



TEACHING MATERIALS
FOR COLLEGE STUDENTS
高等学校教材

材料工程基础

Fundamentals of
Materials Engineering

主 编 王引真

副主编 熊 伟 冯 涛

孙永兴 王彦芳



中国石油大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS



TEACHING MATERIALS
FOR COLLEGE STUDENTS
高等学校教材

材料工程基础

◎ 主 编 王引真

◎ 副主编 熊 伟 冯 涛 孙永兴 王彦芳



中国石油大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS

图书在版编目(CIP)数据

材料工程基础/王引真主编. —东营:中国石油
大学出版社,2015.2

ISBN 978-7-5636-4320-2

I. ①材… II. ①王… 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(2014)第 084670 号

书 名: 材料工程基础

作 者: 王引真

责任编辑: 曹秀丽 秦晓霞(电话 0532—86981532)

封面设计: 青岛友一广告传媒有限公司

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com

印 刷 者: 沂南县汶凤印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981532,86983437)

开 本: 185 mm×260 mm 印张:21.75 字数:557 千字

版 次: 2015 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 43.50 元

前言

PREFACE

材料工程基础是材料科学与工程类专业的必修课程,也是材料科学基础的后继课程。基于行业特色的不同,本课程在国内不同高校讲授的具体内容及侧重点存在较大的差异,但是都主要讲授材料制备、材料成形、金属材料改性、材料连接及常用工程材料等方面的内容。

本书从“材料科学与工程”一级学科的教学出发,突出石油高校的特色及需求,力图将常用材料制备与成形过程中的共同或类似的部分归类,尽可能将其共性和典型的个性涵括在内;将材料制备与成形的重点和难点进行系统梳理总结,以便于学生深刻理解与掌握;对常用钢铁材料的最新牌号、性能与应用进行归纳汇总,以利于学生在掌握基础理论的基础上巩固实践。

本书共分为八章,详细介绍了金属材料制备、金属液态成形、金属塑性成形、金属材料的焊接、热处理原理及工艺、粉末冶金和常用金属材料及其选用等内容,并在每章的后面附有一定量的复习思考题,以便于读者深入学习。

本书由中国石油大学(华东)材料科学与工程系王引真教授担任主编。第1,7章由熊伟编写,第2,5,6章由王引真编写,第3章由冯涛编写,第4章由孙永兴编写,第8章由王彦芳编写。

本书由北京航空航天大学马朝利教授担任主审。本书在编写过程中,硕士研究生李春鹏、刘成浩、杨武虎、栗荔等做了部分校对工作,在此一并致谢。

本书主要是在参考有关文献资料、相关教学讲稿、多媒体文件及网上资源,并在编者多年教学与科研工作实践的基础上编写而成的。在此,谨向所有文献资料的作者致以衷心感谢!书末列有主要参考文献,但限于篇幅,未能悉数列出,祈请未予列入的作者谅解,并致以歉意。

本书在正式出版之前,已在中国石油大学(华东)胶印并试用3年。在此,特

别向在试用过程中对本书提出宝贵意见的各位任课教师及同学表示感谢。

鉴于编者知识水平和编写经验有限,虽几经易稿,书中阙漏之处难免。敬请各位专家同行及广大读者不吝批评指正,以便不断修订完善。

编 者

2015 年 1 月

目 录

CONTENTS

第 1 章 钢铁冶金	1
1.1 冶金工程基础	1
1.2 钢铁冶炼	5
第 2 章 金属液态成形	31
2.1 概 述	31
2.2 铸造合金的工艺性能	32
2.3 砂型铸造	50
2.4 特种铸造	63
2.5 铸造成形新工艺、新技术	76
第 3 章 金属塑性成形	80
3.1 概 述	80
3.2 金属塑性成形理论基础	82
3.3 体积成形方法	88
3.4 板料冲压成形	121
第 4 章 金属材料的焊接	131
4.1 概 述	131
4.2 焊接基础	132
4.3 熔化焊	142
4.4 固相焊	154
4.5 钎 焊	158
4.6 常用材料焊接	160
4.7 焊接检验	165

第 5 章 热处理原理	170
5.1 概 述	170
5.2 钢在加热时的奥氏体转变	171
5.3 钢在冷却时的转变	182
5.4 珠光体转变	192
5.5 马氏体转变	200
5.6 贝氏体转变	210
5.7 钢在回火时的转变	218
第 6 章 热处理工艺	227
6.1 钢的退火和正火	227
6.2 钢的淬火与回火	232
6.3 钢的表面淬火	248
6.4 化学热处理	256
第 7 章 粉末冶金	269
7.1 概 述	269
7.2 粉末成形	272
7.3 烧 结	283
第 8 章 常用金属材料及其选用	288
8.1 碳素钢概述	288
8.2 钢的合金化原理	290
8.3 合金结构钢	298
8.4 合金工具钢	311
8.5 特殊性能钢	322
8.6 铸 铁	327
8.7 工程材料的选用	335
参考文献	341

