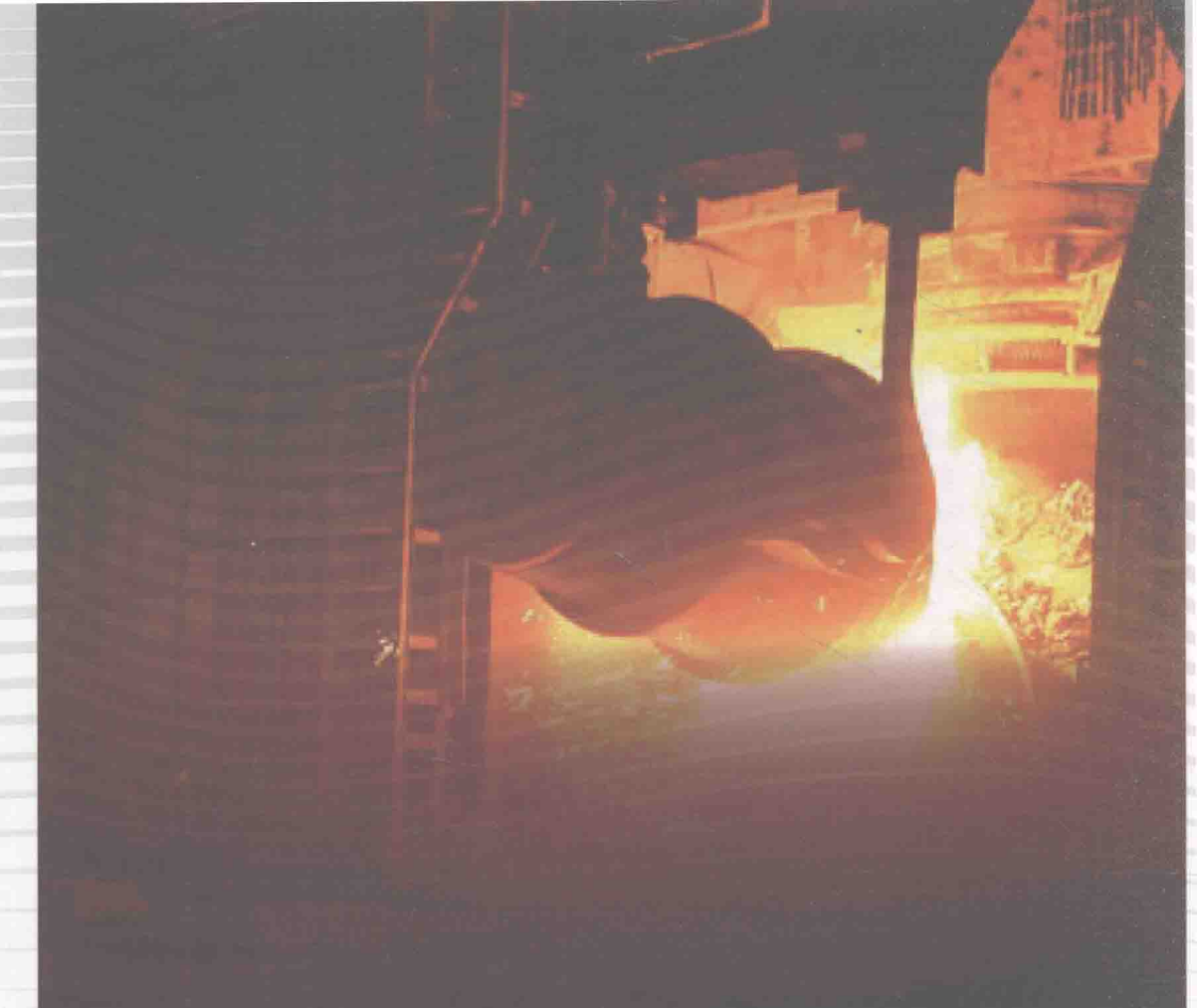




简明钢铁冶金学教程

张昌钦 田彬 编著



化学工业出版社

简明钢铁冶金学教程

张昌钦 田彬 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书介绍了炼铁、炼钢和连铸过程的新工艺、新设备和新技术, 主要内容包括现代高炉炼铁工艺概述、高炉原料的加工处理、高炉炼铁原理、高炉强化冶炼操作、炼钢基本原理、炼钢用原材料、氧气转炉炼钢、电炉炼钢、炉外精炼、钢的连铸工艺等方面。

本书可作为高等学校材料、机械等非钢铁冶金专业本科生或专科生的教材, 也可供从事钢铁生产的工程技术人员以及管理人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

