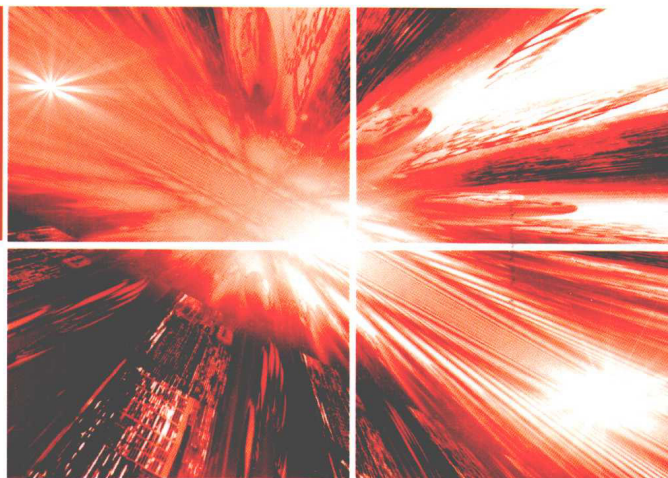


普通高等教育“十二五”规划教材



材料工程基础

毕大森 主编

 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

材料工程基础

主 编 毕大森
副主编 肖平安 张凌峰
参 编 李国禄 王大勇
主 审 张 建



机械工业出版社

本书为高等学校教学用书，内容包括：金属冶金、铸造、压力加工、金属材料热处理、焊接、金属表面工程技术、粉末冶金以及金属材料成形工艺的选择与质量控制。通过本书的学习可以使读者能够全面地了解和掌握金属材料工程知识，为以后的专业课程学习和工程实践打下基础。

本书可作为普通高等院校金属材料工程专业的专业基础课程教材，也可作为材料成形及控制工程等相关专业的课程教材，还可以作为机械工程专业选修课程教材，同时，也可供广大工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

材料工程基础/毕大森主编. —北京：机械工业出版社，2010.10
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-32150-7

I. ①材… II. ①毕… III. ①工程材料—高等学校—教材 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 197940 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：冯春生 责任编辑：冯春生 程足芬

版式设计：张世琴 责任校对：陈延翔

封面设计：张 静 责任印制：杨 曦

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2011 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 21.25 印张 526 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-32150-7

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

社服务中心：(010) 88361066

门户网：<http://www.cmpbook.com>

销售一部：(010) 68326294

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售二部：(010) 88379649

读者服务部：(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

材料工程基础是金属材料工程专业和材料成形及控制工程专业的重要基础课程，本教材是为适应该课程的教学而编写的。全教材共分为八章，包括：第1章金属冶金、第2章铸造、第3章压力加工、第4章金属材料热处理、第5章焊接、第6章金属表面工程技术、第7章粉末冶金和第8章金属材料成形工艺的选择与质量控制。本教材以金属材料工程为主线，较详细地介绍了金属的冶金、铸造、压力加工、热处理、焊接、表面工程技术、粉末冶金以及金属材料成形工艺的选择与质量控制。本教材力求涵盖金属材料成型的主要工艺方法，使读者对金属材料工程有全面的了解。

本教材第1章、第2章和第5章由天津理工大学毕大森编写；第3章由河南科技大学张凌峰编写；第4章由大连交通大学王大勇编写；第6章由河北工业大学李国禄编写；第7章和第8章由湖南大学肖平安编写。本教材由毕大森任主编，肖平安、张凌峰任副主编，天津理工大学张建教授担任主审。

由于条件所限，本教材未能将所有参考文献一一列出，在此对所有参考文献的作者表示衷心的感谢。

在本教材的编写过程中全体编者认真探讨专业教学改革，努力将各自学校的特色通过教材体现出来，但由于编者的水平有限，书中难免有错误、欠妥之处，敬请各兄弟院校的同仁及读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 金属冶金 1

