



国际机械工程先进技术译丛

金属手册 案头卷 (下册)

原书第2版

METALS HANDBOOK
DESK EDITION
(SECOND EDITION)

(美) J.R.Davis(约瑟夫·R.戴维斯) 等编著
陆济国 金锡志 译



国际机械工程先进技术译丛

金属手册案头卷

(下册)

原书第2版

Metals Handbook Desk Edition

(Second Edition)

[美] J. R. Davis (约瑟夫·R. 戴维斯) 等编著

陆济国 金锡志 译

唐波 等审校



机械工业出版社

美国金属学会(ASM)出版的《Metals Handbook》是一部国际公认金属材料方面的经典著作。本手册是其第2版案头卷的中文版。该手册几乎涉及所有在用金属材料,包括当前航空航天、纳米技术、超导技术等领域所应用的新型金属材料的系统基础理论和实用技术数据,以及有关的最新研究成果,还详细描述了各种金属从采矿、冶炼、铸造、热处理到冷、热加工等的最新制造工艺和检测、试验方法,以及有关摩擦学的实验研究方法。

通览全书,本手册不仅具有权威性,而且内容涉猎广泛、丰富先进,理论深入浅出,图表简明实用。

本书不仅可供广大机械、材料工程师和技术人员在工作中查阅,还可以作为材料学科的辅助教材供有关科研院所研究人员和高等学校师生参考。

Metals Handbook Desk Edition(Second Edition)/Edited by J. R. Davis etc.
ISBN: 978-0-87170-654-6

Copyright © 1998 by ASM International
Authorized translation from English language edition published by ASM International,
All right reserved.

China Machine Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

北京市版权局著作权合同登记号:01-2009-0242

图书在版编目(CIP)数据

金属手册. 案头卷. 下册: 原书第2版/(美)戴维斯(Davis, J. R.)等编著;
陆济国、金锡志译. —北京: 机械工业出版社, 2013. 8

(国际机械工程先进技术译丛)

书名原文: Metals Handbook Desk Edition

ISBN 978-7-111-43458-0

I. ①金… II. ①戴…②陆…③金… III. ①金属材料—技术手册
IV. ①TG14-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第170057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: 孔劲 责任编辑: 孔劲 庞晖 王彦青

版式设计: 霍永明 责任校对: 陈延翔

封面设计: 鞠杨 责任印制: 李洋

北京市四季青双青印刷厂印刷

2014年3月第1版第1次印刷

184mm×260mm·66.25印张·2插页·2283千字

0 001—2 000册

标准书号: ISBN 978-7-111-43458-0

定价: 258.00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

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

ASM 国际为其手册诞生 75 周年而感到自豪。1923 年美国钢铁处理学会(即后来的美国金属学会,也就是现在的 ASM 国际)出版了一部小型的数据活页集——即大家所知道的《金属手册》的第一个版本。该活页集经过若干年的发展成为多册的参考手册——其每一册都代表一个完整、综合的具有权威性的专题。后又经过不断扩充,演变成为目前这本冠名为《ASM 手册》的系列图书,它满足了全世界冶金专业不断变化的需要。今年它发展的又一个标志就是《ASM 手册》光盘的出版。

同时,今年又是于 1948 年出版的、已成为经典版本的《金属手册》诞生 50 周年,经整合,它最后编辑为单行本。大约 15 年前出版的第一部《金属手册(案头卷)》也是源自 1948 年的这一版本。现在它的第 2 版也像前两个版本一样,以其简便实用为所有金属工作者提供更多的帮助,是所有金属学优先选择的实用单行本参考用书。

对于 ASM 国际来说,启动增订这本《金属手册(案头卷)》的项目也有些不可思议。其任务之巨似乎是浩瀚的。《ASM 手册》已经增加到目前的 20 卷——差不多是第一版《金属手册(案头卷)》编撰时的两倍。试想要把它从第一个版本诞生时就包含的这么多重要的内容,加上此后多年来又形成的一些最有意义的知识和数据,都归纳在一个单行本里是多么不容易啊!

我们深信这部新的《金属手册(案头卷)》已经超过其预期要达到的目标。这个伟大成就的荣誉应该属于约瑟夫 R. 戴维斯。多年来约瑟夫是《ASM 手册》的编者,他极为渊博的知识加上相当丰富的编辑技巧,使他具有独一无二的资格来完成这本最好的手册。约瑟夫除了个人的努力之外,还组建了一个编写顾问委员会,包括许多 ASM 的朋友们,都对手册作出了不懈的努力,我们也要向他们表示感谢。在此我们还要特别提及有关的 ASM 编辑和工作人员,他们也都为这本手册付出了努力。

当然我们还要特别感谢在过去 75 年中,数以千计的冶金专业人员为这本手册所做出的贡献。正是他们作为作者、校审、编写组织以及手册的编委成员所奉献的知识和经验,才使得这本书有得以出版的可能。也正是由于他们的支持,必将使得《ASM 手册》赢得另一个 75 年。

小爱尔顿 D. 罗米格
ASM(国际)主席

麦格尔 J. 迪海默
ASM(国际)执行经理

目 录

译丛序言		铸铁概论	64
中文版序言		灰铸铁	65
译者前言		球墨铸铁	72
前言		蠕墨铸铁	77
序言		可锻铸铁	78
		高合金白口铸铁	80
		铸钢	81
		第6节 非铁合金的铸造生产	82
		铝合金	82
		铜合金	88
		锌合金	90
		镁合金	90
		超合金	91
		钛合金	92
		金属基复合材料的铸造	93
		第7节 铸件设计和质量保证	93
		设计依据	93
		铸造公差	95
		凝固模拟程序	95
		快速成形技术	96
		铸造厂中的质量保证	97
		第3章 成形加工	98
		第1节 薄板、带料和平板的成形加工	98
		薄板金属成形加工的冲压和辅助设备	98
		薄板金属成形加工模具材料的选择	103
		薄板金属成形加工中润滑液的选择和使用	105
		低碳钢的落料	108
		低碳钢的冲孔	109
		精密冲裁	110
		电工薄钢板的冲裁	112
		低碳钢的压力机折弯	113
		折弯机成形加工	115
		低碳钢的冲压成形	117
		高碳钢的冲压成形	118
		镀层钢板的冲压成形	119
		带钢在多滑块机床上的成形加工	120
		深拉深	121
		拉深成形法	125
		旋压成形	126
		橡胶垫成形加工	127
第4篇 制造工艺			
第1章 金属冶炼	1		
矿产和矿石的开采	1		
选矿	2		
采掘工艺流程图	4		
高温冶金工艺	5		
湿法冶金工艺	12		
电冶金工艺	16		
第2章 铸造	21		
第1节 概论	21		
铸造流程图	21		
铸造合金	21		
第2节 金属和合金的凝固	22		
纯金属	22		
合金	22		
共晶相	25		
缺陷	25		
浇冒口系统	27		
第3节 造型方法	32		
造型方法的分类	32		
砂模	33		
陶瓷模	43		
金属模	46		
第4节 熔化方法	53		
感应熔化	53		
冲天炉熔炼	55		
电弧炉	58		
坩埚熔化	59		
反射炉	61		
反应热熔炼	62		
真空熔化	62		
熔化金属的处理	63		
第5节 铁合金的铸造生产	64		

