

普通高等教育“九五”国家级重点教材



钢铁冶金学
(第2版)
(炼铁部分)

GANGTIE
YEJIN
XUE
LIANTIE
BUFEN

王筱留 主编

冶金工业出版社



10
普通高等教育“九五”国家级重点教材

钢铁冶金学

(炼铁部分)

(第2版)

北京科技大学 王筱留 主编

北京
冶金工业出版社
2004

图书在版编目(CIP)数据

钢铁冶金学:炼铁部分/王筱留主编. —2版. —北京:
冶金工业出版社,2000.1(2004.3重印)
普通高等教育“九五”国家级重点教材
ISBN 7-5024-2441-5

I. 钢… II. 王… III. ①黑色金属冶金—高等学校—教材②炼铁学—高等学校—教材 IV. ①TF4②TF5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 43584 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 王秋芬 美术编辑 李心 责任校对 栾雅谦 责任印制 李玉山

北京燕南印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1991 年 4 月第 1 版,2000 年 1 月第 2 版,2004 年 3 月第 6 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 18 印张; 433 千字; 279 页; 14501~16500

29.00 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)

第 2 版 前 言

《钢铁冶金学》(炼铁部分)初版于 1991 年。该书出版以来,在北京科技大学和包头钢铁学院、河北理工学院等兄弟院校作为本科以及函授、夜大本科的专业课教材已达 7~8 届,得到专业教师和学生的认可,反映良好,在 1997 年被评为“冶金工业部优秀教材”。

本书初版至今,钢铁生产技术有了较大的提高和发展。这次有机会修订再版,编者补充了近年来关于炼铁及铁前系统生产上获得成功的部分新技术和新工艺,改写了第 6 章的“高炉操作制度”一节,删去了一些生产上不用的工艺技术,补上了初版中的遗漏(例如第 3 章的后几节)并改正了一些错误,更新了部分生产技术资料。

在本书使用和修改、评审中那树人教授、顾飞教授等专家、学者、老师以及广大读者提出了许多宝贵意见,修订中应用了刘云彩教授、鞍钢炼铁厂等的资料,在此向他们表示衷心的感谢。在修订再版工作中得到了北京科技大学冶金学院和炼铁研究所、教务处和教材科的领导和工作人员的鼓励和大力支持,在此向他们表示谢意。

参加本书修订工作的有王筱留、吴胜利、高征铠、齐宝铭等,全书仍由王筱留主编。

本书在修订中,尽管编者付出了较大努力,但限于水平和时间关系,书中难免有不妥之处,恳请专家、学者、老师和广大读者指正。

编 者
1999 年 4 月

前 言

本书系钢铁冶金专业《钢铁冶金学》(炼铁部分)课程的教学用书。

自一九七九年开始,将炼铁、炼钢和电冶金专业合并为钢铁冶金专业。作者编写的《钢铁冶金学》(炼铁部分)初稿,曾在北京钢铁学院和包头钢铁学院的部分年级试用。一九八七年在包头钢铁学院召开了全国高等院校钢铁冶金专业教学研讨会,为提高本课程教学质量,参加研讨会的11所院校的代表共同拟定了统一的《钢铁冶金学》教学大纲。本书系在原试用教材的基础上,根据会议制订的教学大纲重新编写的。

按照钢铁冶金专业教学计划和本课程教学大纲的要求,本书重点阐述炼铁过程的基本理论和工艺,主要内容包括含铁原料的造块、炼铁原理、工艺操作及高炉作业的能量利用分析,并结合钢铁工业的最新发展,对数学模型、高炉过程自动控制及非高炉法炼铁(包括直接还原及熔融还原)作了简要介绍。

由于授课时间的限制,凡物理化学、冶金过程热力学和动力学(钢铁冶金原理)和传输原理等内容已在有关课程中讲授,不再重复,只着重于这些内容在炼铁中的应用;炼铁设备结构和工艺操作的内容在有关课程(如冶金单元设计、钢铁厂设计原理、钢铁冶金实验技术等)和生产实习中讲述。为提高学生的运算能力和适应炼铁技术的发展,作者较多地应用数学计算来讲述冶金过程化学反应、能量利用和工艺过程。

本书初稿完成后,其主要章节曾在北京科技大学钢铁冶金专业和武钢、宝钢、湘钢的继续工程教育中试用。本书定稿前于一九八八年三月开过审稿会,有重庆大学裴鹤年、华东冶金学院糜克勤、唐山工程技术学院(原河北矿冶学院)全泰铨等同志参加,他们对本书提出了许多宝贵意见。在编写过程中,得到北京科技大学冶金系和炼铁教研室的同志们的大力支持,书中应用了他们的一些科研成果,也应用了我国兄弟院校和炼铁界的同行们的成果,编者在此表示衷心的感谢。

