是由化学作用或物理机械作用引起的；金属材料的破坏则大多数是电化学腐蚀所致。电化学腐蚀比化学腐蚀强烈得多。化学腐蚀和电化学腐蚀往往是共存的，在一定条件下也可以相互转化。

根据材料被腐蚀的形式，可分为全面腐蚀和局部腐蚀。全面腐蚀是指材料表面在腐蚀介质的作用下，以相同速度进行的均匀腐蚀。局部腐蚀是指材料的个别区域发生的腐蚀，它有各种形式，如晶间腐蚀、溃疡腐蚀、点蚀等。各种形式的腐蚀通常是同时发生的。

金属材料的耐蚀性，通常用腐蚀速度（ $\text{mm/a}$ ）表示。对于均匀腐蚀，腐蚀速度也可以用单位时间、单位面积上的质量损失  $[\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$  来表示。一般认为腐蚀速度在  $0.1\text{mm/a}$  以下的材料是耐蚀的。腐蚀速度在  $1\text{mm/a}$  以下的材料是较耐腐蚀的，可用于制造化工设备和管路。无机材料的耐腐蚀性则采用耐酸度 [材料经介质腐蚀后余下的质量与未腐蚀时质量的比值（百分数）] 来衡量，而有机材料（如塑料、橡胶等）的耐

蚀性,则要根据它们与介质作用后,其外形,重量与物理机械性能的变化情况来确定。

绝对耐腐蚀的材料是没有的,材料的耐腐蚀都是相对的和有条件的,每一种材料都会适用于一定的介质和一定的操作条件。

## 2. 脱硫装置腐蚀介质特点

1) 酸性介质有硫酸、亚硫酸、盐酸、氢氟酸。而  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{F}^-$  的存在恶化了腐蚀环境。 $\text{F}^-$  浓度较低,  $\text{Cl}^-$  则可能出现很高的浓度。

2) 循环浆液中有吸收剂颗粒和液滴,它们具有较强磨损性。

3) 脱硫烟气温度较高,材料的腐蚀速度会随温度升高而加速进行。

4) 烟气流速较高,对材料表面有一定冲击,对金属材料表面钝化膜易腐蚀,会加速材料腐蚀。

5) 脱硫装置干/湿过渡区既有高温、又有腐蚀性盐的浓缩和高浓度酸性沉积物而成为具有强腐蚀性区。

# 11.2 腐蚀环境划分和材料选用

## 1. 腐蚀环境划分

(1) A 区 干区,烟气温度高于酸露点,且为不饱和状态,不带有水雾,基本不具腐蚀性。

(2) B 区 吸收塔内烟气入口区是烟气急冷区,该区温度比吸收塔其他部位的高,而 pH 值可以低至 3.5 左右。在干/湿交界面有高浓度的酸雾、有高浓度的可溶性盐的沉积物、氯化物浓度可超过限量。

(3) C 区 吸收塔循环槽。腐蚀环境比较缓和,热烟气不直接接触罐壁,浆液温度约为 60℃。pH 值通常为 5.0~6.0,相对较高。浆液中  $\text{Cl}^-$  离子会引起点蚀,罐底会受浆液轻度磨损。

(4) D 区 脱硫塔吸收区。是脱硫系统中最为轻度的腐蚀环境。冷却后烟气温度一般为 50℃ 左右,浆液中充裕的碱度可中和酸性烟气, pH 值自上而下从 6.5~5.0 下降到 4.5~3.5。对于喷雾塔的磨损很少成为严重问题。当选用耐高温玻璃鳞片树脂涂层和耐高温橡胶内衬时可以运行很长时间没有问题。但当介质温度超过 60℃ 时,耐磨性能明显下降。

(5) E 区 脱硫塔吸收区上面到烟气再加热器入口。该区域烟温一般在 50℃ 左右。由于该区壁面上水滴水膜继续吸收  $\text{SO}_2$ , 因此 pH 值较低,使这一区腐蚀性变得更强。但由于烟温低,采用橡胶或增强树脂衬里就能满足防腐要求。

(6) F 区 对于采用加热器的系统,从加热器入口至烟气系统出口挡板。该区的烟温从 50℃ 升至 80~100℃,在提高烟温的同时,也增强了烟气的腐蚀性。因为透过除雾器夹带过来的水雾和烟气带水形成的水滴,很难在短时间内蒸发,所以再加热器及下游烟道还不是干状态,还有较强腐蚀性,采用树脂鳞片衬里能满足要求。

(7) G 区 出口挡板、旁路挡板与烟囱入口之间的公共烟道,分几种情况:

- 1) 脱硫停运时, 通过 120 ~ 160℃ 原烟气;
- 2) 当烟气不加热时, 通过 50℃ 的湿烟气;
- 3) 当采用间接加热时, 加热后烟温达到 80 ~ 90℃, 这时烟气接近原烟气的腐蚀环境。

为使三种不同情况都能安全运行, 采用耐高温玻璃鳞片树脂涂层。

(8) H 区 烟囱的腐蚀环境接近公共出口烟道腐蚀环境。当烟气不加热时是湿烟囱。可考虑在烟囱中衬砌耐酸瓷砖或耐腐蚀合金复合板, 或贴合金墙纸。

(9) I 区 石灰石浆液罐 pH 值在 7 ~ 8 之间, 熟石灰浆液罐 pH 值约为 12。腐蚀不严重。如果浆液制备使用脱硫产物过滤回收水, 应考虑  $\text{Cl}^-$  离子的腐蚀。此时可采用碳钢衬橡胶或衬玻璃钢。

## 2. 材料选用

由于工业及供热锅炉烟气湿法脱硫塔体型 ( $D \times H$ ) 比大型火电站小得多, 脱硫塔内分区设计防腐材料可相应归类划分如下:

(1) A 区 进口烟道至脱硫塔入口前 2m (干/湿交界处), 是原烟气状态。管道及附件可以采用碳钢材料制作。

(2) B 区 脱硫塔入口前 2m 干/湿交界处烟道和进入脱硫塔内的一段急冷降温区。由于烟气温度高、进口处流速高、pH 低、冷却蒸发盐类沉积  $\text{Cl}^-$  离子浓度高、腐蚀环境严酷宜采用高镍合金板或高温玻璃鳞片树脂涂层或花岗岩衬里。

(3) C 区 脱硫塔循环槽, 热烟气不直接接触槽壁, 浆液温度约为 60℃, pH 值一般为 5.0 ~ 6.5 (随工艺定), 相对较高, 浆液中  $\text{Cl}^-$  浓度较高, 一般规定  $\leq 20\text{g/L}$ 。槽内如有侧搅拌器, 浆液流动会有一定磨损。 $\text{Cl}^-$  离子会引起金属材料点蚀。腐蚀环境相对 B 区有一定缓和。考虑防腐、防磨, 材料可选用 2205 双相不锈钢。(或 S317LM 不锈钢)。

(4) D 区 脱硫塔吸收区、及吸收区往上至脱硫塔出口都是低温湿烟气流经的地方, 都有较强的腐蚀性和一定的烟气流冲刷, 宜用高温玻璃鳞片树脂涂层或衬 S317LM 不锈钢。

(5) E 区 湿烟囱可内衬 S317LM 不锈钢 (或 316L) 薄板。对新建烟囱, 可内衬耐酸瓷砖。脱硫装置停运时, 可以通过锅炉原烟气。

## 11.3 常用非金属防腐材料

### 1. 橡胶衬里

(1) 种类 比较适合作脱硫装置防腐衬里的是氯丁橡胶 (CR) 和自硫化溴化丁基橡胶 (BIR)。它们加工成橡胶板后可粘贴在脱硫塔内壁, 包覆在一些梁柱的外面, 衬在管道、阀门、风机、泵体的壳体和转子叶轮上, 作为耐酸、碱的防腐层。天然橡胶 (NR) 也可用作橡胶衬里。

(2) 主要性能

1) 氯丁橡胶 (CR) 是合成橡胶; 具有耐酸、耐碱、耐氧化和耐老化性; 可制成自硫化板; CR 胶浆黏结力较高; 使用温度为 70℃, 短时间内可为 90℃; CR 具有阻燃性。CR 的缺点是吸水性很强, 水蒸气扩散系数比丁基橡胶 (CIIR) 和氯化丁基橡胶 (CIIIR) 高得多。在橡胶衬里允许的工作条件下使用, 可有较长寿命, 但需每年维修一次。

2) 目前认为用自硫化溴化丁基橡胶 (BIIR) 作橡胶衬里的效果较好。有良好的抗压性和耐磨性, 最高使用温度为 100℃。其技术性能见表 11-1。

表 11-1 BIIR 衬里技术性能

技术数据单位	KERABUTYL BS <sup>①</sup>	KERABUTYL V <sup>②</sup>
密度/(g/cm <sup>3</sup> )	1.27	上层 1.19, 下层 1.45
肖氏 A 硬度 HA	53 ± 5	55 ± 5
拉伸强度/MPa	≥ 2	≥ 4
伸长率/%	≥ 400	≥ 350
剥离强度/(N/mm)	≥ 3	≥ 3
耐压力/MPa	1	2
允许使用最高温度/℃	90	100

① 胶板厚可为 2 ~ 5mm。  
② 双层胶板厚可为 3 ~ 5mm。

3) 天然橡胶 (NR) 的允许工作温度 ≤ 60℃; 有较好弹性和耐磨性; 由于工作温度较低和同基材粘贴强度的问题, 一般不推荐它作脱硫塔衬里, 但可作低温管道衬里。

4) 橡胶衬里的综合特性归纳起来有:

- ① 耐强酸、碱和盐溶液;
- ② 致密性较高, 抗渗性强;
- ③ 有弹性、抗冲击、使用介质不受 Cl<sup>-</sup> 限制;
- ④ 与钢设备的粘合力强;
- ⑤ 施工较方便;
- ⑥ 价格比玻璃鳞树脂层稍高;
- ⑦ 对强氧化介质稳定性差;
- ⑧ 使用温度分别为 65 ~ 100℃, 超温后损坏较快;
- ⑨ 易受机械性损伤;
- ⑩ 导热性差;
- ⑪ 膨胀系数比金属大 3 ~ 5 倍, 温差大时, 易剥离。

2. 增强树脂涂层

在合成树脂中添加增强材料, 在一定条件下固化形成保护层。合成树脂中加入增强

材料，主要是提高抗渗透性、耐磨性、拉伸强度，减少硬化时的收缩率和热膨胀系数。最常用的增强材料有玻璃鳞片和剪短的玻璃纤维。

增强树脂涂层的耐蚀、耐温等性能，主要取决涂料中的树脂种类。在脱硫装置中，常用的是双酚型乙烯基树脂和酚醛型环氧乙烯基酯树脂（VE）。

（1）性能 VE 玻璃鳞片涂层（VEGF 衬里）的性能有：

- 1) 耐蚀性好，基体树脂是乙烯酯树脂，比环氧树脂更好的耐蚀性。
- 2) 较低的渗透性。VEGF 鳞片抗水蒸气的渗透率比普通环氧树脂涂料高 6 ~ 15 倍，比普通环氧玻璃纤维增强材料高 4 倍。
- 3) 具有较强的黏结强度。与碳钢黏结强度高， $\geq 2.0\text{MPa}$ ；不易产生龟裂、分层或剥离，能保证好的耐蚀性。
- 4) 耐热冲击性能（温差）较好。VEGF 涂层的线膨胀系数为  $11.5 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，钢的线膨胀系数为  $12 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，两者相近。
- 5) 耐磨性好。VEGF 鳞片，涂层固化后的硬度比醇酸漆高 2 ~ 3 倍。VEGF 鳞片的耐磨性为 130mg（CS - 17W - 500g 情况下）。
- 6) 造价适中，FGD 衬里的造价比较见表 11 - 3。
- 7) 工艺性较好。涂层施工可以喷涂、滚涂、刷涂等。现场配制，室温下固化。
- 8) 使用温度：选用耐高温 VEGF 可用在  $\leq 150^{\circ}\text{C}$ 。

（2）VEGF 鳞片在 FGD 中应用 由于 VEGF 鳞片在脱硫装置中优良的耐蚀性、耐磨性和工艺性，现已成为 FGD 防腐常用防衬里和涂层，见表 11 - 2。

表 11 - 2 VEGF 鳞片涂层的应用

装置名称	工作条件	防腐措施
管道	SO <sub>2</sub> 气体等介质,使用温度 $\leq 150^{\circ}\text{C}$	VEGF 涂层、FRP
	SO <sub>2</sub> 气体等介质,使用温度为 150 ~ 200 $^{\circ}\text{C}$	耐高温涂料
冷却塔、快速冷却塔	SO <sub>2</sub> 气体等,使用温度 $\leq 150^{\circ}\text{C}$	VEGF 涂层
	SO <sub>2</sub> 气体等,使用温度为 150 ~ 200 $^{\circ}\text{C}$	VEGF + 耐火砖
循环槽	流体中含亚硫酸、硫酸等,使用温度为 60 ~ 90 $^{\circ}\text{C}$	VEGF 涂层、FRP
吸收塔	介质中 pH3 ~ 12,使用温度 $\leq 150^{\circ}\text{C}$	VEGF 涂层
	介质 pH3 ~ 12,使用温度 $\leq 80^{\circ}\text{C}$	VEGF 涂层或 BIIR 橡胶衬里
氧化塔	介质 pH3 ~ 12,使用温度为 60 ~ 80 $^{\circ}\text{C}$	VEGF 涂层或 FRP
贮槽	使用温度 $\leq 60^{\circ}\text{C}$	VEGF 涂层、橡胶衬里、FRP

注：FRP 为玻璃纤维增强塑料，即玻璃钢。

FGD 材料和衬里造价比较，见表 11 - 3。



表 11-3

类别	造价/(元/m <sup>2</sup> )	备注
碳钢	2235	把设备造价平摊到面积
碳钢衬 VEGF	3560	目前较多选用,使用温度≤150℃
碳钢内衬橡胶	3642 ~ 6292	选用不同橡胶造价有差异,使用温度≤80℃
整体 FRP	3974 ~ 5795	使用温度≤80℃
整体 316/317 不锈钢	4470 ~ 8941	用在高 Cl <sup>-</sup> 离子介质,易出现点蚀和缝隙腐蚀
整体镍合金	11177 ~ 15565	效果好,但投资高

3. 纤维增强塑料 (FRP)

俗称玻璃钢。使用不同合成树脂做成的玻璃钢具有不同的性能。常用的合成树脂有:环氧树脂、酚醛树脂、呋喃树脂及乙烯基酯树脂。在 FGD 中,使用较多的是乙烯基酯树脂。

FRP 的主要特点:质量轻,强度高;耐化学腐蚀性优良,耐热和隔热性良好;可做成各种形状,较适合大型整体的防腐设备。FRP 的缺点是与金属相比,弹性质量较低,大多 FRP 耐温≤100℃,用耐高温树脂的 FRP,耐温可达≤150℃。造价相对较便宜,如管道,造价相当于 316L 不锈钢的 50%,相当于衬胶管的 75%。在 FGD 中,FRP 用作各种耐腐蚀管道、喷淋管、浆液管、氧化空气管、除雾器本体及冲洗管、各种储槽内衬、烟道、烟囱内衬、小直径吸收塔体等。

各种 FRP 的性能及应用:

1) 聚丙烯塑料、高密度聚乙烯塑料:有较好的耐酸、碱的性能,使用温度≤80℃,较适合作为管道、阀门、泵、风机的衬里。

2) 天然花岗岩:具有良好的耐腐蚀、耐磨损性能,可加工、砌筑成烟道、烟囱、除尘器体。耐热冲击性差(忽冷忽热),造价相对便宜,可作为衬里使用。也可作为吸收塔急冷段衬里。一般使用温度≤200℃。

3) 辉绿岩:俗称铸石,有良好的防腐性和耐磨性。可作为防腐设备衬里。一般使用温度≤200℃。

铸石粉与水玻璃配制的涂层可用于工业锅炉脱硫塔体衬里,具有良好耐腐蚀性、耐磨性,非常坚固耐用。这几年来,许多工业锅炉脱硫塔衬里用铸石水玻璃涂层衬里,取得很好效果;长期使用并未发现问题,但是必须按照施工工艺制作。

4) 耐酸水泥涂层:是由水玻璃(氟硅酸钠)、耐酸填料、粗细骨料,按一定比例拌和而成。它可以用作防腐设备衬里。

5) 耐酸陶瓷:可耐各种酸(除氢氟酸)的腐蚀,使用温度可达 150℃,可作为防腐设备衬里。

11.4 常用金属防腐材料

1. 种类

在 FGD 系统中，常用的耐腐蚀金属有：不锈钢、S316L、S317LM 不锈钢、合金 904L、合金 C-22，合金 C-276、合金 625（见表 11-4）。这些合金钢材料中含镍、铬、钼成分比较多，提高了它们抗酸腐蚀的能力。

表 11-4 含镍耐酸钢材成分

材料	化学成分/(质量分数,%)								
	Ni	Mo	Cr	Fe	Cu	W	Nb	N	C(max)
S316L	10	2	16	70	—	—	—	0.02	0.03
S317LM	15.5	4	18.5	62	—	—	—	0.06	0.02
合金 904L	25	5	21	45	2	—	—	—	0.02
合金 625	61	9	22	3	—	—	4	—	0.01
合金 C-276	56	16	16	5	—	3.5	—	—	0.005
合金 C-22	59	13	22	3	—	3	—	—	0.01
合金 G3	48	7	22	20	2		—	0.03	0.01

在 FGD 中，不锈钢和镍合金的选择见表 11-5。

表 11-5 FGD 中不锈钢和镍合金的选择

		弱		中		强		非常强	
pH 值 (酸性)	氯化物含量(酸性) /10 <sup>-6</sup>	100	500	1000	5000	10000	50000	100000	200000
弱	pH6.5	316L	316L	316L	317LM	合金 904L	合金 G3	合金 G3	合金 G3
中	pH4.5	316L	316L	317LM	合金 904L	合金 G3	合金 G3	合金 625	合金 625
强	pH2.0	317LM	317LM	合金 904L	合金 G3	合金 G3	合金 G3	合金 625	合金 C276
非常强	pH1.0	合金 904L	合金 904L	合金 G3	合金 G3	合金 G3	合金 625	合金 C276	合金 C22

由于镍合金价格较高，所以在制造 FGD 选材时，通常并不选用。采用巧妙的工艺设计，可有效降低成本：

- 1) 设计轻型结构；
- 2) 采用镍合金和钢板复合板；
- 3) 采用钢设备贴镍合金衬板；
- 4) 采用复合板或贴衬板后的 FGD 塔，其成本与非金属衬里塔成本相近。

2. 使用效果

镍基合金及不锈钢在 FGD 中的使用效果：

- 1) 在日本，20 世纪 70 年代的第一代 FGD，其燃料主要是油，因此选用 S316L 和 S317L 不锈钢。不仅用于管道，还用于吸收塔本身和许多设备中。对于腐蚀性特别强的部位和不能加衬的部位则采用高耐蚀性不锈钢和镍合金。
- 2) 到 20 世纪 80 年代，在日本，燃料由油改为煤，烟气的含尘量加大，氯化氢和氟化氢含量也增大很多。因此在第二代 FGD 中，以前常用 S316L 和 S317L 不锈钢的许多部件，已经用树脂或橡胶内衬所代替。第二代火力发电厂 FGD 设备的材料见表 11 - 6。

表 11 - 6 日本第二代 FGD 使用的主要材料

设备	类型	材料
冷却塔	喷淋塔或高流速喷淋塔	橡胶衬里、树脂衬里
吸收塔	喷雾塔或填料格栅塔	橡胶衬里或树脂衬里
氧化塔	汽泡塔旋转喷雾器	橡胶衬里或树脂衬里
泵	离心浆液泵	橡胶衬里、双相不锈钢、镍合金
分离装置	滚动离心机或过滤机	橡胶衬里、317L
烟气管道		SS41 ( 普通碳钢 ) 衬不锈钢或树脂衬里
管道阀门	循环管道及阀门	橡胶衬里、聚乙烯衬里 S317L、镍合金

3) 镍铬不锈钢和高镍合金在美国 FGD 中的应用。

美国把 FGD 设备的主要部件分为：

- ① 脱硫烟气入口管道；
- ② 预洗涤急冷区；
- ③ 吸收塔吸收区；
- ④ 旁路烟道挡板后和烟气再热器后的烟道烟囱。

现分述如下：

① 预洗涤塔：一般有文丘里管 + 洗涤塔，见图 7 - 3。

烟气温度为 149℃，用 S316L 不锈钢制造溢流盘和溢流喉。由于反复出现冲蚀腐蚀和点蚀问题，而改用合金 G 制造两个部件后，未出现过问题。也有用耐酸砖和环氧树脂膜对文丘里，预洗涤塔衬里改造的，但耐酸砖衬里和树脂包膜需每半年至一年维修一次。

② 文丘里管洗涤塔外壳用碳钢制造衬里为树脂涂层，溢流盘用 C - 276 合金运行未出现问题，但衬里材料需每年维修一次。

文丘里预洗涤塔也有用 S316L 不锈钢制造的加耐酸混凝土衬里。投入运行后，定期对衬里进行修补。

③ 急冷区及吸收塔：急冷段内腐蚀环境恶劣，采用镍合金或其复合板制造。吸收塔本身用 S317LM 不锈钢制造，自投入运行以来使用效果很好。

④ 出口管道/再热器：出口管道内湿烟气 pH 较低，用玻璃鳞片有机涂层要定期维修。再热器的壳体和管束用 316L 不锈钢制造，但其使用寿命仅为 6 年。在加热器出口

到烟囱段管道用 317LM 不锈钢衬里，运行后状况较好。

为了提高再热器的使用寿命，计划用 C-22 或 C-276 合金制造。

⑤ 烟囱：低于水蒸气饱和温度的湿烟气有强腐蚀性，在美国 FGD 中，烟囱钢筋混凝土内衬用耐酸瓷砖或玻璃纤维增强塑料，也可以用衬合金钢板或合金 C-276 复合板。效果良好。现把湿烟囱可用防腐设计材料列于表 11-7。

表 11-7 湿烟囱防腐材料

烟气状态	衬耐酸砖或胶泥	钢衬 C 合金薄板	玻璃钢(FRP)	增强有机树脂衬里
湿烟气	可用	可用	可用	可用
加热湿烟气	可用	可用	不可用	不可用
改造现烟囱	不可行	可行	不可行	可行

3. FGD 耐蚀金属材料的选择

综上所述，FGD 系统中腐蚀环境最严酷的是高温、急冷、低 pH、有冲刷（高速）和磨损（带硬颗粒）。如不采用 GGH 的脱硫塔入口烟道干/湿交界区和脱硫塔内急冷区。到了吸收区温度已下降、pH 值上升、冲刷逐渐缓和、腐蚀环境大为改善。针对不同的腐蚀环境选择适当的材料。

（1）吸收塔入口烟道/吸收塔急冷区 不采用 GGH 的入口烟道干湿交界区和吸收塔入口后急冷区。在该区采用合金 C-22 和 C-276，腐蚀速度大约是 100 ~ 250μm/a，C 级合金和钛是这一区可以采用的较好材料。

对于采用 GGH 的吸收塔入口烟道，由于烟温已降至 80 ~ 110℃。选用材料除 C 级合金外，耐高温玻璃鳞片涂层也是可选材料。

此外，在我国工业锅炉脱硫中常用的钢衬铸石粉水玻璃涂层和花岗岩衬里使用效果良好。

（2）烟囱 烟囱的防腐，一般衬无机材料，如耐酸陶瓷、耐酸混凝土等，但每隔几年就要维修。所以有些采用 C 级合金薄板衬里。国内也有衬 S316L 薄板的湿烟囱。已使用多年。

（3）吸收塔 吸收塔各部位选用金属材料。

对于干湿交界区及急冷区，采用合金 C-276 或 59 合金。有采用整体板、复合板或内衬板的。吸收塔反应罐采用 2mm 合金 625 复合板，允许反应罐浆液 Cl<sup>-</sup> 含量为 40000ppm，40g/L。

为了降低造价，也有在吸收塔喷淋层以上部位，采用 S316L 整体不锈钢或复合板。

（4）烟道 GGH 原烟气出口至吸收塔入口的烟道属于低温硫酸露点腐蚀区，采用金属材料合金 C-276 或 59 合金薄板衬里，吸收塔出口至系统出口净烟气挡板之间烟道，可采用 316L 或 317LM 整体不锈钢板。如果采用更高级的合金，则可用衬薄板工艺。旁路挡板门、净烟气挡板门和烟囱之间的烟道需要交替输送干/湿，高低温烟气，可选用 C 合金和 6Mo 级不锈钢薄板衬里。

（5）FGD 用合金化学成分 FGD 用不锈钢和合金成分见表 11-8。

表 11-8 通常用于 FGD 的合金化学成分

合金分级	钢种	化学成分/(质量分数,%)									
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	其他
2-3Mo 奥氏体不锈钢	316L	≤0.03	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	16.0~18.0	10.0~14.0	2.0~3.0	—	—
	316LM	≤0.03	—	—	—	—	16.5~18.0	11.5~14	2.5~3.0	0.14~0.22	—
4-Mo 奥氏体不锈钢	317M	≤0.03	≤0.70	≤2.00	≤0.045	≤0.030	18.0~20.0	13.0~17.0	4.00~5.00	≤0.10	Cu≤0.75
	317MN	≤0.03	≤0.75	≤2.00	≤0.045	≤0.030	17.0~20.0	13.5~17.5	4.00~5.0	0.10~0.20	Cu≤0.75
	合金 904L	≤0.02	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.035	19.0~23.0	23.0~28.0	4.0~5.0	—	Cu1.0~2.0
22-Cr 双相不锈钢	2205	≤0.03	≤1.0	≤2.00	≤0.03	≤0.02	21.0~23.0	4.5~6.5	2.5~3.5	0.08~0.20	—
G 级合金 <sup>①</sup>	合金 G	≤0.05	≤0.10	1.0~2.0	≤0.04	≤0.03	21.0~23.5	余量	5.5~7.5	—	Fe20,W≤1.0, Nb1.75~2.5 Co≤2.5,Cu1.5~2.5
	合金 G-3	≤0.015	0.40	0.80	—	—	21.0~23.5	44.0	6.0~8.0	—	W≤1.5,Co≤5.0, Cu1.5~2.5 Nb/Ta=0.3,Fe18~21
	合金 G-30	≤0.03	≤1.0	≤2.0	—	—	29.5	余量	5.0	—	W≤2.5,Co≤5.0, Cu1.70,Nb/Ta=0.7, Fe15.0
6-Mo 超级奥氏体不锈钢	AL-6XN <sup>TM</sup> <sup>①</sup> (N08367)	≤0.03	≤1.00	≤2.0	≤0.04	≤0.03	20.0~22.0	23.6~25.5	6.0~7.0	0.18~0.25	Fe 余量,Cu0.5
	254SMO <sup>TM</sup> (S31254)	≤0.02	≤0.80	≤1.00	≤0.03	≤0.01	19.5~20.5	17.5~18.5	6.0~6.5	0.18~0.22	Cu0.5~1.0
	1925 hMo <sup>TM</sup> (N08926/1.4529)	0.02	0.05	1.00	≤0.045	≤0.030	19.0~21.0	24.0~26.0	6.0~7.0	0.10~0.20	Cu0.8~1.5 Fe 余量
	25-Mo6 (N08026)	≤0.03	≤0.05	≤1.00	≤0.030	≤0.030	22.0~26.0	33.0~37.2	5.0~6.70	0.10	Cu2.0~4.0

(续)

合金分级	钢种	化学成分/(质量分数,%)									
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	其他
25 - Cr 双相 不锈钢	255 <sup>TM</sup> (S32550)	≤0.04	≤1.00	≤1.50	≤0.04	≤0.03	24.0 ~ 27.0	4.50 ~ 6.50	2.00 ~ 4.00	0.10 ~ 0.25	Cu1.5 ~ 2.5
	SAF2507 (S32750)	≤0.03	≤0.8	≤1.20	≤0.035	≤0.020	24.0 ~ 26.0	6.00 ~ 8.00	3.00 ~ 5.00	0.24 ~ 0.32	—
625 级合金	合金 625 (N06625/2.4856)	≤0.025	≤0.50	≤0.50	—	—	21.0 ~ 23.0	61.0	8.0 ~ 10.0	—	Al≤0.40 Ti≤0.40 Nb3.65
	合金 H-9M <sup>TM</sup>	≤0.03	≤1.0	≤1.0	—	—	22.0	余量	9.0	—	Cu≤5.0, W2.5 Fe15, Nb/Ta = 0.70
C 级合金	合金 C-276	≤0.02	≤0.05	≤1.0	—	—	14.0 ~ 16.5	余量	15.0 ~ 17.0	—	W3.0 ~ 4.5, Co≤2.5 V≤0.35, Fe4.0 ~ 4.7
	合金 C-22 <sup>TM</sup>	≤0.015	≤0.08	≤0.50	≤0.025	≤0.010	20.0 ~ 22.5	余量	12.5 ~ 14.5	—	W2.5 ~ 3.5, Co≤2.5 V≤0.35, Fe2.0 ~ 6.0
	合金 59 <sup>TM</sup>	≤0.010	≤0.10	—	—	—	22 ~ 24	余量	15 ~ 16.5	—	Co≤0.3, Fe≤1.5 Al0.1 ~ 0.40
	合金 622 <sup>TM</sup>	—	—	—	—	—	20.5	59	14.2	—	Fe2.3, W3.2
	合金 686 <sup>TM</sup>	≤0.008	≤0.008	—	≤0.04	≤0.02	19.0 ~ 23.0	余量 (54.3 ~ 61.9)	15.0 ~ 17.0	—	W3.0 ~ 4.4 Fe≤1 Ti0.02 ~ 0.25
钛	二级钛 (UNS R50400 DIN 3.7035)	≤0.1	余量 Ti							≤0.03	Fe≤0.3 H≤0.015 O≤0.025

注: TM——TRADE μARK。

① 属同一级的。

## 第 12 章 锅炉烟气湿法脱硫系统调试

### 12.1 脱硫系统调试任务与目的

锅炉烟气脱硫系统安装完成后，经总承包方或施工监理单位检查合格后，就可组织系统调试工作。

系统调试任务包括：调试前各系统检查；调试前的准备；仪表及控制系统调校完毕；机电设备单试运行合格。各系统分部调试包括：脱硫剂制备系统启动调试；吸收塔及循环水系统启动调试、脱硫产物排放系统启动调试；鼓风曝气系统调试；吸收液 pH 值控制及添加系统调试；脱硫塔浓度检测及液位控制调试；增压风机性能及烟气系统调试；脱硫连续检测调试；如果有烟气再加热系统和烟气旁路系统的，则还需进行烟气再热系统和旁路系统调试。

脱硫系统调试是脱硫工程建设过程中的重要环节。在调试前检查中可检验施工单位是否严格按照设计图样施工，如果发现问题可及时修改补正。如果调试中发现问题，需要修改设计时，可提交设计单位进行必要的设计修改。如果调试中发现设备有质量问题的可提交设备厂家负责解决。

系统调试就是对脱硫系统工艺技术质量、设计质量、施工安装质量、各种机械设备质量、各种仪器仪表质量的总检验，起到发现问题、及时修改解决问题的作用。是完善和提升脱硫系统综合质量极其有效的措施，也是为了使脱硫装置安全顺利地整套启动并移交生产，并在投产后能安全稳定运行，发挥应有的环保效益。

下面逐项说明调试工作的要求和做法。

### 12.2 系统调试的一般规定

对于火电厂，可以按照 DL/T 5403—2007《火电厂烟气脱硫工程调整试运及质量验收评定规程》进行。对于工业锅炉及热电锅炉脱硫，也可参照 DL/T 5403—2007 的规定进行调试。此外还有以下几条规定：

- 1) 调试中涉及的技术、设备、仪表等调试按国家标准及行业标准、规范、设备技术文件的要求进行。
- 2) 调试工作一般应由脱硫工程总承包单位负责，并组织设计单位、施工单位、设备厂商等协同参加进行。
- 3) 调试可分为单机（设备）试运转、测控仪表调校、分部调试（分系统调试）及整套调试（全部系统总调试）。

4) 脱硫装置整套调试, 72h 满负荷试运后, 达到合同规定的技术、经济、环保指标, 才能移交试生产运行。

5) 调试工作的职责:

① 施工单位: 负责整个调试阶段设备与系统的维护、检修和消除缺陷, 负责调试阶段临时设施及安全隔离设施的制作和系统恢复等工作。

② 调试单位: 总承包方或总承包方委托的有相应调试资质的工程技术公司。负责做好调试的所有准备工作。编写调试大纲、调试范围、调试质量目标、安全措施组织分工、调试项目(内容)程序、计划等; 编制单机、分系统调试和整套调试方案, 进行技术交底工作。

③ 建设单位: 明确各有关单位的工作关系, 建立各项制度, 协助调试指挥部做好调试的全面组织协调工作。

④ 生产单位(火电站或锅炉车间): 负责完成各项生产准备工作; 根据调试方案, 在调试单位指导下负责运行操作。

⑤ 设计单位: 负责配合整个调试工作, 进行必要的设计修改。

⑥ 设备厂家: 负责配合调试工作, 消除设备质量问题, 提供设备技术支持。

12.3 调试运行组织工作

由调试单位(代表总承包单位)负责组织施工单位、生产单位、设计院、主要脱硫设备制造厂组成调试工作组。领导组织全部调试工作。

1. 调试工作组织指挥系统(见图 12-1)

总指挥由调试单位选派, 调试组由调试单位选派工程技术人员组成, 包括正、副组长, 成员有脱硫工艺人员、电气自控人员、设备技术人员。为了便于与锅炉车间协调, 由建设单位指派锅炉车间有关领导参加调试组, 任副组长。

2. 调试前的检查

脱硫各个系统在安装结束之后, 调试之前, 应进行以下工作:

1) 各个系统的安装质量检查: 包

括烟气系统、水管系统、水泵、风机, 脱硫塔(吸收塔), 脱硫剂制备系统设备, 脱硫物处理系统设备(如旋流器, 过滤机械等), 电气设备、仪表及控制系统(仪器仪表安装位置和信号传输方式, 见表 12-1, 部分测点位置如图 12-2 所示), 控制操作室设施, 增压风机与烟道系统等。

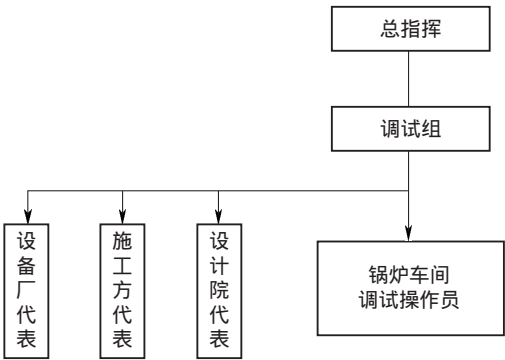


图 12-1 调试组织系统



表 12-1 仪器仪表安装位置和信号传输方式

测量点位置		传感器编号	传感器类型	读数位置
1. 调试脱硫系统,烟气系统需要显示或远传到控制室的参数				
烟 气 温 度	总烟道出口烟温 $T_1$	T101	一体化温度变送器	控制室电脑
	文丘里塔出口烟温 $T_2$	T102	一体化温度变送器	控制室电脑
		T <sub>d</sub> 102	双金属温度计(已有孔,需安装)	就地,文丘里塔平台
	脱硫塔出口烟温 $T_3$	T <sub>d</sub> 103	双金属温度计	就地,脱硫塔出口操作平台
		T103	一体化温度变送器	控制室电脑
	引风机出口烟温 $T_4$	T104	一体化温度变送器	控制室电脑
		T <sub>d</sub> 104	双金属温度计	就地,引风机出口
烟 气 压 力	总烟道出口压力 $p_1$	P101	负压变送器	控制室电脑
		P <sub>d</sub> 101	就地显示负压表(需开孔安装)	就地,总烟道出口处
	文丘里塔阻力 $p_2$	P102	差压变送器	控制室电脑
2. 水系统需要就地显示或远传到控制室的参数				
脱硫塔内循环液 pH 值		AIT101	pH 计	控制室电脑
脱硫塔内循环液电导率值		CIT101	电导率计	控制室电脑
脱硫塔内液位		LIT105	液位变送器	控制室电脑
脱硫塔循环泵出口压力		PII07(A 泵) PII08(B 泵) PII09(C 泵)	普通压力表	就地
脱硫塔喷淋进水管压力		PII10(A 管) PII11(B 管) PII12(C 管)	电接点压力表	开关量传至控制室
文丘里循环泵出口压力		PII13(A 泵) PII14(B 泵)	普通压力表	就地
文丘里循环泵出口母管压力		PS115	压力变送器	控制室电脑
文丘里进水管压力		PII16(A 管) PII17(B 管) PII18(C 管)	普通压力表	就地
脱硫塔除雾器补水压力		PII19	电接点压力表	就地和远传开关量
脱硫塔补水压力		PS120	电接点压力表	就地和远传开关量
文丘里紧急补水压力		PS121	电接点压力表	就地和远传开关量

(续)

测量点位置	传感器编号	传感器类型	读数位置
3. 脱硫液制备系统需要就地显示或远传到控制室的参数			
氧化镁粉仓高料位	LSH101	阻旋式料位计	开关量传至控制室电脑
氧化镁粉仓低料位	LSH102	阻旋式料位计	开关量传至控制室电脑
熟化罐液位	LIT103	超声波液位计	就地和控制室电脑
浆液罐液位	LIT104	超声波液位计	就地和控制室电脑
熟化罐浆液温度	TI105	双金属温度计	就地
浆液罐浆液温度	TI106	双金属温度计	就地
熟化罐补充热水温度	PII07	双金属温度计(需开孔安装)	就地
熟化罐补充热水压力	PII01	电接点压力表	就地和控制室电脑
输送泵出口压力	PII02(A 泵) PII03(B 泵)	普通压力表	就地
供给泵出口压力	PII04(A 泵) PII05(B 泵)	普通压力表	就地
脱硫液供给母管压力	PII06	电接点压力表	就地和控制室电脑

4. 调试脱硫系统,在控制室需要设置手动调控的设备及阀门:

- 1) 脱硫塔循环泵的起、停。
  - 2) 文丘里循环泵的起、停。
  - 3) 脱硫液输送泵的起、停。
  - 4) 脱硫液供给泵的起、停。
  - 5) 曝气风机的起、停。
- 其余用电设备都应在控制室通过程序控制其起、停。

5. 调试脱硫系统,在控制室需要控制的阀门:

- 1) 反冲洗水电磁阀 SV101 的开、关。
- 2) 文丘里紧急补水电磁阀 SV102 的开、关。
- 3) 脱硫塔排液电动调节阀 CV101 的开、关。
- 4) 脱硫液供给电动调节阀 AV101 的开、关。
- 5) 脱硫塔补水电动调节阀 LV105 的开、关。
- 6) 熟化罐补水电磁阀 FV101 的开、关。
- 7) 烟气进出口烟道电动闸板的开、关及开关程度控制。

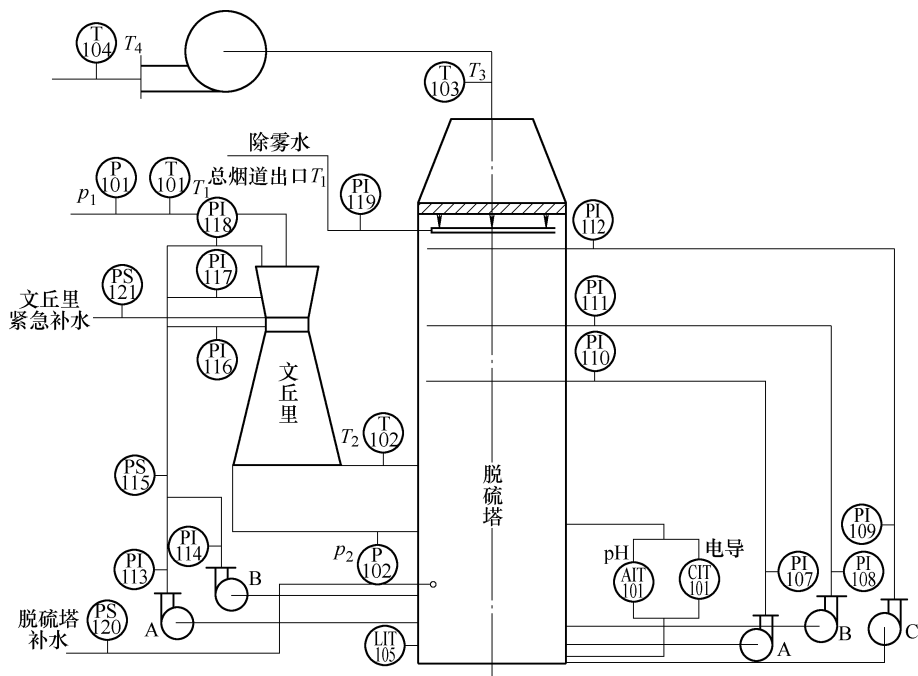


图 12-2 部分测点位置

- 2) 检查所有连接件的紧固状态，特别是所有设备的基础固定和密封固定。
- 3) 检查所有安全防护设施。
- 4) 检查确认所有气、液管道内已冲洗干净，无杂物留在管中。
- 5) 脱硫系统的场地清理，拆除所有临时性构筑物。
- 6) 检查所有烟气、水系统、压缩空气、蒸汽、热水等管道的气密性，应无泄漏。
- 7) 检查所有阀门，转动和运行机械的位置及密封、润滑、冷却都按设备要求处于工作状态，要特别注意阀门和水泵或风机的正确转动方向。
- 8) 检查所有仪表、调节阀门的控制设定都处于启动状态，要特别注意所有紧急开启的电磁阀处于备用状态。
- 9) 检查所有用电设备的电源供应和相应操作装置及相关信号，均处于启动状态。
- 10) 启动前的阀门位置：
  - ① 全关的阀门有：挡板—料斗闸板，所有放水阀、副产品排出阀、进出口烟道挡板、循环泵出口阀门、旁路烟道挡板。
  - ② 全开的阀门有：压力表前阀门、循环泵进口阀门、浆液制备系统回流旁路阀。
  - ③ 部分开启阀门有：吸收塔喷嘴前阀门（开 3/4）以及补水阀和反冲洗阀（开 1/2）
- 11) 机电设备单机试运行应合格，见表 12-2。

表 12-2 机电设备调校一览表

序号	编号	设备名称	试运行工况		实际工况		单机试运行情况		调校人员	调校时间
			介质	温度	介质	温度	出口压力	运行状态		
1	M100	斗式提升机								
2	M101	振动料斗			MgO	常温				
3	M102	星型给料机			MgO	常温				
4	M103	搅拌槽、 搅拌器			Mg(OH) <sub>2</sub> 浆液	60℃				
5	M104 M105	脱硫液 输送泵			Mg(OH) <sub>2</sub> 浆液	60℃				
6	M106	浆液罐 搅拌器			Mg(OH) <sub>2</sub> 浆液	60℃				
7	M107 M108	脱硫液 供给泵			Mg(OH) <sub>2</sub> 浆液	60℃				
8	M110 M111 M112	脱硫塔 循环泵			循环浆液	50℃				
9	M115 M116	文丘里 循环泵			循环浆液	50℃				
10	M117	高温烟 气闸板			高温烟气	500℃				
11	M118	低温烟 气闸板			低温烟气	75℃				
12	M120	引风机			低温烟气	75℃				
13	M130 M131	曝气机			MgSO <sub>3</sub> MgSO <sub>4</sub> 液					

12) 仪表调校全部完成，见表 12-3。

表 12-3 仪表调校一览表

序号	编号	类型	动作要求	调校结果	调校人员	调校时间
1	LSH101	高报	料位加至高位 (LSH101 安装高度) 时: ①现场灯光报警提示; ②操作人员停止加料, 手动关 M100			
2	LSH102	低报	料位降至低位 (LSH102 安装高度) 时: ①控制室和现场报警提示; ②操作人员开始加料, 手动开 M100			

(续)

序号	编号	类型	动作要求	调校 结果	调校 人员	调校 时间
3	LIT103	联锁、 报警液 位显示	当搅拌槽液位升至 80% (至溢流孔为 100%) 时,报 警;液位升至 85% 时,FV101 关闭 当搅拌槽液位降至 25% 时,报警;液位降至 20% 时: ①FV101 开;②M101 和 M102 启动,运行一段时间停 止(时间事先设定);③M104 或 M105 停			
4	LIT104	联锁、 报警液 位显示	当浆液罐液位升至 80% (至溢流孔为 100%) 时,报 警;液位升至 85% 时,M104 或 M105 停 当浆液罐液位降至 25% 时,报警;液位降至 20% 时, M104 或 M105 开			
5	TI105	就地显示	指示搅拌槽浆液温度			
6	TI106	就地显示	指示浆液罐浆液温度			
7	TI107 (新增)	就地显示	指示补充热水温度,不能超过 80℃,否则人工关闭 补充热水管截止阀,人工调整水温			
8	PI101	就地显示 和报警	压力低于 0.2MPa 时,报警提示,操作人员检查补充 热水供给情况			
9	PI102 和 PI103	就地显示	指示 M104 和 M105 运转是否正常			
10	PI104 和 PI105	就地显示	指示 M107 和 M108 运转是否正常			
11	PI106	就地显示 和报警	压力低于 0.4MPa 时,报警提示,操作人员检查 M107 和 M108			
12	AIT101	调节	当 pH 值低于 6.5 时,AV101 启动,当 pH 值高于 9.0 时,AV101 关闭			
13	CIT101	调节	当电导率值低于设定值时 CV101 关闭,当电导率值 高于设定值时 CV101 启动			
14	LIT105	调节	液位为 0 时,设为 0,液位到溢流位置时设为 100%; 当液位值低于 20% 时 LV105 启动,当液位值高于 95% 时 LV105 关闭			
15	PI107、PI108 和 PI109	就地显示	指示 M110、M111 和 M112 运转是否正常			
16	PI110、PI111 和 PI112	就地显示 和报警	指示 M110、M111 和 M112 运转是否正常,信号开关 量传至控制室, $p < 0.2\text{MPa}$ 时,报警,操作人员检查泵			
17	PI113 和 PI114	就地显示	指示 M115 或 M116 运转是否正常			

(续)

序号	编号	类型	动作要求	调校 结果	调校 人员	调校 时间
18	PS115	报警、控制	指示 M115 或 M116 运转是否正常,信号模拟量传至控制室, $p < 0.2\text{MPa}$ 时:①灯光报警,②备用泵自启动;若 $p$ 还是低于 $0.2\text{MPa}$ ,则 SV102 启动,操作人员检查故障			
19	PII16、PII17 和 PII18	就地显示	指示文丘里进水管(A、B 和 C 管)压力是否正常			
20	PII19	就地显示 和报警	信号开关量 $p < 0.35\text{MPa}$ 时,报警,操作人员检查除雾器冲洗水供给			
21	PII20	就地显示 和报警	信号开关量 $p < 0.1\text{MPa}$ 时,报警,操作人员检查脱硫塔补水供给			
22	PII21	就地显示 和报警	信号开关量 $p < 0.35\text{MPa}$ 时,灯光报警,操作人员检查文丘里紧急补水供给			
23	PT124	控制	厂方应测量总烟道压力值 $p_1$ ,当烟气完全切换至脱硫系统时,对应引风机的电动机转速为 $n_1$ ,这两个值输入电脑,当总烟道压力值出现波动时,通过变频器调整电动机转速,从而保证窑压的稳定性,若窑压波动绝对值大于 $20\text{Pa}$ ,灯光报警			
24	PDT120	显示	指示文丘里塔阻力,设计值为 $1500\text{Pa}$ ,若阻力超过 $1700\text{Pa}$ ,则报警提示,操作人员调整文丘里喉部开度			
25	TT101	显示	指示总烟道出口烟气温度			
26	TT102	显示、控制	指示文丘里塔出口烟气温度,当高于 $65^\circ\text{C}$ 时,灯光报警,当高于 $75^\circ\text{C}$ 时,SV102 启动,若 10min 后仍报警或温度超过 $90^\circ\text{C}$ ,则操作人员检查故障,人工切换烟道闸板,使烟气不再通过脱硫系统			
27	TT108	就地显示	指示文丘里塔出口烟气温度,验证 TT102 是否失效或损坏			
28	TT1041	显示	指示脱硫塔出口烟气温度			
29	TT107	显示、控制	指示引风机出口烟气温度,当低于 $75^\circ\text{C}$ 时,混烟闸板启动,逐渐开启,直到 TT107 高于等于 $75^\circ\text{C}$			
30	TT103	就地显示	指示引风机出口烟气温度,验证 TT107 是否失效或损坏			

注: 1. 在本表中未提到的用电设备,在正常工况下为连续运行,如熟化罐搅拌机、浆液罐搅拌机、脱硫液供给泵、脱硫塔循环泵、文丘里循环泵和曝气风机等。

2. 脱硫液输送泵两台、脱硫液供给泵两台、文丘里循环泵均为一用一备,当一台设备出现故障时,另一台能自动切换。

3. 所有电动调节阀开度都调为最大,试运行时再根据实际情况作调整。

## 12.4 系统调试

### 1. 调试前准备

- 1) 所有电气设备的供电电源处于“接通 SON”的状态,设备处于备用状态。
- 2) 控制用压缩空气保持运行压力,并送到所有执行机构。
- 3) 报警信号处于备用状态。
- 4) 所有控制回路处于“手动”状态。
- 5) 储存 7 天用量的脱硫剂,供调试用。一定按设计要求的质量采购脱硫剂。

### 2. 脱硫浆液制备系统调试

1) 把脱硫剂添加至脱硫剂储仓。汽车运送 MgO 粉至斗式提升机受料斗,开动翻斗,将 MgO 粉溜到受料斗,由给料机送到斗式提升机,小斗提到储仓进料口翻转下料进入储仓。

- 2) 向搅拌槽加水至 3m (或 80% 的液位高度)。
- 3) 启动一台搅拌槽浆液泵,把浆液送出再回流进行循环。
- 4) 启动搅拌槽搅拌器。
- 5) 把搅拌槽液位控制和保护调到自动位置。
- 6) 用加料器向搅拌槽加定量氧化镁,配制成一定浓度的浆液。
- 7) 注意监测搅拌槽浓度、温度变化。

8) 向浆液储存槽输送浆液,使浆液储槽的液位达到 2m (或 60% 的液位高度),启动搅拌器和一台浆液泵,把浆液输送出去,经回流管回到储槽进行循环。

9) 搅拌槽从新配制 5% 浓度的氢氧化镁浆液,液位到 80% 的槽高度。搅拌槽浆液泵把浆液回流至搅拌槽。搅拌器连续不停地搅拌,以防止浆液产生沉淀。脱硫剂制备系统处于待用状态。

### 3. 脱硫塔调试

1) 关闭所有排水阀,开启向脱硫塔补水的阀门,直至脱硫塔内水位达到 90% 的液位高度。

2) 检查和试验脱硫塔液位自动调节系统,直至控制回路正常工作。

3) 开启所有通向脱硫塔喷嘴的阀门。

4) 开启脱硫塔 No. 1 循环泵 (从低层到高层编号为 No 1, No 2, No 3), 逐渐打开泵的排出阀,注意观察脱硫塔液位,适当向塔内补水,维持 80% 的液位高度。

5) 调节泵出口循环阀和喷嘴前阀门,稳定喷嘴前压力。

6) 然后按前述步骤依次启动脱硫塔 No. 2 循环泵和 No. 3 循环泵。

7) 稳定 3 台循环泵的运行压力和流量,保持脱硫塔液位正常和喷嘴前压力稳定。

8) 曝气池、排污池具备接受上游来料的状态。

9) 试验低水位保护和控制回路。

10) 脱硫系统各温度、压差、压力、液位控制和联锁保护投入监控状态。

11) 缓慢开启脱硫塔入口烟气挡板, 注意锅炉炉膛负压变化。

12) 启动增压风机逐渐缓慢开启脱硫塔烟气出口挡板。关闭原烟通向烟囱挡板, 密切监控脱硫系统各处温度、压力变化, 包括: 脱硫塔进口、脱硫塔急冷降温区温度, 脱硫塔出口温度, 脱硫塔进口、出口压力及压差。根据脱硫塔内衬防腐材料安全使用温度, 调控循环泵阀门, 使急冷区内温度满足使用温度要求。如果按脱硫循环浆液流量达到设计液气比值, 脱硫塔入口温度符合设计温度, 脱硫塔喷雾喷嘴组工作正常, 压力稳定, 脱硫塔急冷区温度、出口温度应在正常范围。如果脱硫塔出口烟气温度没达到饱和状态温度 (50℃左右)、急冷区温度超过脱硫塔防腐内衬安全使用温度, 按自控设计要求, 会自动开启烟道旁通, 保护脱硫塔防腐内衬的安全。查找超温原因解决故障后, 再把烟气切换到脱硫塔。直到脱硫塔急冷区温度和出口温度正常为止。

13) 脱硫系统进入正常运行状态后, 开启除雾器反冲洗阀, 把除雾器反冲洗自动控制投入运行状态。

14) 脱硫系统工作稳定后, 包括烟气流量、温度、压力、脱硫塔液位, 循环泵压力、流量正常等。开启脱硫剂浆液泵进口阀门及出口阀门。

15) 开启 pH 值及脱硫液电导率测量回路, 把脱硫浆液 pH 监测及自动添加控制回路投入运行。把脱硫浆液电导率测量及控制浆液排放投入运行。当 pH 值小于 6.5 时, 打开脱硫浆液调节系统, 添加脱硫浆液; 当 pH 值等于 6.5 时, 自动关闭调节阀。当脱硫浆液电导率超过设计值时, 自动开启排浆电动调节阀, 排浆同时自动补充工业用水, 脱硫浆液电导率回到设计值时停止排浆。

16) 如果设计强制氧化的脱硫系统。启动曝气鼓风机, 调节鼓风机到设计鼓风量。稳定运行 10min 后, 取样分析亚硫酸根含量, 以确定曝气氧化完成程度, 亚硫酸根浓度接近零为好。如果设计了废水排放曝气池的项目, 则可以同时目测曝气冒泡是否均匀, 全池是否沸腾。

17) 检查、确认所有调节回路、监测仪表参数、阀门位置、电气参数工作是否正常, 记录稳定状态的参数。

18) 用 SO<sub>2</sub> 检测仪表或 SO<sub>2</sub> 连续检测仪, 测量脱硫效率是否达到设计值。如果达到设计值, 可以稳定运行 24h 后停机。

#### 4. 脱硫系统停机

1) 关闭下料闸板, 停止脱硫剂加料, 保持搅拌槽和浆液储存槽 (罐) 自循环运行。

2) 开启主烟道旁通挡板。

3) 停止增压风机运行, 关闭脱硫塔进口、出口烟气挡板。

4) 关闭脱硫浆液输出阀, 可让浆液泵通过浆液回流管自循环。浆液槽搅拌器继续运行。

5) 关闭除雾器反冲洗阀, 关闭脱硫塔排浆液阀。

6) 关闭补水阀。



7) 若长时间停机或检查所需,应排出脱硫塔内存液,切断循环泵电源。由于工业及供热锅炉的脱硫工艺多数是抛弃法,所以,不再作脱硫副产品的系统调试。

## 12.5 脱硫系统运行与性能测试

上面已经对脱硫各个系统进行启动调试,已经能按脱硫工艺设计参数的要求稳定运行。下一步按照 HJ 462—2009《工业锅炉及炉窑湿法烟气脱硫工程技术规范》中 7.2.3 的规定操作:脱硫装置热态调试结束后,应进行 72h 连续试运行验收测试。编写性能试验报告,性能试验报告的主要参数应包括:脱硫效率、工业用水消耗量,脱硫系统压力降,脱硫剂消耗指标、脱硫电能消耗量。

在正式申请环保局验收测试前,总承包方应自己进行性能测试,检验能否达到验收要求,并编写脱硫装置试验报告。

### 1. 系统运行

按 12.4 中的步骤启动脱硫剂浆液制备系统,补足脱硫剂浆液到浆液储槽自控设定的液位高度。按 12.4 中 3. 启动脱硫塔,各系统工作状态正常稳定。锅炉负荷一般应在 90% 以上,并稳定。

### 2. 测定脱硫效率

脱硫各个系统工作正常,自控仪表测定正常,自控回路控制正常脱硫烟气进出口温度、压力正常,脱硫浆液消耗量正常、脱硫自动排浆正常,脱硫塔补水及液位控制正常、锅炉负荷稳定在 90% 以上的一个定值,通过脱硫装置连续监测系统,可以检测并使脱硫系统的烟气进、出脱硫塔的各项数据显示在仪表屏幕上。包括烟气流量、 $\text{SO}_2$  浓度及  $\text{O}_2$ 、 $\text{CO}_2$  等。这样就可以知道脱硫效率。此外,可以按照脱硫装置验收规范规定的化学分析方法同步取样分析,使测试数据更可信,可靠和符合规范。

### 3. 脱硫过程工业用水耗量

本书在第 4 章中介绍脱硫工艺时,讲过脱硫水平衡概念和计算法,在每种脱硫工艺设计方案示例中进行具体的数据计算。在性能试验时,每个用水点应安装工业用水流量计,一般清水可用超声波流量计,污水及浆液可用电磁流量计测定记录。因为实际运行工况与设计工况之间总会有波动,还是应以实际测定数据为准。具体测试水量如下:

- ① 脱硫塔补水量,  $W_{\text{bu}}$  (kg/h);
- ② 除雾器冲洗水量,  $W_{\text{HM}}$  (kg/h);
- ③ 脱硫剂制备用水量,  $W_{\text{HMG}}$  (kg/h);
- ④ 脱硫塔排出水量,  $W_{\text{HP}}$  (kg/h);
- ⑤ 脱硫烟气带入水量,  $W_{\text{Hy}}$  (kg/h);
- ⑥ 脱硫饱和和烟气带出水量,  $W_{\text{HW}}$  (kg/h)。

① ~ ④ 为仪表记录数据, ⑤、⑥ 根据烟气流量  $Q_y$ , 烟气密度  $\rho_y$ 、烟气温度、湿度计算。

$W_{\text{HMg}}$  是脱硫浆液中的水量, 不是浆液量, 要根据浆液浓度 ( $n/\text{Mg}$ ) 和浆液量  $W_{\text{JMg}}$  计算出, 即

$$W_{\text{HMg}} = \frac{W_{\text{JMg}} - n_{\text{Mg}} W_{\text{JMg}}}{n_{\text{Mg}}}$$

$$W_{\text{Hy}} = Q_y \times \rho_j \times x_{\text{H}}$$

式中  $Q_y$ ——脱硫塔进口烟气流, ( $\text{m}^3/\text{h}$ );

$\rho_j$ ——进口烟气密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$x_{\text{H}}$ ——进口烟气含湿量 ( $\text{kg}/\text{kg}$ ), 根据煤质分析计算或提供资料。

$$W_{\text{HW}} = Q_{\text{ch}} \times \rho_{\text{ch}} \times x_{\text{tw}}$$

式中  $Q_{\text{ch}}$ ——脱硫塔出口烟气流 ( $\text{m}^3/\text{h}$ );

$\rho_{\text{ch}}$ ——出口烟气密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$x_{\text{tw}}$ ——饱和状态烟气含湿量 ( $\text{kg}/\text{kg}$ ) (查表 13-14)。

根据①~⑥的数据, 就可统计出脱硫塔的水平衡量  $W_{\text{ZON}}$ 。

$$W_{\text{ZON}} = W_{\text{BU}} + W_{\text{HM}} + W_{\text{HMg}} + W_{\text{HP}} + W_{\text{Hy}} + W_{\text{HW}}$$

#### 4. 脱硫系统额定工况电能消耗 $E_{\text{te}}$

如果脱硫系统单独供电, 则可以安装电功率表, 计量统计出数据。如果不能单独计量, 只能分块计量, 应包括下列用电量:

① 循环泵电耗  $E_{\text{xun}}$  (kW);

② 浆液制备粉料输送, 搅拌器及浆液泵电耗  $E_{\text{jye}}$  (kW);

③ 曝气鼓风机电耗  $E_{\text{Ba}}$  (kW);

④ 排水排浆泵电耗,  $E_{\text{Pa}}$  (kW);

⑤ 废水处理系统电耗  $E_{\text{FEI}}$  (kW)。

完成以上调试及性能测试且合格后, 即可按上述性能测试数据, 以及脱硫系统运行工况和原始数据记录, 编写成测试报告, 申报环保局进行环境保护工程验收和移交脱硫工程给建设单位运行, 并进入工程竣工验收程序。

第 13 章 常用设计资料

13.1 锅炉燃煤资料及燃烧数据

1. 锅炉燃煤资料

见表 13-1、表 13-2。

表 13-1 我国主要动力煤的煤质数据

煤种	元素成分/%							发热量 $Q_{ar,net,p}$ /(kJ/kg)	空气干 燥水分 $M_{ad}/\%$	干燥无 灰基挥 发物 $V_{daf}/\%$	可磨度		灰熔点/℃			备 注
	$M_{ar}$	$A_{ar}$	$C_{ar}$	$H_{ar}$	$O_{ar}$	$N_{ar}$	$S_{ar}$				BTN $K_{km}$	哈氏 HCl	DT	ST	FT	
京西无烟煤	5.0	22.8	67.9	1.7	2.0	0.4	0.2	23040	0.8	6.0	1.1		1260	1370	1430	
阳泉无烟煤	5.0	19.0	68.9	2.9	2.4	1.0	0.8	26400	1.0	9.0	1.0		1400	1500	>1500	
焦作无烟煤	7.0	21.3	66.1	2.2	2.0	1.0	0.4	22880	1.0	7.0	1.2		1310	1370	1420	
萍乡无烟煤	7.0	25.1	60.4	3.3	2.5	1.0	0.7	22625	1.0	10.0			>1500			
金竹山无烟煤	7.0	22.3	65.4	2.3	1.8	0.6	0.6	22210	2.0	8.0	1.7		>1500			
西山贫煤	6.0	19.7	67.6	2.7	1.8	0.9	1.3	24720	1.0	15.0	1.6		1190	1340	1450	
淄博贫煤	4.3	22.6	64.8	3.1	1.6	1.0	2.6	13280	0.8	13.0	1.5		1410	1430	1440	
芙蓉贫煤	6.5	22.8	61.9	2.4	1.6	1.0	3.8	13090	0.7	13.3			1220	1300	1390	
抚顺烟煤	13.0	14.8	56.9	4.4	9.1	1.2	0.6	22415	3.5	46.0	1.4		1190	>1500		
阜新烟煤	15.0	23.0	48.3	3.3	8.6	0.8	1.0	18645	3.1	41.0	1.6		1230	1280	1340	
开滦烟煤	1.2	28.1	58.2	4.3	6.3	1.1	0.8	22825		24.0	1.46	75.37	>1500			
大同烟煤	3.0	11.7	70.8	4.5	7.1	0.7	2.2	27800		24.7	1.05	49.5	1350	1370	1400	
新汶烟煤	6.0	18.8	61.0	4.1	6.8	1.4	1.9	25140	2.0	40.0	1.4		1200	>1500		
徐州烟煤	10.0	13.5	63.0	4.1	6.7	1.5	1.2	24720	2.0	37.0	1.6		1100	1380	1450	
淮南烟煤	6.0	19.7	60.8	4.0	7.7	1.1	0.7	24300	2.3	38.0	1.3		1500	>1500		
义马烟煤	17.0	16.6	49.6	3.2	11.6	0.7	1.3	19690	10.0	41.0	1.4		1230	1250	1300	
平顶山烟煤	7.0	25.6	58.2	3.7	4.1	0.9	0.5	22625	1.4	24.6	1.5		>1500			
开滦洗中煤	8.0	35.0	46.5	3.1	5.8	0.7	0.9	17180	0.9	35.0	1.2		>1500			
龙凤洗中煤	15.0	29.8	42.9	3.4	7.5	0.9	0.5	16760	2.0	47.0			1380	1400	>1400	
鹤岗洗中煤	11.0	34.7	44.5	3.0	5.9	0.7	0.2	17390	1.6	37.0	1.3		1290	1430	1480	
元宝山褐煤	24.0	21.3	39.3	2.7	11.2	0.6	0.9	14580	10.0	44.0	1.3		1150	1300	1360	
丰广褐煤	22.0	25.7	35.2	3.2	12.6	1.1	0.2	13410	8.5	55.0	1.2		1130	1380	1420	

表 13-2 我国部分煤种的煤质数据

煤种	产地	收到基水分 $W_{ar}/\%$	干燥基灰分 $A_d/\%$	干燥无灰基元素分析					收到基低位发热量 $Q_{dw}$ /(kJ/kg)	干燥无灰基挥发分 $V_{daf}/\%$	空气干燥基水分 $W_{ad}/\%$
				碳 $C_{daf}/\%$	氢 $H_{daf}/\%$	氧 $O_{daf}/\%$	氮 $N_{daf}/\%$	硫 $S_{daf}/\%$			
褐煤	内蒙古扎赉诺尔	35.42	15.2	73.0	4.85	20.3	0.89	0.96	14 038	43.0	6.24
	辽宁平庄	24.0	28.0	72.0	4.9	20.4	1.0	1.7	14 570	44.0	10.0
	云南皂角矿	45.0	24.91	70.02	5.91	20.94	1.82	1.31	10 312	56.11	13.47
烟煤	河南观音堂	3.0	26.0	87.0	5.5	5.0	1.5	1.0	24 702	20.0	1.0
	广西合山(劣烟)	4.93	49.2	77.6	4.5	6.9	1.7	9.3	14 150	22.07	—
无烟煤	湖南金竹山	7.5	24.0	92.5	3.6	2.0	0.9	1.0	22 190	0.7	2.0
洗中煤	安徽淮北	9.2	43.0	79.7	6.69	10.92	1.92	0.77	16 806	25.0	1.62
	黑龙江鸡西	7.0	45.0	87.2	5.2	1.2	1.2	0.5	17 166	24.0	0.8

2. 燃料燃烧

(1) 燃料燃烧数据 (见表 13-3)

表 13-3 煤及重油的燃烧数据

燃料名称	燃料发热量 $Q_{ar,net}/(kJ/kg)$	当空气过剩系统 $n=1$ 时的燃烧计算数据				
		需用空气量/ (Nm <sup>3</sup> /kg)	产生燃气/ (Nm <sup>3</sup> /kg)	燃气重量/ (kg/Nm <sup>3</sup> )	CO <sub>2</sub> /%	H <sub>2</sub> O/%
扎赉诺尔褐煤	19850	5.12	5.78	1.32	16	14
鹤岗烟煤	25368	6.67	7.02	1.37	17	7.5
淮南烟煤	24970	6.66	7.06	1.36	17	8
抚顺烟煤	27809	7.21	7.55	1.36	17.5	7.2
大同烟煤	29684	7.98	8.32	1.37	17	7
阳泉烟煤	27784	7.32	7.66	1.39	18	6
重油	39649	10.44	11.05	1.31	11	15

注： $Q_{ar,net}$ 是指煤的收到基低位发热量。

(2) 各种炉型和燃料的机械不完全燃烧损失 (见表 13-4)

表 13-4 各种炉型和燃料的机械不完全燃烧损失

炉 型	燃 料 种 类	机械不完全 燃烧损失/%	炉 型	燃 料 种 类	机械不完全 燃烧损失/%
链条炉	褐煤	5 ~ 10	抛煤机链条炉	褐煤	6 ~ 9
	不结焦烟煤	6 ~ 8		烟煤	6 ~ 7
	弱结焦烟煤	5 ~ 6			
	块状无烟煤	4 ~ 10	煤粉炉		1 ~ 4
	粉状无烟煤	6 ~ 12	振动炉排		12 ~ 14
抛煤机不移动 炉算动	褐煤	6 ~ 11	往复炉排		3 ~ 7
	烟煤	6 ~ 7			
	无烟粉煤	10 ~ 18			

(3) 各种锅炉产生 1t/h 蒸汽所需要的空气量和排烟量 (见表 13-5)

表 13-5 各种锅炉产生 1t/h 蒸汽需要的空气量和排烟量

炉 型	过剩空气系数		送风量 (20℃)/(m <sup>3</sup> /h)	在下列排烟温度下的烟气量/(m <sup>3</sup> /h)			
	炉膛 $a_1$	排烟 $a_{py}$		150℃	200℃	250℃	300℃
层燃锅炉	1.30 ~ 1.40	1.6	1400	2600	2910	3220	3520
沸腾炉	1.05 ~ 1.10	1.6	1200	2600	2910	3220	3520
煤粉炉	1.20 ~ 1.25	1.6	1100	2400	2680	2970	3250
燃油 锅炉 燃气	1.16 ~ 1.20	1.45	1100	2300	2570	2850	3120

(4) 烟道、风道和烟囱出口推荐流速 (见表 13-6)

表 13-6 烟道、风道和烟囱出口推荐流速 (m/s)

名称	冷风道			烟道或热风道		自然通风烟囱		机械通风烟囱	
	自然通风	吸入段	压出段	自然通风	机械通风	正常流速	允许最小 流速	正常流速	允许最小 流速
砖 砌 混凝土 烟道	3 ~ 5	6 ~ 8	8 ~ 10	3 ~ 5	6 ~ 8	6 ~ 8	2.5 ~ 3	10 ~ 20	4 ~ 5
金属烟道		8 ~ 12	10 ~ 15	8 ~ 10	10 ~ 15		2.5 ~ 3		4 ~ 5

(5) 燃烧 1t 煤炭排放的污染物量见表 13-7

表 13-7 燃烧 1t 煤炭排放的污染物量 (kg/t)

污 染 物	炉 型		
	电站锅炉	工业锅炉	采暖炉及家用炉
一氧化碳 (CO)	0.23	1.36	22.7
碳氢化合物 (C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> )	0.091	0.45	4.5
氮氧化物 (以 NO <sub>2</sub> 计)	9.08	9.08	3.62
二氧化硫 (SO <sub>2</sub> )	16.00		

注：本表仅用于估算。

13.2 蒸汽及热水、烟气的热力性质

1. 蒸汽的热力性质 (见表 13-8、表 13-9)

表 13-8 饱和蒸汽热力性质

绝对压力 <i>p</i> /MPa	温度 <i>t</i> /℃	质量体积/(m <sup>3</sup> /kg)		焓/(kJ/kg)		汽化潜热 <i>μ</i> /(kJ/kg)
		水比容 <i>v</i> '	蒸汽比容 <i>v</i> ''	水焓 <i>h</i> '	蒸汽焓 <i>h</i> ''	
0.001	6.983	0.0010001	129.20	29.34	2514.4	2485.0
0.005	32.898	0.0010052	28.19	137.77	2561.6	2423.8
0.010	45.833	0.0010102	14.67	191.83	2584.8	2392.9
0.015	53.997	0.0010140	10.02	225.97	2599.2	2373.2
0.020	60.086	0.0010172	7.65	251.45	2609.9	2358.4
0.025	64.992	0.0010199	6.204	271.99	2618.3	2346.4
0.030	69.124	0.0010223	5.229	289.30	2625.4	2336.1
0.035	72.702	0.0010245	4.529	304.30	2631.5	2327.2
0.040	75.886	0.0010265	3.993	317.65	2636.9	2319.2
0.045	78.743	0.0010284	3.576	329.64	2641.7	2312.0
0.05	81.345	0.0010301	3.240	340.56	2646.0	2305.4
0.06	85.954	0.0010333	2.732	359.93	2653.6	2293.6
0.07	89.959	0.0010361	2.365	376.77	2660.1	2283.3
0.08	93.512	0.0010387	2.087	391.72	2665.8	2274.0
0.09	96.713	0.0010412	1.869	405.21	2670.9	2265.6
0.10	99.632	0.0010434	1.694	417.51	2675.4	2257.9
0.12	104.81	0.0010476	1.428	439.36	2633.4	2244.1
0.14	109.31	0.0010513	1.236	458.42	2690.3	2231.9
0.16	113.32	0.0010547	1.091	475.38	2696.2	2220.9
0.18	116.93	0.0010579	0.9772	490.70	2701.5	2210.8
0.20	120.23	0.0010608	0.8854	504.70	2706.3	2201.6
0.22	123.27	0.0010636	0.8098	517.62	2710.6	2193.0
0.24	126.09	0.0010663	0.7465	529.64	2714.5	2184.9
0.26	128.73	0.0010688	0.6925	540.87	2718.2	2177.3
0.28	131.20	0.0010712	0.6460	551.44	2721.5	2170.1

(续)

绝对压力 $p/\text{MPa}$	温度 $t/^\circ\text{C}$	质量体积/ $(\text{m}^3/\text{kg})$		焓/ $(\text{kJ}/\text{kg})$		汽化潜热 $\mu/(\text{kJ}/\text{kg})$
		水比容 $v'$	蒸汽比容 $v''$	水焓 $h'$	蒸汽焓 $h''$	
0.30	133.54	0.0010735	0.6056	561.43	2724.7	2163.2
0.32	135.75	0.0010757	0.5700	570.90	2727.6	2156.7
0.34	137.86	0.0010779	0.5385	579.92	2730.3	2150.4
0.36	139.86	0.0010799	0.5103	588.53	2732.9	2144.4
0.38	141.78	0.0010819	0.4851	596.77	2735.3	2138.6
0.40	143.62	0.0010839	0.4622	604.67	2737.6	2133.0
0.42	145.39	0.0010858	0.4415	612.27	2739.8	2127.5
0.44	147.09	0.0010876	0.4226	619.60	2741.9	2122.3
0.46	148.73	0.0010894	0.4053	626.67	2743.9	2117.2
0.48	150.31	0.0010911	0.3894	633.50	2745.7	2112.2
0.50	151.84	0.0010928	0.3747	640.12	2747.5	2107.4
0.52	153.33	0.0010945	0.3611	646.53	2749.3	2102.7
0.54	154.76	0.0010961	0.3485	652.76	2750.9	2098.1
0.56	156.16	0.0010977	0.3367	658.81	2752.5	2093.7
0.58	157.52	0.0010993	0.3257	664.69	2754.0	2089.3
0.60	158.84	0.0011009	0.3155	670.42	2755.5	2085.0
0.65	161.99	0.0011046	0.2926	684.12	2758.9	2074.8
0.70	164.96	0.0011082	0.2727	697.06	2762.0	2064.9
0.75	167.76	0.0011117	0.2555	709.29	2764.9	2055.6
0.80	170.41	0.0011150	0.2403	720.94	2767.5	2046.5
0.85	172.95	0.0011182	0.2269	732.02	2769.9	2037.9
0.90	175.36	0.0011213	0.2148	742.64	2772.1	2029.5
0.95	177.67	0.0011244	0.2041	752.82	2774.2	2021.4
1.00	179.88	0.0011274	0.1943	762.61	2776.2	2013.6
1.05	182.02	0.0011303	0.1855	772.03	2778.0	2005.9
1.10	184.07	0.0011331	0.1774	781.13	2779.7	1998.5
1.15	186.05	0.0011359	0.1700	789.92	2781.3	1991.3
1.20	187.96	0.0011386	0.1632	798.43	2782.7	1984.3
1.25	189.81	0.0011412	0.1569	806.69	2784.1	1977.4
1.30	191.61	0.0011438	0.1511	814.70	2785.4	1970.7
1.35	193.35	0.0011464	0.1457	822.49	2786.6	1964.2
1.40	195.04	0.0011489	0.1407	830.08	2787.8	1957.7
1.45	196.69	0.0011514	0.1360	837.46	2788.9	1951.4
1.50	198.29	0.0011539	0.1317	844.67	2789.9	1945.2
1.55	199.85	0.0011563	0.1275	851.69	2790.8	1939.2
1.60	201.37	0.0011586	0.1237	858.56	2791.7	1933.2
1.65	202.86	0.0011610	0.1201	865.27	2792.6	1927.3
1.70	204.31	0.0011633	0.1166	871.84	2793.4	1921.5
1.75	205.72	0.0011656	0.1134	878.28	2794.1	1915.9
1.80	207.11	0.0011678	0.1103	884.58	2794.8	1910.3
1.85	208.47	0.0011701	0.1074	890.75	2795.5	1904.7
1.90	209.80	0.0011723	0.1047	896.81	2796.1	1899.3
1.95	211.10	0.0011744	0.1020	902.75	2796.7	1893.9
2.00	212.37	0.0011766	0.09954	908.59	2797.2	1888.6
2.05	213.63	0.0011787	0.09716	914.32	2797.7	1883.4
2.10	214.85	0.0011809	0.09489	919.96	2798.2	1878.2

