

铁矿选矿新技术 与新设备

印万忠 丁亚卓 编著



冶金工业出版社

<http://www.cnmip.com.cn>



TIEKUANG XUANKUANG XINJISHU YU XINSHEBEI

ISBN 978-7-5024-4755-7



9 787502 447557 >

定价 36.00元

销售分类建议: 矿业工程

铁矿选矿新技术与新设备

印万忠 丁亚卓 编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2008

内 容 简 介

本书系统论述了我国铁矿选矿技术及设备的最新进展,系统介绍了铁矿资源及工艺矿物学、破碎磨矿、筛分、磁分离、浮选、重力分选、磁化焙烧和产品处理、节能减排等领域的最新技术和设备,其中重点反映了铁矿选矿技术进步过程中的科研和生产成果,主要包括一些最新的基础研究成果和设备,也包括已经应用的成果。

本书可供从事铁矿选矿生产、科研、设计和教学的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

铁矿选矿新技术与新设备/印万忠,丁亚卓编著. —北京:
冶金工业出版社, 2008. 11

ISBN 978-7-5024-4755-7

I. 铁… II. ①印… ②丁… III. ①铁矿床—选矿—
新技术 ②铁矿床—选矿机械 IV. TD951

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 166267 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 张 卫 李 雪 美术编辑 张媛媛 版式设计 张 青

责任校对 石 静 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4755-7

北京鑫正大印刷有限公司印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2008 年 11 月第 1 版, 2008 年 11 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 14.25 印张; 342 千字; 218 页; 1-3000 册

36.00 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

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

近年来,世界钢铁生产得到了飞速发展,世界钢铁产量从2003年的9.7亿t,增加到2007年的13.4亿t,中国钢铁产量更是从2003年的2.22亿t增加到2007年的4.89亿t。自1996年以来,中国的钢铁产量一直居世界首位。然而我国铁矿石却呈现严重供不应求的局面,2003年中国取代日本成为铁矿最大进口国,2007年铁矿石进口量高达3.83亿t。钢铁产量的增加导致全球铁矿石需求和生产的迅猛增长,也促使世界铁矿石价格呈逐年上涨趋势,2003年至2008年铁矿石价格的涨价幅度分别为8.9%、18.6%、71.5%、19%、9.5%和79.88%。面对国际铁矿石价格不断上升的局势,为了保证中国钢铁行业健康稳定发展,中国必然必须考虑利用现有国内外先进的矿物加工技术与设备,对我国铁矿石资源进行高效、经济、环保的深度开发与加工,以满足国内市场对铁矿石的需求,故作者编写了本书。

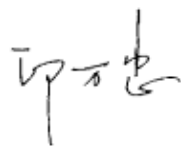
钢铁工业的发展大大促进了铁矿选矿技术的进步与革新。特别是近年来,优质铁矿石资源逐渐开发殆尽,国内外矿物加工工作者针对难选铁矿石的开发利用进行了深入系统的研究工作,开发了许多先进的选矿技术、工艺、装备和药剂。其中一些技术、药剂与设备已投入了工业应用,为企业创造了巨大的经济效益。以我国为例,铁矿石的主要特点是“贫”、“细”、“杂”,平均铁品位32%,比世界平均品位低11个百分点。占中国总储量97%以上的铁矿石需要选矿处理,并且复杂难选赤铁矿所占比例大(占铁矿石储量的20.8%)。近年来,我国选矿工作者针对鞍山式难选赤铁矿的分选,开发了“阶段磨矿、粗细分选、重选—磁选—阴离子反浮选”工艺,使赤铁矿选矿技术达到了一个新阶段。另外,新型破碎、磨矿、细筛、磁选、浮选和过滤设备的应用,也大大提高了我国的铁矿选矿技术水平。

本书着重介绍近年来世界,特别是我国铁矿选矿的新技术和新设备,内容包括铁矿石类型和工艺矿物学研究方法、铁矿石分选新工艺和实践、铁矿石选矿设备、铁矿石选矿药剂、复杂难选铁矿石选矿、产品处理、选矿厂的节能减排与综合利用等,旨在总结近年来在铁矿选矿技术方面取得的最新研究成果,供从事铁矿选矿技术研究的专家和从事铁矿生产的工程技术人员参考。

本书由印万忠、丁亚卓共同撰写。全书共分八章,其中第1、2、5、6、8章由印万忠教授执笔,第3、4、7章由丁亚卓博士执笔。全书由印万忠教授统稿和整理。

本书的编写和出版,得到了东北大学各级领导的关怀和支持,也得到了冶金工业出版社的大力协助,在此表示衷心的感谢。另外,书中也引用了其他选矿工作者相关论文中的精华部分,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中疏漏之处,敬请广大读者指正。