简明钢铁冶金学教程/张昌钦, 田彬编著. —北京:
化学工业出版社, 2015. 10

ISBN 978-7-122-24981-4

I. ①简… II. ①张… ②田… III. ①钢铁冶金-高等学校-教材 IV. ①TF4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 196102 号

责任编辑: 李玉晖 杨 菁

文字编辑: 张绪瑞

责任校对: 王 静

装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 三河市万龙印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张 10.5 字数 196 千字 2016 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

| 前言 |

| FOREWORD |

进入铁器时代以来,钢铁材料一直是人类经济建设和日常生活中最重要的结构材料和用量最大的功能材料,在经济发展中发挥着举足轻重的作用。尽管近年来钢铁材料面临着陶瓷材料、高分子材料、有色金属材料等的挑战,但由于在铁矿石储量、生产成本、回收再利用率、综合性能等方面具有明显优势,可以预期,钢铁材料在材料行业中的统治地位在今后很长的时期内不会改变。

2012年、2013年和2014年,中国钢产量连续三年超过7亿吨。对中国钢铁工业来说,单纯强调产量的增长已经不能满足全行业可持续发展的要求,质量的提高和产品结构的优化必须真正提上行业的发展日程,以求建立一个全面、协调、可持续发展的行业新格局。

钢铁工业的发展是一个系统工程,需要多个专业方向的人才参与其中。笔者主修金属材料学专业,之后在钢铁企业技术中心从事钢铁产品和工艺研发工作,深感非钢铁冶金专业的工程技术人员及企业管理人员需要对钢铁冶金的全流程有一个概要式的了解才能理解并支持配合钢铁冶金工作者的工作,实现高效协调的研究、生产、管理局面。为了满足非钢铁冶金专业从业人员的需要以及高等学校非钢铁冶金专业培养钢铁工业从业人才的需要,笔者参考了诸多专家学者的文献,并结合自己在钢铁企业的从业经历进行了概括、甄选和提炼,编写了本书。

考虑到非钢铁冶金专业人员的相关知识基础特点,在内容的甄选和安排上,注意了以下三个方面:

(1) 重点突出。对于钢铁冶金过程中所涉及的反应、原理、工艺和流程,只详细阐述最基本、最核心和实际生产中最经常接触的部分,其他部分只作科普性介绍,省去了大篇幅的推导、解释和讨论。

(2) 注重工艺。对炼铁原料处理工艺、炼铁工艺、炼钢工艺、炉外精炼工艺、连铸工艺等进行了全面论述,通过本书的学习,可以全面了解钢铁冶金的工艺过程。

(3) 强调时效。对近年来钢铁冶金技术的发展进行了比较全面的概括,引入了对钢铁冶金工业发展有重要影响的新技术。

受水平所限,书中不足之处,恳请读者批评指正。

山东建筑大学 张昌钦

2015年4月于济南

I 目录 I | CONTENTS |

0 绪论	1
1 现代高炉炼铁	3
1.1 高炉炼铁概述	3
1.1.1 高炉本体及主要构成	3
1.1.2 高炉炼铁生产流程	5
1.1.3 高炉冶炼产品	6
1.1.4 高炉主要技术经济指标	7
1.2 高炉炼铁原料	8
1.2.1 铁矿石	8
1.2.2 熔剂	11
1.2.3 高炉燃料	12
1.3 烧结与球团	14
1.3.1 烧结矿	14
1.3.2 球团矿	20
1.4 高炉炼铁基础理论	26
1.4.1 高炉内还原过程	26
1.4.2 直接还原与间接还原	29
1.4.3 铁矿还原动力学	30
1.4.4 渗碳和生铁的形成	32
1.4.5 造渣与脱硫	33
2 高炉炉料和煤气运动	39
2.1 炉缸反应	39
2.1.1 炉缸燃烧反应机理	39
2.1.2 炉缸燃烧反应过程	40
2.1.3 下部调剂原理	42
2.1.4 风口区理论燃烧温度	43
2.2 煤气运动	44
2.2.1 煤气上升过程中的变化	44
2.2.2 高炉热交换	45
2.3 炉料运动	47

2.3.1	炉料下降	47
2.3.2	高炉料柱压差	47
2.3.3	改善料柱透气性	48
2.3.4	上部调剂原理	50
3	高炉强化冶炼	53
3.1	精料	53
3.1.1	精料的要求	53
3.1.2	人造富矿的发展方向	54
3.1.3	提高人造富矿的高温冶金性能	54
3.1.4	合理炉料结构	56
3.2	高压操作	59
3.3	高风温	60
3.3.1	高风温的影响	61
3.3.2	高风温的获得	61
3.4	喷吹燃料	62
3.4.1	喷吹燃料对高炉冶炼的影响	62
3.4.2	置换比与喷吹量	63
3.4.3	限制喷吹量的因素	64
3.5	富氧鼓风操作	65
3.5.1	富氧对高炉冶炼的影响	65
3.5.2	富氧鼓风操作特点	65
4	炼钢基础理论	67
4.1	炼钢用原材料	67
4.1.1	金属料	67
4.1.2	非金属材料	69
4.1.3	氧化剂	71
4.2	炼钢的基本任务	71
4.2.1	钢中的磷	71
4.2.2	钢中的硫	71
4.2.3	钢中的氧	72
4.2.4	钢中的气体	72
4.2.5	钢中的非金属夹杂	73
4.2.6	钢的成分	73
4.3	炼钢过程中的主要反应	74
4.3.1	钢液的主要性质	74