(续)

绝对压力 $p/\text{MPa}$	温度 $t/^\circ\text{C}$	质量体积/ $(\text{m}^3/\text{kg})$		焓/ $(\text{kJ/kg})$		汽化潜热 $\mu/(\text{kJ/kg})$
		水比容 $v'$	蒸汽比容 $v''$	水焓 $h'$	蒸汽焓 $h''$	
2. 15	216. 06	0. 0011830	0. 09272	925. 50	2798. 6	1873. 1
2. 20	217. 24	0. 0011850	0. 09065	930. 95	2799. 1	1868. 1
2. 25	218. 41	0. 0011871	0. 08867	936. 32	2799. 4	1863. 1
2. 30	219. 55	0. 0011892	0. 08677	941. 60	2799. 8	1858. 2
2. 35	220. 68	0. 0011912	0. 08495	946. 80	2800. 1	1853. 3
2. 40	221. 78	0. 0011932	0. 08320	951. 93	2800. 4	1848. 5
2. 45	222. 87	0. 0011952	0. 08152	956. 98	2800. 7	1843. 7
2. 50	223. 94	0. 0011972	0. 07991	961. 96	2800. 9	1839. 0
2. 55	225. 00	0. 0011991	0. 07835	966. 87	2801. 2	1834. 3
2. 60	226. 04	0. 0012011	0. 07686	971. 72	2801. 4	1829. 6
2. 80	230. 05	0. 0012088	0. 07139	990. 48	2802. 0	1811. 5
3. 10	235. 67	0. 0012200	0. 06447	1017. 0	2802. 3	1785. 4
3. 30	239. 18	0. 0012274	0. 06053	1033. 7	2802. 3	1768. 6
3. 50	242. 54	0. 0012345	0. 05703	1049. 8	2802. 0	1752. 2
3. 70	245. 75	0. 0012416	0. 05389	1065. 2	2801. 4	1736. 2
3. 80	247. 31	0. 0012451	0. 05244	1072. 7	2801. 1	1728. 4
3. 90	248. 84	0. 0012486	0. 05106	1080. 1	2800. 8	1720. 6
4. 00	250. 33	0. 0012521	0. 04975	1087. 4	2800. 3	1712. 9
4. 10	251. 80	0. 0012555	0. 04850	1094. 6	2799. 9	1705. 3

表 13-9 过热蒸汽热力性质

$t/^\circ\text{C}$ $\rho/\text{MPa}$		100	130	150	180	200	230	250	300	350	400
0. 10	$v''$	1. 696	1. 841	1. 936	2. 078	2. 172	2. 313	2. 406	2. 639	2. 871	3. 102
	$h''$	2676. 2	2736. 5	2776. 3	2835. 8	2875. 4	2934. 8	2974. 5	3074. 5	3175. 6	3278. 2
0. 20	$v''$	—	0. 910	0. 9595	1. 0325	1. 0804	1. 1517	1. 1989	1. 3162	1. 4328	1. 5492
	$h''$	—	2726. 9	2768. 5	2830. 0	2870. 5	2931. 0	2971. 2	3072. 1	3173. 8	3276. 7
0. 30	$v''$	—	—	0. 6337	0. 6837	0. 7164	0. 7646	0. 7964	0. 8753	0. 9535	1. 0314
	$h''$	—	—	2760. 4	2824. 0	2865. 5	2927. 1	2967. 9	3069. 7	3171. 9	3275. 2
0. 40	$v''$	—	—	0. 4707	0. 5093	0. 5343	0. 5710	0. 5952	0. 6549	0. 7139	0. 7725
	$h''$	—	—	2752. 0	2817. 8	2860. 4	2923. 1	2964. 5	3067. 2	3170. 0	3273. 6
0. 50	$v''$	—	—	—	0. 4045	0. 4250	0. 4549	0. 4744	0. 5226	0. 5701	0. 6172
	$h''$	—	—	—	2811. 4	2855. 1	2919. 1	2961. 1	3064. 8	3168. 1	3272. 1
0. 60	$v''$	—	—	—	0. 3346	0. 3520	0. 3774	0. 3939	0. 4344	0. 4742	0. 5136
	$h''$	—	—	—	2804. 8	2849. 7	2915. 0	2957. 6	3062. 3	3166. 2	3270. 6
0. 70	$v''$	—	—	—	0. 2846	0. 2999	0. 3220	0. 3364	0. 3714	0. 4057	0. 4396
	$h''$	—	—	—	2798. 0	2844. 2	2910. 8	2954. 0	3059. 8	3164. 3	3269. 0
0. 80	$v''$	—	—	—	0. 2471	0. 2608	0. 2805	0. 2932	0. 3241	0. 3543	0. 3842
	$h''$	—	—	—	2791. 1	2838. 6	2906. 6	2950. 4	3057. 3	3162. 4	3267. 5
0. 90	$v''$	—	—	—	0. 2178	0. 2303	0. 2482	0. 2596	0. 2874	0. 3144	0. 3410
	$h''$	—	—	—	2783. 9	2832. 7	2902. 2	2946. 8	3054. 7	3160. 5	3266. 0
1. 0	$v''$	—	—	—	0. 1944	0. 2059	0. 2223	0. 2327	0. 2580	0. 2824	0. 3065
	$h''$	—	—	—	2776. 5	2826. 8	2897. 8	2943. 0	3052. 1	3158. 5	3264. 4



(续)

$t/^{\circ}\text{C}$ $\rho/\text{MPa}$		100	130	150	180	200	230	250	300	350	400
1. 1	$v''$	—	—	—	—	0. 1859	0. 2011	0. 2107	0. 2339	0. 2563	0. 2782
	$h''$	—	—	—	—	2820. 7	2893. 2	2939. 3	3049. 6	3156. 6	3262. 9
1. 2	$v''$	—	—	—	—	0. 1692	0. 1834	0. 1924	0. 2139	0. 2345	0. 2547
	$h''$	—	—	—	—	2814. 4	2888. 5	2935. 4	3046. 9	3145. 6	3261. 3
1. 3	$v''$	—	—	—	—	0. 1551	0. 1686	0. 1769	0. 1969	0. 2160	0. 2348
	$h''$	—	—	—	—	2808. 0	2883. 9	2931. 5	3044. 3	3152. 7	3259. 7
1. 4	$v''$	—	—	—	—	0. 1429	0. 1556	0. 1635	0. 1823	0. 2002	0. 2177
	$h''$	—	—	—	—	2801. 4	2879. 1	2927. 6	3041. 6	3150. 7	3258. 2
1. 7	$v''$	—	—	—	—	—	0. 1261	0. 1329	0. 1489	0. 1640	0. 1785
	$h''$	—	—	—	—	—	2864. 2	2915. 3	3033. 5	3144. 7	3253. 5
2. 0	$v''$	—	—	—	—	—	0. 1053	0. 1114	0. 1255	0. 1386	0. 1511
	$h''$	—	—	—	—	—	2848. 4	2902. 4	3025. 0	3138. 6	3248. 7
2. 2	$v''$	—	—	—	—	—	0. 09458	0. 10035	0. 11343	0. 12547	0. 1370
	$h''$	—	—	—	—	—	2837. 4	2893. 4	3019. 3	3134. 5	3245. 5
2. 4	$v''$	—	—	—	—	—	0. 08559	0. 09107	0. 10336	0. 11455	0. 12522
	$h''$	—	—	—	—	—	2826. 0	2884. 2	3013. 4	3130. 4	3242. 3
2. 6	$v''$	—	—	—	—	—	0. 07796	0. 08320	0. 09483	0. 10532	0. 11526
	$h''$	—	—	—	—	—	2814. 1	2874. 7	3007. 4	3126. 1	3239. 0
2. 9	$v''$	—	—	—	—	—	—	0. 07340	0. 08423	0. 09384	0. 10288
	$h''$	—	—	—	—	—	—	2859. 9	2998. 2	3119. 7	3234. 1
3. 1	$v''$	—	—	—	—	—	—	0. 06788	0. 07829	0. 08742	0. 09597
	$h''$	—	—	—	—	—	—	2849. 6	2991. 9	3115. 4	3230. 8
3. 3	$v''$	—	—	—	—	—	—	0. 06302	0. 07306	0. 08178	0. 08988
	$h''$	—	—	—	—	—	—	2839. 0	2985. 5	3110. 9	3227. 5
3. 5	$v''$	—	—	—	—	—	—	0. 05869	0. 06842	0. 07678	0. 08449
	$h''$	—	—	—	—	—	—	2828. 1	2879. 0	3106. 5	3224. 2
3. 7	$v''$	—	—	—	—	—	—	0. 05481	0. 06428	0. 07231	0. 07969
	$h''$	—	—	—	—	—	—	2816. 8	2972. 3	3102. 0	3220. 8
3. 9	$v''$	—	—	—	—	—	—	0. 05131	0. 06056	0. 06830	0. 07537
	$h''$	—	—	—	—	—	—	2805. 1	2965. 5	3097. 4	3217. 4
4. 1	$v''$	—	—	—	—	—	—	—	0. 05719	0. 06468	0. 07148
	$h''$	—	—	—	—	—	—	—	2958. 5	3092. 8	3214. 0

注:  $v''$ ——过热蒸汽比容 ( $\text{m}^3/\text{kg}$ );  $h''$ ——过热蒸汽焓 ( $\text{kJ/kg}$ )。

2. 热水的热力性质(见表 13 - 10)

表 13 - 10 热水的热力性质

温度 $t/^\circ\text{C}$	绝对压力 $p/\text{MPa}$	密度 $\rho$ $/(\text{kg}/\text{m}^3)$	焓 $h'$ $/(\text{kJ}/\text{kg})$	比定压热容 $c_p$ $/[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})]$	导热系数 $\lambda$ $/[\text{mW}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})]$	运动黏度 $\nu \times 10^6$ $/(\text{m}^2/\text{s})$	动力(绝对) 黏度 $\eta \times 10^4$ $/\text{Pa} \cdot \text{s}$	导温系数 $a \times 10^4$ $/(\text{m}^2/\text{h})$	线膨胀系 数 $\beta \times 10^4$ $/(\text{1}/^\circ\text{C})$	普朗特数 $Pr$
0	0.0006108	999.79	-0.0416	4.217	565	1.792	1792.0	4.71	-0.63	13.37
10	0.001227	999.60	41.99	4.193	584	1.306	1305.5	4.94	0.70	9.373
20	0.002337	998.20	83.86	4.182	602	1.004	1002.6	5.16	1.82	6.965
30	0.004241	995.62	125.66	4.179	617	0.802	798.4	5.35	3.21	5.408
40	0.007375	992.16	167.47	4.179	631	0.659	653.9	5.51	3.87	4.331
50	0.012335	988.04	209.3	4.181	642	0.554	547.1	5.65	4.49	3.563
60	0.01992	983.19	251.1	4.185	652	0.474	466.0	5.78	5.11	2.991
70	0.03116	977.71	293.0	4.190	660	0.412	403.3	5.87	5.70	2.561
80	0.04736	971.82	334.9	4.197	669	0.364	354.2	5.96	6.32	2.222
90	0.07011	965.34	376.9	4.205	675	0.326	314.8	6.03	6.95	1.961
100	0.10133	958.31	419.1	4.216	679	0.294	281.9	6.08	7.52	1.750
110	0.14327	951.02	461.3	4.229	681	0.269	255.5	6.13	8.08	1.587
120	0.19854	943.13	503.7	4.245	685	0.247	232.9	6.16	8.64	1.444
130	0.27013	934.84	546.3	4.263	685	0.230	215.0	6.19	9.19	1.338
140	0.3614	926.10	589.1	4.285	686	0.214	198.2	6.21	9.72	1.238
150	0.4760	916.93	832.2	4.310	686	0.199	182.7	6.22	10.3	1.148
160	0.6181	907.36	675.5	4.339	685	0.188	170.6	6.23	10.7	1.081
170	0.7920	897.34	719.1	4.371	680	0.178	159.7	6.22	11.3	1.027
180	1.0027	886.92	763.1	4.408	674	0.170	150.8	6.20	11.9	0.9862
190	1.2551	876.04	807.5	4.449	669	0.163	142.8	6.17	12.6	0.9497
200	1.5549	864.68	852.4	4.497	664	0.156	134.5	6.14	13.3	0.9109

3. 烟气的热力性质（见表 13 - 11 ~ 表 13 ~ 14）

表 13 - 11 1m<sup>3</sup> 空气、烟气和 1kg 灰的焓 (kJ/m<sup>3</sup> 或 kJ/kg)

$t/^{\circ}\text{C}$	$h_{\text{CO}_2}$	$h_{\text{N}_2}$	$h_{\text{O}_2}$	$h_{\text{H}_2\text{O}}$	$h_{\text{k}}$	$h_{\text{h}}$
100	170	130	132	151	132	80
200	358	260	267	305	266	168
300	559	392	407	463	403	260
400	772	527	551	626	542	357
500	994	664	699	795	684	461
600	1225	804	850	969	830	554
700	1462	948	1004	1149	978	665
800	1705	1094	1160	1334	1129	770
900	1952	1242	1318	1526	1282	812
1000	2204	1392	1478	1723	1435	1005
1100	2458	1544	1638	1925	1595	1128
1200	2717	1697	1801	2132	1753	1261
1300	2977	1853	1964	2344	1914	1426
1400	3239	2009	2128	2559	2076	1583
1500	3503	2166	2294	2779	2239	1777
1600	3769	2325	2461	3002	2403	1957
1700	4036	2484	2629	3229	2567	2206
1800	4305	2644	2797	3458	2732	2412
1900	4574	2804	2967	3690	2899	2625
2000	4844	2965	3138	3926	3066	2847
2100	5115	3128	3309	4163	3234	
2200	5387	3289	3483	4402	3402	

注： $h_{\text{k}}$ ——空气的焓 (kJ/m<sup>3</sup>)； $h_{\text{h}}$ ——灰的焓 (kJ/kg)。

在工程热力学中，通常用  $h_i$  表示工质的焓，即每 m<sup>3</sup>（或 kg）的焓，kJ/m<sup>3</sup>。如空气的焓为  $h_{\text{k}}$ ，CO<sub>2</sub> 的焓为  $h_{\text{CO}_2}$ 。

表 13-12 烟气、灰和空气的平均比定压热容  $c_p$

温度/℃	$c_p$ 平均比定压热容/[kJ/(m <sup>3</sup> ·℃)]								
	CO <sub>2</sub> (RO <sub>2</sub> )	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	灰	空气
0	1.5998	1.2946	1.3059	1.4943	1.2992	1.2766	1.55	0.7955	1.3183
10	1.6099	1.2947	1.3071	1.4954	1.2995	1.278	1.5591	0.7997	1.3194
20	1.6199	1.2948	1.3083	1.4965	1.2997	1.2794	1.5682	0.8039	1.32
30	1.6299	1.2949	1.3095	1.4976	1.3	1.2808	1.5773	0.8081	1.3206
40	1.6399	1.295	1.3107	1.4987	1.3002	1.2822	1.5864	0.8123	1.3212
50	1.6499	1.2951	1.3119	1.4998	1.3005	1.2836	1.5955	0.8165	1.3218
100	1.7003	1.2958	1.3176	1.5052	1.3017	1.2908	1.6411	0.8374	1.3243
150	1.7438	1.2978	1.3266	1.5137	1.304	1.294	1.7	0.8521	1.3281
160	1.7525	1.2982	1.3284	1.5154	1.3046	1.2946	1.7118	0.855	1.3289
170	1.7612	1.2986	1.3302	1.5171	1.3052	1.2952	1.7236	0.8579	1.3927
180	1.7699	1.2990	1.3320	1.5188	1.3058	1.2958	1.7354	0.8608	1.3305
190	1.7786	1.2994	1.3338	1.5205	1.3066	1.2964	1.7472	0.8673	1.3313
200	1.7873	1.2996	1.3352	1.5223	1.3071	1.2971	1.7589	0.8667	1.3318
250	1.8250	1.3032	1.3457	1.5324	1.3119	1.2982	1.8225	0.8793	1.3371
300	1.8627	1.3067	1.3561	1.5424	1.3167	1.2992	1.8861	0.8918	1.3424
600	—	—	—	—	—	—	—	0.9504	—
800	—	—	—	—	—	—	—	0.9797	—
900	—	—	—	—	—	—	—	1.0048	—

表 13-13 大气压力 ( $p=1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ ) 下烟气的热物理性质

(烟气中组成成分的质量分数 $w_{(\text{CO}_2)} = 13\%$ ; $w_{(\text{H}_2\text{O})} = 11\%$ ; $w_{(\text{N}_2)} = 76\%$ )								
$t/^\circ\text{C}$	$c_p$	$c_p$	$\lambda \times 10^2$	$\alpha \times 10^8$	$\eta \times 10^6$	$\nu \times 10^6$	$Pr$	$\rho$
	[kJ/(m <sup>3</sup> ·℃)]	[kJ/kg·℃]	[W/(m·K)]	(m <sup>2</sup> /s)	[kg/(m·s)]	m <sup>2</sup> /s		kg/m <sup>3</sup>
0	1.3556	1.042	2.28	16.9	15.8	12.20	0.72	1.2950
100	1.3734	1.068	3.13	30.8	20.4	21.54	0.69	0.950
200	1.3889	1.097	4.01	48.9	24.5	32.80	0.67	0.748
300	1.4054	1.122	4.84	69.9	28.2	45.81	0.65	0.617
400	1.4242	1.151	5.70	94.3	31.7	60.38	0.64	0.525
500	1.4437	1.185	6.56	121.1	34.8	76.30	0.63	0.457
600	1.4623	1.214	7.42	150.9	37.9	93.61	0.62	0.405
700	1.4821	1.239	8.27	183.8	40.7	112.1	0.61	0.365
800	1.5005	1.264	9.15	219.7	43.4	131.8	0.60	0.330
900	1.5177	1.290	10.00	258.0	45.9	152.5	0.59	0.301
1000	1.5356	1.316	10.90	303.4	48.4	174.3	0.58	0.275
1100	1.5514	1.323	11.75	345.5	50.7	197.1	0.57	0.257
1200	1.5658	1.340	12.62	392.4	53.0	221.0	0.56	0.246

表 13-14 湿空气的热力性质 (标准大气压, 101.325kPa)

温度	含湿量 $x_{tw}$	比体积			焓			熵			冷凝态的水(非气态的水)		
		干空气 $v_a$	水蒸气 $v_{as}$	湿空气 $v_s$	干空气 $h_a$	水蒸气 $h_{as}$	湿空气 $h_s$	干空气 $s_a$	水蒸气 $s_{as}$	湿空气 $s_s$	焓 $h_w$	熵 $s_w$	饱和压力 $p$
/℃	kg/kg(烟气)	m <sup>3</sup> /kg			kJ/kg			kJ/(kg·K)			/(kJ/kg)	/[kJ/(kg·K)]	/kPa
0.01	0.003789	0.7734	0.0047	0.7781	0	9.473	9.473	0	0.0364	0.0364	0.06	-0.0001	0.6112
1	0.004076	0.7762	0.0051	0.7813	1.006	10.197	11.203	0.0037	0.0391	0.0427	4.28	0.0153	0.6571
2	0.004381	0.7791	0.0055	0.7845	2.012	10.97	12.982	0.0073	0.0419	0.0492	8.49	0.0306	0.706
3	0.004707	0.7819	0.0059	0.7878	3.018	11.793	14.811	0.011	0.0449	0.0559	12.7	0.0459	0.7581
4	0.005054	0.7848	0.0064	0.7911	4.024	12.672	16.696	0.0146	0.048	0.0627	16.91	0.0611	0.8135
5	0.005424	0.7876	0.0068	0.7944	5.029	13.61	18.639	0.0182	0.0514	0.0697	21.12	0.0762	0.8725
6	0.005818	0.7904	0.0074	0.7978	6.036	14.608	20.644	0.0219	0.055	0.0769	25.32	0.0913	0.9353
7	0.006237	0.7933	0.0079	0.8012	7.041	15.671	22.713	0.0255	0.0588	0.0843	29.52	0.1064	1.002
8	0.006683	0.7961	0.0085	0.8046	8.047	16.805	24.852	0.029	0.0628	0.0919	33.72	0.1213	1.0729
9	0.007157	0.799	0.0092	0.8081	9.053	18.01	27.064	0.0326	0.0671	0.0997	37.92	0.1362	1.1481
10	0.007661	0.8018	0.0098	0.8116	10.059	19.293	29.352	0.0362	0.0717	0.1078	42.11	0.1511	1.228
11	0.008197	0.8046	0.0106	0.8152	11.065	20.658	31.724	0.0397	0.0765	0.1162	46.31	0.1659	1.3128
12	0.008766	0.8075	0.0113	0.8188	12.071	22.108	34.179	0.0433	0.0816	0.1248	50.5	0.1806	1.4026
13	0.00937	0.8103	0.0122	0.8225	13.077	23.649	36.726	0.0468	0.087	0.1337	54.69	0.1953	1.4979
14	0.010012	0.8132	0.0131	0.8262	14.084	25.286	39.37	0.0503	0.0927	0.143	58.88	0.2099	1.5987
15	0.010692	0.816	0.014	0.83	15.09	27.023	42.113	0.0538	0.0987	0.1525	63.07	0.2244	1.7055
16	0.011413	0.8188	0.015	0.8338	16.096	28.867	44.963	0.0573	0.1051	0.1624	67.26	0.2389	1.8185
17	0.012178	0.8217	0.016	0.8377	17.102	30.824	47.926	0.0607	0.1119	0.1726	71.44	0.2534	1.938
18	0.012989	0.8245	0.0172	0.8417	18.108	32.9	51.008	0.0642	0.119	0.1832	75.63	0.2678	2.0643
19	0.013848	0.8274	0.0184	0.8457	19.114	35.101	54.216	0.0677	0.1266	0.1942	79.81	0.2821	2.1979
20	0.014758	0.8302	0.0196	0.8498	20.121	37.434	57.555	0.0711	0.1346	0.2057	84	0.2965	2.3389
21	0.015721	0.833	0.021	0.854	21.127	39.908	61.035	0.0745	0.143	0.2175	88.18	0.3107	2.4878
22	0.016741	0.8359	0.0224	0.8583	22.133	42.527	64.66	0.0779	0.1519	0.2298	92.36	0.3249	2.6448
23	0.017821	0.8387	0.024	0.8627	23.14	45.301	68.44	0.0813	0.1613	0.2426	96.55	0.339	2.8105
24	0.018963	0.8416	0.0256	0.8671	24.146	48.239	72.385	0.0847	0.1712	0.2559	100.73	0.3531	2.9852
25	0.02017	0.8444	0.0273	0.8717	25.153	51.347	76.5	0.0881	0.1817	0.2698	104.91	0.3672	3.1693
26	0.021448	0.8472	0.0291	0.8764	26.159	54.638	80.798	0.0915	0.1927	0.2842	109.09	0.3812	3.3633
27	0.022798	0.8501	0.0311	0.8811	27.165	58.12	85.285	0.0948	0.2044	0.2992	113.27	0.3951	3.5674
28	0.024226	0.8529	0.0331	0.886	28.172	61.804	89.976	0.0982	0.2166	0.3148	117.45	0.409	3.7823

(续)

温度	含湿量 $x_{tw}$	比体积			焓			熵			冷凝态的水(非气态的水)		
		干空气 $v_a$	水蒸气 $v_{as}$	湿空气 $v_s$	干空气 $h_a$	水蒸气 $h_{as}$	湿空气 $h_s$	干空气 $s_a$	水蒸气 $s_{as}$	湿空气 $s_s$	焓 $h_w$	熵 $s_w$	饱和压力 $p_s$
/℃	kg/kg(烟气)	m <sup>3</sup> /kg			kJ/kg			kJ/(kg·K)			/(kJ/kg)	/[kJ/(kg·K)]	/kPa
29	0.025735	0.8558	0.0353	0.891	29.179	65.699	94.878	0.1015	0.2296	0.3311	121.63	0.4229	4.0084
30	0.027329	0.8586	0.0376	0.8962	30.185	69.82	100.006	0.1048	0.2432	0.3481	125.81	0.4367	4.2462
31	0.029014	0.8614	0.04	0.9015	31.192	74.177	105.369	0.1082	0.2576	0.3658	129.99	0.4505	4.4961
32	0.030793	0.8643	0.0426	0.9069	32.198	78.78	110.979	0.1115	0.2728	0.3842	134.17	0.4642	4.7586
33	0.032674	0.8671	0.0454	0.9125	33.205	83.652	116.857	0.1148	0.2887	0.4035	138.35	0.4779	5.0345
34	0.03466	0.87	0.0483	0.9183	34.212	88.799	123.011	0.118	0.3056	0.4236	142.53	0.4915	5.3242
35	0.036756	0.8728	0.0514	0.9242	35.219	94.236	129.455	0.1213	0.3233	0.4446	146.71	0.5051	5.628
36	0.038971	0.8756	0.0546	0.9303	36.226	99.983	136.209	0.1246	0.342	0.4666	150.89	0.5186	5.9468
37	0.041309	0.8785	0.0581	0.9366	37.233	106.058	143.29	0.1278	0.3617	0.4895	155.07	0.5321	6.2812
38	0.043778	0.8813	0.0618	0.9431	38.239	112.474	150.713	0.1311	0.3824	0.5135	159.25	0.5456	6.6315
39	0.046386	0.8842	0.0657	0.9498	39.246	119.258	158.504	0.1343	0.4043	0.5386	163.43	0.559	6.9988
40	0.049141	0.887	0.0698	0.9568	40.253	126.43	166.683	0.1375	0.4273	0.5649	167.61	0.5724	7.3838
41	0.052049	0.8898	0.0741	0.964	41.261	134.005	175.265	0.1407	0.4516	0.5923	171.79	0.5857	7.7866
42	0.055119	0.8927	0.0788	0.9714	42.268	142.007	184.275	0.1439	0.4771	0.6211	175.97	0.599	8.2081
43	0.058365	0.8955	0.0837	0.9792	43.275	150.475	193.749	0.1471	0.5041	0.6512	180.15	0.6122	8.6495
44	0.061791	0.8983	0.0888	0.9872	44.282	159.417	203.699	0.1503	0.5325	0.6828	184.33	0.6254	9.111
45	0.065411	0.9012	0.0943	0.9955	45.289	168.874	214.164	0.1535	0.5624	0.7159	188.51	0.6386	9.5935
46	0.069239	0.904	0.1002	1.0042	46.296	178.882	225.179	0.1566	0.594	0.7507	192.69	0.6517	10.0982
47	0.073282	0.9069	0.1063	1.0132	47.304	189.455	236.759	0.1598	0.6273	0.7871	196.88	0.6648	10.625
48	0.077556	0.9097	0.1129	1.0226	48.311	200.644	248.955	0.1629	0.6624	0.8253	201.06	0.6778	11.1754
49	0.082077	0.9125	0.1198	1.0323	49.319	212.485	261.803	0.1661	0.6994	0.8655	205.24	0.6908	11.7502
50	0.086858	0.9154	0.1272	1.0425	50.326	225.019	275.345	0.1692	0.7385	0.9077	209.42	0.7038	12.3503
51	0.091918	0.9182	0.135	1.0532	51.334	238.29	289.624	0.1723	0.7798	0.9521	213.6	0.7167	12.9764
52	0.097272	0.9211	0.1433	1.0643	52.341	252.34	304.682	0.1754	0.8234	0.9988	217.78	0.7296	13.6293
53	0.102948	0.9239	0.1521	1.076	53.349	267.247	320.596	0.1785	0.8695	1.048	221.97	0.7424	14.3108
54	0.108954	0.9267	0.1614	1.0882	54.357	283.031	337.388	0.1816	0.9182	1.0998	226.15	0.7552	15.0205
55	0.115321	0.9296	0.1713	1.1009	55.365	299.772	355.137	0.1847	0.9698	1.1544	230.33	0.768	15.7601
56	0.122077	0.9324	0.1819	1.1143	56.373	317.549	373.922	0.1877	1.0243	1.212	234.52	0.7807	16.5311
57	0.129243	0.9353	0.1932	1.1284	57.381	336.417	393.798	0.1908	1.082	1.2728	238.7	0.7934	17.3337
58	0.136851	0.9381	0.2051	1.1432	58.389	356.461	414.85	0.1938	1.1432	1.337	242.88	0.8061	18.1691
59	0.144942	0.9409	0.2179	1.1588	59.397	377.788	437.185	0.1969	1.2081	1.405	247.07	0.8187	19.0393
60	0.15354	0.9438	0.2315	1.1752	60.405	400.458	460.863	0.1999	1.2769	1.4768	251.25	0.8313	19.9439
61	0.16269	0.9466	0.246	1.1926	61.413	424.624	486.036	0.2029	1.35	1.553	255.44	0.8438	20.8858
62	0.17244	0.9494	0.2614	1.2109	62.421	450.377	512.798	0.2059	1.4278	1.6337	259.62	0.8563	21.8651

(续)

温度	含湿量 $x_{tw}$	比体积			焓			熵			冷凝态的水(非气态的水)		
		干空气 $v_a$	水蒸气 $v_{as}$	湿空气 $v_s$	干空气 $h_a$	水蒸气 $h_{as}$	湿空气 $h_s$	干空气 $s_a$	水蒸气 $s_{as}$	湿空气 $s_s$	焓 $h_w$	熵 $s_w$	饱和压力 $p_s$
/℃	kg/kg(烟气)	m <sup>3</sup> /kg			kJ/kg			kJ/(kg·K)			/(kJ/kg)	/[kJ/(kg·K)]	/kPa
63	0.18284	0.9523	0.278	1.2303	63.429	477.837	541.266	0.2089	1.5104	1.7194	263.81	0.8688	22.8826
64	0.19393	0.9551	0.2957	1.2508	64.438	507.177	571.615	0.2119	1.5985	1.8105	268	0.8812	23.9405
65	0.20579	0.958	0.3147	1.2726	65.446	538.548	603.995	0.2149	1.6925	1.9074	272.18	0.8936	25.0397
66	0.21848	0.9608	0.335	1.2958	66.455	572.116	638.571	0.2179	1.7927	2.0106	276.37	0.906	26.181
67	0.23207	0.9636	0.3568	1.3204	67.463	608.103	675.566	0.2209	1.8999	2.1208	280.56	0.9183	27.3664
68	0.24664	0.9665	0.3803	1.3467	68.472	646.724	715.196	0.2238	2.0147	2.2385	284.75	0.9306	28.5967
69	0.26231	0.9693	0.4055	1.3749	69.481	688.261	757.742	0.2268	2.1378	2.3646	288.94	0.9429	29.8741
70	0.27916	0.9721	0.4328	1.4049	70.489	732.959	803.448	0.2297	2.2699	2.4996	293.13	0.9551	31.1986
71	0.29734	0.975	0.4622	1.4372	71.498	781.208	852.706	0.2327	2.4122	2.6448	297.32	0.9673	32.5734
72	0.31698	0.9778	0.4941	1.4719	72.507	833.335	905.842	0.2356	2.5655	2.801	301.51	0.9794	33.9983
73	0.33824	0.9807	0.5287	1.5093	73.516	889.807	963.323	0.2385	2.7311	2.9696	305.7	0.9916	35.4759
74	0.3613	0.9835	0.5662	1.5497	74.525	951.077	1025.603	0.2414	2.9104	3.1518	309.89	1.0037	37.0063
75	0.38641	0.9863	0.6072	1.5935	75.535	1017.841	1093.375	0.2443	3.1052	3.3496	314.08	1.0157	38.594
76	0.41377	0.9892	0.6519	1.6411	76.543	1090.628	1167.172	0.2472	3.3171	3.5644	318.28	1.0278	40.2369
77	0.44372	0.992	0.701	1.693	77.553	1170.328	1247.881	0.2501	3.5486	3.7987	322.47	1.0398	41.9388
78	0.47663	0.9948	0.755	1.7498	78.562	1257.921	1336.483	0.253	3.8023	4.0553	326.67	1.0517	43.702
79	0.51284	0.9977	0.8145	1.8121	79.572	1354.347	1433.918	0.2559	4.081	4.3368	330.86	1.0636	45.5248
80	0.55295	1.0005	0.8805	1.881	80.581	1461.2	1541.781	0.2587	4.389	4.6477	335.06	1.0755	47.4135
81	0.59751	1.0034	0.9539	1.9572	81.591	1579.961	1661.552	0.2616	4.7305	4.9921	339.25	1.0874	49.367
82	0.64724	1.0062	1.036	2.0422	82.6	1712.547	1795.148	0.2644	5.1108	5.3753	343.45	1.0993	51.386
83	0.70311	1.009	1.1283	2.1373	83.61	1861.548	1945.158	0.2673	5.5372	5.8045	347.65	1.1111	53.4746
84	0.76624	1.0119	1.2328	2.2446	84.62	2029.983	2114.603	0.2701	6.0181	6.2882	351.85	1.1228	55.6337
85	0.83812	1.0147	1.3518	2.3666	85.63	2221.806	2307.436	0.2729	6.5644	6.8373	356.05	1.1346	57.8658
86	0.92062	1.0175	1.4887	2.5062	86.64	2442.036	2528.677	0.2757	7.1901	7.4658	360.25	1.1463	60.1727
87	1.01611	1.0204	1.6473	2.6676	87.65	2697.016	2784.666	0.2785	7.9128	8.1914	364.45	1.158	62.5544
88	1.128	1.0232	1.8333	2.8565	88.661	2995.89	3084.551	0.2813	8.758	9.0393	368.65	1.1696	65.0166
89	1.26064	1.0261	2.054	3.08	89.671	3350.254	3439.925	0.2841	9.7577	10.0419	372.86	1.1812	67.5581
90	1.42031	1.0289	2.3199	3.3488	90.681	3776.918	3867.599	0.2869	10.9586	11.2455	377.06	1.1928	70.1817

注:表中的湿空气和水蒸气的参数都是饱和状态下参数。

### 13.3 常用化合物及脱硫剂

#### 1. 常用化合物（见表 13 - 15）

表 13 - 15 常用化合物

化合物名称	分子式	分子量	当量 <sup>①</sup>
氢氧化铝	$\text{Al}(\text{OH})_3$	78.00	26.00
硫酸铝	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	342.15	57.03
含水硫酸铝	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	666.42	111.07
氢氧化铁	$\text{Fe}(\text{OH})_3$	106.87	35.62
氢氧化亚铁	$\text{Fe}(\text{OH})_2$	89.86	44.93
硫酸亚铁	$\text{FeSO}_4$	151.91	75.96
含水硫酸亚铁	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	278.02	139.01
硫酸铁	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	399.88	66.65
氯化铁	$\text{FeCl}_3$	162.21	54.07
含水氯化铁	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	270.30	90.10
氢氧化钾	$\text{KOH}$	56.11	56.11
含水碳酸钾	$\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	174.204	87.102
碳酸氢钙	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	162.118	81.059
氢氧化钙	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	74.10	37.05
氧化钙	$\text{CaO}$	56.08	28.04
硫酸钙	$\text{CaSO}_4$	136.14	68.07
含水硫酸钙(石膏)	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	172.144	86.072
碳酸钙(大理石)	$\text{CaCO}_3$	100.09	50.04
磷酸钙(磷灰石)	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	310.19	51.70
氯化钙	$\text{CaCl}_2$	110.99	55.49
二氧化硅	$\text{SiO}_2$	60.086	30.043



(续)

化合物名称	分子式	分子量	当量 <sup>①</sup>
碳酸氢镁	$\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$	146.34	73.17
氢氧化镁	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	58.33	29.16
氧化镁	$\text{MgO}$	40.31	20.16
硫酸镁	$\text{MgSO}_4$	120.37	60.19
碳酸镁(菱镁矿)	$\text{MgCO}_3$	84.32	42.16
氯化镁	$\text{MgCl}_2$	95.22	47.61
碳酸氢钠	$\text{NaHCO}_3$	84.00	84.00
氢氧化钠(火碱)	$\text{NaOH}$	40.00	40.00
硫酸钠	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	142.04	71.02
碳酸钠(纯碱)	$\text{Na}_2\text{CO}_3$	105.99	53.00
含水碳酸钠	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	285.99	142.99
磷酸钠	$\text{Na}_3\text{PO}_4$	164.00	54.66
含水磷酸钠	$\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	379.94	126.65
六偏磷酸钠	$(\text{NaPO}_3)_6$	611.80	50.98
氯化钠	$\text{NaCl}$	58.44	58.44
含水硅酸钠	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	284.20	142.10
硫酸	$\text{H}_2\text{SO}_4$	98.08	49.04
硫酸根	$\text{SO}_4^{2-}$	96.06	48.03
二氧化碳	$\text{CO}_2$	44.00	22.00
碳酸根	$\text{CO}_3^{2-}$	60.01	30.01
碳酸氢根	$\text{HCO}_3^-$	61.02	61.02
磷酸根	$\text{PO}_4^{3-}$	95.02	31.60
硅酸根	$\text{SiO}_3^{2-}$	76.086	38.043
盐酸	$\text{HCl}$	36.46	36.46
硝酸	$\text{HNO}_3$	63.01	63.01

① 相当于物质的量。

2. 常用脱硫剂（见表 13 - 16）

表 13 - 16 常用脱硫剂

参数 种类	价格/(元/t) 比价	产地产量	脱硫率 90% 时 L/G 比	脱硫产物及 用途	吸收液性状	脱硫剂 Ca/S	吸收液 pH 控制	脱硫产物价格
石灰(CaO)	100 1	全国各地,产 量丰富	6 ~ 8	CaSO <sub>3</sub> 无用, CaSO <sub>4</sub> 用于建材	浆液	1 ~ 1. 03	循环槽 7. 5	工业石灰 100 元/t 脱硫石膏 40 元/t
石灰石(CaCO <sub>3</sub> )	100 (相比基数)	全国各地,产 量丰富	15 ~ 25	CaSO <sub>4</sub> 可作建材	浆液	1. 05 ~ 1. 10	循环槽 5. 6	工业石灰石粉 100 元/t 脱硫石膏 40 元/t
氧化镁(MgO)	350 ~ 400 3. 5 ~ 4	辽宁、山东、河 北等,储、产量世 界第一	3 ~ 5	MgSO <sub>4</sub> 可作镁肥	MgSO <sub>4</sub> 溶液, MgSO <sub>3</sub> 难溶	1	循环槽 6. 5	
火碱(NaOH)	1820 18	化工产品,满 足需求	3 ~ 4	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> 用于造纸、 轻纺行业	溶液	1	循环槽 6. 5	工业级 1800 元/t 脱硫级:—
纯碱(Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )		化工产品,满 足需求	3 ~ 4	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> 用于造纸、 轻纺行业	溶液	1	循环槽 6. 5	工业级 1800 元/t 脱硫级:—
液氨(NH <sub>3</sub> )	2100 21	化工产品,满 足需求	3	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> 可做肥料	溶液	1	循环槽 5. 30	工业级 750 元/t 脱硫级:—

3. 常用元素的相对原子质量（见表 13 - 17）

表 13 - 17 常用元素的相对原子质量

元素名称	化学符号	原子序	相对原子质量	当量
氢	H	1	1. 0079	1. 008
碳	C	6	12. 011	3. 003
氮	N	7	14. 0067	4. 669 , 2. 801
氧	O	8	15. 999	8. 0
钠	Na	11	23. 0	23
镁	Mg	12	24. 305	12 , 15
铝	Al	13	26. 98	8. 99
硅	Si	14	28. 08	7. 02
磷	P	15	30. 97	10. 32 , 6. 195
硫	S	16	32. 06	16. 03 , 8. 015 , 5. 343
氯	Cl	17	35. 453	35. 45 , 7. 091 , 5. 065
钾	K	19	39. 098	39. 098
钙	Ca	20	40. 08	20. 04
铬	Cr	24	51. 996	17. 33 , 8. 666 , 26. 00
锰	Mn	25	54. 9380	27. 47 , 13. 73 , 9. 156 , 7. 848

13.4 常用物理单位换算

1. 长度单位换算（见表 13 - 18）

表 13 - 18 长度单位换算

	m	in	ft	yd	km	mile	nmile
米	1	39. 37	3. 281	1. 094	$10^{-3}$	$6. 21 \times 10^{-4}$	$5. 40 \times 10^{-4}$
英寸	0. 0254	1	0. 0833	0. 0278	$0. 254 \times 10^{-4}$	$1. 578 \times 10^{-5}$	$1. 371 \times 10^{-5}$
英尺	0. 3048	12	1	0. 333	$0. 3048 \times 10^{-3}$	$1. 894 \times 10^{-4}$	$1. 646 \times 10^{-4}$
码	0. 9144	36	3	1	$0. 9144 \times 10^{-3}$	$5. 682 \times 10^{-4}$	$4. 937 \times 10^{-4}$
千米	1000	$3. 937 \times 10^4$	3281	1094	1	0. 621	0. 540
英里	1609	63360	5280	1760	1. 609	1	0. 869
(国际)海里	1852	72913	6076	2025	1. 852	1. 151	1

2. 面积单位换算（见表 13 - 19）

表 13 - 19 面积单位换算

	m <sup>2</sup>	in <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup>	yd <sup>2</sup>	市亩	acre	mile <sup>2</sup>	km <sup>2</sup>	ba
米 <sup>2</sup>	1	1550	10. 76	1. 196	$1. 5 \times 10^{-3}$	$2. 471 \times 10^{-4}$	$3. 861 \times 10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-4}$
英寸 <sup>2</sup>	$6. 452 \times 10^{-4}$	1	$6. 944 \times 10^{-3}$	$7. 716 \times 10^{-4}$	$9. 677 \times 10^{-7}$	$1. 594 \times 10^{-7}$	$2. 491 \times 10^{-10}$	$0. 645 \times 10^{-9}$	$6. 452 \times 10^{-8}$
英尺 <sup>2</sup>	0. 0929	144	1	0. 1111	$1. 394 \times 10^{-4}$	$2. 296 \times 10^{-5}$	$3. 587 \times 10^{-8}$	$9. 29 \times 10^{-8}$	$9. 29 \times 10^{-6}$
码 <sup>2</sup>	0. 836	1296	9	1	$1. 254 \times 10^{-3}$	$2. 066 \times 10^{-4}$	$3. 228 \times 10^{-7}$	$8. 361 \times 10^{-7}$	$8. 361 \times 10^{-5}$
市亩	666. 7	$1. 033 \times 10^6$	$7. 176 \times 10^3$	797. 3	1	0. 1646	$2. 574 \times 10^{-4}$	$6. 607 \times 10^{-4}$	$6. 667 \times 10^{-2}$
英亩	4046. 9	$6. 273 \times 10^6$	43560	4840	6. 073	1	$1. 563 \times 10^{-3}$	$4. 047 \times 10^{-3}$	0. 4047
英里 <sup>2</sup>	$2. 59 \times 10^6$	$4. 014 \times 10^9$	$2. 788 \times 10^7$	$3. 098 \times 10^6$	$3. 885 \times 10^3$	640	1	2. 590	$2. 590 \times 10^2$
千米 <sup>2</sup>	$10^6$	$1. 55 \times 10^9$	$1. 076 \times 10^7$	$1. 196 \times 10^6$	1500	247. 1	0. 386	1	$10^2$
公顷	$10^4$	$1. 55 \times 10^7$	$1. 076 \times 10^5$	$1. 196 \times 10^4$	15	2. 471	$3. 86 \times 10^{-3}$	$10^{-2}$	1

3. 体积单位换算 (见表 13 - 20)

表 13 - 20 体积单位换算

	m <sup>3</sup>	dm <sup>3</sup> (L)	in <sup>3</sup>	ft <sup>3</sup>	yd <sup>3</sup>	UKgal	USgal
米 <sup>3</sup>	1	1000	61024	35. 31	1. 308	220	264
分米 <sup>3</sup> (升)	0. 001	1	61. 024	0. 03531	4. 308 × 10 <sup>-3</sup>	0. 220	0. 264
英寸 <sup>3</sup>	0. 1639 × 10 <sup>-4</sup>	1. 639 × 10 <sup>-2</sup>	1	5. 787 × 10 <sup>-4</sup>	2. 143 × 10 <sup>-5</sup>	3. 605 × 10 <sup>-4</sup>	4. 329 × 10 <sup>-3</sup>
英尺 <sup>3</sup>	0. 02832	28. 32	1728	1	0. 03704	6. 229	7. 481
码 <sup>3</sup>	0. 7646	764. 6	46656	27	1	168. 2	202
英加仑	4. 546 × 10 <sup>-3</sup>	4. 546	277. 42	0. 1605	5. 946 × 10 <sup>-3</sup>	1	1. 201
美加仑	3. 785 × 10 <sup>-3</sup>	8. 785	231	0. 1337	4. 951 × 10 <sup>-3</sup>	0. 8327	1

4. 质量单位换算 (见表 13 - 21)

表 13 - 21 质量单位换算

	t	kg	g	ton	USton	lb	oz
吨	1	1000	10 <sup>6</sup>	0. 9842	1. 102	2204. 6	35274
千克	10 <sup>-3</sup>	1	10 <sup>3</sup>	9. 842 × 10 <sup>-4</sup>	1. 102 × 10 <sup>-3</sup>	2. 2046	35. 274
克	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-3</sup>	1	9. 842 × 10 <sup>-7</sup>	1. 102 × 10 <sup>-6</sup>	2. 2046 × 10 <sup>-3</sup>	0. 03527
英吨	1. 016	1016	1. 016 × 10 <sup>6</sup>	1	1. 12	2240	35840
美吨	0. 9072	907. 2	9. 072 × 10 <sup>5</sup>	0. 8929	1	2000	32000
磅	4. 536 × 10 <sup>-4</sup>	0. 4536	453. 6	4. 464 × 10 <sup>-4</sup>	5 × 10 <sup>-4</sup>	1	16
盎司	2. 835 × 10 <sup>-5</sup>	0. 02835	28. 35	2. 790 × 10 <sup>-5</sup>	3. 125 × 10 <sup>-5</sup>	0. 0625	1

5. 密度单位换算 (见表 13 - 22)

表 13 - 22 密度单位换算

	kg/m <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	g/mL	t/m <sup>3</sup>	ton/yd <sup>3</sup>	lb/ft <sup>3</sup>	lb/in <sup>3</sup>	lb/UKgal	lb/USgal
千克/米 <sup>3</sup>	1	0. 001	1. 00003 × 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup>	7. 525 × 10 <sup>-4</sup>	6. 243 × 10 <sup>-2</sup>	3. 613 × 10 <sup>-5</sup>	1. 002 × 10 <sup>-2</sup>	0. 835 × 10 <sup>-2</sup>
克/厘米 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	1	1. 00003	1	0. 7525	62. 43	0. 03613	10. 02	8. 345
克/毫升	999. 97	0. 99997	1	0. 99997	0. 7525	62. 43	0. 03613	10. 02	8. 345
吨/米 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	1	1. 00003	1	0. 7525	62. 43	0. 03613	10. 02	8. 345
英吨/码 <sup>3</sup>	1329	1. 329	1. 329	1. 329	1	82. 93	0. 048	13. 32	11. 09
磅/英尺 <sup>3</sup>	16. 02	1. 602 × 10 <sup>-2</sup>	1. 602 × 10 <sup>-2</sup>	1. 602 × 10 <sup>-2</sup>	0. 0121	1	5. 787 × 10 <sup>-4</sup>	0. 1605	0. 1337
磅/英寸 <sup>3</sup>	27680	27. 680	27. 681	27. 68	20. 83	1728	1	277. 4	231
磅/英加仑	99. 78	0. 09978	0. 09978	0. 09978	0. 0751	6. 229	3. 605 × 10 <sup>-3</sup>	1	0. 833
磅/美加仑	119. 8	0. 1198	0. 1198	0. 1198	0. 0902	7. 481	4. 329 × 10 <sup>-3</sup>	1. 201	1

6. 比容单位换算（见表 13 - 23）

表 13 - 23 比容单位换算

	m <sup>3</sup> /kg	L/kg	ft <sup>3</sup> /lb	in <sup>3</sup> /lb	ft <sup>3</sup> /ton	UKgal/lb
米 <sup>3</sup> /千克	1	1000	16. 02	27680	35881	99. 78
升/千克	0. 001	1	0. 01602	27. 68	35. 88	0. 09978
英尺 <sup>3</sup> /磅	0. 06243	62. 43	1	1728	2240	6. 229
英寸 <sup>3</sup> /磅	3. 613 × 10 <sup>-5</sup>	0. 0361	5. 787 × 10 <sup>-4</sup>	1	1. 296	3. 605 × 10 <sup>-3</sup>
英尺 <sup>3</sup> /英吨	2. 787 × 10 <sup>-5</sup>	0. 0279	4. 464 × 10 <sup>-4</sup>	0. 7714	1	2. 781 × 10 <sup>-3</sup>
英加仑/磅	10. 02 × 10 <sup>-3</sup>	10. 02	0. 1605	277. 4	359. 6	1

7. 速度单位换算（见表 13 - 24）

表 13 - 24 速度单位换算

	m/s	ft/s	yd/s	km/h	mile/h	n mile/h
米/秒	1	3. 281	1. 094	3. 6	2. 237	1. 944
英尺/秒	0. 3048	1	0. 3333	1. 0973	0. 6819	0. 5925
码/秒	0. 9144	3	1	3. 2919	2. 0457	1. 7775
千米/时	0. 2778	0. 9114	0. 3033	1	0. 6214	0. 54
英里/时	0. 4470	1. 4667	0. 4889	1. 0693	1	0. 8689
海里/时	0. 5144	1. 6881	0. 5627	1. 852	1. 1508	1

8. 流量单位换算（见表 13 - 25）

表 13 - 25 流量单位换算

	m <sup>3</sup> /s	ft <sup>3</sup> /s	yd <sup>3</sup> /s	L/s	UKgal/s	USgal/s	m <sup>3</sup> /h
米 <sup>3</sup> /秒	1	35. 31	1. 3079	1000	220. 1	264. 2	3600
英尺 <sup>3</sup> /秒	0. 0283	1	0. 0370	28. 326	6. 228	7. 481	101. 9
码 <sup>3</sup> /秒	0. 7645	27	1	764. 5	168. 2	202	2752
升/秒	0. 001	0. 0353	0. 0013	1	0. 2201	0. 2642	3. 6
英加仑/秒	0. 0045	0. 1607	0. 0059	4. 544	1	1. 2004	16. 347
美加仑/秒	3. 785 × 10 <sup>-3</sup>	0. 1337	0. 0049	3. 786	0. 833	1	13. 626
米 <sup>3</sup> /时	0. 278 × 10 <sup>-3</sup>	9. 8 × 10 <sup>-3</sup>	0. 4 × 10 <sup>-3</sup>	0. 2778	0. 0611	0. 0734	1

9. 压力单位换算（见表 13 - 26）

表 13 - 26 压力单位换算

	Pa( N/m <sup>2</sup> )	mbar	at( kgf/cm <sup>2</sup> )	atm	mH <sub>2</sub> O	mmHg	inH <sub>2</sub> O	lbf/ft <sup>2</sup>	lbf/in <sup>2</sup>
帕( 斯卡 )	1	0. 01	$1. 0197 \times 10^{-3}$	$9. 869 \times 10^{-6}$	$1. 0197 \times 10^{-4}$	$7. 5 \times 10^{-3}$	$4. 0146 \times 10^{-3}$	$2. 0885 \times 10^{-2}$	$1. 4504 \times 10^{-4}$
毫巴	100	1	$1. 0197 \times 10^{-3}$	$9. 869 \times 10^{-4}$	0. 0102	0. 75	0. 402	2. 0885	$1. 4504 \times 10^{-2}$
工程大气压 ( 千克力/厘米 <sup>2</sup> )	$9. 8067 \times 10^4$	980. 7	1	0. 9678	10	735. 5	395	2048	14. 22
标准大气压	$1. 0133 \times 10^5$	1013. 3	1. 0333	1	10. 333	760	407. 5	2116. 8	14. 696
米水柱	9807	98. 1	0. 1	0. 0968	1	73. 556	39. 40	204. 77	1. 4223
毫米汞柱	133. 32	1. 3332	$1. 36 \times 10^8$	$1. 31 \times 10^3$	0. 0136	1	0. 5352	2. 7845	0. 0193
英寸水柱	249	2. 49	$2. 54 \times 10^{-3}$	$2. 46 \times 10^{-3}$	$2. 54 \times 10^{-2}$	1. 87	1	5. 2023	$3. 61 \times 10^{-2}$
磅力/英尺 <sup>2</sup>	47. 88	0. 4788	$4. 883 \times 10^{-4}$	$4. 724 \times 10^{-4}$	$4. 884 \times 10^{-3}$	0. 3591	0. 1922	1	$6. 944 \times 10^{-3}$
磅 力/英寸 <sup>2</sup>	6894	68. 95	0. 0703	0. 0680	0. 703	51. 72	27. 72	144	1

10. 力、重力单位换算（见表 13 - 27）

表 13 - 27 力、重力单位换算

	N	kgf	lbf	tf	tonf	UStonf
牛顿	1	0. 10197	0. 2248	$1. 0197 \times 10^{-4}$	$1. 0036 \times 10^{-4}$	$1. 124 \times 10^{-4}$
千克力	9. 8067	1	2. 2046	$10^{-3}$	$9. 842 \times 10^{-4}$	$1. 102 \times 10^{-3}$
磅力	4. 448	0. 4536	1	$4. 536 \times 10^{-4}$	$4. 464 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$
吨力	$9. 8067 \times 10^3$	$10^3$	2204. 6	1	0. 9842	1. 1023
英吨力	9964	$1. 0161 \times 10^3$	2240	1. 0161	1	1. 12
美吨力	8896	907. 2	2000	0. 9072	0. 8929	1

11. 动力黏度换算（见表 13 - 28）

表 13 - 28 动力黏度换算

	Pa · s	cP	kgf · s/m <sup>2</sup>	lbf · s/ft <sup>2</sup>	lbf · h/ft <sup>2</sup>
帕(斯卡)秒	1	1000	0. 10197	$2. 0885 \times 10^{-2}$	$5. 8015 \times 10^{-6}$
厘泊	$10^{-3}$	1	$1. 0192 \times 10^{-4}$	$2. 0885 \times 10^{-5}$	$5. 8015 \times 10^{-9}$
千克力秒/米 <sup>2</sup>	9. 8067	9806. 7	1	0. 2048	$5. 689 \times 10^{-5}$
磅力秒/英尺 <sup>2</sup>	47. 88	47880	4. 8824	1	$2. 7778 \times 10^{-4}$
磅力时/英尺 <sup>2</sup>	$1. 7237 \times 10^5$	$1. 7237 \times 10^8$	$1. 7577 \times 10^4$	3600	1

12. 运动黏度换算（见表 13 - 29）

表 13 - 29 运动黏度换算

	St	cSt	m <sup>2</sup> /s	m <sup>2</sup> /h	ft <sup>2</sup> /s	in <sup>2</sup> /s
斯托克斯( 施 )	1	100	$10^{-4}$	0. 36	$1. 076 \times 10^{-3}$	0. 155
厘斯托克斯( 厘施 )	0. 01	1	$10^{-6}$	$3. 6 \times 10^{-3}$	$1. 076 \times 10^{-5}$	$1. 55 \times 10^{-3}$
米 <sup>2</sup> /秒	$10^4$	$10^6$	1	3600	10. 764	$1. 55 \times 10^3$
米 <sup>2</sup> /时	2. 778	277. 8	$2. 778 \times 10^{-4}$	1	$2. 99 \times 10^{-3}$	0. 4306
英尺 <sup>2</sup> /秒	929. 03	92903	$9. 2903 \times 10^{-2}$	334. 5	1	144
英寸 <sup>2</sup> /秒	6. 452	645. 2	$6. 452 \times 10^{-4}$	2. 323	$6. 944 \times 10^{-3}$	1

注:条件黏度( 恩氏黏度)与运动黏度的换算:

$$\nu = 0. 0731E - \frac{0. 0631}{E}$$

式中  $\nu$ ——运动黏度(St);  
E——恩氏黏度(°E)。

13. 热量单位换算（见表 13 - 30）

表 13 - 30 热量单位换算表

	kJ	kW · h	kcal	kgf · m	Btu	马力小时	hp · h
千焦	1	$2. 778 \times 10^{-4}$	0. 2388	101. 97	0. 9478	$3. 777 \times 10^{-4}$	$3. 723 \times 10^{-4}$
千瓦小时	3600	1	859. 8	367098	3412. 14	1. 36	1. 341
国际千卡	4. 1868	$1. 163 \times 10^{-3}$	1	427. 2	3. 968	$1. 581 \times 10^{-3}$	$1. 558 \times 10^{-3}$
千克力米	$9. 807 \times 10^{-3}$	$2. 724 \times 10^{-6}$	$2. 341 \times 10^{-3}$	1	$9. 291 \times 10^{-3}$	$3. 701 \times 10^{-6}$	$3. 653 \times 10^{-6}$
英热单位	1. 055	$2. 931 \times 10^{-4}$	0. 252	107. 6	1	$3. 984 \times 10^{-4}$	$3. 98 \times 10^{-4}$
马力小时	$2. 648 \times 10^3$	0. 7353	632. 5	$2. 702 \times 10^5$	2510	1	0. 9863
英制马力小时	$2. 685 \times 10^3$	0. 7457	641. 2	$2. 737 \times 10^5$	2544. 4	1. 0139	1



14. 功率单位换算 (见表 13-31)

表 13-31 功率单位换算

	W	kcal/h	kgf · m/s	马力	hp	lbf · ft/s	Btu/h
瓦	1	0.8598	0.102	$1.36 \times 10^{-3}$	$1.341 \times 10^{-3}$	0.7376	3.412
千卡/时	1.163	1	0.1186	$1.531 \times 10^{-3}$	$1.56 \times 10^{-3}$	0.8578	3.968
千克力 · 米/秒	9.8067	8.432	1	0.01333	0.01315	7.233	33.46
马力	735.5	632.4	75	1	0.9863	542.5	2509.6
英制马力	745.7	641.2	76.04	1.0139	1	550	2544.4
磅力 · 英尺/秒	1.3558	1.1658	0.1383	$1.843 \times 10^{-3}$	$1.818 \times 10^{-3}$	1	4.626
英热单位/时	0.293	0.252	$2.988 \times 10^{-2}$	$3.985 \times 10^{-4}$	$3.930 \times 10^{-4}$	0.2162	1

15. 传热系数换算 (见表 13-32)

表 13-32 传热系数换算

	W/(m <sup>2</sup> · K)	cal/(cm <sup>2</sup> · s · K)	kcal/(m <sup>2</sup> · h · K)	Btu/(ft <sup>2</sup> · h · °F)
瓦/(米 <sup>2</sup> · 开)	1	$0.2388 \times 10^{-4}$	0.8598	0.1761
卡/(厘米 <sup>2</sup> · 秒 · 开)	41868	1	36000	7373.4
千卡/(米 <sup>2</sup> · 时 · 开)	1.163	$2.7778 \times 10^{-5}$	1	0.2048
英热单位/(英尺 <sup>2</sup> · 时 · °F)	5.6783	$1.356 \times 10^{-4}$	4.8824	1

16. 导热系数换算 (见表 13-33)

表 13-33 导热系数换算

	W/(m · K)	cal/(cm · s · K)	kcal/(m · h · K)	Btu/(ft · h · °F)
瓦/(米 · 开)	1	$0.2388 \times 10^{-2}$	0.8598	0.5778
卡/(厘米 · 秒 · 开)	418.7	1	360	241.9
千卡/(时 · 开)	1.163	$2.778 \times 10^{-3}$	1	0.672
英热单位/(英尺 · 时 · °F)	1.731	$4.134 \times 10^{-3}$	1.488	1

17. 温度换算 (见表 13-34)

表 13-34 温度换算

	K	°C	°F	°R
开尔文	—	$C + 273.16$	$\frac{5}{9}(F - 32) + 273.16$	$\frac{5}{4}R + 273.16$
摄氏度	$K - 273.16$	—	$\frac{5}{9}(F - 32)$	$\frac{5}{4}R$
华氏度	$\frac{9}{5}(K - 273.16) + 32$	$\frac{9}{5}C + 32$	—	$\frac{9}{4}R + 32$
兰氏度	$\frac{4}{5}(K - 273.16)$	$\frac{4}{5}C$	$\frac{4}{9} - (F - 32)$	—

18. 角度换算（见表 13 - 35）

表 13 - 35 角度换算

	rad	( <sup>°</sup> )	( <sup>'</sup> )	( <sup>"</sup> )
弧度	1	57. 296	3437. 8	206265
度	0. 01745	1	60	3600
分	$2. 909 \times 10^{-4}$	0. 01667	1	60
秒	$4. 848 \times 10^{-6}$	$2. 778 \times 10^{-4}$	0. 01667	1

19. 角速度换算（见表 13 - 36）

表 13 - 36 角速度换算

	rad/s	rad/min	r/s	r/min	( <sup>°</sup> )/s	( <sup>°</sup> )/min
弧度/秒	1	60	0. 1592	9. 549	57. 296	3437. 8
弧度/分	0. 01667	1	$2. 653 \times 10^{-3}$	0. 1592	0. 955	57. 296
转/秒	6. 283	376. 99	1	60	360	21600
转/分	0. 1047	6. 283	0. 01667	1	6	3600
度/秒	0. 01745	1. 0472	$2. 778 \times 10^{-8}$	0. 1667	1	60
度/分	$2. 909 \times 10^{-4}$	0. 01745	$4. 63 \times 10^{-5}$	$2. 778 \times 10^{-3}$	0. 01667	1

20. 炉排热负荷换算（见表 13 - 37）

表 13 - 37 炉排热负荷换算

	W/m <sup>2</sup>	W/in <sup>2</sup>	kcal/(m <sup>2</sup> · h)	Btu/(ft <sup>2</sup> · h)
瓦/米 <sup>2</sup>	1	$6. 452 \times 10^{-4}$	0. 8598	0. 317
瓦/英寸 <sup>2</sup>	1550	1	1332. 8	491. 3
千卡/(米 <sup>2</sup> · 时)	1. 163	$7. 503 \times 10^{-4}$	1	0. 3687
英热单位/(英尺 <sup>2</sup> · 时)	3. 155	$2. 035 \times 10^{-3}$	2. 712	1

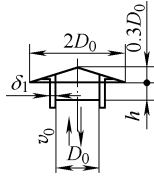
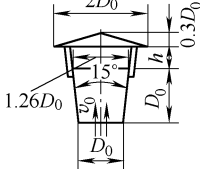
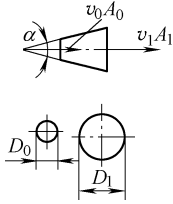
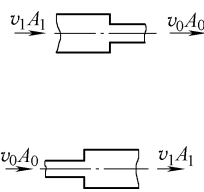
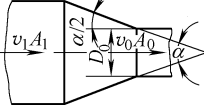
21. 炉膛容积热负荷换算（见表 13 - 38）

表 13 - 38 炉膛容积热负荷换算

	W/m <sup>3</sup>	cal/(cm <sup>3</sup> · s)	kcal/(m <sup>3</sup> · h)	Btu/(ft <sup>3</sup> · h)
瓦/米 <sup>3</sup>	1	$0. 2388 \times 10^{-6}$	0. 8598	$9. 662 \times 10^{-2}$
卡/(厘米 <sup>3</sup> · 秒)	$4. 1868 \times 10^6$	1	$3. 6 \times 10^6$	$4. 0453 \times 10^5$
千卡/(米 <sup>3</sup> · 时)	1. 163	$2. 778 \times 10^{-4}$	1	0. 1124
英热单位/(英尺 <sup>3</sup> · 时)	10. 35	$2. 472 \times 10^6$	8. 899	1

13.5 烟风道异径管局部阻力系数（见表 13 - 39）

表 13 - 39 局部阻力系数

序号	名称	图形	局部阻力系数 $\zeta$ ( $\zeta$ 值以图内所示的速度 $v_0$ 计算)												
1	伞形风帽 (管边尖锐)		进风	$h/D_q$											
				0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	$\infty$	
				2.63	1.83	1.53	1.39	1.31	1.19	1.15	1.08	1.07	1.06	1.06	
				4.00	2.30	1.60	1.30	1.15	1.10	—	1.00	—	1.00	—	
2	带扩散管的伞形风帽		进风	1.32	0.77	0.60	0.48	0.41	0.30	0.29	0.28	0.25	0.25		
			排风	2.60	1.30	0.80	0.7	0.60	0.60	—	0.60	—	0.60	—	
3	圆形渐扩管		$\frac{A_1}{A_0}$	$\alpha$											
				10°			20°		25°		30°			45°	
			1.25	0.01	0.02		0.03		0.04		0.05			0.06	
			1.50	0.02	0.03		0.05		0.08		0.11			0.13	
			1.75	0.03	0.05		0.07		0.11		0.15			0.20	
			2.00	0.04	0.06		0.10		0.15		0.21			0.27	
			2.25	0.05	0.08		0.13		0.19		0.27			0.34	
			2.50	0.06	0.10		0.15		0.23		0.32			0.40	
			当 $\alpha > 45^\circ$ 时, $\zeta = \left(1 - \frac{A_0}{A_1}\right)^2$												
4	突然收缩与突然扩大		$\frac{A_0}{A_1}$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
			$\zeta$	0.5	0.47	0.42	0.38	0.34	0.30	0.25	0.20	0.15	0.09	0	
			$\frac{A_0}{A_1}$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
			$\zeta$	1.0	0.81	0.64	0.49	0.36	0.25	0.16	0.09	0.04	0.01	0	
5	渐缩管		$\alpha$		10°		15°		20°		25°		30°		
			$A_1/A_0$												
			1.25	0.218		0.269		0.313		0.355		0.395			
			1.50	0.314		0.387		0.451		0.512		0.569			
			1.75	0.428		0.527		0.613		0.695		0.774			
			2.00	0.558		0.689		0.801		0.909		1.011			

(续)

序号	名称	图形	局部阻力系数 $\zeta$ ( $\zeta$ 值以图内所示的速度 $v_0$ 计算)																		
6	侧孔吸风		$\frac{A_2}{A_1}$	$Q_2/Q_0$					$\zeta_0$												
				0.1	0.2	0.3	0.4	0.5													
			0.1	0.8	1.3	1.4	1.4	1.4													
			0.2	-1.4	0.9	1.3	1.4	1.4													
			0.4	-9.5	0.2	0.9	1.2	1.3													
			0.6	-21.2	-2.5	0.3	1.0	1.2													
			$\frac{A_2}{A_1}$	$Q_2/Q_0$				$\zeta_1$													
				0.3	0.2	0.3	0.4														
			0.1	0.1	-0.1	-0.8	-2.6														
			0.2	0.1	0.2	-0.01	-0.6														
			0.4	0.2	0.3	0.3	0.2														
			0.6	0.2	0.3	0.4	0.4														
7	圆(方)弯管																				
8	矩形弯管		$\zeta = \zeta' A$ ( $\zeta'$ ——圆、方弯管的 $\zeta$ 值)																		
			$a/b$	0.25	0.5	0.8	1.0	1.25	1.5	1.75	2	2.5	3.0	3.5							
			$A$	1.8	1.5	1.17	1.0	0.8	0.7	0.57	0.48	0.4	0.37	0.33							
9	圆(方)直角弯管		$\alpha$	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°										
			$\zeta$	1.55	1.28	1.04	0.81	0.6	0.4	0.23	0.09										
10	管内间板		$\frac{n}{D_0}$	0.10	0.125	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0							
			圆形风管 $\zeta$	—	97.8	35	10.0	4.6	2.06	0.89	0.44	0.17	0.06	0							
			矩形风道 $\zeta$	193	—	44.5	17.8	8.12	4.02	2.08	0.95	0.39	0.09	0							

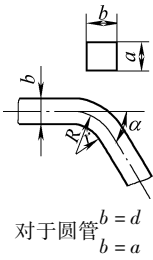
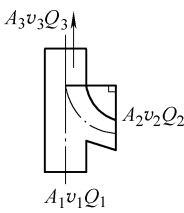
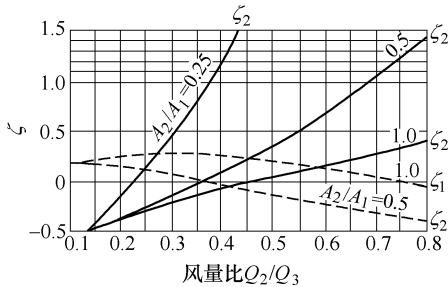
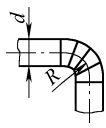
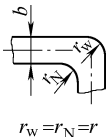
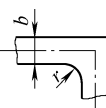
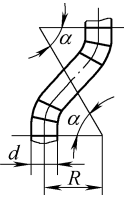
(续)

序号	名称	图形	局部阻力系数 $\zeta$ ( $\zeta$ 值以图内所示的速度 $v_0$ 计算)									
11	伞形罩		$\alpha$	10°	20°	30°	40°	90°	120°	150°		
			圆形	0.14	0.07	0.04	0.05	0.11	0.20	0.30		
			矩形	0.25	0.13	0.10	0.12	0.19	0.27	0.37		
12	开口围罩		$\alpha$	15°	30°	45°	60°	90°	120°	150°		
			圆形	0.15	0.08	0.06	0.08	0.15	0.26	0.40		
			长方	0.25	0.16	0.15	0.17	0.25	0.35	0.40		
13	各种排气室											
		直管排气室	带喇叭管的排气室							沉降室或集气箱		
14	转动挡板		$\zeta$ 值									
			$\alpha$	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
			$n$									
			1	0.3	1.0	2.5	7	20	60	100	1500	8000
			2	0.4	1.0	2.5	4	8	30	50	350	6000
			3	0.2	0.7	2.0	5	10	20	40	160	6000
			4	0.25	0.8	2.0	4	8	15	30	100	6000
5	0.2	0.6	1.8	3.5	7	13	28	80	4000			
$n$ ——叶片数												
序号	名称	示意图	局部阻力系数(对应于尺寸 $d$ 、 $b$ 或 $F$ 处截面积的值)									
15	三通管道合流		$\frac{G_0}{G_2}$	$F_0/F_1$ 为下值时的 $\zeta_0$ 值			$F_0/F_1$ 为下值时的 $\zeta_1$ 值					
				0.25	0.5	1.0	0.5	1.0				
			0.1	-0.60	-0.60	-0.60	0.20	0.20				
			0.2	0.00	-0.20	-0.30	0.20	0.22				
			0.3	0.40	0.00	-0.10	0.10	0.25				
			0.4	1.20	0.25	0.00	0.00	0.24				
			0.5	2.30	0.40	0.01	-0.10	0.20				
			0.6	3.60	0.70	0.20	-0.20	0.18				
			0.7	—	1.00	0.30	-0.30	0.15				
0.8	—	1.50	0.40	-0.40	0.00							

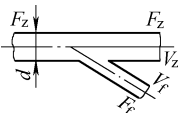
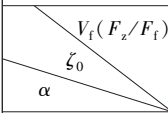
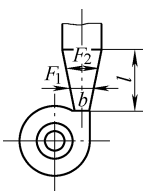
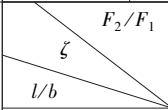
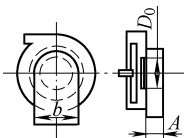
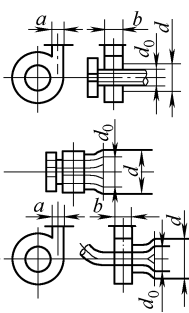
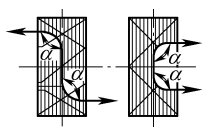
(续)

序号	名称	示意图	局部阻力系数(对应于尺寸 $d, b$ 或 $F$ 处截面积的值)						
16	三通管道分流	<p><math>R=3K, F=F_1</math></p>	$\frac{G_0}{G_2}$	$F_0/F_1$ 为下值时的 $\zeta_0$ 值				$F_0/F_1$ 为下值时的 $\zeta_1$ 值	
				0.25	0.5	0.75	1.0	0.25	1.0
			0.1	0.70	0.61	0.65	0.68	—	—
			0.2	0.50	0.50	0.55	0.56	—	—
			0.3	0.60	0.40	0.40	0.45	—	—
			0.4	0.80	0.40	0.35	0.40	0.05	0.03
			0.5	1.25	0.50	0.35	0.30	0.15	0.05
			0.6	2.00	0.60	0.38	0.29	0.20	0.12
			0.7	—	0.80	0.45	0.29	0.30	0.20
			0.8	—	1.05	0.58	0.30	0.40	0.29
	0.9	—	1.50	0.75	0.38	0.46	0.35		
17	压出四通		$v_2/v_1$	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
			$\zeta_1$	0	0	0	0	0	0
			$\zeta_2$	1.0	0.4	0.2	0.1	0.05	0
18	吸入四通		$v_2/v_1$	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
			$\zeta_1$	0.4	0.35	0.2	0.1	0	0
			$\zeta_2$	-1.8	-0.7	0	0.1	0.25	0.35
19	三通管道	<p><math>F=bh \quad f=b_1h</math></p>	$f/F$ 为下值时的 $\zeta$ 值( $\zeta$ ——支管阻力系数)						
			工况 $f/F$		0.5		1		
			分流		0.304		0.247		
			合流		0.233		0.072		
20	转角		$f/F$	1.0	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1
			$\zeta_A$	1.10	0.97	0.74	0.57	0.46	0.41
			$f/F$	1.0	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1
			$\zeta_B$	1.45	1.32	1.09	0.92	0.81	0.76
			$f/F$	1.0	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1
			$\zeta_C$	1.10	1.06	1.02	1.01	1.00	1.00
			$f, F$ ——图示 $f$ 或 $F$ 处之截面积; $\zeta_A, \zeta_B$ ——以小截面 $f$ 处之动压计算; $\zeta_C$ ——以截面 $F$ 处之动压计算						
21	转角		$t=0.10b$ 时 $\zeta=0.80$ $t=0.25b$ 时 $\zeta=0.50$						

(续)

