

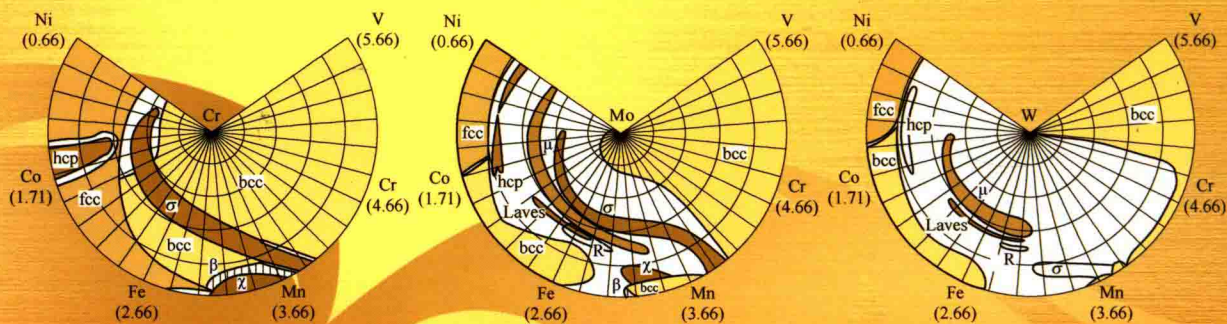


普通高等教育“十三五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU “13·5” GUIHUA JIAOCAI

合金设计及其熔炼

田素贵 编著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn



普通高等教育“十三五”规划教材

合金设计及其熔炼

田素贵 编著

北京
冶金工业出版社

2017

内 容 提 要

本书分为铸铁合金及其熔炼、炼钢原理及其合金熔炼、真空熔炼原理与技术、有色金属合金及其熔炼和合金成分设计四个部分,分别介绍了冲天炉熔铁、电弧炉和感应炉炼钢的原理与工艺,真空熔炼原理与定向凝固技术,有色金属合金的熔炼技术和合金成分设计等内容,使读者触及材料制备的前沿技术成果。内容以讲述不同种类合金的熔炼原理为主,工艺为辅,重要环节详细讲述,并给出实际例子,以加强对基本原理的理解。合金成分设计部分介绍了材料的化学成分、组织结构与力学性能之间的关系等。

本书为金属材料工程、材料加工工程专业和机械类专业本科生教材,也可供从事材料加工、材料选择与应用的工程技术人员和科学研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

合金设计及其熔炼/田素贵编著. —北京:冶金工业出版社, 2017. 1

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5024-7422-5

I. ①合… II. ①田… III. ①合金—设计—高等学校—教材 ②合金—熔炼—高等学校—教材 IV. ①TG13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 009738 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 宋 良 郭冬艳 美术编辑 杨 帆 版式设计 杨 帆

责任校对 郑 娟 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7422-5

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2017 年 1 月第 1 版, 2017 年 1 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 14 印张; 338 千字; 216 页

33.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

“合金设计及熔炼”是金属材料工程专业的一门学科基础课。本课程的教学目的和任务是：着重介绍金属材料的熔炼和成分设计的基本理论和工艺，使学生通过本课程的学习，熟悉金属材料熔炼和设计的基本原理，对材料科学知识的掌握范围有所扩展，为后续金属材料专业课的学习以及今后从事材料的研发、制造与加工工作，打下良好的基础。

本书是在读者已完成“材料物理化学”、“材料科学基础”和“材料力学性能”等课程的基础上编写的。书中在铸铁合金及其熔炼章节中，主要讲述了冲天炉内焦炭燃烧的基本规律、炉内的热交换及冶金反应特征及规律，以了解冲天炉熔炼的原理及工艺。在炼钢原理及其合金熔炼章节中，主要介绍了电弧炉炼钢的基本原理，并对电弧炉、感应炉、电渣炉熔炼工艺进行了详细的讲述。此外，简单介绍了真空熔炼原理，讲述了真空感应炉、真空自耗凝壳炉、电子束炉熔炼技术的特点与工艺。在有色合金及其熔炼章节中，主要讲述了铜合金、铝合金、镁合金、钛合金及镍基合金的熔炼技术，并把作者20年来从事镁合金、钛合金、镍基合金的研究工作充实在有关章节中，重点讲述了采用定向凝固技术制备单晶镍基合金的工艺。在合金成分设计章节中，讲述了材料设计和选用的原则，并给出了应用电子空位法、轨道能级法进行单晶镍基合金成分设计的例子。

