

难处理铁矿石 煤基直接还原磁选技术

NANCHULI TIEKUANGSHI
MEIJI ZHIJIE HUANYUAN CIXUAN JISHU

孙体昌 寇珏 徐承焱 余文 著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

难处理铁矿石 煤基直接还原磁选技术

孙体昌 寇珏 徐承焱 余文 著

北 京
冶金工业出版社
2017

内 容 提 要

本书介绍了以难处理铁矿石原矿为原料,采用直接还原焙烧—磁选技术生产还原铁产品的最新研究成果,内容包括:高磷鲕状赤铁矿、钛磁铁矿、红土镍矿的直接还原焙烧—磁选的影响因素及对不同矿石的影响规律和效果,不同矿石焙烧和磁选所需的最佳条件比较,不同的还原剂、添加剂、焙烧条件等在铁矿石还原过程中的作用机理。

本书可供矿物加工工程、冶金工程的技术人员和相关专业的研究人员和管理人员阅读,也可供高校教师和相关专业研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

难处理铁矿石煤基直接还原磁选技术/孙体昌等著. —北京:
冶金工业出版社, 2017. 7

ISBN 978-7-5024-7540-6

I. ①难… II. ①孙… III. ①铁矿石—磁力选矿—研究
IV. ①TD951. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 173100 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcb@cnmp.com.cn

责任编辑 杜婷婷 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7540-6

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2017 年 7 月第 1 版, 2017 年 7 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 20.25 印张; 391 千字; 311 页

79.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

我国铁矿资源的特点是贫、细、杂，很多铁矿资源品位低、组成复杂，用传统的矿物加工方法很难得到符合要求的铁精矿，其中高磷鲕状赤铁矿是典型代表。而铁矿石直接还原焙烧—磁选生产还原铁产品的工艺为该类铁矿石的有效利用提供了技术上的可能，因此成为近几年的研究热点。本书中介绍的直接还原焙烧—磁选技术是指以煤或其他具有还原作用的固体物料为还原剂，与粉状原矿直接混合后焙烧或压成团块焙烧，目的是把原矿中的铁矿物还原为金属铁，然后通过磨矿后弱磁选，得到的磁性产品是以金属铁为主的产品（本书中称为直接还原铁产品）的过程。该技术有以下几个特点：

(1) 可以有效处理用传统矿物加工方法不能加工或加工效果不理想的矿石或二次资源，包括高磷鲕状赤铁矿石、菱铁矿石、细粒复杂的赤铁矿石、钛铁矿石、钒钛铁矿石，还包括红土镍矿、硫酸渣、各类含铁冶金渣等。

(2) 加热次数少。按照传统的方法，从原矿石到生产出生铁需要经过选矿（有时需要磁化焙烧）—球团（或烧结）—炼铁过程，同时高炉炼铁必须用焦炭，炼焦的过程也是高温过程。而用直接还原焙烧—磁选技术，因为用原矿直接还原焙烧，磁选后可以得到直接还原铁产品，只需加热一次。同时，因为直接以煤为还原剂，不需要焦炭，所以也省去了炼焦的过程。对煤的质量要求也不高，甚至可以用褐煤为还原剂。该过程所得还原铁产品中碳的含量比焦炭低，可以直接用于炼钢。

(3) 可以有效去除矿石中的有害杂质，包括高磷鲕状赤铁矿中的磷和铝、硫酸渣中的硫等。这些杂质在原矿石中的存在状态复杂，很

难脱除，但在直接还原焙烧过程中可以改变矿石的结构构造或杂质的存在状态，为杂质的有效脱除创造了条件。

(4) 适应性强。该技术不仅适用于铁矿石，还适用于硫酸渣、红土镍矿、各类冶金渣、赤泥等。同时，可以根据不同原料的性质和对产品质量的要求，对焙烧条件进行调整，或加入适当的添加剂，基本可以满足各类原料和不同产品质量的要求。

(5) 矿石焙烧量增加。由于是原矿直接焙烧，与用精矿进行冶炼相比，焙烧矿量会增加，焙烧成本有所提高。从技术上考虑，无论原矿品位高低，该项技术都基本可行，但经济上是否合算需要对具体问题进行具体分析，需要通过试验确定。