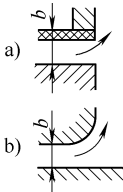
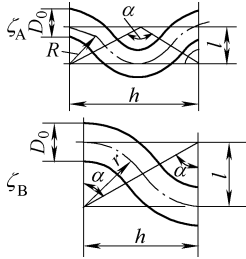
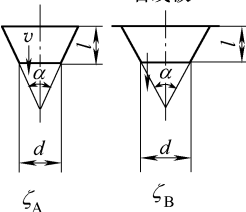
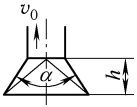
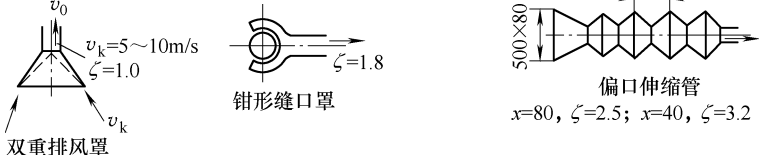
序号	名称	示意图	局部阻力系数(对应于尺寸 $d$ 、 $b$ 或 $F$ 处截面积的值)																																
22	缓弯头		$\zeta = \zeta_0 K_a K_{ab}$																																
			<table><tr><td><math>R/b</math></td><td>0.6</td><td>0.7</td><td>0.8</td><td>0.9</td><td>1.0</td><td>2.0</td><td>3.0</td></tr><tr><td><math>\zeta_0</math></td><td>1.0</td><td>0.68</td><td>0.48</td><td>0.36</td><td>0.28</td><td>0.20</td><td>0.15</td></tr><tr><td><math>\alpha^\circ</math></td><td>0</td><td>30</td><td>60</td><td>90</td><td>120</td><td>150</td><td>180</td></tr><tr><td><math>K_a</math></td><td>0</td><td>0.45</td><td>0.75</td><td>1.0</td><td>1.9</td><td>2.6</td><td>3.0</td></tr></table>	$R/b$	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	2.0	3.0	$\zeta_0$	1.0	0.68	0.48	0.36	0.28	0.20	0.15	$\alpha^\circ$	0	30	60	90	120	150	180	$K_a$	0	0.45	0.75	1.0	1.9	2.6	3.0
			$R/b$	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	2.0	3.0																									
			$\zeta_0$	1.0	0.68	0.48	0.36	0.28	0.20	0.15																									
			$\alpha^\circ$	0	30	60	90	120	150	180																									
			$K_a$	0	0.45	0.75	1.0	1.9	2.6	3.0																									
			<table><tr><td><math>a/b</math> <math>K_{ab}</math></td><td>0.4</td><td>0.6</td><td>0.8</td><td>1.0</td><td>2.0</td><td>3.0</td><td>4.0</td><td>8.0</td></tr><tr><td><math>R/b</math></td><td><math>\leq 2</math></td><td>1.22</td><td>1.14</td><td>1.07</td><td>1.0</td><td>0.86</td><td>0.85</td><td>0.9</td><td>1.0</td></tr><tr><td></td><td><math>&gt; 2</math></td><td>1.55</td><td>1.35</td><td>1.15</td><td>1.0</td><td>0.45</td><td>0.40</td><td>0.43</td><td>0.6</td></tr></table>	$a/b$ $K_{ab}$	0.4	0.6	0.8	1.0	2.0	3.0	4.0	8.0	$R/b$	$\leq 2$	1.22	1.14	1.07	1.0	0.86	0.85	0.9	1.0		$> 2$	1.55	1.35	1.15	1.0	0.45	0.40	0.43	0.6			
$a/b$ $K_{ab}$	0.4	0.6	0.8	1.0	2.0	3.0	4.0	8.0																											
$R/b$	$\leq 2$	1.22	1.14	1.07	1.0	0.86	0.85	0.9	1.0																										
	$> 2$	1.55	1.35	1.15	1.0	0.45	0.40	0.43	0.6																										
23	矩形吸入三通																																		
24	焊接弯头		$\zeta = \zeta_0 K_a$																																
			<table><tr><td><math>R/d</math></td><td>0.6</td><td>0.7</td><td>0.8</td><td>0.9</td><td>1.0</td><td>2.0</td><td>3.0</td></tr><tr><td><math>\zeta_0</math></td><td>1.0</td><td>0.87</td><td>0.80</td><td>0.74</td><td>0.70</td><td>0.34</td><td>0.23</td></tr></table>	$R/d$	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	2.0	3.0	$\zeta_0$	1.0	0.87	0.80	0.74	0.70	0.34	0.23																
$R/d$	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	2.0	3.0																												
$\zeta_0$	1.0	0.87	0.80	0.74	0.70	0.34	0.23																												
			$K_a$ 同序号 22																																
25	弧形的急弯头 内外侧均呈		$\zeta = \zeta_0 K_a K_{ab}$																																
			<table><tr><td><math>r/b</math></td><td>0.1</td><td>0.2</td><td>0.3</td><td>0.4</td><td>0.5</td><td>0.6</td></tr><tr><td><math>\zeta_0</math></td><td>0.84</td><td>0.53</td><td>0.38</td><td>0.32</td><td>0.27</td><td>0.25</td></tr></table>	$r/b$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	$\zeta_0$	0.84	0.53	0.38	0.32	0.27	0.25																		
$r/b$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6																													
$\zeta_0$	0.84	0.53	0.38	0.32	0.27	0.25																													
			$K_a$ 及 $K_{ab}$ 同序号 22																																
26	内侧面呈弧形的 急弯头		$\zeta = \zeta_0 K_a K_{ab}$																																
			<table><tr><td><math>r/b</math></td><td>0.1</td><td>0.2</td><td>0.3</td><td>0.4</td><td>0.5</td><td>0.6</td><td>0.7</td></tr><tr><td><math>\zeta_0</math></td><td>1.05</td><td>0.83</td><td>0.70</td><td>0.63</td><td>0.57</td><td>0.53</td><td>0.50</td></tr></table>	$r/b$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	$\zeta_0$	1.05	0.83	0.70	0.63	0.57	0.53	0.50																
$r/b$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7																												
$\zeta_0$	1.05	0.83	0.70	0.63	0.57	0.53	0.50																												
			$K_a$ 及 $K_{ab}$ 同序号 22																																
27	等错弯头		$\zeta = \zeta_0 K_{ab}$																																
			<table><tr><td><math>R/d</math></td><td><math>\alpha</math></td><td>30°</td><td>45°</td><td>60°</td><td>90°</td></tr><tr><td>1.5</td><td><math>\zeta_0</math></td><td>0.18</td><td>0.25</td><td>0.30</td><td>0.39</td></tr><tr><td>1.0</td><td></td><td>0.23</td><td>0.30</td><td>0.38</td><td>0.48</td></tr></table>	$R/d$	$\alpha$	30°	45°	60°	90°	1.5	$\zeta_0$	0.18	0.25	0.30	0.39	1.0		0.23	0.30	0.38	0.48														
			$R/d$	$\alpha$	30°	45°	60°	90°																											
			1.5	$\zeta_0$	0.18	0.25	0.30	0.39																											
1.0		0.23	0.30	0.38	0.48																														
$K_{ab}$ 同序号 22																																			

(续)

序号	名称	示意图	局部阻力系数(对应于尺寸 $d, b$ 或 $F$ 处截面积的值)						
28	不对称分支三通	 <p><math>F_z</math>——主管截面积; <math>F_f</math>——分支管截面积; <math>V_f</math>——分支管风量份额; <math>V_z</math>——主管风量份额 <math>V_z + V_f = 1</math></p>	分支管局部阻力系数 $\zeta = V_f^2 (F_z/F_f)^2 \zeta_0$						
				0.4	0.6	0.8	1.0	1.5	2.0
			45°	4	1.4	0.7	0.5	0.4	0.5
			90°	7	3	1.8	1.3	0.8	0.6
			主管局部阻力系数 $\zeta = V_z^2 \zeta_0$						
			$V_z$	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	
			$\zeta_0$	5.0	0.9	0.2	0.02	0	
29	渐扩管道 风机出口的			1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	
			1.0	0.20	0.47	0.60			
			2.0	0.04	0.22	0.40	0.54	0.70	
			3.0		0.12	0.22	0.35	0.47	
			4.0			0.15	0.24	0.34	
			注:如果用截面 $F_2$ 上的速度来计算阻力,则 $\zeta$ 值应为表内数值的 $(F_2/F_1)^2$ 倍。						
30	风机的进口 或送风机的出口		$\zeta = 0.7$						
31	二次风蜗壳		当 $a/b = 0.3 \sim 0.9$ ; $d_0/d \leq 0.61$ ; $ab/d^2 = 0.55 \sim 0.72$ ; $\zeta = 5.0$ (已包括出口损失)						
32	在管束中转弯		$\alpha = 45^\circ \quad \zeta = 0.5$ $\alpha = 90^\circ \quad \zeta = 1.0$ $\alpha = 180^\circ \quad \zeta = 2.0$						




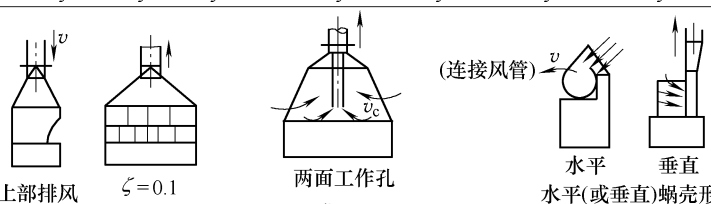
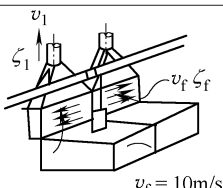
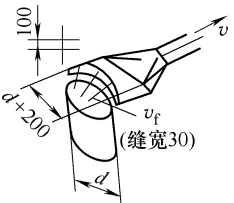
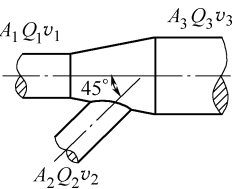
(续)

序号	名称	示意图	局部阻力系数(对应于尺寸 $d$ 、 $b$ 或 $F$ 处截面积的值)																																																																																																										
33	烟囱入口		图 a $\zeta = 1.4$ 图 b $\zeta = 0.9$																																																																																																										
序号	名称	示意图	$\zeta$ 值																																																																																																										
34	圆形弯管		<table><tr><th rowspan="3"><math>\alpha</math></th><th colspan="4"><math>R/D_0</math></th><th colspan="4"><math>r/D_0</math></th></tr><tr><th>1</th><th>2</th><th>4</th><th>6</th><th>1</th><th>2</th><th>4</th><th>6</th></tr><tr><th colspan="4"><math>\zeta_A</math></th><th colspan="4"><math>\zeta_B</math></th></tr><tr><td>20°</td><td>0.26</td><td>0.18</td><td>0.12</td><td>0.1</td><td>0.13</td><td>0.09</td><td>0.06</td><td>0.05</td></tr><tr><td>40°</td><td>0.50</td><td>0.32</td><td>0.22</td><td>0.18</td><td>0.25</td><td>0.16</td><td>0.11</td><td>0.09</td></tr><tr><td>60°</td><td>0.68</td><td>0.44</td><td>0.32</td><td>0.24</td><td>0.34</td><td>0.22</td><td>0.16</td><td>0.12</td></tr><tr><td>80°</td><td>0.81</td><td>0.56</td><td>0.38</td><td>0.30</td><td>0.41</td><td>0.28</td><td>0.19</td><td>0.15</td></tr><tr><td>100°</td><td>0.92</td><td>0.62</td><td>0.44</td><td>0.34</td><td>0.46</td><td>0.31</td><td>0.22</td><td>0.17</td></tr><tr><td>120°</td><td>1.02</td><td>0.68</td><td>0.48</td><td>0.38</td><td>0.51</td><td>0.34</td><td>0.24</td><td>0.19</td></tr><tr><td>140°</td><td>1.08</td><td>0.72</td><td>0.50</td><td>0.40</td><td>0.54</td><td>0.36</td><td>0.25</td><td>0.2</td></tr><tr><td>160°</td><td>1.16</td><td>0.76</td><td>0.54</td><td>0.42</td><td>0.58</td><td>0.38</td><td>0.27</td><td>0.21</td></tr><tr><td>180°</td><td>1.22</td><td>0.82</td><td>0.60</td><td>0.44</td><td>0.61</td><td>0.41</td><td>0.29</td><td>0.22</td></tr></table>	$\alpha$	$R/D_0$				$r/D_0$				1	2	4	6	1	2	4	6	$\zeta_A$				$\zeta_B$				20°	0.26	0.18	0.12	0.1	0.13	0.09	0.06	0.05	40°	0.50	0.32	0.22	0.18	0.25	0.16	0.11	0.09	60°	0.68	0.44	0.32	0.24	0.34	0.22	0.16	0.12	80°	0.81	0.56	0.38	0.30	0.41	0.28	0.19	0.15	100°	0.92	0.62	0.44	0.34	0.46	0.31	0.22	0.17	120°	1.02	0.68	0.48	0.38	0.51	0.34	0.24	0.19	140°	1.08	0.72	0.50	0.40	0.54	0.36	0.25	0.2	160°	1.16	0.76	0.54	0.42	0.58	0.38	0.27	0.21	180°	1.22	0.82	0.60	0.44	0.61	0.41	0.29	0.22
			$\alpha$		$R/D_0$				$r/D_0$																																																																																																				
					1	2	4	6	1	2	4	6																																																																																																	
				$\zeta_A$				$\zeta_B$																																																																																																					
			20°	0.26	0.18	0.12	0.1	0.13	0.09	0.06	0.05																																																																																																		
			40°	0.50	0.32	0.22	0.18	0.25	0.16	0.11	0.09																																																																																																		
			60°	0.68	0.44	0.32	0.24	0.34	0.22	0.16	0.12																																																																																																		
			80°	0.81	0.56	0.38	0.30	0.41	0.28	0.19	0.15																																																																																																		
			100°	0.92	0.62	0.44	0.34	0.46	0.31	0.22	0.17																																																																																																		
			120°	1.02	0.68	0.48	0.38	0.51	0.34	0.24	0.19																																																																																																		
140°	1.08	0.72	0.50	0.40	0.54	0.36	0.25	0.2																																																																																																					
160°	1.16	0.76	0.54	0.42	0.58	0.38	0.27	0.21																																																																																																					
180°	1.22	0.82	0.60	0.44	0.61	0.41	0.29	0.22																																																																																																					
35	喇叭形吸气口		<table><tr><th rowspan="3"><math>\zeta</math> <math>l/d</math></th><th colspan="2"><math>\alpha</math></th><th colspan="2">30°</th><th colspan="2">45°</th><th colspan="2">60°</th><th colspan="2">90°</th><th colspan="2">120°</th></tr><tr><th colspan="2"></th><th><math>\zeta_A</math></th><th><math>\zeta_B</math></th><th><math>\zeta_A</math></th><th><math>\zeta_B</math></th><th><math>\zeta_A</math></th><th><math>\zeta_B</math></th><th><math>\zeta_A</math></th><th><math>\zeta_B</math></th><th><math>\zeta_A</math></th><th><math>\zeta_B</math></th></tr><tr><td>0.05</td><td></td><td>0.8</td><td>0.35</td><td>0.75</td><td>0.3</td><td>0.65</td><td>0.3</td><td>0.6</td><td>0.35</td><td>0.55</td><td>0.4</td></tr><tr><td></td><td>0.1</td><td></td><td>0.55</td><td>0.25</td><td>0.45</td><td>0.2</td><td>0.4</td><td>0.18</td><td>0.4</td><td>0.25</td><td>0.4</td><td>0.3</td></tr><tr><td></td><td>0.2</td><td></td><td>0.35</td><td>0.2</td><td>0.3</td><td>0.16</td><td>0.22</td><td>0.15</td><td>0.22</td><td>0.22</td><td>0.25</td><td>0.3</td></tr><tr><td></td><td>0.3</td><td></td><td>0.3</td><td>0.15</td><td>0.2</td><td>0.15</td><td>0.2</td><td>0.13</td><td>0.2</td><td>0.2</td><td>0.25</td><td>0.3</td></tr><tr><td></td><td>0.6</td><td></td><td>0.15</td><td>0.12</td><td>0.13</td><td>0.08</td><td>0.13</td><td>0.12</td><td>0.15</td><td>0.15</td><td>0.2</td><td>0.25</td></tr><tr><td></td><td>1.0</td><td></td><td>0.1</td><td>0.1</td><td>0.1</td><td>0.05</td><td>0.1</td><td>0.1</td><td>0.13</td><td>0.1</td><td>0.15</td><td>0.25</td></tr></table>	$\zeta$ $l/d$	$\alpha$		30°		45°		60°		90°		120°				$\zeta_A$	$\zeta_B$	$\zeta_A$	$\zeta_B$	$\zeta_A$	$\zeta_B$	$\zeta_A$	$\zeta_B$	$\zeta_A$	$\zeta_B$	0.05		0.8	0.35	0.75	0.3	0.65	0.3	0.6	0.35	0.55	0.4		0.1		0.55	0.25	0.45	0.2	0.4	0.18	0.4	0.25	0.4	0.3		0.2		0.35	0.2	0.3	0.16	0.22	0.15	0.22	0.22	0.25	0.3		0.3		0.3	0.15	0.2	0.15	0.2	0.13	0.2	0.2	0.25	0.3		0.6		0.15	0.12	0.13	0.08	0.13	0.12	0.15	0.15	0.2	0.25		1.0		0.1	0.1	0.1	0.05	0.1	0.1	0.13	0.1	0.15	0.25				
			$\zeta$ $l/d$		$\alpha$		30°		45°		60°		90°		120°																																																																																														
							$\zeta_A$	$\zeta_B$	$\zeta_A$	$\zeta_B$	$\zeta_A$	$\zeta_B$	$\zeta_A$	$\zeta_B$	$\zeta_A$	$\zeta_B$																																																																																													
				0.05		0.8	0.35	0.75	0.3	0.65	0.3	0.6	0.35	0.55	0.4																																																																																														
				0.1		0.55	0.25	0.45	0.2	0.4	0.18	0.4	0.25	0.4	0.3																																																																																														
				0.2		0.35	0.2	0.3	0.16	0.22	0.15	0.22	0.22	0.25	0.3																																																																																														
				0.3		0.3	0.15	0.2	0.15	0.2	0.13	0.2	0.2	0.25	0.3																																																																																														
				0.6		0.15	0.12	0.13	0.08	0.13	0.12	0.15	0.15	0.2	0.25																																																																																														
	1.0		0.1	0.1	0.1	0.05	0.1	0.1	0.13	0.1	0.15	0.25																																																																																																	
36	异径排风罩		当 $\alpha = 30^\circ \sim 60^\circ$ 时, $h \geq d, \zeta = 0.1$ $\alpha = 45^\circ, h = d, \zeta = 0.05$																																																																																																										
37	异形排风罩																																																																																																												

(续)

序号	名称	图 形	$\zeta$ 值									
38	墙上进风口		$\frac{l}{D} = 0.5, \zeta = 0.7$									
39	圆方管端入口	图形										
		圆管	$r = 0.25D$	$r = 0.6D$	1.5		1.25		1.9			
		方管	1.2	1.05								
40	管端入口											
		$\zeta = 1.78 \quad \zeta = 1.0 \quad \zeta = 1.5 \quad \zeta = 0.7 \quad \zeta = 0.8 \quad \zeta = 0.93$ $A_0/A_1=50, \zeta=5.0$ $A_0/A_1=70, \zeta=2.0$										
41	带弯管的吸风口											
42	通风机出口变径管		$\alpha$	$A_0/A_1$								
				1.5	2	2.5	3	3.5	4			
			10°	0.08	0.09	0.1	0.1	0.11	0.11			
			15°	0.1	0.11	0.12	0.13	0.11	0.15			
			20°	0.12	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18			
			25°	0.15	0.18	0.21	0.23	0.25	0.26			
			30°	0.18	0.25	0.3	0.33	0.35	0.35			
			35°	0.21	0.31	0.38	0.41	0.43	0.44			
43	墙内吸风管		$\alpha$	20°	30°	45°	60°	70°	80°	90°		
			$\zeta$	0.96	0.91	0.81	0.70	0.63	0.56	0.50		
44	排风井		网格净面积 80%								$\zeta = 1.0$	

(续)

序号	名称	图 形	$\zeta$ 值																																																																																																																																																																																	
45	各种吸入孔缝		$\zeta=1.06$ $\zeta=1.06$ $\zeta=1.04$ $\zeta=1.75$ $\zeta=2.5$ $\zeta=1.47$ $\zeta=1.85$																																																																																																																																																																																	
46	排风柜		上部排风 $\zeta=0.1$ 两面工作孔 $\zeta=0.4$ (连接风管) 水平 垂直 水平(或垂直)蜗壳形 $\zeta=2.5$																																																																																																																																																																																	
47	浸渍槽侧吸罩	 $v_f = 10\text{m/s}$	对于 $v_1, \zeta_1 = 0.25$ 对于 $v_f, \zeta = 1.78$																																																																																																																																																																																	
48	装桶钳形罩		对于 $v_f, \zeta_1 = 1.76$ 对于 $v, \zeta = 0.25$																																																																																																																																																																																	
序号	名称	图 形	$\zeta$ 值( $\zeta_2$ 以图内所示速度 $v_3$ 计算)																																																																																																																																																																																	
49	气三通		干管 $\zeta_1$																																																																																																																																																																																	
			<table><tr><th rowspan="2"><math>A_1/A_3</math></th><th rowspan="2"><math>A_2/A_3</math></th><th colspan="10"><math>Q_2/Q_1</math></th></tr><tr><th>0.2</th><th>0.4</th><th>0.6</th><th>0.8</th><th>1.0</th><th>1.2</th><th>1.4</th><th>1.6</th><th>1.8</th><th>2.0</th></tr><tr><td rowspan="2">0.3</td><td>0.2</td><td>-2.4</td><td>-0.1</td><td>2.0</td><td>3.8</td><td>5.3</td><td>6.6</td><td>7.8</td><td>8.9</td><td>9.8</td><td>11</td></tr><tr><td>0.3</td><td>-2.8</td><td>-1.2</td><td>0.12</td><td>1.1</td><td>1.9</td><td>2.6</td><td>3.2</td><td>3.7</td><td>4.2</td><td>4.6</td></tr><tr><td rowspan="3">0.4</td><td>0.2</td><td>-1.2</td><td>0.93</td><td>2.8</td><td>4.5</td><td>5.9</td><td>7.2</td><td>8.4</td><td>9.5</td><td>10</td><td>11</td></tr><tr><td>0.3</td><td>-1.6</td><td>-2.7</td><td>0.81</td><td>1.7</td><td>2.4</td><td>3.0</td><td>3.6</td><td>4.1</td><td>4.5</td><td>4.9</td></tr><tr><td>0.4</td><td>-1.8</td><td>-7.2</td><td>0.07</td><td>0.66</td><td>1.1</td><td>1.5</td><td>1.8</td><td>2.1</td><td>2.3</td><td>2.5</td></tr><tr><td rowspan="4">0.5</td><td>0.2</td><td>-0.46</td><td>1.5</td><td>3.3</td><td>4.9</td><td>6.4</td><td>7.7</td><td>8.8</td><td>9.9</td><td>11</td><td>12</td></tr><tr><td>0.3</td><td>-0.94</td><td>0.25</td><td>1.2</td><td>2.0</td><td>2.7</td><td>3.3</td><td>3.8</td><td>4.2</td><td>4.7</td><td>5.0</td></tr><tr><td>0.4</td><td>1.1</td><td>-0.24</td><td>0.24</td><td>0.92</td><td>1.3</td><td>1.6</td><td>1.9</td><td>2.1</td><td>2.3</td><td>2.5</td></tr><tr><td>0.5</td><td>-1.2</td><td>-3.8</td><td>0.18</td><td>0.58</td><td>0.88</td><td>1.1</td><td>1.3</td><td>1.5</td><td>1.6</td><td>1.7</td></tr><tr><td rowspan="5">0.6</td><td>0.2</td><td>-0.55</td><td>1.3</td><td>3.1</td><td>4.7</td><td>6.1</td><td>7.3</td><td>8.6</td><td>9.6</td><td>11</td><td>12</td></tr><tr><td>0.3</td><td>-1.3</td><td>0</td><td>0.88</td><td>1.6</td><td>2.3</td><td>2.8</td><td>3.3</td><td>3.7</td><td>4.1</td><td>4.5</td></tr><tr><td>0.4</td><td>-1.2</td><td>-0.48</td><td>0.10</td><td>0.54</td><td>0.89</td><td>1.2</td><td>1.4</td><td>1.6</td><td>1.8</td><td>2.0</td></tr><tr><td>0.5</td><td>-1.3</td><td>-0.62</td><td>-0.14</td><td>0.21</td><td>0.47</td><td>0.68</td><td>0.85</td><td>0.99</td><td>1.1</td><td>1.2</td></tr><tr><td>0.6</td><td>-1.3</td><td>-0.69</td><td>-0.26</td><td>0.04</td><td>0.26</td><td>0.42</td><td>0.57</td><td>0.66</td><td>0.75</td><td>0.82</td></tr></table>	$A_1/A_3$	$A_2/A_3$	$Q_2/Q_1$										0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	0.3	0.2	-2.4	-0.1	2.0	3.8	5.3	6.6	7.8	8.9	9.8	11	0.3	-2.8	-1.2	0.12	1.1	1.9	2.6	3.2	3.7	4.2	4.6	0.4	0.2	-1.2	0.93	2.8	4.5	5.9	7.2	8.4	9.5	10	11	0.3	-1.6	-2.7	0.81	1.7	2.4	3.0	3.6	4.1	4.5	4.9	0.4	-1.8	-7.2	0.07	0.66	1.1	1.5	1.8	2.1	2.3	2.5	0.5	0.2	-0.46	1.5	3.3	4.9	6.4	7.7	8.8	9.9	11	12	0.3	-0.94	0.25	1.2	2.0	2.7	3.3	3.8	4.2	4.7	5.0	0.4	1.1	-0.24	0.24	0.92	1.3	1.6	1.9	2.1	2.3	2.5	0.5	-1.2	-3.8	0.18	0.58	0.88	1.1	1.3	1.5	1.6	1.7	0.6	0.2	-0.55	1.3	3.1	4.7	6.1	7.3	8.6	9.6	11	12	0.3	-1.3	0	0.88	1.6	2.3	2.8	3.3	3.7	4.1	4.5	0.4	-1.2	-0.48	0.10	0.54	0.89	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	0.5	-1.3	-0.62	-0.14	0.21	0.47	0.68	0.85	0.99	1.1	1.2	0.6	-1.3	-0.69	-0.26	0.04	0.26	0.42	0.57
$A_1/A_3$	$A_2/A_3$	$Q_2/Q_1$																																																																																																																																																																																		
		0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0																																																																																																																																																																									
0.3	0.2	-2.4	-0.1	2.0	3.8	5.3	6.6	7.8	8.9	9.8	11																																																																																																																																																																									
	0.3	-2.8	-1.2	0.12	1.1	1.9	2.6	3.2	3.7	4.2	4.6																																																																																																																																																																									
0.4	0.2	-1.2	0.93	2.8	4.5	5.9	7.2	8.4	9.5	10	11																																																																																																																																																																									
	0.3	-1.6	-2.7	0.81	1.7	2.4	3.0	3.6	4.1	4.5	4.9																																																																																																																																																																									
	0.4	-1.8	-7.2	0.07	0.66	1.1	1.5	1.8	2.1	2.3	2.5																																																																																																																																																																									
0.5	0.2	-0.46	1.5	3.3	4.9	6.4	7.7	8.8	9.9	11	12																																																																																																																																																																									
	0.3	-0.94	0.25	1.2	2.0	2.7	3.3	3.8	4.2	4.7	5.0																																																																																																																																																																									
	0.4	1.1	-0.24	0.24	0.92	1.3	1.6	1.9	2.1	2.3	2.5																																																																																																																																																																									
	0.5	-1.2	-3.8	0.18	0.58	0.88	1.1	1.3	1.5	1.6	1.7																																																																																																																																																																									
0.6	0.2	-0.55	1.3	3.1	4.7	6.1	7.3	8.6	9.6	11	12																																																																																																																																																																									
	0.3	-1.3	0	0.88	1.6	2.3	2.8	3.3	3.7	4.1	4.5																																																																																																																																																																									
	0.4	-1.2	-0.48	0.10	0.54	0.89	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0																																																																																																																																																																									
	0.5	-1.3	-0.62	-0.14	0.21	0.47	0.68	0.85	0.99	1.1	1.2																																																																																																																																																																									
	0.6	-1.3	-0.69	-0.26	0.04	0.26	0.42	0.57	0.66	0.75	0.82																																																																																																																																																																									

13.6 各国不锈钢耐酸钢牌号对照（见表 13 - 40）

表 13 - 40 各国不锈钢耐酸钢牌号对照

中国 GB, YB	日本 JIS	德国 DIN( W - Nr)	美国			英国 BS	法国 NF	前苏联 ГОСТ
			ASTM	AISI	SAE			
0Cr13	SUS405	X7Cr13( 1. 4000 )		405		405S17		08X13( 0X13 )
	SUS429			429				
	SUS416			416		416S21	Z12CF13	
1Cr17	SUS430	X8Cr17( 1. 4016 )		430		430S15	Z8C17	12X17( X17 )
	SUS430F	X12CrMoS17( 1. 4104 )		430F			Z10CF17	
	SUS434	X6CrMo17( 1. 4113 )		434		434S19	Z8CD17 - 01	
1Cr28		X8Cr28( 1. 4083 )						15X28( X28 )
0Cr17Ti								08X17T( 0X17T )
1Cr17Ti		X8CrTi17( 1. 4510 )						
1Cr25Ti								25X25T( X25T )
1Cr17Mo2Ti		X8CrMoTi17( 1. 4523 )						
1Cr13	SUS410 SUS403	X10Cr13( 1. 4006 ) , X15Cr13( 1. 4024 )		410 , 403		410S21 , 403S17	Z12C13	12X13( 1X13 )
	SUS410S	X7Cr13( 1. 4000 )	410S				Z6C13	08X13( 0X13 )
2Cr13	SUS420J1	X20Cr13( 1. 4021 )		420		420S37 420S29	Z20C13	20X13( 2X13 )
	SUS420F			420F			Z30CF13	
3Cr13	SUS420J2					420S45	Z30C13	30X13( 3X13 )

(续)

中国 GB, YB	日本 JIS	德国 DIN (W - Nr)	美国			英国 BS	法国 NF	前苏联 ГОСТ
			ASTM	AISI	SAE			
4Cr13		X40Cr13 (1. 4034)					Z40C14	40X13 (4X13)
1Cr17Ni2	SUS431	X22CrNi17 (1. 4057)		431		431S29		14X17H2 (1X17H2)
9Cr18								95X18 (9X18)
9Cr18MoV		X90CrMoV18 (1. 4112)						
	SUS440A			440A				
	SUS440B			440B				
	SUS440C			440C			Z100CD17	
	SUS440F		440F					
	SUS305	X5CrNi1911 (1. 4303)		305		305S19	Z8CN18 - 12	
00Cr18Ni10	SUS304L	X2CrNi189 (1. 4306)		304L		304L12	Z2CN18 - 10	03X18H11 (000X18H11)
0Cr18Ni9	SUS304	X5CrNi189 (1. 4301)		304		304S15	Z6CN18 - 09	08X18H10 (0X18H10)
1Cr18Ni9	SUS302	X12CrNi188 (1. 4300)		302		302S25	Z10CN18 - 09	12X18H9 (X18H9)
2Cr18Ni9								17X18H9 (2X18H9)
	SUS303	X12CrNiS188 (1. 4305)		303		303S12	Z10CNF18 - 09	
	SUS303Se			303Se		303S14		12X18H10E (X18H10E)
	SUS201			201				
	SUS202			202		284S16		12X17T9AH4 (X17T9AH4)
	SUS301			301		301S21	Z12CN17 - 07	
0Cr18Ni9Ti	SUS321	X10CrNiTi189 (1. 4541)		321		321S12	Z6CNT18 - 11	08X18H10T (0X18H10T)
1Cr18Ni9Ti		X10CrNiTi189 (1. 4541)				321S20	Z10CNT18 - 11	12X18H10T (X18H10T), 12X18H9T (X18H9T)

(续)

中国 GB, YB	日本 JIS	德国 DIN( W – Nr)	美国			英国 BS	法国 NF	前苏联 ГОСТ
			ASTM	AISI	SAE			
1Cr18Ni11Nb	SUS347	X10CrNiNb189( 1. 4550 )		347		347S17	Z10CNNb18 – 10	08X18H12b( 0X18H12b )
	SUS384			384			Z6CNC18 – 16	
	SUS385			385				
	SUSXM7		XM7				Z6CNU18 – 10	
	SUSXM15J1		XM15					
2Cr13Mn9Ni4								20X13H4Г9( 2X13H4Г9 )
1Cr18Mn8Ni5N								15X17AГ14( X17AГ14 )
0Cr18Ni2Mo2Ti		X10CrNiMoTi1810( 1. 4571 )					Z8CNDT17 – 12	10X17H13M2T( X17H13M2T )
1Cr18Ni12Mo2Ti		X10CrNiMoTi1810( 1. 4571 )					Z8CNDT17 – 12	10X17H13M2T( X17H13M2T )
	SUS308			308				
	SUS309S			309S				
	SUS310S			310S				
00Cr17Ni14Mo3	SUS317L	X2CrNiMo1810( 1. 4438 )		317L		317S12	Z2CND19 – 15	
0Cr18Ni12Mo3Ti						320S17	Z8CNDT17 – 13	
1Cr18Ni12Mo3Ti							Z8CNDT17 – 13	
	SUS317			317		317S16		
	SUS316	X2CrNiMo1810( 1. 4401 )		316			Z6CND17 – 12	
	SUS316L	X2CrNiMo1810( 1. 4404 ) , X2CrNiMo1812( 1. 4435 )		316L		316S12	Z2CND17 – 12 , Z2CND17 – 13	03X17H14M2 ( 000X17H13M2 )
00Cr18Ni14Mo2Cu2	SUS316J1L							
0Cr18Ni18Mo2Cu2Ti		X5CrNiMoCuTi1818( 1. 4506 )						
0Cr17Ni7Al	SUS631	X7CrNiAl177( 1. 4568 )	631				Z8CNA17 – 7	09X17H7 <sub>н</sub> ( 0X17H7 <sub>н</sub> )
	SUS630		630					

13.7 常用数据

13.7.1 常用钢材的许用应力

1. 常用国产钢材（见表 13 - 41）

表 13 - 41 常用国产钢材的许用应力

钢号	10	20	20G	15CrMo	12Cr1 MoV	12Cr2MoWVTiB *	12Cr3MoVSiTiB *	Q235	16Mng	
$\sigma_b^{20}$	333	392	402	441	471	539	627	372	470	
$\sigma_s^{20}$	196	226	226	225	255	333	441	216	305	
管 壁 温 度 /℃	20	111	131	134	147	157	180	209	124	156
	250	104	125	125					113	149
	260	101	123	123					111	146
	280	96	118	118					105	140
	300	91	113	113	143				101	135
	320	89	109	109	140				93	132
	340	84	102	102	136				88	130
	350	80	100	100	135	143			85	129
	360	78	97	97	132	141				127
	380	75	92	92	131	138				122
	400	70	87	87	128	135				117
	410	68	83	83	127	133				
	420	66	78	78	126	132				
	430	61	72	72	125	131				
	440	55	63	63	124	130				
	450	49	55	55	123	128				
	460		47	47	122	126				
	470		41	41	120	125				
	480		37	37	119	124				
	490				112	121				
	500				96	118				
	510				82	110(99)				
	520				69	98(88)				
	530				59	86(79)				
	540				49	77(72)	90	110		
	550				40	71(65)	84	97		
	560					65(58)	79	87		
	570					57(52)	74	75		
	580					50(46)	69	65		
	590						64	58		
	600						59	51		

注：1. 碳钢制成的管子或集箱，其金属温度不应超过 430℃，对于 20G 钢，若要求使用寿命不超过 20 年，使用温度则可提高至 450℃，但使用期间应加强金属监督。

2. 相邻金属温度数值之间的许用应力，可用算术内插法确定，但需舍弃小数点后的数字。

3. 铸钢件的许用应力值取表中相应数值的 0.7 倍；锻钢件的许用应力，当用钢锭锻造时，可取表中相应钢号数值的 0.9 倍。

4. 表中粗线下方的数据系按持久强度计算的；对于右上角带 \* 的钢号，此粗线并不表示按持久强度计算许用应力的起始温度。

5. 12Cr1MoV 一栏中括号内的许用应力值，为本规定推荐采用的数值。

## 2. 钢管许用应力

(1) 碳素钢和低合金钢钢管（见表 13 - 42）

表 13 - 42 碳素钢和低合金钢钢管许用应力

钢号	钢管标准	使用状态	壁厚/mm	室温强度指标		在下列温度(℃)下的许用应力/MPa															
				$R_m$ /MPa	$R_{eL}$ /MPa	≤20	100	150	200	250	300	350	400	425	450	475	500	525	550	575	600
10	GB/T 8163	热轧	≤10	335	205	124	121	115	108	98	89	82	75	70	61	41					
20	GB/T 8163	热轧	≤10	410	245	152	147	140	131	117	108	98	88	83	61	41					
Q345D	GB/T 8163	正火	≤10	470	345	174	174	174	174	167	153	143	125	93	66	43					
10	GB 9948	正火	≤16	335	205	124	121	115	108	98	89	82	75	70	61	41					
			> 16 ~ 30	335	195	124	117	111	105	95	85	79	73	67	61	41					
20	GB 9948	正火	≤16	410	245	152	147	140	131	117	108	98	88	83	61	41					
			> 16 ~ 30	410	235	152	140	133	124	111	102	93	83	78	61	41					
20	GB 6479	正火	≤16	410	245	152	147	140	131	117	108	98	88	83	61	41					
			> 16 ~ 40	410	235	152	140	133	124	111	102	93	83	78	61	41					
16Mn	GB 6479	正火	≤16	490	320	181	181	180	167	153	140	130	123	93	66	43					
			> 16 ~ 40	490	310	181	181	173	160	147	133	123	117	93	66	43					
12CrMo	GB 9948	正火加回火	≤16	410	205	137	121	115	108	101	95	88	82	80	79	77	74	50			
			> 16 ~ 30	410	195	130	117	111	105	98	91	85	79	77	75	74	72	50			
15CrMo	GB 9948	正火加回火	≤16	440	235	157	140	131	124	117	108	101	95	93	91	90	88	58	37		
			> 16 ~ 30	440	225	150	133	124	117	111	103	97	91	89	87	86	85	58	37		
			> 30 ~ 50	440	215	143	127	117	111	105	97	92	87	85	84	83	81	58	37		
12Cr2Mo1 <sup>①</sup>	—	正火加回火	≤30	450	280	167	167	163	157	153	150	147	143	140	137	119	89	61	46	37	
1Cr5Mo	GB 9948	退火	≤16	390	195	130	117	111	108	105	101	98	95	93	91	83	62	46	35	26	18
			> 16 ~ 30	390	185	123	111	105	101	98	95	91	88	86	85	82	62	46	35	26	18
12Cr1MoVG	GB 5310	正火加回火	≤30	470	255	170	153	143	133	127	117	111	105	103	100	98	95	82	59	41	
09MnD <sup>①</sup>	—	正火	≤8	420	270	156	156	150	143	130	120	110									
09MnNiD <sup>①</sup>	—	正火	≤8	440	280	163	163	157	150	143	137	127									
08Cr2AlMo <sup>①</sup>	—	正火加回火	≤8	400	250	148	148	140	130	123	117										
09CrCuSb <sup>①</sup>	—	正火	≤8	390	245	144	144	137	127												

① 该钢管的技术要求见 GB 150. 2—2011 中附录 A。



(2) 高合金钢钢管 (见表 13-43)

表 13-43 高合金钢钢管许用应力

钢号	钢管标准	壁厚 /mm	在下列温度(℃)下的许用应力/MPa																								备注
			≤20	100	150	200	250	300	350	400	450	500	525	550	575	600	625	650	675	700	725	750	775	800			
0Cr18Ni9 (S30408)	GB 13296	≤14	137	137	137	130	122	114	111	107	103	100	98	91	79	64	52	42	32	27						①	
			137	114	103	96	90	85	82	79	76	74	73	71	67	62	52	42	32	27							
0Cr18Ni9 (S30408)	GB/T 14976	≤28	137	137	137	130	122	114	111	107	103	100	98	91	79	64	52	42	32	27						①	
			137	114	103	96	90	85	82	79	76	74	73	71	67	62	52	42	32	27							
00Cr19Ni10 (S30403)	GB 13296	≤14	117	117	117	110	103	98	94	91	88														①		
			117	97	87	81	76	73	69	67	65																
00Cr19Ni10 (S30403)	GB/T 14976	≤28	117	117	117	110	103	98	94	91	88														①		
			117	97	87	81	76	73	69	67	65																
0Cr18Ni10Ti (S32168)	GB 13296	≤14	137	137	137	130	122	114	111	108	105	103	101	83	58	44	33	25	18	13					①		
			137	114	103	96	90	85	82	80	78	76	75	74	58	44	33	25	18	13							
0Cr18Ni10Ti (S32168)	GB/T 14976	≤28	137	137	137	130	122	114	111	108	105	103	101	83	58	44	33	25	18	13					①		
			137	114	103	96	90	85	82	80	78	76	75	74	58	44	33	25	18	13							
0Cr17Ni12Mo2 (S31608)	GB 13296	≤14	137	137	137	134	125	118	113	111	109	107	106	105	96	81	65	50	38	30					①		
			137	117	107	99	93	87	84	82	81	79	78	78	76	73	65	50	38	30							
0Cr17Ni12Mo2 (S31608)	GB/T 14976	≤28	137	137	137	134	125	118	113	111	109	107	106	105	96	81	65	50	38	30					①		
			137	117	107	99	93	87	84	82	81	79	78	78	76	73	65	50	38	30							
00Cr17Ni14Mo2 (S31603)	GB/T 13296	≤14	117	117	117	108	100	95	90	86	84																
			117	97	87	80	74	70	67	64	62																
00Cr17Ni14Mo2 (S31603)	GB/T 14976	≤28	117	117	117	108	100	95	90	86	84														①		
			117	97	87	80	74	70	67	64	62																
0Cr18Ni12Mo2Ti (S31668)	GB 13296	≤14	137	137	137	134	125	118	113	111	109	107													①		
			137	117	107	99	93	87	84	82	81	79															

(续)

钢号	钢管标准	壁厚 /mm	在下列温度(℃)下的许用应力/MPa																							备注
			≤20	100	150	200	250	300	350	400	450	500	525	550	575	600	625	650	675	700	725	750	775	800		
0Cr18Ni12Mo2Ti (S31668)	GB/T 14976	≤28	137	137	137	134	125	118	113	111	109	107													①	
			137	117	107	99	93	87	84	82	81	79														
0Cr19Ni13Mo3 (S31708)	GB 13296	≤14	137	137	137	134	125	118	113	111	109	107	106	105	96	81	65	50	38	30					①	
			137	117	107	99	93	87	84	82	81	79	78	78	76	73	65	50	38	30						
0Cr19Ni13Mo3 (S31708)	GB/T 14976	≤28	137	137	137	134	125	118	113	111	109	107	106	105	96	81	65	50	38	30					①	
			137	117	107	99	93	87	84	82	81	79	78	78	76	73	65	50	38	30						
00Cr19Ni13Mo3 (S31703)	GB 13296	≤14	117	117	117	117	117	117	113	111	109														①	
			117	117	107	99	93	87	84	82	81															
00Cr19Ni13Mo3 (S31703)	GB/T 14976	≤28	117	117	117	117	117	117	113	111	109														①	
			117	117	107	99	93	87	84	82	81															
0Cr25Ni20 (S31008)	GB 13296	≤14	137	137	137	137	134	130	125	122	119	115	113	105	84	61	43	31	23	19	15	12	10	8	①	
			137	121	111	105	99	96	93	90	88	85	84	83	81	61	43	31	23	19	15	12	10	8		
0Cr25Ni20 (S31008)	GB/T 14976	≤28	137	137	137	137	134	130	125	122	119	115	113	105	84	61	43	31	23	19	15	12	10	8	①	
			137	121	111	105	99	96	93	90	88	85	84	83	81	61	43	31	23	19	15	12	10	8		
1Cr19Ni9 (S30409)	GB 13296	≤14	137	137	137	130	122	114	111	107	103	100	98	91	79	64	52	42	32	27					①	
			137	114	103	96	90	85	82	79	76	74	73	71	67	62	52	42	32	27						
S21953	GB/T 21833	≤12	233	233	223	217	210	203																		
S22253	GB/T 21833	≤12	230	230	230	230	223	217																		
S22053	GB/T 21833	≤12	243	243	243	243	240	233																		
S25073	GB/T 21833	≤12	296	296	296	280	267	257																		
S30408	GB/T 12771	≤28	116	116	116	111	104	97	94	91	88	85	83	77	67	54	44	36	27	23					①, ②	
			116	97	88	82	77	72	70	67	65	63	62	60	57	53	44	36	27	23					②	

(续)

钢号	钢管标准	壁厚 /mm	在下列温度(℃)下的许用应力/MPa																								备注
			≤20	100	150	200	250	300	350	400	450	500	525	550	575	600	625	650	675	700	725	750	775	800			
S30403	GB/T 12771	≤28	99	99	99	94	88	83	80	77	75															①、②	
			99	82	74	69	65	62	59	57	55																②
S31608	GB/T 12771	≤28	116	116	116	114	106	100	96	94	93	91	90	89	82	69	55	43	32	26							①、②
			116	99	91	84	79	74	71	70	69	67	66	66	65	62	55	43	32	26							②
S31603	GB/T 12771	≤28	99	99	99	92	85	81	77	73	71																①、②
			99	82	74	68	63	60	57	54	53																②
S32168	GB/T 12771	≤28	116	116	116	111	104	97	94	92	89	88	86	71	49	37	28	21	15	11							①、②
			116	97	88	82	77	72	70	68	66	65	64	63	49	37	28	21	15	11							②
S30408	GB/T 24593	≤4	116	116	116	111	104	97	94	91	88	85	83	77	67	54	44	36	27	23							①、②
			116	97	88	82	77	72	70	67	65	63	62	60	57	53	44	36	27	23							②
S30403	GB/T 24593	≤4	99	99	99	94	88	83	80	77	75																①、②
			99	82	74	69	65	62	59	57	55																②
S31608	GB/T 24593	≤4	116	116	116	114	106	100	96	94	93	91	90	89	82	69	55	43	32	26							①、②
			116	99	91	84	79	74	71	70	69	67	66	66	65	62	55	43	32	26							②
S31603	GB/T 24593	≤4	99	99	99	92	85	81	77	73	71																①、②
			99	82	74	68	63	60	57	54	53																②
S32168	GB/T 24593	≤4	116	116	116	111	104	97	94	92	89	88	86	71	49	37	28	21	15	11							①、②
			116	97	88	82	77	72	70	68	66	65	64	63	49	37	28	21	15	11							②
S21953	GB/T 21832	≤20	198	198	190	185	179	173																			②
S22253	GB/T 21832	≤20	196	196	196	196	190	185																			②
S22053	GB/T 21832	≤20	207	207	207	207	204	198																			②

① 该行许用应力仅适用于允许产生微量永久变形之元件,对于法兰或其他有微量永久变形就引起泄漏或故障的场合不能采用。  
② 该行许用应力已乘以焊接接头系数 0.85。

3. 钢板许用应力

(1) 碳素钢和低合金钢钢板 ( 见表 13 - 44 )

表 13 - 44 碳素钢和低合金钢钢板许用应力

钢号	钢板标准	使用状态	厚度/mm	室温强度指标		在下列温度 ( ℃ ) 下的许用应力/MPa															
				$R_m$ /MPa	$R_{eL}$ /MPa	≤20	100	150	200	250	300	350	400	425	450	475	500	525	550	575	600
Q245R	GB 713	热轧, 控轧, 正火	3 ~ 16	400	245	148	147	140	131	117	108	98	91	85	61	41					
			> 16 ~ 36	400	235	148	140	133	124	111	102	93	86	84	61	41					
			> 36 ~ 60	400	225	148	133	127	119	107	98	89	82	80	61	41					
			> 60 ~ 100	390	205	137	123	117	109	98	90	82	75	73	61	41					
			> 100 ~ 150	380	185	123	112	107	100	90	80	73	70	67	61	41					
Q345R	GB 713	热轧, 控轧, 正火	3 ~ 16	510	345	189	189	189	183	167	153	143	125	93	66	43					
			> 16 ~ 36	500	325	185	185	183	170	157	143	133	125	93	66	43					
			> 36 ~ 60	490	315	181	181	173	160	147	133	123	117	93	66	43					
			> 60 ~ 100	490	305	181	181	167	150	137	123	117	110	93	66	43					
			> 100 ~ 150	480	285	178	173	160	147	133	120	113	107	93	66	43					
Q370R	GB 713	正火	> 150 ~ 200	470	265	174	163	153	143	130	117	110	103	93	66	43					
			10 ~ 16	530	370	196	196	196	196	190	180	170									
			> 16 ~ 36	530	360	196	196	196	193	183	173	163									
18MnMoNbR	GB 713	正火加回火	> 36 ~ 60	520	340	193	193	193	180	170	160	150									
			30 ~ 60	570	400	211	211	211	211	211	211	211	207	195	177	117					
13MnNiMoR	GB 713	正火加回火	> 60 ~ 100	570	390	211	211	211	211	211	211	211	211	203	192	177	117				
			30 ~ 100	570	390	211	211	211	211	211	211	211	211	203							
15CrMoR	GB 713	正火加回火	> 100 ~ 150	570	380	211	211	211	211	211	211	211	200								
			6 ~ 60	450	295	167	167	167	160	150	140	133	126	122	119	117	88	58	37		
			> 60 ~ 100	450	275	167	167	157	147	140	131	124	117	114	111	109	88	58	37		
14Cr1MoR	GB 713	正火加回火	> 100 ~ 150	440	255	163	157	147	140	133	123	117	110	107	104	102	88	58	37		
			6 ~ 100	520	310	193	187	180	170	163	153	147	140	135	130	123	80	54	33		
12Cr2Mo1R	GB 713	正火加回火	> 100 ~ 150	510	300	189	180	173	163	157	147	140	133	130	127	121	80	54	33		
			6 ~ 150	520	310	193	187	180	173	170	167	163	160	157	147	119	89	61	46	37	
12Cr1MoVR	GB 713	正火加回火	6 ~ 60	440	245	163	150	140	133	127	117	111	105	103	100	98	95	82	59	41	
			> 60 ~ 100	430	235	157	147	140	133	127	117	111	105	103	100	98	95	82	59	41	

(续)

钢号	钢板标准	使用状态	厚度/mm	室温强度指标		在下列温度(℃)下的许用应力/MPa																
				$R_m$ /MPa	$R_{eL}$ /MPa	≤20	100	150	200	250	300	350	400	425	450	475	500	525	550	575	600	
12Cr2MoVR <sup>①</sup>	—	正火加回火	30 ~ 120	590	415	219	219	219	219	219	219	219	219	219	193	163	134	104	72			
16MnDR	GB 3531	正火,正火 加回火	6 ~ 16	490	315	181	181	180	167	153	140	130										
			> 16 ~ 36	470	295	174	174	167	157	143	130	120										
			> 36 ~ 60	460	285	170	170	160	150	137	123	117										
			> 60 ~ 100	450	275	167	167	157	147	133	120	113										
			> 100 ~ 120	440	265	163	163	153	143	130	117	110										
15MnNiDR	GB 3531	正火,正火 加回火	6 ~ 16	490	325	181	181	181	173													
			> 16 ~ 36	480	315	178	178	178	167													
			> 36 ~ 60	470	305	174	174	173	160													
15MnNiNbDR <sup>①</sup>	—	正火,正火 加回火	10 ~ 16	530	370	196	196	196	196													
			> 16 ~ 36	530	360	196	196	196	193													
			> 36 ~ 60	520	350	193	193	193	187													
09MnNiDR	GB 3531	正火,正火 加回火	6 ~ 16	440	300	163	163	163	160	153	147	137										
			> 16 ~ 36	430	280	159	159	157	150	143	137	127										
			> 36 ~ 60	430	270	159	159	150	143	137	130	120										
			> 60 ~ 120	420	260	156	156	147	140	133	127	117										
08Ni3DR <sup>①</sup>	—	正火,正 火加回 火,调质	6 ~ 60	490	320	181	181															
			> 60 ~ 100	480	300	178	178															
06Ni9DR <sup>①</sup>	—	调质	6 ~ 30	680	560	252	252															
			> 30 ~ 40	680	550	252	252															
07MnMoVR	GB 19189	调质	10 ~ 60	610	490	226	226	226	226													
07MnNiVDR	GB 19189	调质	10 ~ 60	610	490	226	226	226	226													
07MnNiMoDR	GB 19189	调质	10 ~ 50	610	490	226	226	226	226													
12MnNiVR	GB 19189	调质	10 ~ 60	610	490	226	226	226	226													

①该钢板的技术要求见 GB 150.2—2011 中附录 A。

(2) 高合金钢钢板 (见表 13-45)

表 13-45 高合金钢钢板许用应力

钢号	钢板标准	厚度 /mm	在下列温度(℃)下的许用应力/MPa																							备注
			≤20	100	150	200	250	300	350	400	450	500	525	550	575	600	625	650	675	700	725	750	775	800		
S11306	GB 24511	1.5 ~ 25	137	126	123	120	119	117	112	109																
S11348	GB 24511	1.5 ~ 25	113	104	101	100	99	97	95	90																
S11972	GB 24511	1.5 ~ 8	154	154	149	142	136	131	125																	
S21953	GB 24511	1.5 ~ 80	233	233	223	217	210	203																		
S22253	GB 24511	1.5 ~ 80	230	230	230	230	223	217																		
S22053	GB 24511	1.5 ~ 80	230	230	230	230	223	217																		
S30408	GB 24511	1.5 ~ 80	137	137	137	130	122	114	111	107	103	100	98	91	79	64	52	42	32	27					①	
			137	114	103	96	90	85	82	79	76	74	73	71	67	62	52	42	32	27					①	
S30403	GB 24511	1.5 ~ 80	120	120	118	110	103	98	94	91	88														①	
			120	98	87	81	76	73	69	67	65														①	
S30409	GB 24511	1.5 ~ 80	137	137	137	130	122	114	111	107	103	100	98	91	79	64	52	42	32	27					①	
			137	114	103	96	90	85	82	79	76	74	73	71	67	62	52	42	32	27					①	
S31008	GB 24511	1.5 ~ 80	137	137	137	137	134	130	125	122	119	115	113	105	84	61	43	31	23	19	15	12	10	8	①	
			137	121	111	105	99	96	93	90	88	85	84	83	81	61	43	31	23	19	15	12	10	8	①	
S31608	GB 24511	1.5 ~ 80	137	137	137	134	125	118	113	111	109	107	106	105	96	81	65	50	38	30					①	
			137	117	107	99	93	87	84	82	81	79	78	78	76	73	65	50	38	30					①	
S31603	GB 24511	1.5 ~ 80	120	120	117	108	100	95	90	86	84														①	
			120	98	87	80	74	70	67	64	62														①	
S31668	GB 24511	1.5 ~ 80	137	137	137	134	125	118	113	111	109	107													①	
			137	117	107	99	93	87	84	82	81	79													①	
S31708	GB 24511	1.5 ~ 80	137	137	137	134	125	118	113	111	109	107	106	105	96	81	65	50	38	30					①	
			137	117	107	99	93	87	84	82	81	79	78	78	76	73	65	50	38	30					①	
S31703	GB 24511	1.5 ~ 80	137	137	137	134	125	118	113	111	109														①	
			137	117	107	99	93	87	84	82	81														①	
S32168	GB 24511	1.5 ~ 80	137	137	137	130	122	114	111	108	105	103	101	83	58	44	33	25	18	13					①	
			137	114	103	96	90	85	82	80	78	76	75	74	58	44	33	25	18	13					①	
S39042	GB 24511	1.5 ~ 80	147	147	147	147	144	131	122																①	
			147	137	127	117	107	97	90																①	

① 该行许用应力仅适用于允许产生微量永久变形之元件,对于法兰或其他有微量永久变形就引起泄漏或故障的场合不能采用。

13.7.2 常用材料的力学性能、物理性能（见表 13 - 46 ~ 表 13 - 50）

表 13 - 46 常用材料的密度

材料名称	密度/( kg/m <sup>3</sup> )	材料名称	密度/( kg/m <sup>3</sup> )
钢筋混凝土	2400	熟石灰(粉)	500
碎石、卵石混凝土	2200	碳酸钠(纯碱)	2530
碎砖混凝土	1800	氢氧化钠(烧碱)	2130
加气、泡沫混凝土	700	石英砂	1600 ~ 1700
红砖	1700	石油(原油)	820 ~ 880
空心砖	1000 ~ 1500	燃料油(渣油)	900 ~ 950
煤渣砖	1670 ~ 1700	煤油	820 ~ 890
黏土耐火砖	2100	汽油	720 ~ 760
硅质耐火砖	1800 ~ 1900	机油	900 ~ 950
花岗岩	2600 ~ 3000	石棉板	1000 ~ 1300
大理石	2600 ~ 2700	石棉线	450 ~ 550
石灰石	2600 ~ 2800	岩棉板	100 ~ 200
粗砂(干)	1400 ~ 1900	岩棉保温毡	80 ~ 150
细砂(干)	1400 ~ 1650	微孔硅酸钙	200 ~ 250
细砂(湿)	1800 ~ 2100	硅酸铝纤维制品	150 ~ 200
无烟煤(块状)	950	普通玻璃棉	80 ~ 100
无烟煤(碎块)	800	超细玻璃棉	40 ~ 60
煤末	700	水泥膨胀珍珠岩	250 ~ 400
无烟煤粉	840 ~ 890	水玻璃膨胀珍珠岩	200 ~ 300
烟煤粉	400 ~ 700	泡沫塑料	20 ~ 50
锅炉渣	700 ~ 1000	普通玻璃	2400 ~ 2700
干煤灰	640 ~ 720	工业橡胶	1300 ~ 1800
煤矸石( ≤8mm )	< 2200	有机玻璃	1180
盐(细粒散放)	860	松木	417 ~ 440
盐(袋装)	810	杉木	376 ~ 384
矿盐(成块)	1000	柞木	766
盐酸	1200	水曲柳	686
硫酸(98%)	1850	山杨	486
磷酸三钠	1620	楠木	610
氯化铵	1540	软木	100 ~ 400
硫酸铵	1770	胶合板	560
生石灰(粉)	1200	刨花板	600
竹材	900	黏土(压实)	1600 ~ 2000
木屑	250	砂土(干松)	1220
黏土(干松)	1350	砂土(压实)	1600 ~ 2000

表 13-47 常用金属材料的性能

名称	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	线膨胀系数 $\alpha \times 10^6/^{\circ}\text{C}$	弹性模数 $E \times 10^6/98\text{kPa}(\text{kgf/cm}^2)$	导热系数 $\lambda/[W/(m \cdot ^{\circ}\text{C})]$
钢	7850	12	2.0	45.4
铸铁	7220	10.4	1.15~1.60	58.2
铝	2670	24	0.69	203.5
纯铜	8920	16.4	1.10~1.90	383.8
黄铜	8600	18.4	0.91~0.99	85.5
青铜	8800	18.5	1.15	64
锰	7200	23	—	131.4
镍	8900	13.7	—	58.2
锡	7310	22.4	—	64
锌	7140	32.5	0.84	116.3
铅	11337	29.5	0.17	34.9
铬	7100	8.1	—	362.9
银	10500	18.9	—	458.2
汞	13600	41	—	8.72

表 13-48 普通碳素结构钢力学性能 (GB/T 700—2007)

牌号	等级	屈服强度 <sup>①</sup> $R_{eH}$ /(N/mm <sup>2</sup> ), 不小于						抗拉强度 <sup>②</sup> $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A/\%$ $\geq$					冲击试验(V 型缺口)	
		厚度(或直径)/mm							厚度(或直径)/mm					温度 /℃	冲击吸收功 (纵向)/J $\geq$
		$\leq 16$	$> 16$ ~40	$> 40$ ~60	$> 60$ ~100	$> 100$ ~150	$> 150$ ~200		$\leq 40$	$> 40$ ~60	$> 60$ ~100	$> 100$ ~150	$> 150$ ~200		
Q195	—	195	185	—	—	—	—	315 ~ 430	33	—	—	—	—	—	—
Q215	A	215	205	195	185	175	165	335 ~ 450	31	30	29	27	26	—	—
	B													+20	27
Q235	A	235	225	215	215	195	185	370 ~ 500	26	25	24	22	21	—	—
	B													+20	27 <sup>③</sup>
	C													0	
	D													-20	
Q275	A	275	265	255	245	225	215	410 ~ 540	22	21	20	18	17	—	—
	B													+20	27
	C													0	
	D													-20	

① Q195 的屈服强度值仅供参考,不作交货条件。

② 厚度大于 100mm 的钢材,抗拉强度下限允许降低 20N/mm<sup>2</sup>。宽带钢(包括剪切钢板)抗拉强度上限不做交货条件。

③ 厚度小于 25mm 的 Q235B 级钢材,如供方能保证冲击吸收功值合格,经需方同意,可不做检验。



表 13 - 49 优质碳素结构钢化学成分（GB/T 699—1999）

序号	统一数字代号	牌号	化学成分/( 质量分数, % )					
			C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu
						不大于		
1	U20080	08F	0. 05 ~ 0. 11	≤0. 03	0. 25 ~ 0. 50	0. 10	0. 30	0. 25
2	U20100	10F	0. 07 ~ 0. 13	≤0. 07	0. 25 ~ 0. 50	0. 15	0. 30	0. 25
3	U20150	15F	0. 12 ~ 0. 18	≤0. 07	0. 25 ~ 0. 50	0. 25	0. 30	0. 25
4	U20082	08	0. 05 ~ 0. 11	0. 17 ~ 0. 37	0. 35 ~ 0. 65	0. 10	0. 30	0. 25
5	U20102	10	0. 07 ~ 0. 13	0. 17 ~ 0. 37	0. 35 ~ 0. 65	0. 15	0. 30	0. 25
6	U20152	15	0. 12 ~ 0. 18	0. 17 ~ 0. 37	0. 35 ~ 0. 65	0. 25	0. 30	0. 25
7	U20202	20	0. 17 ~ 0. 23	0. 17 ~ 0. 37	0. 35 ~ 0. 65	0. 25	0. 30	0. 25
8	U20252	25	0. 22 ~ 0. 29	0. 17 ~ 0. 37	0. 50 ~ 0. 80	0. 25	0. 30	0. 25
9	U20302	30	0. 27 ~ 0. 34	0. 17 ~ 0. 37	0. 50 ~ 0. 80	0. 25	0. 30	0. 25
10	U20352	35	0. 32 ~ 0. 39	0. 17 ~ 0. 37	0. 50 ~ 0. 80	0. 25	0. 30	0. 25
11	U20402	40	0. 37 ~ 0. 44	0. 17 ~ 0. 37	0. 50 ~ 0. 80	0. 25	0. 30	0. 25
12	U20452	45	0. 42 ~ 0. 50	0. 17 ~ 0. 37	0. 50 ~ 0. 80	0. 25	0. 30	0. 25
13	U20502	50	0. 47 ~ 0. 55	0. 17 ~ 0. 37	0. 50 ~ 0. 80	0. 25	0. 30	0. 25
14	U20552	55	0. 52 ~ 0. 60	0. 17 ~ 0. 37	0. 50 ~ 0. 80	0. 25	0. 30	0. 25
15	U20602	60	0. 57 ~ 0. 65	0. 17 ~ 0. 37	0. 50 ~ 0. 80	0. 25	0. 30	0. 25
16	U20652	65	0. 62 ~ 0. 70	0. 17 ~ 0. 37	0. 50 ~ 0. 80	0. 25	0. 30	0. 25
17	U20702	70	0. 67 ~ 0. 75	0. 17 ~ 0. 37	0. 50 ~ 0. 80	0. 25	0. 30	0. 25
18	U20752	75	0. 72 ~ 0. 80	0. 17 ~ 0. 37	0. 50 ~ 0. 80	0. 25	0. 30	0. 25
19	U20802	80	0. 77 ~ 0. 85	0. 17 ~ 0. 37	0. 50 ~ 0. 80	0. 25	0. 30	0. 25
20	U20852	85	0. 82 ~ 0. 90	0. 17 ~ 0. 37	0. 50 ~ 0. 80	0. 25	0. 30	0. 25
21	U21152	15Mn	0. 12 ~ 0. 18	0. 17 ~ 0. 37	0. 70 ~ 1. 00	0. 25	0. 30	0. 25
22	U21202	20Mn	0. 17 ~ 0. 23	0. 17 ~ 0. 37	0. 70 ~ 1. 00	0. 25	0. 30	0. 25
23	U21252	25Mn	0. 22 ~ 0. 29	0. 17 ~ 0. 37	0. 70 ~ 1. 00	0. 25	0. 30	0. 25
24	U21302	30Mn	0. 27 ~ 0. 34	0. 17 ~ 0. 37	0. 70 ~ 1. 00	0. 25	0. 30	0. 25
25	U21352	35Mn	0. 32 ~ 0. 39	0. 17 ~ 0. 37	0. 70 ~ 1. 00	0. 25	0. 30	0. 25
26	U21402	40Mn	0. 37 ~ 0. 44	0. 17 ~ 0. 37	0. 70 ~ 1. 00	0. 25	0. 30	0. 25
27	U21452	45Mn	0. 42 ~ 0. 50	0. 17 ~ 0. 37	0. 70 ~ 1. 00	0. 25	0. 30	0. 25
28	U21502	50Mn	0. 48 ~ 0. 56	0. 17 ~ 0. 37	0. 70 ~ 1. 00	0. 25	0. 30	0. 25
29	U21602	60Mn	0. 57 ~ 0. 65	0. 17 ~ 0. 37	0. 70 ~ 1. 00	0. 25	0. 30	0. 25
30	U21652	65Mn	0. 62 ~ 0. 70	0. 17 ~ 0. 37	0. 90 ~ 1. 20	0. 25	0. 30	0. 25
31	U21702	70Mn	0. 67 ~ 0. 75	0. 17 ~ 0. 37	0. 90 ~ 1. 20	0. 25	0. 30	0. 25

注：本表所列牌号为优质钢。如果是高级优质钢，在牌号后面加“A”（统一数字代号最后一位数字改为“3”）；如果是特级优质钢，在牌号后面加“E”（统一数字代号最后一位数字改为“6”）；对于沸腾钢，牌号后面为“F”（统一数字代号最后一位数字为“0”）；对于半镇静钢，牌号后面为“b”（统一数字代号最后一位数字为“1”）。

表 13-50 优质碳素结构钢力学性能（GB/T 699—1999）

序号	牌号	试样 毛坯 尺寸 /mm	推荐热处理/℃			力学性能					钢材交货状态硬度 HBS10/3000≤	
			正火	淬火	回火	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_s$ /MPa	$\delta_5$ /%	$\psi$ /%	$A_{KU2}$ /J		
											不小于	
1	08F	25	930			295	175	35	60		131	
2	10F	25	930			315	185	33	55		137	
3	15F	25	920			355	205	29	55		143	
4	08	25	930			325	195	33	60		131	
5	10	25	930			335	205	31	55		137	
6	15	25	920			375	225	27	55		143	
7	20	25	910			410	245	25	55		156	
8	25	25	900	870	600	450	275	23	50	71	170	
9	30	25	880	860	600	490	295	21	50	63	179	
10	35	25	870	850	600	530	315	20	45	55	197	
11	40	25	860	840	600	570	335	19	45	47	217	187
12	45	25	850	840	600	600	355	16	40	39	229	197
13	50	25	830	830	600	630	375	14	40	31	241	207
14	55	25	820	820	600	645	380	13	35		255	217
15	60	25	810			675	400	12	35		255	229
16	65	25	810			695	410	10	30		255	229
17	70	25	790			715	420	9	30		269	229
18	75	试样		820	480	1080	880	7	30		285	241
19	80	试样		820	480	1080	930	6	30		285	241
20	85	试样		820	480	1130	980	6	30		302	255
21	15Mn	25	920			410	245	26	55		163	
22	20Mn	25	910			450	275	24	50		197	
23	25Mn	25	900	870	600	490	295	22	50	71	207	
24	30Mn	25	880	860	600	540	315	20	45	63	217	187
25	35Mn	25	870	850	600	560	335	18	45	55	229	197
26	40Mn	25	860	840	600	590	355	17	45	47	229	207
27	45Mn	25	850	840	600	620	375	15	40	39	241	217
28	50Mn	25	830	830	600	645	390	13	40	31	255	217
29	60Mn	25	810			695	410	11	35		269	229
30	65Mn	25	830			735	430	9	30		285	229
31	70Mn	25	790			785	450	8	30		285	229

注：1. 对于直径或厚度小于 25mm 的钢材，热处理是在与成品截面尺寸相同的试样毛坯上进行。  
2. 表中所列正火推荐保温时间不少于 30min，空冷；淬火推荐保温时间不少于 30min，75、80 和 85 钢油冷，其余钢水冷；回火推荐保温时间不少于 1h。

13.8 常用材料

13.8.1 型材

1. 热轧圆钢、方钢

表 13-51 热轧圆钢和方钢的尺寸及理论重量

圆钢公称直径 $d$ 方钢公称边长 $a/\text{mm}$	理论重量/(kg/m)		圆钢公称直径 $d$ 方钢公称边长 $a/\text{mm}$	理论重量/(kg/m)	
	圆钢	方钢		圆钢	方钢
5.5	0.186	0.237	33	6.71	8.55
6	0.222	0.283	34	7.13	9.07
6.5	0.260	0.332	35	7.55	9.62
7	0.302	0.385	36	7.99	10.2
8	0.395	0.502	38	8.90	11.3
9	0.499	0.636	40	9.86	12.6
10	0.617	0.785	42	10.9	13.8
11	0.746	0.950	45	12.5	15.9
12	0.888	1.13	48	14.2	18.1
13	1.04	1.33	50	15.4	19.6
14	1.21	1.54	53	17.3	22.0
15	1.39	1.77	55	18.6	23.7
16	1.58	2.01	56	19.3	24.6
17	1.78	2.27	58	20.7	26.4
18	2.00	2.54	60	22.2	28.3
19	2.23	2.83	63	24.5	31.2
20	2.47	3.14	65	26.0	33.2
21	2.72	3.46	68	28.5	36.3
22	2.98	3.80	70	30.2	38.5
23	3.26	4.15	75	34.7	44.2
24	3.55	4.52	80	39.5	50.2
25	3.85	4.91	85	44.5	56.7
26	4.17	5.31	90	49.9	63.6
27	4.49	5.72	95	55.6	70.8
28	4.83	6.15	100	61.7	78.5
29	5.18	6.60	105	68.0	86.5
30	5.55	7.06	110	74.6	95.0
31	5.92	7.54	115	81.5	104
32	6.31	8.04	120	88.8	113

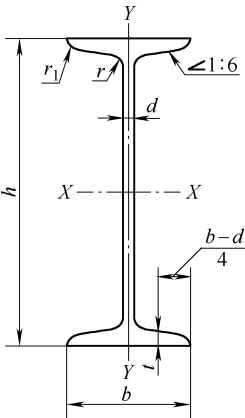
(续)

圆钢公称直径 $d$ 方钢公称边长 $a/\text{mm}$	理论重量/(kg/m)		圆钢公称直径 $d$ 方钢公称边长 $a/\text{mm}$	理论重量/(kg/m)	
	圆钢	方钢		圆钢	方钢
125	96.3	123	210	272	
130	104	133	220	298	
135	112	143	230	326	
140	121	154	240	355	
145	130	165	250	385	
150	139	177	260	417	
155	148	189	270	449	
160	158	201	280	483	
165	168	214	290	518	
170	178	227	300	555	
180	200	254	310	592	
190	223	283			
200	247	314			

注：表中钢的理论重量是按密度为  $7.85\text{g}/\text{cm}^3$  计算。

2. 热轧工字钢（见表 13-52）

表 13-52 工字钢截面尺寸、截面面积、理论重量（GB/T 706—2008）



$h$ ——高度；  
 $b$ ——腿宽度；  
 $d$ ——腰厚度；  
 $t$ ——平均腿厚度；  
 $r$ ——内圆弧半径；  
 $r_1$ ——腿端圆弧半径。

(续)

型号	截面尺寸/mm						截面面积 /cm <sup>2</sup>	理论重量 /(kg/m)
	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>d</i>	<i>t</i>	<i>r</i>	<i>r</i> <sub>1</sub>		
10	100	68	4.5	7.6	6.5	3.3	14.345	11.261
12	120	74	5.0	8.4	7.0	3.5	17.818	13.987
12.6	126	74	5.0	8.4	7.0	3.5	18.118	14.223
14	140	80	5.5	9.1	7.5	3.8	21.516	16.890
16	160	88	6.0	9.9	8.0	4.0	26.131	20.513
18	180	94	6.5	10.7	8.5	4.3	30.756	24.143
20a	200	100	7.0	11.4	9.0	4.5	35.578	27.929
20b		102	9.0				39.578	31.069
22a	220	110	7.5	12.3	9.5	4.8	42.128	33.070
22b		112	9.5				46.528	36.524
24a	240	116	8.0	13.0	10.0	5.0	47.741	37.477
24b		118	10.0				52.541	41.245
25a	250	116	8.0				48.541	38.105
25b		118	10.0				53.541	42.030
27a	270	122	8.5	13.7	10.5	5.3	54.554	42.825
27b		124	10.5				59.954	47.064
28a	280	122	8.5				55.404	43.492
28b		124	10.5				61.004	47.888
30a	300	126	9.0	14.4	11.0	5.5	61.254	48.084
30b		128	11.0				67.254	52.794
30c		130	13.0				73.254	57.504
32a	320	130	9.5	15.0	11.5	5.8	67.156	52.717
32b		132	11.5				73.556	57.741
32c		134	13.5				79.956	62.765
36a	360	136	10.0	15.8	12.0	6.0	76.480	60.037
36b		138	12.0				83.680	65.689
36c		140	14.0				90.880	71.341
40a	400	142	10.5	16.5	12.5	6.3	86.112	67.598
40b		144	12.5				94.112	73.878
40c		146	14.5				102.112	80.158
45a	450	150	11.5	18.0	13.5	6.8	102.446	80.420
45b		152	13.5				111.446	87.485
45c		154	15.5				120.446	94.550
50a	500	158	12.0	20.0	14.0	7.0	119.304	93.654
50b		160	14.0				129.304	101.504
50c		162	16.0				139.304	109.354
55a	550	166	12.5	21.0	14.5	7.3	134.185	105.335
55b		168	14.5				145.185	113.970
55c		170	16.5				156.185	122.605
56a	560	166	12.5				135.435	106.316
56b		168	14.5				146.635	115.108
56c		170	16.5				157.835	123.900
63a	630	176	13.0	22.0	15.0	7.5	154.658	121.407
63b		178	15.0				167.258	131.298
63c		180	17.0				179.858	141.189

注：表中 *r*、*r*<sub>1</sub> 的数据用于孔型设计，不做交货条件。

## 3. 热轧扁钢 (见表 13-53)

表 13-53 热轧扁钢的尺寸及理论重量 (GB/T 702—2008)

公称 宽度 /mm	厚度/mm																									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	18	20	22	25	28	30	32	36	40	45	50	56	60	
	理论重量/(kg/m)																									
10	0.24	0.31	0.39	0.47	0.55	0.63																				
12	0.28	0.38	0.47	0.57	0.66	0.75																				
14	0.33	0.44	0.55	0.66	0.77	0.88																				
16	0.38	0.50	0.63	0.75	0.88	1.00	1.15	1.26																		
18	0.42	0.57	0.71	0.85	0.99	1.13	1.27	1.41																		
20	0.47	0.63	0.78	0.94	1.10	1.26	1.41	1.57	1.73	1.88																
22	0.52	0.69	0.86	1.04	1.21	1.38	1.55	1.73	1.90	2.07																
25	0.59	0.78	0.98	1.18	1.37	1.57	1.77	1.96	2.16	2.36	2.75	3.14														
28	0.66	0.88	1.10	1.32	1.54	1.76	1.98	2.20	2.42	2.64	3.08	3.53														
30	0.71	0.94	1.18	1.41	1.65	1.88	2.12	2.36	2.59	2.83	3.30	3.77	4.24	4.71												
32	0.75	1.00	1.26	1.51	1.76	2.01	2.26	2.55	2.76	3.01	3.52	4.02	4.52	5.02												
35	0.82	1.10	1.37	1.65	1.92	2.20	2.47	2.75	3.02	3.30	3.85	4.40	4.95	5.50	6.04	6.87	7.69									
40	0.94	1.26	1.57	1.88	2.20	2.51	2.83	3.14	3.45	3.77	4.40	5.02	5.65	6.28	6.91	7.85	8.79									
45	1.06	1.41	1.77	2.12	2.47	2.83	3.18	3.53	3.89	4.24	4.95	5.65	6.36	7.07	7.77	8.83	9.89	10.60	11.30	12.72						
50	1.18	1.57	1.96	2.36	2.75	3.14	3.53	3.93	4.32	4.71	5.50	6.28	7.06	7.85	8.64	9.81	10.99	11.78	12.56	14.13						
55		1.73	2.16	2.59	3.02	3.45	3.89	4.32	4.75	5.18	6.04	6.91	7.77	8.64	9.50	10.79	12.09	12.95	13.82	15.54						
60		1.88	2.36	2.83	3.30	3.77	4.24	4.71	5.18	5.65	6.59	7.54	8.48	9.42	10.36	11.78	13.19	14.13	15.07	16.96	18.84	21.20				
65		2.04	2.55	3.06	3.57	4.08	4.59	5.10	5.61	6.12	7.14	8.16	9.18	10.20	11.23	12.76	14.29	15.31	16.33	18.37	20.41	22.96				