本书第一章由齐宝铭编写,第二、五章由王筱留编写,第三、四、六章由齐宝铭、王筱留编写,第七章由齐宝铭和秦民生编写,第八章由杨乃伏编写,全书由王筱留主编。

本书作为钢铁冶金专业四年制本科生教材,也可供继续工程教育、函授、夜大、职大、大专师生以及有关工程技术人员和科学工作者参考。

限于作者水平,书中难免有不妥或错误之处,恳请读者批评指正。

编 者

1990年6月

目 录

1 概论	(1)
1.1 钢铁工业在国民经济中的地位	(1)
1.2 中国钢铁工业的概况	(1)
1.3 钢铁联合企业中的炼铁生产	(2)
1.4 高炉冶炼过程概述	(3)
1.4.1 高炉炼铁工艺流程及炉内主要过程	(4)
1.4.2 含铁原料及其他辅助原料	(6)
1.4.3 高炉燃料	(12)
1.4.4 耐火材料	(17)
1.4.5 高炉产品	(21)
1.4.6 高炉冶炼的主要技术经济指标	(25)
习题和思考题	(30)
2 铁矿粉造块	(31)
2.1 粉矿造块的意义和作用	(31)
2.2 造块的基础理论	(32)
2.3 烧结过程	(32)
2.3.1 一般工艺过程	(32)
2.3.2 烧结过程的主要反应	(33)
2.3.3 烧结过程中的固结	(39)
2.3.4 烧结过程中的传输现象	(46)
2.3.5 烧结工艺	(49)
2.4 球团过程	(56)
2.4.1 生球成型	(57)
2.4.2 生球干燥	(61)
2.4.3 球团矿的焙烧固结	(63)
2.4.4 球团工艺	(64)
2.4.5 特种造块方法	(67)
2.5 烧结矿和球团矿的质量检验	(69)
2.5.1 冷态物理机械性能	(69)
2.5.2 热态及还原条件下的物理机械性能	(70)
2.5.3 冶金性能	(71)
2.6 高炉炉料结构	(72)
2.6.1 高碱度烧结矿的冶金性能	(72)
2.6.2 酸性氧化球团矿的冶金性能	(74)
2.6.3 高碱度烧结矿配加酸性球团矿组成的综合炉料的冶金性能	(75)
参考文献和建议阅读书目	(75)

习题和思考题	(75)
3 高炉冶炼过程的物理化学	(77)
3.1 蒸发、分解与气化	(77)
3.1.1 蒸发	(77)
3.1.2 结晶水分解	(77)
3.1.3 碳酸盐分解	(77)
3.1.4 析碳反应	(78)
3.1.5 气化	(78)
3.2 还原过程	(79)
3.2.1 铁的氧化物及其特性	(79)
3.2.2 铁氧化物还原的热力学	(80)
3.2.3 气固相还原反应的动力学	(87)
3.2.4 其他元素的还原	(96)
3.2.5 炉缸中液态渣铁间的氧化还原反应——耦合反应	(103)
3.3 炉渣	(107)
3.3.1 炉渣在高炉冶炼过程中的作用	(107)
3.3.2 造渣过程简述	(109)
3.3.3 终渣的主要理化性能	(109)
3.3.4 炉渣去硫	(119)
3.3.5 炉渣排碱	(127)
3.4 碳的气化反应	(129)
3.4.1 固体碳气化的一般规律	(129)
3.4.2 风口前碳的燃烧	(131)
3.4.3 燃烧带以外碳的气化	(135)
3.5 生铁的形成	(137)
3.5.1 渗碳反应	(137)
3.5.2 其他少量元素的溶入	(139)
参考文献和建议阅读书目	(140)
习题和思考题	(140)
4 高炉冶炼过程中的传输现象	(142)
4.1 高炉中的动量传输	(142)
4.1.1 煤气流经固体散料层的一般规律	(143)
4.1.2 逆流运动中散料的有效质量	(146)
4.1.3 散料的流态化	(148)
4.1.4 充液散料层的流体力学现象	(148)
4.1.5 高炉过程中的炉料下降	(149)
4.2 高炉内的热量传输	(150)
4.2.1 传热方程	(151)
4.2.2 水当量	(152)

4.2.3	高炉上下部热交换	(153)
4.2.4	高炉条件下的传热方式和给热系数	(153)
	参考文献和建议阅读书目	(156)
	习题和思考题	(156)
5	高炉冶炼能量利用	(157)
5.1	高炉冶炼能量利用指标	(157)
5.1.1	燃料比	(157)
5.1.2	焦比	(157)
5.1.3	直接还原或间接还原发展程度	(157)
5.1.4	燃料中的碳素在高炉内氧化程度或利用程度	(158)
5.1.5	高炉内热能利用程度	(159)
5.1.6	氢利用率	(159)
5.2	高炉能量利用计算分析	(159)
5.2.1	生产高炉的计算	(159)
5.2.2	设计高炉的计算	(166)
5.2.3	物料及热平衡计算举例	(169)
5.2.4	理论焦比计算	(186)
5.3	高炉能量利用图解分析	(193)
5.3.1	铁的直接还原度与碳消耗 $[r_d-w(C)]$ 图解	(193)
5.3.2	里斯特操作线图解	(195)
5.3.3	理查特(Reichardt)区域热平衡图解分析	(206)
	参考文献和建议阅读书目	(209)
	习题和思考题	(209)
6	高炉炼铁工艺	(210)
6.1	高炉炼铁生产的原则	(210)
6.2	高炉操作制度	(212)
6.2.1	装料制度	(212)
6.2.2	送风制度	(218)
6.2.3	造渣制度	(220)
6.2.4	热制度	(220)
6.2.5	炉况判断	(221)
6.3	高压操作	(222)
6.3.1	高压操作系统	(223)
6.3.2	高压操作对高炉冶炼的影响	(224)
6.4	高风温操作	(226)
6.4.1	高风温对高炉冶炼的影响	(226)
6.4.2	高炉接受高风温的条件	(227)
6.4.3	高风温的取得	(229)
6.5	喷吹补充燃料	(230)