三辊成形加工	131	铜和铜合金的锻造	232
型辊成形加工	132	镁合金的锻造	235
落锤成形加工	133	钛合金的锻造	236
爆炸成形加工	134	第 5 章 粉末冶金	241
电磁成形	135	粉末冶金定义	242
超塑成形 (SPF)	136	粉末特性	243
第 2 节 棒材、管材和线材的成形加工	141	粉末生产工艺	245
线材、圆棒和管材的拉制	141	粉末处理	251
棒材和圆棒形截面的弯曲	143	粉末固结	253
管材的弯曲和成形加工	144	二次加工	261
管材的旋压加工	145	第 6 章 切削加工	264
棒材、型材和长形零件的矫直	146	第 1 节 概论	264
管材的矫直	148	第 2 节 切削加工工艺要素	267
线材的成形加工	148	切削形成的力学原理	267
第 3 节 剪切、切割和切断	150	金属切削中的刀具磨损	268
中厚板和薄板的剪切	150	切削加工参数	270
成卷薄板和带材的切割和剪切	151	切削力与功率	272
棒材和型材的剪切	153	第 3 节 切削刀具材料	275
氧气切割	154	第 4 节 切削液	280
等离子弧切割	158	第 5 节 表面粗糙度和表面质量	289
吹气碳电弧切割和刨削	159	第 6 节 微观组织和切削加工性能	295
氧气电弧切割	160	铸铁	295
激光束切割	160	钢	297
第 4 节 不锈钢和耐热合金的成形加工	161	铝合金	299
不锈钢的成形加工	161	第 7 节 切削加工数据的推荐	300
耐热合金的成形加工	164	切削速度和进给量	300
难熔金属的成形加工	166	刀具几何尺寸	347
第 5 节 非铁金属的成形加工	167	切削液	354
铝合金的成形加工	167	第 8 节 磨削	354
铍的成形加工	172	第 9 节 特种加工工艺	362
铜和铜合金的成形加工	173	第 7 章 热处理	371
镁合金的成形加工	177	第 1 节 钢的热处理的基本原理和设计	
镍合金的成形加工	179	准则	371
钛合金的成形加工	180	钢的热处理原理	371
铂系金属的成形加工	182	钢的热处理设计	377
第 4 章 锻造	185	第 2 节 钢的热处理	383
第 1 节 锻造设备、模具和工艺	185	钢的消除应力热处理	383
锻造的锻锤和压力机	185	钢的正火	383
模具设计和材料	193	钢的退火	384
铸造工艺	198	钢的奥氏体化温度	386
第 2 节 特种金属和合金的锻造	220	钢的淬火	388
碳素钢和合金钢的锻造	220	钢的回火	391
不锈钢锻造	223	钢的马氏体等温淬火	392
耐热合金的锻造	225	钢的贝氏体等温淬火	394
铝合金的锻造	229	钢的冷处理和深冷处理	396

超高强度钢的热处理	397	铝合金的热处理	468
马氏体时效钢的热处理	398	铜合金的热处理	481
粉末冶金钢的热处理	398	镁合金的热处理	487
第3节 钢的表面硬化	400	镍和镍合金的热处理	490
气体渗碳	400	钛和钛合金的热处理	492
固体渗碳	404	第8章 连接	496
液体渗碳和液体碳氮共渗	404	第1节 引论与概述	496
真空渗碳	406	连接工艺	496
离子渗碳	408	接头的设计及其坡口的制备	502
气体碳氮共渗	409	第2节 电弧焊接	505
气体渗氮	411	焊条电弧焊	505
液体渗氮	413	药芯焊丝电弧焊	508
离子渗氮	415	埋弧焊	511
铁素体气体碳氮共渗	416	气体保护金属极电弧焊	515
表面硬化层深度的测量方法	417	气体保护钨极电弧焊	519
第4节 热处理设备	418	等离子电弧焊	523
热处理加热炉的类型	418	等离子-MIG焊	525
盐浴设备	418	电渣焊和气电焊	527
流体床设备	420	可硬化的碳素钢和合金钢的电弧焊接	528
热处理用真空加热炉和辅助设备	421	铸铁的电弧焊接	539
用作加热炉零件、料盘和夹具的耐热合金	422	不锈钢的电弧焊接	541
第5节 工艺控制概要	425	耐热合金的电弧焊接	547
温度控制	425	铝合金的电弧焊接	548
加热炉的气氛	426	铜和铜合金的电弧焊接	554
加热炉气氛的控制	429	镁合金的电弧焊接	558
热处理中钢表面含碳量的控制	430	镍合金的电弧焊接	559
对已加工零件含碳量控制的评估	432	钛和钛合金的电弧焊接	560
加热炉的安全	434	第3节 电阻焊接	562
第6节 局部热处理	435	电阻点焊	562
感应淬火和回火	435	电阻缝焊	564
火焰淬火	440	凸焊	566
激光表面相变硬化	444	闪光焊	569
电子束热处理	445	第4节 其他熔焊	571
第7节 铸铁的热处理	446	氧燃气焊	571
铸铁热处理入门	446	电子束焊	573
灰铸铁的热处理	447	激光束焊	574
球墨铸铁的热处理	449	螺柱焊	574
可锻铸铁的热处理	450	冲击焊	574
奥氏体铸铁的热处理	451	高频焊	575
第8节 工具钢的热处理	452	热剂焊	576
第9节 不锈钢和耐热合金的热处理	459	第5节 固态焊接工艺	576
不锈钢的热处理	459	扩散连接	576
超合金的热处理	465	爆炸焊	578
难熔金属和合金的热处理	467	摩擦焊	579
第10节 非铁合金的热处理	468	超声焊	579

