

铸造合金熔炼 配料计算

第 2 版

张文富 张力 编著

ZHUZAO HEJIN RONGLIAN PEILIAO JISUAN

铸造合金熔炼配料计算

第 2 版

张文富 张 力 编著



机 械 工 业 出 版 社

本书介绍了铸铁、铸钢、有色合金熔炼配料计算方法。全书共分三篇，分别为铸铁熔炼的配料计算方法、铸钢熔炼的配料计算方法和有色合金熔炼的配料计算方法。全书内容丰富、先进、实用，例题力求简明易懂，对不同炉料、不同熔炼工艺方法、不同熔炼时期调整成分的铸铁、铸钢、有色合金熔炼均有配料计算方法介绍与实例。每章节前有配料说明、注意事项和关键点等，同样是配料计算的重要组成部分，对指导配料计算有着重要意义。

本书可供铸造领域的技术人员、管理人员及炉前操作工在生产实践中参考应用，也可供技工学校和大专院校师生学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

铸造合金熔炼配料计算/张文富，张力编著. —2 版.
—北京：机械工业出版社，2016. 1
ISBN 978 - 7 - 111 - 52660 - 5

I. ①铸… II. ①张…②张… III. ①铸造合金 - 熔
炼 - 配料 - 计算 IV. ①TG27

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 006580 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：崔滋恩 责任编辑：崔滋恩

版式设计：霍永明 责任校对：胡艳萍

责任印制：乔 宇

北京京丰印刷厂印刷

2016 年 3 月第 2 版 · 第 1 次印刷

169mm×239mm · 15.5 印张 · 296 千字

0 001—3 000 册

标准书号：ISBN 978 - 7 - 111 - 52660 - 5

定价：39.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：010-88361066

机 工 官 网：www. cmpbook. com

读者购书热线：010-68326294

机 工 官 博：weibo. com/cmp1952

010-88379203

策 划 编 辑：010-88379644

金 书 网：www. golden-book. com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网：www. cmpedu. com

第2版前言

本书于2013年5月出版了第1版，系统详细地阐述了铸铁、铸钢、有色金属熔炼配料计算内容和例题。该书上市后很受读者欢迎，但在书中存在几处配料计算数据错误，并在熔炼合金钢还原期调整成分配料计算内容不足。而且熔炼高合金钢含多种合金元素，在熔炼还原期调整成分是保证熔炼优质成分合格高合金钢的最终关键一环。因此，在第2版中修改了有误的地方并补充了部分配料计算内容和例题。

本书可供铸造专业技工学校，大专院校教学参考用书，同时可供铸铁、铸钢、有色金属熔炼工程技术人员及生产工人在生产中参考。

由于编者知识水平所限，书中难免有不妥之处，敬请铸造界专家、学者指正，在此敬谢。

编 者

第1版前言

铸造是机电装备制造业中铸件生产的工艺过程。铸造合金熔炼是将固体金属熔炼成液体金属，浇入特制的砂型或金属型及由其他材料特制的铸型中，待液体金属冷凝后从铸型中取出，经过清理成为铸件。在机电装备中，铸件质量占其总质量的 50% ~ 80%。在国家高端重型设备、机床、高铁轨道交通机车车辆、汽车、农机、船舶、军工国防、航空航天、化工、电力等工业，每年需要供给国内外大量铸铁、铸钢、有色合金铸件。其中生产铸钢的电弧炉已向大容量、超高功率方向发展。我为北方重工设计的铸钢厂房达 8 万 m^2 ，采用双层重型起重机，安装 40t 电弧炉和 50tLF、50tVOD 精炼炉双联，并预留安装 80t 电弧炉和 100tLF 钢包精炼炉。

我国是铸件生产大国，年产铸件 3500 万 t 以上，全国约有两万家铸造厂（公司）。但针对当前铸造行业能熟练掌握铸造生产的能工巧匠匮乏，严重影响铸件质量的提高。铸造合金熔炼是铸造生产工艺过程中极为重要的核心工艺环节，掌握铸铁、铸钢、有色合金熔炼配料计算方法是获得化学成分合格铸件的关键；运用好配料计算方法对节约金属材料和燃料、降低能耗、低碳减排、降低铸件成本，提高经济效益和社会效益有着重要实际意义。为此，编写通俗易懂的、易掌握的、有实际生产应用价值的、有一定先进技术理论水平的铸造合金熔炼配料计算方法的技术书，以促进铸造行业人才技术进步、培养能工巧匠、振兴铸造行业，是编者多年的衷心夙愿。

编者多年在铸钢、铸铁等生产第一线生产劳动，做过大量配料计算，也曾为民营企业用冲天炉、小型中频感应电炉生产铸铁件进行过技术服务，将多年在铸造生产实践中所积累的技术知识，以及收集的大量技术资料加以整理，汇编成《铸铁和铸钢熔炼计算汇编》，在太原科技大学《铸造设备研究》杂志社编辑部王录才教授和游晓红教授等大力帮助下于 2008 年 2 月出版。在此深表感谢。由于属于内部发行，编者先后到过多家铸造工厂、大专院校，去交流推广本书。其中大连交通大学陈玉玺教授、刘赵铭教授对本书提出了增加有色合金等修改建议，在与大连理工大学研究生交流时得知他们偏向有色合金新材料研究。为此在原编著的配料计算的基础上，按新标准进行大量修改增补有色合金内容，因此又收集大量最新出版的先进的铸铁、铸钢、有色合金等，尤其是有色合金熔炼和配料计算文献资料，并根据配料计算公式

又做出大量的配料计算例题，与原编著《铸铁和铸钢熔炼计算汇编》汇集在一起，加以整编，汇编成新的《铸造合金熔炼配料计算》。在编写有色金属部分时也得到太原科技大学游晓红教授的指导和帮助，并得到机械工业出版社的大力支持，谨在此一并表示衷心感谢。

由于编者知识水平所限，书中难免有不妥之处，敬请专家、学者赐教指正。

编者

目 录

第2版前言

第1版前言

第一篇 铸铁熔炼的配料计算方法

| | |
|-------------------------------------|----|
| 第一章 铸铁熔炼配料计算的基本知识 | 1 |
| 第一节 铸铁牌号的化学成分组成及力学性能 | 1 |
| 第二节 合金元素对铸铁组织及性能的影响 | 7 |
| 第三节 铸铁熔炼设备对化学元素增减的影响 | 9 |
| 第二章 铸铁熔炼配料计算对原辅材料的要求 | 11 |
| 第一节 金属炉料 | 11 |
| 第二节 燃料 | 19 |
| 第三节 熔剂 | 21 |
| 第三章 铸铁熔炼的配料计算 | 23 |
| 第一节 铸铁熔炼所需热量消耗的计算 | 23 |
| 第二节 冲天炉熔炼铸铁过程的热平衡计算 | 24 |
| 第三节 冲天炉熔炼底焦、层焦、层料（每批铁料）、熔剂、风量和风压的计算 | 30 |
| 第四节 石灰石需要量计算 | 35 |
| 第四章 冲天炉熔炼铸铁的各种配料计算 | 37 |
| 第一节 配料计算步骤和配料计算方法 | 37 |
| 第二节 配料计算用公式和配料计算例题 | 37 |
| 第五章 中频感应炉熔炼铸铁的配料计算 | 60 |
| 第一节 中频感应炉熔炼灰铸铁的配料计算 | 60 |
| 第二节 中频感应炉熔炼球墨铸铁的配料计算 | 61 |
| 第三节 中频感应炉熔炼蠕墨铸铁的配料计算 | 72 |

第二篇 铸钢熔炼的配料计算方法

| | |
|------------------------------|-----|
| 第六章 电弧炉熔炼碳素钢的配料计算 | 82 |
| 第一节 配料计算的意义、注意事项及原辅材料 | 82 |
| 第二节 熔炼碳素钢的配料计算方法 | 83 |
| 第七章 电弧炉熔炼合金钢的配料计算 | 90 |
| 第一节 采用氧化法熔炼高合金钢的配料计算 | 90 |
| 第二节 电弧炉熔炼合金钢的配料计算方法和实例 | 94 |
| 第八章 熔炼合金钢还原期调整成分的配料计算 | 120 |
| 第一节 还原期补加合金的计算公式和例题 | 120 |

| | | |
|------------|--------------------------|-----|
| 第二节 | 采用杂乱合金钢屑返回料熔炼不锈钢的配料计算 | 134 |
| 第三节 | 查表配料计算法简介 | 140 |
| 第九章 | 中频感应炉熔炼铸钢的配料计算 | 143 |
| 第一节 | 中频感应炉熔炼碳素钢的配料计算 | 143 |
| 第二节 | 中频感应炉熔炼合金钢采用新料的配料计算 | 144 |
| 第三节 | 中频感应炉熔炼合金铸钢采用返回料和新料的配料计算 | 151 |
| 第四节 | 中频感应炉熔炼合金铸钢调整成分的配料计算 | 158 |

第三篇 有色合金熔炼的配料计算方法

| | | |
|-------------|-------------------------------|-----|
| 第十章 | 有色合金熔炼用金属炉料 | 165 |
| 第一节 | 回炉料、新金属和中间合金 | 165 |
| 第二节 | 配料计算应注意节省新金属和贵重合金 | 173 |
| 第十一章 | 有色合金熔炼设备简介 | 175 |
| 第一节 | 有色合金熔炼设备的基本任务和要求 | 175 |
| 第二节 | 有色合金熔炼设备 | 175 |
| 第十二章 | 铜合金熔炼的配料计算 | 180 |
| 第一节 | 常用铸造青铜和黄铜的化学成分 | 180 |
| 第二节 | 采用新料熔炼铜合金的配料计算 | 181 |
| 第三节 | 采用回炉料熔炼铸造铜合金用新金属调整合金元素的配料计算方法 | 184 |
| 第四节 | 采用回炉料加中间合金和新金属的配料计算 | 190 |
| 第十三章 | 铝合金熔炼的配料计算 | 196 |
| 第一节 | 常用铸造铝合金的化学成分 | 196 |
| 第二节 | 熔炼铝合金配料计算例题 | 198 |
| 第三节 | 铝合金熔炼调整成分的配料计算 | 206 |
| 第四节 | 熔炼铝合金元素含量超标用冲淡法的配料计算 | 209 |
| 第十四章 | 铸造镁合金和铸造锌合金熔炼的配料计算 | 212 |
| 第一节 | 铸造镁合金和铸造锌合金化学成分 | 212 |
| 第二节 | 铸造镁合金熔炼的配料计算 | 213 |
| 第三节 | 铸造锌合金熔炼的配料计算 | 220 |
| 第十五章 | 铸造钛合金熔炼的配料计算 | 225 |
| 第一节 | 铸造钛合金熔炼特点 | 225 |
| 第二节 | 铸造钛合金的化学成分和配料计算 | 225 |
| 第三节 | 铸造钛合金熔炼配料计算例题 | 227 |
| 附录 | 化学元素周期表 | 236 |
| 参考文献 | | 237 |

第一篇 铸铁熔炼的配料计算方法

第一章 铸铁熔炼配料计算的基本知识

铸铁熔炼配料计算是指根据铸件不同材质化学成分和其力学性能要求，以及采用的不同熔炼工艺和设备，合理选择使用原材料，并进行正确的配料计算，以达到获得优质合格铸件，降低原材料消耗和能耗，提高经济效益，适应多变的产品市场需要的目的。因此，必须掌握铸铁熔炼配料计算有关的大量基本知识，才能正确地进行配料计算。

第一节 铸铁牌号的化学成分组成及力学性能

GB/T 9439—2010《灰铸铁件》中规定，灰铸铁的生产方法及化学成分由供方决定，但必须达到其规定的灰铸铁牌号及相应的力学性能指标。如需方对灰铸铁的化学成分有特殊要求时，供需双方应在订货协议中商定。GB/T 1348—2009《球墨铸铁件》中规定，生产方法、化学成分及热处理工艺，可由供方自行决定，但必须保证协议技术条件上所规定的球墨铸铁牌号或达到本标准规定的力学性能指标。对于化学成分、热处理方法有特殊要求的球墨铸铁件由供需双方商定。可锻铸铁也按新的规定。由于化学成分、热处理工艺不同导致的性能和金相组织的不同。可锻铸铁分为黑心可锻铸铁和珠光体可锻铸铁及白心可锻铸铁。

铸铁牌号字母代号分别为：灰铸铁 HT；球墨铸铁 QT；蠕墨铸铁 RuT；可锻铸铁 KT（其中，黑心可锻铸铁 KTH，白心可锻铸铁 KTB，珠光体可锻铸铁 KTZ）；耐热铸铁 RT。

灰铸铁牌号、化学成分及其金相组织见表 1-1 不同壁厚灰铸铁的化学成分见表 1-2。各类球墨铸铁化学成分、组织与性能见表 1-3，球墨铸铁和灰铸铁化学成分的对比见表 1-4。

国外可锻锻铁的化学成分见表 1-5，耐热铸铁的牌号及化学成分见表 1-6，蠕墨铸铁的生产举例见表 1-7，铁素体可锻铸铁的化学成分见表 1-8，高硅耐蚀铸铁的化学成分见表 1-9。

表 1-1 灰铸铁牌号、化学成分及其金相组织

| 灰铸铁牌号 | 铸铁主要壁厚/mm | 化学成分 (质量分数, %) | | | | | 金相组织 (含量指体积分数) | |
|-------|-----------|----------------|-----------|-----------|--------|--------|---|--|
| | | C | Si | Mn | P | S | 石墨 | 基体 |
| HT100 | — | 3.4 ~ 3.9 | 2.1 ~ 2.6 | 0.5 ~ 0.8 | < 0.3 | < 0.15 | C型石墨 初晶石墨长度 250 ~ 1000 μm, 无定向分布, 含 量 12% ~ 15% | 珠光体 30% ~ 70%, 粗片状铁 素体 30% ~ 70%, 二元磷共 晶 < 7% |
| HT150 | < 30 | 3.3 ~ 3.5 | 2.0 ~ 2.4 | 0.5 ~ 0.8 | < 0.2 | ≤ 0.12 | A型石墨 片状石墨, 长 度 120 ~ 500 μm, 无定向分布, 含 量 7% ~ 11% | 珠光体 40% ~ 90%, 中粗片 状, 铁素体 10% ~ 60%, 二元碳 共晶 < 7% |
| | 30 ~ 50 | 3.2 ~ 3.5 | 1.9 ~ 2.3 | 0.5 ~ 0.8 | < 0.2 | ≤ 0.12 | | |
| | > 50 | 3.2 ~ 3.5 | 1.8 ~ 2.2 | 0.6 ~ 0.9 | < 0.12 | ≤ 0.12 | | |
| HT200 | < 30 | 3.2 ~ 3.5 | 1.6 ~ 2.0 | 0.7 ~ 0.9 | < 0.15 | ≤ 0.12 | A型石墨 片状石墨 80% ~ 90%, D型过 冷石墨 10% ~ 20%, 长度 60 ~ 250 μm, 无定向 分布, 含量 6% ~ 9% | 珠光体 > 95% 中等片状, 铁素 体 < 5%, 二元 磷共晶 < 4% |
| | 30 ~ 50 | 3.1 ~ 3.4 | 1.5 ~ 1.8 | 0.8 ~ 1.0 | < 0.15 | ≤ 0.12 | | |
| | > 50 | 3.0 ~ 3.3 | 1.4 ~ 1.6 | 0.8 ~ 1.0 | < 0.15 | ≤ 0.12 | | |
| HT250 | < 30 | 3.0 ~ 3.3 | 1.4 ~ 1.7 | 0.8 ~ 1.0 | < 0.15 | ≤ 0.12 | A型石墨 片状石墨 85% ~ 90%, D型过 冷石墨 10% ~ 15%, 长度 60 ~ 250 μm, 无定向 分布, 含量 4% ~ 7% | 珠光体 > 90%, 中细片 状, 二元磷共晶 < 2% |
| | 30 ~ 50 | 2.9 ~ 3.2 | 1.3 ~ 1.6 | 0.9 ~ 1.1 | < 0.15 | ≤ 0.12 | | |
| | > 50 | 2.8 ~ 3.1 | 1.2 ~ 1.5 | 1.0 ~ 1.2 | < 0.15 | ≤ 0.12 | | |
| HT300 | < 30 | 2.9 ~ 3.2 | 1.4 ~ 1.7 | 0.8 ~ 1.0 | < 0.15 | ≤ 0.12 | A型石墨 片状石墨 80% ~ 95%, D型过 冷石墨 5% ~ 20%, 长度 30 ~ 120 μm, 含量 3% ~ 6% | 珠光体 > 98%, 中细片 状, 二元磷共晶 < 2% |
| | 30 ~ 50 | 2.9 ~ 3.2 | 1.2 ~ 1.5 | 0.9 ~ 1.1 | < 0.15 | ≤ 0.12 | | |
| | > 50 | 2.8 ~ 3.1 | 1.1 ~ 1.4 | 1.0 ~ 1.2 | < 0.15 | ≤ 0.12 | | |
| HT350 | < 30 | 2.8 ~ 3.1 | 1.3 ~ 1.6 | 1.0 ~ 1.3 | < 0.10 | ≤ 0.10 | A型石墨 片状石墨 75% ~ 90%, 过冷石 墨 10% ~ 25%, 长度 30 ~ 120 μm, 含量 2% ~ 4% | 珠光体 > 98%, 细片状, 二元磷共晶 < 1% |
| | 30 ~ 50 | 2.8 ~ 3.1 | 1.2 ~ 1.5 | 1.0 ~ 1.3 | < 0.10 | ≤ 0.10 | | |
| | > 50 | 2.7 ~ 3.0 | 1.1 ~ 1.4 | 1.1 ~ 1.4 | < 0.10 | ≤ 0.10 | | |

表 1-2 不同壁厚灰铸铁的化学成分 (质量分数) (%)

| 牌号 | 铸件主要壁厚/mm | C | Si | Mn | P | S |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|-------|
| HT100 | 所有尺寸 | 3.2 ~ 3.8 | 2.1 ~ 2.7 | 0.5 ~ 0.8 | <0.3 | ≤0.15 |
| HT150 | < 15 | 3.2 ~ 3.7 | 2.0 ~ 2.4 | 0.5 ~ 0.8 | <0.2 | ≤0.12 |
| | 15 ~ 30 | 3.2 ~ 3.6 | 2.0 ~ 2.3 | | | |
| | 30 ~ 50 | 3.1 ~ 3.5 | 1.9 ~ 2.2 | | | |
| | > 50 | 3.0 ~ 3.4 | 1.8 ~ 2.1 | | | |
| HT200 | < 15 | 3.1 ~ 3.5 | 1.9 ~ 2.2 | 0.6 ~ 0.9 | <0.15 | ≤0.12 |
| | 15 ~ 30 | 3.0 ~ 3.4 | 1.8 ~ 2.1 | | | |
| | 30 ~ 50 | 3.0 ~ 3.2 | 1.5 ~ 1.8 | | | |
| | > 50 | 3.2 ~ 3.5 | 1.4 ~ 1.7 | | | |
| HT250 | < 15 | 3.2 ~ 3.5 | 1.8 ~ 2.1 | 0.7 ~ 0.9 | <0.15 | ≤0.12 |
| | 15 ~ 30 | 3.1 ~ 3.4 | 1.6 ~ 1.9 | | | |
| | 30 ~ 50 | 3.0 ~ 3.3 | 1.5 ~ 1.8 | | | |
| | > 50 | 2.9 ~ 3.2 | 1.4 ~ 1.7 | | | |
| HT300 | < 15 | 3.1 ~ 3.4 | 1.5 ~ 1.8 | 0.8 ~ 1.0 | <0.15 | ≤0.12 |
| | 15 ~ 30 | 3.0 ~ 3.3 | 1.4 ~ 1.7 | | | |
| | 30 ~ 50 | 2.9 ~ 3.2 | 1.4 ~ 1.7 | | | |
| | > 50 | 2.8 ~ 3.1 | 1.3 ~ 1.6 | | | |

表 1-3 各类球墨铸铁的化学成分、组织与性能

| 球墨铸铁类别 | 铸件 | 化学成分(质量分数,%) | | | | | | | | 热处理与金相组织 | 力学性能 | | | |
|-----------------|----------------------------|--------------|-----------|-------------|------|-------|--------------|--------------|------------------------------|------------------------------------|-----------------|-----------|----------------------------------|------------|
| | | C | Si | Mn | P | S | 残余 Mg | 残余 RE | 其他 | | 抗拉强度 R_m /MPa | 伸长率 A (%) | 冲击韧度 a_K /(J/cm ²) | 硬度 HBW |
| 高强度 | 柴油机曲轴 | 3.6 ~ 3.8 | 2.0 ~ 2.2 | 0.6 ~ 0.8 | <0.1 | <0.2 | 0.035 ~ 0.05 | 0.04 ~ 0.055 | — | 正火珠光体 | 750 ~ 800 | 3 | — | 260 ~ 275 |
| 耐磨球墨铸铁 | 汽车发动机曲轴、凸轮轴 | 3.7 ~ 3.9 | 2.0 ~ 2.3 | 0.6 ~ 0.8 | <0.1 | <0.03 | 0.04 ~ 0.05 | 0.01 ~ 0.03 | — | 正火珠光体 + 小于 10% 的铁素体 | 760 ~ 930 | 2 ~ 4 | — | 255 ~ 280 |
| 超高强度球墨铸铁 | 拖拉机齿轮 | 3.2 ~ 3.5 | 2.9 ~ 3.1 | 0.65 ~ 0.75 | — | — | 0.03 ~ 0.06 | 0.03 ~ 0.05 | Mo0.2 | 等温淬火针状贝氏体 + 奥氏体 + 少量马氏体 | 1480 ~ 1530 | — | 30 ~ 36 | 47 ~ 51HRC |
| 高韧性球墨铸铁 | 万向节轴类导向轮 | 3.6 ~ 3.7 | 2.8 ~ 3.4 | <0.5 | — | — | 0.04 ~ 0.06 | 0.02 ~ 0.08 | — | 铸态使用铁素体为主 | 500 ~ 680 | 12 ~ 21 | 47 ~ 150 | 170 ~ 202 |
| 大截面大尺寸高强度耐磨球墨铸铁 | 1000 马力 ^① 柴油机曲轴 | 3.8 ~ 3.9 | 2.1 ~ 2.3 | 0.6 ~ 0.7 | — | — | 0.045 | <0.003 | Mo0.06 ~ 0.07 Cu0.8 ~ 1.0 | 正火珠光体 | 650 ~ 800 | 2 ~ 3 | 10 ~ 15 | 240 ~ 260 |
| 抗磨球墨铸铁(无润滑) | 犁铧、拖拉机、推土机铸件 | 3.2 ~ 3.9 | 4.0 ~ 4.8 | 8.5 ~ 9.5 | — | — | 0.025 ~ 0.05 | 0.03 ~ 0.05 | — | 不热处理奥氏体体积分数为 70% ~ 80% + 渗碳体 + 马氏体 | — | — | — | 36 ~ 45HRC |

① 1 马力 = 735.499W。

表 1-4 球墨铸铁与灰铸铁化学成分的对比 (质量分数) (%)

| 铸铁名称 | C | Si | Mn | P | S | 残余 Mg | 残余 RE |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|-------------|
| 球墨铸铁 | 3.5 ~ 3.9 | 2.0 ~ 3.1 | 0.3 ~ 0.8 | <0.08 | <0.03 | 0.03 ~ 0.06 | 0.02 ~ 0.05 |
| 灰铸铁 | 2.9 ~ 3.5 | 1.4 ~ 2.1 | 0.6 ~ 1.0 | 0.1 ~ 0.5 | 0.1 ~ 0.12 | — | — |

表 1-5 国外可锻铸铁的化学成分 (质量分数) (%)

| 可锻铸铁种类 | C | Si | Mn | P | S | Cr | 其他 |
|-----------|-----------|-----------|------|------|-------|-------|----|
| 标准白心可锻铸铁 | 2.6 ~ 3.4 | 0.4 ~ 1.2 | <0.6 | <0.2 | <0.3 | <0.15 | — |
| 标准黑心可锻铸铁 | 2.0 ~ 3.2 | 0.7 ~ 1.8 | <0.6 | <0.2 | <0.08 | — | — |
| 标准珠光体可锻铸铁 | 2.0 ~ 3.2 | 0.7 ~ 1.8 | <1.2 | <0.2 | <0.2 | <0.06 | — |

表 1-6 耐热铸铁件牌号及化学成分 (质量分数) (摘自 GB/T 9437—2009)

(%)

| 牌号 | C | Si | Mn | P | S | Cr | Al |
|-----------|-----------|-----------|-----|------|-------|--------------|----------------|
| | | | ≤ | | | | |
| HTRCr | 3.0 ~ 3.8 | 1.5 ~ 2.5 | 1.0 | 0.10 | 0.08 | 0.50 ~ 1.00 | — |
| HTRCr2 | 3.0 ~ 3.8 | 2.0 ~ 3.0 | 1.0 | 0.10 | 0.08 | 1.00 ~ 2.00 | — |
| HTRCr16 | 1.6 ~ 2.4 | 1.5 ~ 2.2 | 1.0 | 0.10 | 0.05 | 15.00 ~ 18.0 | — |
| HTRSi5 | 2.4 ~ 3.2 | 4.5 ~ 5.5 | 0.8 | 0.10 | 0.08 | 0.5 ~ 1.00 | — |
| QTRSi4 | 2.4 ~ 3.2 | 3.5 ~ 4.5 | 0.7 | 0.07 | 0.015 | — | — |
| QTRSi4Mo | 2.7 ~ 3.5 | 3.5 ~ 4.5 | 0.5 | 0.07 | 0.015 | Mo 0.5 ~ 0.9 | — |
| QTRSi4Mo1 | 2.7 ~ 3.5 | 4.0 ~ 4.5 | 0.3 | 0.05 | 0.015 | Mo 1.0 ~ 1.5 | Mg 0.01 ~ 0.05 |
| QTRSi5 | 2.4 ~ 3.2 | 4.5 ~ 5.5 | 0.7 | 0.07 | 0.015 | — | — |
| QTRAl4Si4 | 2.5 ~ 3.0 | 3.5 ~ 4.5 | 0.5 | 0.07 | 0.015 | — | 4.0 ~ 5.0 |
| QTRAl5Si5 | 2.3 ~ 2.8 | 4.5 ~ 5.2 | 0.5 | 0.07 | 0.015 | — | 5.0 ~ 5.8 |
| QTRAl22 | 1.6 ~ 2.2 | 1.0 ~ 2.0 | 0.7 | 0.07 | 0.015 | — | 20.0 ~ 24.0 |

表 1-7 蠕墨铸铁生产举例

| 处理方法 | 合金名称 | 化学成分(质量分数,%) | | | | | | | 金相组织 (体积分数) | 力学性能 | | | | | | |
|-------|-------------------|--------------|-----------|------------|-------------|-------|---------------|--------------|--------------------|-----------------------|-----------|--------------|----------------------------------|---------|-----------|-----------------|
| | | C | Si | Mn | P | S | Mg | RE | | 抗拉强度 R_m /MPa | 屈服强度 /MPa | 伸长率 A (%) | 冲击韧度 a_K /(J/cm ²) | 硬度 HBW | 弹性模量/ MPa | |
| 镁处理法 | Mg-Ce-Ti 复合处理 | 3.2 ~ 3.6 | 2.0 ~ 2.5 | 0.1 ~ 0.6 | — | — | 0.015 ~ 0.004 | 0.004 ~ 0.01 | Ti 0.015 ~ 0.035 | 60% ~ 90% 蠕虫状石墨铁素体基体 | 300 ~ 400 | 250 ~ 350 | 1.5 ~ 7.5 | — | 130 ~ 180 | 133000 ~ 161000 |
| | Ti-Ce-Ca-Mg-Fe-Si | 3.7 | 1.7 | 0.3 | — | — | 0.015 ~ 0.035 | Ce 0.002 | Ti 0.06 ~ 0.13 | 铁素体基体 | 200 ~ 400 | 230 ~ 390 | 3 ~ 5 | — | — | — |
| 稀土处理法 | 混合稀土金属 | 3.5 ~ 3.8 | 2 ~ 3 | 0.04 ~ 0.2 | — | — | — | Ce 0.02 | — | 60% ~ 90% 蠕虫状石墨铁素体基体 | 380 | 310 | 7.8 | 32 | 150 ~ 170 | 160000 |
| | 钇硅稀土合金 | 3.5 ~ 3.6 | 2.4 ~ 2.6 | 0.6 ~ 0.8 | 0.02 ~ 0.06 | <0.01 | — | 钇 0.1 ~ 0.15 | — | ≥70% 蠕虫状石墨珠光体铁素体 | 320 ~ 500 | 270 ~ 420 | 2 ~ 8 | 20 ~ 30 | 143 ~ 241 | 140000 ~ 170000 |
| | 稀土钙合金(Ca > 15%) | 3.8 ~ 4.1 | 2.2 ~ 2.9 | 0.3 ~ 0.95 | <0.07 | <0.02 | — | 0.04 ~ 0.06 | Ca 0.0017 ~ 0.0029 | 蠕虫状 + 球状珠光体 + 50% 铁素体 | 350 ~ 390 | — | — | — | 158 ~ 185 | — |
| | 稀土硅铁合金 | 3.5 ~ 3.9 | 2.0 ~ 2.9 | 0.7 ~ 1.2 | <0.07 | <0.03 | — | 0.05 ~ 0.08 | — | 蠕虫状少量球状铁素体 | 350 ~ 450 | 抗弯 700 ~ 980 | 3 ~ 4 | 7 ~ 11 | 170 ~ 250 | — |

表 1-8 铁素体可锻铸铁的化学成分

| 牌号 | 化学成分(质量分数,%) | | | | | | 孕育剂加入量(质量分数,%) | | | 应用产品 |
|-----------|--------------|--------------|--------------|----------------|----------------|-------|------------------|------------------|------------------------|-------------|
| | C | Si | Mn | P | S | Cr | Bi | Al | B | |
| KTH330-08 | 2.6 ~ 2.8 | 1.5 ~ 1.8 | 0.55 0.70 | <0.12 | <0.25 | <0.05 | <0.01 | 0.01 | — | — 水暖件 |
| KTH330-08 | 2.5 ~ 2.8 | 1.4 ~ 1.8 | 0.5 ~ 0.7 | <0.1 | <0.25 | <0.06 | 0.005 | 0.009 | — | — 农机配件 |
| KTH350-10 | 2.6 ~ 2.8 | 1.4 ~ 1.6 | 0.4 ~ 0.6 | <0.07 | 0.15 ~ 0.30 | <0.06 | 0.01 | 0.01 | 0.002 | — 汽车零件 |
| KTH350-10 | 2.4 ~ 2.7 | 1.3 ~ 1.7 | 0.4 ~ 0.6 | <0.07 | 0.15 ~ 0.20 | <0.06 | 0.005 ~ 0.01 | 0.007 ~ 0.01 | — | — 瓷绝缘子钢帽 |
| KTH350-10 | 2.3 ~ 2.8 | 1.4 ~ 1.9 | 0.5 ~ 0.8 | <0.05 | 0.15 ~ 0.20 | <0.05 | 0.004 | — | — 硅铁 0.3 | 阀门零件 |
| KTH350-10 | 2.4 ~ 2.7 | 1.2 ~ 1.6 | 0.4 ~ 0.6 | <0.07 | 0.12 ~ 0.15 | <0.06 | 0.005 ~ 0.012 | 0.005 ~ 0.010 | — 1号合金 0.2 ~ 0.4 | 汽车零件 |
| KTH350-10 | 2.5 ~ 2.7 | 1.5 ~ 1.8 | 0.4 ~ 0.5 | 0.06 ~ 0.08 | 0.15 ~ 0.20 | <0.06 | 0.003 ~ 0.005 | 0.01 | — | — 铁道配件 |

表 1-9 高硅耐蚀铸铁的化学成分(质量分数)(摘自 GB/T 8491—2009)(%)

| 牌号 | C | Si | Mn≤ | P≤ | S≤ | Cr | Mo | Cu | RE 残留量≤ |
|---------------|----------------|---------------|------|------|------|----------------|----------------|----------------|---------|
| HTSSi11Cu2CrR | ≤1.20 | 10.00 ~ 12.00 | 0.50 | 0.10 | 0.10 | 0.60 ~ 0.80 | — | 1.80 ~ 2.20 | 0.10 |
| HTSSi15R | 0.65 ~ 1.10 | 14.20 ~ 14.75 | 1.50 | 0.10 | 0.10 | ≤0.50 | ≤0.50 | ≤0.50 | 0.10 |
| HTSSi15Cr4MoR | 0.75 ~ 1.15 | 14.20 ~ 14.75 | 1.50 | 0.10 | 0.10 | 3.25 ~ 5.00 | 0.40 ~ 0.60 | ≤0.50 | 0.10 |
| HTSSi15Cr4R | 0.70 ~ 1.10 | 14.20 ~ 14.75 | 1.50 | 0.10 | 0.10 | 3.25 ~ 5.00 | ≤0.20 | ≤0.50 | 0.10 |

第二节 合金元素对铸铁组织及性能的影响

铸铁的金相组织及力学性能,是由铸铁中所含的除铁以外的碳、硅、锰、硫、磷俗称五大元素的多少所决定的。当铸铁中加入不同合金元素及实行不同的

热处理工艺时，所得到的铸铁组织及力学性能也有所不同。因此，正确地进行配料计算必须掌握铸铁中主要化学元素对铸铁金相组织和力学性能的影响和作用。

一、碳

碳（C）是铸铁的主要化学成分，是铸铁的重要标志，铸铁与铸钢的主要区别在于碳含量的多少。铸铁碳的质量分数为2%~4%，而铸钢碳的质量分数在2%以下。

碳是最强的促进石墨化元素。碳在铸铁中以游离碳或化合碳（ Fe_3C ）的形态存在，铸铁中的游离碳就是石墨，化合碳是碳化三铁，金相组织中称为渗碳体。铸铁中石墨析出的多，使铸铁的金相组织粗大，降低力学性能和硬度。如果石墨析出物过少，又使铁液流动性降低，铸造性能不好，铁液冷凝时收缩增大。铸铁中的渗碳体可提高铸铁硬度。

为了获得好的铸造性能和力学性能，铸铁中碳的质量分数多在3.0%~3.6%之间。

二、硅

硅（Si）也是较强的促进石墨化元素，硅在铸铁中溶解度比碳大得多，在一般铸铁中硅的质量分数为1.3%~3%。硅的质量分数增加到1.5%时就显著增加游离碳，而促进石墨化，减少铸件白口倾向，改善加工性能。所以在熔炼铸铁过程中加入75%硅铁或45%硅铁来增加铸铁的硅含量。

在生产实践中严格控制碳、硅含量来得到铸铁所需要的金相组织和力学性能。通过试验发现一个规律：每增加1%（质量分数）的硅，相图共晶点相应下降1%~3%，即硅对铁碳相图的影响。说明硅可以使共晶点向左移，其移动量约相当于碳量的1/3，根据这一关系可以把硅含量简化折合成碳量，并把这个碳和硅含量的总和称为“碳当量”，采用符号CE表示，即

$$w(CE)\% = w(C)\% + \frac{1}{3}w(Si)\%$$

共晶点处碳的质量分数为4.26%，当碳当量值大于4.26%时为过共晶铸铁，小于4.26%时为亚共晶铸铁。

三、锰

锰（Mn）是中等程度阻碍石墨化元素，锰在铸铁中的作用和硅正相反，能延缓或阻止碳化物分解析出游离碳，使铸铁变硬。锰的质量分数超过4%~5%时会使铸铁变成硬而脆的白口铸铁。锰只有在质量分数为1%以下时，才能有效地提高铸铁的力学性能和硬度。锰的质量分数超过0.8%时会增加铸铁的收缩，所

以铸铁中锰的质量分数一般控制在 0.5% ~ 0.8%，对薄壁小件锰含量控制低限。

锰能溶解在铁的固溶体中，和碳组成碳化物 (Mn_3C)，锰还可以与铸铁中硫化合成为硫化锰 (MnS) 形成熔渣而上浮于金属液面，有利于减少硫对铸铁性能的危害。

四、硫

硫 (S) 是强烈阻碍石墨化元素，铁液中硫含量高时会使铁液变稠流动性不好，也阻碍气体从铁液中逸出，浇注的铸铁件容易产生气孔，硫含量过高铸件表面粗糙。硫与铁形成低熔点 (985℃) 的硫化铁 (FeS) 而使铸件产生热裂。硫是铸铁的有害元素，配料计算时应严格控制硫的含量，且硫含量越低越好，即硫的质量分数不宜超过 0.1%。铸铁中由于有锰的存在，锰与硫形成高熔点的硫化锰 (MnS)，从而抵消了一部分硫的有害作用。

五、磷

磷 (P) 是弱的促进石墨化元素，增加含磷量使铁液的流动性增加和减少铸件缩孔，但增加了铸件的冷脆性。磷的质量分数在 0.12% 以下时，可以提高铸铁的耐磨性；当磷的质量分数超过 0.3% 时铸件容易产生缩孔，多于溶解度磷与铁形成磷化铁——磷化铁 (Fe_3P)，又与铁中的碳化铁 (Fe_3C) 及铁形成三元共晶体，增加铸件的脆性。磷是有害元素，所以对重要机器零件应严格控制磷的含量。

六、铸铁中铬、钼、铜、镍、稀土合金等其他元素

铸铁中加入的其他元素如铬、钼、铜、镍等合金元素，是为了提高铸件特殊的力学性能，或者改善其他铸造性能，形成低合金铸铁或者高合金铸铁。尤其加入稀土合金元素后能有效使铁液脱 S 除气净化，改善铸铁的石墨化组织形状，因而形成球墨铸铁和蠕墨铸铁，显著增加了铸件力学性能和铸造性能。

第三节 铸铁熔炼设备对化学元素增减的影响

国内铸铁熔炼设备主要采用冲天炉熔炼，其次是工频感应炉和中频感应炉。采用电弧炉熔炼铸铁的仅有几个大厂，其中有大连机车厂铸铁分厂，曾用过电弧炉熔炼，现改为工频感应炉，由于炉衬采用的耐火材料不同，在熔炼过程中对元素的烧损或增加有所不同。掌握不同熔炼设备和不同熔炼工艺条件，对各种元素的增减影响，能够更准确地进行配料计算，使之获得经济优质合格的铸件。不同熔炼设备中元素的增减情况及冲天炉层焦消耗和配碳量对元素增减的影响见表

1-10、1-11。

表 1-10 不同熔炼设备中元素的增减情况

| 炉种 | 元素变化(质量分数, %) | | | | | 焦耗率 (%) | 铁液温度 /°C | 备注 |
|--------------------|---------------|-------------|-------------|-------------|---|------------|-------------|---------------------|
| | C | Si | Mn | S | P | | | |
| 普通冲天炉 | + (10 ~ 15) | - (10 ~ 30) | - (15 ~ 20) | + (50 ~ 70) | — | — | — | 冷风正常熔炼 |
| 三排大风口冲天炉 | + (1.5 ~ 8) | - (10 ~ 15) | - (15 ~ 20) | + (20 ~ 40) | — | 10 ~ 15 | 1350 ~ 1370 | — |
| 三排小风口冲天炉 | + (10 ~ 20) | - (15 ~ 20) | - (20 ~ 25) | + (20 ~ 50) | — | 10 ~ 15 | 1380 ~ 1420 | — |
| 多排小风口冲天炉 | + (10 ~ 20) | - (20 ~ 25) | - (25 ~ 35) | + (30 ~ 50) | — | 6 ~ 8 | 1360 ~ 1390 | — |
| 卡腰三节炉 | + (5 ~ 10) | - (10 ~ 15) | - (15 ~ 20) | + (5 ~ 10) | — | 5 ~ 6 | 1380 ~ 1420 | — |
| 二排大间距炉 | + (20 ~ 30) | - (10 ~ 20) | - (20 ~ 30) | + (20 ~ 40) | — | 10 ~ 15 | 1400 ~ 1450 | — |
| 煤粉化铁炉 | + (0 ~ 10) | - (15 ~ 20) | - (25 ~ 35) | — | — | — | — | — |
| 工频和中频感应炉 (酸性炉衬) | -5 | + (2 ~ 3) | -15 | 0 | 0 | — | 1450 ~ 1500 | 加石墨增碳, 增碳率70% ~ 90% |

注: 1. 工频感应炉和中频感应炉: Cr: - (10 ~ 20), Mo: -5, Ti: - (15 ~ 20), Cu: -5。

2. (+) 表示增加, (-) 表示减少。

表 1-11 冲天炉层焦消耗和配碳量对元素增减的影响(质量分数, %)

| 层焦消耗率 (%) | 配碳量 (%) | | | | 备注 |
|-----------|---------|-----|-----------|-----------|------|
| | 2.2 | 2.6 | 3.0 ~ 3.4 | 3.4 ~ 3.6 | |
| 10 | +85 | +55 | +25 | -10 | 熔炼正常 |
| 12 | +90 | +60 | +30 | -10 | 熔炼正常 |
| 14 | +100 | +70 | +40 | -15 | 熔炼正常 |
| 15 ~ 16 | +105 | +75 | +45 | -15 | 熔炼正常 |

第二章 铸铁熔炼配料计算 对原辅材料的要求

铸铁熔炼炉料包括金属炉料、燃料及熔剂等原辅材料。生产实践证明：现代铸造生产如果不重视科学管理或管理不善，乱堆、乱放、乱用，往往影响正常熔炼导致铸件废品增加，降低经济效益。所以准确地进行铸铁熔炼配料计算，必须对所用炉料加强管理和要求，且标签分类堆放。

第一节 金属炉料

金属炉料包括：生铁（生铁锭）、回炉料（废铸件、浇冒口、注余）、废机铁、废钢及铁合金（硅铁、锰铁、稀土合金）等。金属炉料应按不同炉料牌号分别堆放，并立标签标示。生铁分为铸造生铁和炼钢生铁，以及以钢屑为原料采用热风焦炭熔化炉生产的再生铁（土铁）。

每批金属炉料重量为冲天炉熔化率的 $1/8 \sim 1/10$ ，料块尺寸不允许超过炉径的 $1/3$ ，料块质量不超过批料质量的 $1/10 \sim 1/20$ 。

一、生铁

按 GB/T 718—2005 《铸造用生铁》的规定，生铁的化学成分见表 2-1。如本溪钢铁公司生产的生铁多为炼钢生铁，质量好，含磷、硫低。炼钢生铁牌号及化学成分见表 2-2，球墨铸铁用生铁牌号及化学成分见表 2-3，国内部分地方生产生铁化学成分见表 2-4。

表 2-1 铸造用生铁（摘自 GB/T 718—2005）

| 生铁号 | | 牌号 | Z34 | Z30 | Z26 | Z22 | Z18 | Z14 |
|-------------------|--|----|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------|
| 化学成分 (质量分数, %) | | C | > 3.3 | | | > 3.3 | | |
| | | Si | > 3.20 ~ 3.60 | > 2.80 ~ 3.20 | > 2.40 ~ 2.80 | > 2.00 ~ 2.40 | > 1.60 ~ 2.00 | $1.25 \sim 1.60$ |
| | | Mn | 1 组 | ≤ 0.50 | | | | |
| | | | 2 组 | $> 0.50 \sim 0.90$ | | | | |
| | | | 3 组 | $> 0.90 \sim 1.30$ | | | | |
| | | P | 1 级 | ≤ 0.060 | | | | |
| | | | 2 级 | $> 0.060 \sim 0.100$ | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

(续)

| 生铁号 | | 牌号 | Z34 | Z30 | Z26 | Z22 | Z18 | Z14 |
|-------------------|---|-----|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 化学成分 (质量分数, %) | P | 3 级 | >0.100 ~ 0.200 | | | | | |
| | | 4 级 | >0.200 ~ 0.400 | | | | | |
| | | 5 级 | >0.400 ~ 0.900 | | | | | |
| | S | 1 类 | ≤0.030 | | | | | |
| | | 2 类 | ≤0.040 | | | | | |
| | | 3 类 | ≤0.050 | | | | | |

表 2-2 炼钢生铁牌号及化学成分 (质量分数) (%)

| 牌号 | | L04 | L08 | L10 |
|----|----|----------------|-------------|--------------|
| C | | ≥3.50 | | |
| Si | | <0.45 | >4.5 ~ 0.85 | >0.85 ~ 1.25 |
| Mn | 一组 | ≤0.40 | | |
| | 二组 | >0.40 ~ 1.00 | | |
| | 三组 | >1.00 ~ 2.00 | | |
| P | 特级 | ≤0.10 | | |
| | 一级 | >0.100 ~ 0.150 | | |
| | 二级 | >0.150 ~ 0.250 | | |
| | 三级 | >0.250 ~ 0.400 | | |
| S | 特类 | ≤0.020 | | |
| | 一类 | >0.020 ~ 0.030 | | |
| | 二类 | >0.030 ~ 0.050 | | |
| | 三类 | >0.050 ~ 0.070 | | |

表 2-3 球墨铸铁用生铁牌号及化学成分 (质量分数) (摘自 GB/T 1412—2005) (%)

| 牌号 | | Q10 | Q12 | 牌号 | | Q10 | Q12 | |
|----|-----|----------------|--------------|----|-----|----------------|-----|--|
| C | | ≥3.40 | | P | 1 级 | <0.050 | | |
| Si | | 0.50 ~ 1.00 | >1.00 ~ 1.40 | | 2 级 | >0.050 ~ 0.060 | | |
| Ti | 1 档 | ≤0.050 | | | 3 级 | >0.060 ~ 0.080 | | |
| | 2 档 | >0.050 ~ 0.080 | | S | 1 类 | ≤0.020 | | |
| Mn | 1 组 | ≤0.20 | | | 2 类 | >0.020 ~ 0.030 | | |
| | 2 组 | >0.20 ~ 0.50 | | | 3 类 | >0.030 ~ 0.040 | | |
| | 3 组 | >0.50 ~ 0.80 | | | 4 类 | ≤0.0450 | | |

表 2-4 国内部分地方生产生铁化学成分 (质量分数) (%)

| 产地 | C | Si | Mn | P | S | 其他 | 特点 |
|--------|-----------|-------------|-------------|-------------|---------------|--------------|--------|
| 本溪生铁 | 3.8 ~ 4.0 | 1.5 ~ 2.5 | 0.4 ~ 0.7 | <0.07 | 0.05 | — | 优质 |
| 武汉生铁 | 3.4 ~ 3.8 | 1.5 ~ 2.0 | 0.2 ~ 0.9 | <0.10 | <0.04 | Cu 0.2 ~ 0.5 | 含 Cu |
| 徐州生铁 | 3.9 ~ 4.1 | 1.3 ~ 1.5 | 0.10 | 0.07 ~ 0.08 | 0.03 ~ 0.05 | — | — |
| 邯郸生铁 | 3.3 ~ 4.0 | 1.5 ~ 2.0 | 0.10 ~ 0.15 | <0.09 | 0.04 ~ 0.07 | — | — |
| 河南安阳生铁 | 3.9 ~ 4.5 | 1.5 ~ 2.0 | 0.10 | 0.07 ~ 0.08 | 0.03 ~ 0.08 | — | — |
| 吉林通化生铁 | 3.4 ~ 4.0 | 1.1 ~ 1.6 | 1.7 ~ 2.3 | 0.04 ~ 0.10 | 0.028 ~ 0.042 | — | 含 Mn 高 |
| 济南生铁 | 4.1 ~ 4.3 | 1.28 ~ 1.65 | 0.52 ~ 0.68 | 0.07 ~ 0.15 | 0.01 ~ 0.04 | — | 含 P 高 |

二、回炉料

回炉料主要包括浇冒口、注余及废铸件，清砂后应将灰铸铁、球墨铸铁等按不同牌号分别堆放以便回用。回炉料一般按约占金属炉料的 20% ~ 40% 质量配比加入。

三、废机铁

废机铁包括报废机器中的铸铁件及回收废铁等，购入后应进行成分分析，分别堆放。废铁块尺寸和质量大小按规定要求破碎，见表 2-5，入炉前应脱油除锈。废机铁按约占金属炉料质量配比的 20% ~ 30% 配入。

表 2-5 废铁块尺寸及质量大小规定表

| 炉料 | 熔化速率 / (t/h) | 最大尺寸/mm ≤ | 单重/kg ≤ | 最小单重/kg |
|--------------|--------------|-----------------|------------|---------|
| 冲天炉 | >10 | 400 × 300 × 200 | 50 | 0.5 |
| | 5 ~ 10 | 300 × 200 × 200 | 35 | 0.5 |
| | <5 | 200 × 150 × 100 | 20 ~ 15 | 0.5 |
| 工频、中频 感应炉 | >10 | 200 × 200 × 100 | 25 | — |
| | 5 ~ 10 | 200 × 150 × 100 | 20 | — |
| | <5 | 150 × 100 × 50 | 10 | — |

四、废钢

废钢包括报废机器中钢件、废铸钢件、钢材切头及边角余料等，废钢含碳、硫、磷低。废钢尺寸应在 $300\text{mm} \times 80\text{mm} \sim 100\text{m} \times 20\text{mm}$ ，最薄为 2mm。废钢中不得混有高合金钢和低合金钢废钢料，以及有色金属等杂料。

废钢配比量应根据铸铁件材质性能要求配入，一般铁液牌号要求越高废钢加入量越高，见表 2-6。

表 2-6 废钢加入量参考表

| 铸铁牌号 | HT100 | HT150 | HT200 | HT250 | HT300 | HT350 |
|-------------------|-------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 废钢加入量 (质量分数,%) | 0 | 0 ~ 10 | 10 ~ 15 | 15 ~ 20 | 20 ~ 30 | 30 ~ 40 |

五、铁合金

铁合金包括硅铁、锰铁、稀土合金、铬铁、钼铁、镍铁、铜等。硅铁常用的有 75% 硅铁和 45% 硅铁两种。

1. 硅铁

硅铁是熔炼铸铁最重要的合金材料，每批进厂硅铁必须有化验单，并应洁净无其他杂物，分别堆放。加入批料中硅铁块度为 20 ~ 60mm，炉前孕育处理硅铁块度为 5 ~ 15mm，并应预热烘干使用。硅铁的化学成分见表 2-7。

2. 锰铁

锰铁有高碳、中碳、低碳、电解锰之分，每批进厂锰铁应附有化验单，按不同成分分别堆放。锰铁最大块度不超过 20kg，配料中锰铁块度为 20 ~ 60mm。采用工频和中频感应炉熔炼时应将锰铁预热烘干使用。常用锰铁牌号及化学成分见表 2-8 和表 2-9。

3. 稀土镁球化剂和孕育剂

稀土镁球化剂和孕育剂主要生产球墨铸铁、蠕墨铸铁和孕育铸铁用，这些铁合金均不应随炉料加入使用。其加入方式按球化处理工艺不同有所不同，如铁液包中球化处理，砂型中加入等多种工艺方法。使用块度一般在 15mm 以下，干燥使用。常用球化剂和孕育剂见表 2-10 ~ 表 2-15。

表 2-7 硅铁化学成分 (质量分数) (摘自 GB/T 2272—2009) (%)

| 牌号 | Si | Al | Ca | Mn | Cr | P | S | C | Ti | Mg | Cu | V | Ni |
|---------------|-------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| | | ≤ | | | | | | | | | | | |
| FeSi90Al1.5 | 87.0 ~ 95.0 | 1.5 | 1.5 | 0.4 | 0.2 | 0.040 | 0.020 | 0.20 | — | — | — | — | — |
| FeSi90Al3.0 | 87.0 ~ 95.0 | 3.0 | 1.5 | 0.4 | 0.2 | 0.040 | 0.020 | 0.20 | — | — | — | — | — |
| FeSi75Al0.5-A | 74.0 ~ 80.0 | 0.5 | 1.0 | 0.4 | 0.3 | 0.035 | 0.020 | 0.10 | — | — | — | — | — |
| FeSi75Al0.5-B | 72.0 ~ 80.0 | 0.5 | 1.0 | 0.5 | 0.5 | 0.040 | 0.020 | 0.20 | — | — | — | — | — |
| FeSi75Al1.0-A | 74.0 ~ 80.0 | 1.0 | 1.0 | 0.4 | 0.3 | 0.035 | 0.020 | 0.10 | — | — | — | — | — |
| FeSi75Al1.0-B | 72.0 ~ 80.0 | 1.0 | 1.0 | 0.5 | 0.5 | 0.040 | 0.020 | 0.20 | — | — | — | — | — |
| FeSi75Al1.5-A | 74.0 ~ 80.0 | 1.5 | 1.0 | 0.4 | 0.3 | 0.035 | 0.020 | 0.10 | — | — | — | — | — |
| FeSi75Al1.5-B | 72.0 ~ 80.0 | 1.5 | 1.0 | 0.5 | 0.5 | 0.040 | 0.020 | 0.20 | — | — | — | — | — |
| FeSi75Al2.0-A | 74.0 ~ 80.0 | 2.0 | 1.0 | 0.4 | 0.3 | 0.035 | 0.020 | 0.10 | — | — | — | — | — |
| FeSi75Al2.0-B | 72.0 ~ 80.0 | 2.0 | — | 0.5 | 0.5 | 0.040 | 0.020 | 0.20 | — | — | — | — | — |
| FeSi75-A | 74.0 ~ 80.0 | — | — | 0.4 | 0.3 | 0.035 | 0.020 | 0.10 | — | — | — | — | — |
| FeSi75-B | 72.0 ~ 80.0 | — | — | 0.5 | 0.5 | 0.040 | 0.020 | 0.20 | — | — | — | — | — |
| FeSi65 | 65.0 ~ 72.0 | — | — | 0.6 | 0.5 | 0.040 | 0.020 | — | — | — | — | — | — |
| FeSi45 | 40.0 ~ 47.0 | — | — | 0.7 | 0.5 | 0.040 | 0.020 | — | — | — | — | — | — |
| TFeSi75-A | 74.0 ~ 80.0 | 0.03 | 0.03 | 0.10 | 0.10 | 0.020 | 0.004 | 0.020 | 0.015 | — | — | — | — |
| TFeSi75-B | 74.0 ~ 80.0 | 0.10 | 0.05 | 0.10 | 0.05 | 0.030 | 0.004 | 0.020 | 0.04 | — | — | — | — |
| TFeSi75-C | 74.0 ~ 80.0 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.040 | 0.005 | 0.030 | 0.05 | 0.10 | 0.10 | 0.05 | 0.40 |
| TFeSi75-D | 74.0 ~ 80.0 | 0.20 | 0.05 | 0.20 | 0.10 | 0.040 | 0.010 | 0.020 | 0.04 | 0.02 | 0.10 | 0.01 | 0.04 |
| TFeSi75-E | 74.0 ~ 80.0 | 0.50 | 0.50 | 0.40 | 0.10 | 0.040 | 0.020 | 0.050 | 0.06 | — | — | — | — |
| TFeSi75-F | 74.0 ~ 80.0 | 0.50 | 0.50 | 0.40 | 0.10 | 0.030 | 0.005 | 0.010 | 0.02 | — | 0.10 | — | 0.10 |
| TFeSi75-G | 74.0 ~ 80.0 | 1.00 | 0.05 | 0.15 | 0.10 | 0.040 | 0.003 | 0.015 | 0.04 | — | — | — | — |

表 2-8 电炉锰铁牌号及化学成分 (质量分数) (摘自 GB/T 3795—2014) (%)

| 类别 | 牌号 | Mn | C | Si | | P | | S |
|------|------------|-------------|-----|-----|-----|------|------|------|
| | | | | I | II | I | II | |
| 低碳锰铁 | FeMn85C0.2 | 85.0 ~ 92.0 | 0.2 | 1.0 | 2.0 | 0.10 | 0.3 | 0.02 |
| | FeMn80C0.4 | 80.0 ~ 87.0 | 0.4 | 1.0 | 2.0 | 0.15 | 0.3 | 0.02 |
| | FeMn80C0.7 | 80.0 ~ 87.0 | 0.7 | 1.0 | 2.0 | 0.20 | 0.3 | 0.02 |
| 中碳锰铁 | FeMn85C1.0 | 78.0 ~ 85.0 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 0.20 | 0.35 | 0.03 |
| | FeMn85C1.5 | 78.0 ~ 85.0 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 0.20 | 0.35 | 0.03 |
| | FeMn85C2.0 | 76.0 ~ 82.0 | 2.0 | 1.5 | 2.5 | 0.20 | 0.40 | 0.03 |
| 高碳锰铁 | FeMn78C8.0 | 75.0 ~ 82.0 | 8.0 | 1.5 | 2.5 | 0.20 | 0.33 | 0.03 |
| | FeMn70C7.5 | 70.0 ~ 77.0 | 7.5 | 2.0 | 3.0 | 0.25 | 0.38 | 0.03 |
| | FeMn68C7.0 | 65.0 ~ 72.0 | 7.0 | 2.5 | 4.5 | 0.25 | 0.40 | 0.03 |

表 2-9 高炉锰铁牌号及化学成分 (摘自 GB/T 3795—2014)

| 类别 | 牌号 | 化学成分 (质量分数, %) 未注明成分范围的均为最大值 | | | | | | |
|------|--------|------------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|
| | | Mn | C | Si | | P | | S |
| | | | | I | II | I | II | |
| 高碳锰铁 | FeMn78 | 75 ~ 82 | 7.5 | 1.0 | 2.0 | 0.25 | 0.35 | 0.03 |
| | FeMn73 | 70 ~ 75 | 7.5 | 1.0 | 2.0 | 0.25 | 0.35 | 0.03 |
| | FeMn68 | 65 ~ 70 | 7.0 | 1.0 | 2.0 | 0.30 | 0.40 | 0.03 |
| | FeMn63 | 60 ~ 65 | 7.0 | 1.0 | 2.0 | 0.30 | 0.40 | 0.03 |

表 2-10 硅钙合金牌号及化学成分 (质量分数) (%)

| 牌号 | Ca | Si | C | Al | P | S |
|----------|----|---------|-----|-----|------|------|
| | ≤ | | ≤ | | | |
| Ca31Si60 | 31 | 55 ~ 65 | 0.8 | 2.4 | 0.04 | 0.06 |
| Ca28Si60 | 28 | 55 ~ 65 | 0.8 | 2.4 | 0.04 | 0.06 |
| Ca24Si60 | 24 | 55 ~ 65 | 0.8 | 2.5 | 0.04 | 0.06 |

表 2-11 孕育剂化学成分 (质量分数) (%)

| 孕育剂名称 | Si | Ca | Al | Mn | 其他 | Fe |
|-------|---------|---------|----|----|----|----|
| 硅铁 | 72 ~ 77 | — | — | — | — | 余 |
| 硅钙 | 60 ~ 65 | 25 ~ 35 | — | — | — | ≤5 |

(续)

| 孕育剂名称 | Si | Ca | Al | Mn | 其他 | Fe |
|-------|-------|-----|------|-----|---------|----|
| 硅锆 | 60~65 | — | — | — | Zr15~20 | 余 |
| 硅锶 | 77.5 | — | ≤0.5 | — | Sr1 | — |
| 硅铬 | 30 | — | — | — | Cr50 | 余 |
| 硅钼 | 30 | — | — | — | Mo60 | 余 |
| 硅锰锆 | 50~55 | — | — | 5~7 | Zr5~7 | 余 |
| 硅钡钙 | 80 | 0.7 | 1.3 | — | Ba8 | — |
| 硅钙钛 | 52 | 6 | 1 | — | Ti10 | — |

表 2-12 常用球化剂 (仅供参考)

| 球化剂 | 基本化学成分 (质量分数, %) | 密度 / (t/m ³) | 熔点 /℃ | 沸点 /℃ | 球化处 理方法 | 应用情况 |
|--------------|---|-----------------------------|-----------|----------|---------------|---|
| 纯镁 | Mg | 1.74 | 651 | 1105 | 压力加镁 钟罩加镁 | 铸件要求动载荷性能 高时用 |
| 稀土硅 铁镁合金 | Re 3~20、 Mg 7~12、 Si 35~45、 Ca 4 | 4.5~4.6 | 1100 左右 | — | 冲入法、 型内球化法 | 多数铸件用 |
| 稀土硅铁 镁钙合金 | Re 6~8、 Mg 3~4、 Ca 10~13、 Si 50~55 | 3.5~4.1 | 1120~1180 | — | 冲入法 | 发挥了 Ca 的球化作用, 薄壁件白口倾向小, 易得铁素体基体, 成本 低, 但需同时使用助熔 剂与引爆剂 |
| 铜镁合金 | Cu80、 Mg20 | 7.5 | 800 | — | 冲入法 | 缺乏 RE 或要求珠光体 基体时用, 价高 |

表 2-13 稀土镁硅铁合金牌号及化学成分 (质量分数) (摘自 GB/T 4138—2004)

(%)

| 牌号 | RE | Ce/RE | Mg | Ca | Si | Mn | Ti | MgO | Fe |
|---------|----------|-------|----------|---------|------|-----|-----|-----|----|
| | | | | | ≤ | | | | |
| 195101A | 0.5~<2.0 | ≥46 | 4.5~<5.5 | 1.5~3.0 | 45.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 余量 |
| 195101B | 0.5~<2.0 | ≥46 | 5.5~<6.5 | 1.5~3.0 | 45.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 余量 |
| 195101C | 0.5~<2.0 | ≥46 | 6.5~<7.5 | 1.0~2.5 | 45.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 余量 |

(续)

| 牌号 | RE | Ce/RE | Mg | Ca | Si | Mn | Ti | MgO | Fe |
|---------|-------------|-------|------------|------------|------|-----|-----|-----|----|
| | | | | | ≤ | | | | |
| 195101D | 0.5 ~ <2.0 | ≥46 | 7.5 ~ 8.5 | 1.0 ~ 2.5 | 45.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 余量 |
| 195103A | 2.0 ~ <4.0 | ≥46 | 6.0 ~ 8.0 | 1.0 ~ <2.0 | 45.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 余量 |
| 195103B | 2.0 ~ <4.0 | ≥46 | 6.0 ~ 8.0 | 2.0 ~ 3.5 | 45.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 余量 |
| 195103C | 2.0 ~ <4.0 | ≥46 | 7.0 ~ 9.0 | 1.0 ~ <2.0 | 45.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 余量 |
| 195103D | 2.0 ~ <4.0 | ≥46 | 7.0 ~ 9.0 | 2.0 ~ 3.5 | 45.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 余量 |
| 195105A | 4.0 ~ <6.0 | ≥46 | 7.0 ~ 9.0 | 1.0 ~ <2.0 | 44.0 | 2.0 | 1.0 | 1.2 | 余量 |
| 195105B | 4.0 ~ <6.0 | ≥46 | 7.0 ~ 9.0 | 2.0 ~ 3.0 | 44.0 | 2.0 | 1.0 | 1.2 | 余量 |
| 195107A | 6.0 ~ <8.0 | ≥46 | 7.0 ~ 9.0 | 1.0 ~ <2.0 | 44.0 | 2.0 | 1.0 | 1.2 | 余量 |
| 195107B | 6.0 ~ <8.0 | ≥46 | 7.0 ~ 9.0 | 2.0 ~ 3.0 | 44.0 | 2.0 | 1.0 | 1.2 | 余量 |
| 195107C | 6.0 ~ <8.0 | ≥46 | 9.0 ~ 11.0 | 1.0 ~ 3.0 | 44.0 | 2.0 | 1.0 | 1.2 | 余量 |
| 195109 | 8.0 ~ <10.0 | ≥46 | 8.0 ~ 10.0 | 1.0 ~ 3.0 | 44.0 | 2.0 | 1.0 | 1.2 | 余量 |
| 195118 | 17.0 ~ 20.0 | ≥46 | 7.0 ~ 10.0 | 1.5 ~ 3.5 | 42.0 | 2.0 | 2.0 | 1.2 | 余量 |

表 2-14 1号、4号、6号稀土合金化学成分(质量分数)(仅供参考) (%)

| 合金 | 品级 | Re | Si | Fe | Al | Mg | Ca | Mn | Ti |
|----------------|----|---------|---------|---------|-----------|-----------|-------|-------|-------|
| 1号稀土 硅铁合金 | 1 | 17 ~ 20 | 36 ~ 44 | 21 ~ 27 | 0.5 ~ 0.9 | 0.4 ~ 1.3 | 1 ~ 5 | 2 ~ 6 | 2 ~ 6 |
| | 2 | 20 ~ 24 | 36 ~ 44 | 21 ~ 27 | 0.5 ~ 0.9 | 0.4 ~ 1.3 | 1 ~ 5 | 2 ~ 6 | 2 ~ 6 |
| | 3 | 24 ~ 27 | <42 | 21 ~ 27 | 0.5 ~ 0.9 | 0.4 ~ 1.3 | 1 ~ 5 | 2 ~ 6 | 2 ~ 6 |
| | 4 | 27 ~ 30 | <41 | 21 ~ 27 | 0.5 ~ 0.9 | 0.4 ~ 1.3 | 1 ~ 5 | 2 ~ 6 | 2 ~ 6 |
| 4号稀土 铁合金 | 1 | 15 ~ 30 | 34 ~ 42 | 21 ~ 27 | 0.5 ~ 0.9 | 3 ~ 5 | 1 ~ 5 | 2 ~ 6 | 2 ~ 6 |
| | 2 | 15 ~ 30 | 34 ~ 42 | 21 ~ 27 | 0.5 ~ 0.9 | 5 ~ 8 | 1 ~ 5 | 2 ~ 6 | 2 ~ 6 |
| | 3 | 15 ~ 30 | 34 ~ 42 | 21 ~ 27 | 0.5 ~ 0.9 | 8 ~ 10 | 1 ~ 5 | 2 ~ 6 | 2 ~ 6 |
| | 4 | 15 ~ 30 | 34 ~ 42 | 21 ~ 27 | 0.5 ~ 0.9 | 10 ~ 12 | 1 ~ 5 | 2 ~ 6 | 2 ~ 6 |
| 6号低稀土 硅铁镁合金 | 1 | 5 ~ 9 | <40 | 21 ~ 27 | 0.5 ~ 0.9 | 5 ~ 11 | 1 ~ 5 | 2 ~ 6 | 2 ~ 6 |
| | 2 | 5 ~ 9 | <42 | 21 ~ 27 | 0.5 ~ 0.9 | 5 ~ 11 | 1 ~ 5 | 2 ~ 6 | 2 ~ 6 |

表 2-15 稀土硅铁合金牌号和化学成分(质量分数)(摘自 GB/T 4137—2004)

(%)

| 牌号 | RE | Ce/RE | Si | Mn | Ca | Ti | Fe |
|--------|--------------|-------|------|-----|-----|-----|----|
| 195023 | 21.0 ~ <24.0 | ≥46 | 44.0 | 2.5 | 5.0 | 2.0 | 余量 |
| 195026 | 24.0 ~ <27.0 | ≥46 | 43.0 | 2.5 | 5.0 | 2.0 | 余量 |

(续)

| 牌号 | RE | Ce/RE | Si | Mn | Ca | Ti | Fe |
|--------|--------------|-------|------|-----|-----|-----|----|
| 195029 | 27.0 ~ <30.0 | ≥46 | 42.0 | 2.0 | 5.0 | 2.0 | 余量 |
| 195032 | 30.0 ~ <33.0 | ≥46 | 40.0 | 2.0 | 4.0 | 1.0 | 余量 |
| 195035 | 33.0 ~ <36.0 | ≥46 | 39.0 | 2.0 | 4.0 | 1.0 | 余量 |
| 195038 | 36.0 ~ <39.0 | ≥46 | 38.0 | 2.0 | 4.0 | 1.0 | 余量 |
| 195041 | 39.0 ~ <42.0 | ≥46 | 37.0 | 2.0 | 4.0 | 1.0 | 余量 |

第二节 燃料

冲天炉熔炼铸铁主要采用焦炭。焦炭分为铸造焦、冶金焦和土焦。焦炭质量主要区别是含固定碳和硫及灰分等不同。对铸造焦炭主要要求（质量分数）：固定碳应>80%、灰分应<15%、硫≤1.0%、挥发物≤1.5%、水分≤5%，其转鼓强度≥310kg，块度>60mm，气孔率<50%。

国外铸造焦含固定碳大于80%（质量分数），高达93%（质量分数）左右。

国内生产焦炭成分及性能见表2-16~表2-18。

表2-16 国内焦炭成分及性能

| 产地 | 化学成分（质量分数，%） | | | | | 物理性能 | | |
|--------|--------------|-------|------|------|-----|--------|-------|-------|
| | 固定碳 | 灰分 | 硫 | 挥发分 | 水分 | 气孔率（%） | 块度/mm | 占比（%） |
| 北京焦 | 85.90 | 13.54 | 0.37 | 0.64 | 4.0 | 37.8 | >60 | 7.00 |
| 沈阳焦 | 85.0 | 13.20 | 0.76 | 0.62 | 4.2 | 43.0 | >60 | 2.24 |
| 武钢焦 | 86.0 | 12.03 | 0.85 | 0.89 | 3.0 | 44.4 | >60 | 5.28 |
| 河南梨园土焦 | 87.85 | 10.99 | 0.41 | 1.17 | 1.5 | 25.68 | >60 | 6.7 |
| 吴淞焦 | 86.0 | 13.0 | 0.77 | 0.68 | 4.9 | 41.6 | >60 | 8.49 |
| 本溪焦 | 86.0 | 13.0 | 0.9 | <1.0 | — | — | — | — |

表2-17 铸造焦炭的理化指标（摘自GB 8729—1988）

| 指 标 | 级 别 | | |
|----------------|---------|--------------|---------------|
| | 特 级 | 一 级 | 二 级 |
| 块度/mm | >80 | | |
| | 80 ~ 60 | | |
| | >60 | | |
| 水分 W_Q (%) ≤ | 5.0 | | |
| 灰分 A^g (%) | ≤8.00 | 8.01 ~ 10.00 | 10.01 ~ 12.00 |

(续)

| 指 标 | 级 别 | | |
|------------------------|------|------|------|
| | 特 级 | 一 级 | 二 级 |
| 挥发分 r (%) ≤ | 1.50 | | |
| 硫分 S_Q^* (%) ≤ | 0.60 | 0.80 | 0.80 |
| 转鼓强度 M_{40} (%) ≥ | 85.0 | 81.0 | 77.0 |
| 落下强度 SI_4^{50} (%) ≥ | 92.0 | 88.0 | 84.0 |
| 显气孔率 P_5 (%) ≤ | 40.0 | 45.0 | 45.0 |
| 碎焦率 <40mm (%) ≤ | 4.0 | 4.0 | 4.0 |

表 2-18 冶金焦炭的理化指标 (摘自 GB/T 1996—2003)

| 指 标 | 等 级 | 粒度/mm | | | | |
|-------------------|----------------------|-----------|------------------------------------|---------|--|--|
| | | >40 | >25 | 25 ~ 40 | | |
| 灰分 A_d (%) | 一级 | ≤12.0 | | | | |
| | 二级 | ≤13.5 | | | | |
| | 三级 | ≤15.0 | | | | |
| 硫分 $S_{t,d}$ (%) | 一级 | ≤0.60 | | | | |
| | 二级 | ≤0.80 | | | | |
| | 三级 | ≤1.00 | | | | |
| 机械强度 | 抗碎强度 M_{25} (%) | 一级 | ≥92.0 | | | |
| | | 二级 | ≥88.0 | | | |
| | | 三级 | ≥83.0 | | | |
| | 抗压强度 M_{40} (%) | 一级 | ≥80.0 | | | |
| | | 二级 | ≥76.0 | | | |
| | | 三级 | ≥72.0 | | | |
| | 耐磨强度 M_{10} (%) | 一级 | M_{25} 时: ≤7.0; M_{40} 时: ≤7.5 | | | |
| | | 二级 | ≤8.5 | | | |
| | | 三级 | ≤10.5 | | | |
| 反应性 CRI (%) | 一级 | ≤30 | | | | |
| | 二级 | ≤35 | | | | |
| | 三级 | — | | | | |
| 反应后强度 CSR (%) | 一级 | ≥55 | | | | |
| | 二级 | ≥50 | | | | |
| | 三级 | — | | | | |
| 挥发分 V_{def} (%) | | ≤1.8 | | | | |
| 水分含量 M_t (%) | | 4.0 ± 1.0 | 5.0 ± 2.0 | ≤12.0 | | |
| 焦末含量 (%) | | ≤4.0 | ≤5.0 | ≤12.0 | | |

注: 百分数为质量分数。

第三节 熔 剂

熔剂起到造渣和微有脱硫作用，主要包括石灰石 (CaCO_3)、石灰 (CaO)、氟石 (CaF_2)。因氟石产生氟气 (F_2) 对大气有污染，为保护生态环境，已经不用或很少使用氟石。

一、石灰石

石灰石是冲天炉熔炼铸铁必不可少的造渣材料，其化学成分品级应满足 YB/T 5279—2005 的要求，具体指标见表 2-19 和表 2-20。

表 2-19 石灰石理化指标供参考

| 类别 | 牌号 | 化学成分 (质量分数, %) | | | | | |
|-------|--------|----------------|-----------|-----|------------------|-------|-------|
| | | CaO | CaO + MgO | MgO | SiO ₂ | P | S |
| | | ≥ | ≤ | | | | |
| 普通石灰石 | PS540 | 54.0 | — | 3.0 | 1.5 | 0.005 | 0.025 |
| | PS530 | 53.0 | — | 3.0 | 1.5 | 0.010 | 0.035 |
| | PS520 | 52.0 | — | 3.0 | 2.2 | 0.015 | 0.060 |
| | PS510 | 51.0 | — | 3.0 | 3.0 | 0.030 | 0.100 |
| | PS500 | 50.0 | — | 3.0 | 3.5 | 0.040 | 0.150 |
| 镁质石灰石 | GMS545 | — | 54.5 | 8.0 | 1.5 | 0.005 | 0.025 |
| | GMS540 | — | 54.0 | 8.0 | 1.5 | 0.010 | 0.035 |
| | GMS535 | — | 53.5 | 8.0 | 2.2 | 0.020 | 0.060 |
| | GMS525 | — | 52.5 | 8.0 | 2.5 | 0.030 | 0.100 |
| | GMS515 | — | 51.5 | 8.0 | 3.0 | 0.040 | 0.150 |

表 2-20 冲天炉用石灰石 (质量分数) (%)

| 指标名称 | 石灰石级别 | |
|----------------------------|---------|-------|
| | PS520 | PS500 |
| 氧化钙 (CaO) ≥ | 52 | 50 |
| 二氧化硅 (SiO ₂) ≤ | 2.2 | 3.5 |
| 氧化镁 (MgO) ≤ | 3.0 | 3.0 |
| 粒度范围/mm | 15 ~ 60 | |
| 最大粒度/mm | 80 | |
| 粒度允许波动范围 (%) ≤ | ± 10 | |

石灰石小于 20mm 的碎块不大于 2%，石灰石入炉使用块度为 30~80mm，不应使用小于 20mm 以下的碎块。

二、石灰

石灰主要用在工频和中频感应炉及电弧炉熔炼铸铁和铸钢造渣用。冶金石灰应满足 YB/T 042—2014 的要求，其理化指标和化学成分见表 2-21 和表 2-22。

表 2-21 石灰化学理化指标（摘自 YB/T 042—2014）

| 类别 | 品级 | 化学成分（质量分数，%） | | | | | 灼减 (质量分 数，%) | 活性度，4mol/mL (40 ± 1) °C, 10min |
|------------|----|--------------|-----------|------|------------------|--------|--------------------|-----------------------------------|
| | | CaO | CaO + MgO | MgO | SiO ₂ | S | | |
| 普通冶 金石灰 | 特级 | ≥92.0 | — | <5.0 | ≤1.5 | ≤0.020 | ≤2 | ≥360 |
| | 一级 | ≥90.0 | | | ≤2.0 | ≤0.030 | ≤4 | ≥320 |
| | 二级 | ≥88.0 | | | ≤2.5 | ≤0.050 | ≤5 | ≥280 |
| | 三级 | ≥85.0 | | | ≤3.5 | ≤0.100 | ≤7 | ≥250 |
| | 四级 | ≥80.0 | | | ≤5.0 | ≤0.100 | ≤9 | ≥180 |
| 镁质冶 金石灰 | 特级 | ≥93.0 | — | ≥5.0 | ≤1.5 | ≤0.025 | ≤2 | ≥360 |
| | 一级 | ≥91.0 | | | ≤2.5 | ≤0.050 | ≤4 | ≥280 |
| | 二级 | ≥86.0 | | | ≤3.5 | ≤0.100 | ≤6 | ≥230 |
| | 三级 | ≥81.0 | | | ≤5.0 | ≤0.200 | ≤8 | ≥200 |

表 2-22 冶金石灰化学成分（质量分数）（摘自 YB/T 042—2014） (%)

| 类别 | 品级 | CaO | CaO + MgO | MgO | SiO ₂ | S | 灼减 |
|------------|----|-----|-----------|------|------------------|--------|----|
| 普通冶 金石灰 | 特级 | ≥92 | — | <5.0 | ≤1.5 | ≤0.02 | ≤2 |
| | 一级 | ≥90 | | | ≤2.0 | ≤0.03 | ≤4 |
| | 二级 | ≥88 | | | ≤2.5 | ≤0.05 | ≤5 |
| | 三级 | ≥85 | | | ≤3.5 | ≤0.10 | ≤7 |
| | 四级 | ≥80 | | | ≤5.0 | ≤0.10 | ≤9 |
| 镁质 石灰 | 特级 | ≥93 | — | ≥5.0 | ≤1.5 | ≤0.025 | ≤2 |
| | 一级 | ≥91 | | | ≤2.5 | ≤0.05 | ≤4 |
| | 二级 | ≥86 | | | ≤3.5 | ≤0.10 | ≤6 |
| | 三级 | ≥81 | | | ≤5.0 | ≤0.2 | ≤8 |

三、氟石

氟石主要稀释炉渣增加炉渣流动性，氟石外观颜色为浅绿色、白色、紫色晶体，避免掺杂黑紫色石料，化学成分应满足表 2-23 的要求。

表 2-23 氟石平均化学成分（质量分数） (%)

| CaF ₂ | SiO ₂ | S | P | 使用块质 |
|------------------|------------------|------|-------|---------|
| >85 | ≤14 | ≤0.2 | ≤0.06 | 20~50mm |

第三章 铸铁熔炼的配料计算

铸铁熔炼的配料计算是在掌握配料计算的基本知识的基础上，根据生产铸件的材质的化学成分、力学性能、结构特点，再进行配料计算的。也有的用户对铸件没有化学成分要求，只提出使用要求的一般铸件，这就应由生产厂家根据铸件使用要求、结构特点确定铸件材质化学成分，然后再进行配料计算。本章是铸铁配料计算的核心，同时还应知道熔炼铸铁需要消耗多少能量及冲天炉熔炼的热平衡计算，从而可采取有效的节能措施，提高熔化率。

第一节 铸铁熔炼所需热量消耗的计算

一、熔炼灰铸铁理论耗能计算

例 3-1 熔炼 1t 灰铸铁自 25℃ 加热熔化 (1150℃)，并过热到 1400℃ 的铁液，计算所需耗热能。

解：(1) 计算单位换算为法定计量单位

$$1 \text{ 大气压} = 101.325 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ kcal} = 4184 \text{ J} = 4.184 \text{ kJ}$$

(2) 公式

$$Q_{\text{总}} = mc_{p\text{固}}(t_{\text{熔}} - 25) + mQ_{\text{熔}} + mc_{p\text{液}}(1400 - t_{\text{熔}})$$

式中 $Q_{\text{总}}$ —— 熔炼总热量 (kJ)；

m —— 熔炼物质质量 (kg)，本例中 $m = 1000 \text{ kg}$ ；

$c_{p\text{固}}$ —— 灰铸铁固体平均比热容 [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{℃})$]，本例中 $c_{p\text{固}} = 0.670 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{℃})$ ；

$Q_{\text{熔}}$ —— 灰铸铁熔化潜热 (kJ/kg)，本例中 $Q_{\text{熔}} = 271.96 \text{ kJ}/\text{kg}$ ；

$c_{p\text{液}}$ —— 灰铸铁液体平均比热容， $0.879 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{℃}$ 。

代入公式计算：

$$\begin{aligned} Q_{\text{总}} &= 1000 \times 0.670 \times (1150 - 25) \text{ kJ} + 1000 \times 271.96 \text{ kJ} + \\ &\quad 1000 \times 0.879 \times (1400 - 1150) \text{ kJ} \\ &= 1245460 \text{ kJ} \end{aligned}$$

例 3-2 采用冲天炉熔炼 1t 灰铸铁需要用多少焦炭？

解：按普通焦炭含固定碳 80% (质量分数) 计算，每公斤焦炭完全燃烧发

热值 = $7837 \text{ kcal} \times 4.184 \text{ kJ/kcal} \times 80\% = 26232 \text{ kJ}$ 。熔炼 1t 灰铸铁铁液需焦炭量为

$$\text{需焦炭} = \frac{1245460 \text{ kJ/t}}{26232 \text{ kJ/kg}} = 47.48 \text{ kg/t}$$

例 3-3 采用工频感应炉熔化 1t 灰铸铁需要用多少电能?

解: 1 度电 ($\text{kW} \cdot \text{h}$) = $860 \text{ kcal} \times 4.184 = 3598.24 \text{ kJ}$

$$\text{需电能} = \frac{1245460}{3598.24} \text{ kW} \cdot \text{h} = 346.13 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

二、采用冲天炉与工频或中频感应炉双联熔炼时计算电炉所消耗的能量

例 3-4 采用冲天炉熔炼灰铸铁, 将熔化的铁液倒人工频感应炉中调整, 欲使 5000kg 铁液自 1300°C 升温到 1450°C , 计算消耗能量?