由于作者水平有限，经验不足，书中不妥之处，诚请广大读者批评指正。

作 者

2016年12月

目 录

1 铸铁合金及其熔炼	1
1.1 冲天炉熔炼概述	1
1.1.1 铸铁熔炼的基本要求	1
1.1.2 冲天炉结构	1
1.1.3 冲天炉操作	3
1.1.4 炉料及其准备	5
1.2 冲天炉熔炼原理	9
1.2.1 冲天炉内的焦炭燃烧	9
1.2.2 冲天炉内的热交换	13
1.2.3 冲天炉的冶金反应	22
1.3 铸铁熔炼过程控制	27
1.3.1 冲天炉操作参数的确定	27
1.3.2 冲天炉配料计算	30
1.3.3 铁液脱硫处理	32
1.3.4 双联熔炼	34
参考文献	37
2 炼钢原理及其合金熔炼	38
2.1 装料与熔化	38
2.1.1 扒补炉	38
2.1.2 装料	39
2.1.3 熔化期	40
2.2 氧化与还原	43
2.2.1 氧化期	43
2.2.2 还原期	48
2.2.3 出钢与浇注	56
2.3 电弧炉炼钢工艺	59
2.3.1 碱性电弧炉不氧化法炼钢工艺	59
2.3.2 酸性电弧炉炼钢工艺	60
2.4 感应炉熔炼工艺特点	61
2.4.1 感应电炉概述	61
2.4.2 感应电炉炼钢的特点	61

2.4.3	感应电炉的结构及炉衬	63
2.4.4	无芯感应电炉的熔炼	64
2.5	电渣炉及熔炼技术	67
2.5.1	概况	67
2.5.2	电渣重熔技术特点	68
2.5.3	影响电渣熔铸质量的因素	69
	参考文献	70
3	真空熔炼原理与技术	71
3.1	概述	71
3.2	真空熔炼热力学	71
3.3	真空熔炼动力学	72
3.3.1	金属的挥发	72
3.3.2	脱气	74
3.3.3	脱氧	74
3.4	真空感应炉熔炼技术	75
3.4.1	概况	75
3.4.2	真空感应炉熔炼	76
3.5	其他真空熔炼技术	77
3.5.1	真空自耗炉熔炼	77
3.5.2	凝壳炉及非自耗炉熔炼	80
3.5.3	电子束炉熔炼技术	81
3.5.4	等离子炉熔炼技术	84
	参考文献	86
4	有色金属合金及其熔炼	87
4.1	铜合金及其熔炼	87
4.1.1	铜合金概述	87
4.1.2	脱氧	89
4.1.3	精炼	93
4.1.4	炉料准备及熔炼工艺	94
4.2	铝及铝合金的熔炼	100
4.2.1	铝及铝合金概述	100
4.2.2	铝合金的热处理	102
4.2.3	铝合金的成分调整与配料	106
4.2.4	液态铝的精炼	107
4.2.5	晶粒细化	114
4.2.6	温度调整与控制	116
4.2.7	铝合金熔炼工艺	118

4.3 镁合金及其熔炼	118
4.3.1 镁合金的组织与性能	118
4.3.2 炉料及原材料	122
4.3.3 熔炼前准备	126
4.3.4 镁合金熔炼	131
4.3.5 铸造质量控制与安全生产	139
4.4 钛合金及其熔炼	140
4.4.1 钛合金概况	140
4.4.2 钛合金的结晶、相变和热处理	142
4.4.3 钛合金熔炼与浇注	148
4.5 镍基合金及其熔炼	157
4.5.1 概述	157
4.5.2 电弧炉熔炼	158
4.5.3 感应炉熔炼	160
4.5.4 电渣重熔	161
4.5.5 真空感应炉熔炼	166
4.5.6 真空电弧炉重熔	174
4.5.7 镍基合金的定向凝固	176
4.6 熔铸合金的质量控制	186
4.6.1 熔铸质量的基本要求	186
4.6.2 合金成分的控制	186
4.6.3 熔体中含气量及夹渣量控制	187
4.6.4 偏析、缩松及裂纹的控制	187
参考文献	188
5 合金成分设计	191
5.1 钢铁材料的成分设计	191
5.1.1 绪论	191
5.1.2 材料设计与选用依据	191
5.1.3 材料设计与选用原则	193
5.1.4 材料的经济成本分析	194
5.1.5 材料设计方法	195
5.2 高温合金的设计与选用	198
5.2.1 概论	198
5.2.2 高温合金的成分设计	198
5.2.3 接近使用条件下的蠕变性能与寿命	211
5.2.4 材料的选择	214
参考文献	215

1.1 冲天炉熔炼概述

1.1.1 铸铁熔炼的基本要求

铁液温度是保证铸件质量的重要因素。如果铁液温度低,必然影响铁液的流动性,薄壁和结构复杂的铸件就难以成形。而熔炼的铁液化学成分是否符合要求,则对铸件的力学性能有直接的影响。铁液中的气体和非金属夹杂物含量不仅影响铸铁的强度和铸件的致密度,还与铸件形成气孔、裂纹等缺陷有关。因此可以认为,发展熔炼技术、提高铁液质量是生产优质铸铁件的最基本和最重要条件。对铁液质量的要求主要包括以下两个方面。

(1) 铁水温度。浇注铁液的温度应能保证得到无冷隔缺陷且轮廓清晰的铸件。浇注温度因铸铁碳当量和铸件的轮廓尺寸、结构复杂程度和铸件壁厚而定。不同牌号灰铸铁件的浇注温度范围为 $1330 \sim 1410^{\circ}\text{C}$ 。在一般情况下,铁液的出炉温度应高于浇注温度 50°C ,故根据铸铁牌号和铸件的具体情况,铁液出炉温度应不低于 $1380 \sim 1460^{\circ}\text{C}$ 。当需要浇注特薄铸件时,出炉温度还应提高 $20 \sim 30^{\circ}\text{C}$ 。为了满足需要,浇注可锻铸铁件的铁液出炉温度应不低于 $1460 \sim 1480^{\circ}\text{C}$ 。