6.5.1	喷吹燃料对高炉冶炼的影响	(230)
6.5.2	置换比与喷吹量	(233)
6.6	富氧和综合鼓风操作	(235)
6.6.1	富氧对高炉冶炼的影响	(235)
6.6.2	富氧鼓风操作特点	(236)
	参考文献和建议阅读书目	(237)
	习题和思考题	(237)
7	高炉冶炼过程数学模型概述	(238)
7.1	数学模型及其功用与分类	(238)
7.2	高炉冶炼过程的特点	(238)
7.3	高炉冶炼过程模型及控制模型概述	(239)
7.4	人工智能高炉专家系统概述	(242)
7.4.1	人工智能(AI)	(242)
7.4.2	专家系统(ES)	(242)
7.4.3	人工智能高炉冶炼专家系统	(242)
	参考文献和建议阅读书目	(244)
	习题和思考题	(244)
8	非高炉炼铁	(245)
8.1	直接还原	(245)
8.1.1	直接还原概况	(245)
8.1.2	气基直接还原法	(249)
8.1.3	煤基直接还原法	(256)
8.1.4	直接还原铁的性质与应用	(264)
8.2	熔融还原法	(268)
8.2.1	一步法熔融还原	(269)
8.2.2	二步法熔融还原	(271)
	参考文献和建议阅读书目	(274)
	主要符号表	(275)
	本书引用的主要参考文献	(279)

1 概 论

1.1 钢铁工业在国民经济中的地位

现代任何国家是否发达的主要标志是其工业化及生产自动化的水平,即工业生产在国民经济中所占的比重以及工业的机械化、自动化程度。而劳动生产率是衡量工业化水平极为重要的标志之一。为达到较高的劳动生产率需要大量的机械设备。钢铁工业为制造各种机械设备提供最基本的材料,属于基础材料工业的范畴。钢铁还可以直接为人民的日常生活服务,如为运输业、建筑业及民用品提供基本材料。故在一定意义上说,一个国家钢铁工业的发展状况也反映其国民经济发达的程度。

衡量钢铁工业的水平应考察其产量(人均年占有钢的数量)、质量、品种、经济效益及劳动生产率等各方面。纵观当今世界各国,所有发达国家无一不是具有相当发达的钢铁工业的。

钢铁工业的发展需要多方面的条件,如稳定可靠的原材料资源,包括铁矿石、煤炭及某些辅助原材料,如锰矿、石灰石及耐火材料等;稳定的动力资源,如电力、水等。此外,由于钢铁企业生产规模大,每天原材料及产品的吞吐量大,需要庞大的运输设施为其服务。一般要有铁路或水运干线经过钢铁厂。对于大型钢铁企业来说,还必须有重型机械的制造及电子工业为其服务。此外,建设钢铁企业需要的投资大,建设周期长,而回收效益慢。故雄厚的资金是发展钢铁企业的重要前提。

钢铁之所以成为各种机械装备及建筑、民用等各部门的基本材料,是因为它具备以下优越性能,并且价格低廉:

- (1)有较高的强度及韧性;
- (2)容易用铸、锻、切削及焊接等多种方式进行加工,以得到任何结构的工部件;
- (3)所需资源(铁矿、煤炭等)贮量丰富,可供长期大量采用,成本低廉;
- (4)人类自进入铁器时代以来,积累了数千年生产和加工钢铁材料的丰富经验,已具有成熟的生产技术。自古至今,与其他工业相比,钢铁工业相对生产规模大、效率高、质量好和成本低。

到目前为止还看不出,有任何其他材料在可预见的将来,能代替钢铁现有的地位。

1.2 中国钢铁工业的概况

中国是使用铁器最早的国家之一,春秋晚期(公元前6世纪)铁器已较广泛地得到应用。西汉时期盐铁官营,冶铁工业得到较大的发展,并在规模及生产技术等方面达到较先进的水平。据资料,当时已有了炉缸断面面积 8.5m^2 的高炉。中国的这种领先的优势一直延续了两千年,直到明代中叶(约17世纪初)西方资本主义世界的产业革命兴起时为止。

近代由于封建主义的束缚,外加帝国主义的掠夺和摧残,中国工业生产及科学技术的发展极度缓慢,到1949年中国的钢铁工业技术水平及装备极其落后,钢的年产量只有25万t。

新中国成立后至1960年,我国逐步建立了现代化钢铁工业的基础,年产量比1949年增加了40多倍,达到了1000万t以上。某些生产指标接近了当时的世界先进水平,中国具备了独立发展自己钢铁工业的实力。

1960~1966年间,在困难的条件下,我国的钢铁工业继续得到了发展,如炼铁方面以细粒铁精矿粉为原料的自熔性及超高碱度烧结矿,向高炉内喷吹煤粉以及成功地冶炼了一些特有的复合矿石等。

