

机械设计与节能减排

吴宗泽 于亚杰 等编著



机械设计与节能减排

吴宗泽 于亚杰 等编著



机械工业出版社

随着国民经济的高速发展,我国的环境遭到日益严重的污染和破坏。单位 GDP 的成本明显高于发达国家,土壤、大气及水污染已经严重威胁到人民群众的身体健康。提高资源利用率、降低污染物的排放,实现经济的可持续发展已经成为我国迫切需要解决的重要问题。

本书共分 8 章,第 1 章介绍我国环境污染的情况及其治理;第 2 章到第 7 章介绍了提高效率、节能减排、减少污染物排放的具体办法,包括结构设计、密封、制造、绿色设计及再制造几个方面;第 8 章介绍了我国关于节能减排的一些政策和措施以及发达国家关于节能减排的政策法规等,可供读者参考。

本书可供机械设计、机械制造等相关专业从业人员及高等院校师生使用,也可供管理人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械设计与节能减排/吴宗泽等编著. —北京:机械工业出版社, 2011. 10

ISBN 978-7-111-36319-4

I. ①机… II. ①吴… III. ①机械设计—节能 IV. ①TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 224040 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

版式设计:霍永明 责任校对:张 媛

责任印制:乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2012 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·15.25 印张·312 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-36319-4

定价:38.00 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 策划编辑:(010)88379782

社服 务 中 心:(010)88361066 网络服务

销 售 一 部:(010)68326294 门户网:<http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部:(010)88379649 教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

目前,我国节能减排形势迫切而严峻。工业生产为人类生活做出了巨大的贡献,但是与之相伴的是物资消耗速度空前,日益严重的环境污染和破坏正威胁着人们的健康和正常生活,这些负面的影响阻碍了工业生产的持续发展,已经引起了全世界的重视。

制造业在节能减排中起着至关重要的作用,机电产品制造业是使用资源最多的行业,从矿山采掘、材料冶炼、零件加工、机械使用直到报废处理,会产生一系列的污染。据统计,全球 70% 的环境污染来自制造业。制造业每年产生 7 亿 t 有害废物和 55 亿 t 无害废物。2005 年我国进入家电报废高峰期,该年淘汰废旧电器达到 1500 万台,以后每年的增加量在 30% 左右。2000 年达到报废标准的汽车已达到 210 万辆,以后逐年迅速增加。这些大量报废的产品如果得不到妥善的处理,不但是极大的资源浪费,还会对环境造成严重的污染。

因此,从事机械制造的人员,理所当然地肩负着节能减排、减少污染、节约原材料的责任。必须采取各种有效措施,完成这一任务。

机械设计在节能减排中的重要作用。机械生产是由设计开始的,机械的强度、寿命,制造和装配的工艺性,材料和热处理的选择,使用和修理是否方便,回收或再制造的可能性等,都是在机械设计阶段决定的。设计中的错误和不足,很难在以后的生产或使用环节得到改正,因此,要进行有效的节能减排必须从设计开始。

设计过程必须有合理的制度和严格的管理。设计师参加制定有关节能减排的规定和制度,会使制度更加全面合理。因此本书也包括一些节能减排管理方面的内容。

本书分 8 章:第 1 章介绍我国环境污染的情况及其治理;第 2 章介绍减轻机械自重、提高有效载荷率的方法;第 3 章从抗疲劳、耐磨及耐蚀性三个方面讲解提高机械寿命的方法;第 4 章介绍零件设计的技巧;第 5 章介绍节能减排的方案;第 6 章介绍绿色设计;第 7 章介绍正在逐渐兴起的再制造技术;第 8 章介绍我国关于节能减排的一些政策、措施以及一些发达国家关于节能减排的政策、法规等。

本书由盖雨聆编写第 6、7 章,于亚杰编写第 8 章,其余各章由吴宗泽编写。吴宗泽和于亚杰负责整理和统编全书。

本书可供机械设计、机械制造等相关专业的从业人员和高等学校师生使用,也可供管理人员参考。

本书经过反复核对,但难免存有不当之处,希望广大读者批评指正。

作 者

目 录

前言

第1章 我国环境污染的情况及其治理

其治理	1
1.1 我国的环境污染情况	1
1.1.1 我国的大气污染物排放情况	1
1.1.2 我国的水污染情况	2
1.1.3 我国的固体废物污染情况	3
1.1.4 我国二氧化碳排放情况	3
1.1.5 三废排放的重点行业	4
1.2 我国对环境污染的治理	5
1.2.1 我国环境保护与可持续发展的政策和规定	5
1.2.2 我国常用的治理污染的技术	6
1.3 机械工业节能减排的重要性	9
1.4 用“循环经济”的思想指导机械设计工作	9
1.4.1 循环经济的特点	9
1.4.2 循环经济的3R原则	10
1.4.3 循环经济是节能减排的重要途径	10

第2章 减轻机器重量

2.1 选择合理的设计方案	11
2.1.1 省掉不必要的机械设备	11
2.1.2 用已有的设备代替	11
2.1.3 减少零件数目	12
2.2 合理选择和使用材料	13
2.3 结构合理设计	14
2.3.1 减小零件受力	14
2.3.2 合理设计零件的形状	16
2.4 减轻汽车重量	23
2.4.1 采用新材料	23
2.4.2 轻量化工艺技术	25

2.4.3 轻量化结构设计技术	26
-----------------	----

2.5 万能工具显微镜改进设计	26
-----------------	----

第3章 提高机械的使用寿命

3.1 概述	30
3.2 提高疲劳强度	32
3.2.1 疲劳强度设计方法	32
3.2.2 合理选择材料	33
3.2.3 改进结构	35
3.2.4 改进工艺	35
3.2.5 合理操作,定期检修	35
3.3 提高耐磨性	36
3.3.1 合理选择材料和热处理	36
3.3.2 减低表面压强	36
3.3.3 避免局部剧烈磨损	36
3.3.4 自动调节与补偿	37
3.3.5 设置易更换的磨损件	37
3.3.6 润滑剂与添加剂	38
3.4 提高耐蚀性	40
3.4.1 常见的腐蚀分类	40
3.4.2 在腐蚀工作条件下材料的选用	40
3.4.3 提高耐蚀性的机械结构	45
3.4.4 用覆盖保护层减轻或避免腐蚀	48
3.4.5 防腐蚀实例	49
3.5 机械设备维修	50
3.5.1 概述	50
3.5.2 维修的工作内容	51
3.5.3 极限技术状态	51
3.5.4 维修性设计	52
3.5.5 机械零件的修复技术	55

第4章 机械零件节能减排合理设计

4.1 螺纹连接件	59
-----------	----

4.1.1 概述	59	5.4.2 锻压加热的节能	157
4.1.2 螺纹连接的力分布	59	5.4.3 合理选择热处理方法	158
4.1.3 受轴向外载荷紧螺栓的强度计算	62	5.4.4 锻造余热利用	158
4.1.4 德国工程师协会技术准则 VDI 2230《高强度螺栓连接系统计算》	68	5.4.5 采用非调质钢	158
4.1.5 受弯曲应力的螺钉强度计算	85	5.4.6 加热炉的节能措施	160
4.1.6 提高螺纹连接强度的措施	88	5.4.7 锻造设备的振动和噪声的控制	161
4.2 密封设计	93	5.5 胶粘工艺的污染和防治	162
4.2.1 概述	93	5.5.1 胶粘剂的分类	162
4.2.2 静密封	93	5.5.2 胶粘剂对健康的主要危害	162
4.2.3 填料密封	107	5.5.3 汽车制造业防止胶粘剂危害的措施	163
4.2.4 机械密封	120	5.6 冷加工工艺的节能减排	163
4.3 钢丝绳设计	127	5.7 涂料涂装工艺的污染和防治	164
4.3.1 概述	127	5.7.1 涂料及其分类	164
4.3.2 钢丝绳的术语、标记和分类	128	5.7.2 涂料的成分	164
4.3.3 钢丝绳的工作状态和失效分析	130	5.7.3 喷涂方法产生的污染	166
4.3.4 钢丝绳的报废标准	131	5.7.4 对喷涂污染的处理	167
4.3.5 有关钢丝绳寿命的结构设计问题	136	5.8 电镀工艺的污染和防治	168
第5章 机械制造业的节能减排	137	5.9 包装的污染和防治	169
5.1 污染排放标准	137	5.9.1 概述	169
5.2 铸造工艺的污染防治和节能	151	5.9.2 包装材料	169
5.2.1 主要污染源和污染物	151	5.9.3 设计包装结构应该注意的问题	170
5.2.2 治理措施	152	5.10 润滑剂的污染和防治	170
5.2.3 节能措施	153	5.10.1 润滑剂的使用	170
5.3 焊接工艺的污染和防治	154	5.10.2 使用润滑油和润滑脂的安全问题	171
5.3.1 概述	154	5.10.3 润滑剂的储存和包装	171
5.3.2 焊接清洁生产的内容	154	5.10.4 润滑油和润滑脂的再生	172
5.3.3 焊接生产中的污染	154	第6章 绿色设计	173
5.3.4 焊接污染的卫生防护技术	155	6.1 概述	173
5.3.5 焊接生产中的安全	156	6.2 绿色设计的材料选择	173
5.4 锻压和热处理工艺的污染和防治	157	6.3 考虑拆卸回收的产品设计	174
5.4.1 概述	157	6.3.1 可拆卸设计的原则	174
		6.3.2 主动拆卸结构设计	176
		6.4 考虑包装的产品设计	176
		6.4.1 概述	176

6.4.2 机械产品的包装设计	176	进节能减排	203
6.5 节能的绿色产品设计	177	8.1.2 国家加快培育战略性新兴产业	204
6.5.1 节能降耗设计方法	177	8.1.3 节能减排与循环经济的关系	206
6.5.2 能耗标签与能耗标准	177	8.1.4 节能减排与清洁生产	208
6.6 绿色设计的评价	179	8.2 国外清洁生产政策与实施状况	210
6.6.1 绿色产品的认证和标识	179	8.2.1 美国清洁生产政策与实施状况	210
6.6.2 绿色产品评价的指标体系	179	8.2.2 丹麦清洁生产政策与实施状况	212
6.7 绿色设计案例	180	8.2.3 荷兰清洁生产政策与实施状况	216
6.7.1 地轮的绿色设计	180	8.2.4 法国清洁生产政策与实施状况	217
6.7.2 齿轮加工机床的绿色设计	180	8.2.5 德国清洁生产政策与实施状况	218
6.7.3 汽车轮胎的绿色设计	181	8.2.6 英国清洁生产政策与实施状况	220
第7章 再制造设计	183	8.2.7 捷克清洁生产政策与实施状况	222
7.1 概述	183	8.2.8 比利时清洁生产政策与实施状况	223
7.1.1 再制造基本概念	183	8.2.9 西班牙清洁生产政策与实施状况	224
7.1.2 再制造工程的现状	183	8.2.10 日本清洁生产政策与实施状况	225
7.1.3 再制造工程的工艺流程	184	8.2.11 泰国清洁生产政策与实施状况	226
7.1.4 再制造的效益	185	8.3 我国实践清洁生产, 促进节能减排的建议	228
7.2 再制造设计	185	8.3.1 我国清洁生产的实践回顾	228
7.2.1 再制造性定义	185	8.3.2 我国清洁生产推进的障碍分析	229
7.2.2 再制造性的定性要求	186	8.3.3 推进我国清洁生产工作的建议	231
7.2.3 再制造性的定量要求	189	8.4 结论	234
7.2.4 再制造性预计	190	参考文献	235
7.2.5 再制造性试验与评定	191		
7.2.6 再制造方案	191		
7.2.7 废旧件失效模式分类	192		
7.2.8 再制造技术资料	193		
7.3 再制造工艺与技术	194		
7.3.1 再制造工艺	194		
7.3.2 再制造技术	194		
7.4 再制造应用实例	199		
7.4.1 汽车发动机再制造	199		
7.4.2 废旧机床再制造	201		
7.4.3 废旧齿轮变速器再制造	202		
第8章 国内外有关节能减排的对策	203		
8.1 我国节能减排的基本情况和对策	203		
8.1.1 坚持科学发展, 大力推			

第 1 章 我国环境污染的情况及其治理

1.1 我国的环境污染情况

1.1.1 我国的大气污染物排放情况

我国是大气污染较严重的国家，SO₂ 的排放量居于世界首位。不少城市的大气颗粒物平均浓度长期处于超标状态。表 1-1 给出了我国几种主要的大气污染物的排放量。表 1-2 介绍几类工业企业向大气中排放的主要污染物情况。我国一次能源消费中煤占 70% 左右，因此 SO₂ 的排放量很大，烟尘、工业粉尘的排放量也很高，迫切需要治理。图 1-1 给出了机电产品制造过程中各种加工方法的污染物排放情况。图中表明，加工必定要使用材料和动力，而炼制材料、产生动力的过程中还要产生污染，因此为了节能减排，必须节省材料和动力。

表 1-1 我国主要大气污染物的排放量统计（/10000t）^[3]

年份	SO ₂			烟尘			工业粉尘
	合计	工业	生活	合计	工业	生活	
2000 年	1995.1	1612.5	382.6	1165.4	953.3	212.1	1092
2001 年	1947.8	1566.6	381.2	1069.8	851.9	217.9	990.6
2002 年	1926.6	1562.0	364.6	1012.7	804.2	208.5	941
2003 年	2158.7	1791.4	367.3	1048.7	846.2	202.5	1021
2004 年	2254.9	1891.4	363.5	1095	866.5	208.5	904.8

表 1-2 工业企业向大气中排放的主要污染物^[3]

工业部门	企业类别	向大气中排放的主要污染物
电力	火力发电	烟尘、SO ₂ 、NO _x 、CO ₂
冶金	钢铁	烟尘、CO ₂ 、氧化铁尘
	非铁金属冶炼	粉尘（含各种重金属如 Pb、Cu 等）、SO ₂ 、汞
化工	化工	SO ₂ 、硫化氢、氰化物、NO ₂ 、氯化物、烃类、烟尘
	氮肥厂	粉尘、NO _x 、CO、氨、酸雾
	化学纤维厂	烟尘、H ₂ S、氨、CO ₂ 、甲醇、丙酮、二氯甲烷
	农药厂	砷、汞、氯气
	合成橡胶厂	丁二烯、苯乙烯、乙烯、异丁烯、丙烯腈等

(续)

工业部门	企业类别	向大气中排放的主要污染物
机械	机械加工	烟尘、粉尘、SO ₂ 、CO _x 等(参见图1-1)
仪器	造纸	烟尘、硫醇、H ₂ S、SO ₂
	灯泡	烟尘、汞
建材	砖瓦	烟尘、CO、SO ₂ 、NO _x
	水泥	烟尘、水泥尘、SO ₂ 、NO _x
核工业	铀矿山	氡气及其衰变子体、放射性粉尘
	反应堆	¹³ N、 ¹⁶ N、惰性气体 ⁸⁵ Kr

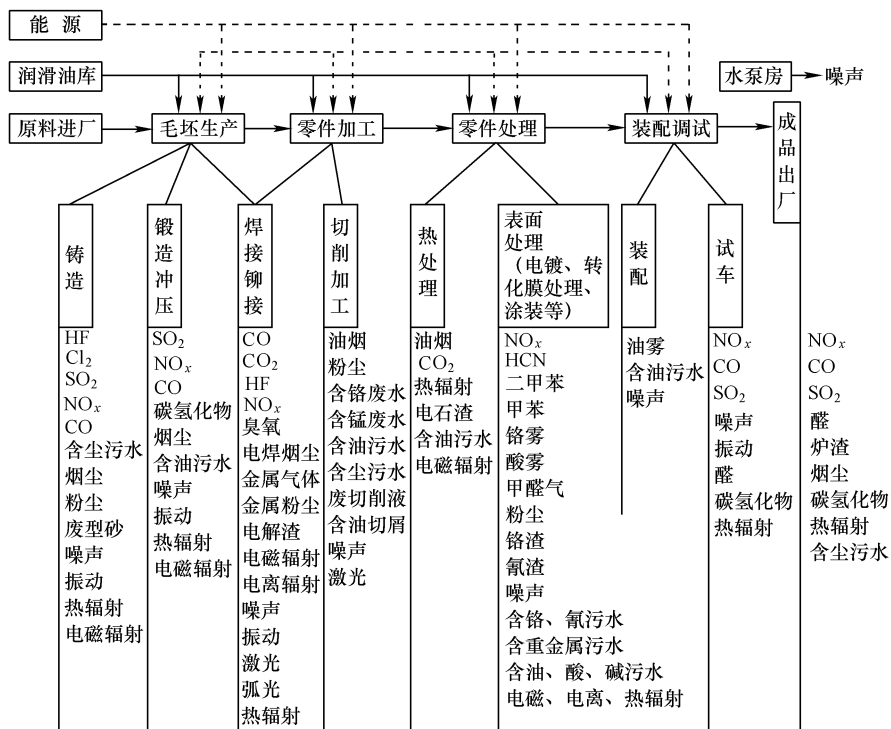


图 1-1 机电产品制造一般生产过程中的污染物排放

1.1.2 我国的水污染情况^[3]

在我国，造成水污染的原因主要有城市排放废水污染，农村禽畜养殖、化肥和农药污染，工业废水、废渣污染。

1972 年我国官厅水库受工业废水的污染，1973 年国家和各地建立了“三废治理”和“环境保护”机构。此后，工业废水治理一直是水污染防治的重点。1996 年国务院提出将三河（淮河、海河、辽河）和三湖（滇池、巢湖、太湖）作为重

点区域进行治理。1994 ~ 2004 年, 仅淮河流域就关闭了近 5000 家污染严重的企业和生产线, 使淮河干流水质得到了改善。

1.1.3 我国的固体废物污染情况

我国工业固体废物的产生量每年都有明显的增加, 其组成相对稳定。2004 年我国工业固体废物的产生量超过 1 亿 t 的行业依次为: 电力和热力生产和供应业, 钢铁材料冶炼和压延加工业, 煤炭开采和洗选业, 黑色金属矿采选业, 有色金属矿采选业。这五个行业的工业固体废物的产生量约占已统计工业固体废物总量的 75%。表 1-3 给出我国主要工业固体废物产生量占总量的比例和综合利用量占综合利用总量的比例。

表 1-3 我国主要工业固体废物产生量占总量的比例和综合利用量占总量的比例

工业固体废物	产生量占 总量的比例 (%)	综合利用量占 总利用量的比例 (%)
尾矿	29	12
粉煤灰	19	24
冶炼矿渣	13	20
煤矸石	12	13
炉渣	11	17
危险废物	1	1
其他	15	13

注: 2004 年我国主要工业固体废物总综合利用率为 55.7%。

由以上资料可以看出, 制造业使用的材料和动力, 对环境污染产生很大的影响, 是各种影响因素中的主要因素。节约材料和动力是从事制造业全体人员的重要任务。

1.1.4 我国二氧化碳排放情况

2007 年以来, 联合国气候变化专门委员会 (IPCC) 陆续发表了四次气候变化评估报告, 从科学上确认了近 50 年气候变暖由人类活动引起的可能性为 90% 以上。并且指出当温室气体浓度超过一定值时, 会导致海平面上升、病毒增加、物种减少和极端气象灾害频繁发生, 进而直接影响人类生存和发展。

我国在世界温室气体排放中占有较大比例, 二氧化碳排放量居世界前列。我国是世界上第二大能源生产国和消费国, 正处在工业化发展加速阶段, 即重化工业阶段。钢铁、汽车、造船等工业的发展和大规模的城市化, 需要消耗大量的材料和能源。在这种情况下, 温室气体排放量的增加很难避免。此外, 由于中国经济增长方式比较粗放, 能源技术装备水平低和管理水平落后, 导致单位 GDP 的能源消耗高

于主要能源消费国家的水平。2005 年，中国单位 GDP 能源消耗，大于美国的三倍，德国的五倍，日本的八倍。同时，中国的能源 70% 来自煤炭，导致二氧化碳的排放较高。因而，中国承担着减少二氧化碳排放的巨大压力。

发展低碳能源燃料是减排二氧化碳的最终途径。低碳能源技术是国家必须掌握的，不但能够达到节能减排的要求，而且可以成为新的经济增长点。

研究发展减少温室气体排放的技术，是非常重要的长期任务。能源需求的重点是：高级建筑系统、交通设施和系统、制造技术。低碳能源供应技术的重点方向在于可再生能源技术、核能、废弃物处理、氢燃料系统、能源储备系统、可持续生物能系统等。其中有很多零碳排放的能源技术，如氢能、太阳能、风能、水电，潮汐、核电、生物质能等。

2003 年，英国政府首先提出了“低碳经济”的概念，是指依靠技术创新和政策措施，建立一种限制、减少温室气体排放的经济发展模式，以减缓气候变化。低碳经济的实质是通过能源技术创新提高能源效率和发展清洁能源。

节能和减排相比，节能具有更大的效果。因为节约了能源，必然就减少了各种有害物质的排放。而人类发展必然会增加能源的利用，因此减排是必须采取的措施，节能和减排是不可分的。应该特别注意减少对化石能源（石油、煤炭、天然气等）的依赖。

1.1.5 三废排放的重点行业

据统计，2003 年我国在废水、废气和固体废弃物产生总量占前五名的行业见表 1-4。1999 年世界银行认定的污染密集企业见表 1-5。

表 1-4 2003 年我国在废水、废气和固体废弃物产生总量占前五名的行业

位次	产生污染的物质		
	废水（按排放总量）	废气（按排放总量）	固体废弃物（按产生总量）
1	造纸及纸制品业	电力蒸汽热水生产供应业	电力蒸汽热水生产供应业
2	化学原料及制品制造业	非金属矿物制品业	火力发电业
3	火力发电业	钢铁材料冶炼及压延加工业	水泥制造业
4	钢铁材料冶炼及加工业	化学原料及制品制造业	煤炭采选业
5	纺织业	非铁金属冶炼及压延加工业	非铁金属矿

表 1-5 世界银行认定的污染密集企业

位次	空气污染	水污染	金属污染	整体污染
1	钢铁	钢铁	非铁金属	钢铁
2	非铁金属	非铁金属	钢铁	非铁金属
3	非金属矿物	造纸	化工	化工
4	石油煤炭	能源制品	皮革制造	石油提炼

(续)

位次	空气污染	水污染	金属污染	整体污染
5	造纸	化工	陶瓷制造	非金属矿产
6	石油提炼	其他化工制品	金属产品	造纸
7	化工	饮料	橡胶制品	其他化工制品
8	其他化工制品	食品	电子产品	橡胶制品
9	木材制品	橡胶制品	机械	皮革制品
10	玻璃制品	石油提炼	非金属矿产品	金属制品

资料来源：World Development Report, World Bank, 1999.

1.2 我国对环境污染的治理

1.2.1 我国环境保护与可持续发展的政策和规定

1982年以来，全国人大常委会陆续制定了一系列关于环境保护的法律。下面介绍这些法律的名称及制定和修订时间，还列举了一些其他命令、规定、标准等，以备查用。

- 1) 《环境保护法》基本法，1989年制定。
- 2) 《海洋环境保护法》1982年制定，1999年修订。
- 3) 《水污染防治法》1984年制定，1996年修订。
- 4) 《大气污染防治法》1987年制定，1995年、2000年修订。
- 5) 《固体废物污染环境防治法》1995年制定，2004年修订。
- 6) 《环境噪声污染防治法》1996年制定。
- 7) 《放射性污染防治法》2003年制定。
- 8) 《中华人民共和国节约能源法》中华人民共和国主席令第77号，2008年4月1日施行。
- 9) 《全国污染源普查条例》国务院令第508号，2007年10月9日公布施行。
- 10) 《中华人民共和国电子废物污染环境防治管理办法》国家环境保护局令第40号，2008年4月1日施行。
- 11) 《中华人民共和国循环经济促进法》中华人民共和国主席令第4号，2009年1月1日施行。
- 12) GB/T 21471—2008 废弃电子电气产品再使用及再生利用体系评价准则。
- 13) GB/T 18883—2002 室内空气质量标准。
- 14) GB/T 14848—1993 地下水质量标准。
- 15) GB/T 15618—1995 土壤环境质量标准。
- 16) GB/T 21900—2008 电镀污染物排放标准。

- 17) GB/T 16297—1996 大气污染物综合排放标准。
- 18) GB/T 13271 锅炉大气污染物排放标准。
- 19) GB/T 16171—1996 炼焦大气污染物排放标准。
- 20) GB/T 9078—1996 工业炉窑大气污染物排放标准。
- 21) GB/T 18918—2002 城镇污水处理厂污染物排放标准。
- 22) GB/T 20426—2006 煤炭工业污染物排放标准。
- 23) GB/T 13456—1992 钢铁工业水污染物排放标准。
- 24) GB/T 22421—2008 通信网络设备的回收处理要求。
- 25) GB/T 22422—2008 通信记录媒体的回收处理要求。
- 26) GB/T 22423—2008 通信终端设备的回收处理要求。
- 27) GB/T 22426—2008 废弃通信设备产品回收处理设备要求。
- 28) GB/T 18598—2001 危险废物填埋污染控制标准。
- 29) GB/T 18599—2001 一般工业固体废物贮存、处置场污染控制标准。

1.2.2 我国常用的治理污染的技术

我国于 1973 年 12 月颁布了中国第一个环境标准《工业“三废”排放试行标准》。以后逐渐加强了对废气、废水、废渣的治理，积累了不少经验。表 1-6 ~ 表 1-8 给出了我国常用的治理三废的技术。

表 1-6 我国常用的大气污染治理技术

技术类型	特 点	说 明
除 尘 抑 尘 技术	机械式	利用重力、惯性力、离心力等除尘，除尘效率 40% ~ 60%
	湿式	利用水或其他液体与含尘气体接触，适于处理有爆炸危险或同时含有多种有害物质的气体
	过滤式	靠过滤材料清除有害物质，用于原料气的精制、固体粉料的回收，要注意及时清灰
	电式	含尘气体在通过高压电场时电离，使尘粒带电，在电场作用下分离，压力损失小，处理烟气量大，能耗低，对细粉尘捕集率高
煤 炭 脱 硫 技术	替换煤炭	换含硫量低的煤炭
	选煤	有物理法、化学法、生物法等去除煤中的硫分
	煤炭加工和转 化	汽化、液化或制成煤液混合物、型煤等
燃 烧 过 程 中 脱 硫	型煤团硫	用沥青、石灰等作为粘结剂将粉煤加工成一定的形状，可以减少 SO ₂ 排放 40% ~ 60%，提高燃烧热效率 20% ~ 30%
	流化床燃烧脱 硫	将煤炭与脱硫剂一起送入循环流化床锅炉中，形成固态硫酸钙，是清洁高效的脱硫方法
	炉内喷钙技术	钙的利用率和脱硫效率较高

(续)

技术类型	特 点	说 明
扬 尘 污 染 治 理 技 术	生态环境治理	绿化地面，硬化地面
	加强施工管理	施工现场建立围栏、及时覆盖、四级风以上停止容易制造扬尘的施工等
	覆盖易产生扬尘的物料	对于砂石、煤炭、沙、渣土等易产生扬尘的物料及时覆盖、洒水
	避免交通扬尘	防止各种尘源进入道路，减少路上的尘土，改进清扫方式

表 1-7 我国常用的水污染治理技术

技术类型	特 点	说 明
物 理 方 法	稀释	将高浓度废水与低浓度废水或天然水混合以降低污染程度
	调节	设调节池，调节水量、水质变化较大的情况
	重力分离	用沉淀、隔离、气浮等方法处理水中的悬浮物
	离心分离	利用离心设备的高速旋转，使废水中的悬浮物与水分离
	过滤	用格栅、筛网、沙滤等手段滤掉水中的杂质和悬浮物等
	热处理	用蒸发、结晶等方法
	磁分离	利用磁场截留和分离水中的磁性悬浮物和重金属离子等
化 学 方 法（投 药 法）	混凝	加入化学药剂破坏胶体的稳定性，使水中悬浮物和胶体形成有可分离性的絮状体，再使之分离、除去
	中和	用中和的方法使水的 pH 达到处理要求（pH = 6 ~ 9）
	氧化还原	利用氧化还原等方法使水中的有害物质转化为无害物质
	化学沉淀	利用沉淀剂与废水中的可溶性污染物起作用而产生沉淀
	电解	常用于去除重金属离子、酚、致病微生物等
物 理 化 学方法	消毒	对于含细菌、微生物的废水加入漂白粉、液氯等消毒剂
	汽提	利用易挥发性杂质在水溶液或水蒸气中的分配作用去除或回收杂质
	吹脱	通过改变与废水相平衡的气相的组成，使废水中的易挥发物转入气相，达到除脱的目的
	萃取	向废水中加入互不相溶，但能够溶解污染物的溶剂（即萃取剂），使污染物大部转入萃取剂，然后分离水和萃取液
	吸附	利用多孔性固体吸附剂把废水中的可溶性物质或无机物吸附到其表面，而达到去除污染的目的。常用的吸附剂有活性炭、白土和焦炭等
	离子交换	用离子交换剂上的离子和废水的离子交换，去除有害离子。常用于去除废水中的重金属离子
	膜分离	利用各种膜的作用，实现分离废水中的有害物质，有电渗析、反渗透、超滤、纳滤、液膜分离等方法

表 1-8 我国常用的固体废物处理技术

技术类型	特 点	说 明
化 学 处 理	中和	主要用于处理化工、冶金、电镀等行业的酸性或碱性废渣，使用中和剂与之发生化学反应，降低毒性，中和剂多采用石灰、硫酸、盐酸等
	氧化还原	通过氧化或还原，使固体废物转化为无毒或低毒的化学稳定物质。例如用煤粉、废活性炭等在回转炉中培烧，或在酸性介质中加入 FeSO_4 、 Na_2SO_3 等还原剂，可将铬渣中的主要毒性成分 6 价铬变成 3 价铬
	化学浸出	用适当的化学溶剂与固体废物发生作用，使其中某些成分选择性溶解，然后回收，可以用于从矿渣中回收贵金属
热 化 学 处 理	焚烧	焚烧可以减少废物的体积，利用其热量，并且有消毒作用。主要用于热值大于 3400kJ/kg 的生活垃圾、医疗垃圾等
	热解	将固体废物在无氧或缺氧条件下加热，使之分解成相对分子质量较小的组分，适于处理废塑料、废橡胶、农业有机废物等
生 物 处 理	堆肥化	通过细菌、真菌等微生物的作用，使固体废物转化成为有机肥，适用于处理生活垃圾、人畜粪便、生活污水污泥等
	厌氧消化	利用厌氧微生物将固体废物中的有机质等分解为稳定、无毒、低毒的物质，同时获得沼气，主要用于处理生活垃圾、农业固体废物、污水污泥等
	生物浸出	用含有某些微生物的溶液与固体废物发生作用，浸出铜、镍、锌、锰等金属，主要用于处理尾矿、矿山废石等，反映温和，能耗较低
固 化 处 理	水泥固化	用硅酸盐水泥和吸附剂、促凝剂使固体废物固化，适用于含重金属的污泥、原子能工业废料等，费用低，但固化体浸出率、增容率较高
	石灰固化	用石灰、粉煤灰、垃圾焚烧灰渣等为固化剂，以活性硅酸盐类为添加剂，使固体废物固化。适用于钢铁、机械工业酸洗产生的废渣、电镀污泥等。处理费用低，固化体可以用于路基、矿坑充填等，但易受酸性介质侵蚀
	沥青固化	用沥青类材料为固化剂，与固体废物在一定温度下均匀混合。适用于中、低放射性蒸发残液、神渣、焚烧残渣等。具有较好的化学稳定性
	玻璃固化	以玻璃原料为固化剂，与固体废物按一定比例混合后，在 $1000 \sim 1200^\circ\text{C}$ 温度下熔融，退化后形成稳定的玻璃固化体，用于处理放射性废物、重金属污泥等

此外，我国对于固体废物的处理还采用陆地填埋或海洋处理的方式。陆地填埋有土地填埋和深井填埋，要严格控制，避免污染。海洋处理只限于主管部门拟定的名录中的固体废物，而且必须遵守相关法规、标准。

1.3 机械工业节能减排的重要性

由表1-5来看,机械工业只在金属污染一项中列第九位。似乎与钢铁、非铁材料、火力发电相比污染较小,但仔细研究并非如此。据统计,造成全球环境污染的污染物70%来自制造业。制造业每年约产生7亿t有害废物。这是因为:

1) 机械工业生产的产品使用大量的材料,如钢铁、非铁材料、塑料、橡胶等。如果机械工业能够节约使用材料,对减轻污染会有很大的作用。

2) 在机器使用过程中,会使用大量的电力、石油、煤炭等作为动力。这些能源的生产和使用(如汽油燃烧)都会产生污染。如果机械工业的能耗能够降低,对减轻污染会有很大贡献。

3) 在机械制造工艺中有一些对环境的污染很严重,耗能较大,如铸造、电镀、喷漆等,热处理、焊接和锻造影响也较大。

4) 在机器使用过程中要修理,最后要报废,如何处理这些废弃的机器和零部件,是对环境污染有重大影响的问题。

因此,机械制造工程师必须注意节能减排,为我国环境的改善提供有效的措施。由于机械设计占有重要的地位,很多节能减排的措施要在设计机械产品时就预先考虑到,使机械产品在整个寿命周期中能够满足节能减排的要求。如果设计时考虑不周,在制造和使用中是很难纠正和挽回的。

1.4 用“循环经济”的思想指导机械设计工作

1.4.1 循环经济的特点

当代资源环境问题日益严重的根源在于工业化运动以来,循环经济是以强物质化为特征的线性经济模式。其特点是高的资源消耗和高污染排放。针对这一情况,提出了人类社会的未来应该建立一种物质生命周期经济,即循环经济。不但保证了物质生活的发展,又保持了所要求的环境,并且避免了资源环境的退化。从物质流的角度来看,传统工业社会的经济是一种由“资源—产出—污染排放”单向流动的线性经济。它是把资源(各种物质和能源)不断变成垃圾的运动,且以日益恶化的自然条件为代价,来实现经济的增长。与此不同,循环经济倡导的是一种与地球和谐发展的模式。它要求把经济活动组成一个“资源—产品—再生资源”的反馈式流程。物质和能源要能在这个循环中得到合理和持久的运用,把经济活动对自然环境的不良影响降低到尽可能小的程度。

1.4.2 循环经济的3R原则

循环经济的操作原则可以归纳为减量化（Reduce）、再利用（Reuse）和再循环（Recycle）原则，也可以称为“3R原则”。有人在3R原则的基础上，增加了“再制造”（Remanufacture）而称为“4R原则”。

（1）减量化原则 要减少进入生产和消费流程的物质质量。例如购买轻型轿车而不是大型轿车，用光纤代替铜导线，用光盘存储代替纸存储。

（2）再利用原则 尽可能多次和多种方式地利用机械产品，避免使其过早地成为垃圾。在设计中选用标准件，使这些零件便于更换或用于其他场合。如包装箱和内装的商品采用标准尺寸，使其可以用于装其他产品。电器设备的遥控器、充电器、外接电源等如果能够互换使用，即使只是同一公司的产品可以互换使用，也可以避免许多废弃的装置。

（3）再循环原则 也称为资源化原则。产品、零部件或其材料，尽可能多地返回使用。我国人口到2020年将达到14~15亿，之后才能逐渐减少。而那时消费水平要有很大提高。因此，资源环境压力很大，必须采用“循环经济”的模式，才能够保证持久的发展。

1.4.3 循环经济是节能减排的重要途径

采用循环经济，使新投入的材料和物资减少了，而旧设备和材料的利用率不断增加，对材料和能源的需求就可以减下来。它是节能减排的重要途径。

本书介绍的内容都与此有关，这也是现代机械设计的一个重要的指导思想。

第 2 章 减轻机器重量

减轻机器重量是节能减排的一个很好的措施。汽车质量每减轻 1%，燃油消耗量降低 0.6% ~ 1%，排放也随之减少，而且减少了材料的消耗，从采矿到冶炼、运输、加工等一系列工作量都减轻，能量消耗也同时减少。下面介绍几种减轻机器重量的途径。

2.1 选择合理的设计方案

2.1.1 省掉不必要的机械设备

再循环经济的 3R 原则中，第一个就是减量化（Reduce），其含义就是省掉不必要的机械设备，也包括减少不必要的配套装置，零部件等。很少用到的大型、精密专用设备，不必购置，可以靠“对外协作”的方法解决。小的修配间，机械加工工作量不大，可以不必各种机床都购买，而购置一台多用机床，达到一机多用，减少了机械设备的数量，也可减小车间面积。这是“节能减排”的一个最简单、易行、有效的措施。就是在添置新设备以前，仔细思考一下“能不能不要这个设备？”“能不能用其他设备代替它？”减少一台设备，则制造、使用、修理、报废等一系列工作都不发生了，材料、能量、人力、运输、安装等工作和消耗都没有了，污染也彻底避免了。所以减量化（Reduce）是实现再循环经济的 3R 原则中的第一步，也就是首先应该考虑的问题。

2.1.2 用已有的设备代替

研制新设备，常需要较长的研制时间，消费较多的人力、物力。使用现有的设备，甚至使用某些闲置的设备进行适当的改造，以满足使用要求，不但是可行的，而且是很好的“再利用（Reuse）”措施。它启用了闲置的设备，使之“变废为宝”，而且缩短了制造新设备的时间。此外，利用某些现有的零部件搭配、组合成新的设备，也可以减少新产品的研制工作，起到“再利用（Reuse）”的作用。

在为满足工作需要，设计一台新机器的时候，首先应该考虑是否可以用现有的机器设备完成要求的功能，而不必另行设计制造一台新的设备，或用现有的其他设备或零件的重新组合代替，以满足使用要求，尤其是这一台设备只是为了完成某一任务，只有短期、暂时的使用要求，这种情况下，应该尽量少设计制造全新的设备。这样不但节省了时间，而且在很多情况下也是经济的，有利于节能减排的。

例如，为了试验一批润滑油的性能，需要一台“四球试验机”，而当时没有现成的试验机购买，使用者不是设计一台新的“四球试验机”，而是把一台旧的钻床改装，很快就完成了，而且效果很好。

还有，有人在作试验的时候，需要记录一台磨损试验机的往复次数，他买了一个为老年人散步，记录行走步数的“计步器”，安装在往复运动零件上面，十分合用。

有人在试验中，需要小的蜗杆传动装置，专门为此加工几套，很费时间，他使用了为小提琴微调琴弦使用的蜗杆蜗轮组合件，很容易购买到现成的组件，也很适用。

研究“全息摄影”需要一个隔振的工作台，上面放置全息摄影的激光光源、反射镜、被摄物体、感光装置等。要求不能有振动，否则不能完成摄影工作。试验者用几个大型的汽车内胎，充满空气，上面放一个钢板，很快隔振工作台就完成了，而且效果很好。

某光学仪器厂常年生产多种光学仪器，有些型号的产品产量并不多，但是社会很需要。因此增加品种成为尖锐的矛盾。一位设计师，接受这一设计任务时，所作的设计只需要制造4个新的零件，其他零部件完全采用该厂其他产品的零部件，“只要增加4个新零件，就可以增加一个新产品”，成为该厂成功设计的典范。这对设计者也是很有启发性的实例。

以上几个实例，设计者深入了解了使用的要求，用最简单易行的方法满足了使用要求，开发了新产品。这些设计反映了设计者的智慧，也说明了制定设计方案时，设计师必须具有广泛的知识 and 灵活处理实际问题的能力。

2.1.3 减少零件数目

为了实现同一要求，可以有多种不同的结构，其中零件数目较少的方案，比较容易达到使用材料和加工时间较少的要求。图2-1所示是一个传动带轮和支架的三

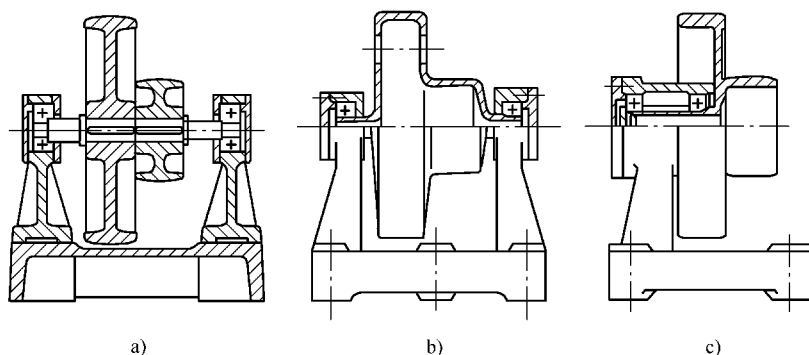


图 2-1 传动带轮和支架的三种结构方案

a) 方案1 b) 方案2 c) 方案3

种结构方案。根据使用要求、加工方便、零件数目等，评价见表 2-1。

表 2-1 带传动装置 3 种方案的比较

顺序号	技 术 要 求	方案 1	方案 2	方案 3
1	构件数少	2	3	4
2	小零件数少	2	3	4
3	占用面积小	2	2	3
4	底板不易变形	2	3	3
5	支架轴承孔同心度高	2	2	3
6	轴承承载能力大	4	4	3
7	总重量轻	2	2	3
8	加工时切削工作量小	3	3	4
9	加工方便	2	3	3
10	装配方便	2	3	3
11	更换平带方便	2	2	4
12	润滑加油方便	3	3	3
总分		28	33	40

注：表中评定标准：2——一般，3——好，4——很好。

2.2 合理选择和使用材料

机械制造的主要工作就是把材料加工成各种形状和性能的零件，装配以后成为具有各种性能的机械设备。机械制造使用的材料有钢铁材料（黑色金属）、非铁材料（有色金属）、非金属（塑料、木材、橡胶、玻璃等），其中钢铁占 90% 以上。这是由于钢铁材料在强度、刚度、耐磨性、耐腐蚀、热处理和加工性能方面具有一系列的优点，价格适当，得到了广泛的应用。机械的常用零件齿轮、滚动轴承、轴、紧固件、机架使用最多的材料就是钢或铸铁。由表 1-2，表 1-4，表 1-5 可以看出钢铁工业和非铁金属冶炼工业，是产生污染的主要行业，也是消耗能源的大户。因此减少材料的消耗，减轻机器的重量，节省原材料，对于节能减排有显著的效果。

提高材料的强度，尤其是提高关键零件的强度，对于减轻机械的重量，节约材料有重要的作用。例如齿轮减速器，过去采用碳素钢调质处理的低硬度齿面齿轮，其齿面硬度在 350HBW 以下，由于齿面硬度低，承载能力差，齿轮减速器尺寸很大，后来采用硬齿面齿轮，或中硬齿面齿轮，由于齿轮硬度提高，齿轮的尺寸减小，减速器的箱体尺寸随之减小（或同样尺寸减速器，传递功率较大）。中硬齿面齿轮减速器和硬齿面齿轮减速器的材料和热处理见表 2-2（摘自 ZBJ19004—1988）。图 2-2 所示为两级展开式渐开线圆柱齿轮减速器，以中心距 $d = 400\text{mm}$ 的 ZLY（圆

柱齿轮—两级—硬齿面)、ZLZ (圆柱齿轮—两级—中硬齿面) 减速器为例。其外形尺寸相同 $A \times B \times H = 1280\text{mm} \times 690\text{mm} \times 968\text{mm}$, 质量 1750kg。取高速轴转速 $n_1 = 1500\text{r/min}$ 、传动比 $i = 18$ 的减速器数据比较, ZLY 型硬齿面齿轮减速器传递功率可达 899kW, ZLZ 型中硬齿面齿轮减速器传递功率可达 216kW, 相差 4 倍多。同样尺寸的软齿面齿轮减速器传递功率为硬齿面传递功率的 1/9 以下, 目前已很少使用。

表 2-2 渐开线圆柱齿轮减速器的齿轮材料和热处理

	齿面硬度	材料和热处理	齿轮精度等级
软齿面齿轮减速器	220 ~ 290HBW	40, 40Cr, 正火、调质	7 ~ 8 级
中硬齿面齿轮减速器	300 ~ 330HBW	42CrMo, 调质	7 级
硬齿面齿轮减速器	55 ~ 62HRC	17CrNiMo, 20CrMnTi 渗碳淬火	5 ~ 6 级

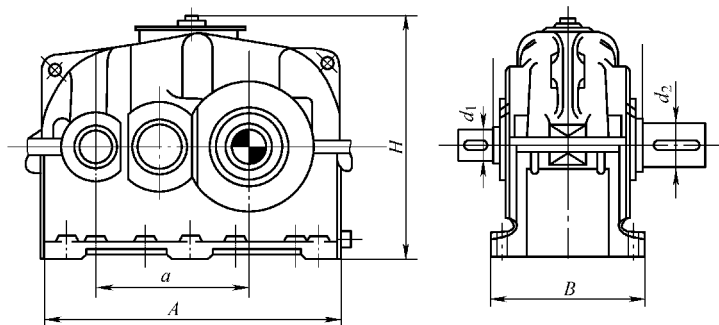


图 2-2 两级展开式渐开线圆柱齿轮减速器 (ZBJ19004—1988)

2.3 结构合理设计

机械都要承受一定的载荷, 按强度和刚度要求, 可以确定机械结构的尺寸。合理设计结构, 可以减小构件所受的载荷或应力, 从而减轻机械结构的重量。下面介绍几种常用的措施。

2.3.1 减小零件受力

(1) 合理传力 设计时应该注意拖动功率在各零件之间的传递过程, 有关的传力零件应该保证具有足够的强度和刚度。因此减小零件受力可以减小零件的尺寸和重量。如图 2-3 所示, 当转矩由一个零件输入, 而由几个传动零件输出时, 为了减小受转矩最大的轴段的转矩, 应该将输入转矩的零件放在中间。图 2-3a 中受最大转矩的轴段, 所受转矩为 $T = T_1$ ($T_1 > T_2$); 图 2-3b 中受最大转矩的轴段, 所受转矩为 $T = T_1 + T_2$ 。因此, 方案 a 的轴直径可以小一些。在图 2-4 所示的起重机卷筒的两种安装方案中, 图 2-4b 中, 大齿轮的转矩经过轴传给卷筒, 轴受转矩和弯矩

的联合作用。而图 2-4a 大齿轮与卷筒直接连在一起, 转矩由大齿轮直接传给卷筒, 轴不受转矩, 只受弯矩, 因而设计较为合理。

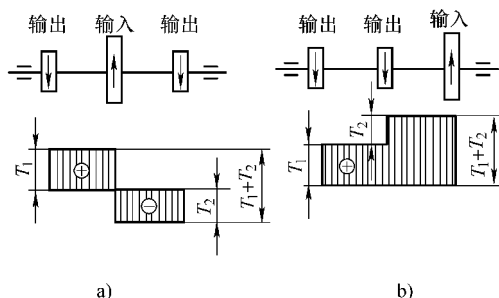


图 2-3 轴上传动零件布置方案

a) 较好 b) 较差

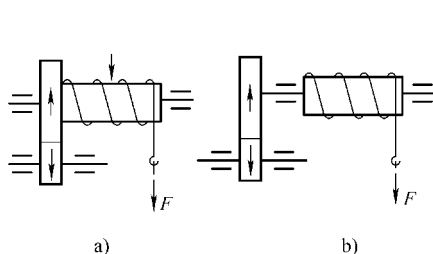


图 2-4 起重机卷筒的两种安装方案

a) 较好 b) 较差

(2) 载荷分担和均化 把作用在一个零件上面的载荷, 分给两个或更多的零件来承担, 从而减小该零件的载荷。图 2-5 所示的卸载带轮, 常用于机床传动箱的带传动。平带的压轴力从带轮经滚动轴承、轴承支座及螺钉传给箱体, 转矩从带轮通过左端带有花键孔的凸缘, 经过轴端的花键使轴转动。这样的结构, 轴只受转矩, 而不受压轴力产生的弯曲力矩, 可以减小轴的直径。

图 2-6 所示是中华世纪坛滚轮车组结构。中华世纪坛的旋转圆坛, 质量为 3000t, 直径 47m, 由 96 台滚轮车组支持, 每个车组有两个车轮。如果各车轮受力不均匀, 则会缩短车轮和轨道的寿命。为了使车轮均载, 在车组中设置弹簧均载装置, 因载荷较大采用碟形弹簧。用电阻片贴在钢轨上面测量各轮的的压力, 世纪坛转动, 使各轮通过测试位置时测量。靠增减调整垫片 6 使各车轮的载荷接近。

减小和均化载荷的目的, 是减小零件的尺寸, 以减轻其重量, 节约材料。

(3) 载荷自平衡 图 2-7a 所示的斜齿圆柱

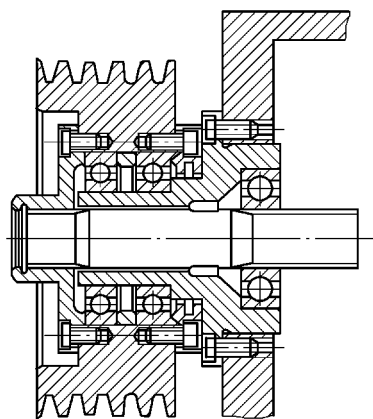


图 2-5 机床卸荷带轮结构

齿轮有轴向力, 由轴承承担。而图 2-7b 所示人字齿轮两边的轴向力互相平衡, 没有轴向载荷作用在轴承上面。这种结构称为自平衡, 减小结构的载荷。摩擦轮传动装置要求有很大的压紧力, 以产生足够大的摩擦力, 对于机架、轴和轴承的承载能力提出了较高的要求。图 2-8 所示的滚锥平盘式 (FU 型) 无级变速器, 采用对称布置结构, 充分利用压紧力的互相平衡, 传递功率大, 结构紧凑, 设计巧妙, 是载荷自平衡利用较好的实例, 但是比较复杂。

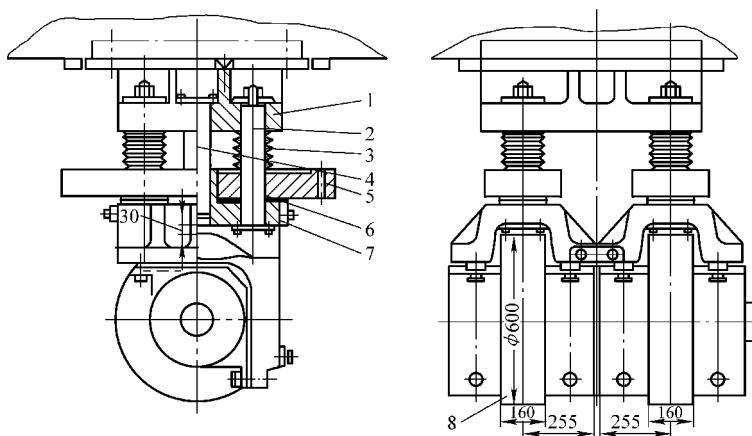


图 2-6 中华世纪坛滚轮车组结构

1—上支座 2—导杆 3—碟形弹簧 4—导柱 5—调整板
6—调整垫片 7—下支座 8—车轮

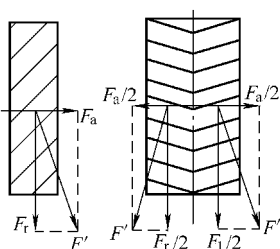
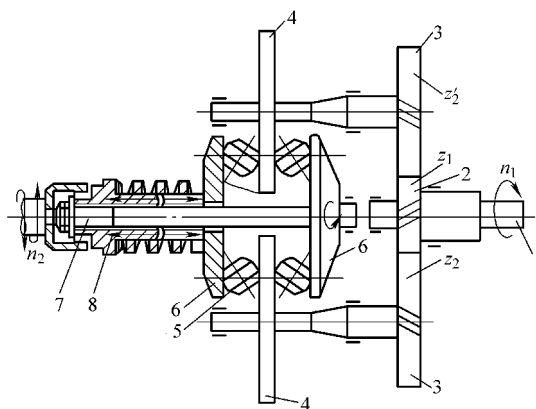
图 2-7 自平衡轴向载荷
的人字齿轮传动

图 2-8 滚锥平盘式 (FU 型) 无级变速器

1—输入轴 2、3—传动齿轮 4—主动平盘 5—滚锥
6—从动平盘 7、8—输出轴

2.3.2 合理设计零件的形状

为了机械零件具有较大的强度和刚度，在不增加重量的前提下，应该尽可能提高其承载能力。在设计时可以参考现有的设计资料，利用材料力学的计算公式或采用有限元和优化技术，使零件的材料发挥最大的作用。

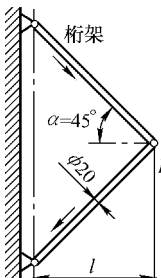
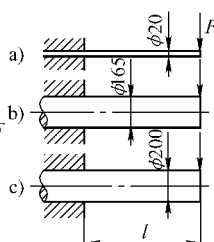
1. 选择零件的形状

1) 用拉压代替弯曲。悬臂梁受弯曲应力，强度和刚度都低于桁架。因为桁架杆受的是拉压应力。见表 2-3。左面的桁架杆直径为 20mm，右面的三种悬臂梁直径分别为 20mm，165mm，200mm。以上四种结构同样在距离墙壁为 l 的位置受 F ，

f 为端点变形, σ 为杆中最大应力, G 为重量。下标 1 表示桁架的有关数值, 下标 2 表示三种悬臂梁的数值。例如第一行, 表示直径 20mm 悬臂梁的变形是桁架变形的 9000 倍, 应力是 550 倍, 而重量是桁架的 35%。

当 l/d 与 α 角取值不同时, f/f 和 σ/σ 值也不同, 由图 2-9 可以看出 $\alpha = 45^\circ \sim 60^\circ$ 时, 桁架对悬臂梁有最大的刚度。图中 f 、 σ 及下标的含义同表 2-3。上面的原理可以用于结构设计, 如图 2-10a 的简支梁, 可以用图 2-10b 的桁架或图 2-10c 的弓形梁代替。图 2-11 中三角形支架优于杆形支架。图 2-12 锥形筒受力情况优于圆形筒。

表 2-3 三角桁架与悬臂梁的刚度和强度比较

	悬臂梁			f_2/f_1	σ_2/σ_1	G_2/G_1
				9×10^3	550	0.35
				2	1	25
				1	0.6	35

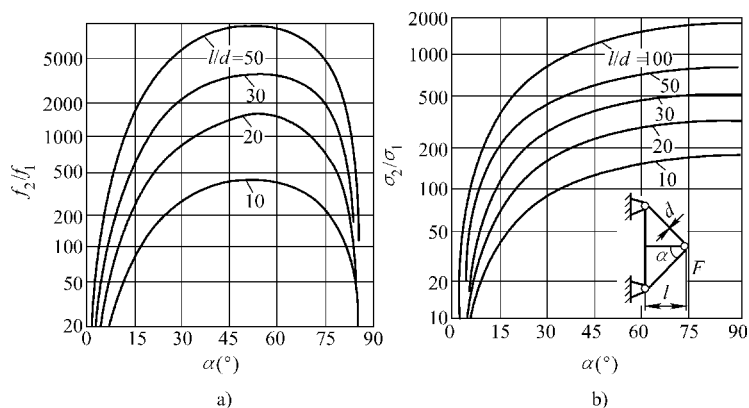


图 2-9 三角形桁架与悬臂梁的挠度与刚度比较

a) 挠度的比较 b) 应力的比较

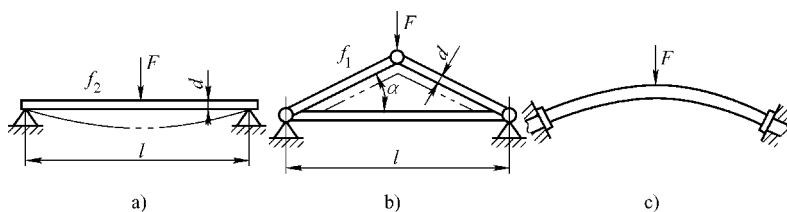


图 2-10 简支梁结构的改善

a) 简支梁 b) 桁架 c) 弓形梁

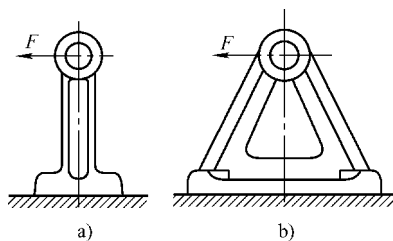


图 2-11 改善铸造支座的刚度

a) 杆形支架 b) 三角形支架

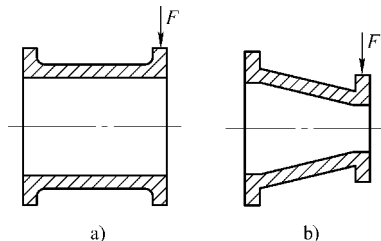


图 2-12 悬臂薄壁筒

a) 圆形筒 b) 锥形筒

2) 支承条件对强度和刚度的影响。支承条件对机械零件的强度和刚度有明显的影响, 对轴类零件弯曲强度和刚度的影响尤为显著。在设计轴类零件时, 应尽量避免悬臂梁和支点间距离很大的简支梁。图 2-13 所示三种不同的支承条件, 其最大弯曲力矩 $M_{\max}$ 和最大挠度 $f_{\max}$ 有明显的差别。

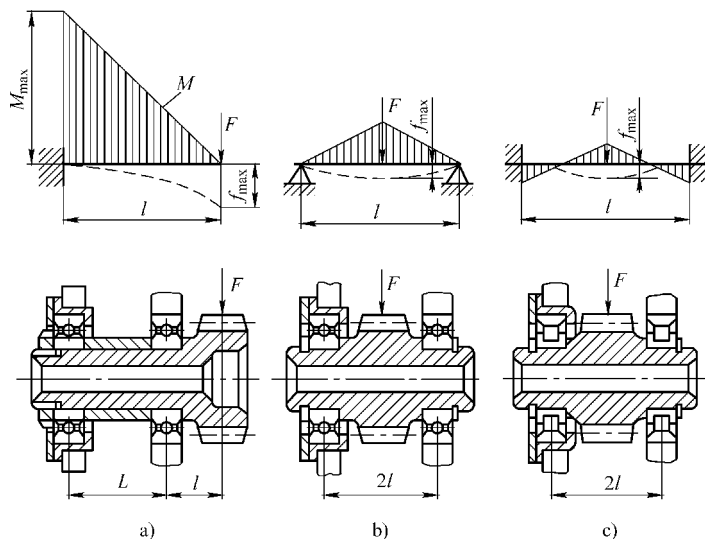


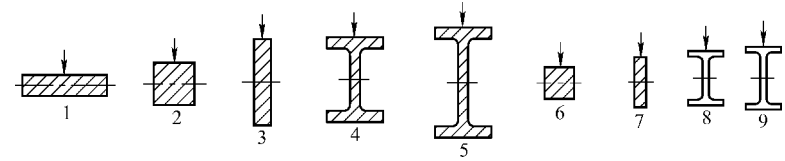
图 2-13 支承条件对强度和刚度的影响

$$\text{a) } M_{\max} = Fl; f_{\max} = \frac{Fl^3}{3EI} \quad \text{b) } M_{\max} = \frac{Fl}{4}; f_{\max} = \frac{Fl^3}{48EI} \quad \text{c) } M_{\max} = \frac{Fl}{8}; f_{\max} = \frac{Fl^3}{192EI}$$

3) 截面形状的确定。对于受弯曲、扭转的轴和受压力的长柱 (有失稳的危险时), 其截面形状对于其承载能力有很大的影响。为了减轻这类零件的重量, 应该考虑其形状设计。表 2-4 给出非圆形截面轴的强度、刚度与质量的比较, 其中, W 为梁的抗弯截面系数, I 为抗弯惯性矩, G 为单位长度的重量, A 为截面积。

对于圆截面受弯曲应力的轴, 当其截面面积相同时, 空心轴比实心轴的强度和刚度都要高, 见表 2-5。或者说, 强度或刚度相同时, 空心轴的重量较轻, 见表 2-6。

表 2-4 非圆形截面轴的强度、刚度与质量



$F (G) = \text{常数}$				$W = \text{常数}$			
图号	G	W	I	图号	G	W	I
1	1	1	1	6	0.6	1	1.7
2	1	2.2	5	7	0.33	1	3
3	1	5	25	8	0.2	1	3
4	1	9	40	9	0.12	1	3.5
5	1	12	70				

表 2-5 截面面积相同的空心轴比实心轴强度和刚度提高的相对值 (实心轴为 1)

$K = D_0/D_1$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
W_0/W	1.01	1.06	1.14	1.27	1.44	1.70	2.09	2.73	4.15
I_0/I	1.01	1.08	1.19	1.38	1.67	2.12	2.92	4.55	9.46

注: W_0 —空心轴截面系数; W —实心轴截面系数; I_0 —空心轴截面的惯性矩; I —实心轴截面惯性矩。

表 2-6 强度 (W) 或刚度 (I) 相同时, 空心轴比实心轴重量降低的百分比

$K = D_0/D_1$		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
强度 (W)	D_1/D	≈ 1.0	1.0005	1.003	1.009	1.022	1.047	1.096	1.192	1.427
	D_0/D	0.1	0.2	0.301	0.404	0.511	0.628	0.767	0.954	1.285
不变	$\Delta G (\%)$	1	3.9	8.8	15.3	23.4	33	44.1	57.1	72.9
刚度 (I)	D_1/D	≈ 1.0	1.0004	1.002	1.007	1.016	1.035	1.071	1.141	1.306
	D_0/D	0.1	0.2	0.301	0.403	0.508	0.621	0.75	0.913	1.175
不变	$\Delta G (\%)$	1	3.9	8.8	15.5	23.8	35	45.4	58.9	75.2

注: D —实心轴直径; D_1 —空心轴外径; D_0 —空心轴内径; $\Delta G (\%)$ —空心轴比实心轴单位长度重量降低的百分比。

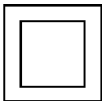
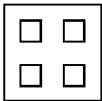
2. 确定肋的形状和尺寸

为了提高大型零件的强度和刚度, 减轻重量, 节约材料, 常需要加肋。肋的厚度, 一般比铸件的壁厚, 约为铸件壁厚的 80%。表 2-7 给出几种肋的形式, 其中斜肋效果最好。

图 2-14 给出了加肋的平置矩形截面的形状及其惯性矩 I 和抗弯截面系数 W , 图中 I_0 和 W_0 表示没有肋时 (即 $h = b = 0$) 的惯性矩和抗弯截面系数。图中给出的是二者的相对值, 即: I/I_0 , W/W_0 。肋的相对高度为 $\eta = h/h_0$ 和相对宽度 $t_0 = b_0/h_0$ 。

b 。由图可以看出,当肋的高度和厚度取值不当时, $W/W_0 < 1$, 强度会有所降低, 设计者应该注意。例如选 $\eta = 2$, $t_0 = 100$, 即 $h = 2h_0$, $b_0 = 100b$ 。则由图 2-14b 可知, 其 $I/I_0 = 1.5$, $W/W_0 = 0.3$ 。表示刚度略有提高, 而强度明显降低。即在宽度很大的板上面设置很低的肋, 对于它的强度不但无利, 而且有害。综合考虑强度、刚度及铸造工艺等因素, 建议取 $\eta \leq 5$, 肋的厚度取为 $(0.6 \sim 0.8) h_0$ 。关于肋的设计, 箱体壁上开孔等问题的设计资料, 可以参考 [17] 第 3 卷, 第 18 篇机架与箱体。

表 2-7 四种断面形式的刚度比较

断面	$I_{\text{弯}}$	$I_{\text{扭}}$	断面	$I_{\text{弯}}$	$I_{\text{扭}}$
	1	1		1.55	3
	1.17	2.16		1.78	3.7

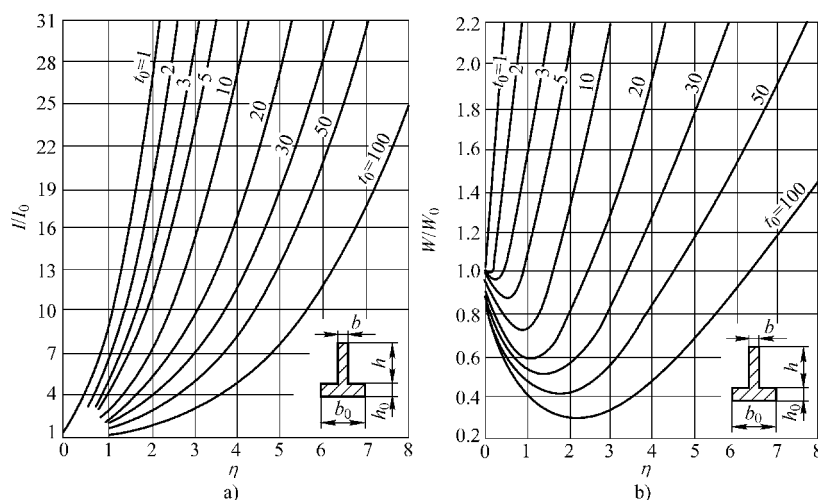


图 2-14 加肋平置矩形断面的刚度、强度指标

a) 惯性矩 b) 抗弯截面系数

3. 利用有限元和优化设计复杂结构

“有限元法”这个名词出现在 1960 年, 以后随着计算机和软件技术的发展, 迅速发展起来。有许多大型通用软件 (如 ANSYS、SAP、OptiStruct 等)、专用软件、自编特殊软件出现。为了减轻机械零部件的重量, 可以利用有限元分析软件进

行机械结构静力分析、动力学分析、热分析、流体动力学分析、耦合场分析等。用 OptiStruct 等软件可以进行结构优化设计,包括拓扑优化、形貌优化、形状优化和尺寸优化,使机械结构得到改进,去掉不必要的材料,重量减轻。关于有限元分析和结构优化设计,可以参考文献[17]第6卷第39篇和文献[29、30]。机床床身等大型零件,以前基本依靠经验进行设计,对其各强度、变形、振动等情况掌握不够细致,因而存在结构复杂、耗材多、成本高等问题。因此这类零件轻量化的工作十分必要。基于有限元分析的结构优化设计技术在大型零件结构设计中的应用,有助于减轻机械重量,减少设计的反复,缩短开发设计的时间,提高产品的竞争能力。文献[32]利用有限元分析对数控机床床身结构进行优化设计,给出了多种改进方案。

有限元设计计算实例:侧翻工况下客车顶盖碰撞强度的仿真分析^[31]。图 2-15 示出公共汽车侧翻的顶盖有限元模型,该模型考虑公共汽车在弯道上行驶,发生事故而侧翻时,顶盖与地面撞击而损坏,分析的目的是改进结构,提高其抗冲击的强度和刚度。图 2-16 给出顶盖的原结构和改进结构。利用有限元分析得出几个时间的应力最大单元及其数值(表 2-8,图 2-17)和变形最大单元及其数值(表 2-9,图 2-18)顶盖变形用开口变形表示(图 2-19)。

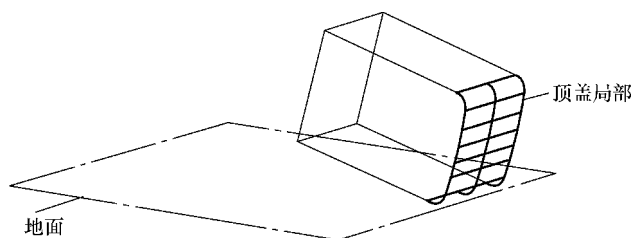


图 1-15 公共汽车侧翻的顶盖有限元模型

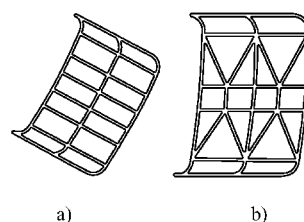


图 2-16 顶盖的原结构和改进结构
a) 原结构 b) 改进结构

表 2-8 几个时间的应力最大单元及其数值

时间/s	原结构		结构变化后		材料变化后	
	单元号	应力值/MPa	单元号	应力值/MPa	单元号	应力值/MPa
0.3	2820	43.6	2554	42.3	6939	58.53
0.4	2641	41.7	4362	36.2	7346	42.91
0.5	6240	39.3	4336	36.7	7358	41.55
0.6	2700	39.4	4359	35.6	6948	38.71
0.7	5635	38.8	4333	38.1	6948	37.38

表 2-9 几个时间的变形最大单元及其数值

工况 时间/s	原结构	变结构	变化量 (对比原结构)	变材料	变化量 (对比原结构)
0	3.10	3.10	0	3.10	0
0.1	2.95	2.98	0.03	2.94	0.01
0.2	2.87	2.88	0.01	2.86	0.01
0.3	2.83	2.85	0.02	2.80	0.03
0.4	2.78	2.80	0.02	2.75	0.03
0.5	2.72	2.78	0.06	2.70	0.02
0.6	2.80	2.81	0.01	2.75	0.05
0.7	2.81	2.82	0.01	2.76	0.05
0.8	2.79	2.82	0.03	2.76	0.03

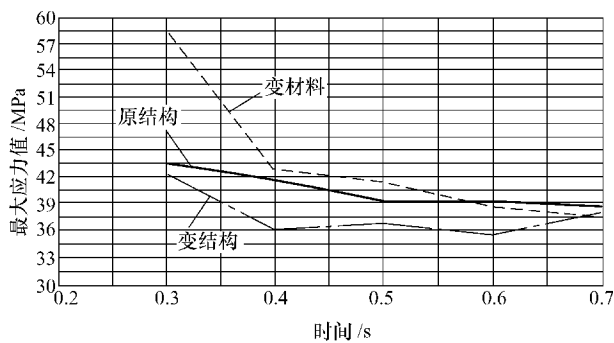


图 2-17 各计算工况最大应力—时间曲线图

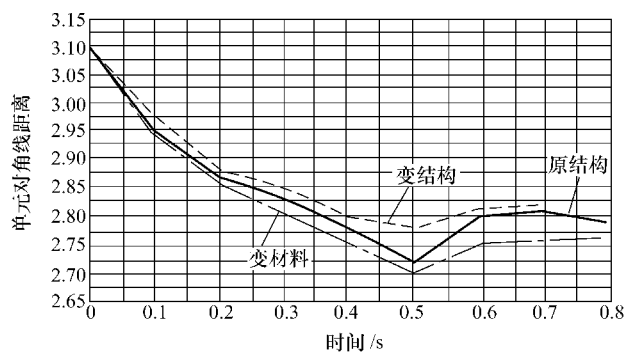


图 2-18 顶盖变形时间曲线

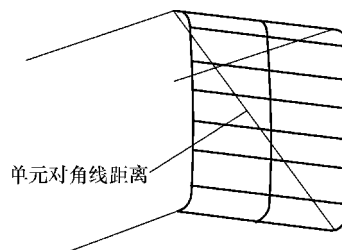


图 2-19 顶盖开口变形图

2.4 减轻汽车重量

减轻汽车重量是制造业节能减排的一个重要课题。试验表明,汽车质量每减轻10%,耗油量下降6%~8%,排放减少4%。国外汽车本身质量与十年前相比,已减轻了20%~26%。此外汽车轻量化使其安全性、加速性能提高,在稳定性、噪声和振动等方面也有改善。

减轻汽车重量的手段有:采用现代设计方法对汽车结构进行优化设计,使用新材料、新工艺在确保汽车综合指标的前提下,尽可能减轻汽车自重,以达到减重,节能减排,安全的综合效果。下面介绍几种目前使用的减轻汽车重量的措施。

2.4.1 采用新材料

目前全球中型轿车平均质量约为1200~1400kg,汽车发达国家力争在2015年将其降至1000kg以下。具有环保性和可回收的材料使用会日益广泛。可用来减轻汽车质量的材料有两大类:一类是高强度钢,另一类是轻质材料,如铝合金、镁合金、钛合金、塑料及复合材料等。

1. 高强度材料

由表2-10可以看出,除疲劳强度外,其他性能均与板厚和材料性能的 n 次方成正比。国外高强度钢(屈服强度为210~550MPa)在轿车车身上的应用比例逐年增加,目前约为50%,我国汽车工业计划用3~5年的时间将目前低于20%的比例提高到40%以上。

表 2-10 高强度钢板的应用与作用

构件使用过程中可能承受的变形	用高强度钢板制造的零件	要求的零件性能	板厚、强度和性能之间的关系方程
大的塑性变形	保险杠、加强板、门、防撞杠	高的压溃强度 P_S	$P_S = t R_m^n$
	边梁、加强肋	高的撞击吸收能 A_e	$A_e = t^2 R_m^{2n} \quad n \in (1/2 \sim 2/7)$
小的塑性变形	车顶盖、门、燃油箱盖板	高的抗压痕抗力 P_l	$P_l = \sigma_p^n \quad n = 1/2 \sim 5$
非常小的弹性变形和塑性变形	车身边梁、横梁	高的微量变形抗力 P	$P = t E_D^n \quad (1/E_D = 1/E + 1/E_S)$
非常小的变形	边梁、车轮	高的疲劳强度 σ_{-1}	$\sigma_{-1} \propto \sigma_b$

注: R_m —抗拉强度, σ_{-1} —疲劳强度, t —板厚, σ_p —成型构件应变下的流变应力, E_D —动负荷设计弹性模量, n —常数。

除高强度钢以外，还使用高强度结构钢、高强度不锈钢、高强度铸铁和粉末冶金的高强度材料。

2. 轻质材料

(1) 铝及铝合金 表 2-11 给出汽车常用的铝制零件。由表 2-12 可以看出铸铁零件改用铝制以后，可以减轻重量平均超过 50%，而钢制零件重量减轻得少一些，这是因为钢制零件一般用于传力较大的零件。

表 2-11 铝材在汽车中的应用

加工方法	系 统	零 部 件 名 称
铸件	发动机	发动机气缸体、气缸盖、活塞、进气歧管、水泵壳、油泵壳
	传动系统	变速器壳、离合器外壳
	底盘行走系统	横梁、上下控制臂、转向器壳、车轮等
	其他系统	离合器踏板、制动器踏板、转向节等
变形铝材	车身系统	发动机罩盖、车门、行李箱盖、地板、车身骨架等
	换热器	散热器、中冷器、空调冷凝器等
	其他系统	冲压车轮、座椅、保险杠、车厢底板、顶板及边板等

表 2-12 铝件代替铸铁件和钢件时质量对比（举例）

零件名称	铸铁件质量 /kg	铸铝件质量 /kg	质量比 (铁: 铝)
气缸体	80 ~ 120	13.5 ~ 32.0	(1.9 ~ 2) : 1
发动机罩盖	18 ~ 27	6.8 ~ 11.4	(2.4 ~ 2.6) : 1
变速器壳	13.5 ~ 23	5.0 ~ 8.2	(2.7 ~ 2.8) : 1
进气歧管	3.5 ~ 18	1.8 ~ 9.0	(1.9 ~ 2) : 1
制动鼓	5.5 ~ 9.0	1.8 ~ 3.6	(2.5 ~ 3.1) : 1
转向机壳	3.6 ~ 4.5	1.4 ~ 1.8	(2.5 ~ 2.6) : 1
零件名称	钢件质量 /kg	铸铝件质量 /kg	质量比 (钢: 铝)
万向接头	6.95	3.90	1.8: 1
转向操纵杆	2.10	1.10	2.2: 1
悬挂支架	1.85	0.7	2.6: 1
转向杆轴承	0.37	0.28	1.3: 1
悬挂支架轴承	0.30	0.14	2.1: 1
托架	0.19	0.12	1.6: 1

(2) 镁及镁合金 镁合金的密度只是铝合金的 2/3，是结构材料中最轻的金属。它的比强度高于铝合金和钢。除了能够承受一定的载荷以外，还具有较高的抗

冲击性。镁合金具有良好的铸造性和尺寸稳定性，容易加工，废品率低，具有较大的阻尼系数，用于壳体可以降低噪声，用于座椅、轮圈可以减少振动。可循环利用率，可达100%。可以用于汽车的车架、仪表板、转向盘、气缸盖、制动踏板等。

(3) 钛及钛合金 钛的密度小 ($4.5\text{g}/\text{cm}^3$) 强度高 (1500MPa)，比强度高，耐高温、耐腐蚀。一些大汽车厂在传动系统（驱动齿轮、从动轴等）、排气系统、发动机系统、减振器、缓冲器等零部件采用钛合金。但因其价格高，主要用于赛车。

(4) 塑料及其复合材料 这是一类用于汽车的重要的非金属材料。它减轻零部件的重量和降低材料采购成本都达到40%。世界汽车塑料使用量在2000年平均一台车已经达到105kg，约占汽车总质量的8%~12%，而奥迪A2型轿车中使用塑料件的总质量已达220kg，占总材料质量的24.6%。发达国家汽车使用塑料占塑料总消耗量的7%~11%，而且仍在迅速增加。目前汽车使用的塑料主要有：聚丙烯(PP)占21%，聚氨酯(PUR)占19.6%，聚氯乙烯(PVC)占12.2%，热固性复合材料占10.4%，ABS占8%，尼龙(PA)占7.6%，聚乙烯(PE)占6%。

2.4.2 轻量化工艺技术

铸造、锻造、焊接、冲压、热处理、机械加工等工艺是汽车制造的基础和核心制造技术。新的制造技术可以使汽车零件结构简化、轻型化、节约生产材料，如剪裁毛坯、液压成型、零件轧制、激光焊接等。

(1) 轻量化成型工艺 有剪裁拼接、激光拼焊板、液压成型、发泡铝成型、半固态金属加工喷射成型、等新技术。以及塑料/金属复合材料、低压反映注射成型、气体辅助注射成型等技术。图2-20 管件液压成型技术，其中的内高压成型技术用于碳钢、不锈钢、铝合金、钛合金、铜合金、镍合金等的成型，制成品重量轻、刚度好。用于制造发动机系统零件，车身构件等。发泡铝成型技术见图2-21，发泡铝是空气与铝复合而成的材料，它是在铝合金基体中分布着大量连通或不连通孔洞的新型轻质多功能材料。主要用于保险杠纵梁、支柱等零部件上。