铁液温度对铸件的内在质量有很大影响。在同样化学成分的灰铸铁中,由于铁液过热温度不同,会导致石墨形态发生变化,并影响铸铁件的力学性能。对球墨铸铁及其他孕育处理的铸铁,在处理期间铁液的温度会逐渐降低,为了补偿铁液的温度损失,需相应提高铁液的出炉温度。

(2) 化学成分和铁液纯净化。熔炼得到的铁液化学成分应满足规定的要求,铁液中的有害元素含量应控制在规定范围以内,铁液中的渣、气体、夹杂物含量应符合规定要求。

1.1.2 冲天炉结构

图1-1是熔化率为 7t/h 冲天炉的结构简图,它主要由4部分组成:炉底与炉基、炉体与前炉、送风系统、烟囱与除尘装置。

1.1.2.1 炉底与炉基

炉底与炉基是冲天炉的基础部分,它对整座炉子和炉料起支撑作用。图1-1所示的整体冲天炉通过4根炉脚支承在混凝土炉基上。冲天炉的炉底为固定式,炉底上设有炉底板,板上安有炉底门及其启闭机构;炉底的地面上铺有铁轨,供打炉小车运行。

1.1.2.2 炉体与前炉

炉体包括炉身和炉缸两部分,是冲天炉的基本组成部分。炉体内壁由耐火材料构筑,临近加料口处的炉壁则用钢板圈或铁砖构筑,以承受加料时炉料的冲击。

从加料口下缘到第一排风口中心线之间的炉体称为炉身，其内部的空腔称为炉膛。炉身的高度也称有效高度，是冲天炉的主要工作区域。由于这座炉子的炉膛直径随炉子高度而变化，故称为曲线炉膛，以区别于炉膛直径恒定的直线炉膛。