4.3.2	熔渣的主要性质	77
4.3.3	碳氧化反应	80
4.3.4	钢液的脱磷	80
4.3.5	钢液的脱硫	81
4.3.6	钢液的脱氧	82
4.3.7	氢、氮的反应	84
4.3.8	硅、锰的氧化和还原反应	85
5	主要炼钢方法	87
5.1	氧气转炉炼钢法	87
5.1.1	顶吹氧气转炉炼钢法	87
5.1.2	底吹氧气转炉炼钢法	98
5.1.3	侧吹氧气转炉炼钢法	98
5.1.4	顶底复合吹炼转炉炼钢法	100
5.2	电炉炼钢	101
5.2.1	电炉炼钢发展前景	101
5.2.2	电炉炼钢设备	102
5.2.3	电炉炼钢冶炼工艺	103
5.3	炉外处理	110
5.3.1	炉外处理的基本手段	110
5.3.2	铁水预处理技术	113
5.3.3	钢水二次精炼方法	116
5.3.4	炉外精炼发展趋势	124
6	钢的连续浇铸	126
6.1	概述	126
6.2	连铸机的主要设备	127
6.2.1	连铸机的基本参数	127
6.2.2	钢包	129
6.2.3	中间包	129
6.2.4	结晶器	131
6.2.5	二次冷却系统	132
6.2.6	拉坯矫直装置	132
6.2.7	引锭装置	133
6.2.8	铸坯切割装置	133
6.2.9	出坯系统的各种设备	134
6.3	连铸坯的凝固	134

6.3.1	连铸坯的凝固特征	134
6.3.2	连铸坯的凝固结构	136
6.3.3	连铸坯冷却过程中的相变和应力	136
6.4	连铸操作工艺	137
6.4.1	连铸钢液的准备	137
6.4.2	浇铸前的准备	138
6.4.3	浇钢操作	139
6.4.4	拉速的控制	142
6.4.5	冷却水控制	142
6.4.6	保护浇铸	143
6.4.7	保护渣	143
6.4.8	中间包覆盖剂	146
6.5	连铸坯质量	146
6.5.1	连铸坯的纯净度	147
6.5.2	连铸坯表面质量	148
6.5.3	连铸坯内部质量	151
6.5.4	连铸坯形状缺陷	153
6.6	薄板坯连铸连轧	154
6.6.1	薄板坯连铸工艺的优点	155
6.6.2	薄板坯连铸连轧的关键技术	156
6.6.3	典型的薄板坯连铸连轧技术	157
参考文献		160

0

绪 论

钢具有强度高、韧性好、易加工等特性，是一种优良的结构材料。改变钢中的合金元素种类及其含量可以获得不同性能的合金钢，从而满足制造各种工具和设备的要求。此外，铁矿石储藏丰富，便于冶炼和加工，可以进行大规模工业化生产。因此，钢铁一直是经济建设、社会发展的重要物质基础，其发展水平也成为衡量一个国家国力的重要标志之一。

钢铁冶金可分为炼铁学和炼钢学两大领域。炼铁是以含铁矿石为主要原料，以焦炭、煤为主要能源，生产炼钢生铁（或铁水）以及部分铸造生铁和铁合金的过程。炼钢是将铁水、直接还原铁或废钢（铁）经加热、熔化，通过化学反应去除金属液中的有害杂质元素，配加合金并浇铸成铸坯（或铸锭）的过程。

钢铁冶炼中的铁元素主要来自于铁矿石。从铁矿石中提取铁元素，有高炉炼铁、直接还原和熔融还原等方式，产品有液态铁水和固态金属铁。目前，高炉炼铁技术较为成熟，其单体设备生产能力大，消耗低，铁水质量较好，但必须用高质量焦炭。为了少用焦炭，高炉上一般采用喷煤技术来降低焦比，缩小焦炭生产规模。这样就减少了环境污染，增强了高炉炼铁工艺的生命力。为了扩大生产规模，提高质量，降低消耗，提高劳动生产率，高炉必须大型化。因此，淘汰技术落后的中小高炉，逐步实行高炉的大型化，是钢铁工业的发展趋势。高炉大型化是现代钢铁工业发展的重要标志之一。