1966~1976年间我国国民经济基本上处于停滞不前的状态,1976年的粗钢产量仅为2045万t。与迅速发展世界经济相比,我国与世界经济水平的差距扩大了,装备陈旧,机械化、自动化水平低,技术经济指标落后,效率低,质量差,成本高。

从1977年开始,特别是党的十一届三中全会以来,中国钢铁工业走向持续发展的阶段。1982年,中国钢的年产量已接近4000万t,仅次于苏、美、日跃居世界第四位。1996年起中国年产钢已超过1亿t,名列世界首位。一些先进企业的技术经济指标已接近世界水平。1996/1997年世界主要国家生铁产量见表1-1。

表 1-1 世界主要国家 1996/1997 年生铁产量/万 t

国家	产量	国家	产量	国家	产量
中国	10721/11374	德国	2772/3094	印度	2045/1996
日本	7460/7852	巴西	2398/2490	法国	1200/1372
美国	4943/4960	韩国	2301/2270	英国	1283/1294
俄罗斯	3705/3685	乌克兰	1816/2057	意大利	1032/1128

1.3 钢铁联合企业中的炼铁生产

钢铁生产流程如图 1-1 所示。

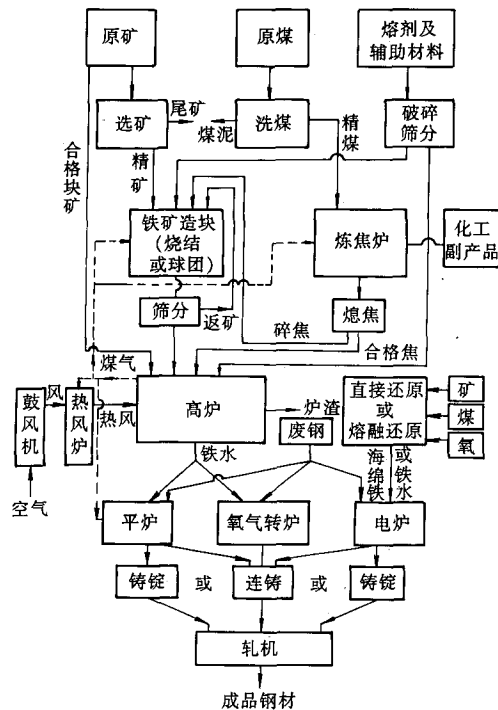


图 1-1 钢铁生产流程框图(未包括蒸汽、水、电等)

从图 1-1 中看出,由矿石到钢材的生产可分为两个流程:高炉—转炉—轧机流程;直接还原或熔融还原—电炉—轧机流程。前者被称为长流程,后者则被称为短流程。目前长流程是主要流程,但因它必须使用块状原料,需要配用质量好的炼焦煤在焦炉内炼成性能好的冶金焦,粉矿和精矿粉要制成烧结矿或球团矿。这两道生产工序不但能耗高,而且生产中产生粉尘、污水和废气等对环境造成污染。所以长流程面临能源和环保等的挑战。直接还原和熔融还原是用来替代高炉炼铁的两种工艺。

直接还原和熔融还原炼铁工艺(参阅本书第 8 章“非高炉炼铁”)的特点是,用块煤或气体还原剂代替高炉炼铁工艺所必需的焦炭来还原天然块矿、粉矿或人造块矿(烧结矿或球团矿),具有相当大的适应性,特别适用于某些资源匮乏、环保要求特别严格的地区或国家。但其生产规模较高炉小(1997 年世界直接还原铁产量为 3620 万 t,而熔融还原铁产量不足 90 万 t),而且很多技术问题还有待解决或完善。故在现阶段高炉炼铁仍占优势。预计 2015 年高炉铁的产量仍将占总铁产量的 70%~80%。

