

复杂难选铁矿石 深度还原—磁选分离原理与技术

李艳军 高鹏 魏国 等◎编著



科学出版社

复杂难选铁矿石深度还原- 磁选分离原理与技术

李艳军 高 鹏 魏 国 等 编著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以复杂难选铁矿资源的高效开发利用为基本出发点,系统介绍了我国复杂难选铁矿资源及开发利用现状,重点论述了复杂难选矿石深度还原-磁选的基本概念、基本原理及工艺特点,对深度还原-磁选工艺、装备及产品处理和应用也进行了详细的介绍;最后介绍了几种典型的复杂难选铁矿石深度还原-磁选工艺研究与实践情况。

本书可供从事矿物加工和冶金工程等领域的技术人员参考,也可作为高等院校相关专业本科生、研究生和教师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

复杂难选铁矿石深度还原-磁选分离原理与技术/李艳军,高鹏,魏国等编著. —北京:科学出版社,2015. 10

ISBN 978-7-03-045934-3

I. ①复… II. ①李… ②高… ③魏… III. ①铁矿物-磁力选矿
IV. ①TD 951. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 240199 号

责任编辑:张 析 / 责任校对:何艳萍
责任印制:肖 兴 / 封面设计:东方人华

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 10 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 10 月第一次印刷 印张:16

字数:380 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

我国铁矿资源总储量超过 700 亿 t,但复杂难选,甚至目前尚无适宜工艺分选的铁矿资源超过 200 亿 t,如湖南、湖北及河北省境内的鲕状赤铁矿、辽宁凌源的微细粒铁矿石等。采用创新工艺实施复杂难选铁矿资源的开发与利用具有重要的战略意义。

近年来,东北大学针对复杂难选铁矿资源的高效开发与利用开展了大量的基础研究和科技开发工作,先后获得国家自然科学基金重点及面上项目、科技部科技支撑和“863”计划项目的支持,经过系统的基础理论与实践探索,形成了复杂难选铁矿石的深度还原-磁选技术,为我国复杂难选铁矿石的高效开发与利用开辟了新途径。深度还原是指将不能直接作为高炉原料的复杂难选铁矿石在比磁化焙烧更高的温度和更强的还原气氛下,使铁矿石中的铁矿物还原为金属铁,并使金属铁生长为一定粒度铁颗粒的过程,然后通过磁选分离获得可作为炼钢原料的深度还原铁粉产品。采用深度还原-磁选技术可以使复杂难选铁矿石得到有效的利用,同时因采用非焦煤作为还原剂可减少钢铁工业对焦煤资源的依赖。深度还原-磁选工艺获得的磁性产品为铁品位大于 85%、回收率大于 90%的金属铁粉,该金属铁粉经适当处理后可以代替废钢直接用于炼钢。

本书共分为六章,第一章系统介绍我国复杂难选铁矿石的资源及开发概况,论述复杂难选铁矿石深度还原-磁选分离技术的特点;第二章系统地论述深度还原-磁选分离技术的基本原理;第三章介绍复杂难选铁矿石深度还原工艺装备;第四章介绍还原物料分选工艺与装备;第五章介绍深度还原-磁选分离产品的处理及应用;第六章介绍典型难选铁矿石深度还原-磁选分离技术的研究与生产实例。

本书由东北大学李艳军、魏国、高鹏、刘杰、赵庆杰等共同编著。第一章由李艳军撰写;第二章和第三章由魏国撰写;第四章由刘杰撰写;第五章由李艳军撰写;第六章由高鹏、吕振福撰写。东北大学韩跃新和赵庆杰两位教授对全书的撰写给予了指导,李文博对书中的图表进行了完善,李艳军负责统一校阅和定稿。

由于编著者水平所限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2015 年 6 月于沈阳

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 我国复杂难选铁矿石资源概况	1
第二节 我国复杂难选铁矿石资源开发利用状况	3
一、鲕状赤铁矿	3
二、褐铁矿	6
三、含菱铁矿铁矿石	8
四、吉林羚羊铁矿石	13
五、白云鄂博氧化矿石	14
第三节 复杂难选铁矿石选矿药剂开发现状	17
第四节 复杂难选铁矿石选矿设备开发现状	17
第五节 难选铁矿石深度还原-磁选分离技术	18
第二章 深度还原-磁选分离技术的基本原理	20
第一节 复杂难选铁矿石深度还原-磁选分离技术	20
一、难选铁矿石深度还原-磁选分离技术的描述	20
二、难选铁矿深度还原-磁选分离技术工艺的原则流程	21
三、难选铁矿石深度还原-磁选分离技术的特点	21
第二节 难选铁矿石深度还原的基本原理	22
一、还原热力学基础	22
二、铁氧化物结构	29
三、铁氧化物的分解	31
四、铁氧化物的还原	34
五、铁氧化物还原速率	48
六、影响铁矿石还原的因素	51
七、碳的沉析	57
第三节 难选铁矿深度还原过程中的燃烧反应	58
一、 H_2 的燃烧反应	59
二、CO的燃烧反应	61
三、甲烷的燃烧反应	61
四、碳的燃烧反应	63
五、煤粒的燃烧	65
第四节 铁矿物还原产物聚合的基本原理	68
一、物质结晶基本原理	68