解: 计算公式为

$$Q_{\text{能量}} = mc_{p\text{液}} (t_2 - t_1)$$

式中 $Q_{\text{能量}}$ —— 感应炉升温所需能量 (kJ);

m —— 铁液量 (kg), 本例中 $m = 5000 \text{ kg}$;

$c_{p\text{液}}$ —— 液态铸铁的平均比热容 [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$], 本例中 $c_{p\text{液}} = 0.879 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$;

t_1 —— 初始温度, 本例中 $t_1 = 1300^{\circ}\text{C}$;

t_2 —— 目标温度, 本例中 $t_2 = 1450^{\circ}\text{C}$ 。

代入公式并计算:

$$Q_{\text{能量}} = 5000 \text{ kg} \times 0.879 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}) \times (1450 - 1300) ^{\circ}\text{C} = 659250 \text{ kJ}$$

$$\text{折合电能} = \frac{659250}{3598.24} \text{ kW} \cdot \text{h} = 183.2 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

第二节 冲天炉熔炼铸铁过程的热平衡计算

本节以某厂燃烧焦炭冲天炉熔炼铸铁过程中实测数据为例, 进行热平衡计算。

一、已知原始数据

1) 熔化率为 4.2 t/h , 熔化 100 kg 铁料需 1.43 min ($\frac{0.1 \times 60}{4.2} = 1.43$)。

2) 总焦炭消耗量为 6.56% , 即每熔化 100 kg 铁料需要 6.56 kg 焦炭, 即焦铁比 $1:6.56$, 焦炭含固定碳 79.8% (质量分数)。

3) 实际送风量 $41.1 \text{m}^3/\text{min}$, 即熔化 100kg 铁料需要风量为 $41.1 \text{m}^3/\text{min} \times 1.43\text{min} = 59 \text{m}^3$ 。

4) 铸件硅的质量分数为 2%, 熔化时烧损 16.2% (质量分数); 锰的质量分数为 0.8%, 熔化时烧损为 25.3% (质量分数)。

5) 渣量与渣中含 FeO 量, 渣铁比为 6%, 即熔化 100kg 铁料的渣量为 6kg 。渣中含 FeO 的质量分数为 5.74%, 则 6kg 渣中 FeO 量 = $6\text{kg} \times 5.74\% = 0.344\text{kg}$ 。

6) 铁液温度为 1358°C ; 炉渣温度为 1340°C ; 热风温度为 186.5°C 。

7) 熔剂石灰石用量为焦炭量的 30%, 即 100kg 铁料用石灰石 = $6.56\text{kg} \times 30\% = 1.968\text{kg}$ 。

8) 加料口下沿炉气成分 (体积分数) 为: CO 为 2.9%; CO_2 为 18.8%; O_2 为 0.33%; N_2 为 77.97%。炉气温度为 151°C 。

二、热量来源

1. 焦炭燃烧放热

工业上常用的焦炭发热量公式为

$$Q_{\text{焦}} = (81\text{C} + 26\text{S} - 6\text{W}) \times 4.184\text{kJ/kg}$$

式中 $Q_{\text{焦}}$ —— 单位焦炭发热量 (kJ/kg);

C —— 焦炭含固定碳 79.8%;

S —— 焦炭含硫量 0.69%;

W —— 焦炭含水量 3%。

则 $Q_{\text{焦}} = (81 \times 79.8 + 26 \times 0.69 - 6 \times 3) \times 4.184\text{kJ/kg} = 27045.4\text{kJ/kg}$

则熔化 100kg 铁料需 6.56kg 焦炭发出热量:

$$Q_{\text{焦热}} = 27045.4\text{kJ/kg} \times 6.56\text{kg} = 177418.2\text{kJ}$$

2. 造渣放热

采用石灰石造渣时, 首先是石灰石 (CaCO_3) 先受炉气热量后而分解, 即 $\text{CaCO}_3 \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$, 此时即吸热有热量损失, 而生成的石灰 (CaO) 与 SiO_2 反应放热, 即: $\text{CaO} + \text{SiO}_2 \longrightarrow \text{CaSiO}_3 + 385.7\text{kcal/kg}$ (CaO)。换算成千焦为: $385.7 \times 4.184\text{kJ/kg} = 1614.0\text{kJ/kg}$ 。

已知造渣用石灰石 1.968kg , 生成的 CaO 量为 $x\text{kg}$:



$$x = \frac{1.968 \times 56.1}{100.1} = 1.103\text{kg}$$

注: $\text{CaCO}_3 = 100.1$; $\text{CaO} = 56.1$ 由化学元素周期表查出 Ca 、 C 、 O 相对原子

质量和为相对分子质量。

则造渣放出热量：

$$Q_{\text{渣热}} = 1614.0 \text{ kJ/kg} \times 1.102 \text{ kg} = 1779.0 \text{ kJ}$$

3. 金属烧损放热

(1) 硅烧损放热 已知铁液中硅的质量分数为 2%，硅烧损的质量分数为 16.2%，则 100kg 铁料中含硅量：

$$\text{铁料中含 Si 量} = \frac{2}{1 - 0.162} \text{ kg} = 2.386 \text{ kg}$$

$$\text{硅铁烧损量} = 2.386 \text{ kg} \times 16.2\% = 0.386 \text{ kg}$$

硅烧损放热：



$$\text{换算成千焦为 } 7480 \times 4.184 \text{ kJ/kg} = 31296.3 \text{ kJ/kg (Si)}$$

则硅烧损放热：

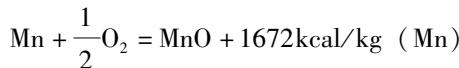
$$Q_{\text{硅}} = 31296.3 \text{ kJ/kg} \times 0.386 \text{ kg} = 12080.4 \text{ kJ}$$

(2) 锰烧损放热 已知铁液中锰的质量分数为 0.8%，锰烧损的质量分数为 25.3%，则 100kg 铁料中含锰量：

$$\text{铁料中含 Mn 量} = \frac{0.8}{1 - 0.253} \text{ kg} = 1.071 \text{ kg (Mn)}$$

$$\text{锰烧损量} = 1.071 \text{ kg} \times 25.3\% = 0.271 \text{ kg}$$

锰烧损放热：



$$\text{换算成千焦为 } 1672 \text{ kcal/kg} \times 4.184 \text{ kJ/kcal} = 6995.6 \text{ kJ/kg (Mn)}$$

则锰烧损放热：

$$Q_{\text{锰}} = 6995.6 \text{ kJ/kg} \times 0.271 \text{ kg} = 1896.0 \text{ kJ}$$

(3) 铁烧损放热 已知渣铁比为 6%，即熔化 100kg 铁料产生的炉渣量为 6kg。又已知炉渣中氧化铁 (FeO) 的质量分数为 5.74%，则 6kg 炉渣中 FeO 量 = $6 \text{ kg} \times 5.74\% = 0.344 \text{ kg}$ ，计算 0.344kg 炉渣含 Fe 量：



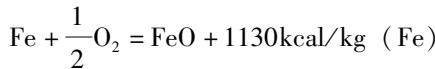
$$71.947 \text{ (g)} \quad 55.847 \text{ (g)}$$

$$0.344 \text{ (kg)} \quad x \text{ (kg)} \text{ (Fe)}$$

$$x = \frac{0.344 \times 55.847}{71.947} \text{ kg} = 0.267 \text{ kg}$$

注：FeO 的相对分子质量 = $55.847 + 16.1 = 71.947$ ；Fe 的相对原子质量 = 55.847。

查化学元素周期表, 则铁烧损放热:



换算成千焦为 $1130 \times 4.184 \text{ kJ/kg} = 4728 \text{ kJ/kg (Fe)}$

$$Q_{\text{铁}} = 4728 \text{ kJ/kg} \times 0.267 \text{ kg} = 1262.4 \text{ kJ}$$

金属烧损放出的总热量:

$$Q_{\text{金热}} = Q_{\text{硅}} + Q_{\text{锰}} + Q_{\text{铁}} = 12080.4 \text{ kJ} + 1896.0 \text{ kJ} + 1262.4 \text{ kJ} = 15238.8 \text{ kJ}$$

4. 热风带入的热量

已知鼓入冲天炉的热风温度为 186.5°C , 自然温度为 25°C , 鼓风量为 $59 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

由热风带入的热量计算公式:

$$Q_{\text{热风}} = Vc_p (t_2 - t_1)$$

式中 V ——熔炼 100 kg 铁料需要的鼓风量为 59 m^3 ;

c_p ——空气平均比热容, 查资料, $c_p = 0.313 \text{ kcal}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$, 换算成千焦为 $0.313 \text{ kcal}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}) \times 4.184 \text{ kJ/kcal} = 1.310 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$;

t_2 ——热风温度 186.5°C ;

t_1 ——自然温度 25°C 。

$$\text{则 } Q_{\text{热风}} = 59 \times 1.310 \times (186.5 - 25) \text{ kJ} = 12482.3 \text{ kJ}$$

则冲天炉熔炼过程中总供给热量:

$$\begin{aligned} Q_{\text{总供}} &= Q_{\text{焦热}} + Q_{\text{渣热}} + Q_{\text{金热}} + Q_{\text{热风}} \\ &= 177418 \text{ kJ} + 1779.0 \text{ kJ} + 15238.8 \text{ kJ} + 12482.3 \text{ kJ} \\ &= 206918.1 \text{ kJ} \end{aligned}$$

三、热量消耗

1. 铁料的加热、熔炼和过热

计算 100 kg 灰铸铁从 25°C 加热、熔炼到 1150°C , 再过热到 1358°C 时需要吸收的热量。

1) 加热至 1150°C 熔炼可看成是固态铸铁简单的加热过程, 其计算公式为

$$Q_{\text{熔}} = mc_{p\text{固}} (t_{\text{熔}} - t_{\text{室}})$$

式中 $Q_{\text{熔}}$ ——熔化潜热 (kJ);

m ——灰铸铁料 100 kg ;

$c_{p\text{固}}$ ——固态灰铸铁平均比热容, 查资料, $c_{p\text{固}} = 0.16 \text{ kcal}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; 换算成千焦为 $0.16 \text{ kcal}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}) \times 4.184 \text{ kJ/kcal} = 0.670 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$;

$t_{熔} = 1150^{\circ}\text{C}$;

$t_{室} = 25^{\circ}\text{C}$ 。

则 $Q_{熔} = 100 \times 0.670 \times (1150 - 25) \text{ kJ} = 75375 \text{ kJ}$

2) 加热至熔炼 1150°C ，这是在等温等压下的相变过程，其计算公式为

$$Q_{熔化} = m v_{熔化}$$

式中 $v_{熔化}$ ——相变过程中灰铸铁平均熔化潜热，本例中 $v_{熔化} = 272.14 \text{ kJ/kg}$ 。

则 $Q_{熔化} = 100 \times 272.14 \text{ kJ} = 27214 \text{ kJ}$

3) 灰铸铁液从 1150°C 过热到 1358°C ，可看作是简单过热过程，其计算公式为

$$Q_{过热} = m c_{p液} (1358 - 1150)$$

式中 $c_{p液}$ ——灰铸铁液平均比热容，本例中 $c_{p液} = 0.21 \text{ kcal/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$ 。

换算成千焦为 $0.21 \text{ kcal/kg} \cdot ^{\circ}\text{C} \times 4.184 \text{ kJ/kcal} = 0.879 \text{ kJ/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$

则 $Q_{过热} = 100 \times 0.879 \times (1358 - 1150) \text{ kJ} = 18283.2 \text{ kJ}$

由计算所得 100kg 灰铸铁从室温 25°C 进炉熔化到 1150°C 再过热到 1358°C ，总共吸收热量（耗热）：

$$Q_{铁耗热} = Q_{熔} + Q_{熔化} + Q_{过热} = 75375 \text{ kJ} + 27214 \text{ kJ} + 18283.2 \text{ kJ} = 120872.2 \text{ kJ}$$

2. 石灰石分解

加入 1.968kg 石灰石造渣时石灰石分解消耗热量，反应式：

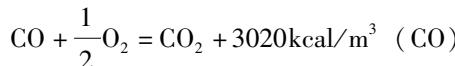


换算成千焦为 1794 kJ/kg 。

则 $Q_{石灰} = 1794 \text{ kJ/kg} \times 1.968 \text{ kg} = 3530.6 \text{ kJ}$

3. 焦炭不完全燃烧所带走的化学热（即炉气带走的化学热）

设冒出炉外炉气的体积与鼓入炉内的空气体积相同（都按同一温度计算），则冒出炉外的炉气体积也应是 $59 \text{ m}^3/\text{min}$ 。由于焦炭不完全燃烧产生 CO 气，再有 O_2 可使 CO 气再燃烧放热，而这部分热量被炉气带出炉外应计算热损失，即反应式为



换算千焦为 $12644.1 \text{ kJ/m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$ 。

因炉气中 CO 气体成分占 2.9% ，所以 CO 气体积为 $59 \text{ m}^3 \times 2.9\% = 1.711 \text{ m}^3$ 。则焦炭中碳不完全燃烧带走的化学热：

$$Q_{焦CO} = 12644.1 \text{ kJ/m}^3 \times 1.711 \text{ m}^3 = 21634.1 \text{ kJ}$$

4. 炉气带走的物理热

已知冲天炉加料口处炉气温度为 151°C ，并已设定炉气体积与鼓风气体体积相等，炉气成分与比热容见表 3-1。

表 3-1 炉气成分与平均比热容

| 炉气组成 | CO ₂ | CO | O ₂ | N ₂ |
|--|-----------------|-------|----------------|----------------|
| 炉气成分 (体积分数, %) | 18.8 | 2.9 | 0.33 | 77.98 |
| $c_p / [\text{kJ} / (\text{m}^3 \cdot \text{°C})]$ | 1.758 | 1.306 | 1.327 | 1.306 |

炉气平均比热容:

$$c_{p\text{炉气}} = \frac{1.758 \times 18.8 + 1.306 \times 2.9 + 1.327 \times 0.33 + 1.306 \times 77.98}{100} \text{ kJ} / (\text{m}^3 \cdot \text{°C}) \\ = 1.391 \text{ kJ} / (\text{m}^3 \cdot \text{°C})$$

则 59m³ 炉气带走的物理热:

$$Q_{\text{炉气}} = 59 \text{ m}^3 \times 1.391 \text{ kJ} / (\text{m}^3 \cdot \text{°C}) \times (151 - 25) \text{ °C} = 10340.7 \text{ kJ}$$

5. 炉渣带走的热量

已知熔化 100kg 铸铁产生炉渣 6kg, 每千克炉渣所带走的热量一般在 1570 ~ 1674kJ/kg, 现按上限计算, 则炉渣带走的热量:

$$Q_{\text{炉渣}} = 6 \text{ kg} \times 1674 \text{ kJ/kg} = 10044 \text{ kJ}$$

6. 其他热量损耗

其他热量损耗主要包括炉体储热、传热和散热。这部分热量计算要从物体传热、散热、辐射热等计算很复杂, 为简化起见, 这部分热损失视为从总热量供给中减去总热量损耗所余下的热量。因此, 其他热量损耗为

$$Q_{\text{其他}} = Q_{\text{总供}} - (Q_{\text{铁耗热}} + Q_{\text{石灰石}} + Q_{\text{焦CO}} + Q_{\text{炉气}} + Q_{\text{炉渣}}) \\ = 206918.1 \text{ kJ} - (120872.2 + 3530.6 + 21634.1 + 10340.7 + 10044) \text{ kJ} \\ = 40496.5 \text{ kJ}$$

四、冲天炉熔炼过程的热平衡计算结果

将上述“二、热量来源”“三、热量消耗”计算结果列于表 3-2。

表 3-2 冲天炉熔炼过程热平衡

| 热量来源 | | | 热量消耗 | | |
|-------|----------|--------|----------|----------|--------|
| 项 目 | 热量/kJ | 占比 (%) | 项 目 | 热量/kJ | 占比 (%) |
| 焦炭燃烧 | 177418.2 | 85.84 | 铁料加热熔化过热 | 120872.2 | 58.44 |
| 金属烧损 | 15238.8 | 7.37 | 石灰石分解 | 3530.6 | 1.71 |
| 造渣放热 | 1779.0 | 0.86 | 焦炭不完全燃烧 | 21634.1 | 10.46 |
| 热风带进热 | 12482.3 | 5.93 | 炉气带走热 | 10340.7 | 4.99 |
| 总供热 | 206918.1 | 100 | 炉渣带走热 | 10044 | 4.86 |
| | | | 其他热损耗 | 40496.5 | 19.54 |
| | | | 总消耗 | 206918.1 | 100 |

五、冲天炉熔炼过程的热效率

1) 按上述计算的冲天炉热平衡结果计算热效率, 其计算公式为

$$y = \frac{Q_{\text{熔热}}}{Q_{\text{总供热}}} = \frac{120872.7}{206828.3} \times 100\% = 58.44\%$$

2) 已知焦耗 8%, 即熔炼 100kg 铁料需要 8kg 焦炭, 一般焦炭含固定碳 80% (质量分数), 铁液过热到 1400°C, 计算冲天炉的热效率。

公式为 $y = \frac{1}{C} (310 + 0.27\Delta t)$

式中 y —热效率 (%) ;

C —耗固定碳量, 本例 $C = 8\text{kg} \times 80\% = 6.4\text{kg}$;

Δt —铁液过热温度 (°C), 本例 $\Delta t = (1400 - 1150)\text{°C} = 250\text{°C}$ 。

则 $y = \frac{1}{6.4} (310 + 0.27 \times 250) = 58.9\%$

通过上述冲天炉熔炼过程的热平衡关系计算, 可以看出铁料熔炼及过热和其他热损失占热量消耗的 77.98%, 占主要部分, 从而为提高冲天炉热效率, 降低能耗、节约原材料提供了重要依据。

第三节 冲天炉熔炼底焦、层焦、层料 (每批铁料)、熔剂、风量和风压的计算

一、底焦

底焦是指由炉底装至熔化带处的焦炭, 底焦加入量的多少是根据冲天炉大小和焦炭质量而确定。

1. 底焦高度

底焦高度是影响铁液温度、生产率和化学成分等的一个重要的操作工艺参数。底焦高度过高使熔化率降低, 过低又使铁液温度降低。当然底焦高度与焦炭质量有直接关系, 焦炭质量好, 块度大, 强度高可适当采用底焦高度的中下限值, 反之采用中上限值为控制底焦高度。

一般计算底焦高度采用的经验公式为

$$H = 37.5 \sqrt{p} + A$$

式中 H —底焦高度 (mm);

p —风压 ($\text{mmH}_2\text{O}^{\ominus}$);

⊖ $1\text{mmH}_2\text{O} = 9.80665\text{Pa}$ 。

A ——常数，熔炼低碳铸铁时 $A = 75\text{mm}$ ；高碳铸铁时 $A = 150\text{mm}$ ，一般铸铁时 $A = 125\text{mm}$ 。

这个经验公式只适用三排大风口冲天炉，当采用小风口或二排大间距风口时，其系数应在实践中加以修正。

选择底焦高度合适时，在送风 $5 \sim 6\text{min}$ 后通过风口可看到明亮的小铁液滴；底焦过高时，送风 $20 \sim 25\text{min}$ 后方能出现铁液滴；底焦高度过低时，送风 2min 后可出现液铁滴。应及时调整底焦高度。

例 3-5 生产率为 2t/h 冷风三排小风口冲天炉，熔炼普通灰铸铁，计算底焦高度。

解：已知风压 $p = 11760\text{Pa}$ ($1200\text{mmH}_2\text{O}$)， $A = 150\text{mm}$ 。

则 $H = 37.5 \sqrt{1200}\text{mm} + 150\text{mm} = 1450\text{mm}$

为减小计算选择合理的底焦高度，根据有关资料列出底焦高度参考数据见表 3-3。

表 3-3 底焦高度参考数据

| 生产率/ (t/h) | | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | 10 | 备注 |
|-----------------------|-------|------|-------------|-------------|---------------|---------------|-------------|------------------------|
| 炉膛直径/mm | | 450 | 550 | 700 | 900 | 950 | 1050 | 采用多排风口曲线炉膛时应分段仔细计算底焦高度 |
| 底焦高度/mm | 三排大风口 | 1300 | 1400 | 1500 | 1700 | 1800 | 1900 | |
| | 三排小风口 | 1100 | 1300 | 1400 | — | — | — | |
| | 二排大间距 | 1400 | 1500 ~ 1600 | 1600 ~ 1700 | 1700 ~ 1800 | 1850 ~ 1900 | 1900 ~ 2000 | |
| 风压/kPa | | 11 | 12 | 13.5 | 15.00 ~ 20.00 | 18.00 ~ 25.00 | — | |

2. 底焦重量

底焦质量计算公式

$$m_{\text{底焦}} = \rho F H$$

式中 $m_{\text{底焦}}$ ——底焦量 (kg)；

ρ ——底焦堆密度 (kg/m^3)，约为 $400 \sim 500\text{kg/m}^3$ ，一般取 450kg/m^3 ；

F ——冲天炉底焦段炉膛截面面积 (m^2)；

H ——底焦高度 (mm)。

这个公式只适应于直线炉膛。

例 3-6 熔化率为 2t/h 二排大间距冲天炉，炉膛直径为 $\phi 600\text{mm}$ ，底焦高度为 1.5m ，计算底焦的质量？

解：炉膛截面面积 $F = \pi R^2 = 3.14 \times \left(\frac{0.6}{2}\right)^2 \text{m}^2 = 0.283\text{m}^2$

则 $m_{\text{底焦}} = 450 \text{ kg/m}^3 \times 0.283 \text{ m}^2 \times 1.5 \text{ m} = 191 \text{ kg}$

二、层焦、层料

层焦加入的目的是为了补充底焦在熔化每一批金属料时所烧去的焦炭，使底焦高度和熔化带保持稳定，从而使冲天炉熔炼正常。每层焦炭加入数量或加入层焦高度不能覆盖冲天炉炉膛的截面面积时，使不同层的金属料彼此连接，容易破坏冲天炉正常熔炼过程。因此，层焦加入量是保持熔炼正常，获得优质铁液的重要工艺参数。

1. 层焦

层焦加入量根据生产经验，层焦高度应为 110 ~ 160mm。层焦量计算公式为

$$m_{\text{层焦}} = \rho F h$$

式中 $m_{\text{层焦}}$ —— 层焦加入量 (kg)；

ρ —— 焦炭堆密度，取 450 kg/m^3 ；

F —— 熔化带处炉膛截面面积 (m^2)；

h —— 层焦加入高度，取 150mm，即 $m_{\text{层焦}} = \frac{1}{4} \pi D^2 \rho h$ 。

例 3-7 生产率为 5t/h 冲天炉，炉膛直径为 900mm，计算层焦的质量？

解： $m_{\text{层焦}} = \left(\frac{1}{4} \pi \times 0.9^2 \times 450 \times 0.15 \right) \text{ kg} = 42.9 \text{ kg} \approx 43 \text{ kg}$

2. 层料 (每批铁料)

每层金属料量根据生产经验一般为冲天炉每小时熔化量的 $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{12}$ ，或者根据

层焦铁比确定每批金属料的加入量，每批金属层料量计算公式为

$$m_{\text{层铁}} = \frac{100}{B} \times m_{\text{层焦}}$$

式中 $m_{\text{层铁}}$ —— 每批金属料质量 (kg)；

B —— 焦炭消耗与金属铁料的百分比；

$m_{\text{层焦}}$ —— 层焦质量 (kg)。

例 3-8 熔化率为 5t/h 的冲天炉，层焦铁比 = 1:10，焦炭消耗 10%，计算每批金属层料质量，层焦取 43kg。

解： $m_{\text{层铁}} = \frac{100}{10} \times 43 \text{ kg} = 430 \text{ kg}$

例 3-9 熔化率为 2t/h 冲天炉，计算每批金属料的质量。

解：按 1h 熔化量为 $\frac{1}{10}$ 计算

则

$$m_{\text{层铁}} = 2000\text{kg} \times \frac{1}{10} = 200\text{kg}$$

3. 接力焦

根据生产中的实际情况，如熔炼停风时间长，或要求铁液温度高，或焦炭质量不好，强度低等原因，要在加入几批料后补加一批焦炭，生产中习惯称为“接力焦”。接力焦加入量一般为层焦量。

4. 焦铁比

焦铁比应有层焦比和总焦比两种含义，即每层焦炭与每批铁料之比和总焦炭消耗（包括底焦、层焦、接力焦之和）与总铁料（即每批铁料之和）之比。焦铁比应指每层焦炭（每批焦炭）与每层铁料（每批金属料）之比。

三、熔剂

熔剂的作用是用来造渣，有利于铁液脱硫。熔剂能与炉料带入的泥沙土、灰分、金属氧化物及剥落的炉衬等形成熔点低、流动性好的熔渣与铁液分离，排出炉外。

常用的熔剂有石灰石和氟石等，氟石因产生氟化氢（HF）有害气体而停止使用。提高炉渣碱度有利于脱硫，当炉料不洁净时应适当多加些石灰石。如果石灰石量加入过少，又可能产生“发渣”“风口结渣”堵住风眼等故障而影响正常熔炼。石灰石加入量一般为层焦量的30%~40%，当焦炭含硫量高时采用40%。

炉渣酸碱度为渣中含CaO和SiO₂之比，计算公式为

$$\text{酸碱度 pH} = \frac{\text{CaO}\%}{\text{SiO}_2\%} \text{ 或 pH} = \frac{\text{CaO}\% + \text{MgO}\%}{\text{SiO}_2\%}$$

当pH值在0.8以下时为酸性渣，pH值在0.8~1.0时为中性渣，pH值>1时为碱性渣。

四、风量和风压

风量和风压似乎与配料计算无关，但风量与风压是焦炭燃烧的动力源（燃烧氧的来源），供应最佳风量、风压促使冲天炉正常熔炼，是对铁液化学成分（元素烧损）及铁液温度至关重要的工艺参数，所以本文略加以计算。

1. 风量

风量计算有两种方法，一种是按最佳送风强度计算，另一种是按每小时焦炭消耗量计算。

(1) 按最佳送风强度计算风量 计算公式为

$$Q_{\text{风量}} = WF = \frac{\pi}{4} D^2 W$$

式中 $Q_{\text{风量}}$ —— 冲天炉送风量 (m^3/min)；

W —— 按主风口处炉膛截面面积计算的最佳送风强度 [$\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$]；

F —— 冲天炉主风口处炉膛横截面面积 (m^2)；

D —— 炉膛直径 (m)。

根据资料和生产经验最佳送风强度为 $100 \sim 160 \text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ ，与铁焦比的关系为

| 铁焦比 | 最佳送风强度 $\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ |
|-------------|---|
| (10~12) : 1 | 100~120 |
| (8~10) : 1 | 120~140 |
| (6~8) : 1 | 140~160 |

化简公式为 $Q_{\text{风量}} = (100 \sim 140) D^2$

(2) 按每小时焦炭消耗量计算风量 根据资料 1kg 焦炭完全燃烧时的理论空气量计算公式为

$$L_{\text{理}} = 0.089C + 0.033S$$

式中的 C、S 分别为 100kg 焦炭中固定碳和硫的绝对含量。

例 3-10 生产率为 5t/h 冲天炉，炉膛直径 D 为 900mm，总铁焦比为 8，焦炭含固定碳 80% (质量分数)，含硫 0.69% (质量分数)，计算 1kg 焦炭完全燃烧需要理论空气量和冲天炉实际鼓风量？

$$\text{解: } L_{\text{理}} = (0.089 \times 80 + 0.033 \times 0.69) \text{ m}^3/\text{kg} = 7.14 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$L_{\text{鼓风}} = 7.14 \text{ m}^3/\text{kg} \times \frac{5 \times 1000 \text{ kg}/\text{h}}{8} = 74.3 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$W = \frac{74.3}{\frac{1}{4}\pi \times 0.9^2} \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m}^2) = 117 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$$

2. 风压

风压是冲天炉鼓风和克服送风系统的各种阻力，如管道沿程阻力、局部阻力、料层阻力、炉胆及其他阻力损失，计算风压也可以说是送风系统阻力之和，计算公式：

$$H_{\text{风压}} = \sum h_1 + \sum h_2 + h_3 + h_4 + h_5$$

式中 $H_{\text{风压}}$ —— 送风系统总阻力 (Pa)；

$\sum h_1$ —— 送风系统沿程阻力 (Pa)，见表 3-4；

$\sum h_2$ —— 送风系统所有局部阻力 (Pa)，见表 3-4；

h_3 ——炉胆内阻力损失 (Pa), 见表 3-4;

h_4 ——料层阻力损失 (Pa), 见表 3-4;

h_5 ——送风管道消声器阻力 (Pa), 一般取 100 ~ 200Pa。

表 3-4 冲天炉各部分阻力损失 (单位: Pa)

| 生产率/(t/h) | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | 10 | 15 |
|-----------|----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 炉子内径/mm | 450 | 600 | 700 | 900 | 1100 | 1300 | 1550 |
| 沿程阻力损失 | ≈450 | ≈400 | ≈350 | ≈250 | ≈200 | ≈150 | ≈150 |
| 局部阻力损失 | 2500 ~ 3000 | 2500 ~ 3000 | 2500 ~ 3000 | 2500 ~ 3000 | 2500 ~ 3000 | 2500 ~ 3000 | 2500 ~ 3000 |
| 炉胆阻力损失 | ≈2000 | ≈2300 | ≈2400 | ≈2600 | ≈3000 | | |
| 料层阻力损失 | 3600 ~ 4400 | 4200 ~ 5000 | 5300 ~ 6300 | 6000 ~ 7200 | 6400 ~ 7700 | 6600 ~ 8000 | 8000 ~ 9600 |
| 消声器阻力损失 | 100 ~ 200 | 100 ~ 200 | 100 ~ 200 | 100 ~ 200 | 100 ~ 200 | 100 ~ 200 | 100 ~ 200 |
| 总阻力损失 | 860 ~ 10000 | 4600 ~ 11000 | 11000 ~ 13000 | 12000 ~ 14000 | 13000 ~ 14000 | 14000 ~ 15000 | 15000 ~ 16000 |

注: 1. 沿程阻力损失按 12m/s 速度, 20m 距离计算。

2. 局部阻力损失, 中央送风速度按 60m/s 及三个直角弯, 两个阀门, 两个突然扩张, 一个突然收缩计算, 其中以风口阻力损失为主。
3. 料层阻力损失只考虑与焦炭块度和堆密度有关, 按 $(100 \sim 120) (H + 0.25D)$ 式计算, 其中 H 为有效高度 (m), D 为炉胆直径 (m)。
4. 表 3-4 所列总阻力损失值包括 10% ~ 20% 的没有考虑到的阻力损失, 可参考此表数据选择风机风压。

第四节 石灰石需要量计算

石灰石加入量本应根据熔炼过程中金属与熔剂化学反应方程式进行理论计算, 数据精确但计算起来比较麻烦。为此本节采用生产经验计算石灰石需要量。

例 3-11 已知每批层焦量为 50kg, 焦炭含灰分为 10% (质量分数), 求需要加纯石灰石多少 kg?

根据生产经验每 kg 灰分需要加 2kg 石灰石。

先求出层焦中含灰量为

$$m_{\text{灰}} = 50 \text{kg} \times 10\% = 5 \text{kg}$$

再求出熔剂石灰石加入量为

$$m_{\text{石}} = 5 \text{kg} \times 2 = 10 \text{kg}$$

例 3-12 石灰石中主要含 CaCO_3 , 加热分解为石灰 CaO 和二氧化碳 CO_2 ,

即 $\text{CaCO}_3 \xrightarrow{\text{加热}} \text{CaO} + \text{CO}_2 \uparrow$ 。冲天炉熔化过程中 CaO 用来造渣净化铁液，而石灰石中还有其他杂质，如 SiO_2 、 MgO 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等，其中不溶解的杂质占 1.5% ~ 3.0%。为此石灰石中不溶解的部分不能用来造渣，为满足造渣需要量应多加一部分石灰石才行。

已知层焦质量为 50kg，焦炭含灰分为 10%（质量分数），不溶解杂质约占 2%，求应加多少石灰石量？

解：先求出焦炭中含灰量为

$$m_{\text{灰}} = 50\text{kg} \times 10\% = 5\text{kg 灰分}$$

再求出石灰石造渣有用部分百分比（%），经验公式为

$$Q_{\text{渣用}} = 100 - 2.8R$$

式中 $Q_{\text{渣用}}$ —— 造渣有用部分百分比（%）；

R —— 石灰石中不溶解物质（%），常取为 2%。

则 $Q_{\text{渣用}} = (100 - 2.8 \times 2)\% = 94.4\%$

求石灰石加入量为

$$m_{\text{石灰石}} = \frac{5 \times 2}{94.4\%} = 10.59\text{kg, 可取为 11kg 石灰石。}$$

如按生产经验石灰石加入量为层焦量的 20% ~ 40% 计算，取 25%，则 $m_{\text{石灰石}} = 50\text{kg} \times 25\% = 12.5\text{kg}$ 。

第四章 冲天炉熔炼铸铁的各种配料计算

第一节 配料计算步骤和配料计算方法

一、配料计算大致步骤

- 1) 前三章的理论和计算都是配料计算的基础知识，即为配料计算必备的技术数据。
- 2) 根据铸件用途及化学成分、力学性能要求，合理选择炉料。铸件化学成分由生产厂家根据铸件用途、力学性能要求，自行确定铸件化学成分。因此，生产的铸件必须合理地选择化学成分和金相组织，才能达到铸件力学性能要求。
- 3) 根据本厂冲天炉熔炼过程中的各种元素增减情况，按照确定的化学成分进行配料计算。
- 4) 根据使用炉料的碳、硅、锰含量情况，合理选择铸造生铁、废钢、回炉料等的大致配料比例。首先计算碳含量，再计算硅、锰含量。考虑增碳量和硅锰烧损量，计算出炉料中应含的碳、硅、锰含量后与确定的化学成分含量之差，再计算补加的硅、锰量。
- 5) 配料计算结果最后还要进行校验配料中硫、磷是否超过规定含量，再进行适当调整炉料。

二、配料计算方法

冲天炉熔炼配料计算方法从以出版的资料来看，主要有计（试）算法、表格法和图解法三种类型。编者认为计算法能牢固地掌握配料计算全部技术知识，而且真实明了。因此，下面着重介绍计算法配料计算。

第二节 配料计算用公式和配料计算例题

一、计算法采用公式

计算法是铸铁熔炼工作者应该掌握的一种常用的配料计算方法，具体计算过程如下。

1. 计算炉料中各元素的含量[⊕]公式

$$x_{\text{炉料}} = \frac{T_{\text{铁液}}}{1 \pm \eta\%} \quad \text{或} \quad x_{\text{炉料}} = \frac{T_{\text{铁液}}}{100 \pm \eta} \quad (4-1)$$

式中 $x_{\text{炉料}}$ —— 炉料中任一种元素含量 (%)；

$T_{\text{铁液}}$ —— 铁液 (铸件) 中元素含量 (%)；

$\eta\%$ —— 熔炼过程元素增减率。

式 (4-1) 中, “+”号用于元素增加, “-”号用于元素减少 (烧损)。

将式 (4-1) 变换为式 (4-2)

$$x_{\text{炉料}} = T_{\text{铁液}} \times \frac{100}{100 \pm \eta} \quad (4-2)$$

配料后铁液中碳含量估算公式为

$$C_{\text{铁液}} = (1.7 \sim 1.9) + (0.4 \sim 0.6) \times C_{\text{炉料}} \quad (4-3)$$

式中 $C_{\text{铁液}}$ —— 铁液碳含量 (%)；

$C_{\text{炉料}}$ —— 炉料碳含量 (%)。

因为铁液中碳的增减率因炉子和炉料不同而变化, 所以式中的常数为一波动值, 使用公式计算时应根据具体情况选择, 若取中间值, 公式变为

$$C_{\text{铁液}} = 1.8 + 0.5C_{\text{炉料}} \quad (4-4)$$

移项后得

$$C_{\text{炉料}} = \frac{C_{\text{铁液}} - 1.8}{0.5} \quad (4-5)$$

2. 确定废钢加入量

一般根据铁液牌号确定废钢加入量, 铁液牌号高、铁液碳含量低需要废钢加入量多。根据生产经验废钢加入量可参照表 4-1 选取。

表 4-1 废钢加入量参考

| 铸铁牌号 | HT150 | HT200 | HT250 | HT300 | HT350 |
|-----------------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 废钢加入量 (质量分数, %) | 0 ~ 10 | 10 ~ 15 | 15 ~ 25 | 25 ~ 30 | 30 ~ 35 |

废钢加入量计算公式为

$$m_{\text{废钢}} = \frac{m_{\text{批料}} (C_{\text{混料}} - C_{\text{炉料}})}{C_{\text{混料}} - C_{\text{废钢}}} \quad (4-6)$$

式中 $m_{\text{废钢}}$ —— 每批铁料中废钢加入量 (kg)；

⊕ 未加说明, 含量均指质量分数。

$C_{\text{混料}}$ ——每批铁料中混合碳含量 (%)；
 $C_{\text{炉料}}$ ——每批铁料控制 (或要求) 的碳含量 (%)；
 $C_{\text{废钢}}$ ——每批废钢中碳含量 (%)；
 $m_{\text{批料}}$ ——每批铁料总质量 (kg)。

3. 确定回炉料和生铁的加入量

确定回炉料的加入量可根据铸铁车间实际产生的回炉料量配入，如本车间产生的回炉料少时可购入废机铁加入，一般按回炉料加上废机铁之和为 30% ~ 50% 左右配入，其余铁料由生铁搭配。

几种铁料配合后碳含量的计算公式为

$$C_{\text{炉料}}^{\ominus} = \frac{m_1 C_1 + m_2 C_2 + m_3 C_3 \dots}{m_1 + m_2 + m_3 \dots} \quad (4-7)$$

式中 $C_{\text{炉料}}$ ——配合后炉料内的碳含量 (%)；

$m_1, m_2, m_3 \dots$ ——各种回炉料、废机铁、生铁的质量 (kg)；

$C_1, C_2, C_3 \dots$ ——各种回炉料、废机铁、生铁的碳含量 (%)。

一般情况是已确定了炉料的碳含量，并知道各种铁料 (铸造生铁、回炉料、废机铁) 的碳含量，求各种铁料 (铸造生铁、回炉料、废机铁) 的用量，此时要用联立方程式来求解，公式为

$$\begin{cases} m_1 C_1 + m_2 C_2 + m_3 C_3 \dots = C_{\text{炉料}} m \\ m_1 + m_2 + m_3 \dots = m \end{cases} \quad (4-8)$$

式中 m ——炉料总质量 (kg)；

其余符号与式 (4-7) 相同。

4. 硅铁、锰铁补加量计算公式

补加硅铁计算公式为

$$x_{\text{硅铁}} = \left(\frac{Si_{\text{铁液}}}{1 - \eta} - Si_{\text{炉料}} \right) \times \frac{100}{Si_{\text{铁合金}}} \quad (4-9)$$

式中 $x_{\text{硅铁}}$ ——硅铁补加量 (kg)；

$Si_{\text{铁液}}$ ——铁液中 Si 含量 (%)；

$Si_{\text{炉料}}$ ——炉料中 Si 含量 (%)；

$Si_{\text{铁合金}}$ ——硅铁合金中 Si 含量 (%)；

η ——硅 (Si) 烧损率 (%)。

补加锰铁计算公式为

$$x_{\text{锰铁}} = \left(\frac{Mn_{\text{铁液}}}{1 - \eta} - Mn_{\text{炉料}} \right) \times \frac{100}{Mn_{\text{铁合金}}} \quad (4-10)$$

⊕ 这里指 $w(C_{\text{炉料}})$ ，以便使式子简化，余同。

式中 $x_{\text{锰铁}}$ —— 锰铁补加量 (kg)；

$Mn_{\text{铁液}}$ —— 铁液中 Mn 含量 (%)；

$Mn_{\text{炉料}}$ —— 炉料中 Mn 含量 (%)；

$Mn_{\text{铁合金}}$ —— 锰铁合金中 Mn 含量 (%)；

η —— 锰 (Mn) 烧损率 (%)。

几种铁料混合后铁料中硅含量 (Si) 和锰含量 (Mn) 计算公式为

$$Mn_{\text{炉料}} = \frac{m_1 Mn_1 + m_2 Mn_2 + m_3 Mn_3 \dots}{m_1 + m_2 + m_3 \dots} \quad (4-11)$$

$$Si_{\text{炉料}} = \frac{m_1 Si_1 + m_2 Si_2 + m_3 Si_3 \dots}{m_1 + m_2 + m_3 \dots} \quad (4-12)$$

式中

$Mn_{\text{炉料}}$ —— 几种炉料混合后含 Mn 量 (%)；

$Si_{\text{炉料}}$ —— 几种炉料混合后含 Si 量 (%)；

$m_1, m_2, m_3 \dots$ —— 各种炉料加入量 (kg)；

$Mn_1, Mn_2, Mn_3 \dots$ —— 各种炉料中对应的 Mn 含量 (%)；

$Si_1, Si_2, Si_3 \dots$ —— 各种炉料中对应的 Si 含量 (%)。

炉料库或车间中现有三种或三种以上金属炉料需要搭配使用，同时要满足硅、锰两种以上主要元素含量的要求。求这三种金属炉料各要用多少重量配入时，要用三元或三元以上联立方程式求解。计算公式为

$$\begin{cases} a_1 m_1 + a_2 m_2 + a_3 m_3 = a_{\text{炉料}} (m_1 + m_2 + m_3) \\ b_1 m_1 + b_2 m_2 + b_3 m_3 = b_{\text{炉料}} (m_1 + m_2 + m_3) \\ m_1 + m_2 + m_3 = m \end{cases} \quad (4-13)$$

式中 a_1, a_2, a_3 —— 为三种金属炉料中含第一种 (同一种) 元素含量 (%)；

b_1, b_2, b_3 —— 为三种金属炉料中含第二种 (同一种) 元素含量 (%)；

$a_{\text{炉料}}$ —— 为三种金属炉料混合后第一种元素含量 (%)；

$b_{\text{炉料}}$ —— 为三种金属炉料混合后第二种元素含量 (%)；

m_1, m_2, m_3 —— 为三种金属炉料用量 (配入量) (kg)；

m —— 为每批金属炉料总用量 (kg)。

5. 硫、磷含量的计算

一般硫、磷含量不用进行计算，只在配料计算时加以注意，防止含硫、磷量超出。特殊铸件必须计算时可采用硅、锰计算公式进行配料计算。

二、配料计算例题

例 4-1 铸造厂要生产硅的质量分数为 2% 的铸铁件，已知冲天炉熔炼过程中硅烧损 (质量分数) 15%，求配金属炉料中硅含量应为多少？

解法 1 由式 (4-1), 并将已知数据代入公式, 有

$$Si_{\text{炉料}} = \frac{2\%}{1 - 15\%} = 2.35\%$$

验算: 金属炉料中硅的质量分数应为 2.35%, 硅在冲天炉熔炼过程中烧损 15% (质量分数), 在铸铁 (铁液) 中留下硅的质量分数为 2%, 为此求 15% (质量分数) 的烧损量为

$$Si_{\text{烧损}} = 2.35\% \times \frac{15}{100} = 0.35\%$$

则铸件中硅的质量分数 = 2.35% - 0.35% = 2%

解法 2 由式 (4-2)

$$Si_{\text{炉料}} = 2\% \times \frac{100}{100 - 15} = 2.35\%$$

例 4-2 制造锰的质量分数为 0.8% 的铸铁件, 冲天炉熔炼时锰烧损 20% (质量分数), 求配金属炉料中应锰含量多少?

解: 由式 (4-1) 得

$$Mn_{\text{炉料}} = \frac{0.8\%}{1 - 0.20\%} = 1\%$$

例 4-3 现生产碳的质量分数为 3.3% 的灰铸铁件, 求配金属料中应碳含量多少?

解: 由式 (4-5), 并代入数值得

$$C_{\text{炉料}} = \frac{C_{\text{铁液}} - 1.8\%}{0.5} = \frac{3.3\% - 1.8\%}{0.5} = 3.0\%$$

验算: 冲天炉熔炼过程中碳增加量为 10% (质量分数) 计算, 则

$$C_{\text{增碳量}} = 3.0\% \times 10\% = 0.3\%$$

则铸件 (铁液) 碳含量 = 3.0% + 0.3% = 3.3%, 符合生产的铸件中碳的质量分数为 3.3% 的要求。

例 4-4 制造碳的质量分数为 3.3% 灰铸铁件, 配铁料混合后的碳的质量分数为 3.6%, 要求配铁料碳的质量分数为 3.0%, 每批铁料为 100kg 求应加入多少废钢量才能调整到铁料中碳的质量分数为 3%?

解: 根据生产经验一般废钢碳的质量分数为 0.15% ~ 0.25%, 取 0.20% (质量分数) 计算, 由式 (4-6), 代入数值得

$$m_{\text{废钢}} = \frac{100\text{kg} (3.6 - 3.0)}{3.6 - 0.2} = 17\text{kg}$$

验算: 每批料 100kg 加入废钢 17kg, 则每批料中铁料质量 = 100kg - 17kg = 83kg

由铁料带入碳量 = $83\text{kg} \times 3.6\% = 2.988\text{kg}$

由废钢带入碳量 = $17\text{kg} \times 0.2\% = 0.034\text{kg}$

$$\text{则每批金属料碳含量} = \frac{2.988 + 0.034}{100} \times 100\% = 3.0\%$$

符合每批铁料中配碳量应为 3.0% (质量分数) 的要求。

金属料熔炼成铁液碳含量, 即

$$C_{\text{铁液}} = 3.0\% + 0.3\% \text{ (熔增碳量)} = 3.3\%$$

符合制造灰铁件的要求。

例 4-5 某铸造厂现有铸造生铁和土生铁 (当地由钢屑炼的生铁) 化学成分见表 4-2, 每批配铁料按 100kg 加入, 其中铸造生铁 60kg, 土生铁 40kg, 求铁料混合后含碳、硅、锰量各多少?

表 4-2 铸造生铁和土生铁的化学成分 (质量分数) (%)

| 生 铁 | C | Si | Mn |
|------|-----|-----|-----|
| 铸造生铁 | 3.6 | 2.0 | 0.6 |
| 土生铁 | 3.4 | 1.5 | 0.5 |

解: 由式 (4-7) 得

$$C_{\text{炉料}} = \frac{60\text{kg} \times 3.6\% + 40\text{kg} \times 3.4\%}{(60 + 40) \text{ kg}} = 3.52\%$$

$$Si_{\text{炉料}} = \frac{60\text{kg} \times 2.0\% + 40\text{kg} \times 1.5\%}{(60 + 40) \text{ kg}} = 1.8\%$$

$$Mn_{\text{炉料}} = \frac{60\text{kg} \times 0.6\% + 40\text{kg} \times 0.5\%}{(60 + 40) \text{ kg}} = 0.56\%$$

例 4-6 现生产灰铸铁 HT200 气缸件, 化学成分 (质量分数) 为: C3.4%, Si2.0%, Mn0.8%, S、P 不计算。已知配铁料中 (质量分数): Si1.8%, Mn0.56%, 求配铁料中应补加多少硅铁、锰铁?

硅铁含 Si75%, 锰铁含 Mn70%, 熔炼中 Si 烧 15% (质量分数), Mn 烧损 20% (质量分数)。

解: 由式 (4-9)、式 (4-10), 代入数值得

$$x_{\text{硅铁}} = \left(\frac{2.0\% - 1.8\%}{1 - 15\%} \right) \times \frac{100}{75} \text{kg} = 0.31\text{kg}$$

$$x_{\text{锰铁}} = \left(\frac{0.8\% - 0.56\%}{1 - 20\%} \right) \times \frac{100}{70} \text{kg} = 0.43\text{kg}$$

例 4-7 现有铸造生铁碳的质量分数为 3.8%, 回炉生铁碳的质量分数为 3.4%, 废机铁碳的质量分数为 3.6%。每批铁料按 100kg, 几种铁料混合配碳的

质量分数为 3.6%，为保证铸件质量，首先确定铸造生铁加入量 40kg，其余搭配回炉料及废机铁，求各应加入多少 kg？

解：由式（4-8），代入数值得

$$\begin{cases} 3.8\% \times 40\text{kg} + 3.4\% \times m_2 + 3.6\% \times m_3 = 3.6\% \times 100\text{kg} \\ 40\text{kg} + m_2 + m_3 = 100\text{kg} \end{cases}$$

整理数值， m_2 为回炉料， m_3 为废机铁。

$$\begin{cases} 3.4m_2 + 3.6m_3 = 208\text{kg} \\ m_2 + m_3 = 60\text{kg} \end{cases}$$

设 $m_2 = 60\text{kg} - m_3$ ，代入上式得

$$3.4(60\text{kg} - m_3) + 3.6m_3 = 208\text{kg}$$

$$0.2m_3 = 4\text{kg} \quad \text{即} \quad m_3 = \frac{4}{0.2} = 20\text{kg}$$

则

$$m_2 = 60\text{kg} - 20\text{kg} = 40\text{kg}$$

经计算，回炉料为 40kg，废机铁为 20kg。

验算：

$$C_{\text{铸造生铁}} = 3.8\% \times 40\% = 1.52\%$$

$$C_{\text{回炉料}} = 3.4\% \times 40\% = 1.36\%$$

$$C_{\text{废机铁}} = 3.6\% \times 20\% = 0.72\%$$

$$C_{\text{铁料}} = C_{\text{铸造生铁}} + C_{\text{回炉料}} + C_{\text{废机铁}} = 1.52\% + 1.36\% + 0.72\% = 3.60\%$$

符合几种铁料混合后配碳的质量分数为 3.6% 的要求。

例 4-8 生产硫的质量分数不超过 0.1% 的铸铁件，冲天炉熔炼过程中硫增加 40%（质量分数），求配铁料中最多硫含量控制是多少？

解：由式（4-1），代入数值得

$$S_{\text{炉料}} = \frac{S_{\text{铁液}}}{1 + \eta} = \frac{0.1\%}{1 + 40\%} = 0.07\%$$

例 4-9 生产磷的质量分数不超过 0.12% 的铸铁件，冲天炉熔炼过程中增磷量为 4.0%（质量分数）（一般冲天炉磷无增减量所以可不计算），求铁料中最多磷含量控制为多少？

解：由式（4-1），代入数值得

$$P_{\text{炉料}} = \frac{0.12\%}{1 + 4\%} = 0.11\%$$

例 4-10 制造汽车齿轮铸铁件，要求硅的质量分数为 2%，采用的金属炉料由硅的质量分数为 1.92% 的废铁占 37% 和生铁锭占 63% 所组成，求生铁锭应含 Si 量？已知冲天炉熔炼硅烧损 20%（质量分数），每批铁料为 100kg。

解：1) 求出铁料中应含硅总量：

$$Si_{\text{炉料}} = \frac{2\%}{1 - 0.2} = 2.5\%$$

每批炉料 100kg，即含硅总量 = $2.5\% \times 100\text{kg} = 2.5\text{kg}$

2) 求废铁中硅含量：

废铁量 = $100\text{kg} \times 37\% = 37\text{kg}$

废铁中含 Si 量 = $1.92\% \times 37\text{kg} = 0.71\text{kg}$

3) 求出生铁锭中硅含量：

生铁锭量 = $100\text{kg} \times 63\% = 63\text{kg}$

$$Si_{\text{铁锭}} = \frac{2.5 - 0.71}{63} = 2.84\%$$

则采用的生铁锭必须是硅的质量分数为 2.84%，如果硅的质量分数低于 2.84% 之差再计算硅补加量。

例 4-11 制造硅的质量分数为 1.6% 铸铁件，冲天炉熔炼硅烧损 15%（质量分数），炉料由硅的质量分数为 1.5% 的废机铁和硅的质量分数为 2% 的铸造生铁所组成，求废机铁和铸造生铁需要量？设每批炉料为 100kg。

解：1) 先求出铁料中应硅含量：

$$Si_{\text{铁料}} = \frac{1.6\%}{1 - 15\%} = 1.88\%$$

2) 设废机铁量为 $x\text{kg}$ ，则铸造生铁量 = $100 - x$

3) 求废机铁中硅含量：

废机铁中含 Si 量 = $1.5\% \times x$

4) 求铸造生铁中硅含量：

铸生铁中含 Si 量 = $2.0\% \times (100 - x)$

5) 铁料中硅的质量分数为 1.88%，则 100kg 铁料含 Si 量 = $100\text{kg} \times 1.88\% = 1.88\text{kg}$ 。

建立方程式： $1.5\% x + 2.0\% (100 - x) = 1.88\text{kg}$

解出 $x = 24\text{kg}$ ，为废机铁量。

则需加入铸造生铁量 = $100\text{kg} - 24\text{kg} = 76\text{kg}$ 。

例 4-12 制造 Si 的质量分数为 2.3%，Mn 的质量分数为 0.6% 的铸铁件。冲天炉熔炼时硅烧损 15%（质量分数），锰烧损 25%（质量分数）。现用 Si 的质量分数为 3.1% 及 Mn 的质量分数为 0.88% 的铸造生铁和 Si 的质量分数为 2.2% 及 Mn 的质量分数为 0.7% 的废机铁配料，求铸造生铁和废机铁应各加多少？每批铁料为 100kg。

解：1) 先求出 100kg 铁料（炉料）中应含 Si、Mn 量：

$$Si_{铁料} = \frac{2.3\%}{1 - 15\%} = 2.7\%$$

即铁料中含 Si 量 = $100\text{kg} \times 2.7\% = 2.7\text{kg}$

$$Mn_{铁料} = \frac{0.6\%}{1 - 25\%} = 0.8\%$$

即铁料中含 Mn 量 = $100\text{kg} \times 0.8\% = 0.8\text{kg}$

2) 求铸造生铁和废机铁中硅含量:

设 x 为铸造生铁量, y 为废机铁量, 则

$$\text{生铁中含 Si 量} = 3.1\% \times x = 0.031x$$

$$\text{废铁中含 Si 量} = 2.2\% \times y = 0.022y$$

由铁料中应 Si 含量得出

$$0.031x + 0.022y = 2.7$$

整理后得

$$31x + 22y = 2700 \quad (4-14)$$

3) 求铸造生铁和废机铁中锰含量:

$$\text{生铁中含 Mn 量} = 0.88\% \times x = 0.0088x$$

$$\text{废铁中含 Mn 量} = 0.7\% y = 0.007y$$

由铁料中 Mn 含量得出

$$0.0088x + 0.007y = 0.8$$

整理后得

$$8.8x + 7y = 800 \quad (4-15)$$

4) 求铸造生铁和废机铁数量:

式 (4-14) 与式 (4-15) 的联立方程式:

$$\begin{cases} 31x + 22y = 2700 \\ 8.8x + 7y = 800 \end{cases}$$

以 $x = \frac{800 - 7y}{8.8}$ 代入消去 x

$$2818 - 24.6y + 7y = 2700$$

$$2.6y = 118$$

$$y = 45.3$$

或以 $y = \frac{800 - 8.8x}{7}$ 代入消去 y

$$31x + 22 \times \frac{800 - 8.8x}{7} = 2700$$

$$3.4x = 186$$

$$x = 54.7$$

则 100kg 铁料中, 铸造生铁为 54.7kg, 废机铁为 45.3kg。

5) 验算铁料中含硅、锰量:

$$\text{生铁中含 Si 量} = 0.031 \times 54.7 \text{kg} = 1.696 \text{kg} \approx 1.7 \text{kg}$$

$$\text{废铁中含 Si 量} = 0.022 \times 45.3 \text{kg} = 0.997 \text{kg} \approx 1.0 \text{kg}$$

$$\text{则 } \text{Si}_{\text{铁料}} = \frac{1.7 + 1}{100} \times 100\% = 2.7\%$$

$$\text{生铁中含 Mn 量} = 0.0088 \times 54.7 \text{kg} = 0.48 \text{kg}$$

$$\text{废铁中含 Mn 量} = 0.007 \times 45.3 \text{kg} = 0.32 \text{kg}$$

$$\text{则 } \text{Mn}_{\text{铁料}} = \frac{0.48 + 0.32}{100} \times 100\% = 0.8\%$$

符合配铁料中硅、锰含量要求。

6) 验算制造的铸件中含硅、锰量:

$$\text{Si}_{\text{铁液}} = 2.7\% - 2.7\% \times 0.15 = 2.7\% - 0.4\% = 2.3\%$$

$$\text{Mn}_{\text{铁液}} = 0.8\% - 0.8\% \times 0.25 = 0.8\% - 0.2\% = 0.6\%$$

符合制造的铸件中 Si 的质量分数为 2.3% , Mn 的质量分数为 0.6% 的要求。

例 4-13 生产散热器片铸件 Si 的质量分数为 2.1% , Mn 的质量分数为 0.6% , P 的质量分数为 1.04% , 冲天炉熔炼 Si 烧损 15% (质量分数) , Mn 烧损 20% (质量分数) , P 增加 4% (质量分数) , 现有高磷生铁 (质量分数): Si3.2% , Mn0.68% , P1.75% ; 废机铁 (质量分数): Si2% , Mn0.8% , P0.5% , 求炉料中加高磷生铁和废机铁量?

解: 每批铁料按 100kg 计算。

1) 先求出配铁料中应配入的 Si、Mn、P 含量:

$$\text{Si}_{\text{铁料}} = \frac{2.1\%}{1 - 15\%} = 2.47\%$$

$$\text{配入的 Si 量} = 2.47\% \times 100 \text{kg} = 2.47 \text{kg}$$

$$\text{Mn}_{\text{铁料}} = \frac{0.6\%}{1 - 20\%} = 0.75\%$$

$$\text{配入的 Mn 量} = 0.75 \text{kg}$$

$$\text{P}_{\text{铁料}} = \frac{1.04\%}{1 + 4\%} = 1.0\%$$

$$\text{配入的 P 量} = 1 \text{kg}$$

2) 求高磷生铁和废机铁含 Si、Mn 量:

设配高磷生铁为 x , 废机铁为 y

$$\text{则 } \text{磷生铁中含 Si 量} = 3.2\% x = 0.032x$$

$$\text{废铁中含 Si 量} = 2.0\% y = 0.02y$$

$$\text{则配铁料中硅含量总和} = 0.032x + 0.02y = 2.47 \text{kg} \quad (4-16)$$

铁料中 Mn 含量可暂时不计算。

3) 求配铁料中磷含量:

$$\text{磷生铁中含 P 量} = 1.75\% x = 0.0175x$$

$$\text{废机铁中含 P 量} = 0.5\% y = 0.005y$$

$$\text{则铁料中含磷总和} = 0.0175x + 0.005y = 1.04 \text{ kg} \quad (4-17)$$

4) 求高磷生铁和废机铁配入量:

将式 (4-16) 与式 (4-17) 建立联立方程式

$$\begin{cases} 0.032x + 0.02y = 2.47 \text{ kg} \\ 0.0175x + 0.005y = 1.04 \text{ kg} \end{cases}$$

解得

$$x = 40 \text{ kg}, y = 60 \text{ kg}$$

即铁料中配入高磷生铁 40kg 占 40%，废机铁 60kg 占 60%。

5) 验算配铁料中锰含量和铸件锰含量:

$$Mn_{\text{高磷铁}} = 0.68\% \times 40\% = 0.272\%$$

$$Mn_{\text{废机铁}} = 0.8\% \times 60\% = 0.48\%$$

$$\text{则} \quad \text{配铁料中总 Mn 含量} = 0.272\% + 0.48\% = 0.752\%$$

即

$$Mn_{\text{铁料}} = 0.752\%$$

$$Mn_{\text{铸件}} = 0.752\% - 0.752\% \times 20\% = 0.602\%$$

符合散热器片铸件 Mn 的质量分数为 0.6% 的要求，含 Si 量验算用同样方法可计算，此处省略。

6) 验算铸件磷含量:

$$\text{高磷生铁带入 P 量} = 0.0175 \times 40 \text{ kg} = 0.7 \text{ kg}$$

$$\text{废机铁带入 P 量} = 0.005 \times 60 \text{ kg} = 0.3 \text{ kg}$$

$$\text{则} \quad \text{铁料带入 P 总量} = (0.7 + 0.3) \text{ kg} = 1.0 \text{ kg}, P_{\text{铁料}} = \frac{1.0}{100} = 1.0\%$$

$$P_{\text{铸件}} = 1.0\% + (1.0\% \times 4\%) = 1.04\%$$

符合散热器片铸件 P 的质量分数为 1.04% 的化学成分要求。

例 4-14 现有甲、乙、丙三种金属炉料其含 C、Si 和混合配料后的含 C、Si 量见表 4-3。

表 4-3 甲、乙、丙三种金属炉料的碳、硅量和混合配料后的碳、硅量

| 元素(质量分数, %) | 炉料种类 | | | 配料后 |
|-------------|------|-----|-----|-----|
| | 甲 | 乙 | 丙 | |
| C | 4.0 | 3.3 | 0.3 | 3.0 |
| Si | 2.9 | 1.6 | 0.4 | 1.8 |

求甲、乙、丙三种金属料各需配入多少? 每批铁料为 100kg。

解: 由式 (4-13) 并代入数值解联立方程式:

$$\begin{cases} 4\% m_{\text{甲}} + 3.3\% m_{\text{乙}} + 0.3\% m_{\text{丙}} = 3 \times 100 = 300 \\ 2.9\% m_{\text{甲}} + 1.6\% m_{\text{乙}} + 0.4\% m_{\text{丙}} = 1.8 \times 100 = 180 \\ m_{\text{甲}} + m_{\text{乙}} + m_{\text{丙}} = 100 \end{cases}$$

用行列式解联立方程式:

$$\text{其中 } A = \begin{pmatrix} 4 & 3.3 & 0.3 \\ 2.9 & 1.6 & 0.4 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= 4 \times 1.6 \times 1 + 2.9 \times 1 \times 0.3 + 3.3 \times 0.4 \times 1 - 4 \times 1 \times 0.4 - 3.3 \times 2.9 \times 1 - 1 \times 1.6 \times 0.3$$

$$= 6.4 + 0.87 + 1.32 - 1.6 - 9.57 - 0.48$$

$$= -3.06$$

$$A_{\text{甲}} = \begin{pmatrix} 300 & 3.3 & 0.3 \\ 180 & 1.6 & 0.4 \\ 100 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= 300 \times 1.6 \times 1 + 180 \times 1 \times 0.3 + 3.3 \times 0.4 \times 100 - 300 \times 1 \times 0.4 - 3.3 \times 180 \times 1 - 100 \times 1.6 \times 0.3$$

$$= 480 + 540 + 132 - 120 - 594 - 48$$

$$= -96$$

$$A_{\text{乙}} = \begin{pmatrix} 4 & 300 & 0.3 \\ 2.9 & 180 & 0.4 \\ 1 & 100 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= 4 \times 180 \times 1 + 2.9 \times 100 \times 0.3 + 300 \times 0.4 \times 1 - 4 \times 100 \times 0.4 - 300 \times 2.9 \times 0.4 - 1 \times 180 \times 0.3$$

$$= 702 + 87 + 120 - 160 - 870 - 54$$

$$= -157$$

$$A_{\text{丙}} = \begin{pmatrix} 4 & 3.3 & 300 \\ 2.9 & 1.6 & 180 \\ 1 & 1 & 100 \end{pmatrix}$$

$$= 4 \times 1.6 \times 100 + 2.9 \times 1 \times 300 + 3.3 \times 180 \times 1 - 4 \times 1 \times 180 - 3.3 \times 2.9 \times 100 - 1 \times 1.6 \times 300$$

$$= 640 + 870 + 594 - 720 \times 957 - 480$$

$$= -53$$

$$\text{则 } m_{\text{甲}} = \frac{A_{\text{甲}}}{A} = \frac{-96}{-3.06} = 31.37 \approx 31.4$$

$$m_{\text{乙}} = \frac{A_{\text{乙}}}{A} = \frac{-157}{-3.06} = 51.3$$

$$m_{\text{丙}} = \frac{A_{\text{丙}}}{A} = \frac{-53}{-3.06} = 17.3$$

$$m_{\text{甲}} + m_{\text{乙}} + m_{\text{丙}} = (31.4 + 51.3 + 17.3) = 100$$

验算 C、Si 含量

$$\begin{aligned} C_{\text{铁料}} &= 4.0\% \times 31.4 + 3.3\% \times 51.3 + 0.3\% \times 17.3 \\ &= 1.256\% + 1.693\% + 0.052\% \\ &= 3.0\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Si_{\text{铁料}} &= 2.9\% \times 31.4 + 1.6\% \times 51.3 + 0.4\% \times 17.3 \\ &= 0.91\% + 0.82\% + 0.069\% \\ &= 1.79\% \approx 1.8\% \end{aligned}$$

符合配料 C 的质量分数为 3.0% 和 Si 的质量分数为 1.8% 的要求。

例 4-15 生产铸件化学成分和采用炉料化学成分见表 4-4，冲天炉熔炼硅烧损 15%（质量分数），锰烧损 20%（质量分数），硫增加 25%（质量分数），磷不变，每批料为 100kg，进行配料计算。

表 4-4 铸件和炉料化学成分（质量分数） (%)

| 炉料及铸件 | Si | Mn | S | P | 备注 |
|-------|-----|-----|------|------|-------|
| 铸件 | 1.7 | 0.8 | 0.1 | 0.6 | 冲天炉熔化 |
| 铸造生铁 | 2.1 | 0.6 | 0.04 | 0.65 | — |
| 碱性生铁 | 1.2 | 1.8 | 0.07 | 0.2 | — |
| 土生铁 | 2.4 | 0.8 | 0.06 | 0.8 | — |
| 废机铁 | 2.1 | 0.9 | 0.1 | 0.65 | — |
| 回炉料 | 2.2 | 0.8 | 0.08 | 0.7 | — |

解：炉料组成（质量分数）必须有 45% 生铁（包括铸造生铁、碱性生铁、土生铁），其余 55% 中废机铁为 20%，回炉料为 35% 组成。

1) 配料中应含的化学成分：

$$Si_{\text{炉料}} = \frac{1.7\%}{1 - 15\%} = 2.0\%$$

$$Mn_{\text{炉料}} = \frac{0.8\%}{1 - 20\%} = 1.0\%$$

$$S_{\text{炉料}} = 0.1\% - 0.1\% \times 25\% = 0.075\%$$

$$P_{\text{炉料}} = 0.6\%$$

2) 求混合生铁硅含量:

设混合生铁含硅为 $Si_{\text{混合生铁}}$, 金属炉料总硅含量为

$$Si_{\text{混合生铁}} \times 45 + 2.1\% \times 20 + 2.2\% \times 35 = 2.0\% \times 100 = 2$$

$$\text{解: } Si_{\text{混合生铁}} = \frac{0.79}{45} \times 100\% = 1.75\% \approx 1.8\%$$

3) 求混合生铁锰含量:

设混合生铁含锰为 $Mn_{\text{混合生铁}}$, 金属炉料总锰含量为

$$Mn_{\text{混合生铁}} \times 45 + 0.9\% \times 20 + 0.8\% \times 35 = 1\% \times 100 = 1$$

$$\text{解: } Mn_{\text{混合生铁}} = \frac{0.54}{45} \times 100\% = 1.2\%$$

4) 求混合生铁硫含量:

设混合生铁含硫为 $S_{\text{混合生铁}}$, 金属炉料总硫含量为

$$S_{\text{混合生铁}} \times 45 + 0.1\% \times 20 + 0.08\% \times 35 = 0.075\% \times 100 = 0.075$$

$$\text{解: } S_{\text{混合生铁}} = \frac{0.027}{45} \times 100\% = 0.06\%$$

5) 求混合生铁磷含量:

设混合生铁含磷为 $P_{\text{混合生铁}}$, 金属炉料总磷含量为

$$P_{\text{混合生铁}} \times 45 + 0.65\% \times 20 + 0.7\% \times 35 = 0.6\% \times 100 = 0.6$$

$$\text{解: } P_{\text{混合生铁}} = \frac{0.225}{45} \times 100\% = 0.5\%$$

由此求得混合生铁各平均成分见表 4-5。

表 4-5 混合生铁各平均成分

| 元素 | Si | Mn | S | P |
|------------|-----|-----|------|-----|
| 平均质量分数 (%) | 1.8 | 1.2 | 0.06 | 0.5 |

6) 求混合生铁中铸造生铁、碱性生铁、土生铁数量:

设 x 为铸造生铁量, y 为碱性生铁量, z 为土生铁量

$$\text{则 } x + y + z = 45 \text{ kg} \quad (4-18)$$

这一个三元一次方程式是无法解的, 但可由上述计算混合生铁成分 Si、Mn、S、P 总含量已算出, 则可再列两个方程式与 (4-18) 联立, 即可由三元一次联立方程式解 x 、 y 、 z 。即可列出混合生铁含 Si、Mn 的方程式:

$$2.1\% \times x + 1.2\% \times y + 2.4\% \times z = 1.8\% \times 45 \quad (4-19)$$

$$0.6\% \times x + 1.8\% \times y + 0.8\% \times z = 1.2\% \times 45 \quad (4-20)$$

则可由式 (4-18)、式 (4-19)、式 (4-20) 建立联立方程式：

$$\begin{cases} x + y + z = 45 \\ 2.1\% \times x + 1.2\% \times y + 2.4\% \times z = 1.8\% \times 45 \\ 0.6\% \times x + 1.8\% \times y + 0.8\% \times z = 1.2\% \times 45 \end{cases}$$

即

$$\begin{cases} x + y + z = 45 \\ 2.1x + 1.2y + 2.4z = 81 \\ 0.6x + 1.8y + 0.8z = 54 \end{cases}$$

解联立方程得 $x = 10, y = 20, z = 15$

即铸造生铁为 10kg, 碱性生铁为 20kg, 土生铁为 15kg。三种生铁之和 = (10 + 20 + 15) kg = 45kg。

验算：

1) 计算混合炉料硅含量：

铸造生铁含 Si 量 = $2.1\% \times 10\text{kg} = 0.21\text{kg}$

碱性生铁含 Si 量 = $1.2\% \times 20\text{kg} = 0.24\text{kg}$

土生铁含 Si 量 = $2.4\% \times 15\text{kg} = 0.36\text{kg}$

废机铁含 Si 量 = $2.1\% \times 20\text{kg} = 0.42\text{kg}$

回炉料含 Si 量 = $2.2\% \times 35\text{kg} = 0.77\text{kg}$

则 炉料总含 Si 量 = $(0.21 + 0.24 + 0.36 + 0.42 + 0.77)\text{kg}$

$$= 2\text{kg}$$

$$\text{即 } \text{Si}_{\text{炉料}} = \frac{2}{100} \times 100\% = 2\%$$

2) 计算混合炉料锰含量：

铸造生铁含 Mn 量 = $0.6\% \times 10\text{kg} = 0.06\text{kg}$

碱性生铁含 Mn 量 = $1.8\% \times 20\text{kg} = 0.36\text{kg}$

土生铁含 Mn 量 = $0.8\% \times 15\text{kg} = 0.12\text{kg}$

废机铁含 Mn 量 = $0.9\% \times 20\text{kg} = 0.18\text{kg}$

回炉料含 Mn 量 = $0.8\% \times 35\text{kg} = 0.28\text{kg}$

则 炉料中总含 Mn 量 = $(0.06 + 0.36 + 0.12 + 0.18 + 0.28)\text{kg}$

$$= 1\text{kg}$$

$$\text{即 } \text{Mn}_{\text{炉料}} = \frac{1}{100} \times 100\% = 1\%$$

3) 计算混合炉料硫含量：

铸造生铁含 S 量 = $0.04\% \times 10\text{kg} = 0.004\text{kg}$

碱性生铁含 S 量 = 0.07% × 20kg = 0.014kg

土生铁含 S 量 = 0.06% × 15kg = 0.009kg

废机铁含 S 量 = 0.1% × 20kg = 0.02kg

回炉料含 S 量 = 0.08% × 35kg = 0.028kg

则 炉料总含 S 量 = (0.004 + 0.014 + 0.009 + 0.02 + 0.028)kg
= 0.075kg

即 $S_{\text{炉料}} = \frac{0.075}{100} \times 100\% = 0.075\%$

4) 计算混合炉料磷含量:

铸造生铁含 P 量 = 0.65% × 10kg = 0.065kg

碱性生铁含 P 量 = 0.2% × 20kg = 0.04kg

土生铁含 P 量 = 0.8% × 15kg = 0.12kg

废机铁含 P 量 = 0.65% × 20kg = 0.13kg

回炉料含 P 量 = 0.7% × 35kg = 0.245kg

则 炉料总含 P 量 = (0.065 + 0.04 + 0.12 + 0.13 + 0.245)kg
= 0.6kg

即 $P_{\text{炉料}} = \frac{0.6}{100} \times 100\% = 0.6\%$

例 4-16 现有碳的质量分数为 3.5% 的铸造生铁占 60% 和碳的质量分数为 0.5% 的废钢切头占 40% 所组成的炉料, 求炉料碳含量, 每批料为 100kg。

解: 每批料 100kg, 则铸造生铁占 60% (60kg), 废钢占 40% (40kg)。

生铁中含 C 量 = 3.5% × 60kg = 2.1kg

废钢中含 C 量 = 0.5% × 40kg = 0.2kg

则 $C_{\text{炉料}} = \frac{2.1 + 0.2}{100} \times 100\% = 2.3\%$

例 4-17 现有碳的质量分数为 3.5% 的铸造生铁, 碳的质量分数为 0.5% 的废钢, 炉料配合后碳的质量分数应为 2.3%, 求炉料组成配比? 每批料为 100kg。

解: 设铸造生铁加入量为 x kg, 废钢加入量为 y kg。

则 $\begin{cases} 3.5\%x + 0.5\%y = 2.3 \\ x + y = 100 \end{cases}$

等号两边同乘 100

即 $\begin{cases} 3.5x + 0.5y = 230 \\ x + y = 100 \end{cases}$

以 $x = 100 - y$ 代入, 解得 $y = 40$, $x = 100 - 40 = 60$

即铸造生铁 60kg 占 60%, 废钢 40kg 占 40%。

验算：

$$\text{生铁中含 C 量} = 60\text{kg} \times 2.5\% = 2.1\text{kg}$$

$$\text{废钢中含 C 量} = 40\text{kg} \times 0.5\% = 0.2\text{kg}$$

$$C_{\text{炉料}} = \frac{2.1 + 0.2}{60 + 40} = \frac{2.3}{100} \times 100\% = 2.3\%$$

例 4-18 炉料库中由碳的质量分数为 3.6% 的铸造生铁、碳的质量分数为 2.4% 的废铁及碳的质量分数为 0.35% 的废钢组成炉料，现决定配入废铁料占 25%，配料的碳的质量分数应为 2.0%，求配入的铸造生铁和废钢的百分比？每批铁料按 100kg 计算。

解：设铸造生铁为 $x\text{kg}$ ，废钢为 $y\text{kg}$ 。废铁量 $= 25\% \times 100\text{kg} = 25\text{kg}$ 。

则
$$\begin{cases} x + 25 + y = 100 \\ 3.6\% \times x + 2.4\% \times 25 + 0.35\% \times y = 2.0\% \times 100 \end{cases}$$

整理得

$$\begin{cases} x + y = 75 \\ 3.6x + 0.35y = 140 \end{cases}$$

以 $x = 75 - y$ 代入，解得： $y = 40$ ， $x = 75 - 40 = 35$

即配入铸造生铁 35kg，占 35%，废钢 40kg，占 40%。

验算：

$$\text{生铁中含 C 量} = 3.6\% \times 35\text{kg} = 1.26\text{kg}$$

$$\text{废铁中含 C 量} = 2.4\% \times 25\text{kg} = 0.6\text{kg}$$

$$\text{废钢中含 C 量} = 0.35\% \times 40\text{kg} = 0.14\text{kg}$$

$$\text{配料总含 C 量} = (1.26 + 0.6 + 0.14) \text{ kg} = 2\text{kg}$$

即 $C_{\text{配料}} = \frac{2}{100} \times 100\% = 2.0\%$ 符合配料要求。

例 4-19 制造灰铁件铁液化学成分（质量分数）要求：C3.0%，Si1.5%，Mn0.6%。已知冲天炉熔炼增碳 5%，硅烧损 15%，锰烧损 20%，现用炉料化学成分见表 4-6。

每批铁料为 100kg，求炉料组成配比。

解：(1) 计算炉料中 C、Si、Mn 应有含量

$$C_{\text{炉料}} = \frac{3\%}{1 + 5\%} = 2.86\% ; \text{ 炉料中含 C 量} = 2.86\text{kg}$$

$$Si_{\text{炉料}} = \frac{1.5\%}{1 - 15\%} = 1.76\% ; \text{ 炉料中含 Si 量} = 1.76\text{kg}$$

$$Mn_{\text{炉料}} = \frac{0.6\%}{1 - 20\%} = 0.75\% ; \text{ 炉料中含 Mn 量} = 0.75\text{kg}$$

表 4-6 现有炉料化学成分 (质量分数) (%)

| 炉 料 | C | Si | Mn | 备 注 |
|-----|------|------|-------|---------|
| 生 铁 | 4. 1 | 1. 7 | 0. 8 | S、P 不计算 |
| 废 钢 | 0. 4 | 0. 3 | 0. 05 | — |
| 回炉料 | 3. 2 | 2. 0 | 0. 7 | — |
| 硅 铁 | — | 45 | — | — |
| 锰 铁 | — | — | 75 | — |

(2) 初步确定炉料配比并试算 根据生产经验, 每天出来的回炉料多少, 可初步确定废钢占 25%, 回炉料占 35%, 其余 40% 为生铁。试算炉料中含 C、Si、Mn 数量。

$$\text{炉料中含 C 量} = (0.4\% \times 25 + 4.1\% \times 40 + 3.2\% \times 35) \text{kg} = 2.86 \text{kg}$$

$$\text{炉料中含 Si 量} = (0.3\% \times 25 + 1.7\% \times 40 + 2\% \times 35) \text{kg} = 1.455 \text{kg}$$

$$\text{炉料中含 Mn 量} = (0.05\% \times 25 + 0.8\% \times 40 + 0.7\% \times 35) \text{kg} = 0.577 \text{kg}$$

试算结果初定炉料中碳含量符合配料要求。

$$\text{含 Si 量缺} = (1.76 - 1.455) \text{kg} = 0.305 \text{kg}$$

$$\text{含 Mn 量缺} = (0.75 - 0.577) \text{kg} = 0.173 \text{kg}$$

(3) 计算补加硅铁和锰铁量

$$\text{硅铁 (SiFe) 量} = \frac{0.305 \text{kg}}{45\%} \approx 0.68 \text{kg}$$

$$\text{锰铁 (MnFe) 量} = \frac{0.173 \text{kg}}{75\%} = 0.23 \text{kg}$$

注意, 采用冲天炉熔炼补加硅铁和锰铁带入的碳和铁忽略不计。

(4) 炉料组成配比 废钢 25kg 占 25%, 生铁 40kg 占 40%, 回炉料 35kg 占 35%。

如果每批铁料为 200kg、300kg、400kg、500kg 等可相应乘以倍数即可得出结果, 见表 4-7。

表 4-7 铁料为 200 ~ 500kg 的炉料配入量 (单位: kg)

| 炉料及配入量 | 生铁 | 废机铁 | 回炉料 | 废钢 | 土生铁 | 硅铁 | 锰铁 |
|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| 每批 100kg 配入量 | 40 | — | 35 | 25 | — | 0.68 | 0.23 |
| 每批 200kg 配入量 | 80 | — | 70 | 50 | — | 1.36 | 0.46 |
| 每批 300kg 配入量 | 120 | — | 105 | 75 | — | 2.04 | 0.69 |
| 每批 400kg 配入量 | 160 | — | 140 | 100 | — | 2.72 | 0.92 |
| 每批 500kg 配入量 | 200 | — | 175 | 125 | — | 3.40 | 1.15 |

例 4-20 某厂生产铸铁牌号 HT200, 铸件厚度为 20mm, 黏土砂造型, 铁液化学成分 (质量分数): C3.3%、Si2.0%、Mn0.7%、S < 0.12%、P < 0.3%。冲天炉熔炼元素增减情况: C + 10%、S + 50%、Si - 15%、P 不变、Mn - 20%。

配料用原材料的化学成分见表 4-8。

表 4-8 配料用原材料的化学成分 (质量分数) (%)

| 原材料 | C | Si | Mn | S | P |
|------------|-----|-----|------|------|------|
| 铸造生铁 (Z20) | 4.2 | 2.0 | 0.10 | 0.04 | 0.06 |
| 本厂回炉料 | 3.4 | 2.0 | 0.8 | 0.10 | 0.12 |
| 废 钢 | 0.5 | 0.3 | 0.3 | 0.05 | 0.05 |
| 硅铁 Si45 | — | 45 | 0.7 | 0.02 | 0.04 |
| 锰铁 Mn65 | — | 2 | 65 | 0.03 | 0.4 |
| 焦炭 | — | — | — | 0.8 | — |

解: 1) 每批铁料按 100kg 计算, 炉料中各元素的平均含量:

$$C_{\text{炉料}} = \frac{C_{\text{铁液}}}{1 + \eta} = \frac{3.3\%}{1 + 0.1} = 3.0\%$$

$$Si_{\text{炉料}} = \frac{Si_{\text{铁液}}}{1 - \eta} = \frac{2.0\%}{1 - 0.15} = 2.35\%$$

$$Mn_{\text{炉料}} = \frac{Mn_{\text{铁液}}}{1 - \eta} = \frac{0.7\%}{1 - 0.2} = 0.875\%$$

$$S_{\text{炉料}} = \frac{S_{\text{铁液}}}{1 + \eta} = \frac{0.12\%}{1 + 0.5} = 0.08\%$$

2) 求炉料配比。根据本厂回炉料情况, 并为简化计算方便先确定回炉料加入配比为 40%, 即 40kg, 其余用铸造生铁 xkg, 废钢 ykg, 以炉料碳含量可列出方程式:

$$\begin{cases} 4.2\% \times x + 3.4\% \times 40 + 0.5\% \times y = 3 \\ x + 40 + y = 100 \end{cases}$$

化简并整理方程:

$$\begin{cases} 4.2x + 136 + 0.5y = 300 \\ x + y = 60 \end{cases}$$

解方程得: $x = 36$, $y = 24$, 取 $x = 35$, $y = 25$ 。

则炉料配比, 铸造生铁 35kg, 占 35%; 回炉料 40kg, 占 40%; 废钢 25kg, 占 25%。

3) 验算炉料中各元素含量:

$$C_{\text{料}} = 4.2\% \times 35\% + 3.4\% \times 40\% + 0.5\% \times 25\% = 2.96\%$$

$$Si_{\text{料}} = 2.0\% \times 35\% + 2.0\% \times 40\% + 0.3\% \times 25\% = 1.58\%$$

$$Mn_{\text{料}} = 0.1\% \times 35\% + 0.8\% \times 40\% + 0.3\% \times 25\% = 0.43\%$$

$$S_{\text{料}} = 0.04\% \times 35\% + 0.1\% \times 40\% + 0.05\% \times 25\% = 0.0665\%$$

$$P_{\text{料}} = 0.06\% \times 35\% + 0.12\% \times 40\% + 0.05\% \times 25\% = 0.082\%$$

由验算结果可看出炉料中碳含量基本可以, 硅含量低, 锰含量低, 硫与磷均小于要求值, 配料比例可以使用, 但需补加硅、锰含量。

4) 采用硅铁和锰铁补加硅、锰含量:

$$Si_{\text{补}} = \frac{2.35\% - 1.58\%}{(1 - 0.15) \times 45\%} = 2.0\%$$

$$Mn_{\text{补}} = \frac{0.875\% - 0.43\%}{(1 - 0.20) \times 65\%} = 0.85\%$$

每批料按 100kg, 则每批补加硅铁和锰铁量:

$$\text{硅铁 FeSi45 量} = 100\text{kg} \times 2.0\% = 2.0\text{kg}$$

$$\text{锰铁 FeMn65 量} = 100\text{kg} \times 0.85\% = 0.85\text{kg}$$

配料单见表 4-9。

表 4-9 配 料 单

(单位:kg)

| 炉 料 | 铸造生铁 | 回炉料 | 废 钢 | 硅铁 FeSi45 | 锰铁 FeMn65 |
|----------------|------|-----|-----|-----------|-----------|
| 每批铁料 100kg 配入量 | 35 | 40 | 25 | 2.0 | 0.85 |
| 每批铁料 200kg 配入量 | 70 | 80 | 50 | 4.0 | 1.7 |

例 4-21 现生产 HT300 孕育铸铁, 其化学成分(质量分数)要求: C3.0%、Si1.6%、Mn0.8%、S<0.12%、P<0.2%, 炉前孕育剂采用 SiFe75, 其加入量为 0.5%, 金属炉料化学成分见表 4-10, 冲天炉熔炼时化学元素变化情况见表 4-11。

表 4-10 金 属 炉 料 化 学 成 分 (质量分数)

(%)

| 炉 料 | C | Si | Mn | S | P |
|-------|-----|-----|-----|------|------|
| 铸造生铁 | 4.1 | 1.7 | 0.8 | 0.08 | 0.06 |
| 废钢 | 0.4 | 0.3 | 0.5 | 0.02 | 0.03 |
| 回炉料 | 3.2 | 2.0 | 0.7 | 0.12 | 0.15 |
| 45 硅铁 | — | 45 | — | — | — |
| 75 硅铁 | — | 75 | — | — | — |
| 60 锰铁 | — | — | 60 | — | — |

表 4-11 冲天炉熔炼时化学元素变化情况

| 元 素 | C | Si | Mn | S | P |
|---------|------|------|------|------|-----|
| 增减率 (%) | + 12 | - 15 | - 20 | + 80 | ± 0 |

求：冲天炉熔炼时炉料配比，每批炉料按 100kg 计算。

解：1) 计算所配炉料中各元素应含量：

$$C_{\text{炉料}} = \frac{3\%}{1 + 12\%} = 2.678\%$$

$$Si_{\text{炉料}} = \frac{1.6\%}{1 - 15\%} = 1.88\%$$

但因炉前铁液孕育时加 75 硅铁 0.5% (质量分数)，此硅铁中硅收得率为 80%，则硅铁孕育剂带入铁液中硅含量应从配料中减去，即

$$Si_{\text{剂}} = 0.75 \times 0.5\% \times 80\% = 0.3\%$$

则

$$Si_{\text{炉料}} = 1.88\% - 0.3\% = 1.58\%$$

$$Mn_{\text{炉料}} = \frac{0.8\%}{1 - 20\%} = 1\%$$

$$S_{\text{炉料}} = \frac{0.12\%}{1 + 80\%} = 0.066\%$$

2) 初步确定炉料配比。在采用炉料种类比较多时计算多元方程式比较麻烦，所以先确定某种炉料加入量，如废钢加入量。根据生产经验灰铸铁牌号 HT300 废钢加入量为 20% ~ 30%，现取 30%，其余如铸造生铁加入量设为 $x\%$ ，回炉料加入量设为 $y\%$ ，则以炉料中碳含量列出联立方程式：每批铁料按 100kg 计算

$$\begin{cases} 4.1\% \times x + 0.4\% \times 30 + 3.2\% \times y = 2.678 \\ x + 30 + y = 100 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0.041x + 0.12 + 0.032y = 2.678 \\ x + y = 70 \end{cases}$$

解方程得 $x = 35.55 \approx 35.6$, $y = 34.4$, 取 $x = 36$, $y = 34$ 。

对 100kg 炉料，铸造生铁加入量 36kg, 占比为 36%; 回炉料 34kg, 占比为 34%; 废钢 30kg, 占比为 30%。

3) 验算：

$$\text{炉料中含 C 量} = 4.1\% \times 36\text{kg} + 0.4\% \times 30\text{kg} + 3.2\% \times 34\text{kg} = 2.684\text{kg}$$

$$\text{炉料中含 Si 量} = 1.7\% \times 36\text{kg} + 0.3\% \times 30\text{kg} + 2.0\% \times 34\text{kg} = 1.382\text{kg}$$

$$\text{炉料中含 Mn 量} = 0.8\% \times 36\text{kg} + 0.5\% \times 30\text{kg} + 0.7\% \times 34\text{kg} = 0.676\text{kg}$$

$$\text{炉料中含 S 量} = 0.08\% \times 36\text{kg} + 0.02\% \times 30\text{kg} + 0.12\% \times 34\text{kg} = 0.0756\text{kg}$$

炉料中含 P 量 = $0.06\% \times 36\text{kg} + 0.03\% \times 30\text{kg} + 0.15\% \times 34\text{kg} = 0.0816\text{kg}$

从验算结果看出：C、P 含量符合要求，而 S 含量稍有超出，Si、Mn 含量偏低，因此需补加硅铁和锰铁调整化学成分。

4) 计算补加硅铁和锰铁量：

$$\text{补加 45 硅铁量} = \frac{1.58\% - 1.38\%}{(1 - 15\%) \times 45\%} \times 100 = 0.53\text{kg}$$

$$\text{补加锰铁量} = \frac{1 - 0.676}{(1 - 20\%) \times 60\%} \times 100 = 0.675\text{kg}$$