1.1 冶金工艺 1

1.1.1 火法冶金 1

1.1.2 湿法冶金 3

1.1.3 电冶金 3

1.2 钢铁冶炼 4

1.2.1 生铁的冶炼 4

1.2.2 钢的冶炼 10

1.3 有色金属冶炼 17

1.3.1 铜冶金 17

1.3.2 铝冶金 19

1.3.3 锌冶金 21

1.3.4 钛冶金 22

1.3.5 镁冶金 23

1.3.6 铅冶金 25

1.4 常用金属材料制备 27

1.4.1 常用黑色金属材料制备 27

1.4.2 常用有色金属材料制备 28

1.5 新型金属材料的发展 30

1.5.1 黑色金属材料的发展 30

1.5.2 有色金属材料的发展 31

复习题 32

第2章 铸造 34

2.1 铸造成形工艺理论 34

2.1.1 铸造成形工艺特点及分类 34

2.1.2 合金的铸造性能 35

2.2 铸造合金及熔炼 44

2.2.1 常用铸造合金 44

2.2.2 铸造合金的熔炼 56

2.3 铸造成形方法 59

2.3.1 砂型铸造 59

2.3.2 铸件结构与铸造工艺参数 71

2.4 特种铸造方法 76

2.4.1 熔模铸造 76

2.4.2 压力铸造 78

2.4.3 金属型铸造 80

2.4.4 离心铸造 82

2.4.5 低压铸造 83

2.4.6 陶瓷型铸造 84

2.5 铸造技术的发展 85

2.5.1 消失模铸造 85

2.5.2 半固态成形 87

复习题 89

第3章 压力加工 90

3.1 金属塑性成形理论基础 90

3.1.1 金属塑性变形 91

3.1.2 金属塑性变形后的组织与性能 94

3.1.3 金属可锻性及影响因素 95

3.2 锻造成形工艺 97

3.2.1 自由锻造 97

3.2.2 模型锻造 100

3.3 板料冲压成形工艺 103

3.3.1 板料冲压的基本工序 103

3.3.2 板料冲压模具 108

3.3.3 冲压件结构设计 117

3.4 挤压与轧制	119	5.3.3 焊接接头缺陷与检验	226
3.4.1 挤压成形	119	5.3.4 焊接结构设计	230
3.4.2 轧制成形	123	5.3.5 典型焊件的工艺设计	234
3.4.3 拉拔成形	126	5.4 焊接技术的发展概况	236
3.5 其他塑性成形工艺简介	129	5.4.1 等离子弧焊接	236
3.5.1 精密模锻成形	129	5.4.2 高能束焊接	237
3.5.2 多向模锻	130	5.4.3 固相焊	239
3.5.3 液态模锻成形	131	5.4.4 微电子焊接技术	240
3.5.4 摆辗成形	132	复习题	242
3.5.5 超塑性成形	133	第6章 金属表面工程技术	243
复习题	135	6.1 概述	243
第4章 金属材料热处理	137	6.1.1 表面工程的概念及其功能	243
4.1 热处理的理论基础	137	6.1.2 表面工程技术的分类	244
4.1.1 金属材料的强化方式	137	6.1.3 表面工程技术的研究方向	244
4.1.2 固态相变	139	6.2 表面涂层技术	244
4.2 钢的热处理	153	6.2.1 热喷涂技术	244
4.2.1 钢的整体热处理	153	6.2.2 表面镀层技术	252
4.2.2 钢的表面热处理	164	6.2.3 气相沉积技术	264
4.2.3 钢的化学热处理	168	6.3 特种表面技术	268
4.2.4 典型件热处理工艺	180	6.3.1 熔结技术	268
4.3 固溶与时效处理	188	6.3.2 激光表面强化技术	269
4.3.1 固溶与时效的强化机理及时效时 间、温度对性能的影响	188	6.3.3 表面粘涂技术	270
4.3.2 几种典型合金的固溶与 时效处理	189	6.3.4 摩擦化学边界膜技术	270
复习题	193	复习题	272
第5章 焊接	195	第7章 粉末冶金	273
5.1 熔焊原理	195	7.1 粉末冶金的特点和基本应用	273
5.1.1 焊接的本质与特点	195	7.1.1 粉末冶金的定义和发展史	273
5.1.2 焊接方法的分类	197	7.1.2 粉末冶金的特点	275
5.1.3 焊接接头的组织及性能	197	7.1.3 粉末冶金的应用	276
5.2 常用的焊接方法	199	7.2 粉末冶金成形工艺	277
5.2.1 电弧焊	199	7.2.1 金属粉末的常用制取方法	277
5.2.2 电阻焊	211	7.2.2 金属粉末的性能及其测定方法	284
5.2.3 摩擦焊	214	7.2.3 金属粉末的成形	293
5.2.4 钎焊	215	7.2.4 金属粉末的烧结	298
5.3 焊接质量控制	217	7.3 粉末冶金新技术	304
5.3.1 金属材料的焊接性	218	7.3.1 粉末锻造	304
5.3.2 焊接应力与焊接变形	222	7.3.2 金属粉末注射成形	305
		7.3.3 粉末热等静压	308
		复习题	312



第 8 章 金属材料成形工艺的选择与

质量控制 314

8.1 零件成形方法选择的原则 314

8.2 金属材料的失效与防护 315

8.2.1 零件的失效形式 315

8.2.2 零件失效分析的一般方法 316

8.2.3 零件失效分析举例 319

8.3 典型零件成形工艺的选择 322

8.3.1 齿轮类零件的选材及成形工艺 ... 322

8.3.2 轴类零件的选材及成形工艺 ... 326

复习题 328

参考文献 329

第 1 章 金属冶金

金属冶金是研究如何从矿山或其他原料中提取金属或金属化合物，并制成具有一定性能的金属材料的工程技术。金属冶金工业是整个原材料工业的基础，金属材料不仅为制造机械设备提供最基础的材料，而且可以直接为人们的日常生活服务。所以，在一定意义上，一个国家的冶金工业发展状况反映了国民经济的发达程度。

现代工业习惯把金属分为黑色金属和有色金属两大类，铁、铬、锰属于黑色金属，其余的金属都属于有色金属。因此，金属冶金分为：钢铁冶金——包括铁、钢及铁合金（如锰铁、铬铁）的生产；有色金属冶金——包括各种有色金属的生产。

本章主要介绍一些常见的冶金工艺方法，并重点介绍钢铁冶金和铜、铝等有色金属冶金工艺工程。

1.1 冶金工艺

金属的冶金工艺可以分为火法冶金、湿法冶金和电冶金三大类。

1.1.1 火法冶金

火法冶金是指在高温下矿石经过熔炼、精炼反应及熔化过程，使其中的金属与杂质分开，以获得较纯金属的工艺方法。火法冶金是生产金属材料的重要方法，钢铁及大部分有色金属材料主要靠火法冶金生产。火法冶金成本较低，是目前生产金属材料的主要方法。但火法冶金会带来环境污染问题，需要加以治理。

火法冶金的基本过程可分为原料准备、冶炼和精炼三个部分。

1. 原料准备

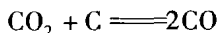
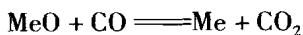
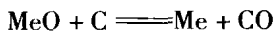
对于原料矿石首先要进行干燥，除去其中的水分，干燥温度一般为 $400 \sim 600^{\circ}\text{C}$ ；然后要对矿石进行焙烧，将矿石置于适当的气氛下，加热至低于它们的熔点温度，使其发生氧化、还原或其他化学反应的冶金过程，用来改变矿石中提取对象的化学组成，满足熔炼的要求；对于碳酸盐或氢氧化物的矿物原料还要进行煅烧，使其在空气中加热分解，除去二氧化碳和水分成为氧化物；最后，还要进行烧结和球团，即将不同矿粉混合均匀或造球后加热焙烧，固结成多孔块状或球状的物料。经过这一系列过程为火法冶金做好了原料准备。