现代炼钢始于 1856 年的酸性底吹转炉炼钢法。该方法首次解决了大规模生产液态钢的问题，奠定了近代炼钢工艺的基础。由于空气与铁水直接作用，该法具有较高的冶炼速度，成为当时主要的炼钢方法。但是，该工艺采用酸性炉衬，不能造碱性炉渣，因而不能进行脱磷和脱硫。1879 年，碱性底吹转炉炼钢法成功地解决了酸性转炉不能冶炼高磷生铁的问题。随后在 1899 年，电弧炉炼钢方法也开发成功。第二次世界大战结束后，世界钢铁工业进入了快速发展时期。这期间开发成功的氧气顶吹转炉炼钢技术和钢水连续浇铸技术，对随后的钢铁工业发展起到了非常重要的推动作用。20 世纪 70 年代，氧气转炉成为主要的炼钢设备。在氧气顶吹转炉炼钢迅速发展的同时，法国、德国、美国等国成功发明了氧

气底吹转炉炼钢方法,通过喷吹甲烷、重油、柴油等对喷口进行冷却,使纯氧能从炉底吹入熔池而不致损坏炉底。80年代中后期,西欧、日本、美国等相继开发氧气顶底复吹转炉炼钢方法,氧气由顶部氧枪供入,同时由炉底喷口吹入氩、氮等气体对熔池进行搅拌(炉底也可吹入少量氧气)。氧气顶底复吹转炉炼钢同时具备顶吹转炉炼钢渣好、废钢用量多,以及氧气底吹转炉炼钢熔池搅拌好、铁和锰氧化损失少、金属喷溅少等优点。目前世界上较大容量的炼钢转炉多数采用了氧气顶底复吹转炉炼钢工艺。

1933年,德国人发明了振动式连铸结晶器,大大减少了拉漏率。1954年开发的连铸结晶器“负滑脱”振动技术,有效地防止了铸坯与结晶器壁的粘连,使钢连铸的关键技术得到突破,从而使此技术步入工业应用阶段。与模铸相比,连铸在建设投资、节能、钢材收得率、产量和质量等方面具有明显的优势。20世纪六七十年代,日本、西欧开始大规模采用连铸技术。至80年代,世界连铸钢产量超过模铸钢,钢铁发达国家连铸技术迅速发展,连铸比均超过了90%。连续铸钢技术的采用不仅完全改变了旧的铸钢工序,还带动了整个钢铁厂的结构优化,因此被称为钢铁工业的一次“技术革命”。由于连铸生产节奏快,为了适应连铸,必须缩短钢的冶炼时间。因此,传统的炼钢工序与功能被进一步分解,铁水预处理、电炉短流程、钢水炉外精炼等重大技术得以快速发展。

铁水预处理最初主要用于冶炼少数高级钢或用于高硫铁水辅助脱硫,脱硫剂主要使用镁焦、 CaC_2 等。20世纪80年代,日本钢铁厂开始大规模采用铁水“三脱”预处理(脱硅、脱磷、脱硫),在高炉出铁沟喷吹氧化铁和 CaO 进行脱硅,在铁水包或混铁车内喷粉进行脱硫和脱磷处理。采用铁水“三脱”预处理和钢水炉外精炼后,转炉的功能由炼钢简化为“钢水的脱碳和提温容器”,转炉吹炼时间减少至9~12min。此外,炼钢产生的炉渣量显著减少,减轻了炼钢的环境负荷。

传统电弧炉炼钢时间长达4~6h,采用连铸后,必须缩短电弧炉冶炼时间以保证与连铸节奏相匹配。现代化的电弧炉炼钢采用超高功率、余热预热废钢、氧燃助熔以及二次精炼等技术,电弧炉冶炼功能也由传统的熔化、脱碳、脱磷、脱硫、脱氧等简化为熔化和脱碳升温,冶炼时间缩短至40~50min。与氧气炼钢工艺相比,电弧炉炼钢具有建设投资少、流程短、劳动生产率高等优点。

20世纪50年代中后期,钢水炉外精炼方法开发成功,可用于高级钢脱除 $[\text{N}]$ 、 $[\text{H}]$ 等。70年代后,尤其是钢铁工业大规模采用连铸技术后,炉外精炼技术迅速发展,精炼方式包括吹氩搅拌、喂线、氩氧精炼、电弧加热、真空处理等多种方式,功能则由最初的钢水脱气发展为加热升温、渣钢精炼脱硫和脱氧、超低碳钢脱碳、成分微调、去除夹杂物等多种功能。目前,现代化钢厂钢水炉外精炼比接近100%,原来由转炉和电弧炉炼钢承担的脱硫、深度脱碳、脱氧、合金化、夹杂物控制等多数转为由炉外精炼工序承担。