配料中硫虽有超出 ($0.0756\text{kg} - 0.0675\text{kg} = 0.0081\text{kg}$)，但加入锰铁后，锰能中和一部分硫。硫和锰中和比例：

$$\frac{\text{Mn}}{\text{S}} = \frac{54.94(\text{Mn 的相对原子质量})}{32.066(\text{S 的相对原子质量})} = 1.7$$

则 中和硫所需锰铁量 = $\frac{1.7 \times (0.0756 - 0.0675)}{60\%} \text{kg} = 0.022\text{kg}$

即硫超出 0.0081kg 需多加锰(多耗锰)铁量为 0.022kg 。

则炉料应补加硅铁 0.53kg ，锰铁 $(0.675 + 0.022)\text{kg} = 0.697\text{kg}$ 。

5) 每批料 100kg 和 200kg 时配料单见表 4-12。

表 4-12 配 料 单

| 每批料重 /kg | 配比量/kg | | | | | |
|-------------|--------|----|-----|-------|-------|-----------|
| | 铸造生铁 | 废钢 | 回炉料 | 45 硅铁 | 锰铁 | 或换成 75 硅铁 |
| 100 | 36 | 30 | 34 | 0.53 | 0.697 | 0.64 |
| 200 | 72 | 60 | 68 | 1.06 | 1.394 | 1.28 |

例 4-22 采用纯镁作球化剂，生产球墨铸铁，设铁液温度为 1400°C ，试计算当铁液中加入 1% (质量分数) 的纯镁时，由于镁在铁液中被加热、熔化、蒸发吸热，使铁液温度降低多少 $^{\circ}\text{C}$ (以 100kg 铁液计算)？

解：为便于计算，设铁液中的镁全部蒸发并过热到 1400°C ，故当铁液中加入 1kg 纯镁时，总的热量消耗由以下几个项目累加而成。

1) 纯镁从 25°C 加热到熔点时所消耗的热量：

公式为 $Q_1 = mc_{p\text{固}}(t_{\text{熔}} - 25)$

根据资料 $c_{p\text{固}} = 0.28\text{kcal}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}) = 1.17\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$, $t_{\text{熔}} = 650^{\circ}\text{C}$

则 $Q_1 = 1\text{kg} \times 1.17\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}) \times (650 - 25)^{\circ}\text{C} = 731.25\text{kJ}$

2) 计算纯镁的熔化热。

公式为 $Q_2 = mv_{\text{熔}}$

式中 m —— 1kg ；

$v_{熔}$ ——熔化潜热 (kJ/kg)。

根据资料, 纯镁 650℃时熔化潜热 = 88kcal/kg = 368.19kJ/kg

则 $Q_2 = 1\text{kg} \times 368.19\text{kJ/kg} = 368.19\text{kJ}$

3) 计算液体镁从熔点温度加热到沸点温度时的热量消耗。

公式为 $Q_3 = mc_{p\text{液}}(t_{\text{沸}} - t_{\text{熔}})$

式中, 根据资料纯镁的 $c_{p\text{液}} = 0.333\text{kcal}/(\text{kg} \cdot \text{°C}) = 1.39\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{°C})$

$$t_{\text{沸}} = 1105\text{°C}; t_{\text{熔}} = 650\text{°C}$$

则 $Q_3 = 1\text{kg} \times 1.39\text{kJ/kg} \cdot \text{°C} \times (1105 - 650)\text{°C} = 632.45\text{kJ}$

4) 计算液体镁的蒸发热。

公式为 $Q_4 = mv_{蒸}$

式中 $v_{蒸}$ ——蒸发潜热, 根据资料, $v_{蒸} = 1254.6\text{kcal/kg} = 5249.24\text{kJ/kg}$

则 $Q_4 = 1\text{kg} \times 5249.24\text{kJ/kg} = 5249.24\text{kJ}$

5) 计算镁蒸气过热到 1400℃时的热量消耗。

公式为 $Q_5 = mc_{p\text{气}}(1400 - t_{\text{沸}})$

式中, 纯镁的 $c_{p\text{气}} = 0.205\text{kcal}/(\text{kg} \cdot \text{°C}) = 0.857\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{°C})$

则 $Q_5 = 1\text{kg} \times 0.857\text{kJ/kg} \cdot \text{°C} \times (1400 - 1105)\text{°C} = 252.81\text{kJ}$

因此, 在 100kg 铁液中加 1kg 纯镁球化处理时, 从铁液中吸收的总热量为

$$\begin{aligned} Q_{\text{总}} &= Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \\ &= (731.25 + 368.19 + 632.45 + 5249.24 + 252.81)\text{kJ} \\ &= 7233.94\text{kJ} \end{aligned}$$

铁液的平均比热容 = 0.21kcal/(kg · °C) = 0.878kJ/(kg · °C), 100kg 铁液中加 1% 纯镁即 1kg 纯镁时, 铁液温度降低为

$$\text{铁液降温} = \frac{7233.94}{100 \times 0.878} \text{°C} = 82.4\text{°C}$$

因此, 为减少铁液由于球化加镁而降低铁液温度, 采用稀土镁合金代替纯镁作球化剂, 并应将稀土镁等预热后加入铁液中为宜, 这也是熔炼球墨铸铁时要求铁液温度高的原因所在。

第五章 中频感应炉熔炼铸铁的配料计算

工频和中频感应炉熔炼铸铁历史还不长，1950年德国首先发展了这种熔炼炉及其操作技术，并逐渐传播到其他各国。日本从1965年开始迅速普及推广工频感应炉熔炼铸铁技术。

这种电炉结构简单易操作，可以比较平稳地进行熔炼作业，容易调整化学成分而获得高温铁液。尤其熔炼合金铸铁和球墨铸铁要求在高温铁液中加球化剂和孕育剂，球化处理合金材料具有独特优势。在大批量生产中多采用冲天炉熔化铁液，再将铁液转人工频或中频感应炉进行升温调整化学成分后浇注铸件的双联熔炼工艺技术。

工频和中频感应炉熔炼虽然要求炉料材料比较好，但熔炼过程中烟尘、粉尘比冲天炉少而有利环境保护和工业卫生。

本章仅介绍中频感应炉熔炼铸铁配料计算方法，中频感应炉熔炼铸铁件配料计算实例。

第一节 中频感应炉熔炼灰铸铁的配料计算

例 5-1 某工厂有熔化量为 250kg 的中频感应炉, 生产减振器座 HT250, 铸件净重 5.5kg, 出口日本。

材质要求 (质量分数): C 3.3% ~ 3.4%; Si 1% ~ 1.6%; Mn 0.8% ~ 1.0%; S < 0.1%; P < 0.2%。工厂原材料见表 5-1。

表 5-1 工厂原材料化学成分 (质量分数) (%)

配料计算按每炉 220kg 计算, 配料单见表 5-2, 熔炼化学成分见表 5-3。

表 5-2 220kg 配料单

| 原材料 | 占比 (%) | 质量 /kg | 配入质量/kg | | | | | 备注 |
|------|-----------|-----------|---------|-------|-------|-------|-------|------------------------|
| | | | C | Si | Mn | S | P | |
| 本溪生铁 | 50 | 110 | 4.4 | 1.21 | 0.44 | 0.044 | 0.044 | $110 \times 4\% = 4.4$ |
| 回炉料 | 40 | 88 | 3.08 | 1.23 | 0.264 | 0.026 | 0.026 | — |
| 废 钢 | 10 | 22 | 0.066 | 0.026 | 0.066 | 0.004 | 0.004 | — |
| 合 计 | 100 | 220 | 7.546 | 2.466 | 0.770 | 0.074 | 0.074 | 配入质量 |
| 硅铁 | 0.68 | 1.5 | — | 1.125 | — | — | — | — |
| 锰铁 | 0.9 | 2 | 0.14 | — | 1.20 | — | — | — |
| 总合计 | 101.58 | 223.5 | 7.686 | 3.591 | 1.970 | 0.074 | 0.074 | — |

表 5-3 熔炼化学成分

| 项 目 | C | Si | Mn | S | P | 备 注 |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-------|-------------|---|
| 配入质量/kg | 7.546 | 2.466 | 0.770 | 0.074 | 0.074 | 计算法 (由配料单) |
| 熔炼成分 (质量分数, %) | 3.43 | 1.13 | 0.35 | 0.033 | 0.033 | $\frac{7.546}{220} \times 100\% = 3.43\%$ |
| 配入总质量/kg | 7.686 | 3.591 | 1.970 | 0.074 | 0.074 | — |
| 熔炼烧损 (%) | 15 | 15 | 10 | — | — | — |
| 烧损后质量/kg | 6.53 | 3.052 | 1.773 | 0.074 | 0.074 | $7.686 \times (100 - 15)\% = 6.53$ |
| 熔炼成分 (质量分数, %) | 3.24 | 1.517 | 0.881 | 0.036 | 0.036 | $\frac{6.53}{223.5 \times 90\%} \times 100\% = 3.24$ └烧损 10% |
| 要求成分 (质量分数, %) | 3.0 ~ 3.4 | 1.4 ~ 1.6 | 0.8 ~ 1.0 | <0.1 | <0.15 ~ 0.2 | 熔炼成分符合要求 |

如果熔炼化学成分与要求化学成分有误差时再进行调整化学成分计算。

第二节 中频感应炉熔炼球墨铸铁的配料计算

球墨铸铁是在熔炼的铁液中经过添加能使石墨球化的合金元素后, 得到的球状石墨组织而得名。其特点具有强度高、韧性好、可加工性好, 可部分代替铸钢

件使用而得到广泛的应用。

为掌握球墨铸铁配料计算, 应掌握球墨铸铁化学成分特点、所用炉料、球化剂、孕育剂, 球化处理工艺是生产球墨铸铁的关键。

一、球墨铸铁的碳当量和五大元素含量及特点

1. 碳当量

球墨铸铁化学成分的一个显著特点是碳当量高于灰铸铁, 一般碳当量 = 4.2% ~ 4.6%, 配高碳当量是因为经过球化处理的球墨铸铁凝固过冷倾向高于灰铸铁, 容易产生渗碳体组织, 因此需要提高铁液中碳活度, 改善石墨化生成条件, 使石墨数量因碳量提高而增加。另外, 原铁液的碳与球化元素化合而进入熔渣, 使碳量有所损失, 能减少 5% ~ 8% (质量分数), 球化剂加入量较多时, 减碳量增加。

2. C、Si 含量

C、Si 是促进石墨化, 减少白口倾向的元素, C 含量适当高, 有利于石墨化, 一般配碳的质量分数为 3.3% ~ 3.8%。Si 显著促进石墨化, 以孕育剂方式添加的 Si 作用最显著, 并有增 Si。

通常珠光体球墨铸铁组织时 Si 的质量分数为 2.0% ~ 2.3%。

铁素体球墨铸铁组织时 Si 的质量分数为 2.4% ~ 3.0%。

3. Mn 含量

Mn 有较强的脱 S 能力, 提高强度, 稳定珠光体。

熔炼铁素体球铁时 Mn 的质量分数控制在 0.3% ~ 0.4%。

熔炼珠光体球铁时 Mn 的质量分数控制在 0.4% ~ 0.8%。

4. P、S 含量

P 有严重偏析倾向, 降低强度, 质量分数应控制在 0.06% 以下。

S 对球化剂中 Mg 和稀土等球化元素与 S 有很强的亲和能力而脱 S, 一般 S 的质量分数会降低到 0.01% ~ 0.018%。一般 S 的质量分数应控制在 0.02% 以下。

5. 铁液中残留 Mg 和稀土元素含量

采用 Mg 作球化剂时残留 Mg 的质量分数应为 0.04% ~ 0.08%, 稀土元素残留一般为 0.02% ~ 0.04% (质量分数)。

二、炉料应按球墨铸铁化学成分特点选择

1. 选择炉料时要求炉料中含干扰石墨球化的元素尽量低

炉料中含干扰石墨化元素极限含量见表 5-4。

表 5-4 炉料中含干扰石墨化元素极限含量 (质量分数)

(%)

| 元素 | Cu | Al | Ti | Pb | Sb | Bi | Zr | Sn | Se | As |
|------|----|-----|-----|-------|------|-------|------|-----|------|------|
| 含量 < | 3 | 0.2 | 0.1 | 0.011 | 0.01 | 0.003 | 0.03 | 0.1 | 0.03 | 0.09 |

2. 新生铁选择

配制熔炼铁液 C 的质量分数为 3.3% ~ 3.9% 时, 不宜选用 C 的质量分数低于 3.0% 的新生铁。

新生铁中 Si 的质量分数以在 1.0% ~ 2.5% 为宜, 如选用 Fe-Si-Mg、Ca-Si、稀土合金中含 Si 多时, 选择 Si 的质量分数在 2.0% 以下的新生铁。

新生铁中 P 和 S 含量应尽可能低, 宜选择 P 的质量分数在 0.08% 以下, S 的质量分数 < 0.03% 的新生铁。

3. 回炉料、返回料的选择

回炉料、返回料的选择应多选用本厂化学成分清楚的回炉料, 对铁液成分影响较小, 不能选择炉料中含有促进铸件产生白口化元素的炉料。

4. 废钢的选择

采用工频和中频感应炉熔炼时, 一般可配入总质量的 20% ~ 30%, 最好不超过 50%, 如果废钢量配入太高, 铁液中含 C 量太低要有增 C 补救措施; 废钢配入多时, 铁液中含 P、S 相对较低能提高铸件强度。

选择的废钢化学成分必须清楚, 不能含多个合金元素, 如 Cr、Ni、W、Mo 等元素, 使铁液铸态下形成白口的倾向加大, 不能配入合金钢废料。

三、球化剂、孕育剂的选择和球化处理方法

1. 球化剂和孕育剂的选择

市售球化剂和孕育剂种类繁多, 根据生产经验, 选择和多掌握球化剂和孕育剂含量特点, 选用含 Al 元素少的球化剂和孕育剂。

比较常用的球化剂有 SiFeMg、SiCaMg 和稀土合金球化剂。

常用的孕育剂有 SiFe、SiCaFe 等, 由于合金元素含量不同, 种类也很多。

注意选择球化干扰元素尽量少的孕育剂。

2. 球化剂和孕育剂处理工艺

球化处理和孕育处理工艺是生产球墨铸铁成功的关键一环, 在不同厂家有不同的处理工艺方法。在球化处理时要求铁液温度高, 一般在 1450 ~ 1500℃ 为宜。据资料介绍, 向铁液中每加入 1% (质量分数) 的 Mg 会使铁液温度降低 79℃, 加入 1% (质量分数) 的 Ca 会使铁液温度降低 64℃, 有的资料介绍要求铁液出炉温度在 1550 ~ 1600℃, 在球化处理和孕育处理时铁液温度一般降低 83 ~ 86℃。

球化处理工艺可归纳以下三种

(1) 表面加入法 在浇包的铁液表面上加入粒度为1mm细粒的球化剂后盖上包盖搅拌,使铁液球化反应充分后再加入粒度为1~2mm的孕育剂,如SiFe,加入量一般为铁液质量的0.2%~0.3%,处理后即浇注铸件。

(2) 冲入法 将干燥好的粒度在6~20mm的球化剂放到浇包底部,冲入铁液与球化剂反应使铁液球化,也可随铁液流加入球化剂进行球化。球化后再加孕育剂使球化率完整。球化剂粒度要适当,根据生产经验确定,太细易氧化,粒度太大熔化慢,都影响球化效果。

(3) 钟罩法、球化包法 生产中球化处理方法也有很多发明改进,钟罩法和球化包法相类似,球化效果好,安全。还有的用压力包球化处理方法,这种方法球化剂与铁液在密闭罩内发生强烈反应,产生很大的蒸气压力和烟尘,应严加注意,防止发生铁液爆散,烫伤事故。

四、简介球墨铸铁、球化剂和孕育剂化学成分

采用Mg的质量分数为10%~20%的球化剂球化处理时应特别注意安全,应用Mg质量分数为5%~6%的球化剂球化安全性好些。

为配料计算,现给出球墨铸铁化学成分、球化剂和孕育剂的化学成分,详见表5-5~表5-8。

表5-5 球墨铸铁化学成分(质量分数) (%)

| 类型 | C | Si | Mn | P | S | Mg | RE |
|------|---------|---------|-----------|-----------|-------|-----------|-----------|
| 铁素体型 | 3.5~3.9 | 2.5~3.0 | 0.3~0.6 | 0.05~0.07 | ≤0.03 | 0.03~0.06 | 0.02~0.05 |
| 珠光体型 | 3.5~3.9 | 2.0~2.6 | 0.5~0.8 | ≤0.07 | ≤0.03 | 0.03~0.06 | 0.02~0.05 |
| 贝氏体型 | 3.3~3.9 | 2.7~3.1 | 0.25~0.50 | ≤0.07 | ≤0.03 | 0.03~0.06 | 0.02~0.05 |

表5-6 推荐的球墨铸铁化学成分(质量分数) (%)

| 球墨铸铁类型 | | C | Si | Mn | P | S | 其他 |
|--------|------|---------|---------|----------|-------|-------|---------------|
| 铁素体型 | 铸态应用 | 3.5~3.9 | 2.5~3.0 | ≤0.25 | ≤0.07 | ≤0.02 | — |
| | 退火 | 3.5~3.9 | 2.0~2.7 | ≤0.40 | ≤0.07 | ≤0.02 | — |
| 珠光体型 | 铸态应用 | 3.6~3.8 | 2.1~2.5 | 0.4~0.55 | ≤0.07 | ≤0.02 | Cu0.5~1.0, Mo |
| | 退火 | 3.5~3.7 | 2.0~2.4 | 0.4~0.8 | ≤0.07 | ≤0.02 | 0.3~1.7 |

表 5-7 常用的球化剂品种牌号及化学成分(质量分数) (%)

| 品种 | 牌号 | RE | Mg | Si | Mn | Ca | Ti | 其他 | Fe | 球化处理工艺 | 适用范围 |
|------------|----------------|-------|-------|-------|------|-------|------|---------|-----|---------------------------------|---|
| 纯镁 | Mg99.8(镁锭) | — | ≥99.8 | — | — | — | — | — | — | 压力加镁法 钟罩压入法 | 用于干扰元素少的炉料 大型厚壁铸件,高韧性铁素体铸件 |
| 稀土硅 镁合金 | FeSiMg6RE1 | 0.1~1 | 5~7 | 40~50 | — | 1~3 | <0.5 | Al<0.5 | 余量 | 冲入法、型内球化 法、盖包法、放入包 底冲入法 | 用于含干扰元素炉料,有良好的 抗干扰脱S,减少黑渣、缩松的作用, 生产各种铸件 |
| | FeSiMg6RE2 | 1~2 | 5~7 | <43 | <0.5 | 1~3 | <0.5 | — | 余量 | | |
| | FeSiMg6Re3 | 2~4 | 5~8 | <43 | <0.5 | 1~3 | <0.5 | — | 余量 | | |
| | FeSiMg8RE3 | 2~4 | 7~9 | <43 | <0.5 | 1~3 | <0.5 | — | 余量 | | |
| | FeSiMg6RE4 | 3~5 | 5~7 | <43 | 0.5 | ≤4 | ≤4 | — | 余量 | | |
| | FeSiMg8RE5 | 4~6 | 7~9 | 44 | 2.0 | ≤3 | 1.0 | — | 余量 | | |
| | FeSiMg8RE7 | 6~8 | 7~9 | 44 | 2.0 | ≤3 | 1.0 | — | 余量 | | |
| | FeSiMg10RE7 | 6~8 | 9~11 | 44 | 2.0 | ≤3 | 1.0 | — | 余量 | | |
| | FeSiMg10RE9 | 8~10 | 9~11 | 44 | 2.0 | ≤4 | 1.0 | — | 余量 | | |
| | FeSiMg8RE18 | 17~20 | 7~10 | 42 | 4.0 | ≤3 | 2.0 | — | 余量 | | |
| 稀土镁 钙合金 | FeSiMg4Ca9RE13 | 10~15 | 3~5 | ≤45 | — | 8~10 | — | — | 余量 | 冲入法 | |
| | FeSiMg4Ca11RE7 | 6~8 | 3~5 | 50~55 | — | 10~13 | — | — | 余量 | | |
| | FeSiMg6Ca13RE9 | 7~10 | 5~7 | ≤45 | — | 10~15 | — | — | 余量 | | |
| 稀土镁 铜合金 | FeSiMg8Cu33RE7 | 9~10 | 7~9 | ≤35 | <3 | <1.0 | — | Cu30~35 | 余量 | 冲入法 | 适用含干扰元素少的炉料 |
| 铜镁合金 | Cu50Mg50 | | 50 | | | | | Cu50 | 冲入法 | 用于大型珠光体基体铸件 | |
| | Cu80Mg20 | | 20 | | | | | Cu80 | | | |
| 镍镁合金 | Ni50Mg50 | | 50 | | | | | Ni50 | 冲入法 | 用于珠光体基体铸件 奥氏体基体铸件 贝氏体基体铸件 | |
| | Ni80Mg20 | | 20 | | | | | Ni80 | | | |
| | Ni85Mg15 | | 15 | | | | | Ni85 | | | |
| 硅镁合金 | FeSi47Mg12 | 0~0.6 | 5~20 | 45~50 | — | 0.5 | — | — | 余量 | 冲入法 | 用于干扰元素含量少的炉料 |

注: 摘自《铸造工程师手册》和《铸造手册》第3版中球化剂数据并加以整编。

表 5-8 球墨铸铁常用孕育剂化学成分(质量分数) (%)

| 名称 | Si | Ca | Al | Ba | Mn | Sr | Bi | Fe | 用途特点 |
|---------|-------|---------|---------|-------|------|-------|-------|----|-----------------|
| Si-Fe-1 | 74~79 | 0.5~1.0 | 0.8~1.6 | — | — | — | — | 余量 | 常规 |
| Si-Fe-2 | 74~79 | <0.5 | 0.8~1.6 | — | — | — | — | 余量 | |
| 钡硅铁 | 60~65 | 0.8~2.2 | 1~2 | 4~6 | 8~10 | — | — | 余量 | 长效, 大件用, 熔点低 |
| 钡硅铁 | 63~68 | 0.8~2.2 | 1~2 | 4~6 | — | — | — | 余量 | |
| 钡硅铁 | 63~78 | ≤0.1 | — | — | — | — | — | 余量 | 薄壁大件用 |
| 硅钙 | 60~65 | 25~30 | — | — | — | — | — | 余量 | — |
| 铋 | — | — | — | — | — | — | ≥99.5 | — | 与硅铁复合用 |
| RECaBa | 46~54 | 1~3 | ≤3.0 | 1.5~4 | — | RE3~5 | — | 余量 | 薄壁件用 |
| REMnCr | 35~40 | <1 | — | — | 6 | RE6~8 | Cr15 | 余量 | |

五、熔炼球墨铸铁配料计算实例

例 5-2 公司订货需要熔炼球墨铸铁铁液 1000kg, 浇注曲轴铸件, 采用中频感应炉熔炼, 应用本厂回炉料和废钢。球墨铸铁的化学成分见表 5-9。

表 5-9 球墨铸铁化学成分(质量分数) (%)

| 球墨铸铁 | C | Si | Mn | P | S | 备注 |
|------|---------|---------|---------|-------|-------|------|
| 规定成分 | 3.6~3.9 | 2.0~2.6 | 0.5~0.8 | <0.1 | <0.08 | 珠光体型 |
| 控制成分 | 3.5~3.9 | 1.5~1.8 | 0.6 | <0.07 | <0.06 | — |
| 计算成分 | 3.8 | 1.4 | 0.6 | 0.07 | 0.06 | — |

(1) 炉料的选择 选用本溪生铁, 含 P、S 低, 质量好, 回炉料选用本厂回炉料, 废钢选用本厂铆焊车间型钢边角余料, 含 P 低的废钢。

(2) 初步确定炉料配比 用本厂回炉料配入量 20%, 废钢 30%, 其余配新生铁, 炉料组成及化学成分见表 5-10。

表 5-10 炉料组成及化学成分(质量分数) (%)

| 炉料 | C | Si | Mn | P | S | Mg | RE |
|----------|-----|-----|-----|------|------|----|----|
| 本溪生铁 P10 | 4.0 | 1.2 | 0.5 | 0.07 | 0.03 | — | — |
| 铸造生铁 Z14 | 3.9 | 1.4 | 0.3 | 0.1 | 0.04 | — | — |
| 回炉料 | 3.6 | 2.2 | 0.6 | 0.07 | 0.03 | — | — |

(续)

| 炉料 | C | Si | Mn | P | S | Mg | RE |
|-----------|------|------|------|------|------|----|----|
| 废钢 | 0.25 | 0.36 | 0.65 | 0.07 | 0.03 | — | — |
| SiFe | — | 75 | — | — | — | — | — |
| MnFe | — | 2.5 | 68 | — | — | — | — |
| 稀土镁合金球化剂 | — | 40 | — | — | — | 9 | 4 |
| 孕育剂 | — | 75 | — | — | — | — | — |
| 元素烧损率 (%) | -5 | +3 | -15 | 0 | 0 | — | — |

(3) 计算炉料中应配入的元素含量, 按铸铁配料计算公式计算

$$C_{\text{炉料}} = \frac{C_{\text{原铁液}}}{1 + \eta_C} = \frac{3.8\%}{1 + (-5\%)} = 4.0\%$$

$$Si_{\text{炉料}} = \frac{Si_{\text{原铁液}}}{1 + \eta_{Si}} = \frac{1.4\%}{1 + 3\%} = 1.36\%$$

$$Mn_{\text{炉料}} = \frac{Mn_{\text{原铁液}}}{1 + \eta_{Mn}} = \frac{0.6\%}{1 + (-15\%)} = 0.706\%$$

$$P_{\text{炉料}} = \frac{P_{\text{原铁液}}}{1 + \eta_P} = \frac{0.07\%}{1 + (0)} = 0.07\%$$

$$S_{\text{炉料}} = \frac{S_{\text{原铁液}}}{1 + \eta_S} = \frac{0.06\%}{1 + (0)} = 0.06\%$$

(4) 计算配入量 先设定某种炉料代号, 并假定加(配)入量, 建立数学方程式, 再解方程计算两种生铁配入量。

设本溪生铁 P10 为 (P), 配入量为 x ; 铸造生铁 Z14 为 (Z); 回炉料为 (回), 配入量为 20%; 废钢为 (废), 配入量为 30%。

列方程式: $x + (Z) + 20\% + 30\% = 100\%$

则 $(Z) = 100\% - x - 20\% - 30\% = 50\% - x$

(5) 计算两种生铁、回炉料, 废钢配入的 C 量

$$C_{\text{炉料}}(P) = 4.0\% \times x$$

$$C_{\text{炉料}}(Z) = 3.9\% \times (50\% - x)$$

$$C_{\text{炉料(回)}} = 3.6\% \times 20\% = 0.72\%$$

$$C_{\text{炉料(废)}} = 0.25\% \times 30\% = 0.075\%$$

各种炉料配入 C 量合计为

$$C_{\text{炉料}} = C_{\text{炉料(P)}} + C_{\text{炉料(Z)}} + C_{\text{炉料(回)}} + C_{\text{炉料(废)}}$$

代入各种炉料计算数量

$$4.0\% = 4.0\% \times x + 3.9\% \times (50\% - x) + 0.72\% + 0.075\%$$

解一元一次方程式, 得 $x = 12.55\%$

即得出本溪生铁 P10 配入量为 12.55%

则铸造生铁 Z14 配入量 $= 50\% - 12.55\% = 37.45\%$

(6) 计算各种炉料中配入的 Si、Mn 含量, 并核算 Si、Mn 配入量, 确定是否需补加 SiFe 和 MnFe, 再计算补加量。

1) Si 量计算: $Si_{\text{炉料}} = 1.36\%$

$$Si_{\text{炉料(P)}} = 1.2\% \times 12.55\% = 0.15\%$$

$$Si_{\text{炉料(Z)}} = 1.4\% \times 37.45\% = 0.52\%$$

$$Si_{\text{炉料(回)}} = 2.2\% \times 20\% = 0.44\%$$

$$Si_{\text{炉料(废)}} = 0.36\% \times 30\% = 0.10\%$$

配入 Si_{合计} $= 1.21\% < Si_{\text{炉料}} = 1.36\%$ 。炉料配入 Si 少 0.15%, 应补加 SiFe。

计算补加 SiFe 量:

$$SiFe = \frac{0.15\%}{75\%} = 0.2\%$$

2) Mn 量计算: $Mn_{\text{炉料}} = 0.706\%$

$$Mn_{\text{炉料(P)}} = 0.5\% \times 12.55\% = 0.063\%$$

$$Mn_{\text{炉料(Z)}} = 0.3\% \times 37.45\% = 0.11\%$$

$$Mn_{\text{炉料(回)}} = 0.6\% \times 20\% = 0.12\%$$

$$Mn_{\text{炉料(废)}} = 0.65\% \times 30\% = 0.19\%$$

炉料配入 Mn_{合计} $= 0.483\% < Mn_{\text{炉料}} = 0.706\%$, 炉料配入 Mn 少 0.223%, 应补加 MnFe。

计算补加 MnFe 量:

$$MnFe = \frac{0.223\%}{68\%} = 0.328\%, \text{ 取 } 0.33\%$$

(7) 核算 P、S 含量 计算配入的各种炉料中带入的 P、S 含量,并核算计算的 P、S 含量是否在允许范围内。

1) P 量计算: $P_{\text{炉料}} = 0.07\%$

$$P_{\text{炉料}(P)} = 0.07\% \times 12.55\% = 0.009\%$$

$$P_{\text{炉料}(Z)} = 0.1\% \times 37.45\% = 0.037\%$$

$$P_{\text{炉料}(回)} = 0.07\% \times 20\% = 0.014\%$$

$$P_{\text{炉料}(废)} = 0.07\% \times 30\% = 0.021\%$$

炉料配入 $P_{\text{合计}} = 0.081\% > P_{\text{炉料}} = 0.07\%$, 炉料配入 P 多 0.011%。炉料配入 P > 控制成分(0.07%), 但 < 规定成分(0.10% 之内), 在球化处理时加球化剂有脱 P 作用, 所以在规定范围内, 即应作脱 P 处理为宜。

2) S 量计算: $S_{\text{炉料}} = 0.06\%$

$$S_{\text{炉料}(P)} = 0.03\% \times 12.55\% = 0.0037\%$$

$$S_{\text{炉料}(Z)} = 0.04\% \times 37.45\% = 0.015\%$$

$$S_{\text{炉料}(回)} = 0.03\% \times 20\% = 0.006\%$$

$$S_{\text{炉料}(废)} = 0.03\% \times 30\% = 0.009\%$$

炉料配入 $S_{\text{合计}} = 0.033\% < S_{\text{炉料}} = 0.06\%$, 在球化处理时球化剂有强脱 S 作用, 所以炉料配入的含 S 量在允许范围内。

(8) 填写配料比和配料计算记录卡(或配料单) 由上述配料计算和核算结果说明, 炉料配入数量合理。

炉料配比如下: 本溪生铁 P10 配入量为 12.55%; 铸造生铁 Z14 配入量为 37.45%; 本厂回炉料配入量为 20%; 废钢配入量为 30%; SiFe(含 Si75%) 配入量为 0.2%; MnFe(含 Mn68%) 配入量为 0.32%。

根据炉前快速分析结果决定球化剂和孕育剂的加入量: 稀土镁加入量为 0.5%; SiFe 加入量为 0.6%。

计算熔炼 1000kg 球墨铸铁配入各种炉料质量:

本溪生铁 $P10 = 1000\text{kg} \times 12.55\% = 125.5\text{kg}$; 铸造生铁 $Z14 = 1000\text{kg} \times 37.45\% = 374.5\text{kg}$; 本厂回炉料 $= 1000\text{kg} \times 20\% = 200\text{kg}$; 废钢 $= 1000\text{kg} \times 30\% = 300\text{kg}$; SiFe $= 1000\text{kg} \times 0.2\% = 2\text{kg}$; MnFe $= 1000\text{kg} \times 0.32\% = 3.2\text{kg}$; 稀土镁球化剂 $= 1000\text{kg} \times 0.5\% = 5\text{kg}$; SiFe 孕育剂 $= 1000\text{kg} \times 0.6\% = 6\text{kg}$; 炉料合计 $= 1016.2\text{kg}$ 。

例 5-3 订货要求熔炼球墨铸铁相当于牌号 QT600-3 球墨铸铁 3000kg, 浇注轴类铸件。采用本厂回炉料、废钢, 外购铸造生铁, 采用 3t/h 中频感应炉熔炼,

球墨铸铁化学成分见表 5-11。

表 5-11 球墨铸铁化学成分 (质量分数) (%)

| 球墨铸铁 | C | Si | Mn | P | S | 备注 |
|------|-----------|-----------|-----------|------|-------|------------------------------|
| 规定成分 | 3.5 ~ 3.9 | 1.2 ~ 1.5 | 0.5 ~ 0.9 | <0.1 | <0.08 | — |
| 计算成分 | 3.8 | 1.3 | 0.7 | 0.07 | 0.06 | 经球化、孕育处理后 Si 控制在 2.2% ~ 2.6% |

(1) 炉料组成 以球墨铸铁 C 含量特点选配炉料, 根据生产经验一般回炉料配入量为 15% ~ 25%, 选为 20% 配入, 其余配入新生铁, 有利节省新生铁和防止 P 含量高, S 含量在球化和孕育处理后可明显降低, 但注意增加 Si 含量。废钢一般配入 20% ~ 30%, 确定配入 30%。炉料组成及化学成分见表 5-12。

表 5-12 炉料组成及化学成分 (质量分数) (%)

| 炉料组成 | C | Si | Mn | P | S | Mg | RE |
|-----------|-----|-----|------|------|------|----|----|
| 铸造生铁 Z14 | 4.1 | 1.2 | 0.3 | 0.08 | 0.03 | — | — |
| 铸造生铁 Z18 | 3.9 | 1.6 | 0.5 | 0.08 | 0.03 | — | — |
| 本厂回炉料 | 3.6 | 2.0 | 0.6 | 0.05 | 0.03 | — | — |
| 废 钢 | 0.2 | 0.3 | 0.6 | 0.07 | 0.03 | — | — |
| 硅铁 SiFe | — | 75 | — | — | — | — | — |
| 锰铁 MnFe | — | — | 68.2 | — | — | — | — |
| 稀土镁合金球化剂 | — | 40 | — | — | — | 9 | 4 |
| 硅铁孕育剂 | — | 75 | — | — | — | — | — |
| 元素烧损率 (%) | -5 | +3 | -15 | 0 | 0 | — | — |

(2) 按铸铁配料计算公式计算炉料中应配入元素含量

$$C_{\text{炉料(计)}} = \frac{C_{\text{原铁液}}}{1 + \eta_C} = \frac{3.8\%}{1 + (-5\%)} = 4.0\%$$

$$Si_{\text{炉料(计)}} = \frac{Si_{\text{原铁液}}}{1 + \eta_{Si}} = \frac{1.3\%}{1 + (+3\%)} = 1.26\%$$

$$Mn_{\text{炉料(计)}} = \frac{Mn_{\text{原铁液}}}{1 + \eta_{Mn}} = \frac{0.7\%}{1 + (-15\%)} = 0.82\%$$

$$P_{\text{炉料(计)}} = \frac{P_{\text{原铁液}}}{1 + \eta_P} = \frac{0.07\%}{1 + (0)} = 0.07\%$$

$$S_{\text{炉料(计)}} = \frac{S_{\text{原铁液}}}{1 + \eta_s} = \frac{0.06\%}{1 + (0)} = 0.06\%$$

(3) 计算新生铁配入比例 (用 Z14 和 Z18 两种铸造生铁分别计算)

设铸造生铁 Z14 为 (Z14) 加入比例为 x ; 铸造生铁 Z18 为 (Z18); 回炉料为 (回); 废钢为 (废)。

建立方程式: Z18 生铁加入比例 = 总炉料 - 回炉料 - 废钢 - Z14

$$\begin{aligned} &= 100\% - 20\% - 30\% - x \\ &= 50\% - x \end{aligned}$$

则

$$C_{\text{炉料(Z14)}} = (Z14)\% \times x$$

$$C_{\text{炉料(Z18)}} = (Z18)\% \times (50\% - x)$$

将生铁 Z14 和 Z18 的 C 含量代入后得

$$C_{\text{炉料(Z14)}} = 4.1\% \times x$$

$$C_{\text{炉料(Z18)}} = 3.9\% \times (50\% - x)$$

$$C_{\text{炉料(回)}} = 3.6\% \times 20\% = 0.72\%$$

$$C_{\text{炉料(废)}} = 0.2\% \times 30\% = 0.06\%$$

则 $C_{\text{炉料}} = C_{\text{炉料(Z14)}} + C_{\text{炉料(Z18)}} + C_{\text{炉料(回)}} + C_{\text{炉料(废)}}$

即 $4.0\% = 4.1\% \times x + 3.9\% \times (50\% - x) + 0.72\% + 0.06\%$

整理方程式 $0.1\% x = 1.27\%$

解方程式 $x = 12.7\%$

即 $Z14 = 12.7\%$

$$Z18 = 50\% - x = 50\% - 12.7\% = 37.3\%$$

(4) 计算炉料中应配入 Si 比例

$$S_{\text{炉料}} = S_{\text{炉料(Z14)}} + S_{\text{炉料(Z18)}} + S_{\text{炉料(回)}} + S_{\text{炉料(废)}}$$

代入数字得出 $S_{\text{炉料}} = 1.2\% \times 12.7\% + 1.6\% \times 37.3\% + 2\% \times 20\% + 0.3\% \times 30\% = 1.23\%$

计算成分 $S_{\text{炉料(计)}} = 1.26\%$, 炉料配入 $S_{\text{炉料}} = 1.23\%$ 少于计算 Si 量, 计算补 Si 量, 采用 SiFe (75% Si) 补 Si, 即

$$\text{SiFe} = \frac{1.26\% - 1.23\%}{75\%} = 0.04\%$$

(5) 计算炉料中应配入 Mn 量

$$M_{\text{炉料}} = M_{\text{炉料(Z14)}} + M_{\text{炉料(Z18)}} + M_{\text{炉料(回)}} + M_{\text{炉料(废)}}$$

代入数字得出 $M_{\text{炉料}} = 0.3\% \times 12.7\% + 0.5\% \times 37.3\% + 0.6\% \times 20\% + 0.6\% \times 30\% = 0.52\%$

计算成分 $Mn_{炉料(计)} = 0.82\%$ ， $Mn_{炉料} = 0.52\%$ 少于计算 Mn 量，计算补 Mn 量，采用 MnFe (Mn68.2%) 补 Mn，即

$$MnFe = \frac{0.82\% - 0.52\%}{68.2\%} = 0.439\%，取 0.44\%$$

(6) 计算炉料中 P 含量并核算 P 含量

$$P_{炉料} = 0.08\% \times 12.7\% + 0.08\% \times 37.3\% + 0.05\% \times 20\% + 0.07\% \times 30\% \\ = 0.07\%$$

计算成分 $P_{炉料(计)} = 0.07\%$ ，与炉料中 $P_{炉料} = 0.07\%$ 相等，在含 P 范围内。

(7) 计算炉料中 S 含量并核算 S 含量

$$S_{炉料} = 0.03\% \times 12.7\% + 0.03\% \times 37.3\% + 0.03\% \times 20\% + 0.03\% \times 30\% \\ = 0.03\%$$

计算成分 $S_{炉料(计)} = 0.06\%$ ，炉料中 $S_{炉料} = 0.03\%$ 小于计算成分说明炉料中 S 含量，没问题。在孕育处理时可适当少加 SiFe 量。

(8) 配料计算结果见表 5-13

表 5-13 配料计算结果

| 炉料组成 | 炉料配入比 (%) | 配入量/kg | 备注 |
|----------------|-----------|--------|---|
| 铸造生铁 Z14 | 12.7 | 381 | $3000\text{kg} \times 12.7\% = 381\text{kg}$ |
| 铸造生铁 Z18 | 37.3 | 1119 | $3000\text{kg} \times 37.3\% = 1119\text{kg}$ |
| 回炉料 | 20 | 600 | $3000\text{kg} \times 20\% = 600\text{kg}$ |
| 废钢 | 30 | 900 | $3000\text{kg} \times 30\% = 900\text{kg}$ |
| SiFe (Si75%) | 0.04 | 1.2 | $3000\text{kg} \times 0.04\% = 1.2\text{kg}$ |
| MnFe (Mn68.2%) | 0.44 | 13.2 | $3000\text{kg} \times 0.44\% = 13.2\text{kg}$ |
| 稀土镁合金 | 1.3 | — | 参考值未计入 |
| 孕育剂 SiFe | 0.8 | — | — |
| 合计 | 100.48 | 3014.4 | — |

第三节 中频感应炉熔炼蠕墨铸铁的配料计算

蠕墨铸铁介于灰铸铁与球墨铸铁之间，因石墨呈蠕虫状而得名。其力学性能与可加工性优于灰铸铁而得到广泛应用。

关于生产蠕墨铸铁已有详细资料，但蠕墨铸铁配料计算资料较少。生产蠕墨铸铁可以采用冲天炉和感应炉熔炼铁液，经过蠕化剂和孕育剂处理后得到蠕墨铸铁。蠕化处理同球化处理一样要求较高的铁液温度。因此采用中频感应炉熔炼可获得化学成分稳定的高温铁液，这为蠕化和孕育处理创造必要的有利条件。

一、概述

1. 蠕墨铸铁化学成分配料计算中的控制要点

蠕墨铸铁化学成分与球墨铸铁略有不同，据有关资料介绍，蠕墨铸铁碳当量应控制在 4.3% ~ 4.6% (质量分数)。与浇注铸件壁厚薄有关，壁薄铸件取上限，壁厚铸件取下限。铸件五大化学元素的确定原则如下：

(1) C 蠕化处理前 C 的质量分数以 3.4% ~ 3.6% 为宜，要求配料计算时，铁料熔化后 C 的质量分数应不低于 3.3%，也不能高于 3.6%。C 含量太低不利于蠕化，太高时在蠕化剂稍多时就成为球化。

(2) Si 终点 Si 的质量分数应在 2.0% ~ 3.2%，铁料熔化时不应大于 1.5%，因在蠕化处理和孕育处理会增加 Si 含量，配料计算时应注意。

(3) Mn 熔炼铁素体基体组织的蠕墨铸铁 Mn 的质量分数 < 0.14%，而含 Si 应高些。

熔炼珠光体基体组织的蠕墨铸铁 Mn 的质量分数为 1.0% ~ 1.5%，而含 Si 量应低些。

(4) P 一般蠕墨铸铁 P 的质量分数 < 0.08%，当熔化含 P 耐磨蠕墨铸铁时，P 的质量分数为 0.2% ~ 0.4%。

(5) S 通常要求 S 的质量分数 < 0.06% 为宜，蠕化剂和孕育剂都有脱 S 作用，配料时 S 含量高会使蠕化和孕育效果受到影响，配料时应注意控制 S 的含量。

2. 蠕化剂和孕育剂的选择与加入量

(1) 蠕化剂和孕育剂的选择 据资料介绍，蠕化剂和孕育剂已有国家标准，种类很多，选择时应注意区别。蠕墨铸铁铸态组织有铁素体和珠光体基体之分，选择有利于对基体组织的蠕化剂和孕育剂。也有的元素有增加白口倾向或减少白口倾向，应注意选择。

(2) 蠕化剂和孕育剂加入量 蠕化剂和孕育剂加入量是获得良好的蠕墨铸铁最关键数据，加入量与蠕墨铸铁化学成分、金相组织有关，加入量少影响蠕化率，加入量多会成为球化，应特别注意。

(3) 稀土蠕化剂临界加入量，变质剂化学成分和加入量见表 5-14 ~ 表 5-17。

表 5-14 稀土蠕化剂临界加入量 (质量分数) (%)

| | | | | | |
|------------|---------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| 处理前铁液 S 含量 | 0.012 ~ 0.016 | 0.016 ~ 0.02 | 0.02 ~ 0.023 | 0.023 ~ 0.025 | 0.025 ~ 0.029 |
| 稀土硅铁加入量 | 0.66 ~ 0.74 | 0.74 ~ 0.81 | 0.81 ~ 0.86 | 0.86 ~ 0.90 | 0.90 ~ 0.98 |

表 5-15 稀土镁复合蠕化剂临界加入量 (质量分数) (%)

| | | | | |
|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 处理前铁液 S 含量 | 0.024 ~ 0.039 | 0.042 ~ 0.046 | 0.064 ~ 0.073 | 0.084 ~ 0.086 |
| 稀土 Mg 合金加入量 | 0.5 ~ 0.6 | 0.7 ~ 0.8 | >0.9 ~ 1.0 | >1.1 ~ 1.2 |

表 5-16 变质剂化学成分 (质量分数) (%)

| 变质剂 | Si | Mn | Ca | RE | Mg | Ti | 其他 |
|----------|---------|---------|---------|--------|--------|---------|---------|
| SiFe | 70 ~ 75 | — | — | — | — | — | 5 ~ 10 |
| MnFe | — | 50 ~ 70 | — | — | — | — | 30 ~ 50 |
| SiCa | 55 ~ 65 | — | 25 ~ 35 | — | — | — | 5 ~ 15 |
| TiFe | — | — | — | — | — | 25 ~ 35 | 10 ~ 30 |
| REMg 球化剂 | 35 ~ 43 | — | — | 8 ~ 12 | 8 ~ 12 | — | 5 ~ 20 |

表 5-17 变质剂加入量与硫含量 (质量分数) (%)

| | | | | |
|----------|-------------|---------------|---------------|---------------|
| 变质剂 | ≤0.02 | 0.021 ~ 0.030 | 0.031 ~ 0.040 | 0.041 ~ 0.050 |
| REMg 球化剂 | 0.20 ~ 0.30 | 0.25 ~ 0.35 | 0.30 ~ 0.45 | 0.35 ~ 0.55 |
| SiCa | 0.20 ~ 0.30 | 0.25 ~ 0.35 | 0.30 ~ 0.40 | 0.35 ~ 0.45 |
| TiFe | 0.35 ~ 0.50 | 0.30 ~ 0.45 | 0.25 ~ 0.40 | 0.20 ~ 0.35 |

3. 蠕化处理和孕育处理工艺方法

蠕化处理和孕育处理工艺方法是获得蠕墨铸铁最后一道关口，应掌握好处理条件和工艺方法。先蠕化后孕育调整和巩固蠕化效果。

将蠕化剂 (铁合金) 加工成 0.5 ~ 1mm 或 2 ~ 5mm 的碎粒小块使用。当用 5t 浇包时，其粒度以 6 ~ 20mm 为宜。

根据资料和生产经验，常用的蠕化处理方法有以下几种。

- 1) 冲入法。在出铁槽加入碎粒蠕化剂随出铁流冲入的蠕化处理。
- 2) 采用堤坝式浇包把蠕化剂碎粒加入浇包底冲入铁液蠕化处理方法，即将蠕化剂加入呈凹形隔槽的包底与铁液反应蠕化处理。
- 3) 采用螺旋加料器蠕化处理装置。蠕化剂装入螺旋加料器中，安装在出铁槽上方，一边出铁液一边旋转螺旋加料器使蠕化剂与铁液混合流到中间漏包中，再流入浇包中充分蠕化处理后十几秒钟即可浇注铸件。

4) 喂丝法。将蠕化剂制成丝材成卷, 通过喂丝装置加入有包盖的浇包中与铁液反应的蠕化处理方法。

二、蠕墨铸铁和蠕化剂化学成分简介

蠕墨铸铁和蠕化剂已有国家标准见表 5-18、表 5-19。

表 5-18 蠕墨铸铁化学成分 (质量分数) (%)

| 牌号 | C | Si | Mn | P | S | 基体组织 |
|-------------------|---------|---------|---------|-------|-------|-----------|
| RuT260 | 3.6~3.8 | 1.5~1.8 | <0.4 | <0.07 | <0.08 | 铁素体 |
| RuT300、 RuT340 | 3.6~3.8 | 1.5~1.8 | 0.3~0.7 | <0.07 | <0.08 | 铁素体 + 珠光体 |
| RuT380、 RuT420 | 3.6~3.8 | 1.2~1.6 | 0.5~0.9 | <0.07 | <0.08 | 珠光体 |

表 5-19 常用蠕化剂化学成分 (质量分数) (%)

| 牌号 | RE | Mg | Ca | Al | Ti | Zn | Si | Fe |
|----------------------|---------|---------|-------|---------|-----|-----|-------|----|
| 稀土合金 RESiFe | 17~20 | 0.4~1.2 | 1~5 | 0.5~0.9 | 2~6 | — | <48 | 余量 |
| | 20~24 | 0.4~1.3 | 1~5 | 0.5~0.9 | 2~6 | — | <44 | 余量 |
| 稀土镁合金 REMgSiFe | 5.5~6.5 | 5~6 | <2 | — | — | — | 40~44 | 余量 |
| | 7~9 | 3.5~4.5 | 4~6 | — | — | — | 40~45 | 余量 |
| | 17~19 | 7~9 | 3~4 | — | — | — | 40~44 | 余量 |
| 稀土镁钙合金 REMgCaSiFe | 0.5~1 | 5~7 | 3~5 | — | — | — | <48 | 余量 |
| | 7~9 | 3.5~4.5 | 4~6 | — | — | — | 40~45 | 余量 |
| | 7~10 | 5~7 | >10 | — | — | — | ≤45 | 余量 |
| | 10~15 | 3~5 | ≥8 | — | — | — | ≤45 | 余量 |
| 稀土钙合金 RECaSiFe | 10~15 | — | 10~15 | — | — | — | <60 | 余量 |
| | 15~20 | — | >~10 | — | — | — | <55 | 余量 |
| 稀土镁锌合金 REMgZnSiFe | 18~22 | 3~5 | — | — | — | 3~5 | <45 | 余量 |

三、蠕墨铸铁熔炼配料计算实例

例 5-4 根据铸造工厂订货合同要求生产蠕墨铸铁铁液 1000kg, 化学成分规定 (质量分数, %): C 3.0~3.5、Si 2.6~3.2、Mn 0.4~0.8、P < 0.07、S < 0.05, 采用中频感应炉熔炼。蠕墨铸铁化学成分见表 5-20。

表 5-20 蠕墨铸铁化学成分 (质量分数) (%)

| 蠕墨铸铁 | C | Si | Mn | P | S |
|------|-----------|-----------|-----------|--------|--------|
| 规定成分 | 3.0 ~ 3.6 | 2.6 ~ 3.2 | 0.4 ~ 0.8 | < 0.07 | < 0.05 |
| 控制成分 | 3.1 ~ 3.6 | 1.8 ~ 2.4 | 0.3 ~ 0.6 | < 0.07 | < 0.03 |
| 计算成分 | 3.5 | 2.2 | 0.4 | 0.06 | 0.02 |

根据上述蠕墨铸铁配料计算化学成分控制要点, 铁料熔化到蠕化处理前铁液含 C 的质量分数应在 3.4% ~ 3.6%, 配料时配入 C 量应满足要求, 选择炉料时含 P、S 量尽量低, 铁料熔化时 Si 的质量分数应为 1.5% 以下, 给蠕化处理和孕育处理时增 Si 留有余地。

(1) 炉料 炉料选用本溪生铁 P10, 含 P、S 较低; 采用本厂回炉料, 包括废铸件碎铁有稳定的化学成分; 废钢选低 P、S 废钢, 包括轧制型钢边角料。蠕化剂选用稀土镁合金, 孕育剂选用 SiFe。

选用炉料组成见表 5-21。

表 5-21 炉料组成及化学成分 (质量分数) (%)

| 炉料组成 | C | Si | Mn | P | S | Mg | RE | 备注 |
|------------------|-----------|-----------|-----------|--------|--------|-------|-----------|--------|
| 本溪生铁 P10 | 4.2 ~ 4.5 | 0.8 ~ 1.5 | 0.3 ~ 0.6 | < 0.07 | < 0.05 | — | — | 取中间值计算 |
| 本厂回炉料 | 3.2 ~ 3.9 | 2.0 ~ 3.0 | 0.3 ~ 0.5 | < 0.07 | < 0.03 | — | — | 取中间值计算 |
| 废钢 | 0.3 | 0.5 | 0.6 | < 0.06 | < 0.03 | — | — | — |
| SiFe | — | 75 | — | — | — | — | — | — |
| MnFe | — | — | 68 | — | — | — | — | — |
| 稀土镁蠕化剂 | — | 40 ~ 44 | — | — | — | 5 ~ 6 | 5.5 ~ 6.5 | 取中间值计算 |
| SiFe 孕育剂 | — | 75 | — | — | — | — | — | — |
| 元素增减率 η (%) | -5 | +2 | -15 | 0 | 0 | -40 | -50 | 中频感应炉 |

(2) 计算炉料组成中应配入的元素含量 根据铸铁配料计算公式:

$$C_{\text{炉料}} = \frac{C_{\text{计}}}{1 + \eta_C} = \frac{3.5\%}{1 + (-5\%)} = 3.68\%$$

$$Si_{\text{炉料}} = \frac{Si_{\text{计}}}{1 + \eta_{Si}} = \frac{2.2\%}{1 + (+2\%)} = 2.16\%$$

$$Mn_{\text{炉料}} = \frac{Mn_{\text{计}}}{1 + \eta_{Mn}} = \frac{0.4\%}{1 + (-15\%)} = 0.47\%$$

$$P_{\text{炉料}} = \frac{P_{\text{计}}}{1 + \eta_p} = \frac{0.06\%}{1 + (0)} = 0.06\%$$

$$S_{\text{炉料}} = \frac{S_{\text{计}}}{1 + \eta_s} = \frac{0.02\%}{1 + (0)} = 0.02\%$$

(3) 根据铸铁配料计算公式建立二元一次联立方程式求解 设本溪生铁配入比例为 x , 本厂回炉料配入比例为 y , 废钢比例为 30%。先以炉料配入 C 计算, 建立方程式:

$$\begin{cases} 4.3\% \times x + 3.6\% \times y + 0.3\% \times 30 = 3.68\% \\ x + y + 30 = 100 \end{cases}$$

整理联立方程式后

$$\begin{cases} 4.3 \times x + 3.6 \times y = 278 \\ x + y = 70\% \end{cases}$$

解联立方程式

$$x = 70\% - y \text{ 代入方程式 } 4.3 \times (70\% - y) + 3.6 \times y = 278$$

$$\text{解得 } y = 32.85\%$$

$$x = 70\% - 32.85\% = 37.15\%$$

即本溪生铁 P10 配入比例为 37.15%; 本厂回炉料配入比例为 32.85%; 废钢配入比例为 30%。

(4) 计算各种配入炉料带入的 Si 和 Mn 含量, 并计算是否补加 Si 和 Mn

1) Si 量计算:

$$Si_{\text{带合计}} = 1.2\% \times 37.15\% + 2.5\% \times 32.85\% + 0.5\% \times 30\% = 1.42\%$$

$Si_{\text{带合计}} = 1.42\% < Si_{\text{炉料}} = 2.16\%$, 没有达到配入炉料 Si 含量, 需用 SiFe 补加。

$$\text{补加 SiFe 比例} = \frac{Si_{\text{炉料}} - Si_{\text{带合计}}}{75\%} = \frac{2.16\% - 1.42\%}{75\%} = 0.98\%$$

2) Mn 量计算:

$$Mn_{\text{带合计}} = 0.45\% \times 37.15\% + 0.4\% \times 32.85\% + 0.6\% \times 30\% = 0.47\%$$

$Mn_{\text{炉料}} = 0.47\%$, 配入量与炉料 $Mn_{\text{带合计}}$ 相等, 不用补加 Mn。

(5) 计算各种配入炉料带入的 P、S 含量, 并验算是否在控制范围之内

$$P_{\text{带合计}} = 0.07\% \times 37.15\% + 0.07\% \times 32.85\% + 0.06\% \times 30\% = 0.067\%$$

$P_{\text{炉料}} = 0.067\%$, 控制成分 $P < 0.07\%$, 炉料带入 $P = 0.067\%$, 在控制范围之内。

$$S_{\text{带合计}} = 0.05\% \times 37.15\% + 0.03\% \times 32.85\% + 0.03\% \times 30\% = 0.037\%$$

炉料带入 $S = 0.037\%$, 大于计算成分 0.017%, 超出控制含 S 只有 0.007%, 在蠕化处理时采用稀土镁合金, 孕育处理采用 SiFe 合金都有很强脱 S 作用, 能使含量明显下降到合格范围内。

(6) 计算炉料配入质量, 填写配料计算记录 (表 5-22)

表 5-22 配料计算记录 (年 月 日 天气)

| 炉料配比 | 炉料配入质量 |
|-----------------|--|
| 本溪生铁 P10 37.15% | $1000 \times 37.15\% = 371.5\text{kg}$ |
| 本厂回炉料 32.85% | $1000 \times 32.85\% = 328.5\text{kg}$ |
| 废钢 30% | $1000 \times 30\% = 300\text{kg}$ |
| 硅铁 0.98% | $1000 \times 0.98\% = 9.8\text{kg}$ |
| 稀土镁蠕化剂 0.6% | $1000 \times 0.6\% = 6\text{kg}$ |
| SiFe 孕育剂 0.5% | $1000 \times 0.5\% = 5\text{kg}$ |
| 合计 102.08% | 1020.8kg |

例 5-5 熔炼蠕墨铸铁 10t 浇注机车铸件, 采用中频感应炉熔炼, 炉料选用本溪炼钢生铁 L10, 用本厂回炉料和废钢配料。蠕墨铸铁化学成分见表 5-23。

表 5-23 蠕墨铸铁化学成分 (质量分数) (%)

| 元素 | C | Si | Mn | P | S | $\text{Mg} + \frac{1}{3}\text{RE}$ | Ti | Cu | 备注 |
|------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------------|------------------------------------|--------------|-----------|---------|
| 规定成分 | 3.2 ~ 3.8 | 1.0 ~ 1.6 | 0.3 ~ 0.9 | ≤ 0.07 | ≤ 0.05 | — | — | — | 铁素体蠕墨铸铁 |
| 控制成分 | 3.3 ~ 3.8 | 2.0 ~ 3.0 | 0.3 ~ 0.7 | ≤ 0.07 | ≤ 0.03 | 0.015 ~ 0.04 | 0.006 ~ 0.02 | 0.3 ~ 0.6 | — |
| 计算成分 | 3.6 | 1.5 | 0.5 | < 0.05 | < 0.03 | — | — | 0.3 | — |

(1) 炉料化学成分 (表 5-24)

表 5-24 炉料化学成分 (质量分数) (%)

| 炉料 | C | Si | Mn | P | S | Ca | RE | Mg | Ti | 备注 |
|-----------|-----|------|-----|------|------|-------|-----------|-------|----|-----|
| 本溪生铁 L10 | 4.2 | 1.25 | 0.3 | 0.07 | 0.05 | — | — | — | — | — |
| 废钢 | 0.3 | 0.3 | 0.5 | 0.05 | 0.03 | — | — | — | — | — |
| 回炉料 | 3.6 | 1.7 | 0.5 | 0.05 | 0.03 | — | — | — | — | — |
| SiFe | — | 75 | — | — | — | — | — | — | — | 孕育剂 |
| MnFe | — | — | 68 | — | — | — | — | — | — | 变质剂 |
| SiCa | — | 55 | — | — | — | 35 | — | — | — | 变质剂 |
| TiFe | — | — | — | — | — | — | — | — | 30 | 变质剂 |
| RE Mg 球化剂 | — | 40 | — | — | — | 7 ~ 9 | 3.5 ~ 4.5 | 4 ~ 6 | — | 蠕化剂 |

(2) 配料计算 根据生产蠕墨铸铁经验, 结合使用炉料质量品级情况, 确定两种和三种炉料搭配比例, 再试算炉料是否搭配合理, 配碳量是否足够, 如不

足可采用电极碎块增碳补救措施。

本例没有列二元一次联立方程式求解，采用试算法配料计算。

1) 先确定配入废钢 30%，本溪生铁配入 40%，其余为回炉料 30%，试算三种炉料中共配入的 C、Si、Mn、P、S 元素含量。

①先计算 100kg 炉料中 C、Si、Mn、P、S、Cu 含量。

$$\text{理论炉料中含 C 量} = \frac{3.6\%}{1 + (0\%)} \times 100\text{kg} = 3.6\text{kg}$$

$$\text{理论炉料中含 Si 量} = \frac{1.5\%}{1 - 10\%} \times 100\text{kg} = 1.66\text{kg}$$

$$\text{理论炉料中含 Mn 量} = \frac{0.5\%}{1 - 10\%} \times 100\text{kg} = 0.55\text{kg}$$

$$\text{理论炉料中含 P 量} = \frac{0.05\%}{1 + (0\%)} \times 100\text{kg} = 0.05\text{kg}$$

$$\text{理论炉料中含 S 量} = \frac{0.03\%}{1 + (0\%)} \times 100\text{kg} = 0.03\text{kg}$$

$$\text{理论炉料中含 Cu 量} = 0.3\% \times 100\text{kg} = 0.3\text{kg}$$

②计算 40kg 本溪生铁带入（配入）的 C、Si、Mn、P、S 量。

$$\text{生铁中含 C 量} = 4.2\% \times 40\text{kg} = 1.68\text{kg}$$

$$\text{生铁中含 Si 量} = 1.25\% \times 40\text{kg} = 0.50\text{kg}$$

$$\text{生铁中含 Mn 量} = 0.3\% \times 40\text{kg} = 0.12\text{kg}$$

$$\text{生铁中含 P 量} = 0.07\% \times 40\text{kg} = 0.028\text{kg}$$

$$\text{生铁中含 S 量} = 0.05\% \times 40\text{kg} = 0.02\text{kg}$$

③计算 30kg 废钢带入的 C、Si、Mn、P、S 量。

$$\text{废钢中含 C 量} = 0.3\% \times 30\text{kg} = 0.09\text{kg}$$

$$\text{废钢中含 Si 量} = 0.3\% \times 30\text{kg} = 0.09\text{kg}$$

$$\text{废钢中含 Mn 量} = 0.5\% \times 30\text{kg} = 0.15\text{kg}$$

$$\text{废钢中含 P 量} = 0.05\% \times 30\text{kg} = 0.015\text{kg}$$

$$\text{废钢中含 S 量} = 0.03\% \times 30\text{kg} = 0.009\text{kg}$$

④计算 30kg 回炉料带入的 C、Si、Mn、P、S 量

$$\text{回炉料中含 C 量} = 3.6\% \times 30\text{kg} = 1.08\text{kg}$$

$$\text{回炉料中含 Si 量} = 1.7\% \times 30\text{kg} = 0.51\text{kg}$$

$$\text{回炉料中含 Mn 量} = 0.5\% \times 30\text{kg} = 0.15\text{kg}$$

$$\text{回炉料中含 P 量} = 0.05\% \times 30\text{kg} = 0.015\text{kg}$$

$$\text{回炉料中含 S 量} = 0.03\% \times 30\text{kg} = 0.009\text{kg}$$

2) 三种炉料带入（配入）元素量合计。

实际炉料中含 C 量 = $(1.68 + 0.09 + 1.08) \text{ kg} = 2.85 \text{ kg}$

实际炉料中含 Si 量 = $(0.50 + 0.09 + 0.51) \text{ kg} = 1.10 \text{ kg}$

实际炉料中含 Mn 量 = $(0.12 + 0.15 + 0.15) \text{ kg} = 0.42 \text{ kg}$

实际炉料中含 P 量 = $(0.028 + 0.015 + 0.015) \text{ kg} = 0.058 \text{ kg}$

实际炉料中含 S 量 = $(0.02 + 0.009 + 0.009) \text{ kg} = 0.038 \text{ kg}$

3) 计算 100kg 炉料中需要元素含量与三种炉料带入 (配入) 各元素量之差。

理论和实际炉料含 C 量差 = $3.6 \text{ kg} - 2.85 \text{ kg} = 0.75 \text{ kg}$

理论和实际炉料含 Si 量差 = $1.66 \text{ kg} - 1.10 \text{ kg} = 0.56 \text{ kg}$

理论和实际炉料含 Mn 量差 = $0.55 \text{ kg} - 0.42 \text{ kg} = 0.13 \text{ kg}$

理论和实际炉料中含 P 量差 = $0.05 \text{ kg} - 0.058 \text{ kg} = -0.008 \text{ kg}$

理论和实际炉料中含 S 量差 = $0.03 \text{ kg} - 0.038 \text{ kg} = -0.008 \text{ kg}$

理论和实际炉料中含 Cu 量差 = $0.3 \text{ kg} - 0 = 0.3 \text{ kg}$

(3) 三种炉料配入情况 C 量少 0.75kg、Si 少 0.56kg、Mn 少 0.13kg、P 和 S 多 0.008kg、Cu 少 0.3kg，在蠕化处理和孕育剂处理时都有脱 P、S 效果，使 P、S 含量合格。在蠕化处理和孕育剂处理时有增 Si 作用。

1) 增碳计算。采用石墨电极块增碳，电极块碳的质量分数为 99.8%，回收率 60%：

$$\text{电极块量} = \frac{0.75}{99.8\% \times 60\%} \text{ kg} = 1.25 \text{ kg}$$

电极块粒度为 0.5~3mm。

2) 补锰计算。采用 MnFe 补 Mn，含 Mn 68%，回收率 95%：

$$\text{MnFe} = \frac{0.13 \text{ kg}}{68\% \times 95\%} = 0.2 \text{ kg}$$

3) 补铜计算。采用电解铜补 Cu，含 Cu 99.9%，回收率 100%：

$$\text{电解铜} = \frac{0.3 \text{ kg}}{99.9\% \times 100\%} = 0.3 \text{ kg}$$

(4) 蠕化剂和孕育剂加入量计算

1) 蠕化剂加入量按 0.6% 加入：

$$\text{REMg 蠕化剂量} = 100 \text{ kg} \times 0.6\% = 0.6 \text{ kg}$$

2) 孕育剂加入量按 0.3% 加入：

$$\text{SiFe 量} = 100 \text{ kg} \times 0.3\% = 0.3 \text{ kg}$$

3) 变质剂加入量按 0.3% 加入：

$$\text{SiCa 量} = 100 \text{ kg} \times 0.3\% = 0.3 \text{ kg}$$

4) 变质剂 TiFe 加入量按 0.2% 加入：

$$\text{TiFe 量} = 100\text{kg} \times 0.2\% = 0.2\text{kg}$$

5) 计算变质剂加入后带入 Si、Ti 量:

$$\text{REMg 带入 Si 量} = 0.6\text{kg} \times 40\% = 0.24\text{kg}$$

$$\text{SiFe 带入 Si 量} = 0.3\text{kg} \times 75\% = 0.22\text{kg}$$

$$\text{SiCa 带入 Si 量} = 0.3\text{kg} \times 55\% = 0.16\text{kg}$$

$$\text{带入 Si 量合计} = 0.24\text{kg} + 0.22\text{kg} + 0.16\text{kg} = 0.62\text{kg}$$

(5) 蠕化处理和孕育处理后铁液中含 Si 量

$$1) \text{炉料中带入 (配入) Si 量} = 1.10\text{kg}$$

$$2) \text{变质剂带入的 Si 量} = 0.62\text{kg}$$

$$\text{铁液含 Si 量} = 1.10\text{kg} + 0.62\text{kg} = 1.72\text{kg}$$

(6) 熔炼 10t 炉料量 (装入量)

本溪生铁 L10 (也可采用球墨铸铁用生铁 Q10 或 Q12)

$$\text{本溪生铁量} = 10000\text{kg} \times 40\% = 4000\text{kg}$$

$$\text{回炉料量} = 10000\text{kg} \times 30\% = 3000\text{kg}$$

$$\text{废钢量} = 10000\text{kg} \times 30\% = 3000\text{kg}$$

$$\text{MnFe 量} = 10000\text{kg} \times 0.2\% = 20\text{kg}$$

$$\text{REMg 量} = 10000\text{kg} \times 0.6\% = 60\text{kg}$$

$$\text{SiFe 量} = 10000\text{kg} \times 0.3\% = 30\text{kg}$$

$$\text{SiCa 量} = 10000\text{kg} \times 0.3\% = 30\text{kg}$$

$$\text{TiFe 量} = 10000\text{kg} \times 0.2\% = 20\text{kg}$$

$$\text{电解铜量} = 10000\text{kg} \times 0.3\% = 30\text{kg}$$

$$\text{质量合计} = 10190\text{kg} = 10.19\text{t}$$

电极碎块量 = $10000\text{kg} \times 1.25\% = 125\text{kg}$, 不计入炉料质量内。

第二篇 铸钢熔炼的配料计算方法

第六章 电弧炉熔炼碳素钢的配料计算

第一节 配料计算的意义、注意事项及原辅材料

一、配料计算的意义

配料计算是熔炼出成分合格的钢液铸出优质铸钢件的关键。熟练地掌握配料计算方法和计算准确可为快速炼钢创造有利条件，对节电及节省原辅材料都有重要意义，所以配料计算是炼好钢的重要一环。

二、配料计算应注意的事项

- 1) 要掌握配料用的原辅材料的化学成分，如各种废钢中碳含量，是否含有其他合金成分等。因为合金钢废料混入时会造成氧化脱碳困难，应予剔除。
- 2) 配碳量要适当。要根据不同熔炼方法来确定，如氧化法应保证有足够的脱碳量，以便去除钢液中的夹杂及气体。一般脱碳量为 0.3% ~ 0.4% 即可。炉料潮湿可为 0.5% 脱碳量，如果采用炉红热装料，第二天熔炼时应适当多配脱碳量，防止热炉碳氧化造成熔清碳不够。
- 3) 一般熔炼碳素钢时，应不少于 0.2% 熔清 Mn。如低于 0.2% 时易造成不必要的过氧化激烈沸腾，必须采取措施，如补加锰铁、加碳等方法补救。
- 4) 熔清硅量不应太高，太高时易造成氧化沸腾时间延长，增加了电耗及炉衬易损坏等。
- 5) 配料计算还必须掌握不同炉子对合金元素的烧损情况及回收率，要摸清炉子情况，找出规律。
- 6) 熔炼合金钢时更要注意合金元素的变化情况和注意节约贵重金属材料。
- 7) 填好配料单。把配料计算数据按配料格式填好，这也是熔炼依据。

三、熔炼碳素钢用铁合金及造渣材料

熔炼碳素钢用铁合金及造渣材料化学成分见表 6-1。表 6-1 中十几种材料均是熔炼碳素钢常用的材料，必须熟知掌握。表中的成分仅作为此配料计算依据，生产中要掌握本厂具体材料成分，以便达到配料计算准确。

表 6-1 熔炼碳素钢用铁合金及造渣材料化学成分 (质量分数) (%)

| 序号 | 材料 | C | Si | Mn | S | P | Al | Fe | 用途 |
|----|------|------------|----------------------------|-----------|-------------|-------------|------|----|----|
| 1 | 生铁 | 3.5 ~ 4.5 | 0.9 ~ 1.5 | 0.5 ~ 0.8 | 0.03 ~ 0.07 | 0.15 ~ 0.35 | — | 余量 | — |
| 2 | 碳素废钢 | 0.25 | 0.23 | 0.45 | 0.04 | 0.04 | — | 余量 | — |
| 3 | 轧钢边头 | 0.15 | 0.30 | 0.50 | 0.025 | 0.03 | — | 余量 | — |
| 4 | 碳素钢屑 | 0.20 | 0.20 | 0.50 | 0.04 | 0.04 | — | 余量 | — |
| 5 | 高碳锰铁 | ≤7.0 | ≤2.0 | ≤76.0 | ≤0.03 | 0.05 | — | 余量 | 脱氧 |
| 6 | 硅铁 1 | — | 70/80 | ≤0.7 | ≤0.04 | ≤0.05 | — | — | 脱氧 |
| 7 | 硅铁 2 | — | 40/47.0 | ≤0.8 | ≤0.04 | ≤0.05 | — | — | 脱氧 |
| 8 | 硅锰合金 | <1.0 | ≥20 | >65 | — | <0.2 | — | — | 脱氧 |
| 9 | 硅钙合金 | — | Si + Ca = 90 | — | 0.04 | 0.05 | ≤2.5 | — | 脱氧 |
| 10 | 铝 | — | 0.02 | — | — | — | 99.6 | — | 脱氧 |
| 11 | 铁矿石 | — | — | — | — | — | — | 55 | 氧化 |
| 12 | 石灰 | CaO15 ~ 18 | — | — | — | — | — | — | 造渣 |
| 13 | 氟石 | CaF55 ~ 65 | SiO ₂ < 3 ~ 8.0 | — | <0.2 | — | — | — | 造渣 |
| 14 | 焦炭粉 | 85.0 | — | — | — | — | — | — | 增碳 |
| 15 | 电极块 | 95.0 | — | — | — | — | — | — | 增碳 |

第二节 熔炼碳素钢的配料计算方法

一、第一种方法

第一种配料计算方法，以 ZG230-450 钢为例。

1. 化学成分和脱碳量

表 6-2 中的化学成分仅为计算所用。根据生产实践证明，熔炼一炉优质钢必须达到 0.3% ~ 0.4% 的脱碳量才行，脱碳量过低和过高都是不利的。为此，熔清钢液中 C 的质量分数以 0.47% ~ 0.57% 为宜，Mn 的质量分数应大于 0.20%，据此进行炉料搭配，即各种废钢占的百分比和生铁配比。一般有个经验数，大体搭配后再详细进行配料计算。

表 6-2 ZG230-450 化学成分 (质量分数) (%)

| 元素 | C | Si | Mn | S | P |
|------|-------------|-------------|-----------|-------|-------|
| 规格成分 | 0.22 ~ 0.32 | 0.20 ~ 0.45 | 0.5 ~ 0.8 | 0.045 | 0.045 |
| 配入成分 | 0.25 | 0.40 | 0.70 | 0.02 | 0.02 |

2. 炉料搭配

本车间废钢（包括废铸件及浇冒口等）占 40%，厂内轧钢边角余料（或外购）占 30%，碳素钢屑占 20%，生铁占 10%。

3. 炉料计算

以 5t 碱性电弧炉每炉炼 8000kg 钢液计算，设炉料总回收率为 95%，则 8t 钢液折合炉料为

$$\text{总炉料量} = \frac{8000}{95\%} \text{kg} = 8421 \text{kg}$$

设熔清钢液中含碳的质量分数应为 0.55%，锰的质量分数为 0.3%，则需要总碳量为

$$\text{含 C 量} = 8000 \text{kg} \times \frac{0.55}{100} = 44 \text{kg}$$

$$\text{含 Mn 量} = 8000 \text{kg} \times \frac{0.3}{100} = 24 \text{kg}$$

4. 炉料中已有 C 和 Mn 的计算

(1) 车间废铸件数量和含碳、锰量

$$\text{废铸件量} = 8421 \text{kg} \times \frac{40}{100} = 3368 \text{kg}$$

$$\text{废件中含 C 量} = 3368 \text{kg} \times \frac{0.25}{100} = 8.42 \text{kg}$$

$$\text{废件中含 Mn 量} = 3368 \text{kg} \times \frac{0.45}{100} = 15.16 \text{kg}$$

(2) 轧钢边角余料量和含碳、锰量

$$\text{轧钢边角余料量} = 8421 \text{kg} \times \frac{30}{100} = 2526 \text{kg, 采用 2500kg}$$

$$\text{边角料含 C 量} = 2500 \text{kg} \times \frac{0.5}{100} = 3.75 \text{kg}$$

$$\text{边角料含 Mn 量} = 2500 \text{kg} \times \frac{0.5}{100} = 12.50 \text{kg}$$

(3) 钢屑量和钢屑中碳和锰

$$\text{钢屑量} = 8421 \text{kg} \times \frac{20}{100} = 1684 \text{kg}$$

$$\text{铁屑中含 C 量} = 1684 \text{kg} \times \frac{0.20}{100} = 3.37 \text{kg}$$

$$\text{铁屑中含 Mn 量} = 1684 \text{kg} \times \frac{0.5}{100} = 8.42 \text{kg}$$

(4) 碳和锰各量总和

$$\text{合计含 C 量} = (8.42 + 3.75 + 3.37) \text{ kg} = 15.54 \text{ kg}$$

$$\text{合计含 Mn 量} = (15.16 + 12.50 + 8.42) \text{ kg} = 36.08 \text{ kg}$$

5. 生铁和锰铁配数

由以上计算可知, 总碳量为 44kg, 而炉料占有的碳量 = 15.54kg, 与计算总量尚差 = (44 - 15.54) kg = 28.46kg, 则相差数量用生铁补加。

$$\text{生铁数} = \frac{28.46}{3.5\%} \text{ kg} = 813.1 \text{ kg}, \text{ 采用 } 810 \text{ kg}.$$

Mn 量需要 24kg, 而炉料中占有 36.08kg, 在熔清前可不补加 MnFe。

6. 总投料数

废铸件量 3368kg; 轧钢边角余料量 2500kg; 钢屑量 1684kg; 生铁量 810kg; 合计 8362kg。

硅量在钢熔清时可不考虑, 在还原期要经计算补加。

7. 还原期调整成分的计算

(1) 碳含量的调整 熔炼 ZG230-450 和 ZG310-570 钢时, 一般在氧化终了时要准确控制钢液碳, 还原期可不补加或不调整碳量, 因为还原期加 MnFe 和焦炭粉可带入碳, 所以一般氧化终了碳的质量分数为 0.17%, 与成品钢碳为 0.25% 相差较少:

相差数 = 0.25% - 0.17% = 0.08%, 由 MnFe 和焦炭粉带入。

一般焦炭粉为 3~5kg/t 钢液, 含碳 85% 的焦炭粉回收率可为 20% (回收率与加入方法及搅拌情况有关), 则焦炭粉带入碳量为

$$C_{\text{焦带入}} = \frac{3 \times 0.85 \times 0.20}{1000} \times 100\% = 0.05\%$$

(2) Mn 量的调整 设还原期化验结果 Mn 的质量分数为 0.4%, 而成品钢 Mn 的质量分数为 0.7%, 则相差数 Mn = 0.7% - 0.4% = 0.3%。

设 MnFe 中 Mn 回收率为 0.85 (MnFe 中 Mn 为 76%), 则 1t 钢液补加 MnFe 量 = $\frac{0.3\% \times 1000}{0.76 \times 0.85} = 4.6 \text{ kg}$, 即 4.6kg/t 钢液。4.6kg 锰铁带入钢液的碳量为

$$C = \frac{4.6 \times 0.07 \times 0.85}{1000} \times 100\% = 0.027\%$$

则还原期总回收碳为

$$C_{\text{回}} = 0.05\% + 0.027\% = 0.077\%$$

如氧化末期钢液中 C 的质量分数为 0.17%, 则还原终了 C_终 = 0.17% + 0.077% = 0.247%, 符合成品钢的要求。

(3) 硅量的调整 配料中的硅由于氧化已基本烧损, 化验结果含微量 Si。

在还原期加 Si 的方法视不同情况而不同。现以加 75SiFe 粉为例，生产中常用 6kg/t 钢液 SiFe 粉，设 Si 的回收率为 60%。

则还原期进入钢液中 Si 量：

$$Si = \frac{6 \times 0.75 \times 0.60}{1000} \times 100\% = 0.27\% \text{, 取 } 0.30\%$$

在还原期焦炭粉还可使 Si 还原一部分，所以可不补加。但为使钢中 Si 的质量分数为 0.4% 时需补加 SiFe 量为（注：出钢前插 Al 块也可使 Si 还原一些，所以一般不按 0.4% 补加，按 0.35%）：

$$SiFe_{块} = \frac{0.35\% - 0.30\%}{0.75 \times 0.80} = 0.08\%$$

即 1000kg 钢液补充 SiFe 块量 = $1000kg \times 0.08\% = 0.8kg$

（4）出钢前铝块的加入量（终脱氧） 生产经验一般为 1kg/t 钢液 Al 量，则 8t 钢需要 8kg 铝块。

二、第二种方法

第二种配料计算方法，采用铁矿石氧化，以 ZG230-450 钢为例，设钢液量 8000kg。

1. 钢液量的确定

要根据车间铸件总质量加上浇注系统总质量和少量钢液裕量，即

$$\text{钢液量} = \text{铸件总重} + \text{浇注系统总重} + \text{少量钢液裕量}$$

2. 矿石加入量

据生产实践，每吨钢液每脱一个碳（0.01% 的 C）用铁矿石 1kg，当钢液脱碳量为 0.30% ~ 0.40%，取脱碳 0.30%，则 8000kg 钢液脱碳 30% 需铁矿石 240kg。

3. 矿石中 Fe 进入钢液量

设矿石中含 Fe 为 50%，回收率为 80%，则矿石中含 Fe 量 = $240kg \times 50\% \times 80\% = 96kg$ 。

4. MnFe 脱氧剂加入量

钢液中 Mn 含量在氧化末期已经很少，但在还原期加硅铁粉和焦炭粉还可以还原 0.25% Mn 量，则补加 MnFe 量为

$$MnFe = \frac{0.70\% - 0.25\%}{0.70 \times 0.85} = 0.756\% \text{, 取 } 0.76\%$$

5. MnFe 进入钢液量

8000kg 钢液需补加 MnFe 量 = $8000kg \times 0.76\% = 60.8kg$ ，取 61kg

$$MnFe \text{ 进入钢液量} = 61kg \times 85\% = 51.8kg \approx 52kg$$

6. 计算配料量

$$\text{配料量} = \frac{8000 - (96 + 52)}{95\%} \text{kg} = 8265 \text{kg}, \text{采用} 8300 \text{kg}$$

注意, 95% 为炉料回收率。

7. 炉料搭配

设废铸件占 40%, 钢屑占 20%, 杂乱废钢占 30%, 余为生铁。

则 废铸件量 = $8300 \text{kg} \times 40\% = 3320 \text{kg}$

杂乱废钢量 = $8300 \text{kg} \times 30\% = 2490 \text{kg}$, 采用 2500kg

钢屑量 = $8300 \text{kg} \times 20\% = 1660 \text{kg}$

8. 炉料化学成分 (表 6-3)

表 6-3 炉料化学成分 (质量分数) (%)

| 序号 | 炉料 | C | Mn |
|----|------|------|------|
| 1 | 废铸件 | 0.25 | 0.60 |
| 2 | 钢屑 | 0.20 | 0.60 |
| 3 | 杂乱废钢 | 0.20 | 0.50 |

9. 配碳量

公式为

$$\text{配碳量} = \frac{\text{配料量} \times (\text{成品钢碳含量} + \text{碳烧损率} + \text{脱碳率})}{\text{配料量}} - \frac{(\text{加入炉料或铁含量} \times \text{该炉料或合金碳量})}{\text{配料量}}$$

$$\text{则 配碳量} = \frac{8300 \times (0.25\% + 0.15\% + 0.30\%)}{8300} - \frac{(3320 \times 0.25\% + 1660 \times 0.20\% + 2500 \times 0.20\%)}{8300} = 0.50\%$$

10. 生铁加入量

公式为

$$\text{生铁加入量} = \frac{\text{配料量} \times \text{配碳量} - (\text{各种炉料碳量之和})}{\text{生铁碳含量} - (\text{各炉料碳含量之和})}$$

$$\text{本例生铁加入量} = \frac{8300 \times 0.50\% - (3320 \times 0.25\% + 1660 \times 0.20\% + 2500 \times 0.20\%)}{4.0\% - (0.25\% + 0.20\% + 0.20\%)} \text{kg}$$

$$= \frac{24.88}{3.35\%} \text{kg} = 742.6 \text{kg} \approx 750 \text{kg}$$

11. 硅铁加入量

公式为

$$\text{硅铁加入量} = \frac{\text{钢液量} \times (\text{成品钢硅含量} - \text{炉内残存硅含量})}{\text{硅铁含 Si 量} \times \text{硅铁回收率}}$$

$$\text{本例硅铁加入量} = \frac{8000\text{kg} \times (0.30\% - 0.10\%)}{75\% \times 70\%} = \frac{16\text{kg}}{0.525} = 30.46\text{kg} \approx 30\text{kg}$$

12. 硅铁进入钢液量

设 80% 为回收率，则

$$\text{SiFe 进入量} = 30\text{kg} \times 80\% = 24.0\text{kg}$$

13. 装入量

装入量即炼钢中所加金属材料之和。

$$\text{装入量} = (8300 + 96 + 61 + 30)\text{kg} = 8487\text{kg}$$

14. 出钢量

$$\text{出钢量} = \text{装入量} \times \text{综合回收率}$$

$$\text{出钢量} = 8487\text{kg} \times 95\% = 8062\text{kg}$$

15. 验算熔清时碳含量

$$\begin{aligned} C_{\text{熔清}} &= \frac{750\text{kg} \times 4\% + 3320\text{kg} \times 0.25\% + 1660\text{kg} \times 0.2\% + 2500\text{kg} \times 0.20\%}{8300\text{kg}} \\ &= 0.56\% \end{aligned}$$