各种炼铁法的设备及生产方式差别很大,但其原理是共同的。

1.4 高炉冶炼过程概述

为了深入理解并掌握高炉冶炼过程的原理,首先从宏观上对高炉应有个整体的概念,如

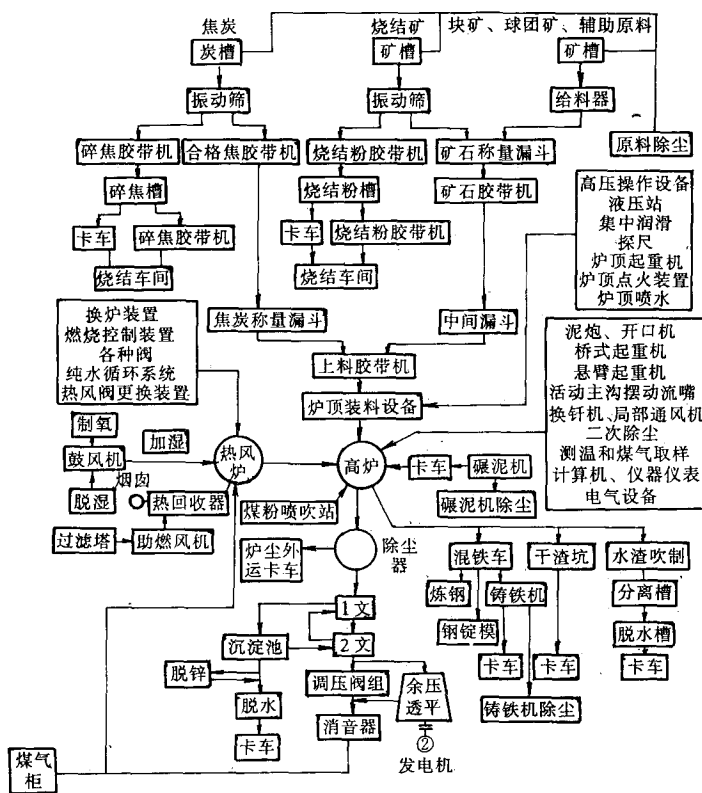


图 1-2 典型高炉炼铁工艺流程及其主要设备示意框图

了解其投入、产出以及总体上的特点等。要求能具体而形象地描述各种反应在高炉内动态变

化的过程。如原料在下降过程中,其温度、成分及性状的变化;煤气的产生及在上升过程中温度、压力、成分及体积的变化;同时要了解在炉料与煤气逆流运动过程中热量、质量及动量的传递是如何发生的。冶炼过程的概述只能给出具体的、粗浅的感性认识,但它是深入的理性认识的基础。

1.4.1 高炉炼铁工艺流程及炉内主要过程

图 1-2 示出的是典型的高炉炼铁生产工艺流程和使用的设备框图。从中看出高炉炼铁具有庞大的主体和辅助系统,包括高炉本体、原燃料系统、上料系统、送风系统、渣铁处理系统和煤气清洗处理系统。在建设上的投资高炉本体占 15%~20%,辅助系统占 85%~80%。各个系统互相联系在一起,但又相互制约,只有相互配合才能形成巨大的生产能力。

高炉冶炼过程是在一个密闭的竖炉内进行的。现代高炉的内型剖面图示于图 1-3。

高炉冶炼过程的特点是,在炉料与煤气逆流运动的过程中完成了多种错综复杂地交织在一起的化学反应和物理变化;且由于高炉是密封的容器,除去投入(装料)及产出(铁、渣及煤气)外,操作人员无法直接观察到反应过程的状况,只能凭借仪器仪表间接观察。

为了弄清楚这些反应和变化的规律,首先应对冶炼的全过程有个总体和概括的了解,这体现在能正确地描绘出运行中的高炉的纵剖面 and 不同高度上横截面的图像。这将有助于正确地理解和把握各种单一过程和因素间的相互关系。

高炉冶炼过程的主要目的是用铁矿石经济而高效率地得到温度和成分合乎要求的液态生铁。为此,一方面要实现矿石中金属元素(主要为 Fe)和氧元素的化学分离——即还原过程;另一方面还要实现已被还原的金属与脉石的机械分离——即熔化与造渣过程。最后控制温度和液态渣铁之间的交互作用得到温度和化学成分合格的铁液。全过程是在炉料自上而下、煤气自下而上的相互紧密接触过程中完成的。低温的矿石在下降的过程中被煤气由外向内逐渐夺去氧而还原,同时又自高温煤气得到热量。矿石升到一定的温度界限时先软化,后熔融滴落,实现渣铁分离。已熔化的渣铁之间及与固态焦炭接触过程中,发生诸多反应,最后调整铁液的成分和温度达到终点。故保证炉料均匀稳定的下降,控制煤气流均匀合理分布是高质量完成冶炼过程的关键。

总之,高炉冶炼的全过程可以概括为:在尽量低能量消耗的条件下,通过受控的炉料及煤气流的逆向运动,高效率地完成还原、造渣、传热及渣铁反应等过程,得到化学成分与温度较为理想的液态金属产品。

1.4.1.1 高炉内各区域的分布

曾经多次对正在运行中的高炉突然停炉,并对其解剖分析,在各种现象沿圆周分布对称

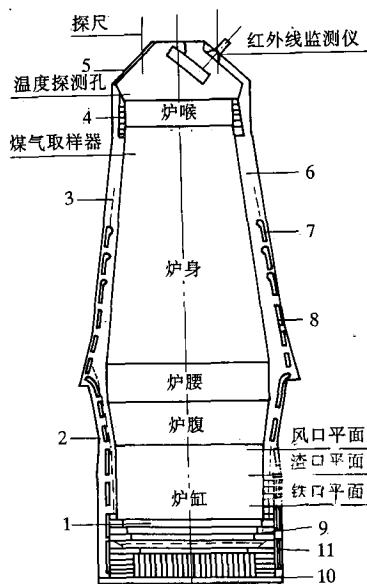


图 1-3 现代高炉内型剖面图

- 1—炉底耐火材料;2—炉壳;3—炉内砖衬生产后的侵蚀线;4—炉喉钢砖;5—炉顶封盖;
- 6—炉体砖衬;7—带凸台镶砖冷却壁;
- 8—镶砖冷却壁;9—炉底碳砖;
- 10—炉底水冷管;
- 11—光面冷却壁

