

# 难选铁矿石 选矿技术

印万忠 刘莉君 刘明宝 李闯 编著



化学工业出版社



# 难选铁矿石 选矿技术

印万忠 刘莉君 刘明宝 李闯 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

《难选铁矿石选矿技术》针对世界及我国难选铁矿石资源的特点,着重阐述难选铁矿石资源及类型,微细嵌布磁铁矿石、微细嵌布赤铁矿石、菱铁矿石、褐铁矿石、多金属共生铁矿石、鲕状赤铁矿石、高磷铁矿石、复杂铁矿石的资源分布、选矿方法、选矿试验研究现状和工业应用实例;并介绍由本书编著者提出的铁矿物浮选交互影响研究成果,以及针对难选铁矿石提出的分步、分散、选择性磁团聚分选、选择性絮凝浮选技术、磁化焙烧、深度还原、生物还原磁化选矿和磁浮选技术等。

本书可供从事铁矿石选矿研究的科技人员,铁矿生产企业的管理和技术人员,大专院校的教师和学生等参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

难选铁矿石选矿技术/印万忠等编著. —北京:化学工业出版社, 2014. 6

ISBN 978-7-122-20370-0

I. ①难… II. ①印… III. ①铁矿床-选矿技术  
IV. ①TD951.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第072432号

责任编辑:袁海燕 陈丽  
责任校对:吴静

文字编辑:向东  
装帧设计:王晓宇

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)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张21½ 字数421千字 2014年9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: 75.00 元

版权所有 违者必究

## 前言

## FOREWORD

目前,中国铁矿资源中易选的铁矿资源日益减少,铁矿资源特点是贫矿多,富矿少,伴生矿产多,矿石组分比较复杂,矿石嵌布粒度大多较细,给选矿造成一定的困难。从技术上来讲,迫切需要先进的技术、先进的工艺和先进的设备来推动贫铁矿资源的高效开发与利用。从经济效益来讲,对贫铁矿的生产,选矿厂必须扩大生产规模,扩大原矿的处理能力,节能降耗,降低选矿加工成本,才会有较好的经济效益。鉴于此,编著者结合多年工作经验、生产实际,利用多年来的铁矿试验研究工作和现场工艺调整所积累的技术、经验和资料,编写本书。

本书内容分为10章,首先将我国难选铁矿石的类型以及分布情况进行了分析,随后对不同类型的难选铁矿石的资源特征及分布情况、现常用的选矿方法和选矿试验以及选矿实例进行了总结,除介绍现有的工艺方法等基本内容外,还结合了作者多年研究工作所提出的一些理论,丰富了相关内容,兼顾了理论和实际。全书主要针对世界及我国难选铁矿石资源的特点,着重阐述难选铁矿石资源及类型,微细嵌布磁铁矿石、微细嵌布赤铁矿石、菱铁矿石、褐铁矿石、多金属共生铁矿石、鲕状赤铁矿石、高磷铁矿石、复杂铁矿石的资源分布、选矿方法、选矿试验研究现状和工业应用实例,并介绍了由本书编著者提出的铁矿物浮选交互影响研究成果,以及针对难选铁矿石提出的分步、分散、选择性磁团聚分选、选择性絮凝浮选技术、磁化焙烧、深度还原、生物还原磁化选矿和磁浮选技术等,本书编写的主要目的是给难选铁矿石选矿研究者和生产企业提供处理难选铁矿石方面的一些思路和方法,以提高难选铁矿石资源的利用效率。

本书紧密围绕难选铁矿石的选矿问题,从资源、科学研究和工业应用情况进行详细的描述,有些铁矿选矿新技术是一些前瞻性的技术,目前还没有得到工业应用,在本书中对这些技术也进行了描述,主要是要引起广大铁矿选矿工作者的研究兴趣,拓宽他们的思路,促进难选铁矿石选矿方面的科技进步。

本书由博士生导师印万忠教授组织编著(第9章、第10章),西安科技大

学刘莉君博士（第2章、第3章、第5章），商洛学院（陕西省尾矿资源综合利用重点实验室）刘明宝博士（第1章、第7章）、北方重工集团李闯博士（第6章、第8章）参与了本书编著，第4章由刘莉君博士和刘明宝博士共同编著，由印万忠教授负责书稿的补充和统稿工作。

由于作者水平有限，书中难免有疏漏之处，敬请广大读者批评指正。

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters, likely '印万忠'.