2008年10月于沈阳

目 录

1 绪论	1
1.1 世界铁矿资源概况	1
1.2 世界铁矿生产、消费和需求概况	1
1.3 世界铁矿选矿新技术和新设备发展概况	2
1.4 铁矿选矿在钢铁工业中的重要性	7
2 铁矿石的类型和工艺矿物学研究方法	8
2.1 铁矿石类型及矿石性质	8
2.1.1 磁铁矿	8
2.1.2 赤铁矿 (镜铁矿)	9
2.1.3 菱铁矿	11
2.1.4 铁的氢氧化物 (针铁矿、纤铁矿及褐铁矿)	11
2.1.5 钛铁矿	12
2.1.6 含铁硅酸盐矿物	13
2.2 铁矿石的工业类型	13
2.2.1 鞍山式铁矿	14
2.2.2 镜铁山式铁矿	15
2.2.3 大西沟式铁矿	15
2.2.4 攀枝花式铁矿	15
2.2.5 大冶式铁矿	17
2.2.6 宁芜式铁矿	17
2.2.7 宣龙-宁乡式铁矿	18
2.2.8 风化淋滤型铁矿	19
2.2.9 包头白云鄂博式铁矿	19
2.2.10 海南石碌铁矿	20
2.2.11 吉林羚羊石	21
2.3 铁矿石工艺矿物学研究方法	22
2.3.1 矿石的物质组成研究	22
2.3.2 矿石的结构构造研究	23
2.3.3 矿石中元素的赋存状态研究	24
2.3.4 矿物的粒度特性研究	24
2.3.5 矿物的解离性研究	25
2.3.6 铁矿石工艺矿物学研究规范	25

3 铁矿石分选新工艺和实践	28
3.1 磁铁矿的分选新工艺与实践.....	28
3.1.1 弱磁—阳离子反浮选工艺流程与实践.....	28
3.1.2 弱磁—阴离子反浮选工艺与实践.....	33
3.1.3 全磁分选工艺流程与实践.....	39
3.2 赤铁矿的分选工艺与实践.....	47
3.2.1 鞍钢齐大山铁矿选矿分厂分选工艺与实践.....	47
3.2.2 鞍钢齐大山选矿厂分选工艺与实践.....	50
3.2.3 东鞍山烧结厂生产工艺与实践.....	52
3.2.4 鞍千矿业公司贫赤铁矿石选矿工艺研究.....	56
3.2.5 其他赤铁矿选矿工艺研究.....	56
3.2.6 赤铁矿选矿新工艺的特点.....	57
3.3 贫磁铁矿的湿式预选技术.....	59
4 铁矿石选矿设备	65
4.1 磁选设备.....	65
4.1.1 磁选柱.....	65
4.1.2 BX 型磁选机.....	71
4.1.3 BK 系列新型磁选机.....	72
4.1.4 SLon 高梯度立环脉动磁选机.....	76
4.1.5 SSS-II 湿式双频脉冲双立环高梯度磁选机.....	80
4.1.6 DMG 型电磁立环脉动高梯度磁选机.....	82
4.1.7 磁场筛选机.....	83
4.1.8 磁团聚重力分选机.....	86
4.1.9 强磁辊.....	87
4.2 细筛设备.....	90
4.2.1 Derrick 重叠式高频细筛.....	90
4.2.2 GPS 高频振动细筛.....	92
4.2.3 MVS 振网筛.....	93
4.3 浮选设备.....	94
4.3.1 浮选柱.....	94
4.3.2 磁浮选机.....	96
4.3.3 BF-T 型浮选机.....	97
4.4 破碎磨矿设备.....	99
4.4.1 Nordberg HP 系列圆锥破碎机.....	99
4.4.2 Sandvik 圆锥破碎机.....	101
4.4.3 高压辊磨机.....	102
4.4.4 深湘柱磨机.....	104
4.5 脱磁设备.....	104

4.5.1 脱磁器进展	104
4.5.2 GMT 型高效脉冲脱磁器	105
4.5.3 SMT 型数字脉冲脱磁器	106
4.5.4 DQ 系列谐振波式脱磁器	106
4.5.5 MTW- ϕ 160 型高场强脉冲脱磁器	107
5 铁矿石选矿药剂	110
5.1 铁矿石选矿药剂的最新进展	110
5.2 捕收剂	111
5.3 抑制剂	118
5.4 活化剂	119
6 复杂难选铁矿石选矿	122
6.1 复杂难选铁矿石的种类及性质	122
6.2 复杂难选铁矿石选矿工艺进步	123
6.3 微细粒嵌布的鞍山式贫磁铁矿石选矿	130
6.4 微细粒嵌布的鞍山式赤铁矿石选矿	133
6.5 菱铁矿石选矿	140
6.6 褐铁矿石选矿	144
6.7 细粒嵌布的高磷赤、褐铁矿石选矿	149
6.8 高磷鲕状赤铁矿石选矿	152
6.9 其他复杂难选铁矿石选矿	156
7 产品处理	165
7.1 浓缩技术与设备	165
7.1.1 浓缩技术	165
7.1.2 浓缩设备	165
7.1.3 大型浓密机的自动控制	183
7.1.4 尾矿高浓度制备及尾矿处理技术的开发与应用	188
7.2 过滤技术与设备	194
7.2.1 陶瓷过滤机	194
7.2.2 ZPG 系列盘式真空过滤机	198
8 选矿厂的节能减排与综合利用	204
8.1 选矿厂的节能技术	204
8.1.1 选矿厂能耗概况	204
8.1.2 选矿厂节能降耗的技术	204
8.1.3 选矿厂节能降耗装备	206
8.1.4 选矿厂节能降耗的实例	208

8.2 选矿厂减排技术	209
8.2.1 选矿厂尾矿排放的情况	210
8.2.2 选矿厂减排技术	210
8.2.3 选矿厂减排设备	214
8.2.4 选矿厂减排实例	215
8.3 铁矿资源的综合利用	217