的条件下,高炉过程及不同区域的特征可用以下高炉纵剖面图予以代表(图 1-4)。

各区内进行的主要反应及特征列入表 1-2。

表 1-2 高炉的各区内进行的主要反应和特征

区号	名称	主要反应	主要特征
1	固体炉料区	间接还原,炉料中水分蒸发及受热分解,少量直接还原,炉料与煤气间热交换	焦与矿呈层状交替分布,皆呈固体状态,以气固相反应为主
2	软熔区	炉料在软熔区上部边界开始软化,而在下部边界熔融滴落。主要进行直接还原反应及造渣	为固—液—气间的多相反应,软熔的矿石层对煤气阻力很大,决定煤气流动及分布的是焦窗总面积及其分布
3	疏松焦炭区	向下滴落的液态渣铁与煤气及固体炭之间进行多种复杂的质量传递及传热过程	松动的焦炭流不断地落向焦炭循环区,而其间又夹杂着向下流动的渣铁液滴
4	压实焦炭区	在堆积层表面,焦炭与渣铁间反应	此层相对呆滞又称“死料柱”
5	渣铁贮存区	在铁滴穿过渣层瞬间及渣铁层间的交界面上发生液—液反应;由风口得到辐射热,并在渣铁层中发生热传递	渣铁层相对静止 只有在周期性渣铁放出时才有较大扰动
6	风口焦炭循环区	焦炭及喷入的辅助燃料与热风发生燃烧反应,产生高热煤气,并主要向上快速逸出	焦炭急速循环运动,既是煤气产生的中心又是上部焦块得以连续下降的“漏斗”,是炉内高温的焦点

1.4.1.2 生产过程中应严密控制的各关键性环节

A 送风条件 在保证顺行的前提下,鼓入的风量越大则生产率越高;风口循环区在炉缸半径方向上大小适当,在圆周方向上分布均匀,以保证煤气分布合理;根据鼓风成分(是否富氧及含水量)以及是否喷吹辅助燃料,调节鼓风温度以适应炉内热状态的需要。

B 软熔区的位置、形状及尺寸 软熔区起着煤气分配器的作用。其位置、形状及大小对顺行、产量、燃料消耗量及铁水成分影响很大。操作中应监测软熔区形态的变化,并及时调整,以保证高炉整体运行于最佳状态。

C 固体炉料区的工作状态 这是决定单位生铁燃料消耗量的关键。要使该区达到较佳的工作状态,首先要严格要求入炉原料达到质量标准;其次要遵守炉顶装料制度并根据炉况变化随时调节焦炭及矿石在炉内的分布,使由软熔区上升的煤气完成合理的再分布;最后还要尽可能充分利用煤气的化学能(表现为炉顶逸出煤气的利用率高)和热能(炉顶温度低)。

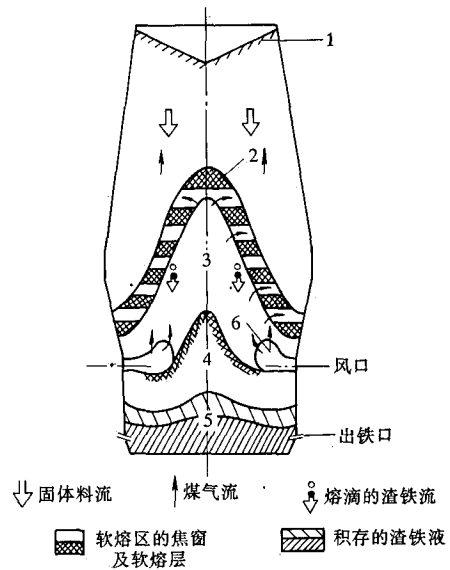


图 1-4 运行中的高炉纵剖面图
1—固体炉料区;2—软熔区;3—疏松焦炭区;
4—压实焦炭区;5—渣铁贮存区;6—风口焦炭循环区

1.4.2 含铁原料及其他辅助原料

1.4.2.1 铁矿石

如以年产 5000 万 t 生铁计,需原矿 1.5~2.0 亿 t。

地壳中铁的贮量比较丰富,按元素总量计占 4.2%,仅次于氧、硅及铝居第四位。但在自然界中铁不能以纯金属状态存在,绝大多数形成氧化物、硫化物或碳酸盐等化合物。不同的岩石含铁品位可以差别很大。凡在当前技术条件下,可以从中经济地提取出金属铁的岩石称为铁矿石。这样,铁矿石中除有含 Fe 的有用矿物外,还含有其他化合物,统称为脉石。常见的脉石有 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 及 MgO 等。

A 铁矿石的分类 炼铁生产使用的铁矿石中铁元素是以氧化物形态赋存的,根据铁矿石中铁氧化物主要矿物形态人们把铁矿石分为赤铁矿、磁铁矿、褐铁矿和菱铁矿等。各种铁矿石的主要特征列于表 1-3。