二、金属铁的聚合、结晶条件及控制	69
第五节 难选铁矿石深度还原后物料磁选分离基本原理	70
一、磁选的物理基础	70
二、磁性颗粒在非均匀磁场中所受的磁力	77
三、磁选过程所需要的磁力	79
四、磁化焙烧的原理和分类	83
五、物料的磁性对磁选过程的影响	86
第六节 深度还原-磁选分离技术中的常用术语	88
第三章 复杂难选铁矿石深度还原工艺装备	90
第一节 复杂难选铁矿石深度还原对工艺装备的基本要求	90
第二节 转底炉	91
第三节 车底炉、往复式车底炉(并行直底炉/PSH)	92
一、车底炉、并行直底炉(PSH)试验效果与分析	95
二、往复式车底炉机组的还原工艺过程	99
三、高温高料层-往复式车底炉工艺的技术特点	100
第四节 回转窑	100
一、传统的回转窑	100
二、深度还原回转窑	101
三、复杂难选铁矿石深度还原-高效分离技术工艺流程	102
四、深度还原回转窑内还原过程及控制	103
第四章 还原物料分选工艺与装备	114
第一节 还原物料的分选工艺	114
一、一段磨矿-磁选流程	114
二、预选-阶段磨矿-阶段磁选流程	114
三、阶段磨矿-重磁联合分选流程	115
四、阶段磨矿-中矿返回分选流程	115
第二节 复杂难选铁矿石深度还原后物料破碎装备	116
一、辊式破碎机	116
二、选择性破碎机	118
三、高压辊磨机	118
第三节 深度还原产品磨矿装备	119
一、球磨机	119
二、棒磨机	124
三、搅拌磨	126
四、离心磨	127
五、磨碎过程的影响因素	127
六、磨碎设备的生产率计算	131

第四节 深度还原产品分选装备	133
一、永磁筒式磁选机	133
二、磁滑轮(磁滚筒)	136
三、磁力脱水槽	138
四、磁团聚重力选矿机	140
五、磁选柱	141
第五章 深度还原-磁选分离产品的处理及应用	143
第一节 深度还原-磁选分离精矿产品特性	143
第二节 深度还原铁粉压块	144
一、压块黏结剂	144
二、铁粉添加黏结剂的压块工艺	146
第三节 深度还原铁粉的其他应用方法	147
一、深度还原铁粉用直接喷吹进入金属熔池方法应用	147
二、深度还原铁粉加入轻薄料打包料中心打包	147
三、直接加入炉料空隙	147
四、深度还原铁粉熔化、排渣、脱硫、脱磷预处理	147
第六章 典型难选铁矿石深度还原-磁选分离技术的研究与生产实例	149
第一节 深度还原试验方法	149
一、深度还原原料的制备	149
二、配碳系数的计算	149
三、深度还原的装备	150
四、深度还原试验	150
五、分选试验	152
第二节 吉林羚羊铁矿石深度还原-磁选分离技术研究	152
一、吉林羚羊铁矿石开发利用概况	152
二、吉林羚羊铁矿石的特性	153
三、吉林羚羊铁矿石深度还原试验研究	157
四、吉林羚羊铁矿石深度还原单因素条件试验研究	160
五、吉林羚羊铁矿石深度还原试验研究	162
六、吉林羚羊铁矿石扩大试验研究	169
七、小结	187
第三节 白云鄂博铁矿石深度还原-磁选分离技术研究	188
一、试验原料及设备	188
二、不同因素对还原指标的影响	190
三、白云鄂博氧化铁矿石深度还原物料分选试验研究	205
第四节 凌源鲕状赤铁矿深度还原-磁选分离技术研究	216
一、工艺矿物学研究	216

二、深度还原试验研究	226
三、还原产品磁选试验研究	236
四、深度还原煤耗及与其他工艺铁回收率比较	241
参考文献	247

第一章 绪 论

第一节 我国复杂难选铁矿石资源概况

在众多的矿产资源中,铁矿资源无疑是最为重要的战略资源,是钢铁工业的命脉。世界铁矿资源丰富,分布特点为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,如苏联地区、美国、加拿大、中国等。我国铁矿石富矿少、贫矿多,97%以上为34%以下的低品位铁矿石。国土资源部的资料显示,全国铁矿石平均品位仅有31.95%,比世界平均品位低11%。同时我国铁矿石组成成分复杂,多组分、共生、伴生铁矿储量比例高(邵安林,2012)。

由于我国优质铁矿资源匮乏、复杂难选铁矿石利用率低以及国内铁矿生产企业产能瓶颈等一系列重大战略问题,国内铁矿石市场呈现严重的供不应求状态,国内多数大型钢铁企业不得不大量进口澳大利亚、巴西、印度等国的铁矿石。