钎焊·····	579	电镀铅·····	641
变形焊·····	580	电镀银·····	641
第6节 硬钎焊·····	580	电镀金·····	642
硬钎焊工艺和硬钎焊填充金属的选用·····	580	电镀合金·····	642
钢的炉中加热硬钎焊·····	582	局部电镀·····	644
钢的焊炬加热硬钎焊·····	583	电铸·····	645
钢的感应硬钎焊·····	586	第5节 非电解沉积工艺·····	645
电阻硬钎焊·····	587	无电镀镍·····	645
钢的熔盐浸渍硬钎焊·····	590	无电镀铜·····	648
铸铁的硬钎焊·····	591	机械渗镀·····	649
不锈钢的硬钎焊·····	591	第6节 浸涂、防护涂层和化学转化涂层·····	650
耐热合金的硬钎焊·····	594	钢的热浸涂·····	650
铝合金的硬钎焊·····	596	带钢的连续电镀涂层·····	653
铜和铜合金的硬钎焊·····	597	巴氏合金浇铸·····	655
钛和钛合金的硬钎焊·····	600	磷酸盐转化涂层·····	655
第7节 软钎焊·····	601	铬酸盐转化涂层·····	657
第9章 表面工程 ·····	607	涂装·····	657
第1节 概论·····	607	防锈剂·····	660
第2节 表面清洗·····	608	堆焊涂层·····	661
清洗工艺的选用·····	608	热喷涂涂层·····	662
碱液清洗·····	610	搪瓷涂层·····	664
电解清洗·····	612	陶瓷涂层·····	666
溶剂清洗·····	613	第7节 化学气相沉积及相关工艺·····	668
乳化液清洗·····	615	第8节 物理气相沉积·····	671
熔盐浴清洗·····	615	第9节 不锈钢和耐热合金的表面工程·····	675
超声波清洗·····	616	不锈钢的表面工程·····	675
钢和铁的酸清洗·····	618	耐热合金的表面工程·····	676
钢和铁的酸洗·····	619	第10节 非铁金属的表面工程·····	676
磨料喷砂清理·····	619	铝和铝合金的表面工程·····	676
第3节 精整加工方法·····	622	铜和铜合金的表面工程·····	681
精整加工方法的分类·····	622	镁合金的表面工程·····	683
磨料精整加工方法·····	622	镍和镍合金的表面工程·····	685
电解抛光·····	625	锌合金的表面工程·····	688
成批精整加工·····	626	钛和钛合金的表面工程·····	689
喷丸处理·····	627	锆和铪的表面工程·····	691
第4节 电镀工艺·····	628	高熔点金属及合金的表面工程·····	691
电镀铜·····	628	第10章 回收和寿命周期分析 ·····	694
工业用电镀硬铬·····	630	第1节 回收·····	694
电镀装饰铬·····	631	回收基础·····	694
电镀镍·····	632	钢和铁的回收·····	699
电镀铁·····	634	不锈钢、超合金和镍的回收·····	700
电镀镉·····	636	铝的回收·····	702
电镀锌·····	637	铜的回收·····	705
电镀钢·····	639	电子废料中贵金属的回收·····	707
电镀锡·····	639	铅的回收·····	708

镁的回收	709	第9节 超声检测	822
锡的回收	710	第10节 声发射检测	835
钛的回收	711	第11节 射线照相检测	837
锌的回收	712	第12节 热检测	853
第2节 回收的规划和寿命周期分析	714	第13节 全息照相检测	855
回收的规划	714	第4章 力学、磨损和腐蚀试验	860
寿命周期分析	716	第1节 力学试验	860
第5篇 试验、检测、特征分析和 质量控制		硬度测试	860
第1章 失效分析	721	拉伸试验	873
第1节 失效的工程现状和失效分析	721	压缩试验	877
失效分析概况	721	动态断裂试验	880
断裂力学引论	723	断裂韧度试验	883
第2节 失效的不同机理和相关环境因素	734	疲劳寿命试验	890
失效类型的鉴别	734	疲劳裂纹生长试验	896
塑性和脆性断裂	735	蠕变、应力破裂和应力松弛试验	898
疲劳失效	740	剪切试验	901
变形失效	745	扭转试验	901
磨损失效	746	成形性试验	902
腐蚀失效	748	第2节 磨损试验	908
应力腐蚀开裂	754	第3节 腐蚀试验	917
液态金属脆化	757	应力腐蚀开裂试验	917
气蚀失效	759	氢脆试验	923
腐蚀疲劳失效	760	第5章 金相分析	928
高温失效	761	第1节 通用于所有金属的金相分析技术	928
第2章 断口分析	767	金相分析方法	928
第1节 原理和方法	767	选择机械抛光的技术依据	938
断口试件的制备和保存	767	电解抛光	942
断裂零件和断口表面的照相	768	制备和处置腐蚀剂的方法及注意事项	945
光学显微镜下的断口分析特征	771	第2节 铁金属的金相分析技术	949
光学断口照片的解析	772	碳素钢和合金钢的金相分析技术	949
扫描电镜断口照片的解析	774	表面硬化钢的金相分析技术	956
第2节 断口分析在失效分析中的应用	779	铸钢件的金相分析技术	957
通过断口分析失效问题	779	铸铁的金相分析技术	957
导致断裂的不连续突变	783	工具材料的金相分析技术	959
第3章 无损检测	786	铁基粉末冶金合金的金相分析技术	962
第1节 无损检测和检验方法指南	786	锻压不锈钢的金相分析技术	964
第2节 泄漏检测	788	不锈钢铸造合金的金相分析技术	966
第3节 目视检测	790	Fe-Cr-Ni耐热铸造合金的金相分析技术	967
第4节 液体渗透检测	794	第3节 铁基合金的典型显微组织	969
第5节 磁粉检测	803	第4节 非铁金属和特种用途合金的金相 分析技术	980
第6节 磁场检测	811	铝合金的金相分析技术	980
第7节 涡流检测	814	铜和铜合金的金相分析技术	983
第8节 微波检测	821	铅和铅合金的金相分析技术	985
		镁合金的金相分析技术	987

镍和镍合金的金相分析技术.....	988	第 6 章 材料特征分析	1005
锻压耐热合金的金相分析技术.....	989	第 1 节 引论和概述	1005
磁性合金的金相分析技术.....	992	第 2 节 整体元素分析	1006
锡和锡合金的金相分析技术.....	994	第 3 节 用于整体组织分析的 X 射线 衍射	1012
钛和钛合金的金相分析技术.....	995	第 4 节 显微组织分析	1022
高熔点金属及合金的金相分析技术.....	996	第 5 节 表面分析	1035
锌和锌合金的金相分析技术.....	998		
第 5 节 显微组织的测量.....	999		

第4篇 制造工艺

第1章 金属冶炼

B. Mishra

科罗拉多矿业大学，冶金和材料工程系

金属逆变为化合物是一种自然现象，如常见的腐蚀和氧化。随着时间的推移，一块钢会被完全锈蚀；这一过程属于自然过程，导致金属自由能降低。所以自发的或自然的逆变通常是能量的释放。金属越活泼或活性越强，它向自然状态转化的倾向就越高。

防止金属出现这一自然过程的技术叫做防腐蚀或防氧化。由于金属具有成为稳定化合物的趋势，因此其自然状态必定是氧化状态，例如，氧化物、硫化物、碳化物、硫酸盐、氯化物或硝酸盐。这种自然状态被称为矿石或矿物。将这种化合物分解并转变成金属（和非金属）的过程叫做冶金，这一过程也被称为还原过程。