2014年2月



# 目 录

<b>第 1 章 难选铁矿石资源及类型</b> .....	1
1.1 我国难选铁矿石资源分布情况 .....	2
1.2 我国难选铁矿石类型 .....	5
1.2.1 微细粒嵌布的磁铁矿 .....	5
1.2.2 微细粒嵌布的鞍山式赤铁矿 .....	7
1.2.3 菱铁矿 .....	9
1.2.4 褐铁矿 .....	11
1.2.5 高磷鲕状赤铁矿 .....	12
1.2.6 多金属共生铁矿石 .....	13
1.2.7 细粒嵌布的高磷硫铁矿石 .....	14
参考文献 .....	14
<b>第 2 章 微细嵌布磁铁矿石选矿</b> .....	16
2.1 微细嵌布磁铁矿石的资源分布 .....	16
2.2 微细嵌布磁铁矿石的选矿方法 .....	16
2.2.1 磁铁矿石岩的选矿 .....	16
2.2.2 磁铁矿石的选矿 .....	17
2.3 微细嵌布磁铁矿石的选矿试验 .....	17
2.3.1 鞍钢谷首峪铁矿试验 .....	17
2.3.2 新疆某贫磁铁矿试验 .....	18
2.4 微细嵌布磁铁矿石的选矿实例 .....	20
2.4.1 南芬选矿厂 .....	20
2.4.2 庙沟铁矿选矿厂 .....	22
2.4.3 河南舞阳矿业公司铁古坑铁矿选矿厂 .....	25
2.4.4 银湾选矿厂 .....	28
2.4.5 恩派尔选矿厂 .....	31
参考文献 .....	34
<b>第 3 章 微细嵌布赤铁矿石选矿</b> .....	35
3.1 微细嵌布赤铁矿石的资源分布 .....	35

3.2	微细嵌布赤铁矿石的选矿方法 .....	35
3.2.1	细粒嵌布赤铁矿石常用分选方法 .....	36
3.2.2	高效回收微细粒贫赤铁矿的关键技术 .....	37
3.3	微细嵌布赤铁矿石的选矿试验 .....	39
3.3.1	微细嵌布赤铁矿磁选过程特性试验研究 .....	39
3.3.2	选矿工艺流程制订研究 .....	43
3.3.3	太钢袁家村铁矿 .....	44
3.3.4	山西岚县某赤铁矿 .....	46
3.4	微细嵌布赤铁矿石的选矿实例 .....	47
3.4.1	鞍钢关宝山铁矿 .....	47
3.4.2	河南舞阳铁山庙矿 .....	50
3.4.3	鞍钢齐大山贫赤铁矿 .....	53
3.4.4	东鞍山烧结厂 .....	56
	参考文献 .....	60
<b>第4章</b>	<b>菱铁矿石选矿 .....</b>	<b>62</b>
4.1	菱铁矿石的资源分布 .....	62
4.1.1	菱铁矿矿石性质 .....	62
4.1.2	我国菱铁矿资源状况 .....	63
4.1.3	国外菱铁矿资源状况 .....	64
4.2	菱铁矿石的选矿方法 .....	67
4.2.1	菱铁矿资源的性质与可选性 .....	67
4.2.2	菱铁矿的选矿工艺 .....	68
4.2.3	菱铁矿选矿研究的进展 .....	75
4.3	菱铁矿石的选矿试验 .....	75
4.3.1	菱铁矿磁化焙烧工艺条件试验研究 .....	76
4.3.2	湘潭钢铁菱铁矿焙烧分选试验 .....	82
4.3.3	威远菱铁矿焙烧分选试验 .....	85
4.3.4	贵州观音山菱铁矿焙烧分选试验 .....	85
4.4	菱铁矿石的选矿实例 .....	86
4.4.1	陕西柞水县大西沟菱铁矿 .....	86
4.4.2	昆钢王家滩菱铁矿 .....	94
4.4.3	国外菱铁矿生产实例 .....	97
	参考文献 .....	99
<b>第5章</b>	<b>褐铁矿石选矿 .....</b>	<b>101</b>
5.1	褐铁矿石的资源分布 .....	101