表 1-3 不同种类铁矿石的特征

矿石名称	矿物名称	理论含铁量/%	密度 ($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$)	颜色	条痕	实际富矿含铁量/%	强度及还原性
磁铁矿	磁铁矿 (Fe_3O_4)	72.4	5.2	黑或灰有光泽	黑	45~70	坚硬、致密、难还原
赤铁矿	赤铁矿 (Fe_2O_3)	70.0	4.9~5.3	红或浅灰	红	55~68	软、易破碎、易还原
褐铁矿	水赤铁矿 ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)	66.1	4.0~5.0	黄褐 暗褐或绒黑	黄褐	37~58	疏松,易还原
	针赤铁矿 ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)	62.9	4.0~4.5				
	水针铁矿 ($3\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)	60.9	3.0~4.4				
	褐铁矿 ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)	60.0	3.0~4.2				
	黄针铁矿 ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	57.2	3.0~4.0				
	黄赭石 ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)	55.2	2.5~4.0				
菱铁矿	菱铁矿 (FeCO_3)	48.2	3.8	灰带有黄褐	灰或带黄色	30~40	易破碎,焙烧后易还原

矿石长期在自然界中受到氧化,磁铁矿常转化为半假象赤铁矿或假象赤铁矿。所谓“假象”赤铁矿,是指从化学成分上 Fe_3O_4 已氧化为 Fe_2O_3 ,但仍保留了原磁铁矿结晶结构的特征。一般以矿石中全含铁量 $w(\text{Fe}_{\text{全}})$ 与 $w(\text{FeO})$ 量的比值判别磁铁矿受到氧化的程度:

$$\begin{aligned} w(\text{Fe}_{\text{全}})/w(\text{FeO}) &\geq 7.0 && \text{称为假象赤铁矿} \\ 7.0 > w(\text{Fe}_{\text{全}})/w(\text{FeO}) &\geq 3.5 && \text{称为半假象赤铁矿} \\ w(\text{Fe}_{\text{全}})/w(\text{FeO}) &< 3.5 && \text{为磁铁矿} \end{aligned}$$

其中 $w(\text{Fe}_{\text{全}})$ ——矿石中含 Fe 总量, %;

$w(\text{FeO})$ ——矿石中 FeO 含量, %。

B 对铁矿石的评价 对铁矿石的评价是:

(1) 含 Fe 品位:矿石品位基本上决定了矿石的价格,即冶炼的经济性。市场上往往以含

Fe 量单位数计价。因为含 Fe 量愈高的矿石,脉石含量愈低,则冶炼时所需熔剂量和形成的渣量也少,用于分离渣与铁所耗能量相应降低。含 Fe 量高并可直接送入高炉冶炼的铁矿石称为富矿;含 Fe 品位低需经富选才能入炉的为贫矿。划分富矿与贫矿没有统一的标准,此界限将随选矿及冶炼技术水平的提高而变化。

一般将矿石中 Fe 的质量分数高于 65% 而 S、P 等杂质少的矿石,供直接还原法和熔融还原法使用。而矿石中 Fe 的质量分数高于 50% 而低于 65% 的可供高炉使用。我国富矿贮量已很少,绝大部分是 Fe 的质量分数为 30% 左右的贫矿,要经过富选才能使用。

(2) 脉石的成分及分布:铁矿石中的脉石包括 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 及 MgO 等金属氧化物,在高炉条件下,这些氧化物不能或很难被还原为金属,最终以炉渣的形式与金属分离。渣中碱性氧化物(CaO 、 MgO 等)与酸性氧化物(SiO_2 等)的质量分数应大体相等。因为只有如此,渣的熔点才较低,粘度也较小,易于在炉内处理而不致有碍于正常操作。为此,实际操作中应根据铁矿石带入的脉石的成分和数量,配加适当的“助熔剂”,简称“熔剂”,以便得到性能较理想的炉渣。此外,造渣物的另一个重要来源——焦炭及煤粉灰分,几乎是 100% 的酸性氧化物,必须从其他炉料中摄取碱性成分。然而大多数铁矿石的脉石也是酸性氧化物。故通常要消耗相当数量的石灰石(CaCO_3)或白云石(CaCO_3 、 MgCO_3)等碱性物作为熔剂。若矿石的脉石成分中碱性物较多,甚至以碱性物为主,必然会节省为中和燃料灰分中的酸性造渣物所需外加的熔剂量,这是极为有利的。但是如果矿石带入的碱性脉石数量超过了造渣的总体需要量,也会给冶炼造成困难。我国有极少数地区性小矿,如河北省涞源的高 MgO 铁矿石,即属于此种类型。

有些矿石中 Al_2O_3 的质量分数很高,也是不利的,因为 Al_2O_3 将大大地提高炉渣的熔点。印度产铁矿石及我国河北省承德地区平安堡矿即为此种类型。

矿石中($\text{CaO}+\text{MgO}$)质量分数适当的矿石,可允许矿石中 Fe 的质量分数低些,冶炼仍然是经济的。用扣除($\text{CaO}+\text{MgO}$)后的折算 Fe 的质量分数对不同的矿石进行评价和对比是合理的。

矿石中脉石的结构和分布,特别对于贫矿,是很重要的特性。如果含 Fe 矿物结晶颗粒比较粗大,则在选矿过程中容易实现有用矿物的单体分离,从而使有用元素达到有效的富集。相反,如果含 Fe 矿物呈细粒结晶嵌布在脉石矿物的晶粒中,则要消耗更多的能量以细碎矿石才能实现有用矿物的单体分离。我国河北省冀东矿属于前者,而四川省攀西地区的钒钛磁铁矿属于后者。