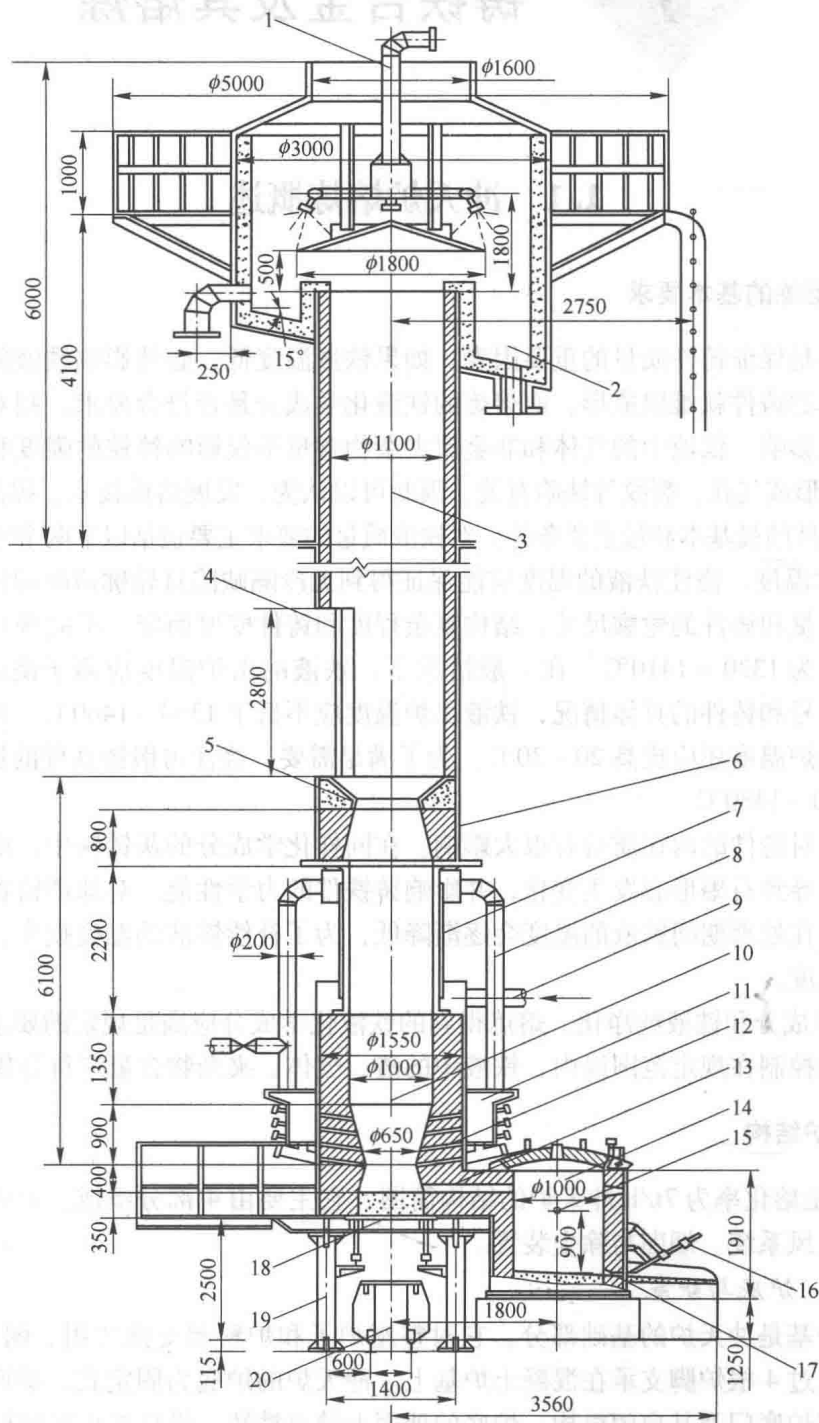


图 1-1 7t/h 冲天炉结构简图

- 1—进水管；2—除尘装置；3—烟囱；4—加料口；5—加料口铁圈；6—加料平台；7—热风炉胆；8—热风管；
9—进风管；10—炉膛；11—风箱；12—风口；13—过桥；14—前炉；15—出渣口；
16—堵出铁口装置；17—出铁口；18—炉底门；19—炉脚；20—打炉小车

从第一排风口中心线到炉底之间的炉体称为炉缸。没有前炉的冲天炉炉缸主要起储存铁水的作用。带有前炉的冲天炉炉缸,其主要作用是保护炉底,使之免受高温气流的直接冲刷,并汇聚铁水与炉渣进入前炉。炉缸的外壳与炉身连成一体。炉缸底部即为冲天炉的炉底,由废干砂及型砂打结而成。炉缸底侧与前炉连接的通道称为过桥,这是冲天炉铁水进入前炉的通道。与过桥相对的炉缸侧壁一般开有工作门,以便于修筑炉底、点火与打炉操作。无前炉的冲天炉,其炉缸侧壁上还开有出铁口与出渣口,并相应地设置出铁槽与出渣槽。

前炉的作用是储存铁水,并使铁水的成分和温度均匀,减少铁水在炉缸内的停留时间,从而有助于降低炉缸对铁水的增碳与增硫作用,而且还有利于渣铁分离、净化铁水。目前,冲天炉大多带有前炉。但冲天炉设置前炉会降低铁水温度、增加修炉工作量、占据车间面积、增加设备费用。前炉的容量大致为冲天炉每小时熔化铁水量的0.8~1.2倍,视所需浇注的最大铸件和每次最大出铁量的要求而定。前炉炉壳由6~12mm厚的钢板焊成,炉壁用耐火砖砌筑。前炉炉壁开有出铁口与出渣口,相应地设有出铁槽与出渣槽,并装有堵泥塞装置。在正对过桥孔的前炉壁上开有窥视孔,用以观察过桥情况,维护过桥畅通。

1.1.2.3 送风系统

冲天炉的送风系统是指自鼓风机出口开始至风口出口处为止的整个系统,包括进风管、风箱、风口以及鼓风机的输出管道。其作用是将来自鼓风机的空气送入冲天炉,供底焦燃烧用,冲天炉风管布置以尽量缩短长度、减少曲折、避免管道截面突变为原则。风箱的作用是使空气均匀、平稳地进入各个风口。风口是空气进入炉内的通道,风口有多种布置形式,图1-1中所示为其中的一种。

1.1.2.4 烟囱与除尘装置

烟囱的作用是利用充满其中的热气体所产生的几何压头引导冲天炉炉气向上流动,经炉顶排出炉外。加料口上面的烟囱,其外壳与炉身连成一体,内壁用耐火砖砌筑。

除尘装置的作用是消除或减少冲天炉废气中的烟灰,使废气净化。湿法除尘装置是以连续喷水、形成水幕的方式实现净化废气的,如图1-1所示。除尘装置有干法与湿法两种基本类型。

除上述几部分外,冲天炉还配有鼓风设备、加料设备、控制与调节设备、测试仪器等。

1.1.3 冲天炉操作

冲天炉的操作工艺是决定冲天炉工作效果的基本因素,包括燃料与原材料的选用、操作参数的选定、操作过程中各个环节的控制等。这里仅简述冲天炉的基本操作过程。

1.1.3.1 冲天炉熔炼的基本操作

A 修炉与烘炉

修炉材料一般由40%~50%耐火泥和60%~50%石英砂以及适量的水分混制而成。

冲天炉修炉时,先铲除炉壁表面的残渣,然后刷上泥浆水,覆上修炉材料,并打结夯

实。修好的炉壁必须结构紧实、尺寸正确、表面光滑。炉壁和过桥修完后，合上炉底门，先放一层废干砂，再放一层旧型砂并夯实，其厚度为 200 ~ 300mm；也可全部用石英砂加入适量水修筑炉底，但都必须保证开炉时不漏铁水，且尺寸合乎要求。