近年来,我国铁矿石对外依存度持续升高,集中度也不断提高。数据显示,我国铁矿石需求增长促使进口铁矿石数量在14年间增长了8.3倍,对外依存度从2001年的39.7%升高到2014年的78.5%。事实证明,进口铁矿石已呈现无法取代并有继续增加的趋势。而近几年,来自巴西和澳大利亚的铁矿石占中国进口总量的比例一直保持上升的趋势,其中2014年所占比例为77%,达到近14年来的最高值,供应来源集中度不断提高。进口铁矿石数量的增加直接导致我国铁矿石进口成本的大幅增加,这不仅对我国钢铁产业造成了严重影响,还对我国国民经济的健康持续发展构成了巨大威胁。因此从战略的角度看,加强复杂难选铁矿石综合利用技术研究,建设一批新的大型铁矿资源基地,增加我国铁矿石的自给能力,具有重要的经济意义和社会意义。

我国复杂难选铁矿石的种类较多,目前已发现的铁矿物和含铁矿物有300余种,其中常见的有170余种。但在目前的技术条件下,具有工业利用价值的主要是磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿和菱铁矿,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,弱磁性铁矿物的物理化学性质见表1.1,其伴生的主要脉石矿物的物理化学性质见表1.2。我国各类难选铁矿石的储量见表1.3(王运敏,2008)。

表 1.1 弱磁性铁矿物物理化学性质

种类	矿物名称	成分	含铁量 /%	密度 /(g·cm ⁻³)	比磁化系数 /(cm ³ ·g ⁻¹)	比导电度	莫氏硬度
无水赤铁矿	赤铁矿	Fe ₂ O ₃	70.1	4.8~5.3	(40~200)×10 ⁻⁶	2.23	5.5~6.5
	镜铁矿	Fe ₂ O ₃	70.1	4.8~5.3	(200~300)×10 ⁻⁶		5.5~6.5
	假象赤铁矿	Fe ₂ O ₃	70.0	4.8~5.3	(500~1000)×10 ⁻⁶		
	水赤铁矿	2Fe ₂ O ₃ ·H ₂ O	66.1	4.0~5.0	(20~80)×10 ⁻⁶	3.06	1~5.5
含水赤铁矿	针铁矿	Fe ₂ O ₃ ·H ₂ O	62.9	4.0~4.5			
	水针铁矿	3Fe ₂ O ₃ ·4H ₂ O	60.9	3.0~4.4			
	褐铁矿	2Fe ₂ O ₃ ·3H ₂ O	60.0	3.0~4.2			
	黄针铁矿	Fe ₂ O ₃ ·2H ₂ O	57.2	3.0~4.0			
	黄赫石	Fe ₂ O ₃ ·3H ₂ O	52.2	2.5~4.0			
	菱铁矿	FeCO ₃	48.2	3.8~3.9	(40~100)×10 ⁻⁶	2.56	3.5~4.5

表 1.2 脉石矿物的物理化学性质

矿物名称	成分	含铁量 /%	密度 /(g·cm ⁻³)	比磁化系数 /(cm ³ ·g ⁻¹)	比导电度	莫氏硬度
石英	SiO ₂		2.65	10×10 ⁻⁶	3.0~3.5	7
黑云母	K(Mg,Fe) ₃	20.00	2.71~3.1	40×10 ⁻⁶	1.73	2.5~3.0
	[AlSi ₂ O ₁₀](OH,F) ₂					
石榴子石	(Ca,Mg,Fe,Mn) ₃	22.00	3.4~4.3	63×10 ⁻⁶	6.48	6.5~7.0
	(Al,Fe,Mn,Cr,Ti) ₂ (SiO ₄) ₃					
辉石	Ca(Mg,Fe,Al) ₂ [(Si,Al) ₂ O ₆]	41.00	3.2~3.6		2.17	5~6
角闪石	(Ca,Mg,Al,Fe,Mn,Na ₂ ,K ₂)SiO ₃	24.00	2.9~3.4		2.51	5~6
阳起石	Ca ₂ (Mg,Fe) ₃ [Si ₄ O ₁₁] ₂ (OH) ₂	28.80	33.2			5~6
绿帘石	Ca ₂ (Al,Fe)Al ₂ [SiO ₄][Si ₂ O ₇]O(OH)	15.00	3.25~3.45			6~7
橄榄石	(Mg,Fe) ₂ SiO ₄	44.50	3.3		3.28	6.5~7
方解石	CaCO ₃		2.7		3.90	3
白云石	(Ca,Mg)CO ₃		2.8~2.9		2.95	3.5~4
磷灰石	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F,Cl,OH)		3.2	18×10 ⁻⁶	4.18	5

表 1.3 我国各类难选铁矿石的储量

矿石类型	累计探明储量		保有储量		采出储量		利用率/%
	亿 t	%	亿 t	%	亿 t	%	
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	0.55
褐铁矿	12.30	9.30	10.90	8.74	1.40	18.60	11.39
镜铁矿	5.63	4.27	5.64	4.52	0.007	0.09	0.12
合计	132.21	100.00	124.7	100.00	7.527	100.00	18.33

