

GAOLU
LIANTIE
LILUN YU
CAOZUO

高炉炼铁 理论与操作

宋建成 编著

冶金工业出版社



高炉炼铁理论与操作

宋建成 编著

北 京

冶金工业出版社

2005

内 容 简 介

本书结合高炉炼铁生产实际,由浅入深地阐明了高炉内铁矿石还原过程、炉渣形成与作用、炉缸还原与氧化的控制、炉料下降与煤气上升过程的燃烧和热量传递等主要反应的理论;并且运用理论与生产实例相结合,全面介绍了冶炼过程工艺计算与能量利用、高炉日常操作原则、常见的典型事故及其处理实例以及对强化冶炼与降焦行之有效的一些技术措施,如精料、高风温、富氧喷煤、冶炼低硅生铁、含钛物料护炉与高炉长寿、无钟炉顶布料与中心加焦、数学模型与智能控制等内容。

本书可作为高等院校钢铁冶金专业的教学参考书,也可供炼铁技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高炉炼铁理论与操作/宋建成编著. —北京:冶金工业出版社, 2005. 1

ISBN 7-5024-3581-6

I. 高… II. 宋… III. ①高炉炼铁—理论②高炉炼铁—炉前操作 (冶金炉) IV. TF53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 058977 号

出版人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 赵培德 美术编辑 王耀忠

责任校对 王永欣 李文彦 责任印制 牛晓波

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2005 年 1 月第 1 版, 2005 年 1 月第 1 次印刷

850mm × 1168mm 1/32; 11 印张; 293 千字; 338 页; 1 ~ 3000 册

35.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100711) 电话: (010)65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前言

本书是在北京钢铁学院（现北京科技大学）自行编印的讲义《高炉炼铁学》与原《高炉冶炼工艺操作》两本书的基础上改编而成的。《高炉炼铁学》讲义是 20 世纪 70 年代末笔者在杨永宜教授指导下，根据北京钢铁学院钢铁冶金专业的教学计划与教学大纲，为冶金系本科生编写的讲稿，后经修改并与秦民生、王筱留、齐宝铭、贾荫隆等人的讲稿合并，由笔者主编后先后以《钢铁冶金学》上册，《高炉炼铁学》等书名由北京钢铁学院印刷作为本科生教材与研究生教学参考书使用。其后十余年间先后印刷 4 次共计 17000 多册。特别是在 1988 年第 3 次印刷前，各章节曾分别请北京科技大学周取定教授、董一诚教授、孔令坛教授、张谦象教授、杨天钧教授，东北大学杜鹤桂教授、王文忠教授，华东冶金学院糜克勤教授，原冶金工业部李马可与徐矩良教授级高工等著名专家教授审定；包头钢铁学院吴志华教授、鞍山钢铁学院邬士英与和丁欣教授等对该书提出过一些很好的建议。之后，全国 50 多家炼铁厂和职工大学也用该书作为技术参考资料、培训教材，在使用过程中众多的热心读者曾提出过很多宝贵意见。

原《高炉冶炼工艺操作》是笔者专为钢铁冶金专业本科生编写的生产实习教材。其特点是结合我国大中型高炉的生产实际，比较全面地论述了高炉工艺操作制度及高炉强化后的新技术与新特点。同时该教材还作为炼铁技术研讨班教材，10 年间先后有上千人使用。

为满足广大炼铁工作者与教学的需要，考虑到炼铁技术的进步与发展，笔者在上述两书的基础上，又重新进行改编。在改编过程中，吸收了众多教授专家意见。在编写本书时，作者根据自

已 40 多年教学科研和参加生产实践的体会与经验，对本书一些章节进行了重点修改与补充。冶金工业出版社杨传福总编与赵培德编辑对全书稿进行了全面的、十分认真与细致的修改，中国金属学会外联部副主任宋青高级工程师提供了大量的技术资料，修改过程还得到了梁德兰与杜春荣老师的协助。

值本书正式出版之际，作者谨向二十多年来所有为本书做过工作，提过意见和建议的同志，致以诚挚的谢意！

书中如有不妥之处，欢迎广大读者批评指正。

北京科技大学 宋建成

2004 年 6 月

目 录

1 铁矿石还原反应	(1)
1.1 高炉解剖研究	(1)
1.1.1 高炉解剖研究的意义与状况	(1)
1.1.2 软熔带的形状及其影响因素	(4)
1.2 炉料的蒸发、分解与气化反应	(6)
1.2.1 水分的蒸发	(6)
1.2.2 碳酸盐分解	(6)
1.2.3 气化反应与循环富集	(8)
1.3 还原过程热力学	(10)
1.3.1 理查德森图	(10)
1.3.2 铁氧化物的还原热力学	(16)
1.4 铁的直接还原与间接还原	(25)
1.4.1 直接还原的定义	(25)
1.4.2 还原度的表示方法与计算	(26)
1.4.3 直接还原与间接还原	(28)
1.5 还原反应动力学	(33)
1.5.1 铁矿石还原机理	(33)
1.5.2 还原速率数学模型	(36)
2 高炉炉渣	(44)
2.1 造渣过程概述	(44)
2.1.1 炉渣形成过程	(44)
2.1.2 炉渣的组成	(46)
2.1.3 炉渣的作用	(48)