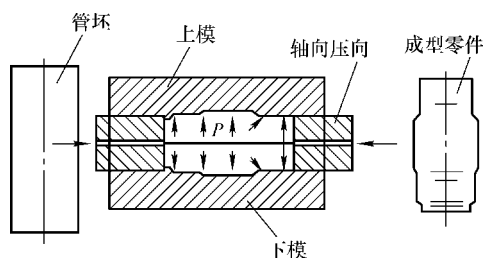


图 2-20 管件液压成型技术

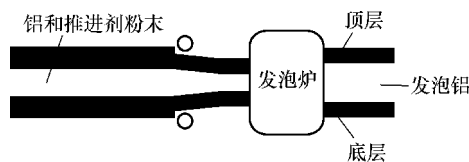


图 2-21 发泡铝成型技术

(2) 结构件优化连接工艺 几种常用连接方法的特点比较, 见表 2-13。

表 2-13 几种常用的轻量化连接工艺特点比较

项目	粘接	铆接	翻边搭接	钎焊	螺纹连接
应力分布	均匀	有应力集中	有应力集中	均匀	有应力集中
相异材料连接	好	较好	较好	仅限于金属材料	不同温度的连接特性无法平衡
轻量化设计	可能	可能	可能	无	有条件进行
阻尼	好	无	无	无	无
材料特性保持	好	材料损伤	材料损伤	内部结构改变	无
结合能力	次于铆、焊及翻边搭接	附加粘结较好	附加粘结较好	附加粘结较好	—
腐蚀	避免	需后处理	腐蚀	腐蚀	需后处理
密封性	好	无	无	好	无

2.4.3 轻量化结构设计技术

常用优化设计技术改进汽车零部件结构, 使其小型化、复合化, 减少零部件数量、尺寸, 优化车身结构, 常用创新性的新结构。对车身、底盘、动力传动系统进行计算机辅助设计和模块化设计, 改进其结构。

2.5 万能工具显微镜改进设计

图 2-22 是原苏联生产的 УИМ-21 型万能工具显微镜。图 2-23 是上海某厂生产的 19JA 型万能工具显微镜。二者的测量范围相同, 都是 100mm × 200mm, 最小读数都可以达到 0.001mm。УИМ-21 型万能工具显微镜尺寸 1150mm × 1150mm × 1150mm, 质量 540kg, 而 19JA 型万能工具显微镜尺寸 1020mm × 980mm × 800mm, 质量 250kg。19JA 型万能工具显微镜在保证原有功能要求条件下, 质量减少一半以上。主要是对原机器质量有重大影响的机座、导轨、顶尖架等零部件进行很大的改进。减轻了机座的质量, 导轨由滚动轴承支持的平导轨改为 V-平滚珠导轨。顶尖架由圆柱体支承改为平面支承, 用平面磨床加工, 显著降低了劳动强度和工作量。是一个成果显著的改进设计。

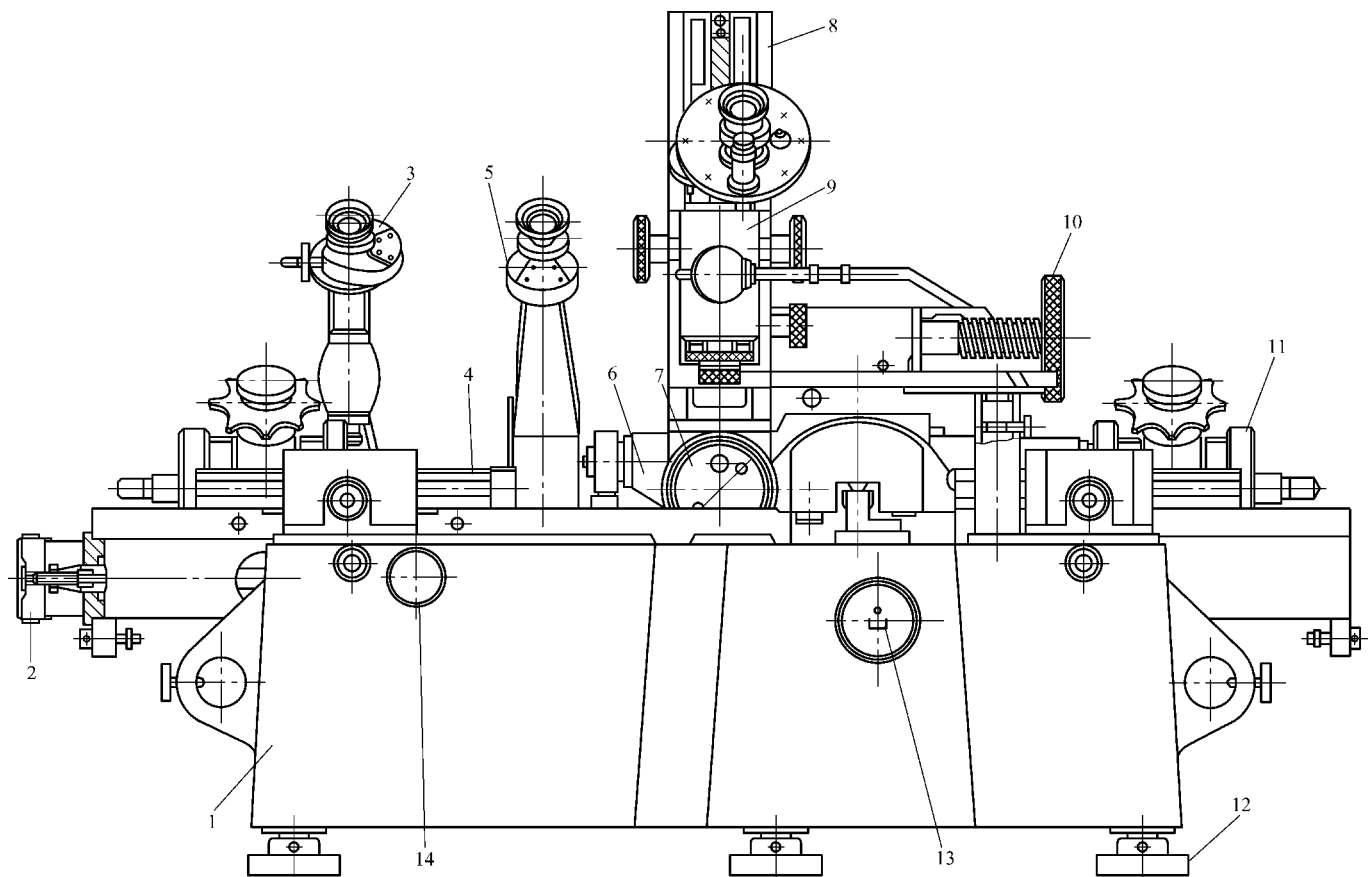


图 2-22 УИМ-21 万能工具显微镜总图

- 1—基座 2—纵向微动手轮 3、5—读数显微镜 4—标尺 6—横向滑台 7—光圈调整环 8—立柱 9—瞄准显微镜 10—立柱倾斜手轮
11—顶尖座 12—底脚螺钉 13—横向微动手轮 14—锁紧手轮 15—制动杆 16—导轨 17—纵向滑台 18—横向标尺 19—光源

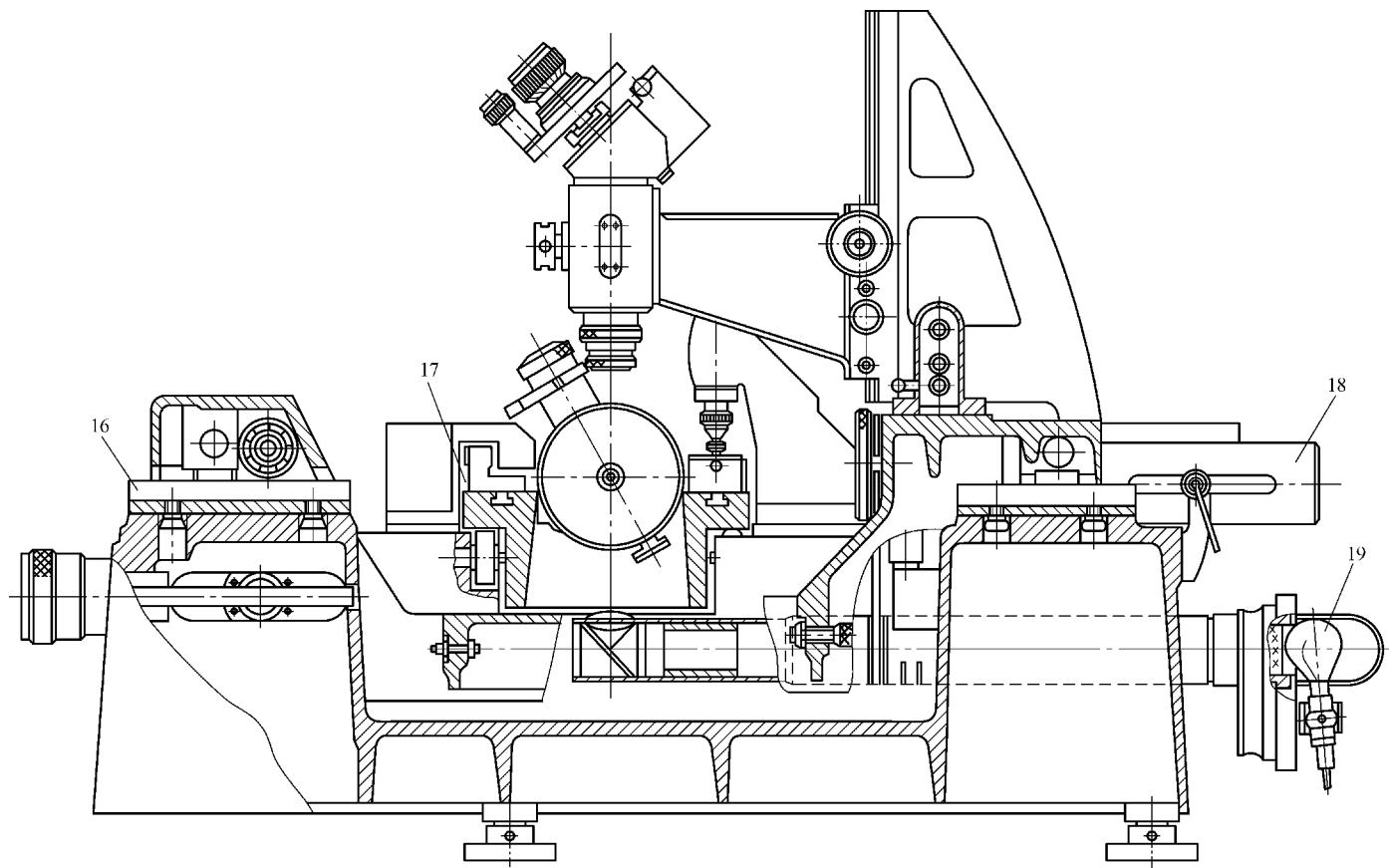


图 2-22 (续)

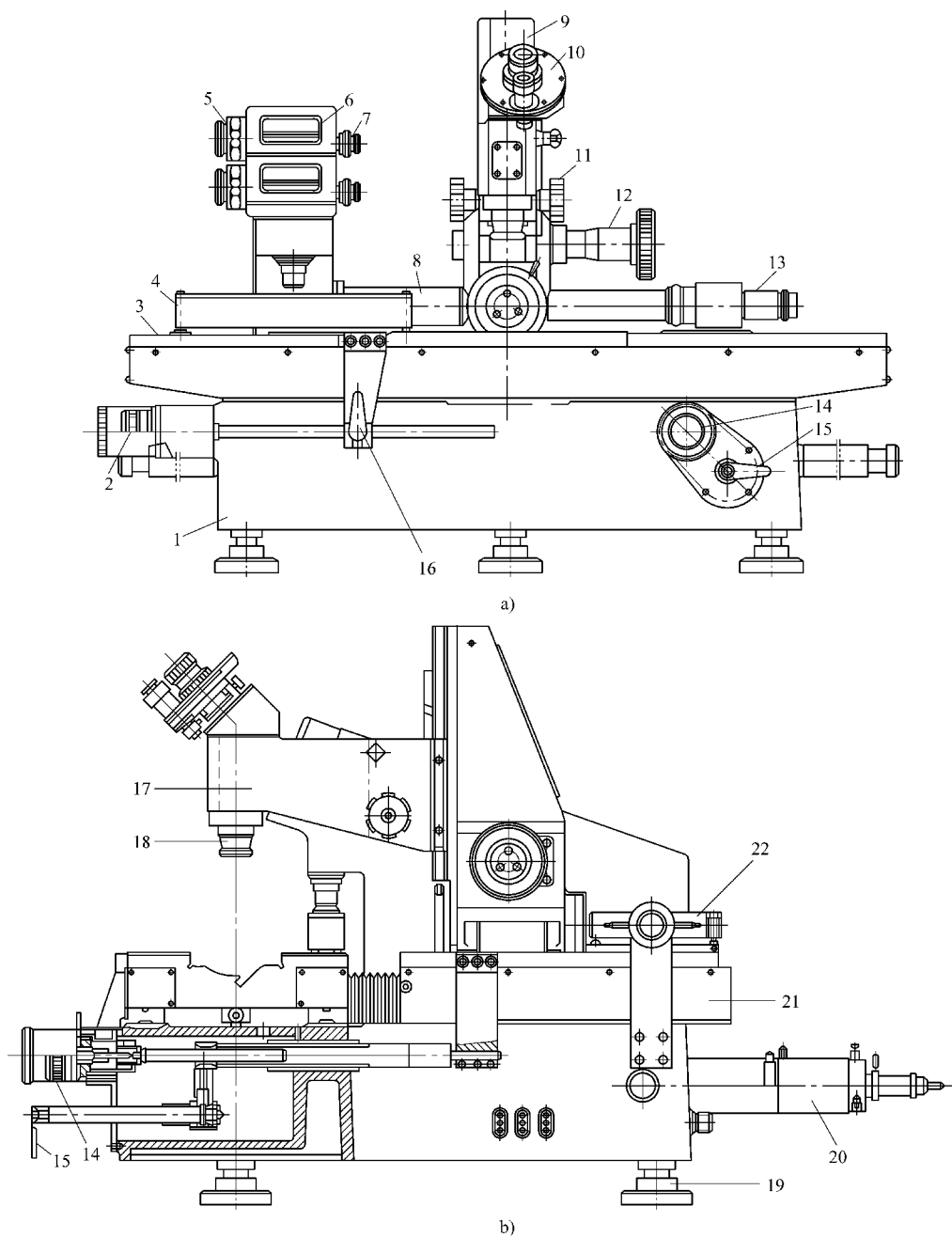


图 2-23 19JA 万能工具显微镜总图

- 1—底座 2—纵向微动手轮 3—纵向滑台 4—纵向标尺 5—测微手轮 6—读数窗 7—调零手轮
 8—物镜组 9—立柱 10—主显微镜 11—调焦手轮 12—立柱偏摆手轮 13—横向标尺照明光源
 14—横向微动手轮 15—横向锁紧手柄 16—纵向锁紧手柄 17—支臂 18—3 倍物镜
 19—调平螺钉 20—纵向照明系统 21—横向滑台 22—横向标尺

第3章 提高机械的使用寿命

3.1 概述

机械设备应该具有合理的寿命,如果设备过早报废,则使制造设备所花的人力物力部分损失,而且处理损坏的设备也要求继续投入,这一过程对节能减排造成不利的后果。此外,由于设计、制造、使用维护不当等原因,会引起机械设备在使用的早期失效,有些失效是突然发生的,使用者可能对此毫无思想准备,因而发生事故,或影响重要工程任务的及时完成,而且对环境产生污染。为了保证机器设备有合理的寿命,必须按其工作条件考虑:疲劳强度、耐磨性、耐腐蚀性、使用保养维护、准确合理的润滑等问题。

实例 3-1 图 3-1 是一个大型游戏飞机的传动装置简图,由电动机-减速器-卷筒-钢丝绳-提起立柱。在立柱顶端有 8 根横杆,横杆端部各有一架模型飞机。每架飞机可以乘坐 3 人(2 个成年人 1 个儿童)。立柱由钢丝绳拉起升高 3m,在拉起过程中横杆绕立柱转动,其端部的飞机同时绕立柱转动,停止上升后,飞机继续转动 3~5min,然后电动机 1 反转飞机下降(同时绕立柱转动)降落到地面,完成一个游戏循环。根据设计计算提升立柱所需钢丝绳拉力 $F = 15\text{kN}$ 。

这一传动装置采用了 $6 \times 19 + 1$ 的钢丝绳(6 股,每股 19 根钢丝,芯 1),钢丝绳直径 $d = 21.5\text{mm}$,钢丝绳最小破断拉力 $F_d = 272\text{kN}$,滑轮直径 $D = 400\text{mm}$ 。在此例中,钢丝绳最小破断拉力 F_d 与提升立柱所需钢丝绳拉力 F 之比, $F_d/F = 272/15 = 18.1$,好像有很大的安全储备。实际上这一游戏机工作 18743 次以后,钢丝绳被拉断,游戏飞机自 3m 高处落下,因为有平衡重,落下速度较慢,乘客 24 人中有一位年纪较大的脊柱受伤。事后对该机进行了仔细的检查、测试和分析,主要结论如下:

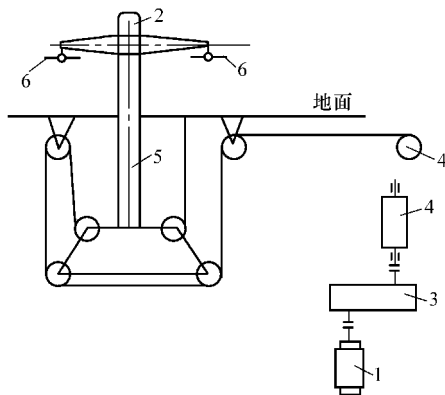


图 3-1 游戏飞机简图

1、2—电动机 3—减速器 4—卷筒
5—立柱 6—模型飞机

1) 不是有人破坏。钢丝绳断口处很不整齐,明显是断开的钢丝在不同位置逐渐增加,最后在一处断面全部钢丝绳断裂(在这一断面的各钢丝断开位置也是参差不齐的),造成事故。并非有人破坏,砍断钢丝绳。

2) 钢丝绳有许多断丝。可以观察到在断口以外钢丝绳表面有很多断丝, 在一个捻距以内超过 10 根的就达 10 处, 而按“起重机安全管理规范”的规定, 安全系数大于 7 的载人设备 6×19 钢丝绳有一个捻距表面断丝数超过 8 根就应该报废, 更换钢丝绳。

3) 钢丝绳表面的钢丝有多处发生磨损。抽检发现磨损最严重的钢丝直径由原来的 1.4mm 减小到 0.82mm, 减小了 41.4%。按规定磨损量达到钢丝直径的 40% 时, 钢丝绳即应报废。

4) 钢丝绳所受弯曲应力过大。钢丝绳在滑轮上面卷绕时, 因弯曲而产生弯曲应力, 所以起重机设计规范中, 规定载人设备滑轮直径 D 与钢丝绳直径 d 之比, 应该大于 40, 即 $D/d \geq 40$ 。而本设计中 $D/d = 400/21.5 = 18.6$, 此值小于规范中的规定值。

5) 导向轮引起钢丝绳磨损。此设备中有两个导向轮 (图 3-2 中的 R_1 、 R_2), 用于引导钢丝绳。导向轮围绕轴 B_1 、 B_2 转动 (图 3-3), 在轴上没有设计润滑油孔, 使其中一个轮在轴上转动失灵, 此轮表面有 L 、 M 、 N 三处磨损 (图 3-2), 同时引起了钢丝绳表面磨损。

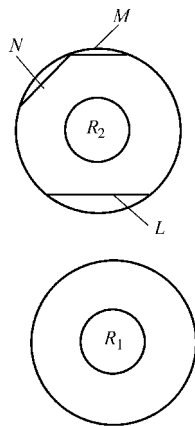


图 3-2 导向轮磨损情况

6) 钢丝绳断口显示明显的疲劳失效特征。对钢丝绳断口用电子显微镜观察, 发现有很清楚的疲劳条带, 条带间距离约为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$, 由此肯定钢丝绳失效原因是疲劳断裂。

7) 钢丝绳断裂发生在弯折次数最多的位置。图 3-3 分析了钢丝绳的运动情况, 图 3-3a、b 分别是游戏飞机在最低位置和最高位置时的钢丝绳工作情况, 钢丝绳上面 0、1、2、3……表示钢丝绳的长度, 相邻数字间的距离为 1m。可以看出为了立柱上升 3m, 需要卷筒卷起钢丝绳 12m, 即四根钢丝绳每根短 3m, 其中 4~5m, 10.5~15.5m 处的钢丝绳工作条件最为严酷。因为要经过 3 个滑轮, 而且其中一个弯折方向相反。即承受对称循环弯曲变应力。实际上这两个部分的断丝特别多, 说明弯曲应力对钢丝绳的钢丝断裂起主要作用。

8) 使用者维修技术不足。使用者没有在规定的大修时发现钢丝绳断丝和表面磨损的严重情况。对导向轮的转动不良没有及时发现和排除。这一方面由于维修技术不足, 另一方面使用说明书编写不够清楚, 要求和指导不明确。

由这一实例可以看出, 疲劳强度、耐磨性、润滑、管理和维修等对机械的寿命有重要的影响。

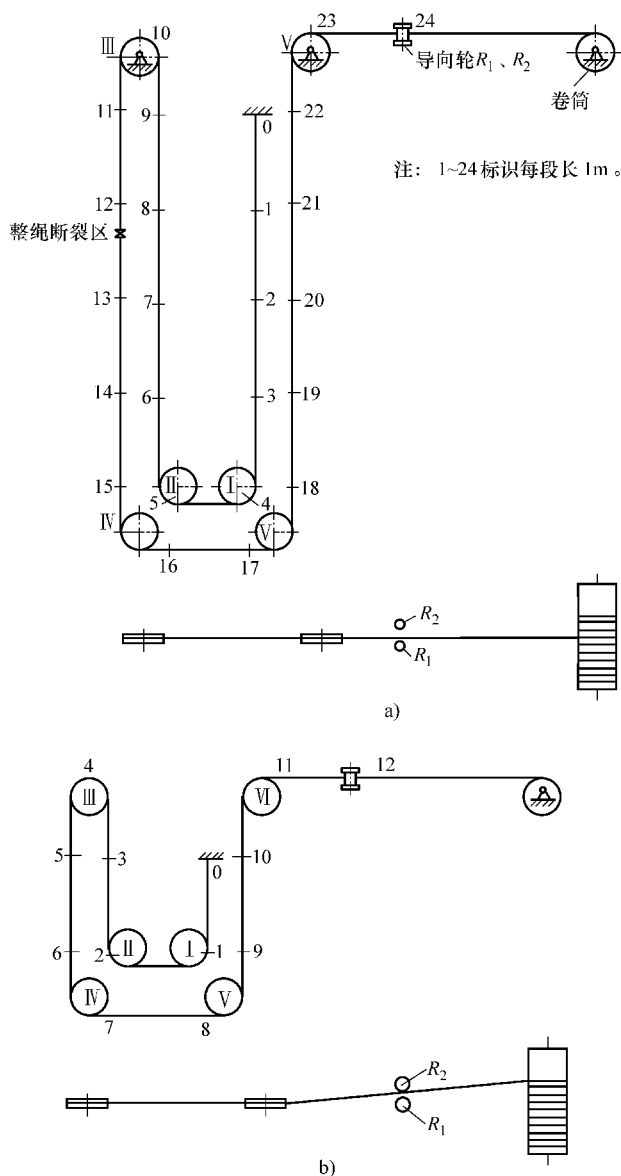


图 3-3 游戏机在最低和最高位置时的钢丝绳工作情况

a) 最低位置 b) 最高位置

3.2 提高疲劳强度

3.2.1 疲劳强度设计方法

承受变应力的机械零件，其尺寸应该按疲劳强度进行计算，常用的计算方法有

以下几种：

(1) 名义应力设计法 以零件危险截面的名义应力为基础，用有效应力集中系数 K_σ (K_τ)、零件的尺寸系数 ε_σ (ε_τ)、表面系数 β 平均应力影响系数 ψ_σ (ψ_τ)，予以修正，得到计算应力 σ_c ，将材料的疲劳强度，如 σ_{-1} 与修正后的计算应力相比较 σ_c ，得到该零件的安全系数 $n = \sigma_{-1} / \sigma_c$ 。要求计算得到的安全系数大于某一数值。此值根据零件的重要性、计算精确度、材料可靠性等决定。

(2) 局部应力应变设计法 此法认为应变集中的塑性变形是疲劳裂纹形成和扩展的主要条件。该处的局部最大应变决定了零件的疲劳强度和寿命。用光滑试件的应变—寿命曲线估算零件的损伤，从而计算零件的寿命。

(3) 损伤容限设计法 这种方法允许零件内部存在初始裂纹，用断裂力学方法计算裂纹扩展速度，估算其剩余寿命，保证有裂纹零件在一定工作期内的安全。

(4) 概率疲劳设计法 是概率统计方法与抗疲劳设计结合的设计方法，也称为疲劳可靠性设计。

机械设计应该采用适当的疲劳强度设计方法，在满足寿命要求条件下，尽可能地节约材料，减轻机器的重量。

3.2.2 合理选择材料

1. 承受疲劳应力零件的常用材料

常用的材料主要是钢材，包括锻钢和铸钢，有些形状复杂的零件采用球墨铸铁。表 3-1 给出一些常用材料的牌号及其力学性能。当找不到材料疲劳强度资料时可按表 3-2 的公式计算其近似值。

表 3-1 承受疲劳应力零件的常用材料

材 料	热处理	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 σ_s /MPa	疲劳强度 σ_{-1} /MPa	
				弯曲疲劳强度	拉压疲劳强度
20	正火	464		250	241
45	调质	735		388	329
Q345	热轧	586		298.1	327
09SiVL	热轧	529			284
HT200	去应力退火	250			96.5
HT300	去应力退火	353			133.3
ZG310-570	调质	1012			303
ZG340-640	调质	1044		322	
12CrNi3	调质	833			363
12CrNi4	调质	793		441	
25Cr2MoV	调质	1090			335

(续)

材 料	热处理	抗拉强度 R_m/MPa	屈服强度 σ_s/MPa	疲劳强度 σ_{-1}/MPa	
				弯曲疲劳强度	拉压疲劳强度
35CrMo	调质	924			317
35VB	热轧	741			331
40CrMnSiMoVA	等温退火	1765		677	718
40CrNiMo	调质	972		498	389
45CrNiMoV	淬火后中温回火	1553			486
20CrMnTi	渗碳淬火后低温回火	1416		566	
55SiMnVB	淬火后中温回火	1536			536

表 3-2 材料疲劳极限与强度关系的计算公式

材料	对称循环变应力的疲劳强度/MPa			脉动循环变应力的疲劳强度		
	拉压 σ_{-1l}	弯曲 σ_{-1}	扭转 τ_{-1}	拉压 σ_{0l}	弯曲 σ_0	扭转 τ_0
结构钢	$0.23(\sigma_s + R_m)$	$0.27(\sigma_s + R_m)$	$0.15(\tau_s + \tau_b)$	$1.42\sigma_{-1}$	$1.33\sigma_{-1}$	$1.50\tau_{-1}$
铸铁	$0.4R_m$	$0.45R_m$	$0.4R_m$	$1.42\sigma_{-1l}$	$1.33\sigma_{-1}$	$1.35\tau_{-1}$
铝合金	$R_m/6 + 75$	$R_m/6 + 75$	$1.5\sigma_{-1l}$			
青铜		$0.21R_m$				

由表 3-1、表 3-2 可以看出疲劳强度 σ_{-1} 比抗拉强度 σ_b 低很多, 比屈服强度 σ_s 也低, 因此受变应力的零件, 必须按疲劳强度设计。

2. 合理选择材料和热处理

为了保证机械的寿命和质量, 正确选择材料和热处理是一个很重要的问题, 一般情况下, 选择材料和热处理应该注意以下问题:

1) 按零件的寿命要求, 选择材料的强度和塑性。对于要求长寿命(无限寿命设计)的机械零件, 一般要求应力循环变化次数 $N \geq 10^7$ 次。强度高的材料具有较高的疲劳寿命。对于要求应力循环次数 $N < 10^3$ 次的机械零件, 属于低周疲劳设计的范围, 其实际应力超过屈服强度 σ_s , 产生较大的塑性变形, 其主要参数是应变, 应该选用塑性好的材料。当零件应力循环变化次数在高周低周之间, 即 $10^3 < N < 10^7$ 时, 应该兼顾强度和塑性, 选择韧性好的材料。

2) 提高材料的纯度, 避免内部缺陷。高周疲劳的机械零件如滚动轴承, 承受很大的载荷, 接近其疲劳极限, 材料内部的缺陷如夹渣、空隙等严重影响了零件的寿命, 因此要求材料具有高纯度, 如对滚动轴承材料电炉重熔, 去掉杂质。对于低周疲劳的机械零件纯度要求较低。此外尽量避免毛坯生产中的偏析、夹渣、脱碳等缺陷, 也是提高疲劳强度的有效措施。

3) 晶粒度和晶粒取向对疲劳强度有较大影响。室温条件下工作的机械零件细化晶粒能够提高疲劳强度, 因为晶粒边界能够阻止材料的滑移、裂纹形成和扩

展。而在高温下工作的机械零件应该有粗大晶粒，疲劳强度较高。锻造和轧制的机械零件受力的方向（力流传递的方向）应该与轧制方向一致，可以提高疲劳强度。

4) 对中碳钢和合金钢进行调质热处理比正火处理更能够提高疲劳强度。

5) 采用在零件表面产生压缩应力的热处理方法，如渗碳热处理、表面化学处理和表面感应热处理等，可以提高疲劳强度。

3.2.3 改进结构

减小应力集中。机械零件有应力集中的部位因为应力较大，经常首先出现裂纹，然后裂纹扩展，导致零件疲劳断裂。因此为了提高机械零件的疲劳寿命，应该尽量减小应力集中。减小应力集中的措施有：加大过渡圆角，避免应力的突然变化，避免在零件受力较大的部位有形状的突然改变（如钻孔、凹槽、过盈配合、有螺纹等）。

3.2.4 改进工艺

1) 提高零件表面的光洁程度，避免擦痕、生锈、腐蚀等。

2) 对零件表面采用冷作硬化，如滚压、喷丸等强化工艺，使其产生压应力，可以提高抗疲劳强度。

3) 对于焊接件按要求加工坡口，使焊缝表面光滑，避免未焊透等缺陷。

3.2.5 合理操作，定期检修

不合理的操作会引起机器零件的损伤，使其寿命缩短，提前报废。如汽车司机变速操作不当，会使齿轮受冲击载荷，使其寿命降低。而定期检修更换不宜继续工作的零件，更换失效和有夹杂物的润滑油，加入润滑剂，重新调整机器（如调整滑动轴承间隙，更换滚动轴承）等，可以排除隐患，及时调整避免不利的工作情况继续发展，是延长机器寿命的有效手段。因此设计师应该在产品使用说明书中明确提出大修、中修、小修的要求和时间，以及修理时的操作要求，零部件更换的标准等。

美国一权威研究机构曾对 8000 多个实验室和现场钢丝绳的检测记录进行统计分析。发现正在使用的钢丝绳的强度损耗超过 15% 的占 10%，这些钢丝绳处于危险状态。另有 2% 以上的钢丝绳强度损耗超过 30%，处于极度危险状态。而被强制更换的钢丝绳中，大约 70% 只有很少的强度损耗，甚至没有损耗。日本的统计表明，被强制更换的钢丝绳中，有一半以上的钢丝绳的强度可以达到新绳的 90% 以上，还有不少超过 100%。因此，钢丝绳只凭经验判断其是否可用，或到期即强制更换，既不能确保安全，又造成浪费。^[35,36]

所以，在日常使用时的实时监测和定期检修中检查，及时、准确地掌握机器零

件的损伤程度，是保证机器安全运转和延长机械零件寿命，避免浪费的有效措施。

3.3 提高耐磨性

机械设备相互摩擦表面的耐磨性是影响设备寿命的重要因素。常用的提高机械设备耐磨性的措施有：

3.3.1 合理选择材料和热处理

为了提高耐磨性应该选择表面硬度较高的材料。如含碳量较高的碳钢。提高钢中的含锰量，可以提高其耐磨性。渗氮、渗碳后淬火，感应淬火都可以提高钢的耐磨性，铸铁零件（如导轨）也可以采用表面淬火的方法提高耐磨性。表面涂层是在金属表面上涂一层耐磨性较好的薄金属层，可以减轻磨损。有些有色金属可以减轻摩擦和磨损，如铜合金。但是应该注意为了提高耐磨性，相互摩擦的零件不宜采用相同的材料。因此铜合金常与钢制零件相配，如螺旋和螺母，轴和滑动轴承，蜗杆和蜗轮。

3.3.2 减低表面压强

减小接触面之间的压强，可以减轻磨损。一般设计滑动表面，应该控制其压强，以保证足够的寿命，如滑动轴承、滑动螺旋。

图 3-4 是常用的机械卸荷装置。移动件 6 压在滑动导轨 5 上，为了减轻导轨的磨损，使移动件的一部分重量（可达移动件重量的 95%）由支承在辅助面 4 上的滚动轴承 3 承受。卸荷力可以由螺钉 1 和碟形弹簧 2 调节。应注意不要使滚动轴承直接压在导轨上面，以免压出沟痕。

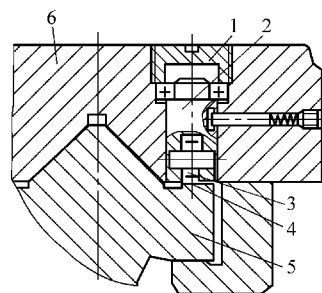


图 3-4 机械卸荷

1—螺钉 2—碟形弹簧 3—滚动轴承
4—辅助面 5—导轨 6—移动件

3.3.3 避免局部剧烈磨损

摩擦表面不均匀的磨损导致载荷分布不均匀。如图 3-5，推力滑动轴承受轴向力。轴旋转时越靠近中心滑动速度越小，磨损也越小。因此经过一段时间的使用以后，中间凸起，承受的压力最大，在此处失效。为了避免这种情况的产生，如图把中间切掉，可以避免局部受力最大。图 3-6a 示出由于轴倾斜产生局部磨损的情况，图 3-6b 示出自动调心轴承的结构。轴承外径为球面，可以绕中心 O 转动避免局部磨损。

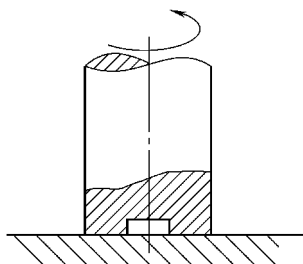


图 3-5 推力轴承止推面

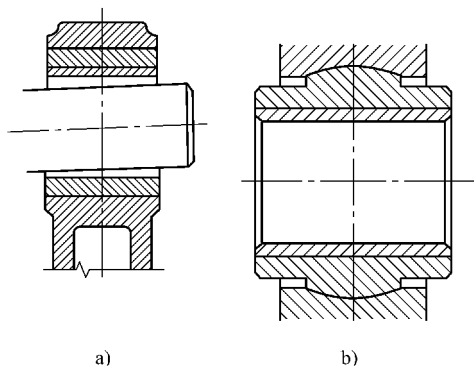


图 3-6 自动调心滑动轴承

a) 轴倾斜产生局部磨损

b) 自动调心轴承避免局部磨损

3.3.4 自动调节与补偿

一般条件下磨损是难以避免的,因此,设计师考虑在磨损发生以后尽量减小它的影响。如机床导轨,由于其上移动件的来回运动产生磨损。设计者把导轨设计成上凸形状,误差在允许范围内,而不宜做成下凹,可以延长其使用寿命。图 3-7 给出利用凸轮磨损互相补偿的机构。图 3-7 中凸轮与杠杆下端接触处的磨损量为 δ_1 ,从动件与杠杆上端接触处的磨损量为 δ_2 。设两种方案的磨损量对应相同。则图 3-7a 中总磨损量 $\Delta_1 = \delta_1 + \delta_2$,图 3-7b 中总磨损量 $\Delta_2 = \delta_1 - \delta_2$ 。后者由于磨损量互相抵消而影响减小。

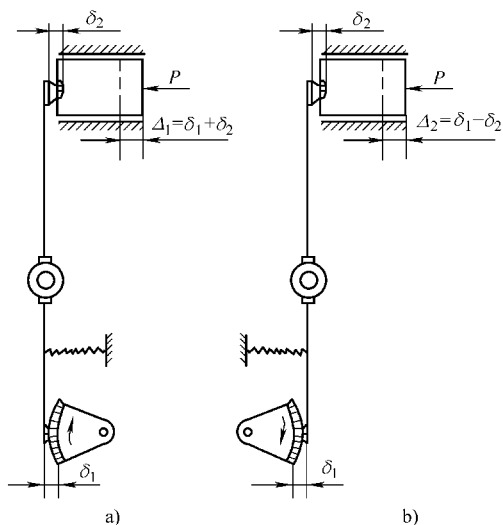


图 3-7 凸轮机构磨损量的互相补偿

a) 磨损量叠加 b) 磨损量互相补偿

3.3.5 设置易更换的磨损件

有一些零件磨损很快,但是只有局部工作表面磨损,磨损后整个更换十分浪费,可以只局部更换,达到节约的要求。图 3-8a 所示为制动器,其制动瓦与直径为 D 的制动轮接触,制动时摩擦速度很快,磨损严重,发热能够达到很高的温度,制动瓦与制动轮接触处磨损很快,在制动瓦表面装一层抗磨材料,用铆钉与制动瓦连接,如图 3-8b 所示,磨损严重时只更换抗磨材料即可。

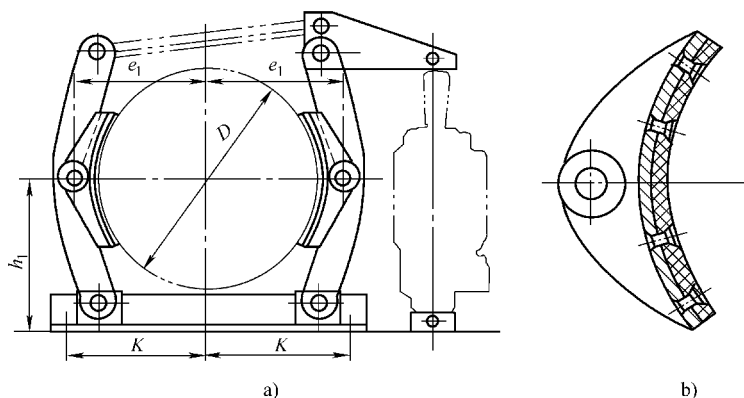


图 3-8 制动器和制动瓦

a) 制动器 b) 制动瓦

3.3.6 润滑剂与添加剂

使用润滑剂是减小摩擦，减轻磨损，实现节能减排的有效措施。润滑设计包括正确选用润滑剂和添加剂，选用适当的润滑方法，设计合理的结构使足够的润滑剂进入需要润滑的部位，选用适当的供应润滑剂的润滑设备，保证润滑剂合理的循环，节约润滑剂而且不污染环境等。润滑剂的选择和供应润滑剂的设计，可以参考一般的机械设计手册，下面介绍润滑设计中关于润滑剂失效和废弃润滑剂处理的知识。

1. 润滑剂的补充和更换

机器在工作时润滑剂（以润滑油为例）逐渐减少，其原因有：通过密封漏失，变成油泥沉淀，蒸发掉，在内燃机气缸中被燃烧掉等。有时润滑油由于老化、变质失去润滑性能而必须更换。

(1) 润滑脂的补充和更换 润滑脂需要经常补充和更换，由于各种润滑脂的寿命不同难以规定统一的更换时间，石油产品销售商给出的使用期只能作为参考。只要脂润滑部位出现析油、脂变硬、脂开裂、温度突然上升等现象，就需要更换润滑脂。

润滑脂在工作时只有与工作表面接触的一层润滑脂被污染，如果污染严重则零件表面将被剧烈磨损。压送进来的新润滑脂应该把相当大的一部分脏润滑脂与新润滑脂混合到一起压出。剩下的少量旧润滑脂与新润滑脂混合在一起工作。这一工作能否实现决定于压送润滑脂的阻力（与通道的尺寸、形状、间隙大小）、压入的压力等有关。如果剩余的压力大于 10MPa 则上述要求可以满足。

必须节约润滑脂。一般只要求充满轴承空间的 2/3，对于汽车车轮轴承的润滑脂，只要对轴承的保持架、滚动体进行润滑即可。

(2) 润滑油的补充与更换 润滑油的寿命互相相差很远。对于油量大于 250L

的一般润滑系统,以及油量大于 70L 的高速高温或重要的润滑系统,应该配备一套监控润滑油质量的系统,随时检查,及时更换。对于小型的润滑系统,配备监控装置是不经济的,而一般制造工厂在使用说明书中都规定了换油时间,但是这些规定不一定可靠。比较合理的方法是,对于重要的设备,定期采取油样,按照规定的润滑油质量指标进行检验,如果某些重要的指标不合格,就应当更换。一般润滑油出现以下情况时,就说明润滑油已经变质。

- 1) 油的颜色发黑,或比新油暗很多。
- 2) 油的流动性比新油低很多。
- 3) 在运动表面上出现棕色或黑色漆膜。
- 4) 油中有较多的油泥或固体颗粒。
- 5) 金属零件有腐蚀。
- 6) 出现强烈的或有刺激性的异味。
- 7) 泡沫增多。

对于一般设备,在缺少实验数据时,可以参照以下建议规定换油时间:

- 1) 密封良好的循环润滑系统,总体温度低于 50°C ,换油期可以取为 2~3 年。
- 2) 密封良好的循环润滑系统,总体温度低于 70°C ,换油期可以取为 1 年。
- 3) 密封良好的油浴润滑系统,总体温度在 70°C 左右,换油期可以取为 1 年。
- 4) 密封良好的油浴润滑系统,总体温度超过 70°C ,换油期可以取为 3 个月。
- 5) 在潮湿或多尘环境下工作的发动机或压缩机,换油期应该短。如果不补充加油,换油期应该更短一些。

2. 注意润滑剂性能在运行中的变化

润滑剂在运输、保管、使用过程中,必须采取措施,避免被污染或变质,否则机器的寿命会受到很大影响。必须注意润滑剂的变化,作为监控的手段。

(1) 物理、化学性质的改变 氧化是使润滑油性质变化的主要原因。在常温和常压下,一般不会发生氧化,在温度达到 100°C 时,经过 24h 润滑油就会发生氧化,而在 205°C 时,经过几分钟润滑油就会发生氧化。在有金属,尤其是金属氧化物和金属皂存在时,氧化速度大大加快。铅是最强的氧化催化剂,其次是铜和铁。当油中进入空气、水时均能使润滑油氧化。油在氧化以后,树脂状物质含量增多,密度增加,闪点提高,颜色变暗,粘度增大。在内燃机中油的氧化比其他机械要快。

(2) 在零件工作表面和润滑系统中产生沉积物 由于润滑油的老化和内燃机燃料的不完全分解,都会产生沉积物。其中含炭的沉积物有:积炭、漆状沉积、沉滓。这些沉积物使油的通道变窄,油管阻塞,润滑系统失灵,阀门运转失灵,其中沉滓的影响最明显。

(3) 起泡 油在被搅动时出现气泡。气泡使油泵的供油量减少,油在被润滑表面分布不均匀,从而使润滑状态变坏。促使磨损加速,或产生漏油。

以上情况都是由于润滑不良引起的,最后导致机器效率降低,寿命缩短,以至报废,不利于节能减排。

3.4 提高耐蚀性

材料腐蚀破坏会造成严重的危害,例如 1997 年我国某化工厂乙烯原料储罐因硫化物腐蚀造成火灾,工厂停产半年,直接损失超过 2 亿元。美、英、日、德、中等国的统计,每年因腐蚀造成的经济损失占国民经济总产值的 2% ~ 6%。彻底避免腐蚀在许多情况下是困难的,因此要求减轻腐蚀,延长使用寿命。减轻腐蚀的途径有:选用耐腐蚀材料,采用耐蚀性较好的结构,采用缓蚀与封存技术等。

3.4.1 常见的腐蚀分类

按产生腐蚀的原因,可以分为以下四类:

(1) 裂缝腐蚀 零件表面存在很小的间隙或裂缝时,引起由此产生腐蚀的现象。

(2) 接触腐蚀 两种有电势差的金属接触时,再加介质的作用,产生腐蚀。选用化学电势差小的金属组合,或者把两种不同的金属隔开可以减轻这种腐蚀。

(3) 振动裂缝腐蚀 有切口或应力集中零件表面再加振动而产生的腐蚀。根据腐蚀产生的原因(应力、形状、温度、共振等),予以消除。

(4) 应力裂缝腐蚀 有应力集中或缺口的零件,在拉应力作用下,产生腐蚀。避免方法是减小或消除表面的拉应力,加大表面的压应力(例如采用滚压、喷丸等),降低介质中起化学反应物质的浓度和介质的温度。

3.4.2 在腐蚀工作条件下材料的选用

1. 大气腐蚀

当大气相对湿度(RH)大于 75% 以上时,金属在大气中被腐蚀的速度迅速提高,如果空气中含有 SO_2 的体积分数达到 0.01% 时,则对金属的腐蚀会造成显著影响。我国根据大气相对湿度的大小(RH),将大气环境分为三种类型:干燥型($\text{RH} < 60\%$),普通型($75\% > \text{RH} \geq 60\%$),潮湿型($\text{RH} \geq 75\%$)。我国 50% 的国土属于西部地区,这些地区的大气环境为干燥型,高原气候区,这些地区的机械设备大气腐蚀是很轻微的。表 3-3 给出一些常用金属在大气中的平均腐蚀速率。可以作为选择材料的参考。

下面给出计算碳钢大气腐蚀量的经验公式:

$$M = 0.484T + 0.701W + 0.075H + 8.202S - 0.022Y - 52.67$$

式中 M ——碳钢大气腐蚀量 [$\text{mg}/(\text{dm}^2 \cdot \text{d})$];

T ——地区气温 ($^{\circ}\text{C}$);

W——地区湿度（%）；
H——海盐粒子量（mg/L）；
S——SO₂ 量 [mg/（dm²·d）]；
Y——降水量（mm）。

表 3-3 一些常用金属在大气中的平均腐蚀速率

金属名称	农村大气	工业大气	海洋大气	应注意的腐蚀特点
Al 及其合金	0.02 ~ 17	15 ~ 80	0.07 ~ 110	点蚀、晶间腐蚀、应力腐蚀
Mg 及其合金	13 (2.5a)	27.7 (2.5a)	18 (2.5a)	
Cu 及其合金	0.15 ~ 23	1.5 ~ 45	0.3 ~ 23	锌黄铜脱锌腐蚀
Ni 及其合金	0.03 ~ 0.3	1 ~ 32	0.1 ~ 23	
蒙乃尔 400	0.13 ~ 10.7	35	17.5	
耐海水不锈钢	0	0.3	1.3	点蚀、缝隙腐蚀
Ti 及其合金	0	0.08	0	
Pb 及其合金	0.2 ~ 19	0.43 ~ 22	0.41 ~ 20	
Sn 及其合金	0.5	2 ~ 12	2 ~ 3	
Zn 及其合金	1	1.7 ~ 50	1.6 ~ 7	
碳钢	15 ~ 150	7 ~ 460	57 ~ 200	
耐大气低合金钢	20 ~ 97	6 ~ 344	29 ~ 75	

2. 淡水中的腐蚀率

表 3-4 给出碳钢在淡水中的平均腐蚀速率。表 3-5 给出一些常用其他金属在淡水中的平均腐蚀速率，可以作为选择材料的参考。

表 3-4 碳钢在淡水中的平均腐蚀速率

pH	9 ~ 13	4 ~ 9	< 4	备 注
腐蚀速率 /（μm/s）	< 250	250	迅速加快	充气软水
	< 50	50	迅速加快	含 O ₂ 1mg/L（22℃）
	< 100	90 ~ 100	迅速加快	含 O ₂ 1mg/L（40℃）

表 3-5 一些常用金属在淡水中的平均腐蚀速率

材 料	环境条件和平均腐蚀速率
铜及铜合金	在淡水中耐蚀，pH>8 时比 pH<7 时耐蚀。在 O ₂ 、CO ₂ 、NH ₃ 、H ₂ S 含量高时，引起腐蚀增加。平均腐蚀速率一般为 2.5 ~ 125μm/a
铝及铝合金	铝在 pH=6 ~ 8 的水质中腐蚀速度最低，用铝合金输送淡水时，流速一般不超过 6m/s，最好在 1.5m/s 左右
镁及镁合金	镁合金在室温下静止的蒸馏水中，能迅速形成一层保护层，阻止进一步腐蚀。但是，当有盐、氯离子、重金属离子溶入时，会破坏保护膜，而发生腐蚀。在流动的水中腐蚀加快

3. 海水中的腐蚀率

影响海洋腐蚀的有海洋物理、化学、生物等三方面的因素，其中海洋的腐蚀环境可以分为五种不同环境区，即：海洋大气区、浪花飞溅区、潮差区、全浸区（又分为浅海区——水深 20 ~ 30m，大陆架全浸区——水深 20 ~ 200m，深海区——水深 200m 以上）和海底泥沙区。钢在海洋不同环境区的平均腐蚀速度如图 3-9 所示。碳钢、低合金钢和铸铁在海洋不同环境区的平均腐蚀速度见表 3-6，表 3-7。

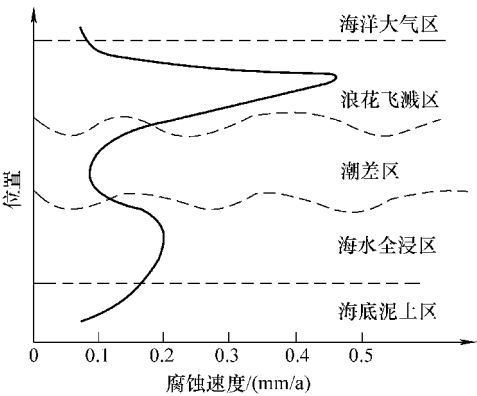


图 3-9 钢在海洋不同环境区的平均腐蚀速度

表 3-6 钢和铸铁在海洋不同环境区的平均腐蚀速度 （单位：μm/a）

腐蚀环境	碳 钢	合金钢	铸铁	不锈钢
大气区（试验 > 8 年）	20 ~ 200	13 ~ 50		0.05 ~ 0.9
浪花飞溅区	280 ~ 500（局部点蚀深度 750）	100 ~ 300（局部点蚀深度 1500）		0.07 ~ 5（局部点蚀深度 69）
潮差区	80 ~ 180（局部点蚀深度 750）	50 ~ 160（局部点蚀深度 625）	400（平均）	0.02 ~ 4.4（局部点蚀深度 231）
全浸区	70 ~ 250（局部点蚀深度 500）	50 ~ 200（局部点蚀深度 325）	150 ~ 203（平均）	0.23 ~ 44（局部点蚀深度 313）
海底泥沙区（试验 1a）	20 ~ 100	10 ~ 67		（局部点蚀深度 1000）

表 3-7 碳钢和低合金钢和铸铁在海洋不同环境区的平均腐蚀速度

（单位：μm/a）

钢种代号	潮差区（试验 8a）			飞溅区（试验 4a）	全浸区（试验 8a）		
	青岛	厦门	榆林	青岛	青岛	厦门	榆林
16Mn	110（3150）	63（1400）	97（1920）	300	130	90	54
09MnNb	110（3850）	65（810）	88（2830）	260	120	78	55
09CuPTiRe	92（3640）	58（1030）	69（2390）	230	120	870	515
12CrMnCu	110（3550）	71（1770）	140（2700）	—	180	89	110
10CrCuSiV	120（2820）	70（1730）	160（8000）	270	150	92	110
10CrMoAl	120（3070）	62（1580）	140（4080）	260	150	110	110
921	（3040）	（1000）	（4790）	140	170	54	150

(续)

钢种代号	潮差区 (试验 8a)			飞溅区 (试验 4a)	全浸区 (试验 8a)		
	青岛	厦门	榆林	青岛	青岛	厦门	榆林
A3				300			
3C				280			

注：括号中数据为八年的最大腐蚀深度，单位 μm 。

4. 酸类环境中的腐蚀率和推荐材料

硫酸、硝酸和盐酸环境中的腐蚀率和推荐材料见表 3-8 ~ 表 3-10。

表 3-8 硫酸环境中的腐蚀率和推荐材料

腐蚀温度	硫酸浓度	优先选用材料	腐蚀速率/($\mu\text{m}/\text{a}$)
$\leq 25^{\circ}\text{C}$	$\leq 25\%$ 或 $\geq 80\%$	0Cr18Ni12Mo2Ti、ZG1Cr17Mn9Ni4Mo3Cu	
	$\geq 70\%$	碳钢、高铬、硅铸铁	< 100
		钛	$< 60\%$ 时 2.5
	$> 100\%$	碳钢、0Cr18Ni9Ti	
	$< 93\%$	硬聚氯乙烯塑料	
		NiWMo 合金	< 30
	任何浓度	0Cr18Ni18Mo2Cu2Ti、00Cr18Ni14Mo2Cu2、瓷砖、氟塑料	
$\leq 50^{\circ}\text{C}$	$\leq 10\%$	0Cr18Ni12Mo2Ti、ZG1Cr17Mn9Ni4Mo3Cu2N	
	$\leq 50\%$	橡胶衬里、不透性石墨	
	$\leq 90\%$	硬聚氯乙烯塑料	
	$\geq 70\%$	高铬、硅铸铁	500
	$> 100\%$	0Cr18Ni9Ti	
	$\geq 80\%$	1Cr18Ni11Si4AlTi	
	任何浓度	0Cr18Ni18Mo2Cu2Ti、ZG1Cr24Ni20Mo2Cu3、瓷砖、氟塑料	
$\leq 65^{\circ}\text{C}$	$\leq 10\%$	0Cr18Ni12Mo2Ti、ZG1Cr17Mn9Ni4Mo3Cu2N	
	$< 30\%$	高铬、硅铸铁	482
	$> 60\%$	高铬、硅铸铁	25
	$\leq 60\%$	0Cr18Ni18Mo2Cu2Ti	640
		ZG1Cr24Ni20Mo2Cu3	
	$\leq 50\%$	橡胶衬里、不透性石墨、纤维酚醛塑料	
		NiWMo 合金	< 30
	$\leq 90\%$	聚丙烯塑料	
	$\geq 70\%$	1Cr18Ni11Si4AlTi	
	$> 100\%$	0Cr18Ni9Ti	
	任何浓度	0Cr23Ni28Mo3Cu3Ti、瓷砖、氟塑料	

(续)

腐蚀温度	硫酸浓度	优先选用材料	腐蚀速率/($\mu\text{m/a}$)
$\leq 80^{\circ}\text{C}$	$\leq 10\%$	0Cr18Ni12Mo2Ti	
	$\leq 50\%$	0Cr18Ni18Mo2Cu2Ti、橡胶衬里、不透性石墨、纤维酚醛增强塑料	
	$\leq 70\%$	聚丙烯塑料	
		高硅铜铸铁	100
	$\geq 65\%$	1Cr18Ni11Si4AlTi	
	$> 100\%$	0Cr18Ni9Ti	
	任何浓度	0Cr23Ni28Mo3Cu3Ti、瓷砖、氟塑料	
		NiWMo 合金	45

表 3-9 硝酸环境中的腐蚀率和推荐材料

腐蚀温度	硝酸浓度	推荐可用材料	腐蚀速率 /($\mu\text{m/a}$)
$\leq 25^{\circ}\text{C}$	$< 5\% \sim 80\%$	CrNiTi 不锈钢、硬聚氯乙烯塑料、高硅铸铁	
		纯铝	< 100
	任何浓度	1Cr18Ni9Ti、ZG1Cr18Ni9Ti	
$\leq 50^{\circ}\text{C}$	$\leq 50\%$	硬聚氯乙烯塑料	
	$70\% \sim 95\%$	1Cr18Ni11Si4AlTi、00Cr17Ni15Si4Nb(C2)、00Cr14Ni14Si4(C4)	
	$> 95\%$	1Cr18Ni11Si4AlTi、00Cr17Ni15Si4Nb(C2)、00Cr14Ni14Si4(C4)	
	任何浓度	00Cr14Ni14Si4(C4)	
$\leq 60^{\circ}\text{C}$	任何浓度	00Cr17Ni15Si4Nb(C2)、ZG1Cr13Si4NiNb	
$\leq 80^{\circ}\text{C}$	$50\% \sim 70\%$	0Cr18Ni9Ti、00Cr18Ni10、ZG0Cr18Ni9Ti、ZG00Cr18Ni10	
	$70\% \sim 95\%$	ZG1Cr13Si4NiNb、00Cr20Ni24Si4Ti(C6)	
	$> 95\%$	ZG1Cr13Si4NiNb、00Cr20Ni24Si4Ti(C6)、高纯铝、钛合金	
沸点以下	$\leq 50\%$	0Cr18Ni9Ti、00Cr18Ni10、ZG0Cr18Ni9Ti、ZG00Cr18Ni10	
	$50\% \sim 70\%$	00Cr25Ni20Nb、钛及其合金、氟塑料	
		FeNiMoMnTi 合金	380
		高硅铸铁	50
	$70\% \sim 95\%$	钛及其合金、氟塑料、高硅铸铁	
	$> 95\%$	钛及其合金、氟塑料、高硅铸铁	
		高纯 CrNi、CrMo 不锈钢	100
$100 \sim 180^{\circ}\text{C}$	50%	钛合金、高硅铸铁	
	$50\% \sim 98\%$	高硅铸铁	

表 3-10 盐酸环境中的腐蚀率和推荐材料

温度/℃	盐酸浓度/%	推荐可用金属材料	腐蚀速率/($\mu\text{m/a}$)
<30	5	高硅铸铁	<500
	15	高硅钼铸铁	160
	20	高硅钼铸铁	500
		钛合金	14
	25 ~ 30	高硅钼铸铁	330 ~ 490
	35	高硅钼铸铁	120
	5 ~ 37	镍钼钨合金	5 ~ 36
60	5 ~ 37	镍钼钨合金	30 ~ 40
90	5 ~ 37	镍钼钨合金	80 ~ 150
沸点	15 ~ 20	钛合金	230 ~ 400
		高硅钼铸铁	1810 ~ 1970

3.4.3 提高耐蚀性的机械结构

(1) 避免狭窄间隙 图 3-10a 中，焊接结构有狭缝，采用图 3-10b 结构有所改善，采用图 3-10c 结构效果更好。

(2) 防止容器中液体淤积 防止液体淤积的结构见图 3-11。

(3) 室外连接件避免雨水积存 图 3-12a 结构容易积存雨水，图 3-12b 改为钉头朝下，图 3-12c 加塑料保护盖，可以提高螺钉头的抗腐蚀能力。

(4) 防止不同材料制造的零件接触 图 3-13 中零件 1 用铝板制造，零件 7 用钢板制造，其电位势不同会产生电腐蚀。用塑料垫片 3、4 和塑料套筒 5，将其隔开，可以避免电腐蚀。此外，还应该尽量避免大的钢零件上面有小的铝制连接件，这种结构会产生严重的电腐蚀。

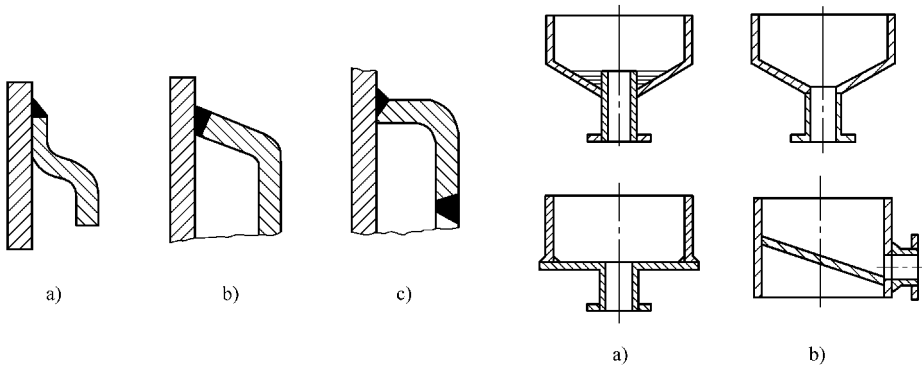


图 3-10 避免狭窄间隙
a) 不好 b) 较好 c) 好

图 3-11 防止容器中液体淤积
a) 不好 b) 好

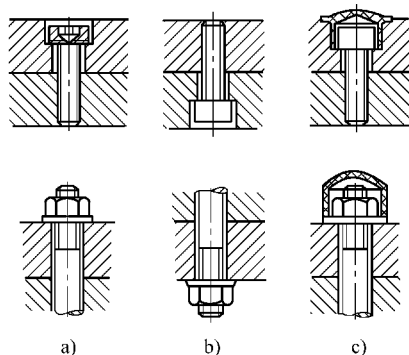


图 3-12 室外连接件避免雨水积存

a) 不正确 b) 正确 c) 正确

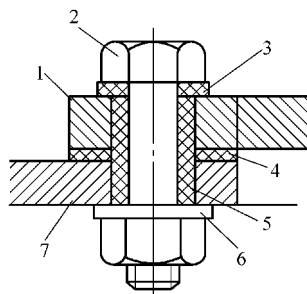


图 3-13 用绝缘材料隔开不同金属制造的零件, 避免电腐蚀

(5) 防止高速流体与管道或容器接触 流速超过 2m/s 的介质, 对管道冲击、侵蚀而发生腐蚀, 尤其当流体内部有颗粒、气泡、或管道有弯曲时, 情况更为严重。应设法避免。

(6) 预留腐蚀裕量 某些管道处于难以更换的部位, 应增加壁厚, 或采用耐腐蚀材料, 以延长管道寿命, 必要时更换。

(7) 设置易损件 钢与铜管连接, 由于电化学的作用产生严重腐蚀。图 3-14 中, 给出了一个解决方案。在两管中间设置一段容易更换的管, 这个管由较活泼的金属钢制造并与铜管接近, 这段钢管腐蚀快而其他钢管腐蚀慢, 设计者取较大的直径和厚度, 可以使用较长的时间, 而又容易更换, 使整个管道的寿命可以延长。

(8) 改进轴毂连接结构, 提高耐腐蚀性 图 3-15a 的轴毂连接采用过盈配合连接, 图 3-15c 采用键连接, 这两种连接形式都有间隙或由于不同材料接触容易产生腐蚀。而图 3-15b 采用粘接, 图 3-15d 轮毂采用塑料零件, 加长了轮毂, 使腐蚀减轻。

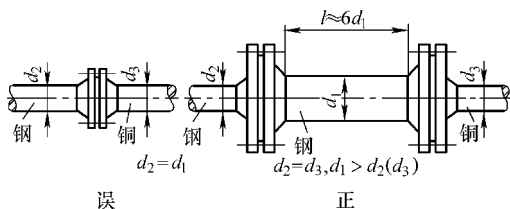


图 3-14 设置腐蚀易损件

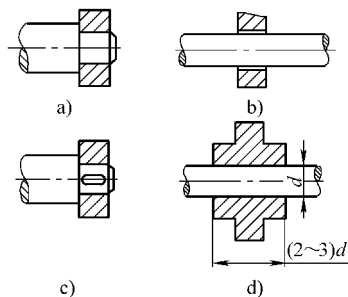


图 3-15 轴与轮毂的连接方案

(9) 结构便于拆卸和检修 结构作成整体时内部有腐蚀不易发现和检修, 改进成容易拆卸的结构, 则易于进行防腐施工、检查和维修。

(10) 简化主体, 集中附件设计 主体零件尽量简化, 把附件集中设置在某一

零件上面，做成可拆卸部件设计，以利于更换和修补。

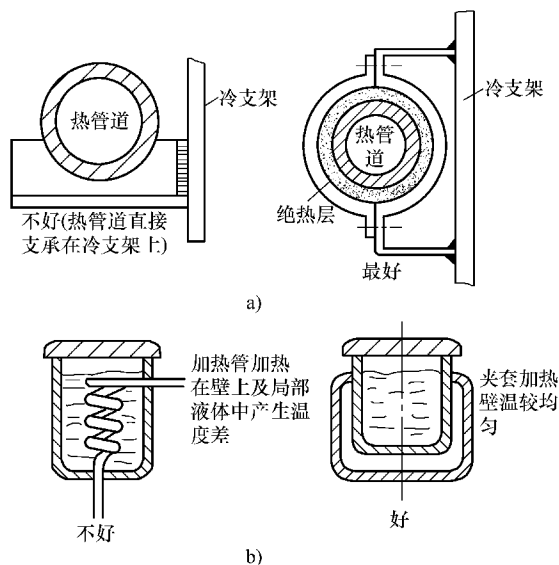


图 3-16 避免有温度差的结构设计

(11) 防止容器局部温度差异 容器局部温度过高或过低，都会引起局部腐蚀。因此应该避免局部高温或低温区（图 3-16）。

(12) 防止介质局部浓度过高 如果容器的介质局部浓度过高，则会产生沉淀物或局部势差，因而加强了腐蚀。因此，向容器内注入酸性物质的管道应远离容器壁面，尽可能注向容器中间的液面（图 3-17）。

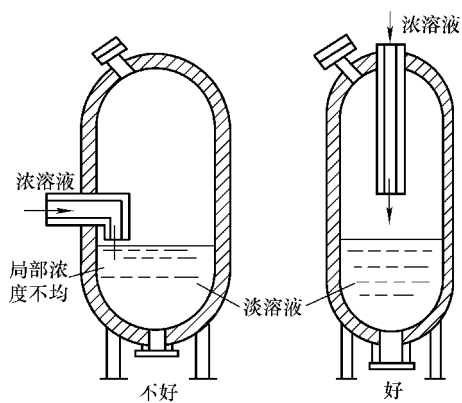


图 3-17 避免有浓度差的结构设计

(13) 钢板连接应该尽量采用对接，避免搭接和铆接 如图 3-18 所示。

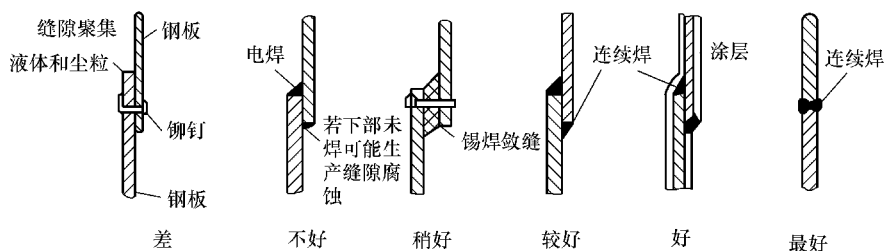


图 3-18 钢板连接应该尽量采用对接，避免搭接和铆接

(14) 直角连接焊缝, 应避免缝隙 如图 3-19 所示。

(15) 法兰连接应该避免尖角 如图 3-20 所示。

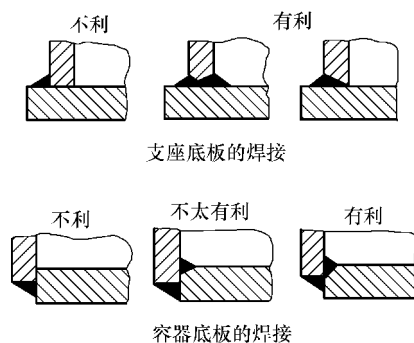


图 3-19 直角连接焊缝应避免缝隙

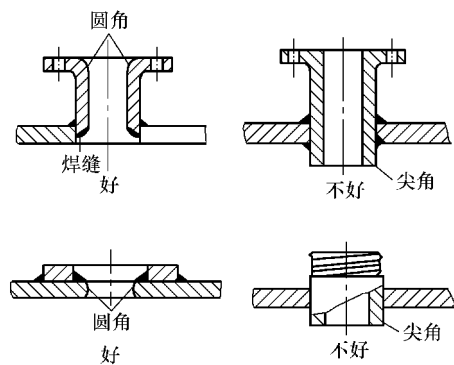


图 3-20 法兰连接应该避免尖角

(16) 容器底部不应该与地面直接接触 如图 3-21 所示。

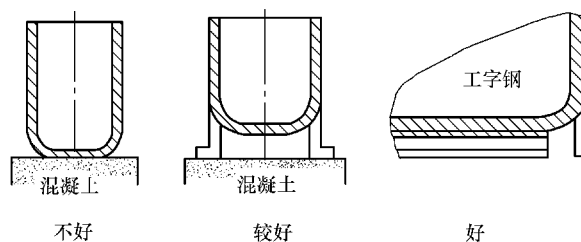


图 3-21 容器底部不应该与地面直接接触

3.4.4 用覆盖保护层减轻或避免腐蚀

覆盖层的作用是防止金属与腐蚀性介质隔离, 以减轻或避免腐蚀。对保护性覆盖层有以下要求:

- 1) 结构紧密, 完整无孔, 腐蚀性介质不能透过。
- 2) 与基体金属有很好的结合力。
- 3) 在被保护的金属表面均匀覆盖。
- 4) 有足够高的硬度和耐磨性。

常用的保护性覆盖层见表 3-11。

表 3-11 常用的金属保护性覆盖层

种 类	涂覆工艺方法		示 例	应用范围
金属覆 盖层	电镀		钢上镀 Zn、Cu、Cr 单金属和合金等	大气、弱介质、腐蚀
	化学镀		钢上镀 Ni、Cu、Au、Ni-P 合金等	大气、弱介质、腐蚀
	喷镀		喷涂 Zn、Al、Sn、Pb 等	大气、弱介质、腐蚀
	渗镀		热渗 Zn、Si、Al、Cr 等	高温、燃气、腐蚀
	热镀		热浸 Zn、Sn、Al、Cd 等	大气、弱介质、腐蚀
	包镀		钢表面包 Ni、Al 合金包 Al	大气、弱介质、腐蚀
	金属衬里		设备表面衬 Pb、不锈钢、Ti 和 Zr	硫酸、医药、食品、石化
	物理气相镀		真空镀蒸发镀 Al、溅镀 Cr、离子镀 TiN	大气、弱介质、耐磨等
	化学气相镀		气相镀 Al、Cr、Cr-Al、BN	大气、弱介质、耐磨等
非金属 覆盖层	涂料		环氧树脂涂料、丙烯酸涂料、氯磺化聚氯乙烯涂料、纳米复合涂料等	大气、海水、军工、汽车
	挤压聚烯烃涂层、熔结环氧涂层		将聚乙烯、聚丙烯涂层挤压到管道表面或将熔结环氧喷涂到管道表面	地下管道
	衬里	塑料	碳钢设备和管道等衬聚氯乙烯、聚四氟乙烯板、管	酸、碱、盐
		橡胶	碳钢设备、管道内衬橡胶	酸、碱、盐(水处理设备)
		搪瓷、搪玻璃	烧结成型作容器、管道衬里	高温、有机酸、无机酸(医药、化工)
		玻璃钢	在碳钢、水泥、木材等表面手敷环氧树脂和酚醛树脂玻璃钢	酸、碱、盐等(化工地坪、设备内衬)
		耐酸瓷板	水泥或混凝土,作大口径管道里衬	大气、海水(化工地坪、废水处理设施、设备内衬)
天然石材	辉绿岩、玄武岩、花岗岩和安山岩等	酸(设备内衬、化工地坪、墙体等)		
化学与电 化学形成 化学转化 膜覆盖层	磷化处理 氧化处理 阳极氧化 钝化处理	黑色、有色金属表面磷酸盐膜 钢件发蓝、有色金属化学氧化膜 有色金属阳极化成氧化膜 有色金属表面钝化膜	涂漆打底 大气、弱介质、腐蚀 大气、弱介质、腐蚀 大气、弱介质、腐蚀	
暂时性 覆盖层	油封 可剥性塑料	金属表面涂防锈油 金属上涂热熔型、溶剂型可剥性塑料	短期防锈封存形状复杂长期防锈	

3.4.5 防腐蚀实例

汽车的腐蚀与防腐。近年来，我国的汽车每年的增长量都达到 15% ~ 20%，到 2010 年我国汽车增加量达 1200 万辆，等于美国历史上的最大增加量。而保有的汽车达到 2 亿辆。因此，延长汽车寿命是节能减排的一个重要问题，而受到了广泛

的重视，在我国每年的汽车腐蚀损失超过 200 亿元。很多汽车因为零件腐蚀而报废。据统计 1980 年我国保有的 90 万辆“解放”型汽车，运行 10 年以下的占 65%，10 年以上的占 35%，其中 20 年以上的占 15%。许多国家汽车出现腐蚀和腐蚀穿孔的时间比我国延长一倍。表 3-12 给出重庆市公交车辆各部位的腐蚀情况。

表 3-12 重庆市公交车辆各部位的腐蚀情况

部位	使用年限			
	0.5 年	1 年	1.5 年	2 年
大梁	局部点锈蚀	点蚀、团状锈蚀	团状锈蚀	团状锈蚀、锈蚀起泡
车身骨架	局部点锈蚀	团状锈蚀	大面积锈蚀	大量起泡
车身面板	连接处点锈蚀	点锈蚀	大面积锈蚀、部分穿孔	多处穿孔
车顶	连接处点锈蚀	点锈蚀、团状锈蚀	大面积锈蚀、个别穿孔	多处穿孔
车顶窗	点锈蚀	团状锈蚀	大面积锈蚀、个别穿孔	多处穿孔
车轮罩	点锈蚀	团状锈蚀	个别穿孔	多处穿孔
车门	点锈蚀、个别团状锈蚀	团状锈蚀	团状锈蚀、穿孔	多处穿孔
前车灯框	锈斑	团状锈蚀	部分起泡	多处起泡

根据调查研究和分析，影响汽车抗腐蚀寿命的因素有：汽车服役环境、汽车设计、材料选择、制造工艺、维修保养等。各部门互相协助才能有效的提高汽车的寿命。其中主要的措施有：

- 1) 采用防腐蚀设计。如避免袋状结构和液体滞留（避免雨水积存），堵塞缝隙，增加镀锌钢板的镀锌厚度，涂层大于 45g/m² 时效果明显。避免沾泥水，例如，北京公共汽车侧窗由上下摇开改为左右推拉开启，显著减轻了窗角和面板的腐蚀。
- 2) 采用耐蚀性优良的材料。采用有防腐性材料涂层的钢板、不锈钢、玻璃钢等材料。
- 3) 上漆前严格进行清洗、除锈、脱脂、磷化、钝化等工艺，使油漆与钢板紧密结合，不易脱落、起皮、剥蚀，钢板的保护能够长期保持。
- 4) 加强日常保养维修，每天汽车入库，不宜露天存放。及时冲洗汽车，洗掉对汽车有腐蚀性的雨水等，清洗时注意控制水温。

3.5 机械设备维修

3.5.1 概述

机械设备经过使用产生老化、损伤以至失效，使生产效率和产品质量降低，最后导致机器失效甚至发生事故。但是许多机器虽然不能正常工作，但是还不是必须报废，经过修理许多旧机器可以整旧如新，恢复原来的功能。这样可以减少生产成

本和污染。这就要求对这些机器进行科学的维修。

长期以来,许多人不重视维修,把维修看成一门技艺,由师傅带徒弟,传承着有关的技术。因此提高很慢,不能满足实际需要。近年来随着科学技术的不断进步,制造业使用设备的复杂程度和技术水平迅速提高,精密、自动化、智能化的新设备不断出现,对它们的维修要求很高的专门技术水平。特别是20世纪70年代世界范围的能源危机出现以后,提出了“节能减排”、“可持续发展”、“绿色生产”、“再制造”等新的概念。维修得到格外的重视和迅速的发展。消耗最少的人力、物力、时间,用最新的科学技术进行设备维修,达到最高的质量,已经成为制造业的一个主要任务,近年来得到了很快的发展和重视,成为一门专门的技术科学。联合国教科文组织在1974年把机械设备维修正式列入技术科学学科分类目录中。我国在1979年举行了“第一次机械维修学术会议”,要求从机械设备研制的最初阶段就把维修作为一个基本因素考虑进去,把设计、制造、使用、维修、管理、报废、处理等作为一个系统进行研究和对待,以提高设备的性能。可以说不考虑维修要求的设计就不是一个好的设计。

3.5.2 维修的工作内容

“维修”一词包括维护和修理两方面的含义。

维护是对能够正常工作的机械设备进行有计划的检查、清洗、加润滑剂、紧固、调整、防腐蚀等,其目的是及时发现机械的隐患和对异常现象(如轻微的振动、发热等)予以消除,防止其继续发展和扩大,降低故障率,避免重大事故发生。如汽车的刹车装置有一些小的偶尔失灵,如果不及时修理,就可能造成大的事故。这是保证机械设备正常运行,延长其工作寿命的重要手段。按维护工作的深度和广度,而将其分成几个等级。例如:日常保养、一级保养、二级保养等。

修理是指机械设备出现故障或技术状况降低到某一临界状态时,采取措施恢复原有的技术功能(恢复性修理),甚至有所提高(改善性修理——如普通机床,经过修理和改装成为数控机床)。在进行修理以前常需要进行检查,以作为修理的依据,因此这一活动又称为“检修”。它是延长机械寿命的重要手段。

由上面的介绍可见,维修已经由单纯的排除故障,发展成为提高设备可用率和技术水平的重要手段;是在提高机械设备的技术水平的要求时减少投资、发挥现有设备潜在能力、延长机械寿命、节约材料和能源的有效途径。所以已经形成为一门新兴的学科,包括:维修理念、维修理论、维修技术、维修管理等内容。

3.5.3 极限技术状态

机械设备是否应该进行维修的判定标准,就是它是否达到了“极限技术状态”。判断机器是否进入极限技术状态的根据有:机器是否能继续工作的技术原则,是否适宜工作的经济原则,是否能够继续工作的安全和环境保护原则。依据以

上原则确定其是否达到了极限技术状态。判断的标志有:

1) 以机械设备无故障工作的概率为标志, 如有人以机器无故障工作概率 0.5 为指标。有一些由经验确定的数据, 根据机械零件的磨损程度、工作温度等确定机器的极限技术状态, 见表 3-13、表 3-14。

2) 用技术经济分析的方法来确定, 如以购置机械设备与保持其正常工作状态的单位费用之和最小为准则, 而制定指标。

3) 以机械设备主要质量指标(工作精度、功率、耗油量、生产率等)的劣化程度为指标。

4) 以机械设备排放超过有关规定为指标。

表 3-13 根据机械零件的磨损程度的极限值

发动机气缸的磨损 极限值	缸径	磨损极限值
	80 ~ 90mm	0.4 ~ 0.5mm
	100mm	0.6mm
齿轮的磨损极限值	种类	磨损极限值
	开式或低速传动	分度圆齿厚的 30% 或模数的 50%
	中速传动	分度圆齿厚的 20% 或模数的 30%
	渗碳齿轮	达到渗碳层厚度的 20% 或出现裂纹
发动机轴承的配合 间隙	材料	最小配合间隙
	三层金属铅基或锡基合金	(0.05 ~ 0.075) % 轴直径
	铜铝合金	(0.075 ~ 0.1) % 轴直径
	铝基合金	(0.08 ~ 0.12) % 轴直径