从表 1.3 看出菱铁矿储量占难选矿总储量比例达到 13.88%，但利用率较低，只有 0.55%。

第二节 我国复杂难选铁矿石资源开发利用状况

一、鲕状赤铁矿

鲕状赤铁矿是我国储量最大的难选铁矿石，占我国铁矿资源的 1/9 左右，以其结构呈鲕粒状而得名。鲕状赤铁矿常形成大型铁矿，如我国北方的宣龙式铁矿、南方的宁乡式铁矿，在已探明的超过 100 亿 t(以金属铁计)的难选铁矿资源中，鲕状赤铁矿所占的比例最大。宁乡式铁矿是我国分布最广、储量最多的沉积型鲕状赤铁矿矿床，广泛分布于湖南、湖北、江西、四川、云南、贵州、广西及甘肃南部地区，现已探明该类铁矿在我国储量达 37 亿 t(含表外矿)，占全国沉积铁矿储量的 70% 以上，其中鄂西鲕状赤铁矿储量约 22 亿 t。国内 14 个主要矿区的矿物组成见表 1.4(刘亚川,2012)。

表 1.4 14 个矿区的矿物成分表

矿区	矿物组成
六市	菱铁矿 58.86%，磁铁矿 27.18%，赤铁矿 12.29%，黄铁矿 1.47%，绿泥石、石英、碳酸盐少量
官店	赤铁矿 58%，石英 24%，胶磷矿 7%，方解石 6%，白云石 2%，绿泥石 2%，其他 1%
十八格	赤铁矿 69%~79%，鲕绿泥石 2%~3%，石英 5%~7%，泥质物 20%
火烧坪	赤铁矿 65%，方解石 13.16%，白云石 12.15%，胶磷矿 5.33%，石英 3.47%，其他 0.44%
海洋	铁白云石 31%，鲕绿泥石 35%，菱铁矿 20%，绿泥石 3%，赤铁矿 2%，磁铁矿 2.5%，菱铁矿 2%，胶磷矿及细晶磷灰石 3%，石英 1%，电气石、锆石<1%
大石桥	铁矿物 36.1%，菱铁矿 0.6%，磷矿物 2.9%，碳酸盐 32.9%，绿泥石 18%，石英 6.5%，黏土矿物 3%
松木坪	赤铁矿 80%~90%，胶磷矿 5%，石英 3%，玉髓 5%~7%，海绿石、鲕绿泥石少见，碳酸盐少见
阮家河	砂质鲕状赤铁矿：赤铁矿 45%~50%，绿泥石 20%，石英 30%，褐铁矿 15%~20% 菱铁矿质鲕绿泥石矿石：褐铁矿 50%~80%，石英 5%~40%，硬锰矿 10%~15%，绿泥石 10%
碧鸡山	47F 样：赤铁矿 25%~30%，菱铁矿 15%~17%，磁铁矿 5%~8%，褐铁矿 10%~15%，石英 8%~16%，绿泥石 26%~30% 48F 样：赤铁矿 25%~30%，菱铁矿 21%~24%，磁铁矿<1%，褐铁矿 8%~9%，石英 26%~30%，绿泥石 33%~35%
鱼子甸	赤铁矿 60%~70%，菱铁矿 20%~50%，鲕绿泥石 5%(混合矿石中 30%~50%)，褐铁矿、磁铁矿、菱铁矿 0%~5%(局部 5%~10%)，石英 5%~10%，黏土矿物、水云母、方解石、白云石 5%~10%
菜园子	赤铁矿型矿石：赤铁矿 50%~80%，菱铁矿 10%~30%，褐铁矿 0%~8%，鲕绿泥石 1%~5%，绿泥石 5%，黏土 2%，石英 1%~5%，白云石 0.2%，方解石 0.2%，有机质 0.6%，黄铁矿 1% 菱铁矿型矿石：赤铁矿 5%~15%，菱铁矿 40%~66%，褐铁矿 0%~7%，鲕绿泥石 5%~40%，绿泥石 5%~30%，黏土 0.27%，石英 1%~10%，白云石 0%~5%，方解石 0%~8%，有机质 0%~8%，黄铁矿 0.2%~3%

续表

矿区	矿物组成
杨家坊	赤铁矿 65%，石英 34%，泥质物、绿泥石 1%
利泌溪	块状赤铁矿：赤铁矿 30%~55%，褐铁矿 5%~20%，黏土 20%~30%，石英 1%~2%，绿泥石 5%~10% 角砾状赤铁矿矿石：赤铁矿 50%~60%，褐铁矿 0%~20%，黏土 25%~35%，石英 3%，绿泥石 15%
乌石山	赤铁矿 64.8%，褐铁矿 26%，绿泥石 5%，石英 0.2%，方解石 4%