5.1.1	褐铁矿的矿石性质 .....	101
5.1.2	我国褐铁矿资源状况 .....	103
5.1.3	国外褐铁矿资源状况 .....	103
5.2	褐铁矿石的选矿方法 .....	104
5.2.1	褐铁矿资源特性与可选性 .....	104
5.2.2	常用选矿方法 .....	104
5.2.3	单一选别流程 .....	105
5.2.4	联合选别流程 .....	110
5.3	褐铁矿石的选矿试验 .....	113
5.3.1	广东某褐铁矿的试验研究 .....	113
5.3.2	山东威海某低品位褐铁矿的试验研究 .....	115
5.3.3	俄罗斯某褐铁矿的试验研究 .....	115
5.3.4	新疆某铁矿的试验研究 .....	115
5.4	褐铁矿石的选矿实例 .....	116
5.4.1	江西铁坑褐铁矿选厂 .....	116
5.4.2	云南化念铁矿 .....	120
5.4.3	广东大宝山铁矿选厂 .....	125
5.4.4	国外褐铁矿选厂实例 .....	130
	参考文献 .....	135
<b>第6章 多金属共生铁矿石选矿</b> .....		<b>137</b>
6.1	钒钛磁铁矿型 .....	137
6.1.1	矿石特点和资源分布 .....	137
6.1.2	选矿试验研究 .....	138
6.1.3	应用实例 .....	144
6.2	含稀土磁铁矿-赤铁矿型 .....	152
6.2.1	矿石特点和资源分布 .....	153
6.2.2	选矿试验研究 .....	155
6.2.3	应用实例 .....	158
6.3	含铜磁铁矿型 .....	164
6.3.1	矿石特点和资源分布 .....	164
6.3.2	选矿试验研究 .....	165
6.3.3	应用实例 .....	168
6.4	含硫化矿磁铁矿型 .....	181
6.4.1	矿石特点和资源分布 .....	181
6.4.2	选矿试验研究 .....	182
6.4.3	应用实例 .....	185

参考文献	192
<b>第7章 鲕状赤铁矿石选矿</b>	195
7.1 宣龙式鲕状赤铁矿	196
7.1.1 宣龙式鲕状赤铁矿矿石特点和资源分布	196
7.1.2 宣龙式鲕状赤铁矿选矿试验研究	197
7.2 宁乡式鲕状赤铁矿	202
7.2.1 宁乡式鲕状赤铁矿矿石特点和资源分布	202
7.2.2 宁乡式铁矿石中不同矿物的矿物学特性	205
7.2.3 宁乡式鲕状赤铁矿选矿试验研究	208
参考文献	234
<b>第8章 高磷铁矿石选矿</b>	236
8.1 铁矿石脱磷方法	237
8.2 鄂西高磷铁矿石	239
8.2.1 矿石特点和资源分布	239
8.2.2 选矿试验研究	241
8.2.3 应用实例	243
8.3 梅山高磷铁矿石	249
8.3.1 矿石特点和资源分布	249
8.3.2 选矿试验研究	251
8.3.3 应用实例	253
8.4 惠民高磷铁矿石	260
8.4.1 矿石特点和资源分布	260
8.4.2 选矿试验研究	261
8.5 北方低品位磷铁矿石	266
8.5.1 矿石特点和资源分布	266
8.5.2 选矿试验研究	267
8.5.3 应用实例	268
参考文献	274
<b>第9章 铁矿物浮选的交互影响研究</b>	276
9.1 矿物浮选交互影响的学术涵义	276
9.2 矿物浮选交互影响的方式	276
9.3 利用和消除矿物交互影响的方法	277
9.4 复杂铁矿石浮选体系中矿物交互影响的规律	283
9.4.1 二元体系中矿物间的交互影响	284
9.4.2 三元体系中矿物间的交互影响	288

9.5 消除复杂铁矿石浮选体系中矿物交互影响的方法 .....	290
9.6 矿物浮选交互影响的作用机理 .....	291
参考文献 .....	292
<b>第 10 章 复杂铁矿石的主要分选技术 .....</b>	<b>295</b>
10.1 分步浮选技术 .....	295
10.2 分散浮选技术 .....	300
10.2.1 含碳酸盐中矿的分散浮选 .....	300
10.2.2 含碳酸盐混合磁选精矿的分散浮选 .....	306
10.3 选择性磁团聚分选技术 .....	309
10.3.1 无外加磁场的磁团聚分选技术 .....	310
10.3.2 外加磁场的磁团聚分选技术 .....	315
10.4 选择性絮凝浮选技术 .....	320
10.5 磁化焙烧技术 .....	323
10.6 深度还原技术 .....	327
10.7 生物还原磁化选矿技术 .....	331
10.8 磁浮选技术 .....	331
参考文献 .....	333

## 难选铁矿石资源及类型

21 世纪以来,随着我国钢铁行业快速发展和钢铁产能的不断扩张,作为钢铁最重要的基础原料,铁矿石需求量迅速增大。最新数据显示,我国铁矿石年产量已从 2003 年的 2.6 亿吨增加到 2012 年的 13.1 亿吨,年均增量接近 20%。虽然国产铁矿产量稳步提升,但仍远远不能满足我国钢铁工业快速发展的需求。自 2000 年开始,我国铁矿石进口量开始以 25% 以上的增速大幅增长。据中国海关总署报告,2012 年我国铁矿石进口 7.44 亿吨,同比增长 8.4%,显示中国钢铁业对铁矿石的需求在 2012 年的强劲增长。2000~2012 年我国铁矿石进口量如图 1.1 所示;世界铁矿石出口量及我国铁矿石进口量占世界出口量的比例如图 1.2 和图 1.3 所示。由图 1.1 可以看出,我国铁矿石进口量除 2009 年受世界经济形势影响稍有回落以外其余年份均呈现强劲增长的势头。由图 1.3 可以看出,2000 年以来世界铁矿石出口量与我国铁矿石进口量占全球出口量的比例均逐渐上升且二者呈现明显的正相关关系,也就是说,世界铁矿石出口量的上升有很大一部分是由中国的进口造成的,中国已经成了名副其实的“吸铁石”<sup>[1]</sup>。

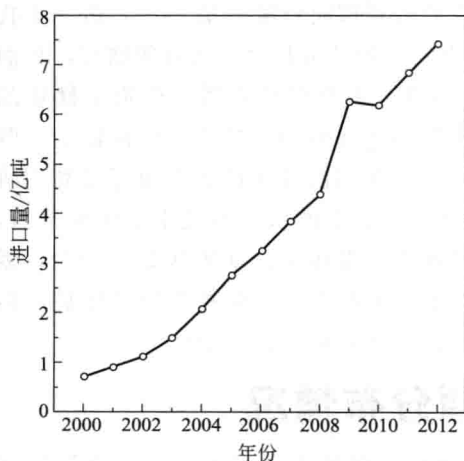


图 1.1 近年来我国铁矿石进口量

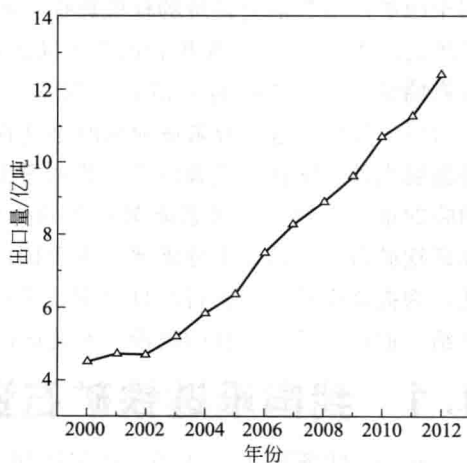


图 1.2 近年来世界铁矿石出口量

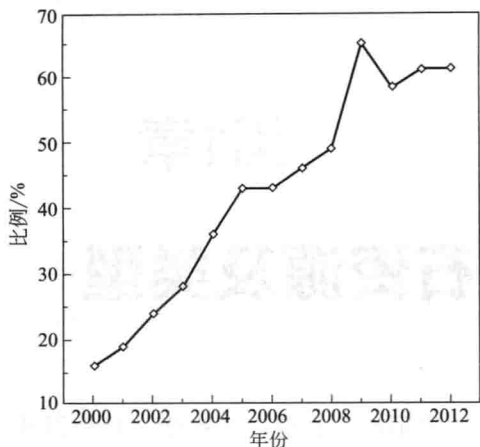


图 1.3 近年来我国铁矿石进口量占世界铁矿石出口量的比例

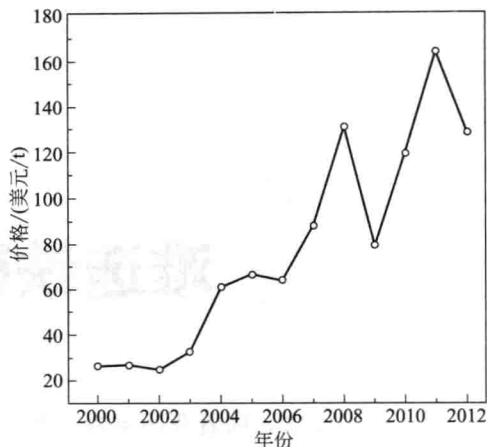


图 1.4 近年来我国进口铁矿石价格

近年来，国际市场上铁矿石的价格连年上涨，我国利用国外铁矿资源的成本在不断上升。2000~2012年我国进口铁矿石价格对比如图 1.4 所示。由图 1.4 可以看出，在全球铁矿石进出口形势的影响下，我国进口铁矿石价格整体呈现上升趋势，在 2011 年甚至达到了 163.8 美元/t 的历史最高位。由此可以看出，铁矿资源的供求矛盾已经成为制约我国钢铁工业发展的主要因素。同时，也是当前我国铁矿资源开发利用所面临的最为突出的问题，进一步提高我国铁矿石的自给率，加大对国内难选铁矿资源的利用率，保证钢铁企业生产原料供应，减少对国外铁矿石的依赖度，对抑制铁矿石价格上涨有重要意义<sup>[2]</sup>。

2010 年 3 月 19 日，国土资源部在北京召开全国铁矿勘查开采重大成果汇报会，会上报告了我国已拥有查明铁矿资源储量 624 亿吨，未探明资源量超过 200 亿吨，据全国矿产资源潜力评价的权威数据，我国铁矿资源探明程度不足 24%，进一步找矿潜力巨大。与 2006 年报告的全国铁矿资源查明资源储量相比，又有所增加，目前尚有储量达 332.3 亿吨未被开发利用的铁矿资源，占全部已查明铁矿资源储量的 54.2%。如何将这部分未被利用的难选铁矿资源储量变成现实的铁矿供应能力，既是缓解当前我国铁矿资源供求矛盾的重要举措，也是当前我国铁矿资源开发利用所面临的重要课题。从国家能源安全的战略角度看，矿石的供应不能主要依靠进口，保证铁矿石的自给率十分重要。由于国内的铁矿石资源中易选矿资源日趋减少，因此，为提高钢铁企业矿石的自给率，缓解进口铁矿石的压力，维持优质的铁矿原料供给，迫切要求以科技的进步来推动贫铁矿石资源的高效开发与利用<sup>[3]</sup>。

## 1.1 我国难选铁矿石资源分布情况

R. A. 威廉斯在 20 世纪 90 年代初就定性和定量地提出了矿石“难选”的概念，定义了 3 种类型的难选矿石<sup>[4]</sup>：“本质上难选”（由于复杂的矿物组成）、“经

济上难选”（由于为达到所要求的精矿品位而进行加工处理和对废物的处理过程带来的高成本）和“环保限制难选”（由于处理过程中受到使用化学物品的限制或所产生气相、固相或液相废物排放的限制）。

“贫”，一般按矿石需要选矿加工和不需要选矿加工来划分贫、富矿。能直接入炉冶炼而不需要选矿加工的铁矿石统称富矿，澳大利亚将富矿称为 DSO 矿（Direct Shipping Ore），一般 TFe 品位 62% 以下，需要选矿加工的铁矿石统称为贫矿，将边界品位  $< 20\%$  的磁铁矿，统称超贫磁铁矿<sup>[5]</sup>。我国可工业利用铁矿石指标见表 1.1。

表 1.1 我国可工业利用铁矿石指标

矿石类型	边界品位/%	工业品位/%
磁铁矿	TFe $\geq 20$ , MFe $\geq 15$	TFe $\geq 25$ , MFe $\geq 20$
赤铁矿	TFe $\geq 25$	TFe $\geq 28 \sim 30$
菱铁矿	TFe $\geq 20$	TFe $\geq 25$
褐铁矿	TFe $\geq 25$	TFe $\geq 30$

“细”，指的是有用矿物嵌布粒度细，通常将磨细到  $45 \sim 0 \mu\text{m}$  时铁矿物的单体解离度才能达到 90% 以上的赤铁矿和磨细到  $30 \sim 0 \mu\text{m}$  时铁矿物的单体解离度才能达到 90% 以上的磁铁矿称为微细粒铁矿。

“杂”，指的是矿石组分杂，金属矿物种类较多，矿石含杂质较多。我国多组分共（伴）生铁矿石储量占总储量的 1/3，典型矿床有攀枝花铁矿、白云鄂博铁矿、大冶铁矿等，共（伴）生组分有钒、钛、稀土、铜等。我国现行的勘查规范规定，圈定磁铁矿矿体、钒钛磁铁矿矿体及菱铁矿矿体的边界品位均为 TFe 20%，而圈定赤铁矿矿体、褐铁矿矿体和镜铁矿矿体的边界品位均为 TFe 25%。低于边界品位的铁矿都叫超贫铁矿。

我国上百亿吨菱铁矿、褐铁矿、微细粒矿及鲕状赤铁矿等复杂难选氧化铁矿石因开发利用技术水平限制而难以工业利用。应该说菱铁矿、褐铁矿、鲕状赤铁矿、矿石组分复杂的共（伴）生铁矿石、超微细粒嵌布矿（如湖南湘西南地区的江口式铁矿）均属于本质上难选的铁矿。而低品位矿、微细粒铁矿则属于经济上难选的范畴<sup>[6]</sup>。

目前已发现的铁矿物和含铁矿物 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、赤铁矿等弱磁性含铁矿石为较难选别的铁矿石，弱磁性铁矿物的物理化学性质如表 1.2 所示，其伴生的主要脉石矿物的物理化学性质如表 1.3 所示，我国各类难选铁矿石的储量如表 1.4 所示。

表 1.2 弱磁性铁矿物物理化学性质

种类	矿物	成分	含铁量 /%	密度 /(g/cm <sup>3</sup> )	比磁化系数 /(cm/g)	比导电度	莫氏硬度
无水 赤铁矿	赤铁矿	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	70.1	4.8~5.3	(40~200)×10 <sup>-6</sup>	2.23	5.5~6.5
	镜铁矿	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	70.1	4.8~5.3	(200~300)×10 <sup>-6</sup>		5.5~6.5
	假象赤铁矿	nFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·mFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (n<m)	约 70	4.8~5.3	(500~1000)×10 <sup>-6</sup>		
含水 赤铁矿	水赤铁矿	2Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·H <sub>2</sub> O	66.1	4.0~5.0	(20~80)×10 <sup>-6</sup>	3.06	1~5.5
	针铁矿	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·H <sub>2</sub> O	62.9	4.0~4.5			
	水针铁矿	3Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·4H <sub>2</sub> O	60.9	3.0~4.4			
	褐铁矿	2Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O	60	3.0~4.2			
	黄针铁矿	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2H <sub>2</sub> O	57.2	3.0~4.0			
	黄赫石	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O	52.2	2.5~4.0			
菱铁矿		FeCO <sub>3</sub>	48.2	3.8~3.9	(40~100)×10 <sup>-6</sup>	2.56	3.5~4.5

表 1.3 弱磁性铁矿石主要伴生脉石矿物的物理化学性质

矿物	成分	含铁量 /%	密度 /(g/cm <sup>3</sup> )	比磁化系数 /(cm/g)	比导电度	莫氏硬度
石英	SiO <sub>2</sub>		2.65	10×10 <sup>-6</sup>	3~3.5	7
黑云母	(H,K)(Mg,Fe) <sub>3</sub> [AlSi <sub>2</sub> O <sub>10</sub> ](OH,F) <sub>2</sub>	约 20	2.71~3.1	40×10 <sup>-6</sup>	1.73	2.5~3.0
石榴子石	(Ca,Mg,Fe,Mn) <sub>3</sub> (Al,Fe,Mn,Cr,Ti) <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	约 22	3.4~4.3	63×10 <sup>-6</sup>	6.48	6.5~7.0
辉石	Ca(Mg,Fe,Al)[(Si,Al) <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ]	约 41	3.2~3.6		2.17	5~6
角闪石	(Ca,Mg,Al,Fe,Mn,Na <sub>2</sub> ,K <sub>2</sub> )	约 24	2.9~3.4		2.51	5~6
阳起石	Ca <sub>2</sub> (Mg,Fe) <sub>3</sub> [Si <sub>4</sub> O <sub>11</sub> ] <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub>	约 28.8	3~3.2			5~6
绿帘石	Ca <sub>2</sub> (Al,Fe)Al <sub>2</sub> [SiO <sub>4</sub> ][Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ]O(OH)	约 15	3.25~3.45			6~7
橄榄石	(Mg,Fe) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	约 44.5	3.3		3.28	6.5~7
方解石	CaCO <sub>3</sub>		2.7		3.9	3
白云石	(Ca,Mg)CO <sub>3</sub>		2.8~2.9		2.95	3.5~4
磷灰石	Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (F,Cl,OH)		3.2	18×10 <sup>-6</sup>	4.18	5

表 1.4 我国各类难选铁矿石的储量

矿石类型	累计探明		保有		采出		利用率/%
	/亿吨	/%	/亿吨	/%	/亿吨	/%	
赤铁矿	95.93	72.55	89.91	72.10	6.02	79.98	6.27
菱铁矿	18.35	13.88	18.25	14.64	0.10	1.33	0.54
褐铁矿	12.30	9.30	10.90	8.74	1.40	18.60	11.38
镜铁矿	5.65	4.27	5.64	4.52	0.007	0.09	0.12
合计	132.23	100.00	124.70	100.00	7.527	100.00	5.69

中国铁矿石类型多样, 主要类型及比例为: 磁铁矿型 55.40%, 赤铁矿型 18.10%, 菱铁矿型 14.40%, 钒钛磁铁矿型 5.30%, 镜铁矿型 3.40%, 褐铁矿型 1.10%, 混合型 2.30%。中国铁矿石的共(伴)生组分多, 物质成分复杂。据统计, 全国已勘探的 2034 处铁矿产地中, 呈单一铁矿床的 1588 处, 以铁为主的 280 处, 共(伴)生铁矿床 166 处。多组分铁矿石常伴生有钒、钛、稀土、铌、铜、锡、钼、铅、锌、钴、金、铀、硼和硫、砷等元素。

## 1.2 我国难选铁矿石类型

我国铁矿石类型主要包括鞍山式铁矿、大冶式铁矿、镜铁山式铁矿、大西沟式铁矿、攀枝花式铁矿、宁芜式铁矿、宣龙-宁乡式铁矿、风化淋滤型铁矿、包头白云鄂博式铁矿、海南石碌铁矿、吉林羚羊铁矿石等。除鞍山式铁矿和大冶式铁矿相对易选之外, 其他几类铁矿都属于难选铁矿石, 另外鞍山市铁矿石中微细粒嵌布的赤铁矿和磁铁矿也属于较为难选的铁矿石。目前我国低品位难选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。

### 1.2.1 微细粒嵌布的磁铁矿

磁铁矿,  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$  或  $\text{Fe}^{3+}[\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}]\text{O}_4$ , 理论组成:  $\text{FeO}$  31.04%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  68.96%。呈类质同象替代  $\text{Fe}^{3+}$  的有  $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Ti}^{4+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$ 、 $\text{V}^{3+}$  等; 替代  $\text{Fe}^{2+}$  的有  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{CO}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Ge}^{2+}$  等。当  $\text{Ti}^{4+}$  替代  $\text{Fe}^{3+}$  时, 其中  $\text{TiO}_2 < 25\%$  者称为含钛磁铁矿,  $\text{TiO}_2 > 25\%$  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<sup>[7]</sup>。

磁铁矿为等轴晶系,  $O_h^-Fm\bar{3}m$ ;  $a_0 = 0.8396\text{nm}$ ;  $Z = 8$ 。反尖晶石型结构, 即  $1/2$  的  $\text{Fe}^{3+}$  和全部  $\text{Fe}^{2+}$  占据八面体位置, 另  $1/2$  的  $\text{Fe}^{3+}$  占据四面体位置, 如图 1.5 所示。晶格常数  $a_0$  随  $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  替代量的增大而减小, 随  $\text{Ti}^{4+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  的替代量增高而增大。

磁铁矿为八面体晶形, 黑色, 条痕亦黑色, 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, 莫氏硬度 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。

目前, 我国最大量入选的矿石为鞍山式沉积变质铁矿石, 但其中有部分矿石由于嵌布粒度微细, 矿物组成复杂尚未得到有效的开发利用。这类矿石由于磁铁矿结晶粒度小于 0.037mm 的占 90% 而造成单体解离和分选困难。此外, 铁矿物与含铁硅酸盐脉石矿物的物理化学性质相近, 也造成分选困难, 使其尚无法在工业上大规模利用。该类矿石主要有本钢贾家堡子磁铁矿矿石(储量约 1.5 亿吨)、鞍山谷首峪铁矿、河南舞阳矿业公司铁古坑铁矿等。目前除本钢贾家堡子磁铁矿

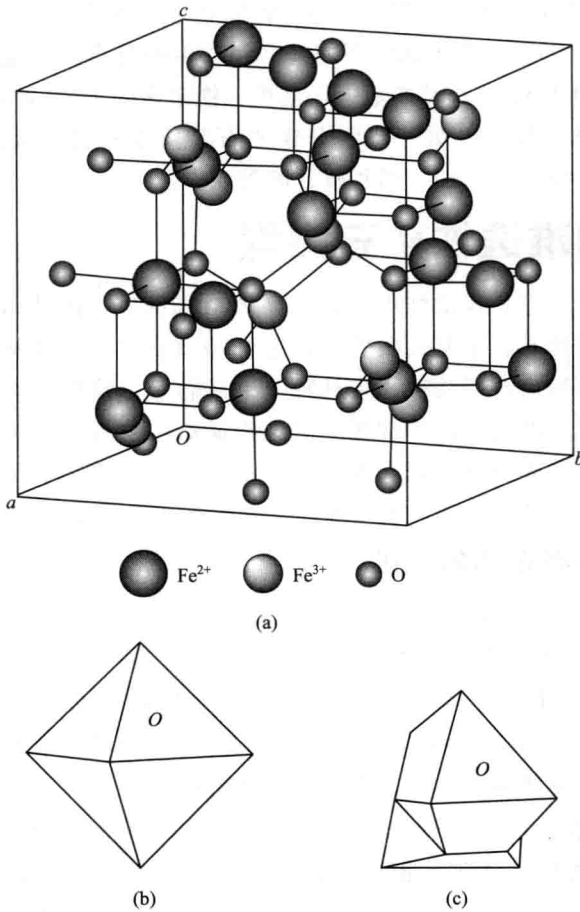


图 1.5 磁铁矿的结构 (a) 与晶形 (b)、(c)

矿石尚未开发利用外，国内学者针对其他几座矿山矿石展开了一定程度的选矿试验研究<sup>[8]</sup>。

### (1) 谷首峪铁矿

鞍钢谷首峪铁矿为微细嵌布的贫磁铁矿，全铁品位为 31.90%，96.14%的铁分布在磁铁矿中，还有一部分以菱铁矿、硅酸铁和假象、半假象赤铁矿形式存在。其化学成分分析结果和铁物相分析结果分别见表 1.5 和表 1.6。

表 1.5 谷首峪铁矿石的化学成分分析结果

成分	TFe	FeO	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	S	P	Ig
含量/%	31.90	16.78	44.82	2.02	2.48	1.02	0.14	0.086	0.046	3.10

注：Ig 表示灼烧减量，全书同。

表 1.6 谷首峪铁矿石的铁物相分析结果

铁物相	TFe	磁性铁	碳酸铁	硅酸铁	假象、半假象赤铁矿
含量/%	31.90	26.70	2.05	3.00	0.15
分布率/%	100.00	96.14	2.00	1.39	0.47

## (2) 铁古坑铁矿

河南舞阳矿业公司铁古坑铁矿主要铁矿物为磁铁矿，其次为硅酸铁和少量赤铁矿，脉石矿物为碧玉、辉石，与磁铁矿的分离较为困难。由于近年来矿石贫化率的增加，入选矿石原矿品位降至 20% 左右。因此，舞阳矿业公司提出了低品位难选磁铁矿的高效节能技术，提出了“多段干式预选-多碎少磨-细筛-磁团聚提质-尾矿中磁扫选”的技术路线，特别加强了原矿破碎流程中的预选，抛弃废石，恢复了矿石地质品位，提高了整个选矿厂的处理能力。

### 1.2.2 微细粒嵌布的鞍山式赤铁矿

赤铁矿，分子式  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ，同质多象变体： $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ，三方晶系，刚玉型结构，在自然界中稳定，称赤铁矿； $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ，等轴晶系，尖晶石型结构，在自然界呈亚稳态，称磁赤铁矿。化学组成：Fe 69.94%，O 30.06%。常含类质同象替代的 Ti、Al、Mn、Fe、Ca、Mg 及少量的 Ga、Co。常含金红石、钛铁矿微包裹体。隐晶质致密块体中常有机混入物  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。纤维状或土状者含水。根据成分可划分出钛赤铁矿、铝赤铁矿、镁赤铁矿、水赤铁矿等变种<sup>[9,10]</sup>。

我国微细粒嵌布的鞍山式赤铁矿石储量大，有近 30 亿吨，这一类型矿石以太钢袁家村铁矿、昆钢惠民矿、湖南祁东为代表，这类矿石由于嵌布粒度太细（小于 0.037 mm 的占 90%），故单体分离困难，分选较难。

#### (1) 太钢袁家村铁矿

太钢袁家村铁矿属大型铁矿床，保有储量有 13 多亿吨。矿床中矿石有多种类型，主要可分为氧化铁矿石和原生铁矿石。氧化铁矿石又可分为石英型、镜（赤）铁矿型、闪石型和砾岩型；原生铁矿石又可分为石英型和闪石型。每种矿石依据铁品位的不同，还有贫铁矿石和次贫铁矿石之分。由于袁家村铁矿石类型较多，结构、构造复杂，各种矿物嵌布粒度微细，给选矿造成很大难度，致使到目前为止尚未全面开发利用。石英型氧化铁矿石和闪石型氧化铁矿石的多元素分析结果和铁物相分析结果分别见表 1.7~表 1.10。

表 1.7 石英型氧化铁矿石多元素分析结果

成分	TFe	SFe	FeO	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	CaO
含量/%	32.70	32.68	1.48	49.23	0.80	0.85
成分	MgO	S	P	MnO	$\text{TiO}_2$	Ig
含量/%	0.36	0.021	0.040	0.154	0.033	1.63