本书对直接还原焙烧—磁选处理不同原矿的研究结果进行了较为详细的介绍。对于高磷鲕状赤铁矿，用该技术可以得到直接还原铁产品，同时脱除其中的磷和铝；对于钛磁铁矿，用该技术可以明显改善钛铁分离的效果，实现钛和铁的有效分离。同时也发现，采用此技术，用钛磁铁矿可以生产新型微波陶瓷材料——钛酸镁，这为钛磁铁矿的利用提供了新的技术途径，也为我国储量丰富但目前利用不理想的钒钛磁铁矿资源中钛的有效利用提供了有益的参考。红土镍矿虽然一般主要考虑的是利用其中的镍，但其中的铁资源也不容忽视，特别是高铁低镍的红土镍矿，目前也未找到合理的利用途径。用直接还原焙烧—磁选技术也可以解决镍和铁的回收问题。并且，可以控制焙烧条件和添加剂的种类，根据不同矿石性质和产品要求，得到不同镍铁含量的产品。由于篇幅所限，本书只介绍了直接还原焙烧—磁选技术研究的部分内容，实际上该技术的应用范围远不止本书介绍的范围，对从菱铁矿石中回收铁、硫酸渣回收铁降低硫、从赤泥和各种冶金渣中回收铁和其他有用成分也都是有效的。

研究中还发现，虽然该过程中以铁矿物还原为金属铁为主，但由于是原矿直接还原，不同原料中脉石矿物的种类、含量、杂质的种类、含量和存在形式不同，反应过程也不同。因此，其反应过程比用铁精

矿炼铁或直接还原法生产还原铁要复杂得多,同时对还原过程的要求也有所不同。用铁精矿为原料生产直接还原铁,只要把其中的含铁矿物还原为金属铁即可,所以可以用铁的金属化率或还原度来评价还原的效果。但在直接还原—磁选过程中有所不同,不仅要把铁矿物中的铁还原为金属铁,还要考虑还原后的金属铁的颗粒和与其他矿物之间的关系,要为后续的磨矿磁选创造有利的条件,所有只用金属化率或还原度不能完整评价焙烧效果。由于原矿性质复杂多变,所以有些传统铁矿物直接还原的理论和反应机理也不能解释原矿直接还原过程中出现的现象,本书中对出现的新问题进行了论述和解释,但由于该类研究还处于初级阶段,很多问题未能得出明确的结论,很多只是作者的个人见解,请读者在阅读本书时注意,也希望广大读者提出宝贵意见。

本书分工如下:第1章由孙体昌撰写;第2章由孙体昌、余文、徐承焱和寇珏撰写;第3章由寇珏撰写,第4章由徐承焱撰写。全书由孙体昌统一整理。

本书的研究和出版得到了国家自然科学基金重点项目(编号:51134002)、面上项目(编号:51074016、51474018)和教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(编号:20130006110017)的资助,在此表示诚挚的谢意。本书中也引用了其他研究者的部分成果,在此一并表示感谢。对参加本书相关研究的杨大伟、李永利、刘志国、许言、高恩霞、魏玉霞博士等做出的贡献表示感谢。

希望本书的出版可以推动难处理铁矿的直接还原焙烧—磁选研究工作的进一步深入,并为该技术的实际应用提供基础。

书中列出的很多研究结果不够深入,撰写也存在不足之处,恳请读者批评指正。

作者
2017年4月

目 录

1 绪论	1
1.1 我国铁矿资源特点及供应现状	1
1.1.1 我国铁矿资源及特点	1
1.1.2 我国铁矿石供应现状	1
1.2 难选铁矿选矿现状及主要问题	2
1.2.1 高磷鲕状赤铁矿选矿研究现状	2
1.2.2 其他难选铁矿石选矿研究现状	6
1.2.3 含铁冶金渣选矿研究现状	8
1.3 炼铁技术简介	9
1.3.1 高炉炼铁	9
1.3.2 非高炉炼铁	11
1.4 难选铁资源煤基直接还原—磁选技术	15
1.4.1 技术特点	16
1.4.2 应用范围	17
1.4.3 与铁精矿直接还原的联系与区别	17
参考文献	18
2 高磷鲕状赤铁矿直接还原焙烧—磁选	21
2.1 原矿性质	21
2.1.1 原矿的化学和矿物组成	21
2.1.2 矿石结构构造	22
2.1.3 主要铁矿物和脉石矿物的工艺粒度分析	23
2.1.4 矿石矿物嵌布特征	24
2.1.5 原矿中磷的存在状态	25
2.2 直接还原焙烧—磁选研究方法	27
2.2.1 工艺影响研究	27
2.2.2 机理研究	27
2.3 粉矿直接还原焙烧效果	28