(一) 宁乡式铁矿资源特性

1. 矿石性质

矿石中金属矿物主要有赤铁矿、菱铁矿、褐铁矿等；非金属矿物主要有石英、绿泥石、胶磷矿和黏土矿物等。含铁品位一般为 30%~45%，含磷通常偏高，介于 0.4%~1.1% 之间，有的甚至更高，磷的含量通常与矿床所在的地理位置有关。由于鲕状赤铁矿嵌布粒度极细，且常与菱铁矿、褐铁矿、鲕绿泥石、黏土和含磷矿物共生、胶结或相互包裹，因此采用常规选矿方法很难达到富铁低磷的指标，所以宁乡式鲕状赤铁矿也被公认为最难选的铁矿石类型之一。由于“铁贫难富，高磷难降”，我国宁乡式铁矿至今尚未大规模工业开发利用，特别是鄂西高磷鲕状赤铁矿石。

2. 不同矿区性质差异及利用分析

现已探明储量的 37 亿 t 宁乡式铁矿，不同地区矿石性质差异较大，矿物组成也不相同。根据姚敬勋提供的宁乡式铁矿 14 个主要矿区矿物组成分析可以看出(表 1.4)，宁乡式铁矿属于低硫高磷贫铁矿石。根据矿区矿物组成的不同，如六市矿区铁矿中磁铁矿含量较高，碧鸡山矿区菱铁矿含量较高，阮家河矿区褐铁矿含量相对较多，官店和十八格则为典型的宁乡式铁矿，海洋矿区主要是铁白云石等，认为宁乡式铁矿基本可以归纳为磁铁矿型矿石、赤铁矿型高磷酸性矿石、赤铁矿型低磷矿石、菱铁矿型矿石、褐铁矿型矿石、铁白云石型矿石以及碱性自熔性矿石 7 种工艺类型。针对不同工艺类型，结合矿区矿石具体性质，研究适合其资源特性的选冶工艺技术，是整体开发利用我国宁乡式铁矿资源的正确途径。

(二) 宁乡式铁矿利用技术的发展

1. 我国宁乡式铁矿开发利用历史进程

早在 1959 年原冶金部钢铁研究所用长阳火烧坪铁矿的样品在重庆钢铁公司 2 号高炉炼铁、用转炉炼钢获得成功，实现利用原矿、不经选矿和烧结等流程，直接入高炉炼得高磷生铁(含磷 2.1%)，在转炉中炼钢脱磷获得钢渣和钢渣磷肥。20 世纪 60 年代，原冶金部在宜昌成立了鄂西铁矿厂筹备处，准备开发宜昌官店铁矿，还专门修建了到矿区的铁路专用线(鸦官铁路)。90 年代，原国家计划委员会批准了由宜昌八一钢厂筹建鄂西宁乡式高磷铁矿开发利用工业性实验基地的可行性研究报告。项目设计年产高磷生铁 6.4 万 t，钢锭 6 万 t，钢渣磷肥 1 万 t。但最终由于设备缺乏、指标不理想、成本较高等原因，项目均

未能实施。目前,国内部分钢铁企业仅将鄂西铁矿作为钢铁冶炼配矿使用。

2. 我国宁乡式铁矿技术发展

针对宁乡式铁矿提铁降磷,实验室研究较多的工艺有磁化焙烧-磁选-反浮选,重选脱泥-反浮选、直接还原-磁选、解胶浸矿等。其中磁化焙烧-磁选-反浮选和脱泥-反浮选是比较有发展前景的工艺。

1) 磁化焙烧-磁选-反浮选工艺

磁化焙烧技术是采用磁化焙烧的方式改变鲕状赤铁矿的磁性,将赤铁矿转变为磁铁矿,为选别创造条件。磁化焙烧工艺能简化选别流程,获得较高的铁精矿品位和回收率指标,具有焙烧精矿易于烧结、易于脱水和过滤等优点。但磁化焙烧基建投资和生产费用较高,为此,研发新型焙烧设备,节能降耗,是该工艺工业化应用的前提。

长沙矿冶研究院以余永富院士为首的科研团队,经过多年潜心研究,开发出新型多级悬浮预热器和闪速反应炉等具有自主知识产权的装置,形成了闪速磁化焙烧技术。闪速磁化焙烧具有工艺参数操作范围较宽、控制方便、单位产能高、矿石还原速率快、时间短、能耗低等优点,能在数秒或数十秒内完成,是处理 1 mm 以下粉矿的理想工艺。“磁化焙烧-磁选-反浮选”工艺过程是,原矿经闪速炉磁化焙烧后,采用弱磁选获得粗精矿,然后采用反浮选脱磷脱硅,进一步提高精矿品质,其最佳试验指标为:最终磨矿细度—0.037 mm 95.83%,铁精矿品位 TFe(全铁) 60.17%,P 0.24%,TFe 回收率 81.99%。

2) 重选脱泥-反浮选工艺

中国地质科学院矿产综合利用研究所从 2006 年开始对宁乡式高磷铁矿开发利用技术进行试验研究,先后开展了单一重选、强磁-解胶脱磷、磁选-反浮选脱磷、原矿磨矿-重选脱泥-反浮选脱磷脱硅等工艺的探索。由于焙烧磁选工艺存在成本高、焙烧设备尚未成型等问题,反浮选成为主攻方向。另外,鲕状赤铁矿由于嵌布粒度极细,且硬度低,在磨矿过程中容易产生大量矿泥,矿泥在微细粒矿物表面形成罩盖,严重恶化浮选效果,且部分细泥进入精矿,还将造成精矿质量降低。预先脱泥可以消除矿泥在浮选中的不良影响,确保浮选顺利进行,有利于提高最终铁精矿质量。