2.2	炉渣结构与性能	(49)
2.2.1	炉渣的结构	(49)
2.2.2	炉渣的熔化温度	(51)
2.2.3	炉渣的黏度	(52)
2.2.4	炉渣的表面性能	(62)
2.2.5	炉渣的稳定性	(66)
2.3	造渣过程对高炉冶炼的影响	(67)
2.3.1	对高炉顺行的影响	(67)
2.3.2	对炉缸热制度的影响	(68)
2.3.3	我国几种特殊炉渣	(68)
2.4	生铁成分的控制	(70)
2.4.1	FeO 的还原	(70)
2.4.2	渗碳反应	(70)
2.4.3	[Si] 的控制	(72)
2.4.4	[Mn]、[P]、[Ti]、[V] 的控制	(75)
2.5	生铁中硫的控制	(80)
2.5.1	硫的来源与在高炉中的变化	(80)
2.5.2	硫的平衡计算	(80)
2.5.3	脱硫的热力学条件	(82)
2.5.4	影响高炉炉渣脱硫的动力学条件	(85)
2.5.5	炉外脱硫	(85)
3	高炉冶炼过程中的炉料与煤气运动	(90)
3.1	散料层的流体力学现象分析	(90)
3.1.1	散料的主要参数	(90)
3.1.2	炉料下降的力学分析	(94)
3.1.3	煤气流经散料层的阻力损失	(96)
3.1.4	在有液相条件下的煤气流动	(102)
3.1.5	炉料下降的分析	(104)
3.2	燃烧及热量传递现象	(112)

3.2.1	风口前燃料燃烧反应	(112)
3.2.2	炉缸煤气成分与温度的变化	(119)
3.2.3	高炉内热交换	(129)
4	高炉冶炼工艺计算	(137)
4.1	高炉冶炼能量利用分析	(137)
4.1.1	高炉冶炼过程的能量	(137)
4.1.2	能量利用分析方法	(138)
4.1.3	物料平衡和热平衡分析法	(138)
4.2	高炉配料计算	(138)
4.2.1	配料计算目的	(138)
4.2.2	配料计算过程实例	(139)
4.3	物料平衡与热平衡计算	(145)
4.3.1	物料平衡计算	(145)
4.3.2	直接还原度计算	(149)
4.3.3	能量平衡计算	(150)
4.3.4	能量平衡表	(153)
4.3.5	高温区域热平衡计算	(154)
4.4	高炉内各种耗碳量的计算	(157)
4.4.1	还原耗碳量计算	(157)
4.4.2	热量耗碳计算	(160)
4.4.3	理论最低焦比计算	(161)
4.5	里斯特图解	(164)
4.5.1	计算原理	(164)
4.5.2	氧的传输计算	(165)
4.5.3	绘制操作线	(167)
4.5.4	操作线说明	(168)
4.5.5	操作线的极限范围	(169)
4.5.6	理想操作线	(176)

5 高炉冶炼操作技术	(179)
5.1 高炉冶炼的特点	(179)
5.1.1 高炉冶炼的任务	(179)
5.1.2 高炉冶炼的工艺特点	(179)
5.1.3 软熔带与高炉操作的关系	(182)
5.1.4 高炉操作的指导思想	(184)
5.1.5 中小高炉冶炼特点	(185)
5.2 高炉操作基本内容	(185)
5.2.1 高炉操作基本制度	(185)
5.2.2 热制度的选择	(185)
5.2.3 造渣制度的选择	(189)
5.2.4 送风制度的选择	(190)
5.2.5 装料制度的选择	(193)
5.3 炉况的波动与判断	(194)
5.3.1 经验判断	(195)
5.3.2 观察仪表	(196)
5.3.3 炉身活体取样与探测	(198)
5.3.4 正常炉况的标志	(198)
5.3.5 失常炉况及其分类	(200)
5.4 失常炉况征兆及其处理	(201)
5.4.1 边缘过轻	(201)
5.4.2 边缘过重、中心过轻	(202)
5.4.3 炉冷	(203)
5.4.4 炉况热行	(205)
5.4.5 高炉管道行程	(205)
5.4.6 连续崩料	(207)
5.4.7 炉缸堆积	(208)
5.4.8 炉墙结厚	(210)
5.4.9 高炉结瘤	(212)