2. 冶炼

冶炼是指将处理好的矿石或其他原料，在高温下通过氧化还原反应，使矿石中金属与杂质分离，形成金属液和熔渣的过程。按冶炼条件不同可分为：还原冶炼、造钨冶炼、氧化吹炼等。

(1) 还原冶炼 还原冶炼是一种使金属氧化物物料在高温熔炼炉还原气氛下被还原成金属

熔体的冶炼方法。加入的炉料包括：富矿、烧结块或球团矿；还有造渣用的石灰石、石英石等熔剂；燃烧用的焦炭、煤，既产生高温，又作为还原剂使金属还原，其主要反应如下：



(2) 造钼冶炼 造钼冶炼属于氧化冶炼，主要用于处理硫化铜矿石和硫化镍矿石。由于硫化矿石的主金属含量不够高，直接冶炼粗金属难度大。所以，利用铜、镍等金属对硫的亲合力近似于铁，而对氧的亲合力远小于铁的物理化学性质，在氧化程度不同的造钼冶炼过程中，使铁的硫化物不断氧化成氧化物，随后被脉石造渣而被除去，主金属经过这些工序进入钼相而得到富集，品位逐渐提高。

(3) 氧化吹炼 氧化吹炼是在氧化气氛下进行冶炼，吹入氧气使铁液中的硫、磷等杂质元素被氧化，或造渣、挥发与主体金属分离而获得粗金属。

3. 精炼

精炼是指进一步处理冶炼所得到的粗金属，以提高其纯度。精炼的方法可分为物理精炼法和化学精炼法。

(1) 物理精炼法 包括：熔析精炼、精馏精炼和区域精炼。

1) 熔析精炼是指利用杂质金属或其化合物在主金属中的溶解度随温度的降低而显著减小的特性，逐渐改变温度使粗金属中发生分相，形成多相系，将杂质分离到某一固相或液相中，与主金属分开，达到提纯主金属的目的。熔析精炼主要用于熔点较低的锡、铅、锌等金属，以除去熔点较高的金属，并与主金属形成含量很低的二元共晶的杂质。例如，粗铅熔析精炼除铜，粗锌熔析精炼除铅、铁等。

2) 精馏精炼是利用物质沸点的不同，交替进行多次蒸发、冷凝除去杂质的精炼方法。精馏精炼适用于相互溶解或部分溶解的金属液体。

3) 区域精炼是利用金属液体混合物在冷凝固结晶过程中的偏析现象，将杂质富集到液相或固相中，与主金属分离，获得精炼主金属的方法。

(2) 化学精炼法 包括：氧化精炼、硫化精炼、氯化精炼和碱性精炼。

1) 氧化精炼是利用氧化剂将粗金属中的杂质氧化造渣或氧化挥发除去的化学精炼方法。该方法是利用不同元素对氧的亲合力不同的原理，使杂质氧化生成不溶或少溶于主金属的氧化物，或以渣的形式聚集于金属熔体的表面，或以气态的形式挥发，使这些杂质被去除达到精炼的目的。例如，炼钢过程中吹入氧气或加入氧化剂去除杂质是对生铁的氧化精炼。

2) 硫化精炼是采用加入硫或硫化物去除粗金属中的杂质的化学精炼方法。采用硫化精炼要考虑主金属与杂质金属对硫的亲合力。当金属熔体中加入硫后，由于主金属对硫的亲合力比杂质金属高得多，所以首先被硫化生成主金属硫化物 MeS ，然后才与杂质金属 Me' 发生反应： $\text{MeS} + \text{Me}' \rightleftharpoons \text{Me}'\text{S} + \text{Me}$ 。如果生产的杂质硫化物在熔体中的溶解度小，密度也比主金属小，则它们会漂浮到熔体表面而被清除。例如，采用硫化精炼可以在粗铅、粗锡等金属熔体中去除铜和铁。

3) 氯化精炼是向粗金属熔体中通入氯气或加入氯化物使杂质生成氯化物而与主金属分离的化学精炼方法。例如，向粗铝金属熔体中通入氯气，可以除去钠、钙、氢气等杂质。氯化精炼受条件的限制，在工业生产中应用较少。

4) 碱性精炼是向粗金属熔体中加入碱使杂质氧化并与碱结合生成渣而被除去的化学精炼方法。碱性精炼可用于粗铜除镍, 粗铅除砷、铋等。

在工业生产中精炼还可以采用真空冶炼、喷射冶炼、电渣重熔等方法进行。

1.1.2 湿法冶金

湿法冶金是在常温或低于 100°C 以下, 用溶剂处理矿石或精矿, 使所要提取的金属溶解于溶液中, 而其他杂质不溶解, 然后再从溶液中将金属分离和提取出来的过程。由于大部分溶剂为水溶液, 所以也称为水法冶金。湿法冶金包括浸出、分离、富集和提取等工序。