实际上在加热熔清时碳烧损约 15%，则实际熔清碳含量 = 0.56% - 0.56% × 15% = 0.476% ≈ 0.48%。

16. 氧化脱碳计算

采用铁矿石氧化，是利用铁矿石含 Fe_2O_3 80% ~ 90% 的赤铁矿石提供 FeO 和“O”，氧化 C、Si、Mn、Cr、P 等。

计算 1kg 赤铁矿石化学反应式可生成 FeO 量和 O 量：



$$\begin{array}{ccc} 160 & & 216 \\ 1 \times 85\% & & x_1 \end{array}$$

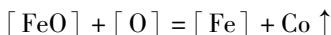
$$x_1 = \frac{216 \times 1 \times 85\%}{160} = 1.148\text{kg} \quad (\text{FeO})$$

$$(\text{FeO}) = [\text{Fe}] + [\text{O}]$$

$$\begin{array}{ccc} 72 & & 16 \\ 1.148 & & x_2 \end{array}$$

$$x_2 = \frac{16 \times 1.148\%}{72} = 0.255\text{kg} \quad [\text{O}]$$

氧化脱 C 量按 0.6% 计算，1t 钢液氧化 C = $1000\text{kg} \times 0.6\% = 6\text{kg}$ ，需要 FeO 量



72 12

x_3 6

$$x_3 = \frac{72 \times 6}{12} = 36 \text{ kg/t 钢}$$

$$\text{折算成赤铁矿石} = \frac{36}{1.148} = 31.36 \text{ kg/t 钢}$$

氧化 0.6% C, 1t 钢液需要赤铁矿石 31.36kg。

氧化 Si、Mn、Cr、P 等同样列出化学反应式计算赤铁矿石需要量从略。

这是按平衡条件计算的理论值, 实际炼钢生产中氧化 0.01% C (碳), 按 1t 钢液加入 1 ~ 1.5kg 赤铁矿石计算。熔炼高合金钢氧化 C、Si、Mn、Cr 等元素采用高压 0.4 ~ 0.8MPa 或 0.8 ~ 1.5MPa 氧气氧化。

国内有的工厂 (公司) 熔炼超低碳 [$w(\text{C}) = 0.02\% \sim 0.06\%$] 高合金不锈钢耐蚀钢, 采用先进的 AOD 氩氧精炼炉双联氧化脱碳, 并补加合金材料。如原沈阳高中压阀门厂采用国产 AOD 炉双联熔炼; 原沈阳水泵厂 5t 电弧炉熔炼不锈钢液转到引进美国产 3t AOD 炉精炼, 钢液成分稳定, 达到优质钢液水平, 已用于浇注各种不锈钢耐蚀超低碳钢铸件。

第七章 电弧炉熔炼合金钢的配料计算

第一节 采用氧化法熔炼高合金钢的配料计算

一、采用氧化法熔炼高合金钢配料计算注意事项

(1) 配碳量的确定 据生产经验要有适当的脱碳量才能熔炼出好钢液，因为钢液温度要求高达 1600°C 才能进行脱碳，而钢中含有大量的多种元素，所以用矿石氧化脱碳是很慢而且是不允许的，要用高压氧气吹入脱碳才能进行。吹氧脱碳速度是很快的，所以要有适当的脱碳量才使钢液中气体杂质少，元素烧损少。一般脱碳量以 $0.40\% \sim 0.50\%$ 为好。

如果用低碳软铁和低 S 废钢件配料，熔清碳达不到 0.30% ，必须随炉料加电极块（头）或用冶金焦炭来增碳，目前多用坏电极头增碳。熔清碳够时必须扒除电极头。

(2) 熔清合金元素的确定

1) Cr 的确定。因为含 Cr 量太高氧化时温度高，Cr 烧损严重，而元素氧化顺序为 Ti、Al、Si、Mn、C、Cr、Ni 等，C 氧化是在高温下进行的，C 氧化，Cr 也随之氧化，只是 Cr 氧化速度小于 C 而已，如果含 Cr 量低使还原期加 CrFe 太多，使钢液温度降低过多，还会使气体和杂质随之带入，所以一般 Cr 的质量分数为 $12\% \sim 14\%$ 。

2) Ni 量确定。Ni 氧化很少，可当作不氧化元素看待，所以在氧化时不计 Ni 的影响，但由于 Ni 熔点高，还原期加入是不利的，一般在装料时加入。

3) Si、Mn 含量一般不考虑。但 Si、Mn 氧化时放出大量热，对钢液提温有利，所以有的工厂在氧化前几分钟向炉内加十几千克 SiFe 块，也可使 Si、Ni 烧损少。

(3) S、P 的确定 用返回氧化法熔炼最大问题是控制 S、P 的回升问题，在出钢前加 SiFe 和稀土合金有去除 S、P 作用，但去除 S、P 效果多大尚缺少数字说明，所以配料时一定要严加注意，因为返回料在高温重溶过程中 P 回升更为严重，所以在还原期要造好渣以便去除 P 和少加含 P 高的炉料。

(4) 配 N（氮）的注意问题 如果熔炼含 N 的钢种，配 N 要小心，在目前生产工艺过程情况下，N 配入过高易使铸钢件产生气孔，当然产生气孔原因是复

杂的，而在熔炼中 N 随温度高低有变化，不要轻易补加 N，如果配入 N 太低，还原末期加 N 会造成麻烦，应一次加完为好。另外，返回料中 N 有回收率，要掌握生产实际情况，一般可按 30% ~ 40% 回收率。

(5) 合金炉料综合回收率 合金炉料综合回收率按 95% 计算。

(6) 要掌握各种材料的化学成分 凡所加材料如铁料和合金料均要清楚化学成分，一方面要为计算作依据，同时防止误加成分不清的炉料。由于合金钢成分复杂，用合金铁料也多，而且合金材料价格又昂贵，所以既要达到成分合格，又要注意节约合金材料。

(7) 填写配料单 熔炼合金钢应填好配料单（或至少填好炉料汇总表），作为熔炼重要依据。

二、相关数据表

为进行配料计算，列举了合金钢配料用相关表格，重在掌握配料计算方法。

(1) 合金钢化学成分（表 7-1）

表 7-1 合金钢化学成分（质量分数） (%)

| 序号 | 牌号 | C | Si | Mn | S | P | Cr | Ni | Mo | Cu | Ti | N | 备注 |
|----|--------------------|-------------|-----------|-------------|--------|--------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------------|-------------|---------|
| 1 | ZG20Cr13 | 0.16 ~ 0.24 | ≤1.0 | ≤0.6 | ≤0.03 | ≤0.04 | 12.0 ~ 14.0 | — | — | — | — | — | 耐蚀铸件 |
| 2 | ZG08Cr18Ni9Ti | ≤0.08 | ≤1.5 | 0.8 ~ 2.0 | ≤0.03 | ≤0.04 | 17.0 ~ 20.0 | 8.0 ~ 11.0 | — | — | 5(Co.02 ~ 0.7) | — | 耐蚀不锈钢铸件 |
| 3 | ZG12Cr18Ni9Ti | ≤0.12 | 1.5 | 0.8 ~ 2.0 | ≤0.03 | ≤0.04 | 17.0 ~ 20.0 | 8.0 ~ 11.0 | — | — | 5(Co.03 ~ 0.80) | — | 耐蚀不锈钢铸件 |
| 4 | ZG08Cr18Ni12Mo2Ti | ≤0.08 | ≤1.5 | 0.8 ~ 2.0 | ≤0.03 | ≤0.040 | 16.0 ~ 19.0 | 11.0 ~ 13.0 | 2.0 ~ 3.0 | — | 5(Co.02 ~ 0.70) | — | 耐蚀不锈钢铸件 |
| | ZG12Cr18Ni12Mo2Ti | ≤0.12 | | 0.045 | | — | — | — | — | — | — | — | 阀门 |
| 5 | ZG12Cr18Mn13Mo2CuN | ≤0.12 | ≤1.5 | 12.0 ~ 14.0 | ≤0.035 | ≤0.06 | 17.0 ~ 20.0 | — | 1.5 ~ 2.0 | 1.0 ~ 1.5 | — | 0.19 ~ 0.26 | 耐蚀阀门铸件 |
| 6 | ZG40CrNiMo | 0.37 ~ 0.44 | 0.4 ~ 0.8 | 0.5 ~ 0.8 | ≤0.04 | ≤0.04 | 0.6 ~ 0.9 | 1.20 ~ 1.70 | 0.15 ~ 0.25 | — | — | — | 结构铸件 |
| 7 | ZG12Cr18Ni9 | 0.12 | 1.5 | 0.8 ~ 2.0 | 0.03 | 0.045 | 17.0 ~ 20.0 | 8.0 ~ 11.0 | — | — | — | — | 耐蚀不锈钢阀门 |
| 8 | ZG07Cr19Ni9 | 0.07 | 1.5 | 1.5 | 0.04 | 0.03 | 18.0 ~ 21.0 | 8.0 ~ 11.0 | — | — | — | — | 耐蚀不锈钢 |
| 9 | ZG03Cr19Ni11Mo2 | 0.03 | 1.5 | 1.5 | 0.04 | 0.03 | 17.0 ~ 20.0 | 9.0 ~ 12.0 | 2.0 ~ 2.5 | — | — | — | 耐蚀不锈钢 |
| 10 | ZG03Cr19Ni11Mo3N | 0.03 | 1.5 | 1.5 | 0.04 | 0.03 | 17.0 ~ 20.0 | 9.0 ~ 12.0 | 3.0 ~ 3.5 | — | — | 0.10 ~ 0.20 | 耐蚀不锈钢 |

注：参照通用阀门不锈钢铸件技术条件(GB/T 12230—2005) 和耐蚀钢铸件(GB/T 2100—2002) 标准。

(2) 合金材料化学成分（表 7-2）

表 7-2 合金材料化学成分 (质量分数) (%)

| 序号 | 名称 | 牌号 | C | Si | Mn | Cr | Ni | Mo | Ti | Cu | Ca | Al | P≤ | S≤ | N | RE | Fe | 备注 |
|----|--------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------|-------------|-------------|-------|-------|--------|-------|--------|------------|---------|-------|-------------------|
| 1 | 微碳铬铁 | FeCr65C0.03 | 0.03 | 1.00 | — | 60.0 ~ 70.0 | — | — | — | — | — | — | 0.03 | 0.025 | — | — | — | 摘自 GB/T 5683—2008 |
| 2 | 微碳铬铁 | FeCr65C0.06 | 0.06 | 1.00 | — | 60.0 ~ 70.0 | — | — | — | — | — | — | 0.03 | 0.025 | — | — | — | — |
| 3 | 微碳铬铁 | FeCr65C0.10 | 0.10 | 1.00 | — | 60.0 ~ 70.0 | — | — | — | — | — | — | 0.03 | 0.025 | — | — | — | — |
| 4 | 低碳铬铁 | FeCr65C0.25 | 0.25 | 1.50 | — | 60.0 ~ 70.0 | — | — | — | — | — | — | 0.03 | 0.025 | — | — | — | — |
| 5 | 中碳铬铁 | FeCr65C1.00 | 1.00 | 1.50 | — | 60.0 ~ 70.0 | — | — | — | — | — | — | 0.03 | 0.025 | — | — | — | — |
| 6 | 高碳铬铁 | FeCr67C6.00 | 6.00 | 3.00 | — | 60.0 ~ 72.0 | — | — | — | — | — | — | 0.03 | 0.04 | — | — | — | — |
| 7 | 氮化铬铁 | FeNCr3-A-B | 0.03 0.06 | 1.50 2.50 | — | 60.0 ~ 70.0 | — | — | — | — | — | — | 0.03 | 0.04 | 3.0 5.0 | — | — | A、B 两种 |
| 8 | 氮化锰铁 | FeMnN-A | 0.10 0.50 | 1.00 2.00 | 80.0 | — | — | — | — | — | — | — | 0.03 | 0.02 | 5.0 | — | — | — |
| 9 | 金属锰 | JMn97-A | 0.08 | 0.40 | ≥97.0 | — | ≤0.02 | — | — | ≤0.03 | — | — | 0.04 | 0.04 | — | — | ≤2.0 | — |
| 10 | 电解锰 | DJMnB | 0.02 | 0.004 | 99.80 | — | — | — | — | — | — | — | 0.02 | 0.02 | — | — | ≤0.01 | — |
| 11 | 高碳锰 | FeMn78C8.0 | 8.00 7.50 | 1.50 | 78.0 ~ 82.0 | — | — | — | — | — | — | — | 0.25 | 0.03 | — | — | — | — |
| 12 | 低碳锰 | FeMn88C0.2 | 0.20 | 1.0 | 85.0 ~ 92.0 | — | — | — | — | — | — | — | 0.10 | 0.02 | — | — | — | — |
| 13 | 钼铁 | FeMo70 | 0.10 | 2.0 | — | — | — | 65.0 ~ 75.0 | — | 0.50 | — | — | 0.05 | 0.08 | — | — | 余量 | — |
| 14 | 电解镍 | Ni9990 | 0.01 | 0.02 | — | — | 99.90 | — | — | — | — | — | 0.001 | 0.001 | — | — | 0.02 | — |
| 15 | 电解铜 | Cu99.95 | — | — | — | — | ≤0.002 | — | — | — | — | — | 0.001 | 0.0025 | — | — | — | — |
| 16 | 低碳硅铁、粉 | FeSi77Al01A | 0.03 | 76.0 ~ 80.0 | ≤0.10 | ≤0.05 | ≤0.10 | — | ≤0.05 | ≤0.10 | — | 0.10 | 0.04 | 0.003 | — | — | — | — |
| 17 | 稀土合金 | 1950 ~ 26 | — | 43.0 | 2.50 | — | — | — | 2.0 | — | 5.0 | — | — | — | — | 24 ~ 27 | 余量 | Ce/RE≥46 |
| 18 | 硅钙合金粉 | Ca28Si60 | 1.20 | 50.0 ~ 65.0 | — | — | — | — | — | — | >28.0 | — | 0.04 | 0.04 | — | — | 余量 | — |
| 19 | 钛铁 | FeTi30 | — | 4.5 | 2.5 | — | — | — | 30.0 ~ 35.0 | — | — | 8.0 | 0.05 | 0.02 | — | — | — | — |
| 20 | 铝、铝粉 | Al99.80 | — | ≤0.10 | — | — | — | — | — | ≤0.01 | ≤0.03 | ≥99.80 | 0.001 | — | — | — | ≤0.15 | — |

注：本表仅列出了一小部分合金材料的化学成分，应根据当时供给的合金材料成分的化验单确定配料。

(3) 返回料合金元素回收率 (表 7-3)

表 7-3 返回料合金元素回收率 (%)

| 序号 | 牌号 | Mn | Cr | Ni | Mo | Cu | N | 备注 |
|----|--------------------|----|----|----|----|----|-------|--------|
| 1 | ZG12Cr18Ni9Ti | 65 | 85 | 95 | — | — | — | Ti 不考虑 |
| 2 | ZG12Cr18Mn13Mo2CuN | 65 | 85 | — | 95 | 95 | 30/40 | — |
| 3 | ZG08Cr18Ni12Mo2Ti | 65 | 85 | 95 | 95 | — | — | — |
| 4 | ZG20Cr13 | — | 90 | — | — | — | — | — |

注：熔炼合金钢种类牌号很多，此表仅列出几种常用主要合金钢返回料。

(4) 合金铁元素回收率 (表 7-4)

表 7-4 合金铁元素回收率仅供参考 (%)

| 序号 | 加入时期 名 称 | 装料 | 熔化 | 氧化 | 扒渣 | 还原 | 出钢 | 包中 | 备注 |
|----|-------------|-----------------|-------|-------|---------|--------------------|-------|-------|--------------|
| 1 | 电极块 | 75 | — | — | 70~80 | — | — | — | — |
| 2 | 焦炭粉 | — | — | — | 40~50 | — | — | 40~60 | — |
| 3 | 合金铁带入碳 | — | — | — | 95~98 | 100 | 100 | — | — |
| 4 | 生铁 | — | — | — | — | 100 | — | — | 不超过 10% |
| 5 | 硅铁 75 | — | — | — | 60~80 | 92~95 | 95~97 | — | 含 Si 72%~78% |
| 6 | 硅铁粉 | — | — | — | 35~55 | — | — | — | — |
| 7 | 合金铁带入硅 | — | — | — | — | 10~50 | 70~90 | — | — |
| 8 | 硅钙 | — | — | — | — | Si≤30 | — | ≤40 | — |
| 9 | 硅钙粉 | — | — | — | — | Si≤30 | — | — | — |
| 10 | 铝块 | — | — | — | ≤20 | 30~40 | 90 | 70~80 | — |
| 11 | 铝粉 | — | — | — | ≤20 | — | — | — | — |
| 12 | 高碳锰铁 | 30~70 | 65~70 | 30~85 | 85~95 | 95~98 | 95~99 | — | — |
| 13 | 中碳锰铁 | — | — | 40~60 | 85~95 | 90~95 | 95~98 | — | — |
| 14 | 电解锰 | — | — | — | — | 95~98 | 97~99 | — | — |
| 15 | 金属锰 | — | — | — | — | 95~97 | 95~98 | — | — |
| 16 | 高碳铬 | 70~90 | — | — | 95~98 | — | — | — | — |
| 17 | 低碳铬 | 70~90、 95~98 | — | — | 90~95 | 90~98、 90~97 | — | — | — |
| 18 | 微碳铬 | 新料法 | — | — | Cr99~95 | Cr95~98 | — | — | — |
| 19 | 氮化铬 | — | — | — | — | Cr90~95、 N85~95 | — | — | — |

(续)

| 序号 | 加入时期 名 称 | 装料 | 熔化 | 氧化 | 扒渣 | 还原 | 出钢 | 包中 | 备注 |
|----|-------------|-------|-------|-------|----|--------------------|--------|-------|----|
| 20 | 镍板 | 95~98 | — | 96~98 | — | 99~100 | — | — | — |
| 21 | 钼铁 | 95~96 | 95~97 | — | — | 97~98 | — | — | — |
| 22 | 钒铁 | — | — | — | — | — | 95~98 | — | — |
| 23 | 钛铁 | — | — | — | — | — | 60~75 | — | — |
| 24 | 电解铜 | 95~98 | — | — | — | 95~98 | 95~100 | — | — |
| 25 | 稀土合金 | — | — | — | — | — | — | 30~40 | — |
| 26 | 氮化锰 | — | — | — | — | N80~90、 Mn90~95 | — | — | — |

第二节 电弧炉熔炼合金钢的配料计算方法和实例

一、熔炼 ZG12Cr18Ni9Ti 耐酸不锈钢配料计算方法

例 7-1 熔炼 ZG12Cr18Ni9Ti 不锈钢配料计算实例

- 1) 采用新料氧化法。由于采用较纯的炉料，故脱碳量未加考虑。
- 2) ZG12Cr18Ni9Ti 钢化学成分见表 7-5。

表 7-5 ZG12Cr18Ni9Ti 钢化学成分 (质量分数) (%)

| | C | Si | Mn | Cr | Ni | Ti | S | P |
|----|-------|-------|---------|---------|----------|-----------------------|-------|-------|
| 规格 | ≤0.12 | ≤1.50 | 0.8~2.0 | 17~20.0 | 8.0~11.0 | 5 (C: 0.03 ~ 0.80) | ≤0.03 | ≤0.04 |
| 配入 | — | — | 1.0 | 19.0 | 8.6 | 0.5 | — | — |
| 控制 | <0.08 | 0.6 | 1.0 | 19.0 | 9.0 | 0.6 | <0.03 | <0.03 |

- 3) 钢液量。设钢液量为 6000kg。
- 4) 对低碳钢的要求。要求 P 的质量分数在 0.03 以下的低 P 钢或废钢，如轧钢边角余料 (一般含 P 低) 或工业纯铁可炼更高质量的钢。
- 5) 采用合金材料见表 7-2。
- 6) 决定各元素烧损量。正确的决定各元素烧损量是配料计算的关键，要根据不同电炉采用不同熔炼方法找出各元素烧损值。此计算见表 7-6。

表 7-6 元素烧损 (质量分数) (%)

| 元素 | Si | Mn | Cr | Ni | Ti | Fe | 注 |
|----|-------|----|-----|-----|-------|----|--------|
| 烧损 | 粉状 40 | 5 | 1~5 | 0~1 | 30~40 | 5 | 指还原期加入 |

7) 计算合金材料加入量:

①Ni 加入量:

$$\text{Ni 加入量} = \frac{6000\text{kg} \times 8.60\%}{99.9\% \times 99.0\%} = 521.7\text{kg} \approx 520\text{kg}$$

②FeCr65C0.03 加入量。钢液中含 Cr0.5% 以下时不计算在内。

$$\text{FeCr65C0.03 加入量} = \frac{6000\text{kg} \times 19.0\%}{70.0\% \times 98\%} = 1662\text{kg}$$

③JMn[⊖]加入量。原钢液中含 Mn 为 0.15%，则补加:

$$\text{JMn96 加入量} = \frac{6000\text{kg} (1.0\% - 0.15\%)}{96\% \times 95\%} = 56\text{kg}$$

④TiFe 加入量:

$$\text{TiFe 加入量} = \frac{6000\text{kg} \times 0.5\%}{30.6\% \times 70\%} = 140\text{kg}$$

⑤FeCr65C0.03 和 TiFe 带入的 Si 量:

$$\text{FeCr65C0.03 中含 Si 量} = 1662\text{kg} \times 1.1\% = 18.3\text{kg}$$

$$\text{TiFe 中含 Si 量} = 140\text{kg} \times 5.0\% = 7.0\text{kg}$$

$$\text{合计含 Si 量} = 18.3\text{kg} + 7\text{kg} = 25.3\text{kg}$$

设 Si 烧损率为 10%，则回收率为 90%

则 25.3kgSi 进入钢液中 Si

$$\text{Si} = \frac{25.3\text{kg} \times 90\%}{6000\text{kg}} \times 100\% = 0.38\%$$

配料钢液 Si 量小于控制成分，在加 Al 粉过程中，还可使渣中 Si 还原进入钢液，故可暂不补加 Si，要根据还原期化验结果确定是否加 Si。

8) 计算低 P 钢加入量。所加铁合金材料之和（去掉烧损）:

$$\begin{aligned} \text{合金材料量总和} &= \text{Ni 加入量} + \text{FeCr65C0.03 加入量} + \text{JMn96 加入量} + \text{TiFe 加入量} \\ &= (520 + 1662 \times 98\% + 140 \times 70\% + 56 \times 95\%) \text{kg} \\ &= 2300\text{kg, 为钢液量} \end{aligned}$$

则 补加低 P 钢 = $\frac{(6000 - 2300)\text{kg}}{95\%} = 3895\text{kg}$, 采用 4000kg

9) 计算装料量（指氧化前加入炉内料）:

$$\text{装料量} = (520 + 4000)\text{kg} = 4520\text{kg}$$

10) 计算熔清 Ni 含量:

$$\text{Ni} = \frac{520\text{kg}}{4520\text{kg}} \times 100\% = 11.5\%$$

11) 炉料化学成分及质量见表 7-7。

⊖ JMn 为金属锰。

表 7-7 炉料化学成分 (质量分数) 及质量

| 序号 | 炉料名称 | 质量 /kg | C | | Si | | Mn | | Cr | | Ni | | Ti | | 备注 |
|----|-------------|--------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | | | 含量 (%) | 数量 /kg | 含量 (%) | 数量 /kg | 含量 (%) | 数量 /kg | 含量 (%) | 数量 /kg | 含量 (%) | 数量 /kg | 含量 (%) | 数量 /kg | |
| 1 | 装料 | 4520 | 0.05 ^① | 2.26 | 0.05 | 2.26 | 0.15 | 6.78 | — | 11.5 | 520 | 无 | — | — | |
| 2 | FeCr65C0.03 | 1662 | 0.030 | 0.50 | 1.1 | 18.30 | 0.4 | 6.64 | 70.0 | 1163.4 | — | — | — | — | 还原期加入 |
| 3 | JMn96 | 56 | 0.06 | 0.03 | 0.3 | 0.10 | 96.0 | 53.76 | — | — | — | — | — | — | 还原期加入 |
| 4 | TiFe | 140 | 0.06 | 0.08 | — | — | — | — | — | — | — | 30.6 | 42.8 | 出钢前加入 | |
| 5 | Al 块 | 10 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 氧化完加入 |
| 6 | 合计 | 6388 | — | 2.87 | — | 20.66 | — | 67.18 | — | 1163.4 | — | 520 | — | 42.8 | — |
| 7 | 折合成分 | — | — | 0.048 | — | 0.34 | — | 1.12 | — | 19.4 ^② | — | 8.66 | — | 0.7 | — |
| 8 | Al 粉 | 50 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 9 | SiCa 粉 | 120 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

① 是指氧化完 C 含量。

② 是指元素未计烧损时 6000kg 钢液 Cr 含量。例: $Cr = \frac{1163.4}{6000} = 19.4\%$ 。

例 7-2 熔化 ZG12Cr18Ni9Ti 返回氧化法实例

1) ZG12Cr18Ni9Ti 钢化学成分配入量和控制成分见表 7-8。

表 7-8 ZG12Cr18Ni9Ti 化学成分及配入量和控制成分 (质量分数) (%)

| 元 素 | C | Si | Mn | Cr | Ni | S | P | Ti |
|------|-------|------|-----------|-------------|------------|-------|-------|-----------------|
| 规格成分 | ≤0.12 | ≤1.5 | 0.8 ~ 2.0 | 17.0 ~ 20.0 | 8.0 ~ 11.0 | ≤0.03 | ≤0.04 | 5(C0.03 ~ 0.80) |
| 配入成分 | ≤0.50 | — | 1.0 | 18.5 | 9.5 | — | — | 0.6 |
| 控制成分 | ≤0.10 | <1.5 | 1.0 ~ 1.5 | 19.0 | 10.0 | <0.03 | <0.04 | 0.7 |

注: 熔清碳含量为 0.5%, 脱碳量为 0.4% ~ 0.45%, 硅量已由加入的合金铁及 SiCa 粉中可得 20% ~ 30% 的 Si 量, 所以不另加 SiFe。

2) 钢液量按 6000kg 计算。

3) 装入量按综合回收率为 95% 算,

$$\text{则 炉料装入量} = \frac{6000}{95\%} \text{kg} = 6315 \text{kg} \approx 6300 \text{kg}$$

4) 返回料配比选为 60%,

$$\text{则 返回料量} = 6300 \text{kg} \times 60\% = 3780 \text{kg} \approx 3800 \text{kg}$$

5) 入炉需要纯合金元素量:

$$\text{理论含 Cr 量} = 6000 \text{kg} \times 18.5\% = 1110 \text{kg}$$

$$\text{理论含 Ni 量} = 6000 \text{kg} \times 9.5\% = 570 \text{kg}$$

$$\text{理论含 Mn 量} = 6000 \text{kg} \times 1.0\% = 60 \text{kg}$$

$$\text{理论含 Ti 量} = 6000 \text{kg} \times 0.6\% = 36 \text{kg}$$

6) 返回料中带入炉内纯合金元素含量 (质量分数) Cr18.5%、Ni9.0%、Mn0.8%，经验回收率为 Cr85%、Ni95%~100%、Mn65%。

$$\text{则 带入 Cr 量} = 3800 \text{kg} \times 18.5\% \times 85\% = 703 \text{kg} \times 85\% = 597.6 \text{kg} \approx 600 \text{kg}$$

$$\text{带入 Ni 量} = 3800 \text{kg} \times 9.0\% \times 100\% = 342 \text{kg}$$

$$\text{带入 Mn 量} = 3800 \text{kg} \times 0.8\% \times 65\% = 30.4 \text{kg} \times 65\% = 19.8 \text{kg} \approx 20 \text{kg}$$

7) 需要铁合金量:

$$\text{FeCr65C0.03 量} = \frac{(1110 - 600) \text{kg}}{62\% \times 95\%} = 866 \text{kg}$$

注: 62% 为 FeCr65C0.03 铬铁中 Cr 含量。

$$\text{JMn96 量} = \frac{(60 - 20) \text{kg}}{96\% \times 95\%} = 44 \text{kg}, \text{实际加 40kg}$$

$$\text{Ni 量} = \frac{(570 - 342) \text{kg}}{99.9\% \times 100\%} = 228 \text{kg}$$

$$\text{TiFe 量} = \frac{36 \text{kg}}{30\% \times 70\%} = 171 \text{kg}, \text{实际加 150kg}$$

$$\text{纯稀土量} = 6000 \text{kg} \times 0.2\% = 12 \text{kg}$$

$$\text{折合稀土合金量} = \frac{12 \text{kg}}{20.9\% \times 100\%} = 57 \text{kg}$$

注: 20.9% 是稀土合金中 Ce 含量, 在炼钢中, 钢液含 Si 量高时可少加稀土合金, 防止 Si 超量。

8) Al 块每吨钢液要加 1.5~2kg, 6000kg 钢液按 10kg 加。

9) 低 S、P 钢配入量 (或称软铁, 或简称低 P 钢):

$$\begin{aligned} \text{低 S、P 钢量} &= (6300 - 3800 - 866 - 228 - 150 - 40 - 57 - 10) \text{kg} \\ &= 1149 \text{kg}, \text{实际加 1200kg} \end{aligned}$$

10) 造渣脱氧用粉状合金料:

$$\text{SiCa 粉加入比例} = 10 \text{kg/t 钢} \text{ (经验数)}$$

$$\text{则} \quad \text{SiCa 粉加入量} = 10 \text{kg/t} \times 6 \text{t} = 60 \text{kg}$$

$$\text{Al 粉加入比例} = 10 \text{kg/t 钢} \text{ (经验数)}$$

$$\text{则} \quad \text{Al 粉加入量} = 10 \text{kg/t} \times 6 \text{t} = 60 \text{kg}$$

11) 氧化前装料量 [同时把电极块 (配碳用) 加入]:

$$\text{装料量} = (3800 + 1200 + 228) \text{kg} = 5228 \text{kg}$$

12) 计算熔清时钢液含合金元素量:

$$Cr = \frac{703\text{kg}}{5228\text{kg}} \times 100\% = 13.4\%$$

注：703kg 是由 3800kg 返回料中含 Cr18.5% 计算而来的。

$$Ni = \frac{570\text{kg}}{5228\text{kg}} \times 100\% = 10.9\%$$

注：570kg 是 3800kg 返回料中含 Ni 量 342kg 加上加入的 Ni 量 228kg，即 $(342 + 228)\text{kg} = 570\text{kg}$ 。

$$Mn = \frac{30.4}{5228} \times 100\% = 0.58\%$$

13) 钢液熔清化验分析结果 (质量分数)：

$$Cr = 12.5\% \quad Ni = 10.8\% \quad Mn = 0.75\% \quad C = 0.36\%.$$

14) 炉后化验分析结果 (质量分数, %)：

$$C = 0.06 \quad Si = 0.93 \quad Mn = 1.36 \quad Cr = 18.8 \quad Ni = 9.5 \\ Ti = 0.55 \quad S = 0.013 \quad P = 0.038.$$

15) 炉料汇总 (ZG12Cr18Ni9Ti) 见表 7-9。

表 7-9 炉料汇总表 (ZG12Cr18Ni9Ti)

| 序号 | 炉料名称 | 数量/kg | 加入时间 | 备注 |
|-------|-------------------|-------|--------------------|---------------|
| 1 | ZG12Cr18Ni9Ti 返回料 | 3800 | 装炉时加入 | — |
| 2 | Ni 板 | 228 | 装炉时加入 | 避开电极弧光处 |
| 3 | 低 P 钢 | 1200 | 装炉时加入 | — |
| 4 | 增碳用电极块 | 50 | 装炉时加入 | 加在炉料底下(不算炉料量) |
| 5 | FeCr65C0.03 铬铁 | 866 | 吹氧完立刻加入 | 即氧化脱碳完毕加入 |
| 6 | JMn96 金属锰 | 40 | 吹氧完加入 | — |
| 7 | TiFe 钛铁 | 150 | 出钢前 10 ~ 15 min 加入 | — |
| 8 | 稀土合金 | 57 | 出钢时加入 | — |
| 9 | Al 块 | 10 | 吹氧完加入 | — |
| 10 | SiCa 块 | 30 | 吹氧完加入 | 不计人装料量 |
| 11 | SiCa 粉 | 60 | 还原期加入 | 不计人装料量 |
| 12 | Al 粉 | 60 | 还原期加入 | 不计人装料量 |
| 合计 | | 6351 | — | 粉状材料不算炉料数量 |
| 折合钢液量 | | 6000 | — | 综合回收率按 95% 计算 |

例 7-3 熔炼 ZG40CrNiMo 合金钢配料计算。

1) 采用返回法熔炼, 本钢种返回料为 90%。

2) 确定钢液量为 7000kg。

3) ZG40CrNiMo 化学成分 (质量分数, %): C 0.37 ~ 0.44、Si 0.4 ~ 0.8、Mn 0.5 ~ 0.8、Cr 0.6 ~ 0.9、Ni 1.20 ~ 1.70、Mo 0.15 ~ 0.25、P ≤ 0.04、S ≤ 0.04。

4) 配入成分 (质量分数, %): Si 0.27、Mn 0.65、Ni 1.50、Cr 0.75、Mo 0.20。

5) 炉料回收率 97%, 炉料装入量 = $\frac{7000\text{kg}}{97\%} = 7216\text{kg}$, 取 7200kg。

6) 返回炉料量 = $7000\text{kg} \times 90\% = 6300\text{kg}$ 。

7) 全炉需要纯合金数量:

$$\text{纯 Mn 量} = 7000\text{kg} \times 0.65\% = 45.5\text{kg}$$

$$\text{纯 Ni 量} = 7000\text{kg} \times 1.50\% = 105\text{kg}$$

$$\text{纯 Cr 量} = 7000\text{kg} \times 0.75\% = 52.5\text{kg}$$

$$\text{纯 Mo 量} = 7000\text{kg} \times 0.20\% = 14\text{kg}$$

8) 返回料带入钢液中元素量:

$$\text{带入 Mn 量} = 6300\text{kg} \times 0.65\% \times 50\% = 20.5\text{kg} \quad (50\% \text{ 为 Mn 回收率})$$

$$\text{带入 Ni 量} = 6300\text{kg} \times 1.5\% \times 97\% = 91.6\text{kg} \quad (97\% \text{ 为 Ni 回收率})$$

$$\text{带入 Cr 量} = 6300\text{kg} \times 0.75\% \times 80\% = 37.8\text{kg} \approx 38\text{kg} \quad (80\% \text{ 为 Cr 回收率})$$

$$\text{带入 Mo 量} = 6300\text{kg} \times 0.20\% \times 96\% = 12\text{kg} \quad (96\% \text{ 为 Mo 回收率})$$

9) 全炉需加入合金铁量:

$$\text{MnFe 量} = \frac{(45.5 - 20.5)\text{kg}}{70\% \times 95\%} = 37.6\text{kg} \approx 38\text{kg}$$

注: 70% 为 MnFe 的 Mn 含量, 95% 为回收率。

$$\text{Ni 量} = \frac{(105 - 91.6)\text{kg}}{98\% \times 97\%} = 14\text{kg}$$

$$\text{CrFe 量} = \frac{(52.5 - 38)\text{kg}}{66\% \times 95\%} = 23\text{kg}$$

CrFe 可用中碳 CrFe。

$$\text{MoFe 量} = \frac{(14 - 12)\text{kg}}{60\% \times 96\%} = 3.5\text{kg}$$

10) 低 P 钢配入量:

$$\text{低 P 钢配入量} = (7200 - 6300 - 38 - 14 - 23 - 3.5)\text{kg} = 821.5\text{kg} \approx 822\text{kg}$$

$$11) \text{ 配料量} = (6300 + 822 + 23 + 14)\text{kg} = 7159\text{kg}。$$

二、熔炼 ZG12Cr18Mn13Mo2CuN 含氮耐蚀不锈钢配料计算方法

例 7-4 熔炼 ZG12Cr18Mn13Mo2CuN 配料计算实例

- 1) 采用返回氧化法熔炼, 未加合金钢屑。
- 2) 钢液化学成分及配入量见表 7-10。

表 7-10 钢液化学成分及配入量 (质量分数) (%)

| | C | Si | Mn | Cr | Mo | Cu | S | P | N |
|----|-------|-------|-------------|-------------|-----------|-----------|--------|-------|-------------|
| 成分 | ≤0.12 | ≤1.50 | 12.0 ~ 14.0 | 17.0 ~ 20.0 | 1.5 ~ 2.0 | 1.0 ~ 1.5 | ≤0.035 | ≤0.06 | 0.19 ~ 0.26 |
| 配入 | — | — | 13.0 | 18.0 | 1.75 | 1.25 | — | — | 0.13 |

3) 钢液量为 5500kg, 按 95% 回收率。

4) 投料量 = $\frac{5500\text{kg}}{95\%} = 5789\text{kg} \approx 5800\text{kg}$ 。

5) 返回料用 3500kg,

则 返回比 = $\frac{3500\text{kg}}{5800\text{kg}} \times 100\% = 60\%$

注: 此钢种返回料不宜太多, S、P 易超出, 但用太少的返回料要加多的合金也是不合适的, 一般可取为 40% ~ 60%。

6) 全炉纯合金元素需要量:

$$\text{需 Cr 量} = 5500\text{kg} \times 18\% = 990\text{kg}$$

$$\text{需 Mn 量} = 5500\text{kg} \times 13\% = 715\text{kg}$$

$$\text{需 Mo 量} = 5500\text{kg} \times 1.75\% = 96\text{kg}$$

$$\text{需 Cu 量} = 5500\text{kg} \times 1.25\% = 69\text{kg}$$

$$\text{需 N 量} = 5500\text{kg} \times 0.13\% = 7.1\text{kg}$$

7) 返回料带入钢液中的合金元素:

$$\text{带入 Cr 量} = 3500\text{kg} \times 20\% \times 85\% = 595\text{kg}$$

注: 20% 返回料的 Cr 含量, 回收率为 85%。

$$\text{带入 Mn 量} = 3500\text{kg} \times 13\% \times 65\% = 296\text{kg}$$

$$\text{带入 Mo 量} = 3500\text{kg} \times 1.7\% \times 95\% = 56.5\text{kg} \approx 57\text{kg}$$

$$\text{带入 Cu 量} = 3500\text{kg} \times 1.2\% \times 95\% = 40\text{kg}$$

$$\text{带入 N 量} = 3500\text{kg} \times 0.25\% \times 40\% = 3.5\text{kg}$$

注: 返回料中 N 可返回到钢液中, 注意 N 的回收率对防止 N 超出及防止产生气孔有重要意义。

8) 合金铁配入量:

$$\text{FeCrN 量} = \frac{7.1 \text{kg}}{3.8\% \times 98\%} = 190.6 \text{kg}, \text{ 取 } 190 \text{kg}$$

注: FeCrN 中含 N 3.8%。

FeCrN 带入的 Cr 量 = $190 \text{kg} \times 68\% \times 95\% = 122.7 \text{kg}$, 取 120kg

$$\text{FeCr65C0.03 量} = \frac{(990 - 120 - 595) \text{kg}}{64\% \times 95\%} = 452 \text{kg}, \text{ 取 } 450 \text{kg}$$

$$\text{JMn97 量} = \frac{(715 - 296) \text{kg}}{97.0\% \times 95\%} = 455 \text{kg}, \text{ 取 } 460 \text{kg}$$

$$\text{FeMo70 量} = \frac{(96 - 57) \text{kg}}{62\% \times 95\%} = 66 \text{kg}$$

$$\text{Cu 量} = \frac{(69 - 40) \text{kg}}{99\% \times 95\%} = 30 \text{kg}$$

9) 低 P 钢配料量:

$$\begin{aligned} \text{低 P 钢量} &= (5800 - 3500 - 190 - 450 - 460 - 66 - 30 - 40) \text{kg} \\ &= 1064 \text{kg}, \text{ 取 } 1060 \text{kg}。40 \text{kg} \text{ 为 SiCa 块加入量。} \end{aligned}$$

10) 配料量:

$$\text{装入量} = (3500 + 66 + 30 + 1060) \text{kg} = 4656 \text{kg}$$

11) 计算熔清时合金元素含量:

$$\text{Cr} = \frac{700 \text{kg}}{4656 \text{kg}} \times 100\% = 15\%$$

注: 700 是返回料中氧化前数量, 即 $3500 \times 20\% = 700$ 。

$$\text{Mn} = \frac{455 \text{kg}}{4656 \text{kg}} \times 100\% = 9.8\%$$

注: $3500 \text{kg} \times 13\% = 455 \text{kg}$ 。

$$\text{Mo} = \frac{100.4 \text{kg}}{4656 \text{kg}} \times 100\% = 2.1\%$$

注: $3500 \text{kg} \times 1.7\% + 66 \text{kg} \times 62\% = 59.5 \text{kg} + 40.9 \text{kg} = 100.4 \text{kg}$ 。

$$\text{Cu} = \frac{69 \text{kg}}{4656 \text{kg}} \times 100\% = 1.48\%$$

$$\text{N} = \frac{8.8 \text{kg}}{4656 \text{kg}} \times 100\% = 0.19\%$$

注: $3500 \text{kg} \times 0.25\% + 190 \text{kg} \times 3.8\% = 8.75 \text{kg} + 0.07 \text{kg} = 8.8 \text{kg}$ 。

12) 熔清时化验结果:

$$\text{Cr} = 15.4\% \text{, Mn} = 8.2\% \text{, Mo} = 1.67\% \text{, Cu} = 1.44\% \text{, N} = 0.26\%。$$

13) 还原期加入合金铁量:

$$\begin{aligned}\text{合金铁量} &= (190 + 450 + 460 + 40) \text{ kg} \\ &= 1140 \text{ kg}\end{aligned}$$

例 7-5 熔炼 ZG12Cr18Mn13Mo2CuN 返回氧化法实例。

此例与例 7-4 不同的是加 N 时用 NMn 和 NCr 同时采用计算方法。其他均相同, 为表达清楚乃详细计算。

- 1) 采用吹氧脱碳, 氧气消耗量为 5~8 瓶/t 钢液。
- 2) 确定钢液量为 5000kg, 则氧气为 $5 \times 8 = 40$ 瓶。
- 3) 钢液化学成分及配入量和控制成分见表 7-11。

表 7-11 钢液化学成分 (质量分数) (%)

| 元 素 | C | Si | Mn | S | P | Cr | Mo | Cu | N |
|-----|-------------|------------|----------------|--------------|-------------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| 规格 | ≤ 0.12 | ≤ 1.5 | 12.0 ~ 14.0 | ≤ 0.035 | ≤ 0.06 | 17.0 ~ 20.0 | 1.5 ~ 2.0 | 1.0 ~ 1.5 | 0.19 ~ 0.26 |
| 配入 | — | — | 13.0 | — | — | 18.0 | 1.75 | 1.25 | 0.2 |
| 控制 | ≤ 0.12 | — | 13.0 | — | — | 18.0 | 1.75 | 1.25 | 0.23 |

- 4) 装料量综合回收率用 95%,

则
$$\text{装料量} = \frac{5000 \text{ kg}}{95\%} = 5263 \text{ kg} \approx 5260 \text{ kg}$$

- 5) 返回料采用 2700kg,

则
$$\text{返回比} = \frac{2700 \text{ kg}}{5260 \text{ kg}} \times 100\% = 51\%$$

- 6) 全炉用纯合金元素量:

$$\text{纯 Cr 量} = 5000 \text{ kg} \times 18.0\% = 900 \text{ kg}$$

$$\text{纯 Mn 量} = 5000 \text{ kg} \times 13.0\% = 650 \text{ kg}$$

$$\text{纯 Mo 量} = 5000 \text{ kg} \times 1.75\% = 87 \text{ kg}$$

$$\text{纯 Cu 量} = 5000 \text{ kg} \times 1.25\% = 62 \text{ kg}$$

$$\text{纯 N 量} = 5000 \text{ kg} \times 0.20\% = 10 \text{ kg}$$

- 7) 返回料带入合金元素量:

$$\text{带入 Cr 量} = 2700 \text{ kg} \times 18.0\% \times 85\% = 486 \times 85\% = 413 \text{ kg}$$

$$\text{带入 Mn 量} = 2700 \text{ kg} \times 13.0\% \times 65\% = 351 \times 65\% = 228 \text{ kg}$$

$$\text{带入 Mo 量} = 2700 \text{ kg} \times 1.7\% \times 95\% = 46 \times 95\% = 43.6 \text{ kg}$$

$$\text{带入 Cu 量} = 2700 \text{ kg} \times 1.25\% \times 95\% = 33.7 \times 95\% = 32 \text{ kg}$$

N 可不算, 但要知道返回料中 N 有回收。在返回料少时可忽略不计。

- 8) 合金铁加入量:

先拟定加入 100kgNMn (氮化锰)。

注: NMn 的成分 (质量分数), 为 3.8% N、75.4% Mn。

NMn 带入的 N 量:

$$\text{带入 N 量} = 100\text{kg} \times 3.8\% \times 85\% \text{ (回收率)} = 3.2\text{kg}$$

其余 N 用 FeCrN 补加, 即

$$\text{FeCrN 量} = \frac{(10 - 3.2)\text{kg}}{6\% \times 90\%} = 126\text{kg} \text{ (FeCrN 含 N6% 回收率 90%)}$$

NMn 中带入 Mn 量:

$$\text{带入 Mn 量} = 100\text{kg} \times 75.4\% \times 95\% = 71\text{kg}$$

FeCrN 带入 Cr 量:

$$\text{带入 Cr 量} = 126\text{kg} \times 63\% \times 95\% = 79\text{kg} \times 95\% = 75\text{kg}$$

拟定加 FeCr65C0.10 100kg, 则 FeCr65C0.10 带入的 Cr 量:

$$\text{Cr 量} = 100\text{kg} \times 65.89\% \times 90\% = 65.89\text{kg} \times 90\% = 59.3\text{kg} \approx 60\text{kg}$$

其余用 FeCr65C0.06 补齐, 这样要节省 100kg FeCr65C0.06。

计算 FeCr65C0.06 铬铁需要量:

全炉需要 Cr 量减去以上加入的 Cr 量, 差用 FeCr65C0.06 补:

$$\text{则 缺 Cr 量} = (900 - 413 - 75 - 60)\text{kg} = 352\text{kg}$$

$$\text{则 FeCr65C0.06 量} = \frac{352\text{kg}}{68\% \times 95\%} = 545\text{kg} \text{ (68% 为 Cr 含量)}$$

JMn96 需要量: 纯 Mn 量 = (650 - 228 - 71)kg = 351kg

$$\text{则 JMn96 量} = \frac{351\text{kg}}{96\% \times 95\%} = 384.8\text{kg} \approx 385\text{kg}$$

$$\text{FeMo60 需要量} = \frac{(87 - 43.6)\text{kg}}{60\% \times 95\%} = 76\text{kg}$$

$$\text{Cu 需要量} = \frac{(62 - 32)\text{kg}}{99.9\% \times 100\%} = 30\text{kg}$$

SiCa 块加入量为 30kg

9) 低 P 钢需要量:

$$\begin{aligned} \text{低 P 钢量} &= (5260 - 2700 - 100 - 126 - 100 - 545 - 385 - 76 - 30 - 30)\text{kg} \\ &= 1168\text{kg}, \text{ 实加 1200kg} \end{aligned}$$

10) 装料量 = (2700 + 100 + 76 + 30 + 1200)kg = 4106kg。

11) 还原期加入量 = (545 + 385 + 100 + 126 + 30)kg = 1186kg。

12) 计算熔清时钢液成分:

$$\text{Cr} = \frac{552\text{kg}}{4106\text{kg}} \times 100\% = 13.4\%$$

注: 552kg 是装料时 Cr 的总和, 即 486kg + 65.89kg = 551.89kg ≈ 552kg

$$Mn = \frac{351\text{kg}}{4106\text{kg}} \times 100\% = 8.5\%$$

$$Mo = \frac{91.6\text{kg}}{4106\text{kg}} \times 100\% = 2.2\%$$

注: $46\text{kg} + 76\text{kg} \times 60\% = 46\text{kg} + 45.6\text{kg} = 91.6\text{kg}$

$$Cu = \frac{63.7\text{kg}}{4106\text{kg}} \times 100\% = 1.5\% \quad (\text{返回料 Cu 量: } 33.7\text{kg} + Cu30\text{kg} = 63.7\text{kg})$$

N 是返回料带入的 N, 所以

$$N = \frac{2700\text{kg} \times 0.20\%}{4106\text{kg}} \times 100\% = 0.13\%$$

注: 0.20% 是返回料 N 含量, 如果 N 在还原期的回收率为 40%, 则可得

$$N = \frac{2700\text{kg} \times 0.20\% \times 40\%}{5000\text{kg}} \times 100\% = 0.04\%$$

注: 可见返回料中 N 应加以考虑。

13) 还原期 SiCa 粉需要量。据生产情况每吨钢液用 SiCa 粉 20~30kg:

则 全炉 SiCa 粉量 = $5\text{t} \times 25\text{kg/t} = 125\text{kg}$

14) SiCa 粉中 Si 量可进入钢液中量:

查表 7-2 SiCa 粉中 Si 含量 = 58%, 则 Si 量 = $125\text{kg} \times 58\% = 72.5\text{kg}$

则 $Si_{进} = \frac{72.5 \times 30\%}{5000} \times 100\% = 0.43\%$

注: 30% 是 Si 回收率。

15) 炉料汇总 (ZG12Cr18Mn12Mo2CuN) 见表 7-12。

表 7-12 炉料汇总 (ZG12Cr18Mn12Mo2CuN)

| 序号 | 炉料名称 | 数量/kg | 加入时期 | 备注 |
|----|--------------------|-------|-------|---------|
| 1 | ZG12Cr18Mn12Mo2CuN | 2700 | 装料时加入 | 返回料 |
| 2 | 低 P 钢 | 1200 | 装料时加入 | — |
| 3 | MoFe | 76 | 装料时加入 | — |
| 4 | Cu(电解铜) | 30 | 装料时加入 | — |
| 5 | SiCa 块 | 30 | 吹氧完加入 | 还原期初 |
| 6 | JMn96 | 385 | 吹氧完加入 | — |
| 7 | NMn | 100 | 吹氧完加入 | — |
| 8 | FeCrN | 126 | 吹氧完加入 | — |
| 9 | FeCr65Co.10 | 100 | 吹氧前加入 | — |
| 10 | FeCr65Co.06 | 545 | 还原期加入 | 即氧吹完后加入 |
| 11 | SiCa 粉 | 125 | 还原期加入 | 不算炉料数量 |

(续)

| 序号 | 炉料名称 | 数量/kg | 加入时期 | 备注 |
|----|-------|-------|-------|----------|
| 12 | 增碳电极块 | 50 | 装炉时加入 | 不算炉料数量 |
| | 合计 | 5292 | — | — |
| | 折合钢液 | 5000 | — | 回收率为 95% |

三、熔炼 ZG12Cr18Mn13Mo2CuN 采用合金钢屑等返回料氧化法配料计算方法

例 7-6 熔炼 ZG12Cr18Mn13Mo2CuN 返回氧化法计算实例。

此例炉料配比，采用合金钢屑、Cr5Mo 和本钢种返回料。合金钢屑成分是较复杂的，要掌握成分规律并按一定比例配入，才能控制成分，保证钢液质量。

- 1) 拟定钢液量为 6000kg。
- 2) 钢液化学成分见表 7-13。

表 7-13 钢液成分 (质量分数) (%)

| 元素 | C | Si | Mn | Cr | Mo | Cu | S | P | N |
|------|-------|-------|-------------|-------------|-----------|-----------|--------|-------|-------------|
| 规格成分 | ≤0.12 | ≤1.50 | 12.0 ~ 14.0 | 17.0 ~ 20.0 | 1.5 ~ 2.0 | 1.0 ~ 1.5 | ≤0.035 | ≤0.06 | 0.19 ~ 0.26 |
| 配入成分 | — | — | 13.0 | 18.0 | 1.75 | 1.25 | — | — | 0.20 |

3) 装料量按综合回收率为 95% 计算，

则
$$\text{装料量} = \frac{6000\text{kg}}{95\%} = 6316\text{kg} \approx 6300\text{kg}$$

4) 拟定 ZG12Cr18Mn13Mo2CuN 返回料数量 2000kg，返回料化学成分见表 7-14。

表 7-14 返回料化学成分 (质量分数) (%)

| 元素 | C | Si | Mn | Cr | Mo | Cu | S | P | N |
|------|---|----|------|------|------|------|---|---|------|
| 化学成分 | — | — | 13.0 | 18.0 | 1.70 | 1.20 | — | — | 0.24 |
| 回收率 | — | — | 65.0 | 85.0 | 95.0 | 95.0 | — | — | 40.0 |

5) Cr5Mo (含 Cr 为 5%) 量为 650kg。

6) 合金钢屑 (含 Cr14.0% ; Mn3.0%) 量为 1500kg。

7) 6000kg 钢液需要纯合金元素量：

$$\text{纯 Cr 量} = 6000\text{kg} \times 18.0\% = 1080\text{kg}$$

$$\text{纯 Mn 量} = 6000\text{kg} \times 13.0\% = 780\text{kg}$$

$$\text{纯 Mo 量} = 6000\text{kg} \times 1.75\% = 105\text{kg}$$

$$\text{纯 Cu 量} = 6000\text{kg} \times 1.25\% = 75\text{kg}$$

$$\text{纯 N 量} = 6000\text{kg} \times 0.20\% = 12\text{kg}$$

8) 返回料带入合金数量:

ZG12Cr18Mn12Mo2CuN 带入的合金量:

$$\text{Cr 量} = 2000\text{kg} \times 18.0\% \times 85\% = 360\text{kg} \times 85\% = 306\text{kg}$$

$$\text{Mn 量} = 2000\text{kg} \times 13.0\% \times 65\% = 260\text{kg} \times 65\% = 169\text{kg}$$

$$\text{Mo 量} = 2000\text{kg} \times 1.7\% \times 95\% = 34\text{kg} \times 95\% = 32\text{kg}$$

$$\text{Cu 量} = 2000\text{kg} \times 1.2\% \times 95\% = 24\text{kg} \times 95\% = 23\text{kg}$$

$$\text{N 量} = 2000\text{kg} \times 0.24\% \times 40\% = 4.8\text{kg} \times 40\% = 1.9\text{kg}$$

Cr5Mo 带入的合金量:

$$\text{Cr 量} = 650\text{kg} \times 5.0\% \times 85\% = 32.5\text{kg} \times 85\% = 27.6\text{kg} \approx 28\text{kg}$$

合金钢屑带入的合金量:

$$\text{Cr 量} = 1500\text{kg} \times 14\% \times 80\% = 210\text{kg} \times 80\% = 168\text{kg}$$

$$\text{Mn 量} = 1500\text{kg} \times 3.0\% \times 65\% = 45\text{kg} \times 65\% = 29\text{kg}$$

9) 全炉需要合金铁数量:

先用 FeCrN 150kg (含 N6%，含 Cr63%) :

$$\text{带入的 N 量} = 150\text{kg} \times 6.0\% \times 85\% = 7.6\text{kg} \approx 8\text{kg}$$

$$\text{带入的 Cr 量} = 150\text{kg} \times 63\% \times 95\% = 89.7\text{kg} \approx 90\text{kg}$$

NMn 需要量 (含 N4.2%；Mn76%) :

$$\text{NMn 量} = \frac{(12 - 8)\text{kg}}{4.2\% \times 90\%} = 105\text{kg}, \text{ 实际用 } 100\text{kg}$$

$$\text{由 NMn 带入的 Mn 量} = 100\text{kg} \times 76\% \times 95\% = 72\text{kg}$$

FeCr65C0.03 铬需要量:

$$\text{尚缺少 Cr 量} = (1080 - 306 - 28 - 168 - 90)\text{kg} = 488\text{kg}$$

$$\text{则 FeCr65C0.03 量} = \frac{488\text{kg}}{64\% \times 97\%} = 786\text{kg}$$

JMn96 需要量:

$$\text{缺少 Mn 量} = (780 - 169 - 29 - 72)\text{kg} = 510\text{kg}$$

$$\text{则 JMn96 量} = \frac{510\text{kg}}{96\% \times 95\%} = 559\text{kg, 取 } 550\text{kg}$$

MoFe 需要量:

$$\text{缺少 Mo 量} = (105 - 32)\text{kg} = 73\text{kg}$$

$$\text{则 MoFe 量} = \frac{73\text{kg}}{60\% \times 97\%} = 125\text{kg, 实加 } 120\text{kg}$$

Cu 需要量:

缺少 Cu 量 = (75 - 23) kg = 52 kg, 实加 50 kg

10) 低 P 钢需要量:

$$\begin{aligned} \text{所加炉料量合计} &= \text{返回料量} + \text{屑量} + \text{Cr5Mo 量} + \text{Cu 量} + \text{FeMo70 量} + \text{FeCrN 量} \\ &\quad + \text{Mn 量} + \text{FeCr65C0.03 量} + \text{JMn96 量} + \text{SiCa 块量} \\ &= (2000 + 1500 + 650 + 50 + 120 + 150 + 100 + 786 + 550 + 30) \text{ kg} \\ &= 5936 \text{ kg} \end{aligned}$$

则 低 P 钢量 = (6300 - 5936) kg = 364 kg

11) 氧化前装料量:

$$\begin{aligned} \text{装料量} &= \text{返回料量} + \text{屑量} + \text{Cr5Mo 量} + \text{FeMo70 量} + \text{低 P 钢量} + \text{Cu 量} \\ &= (2000 + 1500 + 650 + 120 + 364 + 50) \text{ kg} = 4684 \text{ kg} \end{aligned}$$

12) 计算熔清时成分:

熔清时钢液中的元素未计烧损:

钢液中 Cr:

$$\text{Cr 量} = \text{返回料中 Cr 量} + \text{Cr5Mn 量} + \text{屑量} = (360 + 32.5 + 210) \text{ kg} = 602.5 \text{ kg}$$

则 $\text{Cr}_{\text{熔清}} = \frac{602.5 \text{ kg}}{4684 \text{ kg}} \times 100\% = 12.86\%$

钢液中 Mn:

$$\text{Mn 量} = (260 + 45) \text{ kg} = 305 \text{ kg}$$

则 $\text{Mn}_{\text{熔清}} = \frac{305 \text{ kg}}{4684 \text{ kg}} \times 100\% = 6.5\%$

钢液中 Mo:

$$\text{Mo 量} = (34 + 72) \text{ kg} = 106 \text{ kg}$$

注: 120 kg × 60% Mo = 72 kg

则 $\text{Mo}_{\text{熔清}} = \frac{106 \text{ kg}}{4684 \text{ kg}} \times 100\% = 2.26\%$

钢液中 Cu:

$$\text{Cu 量} = (24 + 50) \text{ kg} = 74 \text{ kg}$$

则 $\text{Cu}_{\text{熔清}} = \frac{74 \text{ kg}}{4684 \text{ kg}} \times 100\% = 1.58\%$

钢液中 N:

$$\text{N} = \frac{4.8 \text{ kg}}{4684 \text{ kg}} \times 100\% = 0.10\%$$

13) SiCa 块用量为 30 kg。

14) SiCa 粉用量为 30 kg/t 钢液 × 6 t 钢液 = 180 kg。

15) 炉料汇总见表 7-15。

表 7-15 炉料汇总表 (ZG12Cr18Mn12Mo2CuN) (钢液量 6000kg)

| 序号 | 炉料组成 | 化学成分 (质量分数, %) | 数量 /kg | 点炉料 比(%) | 入炉 时间 | 元素回收率 (%) | 进入钢液 质量/kg | 取样 时期 | 钢液化学成分 (质量分数, %) | 备注 | |
|---------------------------|------------------------|--------------------------------|-----------|-------------|----------|--------------|------------------------------------|-------------|--|--|--|
| 1 | ZG12CrMo12Mo2CuN 返回 | Cr18、Mn13、Mo1.7 Cu1.2、No.24 | 2000 | 31.7 | 装料 | Cr85、Mn65 | Cr306、Mn169、 Mo32、Cu23、 N1.9 | 熔清取 样 | 熔清时取样先用砂轮看火 花, 脱碳量为 0.4% ~ 0.5%。 碳够时扒除余下电极头 | 用两块电 极头增碳装 在炉料底下 事先算出 熔清成分 (未计烧 损) 炉中一般 取 3 个样分 析 | |
| 2 | Cr5Mo | Cr5.0、Mo0.5 | 650 | 10.3 | 装料 | Mo95、Cr85 | Cr28 | 熔清取 样 | C0.57、Mn7.05、P0.045、 Cr13.52、Mo2.16、Cu1.65、 No.14 | | |
| 3 | 合金钢屑 | Cr14.0、Mn3.0 | 1500 | 24.0 | 装料 | N40、 Cr85 | Cr168、 Mn29 | | | | |
| 4 | 低 S、P 钢 | S<0.02、P<0.03 | 364 | 5.5 | 装料 | Mn65 | — | 对照熔 清成分 | Cr13.0、Mn6.5、Mo2.3、 Cu1.65、No.10 | | |
| 5 | FeMo70 | Mo60.0 | 120 | 2.0 | 装料 | Mo97.0 | Mo73 | | | | |
| 6 | Cu(电解铜) | Cu99.9 | 50 | 0.8 | 装料 | Cu95.0 | Cu50 | 吹氧完 取样 | C0.07、Mn3.4、P0.04、 Cr10.08、Mo2.3、Cu1.88、 No.06 | | |
| 7 | 小合计 | — | 4684 | 74.3 | 装料 | — | — | | | | |
| 8 | NMn | Mn76、N4.2 | 100 | 1.6 | 还原 | Mn95、N90 | Mn72、N3.8 | 还原取 样中 1 | C0.08、Si0.52、Mn11.4、 S0.023、Cr19.6、Mo1.75、 Cu1.4、No.24 | | |
| 9 | FeCrN | Cr63、N6.0 | 150 | 2.3 | 还原 | Cr95、N85 | Cr90、N8.0 | | | | |
| 10 | FeCr65C0.03 | Cr64 | 786 | — | 还原 | Cr95 | Cr488 | 还原取 样中 2 | C0.10、Si0.98、Mn12.8、 Cr19.16、Mo2.16、Cu1.65、 No.14 | | |
| 11 | JMn96 | Mn96 | 550 | 12.7 | 还原 | Mn95 | Mn510 | | | | |
| 12 | SiCa 块 | Si + Ca = 90、Ca32 | 30 | 8.4 | 还原 | Si30 | — | 炉后取 样 | C0.10、Mn13.05、Cr18.89、 Mo1.75、Cu1.18、No.23 | | |
| 13 | SiCa 粉 | Si + Ca = 90、Ca32 | 180 | 0.7 | (吹氧完) | Si20 ~ 30 | — | | | | |
| 14 | 小合计 | — | 1616 | 25.7 | 还原 | — | — | 炉后取 样 | C0.10、Mn13.05、Cr18.89、 Mo1.75、Cu1.18、No.23 | | |
| 总合计(序号 7 小合计 + 序号 14 小合计) | | | 6300 | 100 | — | — | — | | | | |

注: SiCa 粉 180kg 未计入炉料量, 即 1616kg 不含 180kg。

四、熔炼 ZG20Cr13 配料计算方法

例 7-7 熔炼 ZG20Cr13 新料氧化法配料计算实例。

1) 化学成分见表 7-16。

表 7-16 化学成分 (质量分数) (%)

| 元 素 | C | Si | Mn | Cr | S | P | 备 注 |
|------|-------------|------|------|-------------|-------|-------|--------|
| 规格成分 | 0.16 ~ 0.24 | ≤0.8 | ≤0.8 | 11.5 ~ 13.5 | ≤0.03 | ≤0.04 | |
| 配入成分 | 0.20 | 0.6 | 0.4 | 13.0 | — | — | 其余元素忽略 |

2) 设钢液量为 7000kg。

3) 炉料综合回收率为 96%，

则
$$\text{装料量} = \frac{7000\text{kg}}{96\%} = 7291\text{kg}$$

4) 需要合金数：

$$\text{Mn 量} = 7000\text{kg} \times 0.4\% = 28\text{kg}$$

$$\text{Cr 量} = 7000\text{kg} \times 13.0\% = 910\text{kg}$$

5) 需要铁合金数：

$$\text{低碳 Mn 量} = \frac{28\text{kg}}{80\% \times 95\%} = 36.8\text{kg} \approx 37\text{kg}$$

$$\text{FeCr65C0.10 量} = \frac{910\text{kg}}{66\% \times 95\%} = 1451\text{kg}$$

注：1451kg 铬铁还原期一次加入数量太大，可用吹氧助熔分批加入。

6) SiCa 块 30kg。

7) 低 P 钢量 = (7291 - 1451 - 37 - 30)kg = 5773kg。

8) 用 SiCa 粉还原。

9) 配碳仍为 0.4%，用铁矿石或吹氧氧化。

10) 炉料汇总见表 7-17。

表 7-17 炉 料 汇 总

| 序 号 | 名 称 | 数量/kg | 入 炉 时 期 | 备 注 |
|-----|-------------|-------|---------|-------------------|
| 1 | 低 P 钢 | 5773 | 装炉时加入 | 可用低 P、S、ZG25 碳钢废件 |
| 2 | FeCr65C0.10 | 1451 | 还原期加入 | 分批加入 |
| 3 | 低碳 Mn | 37 | 还原期加入 | — |
| 4 | SiCa | 30 | 还原期加入 | — |
| 合计 | | 7291 | — | — |

例 7-8 熔炼 ZG20Cr13 返回氧化法配料计算实例。

1) 化学成分见表 7-18。

表 7-18 化学成分 (质量分数, %)

| 元 素 | C | Si | Mn | Cr | S | P | 备注 |
|--------------|-------------|------|------|-------------|-------|-------|-------------|
| 规格成分 | 0.16 ~ 0.24 | ≤0.8 | ≤0.8 | 11.5 ~ 13.5 | ≤0.03 | ≤0.04 | |
| 配入成分 | — | 0.6 | 0.4 | 13.0 | — | — | |
| ZG20Cr13 返回料 | 0.2 | 0.5 | 0.5 | 13.0 | — | — | 残余元素 没计算 |

注: Cr 回收率 87%。

2) 设钢液量为 7000kg。

3) 总装料量综合回收率为 95%,

则
$$\text{总装料量} = \frac{7000\text{kg}}{95\%} = 7368\text{kg} \approx 7370\text{kg}$$

4) 返回料 4000kg, 占总料比 $= \frac{4000\text{kg}}{7370\text{kg}} \times 100\% = 54\%$

5) 用电极块配碳脱碳量为 0.40%。

6) 需要合金数量:

$$\text{Mn 量} = 7000\text{kg} \times 0.4\% = 28\text{kg}$$

$$\text{Cr 量} = 7000\text{kg} \times 13.0\% = 910\text{kg}$$

7) 返回料合金带入量:

$$\text{Cr 量} = 4000\text{kg} \times 13.0\% \times 87\% = 520\text{kg} \times 87\% \approx 452\text{kg}$$

8) 补加合金铁数量:

$$\text{FeCr65Co. 10 量} = \frac{(910 - 452)\text{kg}}{66\% \times 95\%} = 730\text{kg}$$

$$\text{低碳 Mn 量} = \frac{28\text{kg}}{80\% \times 95\%} = 37\text{kg}$$

9) 低 P 钢配入量:

$$\text{配入量} = (7370 - 4000 - 37 - 730 - 42)\text{kg} = 2561\text{kg}$$

10) 氧化前装料量 = 4000kg + 2561kg = 6561kg。

11) 熔清时钢中含 Cr (未计烧损):

$$\text{Cr} = \frac{4000\text{kg} \times 13\%}{6561\text{kg}} \times 100\% = 7.9\%$$

12) 返回料在还原期带入钢液中 Cr:

$$\text{Cr} = \frac{452\text{kg}}{7000\text{kg}} \times 100\% = 6.4\%$$

13) 还原期加入钢液中 Cr 量:

$$\text{Cr 量} = 730\text{kg} \times 66\% \times 96\% = 462\text{kg}$$

则 $\text{Cr} = \frac{462\text{kg}}{7000\text{kg}} \times 100\% = 6.6\%$

14) 还原期钢液中总 Cr 量:

$$\text{Cr} = 6.4\% + 6.6\% = 13.0\%$$

15) SiCa 块 42kg。

16) SiCa 粉 200kg (酌情加入)。

17) 炉料汇总见表 7-19。

表 7-19 炉 料 汇 总

| 序 号 | 炉 料 名 称 | 数 量 / kg | 加 入 时 期 |
|-----|-------------|----------|---------|
| 1 | 返料 | 4000 | 装料时加入 |
| 2 | 低 P 钢 | 2561 | 装料时加入 |
| 3 | FeCr65Co.10 | 730 | 还原期加入 |
| 4 | 低 CMn | 37 | 还原期加入 |
| 5 | SiCa | 42 | 还原期加入 |
| 合计 | | 7370 | — |

五、熔炼 ZG20Cr13 同时采用两种铬铁补加铬配料计算法

例 7-9 采用返料吹氧法熔炼 ZG20Cr13 合金钢, 熔化量为 10t, 炉中取样快速分析 C 的质量分数为 0.15%, Cr 的质量分数为 11.0%, 熔炼要求 C 的质量分数控制在 0.19%, Cr 的质量分数控制在 13%。现有两种铬铁可配料使用, 即有高碳铬铁碳的质量分数为 7.0%、铬的质量分数为 63%, 低碳铬铁碳的质量分数为 0.50%、铬的质量分数为 67%, 铬回收率均为 95%。计算采用这两种铬铁同时补加各用量为多少?

解: 设高碳铬铁的补加量为 $x\text{kg}$, 低碳铬铁的补加量为 $y\text{kg}$ 。

根据控制碳的质量分数为 0.19%, 列平衡式为

$$0.19\% = \frac{10000\text{kg} \times 0.15\% + x \times 7.0\% + y \times 0.5\%}{10000\text{kg} + x + y}$$

根据控制铬的质量分数为 13%, 列平衡式为

$$13\% = \frac{10000\text{kg} \times 11\% + x \times 63\% \times 95\% + y \times 67\% \times 95\%}{10000\text{kg} + x + y}$$

整理两式建立联立方程式得

$$\begin{cases} 6.81x + 0.31y = 400\text{kg} \\ 46.85x + 50.65y = 20000\text{kg} \end{cases}$$

解联立方程式得

$$x = 42 \text{ kg}$$

$$y = 356 \text{ kg}$$

由计算结果得出, 高碳铬铁补加 42kg, 低碳铬铁补加 356kg, 验算补加铬铁后钢中碳含量和铬含量:

$$\text{高碳铬铁带入 C 量} = 42 \text{ kg} \times 7\% = 2.94 \text{ kg}$$

$$\text{低碳铬铁带入 C 量} = 356 \text{ kg} \times 0.5\% = 1.78 \text{ kg}$$

$$\text{钢中原有 C 量} = 10000 \text{ kg} \times 0.15\% = 15 \text{ kg}$$

$$\text{合计 C 量} = (2.94 + 1.78 + 15) \text{ kg} = 19.72 \text{ kg}$$

$$\text{钢中碳含量} \quad C = \frac{19.72}{10000 + 42 + 356} \times 100\% = 0.19\%, \text{ 符合控制成分。}$$

$$\text{高碳铬铁带入 Cr 量} = 42 \text{ kg} \times 63\% = 26.46 \text{ kg}$$

$$\text{低碳铬铁带入 Cr 量} = 356 \text{ kg} \times 67\% = 238.52 \text{ kg}$$

$$\text{钢中原有 Cr 量} = 10000 \text{ kg} \times 11\% = 1100 \text{ kg}$$

$$\text{合计 Cr 量} = (26.46 + 238.52 + 1100) \text{ kg} = 1364.98 \text{ kg}$$

$$\text{钢中铬含量} \quad Cr = \frac{1364.98}{10398} \times 100\% = 13\%, \text{ 符合控制成分。}$$

验算结果表明, 补加高碳铬铁和低碳铬铁后, 钢中碳含量和铬含量完全达到要求控制成分合格, 补加数量合适。

六、熔炼 ZG12Cr18Ni12Mo2Ti 高合金不锈耐蚀铸钢配料计算方法

例 7-10 熔炼 ZG12Cr18Ni12Mo2Ti 不锈钢新料氧化法配料计算实例。

此例是为了使还原期不加更多的合金料, 在装料时将低碳铬铁 FeCr65C0.10 先装入炉内, 在生产中也会遇到这种情况, 防止还原期加合金料太多, 使钢液温度降得太多, 合金铁料熔化得慢, 所以要将合金铁分开加入炉内。

1) 化学成分见表 7-20。

表 7-20 化学成分 (质量分数)

(%)

| 元素 | C | Si | Mn | Cr | Ni | Mo | S | P | Ti | 备注 |
|------|------|-----|--------------|----------------|----------------|--------------|-------|-------|-------------------|------|
| 标准成分 | 0.12 | 1.5 | 0.8 ~ 2.0 | 16.0 ~ 19.0 | 11.0 ~ 13.0 | 2.0 ~ 3.0 | 0.030 | 0.045 | 5(C0.02 ~ 0.7) | — |
| 配入成分 | — | — | 1.0 | 17.5 | 12.0 | 2.5 | — | — | 0.5 | 计算成分 |

2) 钢液需要量为 6000kg。

3) 投料量总回收率为 95%，

则
$$\text{投料量} = \frac{6000\text{kg}}{95\%} = 6315\text{kg}$$

4) 计算合金元素需要量:

$$\text{Cr 量} = 6000\text{kg} \times 17.5\% = 1050\text{kg}$$

$$\text{Ni 量} = 6000\text{kg} \times 12\% = 720\text{kg}$$

$$\text{Mn 量} = 6000\text{kg} \times 1.0\% = 60\text{kg}$$

$$\text{Mo 量} = 6000\text{kg} \times 2.5\% = 150\text{kg}$$

$$\text{Ti 量} = 6000\text{kg} \times 0.5\% = 30\text{kg}$$

5) 装料时加低碳铬铁 FeCr6C0.10 (含 Cr66%) 700kg,

则 带入 Cr 量 = $700\text{kg} \times 66\% \times 90\% \text{ (回收率)} = 462\text{kg} \times 90\% = 416\text{kg}$

6) 计算合金铁需要量:

$$\text{Cr 量} = (1050 - 416)\text{kg} = 634\text{kg}$$

用微碳铬铁 FeCr6C0.06 补 Cr (含 Cr68%),

则
$$\text{FeCr6C0.06 量} = \frac{634\text{kg}}{68\% \times 95\%} = 981\text{kg} \approx 980\text{kg}$$

电解镍 Ni9980 补 Ni (含 Ni99.8%),

则
$$\text{Ni9980 量} = \frac{720\text{kg}}{99.8\% \times 100\%} = 721\text{kg}$$

用 FeMo60 补 Mo (含 Mo60%),

则
$$\text{FeMo60 量} = \frac{150\text{kg}}{60\% \times 96\%} = 260\text{kg}$$

用金属锰 JMn96 补 Mn (含 Mn96%),

则
$$\text{JMn96 量} = \frac{60\text{kg}}{96\% \times 95\%} = 66\text{kg}$$

用钛铁 FeTi30 补 Ti (含 Ti30%),

则
$$\text{FeTi30 量} = \frac{30\text{kg}}{30\% \times 70\%} = 143\text{kg}$$

用 SiCa 块 40kg。

7) 计算低 P 钢用量:

$$\text{低 P 钢量} = (6315 - 700 - 980 - 721 - 260 - 66 - 143 - 40)\text{kg} = 3405\text{kg} \approx 3400\text{kg}$$

8) 装料量 = $(3400 + 700 + 721 + 260)\text{kg} = 5081\text{kg}$

9) 计算熔清时钢液合金元素含量:

$$\text{Cr} = \frac{462\text{kg}}{5081\text{kg}} \times 100\% = 9.09\%$$

$$\text{Ni} = \frac{721\text{kg}}{5081\text{kg}} \times 100\% = 14.2\%$$

$$Mo = \frac{150\text{kg}}{5081\text{kg}} \times 100\% = 2.95\%$$

Mn 含量为 0.4% ~ 0.6%

- 10) SiCa 粉用量为 30 ~ 40kg/t 钢液, 酌情加。
- 11) Al 粉用量一般为 20kg/t 钢液酌情加。
- 12) 配碳量为 0.4%, 用电极头增碳, 用高压吹氧脱碳。
- 13) 炉料汇总表见表 7-21。

表 7-21 炉料汇总表

(年 月 日 天气)

| 序号 | 名称 | 数量/kg | 入炉时期 |
|----|-------------|-------|-----------|
| 1 | 低 P 钢 | 3400 | 装炉 |
| 2 | FeCr65Co.10 | 700 | 装炉 |
| 3 | 电解镍 Ni9980 | 721 | 装炉 |
| 4 | 钼铁 FeMo60 | 260 | 装炉 |
| 5 | JMn96 | 66 | 还原期 |
| 6 | FeCr60Co.06 | 980 | 还原期 |
| 7 | SiCa 块 | 40 | 还原期 |
| 8 | FeTi30 | 143 | 出钢前 15min |
| 合计 | | 6310 | — |

例 7-11 熔炼 ZG12Cr18Ni12Mo2Ti 不锈钢返回氧化法配料计算实例。

- 1) 化学成分见表 7-22。

表 7-22 化学成分 (质量分数, %)

| 元素 | C | Si | Mn | Cr | Ni | Mo | S | P | Ti |
|-------|------|-----|-----------|-------------|-------------|-----------|-------|-------|----------------|
| 标准成分 | 0.12 | 1.5 | 0.8 ~ 2.0 | 16.0 ~ 19.0 | 11.0 ~ 13.0 | 2.0 ~ 3.0 | 0.030 | 0.045 | 5(C0.02 ~ 0.7) |
| 计算成分 | — | — | 1.0 | 17.5 | 12.0 | 2.5 | — | — | 0.5 |
| 返回料成分 | — | — | 1.0 | 17.5 | 12.0 | 2.0 | — | — | — |

- 2) 钢液量需要 6000kg。

- 3) 装料量总回收率 95%,

则 装料量 = $\frac{6000\text{kg}}{95\%} = 6315\text{kg}$, 取 6300kg

- 4) 计算纯合金元素量:

$$\text{纯 Cr 量} = 6000\text{kg} \times 17.5\% = 1050\text{kg}$$

$$\text{纯 Ni 量} = 6000\text{kg} \times 12.0\% = 720\text{kg}$$

$$\text{纯 Mo 量} = 6000\text{kg} \times 2.5\% = 150\text{kg}$$

$$\text{纯 Mn 量} = 6000\text{kg} \times 1.0\% = 60\text{kg}$$

$$\text{纯 Ti 量} = 6000\text{kg} \times 0.5\% = 30\text{kg}$$

Si 量先不计算, 因吹氧前向炉内加 SiFe 块 5~10kg, 还原期加 SiCa 块和 Si-Ca 粉、Al 粉、C 粉都有还原 Si, 加 TiFe 也带入 Si。

5) 采用本钢种废钢返回料为 3000kg。

$$6) \text{ 废钢返回料占配料比} = \frac{3000}{6300} \times 100\% = 47.6\%.$$

7) 计算返回料带入合金元素量:

$$\text{带入 Cr 量} = 3000\text{kg} \times 17.5\% \times 85\% = 525\text{kg} \times 85\% = 446\text{kg}$$

$$\text{带入 Ni 量} = 3000\text{kg} \times 12.0\% \times 95\% = 360\text{kg} \times 95\% = 342\text{kg}$$

$$\text{带入 Mo 量} = 3000\text{kg} \times 2.0\% \times 95\% = 60\text{kg} \times 95\% = 57\text{kg}$$

$$\text{带入 Mn 量} = 3000\text{kg} \times 1.0\% \times 70\% = 30\text{kg} \times 70\% = 21\text{kg}$$

在吹氧时 Si 剩余很少, 在还原期加脱氧 Al 粉、碳粉时有回收 Si。Ti 在吹氧时已烧损。

8) 计算需要(配入)铁合金量:

$$\text{微碳铬铁 FeCr65C0.06 (含 Cr70\%)} \text{ 配入量} = \frac{(1050 - 446)\text{kg}}{70\% \times 95\%} = 908\text{kg}, \text{ 实加 900kg}$$

$$\text{电解镍 Ni9960 (含 Ni99.6\%)} \text{ 配入量} = \frac{(720 - 342)\text{kg}}{99.6\% \times 95\%} = 399\text{kg}$$

$$\text{钼铁 FeMo70 (含 Mo70\%)} \text{ 配入量} = \frac{(150 - 57)\text{kg}}{70\% \times 96\%} = 138\text{kg}$$

$$\text{金属锰 JMn97 (含 Mn97\%)} \text{ 配入量} = \frac{(60 - 21)\text{kg}}{97\% \times 95\%} = 42\text{kg}$$

$$\text{钛铁 FeTi30 (含 Ti30\%)} \text{ 配入量} = \frac{30\text{kg}}{30\% \times 70\%} = 142.8\text{kg} \approx 143\text{kg}$$

SiCa 块加入量为 45kg

SiCa 粉 30~40kg/t 钢液, 根据造渣情况酌情加入。

9) 计算低 P 钢配入量:

$$\begin{aligned} \text{低 P 钢量} &= \text{总装料量} + \text{返回料量} + \text{微碳铬铁量} + \text{电解镍量} \\ &\quad + \text{钼铁量} + \text{金属锰量} + \text{钛铁量} + \text{SiCa 块量} \\ &= (6300 - 3000 - 900 - 399 - 138 - 42 - 143 - 45)\text{kg} \\ &= 1633\text{kg} \end{aligned}$$

10) 装料量:

$$\text{装料量} = (3000 + 1633 + 138 + 399) \text{ kg} = 5170 \text{ kg}$$

11) 还原期加入量:

$$\begin{aligned}\text{还原加入量} &= \text{FeCr65C0.06 量} + \text{JMn97 量} + \text{SiCa 量} + \text{FeTi30 量} \\ &= (900 + 42 + 45 + 143) \text{ kg} \\ &= 1130 \text{ kg}\end{aligned}$$

12) 计算熔清钢液成分:

$$\text{Cr}_{\text{熔清}} = \frac{525 \text{ kg}}{5170 \text{ kg}} \times 100\% = 10.1\%$$

$$\text{Ni}_{\text{熔清}} = \frac{360 \text{ kg} + 397 \text{ kg}}{5170 \text{ kg}} \times 100\% = 14.6\% \quad (\text{注: NiFe 含 Ni 量} = 399 \text{ kg} \times 99.6\% = 397 \text{ kg})$$

$$\begin{aligned}\text{Mo}_{\text{熔清}} &= \frac{60 \text{ kg} + 99.6 \text{ kg}}{5170 \text{ kg}} \times 100\% = 3.0\% \quad (\text{注: MoFe 含 Mo 量} = 138 \text{ kg} \times 70\% = 99.6 \text{ kg}) \\ \text{Mn}_{\text{熔清}} &= \frac{30 \text{ kg} + 8 \text{ kg}}{5170 \text{ kg}} \times 100\% = 0.7\% \quad (\text{注: 低 P 钢中含 Mn 量} = 0.5\% \times 1633 \text{ kg} = 8 \text{ kg})\end{aligned}$$

13) 脱氧 Al 块 10kg 出钢插入钢液中。

14) Al 粉按每吨钢液 20kg 加入, SiCa 粉酌情加。

15) 配碳量为 0.4%, 采用电极头增碳, 高压吹氧脱碳。

七、熔炼高锰钢 ZG100Mn13 新料氧化法配料计算方法

例 7-12 熔炼高锰钢 ZG100Mn13 新料氧化法配料计算方法实例

1) 化学成分见表 7-23。

表 7-23 ZG100Mn13 化学成分 (质量分数) (%)

| 元素 | C | Mn | Si | P | S |
|------|------------|-------------|-----------|-------|-------|
| 标准成分 | 0.9 ~ 1.35 | 11.0 ~ 14.0 | 0.3 ~ 0.8 | ≤0.09 | ≤0.04 |
| 配入成分 | 1.30 | 13.0 | 0.60 | ≤0.06 | ≤0.04 |

2) 需要钢液量为 7000kg。

3) 需纯 Mn 量:

$$\text{纯 Mn 量} = 7000 \text{ kg} \times 13.0\% = 910 \text{ kg}$$

4) 需锰铁量。所选高碳锰铁成分见表 7-24, 回收率为 95%。

表 7-24 高 CMnFe 化学成分 (质量分数) (%)

| 元素 | C | Mn | Si | P |
|----|------|----|-----|------|
| 成分 | 5.80 | 70 | 0.8 | 0.20 |

$$\text{高 CMnFe 量} = \frac{910 \text{ kg}}{70\% \times 95\%} = 1368 \text{ kg} \approx 1370 \text{ kg}$$

5) 计算 1370kg 高 CMnFe 中纯 C、Si、P 量:

$$\text{纯 C 量} = 1370 \text{ kg} \times 5.8\% = 79.4 \text{ kg}$$

$$\text{纯 Si 量} = 1370 \text{ kg} \times 0.80\% = 10.96 \text{ kg} \approx 11 \text{ kg}$$

$$\text{纯 P 量} = 1370 \text{ kg} \times 0.20\% = 2.74 \text{ kg}$$

6) 计算加 1370kg 高 CMnFe 带入钢液中的 C、Si、P 含量:

$$C_{\text{带入}} = \frac{79.4 \text{ kg}}{7000 \text{ kg}} \times 100\% = 1.13\%$$

$$Si_{\text{带入}} = \frac{11.0 \text{ kg}}{7000 \text{ kg}} \times 100\% = 0.15\%$$

$$P_{\text{带入}} = \frac{2.74 \text{ kg}}{7000 \text{ kg}} \times 100\% = 0.039\%$$

7) 硅铁加入量选用 SiFe 含 Si75%，回收率为 95%。配入 Si 量在下限。

设氧化末钢液中 Si 含量为 0.15%:

$$\text{则} \quad \text{SiFe 量} = \frac{7000 \text{ kg} (0.60\% - 0.15\%)}{75\% \times 95\%} = 44 \text{ kg}$$