1 绪 论

1.1 世界铁矿资源概况

世界铁矿资源丰富。据美国地质调查局报告,截至 2005 年底,世界铁矿石储量为 1600 亿 t,储量基础为 3700 亿 t;铁金属储量为 800 亿 t,储量基础为 1800 亿 t。世界铁矿资源分布的特点是南半球国家富铁矿床多,如巴西、澳大利亚、南非等国;北半球国家贫铁矿床多,如前苏联、美国、加拿大、中国等国。我国铁矿石富矿少、贫矿多,97%的铁矿石为 30% 以下的低品位铁矿,国内尚存大量未被开发利用的难选铁矿。另外,自进入 21 世纪以来,铁矿石资源需求呈逐渐上升态势,2005~2007 年全球铁矿石价格分别增长了 71.5%,19% 和 9.5%,2008 年在 2007 年的基础上暴涨了 79.88%。

根据中国国土资源部的资料,2000 年我国储量套改后,全国铁矿石资源储量为 576.62 亿 t,储量为 115.84 亿 t,基础储量为 212.38 亿 t,资源量为 364.23 亿 t。中国已探明的铁矿产地分布极不均匀。从地理分布来看,东部和中部地区各占 46.5%,西部地区只占 7%。从其大行政分布来看,东北、华北和西南地区最多,华东和中南地区次之,西北地区最少。从其省、市、自治区分布来看,中国半数以上的铁矿集中在辽宁、河北、四川、内蒙古、山西 5 省、自治区,安徽、云南、湖北、山东、河南、新疆、西藏、甘肃、贵州、青海、陕西、广西、福建、江西、重庆等省、市、自治区次之,浙江、宁夏、上海、天津等省、市、自治区最少。

据不完全统计,中国 67.3% 储量的铁矿集中在以下几个主要矿区:鞍本地区、冀东地区、鄂东矿区、白云鄂博矿区、攀西矿区和宁芜矿区。大型矿床仅占矿产地的 5%。全国已开发利用铁矿区 1079 个,占已查明储量的 42.99%;可规划矿区 353 个,占已查明资源量的 33.27%;难以利用的矿区 550 个,占已查明资源量的 23.74%。

我国铁矿石资源禀赋较差,丰而不富。尽管探明储量有 463 亿 t,但已被利用和可供选择利用的储量只有 256 亿 t,且多为贫矿,平均品位仅有 31.95%,比世界平均品位低 11 个百分点,贫矿占储量的 94.3%,均需经过选矿富集才能达到炼铁生产对品位的要求。同时我国铁矿石性质较为复杂,其特点是贫、细、杂,上述因素促进了我国选矿新工艺、新技术、新设备研究工作的开展,一系列高效精选设备在选矿厂得到应用,一些选矿新工艺和技术达到了国际先进水平。

1.2 世界铁矿生产、消费和需求概况

进入 21 世纪,世界铁矿石产销增长势头强劲。自 1995 年世界铁矿石产量首次突破 10 亿 t 后,一直到 1999 年,产量呈现平中略降态势。但从 2003 年开始,增长幅度较大,至 2007 年已达到 17.61 亿 t。引起世界铁矿石产量增加的主要因素是中国钢铁工业对铁矿石的强劲需求,中国不仅自产铁矿石大幅度增加,也拉动了其他主要铁矿石生产国的生产

增长, 澳大利亚、巴西、印度、南非等国继续主宰着全球铁矿的生产。

表 1.1 是 1999 ~ 2007 年世界铁矿石生产总量。表 1.2 是我国 1999 ~ 2007 年铁矿石生产总量。

表 1.1 1999 ~ 2007 年世界铁矿石生产总量

年 份	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
产量/亿 t	9.905	10.5	10.47	9.89	10.80	11.84	13.16	16.86	17.61

表 1.2 1980 ~ 2007 年中国铁矿石生产总量

年 份	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
产量/亿 t	2.400	2.170	2.170	2.310	2.500	3.100	3.101	5.882	7.071

近年来, 我国钢铁产量以每年递增 25% 左右的速度增长, 据统计, 2005 年我国生铁产量已达到 3.3 亿 t, 若以吨铁消耗成品矿 1.55t 计, 则需要成品矿为 5.1 亿 t, 而 2005 年我国铁矿石产量为 3.101 亿 t, 矿石缺口高达 2 亿 t。因此, 近年来我国对铁矿石的对外依存度呈逐年增加趋势, 导致铁矿石价格高位运行, 从而促进了我国采矿、选矿业的发展。

1.3 世界铁矿选矿新技术和新设备发展概况

我国作为世界第一铁矿石生产与消费大国, 加上其铁矿资源“贫、细、杂、散”, 开发利用难度大的特点, 近几年已成为世界铁矿选矿技术研究开发的中心, 其工艺技术达到了国际领先水平。中国铁矿选矿技术研究进展主要集中在以下几个方面: 一是实施“提铁降硅”战略; 二是针对脉石为含铁硅酸盐的细粒嵌布磁铁矿、赤铁矿、菱铁矿、褐铁矿、鲕状赤铁矿等复杂难处理铁矿石, 研究开发高效节能选矿新技术; 三是新型破碎磨矿、筛分、磁选和浮选设备的研制与应用。