当然，冶金过程需要消耗能量来使金属从化合物中分离出来。当这种能量的主要是热能时，这一过程就被称为高温冶金。如果消耗的是电能或化学能，则称为电冶金和湿法冶金。

应用于特种金属还原的冶金可能涉及一种或多种不同的冶金工艺。虽然湿法冶金蕴含用水介质来处理的意思，但它仍然需要涉及热量，以增强动力学，并/或有利于热力学。而且适合于每种冶金工艺的矿石的大小和浓度是大不相同的。在金属冶金系统中，电冶金工艺一般是不直接使用在矿石精选上的。通常，用电冶金工艺法来进行冶炼时，需要提供比较纯的金属化合物，而湿法冶金和高温冶金技术适合于处理经预选的矿石。本节将详细讨论这些主要冶金工艺的基本原理，并展现从矿石到冶炼成金属的整个路径。

直到最近，采掘冶金的领域还只是主要涉及从金属的氧化/化合物状态或天然矿石中生产出金属，即初级金属生产。然而，像其他一切事情一样，金属也只有有限的寿命。金属一旦成为工程系统中的一部

分——如合金、金属间化合物或表面改性产品——它的使用期就决定了整个系统的持续使用期，往往因其被腐蚀到某种程度，而使整个系统终止使用。在目前的工业环境下，有使用价值的金属是不会被丢弃的。金属经再生或循环利用，而成为有用的形态（被称为再生金属制品），这也需要同样的金属冶炼过程和复杂的分离方法，就像矿石的还原过程一样。废物的减量、回收、再生和利用的全过程正快速发展成为采掘冶金的一个完整的分支。

对于金属采掘，全新方法的开发是很难的。因此最近，金属采掘的研究和开发已集中到更有效地管理好现有的工艺上。工艺方法上的微小改进在提高生产效率 and 利润率方面已产生了很大收益。由于再生金属和提炼金属有不同的特性，所以再循环利用的新方法也已在开发之中。铝、锌、铅、铜和贵金属产业在过去的二十年中取得了巨大的进步。而且现在所有的技术进步都开始关注对环境的影响，如对空气和水的污染，对健康的危害。

矿产和矿石的开采

超过 98%（质量分数）的地壳含有八种元素：氧、硅、铝、铁、钙、钠、钾和镁。这些元素并不均匀分布，不过它们常以这种或那种集中矿床的形式存在。矿床一般是由岩浆分凝作用、溶液和沉淀物以及像腐蚀和浓缩这样的物理现象形成的。地球物理学、地球化学和地球卫星方法能探测出有用的矿床，并估算出它的商业价值。

一块矿石就能确定是否具有商业价值，是否可提取一种或多种天然金属矿物。在决定开发一个矿藏时，有几个因素需要考虑：矿的范围、所需的开采方法、矿的等级、开采时可能用到的设备、与金属价格

相对应的开采成本、金属需求的预测、矿石处理和提炼的成本以及开采活动对社会经济和环境影响。这一决定具有时效性，也极大地受到变化着的技术、经济和社会等限制条件的影响。

对于矿床开采来说，最简单的就是最有价值金属以元素形式或原生态而存在的矿床；这时，只需用物理分离或游离方法来生产金属。然而，对于低浓度矿床，常需采用化学和加热的方法来分离金属。而且很多金属并不是像金、银和白金一样，以天然的元素形式存在。也有一些金属以元素形式被发现，但达不到经济开采的要求。以元素形式发现的金属一般是贵金属，因为它们本身是惰性的。而大多数金属是与非金属元素化合后，以矿床的形式存在于地壳中，因此有经济开采价值的矿床相对较少。也有一种特殊的矿床可用来提炼几种金属，因为这几种金属常是共生的，如铜、金、铅、锌、镉、铋、钼和砷。

最普通的高吨位金属（铁、铝、铜、钛、镍、铬、镁、锌及其他金属）矿，不是氧化物矿，就是硫化物矿。通常是几种氧化物矿或硫化物矿以化学化合物形态一起共生于矿中。而其中某一种（通常是质量分数最高的）金属的氧化物或硫化物是主要提炼成分，必须将它与其他几种分离。其他的氧化物或硫化物包含了脉石。要极其重视伴随有用矿物的脉石的材料成分和性质。提炼所需的工艺类型极大地取决于脉石的酸碱特性。脉石的量和成分决定了所需熔剂的类型，这种熔剂用来制备合适的熔渣，以确保金属的提炼。因此，一块矿石可以是相对简单，也可以是极其复杂的，但基本上是由以下几种成分构成的：主要的有价值矿物、有影响的脉石含量、宝贵的副产品以及有害杂质。有价值矿物的成分在某种程度上决定了所采用的冶金还原工艺的类型。脉石的成分也影响着可能使用的还原工艺。对于某一给定的矿石，有价值的副产品还可以增加经济收益，如：在铜矿石中有金，在铅矿石中有银，在铜矿石中还有钼。但最终，某些杂质的存在会使处理成本增加而使冶金工艺不可行；例如，在铜矿石中有砷，在铅矿石中有铋就属于这一情况。有关开采方法和用于金属冶炼的普通矿石和矿床类型的详细信息，请参考文献 [1] 和参考文献 [2]。

选矿

选矿指的是通过对有价值金属化合物的精选，而使矿石适于金属的提炼的一组物理和化学步骤。*Mineral beneficiation* 和 *ore dressing* 两词都是选矿的意思，可交替使用。选矿步骤就是使有价值的副产品与精矿分离，而废弃掉某些优良的脉石。在一定条件下，选

矿要能提供两种或两种以上不同层次的矿石，每种都能单独成为有价值的财富。影响矿石的化学变化只是表面的。物理选矿工艺则是建立在对各种矿石碎片的重量、磁性、静电等不同特性的利用的基础上，而且通过大小分类、过筛和清洗的方法还可以提高选矿水平。最常使用的浮选工艺就是利用由表面化学控制而呈现的不同表面特性来实现。经过选矿工艺，可以从天然矿石中分离出某些脉石，而不会改变有价值金属的矿物学状态。结果就是通过选矿提高了有价值矿物的比例，降低了脉石的含量。废弃的材料则被归类为尾矿。

选矿在经济上是合理的，早期，采用剔除部分脉石的方法，使得只需要运输经过精选的体积较小的矿石去提炼，而不是运输庞大的低级别矿石。在大多数装置中，选矿设备——如破碎机、磨矿机、选矿机、分离机和浮选装置——被置于矿床附近，而还原工厂被置于离矿床一定距离的更中心地段。人们希望将经精选过的矿石装运到还原工厂，在那儿，需要用来进行还原处理的其他辅助设备和装置就较容易找到。在过去，只要开采矿脉的顶部（矿石较富集且脉石相对较少），矿石就可直接用于熔炼。而今，这类资源已非常稀少。