8) 需废钢和铁料量:

$$\text{钢铁料量} = \frac{7000 - (1370 + 44) \times 95\%}{90\%} \text{ kg} = 6285 \text{ kg}$$

此数包括生铁数

注: 95%、90% 为废钢回收率, 当废钢料好时用 90%, 或用 95%; 此计算废钢量方法与以上方法不同, 也可用于计算低 P 钢量。

9) 配碳量。根据配入碳量为 1.30%, 而加锰铁时带入碳量为 1.13%, 则尚差碳含量 = 1.30% - 1.13% = 0.17%。即氧化完钢液中碳含量应为 0.17%, 氧化需要的脱碳量设为 0.30% ~ 0.40%, 取 0.30%, 熔化中碳烧损率约 0.10%。

$$\text{则} \quad C_{\text{配入}} = 0.17\% + 0.30\% + 0.10\% = 0.57\%$$

10) 用生铁配碳。选用生铁成分(质量分数) C4.0%、Si1.2%、P0.30%、S 不计; 因炼高锰钢加 Mn 很多(与 S 生成 MnS), 所以加生铁中 S 可不计。

设废钢成分(质量分数)为 C0.35%、Mn0.50%、P0.03%。

$$\text{则} \quad \text{生铁量} = \frac{6285 \times (0.57\% - 0.35\%) \text{ kg}}{4.0\% \times 90\%} = 384 \text{ kg} \approx 380 \text{ kg}$$

$$\text{即} \quad \text{应加废钢量} = (6285 - 380) \text{ kg} = 5905 \text{ kg} \approx 5900 \text{ kg}$$

11) 生铁带入 P 量(Si 不计算):

$$P_{\text{生铁}} = \frac{380 \times 0.30\%}{7000} \times 100\% = 0.016\%$$

12) 废钢带入 P 量:

$$P_{\text{废钢}} = \frac{5900\text{kg} \times 0.03\%}{7000\text{kg}} \times 100\% = 0.025\%$$

13) 计算钢中含 P 量:

$$P = 0.039\% + 0.016\% + 0.025\% = 0.08\%$$

配入控制 P 含量为 0.08%，钢中 P 含量为 0.08%，是可以的。含 P 量越低越好。

14) 炉料汇总表见表 7-25。

表 7-25 炉 料 汇 总

| 序号 | 名 称 | 化学成分(质量分数, %) | 数量/kg | 加入时期 | 备 注 |
|----|------|--------------------------------|-------|-------|------|
| 1 | 废钢 | C0.35, Mn0.50, P0.03 | 5900 | 装料时加入 | — |
| 2 | 生铁 | C4.0, Si1.2, P0.30 | 380 | 装料时加入 | — |
| 3 | 小计 | — | 6280 | — | — |
| 4 | 高碳锰铁 | C5.8, Mn70, Si0.80, P0.20 | 1370 | 还原期加入 | — |
| 5 | 硅铁 | Si75.0 | 44 | 还原期加入 | — |
| 6 | 小计 | — | 1414 | — | — |
| 7 | 铁矿石 | Fe ₂ O ₃ | 210 | 氧化期加入 | 氧化脱碳 |
| 8 | 焦炭粉 | 98.0 | — | 还原期加入 | 酌情加入 |
| 9 | 硅铁粉 | Si75.0 | — | 还原期加入 | 酌情加入 |

八、熔炼 ZG20Cr5Mo 新料氧化法配料计算方法

例 7-13 熔炼 ZG20Cr5Mo 低合金高强度铸钢实例

1) 化学成分见表 7-26。

表 7-26 ZG20Cr5Mo 化学成分 (质量分数) (%)

| 元素 | C | Si | Mn | Cr | Mo | S | P | 备注 |
|------|-------------|-------|-------|-------|------------|-------|-------|------|
| 标准成分 | 0.15 ~ 0.25 | ≤0.50 | ≤0.60 | 4 ~ 6 | 0.5 ~ 0.65 | ≤0.04 | ≤0.04 | — |
| 配入成分 | — | 0.4 | 0.5 | 5.0 | 0.5 | — | — | 计算成分 |

2) 设钢液量为 5000kg。

3) 装料量。设综合回收率为 95%，

则
$$\text{装料量} = \frac{5000\text{kg}}{95\%} = 5263\text{kg}$$

4) 需纯合金元素量:

$$\text{纯 Cr 量} = 5000\text{kg} \times 5.0\% = 250\text{kg}$$

$$\text{纯 Mo 量} = 5000 \text{kg} \times 0.5\% = 25 \text{kg}$$

5) 配碳量为 0.4%，用铁矿石氧化，

则 $\text{铁矿石量} = 40 \text{kg/t} \times 5 \text{t} = 200 \text{kg}$

6) 配入 Cr、Mo 合金量：

$$\text{微碳铬铁 FeC}56.5\text{C}0.10 \text{ 量} = \frac{250 \text{kg}}{68\% \times 95\%} = 386.9 \text{kg} \approx 387 \text{kg}$$

$$\text{钼铁 FeMo}70 \text{ 量} = \frac{25 \text{kg}}{67\% \times 95\%} = 39 \text{kg}$$

7) 低 P 钢量：

$$\text{低 P 钢量} = (5263 - 387 - 39) \text{kg} = 4837 \text{kg}$$

8) 装料量：

$$\text{装料量} = (4837 + 39) \text{kg} = 4876 \text{kg}$$

9) 还原期加料量：

$$\text{还原期加料量} = 387 \text{kg}$$

10) 总装料量：

$$\text{总装料量} = 4876 \text{kg} + 387 \text{kg} = 5263 \text{kg}$$

11) 用铁矿石氧化或吹氧氧化。

12) 增碳用电极头增碳。

13) 造渣还原用 SiFe 粉 (配料单略)。

第八章 熔炼合金钢还原期调整 成分的配料计算

第一节 还原期补加合金的计算公式和例题

一、补加合金后对其他合金元素的降低量计算

因为对某个合金元素补加后会使原有其他合金元素的含量降低，所以要反复进行补加直到成分合格，这种调整成分的方法有的资料称为拉补计算法，简称为拉补法。

$$\text{某降低量} = \frac{\text{补加料量}}{\text{炉内钢液量} + \text{补加料量}}$$

例 8-1 熔炼 ZG08Cr18Ni9Ti 不锈钢，炉内钢液量为 6000kg，加 TiFe 前化验分析 Cr 的质量分数为 18.5%，Ni 的质量分数为 10.0%，加 TiFe200kg 后计算 Cr、Ni 含量降低量。

$$1) \text{Cr 降低量} = \frac{18.5\% \times 200\text{kg}}{6000\text{kg} + 200\text{kg}} \times 100\% = 0.59\%$$

$$2) \text{Ni 降低量} = \frac{10.0\% \times 200\text{kg}}{6000\text{kg} + 200\text{kg}} \times 100\% = 0.32\%$$

验算补加 TiFe200kg 后 Cr、Ni 含量：

$$\text{Cr} = 18.5\% - 0.59\% = 17.91\%， \text{还合格 (Cr17.0\% ~ 20.0\%)。}$$

$$\text{Ni} = 10\% - 0.32\% = 9.68\%， \text{还合格 (Ni8.0\% ~ 11.0\%)。}$$

如果因补加 TiFe 后 Cr 或 Ni 降低至不合格，则还要补加 CrFe 或 Ni，达到合格为止，其他元素也是如此。一般情况下，影响不太大时可不继续连补。此法用在单一高合金元素的钢较方便。

二、还原期某元素含量超出规格成分时用纯铁降低法（冲淡法）

$$\text{补加纯铁量} = \frac{(\text{炉内元素含量} - \text{规格元素含量}) \times \text{原钢液量}}{\text{规格元素含量}}$$

例 8-2 熔炼 ZG20Cr5Mo 耐热钢，还原期钢液含 Cr 的质量分数为 5.5%，规格 Cr 的质量分数为 5.0%，已知炉内钢液量为 5000kg，计算补加多少工业纯铁。

$$\text{补加工业纯铁量} = \frac{(5.5\% - 5.0\%) \times 5000\text{kg}}{5.0\%} = 500\text{kg}$$

验算补加 500kg 工业纯铁后钢液中 Cr 含量：

$$\text{Cr} = \frac{5.5\% \times 5000\text{kg}}{5000\text{kg} + 500\text{kg}} \times 100\% = 5.0\%$$

符合规格成分要求。

应该注意，在熔炼过程中，往往补加某合金元素要影响其他合金元素含量，所以要严格仔细配量计算，在熔炼还原期要严格控制成分，尽量做到不补加或少补加。

三、补加合金铁计算法

$$\text{补加合金铁量} = \frac{\text{原钢液量} \times (\text{钢液控制成分} - \text{原钢液成分})}{(\text{补加合金铁成分} - \text{钢液控制成分}) \times \text{合金铁回收率}}$$

改用字母表示的公式为

$$m_{\text{合金}} = \frac{m_{\text{原钢液}}(a - b)}{(c - a)\eta} \quad (8-1)$$

式中 $m_{\text{合金}}$ —— 铁合金加入量 (kg)；

$m_{\text{原钢液}}$ —— 原钢液量 (kg)；

a —— 所需规格成分 (%)；

b —— 钢液残留成分 (%) (炉中取样成分)；

c —— 合金铁元素含量 (%) (补加合金铁成分)；

η —— 合金元素回收率 (%)。

如变换为简化公式：

$$m_{\text{合金}} = \frac{m_{\text{原钢液}}(a - b)}{c\eta - a} \quad (8-2)$$

则计算结果适宜。

碳钢和低合金钢由于合金元素含量低，合金铁加入量少，对钢液总质量的影响可以忽略不计，合金铁加入量公式为

$$m_{\text{合金}} = \frac{m_{\text{原钢液}}(a - b)}{c\eta} \quad (8-3)$$

例 8-3 熔炼 ZG20Cr13 钢，还原期钢中 Cr 的质量分数为 12.5%，而钢液控制成分 Cr 的质量分数为 13.0%，已知钢液总质量为 6000kg，求补加 CrFe 量。用含 Cr68.0% 的 CrFe，回收率为 95.0%。

$$\text{补加 CrFe 量} = \frac{6000\text{kg} \times (13.0\% - 12.5\%)}{(68.0\% - 13.0\%) \times 95.0\%} = 57\text{kg}$$

例 8-4 用公称 5t 碱性电弧氧化法熔炼高锰钢 ZGMn13, Mn 的质量分数为 13.0%, 氧化末期钢液量为 6500kg, 经取样化验分析: C 的质量分数为 0.25%, Mn 的质量分数为 0.2%, Si 微量, P 的质量分数为 0.018%, 要将 Mn 的质量分数配到 13.0%、Si 的质量分数配到 0.7%, 求补加 MnFe 和 SiFe 的补加量, 铁合金成分及回收率见表 8-1。

表 8-1 铁合金成分及回收率 (质量分数) (%)

| 铁合金 | C | Si | Mn | P |
|-----|-----|------|------|------|
| 锰铁 | 5.2 | 1.75 | 66.0 | 0.38 |
| 硅铁 | — | 75.0 | — | — |
| 生铁 | 3.5 | 0.8 | — | 0.2 |
| 回收率 | 90 | 95 | 90 | 100 |

1) 计算补加锰铁量:

$$\text{MnFe 量} = \frac{6500\text{kg} \times (13.0\% - 0.2\%)}{66.0\% \times 90.0\% - 13.0\%} = 1793\text{kg}$$

如果用公式:

$$m_{\text{合金}} = \frac{a(a-b)}{(c-b)\eta} \text{ 计算,}$$

$$\text{则} \quad \text{MnFe 量} = \frac{6500\text{kg} \times (13.0\% - 0.2\%)}{(66.0\% - 13.0\%) \times 90\%} = 1744\text{kg}$$

此公式计算结果补加 MnFe 量与公式上计算结果偏低, 计算结果相差 = 1793kg - 1744kg = 49kg。

补加合金元素含量偏低, 两公式生产应用时应加注意。

2) 由于补加 1793kg MnFe 使钢液含 C、Si、P 增加:

$$C = \frac{1793\text{kg} \times 5.2\% \times 90\%}{6500\text{kg} + 1793\text{kg}} \times 100\% = 0.10\%$$

$$Si = \frac{1793\text{kg} \times 1.75\% \times 95\%}{6500\text{kg} + 1793\text{kg}} \times 100\% = 0.36\%$$

$$P = \frac{1793\text{kg} \times 0.38\%}{6500\text{kg} + 1793\text{kg}} \times 100\% = 0.08\%$$

3) 计算补加硅铁量:

$$\text{SiFe 量} = \frac{(6500 + 1793)\text{kg} \times (0.7\% - 0.36\%)}{75\% \times 95\% - 0.7\%} = 39.96\text{kg} \approx 40\text{kg}$$

4) 钢液中含碳量:

$$C = 0.25\% + 0.10\% = 0.35\%$$

5) 钢液中含磷量:

$$P = 0.018\% + 0.08\% = 0.098\%$$

钢液中 C、P 均符合要求。

四、一元合金加入量计算（减本身法）

$$\text{合金加入量} = \frac{\text{钢液量} \times (\text{规则成分} - \text{炉中钢液化验元素含量})}{\text{合金成分} - \text{规格成分}}$$

例 8-5 熔炼 ZG20Cr5 耐热钢钢液量 5000kg, 还原期钢液化验 Cr 质量分数为 4.0%, 标准规格 Cr 质量分数为 5.0%, 用 Cr 质量分数 60.0% 的 CrFe 合金补加 Cr, 计算补加 CrFe 量。

$$\text{CrFe 量} = \frac{5000\text{kg} \times (5.0\% - 4.0\%)}{60.0\% - 5.0\%} = 90.9\text{kg}$$

验算补加 CrFe 合金后钢液中 Cr 含量:

$$\text{补 Cr 量} = 90.9\text{kg} \times 60.0\% = 54.54\text{kg}$$

$$\text{Cr}_{\text{钢液}} = \frac{5000 \times 4.0\% + 54.54}{5000 + 90.9} \times 100\% = 5.0\%, \text{ 合格。}$$

五、多元合金补加计算（补加系数法）

补加系数法是某种合金在钢液中所占的比例, 根据合金含量和成品钢的成分分两步完成, 可得出各合金的实际加入量。即先用一般计算法计算出合金预加总量, 再乘以各合金的补加系数。

$$1) \text{ 各项合金料占有率} = \frac{\text{规格成分}}{\text{合金成分}} \times 100\%$$

$$2) \text{ 纯钢液占有率} = 100\% - \text{各项合金占有率之和}$$

$$3) \text{ 补加系数} = \frac{\text{合金占有率}}{\text{纯钢液占有率}}$$

根据补加系数即可求出每增加 100kg 不含合金元素的钢液必须配加多少量合金才能使成分达到最后成品钢的成分控制要求。

$$4) \text{ 合金补加量} = \text{合金预补加总量} \times \text{补加系数}$$

$$5) \text{ 共需补加合金量} = \text{各项合金预补加量} + \text{各项合金的补加量}$$

例 8-6 电弧炉熔炼 ZG0Cr18Ni9Nb 不锈钢, 需要钢液量 20000kg (20t), 钢液控制成分和还原期钢液成分见表 8-2, 配料合金见表 8-3, 计算补加合金量。

表 8-2 ZG0Cr18Ni9Nb 钢化学成分 (质量分数) (%)

| 元素 | C | Si | Mn | Cr | Ni | Nb | 备注 |
|------|------|------|------|-------|------|------|---------|
| 控制成分 | 0.06 | 0.65 | 1.50 | 19.00 | 9.50 | 0.50 | — |
| 分析成分 | 0.06 | 0.60 | 1.50 | 17.00 | 8.90 | 0.45 | 还原期分析成分 |

表 8-3 配 料 表

| 配料合金 | 元素含量(质量分数, %) | 元素收得率(%) |
|------------|---------------|----------|
| 电解镍(Ni99) | Ni99.9 | 100 |
| 微碳铬铁(CrFe) | Cr69.5 | 98 |
| 铌铁(NbFe) | Nb49.6 | 95 |
| 金属锰(JMn) | Mn99.2 | 95 |
| 硅铁(SiFe) | Si44.5 | 90 |

1) 求出各项合金占有率:

$$\text{CrFe 占有率} = \frac{19.0\%}{69.5\%} \times 100\% = 27.33\%$$

$$\text{Ni99 占有率} = \frac{9.5\%}{99.9\%} \times 100\% = 9.51\%$$

$$\text{NbFe 占有率} = \frac{0.5\%}{49.6\%} \times 100\% = 1.01\%$$

$$\text{JMn 占有率} = \frac{1.5\%}{99.2\%} \times 100\% = 1.51\%$$

$$\text{SiFe 占有率} = \frac{0.65\%}{44.5\%} \times 100\% = 1.46\%$$

2) 求出纯钢液占有率:

$$\begin{aligned} \text{纯钢液占有率} &= 100\% - (27.33\% + 9.51\% + 1.01\% + 1.51\% + 1.46\%) \\ &= 59.18\% \end{aligned}$$

3) 求出各项合金补加系数:

$$\text{CrFe 补加系数} = \frac{27.33}{59.18} = 0.462$$

$$\text{Ni99.9 补加系数} = \frac{9.51}{59.18} = 0.16$$

$$\text{NbFe 补加系数} = \frac{1.01}{59.18} = 0.017$$

$$\text{JMn 补加系数} = \frac{1.51}{59.18} = 0.025$$

$$\text{SiFe 补加系数} = \frac{1.46}{59.18} = 0.024$$

4) 求出各项合金预补加量 (按照单一合金元素补加公式计算):

$$\text{CrFe 量} = \frac{20000\text{kg} \times (19.0 - 17.0)\%}{69.5\% \times 98\%} = 587\text{kg}$$

$$\text{Ni99.9 量} = \frac{20000\text{kg} \times (9.5 - 8.9)\%}{99.9\% \times 100\%} = 120\text{kg}$$

$$\text{NbFe 量} = \frac{20000\text{kg} \times (0.5 - 0.45)\%}{49.6\% \times 95\%} = 21.2\text{kg}$$

JMn 不用补, Mn 分析成分 1.5% 已够。

$$\text{SiFe 量} = \frac{20000\text{kg} \times (0.65 - 0.6)\%}{44.5\% \times 90\%} = 24.96\text{kg}$$

$$\begin{aligned}\text{合计合金补加量} &= (587 + 120 + 21.2 + 0 + 24.96)\text{kg} \\ &= 753.16\text{kg}\end{aligned}$$

5) 求出合计补加量乘以各补加系数的补加量:

$$\text{CrFe 量} = 753.16\text{kg} \times 0.462 = 348\text{kg}$$

$$\text{Ni99.9 量} = 753.16\text{kg} \times 0.16 = 120.5\text{kg}$$

$$\text{NbFe 量} = 753.16\text{kg} \times 0.017 = 12.8\text{kg}$$

$$\text{JMn 量} = 753.16\text{kg} \times 0.025 = 18.8\text{kg}$$

$$\text{SiFe 量} = 753.16 \times 0.024 = 18.1\text{kg}$$

6) 合计补加合金料量:

$$\text{CrFe 量} = (587 + 348)\text{kg} = 935\text{kg}$$

$$\text{Ni99.9 量} = (120 + 120.5)\text{kg} = 240.5\text{kg}$$

$$\text{NbFe 量} = (21.2 + 12.8)\text{kg} = 34\text{kg}$$

$$\text{JMn 量} = (0 + 18.8)\text{kg} = 18.8\text{kg}$$

$$\text{SiFe 量} = (24.96 + 18.1)\text{kg} = 43.1\text{kg}$$

$$\begin{aligned}\text{共需补加合金料量} &= (935 + 240.5 + 34 + 18.8 + 43.1)\text{kg} \\ &= 1271.4\text{kg}\end{aligned}$$

7) 补加合金料后总钢液量:

$$\text{总钢液量} = (20000 + 1271.4)\text{kg} = 21271.4\text{kg} \approx 21271\text{kg}$$

8) 验算补加合金料后钢液化学成分:

$$\text{Cr} = \frac{20000\text{kg} \times 17.0\% + 935\text{kg} \times 69.5\% \times 98\%}{21271\text{kg}} \times 100\% = 18.97\%$$

$$\text{Ni} = \frac{20000\text{kg} \times 8.9\% + 240.5\text{kg} \times 99.9\% \times 100\%}{21271\text{kg}} \times 100\% = 9.5\%$$

$$\text{Nb} = \frac{20000\text{kg} \times 0.45\% + 34\text{kg} \times 49.6\% \times 95\%}{21271\text{kg}} \times 100\% = 0.498\%$$

$$\text{Mn} = \frac{20000\text{kg} \times 1.5\% + 18.8\text{kg} \times 95\%}{21271\text{kg}} \times 100\% = 1.5\%$$

$$\text{Si} = \frac{20000\text{kg} \times 0.6\% + 43.1\text{kg} \times 44.5\% \times 90\%}{21271\text{kg}} \times 100\% = 0.64\%$$

验算结果符合钢液的控制成分要求，补加合金料量正确。

例 8-7 熔炼 ZG08Cr18Ni9Ti 不锈钢，预定成品的控制成分（质量分数）为：C0.07%、Mn1.25%、Si<0.80%、Cr17.5%、Ni10.6%、Ti0.5%。

用的合金为：30% TiFe（回收率定为55%）；65% CrFe（回收率定为100%）；100% Ni（回收率定为100%）；100% JMn97（回收率定为100%）；C、Si不考虑。

1) 假定100kg成品钢，由上述的合金配制成，则折合需加入的各合金量：

$$\text{CrFe 量} = \frac{100\text{kg} \times 17.5\%}{65\% \times 100\%} = 27\text{kg}$$

$$\text{Ni 量} = \frac{100\text{kg} \times 10.6\%}{100\% \times 100\%} = 10.6\text{kg}$$

$$\text{JMn97 量} = \frac{100\text{kg} \times 1.25\%}{100\% \times 100\%} = 1.25\text{kg}$$

$$\text{FeTi30 量} = \frac{100\text{kg} \times 0.50\%}{30\% \times 55\%} = 3\text{kg}$$

$$\begin{aligned}\text{Fe 量} &= 100\text{kg} - \text{各合金总量} = [100 - (27 + 10.6 + 1.25 + 3)] \text{ kg} \\ &= (100 - 42) \text{ kg} = 58\text{kg}\end{aligned}$$

2) 补加系数：

$$\text{CrFe 补加系数} = \frac{27\text{kg}}{58\text{kg}} = 0.4655$$

$$\text{Ni 补加系数} = \frac{10.6\text{kg}}{58\text{kg}} = 0.1828$$

$$\text{JMn97 补加系数} = \frac{1.25\text{kg}}{58\text{kg}} = 0.0216$$

$$\text{FeTi30 补加系数} = \frac{3\text{kg}}{58\text{kg}} = 0.0517$$

也就是说，每增加1kg不含合金元素的钢液需补加0.4655kg的65% CrFe、0.1828kg的Ni、0.0216kg的JMn97、0.0517kg的30% TiFe才能使成品钢成分达到控制要求。合计补加量 = (0.4655 + 0.1828 + 0.0216 + 0.0517)kg = 0.7216kg

这时的成品钢总补加量是0.7216kg。

3) 根据炉前分析结果，用单元素配料计算法，计算出各元素的补加量。控制成分（质量分数）：C0.07%、Mn1.25%、Si<0.8%、Cr17.5%、Ni10.6%、Ti0.5%。

设炉内有8t钢液，还原分析的结果是（质量分数）：Mn1.00%、Ni10.0%、Cr16.0%、Ti0%。

那么配制成品钢控制成分需补加各合金量：

$$\text{JMn97 预补加量} = 8000\text{kg} \times \frac{1.25\% - 1.00\%}{100\% \times 100\%} = 20\text{kg}$$

$$65\% \text{ CrFe 预补加量} = 8000\text{kg} \times \frac{17.5\% - 16\%}{65\% \times 100\%} = 185\text{kg}$$

$$\text{Ni 预补加量} = 8000\text{kg} \times \frac{10.6\% - 10.0\%}{100\% \times 100\%} = 48\text{kg}$$

$$30\% \text{ TiFe 预补加量} = 8000\text{kg} \times \frac{0.5\% - 0\%}{30\% \times 55\%} = 242\text{kg}$$

配加合金的总量 = (20 + 185 + 48 + 242) kg = 495kg, 这 495kg 合金加入后炉内钢液量增加了 495kg, 但是它们含有的合金元素只能将 8t 钢液配制所需成分, 其增加的 495kg 钢液依然是“不含合金元素的钢液量”, 需将这部分钢液也配制所需成分。

4) 按各合金的补加系数, 计算出要使整炉钢的成分达到控制要求所需补加的各合金量 (495kg × 补加系数) :

$$\text{CrFe 补加量} = 495\text{kg} \times 0.4655 = 230\text{kg}$$

$$\text{Ni 补加量} = 495\text{kg} \times 0.1828 = 90\text{kg}$$

$$\text{JMn97 补加量} = 495\text{kg} \times 0.0216 = 10.6\text{kg}$$

$$\text{FeTi 补加量} = 495\text{kg} \times 0.0517 = 25.5\text{kg}$$

5) 计算各该元素在还原期中所需加入量:

$$\text{CrFe 加入量} = (185 + 230)\text{kg} = 415\text{kg}$$

$$\text{Ni 加入量} = (48 + 90)\text{kg} = 138\text{kg}$$

$$\text{JMn97 加入量} = (20 + 10.6)\text{kg} = 30.6\text{kg}$$

$$\text{FeTi30 加入量} = (242 + 25.5)\text{kg} = 267.5\text{kg}$$

$$\text{合计补加合金量} = (415 + 138 + 30.6 + 267.5)\text{kg} = 851\text{kg}$$

$$6) \text{ 补加合金后钢液量} = (8000 + 851)\text{kg} = 8851\text{kg}$$

7) 验算补加合金后钢液化学成分:

$$\text{Cr} = \frac{8000\text{kg} \times 16\% + 415\text{kg} \times 65\% \times 100\%}{8851\text{kg}} \times 100\% = 17.498\% \approx 17.5\%$$

$$\text{Ni} = \frac{8000\text{kg} \times 10\% + 138\text{kg} \times 100\% \times 100\%}{8851\text{kg}} \times 100\% = 10.597\% \approx 10.6\%$$

$$\text{Mn} = \frac{8000\text{kg} \times 1.0\% + 30.6\text{kg} \times 97\% \times 100\%}{8851\text{kg}} \times 100\%$$

$$= 0.94\% < \text{控制成分 } 1.25\%, \text{ 但 } > 0.8\%$$

$$\text{Ti} = \frac{8000\text{kg} \times 0\% + 267.5\text{kg} \times 30\% \times 55\%}{8851\text{kg}} \times 100\% = 0.498\% \approx 0.5\%$$

六、多次和反复补加合金配料计算方法

在电弧炉炼钢还原期，取样分析成分中有的合金元素含量低于规格成分，需要补加合金。但由于补加某种合金又要影响未被补加元素，使其含量发生降低变化，这样要多次反复补加合金，使之达到合金元素含量合格，沈才芳将这种方法称为“拉配法”。配料计算公式见式（8-1）。

为掌握多种配料计算方法，下面给出一些示例。

1. 多次补加配料计算

例 8-8 电弧炉熔炼高合金不锈钢 ZG0Cr18Ni9Ti 浇注阀门铸件，需要钢液量 10t，成品钢成分要求、还原期分析成分及补加合金成分，见表 8-4。

表 8-4 配料单化学成分（质量分数） (%)

| 合金名称 | Cr | Ni | Mn | Ti | 备注 |
|---------|------|-----|-----|-----|-------------|
| 成品钢成分要求 | 18.0 | 9.5 | 1.0 | 0.5 | 仅为配料计算元素 |
| 取样分析成分 | 17.3 | 9.0 | 0.8 | 0 | Ti 吹氧后完全氧化掉 |
| 补加合金成分 | 65 | 99 | 98 | 30 | 还原期补加合金 |
| 合金回收率 | 95 | 98 | 98 | 60 | — |

1) 计算初次补加合金量：

$$\text{CrFe 初次补加量} = \frac{10000 \text{kg} \times (18.0 - 17.3)\%}{(65 - 18.0)\% \times 95\%} = 156.7 \text{kg}$$

$$\text{Ni 初次补加量} = \frac{10000 \text{kg} \times (9.5 - 9.0)\%}{(99 - 9.5)\% \times 98\%} = 57 \text{kg}$$

$$\text{JMn 初次补加量} = \frac{10000 \text{kg} \times (1.0 - 0.8)\%}{(98 - 1.0)\% \times 98\%} = 21 \text{kg}$$

$$\text{TiFe 初次补加量} = \frac{10000 \text{kg} \times 0.5\%}{(30 - 0.5)\% \times 60\%} = 282 \text{kg}$$

2) 计算第一次补加合金量：

由于补加 Ni、JMn 和 TiFe 后使 Cr 含量降低，计算补加 CrFe 量：

$$\text{CrFe 第一次补加量} = \frac{(57 + 21 + 282) \text{kg} \times 18\%}{(65 - 18)\% \times 95\%} = 145 \text{kg}$$

由于补加 JMn、CrFe 和 TiFe 后使 Ni 含量降低，计算补加 Ni 量：

$$\text{Ni 第一次补加量} = \frac{(156.7 + 21 + 282) \text{kg} \times 9.5\%}{(99 - 9.5)\% \times 98\%} = 49.8 \text{kg}$$

由于补加 CrFe、Ni 和 TiFe 后使 Mn 含量降低, 计算补加 JMn 量:

$$\text{JMn 第一次补加量} = \frac{(156.7 + 57 + 282) \text{ kg} \times 1.0\%}{(98 - 1.0)\% \times 98\%} = 5.2 \text{ kg}$$

由于补加 CrFe、Ni 和 JMn 后使 Ti 含量降低, 计算补加 TiFe 量:

$$\text{TiFe 第一次补加量} = \frac{(156.7 + 57 + 21) \text{ kg} \times 0.5\%}{(30 - 0.5)\% \times 60\%} = 6.6 \text{ kg}$$

3) 计算补加合金总量:

$$\text{CrFe 补加量} = (156.7 + 145) \text{ kg} = 301.7 \text{ kg}$$

$$\text{Ni 补加量} = (57 + 49.8) \text{ kg} = 106.8 \text{ kg}$$

$$\text{JMn 补加量} = (21 + 5.2) \text{ kg} = 26.2 \text{ kg}$$

$$\text{TiFe 补加量} = (282 + 6.6) \text{ kg} = 288.6 \text{ kg}$$

$$\text{补加合金总量} = (301.7 + 106.8 + 26.2 + 288.6) \text{ kg} = 723 \text{ kg}$$

4) 补加合金后钢液总量:

$$\text{钢液总量} = (10000 + 723) \text{ kg} = 10723 \text{ kg}$$

5) 验算补加合金后钢液中合金元素含量:

$$\text{Cr} = \frac{10000 \text{ kg} \times 17.3\% + 301.7 \text{ kg} \times 65\% \times 95\%}{10723 \text{ kg}} \times 100\% = 17.86\%$$

$$\text{Ni} = \frac{10000 \text{ kg} \times 9\% + 106.8 \text{ kg} \times 99\% \times 98\%}{10723 \text{ kg}} \times 100\% = 9.36\%$$

$$\text{Mn} = \frac{10000 \text{ kg} \times 0.8\% + 26.2 \text{ kg} \times 98\% \times 98\%}{10723 \text{ kg}} \times 100\% = 0.978\%$$

$$\text{Ti} = \frac{10000 \text{ kg} \times 0 + 288.6 \text{ kg} \times 30\% \times 60\%}{10723 \text{ kg}} \times 100\% = 0.48\%$$

验算结果与要求的成品钢成分的误差量:

$$\text{Cr} = 18\% - 17.86\% = 0.14\%$$

$$\text{Ni} = 9.5\% - 9.36\% = 0.14\%$$

$$\text{Mn} = 1.0\% - 0.978\% = 0.02\%$$

$$\text{Ti} = 0.5\% - 0.48\% = 0.02\%$$

计算结果各元素含量均小于成品钢成分规格, 所以还要进行第二次补加合金, 使之到达成品钢要求的合金成分。

6) 计算第二次补加合金量:

由于补加 Ni、JMn 和 TiFe 后使 Cr 含量降低, 计算补加 CrFe 量:

$$\text{CrFe 第二次补加量} = \frac{(49.8 + 5.2 + 6.6) \text{ kg} \times 18\%}{(65 - 18)\% \times 95\%} = 24.8 \text{ kg}$$

由于补加 CrFe、JMn 和 TiFe 后使 Ni 含量降低, 计算补加 Ni 量:

$$\text{Ni 第二次补加量} = \frac{(145 + 5.2 + 6.6) \text{ kg} \times 9.5\%}{(99 - 9.5)\% \times 98\%} = 16.98 \text{ kg}$$

由于补加 CrFe、Ni 和 TiFe 后使 Mn 含量降低, 计算补加 JMn 量:

$$\text{JMn 第二次补加量} = \frac{(145 + 49.8 + 6.6) \text{ kg} \times 1.0\%}{(98 - 1.0)\% \times 98\%} = 2.12 \text{ kg}$$

由于补加 CrFe、Ni 和 JMn 后使 Ti 含量降低, 计算补加 TiFe 量:

$$\text{TiFe 第二次补加量} = \frac{(145 + 49.8 + 5.2) \text{ kg} \times 0.5\%}{(30 - 0.5)\% \times 60\%} = 5.65 \text{ kg}$$

7) 计算补加合金总量 (初次 + 第一次 + 第二次补加量之和):

$$\text{CrFe 补加总量} = (156.7 + 145 + 24.8) \text{ kg} = 326.5 \text{ kg}$$

$$\text{Ni 补加总量} = (57 + 49.8 + 16.98) \text{ kg} = 123.8 \text{ kg}$$

$$\text{JMn 补加总量} = (21 + 5.2 + 2.12) \text{ kg} = 28.3 \text{ kg}$$

$$\text{TiFe 补加总量} = (282 + 6.6 + 5.65) \text{ kg} = 294.3 \text{ kg}$$

$$\text{补加合金总量} = (326.5 + 123.8 + 28.3 + 294.3) \text{ kg} = 773 \text{ kg}$$

8) 补加合金后钢液量:

$$\text{钢液量} = (10000 + 773) \text{ kg} = 10773 \text{ kg}$$

9) 验算补加合金后钢液中合金元素含量:

$$\text{Cr} = \frac{10000 \text{ kg} \times 17.3\% + 326.5 \text{ kg} \times 65\% \times 95\%}{10773 \text{ kg}} \times 100\% = 17.93\%$$

$$\text{Ni} = \frac{10000 \text{ kg} \times 9\% + 123.8 \text{ kg} \times 99\% \times 98\%}{10773 \text{ kg}} \times 100\% = 9.47\% \approx 9.5\%$$

$$\text{Mn} = \frac{10000 \text{ kg} \times 0.8\% + 28.3 \text{ kg} \times 98\% \times 98\%}{10773 \text{ kg}} \times 100\% = 0.99\% \approx 1.0\%$$

$$\text{Ti} = \frac{10000 \text{ kg} \times 0 + 294.3 \text{ kg} \times 30\% \times 60\%}{10773 \text{ kg}} \times 100\% = 0.49\% \approx 0.5\%$$

最后验算结果表明, 只 Cr 含量稍少 0.07%, 可不再补加 Cr, 其余合金元素含量与成品钢成分要求基本相符, 说明配料计算正确。如果验算结果与要求成分中相差较大, 相差大的元素含量还要补加计算直至合格。

2. 反复补加法

熔炼合金钢中, 如含 Cr、Ni 合金元素, 还原分析时 Cr 含量低、Ni 含量稍多, 就要计算补加 Cr; 补完 Cr 后又影响 Ni 含量降低, 又要补加 Ni; 补完 Ni 后, 又影响 Cr 含量降低, 又补加 Cr……这样出现反复补加。沈才芳称这种方法为“反复拉补法”。补加后被降低的元素含量计算公式为

$$\Delta a = \frac{a \times m_{\text{合金}}}{m_{\text{原钢液}} + m_{\text{合金}}} \times 100\% \quad (8-4)$$

式中 Δa ——元素含量被降低的量（%）；

a ——钢液元素分析值（%）；

$m_{\text{合金}}$ ——补加合金加入量（kg）；

$m_{\text{原钢液}}$ ——钢液质量（kg）。

例 8-9 熔炼 ZG12Cr20Ni12 高合金不锈钢，浇注耐酸泵体铸件。钢液量为 15t。还原期取样分析成分（质量分数）：Cr17%、Ni10%。成品钢控制成分（质量分数）：Cr19%、Ni10.5%。补加铁合金成分（质量分数）：CrFe 含 Cr65%、Ni99%。合金回收率：Cr98%、Ni100。采用反复补加法配料计算补加合金量（CrFe、Ni）。

1) 计算补加 CrFe 第一次补加量：

$$\text{CrFe 第一次补加量} = \frac{15000 \text{kg} \times (19 - 17)\%}{(65\% - 19\%) \times 98\%} = 665 \text{kg}$$

补加 CrFe665kg 后，计算 Ni 含量降低量：

$$\Delta \text{Ni} = \frac{665 \times 10\%}{15000 + 665} \times 100\% = 0.4245\%$$

2) 计算 Ni 第一次补加量：

$$\text{Ni 第一次补加量} = \frac{(15000 + 665) \text{kg} \times [10.5 - (10 - 0.4245)]\%}{(99 - 10.5)\% \times 100\%} = 163.6 \text{kg}$$

补加 163.6kgNi，后计算 Cr 含量降低量：

$$\Delta \text{Cr} = \frac{163.6 \times 19\%}{15000 + 665 + 163.6} \times 100\% = 0.196\%$$

3) 计算 CrFe 第二次补加量：

$$\text{CrFe 第二次补加量} = \frac{(15000 + 665 + 163.6) \text{kg} \times 0.196\%}{(65 - 19)\% \times 98\%} = 68.8 \text{kg}$$

补加 68.8kg 后，计算 Ni 含量降低量：

$$\Delta \text{Ni} = \frac{68.8 \times 10.5\%}{15000 + 665 + 163.6 + 68.8} \times 100\% = 0.045\%$$

4) 计算 Ni 第二次补加量：

$$\text{Ni 第二次补加量} = \frac{(15000 + 665 + 163.6 + 68.8) \times 0.045\%}{(99 - 10.5)\%} = 7.9 \text{kg}$$

计算表明，第二次补加 Ni 较少仅为 7.9kg，对 Cr 的含量降低量影响很小，可以不用再补加。

5) 计算补加合金总量：

$$\text{CrFe 总量} = (665 + 68.8) \text{kg} = 733.8 \text{kg}$$

$$\text{Ni 总量} = (163.6 + 7.9) \text{kg} = 171.5 \text{kg}$$

6) 验算补加合金后钢液中 Cr、Ni 含量:

$$\text{Cr} = \frac{15000\text{kg} \times 17\% + 733.8\text{kg} \times 65\% \times 98\%}{15000\text{kg} + 733.8\text{kg} + 171.5\text{kg}} \times 100\% = 18.97\% \approx 19\%$$

$$\text{Ni} = \frac{15000\text{kg} \times 10\% + 171.5\text{kg} \times 99\%}{15000\text{kg} + 733.8\text{kg} + 171.5\text{kg}} \times 100\% = 10.498\% \approx 10.50\%$$

验算结果与成品钢控制成分 (质量分数) Cr19%、Ni10.5% 相符, 配料计算正确。

七、出钢量法

根据还原期分析结果, 先粗略估算所需要补加的合金总量, 求得出钢液总量, 再以这个钢液量分别配算合金。这种方法称为出钢量法, 在实际生产上也用得较多。

例 8-10 以熔炼 W6Mo5Cr4V2 铸造工具钢为例, 设炉内钢液为 10t。还原期分析结果为 (质量分数): W4.5%、Mo3.5%、Cr3.3%、V1.2%。加合金材料为 (质量分数): 70% WFe、60% MoFe、65% CrFe、45% VFe。设合金回收率均为 100%

将还原期分析结果配制成成品钢规格成分 (质量分数): W6.0%、Mo5%、Cr4.1%、V2.1%。(铸造工具钢)。

1) 先粗略估算所要加入的铁合金总量 (将补加元素的质量分数换算成铁合金的质量分数)。

补加铁合金质量分数:

$$\begin{aligned} \text{补加铁合金质量分数} &= \text{W 的质量分数} + \text{Mo 的质量分数} \\ &\quad + \text{Cr 的质量分数} + \text{V 的质量分数} \\ &= \left(\frac{6.0\% - 4.5\%}{70\%} + \frac{5.0\% - 3.5\%}{60\%} \right. \\ &\quad \left. + \frac{4.1\% - 3.3\%}{65\%} + \frac{2.1\% - 1.2\%}{45\%} \right) \times 100\% \\ &= 2.1\% + 2.5\% + 1.2\% + 2\% = 7.8\% \end{aligned}$$

2) 估算补加合金质量分数。从钢中合金元素总含量 [$w(\text{W}) + w(\text{Mo}) + w(\text{Cr}) + w(\text{V}) = 6\% + 5\% + 4\% + 2\% = 17\%$] 知道, 由上述补加铁合金总质量分数 = 7.8% < 17%, 钢液量需要增加, 则需要再补加合金量 45% (即 $7.8\% / 17\% = 45\%$)。

3) 估算铁合金总加入量:

由 $7.8\% + 7.8\% \times 45\% = 7.8\% + 3.5\% = 11.3\% \approx 11\%$, 估算出

$$\text{出钢量} = 10\text{t} + 10\text{t} \times 11\% = 11.1\text{t} \approx 11\text{t}$$

4) 依估计的出钢量和成品成分要求计算出钢时各元素量 (11t × 成品钢规格成分):

$$\text{所需 W 量} = 11000\text{kg} \times 6.0\% = 660\text{kg}$$

$$\text{所需 Mo 量} = 11000\text{kg} \times 5.0\% = 550\text{kg}$$

$$\text{所需 Cr 量} = 11000\text{kg} \times 4.1\% = 451\text{kg}$$

$$\text{所需 V 量} = 11000\text{kg} \times 2.1\% = 231\text{kg}$$

5) 钢中已有的各元素量 (炉内钢液量 10t × 还原期分析元素含量):

$$\text{原有 W 量} = 10000\text{kg} \times 4.5\% = 450\text{kg}$$

$$\text{原有 Mo 量} = 10000\text{kg} \times 3.5\% = 350\text{kg}$$

$$\text{原有 Cr 量} = 10000\text{kg} \times 3.3\% = 330\text{kg}$$

$$\text{原有 V 量} = 10000\text{kg} \times 1.2\% = 120\text{kg}$$

6) 最后求得需补加的铁合金量:

$$\text{WFe 量} = \frac{(660 - 450)\text{kg}}{70\%} = 300\text{kg}$$

$$\text{MoFe 量} = \frac{(550 - 350)\text{kg}}{60\%} = 333\text{kg}$$

$$\text{CrFe 量} = \frac{(451 - 330)\text{kg}}{65\%} = 186\text{kg}$$

$$\text{VFe 量} = \frac{(231 - 120)\text{kg}}{45\%} = 246.6\text{kg} \approx 247\text{kg}$$

$$\text{实际加入的铁合金总量} = (300 + 333 + 186 + 247)\text{kg} = 1066\text{kg}$$

$$\text{实际出钢量} = (10000 + 1066)\text{kg} = 11066\text{kg}$$

估计出钢量 = 11000kg, 则可知:

实际出钢量比估算出钢量多出 66kg (11066kg - 11000kg = 66kg), 这在生产实际中是完全能容许的误差。如果加入的合金量与预计的差异较大, 则应适当增减调整并验算求得准确。

八、熔炼高合金铸钢还原期特别值得注意的事项

还原期钢液已经过氧化期吹高压氧高温氧化脱碳, 大部分合金元素烧损后进入还原期, 钢液要快速地脱氧调整成分补加合金到成分合格, 造好还原碱性白渣出钢。如果补加大量合金材料, 则会使高温钢液降温太多, 且补加合金熔化慢, 要送电加快熔化, 延长还原期时间, 使钢液又吸气不利杂质上浮。因此要配料计算准确快速调整成分, 取钢样快速分析成分至合格, 钢液温度达到出钢温度时要快速出钢浇注铸件。

第二节 采用杂乱合金钢屑返回料熔炼 不锈钢的配料计算

一、先求出合金钢屑中合金元素含量，还原期再调整成分

在利用几种牌号混合堆放的合金钢屑作返回料时，必须清楚地知道除钢屑外加入炉内的成分和量，先进行初算，等熔清时根据化验结果迅速算出合金屑成分，从中找出规律。这虽然对返回料熔炼配料计算带来了较大的麻烦，但可保证成品钢的力学性能和金相组织与耐蚀性检验均合格，从而为堆积如山复杂难用的合金屑找到出路，变废为宝，为国家节约大量贵重合金材料。如果加强管理分别堆放，回用更为方便。现介绍具体实例，此例也可算作编者从事熔炼工作的创新发明成果吧。

例 8-11 熔炼 ZG12Cr18Mn13Mo2CuN 不锈钢用返回氧化法配料计算

1) 化学成分见表 8-5。

表 8-5 化学成分 (质量分数) (%)

| 元素 | C | Si | Mn | Cr | Mo | Cu | S | P | N |
|-------|------|------|-------------|-------------|-----------|-----------|--------|-------|-------------|
| 规格成分 | ≤0.1 | ≤1.5 | 12.0 ~ 14.0 | 17.0 ~ 20.0 | 1.5 ~ 2.0 | 1.0 ~ 1.5 | ≤0.035 | ≤0.06 | 0.19 ~ 0.26 |
| 返回料成分 | — | — | 13.0 | 18.0 | 1.7 | 1.2 | — | — | 0.20 |

2) 设钢液量为 5000kg。

3) 总回收率按 95% 计算。

则
$$\text{总装料量} = \frac{5000\text{kg}}{95\%} = 5263\text{kg}$$

4) 设采用合金钢屑 2000kg，本钢种返回料 2000kg。

5) 需合金数量 (纯合金数配入量)：

$$\text{需 Cr 量} = 5000\text{kg} \times 18.0\% = 900\text{kg}$$

$$\text{需 Mn 量} = 5000\text{kg} \times 13.0\% = 650\text{kg}$$

$$\text{需 Mo 量} = 5000\text{kg} \times 1.75\% = 87.5\text{kg}$$

$$\text{需 Cu 量} = 5000\text{kg} \times 1.25\% = 62.5\text{kg}$$

$$\text{需 N 量} = 5000\text{kg} \times 0.20\% = 10\text{kg}$$

6) 计算返回料带入合金元素量：

$$\text{返回料带入 Cr 量} = 2000\text{kg} \times 18.0\% \times 85\% = 306\text{kg}$$

$$\text{返回料带入 Mn 量} = 2000\text{kg} \times 13.0\% \times 65\% = 169\text{kg}$$

$$\text{返回料带入 Mo 量} = 2000\text{kg} \times 1.7\% = 34\text{kg}$$

$$\text{返回料带入 Cu 量} = 2000 \text{kg} \times 1.2\% = 24 \text{kg}$$

7) 计算合金钢屑带入元素量。此步要根据本厂使用合金钢料先估计出 Cr、Mn 含量进行初算, 如估计 Cr 质量分数可能为 12% ~ 15%, Mn 质量分数可能在 2% ~ 6%, 据估计算出带入合金元素量, 便于配料。本例按 Cr 质量分数为 12%、Mn 质量分数为 2% 算, 其他 Ni、Mo、Cu 等用同样方法计算 (本例未计算)。

$$\text{屑带入 Cr 量} = 2000 \text{kg} \times 12\% \times 80\% = 192 \text{kg}$$

$$\text{屑带入 Mn 量} = 2000 \text{kg} \times 2\% \times 60\% = 24 \text{kg}$$

8) 计算合金铁需要量:

$$\text{FeCr65C0.03 量} = \frac{(900 - 306 - 192) \text{kg}}{70\% \times 95\%} = 604 \text{kg}$$

$$\text{JMn96 量} = \frac{(650 - 169 - 24) \text{kg}}{96\% \times 95\%} = 501 \text{kg}$$

$$\text{MoFe 量} = \frac{(87.5 - 34) \text{kg}}{60\% \times 95\%} = 93.8 \text{kg}, \text{实际加 } 100 \text{kg}$$

$$\text{Cu 量} = \frac{(62.5 - 24) \text{kg}}{99.9\%} = 38.5 \text{kg}, \text{实际加 } 50 \text{kg}$$

$$\begin{aligned} \text{则} \quad \text{总加入量} &= \text{屑量} + \text{返料量} + \text{CrFe 量} + \text{JMn 量} + \text{MoFe 量} + \text{Cu 量} \\ &= (2000 + 2000 + 604 + 501 + 100 + 50) \text{kg} \\ &= 5255 \text{kg} \end{aligned}$$

由此看出, 不必加低 P 钢炉料已够用。

$$9) \text{ 氧化前装料量} = \text{返回料量} + \text{屑量} + \text{MoFe 量} + \text{Cu 量} = (2000 + 2000 + 100 + 50) \text{kg} = 4150 \text{kg}$$

10) 熔清化验分析成分 (质量分数):

$$\text{Cr} = 15.4\% \text{, Mn} = 11.1\% \text{, Mo} = 2.36\% \text{, Cu} = 1.8\% \text{。}$$

11) 根据化验结果要立刻计算出合金钢屑主要成分。

设合金钢屑中 Cr 含量为 $w(\text{Cr}_{\text{屑}})$, 总含 Cr 量为 $m(\text{Cr}_{\text{屑}}) \text{kg}$; Mn 含量为 $w(\text{Mn}_{\text{屑}})$, 总含 Mn 量为 $m(\text{Mn}_{\text{屑}}) \text{kg}$ 。

则 合金钢屑带入合金量:

$$m(\text{Cr}_{\text{屑}}) = 2000 \times w(\text{Cr}_{\text{屑}})$$

$$m(\text{Mn}_{\text{屑}}) = 2000 \times w(\text{Mn}_{\text{屑}})$$

据化验可知, 熔清钢液中 Cr 含量为 15.4%,

$$\text{则} \quad \frac{360 + m(\text{Cr}_{\text{屑}})}{4150} \times 100\% = 15.4\%$$

$$\text{解得} \quad m(\text{Cr}_{\text{屑}}) = 4150 \text{kg} \times 15.4\% - 360 \text{kg} = 279.1 \text{kg}$$

则 $w(\text{Cr}_{\text{屑}}) = \frac{279.1\text{kg}}{2000\text{kg}} \times 100\% = 13.95\% \approx 14.0\%$

即合金钢屑中 Cr 质量分数为 14.0%。

同理计算 Mn 含量：

$$\frac{260 + m(\text{Mn}_{\text{屑}})}{4150} \times 100\% = 11.1\%$$

解得 $m(\text{Mn}_{\text{屑}}) = 4150\text{kg} \times 11.1\% - 260\text{kg} = 200\text{kg}$

$$w(\text{Mn}_{\text{屑}}) = \frac{200\text{kg}}{2000\text{kg}} \times 100\% = 10.0\%$$

此数据偏高，但也有可能此堆合金钢屑中含 Cr、Mn 钢多的缘故。这里着重以介绍怎样算出杂乱合金钢屑合金元素主要成分为目的。

12) 根据上述计算结果，迅速算出还原期应补的 FeCr65C0.03 量、JMn 量、NMn 量、NCr 量等。

则此步计算方法与前面所举的示例相同，故此从略。

13) 验算化开 Cr 及 Mn 的含量。

①Cr 的验算：

合金钢屑中含 Cr 量：

$$\text{Cr}_{\text{屑}} \text{ 量} = 2000\text{kg} \times 14.0\% = 288\text{kg}$$

返回料中含 Cr 量：

$$\text{Cr}_{\text{返}} \text{ 量} = 2000\text{kg} \times 18.0\% = 360\text{kg}$$

则 炉料中含 Cr 量 = 360kg + 288kg = 648kg

而加料量为 4150kg，

则 熔清 Cr 含量

$$\text{Cr}_{\text{化}} = \frac{648\text{kg}}{4150\text{kg}} \times 100\% = 15.6\%$$

与熔清时化验分析成分 Cr15.4% 相近。

②Mn 验算：

合金钢屑中含 Mn 量：

$$\text{Mn}_{\text{屑}} \text{ 量} = 2000\text{kg} \times 10\% = 200\text{kg}$$

返回料中含 Mn 量：

$$\text{Mn}_{\text{返}} \text{ 量} = 2000\text{kg} \times 13\% = 260\text{kg}$$

则 炉料中含 Mn 量 = (200 + 260)kg = 460kg

则 熔清 Mn 含量：

$$\text{Mn}_{\text{化}} = \frac{460\text{kg}}{4150\text{kg}} \times 100\% = 11.08\%$$

与熔清化验成分 Mn11.1% 相符, 配料计算正确。

二、熔炼高合金不锈钢返回料氧化法还原期调整成分

例 8-12 采用返回吹氧法熔炼 ZG08Cr18Ni9Ti, 此例计算与其他例子有不同之处, 故把此例单列出来。

1) 出钢量为 16400kg。

2) 不锈钢的炉料总回收率为 95%, 总进炉料量:

$$\text{进炉料量} = \frac{16400\text{kg}}{95\%} = 17263\text{kg}$$

3) 出钢量钢液中的元素量:

钢液合格成分 (质量分数): Mn1.25%、Cr18.0%、Ni10.0%、Ti0.50%

则 需 Mn 量 = $16400\text{kg} \times 1.25\% = 205\text{kg}$

需 Cr 量 = $16400\text{kg} \times 18.0\% = 2952\text{kg}$

需 Ni 量 = $16400\text{kg} \times 10.0\% = 1640\text{kg}$

需 Ti 量 = $16400\text{kg} \times 0.5\% = 82\text{kg}$

4) 合金元素在各期的回收率见表 8-6。

表 8-6 合金元素在各期的回收率 (%)

| 合金元素 | 氧化期 | 还原期 | 合金元素 | 氧化期 | 还原期 |
|------|-----|-----|------|-----|-----|
| Mn | 70 | 98 | Ni | 98 | 98 |
| Cr | 85 | 96 | Ti | — | 60 |

5) 本钢种返回料使用 6000kg, 返回料成分 (质量成分): C0.06%、Mn1.25%、Cr18.0%、Ni9.8%、Si0.65%、P0.025%。

带入合金元素量:

返回料带入 C 量 = $6000\text{kg} \times 0.06\% = 3.6\text{kg}$

返回料带入 Mn 量 = $6000\text{kg} \times 1.25\% = 75\text{kg}$

返回料带入 Cr 量 = $6000\text{kg} \times 18.0\% = 1080\text{kg}$

返回料带入 Ni 量 = $6000\text{kg} \times 9.8\% = 588\text{kg}$

返回料带入 Si 量 = $6000\text{kg} \times 0.65\% = 39\text{kg}$

返回料带入 P 量 = $6000\text{kg} \times 0.025\% = 1.5\text{kg}$

6) 熔清配入铬含量为 8.0% (即熔 Cr 量), 其余在还原期加入, 也就是说, JMn 及 TiFe 在还原期加入。

采用无碳铬铁 FeCr65C0.03, 其 Cr 质量分数为 61%。

$$\text{FeCr65C0.03 量} = \frac{\frac{2952\text{kg}}{96\%} - 1080\text{kg}}{61\%} = 3270\text{kg}$$

这里给出另一种计算方法：

$$\text{FeCr65C0.03 量} = \frac{(2952 - 1080) \text{ kg}}{96\% \times 61\%} = 3197\text{kg}$$

两种计算方法结果相差量 = $3270\text{kg} - 3197\text{kg} = 73\text{kg}$ ，回收率越高差距越小。

$$\text{JMn96 量} = \frac{\frac{205}{98\%} - 75}{96\%} \text{kg} = 140\text{kg} \text{, 实加 } 150\text{kg}$$

$$\text{TiFe 量} = \frac{82\text{kg}}{60\% \times 30\%} = 455\text{kg}$$

7) 装料加入炉料量：

$$\text{装料量} = 17263\text{kg} - (3270 + 150 + 455) \text{kg} = 13388\text{kg}$$

8) 熔清后钢液量：

$$\text{熔清钢量} = 13388\text{kg} \times 95\% = 12718\text{kg}$$

9) 装料中加入 Ni 量

$$\text{加入 Ni 量} = \frac{\frac{1640}{98\%} - 588}{98\%} \text{kg} = 1107.6\text{kg} \approx 1108\text{kg} \text{, 实际加 } 1113\text{kg}.$$

10) 熔清碳配入量为 0.35%，用碳素工具钢（C 质量分数为 1.0%）增碳，则碳素工具钢的加入量：

$$\text{碳素工具钢量} = \frac{12718\text{kg} \times 0.35\%}{1.0\%} = 4451\text{kg}$$

11) 碳素工具钢带入的合金元素量 [成分（质量分数）：C1.0%、Mn0.30%、Si0.30%、P0.015%]：

$$\text{工具钢带入 C 量} = 4451\text{kg} \times 1.00\% = 44.5\text{kg}$$

$$\text{工具钢带入 Mn 量} = 4451\text{kg} \times 0.30\% = 13.4\text{kg}$$

$$\text{工具钢带入 Si 量} = 4451\text{kg} \times 0.30\% = 13.4\text{kg, 取 } 13\text{kg}$$

$$\text{工具钢带入 P 量} = 4451\text{kg} \times 0.015\% = 0.66\text{kg}$$

12) 考虑到吹氧是用硅氧化提温的，在炉料中加入 0.8%（质量分数）的硅，需加入硅质量分数为 74% 的硅铁量：

$$\text{SiFe 量} = \frac{13388\text{kg} \times 0.8\% - (39 + 13)\text{kg}}{0.74} = 74.3\text{kg} \approx 74\text{kg}$$

13) 其余炉料由工业纯铁配足，工业纯铁量：

$$\text{工业纯铁量} = 13388\text{kg} - (6000 + 4451 + 1113 + 74)\text{kg} = 1750\text{kg}$$

表 8-7 配料计算单

| 材料名称 | 数量 | | C | | Mn | | Cr | | Ni | | Ti | | Si | | P | | |
|-------|------------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|------|-------|-------|-------|------|---------|--------|
| | 计算/kg | 实际/kg | 含量/% | 数量/kg | 含量/% | 数量/kg | 含量/% | 数量/kg | 含量/% | 数量/kg | 含量/% | 数量/kg | 含量/% | 数量/kg | 含量/% | 数量/kg | |
| 装料加入 | 本钢种返回料 | 6000 | — | 0.06 | 3.6 | 1.25 | 75 | 18 | 1080 | 9.8 | 588 | — | — | 0.65 | 39 | 0.025 | 1.5 |
| | 碳素工具钢 | 4451 | — | 1.00 | 44.5 | 0.30 | 13.4 | — | — | — | — | — | — | 0.30 | 13.0 | 0.015 | 0.66 |
| | Ni 板 | 1113 | — | — | — | — | — | — | — | 98 | 1113 | — | — | — | — | — | — |
| | 74% SiFe | 74 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 74 | 74 | — | — |
| | 工业纯铁 | 1750 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 0.01 | 0.18 |
| | 熔清后合金回收 | (12718) | (12718) | (0.37) | (46.0) | (0.50) | (61.6) | (7.33) | (918) | (12.98) | — | — | — | — | — | (0.018) | (2.34) |
| 装料合计 | | 13388 | 13388 | — | 48.1 | — | 88.4 | — | 1080 | — | 1701 | — | — | — | 126 | — | 2.34 |
| 还原加入 | 6% 无碳 CrFe | 3270 | 3270 | — | — | — | — | 61 | 1994 | — | — | — | — | — | — | 0.02 | 0.65 |
| | 98% JMn | 150 | 150 | — | — | 98 | 147 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 30% TiFe | 455 | 455 | — | — | — | — | — | — | — | — | 30 | 136 | — | — | — | — |
| | 还原加入合金回收 | (3875) | (3875) | — | — | — | (147) | — | (1994) | — | — | — | (136) | — | — | — | — |
| 总入炉料量 | | 17263 | 17863 | — | — | — | 235.4 | — | 3074 | — | 1701 | — | 136 | — | 126 | — | 2.99 |
| 出钢量 | | 16400 | 16400 | — | — | 1.25 | 205 | 18 | 2952 | 10 | 1640 | 0.5 | 82 | — | — | 0.018 | 2.95 |
| 回收率 | | 95 | — | — | — | 70/98 | — | 85/96 | — | 98 | — | 60 | — | — | — | — | — |

注: 熔清后合金回收量为 12718kg, 即 $13388\text{kg} \times 95\% = 12718\text{kg}$; 无碳 CrFe 量为 1994kg, 即 $3270\text{kg} \times 61\% = 1994\text{kg}$ 。

另一种计算工业纯铁量方法：

工业纯铁量 = $17263\text{kg} - (6000 + 3270 + 455 + 150 + 1113 + 4451 + 74) \text{kg} = 1750\text{kg}$

14) 验算熔炼的成品钢中合金元素含量：

$$C = \frac{(3.6 + 44.5) \text{kg} \times (1 - 80\%)}{16400\text{kg}} \times 100\% = 0.058\% \text{ (注: 80% 为 C 吹氧氧化烧损率)}$$

$$Cr = \frac{(1080 \times 85\% + 3270 \times 61\% \times 98\%) \text{kg}}{16400\text{kg}} \times 100\% = 17.5\%$$

$$Ni = \frac{(1113 \times 98\% + 588 \times 98\%) \text{kg}}{16400\text{kg}} \times 100\% = 10.16\%$$

$$Mn = \frac{(75 \times 70\% + 150 \times 99.9\% \times 98\%) \text{kg}}{16400\text{kg}} \times 100\% = 1.22\%$$

$$Ti = \frac{445\text{kg} \times 30\% \times 60\%}{16400\text{kg}} \times 100\% = 0.5\%$$

验算结果合金元素含量全部合格，配料计算正确。

15) 炉料平衡。配料计算单见表 8-7。

第三节 查表配料计算法简介

一、查表配料计算法说明

查表配料计算法，通过查表查出相应的配料数量，能快速进行配料，可节省大量配料计算时间。但必须在能熟练地掌握配料计算方法的基础上，可以把配料计算结果分门别类列于表中。在配料时按正确的牌号钢液量在相应的表中查出需要配入的合金铁、废钢、回炉料等数量，然后进行炉料称量，装料熔炼，调整成分。这里仅将部分熔炼合金钢配料计算结果列成表，作为示例供配料计算学习参考。

为了提高计算速度，多用计算器运算，也可用计算机快速配料，但必须按配料技术编出程序才能运算。

铸造生产工艺过程是极为复杂的系统工程，加强管理，熟练掌握铸造生产熔炼合金配料计算技术，是生产出优质合格铸件的关键。

二、熔炼高合金钢配料计算速查表示例

每一个生产铸件的厂家，总是有常用的铸件合金牌号，为节省重复配料计算

时间, 将常用的铸造合金熔炼配料计算结果列成表, 以便生产时查用成为查表配料计算表。常用配料计算示例见表 8-8 ~ 表 8-11。

表 8-8 配 ZG08Cr18Ni9Ti 计算表 (按 TiFe30% Ti, 按 70% 回收)

| 元 素 | Cr | Mn | Ni | Ti | Ti | Ti | Ti | Ti | Ti |
|---------|---------|----|-----|-------------|------------|------------|------------|----------|------------|
| 配入含量(%) | 18 | 1 | 9 | 0.40 | 0.45 | 0.50 | 0.55 | 0.60 | 0.65 |
| 钢液量/kg | 配入数量/kg | | | | | | | | |
| 1000 | 180 | 10 | 90 | (14 ~ 19.2) | 4.5 ~ 21 | 5.0 ~ 24 | 5.5 ~ 26 | 6.0 ~ 28 | 6.5 ~ 30 |
| 5000 | 900 | 50 | 450 | 20 ~ 96 | 22.5 ~ 105 | 25 ~ 120 | 27.5 ~ 130 | 30 ~ 140 | 32.5 ~ 155 |
| 5500 | 1000 | 55 | 500 | 22 ~ 105 | 24.5 ~ 120 | 27.5 ~ 130 | 30 ~ 140 | 33 ~ 158 | 35 ~ 170 |
| 5800 | 1050 | 58 | 520 | 23 ~ 110 | 26 ~ 125 | 29138 | 32 ~ 152 | 35 ~ 165 | 37 ~ 180 |
| 6000 | 1080 | 60 | 540 | 24 ~ 115 | 27 ~ 130 | 30 ~ 143 | 33 ~ 158 | 36 ~ 170 | 39 ~ 185 |
| 6500 | 1170 | 65 | 580 | 26 ~ 125 | 29 ~ 140 | 32.5 ~ 150 | 36 ~ 170 | 39 ~ 185 | 42 ~ 200 |
| 7000 | 1260 | 70 | 630 | 28 ~ 135 | 31 ~ 150 | 35 ~ 165 | 38.5 ~ 180 | 42 ~ 200 | 45 ~ 210 |
| 7500 | 1350 | 75 | 675 | 30 ~ 143 | 34 ~ 160 | 37.5 ~ 180 | 41 ~ 196 | 45 ~ 210 | 49 ~ 235 |
| 8000 | 1440 | 80 | 720 | 32 ~ 152 | 36 ~ 172 | 40 ~ 190 | 44 ~ 210 | 48 ~ 230 | 52 ~ 250 |
| 8500 | 1535 | 85 | 765 | 34 ~ 162 | 38 ~ 180 | 42 ~ 200 | 47 ~ 225 | 51 ~ 240 | 55 ~ 260 |
| 9000 | 1620 | 90 | 810 | 36 ~ 170 | 40 ~ 193 | 45 ~ 215 | 50 ~ 230 | 54 ~ 260 | 60 ~ 280 |

注: 1. 按 0.40% 配入纯 Ti 量。

2. 按 Ti30% 配 TiFe, Ti 按 70% 回收率配入量。

3. 表中有 1t (1000kg) 量配料表, 如配料量大可用 1t 的量乘以相应的倍数任意加。

表 8-9 配 ZG12Cr18Mn13Mo2CuN 表 (纯合金量)

| 元 素 | Cr | Mn | Mo | Cu | N | N | N | N | N |
|---------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 配入含量(%) | 18 | 13 | 1.75 | 1.25 | 0.14 | 0.15 | 0.16 | 0.18 | 0.20 |
| 钢液量/kg | 配入数量/kg | | | | | | | | |
| 1000 | 180 | 130 | 17.5 | 12.5 | 1.4 | 1.5 | 1.6 | 1.8 | 2.0 |
| 5000 | 900 | 650 | 87 | 62 | 7.0 | 7.5 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
| 5500 | 1000 | 715 | 96 | 69 | 7.7 | 8.3 | 8.8 | 9.9 | 11.0 |
| 6000 | 1080 | 780 | 105 | 75 | 8.4 | 9.0 | 9.6 | 10.8 | 12.0 |
| 6500 | 1170 | 850 | 114 | 81 | 9.1 | 9.7 | 10.4 | 11.7 | 13.0 |
| 7000 | 1260 | 910 | 122 | 88 | 9.8 | 10.5 | 11.2 | 12.6 | 14.0 |
| 7500 | 1350 | 980 | 131 | 94 | 10.5 | 11.2 | 12.0 | 13.5 | 15.0 |
| 8000 | 1440 | 1050 | 140 | 100 | 11.2 | 12.0 | 12.8 | 14.4 | 16.0 |
| 8500 | 1530 | 1100 | 149 | 106 | 11.9 | 12.7 | 13.6 | 15.3 | 17.0 |
| 9000 | 1620 | 1170 | 157 | 112 | 12.6 | 14.0 | 14.4 | 16.2 | 18.0 |
| 10000 | 1800 | 1300 | 175 | 125 | 14.0 | 15.0 | 16.0 | 18.0 | 20 |

注: 表中配有 1t (1000kg) 量配料表, 如果电炉容量大, 可任意配入。如 12000kg 钢液量, 可查 10t (10000kg) 量再加 2t (2000kg) 量即可。其合金加入已按一般配料计算方法求出, 故此从略。

表 8-10 ZG08Cr18Ni9Ti 返回料

| 元 素 | Cr | Mn | Ni | Ti |
|------------|-----------------------|----------|----------|----------|
| 含量(回收率)(%) | 18(85) ^① | 1(65) | 9(95) | — |
| 返回量/kg | 返回数量/kg | | | |
| 1000 | 180(153) ^② | 10(6.5) | 90(85) | Ti 认为全烧损 |
| 2000 | 360(286) | 20(13.0) | 180(170) | |
| 2500 | 450(380) | 25(16.0) | 225(210) | |
| 3000 | 540(460) | 30(20) | 270(260) | |
| 3500 | 630(540) | 35(23) | 315(300) | |
| 4000 | 720(610) | 40(26) | 360(342) | |

① 18 (85), 18 表示该元素的质量分数为 18%, 85 表示该元素的回收率为 85%, 余类同。

② 180 (153), 180 表示回收率为 100% 时该元素的返回量为 180kg, 153 表示回收率为 85% 时该元素的返回量为 153kg, 余类同。

表 8-11 ZG12Cr18Mn13Mo2CuN 返回料

| 元 素 | Cr | Mn | Mo | Cu |
|------------|-----------------------|----------|---------|---------|
| 含量(回收率)(%) | 18(85) ^① | 13(65) | 1.7(95) | 1.2(95) |
| 返回料量/kg | 返回数量/kg | | | |
| 1000 | 180(153) ^② | 130(85) | 17(16) | 12(12) |
| 2000 | 360(310) | 260(170) | 34(32) | 24(23) |
| 2500 | 450(380) | 325(210) | 42(40) | 30(28) |
| 3000 | 540(460) | 390(250) | 51(48) | 36(34) |
| 3500 | 630(540) | 455(300) | 60(56) | 42(40) |
| 4000 | 720(610) | 520(340) | 68(65) | 48(45) |
| 4500 | 810(690) | 585(385) | 76(73) | 54(51) |
| 5000 | 720(770) | 650(420) | 85(81) | 60(57) |

注：返回料中元素 N 量回收率不稳定，但一般经验是每炉钢 N 的回收率为 0.03% ~ 0.06%，所以配料时要加以注意。

① 18 (85), 18 表示该元素的质量分数为 18%, 85 表示该元素回收率为 85%, 余类同。

② 180 (153), 180 表示回收率为 100% 时该元素的返回数量为 180kg, 153 表示回收率为 85% 该元素的返回数量为 153kg, 余类同。

通过以上各种配料计算方法例题，达到举一反三，融会贯通，多掌握铸造合金熔炼配料计算方法的目的。如果熔炼出 1 炉废钢液就会造成重大的经济损失，如果多熔炼出优质合格钢液，就能大大提高经济效益，所以一定要熟练掌握各种配料计算方法。

第九章 中频感应炉熔炼铸钢的配料计算

第一节 中频感应炉熔炼碳素钢的配料计算

中频感应炉熔炼铸钢不采用氧化法，炉内钢液化学成分元素增减变化不大，但某些合金元素烧损较大，例如钒（V）、铝（Al）、钛（Ti）等回收率相对较低，而配料计算的准确程度直接影响钢的化学成分，所以在中频感应炉熔炼铸钢配料计算、选料、过秤都应力求精确，这是熔炼出合格铸钢的关键。

例 9-1 ZG230-450 钢配料计算，其化学成分见表 9-1，配料计算见表 9-2。

表 9-1 ZG230-450 钢化学成分（质量分数） (%)

| 合 金 | C | Si | Mn | S | P | Al | Fe |
|---------------|-------|-------|-------|--------|--------|------|----|
| 标准成分 | ≤0.30 | ≤0.60 | ≤0.90 | <0.035 | <0.035 | — | 余量 |
| 配入成分 | 0.25 | 0.35 | 0.7 | <0.02 | <0.04 | — | 余量 |
| 返回料 ZG230-450 | 0.24 | 0.3 | 0.6 | <0.02 | <0.04 | — | 余量 |
| SiFe 块 | — | 75 | — | — | — | — | 余量 |
| MnFe | 7 | 1.5 | 80.0 | <0.03 | <0.05 | — | 余量 |
| Al 块 | — | — | — | — | — | 99.9 | — |
| SiFe 粉 | — | 75 | — | — | — | — | 余量 |
| 碳粉 | 85 | — | — | — | — | — | — |
| 低 P 软铁 | 0.10 | 0.20 | 0.50 | 0.02 | <0.03 | — | 余量 |
| 元素回收率 | 95 | 95 | 98 | — | — | — | 97 |

表 9-2 配料计算（设钢液量为 100kg） (单位: kg)

| ZG230-450 | | ZG230-450 回炉料 100kg | 配入与回炉料差数 | 补加铁合金数 | 备 注 |
|-----------|------|---------------------|----------|--|-------|
| 元素 | 配入量 | 纯量 × 回收率 | 相差数 | 相差数 合金含量 × 回收率 | |
| C | 0.25 | 0.24 × 95% = 0.228 | 0.022 | $\frac{0.022}{85\% \times 30\%} = 0.086$ | 加少量碳粉 |
| Si | 0.35 | 0.3 × 95% = 0.285 | 0.065 | $\frac{0.065}{75\% \times 95\%} = 0.091$ | — |

(续)

| ZG230-450 | | ZG230-450 回炉料 100kg | 配入与回炉料差数 | 补加铁合金数 | 备 注 |
|-----------|-------|----------------------------|----------|--|--|
| 元素 | 配入量 | 纯量 × 回收率 | 相差数 | 相差数 合金含量 × 回收率 | |
| Mn | 0.7 | $0.6 \times 98\% = 0.588$ | 0.112 | $\frac{0.112}{80\% \times 98\%} = 0.143$ | — |
| S | <0.02 | $0.02 \times 98\% = 0.019$ | 0.001 | — | — |
| P | <0.04 | $0.03 \times 100\% = 0.03$ | — | — | — |
| Fe | 98.65 | $98.8 \times 97\% = 95.84$ | 2.81 | $\frac{2.81}{99.15\% \times 97\%} = 2.922$ | $Fe = 100 - 0.25 - 0.35 - 0.7 - 0.02 - 0.03 = 98.65$ |
| Al | — | — | — | 0.01 | — |
| 合计 | 100 | 96.99 | 3.01 | 3.242 | — |

总装料量 = $100 + 0.086 + 0.091 + 0.143 + 2.922 + 0.01 = 103.12$

第二节 中频感应炉熔炼合金钢采用新料的配料计算

一、感应炉熔炼合金钢配料计算注意事项

随着电力工业的发展，越来越多的工厂采用碱性感应炉熔化合金钢。感应炉熔炼合金钢应注意以下几点：

1) 配碳要准确。因为感应炉熔炼不能脱碳，所以配料时要把各合金料中碳含量均加以计算，看碳含量是否符合规格。如果不合适，要重新选料、计算直至达到合格。其他合金成分只能是微调，配料计算尽量精确。

2) 要仔细掌握合金元素回收率。感应炉熔炼虽然比起电弧炉熔炼元素烧损少，但不同合金元素仍有不同的烧损，要严格掌握回收率，才能准确配料。

3) 采用本钢种返回熔炼时，应特别注意回 S、P 问题。因为感应炉炼钢不能像电弧炉炼钢脱 P、去 S，所以在配料时要选择含 S、P 低的返回料和合金料。虽然在钢液中加 SiCa 块及稀土合金等，有去 S、P 作用，但去 S、P 效果也不稳定，因此应特别注意。

4) 要严格填好配料单，从中可找出差错，所以要仔细填好配料单，这是炼好合金钢的依据。

二、碱性感应炉熔炼合金钢合金元素的回收率

因为感应炉熔炼不能进行大量氧化，所以用感应炉炼钢就不能用氧化法，因

此对合金元素烧损就较少, 这对稳定合金钢及钢中含有如 Al、Ti、V、B 等易烧损元素有利。碱性感应炉炼钢返回料及合金料、合金元素回收率见表 9-3。

表 9-3 碱性感应炉炼钢返回料及合金料、合金元素回收率表 (%)

| 序号 | 返回料合金料 | 元素 | 装料期 | 熔化期 | 还原期 | 出钢前 | 备注 |
|----|---------------|----|-----|-----|---------|-------|----------------|
| 1 | ZG08Cr18Ni9Ti | Si | 85 | — | — | — | — |
| | | Mn | 90 | — | — | — | — |
| | | Cr | 98 | — | — | — | — |
| | | Ni | 99 | — | — | — | — |
| | | Ti | 70 | — | — | — | — |
| 2 | 电解镍 Ni 板 | Ni | 100 | — | 100 | — | — |
| 3 | 微碳 CrFe | Cr | 96 | — | 98 | — | — |
| 4 | 电解 Cu | Cu | 100 | — | 100 | — | — |
| 5 | MoFe | Mo | 100 | — | 100 | — | — |
| 6 | NbFe | Nb | 100 | — | 100 | — | — |
| 7 | WFe | W | 100 | — | 100 | — | — |
| 8 | 电解 Mn | Mn | — | — | 97 ~ 98 | 100 | — |
| 9 | JMn97 | Mn | — | 97 | 97 ~ 98 | 100 | — |
| 10 | NCr | N | — | — | 85 ~ 95 | — | Cr 回收 98 ~ 100 |
| 11 | NMn | N | — | — | 80 ~ 95 | — | Mn 回收 98 |
| 12 | TiFe | Ti | — | — | — | 95 | 5 ~ 7 min |
| 13 | VFe | V | — | — | — | 90 | 5 ~ 10 min |
| 14 | SiFe | Si | — | — | 90 | 95 | 3 ~ 5 min |
| 15 | Al | Al | — | — | — | 插入 95 | |
| 16 | BFe | B | — | — | — | 插入 50 | 随出钢流加 |

注: 表中数据为计算而用, 与生产实际可能有出入, 仅供参考。

三、中频感应炉熔炼合金铸钢采用新料配料计算实例

例 9-2 熔炼 ZG12Cr18NiTi 不锈钢。钢液量为 100kg 采用新料配料计算 (熔炼钢量大以此加倍计算)。配料单见表 9-4。

表 9-4 配料单

| 元素 | C | Si | Mn | Cr | Ni | Ti | S | P | Fe | 入炉时期 |
|---------|-------|------|-----------|-------------|------------|-----------------|-------|--------|-------|------|
| 规格成分(%) | ≤0.12 | ≤1.5 | 0.8 ~ 2.0 | 17.0 ~ 20.0 | 8.0 ~ 11.0 | 5(C0.03 ~ 0.80) | ≤0.03 | ≤0.045 | 余 | — |
| 配入成分(%) | <0.10 | <0.8 | 1.2 | 18.0 | 9.0 | 0.6 | <0.03 | <0.04 | 70.23 | — |

(续)

| 元素 | C | Si | Mn | Cr | Ni | Ti | S | P | Fe | 入炉时期 |
|---------|---------|--------|------|------|-----|------|---------|---------|--------|------|
| 回收率(%) | 95 | 95 | 98 | 96 | 100 | 95 | 98 | 100 | 97 | — |
| 炉料 | 配入数量/kg | | | | | | | | | |
| 纯 Fe | — | — | — | — | — | — | — | — | 64.67 | 装料 |
| Ni 板 | — | — | — | — | 9.0 | — | — | — | — | 装料 |
| 微碳 CrFe | 0.008 | 0.27 | 0.10 | 18.0 | — | — | 0.018 | 0.006 | 6.65 | 装料 |
| JMn97 | 0.00079 | 0.0035 | 1.20 | — | — | — | 0.00029 | 0.00043 | 0.021 | 还原 |
| TiFe | 0.0012 | — | — | — | — | 0.60 | 0.00068 | — | 1.365 | 出钢前 |
| 合计 | 0.10 | 0.2735 | 1.30 | 18.0 | 9.0 | 0.60 | 0.019 | 0.00643 | 72.746 | — |
| 装料量 | 104 | | | | | | | | | |

注：表中未列入 1kg FeSi 的含量。

1) 求加 Ni 量：

$Ni = 9.0\% \times 100kg = 9.0kg$ ，把计算出量填入表 9-4 中，下同。

2) 求加微碳 CrFe。微碳 CrFe 化学成分 (质量分数, %)：C0.033、Si1.1、Mn0.4、Cr72.0、S0.07、P0.025、Fe26.37。

则 $CrFe \text{ 量} = \frac{18kg}{72\% \times 96\%} = 26kg$

3) 求微碳 CrFe 带入其他元素量 (进钢液量)：

$$CrFe \text{ 带入 C 量} = 26kg \times 0.033\% \times 95\% = 0.008kg$$

$$CrFe \text{ 带入 Si 量} = 26kg \times 1.1\% \times 95\% = 0.27kg$$

$$CrFe \text{ 带入 Mn 量} = 26kg \times 0.4\% \times 98\% = 0.10kg$$

$$CrFe \text{ 带入 S 量} = 26kg \times 0.07\% \times 98\% = 0.018kg$$

$$CrFe \text{ 带入 P 量} = 26kg \times 0.025\% \times 100\% = 0.006kg$$

$$CrFe \text{ 带入 Fe 量} = 26kg \times 26.37\% \times 97\% = 6.65kg$$

4) 求 JMn97。JMn 化学成分 (质量分数, %)：C0.067、Si0.30、Mn97.6、S0.024、P0.035、Fe1.71。

则 $JMn97 \text{ 量} = \frac{1.2kg}{97.6\% \times 98\%} = 1.25kg$

5) 求 JMn97 带入其他元素量：

$$JMn97 \text{ 带入 C 量} = 1.25kg \times 0.067\% \times 95\% = 0.00079kg$$

$$JMn97 \text{ 带入 Si 量} = 1.25kg \times 0.30\% \times 95\% = 0.0035kg$$

$$JMn97 \text{ 带入 S 量} = 1.25kg \times 0.024\% \times 98\% = 0.00029kg$$

$$JMn97 \text{ 带入 P 量} = 1.25kg \times 0.035\% \times 100\% = 0.00043kg$$

$$\text{JMn97 带入 Fe 量} = 1.25\text{kg} \times 1.71\% \times 97\% = 0.021\text{kg}$$

6) 求 $TiFe_0.66$ 、 $TiFe$ 化学成分 (质量分数, %) $C0.66$ 、 $Ti30.7$ 、 $Si0.034$ 、 $Fe67.14$

$$\text{则 } \text{TiFe 量} = \frac{0.6\text{kg}}{30.7\% \times 95\%} = 2.05\text{kg}$$

7) 求 TiFe 带入其他元素量:

$$\text{TiFe 带入 C 量} = 2.05 \text{kg} \times 0.06\% \times 95\% = 0.0012 \text{kg}$$

$$\text{TiFe 带入 S 量} = 2.05 \text{kg} \times 0.034\% \times 98\% = 0.00068 \text{kg}$$

$$\text{TiFe 带入 Fe 量} = 2.05\text{kg} \times 68.63\% \times 97\% = 1.365\text{kg}$$

8) 求加纯 Fe 量;

$$\text{各合金带入铁量之和} = 6.65\text{kg} + 0.021\text{kg} + 1.365\text{kg} = 8.036\text{kg}$$

$$\text{需加入 Fe 量} = 70.23\text{kg} - 8.036\text{kg} = 62.194\text{kg}$$

$$\text{则} \quad \text{工业纯铁量} = \frac{62.188\text{kg}}{99.15\% \times 97\%} = 64.67\text{kg}$$

9) 求总装料量:

$$\begin{aligned}\text{总装料量} &= \text{工业纯铁量} + \text{CrFe 量} + \text{JMn97 量} + \text{TiFe 量} + \text{SiFe 量} + \text{Ni 量} \\ &= (64.67 + 26 + 1.25 + 2.05 + 1 + 9) \text{ kg} \approx 104 \text{ kg}\end{aligned}$$

例 9-3 工厂需要熔炼 ZG08Cr18Ni9Ti 不锈钢 7000kg, 浇注阀门铸钢件, 采用容量为 8t 中频感应炉熔炼。全用新料熔炼, 选用新炉料含 C、P、S 低的合金材料配料。熔炼配料组成及化学成分见表 9-5。

表 9-5 配料组成及化学成分(质量分数) (%)

| 项 目 | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Ti | Fe | Al | 备注 |
|---------------|------|------|-----------|--------|-------|---------|--------|------------------|------|----|------|
| ZG08Cr18Ni9Ti | 0.08 | 1.5 | 0.8 ~ 2.0 | ≤0.040 | ≤0.03 | 17 ~ 20 | 8 ~ 11 | 5 (C0.03 ~ 0.80) | 余量 | — | — |
| 控制成分 | 0.06 | 1.3 | 1.2 ~ 1.8 | ≤0.03 | ≤0.03 | 18 ~ 19 | 9 ~ 10 | 0.6 | 余量 | — | — |
| 计算成分 | 0.04 | 1.2 | 1.5 | 0.02 | 0.02 | 18 | 9.5 | 0.5 | 余量 | — | — |
| 元素回收率 (%) | 100 | 95 | 95 | 100 | 98 | 98 | 100 | 90 | 97 | — | 生产经验 |
| 电解锰 | 0.03 | — | 99.5 | 0.001 | 0.012 | — | — | — | — | — | — |
| 电解镍 | 0.01 | — | — | 0.001 | 0.001 | — | 99.9 | — | — | — | — |
| 硅铁 | 0.05 | 45.6 | 0.6 | 0.025 | 0.02 | — | — | — | — | — | — |
| 铬铁 | 0.04 | 0.3 | — | 0.05 | 0.03 | 69.8 | — | — | — | — | — |
| 工业纯铁 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.015 | 0.015 | — | — | — | 99.8 | — | — |
| 钛铁 | 0.05 | — | — | 0.03 | 0.02 | — | — | 30 | 余量 | — | — |
| 铝锭 | — | — | — | — | — | — | — | — | 99.6 | — | 脱氧 |
| 铝粉 | — | — | — | — | — | — | — | — | 99.0 | — | 脱氧 |