表 3-14 根据机械零件的工作温度的极限值

零件	温度极限值/℃
滑动轴承	80
滚动轴承	100
齿轮	比环境温度高 80

3.5.4 维修性设计

维修性是机械设备的一种重要的属性, 即在设计时就使机器具有维修简便、迅速、经济、效果好的特点。我国在部队和国防部门建立了 GJB368A—1994 “装备维修性通用大纲”等有关维修的军用标准, 编写了手册和案例汇编。下面举出一些原则和案例。

1) 有明确的装配基准面。图 3-22a 锥齿轮轴承座外壁与机座之间有间隙, 安装时不易调整, 图 3-22b 以轴承座外径为定位基准, 安装、调整方便。

2) 多次装拆的相关零件之间, 应该有定位销或用于定位的结构, 如减速箱的

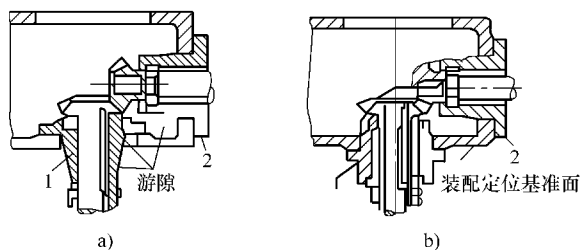


图 3-22 有明确的装配基准面

a) 不合理 b) 合理

机座与箱盖之间，安装两个定位销。

3) 尽可能把多个有关零件设计成组件。如图 3-23a 齿轮外径大于相体上的轴承孔，轴、齿轮、轴承等必须在箱体内存装，图 3-23b 轴上各零件可以在组装以后，一起装入箱内。

4) 考虑易损件的可修复性。如图 3-8 的制动瓦，容易磨损，设计成容易更换的摩擦材料与铸铁瓦块组成的组合件。

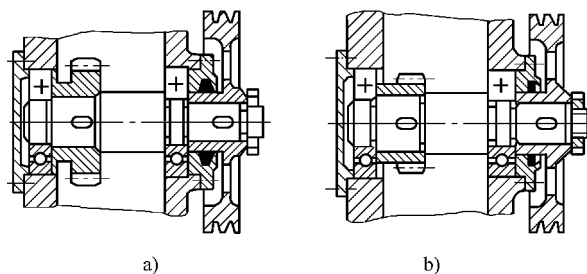


图 3-23 把多个有关零件设计成组件

a) 不合理 b) 合理

5) 尽量采用标准件。滚动轴承、紧固件、联轴器、制动器、电动机、减速器、滚珠丝杠等许多零部件都有国家标准，而且有专业工厂生产供应，采用标准零部件，设计、加工、修理、更换都十分方便、经济。

6) 尺寸留有足够的裕量。机床的导轨，内燃机的气缸、曲轴等，在修理时要对其进行加工，因此在设计时应该预留一定的裕量，可供若干次修理的需要，例如桑塔纳 1.6L 发动机的维修（见表 7-6）。

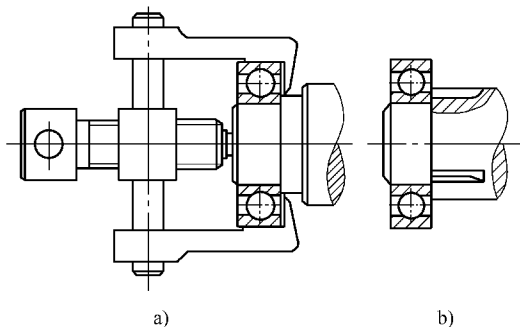


图 3-24 滚动轴承的拆卸

a) 拆卸轴承的工具 b) 轴肩上有沟槽
可以使用拆卸工具钩住内圈

7) 加工的基准面应该保留, 供修理使用。例如精密主轴的中心孔, 应该保留供检查、修理使用。

8) 注意滚动轴承拆卸。拆卸滚动轴承时要避免滚动体受力, 以免轴承损坏, 为此要求拆卸工具能够对轴承内圈施加拆卸所需的力, 因此要把轴肩高度设计适当, 不可过高, 或设计其他利于使用拆卸工具的结构 (图 3-24)。

9) 大尺寸直径圆柱体的过盈配合, 安装和拆卸都需要大型压力机或对零件加热, 在现场操作有较大的困难。建议采用胀紧套连接, 见表 3-15, 图 3-25, 图 3-26。

表 3-15 用胀紧套连接的轴和孔的公差 (JB/T 7934—1999)

胀紧套型式	轴直径 d 尺寸范围/mm	轴的公差	孔的公差	能传递的最大轴向力与转矩	
				轴向力/kN	转矩/Nm
Z1	10 ~ 500	$d \leq 38\text{mm}-h6$ $d > 38\text{mm}-h8$	$d \leq 38\text{mm}-H7$ $d > 38\text{mm}-H8$	0.7 ~ 1110	2 ~ 278000
Z2	20 ~ 1000	h7 或 h8	H7 或 H8	27 ~ 4000	270 ~ 2000000
Z3	20 ~ 150	h8	H8	30 ~ 380	300 ~ 2850
Z4	80 ~ 300	h9 或 k9	N9 或 H9	190 ~ 1650	6850 ~ 245000
Z5	100 ~ 600	h8	H8	288 ~ 4610	14400 ~ 1380000

10) 对于需要多次装拆重复使用的过盈配合连接, 在拆卸时把高压油通入配合面, 是方便拆卸的一种有效方法, 已经成功的使用。采用这种结构时应该在轴或孔的表面作出油沟, 与油孔相连。平时在出口处装有螺塞, 使用时拆下螺塞, 连接高压油管, 见图 3-27。

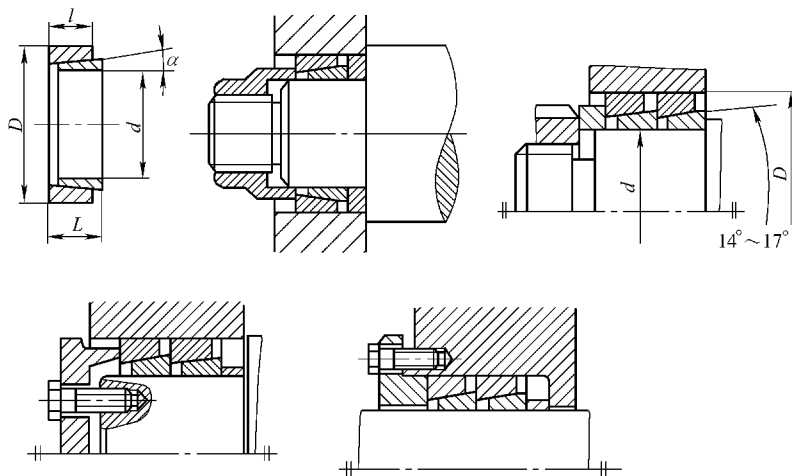


图 3-25 Z1 型胀紧套连接

11) 机器应该有观察孔、检修孔或可以打开的箱体, 以便及时检查和修理。

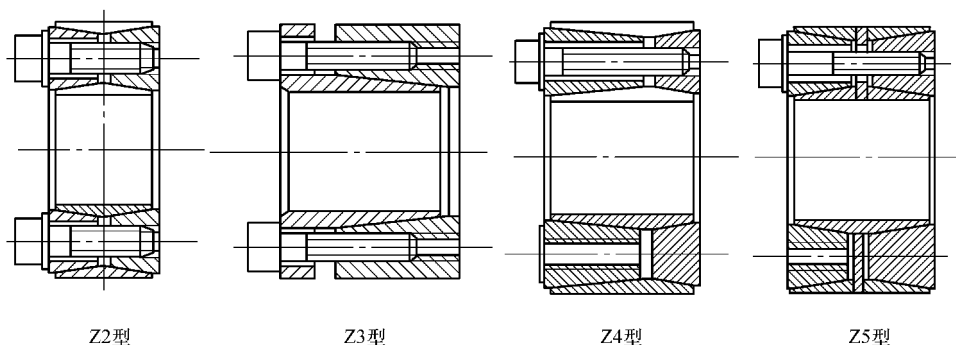
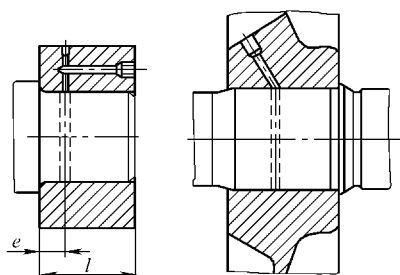


图 3-26 Z2 ~ Z5 型胀紧套连接

12) 密封装置是防止渗漏的重要零件,也是容易磨损的零件,需要经常更换,应该设计成便于更换的结构。

13) 传动带、链、摩擦离合器、滑动轴承、油箱等,都有需要经常更换或清洗的零部件,应该在结构设计时考虑操作方便。

14) 滑动轴承的间隙需要在磨损后调整,采用剖分式结构比较合适。

图 3-27 用高压油拆卸
的过盈配合连接

3.5.5 机械零件的修复技术

机械零件损坏以后,有一些经过修复可以再使用,这样可以节约资金、材料和修复所需的时间。目前比较常用的方法有钳工修复法、机械修复法、焊修法、电镀法、喷涂法、粘修法、熔敷法等。

1. 钳工修复法

钳工修复法是最常用的方法,而且使用其他的修复方法时也常需要以钳工作为配合和补充。常用的钳工修复法有:

(1) 研磨法 用研磨工具(研磨平板、研磨棒等)和研磨剂在零件表面去除很薄的一层材料,切削量很小,但是可以达到很高的表面光滑程度和尺寸精度($Ra = 0.5 \sim 0.8 \mu m$)。可以加工硬度高的表面。

(2) 刮研法 常用于机床导轨,滑动轴承轴瓦的修复,可以提高零件的几何精度、尺寸精度、接触精度等,是一种手工操作,发热小,几乎没有热变形,可以达到很高的精度。常用每 $25mm \times 25mm$ (平方英寸) 的接触点数表示接触精度要求。

2. 机械修复法

(1) 局部更换法 机械零件的某一个部位损坏严重,而其他部位完好,则可以只更换损坏的部位,如图 3-8 的制动瓦。

(2) 换位法 有一些零件由于工作特点, 只有一侧表面损坏, 另一面完好。在可能的情况下, 把该零件反过来使用, 可以延长其使用寿命。

(3) 镶补法 大型机械零件局部损坏时, 可以局部镶补使其恢复功能。如图 3-28 镶齿的齿轮。

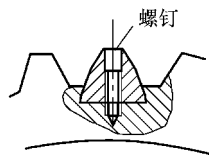


图 3-28 镶齿的齿轮

(4) 修理尺寸法 修理时把零件的损坏表面加工去掉一层, 把其他零件有关尺寸相应加大, 使其能够正常工作。又如大型齿轮传动装置大齿轮表面损伤可以采用负变位大齿轮, 把大齿轮按负变位尺寸加工, 去掉一层, 另做一个正变位的小齿轮, 令大、小齿轮的变位系数 x_2 、 x_1 有关系: $x_1 + x_2 = 0$ 。则可以继续工作。内燃机的曲轴轴径, 气缸等都可以采用这种方法修复, 要求设计时留有足够的预留尺寸裕量。

(5) 塑性变形法 机械零件磨损后尺寸变小, 用锤击、滚压等方法使其产生塑性变形, 尺寸加大, 恢复原来的功能。例如因磨损而使钥匙凸齿的高度降低而不能使用时, 可以采用这一方法使钥匙的齿“变高”一些, 恢复原来的功能。

(6) 利用波形键连接 图 3-29 所示为连接用的波形键。利用波形键可以把出现裂纹的零件, 如机架、箱体、甚至出船舶的船体, 使其恢复工作能力。图 3-30 所示为波形键嵌入波形槽的情况。一般的波形键 (图 3-29) 颈宽 $b = 3 \sim 6\text{mm}$, 其他尺寸取: 凸缘直径 $d = (1.2 \sim 1.6)b$, 凸缘间距 $l = (2 \sim 2.2)b$, 厚度 $t < b$ 。凸缘个数一般取 5、7、9。波形键材料应该具有足够的强度和韧性, 经过热处理以后适于锤接, 加工硬化性好, 而且不变脆, 锤击以后强度会有较大的提高。在高温下工作的波形键线膨胀系数应与零件接近, 以免出现温度升高以后脱落或出现裂纹。常用的材料有 1Cr18Ni9Ti, 1Cr18Ni9 等, 与铸铁线膨胀系数接近的有 Ni36 等。波形键的布置型式见图 3-31。波形键槽应尽量垂直于裂纹。

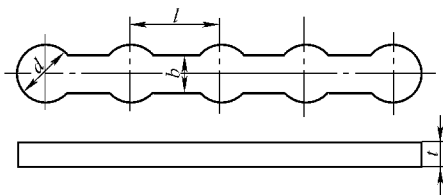


图 3-29 波形键的主要尺寸

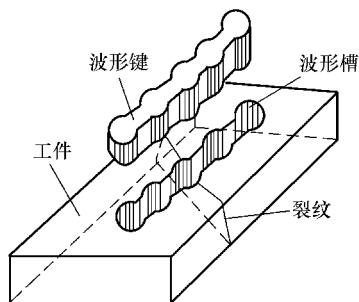


图 3-30 波形键与槽

3. 焊修法

利用焊接的方法可以修复常用材料制造的多种机械零件。这些零件的失效形式有磨损、断裂、裂纹、凹坑等。采用焊修法有许多优点: 覆盖层与原来的零件有很高的结合强度, 加工设备简单, 生产效率高, 零件的形状和尺寸不受限制, 对加工

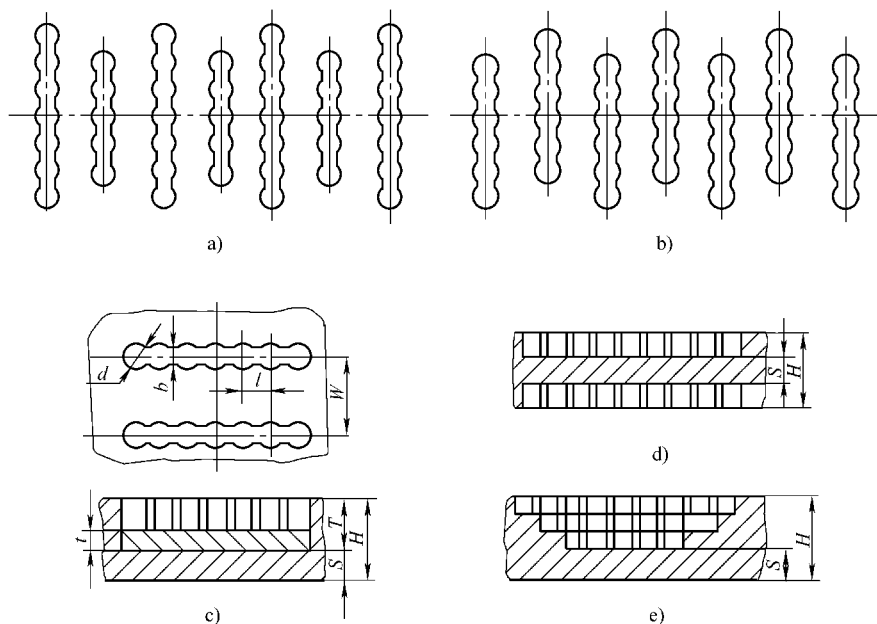


图 3-31 波形键的布置型式

a) 长短交替布置 b) 前后相错布置 c) 单面布置
d) 双面布置 e) 阶梯型布置

场地没有严格的要求，成本低。其主要缺点有：焊接时产生很高的温度，会引起金属组织的变化，产生热应力，甚至产生裂纹和变形。常用的焊修法有：

(1) 堆焊 在零件表面堆焊一层或几层具有要求性能的材料，不但可以修复磨损的零件而且还可以提高零件的耐磨性等性能。一般堆焊的工艺是：工件预热—堆焊—消除内应力—表面加工成要求的形状、尺寸和表面粗糙度。轧钢使用的轧辊已广泛采用堆焊工艺，节省了大量的新轧辊。

(2) 焊补 铸铁制造的大型零件如床身、底座、机架等，发生裂纹或缺陷，重新制造需要很长的时间和人力、物力，焊补是首选的修理方法，修补的主要是灰铸铁。由于铸铁的焊接性能较差，焊接时要采用必要的技术措施，以保证焊接质量。

(3) 钎焊 将焊接材料和焊件加热到钎料熔点（低于母材的熔点），利用钎料将零件焊接。这种方法零件温度低，零件表面光滑，工艺简单但是强度低，熔料对零件有腐蚀。

4. 电镀法

用电镀法修复零件可以修复零件被磨损的尺寸和表面粗糙度（镀后再加工）。常用的电镀方法有镀铬、低温镀铁和电刷镀。其中电刷镀方法简单，使用广泛。

5. 喷涂法

几乎所有的合金和金属都可以采用热喷涂的方法涂敷在各种材料制成的零件表

面，零件大小和形状不受限制，被喷涂的零件温度可以保持在 30 ~ 200℃ 之间。涂层厚度容易控制，由几十微米到几毫米。

6. 粘修法

胶接可以粘接各种不同的材料，加工过程中不需要高温，不会产生变形、退火、氧化等问题。其不足是抗冲击性能差，长期与空气、水和光接触时，胶层容易老化。

第4章 机械零件节能减排合理设计

机械设计工作中,减轻机器重量,延长机器寿命,都是贯彻“节能减排”的重要措施。要达到这一要求,对于各机械零件采用更准确、先进的设计计算方法是一个很重要的条件。我国常见的《机械设计》教材中介绍的是机械零件最常用的基本的计算方法,而对于满足更高的要求,尚需设计师掌握更多的资料。这一章是在《机械设计》教材的基础上介绍一些进一步的设计方法和资料,供有关机械设计人员参考,希望能够为满足提高机械零件设计计算的要求提供一些帮助。这里因篇幅所限,只介绍几种零件的资料。

4.1 螺纹连接件

4.1.1 概述

紧固件(螺钉、螺母、垫圈、键、销、铆钉等)在机械制造中占有重要地位。例如汽车的基础零部件中,紧固件虽然只占成本的1%~2%,而数量占全部零件总数的45%~60%。在装配工作中所需的工作量是很大的,而连接件的设计质量直接影响装配是否方便和可靠。而且连接件常成为机械的薄弱环节之一,由于连接件失效引起的机械事故是很多的。因此,机械设计必须重视机械连接的设计。这一节介绍螺纹连接设计计算的一些重要问题。

4.1.2 螺纹连接的力分布

螺纹连接是通过螺纹的工作表面传力的(图4-1)。各螺纹牙之间载荷不是均匀分布的,而一般《机械设计》中都按均匀分布计算而取较低的许用应力。为精确计算各扣螺纹受力,必须求解静不定的力分布问题。图4-2给出螺纹连接各扣螺纹的力传递路线,由图可以看出螺纹中各扣螺纹间的力分布与螺母的支承结构有关。图4-3是可以适用于图4-2中两种螺母结构的通用模型。对于图4-2中的两种结构, F_z 、 F_d 取不同值即可。对受压螺母 $F_d = F$, $F_z = 0$;对受拉螺母 $F_z = F$, $F_d = 0$ 。

由图4-3第*i*扣螺纹的受力情况,根据节点*A*力的平衡关系可得

$$F_{B(i-1)} - F_{Bi} - F_{Gi} = 0 \quad (4-1)$$

由节点*B*处力的平衡关系可得

$$F_{Mi} - F_{M(i-1)} - F_{Gi} = 0 \quad (4-2)$$

此外, 根据螺纹变形与螺杆、螺母变形协调条件可得以下关系。

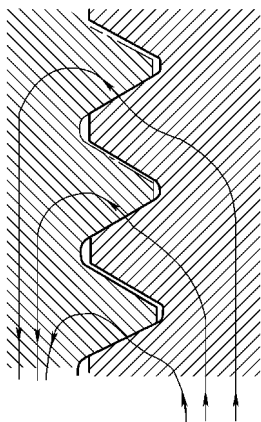


图 4-1 螺纹传力情况

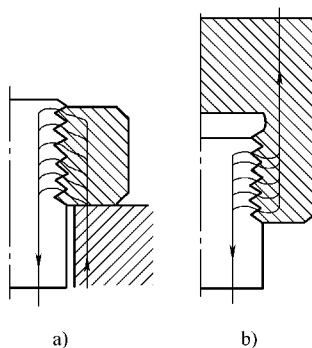


图 4-2 螺母支承结构
a) 受压螺母 b) 受拉螺母

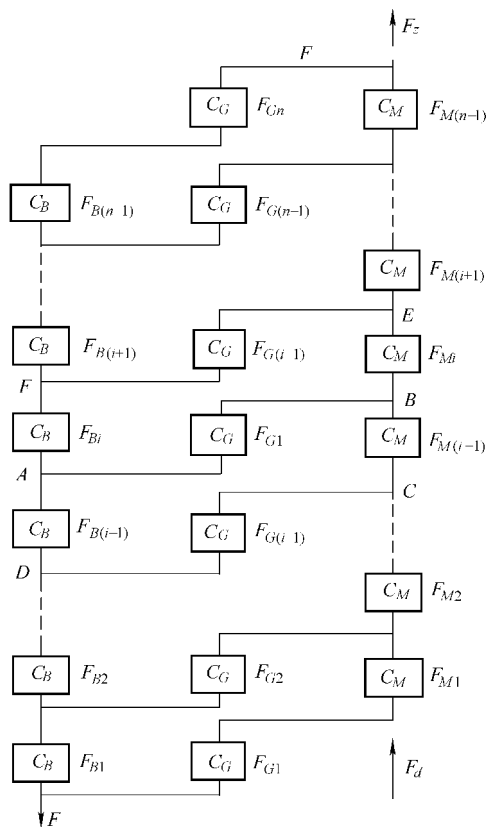


图 4-3 螺纹副受力分析通用模型

C_B —螺钉杆刚度 C_M —螺母刚度 C_G —螺纹结合部分的刚度

由间格 $ABCD$ 的变形协调条件

$$\frac{F_{B(i-1)}}{C_B} + \frac{F_{Gi}}{C_G} - \frac{F_{G(i-1)}}{C_G} - \frac{F_{M(i-1)}}{C_M} = 0 \quad (4-3)$$

由间格 $ABEF$ 的变形协调条件

$$\frac{F_{Bi}}{C_B} + \frac{F_{G(i+1)}}{C_G} - \frac{F_{Gi}}{C_G} - \frac{F_{Mi}}{C_M} = 0 \quad (4-4)$$

以上两式相减得

$$\frac{F_{B(i-1)} - F_{Bi}}{C_B} + 2 \frac{F_{Gi}}{C_G} - \frac{F_{G(i-1)} + F_{G(i+1)}}{C_G} + \frac{F_{Mi} - F_{M(i-1)}}{C_M} = 0$$

将 (4-1) (4-2) 式代入上式并整理之, 得:

$$F_{Gi} \left(\frac{C_G}{C_B} + 2 + \frac{C_G}{C_M} \right) = F_{G(i-1)} + F_{G(i+1)} \quad (4-5)$$

上式对 $i=2 \sim (n-1)$ 都是可用的, 对于 $i=1$ 和 $i=n$ 时, 由不同的支承条件采用下列公式:

对于受压螺母 ($F_d = F$, $F_z = 0$)

$$\left. \begin{aligned} F_{G1} \left(\frac{C_G}{C_B} + 1 + \frac{C_G}{C_M} \right) &= F \left(\frac{C_G}{C_B} + \frac{C_G}{C_M} \right) + F_{G2} \\ F_{Gn} \left(\frac{C_G}{C_B} + 1 + \frac{C_G}{C_M} \right) &= F_{G(n-1)} \end{aligned} \right\} \quad (4-6)$$

对于受拉螺母 ($F_z = F$, $F_d = 0$)

$$\left. \begin{aligned} F_{G1} \left(\frac{C_G}{C_B} + 1 + \frac{C_G}{C_M} \right) &= F \frac{C_G}{C_B} + F_{G2} \\ F_{Gn} \left(\frac{C_G}{C_B} + 1 + \frac{C_G}{C_M} \right) &= F \frac{C_G}{C_M} + F_{G(n-1)} \end{aligned} \right\} \quad (4-7)$$

式中, C_G 、 C_B 、 C_M 可以由以下公式求得

$$C_G = 0.34Ed$$

$$C_M \approx C_B = 0.75Ed \frac{d}{P}$$

$$\frac{C_G}{C_M} \approx \frac{C_G}{C_B} = 0.45 \frac{P}{d}$$

式中 d ——螺纹外径;

P ——螺距;

E ——螺钉及螺母的弹性模量。

在利用以上公式计算时, 可以近似地取 $\frac{C_G}{C_M} = \frac{C_G}{C_B} = 0.5 \frac{P}{d}$ 。可以由此求得图 4-2

中两种结构的力分布情况。

西田正孝用计算和三维冻结光弹性试验方法, 得到直径为 1 英寸的惠氏螺纹,

在螺母受压时, 螺纹牙数分别为 6、8、10 的力分布, 见表 4-1。

表 4-1 螺纹牙受力分布 (%)

受力螺纹号 螺纹牙数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	33.7	22.9	15.8	11.4	8.7	7.5				
8	33.3	22.3	15.0	10.2	7.0	5.0	3.9	3.3		
10	33.1	22.2	14.9	10.0	6.7	4.6	3.1	2.3	1.6	1.5

4.1.3 受轴向外载荷紧螺栓的强度计算

图 4-4a 为一受轴向外载荷的紧螺栓, 预紧力为 F' , 工作载荷为 F , 残余预紧力为 F'' , 工作时螺栓所受的力为 F_0 , C_1 、 C_0 为被连接件和螺栓的刚度。计算式为

$$F_0 = F' + \frac{C_0}{C_0 + C_1} F$$

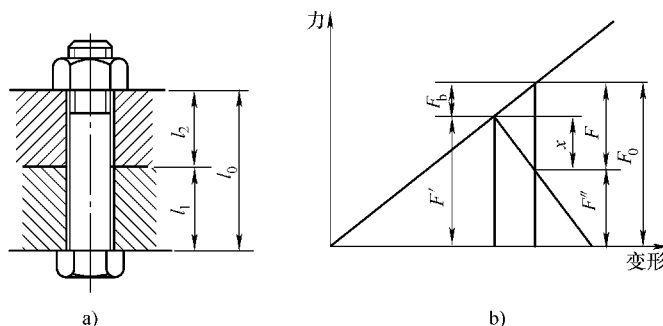


图 4-4 受轴向外载荷的紧螺栓连接

1. 螺栓刚度 C_0 的计算

由材料力学的应力应变关系, 可知螺钉柔度 λ_0 为

$$\lambda_0 = \frac{1}{C_0} = \frac{l_0}{E_0 A_0} \quad (4-8)$$

式中 l_0 ——由螺母端面到螺钉头端面之间的距离。

对于 $l_0 < 6d$ 的短螺栓应该考虑螺杆在螺母中的变形 (或双头螺栓在机座中的变形)。简化计算公式为

$$\lambda_p = \frac{0.49}{d_2 E} \sqrt{1.44 + 9.28 \frac{P}{d}} \quad (4-9)$$

式中 P ——螺距。

还可以用更简单的公式进行近似计算

当 $d/P = 6 \sim 10$ 时 $\lambda_p = (0.95 \sim 0.80)/(dE)$

$d/P = 10 \sim 20$ 时 $\lambda_p = (0.80 \sim 0.70)/(dE)$

如果螺母 (或机座) 与螺钉的弹性模量不同, 分别为 E_b 和 E_k , 则可以采用

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{E_b} + \frac{1}{E_k} \right)$$

研究表明, 螺纹连接的柔度 λ_p 与制造精度有关系, 特别是螺纹牙形角影响很大。2~3 级精度的螺纹比精确制造的螺纹柔度大 2 倍。预紧力大时, 因为有塑性变形, 制造误差的影响减轻了。当螺纹工作表面压强较小时 ($p \leq 10 \text{ MPa}$), 接触变形对柔度有很大的影响。当工作表面压强较大时, 螺纹表面按标准 (粗糙度 $Ra = 3.2 \sim 12.5 \mu\text{m}$), 接触柔度超过螺纹的柔度。在第一次工作时超过 2~4 倍, 重复加载时超过 0.5~0.8 倍。而当表面粗糙度的参数值较小时 ($Ra \leq 0.10$), 对接触柔度影响不大。

钉头的柔度可以只按螺栓头部剪切变形柔度计算, 钉头柔度 $\lambda_b = 0.15/(hE_b)$, 式中 h 为钉头高度。

综上所述, 对于图 4-5 所示的短螺栓连接的柔度为

$$\lambda_0 = \sum_{i=1}^n \frac{l_{oi}}{E_0 A_{oi}} + \lambda_p + \lambda_b \quad (4-10)$$

式中 l_{oi} ——螺栓各部分长度;

A_{oi} ——螺栓各部分断面面积。

2. 被连接件刚度计算

图 4-6 中给出一些计算被连接件刚度影响区时采用的各种假设和计算结果的比较。

计算被连接件刚度的方法很多, 过去多采用 45° 圆锥平均影响区假设 (图 4-6d), 而目前多采用锥顶角 2α 影响区假设。图 4-7 中给出螺钉头压紧被连接件的影响区为半锥顶角为 α 的空心截圆锥, 内部有一直径为 d_0 的圆柱形孔。

图 4-7a 中被连接件很薄 ($l_1 < d_0$) 时可以用圆柱代替圆锥影响区, 被连接件的刚度为 C_1 , 柔度为 λ_1 , 则

$$\lambda_1 = \frac{1}{C_1} = \frac{l_1}{EA_1} \quad (4-11)$$

式中 $A_1 = \pi[(a + l_1 \tan \alpha)^2 - d_0^2]/4$

当 $l_1 \geq d_0$ 时应按空心截圆锥计算 (图 4-7a)。

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{1}{E} \int_0^{l_1} \frac{dx}{\frac{\pi}{4} [(a + 2x \tan \alpha)^2 - d_0^2]} \\ &= \frac{4}{\pi E} \int_0^{l_1} \left[\frac{d(a + 2x \tan \alpha - d_0)}{(a + 2x \tan \alpha - d_0)} - \frac{d(a + 2x \tan \alpha + d_0)}{(a + 2x \tan \alpha + d_0)} \right] \frac{1}{2d_0} \frac{1}{2 \tan \alpha} \end{aligned}$$

得

$$\lambda_1 = \frac{2.3026}{\pi E d_0 \tan \alpha} \lg \frac{(a + d_0)(a + 2l_1 \tan \alpha - d_0)}{(a - d_0)(a + 2l_1 \tan \alpha + d_0)} \quad (4-12)$$

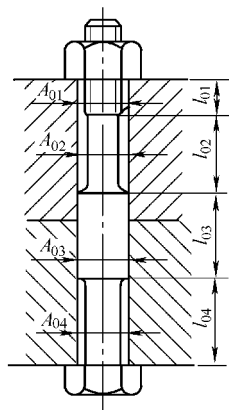


图 4-5 螺栓柔度

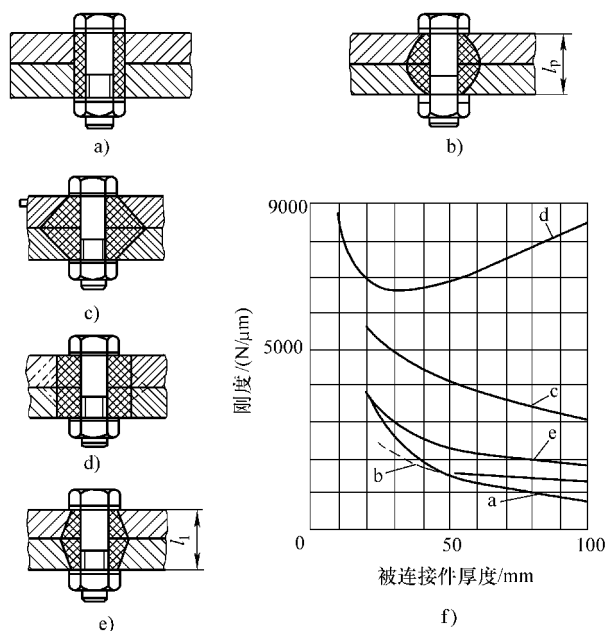


图 4-6 计算被连接件刚度时采用的影响区

a) 圆柱影响区假设 b) 曲线影响区假设 c) 45°圆锥影响区假设 d) 45°圆锥平均影响区假设 e) 锥顶角 2α 影响区假设 f) 按以上五种假设求得的被连接件刚度 C_1

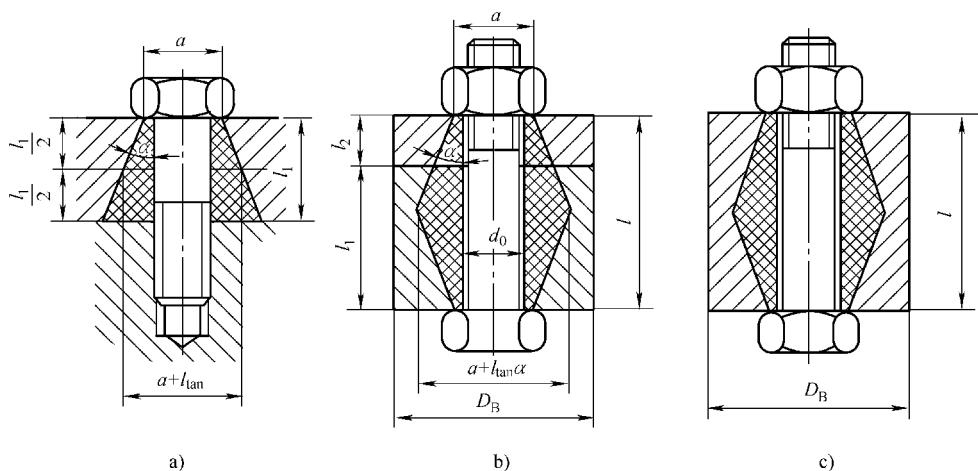


图 4-7 被连接件的影响锥

a) 螺钉连接 b) 螺栓连接, 组合被连接件 c) 螺栓连接, 整体被连接件

对图 4-7b 则在上式中以 l 代替 $2l_1$, 以 4.6052 代替 2.3026 得

$$\lambda_1 = \frac{4.6052}{\pi E d_0 \tan \alpha} \lg \frac{(a + d_0)(a + l \tan \alpha - d_0)}{(a - d_0)(a + l \tan \alpha + d_0)} \quad (4-13)$$

在计算中取 $\tan\alpha = 0.4 \sim 0.5$ ，即 $\alpha = 22 \sim 27^\circ$ 。上述公式比较复杂，下面介绍几种简化计算公式：

В. К. Данилов 给出的简化公式，用于 $l < 8d$

$$l_1 = \frac{1}{Ed^2} \left(0.5 - 0.1 \frac{l}{d} + 0.007 \frac{l^2}{d^2} \right)$$

Weiβ、Wallner 建议采用等效圆筒，其断面面积：

$$A_1 = \frac{\pi}{4} \left[\left(a + \frac{l}{10} \right)^2 - d_0^2 \right]$$

Junker 建议采用等效圆筒断面积为：

$$\text{钢} \quad A_1 = \frac{\pi}{4} \left[\left(a + \frac{l}{10} \right)^2 - d_0^2 \right]$$

$$\text{铸铁} \quad A_1 = \frac{\pi}{4} \left[\left(a + \frac{l}{8} \right)^2 - d_0^2 \right]$$

$$\text{铝合金} \quad A_1 = \frac{\pi}{4} \left[\left(a + \frac{l}{6} \right)^2 - d_0^2 \right]$$

在一般机械零件（机械设计）教材中，常采用相对柔度 x 进行计算。 $x = \frac{C_0}{C_0 + C_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_0 + \lambda_1}$ ，当被连接件为金属件时（不用垫片） $x = 0.2 \sim 0.3$ 。图 4-8 给出相对柔度的试验值。 D_B 为试验所用被连接件的外径。

3. 受轴向力紧螺栓计算

图 4-9a 表示受轴向力紧螺栓连接中，作用力的不同位置。外载荷 F 作用在被连接件中间，则被连接件由 $i+1$ 至 $j-1$ 受拉力（预紧力减小），螺栓也受拉力，而被连接件 $1 \sim i, j \sim n$ 受压力。其受力情况如图 4-9b、c。在图中，把零件分为两组，螺栓零件组（图 4-9b）和被连接件组（图 4-9c）。

设在受有预紧力 F' 的螺栓连接的接合面处，作用外载荷 F 以后，接合面处被连接件之间的压力变化为 X ，则其大小可以由螺钉系统的变形 Δl_b 与被连接件系统变形 Δl_k 相等的条件（即接合面不分离的条件）求得（图 4-4）。

$$(F - X) \left(\frac{l_0}{E_0 A_0} + \sum_{v=1}^i \frac{l_v}{E_v l_v} + \sum_{v=j}^n \frac{l_v}{E_v A_v} \right) = X \sum_{v=i+1}^{j-1} \frac{l_v}{E_v A_v}$$

在公式中引入柔度符号，并整理得到

$$X = F \frac{\lambda_0 + \sum_{v=1}^i \lambda_v + \sum_{v=j}^n \lambda_v}{\sum_{v=0}^n \lambda_v}$$

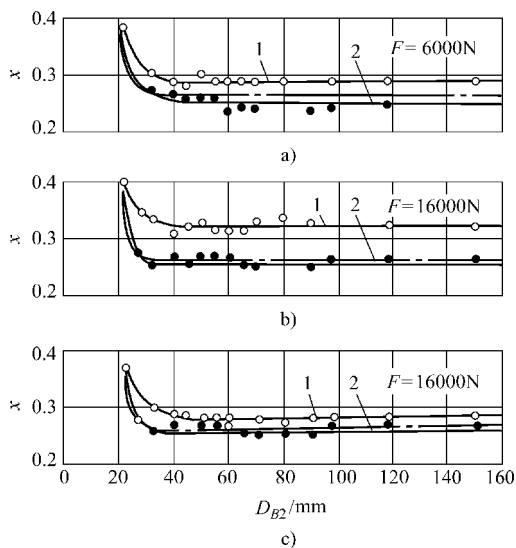
图 4-8 相对柔度与试件直径 D_B 及预紧力 F' 和外载荷 F 的关系

图 a、b 中, 曲线 1— $F' = 16000\text{N}$, 曲线 2— $F' = 32000\text{N}$, 整体被连接件 (无接合面) $l = 36\text{mm}$, 图 c 中, $F' = 32000\text{N}$, 1—组合被连接件, $l_1 = l_2 = 18\text{mm}$; 2—整体被连接件 $l = 36\text{mm}$, 点画线—理论计算结果, 实线—实验结果。

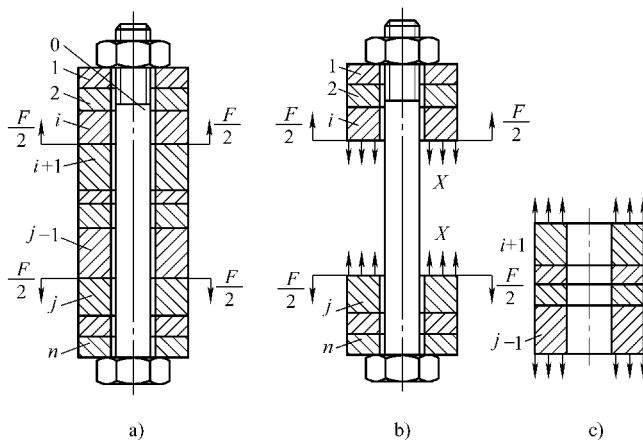


图 4-9 受轴向外载荷紧螺栓力作用点的影响

在图 4-4 中由于外载荷 F 的作用引起的螺栓载荷增加量 F_b 为

$$F_b = F - X = F \frac{\sum_{v=i+1}^{j-1} \lambda_v}{\sum_{v=0}^n \lambda_v}$$

相对柔度 $x = F_b/F$ ，由此可知

$$x = \frac{\sum_{v=i+1}^{j-1} \lambda_v}{\sum_{v=0}^n \lambda_v} = \frac{\text{被连接件组零件柔度之和}}{\text{全部零件柔度之和}}$$

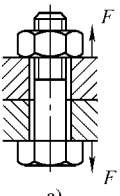
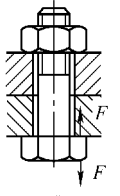
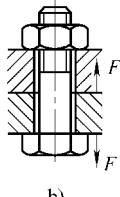
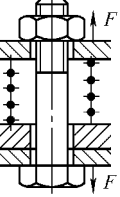
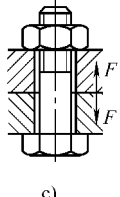
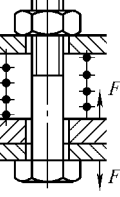
 a)	$0 < x < 1$ $x = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2}$	 d)	$x \approx 0$
 b)	$0 < x < 1$ $x = \frac{\lambda_2}{\lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2}$	 e)	$x \approx 1$
 c)	$x = 0$	 f)	$x \approx 0$

图 4-10 各种外载荷情况的 x 值

图 4-10 给出各种典型情况的相对柔度 x 值。图 4-11 为两种不同的结构，图 4-11a 的结构可认为近似于图 4-10 中的图 b，图 4-11b 的结构可认为接近于图 4-10 中

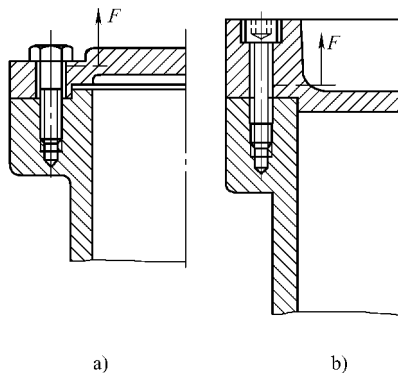


图 4-11 按结构确定外载荷作用点

的图 c。因此在图 4-11 中, 图 a 的结构由螺钉连接的疲劳强度来分析比图 b 的结构差。

4.1.4 德国工程师协会技术准则 VDI 2230 《高强度螺栓连接系统计算》

1. 概述

VDI 2230 是根据德国对于螺栓连接的研究有关成果制定的, 目的是向参加实际工作的设计师推荐一种计算方法, 以帮助他们完成准确确定螺栓连接参数这个通常比较困难的任务。

2. VDI 2230 适用范围

- 1) 钢制螺栓。
- 2) 牙型角 $\alpha = 60^\circ$ 。
- 3) 高强度螺栓, 即性能等级 8.8 到 12.9。
- 4) 一般工作载荷为轴向静载荷, 或轴向动载荷。其所受的力作用线与螺栓轴线平行。此外, 还可能有弯曲力矩。
- 5) 计算表格中给出的数据 M4 至 M39。本准则可通过类推的方法用于其他材料制造的强度较低或者强度不符合 DIN EN 898-1 (即 ISO 898-1, GB/T 3098.1 等同采用) 规定的强度值的螺栓。对于尺寸较大的螺栓 (如大于 M39 的规格), 也可以用同样的处理 (计算) 方法。
- 6) 本准则应用于接触面尺寸在限制值以内, 如果超过了限制值, 此处的方法不再适用, 否则会产生较大的计算误差。
- 7) 材料性质见表 4-2、表 4-3, 这些数据只用于室温条件下, 即对于较高或较低的温度必须予以修正。特殊的工作条件 (例如有腐蚀) 或冲击载荷不能处理。
- 8) 这一准则原则上并不排斥要用试验和 (或) 数值计算 (有限元、边界元) 进行验证。推荐采用这些方法, 特别是对于重要连接的场合。下列标准和说明书 (摘编) 必要时应该参考使用。

3. 基本原理

VDI 2230 的计算方法是在一般的单个螺栓强度计算方法的基础上发展起来的, 但是在理论与应用方面与传统的方法相比有很大的不同。

- 1) 考虑了扭紧后结合面、钉头和螺母支承面由于表面粗糙度引起的压陷, 由此产生的预紧力的减少量 F_z 。
- 2) 具体考虑扭紧力的变化范围。按采用的扭紧工具 (如显示扭矩的扳手), 确定扭紧系数 α_A (按表 4-5 确定), 拧紧系数 $\alpha_A = \text{最大拧紧力 } F_{M\max} / \text{最小拧紧力 } F_{M\min}$ 。
- 3) 用算法按零件的材料和尺寸确定螺栓和被连接件的柔度。
- 4) 考虑力作用点对传力比 ϕ_D 的影响, 引入载荷导入系数 n 。

在连接模型图中,主要尺寸和重要参数之间的关系见图 4-12 (无温度力 ΔF_{Vth})。

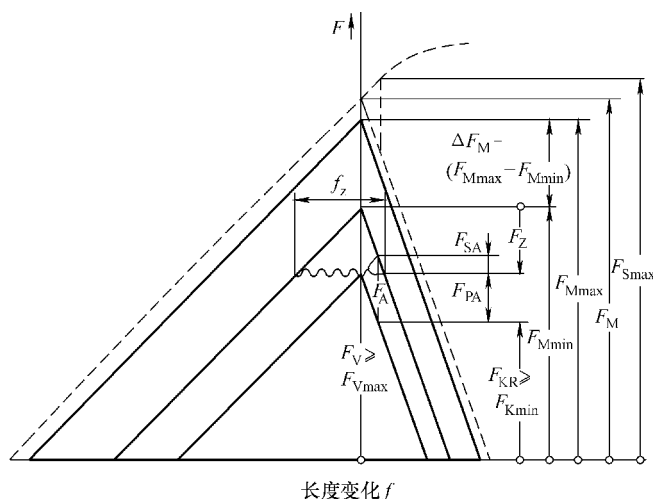


图 4-12 紧螺栓连接力与变形的关系

图中符号的意义:

f_z ——由于压陷引起的塑性变形量。

F_z ——由于工作过程中的压陷,导致预紧力的损失量。

F_M ——装配预紧力

F_{Mmax} ——装配最大预紧力,是设计时必须考虑的。尽管扭紧技术和工作时产生的零件表面压陷值缺乏精确的数据,还是能够求得所需的夹紧力。

F_{Mmin} ——装配要求的最小预紧力,当没有精确的扭紧技术和最大摩擦因数的数据时,可以由它导出 F_{Mmax} 。

$$\Delta F_M = F_{Mmax} - F_{Mmin}$$

F_S ——螺栓的载荷。

F_{SA} ——增加的螺栓轴向载荷。

F_{PA} ——有外载荷作用时,轴向载荷的一部分,它是在被夹紧零件承受载荷的变量。

F_{Smax} ——螺栓载荷的最大值。

F_A ——轴向载荷。

F_{KR} ——残余预紧力。

F_{Kmin} ——要求的残余预紧力。

F_V ——预紧力。

F_{Vmax} ——要求的预紧力。

4. 计算使用的表格和资料

表 4-2 各种材料表面和润滑剂状态下螺栓连接的摩擦因数等级

摩擦因数等级	μ_G 和 μ_K 的范围	对应的典型选择条件	
		表面材料	润滑剂
A	0.04 ~ 0.10	金属表面： 氧化（发黑） 磷化，热镀锌（如 Zn、Zn/Fe、Zn/Ni），多层镀锌	固体润滑剂，如 MoS ₂ ，石墨，PTFE（聚四氟乙烯）、PA（聚酰胺）、PE（聚乙烯）、PI（反式聚异戊二烯），在漆层中，作为表面防护，或在涂胶中 液体石蜡， 弥散石蜡
B	0.08 ~ 0.16	金属表面： 发黑，磷化，热镀锌如 Zn、Zn/Fe、Zn/Ni，铝和镁合金	固体润滑剂，如 MoS ₂ ，石墨，PTFE（聚四氟乙烯）、PA（聚酰胺）、PE（聚乙烯）、PI（反式聚异戊二烯），在漆层中，作为表面防护，或在涂胶中 液体石蜡， 弥散石蜡，润滑脂，油（供应状态）
		热镀锌	MoS ₂ ，石墨，弥散石蜡
		有机涂层	合成固体润滑剂或弥散石蜡
		奥氏体钢	固体润滑剂或石蜡
C	0.14 ~ 0.24	奥氏体钢	弥散石蜡，涂胶
		金属表面： 磷化	供应状态（少量润滑油）
		热镀锌层如 Zn、Zn/Fe、Zn/Ni，吸附锌镀层	无
D	0.20 ~ 0.35	奥氏体钢	油
		热镀锌层如 Zn、Zn/Fe、Zn/Ni	无
E	≥0.30	热镀锌层如 Zn、Zn/Fe、Zn/Ni，奥氏体钢，铝、镁合金	无

力图使摩擦因数达到 B 级以上，以得到尽可能高的预紧力，其分散程度较小。这并不意味着自然地采用最小的摩擦因数或摩擦因数分布显示相当的等级，此表用于室温条件下。

表 4-3 结合面静摩擦因数 μ_T 的近似值

材料组合	以下条件下的静摩擦因数 μ_T	
	干（无润滑）	有润滑
钢—钢或铸钢	0.1 ~ 0.23	0.07 ~ 0.12
钢—灰铸铁	0.12 ~ 0.24	0.06 ~ 0.1

(续)

材料组合	以下条件下的静摩擦因数 μ_T	
	干 (无润滑)	有润滑
灰铸铁—灰铸铁	0.15 ~ 0.3	0.2
青铜—钢	0.12 ~ 0.28	0.18
灰铸铁—青铜	0.28	0.15 ~ 0.2
钢—铜合金	0.07	
钢—铝合金	0.1 ~ 0.28	0.05 ~ 0.18
铝—铝	0.21	

表 4-4 确定螺栓的直径范围

1	2	3	4
力/N	公称直径/mm		
	性能等级		
	12.9	10.9	8.8
250			
400			
630			
1000	3	3	3
1600	3	3	3
2500	3	3	4
4000	4	4	5
6300	4	5	6
10000	5	6	8
16000	6	8	10
25000	8	10	12
40000	10	12	14
63000	12	14	16
100000	16	18	20
160000	20	22	24
250000	24	27	30
400000	30	33	36
630000	36	39	

表 4-4 使用方法:

1) 在第一列中选取螺栓连接最接近的较大载荷。如果承受复合的载荷 (有轴向和横向载荷), 而 $F_{Amax} < F_{Qmax}/\mu_{Tmin}$, 则只考虑 F_{Qmax} 。

2) 所需的最小预紧力 F_{Mmin} 按以下步骤增加数值等级。

① 对按静态 F_{Qmax} 设计的连接或横向动载荷的连接, 提高 4 级 (图 4-13a)。

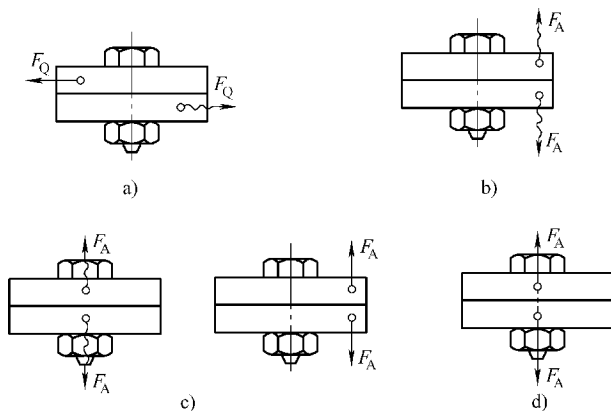


图 4-13 设计载荷的作用方式

② 对按动载荷或偏心作用的轴向载荷 F_{Amax} 设计的连接, 提高 2 级 (图 4-13b)。

③ 对按中心作用的轴向动载荷或偏心作用的轴向静载荷设计的连接, 提高 1 级 (图 4-13c)。

④ 对按中心作用的轴向静载荷设计的连接, 不提高等级 (图 4-13d)。

3) 还应该按以下要求进一步增加所需的最小预紧力 F_{Mmin} , 并从而得到所需的最大预紧力 F_{Mmin} :

① 当采用调整到最终扭紧力矩的简单旋转扳手拧紧时, 增加 2 级。

② 当使用力矩扳手或精密扳手 (利用螺栓的动态扭矩测定或测量螺栓的伸长量控制扭紧力矩) 时, 增加 1 级。

③ 利用塑性变形范围内的扭转角度控制或计算机控制的屈服强度测控扭紧, 不提高等级。

4) 在确定的第一列力的数值右边, 相对的 2 到 4 列按不同的性能等级给出了所需螺栓的直径。

表 4-4 使用方法实例:

承受动载荷和轴向偏心载荷 $F_A = 8500N$ 的连接, 螺栓性能等级 12.9, 用力矩扳手装配。

1) 在第一列中最接近的较大载荷是 10000N。

2) “承受动载荷和轴向偏心载荷” 提高 2 个等级, $F_{Mmin} = 25000N$ 。

3) “用力矩扳手装配” 提高 1 个等级, $F_{Mmin} = 40000N$ 。

4) 对于 $F_{Mmin} = 40000N$, 由第二列 (性能等级 12.9) 取 M10。

表 4-5 拧紧系数 α_A 的参考值

拧紧系数 α_A	分散度 $\frac{\Delta F_M}{2F_m} = \frac{\alpha_A - 1}{\alpha_A + 1}$	拧紧方法	调整方法	说 明	
1.05 ~ 1.2	$\pm 2\% \sim \pm 10\%$	用超声波控制 拧紧引起的伸长 量	回声时间	数值要求定标 $l_k/d < 2$ 时, 允许误差逐渐增加 直接机械连接误差较小, 间接连接误差较大	
1.1 ~ 1.5	$\pm 5\% \sim \pm 20\%$	机械法测量伸 长量	用长度测量方 法调整	要求准确地确定螺栓的轴向弹性柔 度。分散度主要决定于测量技术的精确 度 $l_k/d < 2$ 时, 允许误差逐渐增加	
1.2 ~ 1.4	$\pm 9\% \sim \pm 17\%$	用屈服强度控 制拧紧, 机动或 手动拧紧	相对力矩或转 角系数作为输入 量	分散度主要由螺栓屈服强度的分散度 确定。在此, 测量螺栓的尺寸是为了求 得 F_{Mmin} 。设计螺栓需要根据拧紧系数 求得 F_{Mmax} , 并与拧紧方法一致	
1.2 ~ 1.4	$\pm 9\% \sim \pm 17\%$	用角度控制扭 紧, 机动或手动 拧紧	实验确定预紧 力矩和转角		
1.2 ~ 1.6	$\pm 9\% \sim \pm 23\%$	液压拧紧	按长度或压力 测量	较小的值用于长螺栓 ($l_k/d \geq 5$) 较大的值用于短螺栓 ($l_k/d \leq 2$)	
1.4 ~ 1.6	$\pm 17\% \sim \pm 23\%$	拧紧时用控制 扭矩扳手, 显示 力矩扳手或测量 力矩的精密拧紧 工具控制扭矩	用螺栓样品进 行实验, 确定所 需的拧紧力矩。 用测量螺栓伸长 的方法	较低值: 要求 作大量校准或测 试实验 (例如 20 次) 需要传 递的扭矩有较小 的分散度 (如 $\pm 5\%$)	较低值用于: 较小的转角, 对应 于刚度相对较大的连接 相对较软的结合面 结合表面没有“卡 住”的倾向, 即采用 磷化或足够的润滑
1.6 ~ 2.0 (摩擦因数 B 级) 1.7 ~ 2.5 (摩擦因数 A 级)	$\pm 23\% \sim \pm 33\%$ $\pm 26\% \sim \pm 43\%$	拧紧时用控制 扭矩扳手, 显示 力矩扳手或测量 力矩的精密拧紧 工具控制扭矩	根据摩擦因数 (表面情况和润 滑) 确定所需 的拧紧力矩	较低值用于测 力矩平稳拧紧和 精密的拧紧装置 较高值用于给 定信号控制或自 动切断拧紧力矩 的扳手	较高值用于: 较大的转角, 对应 于柔度相对较大的连接和细牙螺纹 结合表面硬度高而 且表面粗糙
2.5 ~ 4	$\pm 43\% \sim \pm 60\%$	用冲击扳手或 有惯性矩控制的 扳手拧紧	螺栓的校准靠 产生所需的拧紧 力矩所需的力矩 (对于预计的摩 擦因数) 和一个 附加系数	较低值用于: 大量校准实验 (再拧紧力矩) 用于水平零件的螺栓 传递冲击时没有间隙	

5. 计算例题

下面用例题介绍这一方法使用的公式和计算步骤。

例题 4-1 计算连接液压缸活塞与活塞杆之间的螺栓连接。图 4-14 所示，螺栓连接作为一个中心受力连接的计算例题。主要尺寸见表 4-6。

表 4-6 主要尺寸

尺 寸	
活塞厚度 $L_g = 60\text{mm}$	活塞杆直径 $D_{St} = 25\text{mm}$
活塞连接厚度 $L = 55\text{mm}$	活塞直径 $D_Z = 80\text{mm}$

液压缸内压力 $p_{\max} = 5.5\text{MPa}$ 。受压面积 $A = (D_Z^2 - D_{St}^2)\pi/4 = (80^2 - 25^2)\pi/4\text{mm}^2 = 4536\text{mm}^2$ 。轴向载荷 $F_{A\max} = p_{\max}A = 5.5 \times 4536\text{N} = 24.9\text{kN}$ 。

活塞是一个产生压力的零件，每小时 300 个工作行程。因此轴向载荷可以看做是一个动载荷。由于螺栓还要有密封的作用，因而在不受载荷的情况下，还应该保持不少于 $F_{K\min} = 10^3\text{N}$ ，以保证安全。活塞材料为 16MnCr5，活塞杆材料为 C45（国际标准 C45 相当于我国 45 钢）。表面粗糙度 $Ra = 16\mu\text{m}$ 。

连接扭紧时使用能够显示扭矩的扳手。

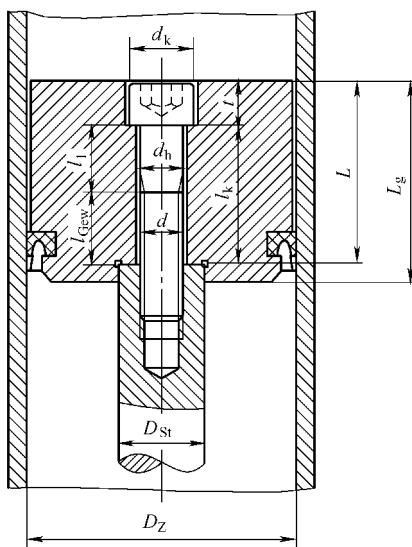


图4-14 液压缸活塞与活塞杆之间的螺栓连接

解

(1) 初步确定螺栓公称直径，核算其适用范围

由表 4-4，对于集中作用的动载荷 $F_{A\max} = 24.9 \times 10^3\text{N}$ 和 $F_Q = 0$ ，螺栓的直径可以按以下的步骤进行：

取 $F = 25000\text{N}$ 作为仅次于 $F_{A\max}$ 的最大比较载荷。

对于集中作用的轴向动载荷，取最小装配预紧力 $F_{M\min} = 40000\text{N}$

用显示扭矩的扳手扭紧, 取最大装配预紧力 $F_{\text{Mmax}} = 63000\text{N}$

由表 4-4 第 2 列, 选择尺寸为 M12 的螺栓, 其性能等级为 12.9。为的是减小对活塞杆截面的削弱。

选择圆柱头螺栓 ISO4762—M12 × 60—12.9 (等效 GB/T 70.1—2008 M12 × 60—12.9 内六角圆柱头螺钉) 得到尺寸见表 4-7。

表 4-7 结果尺寸

查标准得沉头孔尺寸	$t = 13\text{mm}$
夹紧部分长度	$l_k = L - t = 55\text{mm} - 13\text{mm} = 42\text{mm}$
钉杆部分长度	$l_1 = 24\text{mm}$
未拧入螺纹孔的自由螺纹长度	$l_{\text{Gew}} = l_k - l_1 = 42\text{mm} - 24\text{mm} = 18\text{mm}$
“中等”孔直径, 按标准查得	$d_0 = 13.5\text{mm}$
螺距	$P = 1.75\text{mm}$
螺纹中径	$d_2 = 10.863\text{mm}$
螺纹小径	$d_3 = 9.85\text{mm}$
螺栓头直径	$d_K = 18\text{mm}$
螺栓头支承面直径	$d_W = 17.23\text{mm}$
小径处截面积	$A_{d3} = \pi d_3^2 / 4 = \pi \times 9.85^2 / 4\text{mm}^2 = 76.25\text{mm}^2$
公称截面积	$A_N = \pi d^2 / 4 = \pi \times 12^2 / 4\text{mm}^2 = 113.1\text{mm}^2$
计算应力的面积	$A_S = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_2 + d_3}{2} \right)^2 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{10.863\text{mm} + 9.85\text{mm}}{2} \right)^2 = 84.3\text{mm}^2$

(2) 扭紧系数

按采用的扭紧工具 (显示扭矩的扳手), 扭紧系数按表 4-5 确定, 对摩擦因数为 B 级, 扭紧系数 $\alpha_A = 1.7$ 。

(3) 确定所需最小的夹紧力

这一连接是中心对称的, 而且在中心加载。因此, 按照给出的条件

$$F_{\text{Kerf}} = F_{\text{Kmin}} = 10^3\text{N}$$

(4) 求工作载荷、弹性柔度 λ_S 、弹性回复和载荷导出系数

1) 螺栓的弹性柔度 λ_S , 按下列公式计算。

螺栓的弹性柔度 $\lambda_S = \lambda_{\text{SK}} + \lambda_1 + \lambda_{\text{Gew}} + \lambda_{\text{GM}}$

取螺栓材料弹性模量 $E_S = 2.05 \times 10^5\text{MPa}$

螺栓头的弹性柔度 $\lambda_{\text{SK}} = \frac{0.4 \times d}{E_S \times A_N} = \frac{0.4 \times 12}{2.05 \times 10^5 \times 113.1}\text{mm/N}$

$$= 0.207 \times 10^{-6} \text{ mm/N}$$

$$\text{螺栓钉杆的弹性柔度 } \lambda_1 = \frac{l_1}{E_S \times A_N} = \frac{24}{2.05 \times 10^5 \times 113.1} \text{ mm/N}$$

$$= 1.035 \times 10^{-6} \text{ mm/N}$$

$$\text{未拧入螺纹的弹性柔度 } \lambda_{\text{Gew}} = \frac{l_{\text{Gew}}}{E_S \times A_{d_3}} = \frac{18}{2.05 \times 10^5 \times 76.25} \text{ mm/N}$$

$$= 1.152 \times 10^{-6} \text{ mm/N}$$

拧入螺纹和螺母的弹性柔度

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{GM}} &= \lambda_G + \lambda_M = \frac{l_G}{E_S \times A_{d_3}} + \frac{l_M}{E_S \times A_N} = \frac{0.5 \times d}{E_S \times A_{d_3}} + \frac{0.33 \times d}{E_S \times A_N} \\ &= \frac{0.5 \times 12}{2.05 \times 10^5 \times 76.25} \text{ mm/N} + \frac{0.33 \times 12}{2.05 \times 10^5 \times 113.1} \text{ mm/N} \\ &= 0.556 \times 10^{-6} \text{ mm/N} \end{aligned}$$

所以, 螺栓的弹性柔度 $\lambda_S = \lambda_{\text{SK}} + \lambda_1 + \lambda_{\text{Gew}} + \lambda_{\text{GM}} = (0.207 + 1.035 + 1.152 + 0.556) \times 10^{-6} \text{ mm/N} = 2.95 \times 10^{-6} \text{ mm/N}$

2) 被连接件的弹性柔度 λ_P 。考虑到螺栓头部支承面直径 ($d_w = 17.23 \text{ mm}$) 和活塞杆支承面直径 ($D_{\text{St}} = 25 \text{ mm}$) 相差很小, 这一连接近似可以看做是一个穿孔螺栓 (图 4-4a), 为了简化计算, 取支承面平均直径

$$d_{\text{wm}} = (d_w + D_{\text{St}})/2 = (17.23 + 25)/2 = 21.11 \text{ mm}$$

对于螺栓连接在公式 (4-13) 中, 取 $a = d_{\text{wm}}$, $\alpha = 29.51^\circ$ (按 VDI 2230 取值), 求得 $\tan \alpha = 0.566$

考虑符合 4-7b 的情况, 被夹紧活塞的变形, 按两个对称的圆锥回转体计算, 采用式 (4-13)。取弹性模量 $E_P = 2.05 \times 10^5 \text{ MPa}$ 。

$$\begin{aligned} \lambda_P &= \frac{4.6052 \times \lg \left[\frac{(d_{\text{wm}} + d_0)(d_{\text{wm}} + w l_k \tan \alpha - d_0)}{(d_{\text{wm}} - d_0)(d_{\text{wm}} + w l_k \tan \alpha + d_0)} \right]}{w E_P \pi d_0 \tan \alpha} \\ &= \frac{4.6052 \times \lg \left[\frac{(21.11 + 13.5)(21.11 + 1 \times 42 \times 0.566 - 13.5)}{(21.11 - 13.5)(21.11 + 1 \times 42 \times 0.566 + 13.5)} \right]}{1 \times 2.05 \times 10^5 \times \pi \times 13.5 \times 0.566} \text{ mm/N} \\ &= 0.363 \times 10^{-6} \text{ mm/N} \end{aligned}$$

3) 计算传力比 ϕ_K :

按下式, 当外力作用在螺栓头时:

$$\phi_K = \frac{\lambda_P}{\lambda_P + \lambda_S} = \frac{0.363}{0.363 + 2.95} = 0.11$$

这一结果不能直接用于计算, 必须引入载荷导入系数 n , 原理见图 4-15。一个基本实体 (有一些小的台肩) 作为基础件, 即设有连接的基础件。在 $I_A = 0$ 条件下, 只考虑作用在中心的载荷。图 4-14 中的连接情况按力的作用为 SV6 做出的 (见图 4-15)。其尺寸和比例关系为

螺栓头边缘至零件边缘的尺寸 (图 4-16) a_K

$$a_K = (D_Z - d_{wm})/2 = (80 - 21.11)/2\text{mm} = 29.45\text{mm}$$

$$a_K/h = 29.45/42 = 0.7$$

$$I_A/h = 0$$

根据以上数据, 由表 4-8, 按 $a_K/h \geq 0.5$, 查得 $n = 0.7$ 。由此按下列公式求得载荷系数 $\phi_n = n\phi_K = 0.07 \times 0.11 = 0.008$

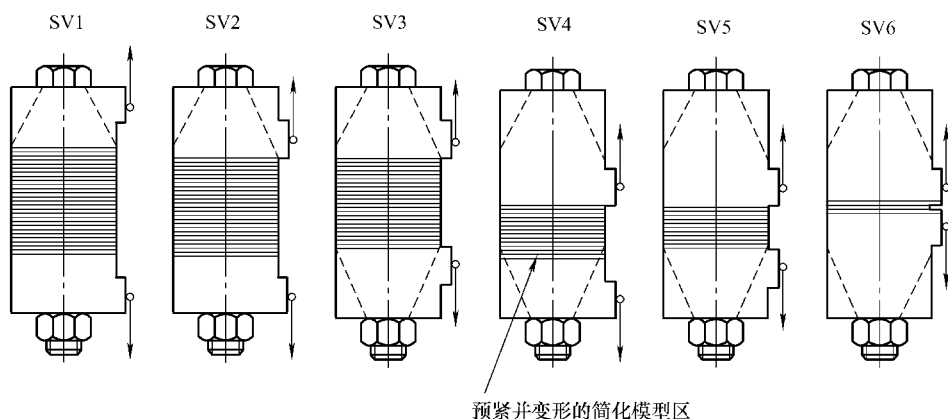


图 4-15 按施力位置简化的模型

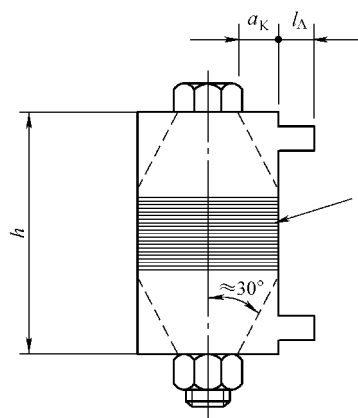


图 4-16 贯穿螺栓连接

表 4-8 图 4-15 中 SV1 ~ SV6 六种结构的传力系数 n

l_A/h	0.00				0.10				0.20				≥ 0.30			
a_k/h	0.00	0.10	0.30	≥ 0.50	0.00	0.10	0.30	≥ 0.50	0.00	0.10	0.30	≥ 0.50	0.00	0.10	0.30	≥ 0.50
SV1	0.70	0.55	0.30	0.13	0.52	0.41	0.22	0.10	0.34	0.28	0.16	0.07	0.16	0.14	0.12	0.04
SV2	0.57	0.46	0.30	0.13	0.44	0.36	0.21	0.10	0.30	0.25	0.16	0.07	0.16	0.14	0.12	0.04
SV3	0.44	0.37	0.26	0.12	0.35	0.30	0.20	0.09	0.26	0.23	0.15	0.07	0.16	0.14	0.12	0.04
SV4	0.42	0.34	0.25	0.12	0.33	0.27	0.16	0.08	0.23	0.19	0.12	0.06	0.14	0.13	0.10	0.03
SV5	0.30	0.25	0.22	0.10	0.24	0.21	0.15	0.07	0.19	0.17	0.12	0.06	0.14	0.13	0.10	0.03
SV6	0.15	0.14	0.14	0.07	0.13	0.12	0.10	0.06	0.11	0.11	0.09	0.06	0.10	0.10	0.08	0.03

(5) 因为压陷产生的预紧力丧失量 F_Z

由表 4-9 查得零件压陷量

表 4-9 螺栓、螺母和压紧的钢制零件压陷量的参考值

粗糙度平均高度 R_z	载荷	压陷量的参考值/ μm		
		螺纹	每一个螺栓头或螺母支承面	每一个内部接触面
$< 10\mu\text{m}$	拉—压	3	2.5	1.5
	剪切	3	3	2
$\geq 10\mu\text{m} \sim 40\mu\text{m}$	拉—压	3	3	2
	剪切	3	4.5	2.5
$\geq 40\mu\text{m} \sim 160\mu\text{m}$	拉—压	3	4	3
	剪切	3	6.5	3.5

按表 4-9, 考虑承受沿轴线作用的载荷和表面粗糙度 $Ra16\mu\text{m}$ 。螺纹和钉头每一处压陷量为 $3\mu\text{m}$, 内部接触面为 $2\mu\text{m}$ 。因此总压陷量为

$$f_Z = 8 \times 10^{-3} \text{mm}$$

因此, 可以求得预加载荷的损失量为

$$F_Z = \frac{f_Z}{\lambda_s + \lambda_p} = \frac{8 \times 10^{-3}}{2.95 \times 10^{-6} + 0.363 \times 10^{-6}} \text{N} = 2.415 \times 10^3 \text{N}$$

(6) 最小装配预紧力计算

$$\begin{aligned} F'_{\text{Mmin}} &= F_{\text{Kerf}} + (1 - \phi_n) F_{\text{Amax}} + F_Z + \Delta F'_{\text{vth}} \\ &= 1000 \text{N} + (1 - 0.008) 24900 \text{N} + 2415 \text{N} + 0 = 28116 \text{N} \end{aligned}$$

(7) 最大装配预紧力计算

$$F'_{\text{Mmax}} = \alpha_A F'_{\text{Mmin}} = 1.7 \times 28116 \text{N} = 47797 \text{N}$$

(8) 装配应力的计算

对于利用材料达到最小屈服强度 90% 螺栓连接, 取螺纹摩擦因数 $\mu_{\text{Gmin}} = 0.1$, 装配预紧力可以按表 4-10 选取。

性能等级 12.9: $F_{\text{Mzul}} = F_{\text{MTab}} = 75.9 \text{kN}$

性能等级 10.9: $F_{\text{Mzul}} = F_{\text{MTab}} = 64.8 \text{kN}$

表 4-10 普通螺栓的装配预紧力 F 和扭紧力矩 M

尺寸	强度等级	装配预紧力 F/kN							扭紧力矩 $M/\text{N} \cdot \text{m}$ $\mu_K = \mu_G$						
		0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.20	0.24	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.20	0.24
M4	8.8	4.6	4.5	4.4	4.3	4.2	3.9	3.7	2.3	2.6	3.0	3.3	3.6	4.1	4.5
	10.9	6.8	6.7	6.5	6.3	6.1	5.7	5.4	3.3	3.9	4.6	4.8	5.3	6.0	6.6
	12.9	8.0	7.8	7.6	7.4	7.1	6.7	6.3	3.9	4.5	5.1	5.6	6.2	7.0	7.8
M5	8.8	7.6	7.4	7.2	7.0	6.8	6.4	6.0	4.4	5.2	5.9	6.5	7.1	8.1	9.0
	10.9	11.1	10.8	10.6	10.3	10.0	9.4	8.8	6.5	7.6	8.6	9.5	10.4	11.9	13.2
	12.9	13.0	12.7	12.4	12.0	11.7	11.0	10.3	7.6	8.9	10.0	11.2	12.2	14.0	15.5
M6	8.8	10.7	10.4	10.2	9.9	9.6	9.0	8.4	7.7	9.0	10.1	11.3	12.3	14.1	15.6
	10.9	15.7	15.3	14.9	14.5	14.1	13.2	12.4	11.3	13.2	14.9	16.5	18.0	20.7	22.9
	12.9	18.4	17.9	17.5	17.0	16.5	15.5	14.5	13.2	15.4	17.4	19.3	21.1	24.2	26.8
M7	8.8	15.5	15.1	14.8	14.4	14.0	13.1	12.3	12.6	14.8	16.8	18.7	20.5	23.6	26.2
	10.9	22.7	22.5	21.7	21.1	20.5	19.3	18.1	18.5	21.7	24.7	27.5	30.1	34.7	38.5
	12.9	26.6	26.0	25.4	24.7	24.0	22.6	21.2	21.6	25.4	28.9	32.2	35.2	40.6	45.1
M8	8.8	19.5	19.1	18.6	18.1	17.6	16.5	15.5	18.5	21.6	24.6	27.3	29.8	34.3	38.0
	10.9	28.7	28.0	27.3	26.6	25.8	24.3	22.7	27.2	31.8	36.1	40.1	43.8	50.3	55.8
	12.9	33.6	32.8	32.0	31.1	30.2	28.4	26.6	31.8	37.2	42.2	46.9	51.2	58.9	65.3
M10	8.8	31.0	30.3	29.6	28.8	27.9	26.3	24.7	36	43	48	54	59	68	75
	10.9	45.6	44.5	43.4	42.2	41.0	38.6	36.2	53	63	71	79	87	100	110
	12.9	53.3	52.1	50.8	49.4	48.0	45.2	42.4	62	73	83	93	101	116	129

(续)

尺寸	强度等级	装配预紧力 F/kN							扭紧力矩 $M/\text{N} \cdot \text{m}$ $\mu_K = \mu_G$						
		0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.20	0.24	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.20	0.24
M12	8.8	45.2	44.1	43.0	41.9	40.7	38.3	35.9	63	73	84	93	102	117	130
	10.9	66.3	64.8	63.2	61.5	59.8	56.3	52.8	92	108	123	137	149	172	191
	12.9	77.6	75.9	74.0	72.0	70.0	65.3	61.8	108	126	144	160	175	201	223
M14	8.8	62.0	60.6	59.1	57.5	55.9	52.6	49.3	100	117	133	148	162	187	207
	10.9	91.0	88.9	86.7	84.4	82.1	77.2	72.5	146	172	195	218	238	274	304
	12.9	106.5	104.1	101.5	98.8	96.0	90.4	84.8	171	201	229	255	279	321	356
M16	8.8	84.7	82.9	80.9	78.8	76.6	72.2	67.8	153	180	206	230	252	291	325
	10.9	124.4	121.7	118.8	115.7	112.6	106.1	99.6	224	264	302	338	370	428	477
	12.9	145.5	142.4	139.0	135.4	131.7	124.1	116.6	262	309	354	395	433	501	558
M18	8.8	107	104	102	99	96	91	85	220	259	295	329	360	415	462
	10.9	152	149	145	141	137	129	121	314	369	421	469	513	592	657
	12.9	178	174	170	165	160	151	142	367	432	492	549	601	692	769
M20	8.8	136	134	130	127	123	116	109	308	363	415	464	509	588	655
	10.9	194	190	186	181	176	166	156	438	517	592	661	725	838	933
	12.9	227	223	217	212	206	194	182	513	605	692	773	848	980	1092
M22	8.8	170	166	162	158	154	145	137	417	495	567	634	697	808	901
	10.9	242	237	231	225	219	207	194	595	704	807	904	993	1151	1284
	12.9	283	277	271	264	257	242	228	696	824	945	1057	1162	1347	1502

(续)

尺寸	强度等级	装配预紧力 F/kN							扭紧力矩 $M/\text{N} \cdot \text{m}$ $\mu_K = \mu_G$						
		0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.20	0.24	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.20	0.24
M24	8.8	196	192	188	183	178	168	157	529	625	714	798	875	1011	1126
	10.9	280	274	267	260	253	239	224	754	890	1017	1136	1246	1440	1604
	12.9	327	320	313	305	296	279	262	882	1041	1190	1329	1458	1685	1877
M27	8.8	257	252	246	240	234	220	207	772	915	1050	1176	1292	1498	1672
	10.9	367	359	351	342	333	314	295	1100	1304	1496	1674	1840	2134	2381
	12.9	429	420	410	400	389	367	345	1287	1526	1750	1959	2153	2497	2787
M30	8.8	313	307	300	292	284	268	252	1053	1246	1428	1597	1754	2931	2265
	10.9	446	437	427	416	405	382	359	1500	1775	2033	2274	2498	2893	3226
	12.9	522	511	499	487	474	447	420	1755	2077	2380	2662	2923	3386	3775
M33	8.8	389	381	373	363	354	334	314	1415	1679	1928	2161	2377	2759	3081
	10.9	554	543	531	517	504	475	447	2015	2392	2747	3078	3385	3930	4388
	12.9	649	635	621	605	589	556	523	2358	2799	3214	3601	3961	4598	5135
M36	8.8	458	448	438	427	415	392	368	1825	2164	2482	2778	3054	3541	3951
	10.9	652	638	623	608	591	558	524	2600	3082	3535	3957	4349	5043	5627
	12.9	763	747	729	711	692	653	614	3042	3607	4136	4631	5089	5902	6585
M39	8.8	548	537	525	512	498	470	443	2348	2791	3208	3597	3958	4598	5137
	10.9	781	765	748	729	710	670	630	3345	3975	4569	5123	5637	6549	7317
	12.9	914	895	875	853	831	784	738	3914	4652	5346	5994	6596	7664	8562