1. 浸出

浸出也称浸取, 是对矿石或精矿进行选择性溶解的过程。利用浸出剂从矿石或精矿中提取所需的金属可溶性组分, 并与其他不溶物质分离。

对浸出剂的要求是: 化学成分稳定、选择性好、反应速度快、所生成盐的溶解度大、价格便宜、容易过滤和回收、使用安全、腐蚀性小等。根据浸出剂的不同可以分为: 酸浸出、碱浸出和盐浸出; 根据浸出化学过程的不同可分为: 氧化浸出和还原浸出; 根据浸出过程压力的不同可分为: 常压浸出和加压浸出; 根据浸出方式的不同可分为: 就地浸出、渗滤浸出、搅拌浸出、球磨浸出等。

2. 分离

分离是将浸出液与残渣分离成液相和固相, 同时将夹带于残渣中的冶金溶剂和金属离子洗涤回收的过程。常用的方法有过滤分离法和沉降分离法。

过滤分离法是使液相和固相在压力的作用下, 利用多孔介质拦截浸出液相中的固体离子, 使液相与固相分离的方法; 沉降分离法是借助于重力的作用使固相沉积将液相与固相分离的方法。

3. 富集

富集是指对分离的溶液进行净化。因为浸出分离的溶液中除含有所需要的金属外, 还含有其他金属和非金属杂质, 必须将它们分离出来才能最终提取所需的金属。常用的净化富集方法有: 结晶、蒸馏、沉淀、置换、溶液萃取、离子交换、膜分离等。工业生产中为了快速获得净化的溶液, 可以综合使用多种方法。

4. 提取

提取是指通过电解、化学置换、还原等方法从净化的溶液中获得金属或化合物的方法。例如, 采用电解法可以从净化的溶液中提取铜、金、银、锌、镍等纯金属。对于铝、钨、钼、钒等金属, 先从净化溶液中析出其氧化物, 然后再还原获得纯金属。

1.1.3 电冶金

电冶金是利用电能提取和精炼金属的方法, 按照电能形式可分为电热冶金和电化学冶金两大类。

1. 电热冶金

利用电能转换成热能, 在高温下提炼金属, 本质上与火法冶金相同。但与火法冶金相比, 电热冶金具有加热速度快、温度高(可达 2000°C)、控温准确、金属烧损少等优点。电热冶金可以在各种压力或真空中完成, 成为冶炼优质钢铁、有色金属材料的重要方法。根据

所采用的电热方式不同，电热冶金可分为：电弧熔炼、电阻熔炼、电阻-电弧熔炼、等离子熔炼、感应熔炼、电子束熔炼等。

1) 电弧熔炼是利用电能能在电极与电极、电极与被熔炼金属之间产生电弧高温来熔炼金属的电热冶金过程。

2) 电阻熔炼是在电阻炉内利用电流通过电阻产生热量来熔炼金属的电热冶金过程。

3) 电阻-电弧熔炼是利用电极与炉料之间产生的电弧和电流通过炉料所产生的电阻热来熔炼金属的电热冶金过程。该方法是有色金属冶炼的重要方法。

4) 等离子熔炼是利用电能产生的等离子弧作为热源来熔炼金属的电热冶金过程。等离子弧有非常高的能量密度，因此其熔炼温度高，物料反应速度快，常用于熔炼、精炼和重熔高熔点金属和合金。同时由于等离子弧可以方便地控制气氛，工作气体可以用惰性气体（如氩气）、还原性气体（如氢气）及两者的混合物或其他气体作介质，因而能够达到不同的冶金目的。

5) 感应熔炼是利用电磁感应和电热转换所产生的热量来熔炼金属的冶金过程。电磁感应熔炼在感应炉内进行，可以防止普通熔炼中耐火材料对金属的污染，感应熔炼适用于熔炼难熔金属及活泼金属。

6) 电子束熔炼是利用电能产生的高速电子动能作为热源来熔炼金属的冶金过程，又称为电子轰击熔炼。该方法具有熔炼温度高、炉子功率和加热速度高、提纯效果好的优点。但电子束熔炼金属收率低、比电耗大。所以，该方法主要用于生产高熔点活性金属和耐热合金。

2. 电化学冶金

采用电化学反应使金属从含金属的盐类的水溶液或熔体中析出，前者称为溶液电解，后者称为熔盐电解。

1) 溶液电解是以金属的浸出液作为电解液进行电解还原，使溶液中的金属离子被还原为金属析出，或使粗金属阳极经由溶液精炼沉积于阴极的冶金过程。溶液电解包括电解精炼和电解提取。

2) 熔盐电解是以熔融盐类为电解质进行金属提取或金属提纯的电化学冶金过程。对于那些电位比氢负得多，而不能从水溶液中电解析出的金属（如铝、镁类等活泼金属）和用氢或碳难以还原的金属，可使用熔盐电解法提取。

1.2 钢铁冶炼

钢铁工业是国家的基础产业，黑色金属具有强度高、韧性好、易加工、成本低等优点，广泛应用于国民经济的各个方面，有着不可替代的地位。钢铁工业的发展水平是国家现代化程度的重要标志之一。