在提纯降硅方面, 提高高炉入炉料的含铁品位, 降低杂质含量, 可以提高高炉利用系数, 降低能耗, 是高效率、低成本炼铁的基础。但以前, 中国对“精料方针”的理解仅停留在高铁品位上, 对硅、铝等杂质的影响关注不够, 同时, 在技术经济评价时, 仅局限在选矿厂内部核算, 对选矿除杂成本低于高炉除杂没有充分认识。故长期以来, 我国铁精矿的质量(铁品位和硅、铝等杂质含量)都低于进口矿石。因此, 国产铁精矿缺乏竞争力, 像鞍钢这样的特大型企业的高炉利用系数长期徘徊在 $1.8t/(m^3 \cdot d)$, 钢铁企业对进口矿的依赖度越来越高。

进入 21 世纪, 为了改善高炉的技术经济指标, 降低成本, 提高自产矿的竞争力, 从而保证钢铁生产的经济技术安全, 国内专家提出了“提铁降杂”的学术思想, 推动了铁矿选矿新技术的研究。通过近几年选矿工作者的共同努力, 使中国在贫赤铁矿选矿工艺技术方面居国际领先水平, 磁铁矿选矿工艺技术有了新进展。

20 世纪 50 ~ 70 年代, 处理贫赤铁矿的主流技术是焙烧—磁选和单一浮选。生产技术指标较差, 鞍钢东鞍山选矿厂是处理能力最大的贫赤铁矿石浮选厂, 精矿品位在 62% 以下, 回收率小于 70%, 处理难选矿时, 精矿品位小于 59%, 回收率仅 46% 左右。虽经不断攻关改造, 技术经济指标有所改善, 但没有突破性进展。2001 年以来, 鞍钢齐大山铁矿选矿分厂、齐大山选矿厂和东鞍山烧结厂率先实施“提铁降杂”战略, 成功地研究出“连续磨矿—弱磁—强磁—

阴离子反浮选”和“阶段磨矿、精细分选、重一磁—阴离子反浮选”全套工艺流程，并配套开发了新型高效阴离子捕收剂 RA 系列和 MZ 系列，在国内首次成功地将阴离子反浮选技术工业应用于赤铁矿选矿，在齐大山铁矿选矿分厂取得精矿品位 66.80%、 SiO_2 含量 3.90%、精矿回收率 84.28% 的指标；在齐大山选矿厂取得精矿品位 67.1%、 SiO_2 含量 4.50%、精矿回收率 72% 的指标；东鞍山烧结厂铁精矿品位也超过了 65%，取得了历史性突破。

磁铁矿的选矿工艺技术在国内外都达到了较高水平，20 世纪 60 年代至 90 年代末期，磁铁矿选矿的技术进步主要集中在磁分离设备和筛分设备方面。但是进入 21 世纪，随着“提铁降杂”战略的实施，进一步提高磁铁精矿质量迫在眉睫。弓长岭矿业公司选矿厂是年处理 800 万 t 铁矿石的磁铁矿选矿厂，采用阶段磨矿、单一磁选、细筛再磨流程处理磁铁矿，精矿品位 65.5%， SiO_2 含量 8%~9%。2001 年对磁选精矿研究采用阳离子反浮选—磁选—中矿再磨流程，并开发了低温（15℃）阳离子捕收剂，经工业改造，取得铁精矿品位 68.89% 的好指标，比改造前提高了 3.34 个百分点； SiO_2 含量为 4.09%，比改造前的 8.31% 降低了 4.22 个百分点；浮选尾矿品位 10%~12%，浮选作业精矿产率 92%，铁回收率 98.50%。但铁的总回收率由 83% 降低到 80%。

鞍钢、齐大山、弓长岭等选矿厂“提铁降杂”技术改造的成功，使鞍钢 2002 年高炉入炉原料（铁精矿）铁品位提高 3.00 个百分点，二氧化硅降低 3.21 个百分点，铁精矿质量达到或超过了进口铁精矿，选厂总效益达 3.41 亿元，炼铁效益 5.44 亿元，节能 1.0 亿元，项目总效益 9.58 亿元，同时增加了 10 亿余吨可利用的铁矿资源。目前中国太钢尖山铁矿、本钢南芬和歪头山铁矿、武钢金山店、舞阳选矿厂、攀钢选矿厂、酒钢选矿厂等大中型选矿厂和很多小型民营厂都在积极实施这一战略，为我国钢铁行业的进步和经济效益的提高做出了重要贡献。

“提铁降杂”的关键技术包括反浮选技术及高效捕收剂的应用、新型磁选设备和细筛技术的应用以及浮选柱的应用。鞍山式贫赤（磁）铁矿石的特点是需回收的铁矿物种类多，其磁性和可浮性均有较大差异，但 90% 以上的脉石为石英，以抑制铁矿物、活化浮选脉石为核心的反浮选技术的研发与工业应用，是经济合理地提高这类矿石选矿技术的关键之一。我国反浮选技术开发始于 20 世纪 70 年代末期，长沙矿冶研究院对包钢选矿厂含氟（萤石）弱磁精矿和鞍钢齐大山强磁精矿进行近十年的反浮选研究，从小型试验、扩大试验、分流试验、工业试验直至工业生产，于 1998 年在鞍钢齐大山铁矿选矿分厂首次将阴离子反浮选技术应用于工业生产。长沙矿冶研究院的 RA 系列反浮选捕收剂、马鞍山矿冶研究院的 MZ 系列和鞍钢自主开发的 LKY 系列反浮选捕收剂均是具有自主知识产权的新品种药剂，具有选别效率高、对矿泥的适应性较好，泡沫脆、流动性好，浮选生产操作稳定的特点；药剂原料来源广泛，生产工艺简单、产品价廉且无毒。武汉理工大学研制的 GE601 和鞍钢自主研发的 YS-73 阳离子捕收剂较好地解决了阳离子捕收剂通常存在的不耐低温，泡沫流动性差，对矿泥敏感的弱点，在低温（15℃）条件下得到了工业应用。