第 1 章

钢铁冶金

1.1 冶金工程基础

冶金是一门研究如何经济地从矿石或其他原料中提取金属或金属化合物,并用各种加工方法制成具有一定性能的金属材料的科学。用于提取各种金属的矿石具有不同的特性,故提取金属要根据不同的原理,采用不同的生产工艺和设备,从而形成了一门专业学科——冶金学。

冶金学从以研究金属的制取、加工和改进性能的各种技术为重要内容,发展到对金属成分、组织结构、性能和有关基础理论的研究,就其研究领域分为提取冶金和物理冶金两门学科。

提取冶金学是研究如何从矿石中提取金属或金属化合物的生产过程,由于该过程伴有化学反应,故又称为化学冶金。物理冶金学是通过成形加工制备有一定性能的金属或合金材料,研究其组成、结构的内在联系,以及在各种条件下的变化规律,为有效地使用和发展特定性能的金属材料服务。物理冶金学包括金属学、粉末冶金、铸造、金属压力加工等。

提取冶金按过程和方法分类,可以分为火法冶金、湿法冶金和电冶金三大类。

(1) 火法冶金:是指在高温下矿石经熔炼与精炼反应及熔化作业,使其中的金属和杂质分开,获得较纯金属的过程。整个过程可分为原料准备(选矿、烧结、球团、焙烧等)、冶炼和精炼三个工序。过程所需能源主要靠燃料燃烧供给,也有依靠过程中的化学反应热来提供的。火法冶金是提取冶金的主要方法,目前工业上大规模的钢铁冶炼、主要的有色金属冶炼和某些稀有金属的提取,都是采用火法冶金进行的。

(2) 湿法冶金:是采用液态溶剂(通常为无机水溶液或有机溶剂),通过矿石浸出、分离和提取等方式制备金属及其化合物。湿法冶金的流程主要包括浸取、固液分离、溶液净化与富集、从溶液中制取产品等工序。目前湿法冶金主要用于有色金属、稀有金属及贵金属的提取,应用范围正日益扩大。

(3) 电冶金:是利用电能提取和精炼金属的方法。按电能形式可分为以下两类。

① 电热冶金:将电能转变成热能,在高温下提炼金属,本质上与火法冶金相同。

② 电化学冶金:用电化学反应使金属从含金属的盐类水溶液或熔体中析出。前者称为溶液电解,如铜的电解精炼,也可归入湿法冶金;后者称为熔盐电解,如电解铝,也可列入火

法冶金。

采用何种方法提取金属,按怎样的顺序进行,在很大程度上取决于所用的原料以及要求的产品。实际生产中应用最多的是火法和湿法冶金。钢铁冶炼主要用火法,有色金属冶炼则火法和湿法兼有。

1.1.1 火法冶金

火法冶金是在高温下从冶金原料提取或精炼金属的科学和技术,是反应温度在 700 K 以上的金属冶金的总称。火法冶金包括炉料准备、熔炼(吹炼)和精炼等过程。过程中的产物除金属或金属化合物之外,还有炉渣、烟气和烟尘。烟气由高温的粉尘、烟雾及气体组成,可通过对烟气处理和烟尘综合利用来回收其中的热量、有价值组分以及把对环境有害气体转化为有用产品。为维持有色金属火法冶金过程中所需的温度并获得更好的冶炼效果,需通过各种途径供热以达到冶金热平衡。

火法冶金的基本条件是维持一定的高温所需的热源,除了冶金本身为放热反应外,主要靠碳质燃料燃烧供热(碳质燃料主要有煤炭、天然气和石油产品)。燃料燃烧大都用空气通风供氧,但由于空气中含有 79%(体积分数)的氮气,燃料燃烧放出的大量热量被氮气带走,使燃料的热效率大大降低。为了提高燃料热效率和减少烟气体积,相继出现了富氧和纯氧的熔炼工艺。为了充分利用烟气带走的热,除了设置余热锅炉生产蒸汽和发电外,也用来预热空气,从而出现了热风熔炼工艺。为了充分利用硫化精矿以及粉状物料大比表面积而开发的各种新冶炼工艺有闪速、旋涡、熔池熔炼等。

火法冶金的每一过程都很复杂。由于在高温下进行的反应速度较快,加之原料化学成分及矿物组成变化大,因此反应过程机理是很难进行研究的。至今尚未找到能解释各种火法冶金现象的动力学规律,大都求助于热力学原理来解决生产中的问题。如 $\text{Me}-\text{O}$ 系化学势图以及其他二元系、三元系、四元系或者 $\text{Me}-\text{Me}'-\text{S}-\text{O}-\text{SiO}_2$ 五元系甚至多元重叠系的化学势图,便成为普遍用于解决火法冶金有关问题的热力学基础。由于火法冶金过程的温度在 700 K 以上,各种化学反应都进行得很迅速,许多过程都是在几秒钟内完成的。因此,化学反应是趋近平衡的,应用热力学基础理论来解释各种生产现象是较为合理和可靠的。

参与火法冶金过程的物质有固体、气体和熔体,如固体精矿、熔剂、燃料、空气、工业氧、熔体铈、熔剂和炉渣等。火法冶金过程的产物亦然,有固体的焙砂、烟尘,气体的二氧化硫、二氧化碳、燃烧气体,熔体金属、铈和炉渣等。火法冶金过程发生的高温化学反应相当复杂,主要的反应类型有气-固相、气-液相、固-液相、液-液相及固-固相反应,以及气-液-固三相之间的反应。火法冶金过程介绍如下:

1) 炉料准备

炉料准备是将精矿或矿石、熔剂和烟尘等按冶炼要求配制成具有一定化学组成和物理性质的炉料的过程,是现代火法冶金流程的重要组成部分。炉料准备一般包括贮存、配料、混合、干燥、制粒、制团、焙烧和煅烧等。除焙烧和煅烧使炉料发生化学变化外,其他过程一般只发生物理变化。有的火法工艺并不要求制粒(制团)或焙烧,如精矿可以直接冶炼。

由精矿、返料、烟尘、熔剂等组成的炉料,其物理状态、化学成分、含水量及数量等不一定能满足冶炼工艺的要求,为保证正常生产,就需要储存足够的原料和熔剂。储存量的多少与处理工艺、工作测试和规模有关。冶炼厂需要对矿石进行配料,将各种矿石按一定的比例混

合成化学成分和物理性质比较一致的原料。进厂的精矿一般含水 8%~15%，而炼前的炉料准备、冶炼过程及烟尘处理都要求精矿含水较低，因此需要对其进行干燥处理。某些原料对某一冶炼过程来说，如果粒度太细，就要配入胶粘剂制粒；如果透气性不够好，就要配入胶粘剂制团。氧化物常比硫化物更易于还原，金属的硫酸盐、氯化物或氧化物更易从原料中浸出，因而常要通过焙烧与煅烧的化学方法将原料中的矿物转变成所需要的金属形式。对于某一具体原料而言，究竟需要经过哪些准备过程，应视原料本身情况和冶炼工艺要求而定。

焙烧是指在低于物料熔化温度下完成的某种化学反应过程，是炉料准备的重要组成部分。焙烧大多是为下一步的熔炼或浸出等主要冶炼作业做准备。

根据工艺目的，焙烧大致可以分为氧化焙烧、盐化焙烧、磁化焙烧、还原焙烧、挥发焙烧和烧结焙烧，其中的盐化焙烧包括硫酸化焙烧和氯化焙烧，磁化焙烧属于还原焙烧。按物料的运动状态，焙烧又分为固定床焙烧、移动床焙烧、流态化焙烧和飘浮焙烧。

2) 熔 炼

熔炼是指炉料在高温(1 300~1 600 K)炉内发生一定的物理、化学变化，产出粗金属或金属富集物和炉渣的冶金过程。炉料除精矿、焙砂、烧结矿等外，有时还需添加使炉料易于熔融的熔剂，以及为进行某种反应而加入的还原剂。此外，为提供必要的温度，往往需要加入燃料，并送入空气或富氧空气进行燃烧。粗金属或金属富集物与熔融炉渣由于互溶度小、密度存在差异而分层并实现分离。金属富集物有钎、黄渣等，它们尚需进一步吹炼或用其他方法处理才能得到金属。

熔炼实质上可以分为氧化熔炼和还原熔炼。此外还有其他的熔炼方法，如还原硫化熔炼、挥发熔炼、沉淀和反应熔炼等，由于种种原因这些方法已较少使用。

3) 精 炼

精炼是从粗金属中去除杂质的提纯过程。对于高熔点金属，精炼还具有致密化作用。精炼可分为化学精炼和物理精炼两大类。

化学精炼利用杂质和主金属的某些化学性质的不同实现分离，主要包括氧化精炼、硫化精炼、氯化精炼和碱性精炼等。物理精炼以物理变化为主，利用杂质和主金属的物理性质不同而脱除杂质，如精馏精炼、真空精炼和熔析精炼等。

1.1.2 湿法冶金

湿法冶金是利用浸出剂将矿石、精矿、焙砂及其他物料中的有价金属组分溶解在溶液中或以新的固相析出，实现金属分离、富集和提取的科学技术。由于这种冶金过程都是在水溶液中进行，故称湿法冶金。

湿法冶金的历史可以追溯到公元前 200 年，我国西汉时期就有用胆矾法提铜的记载。但湿法冶金近代的发展与湿法炼锌的成功、拜耳法生产氧化铝的发明以及铀工业的发展和 20 世纪 60 年代羧基类萃取剂的发明并应用于湿法炼铜是分不开的。随着矿石品位的下降和对环境保护要求的日益严格，湿法冶金在有色金属生产中的作用越来越大。

湿法冶金主要包括浸出、液固分离、溶液净化、从溶液中提取金属及废水处理等操作过程。

1) 浸 出

浸出是借助于溶剂选择性地从矿石、精矿、焙砂等固体物料中提取某些可溶性组分的过程。

根据浸出剂的不同可分为酸浸出、碱浸出和盐浸出。根据浸出化学过程不同又分为氧化浸出和还原浸出。根据浸出方式不同分为堆浸出、就地浸出、渗滤浸出、搅拌浸出、热球磨浸出、管道浸出、流态化浸出。根据浸出过程的压力不同可分为常压浸出和加压浸出。影响浸出速度的因素主要有固体物料的组成、结构和粒度,浸出剂的浓度,浸出的温度,液固相对流动的速度和矿浆黏度等。