重选脱泥-反浮选工艺的技术关键是新型、高效反浮选药剂的开发。经过几年的不懈努力,中国地质科学院矿产综合利用研究所已成功研制出高效脱磷系列捕收剂 EM-501 和新型脱硅捕收剂 EM-508。新药剂能较好地脱除物料中的部分硅、磷矿物,为反浮选脱磷脱硅提铁工艺的实施奠定了良好的药剂基础。

对原矿 TFe 含量为 48.55%,含 P 1.14%的湖北官店鲕状赤铁矿,完成了重选脱泥-反浮选工艺的扩大连续试验。原矿细磨至—0.075 mm 92.50%左右,经重选脱泥后,采用反浮选工艺,配以自主研发的浮选药剂,取得了铁精矿 TFe 品位 57.32%,P 0.28%,TFe 回收率 80.7%的优良指标。

重选脱泥-反浮选工艺处理鄂西鲕状赤铁矿经济、合理、可行,用于处理脉石矿物以石英为主的酸性鲕状赤铁矿矿石效果较好。与磁化焙烧-磁选-反浮选工艺相比,重选脱泥-反浮选具有流程结构简单,选矿成本较低、效率高,易于工业实施等优势,但由于脱泥,部分铁矿物不可避免损失于矿泥中,从而导致铁的回收率较磁化焙烧-磁选-反浮选工艺略低。

3) 其他工艺

酸浸是以硝酸、盐酸或硫酸对矿石进行酸浸脱磷,从技术上说是一种较为有效的脱磷方法,矿石中的磷矿物无须完全单体解离,只要暴露出来与浸出液接触就可达到降磷的目的。缺点是脱磷耗酸量大、成本高,易导致矿石中可溶性铁矿物溶解,造成铁的损失。

二、褐铁矿

我国探明褐铁矿储量 12.3 亿 t,占全国探明储量的 2.3%,主要分布于云南、广东、广西、山东、贵州、江西、新疆和福建等地。褐铁矿矿石含铁 35%~40%,高者可达 50%,有害杂质 S、P 通常较高。由于褐铁矿中富含结晶水,因此采用物理选矿方法,铁精矿品位很难达到 60%,但与菱铁矿类似,焙烧后因烧失较大而大幅度提高铁精矿品位。褐铁矿在磨矿过程中极易泥化,难以获得较高的金属回收率。近年来,随着新型高梯度强磁选机和新型高效反浮选药剂的研制成功,强磁选、反浮选、正浮选、焙烧-磁选联合流程等都取得了明显进展。

王毓华等(2005)针对广东某褐铁矿矿石共生关系简单的特点,采用强化矿浆分散阳离子反浮选脱硅工艺,即采用 $1250 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ 碳酸钠和 $600 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ 水玻璃实现矿浆的强化分散,在磨矿细度为 -0.074 mm 占 80%、十二胺用量 $200 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ 、浮选时间 18 min 的条件下,选别该褐铁矿矿石,获得铁精矿铁品位为 59.25%、全铁回收率为 83.42% 的指标。另外,王毓华等(2004)还针对某褐铁矿性质相对简单的特点,采用单一反浮选工艺选别褐铁矿,研究了脱泥、单一阳离子及阴阳离子捕收剂联合等技术方案对反浮选指标的影响。试验结果表明,采用新型 DTL 阳离子表面活性剂脱泥、氧化钙活化含硅矿物、淀粉抑制铁矿物、油酸及十二胺联合使用的新工艺方案,取得了良好的分选指标,经重选脱泥和反浮选后,得到含铁品位为 57.18%、铁回收率 74.90% 的褐铁矿精矿。

铁坑铁矿采用强磁-正浮选工艺流程处理褐铁矿矿石,获得总精矿品位大于 50%、回收率大于 60% 的指标,后又进行了强磁选-正浮选-强磁选和强磁-反浮选两种分选工艺的试验,分别获得精矿品位 52.09% 和 54.48%、回收率 75.29% 和 70.78% 的试验指标(谢富良,1996)。

近年来,随着新型高梯度强磁选机及新型高效反浮选药剂的研制成功,中钢集团马鞍山矿山研究院对铁坑铁矿褐铁矿进行了大量研究工作。其中强磁选-反浮选-焙烧联合工艺试验研究结果表明,反浮选精矿铁品位可达到 57.00%、 SiO_2 含量降至 5.00% 左右,经焙烧后产品的铁品位可达到 64.00% 以上。与焙烧-磁选-反浮选联合工艺相比,生产成本大幅度下降,使该类型铁矿石具有了经济开发利用价值。