1

现代高炉炼铁

1.1 高炉炼铁概述

1.1.1 高炉本体及主要构成

高炉本体是冶炼生铁的主体设备。它是由耐火材料砌筑成竖式圆筒形，外有钢板炉壳加固密封，内嵌冷却设备保护（图 1.1）。高炉内部工作空间从下往上

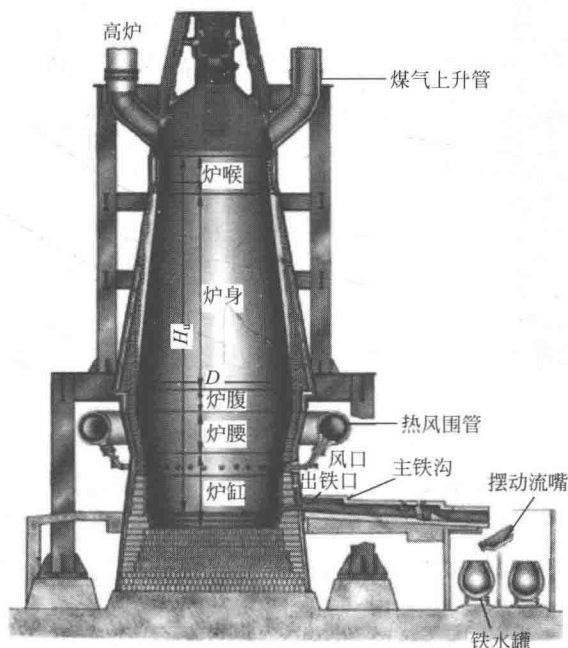


图 1.1 现代高炉炉体剖面图

分为炉缸、炉腰、炉腹、炉身和炉喉五个部分，该容积总和为它的有效容积，反映了高炉所具备的生产能力。高炉内型的形状和尺寸主要与原料、燃料条件和操作制度有关，合理的内型有利于高炉操作顺行、高产、低耗。随着冶炼条件的改善，装备水平和操作水平的提高，高炉内型逐步向矮胖型发展。

高炉内耐火材料砌筑的实体称为高炉内衬，其作用是形成高炉工作空间。由于高炉冶炼过程温度高且存在复杂的物理化学反应，炉衬在冶炼过程中将受到侵蚀和破坏。当炉衬被侵蚀到一定程度时，需要采取措施修补。对高炉内衬的基本要求如下：1) 各部位内衬与热流强度相适应，以保持在高热流冲击下内衬的稳定性；2) 各部位内衬与侵蚀破损机理相适应，既可以延缓内衬破损速度，又有利于降低高炉建设成本。通常，高炉炉衬以陶瓷质材料（包括黏土质和高铝质等）和炭质材料（炭砖、炭捣石墨等）砌筑。

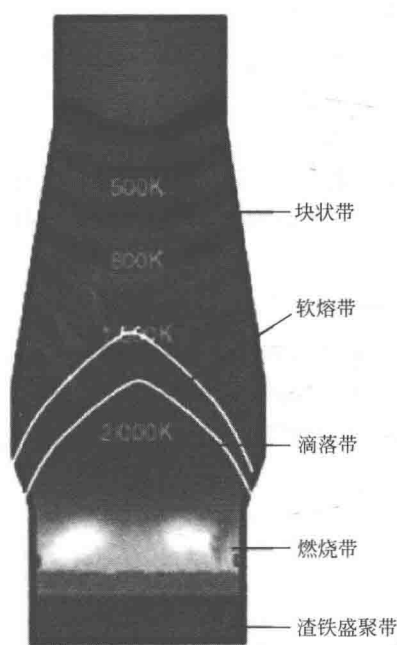


图 1.2 高炉料柱结构及区域分布

炉衬的温度状态是决定其侵蚀速度的重要因素之一。因此，采用适宜的冷却设备维持高炉炉衬在一定温度下工作，可使其不失去强度，维持炉型。使用冷却设备还可保护炉壳及各种钢结构，使其不因受热变形而破坏。通过使用冷却设备，在高炉的某些部位还可形成渣皮，从而保护炉衬，代替炉衬工作。冷却炉衬的方法是：将通有冷却介质的金属冷却器件插入砌体或置于砌体外缘表面，由冷却介质将进入炉衬的热量带走，从而使输入和输出炉衬的热流平衡，保持炉衬工作表面稳定。

将正在运行中的高炉突然停炉并进行解剖分析，结果表明根据物料存在形态的不同，可将高炉划分为五个区域：块状带、软熔带、滴落带、燃烧带、渣铁盛聚带（图 1.2）。各区域内进行的主要反应及特征分别为：