2) 液固分离

将浸出液分离成液相和固相的方法有沉降分离和过滤分离两种。

沉降分离是借助于重力作用将浸出矿浆分离为含固体量较多的底流和清亮的溢流的液固分离方法,其先决条件是在固相和溢流液之间存在密度差。由于矿浆中粒子直径范围很宽,从几百微米到几微米均有,沉降速率不能用理论公式计算,通常要靠试验测定。当处理含极细物料的矿浆时,可利用离心力代替重力以加速颗粒沉降。如利用水力旋流器和螺旋离心机来强化沉降过程。也可借助化学试剂(如絮凝剂或絮凝剂)促进矿浆中分散的、不易凝聚的颗粒转化成澄清溢流和浓密底流。絮凝剂(如石灰)可使颗粒互相凝聚,絮凝剂可使细颗粒形成絮团来强化沉降过程。

过滤分离是利用多孔介质拦截浸出矿浆中的固体粒子,以压强差或其他外力为推动力,使液体通过微孔的液固分离方法。拦截固体粒子的介质有编织物、多孔陶瓷、多孔金属、纸浆及石棉等,但不论是哪种过滤介质,其孔隙通常大于被过滤粒子的直径。真正的过滤是靠粒子群在介质上通过架桥作用或形成疏松的滤饼来实现,只有形成滤饼后的滤液才是清澈的。过滤分恒压和恒速两种,前者在滤饼加厚以后而不改变抽力的情况下,过滤速度会减慢;后者则为了保持过滤速度,在滤饼加厚的情况下,必须加大抽力才能保证速度不变。过滤器选择的要素是滤饼的比阻、过滤物料的固体含量、滤液黏性等。常用过滤器有回转筒真空过滤机、带式过滤机、板框式过滤机等。

3) 溶液净化

一般浸出液中除欲提取金属外,尚有金属和非金属杂质,必须先分离掉这些杂质才能提取目的金属。

溶液净化有以下作用。

(1) 确保产品质量:一些杂质元素会影响产品的用途,必须严格按照规定标准生产,以保证产品质量。

(2) 使后续作业顺利进行。

(3) 提高生产的技术经济指标:某些杂质会直接影响工艺过程的顺利进行,如电积时氯离子会影响电流效率和回收率指标。

(4) 综合回收有价值金属:如湿法炼锌中,可从浸出液中回收金属铜、锗等;又如电解镍时,可从浸出液中回收钴等。

溶液净化方法多种多样,工业上常用的有结晶、蒸馏、沉淀、置换、溶剂萃取、离子交换、电渗析和膜分离等方法。为获得纯净溶液,往往多种方法综合使用。

4) 从溶液中提取金属

把水溶液中所含的金属物料从溶液中提取回收的操作过程,是湿法冶金的重要步骤之一。从溶液中提取金属的方法分电解法和化学法两种。

电解提取又称电解沉积,是向含金属盐的水溶液或悬浮液中通入直流电而使其中的某些金属沉积在阴极的过程。化学提取是用一种还原剂把水溶液中的金属离子还原成金属的过程。

电解提取和化学提取各有其优缺点。电解提取不需大量试剂,对环境污染小,特别适合于大规模生产,是工业上从水溶液中提取铜、镍、锌的主要方法。但该法消耗大量电能,不适用于电力缺乏的地区,此外还有一次性设备投资大、占地面积大及操作周期长的缺点。化学提取法则具有消耗电能少、设备投资少、占地面积小及操作周期短等优点;缺点是需要消耗还原剂,产生的废液经处理才能排放。

1.1.3 电冶金

电冶金是以电能为能源进行提取和处理金属的工艺过程。根据电能转化形式的不同分为电化冶金和电热冶金两类。

电化冶金又称电解,是使直流电能通过电解池转化为化学能,将金属离子还原成金属的过程。根据电解液的不同,电化冶金分为水溶液电解和熔盐电解;根据阳极的不同又分为不溶阳极电解和可溶阳极电解。

电热冶金是利用电能转变为热能在电炉内进行提取或处理金属的过程,按电能转变为热能方法(即加热的方法)的不同,可分为电弧熔炼、电阻熔炼、感应熔炼、电子束熔炼和等离子冶金等。

1.2 钢铁冶炼

1.2.1 钢铁冶炼过程热力学原理

根据热力学基本理论及相关函数关系,在定压条件下可导出吉布斯-杜亥姆方程:

$$\left[\frac{\partial(\Delta G/T)}{\partial T} \right]_P = \frac{-\Delta H}{T^2}$$