李永聪等(2002)针对新疆某含褐铁矿和含铁硅酸盐矿物的铁矿石,采用浮选、重选、磁选和焙烧磁选等选矿方法进行试验研究。试验结果表明,在原矿品位 46.50% 的情况下,焙烧磁选工艺可获得铁精矿品位 59.20%、回收率 92.90% 的技术指标。其不同选矿方法的选别指标见表 1.5。从经济方面考虑,建议采用弱磁选-强磁选-正浮选工艺或分级-重选-细粒级浮选工艺联合流程比较适宜。

表 1.5 新疆某铁矿选矿方法比较

单位: %

选别方法	精矿产率	精矿品位	回收率
正浮选(闭路)	50.65	56.74	62.08
反浮选(开路)	48.18	52.20	54.54
摇床重选	43.42	57.90	54.32
弱磁-强磁选	68.87	52.71	78.26
焙烧磁选	67.22	59.24	92.90

陈雯(2003)采用絮凝-强磁选回收某易泥化褐铁矿,在铁精矿品位保持不变的前提下,可大幅度提高金属回收率。研究结果表明,与直接强磁选相比,絮凝-强磁选工艺可将某含大量易泥化褐铁矿铁矿石的金属回收率提高 10%~15%,认为提高絮凝-强磁选作业分选效率的关键在于正确把握分散-絮凝过程。

张桂兰等(1999)对山东威海某低品位(原矿品位 TFe 25.34%)褐铁矿石进行了选矿研究,比较了 6 种不同选矿工艺的选矿指标,见表 1.6。

表 1.6 山东某地铁矿选矿工艺与选矿指标对比

单位: %

选别方法	精矿产率	精矿品位	回收率
二段强磁选	38.90	47.17	71.93
焙烧-弱磁选	36.33	61.10	87.91
单一弱碱性浮选	53.04	36.92	76.17
单一弱酸性浮选	54.00	41.55	87.58
强磁选-弱碱性浮选	42.04	46.36	79.7
强磁选-弱酸性浮选	38.50	48.42	73.07

周岳远等(2002)针对云南化念褐铁矿,采用粗细颗粒分级入选的生产流程,选用 CRIMM 型稀土永磁辊式强磁选机作为精选设备。当原矿品位为 46%左右时,经过一次选别可得到总精矿品位大于 50%、精矿回收率大于 80%的生产指标,见表 1.7。

表 1.7 云南化念褐铁矿生产指标

单位: %

项目名称	指标	粗粒级	细粒级	合计
给矿	产率	38.77	61.23	100.00
	原矿品位	43.76	47.37	45.97
	分布率	36.91	63.09	100.00
精矿	产率	27.15	47.08	74.23
	精矿品位	51.05	50.74	50.85
	回收率	31.68	50.43	82.11
尾矿	产率	11.62	14.15	25.77
	尾矿品位	26.73	36.16	31.91
	回收率	5.23	12.66	17.89

三、含菱铁矿铁矿石

(一) 菱铁矿资源现状

菱铁矿是一种广泛存在于自然界的低品位铁矿石,我国菱铁矿资源丰富,储量居世界前列。现已探明总储量达 18.34 亿 t,占铁矿石探明储量的 3.4%,另有保有储量 18.21 亿 t。到目前为止,在我国的湖北、湖南、四川、云南、贵州、新疆、陕西、山西、广西、山东、吉林、重庆等省市都发现了菱铁矿矿床,其中大、中、小矿床或矿点均有,特别是贵州、陕西、甘肃和青海等省,菱铁矿矿床是主要铁矿类型,其菱铁矿的储量一般占全省铁矿石总储量的 50%以上。在新疆、云南、湖南、西藏、广西等省区的铁矿资源中,菱铁矿矿床也占有重要位置,例如,昆钢王家滩菱铁矿保有储量有 1360 多万 t,平均含铁量为 30.81%,至今未得到很好的利用。值得注意的是,这些省区大部分是缺铁省份,有的近年来把菱铁矿作为重点找矿对象,取得了令人鼓舞的成果。例如,在湘中和湘南,突破了铁帽关,找到了厚而富的原生菱铁矿体。而我国最大的菱铁矿床是位于陕西省柞水县大西沟,储量达到 3.02 亿 t。

菱铁矿多以碎屑颗粒或以胶结物的形式广泛分布于不同环境沉积岩中,特别是在湖泊和海相沉积物中十分常见。从成因类型,可初步划分为沉积型、沉积-热液改造型、受变质沉积型和接触交代-热液型矿床。表 1.8 是我国菱铁矿资源的基本特征。

表 1.8 我国菱铁矿资源的基本特征

成因类型	含矿岩系	矿体形态 产状	矿物组合		化学成分 特征	矿床实例
			矿石矿物	伴生矿物		
沉积矿床	陆相碎屑岩-泥质岩-有机岩系	层状、透镜状、似层状,与围岩整合产出	菱铁矿、针铁矿、褐铁矿、鲕绿泥石、磁赤铁矿、磁铁矿	石英、黏土矿物、方解石、黄铁矿、磷灰石	含铁品位中等, SiO ₂ 含量一般较高, 磷含量偏高	利周、綦江、万源庙沟
沉积-热液改造矿床	碎屑岩-泥质岩-碳酸盐岩系,以产在碳酸盐层中的居多	层状、透镜状、似层状,常伴有交错矿脉	菱铁矿、赤铁矿、褐铁矿、磁铁矿	铁白云石、方解石、石英、重晶石、铜矿、闪锌矿、方铅矿等	含铁普遍较高, SiO ₂ 含量较低, 常<10%, 锰含量 2%左右, 硫较低	黔西地区、黄梅
受变质矿床	轻微至中等区域变质的碎屑岩-泥质岩-碳酸盐系	层状、似层状、透镜状、不规则状	菱铁矿、赤铁矿、褐铁矿、镜铁矿、磁铁矿、鲕绿泥石	石英、绢云母、绿泥石、方解石、铁白云石、黄铁矿、黄铜矿	含铁和 SiO ₂ 变化大,产在变质碎屑岩系中品位较低,产在碳酸盐岩中品位高, 锰含量高	大西沟, 鲁奎山, 切列其克

续表

成因类型	含矿岩系	矿体形态 产状	矿物组合		化学成分 特征	矿床实例
			矿石矿物	伴生矿物		
受变质 矿床	轻微区域变质的火山-沉积岩系	层状、似层状	菱铁矿、镜铁矿、磁铁矿、褐铁矿	碧玉、燧石、重晶石、方解石、云母、绿泥石	含铁中等或较高, SiO ₂ 含量变化大	桦树沟
接触交代-热液矿床	产在中酸性及中性侵入体与碳酸盐岩石的接触带或附近	层状, 似层状, 透镜状, 脉状, 束状	磁铁矿、赤铁矿、菱铁矿	矽卡岩矿物、方解石、石英、白云石、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿	含铁品位一般较高, SiO ₂ 含量较低, 铜、钴含量较高, 硫含量普遍高或很高	大冶铁山, 银家沟

表 1.8 显示我国菱铁矿矿石主要赋存于沉积型和部分接触交代-热液型铁矿床中, 平均含铁品位 30%~35%, 矿石采、选、冶均较困难, 造成其利用率很低, 陕西大西沟利用的菱铁矿不足总储量的 10%。从目前来看, 我国的菱铁矿资源仍主要用于冶炼钢铁, 其他方面的应用很少。

由于菱铁矿的理论铁品位较低, 且经常与钙、镁、锰呈类质同象共生, 因此采用物理选矿方法, 铁精矿品位很难达到 45% 以上。但焙烧后因烧损较大, 而大幅度提高铁精矿品位。比较经济的选矿方法是重选、强磁选, 但难以有效地降低铁精矿中的杂质含量。强磁选-浮选联合工艺能有效地降低铁精矿中的杂质含量, 铁精矿焙烧后仍不失为一种优质炼铁原料(袁致涛等, 2007)。

(二) 菱铁矿开发利用技术

菱铁矿在自然界中广泛存在, 主要成分为碳酸亚铁, 化学式为 FeCO_3 , 属于方解石族的矿物, 铁的理论品位仅为 48.2%, 其中 FeO 为 62.01%, CO_2 为 37.99%, 晶体为三方晶系, 常见菱面体, 晶面常弯曲。由于 Mn^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 与 Fe^{2+} 的离子半径相近, 于是 Fe^{2+} 经常被这些离子替代, 形成锰菱铁矿、镁菱铁矿等变种。菱铁矿通常呈现晶粒状或隐晶质致密块状(呈隐晶质球粒状的称为球菱铁矿; 隐晶质凝胶状的称为胶菱铁矿)。菱铁矿一般呈灰白或黄白色, 风化后呈褐色、褐黑色。莫氏硬度为 4。密度为 $3.7\sim 4.0\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 随成分中 Mn 和 Mg 含量的升高而降低。热液成因的菱铁矿常见于金属矿脉中; 沉积成因的菱铁矿常见于页岩层、黏土层和煤层中, 在氧化带易水解成褐铁矿, 形成铁帽。菱铁矿大量聚集且硫、磷等有害杂质的含量小于 0.04% 时, 可作为铁矿石开采。采用物理方法很难使铁精矿品位达到 45% 以上, 但是菱铁矿自身具有自熔性和烧损性, 矿石经 $600\sim 700\text{ }^\circ\text{C}$ 的高温焙烧后放出 CO_2 , 铁的品位一般可提高 10%~20%; 焙烧后, 菱铁矿转为磁铁矿, 具有强磁性, 经弱磁选即可富集, 铁品位会进一步提高, 一般品位会提高 10% 以上, 满足了钢铁冶炼对铁精矿的要求。因此焙烧-磁选是处理菱铁矿石最为常见的选矿方法。近几年关于菱铁矿处理技术的发展主要表现在以下几个方面。

1. 焙烧-磁选技术

磁化焙烧是物料或矿石加热到一定的温度后在相应的气氛中进行物理化学反应的过