针对脉石为含铁硅酸盐的细粒嵌布赤（磁）铁矿、菱铁矿、褐铁矿、鲕状矿等复杂难处理铁矿石选矿技术近年得到长足发展。如长沙矿冶研究院对陕西大西沟和新疆切勒克其的菱铁矿、褐铁矿采用“全粒级回转窑焙烧—弱磁—反浮选”流程，基本解决了焙烧设备炉内结圈、微细粒铁矿反浮选（ $-43\mu\text{m}$ 粒级大于 98%）等技术难题，对陕西大西沟矿，在原矿品位 25% 的情况下，工业试验取得了铁精矿品位 64%，回收率 72% 的良好指

标。另外,长沙矿冶研究院针对选矿过程中产生的大量含铁硅酸盐的细粒嵌布赤(磁)铁矿、菱铁矿、褐铁矿、鲕状矿等复杂难处理中矿,研究开发了闪速磁化焙烧技术,可在十几秒时间内完成用其他方法需几十分钟才能完成的还原反应,节能1/3以上;重庆大学对威远菱铁矿进行了研究,采用“破碎—水洗或筛分选矿—烧结”流程,可以经济合理地利用该资源;昆明理工大学对四川某鲕状赤铁矿石进行了多方案选冶试验,采用新工艺,精矿品位和回收率分别可达到55.62%和44.51%,每吨精矿的成本仅为30~45元;黑龙江科技学院对菱铁矿的综合利用进行了研究,通过分析菱铁矿高温氧化分解过程可知,菱铁矿在高温氧化分解过程中会发生分解,放出 CO_2 ,同时产生 Fe_3O_4 , $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 。其中 Fe_3O_4 、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 具有良好的磁性。此外,这三种物质在一定条件下又会呈现不同的颜色。因而从菱铁矿热分解的产物看,除了作为传统的冶炼钢铁原料外,还具有其他的极大的应用价值,如用作磁粉原料、磁性日用陶瓷的主要原料及磁性肥料和颜料工业的原料。

同时,东北大学、长沙矿冶研究院、武汉理工大学开展了对铁与含铁硅酸盐分离的基础理论研究。研究发现,水玻璃经 H_2SO_4 、 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 、 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 活化以后,在赤铁矿的浮选中对含铁硅酸盐脉石矿物具有良好的选择性抑制作用。所制得的聚合硅酸胶体溶液中荷正电的组分由于静电作用而选择性吸附在荷负电的硅酸盐矿物表面,从而导致辉石、闪石等含铁硅酸盐矿物的浮选被抑制。

在新型破碎磨矿、筛分、磁选和浮选设备的研制与应用方面近年来取得了如下进展:

在破碎设备方面,提高破碎效率,实现“多碎少磨”,一直是铁矿选矿节能降耗努力的方向,2001年,Nordberg(诺德伯格)和Sedala(斯维达拉)合并成为Metso Minerals(美卓矿机),其生产的Nordberg HP系列圆锥破碎机采用现代液压和高能破碎技术,破碎能力强,破碎比大,鞍钢齐大山铁矿选矿分厂、齐大山选矿厂、太钢尖山选矿厂、包钢选矿厂、武钢程潮选矿厂、马钢凹山选矿厂等纷纷引进使用了该设备,最终入磨矿石粒度达到-12mm占95%, -9mm占80%。此外,Sandvik公司的圆锥破碎机在我国应用也取得了较好的效果。德国洪堡公司研制的高压辊磨机是进一步降低入磨粒度的有效措施,智利洛斯科罗拉多斯铁矿安装了洪堡公司的1700/1800型高压辊磨机,结果表明,辊压机排料平均粒度为-2.5mm占80%,辊压机可替代两段破碎。如果不用辊压机,在处理量为120t/h,破碎粒度小于6.5mm时,需安装第三段(用短头型圆锥破碎机)和第四段破碎(用Cyradisk型圆锥破碎机),同时,用辊压机将矿石磨碎到所需细度的功指数比用圆锥破碎机时要低,其原因一方面是前者破碎产品中细粒级产率高,另一方面是其中粗颗粒产生了更多的裂隙。该设备在我国水泥行业已得到较好的应用。东北大学在消化吸收的基础上,为其在中国铁矿选矿行业的应用做了大量有益的研究开发工作,研制的工业机型(1000mm×200mm)在马钢钴山铁矿应用表明,可使球磨机给矿由原来的12~0mm下降为-5mm粒级占80%的粉饼,从而大幅度提高生产中球磨的台时能力。但是,辊面材料(网络柱钉型衬板)损坏后只能采用表面焊接法修补,因而不能形成自生磨损层,国产机型的表面材质更是难以满足要求。所需工作压力大,矿石中混杂的铁质杂质(钢纤、铁钉等)都将对辊面材质产生致命的损伤,因而阻碍了该设备在铁矿选矿领域的推广应用。目前马钢南山铁矿引进了德国Koppers公司的高压辊磨机,取得了较好的应用效果。