炉子修完后，可在炉底和前炉装入木柴，引火烘炉；前炉必须烘透，以保证铁水温度。

B 点火与加底焦

烘炉后加入木柴并引火点着，敞开风口盖使之自然通风。待木柴烧旺后，从加料口向炉内加入约 1/3 的底焦量，待其燃烧后再加入约一半左右的底焦量，然后鼓小风几分钟，并测量底焦高度，再加底焦至规定的高度。

所谓底焦量，是指装入金属炉料以前加入炉内的全部焦炭量；而底焦高度则是从第一排风口中心线起至底焦顶面为止的高度，炉缸内的底焦并不包括在底焦高度内。

C 装料与开风

加完底焦后加入石灰石，石灰石的加入量约为 2 倍的层焦石灰石用量，以防止底焦烧结或过桥堵塞。然后，封闭冲天炉工作门，关上风口盖，鼓小风 3 ~ 4min，再敞开风口自然通风，并进行装料。一般先熔化低牌号的铸铁，然后高牌号，再低牌号。每批金属料一般先加废钢，然后加生铁、回炉铁与铁合金。加入一批金属料后，再加层焦和石灰石，有时还加入少量萤石。石灰石量约占层焦重量的 30%。为确保熔炼效果，加入炉内的焦炭、金属料与熔剂都应力求洁净，且尺寸合乎要求。

装料完毕后焖炉 1h 左右即可开风。开风时，仍敞开一部分风口，然后全部关闭，以免因 CO 积聚而发生爆炸事故。冲天炉的风量以每分钟鼓风的立方米数计量，或以送风强度衡量冲天炉风量，送风强度指单位炉膛截面积风量的大小。

D 停风与打炉

停风的时间应掌握为：既要防止因停风过早而造成铁水量不足，也要避免因停风过晚而造成底焦与炉衬的无谓烧失。停风前应力求炉内有 1 ~ 2 批剩余铁料。停风后即可打炉，并立即将打落的炽热焦炭与铁料用水熄灭。

1.1.3.2 冲天炉的工作过程

冲天炉工作时，同时包括 3 个重要过程：(1) 底焦燃烧；(2) 热量传递；(3) 冶金反应。其中，底焦燃烧是热量传递和冶金反应的基础，因而是决定冲天炉工作的根本因素。

冲天炉的工作过程：冲天炉开风后，经风口进入炉内的空气与底焦发生燃烧反应，产生热量，由此而生成的高温炉气向上流动，并使底焦面上的第一批金属炉料熔化。熔化后的铁滴在底焦层内下落的过程中被高温炉气和炽热焦炭进一步过热，然后经炉缸和过桥进入前炉。随着底焦的燃烧损耗和金属炉料的熔化，料层逐渐下降，通过层焦和批料不断加以补偿，使熔化过程连续进行。在炉气的热作用下，石灰石分解成 CO_2 与 CaO 。后者与焦炭中的灰分和侵蚀的炉衬结合成熔点较低的炉渣。在炉气、焦炭和炉渣的作用下，金属的化学成分会发生一定的变化。铁水的最终化学成分就是金属炉料的原始化学成分在熔炼过程中经过变化的结果。

1.1.4 炉料及其准备

1.1.4.1 冲天炉用炉料

冲天炉用的炉料主要是金属炉料、焦炭和熔剂。

A 金属炉料

金属炉料包括：生铁、废钢、回炉料及铁合金等。

a 生铁

铸造用生铁的牌号由用途符号和平均含硅量两项组成，见表 1-1。生铁标准中对硅、锰、磷、硫含量有规定，但未规定含碳量。球墨铸铁用生铁如表 1-2 所示。

生铁应根据牌号、产地、批号分类堆放。因为同一牌号的生铁产地不同、批号不同，成分也有差异。生铁锭要堆放在仓库内以防止淋雨生锈，堆放时不要黏附泥沙和油污。生铁锭在投炉前应破碎成一定的块度，最大尺寸不要超过炉径的 1/3，以免造成棚料。

b 废钢

冲天炉中加入废钢的主要目的是降低铁水的含碳量，以提高铸铁的力学性能，废钢的化学成分见表 1-3。废钢的来源比较复杂，使用时要注意化学成分的差别。废钢在使用前应除去夹带的泥沙，料块应有一定尺寸要求，以免造成棚料。不要将密封的废钢件投入炉内，以防爆炸。

表 1-1 铸造用生铁的牌号和成分 (GB 718—82)

铁种		铸造用生铁						
铁号	牌号	铸 34	铸 30	铸 26	铸 22	铸 18	铸 14	
	代号	Z34	Z30	Z26	Z22	Z18	Z14	
化学 成分 /%	C	>3.3						
	Si	>3.20~3.60	>2.80~3.20	>2.40~2.80	>2.00~2.40	>1.60~2.00	1.25~1.60	
	Mn	1组	≤0.50					
		2组	>0.50~0.90					
		3组	>0.90~1.30					
	P	1级	≤0.06					
		2级	>0.06~0.10					
		3级	>0.10~0.20					
		4级	>0.20~0.40					
		5级	>0.40~0.90					
	S	1类	≤0.03					≤0.04
		2类	≤0.04					≤0.05
3类		≤0.05					≤0.06	