钢铁冶炼包括从矿石到生铁的冶炼和从生铁到钢的冶炼两部分。

1.2.1 生铁的冶炼

生铁是由铁矿石在高炉中经过一系列冶金物理化学过程冶炼获得的，称为高炉炼铁。高炉是一个竖立的炉体，包括炉基、炉壳、炉衬、冷却设备及金属结构。高炉还设有辅助设

备，辅助设备有：上料设备、装料设备、送风设备、煤气除尘设备等，如图 1-1 所示。

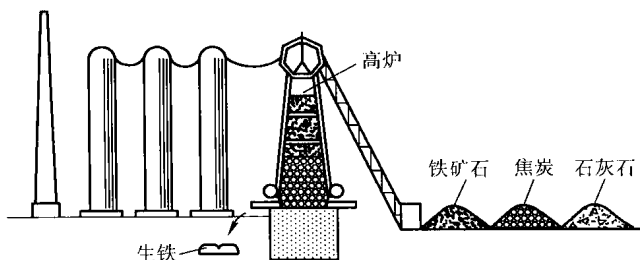


图 1-1 高炉炼铁

高炉炼铁所用的原料主要有铁矿石、燃料（焦炭）和熔剂（石灰石）。一般冶炼 1 t 生铁需要 1.5 ~ 2 t 铁矿石、0.4 ~ 0.6 t 燃料、0.2 ~ 0.4 t 熔剂。高炉炼铁的基本过程为：铁矿石、焦炭和石灰石从高炉炉顶按比例分层装入，热风从高炉下部风口吹入，随着风口前焦炭的燃烧，炽热的煤气流高速上升，下降的炉料被上升的煤气流加热，温度迅速升至 800 ~ 1000℃，铁矿石被炉内煤气 CO 还原，直至进入 1000℃ 以上的高温区，转变成半熔融的黏稠状态，在 1200 ~ 1400℃ 的高温下进一步还原得到金属铁，金属铁吸收焦炭中的碳，熔化成铁液，铁矿石中的脉石也逐渐熔化成炉渣。铁液和炉渣穿过高温区焦炭之间的间隙滴下，积存于炉缸，最后由出铁口和出渣口排出炉外。

1. 高炉炼铁原料

(1) 铁矿石 铁矿石由有用矿物和脉石矿物组成，能经济有效利用的矿物称为有用矿物，而目前不能经济有效利用的矿物称为脉石矿物。常见的铁矿石有：磁铁矿石、赤铁矿石、褐铁矿石和菱铁矿石。

1) 磁铁矿石 (Fe_3O_4)，理论含铁量 w_{Fe} 为 72.4%，实际富磁铁矿石含铁量 w_{Fe} 为 40% ~ 70%。磁铁矿石结构致密，晶粒细小，颜色和条痕均为黑色，有强磁性，S、P 含量高，还原性差。脉石主要为石英、硅酸盐与碳酸盐。磁铁矿石是我国当前的主要矿种。

2) 赤铁矿石 (Fe_2O_3)，理论含铁量 w_{Fe} 为 70%，实际富赤铁矿石含铁量 w_{Fe} 为 55% ~ 60%。赤铁矿石由于颜色和条痕均为樱红色而得名，赤铁矿石具有弱磁性，与磁铁矿石相比，其结构较软，易破碎，S、P 含量一般较低，还原性好。脉石多为石英和硅酸盐。

3) 褐铁矿石 ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)，理论含铁量 w_{Fe} 为 55.2% ~ 66.1%，实际富褐铁矿石含铁量 w_{Fe} 为 37% ~ 55%。褐铁矿石颜色为黑色到褐色，无磁性，有害杂质 S、P、As 含量一般较高，焙烧后还原性好。脉石主要为砂质粘土和石英等。

4) 菱铁矿石 (FeCO_3)，理论含铁量 w_{Fe} 为 42.8%，实际富菱铁矿石含铁量 w_{Fe} 为 30% ~ 40%。菱铁矿石颜色为灰色带黄褐色，无磁性。菱铁矿石经过焙烧，分解出 CO_2 气体，含铁量随即提高，矿石也变得疏松多孔，易破碎，S、P 含量低，还原性好。

铁矿石是高炉炼铁的主要原料，要求其含铁量高，脉石少，有害杂质少，成分稳定，还原性好，软化温度高，机械强度高，粒度合适并均匀。铁矿石的质量直接影响炼铁的经济技术指标。高炉冶炼对铁矿石的主要要求有：

1) 铁矿石的品位。品位是衡量铁矿石质量的主要指标，它表示了铁矿石的含铁量。高炉炼铁要求含铁量高的矿石，因为含铁量高，有利于降低高炉焦比和提高生铁产量。根据生

产经验，铁矿石品位升高 1%，焦比可降低 2%，生铁产量可提高 3%。

直接开采的铁矿石品位一般在 30% ~ 60%，品位高的（达到理论含铁量 $w_{Fe} \geq 70\%$ ）称为富铁矿，富铁矿若含硫、磷杂质较低，并且不需回收共生元素的话，一般只需经过破碎、筛分至一定粒度，均匀后就能直接进入高炉冶炼。

2) 脉石成分与数量。脉石成分与数量在很大程度上决定着熔剂与燃料的消耗，脉石含量越少，铁矿石越富。冶炼时，铁矿石中的脉石含量多，需要加入的熔剂就多，产生熔渣的量也越多。因此，铁矿石中脉石的含量越少越好。

3) 有害杂质含量。铁矿石中的有害杂质通常指硫、磷、铅、锌等，铜有时有害，有时有利。硫会使钢产生“热脆”，还会降低生铁的流动性，降低钢的焊接性、耐磨性和耐蚀性；磷会使钢产生“冷脆”，还会使钢的焊接性、塑性下降。

铁矿石入炉前先要进行破碎、筛选分级、混合均匀；然后，进行焙烧改变铁矿石的化学成分和内部结构，除去部分有害杂质，提高铁矿石的还原性；最后，经过选矿、造块，得到高炉使用的烧结矿和球团矿。

(2) 燃料 燃料是高炉冶炼不可缺少的基本原料之一。目前，高炉几乎都使用焦炭作为燃料。焦炭在高炉冶炼中的作用是：

1) 发热剂。高炉冶炼所消耗热量的 70% ~ 80% 由焦炭燃烧提供。

2) 还原剂。焦炭燃烧产生的 CO 、 H_2 可与铁矿石中的铁氧化物反应，将铁还原。

3) 料柱骨架。高炉内的铁矿石和熔剂下降到高温区时，全部熔化成液体，而焦炭既不软化又不熔化，所以成为高炉内料柱的骨架，支承上部的炉料。焦炭在炉料柱中约占整个体积的 $1/3 \sim 1/2$ ，焦炭是多孔的固体，可以起到改善料柱透气性的作用。