式中, G 为吉布斯自由能,J; H 为焓,J; T 为温度,K。

根据这一方程,可从 $\Delta H-T$ 或 $\Delta H^\ominus-T$ 的关系求得 $\Delta G-T$ 或 $\Delta G^\ominus-T$ 的关系。由于热力学中计算 ΔH 所用的平均热容 C_p 与温度的关系常采用多项式表示,计算中常选择低次项而忽略高次项。在冶金过程中,常需采用简单直观的图解法来研究问题,故应用回归法将多项式处理为简单的线性二项式,即:

$$\Delta G^\ominus = A + BT$$

式中, A, B 为回归系数。根据 $\Delta G^\ominus = \Delta H^\ominus - T\Delta S^\ominus$ 可知, A, B 两数的热力学含义分别为 $\Delta H^\ominus$ 和 $\Delta S^\ominus$, S 为熵(J/K)。目前在有关手册中有大量反应的 $\Delta G^\ominus-T$ 二次关系式可供查用。图1-1为各种氧化物的 $\Delta G^\ominus-T$ 关系图,可以反映纯物质和氧气生成氧化物的标准自由能变化,

故也称为氧势图。由图可看出：

(1) 氧化物的氧势线越低,该氧化物越稳定。因此在标准状态下,氧势线在下的氧化物对应元素可以还原氧势线位置在上的氧化物。

(2) 如果两个氧势线在某温度下相交,在该温度下,对应的两个氧化物的稳定性相同,也可以说两种氧化反应同处平衡状态。此温度称为转化温度。

(3) 由碳和氧生成 CO 反应的氧势线向右下方倾斜,而绝大多数氧化物的氧势线却向上方倾斜。二者必然相交,交点所对应的温度就是碳还原该氧化物的温度,这就是碳还原生产金属的基本原理。可以看出,只要温度足够高,从理论上讲,碳可以还原所有的金属氧化物。

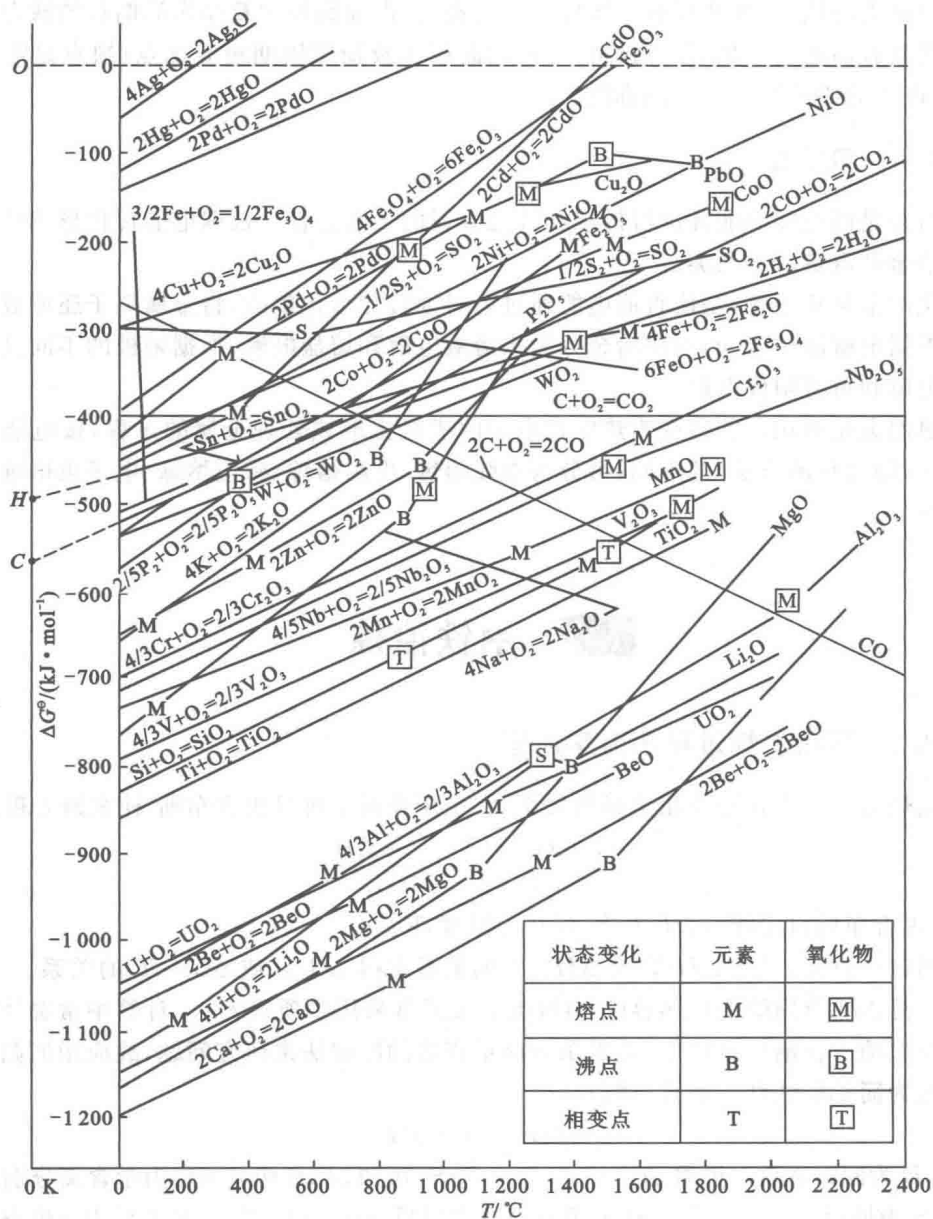


图 1-1 氧化物的标准生成吉布斯自由能与温度的关系

1.2.2 生铁的冶炼

现代炼铁方法分为高炉炼铁法和非高炉炼铁法。高炉炼铁法是现代炼铁的主要方法。这种方法是由古代竖炉炼铁发展、改进而成的。尽管世界各国研究发展了很多新的炼铁方法,但高炉炼铁技术由于经济指标良好、工艺简单、生产量大、劳动生产效率高和能耗低,至今此方法生产的铁仍占世界铁总产量的95%以上。高炉炼铁的主导地位预计在未来相当长时期内不会改变。同时,传统的高炉-转炉炼钢工艺流程工艺成熟,可大规模生产,是现代钢铁生产的主要形式。图1-2是典型的现代钢铁厂的完整生产流程。