表 1-2 球墨铸铁用生铁的牌号和成分 (GB 1412—85)

牌号	化学成分/%											
	Si	Mn			P				S			
		1组	2组	3组	特级	1级	2级	3级	特类	1类	2类	3类
Q10	≤1.00											<0.06
Q12	>1.00 ~ 1.40	≤0.20	>0.20 ~ 0.50	>0.50 ~ 0.80	≤0.05	>0.05 ~ 0.06	>0.06 ~ 0.08	>0.08 ~ 0.10	≤0.02	>0.02 ~ 0.03	>0.03 ~ 0.04	≤0.05
Q16	>1.40 ~ 1.80											≤0.05

表 1-3 废钢的化学成分

废钢特征	化学成分/%				
	C	Si	Mn	P	S
普通碳素钢	0.14 ~ 0.22	0.12 ~ 0.30	0.35 ~ 0.65	<0.045	<0.050
普通碳素铸钢	0.20 ~ 0.60	0.50 ~ 0.60	0.80 ~ 0.90	0.04	0.04
钢屑压块	0.12 ~ 0.32	0.20 ~ 0.45	0.35 ~ 0.85	<0.06	<0.06

c 回炉料

回炉料主要指浇冒口、废铸件等，一般占配料的 30% 左右。回炉料应按不同牌号、成分分类堆放，注意管理，避免混杂。回炉料在使用前应清除表面粘砂及型腔内的型芯等，并应破碎成一定的块度。铸铁回炉料的化学成分，如表 1-4 所示。

表 1-4 铸铁回炉料的化学成分

回炉铁特征		铸铁种类估计	化学成分/%				
			C	Si	Mn	P	S
断口为灰色	晶粒较粗	普通灰铸铁	3.2 ~ 3.9	1.8 ~ 2.6	0.5 ~ 0.9	<0.2	<0.15
	晶粒较细	高牌号灰铸铁	2.7 ~ 3.2	1.1 ~ 1.7	0.8 ~ 1.4	<0.15	<0.12
断口为银灰色晶粒较细		球墨铸铁	3.5 ~ 3.9	2.1 ~ 3.2	0.4 ~ 0.9	<0.10	<0.03
断口为银灰色略暗于球墨铸铁，晶粒较细		蠕墨铸铁	3.5 ~ 3.9	2.2 ~ 2.8	0.3 ~ 0.7	<0.08	<0.08
断口为黑绒色		黑心可锻铸铁	2.3 ~ 3.0	0.7 ~ 1.6	0.4 ~ 0.7	<0.2	<0.2

d 铁合金

冲天炉熔炼常用硅铁和锰铁等铁合金调整铁液的化学成分。在生产合金铸铁时也用其他的铁合金，如铬铁、铝铁、钛铁、钒铁等。硅铁和锰铁的牌号和化学成分可查阅有关铁合金手册。

B 焦炭

冲天炉用焦炭作燃料，焦炭的质量是影响铁水温度与化学成分的重要因素之一。目前冲天炉用焦炭主要有三种，即城市煤气焦化厂生产的铸造焦、冶金焦化厂生产的冶金焦和各地生产的土焦。我国焦炭的固定碳含量一般在 80% 左右，灰分一般在 12% ~ 15% 之间。

焦炭的固定碳含量高、灰分低，焦炭的发热值就高，所以要求焦炭固定碳含量高、灰分低。

焦炭的含硫量一般在 0.5% ~ 1.2% 之间。冲天炉熔炼期间，焦炭中的硫有 30% ~ 50% 进入铁水，可提高铸铁的含硫量，因此，要求焦炭的含硫量低。在生产球墨铸铁时，应尽量使用低硫焦炭。

冲天炉内焦炭与金属炉料直接接触，在高温下承受炉料的重压和冲击力。因此要求焦炭有一定的强度。

焦炭的块度与均匀性对冲天炉熔化过程有较大的影响。一般而言，焦炭块度应与冲天炉直径大小相适应。块度过小，增加送风阻力，影响焦炭的燃烧程度；块度过大，对铁水温度影响虽不显著，但使炉内氧化气氛增强，铁水氧化程度增加，同时熔化率略有下降。

总之，冲天炉熔化对焦炭质量的主要要求是：固定碳量高、硫低、灰分低、有一定的强度和块度、低的反应性。用肉眼观察焦炭，一般呈银白色为好，乌黑色较差；坚硬致密的好，疏松的差；块度合适的好，细小的差；两块焦炭互相撞击，能发出清脆近似金属声为好，撞击成粉末为差。焦炭表面有黄色斑纹表示含硫量高，质量不好。

C 熔剂

冲天炉熔化过程中常用的熔剂是石灰石和萤石。石灰石和萤石的化学成分见表 1-5。

作为熔剂用的石灰石， SiO_2 与 Al_2O_3 的总量应不大于 3%， CaO 的含量大于 50%。石灰石的块度一般为 40 ~ 80mm，太小会很快分解成粉末；太大会使其分解速度减慢，影响造渣效果。