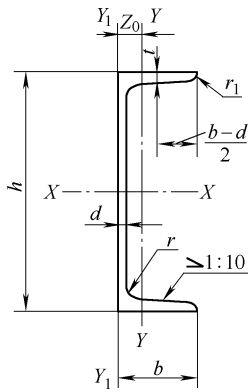
(续)

公称 宽度 /mm	厚度/mm																										
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	18	20	22	25	28	30	32	36	40	45	50	56	60		
	理论重量/( kg/m)																										
70		2.20	2.75	3.30	3.85	4.40	4.95	5.50	6.04	6.59	7.69	8.79	9.89	10.99	12.09	13.74	15.39	16.49	17.58	19.78	21.98	24.73					
75		2.36	2.94	3.53	4.12	4.71	5.30	5.89	6.48	7.07	8.24	9.42	10.60	11.78	12.95	14.72	16.48	17.66	18.84	21.20	23.55	26.49					
80		2.51	3.14	3.77	4.40	5.02	5.65	6.28	6.91	7.54	8.79	10.05	11.30	12.56	13.82	15.70	17.58	18.84	20.10	22.61	25.12	28.26	31.40	35.17			
85			3.34	4.00	4.67	5.34	6.01	6.67	7.34	8.01	9.34	10.68	12.01	13.34	14.68	16.68	18.68	20.02	21.35	24.02	26.69	30.03	33.36	37.37	40.04		
90			3.53	4.24	4.95	5.65	6.36	7.07	7.77	8.48	9.89	11.30	12.72	14.13	15.54	17.66	19.78	21.20	22.61	25.43	28.26	31.79	35.32	39.56	42.39		
95			3.73	4.47	5.22	5.97	6.71	7.46	8.20	8.95	10.44	11.93	13.42	14.92	16.41	18.64	20.88	22.37	23.86	26.85	29.83	33.56	37.29	41.76	44.74		
100			3.92	4.71	5.50	6.28	7.06	7.85	8.64	9.42	10.99	12.56	14.13	15.70	17.27	19.62	21.98	23.55	25.12	28.26	31.40	35.32	39.25	43.96	47.10		
105			4.12	4.95	5.77	6.59	7.42	8.24	9.07	9.89	11.54	13.19	14.84	16.48	18.13	20.61	23.08	24.73	26.38	29.67	32.97	37.09	41.21	46.16	49.46		
110			4.32	5.18	6.04	6.91	7.77	8.64	9.50	10.36	12.09	13.82	15.54	17.27	19.00	21.59	24.18	25.90	27.63	31.09	34.54	38.86	43.18	48.36	51.81		
120			4.71	5.65	6.59	7.54	8.48	9.42	10.36	11.30	13.19	15.07	16.96	18.84	20.72	23.55	26.38	28.26	30.14	33.91	37.68	42.39	47.10	52.75	56.52		
125				5.89	6.87	7.85	8.83	9.81	10.79	11.78	13.74	15.70	17.66	19.62	21.58	24.53	27.48	29.44	31.40	35.32	39.25	44.16	49.06	54.95	58.88		
130				6.12	7.14	8.16	9.18	10.20	11.23	12.25	14.29	16.33	18.37	20.41	22.45	25.51	28.57	30.62	32.66	36.74	40.82	45.92	51.02	57.15	61.23		
140					7.69	8.79	9.89	10.99	12.09	13.19	15.39	17.58	19.78	21.98	24.18	27.48	30.77	32.97	35.17	39.56	43.96	49.46	54.95	61.54	65.94		
150					8.24	9.42	10.60	11.78	12.95	14.13	16.48	18.84	21.20	23.55	25.90	29.44	32.97	35.32	37.68	42.39	47.10	52.99	58.88	65.94	70.65		
160					8.79	10.05	11.30	12.56	13.82	15.07	17.58	20.10	22.61	25.12	27.63	31.40	35.17	37.68	40.19	45.22	50.24	56.52	62.80	70.34	75.36		
180					9.89	11.30	12.72	14.13	15.54	16.96	19.78	22.61	25.43	28.26	31.09	35.32	39.56	42.39	45.22	50.87	56.52	63.58	70.65	79.13	84.78		
200					10.99	12.56	14.13	15.70	17.27	18.84	21.98	25.12	28.26	31.40	34.54	39.25	43.96	47.10	50.24	56.52	62.80	70.65	78.50	87.92	94.20		

注：1. 表中的粗线用以划分扁钢的组别：  
1 组——理论重量≤19kg/m；  
2 组——理论重量>19kg/m。  
2. 表中的理论重量按密度 7.85g/cm<sup>3</sup> 计算。

4. 热轧槽钢（见表 13-54）

表 13-54 槽钢截面尺寸、截面面积、理论重量（GB 706—2008）



$h$ ——高度；  
 $b$ ——腿宽度；  
 $d$ ——腰厚度；  
 $t$ ——平均腿厚度；  
 $r$ ——内圆弧半径；  
 $r_1$ ——腿端圆弧半径；  
 $Z_0$ —— $YY$  轴与  $Y_1Y_1$  轴间距。

型号	截面尺寸/mm						截面面积 /cm <sup>2</sup>	理论重量 /(kg/m)
	$h$	$b$	$d$	$t$	$r$	$r_1$		
5	50	37	4.5	7.0	7.0	3.5	6.928	5.438
6.3	63	40	4.8	7.5	7.5	3.8	8.451	6.634
6.5	65	40	4.3	7.5	7.5	3.8	8.547	6.709
8	80	43	5.0	8.0	8.0	4.0	10.248	8.045
10	100	48	5.3	8.5	8.5	4.2	12.748	10.007
12	120	53	5.5	9.0	9.0	4.5	15.362	12.059
12.6	126	53	5.5	9.0	9.0	4.5	15.692	12.318
14a	140	58	6.0	9.5	9.5	4.8	18.516	14.535
14b		60	8.0				21.316	16.733
16a	160	63	6.5	10.0	10.0	5.0	21.962	17.24
16b		65	8.5				25.162	19.752
18a	180	68	7.0	10.5	10.5	5.2	25.699	20.174
18b		70	9.0				29.299	23.000
20a	200	73	7.0	11.0	11.0	5.5	28.837	22.637
20b		75	9.0				32.837	25.777
22a	220	77	7.0	11.5	11.5	5.8	31.846	24.999
22b		79	9.0				36.246	28.453
24a	240	78	7.0	12.0	12.0	6.0	34.217	26.860
24b		80	9.0				39.017	30.628
24c		82	11.0				43.817	34.396
25a	250	78	7.0				34.917	27.410
25b		80	9.0				39.917	31.335
25c		82	11.0				44.917	35.260



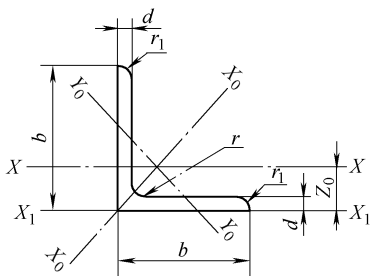
(续)

型号	截面尺寸/mm						截面面积 /cm <sup>2</sup>	理论重量 /(kg/m)
	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>d</i>	<i>t</i>	<i>r</i>	<i>r</i> <sub>1</sub>		
27a	270	82	7.5	12.5	12.5	6.2	39.284	30.838
27b		84	9.5				44.684	35.077
27c		86	11.5				50.084	39.316
28a	280	82	7.5	12.5	12.5	6.2	40.034	31.427
28b		84	9.5				45.634	35.823
28c		86	11.5				51.234	40.219
30a	300	85	7.5	13.5	13.5	6.8	43.902	34.463
30b		87	9.5				49.902	39.173
30c		89	11.5				55.902	43.883
32a	320	88	8.0	14.0	14.0	7.0	48.513	38.083
32b		90	10.0				54.913	43.107
32c		92	12.0				61.313	48.131
36a	360	96	9.0	16.0	16.0	8.0	60.910	47.814
36b		98	11.0				68.110	53.466
36c		100	13.0				75.310	59.118
40a	400	100	10.5	18.0	18.0	9.0	75.068	58.928
40b		102	12.5				83.068	65.208
40c		104	14.5				91.068	71.488

注:表中  $r$ 、 $r_1$  的数据用于孔型设计,不做交货条件。

5. 热轧等边角钢 (见表 13-55)

表 13-55 等边角钢截面尺寸、截面面积、理论重量 (GB/T 706—2008)



$b$ ——边宽度;  
 $d$ ——边厚度;  
 $r$ ——内圆弧半径;  
 $r_1$ ——边端圆弧半径;  
 $Z_0$ ——重心距离。

(续)

型号	截面尺寸/mm			截面面积 /cm <sup>2</sup>	理论重量 /(kg/m)	型号	截面尺寸/mm			截面面积 /cm <sup>2</sup>	理论重量 /(kg/m)
	<i>b</i>	<i>d</i>	<i>r</i>				<i>b</i>	<i>d</i>	<i>r</i>		
2	20	3	3.5	1.132	0.889	7	70	4	8	5.570	4.372
		4		1.459	1.145			5		6.875	5.397
2.5	25	3		1.432	1.124			6		8.160	6.406
		4		1.859	1.459			7		9.424	7.398
3.0	30	3	4.5	1.749	1.373	7.5	75	8	9	10.667	8.373
		4		2.276	1.786			5		7.412	5.818
3.6	36	3		2.109	1.656			6		8.797	6.905
		4		2.756	2.163			7		10.160	7.976
		5		3.382	2.654			8		11.503	9.030
4	40	3	5	2.359	1.852	8	80	9		12.825	10.068
		4		3.086	2.422			10		14.126	11.089
		5		3.791	2.976			5		7.912	6.211
4.5	45	3		2.659	2.088			6	10	9.397	3.376
		4		3.486	2.736			7		10.860	8.525
		5		4.292	3.369			8		12.303	9.658
		6		5.076	3.985			9		13.725	10.774
5	50	3	5.5	2.971	2.332	9	90	10	10	15.126	11.874
		4		3.897	3.059			6		10.637	8.350
		5		4.803	3.770			7		12.301	9.656
		6		5.688	4.465			8		13.944	10.946
5.6	56	3	6	3.343	2.624	10	100	9	12	15.566	12.219
		4		4.390	3.446			10		17.167	13.476
		5		5.415	4.251			12		20.306	15.940
		6		6.420	5.040			6	11	11.932	9.366
		7	6.5	7.404	5.812	11	110	7		13.796	10.830
6	60	5		5.829	4.576			8		15.638	12.276
		6		6.914	5.427			9		17.462	13.708
		7		7.977	6.262			10		19.261	15.120
		8		9.020	7.081			12		22.800	17.898
6.3	63	4	7	4.978	3.907	11	110	14	12	26.256	20.611
		5		6.143	4.822			16		29.627	23.257
		6		7.288	5.721			7		15.196	11.928
		7		8.412	6.603			8		17.238	13.535
		8		9.515	7.469			10		21.261	16.690
		10		11.657	9.151			12		25.200	19.782
								14		29.056	22.809

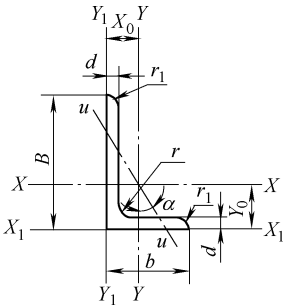
(续)

型号	截面尺寸/mm			截面面积 /cm <sup>2</sup>	理论重量 /(kg/m)	型号	截面尺寸/mm			截面面积 /cm <sup>2</sup>	理论重量 /(kg/m)
	<i>b</i>	<i>d</i>	<i>r</i>				<i>b</i>	<i>d</i>	<i>r</i>		
12.5	125	8	14	19.750	15.504	20	200	14	18	54.624	42.894
		10		24.373	19.133			16		62.013	48.680
		12		28.912	22.696			18		69.301	54.401
		14		33.367	26.193			20		76.505	60.056
		16		37.739	29.625			24		90.661	71.168
14	140	10	14	27.373	21.488	22	220	16	21	68.664	53.901
		12		32.512	25.522			18		76.752	60.250
		14		37.567	29.490			20		84.756	66.533
		16		42.539	33.393			22		92.676	72.751
15	150	8	16	23.750	18.644			24		100.512	78.902
		10		29.373	23.058			26		108.264	84.987
		12		34.912	27.406	25	250	18	24	87.842	68.956
		14		40.367	31.688			20		97.045	76.180
		15		43.063	33.804			24		115.201	90.433
16	160	10	16	31.502	24.729			26		124.154	97.461
		12		37.441	29.391			28		133.022	104.422
		14		43.296	33.987			30		141.807	111.318
		16		49.067	38.518			32		150.508	118.149
18	180	12	16	42.241	33.159			35		163.402	128.371
		14		48.896	38.383						
		16		55.467	43.542						
		18		61.055	48.634						

注：截面图中的  $r_1 = d/3$  及表中  $r$  的数据用于孔型设计，不做交货条件。

6. 热轧不等边角钢（见表 13-56）

表 13-56 不等边角钢截面尺寸、截面面积、理论重量（GB/T 706—2008）



- $B$ ——长边宽度；
- $b$ ——短边宽度；
- $d$ ——边厚度；
- $r$ ——内圆弧半径；
- $r_1$ ——边端圆弧半径；
- $X_0$ ——重心距离；
- $Y_0$ ——重心距离。

(续)

型号	截面尺寸/mm				截面面积/cm <sup>2</sup>	理论重量/(kg/m)
	<i>B</i>	<i>b</i>	<i>d</i>	<i>r</i>		
2.5/1.6	25	16	3	3.5	1.162	0.912
			4		1.499	1.176
3.2/2	32	20	3		1.492	1.171
			4		1.939	1.522
4/2.5	40	25	3	4	1.890	1.484
			4		2.467	1.936
4.5/2.8	45	28	3	5	2.149	1.687
			4		2.806	2.203
5/3.2	50	32	3	5.5	2.431	1.908
			4		3.177	2.494
5.6/3.6	56	36	3	6	2.743	2.153
			4		3.590	2.818
			5		4.415	3.466
6.3/4	63	40	4	7	4.058	3.185
			5		4.993	3.920
			6		5.908	4.638
			7		6.802	5.339
7/4.5	70	45	4	7.5	4.547	3.570
			5		5.609	4.403
			6		6.647	5.218
			7		7.657	6.011
7.5/5	75	50	5	8	6.125	4.808
			6		7.260	5.699
			8		9.467	7.431
			10		11.590	9.098
8/5	80	50	5		6.375	5.005
			6		7.560	5.935
			7		8.724	6.848
			8		9.867	7.745
9/5.6	90	56	5	9	7.212	5.661
			6		8.557	6.717
			7		9.880	7.756
			8		11.183	8.779
10/6.3	100	63	6	10	9.617	7.550
			7		11.111	8.722
			8		12.534	9.878
			10		15.467	12.142

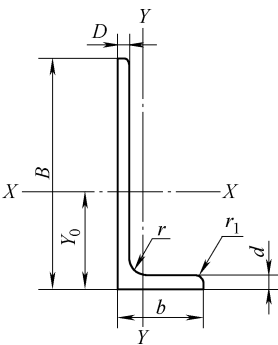
(续)

型号	截面尺寸/mm				截面面积/cm <sup>2</sup>	理论重量/(kg/m)
	<i>B</i>	<i>b</i>	<i>d</i>	<i>r</i>		
10/8	100	80	6	10	10. 637	8. 350
			7		12. 301	9. 656
			8		13. 944	10. 946
			10		17. 167	13. 476
11/7	110	70	6	10	10. 637	8. 350
			7		12. 301	9. 656
			8		13. 944	10. 946
			10		17. 167	13. 476
12. 5/8	125	80	7	11	14. 096	11. 066
			8		15. 989	12. 551
			10		19. 712	15. 474
			12		23. 351	18. 330
14/9	140	90	8	12	18. 038	14. 160
			10		22. 261	17. 475
			12		26. 400	20. 724
			14		30. 456	23. 908
15/9	150	90	8	12	18. 839	14. 788
			10		23. 261	18. 260
			12		27. 600	21. 666
			14		31. 856	25. 007
			15		33. 952	26. 652
			16		36. 027	28. 281
16/10	160	100	10	13	25. 315	19. 872
			12		30. 054	23. 592
			14		34. 709	27. 247
			16		29. 281	30. 835
18/11	180	110	10	14	28. 373	22. 273
			12		33. 712	26. 440
			14		38. 967	30. 589
			16		44. 139	34. 649
20/12. 5	200	125	12	14	37. 912	29. 761
			14		43. 687	34. 436
			16		49. 739	39. 045
			18		55. 526	43. 588

注：截面图中的  $r_1 = d/3$  及表中  $r$  的数据用于孔型设计，不做交货条件。

7. 热轧 L 型钢（见表 13-57）

表 13-57 L 型钢截面尺寸、截面面积、理论重量（GB/T 706—2008）



$B$ ——长边宽度；  
 $b$ ——短边宽度；  
 $D$ ——长边厚度；  
 $d$ ——短边厚度；  
 $r$ ——内圆弧半径；  
 $r_1$ ——边端圆弧半径；  
 $Y_0$ ——重心距离。

型号	截面尺寸/mm						截面面积 /cm <sup>2</sup>	理论重量 /(kg/m)
	$B$	$b$	$D$	$d$	$r$	$r_1$		
L250×90×9×13	250	90	9	13	15	7.5	33.4	26.2
L250×90×10.5×15			10.5	15			38.5	30.3
L250×90×11.5×16			11.5	16			41.7	32.7
L300×100×10.5×15	300	100	10.5	15	15	7.5	45.3	35.6
L300×100×11.5×16			11.5	16			49.0	38.5
L350×120×10.5×16	350	120	10.5	16	20	10	54.9	43.1
L350×120×11.5×18			11.5	18			60.4	47.4
L400×120×11.5×23	400	120	11.5	23	20	10	71.6	56.2
L450×120×11.5×25	450	120	11.5	25			79.5	62.4
L500×120×12.5×33	500	120	12.5	33			98.6	77.4
L500×120×13.5×35			13.5	35			105.0	82.8

## 13.8.2 管材

### 1. 普通钢管（见表 13-58）

表 13-58 普通钢管的外径和壁厚及单位长度理论重量

外径/mm			壁厚/mm															
系列 1	系列 2	系列 3	0.25	0.30	0.40	0.50	0.60	0.80	1.0	1.2	1.4	1.5	1.6	1.8	2.0	2.2(2.3)	2.5(2.6)	2.8
			单位长度理论重量 <sup>①</sup> /(kg/m)															
	6		0.035	0.042	0.055	0.068	0.080	0.103	0.123	0.142	0.159	0.166	0.174	0.186	0.197			
	7		0.042	0.050	0.065	0.080	0.095	0.122	0.148	0.172	0.193	0.203	0.213	0.231	0.247	0.260	0.277	
	8		0.048	0.057	0.075	0.092	0.109	0.142	0.173	0.201	0.228	0.240	0.253	0.275	0.296	0.315	0.339	
10(10.2)	9		0.054	0.064	0.085	0.105	0.124	0.162	0.197	0.231	0.262	0.277	0.292	0.320	0.345	0.369	0.401	0.428
			0.060	0.072	0.095	0.117	0.139	0.182	0.222	0.260	0.297	0.314	0.331	0.364	0.395	0.423	0.462	0.497
	11		0.066	0.079	0.105	0.129	0.154	0.201	0.247	0.290	0.331	0.351	0.371	0.408	0.444	0.477	0.524	0.566
	12		0.072	0.087	0.114	0.142	0.169	0.221	0.271	0.320	0.366	0.388	0.410	0.453	0.493	0.532	0.586	0.635
	13(12.7)		0.079	0.094	0.124	0.154	0.183	0.241	0.296	0.349	0.401	0.425	0.450	0.497	0.543	0.586	0.647	0.704
13.5			0.082	0.098	0.129	0.160	0.191	0.251	0.308	0.364	0.418	0.444	0.470	0.519	0.567	0.613	0.678	0.739
		14	0.085	0.101	0.134	0.166	0.198	0.260	0.321	0.379	0.435	0.462	0.489	0.542	0.592	0.640	0.709	0.773
	16		0.097	0.116	0.154	0.191	0.228	0.300	0.370	0.438	0.504	0.536	0.568	0.630	0.691	0.749	0.832	0.911
17(17.2)			0.103	0.124	0.164	0.203	0.243	0.320	0.395	0.468	0.539	0.573	0.608	0.675	0.740	0.803	0.894	0.981
		18	0.109	0.131	0.174	0.216	0.257	0.339	0.419	0.497	0.573	0.610	0.647	0.719	0.789	0.857	0.956	1.05
	19		0.116	0.138	0.183	0.228	0.272	0.359	0.444	0.527	0.608	0.647	0.687	0.764	0.838	0.911	1.02	1.12
	20		0.122	0.146	0.193	0.240	0.287	0.379	0.469	0.556	0.642	0.684	0.726	0.808	0.888	0.966	1.08	1.19
21(21.3)					0.203	0.253	0.302	0.399	0.493	0.586	0.677	0.721	0.765	0.852	0.937	1.02	1.14	1.26
		22			0.213	0.265	0.317	0.418	0.518	0.616	0.711	0.758	0.805	0.897	0.986	1.07	1.20	1.33
	25				0.243	0.302	0.361	0.477	0.592	0.704	0.815	0.869	0.923	1.03	1.13	1.24	1.39	1.53
		25.4			0.247	0.307	0.367	0.485	0.602	0.716	0.829	0.884	0.939	1.05	1.15	1.26	1.41	1.56
27(26.9)					0.262	0.327	0.391	0.517	0.641	0.764	0.884	0.943	1.00	1.12	1.23	1.35	1.51	1.67
	28				0.272	0.339	0.405	0.537	0.666	0.793	0.918	0.980	1.04	1.16	1.28	1.40	1.57	1.74

(续)

外径/mm			壁厚/mm															
系列 1	系列 2	系列 3	(2.9)3.0	3.2	3.5(3.6)	4.0	4.5	5.0	(5.4)5.5	6.0	(6.3)6.5	7.0(7.1)	7.5	8.0	8.5	(8.8)9.0	9.5	10
			单位长度理论重量 <sup>①</sup> /(kg/m)															
	6																	
	7																	
	8																	
	9																	
10(10.2)			0.518	0.537	0.561													
	11		0.592	0.616	0.647													
	12		0.666	0.694	0.734	0.789												
	13(12.7)		0.740	0.773	0.820	0.888												
13.5			0.777	0.813	0.863	0.937												
		14	0.814	0.852	0.906	0.986												
	16		0.962	1.01	1.08	1.18	1.28	1.36										
17(17.2)			1.04	1.09	1.17	1.28	1.39	1.48										
		18	1.11	1.17	1.25	1.38	1.50	1.60										
	19		1.18	1.25	1.34	1.48	1.61	1.73	1.83	1.92								
	20		1.26	1.33	1.42	1.58	1.72	1.85	1.97	2.07								
21(21.3)			1.33	1.40	1.51	1.68	1.83	1.97	2.10	2.22								
		22	1.41	1.48	1.60	1.78	1.94	2.10	2.24	2.37								
	25		1.63	1.72	1.86	2.07	2.28	2.47	2.64	2.81	2.97	3.11						
		25.4	1.66	1.75	1.89	2.11	2.32	2.52	2.70	2.87	3.03	3.18						
27(26.9)			1.78	1.88	2.03	2.27	2.50	2.71	2.92	3.11	3.29	3.45						
	28		1.85	1.96	2.11	2.37	2.61	2.84	3.05	3.26	3.45	3.63						



(续)

外径/mm			壁厚/mm															
系列 1	系列 2	系列 3	0. 25	0. 30	0. 40	0. 50	0. 60	0. 80	1. 0	1. 2	1. 4	1. 5	1. 6	1. 8	2. 0	2. 2(2. 3)	2. 5(2. 6)	2. 8
			单位长度理论重量 <sup>①</sup> /(kg/m)															
		30			0. 292	0. 364	0. 435	0. 576	0. 715	0. 852	0. 987	1. 05	1. 12	1. 25	1. 38	1. 51	1. 70	1. 88
	32(31. 8)				0. 312	0. 388	0. 465	0. 616	0. 765	0. 911	1. 06	1. 13	1. 20	1. 34	1. 48	1. 62	1. 82	2. 02
34(33. 7)					0. 331	0. 413	0. 494	0. 655	0. 814	0. 971	1. 13	1. 20	1. 28	1. 43	1. 58	1. 73	1. 94	2. 15
		35			0. 341	0. 425	0. 509	0. 675	0. 838	1. 00	1. 16	1. 24	1. 32	1. 47	1. 63	1. 78	2. 00	2. 22
	38				0. 371	0. 462	0. 553	0. 734	0. 912	1. 09	1. 26	1. 35	1. 44	1. 61	1. 78	1. 94	2. 19	2. 43
	40				0. 391	0. 487	0. 583	0. 773	0. 962	1. 15	1. 33	1. 42	1. 52	1. 70	1. 87	2. 05	2. 31	2. 57
42(42. 4)									1. 01	1. 21	1. 40	1. 50	1. 59	1. 78	1. 97	2. 16	2. 44	2. 71
		45(44. 5)							1. 09	1. 30	1. 51	1. 61	1. 71	1. 92	2. 12	2. 32	2. 62	2. 91
48(48. 3)									1. 16	1. 38	1. 61	1. 72	1. 83	2. 05	2. 27	2. 48	2. 81	3. 12
	51								1. 23	1. 47	1. 71	1. 83	1. 95	2. 18	2. 42	2. 65	2. 99	3. 33
		54							1. 31	1. 56	1. 82	1. 94	2. 07	2. 32	2. 56	2. 81	3. 18	3. 54
	57								1. 38	1. 65	1. 92	2. 05	2. 19	2. 45	2. 71	2. 97	3. 36	3. 74
60(60. 3)									1. 46	1. 74	2. 02	2. 16	2. 30	2. 58	2. 86	3. 14	3. 55	3. 95
	63(63. 5)								1. 53	1. 83	2. 13	2. 28	2. 42	2. 72	3. 01	3. 30	3. 73	4. 16
	65								1. 58	1. 89	2. 20	2. 35	2. 50	2. 81	3. 11	3. 41	3. 85	4. 30
	68								1. 65	1. 98	2. 30	2. 46	2. 62	2. 94	3. 26	3. 57	4. 04	4. 50
	70								1. 70	2. 04	2. 37	2. 53	2. 70	3. 03	3. 35	3. 68	4. 16	4. 64
		73							1. 78	2. 12	2. 47	2. 64	2. 82	3. 16	3. 50	3. 84	4. 35	4. 85
76(76. 1)									1. 85	2. 21	2. 58	2. 76	2. 94	3. 29	3. 65	4. 00	4. 53	5. 05
	77										2. 61	2. 79	2. 98	3. 34	3. 70	4. 06	4. 59	5. 12
	80										2. 71	2. 90	3. 09	3. 47	3. 85	4. 22	4. 78	5. 33

(续)

外径/mm			壁厚/mm															
系列 1	系列 2	系列 3	(2.9)3.0	3.2	3.5(3.6)	4.0	4.5	5.0	(5.4)5.5	6.0	(6.3)6.5	7.0(7.1)	7.5	8.0	8.5	(8.8)9.0	9.5	10
			单位长度理论重量 <sup>①</sup> /(kg/m)															
		30	2.00	2.11	2.29	2.56	2.83	3.08	3.32	3.55	3.77	3.97	4.16	4.34				
	32(31.8)		2.15	2.27	2.46	2.76	3.05	3.33	3.59	3.85	4.09	4.32	4.53	4.74				
34(33.7)			2.29	2.43	2.63	2.96	3.27	3.58	3.87	4.14	4.41	4.66	4.90	5.13				
		35	2.37	2.51	2.72	3.06	3.38	3.70	4.00	4.29	4.57	4.83	5.09	5.33	5.56	5.77		
	38		2.59	2.75	2.98	3.35	3.72	4.07	4.41	4.74	5.05	5.35	5.64	5.92	6.18	6.44	6.68	6.91
	40		2.74	2.90	3.15	3.55	3.94	4.32	4.68	5.03	5.37	5.70	6.01	6.31	6.60	6.88	7.15	7.40
42(42.4)			2.89	3.06	3.32	3.75	4.16	4.56	4.95	5.33	5.69	6.04	6.38	6.71	7.02	7.32	7.61	7.89
		45(44.5)	3.11	3.30	3.58	4.04	4.49	4.93	5.36	5.77	6.17	6.56	6.94	7.30	7.65	7.99	8.32	8.63
48(48.3)			3.33	3.54	3.84	4.34	4.83	5.30	5.76	6.21	6.65	7.08	7.49	7.89	8.28	8.66	9.02	9.37
	51		3.55	3.77	4.10	4.64	5.16	5.67	6.17	6.66	7.13	7.60	8.05	8.48	8.91	9.32	9.72	10.11
		54	3.77	4.01	4.36	4.93	5.49	6.04	6.58	7.10	7.61	8.11	8.60	9.08	9.54	9.99	10.43	10.85
	57		4.00	4.25	4.62	5.23	5.83	6.41	6.99	7.55	8.10	8.63	9.16	9.67	10.17	10.65	11.13	11.59
60(60.3)			4.22	4.48	4.88	5.52	6.16	6.78	7.39	7.99	8.58	9.15	9.71	10.26	10.80	11.32	11.83	12.33
	63(63.5)		4.44	4.72	5.14	5.82	6.49	7.15	7.80	8.43	9.06	9.67	10.27	10.85	11.42	11.99	12.53	13.07
	65		4.59	4.88	5.31	6.02	6.71	7.40	8.07	8.73	9.38	10.01	10.64	11.25	11.84	12.43	13.00	13.56
	68		4.81	5.11	5.57	6.31	7.05	7.77	8.48	9.17	9.86	10.53	11.19	11.84	12.47	13.10	13.71	14.30
	70		4.96	5.27	5.74	6.51	7.27	8.02	8.75	9.47	10.18	10.88	11.56	12.23	12.89	13.54	14.17	14.80
		73	5.18	5.51	6.00	6.81	7.60	8.38	9.16	9.91	10.66	11.39	12.11	12.82	13.52	14.21	14.88	15.54
76(76.1)			5.40	5.75	6.26	7.10	7.93	8.75	9.56	10.36	11.14	11.91	12.67	13.42	14.15	14.87	15.58	16.28
	77		5.47	5.82	6.34	7.20	8.05	8.88	9.70	10.51	11.30	12.08	12.85	13.61	14.36	15.09	15.81	16.52
	80		5.70	6.06	6.60	7.50	8.38	9.25	10.11	10.95	11.78	12.60	13.41	14.21	14.99	15.76	16.52	17.26

(续)

外径/mm			壁厚/mm															
系列 1	系列 2	系列 3	11	12(12.5)	13	14(14.2)	15	16	17(17.5)	18	19	20	22(22.2)	24	25	26	28	30
单位长度理论重量 <sup>①</sup> /(kg/m)																		
		30																
	32(31.8)																	
34(33.7)																		
		35																
	38																	
	40																	
42(42.4)																		
		45(44.5)	9.22	9.77														
48(48.3)			10.04	10.65														
	51		10.85	11.54														
		54	11.66	12.43	13.14	13.81												
	57		12.48	13.32	14.11	14.85												
60(60.3)			13.29	14.21	15.07	15.88	16.65	17.36										
	63(63.5)		14.11	15.09	16.03	16.92	17.76	18.55										
	65		14.65	15.68	16.67	17.61	18.50	19.33										
	68		15.46	16.57	17.63	18.64	19.61	20.52										
	70		16.01	17.16	18.27	19.33	20.35	21.31	22.22									
		73	16.82	18.05	19.24	20.37	21.46	22.49	23.48	24.41	25.30							
76(76.1)			17.63	18.94	20.20	21.41	22.57	23.68	24.74	25.75	26.71	27.62						
	77		17.90	19.24	20.52	21.75	22.94	24.07	25.15	26.19	27.18	28.11						
	80		18.72	20.12	21.48	22.79	24.05	25.25	26.41	27.52	28.58	29.59						

(续)

外径/mm			壁厚/mm															
系列 1	系列 2	系列 3	0. 25	0. 30	0. 40	0. 50	0. 60	0. 80	1. 0	1. 2	1. 4	1. 5	1. 6	1. 8	2. 0	2. 2(2. 3)	2. 5(2. 6)	2. 8
			单位长度理论重量 <sup>①</sup> /(kg/m)															
		83(82. 5)									2. 82	3. 01	3. 21	3. 60	4. 00	4. 38	4. 96	5. 54
	85										2. 89	3. 09	3. 29	3. 69	4. 09	4. 49	5. 09	5. 68
89(88. 9)											3. 02	3. 24	3. 45	3. 87	4. 29	4. 71	5. 33	5. 95
	95										3. 23	3. 46	3. 69	4. 14	4. 59	5. 03	5. 70	6. 37
	102 (101. 6)										3. 47	3. 72	3. 96	4. 45	4. 93	5. 41	6. 13	6. 85
		108									3. 68	3. 94	4. 20	4. 71	5. 23	5. 74	6. 50	7. 26
114(114. 3)												4. 16	4. 44	4. 98	5. 52	6. 07	6. 87	7. 68
	121											4. 42	4. 71	5. 29	5. 87	6. 45	7. 31	8. 16
	127													5. 56	6. 17	6. 77	7. 68	8. 58
	133																8. 05	8. 99
140(139. 7)																		
		142(141. 3)																
	146																	
		152(152. 4)																
		159																
168(168. 3)																		
		180(177. 8)																
		194(193. 7)																
	203																	
219(219. 1)																		
		232																
		245(244. 5)																
		267(267. 4)																

(续)

外径/mm			壁厚/mm															
系列 1	系列 2	系列 3	(2.9)3.0	3.2	3.5(3.6)	4.0	4.5	5.0	(5.4)5.5	6.0	(6.3)6.5	7.0(7.1)	7.5	8.0	8.5	(8.8)9.0	9.5	10
			单位长度理论重量 <sup>①</sup> /(kg/m)															
		83(82.5)	5.92	6.30	6.86	7.79	8.71	9.62	10.51	11.39	12.26	13.12	13.96	14.80	15.62	16.42	17.22	18.00
	85		6.07	6.46	7.03	7.99	8.93	9.86	10.78	11.69	12.58	13.47	14.33	15.19	16.04	16.87	17.69	18.50
89(88.9)			6.36	6.77	7.38	8.38	9.38	10.36	11.33	12.28	13.22	14.16	15.07	15.98	16.87	17.76	18.63	19.48
	95		6.81	7.24	7.90	8.98	10.04	11.10	12.14	13.17	14.19	15.19	16.18	17.16	18.13	19.09	20.03	20.96
	102(101.6)		7.32	7.80	8.50	9.67	10.82	11.96	13.09	14.21	15.31	16.40	17.48	18.55	19.60	20.64	21.67	22.69
		108	7.77	8.27	9.02	10.26	11.49	12.70	13.90	15.09	16.27	17.44	18.59	19.73	20.86	21.97	23.08	24.17
114(114.3)			8.21	8.74	9.54	10.85	12.15	13.44	14.72	15.98	17.23	18.47	19.70	20.91	22.12	23.31	24.48	25.65
	121		8.73	9.30	10.14	11.54	12.93	14.30	15.67	17.02	18.35	19.68	20.99	22.29	23.58	24.86	26.12	27.37
	127		9.17	9.77	10.66	12.13	13.59	15.04	16.48	17.90	19.32	20.72	22.10	23.48	24.84	26.19	27.53	28.85
	133		9.62	10.24	11.18	12.73	14.26	15.78	17.29	18.79	20.28	21.75	23.21	24.66	26.10	27.52	28.93	30.33
140(139.7)			10.14	10.80	11.78	13.42	15.04	16.65	18.24	19.83	21.40	22.96	24.51	26.04	27.57	29.08	30.57	32.06
		142(141.3)	10.28	10.95	11.95	13.61	15.26	16.89	18.51	20.12	21.72	23.31	24.88	26.44	27.98	29.52	31.04	32.55
	146		10.58	11.27	12.30	14.01	15.70	17.39	19.06	20.72	22.36	24.00	25.62	27.23	28.82	30.41	31.98	33.54
		152(152.4)	11.02	11.74	12.82	14.60	16.37	18.13	19.87	21.60	23.32	25.03	26.73	28.41	30.08	31.74	33.39	35.02
		159			13.42	15.29	17.15	18.99	20.82	22.64	24.45	26.24	28.02	29.79	31.55	33.29	35.03	36.75
168(168.3)					14.20	16.18	18.14	20.10	22.04	23.97	25.89	27.79	29.69	31.57	33.43	35.29	37.13	38.97
		180(177.8)			15.23	17.36	19.48	21.58	23.67	25.75	27.81	29.87	31.91	33.93	35.95	37.95	39.95	41.92
		194(193.7)			16.44	18.74	21.03	23.31	25.57	27.82	30.06	32.28	34.50	36.70	38.89	41.06	43.23	45.38
	203				17.22	19.63	22.03	24.41	26.79	29.15	31.50	33.84	36.16	38.47	40.77	43.06	45.33	47.60
219(219.1)										31.52	34.06	36.60	39.12	41.63	44.13	46.61	49.08	51.54
		232								33.44	36.15	38.84	41.52	44.19	46.85	49.50	52.13	54.75
		245(244.5)								35.36	38.23	41.09	43.93	46.76	49.58	52.38	55.17	57.95
		267(267.4)								38.62	41.76	44.88	48.00	51.10	54.19	57.26	60.33	63.38

(续)

外径/mm			壁厚/mm															
系列 1	系列 2	系列 3	11	12(12.5)	13	14(14.2)	15	16	17(17.5)	18	19	20	22(22.2)	24	25	26	28	30
			单位长度理论重量 <sup>①</sup> /(kg/m)															
		83(82.5)	19.53	21.01	22.44	23.82	25.15	26.44	27.67	28.85	29.99	31.07	33.10					
	85		20.07	21.60	23.08	24.51	25.89	27.23	28.51	29.74	30.93	32.06	34.18					
89(88.9)			21.16	22.79	24.37	25.89	27.37	28.80	30.19	31.52	32.80	34.03	36.35	38.47				
	95		22.79	24.56	26.29	27.97	29.59	31.17	32.70	34.18	35.61	36.99	39.61	42.02				
	102(101.6)		24.69	26.63	28.53	30.38	32.18	33.93	35.64	37.29	38.89	40.44	43.40	46.17	47.47	48.73	51.10	
		108	26.31	28.41	30.46	32.45	34.40	36.30	38.15	39.95	41.70	43.40	46.66	49.71	51.17	52.58	55.24	57.71
114(114.3)			27.94	30.19	32.38	34.53	36.62	38.67	40.67	42.62	44.51	46.36	49.91	53.27	54.87	56.43	59.39	62.15
	121		29.84	32.26	34.62	36.94	39.21	41.43	43.60	45.72	47.79	49.82	53.71	57.41	59.19	60.91	64.22	67.33
	127		31.47	34.03	36.55	39.01	41.43	43.80	46.12	48.39	50.61	52.78	56.97	60.96	62.89	64.76	68.36	71.77
	133		33.10	35.81	38.47	41.09	43.65	46.17	48.63	51.05	53.42	55.74	60.22	64.51	66.59	68.61	72.50	76.20
140(139.7)			34.99	37.88	40.72	43.50	46.24	48.93	51.57	54.16	56.70	59.19	64.02	68.66	70.90	73.10	77.34	81.38
		142(141.3)	35.54	38.47	41.36	44.19	46.98	49.72	52.41	55.04	57.63	60.17	65.11	69.84	72.14	74.38	78.72	82.86
	146		36.62	39.66	42.64	45.57	48.46	51.30	54.08	56.82	59.51	62.15	67.28	72.21	74.60	76.94	81.48	85.82
		152(152.4)	38.25	41.43	44.56	47.65	50.68	53.66	56.60	59.48	62.32	65.11	70.53	75.76	78.30	80.79	85.62	90.26
		159	40.15	43.50	46.81	50.06	53.27	56.43	59.53	62.59	65.60	68.56	74.33	79.90	82.62	85.28	90.46	95.44
168(168.3)			42.59	46.17	49.69	53.17	56.60	59.98	63.31	66.59	69.82	73.00	79.21	85.23	88.17	91.05	96.67	102.10
		180(177.8)	45.85	49.72	53.54	57.31	61.04	64.71	68.34	71.91	75.44	78.92	85.72	92.33	95.56	98.74	104.96	110.98
		194(193.7)	49.64	53.86	58.03	62.15	66.22	70.24	74.21	78.13	82.00	85.22	93.32	100.62	104.20	107.72	114.63	121.33
	203		52.09	56.52	60.91	65.25	69.55	73.79	77.98	82.13	86.22	90.26	98.20	105.95	109.74	113.49	120.84	127.99
219(219.1)			56.43	61.26	66.04	70.78	75.46	80.10	84.69	89.23	93.71	98.15	106.88	115.42	119.61	123.75	131.89	139.83
		232	59.95	65.11	70.21	75.27	80.27	85.23	90.14	95.00	99.81	104.57	113.94	123.11	127.62	132.09	140.87	149.45
		245(244.5)	63.48	68.95	74.38	79.76	85.08	90.36	95.59	100.77	105.90	110.98	120.99	130.80	135.64	140.42	149.84	159.07
		267(267.4)	69.45	75.46	81.43	87.35	93.22	99.04	104.81	110.53	116.21	121.83	132.93	143.83	149.20	154.53	165.04	175.34

(续)

外径/mm			壁厚/mm											
系列 1	系列 2	系列 3	32	34	36	38	40	42	45	48	50	55	60	65
			单位长度理论重量 <sup>①</sup> /(kg/m)											
		83(82.5)												
	85													
89(88.9)														
	95													
	102(101.6)													
		108												
114(114.3)														
	121		70.24											
	127		74.97											
	133		79.71	83.01	86.12									
140(139.7)			85.23	88.88	92.33									
		142(141.3)	86.81	90.56	94.11									
	146		89.97	93.91	97.66	101.21	104.57							
		152(152.4)	94.70	98.94	102.99	106.83	110.48							
		159	100.22	104.81	109.20	113.39	117.39	121.19	126.51					
168(168.3)			107.33	112.36	117.19	121.83	126.27	130.51	136.50					
		180(177.8)	116.80	122.42	127.85	133.07	138.10	142.94	149.82	156.26	160.30			
		194(193.7)	127.85	134.16	140.27	146.19	151.92	157.44	165.36	172.83	177.56			
	203		134.95	141.71	148.27	154.63	160.79	166.76	175.34	183.48	188.66	200.75		
219(219.1)			147.57	155.12	162.47	169.62	176.58	183.33	193.10	202.42	208.39	222.45		
		232	157.83	166.02	174.01	181.81	189.40	196.80	207.53	217.81	224.42	240.08	254.51	267.70
		245(244.5)	168.09	176.92	185.55	193.99	202.22	210.26	221.95	233.20	240.45	257.71	273.74	288.54
		267(267.4)	185.45	195.37	205.09	214.60	223.93	233.05	246.37	259.24	267.58	287.55	306.30	323.81

(续)

外径/mm			壁厚/mm														
系列 1	系列 2	系列 3	3.5(3.6)	4.0	4.5	5.0	(5.4)5.5	6.0	(6.3)6.5	7.0(7.1)	7.5	8.0	8.5	(8.8)9.0	9.5	10	11
			单位长度理论重量 <sup>①</sup> /(kg/m)														
273									42.72	45.92	49.11	52.28	55.45	58.60	61.73	64.86	71.07
	299(298.5)										53.92	57.41	60.90	64.37	67.83	71.27	78.13
		302									54.47	58.00	61.52	65.03	68.53	72.01	78.94
		318.5									57.52	61.26	64.98	68.69	72.39	76.08	83.42
325(323.9)											58.73	62.54	66.35	70.14	73.92	77.68	85.18
	340(339.7)											65.50	69.49	73.47	77.43	81.38	89.25
	351											67.67	71.80	75.91	80.01	84.10	92.23
356(355.6)														77.02	81.18	85.33	93.59
		368												79.68	83.99	88.29	96.85
	377													81.68	86.10	90.51	99.29
	402													87.23	91.96	96.67	106.07
406(406.4)														88.12	92.89	97.66	107.15
		419												91.00	95.94	100.87	110.68
	426													92.55	97.58	102.59	112.58
	450													97.88	103.20	108.51	119.09
457														99.44	104.84	110.24	120.99
	473													102.99	108.59	114.18	125.33
	480													104.54	110.23	115.91	127.23
	500													108.98	114.92	120.84	132.65
508														110.76	116.79	122.81	134.82
	530													115.64	121.95	128.24	140.79
		560(559)												122.30	128.97	135.64	148.93
610														133.39	140.69	147.97	162.50



(续)

外径/mm			壁厚/mm														
系列 1	系列 2	系列 3	12(12.5)	13	14(14.2)	15	16	17(17.5)	18	19	20	22(22.2)	24	25	26	28	30
			单位长度理论重量 <sup>①</sup> /(kg/m)														
273			77.24	83.36	89.42	95.44	101.41	107.33	113.20	119.02	124.79	136.18	147.38	152.90	158.38	169.18	179.78
	299(298.5)		84.93	91.69	98.40	105.06	111.67	118.23	124.74	131.20	137.61	150.29	162.77	168.93	175.05	187.13	199.02
		302	85.82	92.65	99.44	106.17	112.85	119.49	126.07	132.61	139.09	151.92	164.54	170.78	176.97	189.20	201.24
		318.5	90.71	97.94	105.13	112.27	119.36	126.40	133.39	140.34	147.23	160.87	174.31	180.95	187.55	200.60	213.45
325(323.9)			92.63	100.03	107.38	114.68	121.93	129.13	136.28	143.38	150.44	164.39	178.16	184.96	191.72	205.09	218.25
	340(339.7)		97.07	104.84	112.56	120.23	127.85	135.42	142.94	150.41	157.83	172.53	187.03	194.21	201.34	215.44	229.35
	351		100.32	108.36	116.35	124.29	132.19	140.03	147.82	155.57	163.26	178.50	193.54	200.99	208.39	223.04	237.49
356(355.6)			101.80	109.97	118.08	126.14	134.16	142.12	150.04	157.91	165.73	181.21	196.50	204.07	211.60	226.49	241.19
		368	105.35	113.81	122.22	130.58	138.89	147.16	155.37	163.53	171.64	187.72	203.61	211.47	219.29	234.78	250.07
	377		108.02	116.70	125.33	133.91	142.45	150.93	159.36	167.75	176.08	192.61	208.93	217.02	225.06	240.99	256.73
	402		115.42	124.71	133.96	143.16	152.31	161.41	170.46	179.46	188.41	206.17	223.73	232.44	241.09	258.26	275.22
406(406.4)			116.60	126.00	135.34	144.64	153.89	163.09	172.24	181.34	190.39	208.34	226.10	234.90	243.66	261.02	278.18
		419	120.45	130.16	139.83	149.45	159.02	168.54	178.01	187.43	196.80	215.39	233.79	242.92	251.99	269.99	287.80
	426		122.52	132.41	142.25	152.04	161.78	171.47	181.11	190.71	200.25	219.19	237.93	247.23	256.48	274.83	292.98
	450		129.62	140.10	150.53	160.92	171.25	181.53	191.77	201.95	212.09	232.21	252.14	262.03	271.87	291.40	310.74
457			131.69	142.35	152.95	163.51	174.01	184.47	194.88	205.23	215.54	236.01	256.28	266.34	276.36	296.23	315.91
	473		136.43	147.48	158.48	169.42	180.33	191.18	201.98	212.73	223.43	244.69	265.75	276.21	286.62	307.28	327.75
	480		138.50	149.72	160.89	172.01	183.09	194.11	205.09	216.01	226.89	248.49	269.90	280.53	291.11	312.12	332.93
	500		144.42	156.13	167.80	179.41	190.98	202.50	213.96	225.38	236.75	259.34	281.73	292.86	303.93	325.93	347.93
508			146.79	158.70	170.56	182.37	194.14	205.85	217.51	229.13	240.70	263.68	286.47	297.79	309.06	331.45	353.65
	530		153.30	165.75	178.16	190.51	202.82	215.07	227.28	239.44	251.55	275.62	299.49	311.35	323.17	346.64	369.92
		560(559)	162.17	175.37	188.51	201.61	214.65	227.65	240.60	253.50	266.34	291.89	317.25	329.85	342.40	367.36	392.12
610			176.97	191.40	205.78	220.10	234.38	248.61	262.79	276.92	291.01	319.02	346.84	360.68	374.46	401.88	429.11

(续)

外径/mm			壁厚/mm														
系列 1	系列 2	系列 3	32	34	36	38	40	42	45	48	50	55	60	65	70	75	80
			单位长度理论重量 <sup>①</sup> (kg/m)														
273			190.19	200.40	210.41	220.23	229.85	239.27	253.03	266.34	274.98	295.69	315.17	333.42	350.44	366.22	380.77
	299(298.5)		210.71	222.20	233.50	244.59	255.49	266.20	281.88	297.12	307.04	330.96	353.65	375.10	395.32	414.31	432.07
		302	213.08	224.72	236.16	247.40	258.45	269.30	285.21	300.67	310.74	335.03	358.09	379.91	400.50	419.86	437.99
		318.5	226.10	238.55	250.81	262.87	274.73	286.39	303.52	320.21	331.08	357.41	382.50	406.36	428.99	450.38	470.54
325(323.9)			231.23	244.00	256.58	268.96	281.14	293.13	310.74	327.90	339.10	366.22	392.12	416.78	440.21	462.40	483.37
	340(339.7)		243.06	256.58	269.90	283.02	295.94	308.66	327.38	345.66	357.59	386.57	414.31	440.83	466.10	490.15	512.96
	351		251.75	265.80	279.66	293.32	306.79	320.06	339.59	358.68	371.16	401.49	430.59	458.46	485.09	510.49	534.66
356(355.6)			255.69	269.99	284.10	298.01	311.72	325.24	345.14	364.60	377.32	408.27	437.99	466.47	493.72	519.74	544.53
		368	265.16	280.06	294.75	309.26	323.56	337.67	358.46	378.80	392.12	424.55	455.75	485.71	514.44	541.94	568.20
	377		272.26	287.60	302.75	317.69	332.44	346.99	368.44	389.46	403.22	436.76	469.06	500.14	529.98	558.58	585.96
	402		291.99	308.57	324.94	341.12	357.10	372.88	396.19	419.05	434.04	470.67	506.06	540.21	573.13	604.82	635.28
406(406.4)			295.15	311.92	328.49	344.87	361.05	377.03	400.63	423.78	438.98	476.09	511.97	546.62	580.04	612.22	643.17
		419	305.41	322.82	340.03	357.05	373.87	390.49	415.05	439.17	455.01	493.72	531.21	567.46	602.48	636.27	668.82
	426		310.93	328.69	346.25	363.61	380.77	397.74	422.82	447.46	463.46	503.22	541.57	578.68	614.57	649.22	682.63
	450		329.87	348.81	367.56	386.10	404.45	422.60	449.46	475.87	493.23	535.77	577.08	617.16	656.00	693.61	729.98
457			335.40	354.68	373.77	392.66	411.35	429.85	457.23	484.16	501.86	545.27	587.44	628.38	668.08	706.55	743.79
	473		348.02	368.10	387.98	407.66	427.14	446.42	474.98	503.10	521.59	566.97	611.11	654.02	695.70	736.15	775.36
	480		353.55	373.97	394.19	414.22	434.04	453.67	482.75	511.38	530.22	576.46	621.47	665.25	707.79	749.09	789.17
	500		369.33	390.74	411.95	432.96	453.77	474.39	504.95	535.06	554.89	603.59	651.07	697.31	742.31	786.09	828.63
508			375.64	397.45	419.05	440.46	461.66	482.68	513.82	544.53	564.75	614.44	662.90	710.13	756.12	800.88	844.41
	530		393.01	415.89	438.58	461.07	483.37	505.46	538.24	570.57	591.88	644.28	695.46	745.40	794.10	841.58	887.82
		560(559)	416.68	441.06	465.22	489.19	512.96	536.54	571.53	606.08	628.87	684.97	739.85	793.49	845.89	897.06	947.00
610			456.14	482.97	509.61	536.04	562.28	588.33	627.02	665.27	690.52	752.79	813.83	873.64	932.21	989.55	1045.65

(续)

外径/mm			壁厚/mm													
系列 1	系列 2	系列 3	85	90	95	100	110	120								
			单位长度理论重量 <sup>①</sup> /(kg/m)													
273			394.09													
	299(298.5)		448.59	463.88	477.94	490.77										
		302	454.88	470.54	484.97	498.16										
		318.5	489.47	507.16	523.63	538.86										
325(323.9)			503.10	521.59	538.86	554.89										
	340(339.7)		534.54	554.89	574.00	591.88										
	351		557.60	579.30	599.77	619.01										
356(355.6)			568.08	590.40	611.48	631.34										
		368	593.23	617.03	639.60	660.93										
	377		612.10	637.01	660.68	683.13										
	402		664.51	692.50	719.25	744.78										
406(406.4)			672.89	701.37	728.63	754.64										
		419	700.14	730.23	759.08	786.70										
	426		714.82	745.77	775.48	803.97										
	450		765.12	799.03	831.71	863.15										
457			779.80	814.57	848.11	880.42										
	473		813.34	850.08	885.60	919.88										
	480		828.01	865.62	902.00	937.14										
	500		869.94	910.01	948.85	986.46	1057.98									
508			886.71	927.77	967.60	1006.19	1079.68									
	530		932.82	976.60	1019.14	1060.45	1139.36	1213.35								
		560(559)	995.71	1043.18	1089.42	1134.43	1220.75	1302.13								
610			1100.52	1154.16	1206.57	1257.74	1356.39	1450.10								

(续)

[illegible]

(续)

外径/mm			壁厚/mm												
系列 1	系列 2	系列 3	24	25	26	28	30	32	34	36	38	40	42	45	48
			单位长度理论重量 <sup>①</sup> /(kg/m)												
	630		358.68	373.01	387.29	415.70	443.91	471.92	499.74	527.36	554.79	582.01	609.04	649.22	688.95
		660	376.43	391.50	406.52	436.41	466.10	495.60	524.90	554.00	582.90	611.61	640.12	682.51	724.46
		699	399.52	415.55	431.53	463.34	494.96	526.38	557.60	588.62	619.45	650.08	680.51	725.79	770.62
711			406.62	422.95	439.22	471.63	503.84	535.85	567.66	599.28	630.69	661.92	692.94	739.11	784.83
	720		411.95	428.49	444.99	477.84	510.49	542.95	575.21	607.27	639.13	670.79	702.26	749.09	795.48
	762		436.81	454.39	471.92	506.84	541.57	576.09	610.42	644.55	678.49	712.23	745.77	795.71	845.20
		788.5	452.49	470.73	488.92	525.14	561.17	597.01	632.64	668.08	703.32	738.37	773.21	825.11	876.57
813			466.99	485.83	504.62	542.06	579.30	616.34	653.18	689.83	726.28	762.54	798.59	852.30	905.57
		864	497.18	517.28	537.33	577.28	617.03	656.59	695.95	735.11	774.08	812.85	851.42	908.90	965.94
914				548.10	569.39	611.80	654.02	696.05	737.87	779.50	820.93	862.17	903.20	964.39	1025.13
		965		579.55	602.09	647.02	691.76	736.30	780.64	824.78	868.73	912.48	956.03	1020.99	1085.50
1016				610.99	634.79	682.24	729.49	776.54	823.40	870.06	916.52	962.79	1008.86	1077.59	1145.87

(续)

外径/mm			壁厚/mm												
系列 1	系列 2	系列 3	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	110	120
			单位长度理论重量 <sup>①</sup> /(kg/m)												
	630		715.19	779.92	843.43	905.70	966.73	1026.54	1085.11	1142.45	1198.55	1253.42	1307.06	1410.64	1509.29
		660	752.18	820.61	887.82	953.79	1018.52	1082.03	1144.30	1205.33	1265.14	1323.71	1381.05	1492.02	1598.07
		699	800.27	873.51	945.52	1016.30	1085.85	1154.16	1221.24	1287.09	1351.70	1415.08	1477.23	1597.82	1713.49
711			815.06	889.79	963.28	1035.54	1106.56	1176.36	1244.92	1312.24	1378.33	1443.19	1506.82	1630.38	1749.00
	720		826.16	902.00	976.60	1049.97	1122.10	1193.00	1262.67	1331.11	1398.31	1464.28	1529.02	1654.79	1775.63
	762		877.95	958.96	1038.74	1117.29	1194.61	1270.69	1345.53	1419.15	1491.53	1562.68	1632.60	1768.73	1899.93
		788.5	910.63	994.91	1077.96	1159.77	1240.35	1319.70	1397.82	1474.70	1550.35	1624.77	1697.95	1840.62	1978.35
813			940.84	1028.14	1114.21	1199.05	1282.65	1365.02	1446.15	1526.06	1604.73	1682.17	1758.37	1907.08	2050.86
		864	1003.73	1097.32	1189.67	1280.80	1370.69	1459.35	1546.77	1632.97	1717.92	1801.65	1884.14	2045.43	2201.78
914			1065.38	1165.14	1263.66	1360.95	1457.00	1551.83	1645.42	1737.78	1828.90	1918.79	2007.45	2181.07	2349.75
		965	1128.27	1234.31	1339.12	1442.70	1545.05	1646.16	1746.04	1844.68	1942.10	2038.28	2133.22	2319.42	2500.68
1016			1191.15	1303.49	1414.59	1524.45	1633.09	1740.49	1846.66	1951.59	2055.29	2157.76	2259.00	2457.77	2651.61

注：1. 括号内尺寸为相应的 ISO 4200 的规格。  
2. 系列 1 是通用系列，属于推荐选用系列；系列 2 是非通用系列；系列 3 是少数特殊、专用系列。  
① 理论重量按下式计算，钢的密度为 7.85kg/dm<sup>3</sup>。

$$W = \pi \rho (D - S) S / 1\,000$$

式中  $W$ ——钢管的理论重量 (kg/m)；  
 $\rho$ ——钢的密度 (kg/dm<sup>3</sup>)；  
 $D$ ——钢管的公称外径 (mm)；  
 $S$ ——钢管的公称壁厚 (mm)。

2. 精密钢管（见表 13-59）

表 13-59 精密钢管的外径和壁厚及单位长度理论重量

外径/mm		壁厚/mm																				
系列 2	系列 3	0.5	(0.8)	1.0	(1.2)	1.5	(1.8)	2.0	(2.2)	2.5	(2.8)	3.0	(3.5)	4	(4.5)	5	(5.5)	6	(7)	8	(9)	10
		单位长度理论重量 <sup>①</sup> /( kg/m)																				
4		0.043	0.063	0.074	0.083																	
5		0.055	0.083	0.099	0.112																	
6		0.068	0.103	0.123	0.142	0.166	0.186	0.197														
8		0.092	0.142	0.173	0.201	0.240	0.275	0.296	0.315	0.339												
10		0.117	0.182	0.222	0.260	0.314	0.364	0.395	0.423	0.462												
12		0.142	0.221	0.271	0.320	0.388	0.453	0.493	0.532	0.586	0.635	0.666										
12.7		0.150	0.235	0.289	0.340	0.414	0.484	0.528	0.570	0.629	0.684	0.718										
	14	0.166	0.260	0.321	0.379	0.462	0.542	0.592	0.640	0.709	0.773	0.814	0.906									
16		0.191	0.300	0.370	0.438	0.536	0.630	0.691	0.749	0.832	0.911	0.962	1.08	1.18								
	18	0.216	0.339	0.419	0.497	0.610	0.719	0.789	0.857	0.956	1.05	1.11	1.25	1.38	1.50							
20		0.240	0.379	0.469	0.556	0.684	0.808	0.888	0.966	1.08	1.19	1.26	1.42	1.58	1.72	1.85						
	22	0.265	0.418	0.518	0.616	0.758	0.897	0.986	1.07	1.20	1.33	1.41	1.60	1.78	1.94	2.10						
25		0.302	0.477	0.592	0.704	0.869	1.03	1.13	1.24	1.39	1.53	1.63	1.86	2.07	2.28	2.47	2.64	2.81				
	28	0.339	0.537	0.666	0.793	0.980	1.16	1.28	1.40	1.57	1.74	1.85	2.11	2.37	2.61	2.84	3.05	3.26	3.63	3.95		
	30	0.364	0.576	0.715	0.852	1.05	1.25	1.38	1.51	1.70	1.88	2.00	2.29	2.56	2.83	3.08	3.32	3.55	3.97	4.34		
32		0.388	0.616	0.765	0.911	1.13	1.34	1.48	1.62	1.82	2.02	2.15	2.46	2.76	3.05	3.33	3.59	3.85	4.32	4.74		
	35	0.425	0.675	0.838	1.00	1.24	1.47	1.63	1.78	2.00	2.22	2.37	2.72	3.06	3.38	3.70	4.00	4.29	4.83	5.33		
38		0.462	0.734	0.912	1.09	1.35	1.61	1.78	1.94	2.19	2.43	2.59	2.98	3.35	3.72	4.07	4.41	4.74	5.35	5.92	6.44	6.91
40		0.487	0.773	0.962	1.15	1.42	1.70	1.87	2.05	2.31	2.57	2.74	3.15	3.55	3.94	4.32	4.68	5.03	5.70	6.31	6.88	7.40
42			0.813	1.01	1.21	1.50	1.78	1.97	2.16	2.44	2.71	2.89	3.32	3.75	4.16	4.56	4.95	5.33	6.04	6.71	7.32	7.89

(续)

[illegible]



(续)

外径/mm		壁厚/mm													
系列 2	系列 3	(9)	10	(11)	12.5	(14)	16	(18)	20	(22)	25				
		单位长度理论重量 <sup>①</sup> /(kg/m)													
	45	7.99	8.63	9.22	10.02										
48		8.66	9.37	10.04	10.94										
50		9.10	9.86	10.58	11.56										
	55	10.21	11.10	11.94	13.10	14.16									
60		11.32	12.33	13.29	14.64	15.88	17.36								
63		11.99	13.07	14.11	15.57	16.92	18.55								
70		13.54	14.80	16.01	17.73	19.33	21.31								
76		14.87	16.28	17.63	19.58	21.41	23.68								
80		15.76	17.26	18.72	20.81	22.79	25.25	27.52							
	90	17.98	19.73	21.43	23.89	26.24	29.20	31.96	34.53	36.89					
100		20.20	22.20	24.14	26.97	29.69	33.15	36.40	39.46	42.32	46.24				
	110	22.42	24.66	26.86	30.06	33.15	37.09	40.84	44.39	47.74	52.41				
120		24.64	27.13	29.57	33.14	36.60	41.04	45.28	49.32	53.17	58.57				
130		26.86	29.59	32.28	36.22	40.05	44.98	49.72	54.26	58.60	64.74				
	140	29.08	32.06	34.99	39.30	43.50	48.93	54.16	59.19	64.02	70.90				
150		31.30	34.53	37.71	42.39	46.96	52.87	58.60	64.12	69.45	77.07				
160		33.52	36.99	40.42	45.47	50.41	56.82	63.03	69.05	74.87	83.23				
170		35.73	39.46	43.13	48.55	53.86	60.77	67.47	73.98	80.30	89.40				
	180	37.95	41.92	45.85	51.64	57.31	64.71	71.91	78.92	85.72	95.56				
190		40.17	44.39	48.56	54.72	60.77	68.66	76.35	83.85	91.15	101.73				
200		42.39	46.86	51.27	57.80	64.22	72.60	80.79	88.78	96.57	107.89				
	220	46.83	51.79	56.70	63.97	71.12	80.50	89.67	98.65	107.43	120.23				

外径/mm		壁厚/mm													
系列 2	系列 3	(5.5)	6	(7)	8	9	10	(11)	12.5	(14)	16	(18)	20	(22)	25
		单位长度理论重量 <sup>①</sup> /(kg/m)													
	240			40.22	45.77	51.27	56.72	62.12	70.13	78.03	88.39	98.55	108.51	118.28	132.56
	260			43.68	49.72	55.71	61.65	67.55	76.30	84.93	96.28	107.43	118.38	129.13	144.89

注：1. 括号内尺寸不推荐使用。  
2. 系列 2 是非通用系列；系列 3 是少数特殊，专用系列。  
① 理论重量计算与表 13-57 相同。

3. 低压流体输送焊接钢管（见表 13 - 60）

表 13 - 60 钢管的公称口径与钢管的外径、壁厚对照 (mm)

公称口径	外径	壁厚	
		普通钢管	加厚钢管
6	10.2	2.0	2.5
8	13.5	2.5	2.8
10	17.2	2.5	2.8
15	21.3	2.8	3.5
20	26.9	2.8	3.5
25	33.7	3.2	4.0
32	42.4	3.5	4.0
40	48.3	3.5	4.5
50	60.3	3.8	4.5
65	76.1	4.0	4.5
80	88.9	4.0	5.0
100	114.3	4.0	5.0
125	139.7	4.0	5.5
150	168.3	4.5	6.0

注：表中的公称口径系近似内径的名义尺寸，不表示外径减去两个壁厚所得的内径。

钢管的理论重量按公式（13 - 1）计算（钢的密度按  $7.85\text{kg}/\text{dm}^3$ ）。

$$W = 0.0246615(D - t)t \tag{13 - 1}$$

式中  $W$ ——钢管的单位长度理论重量（ $\text{kg}/\text{m}$ ）；

$D$ ——钢管的外径（ $\text{mm}$ ）；

$t$ ——钢管的壁厚（ $\text{mm}$ ）。

钢管镀锌后单位长度理论重量按公式（13 - 2）计算。

$$W' = cW \tag{13 - 2}$$

式中  $W'$ ——钢管镀锌后的单位长度理论重量（ $\text{kg}/\text{m}$ ）；

$W$ ——钢管镀锌前的单位长度理论重量（ $\text{kg}/\text{m}$ ）；

$c$ ——镀锌层的重量系数，见表 13 - 61。

表 13 - 61 镀锌层的重量系数

壁厚/ $\text{mm}$	0.5	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.3
系数 $c$	1.255	1.112	1.159	1.127	1.106	1.091	1.080	1.071	1.064	1.055
壁厚/ $\text{mm}$	2.6	2.9	3.2	3.6	4.0	4.5	5.0	5.4	5.6	6.3
系数 $c$	1.049	1.044	1.040	1.035	1.032	1.028	1.025	0.024	1.023	1.020
壁厚/ $\text{mm}$	7.1	8.0	8.8	10	11	12.5	14.2	16	17.5	20
系数 $c$	1.018	1.016	1.014	1.013	1.012	1.010	1.009	1.008	1.009	1.006

4. 流体输送用电焊钢管（见表 13 - 62）

表 13 - 62 外径、壁厚及理论重量

公称外径/mm	公称壁厚/mm								
	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	6.0
	理论重量/( kg/m)								
10	0.314	0.395	0.462						
12	0.388	0.493	0.586						
14		0.592	0.709	0.814					
16		0.691	0.832	0.962					
17		0.740	0.894	1.04					
18		0.789	0.956	1.11					
19		0.838	1.02	1.18					
20		0.888	1.08	1.26					
22		0.986	1.20	1.41	1.60	1.78			
25		1.13	1.39	1.63	1.86	2.07			
30		1.38	1.70	2.00	2.29	2.56			
32			1.82	2.15	2.46	2.76			
35			2.00	2.37	2.72	3.06			
38			2.19	2.59	2.98	3.35			
40			2.31	2.74	3.15	3.55			
42			2.44	2.89	3.32	3.75	4.16	4.56	
45			2.62	3.11	3.58	4.04	4.49	4.93	
48			2.81	3.33	3.84	4.34	4.83	5.30	
51			2.99	3.55	4.10	4.64	5.16	5.67	
57				4.00	4.62	5.23	5.83	6.41	
60				4.22	4.88	5.52	6.16	6.78	
63.5				4.44	5.14	5.82	6.49	7.15	
70				4.96	5.74	6.51	7.27	8.01	9.47
76					6.26	7.10	7.93	8.75	10.36
83					6.86	7.79	8.71	9.62	11.39
89						8.38	9.38	10.36	12.38
102						9.67	10.82	11.96	14.21
108						10.26	11.49	12.70	15.09
114						10.85	12.12	13.44	15.98

5. 化工用硬聚氯乙烯管

管材按尺寸分为：S20、S16、S12.5、S10、S8、S6.3、S5 共七个系列。

管系列 S、标准尺寸比 SDR 及管材规格尺寸，见表 13-63。

根据管材所输送的介质及应用条件，从表 13-63 中选择合理的管系列。表 13-64 中列出了管系列与公称压力（PN）的对照表。

表 13-63 管材规格尺寸、壁厚及其偏差 (mm)

公称 外径 $d_n$	壁厚 $e$ 及其偏差													
	管系列 S 和标准尺寸比 SDR													
	S20 SDR41		S16 SDR33		S12.5 SDR26		S10 SDR21		S8 SDR17		S6.3 SDR13.6		S5 SDR11	
	$e_{\min}$	偏差	$e_{\min}$	偏差	$e_{\min}$	偏差	$e_{\min}$	偏差	$e_{\min}$	偏差	$e_{\min}$	偏差	$e_{\min}$	偏差
16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.0	+0.4
20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.0	+0.4
25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.0	+0.4	2.3	+0.5
32	—	—	—	—	—	—	—	—	2.0	+0.4	2.4	+0.5	2.9	+0.5
40	—	—	—	—	—	—	2.0	+0.4	2.4	+0.5	3.0	+0.5	3.7	+0.6
50	—	—	—	—	2.0	+0.4	2.4	+0.5	3.0	+0.5	3.7	+0.6	4.6	+0.7
63	—	—	2.0	+0.4	2.5	+0.5	3.0	+0.5	3.8	+0.6	4.7	+0.7	5.8	+0.8
75	—	—	2.3	+0.5	2.9	+0.5	3.6	+0.6	4.5	+0.7	5.6	+0.8	6.8	+0.9
90	—	—	2.8	+0.5	3.5	+0.6	4.3	+0.7	5.4	+0.8	6.7	+0.9	8.2	+1.1
110	—	—	3.4	+0.6	4.2	+0.7	5.3	+0.8	6.6	+0.9	8.1	+1.1	10.0	+1.2
125	—	—	3.9	+0.6	4.8	+0.7	6.0	+0.8	7.4	+1.0	9.2	+1.2	11.4	+1.4
140	—	—	4.3	+0.7	5.4	+0.8	6.7	+0.9	8.3	+1.1	10.3	+1.3	12.7	+1.5
160	4.0	+0.6	4.9	+0.7	6.2	+0.9	7.7	+1.0	9.5	+1.2	11.8	+1.4	14.6	+1.7
180	4.4	+0.7	5.5	+0.8	6.9	+0.9	8.6	+1.1	10.7	+1.3	13.3	+1.6	16.4	+1.9
200	4.9	+0.7	6.2	+0.9	7.7	+1.0	9.6	+1.2	11.9	+1.4	14.7	+1.7	18.2	+2.1
225	5.5	+0.8	6.9	+0.9	8.6	+1.1	10.8	+1.3	13.4	+1.6	16.6	+1.9	—	—
250	6.2	+0.9	7.7	+1.0	9.6	+1.2	11.9	+1.4	14.8	+1.7	18.4	+2.1	—	—
280	6.9	+0.9	8.6	+1.1	10.7	+1.3	13.4	+1.6	16.6	+1.9	20.6	+2.3	—	—
315	7.7	+1.0	9.7	+1.2	12.1	+1.5	15.0	+1.7	18.7	+2.1	23.2	+2.6	—	—
355	8.7	+1.1	10.9	+1.3	13.6	+1.6	16.9	+1.9	21.1	+2.4	26.1	+2.9	—	—
400	9.8	+1.2	12.3	+1.5	15.3	+1.8	19.1	+2.2	23.7	+2.6	29.4	+3.2	—	—

注：1. 考虑到安全性，最小壁厚应不小于 2.0mm。  
2. 除了有其他规定之外，尺寸应与 GB/T 10798 一致。

表 13-64

C 值	管系列 S、标准尺寸比 SDR 与公称压力(PN)对照						
2.0	S20 SDR41	S16 SDR33	S12.5 SDR26	S10 SDR21	S8 SDR17	S6.3 SDR13.6	S5 SDR11
	PN0.63MPa	PN0.8MPa	PN1.0MPa	PN1.25MPa	PN1.6MPa	PN2.0MPa	PN2.5MPa
2.5	S20 SDR41	S16 SDR33	S12.5 SDR26	S10 SDR21	S8 SDR17	S6.3 SDR13.6	S5 SDR11
	PN0.5MPa	PN0.63MPa	PN0.8MPa	PN1.0MPa	PN1.25MPa	PN1.6MPa	PN2.0MPa

注：1. 以上数据基于最小要求强度（MRS）值为 25MPa。  
2. C 为总体使用（设计）系数。

6. 输送用胶管

(1) 压缩空气用织物增强橡胶软管

GB/T 1186—2007 规定了压缩空气用最大工作压力为 2.5MPa 和工作温度范围依据类别在 -40℃ ~ +70℃ 之间的七种型别和两种类别的织物增强橡胶软管的要求。

软管的七种型别和两种类别规定如下：

1) 型别：

- ① 1 型：最大工作压力为 1.0MPa 的一般工业用空气软管；
- ② 2 型：最大工作压力为 1.0MPa 的重型建筑用空气软管；
- ③ 3 型：最大工作压力为 1.0MPa 的具有良好耐油性能的重型建筑用空气软管；
- ④ 4 型：最大工作压力为 1.6MPa 的重型建筑用空气软管；
- ⑤ 5 型：最大工作压力为 1.6MPa 的具有良好耐油性能的重型建筑用空气软管；
- ⑥ 6 型：最大工作压力为 2.5MPa 的重型建筑用空气软管；
- ⑦ 7 型：最大工作压力为 2.5MPa 的具有良好耐油性能的重型建筑用空气软管。

2) 类别：

- A 类：软管工作温度范围为：-25℃ ~ +70℃；
- B 类：软管工作温度范围为：-40℃ ~ +70℃。

软管的内径应符合表 13-65 中规定的公称尺寸和公差。

表 13-65 公称内径和公差 (mm)

公称内径	公差	公称内径	公差
5	±0.5	25	±1.25
6.3	±0.75	31.5	±1.25
8	±0.75	40(38)	±1.5
10	±0.75	50	±1.5
12.5	±0.75	63	±1.5
16	±0.75	80(76)	±2.0
20(19)	±0.75	100(102)	±2.0

注：括号中的数字是供选择的。

如果特殊情况需要特别的规格：

- 1) 对于更小或更大的尺寸，另外的数字应从 R10 优先数系（GB/T 321）选取，公差应符合 GB/T 9575 的规定；
- 2) 对于居于中间的尺寸，数字应从 R20 优先数系（GB/T 321）选取，公差按相邻较大规格的公差计。

(2) 通用输水织物增强橡胶软管

HG/T 2184—2008 规定了对三种型别适用温度范围为 -25℃ ~ +70℃、最大工作压力为 2.5MPa 的通用输水织物增强橡胶软管的要求。

软管根据其压力等级分为下列型别之一：

- 1 型：低压——设计用于 0.7MPa 最大工作压力；
- 2 型：中压——设计用于 1.0MPa 最大工作压力；
- 3 型：高压——设计用于 2.5MPa 最大工作压力。

此外，上述 1 型、2 型和 3 型三种型别进一步细分为 a、b、c、d 和 e 五个级别，见表 13-66。

表 13-66 软管的型号和级别

型号	类型	级别	工作压力范围
1 型	低压型	a 级	工作压力 ≤0.3MPa
		b 级	0.3MPa < 工作压力 ≤0.5MPa
		c 级	0.5MPa < 工作压力 ≤0.7MPa
2 型	中压型	d 级	0.7MPa < 工作压力 ≤1.0MPa
3 型	高压型	e 级	1.0MPa < 工作压力 ≤2.5MPa