4) 渗碳剂。焦炭中的碳渗入铁中，可降低铁的熔点，保证生铁在高炉内熔化。

(3) 熔剂 高炉冶炼中加入熔剂具有以下作用：

1) 熔剂与铁矿石中的脉石、焦炭灰分作用生成低熔点化合物，形成易从炉缸流出的炉渣，与铁液分离。

2) 生成一定数量和有一定物理、化学性能的炉渣，去除有害杂质硫，提高生铁质量。

高炉用熔剂一般在烧结矿和球团矿生产中加入。

2. 高炉炼铁的冶炼过程

(1) 高炉 炼铁的主体设备是高炉，如图 1-2 所示。高炉炼铁的基本过程是：炉料（铁矿石、燃料、熔剂）由料车从炉顶经料钟均匀加入炉内，在自身重力作用下，自上而下运动。同时，来自热风炉的热风从高炉的下部风口进入，使燃料燃烧，产生的热炉气不断向上运动。炉料与炉气之间连续进行热交换，它们之间发生了一系列物理化学反应，使铁矿石被逐步还原，并熔化成铁液，进入炉缸，最后从高炉下部的出铁口流出。炉内的炉渣则由出渣口排出。而反应后的炉气成为煤气从炉顶的煤气出口排出。图 1-3 所示为高炉炼铁过程的示意图。

(2) 炼铁时高炉中的物理化学过程 高炉冶炼的目的就是把铁矿石炼成生铁。因此，冶炼过程就是对铁矿石的还原过程和除去脉石的造渣过程。其主要反应如下：

1) 燃料的燃烧。从高炉顶部加入的焦炭被逐渐加热，在风口附近与热风中的氧发生燃烧反应，燃烧反应分两步进行：

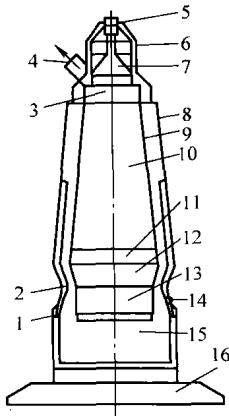


图 1-2 高炉结构示意图

- 1—出铁口 2—风口 3—炉喉 4—煤气出口
5—小料钟 6—大料斗 7—大料钟 8—炉壳
9—炉衬 10—炉身 11—炉腰 12—炉腹
13—炉缸 14—出渣口 15—炉底 16—炉基

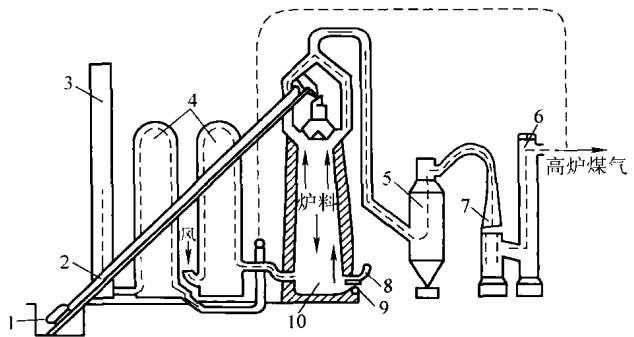
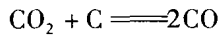
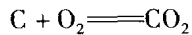


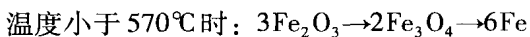
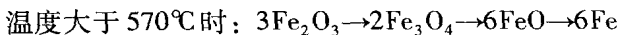
图 1-3 高炉炼铁过程示意图

- 1—料车 2—上料斜桥 3—烟囱 4—热风炉
5—重力除尘器 6—洗涤塔 7—文氏管
8—风口 9—铁渣口 10—高炉



风口前焦炭的燃烧反应是不完全燃烧，生成 CO 并放出大量的热，使炉缸部分的温度达到 1800 ~ 1900℃。焦炭中的碳除一部分参加直接还原和渗入生铁外，约有 70% 的量在风口前燃烧生成 CO，燃烧反应供给了高炉气体还原剂和热量，并使炉缸下部腾出空间，为高炉炉料下降提供了条件。含有大量 CO 的灼热炉气不断随炉料的下降而上升，对铁矿石的还原既是还原剂，又是热源。

2) 铁的还原。高炉炉料中的铁氧化物还原为金属铁，是高炉内最主要的化学反应。高炉中的铁氧化物由高价向低价逐级被还原剂还原，其还原顺序为：



铁矿石加入炉内后，当温度在 1000℃ 以下时，用煤气中的 CO 和 H₂ 夺取铁氧化物中的氧，生成 CO₂ 和 H₂O。在高炉冶炼中，使用 CO 和 H₂ 作为还原剂，生成 CO₂ 和 H₂O 的还原反应称为间接还原。铁氧化物的间接还原为放热反应，因此低温有利于铁氧化物的间接还原。所以，间接还原发生在高炉炉温小于 800℃ 的区域，即高炉的上部，如图 1-4 所示。

高炉内凡是用碳作为还原剂还原铁氧化物，生成 CO 的还原反应称为直接还原。铁矿石在达到高炉下部高温区之前已经进行了相当程度的间接还原，残留的铁氧化物主要以 FeO 的形式存在，其直接还原由以下反应完成：