本设计可以改进为取较经济的内六角圆柱头螺钉 GB/T 70.1—2008 M12 × 60—10.9。因为 $F'_{\text{Mmax}} < F_{\text{Mzul}}(10.9)$ ，所选择的螺栓满足工作要求。

(9) 工作应力

按下式计算最大的螺栓受力

$$F_{\text{Smax}} = F_{\text{Mzul}} + \phi_n F_{\text{Amax}} = 64800\text{N} + 0.008 \times 24900\text{N} = 64999\text{N}$$

$$\text{最大拉伸应力} \quad \sigma_{\text{Zmax}} = F_{\text{Mmax}}/A_{\text{S}} = 64999/84.3\text{MPa} = 771\text{MPa}$$

$$\text{最大扭切应力} \quad \tau_{\text{max}} = M_{\text{G}}/W_{\text{P}} = 58700/218\text{MPa} = 269.3\text{MPa}$$

$$\begin{aligned} \text{式中 } M_{\text{G}} \text{——扭矩, } M_{\text{G}} &= F_{\text{Mzul}} \frac{d_2}{2} \left(\frac{P}{\pi d_2} + 1.155\mu_{\text{Gmin}} \right) = 64800 \times \frac{10.863}{2} \left(\frac{1.75}{\pi \times 10.863} \right. \\ &\left. + 1.155 \times 0.1 \right) \text{N} \cdot \text{mm} = 58700\text{N} \cdot \text{mm}; W_{\text{P}} \text{——截面系数, } W_{\text{P}} = \frac{\pi}{16} d_s^3 = \frac{\pi}{16} \left(\frac{d_2 + d_3}{2} \right)^3 \\ &= \frac{\pi}{16} \left(\frac{10.863\text{mm} + 9.85\text{mm}}{2} \right)^3 = 218\text{mm}^3。 \end{aligned}$$

合成应力 σ_{redB} 按下式求得

$$\sigma_{\text{redB}} = \sqrt{\sigma_{\text{Zmax}}^2 + 3(k_{\tau}\tau_{\text{max}})^2} = \sqrt{771^2 + 3(0.5 \times 269.3)^2}\text{MPa} = 806\text{MPa}$$

$$\text{螺栓的安全系数 } S_{\text{F}} = R_{\text{p0.2min}}/\sigma_{\text{redB}} = 940/806 = 1.17$$

螺栓能够承受最大的工作载荷。

(10) 变应力

考虑本题为中心加载和固定，螺栓所受的连续变应力由下式计算：

$$\sigma_{\text{a}} = \frac{F_{\text{sao}} - F_{\text{SAU}}}{2A_{\text{S}}} = \frac{\phi_n (F_{\text{Amax}} - F_{\text{Amin}})}{2A_{\text{S}}} = \frac{0.008(24900 - 0)}{2 \times 84.3}\text{MPa} = 1.2\text{MPa}$$

在热处理以前滚压而成的螺栓，其疲劳极限按下式计算。

$$\sigma_{\text{ASV}} = 0.85(150/d + 45) = 0.85(150/12 + 45)\text{MPa} = 48.9\text{MPa}$$

这一连接具有较高的疲劳强度。 $\sigma_{\text{a}} \ll \sigma_{\text{ASV}}$

(11) 求表面压强

支承螺栓头的较小的面积等于

$$A_{\text{Pmin}} = \frac{\pi}{4}(d_{\text{w}}^2 - d_{\text{h}}^2) = \frac{\pi}{4}(17.23^2 - 13.5^2)\text{mm}^2 = 90\text{mm}^2$$

在装配条件下表面压强为

$$p_{\text{Mmax}} = \frac{F_{\text{Mzul}}}{A_{\text{Pmin}}} = \frac{64.8 \times 10^3}{90}\text{MPa} = 720\text{MPa}$$

由表 4-11 可得，16MnCr 材料的表面压强极限值为 $p_{\text{G}} = 900\text{MPa}$

安全系数 $S_p = p_G / p_{Mmax} = 900 / 720 = 1.25$

计算 p_{Bmax} 工作情况下的压强, 可以省略, 因为 $F_Z > \phi_n F_{Amax} = 199\text{MPa}$

(12) 最小拧入深度

活塞杆材料 C45 的剪切强度 (表 4-11) $\tau_{Bmin} = 460\text{MPa}$ 。要求的最小拧入深度的相对值 $M_{eff}/d = 0.9$ 。

因此, $M_{eff} = 0.9d = 0.9 \times 12\text{mm} = 10.8\text{mm}$

要减去螺纹倒角, 其尺寸等于 $(d - d_3)/2 = (12\text{mm} - 9.85\text{mm})/2 = 1.1\text{mm}$

螺纹拧入的有效长度 $m_{vorh} = l_s - l_k - 1.1\text{mm} = 60\text{mm} - 42\text{mm} - 1.1\text{mm} = 16.9\text{mm}$

螺纹拧入的有效长度实际值 $m_{vorh\ eff} = m_{vorh} - 0.8P = 16.9\text{mm} - 0.8 \times 1.75\text{mm} = 15.5\text{mm}$

由此可得: $m_{vorh\ eff} > M_{eff}$, 这一螺栓的拧入深度足够。

(13) 抵抗滑动的安全限度

(14) 求扭紧力矩

对于 $\mu_{Gmin} = \mu_{Kmin} = 0.1$, 由表 4-10 查得, 所需的扭紧力矩为 $M_A = 108\text{N} \cdot \text{m}$ 。

6. VDI2230 方法与常用《机械设计》螺纹连接强度计算方法比较

VDI2230 例 B2 凸缘联轴器传递转矩 $M_{Tmax} = 13000\text{N} \cdot \text{m}$, 螺栓数目 $i = 12$, 摩擦因数 $\mu = 0.15$

螺栓分布圆直径 $D_t = 258\text{mm}$

每个螺栓所受横向力 $F_{Qmax} = \frac{2M_{Tmax}}{iD_t} = \frac{2 \times 13000000}{12 \times 258}\text{N} = 8398\text{N}$

按 VDI2230 计算所需螺栓为 M16, 10.9 级。而按常用《机械设计》教材方法计算, 则有

每个螺栓所需预紧力 $F_p = \frac{K_f F_{Qmax}}{\mu} = \frac{1.2 \times 8398}{0.15}\text{N} = 67184\text{N}$

取安全系数 $S = 3.5$

螺栓强度等级 10.9 $R_{eL} = 900\text{MPa}$

许用应力 $[\sigma] = \frac{R_{eL}}{S} = \frac{900}{3.5}\text{MPa} = 257\text{MPa}$

螺栓小径 $d_1 = \sqrt{\frac{4 \times 1.3 F_p}{\pi [\sigma]}} = \sqrt{\frac{4 \times 1.3 \times 67184}{\pi \times 257}}\text{mm} = 20.8\text{mm}$

查螺纹标准, 取 M24。

结论: 用《机械设计》的方法计算所得螺栓直径比 VDI 2230 计算所得要大。

表 4-11 选择螺栓材料机械和物理性能参考值

材料种类	材料的符号	材料数字	抗拉强度 $R_{\text{mmin}}/\text{MPa}$	0.2% 抗拉 $R_{\text{p0.2min}}/\text{MPa}$	抗剪强度 $\tau_{\text{Bmin}}/\text{MPa}$	表面压强极限 p_{G}/MPa	弹性模量 E/MPa	密度 ρ / (kg/dm^3)	热膨胀系数 ($20^\circ\text{C}/100^\circ\text{C}$) $\alpha_{\text{T}}/(10^{-6}\text{K}^{-1})$
普通结构钢	USt 37-2	1. 0036	340	230	200	490	205000	7. 85	11. 1
	St 50-2	1. 0050	470	290	280	710			
低合金调质钢	Cq 45	1. 1192	700	500	460	630	205000	7. 85	11. 1
	34 CrNiMo6	1. 6582	1200	1000	720	1080			
	38MnSi-V5 5-BY	—	900	600	580	810			
	16MnCr5	1. 7131	1000	850	650	900			
烧结金属	SINT-D30	—	510	370	300	450	130000	7	12
奥氏体结构钢	X5 CrNi 18 12	1. 4303	500	185	400	630	200000	7. 90	16. 5
	X5 CrNiMo 17 12 2	1. 4401	510	205	410	460			
	X5 NiCrTi 26 15	1. 4980	960	660	670	860			
铸铁	GJL-250	0. 6020	250	—	290	850 ²⁾	110000	7. 20	10. 0
	GJL-260 Cr	—	260	—	290	600	110000		
	GJS-400	0. 7040	400	250	360	600 ²⁾	169000		
	GJS-500	0. 7050	500	320	450	750 ²⁾	169000		
	GJS-600	0. 7060	600	370	540	900 ²⁾	174000		
煅铝合金	AlMgSi 1 F31	3. 2315. 62	290	250	170	260	75000	2. 70	23. 4
	AlMgSi 1 F28	3. 2315. 61	260	200	150	230		2. 70	23. 4
	AlMg4. 5Mn F27	3. 3547. 08	260	110	150	230		2. 66	23. 7
铸造铝合金	GK-ALSi9Cu3	3. 2163. 02	180	110	110	220	75000	2. 75	21. 0
	GD-ALSi9Cu3	3. 2163. 05	240	140	140	290	75000	2. 75	21. 0
	GK-ALSi7Mg wa	3. 2371. 62	250	200	150	380	73000	2. 65	22. 0
镁合金	GD-AZ 91 (MgAl9Zn1)		200	150	130	180	45000	1. 80	27. 0
	GK-AZ 91-T4		240	120	160	210			
钛合金	TiAl6V4	3. 7165. 10	890	820	600	890	110000	4. 43	8. 6

注:表中为德国材料牌号。

4.1.5 受弯曲应力的螺钉强度计算

受拉、压应力的零件如果还受弯曲应力,则对于其强度有很不利的影响。这一节介绍受偏心载荷引起弯曲应力的螺钉强度计算,对这一问题的几种计算方法进行比较。也可对其他受弯曲零件的分析提供参考,准确的计算受弯曲零件的强度,减轻机器的重量。

下页介绍三种常用受偏心载荷螺栓的强度计算方法。

1. 拉弯应力叠加法 (图 4-17)

外载荷 F 作用线偏离螺钉中心线距离为 e , 螺钉所受之拉弯合成应力 σ_c 为:

$$\sigma_c = \frac{F}{\frac{\pi}{4}d_1^2} + \frac{Fe}{\frac{\pi}{32}d_1^3} = \frac{F}{\frac{\pi}{4}d_1^2} \left(1 + \frac{8e}{d_1} \right) \quad (4-14)$$

当 $e = d_1$ 时, 合成应力比单纯拉伸 ($e = 0$) 时大 8 倍。应尽量避免螺钉受偏心载荷。这一方法对弯曲应力的影响, 计算结果过大, 与实际有差距。

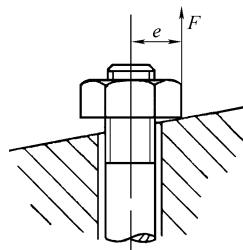


图 4-17 受偏心载荷螺钉

2. 按螺杆弯曲曲率计算弯曲应力

螺栓受拉伸应力 σ 及弯曲应力 σ_w , 可把螺杆弯曲的形状假设为半径为 ρ 的圆弧, 其上端的转角为 α , 由此可得螺杆内的弯矩, 按材料力学公式为 $M = EI/\rho$, 钉杆的弯曲应力 $\sigma_w = M/W$, 由图 4-18 根据几何关系 $\rho = l/\alpha$ 。式中 l 为钉杆长度。取 $W = \pi d^3/32$, $I = \pi d^4/64$, 则

$$\sigma_w = \frac{M}{W} = \frac{E \frac{\pi}{64} d^4}{\frac{l}{\alpha} \times \frac{\pi}{32} d^3} = \frac{1}{2} \alpha E \frac{d}{l} \quad (4-15)$$

螺纹部分弯曲应力

$$\sigma_{w1} = \frac{M}{W_1} = \frac{M}{\frac{\pi}{32} d_1^3} = \frac{1}{2} \alpha E \left(\frac{d}{d_1} \right)^3 \frac{d}{l_s} \quad (4-16)$$

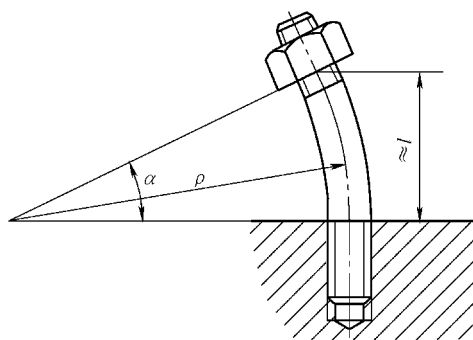


图 4-18 支承面倾斜引起钉杆弯曲

式中 d ——钉杆直径;

d_1 ——螺纹内径。

式 (4-15)、式 (4-16) 表明弯曲应力与头部转角、材料弹性模量、钉直径成正比, 与钉长度成反比。这个结论比式 (4-14) 合理。例如, 当 $\alpha = 0.5^\circ$, $d = 10\text{mm}$, $d_1 = 8.376\text{mm}$, $l_s = 50\text{mm}$, $E = 2 \times 10^5 \text{MPa}$ 时, $\sigma_{w1} = 297\text{MPa}$, 此值也是不容忽视的。

3. 考虑弯曲和拉伸的综合作用 (图 4-19)

设螺母支承面与工件表面完全贴合。由预紧力和工作拉力产生的总轴向力为 Q ，其作用方向沿螺钉轴线方向。螺钉的弯矩方程式为 (不考虑切应力的影响)：

$$EIy'' = M + F[(l-x)\sin\alpha - (f-y)\cos\alpha]$$

式中 f 和 α 为 $x=l$ 时螺栓的挠度和转角

$$\text{令 } F\cos\alpha/(EI) = \lambda^2 \text{ 则 } \lambda =$$

$\sqrt{F\cos\alpha/(EI)}$ 代入上式可得

$$y'' - \lambda^2 y = \frac{M}{EI} + \frac{F}{EI}(l-x)\sin\alpha + \frac{Ff}{EI}\cos\alpha$$

解上式可得

$$y = A\cosh\lambda x + B\sinh\lambda x - \frac{M}{F\cos\alpha} - (l-x)\tan\alpha + f$$

并可求得

$$y' = A\lambda\sinh\lambda x + B\lambda\cosh\lambda x + \tan\alpha$$

以上两式中的常数 A 、 B 可由边界条件 $x=0$ 时 $y=0$ ， $x=0$ 时 $y'=0$ 求得：

$$A = \frac{M}{F\cos\alpha} + l\tan\alpha - f, \quad B = -\tan\alpha/\lambda$$

将求得的 A 、 B 代入 y 的方程式可得

$$y = \left(\frac{M}{F\cos\alpha} + l\tan\alpha - f \right) \cosh\lambda x - \frac{\tan\alpha}{\lambda} \sinh\lambda x - \frac{M}{F\cos\alpha} - (l-x)\tan\alpha + f \quad (4-17)$$

将边界条件 $x=l$ 时 $y=f$ 代入上式可求得最大挠度 f ；将式(4-17)两边对 x 求导，并代入边界条件 $x=l$ 时， $y'=\tan\alpha$ 可得 α ：

$$f = \frac{M}{F\cos\alpha} \frac{\cosh\lambda l - 1}{\cosh\lambda l} + \tan\alpha \left(l - \frac{\tanh\lambda l}{\lambda} \right) \quad (4-18)$$

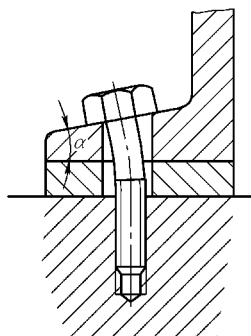
$$\sin\alpha = \frac{F\lambda\sinh\lambda l}{F} \quad (4-19)$$

由以上所得各式可求根部弯矩 M_0 ，由图 4-19 可得

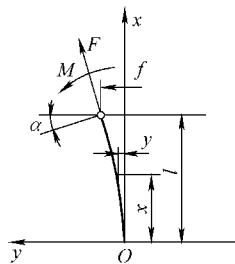
$$M_0 = M + F(l\sin\alpha - f\cos\alpha)$$

将式(4-18)代入上式得

$$M_0 = \frac{F\sin\alpha\tan\lambda l}{\lambda} + \frac{M}{\cosh\lambda l}$$



a)



b)

图 4-19 拉弯联合应力计算

将式(4-19)代入上式可得

$$M_0 = \frac{F \sin \alpha \tan \lambda l}{\lambda} + \frac{F \sin \alpha}{\lambda \operatorname{sh} \lambda l \operatorname{ch} \lambda l} = \frac{F \sin \alpha}{\lambda \operatorname{th} \lambda l} = M \operatorname{ch} \lambda l$$

当 α 很小时, $\sin \alpha \approx \alpha$, $\cos \alpha \approx 1$, 由预紧力 F 产生的螺杆的拉应力 $\sigma = 4F/(\pi d^2)$, 则 $\lambda = \sqrt{F \cos \alpha / (EI)} = \frac{4}{d} \sqrt{\frac{\sigma}{E}}$, 式中 $I = \frac{\pi}{64} d^4$ 。

$$M_0 = \frac{F \alpha}{\lambda \operatorname{th} \lambda l} = \frac{\sigma \frac{\pi}{4} d^2 \alpha}{\frac{4}{d} \sqrt{\frac{\sigma}{E}} \operatorname{th} \left(\frac{4l}{d} \sqrt{\frac{\sigma}{E}} \right)} = \sqrt{\sigma} \frac{\pi d^3 \alpha \sqrt{E}}{16 \operatorname{th} \left(\frac{4l}{d} \sqrt{\frac{\sigma}{E}} \right)}$$

根部 $x=0$ 处的弯曲应力 σ_w 为

$$\sigma_w = \frac{M_0}{\frac{\pi}{32} d^3} = 2 \sqrt{\sigma} \frac{\alpha \sqrt{E}}{\operatorname{th} \left(\frac{4l}{d} \sqrt{\frac{\sigma}{E}} \right)} \quad (4-20)$$

当预紧力很小时, $\operatorname{th} \left(\frac{4l}{d} \sqrt{\frac{\sigma}{E}} \right) \approx \frac{4l}{d} \sqrt{\frac{\sigma}{E}}$ 则式(4-20)可化为 $\sigma_w = \frac{1}{2} \alpha E \frac{d}{l}$ 即式(4-15)。

在图 4-20 中给出预加应力 σ 及螺栓长径比 l/d 对弯曲应力的影响, 由式(4-20)计算而得, 计算时, 取 $\alpha = 0.5^\circ$, $E = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$ 。由图可以看出, l/d 小, 即螺栓短时, 钉头偏转引起的弯曲应力大, 预紧力大时弯曲应力的影响也比较显著, 当 l/d 大于 10~12 时, 继续加大 l/d , σ_w 降低不多。

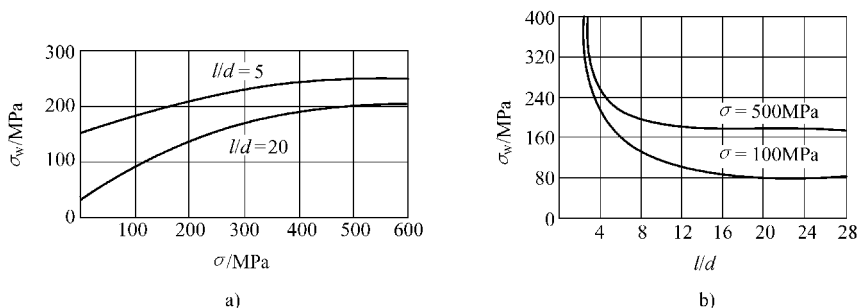


图 4-20 预紧力 σ 和 l/d 对弯曲应力 σ_w 的影响

考虑双头螺柱或螺钉的螺纹部分拧入零件本体时, 螺杆与螺孔的平均直径处的螺纹间隙 Δ 对弯曲应力的影响, 螺纹部分所受弯曲应力为

$$\sigma_w = 2 \sqrt{\sigma} \frac{\sqrt{E}}{\operatorname{th} \left(\frac{4l}{d} \sqrt{\frac{\sigma}{E}} \right)} \left(\frac{d}{d_1} \right)^3 \left(\alpha - \frac{\Delta}{1.732d + l_s} \right) \quad (4-21)$$

式中 $\frac{\Delta}{1.732d + l_s}$ 考虑由螺纹之间的间隙使钉杆在螺纹孔中可以有少许转动从而

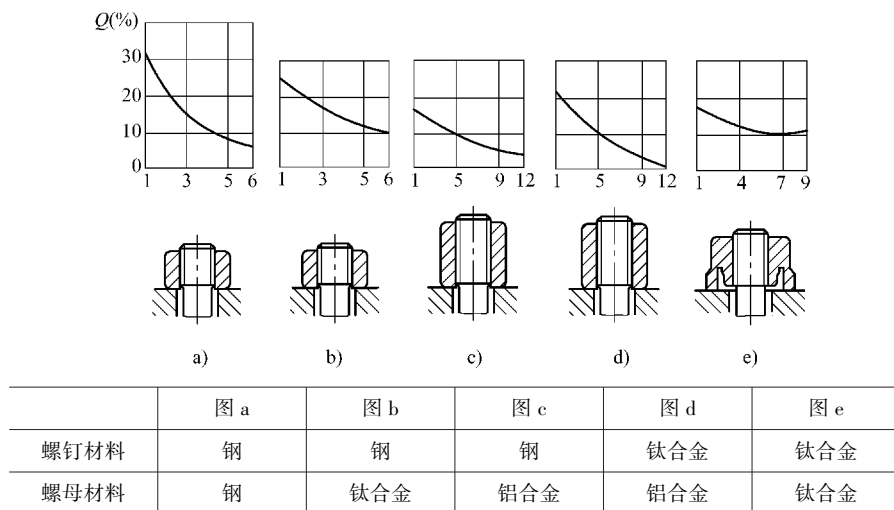
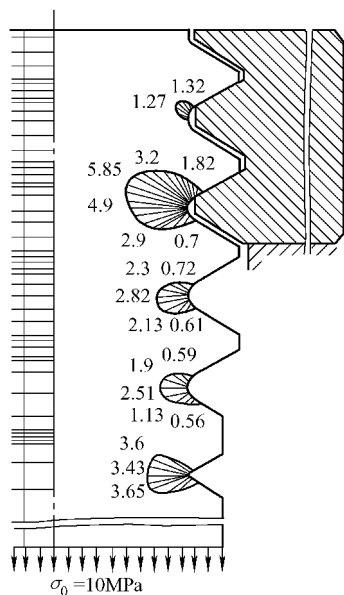


图 4-24 螺母材料和结构对受力分布的影响

3. 减小应力集中

图 4-25 所示为螺纹连接的应力集中系数。螺纹为 M10，根部圆角半径 r 为 $0.1P$ (P ——螺距)，螺母高度为 $0.8d$ 。理论应力集中系数 K_T 与相对圆角半径 r/P 的关系见图 4-26。常用圆角范围在 $0.1P$ 至 $0.2P$ 之间。理论应力集中系数也可由下列公式求得



(M10, $r=0.1P$, $H=0.8d$)

图 4-25 螺纹连接的应力集中系数

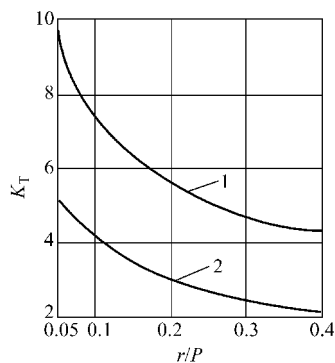


图 4-26 理论应力集中系数 K_T 与 r/P 之关系
曲线 1——工作螺纹 曲线 2——自由螺纹

工作部分 $K_T = 1 + 1.57 \sqrt{P/r}$

自由部分 $K_T = 1 + 0.65 \sqrt{P/r}$

可以看出这些数据之间有较大出入，使用时要进行分析。

螺钉头过渡部分有半径为 r 的圆角，其应力集中系数可由下式计算或按图 4-27 ~ 图 4-29 查得。

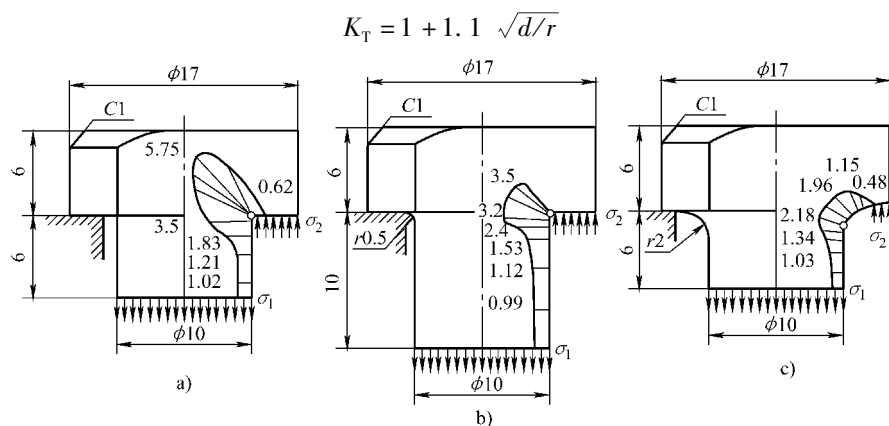


图 4-27 螺钉头过渡部分的应力集中

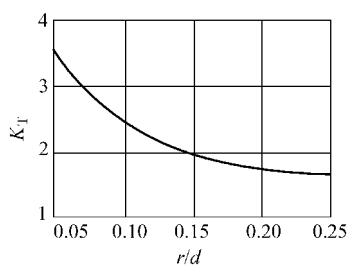


图 4-28 螺钉头过渡部分的应力集中系数与圆角半径的关系

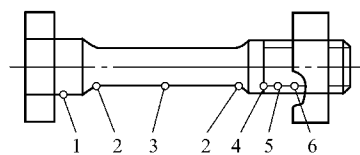


图 4-29 螺栓连接的应力集中区(参见表 4-12)

表 4-12 在螺栓应力集中区的理论应力集中系数 K_T 和有效应力集中系数 K_σ

应力集中区 (图 4-29)	Биргер, 推荐 Иосилевич K_T	Wiegand 推荐 K_T	Wiegand 推荐 K_σ
1	1.8 ~ 6	3.5	2 ~ 4
2	—	1.1	1 ~ 1.1
3	1	1	1
4	2.5 ~ 5	3 ~ 4	2
5	≤ 3	2 ~ 3	1.5 ~ 2
6	4 ~ 10	≤ 10	5 ~ 8

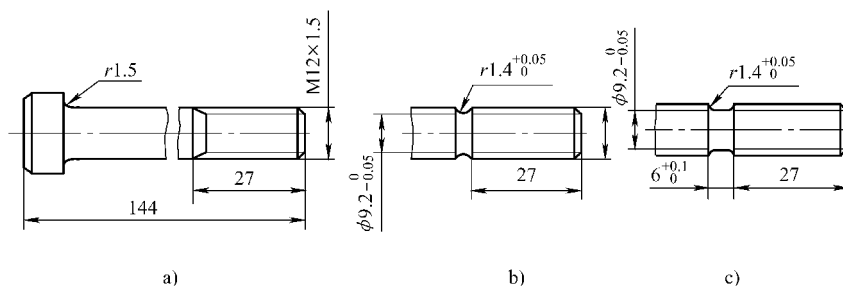


图 4-30 螺纹与螺杆之间的过渡部分形状

a) 螺纹收尾 b) 半圆退刀槽 c) 宽型退刀槽

螺纹与钉杆之间的过渡部分(图 4-30)对螺纹连接的强度有很大影响。表 4-13 为由 40CrNi2MoA 钢(32~35HRC)制造的 M12×1.5 螺栓,按图 4-30 的三种结构进行强度实验所得结果。由此表可知,图 4-30a 的结构因面积大而静承载能力最高。而图 4-30b、c 的结构由于刚度变化较小而有较高的疲劳强度。因而对于变载荷推荐图 4-31 的结构。退刀槽直径 $d_{\text{II}} = 0.95d_1$, $R = (d - d_{\text{II}})/2$ (图 4-31a); $R = \frac{h}{2} + \frac{f^2}{8h}$, $h = (d - d_{\text{II}})/2$ (图 4-31b)。

表 4-13 各种螺纹与螺杆间的过渡部分形状的螺栓的强度(参见图 4-30)

过渡部分形状	破坏载荷/kN	抗拉强度 R_m /MPa	极限变载荷/kN	疲劳强度极限/MPa
	静载荷		变载荷 $\sigma_m = 250\text{MPa}$	
图 4-30a	117	1537 ^①	4.19	55 ^①
图 4-30b	113	1701 ^②	5.35	70 ^①
图 4-30c	105	1558 ^②	5.71	75 ^①

注: ① 断面按螺纹内径计算

② 断面按退刀槽底部直径计算

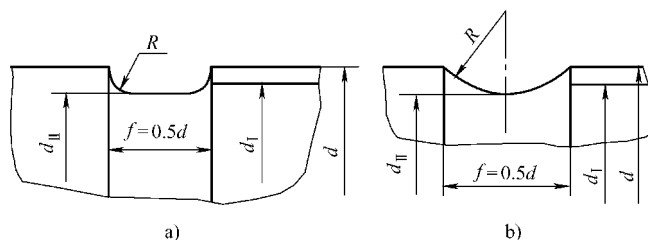


图 4-31 推荐的螺纹与螺杆之间过渡部分形状

a) 基本形状 b) 可用形状

4. 螺栓直径和螺母高度对疲劳强度的影响

当螺栓直径增大时,螺栓的疲劳强度降低,当螺母高度增加时(在一定范围以内)由于工作螺牙数增加疲劳强度提高。表 4-14 给出试验结果。螺纹在车床上切出后在螺纹磨床上磨削而成。在粗车螺纹后进行热处理。45 钢 860℃ 正火,硬度 90

~96HRB。40CrNi2MoA 在 850℃ 油中淬火, 540℃ 回火, 硬度 32 ~ 35HRC。螺母由 45 钢制造, 用丝锥攻螺纹。

表 4-14 螺钉直径和螺母高度对螺纹连接疲劳强度的影响

螺纹尺寸	螺栓材料 40CrNi2MoA ($\sigma_m = 250\text{MPa}$)								螺栓材料 45 钢 ($\sigma_m = 150\text{MPa}$)				
	不同螺母高度与螺栓直径之比时，螺栓的疲劳强度 σ_α/MPa												
	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5	2.0	0.4	0.6	0.8	1.0	2.0
M6 × 1	—	—	95	120	130	—	130	150	—	60	80	80	125
(M12 × 1)	—	—	80	85	85	90	—	—	—	60	65	65	—
(M12 × 1.5)	50	60	65	70	85	95	85	85	50	50	60	65	80
(M24 × 1.5)	—	—	45	55	65	—	—	—	—	40	45	65	—
M24 × 3	—	—	55	60	60	—	—	—	—	—	—	—	—

注: 表中有括号的为细牙螺纹。

由表 4-14 可以看出, M6 ~ M12 尺寸对疲劳强度影响较大(图 4-32a)。据表 4-14 中数据画出图 4-32, 其中图 a 表示螺母高度 H 与螺纹直径 d 之比为 0.8 时, 螺纹直径对疲劳强度的影响; 图 b 为 M12 × 1.5 螺栓 H/d 对疲劳强度的影响。由图 4-32b 可以看出 H/d 超过 1.0 ~ 1.2 时, 螺母高度对疲劳强度的影响减小。

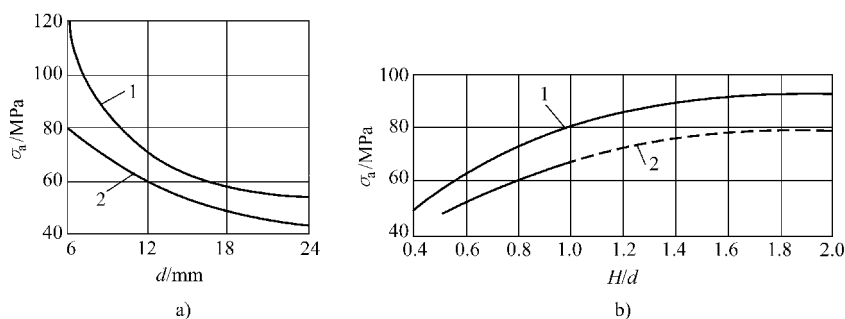


图 4-32 螺母高度对疲劳强度的影响

1—螺栓材料 40CrNi2MoA 2—螺栓材料 45 钢

5. 改变螺纹制造工艺提高螺栓强度

表 4-15 中为不同制造工艺情况下螺栓静强度的比较, 在此试验中抗拉强度都比螺纹的抗剪强度低(按螺纹的抗剪强度确定螺母高度 H)。由表可知对各种制造方法其抗拉强度相差很少, 对同一种材料, 不同螺纹加工方法抗拉强度相差仅百分之几。

由表 4-16 可知加工方法对螺纹的疲劳强度有很大的影响。正确选择滚压方法, 可使滚压螺纹的强度达到切削或磨削螺纹强度的 2 倍。先用磨、铣、车方法加工螺纹然后滚压螺纹牙底, 可提高螺纹的疲劳强度, 但这种方法主要用于螺纹尺寸太大, 滚压困难的情况。

表 4-15 不同加工方法对 M12 × 1.5 螺纹静强度的影响

螺纹制造方法	40CrNi2MoA 螺栓		45 钢螺栓	
	螺母高度	R_m/MPa	螺母高度	R_m/MPa
磨削	$0.8d$	1333	$0.6 \sim 0.8$	789 ~ 794
滚压螺纹(滚子螺纹未抛光)	—	—	0.6	828
滚压螺纹(滚子螺纹抛光)	$0.8d$	1330	0.6	818
铲背滚子滚压螺纹	$0.8d$	1335	—	—

表 4-16 不同加工方法对螺纹疲劳强度的影响

螺纹尺寸	螺纹加工方法	疲劳强度 σ_a/MPa	
		40CrNi2MoA 螺栓 $\sigma_m = 250\text{MPa}$	40 钢螺栓 $\sigma_m = 150\text{MPa}$
M6	切削螺纹	≤ 80	≤ 70
	磨削	≤ 120	≤ 80
	滚压	195 ~ 220	135 ~ 155
M12 × 1.5	磨削	70 ~ 90	60 ~ 70
	磨削并滚压螺纹牙底	≤ 145	≤ 100
	滚压螺纹	125 ~ 170	95 ~ 110
	滚压螺纹并滚压螺纹牙底	≤ 160	≤ 110

4.2 密封设计

4.2.1 概述

密封装置用于防止机械设备内部工作介质的泄漏以节约能源和防止对环境的污染,此外还能够防止环境中的气、尘、水等进入机器内部。生产中许多非计划停机事故与密封装置泄漏有关。对于高压、高温、高真空设备,密封失效会导致设备的失效。而运动件的密封如果太紧,会造成功率损失和相对运动零件的发热和迅速磨损。因此,密封的设计是实现节能减排和保证机械正常工作的一个重要问题。一般对内部装有昂贵、有毒、有腐蚀性、易燃、易爆介质的机械设备,必须规定允许最低的泄漏率。

对密封装置的一般要求有:工作可靠、寿命长、结构紧凑、系统简单、制造维修方便、功耗小、与工作介质不发生化学反应、成本低、材料能够回收等。设计中尽量选择标准的密封件,以便修理和更换。

按密封处的零件是否有相对运动,分为静密封和动密封两大类。动密封中,按密封件是否与运动零件接触分为接触式和非接触式密封两大类。

4.2.2 静密封

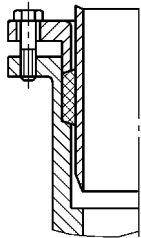
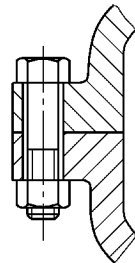
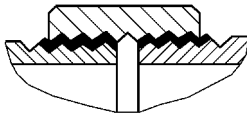
1. 静密封的分类

表 4-17 给出常见的静密封结构简图。其中金属空心 O 形密封圈可以达到橡胶 O 形密封圈不能达到的高温(1000℃), 深冷(最低 -270℃), 高压(最高 140MPa) 器件的静密封。特别是高真空(1.33×10^{-13} MPa) 和强辐射的场合。

表 4-17 静密封的分类

静密封分类		图 例
垫圈密封	螺纹连接垫圈密封	
	平垫密封	
	螺栓法兰连接垫圈密封	
	线接触密封	
	硬靠垫片密封	

(续)

静密封分类	图 例
填料密封	
直接接触密封	
密封胶密封	

静密封泄漏有两方面的原因：即界面泄漏和渗透泄漏。界面泄漏与密封垫的压紧程度和结合面的表面粗糙度有关。只有垫片受压变形并能使垫片面压入结合面凹凸不平的沟槽，将界面上泄漏通道堵塞之后，才能实现密封。另外，垫片材质老化和变质也会产生界面泄漏。

渗透泄漏主要原因是垫片有纤维介质，组织疏松，介质经过微型缝隙渗透。渗透量与压力、微型缝隙形成的毛细管当量直径和长度及介质黏度有关。

2. 垫片密封的类型及选择

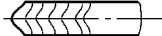
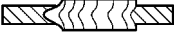
垫片是静密封的基本元件。它由铝箔、紫铜箔或纸板、塑料、橡胶、纤维和石棉橡胶板等制成。选择垫片类型主要根据介质温度、压力和腐蚀性等因素来决定。当温度和压力不高时，一般选用非金属软垫片；中压高温时，选用非金属与金属组合垫片或金属垫片；温度和压力有较大波动时，选用弹性好的或自紧式垫片。

垫片的类型、特点和用途，见表 4-18。

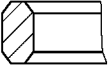
表 4-18 垫片类型、特点和用途

垫片种类	材质及其处理		特点和用途
纸 垫	油封纸	用明胶、合成树脂或合成橡胶浸渍	适用于油类介质。不适用于水溶液或水蒸气。使用温度在 100℃ 以下。压紧压力可达 10MPa
	钢板纸	分硬、软两种。硬纸板经氯化锌浸渍后，经表面胶化处理	硬纸板的强度高、硬度大、厚薄均匀，但脆而易折断。适用于齿轮泵和旋涡泵的侧面盖的密封垫
	铜板纸	由纸类经氯化锌及甘油、蓖麻油处理成软纤维板	软纸板适用于汽车、拖拉机、发动机、各种油泵和工业设备
	青壳纸	用薄钢纸经氯化锌浸渍而成	用于要求装配精度较高的机械，如变速箱等。还可作为电气绝缘材料
软木垫	由软木用树脂或橡胶粘接压接而成		软木板制成的密封垫广泛用于汽车上汽阀室盖、水套孔盖板的垫片。液压设备上的油封、变压器密封的垫片等
橡胶密 封垫	天然橡胶		组织致密、柔软、回弹性好、易剪切，有良好的适应性。但不耐高压、不耐油、不耐腐蚀，在高温下易老化 适用于低压水管，耐温 -60 ~ +100℃
	丁腈橡胶		耐油、抗老化性能好，适用于石油产品。耐温 -60 ~ +120℃ 适用于光滑面法兰，压力范围为 0.5 ~ 1.6MPa
	氯丁橡胶		有较高的抗老化性和耐油性。耐温 -65 ~ +135℃，可用于水、空气、氧气等介质
	异丁橡胶		能耐植物油、臭氧、弱酸、弱碱等。耐温 -30 ~ +120℃，耐压 < 3.0MPa。用于凹凸面法兰
	氟橡胶		它的耐腐蚀性最好，能耐各种油品、空气、蒸气、无机酸等。对有机酸等不太适应，耐温可达 200℃，强度大
	硅橡胶		耐温、耐寒性能甚好，适于 -70 ~ +260℃。能耐石油、植物油、氧、弱酸、弱碱等
	夹布橡胶		适用于海水、淡水、空气、润滑油和燃料油等。耐温 -30 ~ +60℃

(续)

垫片种类	材质及其处理	特点和用途
塑料垫片	塑料平垫片—聚四氟乙烯板	耐化学品性能优异。耐热性、耐寒性、耐油性以及耐天候性等均比其他塑料优越。耐温 $-180 \sim +250^{\circ}\text{C}$ 。高压下会产生“冷流”。使用压力超过 2.5MPa 时, 易产生“应力松弛”现象。适用于浓酸、碱、溶剂和油类
	聚四氟乙烯包垫	耐化学品性能优异。耐热性、耐寒性、耐油性以及耐天候性等均比其他塑料优越。耐温 $-180 \sim +250^{\circ}\text{C}$ 。高压下会产生“冷流”。使用压力超过 2.5MPa 时, 易产生“应力松弛”现象。适用于浓酸、碱、溶剂和油类
	软聚氯乙烯垫片	酸碱稀溶液及氨, 具有氧化性的蒸气及气体。温度 $<60^{\circ}\text{C}$, 压力 $\leq 1.6\text{MPa}$
橡胶石棉垫片	由 60% ~ 80% 的石棉和 10% ~ 20% 的橡胶再加填充物和硫化剂压制而成	适用于空气、压缩空气、惰性气体、蒸气、气态氨、液氨、水、硫酸(浓度 $< 98\%$)、盐酸(浓度 $\leq 35\%$)、盐类、硝氨液、硫氨液、甲氨液、尿液、烧碱、氟里昂、氢氰酸、青霉素、链霉素等
	耐油石棉橡胶板	适用于油品(汽、柴、煤、重油等)、油气、溶剂、浓度小于 30% 的尿素、氢气、硫化催化剂、润滑油、碱类。耐温 $\leq 350^{\circ}\text{C}$, 耐压 $\leq 4.0\text{MPa}$
O 形橡胶圈	压力大采用硬度大(邵氏硬度 80 以上)的橡胶, 压力小采用硬度小(邵氏硬度 70 以上)的橡胶。耐温型用硅橡胶; 耐油型用丁腈橡胶	适用于燃料油、润滑油、液压油、空气、水蒸气、热空气等。耐温 $-60 \sim +200^{\circ}\text{C}$; 耐压 $1.33 \times 10^{-10} \sim 32.0\text{MPa}$
	耐腐蚀介质用氟橡胶	适用于 20% 的硫酸, 盐酸, 氢氧化钠, 氢氧化钾。耐温 $< 25 \sim 80^{\circ}\text{C}$, 耐压 $< 2.5\text{MPa}$
金属缠绕垫片  	具有多道密封, 压缩回弹性好, 能适应温度、压力急剧变化, 减振。对法兰密封面要求不高 金属材料: 软钢、0Cr13 (1Cr13)、2Cr13、1Cr18Ni9Ti、铜、铝、铅、钛、蒙乃尔合金等 非金属材料: 石棉橡胶带、聚四氟乙烯生料带、柔性石墨等	适用于蒸气、氢气、压缩空气、天然气、裂解气、油品溶剂、渣油、蜡油、油浆、重油、丙烯、烧碱、熔融盐载热体、酸、碱、盐溶液、液化气、水等。耐温 $\leq 600^{\circ}\text{C}$; 耐压 $< 6.4\text{MPa}$

(续)

垫片种类	材质及其处理	特点和用途
金属包平垫片 	用金属材料包覆。有纯铜、铝、不锈钢、合成钢等薄板 用非金属材料为芯材。有石棉板、橡胶石棉板、聚四氟乙烯板、陶瓷纤维	根据选用的材质,适用于各种介质。耐温 600℃; 耐压 ≤6.4MPa
金属平垫片 	纯铜、铝、铅、软钢、不锈钢、合金钢	适用介质同金属缠绕垫片。耐温 600℃; 耐压 $1.33 \times 10^{-6} \sim 20.0\text{MPa}$
金属八角垫片  金属透镜垫片 	10 钢、1Cr13、合成钢、不锈钢等	适用介质同上。耐温 600℃; 耐压 ≥6.4MPa
金属空心 O 形环 	铜、铝、低碳钢、不锈钢、合金钢	适用介质同上。低温 ~ 高温; 真空 ~ 高压耐温 -196 ~ 450℃; 耐压 $1.33 \sim 10^6\text{MPa}$
膨胀石墨垫片 	由普通石墨用浓硫酸处理,经洗涤过滤、高温膨胀。再加以碾压制成石墨板。用石墨板制成垫片。是一种新型密封元件	耐腐蚀性优良,适用于大多数酸、碱、盐、有机溶剂和油类,强氧化性酸(硝酸、浓硫酸)除外 柔韧性和回弹性好,有良好的密封性能。耐辐射能力强。耐温 -200 ~ 870℃; 耐压 170MPa。广泛应用于炼油、化工、冶金、原子能和宇航部门。缺点是机械强度低

注:表中的成分均为质量分数。

3. 垫片设计的最小有效压紧压力值 Y 和垫片系数 m

法兰中的密封垫片靠拧紧螺栓而被压紧,如图 4-33 所示,在无内压力时,螺栓所加的总压紧力为 F_0 ,垫片的初始压缩量为 δ_0 ,垫片的受压面积为 A_g ,则垫片所受的平均预紧力 σ_{g0} 为

$$\sigma_{g0} = \frac{F_0}{A_g} \quad (4-23)$$

如介质的内压为 p_i ，则上盖受力使垫片放松，回弹量为 δ 。这时垫片上的压紧力减小，当压紧的垫片放松到一定程度时，就开始出现泄漏，只有垫片表面被压入并填满法兰面上的凹凸不平的间隙，才能起密封作用。垫片被放松，直到垫片与法兰面脱开，出现泄漏沟槽通道时，介质开始向外泄漏。

对于各种垫片和不同的介质和设备，都有一个最小压紧压力的允许值，将此最小预紧压力乘以一个安全系数，所得到的最小有效压紧压力就是选用和计算密封垫的设计值“Y”，简称为Y值，单位为MPa。

Y值通常由密封垫生产厂在样本或产品说明书中给出，或由各部门根据使用经验规定。根据Y值可算出在安装时压紧垫片所需要的螺栓预紧力 ($F' = \pi D_n b Y$, D_n ——密封力位置处的直径, b ——垫片的有效密封宽度)。

密封性能还与介质压力有密切关系。实验证明，在开始发生泄漏时，垫片有效压紧应力 σ_g 与内压 p_i 之比为一常数 m ，可以写作：

$$\frac{\sigma_g}{p_i} = m \quad (4-24)$$

$$\text{取} \quad \sigma_g = \frac{F_0 - \frac{\pi D^2}{4} p_i}{A_g} \quad (4-25)$$

式中 m ——垫片系数，决定于垫片种类、尺寸、形状、温度、介质压力和法兰接合表面的表面粗糙度等多种因素；

D ——气缸内径。

由以上二式并令 $D \approx D_n$ ，可以导出在工作状态下，为保证密封所需的螺栓力 F'' ，即

$$F'' = \frac{\pi}{4} D_n^2 p_i + \pi D_n b m p_i \quad (4-26)$$

比较上面计算螺栓力 F' 和 F'' ，取其大者作为螺栓力计算值。 $F' \geq F''$ 的条件，可以写作：

$$A_g \geq \frac{A_e p_i}{Y - m p_i} \quad (4-27)$$

式中 $A_g = \pi D_n b$ ——垫片受压面积；

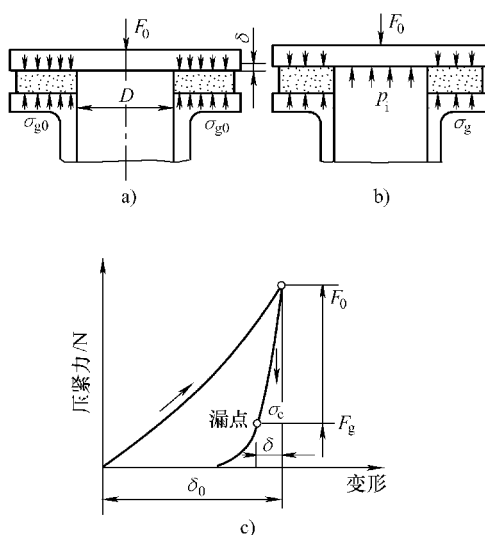


图 4-33 密封垫的压缩与回弹

$$A_e = \frac{\pi}{4} D^2 \approx \frac{\pi}{4} D_n^2$$
——内压作用在法兰上的面积；

p_i ——介质压力(容器内压力)。

必须指出，垫片密封是一个极为复杂的问题。迄今尚无可靠的理论和实验数据作为指导设计的根据。目前国内外多数规范仍沿用 Ross-Heim 和 Markle 在 1943 年发表的，并为 ASME 规范所采用的垫片系数 m 和预紧比压 Y 。它们既未得到完整的实验证明，也与实际情况不甚相符。长期以来，现场实用的 m 和 Y 值远大于设计值。而且关于密封不漏的定义和准则，也尚无统一和明确的规定。对于各种介质规定出允许的泄漏量，才能用以评定密封的性能。

表 4-19 给出某些垫片的 m 和 Y 值。

表 4-19 某些垫片的 m 和 Y 值

垫片名称		垫片系数 m	最小有效压紧 压力 Y 值/MPa	附 注
橡胶垫	邵氏硬度 < 75	0.5	1.0	密封面表面粗糙度 $Ra \leq 25\mu\text{m}$ 。 可用于水蒸气、热水、海水、溶液 空气、醇类、脂肪族胺类、硝化物 等。压力 0 ~ 5MPa；温度 100℃ 以 下
	邵氏硬度 ≥ 75	1.0	1.5	
夹布橡胶垫		1.25	2.8	密封面表面粗糙度 $Ra < 25\mu\text{m}$ ， 可用于水蒸气、热水、海水、溶液 空气、醇类、脂肪族胺类、硝化物 等。压力 0 ~ 5MPa；温度 100℃ 以 下
夹金属丝石 棉橡胶垫	三层	2.25	15.5	$Ra \leq 10\mu\text{m}$ 。垫片与法兰之间涂 石墨。可用于密封水蒸气、热水、 海水、溶液。压力 2 ~ 5MPa；温度 200 ~ 500℃
	二层	2.50	20.4	
	一层	2.75	26.0	
金属石棉缠 绕垫片	碳钢、不锈钢 或蒙乃尔	2.50	20.4	$Ra \leq 1.6\mu\text{m}$ 密封水蒸气、热水等。压力 2 ~ 10MPa；温度 350 ~ 550℃
		3.00	31.6	
波形状金属 垫	软铅	2.75	26.0	$Ra \leq 1.6\mu\text{m}$ ，密封水蒸气、热水 压力 2 ~ 10MPa；温度 350 ~ 550℃
	软铜或黄铜	3.00	31.6	
	铁或软钢	3.25	38.7	
	蒙乃尔或 铬钢 ^①	3.50	45.7	
	不锈钢	3.75	53.4	

(续)

垫片名称		垫片系数 m	最小有效压紧 压力 Y 值/MPa	附 注
金属包石棉 垫	软铝	3.25	38.7	$Ra \leq 1.6 \mu\text{m}$
	软铜或黄铜	3.50	45.7	密封水蒸气、热水、天然气、乙
	铁或软钢	3.75	53.4	炔、一氧化碳、乙烷、乙烯、氧、
	蒙乃尔	3.50	56.2	氮、甲烷
	铬钢 ^①			压力: 2 ~ 10MPa; 温度: 300 ~
	不锈钢	3.75	63.3	450℃
金属齿形垫	软铝	3.25	38.7	$Ra \leq 1.6 \mu\text{m}$
	软铜或黄铜	3.50	45.7	密封水蒸气、热水、原油、挥发
	铁或软钢	3.75	53.4	油、汽油、煤油、瓦斯油、燃料
	蒙乃尔或			油、润滑油
	铬钢 ^①	3.75	63.3	压力: 2 ~ 10MPa; 温度: 35 ~
	不锈钢	4.25	71.0	550℃
实心金属平 垫	软铝	4.00	61.9	$Ra \leq 1.6 \mu\text{m}$
	软铜或黄铜	4.75	91.4	其间涂密封膏
	铁或软钢	5.50	126.6	密封水蒸气、热水、原油、挥发
	蒙乃尔或			油、汽油、煤油、瓦斯油、燃料
	铬钢 ^①	6.00	153.3	油、润滑油
	不锈钢	6.50	182.8	压力: 2 ~ 10MPa; 温度: 35 ~
金属椭圆形 环或八角形环				550℃
	铁或软钢	5.50	126.6	$Ra \leq 0.8 \mu\text{m}$
	蒙乃尔或			其间涂敷密封膏
	铬钢 ^①	6.00	153.3	密封水蒸气、热水、脂肪族烃
	不锈钢	6.50	182.8	类、原油、汽油、瓦斯油、燃料
				油、润滑油
				压力: 15 ~ 50MPa; 温度: 500 ~ 600℃

① $w(\text{Cr}) = 4\% \sim 6\%$ 。

4. 法兰连接密封

法兰连接的密封元件是垫片, 根据不同的法兰结构选用不同的垫片。法兰的结构型式及常用的垫片示于表 4-20。各种法兰的公称口径和承压范围见有关标准。

5. 管道连接密封

管道口径小于 50mm 以下的多采用螺纹连接密封, 见表 4-21。

表 4-20 法兰连接密封的型式

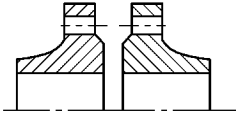
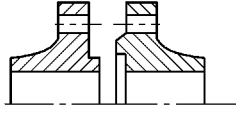
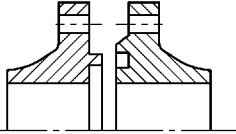
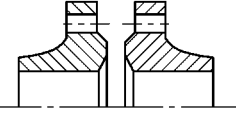
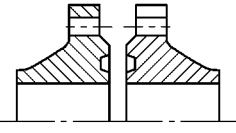
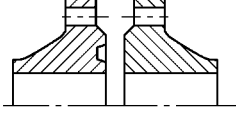
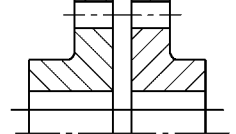
结构型式	简 图	结构特点及密封垫片的选择
平面法兰		连接面为平面, 常有几条(一般为 2~4 条)截面形状为三角形的同心沟槽, 俗称水线。结构简单、加工容易 选用的垫片型式有平垫片、波形垫片和缠绕垫片等。承受的压力范围为 1.6~6.4MPa
凹凸法兰		性能优于平面法兰。易于对中, 能防止非金属软垫片受内压被挤出密封面。可用于要求较高的场合。尤其在换热器中使用广泛使用垫片有平垫片、缠绕垫片、齿形垫片等。承受介质压力可达 6.4MPa, 如配用金属齿形垫片时, 压力达 20.0MPa
榫槽法兰		密封面窄, 垫片容易压紧, 不易挤出, 密封可靠性高。多用于有毒介质和要求较高的场合 多用平垫片和缠绕垫片。承受介质压力与凹凸法兰相同, 但不用齿型垫片
透镜法兰		与透镜垫圈配套使用。受介质压力作用将透镜垫向外挤压, 与法兰上的透镜槽表面贴合得更紧, 加强了密封效果。提高了可靠性。用在高于 6.4MPa 的压力。缺点是要求较高的尺寸精度和较低的表面粗糙度
梯形槽法兰		与八角垫或椭圆垫片配套使用。密封效果可靠。使用压力多高于 6.4MPa
O 形密封垫圈法兰		橡胶密封圈配套使用。密封效果甚好。耐冲击振动。可以承受 32.0MPa 的高压。广泛使用液压系统和真空系统。使用范围日趋扩大, 前景较好
研合密封面		两密封需刮研, 中间没有垫片。多用于汽缸中分面和阀板密封

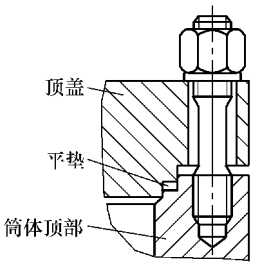
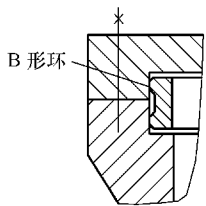
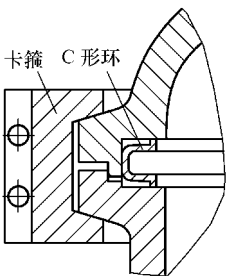
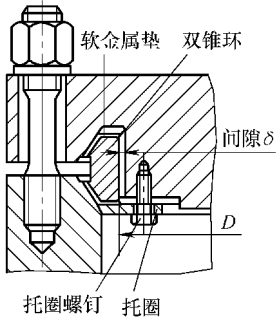
表 4-21 管道连接的密封形式

名 称	简 图	特 点
螺纹连接密封		结构简单, 加工方便。最高使用压力为 1.6MPa, 适用口径为 8~150mm 螺纹的配合间隙一般较大, 所以螺纹间要有填充物, 以保证严实无缝。近年来, 采用了液态密封胶或聚四氟乙烯生料带。耐腐蚀, 适应温度从 $-180 \sim +250^{\circ}\text{C}$。此外还有使用方便、耐高压(可达 10MPa), 干净、耐振、装拆不磨损螺纹等优点
平垫片密封		结构紧凑、使用方便 当采用非金属软垫片时(图 a), 承受最大压力为 1.6MPa, 公称直径 $D_g = 8 \sim 150\text{mm}$ 采用金属(铜、铝垫)平垫时(图 b), 承受最大压力可达 32MPa, $D_g = 6 \sim 30\text{mm}$
卡套式接头	1—组合垫圈 2—接头体 3—卡套 4—螺母 5—钢管	结构先进、性能优良、使用方便。广泛用于液压系统中。卡套式管接头要求配用冷拔钢管、制造要求精度较高 接头包括: 24°锥形孔的接头体、尖锐内刃的卡套和压紧螺母 接头连接用垫片密封, 中压推荐用金属垫圈, 高压时用组合垫圈
锥形垫密封		适用的压力为 250MPa, $D_g = 3 \sim 15\text{mm}$, 用于密封乙烯和聚乙烯等中性介质

6. 高压设备密封(表 4-22)

高压设备的静密封(压力大于 10MPa)必须安全可靠, 并能适应温度和压力的波动。结构要求紧凑, 占用空间小。

表 4-22 高压设备的密封结构

名 称	简 图	结 构 说 明
平垫密封		完全依靠螺栓力将垫片压紧达到密封。用于温度不高、直径不大的高压设备。使用压力范围 20 ~ 30MPa, 直径 600 ~ 1000mm, 温度 $t < 200^{\circ}\text{C}$。但在有压力和温度波动的场合不宜使用。垫片材料一般选用退火的铝、铜或 20 软钢
B 形环密封		环的剖面形状如 B 字形。B 形环的两个高峰分别接触设备的顶盖内壁和本体内壁。制造中, B 形环上两个高峰外径应比顶盖和本体的内径略大, 在安装时产生预压紧密封。内压力使两高峰与内壁压紧, 加强了密封效果。这种型式的密封属于自紧密封。缺点是密封部件加工精度要求高; 装拆不方便, 密封面易擦伤。使用范围: $p = 30 \sim 300\text{MPa}$; $t < 350^{\circ}\text{C}$; $D < 1000\text{mm}$
C 形环密封		C 形密封面是一种轴向自紧密封。C 形密封环的首尾都有凸圆。安装时, C 形环受到压缩, 凸圆与顶盖、本体压紧, 形成预密封。工作状态下, 设备内压使 C 形环张开, 与顶盖、本体压得更紧, 密封效果得到加强。C 形环结构简单, 制造比较方便, 预紧力较小并能严格控制。适用于无主螺栓的快开连接结构以及温度和压力有波动的场合。目前推荐使用范围: 温度低于 200°C, 压力小于 34MPa, 封口直径 $\phi 300 \sim \phi 1000\text{mm}$
双锥密封		属于半自紧密封, 是自紧密封与强制密封的结合。密封具有双锥面, 分别与顶盖和本体的相应锥面配合, 并靠螺栓压紧达到初始密封。在内压作用下, 双锥面密封环往外扩张, 进一步压紧配合锥面(一般其中放入 1mm 的金属软垫片), 加大密封效果, 产生自紧作用。但轴向力增大, 螺栓力增加。在内压高时, 锥环向外扩张较大, 自紧作用降低, 所以间隙 δ 的选取应适量, 在 $(0.1\% \sim 0.15\%)D$ 范围内。结构简单, 加工精度要求不太高。在温度、压力有波动的场合密封可靠。用于压力 32MPa、直径 1300mm 的卧式合成塔, 压力 200MPa, 温度小于 300°C 的超高压容器上

7. 特殊工况下的静密封

(1) 高温密封 高温操作下会引起材料变形、紧固件蠕变、松弛、热应力过大和较大的热变形。这些因素皆可引起泄漏、甚至使密封完全破坏。

材质选择应选用回弹性好或自紧式垫片,如缠绕式垫片、充气式金属空心O形环。紧固件应选用抗蠕变性能好的材质。

高温设备在经过一段工作后,应再次拧紧螺栓,以消除由于蠕变作用而引起的密封比压降低的现象。

(2) 低温深冷密封 在宇航技术中常遇到要密封如液氢、液氮和高真空深冷下的氮等介质,这与常温下的密封不同。

使用金属O形圈可以得到较好的效果。

此外还有利用低温下不同材质的收缩率的差异使其密封作用加强的结构。

如图4-34所示为一种双金属半圆环的密封结构。外环用铝、内环用不锈钢制成。两半环的平面为 45° 的锥形平面、环的外表面涂敷一层聚四氟乙烯,以减少与槽表面的摩擦力。当深冷介质流过时,铝制外环的收缩率大于不锈钢的内环,外环沿锥面向内滑动,故使环表面与槽面压得更紧,加强了密封效果。

在低于 -20°C 的低温下,有些垫片材料变脆、弹性降低。低温下常用的材料有普通橡胶、石棉橡胶板、W形液态密封胶、聚四氟乙烯、纯铜垫和铝垫片。低于 -200°C 时,可选用铝合金、铜合金和不锈钢等。

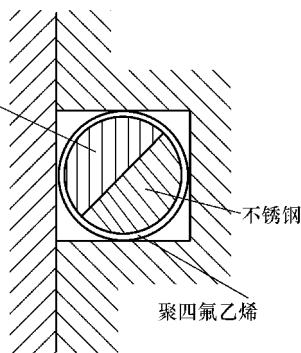


图4-34 聚四氟乙烯涂层的双金属环密封

(3) 真空密封 高真空($1.33 \times 10^{-11} \sim 1.33 \times 10^{-8} \text{MPa}$)密封垫片的材料主要是橡胶,常用的是邵氏硬度为55~65的丁腈橡胶和氯丁橡胶。密封圈的断面有圆形的和矩形的。它的压缩变形量为15%~20%。

超高真空($10^{-16} \sim 10^{-12} \text{MPa}$)密封材料主要有金、银、无氧铜、高纯铝、纯铜、氟橡胶和氟塑料等。

8. 金属空心O形圈密封

金属空心O形圈密封具有特殊优良的密封性能。主要是适应性广,特别适用于高温高压、超高压、高真空、低温及介质有放射性、要求严格密封的场合。使用压力最高达700MPa,温度范围 $-250 \sim 1000^\circ\text{C}$,真空度最高达 $1.33 \times 10^{-13} \text{MPa}$ 。

金属空心O形环靠压扁后断面弹性变形所产生的回弹力使密封面严密接触来实现密封。压扁度 η 代表压扁的程度,即

$$\eta = \frac{G_0}{d}$$

式中 G_0 ——O形环管子压扁后高度;

d ——O 形环管子压扁前直径。

金属空心 O 形环的有限密封的压扁度与环的材质和尺寸特别是管壁厚有关。一般最合适的压扁度为 0.7 ~ 0.8。若综合考虑 O 形环的膨胀、蠕变、松弛等因素， η 取 0.7 最合适。

金属空心 O 形环有三种类型，见表 4-23。与它相配套的法兰，密封面的形式见图 4-35。基本型式的法兰对三种金属空心 O 形环均适用。其改型使法兰加工简化，并便于调节 O 形环的压扁度，中间一件起挡圈作用，可根据需要加工成任意厚度，并可根据需要更换。

图 4-36 为凹槽形法兰和三角槽形法兰。凹槽形与橡胶 O 形环法兰形相同，这种形式一般用于腐蚀性介质或含有硬质颗粒的介质。

在压力特高或高度真空的情况下，可将法兰槽由矩形变成三角形。压紧后，金属 O 形环在槽内就由圆形变成了方形，加强了密封效果。

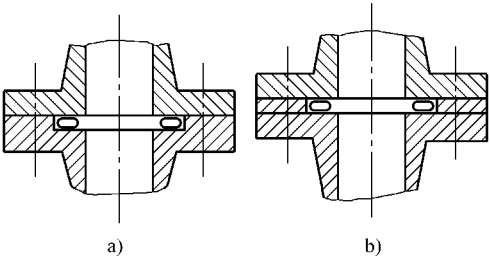


图 4-35 金属 O 形圈法兰的基本形式和改型
a) 基本形式 b) 改型

表 4-23 金属空心 O 形环的类型

类 型	简 图	特点及用途
非自紧式		可用于真空和中、低压(<7MPa)以及没有特殊要求的场合
充气式		在封闭的 O 形环内充惰性气体，充气压力 4 ~ 5MPa
自紧式		在环的内侧钻有若干小孔，由于管内压力随介质压力的增高而增高，使环有自紧性能。用于高压、超高压的场合，如 350 ~ 700MPa

金属 O 形环的空心管材料, 是根据介质温度、压力和腐蚀性来选用。一般用 1Cr18Ni9Ti 不锈钢管焊成的。在不同情况下也可用低碳钢管、铝管、铜管、因科镍管等。为改善密封性能, O 形环表面需镀覆或涂以金、银、铂、铜、氟塑料等, 覆盖层厚度为 0.03 ~ 0.04mm。

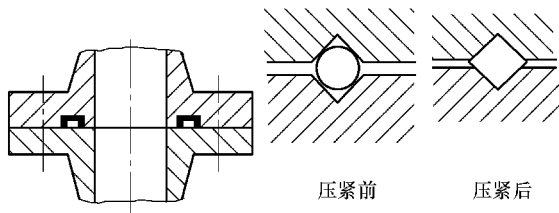


图 4-36 凹槽和三角槽形法兰与金属 O 形圈

与金属 O 形环配套的法兰, 密封面表面粗糙度要求达到 $Ra \leq 1.6 \mu\text{m}$ 。

9. 密封胶

密封胶是一种液体密封剂, 也叫液体密封填料。它分为液态密封胶和厌氧胶两类。

(1) 液态密封胶 它是由基料、溶剂和填充剂组成。基料可分为合成树脂、合成橡胶和天然高分子物质等几类。这些都是高分子聚合物, 并以合成材料为主要基料。

液体密封剂在常温下是可流动的黏稠液体。可用于温度高至 300℃, 压力至 1.6MPa 的油类、水、气、有机化合物、酸、碱等介质。不腐蚀金属。

液态密封胶可单独使用, 也可与垫片配合使用, 可获得更好的密封效果。

(2) 厌氧胶 厌氧胶分为胶粘剂和密封剂两种。其组成主要是具有厌氧性的树脂单体和催化剂。它的外观是茶色或无色透明液体, 涂敷性良好, 在隔绝空气的情况下, 胶液自动固化。能耐酸、碱、盐、水、油、醇类等介质, 有良好的耐热性和耐寒性。

厌氧胶的使用工艺与液态密封胶相似。一般用于不仅需要密封而且需要固定的接合面。对液压元件的接头和阀门接合面的密封有良好的效果。密封高压油管接头 (5 ~ 30MPa) 时, 更显出其优越性。

4.2.3 填料密封

填料密封主要用于动密封。

对填料密封的一般要求:

- 1) 有一定的塑性, 在压紧力作用下能产生一定的径向力, 并压紧轴面。
- 2) 有足够的化学稳定性, 不污染介质, 不被泡胀, 填料中的浸渍剂不被溶解。
- 3) 自润滑性良好、耐磨、摩擦因数小。
- 4) 在有轻微的偏心下, 应有足够的浮动弹性。
- 5) 制造简单, 装填方便。

填料类型有弹、塑性体和非弹、塑性体之分。弹、塑性体填料有: 软填料密封、成型软填料密封、油封和防尘密封。非弹塑性体密封有硬填料密封和分瓣环密封等。

1. 软填料密封

典型结构如图 4-37 所示。一般应满足下列工艺条件：

- 介质压力
- 由真空 $1.33 \times 10^{-3} \sim 35 \text{MPa}$
- 工作温度
- $-200 \sim +600^\circ\text{C}$
- 密封面线速度
- $\leq 25 \text{m/s}$
- 寿命
- 2 ~ 3 个月

软填料类型及其应用见表 4-24。
填料腔的类型及其结构特点见表 4-25。
填料腔尺寸的确定见表 4-26。

软填料需用的压盖力，摩擦因数和泄漏量见表 4-27 ~ 表 4-29。

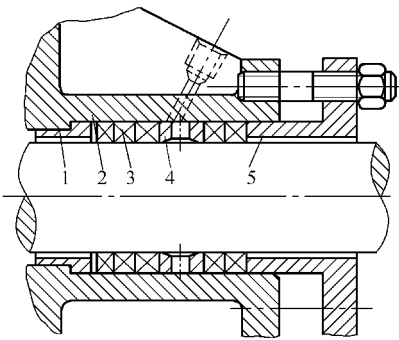


图 4-37 软填料密封

1—底衬套 2—填料箱体 3—填料
4—封液环 5—压盖

表 4-24 软填料的类型及应用范围

类型	名称型号	结构特征	适用范围	适用介质和场合
天然纤维	棉纱浸牛油 填料 MCU-1	用棉纱编织，浸牛油而成	温度 $t < 100^\circ\text{C}$ 压力 $p < 5 \text{MPa}$ 线速度 $< 6 \text{m/s}$	植物油、动物油、海水、水、食品。天然纤维对氨水和氢氧化钠有一定耐腐蚀能力
	棉纱线浸聚四氯乙烯 MCU-2	用棉纱编织线，浸聚四氯乙烯	$< 100^\circ\text{C}$ $< 5 \text{MPa}$ $< 6 \text{m/s}$	植物油、动物油、海水、水、食品。天然纤维对氨水和氢氧化钠有一定耐腐蚀能力
	麻线-聚四氟乙烯密封填料 MSU	麻线浸聚四氟乙烯编织	$< 100^\circ\text{C}$ $< 12 \text{MPa}$ $< 8 \text{m/s}$	油类、海水、溶剂、水等。食品工业
石棉填料	油浸石棉	用石棉线编结，浸润滑油及石墨	450℃ 6.0MPa	用于旋转轴、往复活塞杆、阀杆的密封 适用于蒸气、空气、工业用水和重油
			350℃ 4.0MPa	
			250℃ 4.5MPa	
	橡胶石棉	石棉线加各种金属丝捻捻编织成绳状密封材料、外涂高碳石墨	450℃ 6.0MPa	有良好的导热性，耐高温性能好，机械强度高，适用于高温密封 适用于过热蒸气、高温油、碳氢化合物、碱性、盐类溶液
			350℃ 4.5MPa	
			250℃ 4.5MPa	

(续)

类型	名称型号	结构特征	适用范围	适用介质和场合
石棉填料	石棉浸聚四氟乙烯	以优质石棉线、尼龙线为主体材料、浸渍聚四氟乙烯乳液和二硫化钼, 经编织而成	$-200 \sim +250^{\circ}\text{C}$ $<25\text{MPa}$ $<5\text{m/s}$	适用于弱酸、强碱、有机溶剂、液氨、纸浆、废液、海水等
	石棉石墨	以优质石棉线编织成断面为正方形或圆形的绳状物, 用石墨或特殊润滑剂处理而成	$<350^{\circ}\text{C}$ $<8\text{MPa}$ $<0.3\text{m/s}$	适用于碱性溶液、盐类溶液、蒸气、有毒性气体等介质
	湿纺石棉线加合金丝	以金属丝增强的湿纺石棉线为主体材料编织断面为正方或圆形的绳状产品	$<550^{\circ}\text{C}$ $<20\text{MPa}$ $<0.5\text{m/s}$	适用于过热蒸气、热水、高温碱性的流体介质
合成纤维填料	碳纤维四氟填料	碳纤维为主体材料、浸渍聚四氟乙烯乳液、经编织而成绳状产品。穿心编结	$-200 \sim +250^{\circ}\text{C}$ $<10.0\text{MPa}$ $<25\text{m/s}$	有优良的耐热、耐化学药品性、热传导性能好、自润滑性好、使用寿命长。适用于各种腐蚀性介质、酸类(浓硝酸除外)、碱溶液、有机溶剂等介质
	酚醛纤维四氟填料	以酚醛纤维为主体材料, 浸渍聚四氟乙烯乳液、经编织而成的绳状产品	$-20 \sim +280^{\circ}\text{C}$ $<20.0\text{MPa}$ $<8\text{m/s}$	有优良的密封性、自润滑性、化学稳定性, 并具有较高的机械强度, 是动、静密封的优良填料。适用于酸、碱、有机溶剂等腐蚀性流体, 广泛用于化肥、化工、冶炼、石油、发电、制药等领域
	氟纤维填料	以聚四氟乙烯纤维为主体材料、经编织而成绳状产品穿心编结	$-200 \sim +260^{\circ}\text{C}$ $<30.0\text{MPa}$ $<8\text{m/s}$	有优良的耐腐蚀性、耐磨性和较高的机械强度, 并有自润滑性好、摩擦系数小、转矩小的特点。但热传导性差、热膨胀系数大, 需要采取强制冷却、润滑等措施。适用于各种腐蚀性化学产品的流体、浓硝酸、盐酸、硫酸、氢氟酸、强碱等。广泛用于石油、化工、化肥、化纤、食品等工业的设备所用的法兰、阀、泵的密封
柔性石墨密封环	RSU	将柔性石墨制成的带状板材, 以模具压制成环的密封填料	$-200 \sim +1600^{\circ}\text{C}$ $<35\text{MPa}$ $<8\text{m/s}$	有耐腐蚀、耐低温、耐高温的性能。有自润滑性好, 弹性大, 转矩小等特点。但因强度低, 与其他填料混合装配使用效果好。适用于酸、碱、氨、有机溶剂、化学药品等腐蚀性流体。广泛用于石油、化工、化肥、化纤等工业部门

表 4-25 填料腔结构

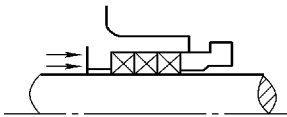
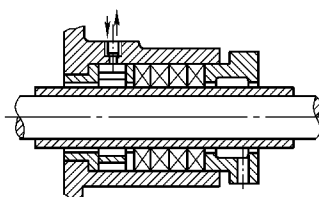
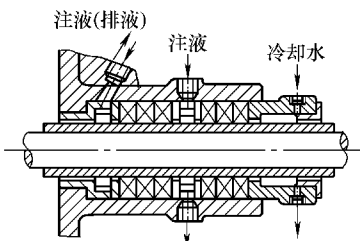
类型	简图	特点	应用
简单的填料腔		结构简单, 无封液环, 无冷却室	用于转速不高, 介质腐蚀性不大的常温室泵、阀门和搅拌机
有润滑的填料腔		在腔壁上开有注液孔或注入润滑油, 或与机械本身的高压介质相通。当介质含有纤维物和沉淀物时, 则通以清洁的冲洗液	用于常温室介质的离心泵上
有冷却室的填料腔		腔外通有冷却液进行循环冷却。因为热量传到轴承处, 对填料压盖也进行冷却	用于高温介质的密封, 如热油泵、锅炉给水泵和搅拌轴

表 4-26 填料腔尺寸

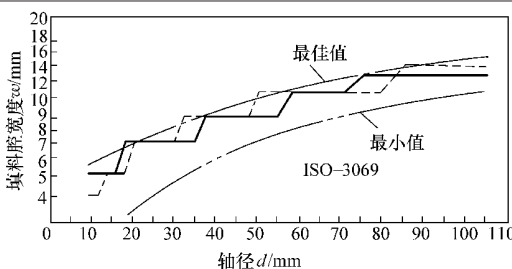
密封类型	根据介质压力选择 填料根数	根据轴径 (mm) 选择填料宽度与填料腔尺寸	填料腔尺寸的 计算/mm
旋转轴密封	压力/MPa		根据轴径 d 选择 填料宽度 w 填料腔内径 $D = d + 2w$ 填料总宽度 $L = nw$ (n —填料根数) 填料腔深度 无封液环时 $L_1 = nw + (5 \sim 10) \text{ mm}$ 或 $L_1 = 1.2nw$ 有封液环时 $L_1 = (n + 2)w + (5 \sim 10) \text{ mm}$ 内腔表面粗糙度 $Ra = 6.3 \sim 3.2 \mu\text{m}$ 与压盖配合取 $\frac{H11}{d11}$ 要求较高时取 $\frac{H8}{f9}$
	根数		
	0.1 ~ 0.5	3 ~ 4	
	0.5 ~ 1.0	4 ~ 5	
	1.0 ~ 4.0	6	
往复轴与阀的密封	4.0 ~ 6.4	7	
	6.4 ~ 10.5	8	
	1.0 以下	3 ~ 4	
	1.0 ~ 3.5	4 ~ 5	
	3.5 ~ 7.0	5 ~ 6	
	7.0 ~ 10.0	6 ~ 7	
	10.0 以上	7 ~ 8	

表 4-27 各种填料与钢轴的摩擦因数 μ

材料名称	μ	材料名称	μ
石棉	0.25 ~ 0.4	聚四氟乙烯	0.04
尼龙	0.3 ~ 0.5	碳纤维浸渍四氟	0.15 ~ 0.2
硬橡胶	0.2 ~ 0.4	青铜	0.15
皮革	0.3 ~ 0.5	铝合金	0.30
毛毡	0.22	铅	0.4
膨胀石墨	0.13 ~ 0.15		