破碎、磨矿和分级

天然粗坯矿石必须先被粉碎成一定大小，才能将有价值的矿物从与脉石的物理结合中分离出来。至于矿石要粉碎到什么程度，才能达到合理的解离度，则取决于具体矿石的独有特性。矿石被分为细颗粒或粗颗粒，来描述有价值矿物成分的平均天然颗粒大小，这同样也可用于描述脉石。矿石样品被破碎和碾磨成不同大小，再用实验室筛分设备筛选成不同的颗粒组，并淘洗掉不能用筛子分级的微小颗粒。然后用显微镜来检查这些颗粒组，以确定解离度，并对颗粒组进行浓度试验来确定所能获得的浓度。是否要进一步碎磨以通过解离获得更高的浓度，必须与需增加的碾磨成本一起考虑。但当颗粒的尺寸非常小时，浓缩工艺就没有效率了，同时尾矿损失很高。此外，细小的矿石并不适合一些高温冶金工艺，如高炉熔炼。颗粒尺寸的减小是通过被称为破碎和碾磨的两个或三个步骤来实现的。这两个步骤合起来称作碎磨。三个最基本类型的破碎和碾磨循环如图 4.1-1 所示。

破碎可使直径 0.3 ~ 0.6m (1 ~ 2ft) 或更大的矿石块减小成平均直径为 100 ~ 150mm (4 ~ 6in) 的矿石块。伊斯默 (Schumann) 已给出了系列的筛网尺寸和每种筛网所保留尺寸的累积百分比对数之间的线

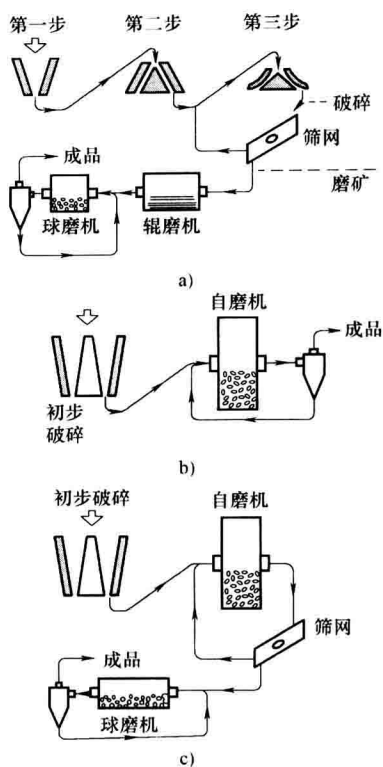


图 4.1-1 破碎和磨矿循环的三种基本类型

a) 普通型 b) 自磨型 c) 具有分离精细矿石的自磨型

性关系 (见参考文献 [3])。很多设备可以用来做粗破碎,但颚式破碎机或回转式破碎机主要用于普通的矿石。有时,短头圆锥破碎机用于将经过颚式破碎机 and 回转式破碎机破碎过的矿石,再经中间破碎来减小尺寸 (见参考文献 [4])。

碾磨是在粗破碎之后,也可能是在中间破碎之后,将最大达几英寸大小的矿石磨碎成较小尺寸的小矿石,以便能合理分离。虽然很多设备和程序被发明用来碾磨,但大多数工厂还是使用以钢球或陶瓷球、钢棒或块状矿石本身作为碾磨介质的辊磨机,后者被称作“自体”碾磨。碾磨可以是湿磨也可以是干磨,但通常使用湿磨,因为后续的选矿工艺也是湿的。湿磨还有其他优点,如能避免严重的粉尘问题,湿法分类多及粒度可控。

碾磨可以开环模式运作。矿石可在给料口加入,然后在卸料口收集全部磨好的成品。在这种情况下,所有矿石的颗粒尺寸只要经过一个通道就基本减小了,但它会使大多数送进去的矿石产生严重的过度磨碎。代替方案是将这种碾磨设备与分级装置组成一个闭环系统。这种模式不会使所有的矿石都充分减小尺寸,但磨后卸载的料会被送到分级机,分级机将过大

的矿石颗粒再送回到碾磨机给料口使它继续碾磨,而将筛下的小矿石送到处理过程的下一工序继续处理。

分级就是根据颗粒在流体 (一般是水) 中的沉降速度来进行分离,干式分级机一般用于从破碎操作中收集粉尘。与碾磨一起使用的湿法分级机可细分为机械式分级机和湿式分级机。螺旋 (机械) 式分级机在喂入从碾磨机来的矿浆后,会迫使较大较重的颗粒沉到水池底部,然后由螺旋输送出去再次碾磨。较小和较轻的颗粒就溢流出水池,并继续下一个工序。在湿式分级机 (水力旋流器) 中: 溢流中的细颗粒从顶部流出,潜流中的粗颗粒从底部流出。

选矿设备

重力选矿机。矿物的密度一般比脉石高,所以很多设备都可以用来选矿。传统上矿工用的淘选盘和摇动式吊架已被更复杂的摇床或跳汰机 (筛选机) 所替代,它们能机械化地处理更大量的材料和获得较好的分类结果。然而,这些设备却不能处理由于细矿石-脉石组织所需要达到的碾磨程度而产生的细小颗粒。

磁力选矿机。根据磁力的特性来分类,被广泛地用于铁矿石的选矿。如果铁矿是磁化的,磁性颗粒就能被永久磁铁或电磁铁吸引而与脉石分离,如图 4.1-2 所示。如果铁矿石主要是赤铁矿 (Fe_2O_3), 用部分还原的方法即可将赤铁矿转换成磁铁矿 (Fe_3O_4), 使得磁力选矿成为可能。要想成功地应用磁力选矿,矿石中的磁性部分和非磁性部分的矿物学特征明显可分是极其重要的。

静电选矿机。这种根据静电特性的不同而进行的选矿,要求将矿石的大小限定在像砂子一样的范围内。矿石被送到一个导电并接地的回转圆筒内,并暴露在电离电极下。矿石颗粒接受电荷,然而那些导电的矿石颗粒经过圆筒失去电荷后而被甩掉。非导电矿石颗粒保留了电荷并紧贴于圆筒内,然后被刷子扫入分离容器内。这个程序已被成功用于海滩砂的处理。静电选矿设备加上磁力选矿和重力选矿设备,能分离的矿石类型有金红石、钛铁矿、铬铁矿、石榴石、磁铁矿及硅石等。

浮游选矿是最广泛地用于有色金属矿的选矿方法,特别是用于硫化物。它也能用于氧化型的矿,但效率有限。它的分离原理是根据矿物的表面是否有可湿性。在水流矿浆中磨过的细矿石,送入到浮选机中被叶轮剧烈搅动。空气从压缩空气管道或因为叶轮的抽吸作用而导入到浮选室内。由搅动产生的气泡在矿浆中升起,粘附到未湿润的矿物颗粒上,并将它们带