1) 配料计算在 100kg 炉料中应配入元素数量。先以 100kg 炉料为基础进行配料计算, 再乘以 100kg 倍数得出全部配料量。

$$C \text{ 量} = 100\text{kg} \times 0.04\% = 0.04\text{kg}$$

$$Si \text{ 量} = 100\text{kg} \times 1.2\% / 95\% = 1.26\text{kg}$$

$$Mn \text{ 量} = 100\text{kg} \times 1.5\% / 95\% = 1.58\text{kg}$$

$$P \text{ 量} = 100\text{kg} \times 0.02\% = 0.02\text{kg}$$

$$S \text{ 量} = 100\text{kg} \times 0.02\% = 0.02\text{kg}$$

$$Cr \text{ 量} = 100\text{kg} \times 18\% / 98\% = 18.36\text{kg}$$

$$Ni \text{ 量} = 100\text{kg} \times 9.5\% = 9.5\text{kg}$$

$$Ti \text{ 量} = 100\text{kg} \times 0.5\% / 90\% = 0.56\text{kg}$$

$$\begin{aligned} Fe \text{ 量} &= 100\text{kg} - (0.04 + 1.26 + 1.58 + 0.02 + 0.02 + 18.36 + 9.5 + 0.56)\text{kg} \\ &= (100 - 31.34)\text{kg} = 68.66\text{kg} \end{aligned}$$

2) 根据配入的元素数量计算需要各种合金炉料量, 并计算其带入其他合金元素数量。

①生产经验先计算钛铁合金需要量:

$$TiFe \text{ 量} = \frac{0.56\text{kg}}{30\%} = 1.86\text{kg}$$

②计算由 TiFe 带入的元素量:

$$TiFe \text{ 带入 C 量} = 1.86\text{kg} \times 0.05\% = 0.0009\text{kg}$$

$$TiFe \text{ 带入 P 量} = 1.86\text{kg} \times 0.03\% = 0.0005\text{kg}$$

$$TiFe \text{ 带入 S 量} = 1.86\text{kg} \times 0.02\% = 0.0003\text{kg}$$

$$TiFe \text{ 带入 Fe 量} = 1.86\text{kg} - (0.56 + 0.0009 + 0.0005 + 0.0003)\text{kg} = 1.3\text{kg}$$

③计算电解镍需要量:

$$电解镍量 = \frac{9.5\text{kg}}{99.9\%} = 9.509\text{kg}, \text{ 取 } 9.51\text{kg}$$

④计算由电解镍带入的元素量:

$$电解镍带入 C 量 = 9.5\text{kg} \times 0.01\% = 0.0009\text{kg}$$

$$电解镍带入 P 量 = 9.51\text{kg} \times 0.001\% = 0.0001\text{kg}$$

$$电解镍带入 S 量 = 9.51\text{kg} \times 0.001\% = 0.0001\text{kg}$$

⑤计算铬铁需要量:

$$CrFe \text{ 量} = \frac{18.36\text{kg}}{69.8\%} = 26.3\text{kg}$$

⑥计算由 CrFe 带入的元素量:

$$CrFe \text{ 带入 C 量} = 26.3\text{kg} \times 0.04\% = 0.0105\text{kg}$$

$$CrFe \text{ 带入 Si 量} = 26.3\text{kg} \times 0.3\% = 0.0789\text{kg}$$

$$\text{CrFe 带入 P 量} = 26.3 \text{kg} \times 0.05\% = 0.013 \text{kg}$$

$$\text{CrFe 带入 S 量} = 26.3 \text{kg} \times 0.03\% = 0.0079 \text{kg}$$

$$\begin{aligned}\text{CrFe 带入 Fe 量} &= 26.3 \text{kg} - (0.0105 + 0.0789 + 0.013 + 0.0079 + 18.36) \text{kg} \\ &= 7.83 \text{kg}\end{aligned}$$

⑦计算电解锰需要量：

$$\text{电解锰量} = \frac{1.58 \text{kg}}{99.5\%} = 1.58 \text{kg}$$

⑧计算由电解锰带入的元素量：

$$\text{电解锰带入 C 量} = 1.58 \text{kg} \times 0.03\% = 0.0005 \text{kg}$$

$$\text{电解锰带入 P 量} = 1.58 \text{kg} \times 0.001\% = 0.00002 \text{kg}$$

$$\text{电解锰带入 S 量} = 1.58 \text{kg} \times 0.012\% = 0.0002 \text{kg}$$

因电解锰中含 Fe 很少，故未计算。

⑨计算硅铁需要量：

$$\text{SiFe 量} = \frac{1.26 \text{kg}}{45.6\%} = 2.76 \text{kg}$$

⑩计算由 SiFe 带入的元素量：

$$\text{SiFe 带入 C 量} = 2.76 \text{kg} \times 0.05\% = 0.0014 \text{kg}$$

$$\text{SiFe 带入 Mn 量} = 2.76 \text{kg} \times 0.6\% = 0.016 \text{kg}$$

$$\text{SiFe 带入 P 量} = 2.76 \text{kg} \times 0.025\% = 0.0007 \text{kg}$$

$$\text{SiFe 带入 S 量} = 2.76 \text{kg} \times 0.02\% = 0.0006 \text{kg}$$

$$\begin{aligned}\text{SiFe 带入 Fe 量} &= 2.76 \text{kg} - (1.26 + 0.0014 + 0.016 + 0.0007 + 0.0006) \text{kg} \\ &= 1.48 \text{kg}\end{aligned}$$

⑪计算工业纯铁需要量。先将已由合金炉料中带入的 Fe 量相加之和与计算需要 Fe 总量相减之差即得出需要补加的 Fe 量

$$\Sigma \text{带入 Fe 量} = (1.3 + 7.83 + 1.48) \text{kg} = 10.61 \text{kg}$$

$$\text{工业纯铁} = \frac{68.66 - 10.61}{99.8\%} \text{kg} = 58.166 \text{kg, 取 58.16kg}$$

⑫计算由工业纯 Fe 带入的元素量：

$$\text{工业纯 Fe 带入 C 量} = 58.16 \text{kg} \times 0.03\% = 0.017 \text{kg}$$

$$\text{工业纯 Fe 带入 Si 量} = 58.16 \text{kg} \times 0.02\% = 0.0116 \text{kg}$$

$$\text{工业纯 Fe 带入 Mn 量} = 58.16 \text{kg} \times 0.03\% = 0.017 \text{kg}$$

$$\text{工业纯 Fe 带入 P 量} = 58.16 \text{kg} \times 0.015\% = 0.0087 \text{kg}$$

$$\text{工业纯 Fe 带入 S 量} = 58.16 \text{kg} \times 0.015\% = 0.0087 \text{kg}$$

⑬计算钢液出炉前脱氧需要铝锭（纯铝）量。生产经验一般按钢液量的 0.1%（质量分数）加入（插入）炉中或钢包中脱氧。

$$\text{铝锭量} = \frac{100\text{kg} \times 0.1\%}{99.6\%} = 0.1\text{kg}$$

3) 填写 100kg 炉料配料计算平衡表, 见表 9-6。

表 9-6 100kg 炉料配料计算平衡表

| 炉料 | 配入量/kg | 炉料带入的合金元素量/kg | | | | | | | | | |
|---------|--------|---------------|--------|-------|---------|--------|-------|-----|------|-------|------|
| | | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Ti | Fe | Al |
| 电解镍 | 9.51 | 0.0009 | — | — | 0.0001 | 0.0001 | — | 9.5 | — | — | — |
| 铬铁 | 26.3 | 0.0105 | 0.0789 | — | 0.013 | 0.0079 | 18.36 | — | — | 7.83 | — |
| 工业纯铁 | 58.16 | 0.017 | 0.0116 | 0.017 | 0.0087 | 0.0087 | — | — | — | 58.16 | — |
| 电解锰 | 1.58 | 0.0005 | — | 1.58 | 0.00002 | 0.0002 | — | — | — | — | — |
| 硅铁 | 2.76 | 0.0014 | 1.26 | 0.016 | 0.0007 | 0.0006 | — | — | — | 1.48 | — |
| 钛铁 | 1.86 | 0.0009 | — | — | 0.0005 | 0.0003 | — | — | 0.56 | 1.3 | — |
| 铝锭 | 0.1 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 99.6 |
| 总计 | 100.27 | 0.0312 | 1.35 | 1.61 | 0.023 | 0.018 | 18.36 | 9.5 | 0.56 | 68.77 | — |
| 计算含量(%) | 100 | 0.04 | 1.26 | 1.58 | 0.02 | 0.02 | 18.36 | 9.5 | 0.56 | 68.66 | — |

从平衡表中配入炉料带入的合金元素量总计与计算成分含量数据表明误差很小, 在生产中控制范围之内, 证明以 100kg 炉料配料计算正确, 可以计算出实际熔炼 7000kg ZG08Cr18Ni9Ti 不锈钢的装料量。

4) 计算总装料量。计算总装料量可以用配入质量视为百分数, 例如电解镍 9.51kg 可写成 9.51%, 再乘 7000kg 得电解镍装入量:

$$\text{即} \quad \text{电解镍量} = 7000\text{kg} \times 9.51\% = 665.7\text{kg}$$

也可以用 $7000\text{kg}/100\text{kg} = 70$ 倍, 再乘以 9.51kg 得电解镍装入量:

$$\text{即} \quad \text{电解镍量} = 9.51\text{kg} \times 70 = 665.7\text{kg}$$

$$\text{铬铁量} = 26.3\text{kg} \times 70 = 1841\text{kg}$$

$$\text{工业纯铁量} = 58.16\text{kg} \times 70 = 4071.2\text{kg}$$

$$\text{电解锰量} = 1.58\text{kg} \times 70 = 110.6\text{kg}$$

$$\text{硅铁量} = 2.76\text{kg} \times 70 = 193.2\text{kg}$$

$$\text{钛铁量} = 1.86\text{kg} \times 70 = 130.2\text{kg}$$

$$\text{铝锭量} = 0.1\text{kg} \times 70 = 7\text{kg}$$

$$\text{总装料量} = 7018.9\text{kg}$$

5) 熔炼到还原末期取样快速分析钢液化学成分, 测温达到出钢温度 1600℃, 向钢液表面撒铝粉扩散脱氧, 插入铝块最终脱氧, 出钢浇注铸钢件。

第三节 中频感应炉熔炼合金铸钢采用返回料和新料的配料计算

一、炉料选择注意事项

- 选用的返回料和其他废料等一定选用有炉料化学成分的炉料，并选用 C、P、S 较低的炉料。
- 选用的返回料化学成分应与熔炼钢的化学成分相似，并适当低于熔炼钢的化学成分的炉料。当个别成分含量高于熔炼钢的主要成分时，一定限量使用或少量选用，为调整成分创造条件。

二、返回料最大限度允许用量的确定

1. 根据炉料中化学成分之比确定返回料用量

根据资料介绍，采用返回料中 C、Si、Mn 均高于熔炼钢种相应的含量时，计算依据选择比值最大的元素，如返回料中 C 的质量分数为 0.2%、Mn 的质量分数为 0.6%、Si 的质量分数为 0.2%，而熔炼钢液中 C 的质量分数为 0.05%、Mn 的质量分数为 0.2%、Si 的质量分数为 0.2% 时，相应元素质量分数比值为：

$$\text{C 质量分数比} = \frac{0.2\%}{0.05\%} = 4, \text{Mn 质量分数比} = \frac{0.6\%}{0.2\%} = 3, \text{Si 质量分数比} = \frac{0.2\%}{0.2\%} = 1,$$

则选择计算依据元素 C 的质量分数比值最大，于是用 C 含量来计算返回料最大允许使用量。

2. 返回料用量的经验公式

返回料中除含有 C、Si、Mn 等元素之外还含有其他元素，这时配料计算方法就比较复杂而麻烦，根据资料通常可用生产中用的经验公式进行计算。

$$\text{公式为} \quad y = \frac{d - 100a}{b - a} \quad (9-1)$$

式中 y ——返回料最大使用量 (kg)；

d ——依据元素的需要量 (kg)；

a ——假设按全新炉料配料时，依据元素的计算含量 (%)；

b ——返回料中依据元素的含量 (%)。

3. 当含有 Ni、Cr、V、Mo 等元素作为计算依据元素时计算返回料最大允许用量公式

$$\text{公式为} \quad y = \frac{d}{b} \quad (9-2)$$

式中符号含义同式 (9-1)。

三、中频感应炉熔炼采用返回料和新料配料计算实例

例 9-4 阀门公司生产 ZG08Cr18Ni12Mo2Ti 不锈钢阀门，材质要求严格，炉料选用含 C、P、S 低的 ZG08Cr18Ni9 不锈钢返回料和新合金料配料，采用容量 5t 的 GWJ5-2500-0.5 碱性中频感应炉熔炼。浇注阀体铸钢件单重 210kg，共 15 件。

(1) 计算钢液需要量和炉料量

1) 计算钢液需要量：

15 件阀体铸钢件钢液量： $210\text{kg} \times 15 = 3150\text{kg}$

浇道和浇冒口钢液量占阀体质量的 40%，

则 浇道和浇冒口钢液量 = $3150\text{kg} \times 40\% = 1260\text{kg}$

钢液裕量占 5%，钢液裕量 = $3150\text{kg} \times 5\% = 157.5\text{kg}$

钢液量合计 = $(3150 + 1260 + 157.5)\text{kg} = 4567.5\text{kg}$ ，取 4568kg，则

钢液总量为 4568kg。

2) 计算炉料量：

中频感应炉熔炼过程合金炉料烧损 3%，烧损量 = $4568\text{kg} \times 3\% = 137\text{kg}$

炉料量 = $(4568 + 137)\text{kg} = 4705\text{kg}$

炉料总量 (装料量) = 4705kg

(2) 熔炼钢和计算成分 ZG08Cr18Ni12Mo2Ti 钢化学成分、配料控制成分和计算成分见表 9-7。

表 9-7 ZG08Cr18Ni12Mo2Ti 钢化学成分、配料控制成分和计算成分

| 合 金 | 化学成分(质量分数, %) | | | | | | | | | | |
|-------------------|---------------|------|---------|-------|--------|-------------|-------------|-----------|-----------------|------|-----|
| | C | Si | Mn | S | P | Cr | Ni | Mo | Ti | Fe | 备注 |
| ZG08Cr18Ni12Mo2Ti | 0.08 | 1.5 | 0.8 ~ 2 | ≤0.03 | ≤0.040 | 16.0 ~ 19.0 | 11.0 ~ 13.0 | 2.0 ~ 3.0 | 5(C0.02 ~ 0.70) | 余量 | — |
| 控制成分 | ≤0.07 | 0.8 | 1.7 | 0.018 | 0.018 | 17 | 12 | 2.5 | 0.5 | 余量 | — |
| 计算成分 | 0.06 | 0.60 | 1.50 | 0.016 | 0.018 | 17 | 12 | 2.5 | 0.50 | 余量 | — |
| 元素回收率 | 100 | 95 | 95 | 100 | 100 | 98 | 100 | 98 | 90 | 97 | 经验数 |
| 需要元素量/kg | 0.06 | 0.63 | 1.57 | 0.016 | 0.018 | 17.35 | 12 | 2.55 | 0.56 | 67.3 | — |

(3) 配料计算 先以 100kg 炉料为基数计算。

1) 计算 100kg 炉料中需要 (配入) 元素量。

根据计算成分和元素回收率计算：

$$\text{所需 C 量} = 100\text{kg} \times 0.06\% = 0.06\text{kg}$$

$$\text{所需 Si 量} = \frac{100\text{kg} \times 0.6\%}{95\%} = 0.63\text{kg}$$

$$\text{所需 Mn 量} = \frac{100\text{kg} \times 1.5\%}{95\%} = 1.57\text{kg}$$

$$\text{所需 S 量} = \frac{100\text{kg} \times 0.016\%}{100\%} = 0.016\text{kg}$$

$$\text{所需 P 量} = \frac{100\text{kg} \times 0.018\%}{100\%} = 0.018\text{kg}$$

$$\text{所需 Cr 量} = \frac{100\text{kg} \times 17\%}{98\%} = 17.35\text{kg}$$

$$\text{所需 Ni 量} = \frac{100\text{kg} \times 12\%}{100\%} = 12\text{kg}$$

$$\text{所需 Mo 量} = \frac{100\text{kg} \times 2.5\%}{98\%} = 2.55\text{kg}$$

$$\text{所需 Ti 量} = \frac{100\text{kg} \times 0.5\%}{90\%} = 0.555\text{kg, 取 0.56kg}$$

2) 先求 Fe 含量:

$$\begin{aligned} \text{Fe} &= 100\% - (0.06\% + 0.63\% + 1.57\% + 0.016\% + 0.018\% + \\ &\quad 17.35\% + 12\% + 2.55\% + 0.56\%) \\ &= 65.25\% \end{aligned}$$

则 所需 Fe 量 = $\frac{100\text{kg} \times 65.25\%}{97\%} = 67.268\text{kg, 取 67.3kg}$

将计算的 100kg 炉料中需要配入元素量, 分别填入表 9-7 中需要元素量格内。

(4) 配料计算各种炉料需要(配入)量

1) 炉料化学成分见表 9-8

表 9-8 炉料化学成分(质量分数) (%)

| 炉料 | C | Si | Mn | S | P | Cr | Ni | Mo | Ti | Fe | 备注 |
|-----------------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|----|--------|----|
| 返回料 ZG08Cr18Ni9 | 0.08 | 0.78 | 1.5 | 0.015 | 0.012 | 18.5 | 8.8 | — | — | 余量 | — |
| 电解镍 | 0.01 | — | — | 0.001 | 0.001 | — | 99.9 | — | — | — | — |
| 钼铁 | 0.10 | 0.5 | — | 0.08 | 0.05 | — | — | 59.5 | — | 余量 | — |
| 铬铁 | 0.04 | 0.3 | — | 0.03 | 0.05 | 69.8 | — | — | — | 余量 | — |
| 电解锰 | 0.03 | — | 99.5 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 硅铁 | 0.05 | 45.6 | 0.6 | 0.02 | 0.025 | — | — | — | — | 余量 | — |
| 钛铁 | 0.05 | — | — | 0.02 | 0.02 | — | — | — | 30 | 余量 | — |
| 工业纯铁 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.010 | 0.015 | — | — | — | — | 99.8 | — |
| 铝锭 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | Al99.6 | 脱氧 |

2) 计算返回料使用量:

返回料 ZG08Cr18Ni9 成分 (质量分数): C0.1%、Si0.78%、Mn1.5%。

熔炼钢 ZG08Cr18Ni12Mo2Ti 成分 (质量分数): C0.08%、Si1.5%、Mn1.5%。

相应元素比值: C 质量分数比值 $= \frac{0.1\%}{0.08\%} = 1.25$ 倍最大, 根据含 C 量确定

返回料最大使用量。

先假定熔炼的 ZG08Cr18Ni12Mo2Ti 钢中的主要合金元素, 如 Cr、Ni、Fe、Mo 全用新合金料配入时, 估算配入的新合金料中带入的 C 量。

$$\text{铬铁带入 C 量} = \frac{17.35\text{kg}}{68.9\%} \times 0.04\% = 0.01\text{kg}$$

$$\text{电解镍带入 C 量} = \frac{12\text{kg}}{99.9\%} \times 0.01\% = 0.0012\text{kg}$$

$$\text{工业纯铁带入 C 量} = \frac{67.3\text{kg}}{99.8\%} \times 0.03\% = 0.02\text{kg}$$

$$\text{钼铁带入 C 量} = \frac{2.55\text{kg}}{59.5\%} \times 0.10\% = 0.004\text{kg}$$

合计新合金料带入 C 量 $= (0.01 + 0.0012 + 0.02 + 0.004)\text{kg} = 0.035\text{kg}$, 占比 0.035%。

$$\text{根据资料公式: } y = \frac{d - 100 \times a}{b - a}$$

取 $a = 0.035\%$ 、 $b = 0.1\%$ 、 $d = 0.06\text{kg}$ 。

$$\text{则 } y = \frac{0.06 - 100 \times 0.035\%}{0.1\% - 0.035\%} = 38.46\text{kg}, \text{ 取 } 38\text{kg}。$$

即得出, 100kg 炉料中需要配用 ZG08Cr18Ni9 返回料 38kg。

3) 计算 ZG08Cr18Ni9 返回料带入各元素量 [成分 (质量分数): Cr18.5%、Ni8.8%、S0.015%、P0.012%]:

$$\text{返回料带入 C 量} = 38\text{kg} \times 0.1\% = 0.038\text{kg}$$

$$\text{返回料带入 Si 量} = 38\text{kg} \times 0.78\% = 0.296\text{kg}$$

$$\text{返回料带入 Mn 量} = 38\text{kg} \times 1.5\% = 0.57\text{kg}$$

$$\text{返回料带入 S 量} = 38\text{kg} \times 0.015\% = 0.005\text{kg}$$

$$\text{返回料带入 P 量} = 38\text{kg} \times 0.012\% = 0.004\text{kg}$$

$$\text{返回料带入 Cr 量} = 38\text{kg} \times 18.5\% = 7.03\text{kg}$$

$$\text{返回料带入 Ni 量} = 38\text{kg} \times 8.8\% = 3.34\text{kg}$$

$$\text{合金元素量总和} = 11.283\text{kg}$$

$$\text{返回料带入 Fe 量} = (38 - 11.283)\text{kg} = 26.7\text{kg}$$

4) 计算 100kg 炉料中需要元素量与返回料带入元素量之差:

$$\text{C 量差} = (0.06 - 0.038) \text{kg} = 0.022 \text{kg}$$

$$\text{Si 量差} = (0.63 - 0.296) \text{kg} = 0.334 \text{kg}$$

$$\text{Mn 量差} = (1.57 - 0.57) \text{kg} = 1.0 \text{kg}$$

$$\text{Cr 量差} = (17.35 - 7.03) \text{kg} = 10.32 \text{kg}$$

$$\text{Ni 量差} = (12 - 3.34) \text{kg} = 8.66 \text{kg}$$

$$\text{Mo 量差} = 2.55 \text{kg}$$

$$\text{Ti 量差} = 0.56 \text{kg}$$

$$\text{Fe 量差} = (67.3 - 26.7) \text{kg} = 40.60 \text{kg}$$

5) 计算用各新合金补加量 (配入量), 并计算带入元素量:

$$\textcircled{1} \text{TiFe 量} = \frac{0.56 \text{kg}}{30\%} = 1.87 \text{kg}$$

$$\text{TiFe 带入 C 量} = 1.87 \text{kg} \times 0.05\% = 0.0009 \text{kg}$$

$$\text{TiFe 带入 S 量} = 1.87 \text{kg} \times 0.02\% = 0.0003 \text{kg}$$

$$\text{TiFe 带入 P 量} = 1.87 \text{kg} \times 0.02\% = 0.0003 \text{kg}$$

$$\text{TiFe 带入 Fe 量} = 1.87 \text{kg} - (0.0009 + 0.0003 + 0.0005 + 0.56) \text{kg} = 1.3 \text{kg}$$

$$\textcircled{2} \text{MoFe 量} = \frac{2.55 \text{kg}}{59.5\%} = 4.28 \text{kg}$$

$$\text{MoFe 带入 C 量} = 4.28 \text{kg} \times 0.10\% = 0.004 \text{kg}$$

$$\text{MoFe 带入 Si 量} = 4.28 \text{kg} \times 0.5\% = 0.02 \text{kg}$$

$$\text{MoFe 带入 S 量} = 4.28 \text{kg} \times 0.08\% = 0.003 \text{kg}$$

$$\text{MoFe 带入 P 量} = 4.28 \text{kg} \times 0.05\% = 0.002 \text{kg}$$

$$\text{MoFe 带入 Fe 量} = 4.28 \text{kg} - (0.004 + 0.02 + 0.003 + 0.002 + 2.55) \text{kg} = 1.7 \text{kg}$$

$$\textcircled{3} \text{Ni9990 量} = \frac{8.66 \text{kg}}{99.9\%} = 8.67 \text{kg}$$

$$\text{Ni9990 带入 C 量} = 8.67 \text{kg} \times 0.01\% = 0.0008 \text{kg}$$

$$\text{Ni9990 带入 S 量} = 8.67 \text{kg} \times 0.001\% = 0.00008 \text{kg}$$

$$\text{Ni9990 带入 P 量} = 8.67 \text{kg} \times 0.001\% = 0.00008 \text{kg}$$

$$\textcircled{4} \text{CrFe 量} = \frac{10.32 \text{kg}}{69.8\%} = 14.78 \text{kg}$$

$$\text{CrFe 带入 C 量} = 14.78 \text{kg} \times 0.04\% = 0.0059 \text{kg}$$

$$\text{CrFe 带入 Si 量} = 14.78 \text{kg} \times 0.3\% = 0.04 \text{kg}$$

$$\text{CrFe 带入 S 量} = 14.78 \text{kg} \times 0.03\% = 0.004 \text{kg}$$

$$\text{CrFe 带入 P 量} = 14.78 \text{kg} \times 0.05\% = 0.007 \text{kg}$$

$$\text{CrFe 带入 Fe 量} = 14.78 \text{kg} - (0.0059 + 0.04 + 0.004 + 0.007 + 10.32) \text{kg}$$

$$= 4.4 \text{kg}$$

$$⑤ \text{SiFe 量} = \frac{0.334 \text{kg}}{45.6\%} = 0.73 \text{kg}$$

$$\text{SiFe 带入 C 量} = 0.73 \text{kg} \times 0.05\% = 0.00036 \text{kg}$$

$$\text{SiFe 带入 Mn 量} = 0.73 \text{kg} \times 0.6\% = 0.004 \text{kg}$$

$$\text{SiFe 带入 S 量} = 0.73 \text{kg} \times 0.02\% = 0.0001 \text{kg}$$

$$\text{SiFe 带入 P 量} = 0.73 \text{kg} \times 0.025\% = 0.00018 \text{kg}$$

$$\text{SiFe 带入合金元素量之和} = 0.34 \text{kg} (\text{包括 Si0.334kg})$$

$$\text{SiFe 带入 Fe 量} = (0.73 - 0.34) \text{kg} = 0.39 \text{kg}$$

$$⑥ \text{电解锰量} = \frac{(1.0 - 0.004) \text{kg}}{99.5\%} = 1.0 \text{kg}$$

$$\text{电解锰带入 C 量} = 1.0 \text{kg} \times 0.03\% = 0.0003 \text{kg}$$

$$⑦ \text{工业纯铁量} = \frac{40.6 \text{kg} - (1.3 + 1.7 + 4.4 + 0.39) \text{kg}}{99.9\%} = 32.81 \text{kg}$$

$$\text{工业纯铁带入 C 量} = 32.81 \text{kg} \times 0.03\% = 0.01 \text{kg}$$

$$\text{工业纯铁带入 Si 量} = 32.81 \text{kg} \times 0.02\% = 0.006 \text{kg}$$

$$\text{工业纯铁带入 Mn 量} = 32.81 \text{kg} \times 0.03\% = 0.01 \text{kg}$$

$$\text{工业纯铁带入 S 量} = 32.81 \text{kg} \times 0.01\% = 0.003 \text{kg}$$

$$\text{工业纯铁带入 P 量} = 32.81 \text{kg} \times 0.015\% = 0.005 \text{kg}$$

因工业纯铁带入 Mn 量 = 0.01kg, 折合成电解锰量 = $\frac{0.01 \text{kg}}{99.5\%} = 0.01 \text{kg}$, 所以

应从电解锰 = 1.0kg 中减去 0.01kg。于是电解锰量应进行修正, 修正后的电解锰量 = (1.0 - 0.01) kg = 0.99kg。

但因减去数量小仍按电解锰量 = 1.0kg 配入。

⑧计算配入各种合金元素量之和 (返回料 + 新合金)。

各合金元素量合计计算数据填写入表 9-9 中

表 9-9 计算数据

| 元 素 | C | Si | Mn | S | P | Cr | Ni | Mo | Ti | Fe | 总计 |
|----------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|---------|
| 元素配入量/kg | 0.06 | 0.696 | 1.584 | 0.015 | 0.017 | 17.35 | 12.0 | 2.55 | 0.56 | 67.87 | 102.702 |
| 元素配比(%) | 0.06 | 0.69 | 1.58 | 0.015 | 0.017 | 17.35 | 12.0 | 2.55 | 0.56 | 67.87 | 102.692 |

(5) 填写熔炼 100kg 炉料配料计算平衡表 (表 9-10)

(6) 计算熔炼 5000kg ZG08Cr18Ni12Mo2Ti 钢炉料总装入量 把配入量的 kg 数当成炉料配比百分数与熔炼 5000kg 钢相乘得出炉料总装入量, 或者熔炼 5000kg 钢是 100kg 炉料倍数相乘即得出各炉料总需要量。计算顺序可按装炉顺

序计算。

表 9-10 熔炼 ZG08Cr18Ni12Mo2Ti 配料计算平衡表

| 炉 料 | 配入量 /kg | 炉料带入合金元素量/kg | | | | | | | | | |
|-----------------|------------|--------------|-------|-------|---------|---------|-------|------|------|------|--------|
| | | C | Si | Mn | S | P | Cr | Ni | Mo | Ti | Fe |
| 返回料 ZG08Cr18Ni9 | 38 | 0.038 | 0.296 | 0.57 | 0.005 | 0.004 | 7.03 | 3.34 | — | — | 26.7 |
| 电解镍 | 8.67 | 0.0008 | — | — | 0.00008 | 0.00008 | — | 8.66 | — | — | — |
| 钼铁 | 4.28 | 0.004 | 0.02 | — | 0.003 | 0.002 | — | — | 2.55 | — | 1.7 |
| 铬铁 | 14.78 | 0.0059 | 0.04 | — | 0.004 | 0.007 | 10.32 | — | — | — | 4.4 |
| 工业纯铁 | 32.81 | 0.01 | 0.006 | 0.01 | 0.003 | 0.005 | — | — | — | — | 32.81 |
| 硅铁 | 0.73 | 0.0003 | 0.334 | 0.004 | 0.0001 | 0.00018 | — | — | — | — | 0.39 |
| 电解锰 | 1.0 | 0.0003 | — | 1.0 | — | — | — | — | — | — | — |
| 钛铁 | 1.87 | 0.0009 | — | — | 0.0003 | 0.0003 | — | — | — | 0.56 | 1.3 |
| 总计/kg | 102.14 | 0.06 | 0.696 | 1.584 | 0.015 | 0.018 | 17.35 | 12 | 2.55 | 0.56 | 67.3 |
| 计算含量(%) | 100 | 0.06 | 0.6 | 1.5 | 0.016 | 0.018 | 17 | 12 | 2.5 | 0.5 | 65.806 |

$$1) \text{ 返回炉量} = 5000\text{kg} \times 38\% = 38\text{kg} \times \frac{5000}{100} = 1900\text{kg}$$

$$2) \text{ 电解镍量} = 5000\text{kg} \times 8.67\% = 8.67\text{kg} \times \frac{5000}{100} = 433.5\text{kg}$$

$$3) \text{ 钼铁量} = 5000\text{kg} \times 4.28\% = 4.28\text{kg} \times \frac{5000}{100} = 214\text{kg}$$

$$4) \text{ 铬铁量} = 5000\text{kg} \times 14.78\% = 14.78\text{kg} \times \frac{5000}{100} = 739\text{kg}$$

$$5) \text{ 工业纯铁量} = 5000\text{kg} \times 32.81\% = 32.81\text{kg} \times \frac{5000}{100} = 1640\text{kg}$$

$$6) \text{ 硅铁量} = 5000\text{kg} \times 0.73\% = 0.73\text{kg} \times \frac{5000}{100} = 36.5\text{kg}$$

$$7) \text{ 电解锰量} = 5000\text{kg} \times 1.0\% = 1.0\text{kg} \times \frac{5000}{100} = 50\text{kg}$$

$$8) \text{ 钛铁量} = 5000\text{kg} \times 1.87\% = 1.87\text{kg} \times \frac{5000}{100} = 93.5\text{kg}$$

$$9) \text{ 总计装料量} = 5106.5\text{kg}$$

第四节 中频感应炉熔炼合金铸钢调整成分的配料计算

采用中频感应电炉熔炼合金铸钢因含多种合金元素，熔点高 $1480 \sim 1600^{\circ}\text{C}$ ，多采用镁砂打结的碱性炉衬熔炼。由于中频感应炉熔炼不能采用氧化法氧化脱 C，因为氧化法必须采用高压吹氧脱 C 氧化合金元素，同时产生高达 1700°C 以上的高温而使炉衬烧损严重，采用造碱性渣也能脱磷和脱硫而净化处理钢液，但在熔炼过程中一旦出现合金成分有偏差不符合规格时，必须进行调整成分补加合金补救。但由于补加合金容易引起其他合格成分发生变化，增加联锁补加配料计算麻烦。由于中频感应炉熔炼不能用长时间补加合金成分，因此中频感应炉熔炼合金铸钢配料计算至关重要，必须精确无误。

补加合金成分配料计算公式，电弧炉熔炼铸钢配料计算公式也适用于中频感应炉熔炼，两种电炉熔炼合金元素烧损回收率有所不同，应严加注意。

一、补加合金配料计算实例

例 9-5 某工厂生产耐腐蚀合金钢 ZG20Cr13Ni 钢液量 1800kg，浇注化工泵铸钢件。采用容量为 2t 的 GWJ2-1200-0.5 中频感应炉，用返回料和新料熔炼。

(1) 熔炼钢牌号和炉中化验成分 (表 9-11)

表 9-11 熔化钢牌号和炉中化验成分

| 熔炼合金钢 | 化学成分(质量分数, %) | | | | | | | |
|------------|---------------|------------|------------|--------------|--------------|-------------|------------|----|
| | C | Si | Mn | S | P | Cr | Ni | Fe |
| ZG20Cr13Ni | 0.17 ~ 0.23 | ≤ 0.8 | ≤ 0.8 | ≤ 0.025 | ≤ 0.035 | 11.5 ~ 13.5 | ≤ 1.0 | 余量 |
| 控制成分 | 0.20 | 0.60 | 0.70 | ≤ 0.02 | ≤ 0.02 | 12.0 ~ 12.5 | 0.7 ~ 0.8 | 余量 |
| 计算成分 | 0.19 | 0.5 | 0.6 | 0.015 | 0.015 | 12.5 | 0.8 | 余量 |
| 钢液化验成分 | 0.20 | 0.58 | 0.6 | 0.016 | 0.015 | 11.5 | 0.6 | 余量 |

从炉中取样快速分析的成分可以看出，主要合金元素 Cr、Ni 含量偏低，要补加 Cr、Ni。

(2) 合金化学成分 (表 9-12)

表 9-12 合金化学成分(质量分数) (%)

| 合金 | C | Si | Mn | S | P | Cr | Ni | Fe |
|-------|------|-----|----|-------|-------|------|------|----|
| 铬铁 | 0.06 | 0.4 | — | 0.003 | 0.005 | 68.5 | | 余量 |
| 电解镍 | 0.03 | — | — | 0.001 | 0.001 | — | 99.8 | 余量 |
| 元素回收率 | — | — | — | — | — | 98 | 100 | — |

(3) 补加铬和镍配料计算

1) 计算补加铬铁量。

根据补加合金公式

$$\text{铬铁量} = \frac{1800\text{kg} \times (12.5\% - 11.5\%)}{68.5\% \times 98\% - 12.5\%} = 32.95\text{kg}$$

2) 计算补加铬铁带入的元素量：

$$\text{铬铁带入 C 量} = 32.95\text{kg} \times 0.06\% = 0.0198\text{kg}$$

$$\text{铬铁带入 Si 量} = 32.95\text{kg} \times 0.4\% = 0.132\text{kg}$$

$$\text{铬铁带入 S 量} = 32.95\text{kg} \times 0.003\% = 0.00099\text{kg}$$

$$\text{铬铁带入 P 量} = 32.95\text{kg} \times 0.005\% = 0.00164\text{kg}$$

3) 计算补加电解镍量。

$$\text{电解镍量} = \frac{1800\text{kg} \times (0.8\% - 0.6\%)}{99.8\% \times 100\% - 0.8\%} = 3.63\text{kg}$$

4) 计算电解镍带入的元素量：

$$\text{电解镍带入 C 量} = 3.63\text{kg} \times 0.03\% = 0.001\text{kg}$$

$$\text{电解镍带入 Si 量} = 3.63\text{kg} \times 0.001\% = 0.000036\text{kg}$$

$$\text{电解镍带入 P 量} = 3.63\text{kg} \times 0.001\% = 0.000036\text{kg}$$

(4) 计算补加铬铁和电解镍后钢液中 C、Si、S、P 含量

$$\text{合计带入 C 量} = (0.0198 + 0.001)\text{kg} = 0.0208\text{kg}$$

$$\text{合计带入 Si 量} = 0.132\text{kg}$$

$$\text{合计带入 S 量} = (0.00099 + 0.000036)\text{kg} = 0.001026\text{kg}$$

$$\text{合计带入 P 量} = (0.00164 + 0.000036)\text{kg} = 0.001676\text{kg}$$

钢液中元素含量：

$$C = \frac{0.0208}{1800 + 32.95 + 3.63} \times 100\% + 0.20\% \text{ (原有)} = 0.2011\% \text{, 合格, 几乎没变化。}$$

$$Si = \frac{0.132}{1836.58} \times 100\% + 0.58\% = 0.5872\% \text{, 含硅稍有增加, 合格。}$$

$$S = \frac{0.001026}{1836.58} \times 100\% + 0.016\% = 0.016056\% \text{, 几乎没变化, 合格。}$$

$$P = \frac{0.001676}{1836.58} \times 100\% + 0.015\% = 0.015091\% \text{, 几乎没变化, 合格。}$$

补加铬和镍配料计算正确。

二、补加系数法调整成分和实例

1. 补加系数法

根据合金含量和成品钢的成分分为两步补加合金，此法适用含有多个合金元素钢种，用起来比较麻烦。在第八章已介绍过补加系法，在感应炉熔炼中调整合金成分不能应用长时间进行补加合金。在感应炉熔炼调整成分资料中也应用了补加系数法。为多掌握配料计算知识，在本章中也收纳了补加系数法。

补加系数法首先确定一次补加料数量，计算出补加系数，然后利用补加系数使第二次补加料数量达到成品合格成分。也就是说，求出每增加 100kg 不含合金元素的钢液必须补加多少合金才能使成分达到最后成品钢的成分要求。

计算方法是以 100kg 钢液计算下列各项：

$$\text{各项合金占比} = \frac{\text{钢液规格成分或计算成分}}{\text{补加合金成分}} \times 100\%$$

$$\text{钢液中纯铁占比} = 100\% - \text{各项合金占比之和}$$

$$\text{补加系数} = \frac{\text{合金占比}}{\text{钢液不含合金的纯铁占比}}$$

2. 补加系数计算法实例

例 9-6 某工厂熔炼 ZG06Cr20Ni10MnTi 不锈钢 1000kg，在中频感应炉熔炼。还原期取样快速分析成分与配料计算成分出现偏差，需要补加合金，调整成分。钢的化学成分见表 9-13。

表 9-13 ZG06Cr20Ni10MnTi 不锈钢化学成分（质量分数） (%)

| 熔炼合金 | C | Si | Mn | Cr | Ni | Ti | Fe | 备注 |
|-------|-------|------|------|------|------|------|--------|------------|
| 计算成分 | ≤0.06 | 0.50 | 1.50 | 19.0 | 10.0 | 0.4 | ≈68.54 | 含 S、P 量未计算 |
| 炉前分析 | 0.05 | 0.30 | 1.20 | 18.0 | 9.0 | 0.3 | — | — |
| 需要调整值 | — | -0.2 | -0.3 | -1.0 | -1.0 | -0.1 | — | — |

注：此例参照王振东等编著的《感应炉熔炼》一书中例题编写。

（1）计算各元素补加系数

1) 计算公式为

$$\varphi(\text{某元素}) = \frac{100\text{kg 钢液中含某元素量}}{100\text{kg 钢液中含纯铁量}}$$

2) 100kg 钢液中含某元素量按计算含量计算。

3) 100kg 钢液中含纯铁量为 100kg 减去含各元素量之和的差。

本例中各元素补加系数计算如下：

$$\varphi(\text{C}) = \frac{0.06}{68.54} = 0.00087$$

$$\varphi(\text{Si}) = \frac{0.5}{68.54} = 0.0073$$

$$\varphi(\text{Mn}) = \frac{1.5}{68.54} = 0.022$$

$$\varphi(\text{Cr}) = \frac{19.0}{68.54} = 0.277$$

$$\varphi(\text{Ni}) = \frac{10.0}{68.54} = 0.146$$

$$\varphi(\text{Ti}) = \frac{0.4}{68.54} = 0.0058$$

(2) 计算 1000kg 钢液中各种炉料的一次补加量 计算公式为

$$y_1 = \frac{m_{\text{钢液}}(a_0 - a_1)}{b}$$

式中 y_1 ——炉料(合金)一次补加量(kg)；

$m_{\text{钢液}}$ ——炉中钢液量(kg)；

a_0 ——钢液中的计算成分元素含量(%)；

a_1 ——钢液中炉前分析成分元素含量(%)；

b ——补加合金成分元素含量(%)。

$$\text{硅铁量} = \frac{1000\text{kg} \times (0.5\% - 0.3\%)}{44.5\%} = 4.49\text{kg}$$

$$\text{电解锰量} = \frac{1000\text{kg} \times (1.5\% - 1.2\%)}{99.8\%} = 3.0\text{kg}$$

$$\text{铬铁量} = \frac{1000\text{kg} \times (19\% - 18\%)}{69.8\%} = 14.33\text{kg}$$

$$\text{电解镍量} = \frac{1000\text{kg} \times (10\% - 9\%)}{99.9\%} = 10\text{kg}$$

$$\text{钛铁量} = \frac{1000\text{kg} \times (0.4\% - 0.3\%)}{30\%} = 3.3\text{kg}$$

钢液中 C 含量, 因分析 C0.05% < C0.06% 计算成分, 所以不用调整。

合计加料量 = 35.12kg

(3) 计算 1000kg 钢液中各种炉料(合金料)的二次补加量 设为 y_2 二次补加量等于一次补加量乘以补加元素的补加系数,

即

$$y_2 = y_1 \times \varphi$$

则

$$\text{硅铁二次补加量} = 4.49 \text{ kg} \times 0.0073 = 0.032 \text{ kg}$$

$$\text{电解锰二次补加量} = 3.0 \text{ kg} \times 0.022 = 0.066 \text{ kg}$$

$$\text{铬铁二次补加量} = 14.33 \text{ kg} \times 0.277 = 3.97 \text{ kg}$$

$$\text{电解镍二次补加量} = 10 \text{ kg} \times 0.146 = 1.46 \text{ kg}$$

$$\text{钛铁二次补加量} = 3.3 \text{ kg} \times 0.0058 = 0.019 \text{ kg}$$

$$\text{合计二次补加量} = 5.55 \text{ kg}$$

(4) 平衡验证补加合金料的计算结果

$$\text{两次合计补加合金料} = 35.12 \text{ kg} + 5.55 \text{ kg} = 40.67 \text{ kg}$$

$$\text{两次补加合金料后钢液量} = 1000 + 40.67 \text{ kg} = 1040.67 \text{ kg}$$

两次补加合金料后钢液成分元素含量计算如下：

$$\text{Si} = \frac{(4.49 \text{ kg} + 0.032 \text{ kg}) \times 44.5\%}{1040.67 \text{ kg}} \times 100\% + 0.3\% = 0.49\%$$

$$\text{Mn} = \frac{(3.0 \text{ kg} + 0.066 \text{ kg}) \times 99.8\%}{1040.67 \text{ kg}} \times 100\% + 1.2\% = 1.49\%$$

$$\text{Cr} = \frac{(14.33 \text{ kg} + 3.97 \text{ kg}) \times 69.8\%}{1040.67 \text{ kg}} \times 100\% + 18\% = 19.23\%$$

$$\text{Ni} = \frac{(10 \text{ kg} + 1.46 \text{ kg}) \times 99.9\%}{1040.67 \text{ kg}} \times 100\% + 9.0\% = 10.100\%$$

$$\text{Ti} = \frac{(3.3 \text{ kg} + 0.019 \text{ kg}) \times 30\%}{1040.67 \text{ kg}} \times 100\% + 0.3\% = 0.395\%$$

成品钢样快速分析结果（质量分数）：C0.05%、Si0.49%、Mn1.48%、Cr19.21%、Ni10.09%、Ti0.4%。分析结果证明，补加调整计算正确。

例 9-7 熔炼 ZG06Cr20Ni10 不锈钢，熔化量 1000kg（此例计算法与例 9-6 略有不同）。不锈钢的化学成分见表 9-14，选用补加合金和回收率见表 9-15。

表 9-14 H0Cr20Ni10 不锈钢化学成分（质量分数） (%)

| 元素 | C | Si | Mn | Cr | Ni | Ti | Fe | 备注 |
|------|-------|-----|-----|------|------|-----|----|-----------|
| 计算成分 | ≤0.06 | 0.5 | 1.5 | 19.0 | 10.0 | 0.4 | 余量 | — |
| 炉前分析 | 0.05 | 0.3 | 1.2 | 18 | 9.0 | 0.3 | 余量 | — |
| 调整值 | — | 0.2 | 0.3 | 1.0 | 1.0 | 0.1 | — | C、S、P 不考虑 |

(1) 求出合金补加系数

1) 计算各种合金占比：

$$\text{硅铁占比} = \frac{0.5\%}{44.5\%} \times 100\% = 1.12\%$$

表 9-15 选用补加合金和回收率

| 合金 | 主要元素含量 (质量分数, %) | 回收率(%) | 合金 | 主要元素含量 (质量分数, %) | 回收率(%) |
|-----|---------------------|--------|-----|---------------------|--------|
| 硅铁 | Si 44.5 | 97 | 电解镍 | Ni 99.9 | 100 |
| 电解锰 | Mn 99.5 | 97 | 钛铁 | Ti 30 | 95 |
| 铬铁 | Cr 69.8 | 98 | | | |

$$\text{电解锰占比} = \frac{1.5\%}{99.5\%} \times 100\% = 1.51\%$$

$$\text{铬铁占比} = \frac{19\%}{69.8\%} \times 100\% = 27.22\%$$

$$\text{电解镍占比} = \frac{10\%}{99.9\%} \times 100\% = 10\%$$

$$\text{钛铁占比} = \frac{0.4\%}{30\%} \times 100\% = 1.33\%$$

$$\text{纯钢液(Fe)占比} = 100\% - (1.12\% + 1.51\% + 27.22\% + 10\% + 1.33\%) \\ = 58.82\%$$

2) 计算各种合金补加系数:

$$\text{硅铁补加系数} = \frac{1.12\%}{58.82\%} = 0.019$$

$$\text{电解锰补加系数} = \frac{1.51\%}{58.82\%} = 0.026$$

$$\text{铬铁补加系数} = \frac{27.22\%}{58.82\%} = 0.463$$

$$\text{电解镍补加系数} = \frac{10\%}{58.82\%} = 0.17$$

$$\text{钛铁补加系数} = \frac{1.33\%}{58.82\%} = 0.023$$

(2) 按照单一元素计算合金一次补加量

$$\text{硅铁一次补加量} = \frac{1000\text{kg} \times (0.5\% - 0.3\%)}{44.5\% \times 97\%} = 4.63\text{kg}$$

$$\text{电解锰一次补加量} = \frac{1000\text{kg} \times (1.5\% - 1.2\%)}{99.5\% \times 97\%} = 3.11\text{kg}$$

$$\text{铬铁一次补加量} = \frac{1000\text{kg} \times (19\% - 18\%)}{69.8\% \times 98\%} = 14.62\text{kg}$$

$$\text{电解镍一次补加量} = \frac{1000\text{kg} \times (10\% - 9\%)}{99.9\% \times 100\%} = 10.01\text{kg}$$

$$\text{钛铁一次补加量} = \frac{1000\text{kg} \times (0.4\% - 0.3\%)}{30\% \times 95\%} = 3.51\text{kg}$$

$$\text{合计补加量} = (4.63 + 3.11 + 14.62 + 10.01 + 3.51)\text{kg} = 35.88\text{kg}$$

(3) 计算另外需补加合金量(二次补加量) 计算法用补加系数乘以各种合金一次补加量。

$$\text{硅铁二次补加量} = 35.88\text{kg} \times 0.019 = 0.68\text{kg}$$

$$\text{电解锰二次补加量} = 35.88\text{kg} \times 0.026 = 0.93\text{kg}$$

$$\text{铬铁二次补加量} = 35.88\text{kg} \times 0.463 = 16.61\text{kg}$$

$$\text{电解镍二次补加量} = 35.88\text{kg} \times 0.17 = 6.1\text{kg}$$

$$\text{钛铁二次补加量} = 35.88\text{kg} \times 0.023 = 0.83\text{kg}$$

(4) 计算共需补加合金之和

$$\text{硅铁补加量} = (4.63 + 0.68)\text{kg} = 5.31\text{kg}$$

$$\text{电解锰补加量} = (3.11 + 0.93)\text{kg} = 4.04\text{kg}$$

$$\text{铬铁补加量} = (14.62 + 16.61)\text{kg} = 31.23\text{kg}$$

$$\text{电解镍补加量} = (10.01 + 6.1)\text{kg} = 16.11\text{kg}$$

$$\text{钛铁补加量} = (3.51 + 0.83)\text{kg} = 4.34\text{kg}$$

$$\text{合计补加量} = (5.31 + 4.04 + 31.23 + 16.11 + 4.34)\text{kg} = 61.03\text{kg}$$

(5) 计算总钢液量

$$\text{总钢量} = (1000 + 61.03)\text{kg} = 1061\text{kg}$$

(6) 验算补加合金后钢液成分

$$C = \frac{1000\text{kg} \times 0.05\%}{1061\text{kg}} \times 100\% = 0.047\%$$

$$Si = \frac{1000\text{kg} \times 0.3\% + 5.3\text{kg} \times 44.5\% \times 97\%}{1061\text{kg}} \times 100\% = 0.5\%$$

$$Mn = \frac{1000\text{kg} \times 1.2\% + 4.04\text{kg} \times 99.5\% \times 97\%}{1061\text{kg}} \times 100\% = 1.497\% = 1.5\%$$

$$Cr = \frac{1000\text{kg} \times 18\% + 31.23\text{kg} \times 69.8\% \times 98\%}{1061\text{kg}} \times 100\% = 18.98\% \approx 19.0\%$$

$$Ni = \frac{1000\text{kg} \times 9\% + 16.11\text{kg} \times 99.9\% \times 100\%}{1061\text{kg}} \times 100\% = 10.0\%$$

$$Ti = \frac{1000\text{kg} \times 0.3\% + 4.34\text{kg} \times 30\% \times 95\%}{1061\text{kg}} \times 100\% = 0.4\%$$

验算结果符合计算成分元素含量。

第三篇 有色合金熔炼的配料计算方法

第十章 有色合金熔炼用金属炉料

有色合金熔炼配料计算用的金属炉料的种类和牌号很多，本章只能简单介绍回炉料、废料、新金属（纯金属）、中间合金等常用的金属炉料，并应注重节约新金属和贵重金属。

第一节 回炉料、新金属和中间合金

一、回炉料分类及选用注意事项

1) 回炉料、废料可统称为回炉料。回炉料按品级可分为三级：

一级回炉料。包括本厂有色金属熔炼废铸件、加工废件及轧制、切割边角料等，炉料整洁，化学成分确定。

二级回炉料。包括本厂有色金属熔炼浇注浇冒口、加工切屑等，有的切屑成分不稳定，要重熔化验成分，去除油污。

三级回炉料。包括市售废旧有色合金料、杂料，应清除油污或处理清洁，二次重熔化验确定成分含量再回用。

2) 各种回炉料应按不同合金牌号成分进行分类分别堆放，以便配料计算准确，防止不同合金成分炉料混入导致熔炼合金成分偏差和影响合金性能。

3) 特别注意市售废杂铜料，含油污大、有毒物料及弹壳等有爆炸危险废杂料一定要挑出，经安全处理合格后再回用，防止污染环境人身伤害。

二、新金属

新金属是指由冶金部门直接冶炼、生产和提供的一次性工业纯金属。熔炼有色合金配料用新金属可降低炉料中总的杂质含量，提高有色合金的纯洁度和制品的最终综合性能，因为新金属都属于品位高的纯金属，杂质含量少。配料计算用新金属，特别是熔炼有色合金调整成分补加新金属，有利于保证熔炼有色合金成分合格。

配料用新金属有电解铜、电解镍、铝锭、锌锭、镁锭、电解锰、锡锭、海绵钛等均有国家标准和行业标准，其化学成分见表 10-1 ~ 表 10-13。

表 10-1 阴极铜化学成分 (质量分数) (摘自 GB/T 467—2010) (%)

| Cu + Ag ≥ | 杂质含量 ≤ | | | | | | | | | |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | As | Sb | Bi | Fe | Pb | Sn | Ni | Zn | S | P |
| 99.95 | 0.0015 | 0.0015 | 0.0005 | 0.0025 | 0.0020 | 0.0010 | 0.0020 | 0.0020 | 0.0025 | 0.0010 |

表 10-2 锌锭的化学成分 (质量分数) (摘自 GB/T 470—2008) (%)

| 牌号 | Zn ≥ | 杂质 ≤ | | | | | | |
|----------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | Pb | Cd | Fe | Cu | Sn | Al | 总和 |
| Zn99.995 | 99.995 | 0.003 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.005 |
| Zn99.99 | 99.99 | 0.005 | 0.003 | 0.003 | 0.002 | 0.001 | 0.002 | 0.01 |
| Zn99.95 | 99.95 | 0.030 | 0.01 | 0.02 | 0.002 | 0.001 | 0.01 | 0.05 |
| Zn99.5 | 99.5 | 0.45 | 0.01 | 0.05 | — | — | — | 0.50 |
| Zn98.5 | 98.5 | 1.40 | 0.01 | 0.05 | — | — | — | 1.50 |

表 10-3 锡锭化学成分 (质量分数) (摘自 GB/T 728—2010) (%)

| 牌号 | Sn99.90 | | Sn99.95 | | Sn99.99 | |
|---------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| 级别 | A | AA | A | AA | A | |
| Sn ≥ | 99.90 | 99.90 | 99.95 | 99.95 | 99.99 | |
| 杂质 ≤ | As | 0.0080 | 0.0080 | 0.0030 | 0.0030 | 0.0005 |
| | Fe | 0.0070 | 0.0070 | 0.0040 | 0.0040 | 0.0020 |
| | Cu | 0.0080 | 0.0080 | 0.0040 | 0.0040 | 0.0005 |
| | Pb | 0.0320 | 0.0100 | 0.0200 | 0.0100 | 0.0035 |
| | Bi | 0.0150 | 0.0150 | 0.0060 | 0.0060 | 0.0025 |
| | Sb | 0.0200 | 0.0200 | 0.0140 | 0.0140 | 0.0015 |
| | Cd | 0.0008 | 0.0008 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0003 |
| | Zn | 0.0010 | 0.0010 | 0.0008 | 0.0008 | 0.0003 |
| | Al | 0.0010 | 0.0010 | 0.0008 | 0.0008 | 0.0005 |
| | S | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0003 |
| | Ag | 0.0050 | 0.0050 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 |
| | Ni + Co | 0.0050 | 0.0050 | 0.0050 | 0.0050 | 0.0006 |
| | 杂质总和 | 0.10 | 0.10 | 0.05 | 0.05 | 0.01 |

注：表中杂质总和指表中所列杂质元素实测值之和。

表 10-4 铅锭的化学成分 (质量分数) (摘自 GB/T 469—2013) (%)

| 牌号 | Pb ≥ | 杂质 ≤ | | | | | | | | | | |
|----------|---------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | | Ag | Cu | Bi | As | Sb | Sn | Zn | Fe | Cd | Ni | 总和 |
| Pb99.994 | 99.994 | 0.0008 | 0.001 | 0.004 | 0.0005 | 0.0008 | 0.0005 | 0.0004 | 0.0005 | — | — | 0.006 |
| Pb99.990 | 99.990 | 0.0015 | 0.001 | 0.010 | 0.0005 | 0.0008 | 0.0005 | 0.0004 | 0.0010 | 0.0002 | 0.0002 | 0.010 |
| Pb99.985 | 99.985 | 0.0025 | 0.001 | 0.015 | 0.0005 | 0.0008 | 0.0005 | 0.0004 | 0.0010 | 0.0002 | 0.0005 | 0.015 |
| Pb99.970 | 99.970 | 0.0050 | 0.003 | 0.030 | 0.0010 | 0.0010 | 0.0010 | 0.0005 | 0.0020 | 0.0010 | 0.0010 | 0.030 |
| Pb99.940 | 99.940 | 0.0080 | 0.005 | 0.060 | 0.0010 | 0.0010 | 0.0010 | 0.0005 | 0.0020 | 0.0020 | 0.0020 | 0.060 |

表 10-5 原料纯铁化学成分 (质量分数) (%)

| 统一数字 代号 | 牌号 | 杂质含量 ≤ | | | | | | | | | |
|------------|-----|--------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|----|
| | | C | Si | Mn | P | S | Al | Ni | Cr | Cu | Fe |
| M00108 | YT1 | 0.01 | 0.06 | 0.2 | 0.015 | 0.012 | 0.5 | 0.02 | 0.02 | 0.10 | 余量 |
| M00088 | YT2 | 0.008 | 0.03 | 0.12 | 0.012 | 0.009 | 0.05 | 0.02 | 0.02 | 0.08 | 余量 |
| M00058 | YT3 | 0.005 | 0.01 | 0.07 | 0.009 | 0.007 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.05 | 余量 |

表 10-6 重熔用铝锭的化学成分 (质量分数) (摘自 GB/T 1196—2008) (%)

| 牌号 | Al ≥ | 杂质 ≤ | | | | | | | | |
|---------|---------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|
| | | Si | Fe | Cu | Ga | Mg | Zn | Mn | 其他每种 | 总和 |
| Al99.90 | 99.90 | 0.05 | 0.07 | 0.005 | 0.020 | 0.01 | 0.025 | — | 0.010 | 0.10 |
| Al99.85 | 99.85 | 0.08 | 0.12 | 0.005 | 0.030 | 0.02 | 0.030 | — | 0.015 | 0.15 |
| Al99.70 | 99.70 | 0.10 | 0.20 | 0.01 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | — | 0.03 | 0.30 |
| Al99.60 | 99.60 | 0.16 | 0.25 | 0.01 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | — | 0.03 | 0.40 |
| Al99.50 | 99.50 | 0.22 | 0.30 | 0.02 | 0.03 | 0.05 | 0.05 | — | 0.03 | 0.50 |
| Al99.00 | 99.00 | 0.42 | 0.50 | 0.02 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | — | 0.05 | 1.00 |
| Al99.7E | 99.70 | 0.07 | 0.20 | 0.01 | — | 0.02 | 0.04 | 0.005 | 0.03 | 0.30 |
| Al99.6E | 99.60 | 0.10 | 0.30 | 0.01 | — | 0.02 | 0.04 | 0.007 | 0.03 | 0.40 |

表 10-7 电解金属锰的牌号及化学成分 (质量分数) (摘自 YB/T 051—2003)

()%

| 牌号 | Mn ≥ | 杂质 ≤ | | | | | |
|-------|---------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| | | C | S | P | Si | Se | Fe |
| DJMnA | 99.95 | 0.01 | 0.03 | 0.001 | 0.002 | 0.0003 | 0.006 |
| DJMnB | 99.90 | 0.020 | 0.040 | 0.002 | 0.004 | 0.001 | 0.010 |

(续)

| 牌号 | Mn ≥ | 杂质 ≤ | | | | | |
|-------|---------|------|------|-------|-------|------|------|
| | | C | S | P | Si | Se | Fe |
| DJMnC | 99.88 | 0.02 | 0.02 | 0.002 | 0.004 | 0.06 | 0.01 |
| DJMnD | 99.80 | 0.03 | 0.04 | 0.002 | 0.01 | 0.08 | 0.03 |

表 10-8 电解镍的化学成分 (质量分数) (摘自 GB/T 6516—2010) (%)

| 牌号 | | Ni9999 | Ni9996 | Ni9990 | Ni9950 | Ni9920 |
|-----------|----|--------|--------|--------|--------|--------|
| Ni + Co | | 99.99 | 99.96 | 99.90 | 99.50 | 99.20 |
| Co | | 0.005 | 0.02 | 0.08 | 0.15 | 0.50 |
| 杂质含量 ≤ | C | 0.005 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.10 |
| | Si | 0.001 | 0.002 | 0.002 | — | — |
| | P | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.003 | 0.02 |
| | S | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.003 | 0.02 |
| | Fe | 0.002 | 0.01 | 0.02 | 0.20 | 0.50 |
| | Cu | 0.0015 | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.15 |
| | Zn | 0.001 | 0.0015 | 0.002 | 0.005 | — |
| | As | 0.0008 | 0.0008 | 0.001 | 0.002 | — |
| | Cd | 0.0003 | 0.0003 | 0.0008 | 0.002 | — |
| | Sn | 0.0003 | 0.0003 | 0.0008 | 0.0025 | — |
| | Sb | 0.0003 | 0.0003 | 0.0008 | 0.0025 | — |
| | Pb | 0.0003 | 0.0015 | 0.0015 | 0.002 | 0.005 |
| | Bi | 0.0003 | 0.0003 | 0.0008 | 0.0025 | — |
| | Al | 0.001 | — | — | — | — |
| | Mn | 0.001 | — | — | — | — |
| | Mg | 0.001 | 0.001 | 0.002 | — | — |

表 10-9 金属铬化学成分 (质量分数) (GB/T 3211—2008) (%)

| 牌号 | Cr ≥ | 杂质 ≤ | | | | | | | | | | | | H | O | | |
|---------|---------|------|------|-------|--------|------|------|--------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|------|
| | | Fe | Si | Al | Cu | C | S | P | Pb | Sn | Sb | Bi | As | N | | | |
| | | I | II | | | | | | | | | | | | | | |
| JCr99.2 | 99.20 | 0.25 | 0.25 | 0.100 | 0.003 | 0.01 | 0.01 | 0.0050 | 0.00050 | 0.00050 | 0.00080 | 0.00050 | 0.001 | 0.01 | 0.005 | 0.20 | |
| JCr99-A | 99.00 | 0.30 | 0.25 | 0.300 | 0.0050 | 0.01 | 0.01 | 0.0050 | 0.0005 | 0.0001 | 0.001 | 0.00050 | 0.001 | 0.020 | 0.030 | 0.005 | 0.30 |

(续)

| 牌号 | Cr ≥ | 杂质 ≤ | | | | | | | | | | | | | H | O |
|---------|---------|------|------|------|------|------|------|------|--------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|
| | | Fe | Si | Al | Cu | C | S | P | Pb | Sn | Sb | Bi | As | N | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | I | II |
| JCr99-B | 99.00 | 0.40 | 0.30 | 0.30 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.0005 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.05 | 0.01 | 0.50 |
| JCr98.5 | 98.5 | 0.50 | 0.40 | 0.50 | 0.01 | 0.03 | 0.02 | 0.01 | 0.0005 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.05 | 0.01 | 0.50 |
| JCr98 | 98.00 | 0.80 | 0.40 | 0.80 | 0.02 | 0.05 | 0.03 | 0.01 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | — | — | — |

表 10-10 金属镁化学成分 (质量分数^①) (摘自 GB/T 3499—2011) (%)

| 牌号 | Mg ≥ | 杂质元素 ≤ | | | | | | | | | | 其他单个杂质 |
|---------|---------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|
| | | Fe | Si | Ni | Cu | Al | Mn | Ti | Pb | Sn | Zn | |
| Mg9999 | 99.99 | 0.002 | 0.002 | 0.0003 | 0.0003 | 0.002 | 0.002 | 0.0005 | 0.001 | 0.002 | 0.003 | — |
| Mg9998 | 99.98 | 0.002 | 0.003 | 0.0005 | 0.0005 | 0.004 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.004 | 0.004 | — |
| Mg9995A | 99.95 | 0.003 | 0.006 | 0.001 | 0.002 | 0.008 | 0.006 | — | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 |
| Mg9995B | 99.95 | 0.005 | 0.015 | 0.001 | 0.002 | 0.015 | 0.015 | — | 0.005 | 0.005 | 0.01 | 0.01 |
| Mg9990 | 99.90 | 0.04 | 0.03 | 0.001 | 0.004 | 0.02 | 0.03 | — | — | — | — | 0.01 |
| Mg9980 | 99.80 | 0.05 | 0.05 | 0.002 | 0.02 | 0.05 | 0.05 | — | — | — | — | 0.05 |

① Cd、Hg、As、Cr⁶⁺元素, 供方可不作常规分析, 但应监控其含量, 要求 $w(Cd + Hg + As + Cr^{6+}) \leq 0.03\%$ 。

表 10-11 工业硅化学成分 (质量分数) (摘自 GB/T 2881—2014) (%)

| 牌号 | Si ≥ | 杂质 ≤ | | |
|--------|-------|------|------|------|
| | | Fe | Al | Ca |
| Si1101 | 99.79 | 0.10 | 0.10 | 0.01 |
| Si2202 | 99.58 | 0.20 | 0.20 | 0.02 |
| Si3303 | 99.37 | 0.30 | 0.30 | 0.03 |
| Si4110 | 99.40 | 0.40 | 0.10 | 0.10 |
| Si4210 | 99.30 | 0.40 | 0.20 | 0.10 |
| Si4410 | 99.10 | 0.40 | 0.40 | 0.10 |
| Si5210 | 99.20 | 0.50 | 0.20 | 0.10 |
| Si5530 | 98.70 | 0.50 | 0.50 | 0.30 |

表 10-12 金属钒化学成分 (质量分数) (摘自 GB/T 4310—1984) (%)

| 牌号 | V ≥ | 杂质含量 ≤ | | | | | | |
|-----|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| | | Fe | Cr | Al | Si | O | N | C |
| V-1 | 余量 | 0.005 | 0.006 | 0.005 | 0.004 | 0.025 | 0.006 | 0.01 |
| V-2 | 余量 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.004 | 0.035 | 0.01 | 0.02 |
| V-3 | 99.5 | 0.10 | 0.10 | 0.05 | 0.05 | 0.08 | — | — |
| V-4 | 99.0 | 0.15 | 0.15 | 0.08 | 0.08 | 0.10 | — | — |

表 10-13 海绵钛化学成分 (质量分数) (摘自 GB/T 2524—2010) (%)

| 产品 等级 | 产品牌号 | Ti ≥ | 杂质 ≤ | | | | | | | | |
|------------------|---------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| | | | Fe | Si | Cl | C | N | O | Mn | Mg | H |
| 0 _A 级 | MHT-95 | 99.8 | 0.03 | 0.01 | 0.06 | 0.01 | 0.01 | 0.05 | 0.01 | 0.01 | 0.003 |
| 0 级 | MHT-100 | 99.7 | 0.05 | 0.02 | 0.06 | 0.02 | 0.01 | 0.06 | 0.01 | 0.02 | 0.003 |
| 1 级 | MHT-110 | 99.6 | 0.08 | 0.02 | 0.08 | 0.02 | 0.02 | 0.08 | 0.01 | 0.03 | 0.005 |
| 2 级 | MHT-125 | 99.5 | 0.12 | 0.03 | 0.10 | 0.03 | 0.03 | 0.10 | 0.02 | 0.04 | 0.005 |
| 3 级 | MHT-140 | 99.3 | 0.20 | 0.03 | 0.15 | 0.03 | 0.04 | 0.15 | 0.02 | 0.06 | 0.010 |
| 4 级 | MHT-160 | 99.1 | 0.30 | 0.04 | 0.15 | 0.04 | 0.05 | 0.20 | 0.03 | 0.09 | 0.012 |
| 5 级 | MHT-200 | 98.5 | 0.40 | 0.06 | 0.30 | 0.05 | 0.10 | 0.30 | 0.08 | 0.15 | 0.030 |

三、中间合金

熔炼合金时配入的合金元素有的熔点低, 如 Sn、Zn、Mg、Al 等熔点为 450 ~ 650℃, 易熔化, 烧损大; 有的合金元素熔点高, 如 Cr、Ni 等熔点为 1450 ~ 1930℃, 难熔化。为使熔炼合金成分均匀、稳定、熔化快, 在熔炼时用事先制备好的中间合金加入。市场出售的中间合金均有国家标准化化学成分, 使用方便。

部分中间合金的化学成分见表 10-14 ~ 表 10-17, 供配料计算应用。

表 10-14 含铜中间合金锭化学成分 (质量分数) (%)

| 牌号 | 主要成分 | | 杂质 ≤ | | | | | | | | 物理性能 | | |
|--------|---------------|----|------|----|----|-----|-----|-----|----|-----|------|-----------|----|
| | 合金元素 | Cu | Si | Mn | Ni | Fe | Sb | P | Pb | Zn | Al | 熔化温度 /℃ | 特性 |
| CuSi16 | Si13.5 ~ 16.5 | 余量 | — | — | — | 0.5 | — | — | — | 0.1 | 0.25 | 800 | 脆 |
| CuMn28 | Mn25 ~ 30 | 余量 | — | — | — | 1.0 | 0.1 | 0.1 | — | — | — | 870 | 韧 |
| CuMn22 | Mn20 ~ 25 | 余量 | — | — | — | 1.0 | 0.1 | 0.1 | — | — | — | 850 ~ 900 | 韧 |

(续)

| 牌号 | 主要成分 | | 杂质 ≤ | | | | | | | | 物理性能 | | |
|--------|-----------|---------|------|-----|-----|------|----|-----|-----|-----|------|-----------|----|
| | 合金元素 | Cu | Si | Mn | Ni | Fe | Sb | P | Pb | Zn | Al | 熔化温度 /℃ | 特性 |
| CuNi15 | Ni14~18 | 余量 | — | — | — | 0.5 | — | — | — | 0.3 | — | 1050~1200 | 韧 |
| CuFe10 | Fe9~11 | 余量 | — | 0.1 | 0.1 | — | — | — | — | — | — | 1300~1400 | 韧 |
| CuFe5 | Fe4~6 | 余量 | — | 0.1 | 0.1 | — | — | — | — | — | — | 1200~1300 | 韧 |
| CuSb50 | Sb49~51 | 余量 | — | — | — | 0.2 | — | 0.1 | 0.1 | — | — | 680 | 脆 |
| CuBe4 | Be3.8~4.3 | 余量 | 0.18 | — | — | 0.15 | — | — | — | — | 0.13 | 1100~1200 | 韧 |
| CuP8 | P8~9 | 余量 | — | — | — | 0.15 | — | — | — | — | — | 900~1020 | 脆 |
| CuMg20 | Mg17~23 | 余量 | — | — | — | 0.15 | — | — | — | — | — | 1000~1100 | 脆 |
| CuMg10 | Mg9~11 | 余量 | — | — | — | 0.15 | — | — | — | — | — | 750~800 | 脆 |
| CuAlFe | Fe15~20 | 69~76 | — | — | — | — | — | — | — | — | 9~11 | — | — |
| CuCr | Cr2~3.5 | 96.5~98 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 1150~1180 | 韧 |
| CuTi | Ti28 | Cu 余 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 875 | 韧 |
| CuZr | Zr8~15 | Cu 余 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 960~1050 | 韧 |

表 10-15 主要含铝中间合金

| 中间合金 | 牌号 | 化学成分(质量分数, %) | | | | | | 熔点/℃ | 韧脆性 |
|------|------------|---------------|---------|----|----|----|----|---------|-----|
| | | Al | Si | Mn | Cu | Fe | Ni | | |
| 铝铜 | AlCu50 | 50 | — | — | 50 | — | — | 580 | 脆 |
| 铝镍 | AlNi20 | 80 | — | — | — | — | 20 | 780 | — |
| 铝锰 | AlMn10 | 90 | — | 10 | — | — | — | 780~800 | 韧 |
| 铝硅 | AlSi20 | 80 | 20 | — | — | — | — | 600~770 | 韧 |
| 铝铁 | AlFe20 | 80 | — | — | — | 20 | — | 1020 | 稍脆 |
| 铝铁 | AlFe10 | 90 | — | — | — | 10 | — | 830 | 韧 |
| 铝铬 | AlCr3 | 97 | Cr2~3.5 | — | — | — | — | 750~820 | 韧 |
| 铝硅锰 | AlSi10Mn7 | 83 | 10 | 7 | — | — | — | — | — |
| 铝铜镍 | AlCu10Ni40 | 50 | — | — | 10 | — | 40 | 670 | — |
| 铝铜锰 | AlCu40Mn10 | 50 | — | 10 | 40 | — | — | 650 | — |
| 铝铜铁 | AlCu20Fe10 | 70 | — | — | 20 | 10 | — | 830 | — |
| 铝铜镍 | AlCu40Ni20 | 40 | — | — | 40 | — | 20 | 700 | 脆 |

(续)

| 中间合金 | 牌号 | 化学成分(质量分数,%) | | | | | | 熔点/℃ | 韧脆性 |
|------|-----------|--------------|----|----|----|------|-----|---------|-----|
| | | Al | Si | Mn | Cu | Fe | Ni | | |
| 铝铜钛 | AlCu15Ti3 | 82 | — | — | 15 | — | Ti3 | 650 | — |
| 铝镁钛 | AlMg25Ti3 | 79 | — | — | — | Mg18 | Ti3 | 670 | 脆 |
| 铝镁铍 | AlMg25Be3 | 72 | — | — | — | Mg25 | Be3 | 800 | 脆 |
| 铝钛硼 | AlTi5B1 | 94 | — | — | — | B1 | Ti5 | 550~650 | — |

注：含三个主要合金元素的为多元中间合金。

表 10-16 主要含镁中间合金

| 中间合金 | 牌号 | 化学成分(质量分数,%) | | 熔点/℃ | 韧脆性 |
|------|--------|--------------|----------|---------|-----|
| | | Mg | 合金元素 | | |
| 镁锰 | MgMn10 | 余量 | Mn:8~10 | 750~800 | 韧 |
| 镁锆 | MgZr40 | 余量 | Zr:30~50 | — | — |
| 镁镍 | MgNi20 | 余量 | Ni:20~25 | 508~720 | 脆 |

表 10-17 铸造钛合金用中间合金

| 中间合金 | 化学成分(质量分数,%) | | 熔点/℃ | 密度/(t/m ³) | 脆性 | 熔炼方法和设备 |
|-------|--------------|---------------------------------|---------|------------------------|----|------------|
| | 主要元素 | 杂质含量 ≤ | | | | |
| Al-Mo | Al50~55,余 Mo | C≤0.1、Fe≤0.3、Si≤0.3 | ≈1400 | 5.7~6.46 | 大 | 铝热法, 高频感应炉 |
| Al-Mo | Al20~30,余 Mo | C≤0.1、Fe≤0.3、Si≤0.1 | — | 7.98~8.7 | 大 | 铝热法 |
| Al-Si | Al80~85,余 Si | (Fe + Cu + Ca) < 0.5 | — | — | 中 | 铝热法 |
| Al-V | Al45~55,余 V | (C + H + O + N + Fe + Si) ≤ 0.5 | 1650 | 4.2~4.5 | 大 | 铝热法 |
| Al-V | Al20~30,余 V | (C + H + O + N + Fe + Si) ≤ 0.5 | 1700 | 5~5.3 | 大 | 铝热法 |
| Al-Sn | Al40~45,余 Sn | (Fe + Si + Cu + Pb) ≤ 0.3 | ≈230 | 5.45~5.95 | 小 | 坩埚炉 |
| Al-Sn | Al70~75,余 Sn | (Fe + Si + Cu + Pb) ≤ 0.31 | — | — | 小 | 坩埚炉 |
| Al-Cr | Al90~95,余 Cr | Fe≤0.3, Si≤0.25 | ≈640 | — | 小 | 坩埚炉 |
| Al-Ti | Ti2~5,余 Al | Si≤0.6、Fe≤0.6、Zn≤0.3 | 750~800 | — | 韧 | — |
| Ti-Mo | Ti60, Mo40 | — | — | — | — | — |
| Zn-Ti | Ti5,余 Zn | — | — | — | 韧 | — |

第二节 配料计算应注意节省新金属和贵重合金

一、计算成分的确定

1) 熔炼的有色合金是根据国家标准或规定的合金化学成分的元素含量上限和下限范围, 确定出一个合理计算值, 这个合理的计算值就是配料计算中用的“计算成分”。确定计算成分是为了计算所配炉料中所需要含合金元素的量值(质量)。确定的计算成分是否合理是确保熔炼合金成分合格的关键。

2) 一般确定计算成分的依据是标准成分元素含量的中限值平均成分。易氧化元素取偏中上限值计算, 贵重合金元素取偏中下限值计算。

二、炉料组成配比应注意节省新金属

1) 选择炉料组成配比, 在确保熔炼合金质量的前提下, 应注意节省新金属, 多用回炉料。

2) 军工、国防、航空航天产品熔炼合金质量要求高, 一定要选用一级品的炉料配料。

3) 一般普通熔炼合金可选用品位低的炉料, 可多用回炉料和废料, 以降低成本。

三、配料计算注意合金元素的烧损率

1) 配料计算注意选择好合金元素烧损率, 使配料计算和补加合金元素达到成分合格。

2) 不同熔炼炉对合金元素的烧损不尽相同, 一般火焰炉熔炼合金元素烧损率比中频感应炉大, 一般为3%~10%, 中频感应炉或工频感应炉熔炼合金元素烧损相对较少, 一般为2%~5%。

3) 根据资料和生产经验汇总, 主要合金元素烧损率见表10-18。

表 10-18 主要合金元素烧损率 (%)

| 合金 | Cu | Al | Si | Zn | Sn | Mn | Ni | Mg | Cr | Pb | Be | Ti | P |
|----|---------|------|-----|------|-------|------|-----|----|-----|-------|------|-------|-------|
| 黄铜 | 0.5~1.5 | 2~3 | 2~6 | 1~3 | 0.5~3 | 2~3 | 0~1 | — | 0 | 0.5~2 | 15 | 30 | — |
| 青铜 | 0.5~1.5 | 4~10 | 3~5 | 5~10 | 1~4 | 4~15 | 0~1 | — | 2~3 | 1~3 | 6~20 | 20~30 | 20~40 |

(续)

| 合金 | Cu | Al | Si | Zn | Sn | Mn | Ni | Mg | Cr | Pb | Be | Ti | P |
|-----|-----|-----|-----|-----|----|-------|-----|-----|----|----|----|----|---|
| 铝合金 | 0.5 | 1~5 | 1~5 | 1~3 | — | 0.5~2 | 0.5 | 2~4 | 0 | — | 10 | 20 | — |
| 镁合金 | — | 2~3 | 1~5 | 2 | — | 5 | — | 3~5 | 0 | — | 15 | — | — |

4) 配料计算不仅仅是计算, 要求能统筹全面, 掌握一定的熔炼合金技术, 根据配用的炉料质量、化学成分、熔炼设备特点及对合金元素烧损增减情况, 合理配入各种合金元素。

第十一章 有色合金熔炼设备简介

第一节 有色合金熔炼设备的基本任务和要求

一、有色合金熔炼炉的基本任务

- 1) 熔炼设备是铸造生产工艺过程中熔炼合金浇注铸件最重要且必不可少的设备，熔炼合金的冶金物理化学等一切复杂的反应过程都在熔炼设备中完成，是铸造生产工艺过程中的中心环节、核心环节。
- 2) 有色合金熔炼中突出的特点是大部分合金元素易氧化，合金容易吸气，如镁合金在空气中易氧化燃烧。熔炼设备应使合金氧化吸气少、化学成分均匀，熔炼高质量的合金液浇注铸件和锭材。

二、有色合金熔炼设备的基本要求

- 1) 熔炼有色合金的熔炼炉应具备热工特性好、金属炉料熔化快、冶金质量高、元素烧损和吸气少、操作安全方便和生产率高等特点。
- 2) 熔炼设备用燃料、电能耗量低，热效率高，坩埚、炉衬寿命长，炉温便于调整和控制，节能减排。
- 3) 操作简便，设备维护检修方便，噪声低，环境保护和劳动卫生条件好。

第二节 有色合金熔炼设备

有色合金熔炼设备由于其使用能源不同和熔炼设备结构不同，有色合金熔炼本身特点不同。因此，有色合金熔炼设备种类规格繁多。配料计算也应掌握各种熔炼炉特点和使用性能要求。为此，简介几种熔炼设备的主要技术参数，供参考。

一、火焰炉类

1. 坩埚炉

坩埚炉体有石墨炉体、铸铁炉体和钢炉体之分，以焦炭燃烧为热源熔化有色合金，设备简单、易操作。多应用在小型铸造厂，生产环境差，有一定烟尘，坩埚炉主要技术参数见表 11-1。

表 11-1 坩埚炉主要技术参数

| 坩埚炉容量/kg | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 备注 |
|---------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-------------------|
| 生产率/(kg/h) | 40 | 60 | 70 | 80 | 100 | 120 | 元素烧损大,一般为2.5%~5%, |
| 平均燃料消耗/(kg/h) | 19 | 23 | 50 | 60 | 80 | 100 | 生产率低 |

2. 燃气、燃油炉

(1) 坩埚燃气炉 以天然气、煤气、石油液化气的燃烧为热源熔炼有色合金。坩埚容量(单位为kg): 100、150、200、300、500等。生产率比焦炭炉高,生产环境较差。

(2) 坩埚燃油炉 燃柴油炉,炉子坩埚容量(单位为kg): 100、150、200、300、500等。炉子结构有固定式和可倾转式。

(3) 火焰反射炉 分固定式或回转式(可倾式),可熔炼铜合金和铝合金等,炉子容量大,多应用在大型铸造企业,如沈阳某军工机械厂铸造车间用反射炉熔炼铝合金,炉子容量为10t。

根据资料,熔铜反射炉多在10t和40t,有的高达120t。氧化和挥发烧损较大,一般为3%~6%。熔铜反射炉主要技术参数见表11-2。

表 11-2 熔铜反射炉主要技术参数

| 炉子容量/t | 8 | 20 | 35 | 40 | 70 | 120 |
|---------------------|----------------------|---------|--------|--------|--------|------|
| 炉床面积/m ² | 4.2 | 8.5 | 9.9 | 11 | 14.8 | |
| 炉膛温度/℃ | 1300 | 1300 | 1300 | 1300 | 1300 | 1300 |
| 生产率/(t/24h) | 27 | 50 | 60 | 60 | 100 | |
| 燃料种类 | 煤气 | 块煤 | 重柴油 | 重柴油 | 重柴油 | |
| 燃料消耗/(kg/t) | 750(m ³) | 350~400 | 90~110 | 90~110 | 90~130 | |

注:熔铝炉炉膛温度为700~800℃。

(4) 火焰竖式炉 火焰竖式炉可熔炼铜合金和铝合金。其中,竖式熔铜炉是20世纪80年代中期引进国外先进的技术设备,炉子结构形式与冲天炉相类似,炉高6m,炉膛直径约1.77m,炉膛内壁用碳化硅砖砌筑,可连续加入炉料,以天然气或液化气(煤气)为燃料,熔化率高。固定竖式熔铝炉主要技术参数见表11-3。

表 11-3 固定竖式熔铝炉主要技术参数

| 炉子规格 | L5 | L8 | L10 | L12 | L15 | L20 | L25 |
|------------|------|------|------|-------|------|------|------|
| 额定容量/t | 5 | 8 | 10 | 12 | 15 | 20 | 25 |
| 熔化速度/(t/h) | ≥2.5 | ≥3.0 | ≥4.0 | ≥4.0 | ≥5.0 | ≥5.5 | ≥7.0 |
| 油耗/(kg/t) | | | | 45~55 | | | |
| 金属损耗率(%) | | | | | ≤1.5 | | |

(续)

| 炉子规格 | L5 | L8 | L10 | L12 | L15 | L20 | L25 |
|--------|----|----|-----|--------------|-----|-----|-----|
| 大修炉龄/年 | | | | ≥3 | | | |
| 排烟 | | | | ≤150℃, 林格曼一级 | | | |