当按 GB/T 9573 进行测量时，软管的内径及公差应符合表 13-67 规定的值。

表 13-67 软管内径、公差及胶层厚度 (mm)

内径		胶层厚度(≥)	
公称尺寸	公差	内衬层	外覆层
10 12.5 16 19 20	±0.75	1.5	1.5
22		2.0	1.5
25 27 32	±1.25	2.5	1.5
38 40 50 63 76		3.0	2.0
80 100	±2.00		

注：未标注的软管内径、公差及胶层厚度，可比照临近软管的内径、公差及胶层厚度为准。

(3) 耐稀酸碱橡胶软管

HG/T 2183—1991 适用于 -20 ~ 45℃ 环境中输送浓度不高于 40% 的硫酸溶液及浓度不高于 15% 的氢氧化钠溶液以及与上述浓度程度相当的酸碱溶液（硝酸除外）的橡胶软管（以下简称软管）。

软管按表 13-68 的要求分为 A、B、C 三种类型。

表 13-68

型号	结构	用途	使用压力/MPa
A	有增强层	输送酸碱液体	0.3、0.5、0.7
B	有增强层和钢丝螺旋线	吸引酸碱液体	负压
C		排吸酸碱液体	负压 0.3、0.5、0.7

A 型软管的尺寸及公差应符合表 13-69 的规定；B 型、C 型软管的尺寸及公差应符合表 13-70 的规定。

表 13-69 (mm)

A 型		胶层厚度不小于	
公称内径	公差	内胶层	外胶层
12.5 16 20 22	±0.75	2.2	1.2
25 31.5	±1.25		
40 45 50 63	±1.5	2.5	1.5
80	±2.0	2.8	

表 13-70 (mm)

B 型及 C 型	
公称内径	公差
31.5	±1.25
40 45 50 63	±1.5
80	±2.0

### 13.8.3 钢塑复合管（GB/T 28897—2012）

钢塑复合管是以钢管为基管，在其内表面或外表面或内外表面黏结上塑料防腐层的钢塑复合产品。

钢塑复合管按其塑料防腐层黏结位置的不同（防腐形式）分为：

- 1) 衬塑复合钢管：在钢管内壁粘衬薄壁塑料管的钢塑复合管，代号为 SP—C。
- 2) 涂塑复合钢管：在钢管内或内外表面熔融一层塑料粉末的钢塑复合管，代号为 SP—T。
- 3) 外覆塑复合钢管：在钢管外表面覆塑熔融的胶粘剂和熔融的塑料层的钢塑复合管，代号为 SP—F。

衬塑复合钢管和外覆塑复合钢管塑层尺寸及允许偏差应符合表 13-71 的规定，涂塑复合钢管塑层的最小厚度应符合表 13-72 的规定。

表 13-71 衬塑管和外覆塑复合钢管塑层厚度和允许偏差 (mm)

公称通径 DN	内衬塑料层		法兰面覆塑层		外覆塑层最小厚度
	厚度	允许偏差	厚度	允许偏差	
15	1.5	+0.2 -0.2	1.0	+ 不限 -0.5	0.5
20					0.6
25					0.7
32					0.8
40					1.0
50					1.1
65					1.1
80	2.0	+0.2 -0.2	1.5		1.2
100					1.3
125					1.4
150					1.5
200	3.0	+ 不限 -0.5	2.0	+ 不限 -0.5	2.0
250					2.2
300					
350					
400					
450					2.5
500					



表 13-72 涂塑复合钢管塑层的最小厚度 (mm)

公称通径 DN	内面涂塑层		外面涂塑层		
	最小厚度		最小厚度		
	聚乙烯	环氧树脂	聚乙烯	环氧树脂	
15	0.4	0.3	0.5	0.3	
20					
25					
32					
40					
50					
65					
80	0.5	0.35	0.6	0.35	
100					
125					
150					
200	0.6		0.8		0.35
250					
300					
350					
400					
450					
500					
600	0.8	0.4	1.0	0.4	
700					
800	1.0	0.45	1.2	0.45	
900					
1000					
1100					
1200					

13.8.4 ABS 塑料管

ABS 管和管件主要用于化学工业输送某些腐蚀性流体，亦可用于食品、医药、纯水制备和水处理装置。

使用温度范围：-20℃ ~ +70℃。

ABS 管的公称压力等级分为 0.6MPa、1.0MPa。管子外径、壁厚如图 13 - 1 所示，尺寸及其公差见表 13 - 73。

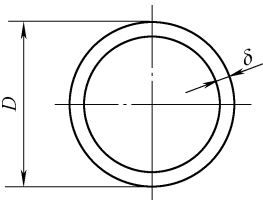


图 13 - 1 管子外径、壁厚

表 13 - 73 管子外径、壁厚及公差 (mm)

公称通径 DN	外径及公差 $D$	PN0.6MPa		PN1.0MPa	
		壁厚及公差 $\delta$	近似质量/(kg/m)	壁厚及公差 $\delta$	近似质量/(kg/m)
15	$20^{+0.2}_0$			$2.0^{+0.4}_0$	0.12
20	$25^{+0.2}_0$			$2.0^{+0.4}_0$	0.15
25	$32^{+0.2}_0$			$2.4^{+0.5}_0$	0.23
32	$40^{+0.2}_0$	$2.0^{+0.4}_0$	0.25	$3.0^{+0.5}_0$	0.37
40	$50^{+0.2}_0$	$2.4^{+0.5}_0$	0.38	$3.7^{+0.6}_0$	0.57
50	$63^{+0.2}_0$	$3.0^{+0.5}_0$	0.59	$4.7^{+0.7}_0$	0.90
65	$75^{+0.3}_0$	$3.6^{+0.6}_0$	0.85	$5.5^{+0.8}_0$	1.26
80	$90^{+0.3}_0$	$4.3^{+0.7}_0$	1.22	$6.6^{+0.8}_0$	1.82
100	$110^{+0.4}_0$	$5.3^{+0.8}_0$	1.83	$8.1^{+1.1}_0$	2.72
125	$140^{+0.5}_0$	$6.7^{+0.9}_0$	2.95	$10.3^{+1.3}_0$	4.41
150	$160^{+0.5}_0$	$7.7^{+1.0}_0$	3.87	$11.8^{+1.4}_0$	5.77
200	$225^{+0.7}_0$	$10.8^{+1.3}_0$	7.83	$16.6^{+1.9}_0$	11.41

13.8.5 板材

1. 钢板

钢板厚度：冷轧钢板（GB/T 708—2006）的厚度为 0.30 ~ 4.00mm，热轧钢板（GB/T 709—2006）的厚度为 3.00 ~ 400mm。钢板理论计重的计算方法见表 13 - 74。

表 13-74 钢板理论计重的计算方法

计算顺序	计算方法	结果的修约
基本重量/[kg/(mm·m <sup>2</sup> )]	7.85(厚度 1mm,面积 1m <sup>2</sup> 的重量)	—
单位重量/(kg/m <sup>2</sup> )	基本重量[kg/(mm·m <sup>2</sup> )]×厚度(mm)	修约到有效数字 4 位
钢板的面积/m <sup>2</sup>	宽度(m)×长度(m)	修约到有效数字 4 位
一张钢板的重量/kg	单位重量(kg/m <sup>2</sup> )×面积(m <sup>2</sup> )	修约到有效数字 3 位
总重量/kg	各张钢板重量之和	kg 的整数值

注：1. 碳钢密度为 7.85g/cm<sup>3</sup>。  
2. 数值修约方法按 GB/T 8170 的规定。

2. 花纹钢板（见表 13-75）

表 13-75 花纹钢板 [GB 3277—1991]

基本厚度	基本厚度允许偏差	理论重量/(kg/m <sup>2</sup> )		
		菱形	扁豆	圆豆
2.5	±0.3	21.6	21.3	21.1
3.0	±0.3	25.6	24.4	24.3
3.5	±0.3	29.5	28.4	28.3
4.0	±0.4	33.4	32.4	32.3
4.5	±0.4	37.3	36.4	36.2
5.0	+0.4 -0.5	42.3	40.5	40.2
5.5	+0.4 -0.5	46.2	44.3	44.1
6.0	+0.5 -0.6	50.1	48.4	48.1
7.0	+0.6 -0.7	59.0	52.6	52.4
8.0	+0.6 -0.8	66.8	56.4	56.2

注：常用板材还有硬质聚氯乙烯板和工业用硫化橡胶板。

13.9 常用设备

1. 常用除雾器

常用折流板除雾器如图 13-2 所示。

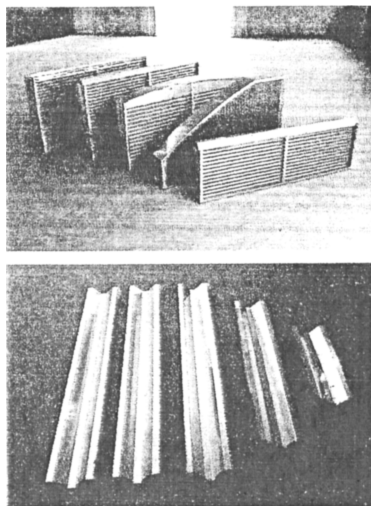


图 13-2 折流板除雾器

## 2. 常用脱硫喷嘴

常用脱硫喷嘴及检测装置如图 13-3 所示。



图 13-3 常用脱硫喷嘴及检测装置

### 3. Y 系列小型三相笼型异步电动机

### (1) 型号说明

Y 132 M<sub>2</sub> — 2

S  
L

极数

短、中、长机座（M<sub>2</sub>的下角2表示第二种铁心长度）

机座中心高（mm）







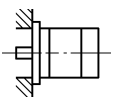
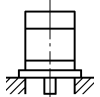
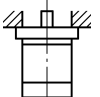
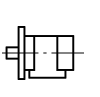


异步电动机

## (2) 安装结构型式

本系列电动机有以下三种基本安装结构型式：

- 1) B3——机座带底脚，端盖无凸缘。
  - 2) B5——机座不带底脚，端盖有凸缘。
  - 3) B35——机座带底脚，端盖有凸缘。
- (3) 基本安装结构型式（见表 13 - 76）

表 13 - 76 Y 系列电动机安装结构

基本结构型式	B3					
安装型式	B3	B6	B7	B8	V5	V6
示意图						
基本结构型式	B5			B35		
安装型式	B5	V1	V3	B35	V15	V36
示意图						

(4) 适用范围

不含易燃易爆或腐蚀性气体的一般场所和无特殊要求的机械上，也适用于某些对起动转矩有较高要求的机械，如压缩机等。

(5) 主要技术数据（见表 13 - 77）

表 13 - 77 Y 系列电动机技术数据

型号	转速/(r/min)	电流/A	功率/kW	重量/kg
Y801 - 2	2825	1. 9	0. 75	17
Y802 - 2	2825	2. 6	1. 1	18. 5
Y90S - 2	2840	3. 4	1. 5	22
Y90L - 2	2840	4. 7	2. 2	26
Y100L - 2	2880	6. 4	3	36
Y112M - 2	2890	8. 2	4	46
Y132S <sub>1</sub> - 2	2900	11. 1	5. 5	67
Y132S <sub>2</sub> - 2	2900	15. 0	7. 5	72
Y160M <sub>1</sub> - 2	2930	21. 8	11	116
Y160M <sub>2</sub> - 2	2930	29. 4	15	127
Y160L - 2	2930	35. 5	18. 5	152
Y180M - 2	2940	42. 2	22	175
Y200L <sub>1</sub> - 2	2950	56. 9	30	241

(续)

型号	转速/(r/min)	电流/A	功率/kW	重量/kg
Y200L <sub>2</sub> - 2	2950	70.4	37	257
Y225M - 2	2970	83.9	45	325
Y250M - 2	2970	102.7	55	407
Y280S - 2	2970	140.1	75	540
Y280M - 2	2970	167	90	590
Y315M - 2	2970	206.4	110	—
Y315M <sub>1</sub> - 2	2970	247.6	132	—
Y315M <sub>2</sub> - 2	2970	298.5	160	—
Y355M <sub>1</sub> - 2	2975	369	200	—
Y355M <sub>2</sub> - 2	2975	461.2	250	—
Y801 - 4	1390	1.6	0.55	17
Y802 - 4	1390	2.1	0.75	18
Y90S - 4	1400	2.7	1.1	26.5
Y90L - 4	1400	3.7	1.5	35
Y100L <sub>1</sub> - 4	1420	5.0	2.2	39
Y100L <sub>2</sub> - 4	1420	6.8	3	45
Y112M - 4	1440	8.8	4	73
Y132S - 4	1440	11.6	5.5	78
Y132M - 4	1440	15.4	7.5	125
Y160M - 4	1460	22.6	11	155
Y160L - 4	1460	30.3	15	177
Y180M - 4	1470	35.9	18.5	191
Y180L - 4	1470	42.5	22	259
Y200L - 4	1470	56.8	30	305
Y225S - 4	1480	69.8	37	338
Y225M - 4	1480	84.2	45	430
Y250M - 4	1480	102.5	55	560
Y280S - 4	1480	139.7	75	670
Y280M - 4	1480	164.3	90	—
Y315S - 4	1480	201.9	110	—
Y315M <sub>1</sub> - 4	1480	242.3	132	—
Y315M <sub>2</sub> - 4	1480	293.7	160	—
Y355M <sub>1</sub> - 4	1480	367.1	200	—
Y355M <sub>2</sub> - 4	1480	458.9	250	—
Y355M <sub>3</sub> - 4	1480	578.2	315	—
Y90S - 6	910	2.3	0.75	22.5
Y90L - 6	910	3.2	1.1	25.5
Y100L - 6	940	4.0	1.5	36
Y112M - 6	940	5.6	2.2	45
Y132S - 6	960	7.2	3	71
Y132M <sub>1</sub> - 6	960	9.4	4	75

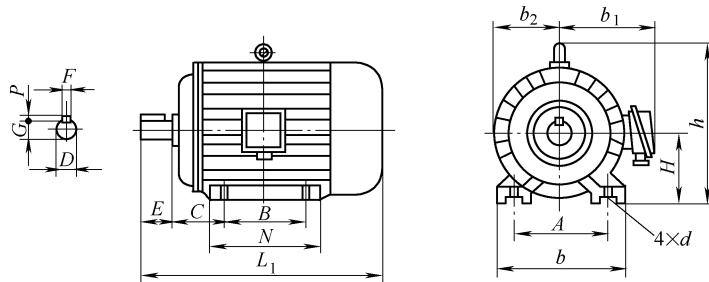
(续)

型号	转速/(r/min)	电流/A	功率/kW	重量/kg
Y132M <sub>2</sub> -6	960	12.6	5.5	77
Y160M-6	970	17.0	7.5	122
Y160L-6	970	24.6	11	143
Y180L-6	970	31.5	15	184
Y200L <sub>1</sub> -6	970	37.7	18.5	233
Y200L <sub>2</sub> -6	970	44.6	22	250
Y225M-6	980	59.5	30	309
Y250M-6	980	72	37	407
Y280S-6	980	85.4	45	540
Y280M-6	980	104.9	55	590
Y315S-6	980	142.4	75	—
Y315M <sub>1</sub> -6	980	170.8	90	—
Y315M <sub>2</sub> -6	980	207.7	110	—
Y315M <sub>3</sub> -6	980	249.2	132	—
Y355M <sub>1</sub> -6	980	297	160	—
Y355M <sub>2</sub> -6	980	371.3	200	—
Y355M <sub>3</sub> -6	980	464.1	250	—
Y132S-8	710	5.8	2.2	66
Y132M-8	710	7.7	3	77
Y160M <sub>1</sub> -8	720	9.9	4	110
Y160M <sub>2</sub> -8	720	13.3	5.5	119
Y160L-8	720	17.7	7.5	145
Y180L-8	730	25.1	11	183
Y200L-8	730	34.1	15	235
Y225S-8	730	41.3	18.5	279
Y225M-8	730	47.6	22	320
Y250M-8	730	63	30	402
Y280S-8	740	78.2	37	530
Y280M-8	740	93.2	45	590
Y315S-8	740	112.1	55	—
Y315M <sub>1</sub> -8	740	152.9	75	—
Y315M <sub>2</sub> -8	740	180.3	90	—
Y315M <sub>3</sub> -8	740	220.3	110	—
Y355M <sub>1</sub> -8	740	261.2	132	—
Y355M <sub>2</sub> -8	740	316.6	160	—
Y355M <sub>3</sub> -8	740	395.8	200	—
Y315S-10	585	100.2	45	—
Y315M <sub>1</sub> -10	585	121.8	55	—
Y315M <sub>2</sub> -10	585	163.9	75	—
Y355M <sub>1</sub> -10	585	185.8	90	—
Y355M <sub>2</sub> -10	585	227	110	—
Y355M <sub>3</sub> -10	585	272.5	132	—

(6) 三种安装结构型式的外形及安装尺寸

1) B<sub>3</sub> 型电动机见表 13-78。

表 13-78 B<sub>3</sub> 型电动机外形及安装尺寸



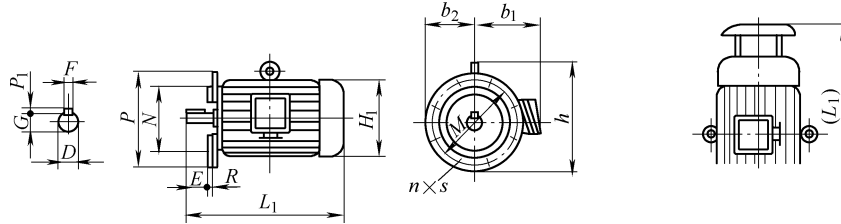
型号	外形尺寸/mm										安装尺寸/mm									
	H	L <sub>1</sub>		4 × d	b	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	h	B	C	D		E		F × P		G		A	N
		2 极	4、6、 8、10 极								2 极	4、6、 8、10 极	2 极	4、6、 8、10 极	2 极	4、6、 8、10 极	2 极	4、6、 8、10 极		
Y80	80	285		φ10	160	150	85	170	100	50	19		40		6 × 6		15.5		125	130
Y90S	90	310		φ10	180	155	90	190	100	56	24		50		8 × 7		20		140	130
Y90L	90	335		φ10	180	155	90	190	125	56	24		50		8 × 7		20		140	155
Y100L	100	380		φ12	205	180	105	245	140	63	28		60		8 × 7		24		160	176
Y112M	112	400		φ12	245	190	115	265	140	70	28		60		8 × 7		24		190	180
Y132S	132	475		φ12	280	210	135	315	140	89	38		80		10 × 8		33		216	200
Y132M	132	515		φ12	280	210	135	315	178	89	38		80		10 × 8		33		216	238
Y160M	160	600		φ15	325	255	165	385	210	108	42		110		12 × 8		37		254	270
Y160L	160	645		φ15	325	255	165	385	254	108	42		110		12 × 8		37		254	314
Y180M	180	670		φ15	355	285	180	430	241	121	48		110		14 × 9		42.5		279	311
Y180L	180	710		φ15	355	285	180	430	279	121	48		110		14 × 9		42.5		279	349
Y200L	200	775		φ19	395	310	200	475	305	133	55		110		16 × 10		49		318	379
Y225S	225	—	820	φ19	435	345	225	530	286	149	55	60	110	140	16 × 10	18 × 11	49	53	356	368
Y225M	225	815	845	φ19	435	345	225	530	311	149	55	60	110	140	16 × 10	18 × 11	49	53	356	393
Y250M	250	930		φ24	490	385	250	575	349	168	60	65	140		18 × 11		53	58	406	455
Y280S	280	1000		φ24	545	410	280	640	368	190	65	75	140		18 × 11	20 × 12	58	67.5	457	530
Y280M	280	1050		φ24	545	410	280	640	419	190	65	75	140		18 × 11	20 × 12	58	67.5	457	581
Y315S	315	—	—	φ28	—	—	—	—	406	216	65	80	140	170	18 × 11	22 × 14	58	71	508	—
Y315M	315	—	—	φ28	—	—	—	—	457	216	65	80	140	170	18 × 11	22 × 14	58	71	508	—
Y355M	355	—	—	φ28	—	—	—	—	560	254	75	90	140	170	20 × 12	25 × 14	67.5	81	610	—

注：315、355 机座外形尺寸待定。



2) B<sub>s</sub> 型电动机见表 13-79。

表 13-79 B<sub>s</sub> 型电动机外形及安装尺寸



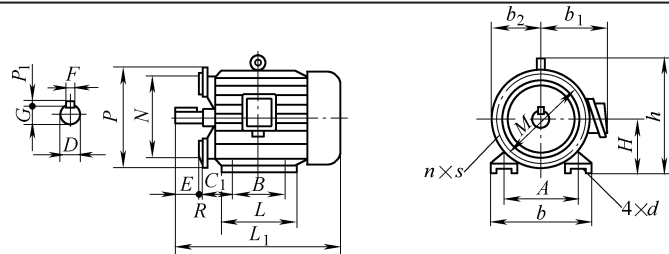
型号	外形尺寸/mm					安装尺寸/mm													
	$n \times s$	$b_1$	$b_2$	$h$	$H_1$	$L_1$		$D$		$E$		$F \times P_1$		$G$		$M$	$N$	$P$	$R$
						2 极	4、6、 8、10 极	2 极	4、6、 8、10 极	2 极	4、6、 8、10 极	2 极	4、6、 8、10 极	2 极	4、6、 8、10 极				
Y80	4 × φ12	150	105	185	156	285		19		40		6 × 6		15. 5		165	130	200	0
Y90S	4 × φ12	155	105	195	176	310		24		50		8 × 7		20		165	130	200	
Y90L	4 × φ12	155	105	195	176	335		24		50		8 × 7		20		165	130	200	
Y100L	4 × φ15	180	130	245	196	380		28		60		8 × 7		24		215	180	250	
Y112M	4 × φ15	190	130	265	220	400		28		60		8 × 7		24		215	180	250	
Y132S	4 × φ15	210	155	315	259	475		38		80		10 × 8		33		265	230	300	
Y132M	4 × φ15	210	155	315	259	515		38		80		10 × 8		33		265	230	300	
Y160M	4 × φ19	255	180	385	314	600		42		110		12 × 8		37		300	250	350	
Y160L	4 × φ19	255	180	385	314	645		42		110		12 × 8		37		300	250	350	
Y180M	4 × φ19	285	180	430 (500)	355	670		48		110		14 × 9		42. 5		300	250	350	
Y180L	4 × φ19	285	180	430 (500)	355	710		48		110		14 × 9		42. 5		300	250	350	
Y200L	4 × φ19	310	205	480 (550)	397	775		55		110		16 × 10		40		350	300	400	
Y225S	8 × φ19	345	230	535 (610)	446	—	820	55	60	110	140	16 × 10	18 × 11	49	53	400	350	450	
Y225M	8 × φ19	345	230	535 (610)	446	815	845	55	60	110	140	16 × 10	18 × 11	49	53	400	350	450	
Y250M	8 × φ19	385	280	(650)	485	—	—	60	65	140		18 × 11		53	58	500	450	550	
Y280S	8 × φ19	410	280	(720)	547	—	—	65	75	140		18 × 11	20 × 12	58	67. 5	500	450	550	
Y280M	8 × φ19	410	280	(720)	547	—	—	65	75	140		18 × 11	20 × 12	58	67. 5	500	450	550	
Y315S	8 × φ24	—	—	—	—	—	—	65	80	140	170	18 × 11	22 × 14	58	71	600	550	660	
Y315M	8 × φ24	—	—	—	—	—	—	65	80	140	170	18 × 11	22 × 14	58	71	600	550	660	
Y355M	8 × φ24	—	—	—	—	—	—	75	90	140	170	20 × 12	25 × 14	67. 5	81	740	680	800	

注：1. 括号内尺寸仅用于 V1 结构。

2. 315、355 机座外尺寸待定。

3) B<sub>35</sub>型电动机见表 13 - 80。

表 13 - 80 B<sub>35</sub>型电动机外形及尺寸



型号	外形尺寸/mm									安装尺寸/mm																
	H	L <sub>1</sub>		4×d	b	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	h	H <sub>1</sub>	A	B	C <sub>1</sub>	M	N	P	R	n×s	D		E		F×P <sub>1</sub>		G		L
		2 极	4、6、 8、10 极															2 极	4、6、 8、10 极	2 极	4、6、 8、10 极	2 极	4、6、 8、10 极			
Y80	80	285		φ10	160	150	105	170	10	125	100	50	165	130	200		4×φ12	19		40		6×6		15.5		130
Y90S	90	310		φ10	180	155	105	190	12	140	100	56	165	130	200		4×φ12	24		50		8×7		20		130
Y90L	90	335		φ10	180	155	105	190	12	140	125	56	165	130	200		4×φ12	24		50		8×7		20		155
Y100L	100	380		φ12	205	180	130	245	14	160	140	63	215	180	250		4×φ15	28		60		8×7		24		170
Y112M	112	400		φ12	245	190	130	265	15	190	140	70	215	180	250		4×φ15	28		60		8×7		24		180
Y132S	132	475		φ12	280	210	155	315	18	216	140	89	265	230	300		4×φ15	38		80		10×8		33		200
Y132M	132	515		φ12	280	210	155	315	18	216	178	89	265	230	300		4×φ15	38		80		10×8		33		238
Y160M	160	600		φ15	325	255	180	385	20	254	210	108	300	250	350		4×φ19	42		110		12×8		37		270
Y160L	160	645		φ15	325	255	180	385	20	254	254	108	300	250	350		4×φ19	42		110		12×8		37		314
Y180M	180	670		φ15	355	285	180	430	22	279	241	121	300	250	350	0	4×φ19	48		110		14×9		42.5		311
Y180L	180	710		φ15	355	285	180	430	22	279	279	121	300	250	350		4×φ19	48		110		14×9		42.5		349
Y200L	200	775		φ19	395	310	205	475	25	318	305	133	350	300	400		4×φ19	55		110		16×10		49		379
Y225S	225	—	820	φ19	435	345	230	530	28	356	286	149	400	350	450		8×φ19	55	60	110	140	16×10	18×11	49	53	368
Y225M	225	815	845	φ19	435	345	230	530	28	356	311	149	400	350	450		8×φ19	55	60	110	140	16×10	18×11	49	53	393
Y250M	250	930		φ24	490	385	280	57.5	30	406	349	168	500	450	550		8×φ19	60	65	140		18×11		53	58	455
Y280S	280	1000		φ24	545	410	280	640	35	457	368	190	500	450	550		8×φ19	65	75	140		18×11	20×12	58	67.5	530
Y280M	280	1050		φ24	545	410	280	640	35	457	419	190	500	450	550		8×φ19	65	75	140		18×11	20×12	58	67.5	581
Y315S	315	—	—	φ28	—	—	—	—	—	508	406	216	600	550	660		8×φ24	65	80	140	170	18×11	22×14	58	71	—
Y315M	315	—	—	φ28	—	—	—	—	—	508	457	216	600	550	660		8×φ24	65	80	140	170	18×11	22×14	58	71	—
Y355M	355	—	—	φ28	—	—	—	—	—	610	566	254	740	680	800		8×φ24	75	90	140	170	20×12	25×14	67.5	81	—

注：315、355 机座外形尺寸待定。

#### 4. 常用脱硫循环泵

(1) AHR 型衬胶脱硫泵 根据国际工业标准和  $\text{SO}_2$  治理的特殊要求, 当今世界各地燃煤电厂脱硫系统运行证明: 脱硫泵采用模压橡胶衬里最为合理。其成本大大低于金属材料, 且寿命为金属材料的 3 倍以上。某厂研制的卧式、单级、单吸悬臂式 AHR&LR、衬胶脱硫泵和立式 SP&SPR 型液下脱硫泵具有以下特点:

1) 采用 CAD 技术, 水力性能优良, 效率高, 节能显著。

2) 采用模压成形耐磨耐腐蚀 (适应 pH 值 2.5 - 13, 氯化物含量 8000ppm) 橡胶衬里, 球墨铸铁外壳。对于特殊要求, 可提供国内独有的高合金耐磨耐腐材料叶轮及前护板, 确保泵长期无故障运行。使用成本低, 社会效益显著。

3) 轴承采用油脂润滑或稀油润滑。泵间隙可调整, 轴承温度低, 调整方便, 可靠性高。

4) 为防止泵轴封泄露和污染, 泵配有注水式机械密封、不注水式机械密封、填料密封和副叶轮加填料组合式密封可供选择, 确保完全无泄漏, 可靠运行, 无故障, 免维护。

5) AHR (P) 和 LR 型泵在允许压力范围内, 根据要求可以串联使用。

6) AHR (P) 和 LR 型泵配直接传动和传送带间接传动等, 并可采用齿轮变速、液力偶合器调速和变频调速装置, 从而保证泵适应工况要求达到经济运行。

7) SP&SPR 型泵在池内使用, 轴可根据需求加长, 中间加以支撑; 可靠性高, 运转平稳。

8) 经特殊处理, 可用于沿海地区海水脱硫及烟雾, 电化学腐蚀工况。

若串联使用, 则建议采用注水式机械密封。

轴封水量见表 13-81。

表 13-81 机械密封 (注水式) 轴封水量

托架型式	A	B	C	D	E、F	G	R、RS	S、ST	T、TU	U
轴封水水量/(L/S)	0.15	0.25	0.35	0.55	0.7	1.2	0.70	1.2	1.6	2.1

轴封水压: 对于采用填料密封, 一般应高于泵出口压力  $3.5 \times 10^{-3}$  MPa; 对于副叶轮加填料组合式密封, 一般为 0.2 ~ 0.3 MPa; 对于采用机械密封, 各级泵轴封水压力一般要求比泵出口压力大 0.1 MPa。

型号意义:

AHR (P) 型泵结构及主要零件如图 13-4 所示。

AHR 系列脱硫泵性能型谱如图 13-5 所示, 性能参数见表 13-82。

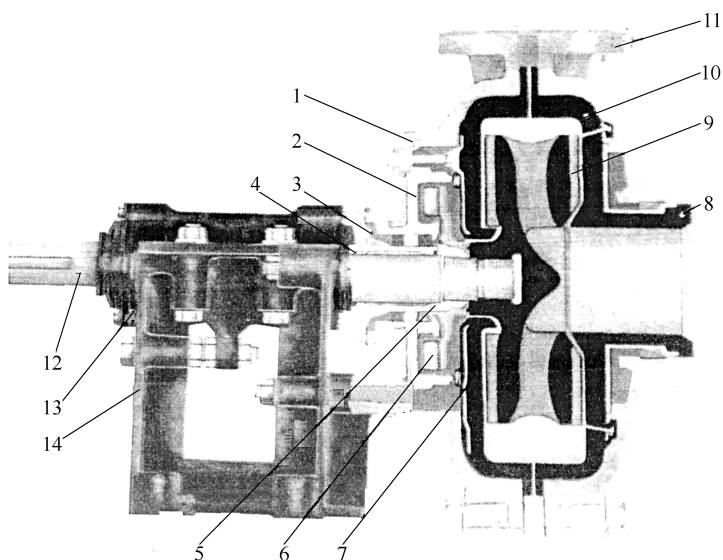
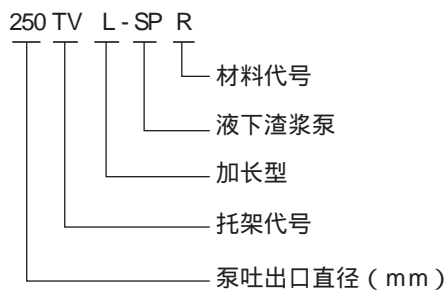
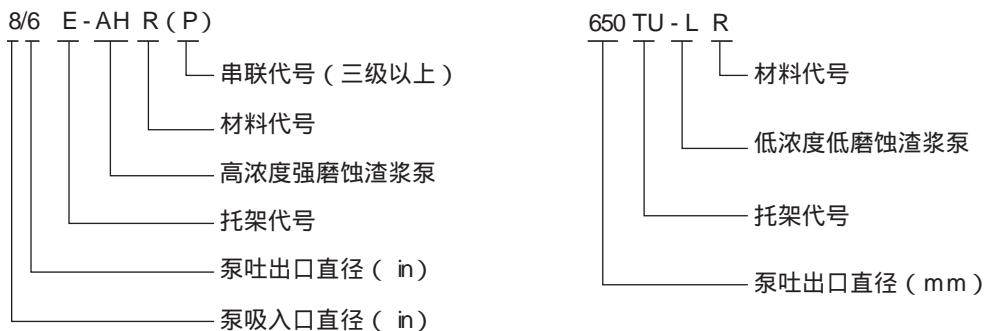


图 13-4 AHR (P) 型泵结构及主要零件

- 1—泵体 2—减压盖 3—填料压盖 4—轴“O”形圈 5—定位套 6—副叶轮 7—泵体护套  
8—吸入护套 9—叶轮 10—泵盖护套 11—泵盖 12—轴 13—轴承体 14—托架

表 13-82 AHR (P) 型泵性能参数

泵 型 号	清水性能					轴功率 $P_a$ /kW	配套电机 型号功率 /电压/(kW/V)	传动方式		泵重 量/kg
	转速 $n$ /(r/min)	流量 $Q$ /(L/s)	扬程 $H$ /m	效率 $\eta$ /%	汽蚀余量 NPSH/m			间接传动	直接 传动	
1 $\frac{1}{2}$ /1B - AHR	3400	7.56	38.2	30	4	9.4	Y160L - 2 18.5/380	ZV,CR,CL		77
		6.3	42.8	30	3.5	8.8				
		2.52	52.5	20	2	6.4	Y160M2 - 2 15/380			
	3200	7.32	32	30		7.6	Y160M2 - 2 15/380	ZV,CR,CL		
		6.1	37	35		6.3				
		2.44	46.8	18		6.2	Y160M1 - 2 11/380			
	3000	6.72	29	30		6.37	Y160M1 - 2 11/380	ZV,CR,CL		
		5.6	32.2	35		5.05				
		2.24	41	19		4.7				
	2930	6.48	27	35		4.9	Y160M1 - 2 11/380		DC	
		5.4	30.5	35		4.6				
	2900	2.16	38.6	20		4	Y132S2 - 2 7.5/380			
	2800	6.24	24.5	35		4.3	Y132S2 - 2 7.5/380	CV,ZV, CR,CL		
		5.2	27.9	35		4				
		2.08	35.5	20		3.6				
	2600	5.88	21	35		3.4	Y132S2 - 2 7.5/380	CV,ZV, CR,CL		
		4.9	24	35		3.2				
		1.96	30.6	21		2.8	Y132S1 - 2 5.5/380			
	2400	5.4	17	35		2.57	Y132S1 - 2 5.5/380	CV,ZV, CR,CL		
		4.5	21	35		2.65				
		1.8	26.5	23		2.03	Y112M - 2 4/380			
	2200	5.04	15	35		2.1	Y112M - 2 4/380	CV,ZV, CR,CL		
		4.2	18.5	35		2.2				
		1.68	22	28		1.29	Y100L - 2 3/380			
	2000	4.68	13.2	30		1.71	Y100L - 2 3/380	CV,ZV, CR,CL		
		3.9	14.9	35		1.62				
		1.56	18.1	26		1.06	Y90L - 2 2.2/380			
	1800	4.2	10.5	35		1.23	Y90L - 2 2.2/380	CV,ZV, CR,CL		
		3.5	12	35		1.17	Y100L1 - 4 2.2/380			
		1.4	15	30		0.68	Y90S - 2 1.5/380 Y90L - 4 1.5/380			
	1600	3.6	8.5	30		1	Y100L1 - 4 2.2/380	CV,ZV, CR,CL		
		3	9.5	35		0.79	Y90L - 4 1.5/380			
		12	12	23		0.61	Y90S - 4 1.1/380			
	1400	3	6.5	30		0.63	Y90S - 4 1.1/380		DC	
		2.5	7.2	30		0.58				
		1	9	21			0.42			

(续)

泵 型 号	清水性能					轴功率 $P_a$ /kW	配套电机 型号功率 /电压 kW/V	传动方式		泵重 量/kg
	转速 $n$ /(r/min)	流量 $Q$ /(L/s)	扬程 $H$ /m	效率 $\eta$ /%	汽蚀余量 NPSH/m			间接传动	直接 传动	
2/1 $\frac{1}{2}$ B – AHR	2600	14.16	35	50	5	9.7	Y160L – 2 18.5/380	ZV, CR, CL		118
		11.8	37.5	50	4.2	8.67				
		4.7	42.5	30	2.3	6.5	Y160M2 – 2 15/380			
	2400	12.6	30.1	50	4.5	7.4	Y160M2 – 2 15/380	ZV, CR, CL		
		10.5	32.1	50	3.7	6.6				
		4.2	36.5	29	2.2	5.1	Y160M1 – 2 11/380			
	2200	11.28	26	50	3.2	5.75	Y160M2 – 2 15/380	ZV, CR, CL		
		9.4	27.1	50	3.5	4.9				
		3.76	30.8	25	2	4.5				
	2000	10.8	22	50	3.5	4.65	Y160M1 – 2 11/380	ZV, CR, CL		
		9	23.1	50	2.7	4.07	Y132S2 – 2 7.5/380			
		3.6	26	28	2	2.73	Y132S1 – 2 5.5/380			
	1800	9.72	17.5	50	2.8	3.3	Y132M – 4 7.5/380	ZV, CR, CL		
		8.1	18.9	50	2.2	3	Y132S – 4 5.5/380			
		3.24	21	26	2	2.56				
	1600	9	13.4	50	2.2	2.36	Y132S – 4 5.5/380	CV, ZV, CR, CL		
		7.5	14.8	50	2	2.17	Y112M – 4 4/380			
		3	16.8	30		1.64	Y100L2 – 4 3/380			
	1420	8.52	10.5	50	2	1.65	Y100L2 – 4 3/380		DC	
		7.1	11	50		1.53				
		2.84	12.9	31		1.15	Y100L1 – 4 2.2/380			
	1200	6.72	8	45	2	1.17	Y100L1 – 4 2.2/380	CV, ZV, CR, CL		
		5.6	8.6	45		1.04				
		2.24	9.6	31		0.68	Y90L – 4 1.5/380			
	1000	6	5.5	44	2	0.73		CV, ZV, CR, CL		
		5	6	44		0.66	Y100L – 6 1.5/380			
		2	7	31		0.44	Y90L – 6 1.1/380			
3/2C – AHR	2100	18.9	33.6	55	3.9	11.3	Y180M – 2 22/380	ZV, CR, CL	154	
		13.2	36.4	52	3.4	9.05	Y106L – 2 18.5/380	CV, ZV, CR, CL		
		7.56	38.8	37	3.1	7.7	Y160M2 – 2 15/380			
	2000	17.9	35	55	3.7	11.1	Y180M – 2 22/380	ZV, CR, CL		
		12.53	37.5	52	3.2	10	Y160L – 2 18.5/380	CV, ZV, CR, CL		
		7.16	42.5	38	2.4	7.8	Y160M2 – 2 15/380			
	1900	17	26	55	3.5	7.8	Y160L – 4 15/380	CV, ZV, CR, CL		
		11.9	29	52	2.9	6.5				
		6.8	31	36	2	5.7	Y160M – 4 11/380			

(续)

泵 型 号	清水性能					轴功率 $P_a$ /kW	配套电机 型号功率 /电压 kW/V	传动方式		泵重 量/kg
	转速 $n$ /(r/min)	流量 $Q$ /(L/s)	扬程 $H$ /m	效率 $\eta$ /%	汽蚀余量 NPSH/m			间接传动	直接 传动	
3/2C - AHR	1800	16.2	23.3	55	3.2	8.46	Y160L-4 15/380	CV,ZV, CR,CL		154
		11.34	25.9	52	2.5	5.53	Y160M-4 11/380			
		6.48	27.8	36	2	4.9				
	1700	15.5	20.9	55	3.1	5.5	Y160M-4 11/380	CV,ZV, CR,CL		
		10.85	23.4	52	2.5	4.78	Y132M-4 7.5/380			
		6.2	25	36	2	4.2				
	1600	14.8	18.4	55	2.8	4.85	Y160M-4 11/380	CV,ZV, CR,CL		
		10.36	20.5	52	2.2	4	Y132M-4 7.5/380			
		5.96	21.2	36	2	3.44				
	1440	13.4	14.7	55	2.6	3.5	Y132M-4 7.5/380 Y132S-4 5.5/380		DC	
		9.38	16.5	52	2.2	2.9				
		5.36	17.8	36	2	2.6				
	1500	13.9	15.9	55	2.6	3.9	Y132M-4 7.5/380	CV,ZV, CR,CL		
		9.73	17.9	52	2.2	3.2	Y132S-4 5.5/380			
		5.56	18.3	36	2	2.7				
	1300	12.1	12.3	55	2.6	2.9	Y132S-4 5.5/380	CV,ZV, CR,CL		
		8.47	13.8	52	2	2.1	Y112M-4 4/380			
		4.84	14.8	36		1.95				
4/3 <sup>D</sup> C - AHR	1800	46.9	28.5	59	5.7	22.2	Y225M-4 45/380	CR,CL ZV 用于 D 托架		290 236
		31	32.6	55	3.9	18	Y225S-4 37/380			
		15.5	35.2	40	2.8	13.7	Y200L-4 30/380			
	1700	42.5	25.4	59	4.8	17.9	Y225S-4 37/380	CR,CL		
		29	29.2	55	3.5	15	Y200L-4 30/380 Y180L-4 22/380			
		14.8	31.5	40	2.5	11.4	Y180M-4 18.5/380			
	1600	40	22.5	59	4.2	14.9	Y225S-4 37/380	CR,CL		
		27.5	25.7	55	3.1	12.6	Y200L-4 30/380 Y180L-4 22/380			
		14	27.8	40	2.4	9.5	Y180M-4 18.5/380			
	1470	36.5	18.6	59	3.5	11.2	Y180L-4 22/380		DC	
		25	21.7	55	2.7	9.67	Y180M-4 18.5/380 Y160L-4 15/380			
		13	23.5	40	2	7.4	Y160M-4 11/380			
	1400	34.9	17	59	3.2	9.8	Y180M-4 18.5/380	ZV,CR,CL		
		24	19.5	55	2.5	8.3	Y160L-4 15/380 Y160M-4 11/380			
		12	21.2	40	2	6.2	Y132M-4 7.5/380			
	1300	32.5	14.5	59	2.8	7.8	Y160L-4 15/380	CV,ZV, CR,CL		
		22.3	17	55	2.1	6.7	Y160M-4 11/380 Y132M-4 7.5/380			
		11.2	18.4	40	2	5.05	Y132S-4 5.5/380			

(续)

泵 型 号	清水性能					轴功率 $P_a$ /kW	配套电机 型号功率 /电压 kW/V	传动方式		泵重 量/kg
	转速 $n$ /(r/min)	流量 $Q$ /(L/s)	扬程 $H$ /m	效率 $\eta$ /%	汽蚀余量 NPSH/m			间接传动	直接 传动	
D 4/3 C - AHR	1200	29.5	12.4	59	2.5	6.1	Y160M -4 11/380	CV,ZV, CR,CL		290 236
		20.5	14.4	55	2	5.2	Y132M -4 7.5/380			
		10.5	15.5	40		3.9	Y132S -4 5.5/380			
	1100	27.2	10.5	59	2	4.7	Y160M -4 11/380	CV,ZV, CR,CL		
		18.9	12.1	55		4	Y132M -4 7.5/380			
		9.5	13	40		3	Y132S -4 5.5/380			
	1000	25	8.7	59	2	3.6	Y160M -6 7.5/380	CV,ZV, CR,CL		
		17	10	55		3	Y132M2 -6 5.5/380			
		9.5	11	40		2.5	Y132M1 -6 4/380			
	960	23.5	7.9	59	2	3	Y132M2 -6 5.5/380		DC	
		17.5	9.2	55		2.8	Y132M1 -6 4/380			
		9.4	10	40		2.3	Y132S -6 3/380			
	800	20	5.5	59	2	18	Y132M1 -6 4/380	CV,ZV, CR,CL		
		14	6.5	55		1.6	Y132S -6 3/380			
		7	7.3	40		1.25	Y112M -6 2.2/380			
E 6/4 D R - AHR	1350	104	33	70	6	48.1	Y280M -4 90/380	CR,CL		635 454
		72	39	70	4.6	39.1	Y280S -4 75/380			
		30	43.5	50	2.8	25.5	Y250M -4 55/380	ZV,CR,CL		
	1300	102	31	70	5.9	44.2	Y280M -4 90/380	CR,CL		
		70	36	70	4.4	35.3	Y280S -4 75/380			
		29	40.8	50	2.8	23.2	Y250M -4 55/380	ZV,CR,CL		
	1250	98	29.5	70	5.8	40.5	Y225M -4 45/380	CR,CL		
		67	33.5	70	3.4	31.4	Y225S -4 37/380			
		24	37.4	50	2.4	17.6	Y225M -4 45/380	ZV,CR,CL		
	1200	96	26.2	70	5.2	35.2	Y280S -4 75/380	CR,CL		
		65	30.4	70	3.7	27.7	Y250M -4 55/380			
		34.3	34.4	50	2.2	23.1	Y225M -4 45/380	ZV,CR,CL		
	1150	90	24	70	5	30.2	Y225M -4 45/380	ZV,CR,CL		
		62	28.5	70	3.5	24.7	Y225S -4 37/380			
		25	31.5	50	2.1	15.4	Y200L -4 30/380			
	1100	86	21.9	70	4.9	26.3	Y225M -4 45/380	ZV,CR,CL		
		60	25.5	70	3.2	21.4	Y225S -4 37/380			
		24	29	50	2	13.6	Y200L -4 30/380			
	1050	82	20	70	4.6	22.9	Y225M -4 45/380	CV,ZV, CR,CL		
		57	23	70	2.9	18.3	Y225S -4 37/380			
		23	26.1	50	2	11.7	Y200L -4 30/380			
							Y180L -4 22/380			



(续)

泵 型 号	清水性能					轴功率 $P_a$ /kW	配套电机 型号功率 /电压 kW/V	传动方式		泵重 量/kg
	转速 $n$ /(r/min)	流量 $Q$ /(L/s)	扬程 $H$ /m	效率 $\eta$ /%	汽蚀余量 NPSH/m			间接传动	直接 传动	
E 6/4 D R - AHR	1000	79	18.2	70	4.4	20.1	Y250M - 6 37/380	ZV, CR, CL		635 454
		55	21	70	2.7	16.1	Y225M - 6 30/380	CV, ZV, CR, CL		
		22	22	50	2	9.5	Y200L1 - 6 18.5/380			
	970	76	17	70	4	18.1	Y250M - 6 37/380		DC	
		52	20	70	2.5	14.5	Y225M - 6 30/380			
		21	22.5	50	2	9.2	Y200L1 - 6 18.5/380 Y180L - 6 15/380			
	900	70	14.5	70	3.8	14.2	Y225M - 6 30/380	CV, ZV, CR, CL		
		49	17	70	2.2	11.6	Y200L2 - 6 22/380			
		20	19	50	2	7.4	Y200L1 - 6 18.5/380 Y180L - 6 15/380			
	800	63	11.2	70	2.9	9.8	Y200L1 - 6 18.5/380	CV, ZV, CR, CL		
		43	13.5	70	2	8.1	Y180L - 6 15/380			
		19	15	50		5.6	Y160L - 6 11/380 Y160M - 6 7.5/380			
8/6 E - AHR	1000	227	39.4	70		125.2	Y355L1 - 6 220/380	CR, CL		1150 982
		151	46.5	70	7.5	97.3	Y355M3 - 6 200/380			
		66	51	50	4	66	Y355M2 - 6 185/380 Y355M1 - 6 160/380 Y315M3 - 6 132/380 Y315M2 - 6 110/380			
	980	221	38	70		117.6	Y355M3 - 6 200/380		DC	
		148	44.5	70	7.2	92.2	Y355M2 - 6 185/380			
		65	49	50	3.9	62.4	Y355M1 - 6 160/380 Y315M3 - 6 132/380 Y315M2 - 6 110/380 Y315M1 - 6 90/380			
	940	212	35	70		103.9	Y355M2 - 6 185/380	CR, CL		
		142	41	70	6.7	81.5	Y355M1 - 6 160/380			
		62	44.6	50	3.6	54.2	Y315M3 - 6 132/380 Y315M2 - 6 110/380 Y315M1 - 6 90/380			
	900	204	32	70		91.4	Y355M1 - 6 160/380	CR, CL		
		136	37.5	70	6.1	71.4	Y315M3 - 6 132/380			
		60	41.3	50	3.3	48.6	Y315M2 - 6 110/380 Y315M1 - 6 90/380 Y315S - 6 75/380			
	850	192	28.5	70	9.2	67.2	Y315M3 - 6 132/380	CR, CL		
		129	33.3	70	5.5	60	Y315M2 - 6 110/380			
		55	36.8	50	2.9	39.7	Y315M1 - 6 90/380 Y315S - 6 75/380 Y280M - 6 55/380	ZV, CR, CL		
	800	182	25.5	70	8.3	65	Y315M2 - 6 110/380	CR, CL		
		140	29.5	70	5	57.8	Y315M1 - 6 90/380			
		52	32.5	50	2.6	33.1	Y315S - 6 75/380 Y280M - 6 55/380	ZV, CR, CL		
	770	175	23.2	70	7.8	56.8	Y315M3 - 8 110/380	CR, CL		
		116	27.5	70	4.6	44.7	Y315M2 - 8 90/380			
		50	30.5	50	2.4	29.9	Y315M1 - 8 75/380 Y315S - 8 55/380 Y280M - 8 45/380	ZV, CR, CL		

(续)

泵 型 号	清水性能					轴功率 $P_a$ /kW	配套电机 型号功率 /电压 kW/V	传动方式		泵重 量/kg
	转速 $n$ /(r/min)	流量 $Q$ /(L/s)	扬程 $H$ /m	效率 $\eta$ /%	汽蚀余量 NPSH/m			间接传动	直接 传动	
8/6 R E - AHR	740	168	21.5	70	7	50.6	Y315M2 - 8 90/380		DC	1150 982
		112	25	70	4.2	39.2	Y315M1 - 8 75/380 Y315S - 8 55/380			
		49	27.8	50	2.2	26.7	Y280M - 8 45/380			
	700	158	19	70	6.4	42	Y315M1 - 8 75/380 Y315S - 8 55/380	CR, CL		
		108	22.5	70	3.7	34	Y280M - 8 45/380			
		45	25	50	2	22	Y280S - 8 37/380	ZV, CR, CL		
	650	146	16.5	70	5.5	33	Y315S - 8 55/380 Y280M - 8 45/380	ZV, CR, CL		
		99	19	70	3.2	26	Y280S - 8 37/380			
		41	21	50	2	16.9	Y250M - 8 30/380	CV, ZV, CR, CL		
	600	136	14	70	4.5	26.6	Y315M1 - 10 55/380 Y315S - 10 45/380	ZV, CR, CL		
		90	17	70	2.8	21	Y280S - 8 37/380 Y250M - 8 30/380			
		40	18.5	50	2	14.5	Y225M - 8 22/380	CV, ZV, CR, CL		
	580	132	13	70	4.3	24	Y315M1 - 10 55/380 Y315S - 10 45/380		DC	
		88	15	70	2.5	18.5				
		38	17	50	2	12.7				
	540	121	11	70	3.9	18.5	Y280S - 8 37/380 Y250M - 8 30/380	CV, ZV, CR, CL		
		83	13	70	2.2	15	Y225M - 8 22/380			
		35	15	50	2	10.3	Y225S - 8 18.5/380			
	500	112	10	70	3.3	15.6	Y250M - 8 30/380 Y225M - 8 22/380	CV, ZV, CR, CL		
		75	11.4	70	2	11.9	Y225S - 8 18.5/380			
		31	12.5	50		7.6	Y200L - 8 15/380			
	450	100	8	70	2.5	67.2	Y225M - 8 22/380 Y225S - 8 18.5/380	CV, ZV, CR, CL		
		67	9	70	2	60	Y200L - 8 15/380			
		29	10.5	50	2	5.9	Y180L - 8 11/380			
	400	90	6.5	70	2	8.2	Y200L - 8 15/380 Y180L - 8 11/380 Y160L - 8 7.5/380	CV, ZV, CR, CL		
		60	7	70		5.8				
		26	8.4	50		4.3				
10/8ST - AHR	750	428	33.5	70		200	Y450 - 54 - 8 355/6Kv Y450 - 50 - 8 315/6Kv Y400 - 59 - 8 280/6Kv Y400 - 54 - 8 250/6Kv Y355L2 - 8 200/380 Y355L1 - 8 185/380		DC	3130
		297	43	75	10	166.9				
		170	49	70	4.8	116.6				
	700	400	29	70		162	Y400 - 59 - 8 280/6Kv Y400 - 54 - 8 250/6Kv Y355L2 - 8 200/380 Y355L1 - 8 185/380 Y355M2 - 8 160/380	CR, CL		
		288	38	75	9	143				
		158	43	70	3.9	95				

(续)

泵 型 号	清水性能					轴功率 $P_a$ /kW	配套电机 型号功率 /电压 kW/V	传动方式		泵重 量/kg
	转速 $n$ /(r/min)	流量 $Q$ /(L/s)	扬程 $H$ /m	效率 $\eta$ /%	汽蚀余量 NPSH/m			间接传动	直接 传动	
10/8ST - AHR	600	350	21	70		102	Y355L2 - 8 200/380 Y355L1 - 8 185/380 Y355M2 - 8 160/380 Y355M1 - 8 132/380	CR, CL		3130
		230	27.5	75	7	82				
		130	31	70	3	56.4				
	500	293	14.8	70	9.7	60.7	Y355M2 - 1 0110/380 Y255M1 - 1 090/380 Y315M2 - 1 075/380 Y315M1 - 1 055/380	ZV, CR, CL		
		190	19	75	5.4	47.2				
		110	21.5	70	2.5	33.1				
	400	230	9	70	7	28.9	Y315M1 - 1 055/380 Y315S - 1 045/380 Y280S - 8 37/380 Y250M - 8 30/380	ZV, CR, CL	CV, ZV, CR, CL	
		150	12.5	75	3.9	24.5				
		90	14	70	2	17.6				
12/10 ST - AHR	650	425	37	81	7.5	190.3	Y450 - 50 - 8 315/6Kv Y400 - 59 - 8 280/6Kv Y400 - 54 - 8 250/6Kv Y400 - 50 - 8 220/6Kv	CR, CL		3357
		358	39	80	6	172.1				
		225	43	70	3.6	135.5				
	600	395	31	81	6.9	148.2	Y400 - 59 - 8 280/6Kv Y400 - 54 - 8 250/6Kv Y400 - 50 - 8 220/6Kv Y400 - 46 - 8 200/6Kv	CR, CL		
		330	33	80	5.2	133.4				
		209	36.5	70	3.2	106.8				
	500	340	21	80.6	5	86.9	Y355L2 - 10 160/380 Y355L1 - 10 132/380 Y355M2 - 10 110/380	CR, CL		
		275	23	80	3.9	77.5				
		170	25	70	2.5	59.5				
	400	285	13	80.4	2.5	45	Y355M1 - 10 90/380 Y315M2 - 10 75/380 Y315M1 - 10 55/380	CR, CL		
		220	15	80	2	40.4				
		140	16	70	2	31.4				
	300	230	7	80	2.5	19.7	Y280S - 8 37/380 Y250M - 8 30/380 Y225M - 8 22/380 Y225S - 8 18.5/380	ZV, CR, CL		
		170	8.5	80	2	17.7				
		105	9	70	2	13.2				
14/12 ST - AHR	500	800	34.5	75		360.7	Y500 - 69 - 10 630/6Kv Y500 - 59 - 10 560/6Kv Y500 - 54 - 10 500/6Kv Y500 - 69 - 12 450/6Kv Y500 - 64 - 12 400/6Kv	CR, CL		4672
		620	38.5	79	7.3	296.2				
		422	42.5	75	4.5	234.4				
	450	720	28	75		263.5	Y500 - 69 - 12 450/6Kv Y500 - 64 - 12 400/6Kv Y500 - 59 - 12 355/6Kv Y500 - 54 - 12 315/6Kv	CR, CL		
		580	31	79	6.2	223.1				
		400	34	75	3.5	177.7				
	400	650	22	75	7	186.9	Y500 - 54 - 12 315/6Kv Y500 - 50 - 12 280/6Kv Y450 - 64 - 12 250/6Kv Y450 - 59 - 12 220/6Kv Y450 - 54 - 12 200/6Kv	CR, CL		
		510	24.5	79	5	155				
		358	27	75	2.9	126.3				
	350	560	17	75	5.6	124.4	Y450 - 59 - 12 220/6Kv Y450 - 54 - 12 200/6Kv Y355L2 - 10 160/380 Y355L1 - 10 132/380	CR, CL		
		450	19	79	3.6	106.1				
		310	21	75	2.2	85				
	300	480	12.5	75	4	78.4	Y355L2 - 10 160/380 Y355L1 - 10 132/380 Y355M2 - 10 110/380 Y355M1 - 10 90/380	CR, CL		
		380	14	79	2.8	66				
		250	15.3	75	2	50				

## (2) UHB-ZK 耐腐耐磨砂浆泵

### 1) 概述:

本系列泵属单级单吸悬臂式离心泵, 过流部件采用钢衬超高分子量聚乙烯 (UHM-WPE)。该材质是目前国际上新一代的泵用耐腐耐磨工程塑料, 其最突出的优点是在所有的塑料中, 它具有优异的耐磨性、耐冲击性 (尤其是耐低温冲击)、抗蠕变性 (耐环境应力开裂) 和极好的耐腐蚀性。

该泵显著特点是: 多功能, 即一种泵能适应各种不同的工况, 如输送酸、碱性清液或料浆; 冶炼行业各种腐蚀性矿浆; 硫酸行业各类稀酸; 环保行业各类污水等。该泵既耐腐蚀又耐磨损, 使用范围十分广泛。

该泵在江西贵溪冶炼厂、甘肃白银公司、辽宁葫芦岛锌厂等三十多家大型有色冶炼和硫酸企业的酸性矿浆和稀酸岗位经过长期比较使用, 其耐腐耐磨性、密封可靠性、使用寿命性均得到了极高的评价。

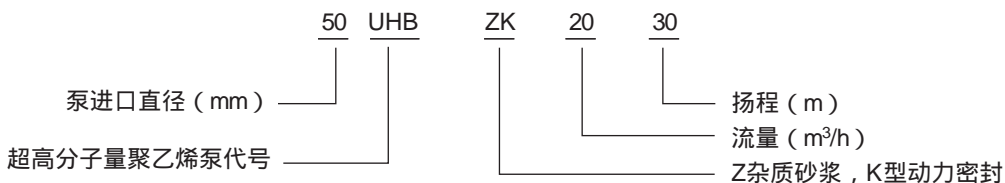
主要技术性能简述如下:

- ① 型号: UHB-ZK 系列
- ② 特点: 耐腐耐磨, 一泵多用, 酸碱类清液料浆均适用。
- ③ 结构: 泵体为钢衬超高分子量聚乙烯, 衬层厚 8~20mm; 叶轮分开式, 闭式两种, 可根据介质状况任选; 密封: K 型动力密封。
- ④ 适用介质: 浓度 80% 以下硫酸, 50% 以下硝酸, 各种浓度的盐酸, 液碱; 既适用于清液又适用于料浆。
- ⑤ 主要技术参数: 使用温度 -20℃~80℃ (对特殊要求, 使用改性材质, 可提高到 105℃), 进口  $\phi 32\text{mm} \sim \phi 250\text{mm}$ , 流量 5~600m<sup>3</sup>/h, 扬程 50m 以内。

使用范围极广泛, 有:

- ① 硫酸磷肥业: 稀酸、母液、污水、海水、含硅胶的氟硅酸, 磷酸料浆等介质的输送。
- ② 有色金属冶炼业: 特别适用于铅、锌、金、银、铜、锰、钴、稀土等湿法冶炼的各种酸液, 腐蚀性矿浆, 料浆 (压滤机配用) 电解液, 污水等介质的输送。
- ③ 化工及其他企业: 各种硫酸、盐酸、碱性、油类的清液或料浆岗位。
- ④ 氯碱业: 盐酸、液碱、电解液等。
- ⑤ 水处理业: 纯水、高纯水、污水 (皮革污水、电镀污水、电子污水、造纸污水、纺织污水、食品污水、生活污水、制药业污水等)。
- ⑥ 钢铁企业: 酸洗系统的硫酸、盐酸岗位、带杂质的污水。
- ⑦ 配套湿式脱硫除尘器: 能同时适用碱性、酸性、腐蚀性岗位。

### 2) 型号含义说明:



3) 泵的性能参数见表 13-83。

表 13-83

序号	型号	流量 /(m <sup>3</sup> /h)	扬程 /m	转速 /(r/min)	功率/kW		进出口直径 (mm × mm)	重量 /kg
					轴功率	配备电动机		
1	25UHB-ZK-3-13	3	13	2900	0.3	0.75	25 × 20	75
2	25UHB-ZK-5-12	5	12	2900	0.42	0.75		
3	25UHB-ZK-7-10	7	10	2900	0.5	0.75		
4	25UHB-ZK-3-18	3	18	2900	0.4	1.1		
5	25UHB-ZK-5-15	5	15	2900	0.55	1.1		
6	25UHB-ZK-8-12	8	12	2900	0.7	1.1		
7	32UHB-ZK-5-20	5	20	2900	0.72	1.1	32 × 25	80
8	32UHB-ZK-8-18	8	18	2900	1.2	1.5		
9	32UHB-ZK-12-15	12	15	2900	1.3	2.2		
10	32UHB-ZK-5-25	5	25	2900	1.1	2.2		
11	32UHB-ZK-10-20	10	20	2900	1.6	2.2		
12	32UHB-ZK-5-5	5	5	1450	0.25	0.75		
13	32UHB-ZK-15-15	15	15	2900	1.7	2.2	40 × 32	130
14	40UHB-ZK-10-30	10	30	2900	2.2	3		
15	40UHB-ZK-15-25	15	25	2900	2.7	3		
16	40UHB-ZK-7.5-6	7.5	6	1450	0.4	0.75		
17	40UHB-ZK-18-20	18	20	2900	2.6	3		
18	40UHB-ZK-10-18	10	18	2900	1.3	2.2		
19	40UHB-ZK-15-15	15	15	2900	1.7	2.2	50 × 40	170
20	50UHB-ZK-15-32	15	32	2900	3.5	5.5		
21	50UHB-ZK-20-30	20	30	2900	4.3	5.5		
22	50UHB-ZK-10-7.5	10	7.5	1450	0.6	1.1		
23	50UHB-ZK-25-28	25	28	2900	5.0	5.5		
24	50UHB-ZK-10-35	10	35	2900	3.2	4		
25	50UHB-ZK-12-40	12	40	2900	3.8	5.5	65 × 50	220
26	50UHB-ZK-15-43	15	43	2900	5.6	7.5		
27	50UHB-ZK-20-20	20	20	2900	3.0	4		
28	50UHB-ZK-25-18	25	18	2900	3.2	4		
29	50UHB-ZK-30-15	30	15	2900	3.1	4		
30	65UHB-ZK-30-25	30	25	2900	5.3	5.5		
31	65UHB-ZK-35-20	35	20	2900	5.1	5.5	65 × 50	220
32	65UHB-ZK-40-15	40	15	2900	4.5	5.5		
33	65UHB-ZK-30-32	30	32	2900	6.5	7.5		
34	65UHB-ZK-15-8	15	8	1450	0.9	1.1		
35	65UHB-ZK-35-25	35	25	2900	6.2	7.5		
36	65UHB-ZK-40-20	40	20	2900	5.9	7.5		
37	65UHB-ZK-10-45	10	45	2900	4.8	7.5	65 × 50	220
38	65UHB-ZK-5-11	5	11	1450	0.6	1.1		
39	65UHB-ZK-10-40	10	40	2900	4.2	5.5		
40	65UHB-ZK-20-50	20	50	2900	8.7	11		
41	65UHB-ZK-10-12.5	10	12.5	1450	1.2	2.2		
42	65UHB-ZK-30-50	30	50	2900	12	15		
43	65UHB-ZK-15-12.5	15	12.5	1450	1.6	2.2	65 × 50	220
44	65UHB-ZK-30-40	30	40	2900	9.6	11		

(续)

序号	型号	流量 /(m <sup>3</sup> /h)	扬程 /m	转速 /(r/min)	功率/kW		进出口直径 (mm×mm)	重量 /kg
					轴功率	配备电动机		
45	80UHB-ZK-40-20	40	20	2900	5.8	7.5	80×65	270
46	80UHB-ZK-45-18	45	18	2900	6.1	7.5		
47	80UHB-ZK-50-15	50	15	2900	5.6	7.5		
48	80UHB-ZK-35-45	35	45	2900	10.8	11		
49	80UHB-ZK-17.5-11	17.5	11	1450	1.5	2.2		
50	80UHB-ZK-40-35	40	35	2900	10.2	11		
51	80UHB-ZK-45-32	45	32	2900	10.1	11		
52	80UHB-ZK-50-30	50	30	2900	10.2	11		
53	80UHB-ZK-60-30	60	30	2900	12.6	15		
54	80UHB-ZK-45-50	45	50	2900	14.8	15		
55	80UHB-ZK-22.5-12.5	22.5	12.5	1450	2.3	3		
56	80UHB-ZK-55-40	55	40	2900	15	15		
57	100UHB-ZK-50-58	50	58	2900	21	22	100×80	370
58	100UHB-ZK-50-50	50	50	2900	17.5	18.5		
59	100UHB-ZK-60-50	60	50	2900	21.5	22		
60	100UHB-ZK-60-40	60	40	2900	16.8	18.5		
61	100UHB-ZK-60-30	60	30	2900	13.8	15		
62	100UHB-ZK-70-45	70	45	2900	22.1	22		
63	100UHB-ZK-80-35	80	35	2900	17.8	18.5		
64	100UHB-ZK-100-27	100	27	2900	18.4	18.5		
65	100UHB-ZK-80-15	80	15	2900	10.2	11		
66	100UHB-ZK-100-20	100	20	2900	15	15		
67	100UHB-ZK-80-50	80	50	2900	27	30		
68	100UHB-ZK-100-45	100	45	2900	28	30		
69	100UHB-ZK-50-11	50	11	1450	4.2	5.5		
70	100UHB-ZK-120-40	120	40	2900	28.5	30		
71	100UHB-ZK-145-28	145	28	2900	29.5	30		
72	100UHB-ZK-80-30	80	30	2900	17.5	18.5		
73	100UHB-ZK-100-25	100	25	2900	17.9	18.5		
74	100UHB-ZK-120-20	120	20	2900	17.2	18.5		
75	100UHB-ZK-140-15	140	15	2900	16.8	18.5		
76	100UHB-ZK-100-20	100	20	2900	14.9	15		
77	100UHB-ZK-120-15	120	15	2900	14.2	15		
78	100UHB-ZK-140-10	140	10	2900	14.5	15		
79	125UHB-ZK-100-40	100	40	2900	28.8	30	125×100	480
80	125UHB-ZK-120-35	120	35	2900	29.4	30		
81	125UHB-ZK-140-25	140	25	2900	25	30		
82	125UHB-ZK-120-32	120	32	2900	26.8	30		
83	125UHB-ZK-140-28	140	28	2900	27.6	30		
84	125UHB-ZK-160-24	160	24	2900	28.1	30		
85	125UHB-ZK-120-20	120	20	2900	17.2	18.5		
86	125UHB-ZK-140-18	140	18	2900	21	22		
87	125UHB-ZK-150-15	150	15	2900	21.5	22		
88	125UHB-ZK-80-15	80	15	1450	10.2	11		

(续)

序号	型号	流量 /(m <sup>3</sup> /h)	扬程 /m	转速 /(r/min)	功率/kW		进出口直径 (mm×mm)	重量 /kg
					轴功率	配备电动机		
89	150UHB-ZK-120-25	120	25	1450	22	30	150×125	1000
90	150UHB-ZK-80-11	80	11	980	8.9	11		
91	150UHB-ZK-150-20	150	20	1450	24.5	30		
92	150UHB-ZK-180-30	180	30	1450	35.5	37		
93	150UHB-ZK-210-26	210	26	1450	36.4	37		
94	150UHB-ZK-148-11	148	11	980	15	15		
95	150UHB-ZK-240-24	240	24	1450	37	37		
96	150UHB-ZK-270-20	270	20	1450	36	37		
97	150UHB-ZK-190-18	190	18	1450	22	22		
98	150UHB-ZK-135-8	135	8	980	10.5	11		
99	150UHB-ZK-260-16	260	16	1450	28	30		
100	150UHB-ZK-280-14	280	14	1450	28.2	30		
101	150UHB-ZK-120-40	120	40	1450	33.6	37		
102	150UHB-ZK-150-40	150	40	1450	42	45		
103	150UHB-ZK-101-18	101	18	980	12.8	15		
104	150UHB-ZK-200-32	200	32	1450	44	45		
105	150UHB-ZK-250-30	250	30	1450	44.5	45		
106	150UHB-ZK-300-25	300	25	1450	45	45		
107	200UHB-ZK-320-32	320	32	1450	55	55	200×150	1200
108	200UHB-ZK-210-14	210	14	980	18.4	18.5		
109	200UHB-ZK-350-28	350	28	1450	55	55		
110	200UHB-ZK-400-25	400	25	1450	70	75		
111	200UHB-ZK-250-45	250	45	1450	74	75		
112	200UHB-ZK-168-20	168	20	980	27	30		
113	200UHB-ZK-300-38	300	38	1450	72	75		
114	200UHB-ZK-350-34	350	34	1450	73.8	75		
115	200UHB-ZK-320-24	320	24	1450	42	45		
116	200UHB-ZK-215-10	215	10	980	15.6	18.5		
117	200UHB-ZK-350-20	350	20	1450	43	45		
118	200UHB-ZK-400-18	400	18	1450	44	45		
119	200UHB-ZK-500-12	500	12	1450	45	45		
120	250UHB-ZK-400-45	400	45	1450	112	132	250×200	1450
121	250UHB-ZK-270-20	270	20	980	35	37		
122	250UHB-ZK-500-37	500	37	1450	118	132		
123	250UHB-ZK-600-30	600	30	1450	120	132		
124	250UHB-ZK-400-32	400	32	1450	85	90		
125	250UHB-ZK-270-14	270	14	980	25	30		
126	250UHB-ZK-500-26	500	26	1450	79	90		
127	250UHB-ZK-600-20	600	20	1450	84	90		
128	300UHB-ZK-Ⅲ-860-33	860	33	1450	135	160	300×250	2200
129	300UHB-ZK-Ⅲ-1000-32	1000	32	1450	145	160		
130	300UHB-ZK-Ⅲ-1180-31	1180	31	1450	155	160		

4) 泵的结构简图如图 13-5 所示。

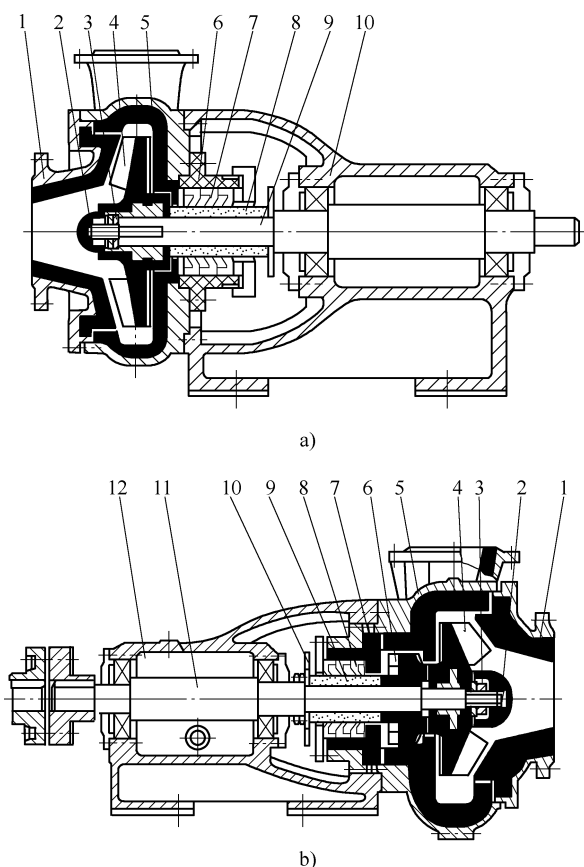


图 13-5 泵结构简图

a) 泵进口直径 $\leq 125\text{mm}$ 时 (不含副叶轮)

1—泵盖 2—拼帽 3—防转螺母 4—叶轮 5—泵体 6—密封盒  
7—油封 8—轴套 9—主轴 10—轴承座

b) 泵进口直径 $> 125\text{mm}$ 时 (含副叶轮)

1—泵盖 2—拼帽 3—防转螺母 4—叶轮 5—泵体 6—副叶轮 7—密封盒  
8—油封 9—轴套 10—挡水圈 11—主轴 12—轴承座

5) 密封结构简图如图 13-6 所示。

6) 启动、运行、维护及拆装程序说明：

#### I. 启动、运行及维护

① 运行前的检查：试运行前，应先用手盘动联轴器或轴，检查转向是否正确，运转是否灵活；如果盘不动或有异常声音，应及时检查，检查时先从外部用手检查联轴器是否水平，从轴承座上的油镜孔处查看润滑油的位置是否在油镜的中心线附近（太多应放掉一些，太少应加上一些），边检查边盘动，如果问题依然存在，就要拆泵检查（拆泵时，请参照本说明书上的结构简图和拆装程序），清理异物，并和生产厂联系协



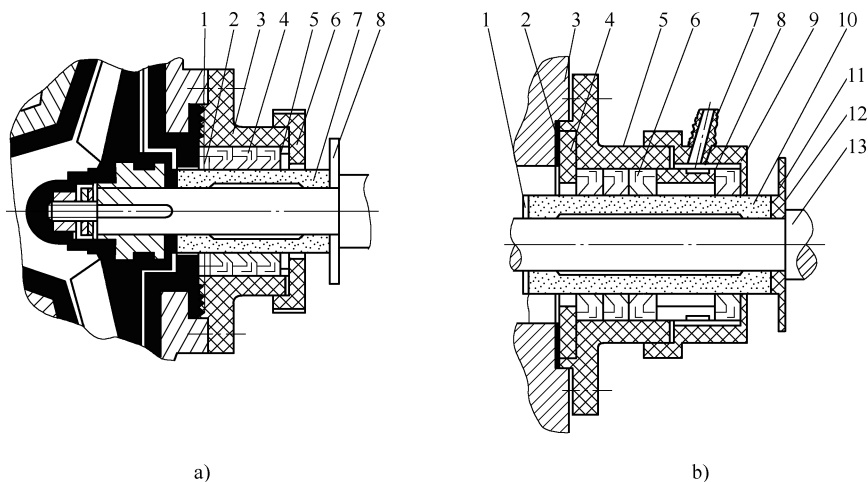


图 13-6 密封结构简图

a) K 型动力密封

1—密封垫 2—挡圈 3—密封盒 4—油封 5—顶圈 6—后压盖 7—轴套 8—挡水圈

b) 带冷却水 K 型动力密封

1—叶轮垫 2—密封盒垫圈 3—泵体 4—挡圈 5—密封盒 6—油封 7—水嘴  
8—水封环 9—密封盒压盖 10—轴套 11—轴套垫 12—挡酸环 13—主轴