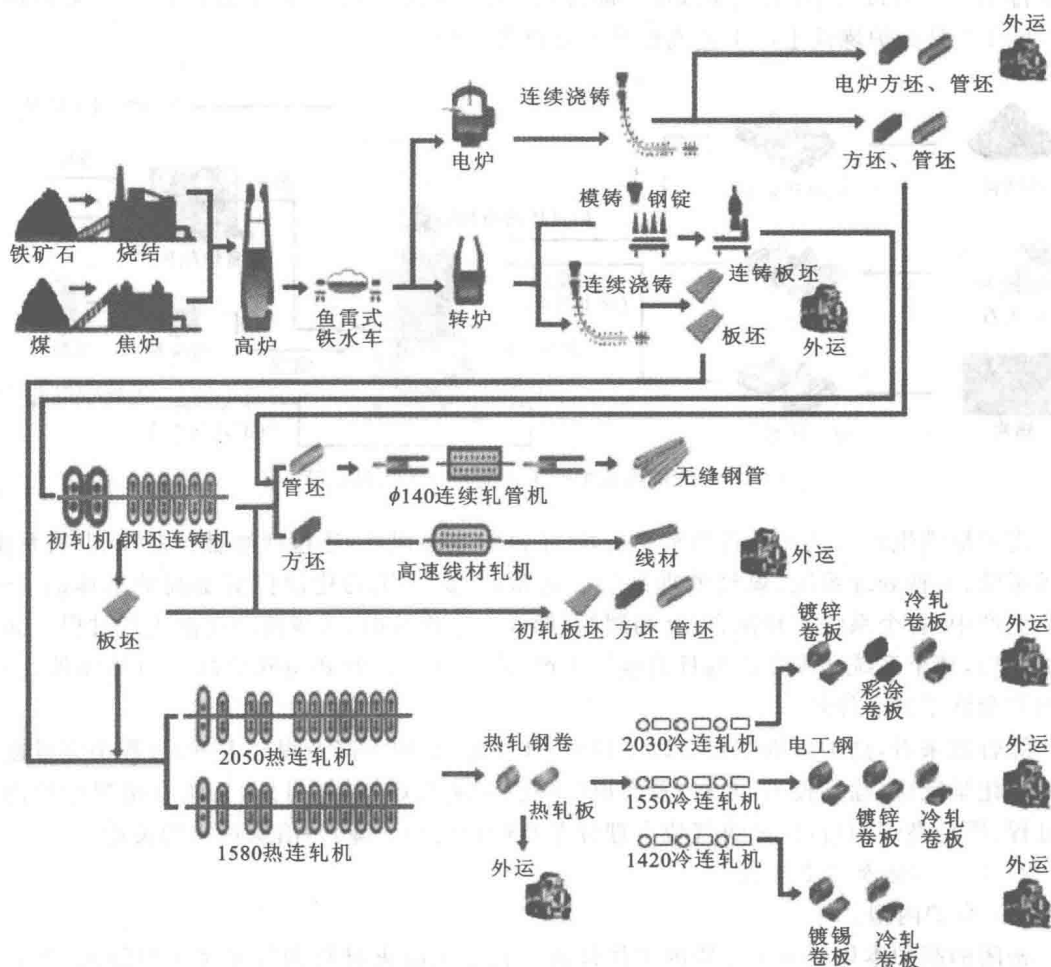


图 1-2 典型的现代钢铁厂的完整生产流程

由于高炉炼铁受能源焦炭的限制,一些缺乏焦煤资源的国家和地区经过长期的研制和实践,也逐步形成了不同形式的非高炉炼铁法。非高炉炼铁法泛指除高炉以外,不用焦炭而用煤、燃油、天然气、电等为能源基础的一切其他炼铁方法。例如直接还原法,主要是指在冶炼过程中,炉料始终保持固体状态而不熔化,产品为多孔状海绵铁或金属化球团的方法。熔融还原法是用高品位铁精矿粉(经预还原)在高温熔融状态下直接还原冶炼钢铁的一种新工

艺。新兴的直接还原-电炉炼钢流程规模较小,目前正处于发展阶段,是钢铁生产的重要补充。

1) 高炉炼铁生产流程及特点

高炉炼铁的本质是铁的还原过程,即焦炭作燃料和还原剂,在高温下将铁矿石或含铁的原料,从氧化物或矿物状态(如 Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , Fe_2SiO_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot \text{TiO}_2$ 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。从下部风口鼓入的高温热风与焦炭发生反应,产生的高温还原性煤气上升,并使炉料加热、还原、熔化、造渣,产生一系列的物理化学变化,最后生成液态渣、铁聚集于炉缸,周期性地从高炉排出。上升过程中,煤气流温度不断降低,成分逐渐变化,最后形成高炉煤气从炉顶排出。图 1-3 是高炉炼铁生产工艺流程及主要设备简图。