表 4-28 填料密封的允许泄漏量^①

轴径/mm		25	40	50	60
允许泄漏量/ (mL/min)	起动后 30min 内	24	30	58	60
	正常运行	8	10	16	20

① 转速约为 3000r/min, 压力范围 0.1 ~ 0.5MPa。

(1) 影响磨损的因素 在同一条件下由于填料类型不同或填料装填是否正确对磨损量的影响差异较大, 参见图 4-38、图 4-39。

此外, 磨损与轴表面是否发生腐蚀还有密切关系。如不锈钢的轴采用石墨润滑的填料时, 会发生严重的腐蚀现象。这是因为在导电介质中, 石墨成为阴极、不锈钢轴 (特别是 Cr13 钢) 成为阳极, 产生电化学腐蚀。故应加入附加在将被磨损表面上的“牺牲金属”以保护轴表面免于腐蚀。

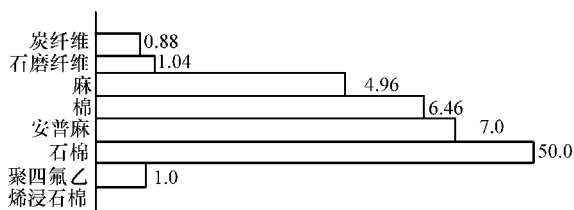


图 4-38 各种填料的磨损对比试验结果 (运转 1000h 后)

(2) 润滑 填料润滑对使用寿命和密封性有极大的影响。对填料的润滑剂一般要求为:

- 1) 有良好的化学稳定性: 既不污染介质, 又不与介质发生反应产生沉淀物和固体微粒。
- 2) 有良好的浸渍性能和持久的保持性能; 既能很容易地浸入到填料纤维微小的缝隙之中, 又能在挤压下缓慢地流出来。
- 3) 不允许加速密封部位的电化学腐蚀, 即润滑剂不得成为电解介质, 最好具有绝缘性。

此外, 还应有一般润滑剂优良的成膜性, 还要注意润滑剂不至因受热而变

稀。

2. 成型填料

成型填料泛指用橡胶、塑料、皮革和金属以型腔工艺或车削加工成型的环状密封圈。

成型填料按工作原理分为挤压型密封圈及唇型密封圈两类；按材质分为橡胶类、塑料类、皮革类及金属类。

(1) O形橡胶密封圈 O形圈密封具有简单、密封性能良好和可靠等一系列优点，现已成为广泛使用的一种密封件。O形圈可用橡胶、塑料和金属（空心）制成。

橡胶 O 形圈已可达到下列性能指标：

工作压力：静密封 100MPa

动密封 35MPa

工作温度：-60 ~ +200℃

轴径：<3m

密封面线速度：<3m/s

O 形圈具有双向密封能力。可作为静密封和动密封件使用。

O 形密封圈及沟槽的尺寸和公差见 GB 3452.1 ~ GB 3452.3—2005。O 形圈沟槽形式见表 4-29。

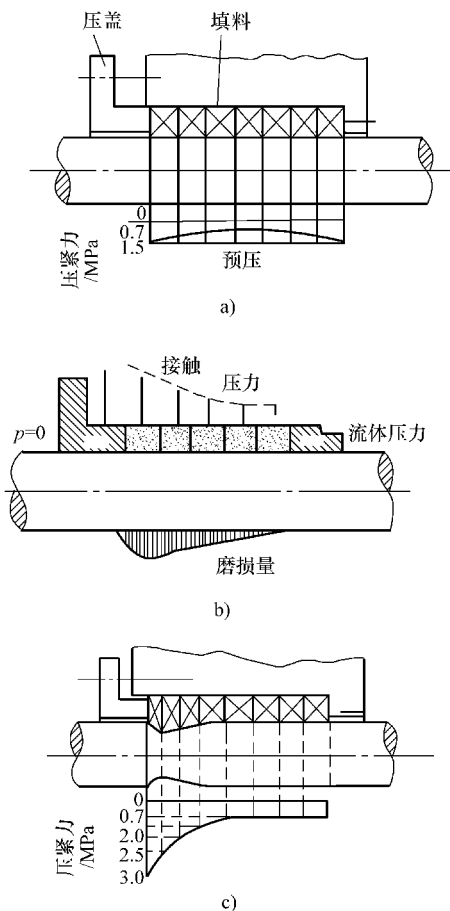


图 4-39 填料对轴的磨损

a) 良好装填 b) 正常磨损 c) 异常磨损

表 4-29 O 形圈沟槽形式

沟槽型式	简 图	特 点
矩形槽		静密封与动密封均适宜，应用普遍
三角形槽		尺寸紧凑，静密封用
燕尾形槽		可将 O 形圈牢固地安放在沟槽中，适于装在上法兰面上，装拆时不脱落

沟槽内外壁对 O 形圈施加的挤压程度用压缩率 K 表征（见表 4-30 及图 4-40）。

$$K = \left(1 - \frac{D_0 - d_0}{2W} \right) \times 100\%$$

式中 D_0 ——沟槽外直径（mm）；

d_0 ——沟槽内直径（mm）；

W ——自由状态的 O 形圈截面直径（mm）。

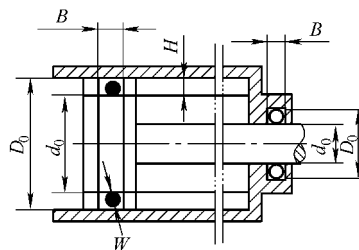


图 4-40 O 形圈沟槽计算

表 4-30 橡胶 O 形圈伸长率和压缩率

密封型式	介质	伸长率 a (%)	压缩率 K (%)
静密封	油	1.03 ~ 1.04	15 ~ 25
	空气	< 1.01	15 ~ 25
往复密封	油	1.02	12 ~ 17
	空气	< 1.01	12 ~ 17
旋转密封	油	0.95 ~ 1.0	5 ~ 10

1) 沟槽间隙 在高压下，O 形圈的一部分被挤入沟槽的间隙内，因之被咬伤或剪切撕裂。防止挤出破坏的办法是采用挡圈，应正确选择胶料硬度及沟槽间隙。

沟槽的主要尺寸：常用的矩形槽尺寸如下：

矩形槽深度： $H = (1 - K) W$

宽度： $B = W + (0.3 \sim 0.5) W$

2) 挡圈橡胶 O 形圈在介质压力超过 10MPa（动密封）和 32MPa（静密封）时，应在承压面设置挡圈（图 4-41）。

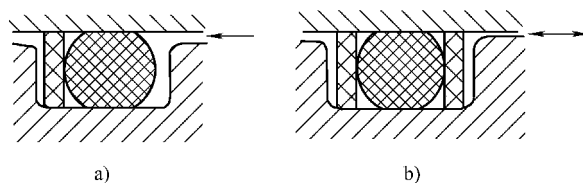


图 4-41 挡圈

a) 单向压力 b) 双向压力

3) O 形圈的装填结构。在结构设计上应尽可能避免 O 形圈触及径向孔、键槽和螺纹等（见图 4-42）。装填时可能触及的轴或孔的台肩应作出导锥（见表 4-31）。必要时使用专用的轴套装填，如图 4-43 所示。

O 形圈密封的启动摩擦阻力是运动摩擦阻力的 3 ~ 10 倍。启动摩擦阻力随停歇时间、胶料硬度、压缩率等因素的增长而增大。

O 形圈用于往复运动零件密封时，可能产生局部扭转，使一部分密封圈拧成麻花状，泄漏量很大。为了避免这种情况，生产了一些 O 形圈，其断面形状如图 4-

44a 所示。

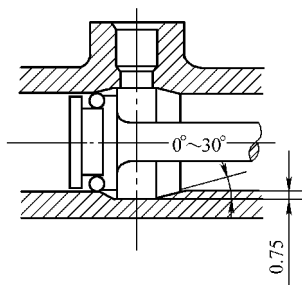


图 4-42 避免 O 形圈触及径向孔

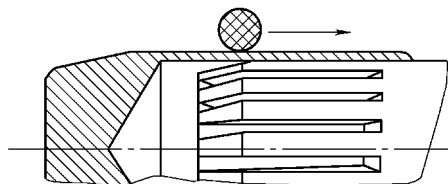


图 4-43 O 形圈用轴套装填

表 4-31 孔或轴端导锥

(单位: mm)

O 形圈截面直径 W	l	简 图
1.9	0.9	
2.4	0.9	
3.1	1.0	
3.5	1.1	
4.6	1.2	
5.7	1.3	
8.6	1.5	

另外,用模型浇铸的密封圈,一般有一个分模面,在其中心平面上有一圈飞边,容易引起泄漏(图 4-44b),现有的改为斜的分模面(图 4-44c),可以避免这一问题的发生。

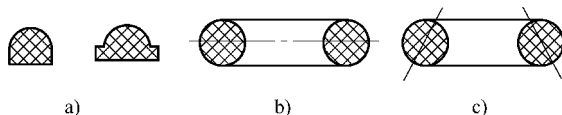


图 4-44 改进型的密封圈

(2) 唇形密封 唇形密封圈中有一个或一个以上的唇口,多用于往复运动件的密封,具有比挤压型密封圈更显著的自紧作用。橡胶唇形密封圈有纯橡胶的和夹布橡胶两类。夹布橡胶密封圈能在更高的介质压力中工作。

唇形密封圈的主要材料有合成橡胶、夹布橡胶、皮革和聚四氟乙烯等。合成橡胶主要有丁腈橡胶、硅橡胶和聚氨酯橡胶等。夹布橡胶主要用于高压及其他苛刻条件下。其中夹布丁腈橡胶用得最多。

图 4-45 所示为几种皮革密封圈。

3. 油封

油封(图 4-46)与其他唇形密封不同之处在于具有回弹能力更大的唇部,密

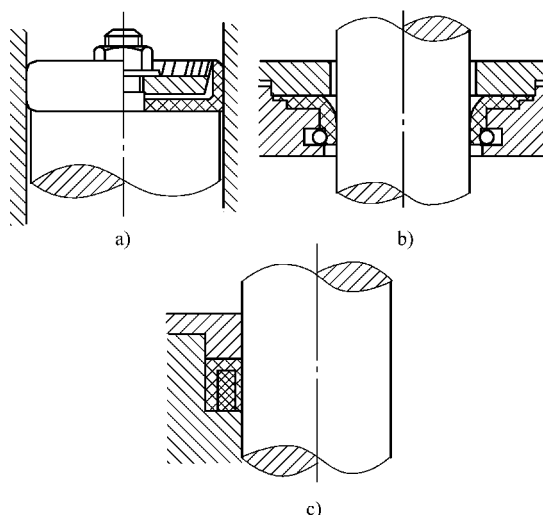


图 4-45 皮革密封圈增强弹力

a) 菊花形板簧 b) 钢丝圈簧 c) 橡胶垫

封接触面宽度很窄（在 $0.25 \sim 0.5\text{mm}$ 之间），接触应力尖锐分布。

油封的断面形状及箍紧弹簧，使唇口对轴具有较好的追随补偿性能。油封能以较小的唇口径向力获得良好的密封效果。油封也是一种自紧式唇状密封。

油封结构简单、尺寸紧凑、成本低廉，对工作环境条件及维护保养的要求不苛刻，适宜大批量生产。油封的工作条件：

工作压力：可达 0.3MPa ，推荐在低于 0.05MPa 下运转。

密封面线速度：低速型 $<4\text{m/s}$

高速型 $4 \sim 15\text{m/s}$

工作温度： $-60 \sim 150^\circ\text{C}$ （与橡胶种类有关）

介质：油、水、弱腐蚀性液体

寿命： $500 \sim 2000\text{h}$

(1) 油封类型（表 4-32） 以骨架式有簧橡胶油封应用最普通。

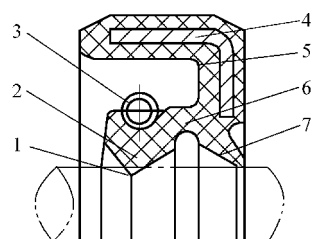
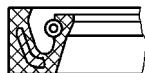


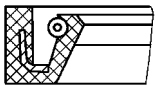
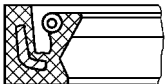
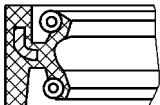
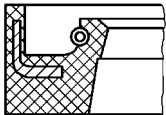
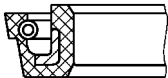
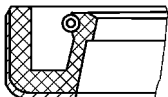
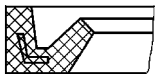
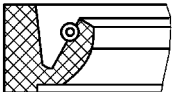
图 4-46 油封结构

1—唇口 2—冠部 3—弹簧
4—骨架 5—底部 6—腰部
7—副唇

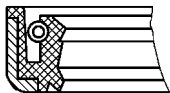
表 4-32 油封类型

类型	简 图	特 点
低速型		带金属骨架和螺旋弹簧的单唇油封，线速度低于 4m/s

(续)

类型	简 图	特点
高速型		同上，但在材质及结构上针对高速条件设计，线速度可达 $12 \sim 15\text{m/s}$ 。可做成双唇型
双唇型		同低速型，但具有防尘防水的副唇。可制成高速型
复式		可视为两个油封的复合结构，用于用密封隔离两种不同介质的场合
耐压型		提高油封结构的承压能力，用于较高压力场合
封孔油封		唇口位于外圈，用于密封旋转孔。可制成双唇型
端面油封		唇口位于轴端面，主要作为防尘密封件
包铁型		骨架外露成金属壳，装配简便，定位准确，同心度好
无簧型		仅有骨架而无弹簧，常用为防尘密封件。尺寸紧凑，油封高度为 $4 \sim 7\text{mm}$
J 型		仅有弹簧而无骨架，常用于大轴径的低速机械上。装填时外圈需用压板固定。用于小轴径上，亦可制成有骨架的

(续)

类型	简 图	特点
往复型		用于低压往复柱塞杆密封, 压力可达 0.7MPa, 速度可达 1m/s

(2) 油封的性能参数和结构参数

1) 唇口的径向力 油封唇口径向力推荐值见表 4-33。

表 4-33 油封唇口径向力推荐值 (单位: 10^{-2}N/mm)

油封型式	低速型	高速型
径向力 g_r	15 ~ 22	9.5 ~ 13

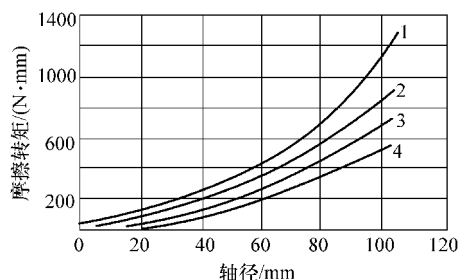


图 4-47 油封摩擦转矩与轴径关系

1—复式 2—双唇型 3—单唇有簧型 4—单唇无簧型

(油温 50℃, 转速 2000r/min)

2) 摩擦转矩 在保证密封性能的前提下, 应适当减小摩擦转矩, 图 4-47 为摩擦转矩与直径的关系。

油封摩擦转矩 T 由式 (4-28) 确定

$$T = 2\pi R^2 \mu g_r \quad (4-28)$$

式中 R ——轴半径 (mm);

g_r ——油封唇口径向力, 见表 4-33;

μ ——摩擦因数, 见表 4-34。

表 4-34 油封的摩擦因数 μ

介质		润滑脂	锭子油	内燃机油	气缸油	一般
μ	最低值	0.3	0.2	0.3	0.4	0.2
	最高值	0.8	0.45	1.0	1.0	0.5

注: 本表系 $\phi 40\text{mm}$ 的油封的摩擦因数。随轴径的增加, μ 值 (表 4-33) 将与轴径的 $\frac{1}{3}$ 次方成比例地增大。

3) 唇口温升 油封唇口与轴摩擦发热使唇口温度上升,使油封寿命降低。唇口温度分布如图 4-48 所示。在与轴接触面处温度最高。

油封唇口的温升可用下式估算:

$$\Delta T = 7.795 K \sqrt{V}$$

式中 V ——轴转速 (m/s);

K ——系数,与油封型式和润滑油种类有关,一般为 1.5 ~ 2.5。

结构参数有:

① 过盈量:指在自由状态(未装弹簧)时,唇口直径与轴径之差。过盈量的选取应根据橡胶材料的弹性恢复速度和轴的几何精度来决定。材料弹性恢复速度大的油封,即使轴的几何精度差一些,过盈量也可取小值。反之,应取大值。过盈量的选取参见表 4-35。

过盈量可适当补偿轴的偏心。过盈量取得过小会降低密封性;过大则加速唇口老化或龟裂。

② 唇口接触宽度:指油封唇口位置至弹簧中心平面的距离;通常取为 0.13 ~ 0.5mm,最佳宽度为 0.25mm 以下,这有利于润滑油膜的稳定。

③ 油封外径。为了保证油封装入座孔后能牢固可靠,油封外径对座孔直径应有适当的过盈量。油封外径按表 4-36 选用。

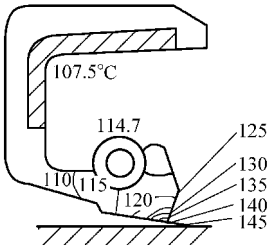


图 4-48 丁腈橡胶油封的温度分布等温线
油封规格 80 × 100 × 10,
油温 110℃,环境温度 50℃
唇口接触宽度 0.4mm,
唇口尖端温度 150℃

表 4-35 油封过盈量 (单位: mm)

轴径 d_0	唇口直径 d		
	低速型	高速型	无簧型
≤30	$(d_0 - 1) \pm 0.3$	—	$(d_0 - 1.5) \pm 0.3$
30 ~ 80	$(d_0 - 1) \pm 0.5$	$d_0 \begin{smallmatrix} 0 \\ -1.0 \end{smallmatrix}$	$(d_0 - 1.5) \pm 0.5$
80 ~ 180	$(d_0 - 1) \begin{smallmatrix} 0 \\ -1.0 \end{smallmatrix}$	$d_0 \begin{smallmatrix} -0.5 \\ -1.5 \end{smallmatrix}$	$(d_0 - 1.5) \begin{smallmatrix} 0 \\ -1.0 \end{smallmatrix}$
> 180	$(d_0 - 1) \begin{smallmatrix} 0 \\ -1.5 \end{smallmatrix}$	$d_0 \begin{smallmatrix} -1.0 \\ -1.5 \end{smallmatrix}$	$(d_0 - 1.5) \begin{smallmatrix} 0 \\ -1.0 \end{smallmatrix}$

表 4-36 油封外径公差值 (单位: mm)

外径	公差	
	金属外圈骨架式	橡胶外圈式
≤30	+0.09 +0.04	+0.25 +0.10
>30 ~ 50	+0.11 +0.05	+0.30 +0.10

(续)

外径	公差	
	金属外圈骨架式	橡胶外圈式
> 50 ~ 80	+0.14	+0.30
	+0.06	+0.10
> 80 ~ 120	+0.17	+0.30
	+0.08	+0.10
> 120 ~ 180	+0.21	+0.35
	+0.11	+0.15
> 180 ~ 300	+0.25	+0.45
	+0.12	+0.15
> 300 ~ 550	+0.30	+0.55
	+0.14	+0.20

④ 油封座和轴的尺寸。同轴度是保证油封正常工作的关键。轴加工的偏心量必须尽量地小, 见图 4-49。表面镀铬的轴具有良好的适应性。表面粗糙度必须控制在适当范围内。旋转轴的表面粗糙度为 $Ra0.16 \sim Ra0.63\mu\text{m}$; 往复杆的表面粗糙度为 $Ra0.04 \sim Ra0.32\mu\text{m}$ 。

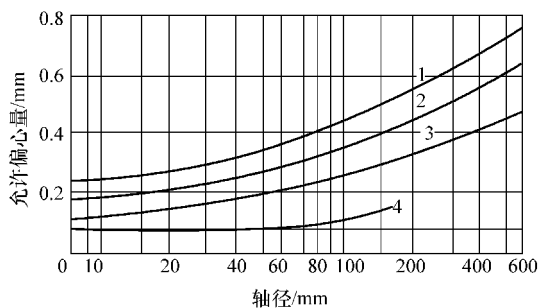


图 4-49 油封允许轴偏心量

1、2、3—有簧型油封用于低速、中速或高速 4—无簧油封用于低速

4. 防尘密封

防尘密封装在轴承或柱塞杆的空气侧, 阻止润滑剂外漏和有害杂质侵入。防尘密封仅用于常压或压力很低的场合。

(1) 防尘填料箱 防尘填料箱与一般填料箱相似, 但装填的填料圈数较少, 不用补充润滑或冷却冲洗等辅助措施, 压盖螺栓的拧紧程度较轻。

(2) 毡封 毡封主要用于环境比较清洁干燥, 以脂类做润滑剂的轴承或柱塞部位。若与其他防尘密封组合应用, 亦可用于稀油润滑剂中 (图 4-50)。

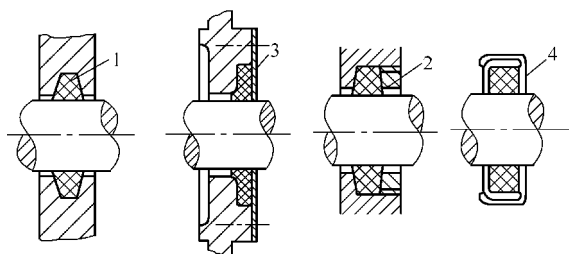


图 4-50 毡封结构

1—毡封圈 2—压盖 3—压板 4—铁壳毡封

毡封可由一种或多种纤维制成, 如用羊毛、再生羊毛等。

毡封工作参数为: 压力低于 0.1MPa , 温度低于 90°C , 速度低于 $4 \sim 5\text{m/s}$ 。

(3) 间隙节流式防尘密封 这种密封见图 4-51。它是利用节流沟槽或间隙达到防尘节流的目的。

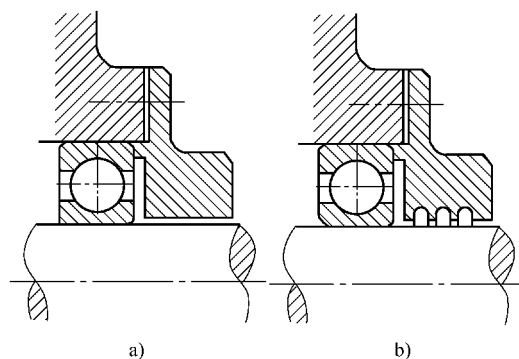


图 4-51 防尘节流环

a) 无节流沟槽 b) 有节流沟槽

4.2.4 机械密封

机械密封也称端面密封, 是目前应用最广泛的一种动密封形式。它用于泵、釜、压缩机、液压传动和其他类似设备的旋转轴上。它能满足多种特殊工艺条件, 可用在高压、真空、高温、深冷、高速、大直径、腐蚀、易燃、易爆、有毒、放射性及稀有贵重介质的设备上。

目前可以达到的工作参数范围:

工作压力: $1.33 \times 10^{-7} \sim 42 \text{ MPa}$

工作温度: $-190 \sim 450^\circ\text{C}$

线速度: $< 150 \text{ m/s}$

寿命: 在正确合理使用条件下可达1年以上

1. 机械密封的工作原理

机械密封主要是由垂直于轴的两块密封环组成, 它的光洁而平直的端面在流体压力和补偿机构的弹力(或磁力)的作用, 以及辅助密封的配合下, 保持紧密贴合并相对滑动而构成防止流体泄漏的装置。

端面间维持一层极薄的液体膜而达到密封目的。这层液体膜具有流体动压力和静压力, 起着润滑和平衡压力的作用。

机械密封一般有四个密封点, 如图4-52中所示A、B、C、D。A点为端面密封点; C点为静环与压盖端面之间的密封点; B点为动环与轴(或轴套)配合面之间的密封点; D点为压盖与泵壳端面之间的密封点。其中B、C、D三点是静密封, 一般不易泄漏; A点为端面动密封, 在设计合理、使用正确的条件下就可获得良好的密封性。

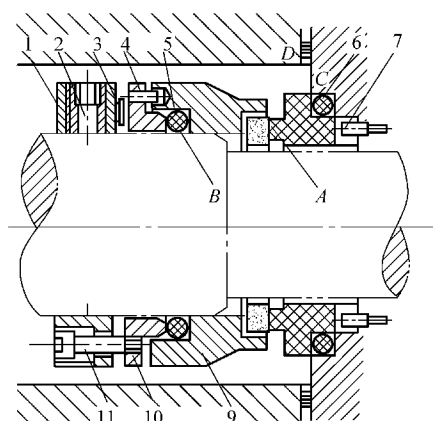


图4-52 机械密封结构

- 1—弹簧座 2—固定螺钉 3—弹簧 4—传动销
5—动环密封圈 6—静环密封圈 7—防转销
8—静环 9—动环 10—推环 11—传动螺钉

2. 机械密封与填料密封的比较

两者比较的优缺点见表4-37。

表4-37 机械密封与填料密封比较

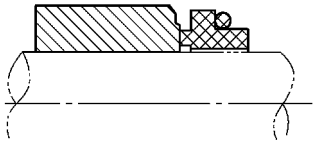
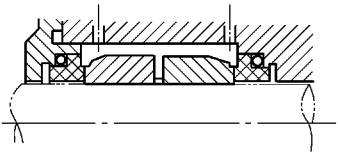
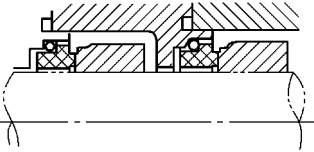
比较项目	机械密封		填料密封	
泄漏量	极微	对一般透平泵: $Q \leq 0.01 \sim 3 \text{ mL/h}$	较大	对一般透平泵: $Q \geq 300 \sim 1200 \text{ mL/h}$
寿命	长	通常可连续使用1~2年以上, 特殊的可连续运行10年以上	短	需定期频繁更换填料, 轴或轴套磨损严重
摩擦损失	小	摩擦面与摩擦因数均小, 动力消耗小	大	摩擦面与摩擦因数均大, 动力消耗大
调整	不需要	能自动调整	需要	如不经常补紧, 泄漏量就会增大
$[pv]$ 值	大	非平衡型: $[pv] < 4.0 \sim 6.0 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$ 平衡型 $< 200 \sim 250 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$	小	一般情况下: $[pv] < 30 \sim 100 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$

(续)

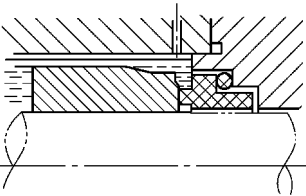
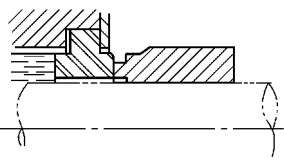
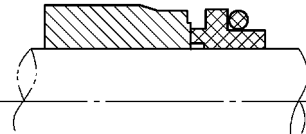
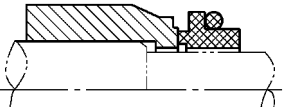
比较项目	机械密封		填料密封	
轴振幅允许值	大	比填料密封好	小	对一般透平泵，双振幅若不控制在 0.07 ~ 0.08mm 以下，则泄漏量会增大
安装长度	短	因无需调整空间，故长度短	长	需有更换填料的空间，故长度较大
价格	大多数总成本低	初始投资高，但运转费用相对较低	大多数总成本高	初始投资虽低，但根据运行工况，运转费用相当高
结构	复杂	零件多、精密度高，故较复杂	简单	零件少、精度低、故较简单
安装	稍困难		容易	
更换方便程度	不方便	因为密封环要从轴端抽出，所以必须将机器部分或全部拆开	简便	不需要将机器拆开，就可方便地更换

3. 机械密封的分类与结构（表 4-38）

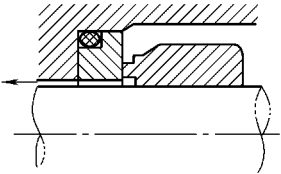
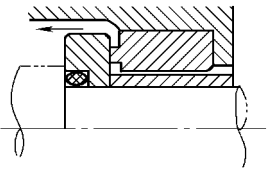
表 4-38 机械密封分类

按技术特征分类		结构型式	适用范围	特 点
摩擦副对数	单端面		应用普遍	仅有一对摩擦副。制造、装拆方便
	双端面		适用于强腐蚀、高温、带悬浮颗粒及纤维介质、气体介质、易燃易爆、易挥发、低黏度的介质。高真空密封	有两对摩擦副，需外部供给封液至密封腔，起“堵封”和润滑作用。封液应选出影响被密封介质的性能、无毒、无腐蚀、润滑性能好的介质。封液压力应比介质工作压力大 0.05 ~ 0.15MPa
	串联多端面		适用于高压密封	两级或更多级串联安装，使每级密封承受的介质压力递减

(续)

按技术特征分类	结构型式	适用范围	特 点
弹簧是否 与介质接触	内装式 	常用于介质无强腐蚀性以及不影响弹簧机能的场合	弹簧置于密封介质之内。受力情况较好,端面比压随介质压力增大而增大,增加了密封的可靠性。一般介质泄漏方向与离心力相反。提高了密封效果
	外装式 	适用于密封零件与弹簧材料不耐腐蚀或粘稠介质以及压力较低的场合	弹簧置于密封介质之外,受力情况较差,当密封压力波动时会出现密封不稳定 一般情况,介质泄漏方向与离心力方向相同,因而增大泄漏。外装式因大部分零件不与介质接触,且暴露在设备外,故便于观察、安装及维修
介质在端面引起的卸载情况	不卸载的称为非平衡型 	一般介质压力$\leq 0.7\text{MPa}$时采用非平衡型。但对于黏度较小,润滑性能差的介质,当压力等于$0.3 \sim 0.5\text{MPa}$时,就采用平衡型	介质压力在密封端面上引起卸载的称平衡型,不卸载的称为非平衡型 $K \geq 1$ K——载荷系数,表示动环的轴向受压面积与端面贴合面积之比。即 $K = \frac{\text{载荷面积}}{\text{接触面积}}$
	卸载的称为平衡型 	用于中、高压条件,一般在0.5MPa以上 平衡型成本高于非平衡型。应尽量使用非平衡型	载荷系数: $0 < K < 1$

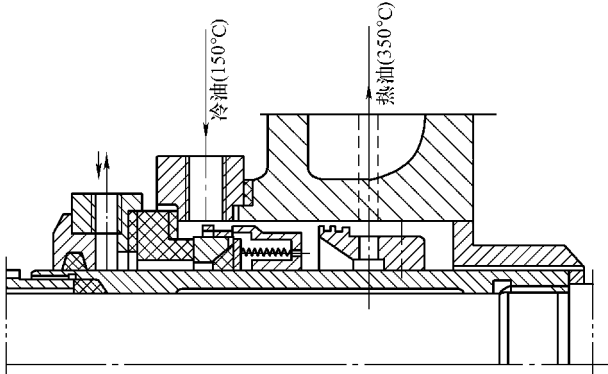
(续)

按技术特征分类	结构型式	适用范围	特 点
介质泄漏方向		多用于一般场合, 尤其适用于含有固体悬浮颗粒介质的场合	泄漏方向与离心力方向相反, 故泄漏量较外流式小
		多用于外装式	泄漏方向与离心力方向相同, 故泄漏量大

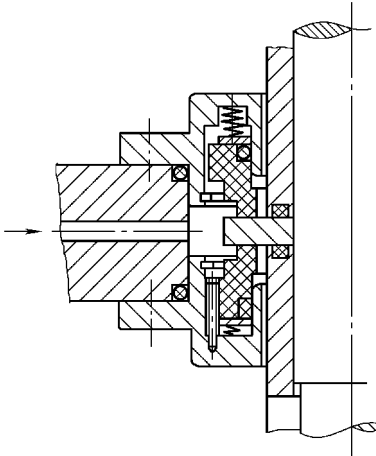
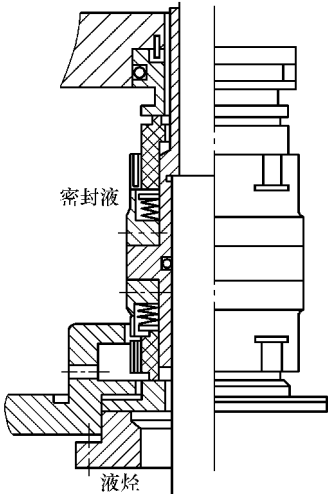
4. 特殊工况下的机械密封

对于高温、高速、低速、高压和耐腐蚀介质的机械密封都具有特殊要求, 举例如表 4-39 所示:

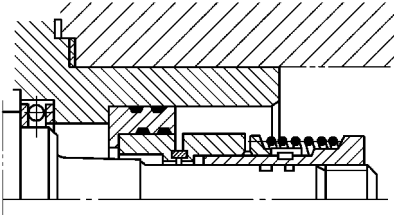
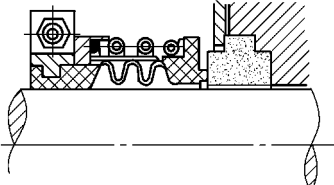
表 4-39 特殊工况下的机械密封

工况	简 图	说 明
高温机械密封 (超过 80°C)	 泵机械密封	高温使摩擦副的润滑条件恶化, 甚至出现液膜汽化 高温是环变形的主要原因 改善措施: 设计时要适当考虑其间隙量和过盈量。采用有效的冷却系统

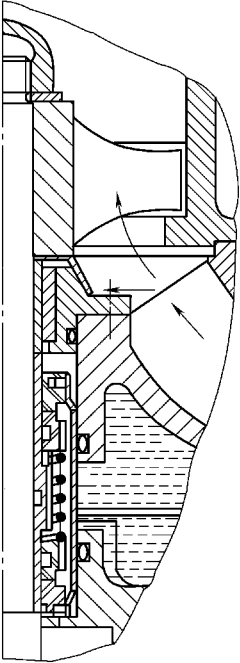
(续)

工况	简 图	说 明
高速机械 密封 (线速度超过 25 ~ 30m/s)	 高速液氨泵机械密封	高速运转使摩擦副热量增加和磨损量加大 可以采用动压效应和静压效应的机械密封 加强冷却和润滑 选用 $[p_c v]$ 值高的材料做摩擦副, 并注意旋转件的动力平衡
低温机械 密封	 密封液 液氢 液氢泵机械密封	在低温下材料易产生冷脆现象 选材要注意它的强度、韧性、膨胀系数、导热系数等因素 低温条件下密封面的液膜汽化显著地改变了其润滑性能, 因此要注意保温

(续)

工况	简 图	说 明
高压机械 密封 (压力超过 4~5MPa)		高压运转可能使石墨环破裂或出现较大变形, 端面负载增大, 端面液膜可能遭到破坏, 加速磨损 采取平衡型机械密封, 或全膜(受控膜)机械密封。采取辅助措施, 降低密封腔压力
耐腐蚀介质机械 密封		密封零件受化学腐蚀和电化学腐蚀。在密封端面上, 由于摩擦使腐蚀生成物被破坏。周期性地产生这种现象, 产生磨蚀。磨蚀速度约为无摩擦作用表面磨蚀率的10~15倍 注意选用耐腐蚀材料制造摩擦副, 如用陶瓷与填充聚四氟乙烯的组对 采用外装式结构, 或双端面密封

(续)

工况	简 图	说 明
介质含颗粒的机械密封	 潜水泵机械密封	介质中含有粉尘、晶粒、纤维等固态粒子进入摩擦副端面，加剧磨损和泄漏 采取积极地冲洗和净化装置，加大冲洗量，防止粒子进入摩擦面和沉积。对自冲洗液应采用旋液分离器或过滤器净化。对降温结晶性介质，可以适当提高操作温度，阻止晶粒生成 左图为一潜水泵机械密封。工作介质为含砂河水，井水等。采用双端面机械密封。摩擦副材料组对为 Si_3N_4 对 Si_3N_4 或氧化铝陶瓷对金属氧化铝陶瓷。采用甩砂环作外围辅助密封

4.3 钢丝绳设计

4.3.1 概述

钢丝绳在电梯、缆索起重机等机械设备中被广泛应用。钢丝绳承受变化的弯曲

应力和拉应力, 它的损伤和失效直接影响机械的安全和寿命, 而更换钢丝绳需要很多的资金和时间。美国的一个机构对于实验室和现场的钢丝绳进行了研究, 发现其中 10% 的钢丝绳强度损耗超过 15%, 处于危险状态, 另有 2% 的钢丝绳强度损耗超过 30%, 处于极度危险状态。而大约 70% 的钢丝绳只有很少的强度损耗甚至没有损耗。日本对被强制更换的钢丝绳进行了统计, 其中有一半以上钢丝绳的强度能够达到新钢丝绳的 90% 以上, 还有不少超过 100%。由于对钢丝绳的损伤情况检测尚不够完善, 为了确保安全, 多采用定期强迫更换, 或用人工检查的方法, 既不能保证钢丝绳的使用安全, 又会造成了巨大的浪费。国内外对此正进行大量的研究。

4.3.2 钢丝绳的术语、标记和分类 (GB/T8706—2006)

(1) 股 由一定形状和尺寸的钢丝绕一个中心沿相同方向捻制成一层或多层的螺旋状结构, 只有一层钢丝捻成的称为单捻股。而一般钢丝绳多为由两层或两层以上的钢丝捻成的股, 股中所有钢丝具有相同的捻距 h (图 4-53a), 钢丝间为线接触。

(2) 捻股结构

1) 西鲁式。两层具有相同钢丝的平行捻股结构, 如图 4-54a 所示, 代号为 S。西鲁式钢丝绳外面的钢丝较粗, 耐磨性好, 恰好符合电梯钢丝绳的要求, 因此电梯钢丝绳采用西鲁式结构。

2) 瓦林吞式。外层包括粗细两种交替排列的钢丝, 外层钢丝数是内层钢丝数的 2 倍, 平行捻股结构, 如图 4-54b 所示, 代号为 W。

3) 填充式。外层钢丝数是内层钢丝数的 2 倍, 在两层钢丝间的间隙中有填充钢丝, 平行捻股结构, 如图 4-54c 所示, 代号为 Fi。

4) 组合式。由西鲁式和瓦林吞式组合而成, 平行捻股结构, 如图 4-54d 所示。

5) 压实股。用模拔、轧制或锻打等方法, 使钢丝发生变形, 如图 4-55 所示。

(3) 芯 按芯的材料分, 它的类型有纤维芯 (FC) 和钢芯 (WC)。纤维芯用浸透润滑油的麻绳、棉纱绳、合成纤维绳等制成, 吸收润滑油较多, 柔软, 但是易燃, 不可用于高温场合。钢芯由软钢丝作芯, 耐高温可以承受较大的压力, 只用于多层缠绕或高温的场合。用石棉绳作芯的钢丝数可以用于高温。

(4) 钢丝束的捻向 图 4-53 的股为右捻, 用 Z 表示。

1) 右交互捻 (ZS) 图 4-56a, 绳为右捻 (S), 股为左捻 (S), 称为右交互捻。

2) 左交互捻 (SZ) 图 4-56b, 绳为左捻 (S), 股为右捻 (Z), 称为左交互捻。

3) 右同向捻 (ZZ) 图 4-56c, 绳为右捻 (S), 股为右捻 (Z), 称为右同向

捻。

4) 左同向捻 (SS) 图 4-56d, 绳为左捻 (S), 股为左捻 (S), 称为左同向捻。

同向捻钢丝绳的耐磨性和挠性比交互捻钢丝绳好, 但是有扭转趋势, 容易打结而且容易松散, 因此常用于两端固定的场合。交互捻钢丝绳由于绳与股的捻向相反, 互相抵消, 不易松散, 常用于悬挂式的设备。电梯是悬挂式使用的钢丝绳, 因此必须使用交互捻钢丝绳, 多采用右交互捻。

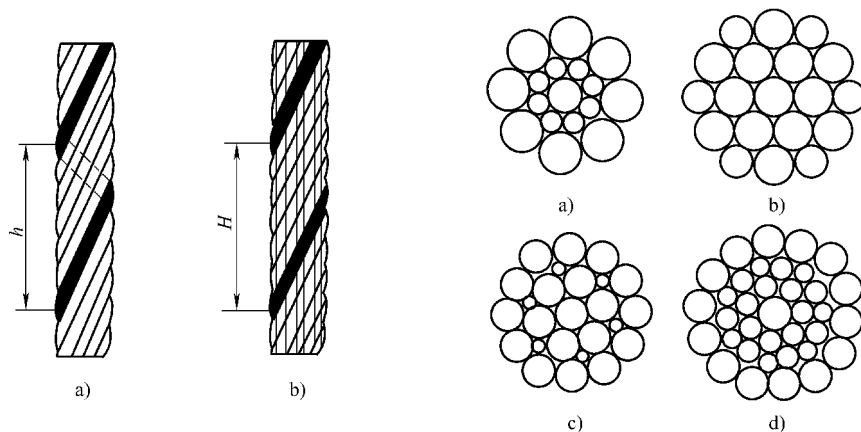


图 4-54 捻股结构

图 4-53 股和钢丝绳的捻距

a) 股的捻距 b) 钢丝绳的捻距

a) 西鲁式结构 (S) b) 瓦林吞式结构 (W)
c) 填充式结构 (Fi) d) 瓦林吞式和西鲁式组合平行捻

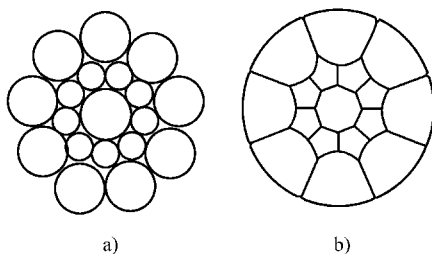


图 4-55 压实股 (K)

a) 压实前的股 b) 压实后的股

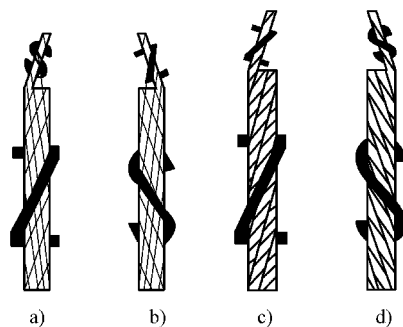


图 4-56 股的捻向

a) 右交互捻 (ZS) b) 左交互捻 (SZ)
c) 右同向捻 (ZZ) d) 左同向捻 (SS)

(5) 常用的钢丝绳标准

GB/T 20118—2006 一般用途钢丝绳。

- GB/T 8918—2006 重要用途钢丝绳。
- GB/T 8903—2005 电梯用钢丝绳。
- YB/T 5295—2006 密封钢丝绳。

4.3.3 钢丝绳的工作状态和失效分析

1) 钢丝绳缠绕在滑轮和卷筒上面, 钢丝绳产生弯曲应力, 并与 D/d 成反比, 其中 D 为滑轮或卷筒直径, d 为钢丝绳直径。由于钢丝绳的运动, 其中的弯曲应力是变应力, 使钢丝绳疲劳破坏。为了钢丝绳有较长的寿命, 起重机设计规范对 D/d 有规定。作为推荐值: 一般起重设备, 要求 $D/d \geq 30$, 电梯要求 $D/d \geq 40$ 。

2) 由于钢丝绳与滑轮接触和各钢丝之间的滑动和挤压, 钢丝绳的钢丝产生磨损。尤其是表层的钢丝磨损严重。

3) 由于弯曲疲劳应力的作用和表面钢丝的磨损, 钢丝产生断丝。

4) 对于点接触的钢丝绳, 钢丝间的接触应力很大, 其寿命较短, 因此尽量不采用。

5) 当钢丝绳一个捻距内的断丝数达到该断面全部钢丝数的 10% 时, 如果继续使用, 则钢丝绳的断丝数将迅速增加, 短期内将出现断股, 以至整个钢丝绳断裂。所以控制断丝数, 及时更换钢丝绳, 是保证其安全运行的重要手段。而实时监测钢丝绳的断丝数, 是保证钢丝绳安全运行和合理寿命的重要问题。

表 4-40 是上海市劳动保护研究所用 6×24 型号的钢丝绳做的断丝实验, 说明断丝位置对其破断拉力的影响。

表 4-40 断丝位置对其破断拉力的影响

断丝根数 (占总数百分比)	断丝位置	破断拉力降低 (%)
14 (约 10%)	集中在一股, 一个面上	20.0
	在钢丝绳的同一个截面上, 分散在各股	9.3
	分散在三个捻距内	2.0
30 (约 20%)	集中在一股, 一个面上	42.2
	在钢丝绳的同一个截面上, 分散在各股	21.6
	分散在三个捻距内	3.7
42 (约 30%)	集中在一股, 一个面上	43.1
	在钢丝绳的同一个截面上, 分散在各股	27.5
	分散在三个捻距内	6.0

6) 腐蚀性的环境会使钢丝绳的寿命显著降低, 横断面减小, 磨损加剧。特别是麻质填料解体, 或水和腐蚀性介质进入到钢丝绳内部引起的腐蚀, 对钢丝绳的寿命影响更大。

4.3.4 钢丝绳的报废标准

1. 起重机钢丝绳的报废标准

按 GB/T5972—2009《起重机 钢丝绳 保养、维护、安装、检验和报废》的规定，起重机的总体设计不允许钢丝绳有无限长的寿命。钢丝绳的报废标准决定钢丝绳的使用安全程度，其报废标准包括以下项目判定。所有的检验均应考虑以下各因素和其中的主要因素。但钢丝绳的损坏往往是多种因素综合积累造成的。主管人员应该判断原因并决定钢丝绳是报废还是继续使用。

对于钢丝绳的损坏，检验人员首先应该弄清其是否因机构的缺陷所致，如果是这样，应在更换钢丝绳之前消除该缺陷。

(1) 断丝的性质和数量 对于6股和8股的钢丝绳，断丝主要发生在外表面，而对于多层绳股的钢丝绳（典型的多股结构）断丝大多发生在内部，因而是“不可见的”断裂。表4-41是对各种情况综合考虑以后规定的断丝控制标准，它适用于各种结构的起重机用钢丝绳。起重机工作级别划分见表4-42。

表 4-41 钢制滑轮上使用的单层股钢丝绳和平行捻密实钢丝绳中达到或超过报废标准的可见断丝数

钢丝绳 类别号 RCN	外层股中 承载钢丝 的总数 ^① n	可见断丝的数量 ^②					
		在钢制滑轮和/或单层缠绕在卷筒上工作的钢丝绳区段（钢丝断裂随机分布）				多层缠绕在卷筒上工作的钢丝绳区段 ^③	
		工作级别 M1 ~ M4 或未知级别 ^④				所有工作级别	
		交互捻		同向捻		交互捻和同向捻	
		长度范围 大于 $6d$ ^⑤	长度范围 大于 $30d$ ^⑤	长度范围 大于 $6d$ ^⑤	长度范围 大于 $30d$ ^⑤	长度范围 大于 $6d$ ^⑤	长度范围 大于 $30d$ ^⑤
01	$n \leq 50$	2	4	1	2	4	8
02	$51 \leq n \leq 75$	3	6	2	3	6	12
03	$76 \leq n \leq 100$	4	8	2	4	8	16
04	$101 \leq n \leq 120$	5	10	2	5	10	20
05	$121 \leq n \leq 140$	6	11	3	6	12	22
06	$141 \leq n \leq 160$	6	13	3	6	12	26
07	$161 \leq n \leq 180$	7	14	4	7	14	28
08	$181 \leq n \leq 200$	8	16	4	8	16	32
09	$201 \leq n \leq 220$	9	18	4	9	18	36
10	$221 \leq n \leq 240$	10	19	5	10	20	38

(续)

钢丝绳 类别号 RCN	外层股中 承载钢丝 的总数 ^① <i>n</i>	可见断丝的数量 ^②					
		在钢制滑轮和/或单层缠绕在卷筒上工作的钢丝绳区段（钢丝断裂随机分布）				多层缠绕在卷筒上工作的钢丝绳区段 ^③	
		工作级别 M1 ~ M4 或未知级别 ^④				所有工作级别	
		交互捻		同向捻		交互捻和同向捻	
		长度范围 大于 6 <i>d</i> ^⑤	长度范围 大于 30 <i>d</i> ^⑤	长度范围 大于 6 <i>d</i> ^⑤	长度范围 大于 30 <i>d</i> ^⑤	长度范围 大于 6 <i>d</i> ^⑤	长度范围 大于 30 <i>d</i> ^⑤
11	241 ≤ <i>n</i> ≤ 260	10	21	5	10	20	42
12	261 ≤ <i>n</i> ≤ 280	11	22	6	11	22	44
13	281 ≤ <i>n</i> ≤ 300	12	24	6	12	24	48
	<i>n</i> > 300	0.04 <i>n</i>	0.08 <i>n</i>	0.02 <i>n</i>	0.04 <i>n</i>	0.08 <i>n</i>	0.16 <i>n</i>

- 注：1. 具有外层股且每股钢丝数 ≤ 19 根的西鲁式钢丝绳（例如 6 × 19 西鲁式），在表中被分列于两行，上面一行构成为正常放置的外层股承载钢丝的数目。
2. 在多层缠绕卷筒区段上述数值也可适用于在滑轮工作的钢丝绳的其他区段，该滑轮是用合成材料制成的或具有合成材料轮衬。但不适用于在专门用合成材料制成的或以由合成材料轮衬组合的单层卷绕的滑轮工作的钢丝绳。
- ① 填充钢丝未被视为承载钢丝，因而不包含在 *n* 值中。
- ② 一根断丝会有两个断头（按一根钢丝计数）。
- ③ 这些数值适用于在跃层区和由于缠入角影响重叠层之间产生干涉而损坏的区段（且并非仅在滑轮工作和不缠绕在卷筒上的钢丝绳的那些区段）。
- ④ 可将以上所列断丝数的两倍数值用于已知其工作级别为 M5 ~ M8 的机构。参见 GB/T 24811.1—2009。
- ⑤ *d*—钢丝绳公称直径。

表 4-42 起重机工作级别的划分（GB/T 3811—2008）

载荷 状态	名义 载荷 系数	说明	利用等级									
			T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
			总设计寿命/ <i>h</i>									
			200	400	800	1600	3200	6300	12500	25000	50000	100000
L1-轻	0.125	起升轻微 载荷			M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
L2-中	0.25	有时起升 额定载荷		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	
L3-重	0.5	经常起升 额定载荷	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8		
L4-特重	1.0	频繁起升 额定载荷	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8			

(2) 绳端断丝 当绳端或其附近出现断丝时,即使数量很少也表明该部位应力很大,可能是由于绳端安装不正确造成的,应查明损坏原因。如果绳长允许,应将断丝的部位切去重新安装。

(3) 断丝的局部聚集 如果断丝紧靠一起形成聚集,则钢丝绳应报废。如这种断丝聚集在小于 $6d$ 的绳长范围内,或者集中在任一支绳股里,即使断丝数比表4-41中的数值少,钢丝绳也应报废。

(4) 断丝的增加率 在许多使用场合,疲劳是钢丝绳损坏的主要原因,断丝是在使用一段时间以后才开始出现,当断丝数逐渐增加,其时间间隔越来越短时,为了判定断丝的增加率,应仔细检验并记录断丝增加情况,利用这一“规律”可以用来确定钢丝绳未来报废的日期。

(5) 绳股断裂 如果出现整根绳股的断裂,钢丝绳应予以报废。

(6) 由于绳芯损坏而引起的绳径减小 其具体原因可能有:内部磨损和压痕,由钢丝绳中各绳股和钢丝之间的摩擦引起的内部摩擦(尤其是钢丝绳弯曲时引起),纤维绳芯的损坏,钢丝芯的断裂,多层股结构中内部股的断裂。如果这些因素引起钢丝绳实测直径(互相垂直的两个直径的平均值)

(7) 弹性降低 钢丝绳弹性降低通常伴随以下现象:绳径减小,钢丝绳捻距增大,钢丝之间和绳股之间缺少空隙,绳股凹处出现微细的褐色粉末,虽未断丝,但是钢丝绳明显不易弯曲和直径减小,比起单纯由于钢丝磨损引起的直径减小严重得多。这种情况会导致在动载荷作用下钢丝绳突然断裂,故应立即报废。

(8) 外部磨损 钢丝绳外部的磨损,润滑不足或不正确的润滑以及存在灰尘和砂粒都会加剧磨损。磨损使钢丝绳的断面积减小而强度降低,当钢丝绳直径相对于公称直径减小7%或更多时,即使未发现断丝,该钢丝绳也应报废。

(9) 外部及内部腐蚀 腐蚀发生在海洋环境或有污染的大气环境。外部钢丝的腐蚀可以用肉眼观察,内部腐蚀可以由经过滑轮的钢丝绳直径变小发现,而对于静止段的钢丝绳则常由于外层绳股出现锈蚀而引起钢丝绳直径的增加。如果有任何内部腐蚀的迹象,则应对钢丝绳进行内部检验(检验方法见GB/T 5972—2009附录C)。对于严重的内部腐蚀,钢丝绳应立即报废。

(10) 变形 钢丝绳失去正常形状或产生可见的畸形称为“变形”。它导致钢丝绳内部应力分布不均匀。变形后的形状有波浪形、笼状畸变、绳股挤出、绳径局部增大、绳径局部减小、部分被压扁、扭结、弯折等严重变形的钢丝绳应立即报废。

(11) 由于受热或电弧的作用而引起的损坏 钢丝绳经受特殊的热力作用其外表出现颜色变化时应报废。

2. 电梯钢丝绳的报废标准

按GB/T18775—2009《电梯、自动扶梯和自动人行道维修规范》的规定,悬挂绳应无机械损伤,当钢丝绳有下列情况之一者应用同样规格的钢丝绳更换,更换

时，整台电梯的悬挂钢丝绳应同时更换。

- 1) 钢丝绳出现断股。
- 2) 钢丝绳严重磨损或锈蚀，造成实际直径为公称直径 90% 及其以下时。
- 3) 钢丝绳的可见断丝超过表 4-43 的规定数值。

表 4-43 电梯悬挂钢丝绳中断丝根数的控制标准

钢丝绳类型	测量长度范围	
	6 <i>d</i>	30 <i>d</i>
6 × 19	6	12
8 × 19	10	19

注：*d*—钢丝绳直径。

3. 索道用钢丝绳的报废标准

按 GB/T9075—2008 《索道用钢丝绳检验和报废规范》的规定，判定钢丝绳的报废或局部更换应注意：断面的缩小值，断丝的局部聚集，绳股断裂，断丝的增加率，如果钢丝绳的损坏是由于鞍座、绳轮的缺陷引起的，在换钢丝绳之前应消除这些缺陷，如果判定钢丝绳的断面缩小值接近报废标准则应报废，出现外部事件（雷击、脱索等）之后，是否报废应由使用单位报安检机构进行检测，依据检测意见做出决定。

- 1) 钢丝绳金属断面缩小。允许的断面缩小最大值见表 4-44。

表 4-44 索道用钢丝绳允许的断面缩小最大值（GB/T 9075—2008）

钢丝绳结构	允许的金属断面缩小最大值		相关长度 <i>L</i>
	客运索道	货运索道	
密封钢丝绳	10%	15%	200 <i>d</i>
	8%	10%	30 <i>d</i>
	5%	7%	6 <i>d</i>
股捻钢丝绳	20%	25%	200 <i>d</i>
	10%	15%	30 <i>d</i>
	6%	8%	6 <i>d</i>

注：*d* 钢丝绳直径。

- 2) 断丝数。最大允许的目视断丝数见表 4-45。下列钢丝绳视为例外：

脱挂式拖牵索道同向捻 6 × 7 的拖牵钢丝绳，在相关长度 6 × *d* 范围内最大允许外部断丝数为 3。

对于张紧索，由可见的外部断丝造成的最大金属断面缩小值应为表 4-45 所列值的 50%。

对于货运架空索道的张紧索，由可见的外部断丝造成的最大金属断面缩小值应为表 4-45 所列值的 120%。

张紧索使用 6 年或工作 18000h 后（以先到为准）应予以报废，带有附加张紧

装置的张紧索 8 年后报废。

对于合成纤维的拖牵索和合成纤维的拉绳，任何明显的损坏或变质（例如直径、形状的改变）对进一步安全使用有影响时，都可考虑报废。

表 4-45 索道用钢丝绳允许的断丝数（GB/T 9075—2008）

钢丝绳结构	相关长度			
	交互捻		同向捻	
	6d	30d	6d	30d
6×7	2	4	2	3
6×19S	3	6	3	4
6×25Fi, 6×25SW	5	10	4	6
6×31SW, 6×36SW, 6×41SW	7	14	5	7

注：d 钢丝绳直径。

3) 内部及外部磨损。磨损钢丝绳的断面缩小、强度降低。断面缩小允许值见表 4-44。

4) 断丝的局部聚集。客运架空索道密封钢丝绳（承载索）相邻异型钢丝在 18d 长度内，如有两处断裂，其断面缩小值虽未超出表 4-44 中的数值也应报废。

5) 索道的运动索（牵引索、平衡索、运载索、拖牵索）在一绳股中如在一个捻距的长度内，外部断丝数大于外层钢丝数的 50%，应局部更换或报废。

6) 索道的运动索张紧时，测量编接区直径小于钢丝绳公称直径的 90%，应予以报废。

7) 绳股断裂。若整根绳股断裂，应局部更换或报废。

8) 钢丝绳的固定末端。钢丝绳固定末端应符合 GB/T 12352—2007 的有关规定。对于合金或树脂浇注的套筒，在接近套筒的钢丝绳段任何断丝或明显的腐蚀都应考虑报废。此外，不考虑钢丝绳状况，固定末端套筒的报废标准见表 4-46。

表 4-46 架空索道固定末端套筒的报废标准（GB/T 9075—2008）

钢丝绳的型式	固定末端套筒型式	最大使用年限/年
牵引索	合金浇注套筒	4
	夹紧套筒	3
缆车牵引索	树脂浇注套筒	2
张紧索	没有附加张紧装置的固定末端套筒	6
	有附加张紧装置的固定末端套筒	8
承载索	没有附加张紧装置的固定末端套筒	6
	有附加张紧装置的固定末端套筒	8

如果可用无损探伤仪检查树脂浇注套筒，它们的使用年限可由 2 年增加到 4 年
附加张紧装置应是对称的并可承受 3 倍的静张紧力

4.3.5 有关钢丝绳寿命的结构设计问题

设计有钢丝绳的机构时应该注意以下问题:

1) 滑轮直径 D 与钢丝绳直径 d 之比应大于一定值, 以避免产生过大的弯曲应力, 使钢丝绳因弯曲疲劳而破坏。

2) 避免钢丝绳经过相邻的滑轮时受反向的弯曲应力。图 3-3 中滑轮 II 和滑轮 III 就是使钢丝绳反向弯曲的实例, 也正是钢丝绳断裂的部位。

3) 两相邻滑轮间的中心距 a 点大于钢丝绳直径 d 的 50 倍。以保证有足够的时间和距离使钢丝绳在经过前一个滑轮被扰动的结构充分恢复平直。

4) 控制钢丝绳进出滑轮时的偏角 $\beta \leq 0.5^\circ$ (图 4-57), 以减小钢丝绳的磨损。图 4-58 给出偏角 β 对钢丝绳疲劳寿命的影响。

5) 控制钢丝绳绕过滑轮的包角 α , α 不宜在 $10^\circ \sim 35^\circ$ 范围以内 (图 4-59)。

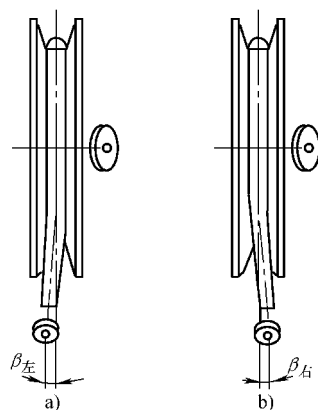


图 4-57 控制钢丝绳进出滑轮时的偏角 $\beta \leq 0.5^\circ$

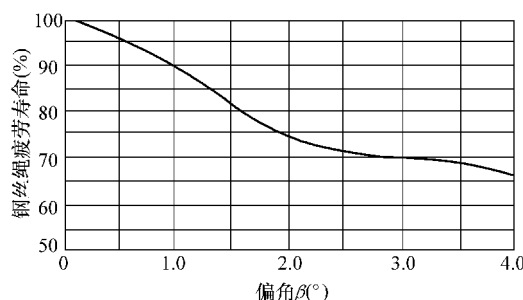


图 4-58 偏角 β 对钢丝绳疲劳寿命的影响

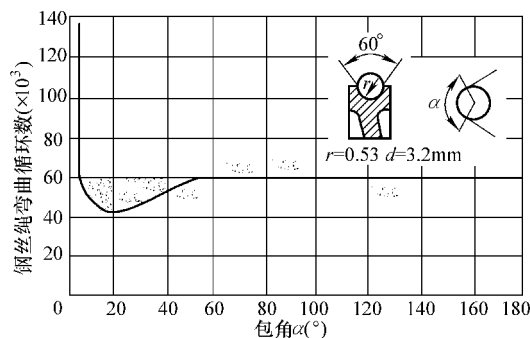


图 4-59 包角 α 对钢丝绳疲劳寿命的影响

第 5 章 机械制造业的节能减排

机械设计师应该考虑到，他所设计的产品在生产过程中的各个步骤保持清洁生产，选择设计方案和确定机械结构时，选择有利于节能减排的方案。下面将介绍机械制造过程中的节能减排问题。

由表 1-4 和表 1-5 可以看出，冶金（钢铁、有色）、火力发电是污染的主要行业，而机械制造业的污染较小。但是图 1-1 表明：机电产品在制造过程中，包括毛坯生产、零件加工、零件处理、装配调试等环节，都会有污染物排放，设计者必须予以充分的重视。下面将对铸造、焊接、电镀、锻压、热处理等工艺产生的污染和防治，分别介绍。

5.1 污染排放标准

在我国现有的国家大气污染物排放标准体系中，按照综合性排放标准与行业性排放标准不交叉执行的原则，各行业执行的标准有：

锅炉行业执行 GB/T 13271—2001 《锅炉大气污染物排放标准》。

工业炉窑行业执行 GB/T 9078—1996 《工业炉窑大气污染物排放标准》。

火电厂执行 GB/T 13223—2003 《火电厂大气污染物排放标准》。

炼焦炉行业执行 GB/T 16171—1996 《炼焦炉大气污染物排放标准》。

水泥厂行业执行 GB/T 4915—2004 《水泥工业大气污染物排放标准》。

恶臭物质排放执行 GB/T 14554—1993 《恶臭污染物排放标准》。

汽车排放执行 GB/T 14761.1 ~ 14761.7—1993 《汽车大气污染物排放标准》。

摩托车排放执行 GB/T 14621—2002 《摩托车和轻便摩托车排气污染排放限值及测量方法（怠速法）》。

其他大气污染物排放均执行本标准。

表 5-1 给出现有污染源大气污染物排放极限值。

表 5-2 给出新污染源大气污染物排放极限值。

表中最高允许排放浓度指：处理设施后排气筒污染物任何 1h 浓度平均值不得超过的限值，或指无处理设施排气筒中污染物任何 1h 浓度平均值不得超过的限值。

最高允许排放速率指：一定高度的排气筒任何 1h 排气筒污染物的质量不得超过的限值。

排气筒高度除须遵守表中所列排放速度标准值外，还应高出周围 200m 半径范

围的建筑物 5m 以上, 不能达到该标准要求的排气筒, 应按其高度对应的表列排放速率的标准值的 50% 执行。

新污染源的排气筒一般不低于 15m, 若必须低于 15m 时, 按表 5-2 的外推计算结果再降低 50% 执行。

表 5-1 现有污染源大气污染物排放极限值

序号	污染物	最高允许排放浓度 /(mg/m ³)	最高允许排放速率/(kg/h)				无组织排放监控浓度限值	
			排气筒 高度 /m	一级	二级	三级	监控点	浓度 /(mg/m ³)
1	二氧化 硫	1200 (硫、二氧化硫、硫酸和其 他含硫化物生产)	15	1.6	3.0	4.1	无组织排 放源上风向 设参照点, 下风向设监 控点 ^①	0.50 (监控点与参 照点浓度差 值)
			20	2.6	5.1	7.7		
			30	8.8	17	26		
			40	15	30	45		
			50	23	45	69		
		700 (硫、二氧化硫、硫酸和其 他含硫化物使用)	60	33	64	98		
			70	47	91	140		
			80	63	120	190		
			90	82	160	240		
			100	100	200	310		
2	氮氧 化物	1700 (硝酸、氮肥 和火炸药生产)	15	0.47	0.91	1.4	无组织排 放源上风向 设参照点, 下风向设监 控点 ^①	0.15 (监控点与参 照点浓度差 值)
			20	0.77	1.5	2.3		
			30	2.6	5.1	7.7		
			40	4.6	8.9	14		
			50	7.0	14	21		
		420 (硝酸使用和其他)	60	9.9	19	29		
			70	14	27	41		
			80	19	37	56		
			90	24	47	72		
			100	31	61	92		
3	颗 粒 物	22 (炭黑尘、染料尘)	15	禁排	0.60	0.87	周界外浓 度最高点 ^②	肉眼不可见
			20		1.0	1.5		
			30		4.0	5.9		
			40		6.8	10		
		80 ^③ (玻璃棉尘、石英粉尘、 矿渣棉尘)	15	禁排	2.2	3.1	无组织排 放源上风向 设参照点, 下风向设监 控点 ^①	2.0 (监控点与参 照点浓度差 值)
			20		3.7	5.3		
			30		14	21		
			40		25	37		

(续)

序号	污染物	最高允许排放浓度 (mg/m^3)	最高允许排放速率/(kg/h)				无组织排放监控浓度限值	
			排气筒 高度 /m	一级	二级	三级	监控点	浓度 (mg/m^3)
3	颗粒物	150 (其他)	15 20 30 40 50 60	2.1 3.5 14 24 36 51	4.1 6.9 27 46 70 100	5.9 10 40 69 110 150	无组织排放源上风向设参照点,下风向设监控点	5.0 (监控点与参照点浓度差值)
4	氯化氢	150	15 20 30 40 50 60 70 80	禁排	0.30 0.51 1.7 3.0 4.5 6.4 9.1 12	0.46 0.77 2.6 4.5 6.9 9.8 14 19	周界外浓度最高点	0.25
5	铬酸雾	0.080	15 20 30 40 50 60	禁排	0.009 0.015 0.051 0.089 0.14 0.19	0.014 0.023 0.078 0.13 0.21 0.29		0.0075
6	硫酸雾	1000 (火炸药厂)	15 20 30 40	禁排	1.8 3.1 10 18	2.8 4.6 16 27		1.5
		70 (其他)	50 60 70 80		27 39 55 74	41 59 83 110		
7	氟化物	100 (普钙工业)	15 20 30 40	禁排	0.12 0.20 0.69 1.2	0.18 0.31 1.0 1.8	无组织排放源上风向设参照点,下风向设监控点 ^①	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (监控点与参照点浓度差值)
		11 (其他)	50 60 70 80		1.8 2.6 3.6 4.9	2.7 3.9 5.5 7.5		

(续)

序号	污染物	最高允许排放浓度 (mg/m^3)	最高允许排放速率/(kg/h)				无组织排放监控浓度限值	
			排气筒 高度 /m	一级	二级	三级	监控点	浓度 (mg/m^3)
8	氯 ^④ 气	85	25 30 40 50 60 70 80	禁排	0.60 1.0 3.4 5.9 9.1 13 18	0.90 1.5 5.2 9.0 14 20 28	周界外浓 度最高点 ^②	0.50
9	铅及其化合物	0.90	15 20 30 40 50 60 70 80 90 100	禁排	0.005 0.007 0.031 0.055 0.085 0.12 0.17 0.23 0.31 0.39	0.007 0.011 0.048 0.083 0.13 0.18 0.26 0.35 0.47 0.60		0.0075
10	汞及其化合物	0.015	15 20 30 40 50 60	禁排	1.8×10^{-3} 3.1×10^{-3} 10×10^{-3} 18×10^{-3} 28×10^{-3} 39×10^{-3}	2.8×10^{-3} 4.6×10^{-3} 16×10^{-3} 27×10^{-3} 41×10^{-3} 59×10^{-3}		0.0015
11	镉及其化合物	1.0	15 20 30 40 50 60 70 80	禁排	0.060 0.10 0.34 0.59 0.91 1.3 1.8 2.5	0.090 0.15 0.52 0.90 1.4 2.0 2.8 3.7		0.050
12	铍及其化合物	0.015	15 20 30 40 50 60 70 80	禁排	1.3×10^{-3} 2.2×10^{-3} 7.3×10^{-3} 13×10^{-3} 19×10^{-3} 27×10^{-3} 39×10^{-3} 52×10^{-3}	2.0×10^{-3} 3.3×10^{-3} 11×10^{-3} 19×10^{-3} 29×10^{-3} 41×10^{-3} 58×10^{-3} 79×10^{-3}		0.0010

(续)

序号	污染物	最高允许排放浓度 /(mg/m ³)	最高允许排放速率/(kg/h)				无组织排放监控浓度限值	
			排气筒 高度 /m	一级	二级	三级	监控点	浓度 /(mg/m ³)
13	镍及其化合物	5.0	15	禁排	0.18	0.28	周界外浓度最高度 ^②	0.050
			20		0.31	0.46		
			30		1.0	1.6		
			40		1.8	2.7		
			50		2.7	4.1		
			60		3.9	5.9		
			70		5.5	8.2		
			80		7.4	11		
14	锡及其化合物	10	15	禁排	0.36	0.55		0.30
			20		0.61	0.93		
			30		2.1	3.1		
			40		3.5	5.4		
			50		5.4	8.2		
			60		7.7	12		
			70		11	17		
			80		15	22		
15	苯	17	15	禁排	0.60	0.90		0.50
			20		1.0	1.5		
			30		3.3	5.2		
			40		6.0	9.0		
16	甲苯	60	15	禁排	3.6	5.5		3.0
			20		6.1	9.3		
			30		21	31		
			40		36	54		
17	二甲苯	90	15	禁排	1.2	1.8		1.5
			20		2.0	3.1		
			30		6.9	10		
			40		12	18		
18	酚类	115	15	禁排	0.12	0.18		0.10
			20		0.20	0.31		
			30		0.68	1.0		
			40		1.2	1.8		
			50		1.8	2.7		
			60		2.6	3.9		
19	甲醛	30	15	禁排	0.30	0.46		0.25
			20		0.51	0.77		
			30		1.7	2.6		
			40		3.0	4.5		
			50		4.5	6.9		
			60		6.4	9.8		

(续)

序号	污染物	最高允许排放浓度 (mg/m^3)	最高允许排放速率/(kg/h)				无组织排放监控浓度限值	
			排气筒 高度 /m	一级	二级	三级	监控点	浓度 (mg/m^3)
20	乙醛	150	15 20 30 40 50 60	禁排	0.060 0.10 0.34 0.59 0.91 1.3	0.090 0.15 0.52 0.90 1.4 2.0	周界外浓度最高度 ^②	0.050
21	丙烯腈	26	15 20 30 40 50 60	禁排	0.91 1.5 5.1 8.9 14 19	1.4 2.3 7.8 13 21 29		0.75
22	丙烯醛	20	15 20 30 40 50 60	禁排	0.61 1.0 3.4 5.9 9.1 13	0.92 1.5 5.2 9.0 14 20		0.50
23	氰化氢 ^⑤	2.3	25 30 40 50 60 70 80	禁排	0.18 0.31 1.0 1.8 2.7 3.9 5.5	0.28 0.46 1.6 2.7 4.1 5.9 8.3		0.030
24	甲醇	220	15 20 30 40 50 60	禁排	6.1 10 34 59 91 130	9.2 15 52 90 140 200		15
25	苯胺类	25	15 20 30 40 50 60	禁排	0.61 1.0 3.4 5.9 9.1 13	0.92 1.5 5.2 9.0 14 20		0.50

(续)

序号	污染物	最高允许排放浓度 (mg/m^3)	最高允许排放速率/(kg/h)				无组织排放监控浓度限值	
			排气筒 高度 /m	一级	二级	三级	监控点	浓度 (mg/m^3)
26	氯苯类	85	15 20 30 40 50 60 70 80 90 100	禁排	0.67 1.0 2.9 5.0 7.7 11 15 21 27 34	0.92 1.5 4.4 7.6 12 17 23 32 41 52	周界外浓度最高度 ^②	0.50
27	硝基苯类	20	15 20 30 40 50 60	禁排	0.060 0.10 0.34 0.59 0.91 1.3	0.090 0.15 0.52 0.90 1.4 2.0		0.050
28	氯乙烯	65	15 20 30 40 50 60	禁排	0.91 1.5 5.0 8.9 14 19	1.4 2.3 7.8 13 21 29		0.75
29	苯并[a]芘	0.50×10^{-3} (沥青、碳素制品生产和加工)	15 20 30 40 50 60	禁排	0.06×10^{-3} 0.10×10^{-3} 0.34×10^{-3} 0.59×10^{-3} 0.90×10^{-3} 1.3×10^{-3}	0.09×10^{-3} 0.15×10^{-3} 0.51×10^{-3} 0.89×10^{-3} 1.4×10^{-3} 2.0×10^{-3}		$0.01 \mu\text{g}/\text{m}^2$
30	光 ^⑥ 气	5.0	25 30 40 50	禁排	0.12 0.20 0.69 1.2	0.18 0.31 1.0 1.8		0.10

(续)

序号	污染物	最高允许排放浓度 /(mg/m ³)	最高允许排放速率/(kg/h)				无组织排放监控浓度限值	
			排气筒 高度 /m	一级	二级	三级	监控点	浓度 /(mg/m ³)
31	沥青烟	280 (吹制沥青)	15	0.11	0.22	0.34	生产设备不得有明显 无组织排放存在	
			20	0.19	0.36	0.55		
			30	0.82	1.6	2.4		
		80 (熔炼、浸涂)	40	1.4	2.8	4.2		
			50	2.2	4.3	6.6		
			60	3.0	5.9	9.0		
		150 (建筑搅拌)	70	4.5	8.7	13		
			80	6.2	12	18		
32	石棉尘	2根(纤维)/cm ³ 或 20mg/m ³	15	禁排	0.65	0.98		
			20		1.1	1.7		
			30		4.2	6.4		
			40		7.2	11		
			50		11	17		
33	非甲烷总烃	150 (使用溶剂汽油 或其他混合烃类 物质)	15	6.3	12	18	周界外浓 度最高度 ^②	5.0
			20	10	20	30		
			30	35	63	100		
			40	61	120	170		

- ① 一般应于无组织排放源上风向2~50m范围内设参考点，排放源下风向2~50m范围内设监控点。
- ② 周界外浓度最高点一般应设于排放源下风向的单位周界外10m范围内。如预计无组织排放的最大落地浓度点越出10m范围，可将监控点移至该预计浓度最高点。
- ③ 均指含游离二氧化硅10%（质量分数）以上的各种尘。
- ④ 排放氯气的排气筒不得低于25m。
- ⑤ 排放氰化氢的排气筒不得低于25m。
- ⑥ 排放光气的排气筒不得低于25m。

表 5-2 新污染源大气污染物排放限值

序号	污染物	最高允许排放浓度 /(mg/m ³)	最高允许排放速率/(kg/h)			无组织排放监控浓度限值	
			排气筒高度 /m	二级	三级	监控点	浓度 /(mg/m ³)
1	二氧化硫	960 (硫、二氧化硫、硫酸和其他含硫化物生产)	15	2.6	3.5	周界外浓度 最高点 ^①	0.40
			20	4.3	6.6		
			30	15	22		
			40	25	38		
		550 (硫、二氧化硫、硫酸和其他含硫化物使用)	50	39	58		
			60	55	83		
			70	77	120		
			80	110	160		
			90	130	200		
			100	170	270		

(续)

序号	污染物	最高允许排放浓度 /(mg/m ³)	最高允许排放速率/(kg/h)			无组织排放监控浓度限值	
			排气筒高度 /m	二级	三级	监控点	浓度 /(mg/m ³)
2	氮氧化物	1400 (硝酸、氮肥和火、炸药生产)	15	0.77	1.2	周界外浓度 最高点 ^①	0.12
			20	1.3	2.0		
			30	4.4	6.6		
			40	7.5	11		
			50	12	18		
		240 (硝酸使用和其他)	60	16	25		
			70	23	35		
			80	31	47		
			90	40	61		
			100	52	78		
3	颗粒物	18 (炭黑尘、染料尘)	15	0.51	0.74	周界外浓度 最高点 ^①	肉眼不可见
			20	0.85	1.3		
			30	3.4	5.0		
			40	5.8	8.5		
		60 ^② (玻璃棉尘、石英粉尘、 矿渣棉尘)	15	1.9	2.6		1.0
			20	3.1	4.5		
			30	12	18		
			40	21	31		
		120 (其他)	15	3.5	5.0		1.0
			20	5.9	8.5		
			30	23	34		
			40	39	59		
			50	60	94		
			60	85	130		
4	氯化氢	100	15	0.26	0.39	周界外浓度 最高点 ^①	0.20
			20	0.43	0.65		
			30	1.4	2.2		
			40	2.6	3.8		
			50	3.8	5.9		
			60	5.4	8.3		
			70	7.7	12		
			80	10	16		

(续)

序号	污染物	最高允许排放浓度 /(mg/m ³)	最高允许排放速率/(kg/h)			无组织排放监控浓度限值	
			排气筒高度 /m	二级	三级	监控点	浓度 /(mg/m ³)
5	铬酸雾	0.070	15	0.008	0.012	周界外浓度 最高点 ^①	0.0060
			20	0.013	0.020		
			30	0.043	0.066		
			40	0.076	0.12		
			50	0.12	0.18		
			60	0.16	0.25		
6	硫酸雾	430 (火、炸药厂)	15	1.5	2.4		1.2
			20	2.6	3.9		
			30	8.8	13		
			40	15	23		
		45 (其他)	50	23	35		
			60	33	50		
			70	46	70		
			80	63	95		
7	氟化物	90 (普钙工业)	15	0.10	0.15		20 μg/m ³
			20	0.17	0.26		
			30	0.59	0.88		
			40	1.0	1.5		
		9.0 (其他)	50	1.5	2.3		
			60	2.2	3.3		
			70	3.1	4.7		
			80	4.2	6.3		
8	氯 ^③ 气	65	25	0.52	0.78		0.40
			30	0.87	1.3		
			40	2.9	4.4		
			50	5.0	7.6		
			60	7.7	12		
			70	11	17		
			80	15	23		
9	铅及其化合物	0.70	15	0.004	0.006		0.0060
			20	0.006	0.009		
			30	0.027	0.041		
			40	0.047	0.071		
			50	0.072	0.11		
			60	0.10	0.15		
			70	0.15	0.22		
			80	0.20	0.30		
			90	0.26	0.40		
			100	0.33	0.51		