2.3.1	焙烧温度的影响	28
2.3.2	褐煤用量试验	28
2.3.3	添加脱磷剂焙烧的效果	29
2.3.4	提高焙烧温度焙烧的效果	35
2.3.5	工业隧道窑焙烧结果	43
2.4	粉矿直接还原焙烧反应机理	52
2.4.1	最佳条件不同产品矿物组成变化	52
2.4.2	最佳条件不同产品微观结构对比	52
2.4.3	升温过程高磷鲕状赤铁矿中矿物变化规律	56
2.4.4	焙烧时间对焙烧产物中矿物变化的影响	63
2.4.5	还原剂用量对焙烧产物矿物组成和结构的影响	66
2.4.6	脱磷剂的作用	69
2.5	含碳球团直接还原—磁选工艺	80
2.5.1	高磷鲕状赤铁矿含碳球团直接还原—磁选工艺条件	80
2.5.2	高磷鲕状赤铁矿含碳球团的性能	84
2.6	含碳球团直接还原焙烧反应机理	93
2.6.1	含碳球团焙烧过程中物相的变化	93
2.6.2	含碳球团焙烧过程中微观结构的变化	94
2.6.3	含碳球团膨胀行为	97
2.6.4	高磷鲕状赤铁矿煤基直接还原热力学	103
2.6.5	低品位赤铁矿煤基直接还原热力学	103
2.7	煤泥做还原剂对高磷鲕状赤铁矿还原的影响	125
2.7.1	煤泥的性质	125
2.7.2	煤泥做还原剂对焙烧效果的影响	125
2.7.3	焙烧温度对煤泥 H、T 还原铁指标的影响	128
2.8	煤泥还原焙烧高磷鲕状赤铁矿的反应机理	130
2.8.1	煤泥灰分对直接还原的影响机理研究	130
2.8.2	煤泥对焙烧产物中铁颗粒形态及矿物嵌布关系的影响	132
2.8.3	煤泥挥发分对直接还原的影响机理研究	135
2.9	高炉灰做还原剂对焙烧效果的影响	146
2.9.1	高炉灰的性质	146
2.9.2	高炉灰对还原铁指标的影响研究	148
2.9.3	共还原焙烧脱磷剂组合的最佳配比	151
2.9.4	最佳脱磷剂配比下高炉灰对共还原焙烧的影响研究	154
2.10	高炉灰在直接还原焙烧中的机理	157

2.10.1	高炉灰与煤焙烧结果的对比与讨论	157
2.10.2	高炉灰对焙烧产物铁颗粒形态的影响	158
2.10.3	高炉灰对焙烧产物中磷元素分布的影响	160
2.11	尼日利亚高磷铁矿石直接还原焙烧提铁降磷研究	163
2.11.1	尼日利亚铁矿石性质简介	163
2.11.2	直接还原焙烧磁选影响因素研究简介	164
	参考文献	165
3	钛磁铁矿直接还原—磁选钛铁分离	166
3.1	钛磁铁矿性质	166
3.1.1	资源特性	166
3.1.2	钛磁铁矿性质	167
3.1.3	还原剂煤的性质	169
3.2	直接还原焙烧工艺条件对钛铁分离的影响	170
3.2.1	焙烧温度的影响	170
3.2.2	煤种类和用量的影响	171
3.2.3	添加剂种类和用量的影响	177
3.3	钛磁铁矿直接还原—磁选钛铁分离机理	183
3.3.1	焙烧温度对钛铁分离的影响机理	183
3.3.2	碳酸钠对钛铁分离的影响机理	186
3.3.3	硫酸钠对钛铁分离的影响机理	190
3.3.4	氟化钙对钛铁分离的影响机理	195
3.3.5	煤种类对钛铁分离的影响机理	199
3.4	直接还原焙烧—磁选钛磁铁矿制备金属铁和正钛酸镁	206
3.4.1	原料性质	207
3.4.2	焙烧条件对正钛酸镁生成的影响	209
	参考文献	227
4	红土镍矿煤基直接还原—磁选	228
4.1	红土镍矿资源现状	228
4.2	原料性质与研究方法	229
4.2.1	多元素分析	229
4.2.2	物相分析	229
4.2.3	矿物组成和相互关系	230
4.2.4	还原剂煤的性质	237

4.2.5 研究方法	237
4.3 高镍型红土镍矿直接还原—磁选影响因素	238
4.3.1 无添加剂时褐煤用量对镍铁选择性还原的影响	238
4.3.2 添加剂对镍铁选择性还原的影响	239
4.3.3 煤种对镍铁选择性还原的影响	244
4.3.4 石煤作为还原剂对镍铁选择性还原的影响	246
4.3.5 混合添加剂对镍铁选择性还原的影响	252
4.3.6 选别条件的影响及产品分析	253
4.4 高镍型红土镍矿选择性还原焙烧分离镍铁机理	260
4.4.1 煤种对镍铁选择性还原的影响机理	260
4.4.2 添加剂对镍铁选择性还原的影响机理	268
4.5 低镍型红土镍矿选择性直接还原—磁选影响因素	283
4.5.1 还原剂对选择性还原的影响	283
4.5.2 添加剂对镍铁选择性还原的影响	286
4.5.3 最佳还原剂和添加剂时其他因素对选择性还原的影响	288
4.6 低镍原矿选择性还原焙烧分离镍铁机理	296
4.6.1 焙烧温度对选择性还原的影响机理	297
4.6.2 焙烧时间对选择性还原的影响机理	300
4.6.3 Na_2SO_4 对选择性还原的影响机理	304
4.6.4 硫酸钠作用机理总结	308
参考文献	310