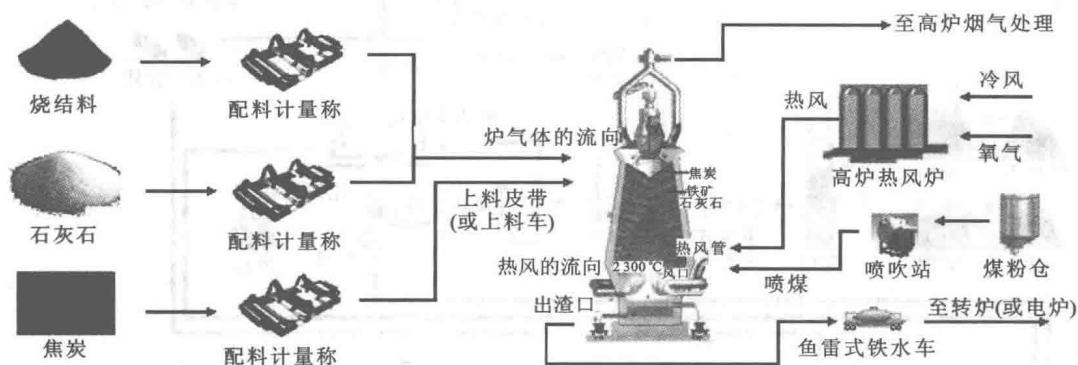


图 1-3 高炉炼铁生产工艺流程及主要设备简图

高炉炼铁生产工艺和设备非常复杂,除了高炉本体以外,还包括原燃料系统、上料系统、送风系统、渣铁处理系统、煤气处理系统。通常,辅助系统的建设投资是高炉本体的 4~5 倍。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。高炉开炉之后,整个系统必须夜以继日地连续生产,除了计划检修和特殊事故暂时休风外,一般要到寿命终了时才停炉。

综合起来看,高炉炼铁主要有以下特点:在逆流(炉料下降及煤气上升)过程中完成复杂的物理化学反应;除在投入(装料)及产出(生铁、炉渣及煤气)之时外,无法直接观察炉内反应过程;维持高炉顺行(保证煤气流合理分布及炉料均匀下降)是冶炼过程的关键。

2) 高炉本体及主要构成

(1) 高炉内型。

密闭的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。高炉内部工作空间的形状称为高炉内型。高炉内型从下往上分为炉缸、炉腹、炉腰、炉身和炉喉五个部分(见图 1-4)。其中炉缸部位布置有铁口、渣口和风口,数目依据炉容、炉缸直径、冶炼强度等有所差别。如我国宝钢一号高炉容积达 $4\,063\text{ m}^3$,设置 36 个风口,4 个铁口。

(2) 高炉内衬。

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。通常,高炉炉衬由陶瓷质材料(包括黏土质和高铝质等)和炭质材料(炭砖、炭捣石墨等)砌筑。由于高炉

冶炼过程温度高且有复杂的物理化学反应发生，炉衬在冶炼过程中将受到侵蚀和破坏。炉衬被侵蚀到一定程度，就需要采取措施修补。停炉大修便是高炉一代寿命的终止。

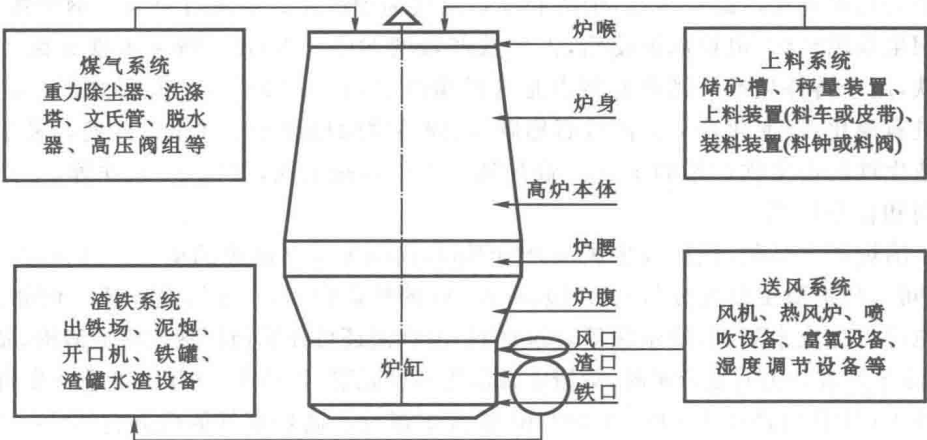


图 1-4 高炉内型简图

(3) 高炉冷却设备。

温度是影响高炉炉衬侵蚀程度的主要因素之一，高温是炉衬破损的主要原因。因此，采用合适的冷却设备以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被破坏。在某些部位还可形成渣皮，保护炉衬并代替炉衬工作。