① 块状带。炉料中水分蒸发及受热分解，铁矿石还原，炉料与煤气热交换；焦炭与矿石层状交替分布，呈固体状态；以气固相反应为主。

② 软熔带。炉料在该区域软化，在下部边界开始熔融滴落；主要进行直接还原反应，初渣形成。

③ 滴落带。滴落的液态渣铁与煤气及固体碳之间进行多种复杂的化学反应。

④ 燃烧带。喷入的燃料与热风发生燃烧反应，产生高热煤气，是炉内温度

最高的区域。

⑤ 渣铁盛聚带。在渣铁层间的交界面及铁滴穿过渣层时发生渣金反应。

1.1.2 高炉炼铁生产流程

高炉炼铁的本质是铁的还原过程，即用焦炭做燃料和还原剂，在高温下将铁矿石或含铁原料中的铁从氧化物或矿物状态（如 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、 Fe_2SiO_4 等）还原为液态生铁。冶炼过程中，炉料（矿石、熔剂、焦炭）按照确定的比例通过装料设备分批地从炉顶装入炉内，高温热风从下部风口鼓入，与焦炭反应生成高温还原性煤气；炉料在下降过程中被加热、还原、熔化、造渣，发生一系列物理化学变化，最后生成液态渣、铁聚集于炉缸，周期地从高炉排出。煤气流上升过程中，温度不断降低，成分逐渐变化，最后形成高炉煤气从炉顶排出。高炉炼铁生产工艺过程如图 1.3 所示。

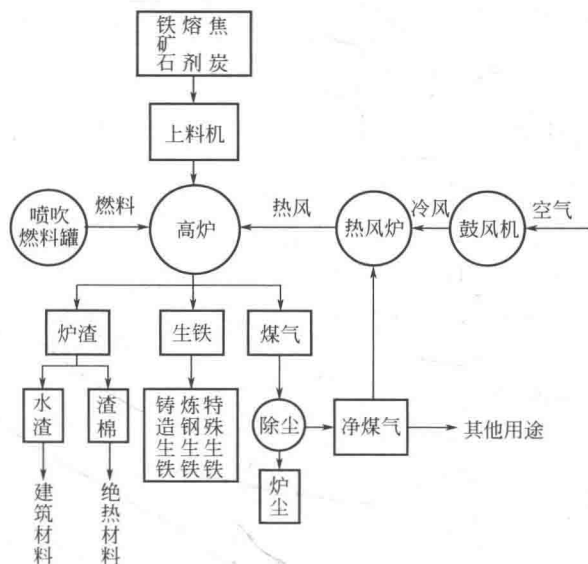


图 1.3 现代高炉炼铁生产工艺过程

高炉炼铁生产过程非常复杂，除高炉本体以外，还包括有原燃料系统、上料系统、送风系统、渣铁处理系统、煤气处理系统等辅助系统。生产中，各个系统互相配合、互相制约，形成一个连续的、大规模的高温生产过程。此外，高炉生产还具有连续、不间断的特点。高炉开炉之后，整个系统必须一直进行生产，除了计划检修和特殊事故暂时休风外，一般要到高炉一代寿命终了时才停炉。

1.1.3 高炉冶炼产品

高炉冶炼的主要产品是生铁，炉渣和高炉煤气为副产品。

1.1.3.1 生铁

生铁是铁与碳及其他一些元素的合金。通常生铁含铁 94% 左右，含碳 4% 左右，其余为硅、锰、磷、硫等少量元素。生铁可分为炼钢生铁、铸造生铁。炼钢生铁供转炉、电炉炼钢使用，占生铁产量的 80%~90%；铸造生铁又称为翻砂铁或灰口铁，主要用于生产耐压铸件，约占生铁产量的 10% 左右。铸造生铁的主要特点是含硅较高，在 1.25%~4.25% 之间。硅在生铁中能促进石墨化，使化合碳游离成石墨碳，增强铸件的韧性、耐冲击性并易于切削加工。高炉还可生产特殊生铁，如锰铁、硅铁、镜铁、硅镜铁等，主要用作炼钢脱氧剂和合金化剂。此外，生铁中还可能含有部分微量元素，当微量元素含量之和小于 0.11% 时称为高纯生铁。

1.1.3.2 高炉渣

由于矿石品位、焦比及焦炭灰分的不同，高炉生产每吨生铁产生的炉渣量差异很大。我国大中型高炉的单位生铁渣量在 0.13~0.15t 之间。一些原料条件差、技术水平低的高炉，单位生铁渣量甚至超过 0.16t。高炉渣主要是由钙、镁、硅、铝的氧化物构成的复杂硅酸盐系。此外，高炉渣中还含有少量硫化物和碳化物。