5.4.10 高硫号外铁	(215)
6 高炉强化冶炼技术及发展	(216)
6.1 高风温操作	(216)
6.1.1 风温对焦比的影响	(216)
6.1.2 高风温与喷吹燃料的关系	(217)
6.1.3 高风温与炉况顺行的关系	(217)
6.1.4 高风温热风炉	(218)
6.1.5 高风温对高炉冶炼的影响	(218)
6.1.6 高炉接受高风温的条件	(219)
6.1.7 取得高风温的条件	(220)
6.2 富氧喷煤技术	(221)
6.2.1 高炉富氧	(221)
6.2.2 高炉喷吹煤粉	(224)
6.2.3 高炉富氧喷煤	(225)
6.3 高压操作	(229)
6.3.1 高压操作的发展过程	(229)
6.3.2 高压操作工艺流程	(230)
6.3.3 高压操作对高炉冶炼的影响	(231)
6.4 高炉中心加焦技术	(235)
6.4.1 高炉中心加焦的发展	(235)
6.4.2 中心加焦技术	(238)
6.5 延长高炉炉衬寿命	(246)
6.5.1 延长高炉寿命的意义	(246)
6.5.2 影响炉衬寿命的主要部位	(246)
6.5.3 延长我国高炉寿命的途径	(249)
6.6 冶炼低硅生铁	(255)
6.6.1 低硅铁冶炼的意义	(255)
6.6.2 国内外低硅铁冶炼水平	(256)
6.6.3 低硅铁冶炼的理论与实践	(258)

6.6.4	降低铁水硅含量的理论	(263)
6.6.5	降低铁水硅含量的措施	(265)
6.7	含钛物料护炉技术	(270)
6.7.1	钛化物 (TiC, TiN) 护炉机理	(271)
6.7.2	护炉技术的发展	(279)
6.8	高炉数学模型及智能控制的应用	(280)
6.8.1	实用高炉数学模型的早期状况	(281)
6.8.2	高炉炉内数据处理模型	(282)
6.8.3	高炉炉况判定 GO-STOP 模型	(283)
6.8.4	国内外高炉数学模型研究进展	(284)
6.8.5	国内外高炉“专家系统”的简明对比	(285)
6.8.6	检测技术	(287)
7	出铁口维护及高炉事故	(289)
7.1	出铁口的维护	(289)
7.1.1	出铁口的结构	(289)
7.1.2	出铁口维护环节	(289)
7.2	高炉事故	(291)
7.2.1	炉前事故	(291)
7.2.2	结瘤事故	(296)
7.2.3	炉缸冻结	(297)
7.2.4	顽固悬料和恶性管道事故	(303)
7.2.5	煤气事故	(306)
7.2.6	其他事故	(307)
8	高炉开炉与停炉操作	(308)
8.1	开炉设备试运转与烘炉	(308)
8.1.1	新开高炉特点	(308)
8.1.2	高炉部件检查与试运转	(308)
8.1.3	新建或大修后高炉开炉烘炉	(309)

8.2 开炉配料计算与装炉	(311)
8.2.1 开炉料准备	(311)
8.2.2 焦比的确定	(312)
8.2.3 计算举例	(314)
8.3 开炉装料及操作	(320)
8.3.1 装料	(320)
8.3.2 点火送风	(321)
8.4 停炉操作	(322)
8.4.1 高炉停炉	(322)
8.4.2 停炉方法	(323)
8.5 高炉封炉操作	(325)
附录 冶炼原理与工艺操作复习思考题	(327)
一、冶炼原理部分	(327)
二、工艺操作部分	(332)
参考文献	(337)

1 铁矿石还原反应

从铁矿石中将铁还原出来是高炉冶炼最基本的任务。高炉中除铁以外，还有少量的硅、锰、磷等的还原反应，并溶入生铁中，当使用特种矿石时，还有微量的钒、钛、镍、铌和铬等氧化物的还原。

炉料自炉顶进入高炉开始，直到降至高炉下部的炉缸，在全过程中都进行着还原反应，整个高炉内只有风口前燃烧带为氧化燃烧区域，这也是区别于炼钢过程的特点，所以还原反应是高炉炼铁过程中最重要的化学反应。