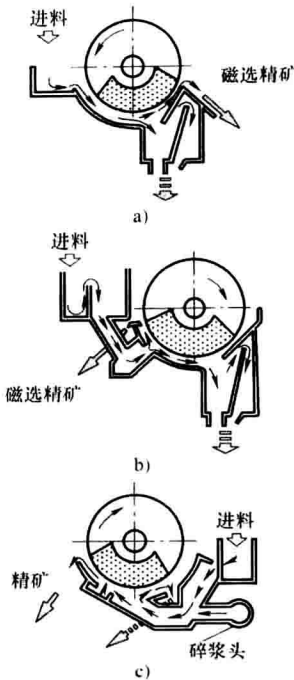


图 4.1-2 湿-筒低强度磁选机
(美国艺利磁铁 [Eriez Magnetics] 公司提供资料)
a) 同步型 b) 逆转型 c) 逆流型

到已形成泡沫的表面，这些矿物颗粒就能从浮选室中被扒掉。已湿润的颗粒，通常是脉石，不会粘附气泡，因此就保留在矿浆中并作为尾矿被处理掉。仅做一次分离是不够充分的，可以重新再做一次粗选。同样，第一次分离下来的尾矿可以再清理一次，以免倒掉有用的矿物。再处理，再磨矿和其他精细步骤导出了一个复杂的流程表。这些流程表已经过数学模型优化完善，而灵敏的仪器使效率和控制程度更高。

只有石墨和辉钼矿才需要有不湿的表面，以便颗粒粘着到气泡上并被带到泡沫的表面上。通常，要在矿浆中加入试剂来改变表面特性。曾经使用过矿物油给硫化物提供油性表面，以使它们漂浮起来而不影响矿浆中的脉石。现在，可选择使用试剂，对各种硫化物进行区分。这些被称作“捕收剂”的试剂与其他一些试剂一起添加，它们将起到稳定泡沫，降低或增加所选矿物的活性，控制 pH 值以及一般的改善所选矿物的捕收性和选择性的作用。

尾矿的处理

任何湿法选矿工艺得到的选矿产物都要进行脱水。初始步骤是在一个硕大的圆筒罐内进行浓缩。矿选物和水流体进入罐内，矿物颗粒就沉降到罐底，然后缓慢旋转的耙片将类似泥浆的沉淀物移动到中心

的卸载口。如果溶解的试剂是无害的，那么几乎没有固体物的溢流就重新返回这个工艺流程。从浓缩器下溢口里泵出来的经增稠的流体通常被送入一个鼓形或碟形的真空过滤器内，以将该泥饼的水分减少到约 10% 或更低。

如果需要补偿选矿厂的水的话，从选矿厂来的尾矿可以被进一步浓缩。否则，尾矿就通过管道或水槽排到尾矿池中，在那儿，尾矿中所含的颗粒经过一段时间会沉降出来，而顶部的清水可以废弃。

采掘工艺流程图

如前所述，单元工艺的最终组合形成一个完整（任何一种从矿石到金属的开采）的流程图，取决于原料的类型和成本、工艺成本和对金属的需求。在工艺成本中，能源成本占主要的部分；需要的金属纯度越高，就需要更多的能量来生产。然而，单元工艺基本可被分为三类：高温冶金、湿法冶金和电冶金。图 4.1-3 ~ 图 4.1-5 展示了铜、铁和锌的冶炼流程图（见参考文献 [5]），它们表示了这三种基本的冶金工艺的组合。例如，生产锌的两个替代路线，不是高

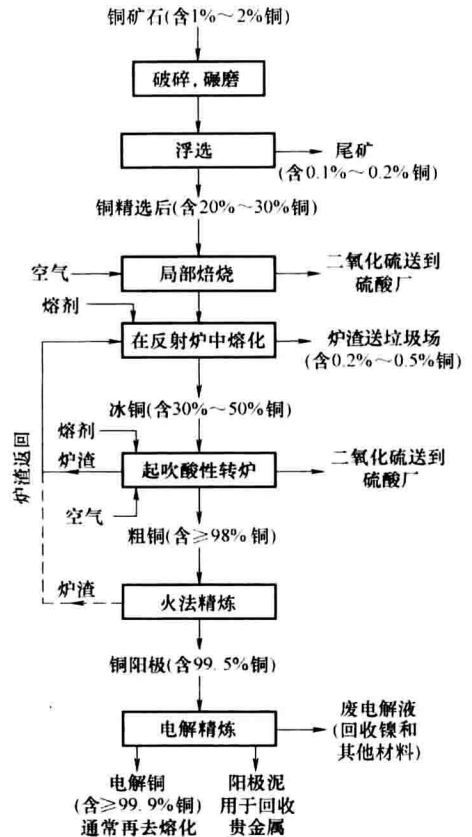


图 4.1-3 从硫化铜矿石中提炼铜的典型流程图

温冶金工艺 (图 4.1-5 左) 就是三种工艺的组合 (图 4.1-5 右)。铜的流程图 (图 4.1-3) 显示了高温冶金工艺和电冶金工艺的组合。铁的冶炼流程图 (图 4.1-4) 是最基本的高温冶金单元工艺的组合。金属产品的纯度也取决于所选择的工艺路线。作为冶炼的最后一个步骤, 电解精炼生产出了高纯度制品。而高温冶金工艺一般生产不太纯的产品, 除非产品经进一步精炼。有关这些单元工艺的热力学特性和动力学特性的完整描述请参考文献 [6] ~ 参考文献 [8]。

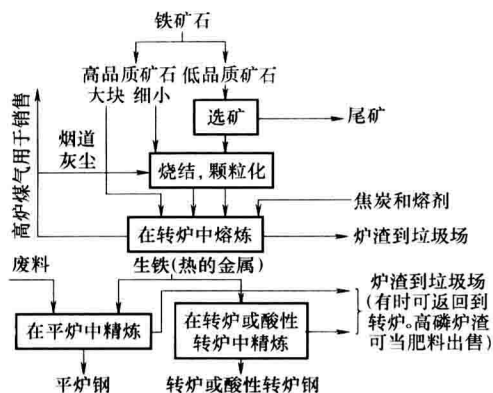


图 4.1-4 通过平炉和转炉 (BOF) 来炼铁和炼钢的流程图

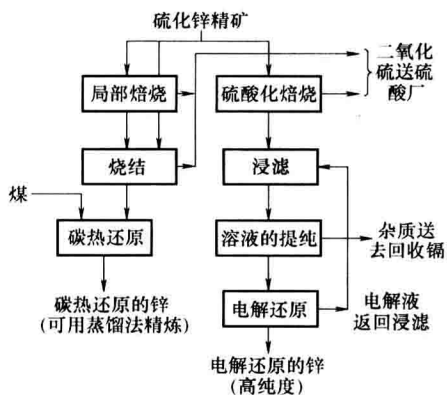


图 4.1-5 从硫化锌精矿提炼锌

高温冶金工艺

从天然开采的矿石生产的精矿是矿物与一些残余脉石的复杂混合物, 一般并不适合直接还原。值得注意的是, 有赖于非常高纯度氧化铁 (即只含有非常少量相关脉石) 供给的铁或碳化铁的直接还原工艺是个例外。某些预处理是否必要, 则要看主要金属的活性。高活性金属 (如像铝、镁、钛和钙) 的精选矿石必须经过预处理, 以获得高纯度的用于还原生产出高纯度金属的原料矿, 因为高活性金属的精炼是很