(续)

序号	污染物	最高允许排放浓度 /(mg/m ³)	最高允许排放速率/(kg/h)			无组织排放监控浓度限值	
			排气筒高度 /m	二级	三级	监控点	浓度 /(mg/m ³)
10	汞及其化合物	0.012	15	1.5×10^{-3}	2.4×10^{-3}	周界外浓度 最高点 ^①	0.0012
			20	2.6×10^{-3}	3.9×10^{-3}		
			30	7.8×10^{-3}	13×10^{-3}		
			40	15×10^{-3}	23×10^{-3}		
			50	23×10^{-3}	35×10^{-3}		
			60	33×10^{-3}	50×10^{-3}		
11	镉及其化合物	0.85	15	0.050	0.080		0.040
			20	0.090	0.13		
			30	0.29	0.44		
			40	0.50	0.77		
			50	0.77	1.2		
			60	1.1	1.7		
			70	1.5	2.3		
			80	2.1	3.2		
12	铍及其化合物	0.012	15	1.1×10^{-3}	1.7×10^{-3}		0.0008
			20	1.8×10^{-3}	2.8×10^{-3}		
			30	6.2×10^{-3}	9.4×10^{-3}		
			40	11×10^{-3}	16×10^{-3}		
			50	16×10^{-3}	25×10^{-3}		
			60	23×10^{-3}	35×10^{-3}		
			70	33×10^{-3}	50×10^{-3}		
			80	44×10^{-3}	67×10^{-3}		
13	镍及其化合物	4.3	15	0.15	0.24		0.040
			20	0.26	0.34		
			30	0.88	1.3		
			40	1.5	2.3		
			50	2.3	3.5		
			60	3.3	5.0		
			70	4.6	7.0		
			80	6.3	10		
14	锡及其化合物	8.5	15	0.31	0.47		0.24
			20	0.52	0.79		
			30	1.8	2.7		
			40	3.0	4.6		
			50	4.6	7.0		
			60	6.6	10		
			70	9.3	14		
			80	13	19		

(续)

序号	污染物	最高允许排放浓度 /(mg/m ³)	最高允许排放速率/(kg/h)			无组织排放监控浓度限值	
			排气筒高度 /m	二级	三级	监控点	浓度 /(mg/m ³)
15	苯	12	15 20 30 40	0.50 0.90 2.9 5.6	0.80 1.3 4.4 7.6	周界外浓度 最高点 ^①	0.40
16	甲苯	40	15 20 30 40	3.1 5.2 18 30	4.7 7.9 27 46		2.4
17	二甲苯	70	15 20 30 40	1.0 1.7 5.9 10	1.5 2.6 8.8 15		1.2
18	酚类	100	15 20 30 40 50 60	0.10 0.17 0.58 1.0 1.5 2.2	0.15 0.26 0.88 1.5 2.3 3.3		0.080
19	甲醛	25	15 20 30 40 50 60	0.26 0.43 1.4 2.6 3.8 5.4	0.39 0.65 2.2 3.8 5.9 8.3		0.20
20	乙醛	125	15 20 30 40 50 60	0.050 0.090 0.29 0.50 0.77 1.1	0.080 0.13 0.44 0.77 1.2 1.6		0.040
21	丙烯腈	22	15 20 30 40 50 60	0.77 1.3 4.4 7.5 12 16	1.2 2.0 6.6 11 18 25		0.60

(续)

序号	污染物	最高允许排放浓度 /(mg/m ³)	最高允许排放速率/(kg/h)			无组织排放监控浓度限值	
			排气筒高度 /m	二级	三级	监控点	浓度 /(mg/m ³)
22	丙烯醛	16	15	0.52	0.78	周界外浓度 最高点 ^①	0.40
			20	0.87	1.3		
			30	2.9	4.4		
			40	5.0	7.6		
			50	7.7	12		
			60	11	17		
23	氰 ^④ 化氢	1.9	25	0.15	0.24		0.024
			30	0.26	0.39		
			40	0.88	1.3		
			50	1.5	2.3		
			60	2.3	3.5		
			70	3.3	5.0		
			80	4.6	7.0		
24	甲醇	190	15	5.1	7.8		12
			20	8.6	13		
			30	29	44		
			40	50	70		
			50	77	120		
			60	100	170		
25	苯胺类	20	15	0.52	0.78		0.40
			20	0.87	1.3		
			30	2.9	4.4		
			40	5.0	7.6		
			50	7.7	12		
			60	11	17		
26	氯苯类	60	15	0.52	0.78		0.40
			20	0.87	1.3		
			30	2.5	3.8		
			40	4.3	6.5		
			50	6.6	9.9		
			60	9.3	14		
			70	13	20		
			80	18	27		
			90	23	35		
			100	29	44		

(续)

序号	污染物	最高允许排放浓度 /(mg/m ³)	最高允许排放速率/(kg/h)			无组织排放监控浓度限值	
			排气筒高度 /m	二级	三级	监控点	浓度 /(mg/m ³)
27	硝基苯类	16	15	0.050	0.080	周界外浓度 最高点 ^①	0.040
			20	0.090	0.13		
			30	0.29	0.44		
			40	0.50	0.77		
			50	0.77	1.2		
			60	1.1	1.7		
28	氯乙烯	36	15	0.77	1.2		0.60
			20	1.3	2.0		
			30	4.4	6.6		
			40	7.5	11		
			50	12	18		
			60	16	25		
29	苯并[a]芘	0.30×10^{-3} (沥青及碳素制品 生产和加工)	15	0.050×10^{-3}	0.080×10^{-3}		0.008 μg/m ³
			20	0.085×10^{-3}	0.13×10^{-3}		
			30	0.29×10^{-3}	0.43×10^{-3}		
			40	0.50×10^{-3}	0.76×10^{-3}		
			50	0.77×10^{-3}	1.2×10^{-3}		
			60	1.1×10^{-3}	1.7×10^{-3}		
30	光 ^⑤ 气	3.0	25	0.10	0.15		0.080
			30	0.17	0.26		
			40	0.59	0.88		
			50	1.0	1.5		
31	沥青烟	140 (吹制沥青)	15	0.18	0.27	生产设备不得有明显的 无组织排放存在	
			20	0.30	0.45		
			30	1.3	2.0		
		40 (熔炼、浸涂)	40	2.3	3.5		
			50	3.6	5.4		
			60	5.6	7.5		
		75 (建筑搅拌)	70	7.4	11		
			80	10	15		
32	石棉尘	1根(纤维)/cm ³ 或 10mg/m ³	15	0.55	0.83		
			20	0.93	1.4		
			30	3.6	5.4		
			40	6.2	9.3		
			50	9.4	14		

(续)

序号	污染物	最高允许排放浓度 /(mg/m ³)	最高允许排放速率/(kg/h)			无组织排放监控浓度限值	
			排气筒高度 /m	二级	三级	监控点	浓度 /(mg/m ³)
33	非甲烷总烃	120 (使用溶剂汽油或其他混合烃类物质)	15	10	16	周界外浓度最高点 ^①	4.0
			20	17	27		
			30	53	83		
			40	100	150		

- ① 周界外浓度最高点一般应设置于无组织排放源下风向的单位周界外 10m 范围内。若预计无组织排放的最大落地浓度点越出 10m 范围，可将监控点移至该预计浓度的最高点。
- ② 均指含游离二氧化硅超过 10%（质量分数）以上的各种尘。
- ③ 排放氯气的排气筒不得低于 25m。
- ④ 排放氰化氢的排气筒不得低于 25m。
- ⑤ 排放光气的排气筒不得低于 25m。

5.2 铸造工艺的污染防治和节能

5.2.1 主要污染源和污染物

铸造车间对环境的污染主要是排放的粉尘、有害气体、废水和噪声。产生这些污染的设备和工艺见表 5-3。允许排放量参见 GB/T 4286—1984《船舶工业污染物排放标准》。

表 5-3 铸造车间主要污染源和污染物

工部	担任的作业	产生的污染
原料贮存和炉料准备	存放废金属、焦炭、石灰石、原砂	各种原料的粉尘
	用燃烧等方法去除非金属上面的油脂	油蒸气、烟等
	炉料过秤	焦炭、石灰石等炉料粉尘
熔炼	冲天炉	粉尘、烟、金属氧化物、CO ₂ 、CO、油蒸气
	电弧炉	粉尘、烟、金属氧化物、油蒸气
	感应电炉	金属氧化物、油蒸气
	炉料预热或烘干	烟、金属氧化物、油蒸气
	保温炉	氧化物、油蒸气
造型、浇注、落砂	造型	灰尘、烟气、砂
	浇注	砂芯油蒸气、烟气、有机粘结剂、金属氧化物
	落砂	粉尘、烟、水蒸气
造芯	造芯	粉尘
	烘干	蒸气、烟气

(续)

工部	担任的作业	产生的污染
砂制备	筛砂	细粉
	混砂	细粉及粉尘、膨润土、煤粉
	烘干及再生	粉尘、油蒸气
铸件清理 及精整	喷丸、抛丸	粉尘
	打磨	粉尘、磨屑
	涂漆、喷漆	挥发性气体、油雾、水雾

5.2.2 治理措施

对于铸造车间的污染,最合理的措施是采用少产生污染或不产生污染的新技术、新设备、新材料。下面介绍一些常用的防治和处理污染的方法。

(1) 废气及粉尘处理 铸造车间的废气及粉尘处理参见 GB/T 8959—2007《铸造防尘技术规程》。

1) 冲天炉烟气净化装置。一级低阻干式除尘器可以满足粉尘排放量 $200 \sim 400\text{mg}/\text{m}^3$ 的要求。如果粉尘排放量要求低于 $200\text{mg}/\text{m}^3$, 则可以采用一级低阻干式除尘器加一级袋式除尘器。冲天炉产生的一氧化碳, 可以采用燃烧的方法消除。如果冲天炉小于 $10\text{t}/\text{h}$, 而且采用了中央和侧吹结合的送风方式, 则 CO 的体积分数低于 $5\% \sim 10\%$, 较少采用燃烧室。

2) 电弧炉烟气净化装置。主要是粉尘治理, 电弧炉的粉尘粒径细、浓度大、温度高且有一定腐蚀性, 适用的只有袋式除尘器、静电除尘器和湿式波纹管式除尘器, 其中以袋式除尘器最好。处理后烟尘排放浓度一般小于 $50\text{mg}/\text{m}^3$, 满足国家标准对排放的要求。

3) 非铁合金熔炼炉烟气净化装置。非铁合金熔炼炉熔铅时, 氧化锌粉尘浓度不高, 约为 $300 \sim 500\text{mg}/\text{m}^3$, 最高为 $1500 \sim 2000\text{mg}/\text{m}^3$, 烟气温度通常在 $50 \sim 60^\circ\text{C}$, 但是粉尘很细, 宜采用袋式除尘器。

4) 采用树脂砂造型造芯工艺产生的有害气体的净化。树脂砂产生的有害气体主要有甲醛、氨、糠醛、CO、SO₂ 等。对环境要求严格的地区, 应将有害气体净化后排放。目前有一些车间设有此项措施。

(2) 废水处理 冷却水经冷却塔冷却以后循环使用。湿式除尘、水力清砂废水、炉渣粒化废水, 沉淀后循环使用。

(3) 废渣处理 煤渣、冲天炉渣、钢渣等应尽量利用, 如铺路、制砖等。废砂除铺路、制砖外还可以作为造水玻璃的原料。

(4) 噪声控制 参见 GB/T 12348—2008《工业企业厂界噪声标准》及 GB/T 3096—2008《声环境质量标准》。表 5-4 给出各类厂界噪声标准值等效声级。为了

考虑噪声要求，铸造车间不应设在居民区、医疗区、文教区等区域。

表 5-4 各种铸造设备的噪声级和频谱特性

序号	设备名称	噪声级/dB(A)	测点距离/m	频谱特性
1	造型机(震压式)	100~105	1	低中频
2	风锤	90~95	1	低中频
3	射芯机	100~120	1	高频
4	气动起重机	100~105	1	高频
5	烘炉	98	2	中低频
6	烘炉烧嘴	90~105	1	中高频
7	电弧炉	80~115	3	宽频
8	熔铝炉	89.5	2.5	低中频
9	冲天炉鼓风机	95~120	1	宽频
10	除尘风机	90~110	1	低中频
11	30t落砂机	105	2	低中频
12	清理滚筒	95~105	1	中高频
13	水力清砂	83~94	操作点	中高频
14	振动筛	90~100	1	中高频
15	砂轮磨钢锭	95.5	1.5	中高频
16	风铲清砂	103	1	中高频
17	C106 砸碎机	103	1	中高频
18	ZZ8640 射芯机	126	1	中高频
19	抛丸机	95~105	3	中低频
20	喷丸室	103	1	中低频

5.2.3 节能措施

目前我国在机械工业中，铸造生产消耗的能量占企业总消耗能量的 23% ~ 62%，平均能源利用率为 17% 左右，与先进国家差距很大。因此，在铸造生产中开展节约能源很有必要。建议采用的措施有：

- 1) 组织专业化协作生产，提高生产批量和设备利用率。
- 2) 提高铸件的尺寸精度，降低表面粗糙度的参数值，减少加工裕量。
- 3) 提高铸件成品率，减少废品。
- 4) 加强管理，减少各种能量流失和浪费。
- 5) 采用高效率、低耗能的设备。
- 6) 改造落后的炉窑，提高热效率，采用各种利用余热的措施。
- 7) 电弧炉采用吹氧助熔强化冶炼。
- 8) 废钢入炉前预热。
- 9) 采用炉外精炼缩短还原期。
- 10) 冲天炉熔炼采用富氧送风，预热送风，以提高热效率。
- 11) 用自硬砂造型工艺代替黏土砂烘模造型工艺，降低用于砂型干燥的能耗。
- 12) 对于铸钢件、球墨铸铁件，采用保温冒口和发热冒口，提高钢液和铁液

的收得率。

5.3 焊接工艺的污染和防治

5.3.1 概述

在电弧焊接过程中,产生的烟尘排放到大气中,造成大气的污染、烟气中的重金属粒子混入土壤,也成为污染的来源。钎焊的钎料中含有有毒元素铅、镉等成分,焊接时焊接烟雾进入大气、土壤和人体,造成损害。盛装食物的容器,如果使用钎焊连接,也会危害人体。焊接使用的焊条、焊药等焊接材料,使用后留有少量的残余,施工人员如果随手丢弃,也会造成污染。此外,焊接引起严重的火灾事故,甚至人员伤亡,已经是众所周知的惨痛教训,在焊接设计和施工中必须充分注意。

5.3.2 焊接清洁生产的内容

焊接的清洁生产包括以下内容:

- 1) 尽可能减少能源和材料的消耗,例如用自动焊代替手工焊。
- 2) 尽可能不用有毒、有害的焊接材料,如研制和使用无铅钎料。
- 3) 使用低烟尘、低排放的焊接材料。
- 4) 尽可能使用可再生能源。
- 5) 产品在使用终结后,要能够全部降解,回收再使用,或重新熔炼成为可利用的材料。
- 6) 对危险物质实施在线监测和控制。
- 7) 降低污染治理的费用,提高治理污染的效果。

5.3.3 焊接生产中的污染

(1) 弧光辐射 包括紫外线、红外线和可见光线。

1) 强烈的紫外线照射对人体健康的危害主要是造成皮肤和眼睛的损害。紫外线过度照射会引起急性角膜炎,称为“电光性眼炎”。波长较短的紫外线,尤其是波长 320nm 以下的紫外线,能损伤结膜和角膜,甚至侵害视网膜和虹膜。电弧温度超过 3000℃ 时产生的紫外线波长小于 290nm,温度超过 3200℃ 时产生的紫外线波长小于 230nm。波长为 180~320nm 的紫外线,具有强烈的生物作用。波长在 290nm 以下的焊接方法中,以等离子弧焊的紫外线强度最大,其次是氩弧焊,焊条电弧焊最小,CO₂ 气体保护焊的弧光强度是焊条电弧焊的 2~3 倍。

为了避免紫外线的损害,焊接工人应该注意防护,如戴护镜、面罩、穿防护服等。不要在没有防护的情况下点燃电弧,或过早打开面罩。

2) 红外线。严重的红外线可能使皮肤灼伤,长期接触可能造成红外线白内

障,严重的会导致失明和视网膜灼伤。

3) 可见光线。焊接时产生的可见光线可超过能承受的正常可见光强度一万倍。当受到照射时会导致眼睛流泪、疼痛、红肿、看不清,一般称为电焊“晃眼”,休息几天以后可以恢复。

(2) 金属烟尘 金属烟尘包括烟和粉尘。焊接母材金属和焊接材料熔化时产生的蒸气在空气中冷凝及氧化,其固体微粒直径小于0.1nm的称为烟,直径在0.1~10nm的为金属固体微粒粉尘。金属烟尘中的氧化铁、氧化锰等可以引起焊接工人发生“金属热”,其典型症状是工作后寒战,然后发烧、无力、口内有金属味、呼吸困难、食欲不振等。发汗后症状减轻,但是仍觉疲乏无力。

(3) 有毒气体 在焊接过程中产生多种有害气体,其中主要有:臭氧、氮氧化物、一氧化碳和氟化氢。臭氧是有刺激性的有毒气体,超过一定浓度时,会引起咳嗽、胸闷、食欲不振、疲劳无力等。氮氧化物主要有:氧化亚氮(N_2O)、一氧化氮(NO)、二氧化氮(NO_2)、三氧化二氮(N_2O_3)等。其毒性比臭氧小,慢性中毒后症状主要有:头痛、食欲不振、无力等。一氧化碳中毒时,使人血液输氧的功能发生故障,表现出缺氧的体征,出现头痛、无力、头晕等症状。应尽快离开现场,呼吸新鲜空气。氟化氢主要发生在焊条电弧焊,涂料中含有萤石(CaF_2)和石英(SiO_2),在电弧高温作用下,产生氟化氢气体。我国规定氟化氢气体的最高允许浓度为 $1mg/m^3$ 。氟化氢气体能生成氢氟酸,氟化氢和氢氟酸的毒性剧烈,由皮肤吸收即可产生强烈的毒性作用。

(4) 高频电磁场 非熔化极氩弧焊和等离子氩弧焊时,为了迅速引燃电弧,采用高频振荡器来激发引弧,所以在引弧的瞬间出现高频电磁场(时间只有几秒)。而有一些自己安装的焊机,在操作时间高频振荡器连续工作,高频电磁场始终存在,电磁场会引起操作者植物神经紊乱和神经衰弱,症状有头昏、头痛、记忆力减退、失眠等。

(5) 放射性物质 氩弧焊和等离子弧焊使用的钍钨极含有1%~2.5%(质量分数)的钍。而钍及其衰变物为放射性物质,此外利用放射性物质为焊缝探伤,也接触到放射性物质。如果防护不当,则会引起慢性放射性病。其主要表现是,对传染病抵抗力下降,明显的衰弱无力等。

(6) 噪声 等离子焊接和切削过程中,由于离子焰流从喷口高速喷射出来,产生很大的噪声。会引起人体的听觉障碍、噪声性耳聋、血压升高、心跳过速等。

5.3.4 焊接污染的卫生防护技术

(1) 烟尘和有毒气体的防护

1) 改进焊接工艺。采用污染较小的焊接方法,如采用埋弧焊、摩擦焊、电阻焊等。在明弧焊中脉冲钨极气体保护焊(GTAW,旧称TIG)和气体保护电弧焊(GMAW,旧称MIG)发生的尘量很少,应优先考虑采用。开发采用低尘低毒的焊

接材料,提高焊接工艺的机械化和自动化程度以改善作业环境。

2) 采用有效的通风排烟措施。可以采用自然通风或机械通风。

3) 采用个人防护措施,包括工作服、手套、工作鞋、眼镜、口罩、头盔等。通风焊帽用于通风困难的封闭容器内的焊接作业。

(2) 光污染和放射性污染的防护 防护光污染可以采用防护屏、焊接面罩护目滤光片等。防止放射性污染除各种防护用具以外,还应在操作以后,用流水和肥皂水洗手,并经常清洗工作服和手套。

(3) 噪声防护

1) 采用低噪声的焊接工艺装备。

2) 采用隔声措施,把焊接工作区与大车间隔离。

3) 采取吸声降噪措施,在隔墙上加石棉等消声材料。

(4) 高频电磁场的防护

1) 工件良好接地,能降低高频电流。

2) 降低振荡器频率。

3) 屏蔽把线和地线,使高频电场局限在屏蔽内。此外,焊把与焊机连接的电缆线外面也应该加细铜丝编制的套。

4) 降低焊接作业现场的温度和湿度。温度和湿度越高,人体对高频电磁场的反应越敏感。

5.3.5 焊接生产中的安全

1. 焊接防火与防爆

焊接产生明火,而且温度很高,焊接产生的火星落在易燃物上面就会成为火灾的起因。在建筑业此种事故并不罕见。机械制造业工业现场的易燃物虽然较小,但仍须注意焊接现场的安全。从事焊接操作的工人必须具有必要的资质,经过必要的安全培训。从事焊接操作以前,注意移开易燃和易爆物品,保持足够的安全距离。并对焊接产生的明火严格控制,避免火灾发生。

2. 乙炔发生器和乙炔气瓶的安全

乙炔发生器着火和爆炸的危险最大。其操作人员必须受专门的培训熟悉安全操作技术,并经考试合格。严格禁止非操作人员操作乙炔发生器。氧气瓶、乙炔瓶都属于高压力的易燃易爆容器,制造者必须持有国家核准的证书,生产的产品要通过规定的检验。其运输、保管、使用、定期技术检验等都必须符合国家的规定。

3. 防火与防爆措施

在进行焊接与切割操作时,应该注意采用以下措施:

1) 执行焊接、切割用火审批制度。应经过本单位技术部门、保卫部门检查同意后才能进行。应根据消防需要,配备必要的消防设备和材料。

2) 进入石油化工区、煤气站、油库区等危险区域的焊接、切割人员必须经过

焊接安全培训，并考试合格，才能独立作业。在禁火区工作的焊工，必须持有动火证和出入证。

3) 加强安全检查。离焊接切割作业 10m 范围内不应有木屑、棉纱、草袋、石油、汽油、油漆等。不能及时清除的应用水喷湿，或盖上石棉板、石棉布、湿麻袋等，并用水淋湿。

4) 乙炔发生器与焊接、切割操作地点的距离不得小于 10m。

5) 在喷漆室、油库、中心乙炔站、氧气站内和储存汽油、煤油等的容器以及木板上严禁进行焊接、切割。

6) 焊接、切割管子时，不准堵塞管子两端。管子两端也不可有易燃物或有人工作。在焊接容器时，容器必须有透气孔，所有的孔都必须打开。

7) 焊接、切割工作完毕后，必须切断电源，认真检查，消灭一切隐患。

8) 有些设备有保温层，由沥青胶合木、泡沫塑料、玻璃纤维等易燃物制造，焊接之间应将可能因焊接引起燃烧的保温层拆降干净，并用遮挡板隔离，以免引起燃烧，导致火灾。

9) 新制的产品在油漆未干时，不允许进行焊接和切割，以免因周围的挥发性气体引起火灾。

5.4 锻压和热处理工艺的污染防治

5.4.1 概述

锻造坯料加热的目的是提高塑性，降低锻造抗力，获得良好的锻后金属组织。加热时要消耗大量的能源，所以必须考虑节能问题。我国每吨锻件综合耗能 1.2 ~ 1.5t 标准煤，每吨模锻件综合耗能 0.8 ~ 1.2t 标准煤。而工业发达国家每吨锻件综合耗能 0.7 ~ 0.8t 标准煤（日本 0.515t 标准煤）。锻件能耗占其总成本的 8% ~ 12%，所以降低锻件能耗对降低成本和节能减排都有很大的意义。

5.4.2 锻压加热的节能

锻造加热需要大量的能源，锻坯加热占锻件生产总能耗的 25% ~ 30%，锻件热处理消耗的能源占锻件生产总能耗的 30% ~ 35%，设备的动力能耗占 30%，其他（辅助生产工具、照明、生活等）占 15% ~ 20%。从事锻压零件设计制造的人员可以从以上各环节寻找节能的途径。

(1) 正确确定锻造温度范围 确定加热温度时要考虑以下原则：

- 1) 保证锻造零件具有良好的锻造质量。
- 2) 保证锻造金属在温度范围内，有较好的塑性和较低的变形抗力。
- 3) 尽可能扩大锻造温度范围，以减少加热次数，节约热能，提高工作效率。

(2) 热模锻推广采用中频感应加热 加热一般低合金结构钢, 加热温度为 1200 ~ 1250℃。各种加热方法中, 中频感应加热耗能最低, 煤气加热次之, 燃煤加热耗能最高, 加热每千克坯料所需热量, 折合为标准煤消耗依次为: 0.202kg、0.35kg、0.47kg。中频感应加热, 加热均匀, 炉温可以自动控制, 坯料可以自动分选, 坯料表面氧化、脱碳少, 劳动生产率高, 污染很小。

(3) 自由锻建议采用自由锻天然气台式炉 天然气含硫少, 金属材料加热时氧化少, 容易实现燃料自动调节和温度控制。同时还应该采用先进的喷嘴以提高燃烧效率。

5.4.3 合理选择热处理方法

一般的机械零件多采用低合金结构钢, 其常用热处理方法及其耗电量见表 5-5。

表 5-5 一般机械零件常用热处理方法及其耗电量

热处理方法	加热温度/℃	耗电量/(kWh/kg)
调质热处理	淬火 840 ~ 860	淬火 0.6, 回火 0.4
正火热处理	930 ~ 960	0.5
等温淬火热处理	920 ~ 940 快速冷却, 等温温度 600 ~ 650	0.8

5.4.4 锻造余热利用

零件在锻造成形以后, 仍有相当的温度, 利用它进行余热处理、淬火、等温正火等处理, 不但节约燃料, 而且不用额外的加热设备, 加工时间也缩短了。这一方法日益得到推广。表 5-6 给出了 40Cr、45 钢两种材料的连杆, 采用锻造余热淬火和常规调质热处理的力学性能比较。说明锻造余热淬火方法的优点。

表 5-6 锻造余热淬火和常规调质热处理的力学性能比较

钢号	热处理工艺	力 学 性 能				
		R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	Z (%)	A (%)	硬度(HBW)
40Cr	1160℃余热锻造淬火, 660℃回火	856	66.1	19.5	166/94	252 ~ 260
	850℃余热锻造淬火, 610℃回火	799	65.6	20.6	163/59	249 ~ 255
45	1180℃余热锻造淬火, 600℃回火	914	58.2	19.3	123	246
	850℃余热锻造淬火, 550℃回火	877	57.4	18.2	121	235

5.4.5 采用非调质钢

非调质钢是为了节约能源而开发的不需要进行调质处理的钢材。它是在碳素结构钢或合金结构钢中加入微量的 V、Ti、Nb、N 等元素, 进行“微合金化”。用它制造的机械零件, 锻造以后, 控制冷却, 即可得到要求的力学性能, 直接使用, 省去热处理的步骤。国外 30% 以上的汽车零件已经采用非调质钢。国内汽车行业也使用了大量的非调质钢。我国非调质钢的牌号和化学成分见表 5-7, 力学性能见表 5-8。

按国家标准 GB/T 15712—2008 的规定，非调质钢按使用加工方法分为两类：

1) 直接切削加工用非调质机械结构钢 UC。直径或边长不大于 60mm 的钢材的力学性能应符合表 5-8 的规定；直径不大于 16mm，或边长不大于 12mm 的方钢不作冲击试验，直径或边长大于 60mm 的钢材的力学性能由供需双方协商。

2) 热压力加工用非调质机械结构钢 UHP。根据供需双方的要求可检验力学性能及硬度，其试验方法和验收指标由供需双方协商。但直径不小于 60mm 的 F12Mn2VBS 钢，应先改锻成直径为 30mm 的圆钢，经 450 ~ 650℃ 回火，其力学性能应符合：抗拉强度 $R_m \geq 685\text{MPa}$ ，下屈服强度 $R_{eL} \geq 490\text{MPa}$ ，断后伸长率 $A \geq 16\%$ ，断面收缩率 $Z \geq 45\%$ 。

表 5-7 我国非调质钢的化学成分（GB/T 15712—2008）

序号	统一数字代号	牌 号	化学成分(质量分数,%)									
			C	Si	Mn	S	P	V	Cr	Ni	Cu ^{②③}	其他 ^③
1	I22358	F35VS	0.32 ~ 0.39	0.20 ~ 0.40	0.60 ~ 1.00	0.035 ~ 0.075	≤ 0.035	0.06 ~ 0.13	≤ 0.03	≤ 0.03	≤ 0.03	
2	I22408	F40VS	0.37 ~ 0.44	0.20 ~ 0.40	0.60 ~ 1.00	0.035 ~ 0.075	≤ 0.035	0.06 ~ 0.13	≤ 0.03	≤ 0.03	≤ 0.03	
3	I22468	F45VS ^①	0.42 ~ 0.49	0.20 ~ 0.40	0.60 ~ 1.00	0.035 ~ 0.075	≤ 0.035	0.06 ~ 0.13	≤ 0.03	≤ 0.03	≤ 0.03	
4	I22308	F30MnVS	0.26 ~ 0.33	≤ 0.80	1.20 ~ 1.60	0.035 ~ 0.075	≤ 0.035	0.08 ~ 0.15	≤ 0.03	≤ 0.03	≤ 0.03	
5	I22378	F35MnVS ^①	0.32 ~ 0.39	0.30 ~ 0.60	1.00 ~ 1.50	0.035 ~ 0.075	≤ 0.035	0.06 ~ 0.13	≤ 0.03	≤ 0.03	≤ 0.03	
6	I22388	F38MnVS	0.34 ~ 0.41	≤ 0.80	1.20 ~ 1.60	0.035 ~ 0.075	≤ 0.035	0.08 ~ 0.15	≤ 0.03	≤ 0.03	≤ 0.03	
7	I22428	F40MnVS ^①	0.37 ~ 0.44	0.30 ~ 0.60	1.00 ~ 1.50	0.035 ~ 0.075	≤ 0.035	0.06 ~ 0.13	≤ 0.03	≤ 0.03	≤ 0.03	
8	I22478	F45MnVS	0.42 ~ 0.49	0.30 ~ 0.60	1.00 ~ 1.50	0.035 ~ 0.075	≤ 0.035	0.06 ~ 0.13	≤ 0.03	≤ 0.03	≤ 0.03	
9	I22498	F49MnVS	0.44 ~ 0.52	0.15 ~ 0.60	0.70 ~ 1.00	0.035 ~ 0.075	≤ 0.035	0.08 ~ 0.15	≤ 0.03	≤ 0.03	≤ 0.03	
10	I27128	F12Mn2VBS	0.09 ~ 0.16	0.30 ~ 0.40	2.20 ~ 2.65	0.035 ~ 0.075	≤ 0.035	0.06 ~ 0.12	≤ 0.03	≤ 0.03	≤ 0.03	B0.001 ~ 0.004

① 当硫含量只有上限要求时，牌号尾部不加“S”。

② 热压力加工用钢的铜含量（质量分数）不大于 0.20%。

③ 为了保证钢材的力学性能，允许钢中添加氮，推荐含氮量（质量分数）为 0.008% ~ 0.020%。

表 5-8 直接切削加工用非调质机械结构钢的力学性能 (GB/T 15712—2008)

序号	统一数字代号	牌 号	钢材直径 或边长/mm	抗拉强度 R_m /MPa	下屈服强度 R_{eL} /MPa	断后伸长率 A (%)	断面收缩率 Z (%)	冲击吸收 能量 KU_2 /J
1	L22358	F35VS	≤40	≥590	≥390	≥18	≥40	≥47
2	L22408	F40VS	≤40	≥640	≥420	≥16	≥35	≥37
3	L22468	F45VS	≤40	≥685	≥440	≥15	≥30	≥36
4	L22308	F30MnVS ^①	≤60	≥700	≥450	≥14	≥30	实测
5	L22378	F35MnVS	≤40	≥735	≥460	≥17	≥35	≥37
			>40 ~ 60	≥710	≥440	≥15	≥33	≥35
6	L22388	F38MnVS ^①	≤60	≥800	≥520	≥12	≥25	实测
7	L22428	F40MnVS	≤40	≥785	≥490	≥15	≥33	≥32
			>40 ~ 60	≥760	≥470	≥13	≥30	≥28
8	L22478	F45MnVS	≤40	≥835	≥510	≥13	≥28	≥28
			>40 ~ 60	≥810	≥490	≥12	≥28	≥25
9	L22498	F49MnVS ^①	≤60	≥780	≥450	≥8	≥20	实测

① F30MnVS、F38MnVS、F49MnVS 钢的冲击吸收能量报实测数据, 不作判定依据。

5.4.6 加热炉的节能措施

(1) 中频感应加热设备的节能措施

1) 所配变压器的容量要大于中频感应加热设备的功率, 以免因变压器超载, 寿命缩短。

2) 中频电源是谐波源, 在其电网输入端应加无源滤波装置。可以改善功率因数, 而且节能。

3) 加热温度与温度差应该合理。被加热零件的表面和心部温度差应取适当值, 不宜无限减小其差值。合理的差值可以节约能量。锤锻温度差可取 100℃ 左右, 热模锻压力机和万吨级螺旋压力机加热温度取 1280℃, 心表温度差 ≤30℃, 可以节约热能。

4) 整个中频加热设备、中频电源、补偿电容器、感应加热炉等设备都在高电流密度下工作, 要用水冷却。应该注意水的循环使用, 保持水清洁, 不损害设备。

5) 采用带电清空，双频加热等新技术。

(2) 火焰炉节能减排措施 火焰炉在燃料燃烧和产品处理过程中都产生废弃物，如烟尘、CO₂、SO₂、NO_x 等有害气体，是节能减排需处理的重点。其改进途径有：

1) 优化加热工艺，缩短加热时间。

2) 提高能源利用率。

3) 充分利用余热。

4) 选择污染较小的燃料。燃烧 1kg 煤产生的 CO₂ 大约是燃烧 1kg 天然气的 2 倍，是油的 1.5 倍，燃烧天然气产生的 CO₂、SO₂、NO_x 等有害气体，明显低于燃煤，因此应尽量减少燃煤。

5) 采用先进的燃烧技术。例如，为避免局部高温可以减少 NO_x 的排放，因为它是在高温下产生的。此外，利用高温低氧燃烧技术使炉膛中的含氧量大大低于空气中的含氧量，燃烧完全，温度均匀，NO_x 含量很低。

(3) 电炉节能措施

1) 采用合理的炉衬结构，减少炉墙的蓄热量和散热量。

2) 加强炉膛密封，减少热损失，提高炉膛内温度的均匀性。

3) 合理选择和布置加热原件，可以提高使用效果。

4) 选择合理的技术参数。如升温速度、升温时间及最大允许装炉量等。

5) 合理布置工件。工件间距离为工件直径（宽度）的一半时，有较好的传热效果和生产率。

6) 提高电炉温度控制的精度，设置超温度报警装置。

7) 注意减小和避免电炉的噪声、电磁场辐射、热辐射和有害气体等污染。

5.4.7 锻造设备的振动和噪声的控制

锻压设备如锻锤、螺旋压力机等都产生很大的振动，对环境有很大的影响。表 5-9、表 5-10 给出了一些数据，供设计和使用参考。为了减轻锻造设备的影响，锻锤、螺旋压力机等都要设置隔振的地基。为了减轻噪声对环境的影响，常采用隔声降噪的各种措施，如加屏障、隔声罩、使用多孔吸声材料等。

表 5-9 常见锻压设备距设备中心 10m 处的地面垂直运动

设 备	吨位	振幅/μm	速度/（mm/s）	设 备	吨位	振幅/μm	速度/（mm/s）
模锻锤	0.5	37	3.5	热模锻用 机械压力机	8000	110	16
	1	53	5.0		6000	153	13.5
	2	74	7.0		2000	66	5.8
	3	87	8.2	螺旋压力机	5000	85	8
	5	103	9.8	机械压力机	2000	148	8.4
	10	142	13.4		1400	61	5.8

表 5-10 常见工业设备的基础振动容许值

设 备	位移/ μm	速度/ (mm/s)
精度 $<0.01\mu\text{m}$ 、 $Ra <0.0125\mu\text{m}$ 的车铣磨床	—	0.03
精度 $>0.1\sim0.5\mu\text{m}$ 、 $Ra =0.025\mu\text{m}$ 的车磨床	—	0.05
精度 $>0.5\sim1\mu\text{m}$ 、 $Ra =0.05\mu\text{m}$ 的车磨床	1.5	0.1
精度 $>1\sim3\mu\text{m}$ 、 $Ra >0.1\sim0.2\mu\text{m}$ 的车镗磨床	3.0	0.2
精度 $>3\sim5\mu\text{m}$ 、 $Ra >0.4\sim0.8\mu\text{m}$ 的机床	4.8	0.3
$Ra >0.8\sim1.6\mu\text{m}$ 的车床、磨床	10	0.5
表面粗糙度 $Ra >1.6\sim3.2\mu\text{m}$ 的机床	—	1
某三坐标测量机 (10~20Hz 的振动)	—	0.08

5.5 胶粘工艺的污染和防治

5.5.1 胶粘剂的分类

按胶粘剂的物质组成，可以分为有机、无机两大类，如图 5-1 所示。

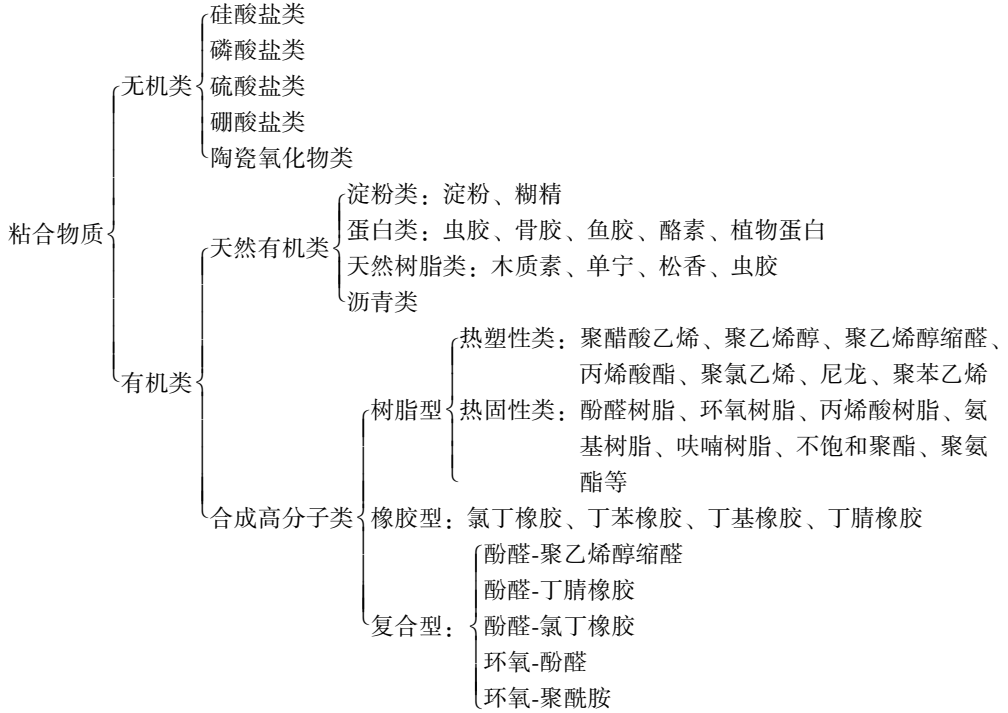


图 5-1 胶粘剂分类

5.5.2 胶粘剂对健康的主要危害

(1) 对皮肤的损害 皮肤接触环氧对脂、正己烷、甲苯、氯乙烯会引起皮肤过敏、接触性皮炎。与氯丁橡胶接触的工人会发生皮肤色素消失。

(2) 刺激鼻、眼、口腔等器官 含有氯醇、氯化溶剂、甲苯或二甲苯的胶粘剂刺激眼睛, 甲苯、三氯乙烯、二甲苯刺激口、喉和鼻腔。生产胶粘剂的许多辅料对皮肤、粘膜有刺激作用。

(3) 窒息 接触高浓度正己烷的工人可能发生窒息。有些胶粘剂过热时产生一氧化碳、氮氧化物, 会产生窒息。

(4) 损伤内脏 长时间吸入高浓度芳香族溶剂, 可能引起肺部炎症或肺水肿。各种胶都会引起胃肠功能失调, 出现恶心、呕吐等症状。二甲基甲酰胺、四氯呋喃、氯乙烯会引起肝损害, 其中二甲基甲酰胺还会引起血压升高。

(5) 神经系统病变 丙烯腈、环己烷、甲苯、二甲苯、三氯乙烯等, 可能引起头疼、眩晕、动作失调、麻木和昏迷。

(6) 生殖毒性 接触有机卤溶剂的孕妇, 可能造成流产或胎儿损害。

(7) 致癌性 根据国际癌症研究中心 (IARC) 2007 年公布的 932 种致癌化学物质中, 与胶粘剂的使用、生产有关的物质有:

1 类——对人类致癌的物质: 石棉、笨、铬化物 (六价)、甲醛、二氧化硅、含石棉状纤维的滑石。

2B 类——与胶粘业有关的可能对人类致癌的物质: 丙烯腈、乙醛、醋酸乙烯、三氯甲烷、二氯乙烷、二氯甲烷、四氯化碳、氯丁二烯、炭黑、二氧化钛等。

苯引起白血细胞减少, 再生障碍性贫血, 甚至白血病。

5.5.3 汽车制造业防止胶粘剂危害的措施

汽车与航空工业是在机械制造业中使用胶粘剂最多的部门, 而且还在迅速增加。汽车使用的胶粘剂按其所起的作用可分为三类:

1) 结构胶粘剂——需承受较大的力, 一般为热固性胶粘剂, 如环氧、酚醛类胶粘剂, 常用于制动零件。

2) 非结构胶粘剂——不承受大的外力, 多采用热塑性和橡胶胶粘剂, 用于粘贴地毯、隔声材料、灯等。

3) 密封胶粘剂——用于密封和螺栓的紧固。常用的是各种密封胶。

粘接的减排措施, 首先选择无污染或污染较小的粘接剂; 其次, 在工作场地加强通风, 避免温度过高, 使挥发物大量挥发; 再次采用机器人操作, 避免工人直接接触胶粘剂。

5.6 冷加工工艺的节能减排

(1) 正确、合理地选择切削液 选择切削液时首先考虑其使用效果, 其次还应注意其是否有毒性和对环境的影响, 此外还应考虑其回收和处理的可能性。

(2) 废乳化液处理 废乳化液主要来自机械加工和金属表面处理过程中的防腐

剂、润滑剂及冷却液等循环使用后的排放。废液的特点是有有机物浓度高，含油高，色度高，间歇排放，每次排放量较小，但污染性较强。如果处理不当，会对环境造成严重的污染。对于废乳化液的处理，目前国内外有三种办法：

1) 化学法。在废乳化液中酸破乳，加酸调节 pH，或加化学破乳剂等，然后再使油渣与水分离，对于多种乳化基油的稳定乳化液较难处理。这种方法产生的浮油渣脱水较困难，容易造成二次污染。

2) 微生物法。要求废水的 BOD 与 COD 值之比大于 0.5，微生物才能够存活，这种方法有局限性。

3) 物理法。用沉淀、加热、油水分离、过滤、最后用高分子膜超滤法使油水分离。优点是费用较低，效果稳定，不产生二次污染。废油可以回收利用，缺点是一次性费用较高。

(3) 机床设备的改造 采用加工中心等先进设备，提高加工精度和稳定性，提高劳动生产率，还可以节电 30% 以上。

(4) 正确选择工具的材料、形状、尺寸和切削用量 可以提高零件的加工精度、加工效率，减少动力的消耗。

(5) 改善公用工程 公用工程是指配电房、空压机房等，充分发挥其作用可以提高节能减排的效果。

(6) 合理处置和利用切屑，严格分离不同材料的切屑，以便回收利用。

5.7 涂料涂装工艺的污染和防治

5.7.1 涂料及其分类

涂料是涂覆在物件表面，形成粘附牢固、具有一定强度、连续的薄膜——涂膜，或称漆膜、涂层。起保护（防腐、防水、防油、耐化学品、耐光、耐温等）、装饰（颜色、光泽、图案和平整性等）及其他作用（标记、防污、绝缘等）。涂料可以是油漆、煤焦油等。早期用植物油（桐油、大漆），称为“油漆”，现泛指油类和漆类涂料产品。

机械、电子工业（通用、专用设备制造、铁路运输设备制造、汽车、摩托车制造、自行车制造、船舶及浮动装置制造、交通器材及其他交通运输设备制造、电器机械及器材制造、仪器仪表及文化、办公用机械制造等）常用涂料约有 60 余种。这些涂料绝大部分可以采用喷涂技术涂覆在涂件表面，喷漆工艺是一种机电行业应用的十分广泛的表面涂覆工艺。

5.7.2 涂料的成分

涂料主要由四部分组成：成膜物质（主要是各类合成树脂）、颜料、溶剂和助

剂。其中许多成分有毒性。

(1) 溶剂及其毒性 溶剂的主要成分是水、无机化合物和有机化合物。溶剂在涂料制造时加入,有的是使用时加入。施工时——尤其是“喷漆”时,溶剂从涂料中挥发出来,形成油漆工艺最主要的污染物——“漆雾”。

1) 萜烯溶剂:松节油、松油等松树分泌物。

2) 石油溶剂:汽油、松香水、火油等石油分馏烃类产品。油性漆、磁性漆常用松香水作为溶剂。

3) 煤焦溶剂:苯、甲苯、二甲苯等煤干馏烃类产品。苯为剧毒溶剂,少量吸入也会对人体造成长期的损害。它能在神经系统和骨髓内蓄积,苯环氧化,转为强毒的酚类,使神经系统和造血组织受到损害,引起血液中白血球、血小板数减少,长期接触可引起白血病。甲苯主要作为醇酸漆溶剂与环氧树脂、喷漆等的稀释剂。二甲苯可代替松香水作为油性漆、磁性漆溶剂。甲苯、二甲苯为中等毒性溶剂。吸入人体,甲苯、二甲苯甲基氧化,依次转为苯甲醇、苯甲酸、马尿酸(苯甲酰甘氨酸),对人体有麻醉、刺激作用,高浓度时对神经系统有毒害作用。

4) 脂类溶剂:醋酸丁酯、乙酸乙酯、醋酸乙酯、醋酸戊酯等低碳的有机酸和醇的结合物。醋酸丁酯用于喷漆,毒性小。

5) 酮类溶剂:丙酮、甲乙酮、甲异丙酮、环己酮、甲己酮等有机溶剂。丙酮多用于喷漆,极易燃。

6) 醇类溶剂:乙醇、丁醇等有机溶剂,能与水混合。乙醇作为乙基纤维溶剂,丁醇作为氨基树脂溶剂。

7) 其他溶剂:乙二醇醚类溶剂(主要是乙二醇丁醚),广泛用于水基涂料。在体内经代谢后会形成剧毒的化合物,对人体的血液系统和神经系统造成永久的损害,长期接触高浓度的乙二醇醚类溶剂可致癌。还会对生殖系统产生损害,导致不育。

(2) 颜料及其毒性 颜料中的铅会造成慢性中毒。

(3) 助剂及其毒性 助剂有消泡剂、润湿剂、防流挂、防沉降、催干剂、增塑剂、防霉剂等。它可对涂料或涂膜某一特定方面的性能起改进作用,在涂料成膜后存在于涂膜中。

1) 增塑剂邻苯二甲酸酯类(邻苯二甲酸二甲酯、邻苯二甲酸二丁酯 DBP、邻苯二甲酸二辛酯 DOP)。其中 DBP、DOP 为我国环境主要污染物,它们的作用类似雌性激素,可使男人津液量和精子数量减少,严重的导致睾丸癌,还可使女童性早熟。

2) 固化剂 TDI(甲苯二异氰酸酯),有剧毒。会损害人的肝、肾功能,长期接触高浓度的 TDI 蒸气会致癌。

3) 挥发性有机化合物 VOC,主要成分有烃类、卤代烃、氧烃和氮烃,包括苯系物、有机氯化物、氟利昂系列、有机酮、胺、醇、醚、酯、酸和石油烃化合物

等。会影响皮肤和粘膜，对人体产生急性损害。

上述组成涂料的物质具有毒性，同时又具有易燃性。因此，涂料、涂料废物被列入《国家危险废物》，废物类别 HW12。喷漆时，还会形成大量“飞漆”。既浪费了涂料，又会产生严重的“漆雾”污染、“漆渣”污染。

5.7.3 喷涂方法产生的污染

1. 液态涂料涂覆技术

(1) 油漆喷涂 在喷漆过程中，由于压缩空气的作用，会产生大量“飞漆”飘浮在施工作业的空间；“飞漆”粘附在作业场所的屋顶、墙壁上，沉降到地面，形成“漆渣”。对涂料的利用率约 50% 左右。

(2) 浸漆 适用于对涂膜厚度均匀要求不高及无机加工孔洞或方便进行表面掩蔽的涂件。如机架类产品、变压器铁心等。浸漆是把工件全浸入油漆中后提出，淋去挂在工件上过量的油漆，在工件表面形成一层漆膜的工艺。浸漆工艺对涂料的利用率较高，为 70% ~ 80%。

(3) 流涂 广泛用于家电镶板及带凹陷不易喷涂的工件、开口宽大不易喷涂的工件与太大不能浸涂的工件。流涂是用泵以 0.02 ~ 0.2 MPa 的压力将油漆从喷嘴中挤出，涂覆在传送器的工件上。过量的油漆，溢流淋漓返回储槽循环使用。流漆有溶剂挥发问题，对涂料的利用率高达近 95%。

(4) 辊涂或卷涂 用于薄板或带材单面或双面高速连续机械涂覆。它将沾有涂料的旋转的涂辊把涂料“转印”到工件表面，形成所需厚度的漆膜，可严格控制涂膜厚度。

(5) 帘涂 用于薄板或带材涂覆。涂料用泵送或重力溢流使之通过可调缝隙形成“漆帘”，涂覆于工件表面，是涂料损失最少的一种高速涂覆工艺。

(6) 滚涂或旋转鼓涂覆 用于单重小于 0.5 kg 的螺钉、螺母、小螺丝之类的小零件。它是将一定量的涂料泼洒在盛放工件的滚筒或旋转鼓中，使涂料均匀涂粘到工件表面。

(7) 电泳涂覆 主要指“阴极电泳涂覆”，用于汽车、摩托车、自行车、家电、轻工产品及装饰线工艺品等的表面涂覆。其漆膜的附着力强、遮盖力强、耐蚀性高（中性盐雾试验达 1000h）。电泳漆为水性漆。常用阴极电泳漆有环氧树脂漆、丙烯酸树脂漆及聚氨酯漆。它是将电泳漆用蒸馏水稀释，将工件作为阴极，涂料粒子带正电，在电场力的作用下，涂料粒子在工件上沉积成膜。电泳不存在溶剂挥发问题。

2. 固态涂料涂覆技术

固态涂料涂覆技术即“粉末涂覆”。它不用溶剂，而是将涂料物质的细粉末覆盖在工件上后，以超过粉末熔点的温度将之熔化，在工件上形成漆膜。粉末涂覆包括静电喷涂、流态床与静电流态床三种工艺。在粉末进行收集和回用的条件下，粉

末涂料的利用率几乎为 100%。静电喷涂是利用静电吸附作用将粉末涂料吸附于常温态工件上，然后加温熔融形成漆膜。流态床是将已预热到涂料熔点温度以上的工件置入流态化悬浮着的涂料粉末中，与工件接触的涂料粉末熔融涂覆于工件上形成漆膜。静电流态床是将电极设置于粉末室，使流态床涂料粉末荷负电，吸附于接地的工件上。粉末涂覆不存在溶剂污染问题，主要是涂料粉末回收利用问题。已有专业生产成套粉末喷涂设备的企业，其产品配有完整的粉末回收系统，还配备预防爆炸系统。

3. 喷涂污染

喷涂污染主要是漆雾、漆渣、废漆桶及漆雾污染治理产生的二次污染物（包括含漆废水、危险固废等）。为了保证涂覆质量，喷漆前要对工件进行表面准备。不仅要清除表面的污染物（油脂类、尘粒、锈、轧皮、水、盐等），还要保证适当的表面粗糙度。表面准备会产生工业废水、泥渣、粉尘、噪声等污染。

喷漆漆膜固化，有的是自然风干，有的（烤漆）要烘烤。逸出的溶剂气体应用充足的新鲜空气稀释排放。要防止遇明火燃烧、爆炸。

5.7.4 对喷涂污染的处理

1. 处理要求

经处理后达到表 5-11 所示排放标准：

表 5-11 排放标准

颗粒物	苯	甲苯	二甲苯
120mg/m ³	12mg/m ³	40mg/m ³	70mg/m ³

2. 常用处理技术

目前国内外漆雾处理方法包括：过滤法、低温冷凝法、油吸收法、水吸收法等，较多采用的是过滤法和水吸收法。目前比较广泛使用的有液体吸收法、直接燃烧法、催化燃烧法和活性炭吸附等四种不同的方法。

1) 活性炭吸附法净化率可达 95% 以上，若无再生装置，则运行费用太高。

2) 液体吸收法净化率只有 60% ~ 80%，这种方法实际应用存在吸收效率不高、油雾夹带现象，一般难以达到国家排放标准，而且存在二次污染问题。

3) 催化燃烧法净化率也可达 95%，但适合于处理高浓度、小风量且废气温度较高的有机废气，而喷漆废气中的“三苯”浓度一般低于 300mg/m³，因此采用催化燃烧法处理也不合适。

目前大部分工厂在处理喷漆废气时采用水帘洗涤装置或颗粒炭吸附法，水帘洗涤法处理后的喷漆废气一般达不到《大气污染物排放标准》GB/T 16297—1996 中的规定。颗粒炭吸附法一般未采取再生措施，设施运行一定时间后需更新炭。

3. 应急处理措施

任何可燃烧物与氧或空气的混合物都有爆炸下限和爆炸上限两种临界组成。为

安全计，通常将可燃物浓度冲淡在爆炸浓度下限以下燃烧，即将废气中的可燃物浓度控制在 25% LEL（Lower Explosive Limit）以下，以防止由于混合物比例及爆炸范围的偶然变化，可能引起的爆炸或回火。为此，在系统中的脱附风机、补冷风机进口，均需装有新鲜空气进口管道。

5.8 电镀工艺的污染和防治

在机械制造行业中电镀属于热处理的一个分支，即表面处理的一个部分。目前已经发展成具有很大规模的独立企业。据统计，全国有 2 万家电镀企业，每年排放废水总量达到 800 亿 t，还有大量的污泥，如不加以处理必然造成严重的污染。

电镀行业应该按国家标准 GB/T 21900—2008 《电镀污染物排放标准》（表 5-12）控制排放量。

表 5-12 电镀行业污染物排放标准（GB/T 21900—2008）

序号	污染物项目	排放限值			造成的危害
		现有企业	新建企业	特别限值	
1	总值/(mg/L)	1.5	1.0	0.5	
2	六价铬/(mg/L)	0.5	0.2	0.1	皮肤过敏、支气管癌、肠胃溃疡
3	总镍/(mg/L)	1.0	0.5	0.1	呕吐、腹泻、酶系统中毒
4	总镉/(mg/L)	0.1	0.05	0.01	骨质疏松、贫血、肾功能衰竭
5	总银/(mg/L)	0.5	0.3	0.1	
6	总铅/(mg/L)	1.0	0.2	0.1	
7	总汞/(mg/L)	0.05	0.01	0.005	
8	总铜/(mg/L)	1.0	0.5	0.3	脑病、血尿、意识不清
9	总锌/(mg/L)	2.0	1.5	1.0	腹膜炎、休克、死亡
10	总铁/(mg/L)	5.0	3.0	2.0	
11	总铝/(mg/L)	5.0	3.0	2.0	
12	pH	6~9	6~9	6~9	
13	悬浮物/(mg/L)	70	50	30	
14	化学需氧量(CODCr)/(mg/L)	100	80	50	
15	氨氮/(mg/L)	25	15	8	
16	总氮/(mg/L)	30	20	15	磷、氮分解过程大量消耗水中的溶解氧,使水质恶化
17	总磷/(mg/L)	1.5	1.0	0.5	
18	石油类/(mg/L)	5.0	3.0	2.0	使农作物枯死,鱼类死亡
19	氟化物/(mg/L)	10	10	10	

(续)

序号	污染物项目		排放限值			造成的危害
			现有企业	新建企业	特别限值	
20	总氰化物/(以 CN^{1-} 计 mg/L)		0.5	0.3	0.2	剧毒,氰化钠 0.10g 即可致死
	单位产品基准排水量	多层镀	750	500	250	
	(镀件镀层/(L/m^2))	单层镀	300	200	100	

注:1. “现有企业排放限值”适用于现有设施,自 2009 年 1 月 1 日至 2010 年 6 月 30 日执行。“新建企业排放限值”适用于现有设施,自 2010 年 7 月 1 日起执行,新建企业自 2008 年 8 月 1 日起执行。“特别排放限值”适用于根据环境保护工作的要求,在国土开发密度较高、环境承载能力开始减弱,或水环境容量较小,生态环境较弱,容易发生严重水环境污染问题而需要采取特别保护措施的地区。

2. 污染物排放监控位置:表中 1~7 项在车间或生产设施废水排放口。8~20 项在企业废水总排放口。单位产品基准排水量,计量位置与污染物排放监控位置一致。

5.9 包装的污染和防治

5.9.1 概述

(1) 产品包装的任务

- 1) 保护产品。在生产、销售的过程中,经过装卸、搬运、储存等环节时,在外界环境(如温度、湿度、冲击、振动、雨淋等)的影响下使产品完整无损地送到使用者手中。
- 2) 盛装与划分。使产品保持原来的形状、颜色、性质等,不致变形、混杂。
- 3) 信息传递。在包装上表明产品的性能、质量、成分、功能等。
- 4) 外形美观,与环境协调,吸引顾客,促进销售。

(2) 对包装的要求

- 1) 要求包装减量化,不可过度包装。
- 2) 使用后包装功能不破坏,易于重复利用。
- 3) 在包装原材料制造、加工生产过程中应该无毒无害。包装废弃物,易于回收再生,不能回收的应该易于降解。

5.9.2 包装材料

常用材料有以下五类:

- (1) 金属 如钢、铝等。多采用薄板或金属箔,多用于食品包装,利于长期保存,容易回收。对于工具(如汽车修理工具)、仪表等,可以做成工具箱、仪表箱,作为长期使用的容器。
- (2) 纸材 占包装材料产值的 45%。多为一次性使用,用于中小型机械产品

的包装。

(3) 塑料 生产耗能较少。除包装箱外，多用于防振的填充材料。已研究容易降解的塑料。

(4) 木材 多用于大型机械设备的包装箱。

(5) 玻璃 用于食品、饮料、药品等。加工能耗大，容易破碎。机械产品很少采用。

5.9.3 设计包装结构应该注意的问题

(1) 采用提高包装箱刚度的结构，图 5-2 所示为几种提高包装箱刚度的结构。图 5-2a 是提高箱体边缘刚度的结构，图 5-2b 是提高箱体侧壁刚度的结构，图 5-2c 是提高箱体底部刚度的结构，图 5-2d 是提高箱盖刚度的结构。

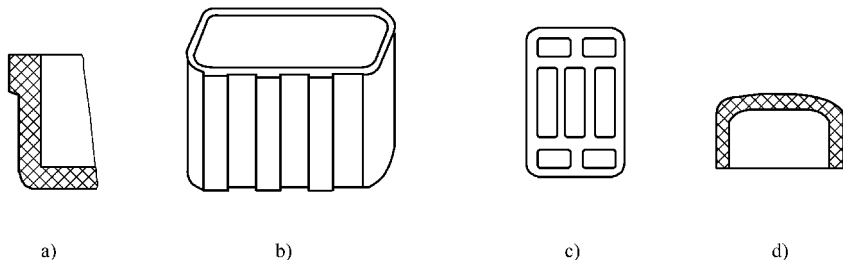


图 5-2 提高包装箱各部分刚度的结构

(2) 通过合理设计包装箱的形状，减少包装材料的消耗。对于容积相同的容器，球体的表面积最小，所以有一些容器设计成球形，但对于机械零件及机器的包装，多采用长方体的形状，为的是容易搬运和叠放。可以合理安排一个包装箱中零件的数量，以节省包装材料。

(3) 按原材料的尺寸设计包装箱的尺寸。包装所用的原材料如纸板、薄铁等供货时有一定的尺寸。合理设计包装箱的尺寸可以减少制造包装箱时的边角废料，减少材料消耗。

(4) 尽可能考虑包装的回收容易，回收时体积可以减小（如木箱可以拆卸成为木板），运输方便。

(5) 用过的包装可以资源化，回收再用或作为生产的原材料。

5.10 润滑剂的污染和防治

5.10.1 润滑剂的使用

由于机械系统的摩擦、发热、氧化等物理和化学作用，可以导致润滑剂性能下降，以致丧失功能，另外使用、储存或运输不当还会引起安全问题，如失火、严重

污染环境等。

5.10.2 使用润滑油和润滑脂的安全问题

(1) 失火和污染 在润滑剂的储存、运输和使用过程中，发生泄漏或温度过高，会发生火警或流失，使环境发生严重的污染。改善密封装置的结构避免发生泄漏，是防止污染的重要手段。在生产中应严格按照有关规定使油品远离火源，避免温度过高等。

在敞开的润滑系统中，注意避免因温度、压力的影响使润滑剂挥发，以致在工作场所弥漫易燃气体，一旦遇到明火会发生火灾甚至爆炸。因而应该对车间内的空气进行监控，避免空气中挥发物浓度超过临界值，及时通风以免危险事故发生。此外，还应准备必要的消防设备。

(2) 病毒 与润滑剂长期接触的工人容易发生皮肤病。例如皮肤脱脂、开裂、皮炎甚至发展成为皮肤癌。据统计，皮炎患者中有 20% 是由于经常接触石油或润滑油引起的。因此应该制定规章，尽量避免人体与油液直接接触。使用必要的防护用品，及时清洗。长期吸入油气，可能导致肺癌或肠胃系统的癌变。人体在各种油雾气氛中，其暴露部分能够承受的极限值，见表 5-13。每天在含油雾的空气中工作 8h 的工人，安全的极限油雾浓度为 5mg/m³。油蒸气的最高含量，在 20℃ 下为 0.016 × 10⁻⁶，在 100℃ 下为 1.4 × 10⁻⁶。

表 5-13 人体在各种油雾气氛中其暴露部分能够承受的极限值

气体环境	每 8h 最大平均称重值		气体环境	每 8h 最大平均称重值	
	1/10 ⁶	mg/m ³		1/10 ⁶	mg/m ³
氯	1	3	干洗溶剂型汽油	500	2950
正己烷	500	1800	苯	1	—
异丙醇	400	980	四氯化碳	10	—
煤焦油、轻油	100	400	三氯乙烯	100	—
硝酸	2	5	甲苯	200	—
矿物油油雾	—	5			

5.10.3 润滑剂的储存和包装

润滑油应储存在干燥的环境中，以避免因湿度过高引起润滑油劣化。对于含挥发性溶剂的油，如含防腐剂的可溶性油、钢丝绳用油和开式齿轮用油，不可放在高温环境中或长时间日晒。这将使溶剂挥发，甚至发生火灾。对于含水的油品，如防燃型液压油、切削液等，不可存放在寒冷的环境中，以免冻冰。此外，还应注意防止灰尘进入。

我国规定闪点低于 45℃ 的润滑剂为易燃品，超过 45℃ 的属于可燃品。一般用于润滑油的油品，沸点超过 300℃，闪点在 130 ~ 300℃ 范围以内。

5.10.4 润滑油和润滑脂的再生

使用过的润滑油和润滑脂因性能变化而失去原有的润滑效能时，应及时更换新的润滑剂。更换下来的废油和废脂应该妥善处理以免造成污染和浪费。回收的油不可混在一起，随意掺和将使其性能无法复原。同一种型号的润滑油，也应该考虑其添加剂是否相同。

造成油脂质量下降的原因有：磨屑的积累、油料中不稳定成分的氧化、添加剂消耗使润滑油黏度降低以及各种杂质的进入等。对于理化性能变化不大的固体颗粒污染的油料，可以采用在线（或不在线）进行沉淀、过滤，清除杂质。铁屑可以用磁性捕集器收集，可以用离心式和土质（活化了的白土等）过滤器收集较大尺寸的颗粒。酸碱处理是一种重要的再生手段，用硫酸可以溶解因氧化而生成的树脂，还可以消除沥青等残渣。再生处理后的润滑油不能完全恢复原来的性能，应该降级使用。用过的不同皂基的润滑脂不可混在一起。使用过的润滑脂不仅理化性能有变化，而且还有磨屑、尘土等杂质，一般可以用酸分解法使皂分解，再经水洗将酸洗去，再经脱水、过滤、加碱皂化，制得再生脂。一般情况下，再生脂即使测出的性能指标与原来相同，也不能等同原来的润滑脂使用。

第 6 章 绿 色 设 计

6.1 概述

绿色设计又称为环境化设计，其内容是在产品生命周期内着重考虑产品的环境属性，包括可拆卸性、可回收性、可重复利用性等，并将其作为设计目标，与保证产品的功能、满足使用寿命要求、经济性要求并重。甚至对于严重污染的设计作“一票否决”，所以绿色设计与传统的设计思路有很大的不同。

6.2 绿色设计的材料选择

一般情况下选择材料的原则有：满足使用要求，满足工艺性要求，满足经济性要求三个方面。考虑到绿色设计的要求，除上述原则以外，还应该注意以下要求：

- 1) 选择冶炼时对资源和能量消耗小，污染小，与环境协调的绿色材料。表 6-1 给出几种材料制造过程消耗的能量。
- 2) 选择毛坯制造和机械加工等加工过程中污染小、或无污染的材料。
- 3) 容易回收和处理，可以再利用，容易降解。表 6-2 给出材料可回收的难易程度。
- 4) 材料种类不宜多，回收时便于处理。
- 5) 提高材料之间的相容性。由相容性好的材料制造的部件，可以不必拆卸，一起回收处理，减少了拆卸分类的工作量。
- 6) 尽量不用或少用有毒、有害的材料。不得已采用时，尽可能把这些材料制造的零件作成容易分离，集中处理。
- 7) 尽量采用没有涂层、镀层的材料。有涂层、镀层的材料给回收带来困难，而且很多涂层、镀层材料本身就有毒，而且生产过程中产生大量有害物质。

表 6-1 几种材料制造过程消耗的能量 [单位/ (MJ/kg)]

金属材料	消耗能量	塑 料	消耗能量	其他材料	消耗能量
钢	30. 0	PC(聚碳酸酯)	118. 7	天然橡胶	60. 0
铁	23. 4	PS(聚苯乙烯)	105. 3	合成橡胶	70. 0
铜	90. 1	ABS(丙烯腈—丁二烯—苯乙烯共聚物)	90. 3	玻璃	9. 9

(续)

金属材料	消耗能量	塑 料	消耗能量	其他材料	消耗能量
铝	198. 2	EPS	82. 1	平板玻璃	22. 0
锡	220. 0	HDPE(高密度聚乙烯)	79. 9	漆	86. 0
锌	61. 0	LDPE(低密度聚乙烯)	66. 2	包装纸	35. 8
铅	51. 0	PP(聚丙烯)	77. 2	瓦楞纸	24. 7
镍	167. 0	PET	76. 2	报纸	29. 2
铬	71. 0	PVC(聚氯乙烯)	70. 5	书纸	40. 2
钴	1600. 0				
钼	700. 0				
钙	179. 0				

表 6-2 常用材料可回收的难易程度

回收性能	贵金属	非铁材料	铁金属	塑料	非金属	其他
回收性能较好	金、银、铅、钯	锡、铜、铝合金	钢			
回收性能中等		黄铜、镍		热塑性塑料	纸制品、玻璃	
回收性能较差		铅、锌		热固性塑料	陶瓷、橡胶	两种不同材料连接而成的零件。如粘接、铆接、镀层、涂层

6.3 考虑拆卸回收的产品设计

6.3.1 可拆卸设计的原则

(1) 结构可拆卸原则

1) 采用容易拆卸的连接型式。尽量采用可拆卸连接型式，如螺纹连接、键连接、销钉连接等，避免采用铆接、焊接、粘接等。图 6-1 所示为蜗轮的常用结构，因为铜合金很贵，所以采用铸铁或铸钢的轮心以节约铜合金。图 6-1a 用铸造的方法在铸铁的轮心上加铸青铜齿圈，回收时把铜合金轮缘与铸铁轮心分开困难。图 6-1b 是过盈配合的齿圈和轮心，用压配合连接，拆卸比较容易。图 6-1c 是用螺纹连接的结构，拆卸最方便。

2) 采用的连接类型和连接件的数量尽量减少，以减少拆卸的工作量和拆卸使用的工具种类。在同一台机械设备中，连接件的类型、尺寸、材料应尽量相同或种类尽可能少。如图 6-2a 所示的齿轮结构因为两个齿轮距离近，分别加工后用螺钉连接起来。图 6-2b 用粉末冶金合并成一个零件，加工、装拆都很方便。

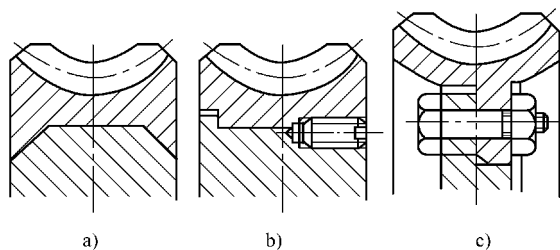


图 6-1 组合式蜗轮结构

a) 铸造连接 b) 过盈配合连接 c) 螺纹连接

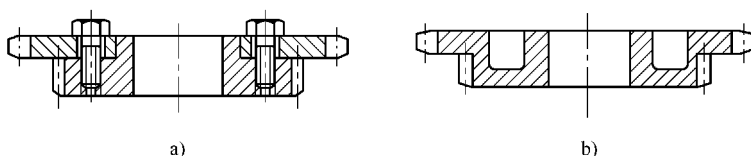


图 6-2 齿轮结构尽量合成一个

a) 不合理结构 b) 合理结构

3) 拆卸的动作和使用的设备尽量简单。避免采用拆卸时依靠大型压力机的大直径过盈配合连接。

4) 结构的可达性好。要求拆卸时操作者能够看到被拆卸零件，拆卸工具容易进入工作位置，操作工具有足够的空间，拆下的零部件容易取出。如图 2-6 所示，中华世纪坛坛体质量 3000t，由 96 组滚轮车组支持，当个别车轮组损坏，需要拆下修理或更换时，如何取出就是设计者必须考虑的问题（在某一位置可以拆下）。

5) 避免由于连接件损坏引起的拆卸困难。有些螺纹连接在使用过程中由于生锈而拆卸困难，图 3-12 给出了一些避免螺纹连接生锈的措施。

(2) 拆卸容易操作原则

1) 零件材料单一。一个零件最好由一种材料或相容的材料制造，以减少拆卸、分离等的工作量。有一些把金属零件嵌铸在塑料件中的组合结构，回收时要分离不同的材料分别处理，就比较麻烦。如图 6-3a 中的冰箱支脚螺钉嵌入塑料支架的结构，回收时拆分比较费时，改为图 6-3b 的结构较好。

2) 废液容易排放干净。在拆卸旧设备时，首先要把设备中的残留废液、废渣等清理干净，以便于以后操作的安全和避免污染。参见图 3-11。

3) 采用模块化设计。把系列产品分解成为若干模块，可以通过不同组合成为多种规格的产

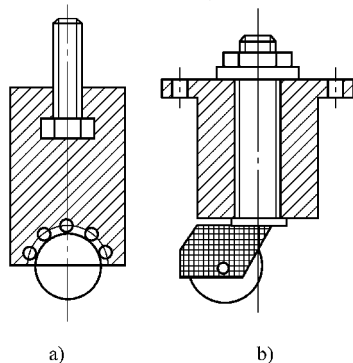


图 6-3 冰箱支脚的两种结构

a) 整体式 b) 可拆卸式

品, 满足广泛的需求, 而模块有通用性, 便于制造、修理和拆卸。模块化也是便于回收的设计, 也是实现绿色设计的一个重要方法。

(3) 保证零件有足够的寿命原则 设计者应该保证零件有足够的寿命, 避免由于腐蚀、磨损、污染等因素使材料在机械设备退出使用时, 拆卸后不能够回收到有利用价值的材料。

6.3.2 主动拆卸结构设计

主动拆卸结构是当此种结构处于一定的外界条件时, 其中的一些零件产生形变动作, 自动实现零部件的拆卸。这种结构的特点是利用了形状记忆合金的性能, 因此又称为使用智能材料的主动拆卸。这种方法英文名称是 Active Disassembly using Smart Materials 简称 ADSM 方法。此法利用的形状记忆合金 (SMA) 或形状记忆高分子材料 (SMP) 制成智能驱动器或可主动分离的扣件。当对这些产品进行回收处理时, 只要将其安放在预定的环境条件下 (如提高到一定温度) 这些零件便可以自动拆分, 使产品的拆分十分方便。形状记忆合金 (SMA) 恢复形状时变形很大, 一般用做弹簧、铆钉、圆管、短销等提供驱动力的主动拆卸零件。Ni-Ti 合金用于需要大拆卸力的场合, 铜基形状记忆合金用于需要较小拆卸力的场合。而形状记忆高分子材料 (SMP) 恢复形状时的变形力不大, 但是变形可达 400%, 常用于制造需要大的变形恢复、而力较小的场合。形状记忆合金的激发温度建议在 55℃ 以上。

6.4 考虑包装的产品设计

6.4.1 概述

绿色包装指的是对于生态环境和人类健康无害, 容易回收使用或再生的包装方法。绿色包装设计要求从材料选择、制造、使用、报废到回收利用的整个包装生命周期内, 完全符合环境保护的要求, 首先要求在设计时考虑到以上各个环节的要求。可以把绿色包装设计的要求归纳为 4R1D, 即:

- 1) 减量化 (Reduce) —— 尽量减少包装材料的使用。
- 2) 可重复使用 (Reuse) —— 包装使用后, 容易收回再重复使用。
- 3) 能回收再生 (Recycle) —— 包装材料容易回收利用。
- 4) 能再使用 (Refill) —— 包装用的瓶、罐、箱等用过以后, 可以再作为容器使用。
- 5) 可降解 (Degradable) —— 包装废弃以后容易分解, 不污染环境。

6.4.2 机械产品的包装设计

- 1) 小型精密机械产品。如测量用的百分表、卡尺等, 包装盒是产品的组成部

分,需要精心设计,可靠、适用、防振、防潮,能够使产品长期保持其性能和有关附件不致遗失。出厂时在其外面常再加一个纸制或木制包装盒。

2) 有些仪表如电能表、电压表、滚动轴承、螺栓、螺母、垫圈等安装在其他设备上配套使用,常用一次性使用的纸盒、防潮纸等包装。

3) 一般精度的机械设备如机床、水泵、电动机等常用一般的木箱包装,有防潮、防尘等功能,可以避免一般的撞击,使机械损坏。

4) 大中型精密机械。如高精度数控机床,大型精密测量仪器如测量机、万能工具显微镜等,其包装需要精心设计,满足很高的防振、防潮、防磁等特殊要求。用户常保存其包装箱,以备搬运、修理时再利用原包装箱,安全、可靠、迅速地实现搬运。

设计者应该根据机械产品包装箱的功能要求,使用情况,选择材料和结构。满足回收、使用的要求。

6.5 节能的绿色产品设计

生产节能的绿色产品是实现节能减排的重要途径。

6.5.1 节能降耗设计方法

产品生产的过程都有材料和能源的消耗,整个过程包括自然资源开采和利用,原材料的生产,把原材料加工成为机械零件,再经过加工、装配、实验、包装、运输、安装、使用、维修、直到产品寿命的终结。然后对报废的机械进行处理,按实际情况和使用要求确定其回用方法。整个过程都有能量的消耗。要求按全过程统一考虑,采用降低材料、人力、能源消耗的最佳方案。如水泵、风机、管道、阀门等零部件,报废以后可以有不同的处理方法:

1) 破碎,捡出铜合金、铸铁、钢材、其他材料等,分类处理。炼制出铜合金、铸铁、钢材等新生的材料。

2) 拆卸的方法,分类处理。有些零件可以直接回用,或修理以后使用。其他零件回炉熔炼。

以上两种方法,哪一种更符合节能减排的要求,必须经过详细的比较和计算,才能确定什么方法是更合理的。

6.5.2 能耗标签与能耗标准

在我国市场上销售的产品,实行能耗标签的标识方法,避免耗能大的落后产品流入市场。目前我国有3种标识可以帮助消费者参考。

(1) 我国的产品能耗标识 图6-4是我国的产品能效标识的一个实例,它粘贴在产品上面,显示出该产品能源效率水平,供选购产品参考。能效系数是产品实测

耗电量占国家标准规定的最大允许耗电量之比,用百分数表示。

(2) 中国节能认证标识 图 6-5 是我国的节能认证标识。该标识由 1998 年 10 月成立的专门认定节能产品的机构“中国节能产品认定中心”(China Certification Center for Energy Conservation Product, CECP)认定产品是否属于节能产品。其认证范围包括节能、节水和环保。目前受理电冰箱、微波炉、电饭煲、电热水器、电视机等 18 类产品。CECP 经过调研,把 20% ~ 30% 产品能够达到的能效指标作为节能指标,把 90% 产品能够达到的指标为能效指标的限定值,淘汰 10% 能效指标低的产品,引导 60% ~ 70% 能效指标较低的产品提高能效。