1.1 高炉解剖研究

1.1.1 高炉解剖研究的意义与状况

1.1.1.1 高炉解剖研究的意义

高炉冶炼过程是在高温条件下进行的复杂的物理化学反应，并充满了动量、热量与质量传输过程等复杂现象，而这些复杂现象又直接关系到高炉内的还原反应。为了确定能够正确处理这些现象的操作技术，就必须正确掌握炉内情况的变化。但要准确地、及时地判断炉内发生的情况是困难的，因为高炉是一个密闭的、连续的逆流反应器，对反应过程的变化要进行直接的观察与测试都难以进行，人们主要依靠间接的仪表反应与实践的经验来进行操作。为了搞清楚高炉内的变化规律，以往的冶金工作者采取了很多办法，例如各个部位的测温、取样以及模拟实验等一系列的手段，取得了很多成果，从而丰富了人们对高炉内部状况的了解。但是仍不能十分确切地描述炉内变化状况，而最直接和最有效的办法就是对高炉进行解剖研究。

1.1.1.2 国内外高炉解剖研究的状况

高炉解剖是将正在进行冶炼中的高炉，突然停止鼓风，并且

急速降温以保持炉内原状，然后将高炉剖开，进行全过程的观察、录像、分析化验等各个项目的研究考察，人们将此项工作称作高炉解体研究。

早在 1930 年前后，在斯德哥尔摩就开始了解剖高炉的工作，为了研究生产高炉的内部状况，日本进行了大量的高炉解体研究，并取得了新的研究成果，为研究高炉冶炼过程提供了新的依据。日本于 1968 年首先解剖了一座 646m^3 高炉，1970 年又解剖了一座 1407m^3 高炉。据统计，从那时开始，日本已经在生产高炉进行解剖研究达 12 次以上。前苏联也解剖了 2 次。我国也于 1979 年 10 月对首钢 018 实验高炉进行了解剖研究。关于从高炉解剖调查过程中获得的新知识，本书将在以后各有关章节中分别介绍，本节着重介绍高炉中的分层情况及各层的化学反应与热工特点，特别是软熔带的形成与其对高炉冶炼过程的影响。

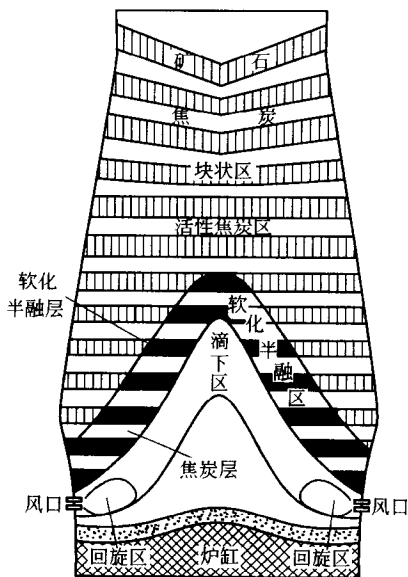


图 1-1 高炉内固体炉料形态变化示意图

高炉内解剖后得到的分层情况示意于图 1-1，它表示出固体炉料形态的变化。

煤气上升过程中，其成分、温度和压力都有很大改变。成分中首先是由于直接还原使 CO 提高，而后由于间接还原使 CO 降低， CO_2 开始出现并逐渐增多。煤气温度则由于与炉料的热交换及热损失而逐步降低，压力也由于阻力损失而减少，其变化过程如图 1-2。图中各标号的意义如下：Ⅰ—上部热交换区，Ⅱ—空区，Ⅲ—下

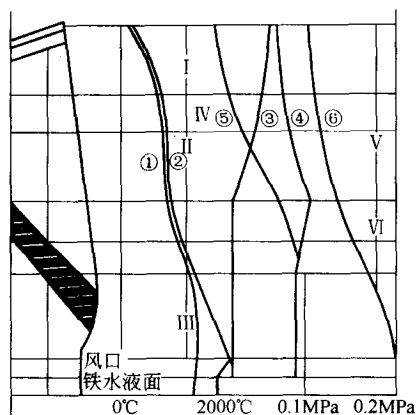


图 1-2 高炉内煤气压力的温度与成分变化示意图

部热交换区，IV—化学稳定区，V—间接还原区，VI—直接还原区；①，②—分别表示固体液体温度和气体温度（℃），③— CO_2 浓度（%），④—CO 浓度（%），⑤—还原度（%），⑥—压力（MPa）。

1.1.1.3 炉料下降过程的层状分布现象

解剖调查初步肯定了高炉的冶炼过程可分为五个主要区域，在炉料与煤气流逆向运动过程中，热交换、还原、熔化与成渣等反应依次在五个区域中进行，这五个区域一般称为五带或五层，现分述如下：