炉衬冷却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。由于高炉各部位热负荷和结构不同，所以高炉冷却设备也有多种形式和方法，如冷却壁、冷却水箱、外部喷水冷却、水冷炉底等。

(4) 高炉内主要区域。

正在运行中的高炉根据其中物料存在形态的不同，可划分为五个区域：块状带、软熔带、滴落带、风口前回旋区、渣铁聚集区（见图 1-5）。各区内进行的主要反应及特征如下。

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

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，形成初渣。

滴落带：在此区域，滴落的液态渣铁与煤气及固体炭之间进行多种复杂的化学反应。

风口前回旋区：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。

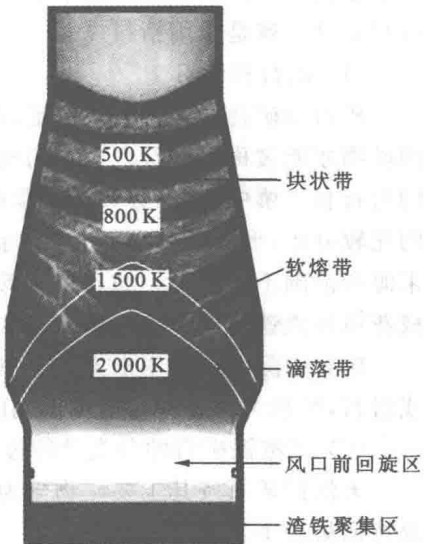


图 1-5 高炉内主要区域

渣铁聚集区;在渣铁层间的交界面及铁滴穿过渣层时发生渣铁反应。

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。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,用于铸件生产。其主要特点是含硅量较高,在 1.25%~4.25%之间。硅在生铁中能促进石墨化,即使化合碳游离成石墨碳,增强铸件的韧性和耐冲击性并使其易于切削加工。铸造生铁约占生铁产量的 10%。高炉还可生产特殊生铁,如锰铁、硅铁等,主要用作炼钢脱氧剂和合金化剂。

由于冶炼矿石品位、焦比及焦炭灰分的不同,我国大中型高炉的单位生铁渣量在 0.3~0.5 t 之间。高炉渣主要成分是 Ca、Mg、Si 及 Al 的氧化物,其工业用途广泛。例如:高炉渣在炉前急冷粒化成水渣,做成水泥等建筑材料;酸性渣还可在炉前用蒸汽吹成渣棉,做成绝热材料;冶炼多元素共生的复合矿时,炉渣中常富集多种元素(如稀土、钛等),可进一步利用。

冶炼 1 t 生铁可产生 1 600~3 000 m³ 的高炉煤气。高炉煤气的成分有 20%~25% (体积分数,下同)的 CO,1%~3%的 H₂,少量甲烷(CH₄)等可燃气,还有大量的炉料粉尘,经过除尘处理可使含尘量降到 10~20 mg/m³。除尘处理后的高炉煤气发热值为 3 350~3 770 kJ/m³,是良好的气体燃料。高炉煤气的量、成分及发热值与高炉操作参数及产品种类有关。如高炉冶炼铁合金时煤气中几乎没有 CO₂。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、炼钢及轧钢等部门使用。

4) 高炉炼铁的原料及预处理

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。目前,炼铁的发展趋势之一就是采用精料。

(1) 矿石和脉石。

矿石是矿物的集合体。但是,在当前的科学技术条件下能经济合理地从中提炼出金属的矿物才能被称为矿石。矿石的概念是相对的,例如铁元素广泛地、程度不同地分布在地壳的岩石和土壤中,有的分布比较集中,形成天然的富铁矿,可以直接用来炼铁,堪称矿石;有的比较分散,形成贫铁矿,用于冶炼既困难又不经济。随着选矿和冶炼技术的发展,矿石的来源和范围不断扩大。如含铁较低的贫矿经过富选也可用来炼铁;过去认为不能冶炼的攀枝花钒钛磁铁矿已成为重要的炼铁原料。通常冶炼 1 t 生铁,需铁矿石 1.6~1.8 t。

矿石中除了含有用来提取金属的有用矿物外,还含有一些工业上没有提炼价值的矿物或岩石,统称为脉石。对冶炼不利的脉石矿物,应在选矿和其他处理过程中尽量去除。

(2) 天然铁矿石的分类及特征。

天然铁矿石按其矿物分为磁铁矿、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。

磁铁矿主要的含铁矿物为 Fe₃O₄,具有磁性。其化学组成可视为 Fe₂O₃·FeO, $w(\text{FeO}) = 30\%$, $w(\text{Fe}_2\text{O}_3) = 69\%$,其中 $w(\text{Fe}) = 72.4\%$, $w(\text{O}) = 27.6\%$ 。磁铁矿颜色为灰色或黑色,由于其结晶结构致密,所以还原性比其他铁矿差。磁铁矿的熔融温度为 1 500~1 580 °C。这种矿物与 TiO₂ 和 V₂O₅ 共生,叫钒钛磁铁矿;只与 TiO₂ 共生的叫钛磁铁矿,其他常见混入元素还有 Ni、Cr、Co 等。