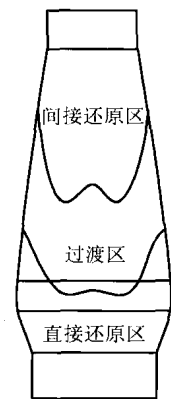
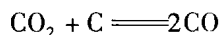
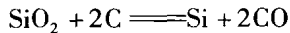


图 1-4 高炉内还原区分布

直接还原是吸热量很大的反应，一般在温度高于 1100℃ 的区域内进行，气体产物 CO_2 在高温区几乎全部与碳发生反应，直接消耗碳。

3) 其他元素的还原。生铁中除了含有 90% 以上的铁元素之外，还含有一定量的 Si、Mn、P、S 等元素，这些杂质元素一般是从液态炉渣中被还原进入生铁的。

① Si 的还原——生铁中的 Si 由炉料中的 SiO_2 还原得到。 SiO_2 是较稳定的化合物，其还原温度在 1300℃ 左右，必须在高炉下部的高温区才能直接还原，其还原反应为：



由于 SiO_2 在还原时需要吸收大量的热，所以 Si 在高炉中只有少量被还原，较高的炉温和较低的炉渣碱度可获得含 Si 较高的铸造生铁。

② Mn 的还原——含 Mn 氧化物的还原与铁氧化物相似，也是采用逐级还原，即：



Mn 的高价氧化物可采用间接还原，而 MnO 是稳定的化合物，必须通过直接还原获得 Mn，其直接还原温度为 1100 ~ 1200℃，直接还原需要吸收大量的热。

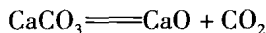
③ P 的还原——炉料中的 P 主要以磷酸钙 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 的形式存在，磷酸钙是稳定的化合物，只能在高温下用碳直接还原，其还原反应如下：



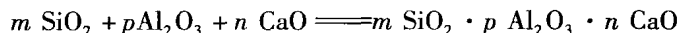
在高炉冶炼中，存在对磷酸盐还原的有利因素，如 SiO_2 、Fe 都能促进其还原，形成 $[\text{Fe}_2\text{P}]$ 或 $[\text{FeP}]$ 而溶于铁中。所以，普通生铁冶炼中，炉料中的 P 几乎全部被还原进入生铁中，影响生铁的质量。因此，控制生铁中的含 P 量，只有通过控制炉料中的含 P 量来实现。

④ S 的还原——高炉内的 S 主要来自炉料。炉料在下降过程中，焦炭燃烧生成 SO_2 进入煤气，煤气中的 S 大部分为 H_2S ，小部分以其他形式存在。煤气在高炉内上升过程中，所含的 S 大部分又被渣、铁和炉料所吸收，在炉内形成 S 的循环，小部分 S 随煤气逸出炉外，或进入铁中，以 $[\text{FeS}]$ 的形式存在，另一部分则进入炉渣中。

4) 石灰石的分解与造渣。石灰石在 750 ~ 1000℃ 时会发生分解反应：



CaO 在 1000℃ 以上与脉石中的 SiO_2 和 Al_2O_3 等结成熔渣，其反应为：



熔渣能吸收焦炭燃烧后留下的灰分及某些未完全还原的氧化物，例如 FeO、MnO、HgO 等。熔渣中的 CaO 还促使 FeS 转变为 CaS 而熔于渣中。因此，控制炉渣成分和数量就能够炼出各种不同要求的生铁。

3. 高炉炼铁产品

高炉炼铁的主要产品是生铁，副产品是炉渣、煤气和炉尘。

(1) 生铁 高炉生铁分为：炼钢生铁、铸造生铁和铁合金。

1) 炼钢生铁因其断面呈银白色又称为白口铸铁，约占生铁总量的 90% 以上。炼钢生铁中的碳以化合形态 (Mn_3C 、 Fe_3C 等) 存在，因此，炼钢生铁硬而脆，不宜加工。炼钢生铁中 w_{C} 为 2.5% ~ 4.5%，并含有少量的 Si、Mn、P、S 等元素。

2) 铸造生铁要求具有良好的流动填充性和良好的可加工性，因此其含 Si 量较高。此外，铸造生铁为改善流动性能，应含有一定量的 P (w_{P} 约为 0.3%)。铸造生铁断面呈灰色，

所以也称为灰铸铁。

3) 铁合金是含有多种合金元素的生铁。在高炉冶炼时, 加入一定量的其他成分, 获得铁合金。高炉冶炼的铁合金主要是锰铁。

(2) 炉渣 铁矿石中的脉石、熔剂中的各种氧化物和燃料中的灰分等熔化后形成炉渣。高炉每炼 1t 生铁大约产生 300 ~ 600 kg 的炉渣。

高炉炉渣可制成水渣、渣棉和干渣等。水渣是液态炉渣用高压水急冷粒化形成的, 它是良好的制砖、制水泥的原料; 渣棉是液态炉渣用高压蒸汽或高压压缩空气吹成的纤维状的渣, 是良好的绝缘材料; 干渣是液态炉渣自然冷凝后形成的渣, 经处理后可用于铺路、制砖、生产水泥等建筑材料。

(3) 煤气 煤气的成分包括: $w_{\text{CO}} = 20\% \sim 30\%$ 、 $w_{\text{CO}_2} = 15\% \sim 20\%$ 、 $w_{\text{H}_2} = 1\% \sim 3\%$ 、 $w_{\text{N}_2} = 56\% \sim 58\%$ 和少量的 CH_4 。高炉每炼 1t 生铁大约能产生 2000 ~ 3000 m^3 的煤气。高炉煤气可以作燃料, 回收的煤气可供热风炉、烧结、炼钢、炼焦等使用, 还可以在高炉炉顶安装余压发电装置, 利用煤气余压发电。