商解决方法。

## ② 开车步骤:

- a. 将泵内灌满液体;
- b. 及时打开通口阀门 (如进口阀门为单向阀, 就不需要人工操作);
- c. 接通电源;
- d. 打开通口阀门。

③ 运行: 运行中如有异常声音, 或有电动机发热等不正常情况, 则应停机检查, 检查方法和步骤同①。

## ④ 停车步骤:

- a. 先关闭出口处阀门。
- b. 切断电源, 并及时关闭进口处阀门 (如进口阀门为单向阀, 就不需要人工操作)。

## ⑤ 维护:

- a. 轴承座内的润滑油应定期更换, 正常情况六个月更换一次。
- b. 寒冷季节停泵后, 若有结冰现象, 应先接通密封处冷却水, 必要时可加热水进去解冻, 之后用手盘动联轴器, 直到运转灵活, 再按照启动步骤开车。
- c. 有冷却水装置的泵, 开车前应先接通冷却水, 泵正常运行时, 可继续接通, 若条件不允许也可停掉, 冷却水的流量和压力都没有要求, 自来水即可。
- d. 泵在关闭出口阀门时的运行称为闭压运行状态, 全塑泵或衬塑泵的闭压运行时间应尽可能减短, 常温介质以不超过 5min 为限, 高温介质最好不要超过 2min。
- e. 中分泵壳的泵, 如果进口 150mm 以上的泵, 中分面处的密封塑料, 因热胀冷缩

尺寸有些变化,安装时应先将中分处的联接螺栓拧紧,再连接进口管路,以防中分面泄漏,此条对北方的用户尤其重要。

f. 泵不能承受进出口管道的重量,进口管路越短越好,泵出口到阀门处的垂直高度应尽可能短。

g. 保持电动机上没有水迹,防止电动机受潮。

## II. 拆装程序

① 不带副叶轮的泵(进口直径 $\leq 125\text{mm}$ 的泵)。

拆装顺序(参见图 13-5a):

- 松开泵体 5 与泵盖 1 联接螺栓,拆下泵盖。
- 松开叶轮拼帽 2 (左旋螺纹) 和防转螺母 3 (左旋螺纹),拆下叶轮 4。
- 松开泵体 5 与轴承座 10 的联接螺栓,拆下泵体 5。
- 松开密封盒 6 与泵体 5 的联接螺栓,拆下密封盒 6。
- 旋开密封盒上的后压盖,取出油封。

安装顺序与拆卸顺序相反,需要注意的是:

- 将叶轮拼帽拼紧后,检查一下叶轮与泵体之间的间隙,此间隙要求在  $2\text{mm}$  左右。
- 安装好泵盖后,检查一下泵盖与叶轮之间的间隙(从出口处往里看),此间隙应保证在  $2\text{mm}$  左右,高温介质用泵,此间隙要求在  $2.5\text{mm}$  左右。
- 叶轮与泵体之间的间隙达不到要求的,可通过增减叶轮与轴套之间的垫片进行调整。
- 泵盖与叶轮之间的间隙达不到要求的,可通过增减泵体与泵盖之间的垫片进行调整。

② 带副叶轮的泵(进口直径  $> 125\text{mm}$  的泵)。

拆装顺序(参见图 13-5b):

- 松开泵体 5 与泵盖 1 连接螺栓,拆下泵盖 1。
- 松开叶轮拼帽 2 (左旋螺纹) 和防转螺母 3 (左旋螺纹),拆下叶轮 4。
- 松开泵体 5 与轴承座 12 的连接螺栓,密封盒 7 与泵体之间的连接螺栓,拆下泵体 5。
- 依次拆下副叶轮、密封盒、油封、轴套。

安装顺序与拆卸顺序相反,需要注意的是:

- 将叶轮拼帽与挡水圈后的螺母相对拼紧后,检查一下叶轮与泵体之间的间隙,此间隙要求在  $2.5\text{mm}$  左右。
- 安装好泵盖后,检查一下泵盖与叶轮之间的间隙(从出口处往里看),此间隙应保证在  $2\text{mm}$  左右,高温介质用泵,此间隙要求在  $2.5\text{mm}$ 。
- 叶轮与泵体之间的间隙不符合要求的,可通过增减叶轮与轴套之间的垫片进行调整。
- 泵盖与叶轮之间的间隙不符合要求的,可通过增减泵体与泵盖之间的垫片进行调整。

7) 外形及安装尺寸如图 13-7、图 13-8 和表 13-84、表 13-85 所示。

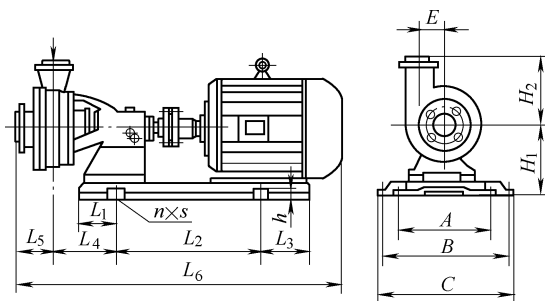


图 13-7 安装尺寸图

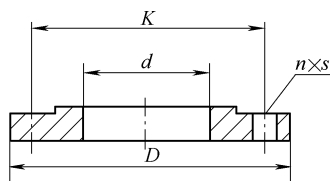


图 13-8 泵进出口法兰简图

表 13-84 安装尺寸表

(mm)

序号	型号	A	B	C	E	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	L <sub>5</sub>	L <sub>6</sub>	h	n × s
1 ~ 6	25UHB - ZK	260	260	310	62	170	125	100	335	100	210	85	815	25	φ18 × 4
7 ~ 13	32UHB - ZK	260	260	310	78	170	150	100	335	100	210	105	815	25	φ18 × 4
14 ~ 19	40UHB - ZK	320	260	310	86	180	170	130	335	130	250	120	900	25	φ18 × 4
20 ~ 29	50UHB - ZK	320	320	380	95	215	180	160	400	160	270	130	1070	25	φ20 × 4
30 ~ 36	65UHB - ZK	320	320	380	105	212	195	160	400	160	270	127	1070	25	φ20 × 4
37 ~ 39	65UHB - ZK	320	320	380	126	212	205	160	400	160	265	135	1070	25	φ20 × 4
40 ~ 44	65UHB - ZK	320	370	430	126	212	205	160	520	160	265	135	1290	25	φ25 × 4
45 ~ 56	80UHB - ZK	320	370	430	125	212	220	160	525	160	265	135	1290	35	φ25 × 4
57 ~ 78	100UHB - ZK	415	460	540	183	285	225	188	705	190	320	145	1510	40	φ25 × 4
79 ~ 88	125UHB - ZK	415	460	540	130	285	235	188	705	190	320	195	1610	45	φ30 × 4
89 ~ 91	150UHB - ZK	420	586	650	-190	350	435	250	700	300	430	350	1868	45	φ30 × 4
92 ~ 96	150UHB - ZK	420	586	-190	-190	350	435	250	840	188	430	350	1926	50	φ25 × 4
97 ~ 100	150UHB - ZK	420	586	650	-190	350	435	250	700	300	430	350	1868	50	φ25 × 4
101 ~ 106	150UHB - ZK	510	610	680	-225	370	450	250	935	250	468	365	1998	50	φ25 × 4
107 ~ 119	200UHB - ZK	525	675	780	-235	405	475	250	1010	250	468	230	1980	60	φ25 × 4
120 ~ 127	250UHB - ZK	700	700	820	-270	430	490	250	1010	250	500	250	2080	60	φ30 × 4

表 13-85 法兰连接尺寸表 (mm)

<i>d</i>	25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	250
<i>D</i>	115	140	150	165	185	200	220	250	285	340	395
<i>K</i>	85	100	110	125	145	160	180	210	240	295	350
<i>n</i> × <i>s</i>	4 × φ4	4 × φ18				8 × φ18			8 × φ22	12 × φ22	

引用标准 GB/T 9116—2010 PN 1.0MPa。

注：1. 进口≥150mm 的泵，泵的出口位置与图示相反。

2. 本厂所有系列泵所配进出口法兰的公称压力均为 1.0MPa 标准代号为：法兰 D—10 GB/T 9116—2010，*D* 为公称通径。

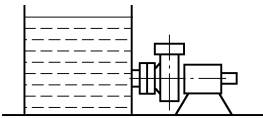
3. 序号：指本书前面性能表中所列的序号。

4. 表中所列 *L*<sub>6</sub> 尺寸均为配二级电机时泵的总长度尺寸，若配 4 级电动机，*L*<sub>6</sub> 则随电机长度减小而减小。

8) UHB-ZK 系列泵在几种常见的槽位状况下的安装示意及说明：

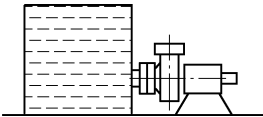
① 高位槽正压状态

特点说明：泵安装在储槽的底部，储槽内介质处于正压状态，泵进口处阀门打开时，储槽的液体能自流到泵腔中，这是 UHB-ZK 型防腐耐磨离心泵最理想的安装方式。



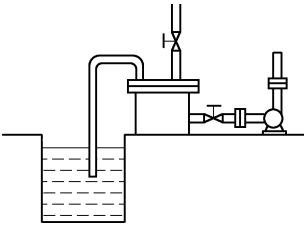
② 高位槽负压状态

特点说明：泵安装在储槽的底部，密闭的储槽处于负压状态，这种状态选泵，必须弄清储槽中负压的确切数据，再和生产厂联系，方可定型。



③ 低位槽不装底阀装虹吸桶状态

特点说明：泵安装在储槽的上部，在进口管道靠近泵进口处安装一帮助启动的虹吸桶，第一次启动泵之前需将虹吸桶中灌满液体，以后就不需要再灌。虹吸桶的制作可根据介质性质的不同选用相适应的材料和制造工艺，虹吸桶的制作要求就是密封性好，不能漏水漏气，虹吸桶大小的计算方法如下： $V = (3 \sim 5) \times \frac{\pi d^2}{4} \times L$

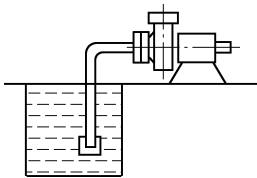


式中 *d*——进口管直径；  
*L*——进口管总长；  
*V*——虹吸桶容积。

根据计算出的容积和现有材料的尺寸，再确定虹吸桶的直径和高度。

④ 低位槽装底阀状态

特点说明：泵安装在储槽的上部，进口管道底部需安装底阀，每次启动泵之前，都须将泵腔内灌满液体，切不可开空车。



9) 主要零部（配）件见表 13-86。

表 13-86 主要零部件名称及材质

名称	材质	备注	名称	材质	备注
泵盖	HT200/UHMWPE		K 形密封圈	F <sub>26</sub> B	每组 3 只
泵体	HT200/UHMWPE		垫床	F <sub>26</sub> B	叶轮与拼帽之间
叶轮	1Cr18Ni9/UHMWPE		垫床	F <sub>26</sub> B	叶轮与轴套之间
拼帽	A <sub>3</sub> /UHMWPE		垫床	F <sub>26</sub> B	泵体与密封盒之间
轴套	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 或硬质石墨		密封盒	玻璃钢	

10) UHB-ZK 系列泵的性能曲线如图 13-9 所示。

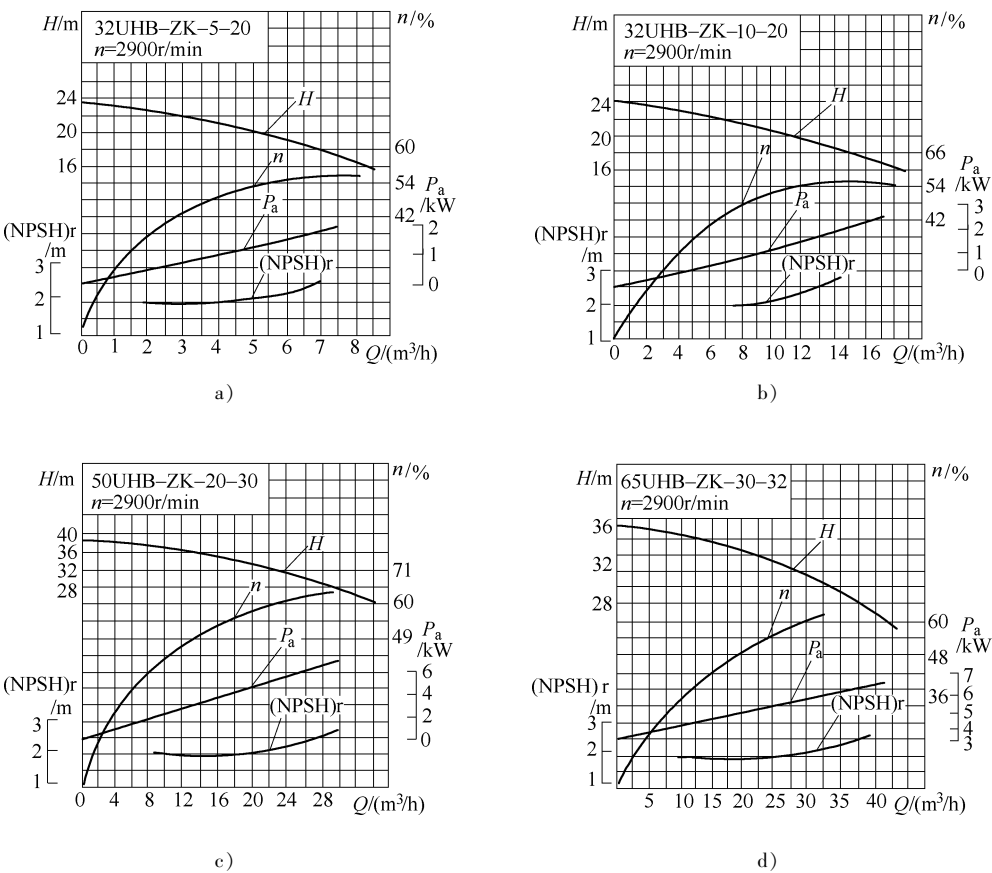


图 13-9 UHB-ZK 系列泵性能曲线

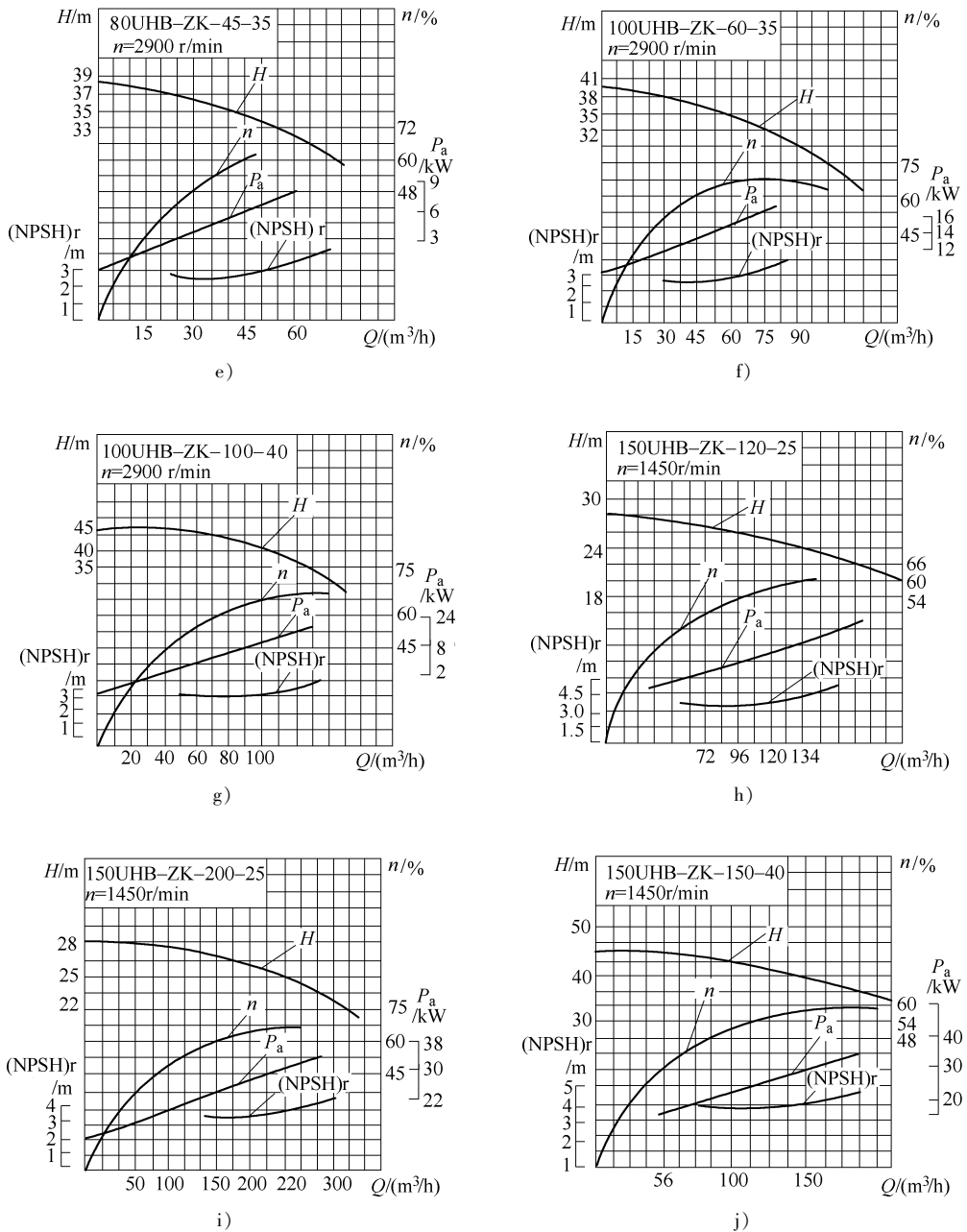


图 13-9 UHB-ZK 系列泵性能曲线 (续)

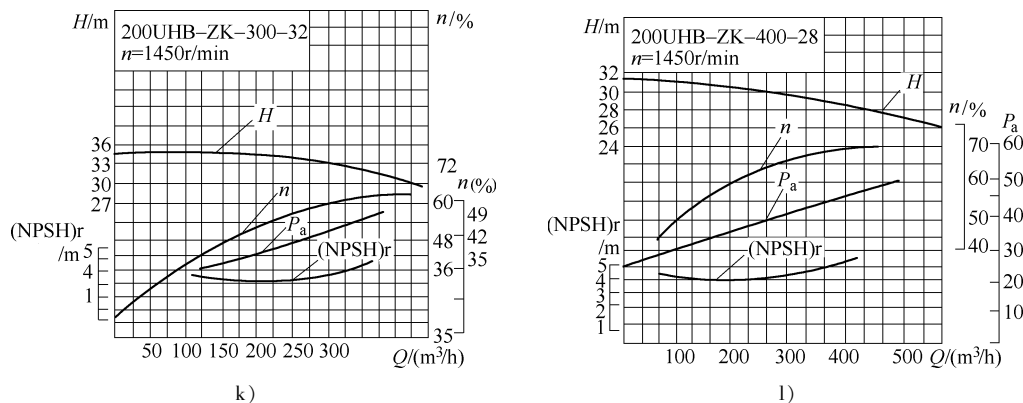


图 13-9 UHB-ZK 系列泵性能曲线 (续)

### 5. 常用脱硫增压风机 (G4-73、Y4-73 系列引风机)

(1) 用途 G4-73 与 Y4-73 系列锅炉通、引风机适用于火力发电厂中  $2 \times 670\text{t/h}$  蒸汽锅炉的通、引风机系统。在无其他特殊要求时, G4-73 亦可用于矿井通风及一般通风。

通风机输送的介质为空气, 最高温度不得超过  $80^\circ\text{C}$ , 引风机输送的介质为烟气, 最高温度不得超过  $250^\circ\text{C}$ 。

通风机输送介质的含尘量不得超过  $150\text{mg}/\text{m}^3$ 。对引风机在进风口前必须加装除尘装置, 以保证进入风机的烟气中的含尘量不得超过  $7 \sim 10\text{g}/\text{m}^3$ 。根据一般电厂使用情况, 除尘效率不得低于  $85\%$ 。

#### (2) 型式

1) 通风机与引风机制成单吸放, 机号 No. 8 ~ 28 共 12 个机号。

2) 每种风机可制成左旋转或右旋转两种型式, 从电动机一端正视, 叶轮按顺时针方向旋转, 称为右旋转风机, 以“右”表示, 如叶轮按逆时针方向旋转, 称为左旋转风机, 以“左”表示。

3) 风机的出口位置, 以机壳的出风口角度表示, 如图 13-16 所示。

4) 风机传动方式为 D 式, 电动机与风机连接均采用弹性联轴器直联传动。

5) 产品全称举例如下: G4-73-12No18D 左  $90^\circ$ ;

Y4-73-12No18D 左  $0^\circ$ 。

其中: G、Y 分别表示锅炉通风机和锅炉引风机; “4”表示最高效率点的压力系数为 0.437, 10 倍化整为 4; “73”表示比转数, 12 表示单吸入进风, 第二次设计; No. 18 表示风机机号, 即叶轮直径为  $1800\text{mm}$ ; D 表示传动方式, 即联轴器与电动机直联传动; 左、右表示叶轮旋转方向;  $90^\circ$ 、 $0^\circ$ 表示风机出口位置。

(3) 结构特性 风机主要由叶轮、机壳、进风口、调节门及传动部分等组成。

1) 叶轮: 由 12 片后倾机翼斜切的叶片焊接于弧锥形的前盘与平板形的后盘中间。由于采用机翼形叶片, 保证了风机高效率、低噪声、高强度, 同时叶轮又经过动、静平

衡校正，因此运转平稳。同一机号的通、引风机叶轮结构相同。

2) 机壳：机壳是用普通钢板焊接而成的蜗形体。单吸入风机的机壳作成三种不同形式；No. 8 ~ 12 机壳作成整体结构，不能上下拆开，如图 13-13 所示。No. 14 ~ 16 机壳作成两开式，如图 13-14 所示。No. 18 ~ 20 作成三开式，如图 13-15 所示。对于引风机，蜗形板作了适当加厚以耐磨。

3) 进风口：收敛式流线的进风口制成整体结构，用螺栓固定在风机入口侧。

4) 调节门：用以调节风机流量的装置，轴向安装在进风口前面。调节范围有 90°（全闭）到 0°（全开）。调节的搬把位置，从进风口方向看，在右侧，对右旋转风机，搬把由下往上推是由全闭到全开方向；对左旋转风机，搬把由上往下拉是由全闭到全开。为使调节门各部正常工作，必须采用钙钠基润滑脂润滑，对引风机应采用二硫化钼高温（260℃）润滑脂，高温运转时仍能保证润滑，No. 16 以上风机在螺塞处加干油。

5) 传动部分：主轴由优质钢制成，本系列机组均采用滚动轴承。轴承箱（No. 8 ~ 16）均采用整体的筒式结构，No. 18 ~ 28 用两个独立的枕式轴承箱。轴承箱上装有温度计和油位指示器。润滑油采用 30 号机械油，加入油量按油位标志的要求。No. 8 ~ 16 整体筒式轴承箱如采用干油，在轴箱内滚珠一侧应加挡油板，其固定槽已预制。

(4) 风机的性能与选择

$\frac{G}{Y}$  4-73 型风机只给出 No. 10 样机的无因次性能表及曲线。由给出的无因次性能表（见表 13-87）或曲线（见图 13-10、图 13-11）计算 No. 8 ~ 28 所有机号的有因次性能。

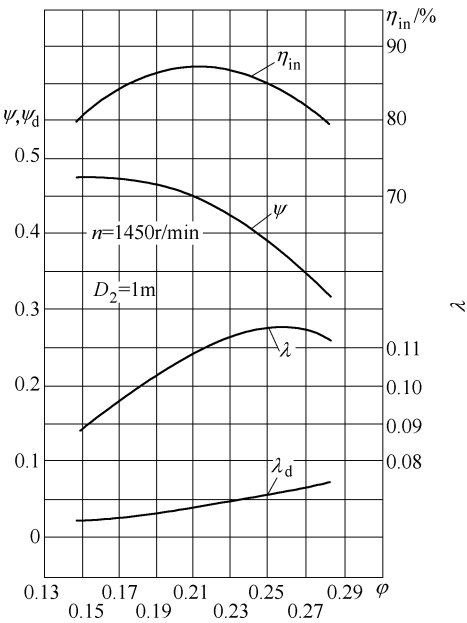


图 13-10  $\frac{G}{Y}$  4—73 无因次性能曲线



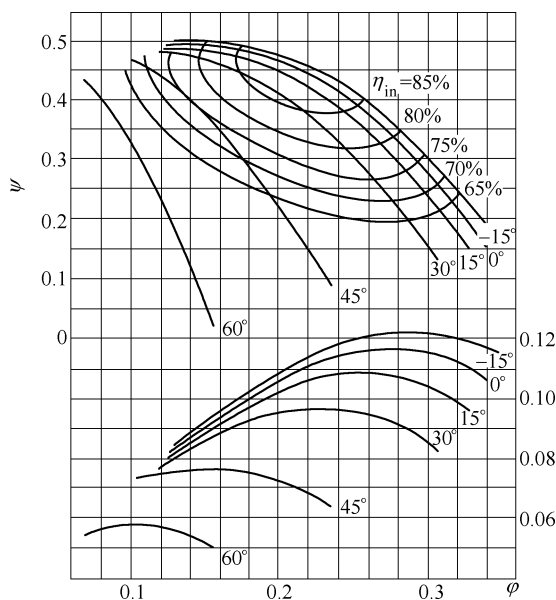


图 13-11  $\frac{G}{Y}$  4—73No. 10 调节性能曲线

由无因次参数计算有因次参数的公式有：

$$Q = 900 \pi D_2^2 \cdot U_2 \cdot \varphi$$

$$K_p = \frac{\rho_1 U_2^2 \varphi}{101300} \left[ \left( \frac{\rho_1 U_2^2 \varphi}{354550} + 1 \right)^{3.5} - 1 \right]$$

$$p = \rho_1 U_2^2 \cdot \psi / K_p$$

$$N_{in} = \frac{\pi D_2^2}{4000} \rho_1 U_2^3 \cdot \lambda$$

$$N_{re} = \frac{N_{in}}{\eta_m} \cdot K$$

式中  $Q$ ——流量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )；

$D_2$ ——叶轮叶片外缘直径 (m)；

$\rho_1$ ——进气密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )；

$N_{in}$ ——内功率 (kW)；

$\eta_m$ ——机械效率，D 式传动取 0.98；

$p$ ——全压 (Pa)；

$U_2$ ——叶轮叶片外缘线速度 (m/s)；

$K_p$ ——全压压缩性系数；

$N_{re}$ ——所需功率 (kW)；

$K$ ——储存系数，通风机制 1.15，引风机取 1.3。

表 13-87  $\frac{G}{Y}$  4-73No. 10 样机的无因次性能表

相应量	1	2	3	4	5	6	7	8
$\varphi$	0.147	0.166	0.186	0.205	0.224	0.243	0.263	0.282
$\psi$	0.472	0.470	0.465	0.453	0.432	0.403	0.362	0.315
$\psi_d$	0.0193	0.0246	0.0309	0.0375	0.0448	0.0528	0.0619	0.0712
$\lambda$	0.0874	0.0938	0.1009	0.1067	0.1115	0.1144	0.115	0.1119
$\eta_{in}$	0.794	0.832	0.857	0.87	0.868	0.856	0.828	0.794

在使用时，常发生流量过多或不足的现象。产生这种现象的原因很多，如果是在使用过程中发生这种现象，主要是由于管网中的阻力时大时小，或风机在波动区工作等原因；如果是在使用过程中，经过较长时间逐渐减少，或在短时间内突然减少，则主要是由于管网堵塞。

在风机新安装后，进行运转时就发生流量过多或不足现象，其原因主要有以下几点：

1) 管网阻力实际值与计算值相差过大。由一般管网特性方程式  $p = KQ^2$  ( $K$  为阻力系数) 可知，如果阻力系数的实际值小于计算值，则流量增大；若实际值大于计算值，则流量减少 (见图 13-12a)。

2) 选择时，未考虑风机本身全压值偏差  $\Delta p$  的影响，当风机全压为正偏差时，则流量增大；当风机全压为负偏差时，则流量减少 (见图 13-12b)。

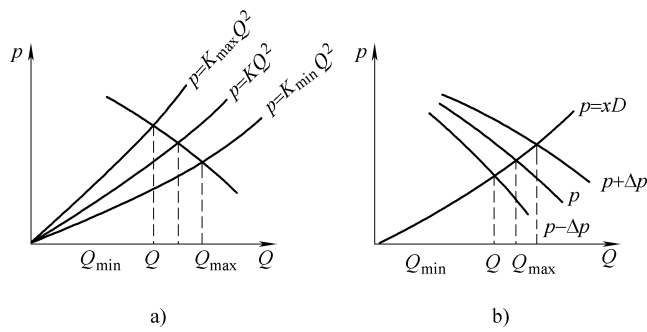


图 13-12 管网特性和全压偏差与流量的关系

当风机新安装开始正式运转,或在使用过程中发生流量过大或过小时,可采用下列方法之一解决问题。

- 1) 利用调节门的开闭程度调节流量;
- 2) 改变风机的转速调节流量;
- 3) 调换压力较高或较低的风机调节流量;
- 4) 改变管网阻力系数调节流量。

必须指出的是:一般都采用节流装置来调节流量。但当实际流量比需要流量大很多时,这种方法则浪费电力过多,很不经济。如条件允许,通常采用降低风机转速或调换压力较低的风机。

当调节门全开时,流量仍嫌过小,此时应设法改变管网,使阻力系数减小以增加流量;也可采用增加风机转速和调换压力较高的风机,但风机的最大转速不可超过性能表上之最高转速。

风机性能表一般均指在标准状态下输送空气的性能。引风机的指定状态为大气压  $p_a = 101300\text{Pa}$ , 气体温度  $t = 200^\circ\text{C}$ , 气体密度  $\rho = 0.745\text{kg/m}^3$ 。性能表中性能均指调节叶片为全开  $0^\circ$  时。订货时,以性能表为准。

当实际使用状态与上述指定状态不相符时,则必须把实际使用状态的性能换算到指定状态的性能,然后根据换算性能选择风机。其换算公式如下:

$$Q_0 = Q \frac{n_0}{n}$$

$$p_0 = p \left( \frac{n_0}{n} \right)^2 - \frac{\rho_0 K_p}{\rho K_{p0}}$$

$$N_{in0} = N_{in} \left( \frac{n_0}{n} \right)^3 \frac{\rho_0}{\rho}$$

$$\eta_{in0} = \eta_{in}$$

式中  $N$ ——转速 ( $\text{r/min}$ );

$\eta_{in}$ ——内效率。

用下角 0 表示指定状态,无下角 0 表示使用状态。

#### (5) 风机的安装调试和操作

在安装前,首先应准备好安装用材料及工具,并对风机各部分的机件进行检查,对叶轮、主轴和轴承等应更细致检查,如发现损伤,应该修好,然后用煤油清洗轴承箱内部。

在安装操作的过程中必须注意下列几点:

- ① 在一些接合面上,为防止生锈、减少拆卸困难,应涂上润滑脂或机油。
- ② 在安装接合面的螺栓时,如有定位销,应先上好销,再拧紧螺栓。
- ③ 检查机壳内及其他壳体内部,不应有掉入和遗留的工具、杂物。

1) 安装要求:

① 按相关尺寸图所示的位置及尺寸安装,为得到高效率,特别要保证进风口与叶轮的间隙尺寸。

② 保证主轴的水平位置,并测量主轴与电动机轴的同轴度及联轴器两端面的平行度。两轴平行度允差为 0.05mm,联轴器两端面平行度允差为 0.05mm。

③ 安装调节门时,注意不要装反,要保证进气方向与叶轮旋转方向一致。

④ 风机安装后,拨动转子,检查是否有过紧或与固定部分碰撞的现象。

⑤ 安装风机进口和出口管道时,重量不应加在机壳上。

⑥ 全部安装后,经总检合格,方可试运转。

## 2) 风机的试运转:

① 风机的试运转应在无载荷(关闭进气管道闸门或调节门)的情况下进行。

② 如果运转情况良好,再转入满载荷(规定全压和流量)下的运转。

③ 满载荷运转,对新安装风机不少于 2h,对修理安装风机不少于 30min。

## 3) 风机的操作:

① 风机启动前,应做下列准备工作:

a. 关闭调节门。

b. 检查风机各部的间隙尺寸,转动部分与固定部分有无碰撞及摩擦现象。

c. 联轴器应加保护罩。

d. 检查轴承的油位是否在最高油位与最低油位之间。

e. 检查电器线路及仪表是否正确。

f. 检查冷却部分是否正常。

② 风机启动后,逐渐开大调节门,达到正常工况。运转过程中,轴承温升不得超过周围环境温度的 40℃。轴承部位的均方根振动速度值不得大于 6.3mm/s。

③ 下列情况下,必须紧急停车:

a. 风机有明显噪声。

b. 轴承的温度剧烈上升。

c. 风机发生剧烈振动和撞击。

## (6) 风机的维护

1) 风机维护工作制度。风机维护人员必须注意下列各点:

① 只有在风机设备完全正常的情况下,方可运转。

② 如风机设备在检修后开动,则需注意风机各部位是否正常。

③ 定期清除风机内部的灰尘,污垢及水等杂质,并防止锈蚀。

④ 对风机设备的修理,不许在运转中进行。

2) 风机正常运转中的注意事项:

① 如发现流量过大,不符合使用要求,或短时间内需要较小的流量,则可利用调节门进行调节。

② 对温度计和油标的灵敏性定期检查。

③ 在风机的开车、停车或运转过程中,如发现不正常现象,则应立即进行检修。

④ 对检查发现的小故障，应及时查明原因，设法消除；发现大故障时，应立即进行检修。

⑤ 除每次拆修后应更换润滑油外，正常情况下应 3~6 月更换一次润滑油。

3) 风机的主要故障及原因：

① 轴承箱剧烈振动：

- a. 风机轴与电动机轴不同心，联轴器安装不正；
- b. 机壳或进风口与叶轮摩擦；
- c. 基础的刚度不够或不牢固；
- d. 叶轮铆钉松动或叶轮变形；
- e. 叶轮轴盘与轴松动，联轴器螺栓松动；
- f. 机壳与支架、轴承箱与支架、轴承箱盖与座等联接螺栓松动；
- g. 风机进出气管道的安装不良；
- h. 转子不平衡；
- i. 引风机叶片磨损。

② 轴承温升过高：

- a. 轴承箱剧烈振动；
- b. 润滑质量不良、变质、含有过多灰尘、粘砂、污垢等杂质；
- c. 轴承箱盖、座联接螺栓之紧力过大或过小；
- d. 轴与滚动轴承安装歪斜，前后两轴承不同轴；
- e. 滚动轴承损坏。

③ 电动机电流过大或温升过高：

- a. 开车时，进气管道内闸门或节流阀未开启；
- b. 流量超过规定值；
- c. 风机输送气体密度过大，使压力过大；
- d. 电动机输入电压过低或电源单相断电；
- e. 联轴器联接不正，皮圈过紧或间隙不匀；
- f. 受轴承箱剧烈振动的影响。

(7) 订货须知

订货时须注明风机的机号、转速、风量、压力、出风口角度及旋转方向，以及电动机型号规格。

G4-73、Y4-73 离心通风机的性能及选用件见表 13-88、表 13-89，Y4-73 离心引风机性能与选用件见表 13-94。外形、安装尺寸如图 13-13~图 13-19 所示，见表 13-90~表 13-93、表 13-95、表 13-96。

表 13-88 G4-73 离心通风机性能与选用件

机号 No.	传动 方式	转速 /(r/min)	序号	流量 /(m³/h)	全压 /Pa	内效率 /%	内功率 /kW	所需功率 /kW	电动机		联轴器(1 套) (HST0103)	地脚螺栓 (4 个)	螺母 (4 个)	垫圈 (4 个)
									型号	功率 /kW				
8	D	1450	1	16156	2104	79.4	11.80	13.85	Y180M-4	18.5	TL8 $\frac{48 \times 112}{65 \times 142}$ 224-48×65	M12×300	M12	12
			2	18244	2095	83.2	12.67	14.86						
			3	20442	2072	85.7	13.63	15.99						
			4	22530	2018	87	14.42	16.92						
			5	24618	1924	86.8	15.06	17.67						
			6	26706	1794	85.6	15.45	18.13						
			7	28904	1611	82.8	15.53	18.22						
			8	30993	1400	79.4	15.11	17.73						
9	D	1450	1	23003	2668	79.4	21.27	24.96	Y200L-4	30	TL8 $\frac{55 \times 112}{65 \times 142}$ 224-55×65	M16×400	M16	16
			2	25976	2656	83.2	22.83	26.78						
			3	29106	2628	85.7	24.55	28.81						
			4	32079	2559	87	25.98	30.48						
			5	35052	2440	86.8	27.13	31.84	Y200S-4	37	TL8 $\frac{60 \times 142}{65 \times 142}$ 224-60×65			
			6	38026	2275	85.6	27.84	32.67						
			7	41155	2042	82.8	27.99	32.84						
			8	44128	1775	79.4	27.23	31.95						
9	D	960	1	15229	1163	79.4	6.17	7.24	Y160L-6	11	TL8 $\frac{42 \times 112}{65 \times 142}$ 224-42×65	M12×300	M12	12
			2	17198	1158	83.2	6.62	7.77						
			3	19270	1146	85.7	7.13	8.36						
			4	21238	1116	87	7.54	8.85						
			5	23207	1064	86.8	7.87	9.24						
			6	25175	993	85.6	8.08	9.48						
			7	27247	891	82.8	8.12	9.53						
			8	29216	775	79.4	7.90	9.27						
10	D	1450	1	31554	3301	79.4	36.02	42.27	Y250M-4	55	TL8 $\frac{65 \times 142}{65 \times 142}$ 224-65×65	M20×500	M20	20
			2	35633	3287	83.2	38.66	45.36						
			3	39926	3251	85.7	41.58	48.79						
			4	44004	3166	87	44.0	51.64						
			5	48083	3018	86.8	45.95	53.92						
			6	52161	2813	85.6	47.15	55.32						
			7	56455	2525	82.8	47.39	55.61						
			8	60533	2194	79.4	46.12	54.11						

(续)

机号 No.	传动 方式	转速 /(r/min)	序号	流量 /(m³/h)	全压 /Pa	内效率 /%	内功率 /kW	所需功率 /kW	电动机		联轴器(1套) (HST0103)	地脚螺栓 (4个)	螺母 (4个)	垫圈 (4个)
									型号	功率 /kW				
10	D	960	1	20891	1437	79.4	10.45	12.26	Y180L-6	15	TL8 $\frac{48 \times 112}{65 \times 142}$ 224-48×65	M12×300	M12	12
			2	23591	1431	83.2	11.22	13.16						
			3	26434	1416	85.7	12.07	14.16						
			4	29134	1379	87	12.76	14.98						
			5	31834	1315	86.8	13.34	15.65	Y200L1-6	18.5	TL8 $\frac{55 \times 112}{65 \times 142}$ 224-55×65	M16×400	M16	16
			6	34534	1226	85.6	13.68	16.06						
			7	37377	1101	82.8	13.75	16.14						
			8	40077	958	79.4	13.38	15.70						
10	D	730	1	15886	829	79.4	4.60	5.63	Y160L-8	7.5	TL8 $\frac{42 \times 112}{65 \times 142}$ 224-42×65	M12×300	M12	12
			2	17939	826	83.2	4.93	5.79						
			3	20100	817	85.7	5.31	6.23						
			4	22154	796	87	5.61	6.59						
			5	24207	759	86.8	5.86	6.88						
			6	26260	708	85.6	6.02	7.06						
			7	28422	636	82.8	6.05	7.10						
			8	30475	553	79.4	5.88	6.91						
11	D	1450	1	41999	4003	79.4	58.01	68.07	Y280S-4	75	TL9 $\frac{75 \times 142}{75 \times 142}$ 250-75×75	M20×500	M20	20
			2	47427	3986	83.2	62.26	73.05						
			3	53142	3943	85.7	66.97	78.58						
			4	58570	3840	87	70.88	83.16	Y280M-4	90				
			5	63998	3660	86.8	74.00	86.84						
			6	69427	3411	85.6	75.93	89.10						
			7	75141	3060	82.8	76.33	89.57						
			8	80570	2659	79.4	74.27	87.15						
11	D	960	1	27806	1741	79.4	16.83	19.75	Y200L2-6	22	TL8 $\frac{55 \times 112}{75 \times 142}$ 224-55×75	M16×400	M16	16
			2	31400	1734	83.2	18.07	21.20						
			3	35183	1715	85.7	19.43	22.80	Y225M-6	30	TL8 $\frac{60 \times 142}{75 \times 142}$ 224-60×75			
			4	38777	1671	87	20.57	24.13						
			5	42371	1593	86.8	21.48	25.20						
			6	45965	1485	85.6	22.04	25.86						
			7	49748	1334	82.8	22.15	25.99						
			8	53343	1160	79.4	21.55	25.29						

(续)

机号 No.	传动 方式	转速 /(r/min)	序号	流量 /(m <sup>3</sup> /h)	全压 /Pa	内效率 /%	内功率 /kW	所需功率 /kW	电动机		联轴器(1套) (HST0103)	地脚螺栓 (4个)	螺母 (4个)	垫圈 (4个)
									型号	功率 /kW				
11	D	730	1	21144	1004	79.4	7.40	8.69	Y180L-8	11	TL8 $\frac{48 \times 112}{75 \times 142}$ 224-48×75	M12×300	M12	12
			2	23877	1000	83.2	7.94	9.32						
			3	26754	989	85.7	8.55	10.03						
			4	29487	964	87	9.04	10.61						
			5	32220	919	86.8	9.44	11.08						
			6	34953	857	85.6	9.69	11.37						
			7	37829	770	82.8	9.74	11.43						
			8	40562	669	79.4	9.48	11.12						
12	D	1450	1	54526	4777	79.4	89.63	105.17	Y315M1-4	132	TL10 $\frac{80 \times 175}{75 \times 142}$ 315-80×75	M24×630	M24	24
			2	61574	4756	83.2	96.19	112.87						
			3	68992	4705	85.7	103.46	121.40						
			4	76040	4582	87	109.49	128.47						
			5	83088	4366	86.8	114.33	134.15	Y315M2-4	160	TL10 $\frac{80 \times 175}{75 \times 142}$ 315-80×75			
			6	90135	4069	85.6	117.31	137.65						
			7	97554	3650	82.8	117.92	138.36						
			8	104600	3171	79.4	114.75	134.65						
12	D	960	1	36100	2075	79.4	26.01	30.52	Y250M-6	37	TL8 $\frac{65 \times 142}{75 \times 142}$ 224-65×75	M20×500	M20	20
			2	40766	2066	83.2	27.91	32.76						
			3	45677	2044	85.7	30.03	35.23						
			4	50344	1990	87	31.77	37.29						
			5	55010	1898	86.8	33.18	38.94	Y280S-6	45	TL8 $\frac{75 \times 142}{75 \times 142}$ 224-75×75			
			6	59676	1769	85.6	34.05	39.95						
			7	64587	1588	82.8	34.22	40.16						
			8	69253	1381	79.4	33.30	39.08						
12	D	730	1	27451	1196	79.4	11.44	13.42	Y200L-8	15	TL8 $\frac{55 \times 112}{75 \times 142}$ 224-55×75	M16×400	M16	16
			2	30999	1191	83.2	12.27	14.40						
			3	34734	1178	85.7	13.20	15.49	Y225S-8	18.5	TL8 $\frac{60 \times 142}{75 \times 142}$ 224-60×75			
			4	38282	1148	87	13.97	16.39						
			5	41830	1094	86.8	14.59	17.12						
			6	45378	1020	85.6	14.97	17.57						
			7	49113	916	82.8	15.05	17.66						
			8	52661	797	79.4	14.64	17.18						



(续)

机号 No.	传动 方式	转速 /(r/min)	序号	流量 /(m <sup>3</sup> /h)	全压 /Pa	内效率 /%	内功率 /kW	所需功率 /kW	电动机		联轴器(1套) (HST0103)	地脚螺栓 (4个)	螺母 (4个)	垫圈 (4个)
									型号	功率 /kW				
14	D	1450	1	86586	6541	79.4	193.71	227.30	Y355L1-4	280	TL10 $\frac{100 \times 215}{105 \times 215}$ 315-100×105 (铸钢)	M24×630	M24	24
			2	97777	6513	83.2	207.90	243.96						
			3	109550	6442	85.7	223.63	262.41						
			4	120740	6272	87	236.66	277.7						
			5	131940	5975	86.8	247.13	289.99	Y355L2-4	315				
			6	143130	5566	85.6	253.56	297.53						
			7	154910	4990	82.8	254.89	299.10						
			8	166100	4333	79.4	248.02	291.04						
14	D	960	1	57326	2831	79.4	56.22	65.97	Y315S-6	75	TL10 $\frac{80 \times 175}{105 \times 215}$ 315-80×105	M24×630	M24	24
			2	64735	2819	83.2	60.33	70.80						
			3	72534	2789	85.7	64.90	76.16	Y315M1-6	90				
			4	79944	2716	87	68.68	80.56						
			5	87353	2589	86.8	71.72	84.16						
			6	94763	2414	85.6	73.59	86.35						
			7	102560	2166	82.8	73.97	86.80						
			8	109970	1883	79.4	71.98	84.46						
14	D	730	1	43591	1630	79.4	24.72	29.01	Y280S-8	37	TL10 $\frac{75 \times 142}{105 \times 215}$ 315-75×105	M20×500	M20	20
			2	49225	1623	83.2	26.53	31.13						
			3	55156	1606	85.7	28.54	33.49						
			4	60791	1564	87	30.20	35.44						
			5	66425	1491	86.8	31.54	37.00	Y280M-8	45				
			6	72059	1391	85.6	32.36	37.97						
			7	77990	1249	82.8	32.53	38.17						
			8	83624	1086	79.4	31.65	37.14						
16	D	960	1	85571	3709	79.4	109.60	128.60	Y355M2-6	185	TL10 $\frac{100 \times 215}{105 \times 215}$ 315-100×105 (铸钢)	M24×630	M24	24
			2	96631	3693	83.2	117.63	138.03						
			3	108270	3653	85.7	126.53	148.47						
			4	119330	3558	87	133.91	157.12						
			5	130390	3391	86.8	139.83	164.08						
			6	141450	3161	85.6	143.46	168.33						
			7	153090	2836	82.8	144.21	169.22						
			8	164150	2465	79.4	140.33	164.66						

(续)

机号 No.	传动 方式	转速 /(r/min)	序号	流量 /(m <sup>3</sup> /h)	全压 /Pa	内效率 /%	内功率 /kW	所需功率 /kW	电动机		联轴器(1套) (HST0103)	地脚螺栓 (4个)	螺母 (4个)	垫圈 (4个)
									型号	功率 /kW				
16	D	730	1	65069	2133	79.4	48.19	56.55	Y315M1-8	75	TL10 $\frac{80 \times 175}{105 \times 215}$ 315-80×105	M24×630	M24	24
			2	73480	2124	83.2	51.72	60.69						
			3	82333	2101	85.7	55.64	65.29						
			4	90743	2047	87	58.88	69.09						
			5	99153	1951	86.8	61.48	72.15						
			6	107560	1819	85.6	63.08	74.02						
			7	116410	1633	82.8	63.41	74.41						
			8	124820	1420	79.4	61.70	72.41						
16	D	580	1	51699	1343	79.4	24.17	28.36	Y315S-10	45	TL10 $\frac{80 \times 175}{105 \times 215}$ 315-80×105	M24×630	M24	24
			2	58381	1337	83.2	25.94	30.44						
			3	65415	1323	85.7	27.91	32.75						
			4	72097	1289	87	29.53	34.65						
			5	78779	1228	86.8	30.84	36.18						
			6	85462	1146	85.6	31.64	37.13						
			7	92495	1029	82.8	31.80	37.32						
			8	99178	895	79.4	30.95	36.31						
18	D	960	1	121830	4710	79.4	197.51	231.77	Y355-6	280	TL11 $\frac{100 \times 215}{130 \times 255}$ 400-100×130	M24×630	M24	24
			2	137580	4690	83.2	211.97	248.73						
			3	154160	4639	85.7	228.02	267.57						
			4	169910	4518	87	241.3	283.15	JSQ148-6	310	TL11 $\frac{110 \times 215}{130 \times 255}$ 400-110×130	M36×1000	M36	36
			5	185650	4305	86.8	251.97	295.67						
			6	201400	4012	85.6	258.53	303.37						
			7	217980	3599	82.8	259.88	304.95						
			8	233730	3126	79.4	252.88	296.74						
18	D	730	1	92648	2705	79.4	86.85	101.91	Y315M1-8	132	TL11 $\frac{90 \times 175}{130 \times 255}$ 400-90×130	M24×630	M24	24
			2	104620	2693	83.2	93.21	109.37						
			3	117220	2664	85.7	100.26	117.64						
			4	129200	2595	87	106.1	124.49						
			5	141170	2474	86.8	110.79	130						
			6	153150	2306	85.6	113.67	133.37						
			7	165750	2070	82.8	114.27	134.09						
			8	177730	1800	79.4	111.19	130.46						

(续)

机号 No.	传动 方式	转速 /(r/min)	序号	流量 /(m <sup>3</sup> /h)	全压 /Pa	内效率 /%	内功率 /kW	所需功率 /kW	电动机		联轴器(1套) (HST0103)	地脚螺栓 (4个)	螺母 (4个)	垫圈 (4个)
									型号	功率 /kW				
18	D	580	1	73610	1702	79.4	43.56	51.11	Y315M2-10	75	TL11 $\frac{80 \times 175}{130 \times 255}$ 400-80×130	M24×630	M24	24
			2	83125	1694	83.2	46.75	54.56						
			3	93140	1676	85.7	50.29	59.01						
			4	102650	1633	87	53.22	62.45						
			5	112160	1557	86.8	55.57	65.21						
			6	121680	1452	85.6	57.01	66.90						
			7	131690	1303	82.8	57.31	67.25						
			8	141210	1133	79.4	55.77	65.44						
20	D	960	1	167130	5837	79.4	334.49	392.50	△JSQ148-6	430	TL12 $\frac{110 \times 215}{130 \times 255}$ 475-110×130	M36×1000	M36	36
			2	188730	5812	83.2	358.98	421.24	△JSQ1410-6	520				
			3	211470	5749	85.7	386.15	453.13						
			4	233070	5598	87	408.65	479.52						
			5	254670	5334	86.8	426.72	500.73						
			6	276270	4969	85.6	437.82	513.76						
			7	299010	4456	82.8	440.12	516.46						
			8	320610	3870	79.4	428.25	502.52						
20	D	730	1	127080	3347	79.4	147.04	172.58	Y355-8	220	TL11 $\frac{100 \times 215}{130 \times 255}$ 400-100×130	M24×630	M24	24
			2	143510	3333	83.2	157.84	185.21						
			3	160800	3297	85.7	169.79	199.23						
			4	177230	3211	87	179.68	210.85						
			5	193660	3060	86.8	187.63	220.16	Y355-8	250				
			6	210080	2853	85.6	192.51	225.89						
			7	227370	2560	82.8	193.52	227.07						
			8	243800	2225	79.4	188.30	220.96						
20	D	580	1	100970	2104	79.4	73.77	86.56	Y355M <sub>2</sub> -10	110	TL11 $\frac{100 \times 215}{130 \times 255}$ 400-100×130	M24×630	M24	24
			2	114020	2095	83.2	79.17	92.90						
			3	127760	2072	85.7	85.16	99.93						
			4	140810	2018	87	90.12	105.75						
			5	153860	1924	86.8	94.11	110.42	Y355L <sub>1</sub> -10	132				
			6	166910	1794	85.6	96.55	113.30						
			7	180650	1611	82.8	97.06	113.89						
			8	193700	1400	79.4	94.44	110.82						

表 13-89 Y4-73 离心通风机性能与选用件

机号 No.	传动 方式	转速 /(r/min)	序号	流量 /(m³/h)	全压 /Pa	内效率 /%	内功率 /kW	所需功率 /kW	电动机		联轴器(1套) (HST0103)	地脚螺栓 (4个)	螺母 (4个)	垫圈 (4个)
									型号	功率 /kW				
8	D	1450	1	16156	1303	79.4	7.33	9.73	Y160M-4	11	TL8 <sup>42×112</sup> <sub>65×142</sub> 224-42×65	M12×300	M12	12
			2	18244	1298	83.2	7.87	10.44						
			3	20442	1284	85.7	8.46	11.23						
			4	22530	1250	87	8.96	11.89	Y160L-4	15				
			5	24618	1192	86.8	9.35	12.41						
			6	26706	1112	85.6	9.60	12.73						
			7	28904	988	82.8	9.65	12.80						
8	30993	868	79.4	9.39	12.45									
9	D	1450	1	23003	1651	79.4	13.21	17.52	Y180L-4	22	TL8 <sup>48×112</sup> <sub>65×142</sub> 224-48×65	M12×300	M12	12
			2	25976	1644	83.2	14.18	18.81						
			3	29106	1627	85.7	15.25	20.23						
			4	32079	1584	87	16.14	21.41	Y200L-4	30				
			5	35052	1511	86.8	16.85	22.36						
			6	38026	1409	85.6	17.29	22.94						
			7	41155	1265	82.8	17.38	23.06						
8	44128	1100	79.4	16.91	22.44									
9	D	960	1	15229	721	79.4	3.83	5.09	Y160M-6	7.5	TL8 <sup>42×112</sup> <sub>65×142</sub> 224-42×65	M12×300	M12	12
			2	17198	718	83.2	4.11	5.46						
			3	19270	711	85.7	4.43	5.87						
			4	21238	692	87	4.68	6.21						
			5	23207	660	86.8	4.89	6.49						
			6	25175	616	85.6	5.02	6.66						
			7	27247	553	82.8	5.04	6.69						
8	29216	481	79.4	4.91	6.51									
10	D	1450	1	31554	2041	79.4	22.37	29.68	Y225S-4	37	TL8 <sup>60×142</sup> <sub>65×142</sub> 224-60×65	M16×400	M16	16
			2	35633	2033	83.2	24.01	31.85						
			3	39926	2011	85.7	25.83	34.26						
			4	44004	1959	87	27.34	36.26	Y225M-4	45				
			5	48083	1867	86.8	28.54	37.86						
			6	52161	1741	85.6	29.29	38.85						
			7	56455	1563	82.8	29.44	39.05						
8	60533	1359	79.4	28.65	38.00									

(续)

机号 No.	传动 方式	转速 /(r/min)	序号	流量 /(m <sup>3</sup> /h)	全压 /Pa	内效率 /%	内功率 /kW	所需功率 /kW	电动机		联轴器(1套) (HST0103)	地脚螺栓 (4个)	螺母 (4个)	垫圈 (4个)
									型号	功率 /kW				
10	D	960	1	20891	891	79.4	6.49	8.61	Y160L-6	11	TL8 <sup>42×112</sup> 65×142 224-42×65	M12×300	M12	12
			2	23591	887	83.2	6.97	9.24						
			3	26434	878	85.7	7.50	9.94						
			4	29134	855	87	7.93	10.52						
			5	31834	815	86.8	8.28	10.99						
			6	34534	761	85.6	8.50	11.27						
			7	37377	683	82.8	8.54	11.33						
			8	40077	594	79.4	8.31	11.03						
10	D	730	1	15886	515	79.4	2.85	3.79	Y160M2-8	5.5	TL8 <sup>42×112</sup> 65×142 224-42×65	M12×300	M12	12
			2	17939	512	83.2	3.06	4.06						
			3	20100	507	85.7	3.30	4.37						
			4	22154	494	87	3.49	4.62						
			5	24207	471	86.8	3.64	4.83						
			6	26260	439	85.6	3.74	4.96						
			7	28422	395	82.8	3.76	4.98						
			8	30475	343	79.4	3.66	4.85						
11	D	1450	1	41999	2474	79.4	36.03	47.80	Y250M-4	55	TL8 <sup>65×142</sup> 75×142 224-65×75	M20×500	M20	20
			2	47427	2463	83.2	38.67	51.30						
			3	53142	2437	85.7	41.60	55.18						
			4	58570	2373	87	44.02	58.39	Y280S-4	75	TL8 <sup>75×142</sup> 75×142 224-75×75			
			5	63998	2263	86.8	45.97	60.98						
			6	69427	2109	85.6	47.16	62.56						
			7	75141	1893	82.8	47.41	62.89						
			8	80570	1646	79.4	46.13	61.20						
11	D	960	1	27806	1079	79.4	10.46	13.87	Y200L1-6	18.5	TL8 <sup>55×112</sup> 75×142 224-55×75	M16×400	M16	16
			2	31400	1075	83.2	11.22	14.89						
			3	35183	1063	85.7	12.07	16.01						
			4	38777	1035	87	12.78	16.95						
			5	42371	987	86.8	13.34	17.70						
			6	45965	921	85.6	13.69	18.16						
			7	49748	827	82.8	13.76	18.25						
			8	53343	719	79.4	13.39	17.76						

(续)

机号 No.	传动 方式	转速 /(r/min)	序号	流量 /(m <sup>3</sup> /h)	全压 /Pa	内效率 /%	内功率 /kW	所需功率 /kW	电动机		联轴器(1套) (HST0103)	地脚螺栓 (4个)	螺母 (4个)	垫圈 (4个)
									型号	功率 /kW				
11	D	730	1	21144	623	79.4	4.60	6.10	Y160L-8	7.5	TL8 $\frac{42 \times 112}{75 \times 142}$ 224-42×75	M12×300	M12	12
			2	23877	620	83.2	4.93	6.55						
			3	26754	614	85.7	5.31	7.04						
			4	29487	598	87	5.61	7.45						
			5	32220	570	86.8	5.87	7.78	Y180L-8	11	TL8 $\frac{48 \times 112}{75 \times 142}$ 224-48×75			
			6	34953	532	85.6	6.02	7.98						
			7	37829	478	82.8	6.05	8.03						
			8	40562	415	79.4	5.89	7.81						
12	D	1450	1	54526	2949	79.4	55.67	73.85	Y280M-4	90	TL9 $\frac{75 \times 142}{75 \times 142}$ 250-75×75	M20×500	M20	20
			2	61574	2936	83.2	59.75	79.26						
			3	68992	2905	85.7	64.27	85.26						
			4	76040	2829	87	68.01	90.23						
			5	83088	2697	86.8	71.02	94.21	Y315S-4	110	TL9 $\frac{80 \times 175}{75 \times 142}$ 250-80×75			
			6	90135	2514	85.6	72.87	96.67						
			7	97554	2256	82.8	73.25	97.17						
			8	104600	1961	79.4	71.28	94.55						
12	D	960	1	36100	1285	79.4	16.16	21.43	Y225M-6	30	TL8 $\frac{60 \times 142}{75 \times 142}$ 224-60×75	M16×400	M16	16
			2	40766	1280	83.2	17.34	23.00						
			3	45677	1266	85.7	18.65	24.74						
			4	50344	1233	87	19.74	26.18						
			5	55010	1176	86.8	20.61	27.34						
			6	59676	1096	85.6	25.15	28.05						
			7	64587	985	82.8	21.26	28.20						
			8	69253	856	79.4	20.69	27.44						
12	D	730	1	27451	742	79.4	7.10	9.42	Y180L-8	11	TL8 $\frac{48 \times 112}{75 \times 142}$ 224-48×75	M12×300	M12	12
			2	30999	739	83.2	7.62	10.11						
			3	34734	731	85.7	8.20	10.88						
			4	38282	712	87	8.68	11.52						
			5	41830	679	86.8	9.06	12.02	Y200L-8	15	TL8 $\frac{55 \times 112}{75 \times 142}$ 224-55×75			
			6	45378	633	85.6	9.30	12.33						
			7	49113	569	82.8	9.35	12.40						
			8	52661	495	79.4	9.10	12.07						

(续)

机号 No.	传动 方式	转速 /(r/min)	序号	流量 /(m³/h)	全压 /Pa	内效率 /%	内功率 /kW	所需功率 /kW	电动机		联轴器(1套) (HST0103)	地脚螺栓 (4个)	螺母 (4个)	垫圈 (4个)
									型号	功率 /kW				
14	D	1450	1	86586	4029	79.4	120.33	159.61	Y315L-4	185	TL10 $\frac{90 \times 175}{105 \times 215}$ 315-90×105	M24×630	M24	24
			2	97777	4011	83.2	129.14	171.3						
			3	109550	3968	85.7	138.91	184.26						
			4	120740	3864	87	147.00	195.00						
			5	131940	3683	86.8	153.5	203.63	Y355M1-4	220				
			6	143130	3433	85.6	157.5	208.92						
			7	154910	3080	82.8	158.33	210.02						
			8	166100	2676	79.4	154.06	204.36						
14	D	960	1	57326	1752	79.4	34.92	46.32	Y280M-6	55	TL10 $\frac{75 \times 142}{105 \times 215}$ 315-75×105	M20×500	M20	20
			2	64735	1745	83.2	37.48	49.71						
			3	72534	1726	85.7	40.32	53.48						
			4	79944	1681	87	42.66	56.59						
			5	87353	1603	86.8	44.55	59.10	Y315S-6	75				
			6	94763	1495	85.6	45.71	60.63						
			7	102560	1342	82.8	45.95	60.95						
			8	109970	1167	79.4	44.71	59.31						
14	D	730	1	43591	1010	79.4	15.35	20.37	Y225M-8	22	TL10 $\frac{60 \times 142}{105 \times 215}$ 315-60×105	M16×400	M16	16
			2	49225	1006	83.2	16.48	21.86						
			3	55156	955	85.7	17.73	23.51	Y250M-8	30				
			4	60791	970	87	18.76	24.88						
			5	66425	925	86.8	19.59	25.98						
			6	72059	862	85.6	20.10	26.66						
			7	77990	774	82.8	20.20	26.80						
			8	83624	674	79.4	19.66	26.08						
16	D	960	1	85571	2293	79.4	68.08	90.31	Y315M2-6	110	L10 $\frac{80 \times 175}{105 \times 215}$ 315-80×105	M24×630	M24	24
			2	96631	2283	83.2	73.07	96.93						
			3	108270	2258	85.7	78.60	104.26						
			4	119330	2200	87	83.18	110.33						
			5	130390	2097	86.8	86.86	115.21	Y315M3-6	132				
			6	141450	1955	85.6	89.12	118.21						
			7	153090	1755	82.8	89.59	118.83						
			8	164150	1526	79.4	87.17	115.63						

(续)

机号 No.	传动 方式	转速 /(r/min)	序号	流量 /(m <sup>3</sup> /h)	全压 /Pa	内效率 /%	内功率 /kW	所需功率 /kW	电动机		联轴器(1套) (HST0103)	地脚螺栓 (4个)	螺母 (4个)	垫圈 (4个)				
									型号	功率 /kW								
16	D	730	1	65069	1321	79.4	29.94	39.71	Y280M-8	45	TL10 $\frac{75 \times 142}{105 \times 215}$ 315-75×105	M20×500	M20	20				
			2	73480	1316	83.2	32.13	42.62										
			3	82333	1302	85.7	34.56	45.34	Y315S-8	55	TL10 $\frac{80 \times 175}{105 \times 215}$ 315-80×105	M24×630	M24	24				
			4	90743	1268	87	36.58	48.51										
			5	99153	1209	86.8	38.19	50.56										
			6	107560	1127	85.6	39.18	51.98										
			7	116410	1012	82.8	39.39	52.25										
			8	124820	880	79.4	38.33	50.84										
16	D	580	1	51699	833	79.4	15.01	19.92	Y315S-10	45	TL10 $\frac{80 \times 175}{105 \times 215}$ 315-80×105	M24×630	M24	24				
			2	58381	829	83.2	16.11	21.37										
			3	65415	820	85.7	17.33	22.99										
			4	72097	799	87	18.34	24.33										
			5	78779	762	86.8	19.16	25.41										
			6	85462	711	85.6	19.65	26.07										
			7	92495	638	82.8	19.76	26.21										
			8	99178	555	79.4	19.22	25.50										
18	D	960	1	121830	2908	79.4	122.69	162.74	Y355M3-6	200	TL11 $\frac{100 \times 215}{130 \times 255}$ 400-100×130	M24×630	M24	24				
			2	137580	2895	83.2	131.67	174.65										
			3	154160	2864	85.7	141.64	187.88										
			4	169910	2790	87	149.89	198.82										
			5	185650	2659	86.8	156.52	207.62	Y355L1-6	220								
			6	201400	2479	85.6	160.59	213.01										
			7	217980	2225	82.8	161.43	214.13										
			8	233730	1934	79.4	157.08	208.36										
18	D	730	1	92648	1674	79.4	53.95	71.56	Y315M2-8	90	TL11 $\frac{85 \times 175}{130 \times 255}$ 400-85×130	M24×630	M24	24				
			2	104620	1667	83.2	57.90	76.80										
			3	117220	1649	85.7	62.28	82.62										
			4	129200	1606	87	65.90	87.43										
			5	141170	1532	86.8	68.82	91.29	Y315M3-8	110								
			6	153150	1428	85.6	70.61	93.67										
			7	165750	1282	82.8	70.98	94.16										
			8	177730	1115	79.4	69.07	91.62										



(续)

机号 No.	传动 方式	转速 /(r/min)	序号	流量 /(m³/h)	全压 /Pa	内效率 /%	内功率 /kW	所需功率 /kW	电动机		联轴器(1套) (HST0103)	地脚螺栓 (4个)	螺母 (4个)	垫圈 (4个)
									型号	功率 /kW				
18	D	580	1	73610	1055	79.4	27.06	35.89	Y315S-10	45	TL11 $\frac{80 \times 175}{130 \times 255}$ 400-80×130	M24×630	M24	24
			2	83125	1050	83.2	29.04	38.52						
			3	93140	1039	85.7	31.24	41.43						
			4	102650	1012	87	33.05	43.85						
			5	112160	965	86.8	34.52	45.79	Y315L1-10	55				
			6	121680	900	85.6	35.42	46.98						
			7	131690	808	82.8	35.6	47.23						
			8	141210	703	79.4	34.64	45.95						
20	D	960	1	167130	3598	79.4	207.77	275.61	JSQ1410-6	380	TL11 $\frac{110 \times 215}{130 \times 255}$ 400-110×130	M36×1000	M36	36
			2	188730	3583	83.2	222.99	295.8						
			3	211470	3545	85.7	239.87	318.18						
			4	233070	3452	87	253.84	336.71						
			5	254670	3290	86.8	265.07	351.61						
			6	276270	3067	85.6	271.96	360.76						
			7	299010	2752	82.8	273.39	362.64						
			8	320610	2392	79.4	266.02	352.87						
20	D	730	1	127080	2070	79.4	91.36	121.18	Y355M1-8	132	TL11 $\frac{90 \times 175}{130 \times 255}$ 400-90×130	M24×630	M24	24
			2	143510	2061	83.2	98.05	130.06						
			3	160800	2039	85.7	105.47	139.9	Y355M2-8	160				
			4	177230	1986	87	111.61	148.05						
			5	193660	1893	86.8	116.55	154.59						
			6	210080	1765	85.6	119.58	158.62						
			7	227370	1585	82.8	120.2	159.44						
			8	243800	1378	79.4	116.96	155.14						
20	D	580	1	100970	1303	79.4	45.82	60.78	Y315M2-10	75	TL11 $\frac{80 \times 175}{130 \times 255}$ 400-80×130	M24×630	M24	24
			2	114020	1298	83.2	49.18	65.23						
			3	127760	1284	85.7	52.90	70.17						
			4	140810	1250	87	55.98	74.25						
			5	153860	1192	86.6	58.46	77.54	Y355M1-10	90				
			6	166910	1112	86.5	59.98	79.56						
			7	180650	998	82.8	60.29	79.98						
			8	193700	868	79.4	58.67	77.82						

注：表 13-88、表 13-89 中所配用的电动机型号左侧符号，表示对应于该额定容量（kW）时采用电压，※表示 6000V，△表示 3000V，无注角符号表示为低压（380V 或 220V）注角号及电动机型号仅供参考，以电动机样本为准。

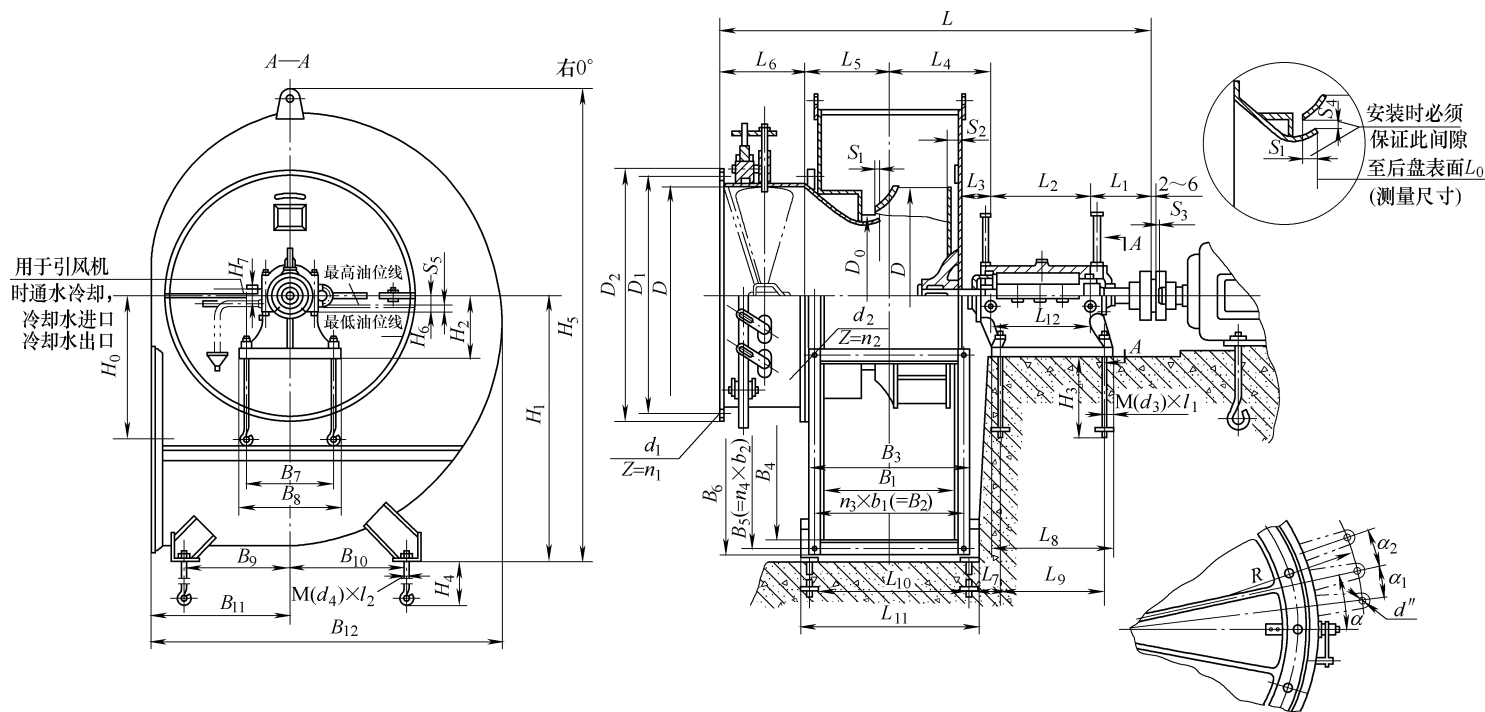


图 13-13  $G_4-73$  No. 8、9、10、11、12D 单吸入离心锅炉通风机、引风机外形及安装尺寸图 (一)

注: 各符号代表的尺寸见表 13-90,  $B_9$ 、 $B_{10}$ 、 $H_1$  见图 13-14 及表 13-93。引风机通水冷却管径: No. 8、9、10、为  $\frac{3}{4}$  in No. 11、12 为 1 in。

表 13-90  $\frac{G}{Y}4-73$ No. 8、9、10、11、12D 单吸入离心锅炉通风机、引风机外形及安装尺寸（一）

机号 $\left(\frac{D}{100}\right)$	进 风 口					出 风 口										安装及外形尺寸			
	D	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	连接螺栓孔		B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	B <sub>6</sub>	连接螺孔				D <sub>0</sub>	B <sub>7</sub>	B <sub>8</sub>	B <sub>11</sub>
				直径	个数							间距							
				d <sub>1</sub>	n <sub>1</sub>									d <sub>2</sub>	n <sub>2</sub>				
No. 8	φ800	φ860	φ910	φ15	16	520	580	629	720	777	826	φ15	24	5 × 116	7 × 111	φ584	440	510	536
No. 9	φ900	φ970	φ1030	φ15	16	585	650	694	810	868	916	φ15	24	5 × 130	7 × 124	φ657	440	510	602
No. 10	φ1000	φ1070	φ1130	φ15	16	650	710	759	900	959	1006	φ15	24	5 × 142	7 × 137	φ730	440	510	668
No. 11	φ1100	φ1170	φ1210	φ15	24	715	780	824	990	1048	1096	φ15	28	6 × 130	8 × 131	φ803	620	700	734
No. 12	φ1200	φ1270	φ1310	φ15	24	780	846	889	1080	1144	1186	φ15	28	6 × 141	8 × 143	φ876	620	700	800
安 装 及 外 形 尺 寸																			
B <sub>12</sub>	H <sub>0</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>	H <sub>4</sub>	H <sub>5</sub>	H <sub>6</sub>	H <sub>7</sub>	L <sub>0</sub>	L	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	L <sub>5</sub>	L <sub>6</sub>	L <sub>7</sub>	L <sub>8</sub>	L <sub>9</sub>	L <sub>10</sub>
1323	552	280	530	360	1751	60	65	272	1791.5	299	496	167.5	432	324.5	240	177.5	590	520	599
1487	621	280	530	360	1940	60	65	306	1882	299	496	163.5	460.5	353.5	270	173.5	590	520	664
1651	690	280	530	360	2133	60	65	340	1973.5	299	496	159.5	489	389.5	300	169.5	590	520	729
1815	759	375	670	360	2240	75	85	374	2274	327	650	189.5	551.5	415.5	330	216	780	700	794
1979	828	357	670	360	2532	75	85	408	2381.5	324	650	185.5	580	467.5	360	212	780	700	859
安 装 及 外 形 尺 寸										调 节 门					叶轮重 /kg	转动惯 量/(kg · m <sup>2</sup> )	滚动 轴承 型号	风机重(不 包括电 机)/kg	
L <sub>11</sub>	L <sub>12</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	地脚螺栓				R	α	α <sub>1</sub>	α <sub>2</sub>					d″
							M(d <sub>3</sub> ) × l <sub>2</sub>	个数	M(d <sub>4</sub> ) × l <sub>2</sub>	个数									
655	470	8	32	2	1.8	10	M24 × 630	4	M16 × 400	4	750	16°21′	7°40′	7°40′	10	133	46	3616	(G)795(Y)882
722	470	9	36	2	2.0	10	M24 × 630	4	M16 × 400	4	810	16°21′	7°	7°	10	149	55	3616	(G)822(Y)931
787	470	10	40	2	2.0	10	M24 × 630	4	M16 × 400	4	860	16°21′	6°26′	6°26′	10	174	90	3616	(G)947(Y)1082
852	630	11	44	2	2.2	10	M30 × 800	4	M16 × 400	4	910	16°21′	5°58′	5°58′	10	248	145	3620	(G)1338(Y)1493
917	630	12	48	2	2.2	10	M30 × 800	4	M16 × 400	4	960	16°21′	5°33′	5°33′	10	293	212	3620	(G)1467(Y)1787