(3) 欧洲能效等级标识 图 6-6 所示的欧洲能效等级标识中,家电能效等级分为 7 个等级:A、B、C、D、E、F、G。其中 A 级比同类产品节电 45% 以上。现在又发展了 A +、A + + 和 A + + + 三个更高的等级。A + 级比同类产品节电 58% 以上, A + + 级比同类产品节电 70% 以上。

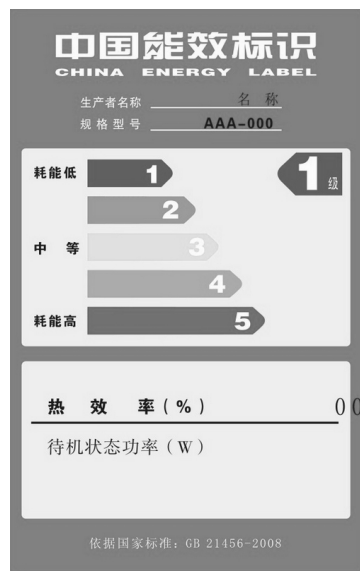


图 6-4 我国产品能效标识



图 6-5 我国的节能认证标识



图 6-6 欧洲能效等级标识

表 6-3 能源效率等级和能效系数（%）

能源效率等级		1	2	3	4	5
能效系数 η （%）	最高	≤ 55	≤ 65	≤ 80	≤ 90	≤ 100
	最低	$>$	> 55	> 65	> 80	> 90
耗能特点		耗能低		耗能中等		耗能高
标记颜色		绿色	浅绿色	黄色	橙色	红色

6.6 绿色设计的评价

6.6.1 绿色产品的认证和标识

绿色产品的标识表明该产品经过了严格的检查、检测综合评定等程序，由有关单位认定其为绿色产品，所给予的证明性商标，表明该产品不但质量合格，而且在生产、使用等过程中，满足环境保护的要求。图 6-7 给出了几个国家和地区的绿色标识。



图 6-7 几个国家和地区的绿色标志

6.6.2 绿色产品评价的指标体系

（1）制定绿色产品评价指标体系的原则

- 1) 综合性。体现出绿色产品的综合情况，从技术、经济和生态三个方面综合评价。
- 2) 科学性。绿色产品的工作原理、设计、生产、使用等建立在科学发展的基础上。
- 3) 系统性。在资源、能源、经济、生态等方面有确切的指标，互相之间关系是协调的。
- 4) 有发展前途。不但要考虑当前的技术和市场，而且有一定的发展前景。
- 5) 可操作性。制定的指标、要求等可以收集到，利用现有的测试手段可以进行测试，便于考查和评价。
- 6) 不相容性。避免评价指标重复设置或分工不明确，难以评价。

(2) 绿色产品评价指标体系的组成 应该包括资源、能源、环境、经济几方面的指标。其中环境属性应该包括：大气、水体、固体废弃物、噪声、放射性、光、电磁场等各方面影响的评价指标。

(3) 常用的评价方法 评价方法力求客观，数量化。减少评价专家主观因素的影响。

6.7 绿色设计案例

6.7.1 地轮的绿色设计

地轮是农业机械常用的一种车轮，用于除草机、播种机、覆膜机等。一般常用的地轮有铁制的和充气的两种。铁制的地轮主要缺点有压力大，容易使土壤板结，容易腐蚀损坏，不能在公路上面行驶等。充气地轮成本较高，容易被农田内的杂物扎破轮胎，长期放置容易漏气。考虑到以上问题，设计了利用废旧轮胎制造的地轮，其结构如图 6-8a 所示。其中，轮缘由轮胎割制成的橡胶块（图 6-8b）组成。在橡胶块上面有矩形孔，把橡胶块叠放以后，在矩形孔中穿入钢带。用专用设备把钢带的两端用焊接的方法连接在一起，在轮胎的两侧各装入一个支撑圈。这一设计避免了铁制的和充气的地轮的一些缺点，为废旧轮胎找到了一个利用的途径，降低了农业机械的成本，而且具有很好的使用性能，可以作为绿色设计的一个范例。

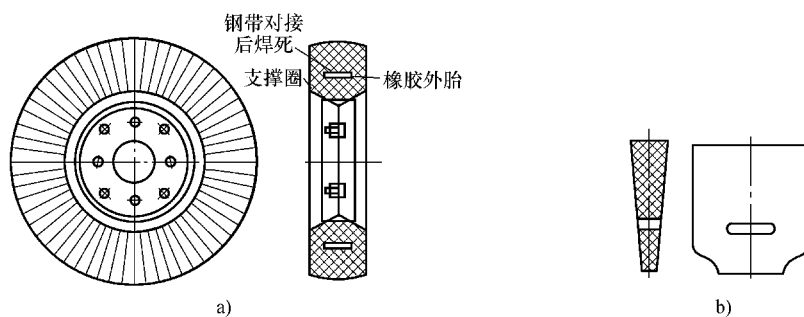


图 6-8 废旧轮胎制成的地轮

a) 地轮 b) 组成地轮的橡胶块

6.7.2 齿轮加工机床的绿色设计

传统的齿轮加工机床与车床、钻床、镗床、加工中心等相比，齿轮加工机床的传动链长，结构复杂，加工过程中切削油消耗量大，油雾和油污污染严重，这些情况表明齿轮加工机床绿色性差。在齿轮加工机床改进设计中可以采用以下技术：

(1) 干式切削技术 研究表明,切削液的使用成本超过了刀具及其维护成本,而且造成污染,为此采用了微量润滑切削、冷风切削等干切削的新工艺。日本、德国、美国的试验结果表明,干式切削技术的切削速度和生产效率可达传统加工方法的5倍左右。与湿式加工方法比较,干式滚切加工机床的加工成本可以减低45%,其中,刀具费降低40%,切削液费降低100%,电费降低33%,加工的连接质量更高,而且干净无油雾。实现干式切削技术需要解决的技术关键问题有:

1) 使用TiAlN镀层的高速钢滚刀,提高滚切速度,达到180m/min,硬质合金滚刀达到300m/min。工作台转速达到800r/min以上。

2) 切削快速分离。减小和避免切削的热量传递给工件和机床,可以采用高压冷风等措施。

(2) 少无切削加工技术 采用齿轮冷轧机,直接轧制齿轮,属于绿色加工技术,但是能耗高、噪声大,加工能力有限,有待提高。

(3) 数控化技术 使用数控齿轮加工机床或把一般的齿轮加工机床数控化,有利于绿化加工齿轮。主要表现在:

1) 数控化有利于简化机床的传动系统和结构,使机床的重量、材料消耗和动力减少。

2) 采用数控程序,减少调整所需的时间,提高了生产率。

3) 切削速度、进给量等可以按需要任意调节,有利于实现优化得到的最佳切削参数。

4) 操作方便,采用密封式加工,降低了劳动强度,提高了安全性,有利于防止切削液溅出。

(4) 模块化和结构优化设计技术 齿轮加工机床设计采用模块化设计,可以减少设计工作量,缩短交货时间,有利于机床的再制造、维护和更换零部件。设计中采用有限元的优化设计计算方法,可以在减轻机床零件重量的情况下,更合理地布置机床大件的材料的肋,使其强度、刚度提高,并可以提高其抗振能力。

(5) 采用再制造技术 再制造技术(参考本书第7章)用于齿轮加工机床,大量机床零件可以回用,用于再制造新机床,可以减少材料消耗,降低机床成本,达到节能减排的效果。再制造滚齿机的成本,只有相同技术水平的新滚齿机的50%~60%。

(6) 其他绿色设计技术 在齿轮加工机床中采用的绿色设计技术还有:采用油雾处理装置净化油雾,采用有效的切屑回收系统分离铁屑与油污等。

绿色设计是齿轮加工机床重要的发展方向。

6.7.3 汽车轮胎的绿色设计

轮胎行驶滚动阻力造成的燃油消耗量占轿车燃油总消耗量的20%,在卡车中,这一比例高达1/3。根据国际能源署的数据,2008年全球汽车排放的二氧化碳占全

球二氧化碳排放总量的 18%。因此汽车的节能减排具有很大的迫切性。

轮胎的性能与它的耐磨性、湿地抓着力和滚动阻力三个方面有关，同时提高耐磨性和湿地抓着力又降低滚动阻力是困难的。常常是要提高某一方面的性能，必然导致其他方面的降低，许多公司在从事这方面的努力，发展绿色轮胎的设计。

1992 年某公司的绿色轮胎面世，其原理是将硅原料部分替代炭黑溶入轮胎胎面。硅有助于在保持轮胎抓地能力（尤其是在湿滑路面上）和耐磨性的前提下，降低滚动阻力，可以减少燃油消耗。

还有一些公司采用顺丁橡胶改进轮胎性能，生产绿色轮胎。

第 7 章 再制造设计

7.1 概述

7.1.1 再制造基本概念

1999 年 6 月徐滨士院士在一个在我国召开的国际会议上发表了题为《表面工程与再制造技术》的论文，首先在国内提出了“再制造”概念。徐滨士院士将再制造工程定义为“以产品全寿命周期和管理为指导，以优质、高效、节能、节材、环保为目标，以先进技术和产业化生产为手段，来修复或改造废旧产品的一系列技术措施和工程活动的总称”。据此，可以说再制造就是把废旧机电产品收集起来，利用高新制造技术，使其恢复或超过原有的功能。它是循环经济在机电产品制造中的具体化，是节能减排重要途径。根据现有的资料统计，用再制造技术生产的新产品，其成本仅为全产品的 50% 左右，节能可达 60%，节材可达 70% 以上。

7.1.2 再制造工程的现状

再制造业在国外已经得到了长足的发展，1996 年美国波士顿大学罗伯特教授对美国的再制造业统计了 8 个领域，情况表明，再制造公司有 73315 个，年销售额达到 360 亿美元，从业人员超过 48 万人。表 7-1 是根据他的研究结构处理后的数据，表中列出各领域的再制造业在统计总数中所占的百分比，可以比较容易地看出各领域的再制造发展程度。

表 7-1 1996 年美国再制造业各领域所占的百分比

领域	销售额 (%)	公司总数 (%)	雇员人数 (%)
汽车	69.1	68.9	70.0
电子仪器	8.8	18.0	9.8
轮胎	8.2	1.9	5.8
墨盒	4.7	8.9	6.6
办公用具	3.1	1.0	2.5
阀门	1.1	0.6	1.0
机械	0.8	0.2	0.7
压缩机	0.5	0.2	0.6
其他	3.7	0.3	3.0

由表 7-1 可以看出，在 20 世纪末，美国再制造工程的发展，主要在汽车行业，约占 70%，而前四种行业（包括汽车、电子仪器、轮胎、墨盒）占 90% 以上，而

机械行业处于起步阶段。美国制定了中长期的再制造发展规划，计划在 2010 年 100% 再制造产品性能达到或超过原产品，到 2020 年，再制造业基本实现零浪费。再制造在国防和军事方面具有更大的意义。

再制造技术在我国也受到很大的重视，并且得到了发展。开始在汽车发动机等方面开展再制造工作，并且有一些单位研究再制造需要的修复技术。

7.1.3 再制造工程的工艺流程

图 7-1 为主要工艺流程。一种产品在设计、制造以后，使用一定时间报废。对于报废产品，按照以前的惯例拆卸以后，一部分回收再熔炼为材料使用，另外的作为废物处理。而再制造工艺的特点在于：把报废的机械设备拆卸，经过清洗和检测，分为四部分处理，各部分的特点见表 7-2，并以汽车发动机为例说明。其中 A 类零件，质量完好，不需处理，可以直接使用。B 类零件可能因为磨损、裂纹、碰伤等失效，尺寸、形状和质量不满足使用要求，需要经过喷涂、刷镀、机械加工等达到要求。C 类零件不能修复，只能作为材料回收，经过重新冶炼再使用。D 类的材料也没有使用价值，作为废物处理。其中 A、B 两类零件和补充的新的零件，经过装配，成为再制造的新产品。

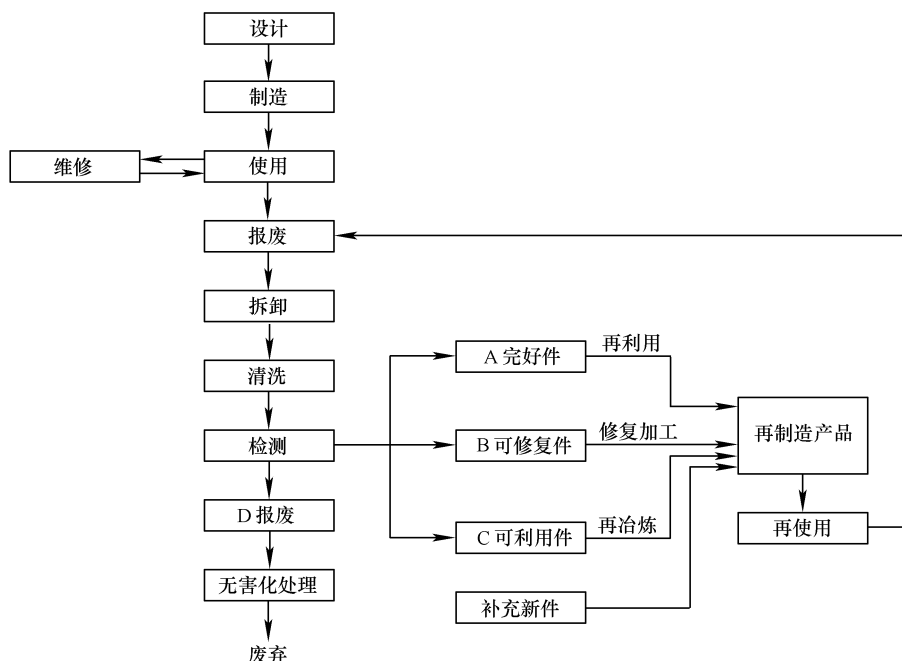


图 7-1 再制造工艺流程图

由此可见再制造成功的关键技术在于，经过检测正确判断零件的损伤程度，按其是否可用，决定分类，然后对于失效的零件加工修复使其恢复使用功能。

表 7-2 再制造工艺中对于零件的分类和处理

分类代号	名称	特点	举例
A	完好件	可以直接使用	进气管、排气管、正时齿轮
B	可修复件	再制造加工后可使用的零件	缸体、缸盖、连杆、曲轴
C	可利用件	经过再冶炼作为材料使用	活塞、主轴瓦、连杆瓦、气缸套
D	报废件	废弃, 需作无害化处理	气缸垫、密封垫片

7.1.4 再制造的效益

再制造的效益体现在许多方面, 下面列举出其主要效益, 并加说明。

(1) 资源效益 由于再制造是利用报废机器生产新机器, 所以原产品第一次生产时所用的材料和能源大部分得到了继续使用。而且减少了原生矿的开采和能源的消耗。例如每利用 1t 铜, 可以节约 200t 铜矿石, 1t 用于采矿的炸药, 0.5t 用于浮选的化学制剂和 1t 用于熔化的油等。专家统计结果表明, 平均每 1t 材料用于再制造, 就可以节省 5~9t 原材料。而再制造机械零件比新制机械零件所需的能量也少得多。例如翻新一个客车轮胎只需要 26L 油, 而制造一个新的轮胎需要 83L 油。

(2) 环保效益 减少需要处理的废物, 节约了原材料和能源, 这些对于环境保护。节能减排都是有利的措施。

(3) 经济效益 1996 年美国再制造年销售额已经达到数百亿美元。产生巨大的经济利益。减少了企业的环境保护费和处理污染物所需的费用。

(4) 社会效益 发展再制造需要大量的人力, 提供了就业机会。再制造减少了处理废弃物所需的土地, 减小了对于空气和水的污染。

总之, 再制造对于节能减排和建立再循环经济, 是一种有效的手段。受到了国内外的普遍重视与推广, 也是先进制造技术的一个重要的发展方面。

7.2 再制造设计

7.2.1 再制造性定义

再制造设计的目标是使产品退役后具有良好的再制造能力, 便于再制造时取得最大的经济和环境效益。因此, 再制造设计的任务包括以下几个方面:

- 1) 在确定设计要求时, 考虑到再制造的特点, 使之适合于实现再制造。
- 2) 选择机械设计方案时, 使产品退役后适合于进行再制造。
- 3) 要进行再制造保障系统的总体设计, 能够实现优化再制造工作和保障资源。
- 4) 完成再制造生产工艺和设备的技术设计, 使再制造有最好的综合效益。
- 5) 考虑再制造的管理要求, 使产品适合于再制造管理。
- 6) 进行经济分析, 使该产品的再制造在经济上合理可行。

为了表示某一产品的设计是否适合再制造要求,在产品设计时用该产品的再制造性表示它在再制造方面的设计水平。再制造性是产品设计师赋予产品的特性,用于表示产品再制造的简便、经济和易于实现程度的特性。再制造的定义是:废旧产品在规定的条件下和规定的费用内,按规定的程序和方法进行再制造时,产品能够恢复到规定性能的能力。

一种产品的再制造性,是由设计赋予产品的一种固有特性。对于再制造性的量度是随机变量,具有统计上的意义,因此应该用概率表示,记做 $R_{(a)}$, 而且 $0 < R_{(a)} < 1$ 。

7.2.2 再制造性的定性要求

设计师在研究和分析类似产品的特点以后,结合自己的经验,提出对于所设计产品应该具有的再制造性的定性要求。下面给出几种对于一般产品经常需要考虑的几个问题:

(1) 易于运输 要进行再制造的废旧产品,由使用和报废场所运到处理它的再制造厂,是再制造的第一步。这个渠道应该是通畅、方便、经济的。大型产品结构应该便于吊装,不会在运输过程中发生损坏。

(2) 易于拆卸性 再制造厂收到废旧产品以后首先要进行拆卸。设计者在设计时应该使产品便于拆卸。机械中大量使用的是连接件,设计者应该尽量采用可拆卸连接(螺纹连接、键连接、花键连接、销连接等),避免采用不可拆卸连接(焊接、铆接、粘接等)。

大直径的过盈配合连接,装拆都需要大型压力机。推荐采用容易拆卸的胀紧连接(JB/T 7934—1999),见图 7-2,在拆卸这种连接时不需要大型压力机,只需拧松连接螺栓就可以松开轴与轮孔的连接。

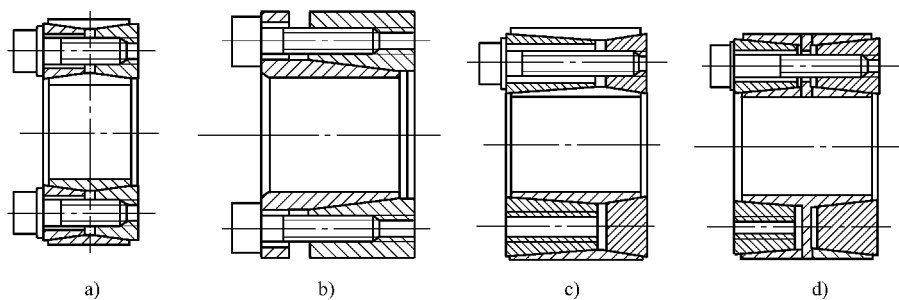


图 7-2 胀紧连接 (JB/T 7934—1999)

a) Z_2 型 b) Z_3 型 c) Z_4 型 d) Z_5 型

过盈配合需要多次装拆时,容易损坏轴和孔的表面,图 7-3 所示是一种在轴颈表面和端面同时加入高压油,但轴向油压力要小于轴颈表面油压的 $1/5$,以保证安全。在轴或孔表面制有油槽(图 7-4),拆卸时通过螺纹连接安装油管,引入高压

油。在压力油作用下使过盈配合轻松拆下。

轴颈和滚动轴承的内圈采用较紧的配合，在拆卸大型滚动轴承时，操作稍有不当，滚动轴承内圈就会产生破裂，而破裂的滚动轴承一般无法修复，会带来很大的损失。这种情况也可以在轴表面作出油槽，通入高压油使滚动轴承顺利拆卸（图7-5）。

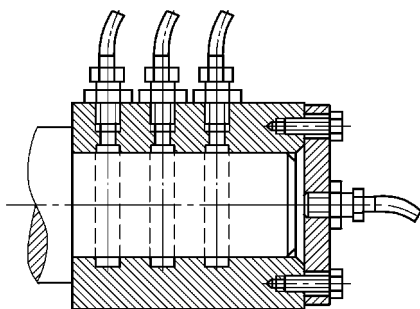


图 7-3 径向和端面加高压油的辅助拆卸结构（JB/T 6136—2007）

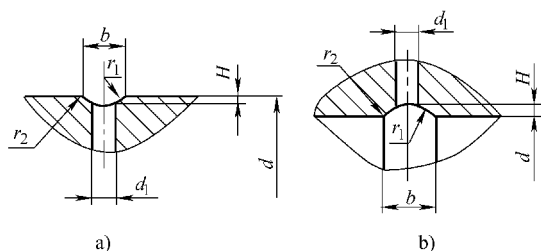


图 7-4 轴和孔表面油槽（JB/T 6136—2007）

a) 轴表面油孔 b) 孔表面油孔

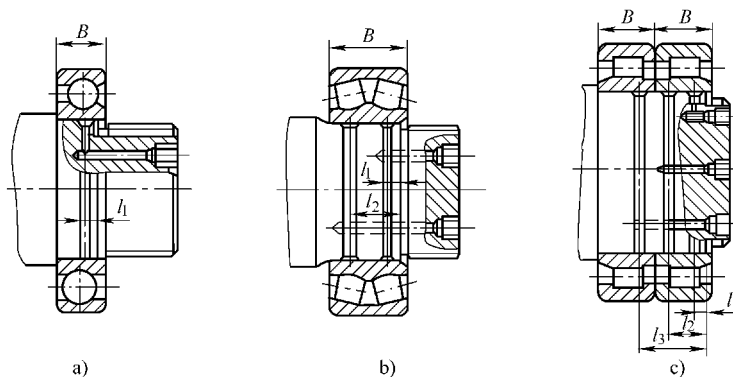


图 7-5 利用高压油拆卸滚动轴承油孔结构

a) 一个滚动轴承的圆柱形轴（有一个环形槽） b) 一个滚动轴承的圆柱形轴（有两个环形槽） c) 两个滚动轴承的圆柱形轴（有三个环形槽）

(3) 易于分类性 主要指在图 7-1 中容易通过检测容易把零件分为 A、B、C、D 四类。其中主要的检测是：几何尺寸和精度的检测，损伤失效的检测。几何尺寸、精度、表面粗糙度、形状误差（如导轨的磨损、梁的变形）都可以利用测量仪器测得。比较困难的是测量内部损伤，如内部是否有裂纹，疲劳强度如何等。有些轴做成空心轴，为的是便于用探伤仪器检测其内部是否有裂纹。

(4) 易于清洗性 可以采用水或溶剂清洗、超声波清洗等。在清洗时要避免损伤零件表面，设计零件时要避免有深而曲折的内部凹陷，清洗时不易到达。

(5) 易于修复性 设计零件时要考虑到容易修复或更换，如采用标准件。采用模块化设计以便于通过更换部件恢复或提高设备的性能，使产品升级。轴的中心孔

应该保留,以便再制造时测量轴的尺寸和精度,修理时(如磨削)便于夹持。图7-6所示为几种标准的中心孔(GB/T 145—2001),其中A型为不带护锥中心孔,在使用过程中,中心孔容易被损坏,B型为带护锥的中心孔,不易被损坏,C型是带有螺纹可以安装一个保护盖板,有更好的保护作用。此外应该考虑采用易于替换的标准化零部件和可以再加工以后使用的零件,如滑动轴承,在其内孔因为磨损不圆时,可以修理表面使之成为圆形,然后用表面镀层使轴径加粗一些,可以继续使用,而不必将二者(或其中之一)更换新零件。

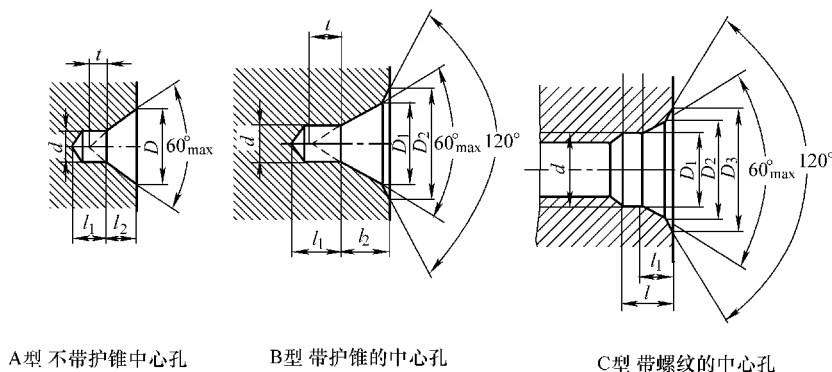


图7-6 标准的60°中心孔(GB/T 145—2001)

在摩擦离合器和摩擦制动器的制动瓦块表面加一层摩擦材料,比与其摩擦的金属件相比强度略低,而这一零件更换容易,使修复简化。

(6) 易于装配性 一般机械设计都应该考虑易于装配的问题,应该尽量避免装配时的手工操作,如用刮研或研磨的方法调整零件的尺寸或相关位置。必要时应改变结构以磨削代替刮研或研磨。

再制造装配与一般机械制造的装配工作不同的是,再制造装配工作要求多次拆装而零件仍能保持原来的性能,所以设计时应该考虑产品的零部件具有较高的连接质量。例如定位销,锥销比圆柱销适合于多次拆装。

(7) 提高标准化水平 采用模块化设计和零部件标准化设计,适合于再制造更换废弃的零部件,简单易行,容易保证质量。如采用标准化的离合器、制动器、联轴器、减速器、泵、阀、管接头等。

(8) 提高可测试性 机械产品在生产过程最后都有测试其性能的步骤,测试项目和指标明确、具体、可行,再制造产品如果要求到达原有产品的性能,或超过它,则应该参照原来新产品的测试标准制定再制造产品的测试标准。

新产品末端的再制造性应该是新产品设计的一个重要部分。设计者应该保证产品寿命末端的再制造能力,以实现产品的最优化回收。因此再制造性设计属于环保设计、绿色设计的重要组成部分。其目的是使回收产品的附加值达到最大值,实现可持续发展。

7.2.3 再制造性的定量要求

1. 再制造性函数

此函数表示再制造获利的比率见表 7-3。

表 7-3 再制造性函数

名称和代号	计算公式	说 明
再制造度 $R_{(n)}$	$\frac{C_r + C_e - C_c}{C_r + C_e}$	在规定的条件和时间内被使用的产品退出使用后，再制造所获得的利润与生成的再制造产品的价值的比率 式中 C_r——再制造产品本身的价值 C_e——再制造的环境效益 C_c——再制造投资 若再制造度 $R_{(n)} < 0$，则不宜进行再制造。如果再制造的环境效益很大，通过政府的资助使 C_e 增大，使再制造成为可能
企业再制造度 $R_{(e)}$	$\frac{C_r - C_c}{C_r}$	指企业在未获得政府资助情况下，不考虑产品本身的价值，计算得到的再制造度
平均再制造度 $R_{(an)}$	$R_{(na)} \times x\% + R_{(nb)} \times y\% + R_{(nc)} \times z\%$	设某零件有三种失效模式，用 A、B、C 表示，其在产品末端的失效概率为 $x\%$ 、 $y\%$ 、 $z\%$ ，相应的再制造度为 $R_{(na)}$ 、 $R_{(nb)}$ 、 $R_{(nc)}$
不可再制造度 $F_{(n)}$	$\frac{C_e}{C_r + C_e}$	指再制造回收的价值与总投入之比，此值超过 1 越多，则表明它更不宜于再制造
再制造率 $R_{(f)}$	$\frac{m}{N}$	式中 N——一批产品中产品总数 m——其中达到或超过 $R_{(n)}$ 的产品数

如果一批零件的检测费 C_i 超过再制造率与该零件纯利润的乘积，则表明该零件不适于再制造，应该作为废弃件处理。用公式表示为：满足下式，则该零件不适于再制造。

$$C_i \geq R_{(f)} (C_r + C_e - C_c)$$

2. 再制造性参数

(1) 再制造时间参数 再制造时间 (T_r)。产品退出使用后，其零部件由进入再制造程序后通过再制造过程恢复到合格状态的时间。一般此时间小于新零件的制造时间 (T_m)。

(2) 再制造费用参数

1) 再制造产品的价值。根据再制造产品的性能，确定的该产品的实际价值，可以以市场价格作为衡量标准。由于新技术的应用，可能使升级后产品的价值高于原来产品的价值。

2) 再制造产品的环保价值。由于再制造避免了新产品制造过程中造成的环境

污染, 及旧产品进行环保处理时所需要的费用的总和。

3) 再制造过程的注入费用。指再制造过程中注入的全部费用, 包括运输费、加工费、检测费、拆解费、检测费、修理或替换零件费、管理费等。

3. 再制造指标

对选定的再制造参数给予一定的数值作为指标。确定指标数值时, 应该注意, 既能够满足使用者的使用要求, 又能够降低寿命周期费用。可以给出一定范围。有以下几种取值:

1) 目标值。产品需要达到的再制造指标, 它是确定合同指标规定值的依据。

2) 门限值。再制造部门认为在一定条件下, 满足再制造需求的最低要求值。比这个值再低, 产品将不适于再制造。

3) 规定值。研制任务书中规定的, 产品需要达到的合同指标。

4) 最低可接受值。合同或研制任务书中规定的装备必须达到的合同指标。

参照以上数值, 由订购商、再制造部门和承制方反复评议, 慎重确定指标。

7.2.4 再制造性预计

再制造性预计的目的是预先估计产品的再制造性参数, 以便在再制造实施之前估计产品可能达到的再制造水平, 避免设计的盲目性, 使再制造设计能够顺利实施。

再制造预计应收集一些资料。应该收集的资料一般包括: 各种原理、功能图、产品图、产品零部件可能的故障模式。再制造方案, 类似产品的再制造数据, 包括类似零部件的故障模式、故障率、再制造费用等。

由产品设计或方案设计确定再制造性参数, 并预计这些参数的数值。预计再制造参数的数量值, 可以采用推断法、单元对比法、累计图表法、专家预测法等。

(1) 推断法 根据新产品的设计特点结合现有类似产品的设计特点以及再制造性参数值, 预计新产品的再制造性参数值。推断法是一种产品设计初期的再制造预计方法, 不需要很多的产品数据和信息, 在产品设计初期有一定的应用价值。

(2) 单元对比法 从研制的产品中找出一个可知其再制造费用的单元, 以此作为基准, 通过与基准单元进行对比, 估计其他各单元的再制造时间和费用等, 这一方法不需要更多的具体设计信息, 适用于各类产品方案设计阶段的早期预计。

(3) 累计图表法 这一方法包括: 计算完成每一项再制造职能的全部工作步骤, 根据成功完成再制造的概率、完成所需费用, 考虑对单元个体差异的敏感性等, 将各项再制造工作的综合再制造量相加, 得到在每个再制造模式下的再制造工作量和费用。

(4) 专家预测法 在再制造设计过程中, 邀请若干名专家, 对产品及其各部分的再制造参数分别进行估计, 然后进行数据处理, 求得所需的再制造参数预计值。预计的主要依据是: 专家经验、类似产品的数据、使用部门的反映、图样、资料等。

对于不同产品，不同设计阶段，选择适用的再制造性预计方法。

7.2.5 再制造性试验与评定

再制造性试验与评定是再制造的产品研制的重要内容，其目的是考核产品的再制造性是否满足规定要求。发现有关再制造性的设计有什么缺陷和不足，以便采取纠正措施。在产品的设计过程中，进行再制造性设计与分析，是为了把再制造性设计到产品中去。但是只有通过试验才能够最后确定再制造性是否满足要求。所以说，再制造性试验与评定是用较短时间、较少经费及时检验产品再制造性的良好途径。

7.2.6 再制造方案

产品的再制造方案包括：对于保障资源的总体安排，对退出使用的产品再制造策略等的有关说明。具体内容有：再制造策略、再制造原则、再制造资源保障和再制造约束条件等。

1. 再制造策略

在制定产品的再制造方案时必须首先制定再制造策略，按再制造的目的和方法不同，可以分为：恢复性再制造，升级性再制造，改造性再制造，应急再制造等。

(1) 恢复性再制造 把末端产品经过再制造，恢复原来产品的性能。如汽车发动机的再制造。

(2) 升级性再制造 把因过时而退出使用的批量产品，通过再制造进行升级，使其性能超过原产品，满足当前用户的要求。例如改变汽车发动机的结构使之满足新的排放标准。

(3) 改造性再制造 把退出使用的产品通过改变结构，增加新功能，再制造成满足新要求的产品。例如，把普通机床改造成数控机床。

(4) 应急再制造 在特殊条件下（例如战场、自然灾害现场等）通过快速的再制造方法，使产品在当前条件下恢复所要求的部分功能，实现该产品的应急使用。

在选择再制造策略时首先要满足用户的使用需求，其次应该注意保障资源（设备的生产能力、备件供应情况、人员的专业水平等），选择可行的再制造策略，还必须注意减少资源（人力、物资等）消耗。

2. 再制造思想

(1) “以退役后再制造为主”的再制造思想 是当前再制造业的基本指导思想，也是最普遍的思想。可以充分发挥原产品在第一次寿命中的最大使用价值。能够取得很好的社会、经济和环境效益。

(2) “以预防为主”的再制造思想 以机件的磨损规律为基础，以磨损曲线第二阶段末端为再制造的时间界限（图 7-7），由于还没有达到剧烈磨损的阶段，磨损量较小，能够显著地减少再制造的工作量，可以在设备发生故障退役之前，以较

少的投入,使设备恢复原有的工作状态。现在的发动机再制造正在逐步代替发动机大修的模式。

(3)“以可靠性为中心”的再制造思想 根据较完善的可靠性资料,数据收集与处理系统,进行可靠性的定量分析,确定再制造策略,来恢复或提高产品的固有可靠性。但是应该注意避免由于频繁的维修或维修不当导致可靠性下降。

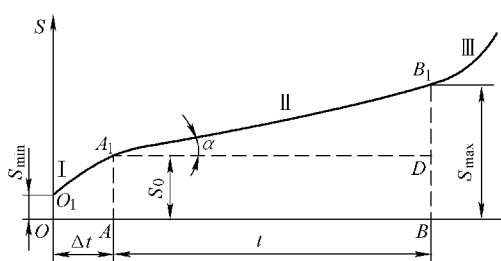


图 7-7 典型磨损过程

I—跑合阶段 (OA) II—稳定磨损阶段 (AB)

III—急剧磨损阶段 (B 以后)

7.2.7 废旧件失效模式分类

由于各种原因,机械零件失去规定的工作能力即为失效。再制造的主要工作就是使失效的机械零件恢复其原来的工作能力。机械零件最常见的失效形式有:磨损、腐蚀、气蚀、断裂、变形等。有些一般机械零件设计教材中提到的失效形式,如:压杆失稳、高速轴共振、气缸预紧力不足而泄漏、带传动打滑等,不是再制造要修复的内容,而属于设计问题,要通过改进设计解决。因此,在此所说的失效,与一般机械设计教材中的失效有一些不同。再制造常见的机械零件失效形式见表 7-4。

表 7-4 再制造常见的机械零件失效形式

失效类型	失效形式	失效原因	举例
损伤	磨损	互相接触的零件表面由于接触面之间的压力和相对运动而产生磨损,造成材料流失	齿轮传动、蜗杆传动、螺旋传动、轴承
	腐蚀	与腐蚀性气体、液体、固体接触。有害环境的化学和物理化学作用	与燃气、海水、润滑油、大气接触的零件表面
	气蚀	与泡形成与破灭的反复作用,使零件表面材料脱落	气缸套、水泵、液压泵
断裂	低频疲劳断裂	周期变化的应力引起零件裂纹,裂纹逐渐扩展,导致零件断裂	压力容器、飞机机身
	高频疲劳断裂		轴、齿轮、螺栓、弹簧
	环境介质引起断裂	环境、应力共同作用引起低应力破坏	应力腐蚀、氢脆、腐蚀
	一次性加载断裂	过载	冲击,载荷过大
变形	高低温下的蠕变	在一定载荷下发生过量变形,使零件不能正常工作	气轮机叶片,发动机零件
其他	老化	材料暴露在自然或人工环境条件下性能随时间变坏	塑料或橡胶零件
	泄漏	密封失效,维修或装配不当	密封圈失效

根据本章 7.1.1 节徐滨士院士对再制造技术的定义“以产品全寿命周期和管理为指导,以优质、高效、节能、节材、环保为目标,以先进技术和产业化生产为手段,来修复或改造废旧产品的一系列技术措施和工程活动的总称”。据此,再制造产品作为新设备开始使用时,其设计是正确无误的,是可以正常工作的。而机械设计考虑问题的一个重要的出发点就是避免失效,所以再制造工程师在分析失效时应该注意失效原因。再制造要处理的是原设计有一定的寿命,达到预期寿命产生的磨损或疲劳等失效形式,属于正常的失效,按原来的尺寸、材料和热处理修复或重新制造这一零件,仍然可以正常工作,有足够的寿命。而有一些零件的失效属于设计不当,如带传动根数不够发生打滑,轴直径太小发生共振,压杆截面尺寸小发生失稳,零件过渡圆角尺寸小发生过大的应力集中导致失效等。这类失效属于设计不当,不属于正常的再制造,而是在再制造时,应该同时纠正原设计的错误或不足。对于这类问题,不能按原来的尺寸、形状、材料、热处理简单地修复零件,而应该作必要的改进。这些工作,在工程上是完全必要的,但是按学科范围,已经超出了再制造的内容。由此可见,“机械设计”学科中的“失效”,与再制造中的“失效”有一些差别。在再制造“检测”工序中应该分别清楚,区别对待。

7.2.8 再制造技术资料

再制造技术资料包括对退役产品进行再制造所需的全部资料,如工程图样、技术规范、技术手册、技术报告和计算机软件文档等。图 7-8 所示为技术资料的编写过程和内容。

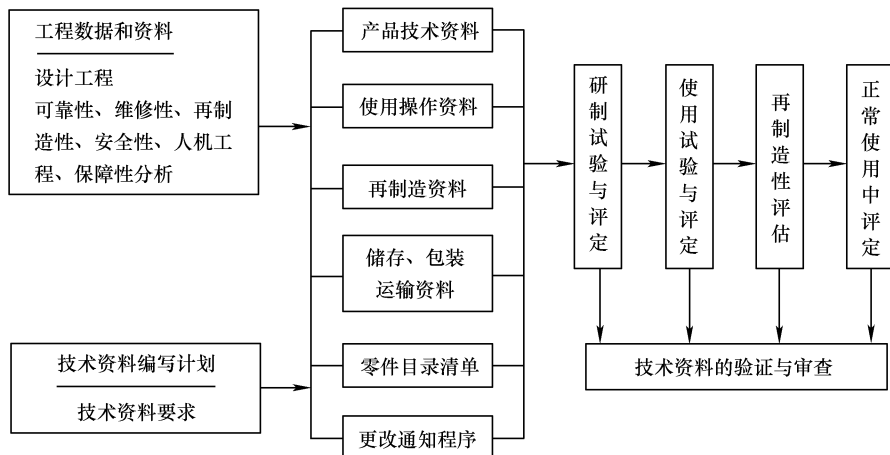


图 7-8 再制造的技术资料的内容和编写过程

7.3 再制造工艺与技术

7.3.1 再制造工艺

再制造工艺过程见图 7-1。

7.3.2 再制造技术

再制造用到的主要技术有：拆卸技术、清洗技术、零件检测鉴定技术、零件再制造加工技术、再制造装配技术、磨合与试验技术等。其中许多在制造新机械时也使用，而对于再制造特别重要的是零件检测鉴定技术和零件再制造加工技术。下面对这两方面的技术作简单介绍。

1. 零件检测鉴定技术

零件检测鉴定包括对零件几何尺寸测量和物理性能和力学性能的鉴定。其中，无损检测鉴定技术是再制造检测的重要发展方向。无损检测鉴定技术用于零件的内部缺陷检测，常用的有超声波检测、渗透检测、磁粉检测、涡流检测、射线检测等。表 7-5 对于这些技术作扼要的介绍。

表 7-5 常用的无损检测鉴定技术

名称	原 理	应 用
超声波检测	利用超声波探头产生的超声波脉冲，射入被检测工件。如果工件内部有缺陷，则被缺陷处反射，由探头接收，并在显示器上表示出来	用于厚板、锻件、铸件、焊缝、腐蚀件厚度等的检测，对钢板的叠层、分层和裂纹的检测率较高，对单个气孔检测率较低
渗透检测	把零件表面处理干净，涂敷专用的渗透液，零件表面的细微裂纹的毛细作用将渗透液吸入其中。然后把零件表面残存的渗透液洗净，再涂显像剂把缺陷中的渗透液吸出，显示缺陷图像	这一方法简单有效，但检测表面裂纹缺陷。不适合检查多孔性材料或多孔性表面缺陷
磁粉检测	强磁性材料（钢铁等）磁化以后，在裂纹等缺陷处，由于磁性的不连续而呈现磁极，在缺陷附近产生漏磁场，其强度取决于缺陷的尺寸、位置及试件的磁化强度。此时，在裂纹处就会吸附磁粉，显示出缺陷的大小、形状和位置	适用于检查钢铁材料的裂纹等表面缺陷。对于深度很浅的裂纹也可以检测出来。不适用于奥氏体不锈钢等非磁性材料。此外，对于内部缺陷的检测有困难
涡流检测	在交流电通过线圈时，会产生交变磁场，若将试件放在线圈附近或其中，就会在试件表面产生涡流状的电流，称为涡流。涡流又产生一个反交变磁场，二者叠加形成合磁场，使线圈磁场和电流发生变化。如果加在线圈两端的电压不变，则电流随阻抗的变化而改变，阻抗的变化反映试件中的缺陷，经过信号处理后，可以显示出试件的缺陷情况	涡流检测的方法适合零件表面或近表面的缺陷情况。灵敏度高，可以自动显示，探测效率高，可用于高温检测，可以用于比较复杂形状的零件。缺点是不能检测零件内部的缺陷，影响因素多难以准确判断缺陷的种类、形状和大小等
射线检测	用 X 射线、 γ 射线、中子射线穿透物质可以发现其中的缺陷，可以测出缺陷的大小、形状、位置等	用硬 X 射线或 γ 射线穿透物质的最大厚度，钢铁约 450mm，铜约 350mm，铝约 1200mm

2. 零件再制造加工技术

机械零件的再制造方法有两大类：机械加工方法和表面工程技术方法。常用再制造加工技术见图 7-9。

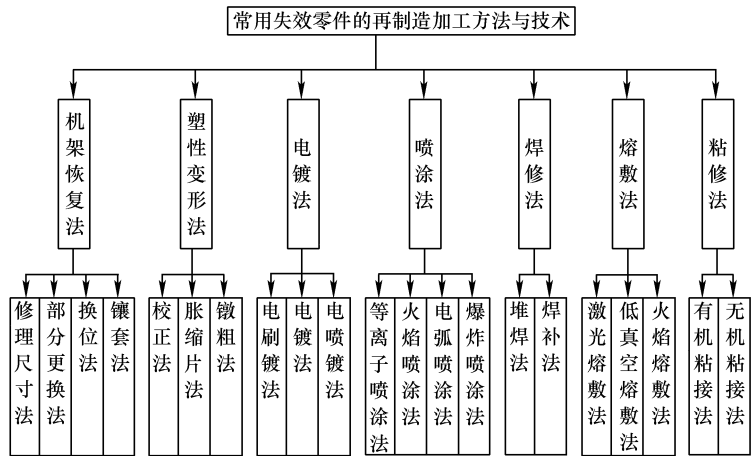


图 7-9 零件再制造常用加工方法

(1) 机械加工方法

1) 切削加工方法。用机械加工方法进行再制造修复时，一般需要切除一些零件表面的材料，使其尺寸（如轴径）有一些减小（此减小量应尽可能小），与此轴配合的零件如滑动轴承的同套内径也要作出相应的改变，一般需要按轴的新直径数值，重新配置。表 7-6 给出桑塔纳 1.6L 发动机曲轴和连杆轴轴颈，每次修理规定的尺寸改变情况。由表中数据可以看出，每一次修理，轴直径减少 0.25mm，切削最大深度 0.125mm。

表 7-6 给出桑塔纳 1.6L 发动机每次修理规定的轴颈尺寸（单位：mm）

零件名称	标准尺寸	第一次修理后尺寸	第二次修理后尺寸	第三次修理后尺寸
主轴颈尺寸	54. 00 ^{-0. 022} _{-0. 042}	53. 75 ^{-0. 022} _{-0. 042}	53. 50 ^{-0. 022} _{-0. 042}	53. 25 ^{-0. 022} _{-0. 042}
连杆轴颈尺寸	46. 00 ^{-0. 022} _{-0. 042}	45. 75 ^{-0. 022} _{-0. 042}	45. 50 ^{-0. 022} _{-0. 042}	45. 25 ^{-0. 022} _{-0. 042}

2) 钳工再制造加工方法。如机床导轨，在磨损后，目前多采用大型磨床磨削的方法，恢复其尺寸精度。而在没有大型磨削设备的情况下，可以采用人工刮研的方法，其不足是：劳动强度高，生产效率低。但是仍然可以达到较高的精度。而且，由于在长期的使用过程中，铸造的机床导轨，等于经过了长期的人工时效，重新修理后，残余应力几乎彻底消失，几乎不会引起变形，其精度保持稳定，胜过新机床。

3) 镶加零件法。在相配合零件的互相接触处发生损坏时，经过加工在配合处镶嵌一个中间零件，使连接功能恢复。例如大型零件上面的当螺纹孔损坏时，可以将孔扩大，嵌入与大型零件过盈配合的套筒，可以在套筒内加工出螺纹。

(2) 表面工程技术方法

1) 热喷涂技术。把经过加热的材料高速喷向基体表面，形成涂层。是表面防护和表面强化的新技术。已经用于许多部门和行业。由于热源不同，有等离子喷涂、火焰喷涂、电弧喷涂、气体爆燃喷涂方法等，应用前景十分广泛。表 7-7 介绍了几种热喷涂技术的特点。

表 7-7 几种热喷涂技术的特点

加工方法	特点和应用
等离子喷涂方法	孔隙率较低，结合性好，用途广，污染小，施工时对工件温度要求不高，成本较高
火焰喷涂方法	设备简单，工艺灵活，对工件要加热，通常孔隙率高，结合性差
电弧喷涂方法	成本低，效率高，污染小，施工时对工件温度要求不高，只用于导电材料喷涂，孔隙率较高
气体爆燃喷涂方法	孔隙率非常低，结合性极好，施工时对工件温度要求低，成本高，效率低

2) 电刷镀技术。电刷镀设备简单，工艺灵活，加工速度快，镀层种类多，结合强度高，对环境污染小，适用范围广。特别适用于野外抢修。其基本原理如图 7-10 所示，刷镀时用专用的直流电源，用浸满镀液的镀笔在工件表面移动，保持相当的压力。在刷镀液中的金属离子在电场力的作用下迁移到工件表面，沉积形成镀层。

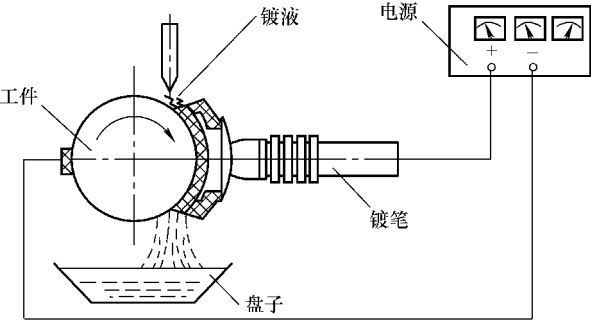


图 7-10 电刷镀基本原理图

3) 堆焊技术。堆焊是利用焊接的热源使敷焊材料堆积在零件表面，形成熔化冶金结合。按焊接方法不同分为气体火焰堆焊、电弧堆焊、等离子弧堆焊、电阻堆焊、电渣堆焊、激光堆焊等。堆焊层与基体金属结合强度高，抗冲击性能好，适用于高应力变载荷受力情况。通过选择堆焊金属，可以得到较高的耐磨性，抗腐蚀性，耐气蚀等。堆焊层厚度大，可达 2 ~ 30mm，堆焊后还可以加工到要求的形状、尺寸和精度。但是堆焊受热不均匀，应该注意变形问题。

4) 表面粘涂技术。用高分子聚合物与特殊填料（如石墨、二硫化钼、金属粉末、陶瓷粉末和纤维）组成的复合材料胶粘剂涂敷在零件表面提高其耐磨性、抗蚀性、绝缘性、导电性、保温性、防辐射性等。工艺简单，经济，容易操作，不需专用设备。但耐温性不高，复杂环境下寿命短，易燃，安全性差。

5) 高能束技术。高能束表面加工技术包括：激光束、电子束、离子束加工技

术。高能束加工技术是目前值得注意的发展方向之一，使用中已经证明它在质量和效率方面有明显的优势，还处于继续发展过程中。

(3) 智能自修复技术 机械装备的自修复是近年来重点研究的一个项目。其要点是在不停机、不解体状况下，利用添加剂中纳米颗粒的独特作用，通过摩擦化学的方法，在被磨损的零件表面原位生成一层具有超强润滑作用的自修复膜，补偿磨损，达到磨损与修复的动态平衡。从而达到减少维修次数，延长使用寿命的目的。纳米铜粉润滑油，纳米稀土化合物等是目前使用的自修复润滑油添加剂。表 7-8 给出几种内燃机摩擦副只使用基础油和使用含纳米添加剂润滑油的磨损测试结果对比。由此可以看出有一些零件在使用含纳米复合自修复添加剂以后，300h 后的磨损量为零，即出现了“零磨损”的效果。

表 7-8 内燃机零件不同润滑剂磨损测试结果对比 (单位: μm)

润滑剂	时间/h	曲轴	轴瓦	连杆轴	活塞	气缸	活塞销	铜套
基础油	150	13	11	6	52	6	4	32
	300	21	16	10	69	14	9	36
含纳米添加剂油	150	2	0	1	6	3	3	0
	300	3	0	0	9	6	6	1

纳米添加剂的加入还可以提高发动机的效率约 3%，油耗降低约 3.5%，对节能减排起良好的作用。

(4) 快速成型技术 (Rapid Prototyping, RP) 这一技术是综合利用计算机、数控、激光、新材料等技术，直接使材料成型。此项技术，利用喷射堆积原理，按计算机的控制，直接制造出任意形状的金属或非金属零件。这是与传统的靠切削加工成型的技术完全不同的概念。图 7-11 选择性激光烧结 (Selective Laser Sintering, SLS) 成型工艺是快速成型技术的一个示例。它的成形步骤有：

1) 建立 CAD 模型。要求所使用的 CAD 软件具有良好的实体造型或曲面造型功能，如 Pro/Engineer 等。

2) Z 向离散化。在垂直于 Z 方向作多个平行平面，平面间距离取为 0.02 ~ 0.30mm，距离决定于零件表面曲线变化大小，令一层以内的轮廓形状相同，原零件的曲面外形化为多层柱体叠起来组成的零件。

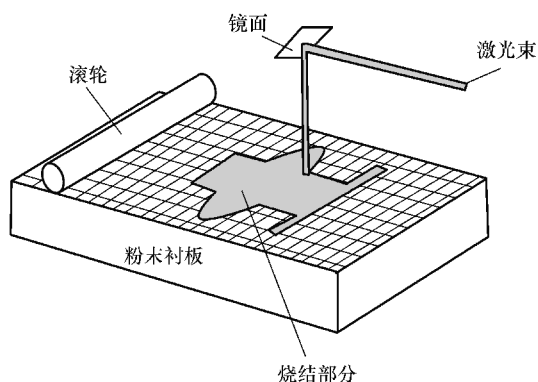


图 7-11 激光烧结成型工艺

3) 层面信息处理。把每一层的几何形状信息转换成控制成型机运动的数控代码。

4) 层面加工与粘接。按照计算机发出的指令, 控制反射镜面的运动, 成型机进行二维扫描, 在 CO_2 激光热力作用下, 金属粉末烧结成型, 并使层与层之间连接。

5) 层层堆积。加工完一层以后, 成型机工作台下降一个层厚的距离, 再加工下面的一层。如此反复直到制造出整个零件。

6) 进行后处理。如深度固化, 修磨等使零件达到使用要求。

激光烧结成型不需专用工具、夹具可以制造任意形状的三维零件, 只要在计算机中有生产该零件所需的控制成型机运动数控代码。只要有所需的金属粉末, 就可以生产任何形状的零配件。在野外、战场等情况下, 显示出独特的优越性。

(5) 修复热处理 图 7-1 中报废机器经过检测, 机械零件分为 4 类, 其中 B 类为可修复件 (表 7-2)。表 7-4 中给出再制造常见的机械零件失效形式: 一种是零件表面的损坏, 如磨损、腐蚀、气蚀、蠕变等, 另一种是机械零件内部的失效, 如内部裂纹、碳化物球化、石墨化、杂质元素 (P 等) 向晶界处的扩散偏聚、蠕变或疲劳造成的亚组织变化等。

外观损伤可以用表面工程技术进行再制造。内部损伤则需要经过合理的修复热处理技术进行再制造。例如, 采用重新奥氏体化并辅以适当的冷却可以使显微组织恢复。采用适当的重新回火可以使大部分已有的微裂纹弥合起来。表 7-9 给出常用修复热处理方法的分类。

表 7-9 常用修复热处理方法的分类

热处理方法分类			特点和应用
普通修复热处理	无相变修复热处理		效果不够明显
	有相变修复热处理	低温修复热处理	加热温度在 A_1 以下, 可降低钢中内应力局部校正组织, 不发生明显的变形, 表面不会氧化
		高温修复热处理	加热温度在 A_3 以上, 可以最大限度地修复金属的损伤减少缺陷, 完全恢复组织
		循环修复热处理	多次加热到相变温度以上随后冷却。12Cr1MoV 钢损伤 0.13%, $980^\circ\text{C} \times 15\text{min}$, 经过 2 ~ 3 次循环可以恢复, 而损伤 0.92% 时要 60 次循环
复合修复热处理	修复化学热处理		加热并饱和一种或几种成分, 是修复表面损伤最经济的方法之一
	修复热力热处理		加热并同时加载, 修复热处理时加反向应力, 在低于 A_1 温度能够完全消除显微损伤
	修复辐射热处理		用激光或电子束轰击金属表面和加热, 能够强化扩散, 修复显微缺陷, 激光处理能够阻止裂纹扩散

7.4 再制造应用实例

7.4.1 汽车发动机再制造

1. 概述

汽车发动机是大量使用的机器，由表 7-1 可以看出，它也是当前再制造发展较快的项目。制造新的发动机，以原材料制造毛坯，进行机械加工。再制造以旧的报废发动机为毛坯进行加工。发动机再制造节省了材料、能源、加工等方面的费用，并且减少污染，符合节能减排的要求。统计资料表明，新制造发动机所需的材料费和加工费占总费用的 70% ~ 75%，而再制造只占总费用的 6% ~ 10%。应该注意的是，再制造与大修不同，大修是对某一台发动机进行手工作业修理，使其恢复功能，周期长、生产效率低，质量受到限制。而再制造是以大批同一品种的发动机为毛坯，进行专业化、流水作业的生产，对产品的质量和性能有保证，生产效率高，成本低。

汽车发动机再制造的工艺流程按照典型的再制造流程图（图 7-1）。对以 3000 台旧斯太尔发动机再制造为例，统计了 3000 台发动机再制造数据。其中，按图 7-1，对旧机器检测以后，分为 4 类，其中 A 类为完好件，经清洗后可以直接使用，占零件数的 23.7%，价值占 12.3%，其中主要零件见表 7-10。B 类为可修复件，经修复加工后可以再利用，占零件数的 62%，价值占 77.8%，其中主要零件见表 7-11。C 类为可利用件，需要回炉重新冶炼，作为材料使用，D 类为报废件，需要经过无害化处理以后废弃（如填埋），这两类零件总称为需要用新品替换的零件，占零件数的 14.3%，价值占 9.9%，其中主要零件见表 7-12。

2. 汽车发动机再制造使用的主要技术

发动机再制造使用的技术有些和制造新产品是相同的，如表 7-12 中用新品替

表 7-10 清洗后可以直接使用的主要零件（A 类零件）

序号	名称	材料	质量/kg	判断标准	可直接使用率（%）
1	进气管总成	铸铝	10	原厂标准	95
2	前排气歧管	铸铁	15	原厂标准	95
3	后排气歧管	铸铁	15	原厂标准	95
4	油底壳	钢板	10	原厂标准	90
5	机油冷却器芯	铜	5	原厂标准	90
6	机油冷却器盖	铸铝	5	原厂标准	80
7	集滤器	钢板	1	原厂标准	95
8	正时齿轮室	铸铁	30	原厂标准	80
9	飞轮壳	铸铁	40	原厂标准	80

表 7-11 经修复加工后可以再利用的主要零件（B 类零件）

序号	名称	材料	质量/kg	常见失效形式	再制造时间/h	可再制造率（%）
1	缸体总成	铸铁	300	磨损、裂纹、碰伤	15	95
2	缸盖总成	铸铁	100	裂纹、碰伤	8	95
3	连杆总成	合金钢	30	磨损、抱瓦	6	90
4	曲轴总成	合金钢	200	磨损、抱轴	16	80
5	喷油泵总成	铸铝	30	渗漏	10	90
6	气门	合金钢	2	磨损	1	60
7	挺柱	合金钢	2	端面磨损	1	80
8	喷油器总成	合金钢	2	偶件失效	1	70
9	空压机总成	合金钢	30	连杆损坏	4	70
10	增压器总成	铸铁、铸铝	20	密封环失效	4	70

表 7-12 需要用新品替换的零件的主要零件（C、D 类零件）

序号	名称	材料	重量	常见失效原因	判断标准	替换率（%）	替换原因
1	活塞总成	硅铝合金	18	磨损	原厂标准	100	无再制造价值
2	活塞环	合金钢	1	磨损	原厂标准	100	无法再制造
3	主轴瓦	巴氏合金	0.5	磨损	原厂标准	100	无再制造价值
4	连杆瓦	巴氏合金	0.5	磨损	原厂标准	100	无再制造价值
5	油封	橡胶	0.5	磨损	原厂标准	100	老化
6	气缸垫	复合材料	0.5	损坏	原厂标准	100	无法再制造
7	橡胶管	橡胶	4	老化	原厂标准	100	老化
8	密封垫片	纸	0.5	损坏	原厂标准	100	无再制造价值
9	气缸套	铸铁	14	磨损	原厂标准	100	无再制造价值
10	螺栓	合金钢	10	价值低	原厂标准	100	无再制造价值

换的零件（C、D 类零件）。而表 7-10 中清洗后可以直接使用的零件（A 类零件）再制造中不必再加工，因而体现再制造特色的主要是经修复加工后可以再利用的零件（B 类零件）。这类零件再制造使用的主要技术有：

（1）拆卸的设备和技术 有些零件拆卸困难，要采用专用的设备，以免拆卸时损坏，为此在设计时应该考虑再制造拆卸的要求。

（2）清洗的设备和技术 只有经过彻底的清洗才能够保证下一步检测的准确和以后的使用，要采用适用的清洗设备和方法。为了清洗方便，设计再制造产品时应该避免曲折的深孔、凹槽等。

（3）检测 零件的尺寸、表面粗糙度、动平衡等的检测，在一般发动机零件生产中都是经常使用的，再制造也使用这些测量仪器。而再制造要检测零件内部的损伤情况，采用各种探伤设备（如磁力探伤设备），决定其是否可以再利用，这是再制造的检测特点。

（4）表面工程技术 专业的再制造生产常采用高新表面工程技术。表 7-11 表

明, 62% 的旧斯太尔发动机零件可以用表面工程等技术恢复零件的外形尺寸和性能, 如根据零件的失效情况, 以预防性维修的思想对零件进行适当的强化处理, 可以使修复零件表面的耐磨性和耐蚀性超过原来的新零件。在发动机再制造中广泛使用的表面工程技术有: 纳米电刷镀、高速电弧喷涂、微脉冲冷焊、粘涂等。

(5) 机械加工及装配 所需的机械设备、量具、工具等与新产品所需的设备是一致的。由以上分析可以看出, B 类零件 (表 7-11) 的选出和修复, 是再制造技术的重点。

3. 我国的汽车零部件再制造业的现状

根据中国汽车工业年鉴的资料, 中国汽车每年的报废数量都非常大, 由于缺乏报废车辆回收体系, 正规再制造企业缺乏稳定的供应源, 以及汽车再制造产品的回收、市场准入和监督办法的法规政策缺失等, 汽车再制造企业无法获得规模效应。

(1) 我国的汽车零部件再制造 我国江苏常熟柏科电机有限公司于 1986 年在深圳设厂, 再制造汽车发电机和起动机。济南重汽集团经原机械部批准, 于 1994 年组建第一家中外合资再制造企业。后来我国又发展了几家再制造企业。2008 年 3 月, 国家发改委召开汽车零部件再制造产业试点启动会, 批准了 14 家试点企业。在试运行期间, 国家规定再制造产品有: 发动机、变速器、转向机、发电机和起动机。同时规定不允许再制造安全气囊系统、安全带系统和排气后处理系统, 规定了旧件的来源, 还规定了再制造企业的产品只能在本企业或委托方销售网络流通, 暂时不允许流向社会。

(2) 建议政策和措施

- 1) 培育和发展再制造企业。
- 2) 继续支持再制造企业上再制造项目, 给予财政支持。
- 3) 加大对汽车零部件再制造技术和设备的技术、装备的研发。
- 4) 抓紧制定有关法规, 加强宣传。

7.4.2 废旧机床再制造

(1) 对再制造对象的研究和分析 我国有很多普通机床, 而随着技术的迅速进步, 目前广泛使用数控机床。对旧式的普通机床进行再制造, 实现机床数控化, 成为机械制造业的一个重要的任务。再制造以后, 数控机床的加工精度和自动化程度提高, 产品质量稳定, 工人劳动强度降低, 使生产条件得到了改善。而机床数控化再制造可以充分利用原有资源, 减少浪费, 有益于绿色环保, 节能减排, 经济合理。

在对机床进行再制造以前, 应该首先对它进行分析, 研究它是否适宜再制造。如果该机床的主要零部件 (如床身、主轴、丝杠、主轴箱等) 已经严重破坏, 不能修复, 即使勉强修复, 成本也过高, 经济上不合适, 则应该按报废处理, 回炉冶炼。

(2) 确定再制造目标和再制造的可行性 根据对再制造对象的研究和分析,对需要进行再制造的零部件进行分析,分析零件失效的原因和破损程度,制定对旧机床数控化再制造升级的目标和技术要求,如机床的运动范围、速度、精度等。

(3) 确定再制造机床的主要结构和控制方案 根据再制造升级的目标和技术要求,确定机床的主要结构,如导轨形式(如滚动导轨、滑动导轨及其加工方法)、滚珠丝杠、电动机、传动装置等的结构和机床的控制方案。

(4) 制定对旧机床数控化再制造升级的技术路线 如图 7-12 所示。

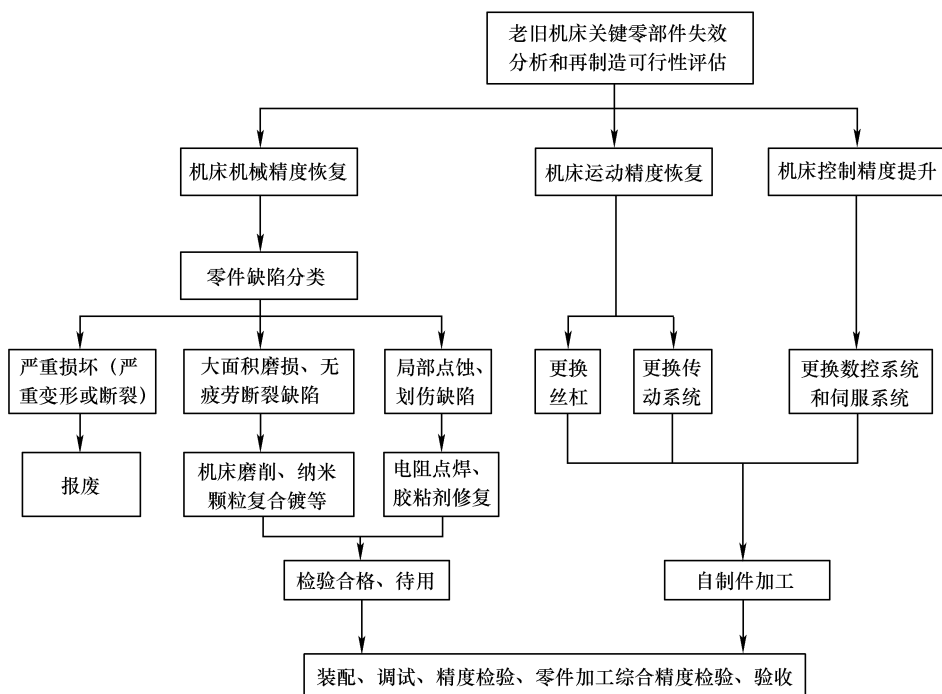


图 7-12 旧机床数控化再制造升级的技术路线

(5) 再制造工艺设计和确定质量检验要求和方法 再制造设计完成以后即可按计划进行再制造工作。

7.4.3 废旧齿轮变速器再制造

汽车的齿轮变速器也是汽车再制造的一个重要的组成部分。据统计汽车齿轮变速器的六种零件的失效比例,齿轮占 60%,轴承占 19%,轴占 10%,箱体占 7%,紧固件占 3%,密封占 1%。齿轮变速器的轴承大部分是滚动轴承,失效后,主要处理手段是更换(换下的轴承孔另外组织再制造)。对于表面磨损的齿轮和轴可以采用喷涂、堆焊、刷镀等手段,增材以获得加工裕量,再进行机械加工,达到预期的精度要求。在润滑油中加入添加剂,可以提高齿轮的耐磨性和效率,采用智能自修复技术,也是可以推荐的措施(参见表 7-8)。

第 8 章 国内外有关节能减排的对策

8.1 我国节能减排的基本情况和对策

8.1.1 坚持科学发展，大力推进节能减排

发展国民经济，建设资源节约型和环境友好型社会是我国国民经济发展的基本国策。我国人口众多，资源相对不足，长期以来，高能耗、高污染、高排放的经济增长方式难以持续，我们应当清醒地认识到改善生态环境，实现可持续发展是我们十分紧要的、迫切的任务。因此，转变经济增长方式，改变工业高能耗、高污染、高排放的粗放式增长方式，发展节约资源、环境友好、无污染、低排放的循环经济增长方式迫在眉睫。

科学发展观基本原理表明，人类社会发展不单纯是经济发展，而要包括社会整体、全面、协调的可持续发展，这种发展模式是人类社会和自然环境相互协调的可持续发展。我国政府长期以来十分重视资源与环境问题，在国家中长期规划中，把坚持可持续发展战略、节约资源、保护生态环境和生活环境作为基本国策，倡导全社会建设资源节约型、环境友好型社会。

我国是世界上最大的发展中国家，十三亿人口的国家工业化进程和城镇化进程令世界瞩目。目前，我国的碳排放量仅次于美国。我国的发展道路和经济增长模式必将成为国际社会关注的焦点。因此，我国政府在哥本哈根会议（2009 年世界气候大会，在丹麦首都哥本哈根举行）上郑重承诺：“到 2020 年单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 40% ~ 45%。”这充分展示了我国谋发展，促合作的负责任大国的形象。

因此，在经济的增长中，节能减排是可持续发展的首要任务。

1. 循环经济模式是人类社会全面发展的必由之路

早在 20 世纪 70 年代末期，西方经济界针对发达国家在工业化发展过程中环境污染严重情况，就已经开始思考和探讨转变经济增长的发展模式。经济的发展必然带动整个社会的全面发展，经济增长机制和经济发展水平对资源来说是一个无限的需求，自然界及生态环境可以提供的资源、能源和环境容量相对人类社会的发展要求十分有限。西方发达国家的经验表明，要解决好这两者的矛盾，必然要选择科学的经济增长方式，这就是“循环经济”产生的总体背景和客观要求。

实践证明，当前我国社会经济发展和环境保护的要求需要改变传统的生产方式和经济发展模式时，只有走新型工业化道路，加快发展循环经济，实施清洁生产，

选择可持续发展模式,才能实现建设资源节约型、环境友好型社会的远大目标。

因此,实践循环经济发展模式,改变以往粗放式的增长模式,合理有效地开发和利用资源及再生资源,节能减排是落实科学发展观,实现社会协调、全面和可持续发展的必然选择。

2. 抓住金融危机的战略机遇期,加快节能减排优化产业结构

“十一五”期间,特别是2008年~2009年间,受国际金融危机影响,我国工业经济也受到严重冲击,出口加工和进出口贸易面临巨大压力。到2009年12月,工业增加值下跌到3.8%,失业人口急剧增加,出口加工业、出口贸易及工业体系严重动荡。

我国政府面对严峻的局势,审时度势,及时出台了应对国际金融危机的“一揽子”计划,颁布了十大产业调整和振兴计划,出台了一系列保增长、扩内需、调结构、惠民生的政策措施,确保国民经济稳步回升。

在工业经济领域,加快节能减排技术发展,促进产业结构调整和优化升级,节能减排及再生资源化工程技术领域中的前瞻性技术与关键工艺的技术创新取得了可喜的成就,主要产业整体素质明显提高。

3. 区域经济和城镇化进程的节能减排取得明显效果

在环渤海经济区、长三角经济区和珠三角经济区域中,在调整产业结构、强化节能减排、创新体制建设、重点工程实施和环境意识培育等方面,都不同程度地取得了阶段性进展。

8.1.2 国家加快培育战略性新兴产业

“十二五”是我国经济发展的重要机遇期。当前,世界各国为增强国际竞争力纷纷提出本国的战略性新兴产业,作为抢占未来经济发展制高点的重要战略选择。

1. 工业经济转变的基础发生重大变化

经历国际金融危机冲击后的世界经济格局正在发生深刻而复杂的变化,美国、欧盟、亚太和中国的多极格局已经形成,我国经济与国际经济相融合,相补充的特征更加明显,工业经济处于大有作为的重要战略机遇期。

1) 我国经济继续保持平稳较快发展,为工业经济快速发展提供了充足的市场空间。“十二五”期间,我国经济增长将较以往有所趋缓,但工业化、城镇化的快速推进在相当程度上可以弥补出口下降的不利影响。我国仍将作为“世界经济的引擎”之一,继续保持相对较快增长,工业经济平稳发展的基础没有改变。

2) 转变经济发展方式成为经济发展的重要环节,为工业经济转型创造了新的空间。我国经济结构战略性调整步伐加快,经济发展将呈现从“快”向“好”、从“国强”向“民富”、从“外需”向“内需”、从“高碳”向“低碳”、从“世界工厂”向“世界市场”等一系列转型。

3) 产业结构调整和优化升级取得新的进展。这主要体现在重点产业技术创新的总体水平明显提高。其中重大技术创新成果有:实施载人航天、高档数控机床、“核高基”(“核高基”,是对核心电子器件、高端通用芯片及基础软件产品的简称)

等重大科技成果。这些重大技术创新成果为工业经济进一步发展壮大及提升产业整体水平,打下了装备制造基础。

4) 采用先进技术和适用技术改造传统产业,提升工业化总体水平取得了积极进展。积极推进信息化与工业化融合,加快汽车、钢铁、船舶、石化、纺织、轻工、有色金属、装备制造等重点产业信息化推进步伐。信息化技术的应用,使节能减排等领域的管理效率明显提高。

2. 培育发展战略战略性新兴产业的重要意义

发展新能源、新材料、节能减排等战略性新兴产业,积极推进节能减排和低碳经济,对实现经济发展与生态建设的有机统一有着重要意义。转变经济发展方式,扭转制约工业经济发展方式转变的瓶颈问题,主要是产业结构不合理、传统产业比重过大及区域发展不平衡所致。积极培育发展战略战略性新兴产业,并采用先进技术和适用技术改造提升传统产业,能够有效促进产业结构优化升级,加快经济发展方式转变。

培育战略性新兴产业,加快形成区域性战略性新兴产业聚集区,是实现经济跨越式发展的有效途径。将确保在若干关系长远发展的新兴产业领域抢得发展先机,同时辐射带动区域经济发展,将极大地促进区域经济产业集群发展壮大,使区域技术创新能力不断增强,从而实现跨越式发展。

3. 科学选择培育节能减排发展战略战略性新兴产业的方向重点

优先发展节能减排技术是环保节能产业的核心任务。以节能减排为环保节能产业的技术选择原则,将有助于实现技术跨越,转变先污染后治理的弊端。

1) 在钢铁、煤炭、纺织、有色金属、装备制造、电子电器等典型产业门类中实现资源综合利用与循环利用,采用保护资源,节约资源,减量化和再利用相结合的原则,努力打造资源综合利用与循环利用产业集群,提升重点产业的资源综合利用率。

2) 坚持科学发展,有所侧重的原则。在重点行业、典型产业中选择共性技术和关键工艺方面有所突破,瞄准国际节能减排科学技术发展前沿和先进制造技术,努力在节能减排核心技术领域实现突破,选择发展资源消耗低、环境污染少、创造就业机会多、经济效益好的产业,为全面实现国家节能减排总体目标服务。

3) 工业经济应加强战略规划。按照国际化、前瞻性、高起点、合理布局的原则研究制定战略性新兴产业发展规划,准确定位重点产业发展目标,坚持市场主导,企业为主体和政府引导相结合,逐步壮大产业规模,以典型企业为引领,以资源综合利用与循环利用的专业化园区为主要载体,创造出一条节能减排、资源节约型的战略性新兴产业发展之路。

4. 认真落实各项培育发展战略战略性新兴产业的政策措施

贯彻落实好国务院和主管部门的各项政策措施,积极推进战略性新兴产业,形成健康发展、协调推进的基本局面。

(1) 完善各项法律、财税、金融、担保和保险优惠政策,支持节能环保产业

的健康协调发展 在节能环保产业领域中,建立政策导向机制,制定技术创新、技术扩散和税收优惠的科技和财税联动创新发展体制,推动战略性新兴产业良性发展;在战略性新兴产业发展初期,给予其一定的税收优惠政策支持;制定相关金融政策,吸纳和鼓励民营资本参与组建战略性新兴产业创业投资基金。

(2) 加快技术创新步伐,尽快形成产业技术集群 完善技术创新体系建设,搭建开放的创新平台,不断释放企业自主创新的能力;鼓励企业不断积累技术研发能力和管理经验,以形成核心技术优势;全面解决节能减排共性技术领域中的技术瓶颈问题。

(3) 完善市场政策 充分发挥市场配置资源的基础性作用,通过优化产业布局,促进产业园区规范化、集约化、特色化发展,不断增强重点区域和园区的产业集聚创新功能;通过建立产学研联合机制,技术创新战略产业联盟、行业技术中心、资源“节能减排”产业示范基地等创新体系建设,加快推动一批关键技术的研发和产业化,努力提高战略性新兴产业的内在发展动力与持续创新能力。

(4) 加快资源综合利用管理队伍建设与人才培养 完善以大专院校为主体,社会机构和企业为辅的培养战略性新兴产业专业技术人才机制。同时,加大对技能型人才的培训力度,引进具有跨学科知识、跨行业经验和广阔视野的战略新兴产业学术带头人,充分发挥各层次人才的作用,不断提升战略性新兴产业企业家的管理素质和创新能力。

8.1.3 节能减排与循环经济的关系

所谓循环经济是经济学界根据生态经济学、环境经济学原理,从国际社会实践经验中总结出来的一种新型经济发展模式。

循环经济模式以资源再循环为原则,资源减量化,将废旧产品中的资源综合利用与再循环利用,形成无污染排放。

发达国家的经济发展实践证明,发展循环经济意义重大:一是转变经济发展方式,使社会发展和环境形成统一和谐的发展模式,使资源得到综合利用和循环利用;二是可以有效减少污染物的排放,使资源得到循环再利用;三是循环经济有利于改善环境,提高经济效益,使经济发展保持可持续性。

20世纪90年代末期,在我国主要产业的节能减排实践中,由于没有在战略层面上确定经济发展方式的转变,曾经单纯强调环境保护,导致社会节能减排成本代价高,受到不少企业和地方政府的抵制和反对。

随着社会文明进步和国民经济发展,我国环境压力与资源压力越来越大,促使我们思考和寻找改变经济发展方式的途径。2002年,由中国工程院院士首次向国务院提出发展循环经济,促进经济与环境和谐发展的意见,得到国家的高度重视,进而在全社会逐步形成了保护环境、节约资源的理念,倡导循环经济,转变经济发展方式,采用循环经济的经济发展模式解决环境和资源问题,把资源节约、环境保

护和经济效益有机地结合在一起,因而得到了全社会的普遍认同。

国务院于2005年下发《国务院关于加强发展循环经济的若干意见》(国发[2005]22号),确定了我国发展循环经济为基本国策的政策基础,进而为在法律的层面上,为确定发展循环经济,转变经济发展方式,打下了政策基础。我国第十一届全国人民代表大会常务委员会第四次会议于2008年8月29日通过,并发布施行的《中华人民共和国循环经济促进法》正式确立了实施循环经济的法律地位。

循环经济促进法的立法宗旨,就是通过推进循环经济的发展,提高资源利用效率,保护和改善环境,实现可持续发展。

1. 循环经济是一种可持续发展的经济模式,节能减排是循环经济实施过程的重要环节

国际社会在追求工业化发展的同时,面对资源压力、环境压力,开始注重社会和经济的可持续发展问题。传统的经济增长模式是粗放型经济单项流动的线性经济,其特征是高投入、高排放、高污染。这种经济发展方式的主要表现在于大量开采资源,高强度地提取物质和能源,然后将生产、流通、消费过程的废弃物直接排放到环境中,直接后果是严重污染环境,进而导致资源枯竭,社会发展难以为继。