(4) 炉尘 炉尘是煤气上升时从炉内带出的细颗粒固体炉料, 其中 w_{Fe} 为 30% ~ 50%、 w_{C} 为 5% ~ 15%, 每冶炼 1t 生铁大约吹出炉尘 50 ~ 100 kg。炉尘通过重量除尘器被回收, 可作为烧结配料。

4. 高炉冶炼技术经济指标

高炉生产的技术水平和经济效益可以用技术经济指标来衡量。

(1) 高炉有效容积利用系数 高炉有效容积利用系数是指每 1 m^3 高炉的有效容积平均每昼夜 (d) 生产出合格生铁的质量 (t), 其单位为: $\text{t}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。该系数是衡量高炉生产效率的重要指标, 利用系数越高, 说明高炉的生产效率越高。

(2) 焦比 焦比表示高炉每冶炼 1t 生铁所消耗的焦炭量 (kg), 其单位为: kg/t 。焦比是高炉能量消耗的重要指标, 降低焦比, 可以有效降低生铁的冶炼成本。

(3) 燃料比 高炉采用喷吹煤粉、重油或天然气后, 折合每冶炼 1t 生铁所消耗的燃料总量。每冶炼 1t 生铁的喷煤量和喷油量分别称为煤比、油比, 此时燃料比等于焦比、煤比和油比的总和。根据喷吹的煤和油置换比的不同, 分别折合成焦炭 (kg), 再和焦比相加称为综合焦比。燃料比和综合焦比是确定冶炼 1t 生铁总燃料消耗的一个重要指标。

(4) 冶炼强度 冶炼强度是指 1 m^3 高炉的有效容积, 在一昼夜 (d) 内所能燃烧的干焦量, 其单位为: $\text{t}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。冶炼强度反映了炉料下降及冶炼的速度, 也表明了高炉生产强化程度的高低。冶炼强度取决于高炉所能接受的风量, 风量越大, 燃烧焦炭就越多, 在焦比不变的情况下, 高炉有效容积利用系数越高。

(5) 生铁合格率 生铁合格率是指化学成分符合国家标准规定的生铁量占总产量的比例。这是评价生产质量的主要指标, 一般合格率应在 99% 以上。

(6) 生铁成本 单位生铁成本由原料、燃料、动力消耗及车间经费、管理成本等组成。一般在单位生铁成本中, 原料、燃料费约占成本的 80%, 动力消耗费约占成本的 10%。生铁成本是从经济角度衡量高炉生产的重要指标。

(7) 炉龄 高炉从开炉到停炉大修之间的时间为一代高炉的炉龄。延长高炉炉龄可以提高生产效率, 降低生产成本。

5. 炼铁技术的发展

(1) 高炉炼铁技术的发展 高炉炼铁技术的发展有以下几个方面:

1) 高炉的大型化、自动化。高炉的大型化可以提高热效率、提高生产率。而计算机技术的普遍应用使高炉生产的自动化程度不断提高。

2) 高炉冶炼低硅生铁。冶炼低硅生铁可以降低高炉焦比, 提高高炉产量。有利于铁液的脱硫、脱磷处理, 满足了无渣、少渣炼钢的需要。

3) 高炉使用金属炉料。金属炉料是将铁矿石的部分还原任务提前到烧结矿或球团矿阶段进行。这种炉料冷强度高, 相当一部分 FeO 已被还原为金属铁。高炉使用这样的炉料, 焦比会大幅度降低而生产率明显提高。

4) 高炉喷吹还原气体。喷吹还原气体可提高炉内煤气中还原气氛, 提高间接还原, 降低直接还原, 从而降低高炉的焦比。

(2) 非高炉炼铁技术 非高炉炼铁彻底摆脱传统工艺方法, 不用焦炭, 能源很容易解决。目前, 非高炉炼铁主要分为两大类: 一类是铁矿石在低于熔点温度下还原成海绵铁的直接还原炼铁; 另一类是用铁矿石直接冶炼熔融的铁液还原炼铁。

1) 直接还原炼铁。直接还原炼铁是在熔点以下还原得到固态金属铁, 其中夹杂着矿石中的脉石成分。由于其未经熔炼, 在脱氧过程中形成多微孔的结构, 称为海绵铁。海绵铁中有害杂质含量低, 因此是冶炼特种钢的优质原料。

2) 熔融还原炼铁。熔融还原是以纯氧、原煤和原矿为炼铁原料的一种新工艺, 它不需要铁矿石造块和使用昂贵的冶金焦炭, 又能生成优质铁液, 并且不污染环境。它拓宽了钢铁冶金所使用的煤种, 省去了焦化、烧结工序, 使冶炼速度成倍提高, 同时降低了投资, 节省了能源, 增强了生产的灵活性, 是一种理想的冶炼工艺方法。

1.2.2 钢的冶炼

炼钢就是通过冶炼降低生铁中的含碳量和去除有害杂质, 再根据对钢性能的要求加入适量的合金元素, 使之成为具有优良性能的钢的生产过程。钢和生铁都是铁基合金, 都含有 C、Si、Mn、P、S 五种元素, 其主要区别见表 1-1 所列。

表 1-1 钢和生铁的主要区别

项 目	钢	生铁
含 C 量	$w_C \leq 2\%$, 一般为 0.04% ~ 1.7%	$w_C > 2\%$, 一般为 2.5% ~ 4.3%
含 Si、Mn、P、S 量	较少	较多
熔点	1450 ~ 1530℃	1100 ~ 1150℃
力学性能	强度、塑性、韧性好	硬而脆, 耐磨性好
铸造性能	较好	好
锻造性能	好	差
焊接性能	好	差
可加工性能	好	好
热处理性能	好	差

1. 炼钢的基本任务

炼钢的基本任务包括: