

邱俊 吕宪俊 陈平 胡术刚 等编著

TIEKUANG XUANKUANG JISHU

铁矿选矿技术

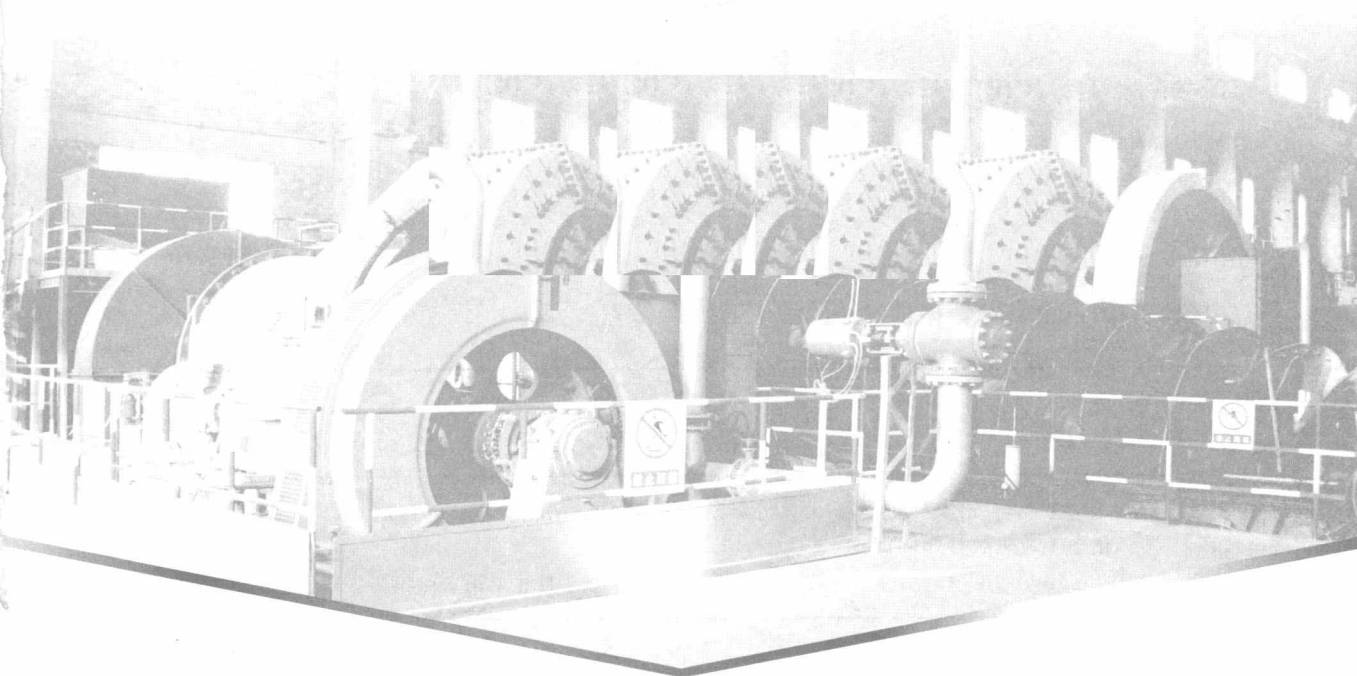


化学工业出版社

邱俊 吕宪俊 陈平 胡术刚 等编著

TIEKUANG XUANKUANG JISHU

铁矿选矿技术



化学工业出版社

· 北京 ·

本书全面介绍了铁矿资源的种类和性质、铁矿选矿的基本原理和工艺方法以及不同铁矿石的选矿工艺流程和典型选矿生产实例。其主要内容包括：铁矿物与铁矿石、碎矿与磨矿、铁矿选矿工艺及设备、磁铁矿选矿、赤铁矿选矿、镜铁矿选矿、褐铁矿选矿、菱铁矿选矿、选矿厂取样及金属平衡、铁矿石化学分析等。

本书主要作为从事铁矿选矿工作的管理人员、生产技术人员和科研人员作为技术资料使用，也可以作为相关企业职工培训教材，还可供矿物加工专业大中专院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

铁矿选矿技术/邱俊等编著. —北京: 化学工业出版社,
2009.1
ISBN 978-7-122-04302-3

I. 铁… II. 邱… III. 铁矿床-选矿 IV. TD951.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 195265 号

责任编辑: 戴燕红

文字编辑: 颜克俭

责任校对: 顾淑云

装帧设计: 韩 飞

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: 化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 17 字数 440 千字 2009 年 3 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: 48.00 元

版权所有 违者必究

前言

铁矿石是钢铁工业的重要原料。随着我国经济和钢铁工业的高速发展，对铁矿石的需求量快速增长。近年来，国内铁矿石一直处于供不应求的局面，铁矿石进口量逐年增加。因此，必须通过加强国内铁矿资源的开发利用和不断增加供给来缓解国内铁矿石的供需矛盾。

我国铁矿资源具有贫、细、杂的特点，贫矿所占比例高达 97% 左右，绝大多数铁矿必须通过选矿处理后才能被有效利用。而且，只有依靠选矿技术的进步，才能为钢铁冶炼提供优质入炉矿石，为钢铁工业节能降耗、提高经济效益奠定基础。因此，加强铁矿选矿技术的研究与推广应用，不断提高铁矿选矿技术水平，对于我国铁矿石的开发利用具有十分重要的作用。为了适应这一形势的需要，我们编写了本书，旨在通过对不同类型铁矿石选矿技术的介绍，普及铁矿选矿知识、推广铁矿选矿技术，为相关生产企业和科研设计部门提供借鉴和参考。

本书在系统介绍了铁矿石的种类和性质、铁矿选矿工艺及设备的基础上，分别介绍了磁铁矿、赤铁矿、镜铁矿、褐铁矿和菱铁矿的选矿工艺方法和典型生产实例，并在内容上力求反映目前国内外铁矿选矿的最新技术。

本书由邱俊、吕宪俊、陈平和胡术刚等编写，参加编写的人员还有王桂芳、孙丽君、杜飞飞、王健、金子桥。全书由邱俊和吕宪俊负责统一整理和校核。

在本书编写过程中，编者参阅了许多国内外同行、生产企业的相关资料和成果，在此一并表示衷心感谢。由于编者水平所限，书中不当之处难免，诚望广大读者批评指正。

编者

2008 年 11 月

目 录

1 绪论	1
1.1 中国铁矿资源概况	1
1.1.1 铁矿资源储量	1
1.1.2 铁矿资源地域分布特点	2
1.1.3 矿石质量特点	2
1.2 我国铁矿资源开发利用概况	2
1.2.1 铁矿资源开发利用形势	2
1.2.2 发展趋势	3
1.3 铁矿选矿在我国钢铁工业中的地位	4
2 铁矿物与铁矿石	6
2.1 铁矿物的种类和性能	6
2.2 铁矿床类型	8
2.3 铁矿石类型	11
2.3.1 铁矿石的自然类型	11
2.3.2 铁矿石的工业类型	12
2.4 铁精矿技术要求	14
2.4.1 铁精矿质量标准	14
2.4.2 铁矿石中常见有害成分的种类及技术要求	16
3 碎矿与磨矿	18
3.1 筛分	18
3.1.1 筛分原理	18
3.1.2 物料的粒度组成分析——筛分分析	19
3.1.3 筛分机械	21
3.2 碎矿	25
3.2.1 碎矿的基本概念	25
3.2.2 破碎设备	28
3.2.3 常见的破碎筛分流程	34
3.3 磨矿	35

3.3.1	磨矿的基本概念	35
3.3.2	磨矿设备	38
3.3.3	磨矿分级循环	42
3.3.4	闭路磨矿中常用的分级设备	43
3.3.5	磨矿流程	45
4	铁矿选矿工艺及设备	49
4.1	磁选工艺及设备	49
4.1.1	磁选原理	49
4.1.2	矿物的磁性	52
4.1.3	磁选机	54
4.2	磁化焙烧-磁选工艺及设备	64
4.2.1	磁化焙烧原理	64
4.2.2	焙烧设备	67
4.2.3	焙烧矿石的特点及其对磁选工艺的影响	69
4.3	浮选工艺及设备	70
4.3.1	浮选原理	70
4.3.2	浮选药剂	71
4.3.3	浮选机	75
4.3.4	浮选作业及浮选流程	81
4.4	重选工艺及设备	82
4.4.1	重选原理	82
4.4.2	重选方法及设备	84
4.5	产品脱水及尾矿处理	89
4.5.1	产品脱水	89
4.5.2	尾矿处理	97
4.5.3	尾矿处理技术进展	104
5	磁铁矿选矿	114
5.1	矿石性质	114
5.2	选矿工艺流程	115
5.2.1	单一弱磁选流程	115
5.2.2	弱磁选-反浮选流程及弱磁选-精选流程	116
5.2.3	弱磁-强磁-浮选联合流程	117
5.2.4	磁铁矿的预选	118
5.3	磁铁矿选矿实例	119
5.3.1	首钢矿业公司水厂选矿厂	119
5.3.2	马钢集团南山矿业公司凹山选矿厂	125
5.3.3	邯邢冶金矿山管理局西石门铁矿选矿厂	130

5.3.4	武钢大冶铁矿选矿厂	135
5.3.5	包头钢铁公司选矿厂	137
6	赤铁矿选矿	141
6.1	矿石性质	141
6.1.1	赤铁矿的矿物学特性	141
6.1.2	赤铁矿矿石类型	141
6.1.3	赤铁矿的可选性	143
6.2	选矿工艺方法流程	144
6.2.1	焙烧磁选流程	144
6.2.2	赤铁矿浮选流程	144
6.2.3	弱磁-强磁流程	151
6.2.4	强磁-浮选流程	152
6.2.5	重-磁-浮联合流程	153
6.2.6	赤铁矿矿石的预选	154
6.3	赤铁矿选矿实例	156
6.3.1	齐大山铁矿选矿厂	156
6.3.2	东鞍山烧结厂	161
6.3.3	姑山矿业公司龙山选矿厂	163
7	镜铁矿选矿	170
7.1	矿石性质	170
7.1.1	矿物学特性	170
7.1.2	矿石种类	170
7.2	选矿工艺流程及生产实例	171
7.2.1	焙烧磁选和强磁流程——酒泉钢铁公司选矿厂	171
7.2.2	“强磁-浮选”流程——安徽李楼铁矿选矿厂	177
7.2.3	重选流程——加拿大卡罗尔选矿厂	183
8	褐铁矿选矿	186
8.1	矿石性质	186
8.1.1	矿物学特性	186
8.1.2	矿石类型	187
8.1.3	褐铁矿资源	187
8.2	选矿工艺流程	188
8.2.1	常用选矿方法	188
8.2.2	单一选别流程	189
8.2.3	联合选别流程	192
8.3	褐铁矿选矿实例	194

8.3.1	江西铁坑褐铁矿	194
8.3.2	云南化念铁矿	196
8.3.3	广东大宝山铁矿选矿厂	199
9	菱铁矿选矿	204
9.1	矿石性质	204
9.1.1	菱铁矿的矿物学特性	204
9.1.2	我国菱铁矿资源及矿石类型	204
9.1.3	菱铁矿的可选性	205
9.2	选矿工艺	205
9.2.1	焙烧-磁选技术	205
9.2.2	强磁选工艺	211
9.2.3	浮选工艺	212
9.2.4	菱铁矿其他加工技术	212
9.3	菱铁矿选矿实例	213
9.3.1	陕西大西沟菱铁矿选矿	213
9.3.2	王家滩低铜菱铁矿选矿试验	217
10	选矿厂取样及金属平衡	219
10.1	样品的代表性	219
10.1.1	样品的代表性概述	219
10.1.2	试样最小必需重量的确定	219
10.2	选矿厂样品的采集与制备	220
10.2.1	样品的采集	220
10.2.2	样品的制备	226
10.3	选矿厂主要指标的计算	228
10.3.1	选矿厂工作制度及设备作业率	228
10.3.2	选矿厂设计小时处理量	228
10.3.3	品位	229
10.3.4	产率	229
10.3.5	选矿比	229
10.3.6	富集比	229
10.3.7	回收率	229
10.4	金属平衡	230
10.4.1	工艺金属平衡及工艺金属平衡表的编制	230
10.4.2	商品金属平衡及商品金属平衡表的编制	232
10.4.3	车间金属流失的检查与分析	234
10.4.4	金属不平衡产生的原因及其分析	235
11	铁矿石化学分析	236
11.1	化学分析样品的制备	236

11.2 分析化学通则与样品预处理	237
11.2.1 分析化学通则	237
11.2.2 试样的预处理	238
11.3 铁矿石多元素化学分析	239
11.3.1 全铁含量的测定	239
11.3.2 亚铁的测定	242
11.3.3 可溶铁的测定	244
11.3.4 二氧化硅的测定	245
11.3.5 五氧化二磷的测定	248
11.3.6 硫的测定	251
11.4 多元素同时测定	254
11.4.1 X 荧光光谱法	254
11.4.2 ICP 发射光谱法	256
11.5 铁矿石物相分析	256
11.5.1 铁矿石化学物相分析的常测项目及意义	256
11.5.2 铁矿石化学物相分析	257
参考文献	260

1 绪 论

1.1 中国铁矿资源概况

1.1.1 铁矿资源储量

我国铁矿资源较为丰富，而且随着铁矿勘察技术的进步和勘察程度的提高，探明铁矿资源储量不断增加。截止到2007年底，全国累计查明铁矿石资源储量680亿吨，保有资源储量607亿吨，其中可采储量约为210亿吨。

据美国地质调查局(USGS)2008年初公布的数据显示，世界铁矿石储量为1500亿吨、基础储量为3400亿吨；金属铁储量为730亿吨、基础储量为1600亿吨(表1-1)。世界铁矿石储量主要集中在乌克兰、俄罗斯、中国、澳大利亚和巴西，五国储量之和占世界总储量的72%。其他铁矿资源较丰富的国家包括：哈萨克斯坦、美国、印度、委内瑞拉和瑞典等国。由表1-1还可以看出，世界金属铁储量以俄罗斯最多，其次为澳大利亚、乌克兰、巴西，中国居世界第五位。中国虽然铁矿石储量很大，但贫矿多、富矿少，铁矿石含铁品位较低。

表 1-1 世界铁矿石的储量和基础储量

国家(地区)	铁 矿 石		金 属 铁	
	储量/亿吨	基础储量/亿吨	储量/亿吨	基础储量/亿吨
乌克兰	300	680	90	200
俄罗斯	250	560	140	310
中国	210	460	70	150
澳大利亚	160	450	100	280
巴西	160	270	89	140
哈萨克斯坦	83	190	33	74
美国	69	150	21	46
印度	66	98	42	62
委内瑞拉	40	60	24	36
瑞典	35	78	22	50
伊朗	18	25	10	15
加拿大	17	39	11	25
南非	10	23	6.5	15
毛里塔尼亚	7	15	4	10
墨西哥	7	15	4	9
其他	110	300	62	170
世界合计	1500	3400	730	1600

注：资料来源为 USGS Mineral Commodity Summaries 2008。(储量也称可采储量，是基础储量中在当前的技术经济条件下可利用的部分。基础储量包括储量、边缘经济储量和部分接近边缘经济储量。)

1.1.2 铁矿资源地域分布特点

我国铁矿资源在地域分布方面呈现出既分布广泛又相对集中的特点。

目前已查明的铁矿产地星罗棋布,遍及全国 29 个省、市、自治区内的近 700 多个县(旗),分布十分广泛。其中,资源储量大于 10 亿吨的铁矿床仅 10 处,分别为辽宁的齐大山、胡家庙子(红旗)、东鞍山、西鞍山、南芬,河北的司家营,内蒙古的白云鄂博,四川的攀枝花、红格和云南的惠民铁矿,合计资源储量约占全国总量的 26%。

储量在 5 亿~10 亿吨之间的有鄂东、鄂西、河北邯郸、河北邢台、滇中、甘肃酒泉、河南舞阳-许昌、江西新余-吉安、闽南等地区。

1.1.3 矿石质量特点

从我国铁矿石质量来看,其主要特点在于:贫矿多、富矿少,多金属共(伴)生矿石比例高、矿石组分复杂。

(1) 贫矿多、富矿少 我国铁矿石平均品位为 33%左右,比世界平均水平低 10%以上,与澳大利亚、巴西、印度的含铁品位 60%以上的大而富的铁矿相比,则相差更远。

由于铁矿石原矿品位低,必须经过选矿富集后才能被有效利用。

(2) 多金属共(伴)生铁矿石比例高、矿石组分复杂 多金属共(伴)生铁矿石是指铁矿石中共生和伴生的有益元素较多、成分复杂的铁矿。这种铁矿储量约占全国总量的 1/3,主要共(伴)生组分包括钒、钛、稀土、铌、铜、铅、锌、钴、锰、钨、钼、金、硫等;典型矿床包括攀枝花铁矿、白云鄂博铁矿、大冶铁矿等。

共(伴)生铁矿石的利用既有不利的一面,又有有利的一面。其不利之处在于选冶困难、工艺复杂;其有利的一面在于综合利用潜力大,有的共(伴)生组分的经济价值甚至可以超过铁矿石。例如,攀枝花钒钛磁铁矿中伴生的钒、钛资源储量居世界首位,已形成一个重要的钒、钛资源基地;白云鄂博铁矿中含有丰富的稀土和铌,稀土和铌的储量分别占全国总储量的 94.3%和 72%,稀土储量约为国外总储量的 5 倍以上,具有巨大的综合利用价值。目前,攀枝花钒钛磁铁矿、白云鄂博铁矿伴生的钒、钛、稀土的综合利用已经形成了较大的规模,创造了巨大的经济效益。大冶铁矿、山东金岭铁矿等铁矿山综合回收伴生的铜、硫、钴等,也取得了良好的效果。

因此,对于多金属共(伴)生铁矿,必须通过提高选、冶技术水平,实现对伴(共)生有益组分的综合利用。

(3) 铁矿物嵌布粒度细 我国铁矿石资源,大多属于细粒、微细粒嵌布的矿石,部分为中粒嵌布矿石。要达到铁矿物基本单体分离的选别要求,大部分矿石的磨矿细度要达到-200目占 70%~90%,有的则要磨到-280目、-325目甚至-400目。还有占一定储量比的鲕状赤铁矿石,铁矿物的嵌布粒度仅为几微米、十几微米,要获得高品位铁精矿,在目前磨、选技术条件下还很困难,只能获得低品位精矿。众所周知,磨矿粒度越细,选别难度越大,金属流失越多,精矿成本也越高。

1.2 我国铁矿资源开发利用概况

1.2.1 铁矿资源开发利用形势

(1) 铁矿资源开发已成为国民经济发展的重要支柱产业 2007 年全国铁矿石产量达到 7.07 亿吨,实物量居世界第一位,按金属量计算,居世界第三位。铁矿石的大量开发,为

我国钢铁工业的持续发展奠定了基础。

需要指出, 尽管我国铁矿石原矿产量居世界第一, 但我国铁矿石大多数为贫矿石, 折合金属产量占世界铁矿产量的比重偏低。据美国地质调查局 (USGS) 的统计资料, 2006 年全球铁矿石产量约为 18 亿吨, 中国铁矿石原矿产量 5.88 亿吨, 约占 32.67%, 折合为成品矿后约占 18% 左右。此外, 从铁矿石的品种质量来看, 由于国内铁矿资源具有贫、杂、细的特点, 因此绝大多数铁矿石需经磨矿和选矿处理, 细粒铁精矿成为铁矿生产企业的主导产品, 生产成本较高、回收率低。

与世界主要铁矿石生产国相比, 我国铁矿山的生产规模普遍较小、装备水平和生产效率较低。我国拥有采矿权的铁矿企业就有 5700 多家, 其中重点矿山 44 家, 地方矿山 5600 多家。我国规模最大的齐大山铁矿, 矿山生产能力也只有 1100 万吨/年、铁精矿产量不到 500 万吨/年左右。目前, 我国拥有原矿年产量在 300 万吨以上的露天矿 13 座、100 万吨以上的坑内矿山 10 座、拥有年产精矿 50 万吨以上选矿厂 29 座, 在全国铁矿石总产量中, 重点铁矿山产量约占 47%, 地方矿山约占 53%。可见, 尽管我国铁矿石产量在世界上处于领先地位, 但铁矿企业数量众多, 单个铁矿企业的生产规模远远落后于国际上大型铁矿公司。

(2) 铁矿石自给率逐年降低、对外依存度逐年增加 首先, 从铁矿储量总数来看, 中国属于铁矿资源较为丰富的国家。但是我国铁矿石储量消耗大, 目前年消耗量为 7 亿吨左右, 据此估计, 在我国铁矿石现有保有储量中, 可供设计和规划利用的保有铁矿储量可供开采的年限仅为 30 年左右, 而世界铁矿资源的可采年限约为 100 年左右。可见, 我国铁矿资源的保障程度较低, 其可持续供给仍是一个需要解决的重要问题。

其次, 从近年来我国铁矿石进口量来看, 我国钢铁工业发展已形成了从以利用国内铁矿石为主过渡为以利用进口铁矿石为主的发展格局。虽然近 10 多年来我国铁矿石产量居世界第一, 但国产铁矿石远不能满足钢铁工业发展的需要, 致使对进口铁矿石的依存度不断加大。我国铁矿石进口量约占世界铁矿石贸易量的 52%。可见, 国内铁矿石的供需矛盾已十分突出。

此外, 我国钢产量的急剧增长带动了对铁矿石需求的大幅增长, 在促进铁矿石生产的同时, 也导致国际铁矿石供不应求, 全球铁矿石价格全面上涨。据海关数据统计, 2007 年中国铁矿石共进口 3.83 亿吨, 比 2006 年增加进口 5679 万吨, 同比增长 17.4%。中国 2007 年进口铁矿石整体平均到岸价格为 88.22 美元/t, 与 2006 年同期相比上涨 24.1 美元/t, 同比增长 37.57%。国际市场铁矿石的合同价格 2003 年上涨 8.9%, 2004 年上涨 18.62%, 2005 年上涨 71.5%, 2006 年上涨 19%, 2007 年上涨 9.5%, 2008 年从巴西淡水河谷公司进口粉矿和块矿分别上涨 65% 和 71%, 从澳大利亚力拓公司进口粉矿和块矿分别上涨 79.88% 和 96.5%, 已经连续 6 年大幅上涨。铁矿石进口量的急剧增加和铁矿石价格的大幅度上涨, 对我国钢铁工业的健康发展和我国经济安全已形成了至关重要的影响。

1.2.2 发展趋势

为了解决我国铁矿资源的保障程度低、铁矿石自给率低、对外依存度逐年增加, 国内铁矿石的供需矛盾等问题, 我国铁矿资源的开发利用需要切实加强以下几个方面的工作。

(1) 加强铁矿勘察工作, 提高铁矿资源保障程度 在铁矿资源勘察中, 一方面要加强地质工作较为薄弱的新矿区的勘察, 不断增加资源储量, 根据区域地质背景、成矿条件、找矿潜力, 我国西部地区预测潜在资源量达 200 亿吨、东部地区预测潜在资源量约 178 亿吨; 另

一方面要加强已探明资源的利用程度,目前已开发利用的铁矿储量占铁矿全部查明资源储量的52.2%,还有一半的铁矿查明资源储量尚未被开发利用。

除此之外,我们应该重视和加强对低品位铁矿资源的勘察和采矿生产过程的探矿工作。随着选矿技术的进步,传统的低品位铁矿石的利用已经成为可能;利用井下采矿工程所披露的矿化信息和生产工程进行深部勘探,对于寻找深部的盲矿体、增加矿山储量和延长矿山的服务年限是极为有利的。

(2) 依靠科技进步提高铁矿资源的利用率 从目前我国铁矿资源的开发利用形势来看,一方面可采资源不足,另一方面资源浪费现象严重。我国地方和群采铁矿数量众多,铁矿石产量已超过重点矿山和地方骨干矿山,但由于技术和装备落后,存在着采富弃贫、采易弃难等不良现象,资源浪费严重,采选综合回收率仅为50%左右,加速了我国铁矿资源的消耗。因此,提高铁矿资源利用率具有巨大的潜力。

为了提高铁矿资源利用率,一方面应树立资源危机意识、大力提倡资源节约,通过采用新技术和新装备,不断提高采选综合回收率;另一方面,应不断提高共生、伴生铁矿资源的综合利用水平,使有限的铁矿资源能够最大程度得到开发利用。与此同时,应重视尾矿和硫酸渣等废弃物中铁的综合回收。

(3) 加强对难利用铁矿石的开发研究 在我国已探明的铁矿资源中,目前尚难以利用的资源量约达上百亿吨。从其难利用的类型来看,主要包括难采和难选两大类。难采矿石包括水文地质条件复杂、矿体埋藏深、矿区构造复杂、围岩破碎等难采类型;难选矿石主要为杂质含量高、嵌布粒度细的赤铁矿、褐铁矿、菱铁矿、混合矿等。因此,通过科技攻关实现对难利用铁矿资源的开发利用,对于增加铁矿可采储量、缓解资源紧张的矛盾具有重要意义。

(4) 加强贫磁铁矿资源的开发利用 随着国内钢铁市场对铁矿需求的增长和国际铁矿石价格的不断上涨,使大量低品位铁矿石的开发利用成为可能,尤其是易采易选的贫磁铁矿资源的开发利用具有巨大的潜力。我国已开发的磁铁矿矿床的矿石 TFe 品位一般在20%~25%以上,对于大量 TFe 品位在20%以下、磁性铁含量10%~15%以下的贫磁铁矿尚未得到大规模开发利用,这类资源仅在东北地区的蕴藏量就达到上百亿吨,在山东、新疆、内蒙古等地也发现了大量类似铁矿床。因此,通过强化预选抛废、采用高效节能新技术,实现易采易选的贫磁铁矿资源的开发利用,对于增加铁矿石的供应、缓解铁矿石供需矛盾具有重要作用。

1.3 铁矿选矿在我国钢铁工业中的地位

(1) 铁矿选矿是我国钢铁工业发展的基础 必须经过选矿富集后才能得到利用,说明选矿工业是我国钢铁工业的发展中不可缺少的重要环节。目前,全国铁矿选矿厂的处理能力已达到7亿吨/年以上,已经形成了巨大的工业生产规模,铁矿选矿已成为国民经济发展中的一个重要支柱行业。

(2) 铁矿选矿对于我国炼铁工业的生产效率和经济效益具有重要影响 首先,铁精矿质量的提高,有利于提高炼铁高炉利用系数。铁精矿(粉矿)品位直接影响着高炉利用系数的提高。通过选矿技术改造,使铁精矿提质降杂,对于炼铁生产效率和生产成本具有重要影响。

(3) 提质降杂、节能降耗是我国选矿技术发展的重要方向 据统计,目前我国铁矿石平均品位32.67%,其中重点矿山为31.5%、地方中小矿山为37.37%。经过选矿后的铁精矿

品位在 52.65%~67.57%，铁精矿中 SiO_2 含量为 6.5%~12%，平均含铁品位约为 62%。与澳大利亚、巴西进口矿相比，我国铁精矿质量尚有明显的差距。例如，澳矿多为赤铁富矿，粉矿品位 62%、块矿品位 64%， SiO_2 含量 3%~4%；巴西也主要是赤铁富矿，粉矿品位 65%~66%、块矿品位 66%~67%， SiO_2 含量多在 1%~2%。因此，进一步提高铁精矿品位、降低杂质含量，仍是我国铁矿选矿工作者面临的重要任务。

基于我国铁矿资源的质量特点，我国在铁矿选矿工艺技术研究方面较为先进，但国内选矿厂普遍存在着装备较为落后、自动化程度低、消耗偏高等问题，在设备大型化、生产自动化、提高生产效率、节能降耗等方面与国外相比尚存在明显的差距。因此，进一步开展选矿厂节能降耗研究和技术改造，不断提高铁矿选矿厂的装备水平和自动化水平，将是我国选矿技术发展的重要方向。

2 铁矿物与铁矿石

2.1 铁矿物的种类和性能

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、褐铁矿、菱铁矿、钛铁矿和黄铁矿等。

(1) **磁铁矿** 磁铁矿形成于内生作用和变质作用过程，是岩浆成因铁矿床、接触交代-热液铁矿床、沉积变质铁矿床以及一系列与火山作用有关的铁矿床中铁矿物的主要矿物。磁铁矿的化学结构为 Fe_3O_4 。磁铁矿中 FeO 的质量分数为 31.03%、 Fe_2O_3 的质量分数为 68.97%，理论化学组成为 Fe 72.4%、 O 27.6%，为等轴晶系，单晶体常呈八面体，较少呈菱形十二面体。在菱形十二面体上，长对角线方向常现条纹。集合体多呈致密块状和粒状。颜色为铁黑色、条痕为黑色，半金属光泽，不透明。莫氏硬度为 5.5~6.5，密度为 4.9~5.2 g/cm^3 。其具强磁性。

磁铁矿中常有相当数量的 Ti^{4+} 以类质同象代替 Fe^{3+} ，还伴随有 Mg^{2+} 和 V^{3+} 等相应地代替 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} ，因而形成一些矿物亚种，即：

① 钛磁铁矿 $\text{Fe}_{(2+x)}^{2+}\text{Fe}_{(2-2x)}^{3+}\text{Ti}_x\text{O}_4$ ($0 < x < 1$)，含 TiO_2 12%~16%。常温下，钛从其中分离成板状和柱状的钛铁矿及布纹状的钛铁晶石。

② 钒磁铁矿 FeV_2O_4 或 $\text{Fe}^{2+}(\text{Fe}^{3+}\text{V})\text{O}_4$ ，含 V_2O_5 有时高达 68.41%~72.04%。

③ 钒钛磁铁矿 为成分更为复杂的上述两种矿物的固溶体产物。

④ 铬磁铁矿 含 Cr_2O_3 可达百分之几。

⑤ 镁磁铁矿 含 MgO 可达 6.01%。

磁铁矿氧化后可变成赤铁矿，但仍能保持其原来的晶形，称为假象赤铁矿或半假象赤铁矿。

(2) **赤铁矿** 自然界中 Fe_2O_3 有两种同质多象变种，即 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 。前者在自然条件下稳定，称为赤铁矿；后者在自然条件下不如 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 稳定，处于亚稳定状态，称之为磁赤铁矿。

① 普通赤铁矿 普通赤铁矿的理论化学组成为 Fe 69.94%、 O 30.06%，常含类质同象混入物 Ti 、 Al 、 Mn 、 Fe^{2+} 、 Ca 、 Mg 及少量 Ga 和 Co 。三方晶系，完好晶体少见。结晶赤铁矿为钢灰色，隐晶质、土状赤铁矿呈红色。条痕为樱桃红色或鲜猪肝色。金属至半金属光泽，有时光泽暗淡，莫氏硬度为 5~6，密度 5~5.3 g/cm^3 。具弱磁性。

赤铁矿的集合体有各种形态，形成一些矿物亚种，如下所述。

a. 镜铁矿 为具金属光泽的玫瑰花状或片状赤铁矿的集合体。

b. 云母赤铁矿 具金属光泽的晶质细鳞片状赤铁矿。

c. 鲕状或肾状赤铁矿 形态呈鲕状或肾状的赤铁矿。

赤铁矿是自然界中分布很广的铁矿物之一,可形成于各种地质作用,但以热液作用、沉积作用和区域变质作用为主。在氧化带里,赤铁矿可由褐铁矿或纤铁矿、针铁矿经脱水作用形成。但也可以变成针铁矿和水赤铁矿等。在还原条件下,赤铁矿可转变为磁铁矿,称为假象磁铁矿。

② 磁赤铁矿 磁赤铁矿的化学式为 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$,其化学组成中常含有 Mg、Ti 和 Mn 等混入物。等轴晶系,五角三四面体晶类,多呈粒状集合体,致密块状,常具磁铁矿假象。颜色及条痕均为褐色,莫氏硬度为 5,密度 $4.88\text{g}/\text{cm}^3$,强磁性。

磁赤铁矿主要是磁铁矿在氧化条件下经次生变化作用形成。磁铁矿中的 Fe^{2+} 完全为 Fe^{3+} 所代替 ($3\text{Fe}^{2+} \rightarrow 2\text{Fe}^{3+}$),所以有 $1/3\text{Fe}^{2+}$ 所占据的八面体位置产生了空位。另外,磁赤铁矿可由纤铁矿失水而形成,亦有由铁的氧化物经有机作用而形成的。

(3) 褐铁矿 褐铁矿是指含水氧化铁矿石,是由其他矿石风化后生成的。褐铁矿并不是一个矿物种,而是针铁矿、纤铁矿、水针铁矿、水纤铁矿以及含水氧化硅、泥质等的混合物。其化学成分变化大,含水量变化也大。褐铁矿的化学式为 $n\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ ($n=1\sim 3$, $m=1\sim 4$)。

① 针铁矿 针铁矿的化学式为 $\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$,含 Fe 62.9%。含不定量的吸附水者,称为水针铁矿 $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 。斜方晶系,形态有针状、柱状、薄板状或鳞片状。通常呈豆状、肾状或钟乳状。切面具平行或放射纤维状构造。有时成致密块状、土状,也有呈鲕状、结核状者。颜色红褐、暗褐至黑褐。经风化而成的粉末状、赭石状褐铁矿则呈黄褐色。针铁矿条痕为红褐色,莫氏硬度为 $5\sim 5.5$,密度为 $4\sim 4.3\text{g}/\text{cm}^3$ 。而褐铁矿条痕则一般为淡褐或黄褐色,莫氏硬度为 $1\sim 4$,密度为 $3.3\sim 4\text{g}/\text{cm}^3$ 。

② 纤铁矿 纤铁矿化学式为 $\gamma\text{-FeO}(\text{OH})$,含 Fe 62.9%。含不定量的吸附水者,称为水纤铁矿 $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 。斜方晶系。常见鳞片状或纤维状集合体。颜色暗红至黑红色。条痕为橘红色或砖红色。莫氏硬度为 $4\sim 5$,密度为 $4.01\sim 4.1\text{g}/\text{cm}^3$ 。

(4) 菱铁矿 菱铁矿的化学式为 FeCO_3 ,理论化学组成为 FeO 62.01%、 CO_2 37.99%,常含 Mg 和 Mn。三方晶系。常见菱面体,晶面常弯曲。其集合体呈粗粒状至细粒状。也有呈结核状、葡萄状、土状的。黄色、浅褐黄色(风化后为深褐色),玻璃光泽。莫氏硬度为 $3.5\sim 4.5$,密度为 $3.96\text{g}/\text{cm}^3$ 左右,因 Mg 和 Mn 的含量不同而有所变化。

外生沉积成因的菱铁矿是在缺氧的环境下,由生物作用或化学沉积作用形成的。热液成因的菱铁矿常作为铁、铜、铅、锌金属矿床的脉石矿物产出。菱铁矿在地表氧化条件下,一般可分解氧化成褐铁矿等次生矿物。

(5) 钛铁矿 钛铁矿的化学分子式为 FeTiO_3 ,理论化学组成为 Fe 36.8%、Ti 36.6%、O 31.6%。三方晶系。菱面体晶类。常呈不规则粒状、鳞片状或厚板状。在 950°C 以上钛铁矿与赤铁矿形成完全类质同象。当温度降低时,即发生熔离,故钛铁矿中常含有细小鳞片状赤铁矿体。钛铁矿颜色为铁黑色或钢灰色。条痕为钢灰色或黑色。含赤铁矿包裹体时呈褐色或带褐的红色条痕。金属-半金属光泽。不透明,无解理。莫氏硬度为 $5\sim 6.5$,密度为 $4\sim 5\text{g}/\text{cm}^3$,弱磁性。钛铁矿主要出现在超基性岩、基性岩、碱性岩、酸性岩及变质岩中。我国攀枝花钒钛磁铁矿床中,钛铁矿呈粒状或片状分布于钛磁铁矿等矿物颗粒之间,或沿钛磁铁矿裂开面成定向片晶。

(6) 黄铁矿 黄铁矿的化学式为 FeS_2 ,理论化学组成为 Fe 46.55%、S 53.45%,常有 Co、Ni 类质同象代替 Fe,形成 $\text{FeS}_2\text{-CoS}_2$ 和 $\text{FeS}_2\text{-NiS}_2$ 系列。As、Se、Te 可代替 S。常含

Sb、Cu、Au、Ag 等的细分散混入物。也可有微量 Ge、In 等元素。等轴晶系，偏方复十二面体晶类，晶体完好，常呈立方体或五角十二面体，较少为八面体晶形，立方体晶面上有与晶棱平行的条纹，各晶面上的条纹相互垂直。集合体呈粒状、致密块状、浸染状或球状。浅黄（铜黄）色，条痕绿黑色，强金属光泽，不透明，无解理，参差状断口。莫氏硬度较大，达 6~6.5，密度为 4.9~5.2g/cm³。在地表条件下易风化为褐铁矿。

它是地壳中分布最广的硫化物。在岩浆岩中，黄铁矿呈细小浸染状，为岩浆期后热液作用的产物。接触交代矿床中，黄铁矿常与其他硫化物共生，形成于热液作用后期阶段。在热液矿床中，黄铁矿与其他硫化物、氧化物、石英等共生；有时形成黄铁矿的巨大堆积。在沉积岩、煤系及沉积矿床中，黄铁矿呈团块、结核或透镜体产出。在变质岩中，黄铁矿往往是变质作用的新生产物。

黄铁矿在氧化带不稳定，易分解形成氢氧化铁如针铁矿等，经脱水作用，可形成稳定的褐铁矿，且往往依黄铁矿成假象。这种作用常在金属矿床氧化带的地表露头部分形成褐铁矿或针铁矿、纤铁矿等覆盖于矿体之上，故称铁帽。在氧化带酸度较强的条件下，可形成黄钾铁矾 $\text{KFe}_3[\text{SO}_4]_2(\text{OH})_6$ ，其分布量仅次于褐铁矿。

以上几种铁矿物中，作为炼铁原料的主要是磁铁矿和赤铁矿，其次为褐铁矿和菱铁矿。钛铁矿主要用于提炼金属钛或生产 TiO_2 ，黄铁矿则主要用于生产硫酸。

2.2 铁矿床类型

我国铁矿床类型齐全，世界上已发现的铁矿成因类型在我国均有发现，除前寒武纪硅铁建造风化壳型铁矿外，均探明了一定的储量。我国目前具有工业意义的铁矿床，按其成因可分为沉积变质型、岩浆型、接触交代-热液型、火山岩型、沉积型和风化型等类型。

(1) 沉积变质铁矿 这类铁矿床又称受变质沉积型铁矿床，主要产于前寒武纪（太古宙、元古宙）古老的区域变质岩系中，是我国十分重要的铁矿类型，其储量约占全国总储量的 57.8%，居各类型铁矿床之首。并具有“大、贫、浅、易（选）”的特点，即矿床规模大、含铁量低、矿体出露地表或浅部、易于选别。主要分布于吉林东南部、辽宁鞍山-本溪、冀东、北京密云、晋北、内蒙古南部、豫中、鲁中、皖西北、江西新余、陕西汉中、湘中等地。根据矿床中的矿石类型和含矿变质岩系的岩石矿物组合以及其他地质特征，又分为下列两大类。

① 受变质铁硅质建造型铁矿床 这类铁矿是受不同程度区域变质作用并与火山-铁硅质沉积建造有关的铁矿床，矿床规模大多数为大型或特大型。典型铁矿床分布于辽宁鞍山-本溪一带，一般称为“鞍山式”铁矿。矿石中铁矿物与石英组成具有黑白相间的条带状、条带状构造；变质程度高时，向片麻状过渡。矿石为磁铁矿石岩、赤铁矿石岩、绿泥磁铁矿石岩、角闪磁铁矿石岩。以贫矿为主，含铁品位一般为 25%~40%。在贫矿中也有含铁品位达 50%~60% 的不同规模不同成因的富铁矿石。

② 受变质碳酸盐建造型铁矿床 这种类型铁矿是受到轻微区域变质作用的碳酸盐型沉积铁矿床，含矿岩系主要由碎屑-碳酸盐岩组成，如砂岩、泥岩、灰岩等。典型矿床分布于吉林省南部大栗子等地区，也称为“大栗子式”铁矿。矿石矿物有赤铁矿、磁铁矿、菱铁矿、褐铁矿等。矿石以块状、条带状构造为主，鲕状构造次之。矿石类型有赤铁矿型、磁铁矿型、菱铁矿型、次生褐铁矿型。磁铁矿型、赤铁矿型矿石围岩多为千枚岩，而菱铁矿型矿石围岩多为大理岩。

(2) 接触交代-热液铁矿 接触交代型矿床，常称为矽卡岩型矿床。主要赋存于中酸性-