表 1-5 石灰石和萤石的化学成分

名称		化学成分/%								
		CaO	MgO	SiO_2	FeO	Al_2O_3	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$	CaF_2	CO_2	S
石灰石	好	54.10	0.65	0.92			0.91	—	43.20	
	一般	50 ~ 53	0.5 ~ 2.0	0.3 ~ 5.0	< 0.8	0.2 ~ 0.3		—	38 ~ 44	
	差	47.30	3.95	6.25			1.97	—	40.50	0.20
萤石	好	CaCO_3 3.04	—	1.78	—	—	1.55	93.27	—	—
	一般	—	—	1.5 ~ 2.0	—	—		< 92	—	—
	差	CaCO_3 8.85	—	4.25	—	—	1.75	84.20	—	—

冲天炉中加入萤石可以稀释炉渣，提高炉渣流动性。但萤石是炉气中有害成分氟化氢的来源，应尽可能少用萤石。

1.1.4.2 冲天炉用耐火材料

用于冲天炉的耐火材料承受高温作用，承受熔渣、金属、炉气的化学侵蚀和下降炉料的磨损、撞击，还会在受热及冷却时发生膨胀和收缩。因此，对于耐火材料的要求应是耐

热、化学性质稳定、有较高的强度、急冷急热时体积变化小。耐火材料被侵蚀后可构成炉渣的一部分。

耐火材料应能承受耐火材料之间及与炉渣、炉气、铁水的相互作用。表 1-6 ~ 表 1-9 是常用耐火材料的性能。

表 1-6 黏土耐火砖的性能 (GB 4415—84)

项 目	制 品 牌 号							
	N-1	N-2a	N-2b	N3-a	N3-b	N-4	N-5	N-6
耐火度/°C ≥	1750	1730	1730	1710	1710	1690	1970	1580
0.2MPa 荷重软化开始温度/°C ≥	1400	1350	—	1320	—	1300	—	—
重烧线变化/% ≤	1400°C, 2h	+0.1 -0.4	+0.1 -0.5	+0.2 -0.5	—	—	—	—
	1350°C, 2h	—	—	—	+0.2 -0.5	+0.2 -0.5	+0.2 -0.5	+0.2 -0.5
显气孔率/% ≤	22	24	26	24	26	24	26	28
常温耐压强度/MPa ≥	30	25	20	20	15	20	15	15
热震稳定性次数	N-2b、N-3b 必须进行此项检验, 将实测数据在质量证明书中注明							

表 1-7 硅质耐火砖的性能 (GB 2608—87)

项 目	制 品 牌 号		
	GZ-95	GZ-94	GZ-93
SiO ₂ 含量/% ≥	95	94	93
耐火度/°C ≥	1710	1710	1690
0.2MPa 荷重软化开始温度/°C ≥	1650	1640	1620
显气孔率/% ≤	22	23	25
常温耐压强度/MPa ≥	29.4	24.5	19.6
真密度/g·cm ⁻³ ≤	2.37	2.38	2.39

表 1-8 镁砖、镁硅砖的性能 (GB 2275—87)

项 目	制 品 牌 号			
	MZ-91	MZ-89	MZ-87	MZ-82
MgO 含量/% ≥	91	89	87	82
SiO ₂ 含量/%	—	—	—	5~10
CaO 含量/% ≤	3.0	3.0	3.0	2.5
0.2MPa 荷重软化开始温度/°C ≥	1550	1540	1520	1550
显气孔率/% ≤	18	20	20	20
常温耐压强度/MPa ≥	58.8	49.0	39.2	39.2

表 1-9 镁铬砖的性能 (GB 2277—87)

项 目	制 品 牌 号			
	MGe-20	MGe-16	MGe-12	MGe-8
MgO 含量/% \geq	40	45	55	60
Cr ₂ O ₃ 含量/% \geq	20	16	12	8
0.2MPa 荷重软化开始温度/°C \geq	1550	1550	1550	1530
显气孔率/% \leq	23	23	23	24
常温耐压强度/MPa \geq	24.5	24.5	24.5	24.5

1.2 冲天炉熔炼原理

1.2.1 冲天炉内的焦炭燃烧

为掌握冲天炉熔炼原理,应了解焦炭的特性、焦炭层状燃烧的基本规律、冲天炉内焦炭燃烧的特点,以及影响底焦燃烧过程的主要因素。

1.2.1.1 焦炭特性及对焦炭的要求

焦炭是烟煤经粉碎、干馏后得到的产物。我国冲天炉熔炼使用的焦炭以城市煤气焦化厂生产的铸造焦炭为主,约占60%。冲天炉熔炼对焦炭特性和铸造用焦有如下要求。

A 焦炭的成分

(1) 固定碳含量。固定碳含量是指焦炭中单质存在的自由碳,是焦炭的基本组分和最主要的可燃物质,焦炭固定碳含量愈高,焦炭经完全燃烧后所发出的热量就愈多。固定碳含量一般约为80%,高碳焦炭的固定碳含量可达95%以上,而劣质焦炭的固定碳含量只有约60%。