在磨矿设备方面,设备的大型化和自动化是目前的主要发展趋势。国内新建、扩建选

矿厂采用大型破碎机和球磨机,节能效果显著。鞍钢调军台选矿厂的球磨机规格为:5.59m×8.83m,处理能力420t/h;鞍钢新建的鞍千矿业公司选矿厂、弓长岭一期工程改造均采用大型磨机;弓长岭矿山公司选矿厂通过实施磨矿分级过程的自动化,磨矿处理能力提高10%左右,每年多产品位67.5%以上的铁精粉30万t左右,提高了企业的经济效益,提高了矿产资源的利用效率。

在筛分设备方面,细筛技术在铁矿选矿中广泛应用。细筛的主要作用:(1)用细筛控制铁精矿中含硅高的粗粒连生体,筛上部分返回再磨,筛下铁精矿的铁品位一般可提高1~1.5个百分点, SiO_2 含量可降低0.5~2个百分点;(2)用细筛控制浮选给矿粒度,改善浮选效果;(3)提高磨矿分级效率,一般生产中螺旋分级机的分级效率只有20%~30%,水力旋流器的分级效率也只有30%~40%,并常伴有反富集现象,在阶段磨矿阶段选别流程中,由于存在磁团聚,分级效果更差。在磨矿分级过程中引入细筛,可使分级效率提高到50%~60%。

鞍山式磁铁矿石岩(磁性铁燧岩)的磁选精矿中不同粒级的铁品位及 SiO_2 含量差异很大,本钢歪头山弱磁精矿(TFe 67%, SiO_2 6.5%,粒度-0.074mm占82%~83%)的细筛结果如表1.3所示。

表 1.3 本钢歪头山弱磁精矿粒度组成

粒级/mm	-0.15+0.10	-0.10+0.074	-0.074+0.044	-0.044+0.038	-0.038+0.030	-0.030
产率/%	9.04	9.33	22.14	16.78	0.99	41.72
w(TFe)/%	36.47	64.32	69.22	70.54	71.09	
w(SiO_2)/%	37.40	9.50	4.10	2.70	2.0	

由表可见,(-0.15+0.074)mm粒级产率为18.37%,TFe 50.16%, SiO_2 23.33%,该粒级主要是未单体解离的硅铁连生体和极少量的单体石英脉石。如果对该铁精矿能筛除+0.074mm粒级,以-0.074mm粒级为最终精矿,则产率有81.63%,铁品位70.48%, SiO_2 只有2.71%。由此可见,细筛技术“提铁降杂”效果十分明显。

美国德瑞克(DERRICK)细筛自1951年问世以来,以其出色的高效耐磨防堵筛网技术和重复造浆、强力脱水等技术在分级和脱水以及通过控制粒度来降硅提铁等方面得到了广泛的应用。但在引入中国的应用过程中,也出现了因油膜堵塞现象严重,不能达到预期处理能力和分级效率的问题。近年,为满足市场对性价比高的细粒、微细粒筛分设备的强劲需求,长沙矿冶研究院GPS系列和唐山路凯公司的电磁振动筛面的高频率振动细筛发展十分迅速。GPS系列在筛网寿命、开孔率及筛网维护更换等方面有重大进展。攀枝花选矿厂“九五”期间研发成功的组合分级工艺在筛分设备选型方面进行了多年的对比选型试验,于2005年确定选择新型GPS系列高频振动细筛进行全厂16个系列(年处理能力达1350万t)的技术改造。但是,不论是哪种细筛,筛网技术与国外都存在一定差距,它的开孔率和磨损寿命远低于DERRICK细筛。

在磁选设备方面,近年来中国取得了突出的成绩,细粒磁选深选设备是提高铁精矿质量的有效手段。

鞍山科技大学研制的磁选柱近年在强磁性分选上取得一定的成绩。该装备采用特殊的电源供电方式,在磁选区间内产生特殊的磁场交换机制,对矿浆进行反复多次的磁聚合—

分散—磁聚合作用,从而充分分离出磁性矿物中夹杂的中、贫连生体及单体脉石,生产出高品位磁精矿。该设备已在鞍钢、包钢、本钢、通钢等十几家大型选矿厂得到工业应用,可以获得铁品位 67% 以上的铁精矿。但该设备耗水量大,处理能力偏小。

郑州矿产资源综合利用研究所和首钢矿业公司合作的磁聚机近年来获得新的进展。磁聚机是利用较低的不连续非均匀永磁磁场作用,使磁铁矿颗粒形成的磁团聚比较松,当磁团处于松散状态时,在上升水流的作用下,使夹杂的脉石矿物和贫连生体被清洗出。在此原理的基础上,引进了变径的概念,强化了磁团的“松紧”频率和强度,可将峨口铁矿 -0.074mm 占 96% 的磁选精矿的品位提高到 66% 以上。

马鞍山矿山研究院研制的 GD 型低场强脉动筒式磁选机是在圆筒旋转时,圆筒表面形成脉动磁场,使磁团松散,排除其中夹杂的脉石矿物及贫连生体。在庙沟铁矿应用时,使普通筒式磁选机两次精选的最终精矿品位提高 1.19 个百分点。