高炉渣的工业用途广泛。如在炉前急冷粒化成水渣，制成水泥和建筑材料；酸性渣还可在炉前用蒸汽吹成渣棉，作为绝热材料。炉渣还可代替天然碎石作为路基材料。冶炼多元素共生的复合矿时，炉渣中常富集有多种元素（如稀土、钛等），这类炉渣可进一步利用。

1.1.3.3 高炉煤气

冶炼每吨生铁可产生 1600~3000m³ 的高炉煤气，其中含 CO₂ 25%，H₂ 3%，还有少量甲烷等可燃性气体。从高炉排出的煤气中含有大量的炉料粉尘，经过除尘处理可使含尘量降到 10~20mg/m³，是良好的气体燃料。但高炉冶炼产生的煤气量、成分及发热值与高炉操作参数及产品种类有关。

高炉煤气是钢铁联合企业的重要二次能源，主要用作热风炉燃料，还可供动力、炼焦、烧结、炼钢、轧钢等部门使用。

1.1.4 高炉主要技术经济指标

① 有效容积利用系数：指高炉单位有效容积的日产铁量。

利用系数愈大，生铁产量愈高，高炉的生产率也就愈高。对一定容积的高炉，有效容积利用系数随生铁日产量成正比增加。对不同容积高炉，生铁日产量无可比性，而有效容积利用系数可比。一般高炉有效容积利用系数为 2.0，一些先进高炉为 2.2~2.3。小型高炉的有效容积利用系数更高，100~300m³ 高炉的利用系数为 2.8~3.2。

② 焦比：生产每吨生铁所消耗的焦炭量。

对高炉生产而言，焦比越低越好。焦炭消耗量约占生铁成本的 30%~40%，欲降低生铁成本必须力求降低焦比。焦比大小与冶炼条件密切相关，一般情况下为 450~500kg/t。喷吹煤粉可以有效地降低焦比。

③ 煤比：冶炼每吨生铁消耗的煤粉量。

单位质量的煤粉所代替的焦炭的质量称为煤焦置换比，它表示煤粉利用率的高低。一般煤粉的置换比为 1.7~1.9。

④ 冶炼强度：单位体积高炉有效容积焦炭日消耗量。

冶炼强度是高炉强化程度的指标之一。在喷吹燃料条件下，冶炼强度应该理解为综合冶炼强度，即不仅要计算焦炭消耗量，还要计算喷吹燃料按置换比折合成的焦炭量。

利用系数与冶炼强度成正比，与焦比成反比。要提高利用系数，强化高炉生产，应从降低焦比和提高冶炼强度两方面考虑。在当前能源紧张的情况下，首先应考虑降低焦比（燃料比）。

⑤ 焦炭负荷：每批炉料中铁、锰矿石的总质量与焦炭质量之比，是评估燃料利用水平、调节配料的重要参数。

⑥ 生铁合格率：合格生铁量占高炉总产量的百分数。

⑦ 休风率：高炉休风时间占规定作业时间的百分数。降低休风率是增产节约的重要途径。

⑧ 高炉炉龄：通常指从高炉点火开炉到停炉大修，或高炉相邻两次大修之间的冶炼时间。

一般高炉的一代寿命在 10 年左右，有的高达 18 年。衡量炉龄的另一个指标是每 1m³ 炉容在一代炉龄期内的累计产铁量。先进高炉平均达 5000t/m³，我国宝钢 2 号高炉已接近 10000t/m³。

1.2 高炉炼铁原料

高炉炼铁必备的三种原料中，焦炭作为燃料和还原剂，是主要能源；熔剂，如石灰石，主要用来助熔、造渣；铁矿石则是冶炼的对象。这些原料是高炉冶炼的物质基础，其质量对冶炼过程及冶炼效果影响极大。

1.2.1 铁矿石

高炉冶炼用的铁矿石有天然富矿和人造富矿两大类。含铁量在 50% 以上的天然富矿经适当破碎、筛分处理后可直接用于高炉冶炼。贫铁矿一般不能直接入炉，需要破碎、富选并重新造块，制成人造富矿（烧结矿或球团矿）再入高炉。人造富矿含铁量一般在 55%~65% 之间。由于人造富矿事先经过焙烧或烧结高温处理，因此又称为熟料，其冶金性能远比天然富矿优越，是现代高炉冶炼的主要原料。天然块矿通常称为生料。我国富矿储量很少，多数是含铁量 30% 左右的贫矿，需要经过富选才能使用。天然铁矿石按其主要矿物分为磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿和菱铁矿等几种，主要矿物组成及特征见表 1.1。