(2) 灰分含量。灰分是焦炭中的不可燃组分,焦炭含灰量愈高,发热量就愈低。灰分的含量一般为8%~16%,但也有灰分低于5%及高于30%的焦炭。

除固定碳和灰分以外,焦炭的其他成分主要是由碳氢化合物组成的挥发物、硫以及水分,通常它们的含量分别不超过1.5%、1.2%和7%。

为了保证焦炭有足够的发热量,冲天炉熔炼用焦炭的固定碳含量要高于80%,灰分要低于15%。为减少熔炼过程中铁水的增硫,焦炭的含硫量不得超过1.2%。受热时,因焦炭中的挥发物逸出而使焦炭开裂破碎,致使焦炭无法保持所要求的块度,因此焦炭中挥发物的含量也应愈低愈好,一般控制在1.5%以下。

B 焦炭的强度与块度

焦炭的强度通常用转鼓残留量评定。我国铸造用焦的转鼓残留量一般为300~330kg。冲天炉使用的焦炭要承受加料时的冲击和料柱的压力,因此必须具有足够的强度,以免因焦炭破碎而阻塞气流通道,影响底焦燃烧。

焦炭块度适度是保证炉子正常工作的基本条件。焦炭的合适块度随炉子大小而异,对

于中、小型冲天炉，焦炭块度可为 80 ~ 150mm；大型冲天炉，焦炭的块度应大一些，且块度应力求均匀。

C 焦炭的气孔率

焦炭的气孔率是指焦炭内气孔的体积占包括气孔在内的焦炭体积的百分数。我国铸造用焦的气孔率一般在 41% ~ 48% 之间。气孔率小的焦炭不仅反应能力低，而且焦炭致密、比重大、强度高，因而焦炭的气孔率要大。

1.2.1.2 焦炭层状燃烧的基本规律

层状燃烧是指固体块状燃料呈层状堆积时所进行的燃烧，冲天炉内的底焦燃烧属于这种方式。

A 焦炭层状燃烧的一般过程

a 燃烧反应过程

焦炭的燃烧是从加热到 500 ~ 600℃ 焦炭的着火点温度开始的。如图 1-2 所示，当焦炭被加热到 p 点时，焦炭开始着火。此后，反应速度随温度提高而急剧上升，至 n 点后开始变慢。此后，反应速度随着气流速度（图中气流速度 A 大于 B 和 C ）的提高而增大，而温度对其影响较小。因此，焦炭的燃烧过程可以归结为以下 3 个环节。

(1) 图 1-2 的 $m \sim p$ 段为加热着火阶段。冷焦炭在气流中受热，当温度达到着火温度时开始燃烧。焦炭的着火温度可用热平衡的热量表示，即焦炭在该温度下进行氧化反应所放出的热量，等于或超过传给周围环境的热量。因此，焦炭的挥发物含量愈高、气孔率愈大、含灰量愈低，着火点就愈低。

(2) 图 1-2 中的 $p \sim n$ 段为动力燃烧阶段。焦炭的燃烧速度受化学反应速度制约，故称动力学燃烧。温度愈高，焦炭的燃烧速度愈大。在这一区域内，从着火点开始，焦炭因燃烧使表面温度提高，故因温度提高而使反应加速，直到整个燃烧过程不再受化学反应速度的制约为止。

(3) 扩散燃烧阶段。在扩散燃烧区域内，当氧气扩散到反应表面时，气态燃烧产物脱离反应表面的速度成为整个燃烧过程的限制环节。因此，气流速度增大有利于加强扩散，从而提高反应速度和温度。

b 焦炭层状燃烧过程

焦炭层状燃烧期间炉气成分与温度的分布如图 1-3 所示。可以看出，焦炭块堆积在炉栅上，从炉栅下部引入供燃烧用的空气，在穿越焦炭层的过程中，空气中的氧与焦炭中的碳发生燃烧反应，生成 CO_2 ，部分 CO_2 又被碳还原成 CO ；随着燃烧反应的进行，炉气中的 O_2 逐步消失， CO_2 的

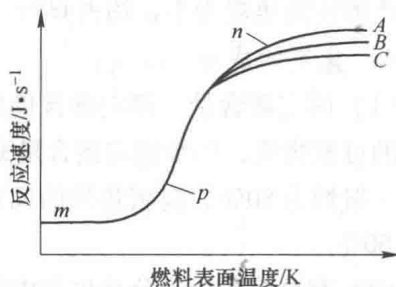


图 1-2 焦炭燃烧反应速度与温度的关系

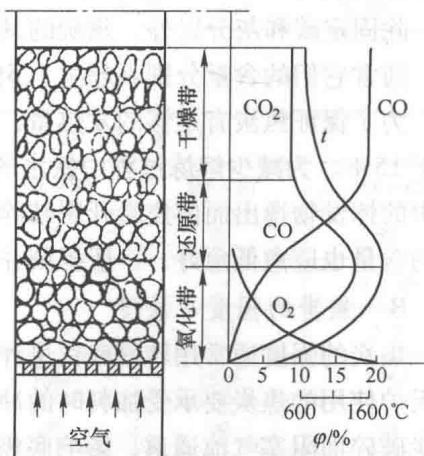


图 1-3 焦炭层状燃烧示意图