东北大学研制的脉冲振动磁场磁选柱,是利用充电和放电过程中产生的较高磁场,并采用控制电路使充电和放电过程强制中断,产生一定频率的振动磁场,位于选别区间的磁矿颗粒产生磁团聚,而后又分散,交替进行,上升水流在其团聚分散时将脉石矿物及连生体冲洗出来。选别本钢南芬磁选精矿,品位可提高 3.54 ~ 8.27 个百分点。

包头新材料应用设计研究所研制的 BX 新磁系永磁磁选机具有多磁极、高场强、大磁系包角、合理磁场梯度和深度的特点,该设备已在酒钢、包钢、河南舞阳、鞍钢大孤山选矿厂应用,在酒钢的应用表明,在尾矿品位基本不变的情况下,精矿品位提高 1.68 个百分点。

长沙矿冶研究院在 DPMS 机型基础上研制的广义分选空间湿式永磁磁选机充分利用了新型稀土永磁材料的进步和水介质分散的原理,可处理有效选别 $6 \sim 0.074\text{mm}$ 的弱磁性矿物。

国外目前磁选设备方面的主流机型有:美国 Eries 公司的圆筒型稀土永磁磁选机、辊带式稀土永磁强磁选机、轮式稀土永磁磁选机,德国洪堡公司的 Jons DP 湿式强磁选机, Sol 平环高梯度磁选机,瑞典 Sala 公司的 Sala 平环高梯度磁选机、俄罗斯的脉冲梯度磁场磁选机,捷克的 VMS、VMKS 立环高梯度磁选机等。另外,目前低温超导磁选机(背景磁场 5.0T)已开发并应用,对微细粒磁性矿物的回收或除杂将带来根本性变化。

在浮选设备方面,目前在铁精矿反浮选中广泛使用浮选柱取代传统浮选机。工业试验表明,浮选柱用于反浮选脱硅较传统浮选机分选好。由于浮选柱的特定几何形状,单位体积容量占地面积小,泡沫密集,泡沫高度可达 1 ~ 2m,当冲洗水冲洗泡沫时,能降低铁精矿中硅含量,同时又能使铁的损失率保持最低,回收率高,浮选回路简单,建设投资低 20% ~ 30%,运营费用低。近年来,国外一些大型铁矿反浮选厂普遍采用浮选柱取代浮选机。巴西萨马尔库矿业公司最早于 1990 年在铁矿浮选中采用浮选柱用以提高生产能力,为降低尾矿品位,又先后安装使用了粗选、扫选和精选作业的 15 台浮选柱。印度库德雷克铁矿有限公司采用 8 台浮选柱处理铁品位 67%, SiO_2 4.5% 的精矿,使 SiO_2 含量降到了 2%,满足了用户球团用铁精矿的质量要求。目前,巴西、加拿大、美国、委内瑞拉和印度等国的铁矿选矿厂已安装使用了 50 余台浮选柱。长沙矿冶研究院将中国矿业大学研制的,并已在煤矿应用的旋流—静态浮选柱引入铁矿反浮选,自 2003 年在弓长岭选矿厂进行 3t/h 规模的工业分流试验,与浮选机相比,精矿品位提高 1 ~ 1.5 个百分点, SiO_2 含量降低 1 个百分点,回收率提高 10 个百分点。

1.4 铁矿选矿在钢铁工业中的重要性

自 1996 年以来,我国钢铁产量一直居世界首位。钢铁生产的飞速发展,导致铁矿石需求和生产的迅猛增长,铁矿石生产呈现供不应求的局面。我国从 2003 年起,成为世界铁矿石进口量最大的国家,2007 年铁矿石进口量高达 3.83 亿 t。2008 年进口铁矿石的价格再次上涨 65%,使本已在高位运行的铁矿石价格再次大幅攀升。国家虽然出台了一些相关的宏观调控政策,对有些行业的过快发展有所抑制,钢铁生产的增长势头也有所减缓,但是随着我国居民消费结构的升级、工业化和城镇化步伐的加快,对钢铁产品的需求还将继续增加,钢铁工业还将继续发展,大量进口铁矿石的局面短期内难以改观。

面对我国对进口矿的过量需求,国际大型矿业公司纷纷扩大产能,国际铁矿企业大规模兼并重组,形成垄断国际市场的局面,世界铁矿业发展的新态势和新局面,应引起我国钢铁和铁矿企业的重视。国际、国内铁矿石市场的竞争越来越激烈,这两种资源的竞争已成为我国矿山和钢铁企业必须面对的一个突出问题。造成这一问题的原因除了资源短缺本身的因素外,与我国铁矿企业技术水平落后,生产效率低,产品质量和价格处于劣势也有很大关系。近年来,虽然我国部分铁矿的技术装备水平有了迅速提高,但我国的矿山劳动生产率仅为发达国家的 1/10~1/5,单位生产总值能耗量是发达国家的 3~5 倍。提高矿产资源利用效率,节能降耗已势在必行。

我国铁矿石的主要特点是“贫、细、杂”,平均铁品位 32%,比世界平均品位低 11 个百分点。我国 97% 的铁矿石需要选矿处理,并且复杂难选的红铁矿占的比例大(约占铁矿石储量的 20.8%)。目前,我国菱铁矿石和褐铁矿石资源的利用率极低,大部分没有回收利用或根本没有开采利用。我国微细粒鲕状赤铁矿的利用问题一直没有得到解决,吉林临江羚羊铁矿石、鞍山含碳酸盐铁矿石、辽宁凌源野猪沟菱铁矿、内蒙古温都尔庙式赤铁矿等资源均没有得到很好的开发。另外,选厂目前存在消耗偏高,设备规格小,自动化程度低,不少选厂技术指标不高,综合回收程度低等问题。因而选矿技术成为制约我国钢铁生产的重要环节之一,通过难选铁矿石选矿技术的突破,将目前不能直接作为铁矿石的“呆矿”、低品位矿石加以利用,降低我国钢铁工业对进口矿石的依赖程度,对于实现我国钢铁行业的可持续发展意义重大。