二、电炉类

以电能为热源的电炉种类最多。

1. 电阻炉

坩埚电阻炉熔炼铝、锌、镁等合金。炉子容量 (kg): 30、50、100、200、300、400。

2. 红外熔炼炉

主要熔炼铝、铜等合金。

1) HRL 红外熔铝炉。有固定式和可倾转式, 炉子容量 (kg): 30、60、100、150、200、250。

2) HRT 红外熔铜炉。有固定式和可倾转式, 炉子容量 (kg): 50、100、200、300、500。

3. 工频感应电炉

分为有芯和无芯两种, 有芯炉容量大, 无芯炉容量小。可熔炼铝、铜合金。工频感应炉熔化速度比中频感应炉慢, 应用逐渐减少。

1) GWT 工频无芯熔铜炉, 容量(t): 0.75、1.5、3 等, 加热温度为 1200℃。

2) GWLJ 工频无芯熔铝炉, 工作温度 700℃, 可调到 1300℃ 熔铜; 炉子容量 (t): 1、1.5、2.5、3.5、5、7。

4. 中频感应炉

中频感应炉有熔铜炉和熔铝炉, 炉温为 1300℃, 熔化快。

应用逐渐增多。炉子容量从几百千克到 10t 不等。

中频真空感应炉主要熔炼镁、钛等特种合金, 容量从几十千克到 1t 不等。

中频感应熔铜和熔铝炉主要技术参数见表 11-4、表 11-5。

表 11-4 GWTJ 中频感应熔铜炉主要技术参数

| 型号 | 额定容量 /t | 额定功率 /kW | 熔炼纯铜 1200℃ | | 熔炼黄铜 1000℃ | | 冷却水耗量/ (m ³ /h) | 备注 |
|------------------|---------|----------|-------------|----------------|-------------|----------------|----------------------------|----------------|
| | | | 熔化率 / (t/h) | 电耗/ (kW · h/t) | 熔化率 / (t/h) | 电耗/ (kW · h/t) | | |
| GWTJ0.6-250-1 | 0.6 | 250 | 0.17 | 560 | 0.27 | 360 | 3 | 无锡万利电炉有限公司 |
| GWTJ2.4-600-1 | 2.4 | 600 | 1.33 | 450 | 2.14 | 280 | 18 | 责任公司中间还有 |
| GWTJ6.0-1500-0.5 | 6.0 | 1500 | 3.57 | 420 | 5.76 | 260 | 35 | 1.2t、3.6t 规格产品 |

表 11-5 GWLJ 中频感应熔铝炉主要技术参数

| 型号 | 额定容量 /t | 额定功率 /kW | 额定电压 /V | 工作温度 /℃ | 熔化率 /(t/h) | 电耗/ (kW · h/t) | 冷却水耗量 (m ³ /h) | 备注 |
|----------------|------------|-------------|------------|------------|---------------|-------------------|------------------------------|------------|
| GWLJ0.75-350-1 | 0.75 | 350 | 1500 | 700 | 0.396 | 630 | 6 | 无锡万利电炉有限公司 |
| GWLJ1.0-350-1 | 1.0 | 350 | 1500 | 700 | 0.598 | 585 | 8 | |
| GWLJ1.5-500-1 | 1.5 | 500 | 1500 | 700 | 0.870 | 570 | 10 | |
| GWLJ3.0-1500-1 | 3.0 | 1500 | 1500 | 700 | 2 | 550 | 20 | |

5. 单相电弧炉

炉子容量在 500kg 以下，应用较少。

6. 真空自耗电极电弧炉和真空自耗电极电弧凝壳炉

(1) 真空自耗电极电弧炉 用来熔制钛合金自耗电极(锭)，熔出小块自耗电极块再采用焊接方法制成熔炼钛合金用的自耗电极，其主要技术参数见表 11-6。

表 11-6 ZH 系列真空自耗电极电弧炉技术参数

| 型号 | 容量 /kg | 工作真 空度 /Pa | 冷却水 耗量 (t/h) | 坩埚尺寸 | | 电极尺寸 | | 工作 电压 /V | 最大 电流 /A | 设备 质量 /t | 外形尺寸 (长×宽×高) /m |
|---------|---------------|----------------------|--------------------|-------------|---------------|-------------|---------------|----------------|----------------|----------------|------------------------------|
| | | | | 直径 /mm | 长度 /mm | 直径 /mm | 长度 /mm | | | | |
| ZH-5 | 5 | 6.7×10^{-1} | 15 | 45、 80 | 100、 150 | 20、 45 | 600、 500 | 20~40 | 3000 | 1.3 | $1.8 \times 1.25 \times 2.5$ |
| ZH-15 | 5、15 | 1.3×10^{-2} | 20 | 60、 100 | 245 | 30、60 | 1000、 795 | 20~40 | 3000 | 4.2 | $3.37 \times 2.7 \times 4.1$ |
| ZH-50 | 25、50 | 6.7×10^{-1} | 32 | 100、 150 | 450 | 60、 100 | 1250、 900 | 20~40 | 10000 | 9 | $4.5 \times 3.7 \times 5.85$ |
| ZH-200 | 100、 200 | 6.7×10^{-1} | 35 | 150、 210 | 725、 736 | 100、 150 | 1650、 1442 | 20~40 | 10000 | 9.3 | $4.5 \times 3.7 \times 6.35$ |
| ZH-500 | 250、 500 | 6.7×10^{-1} | 40 | 210、 280 | 925、 1042 | 150、 210 | 1825、 1850 | 20~40 | 10000 | 41.8 | $14.7 \times 9.3 \times 7.8$ |
| ZH-1000 | 500、 1000 | 6.7×10^{-1} | 45 | 280、 380 | 1042、 1130 | 210、 280 | 1850、 2040 | 20~40 | 12000 | 41.8 | $14.7 \times 9.3 \times 7.8$ |
| ZH-3000 | 1500、 3000 | 6.7×10^{-1} | 65 | 380、 480 | 1700、 2126 | 280、 380 | 3130、 3400 | 20~40 | 18000 | 64.5 | $17.5 \times 14 \times 11$ |
| ZH-5000 | 2500、 5000 | 6.7×10^{-1} | 70 | 480、 600 | 1700、 2270 | 380、 480 | 2830、 3400 | 20~40 | 24000 | 65.5 | $17.5 \times 14 \times 11$ |

(续)

| 型号 | 容量 /kg | 工作真 空度 /Pa | 冷却水 耗量 (t/h) | 坩埚尺寸 | | 电极尺寸 | | 工作 电压 /V | 最大 电流 /A | 设备 质量 /t | 外形尺寸 (长×宽×高) /m |
|----------|----------------|----------------------|--------------------|-------------|---------------|-------------|---------------|----------------|----------------|----------------|--------------------------------|
| | | | | 直径 /mm | 长度 /mm | 直径 /mm | 长度 /mm | | | | |
| ZH-7000 | 3500、 7000 | 6.7×10^{-1} | 80 | 600、 720 | 1600、 2200 | 480、 600 | 2480、 3180 | 20~40 | 30000 | 82 | $18.5 \times 15 \times 12$ |
| ZH-10000 | 7000、 10000 | 6.7×10^{-1} | 95 | 720、 840 | 2270、 2480 | 600、 720 | 3200、 3400 | 20~40 | 36000 | 104 | $19.2 \times 15.8 \times 12.5$ |

(2) 真空自耗电极电弧凝壳炉 用来熔炼钛合金或钛合金锭、棒材等，其主要技术参数见表 11-7。

表 11-7 ZHN 系列真空自耗电极电弧凝壳炉技术参数

| 型号 | 额定容量 (铁液) /kg | 最大 电流 /A | 工作 电压 /V | 极限真空度 /Pa | 工作真空度 /Pa | 结晶器 直径 /mm | 外形尺寸 (长×宽×高) /m | 质量 /t |
|----------|---------------------|----------------|----------------|-----------------------|---------------------------------|------------------|-----------------------------|----------|
| ZHN-10 | 10 | 3000 | 20~40 | 6.65×10^{-2} | $6.65 \sim 6.65 \times 10^{-1}$ | 150 | — | — |
| ZHN-20 | 10、20 | 6000 | 20~40 | 6.65×10^{-2} | $6.65 \sim 6.65 \times 10^{-1}$ | 150、200 | — | — |
| ZHN-50 | 20、50 | 12000 | 20~40 | 6.65×10^{-2} | $6.65 \sim 6.65 \times 10^{-1}$ | 200、260 | — | 17.8 |
| ZHN-100 | 50、100 | 18000 | 20~60 | 6.65×10^{-2} | $6.65 \sim 6.65 \times 10^{-1}$ | 260、320 | — | 32.5 |
| ZHN-100B | 50、100 | 18000 | 20~60 | 6.65×10^{-2} | $6.65 \sim 6.65 \times 10^{-1}$ | 260、320 | $8.6 \times 4.2 \times 9.5$ | 44 |
| ZHN-200 | 100、200 | 20000 | 20~40 | 6.65×10^{-2} | $6.65 \sim 6.65 \times 10^{-1}$ | 450、550 | — | — |
| ZHN-500 | 200、500 | 30000 | 20~40 | 6.65×10^{-2} | $6.65 \sim 6.65 \times 10^{-1}$ | 550、750 | — | — |

注：两种系列真空自耗电极电弧凝壳炉摘自陈琦等主编的《实用铸造手册》一书。

第十二章 铜合金熔炼的配料计算

第一节 常用铸造青铜和黄铜的化学成分

一、常用铸造青铜 (表 12-1)

表 12-1 常用铸造青铜牌号及化学成分

| 合金类型 | 牌号 | 化学成分(质量分数,%) | | | | | | 铸造方法 | 备注 |
|-------|---------------|--------------|-------------|------------|-----------|-------------------------|----|------|--------|
| | | Sn | Pb | Al | Zn | 其他 | Cu | | |
| 锡青铜 | ZCuSn5Pb5Zn5 | 4.0 ~ 6.0 | 4.0 ~ 6.0 | — | 4.0 ~ 6.0 | — | — | 余量 | 砂型 |
| | ZCuSn10Pb5 | 9.0 ~ 11.0 | 4.0 ~ 6.0 | — | — | — | — | 余量 | 砂型、金属型 |
| | ZCuSn10Zn2 | 9.0 ~ 11.0 | — | — | 1.0 ~ 3.0 | — | — | 余量 | 砂型、金属型 |
| 铅青铜 | ZCuPb10Sn10 | 9.0 ~ 11.0 | 8.0 ~ 11.0 | — | — | — | — | 余量 | 砂型 |
| | ZCuPb30 | | 27.0 ~ 33.0 | — | — | — | — | 余量 | 砂型、金属型 |
| 铝青铜 | ZCuAl9Mn2 | — | — | 8.0 ~ 11.0 | — | Mn1.5 ~ 2.5 | — | 余量 | 砂型、金属型 |
| | ZCuAl10Fe3Mn2 | — | — | 9.0 ~ 11.0 | — | Fe2.0 ~ 4.0、Mn1.5 ~ 2.5 | — | 余量 | 砂型、金属型 |
| 铸造锌白铜 | ZCuNi10Fe1 | — | — | — | — | Ni10.5、Fe1.6 | — | 余量 | 砂型、金属型 |
| | ZCuNi15Zn20 | — | — | — | 20 | Ni15 | — | 余量 | 砂型 |

二、常用黄铜 (表 12-2)

表 12-2 常用黄铜牌号及化学成分

| 合金 | 牌号 | 化学成分(质量分数,%) | | | | | | 铸造方法 | 用途 |
|------|------------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----|--------|---------------------------|
| | | Cu | Pb | Mn | Si | Al | Zn | | |
| 普通黄铜 | H70 | 69.0 ~ 72.0 | — | — | — | — | 余量 | — | 制造弹簧管、垫、螺栓、螺母 |
| | H62 | 60.5 ~ 63.5 | — | — | — | — | 余量 | — | |
| | H59 | 57.0 ~ 60.0 | — | — | — | — | 余量 | — | |
| 特殊黄铜 | HPb59-1 | 57.0 ~ 60.0 | 0.8 ~ 1.9 | — | — | — | 余量 | — | 螺栓、螺母、冲压件、高强度件、船舶件 |
| | HA159-3 | 57.0 ~ 60.0 | — | — | — | 2.5 ~ 3.5 | 余量 | — | |
| | HMn58-2 | 57.0 ~ 60.0 | — | 1.5 ~ 3.5 | — | — | 余量 | — | |
| 铸造黄铜 | ZCuZn38 | 60.0 ~ 63.0 | — | — | — | — | 余量 | 砂型、金属型 | 机械、液压件, 轴承座, 耐腐蚀件, 轴承、轴套件 |
| | ZCuZn33Pb2 | 63.0 ~ 67.0 | 1.0 ~ 3.0 | — | — | — | 余量 | 砂型 | |
| | ZCuZn40Pb2 | 58.0 ~ 63.0 | 0.5 ~ 2.5 | — | — | 0.2 ~ 0.8 | 余量 | 砂型、金属型 | |
| | ZCuZn16Si4 | 79 ~ 81 | — | — | 2.5 ~ 4.5 | — | 余量 | 砂型、金属型 | |

第二节 采用新料熔炼铜合金的配料计算

采用新料就是不加回炉料和废料, 全用新金属炉料配料。

例 12-1 根据订货合同要求 QAl10-3-1.5 铝青铜合金, 熔化量 600kg, 采用容量 0.75t 工频感应炉熔炼。铝青铜和炉料化学成分见表 12-3。

1) 配料计算熔炼 600kg QAl10-3-1.5 合金需要的合金元素量:

$$\text{Cu 量} = 600\text{kg} \times \frac{86.5}{100} \times (1 + 0.01) = 524.19\text{kg}$$

$$\text{Al 量} = 600\text{kg} \times \frac{9}{100} \times (1 + 0.02) = 55.08\text{kg}$$

$$\text{Fe 量} = 600\text{kg} \times \frac{3}{100} \times (1 + 0.015) = 18.27\text{kg}$$

$$\text{Mn 量} = 600\text{kg} \times \frac{1.5}{100} \times (1 + 0.026) = 9.23\text{kg}$$

表 12-3 铝青铜和炉料化学成分 (质量分数) (%)

| 合金 | Al | Mn | Fe | Cu | 备注 |
|-------------|------------|-----------|-----------|-------|-------|
| QAl10-3-1.5 | 8.5 ~ 10.0 | 1.0 ~ 2.0 | 2.0 ~ 4.0 | 余量 | 不计算杂质 |
| 计算成分 | 9 | 1.5 | 3 | 86.5 | — |
| 元素烧损率 | 2 | 2.5 | 1.5 | 1 | — |
| 铝锭 | 99.60 | — | 0.25 | 0.01 | — |
| 电解锰 | — | 96.0 | 2.3 | 0.03 | — |
| 电解铜 | — | — | — | 99.95 | — |
| 工业纯铁 | — | — | 99.25 | — | — |

2) 计算熔炼 600kg QAl10-3-1.5 合金配入的新金属量:

$$\text{电解铜量} = \frac{524.19\text{kg}}{99.95\%} = 524.45\text{kg}$$

$$\text{铝锭量} = \frac{55.08\text{kg}}{99.60\%} = 55.30\text{kg}$$

$$\text{电解锰量} = \frac{9.23\text{kg}}{96\%} = 9.61\text{kg}$$

3) 计算由金属锰和铝锭带入的 Fe 含量:

$$\text{电解锰带入的 Fe 量} = 9.61\text{kg} \times 2.3\% = 0.22\text{kg}$$

$$\text{铝锭带入的 Fe 量} = 55.30\text{kg} \times 0.25\% = 0.14\text{kg}$$

$$\text{合计 Fe 量} = (0.22 + 0.14)\text{kg} = 0.36\text{kg}$$

4) 计算补加工业纯铁量:

$$\text{Fe 量} = (18.27 - 0.36)\text{kg} = 17.91\text{kg}$$

$$\text{工业纯铁量} = \frac{17.91\text{kg}}{99.25\%} = 18.045\text{kg} \text{ 取 } 18.05\text{kg}$$

5) 炉料组成: 电解铜量为 524.45kg、铝锭量为 55.30kg、电解锰量为 9.61kg、工业纯铁量为 18.05kg。

$$\text{合计炉料量} = (524.45 + 55.30 + 9.61 + 18.05)\text{kg} = 607.41\text{kg}$$

6) 配料计算单略。

例 12-2 据某公司订货单要求熔炼铸造锰黄铜 ZCuZn40Mn3Fe1 合金 500kg。决定用新金属炉料配料计算, 用容量 0.6t 中频感应炉熔炼。先按 100kg 合金配料计算。锰黄铜化学成分见表 12-4。

表 12-4 锰黄铜 ZCuZn40Mn3Fe1 及主要炉料化学成分 (质量分数) (%)

| 合金牌号 | Cu | Al | Fe | Mn | Zn | 备注 |
|---------------|-------|-----|------|-----|-------|-------|
| ZCuZn40Mn3Fe1 | 56 | 0.5 | 1.2 | 3.5 | 余量 | |
| 计算成分 | 56 | — | 1 | 3 | 39 | |
| 元素烧损率 | 1 | — | 0.5 | 2.5 | 2.5 | |
| 电解铜 | 99.95 | — | — | — | — | 未计算杂质 |
| 电解锰 | — | — | 2.3 | 96 | — | |
| 电解锌 | — | — | — | — | 99.95 | |
| 工业纯铁 | — | — | 99.5 | — | — | |

1) 配料计算熔炼 100kg 锰黄铜 ZCuZn40Mn3Fe1 合金应配入的合金元素量:

$$\text{Cu 量} = 100\text{kg} \times \frac{56}{100} \times (1 + 0.01) = 56.56\text{kg}$$

$$\text{Zn 量} = 100\text{kg} \times \frac{39}{100} \times (1 + 0.025) = 39.975\text{kg}, \text{取 } 39.98\text{kg}$$

$$\text{Mn 量} = 100\text{kg} \times \frac{3}{100} \times (1 + 0.025) = 3.075\text{kg}, \text{取 } 3.08\text{kg}$$

$$\text{Fe 量} = 100\text{kg} \times \frac{1}{100} \times (1 + 0.005) = 1.005\text{kg}, \text{取 } 1.01\text{kg}$$

2) 计算熔炼 500kg ZCuZn40Mn3Fe1 锰黄铜需要配制的新金属炉料量, 因 500kg 正好是 100kg 的 5 倍, 合金含量乘 5 即得。

$$\text{电解铜量} = \frac{56.56}{99.95\%} \text{kg} \times 5 = 282.9\text{kg}$$

$$\text{电解锌量} = \frac{39.98}{99.5\%} \text{kg} \times 5 = 200.9\text{kg}$$

$$\text{电解锰量} = \frac{3.08}{96\%} \text{kg} \times 5 = 16.04\text{kg}$$

$$\text{工业纯铁量} = \frac{1.01}{99.5\%} \text{kg} \times 5 = 5.08\text{kg}$$

3) 熔炼 500kg 铸造锰黄铜用新金属炉料。电解铜 282.9kg、电解锌 200.9kg、电解锰 16.04kg、工业纯铁 5.08kg, 新金属炉料合计 504.92kg。

第三节 采用回炉料熔炼铸造铜合金用新金属 调整合金元素的配料计算方法

例 12-3 某工厂需要熔炼 ZCuNi15Zn20 铸造锌白铜 500kg, 选用均有成分单的回炉料 ZCuZn20 150kg 和市售废料 ZCuNi20 100kg, 用新金属电解铜、电解镍、锌锭补加不足合金元素, 采用容量 0.6t 中频感应炉熔炼。

1) 熔炼合金和炉料成分见表 12-5。

表 12-5 熔炼用合金和炉料成分

| 合金和炉料 | 合金元素含量(质量分数, %) | | | | 备注 |
|------------------|-----------------|------|-------|-----|----------|
| | Zn | Ni | Cu | 杂质 | |
| 熔化合金 ZCuNi15Zn20 | 20 | 15 | 65 | 未计入 | 计算成分 |
| 合金元素烧损率 | 2.5 | 0 | 1 | — | — |
| 回炉料 ZCuZn20 | 20 | — | 80 | — | 配用 150kg |
| 废料 ZCuNi20 | — | 20 | 80 | — | 配用 100kg |
| 电解铜 | — | — | 99.95 | — | — |
| 电解镍 | — | 99.5 | — | — | — |
| 锌锭 | 99.95 | — | — | — | — |

2) 配料计算熔炼 500kg 铸造锌白铜合金需要的合金元数量:

$$\text{Cu 量} = 500\text{kg} \times \frac{65}{100} = 325\text{kg}$$

$$\text{Ni 量} = 500\text{kg} \times \frac{15}{100} = 75\text{kg}$$

$$\text{Zn 量} = 500\text{kg} \times \frac{20}{100} = 100\text{kg}$$

3) 计算配用 150kg 回炉料 ZCuZn20 带入的合金元素量:

$$\text{回炉料带入 Cu 量} = 150\text{kg} \times 80\% = 120\text{kg}$$

$$\text{回炉料带入 Zn 量} = 150\text{kg} \times 20\% = 30\text{kg}$$

4) 计算配用 100kg 废料 ZCuNi20 带入的合金元素量:

$$\text{废料带入 Cu 量} = 100\text{kg} \times 80\% = 80\text{kg}$$

$$\text{废料带入 Ni 量} = 100\text{kg} \times 20\% = 20\text{kg}$$

5) 计算合金需要量与带入合金量之差:

$$\text{带入 Cu 量} = (120 + 80)\text{kg} = 200\text{kg}, \text{相差 Cu 量} = (325 - 200)\text{kg} = 125\text{kg};$$

$$\text{带入 Zn 量} = 30\text{kg}, \text{相差 Zn 量} = (100 - 30)\text{kg} = 70\text{kg};$$

带入 Ni 量 = 20kg, 相差 Ni 量 = (75 - 20)kg = 55kg。

6) 计算用新金属补加量, 包括元素烧损量 (Cu 烧损 1%, Zn 烧损 2.5%):

$$\text{电解铜量} = \frac{125\text{kg} \times (1 + 0.01)}{99.95\%} = 126.31\text{kg}$$

$$\text{电解镍量} = \frac{55\text{kg}}{99.5\%} = 55.27\text{kg}$$

$$\text{锌锭量} = \frac{70\text{kg}(1 + 0.025)}{99.95\%} = 71.78\text{kg}$$

7) 计算结果炉料组成和装料量:

回炉料 ZCuZn20 = 150kg

废料 ZCuNi20 = 100kg

电解铜量 = 126.31kg

电解镍量 = 55.27kg

锌锭量 = 71.78kg

装料量 = 503.36kg

例 12-4 某厂内有黄铜 H68 和 H62 两种回炉料, 利用这两种炉料重新熔炼成 500kg H62 黄铜, 采用容量 0.6t 中频感应炉熔炼。确定 H62 黄铜配料计算成分 (质量分数): Cu62%、Zn37%。回炉料化学成分见表 12-6。

表 12-6 回炉料化学成分 (质量分数) (%)

| 合金 | Cu | Fe | Pb | Ni | Zn | 备注 |
|---------|-------------|------|------|-----|----|----------------|
| 回炉料 H62 | 60.5 ~ 63.5 | 0.15 | 0.08 | 0.5 | 余量 | 后面计算取 Zn = 37% |
| 回炉料 H68 | 67.0 ~ 70.0 | 0.10 | 0.03 | 0.5 | 余量 | 后面计算取 Zn = 32% |
| 熔炼成 H62 | 61.0 ~ 63.0 | — | — | — | 余量 | — |
| 计算成分 | 62 | — | — | — | 37 | — |
| 元素烧损 | — | — | — | — | 2 | Cu 未烧损 |

从表 12-6 可知, H68 化学成分中杂质含量 Fe、Pb、Ni 均小于重新熔炼成 H62 合金杂质含量, 所以不用考虑杂质含量超标问题。

1) 计算熔炼成新 H62 黄铜 500kg 中需要的含 Cu、Zn 量:

$$\text{所需 Cu 量} = 500\text{kg} \times \frac{62}{100} = 310\text{kg}$$

$$\text{所需 Zn 量} = 500\text{kg} \times \frac{37}{100} = 185\text{kg}$$

2) 熔炼 500kg H62 黄铜需要 310kg Cu 量, 用 H68 回炉料的配料计算:

$$\text{回炉料 H68 量} = \frac{310\text{kg}}{68\%} = 456\text{kg}$$

3) 用 H68 黄铜炉料已配入 456kg, 其余用回炉料 H62 配入, 计算 H62 回炉料配入量:

$$\text{回炉料 H62 量} = (500 - 456)\text{kg} = 44\text{kg}$$

4) 计算回炉料 H68 配入 456kg 带入 Zn 量和 H62 配入 44kg 带入 Zn 量:

$$\text{H68 带入 Zn 量} = 456\text{kg} \times 32\% = 145.92\text{kg}$$

$$\text{H62 带入 Zn 量} = 44\text{kg} \times 37\% = 16.28\text{kg}$$

$$\text{合计带入 Zn 量} = (145.92 + 16.28)\text{kg} = 162.2\text{kg}$$

5) 计算 Zn 烧损 2% 的烧损量, 并计算 Zn 加入量:

$$\text{总 Zn 烧损量} = 185\text{kg} \times \frac{2}{100} = 3.7\text{kg}, \text{用新金属锌补上。}$$

$$\text{带入与烧损总 Zn 量} = (145.92 + 16.28 + 3.7)\text{kg} = 165.9\text{kg}$$

$$\text{总缺 Zn 量} = (185 - 165.9)\text{kg} = 19.1\text{kg}$$

$$\text{新金属锌量} = \frac{19.1\text{kg}}{99.9\%} = 19.12\text{kg}, \text{合计金属锌量} = (3.7 + 19.12)\text{kg} =$$

22.82kg, 取 22kg。

6) 计算结果炉料组成和装料量:

$$\text{回炉料 H68 量} = 456\text{kg}$$

$$\text{回炉料 H62 量} = 44\text{kg}$$

$$\text{金属锌 Zn 量} = 22\text{kg}$$

$$\text{装料量} = (456 + 44 + 22)\text{kg} = 522\text{kg}$$

7) 验算 Cu 含量:

$$\text{H68 配入 Cu 量} = 456\text{kg} \times 68\% = 310\text{kg}$$

$$\text{H62 配入 Cu 量} = 44\text{kg} \times 62\% = 27\text{kg}$$

$$\text{合计 Cu 量} = 337\text{kg}, \text{Cu 烧损率为 } 1.5\%, \text{Cu 烧损量} = 337\text{kg} \times 1.5\% = 5.06\text{kg}$$

$$\text{新 H62 (熔炼金属) Cu 含量} = \frac{337 - 5.06}{522} \times 100\% = 63.6\% > 63\% \text{ 的上限。}$$

例 12-5 利用原有旧杂料 HPb59-1 铜合金 30% 和废黄铜料 H62、锌和铅, 需配成新的铜合金 HPb59-1 为 600kg, 计算需要配制各种合金元素量。合金料的化学成分见表 12-7。

1) 配料计算新 HPb59-1 铜合金需要配入的合金元素量:

$$\text{所需 Cu 量} = 600\text{kg} \times \frac{58}{100} = 348\text{kg}$$

表 12-7 合金料的化学成分 (质量分数) (%)

| 合 金 | Cu | Pb | Fe | 杂质 | Zn | 备 注 |
|-------------|-------|---------|-----|-----|----|----------|
| 旧杂料 HPb59-1 | 58.5 | 1.2 | — | — | 余量 | 配入 30% |
| 废黄铜 H62 | 62 | 0.08 | — | — | — | — |
| 配制新 HPb59-1 | 57~60 | 0.8~1.9 | 0.5 | 0.5 | 余量 | 未计算元素烧损量 |
| 计算成分 | 58 | 1.2 | — | — | 余量 | |

$$\text{所需 Pb 量} = 600\text{kg} \times \frac{1.2}{100} = 7.2\text{kg}$$

$$\text{所需 Zn 量} = 600\text{kg} - (348 + 7.2)\text{kg} = 244.8\text{kg}$$

2) 计算旧杂料 HPb59-1 配入量及带入合金元素量:

$$\text{HPb59-1 量} = 600\text{kg} \times 30\% = 180\text{kg}$$

$$\text{带入 Cu 量} = 180\text{kg} \times \frac{58.5}{100} = 105.3\text{kg}$$

$$\text{带入 Pb 量} = 180\text{kg} \times \frac{1.2}{100} = 2.16\text{kg}$$

$$\text{带入 Zn 量} = 180\text{kg} - (105.3 + 2.16)\text{kg} = 72.5\text{kg}$$

3) 计算新 HPb59-1 合金量与带入的合金量之差用废黄铜 H62 配制。

$$\text{尚缺 Cu 量} = (348 - 105.3)\text{kg} = 242.7\text{kg}$$

$$\text{尚缺 Pb 量} = (7.2 - 2.16)\text{kg} = 5.04\text{kg}$$

$$\text{废黄铜 H62 需要量} = \frac{242.7\text{kg}}{62\%} = 391.45\text{kg}, \text{取 } 391\text{kg}$$

4) 废黄铜 H62 带入合金元素量:

$$\text{带入 Cu 量} = 391\text{kg} \times \frac{62}{100} = 242.4\text{kg}$$

$$\text{带入 Zn 量} = 391\text{kg} - (242.4 + 3.13)\text{kg} = 145\text{kg}$$

$$\text{带入 Pb 量} = 391\text{kg} \times \frac{0.8}{100} = 3.13\text{kg}$$

5) 计算配入 H62 废黄铜合金后需要补加铅量:

$$\text{补 Pb 量} = 5.04\text{kg} - 3.13\text{kg} = 1.91\text{kg}, \text{取 } 2.0\text{kg}$$

$$\text{应补加铅量} = \frac{2.0\text{kg}}{99.96\%} \approx 2.0\text{kg}$$

6) 计算所需锌量, 添加各种合金后余量即为 Zn 量。

$$\text{Zn 量} = 600\text{kg} - (180 + 391 + 2.0)\text{kg} = 27.0\text{kg}$$

7) 配料计算后炉料组成:

旧杂料 HPb59-1 量 = 180kg

废黄铜 H62 量 = 391kg

铅金属量 = 2kg

锌金属量 = 27kg

合计炉料量 = 600kg

8) 验算炉料中含 Cu、Pb、Zn 量:

Cu 量 = (105.3 + 242.4)kg = 347.7kg, 与 Cu = 348kg 接近, 合格。

Pb 量 = (2.16 + 3.13 + 2)kg = 7.29kg, 与 Pb = 7.2kg 多出 0.09kg, 在含量范围内。

Zn 量 = (72.5 + 145 + 27)kg = 244.5kg, 与 Zn = 244.8kg 接近, 合格。

例 12-6 根据订货要求熔炼特殊黄铜 HPb59-1 合金 500kg, 利用本厂四种炉料, 其取样分析化学成分见表 12-8。用 0.6t 中频感应炉熔铜。

表 12-8 四种炉料化学成分 (质量分数) (%)

| 合金和炉料 | Cu | Pb | Fe | Sb | Bi | P | Sn | 杂质总和 | Zn | 备注 |
|---------------|---------|-----------|---------|----------|-----------|----------|----|-------|-------------|---|
| HPb59-1 | 57 ~ 60 | 0.8 ~ 1.9 | 0.5 ~ 0 | 0.01 ~ 0 | 0.003 ~ 0 | 0.02 ~ 0 | — | 0.75 | 37.3 ~ 42.2 | — |
| 计算成分 | 58 | 1.3 | 0.5 | 0.01 | 0.003 | 0.02 | — | 0.75 | 39.7 | |
| 炉料 1 | 54.8 | 1.8 | 0.5 | 0.01 | 0.004 | 0.01 | 0 | 0.63 | 41.53 | |
| 炉料 2 | 62.3 | 2.3 | 1.1 | 0.03 | 0.005 | 0.04 | 0 | 1.170 | 33.56 | |
| 炉料 3 | 56.8 | 1.7 | 0.4 | 0.01 | 0 | 0.01 | 0 | 1.72 | 38.76 | |
| 炉料 4 | 65.2 | 0.3 | 0.6 | 0.01 | 0 | 0.02 | 0 | 0.65 | 34.28 | |
| 炉料中最大元素含量 | 65.2 | 2.3 | 1.1 | 0.03 | 0.005 | 0.04 | 0 | 1.720 | 41.53 | |
| 炉料中最小元素含量 | 54.8 | 0.3 | 0.4 | 0.01 | 0.004 | 0.01 | 0 | 0.63 | 33.56 | |
| 炉料中各元素平均含量 | 60.0 | 1.3 | 0.75 | 0.02 | 0.0045 | 0.025 | 0 | 0.875 | 37.55 | $\frac{\text{最大元素含量} + \text{最小元素含量}}{2}$ |
| 炉料中元素实际绝对偏差 | 10.4 | 2.0 | 0.7 | 0.02 | 0.001 | 0.03 | 0 | 1.09 | 7.97 | 最大元素含量 - 最小元素含量 |
| 根据化学成分的允许绝对偏差 | 3.0 | 1.1 | 0.5 | 0.01 | 0.003 | 0.02 | — | 0.75 | 4.9 | 目标金属元素含量上限 - 目标金属元素含量下限 |

1) 根据化学成分允许绝对偏差和炉料中实际的绝对偏差计算 100kg 炉料中元素含量:

$$\text{Cu} = \frac{3.0\% \times 100\%}{10.4\%} = 28.8\%$$

$$\text{Pb} = \frac{1.1\% \times 100\%}{2.0\%} = 55.0\%$$

$$\text{Fe} = \frac{0.5\% \times 100\%}{0.7\%} = 71.4\%$$

$$\text{Sb} = \frac{0.01\% \times 100\%}{0.02\%} = 50.0\%$$

$$\text{Bi} = \frac{0.003\% \times 100\%}{0.001\%} = 300\%$$

$$\text{P} = \frac{0.02\% \times 100\%}{0.03\%} = 66.6\%$$

$$\text{Zn} = \frac{4.9\% \times 100\%}{7.97\%} = 61.5\%$$

$$\text{杂质总含量} = \frac{0.75\% \times 100\%}{1.09\%} = 68.8\%$$

2) 根据炉料中基本元素含量计算：

$$\text{Cu} = \frac{58.0\%}{65.2\%} \times 100\% = 88.95\%$$

$$\text{Pb} = \frac{1.3\%}{2.3\%} \times 100\% = 56.52\%$$

$$\text{Zn} = \frac{39.7\%}{41.53\%} \times 100\% = 95.59\%$$

3) 炉料用量取计算所得小数值 28.8%，取整数后为 28%，取炉料量 = 28kg。

28kg 炉料中加入后带入的合金元素量：

$$\text{带入 Cu 量} = 28\text{kg} \times 60\% = 16.8\text{kg}$$

$$\text{带入 Pb 量} = 28\text{kg} \times 1.3\% = 0.36\text{kg}$$

$$\text{带入 Fe 量} = 28\text{kg} \times 0.75\% = 0.21\text{kg}$$

$$\text{带入 Sb 量} = 28\text{kg} \times 0.02\% = 0.0056\text{kg}$$

$$\text{带入 Bi 量} = 28\text{kg} \times 0.0045\% = 0.0013\text{kg}$$

$$\text{带入 P 量} = 28\text{kg} \times 0.025\% = 0.007\text{kg}$$

$$\text{带入 Sn 量} = 0$$

$$\text{带入杂质总和} = 28\text{kg} \times 0.875\% = 0.245\text{kg}$$

$$\text{带入 Zn 量} = 28\text{kg} \times 37.55\% = 10.51\text{kg}$$

4) 基本合金元素不足数量:

$$\text{缺 Cu 量} = (58 - 16.8) \text{ kg} = 41.2 \text{ kg}$$

$$\text{缺 Pb 量} = (1.3 - 0.36) \text{ kg} = 0.94 \text{ kg}$$

$$\text{缺 Zn 量} = (39.7 - 10.51) = 29.19 \text{ kg}$$

5) 合金元素烧损数量:

基本合金元素烧损率 (质量分数, %): Cu0.3、Pb0.5、Zn3。

$$\text{Cu 烧损量} = 58 \text{ kg} \times 0.3\% = 0.17 \text{ kg}$$

$$\text{Pb 烧损量} = 1.3 \text{ kg} \times 0.5\% = 0.0065 \text{ kg}$$

$$\text{Zn 烧损量} = 39.7 \text{ kg} \times 3\% = 1.19 \text{ kg}$$

6) 基本元素不足量加上元素烧损量为总合金元素不足量, 用新金属补足。

所用新金属为电解铜 Cu99.5%、金属铅 Pb99.9% 和金属锌 Zn99.9%。

新金属炉料量:

$$\text{电解铜量} = \frac{(41.2 \text{ kg} + 0.17 \text{ kg}) \times 100}{99.5} = 41.57 \text{ kg}$$

$$\text{金属铅量} = \frac{(0.94 \text{ kg} + 0.0065 \text{ kg}) \times 100}{99.9} = 0.95 \text{ kg}$$

$$\text{金属锌量} = \frac{(29.19 \text{ kg} + 1.19 \text{ kg}) \times 100}{99.9} = 30.41 \text{ kg}$$

$$\text{合计炉料量} = (28 + 41.57 + 0.95 + 30.41) \text{ kg} = 100.93 \text{ kg}$$

7) 熔炼铜合金 HPb59-1 500kg 炉料组成 (500 是 100 的 5 倍):

$$\text{本厂炉料量} = 28 \text{ kg} \times 5 = 140 \text{ kg}$$

$$\text{电解铜量} = 41.57 \text{ kg} \times 5 = 207.85 \text{ kg}$$

$$\text{金属铅量} = 0.95 \text{ kg} \times 5 = 4.75 \text{ kg}$$

$$\text{金属锌量} = 30.41 \text{ kg} \times 5 = 152.05 \text{ kg}$$

$$\text{合计总炉料量} = 504.65 \text{ kg}$$

第四节 采用回炉料加中间合金和新金属的配料计算

一、配料计算一般方法

- 按国家标准成分或规定成分确定熔炼有色合金成分。
- 确定计算成分是配料计算各种合金元素含量的依据。
- 先计算出所用回炉料和废料中各合金元素含量的数量, 再计算炉料中相同元素含量的数量之和。
- 计算 2) 项中计算成分元素含量与 3) 项相同元素含量之和的差 (之

差), 确定补加量。

5) 采用三元中间合金或用二元中间合金补加, 如果补加的元素含量达到或满足“之差”含量要求, 即补加计算完成。如果补加之差后, “之差”的含量(数量)没有完成补加元素含量, 则要再计算补加二元中间合金。

6) 补加二元中间合金 = 计算成分 - (之差 + 三元中间合金补加量), 如果补加的二元中间合金没有达到计算成分含量时, 计算之差用新金属补齐之差含量。

7) 新金属补加量 = 计算成分 - (回炉料 + 废料 + 三元、二元中间合金量)。

二、配料计算例题

例 12-7 工厂需要熔炼铸造铝青铜 ZCuAl10Fe3Mn2 合金 700kg, QA10-3-1.5 铝青铜回炉料占 30%, 其余不足部分合金用中间合金和用新金属配齐。采用容量 0.75t 工频感应熔铜炉。

1) 熔炼合金成分和回炉料及中间合金成分见表 12-9。

表 12-9 熔炼合金和回炉料及中间合金成分

| 熔炼合金和炉料 | 合金元素含量(质量分数, %) | | | | 备注 |
|----------------|-----------------|------------|-----------|-----------|--------|
| | Cu | Al | Fe | Mn | |
| ZCuAl10Fe3Mn2 | 82.5 ~ 86.5 | 9.0 ~ 11.0 | 3.0 ~ 4.0 | 1.5 ~ 2.5 | 不计算杂质 |
| 计算成分 | 86 | 9.5 | 3 | 1.5 | 未计算烧损量 |
| 回炉料 QA10-3-1.5 | 85 | 9.5 | 2.5 | 1.6 | 占 30% |
| 中间合金(Cu-Al-Fe) | 69 ~ 76 | 9 ~ 11 | 15 ~ 20 | — | — |
| 计算成分 | 72 | 10 | 18 | — | |
| 中间合金(Cu-Mn) | 75 ~ 78 | — | — | 22 ~ 25 | |
| 计算成分 | 76 | — | — | 23 | — |
| 中间合金(Cu-Al) | 50 | 50 | — | — | — |
| 新金属电解铜 | 99.95 | — | — | — | — |

2) 配料计算熔炼 700kg ZCuAl10Fe3Mn2 合金需要的元素质量

$$\text{Cu 量} = 700\text{kg} \times \frac{86}{100} = 602\text{kg}$$

$$\text{Al 量} = 700\text{kg} \times \frac{9.5}{100} = 66.5\text{kg}$$

$$\text{Fe 量} = 700\text{kg} \times \frac{3}{100} = 21\text{kg}$$

$$\text{Mn 量} = 700\text{kg} \times \frac{1.5}{100} = 10.5\text{kg}$$

3) 计算 QAl10-3-1.5 合金回炉料带入的合金元素量

$$\text{回炉料配入量} = 700\text{kg} \times \frac{30}{100} = 210\text{kg}$$

$$\text{回炉料带入 Cu 量} = 210\text{kg} \times \frac{85}{100} = 178.5\text{kg}$$

$$\text{回炉料带入 Al 量} = 210\text{kg} \times \frac{9.5}{100} = 19.95\text{kg}$$

$$\text{回炉料带入 Fe 量} = 210\text{kg} \times \frac{2.5}{100} = 5.25\text{kg}$$

$$\text{回炉料带入 Mn 量} = 210\text{kg} \times \frac{1.6}{100} = 3.36\text{kg}$$

4) 计算熔炼合金元素需要量 (配入量) 与回炉料带入的合金元素量之差:

$$\text{缺 Cu 量} = (602 - 178.5)\text{kg} = 423.5\text{kg}$$

$$\text{缺 Al 量} = (66.5 - 19.95)\text{kg} = 46.55\text{kg}$$

$$\text{缺 Fe 量} = (21 - 5.25)\text{kg} = 15.75\text{kg}$$

$$\text{缺 Mn 量} = (10.5 - 3.36)\text{kg} = 7.14\text{kg}$$

5) 计算中间合金配入量:

①采用 (Cu-Fe-Al) 中间合金补 Fe, 计算配入量:

$$(\text{Cu-Fe-Al}) \text{ 中间合金量} = \frac{15.75\text{kg}}{18\%} = 87.5\text{kg}$$

②计算由中间合金带入的 Al 量:

$$\text{Cu-Fe-Al 合金带入 Al 量} = 87.5\text{kg} \times 10\% = 8.75\text{kg}$$

③采用 (Cu-Mn) 中间合金补 Mn, 计算配入量:

$$(\text{Cu-Mn}) \text{ 中间合金量} = \frac{7.14\text{kg} \times 100}{23} = 31.04\text{kg}$$

④采用 (Cu-Al) 中间合金补 Al, 计算配入量, 应将中间合金 (Cu-Fe-Al) 带入的 Al 扣除, 缺 Al 量 = (46.55 - 8.75)kg = 37.8kg:

$$(\text{Cu-Al}) \text{ 中间合金量} = \frac{37.8\text{kg} \times 100}{50} = 75.6\text{kg}$$

6) 计算由中间合金带入的其他合金元素量:

① (Cu-Fe-Al) 中间合金带入的 Cu、Al 量 (其中 Fe 已计人在内):

$$\text{Cu-Fe-Al 合金带入 Cu 量} = 87.5\text{kg} \times \frac{72}{100} = 63\text{kg}$$

$$\text{Cu-Fe-Al 合金带入 Al 量} = 87.5 \text{kg} \times \frac{10}{100} = 8.75 \text{kg}$$

$$\text{Cu-Fe-Al 合金带入 Fe 量} = 87.5 \text{kg} \times \frac{18}{100} = 15.75 \text{kg}$$

② (Cu-Mn) 中间合金带入的 Cu 量 (其中 Mn 已计入在内):

$$\text{Cu-Mn 合金带入 Cu 量} = 31.04 \text{kg} \times \frac{76}{100} = 23.59 \text{kg}, \text{取 } 23.6 \text{kg}$$

$$\text{Cu-Mn 合金带入 Mn 量} = 31.04 \text{kg} \times \frac{23}{100} = 7.14 \text{kg}$$

③ (Cu-Al) 中间合金带入的 Cu 量 (其中 Al 已计入在内):

$$\text{Cu-Al 合金带入 Cu 量} = 75.6 \text{kg} \times \frac{50}{100} = 37.8 \text{kg}$$

$$\text{Cu-Al 合金带入 Al 量} = 75.6 \text{kg} \times \frac{50}{100} = 37.8 \text{kg}$$

$$\text{合计带入 Cu 量} = (63 + 23.6 + 37.8) \text{kg} = 124.4 \text{kg}$$

7) 在第 4) 项计算的 Cu 量还差 423.5kg, 减去由中间合金带入的 Cu 量差后, 最后用新金属电解铜补齐。

$$\text{需补 Cu 量} = (423.5 - 124.4) \text{kg} = 299.1 \text{kg}$$

$$\text{需补电解铜量} = \frac{299.1 \text{kg}}{99.95\%} = 299.2 \text{kg}$$

8) 配料计算结果见表 12-10。

表 12-10 熔化 700kg ZCuAl10Fe3Mn2 铸造铝青铜配料单

| 炉料组成 | 配入量 /kg | 配入合金量/kg | | | | 备注 |
|-----------------|------------|----------|-------|------|------|-----------|
| | | Cu | Al | Fe | Mn | |
| 回炉料 QAl10-3-1.5 | 210 | 178.5 | 19.95 | 5.25 | 3.36 | 按 30% 配入量 |
| 中间合金 (Cu-Al-Fe) | 87.5 | 63 | 8.75 | 15.7 | — | — |
| 中间合金 (Cu-Mn) | 31.04 | 23.6 | — | — | 7.14 | — |
| 中间合金 (Cu-Al) | 75.6 | 37.8 | 37.8 | — | — | — |
| 电解铜 DJCu | 299.2 | 299.2 | — | — | — | — |
| 合计 | 703.3 | 602.1 | 66.5 | 21.0 | 10.5 | 杂质约 3.2% |

例 12-8 熔炼铸造锡青铜 ZCuSn10Zn2 合金 500kg, 本厂回炉料 ZCuSn10Zn2 配入 50%, 废杂铜料 ZCuSn10 配入 10%, 其余用中间合金 (Cu-Zn) 和新金属配料, 采用 0.6t 中频感应炉熔化。

1) 熔炼合金和炉料化学成分见表 12-11。

表 12-11 熔化合金及炉料化学成分 (质量分数) (%)

| 合金和炉料 | Sn | Zn | Al | Fe | Pb | Cu | 备注 |
|----------------|------------|-----------|----|----|-----|------|--------|
| 熔炼 ZCuSn10Zn2 | 9.0 ~ 11.0 | 2.0 ~ 4.0 | — | — | 0.5 | 余量 | 未计算杂质 |
| 配料计算成分 | 10 | 3 | — | — | — | 87 | 未计算烧损 |
| 回炉料 ZCuSn10Zn2 | 9.5 | 3 | — | — | — | 87.5 | 配入 50% |
| 杂废料 ZCuSn10 | 10 | — | — | — | — | 90 | 配入 10% |
| 中间合金(Cu-Zn) | — | 35 | — | — | — | 65 | — |
| 电解铜 | — | — | — | — | — | 99.9 | |
| 金属锡 | 99.9 | — | — | — | — | — | — |

2) 计算熔炼 500kg ZCuSn10Zn2 合金需要元素量:

$$\text{所需 Cu 量} = 500\text{kg} \times \frac{87}{100} = 435\text{kg}$$

$$\text{所需 Sn 量} = 500\text{kg} \times \frac{10}{100} = 50\text{kg}$$

$$\text{所需 Zn 量} = 500\text{kg} \times \frac{3}{100} = 15\text{kg}$$

$$\text{所需 Pb 量} = 500\text{kg} \times \frac{0.5}{100} = 2.5\text{kg, 记为杂质}$$

3) 计算回炉料 ZCuSn10Zn2 配入 50% 所带入的合金元素量:

$$\text{回炉料量} = 500\text{kg} \times 50\% = 250\text{kg}$$

$$\text{回炉料带入 Cu 量} = 250\text{kg} \times \frac{87.5}{100} = 218.75\text{kg}$$

$$\text{回炉料带入 Sn 量} = 250\text{kg} \times \frac{9.5}{100} = 23.75\text{kg}$$

$$\text{回炉料带入 Zn 量} = 250\text{kg} \times \frac{3}{100} = 7.5\text{kg}$$

4) 计算杂废料 ZCuSn10 配入 10% 所带入的合金元素量:

$$\text{杂废料量} = 500\text{kg} \times \frac{10}{100} = 50\text{kg}$$

$$\text{杂废料带入 Cu 量} = 50\text{kg} \times \frac{90}{100} = 45\text{kg}$$

$$\text{杂废料带入 Sn 量} = 50\text{kg} \times \frac{10}{100} = 5\text{kg}$$

5) 计算两种炉料带入的合金元素量之和与熔炼合金元素总量之差

$$\text{合计带入 Cu 量} = (218.75 + 45) \text{ kg} = 263.75 \text{ kg}$$

$$\text{合计带入 Sn 量} = (23.75 + 5) \text{ kg} = 28.75 \text{ kg}$$

$$\text{合计带入 Zn 量} = 7.5 \text{ kg}$$

$$\text{缺 Cu 量} = (435 - 263.75) \text{ kg} = 171.25 \text{ kg}$$

$$\text{缺 Sn 量} = (50 - 28.75) \text{ kg} = 21.25 \text{ kg}$$

$$\text{缺 Zn 量} = (15 - 7.5) \text{ kg} = 7.5 \text{ kg}$$

6) 计算补 Zn 用中间合金 (Cu-Zn) 的配入量及带入的合金元素量

$$\text{Cu-Zn 量} = \frac{7.5 \text{ kg}}{35\%} = 21.42 \text{ kg, 按 22kg 配入。}$$

$$\text{Cu-Zn 合金带入 Cu 量} = 22 \text{ kg} \times \frac{65}{100} = 14.3 \text{ kg}$$

$$\text{Cu-Zn 合金带入 Zn 量} = 22 \text{ kg} \times \frac{35}{100} = 7.7 \text{ kg} > 7.5 \text{ kg, 说明 Zn 已补足。}$$

7) 计算补完中间合金 (Cu-Zn) 后熔炼合金需补加合金元素量, 用新金属补加。

$$\text{补加 Cu 量} = \text{缺 Cu 量} - \text{Cu-Zn 带入 Cu 量} = (171.25 - 14.3) \text{ kg} = 156.95 \text{ kg}$$

$$\text{电解铜量} = \frac{156.95 \text{ kg}}{99.9\%} = 157.1 \text{ kg}$$

$$\text{金属锡量} = \frac{21.25 \text{ kg}}{99.9\%} = 21.27 \text{ kg}$$

8) 配料计算单见表 12-12。

表 12-12 熔炼 500kg ZCuSn10Zn2 合金配料计算单

| 炉料组成 | 配料量 /kg | 合金元素量/kg | | | 备注 |
|---------------|------------|----------|------|--------|--------|
| | | Sn | Zn | Cu | |
| 回炉料 ZnSn10Zn2 | 250 | 23.75 | 7.5 | 218.75 | 配入 50% |
| 废杂料 ZCuSn10 | 50 | 5 | — | 45 | 配入 10% |
| 中间合金 (Cu-Zn) | 22 | — | 7.7 | 14.3 | — |
| 电解铜 | 157.1 | — | — | 157.1 | — |
| 金属锡 | 21.27 | 21.27 | — | — | — |
| 合计 | 500.37 | 50.2 | 15.2 | 435.15 | — |

第十三章 铝合金熔炼的配料计算

第一节 常用铸造铝合金的化学成分

一、常用铸造铝合金的牌号及化学成分（表 13-1）

表 13-1 常用铸造铝合金牌号及化学成分

| 合金 | 牌号 | 代号 | 化学成分(质量分数, %) | | | | | | 铸造方法 | 备注 |
|------------------|------------------|-------|----------------|--------------|----------------|---------------|------------------|----|------|------------|
| | | | Si | Cu | Mg | Mn | 其他 | Al | | |
| 铝 硅 合 金 | ZAlSi7Mg | ZL101 | 6.5 ~ 7.5 | — | 0.25 ~ 0.45 | — | — | — | 余量 | 砂型、 金属型 |
| | ZAlSi12 | ZL102 | 10.0 ~ 13.0 | — | — | — | — | — | 余量 | 砂型 |
| | ZAlSi9Mg | ZL104 | 8.0 ~ 10.5 | — | 0.17 ~ 0.35 | 0.2 ~ 0.5 | — | — | 余量 | 砂型、 金属型 |
| | ZAlSi5Cu1Mg | ZL105 | 4.5 ~ 5.5 | 1 ~ 1.5 | 0.4 ~ 0.6 | — | — | — | 余量 | 金属型 |
| | ZAlSi8Cu1Mg | ZL106 | 7.5 ~ 8.5 | 1 ~ 1.5 | 0.3 ~ 0.5 | 0.35 ~ 0.5 | Ti0.12 ~ 0.25 | — | 余量 | 砂型 |
| | ZAlSi7Cu4 | ZL107 | 6.5 ~ 7.5 | 3.5 ~ 4.5 | — | — | — | — | 余量 | 金属型 |
| | ZAlSi12Cu2Mg1 | ZL108 | 11.0 ~ 13.0 | 1.5 ~ 2.5 | 0.4 ~ 1.0 | — | — | — | 余量 | 砂型 |
| | ZAlSi12Cu1Mg1Ni1 | ZL109 | 11.0 ~ 13.0 | 1 ~ 1.5 | 0.8 ~ 1.5 | — | Ni0.8 ~ 1.5 | — | 余量 | 砂型 |
| 铝 铜 合 金 | ZAlCu5Mn | ZL201 | — | 4.5 ~ 5.5 | — | — | Ti0.15 ~ 0.35 | — | 余量 | 砂型 |
| | ZAlCu4 | ZL203 | — | 3.5 ~ 4.5 | — | — | — | — | 余量 | 砂型 |

(续)

| 合金 | 牌号 | 代号 | 化学成分(质量分数,%) | | | | | | 铸造方法 | 备注 |
|------------------|------------|-------|--------------|----|---------------|----|-----------------|----|------|------------------------------|
| | | | Si | Cu | Mg | Mn | 其他 | Al | | |
| 铝 镁 合 金 | ZAlMg10 | ZL301 | — | — | 9.5 ~ 11.0 | — | — | 余量 | 砂型 | — |
| | ZAlMg5Si1 | ZL303 | 0.8 ~ 1.3 | — | 4.5 ~ 5.5 | — | — | 余量 | 砂型 | — |
| 铝 锌 合 金 | ZAlZn11Si7 | ZL401 | 6.0 ~ 8.0 | — | 0.1 ~ 0.3 | — | Zn9.0 ~ 13.0 | 余量 | 砂型 | — |
| | ZAlZn6Mg | ZL402 | — | — | 0.5 ~ 0.65 | — | Zn5.0 ~ 6.5 | 余量 | 金属型 | Cr0.4 ~ 0.6 Ti0.15 ~ 0.25 |

二、常用铝合金重熔料牌号及化学成分 (表 13-2)

表 13-2 常用铝合金重熔料牌号及化学成分

| 牌号 | 化学成分(质量分数,%) | | | | | | | | | | | Al | |
|------|--------------|-----|--------------|---------------|---------------|----------------|----|--------------|------|----|------|------|----|
| | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Ni | Zn | Ti | Zr | 其他 | | |
| | | | | | | | | | | | 单个 | 合计 | |
| 2A02 | 0.3 | 0.3 | 2.6 ~ 3.2 | 0.45 ~ 0.7 | 2.0 ~ 2.4 | — | — | 0.10 | 0.15 | — | 0.05 | 0.10 | 余量 |
| 2A10 | 0.25 | 0.2 | 3.9 ~ 4.5 | 0.3 ~ 0.5 | 0.15 ~ 0.3 | — | — | 0.10 | 0.15 | — | 0.05 | 0.10 | 余量 |
| 2B11 | 0.5 | 0.5 | 3.8 ~ 4.5 | 0.4 ~ 0.8 | 0.4 ~ 0.8 | — | — | 0.10 | 0.15 | — | 0.05 | 0.10 | 余量 |
| 2017 | 0.2 ~ 0.8 | 0.7 | 3.5 ~ 4.5 | 0.4 ~ 1.0 | 0.4 ~ 0.8 | 0.10 | — | 0.25 | 0.15 | — | 0.05 | 0.15 | 余量 |
| 5A03 | 0.5 ~ 0.8 | 0.5 | 0.10 | 0.3 ~ 0.6 | 3.2 ~ 3.8 | — | — | 0.20 | 0.15 | — | 0.25 | 0.10 | 余量 |
| 5A05 | 0.5 | 0.5 | 0.10 | 0.3 ~ 0.6 | 4.8 ~ 5.5 | — | — | 0.20 | — | — | 0.05 | 0.10 | 余量 |
| 7A04 | 0.5 | 0.5 | 1.4 ~ 2.0 | 0.2 ~ 0.6 | 1.8 ~ 2.8 | 0.10 ~ 0.25 | — | 5.0 ~ 7.0 | 0.10 | — | 0.05 | 0.10 | 余量 |
| 7A09 | 0.5 | 0.5 | 1.2 ~ 2.0 | 0.15 | 2.0 ~ 3.0 | 0.16 ~ 0.30 | — | 5.1 ~ 6.1 | 0.10 | — | 0.05 | 0.10 | 余量 |

注：此表摘自周家荣的《铝合金熔铸生产技术问答》一书的附录1。

第二节 熔炼铝合金配料计算例题

例 13-1 熔炼牌号为 7A04 铝合金，配料总量为 10t，浇注重要铸件，要求选用炉料质量好，化学成分稳定的品级炉料，补加中间合金和新金属配制。

1) 7A04 合金的化学成分和计算成分见表 13-3。

表 13-3 7A04 合金化学成分和计算成分

| 7A04 | 化学成分(质量分数, %) | | | | | | | | |
|--------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-------|---------------|------|----|
| | Cu | Mg | Mn | Zn | Cr | Ti | Fe | Si | Al |
| 厂内标准成分 | 1.4 ~ 1.7 | 1.9 ~ 2.3 | 0.2 ~ 0.4 | 5.5 ~ 6.5 | 0.12 ~ 0.2 | ≤0.08 | 0.2 ~ 0.45 | ≤0.3 | 余量 |
| 计算成分 | 1.55 | 2.1 | 0.3 | 6.0 | 0.15 | 0.04 | ≤0.40 | ≤0.3 | 余量 |

2) 根据本厂现有炉料情况确定选用有化学成分的碎屑重熔炉料，配入量为 30%，厂内一级料 7A04 圆料和 7A04 板边角余料各配入 25%，炉料组成和配比见表 13-4。

表 13-4 炉料组成和配比

| 炉料组成 | | 配料比 (%) | 化学成分(质量分数, %) | | | | | | | | | 备注 |
|----------|---------|------------|---------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|--------------|
| | | | Cu | Mg | Mn | Zn | Cr | Ti | Fe | Si | Al | |
| 重熔料 | 7A04 | 30 | 1.2 | 1.7 | 0.3 | 5 | 0.1 | 0.05 | 0.4 | 0.2 | 余量 | 碎屑重熔料 有成分 |
| 一级料 | 7A04 圆 | 25 | 1.6 | 2.0 | 0.3 | 5.8 | 0.15 | 0.04 | 0.4 | 0.2 | 余量 | 品级炉料成 分稳定 |
| | 7A04 板 | 25 | 1.5 | 2.2 | 0.3 | 6 | 0.15 | 0.05 | 0.45 | 0.22 | 余量 | |
| 中间 合金 | (Al-Mn) | 20 | — | — | 10.50 | — | — | — | 0.5 | 0.3 | 余量 | 配入 |
| | (Al-Cr) | | — | — | — | — | 4.0 | — | 0.6 | 0.3 | 余量 | |
| | (Al-Ti) | | — | — | — | — | — | 3.5 | 0.5 | 0.4 | 余量 | |
| 新金属 | 电解铜 | — | 99.90 | — | — | — | — | — | — | — | — | 补加 |
| | 镁锭 | | — | 99.99 | — | — | — | — | — | — | — | |
| | 锌锭 | | — | — | — | 99.95 | — | — | — | — | — | |
| | 铝锭 | | — | — | — | — | — | — | — | — | 99.60 | |

3) 计算配料总量需要的各合金元素量：

$$\text{需 Cu 量} = 10000 \text{kg} \times 1.55\% = 155 \text{kg}$$

$$\text{需 Mg 量} = 10000 \text{kg} \times 2.1\% = 210 \text{kg}$$

需 Mn 量 = $10000\text{kg} \times 0.3\% = 30\text{kg}$

需 Zn 量 = $10000\text{kg} \times 6\% = 600\text{kg}$

需 Cr 量 = $10000\text{kg} \times 0.15\% = 15\text{kg}$

需 Fe 量 = $10000\text{kg} \times 0.40\% = 40\text{kg}$

需 Si 量 = $10000\text{kg} \times 0.3\% = 30\text{kg}$

需 Ti 量 = $10000\text{kg} \times 0.04\% = 4\text{kg}$

合计除 Al 以外的合金元素量 = 1084kg

需 Al 量 = $(10000 - 1084)\text{kg} = 8916\text{kg}$

4) 计算配入的各种炉料中分别带入的合金元素量:

7A04 重熔料量 = $10000\text{kg} \times 30\% = 3000\text{kg}$

重熔料带入 Cu 量 = $3000\text{kg} \times 1.2\% = 36\text{kg}$

重熔料带入 Mg 量 = $3000\text{kg} \times 1.7\% = 51\text{kg}$

重熔料带入 Mn 量 = $3000\text{kg} \times 0.3\% = 9\text{kg}$

重熔料带入 Zn 量 = $3000\text{kg} \times 5\% = 150\text{kg}$

重熔料带入 Cr 量 = $3000\text{kg} \times 0.1\% = 3\text{kg}$

重熔料带入 Ti 量 = $3000\text{kg} \times 0.05\% = 1.5\text{kg}$

重熔料带入 Fe 量 = $3000\text{kg} \times 0.4\% = 12\text{kg}$

重熔料带入 Si 量 = $3000\text{kg} \times 0.2\% = 6\text{kg}$

重熔料带入合计除 Al 以外的合金元素量 = 268.5kg

重熔料带入 Al 量 = $(3000 - 268.5)\text{kg} = 2731.5\text{kg}$

7A04 圆料量 = $10000\text{kg} \times 25\% = 2500\text{kg}$

圆料带入 Cu 量 = $2500\text{kg} \times 1.6\% = 40\text{kg}$

圆料带入 Mg 量 = $2500\text{kg} \times 2\% = 50\text{kg}$

圆料带入 Mn 量 = $2500\text{kg} \times 0.3\% = 7.5\text{kg}$

圆料带入 Zn 量 = $2500\text{kg} \times 5.8\% = 145\text{kg}$

圆料带入 Cr 量 = $2500\text{kg} \times 0.15\% = 3.75\text{kg}$

圆料带入 Ti 量 = $2500\text{kg} \times 0.04\% = 1\text{kg}$

圆料带入 Fe 量 = $2500\text{kg} \times 0.4\% = 10\text{kg}$

圆料带入 Si 量 = $2500\text{kg} \times 0.2\% = 5\text{kg}$

圆料带入合计除 Al 以外的合金元素量 = 262.25kg

圆料带入 Al 量 = $(2500 - 262.25)\text{kg} = 2237.75\text{kg}$

7A04 板料量 = $10000\text{kg} \times 25\% = 2500\text{kg}$

板料带入 Cu 量 = $2500\text{kg} \times 1.5\% = 37.5\text{kg}$

板料带入 Mg 量 = $2500\text{kg} \times 2.2\% = 55\text{kg}$

板料带入 Mn 量 = $2500\text{kg} \times 0.3\% = 7.5\text{kg}$

板料带入 Zn 量 = $2500\text{kg} \times 6\% = 150\text{kg}$

板料带入 Cr 量 = $2500\text{kg} \times 0.15\% = 3.75\text{kg}$

板料带入 Ti 量 = $2500\text{kg} \times 0.05\% = 1.25\text{kg}$

板料带入 Fe 量 = $2500\text{kg} \times 0.45\% = 11.25\text{kg}$

板料带入 Si 量 = $2500\text{kg} \times 0.22\% = 5.5\text{kg}$

板料带入合计除 Al 以外的合金元素量 = 271.75kg

板料带入 Al 量 = $2500\text{kg} - 271.75\text{kg} = 2228.25\text{kg}$

三种炉料带入合金元素量见表 13-5。

表 13-5 三种炉料带入合金元素量

| 炉料 | 配入炉料量 /kg | 三种炉料带入合金元素量/kg | | | | | | | | |
|----------|--------------|----------------|-----|-----|-----|------|-------|------|------|---------|
| | | Cu | Mg | Mn | Zn | Cr | Fe | Si | Ti | Al |
| 重熔料 7A04 | 3000 | 36 | 51 | 9 | 150 | 3 | 12 | 6 | 1.5 | 2731.5 |
| 一级圆 7A04 | 2500 | 40 | 50 | 7.5 | 145 | 3.75 | 10 | 5 | 1 | 2237.75 |
| 一级板 7A04 | 2500 | 37.5 | 55 | 7.5 | 150 | 3.75 | 11.25 | 5.5 | 1.25 | 2228.25 |
| 合计 | 8000 | 113.5 | 156 | 24 | 445 | 10.5 | 33.25 | 16.5 | 3.75 | 7197.5 |

5) 计算熔炼 7A04 合金元素需要量与三种炉料带入合金元素量之差, 结果见表 13-6。

表 13-6 合金元素需要量与三种炉料带入合金元素量

| 合金元素 | Cu | Mg | Mn | Zn | Cr | Fe | Si | Ti | Al |
|---------------|-------|-----|----|-----|------|-------|------|------|--------|
| 目标 7A04 合金元素量 | 155 | 210 | 30 | 600 | 15 | 40 | 30 | 4 | 8916 |
| 炉料带入元素量 | 113.5 | 156 | 24 | 445 | 10.5 | 33.25 | 16.5 | 3.75 | 7197.5 |
| 元素相差量 | 41.5 | 54 | 6 | 155 | 4.5 | 6.75 | 13.5 | 0.25 | 1718.5 |

6) 计算用中间合金和新金属 (纯金属) 配齐量。熔炼的 7A04 合金中计算元素除 Al 为主要核心元素之外, 还有 Cu、Mg、Zn 三个需要合金元素多的主要元素, 应采用新金属 (纯金属) 配齐。其余元素, 如 Mn、Cr、Ti 用中间合金配入, 最后计算相差元素量, 再用新金属 (纯金属) 配足完成。

①计算中间合金量:

$$\text{Al-Mn 中间合金量} = \frac{6\text{kg}}{10.5\%} = 57.14\text{kg}$$

$$\text{Al-Cr 中间合金量} = \frac{4.5\text{kg}}{4\%} = 112.5\text{kg}$$

$$\text{Al-Ti 中间合金量} = \frac{0.25\text{kg}}{3.5\%} = 7.14\text{kg}$$

②计算由 Al-Mn 中间合金带入的合金元素量：

$$\text{Al-Mn 合金带入 Mn 量} = 57.14 \text{kg} \times 10.5\% = 5.99 = 6 \text{kg}$$

$$\text{Al-Mn 合金带入 Fe 量} = 57.14 \text{kg} \times 0.5\% = 0.285 \text{kg}$$

$$\text{Al-Mn 合金带入 Si 量} = 57.14 \text{kg} \times 0.3\% = 0.17 \text{kg}$$

$$\text{Al-Mn 合金带入 Al 量} = (57.14 - 6 - 0.28 - 0.17) \text{kg} = 50.69 \text{kg}$$

③计算由 (Al-Cr) 中间合金带入的合金元素量：

$$\text{Al-Cr 合金带入 Cr 量} = 4.5 \text{kg}$$

$$\text{Al-Cr 合金带入 Fe 量} = 112.5 \text{kg} \times 0.6\% = 0.67 \text{kg}$$

$$\text{Al-Cr 合金带入 Si 量} = 112.5 \text{kg} \times 0.3\% = 0.34 \text{kg}$$

$$\text{Al-Cr 合金带入 Al 量} = (112.5 - 4.5 - 0.67 - 0.34) \text{kg} = 107.0 \text{kg}$$

④计算由 (Al-Ti) 中间合金带入的合金元素量：

$$\text{Al-Ti 合金带入 Ti 量} = 0.25 \text{kg}$$

$$\text{Al-Ti 合金带入 Fe 量} = 7.14 \text{kg} \times 0.5\% = 0.036 \text{kg}$$

$$\text{Al-Ti 合金带入 Si 量} = 7.14 \text{kg} \times 0.4\% = 0.028 \text{kg}$$

$$\text{Al-Ti 合金带入 Al 量} = (7.14 - 0.25 - 0.036 - 0.028) \text{kg} = 6.82 \text{kg}$$

⑤计算由中间合金带入的 Fe、Si、Al 元素合计量：

$$\text{合计 Fe 量} = (0.285 + 0.67 + 0.036) \text{kg} = 0.99 \text{kg}$$

$$\text{合计 Si 量} = (0.17 + 0.34 + 0.028) \text{kg} = 0.538 \text{kg}$$

$$\text{合计 Al 量} = (50.69 + 107.0 + 6.82) \text{kg} = 164.5 \text{kg}$$

⑥计算电解铜、镁锭、锌锭、铝锭新金属配入量：

$$\text{电解铜量} = \frac{41.5 \text{kg}}{99.9\%} = 41.54 \text{kg}$$

$$\text{镁锭量} = \frac{54 \text{kg}}{99.99\%} = 54.01 \text{kg}$$

$$\text{锌锭量} = \frac{155 \text{kg}}{99.95\%} = 155.07 \text{kg}$$

$$\begin{aligned} \text{铝锭量} &= 2000 \text{kg} - (57.14 + 112.5 + 7.14) \text{kg} - (41.54 + 54.01 + 155.07) \text{kg} \\ &= 1572 \text{kg} \end{aligned}$$

计算铝锭加入量（或补铝量）也可采用各种炉料带入 Al 量之和与计算成分含 Al 量之差补加铝锭计算法。

$$\text{各炉料带入 Al 量之和} = (2731.5 + 2237.75 + 2228.25 + 164.5) \text{kg} = 7362 \text{kg}$$

$$\text{尚缺 Al 量} = \text{总铝} - \text{带入铝} = 8916 \text{kg} - 7362 \text{kg} = 1554 \text{kg}$$

$$\text{补铝锭量} = \frac{1554 \text{kg}}{99.6\%} = 1560.24 \text{kg, 取 1560kg}$$

$$\text{两种算法补铝量相差量} = (1572 - 1560) \text{kg} = 12 \text{kg}$$

7) 验算熔炼 7A04 合金成分。Cu、Mg、Zn、Mn、Al 含量, 杂质 Fe、Si 含量:

$$\text{Cu} = \frac{113.5\text{kg} + 41.5\text{kg}}{10000\text{kg}} \times 100\% = 1.55\% \text{, 与计算成分 Cu = 1.55\% 相同, 合格。}$$

$$\text{Mg} = \frac{156\text{kg} + 54.01\text{kg}}{10000\text{kg}} \times 100\% = 2.1\% \text{, 合格。}$$

$$\text{Mn} = \frac{24\text{kg} + 6\text{kg}}{10000\text{kg}} \times 100\% = 0.3\% \text{, 合格。}$$

$$\text{Zn} = \frac{445\text{kg} + 155.07\text{kg}}{10000\text{kg}} \times 100\% = 6.0\% \text{, 合格。}$$

$$\text{Al} = \frac{7197.5\text{kg} + 164.5\text{kg} + 1572\text{kg}}{10000\text{kg}} \times 100\% = 89.34\% \text{, 与计算成分相符, 合格。}$$

$$\text{Fe} = (33.25 + 0.99)\text{kg} = 34.24\text{kg} < \text{计算成分 Fe 含量 40kg, 合格。}$$

$$\text{Fe} = \frac{34.24\text{kg}}{10000\text{kg}} \times 100\% = 0.34\% < \text{计算成分 Fe}0.4\%, \text{ 合格。}$$

$$\text{Si} = (16.5 + 0.538)\text{kg} = 17.038\text{kg} < \text{计算成分 Si 含量 30kg, 合格。}$$

$$\text{Si} = \frac{17.028\text{kg}}{10000\text{kg}} \times 100\% = 0.17\% < \text{计算成分 Si}0.3\%, \text{ 合格。}$$

8) 填写配料计算结果配料单, 见表 13-7。

表 13-7 熔炼 7A04 铝合金配料计算单

| 炉料组成 | 配入量 /kg | 化学元素含量/kg | | | | | | | | |
|--------------|------------|-----------|------|--------|-----|--------|------|-------|-------|------|
| | | Al | Cu | Mg | Mn | Zn | Cr | Fe | Si | Ti |
| 7A04 重熔料 | 3000 | 2731.5 | 36 | 51 | 9.0 | 150 | 3 | 12 | 6 | 1.5 |
| 7A04 一级圆 | 2500 | 2237.75 | 40 | 50 | 7.5 | 145 | 3.75 | 10 | 5 | 1 |
| 7A04 一级板 | 2500 | 2228.25 | 37.5 | 55 | 7.5 | 150 | 3.75 | 11.25 | 5.5 | 1.25 |
| (Al-Mn) 中间合金 | 57.14 | 50.69 | — | — | 6 | — | — | 0.285 | 0.17 | — |
| (Al-Cr) 中间合金 | 112.5 | 107 | — | — | — | — | 4.5 | 0.67 | 0.34 | — |
| (Al-Ti) 中间合金 | 7.14 | 6.82 | — | — | — | — | — | 0.036 | 0.028 | 0.25 |
| 电解铜 | 41.54 | — | 41.5 | — | — | — | — | — | — | — |
| 镁锭 | 54.01 | — | — | 54.01 | — | — | — | — | — | — |
| 锌锭 | 155.07 | — | — | — | — | 155.07 | — | — | — | — |
| 铝锭 | 1572 | 1572 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 投料量合计 | 9999.4 | 8934.01 | 155 | 210.01 | 30 | 600.07 | 15 | 34.24 | 17.04 | 4 |

例 13-2 采用回炉料和中间合金熔炼 2A11 铝合金 100kg。2A11 合金炉料配比、化学成分及计算结果见表 13-8。

表 13-8 2A11 合金炉料配比、化学成分及计算结果

(续)

• 204 •

铸造合金熔炼配料计算

| 序号 | 项 目 | 总计 | 化学成分(质量分数, %) | | | | | | | | Al | |
|----|---|----|---------------|------|--------|--------|------|------|------|---------|------|-------|
| | | | Cu | Mg | Mn | 杂质含量 ≤ | | | | | | |
| | | | | | | Fe | Si | Ni | Zn | Ni + Fe | 其他 | |
| 13 | 根据主要元素取最大含量计算： $Cu = 4.3 \times 100\% / 5.6 = 76.78\%$ $Mg = 0.6 \times 100\% / 1 = 60\%$ $Mn = 0.6 \times 100\% / 0.8 = 75\%$ $Al = 93.2 \times 100\% / 95.4 = 97.69\%$ | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 14 | 从以上计算取最少回炉料数量，并取整数为 30% 配入： $100kg \times 30\% = 30kg$ ，即按 30% 配入，则 带入合金元素量： $Cu = 30\% \times 4.3\% = 1.29\%$ $Mg = 30\% \times 0.6\% = 0.18\%$ $Mn = 30\% \times 0.6\% = 0.18\%$ $Fe = 30\% \times 0.7\% = 0.21\%$ $Si = 30\% \times 0.7\% = 0.21\%$ $Ni = 30\% \times 0.1\% = 0.03\%$ $Zn = 30\% \times 0.3\% = 0.09\%$ $Ni + Fe = 30\% \times 0.7\% = 0.21\%$ 其他元素含量 = $30\% \times 0.1\% = 0.03\%$ $Al = 30\% \times 93.2\% = 27.96\%$ | 30 | 1.29 | 0.18 | 0.18 | 0.21 | 0.21 | 0.03 | 0.09 | 0.21 | 0.03 | 27.96 |
| 15 | 计算锰量之差： $0.6\% - 0.18\% = 0.42\%$ | — | — | — | (0.42) | — | — | — | — | — | — | — |

(续)

| 序号 | 项 目 | 总计 | 化学成分(质量分数, %) | | | | | | | | | Al | |
|----|--|-------|---------------|------|------|--------|-------|------|------|---------|------|-------|--|
| | | | Cu | Mg | Mn | 杂质含量 ≤ | | | | | | | |
| | | | | | | Fe | Si | Ni | Zn | Ni + Fe | 其他 | | |
| 16 | Mn 之差用(Al-Cu-Mn)中间合金补齐, Mn 的用量: $0.42 \times 100\% / 11.2 = 3.75\%$ 计算带入合金元素量: $Cu = 3.75\% \times 40.4\% = 1.5\%$ $Fe = 3.75\% \times 0.6\% = 0.02\%$ $Si = 3.75\% \times 0.4\% = 0.014\%$ $Al = 3.75\% \times 47.4\% = 1.77\%$ | 3.75 | 1.5 | — | 0.42 | 0.02 | 0.014 | — | — | — | — | 1.77 | |
| 17 | 计算铜量之差: $4.3\% - (1.29\% + 1.5\%) = 1.5\%$ | — | (1.5) | — | — | — | — | — | — | — | — | — | |
| 18 | 铜之差用(Al-Cu)中间合金补齐, 补 Cu 的用量: $1.5 \times 100\% / 50.8 = 2.95\%$, 取补加3% $Cu = 3.00\% \times 50.8\% = 1.52\%$ $Fe = 3.00\% \times 0.1\% = 0.003\%$ $Si = 3.00\% \times 0.2\% = 0.006\%$ $Al = 3.00\% \times 48.9\% = 1.46\%$ | 3.00 | 1.52 | — | — | 0.003 | 0.006 | — | — | — | — | 1.46 | |
| 19 | 计算补加金属镁(假定回炉料中的镁有40%烧损): 金属镁 = $0.6 \times 100\% / 99.8 = 0.6\%$ | 0.6 | — | 0.6 | — | — | — | — | — | — | — | — | |
| 20 | 计算补铝量, 用铝锭(质量分数: Fe0.5%、Si0.5%、Al99%): 已有 $Al = 27.96\% + 1.77\% + 1.46\% = 31.19\%$ 还少 $Al = 93.2\% - 31.19\% = 62.01\%$ 铝锭 = $62.01 \times 100\% / 99 = 62.64\%$ 带入 $Fe = 62.64\% \times 0.5\% = 0.31\%$ $Si = 62.64\% \times 0.5\% = 0.31\%$ | 62.64 | — | — | — | 0.31 | 0.31 | — | — | — | — | 62.01 | |
| 21 | 计算结果炉料成分 | 100 | 4.31 | 0.78 | 0.6 | 0.54 | 0.54 | 0.03 | 0.09 | 0.21 | 0.03 | 93.2 | |

第三节 铝合金熔炼调整成分的配料计算

在炉中熔炼过程中可能出现某合金元素含量发生变化而与配料计算成分不符的情况。所以在熔化到还原期临近熔炼合金出炉前取样快速分析合金成分最为重要，如果发现某元素分析结果未达到标准或计算成分，就要快速采取补料措施，使不足元素含量合格。如果发现某元素含量超出标准或计算成分，就要补加单一成分不含超出元素的纯金属进行冲淡措施补救，使其含量合格，这就必须进行调整成分配料计算，准确配入某合金元素量。

一、补加合金配料计算注意要点和公式

1. 补加合金配料计算应注意的要点

1) 熔炼合金成分要求严格，应先计算调整杂质成分含量，因为杂质含量会影响到合金性能，然后再调整计算其他元素含量。

2) 先计算含量少的合金元素，后计算合金含量较多元素。

3) 先用中间合金补加，后用纯金属补加。

2. 计算补料量公式

根据周家荣的《铝合金熔铸生产技术问答》一书中补料量计算公式：

$$x = \frac{(a - b)m + (c_1 + c_2 + \dots)a}{d - a} \quad (13-1)$$

式中 x ——补料量 (kg)；

a ——某元素的要求含量 (%)；

b ——该元素的炉前分析值 (%)；

m ——熔化合金总质量 (kg)；

c_1 、 c_2 ……新补加炉料的加入量 (kg)；

d ——补料用中间合金或新金属 (纯金属) 中该元素的含量 (%)。

如果生产中熔炼二元合金，补料计算公式可简化为

$$x = \frac{(a - b)m}{d - a} \quad (13-2)$$

式中各量含义与式 (13-1) 相同。

二、补加合金配料计算例题

例 13-3 熔炼铸造铝青铜 ZAlCu5Mn 合金 1000kg，中频感应炉熔炼合金到还原期即中期取样分析成分，根据取样分析成分计算确定炉料调整成分，见表 13-9。

表 13-9 合金计算成分和炉料成分 (质量分数, %)

| 合金和炉料 | Cu | Mn | Mg | Si | Fe | Cr | Zn | Ti | Al |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------|------|------|------|------|
| 标准成分 | 4.0 ~ 5.5 | 0.4 ~ 1.0 | 0.4 ~ 0.8 | 0.2 ~ 0.8 | 0.7 | 0.1 | 0.25 | 0.15 | 余量 |
| 计算成分 | 4.5 | 0.8 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.05 | 0.2 | 0.12 | 余量 |
| 取样分析成分 | 4.3 | 0.6 | 0.5 | 0.6 | 0.5 | — | — | — | 余量 |
| 成分偏差 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | — | 0.1 | — | — | — | — |
| (Al-Cu) 中间合金 | 50 | 0.35 | 0.2 | 0.4 | 0.45 | 0.1 | 0.3 | 0.1 | 余量 |
| (Al-Mn) 中间合金 | 0.2 | 10 | 0.15 | 0.4 | 0.45 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 余量 |
| (Al-Fe) 中间合金 | — | — | — | 0.5 | 10 | — | — | — | 余量 |
| 金属镁 | — | — | 99.9 | — | — | — | — | — | — |
| 铝锭 | — | — | — | — | — | — | — | — | 99.8 |
| 金属锰 | — | 99.6 | — | — | — | — | — | — | — |

由表 13-9 可知, 成分偏差 (质量分数): Cu 为 0.2%、Mn 为 0.2%、Mg 为 0.1%、Fe 为 0.1%。

1) 补杂质 Fe 用 (Al-Fe) 中间合金, 先计算用 (Al-Fe) 合金量:

$$(Al-Fe) \text{ 量} = \frac{(0.6 - 0.5) \times 1000 \text{ kg}}{10 - 0.6} = 10.638 \text{ kg}, \text{ 取 } 10.64 \text{ kg}$$

2) 计算由 (Al-Fe) 带入的合金元素量:

$$Al-Fe \text{ 合金带入 Si 量} = 10.64 \text{ kg} \times 0.5\% = 0.53 \text{ kg}$$

$$Al-Fe \text{ 合金带入 Fe 量} = 10.64 \text{ kg} \times 10\% = 1.06 \text{ kg}$$

$$Al-Fe \text{ 合金带入 Al 量} = 10.64 \text{ kg} - 0.53 \text{ kg} - 1.06 \text{ kg} = 9.05 \text{ kg}$$

3) 用 (Al-Mn) 合金补 Mn, 计算用 (Al-Mn) 合金量:

$$(Al-Mn) \text{ 量} = \frac{(0.8 - 0.6) \times 1000 + 10.64 \times 0.8}{10 - 0.8} \text{ kg} = 22.66 \text{ kg}$$

4) 计算由 (Al-Mn) 带入的合金元素量:

$$Al-Mn \text{ 合金带入 Cu 量} = 22.66 \text{ kg} \times 0.2\% = 0.045 \text{ kg}$$

$$Al-Mn \text{ 合金带入 Mn 量} = 22.66 \text{ kg} \times 10\% = 2.26 \text{ kg}$$

$$Al-Mn \text{ 合金带入 Mg 量} = 22.66 \text{ kg} \times 0.15\% = 0.034 \text{ kg}$$

$$Al-Mn \text{ 合金带入 Si 量} = 22.66 \text{ kg} \times 0.4\% = 0.09 \text{ kg}$$

$$Al-Mn \text{ 合金带入 Fe 量} = 22.66 \text{ kg} \times 0.45\% = 0.1 \text{ kg}$$

$$Al-Mn \text{ 合金带入 Cr 量} = 22.66 \text{ kg} \times 0.1\% = 0.022 \text{ kg}$$

$$Al-Mn \text{ 合金带入 Ti 量} = 22.66 \text{ kg} \times 0.1\% = 0.022 \text{ kg}$$

$$Al-Mn \text{ 合金带入 Zn 量} = 22.66 \text{ kg} \times 0.2\% = 0.045 \text{ kg}$$

Al-Mn 合金带入合计除 Al 外合金元素量 = 2.61kg

Al-Mn 合金带入 Al 量 = (22.66 - 2.61)kg = 20.05kg

5) 用 (Al-Cu) 合金补 Cu, 计算用 (Al-Cu) 合金量:

$$(Al\text{-Cu}) \text{ 量} = \frac{(4.5\text{kg} - 4.3\text{kg}) \times 1000 + (10.64\text{kg} + 22.66\text{kg}) \times 4.5}{50 - 4.5} = 7.69\text{kg}$$

6) 计算由 (Al-Cu) 带入的合金元素量:

Al-Cu 合金带入 Cu 量 = 7.69kg × 50% = 3.84kg

Al-Cu 合金带入 Mn 量 = 7.69kg × 0.35% = 0.026kg

Al-Cu 合金带入 Mg 量 = 7.69kg × 0.2% = 0.015kg

Al-Cu 合金带入 Si 量 = 7.69kg × 0.4% = 0.03kg

Al-Cu 合金带入 Fe 量 = 7.69kg × 0.45% = 0.034kg

Al-Cu 合金带入 Cr 量 = 7.69kg × 0.1% = 0.0076kg

Al-Cu 合金带入 Zn 量 = 7.69kg × 0.2% = 0.015kg

Al-Cu 合金带入 Ti 量 = 7.69kg × 0.1% = 0.0076kg

Al-Cu 合金带入合计除 Al 外合金元素量 = 3.97kg

Al-Cu 合金带入 Al 量 = (7.69 - 3.97)kg = 3.72kg

7) 校核补加配料计算后熔炼合金成分含量:

合计补加中间合金量 = (10.64 + 22.66 + 7.69)kg = 40.99kg

炉内合金量 = (1000 + 40.99)kg = 1040.99kg (未计合金烧损量)

$$Cu = \frac{1000\text{kg} \times 4.3\% + 3.84\text{kg} + 0.043\text{kg}}{1040.99\text{kg}} \times 100\% = 4.5\% \text{, 合格}$$

$$Mn = \frac{1000\text{kg} \times 0.6\% + 2.26\text{kg} + 0.026\text{kg}}{1040.99\text{kg}} \times 100\% = 0.8\% \text{, 合格}$$

$$Mg = \frac{1000\text{kg} \times 0.5\% + 0.034\text{kg} + 0.015\text{kg}}{1040.99\text{kg}} \times 100\% = 0.485\% \text{, 比计算成分少} 0.115\%$$

0.115%

应补加 Mg, 用金属镁补加, 计算补金属镁量:

$$\text{金属镁} = \frac{1040.99\text{kg} \times 0.115\%}{99.9\%} = 1.197\text{kg, 取 1.2kg}$$

Mg = 0.485% + 0.115% = 0.60%, 合格

$$Ti = \frac{1000\text{kg} \times 0.1\% + 0.022\text{kg} + 0.0076}{1040.99\text{kg}} \times 100\% = 0.098\% \approx 0.10\% \text{, 合格}$$

$$Zn = \frac{1000\text{kg} \times 0.15\% + 0.045\text{kg} + 0.015}{1040.99\text{kg}} \times 100\% = 0.02\% \text{, 合格}$$

$$Si = \frac{1000\text{kg} \times 0.6\% + 0.03\text{kg} + 0.09}{1040.99\text{kg}} \times 100\% = 0.59\% \text{, 合格}$$

$$Fe = \frac{1000kg \times 0.5\% + 1.06kg + 0.1kg + 0.034kg}{1040.99kg} \times 100\% = 0.6\% \text{, 合格}$$

Al 含量按计算成分计算。Al 含量为 92.5% ~ 94.5% , 平均 93.5% , 而炉料 Al 含量为

$$Al = \frac{1000kg \times 93.5\% + 9.05kg + 20.05kg + 3.72kg}{1040.99kg} \times 100\% = 92.5\% \text{, 合格}$$

校核计算结果除 Mg 含量少 0.115% (补加金属镁后含 Mg 为 0.6% , 合格) 外, 其余化学成分均合格。

第四节 熔炼铝合金元素含量超标用冲淡法的配料计算

一、冲淡法配料计算值得特别注意的事项

1. 熔炼铝合金当某元素含量超标时也用冲淡法计算

当某元素含量超标时采用冲淡法加纯金属或合金补救措施使成分达到合格, 但是, 由于多加入纯金属或合金会影响到原本含量合格成分, 使其发生变化或出现不合格的连锁反应, 有时要反复补加, 增加了熔炼时间, 不利于节能减排。

2. 冲淡法配料计算只能是近似计算

冲淡法配料计算只能是近似计算, 从而使元素含量接近合格, 因此熔炼合金配料计算是关键, 力求精确, 选料成分清楚, 过秤仔细, 掌握好熔炼合金工艺过程, 生产出合格优质产品。

二、冲淡法配料计算公式和例题

1. 公式

$$B = \frac{(b - a)m}{a}$$

式中 B —— 补加冲淡合金 (纯金属或合金) 量 (kg);

a —— 熔化合金计算成分 (%) ;

b —— 该原计算成分在炉前取样分析时超标含量成分 (%) ;

m —— 熔化合金总质量 (kg)。

2. 配料计算例题

例 13-4 熔炼铸造铝铜 ZAlCu4 合金 1000kg, 熔炼还原期炉前取样分析成分, 熔炼合金及炉料化学成分见表 13-10。

从计算成分与炉前分析成分偏差结果可知, Cu 含量多 0.4% , 需要冲淡降

低；Mn 含量少 0.1% 需要补加；Fe、Zn、Ti 属于杂质。

表 13-10 熔炼合金及炉料化学成分 (质量分数) (%)

| 合金 | Cu | Mn | Mg | Si | Fe | Zn | Ti | Al |
|--------------|-----------|-----------|-----------|------|-------|-------|-------|------|
| ZAlCu4 合金 | 3.8 ~ 4.5 | 0.4 ~ 0.8 | 0.4 ~ 0.8 | 0.5 | 0.5 | 0.1 | 0.15 | 余量 |
| 计算成分 | 4.2 | 0.6 | 0.6 | 0.4 | 0.4 | 0.015 | 0.10 | 余量 |
| 炉前分析成分 | 4.6 | 0.5 | 0.6 | 0.4 | 0.35 | 0.016 | 0.09 | 余量 |
| 成分偏差 | +0.4 | -0.1 | 0 | 0 | -0.05 | -0.04 | -0.01 | — |
| (Al-Mn) 中间合金 | — | 10 | — | 0.4 | 0.45 | 0.2 | — | 余量 |
| (Al-Ti) 中间合金 | — | — | — | 0.2 | 0.3 | 0.1 | 4 | 余量 |
| 金属镁锭 | — | — | 99.9 | — | — | — | — | — |
| 铝锭 | — | — | — | 0.10 | 0.15 | — | — | 99.8 |

1) 计算冲淡 Cu 含量需要冲淡合金量：

$$\text{冲淡合金量} = \frac{(4.6\% - 4.2\%) \times 1000\text{kg}}{4.2\%} = 95.23\text{kg}$$

2) 计算补加合金量 (由于多加合金使 Mn、Mg 等含量下降)。

①用 Al-Mn 中间合金补 Mn，计算 (Al-Mn) 合金量：

$$\text{Al-Mn 量} = \frac{(0.6\% - 0.5\%) \times 1000 + 95.23 \times 0.6\%}{10\% - 0.6\%} \text{kg} = 16.71\text{kg}$$

②计算由 Al-Mn 合金带入的合金含量：

$$\text{Al-Mn 合金带入 Si 量} = 16.71\text{kg} \times 0.4\% = 0.066\text{kg}$$

$$\text{Al-Mn 合金带入 Fe 量} = 16.71\text{kg} \times 0.45\% = 0.075\text{kg}$$

$$\text{Al-Mn 合金带入 Zn 量} = 16.71\text{kg} \times 0.2\% = 0.033\text{kg}$$

由于杂质中 Ti 由中间合金带入量很微量，即等于零，所以这里不计算补加 Ti。

③用 Al-Ti 中间合金补加 Ti，计算 (Al-Ti) 合金量：

$$\text{Al-Ti 量} = \frac{95.23 \times 0.1 + 16.71 \times 0.1}{4} \text{kg} = 2.8\text{kg}$$

④计算 Al-Ti 合金带入的合金量：

$$\text{Al-Ti 合金带入 Si 量} = 2.8\text{kg} \times 0.2\% = 0.0056\text{kg}$$

$$\text{Al-Ti 合金带入 Fe 量} = 2.8\text{kg} \times 0.3\% = 0.0084\text{kg}$$

$$\text{Al-Ti 合金带入 Zn 量} = 2.8\text{kg} \times 0.1\% = 0.0028\text{kg}$$

⑤用金属镁补镁，计算金属镁锭用量：

$$\text{金属镁锭} = \frac{95.23 \times 0.6}{99.9} \text{kg} = 0.57\text{kg}$$

⑥计算冲淡用铝锭量：

$$\text{铝锭量} = (95.23 - 16.71 - 2.8 - 0.57) \text{ kg} = 75.15 \text{ kg}$$

⑦计算由铝锭带入的合金量：

$$\text{铝锭带入 Si 量} = 75.15 \text{ kg} \times 0.1\% = 0.075 \text{ kg}$$

$$\text{铝锭带入 Fe 量} = 75.15 \text{ kg} \times 0.15\% = 0.11 \text{ kg}$$

3) 验算主要杂质 Si、Fe 含量：

$$\text{Si} = \frac{1000 \text{ kg} \times 0.4\% + 0.066 \text{ kg} + 0.0056 \text{ kg} + 0.075 \text{ kg}}{1095.23 \text{ kg}} \times 100\% = 0.37\%$$

$$\text{Fe} = \frac{1000 \text{ kg} \times 0.35\% + 0.075 \text{ kg} + 0.0084 \text{ kg} + 0.11 \text{ kg}}{1095.23 \text{ kg}} \times 100\% = 0.33\%$$

验算结果：杂质 Si 含量 0.37% < 计算杂质 Si 含量 0.4%，合格

杂质 Fe 含量 0.33% < 计算杂质 Fe 含量 0.4%，合格

计算数据表明冲淡配料计算正确。

第十四章 铸造镁合金和铸造锌合金熔炼的配料计算

第一节 铸造镁合金和铸造锌合金化学成分

一、铸造镁合金的牌号及化学成分（表 14-1）

表 14-1 铸造镁合金的牌号及化学成分（质量分数）（摘自 GB/T 1177—1991）

(%)

| 牌号 | 代号 | 化学成分 | | | | | | | | | | |
|-------------|------|-----------|------------|-----------|-------------|------------|-----------|----|-----|-----|------|----------|
| | | Zn | Al | Zr | RE | Mn | Ag | Mg | Si | Cu | Fe | Ni |
| ZMgZn5Zr | ZM1 | 3.5 ~ 5.5 | — | 0.5 ~ 1.0 | — | — | — | 余量 | — | 0.1 | — | 0.01 0.3 |
| ZMgZn4RE1Zr | ZM2 | 3.5 ~ 5.0 | — | 0.5 ~ 1.0 | 0.75 ~ 1.75 | — | — | 余量 | — | 0.1 | — | 0.01 0.3 |
| ZMgRE3ZnZr | ZM3 | 0.2 ~ 0.7 | — | 0.4 ~ 1.0 | 2.5 ~ 4.0 | — | — | 余量 | — | 0.1 | — | 0.01 0.3 |
| ZMgRE3Zn2Zr | ZM4 | 2.0 ~ 3.0 | — | 0.5 ~ 1.0 | 2.5 ~ 4.0 | — | — | 余量 | — | 0.1 | — | 0.01 0.3 |
| ZMgAl8Zn | ZM5 | 0.2 ~ 0.8 | 7.5 ~ 9.0 | — | — | 0.15 ~ 0.5 | — | 余量 | 0.3 | 0.2 | 0.05 | 0.01 0.3 |
| ZMgRE2ZnZr | ZM6 | 0.2 ~ 0.7 | — | 0.4 ~ 1.0 | 2.0 ~ 2.8 | — | — | 余量 | — | 0.1 | — | 0.01 0.3 |
| ZMgZn8AgZr | ZM7 | 7.5 ~ 9.0 | — | 0.5 ~ 1.0 | — | — | 0.6 ~ 1.2 | 余量 | — | 0.1 | — | 0.01 0.3 |
| ZMgAl10Zn | ZM10 | 0.6 ~ 1.2 | 9.0 ~ 10.2 | — | — | 0.1 ~ 0.5 | — | 余量 | 0.3 | 0.2 | 0.5 | 0.01 0.5 |

二、铸造锌合金牌号及化学成分 (表 14-2)

表 14-2 铸造锌合金牌号化学成分 (质量分数) (摘自 GB/T 1175—1997)

(%)

| 牌号 | 代号 | Al | Cu | Mg | Zn | Fe | Pb | Cd | Sn | 其他 | 杂质总和 |
|--------------|--------|-------------|-------------|--------------|----|-------|------------------|-------|---------|----------------------------|------|
| ZZnAl4Cu1Mg | ZA4-1 | 3.5 ~ 4.5 | 0.75 ~ 1.25 | 0.03 ~ 0.08 | 其余 | 0.10 | 0.015 | 0.005 | 0.003 | — | 0.2 |
| ZZnAl4Cu3Mg | ZA4-3 | 3.5 ~ 4.3 | 2.5 ~ 3.2 | 0.03 ~ 0.06 | 其余 | 0.075 | Pb + Cd 0.009 | | 0.002 | — | — |
| ZZnAl6Cu1 | ZA6-1 | 5.6 ~ 6.0 | 1.2 ~ 1.6 | — | 其余 | 0.075 | Pb + Cd 0.009 | | 0.002 | Mg0.005 | — |
| ZZnAl8Cu1Mg | ZA8-1 | 8.0 ~ 8.8 | 0.8 ~ 1.3 | 0.015 ~ 0.03 | 其余 | 0.075 | 0.006 | 0.006 | 0.002 | Mn0.01 Cr0.01 Ni0.01 | — |
| ZZnAl9Cu2Mg | ZA9-2 | 8.0 ~ 10.0 | 1.0 ~ 2.0 | 0.03 ~ 0.06 | 其余 | 0.2 | 0.03 | 0.02 | 0.01 | Si0.1 | — |
| ZZnAl11Cu1Mg | ZA11-1 | 10.5 ~ 11.5 | 0.5 ~ 1.2 | 0.015 ~ 0.03 | 其余 | 0.075 | 0.006 | 0.006 | 0.003 | Mn0.01 Cr0.01 Ni0.01 | — |
| ZZnAl11Cu5Mg | ZA11-5 | 10.0 ~ 12.0 | 4.0 ~ 5.5 | 0.03 ~ 0.06 | 其余 | 0.2 | 0.02 | 0.01 | Si0.015 | 0.35 | — |
| ZZnAl27Cu2Mg | ZA27-2 | 25.0 ~ 28.0 | 2.0 ~ 2.5 | 0.01 ~ 0.02 | 其余 | 0.075 | 0.006 | 0.006 | 0.003 | Mn0.01 Cr0.01 Ni0.01 | — |

第二节 铸造镁合金熔炼的配料计算

一、炉料组成

1. 新料和回炉料组成 (表 14-3)

表 14-3 新料和回炉料组成

| 炉料 | 新料 | 一级回炉料 | 二级回炉料 | 三级回炉料 |
|-------------|---------|---------|--------|--------|
| 组成比(质量分数,%) | 20 ~ 40 | 40 ~ 80 | 0 ~ 30 | 0 ~ 20 |

2. 炉料组成说明

- 1) 同时采用二级、三级回炉料时，其总和以不超过配料炉料总和的 30% (质量分数) 为宜。
- 2) 为减少回炉料中 Mg 氧化烧损 (燃烧) 量，配料中允许配入不大于炉料的 0.002% (质量分数) 的铍。
- 3) 配料中采用 Mg-Zr 中间合金的加入，可根据镁合金熔炼生产经验确定加入量，一般新料时按 7% ~ 10% (质量分数) 配入，回炉料按 3.5% ~ 5% (质量分数) 配入。

3. 铸造镁合金熔炼应特别注意镁的氧化燃烧

镁在空气中，尤其在熔融的状态下，比其他工业金属的氧化性强很多，在温度接近 500℃ 或以上时镁开始大量氧化燃烧，应特别注意安全。所以，熔炼镁合金时应防止镁合金氧化燃烧，在镁合金液表面用熔剂保护层，以防止与空气及炉气接触氧化。选择质量好的熔剂是熔炼镁合金成功的关键。

二、配料计算例题

例 14-1 工厂订货需要熔炼铸造镁合金 ZMgAl8Zn (ZM5) 合金 500kg，采用本厂回炉料和新料，熔化设备采用电阻炉。熔炼合金化学成分见表 14-4。

表 14-4 熔炼合金化学成分 (质量分数)

| ZMgAl8Zn | Zn | Al | Mn | Mg | 备注 |
|--------------|-----------|-----------|------------|---------|---------|
| 标准成分(质量分数,%) | 0.2 ~ 0.8 | 7.5 ~ 9.0 | 0.15 ~ 0.5 | 余量 | 未计算杂质含量 |
| 计算成分(质量分数,%) | 0.5 | 8 | 0.35 | (91.15) | 未计算元素烧损 |
| 各元素需要量/kg | 2.5 | 40 | 1.75 | 455.75 | 由计算结果填入 |

1) 计算熔炼 500kgZM5 各元素需要量 (配入量)：

$$\text{需要 Zn 量} = 500\text{kg} \times 0.5\% = 2.5\text{kg}$$

$$\text{需要 Al 量} = 500\text{kg} \times 8\% = 40\text{kg}$$

$$\text{需要 Mn 量} = 500\text{kg} \times 0.35\% = 1.75\text{kg}$$

$$\text{需要 Mg 量} = 500\text{kg} - (2.5 + 40 + 1.75)\text{kg} = 455.75\text{kg}$$

2) 确定炉料组成和配入量，见表 14-5。

表 14-5 炉料组成和配入量

| 炉料 | 一级回炉料 | 二级回炉料 | 三级回炉料 | 备注 |
|-------------|-------|-------|-------|---|
| 配入比(质量分数,%) | 40 | 20 | 10 | — |
| 配入量/kg | 200 | 100 | 50 | 计算法 $500\text{kg} \times 40\% = 200\text{kg}$ |

3) 确定各级回炉料主要化学成分含量, 见表 14-6。

表 14-6 各级回炉料主要化学成分 (质量分数) (%)

| 炉料 | Zn | Al | Mn | Mg | 备注 |
|-------|------|-----|-----|-------|---------|
| 一级回炉料 | 0.36 | 8 | 0.3 | 91.34 | 未计算杂质含量 |
| 二级回炉料 | 0.48 | 8.6 | 0.4 | 90.52 | — |
| 三级回炉料 | 0.40 | 8.2 | 0.4 | 91.0 | — |

4) 计算回炉料带入的各合金元素量:

$$\text{一级回炉料带入 Zn 量} = 200\text{kg} \times 0.36\% = 0.72\text{kg}$$

$$\text{一级回炉料带入 Al 量} = 200\text{kg} \times 8\% = 16\text{kg}$$

$$\text{一级回炉料带入 Mn 量} = 200\text{kg} \times 0.3\% = 0.6\text{kg}$$

$$\text{一级回炉料带入 Mg 量} = 200\text{kg} \times 91.34\% = 182.68\text{kg}$$

$$\text{二级回炉料带入 Zn 量} = 100\text{kg} \times 0.48\% = 0.48\text{kg}$$

$$\text{二级回炉料带入 Al 量} = 100\text{kg} \times 8.6\% = 8.6\text{kg}$$

$$\text{二级回炉料带入 Mn 量} = 100\text{kg} \times 0.4\% = 0.4\text{kg}$$

$$\text{二级回炉料带入 Mg 量} = 100\text{kg} \times 90.52\% = 90.52\text{kg}$$

$$\text{三级回炉料带入 Zn 量} = 50\text{kg} \times 0.4\% = 0.2\text{kg}$$

$$\text{三级回炉料带入 Al 量} = 50\text{kg} \times 8.2\% = 4.1\text{kg}$$

$$\text{三级回炉料带入 Mn 量} = 50\text{kg} \times 0.4\% = 0.2\text{kg}$$

$$\text{三级回炉料带入 Mg 量} = 50\text{kg} \times 91.0\% = 45.5\text{kg}$$

计算的各种回炉料带入的各种合金元素量汇总见表 14-7。

表 14-7 各种合金元素量汇总

| 炉料 | 合金元素量/kg | | | |
|-------|----------|------|-----|--------|
| | Zn | Al | Mn | Mg |
| 一级回炉料 | 0.72 | 16 | 0.6 | 182.68 |
| 二级回炉料 | 0.48 | 8.6 | 0.4 | 90.52 |
| 三级回炉料 | 0.2 | 4.1 | 0.2 | 45.5 |
| 合计 | 1.4 | 28.7 | 1.2 | 318.7 |

5) 计算各种合金元素的不足量:

$$\text{缺 Zn 量} = (2.5 - 1.4)\text{kg} = 1.1\text{kg}$$

$$\text{缺 Al 量} = (40 - 28.7) \text{ kg} = 11.3 \text{ kg}$$

$$\text{缺 Mn 量} = (1.75 - 1.2) \text{ kg} = 0.55 \text{ kg}$$

$$\text{缺 Mg 量} = (455.75 - 318.7) \text{ kg} = 137.05 \text{ kg}$$

6) 计算采用新金属补加量:

先计算最少的补加合金量, 采用 Al-Mn 中间合金补加, 其 Mn 含量为 10% (质量分数), Al 含量为 90% (质量分数)。

$$\text{Al-Mn 中间合金量} = \frac{0.55 \text{ kg}}{10\%} = 5.5 \text{ kg}$$

7) 计算由 Al-Mn 中间合金带入的 Mn、Al 量:

$$\text{Al-Mn 合金带入 Mn 量} = 5.5 \text{ kg} \times 10\% = 0.55 \text{ kg}$$

$$\text{Al-Mn 合金带入 Al 量} = 5.5 \text{ kg} \times 90\% = 4.95 \text{ kg}$$

8) 计算尚缺 Al 量:

$$\text{缺 Al 量} = (11.3 - 4.95) \text{ kg} = 6.35 \text{ kg}$$

9) 计算新金属补加量:

①采用锌锭补加 Zn, 计算锌锭量:

$$\text{锌锭量} = \frac{1.1 \text{ kg}}{99.95\%} = 1.101 \text{ kg}$$

②采用铝锭补 Al, 计算铝锭量:

$$\text{铝锭量} = \frac{6.35 \text{ kg}}{99.9\%} = 6.36 \text{ kg}$$

③采用镁锭补加 Mg, 计算镁锭量:

$$\text{镁锭量} = \frac{137.05 \text{ kg}}{99.95\%} = 137.12 \text{ kg}$$

10) 验算配料计算结果:

$$\text{Zn} = \frac{1.4 \text{ kg} + 1.101 \text{ kg}}{500 \text{ kg}} \times 100\% = 0.5\%$$

$$\text{Al} = \frac{28.7 \text{ kg} + 4.95 \text{ kg} + 6.36 \text{ kg}}{500 \text{ kg}} \times 100\% = 8.0\%$$

$$\text{Mn} = \frac{1.2 \text{ kg} + 0.55 \text{ kg}}{500 \text{ kg}} \times 100\% = 0.35\%$$

$$\text{Mg} = \frac{318.7 \text{ kg} + 137.12 \text{ kg}}{500 \text{ kg}} \times 100\% = 91.16\%$$

验算结果与配料计算成分相符, 说明配料计算结果正确, 可以投料熔化。

11) 熔炼 ZMgAl8Mg 合金 500kg 配料单见表 14-8。

表 14-8 熔炼 ZMgAl8Mg 合金 500kg 配料单

| 炉料组成 | 配入量 /kg | 元素含量/kg | | | | 备注 |
|--------------|------------|---------|------|------|--------|----------|
| | | Zn | Al | Mn | Mg | |
| 本厂一级回炉料 | 200 | 0.72 | 16 | 0.6 | 182.68 | 未计合金元素烧损 |
| 本厂二级回炉料 | 100 | 0.48 | 8.6 | 0.4 | 90.52 | — |
| 本厂三级回炉料 | 50 | 0.2 | 4.1 | 0.2 | 45.5 | — |
| [Al-Mn] 中间合金 | 5.5 | — | 4.95 | 0.55 | — | — |
| 锌锭 Zn99.95 | 1.101 | 1.1 | — | — | — | — |
| 铝锭 Al99.9 | 6.36 | — | 6.35 | — | — | — |
| 镁锭 Mg99.95 | 137.12 | — | — | — | 137.05 | — |
| 合计 | 500.081 | 2.5 | 40.0 | 1.75 | 455.75 | — |

注：本配料中二级、三级回炉料之和为 150kg，与 500kg 炉料之比为 30%，未大于 30%，为了减少 Mg 氧化烧损，配料中允许配入不大于 0.002%（质量分数）的铍。

例 14-2 某工厂（公司）预订货需要熔炼 ZMgZn8AgZr 铸造镁合金 300kg，采用本厂回炉料，补加料采用新金属，采用电阻炉熔炼。铸造镁合金的化学成分见表 14-9。

表 14-9 铸造镁合金化学成分（质量分数） (%)

| 合金 ZM7 | Zn | Zr | Ag | Mg | Cu | Ni | 其他杂质总和 |
|--------|---------|---------|---------|----|------|------|--------|
| 标准成分 | 7.5~9.0 | 0.5~1.0 | 0.6~1.2 | 余量 | 0.1 | 0.01 | 0.3 |
| 配入计算成分 | 8 | 0.7 | 0.6 | 余量 | 0.06 | 0.01 | 0.25 |
| 元素烧损率 | 2 | 0 | 0.5 | 3 | 0.5 | 0 | 0 |

1) 计算熔炼 ZMgZn8AgZr 合金 300kg 需要配入的合金元素量：

① 主要元素量：

$$\text{需 Zn 量} = 300\text{kg} \times 8\% = 24\text{kg}$$

$$\text{需 Zr 量} = 300\text{kg} \times 0.7\% = 2.1\text{kg}$$

$$\text{需 Ag 量} = 300\text{kg} \times 0.6\% = 1.8\text{kg}$$

$$\text{需 Mg 量} = 300\text{kg} - (24 + 2.1 + 1.8)\text{kg} = 272.1\text{kg}$$

② 杂质量：

$$\text{允许 Cu 量} = 300\text{kg} \times 0.06\% = 0.18\text{kg}$$

$$\text{允许 Ni 量} = 300\text{kg} \times 0.01\% = 0.03\text{kg}$$

$$\text{其他杂质总和} = 300\text{kg} \times 0.25\% = 0.75\text{kg}$$

2) 计入合金元素烧损率后需要配入合金元素量：

① 合金元素烧损量：

$$\text{Zn 烧损量} = 24\text{kg} \times 2\% = 0.48\text{kg}$$

$$\text{Ag 烧损量} = 1.8\text{kg} \times 0.5\% = 0.009\text{kg}, \text{取} 0.01\text{kg}$$

$$\text{Mg 烧损量} = 272.1\text{kg} \times 3\% = 8.163\text{kg}$$

②需配入各元素总量：

$$\text{需 Zn 量} = (24 + 0.48)\text{kg} = 24.48\text{kg}$$

$$\text{需 Zr 量} = 2.1\text{kg}$$

$$\text{需 Ag 量} = (1.8 + 0.01)\text{kg} = 1.81\text{kg}$$

$$\text{需 Mg 量} = (272.1 + 8.163)\text{kg} = 280.263\text{kg}$$

3) 确定炉料组配比, 见表 14-10。

表 14-10 炉料配比

| 炉料 | 一级回炉料 | 二级回炉料 | 三级回炉料 | 备注 |
|--------|-------|-------|-------|--------------|
| 配入比(%) | 50 | 20 | 10 | — |
| 配入量/kg | 150 | 60 | 30 | 按 300kg 炉料计算 |

4) 确定炉料化学成分, 见表 14-11。

表 14-11 炉料化学成分 (质量分数) (%)

| 炉料 | Zn | Zr | Ag | Mg | Cu | Ni | 杂质总和 |
|--------------|-------|-----|-------|-------|------|-------|------|
| 本厂一级回炉料 ZM7 | 8 | 0.6 | 0.7 | 90.38 | 0.06 | 0.008 | 0.26 |
| 本厂二级回炉料 ZM7 | 8.5 | 0.5 | 0.8 | 90.0 | 0.05 | — | 0.25 |
| 本厂三级回炉料 ZM1 | 5 | 0.8 | — | 93.92 | 0.08 | — | 0.20 |
| (Mg-Zr) 中间合金 | — | 30 | — | 70 | — | — | — |
| 锌锭 Zn99.95 | 99.95 | — | — | — | — | — | 0.05 |
| 银锭 Ag99.95 | — | — | 99.95 | — | — | — | 0.05 |
| 镁锭 Mg99.95 | — | — | — | 99.95 | — | — | — |

5) 计算回炉料带入的合金元素量：

①一级回炉料 ZM7 带入合金元素量：

$$\text{一级回炉料 ZM7 带入 Zn 量} = 150\text{kg} \times 8\% = 12\text{kg}$$

$$\text{一级回炉料 ZM7 带入 Zr 量} = 150\text{kg} \times 0.6\% = 0.9\text{kg}$$

$$\text{一级回炉料 ZM7 带入 Ag 量} = 150\text{kg} \times 0.7\% = 1.05\text{kg}$$

$$\text{一级回炉料 ZM7 带入 Mg 量} = 150\text{kg} \times 90.38\% = 135.57\text{kg}$$

$$\text{一级回炉料 ZM7 带入 Cu 量} = 150\text{kg} \times 0.06\% = 0.09\text{kg}$$

$$\text{一级回炉料 ZM7 带入 Ni 量} = 150\text{kg} \times 0.008\% = 0.012\text{kg}$$

$$\text{一级回炉料 ZM7 带入其他杂质总和} = 150\text{kg} \times 0.26\% = 0.39\text{kg}$$

②二级回炉料 ZM7 带入合金元素量：

$$\text{二级回炉料 ZM7 带入 Zn 量} = 60\text{kg} \times 8.5\% = 5.1\text{kg}$$

二级回炉料 ZM7 带入 Zr 量 = $60\text{kg} \times 0.5\% = 0.3\text{kg}$

二级回炉料 ZM7 带入 Ag 量 = $60\text{kg} \times 0.8\% = 0.48\text{kg}$

二级回炉料 ZM7 带入 Mg 量 = $60\text{kg} \times 90\% = 54\text{kg}$

二级回炉料 ZM7 带入 Cu 量 = $60\text{kg} \times 0.05\% = 0.03\text{kg}$

二级回炉料 ZM7 带入其他杂质总和 = $60\text{kg} \times 0.25\% = 0.15\text{kg}$

③三级回炉料 ZM1 带入合金元素量：

三级回炉料 ZM1 带入 Zn 量 = $30\text{kg} \times 5\% = 1.5\text{kg}$

三级回炉料 ZM1 带入 Zr 量 = $30\text{kg} \times 0.8\% = 0.24\text{kg}$

三级回炉料 ZM1 带入 Mg 量 = $30\text{kg} \times 93.92\% = 28.176\text{kg}$

三级回炉料 ZM1 带入 Cu 量 = $30\text{kg} \times 0.08\% = 0.024\text{kg}$

三级回炉料 ZM1 带入其他杂质总和 = $30\text{kg} \times 0.2\% = 0.06\text{kg}$

④计算回炉料带入各种合金元素之和：

合计带入 Zn 量 = $(12 + 5.1 + 1.5)\text{kg} = 18.6\text{kg}$

合计带入 Zr 量 = $(0.9 + 0.3 + 0.24)\text{kg} = 1.44\text{kg}$

合计带入 Ag 量 = $(1.05 + 0.48)\text{kg} = 1.53\text{kg}$

合计带入 Mg 量 = $(135.57 + 54 + 28.176)\text{kg} = 217.746\text{kg}$

合计带入 Cu 量 = $(0.09 + 0.03 + 0.024)\text{kg} = 0.144\text{kg} < \text{标准含量 } 0.18\text{kg}$

合计带入 Ni 量 = $0.012\text{kg} < \text{标准含量 } 0.03\text{kg}$

合计带入其他杂质总和 = $(0.039 + 0.15 + 0.06)\text{kg} = 0.249\text{kg} < \text{标准杂质总和 } 0.75\text{kg}$

6) 计算各元素配入量与炉料各元素配入量之差：

缺 Zn 量 = $(24.48 - 18.6)\text{kg} = 5.88\text{kg}$

缺 Zr 量 = $(2.1 - 1.44)\text{kg} = 0.66\text{kg}$

缺 Ag 量 = $(1.81 - 1.53)\text{kg} = 0.28\text{kg}$

缺 Mg 量 = $(280.263 - 217.746)\text{kg} = 62.517\text{kg}$

7) 计算补加各合金元素的中间合金量：

①采用 Mg-Zr 中间合金补 Zr, Mg-Zr 中间合金量：

$$\text{Mg-Zr 中间合金量} = \frac{0.66\text{kg}}{30\%} = 2.2\text{kg}$$

②计算 Mg-Zr 中间合金带入 Mg、Zr 量：

Mg-Zr 合金带入 Mg 量 = $2.2\text{kg} \times 70\% = 1.54\text{kg}$

Mg-Zr 合金带入 Zr 量 = $2.2\text{kg} \times 30\% = 0.66\text{kg}$

③采用锌锭补加 Zn 的不足，锌锭量：

$$\text{锌锭量} = \frac{5.88\text{kg}}{99.95\%} = 5.88\text{kg}$$

④采用银锭补加 Ag 的不足, 银锭量:

$$\text{银锭量} = \frac{0.28\text{kg}}{99.95\%} = 0.28\text{kg}$$

⑤采用镁锭补加 Mg 的不足, 镁锭量:

$$\text{镁锭量} = \frac{(62.517 - 1.54)\text{ kg}}{99.95\%} = 61\text{kg}$$

8) 验算

$$\text{Zn} = \frac{(18.6\text{kg} + 5.88\text{kg}) \times 98\%}{300\text{kg}} \times 100\% = 8\%$$

$$\text{Zr} = \frac{1.44\text{kg} + 0.66\text{kg}}{300\text{kg}} \times 100\% = 0.7\%$$

$$\text{Ag} = \frac{1.53\text{kg} + 0.28\text{kg}}{300\text{kg}} \times 100\% = 0.6\%$$

$$\text{Mg} = \frac{(217.746\text{kg} + 1.54\text{kg} + 61\text{kg}) \times 97\%}{300\text{kg}} \times 100\% = 90.06\%$$

验算结果符合计算成分, 说明配料计算正确。

9) 填写熔炼 ZMgZn8AgZr 合金 300kg 配料单 (卡), 见表 14-12。

表 14-12 配料单 (卡)

| 炉料组成 | 配入量/kg | 元素量/kg | | | | | | |
|------------|--------|--------|------|------|---------|-------|-------|------|
| | | Zn | Zr | Ag | Mg | Cu | Ni | 杂质总和 |
| 一级回炉料 ZM7 | 150 | 12 | 0.9 | 1.05 | 135.57 | 0.09 | 0.012 | 0.39 |
| 二级回炉料 ZM7 | 60 | 5.1 | 0.3 | 0.48 | 54 | 0.03 | — | 0.15 |
| 三级回炉料 ZM1 | 30 | 1.5 | 0.24 | — | 28.176 | 0.024 | — | 0.06 |
| Mg-Zr 中间合金 | 2.2 | — | 0.66 | — | 1.54 | — | — | — |
| 锌锭 Zn99.95 | 5.88 | 5.88 | — | — | — | — | — | — |
| 银锭 Ag99.95 | 0.28 | — | — | 0.28 | — | — | — | — |
| 镁锭 Mg99.95 | 61 | — | — | — | 61 | — | — | — |
| 合计 | 309.36 | 24.48 | 2.1 | 1.81 | 280.286 | 0.144 | 0.012 | 0.6 |

第三节 铸造锌合金熔炼的配料计算

一、铸造锌合金熔炼配料的特点

1. 铸造锌合金熔炼选用炉料组成特点

由于铸造锌合金本身对有害杂质极其敏感, 因此为保证锌合金的质量必须选

用质量好的新金属和高纯度的纯金属配料。

2. 炉料组成

炉料由纯金属、新金属、中间合金、含有害元素极少的回炉料组成，也可全部采用新金属。

3. 高纯度新金属

- 1) 锌锭，牌号为 Zn99.995、Zn99.99。
- 2) 阴极铜，牌号为 Cu-CATH-1、Cu-CATH-2。
- 3) 铝锭，牌号为 Al99.90、Al99.85。
- 4) 镁锭，牌号为 Mg9999、Mg9998、Mg9995A、Mg9995B。

二、配料计算例题

例 13-3 某公司订货合同需要熔炼 ZZnAl9Cu2Mg 铸造锌合金 300kg，采用新金属配料，采用容量 300kg 电阻炉熔炼。合金的化学成分见表 14-13。

表 14-13 合金化学成分 (质量分数) (%)

| 合 金 元 素 | Al | Cu | Mg | Zn | 备 注 |
|---------|------------|-----------|-------------|-------|--------------|
| 规定成分 | 8.0 ~ 10.0 | 1.0 ~ 2.0 | 0.03 ~ 0.06 | 其余 | 采用新金属未计算杂质含量 |
| 计算成分 | 9 | 1.5 | 0.05 | 89.45 | |

(1) 配料计算 包括元素烧损率。先计算 100kg 炉料需配入元素量，合金元素烧损率见表 14-14。

表 14-14 合金元素烧损率

| 合 金 元 素 | Al | Cu | Mg | Zn |
|----------|----|-----|----|----|
| 元素烧损率(%) | 1 | 0.5 | 15 | 3 |

$$\text{需 Al 量} = 100\text{kg} \times 9\% \times (1 + 1\%) = 9.09\text{kg}$$

$$\text{需 Cu 量} = 100\text{kg} \times 1.5\% \times (1 + 0.5\%) = 1.5075\text{kg}$$

$$\text{需 Mg 量} = 100\text{kg} \times 0.05\% \times (1 + 15\%) = 0.0575\text{kg}$$

$$\text{需 Zn 量} = 100\text{kg} \times 89.45\% \times (1 + 3\%) = 92.134\text{kg}$$

(2) 计算需要补加新金属量

1) 采用 Al-Cu 中间合金补加 Cu，中间合金成分(质量分数)：Cu50%、Al50%。

$$\text{Al-Cu 中间合金量} = \frac{1.5075\text{kg}}{50\%} = 3.015\text{kg}$$

2) 计算由 Al-Cu 中间合金带入的合金元素量：

$$\text{Al-Cu 合金带入 Al 量} = 3.015\text{kg} \times 50\% = 1.5075\text{kg}$$

$$\text{Al-Cu 合金带入 Cu 量} = 3.015\text{kg} \times 50\% = 1.5075\text{kg}$$

$$\text{补加 Al-Cu 中间合金后尚缺 Al 量} = (9.09 - 1.5075)\text{kg} = 7.58\text{kg}$$

3) 采用铝锭补加 Al, 计算铝锭量:

$$\text{铝锭量} = \frac{7.58\text{kg}}{99.9\%} = 7.59\text{kg}$$

4) 采用镁锭补加 Mg, 计算镁锭量

$$\text{镁锭量} = \frac{0.0575\text{kg}}{99.95\%} = 0.0575\text{kg}$$

5) 采用锌锭补加 Zn, 计算锌锭量:

$$\text{锌锭量} = \frac{92.134\text{kg}}{99.95\%} = 92.18\text{kg}$$

$$\text{合计新金属炉料量} = (3.015 + 7.59 + 0.0575 + 92.18)\text{kg} = 102.84\text{kg}$$

(3) 熔炼 300kg 补加的新金属量 应是前面计算 100kg 熔液补加量的 3 倍。

$$1) \text{Al-Cu 中间合金量} = 3.015\text{kg} \times 3 = 9.045\text{kg}$$

$$2) \text{铝锭量} = 7.59\text{kg} \times 3 = 22.77\text{kg}$$

$$3) \text{镁锭量} = 0.0575\text{kg} \times 3 = 0.173\text{kg}$$

$$4) \text{锌锭量} = 92.18\text{kg} \times 3 = 276.54\text{kg}$$

$$\text{合计炉料量} = 308.53\text{kg}$$

(4) 配料记录单 熔炼 ZnAl9Cu2Mg 铸造锌合金 300kg 配料记录单如下:

配用新金属炉料:

| | |
|-----------------------------|----------|
| Al-Cu 中间合金 (Cu50%, Al50%) 量 | 9.045kg |
| 铝锭 Al99.9 量 | 22.77kg |
| 镁锭 Mg99.95 量 | 0.173kg |
| 锌锭 Zn99.95 量 | 276.54kg |
| 装料量 | 308.53kg |

例 13-4 某公司熔炼 ZnAl11Cu5Mg 合金 500kg, 浇注铸件, 采用本厂炉料 ZnAl11Cu5Mg 合金切屑重熔锭 30% 配料, 其余为新金属补加配料, 采用电阻炉熔炼。合金化学成分见表 14-15, 炉料化学成分见表 14-16。

表 14-15 合金化学成分 (质量分数) (%)

| 熔炼合金 | Al | Cu | Mg | Zn | Fe | Pb | Cd | Sn | 其他 | 杂质总和 |
|-------|-------------|-----------|-------------|------|-----|------|------|----|------|------|
| 标准成分 | 10.0 ~ 12.0 | 4.0 ~ 5.0 | 0.03 ~ 0.06 | 其余 | 0.2 | 0.02 | 0.01 | — | 0.35 | — |
| 计算成分 | 11 | 4.5 | 0.04 | 84.1 | 0.2 | — | — | — | 0.3 | — |
| 元素烧损率 | 1 | 0.5 | 15 | 3 | 0 | — | — | — | 0 | — |

表 14-16 炉料化学成分 (质量分数) (%)

| 炉料组成 | Al | Cu | Mg | Zn | Fe | Pb | 其他 | 杂质总和 |
|--------------------|------|----|-------|-------|------|----|------|------|
| ZZnAl11Cu5Mg 切屑重熔锭 | 11 | 5 | 0.05 | 82.7 | 0.2 | — | 0.25 | — |
| Al-Cu 中间合金 | 50 | 50 | — | — | — | — | — | — |
| 铝锭 | 99.9 | — | — | — | 0.07 | — | — | 0.1 |
| 镁锭 | — | — | 99.95 | — | — | — | — | — |
| 锌锭 | — | — | — | 99.99 | — | — | — | 0.01 |

1) 配料计算熔炼 ZZnAl11Cu5Mg 合金 500kg 包括元素烧损配入合金元素量:

$$\text{需 Al 量} = 500\text{kg} \times 11\% \times (1 + 1\%) = 55.55\text{kg}$$

$$\text{需 Cu 量} = 500\text{kg} \times 4.5\% \times (1 + 0.5\%) = 22.613\text{kg}$$

$$\text{需 Mg 量} = 500\text{kg} \times 0.04\% \times (1 + 15\%) = 0.23\text{kg}$$

$$\text{需 Zn 量} = 500\text{kg} \times 84.1\% \times (1 + 3\%) = 433.115\text{kg}$$

$$\text{允许 Fe 量} = 500\text{kg} \times 0.2\% = 1\text{kg}$$

$$\text{允许其他杂质质量} = 500\text{kg} \times 0.3\% = 1.5\text{kg}$$

2) 计算配入切屑重熔锭含杂质 Fe0.2%，按 30% 比例配入，计算带入 Fe 量:

$$\text{切屑重熔锭量} = 500\text{kg} \times 30\% = 150\text{kg}$$

$$\text{①带入杂质 Fe 量} = 150\text{kg} \times 0.2\% = 0.3\text{kg}$$

$$\text{带入其他杂质质量} = 150\text{kg} \times 0.25\% = 0.375\text{kg}$$

杂质 Fe 占 500kg 炉料之比 $= \frac{0.3\text{kg}}{500\text{kg}} \times 100\% = 0.06\% < 0.2\%$ 标准 Fe 含量，合

格。

$$\text{②带入 Al 量} = 150\text{kg} \times 11\% = 16.5\text{kg}$$

$$\text{③带入 Cu 量} = 150\text{kg} \times 5\% = 7.5\text{kg}$$

$$\text{④带入 Mg 量} = 150\text{kg} \times 0.05\% = 0.075\text{kg}$$

$$\text{⑤带入 Zn 量} = 150\text{kg} \times 82.7\% = 124.05\text{kg}$$

3) 计算合金元素应配入量与 ZZnAl11Cu5Mg 炉料带入合金元素量之差:

$$\text{缺 Al 量} = (55.55 - 16.5)\text{kg} = 39.05\text{kg}$$

$$\text{缺 Cu 量} = (22.613 - 7.5)\text{kg} = 15.113\text{kg}$$

$$\text{缺 Mg 量} = (0.23 - 0.075)\text{kg} = 0.155\text{kg}$$

$$\text{缺 Zn 量} = (433.115 - 124.05)\text{kg} = 309.065\text{kg}$$

4) 计算用中间合金和新金属补加元素不足量:

①先计算补加 Cu 量，采用 Al-Cu 中间合金，成分 (质量分数) Cu50%、Al50%。

$$\text{Al-Cu 中间合金量} = \frac{15.113\text{kg}}{50\%} = 30.23\text{kg}$$

②计算由中间合金带入 Al 量：

$$\text{Al-Cu 合金带入 Al 量} = 30.23\text{kg} \times 50\% = 15.115\text{kg}$$

$$\text{尚缺 Al 量} = (39.05 - 15.115)\text{kg} = 23.935\text{kg}$$

③用铝锭补加 Al，计算铝锭量：

$$\text{铝锭量} = \frac{23.935\text{kg}}{99.9\%} = 23.96\text{kg}$$

④用镁锭补加 Mg，计算镁锭量：

$$\text{镁锭量} = \frac{0.155\text{kg}}{99.95\%} = 0.155\text{kg}$$

⑤用锌锭补加 Zn，计算锌锭量：

$$\text{锌锭量} = \frac{309.065\text{kg}}{99.99\%} = 309.0959\text{kg, 取 309.1kg}$$

5) 计算合计炉料量：

$$\text{合计炉料量} = (150 + 30.23 + 23.96 + 0.155 + 309.1)\text{kg} = 513.445\text{kg}$$

6) 熔炼 ZZnAl11Cu5Mg 合金 500kg 炉料配料单：

| | |
|----------------------|-----------|
| ①ZZnAl11Cu5Mg 切屑重熔锭量 | 150kg |
| ②Al-Cu 中间合金量 | 30.23kg |
| ③铝锭量 | 23.96kg |
| ④镁锭量 | 0.155kg |
| ⑤锌锭量 | 309.1kg |
| 合计装料量 | 513.445kg |

第十五章 铸造钛合金熔炼的配料计算

第一节 铸造钛合金熔炼特点

一、钛密度低、熔点高，化学活泼性强

1) 钛在 20°C 时密度为 4.5g/cm^3 ，熔点为 1690°C，钛的沸点为 $(3260 \pm 20)\text{°C}$ 。钛合金强度高，无磁性，耐磨、耐腐蚀。钛合金和铸件多应用在航空、航天、航海、军工国防、石油化工、仪表、医疗器械等高科技领域。钛在地壳中储量极其丰富，但由于钛在熔融状态下的化学活泼性很强，几乎能与所有耐火材料发生反应，导致钛合金熔炼很困难。据资料介绍，直到 20 世纪 60 年代由美国矿业局研究出真空电弧凝壳熔炼法，才使钛铸件得到迅速发展。

2) 由于钛化学活泼性强，除能与耐火材料反应外，还与氧、氢、氮等气体发生反应，使钛金属可塑性严重降低。因此，熔化钛合金设备很特殊，必须用真空自耗电极电弧凝壳炉熔炼，同时必须在一定的真空和惰性气体保护下在强制冷却坩埚中进行钛合金铸件浇注。铸型应事先预制好放在真空炉内。

二、铸造钛和铸造钛合金

- 1) 铸造钛铸件是指用工业纯钛熔化浇注的钛锭和钛铸件。
- 2) 铸造钛合金铸件是指用工业纯钛为合金基体，参配其他合金元素熔炼浇注的钛合金锭和钛合金铸件。熔炼过程中不能取样分析合金成分，配料计算一定要精确，可以不计算元素烧损。
- 3) 为了克服石墨坩埚对钛金属熔液的污染，现在用真空自耗电极电弧凝壳炉熔炼法，生产出优质的钛锭和钛合金铸件。

第二节 铸造钛合金的化学成分和配料计算

一、铸造钛及钛合金的化学成分（表 15-1）

铸造钛（纯钛）与钛合金一般按退火状态下的金相组成为 α 合金（近 α 合金）、 $\alpha + \beta$ 合金、 β 合金三种类型，其化学成分见表 15-1。

表 15-1 铸造钛及钛合金化学成分

| 铸造钛及钛合金 | | 化学成分(质量分数, %) | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-------|---------------|-------------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|------|------|------|------|-------|------|------|------|
| | | 主要成分 | | | | | | | | 杂质 ≤ | | | | | | | | |
| 牌号 | 代号 | Ti | Al | Sn | Mo | V | Zr | Nb | Ni | Pb | Fe | Si | C | N | H | O | 其他元素 | |
| | | 单个 | 总和 | | | | | | | | | | | | | | | |
| ZTi1 | ZTA1 | 余量 | — | — | — | — | — | — | — | — | 0.25 | 0.10 | 0.10 | 0.03 | 0.015 | 0.25 | 0.10 | 0.40 |
| ZTi2 | ZTA2 | 余量 | — | — | — | — | — | — | — | — | 0.30 | 0.15 | 0.10 | 0.05 | 0.015 | 0.35 | 0.10 | 0.40 |
| ZTi3 | ZTA3 | 余量 | — | — | — | — | — | — | — | — | 0.40 | 0.15 | 0.10 | 0.05 | 0.015 | 0.40 | 0.10 | 0.40 |
| ZTiAl4 | ZTA5 | 余量 | 3.3 ~ 4.7 | — | — | — | — | — | — | — | 0.30 | 0.15 | 0.10 | 0.04 | 0.015 | 0.20 | 0.10 | 0.40 |
| ZTiAl5Sn2.5 | ZTA7 | 余量 | 4.0 ~ 6.0 | 2.0 ~ 3.0 | — | — | — | — | — | — | 0.50 | 0.15 | 0.10 | 0.05 | 0.015 | 0.20 | 0.10 | 0.40 |
| ZTiPd0.2 | ZTA9 | 余量 | — | — | — | — | — | — | — | 0.12 ~ 0.25 | 0.25 | 0.10 | 0.10 | 0.05 | 0.015 | 0.40 | 0.10 | 0.40 |
| ZTiMo0.3Ni0.8 | ZTA10 | 余量 | — | — | 0.2 ~ 0.4 | — | — | — | 0.6 ~ 0.9 | — | 0.30 | 0.10 | 0.10 | 0.05 | 0.015 | 0.25 | 0.10 | 0.40 |
| ZTiAl6Zr2Mo1V1 | ZTA15 | 余量 | 5.5 ~ 7.0 | — | 0.5 ~ 2.0 | 0.8 ~ 2.5 | 1.5 ~ 2.5 | — | — | — | 0.30 | 0.15 | 0.10 | 0.05 | 0.015 | 0.20 | 0.10 | 0.40 |
| ZTiAl4V2 | ZTA17 | 余量 | 3.5 ~ 4.5 | — | — | 1.5 ~ 3.0 | — | — | — | — | 0.25 | 0.15 | 0.10 | 0.05 | 0.015 | 0.20 | 0.10 | 0.40 |
| ZTiMo32 | ZTB32 | 余量 | — | — | 30.0 ~ 34.0 | — | — | — | — | — | 0.30 | 0.15 | 0.10 | 0.05 | 0.015 | 0.15 | 0.10 | 0.40 |
| ZTiAl6V4 | ZTC4 | 余量 | 5.50 ~ 6.75 | — | — | 3.5 ~ 4.5 | — | — | — | — | 0.40 | 0.15 | 0.10 | 0.05 | 0.015 | 0.25 | 0.10 | 0.40 |
| ZTiAl6Sn4.5 Nb2Mo1.5 | ZTC21 | 余量 | 5.5 ~ 6.5 | 4.0 ~ 5.0 | 1.0 ~ 2.0 | — | — | 1.5 ~ 2.0 | — | — | 0.30 | 0.15 | 0.10 | 0.05 | 0.015 | 0.20 | 0.10 | 0.40 |

注: 1. 其他元素是指钛及钛合金铸件生产过程中固有存在的微量元素, 一般包括 Al、V、Sn、Mo、Cr、Mn、Zr、Ni、Cu、Si、Nb、Y 等 (该牌号中含有合金元素应除去)。

2. 其他元素单个含量和总量只有在需方有要求时才考虑分析。

二、铸造钛合金熔炼配料计算及炉料组成

1. 熔炼钛合金炉料组成

熔炼钛合金炉料中不得混入其他有色金属废料，炉料必须由钛合金废料、回炉料、钛合金熔炼用的中间合金和新金属组成。

2. 钛合金回炉料的分类、用途和炉料处理（表 15-2）

表 15-2 钛合金回炉料的分类、用途和炉料处理

| 分类 | 组成 | 用 途 | 炉 料 处 理 |
|-----------|-------------------------|--|---|
| 块状将废料切成小块 | 废钛合金铸件、浇道、冒口，以及钛铸锭切头、残头 | 切成小块炉料作为凝壳炉熔炼时炉料的组成部分，添加量不超过炉料质量的 8%。用氩弧焊焊成自耗电极，再在真空自耗炉内重熔铸锭 | 炉料表面有氧化严重要经过喷砂，且酸洗干净 放在坩埚底的炉料需加工平整，防止起弧时烧穿坩埚 自耗电极长度和直径应符合要求 |
| 屑状 | 加工钛合金切屑 | 将切屑经液压机制成电极块，为加强电极块之间的连接，用钛金属板条焊成电极块侧边加固。用作自耗电极熔炼成铸锭 | 切屑炉料表面有氧化、油污切屑、应经过酸洗、水洗，干燥处理后才能用作炉料 |

第三节 铸造钛合金熔炼配料计算例题

一、电极块和钛合金配料要求

1) 钛合金电极块配料用的海绵钛，根据铸锭要求和铸件力学性能要求，选用国家标准不同级别的海绵钛配料。

2) 合金添加元素（配入元素），一般按熔炼合金标准成分上限值配料计算，当配入金属元素为海绵钛中所含有的杂质元素时，应扣除该元素的含量后计算配料用量。

二、真空自耗电极块配料计算

例 15-1 真空自耗电极块钛合金采用 ZTiAl6V4 (ZTC4) 合金，采用海绵钛，铝钒中间合金和纯铝配料。采用纯铝箔包制成合金包。合金的化学成分见表 15-3。

1) 计算钛合金电极块的质量。钛合金电极块为 ZTC4 电极块，直径为 10cm、半径 $r = 5\text{cm}$ 、长度 $L = 20\text{cm}$ 的圆柱体，ZTC4 合金密度为 $\rho = 3.2\text{ g/cm}^3$ 。

表 15-3 合金的化学成分 (质量分数)

| 钛合金 | 主 要 成 分 | | | 备 注 |
|---------|---------|-----------|-----------|-------|
| | Ti | Al | V | |
| 标准成分(%) | 余量 | 5.0 ~ 6.8 | 3.5 ~ 4.5 | 未计算杂质 |
| 计算成分(%) | 余量 | 6 | 4.5 | |

$$\begin{aligned}
 \text{电极块质量 } m &= \pi r^2 L \rho \\
 &= 3.14 \times 25 \text{cm}^2 \times 20 \text{cm} \times 3.2 \text{g/cm}^3 \\
 &= 5024 \text{g}
 \end{aligned}$$

2) 计算 ZTiAl6V4 (ZTC4) 合金 5024g 应配入的 Al、V、Ti 量:

$$\text{需 Al 量} = 5024 \text{g} \times 6\% = 301.44 \text{g}$$

$$\text{需 V 量} = 5024 \text{g} \times 4.5\% = 226.08 \text{g}$$

$$\text{需 Ti 量} = (5024 - 301.44 - 226.08) \text{g} = 4496.48 \text{g}$$

3) 采用 Al-V 中间合金 (质量分数: Al50%、V50%) 补加 Al、V, 计算 Al-V 中间合金配入量, 先计算补 V 量:

$$\text{Al-V 中间合金量} = \frac{226.08 \text{g}}{50\%} = 452.16 \text{g}$$

4) 计算由 Al-V 中间合金带入的 Al 量:

$$\text{Al-V 合金带入 Al 量} = 452.16 \text{g} \times 50\% = 226.08 \text{g}$$

5) 计算 Al 应配入量与由 Al-V 中间合金带入 Al 量之差:

$$\text{缺 Al 量} = (301.44 - 226.08) \text{g} = 75.36 \text{g}$$

6) 采用纯铝补 Al 量之差, 计算纯铝锭补加量 (质量分数: Al99.9%):

$$\text{纯铝锭量} = \frac{75.36 \text{g}}{99.9\%} = 75.43 \text{g} \text{ (包括用铝箔包重量)}$$

7) 配料计算海绵钛配入量:

$$\text{海绵钛量} = (5024 - 452.16 - 75.43) \text{g} = 4496.41 \text{g}$$

8) 配料计算结果:

$$\text{海绵钛量} = 4496.41 \text{g}$$

$$\text{纯铝锭包括铝箔包量} = 75.43 \text{g}$$

$$\text{Al-V 中间合金量} = 452.16 \text{g}$$

熔炼完成后, 按电极块压制工艺制成电极块即可。

三、铸造钛合金熔炼配料计算, 生产钛合金铸件例题

1. 铸造钛合金 ZTiAl5Sn2.5 熔炼配料计算

例 15-2 熔炼 ZTA7 合金 10000g, 浇注航空铸件。采用海绵钛、Al-Sn 中间

合金、纯铝和铝箔配料，采用真空自耗电弧凝壳炉熔炼。合金化学成分见表 15-4，配料用炉料组成和化学成分见表 15-5。

表 15-4 合金化学成分 (质量分数)

| ZTA7 | 主要元素 | | | 杂质含量 ≤ | | | | | |
|---------|------|---------|---------|--------|------|-----|-------|-----|--------|
| | Ti | Al | Sn | Fe | Si | C | N | O | 其他杂质总和 |
| 标准成分(%) | 余量 | 4.0~6.0 | 2.0~3.0 | 0.5 | 0.15 | 0.1 | 0.015 | 0.2 | 0.4 |
| 计算成分(%) | 余量 | 5 | 2.5 | 0.4 | 0.15 | 0.1 | 0.015 | 0.2 | 0.4 |

表 15-5 配料用炉料组成和化学成分 (质量分数) (%)

| 炉料组成 | 主要元素 | | | 杂质 | | | | | | |
|------------|------|------|----|-----------------|------|------|------|-------|------|--------|
| | Ti | Al | Sn | Fe | Si | C | N | H | O | 其他杂质总和 |
| Al-Sn 中间合金 | — | 55 | 45 | (Fe + Si) ≤ 0.3 | — | — | — | — | — | — |
| 纯铝锭 | — | 99.9 | — | 0.07 | 0.05 | — | — | — | — | 0.1 |
| 海绵钛 0 级 | 99.7 | — | — | 0.06 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.005 | 0.06 | — |

1) 熔炼 ZTA7 铸造钛合金 10000g, 按计算成分计算应配入合金元素量。

① 主要元素量:

$$\text{需 Al 量} = 10000g \times 5\% = 500g$$

$$\text{需 Sn 量} = 10000g \times 2.5\% = 250g$$

$$\text{需 Ti 量} = 10000g - (500 + 250)g = 9250g$$

② 杂质元素量:

$$\text{杂质 Fe 量} = 10000g \times 0.4\% = 40g$$

$$\text{杂质 Si 量} = 10000g \times 0.15\% = 15g$$

$$\text{杂质 C 量} = 10000g \times 0.1\% = 10g$$

$$\text{杂质 N 量} = 10000g \times 0.015\% = 1.5g$$

$$\text{杂质 O 量} = 10000g \times 0.2\% = 20g$$

$$\text{合计杂质元素量} = 86.5g$$

$$\text{其他杂质总量} = 10000g \times 0.4\% = 40g$$

2) 采用 Al-Sn 中间合金补加 Sn, 计算 Al-Sn 中间合金配入量:

$$\text{Al-Sn 中间合金量} = \frac{250g}{45\%} = 555.5g$$

3) 计算由 Al-Sn 中间合金带入 Al 量和杂质量:

$$\text{Al-Sn 合金带入 Al 量} = 555.5g \times 55\% = 305.5g$$

$$\text{Al-Sn 合金带入杂质 (Fe + Si) 量} = 305.5g \times 0.3\% = 0.916g$$

4) 计算应配入 Al 量与补加 (带入) Al 量之差:

$$\text{尚缺 Al 量} = (500 - 305.5) \text{ g} = 194.5 \text{ g}$$

5) 采用纯铝锭补加不足 Al 量, 计算铝锭量:

$$\text{纯铝锭量} = \frac{194.5 \text{ g}}{99.9\%} = 194.69 \text{ g}$$

6) 计算由纯铝锭带入杂质量:

$$\text{纯铝锭带入 Fe 量} = 194.69 \text{ g} \times 0.07\% = 0.136 \text{ g}$$

$$\text{纯铝锭带入 Si 量} = 194.69 \text{ g} \times 0.05\% = 0.097 \text{ g}$$

7) 计算海绵钛补加量:

$$\text{补 Ti 量} = 10000 \text{ g} - (555.5 + 194.69) \text{ g} = 9249.81 \text{ g}$$

8) 计算由海绵钛带入的杂质量:

$$\text{海绵钛带入 Fe 量} = 9249.81 \text{ g} \times 0.06\% = 5.55 \text{ g}$$

$$\text{海绵钛带入 Si 量} = 9249.81 \text{ g} \times 0.02\% = 1.85 \text{ g}$$

$$\text{海绵钛带入 C 量} = 9249.81 \text{ g} \times 0.02\% = 1.85 \text{ g}$$

$$\text{海绵钛带入合计杂质量} = (5.55 + 1.85 + 1.85) \text{ g} = 9.25 \text{ g}$$

9) 应将杂质扣除补加海绵钛, 实际补加海绵钛量:

$$\text{实际补加海绵钛量} = (9249.81 + 9.25) \text{ g} = 9259.06 \text{ g}$$

10) 核算杂质:

$$\text{杂质 Fe 量} = (0.916 + 0.136 + 5.55) \text{ g} = 6.60 \text{ g} < 40 \text{ g}, \text{ 合格}$$

$$\text{杂质 Si 量} = (0.916 + 0.097 + 1.85) \text{ g} = 2.86 \text{ g} < 15 \text{ g}, \text{ 合格}$$

$$\text{合计杂质} = (6.60 + 2.86 + 1.85) \text{ g} = 11.31 \text{ g} < 65 \text{ g}, \text{ 合格}$$

11) 炉料清单:

| | |
|-----------------------------|------------|
| Al-Sn 中间合金 (Al55%, Sn45%) 量 | 555.5 g |
| 纯铝锭 (Al99.9%) 包括铝箔包量 | 194.69 g |
| 海绵钛 0 级 (Ti99.7%) 量 | 9259.06 g |
| 合计炉料量 | 10009.25 g |

2. 铸造钛合金 ZTiAl6Zr2Mo1V1 熔炼配料计算

例 15-3 熔炼 ZTiAl6Zr2Mo1V1 合金 10000g, 浇注航空发动机铸件, 采用海绵钛、纯铝 (包括铝箔)、Al-V 和 Ti-Mo 中间合金、纯锆配料, 合金应经过三次真空自耗电极电弧炉熔炼, 再在真空自耗电极电弧凝壳炉中熔炼后浇注铸件。合金化学成分见表 15-6, 配料用炉料组成和化学成分见表 15-7。

1) 熔炼铸造钛合金 10000g, 按计算成分计算应配入合金元素量:

$$\text{需 Al 量} = 10000 \text{ g} \times 6\% = 600 \text{ g}$$

$$\text{需 V 量} = 10000 \text{ g} \times 2.4\% = 240 \text{ g}$$

表 15-6 合金化学成分 (质量分数) (%)

| 铸造钛合金 | 主要元素 | | | | | 杂质含量 ≤ | | | | | | | |
|-------|--------------|--------------|--------------|--------------|----|--------|------|------|------|------|------|------|-----|
| | Al | V | Zr | Mo | Ti | Fe | Si | C | N | H | O | 其他元素 | |
| | 单个 | 总和 | | | | | | | | | | | |
| 控制成分 | 5.5 ~ 6.8 | 0.8 ~ 2.5 | 1.5 ~ 2.5 | 0.5 ~ 2.0 | 余量 | 0.3 | 0.15 | 0.13 | 0.05 | 0.01 | 0.16 | 0.10 | 0.3 |
| 计算成分 | 6 | 2.4 | 2.3 | 1.7 | 余量 | — | — | — | — | — | — | — | — |

表 15-7 配料用炉料组成和化学成分 (质量分数) (%)

| 炉料组成 | Al | V | Zr | Mo | Ti | 备 注 |
|------------|------|----|-------|----|------|-------|
| Al-V 中间合金 | 50 | 50 | — | — | — | 未计算杂质 |
| Ti-Mo 中间合金 | — | — | — | 40 | 60 | |
| 纯铝包括铝箔 | 99.9 | — | — | — | — | |
| 纯锆 | — | — | 99.98 | — | — | |
| 海绵钛 | — | — | — | — | 99.7 | |

$$\text{需 Zr 量} = 10000\text{g} \times 2.3\% = 230\text{g}$$

$$\text{需 Mo 量} = 10000\text{g} \times 1.7\% = 170\text{g}$$

2) 采用 Al-V 中间合金 (质量分数: Al50%、V50%) 补 V, 计算中间合金量:

$$\text{Al-V 中间合金量} = \frac{240\text{g}}{50\%} = 480\text{g}$$

3) 计算由 Al-V 中间合金带入 Al 量:

$$\text{Al-V 合金带入 Al 量} = 480\text{g} \times 50\% = 240\text{g}$$

4) 计算采用 (Ti-Mo) 中间合金 (质量分数: Mo40%、Ti60%) 补 Mo, 计算中间合金量:

$$\text{Ti-Mo 中间合金量} = \frac{170\text{g}}{40\%} = 425\text{g}$$

5) 计算由 Ti-Mo 中间合金带入 Ti 量:

$$\text{Ti-Mo 合金带入 Ti 量} = 425\text{g} \times 60\% = 255\text{g}$$

6) 计算应配入 Al 量与带入 Al 量之差, 即尚缺 Al 量:

$$\text{尚缺 Al 量} = (600 - 240)\text{g} = 360\text{g}$$

7) 采用纯铝补加不足 Al, 计算纯铝量

$$\text{纯铝量} = \frac{360\text{g}}{99.9\%} = 360.36\text{g, 包括铝箔}$$

8) 计算用纯锆补 Zr 量:

$$\text{纯锆量} = \frac{230\text{g}}{99.98\%} = 230.046\text{g, 取 230g}$$

9) 计算海绵钛的配入量:

$$\text{海绵钛量} = 10000\text{g} - (480 + 425 + 360.36 + 230)\text{g} = 8504.64\text{g}$$

10) 炉料清单:

| | |
|----------------------------|----------|
| Al-V 中间合金 (Al50%、V50%) 量 | 480g |
| Ti-Mo 中间合金 (Ti60%、Mo40%) 量 | 425g |
| 纯铝 (Al99.9%) 包括铝箔量 | 360.36g |
| 纯锆 (Zr99.98%) 量 | 230g |
| 海绵钛 (Ti99.7%) 量 | 8504.64g |
| 合计炉料量 | 10000g |

3. 铸造钛合金 ZTiAl6Sn4.5Nb2Mo1.5 熔炼配料计算

例 15-4 熔炼 ZTiAl6Sn4.5Nb2Mo1.5 (ZTC21) 铸造钛合金 10000g, 浇注军工武器铸件, 采用海绵钛、Al-Sn 和 Al-Mo 中间合金、纯铌、纯铝配料。采用 ZHN-20 真空自耗电极电弧凝壳炉熔炼浇注铸件。合金化学成分见表 15-8, 炉料组成和化学成分见表 15-9。

表 15-8 合金化学成分 (质量分数) (%)

| ZTC21 合金 | 主要成分 | | | | | | 杂质含量 ≤ | | | | | 其他元素 | |
|----------|------|--------------|--------------|--------------|--------------|------|--------|------|------|-------|-----|------|-----|
| | Ti | Al | Sn | Mo | Nb | Fe | Si | C | N | H | O | 单个 | 总和 |
| | | | | | | | | | | | | | |
| 标准成分 | 余量 | 5.5 ~ 6.5 | 4.0 ~ 5.0 | 1.0 ~ 2.0 | 1.5 ~ 2.0 | 0.3 | 0.15 | 0.10 | 0.05 | 0.015 | 0.2 | 0.10 | 0.4 |
| 计算成分 | 余量 | 6 | 4.5 | 1.5 | 2 | 0.25 | 0.12 | 0.10 | — | — | — | — | 0.3 |

表 15-9 炉料组成和化学成分 (质量分数) (%)

| 炉料组成 | Al | Sn | Mo | Nb | Tl | Fe | Si | C |
|------------|------|----|----|-------|------|-----------------|-------|-------|
| Al-Sn 中间合金 | 30 | 70 | — | — | — | (Fe + Si) ≤ 0.3 | — | — |
| Al-Mo 中间合金 | 50 | — | 50 | — | — | ≤ 0.3 | ≤ 0.3 | ≤ 0.1 |
| 纯铝、铝箔 | 99.9 | — | — | — | — | 0.07 | 0.05 | — |
| 纯铌 | — | — | — | 99.95 | — | — | — | — |
| 海绵钛 | — | — | — | — | 99.7 | 0.06 | 0.02 | 0.02 |

1) 熔炼 ZTC21 合金 10000g, 按计算成分计算应配入合金元素量:

① 主要元素量:

$$\text{Al 量} = 10000 \text{g} \times 6\% = 600 \text{g}$$

$$\text{Sn 量} = 10000 \text{g} \times 4.5\% = 450 \text{g}$$

$$\text{Mo 量} = 10000 \text{g} \times 1.5\% = 150 \text{g}$$

$$\text{Nb 量} = 10000 \text{g} \times 2\% = 200 \text{g}$$

② 主要杂质量：

$$\text{杂质 Fe 量} = 10000 \text{g} \times 0.25\% = 25 \text{g}$$

$$\text{杂质 Si 量} = 10000 \text{g} \times 0.12\% = 12 \text{g}$$

$$\text{杂质 C 量} = 10000 \text{g} \times 0.1\% = 10 \text{g}$$

$$\text{其他元素量总和} = 10000 \text{g} \times 0.3\% = 30 \text{g}$$

2) 采用 Al-Mo 中间合金 (质量分数: Al50%、Mo50%) 补 Mo, 计算补加 Al-Mo 中间合金量：

$$\text{Al-Mo 中间合金量} = \frac{150 \text{g}}{50\%} = 300 \text{g}$$

3) 计算由 Al-Mo 中间合金带入 Al 量和杂质元素量：

$$\text{Al-Mo 合金带入 Al 量} = 300 \text{g} \times 50\% = 150 \text{g}$$

$$\text{Al-Mo 合金带入 Fe 量} = 300 \text{g} \times 0.3\% = 0.9 \text{g}$$

$$\text{Al-Mo 合金带入 Si 量} = 300 \text{g} \times 0.3\% = 0.9 \text{g}$$

$$\text{Al-Mo 合金带入 C 量} = 300 \text{g} \times 0.1\% = 0.3 \text{g}$$

4) 采用 Al-Sn 中间合金 (质量分数: Al30%、Sn70%) 补 Sn, 计算 Al-Sn 中间合金量：

$$\text{Al-Sn 中间合金量} = \frac{450 \text{g}}{70\%} = 642.85 \text{g}$$

5) 计算由 Al-Sn 中间合金带入 Al 量和杂质元素量：

$$\text{Al-Sn 合金带入 Al 量} = 642.85 \text{g} \times 30\% = 192.85 \text{g}$$

$$\text{Al-Sn 合金带入 (Fe + Si) 量} = 642.85 \text{g} \times 0.3\% = 1.93 \text{g}$$

6) 计算应配入 Al 量与带入 Al 量之差, 即尚缺 Al 量：

$$\text{尚缺 Al 量} = 600 \text{g} - (150 + 192.85) \text{g} = 257.15 \text{g}$$

7) 采用纯铝补加不足 Al, 计算补加纯铝量：

$$\text{补加纯铝量} = \frac{257.15 \text{g}}{99.9\%} = 257.41 \text{g, 包括纯铝箔包}$$

8) 计算由纯铝带入杂质 Fe、Si 量：

$$\text{纯铝带入 Fe 量} = 257.41 \text{g} \times 0.07\% = 0.18 \text{g}$$

$$\text{纯铝带入 Si 量} = 257.41 \text{g} \times 0.05\% = 0.13 \text{g}$$

9) 采用纯铌 (Nb99.95%) 补 Nb, 计算纯铌量：

$$\text{纯铌量} = \frac{200 \text{g}}{99.95\%} = 200 \text{g}$$

10) 采用海锦钛 (Ti99.7%) 补 Ti, 计算海绵钛量:

$$\text{海绵钛量} = 10000\text{g} - (300 + 642.85 + 257.15 + 200)\text{g} = 8600\text{g}$$

11) 计算由海绵钛带入杂质 Fe、Si、C 量:

$$\text{海绵钛带入 Fe 量} = 8600\text{g} \times 0.06\% = 5.16\text{g}$$

$$\text{海绵钛带入 Si 量} = 8600\text{g} \times 0.02\% = 1.72\text{g}$$

$$\text{海绵钛带入 C 量} = 8600\text{g} \times 0.02\% = 1.72\text{g}$$

$$\text{海绵钛带入合计杂质元素} = (5.16 + 1.72 + 1.72)\text{g} = 8.6\text{g}$$

12) 应扣除杂质质量补加纯钛, 计算补加海绵钛总量

$$\text{海绵钛总量} = (8600 + 8.6)\text{g} = 8608.6\text{g}$$

$$\text{海绵钛实际补加量} = \frac{8608.6\text{g}}{99.7\%} = 8634.5\text{g}$$

13) 校核杂质 Fe、Si、C 带入量:

$$\text{Fe 量} = (0.9 + 1.93 + 0.18 + 5.16)\text{g} = 8.17\text{g} < 25\text{g}, \text{合格}$$

$$\text{Si 量} = (0.9 + 1.93 + 0.13 + 1.72)\text{g} = 4.68\text{g} < 12\text{g}, \text{合格}$$

$$\text{C 量} = (0.3 + 1.72)\text{g} = 2.02\text{g} < 10\text{g}, \text{合格}$$

其他杂质元素量 = 0 < 30g, 合格

14) 配料清单:

| | |
|-------------------------------|-----------|
| (Al-Mo) 中间合金 (Al50%, Mo50%) 量 | 300g |
| (Al-Sn) 中间合金 (Al30%, Sn70%) 量 | 642.85g |
| 纯铝 (Al99.9%) 包括铝箔包量 | 257.41g |
| 纯铌 (Nb99.95%) 量 | 200g |
| 海锦钛 (Ti99.7%) 量 | 8634.5g |
| 合计炉料量 | 10034.76g |

4. 熔炼铸造钛合金 ZTiAl6V4 (ZTC4) 配料计算

例 15-5 熔炼 ZTiAl6V4 合金 8000g, 浇注航天飞机用铸件, 采用海绵钛、Al-V 中间合金、纯铝包括铝箔配料, 合金熔炼应经三次真空自耗电弧炉熔炼, 再在真空自耗电极电弧凝壳炉熔炼, 浇注铸件。合金化学成分见表 15-10, 配料用炉料组成和化学成分见表 15-11。

1) 计算熔炼 ZTC4 合金 8000g 应配入的合金元素量:

$$\text{应配入 Al 量} = 8000\text{g} \times 6\% = 480\text{g}$$

$$\text{应配入 V 量} = 8000\text{g} \times 4\% = 320\text{g}$$

2) 采用 Al-V 中间合金补 V, 计算 Al-V 中间合金补加量:

$$\text{Al-V 中间合金量} = \frac{320\text{g}}{50\%} = 640\text{g}$$

3) 计算由 Al-V 中间合金带入的 Al 量:

表 15-10 合金化学成分 (质量分数) (%)

| ZTiAl6V4 合金 (ZTC4) | 主要成分 | | | 杂质含量 ≤ | | | | | | 其他元素 | |
|-----------------------|------|-----------|-----------|--------|------|-----|------|-------|------|------|-----|
| | Ti | Al | V | Fe | Si | C | N | H | O | 单个 | 总和 |
| | | | | | | | | | | | |
| 标准成分 | 余量 | 5.5 ~ 6.8 | 3.5 ~ 4.5 | 0.4 | 0.15 | 0.1 | 0.04 | 0.015 | 0.25 | 0.1 | 0.4 |
| 计算成分 | 余量 | 6 | 4 | — | — | — | — | — | — | — | — |

表 15-11 炉料组成和化学成分 (质量分数) (%)

| 炉料组成 | Al | V | Ti | 备注 |
|-----------|-------|----|-------|---|
| Al-V 中间合金 | 50 | 50 | — | |
| 纯铝包括铝箔 | 99.90 | — | — | 未计算杂质含量, 采用高品级的炉料, 杂质含量很低, 只有采用低品级炉料, 杂质含量相应较高, 计算杂质含量方法同例 15-4 |
| 海绵钛 | — | — | 99.70 | |

$$\text{Al-V 合金带入 Al 量} = 640\text{g} \times 50\% = 320\text{g}$$

4) 采用纯铝补加 Al, 计算纯铝补加量。由于采用 Al-V 中间合金补 V 已带入了 320g Al, 而应配入 Al 量为 480g, 尚缺 Al 量:

$$\text{尚缺 Al 量} = (480 - 320)\text{g} = 160\text{g}$$

$$\text{补纯铝量} = \frac{160\text{g}}{99.9\%} = 160.16\text{g, 包括铝箔}$$

5) 计算海绵钛配入量:

$$\text{海绵钛量} = (8000 - 640 - 160.16)\text{g} = 7199.84\text{g}$$

6) 炉料清单:

| | |
|--------------------------|----------|
| Al-V 中间合金 (Al50%、V50%) 量 | 640g |
| 纯铝 (Al99.9%) 包括铝箔量 | 160.16g |
| 海绵钛 (Ti99.7%) 量 | 7199.84g |
| 合计炉料量 | 8000g |

附录 化学元素周期表

| 周期 | IA |
|----|--|
| 1 | 1 H 氢 1.00794(7) |
| 2 | 3 Li 4 Be 锂 6.941(2) 铍 9.012182(3) |
| 3 | 11 Na 12 Mg 钠 22.989770(2) 镁 24.3050(6) |
| 4 | 19 K 20 Ca 钾 39.0983(1) 钙 40.078(4) |
| 5 | 37 Rb 38 Sr 铷 85.4678(3) 钡 87.62(1) |
| 6 | 55 Cs 56 Ba 铯 132.90545(2) 钡 137.327(7) |
| 7 | 87 Fr 88 Ra 钫* 223.02 镡 226.03 |

原子序数 ← 19 K → 元素符号
钾 → 元素名称
原子量 ← 39.0983(1) → 注*的是人造元素

| VIIIA | 电子层 |
|--|-----|
| 2 He 氦 4.002602(2) | K |
| 5 B 6 C 7 N 8 O 9 F 硼 10.811(7) 碳 12.0107(8) 氮 14.0067(2) 氧 15.9994(3) 氟 18.9984032(5) | L |
| 13 Al 14 Si 15 P 16 S 17 Cl 18 Ar 铝 26.981538(2) 硅 28.0855(3) 磷 30.973761(2) 硫 32.065(5) 氯 35.453(2) 氩 39.948(1) | M |
| 31 Ga 32 Ge 33 As 34 Se 35 Br 36 Kr 镓 69.723(1) 锗 72.64(1) 砷 74.92160(2) 硒 78.96(3) 溴 79.904(1) 氪 83.798(2) | L |
| 37 Rb 38 Sr 39 Y 40 Zr 41 Nb 42 Mo 43 Tc 44 Ru 45 Rh 46 Pd 47 Ag 48 Cd 49 In 50 Sn 51 Sb 52 Te 53 I 54 Xe 铷 85.4678(3) 钡 87.62(1) 钇 88.90585(2) 锆 91.224(2) 钮 92.90638(2) 钼 95.94(2) 钍* 97.907 钍 101.07(2) 钇 102.90550(2) 钇 106.42(1) 钇 107.8682(2) 钇 112.411(8) 钇 114.818(3) 钇 118.710(7) 钇 121.760(1) 钇 127.60(3) 钇 126.90447(3) 钇 131.293(6) | N |
| 55 Cs 56 Ba 57-71 72 Hf 73 Ta 74 W 75 Re 76 Os 77 Ir 78 Pt 79 Au 80 Hg 81 Tl 82 Pb 83 Bi 84 Po 85 At 86 Rn 铯 132.90545(2) 钡 137.327(7) 钇系 178.49(2) 钇 180.9479(1) 钇 183.84(1) 钇 186.207(1) 钇 190.23(3) 钇 192.217(3) 钇 195.078(2) 钇 196.96655(2) 钇 200.59(2) 钇 204.3833(2) 钇 207.2(1) 钇 208.98 钇 209.99 钇 222.02 | M |
| 87 Fr 88 Ra 89-103 104 Rf 105 Db 106 Sg 107 Bh 108 Hs 109 Mt 110 Ds 111 Rg 112 Cn 113 Uut 114 Fl 115 Uup 116 Lv 钫* 223.02 镡 226.03 钇系 261.11 钇* 262.11 钇* 263.12 钇* 264.12 钇* 265.13 钇* 266.13 (269) 钇* 272(277) 钇* 278(277) 钇* 289(288) 钇* 289(289) 钇* 294(294) | L |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-------------|-------------|--------------|--------------|--------|-----------|------------|-----------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|-----------|------------|
| 镧系 | 57 La | 58 Ce | 59 Pr | 60 Nd | 61 Pm | 62 Sm | 63 Eu | 64 Gd | 65 Tb | 66 Dy | 67 Ho | 68 Er | 69 Tm | 70 Yb | 71 Lu |
| | 138.9055(2) | 140.116(1) | 140.90765(2) | 144.24(3) | 144.91 | 150.36(3) | 151.964(1) | 157.25(3) | 158.92534(2) | 162.500(1) | 164.93032(2) | 167.259(3) | 168.93421(2) | 173.04(3) | 174.967(1) |
| 锕系 | 89 Ac | 90 Th | 91 Pa | 92 U | 93 Np | 94 Pu | 95 Am | 96 Cm | 97 Bk | 98 Cf | 99 Es | 100 Fm | 101 Md | 102 No | 103 Lr |
| | 227.03 | 232.0381(1) | 231.03588(2) | 238.02891(3) | 237.05 | 244.06 | 243.06 | 247.07 | 247.07 | 251.08 | 252.08 | 257.10 | 258.10 | 259.10 | 260.11 |

参 考 文 献

- [1] 全国铸造学会标准化技术委员会. 铸造标准应用手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [2] 中国铸造协会《铸造工程师手册》编写组. 铸造工程师手册 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [3] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册: 第 3 卷 铸造非铁合金 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [4] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册: 第 1 卷 铸铁 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [5] 沈才芳, 孙社成, 陈建斌. 电弧炉炼钢工艺与设备 [M]. 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
- [6] 赵文广. 电弧炉炼钢生产技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [7] 童军, 章舟, 连炜. 铸铁感应电炉熔炼及应用实例 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [8] 王振东, 曹孔健, 何纪龙. 感应炉冶炼 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [9] 陈琦, 彭兆弟. 实用铸造手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [10] 陈琦, 彭兆弟. 铸造合金配料速查手册 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [11] 郝石坚. 现代铸铁学 [M]. 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [12] 邱汉泉. 蠕墨铸铁及其生产技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [13] 俞海明. 电炉钢水的炉外精炼技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [14] 刘培兴, 刘晓瑭, 刘华鼐. 铜合金熔炼与铸造工艺 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [15] 周家荣. 铝合金熔铸生产技术问答 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
- [16] 王文礼, 王快社, 等. 有色金属及合金的熔炼与铸锭 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [17] 姚晓燕. 重有色金属及其合金熔炼与铸造 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
- [18] 王立娟, 张万金, 吴欣凤. 变形铝合金熔炼与铸造 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2010.
- [19] 中国铸造协会. 新编铸造技术数据手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [20] 李晨希, 王峰, 伞晶超. 铸造合金熔炼 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [21] 张士宪, 赵晓萍, 时彦林. 电弧炉炼钢生产实训 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [22] 张承斌. 炼钢学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1991.
- [23] 徐立军. 电弧炼钢炉实用工程技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013.

机械工业出版社现有在售铸造类图书(部分)

| 书号 | 书名 | 定价/元 | 作者 |
|-------|------------------|------|--------------|
| 30499 | 铸造工程师手册(第3版) | 148 | 编写组 |
| 31126 | 铸造生产技术禁忌手册 | 138 | 王文清 等 |
| 35710 | 铸造标准应用手册(上) | 98 | 全国铸造标准化技术委员会 |
| 37079 | 铸造企业质量管理及检验入门与精通 | 65 | 房贵如 |
| 37106 | 铸造合金配料速查手册(第2版) | 128 | 陈琦 |
| 37740 | 新编铸造技术数据手册 | 198 | 温平 |
| 40891 | 非铁合金铸造用熔剂和中间合金 | 39 | 罗启全 |
| 41003 | 铸造造型材料技术问答 | 49 | 李远才 |
| 42606 | 典型铸铁件铸造实践 | 58 | 谢应良 |
| 44024 | 铸造实用技术问答(第2版) | 76 | 杜西灵 |
| 45008 | 铸造质量检验手册(第2版) | 118 | 陈琦 |
| 45460 | 铸铁轮类件铸造精确成形 | 36 | 单忠德 |
| 45819 | 铸造实用数据速查手册(第2版) | 52 | 刘瑞玲 |
| 49724 | 铸造造型材料实用手册(第2版) | 99 | 李远才 |
| 50006 | 铸造质量控制应用技术(第2版) | 68 | 樊自田 |
| 52345 | 铸造粘土旧砂完全再生技术 | 39 | 孙清洲 |

地址: 北京市百万庄大街22号

邮政编码: 100037

电话服务

服务咨询热线: 010-88361066

读者购书热线: 010-68326294

010-88379203

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

教育服务网: www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版



机械工业出版社微信公众号



机械工业出版社科普平台
科技有的聊



机械工业出版社制造业资讯
制造业那些事儿

ISBN 978-7-111-52660-5



9 787111 526605 >

上架指导 机械工程 / 铸造

ISBN 978-7-111-52660-5

策划编辑◎崔滋恩

定价: 39.00元