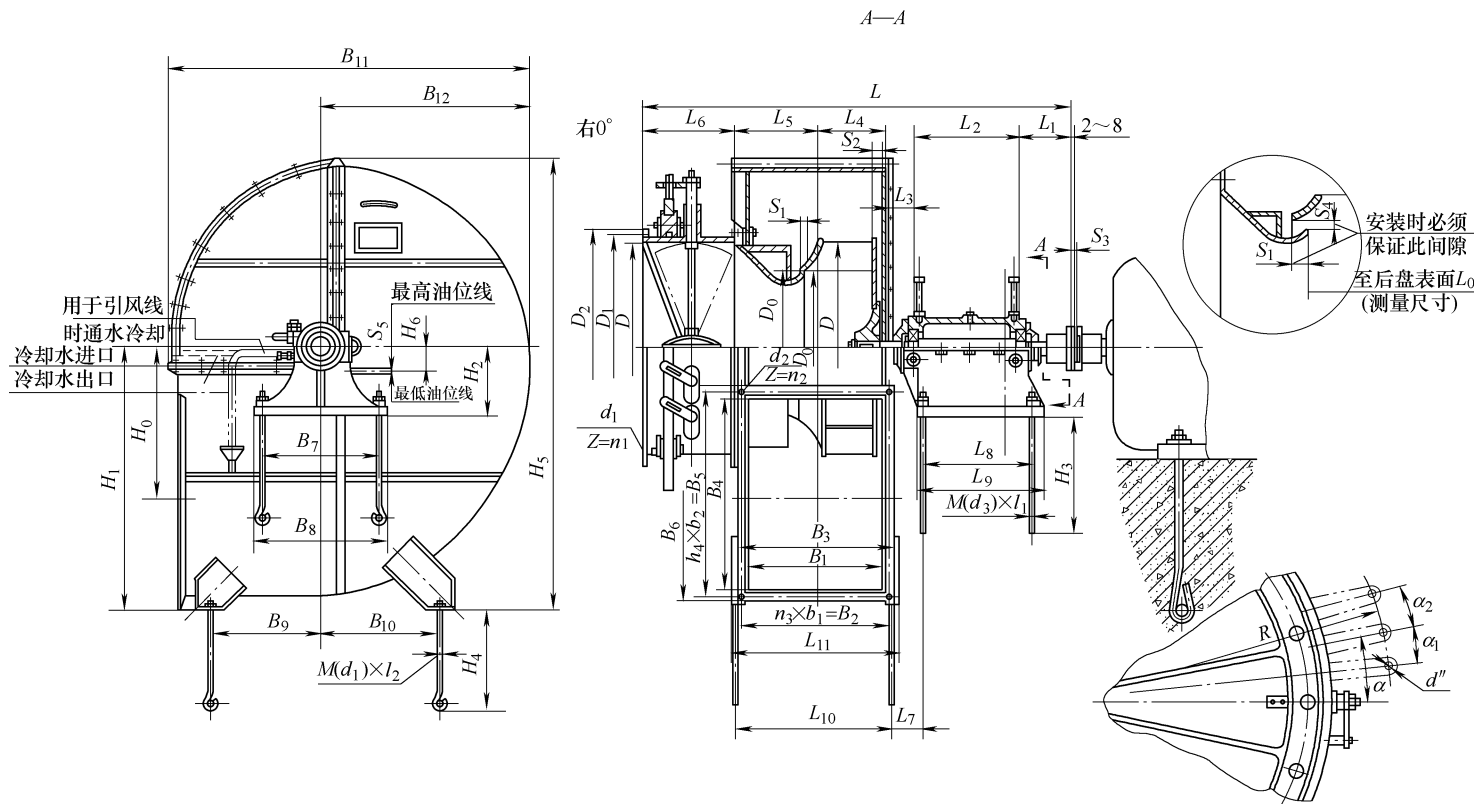
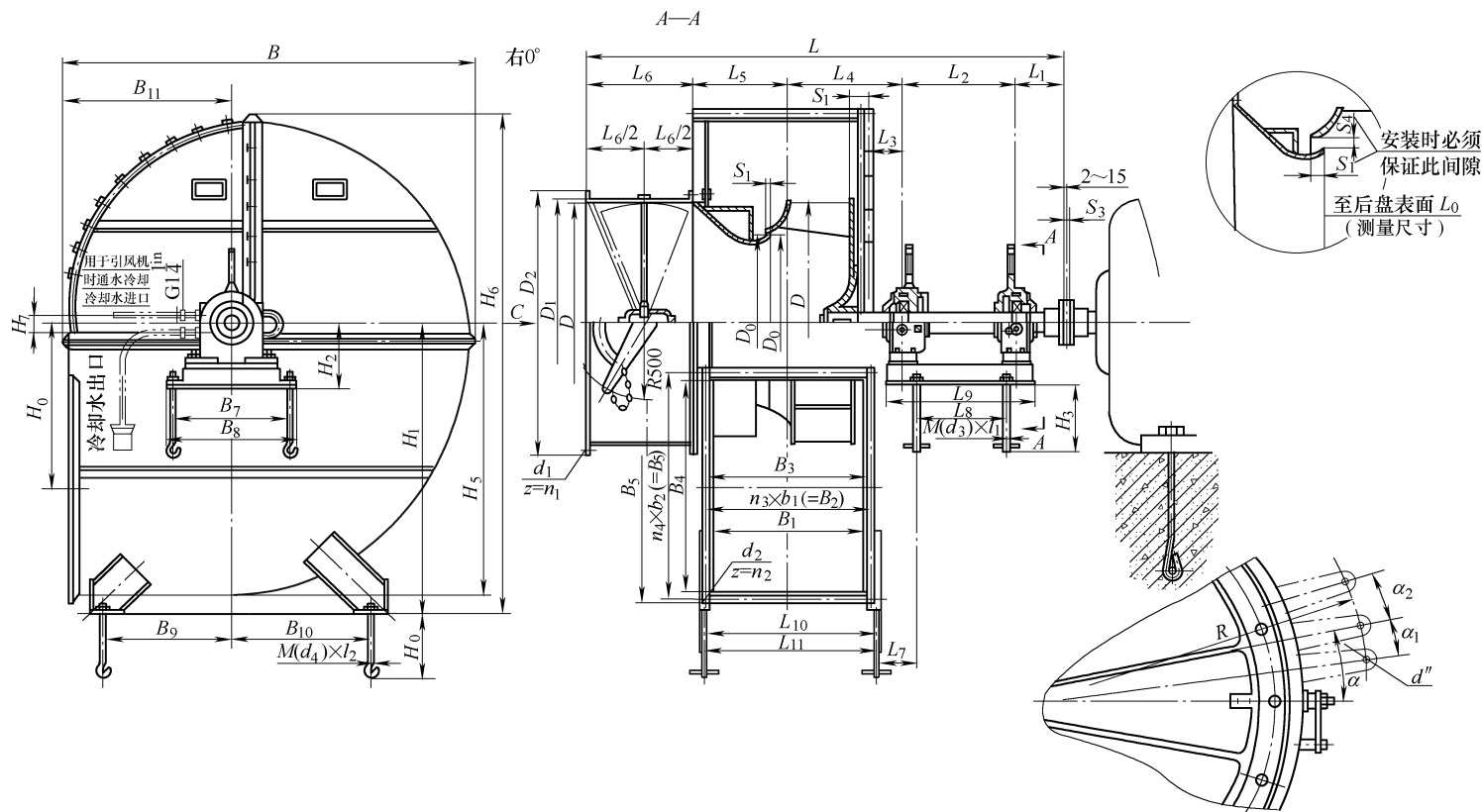


图 13-14  $G_4-73$ No. 14、16D 单吸入离心锅炉通风机外形及安装尺寸图 (一)

注: 各符号代表的尺寸见表 13-91。 $B_9$ 、 $B_{10}$ 、 $H_1$  见图 13-16 及表 13-93。引风机通水冷却管径:  $1 \frac{1}{4}$  in。

表 13-91  $\text{G}_4-73\text{No. 14、16D}$  单吸入离心锅炉通风机外形及安装尺寸 (一)

机号 $\left(\frac{D}{100}\right)$	进 风 口					出 风 口										安装及外形尺寸			
	D	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	连接螺栓孔		B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	B <sub>6</sub>	连接螺孔				D <sub>0</sub>	B <sub>7</sub>	B <sub>8</sub>	B <sub>11</sub>
				直径	个数							直径	个数	间距					
				d <sub>1</sub>	n <sub>1</sub>									d <sub>2</sub>	n <sub>2</sub>				
No. 14	φ1400	φ1470	φ1530	φ15	20	910	990	1042	1260	1336	1389	φ15	28	6 × 165	8 × 167	φ1022	900	1000	2357
No. 16	φ1600	φ1680	φ1750	φ15	28	1040	1120	1172	1440	1512	1569	φ15	32	7 × 160	9 × 168	φ1168	900	1000	2683
安 装 及 外 形 尺 寸																			
B <sub>12</sub>	H <sub>0</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>	H <sub>4</sub>	H <sub>5</sub>	H <sub>6</sub>	L	L <sub>0</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	L <sub>5</sub>	L <sub>6</sub>	L <sub>7</sub>	L <sub>8</sub>	L <sub>9</sub>	L <sub>10</sub>	L <sub>11</sub>
1377	966	500	650	580	2913	95	2939	476	455	820	255	455	534	420	276	900	1000	1022	1122
1573	1104	500	650	580	3277	95	3132	544	455	820	247	520	610	480	268	900	1000	1152	1252
安 装 及 外 形 尺 寸										调 节 门					叶轮重 /kg	转动惯 量/(kg · m <sup>2</sup> )	滚动 轴承 型号	风机重(不 包括电动 机)/kg	
S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	地脚螺栓				R	α	α <sub>1</sub>	α <sub>2</sub>	d″						
					M(d <sub>3</sub> ) × l <sub>2</sub>	个数	M(d <sub>4</sub> ) × l <sub>2</sub>	个数											
14	56	5	2.4	10	M36 × 800	4	M30 × 630	4	1169.5	6°55′	8°36′	8°36′	18	513	360	3624	(G)2647 (Y)2903		
16	64	5	2.4	10	M36 × 800	4	M30 × 630	4	1269.5	6°55′	7°40′	7°40′	18	630	820	3624	(G)3126 (Y)3459		



注：各符号代表的尺寸见表 13-92。 $B_9$ 、 $B_{10}$ 、 $H_1$  见图 13-16 及表 13-93。

表 13-92  $\frac{G}{Y}4-73$ No. 18、20D 单吸入离心锅炉通风机外形及安装尺寸（一）

机号 $\left(\frac{D}{100}\right)$	进 风 口					出 风 口										安 装 及 外 形 尺 寸			
	$D$	$D_1$	$D_2$	连接螺栓		$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$	$B_6$	连接螺栓孔				$D_0$	$B$	$B_7$	$B_8$
				直径	个数														
				$d_1$	$n_1$							直径	个数	间距					
No. 18	$\phi 1800$	$\phi 1860$	$\phi 1922$	$\phi 19$	28	1170	1260	1332	1620	1710	1779	$\phi 19$	32	$7 \times 180$	$9 \times 190$	$\phi 1314$	3094	960	1060
No. 20	$\phi 2000$	$\phi 2060$	$\phi 2122$	$\phi 19$	28	1300	1386	1462	1800	1890	1959	$\phi 19$	32	$7 \times 198$	$9 \times 210$	$\phi 1460$	3380	960	1060

安 装 及 外 形 尺 寸

$B_{11}$	$H_0$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	$H_5$	$H_6$	$H_7$	$L_0$	$L$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$	$L_6$	$L_7$	$L_8$	$L_9$	$L_{10}$
1250	1242	500	710	580	2056.5	3736	170	612	3595	548	950	281	872	679	540	281	850	1290	1282
1340	1380	500	710	580	2284.5	4119.5	170	680	3787.5	548	950	273	929	760.5	600	273	850	1290	1412

安 装 及 外 形 尺 寸

调 节 门

$L_{11}$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	地脚螺栓				$R$	$\alpha$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$d''$	叶轮重 /kg	转动惯 量/(kg · m <sup>2</sup> )	滚动 轴承 型号	风机重(不 包括电动 机)/kg
					$M(d_3) \times l_1$	个数	$M(d_4) \times l_2$	个数									
1382	18	72	5	2.6	$M36 \times 800$	4	$M30 \times 630$	4	1372	$13^\circ 50'$	$6^\circ 54'$	$6^\circ 54'$	18	827	1330	3632	(G)4158 (Y)4692
1512	20	80	5	2.6	$M36 \times 800$	4	$M30 \times 630$	4	1472	$13^\circ 50'$	$6^\circ 18'$	$6^\circ 18'$	18	1000	2270	3632	(G)4331 (Y)5047

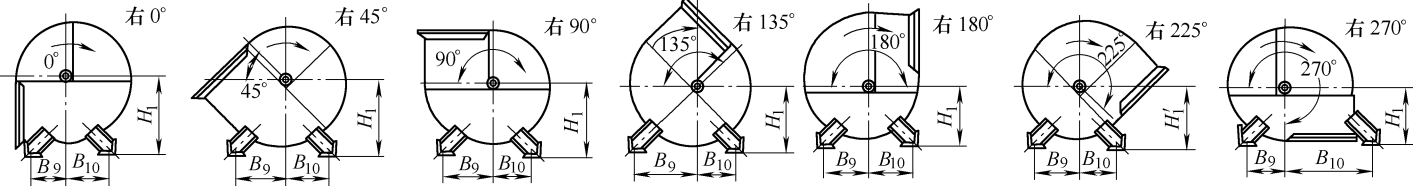


图 13-16  $\frac{G}{Y}4-73$ No. 8、9、10、11、12、14、16、18、20D 单吸入离心锅炉通风机外形及安装尺寸图（二）

表 13-93  $G_Y4-73$ No. 8、9、10、11、12、14、16、18、20D 单吸入离心锅炉通风机外形及安装尺寸（二）

机号	0°			45°			90°			150°			180°			225°			270°		
	$H_1$	$B_9$	$B_{10}$	$H_1$	$B_9$	$B_{10}$	$H_1$	$B_9$	$B_{10}$	$H_1$	$B_9$	$B_{10}$	$H_1$	$B_9$	$B_{10}$	$H_1$	$B_9$	$B_{10}$	$H_1$	$B_9$	$B_{10}$
No. 8	1000	400	450	890	400	450	830	400	450	750	400	450	700	400	450	650	400	450	570	470	1080
No. 9	1110	450	500	990	450	500	920	450	500	850	450	500	780	450	500	720	450	500	630	500	1190
No. 10	1220	500	550	1100	500	550	1010	500	550	940	500	550	860	500	550	760	500	550	700	500	1310
No. 11	1335	550	600	1200	550	600	1110	550	600	1020	550	600	940	550	600	850	550	600	760	550	1420
No. 12	1450	600	660	1300	600	660	1210	600	660	1110	600	660	1010	600	660	920	600	660	800	600	1530
No. 14	1700	740	800	1600	1050	800	1440	1050	800	1320	1050	680	1210	1050	800	1100	1050	800	1000	1050	1840
No. 16	1900	850	900	1730	1200	900	1650	1200	900	1510	1200	800	1380	1200	900	1240	1200	900	1150	1200	2100
No. 18	2180	900	1000	1920	1200	1000	1830	1300	950	1680	1200	900	1540	1200	900	1400	1200	650	1260	1000	2400
No. 20	2400	1000	1300	2170	1200	1150	2000	1450	900	1850	1350	1000	1700	1300	1000	1530	1300	800	1350	1100	2600

注：图 13-16 中 No. 18、20 出风口至轴中心线垂直距离分别为 1250、1340。

No. 8~12 机壳为整体（如本图所示），No. 14~16 起吊转子用的约  $\frac{1}{4}$  机壳开箱部分的位置与图 13-16 中（包括轴在内的大面积部分）相同。

图 13-14 中 No. 14、16 出风口至轴中心线的垂直距离分别为 980、1110。



表 13-94 Y4-73 离心引风机性能与选用件

机号 No.	传动 方式	转速 /(r/min)	序号	流量 /(m³/h)	全压 /Pa	内效率 /%	内功率 /kW	所需功率 /kW	电动机		联轴器(1套) (ST0103)	地脚螺栓 (4个)	螺母 (4个)	垫圈 (4个)
									型号	功率 /kW				
22	D	960	1	222447	4312	79.4	334	443	△JSQ1410-6	250	TL13 $\frac{110 \times 215}{160 \times 305}$	M36 × 1000	M36	36
			2	251197	4293	83.2	359	476						
			3	281469	4250	85.7	387	513						
			4	310219	4138	87	409	534	JSQ158-6	550	TL13 $\frac{120 \times 215}{160 \times 305}$			
			5	338968	3945	86.8	427	566	JSQ1510-6	650				
			6	367718	3683	85.6	438	581	△JSQ157-6	600				
			7	397990	3306	82.8	440	584						
			8	426740	2875	79.4	428	568						
22	D	730	1	169154	2493	79.4	147	195	※JSQ148-8	240	TL10 $\frac{110 \times 215}{160 \times 305}$	M36 × 1000	M36	36
			2	191014	2478	83.2	158	210						
			3	214025	2454	85.7	170	226						
			4	235896	2391	87	180	239						
			5	257756	2280	86.8	188	249	※JSQ1410-8	280				
			6	279616	2125	85.6	193	256						
			7	302637	1912	82.8	194	257						
			8	324498	1660	79.4	189	251						
22	D	580	1	134396	1574	79.4	74	98	△JS136-10	125	TL10 $\frac{110 \times 215}{160 \times 305}$	M36 × 1000	M36	36
			2	151765	1564	83.2	79	105						
			3	170047	1549	85.7	85	113						
			4	187424	1509	87	90	119						
			5	204792	1439	86.8	94	125	△JS137-10	145				
			6	222161	1341	85.6	97	129						
			7	240451	1207	82.8	97	129						
			8	257820	1084	79.4	95	126						

(续)

机号 No.	传动 方式	转速 /(r/min)	序号	流量 /(m³/h)	全压 /Pa	内效率 /%	内功率 /kW	所需功率 /kW	电动机		联轴器(1套) (ST0103)	地脚螺栓 (4个)	螺母 (4个)	垫圈 (4个)	
									型号	功率 /kW					
25	D	730	1	248219	3219	79.4	276	369	△JSQ157-8	440	TL13 $\frac{110 \times 215}{160 \times 305}$	M36 × 1000	M36	36	
			2	280297	3200	83.2	299	397	△JSQ157-8	440					
			3	314063	3169	85.7	322	427		TL13 $\frac{120 \times 215}{160 \times 305}$					
			4	346156	3088	87	341	452	△JSQ158-8						500
			5	378204	2944	86.8	355	471	JSQ1510-8						475
			6	410313	2744	85.6	365	484	※JSQ1512-8						570
			7	444094	2469	82.8	367	487	※JSQ1510-8						475
			8	476172	2144	79.4	357	474							
25	D	580	1	197215	2032	79.4	139	184	△JSQ148-10	230	TL10 $\frac{110 \times 215}{160 \times 305}$	M36 × 1000	M36	36	
			2	222702	2020	83.2	150	199							
			3	249530	2000	85.7	161	214							
			4	275028	1949	87	171	227							
			5	300515	1858	86.8	178	236	JSQ1410-10	280					
			6	326002	1732	85.6	183	243							
			7	352842	1559	82.8	184	244							
			8	378328	1353	79.4	179	237							
25	D	480	1	163212	1392	79.4	79	105	△JSQ147-12	140	TL10 $\frac{110 \times 215}{160 \times 305}$	M36 × 1000	M36	36	
			2	184305	1383	83.2	85	113							
			3	206508	1370	85.7	91	121							
			4	227609	1335	87	97	129							
			5	248702	1273	86.8	101	134							
			6	269795	1186	85.6	104	138							
			7	292007	1068	82.8	104	138							
			8	313099	927	79.4	101	134							

(续)

机号 No.	传动 方式	转速 /(r/min)	序号	流量 /(m³/h)	全压 /Pa	内效率 /%	内功率 /kW	所需功率 /kW	电动机		联轴器(1套) (ST0103)	地脚螺栓 (4个)	螺母 (4个)	垫圈 (4个)
									型号	功率 /kW				
28	D	730	1	348729	4038	79.4	490	650	△TD118/ 41-8	800				
			2	393797	4014	83.2	527	699						
			3	441235	3975	85.7	568	753						
			4	486325	3873	87	601	797						
			5	531392	3693	86.8	626	830	△TD118/ 41-8	1000				
			6	576460	3412	85.6	644	854						
			7	623920	3097	82.8	647	858						
			8	668987	2689	79.4	630	836						
28	D	580	1	277072	2549	79.4	246	326	※TD118/ 44-10	630				
			2	312880	2534	83.2	264	350						
			3	350570	2509	85.7	285	378						
			4	386395	2445	87	301	399						
			5	422202	2331	86.8	314	417						
			6	458009	2173	85.6	323	428						
			7	495717	1955	82.8	325	431						
			8	531524	1697	79.4	316	419						
28	D	480	1	229301	1746	79.4	139	184	△TD118/ 30-12	400				
			2	258935	1736	83.2	150	199						
			3	290127	1718	85.7	162	215						
			4	319775	1675	87	171	227						
			5	349409	1596	86.8	178	236						
			6	379042	1488	85.6	183	242						
			7	401249	1339	82.8	184	244						
			8	439882	1162	79.4	179	237						

(续)

机号 No.	传动 方式	转速 /(r/min)	序号	流量 /(m³/h)	全压 /Pa	内效率 /%	内功率 /kW	所需功率 /kW	电动机		联轴器(1套) (ST0103)	地脚螺栓 (4个)	螺母 (4个)	垫圈 (4个)
									型号	功率 /kW				
29 $\frac{1}{2}$	D	745	1	416211	4668	79.4	790	1048	YLB173/ 41-8/10	1250	1084×4			
			2	467000	4641	83.2	849	1126						
			3	526618	4595	85.7	915	1213						
			4	580432	4478	87	968	1284						
			5	634221	4296	86.8	1009	1338						
			6	688009	3979	85.6	1037	1376						
			7	744653	3580	82.8	1043	1384						
			8	798442	3109	79.4	1015	1346						
29 $\frac{1}{2}$	D	596	1	332969	2988	79.4	404	536	JSZ1180	630	1084×3			
			2	376000	2970	83.2	435	577						
			3	421294	2941	85.7	468	621						
			4	464346	2866	87	496	658						
			5	507377	2732	86.8	517	686						
			6	550407	2547	85.6	531	704						
			7	595723	2291	82.8	534	708						
			8	638753	1990	79.4	520	690						

注：1. Y4-73-11No. 29  $\frac{1}{2}$ -D 系指进气工况为大气压  $p=101325\text{Pa}$ ， $t=130^{\circ}\text{C}$ ， $\rho=0.87\text{kg/m}^3$  时的性能。

2. 性能选用件表中所配用的电动机型号左侧符号，表示对应于该额定容量（kW）时采用电压，※表示 6000V，△表示 3000V，无注角符号表示为低压（380V 或 220V）注角号及电动机型号仅供参考，以电动机样本为准。

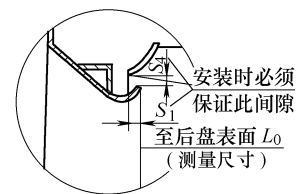


图 13-17  $\frac{G}{Y}4-73-11$  No. 22 单吸入离心锅炉通风机外形及安装尺寸图

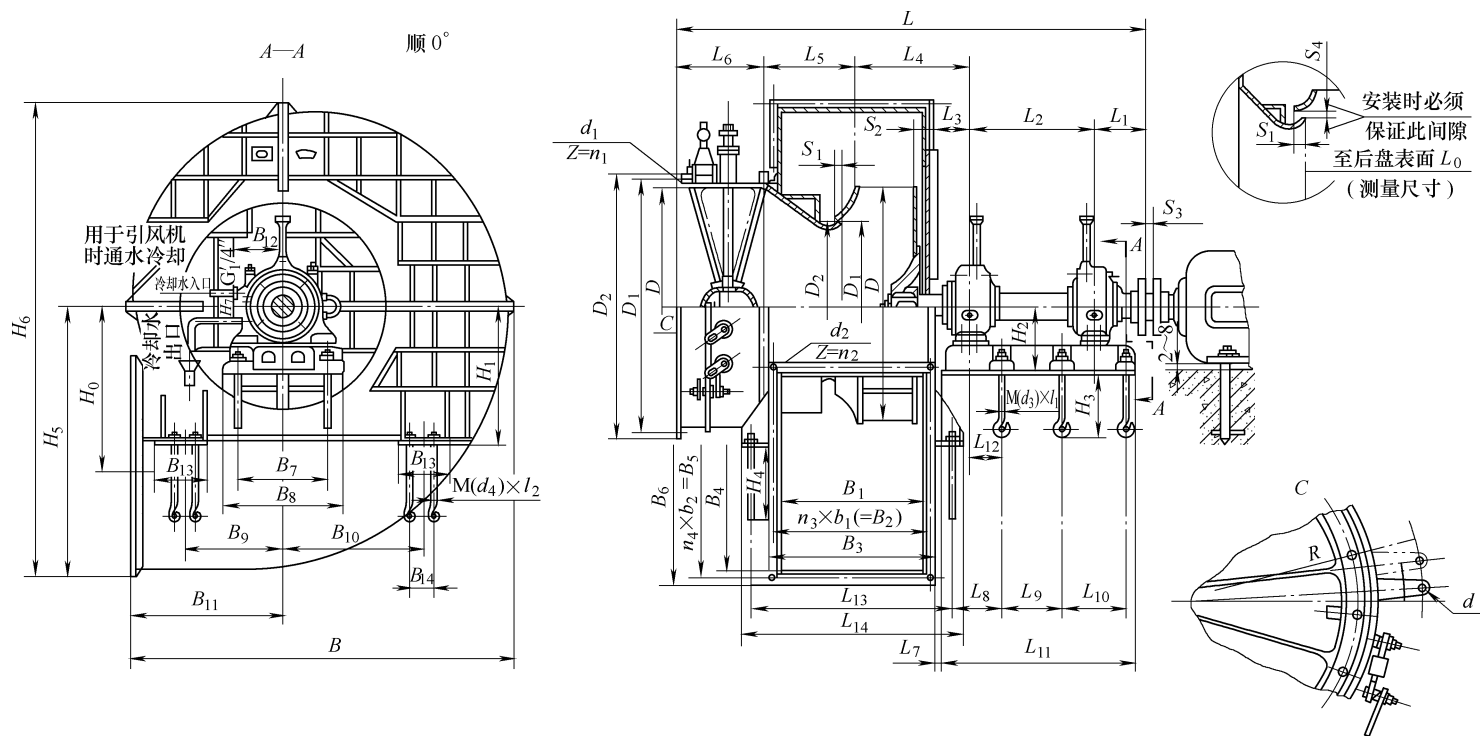


图 13-18  $G_Y^{4-73-11}$  No. 25、28、29  $\frac{1}{2}$  单吸入离心锅炉通风机外形及安装尺寸图

表 13-95  $\frac{G}{Y}4-73-11$  No. 22、25、28、29  $\frac{1}{2}$ 单吸入离心锅炉通风机、引风机外形及安装尺寸

机 号	调节门法兰					出 风 口										安装及外形尺寸						
	D	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	连接螺栓孔		B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	B <sub>6</sub>	连接螺栓孔				D <sub>0</sub>	B	B <sub>7</sub>	B <sub>8</sub>			
				直径	个数							直径	个数	间距								
				d <sub>1</sub>	n <sub>2</sub>									d <sub>2</sub>	n <sub>2</sub>					n <sub>3</sub> × b <sub>1</sub>	n <sub>4</sub> × b <sub>2</sub>	
No. 22	φ2200	φ2320	φ2420	φ19	36	1430	1530	1596	1980	2067	2139	φ19	36	10 × 153	13 × 159	φ1606	3692	960	1110			
No. 25	φ2500	φ2580	φ2660	φ19	36	1625	1755	1814	2250	2376	2459	φ19	42	9 × 195	12 × 198	φ1825	4209	870	990			
No. 28	φ2800	φ2880	φ2960	φ24	36	1820	1975	2084	2532	2688	2796	φ19	44	10 × 197. 5	12 × 224	φ2044	4843	1060	1180			
No. 29 $\frac{1}{2}$	φ2950	φ3070	φ3170	φ24	36	2065	2196	2280	2360	2478	2570	φ19	52	12 × 183	14 × 177	φ2143	4720	1230	1370			
安 装 及 外 形 尺 寸																						
B <sub>11</sub>	B <sub>12</sub>	B <sub>13</sub>	B <sub>14</sub>	H <sub>0</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>	H <sub>4</sub>	H <sub>5</sub>	H <sub>6</sub>	H <sub>7</sub>	L	L <sub>0</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	L <sub>5</sub>	L <sub>6</sub>	L <sub>7</sub>	L <sub>8</sub>	L <sub>9</sub>	L <sub>10</sub>
1456. 5	347	320		1518	500	680	580	2512. 5	4471	150	4437	748	659	1191	369	1084	834	660	263	81	1090	1230
1664. 5	426. 5	420	280	1725	735	680	580	2954. 5	5109	170	4680	850	650	1200	325	1137. 5	951. 5	750	17	267. 5	560	600
1874	483	490	280	1932	830	880	580	3330	5752	170	5377	952	810	1340	403	1313	1068	840	41	243	700	650
1925	486	520	260	2065	830	850	580	3245	5605	170	5517	1003	800	1350	397	1429. 5	1052. 5	885	55	—	1350	320
安 装 及 外 形 尺 寸												叶 轮 重 /kg	转 动 惯 量 /(kg · m <sup>2</sup> )	转 动 轴 承 型 号	风 机 重 (不 包 括 电 动 机)/kg	$\alpha$ $\alpha_1$ $\alpha_2$	R	d				
L <sub>11</sub>	L <sub>12</sub>	L <sub>13</sub>	L <sub>14</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	地脚螺栓														
								M(d <sub>3</sub> ) × l <sub>1</sub>	个数	M(d <sub>4</sub> ) × l <sub>2</sub>	个数											
54	47	2100	2300	22	90	4	3 ~ 5	M36 × 800	4	M30 × 630	4	1600	4240	3638	(G)7580 (Y)8789	15° 12. 5°	1725	25				
1770	280	2300	2500	25	100	5	3	M36 × 800	6	M30 × 630	8	2200	10166	3638	(G)9210 (Y)10460	7°21′	1843	25				
2030	330	2800	3000	28	112	5	3. 5	M42 × 1000	6	M30 × 630	8	3100	13630	3644	(G)17067 (Y)18920	10°	2025	25				
1810		2990	2290	29. 5	118	5	3. 5	M42 × 1000	4	M30 × 630	8	3500		3644	(G)15990 (Y)18460	11°12′	2100	25				

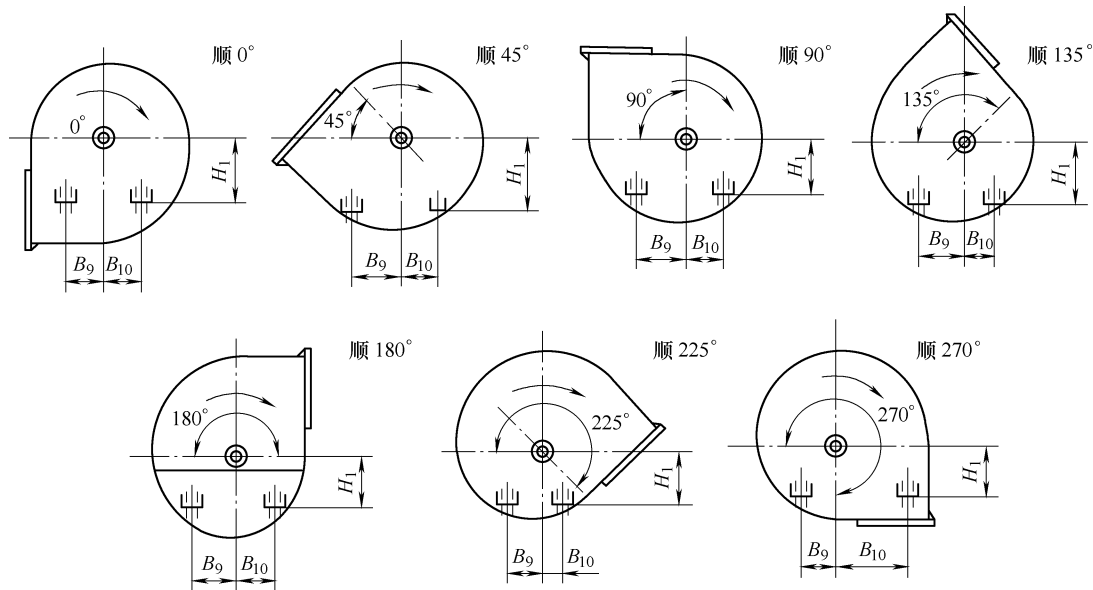


图 13-19  $G_4-73-11$  No. 22、25、28、29  $\frac{1}{2}$  锅炉离心通风机外形安装尺寸图(二)

表 13-96  $G_4-73-11$  No. 22、25、28、29  $\frac{1}{2}$  锅炉离心通风机外形安装尺寸(二)

机号	顺 0°			顺 45°			顺 90°			顺 150°			顺 180°			顺 225°			顺 270°		
	$H_1$	$B_9$	$B_{10}$	$H_1$	$B_9$	$B_{10}$	$H_1$	$B_9$	$B_{10}$	$H_1$	$B_9$	$B_{10}$	$H_1$	$B_9$	$B_{10}$	$H_1$	$B_9$	$B_{10}$	$H_1$	$B_9$	$B_{10}$
No. 22	1500	800	1300	1700	1300	800	1500	1300	800	1600	1300	650	1500	1100	650	1350	1100	650	800	1300	1500
No. 25	1700	1000	1200	2000	1000	900	1700	1300	900	1800	1300	900	1700	1200	700	1700	1200	700	850	1500	1800
No. 28	1800	1400	1000	2200	1400	1000	1800	1400	1000	2200	1400	1000	1800	1400	1000	1800	1400	900	1100	1600	1900
No. 29 $\frac{1}{2}$	1750	1550	200	2130	1100	1600	1300	2230	1500	1880	1800	850	1400	2000	1460	1860	1540	840	1290	1500	2230



6. 常用旋流器

(1) 聚氨酯弹性体的水力旋流器

1) 聚氨酯弹性体的特性：聚氨酯弹性体（PUR）就其物理性能而言可算是橡胶、塑料中的万能材料，其丰富的特性使它拥有广阔的应用范围，成为一种新型的耐磨材料，逐步取代了某些金属、非金属材料。

其中浇注型聚氨酯弹性体（CPUR），具有耐磨、耐腐蚀、抗老化、强度高、硬度范围广、回弹范围宽、易加工、隔声减振、粘接性好等特点，它的承载负荷和抗撕裂性也很优良，在正常情况下，耐磨效果为丁腈橡胶的 5 ~ 10 倍，是高铬铸铁的 6 倍以上，重量轻，无污染，是当今节能降耗的理想材料。其物性指标范围见表 13 - 97。钢制旋流器与聚氨酯旋流器的寿命对比见表 13 - 98。

表 13 - 97 聚氨酯弹性体的物性指标范围

项 目	数据	项 目	数据
密度/(g/cm <sup>3</sup> )	1. 26	机油(70℃ × 72h)/(质量分数,%)	1. 25
邵氏硬度 HA	40 ~ 98	机油(70℃ × 72h)/(体积分数,%)	3. 06
抗张强度/(kg/cm <sup>2</sup> )	300 ~ 500	海水(70℃ × 22h)/(质量分数,%)	0. 2
伸长率/%	300 ~ 650	自来水(70℃ × 48h)/(质量分数,%)	- 0. 63
300% 定伸/(kg/cm <sup>2</sup> )	80 ~ 100	耐酸碱浓度/%	< 30
抗撕强度/(kg/cm <sup>2</sup> )	60 ~ 120	体积电阻(24℃时)/(Ω · cm)	3. 7 × 10 <sup>12</sup>
冲击性/%	< 10	表面电阻(24℃时)/Ω	2. 21 × 10 <sup>12</sup>
低温脆性/℃	< - 70	介电常数(24℃时)ε	7. 58 ~ 9. 25
阿克隆磨耗/(g/1. 61km)	0. 012 ~ 0. 05	介质损耗	0. 11 ~ 0. 2
热老化系数 KI(70℃ × 144h)	0. 96	击穿电压/(kW/m)	21
热老化系数 KI(120℃ × 48h)	0. 83	垂直回弹性/%	> 15
热老化系数 KI(100℃ × 48h)	0. 93	永久变形/%	< 15

表 13 - 98 钢制旋流器与聚氨酯旋流器寿命、成本对比

项 目	钢制旋流器	聚氨酯旋流器	备 注
旋流器柱、锥体使用寿命/h	480	29900	部分聚氨酯旋流器仍在使
沉砂口使用寿命/h	240	2000	
年耗用台数	30	1. 5	6 台同时放矿
年需设备费用/元	27000	3450	台数 × 单价
年耗沉砂口个数	180	26	
后需沉砂口费用/元	3600	1040	
移动和更换沉砂口人工费/元	2560	1120	钢制 320 个工作日/年 聚氨酯 140 个工作日/年

(续)

项 目	钢制旋流器	聚氨酯旋流器	备 注
年需费用/元	33160	5610	
年节约费用/元		27550	
筛板材料	寿 命	价 格	费 用
金属筛板	15 天	1880 元	3.6 万元
聚氨酯筛板	70 天	9720 元	2.9 万元

聚氨酯弹性体是液态固化成型，因此，为制作各种复杂制品提供了方便条件，为我们有价值的共同开发奠定了基础。

2) 聚氨酯水力旋流器（见图 13 - 20），水力旋流器组（整台）（见图 13 - 21），品种多，规格全，应用范围广，在有色、黑色、非金属矿山、选煤、油田钻探、化工、造纸、水利工程，环保等领域应用广泛。主要应用于：分级、超细分级、浓密、脱泥、脱砂、固体回收、水质净化等。

其特点是：分级效率高；使用寿命长；重量轻；安装、维修方便；超细分级无污染。

聚氨酯水力旋流器单机性能见表 13 - 99。

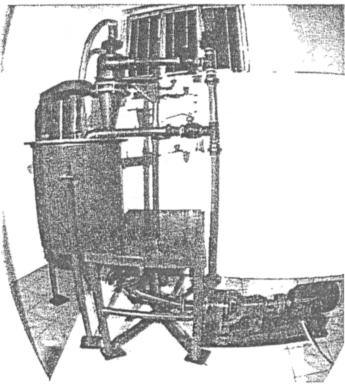


图 13 - 20 聚氨酯水力旋流器

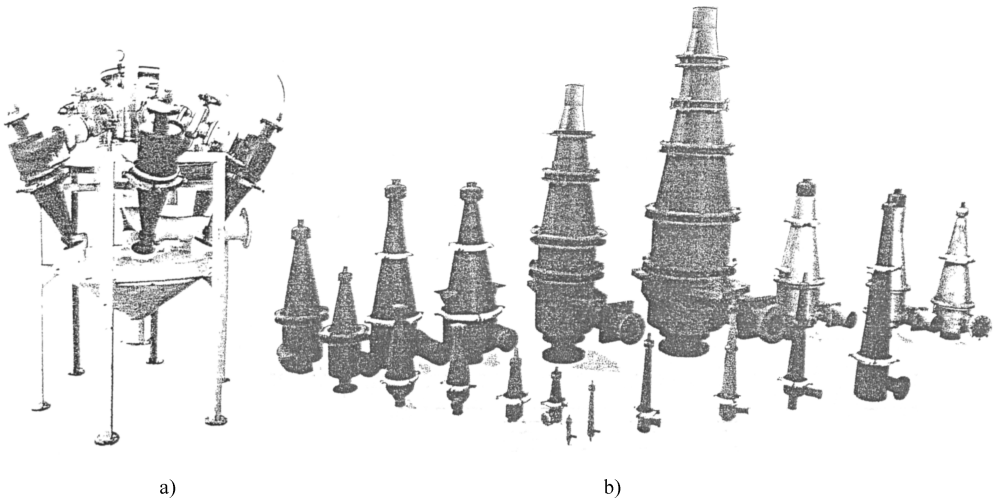


图 13 - 21 水力旋流器组  
a) 整机 b) 旋流器系列

表 13-99 聚氨酯水力旋流器单机性能

型号	亚型	结构参数						允许最大 给料粒度 /mm	给料压力 /MPa	处理能力 /(m <sup>3</sup> /h)	分离粒度 /μm	外形尺寸/mm			单机 重量 /kg
		内径 /mm	柱体高 /mm	给矿口 当量直径 /mm	溢流管径 /mm	沉砂口径 /mm	锥角 /(°)					长	宽	高	
FXJ-660		660	450	179	200. 240	80. 110. 150.	20	20	0. 03 ~ 0. 2	350	74 ~ 220	1250	880	3100	693
FXJ-500	I	500	350	130	140. 150.	35. 50. 70	25	10	0. 03 ~ 0. 3	220	74 ~ 200	1100	820	2050	245
	II		350		160. 180.	90. 110.	20	10			74 ~ 150	1100	820	2455	278
	III		725				20	15			74 ~ 150	1100	820	2870	330
FXJ-350	I	350	365	81	90. 105.	28. 30. 35.	25	6	0. 03 ~ 0. 3	85	50 ~ 200	825	590	2080	161
	II		365		115.	40. 50. 60. 70. 80.	20	7			50 ~ 150	825	590	2000	152
	III		595				20	7			50 ~ 120	825	590	2230	181
FXJ-300	I	300	205	64	55. 65.	18. 20. 25.	20	4. 5	0. 03 ~ 0. 3	60	50 ~ 200	560	400	1214	56
	II		295	75	100. 120. 136.	30. 34. 38. 42.					50 ~ 150	600	400	1214	81
	III		495	75							40 ~ 100	560	400	1420	84
FXJ-250	I	250	245	80	60. 75.	16. 18. 20.	20	3	0. 05 ~ 0. 3	50	40 ~ 100	570	415	1148	47
	II		272	74	80. 95.	24. 28.	20				40 ~ 100	570	415	1172	56
	III		272	74	100. 110.	32. 38. 40.	15				30 ~ 100	570	415	1380	58
FXJ-200	I	200	260	50	55. 65.	16. 20. 24.	20	2	0. 05 ~ 0. 4	30	40 ~ 100	435	355	990	31
	II				75. 85	28. 32.	15	1. 5			30 ~ 100	435	355	1114	36

(续)															
型号	亚型	结 构 参 数						允许最大 给料粒度 /mm	给料压力 /MPa	处理能力 /(m <sup>3</sup> /h)	分离粒度 /μm	外形尺寸/mm			单机 重量 /kg
		内径 /mm	柱体高 /mm	给矿口 当量直径 /mm	溢流管径 /mm	沉砂口径 /mm	锥角 /(°)					长	宽	高	
FXJ-150	I	150	180	39	25. 30. 40. 50.	8. 12. 14. 16. 18. 20. 22. 24.	20	1. 5	0. 05 ~ 0. 4	15	30 ~ 100	380	345	782	16
	II		200				15				20 ~ 74	290	270	953	15
	III		175				8				20 ~ 74	290	270	1430	17
FXJ-125	I	125	200	26	30. 35. 38.	8. 10. 12. 14. 16.	15	1	0. 05 ~ 0. 4	9	20 ~ 100	250	240	580	10
	II						8				20 ~ 74	250	240	973	11
FXJ-100	I	100	74	23	20. 25. 30. 35. 40.	8. 10. 12. 14. 16.	20	1	0. 05 ~ 0. 4	6. 5	20 ~ 100	257	210	510	6
	II						15				10 ~ 100	257	210	575	5
	III						8				10 ~ 74	257	210	829	6
FXJ-75	I	75	90	13	15. 17. 20. 22.	6. 7. 8. 10. 12. 13.	15	0. 6	0. 1 ~ 0. 4	2. 5	20 ~ 74	240	230	459	4
	II						7				5 ~ 40	240	230	700	4. 5
FXJ-50	I	50	72	9	11. 13. 15. 18.	4. 6. 7. 8. 10.	15	0. 3	0. 1 ~ 0. 4	1. 0	10 ~ 74	160	152	345	2
	II						6				5 ~ 30	160	152	587	2. 5
FXJ-25		25	35	5	5. 6. 7. 8.	3. 4. 5.	5	0. 2	0. 1 ~ 0. 5	0. 3	3 ~ 10	75	65	327	0. 3
FXJ-10		10	18	3	2. 3.	1 ~ 2	5	0. 1	0. 1 ~ 0. 6	0. 06	1 ~ 5	60	50	160	0. 1

注：表中处理能力为给料压力为0. 1MPa、溢流管直径为中间值时的处理能力。处理能力随溢流管直径和给料压力的均方根而变化。

(2) 其他旋流器

1) 高耐磨筛网旋流器 (见图 13-22) 主要用在选 (洗) 煤厂浮选配套工艺、油田钻探、选矿等过程中, 用于煤泥水浮选前脱除不易浮选的粗颗粒和减少微泥含量, 亦可用于其他固体物料的产品分级。可以提高分级效率, 浮选精度, 降低灰粉等。

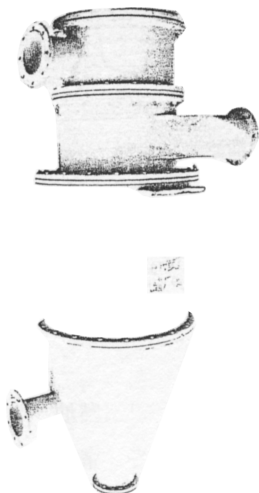


图 13-22 高耐磨筛网旋流器

其性能参数见表 13-100。

表 13-100 高耐磨筛网旋流器性能参数

型号	结 构 参 数								给料压力 /MPa	处理能力 /(m <sup>3</sup> /h) (给矿压力为 0.1MPa 时)	外形尺寸 (长×宽×高) /mm
	圆筛直 径/mm	圆筛高 /mm	筛缝 /mm	给料口 /mm	溢流管 径/mm	筛下排 料口径 /mm	沉砂口 径/mm	锥角 /(°)			
XSJ-500	500	700	0.5 或 0.75	140×70	150	150	100	25	0.05~0.2	250	1100×880×2368
XSJ-300	300	410	0.3 或 0.5	85×40	80	80	70,80	25	0.05~0.2	90	760×600×1456

2) 重介质水力旋流器 (见图 13-23) 主要用于重介选煤厂分选 0~0.5mm、0.5~20mm 的原煤, 与水平面呈一定角度安装, 新的重介旋流器可生产三种产品: 有色和黑色金属矿石、金刚石和磷矿石以及煤炭。

其性能参数见表 13-101。

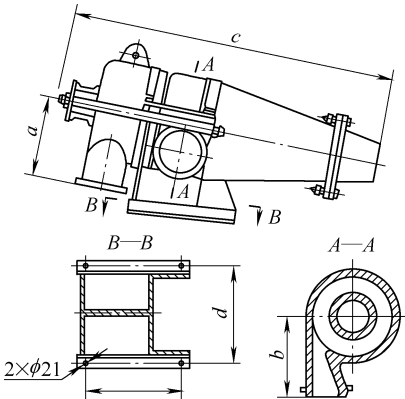


图 13-23 重介质旋流器安装示意图

表 13-101 重介质水力旋流器性能参数

型号	结构参数						允许给料 最大粒度 /mm	给料压力/MPa	处理能力(当给矿 压力为 0.1MPa、 溢流管径为中间值)		外形尺寸 (长×宽×高) /mm
	内径 /mm	柱体 高 /mm	给料口 /mm	溢流 管径 /mm	沉砂口径 /mm	锥角 /(°)			m³/h	t(干料)/h	
FZJ-700	700	500	200×120	250	160、180、200	20	50	0.05~0.2	300	70	980×980×2500
FZJ-600	600	450	180×100	220	120、140、180	20	40	0.05~0.2	230	55	870×870×2260
FZJ-500	500	400	150×80	180	80、100、120	20	25	0.05~0.2	150	40	760×760×2000
FZJ-350	350	300	100×60	125	40、55、70	20	10	0.05~0.2	60	15	570×570×1500

3) 耐磨水介质旋流器主要用于选煤厂除去 0~0.5mm 末煤中以黄铁矿形式存在的硫, 亦可作为分级旋流器在砂金矿的粗选使用, 目前正在发展之中。

其性能参数见表 13-102。

表 13-102 耐磨水介质旋流器性能参数

型号	结构参数						允许给料 最大粒度 /mm	给料压 力/MPa	处理能力(当给矿 压力为 0.1MPa、 溢流管径为中间值)		外形尺寸 (长×宽×高) /mm
	内径 /mm	柱体 高 /mm	给料口 /mm	溢流 管径 /mm	沉砂口 径/mm	锥角 /(°)			m³/h	t(干料)/h	
FSJ-610	610	600	108×108	305	127	75	1	0.05~0.1	260	45	1100×780×1600
FSJ-510	510	530	89×89	216	102	75	1	0.05~0.1	180	27	900×650×1300
FSJ-360	360	400	64×64	152	51	75	1	0.05~0.1	95	14	650×500×950

三种旋流器的主要特点: 分级效率高: 远高于普通水力旋流器的分级效率, 可高出 20%~30%; 耐磨寿命长: 采用耐磨蚀的聚氨酯材质; 处理量大: 是同种型号水力旋流器处理量的 1.5 倍以上; 适用性广: 可适用于不同的选煤、选矿工艺流程。

7. 常用三叶罗茨鼓风机 (见图 13-24)

(1) 工作原理 罗茨风机为容积式风机, 输送的风量与转数成比例, 三叶型叶轮每转动一次由 2 个叶轮进行 3 次吸、排气, 与二叶型相比, 气体脉动变少, 负荷变化小, 机械强度高, 噪声低, 振动也小。

在 2 根相平行的轴上设有 2 个三叶型叶轮, 叶轮与椭圆形机箱内孔面及各叶轮三

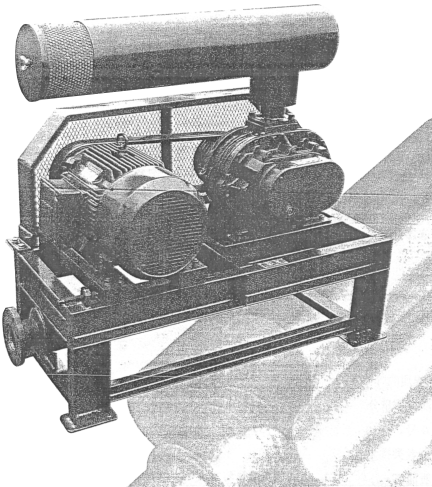


图 13-24 三叶罗茨鼓风机

者之间始终保持微小的间隙, 由于叶轮互为反方向匀速旋转, 使箱体和叶轮所包围着的一定量的气体由吸入的一侧输送到排出的一侧。风机工作原理如图 13-25 所示, 风机结构如图 13-26 所示。

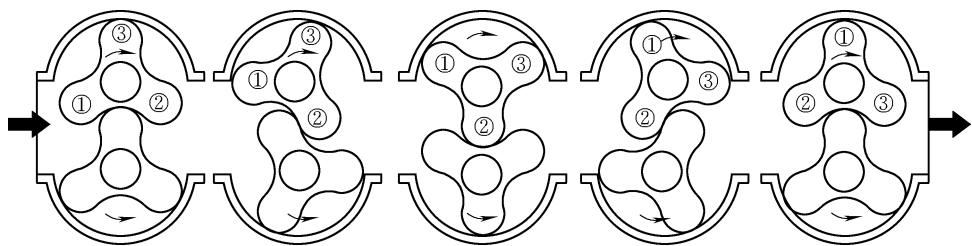


图 13-25 工作原理图

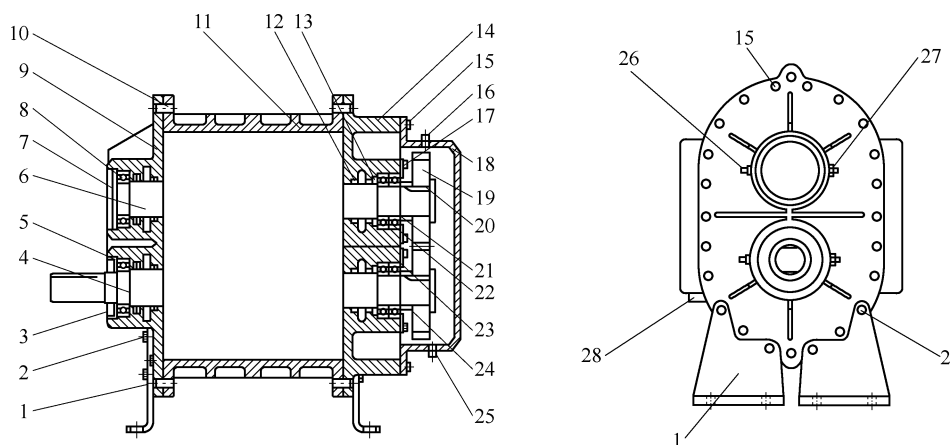


图 13-26 风机结构图

- 1—底角 2、15、17—六角螺栓 3—防尘密封圈 4—主动叶轮 5、8、22—轴承 6—从动叶轮  
7—防尘盖 9—驱动端盖 10—内螺纹圆柱销 11—缸体 12、13—油封 14—齿轮端盖  
16—呼吸器 18—齿轮罩 19—齿轮 20—圆头平键 21—轴向定位套 23—轴承压板  
24—调整垫 25—磁性堵头 26—泄油嘴 27—润滑油嘴 28—放油堵

各叶轮始终由同步齿轮保持正确的相位, 不会出现互相触碰现象, 因而可以高速化, 不需要内部润滑, 而且结构简单, 运转平稳, 性能稳定, 适应多种用途, 已运用于广泛的领域。

(2) 风机性能 (见表 13-103)

(3) 风机噪声曲线 (见图 13-27)

表 13-103 三叶罗茨风机性能参数

型号	排风口径		转速 /(r/min)	不同压力下的吸入口风量 (m <sup>3</sup> min) 及轴功率 (kW)															
				0.1kgf/cm <sup>2</sup>		0.2kgf/cm <sup>2</sup>		0.3kgf/cm <sup>2</sup>		0.4kgf/cm <sup>2</sup>		0.5kgf/cm <sup>2</sup>		0.6kgf/cm <sup>2</sup>		0.7kgf/cm <sup>2</sup>		0.8kgf/cm <sup>2</sup>	
				1000mmH <sub>2</sub> O		2000mmH <sub>2</sub> O		3000mmH <sub>2</sub> O		4000mmH <sub>2</sub> O		5000mmH <sub>2</sub> O		6000mmH <sub>2</sub> O		7000mmH <sub>2</sub> O		8000mmH <sub>2</sub> O	
				0.01MPa		0.02MPa		0.03MPa		0.04MPa		0.05MPa		0.06MPa		0.07MPa		0.08MPa	
	mm	in		m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW
BK5003	65	2.5	850	2.23	0.85	1.94	1.44	1.73	2.08	1.60	2.69	1.35	3.30	1.15	4.02				
			1000	2.89	1.00	2.50	1.71	2.30	2.44	2.20	3.15	1.95	3.88	1.70	4.72	1.60	5.47		
			1150	3.39	1.15	3.17	1.97	2.98	2.81	2.80	3.62	2.50	4.47	2.46	5.34	2.20	6.29		
			1250	3.72	1.25	3.53	2.14	3.38	3.05	3.28	4.05	2.90	4.86	2.80	5.76	2.66	6.84		
			1350	4.13	1.35	3.93	2.30	3.75	3.29	3.65	4.27	3.30	5.24	3.19	6.22	3.03	7.38		
			1500	4.72	1.51	4.52	2.55	4.33	3.65	4.22	4.61	3.95	5.82	3.74	6.90	3.62	8.20	3.44	9.40
			1600	5.19	1.61	4.89	2.72	4.74	3.99	4.60	4.85	4.35	6.21	4.00	7.36	3.99	8.75	3.84	9.96
			1750	5.70	1.76	5.54	2.98	5.36	4.50	5.25	5.20	4.94	6.80	4.70	8.05	4.60	9.57	4.45	10.80
			1850	6.03	1.86	5.80	3.15	5.61	4.80	5.50	5.75	5.30	7.18	5.06	8.51	4.90	10.22		
			2000	6.51	2.00	6.31	3.41	6.20	5.35	5.95	6.31	5.75	7.76	5.50	9.21	5.30	11.20		
BK5006	100	4	850	4.07	1.29	3.68	2.28	3.33	3.27	3.15	4.36	2.80	5.37	2.40	6.41				
			1000	5.07	1.31	4.71	2.68	4.34	3.90	4.30	5.11	3.90	6.34	3.56	7.55	3.21	8.61		
			1150	5.95	1.51	5.70	3.08	5.31	4.49	5.30	5.88	4.90	7.29	4.52	8.68	4.22	9.90		
			1250	6.62	1.64	6.25	3.35	6.10	4.88	5.92	6.39	5.60	7.93	5.17	9.44	4.86	10.77		
			1350	7.35	1.88	7.06	3.62	6.78	5.27	6.68	6.91	6.26	8.56	5.92	10.20	5.60	11.84		
			1500	8.51	2.25	8.18	4.03	7.98	5.85	7.86	7.68	7.45	9.50	7.07	11.33	6.81	13.45		
			1600	9.14	2.40	8.80	4.30	8.65	6.24	8.45	8.19	8.05	9.90	7.50	12.09	7.25	14.27		
			1750	10.10	2.63	9.84	5.52	9.47	6.83	9.27	8.96	8.98	10.50	8.76	13.22	8.20	15.50		
			1850	10.90	2.78	10.60	5.85	10.20	7.22	9.80	9.47	9.50	11.37	9.20	14.32				
			2000	11.75	3.01	11.50	6.00	11.20	7.80	10.80	10.24	10.40	12.68	10.10	15.96				



(续)

型号	排风口径		转速 /(r/min)	不同压力下的吸入口风量 (m <sup>3</sup> min) 及轴功率 (kW)															
				0.1kgf/cm <sup>2</sup>		0.2kgf/cm <sup>2</sup>		0.3kgf/cm <sup>2</sup>		0.4kgf/cm <sup>2</sup>		0.5kgf/cm <sup>2</sup>		0.6kgf/cm <sup>2</sup>		0.7kgf/cm <sup>2</sup>		0.8kgf/cm <sup>2</sup>	
				1000mmH <sub>2</sub> O		2000mmH <sub>2</sub> O		3000mmH <sub>2</sub> O		4000mmH <sub>2</sub> O		5000mmH <sub>2</sub> O		6000mmH <sub>2</sub> O		7000mmH <sub>2</sub> O		8000mmH <sub>2</sub> O	
				0.01MPa		0.02MPa		0.03MPa		0.04MPa		0.05MPa		0.06MPa		0.07MPa		0.08MPa	
	mm	in		m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW
BK5009	100	4	850	5.80	1.77	5.40	3.25	5.26	4.75	5.04	6.26	4.60	8.04						
			1000	7.30	2.20	6.90	3.81	6.70	5.59	6.40	7.37	6.10	8.86						
			1150	8.94	2.53	8.45	4.15	8.19	6.42	7.79	8.47	7.42	10.19						
			1250	9.79	2.75	9.29	4.38	8.90	6.98	8.71	9.21	8.30	11.08						
			1350	10.91	2.94	10.46	5.05	10.10	7.69	9.80	10.14	9.65	12.41						
			1500	12.20	3.13	11.80	5.72	11.62	8.39	11.30	11.06	11.00	13.73						
			1600	13.00	3.34	12.60	6.10	12.40	8.95	12.16	11.80	11.79	14.65						
			1750	14.04	3.65	13.65	6.68	13.55	9.78	13.45	12.90	12.98	16.02						
			1850	15.03	3.85	14.58	7.06	14.63	11.10	14.31	13.63	13.87	16.92						
			2000	17.00	4.16	16.50	7.62	16.00	11.90	15.60	14.73	15.20	18.28						
BK6005	80	3	850	3.90	1.48	3.50	2.55	3.20	3.68	2.90	4.82	2.60	5.93	2.40	7.07	2.20	8.10		
			1000	4.90	1.74	4.60	3.00	4.30	4.33	4.00	5.65	3.65	6.98	3.45	8.31	3.30	9.50	3.10	10.30
			1150	6.00	2.00	5.70	3.45	5.40	5.07	5.10	6.50	4.80	8.03	4.50	9.56	4.40	11.20	4.20	12.00
			1250	6.70	2.18	6.40	3.75	6.20	5.57	5.90	7.07	5.50	8.73	5.30	10.40	5.22	12.20	5.00	13.20
			1400	7.87	2.44	7.56	4.60	7.20	6.12	6.99	7.92	6.65	9.77	6.40	11.20	6.32	13.00	6.08	15.20
			1500	8.51	2.61	8.20	5.20	7.94	6.49	7.72	8.48	7.42	10.47	7.20	12.20	7.05	14.20	6.80	15.90
			1650	9.50	2.87	9.17	5.70	8.90	7.60	8.60	9.32	8.20	11.52	8.00	13.71	7.80	16.00	7.50	17.30
			1800	10.46	3.13	10.13	6.40	9.90	8.14	9.60	10.19	9.10	12.58	8.90	15.20	8.70	17.50		

(续)

型号	排风口径		转速 /(r/min)	不同压力下的吸入口风量(m <sup>3</sup> min)及轴功率(kW)															
				0.1kgf/cm <sup>2</sup>		0.2kgf/cm <sup>2</sup>		0.3kgf/cm <sup>2</sup>		0.4kgf/cm <sup>2</sup>		0.5kgf/cm <sup>2</sup>		0.6kgf/cm <sup>2</sup>		0.7kgf/cm <sup>2</sup>		0.8kgf/cm <sup>2</sup>	
				1000mmH <sub>2</sub> O		2000mmH <sub>2</sub> O		3000mmH <sub>2</sub> O		4000mmH <sub>2</sub> O		5000mmH <sub>2</sub> O		6000mmH <sub>2</sub> O		7000mmH <sub>2</sub> O		8000mmH <sub>2</sub> O	
				0.01MPa		0.02MPa		0.03MPa		0.04MPa		0.05MPa		0.06MPa		0.07MPa		0.08MPa	
	mm	in		m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW
BK6008	125	5	850	7.68	2.17	7.20	3.91	6.85	5.71	6.43	7.51	5.81	9.31	5.50	11.12	5.00	12.50		
			1000	9.60	2.56	8.90	4.58	8.70	6.71	8.47	8.83	7.90	10.50	7.50	13.08	7.06	15.20	6.44	17.30
			1150	11.21	2.94	10.80	5.26	10.52	7.72	10.12	10.16	9.70	12.43	9.40	15.05	8.68	16.50	8.13	18.80
			1250	12.29	3.20	11.87	5.72	11.60	8.39	11.23	11.04	10.80	13.71	10.50	16.36	9.76	18.20	9.22	20.80
			1400	13.84	3.59	13.60	6.41	13.34	9.40	13.14	12.37	12.73	15.35	12.37	18.97	12.03	20.40		
			1500	15.10	3.85	14.80	6.87	14.60	10.07	14.42	13.25	14.11	16.44	13.60	19.62	13.20	22.20		
			1650	16.50	4.24	16.20	7.56	15.90	11.20	15.70	14.57	15.50	18.00	15.10	21.58	14.80	24.20		
			1800	18.00	4.61	17.70	8.26	17.40	12.08	17.20	15.90	16.90	19.73	16.60	23.50				
BK6015	150	6	850	14.56	3.83	13.20	7.07	12.40	10.45	11.50	13.85	10.60	17.24						
			1000	17.77	4.51	16.80	8.31	16.00	12.30	15.20	16.28	14.20	19.93						
			1150	21.57	5.19	20.25	9.56	19.18	14.14	18.40	18.72	17.50	22.92						
			1250	23.60	5.64	22.31	10.40	21.07	15.37	20.80	20.35	20.50	24.91						
			1400	27.01	6.31	25.69	11.64	24.77	17.22	24.04	22.79	23.00	28.18						
			1500	29.00	6.76	27.94	12.46	27.00	18.45	26.20	24.42	25.40	30.36						
			1650	32.06	7.44	31.20	13.71	30.50	20.29	29.70	26.86	29.10	33.40						
			1800	36.00	8.12	34.80	14.96	33.50	22.14	32.70	29.31	32.00	36.00						

(续)

型号	排风口径		转速 (r/min)	不同压力下的吸入口风量 (m <sup>3</sup> /min) 及轴功率 (kW)															
				0.1kgf/cm <sup>2</sup>		0.2kgf/cm <sup>2</sup>		0.3kgf/cm <sup>2</sup>		0.4kgf/cm <sup>2</sup>		0.5kgf/cm <sup>2</sup>		0.6kgf/cm <sup>2</sup>		0.7kgf/cm <sup>2</sup>		0.8kgf/cm <sup>2</sup>	
				1000mmH <sub>2</sub> O		2000mmH <sub>2</sub> O		3000mmH <sub>2</sub> O		4000mmH <sub>2</sub> O		5000mmH <sub>2</sub> O		6000mmH <sub>2</sub> O		7000mmH <sub>2</sub> O		8000mmH <sub>2</sub> O	
				0.01MPa		0.02MPa		0.03MPa		0.04MPa		0.05MPa		0.06MPa		0.07MPa		0.08MPa	
	mm	in		m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW
BK7006	100	4	700	5.60	1.89	5.30	3.48	5.00	5.05	4.80	6.64	4.43	8.22	3.80	9.80	3.60	11.4		
			850	7.40	2.31	7.10	4.23	6.80	6.15	6.60	8.07	6.30	9.99	5.80	11.91	5.50	13.84		
			1000	9.20	2.73	8.90	4.98	8.70	7.25	8.40	9.50	8.17	11.76	7.80	14.02	7.40	16.28	7.22	18.2
			1150	10.90	3.14	10.70	5.73	10.43	8.34	10.20	10.93	9.87	13.52	9.50	16.13	9.20	17.50	8.98	20.5
			1250	12.10	3.41	11.80	6.23	11.60	9.06	11.40	11.88	11.00	14.70	10.64	17.53	10.40	20.36	10.16	22.5
			1400	13.93	3.81	13.65	6.98	13.35	10.15	13.18	13.30	12.84	16.46	12.41	19.63	12.20	22.54		
			1500	15.01	4.08	14.79	7.48	14.55	10.87	14.36	14.25	14.06	17.64	13.59	21.03	13.40	24.00		
BK7011	150	6	700	11.40	3.25	11.10	6.14	10.80	9.04	10.50	11.95	10.20	14.85	9.2	17.73	8.00	19.00		
			850	15.15	3.93	14.45	7.45	13.95	10.97	13.57	14.50	13.50	18.02	13.00	21.54	11.71	23.20		
			1000	18.90	4.61	18.25	8.76	17.65	12.90	17.37	17.05	16.83	21.19	16.50	25.35	15.66	27.00		
			1150	21.85	5.30	21.21	10.07	20.90	14.84	20.66	19.61	20.20	24.37	19.50	29.00	18.86	31.20		
			1250	23.74	5.76	23.50	10.95	23.20	16.13	22.85	21.31	22.21	26.49	21.40	31.69	20.99	34.00		
			1400	27.17	6.46	26.85	12.26	26.50	18.06	26.23	23.87	25.82	29.68	25.12	35.54				
			1500	29.46	6.92	29.20	13.13	28.90	19.35	28.48	25.58	28.22	31.80	27.50	38.10				
BK7018	200	8	700	18.80	5.04	17.60	9.82	16.40	14.55	15.60	19.31	14.60	21.40						
			850	24.46	6.15	23.20	11.93	22.00	17.69	21.60	23.46	20.60	26.20						
			1000	30.10	7.26	29.10	14.04	27.60	20.83	26.80	27.61	25.60	31.00						
			1150	35.00	8.35	34.00	16.15	33.00	23.95	32.44	30.50	31.10	35.70						
			1250	38.60	9.08	37.60	17.55	36.80	26.03	36.20	33.80	35.30	40.00						
			1400	44.00	10.16	43.00	20.00	41.90	29.16	41.20	38.20	40.20	44.00						
			1500	47.30	10.88	46.10	21.50	45.00	31.25	44.10	41.42	43.20	47.50						

(续)

型号	排风口径		转速 /(r/min)	不同压力下的吸入口风量(m <sup>3</sup> min)及轴功率(kW)															
				0.1kgf/cm <sup>2</sup>		0.2kgf/cm <sup>2</sup>		0.3kgf/cm <sup>2</sup>		0.4kgf/cm <sup>2</sup>		0.5kgf/cm <sup>2</sup>		0.6kgf/cm <sup>2</sup>		0.7kgf/cm <sup>2</sup>		0.8kgf/cm <sup>2</sup>	
				1000mmH <sub>2</sub> O		2000mmH <sub>2</sub> O		3000mmH <sub>2</sub> O		4000mmH <sub>2</sub> O		5000mmH <sub>2</sub> O		6000mmH <sub>2</sub> O		7000mmH <sub>2</sub> O		8000mmH <sub>2</sub> O	
				0.01MPa		0.02MPa		0.03MPa		0.04MPa		0.05MPa		0.06MPa		0.07MPa		0.08MPa	
	mm	in		m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW
BK8016	200	8	700	23.30	7.10	22.20	12.40	21.40	14.20	20.70	18.00	19.70	22.30	18.90	26.00				
			850	27.50	8.00	26.50	14.60	25.60	18.80	24.70	22.20	23.80	25.90	22.70	33.00				
			1000	31.20	9.50	30.00	15.10	29.00	21.00	28.00	25.90	27.00	31.30	26.00	37.80	25.00	42.10	24.00	48.60
			1150	35.80	10.10	34.60	16.90	33.60	24.00	32.50	30.50	31.50	36.00	30.50	43.20	29.50	50.10	28.50	57.20
			1250	39.10	11.50	37.90	18.20	36.80	26.00	35.40	33.50	34.20	39.80	33.20	49.00	31.20	54.00	30.50	62.00
			1400	43.20	12.80	42.00	21.20	40.60	29.00	39.50	37.20	38.40	44.50	37.20	52.60	36.20	62.00	35.40	68.80
			1500	46.60	14.50	45.40	23.00	44.10	32.00	43.00	41.00	41.80	49.00	40.60	57.40	39.60	66.50	38.60	72.80
BK8024	250	10	700	33.00	11.20	31.50	16.20	30.30	21.60	29.20	27.50	28.00	34.20	27.00	44.10				
			850	38.80	12.00	37.30	18.60	36.10	25.00	34.90	31.20	33.80	39.50	32.80	53.00				
			1000	44.50	14.00	43.00	20.80	41.80	28.00	40.60	35.20	39.60	44.20	38.70	61.20				
			1150	51.00	16.10	49.50	23.90	48.20	31.70	47.00	40.50	46.00	53.40	45.20	70.80				
			1250	56.00	17.80	54.50	25.60	53.30	35.20	52.10	45.20	51.00	61.00	50.00	77.80				
			1400	62.00	19.10	60.00	28.00	58.50	39.00	57.20	49.20	56.90	68.30	55.80	84.60				
			1500	68.20	20.80	66.50	32.00	65.00	46.20	63.50	55.20	62.20	72.30	61.00	90.60				
BK9020	250	10	700	38.50	12.50	36.70	18.80	35.90	25.60	35.00	32.80	34.10	40.60	33.20	53.50				
			850	46.40	14.30	45.20	21.80	44.00	30.20	42.80	36.60	41.60	47.80	40.60	64.20				
			1000	51.60	16.40	50.50	24.70	49.40	32.90	48.30	41.00	47.30	54.20	46.20	70.10	45.20	81.60	44.00	93.00
			1150	60.00	18.90	59.00	27.20	58.00	38.30	56.80	50.10	55.70	63.90	54.60	80.20	53.20	91.00	52.10	102.00
			1250	64.70	19.80	63.70	30.80	62.70	42.60	61.60	58.60	60.40	72.00	59.10	87.20	58.00	95.80	56.90	112.00
			1400	72.80	22.20	71.50	34.80	70.20	48.40	69.00	60.00	67.80	77.60	66.70	94.00	65.60	108.20	64.60	121.80
			1500	78.60	23.80	77.20	37.80	76.00	51.20	74.60	68.60	73.20	83.60	72.20	104.10	71.20	120.00	70.10	134.00
BK9030	300	12	700	58.00	17.50	56.00	27.00	54.50	38.20	53.00	47.80	51.50	58.20	50.50	69.10				
			850	70.20	21.00	68.20	33.00	66.20	46.50	64.30	58.10	62.80	70.10	61.80	84.20				
			1000	81.00	24.00	78.00	37.50	76.00	54.00	73.90	67.00	72.40	82.00	71.40	98.00				
			1150	93.50	27.20	90.50	44.00	88.50	62.00	86.50	78.00	85.00	96.00	84.00	114.00				
			1250	101.20	29.60	98.20	48.20	96.10	68.20	94.10	85.20	91.80	103.60	90.80	123.20				
			1400	112.00	33.20	109.00	52.20	107.00	76.20	105.00	95.20	103.00	116.20	101.50	137.60				
			1500	120.00	36.00	117.00	57.00	114.00	82.00	112.00	101.80	110.00	124.10	108.00	148.30				

(续)

型号	排风口径		转速 /(r/min)	不同压力下的吸入口风量 (m <sup>3</sup> min) 及轴功率(kW)															
				0.1kgf/cm <sup>2</sup>		0.2kgf/cm <sup>2</sup>		0.3kgf/cm <sup>2</sup>		0.4kgf/cm <sup>2</sup>		0.5kgf/cm <sup>2</sup>		0.6kgf/cm <sup>2</sup>		0.7kgf/cm <sup>2</sup>		0.8kgf/cm <sup>2</sup>	
				1000mmH <sub>2</sub> O		2000mmH <sub>2</sub> O		3000mmH <sub>2</sub> O		4000mmH <sub>2</sub> O		5000mmH <sub>2</sub> O		6000mmH <sub>2</sub> O		7000mmH <sub>2</sub> O		8000mmH <sub>2</sub> O	
	0.01MPa			0.02MPa		0.03MPa		0.04MPa		0.05MPa		0.06MPa		0.07MPa		0.08MPa			
mm	in	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW	m <sup>3</sup> /min	kW		
BK10027	300	12	850	80.60	24.90	78.70	37.90	76.50	52.50	74.40	63.60	72.30	83.10	70.70	111.60				
			900	85.30	26.40	83.20	40.20	81.00	55.50	78.80	67.40	76.50	88.00	74.90	118.20				
			1000	89.80	28.50	87.80	43.00	85.90	57.30	84.10	71.40	82.20	94.30	80.30	121.90	78.70	141.90	76.50	161.80
			1100	98.80	31.30	96.60	47.30	94.50	63.40	92.50	78.50	90.40	103.70	88.30	134.10	86.50	156.10	84.20	178.00
			1250	112.60	34.40	110.80	53.50	109.10	74.10	107.20	93.90	105.10	125.30	102.80	151.70	101.00	166.70	99.00	194.90
			1400	126.50	38.60	124.30	60.60	122.10	84.20	120.00	104.50	117.90	135.00	116.00	163.20	114.10	188.20	112.30	211.80
BK10034	350	14	850	103.60	31.00	100.70	48.70	97.80	68.70	95.00	85.80	92.70	103.50	91.30	124.30				
			900	109.70	32.80	106.60	51.60	103.60	72.70	100.60	90.80	98.20	109.60	96.70	131.60				
			1000	119.60	35.40	115.20	55.40	112.20	79.70	109.10	98.90	106.90	121.10	105.40	144.70				
			1100	131.60	38.90	126.70	60.90	123.40	87.70	120.00	108.80	117.60	133.20	115.90	159.20				
			1250	149.40	43.70	145.00	71.20	141.90	100.70	139.00	125.80	135.60	153.00	134.10	181.90				
			1400	165.40	49.00	161.00	77.10	158.00	112.50	155.00	140.60	152.10	171.60						

注：1. 表中所示的风量为标准状态的风量。

2. 表示基准状态的风量时风量以 m<sup>3</sup>/min 单位表示

3. 一般风量的表示有如下三种：

1) 标准状态风量——温度 20℃、绝对压力 760mmHg (101.3kPa)、相对湿度 65% 状态下的风量。

2) 吸入状态风量——吸入温度、压力、湿度状态下的表示值。

3) 基准状态风量——温度 0℃、绝对压力 760mmHg (101.3kPa) 时的干燥气体状态下的风量。

以上三种风量可以换算。

如 Q<sub>1</sub> 换算为 Q<sub>2</sub> 时：

$$Q_2 = Q_1 \times \frac{p_1}{p_2} \times \frac{T_2}{T_1}$$

Q<sub>1</sub>：绝对压力 p<sub>1</sub>(mmH<sub>2</sub>O) 绝对温度 T<sub>1</sub>(K) 状态的风量 (m<sup>3</sup>/min)；