表 1.1 常见铁矿石的组成及特征

名称	主要成分化学式	理论含铁量	颜色	特性
磁铁矿	Fe_3O_4	72%	黑色	P、S 高，坚硬、致密、难还原
赤铁矿	Fe_2O_3	70%	红色	P、S 低，质软、易碎、易还原
褐铁矿	$n\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$	55%~66%	黄褐色	P 高，质软疏松、易还原
菱铁矿	FeCO_3	48%	灰浅黄	易破碎，焙烧后易还原

铁矿石质量直接影响高炉冶炼效果，必须严格要求，通常从以下几方面评价：

(1) 矿石品位

品位即铁矿石的含铁量，它决定了矿石的开采价值和入炉前的处理工艺。入炉品位愈高，愈有利于降低焦比和提高产量，从而提高经济效益。因为品位提高，意味着酸性脉石大幅度减少，冶炼时可少加石灰石造渣，既节省热量，又促进炉况顺行。经验表明，矿石品位提高 1%，则焦比降低 2%，产量增加 3%。

矿石的贫富一般以其理论含铁量的 70% 来评估，实际含铁量超过理论含铁量的 70% 称富矿，但这并不是绝对固定的标准。矿石的贫富还与矿石的脉石成分、杂质含量和矿石类型等因素有关。如对褐铁矿、菱铁矿和碱性脉石矿含铁量的要求可适当放宽。

(2) 有害杂质和有益元素

有害杂质通常指硫、磷、铅、锌、砷等，它们的含量愈低愈好。铜有时为害，有时为益，视具体情况而定。

硫是对钢铁危害较大的元素，它使钢材具有热脆性。所谓“热脆”就是硫几乎不溶于固态铁而与铁形成 FeS ，而 FeS 与铁形成的共晶体熔点为 988°C ，低于钢材热加工的开始温度 ($1150\sim 1200^{\circ}\text{C}$)。热加工时，分布于晶界的共晶体先行熔化而导致开裂。因此矿石含硫愈低愈好。高炉炼铁过程可去除 90% 以上的硫。但脱硫需要提高炉渣碱度，导致焦比增加，产量降低。

磷是钢材中的有害成分，使钢具有冷脆性。磷能溶于 $\alpha\text{-Fe}$ 中，固溶并富集在晶粒边界的磷原子使铁素体在晶粒间的强度大大增加，从而使钢材的室温强度提高而脆性增加，称为“冷脆”。但含磷铁水的流动性好，充填性好，对制造形状复杂铸件有利。此外，磷可改善钢的切削性能，易切削钢中磷含量可达 $0.08\%\sim 0.15\%$ 。矿石中的磷在选矿和烧结过程中不易除去，在高炉冶炼过程中，磷几乎全部进入生铁。因此，生铁含磷量决定于矿石含磷量，要求铁矿石含磷低。

铅、锌和砷在高炉内部易还原。铅不溶于铁而密度又比铁大，还原后沉积于炉底，破坏性很大。铅在 1750°C 时沸腾，挥发的铅蒸气在炉内循环能形成炉瘤。锌还原后在高温区以锌蒸气形式大量挥发上升，部分以 ZnO 沉积于炉墙，使炉墙胀裂并形成炉瘤。砷可全部还原进入生铁，它可降低钢材的焊接性并使之“冷脆”。生铁含砷量应小于 1%，优质生铁不应含砷。铁矿石中的铅、锌、砷常以硫化物形态存在，烧结过程中很难去除铅、锌，因此要求含量越低越好。一般要求含铅、锌不超过 0.11%。含铅高的铁矿石可以通过氯化焙烧和浮选法使铅铁分离。含锌高的矿石不能单独直接冶炼，应该与含锌少的矿石混合使用，或进行焙烧、选矿等处理，降低铁矿石中的含锌量。烧结过程中能部分去除矿石中的砷，可以采用氯化焙烧方法去除。通常要求铁矿石含砷不超过 0.07%。

铜在钢中若不超过 0.3%，可增加钢材抗蚀性；超过 0.3% 时，则降低其焊接性，并有“热脆”现象。铜在烧结中一般不能去除，在高炉中又全部还原进入生铁。故钢铁含铜量决定于原料含铜量。

铁矿石中常共生有锰、铬、镍、钴、钒、钛、钼，还含有铌、钽及稀土元素铈、镧等。这些元素有改善钢铁性能的作用，故称有益元素。当它们在矿石中的含量达到一定数值时称为复合矿石，经济价值很大，应考虑综合利用。

(3) 粒度和强度

入炉铁矿石应具有适宜的粒度和足够的强度。粒度过大会减少煤气与铁矿石的接触面积，使铁矿石不易还原；过小则增加气流阻力，同时易吹出炉外形成炉尘损失；粒度大小不均，则严重影响料柱透气性。因此，大块应破碎，粉末应筛