（1）块料带。炉内料柱的上部，矿石与焦炭始终保持着明显的固态的层次缓缓下降，但层状逐渐趋于水平，而且厚度也逐渐变薄。

（2）软熔带。它由许多固态焦炭层和粘结在一起的半熔融的矿石层组成，焦炭矿石相间，层次分明，由于矿石呈软熔状，透气性极差，煤气主要从焦炭层通过，像窗口一样，因此称为“焦窗”。软熔带的上沿是软化线，下沿是熔化线，它和矿石的软熔温度区间相一致，其最高部分称为软熔带顶部，其最低部分

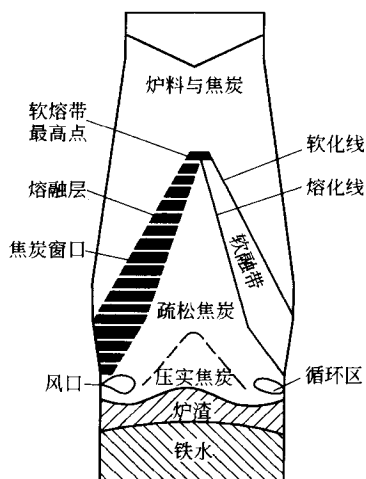


图 1-3 软熔带示意图

与炉墙相连接，称为软熔带的根部，如图 1-3 所示。随着原料条件与操作条件的变化，软熔带的形状与位置也随之改变。

(3) 滴落带。它位于软熔带之下，熔化后的渣铁像雨滴一样穿过固态焦炭层而滴落。

(4) 风口带。焦炭在风口前，由于鼓风动能的作用在剧烈地回旋运动中燃烧，形成一个半空状态的焦炭回旋区。这个小区域是高炉中唯一存在的氧化性区域。

(5) 渣铁带。它在炉缸下部，主要是液态渣铁以及浸入其中的焦炭，铁滴穿过渣层以及渣铁界面时最终完成必要的渣铁反应，得到合格的生铁。

1.1.2 软熔带的形状及其影响因素

高炉解剖研究肯定了软熔带的存在，这是一项很重要的研究成果，寻求最佳软熔带的形状与位置，对于改善高炉操作以及获得先进的经济技术指标，具有非常大的实际意义。

1.1.2.1 软熔带的形状

根据其形状特点软熔带一般可分为三种：

(1) 倒 V 形。它的形状像倒写的英文字母 V，如图 1-1 和图 1-3 中所示的软熔带形状。它的特点是由于中心温度高边缘温度低，煤气利用较好，而且对高炉冶炼过程的一系列反应有着很好的影响。缺点是容易导致炉墙结厚。

(2) V 形。它的形状像英文字母 V，其特点刚好与倒 V 形相反，是边缘温度高而中心温度低，煤气利用不好，而且

还不利于炉缸的一系列反应，高炉操作中应该尽量避免它的出现。

(3) W 形。它的特点与效果处于倒 V 形与 V 形之间。

1.1.2.2 影响软熔带形状的因素

根据高炉解剖研究以及矿石的软熔特性，软熔带形状与炉内等温线相适应，而等温线又是和煤气中 CO_2 分布曲线相对应的，在高炉操作中炉顶煤气的 CO_2 曲线主要由装料制度来调节，其次是送风制度的影响。因此软熔带的形状也主要受两方面的影响，即装料制度与送风制度的影响，前者是属于上部调节，而后者是属于下部调节。例如以正装比例为主的高炉，一般都是接近倒 V 形的软熔带，以倒装为主或全倒装的高炉，基本上属于 V 形软熔带，正倒装都有一定比例的高炉，一般接近 W 形的软熔带。

1.1.2.3 软熔带对高炉冶炼过程的影响

软熔带在高炉中下部起着煤气再分布的作用，它的形状与位置对高炉冶炼过程产生明显的影响，如影响矿石预还原、生铁 Si 含量、煤气利用、炉缸温度与活跃程度以及对炉衬的维护等等。

目前倒 V 形软熔带被公认为是最佳软熔带，各种软熔带对高炉冶炼过程的影响列于表 1-1。

表 1-1 软熔带形状对冶炼过程的影响

影响内容	形 状		
	倒 V 形	V 形	W 形
铁矿石预还原	有利	不利	中等
生铁脱硫	有利	不利	中等
生铁 Si 含量	有利	不利	中等
煤气利用	好	不好	中等
炉缸中心活跃	活跃	不活跃	中等
炉墙维护	有利	不利	中等