Q<sub>2</sub>：绝对压力 p<sub>2</sub>(mmH<sub>2</sub>O) 绝对温度 T<sub>2</sub>(K) 状态的风量 (m<sup>3</sup>/min)。

4. 表中所示的动力为电动装置的驱动动力，包括在内的需要动力，因此在选定电动机时不必再加系数。

动力（输出功率，kW）按以下式求得

$$p = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos\varphi \times P_d \times 10^{-3}$$

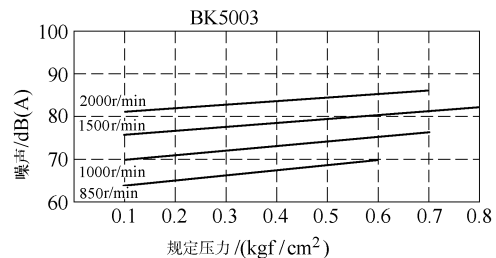
式中 U——电压；

I——电流；

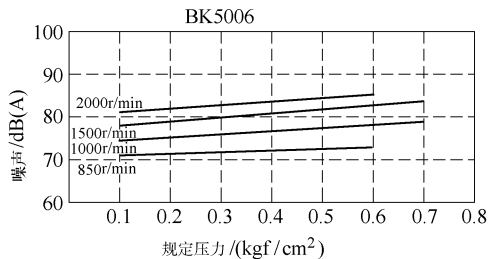
cosφ——电动机功率因数；

P<sub>d</sub>——电动机功率。

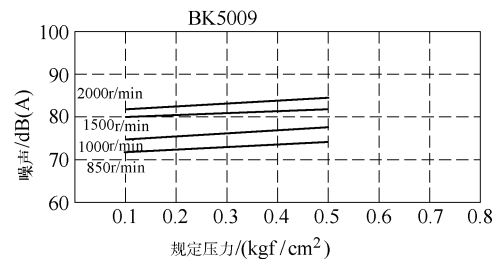
规定压力的空气量的许用范围为 ±5%。



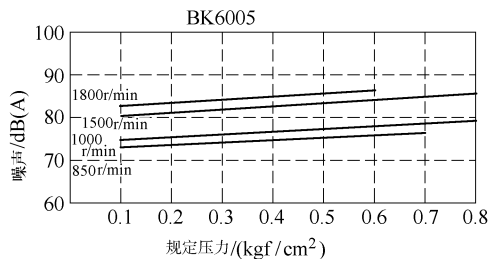
a)



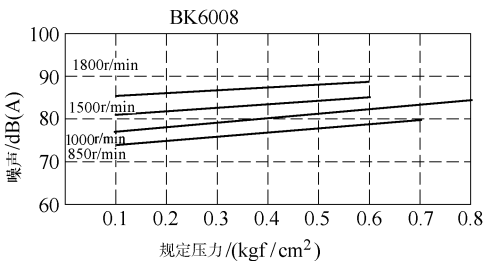
b)



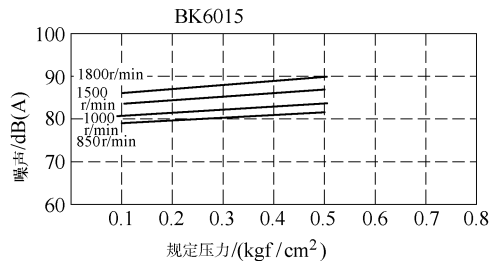
c)



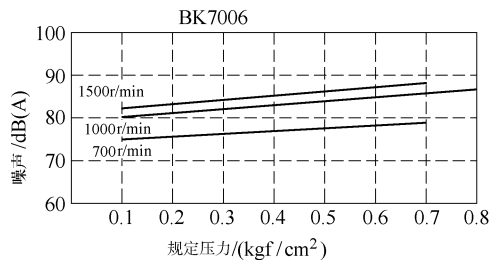
d)



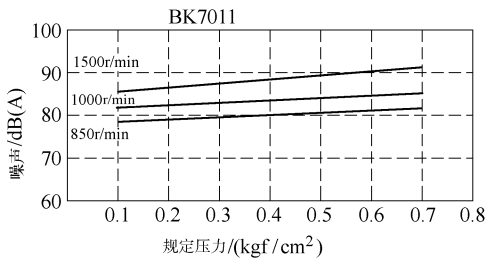
e)



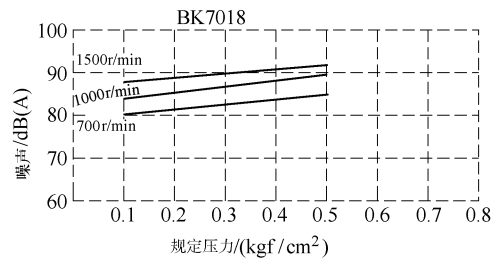
f)



g)



h)



i)

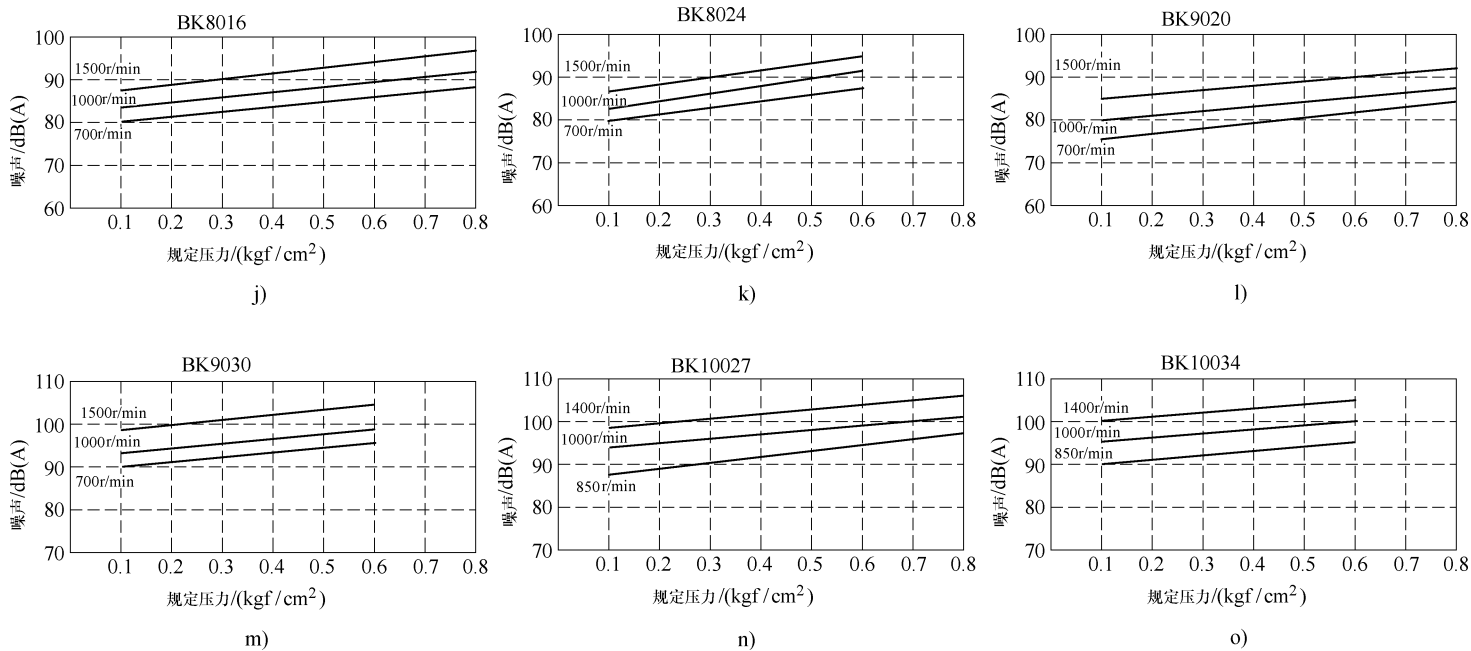


图 13-27 三叶罗茨风机噪声曲线

- 注：1. 上述噪声曲线为离风机 1m 处测得的噪声值（装有标准进气口消声器和排气口消声器）而绘制的。
2. 图中数据并不是保证值，底座（基础）或管道状况的不同，噪声值也不同。

#### (4) 风机结构尺寸

1) 卧式风机安装形式如图 13-28 所示, 安装、外形尺寸如图 13-29、表 13-104 所示。

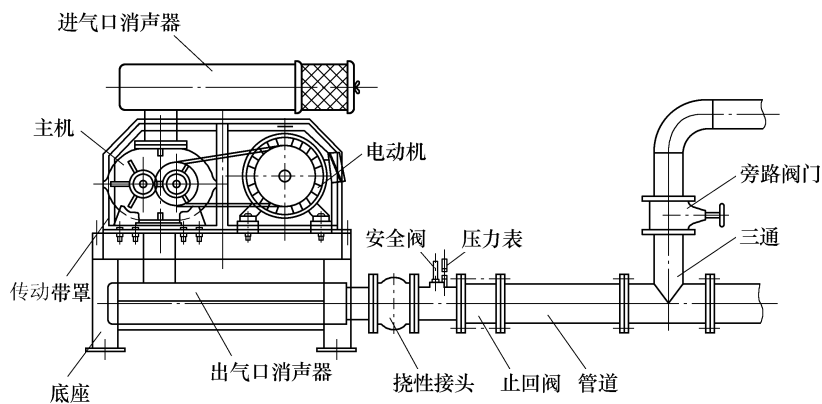


图 13-28 卧式风机安装图

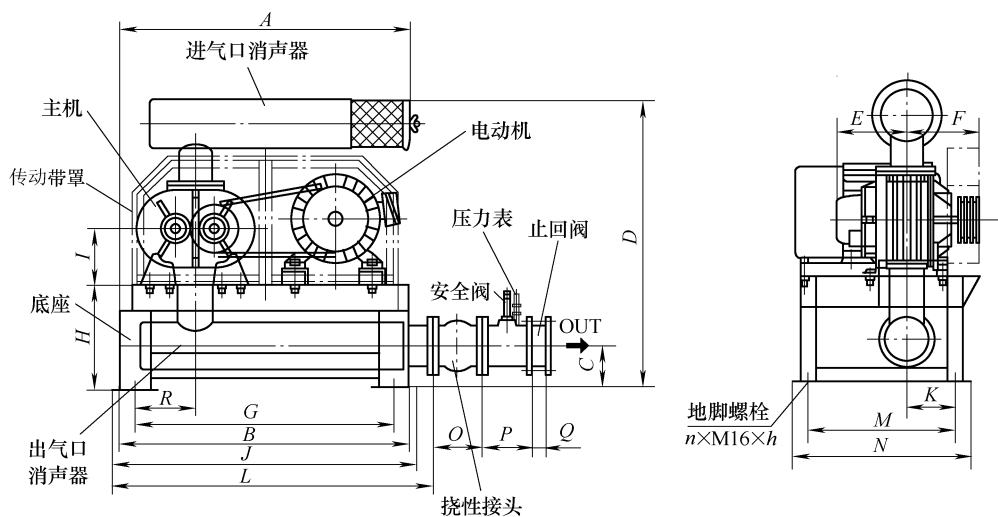


图 13-29 卧式风机安装、外形尺寸



表 13-104 卧式风机安装外形尺寸

(mm)

型号	排风口径		适用电动机 功率	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	R	Q	4 × M16 × h	重量 /kg
	mm	in																					
BK5003	65	2.5	5.5 ~ 7.5	1080	1080	153	1019	188	200	940	360	172	1120	144.5	1190	392	460	115	190	200	18	4 × M16 × 300	180
			11 ~ 15				1099									550	618						
BK5006	100	4	5.5 ~ 7.5	1120	1120	189	1164	221	234	980	420	172	1160	179	1220	387	467	150	230	228	18	4 × M16 × 300	215
			11 ~ 15				1225									567	647						
			18.5 ~ 22				1260									617	697						
BK5009	100	4	5.5 ~ 11	1150	1150	180	1222	259	272	984	436	172	1204	208	1255	457	554	150	230	192	18	4 × M16 × 300	250
			15 ~ 22				1256									597	694						
BK6005	80	3	5.5 ~ 7.5	1220	1220	150	1110	240	237	1054	376	222	1254	169	1330	386	469	135	200	221	18	4 × M16 × 300	255
			11 ~ 15				1110									502	585						
			18.5 ~ 22				1144									562	645						
BK6008	125	5	5.5 ~ 11	1250	1250	196	1315	278	297	1084	466	222	1304	211	1335	457	554	165	250	222	18	4 × M16 × 400	305
			15 ~ 22				1330									572	699						
			30 ~ 45				1440									657	754						
BK6015	150	6	11 ~ 22	1250	1250	224	1400	367	364	1064	526	222	1290	295	1340	617	700	180	280	222	24	4 × M16 × 400	395
			30 ~ 45				1510									617	700						
BK7006	100	4	11 ~ 22	1400	1400	186	1265	261	254	1214	446	279	1440	184	1495	582	655	150	230	282.5	18	4 × M16 × 400	400
			30 ~ 45				1375									657	730						
BK7011	150	6	11 ~ 22	1400	1400	219	1424	325	324	1200	550	279	1445	260	1495	573	672	180	280	271	24	4 × M16 × 400	495
			30 ~ 45				1534									673	772						

(续)

型号	排风口径		适用电动机 功率	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	R	Q	4 × M16 × h	重量 /kg
	mm	in																					
BK7018	200	8	11 ~ 22	1450	1450	252	1550	414	413	1250	615	279	1500	353	1550	737	832	190	350	271	24	4 × M16 × 400	580
			30 ~ 55				1770																
BK8016	200	8	11 ~ 55	1500	1650	284	1856	475	467	1490	680	330	1700	348	1750	805	900	190	350	345	24	4 × M16 × 600	800
			75 ~ 90				1926																
BK8024	250	10	15 ~ 55	1650	1650	284	1856	576	569	1490	680	330	1700	449	1750	1005	1100	230	360	345	114	4 × M16 × 600	950
			75 ~ 90				1926																
			110				2076																
BK9020	250	10	15 ~ 90	1700	1960	300	1955	574	516	1800	690	358	2020	396	2055	945	1060	230	360	400	114	4 × M16 × 600	1190
			110 ~ 132				2110																
BK9030	300	12	18.5 ~ 55	1950	2000	324	1955	701	643	1840	750	358	2060	523	2105	1199	1314	245	380	400	114	4 × M16 × 600	1600
			75 ~ 90				2065																
			110 ~ 160				2220																
BK10027	300	12	22 ~ 55	1935	2060	325	1984	654	625	1900	750	386	2120	436	2175	1121	1236	245	380	440	114	4 × M16 × 600	1750
			75 ~ 90				2054																
			110 ~ 200				2209																
BK10034	350	14	37 ~ 55	2035	2120	375	2134	781	750	1960	850	386	2180	580	2235	1299	1414	260	420	440	127	4 × M16 × 600	2000
			75 ~ 90				2204																
			110 ~ 200				2359																

注：1. 重量中不包括电动机重量，只包括标准附件重量。  
2. 标准附件包括：进气口、出气口消声器、压力表、底座、传动带罩、安全阀、V带、止回阀。

2) 立式风机安装形式如图 13-30 所示, 安装、外形尺寸如图 13-31、表 13-105 所示。

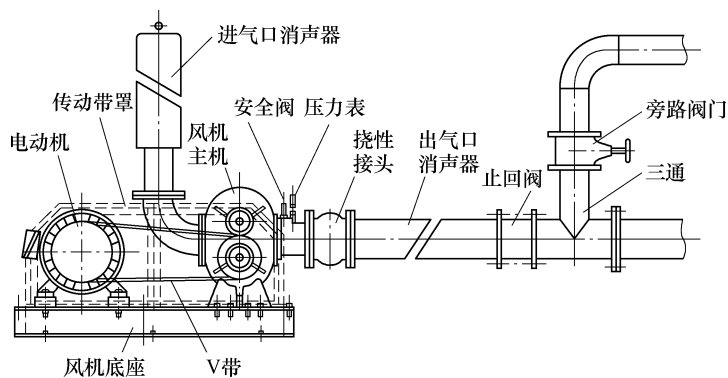


图 13-30 立式风机安装图

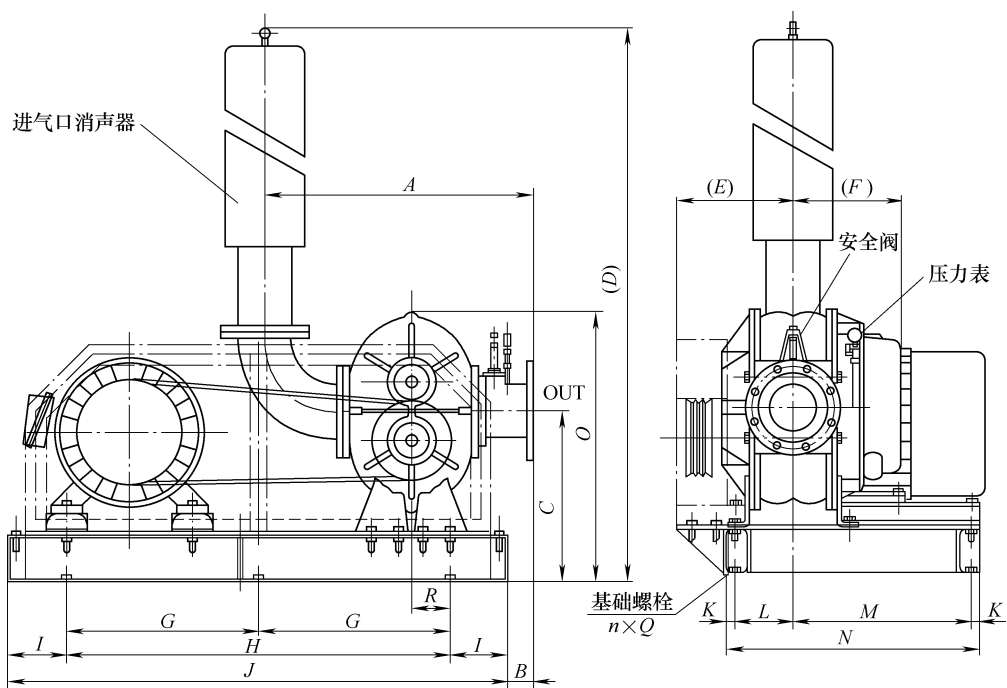


图 13-31 立式风机安装、外形尺寸

表 13-105 立式风机安装、外形尺寸 (mm)

型号	排风口径		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	R	n	Q	O	重量/kg
	mm	in																			
BK5003	65	2.5"	484	51	322	1338	227	188	—	740	145	1030	18	89	375	500	45	4	M12	541	171
BK5006	100	4"	561	73	322	1582	260	221	—	830	145	1120	18	122	392	550	45	4	M12	541	204
BK5009	100	4"	561	73	348	1608	308	259	—	914	120	1154	20	158	382	580	70	4	M12	567	239
BK6005	80	3"	582	22	424	1654	259	240	475	950	150	1250	20	109	456	605	106	6	M12	677	241
BK6008	125	5"	694	64	424	1929	297	278	500	1000	150	1300	20	147	463	650	106	6	M12	677	290
BK6015	150	6"	886	212	424	1964	386	367	500	1000	150	1300	20	236	374	650	106	6	M12	677	380
BK7006	100	4"	669	—	528	1788	309	261	550	1100	150	1400	26	123	445	620	56	6	M12	824	385
BK7011	150	6"	937	176	528	2068	358	325	575	1150	150	1450	26	187	513	752	156	6	M12	824	477
BK7018	200	8"	1082	246	528	2228	447	414	575	1150	150	1450	26	276	474	802	156	6	M12	824	564
BK8016	200	8"	1122	140	586	2286	467	473	745	1490	80	1650	26	348	457	857	220	6	M16	929	785
BK8024	250	10"	1207	170	586	2296	569	575	745	1490	80	1650	26	449	556	1057	220	6	M16	929	925
BK9020	250	10"	1240	170	602	2312	516	574	900	1800	80	1960	26	396	549	997	290	6	M16	1002	1160
BK9030	300	12"	1355	200	602	2702	643	701	920	1840	80	2000	26	523	676	1251	290	6	M16	1002	1560

注：1. 重量中不包括电动机重量，只包括标准附件重量。  
2. 标准附件包括：进气口、出气口消声器、压力表、底座、传动带罩、安全阀、V带、止回阀。

3) 风机附件。

① BFZ 型风机罩安装尺寸如图 13 - 32、表 13 - 106 所示。

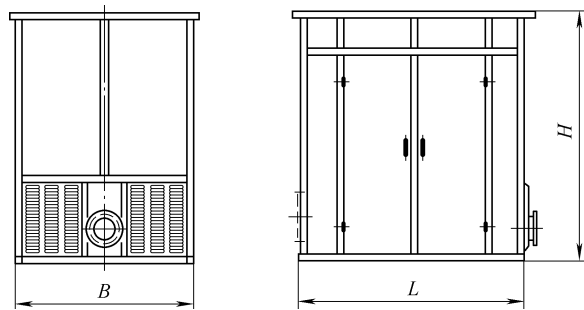


图 13 - 32 BFZ 型风机罩安装尺寸

表 13 - 106 BFZ 型风机罩安装尺寸及适用风机 (mm)				
风机罩型号	适用风机(单台卧式)	L	B	H
BFZ1850	BK5003	1850	1450	1600
BFZ2100	BK5006	2100	1600	1750
	BK5009			
	BK6005			
	BK6008			
BFZ2300	BK7006	2400	1600	1750
	BK6015			
BFZ2600	BK7011	2600	1800	1900
BFZ2700	BK7018	2700	1900	1950
BFZ2900	BK8016	2900	2100	2250
	BK8024			
BFZ3200	BK9020	3200	2100	2250
BFZ3300	BK9030	3300	2250	2350
	BK10027			
BFZ3500	BK10034	3500	2500	2500
风机罩型号	适用风机(单台立式)	L	B	H
BFZ1850	BK5003	1850	1450	1800
BFZ2100	BK5006	2100	1450	2100
	BK5009			
	BK6005			
	BK6008			

(续)

风机罩型号	适用风机(单台立式)	L	B	H
BFZ2300	BK6015	2300	1650	2150
BFZ2600	BK7006	2600	1750	2400
	BK7011			
	BK7018			
BFZ2900	BK8016	2900	2000	2500
	BK8024			
BFZ3200	BK9020	3200	2250	2600
BFZ3300	BK9030	3300	2250	2950

② ADS 出气口消声器（立式用）外形尺寸如图 13 - 33、表 13 - 107 所示。

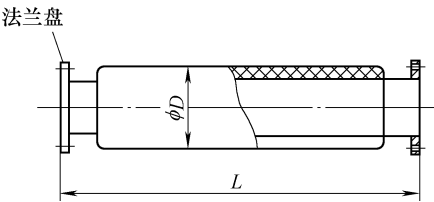


图 13 - 33 ADS 出气口消声器（立式用）外形尺寸

表 13 - 107 ADS 出气口消声器（立式用）外形尺寸及重量

型号	适用风机	D	L	重量/kg
ADS65	BK5003	160	815	19. 8
ADS80	BK6005	160	900	21. 4
ADS100	BK5006, BK5009, BK7006	219	900	30. 2
ADS125	BK6008	219	1000	47. 2
ADS150	BK6015, BK7011	285	1000	53. 0
ADS200	BK7018, BK8016	345	1000	68. 0
ADS250	BK8024, BK9020	345	1000	86. 0
ADS300	BK9030, BK10023	400	1000	108. 0
ADS350	BK10034	500	1000	135. 0

③ AD 硬密封薄型止回阀安装尺寸如图 13 - 34、表 13 - 108 所示。

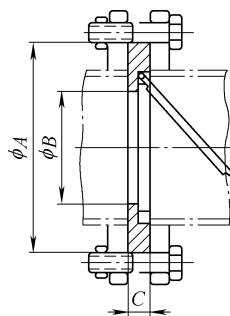


图 13-34 AD 硬密封薄型止回阀安装尺寸

表 13-108 AD 硬密封薄型止回阀安装尺寸及配件规格 (mm)

型号	A	B	C	螺栓规格
AD40	86	30	18	M16 × 80
AD50	101	38	18	M16 × 80
AD65	121	45	18	M16 × 80
AD80	131	52	18	M16 × 80
AD100	156	65	18	M16 × 90
AD125	187	90	18	M16 × 90
AD150	217	115	24	M20 × 110
AD200	267	160	24	M20 × 110
AD250	320	273	114	M20 × 220
AD300	368	325	114	M20 × 220
AD350	428	377	127	M20 × 250

④ 挠性接头安装尺寸如图 13-35、表 13-109 所示。

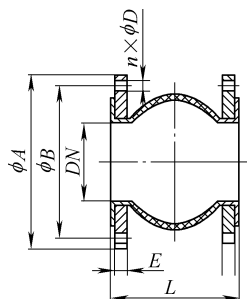


图 13-35 挠性接头安装尺寸

表 13-109 挠性接头安装尺寸 (mm)

型号	A	B	E	L	n	D
AD40	150	110	15	95	4	18
AD50	165	125	15	105	4	18
AD65	185	145	17	115	4	18
AD80	200	160	20	135	8	18
AD100	220	180	21	150	8	18
AD125	250	210	21	165	8	18
AD150	285	240	21	180	8	22
AD200	340	295	21	190	8	22
AD250	395	350	23	230	12	22
AD300	445	400	24	245	12	22
AD350	505	460	28	260	16	22

⑤ 电控柜：可根据用户需要专门设计。  
若产品改进，则会对技术参数进行相应变动。

(5) 风机主要用途 具体示例如图 13-36（见全文后插页）所示。

8. 常用真空带式过滤机

该过滤机典型工艺图如图 13-37 所示，结构及外形尺寸如图 13-38 所示。其技术参数见表 13-110。

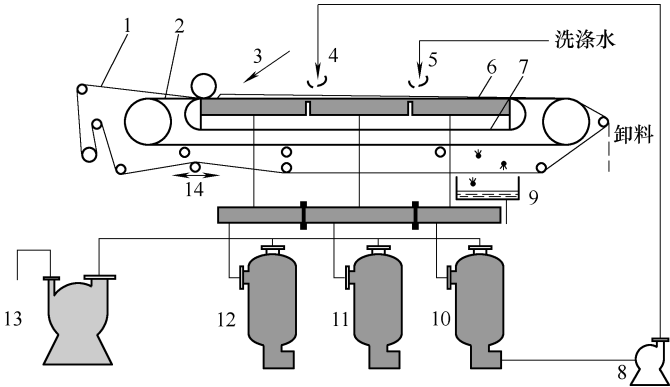


图 13-37

1—滤布 2—橡胶带 3—加料装置 4、5—淋洗装置 6—真空盒 7—摩擦带  
8—返水泵 9—清洗装置 10、11、12—气液分离器 13—真空泵 14—纠偏装置



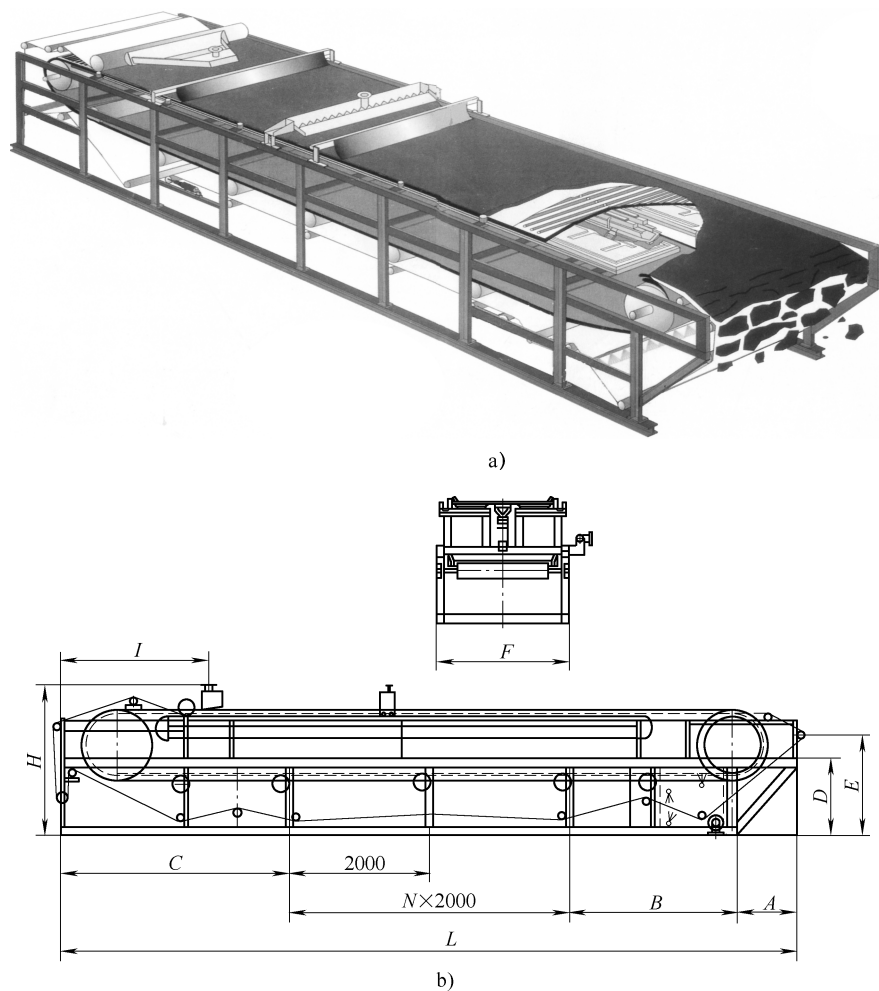


图 13-38 过滤机结构及外形尺寸图

a) 结构 b) 外形尺寸

表 13-110 过滤机技术参数

过滤宽度	1300 ~ 2800mm		1300mm		1800mm		2000mm		2500mm		2800mm	
过滤长度 /mm	N	L	过滤面 积/m <sup>2</sup>	重量 /kg	过滤面 积/m <sup>2</sup>	重量 /kg	过滤面 积/m <sup>2</sup>	重量 /kg	过滤面 积/m <sup>2</sup>	重量 /kg	过滤面 积/m <sup>2</sup>	重量 /kg
8000	3	12500	10.4	7100	—	—	—	—	—	—	—	—
10000	4	14500	13.0	8300	—	—	—	—	—	—	—	—
12000	5	16500	15.6	9500	21.6	13200	24.0	14600	30.0	18200	33.6	20400
14000	6	18500	18.2	10700	25.2	14900	28.0	16500	35.0	20600	39.2	23200

(续)

过渡宽度	1300 ~ 2800mm		1300mm		1800mm		2000mm		2500mm		2800mm	
过滤长度 /mm	<i>N</i>	<i>L</i>	过滤面 积/m <sup>2</sup>	重量 /kg	过滤面 积/m <sup>2</sup>	重量 /kg	过滤面 积/m <sup>2</sup>	重量 /kg	过滤面 积/m <sup>2</sup>	重量 /kg	过滤面 积/m <sup>2</sup>	重量 /kg
16000	7	20500	20. 8	11900	28. 8	16600	32. 0	18400	40. 0	23000	44. 8	26000
18000	8	22500	—	—	32. 4	18300	36. 0	20300	45. 0	25400	50. 4	28800
20000	9	24500	—	—	36. 0	2000	40. 0	22200	50. 0	27800	56. 0	31600
<i>A</i>			850		850		850		850		850	
<i>B</i>			2400		2400		2400		2400		2400	
<i>C</i>			3250		3250		3250		3250		3250	
<i>D</i>			1095		1095		1095		1195		1195	
<i>E</i>			1423		1423		1423		1673		1673	
<i>F</i>			1900		2400		2600		3150		3450	
<i>H</i>			2130		2130		2130		2380		2380	
<i>I</i>			2105		2105		2105		2105		2105	

9. 常用卧式离心机

卧式离心机结构如图 13 - 39 所示，其规格及主要技术参数见表 13 - 111。

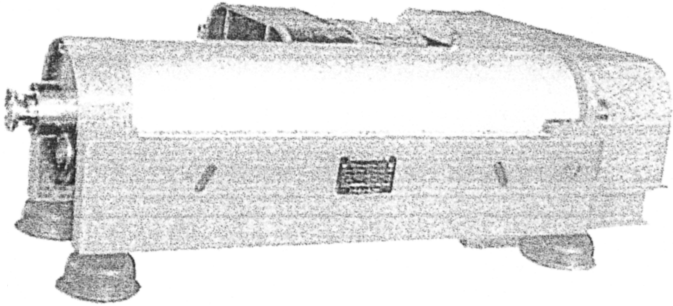


图 13 - 39 卧式离心机

表 13 - 111 卧式离心机规格及主要技术参数

型号	转鼓直径 /mm	转鼓长度 /mm	转鼓转速 /(r/min)	分离因数	电动机功率 /kW	机器重量 /kg	外形尺寸 /mm
LW200 × 600	200	600	5000	2795	5. 5	950	1545 × 1930 × 774
LW355 × 860	355	860	3500	2433	18. 5	2207	2730 × 1885 × 1035
LW355 × 1160	355	1160	3600	2575	22	1810	2442 × 2113 × 1065
LW355 × 1460	355	1460	3500	2433	18. 5/22	2650	3470 × 1785 × 1055
LW450 × 730	450	730	2600	1728	30	1892	2310 × 1931 × 771
LW450 × 750	450	750	2500	1570	15	1735	2140 × 1450 × 700
LW450 × 1610	450	1610	3200	2465	37	2555	2670 × 1920 × 905
LW450 × 1910	450	1910	2900	2117	55	4200	4600 × 1200 × 1293
LW600 × 1020	600	1020	1300	567	18. 5	2500	2345 × 2005 × 928
LW630 × 2480	620	2480	2650	2436	75	9000	4285 × 1770 × 1343
LW420 × 1680	420	1680	3300	2556	30/15	3465	2760 × 1540 × 1053

10. 常用板框压滤机

常用板框压滤机结构如图 13-40、图 13-41 所示，其技术参数见表 13-112、表 13-113。

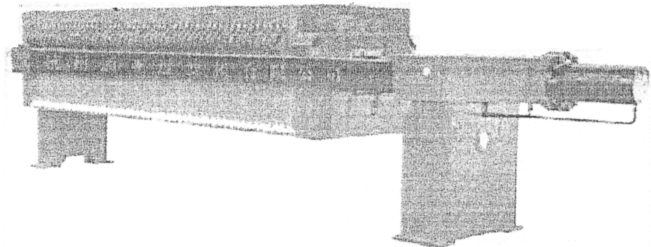


图 13-40  $X^AY_{MZ}800-U_K^B$  系列板框压滤机

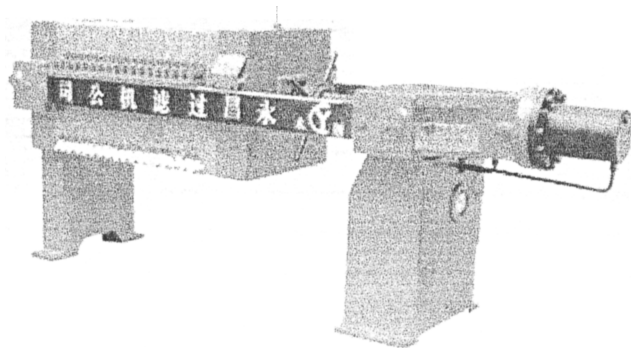


图 13-41 BYJ650 板框式压滤机（液压压紧、机械保压）

表 13-112  $X^AY_{MZ}800-U_K^B$  系列板框压滤机技术参数

型号	过滤面积 /m <sup>2</sup>	滤室总容量 /L	外框尺寸 /mm	滤板厚度 /mm	滤室数量 /个	滤饼厚度 /mm	外形尺寸 (长×宽×高) /mm	电动机 功率 /kW	滤室内 工作压力 /MPa	整机 质量 /kg
$X_M^AY_{J20}/800-U_K^B$	20	320	800×800	60	20	32	3585×1100×1265	1.5	≤1	2130
$X_M^AY_{J30}/800-U_K^B$	30	480	800×800	60	30	32	4196×1100×1265	1.5	≤1	2460
$X_M^AY_{J40}/800-U_K^B$	40	640	800×800	60	40	32	4806×1100×1265	1.5	≤1	2790
$X_M^AY_{J50}/800-U_K^B$	50	800	800×800	60	50	32	5416×1100×1265	1.5	≤1	3120
$X_M^AY_{J60}/800-U_K^B$	60	960	800×800	60	60	32	6026×1100×1265	1.5	≤1	3440
$X_M^AY_{J70}/800-U_K^B$	70	1120	800×800	60	70	32	6636×1100×1265	1.5	≤1	3930
$X_M^AY_{J80}/800-U_K^B$	80	1280	800×800	60	80	32	7246×1100×1265	1.5	≤1	4280
$X_M^AZ_{20}/800-U_K^B$	20	300	800×800	60	20	32	2964×1246×1628	3	≤1	2240
$X_M^AZ_{30}/800-U_K^B$	30	450	800×800	60	30	32	3574×1246×1628	3	≤1	2580
$X_M^AZ_{40}/800-U_K^B$	40	600	800×800	60	40	32	4184×1246×1628	3	≤1	2922
$X_M^AZ_{50}/800-U_K^B$	50	750	800×800	60	50	32	4794×1245×1628	3	≤1	3250
$X_M^AZ_{60}/800-U_K^B$	60	900	800×800	60	60	32	5404×1246×1628	3	≤1	3590
$X_M^AZ_{70}/800-U_K^B$	70	1050	800×800	60	70	32	6014×1246×1628	3	≤1	4080
$X_M^AZ_{80}/800-U_K^B$	80	1200	800×800	60	80	32	6624×1245×1628	3	≤1	4450

表 13 - 113 BYJ650 板框式压滤机技术参数

型号	过滤面积 /m <sup>2</sup>	滤室总容量 /L	滤板外框尺寸 /mm	滤板厚度 /mm	滤室数量 /个	滤饼厚度 /mm	外形尺寸 (长×宽×高) /mm	电动机功率 /kW	过滤压力 MPa	整机质量 /kg
B <sub>M</sub> <sup>A</sup> YJ5/650 - U <sub>K</sub> <sup>B</sup>	5	80	650 × 650	30	10	30	2503 × 1050 × 1023	1.5	0.6	1120
B <sub>M</sub> <sup>A</sup> YJ10/650 - U <sub>K</sub> <sup>B</sup>	10	160	650 × 650	30	20	30	3113 × 1050 × 1023	1.5	0.6	1400
B <sub>M</sub> <sup>A</sup> YJ15/650 - U <sub>K</sub> <sup>B</sup>	15	240	650 × 650	30	30	30	3723 × 1050 × 1023	1.5	0.6	1580
B <sub>M</sub> <sup>A</sup> YJ20/650 - U <sub>K</sub> <sup>B</sup>	20	320	650 × 650	30	40	30	4333 × 1050 × 1023	1.5	0.6	1780
B <sub>M</sub> <sup>A</sup> YJ25/650 - U <sub>K</sub> <sup>B</sup>	25	400	650 × 650	30	50	30	4943 × 1050 × 1023	1.5	0.6	1970

注：标准产品滤饼厚度为 30mm，如果需要增厚或减薄滤饼，请垂询。

11. 常用搅拌机

(1) 中、低速型搅拌（机）装置（见图 13 - 42）

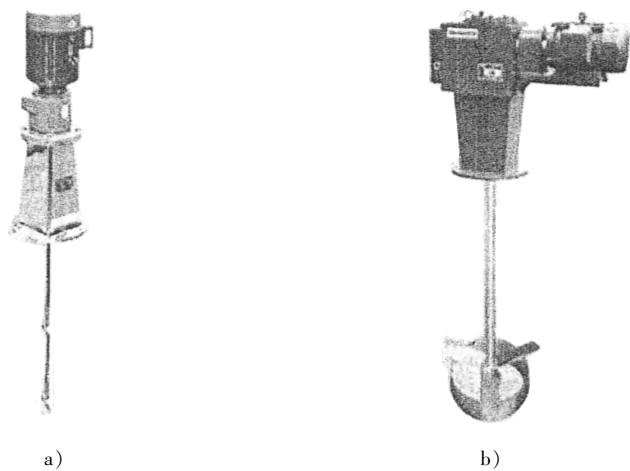


图 13 - 42 中、低速型搅拌（机）装置

1) 装置类型及其主要特点：

LSC 系列搅拌机配用硬齿面同轴型齿轮减速机，具有传动平稳、噪声低、效率高、结构紧凑、承载能力高、组合性能好等特点，适用于各行业低、中黏度物料的混合、溶解、固体悬浮、传热、反应、萃取、结晶等搅拌作业。

LSZ 系列搅拌机采用硬齿面圆柱齿轮与螺旋圆锥齿轮传动，卧式电动机输入，模块组合设计，具有整机高度低、结构紧凑、传动精度高、承载能力强、机型组合安装方便等特点。减速机输出端可采用隔油套结构设计，此结构能保证减速机在任何时候不漏油，可用于食品、卫生级及安装空间受到限制等搅拌作业场合。

LSP 系列搅拌机配用硬齿面平行轴齿轮减速机，适用于各行业中负荷和重负荷搅拌作业，整机具有传动比大，承载能力强，传动平稳可靠、低噪声、高效率特点。减速机

输出可采用隔油套结构设计，此结构能确保减速机在任何时候不漏油。

2) 产品参数见表 13 - 114。

表 13 - 114

型式	驱动方式	配用功率/kW	搅拌转速/(r/min)	密封型式
LSC 系列	齿轮减速	0.12 ~ 300	45 ~ 400	橡胶唇封/填料箱/机封
LSZ 系列	齿轮减速	0.55 ~ 110	16 ~ 300	橡胶唇封/填料箱/机封
LSP 系列	齿轮减速	0.55 ~ 300	12 ~ 300	橡胶唇封/填料箱/机封

3) 常见配用搅拌器型式：LSC、LSZ、LSP 系列搅拌机配用的搅拌器类型十分广阔，根据其不同的工艺条件要求和工况条件，可选用 A100 系列螺旋式，A200 系列二叶桨式，A300 系列三叶桨式，A400 系列框式，A500、A600 涡轮式系列搅拌器等，具体选用可参照相应生产企业中《搅拌装置选型图册》的搅拌器部分。

(2) LZC、LVC 侧入式搅拌机 LZC、LVC 侧入式搅拌机主要特点：LZC 型螺旋锥齿侧入式搅拌机（见图 13 - 43）和 LVC 型窄 V 带侧入式搅拌机是根据国外同类产品改进设计的新型搅拌机，具有结构紧凑、效率高、传动平稳、噪声低、装拆方便等特点。特殊的堵流装置可以在不清空罐内液体的情况下，更换轴封或拆卸减速机维护修理。配用 A130 或 A120 螺旋式搅拌器，在消耗同等功率的情况下，能得到最高的搅拌效果，可用于重油、汽油等石油制品匀质搅拌或各种液体的混合、烟气脱硫中的防止固体沉降等搅拌，在大型储罐上联组使用，可以获得较好的搅拌效果和经济效益。

LZC、LVC 型侧入式搅拌机使用工作压力 0 ~ 0.4MPa，工作温度 ≤ 110℃，轴封型式分填料密封和机械密封两种，一般适用于无固体颗粒液体的搅拌密封。如液体中带有固体颗粒，选用时应向生产企业咨询。

LZC 侧入式搅拌机的主要参数及外形尺寸如图 13 - 44 和表 13 - 115 所示。

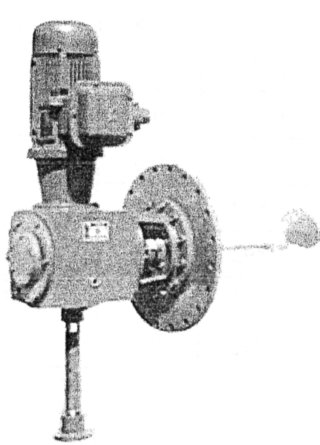


图 13 - 43 LZC 侧入式搅拌机

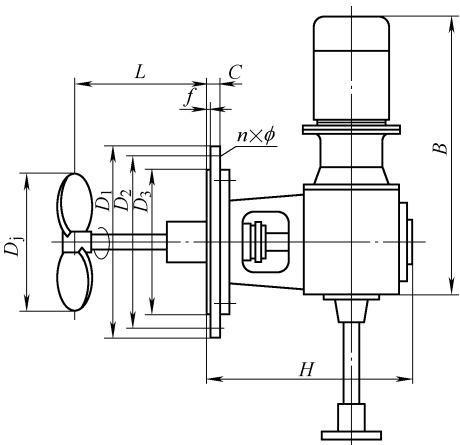


图 13 - 44 LZC 侧入式搅拌机外形尺寸

型号标记及示例：LZS T/S1

其中 LZC——侧入式搅拌机型号；  
T——轴封型式代号（填料密封注 T，机械密封注 M）；  
S1——接液部位材料代号。

表 13 - 115 LZC 侧入式搅拌机主要参数及尺寸 (mm)

搅拌机型号	电动机 功率/kW	搅拌机转速 /(r/min)	搅拌器径 $D_j$	安装及外形尺寸									搅拌容量 /m <sup>3</sup>	重量 /kg
				$D_1$	$D_2$	$D_3$	$C$	$f$	$n \times \phi$	$L$	$H$	$B$		
LZC40 - 2	1.5	240	400	540	495	463	28	2	16 × $\phi$ 22	600	560	820	15 ~ 30	320
LZC40 - 4	4	350	400	540	495	463	28	2	16 × $\phi$ 22	600	560	840	40 ~ 80	340
LZC55 - 6	5.5	215	600	755	705	667	36	2	20 × $\phi$ 26	750	650	965	50 ~ 100	450
LZC55 - 8	7.5	320	500	645	600	568	32	2	20 × $\phi$ 22	625	650	965	80 ~ 150	450
LZC65 - 11	11	250	600	755	705	667	36	2	20 × $\phi$ 26	750	750	1150	150 ~ 250	680
LZC80 - 15	15	220	700	860	810	772	40	5	24 × $\phi$ 26	880	800	1220	200 ~ 300	910

12. 常用蝶阀

(1) 常用蝶阀的结构和工作条件见表 13 - 116。

表 13 - 116 常用蝶阀的结构和工作条件

结构	工作条件	结构	工作条件
 A 型手动对夹式蝶阀	类型:A 型 公称通径:DN40 ~ DN300 公称压力:PN1.0、PN1.6 适用温度: -45 ~ 150℃	 LT 型手动单夹式蝶阀	类型:LT 型 公称通径:DN40 ~ DN300 公称压力:PN1.0、PN1.6 适用温度: -45 ~ 150℃
 蜗轮传动蝶阀	类型:A 型、LT 型 公称通径:DN40 ~ DN1200 公称压力:PN1.0、PN1.6 适用温度: -45 ~ 150℃	 气动蝶阀	类型:A 型、LT 型 公称通径:DN40 ~ DN800 公称压力:PN1.0、PN1.6 适用温度: -45 ~ 150℃

(续)

结构	工作条件	结构	工作条件
 <p>电动蝶阀</p>	类型:A 型、LT 型 公称通径:DN40 ~ DN1200 公称压力:PN1.0、PN1.6 适用温度: -45 ~ 150℃	 <p>消防信号蝶阀</p>	类型:A 型、LT 型 公称通径:DN40 ~ DN150 公称压力:PN1.0、PN1.6 适用温度: -45 ~ 150℃
 <p>对夹式蝶形止回阀</p>	公称通径:DN50 ~ DN700 公称压力:PN1.0、PN1.6 适用温度: -45 ~ 150℃	 <p>软密封双偏心法兰连接微阻缓闭蝶形止回阀</p>	公称通径:DN300 ~ DN1800 公称压力:PN1.0、PN1.6 适用温度: -45 ~ 150℃
 <p>电动密封空气调节阀</p>	公称通径:DN100 ~ DN1600 公称压力:PN1.0、PN1.6 适用温度: -45 ~ 150℃ 传动方式:蜗轮传动、电动	 <p>伸缩型蝶阀</p>	公称通径:DN300 ~ DN2000 公称压力:PN1.0 适用温度: -45 ~ 150℃ 传动方式:蜗轮传动、电动
 <p>暗杆/明杆橡胶闸阀</p>	公称通径:DN65 ~ DN250 公称压力:PN1.0、PN1.6 适用温度: -45 ~ 150℃	 <p>暗杆楔式单闸板闸阀</p>	公称通径:DN400 ~ DN1200 公称压力:PN1.0、PN0.6 适用温度: -15 ~ 100℃



(2) 常用蝶阀外形尺寸 如图 13-45 ~ 图 13-48 所示, 见表 13-117 ~ 表 13-120。

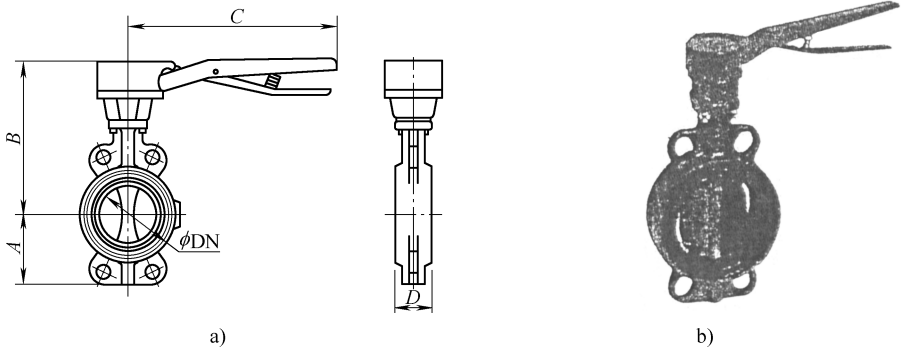


图 13-45 蝶阀外形图 (一)

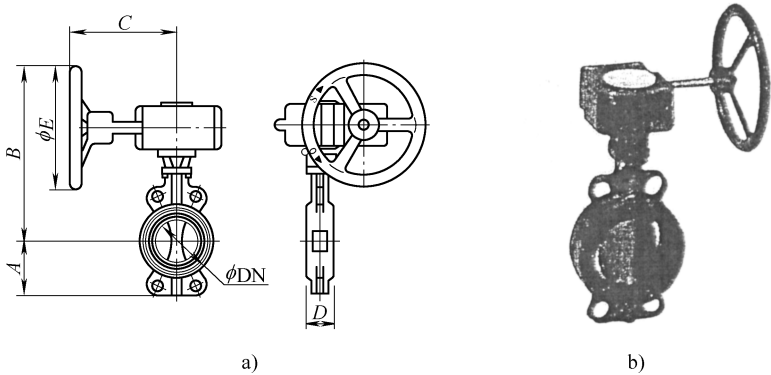


图 13-46 蝶阀外形图 (二)

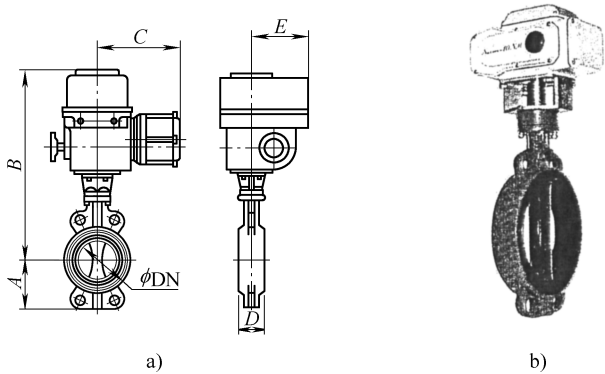


图 13-47 蝶阀外形图 (三)



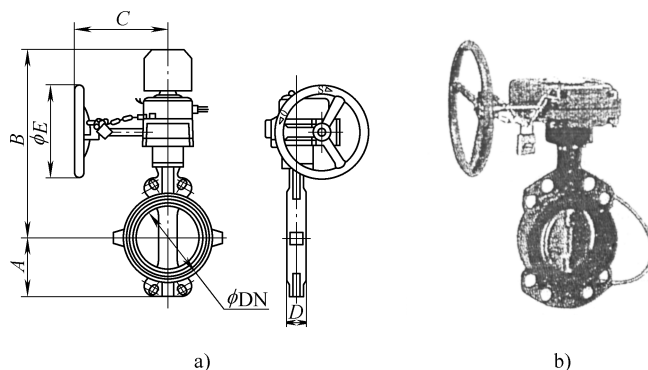


图 13-48 蝶阀外形图 (四)

表 13-117 蝶阀外形尺寸 (一)

(mm)

DN	A	B	C	D	重量/kg
25	55	165	200	33	3.4
32	55	165	200	33	3.4
40	55	165	200	33	3.4
50	62	171	200	43	4.1
65	70	180	200	46	4.6
80	89	186	200	46	4.8
100	106	210	290	52	6.5
125	119.5	225	290	56	8.7
150	130	238	290	56	9.4
200	163.5	306.5	450	60	17.1
250	200	327	450	68	28.4
300	232	352	450	78	32.2

表 13-118 蝶阀外形尺寸 (二)

(mm)

DN	A	B	C	D	E	重量/kg
25	55	222.5	173	33	125	6.1
32	55	222.5	173	33	125	6.1
40	55	222.5	173	33	125	6.1
50	62	228.5	173	43	125	6.8
65	70	237.5	173	46	125	7.3
80	89	243.5	173	46	125	7.5
100	106	305	183	52	200	9.3
125	119.5	320	183	56	200	11.5
150	130	333	183	56	200	12.2
200	163.5	375.5	183	60	200	18.6
250	200	434	287	68	250	32.6
300	232	459	287	78	250	36.4
350	280	556	378	78	400	63

表 13 - 119 蝶阀外形尺寸 ( 三 ) ( mm )

DN	A	B	C	D	E	重量/kg	型号
25	55	409	59	33	90	7. 8	Z3
32	55	409	59	33	90	7. 8	Z3
40	55	409	59	33	90	7. 8	Z3
50	62	415	59	43	90	8. 5	Z3
65	70	405	200	46	145	9. 7	0A6
80	89	411	200	46	145	11	0A8
100	106	435	260	52	145	13. 7	0A15
125	119. 5	450	260	56	145	15. 9	0A15
150	130	425	312	56	226	25. 1	AS18
200	163. 5	482. 5	340	60	226	34. 3	AS50
250	200	528	340	68	229	46	AS50
300	232	553	343	78	226	51. 8	AS80
350	280	561	439	78	284	76	BS100

表 13 - 120 蝶阀外形尺寸 ( 四 ) ( mm )

DN	A	B	C	D	E	重量/kg
50	71	307	178	43	125	11. 6
65	80	316	178	46	125	12. 2
80	87	323	178	46	125	12. 7
100	104. 5	340. 5	178	52	200	14. 1
125	117	353	178	56	200	15. 9
150	129. 5	365. 5	178	56	200	17. 2
200	166	460. 5	285	60	200	27
250	200	486	285	68	250	35
300	220	511	285	78	250	40

## 参 考 文 献

- [1] 机械电子工业部设计研究院, 等. 工业锅炉房实用设计手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [2] 樊泉桂. 锅炉原理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [3] 马广大, 等. 大气污染控制手册 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1985.
- [4] 雷仲存. 工业脱硫技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [5] 谭天恩, 窦梅, 周明华. 化工原理: 下册 [M]. 3 版. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [6] P. N. Chere misinoff, Richard A. Young. Air Pollution Control and Design Handbook [M]. New York and Basel: Marcel Dekker inc, 1977.
- [7] 钟秦. 燃煤烟气脱硫脱硝技术及工程实例 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [8] 周至祥, 段建中, 薛建明. 火电厂湿法烟气脱硫技术手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [9] 吴安. 锅炉烟气喷雾干燥脱硫技术 [J]. 工厂动力, 1997 (4): 13 - 17.
- [10] 王天堂, 陆士平. VEGF 鳞片胶泥在烟气脱硫装置中的应用 [J], 中国环保产业, 2002 (2): 70 - 72.
- [11] 胡名操. 环境保护实用数据手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [12] 严兴忠. 工业防尘手册 [M]. 北京: 劳动人事出版社, 1989.
- [13] 郝吉明, 等. 燃煤二氧化硫污染控制手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.

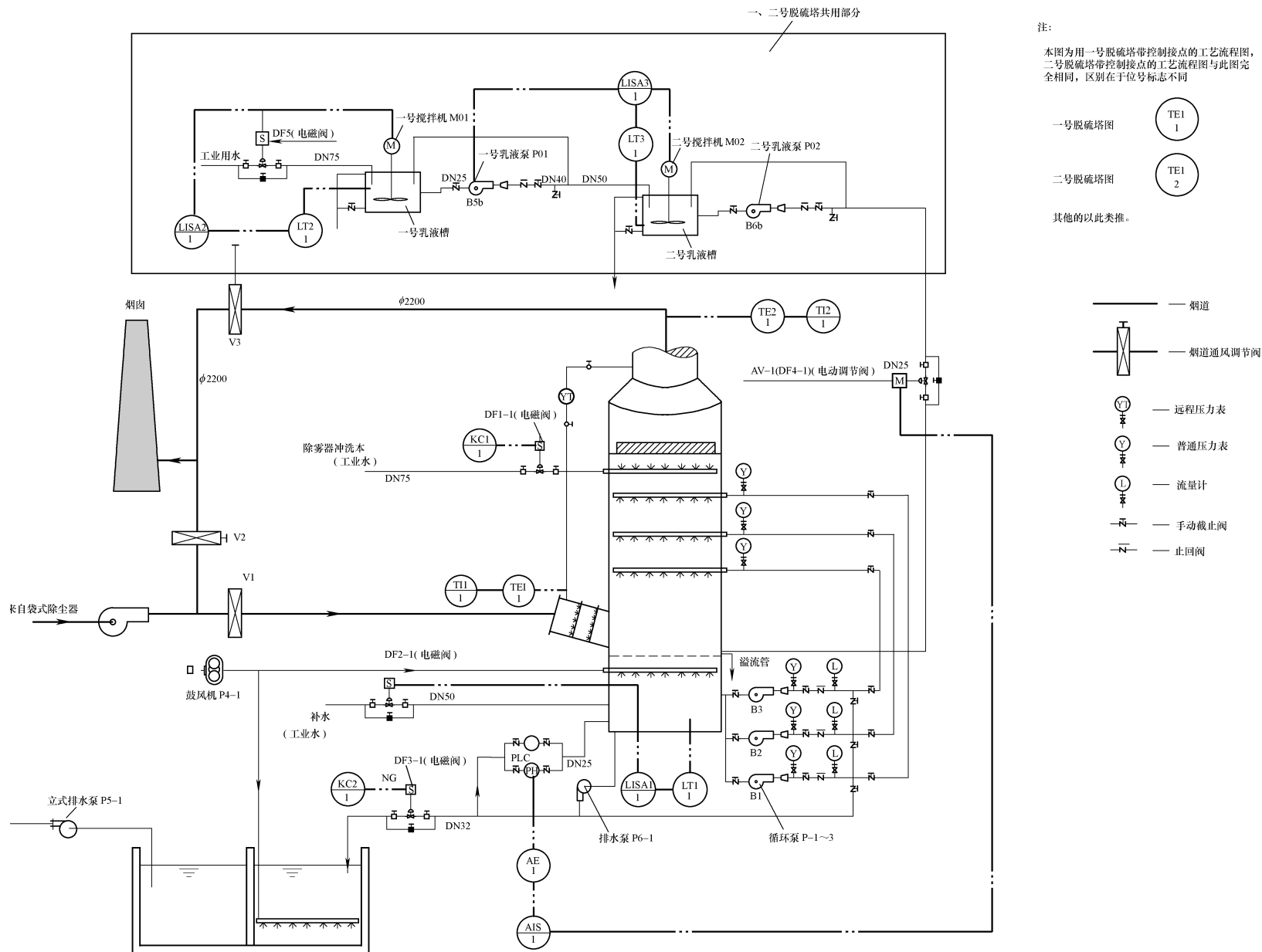


图 4-43 带控制转点的工艺流程图

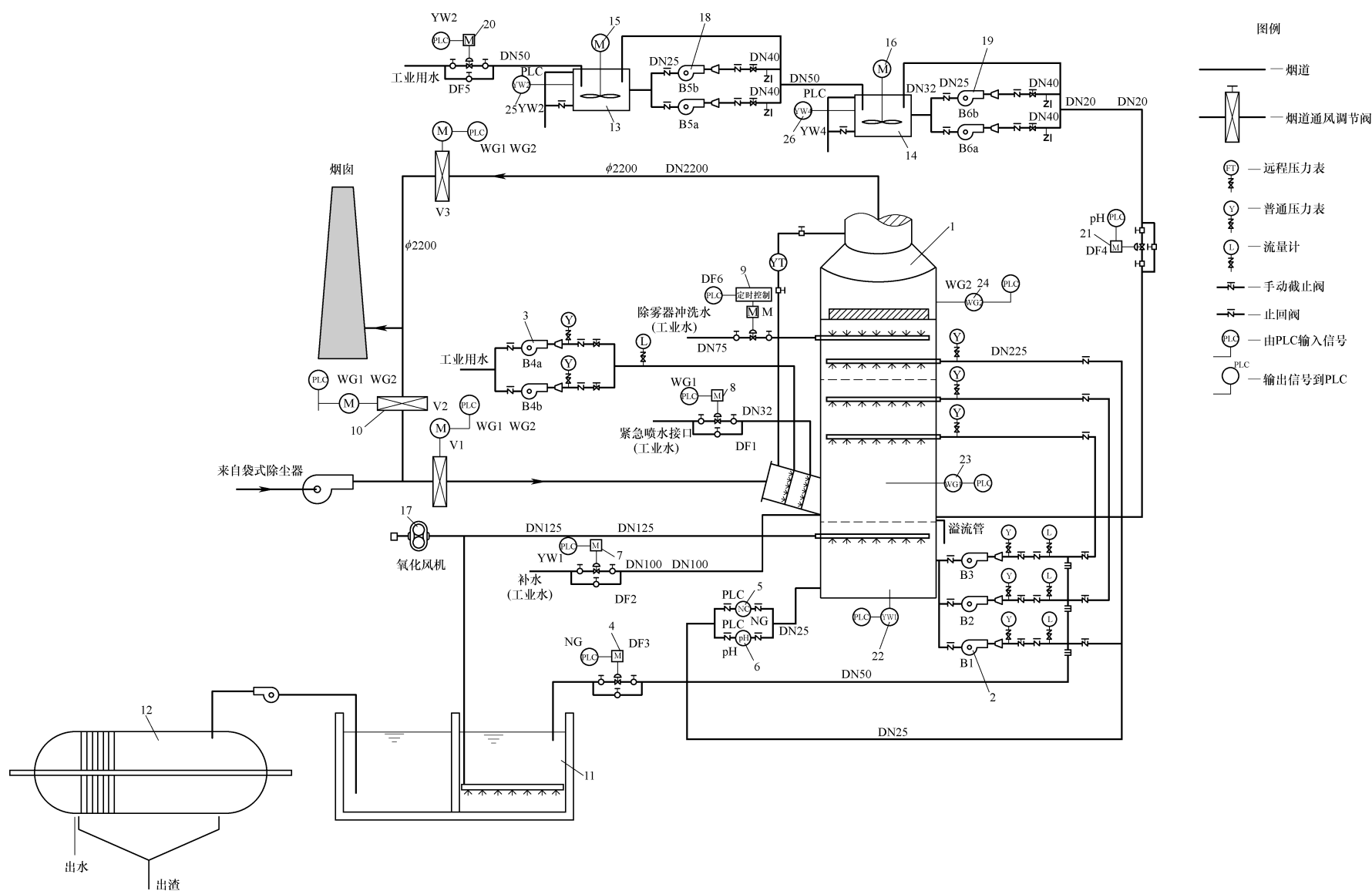


图 8-1 脱硫系统控制流程图

- 1—脱硫塔 2—循环泵 3—预冷喷淋泵 4—电动调节阀 5—浓度传感器 6—pH 值传感器 7、8—电磁阀 9—定时控制器 + 电磁阀 10—蝶阀 11—氧化缓冲池  
 12—板框压滤机 13—MgO 熟化池 14—MgO 浆液池 15、16—搅拌装置 17—氧化风机 18—脱硫剂中间输送泵 19—脱硫剂供给泵 20—电磁阀 21—电动调节阀  
 22—液位传感器 (YW1) 23—温度传感器 (WG1) 24—温度传感器 (WG2) 25—液位传感器 (YW2、YW3) 26—液位传感器 (YW4、YW5)

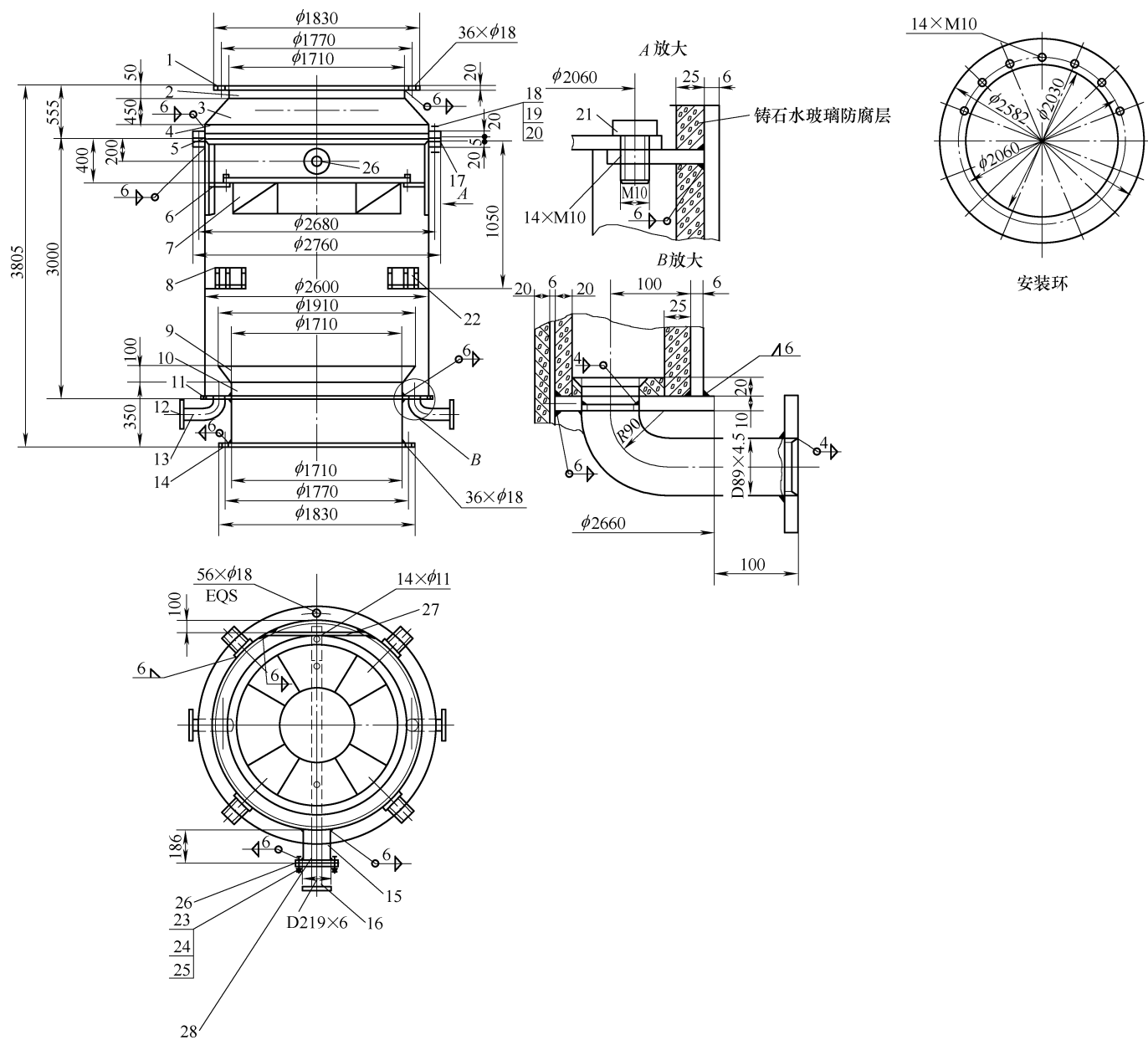


图 9-25 旋流叶轮除雾器施工图

- 1—进烟法兰 2—进口直段 3—锥体 4—直段 5—法兰 6—安装环 7—旋流器 8—脱水筒 9—导烟锥 10—出烟管 11—底板
- 12、26—平焊钢法兰 13—无缝钢管 14—出烟法兰 15—反冲安装口 16—反冲管 17、28—垫片
- 18、21、23—螺栓 19、24—螺母 20、25—垫圈 22—支架 27—支梁

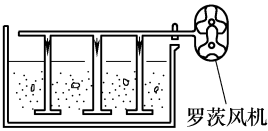
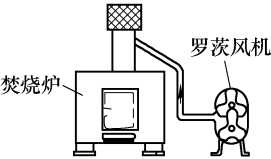
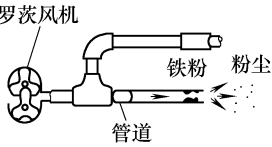
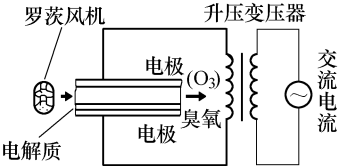
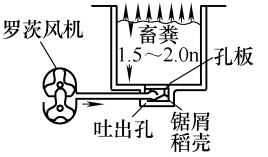
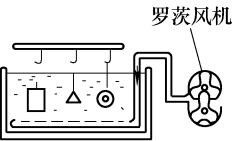
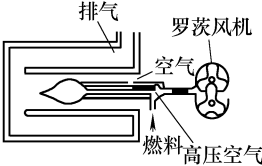
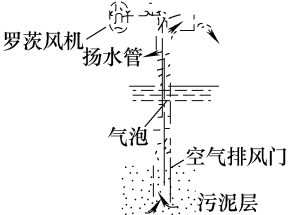
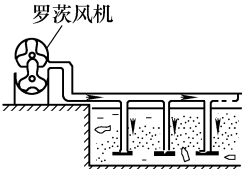
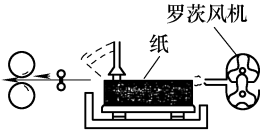
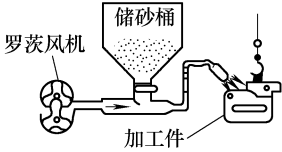
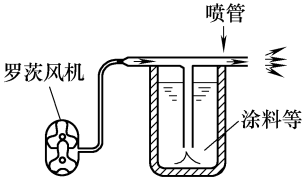
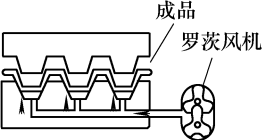
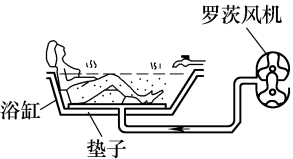
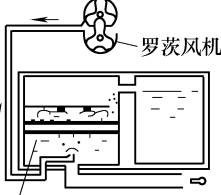
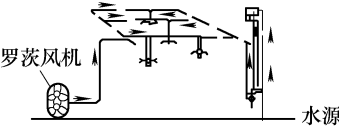
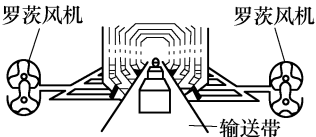
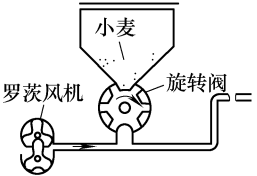
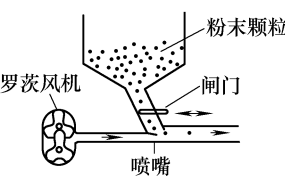
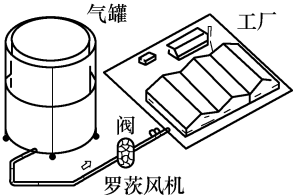
<p>水处理</p>  <p>罗茨风机</p> <p>用于水处理厂的净化的沉淀物的搅拌</p>	<p>焚烧炉</p>  <p>罗茨风机</p> <p>焚烧炉</p> <p>可以助燃,也可促进排气</p>	<p>管道清扫</p>  <p>罗茨风机</p> <p>铁粉 粉尘</p> <p>管道</p> <p>用于除掉管道更换或检修时发生的尘土和铁粉, 还用于供给管道内的各种涂料</p>	<p>臭氧发生器</p>  <p>罗茨风机</p> <p>升压变压器</p> <p>电极 (O<sub>3</sub>)</p> <p>臭氧</p> <p>电极</p> <p>电解质</p> <p>交流电流</p> <p>作为高浓度臭氧发生器的气源使用</p>
<p>畜粪发酵的堆肥</p>  <p>罗茨风机</p> <p>畜粪</p> <p>1.5~2.0m</p> <p>孔板</p> <p>吐出孔</p> <p>锯屑 稻壳</p> <p>输送气体,加快家畜粪尿的发酵堆肥</p>	<p>电镀槽</p>  <p>罗茨风机</p> <p>为优化电镀质量(镀层均匀)电解质层内输送气体,使电解质循环,这时作气源被利用</p>	<p>煤气燃烧器</p>  <p>排气</p> <p>罗茨风机</p> <p>空气</p> <p>燃料</p> <p>高压空气</p> <p>利用高压排风使燃气化成微小分子</p>	<p>空气升液泵</p>  <p>罗茨风机</p> <p>扬水管</p> <p>气泡</p> <p>空气排风门</p> <p>污泥层</p> <p>用气泡降低污水比重,达到扬水</p>
<p>鱼池的供氧</p>  <p>罗茨风机</p> <p>用于各种鱼类和蟹类的养鱼池中供氧和搅拌, 还用于水族馆和活鱼槽</p>	<p>印刷机关纸</p>  <p>罗茨风机</p> <p>纸</p> <p>使用排气可进行分离,对齐及分送等作业</p>	<p>喷砂器</p>  <p>罗茨风机</p> <p>储砂桶</p> <p>加工件</p> <p>用作喷砂器喷射气源</p>	<p>喷雾器</p>  <p>罗茨风机</p> <p>喷管</p> <p>涂料等</p> <p>用于涂装等喷雾器供给不含油质的高压排气</p>
<p>压力机械</p>  <p>成品</p> <p>罗茨风机</p> <p>用于工件成型后的脱模</p>	<p>桑拿浴</p>  <p>罗茨风机</p> <p>浴缸</p> <p>垫子</p> <p>桑拿浴对健康有良好的作用,多用于医药、饭店等</p>	<p>逆洗</p>  <p>罗茨风机</p> <p>过滤器</p> <p>用于过滤材料和过滤的逆洗。</p>	<p>加湿装置</p>  <p>罗茨风机</p> <p>水源</p> <p>用于供给为稳定室内温度的加湿装置和防止发生纺织, 香烟及印刷等工厂静电的气源</p>
<p>烘干生产线</p>  <p>罗茨风机</p> <p>罗茨风机</p> <p>输送带</p> <p>用于小规模生产线的烘干</p>	<p>输送谷物</p>  <p>罗茨风机</p> <p>小麦</p> <p>旋转阀</p> <p>用气体输送由回转式导阀落下来的小麦等谷物</p>	<p>粉末颗粒的输送</p>  <p>罗茨风机</p> <p>粉末颗粒</p> <p>闸门</p> <p>喷嘴</p> <p>用于输送气体氯化烯、聚乙烯等颗粒状原料 (也可以采取吸入式)</p>	<p>特殊气体</p>  <p>气罐</p> <p>工厂</p> <p>罗茨风机</p> <p>用于城市煤气供给等</p>

图 13 - 36 风机主要用途示例

为中华崛起传播智慧

地址:北京市百万庄大街22号

邮政编码:100037

**电话服务**

社服务中心: 010-88361066

销售一部: 010-68326294

销售二部: 010-88379649

读者购书热线: 010-88379203

**网络服务**

教材网: <http://www.cmpedu.com>

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版



J I E N E N G J I A N P A I



上架指导： 工业技术 / 动力工程

ISBN 978-7-111-43981-3



9 787111 439813 >

ISBN 978-7-111-43981-3

策划编辑◎曲彩云/ 封面设计◎赵颖喆

定价：86.00元