循环经济倡导的是经济增长与环境和谐发展,使经济增长活动形成循环流动,其特征是低投入、低排放、低消耗。在生产、流通、消费过程中产生的废弃物中一部分经过废弃物综合利用与循环利用技术加工分解成新的资源返回到经济运行中,一部分经过环境无害化处理形成无害或低度污染物返回到自然环境中,由自然环境对其进行净化处理。循环经济要求所有物质和能源在经济活动中不断进行合理和持久的使用,最终把经济活动对自然环境的影响降低到最小程度。

2. 环境压力与资源压力

全球经济一体化及现代工业高速发展,促进了人类物质文明的快速发展。与此同时,由于经济规模的增长和人类生活质量的提高,对资源的需求量日益增大,从而导致资源过度开发,环境日益恶化,人类社会发展面临巨大挑战。

1) 全球因环境污染造成严重灾害的典型事件屡有发生,至今仍给国际社会警示。

北美死湖事件:美国东北部和加拿大东南部是西半球工业最发达的地区,每年向大气中排放 SO_2 2500多万吨,其中约有380万吨由美国飘到加拿大,100多万吨由加拿大飘到美国。20世纪70年代开始,这些地区出现了大面积酸雨区,酸雨比番茄汁还要酸,多个湖泊池塘漂浮死鱼,湖滨树木枯萎。

伦敦烟雾事件:1952年12月5日~9日,伦敦发生一次严重大气污染事件。这次事件造成多达12000人因为空气污染而丧生,推动了英国环境保护立法的进程。

2) 我国在改革开放后,工业经济长期保持快速增长,对资源依赖日益严重。我国45种主要的矿产资源中,有10种是不能保证,有5种是属于短缺。随着经济

社会的快速发展,资源供需矛盾和环境保护压力日益增大,这些矛盾正在越来越多制约着经济社会的进一步发展,甚至威胁着整个自然界生物的存在。

8.1.4 节能减排与清洁生产

1. 国际社会节能减排的实践

国际社会节能减排的实践大致经过以下几个阶段:

20 世纪 60 年代,“末端治理”阶段:工业化国家开始通过各种方法和技术对生产过程中产生的废物进行处理,以减少其排放量,减轻对环境的危害。认识到“末端治理”在战略层面上处于最底层,而污染预防策略则处于最高层。

20 世纪 70 年代,发达国家相继尝试运用如“废物最小化”、“污染预防”、“无废技术”、“资源削减”、“零排放技术”和“环境友好技术”等方法 and 措施,来提高生产过程中的资源利用效率、削减污染物以减轻对环境和公众的危害,取得了良好的环境和经济效益。

联合国环境规划署 (UNEP) 于 1989 年提出了清洁生产的战略和推广计划,使清洁生产正式走上了国际化道路。

联合国环境规划署 (UNEP) 的定义 (1996 年):

清洁生产指将整体预防的环境战略持续应用于生产过程、产品和服务中,以期增加生态效率并减少对人类和环境的风险。

对生产过程:要求节约原材料和能源,淘汰有毒原材料,消减所有废物的数量和毒性。

对产品:要求减少从原材料提炼到产品最终处置的全生命周期的不利影响。

对服务:要求将环境因素纳入设计和所提供的服务中。

2. 我国清洁生产的形成与发展

第一阶段 (1983 ~ 1992) ——形成阶段:从萌芽状态逐渐发展到理念的形成,并作为环境与发展的对策。

第二阶段 (1993 ~ 2002) ——推行阶段:确立清洁生产在工业污染防治中的地位,将清洁生产作为实现可持续发展战略的重要措施。

1992 年我国与联合国环境规划署合作推出“中国清洁生产行动计划”(草案)。1998 年 10 月在第五次国际清洁生产高级研讨会上,中国签署了《国际清洁生产宣言》,成为宣言的第一批签约国。

第三阶段 (2003 ~ 今) ——依法全面推行阶段:我国工业经济主管部门提出走新型工业化道路的产业政策,为加快推行清洁生产创造了条件。

《中华人民共和国清洁生产促进法》(2002 年 6 月 29 日第九届全国人大常委会第二十八次会议审议通过)的实施为加快推行清洁生产提供了法律保障。

3. 清洁生产与循环经济

清洁生产主要是指在产品的设计、清洁能源和节能减排的各个阶段、采用先进的

工艺技术与设备,通过完善的管理和综合利用等措施,从源头削减污染,提高资源利用效率,减少或者避免生产、服务和产品使用过程中污染物的产生和排放,以减轻或者消除对人类健康和环境的危害,最终达到节能减排的目的。其目的是实现清洁生产,保护和改善环境,保障人体健康,促进经济与社会可持续发展。

需要强调的是,清洁生产只是一个相对的概念,所谓清洁的工艺、清洁的产品、清洁的能源和原料是和现有的工艺、产品、能源比较而言的,也就是说推行清洁生产本身是一个持续完善的过程,随着社会经济的发展和科学技术的进步会不断提出更新的目标,以达到更高的清洁生产水平。清洁生产不可能把所有生产过程中产生的污染物完全消灭。那么在当前我国技术现状的情况下,应当采用循环经济发展方式,以经济循环的模式促进社会、经济和环境的协调发展。

发展循环经济,是人类对难以为继的传统发展模式深刻反思后的理念创新。清洁生产是在生产过程中遵循循环经济的理念,使生产活动的全过程达到“零废物、零污染、零排放”。由循环经济和清洁生产的基本理念可知,两者均强调对资源的合理有效配置(包括合理高效开发和利用),通过技术创新对不可再生、稀缺的资源的替代,提高资源使用效率,实现资源的综合利用与循环利用,最终体现的还是经济发展的可持续性,其经济增长方式很好地解决了环境保护与经济增长“不可调和”的矛盾,揭示了环境保护的本质作用就是规范经济增长模式,以实现社会经济的可持续发展。

虽然清洁生产着重在污染物产生初始时预防污染,在其内涵中同样包括了实现不同层次上的物料再循环外,还包括减少有毒有害原材料的使用,削减废料及污染物的生成和排放以及节约资源能源等要求,这与循环经济主要着眼于实现自然资源,特别是不可再生资源的再循环目标是完全一致的。从实现途径来看,清洁生产和循环经济也有很多相同之处。清洁生产的实现途径可以归纳为两大类,即源削减和再循环,包括:减少资源和能源的消耗,重复使用原料、中间产品和产品,对无害产品进行再循环,尽可能利用可再生资源,采用对环境无害的替代技术等,循环经济的“3R”原则(减量化原则、再使用原则、再循环原则)就源于此。可以说从清洁生产到循环经济,是对清洁生产在更高层次、更大范围上的拓展与深化。在循环经济的层次高度上实施清洁生产,有助于推动产业系统的生态化转型,有助于支持促进消费方式的转变,从而使清洁生产在循环经济中获得更为彻底的发展。

另一方面,清洁生产又不完全等同于循环经济,清洁生产偏重于企业生产层次,更加注重在工业生产过程中的产品生命周期中对资源的合理有效利用;而循环经济则偏重于整个经济系统,从更加宏观的国民经济运行机制来讨论资源的合理配置,要求以环境友好的方式利用自然资源和环境容量,实现经济活动的生态化转向。也可以说是整体和局部的关系,清洁生产是循环经济的基础,是循环经济在微观组织的具体体现形式,两者最大的区别是在实施的层次上。在企业层次实施清洁生产就是小循环的循环经济,一个产品,一台装置,一条生产线都可采用清洁生产

的方案,在园区、行业或城市的层次上,同样可以实施清洁生产。而广义的循环经济是需要相当大的范围和区域的,如日本称为建设“循环型社会”。推行循环经济由于覆盖的范围较大、链接的部门较广、涉及的因素较多,见效的周期较长,不论是哪个单独的部门恐怕都难以担当这项筹划和组织的工作。

就实际运作而言,在推行循环经济过程中,需要解决一系列技术问题,清洁生产为此提供了必要的技术基础。应该特别指出的是,发展循环经济,前提是产品在设计阶段就采用生态设计,没有产品的生态设计,循环经济只能是一个口号,而无法变成现实。清洁生产是实现循环经济的基本形式。

由此可见,循环经济的实现需要清洁生产的大力推进;清洁生产的推进需要循环经济宏观层面的指导,两者互为依赖和促进。其基本思想是一致的,只不过是不同层面上探讨实现环境与经济协调发展的问题。

8.2 国外清洁生产政策与实施状况

8.2.1 美国清洁生产政策与实施状况

1990 年秋,美国国会通过了污染预防法。

1990 年对联邦清洁空气法做了修订。修订内容融汇了革新措施和预防办法,以解决某些最为严重的空气污染问题,包括有毒气体排放、酸雨、城市烟雾以及大气层臭氧减少等。

1991 年 2 月,美国节能减排局(Environmental Protection Agency, EPA)发布了一项污染预防措施,阐明该局在污染预防工作中所处地位、职能及其在此领域中所定目标。该项措施拟服务于以下两种目的:

① 提供指示,使节能减排局内部受规章限制和非受规章限制方案中的污染预防工作集合为一体;

② 提出一项方案,使之在合理的时间框架内完成某种污染预防的特定目标。

能源部在其 1990 年废弃物减少政策声明中宣布,废弃物的减少(根据该部界定,指减少来源、回收利用和处理)将成为今后在研究活动、程序设计、设备改进与现代化、新设备设计、设备操作和设备预防污染以及设备停止使用等方面的一项主要考虑,声明并宣布废弃物的减少应采用自上而下一整套环境保护措施来加以完成,并先从减少废弃物的来源开始。该项政策声明它适用于无害固体废弃物、资源保存回收法(Resource Conservation Recovery Act, RCRA)条例子项 4 所限制的有害废弃物、放射性废弃物、放射性混合废弃物,并且也是在开发能源部整个范围内,污染预防计划分阶段进行的第一步。

1. 清洁技术的概念及定义

美国使用污染预防这一名词代表清洁技术的概念。美国节能减排局(EPA)将

污染预防定义为：“采用不同原材料、改进工艺或操作等在源头削减（限制）污染物（或废弃物）的生产。这包括减少使用有害物料，降低能源、水或其他资源消耗的措施，以及通过维护或更为有效地使用来保护自然资源的措施”。

2. 清洁技术战略及其实施

(1) 联邦污染预防计划 美国节能减排局制定了一系列计划以支持污染预防项目。该项目计划所需资金是按美国节能减排局 1991 及 1992 年度预算的 2% 拨付的。

节能减排局还拟定了一项措施，以减少人体受铅的危害。铅污染预防计划包括采用某些以市场利益为基础的刺激手段，以限制或消除铅的使用；应用立法手段（如有毒物质制法），在现时或将来的产品中减少铅的使用；甄选并鼓励应用更为清洁的工艺技术，从事铅的开采、冶炼和加工。1991 年 1 月美国节能减排局宣布实施绿色照明计划。这个计划鼓励美国的大公司在有利可图并在保持或改善照明质量的条件下，安装节能照明设备。使用节能照明技术和设计可减少对能源和电力的需要，从而减少发电厂产生的污染。

节能减排局还推出了“绿星电脑”计划，鼓励电脑业生产个人电脑 Personal Computer (PC)，以最低限度地使用能源。

1993 年，能源部发起污染预防鼓励倡议，目的在于降低能源消耗的增长率。该部提出给予高达十万美元的鼓励和免费技术评估。

节能减排局已成立了一个污染预防办公室，以协调所有地区办公室中该局的污染预防活动。

国防部（Department Of Defense DOD）现在同节能减排局和其他联邦机构就本国废物减少评估计划（WREAFS）进行合作，该项计划包括为寻求降低或预防污染的各种办法的一系列评价工作。它的两项主要目标是评价联邦设施中产生污染的过程，以便寻求在源头降低和回收利用的机会，并以项目报告、项目摘要、会议展示和专题讨论会等方式，向公、私双方转让技术，以加强采取污染预防的措施。

国防部的工业技术办公室已制定了一个工业废弃物减少计划，寻求同工业界共同工作以实现节约费用的废弃物减少机会，从而减少能源的使用和对环境造成的压力。该计划以现有的若干项活动为基础，集中力量开发出特定技术以降低工业方面的废弃物。

节能减排局在其“1991 年的污染预防工作：减少工业污染物进展情况”文件中，就 24 家大公司的污染预防计划做了汇报，这些公司的方案、目标和所取得的成就是属于全公司范围内的。其中的几家公司是：

Amoco 公司：“减少废弃物计划（1983）”；

Chevron 公司：“节约开支及减少有害物计划（1987）”；

Dow 公司：“减少废弃物有利可图（1986）”；

通用动力公司“零排放（1985）”；

IBM 公司、孟山都公司：“优先一号”（TRI 废弃物）。

(2) 各州的污染预防计划 至 1991 年 4 月 1 日, 半数以上的州均通过了污染预防法。因此, 许多州已开始实施污染预防计划。各州污染预防计划中的典型组成部分为: 信息交换室、研究与开发、技术协助、现场技术协助、对工业给予财政资助、对市县给予财政资助、废弃物交换、检查、专题讨论和座谈、大型会议、视察和评价、通信评估污染预防计划、同学术机构合作以推动污染预防计划和奖励计划。

地方政府也可通过公有废物处理场 (Public Of Treatment Waste, POTWs) 推动污染预防计划。处理场检查人员对废弃物排放企业有彻底的了解, 可以对那些产生废弃物的企业提出从源头降低污染的建议和办法。利用这些人员作为契机, 地方政府可通过既省钱又有效的办法来推动污染预防计划, 其中有些办法是州和联邦一级机构所不可能做到的。

(3) 对中小企业的特殊鼓励办法 根据联邦政府“中小型企业污染预防”特殊计划, 对每家进行污染预防革新示范的中小企业, 各给予 25000 美元的奖励。

在辛辛那提节能减排局风险减少环境实验室 (Risk Reduction Environmental Laboratory, RREL) 对一项十年计划 (1989 ~ 1993) 提供经费, 在“大学城市科学中心计划”中, 科罗拉多州立大学、路易维尔大学利田纳西大学为中小企业提供 90 项免费污染预防评估。自 1994 年起, 该项计划已经陆续建立 6 个中心, 每个中心承担 10 次评估工作。所需经费将由“节能减排”局和能源部的能源效益和再生能源办公室拨付。

(4) 未来行动计划 节能减排局内部的清洁空气计划正在为有害气体污染物以污染预防为重点制定最大限度可能完成的控制技术标准 (Max Achievement Control Technology, MACT), 清洁水计划活动包括评审最佳适用技术规范 (Best Adaptive Technology, BAT), 以保证达到清洁水法制定的工业排放标准, 该局还正在制定新的工业水排放指南, 这项指南考虑了各种设施可能做到的源发地降低污染的选择办法。

(5) 信息手段 美国节能减排局已建立了污染预防信息交换所 (Pollution Prevention Information Clearing, PPIC)。交换所向联邦、州、地方和各国政府、工商企业、公私会社、公益团体及学术机关等提供污染预防信息。此项工作是通过其姐妹机构国际清洁生产信息交换所 (International Cleaner Production Information Clearing, ICPIC) 进行的。国际清洁生产信息交换所是由联合国环境计划署和美国节能减排局共同主办的。可通过电话热线或计算机信息网络, 同污染预防信息交换所取得联系。

8.2.2 丹麦清洁生产政策与实施状况

1. 清洁行动战略与计划

丹麦作为北欧发达国家的循环经济的成功模式, 为清洁技术建立了清洁战略和

政策,许多项目都起始于该战略。清洁技术是一种预防战略,该战略与治理战略截然不同。末端治理战略是一种补救策略,污染和废物被认为是一种不可避免的结果,只能通过适当的治理措施和倾倒措施处理。而预防战略将末端治理措施作为第二种措施,它只能在清洁技术不能防止环境污染的情况下使用。

预防战略是丹麦节能减排局(MILJ)在1983年对清洁技术和再生利用技术提出的。1984年,预防战略第一次出现在立法之中,以法令的形式规定再生利用和废物最少量化。

1988年,丹麦政府根据世界环境与发展委员会(Brundtland Commission)提出的报告,出版了“环境和发展:丹麦政府行动计划”由这项计划引发的讨论使人们将采用清洁技术放到首要位置。

行动计划的中心思想是使用清洁技术和再生利用手段预防环境污染。计划应用市场经济调动生产者和消费者承担相应责任,采用生命周期评价方法的预先警告行动等等,将各行各业中的环境问题集中处理。

环境行动计划列出了下列重点:

- 1) 发展清洁技术,目标是从源头开始减少污染。
- 2) 再生利用,目标是限制消耗资源和不断增长的废物数量。
- 3) 废物焚化过程中的热回收。
- 4) 倾倒不含可回收资源的废物。

丹麦的环境保护立法框架在1991年进行了修改,条款的覆盖范围扩大了。现在,法案不仅立法防止并减少对空气、水、土壤的污染,同时还限制使用和浪费原材料和能源,法案还促进使用清洁技术。现在,清洁技术已经成为环境保护法案的基本组成部分。

这项法律的目的是保护丹麦的自然和环境,保证人类生活质量的持续发展,并保护动植物。

该法律的目标:

- 1) 防治和查处对空气、水、土壤和下层土壤的污染和振动、噪声产生的危害。
- 2) 出于对人类和环境卫生的考虑,建立各项规定。
- 3) 减少使用和浪费原材料和其他资源。
- 4) 促进使用清洁技术。
- 5) 促进再生利用和减少废物处理中的问题。

法律的基础是除了明确被当局允许的污染外,应该禁止所有污染行为。不管是在农村或在城区,环境保护当局必须明确地指出工业生产允许的条件,包括废物数量,废水排放量,废气排放量都必须以法律为依据,严格地规定执行。

环境保护法案包括许多针对预防行动和可持续性发展的通用目标。但是,法案的相关文件中对具体目标和目的描述不如“环境行动计划”详细。特定目标中,

例如 1995 年的生产中应减少使用特定替代物质 25%，泛指的条款中有毒废物总数量则没有给出。至于氯氟烃 Chlorofluorocarbon (CFC) 的使用，则属例外，蒙特利尔议定书（蒙特利尔议定书又称为蒙特利尔公约，全名为“蒙特利尔破坏臭氧层物质管制议定书（Montreal Protocol on Substances that Depletethe Ozone Layer）”，是联合国为了避免工业产品中的氟氯碳化物对地球臭氧层继续造成恶化及损害，承续 1985 年保护臭氧层维也纳公约的大原则，于 1987 年 9 月 16 日邀请所属 26 个会员国在加拿大蒙特利尔所签署的环境保护公约。该公约自 1989 年 1 月 1 日起生效。

2. 清洁技术概念和定义

在丹麦对清洁技术的理解包括不同层次。一是采用简单的经济方式更有效地利用原材料，而另一种则是使用先进的工艺和产品设计而彻底减少污染的效果。

目前，在丹麦清洁技术已成为工业界普遍采用的具体解决方法，同时也作为环境公共立法的根本战略。作为一项基本原则，环境部对清洁技术的最新定义作了如下描述：

对于产品生产、使用和最终处理处置所产生的污染，要最大程度地并尽可能地靠近源头，使其达到最小化。这意味着必须改进产品和生产工艺，使得社会中原材料和物质循环造成的环境污染总量降至最低点。

清洁技术的关键环节是使人们认识一个事实，所有生产中使用的原材料和所有消费商品最终都会在环境中报废并产生潜在的污染源。因此，污染问题必须从资源使用的循环起点开始考虑，这意味着在环境中报废的物质应该最少量化。

3. 清洁技术战略和执行

丹麦的清洁技术战略通过多种行动计划和项目来执行：

1986 ~ 1989 清洁技术发展计划，投资预算为 120 万欧元。

1990 ~ 1992 清洁技术行动计划，投资预算为 3 千万欧元。

1990 ~ 1992 年清洁技术行动计划的目的是预防环境污染和预防破坏环境，促使企业在生产过程中采用清洁技术或按照清洁技术的原则来生产产品。

1993 ~ 1997 清洁技术行动计划，投资预算为 5 千万欧元。

1993 ~ 1997 年的清洁技术行动计划是最新的行动计划，该计划是执行新的环境保护法案。行动计划的目的是根据前一阶段清洁生产实施情况，继续安排今后的清洁生产活动，并将清洁生产的重点从生产过程转变到产品。

4. 政策手段

(1) 立法 丹麦当局规定，当严重污染的企业建设或扩大生产规模时，必须申请排污许可，并获得政府的批准。

这项规定以法令形式执行，后来的导则规定了环境主管部门如何以及何时向污染企业发放许可证。

在导则中清楚地指出，申请排污许可时必须按照清洁技术战略的要求，要在报告和文件中说明要使用的清洁技术以及环境保护最佳使用技术装置的资料。

在报告中,公司必须描述在该行业使用清洁技术的可能性,并必须提供某个公司选择该项技术的案例。

(2) 自愿协议 在新的环境保护法案中,包括可通过与工业界签定自愿协议减少污染。

(3) 财政政策 丹麦采用清洁技术的经费来自税收,关税以及收费与许可加补贴。

税收,关税和收费:

丹麦对环境和能源方面特定排放和产品征收税款已经很多年。

包装方面税收,包括对零售贸易中的一些包装。对每瓶啤酒或柠檬汁的关税是0.067欧元。收税的目的是鼓励人们使用能够再生的材料以最小化废物产生。

对于小于1kg的化学品材料 and 产品包装也要征税。税收占包装材料价格的20%。税收的目的是为了减少销售和使用有害化家用化学品。

餐具要征收材料价格的50%。以减少使用产生的废物。

原材料中的沙子、碎石子和其他原材料也要征税,税收是每立方米0.67欧元。目的是减少使用原材料并资助一些环境领域的活动。

进口的氯氟烃 Chlorofluorocarbon (CFC),每千克征收0.4欧元,关税用于自助出口。税收的目的是减少使用CFC并资助与清洁技术项目相关的材料替代。

水的税收,1998年从每立方米0.13欧元提高到0.67欧元,几乎所有在VAT注册的工业企业都可以申报领回税收。

可焚烧性废物每吨税收21.45欧元、填埋式废物每吨税收26.15欧元等对废物的税收。税收的目的是为了减少废物倾倒的数量和增加再生的数量。

5. 财政支持

工业部开展了一个支持环境技术开发成果的商业性项目,其中包括清洁技术。项目的主要目的:

- ① 增加环境技术的出口;
- ② 增加清洁技术的出口;
- ③ 增加少污染产品的竞争力;
- ④ 促进产品质量和国际环境产品和标准化。

6. 信息和教育,研究和开发

在行动计划的指导下,使用相应的基金,主要的清洁技术活动开始得以执行。特别的行动针对特别的目标、目的和对象群,但是所有的这些行动都可以被罗列成各种信息和教育活动,其目的是为了促进态度的改变。主要活动:调研活动、技术发展、完善和示范项目、环境评价和产品生命周期评估 Life Cycle Assessments (LCAs)。

丹麦的清洁技术概念不断扩展,目标是将物质和社会材料循环使用,使环境总压力减至最小。一些专家指出整体清洁技术概念还应该包括雇员的工作环境。

丹麦是欧盟的成员国，在结合清洁技术概念到环境政策方面做了极大的努力。大部分的工作是通过项目和行动计划进行的，完成的项目多达 350 个，参加的企业都是自愿的。更多的法令正在制定过程中。

8.2.3 荷兰清洁生产政策与实施状况

1. 清洁生产技术概念和定义

在荷兰，清洁生产技术的概念主要与污染防治方法有关。污染防治的定义如下：

从减少资源、实行再生利用或减少对环境有害物质总量入手，避免或尽量减少废弃物和排放物的产生。

废弃物和排放物的意思是：所有固体、液体和进入大气的气体、水和土壤。污染防治是一个综合体系，应考虑污染物从一地转移到另一个地区的可能性。

污染防治一词覆盖了多层意思，它们是：

健全的管理；改进工艺过程；改变原材料；改变产品；建立循环利用。

污染防治不包括企业的不在现场的废弃物的循环利用及附加技术。

污染防治措施基本上是一件与企业使用材料和能源的有效利用和清洁生产环境的需要相匹配的工具。污染防治措施为分析环境的性能和改善这种性能的评价提供方法。污染防治也包括环境产品的改善。

2. 清洁生产技术的策略和实施

(1) 立法 在 1980 年末，官方除地表水的污染法律之外，把各自分隔的法律集中统一在一个法律中。在新的法律中，许可证中对于综合污染防治有几种选择。

制定指导性方案，以探索不同的选择作为规则。把综合污染防治计划列入行政许可证。另外，在国家权威部门和贸易组织或公司之间有协定，用协定代替立法的主要原因是后者进行了许多年的调整和贯彻。

(2) 财政文件

补助金：国家主管部门已制订不同的补助金计划，以奖励发展环境技术的实施。

税收：鼓励进行家庭废弃物的防治，实施区别征收的指导性计划。

(3) 信息和教育 荷兰的计划是建立在美国和荷兰之间经验交流的基础上的，主要在美国环境保护局，一些美国学者和荷兰的学校之间接触，其目的是由美国的研究机构向荷兰传授关键技术。PRISMA 计划由 IDRS（Interfaculty 环境科学部门，Erasmus Rotterda 大学）和 NOTA（在海牙的荷兰技术评价组织）来的顾问执行。

PRISMA 计划涉及荷兰在食品加工，金属包装，金属构件，公众运输和化学工业等方面的 10 个公司，计划的目标是建立多种污染防治的概念。PRISMA 计划的一个重要作用是示范在公司中减少污染可行的和高效使用经费的预防措施。

环境管理系统和指南：对企业控制污染和废水排放的环境管理系统是一个组织

系统,它包括对一个环境程序规则的起草,内部管理和协调,物质的登记,定期给权威机构提供报告和定期检查。许多商业组织已经起草了他们自己的环境管理系统手册。这些手册在企业中为该系统的实施提供指导性方针。

(4) 财政激励

1) 补贴:在经济事务部管理的范围中,大量的在技术发展和执行方面的投资不会中断或因为没有补贴而被推迟。

2) 税收:对水污染进行的税收非常有效,它激励企业在环境技术上进行投资。由于增加了把废弃物向其他地方输送的数量,对固体废弃物处理的税收效果不太明显。税款在荷兰仍然是讨论的话题。

8.2.4 法国清洁生产政策与实施状况

1. 清洁技术政策

法国清洁技术方面的政策是基于1979年的一项政府决定。条款中一方面提倡废物和污染物的再利用技术,另一方面在生产中提倡低废和无废工艺。

从1990年9月颁布的国家环境计划中得出,废物管理政策的目的是:

从源头上限制废物和有毒物质的产生;控制废物的生产和运输;鼓励废物再利用和能源再生;改进废物处理技术;提高公众意识。

清洁技术付诸工业应用(技术转移)的主要障碍在于工业界对清洁技术的信心,使用了新技术以后能否带来竞争上的优势,对潜在的新市场缺乏认识,新工艺要求过高等。因此,有必要加强教育和提高认识。

2. 清洁技术战略及其执行

法国的环境部清洁技术和废物局主管废物管理政策和适用的测试仪器的管理。

法国环境能源管理部(ADEME)成立于1991年,由废物、大气质量和能源三个部合并而成的。ADEME负责环境领域(大气、水、土壤和噪声)及能源领域应用清洁技术和废物最小化的项目管理和采集信息,促进研究与开发计划的技术和资金支持,教育和示范项目。

水管理署从事水的管理和水污染的控制。采取谁污染谁付费的原则。管理署负责收税,并对采用清洁技术和先进的废物管理的单位发放补贴。

清洁技术委员会向清洁技术及废物司推荐专家,这些专家来帮助提供制定政策的咨询。清洁技术委员会的成员来自行政管理部门和工业界,他们负责对来自工业界的建议进行评价,同时对一些建议中的项目提出财政支持的评价,从1992年开始,他们所作的决定都被清洁技术及废物司所采纳。

法国清洁技术的战略目标是鼓励工业界用低能耗、低污染的新工艺替代现行工艺。另外,还特别将重点放在清洁技术领域的信息和教育修正。清洁技术同时也进入了促进经济发展的项目。此外,法国政府每年举行“企业-环境竞赛”,并给予若干奖励;推荐清洁技术,倡导环境标志(ECO)产品,促进和第三世界国家在

环境保护方面的技术交流。

3. 政策措施的实施

(1) 立法 立法中,清洁技术被明确地提出来,被认为是与研究再生技术有同等重要地位的技术政策。废物分类回收、废物治理、末端废物监督等,这些监督手段有助于实现当局制定措施和确立减少、处理废物再生的目标,以及有效地确定废物管理计划。基于这些废物监督手段,政府当局能够与地方工业、研究机构和环境管理部门紧密合作,在技术和财政上可行的条件下,以适当的步骤决定将清洁技术应用于工厂。为了获得政府的批准,新成立的公司必须证明他们在技术与资金可行的前提下,采用了清洁技术措施。

(2) 财政措施 法国环境能源管理部(ADEME)和水管理署实施了一些促进措施,对采用环境技术的公司(包括末端技术和清洁技术)给予补偿。

研究与开发示范项目的财政补贴最高达到总投资的50%。补贴用于清洁技术应用中对原过程的改造。但是,在示范性的研究与开发完成后,对清洁技术的应用过程投资将不予补偿。

水管理署将清洁技术区分为两类,并由此产生不同形式的财政支持:

对于采用清洁技术过程代替原有过程的项目,很难区分生产投资与污染限制投资。因此,财政支持一般是对工程总投资的70%以低息贷款的形式提供支持(利率为一般利率的25%)。

对于原工艺过程进行改造,目标是物质再利用和废物最小化,在清洁技术方面的投资是很容易被区分的,因此,项目总投资的40%来自财政补贴,20%来自贷款。

(3) 信息与教育 采取多种措施引导和影响公众意识,向企业提供清洁技术信息。在有关刊物上出版专题文章,并计划每年出版一期示范项目的应用结果。ADEME信息简报发布到工业和地方当局的各部门。能源效率技术学会发行的月刊“能源副刊”对清洁技术的最新发展趋势给予了一定的介绍。

建立了教育指南,面向高年级的大学生(工科院校)和工厂工人。环境管理署对中小企业 Small and Medium Enterprises (SMEs) 研究与发展项目的重视和支持,同时通过贸易协会提供信息。

8.2.5 德国清洁生产政策与实施状况

1. 清洁技术政策

德国联邦政府将清洁技术以及生产与节能减排一体化的概念融合进环境政策框架。环境政策的根本目标是承诺生命周期评价和再生过程的进一步改进。

在制造、运输、零售行业,政府强调发展和执行回收产品和包装的义务。这项措施的目的是避免可能产生的废物。

2. 清洁技术的概念和定义

在德国,“低排放技术”(“低废技术”)包含了“清洁技术”的各方面内容,比“清洁技术”更加通用。1986年德国政府环境条文导则中给出了专门的定义。“低排放技术”借助于源头主要措施,包括低废工艺和低废产品。由于这些“主要措施”是在源头预防污染物的产生,因此要求在工业的生产工艺和消费过程引入新的概念。通过“主要措施”能够同时更有效地利用原材料和能源。德国的污染预防环境政策,非常重视在性能近似的条件下,用危害小的原材料代替有毒原材料。

3. 清洁技术战略和实施

在德国没有全国性的清洁技术战略。但是在联邦政府(环境部、研究和技术部)和节能减排局资助或倡导的具体环境项目中,必须考虑清洁技术的应用。因此具体参与清洁生产实施的机构是联邦环境部、研究与技术部和联邦节能减排局。

从总的环境战略和政策中可以很清楚看到废物管理政策中强调立法,并把污染预防放在首位,其次是物料循环利用,再次则是利用废物焚烧强制性回收能源,最后是废物最终处置,包括与企业签定自愿协议。在这种背景下,联邦环境部(Federal Ministry of the Environment, FME)、联邦科技部(Federal Ministry of Research Technology, FMRT)以及企业、协会之前保持长期接触。其目的是促进开展研究与开发和技术创新,并推广示范过的新技术、新工艺。

4. 实施的政策措施

(1) 立法 由于清洁技术作为德国环境政策一部分,对气态、液态、固态废物最小化的立法为:

1986年8月27日避免废物和废物管理法案;

1990年6月26日修订联邦排放控制法案;

1990年2月12日修正供水法案;

1990年12月6日废水收费法案修正案。

减少CO₂计划,1991年12月11日修正;

1991年6月12日避免包装废物的命令;

1992年3月12日避免废物和废物管理法案的第二个管理条款;

(2) 财政手段 对清洁技术没有具体的财政促进计划项目。可是,在联邦环境部有一些计划从事开发、改进“综合措施和总体投资”计划,该计划通过示范项目对应用环境技术给予财政支持。而且,联邦环境部和联邦科技部参加了EU-REKA(尤里卡)开展的“PREPARE(筹备)”工作,该项目是对环境友好产品的研究。

地方政府有各自的促进计划,主要是支持示范和市场定向的项目。

(3) 信息和教育,研究和开发 不管是计划中的项目还是已经实施的项目,联邦科技部对资助的项目不断收集环境技术资料,同时收集对项目的评价资料,还组织观摩活动,推广环境保护技术和经验。

对于在德国科技部计划中的低排放技术项目，开发与研究针对工艺过程和由产品造成的废物排放，包括运输、储藏、使用处理。项目参加者可获得补贴形式的财政支持以弥补收入损失。

1994年1月，针对生产—节能减排一体化，德国科技部开展了新的开发研究促进项目。因此，所有清洁技术领域的技术成果将被汇集起来并确定促进项目的优先领域。

德国在1977年引用了环境标志 ECO。蓝鹰标志是由环境标志评审团颁发的。带有蓝鹰标志的产品意味着能降低污染发生、废物排放和能源消耗，达到特别低的噪声或污染排放，或者可以再生利用的产品（4000种产品/75产品大类）。

8.2.6 英国清洁生产政策与实施状况

1. 清洁技术政策

英国政府的环境政策是在1990年9月公布的一份主要白皮书（政策陈述）“共同遗产”中加以阐述的。1991年9月的第二份白皮书“共同遗产：第一年度报告”中说明了进展情况。

英国的环境保护政策在于说服工业企业界了解在生产过程中废弃物最少量化的努力可获得各方面的利益：

节约废弃物处理费用、可能受到的罚款和清理费用；

以其对环境有好处的产品满足消费者的需求；

通过对环境所进行的工作，提高其在环境方面的形象。

英国当局面临的问题是如何使中小企业获得废弃物最少量化方面的信息和建议。英国打算通过下达行动来解决这个问题。

2. 清洁技术的概念及定义

英国的环境保护政策并没有明确地反映出清洁技术的概念。环境保护政策的首要任务是废弃物最少量化，它是指要从源头降低废弃物的产生。首先要预防废弃物的产生，而后才是对其加以处理。废弃物最少量化可通过下达技术加以实现：

使用可替代的原料；

溶剂的可回收利用；

副产品的重复使用；

厂房设备的改造；

废品的综合利用。

废弃物最少量化被认为是保持自然物质资源的最好途径，也是在废弃物处理活动中减少可能产生的污染的最佳途径。

英国的清洁技术概念是指所采用的那些技术和工艺（含设备和最佳操作方法），它们能使在能源和原材料的使用、生产过程中的排放物（包括废弃物）以及最终产品和服务在使用中和使用后对环境造成的影响等方面，都降低污染的产生。因此，英

国的环境保护政策将清洁技术同通常使用的末端治理技术和设备区别开来。

3. 清洁技术战略及实施

环境部 (Department Of Environment, DOE) 承担实施中央政府环境政策的主要责任, 涉及一般环境问题以及诸如废弃物最少量化、集中污染控制 (Integration Pollution Control, IPC)、环境标志和审计等有关清洁技术问题。贸易工业局 (Department of Trade and Industry, DTI) 组成自己的环境保护部门, 作为企业活动和节能减排政策的中间界面。贸易工业局环境保护部门的任务是提供有关减少污染的商品化设备、废弃物最少量化和环境审计等方面的信息。环境部和贸易工业局联合立法 (由环境部牵头), 皇家污染检查组 (HMIP) 在集中污染控制 (IPC) 下, 给予授权 (批准方案), 并从而规定各种条件, 要求废弃物质的排放不得违反法定限制、标准和目标。

为推广清洁技术, 政府 (由贸易工业局牵头) 可与产业部门团体以及公用事业单位进行合作。

英国废弃物最少量化的对策, 首先是提高人们对废弃物最少量化所产生的经济效益和环境效益的认识。其次, 制定立法限制自由选择权并加大废物处理费用以及通过刑法和民法处罚打击污染, 此外, 还以资助方式支持示范和研究开发项目。

4. 政策措施

(1) 立法 1990 年制定的环境保护法, 在第一部分的关键措施是, 限制废物最少量化方面的规章制度。该法令介绍了自 1991 年 4 月 1 日起生效的“集中污染控制 (IPC)”的概念。依照“集中污染控制”的内容规定, 原来分别受有关空气、水和土地保护等立法限制的最为严重的商业、工业和其他方面的污染行业, 必须在 1991 年至 1996 年期间陆续从 HMIP 获得单独授权后, 才能继续运行。从 1991 年 4 月 1 日开始, 凡是新建的工厂和工艺属于 IPC 制定的行业在开始生产之前必须获得 IPC 的审核。“集中污染控制”对在这些生产过程中所制造和所使用物质的数量和成分, 均加以控制。

1990 年的环境保护法还制定了一项“不承担过多费用的最佳适用技术”的定则, 各企业必须采用以防止其规定的生产过程中产生的污染。

1990 年环境保护法第二部分规定了“注意职责”, 对产生废弃物的企业征收全部废弃物处理费用, 从而引导这些企业废弃物最少量化的产生。

(2) 经济措施 根据政府规定, 经济措施的目的, 在于使产生废弃物的单位承担全部废弃物处理费用和有关的环境保护费用, 同时并鼓励废弃物最少量化的回收利用。更为现实的办法是: 政府在 1993 年安排了一段公众咨询时间, 征求在固体废弃物管理方面如何运用经济措施。

(3) 信息与教育, 研究与开发 政府了解到企业界缺少对清洁技术和废弃物减少方面的知识, 因而要设法提高它们对废弃物最少量化所产生效益的认识, 并强调其有效的经济意义, 而不仅是关于环境保护意义。政府还应使企业能获得有关文献。

在这方面, 贸易工业局举行定期报告、参加展览, 并在有关刊物上发表文章。

政府支持示范工程, 鼓励并宣传废物最少量化所取得的效益。

科学和工程研究理事会 (Science and Engineering Research Council, SERC)、农业和食品研究理事会 (Agriculture and Food Research Council, AFRC) 以及经济和社会理事会 (Economic and Social Research Council, ESRC) 都特别鼓励目的在于寻求可能有的清洁技术的长期科研工作。

8.2.7 捷克清洁生产政策与实施状况

1. 清洁生产技术的概念和定义

生产对环境无害的产品是一种既改善公司的生产环境, 又同时增加竞争力的具有双重利益的方法。由于这种双倍利益将使公司自愿生产对环境无害的产品。

清洁生产通过下列方法帮助防止废弃物和污染:

- 1) 减少废弃物的来源。
- 2) 在现场回收利用。
- 3) 把废弃物变成畅销的产品。

在清洁生产的概念中并不包括不在现场的回收利用, 因为这不是一种在产品制作过程中有效利用资源的方法。

2. 政策

促进清洁生产的政府策略:

在政策方面, 最重要的行动是由环境部发布的环境无害产品计划, 明确规定在较大范围内实行清洁生产。在 1995 年该计划综合了清洁生产, 环境管理系统 (Environmental Management System, EMS), ECO 标志和自愿地与工业界达成协议, 在清洁生产中心 (Cleaner Production Center, CPC) 的管理下实现。

3. 立法

(1) 自愿协议 自愿协议是一个在政府和工业界之间的协议, 通过这项协议工业界自愿承担在环境上做出贡献。它能为工业界提供双重利益: 改进工业社团的环境装备性能和增加市场的竞争力。

(2) 标准—环境管理系统 环境管理系统 (EMS) 综合环境保护条款进入社团管理系统, 它是鼓励公司“自愿”行为的重要工具。通过监督符合共同的环境协定并帮助他们减少负担。事实上, 它不在法律规定之内。

4. 信息与教育、研究与发展

建立捷克清洁生产中心 (CPC):

CPC 的目的是减少由工业行为引起的环境负担, 同时增加企业的竞争力。CPC 应用清洁生产实现这目标。

CPC 担当协调和促进的角色, 所采用的方式为:

提供培训; 进行示范; 收集信息; 提供政策咨询。

CPC 主要的活动集中在培训和示范方面,通过所有合适的媒体推行清洁生产。

ECO 标志是一种产品定向的环境政策工具。将清洁生产介绍进环境的无害产品标志,使用环境无害产品标志 (ECO), 国家计划的目标是为消费者提供有关产品的信息, 这些产品相对于别的产品具有较少的环境损害作用。使政府刺激环境无害产品的发展, 让消费者建立环境意识。

8.2.8 比利时清洁生产政策与实施状况

1. 比利时 (布鲁塞尔地区) 清洁生产技术的概念和定义

在 1992 ~ 1997 年的废弃物防治和管理的地区计划中提出清洁生产技术的概念: 国内所有的措施都应有助于工厂减少或避免在生产过程中的污染物质的排放 (在源头采取防止措施)。以这种观念, 特别是为了减少和避免污染以及产生废弃物, 清洁生产技术就意味着生产过程需要改进或改变。

2. 清洁生产技术策略和实行

根据 1992 ~ 1997 年的废弃物防治和管理的地区计划, 布鲁塞尔地区议会批准成立一个清洁生产技术机构, 目的是在布鲁塞尔地区促进清洁生产技术。

在布鲁塞尔地区发展署中还有一个商业环境部门给布鲁塞尔的公司提供有关环境立法和财政文件的信息。

3. 政策文件

(1) 立法 在 1991 年 3 月 7 日制订的有相关的地方法律中, 布鲁塞尔环境立法中明确包括清洁生产技术。

布鲁塞尔地方议会有权力采取适当的行动, 阻止或减少废弃物的产生。清洁生产的开展和更经济、更有效技术的采用与重视自然资源是最好的选择。

1992 年 7 月, 布鲁塞尔地方政府通过了 1992 ~ 1997 年的废弃物防治和管理的地区计划, 该计划根据 1991 年 3 月 7 日的地方法律起草。该计划规定通过制度结构促进清洁生产技术。

1992 年 7 月 30 日, 地方法律批准新的综合性方案, 这个方案中每个公司必须从 1993 年 12 月 1 日开始执行并提交年度环境报告。清洁生产技术机构将参与制定将来批准的方案中的部门规定。

此外, 在财政上支持促进清洁生产技术立法:

1993 年 7 月 1 日, 出台促进布鲁塞尔地区经济扩展的地方法;

1991 年 12 月, 地方法令规定对于在研究与发展 Research & Development (R&D) 方面投资增加财政减免。

(2) 财政文件 根据 1993 年 7 月 1 日的地方法律, 布鲁塞尔的公司能够获得投资成本 20% 的财政支持, 只要他们的目标是至少为下列之一:

合理使用能源、水或原材料; 环境保护; 执行由欧盟强制执行的标准。

布鲁塞尔的公司可以获得高达 50% 投资用于技术经济研究、预备性研究、对外协商或培训。

对投资于清洁生产技术的公司, 有一些立法行动提供财政资助, 例如:

1990 年 4 月 17 日的皇家法令 (国家法令条款) 关于 R&D 领域中增加财政减

税作为投资。

1993 年 9 月 16 日的地方性法规条款对于在减少废弃物、回收利用、清洁生产技术等方面引入 R&D 和示范项目的资金提供财政支持。

关于清洁产品的两条法令是：

1989 年 12 月 7 日关于 ECO 标志的地方法律。

1990 年 12 月 20 日和 1991 年 7 月 18 日的关于 ECO 标志的地方性法律条款。

4. 信息与教育、研究与发展

清洁生产技术机构收集、处理和分配信息。出版物包括有关可能减少公司环境压力的信息，提供防治污染的优先权，减少工业废料和清洁生产技术。

清洁生产技术机构也实施推动 1993 年 1 月开始的清洁生产技术计划，该计划主要由在工厂提高认识和与有关的公司代表建立紧密合作的信息组成。这些行动包括公司调查和提供用于该部门的装备、讲座和发布小册子。另一方面是对在污染防治方面进行了重大努力的公司给予鼓励性的奖励（第一次颁奖在 1994 年）。

8.2.9 西班牙清洁生产政策与实施状况

1. 清洁技术政策

西班牙以分散模式采用清洁技术，将清洁技术的内容包含到各种规章中（能源、固体废物、水质量、工业发展等）。

在西班牙分析环境立法时应注意到，在现存的法律和法令中，没有通用的环境法律来控制各个部委。公共组织、自治社团、市政厅、社会机构赋予相应的责任和职权，导致实施防治、改造、跟踪、谈判等工作很困难。

1991 年 12 月 22 日生效的，“保护大气环境”的法律中第 38/72 款正是因此而诞生的法律系统。该法律的总目标中指出“工作的准则是为保护环境而起草一项通用性的法律。”

自治社团在各地区建立了立法和政策，地方政府还实施了一些环境标准和环境项目。地区性标准的强制实施至少要和国家标准的实施一样严格。

2. 清洁技术的概念和定义

西班牙政府没有建立官方的清洁技术定义。西班牙对应用清洁技术的综合概念是污染防治。

3. 清洁技术战略和措施

西班牙没有专门的清洁技术项目。工业和能源部确认下列工作是为了促进清洁技术的工作：

1) 为工业的研究与开发提供财政支持，为协会的教育和培训提供财政支持，帮助企业应用 ECO 管理。

2) 出版手册性刊物针对工业对环境影响的最小化，特别是促进中小型企业废物和排放的最小化，在工业应用 ECO 管理和 ECO 监督。

3) 与工业能源部合作, 西班牙标准化协会最近建立了西班牙 ECO 标志, 颁发了两项与 ECO 管理和 ECO 监督有关的标准。

4) 工业能源部与许多工业协会起草自愿协议。

工业与工艺的环境项目计划 (PITMA 计划) 被认为是最主要的计划项目。评价这些项目的依据是投资到环境项目的资金与参与的公司数量。通过信息宣传促进改善哪个行为, 促进环境行为方面的技术转让与技术鉴定 (ECO 标志、ECO 监督)。

由于缺乏有效的强制性环境立法, 工业界对环境行为的改善工作反映很小。一般都认为只有对环境罚款达到影响企业运行的地步, 工业界才会慢慢改善他们的环境行为。

4. 已经实施的政策措施

(1) 立法 清洁技术被间接地包含在西班牙的环境和工业立法中。没有专门为工业生产工艺设立的清洁技术立法。

鼓励应用最成熟的技术, 通过监督防治污染, 污染环境研究, 重复再生, 事故防止措施以及紧急反映计划等基本上包括在所有西班牙主要环境立法之中。

(2) 财政手段

PITMA 项目: 该项目是西班牙最早的“清洁技术”项目, 由工业、商业、旅游部在 1989 年发起, 目的是促进解决工业污染问题, 通过技术支持和资助计划激励环境行业的成长。

PITMA 为下列项目提供了财政支持:

改造项目、末端治理、废物清洁; 清洁生产方法革新与开发; 培训、促进、技术转让。

(3) 信息和教育 一个国营公司 (国家工业环境研究所) 负责管理协调参加“水平环境项目”的成员公司。该项目支持参与项目的公司评估他们的环境问题并符合立法要求, 确认采用的最佳环境技术, 策划和促进激励行动, 确认市场机会, 提供技术支持和促进合作。

8.2.10 日本清洁生产政策与实施状况

1. 清洁技术战略和应用

政府将节能减排意识融入到工业和能源政策及实施中, 而不是采取“附加”的方式治理环境。

2. 政策与措施

(1) 立法 1991 年, 通过了一项促进资源回收利用的法律。法律中对各行业确定了目标, 包括商业和法律规定的工业企业。

工业企业不仅要努力促进应用回收资源生产产品, 向消费者提供和传播信息, 使他们懂得技术的发展和如何进行资源综合利用以减少废弃物, 同时保护环境, 而

且应该增加使用回收资源作为原材料扩大生产的产品。对于制造、生产、修理、销售、能源供应中带来的副产品,工业企业应该通过技术开发等途径加以回收利用,同时,工业企业应该通过与标准和规定相符合的工艺促进资源综合利用。企业应努力使用那些限制产生副产品的工程方法和结构材料,在设计上,应尽量限制副产物的产生。

(2) 自愿协议 地方政府经常参与主要工厂之间的谈判,目的是达到环境控制措施协议中规定的具体要求。协议随着工厂的更新而更新,因而促进企业不断改进环境设施以防止污染。

(3) 财政手段 1965 年,日本环境公司 (Japanese Environmental Center, JEC) 成立,全部由政府资助,目的是为了对投资进行评估和对污染控制措施提供财政支持。

(4) 信息和教育 1989 年,ECO 标志计划开始启动执行,工作的主要目标是废物最小量化和废弃资源回收的再生利用。

8.2.11 泰国清洁生产政策与实施状况

1. 环境政策、法规及实施

(1) 国家环境质量法 (National Environmental Quality Act, NEQA) NEQA 在 1992 年被进一步修订,并具有下列的关键特征:扩大环境和污染控制的范围,国家环境委员会升级为法令的政策制订中心,制订更严格的标准评定系统,鼓励污染者改正他们的行为,对违反法令的罪行进行惩罚,同时设立环境基金帮助污染者控制和消除他们所造成的污染。

(2) 工厂法 工厂法管理和规定工厂描述的地点和环境,在工厂的生产中使用的机器种类、型号和设备。这些标准和手续用于对生产过程中的废弃物、污染和任何会破坏环境的行为的控制,工厂遵守必需的文件和数据以保证遵守法令及其规定。该法令也直接为使用环境基金作为参考,使资讯管理局 (Ministry Of Information, MOI) 或其他有关部门资助未达到标准的工厂改善环境控制。

(3) 危险品法 该法令制定于 1967 年,作为控制进口、制造、销售、储藏、运输和使用有毒物质的标准。在 1992 年 4 月生效的,危险品法要求在更高程度上在所有范围内控制在工业加工中使用的危险品。

(4) 促进节约能源法 通过能源事务部门,这一法令为在工厂和大型建筑中的能源节约新制定法令,比如能源审核和保存有关能源产品的生产和节约的记录。按这一法令,将设立促进节约能源基金,对于提高能效、更新能源计划和有关的环境活动,包括教育、推动、演示、监测、研究和发展提供基金。

现有的政策、策略和促进污染控制的对策:

在工业污染防治领域提供特别的指导性原则并奖励和鼓励下列行为:

(1) 从矿产资源局 Bureau of Mineral Resources (BMR) 重新安置污染严重的工

业到其他合适的地区。

- (2) 清洁生产技术的应用, 废弃物再循环和水的再利用。
- (3) 制定严格管理控制水污染工业。
- (4) 开始有关附加废水处理中心的可行性研究。
- (5) 为工业企业建立并执行空气扩散标准。
- (6) 建立容纳空气污染工厂的特殊工业区。
- (7) 为工业区和周边地区制订大气质量标准。
- (8) 建立排出物收费系统和新的环境基金, 实行谁污染谁付钱的原则。

2. 污染防治政策和策略

在强调污染防治方面提到三个主要的行动:

- (1) 减少来源——进行新产品的环境无害设计, 改变产品和消除污染源。
- (2) 循环利用——在加工过程中进行再生利用, 节约水和能源。
- (3) 当前缺乏污染防治政策和指导纲要, 这在目前和未来的立法中应明确规定。

3. 政策文件

(1) 信息交换/教育/培训 联合国工业发展组织 (United Nations Industrial Development Organization, UNIDO) 和工业与技术信息银行 (Industry and Technical Information Bank, INTIB) 已经开始支持泰国的亚洲技术研究所的图书馆和地区文件中心作为能源和环境信息系统 (Energy and Environment of Information System, EE-IS) 的领导人, 逐步开始为管理信息结构 (Structure of Management Information, SMI) 在全国传递工业能源和环境信息。

污染防治信息的最好来源是那些从美国环境保护局 (United States Environmental Protection Agency, USEPA) 获得的文档以及横跨美国几个州的废弃物减少至最小限度中心。与 UNEP 的清洁生产计划联系以及开始访问 ICPIC 的数据库, 不断地有国家邀请参加培训活动。

(2) 技术援助和技术演示 通过与发达国家之间的援助计划、资金支持, 双方努力, 促进组织在将废弃物减到最小限度、废物管理、减少污染源、再循环利用、再生利用等方面采取行动。

(3) 财政资助/奖励 对在生产过程中采用环境无害技术的企业提供资助。为了鼓励在生产过程中节约能源和控制污染, 财政部已对许多指定的工业技术降低进口税, 降低的税额是规定关税的一半或 10%, 无论怎样都有所减低, 但对于专门用于污染防治的资助不是非常明确。

(4) 在全国进行污染防治的目标 污染防治和清洁生产项目将由国家清洁生产中心 (National Cleaner Production Center, NCPC) 和政府对污染防治和废弃物处理的基本政策提供帮助。

8.3 我国实践清洁生产，促进节能减排的建议

从源头削减和全过程控制的有效性和生命力，揭示了末端治理的种种局限性和弊端，证明了清洁生产是实现环境效益和经济效益“双赢”的切实有效的环境管理手段，是实现节能减排总体目标的有力措施。

20 世纪 90 年代，清洁生产理念引入到我国以后，我国政府通过制定一系列清洁生产政策措施，建立清洁生产推进机制，开展清洁生产的宣传与培训等措施，取得了阶段性成果。但是清洁生产尚未在工业经济发展上形成整体推进的局面。

2002 年国务院颁布《中华人民共和国清洁生产促进法》。《中华人民共和国清洁生产促进法》的颁布，使工业经济推进清洁生产有了法律依据，但是并没有真正成为各级政府部门有效的管理工具。这种状况至今仍停留在针对产品的管理层面上，没有贯彻到工业生产体系中对生产企业的整体监管层面上。为此，我们有必要对我国清洁生产的管理体制和实践反思，进一步调整政策和规范市场行为，使清洁生产真正发挥其源头削减、全过程控制、经济效益环境效益“双赢”的作用，为实现“十二五”节能减排总体目标发挥积极作用。

8.3.1 我国清洁生产的实践回顾

我国清洁生产的实践历程，划分为三个阶段：

(1) 1973 ~ 1992 年是清洁生产的萌芽阶段 关于清洁生产的思想零星地体现在环境管理的政策文件中，开始提出了“预防为主，防治结合”的环境政策。

(2) 1992 ~ 2002 年是建立清洁生产制度及清洁生产审核示范试点阶段 有关部门颁布一系列规章制度，建立清洁生产制度体系建设。

1992 年，我国将推行清洁生产列入《中国环境与发展十大对策》。《中国环境与发展十大对策》是继联合国环境与发展会议之后，中国于 1992 年 8 月制定的第一份环境与发展方面的纲领性文件。其要点有：

1) 确立实行可持续发展战略，走可持续发展道路。

2) 确定了工业、农业和社会环境治理的重点战略任务：

一是采取有效措施，防治工业污染，提出预防为主、防治结合、综合治理和污染者付费等指导原则；二是深入开展城市环境综合整治，认真治理废气、废水、废渣、噪声的污染；三是提高能源利用效率，采取有效措施大力节约能源，改善能源结构，降低煤炭在我国能源结构中的比重；四是推广生态农业，坚持不懈地植树造林，切实加强生物多样性保护。

3) 制定四项战略措施：

一是大力推进科技进步，加强环境科学研究，积极发展节能减排产业；二是运用经济手段保护环境，包括资源有偿使用、资源核算和计价、环境成本核算等；三

是加强环境教育,不断提高全民族的环境意识;四是健全环境法制,运用法制手段,强化环境管理效率。

1993年10月原国家节能减排局、原国家经贸委在上海召开了第二次全国工业污染防治会议,确定了清洁生产在我国环境保护事业中的战略地位。

1994年3月,国务院讨论通过了《中国21世纪议程》,将重点开发清洁煤技术,大力发展可再生和清洁能源、大力推广清洁生产工艺技术等作为重要内容。

1997年4月,原国家节能减排局制定并发布了《关于推行清洁生产的若干意见》,要求地方环境保护行政主管部门将清洁生产纳入环境管理政策中,以便更深入地促进清洁生产。

(3) 2002年至今,是清洁生产立法和政策研究推进阶段 2002年是我国清洁生产发展历程中的一个重要里程碑,《中华人民共和国清洁生产促进法》颁布,标志着我国进入依法推行清洁生产的新阶段。2004年颁布的《清洁生产审核暂行办法》,开创性地提出了强制性清洁生产审核与自愿性清洁生产审核的概念。2005年国务院下发了《国务院关于落实科学发展观加强环境保护的决定》,即国发[2005]39号文件,作为今后一个时期内环境保护工作的纲领性文件,明确提出“实行清洁生产并依法强制审核”的要求,把强制性清洁生产审核摆在了更加重要的位置。2005年底原国家节能减排总局下发了《重点企业清洁生产审核程序的规定》,针对重点企业的强制性清洁生产审核在全国全面开展。

2007年,国务院下发《节能减排综合性工作方案》进一步明确地提出“要全面推进清洁生产”,把清洁生产作为实现节能减排的一项重要手段,进一步明确实现节能减排的目标任务和总体要求。

2008年,环境保护部又结合全国污染物减排目标,下发了《关于进一步加强重点企业清洁生产审核工作的通知》。2010年,环境保护部下发了《关于深入推进重点企业清洁生产的通知》,使推进清洁生产的体制建设具备了明确的法律基础和较完善的政策体系。

8.3.2 我国清洁生产推进的障碍分析

1. 对清洁生产认识的局限性

清洁生产在我国的推行是从启动清洁生产示范项目开始的,也正因为如此,一说清洁生产,就以为仅仅是针对单个企业清洁生产的活动,存在认识上的局限性。实际上无论是从联合国环境规划署对清洁生产的定义,还是《中华人民共和国清洁生产促进法》中对清洁生产定义的规定,他们所强调清洁生产的内涵是:第一,通过设备或技术改造、工艺或流程改革、改变产品配方或设计、原料替代、改进管理等手段从源头削减污染;第二,强调生产过程、产品和服务的全过程控制;第三,清洁生产的范围包含了全部的生产和服务领域。不难看出清洁生产不仅仅局限于企业层面,企业只是实施清洁生产的基础单位。只要紧紧围绕产品的升级换代、

实施全过程控制、实现源头削减、实现污染物的减量化,完全可以从一个行业、一个区域入手推进清洁生产,使清洁生产上档次。

2. 关注末端治理,轻视全过程控制

末端治理作为国内外控制污染的最重要的手段,对保护环境起到了极为重要的作用,特别是在经济发展初期,正是通过严格的外部或末端要求所形成的压力,才促使它们对资源环境的考虑向经济活动内部的积极转移,有效地解决了资源环境问题。但是末端治理战略经过多年的实践,也暴露出了一系列的弊端,诸如末端治理设施投资大、运行费用高、造成了资源的额外浪费、只是对经济活动的不良后果做出被动式的处理等。

综观我国的环境法律、法规制度体系,直接体现末端治理的污染物排放标准、八项环境管理制度都具有良好的执法依据和实施基础,对企业具有很强的约束力,充分地体现了环境政策关注末端控制的思维模式。而预防为主的原则虽然在法律上有所确定,但是由于缺乏必要的支持系统,推广起来步履维艰,以致在陆续地颁布实施《中华人民共和国清洁生产促进法》、《清洁生产审核暂行办法》、《重点企业清洁生产审核程序的规定》后,全国范围内仍然没有掀起清洁生产推进的高潮,从管理的角度讲缺乏对生产全过程的重视。

3. 清洁生产缺少与现行的环境管理制度的有机结合

清洁生产不能迅速在全国普及发展,其中一个最主要的原因就是缺少与现行的环境管理制度的有机结合。从目前各级政府部门的工作分工、机构设置来看,清洁生产只是作为一项工作来抓,与其他的环境管理制度手段没有实现有机结合,以致清洁生产工作在相当长的时间内只是停留在宣传清洁生产理念、推广清洁生产审核方法、开展清洁生产审核试点的层面上,不能够实现以点带面、以局部促全局的效应。

以环境影响评价制度和“三同时”验收制度为例,第一,由于我国长期实行浓度控制的方针,导致评价工作的重心是污染物的达标排放,并不重视资源消耗量和利用量的高低。第二,清洁生产分析已经成为环境影响评价工作的重要组成部分,但是由于长期以来在环评中缺乏统一、规范的清洁生产评价方法、缺乏定量的指标体系、缺乏判断与验证的手段,导致环境影响报告书中清洁生产分析章节只是停留在概念化、表面化、定性化的描述上,很难评判项目真实的清洁生产水平,导致这项工作往往流于形式,管理部门无法判断该工艺的清洁生产水平。“三同时”验收制度强调的是环境污染治理工程要与主体工程同时设计、同时施工、同时验收,与清洁生产强调的从源头减少污染、从全过程控制的核心思想在环境管理的导向上没有有机结合。

4. 清洁生产中介制度的缺乏

除了企业作为开展清洁生产的主体、政府引导服务于企业外,发达的中介组织、完善的中介制度是推进清洁生产必不可少的保障条件,没有中介机构作为清

生产推进的技术支撑,提供咨询服务的平台,在清洁生产推进工作中就缺少了一个关键的起着纽带作用的链条。

原国家节能减排总局曾在2001年9月发布了《关于开展清洁生产审计机构试点工作的通知》(环发[2001]154号),确定了首批46家清洁生产审核试点机构,目的就是规范建设行业和地方的清洁生产审核机构、为各机构培训清洁生产审核人员,各机构选择适当的行业,进行清洁生产审核的试点,在清洁生产审核试点基础上,组织编制行业清洁生产标准和行业清洁生产审核指南。

《清洁生产审核暂行办法》、《重点企业清洁生产审核程序的规定》中对清洁生产审核咨询机构、人员的能力提出了更高的要求,但是推进清洁生产的中介制度并没有建立,行业的、地方的清洁生产中心缺乏统一的管理,对清洁生产审核人员的配备参差不齐、缺少各行业清洁生产信息的交流平台,这些因素极大地限制了清洁生产的推进。

5. 重点企业环境信息公开步履维艰

原国家节能减排总局下发的《重点企业清洁生产审核程序的规定》第五条明确规定“列入公布名单的第一类重点企业,应在名单公布后一个月内,在当地主要媒体公布其主要污染的排放情况,接受公众监督”。公布的内容应包括:企业名称、规模;法人代表、企业注册地址和生产地址;主要原辅材料(包括燃料)消耗情况;主要产品名称、产量;主要污染物名称、排放方式、去向、污染物浓度和排放总量、应执行的排放标准、规定的总量限额以及排污费缴纳情况等。但是从目前实施的情况来看,重点企业环境信息公开工作没有打开局面,一是列入名单的企业绝大部分没有公开相关信息;二是企业公开的环境信息中也存在污染物排放信息不真实的问题,这些问题严重制约着重点企业清洁生产审核工作的开展。

8.3.3 推进我国清洁生产工作的建议

1. 提高认识,明确清洁生产对现实节能减排的现实意义

国家“十一五”规划中明确提出来“万元国内生产总值能耗降低20%,主要污染物排放总量减少10%”的约束性指标,为了完成这一指标,全国上下加强了节能减排工作,制定了促进节能减排的一系列政策措施,节能减排工作取得了积极进展。但是从减排措施中也不难看到减排的污染物大多是通过一些污染治理设施针对企业末端排放的污染物进行处理实现的,而通过源头削减实现的污染物减排量还是少。节能减排是国民经济又好又快发展的长期要求,通过末端处理所能实现的污染物减排的潜力毕竟有限,更何况受污染治理设施正常运转率的影响。而清洁生产体现的正是“预防为主”的方针,要求淘汰落后的生产工艺和管理方式,淘汰有害的原材料,减少有害物和废物的排放,节约原材料和能源。以清洁生产作为抓手来加快淘汰落后生产能力、推进节能减排技术进步,进而实现控制高耗能高污染行业的过快增长、调整产业结构,正因为如此,在国务院下发的《节能减排综

合性工作方案》中明确提出“要全面推进清洁生产，组织编制《工业企业清洁生产审核指南编制规则》，制定和发布重点行业清洁生产标准和评价指标体系，加大清洁生产审核力度。”从这点上来说，我们必须提高高度，重新认识清洁生产对实现节能减排所具有特殊的现实意义。

2. 加强清洁生产审核的管理

清洁生产在我国虽然没有呈现轰轰烈烈的局面，但还是脚踏实地地在推进、在探索，清洁生产审核的企业数量也在逐渐增加，特别是重点企业强制性清洁生产审核工作全面开展后，清洁生产审核企业数量迅速增加，但同时清洁生产审核质量下降也已经成为业内不争的事实。一个企业的清洁生产审核在短短的2~3个月就可以完成。清洁生产审核报告经过清洁生产审核机构的修改、删减、改头换面，就可以代表企业的清洁生产审核成果，企业只需支付给清洁生产审核机构咨询费用，就可以拿到一份审核报告。清洁生产审核过程的规范与否、清洁生产方案的合理与否、清洁生产审核机构是否具备相应的能力，对此都缺乏必要的控制，结果就是使清洁生产审核走过场、清洁生产审核无法与国家节能减排的约束性指标挂钩，更无从谈起为国家的环境管理目标服务。

3. 加大力度，全面推进清洁生产审核评估验收制度

《中华人民共和国清洁生产促进法》、《清洁生产审核暂行办法》的颁布实施，标志着我国进入依法推行清洁生产的新阶段。但是《清洁生产审核暂行办法》中有关清洁生产审核的实施、清洁生产审核的组织和管理条款中只是规定“列入实施强制性清洁生产审核名单的企业，应当在名单公布之日起一年内，将清洁生产审核报告报当地环境保护行政主管部门和发展改革（经济贸易）行政主管部门”，只提出了清洁生产审核报告上报的要求，但缺失政府对企业清洁生产审核过程、清洁生产方案可行性、清洁生产审核结果绩效的评估验收环节，而多年的清洁生产实践表明，评估验收环节是保障清洁生产审核质量、落实清洁生产方案、实现环境绩效的关键之所在。

原国家节能减排总局2005年底出台的《重点企业清洁生产审核程序的规定》是指导各级节能减排行政主管部门推进强制性清洁生产审核的指导性文件，该规定第九条明确了“各省、自治区、直辖市、计划单列市环境保护行政主管部门应组织或委托有关单位，对重点企业的清洁生产审核结果进行评审验收”的要求，但是缺少对评审验收程序、评审验收标准、评审验收内容、组织实施等方面的规定，导致各级环境保护行政主管部门在推行强制性清洁生产审核工作时评审验收标准不一致，缺少可操作性层面的评审验收文件，给评审验收工作带来了很大难度。

2008年环境保护部出台了《关于进一步加强重点企业清洁生产审核工作的通知》，同时下发了《重点企业清洁生产审核评估验收实施指南》，标志着建立了重点企业评估验收制度，是对清洁生产审核制度的创新与完善。如何开展企业清洁生产审核的评估验收，用好这个制度是各级环境保护部门在新时期推进重点企业清

生产审核, 保证清洁生产审核质量的重要任务。

4. 机制创新, 实现清洁生产与现有环境管理制度的有机结合

传统的八项环境管理制度长期以来对我国工业企业污染源的管理起到了良好的作用。环境影响评价制度从建设项目环评到规划环评, 从区域限批到流域限批, 提高了环境准入门槛, 加大了环评工作力度, 环境影响评价制度成为各级环境管理部门进行环境管理的一个“杀手锏”, 体现出了强大的生命力。目前随着节能减排形式的严峻、深化工业污染防治任务的加剧, 尽快出台污染物排放总量控制和排污许可制度在内的工业污染防治政策和措施已经迫在眉睫。

强制性清洁生产审核的实施必须与环境影响评价制度、限期治理制度、排污许可制度、目标责任制等环境管理制度相结合, 打破单纯依靠末端治理解决资源环境问题的模式体系, 以强化末端管制促进清洁生产, 形成新形势下的环境管理机制。实施排污许可证管理的地区环境保护部门, 可以把企业进行清洁生产审核的结果和采用清洁生产工艺的情况, 作为核定该单位排污许可证允许排放量的依据。对于污染物排放超过国家和地方规定的排放标准或者超过经有关地方人民政府核定的污染物排放总量控制指标的第一类企业, 责令其限期治理, 对限期治理的企业进行强制性清洁生产审核, 落实清洁生产方案。

5. 发展中介, 实现政府宏观调控与发挥市场机制的有机结合

建立完善的中介服务制度是推进清洁生产、提高环境政策运行效率的保障。为了进一步贯彻执行《清洁生产审核暂行办法》、《重点企业清洁生产审核程序的规定》中对清洁生产审核咨询机构资质提出的明确要求, 建议政府管理部门尽快出台有关清洁生产审核机构及人员的管理规定, 从国家层面上对其进行规范化管理, 一方面可以减少各级政府清洁生产推进部门在这方面的重复性工作, 提高工作效率; 另一方面可以充分发挥清洁生产审核资源在全国范围内的合理利用, 提供有序的竞争环境, 促进清洁生产审核机构的健康发展和壮大, 进而从源头上保障清洁生产审核质量。

6. 统筹兼顾, 制定清洁生产推行规划

实施清洁生产是一项长期、系统的工程, 涉及工业、农业、第三产业领域, 需要各方面的大力支持, 必须综合考虑, 统筹兼顾, 不能把清洁生产只设定在单个企业层面, 应该在更广层面范围内推广, 应该组织相关部门制定重点行业、重点区域清洁生产推行规划。各地政府研究制定符合本地区实际情况的清洁生产推行规划。清洁生产推行规划的内容应包括: 污染状况分析, 实施清洁生产的指导思想、目标任务、重点内容、主要措施和进度安排, 实施清洁生产重点工业企业名单, 以及清洁生产重点投资项目等。

7. 抓好企业环境信息公开, 充分发挥公众监督力量推进清洁生产

环境信息公开也是一项新的环境管理制度, 环境保护部颁布了《环境信息公开办法(试行)》, 从2008年5月1日起正式施行, 这是第一部有关环境信息公开

的综合性部门规章。该规章中强制超标、超总量排污的企业公开四大类环境信息，企业不得以保守商业秘密为借口，拒绝公开所列的环境信息。不公布或者未按规定要求公布污染物排放情况的，由县级以上地方人民政府环境保护部门依据《中华人民共和国清洁生产促进法》的规定，处10万元以下罚款，并代为公布。各级环境保护部门充分承担起自己的职责，将重点企业清洁生产审核的开展与贯彻执行《环境信息公开办法（试行）》结合，促使重点企业如实公开企业的环境信息，充分发挥公众监督的作用，为推进重点企业的清洁生产审核，淘汰落后产能设备奠定良好基础。

8.4 结论

清洁生产的推进存在着若干方面的障碍，但是我国清洁生产的实践历程也积累了丰富的经验和教训。初步建立了清洁生产推进的法律体系，创造性地全面开展了重点企业的强制性清洁生产审核，万余家的企业开展了清洁生产审核，300余家的清洁生产审核机构为企业的清洁生产审核提供技术服务，清洁生产带来了明显的环境效益、经济效益。只要能够在强化末端控制的同时，突出清洁生产，强调源头和全过程污染物的削减，实现清洁生产与现有的环境管理系统实现创新性的衔接，抓好清洁生产审核评审验收，加强清洁生产中介能力建设，保障清洁生产审核质量，促进环境信息公开，就会使清洁生产在实现节能减排的约束性目标中展现其强大的生命力，成为我国一项重要的环境管理制度，为我国的环境管理目标服务。

参 考 文 献

- [1] 严建华, 章丽萍. 能源与环境研究进展 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2008.
- [2] 张文驹. 中国可持续发展总纲: 中国矿产资源与可持续发展 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [3] 朱坦. 中国可持续发展总纲: 中国环境与可持续发展 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [4] 力新. 中国可持续发展总纲: 中国科技创新与可持续发展 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [5] 诸大建. 中国可持续发展总纲: 中国经济与可持续发展 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [6] 郑季良. 绿色制造系统的集成发展论——基于企业集群视角 [M]. 昆明: 云南人民出版社, 2009.
- [7] 朱胜, 姚巨坤. 再制造设计理论及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [8] 徐滨士, 等. 再制造工程基础及其应用 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.
- [9] 张安峰. 绿色再制造工程基础及其应用 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.
- [10] 汪劲松, 向东, 段广洪. 产品绿色化工程概论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [11] 罗尔夫·施泰因希尔佩. 再制造—再循环的最佳形式 [M]. 朱胜, 姚巨坤, 等, 译. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [12] 大卫 G 乌尔曼. 机械设计过程 [M]. 黄靖远, 刘莹, 等, 译. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [13] G. 帕尔, W. 拜茨. 工程设计学 学习与实践手册 [M]. 张直明, 等, 译. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [14] 小栗富士雄, 小栗达男. 机械设计禁忌手册 [M]. 陈祝同, 刘惠臣, 译. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [15] 杨文彬. 机械结构设计准则及实例 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [16] 王成焘. 现代机械设计——思想与方法 [M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1999.
- [17] 闻邦椿. 机械设计手册 [M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [18] Neil Sclater, Nicholas P Chironis. 机械设计实用机构与装置图册 [M]. 邹平, 译. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [19] 何少平, 等. 机械结构工艺性 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2003.
- [20] 张善钟. 精密仪器结构设计手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [21] 陈榕林, 陆同理. 新编机械设计与制造禁忌手册 [M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
- [22] 涂发越. 机械零件制造结构设计手册 [M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 2002.
- [23] 吴宗泽. 机械设计禁忌 1000 例 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [24] 吴宗泽. 机械结构设计准则与实例 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [25] 徐滨士, 等. 装备再制造工程的理论与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [26] 中国汽车技术研究中心, 中国汽车工业协会. 2009 年中国汽车工业年鉴 [M]. 2010.

- [27] 商跃进. 有限元原理和 ANSYS 应用指南 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [28] 周传月, 等. 工程有限元与优化分析 应用实例教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [29] 倪建强, 等. 侧翻工况下客车顶盖碰撞强度的仿真分析 [J]. 机械设计, 2010, 27 (7): 15-19.
- [30] 张学玲, 等. 基于有限元分析的数控机床床身结构动态优化设计方法研究 [J]. 机械强度, 2005, 27 (3): 353-357.
- [31] 范军锋. 现代轿车轻量化技术研究—新材料技术、轻量化工艺和轻量化结构 [J]. 汽车工艺与材料, 2009 (5).
- [32] 郭抚顺. 紧固件的非调质钢应用及标准 [J]. 汽车工艺与材料, 2010 (5): 40-46.
- [33] 林大建, 等. 建立钢丝绳断丝信号数据库的探讨 [J]. 工业安全与环保, 2010, 36 (2): 29-30.
- [34] 薛艳梅. 电梯曳引钢丝绳的检验 [J]. 工业安全与环保, 2010, 35 (11): 36-40.
- [35] 段光复. 电镀废水处理及回用技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [36] 汪德涛, 林亨耀. 设备润滑手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [37] 初世宪, 王洪仁. 工程防腐蚀指南——设计. 材料. 方法. 监理检测 [M] 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [38] 曾荣昌. 韩恩厚, 等. 材料的腐蚀与防护 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [39] 陈冠国. 机械设备维修 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [40] 石全. 维修性设计技术案例汇编 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [41] 张树海. 机械安装与维护 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- [42] 严自勉, 顾斯照. 缆索起重机 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [43] 奚旦立. 清洁生产与循环经济 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [44] 周风华. 塑料回收利用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [45] 王相. 我国实施清洁生产的法制建设的探讨 [J]. 上海环境科学, 2000, 19 (2): 63-65.
- [46] 刘宏, 赵如金. 工业环境工程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [47] 贾金平, 等. 电镀废水处理技术及工程实例 [M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [48] 李涛, 等. 胶粘剂职业危害分析与控制技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [49] 宗培言. 焊接结构制造技术与装备 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [50] 中国锻压协会. 锻造加热与热处理及节能环保 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [51] 铸造车间和工厂设计手册编委会. 铸造车间和工厂设计手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [52] 余梦生, 吴宗泽. 机械零部件手册: 选型. 设计. 指南 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [53] 何衍兴, 等. 矿用钢丝绳在线监测系统及关键技术研究 [J]. 工业安全与环保, 2009, 35 (12): 34-36.
- [54] 吴宗泽, 等. 简明机械零件设计手册 [M]. 北京: 中国电力工业出版社, 2011.
- [55] 高志, 刘莹. 机械创新设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [56] 黄颖颖, 高志, 等. 机械创新设计 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.

-
- [57] 黄靖远, 高志, 陈祝林. 机械设计学 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [58] 吴国政. 电梯原理. 使用. 维修 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1999.
- [59] 孙桂林. 起重机械安全技术手册 [M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2008.
- [60] 郭云山, 等. 桥架类起重机安装维修安全技术 [M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 2009.
- [61] 陈祥生, 陆祥瑞. 节能高手—节能新材料和适用新技术 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
- [62] 张天柱. 从清洁生产到循环经济 [J]. 我国人口·资源与环境, 2006, 16 (6): 169-174.
- [63] 段宁. 清洁生产、生态工业和循环经济 [J]. 环境科学研究, 2001, 14 (6): 1-4.
- [64] 宋永欣. 清洁生产、循环经济与可持续发展 [J]. 我国资源综合利用, 2008, 26 (4): 19-21.
- [65] 张正敏, 李宝山, 等. 清洁能源促进政策应用与分析 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.
- [66] 卞耀武. 中华人民共和国清洁生产促进法释义 [M]. 北京: 法律出版社, 2002, 7-8.
- [67] 张亚婷, 许丹妮. 浅议可持续发展政策下环境问题的制度根源 [J]. 环境科学与管理, 2005, 30 (6): 9-11.
- [68] 刘新宇, 等. 建设项目环境影响评价的清洁生产分析 [J]. 上海环境科学, 2002, 22 (9): 629-634.

- ◎ ISBN 978-7-111-36319-4
◎ 封面设计\电脑制作：陈沛

地址：北京市百万庄大街22号

电话服务

社服中心：(010)88361066

销售一部：(010)68326294

销售二部：(010)88379649

读者购书热线：(010)88379203

邮政编码：100037

网络服务

门户网：<http://www.cmpbook.com>

教材网：<http://www.cmpedu.com>

封面无防伪标均为盗版

上架指导：机械设计与节能减牌

ISBN 978-7-111-36319-4



定价：38.00元