此外,有用矿物及脉石矿物的结构又决定了矿石的致密程度,影响矿石的机械强度及还原性。矿石要具有一定的机械强度,但不宜过度致密,以致难以进行加工和被还原。

(3) 有害元素的含量:矿石中除去不能还原而造渣的氧化物外,常含有其他化合物,它们可以被还原为元素形态。其中有的可与 Fe 形成合金,有的则不能,有些则是有害的。

常见的有害元素是 S、P;较少见的有碱金属(K、Na 等)以及 Cu、Pb、Zn、F 及 As 等。

S、P、As 和 Cu 易还原为元素并进入生铁,对铁及其后的钢及钢材的性能有害。碱金属及 Zn、Pb 和 F 等虽不能进入生铁,但易于破坏炉衬,或易于挥发并在炉内循环累积造成结瘤事故,或污染环境有害人身健康。事先用选矿法除去这些有害杂质,或困难很大,或代价太高,迫使高炉炉料中不得限制这些矿石用量的百分比,从而极大地降低了这些矿石的使用价值。

各种有害杂质的界限含量见表 1-4。

表 1-4 矿石中有害杂质的危害及界限含量

元素	允许的质量分数/%	危害及某些说明	
S	≤0.3	使钢产生“热脆”，易轧裂	
P	≤0.3	对酸性转炉生铁	磷使钢产生“冷脆” 烧结及炼铁过程皆不能除磷 矿石允许含磷量 $w(P_{\text{矿}})$ 可按下式计算 $w(P_{\text{矿}}) = \frac{[w(P_{\text{铁}}) - w(P_{\text{熔炼}})] \times w(Fe_{\text{矿}})}{w(Fe_{\text{铁}})} (\%)$
	0.03~0.18	对碱性平炉生铁	
	0.2~1.2	对碱性转炉生铁	
	0.05~0.15	对普通铸造生铁	
	0.15~0.6	对高磷铸造生铁	
Zn	≤0.1~0.2	Zn 在 900℃ 挥发，上升后冷凝沉积于炉墙，使炉墙膨胀，破坏炉壳。烧结时可除去 50%~60% 的 Zn	
Pb	≤0.1	Pb 易还原，密度大，与 Fe 分离沉于炉底，破坏砖衬，Pb 蒸气在上部循环累积，形成炉瘤，破坏炉衬	
Cu	≤0.2	少量 Cu 可改善钢的耐腐蚀性。但 Cu 过多使钢热脆，不易焊接和轧制。Cu 易还原并进入生铁	
As	≤0.07	砷使钢“冷脆”，不易焊接。生铁含 [As] ≤ 0.1%。炼优质钢时，铁中不应有 [As]	
Ti	(TiO ₂) 15~16	钛降低钢的耐磨性及耐腐蚀性。使炉渣变粘易起泡沫。含 (TiO ₂) 过高的矿应作为宝贵的 Ti 资源	
K, Na		易挥发，在炉内循环累积，造成结瘤，降低焦炭及矿石的强度	
F		氟高温下气化，腐蚀金属，危害农作物及人体，CaF ₂ 侵蚀破坏炉衬	

(4) 有益元素：有些与 Fe 伴生的元素可被还原并进入生铁，并能改善钢铁材料的性能。这些有益元素有 Cr、Ni、V 及 Nb 等。还有的矿石中的伴生元素有极高的单独分离提取的价值，如 Ti 及稀土元素等。某些情况下，这些元素的品位已达到可单独分离利用的程度，虽然其绝对含量相对于 Fe 仍是少量的，但其价值已远超过铁矿石本身，则这类矿石应作为宝贵的综合利用的资源。

(5) 矿石的还原性：矿石在炉内被煤气还原的难易程度称为“还原性”。冶炼易还原的矿石，可降低碳素消耗量。矿石的还原性与其结构，特别是开口的微气孔率及气孔的分布状态有关。一般赤铁矿不如磁铁矿致密，还原性好。褐铁矿及菱铁矿在炉内受热后，其所含碳酸盐及结晶水或分解或挥发，留下孔洞，形成疏松多孔的结构便于煤气的渗透，故此类矿石的还原性好。

(6) 矿石的高温性能：矿石是在炉内逐渐受热、升温的过程中被还原的。矿石在受热及被还原的过程中及还原后都不应因强度下降而破碎，以免矿粉堵塞煤气流通孔道而造成冶炼过程的障碍。

为了在熔化造渣之前，矿石更多地被煤气所还原，矿石的软化熔融温度不可过低，软化与熔融的温度区间不可过宽。这样一方面可保证炉内有良好的透气性，另一方面可使矿石在软熔前达到较高的还原度，以减少高温直接还原度，降低能源消耗。

C 国内外铁矿石分布及成分 我国的铁矿石资源不算丰富。1982 年底已探明保有储量为 443 亿 t。其中工业储量占 54%。近年来年产铁矿石都在 2 亿 t 以上。但由于我国钢铁工业自 1980 年后发展很快，而矿山由于所需投资大，建设周期长，赶不上钢铁工业发展的速度，故目前铁矿石尚不能自给自足，每年进口 3000 万 t 以上。