困难的。在有些情况下, 预处理的必要性是由于精选的不只是富含一种, 而是富含两种或三种金属的化合物。另一方面, 为生产低活性金属 (如铁、铬、镍) 提供的原料并不全进行预处理; 因此, 根据还原情况, 不纯的金属需要进一步精炼。所以, 在初期的还原反应发生之前, 必须准备好精选矿石。

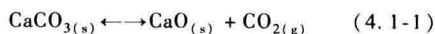
制备工艺

高温冶金的预处理包括干燥、煅烧、氧化物或硫化物的煅烧、还原煅烧、氯气处理或碳-氯气处理以及其他的外来工艺。

干燥。干燥处理的目的是去除大部分水和易挥发物, 通常它们一共占 20% ~ 30% (体积分数)。水的蒸发可以通过加热固体材料或者利用真空系统来实现。去除有机物要用真空系统, 因为它在高温时会分解。失去的重量百分比称作烧焦损失 (loss on ignition, LOI)。高温要保持足够的时间, 以便能完全干燥。因为水的蒸发是吸热反应 (水蒸发时的反应热是 44 kJ/mol), 所以水蒸发时必须要有能量, 并且要将材料升到干燥的温度。干燥必须使温度接近水的沸点时才会进行, 可以使用低品质的燃料来干燥, 如来源于其他工艺或便宜的人工煤气的热的燃烧气体。同样, 用于干燥工艺的低温对于设备的材料没有特别的要求。

固式床炉、回转窑、沸腾炉通常用于干燥。固式床炉或竖炉最适合于干燥粗糙材料。回转窑一般用于干燥混合尺寸的原材料。沸腾炉主要用于干燥细颗粒材料。如果在多层烘烤炉内烘烤精矿, 可利用从烘烤炉内上升的热量在炉子的上层进行干燥和预热。有些悬浮焙烧炉也是在炉子的上层干燥精矿, 取出经碾磨后消除结块, 然后将细的、干燥的材料再喷射入燃烧室。湿的精矿可送到流态化空气烘焙炉中, 在热的流化床上快速干燥。湿的精矿也能被送入到反射炉中干燥, 但要防止精矿在炉子的一边堆积太高而掉落到热浴中引起爆炸。分开的干燥步骤一般是比较昂贵的。在大多数反应中, 只有费用低时才会进行干燥, 或者等到最后的烘烤、还原时进行干燥, 或在熔化工艺中进行干燥。

煅烧是一个高温作业, 是用来去除化学束缚水或用来分解碳酸盐以去除二氧化碳气体的。在冶金工业中最普通的煅烧实例是分解金属碳酸盐而形成金属氧化物, 如从石灰石变成石灰。在一个大气压下, 分解碳酸盐或氢氧化物的温度为 1000 ~ 1500°C (1832 ~ 2732 °F)。在 1000°C (1832 °F) 和一个大气压下的典型分解反应式为:



分解率是输入热（见参考文献 [9]）的函数，因为煅烧是气固相反应，所以工艺分解率是通过产品氧化层的热传导来控制的。为了增加工业烘烤炉中的煅烧分解率，通常要用到大量的余热来增加煅烧分解率，但也使产品氧化层中产生了相当高的温度。只要高出煅烧温度就轻易烧结的氧化钙，如果使用超额热量（见参考文献 [10]），它就会有较低的比孔容积、比表面积和活性。

固式床炉或竖炉最常用于块状碳酸盐材料的煅烧。然而，由于较长的反应时间和较高的表面温度，氧化物产品趋于较低的活性或有硬的烧结层。回转窑生产的氧化物产品具有较高的活性或有较软的烧结层，但与竖炉相比，回转窑的燃料效率低，维护、运行和资产的成本高。像干燥一样，煅烧也只是烘烤或预还原的主要冶金工艺的一部分。

焙烧是将矿物混合物加热到低于熔化温度或矿物烧结点温度时，在空气或其他活性气体下产生化学变化的一种工艺。焙烧是铜冶炼中一个重要步骤。通常焙烧温度是在 $500 \sim 900^\circ\text{C}$ ($932 \sim 1652^\circ\text{F}$) 之间，在这个温度下，反应动力学是快速的。焙烧工艺是在高温下用空气与硫化物接触来进行的。焙烧一旦启动，就不再需要外加燃料而能维持下去，因为焙烧反应是发热的。硫化物的燃烧所提供的热量常超过维持焙烧所需的热量。

对于金属、氧化物、硫化物或硫酸盐而言，金属-氧-硫系统的平衡关系被用来确定，它们当中哪一个固相将作为成品出现。用优势区域图来表示系统平衡关系也是完全可能的。在 700°C (1292°F)（见参

考文献 [11]）时，有关铜-氧-硫和铁-氧-硫系统的优势区域图请参见图 4.1-6。氧气和二氧化硫这两种特殊的气体成分，使固相保持稳定成为可能。硫或三氧化硫气体的分压也能用作图上的一根轴线。一般说来，高温冶金工厂探寻在焙烧期间利用碳或其他还原剂在之后的还原中从硫化物中生产氧化物的方法。如果后续使用浸滤工艺（湿法冶金工艺），由焙烧得到硫酸盐产品是可行的。在焙烧中直接获得金属成品是在铅精矿的烧结中可观察到的现象。

如前所述，在还原氛围下，焙烧通常用于部分还原反应，如后续涉及的磁性选矿中， Fe_2O_3 向 Fe_3O_4 的转化。在氯气氛围下或氯化物存在的炉膛中焙烧，是用金属氧化物生产出金属氯化物的一种方法，而且它们能被挥发掉或者浸滤掉。在常温条件下，氧气比氯气更稳定，依据热力学原理，在处理氯气时有必要加些碳。

现代焙烧炉装有温控、气氛控制和热量保持装置。此外，为了将更大的矿物表面暴露在气体下，要频繁地搅拌或利用固体分散术，使矿物颗粒悬浮混合在气体中。现代焙烧设备仅限于多层焙烧炉、悬浮焙烧炉和沸腾焙烧炉。多层焙烧炉是由 4~12 层炉床叠加而成的圆形炉。由炉顶的中央给料，第一层的料被搅动到中间后落到第二层炉子，再被搅动到边缘落到第三层炉子。这一过程始终延续，直到要焙烧的材料到达焙烧炉的最低一层。气体沿着材料运动相反的方向上升，直至第二层炉子，再被排到烟道、灰尘收集器，或者可能的话到达酸处理装置。上升气体上升的同时也干燥了下行的材料。