参 考 文 献

- [1] 黄晓燕,沈慧庭.当代世界的矿物加工技术与装备:铁矿石选矿[M].北京:科学出版社,2006.
- [2] 余永富.国内外铁矿技术进展[J].矿业工程,2004,2(5).
- [3] 张光烈.中国铁矿选矿技术的进展[M].2004.
- [4] 陈广振.磁选柱及其工业应用[J].金属矿山,2002,9.
- [5] 周洪林.德瑞克高频振动细筛在降硅提铁中的应用[J].金属矿山,2002,(10).
- [6] 罗立群,张泾生.菱铁矿干式冷却磁化焙烧技术研究[J].金属矿山,2004,9(10).
- [7] 袁志涛.脉冲振动磁场磁选柱的研制与试验[J].金属矿山,2001,(3).

2 铁矿石的类型和工艺矿物学研究方法

2.1 铁矿石类型及矿石性质

含铁矿物种类繁多，目前已发现的铁矿物和含铁矿物约 300 余种，其中常见的有 170 余种。但在当前技术条件下，具有工业利用价值的主要是磁铁矿、赤铁矿、磁赤铁矿、钛铁矿、褐铁矿和菱铁矿等。其中褐铁矿、菱铁矿等弱磁性含铁矿石为较难选别的铁矿石。

2.1.1 磁铁矿

磁铁矿， FeFe_2O_4 或 $\text{Fe}^{3+} [\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}]_2\text{O}_4$ ，理论组成（质量分数）： FeO 31.04%， Fe_2O_3 68.96%。呈类质同象替代 Fe^{3+} 的有 Al^{3+} 、 Ti^{4+} 、 Cr^{3+} 、 V^{3+} 等；替代 Fe^{2+} 的有 Mg^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 、 CO^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Ge^{2+} 等。当 Ti^{4+} 替代 Fe^{3+} 时，其中 TiO_2 质量分数小于 25% 时称为含钛磁铁矿， TiO_2 质量分数大于 25% 者称钛磁铁矿。当含钒钛较多时，则称钒钛磁铁矿。含铬者称铬磁铁矿。

磁铁矿为等轴晶系， $O_h^7\text{-Fd}3m$ ； $a_0 = 0.8396\text{nm}$ ； $Z = 8$ 。反尖晶石型结构，即 1/2 的

Fe^{3+} 和全部 Fe^{2+} 占据八面体位置，另 1/2 的 Fe^{3+} 占据四面体布置，如图 2.1 所示。晶格常数 a_0 随 Al^{3+} 、 Cr^{3+} 、 Mg^{2+} 替代量的增大而减小，随 Ti^{4+} 、 Mn^{2+} 的替代量增高而增大。

磁铁矿为八面体晶形，黑色，条痕也为黑色，呈半金属至金属光泽，不透明，无解理，有时可见 $\{111\}$ 的裂开，往往为含铁磁铁矿中呈显微状的钛铁晶石、铁磁铁矿的包裹体在 $\{111\}$ 方向定向排列所致。性脆，硬度 5.5~6。相对密度 4.9~5.2。具强磁性，居里点 (T_c) 578℃。居里点是磁性矿物的一种热磁效应，为磁性或反磁性物质加热转变为顺磁性物质的临界温度值。

磁铁矿产于还原性环境，主要有以下成因类型：

(1) 岩浆型。在各种岩浆岩中呈副矿物广泛分布。在基性岩中形成有

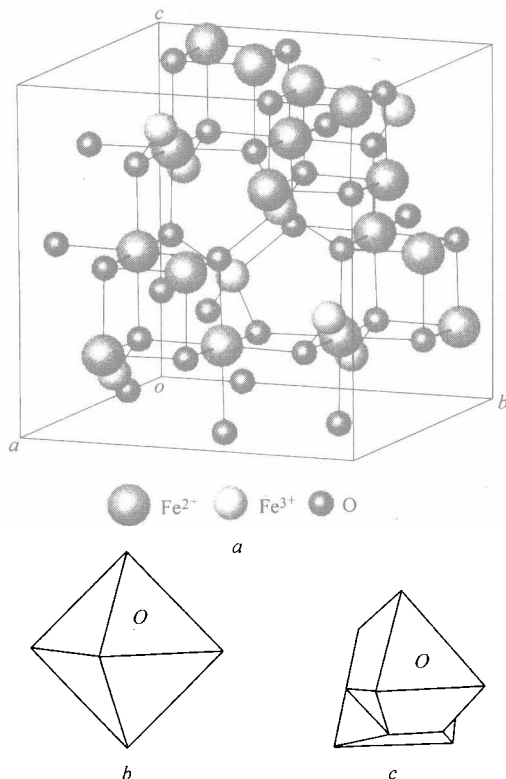


图 2.1 磁铁矿的结构 (a) 与晶形 (b、c)