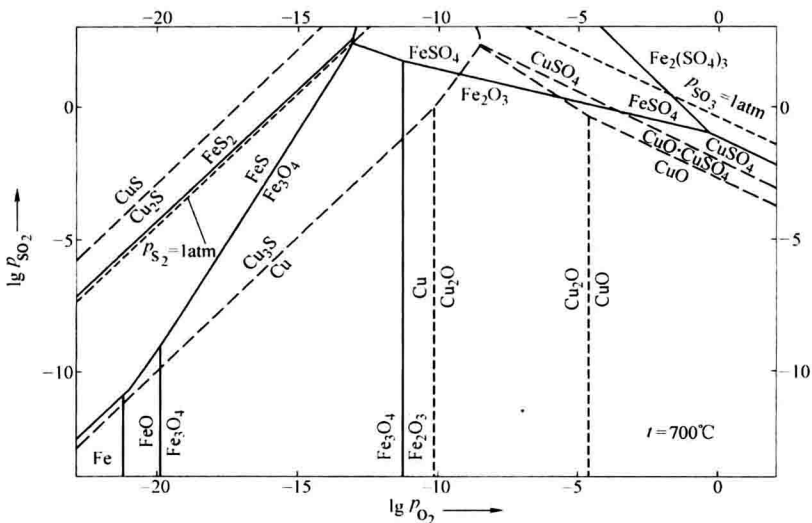


图 4.1-6 在 700°C (1292°F) 焙烧时硫化铜和铁的优势区域图。实线：铁化合物。虚线：铜化合物。点线：气体。三元化合物忽略。注：1 atm = 1 大气压

悬浮焙烧炉比同样尺寸的多层焙烧炉有更大的容积, 因为与反应气体接触的矿物表面积更大。顶部-注入式装料可以在自由落体经过发生快速氧化反应的燃烧室之前就得到干燥和预热。在之后的模式里, 干燥炉床大多在圆形结构的底部。将气体吹入到有矿石颗粒的流化床, 沸腾焙烧炉就完全改变了悬浮焙烧炉的工作原理。由气体压力将炉料托举起来, 就相当于将床膨胀起来, 使气体与细颗粒材料得以更密切地接触。

烧结。用于引起局部还原反应和比较精细矿石聚集的工艺称作烧结。在烧结中, 利用高温而获得部分颗粒的结合来形成烧结矿。烧结是现代炼铁的组成部分。精铁矿的烧结导致小颗粒聚结成大的预还原、预熔化烧结矿, 从而避免被吹到炉子外面去。干燥、煅烧和焙烧是同时实现的。铅、铜、锌和其他有色金属硫化物精矿的烧结, 具有对颗粒尺寸进行控制和同时进行焙烧的双重功能, 但焙烧是更重要的, 因为最后的含硫量是更关键性的指标。

烧结设备包括炉排。要烧结的矿物原料被铺在炉排上, 然后点火燃烧。空气通过炉排和炉床往上吹, 或者通过炉排和炉床往下吸。高硫化物矿石能产生足够的热量, 从而达到烧结所需要的温度。低硫矿石或者无燃烧值的铁矿石通常需要添加碳一类的燃料(碎焦炭)。该设备还能进一步扩展成连续烧结的形式, 即与简单的上料机械和烧结完成后的卸载机械相连。大多数连续烧结设备的运转机理是向下通风。但是, 在熔炼铅时, 向上通风的烧结可以获得更高的含铅量, 并能消除大多数风箱内的铅。烧结炉的主要特点是熔炉作业, 即化铁高炉。这些特点涉及有关烧结炉料的成分、炉料的尺寸、烧结的炉温、炉排移动的速度以及吸风的速度。

烧结炉-焙烧是铅高炉备料的习惯方法, 只有在极少数情况下, 它才用于铜高炉。它也是在电加热炉或密闭鼓风炉熔炼之前, 处理硫化锌精矿的方法。

高温冶金还原反应

选矿工艺后, 精矿石中的大多数金属成分都形成了金属氧化物或金属硫化物, 其浓度远高于原始矿石。因此, 它更适合用来还原和熔炼成所要求的金属产品。这一变化可以用下述方程式来表示:



其中, M 表示任何一种金属, X 表示非金属元素或最初与金属 M 化合的元素, RX 是反应得到的产品。当金属化合物 MX, 在适当温度下分解(无论有无空气)而获得金属元素时, 可以不需要还原剂 R。

这种情形就好比在空气中加热硫化汞(朱砂)获得汞和二氧化硫, 也像四碘化锆和四碘化铪在加热分解时生成金属一样。

还原剂。图 4.1-7 和图 4.1-8 分别表示金属-金属氧化物和金属-金属硫化物系统的艾林罕姆-理查森(Ellingham-Richardson)图。这些平衡图与气相图和等温稳定性图或优势区域图一起用于各种金属-非金属系统(见参考文献[12])——形成了在高温冶金中选择合适还原剂的基础。产生这些图表的热力学原理已经在参考文献[13]和参考文献[14]中进行了充分描述。这样的工艺条件需要建立在这些图中较稳定的金属上。

图 4.1-7 所示为作为温度函数的金属氧化物生成“标准自由能变”的图形。图上各条曲线的相对位置表示了金属生成氧化物的相对状态。由图 4.1-7 的顶部到底部, 表明自由能下降得越多(较高稳定性所要求的状态), 金属生成氧化物的状态越明显。换句话说, 图形底部的氧化物是比较稳定的, 因而也很难再分解成为纯的元素。由图中还可知“标准自由能变”随温度的升高而降低, 那么在高温时金属氧化就较易分解。对于某一给定的曲线, 金属在曲线的下部较稳定, 而金属氧化物在曲线的上部较稳定。要注意的是: 所有标示出来的线都是在 1mol 氧气下绘制的, 它可以用来对各种金属氧化物的稳定性进行比较。图 4.1-7 表示了当几种纯金属暴露在同样数量的氧气(正常状态或有分压力状态)下时, 哪一种金属将更容易被氧化。例如, 铁和铝暴露在高温的大气环境, 铝被首先氧化。这也更容易确定在低温和有分压力的氧气环境下, 哪一种金属更稳定。

同样, 也能确定 CO/CO_2 和 $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$ 的还原混合气的氧势, 它用于表示一种氧化物分别在 CO 或 H_2 的环境气氛下的还原能力。图 4.1-7 中其他重要曲线是碳、一氧化碳和氢气的稳定性曲线, 因为碳、一氧化碳和氢气是高温冶金中最普通的还原剂。这些工艺被称为热碳还原法或水热还原法。这些还原剂在它们各自对应曲线的下面是稳定的。所以当它们处于曲线下面时, 它们就不能还原氧化物。例如, 在合理的温度下, 碳是不能还原铝的。但可以看到的是, 各氧化物的稳定性也是温度的函数, 也是能变的, 所以在非常高的温度下做这种还原也是有可能的。同样, “金属热还原法”也备受推崇, 能够形成更稳定的氧化物的金属就能还原稳定性更差些的氧化物。例如, 镁元素能够还原二氧化硅或二氧化钛。实践表明, 当碳和氢气用还原反应来制备气体时, “金属热还原法”常导致固体氧化物的生成, 它会产生一系列的动力学