1 绪 论

1.1 我国铁矿资源特点及供应现状

1.1.1 我国铁矿资源及特点

我国铁矿资源丰富,查明全国铁矿资源产地有 3000 多处,铁矿资源储量为 613.35 亿吨,我国铁矿资源有自己的特点,主要有如下几点^[1,2]:

(1) 储量大,但贫矿多富矿少。按铁矿资源储量排名,居世界第五位,但在保有储量中贫铁矿石占 97.5%。而含铁(质量分数)平均品位 55%左右,能直接入炉的富铁矿储量仅占总储量的 2.5%。

(2) 分布范围广,但又相对集中。我国铁矿资源在全国 31 个省(市、自治区)均有分布,相对集中在辽宁、河北、四川、湖北、山东、内蒙古等 13 个省、自治区,共拥有铁矿资源储量 571.9 亿吨,占全国资源储量的 88.52%。

(3) 矿石类型复杂。我国铁矿石自然类型复杂,有磁铁矿、钒钛磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿、菱铁矿、镜铁矿及混合矿石。磁铁矿石占 55.5%,钒钛磁铁矿石占 14.4%,红矿(赤铁矿、褐铁矿、菱铁矿、镜铁矿)占 24.8%,其他种类铁矿石占 5.3%。

(4) 伴(共)生有益组分多。具有伴(共)生有益组分的铁矿石储量约占全国储量的 1/3,涉及一批大中型铁矿区,如攀枝花、红格、白马、白云鄂博等铁矿区。伴(共)生有益组分种类包括钒、钛、铜、铅、锌、锡、稀土和铌等 30 余种。

(5) 嵌布粒度比较细。不磨细无法实现单体解离,磨太细,小于 20 μm 的铁矿物颗粒较多,特别是褐铁矿容易泥化,用目前的回收方法回收困难。如酒钢酒泉粉矿选矿厂的尾矿含铁质量分数 25%以上,强磁选铁精矿含铁质量分数 48%、铁回收率仅 65%,铁损失较多。

(6) 褐铁矿、菱铁矿等难选矿的高效选矿仍没有很好解决。如铁坑褐铁矿选矿厂入选的原矿石含铁质量分数 37%,经过选矿后得铁精矿含铁质量分数 54%,而铁回收率只有 50%左右,尾矿含铁质量分数 28%。高磷鲕状赤铁矿仍未找到经济有效的利用方法。

1.1.2 我国铁矿石供应现状

我国铁矿资源总量丰富,但由于优质资源匮乏,复杂难选矿石利用率低以及

国内铁矿石生产企业产能不足，致使国内铁矿石产量远远无法满足钢铁企业的需求，钢铁企业不得不大量进口铁矿石。铁矿石进口量逐年递增，2015 年增加至 9.53 亿吨，铁矿石对外依存度高达 84%，具体进口矿石量见表 1-1^[3,4]。长期大量进口铁矿石不仅对我国钢铁产业造成严重的影响，对国民经济的健康持续发展也构成了巨大威胁。

表 1-1 2000~2015 年我国进口铁矿量表 (亿吨)

年 份	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
进口铁矿石量	0.7	0.92	1.12	1.48	2.1	2.75	3.26	3.83
年 份	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
进口铁矿石量	4.43	6.27	6.19	6.86	7.44	8.2	9.33	9.53

1.2 难选铁矿选矿现状及主要问题

1.2.1 高磷鲕状赤铁矿选矿研究现状

1.2.1.1 高磷鲕状铁矿石物理选矿工艺研究现状

高磷鲕状赤铁矿属于极难选的铁矿石，对其利用的研究已经进行了几十年，进行了多种工艺的比较，主要包括单一反浮选、选择性絮凝—反浮选以及磁选（重选）—反浮选联合等，但到目前为止，仍未找到合适的处理方法。

闫武等^[5]采用自主研发的新型捕收剂 EM-501 对重庆桃花高磷鲕状赤铁矿和湖北官店高磷鲕状赤铁矿脱泥后产品进行了反浮选脱磷研究。桃花高磷鲕状赤铁矿的脱泥后经一粗一精二扫脱磷反浮选，在给矿铁品位 41.50%、磷质量分数 0.88% 情况下，得到精矿品位为 50.00%、磷质量分数 0.081%、铁回收率 88.22% 的铁精矿。官店高磷鲕状赤铁矿的脱泥后经一粗一精一扫脱磷反浮选，在给矿铁品位 49.26%、磷质量分数 0.89% 情况下，获得了精矿铁质量分数 51.69%、磷质量分数 0.21%、铁回收率 94.77% 的选别指标。可以看出，对于高磷鲕状赤铁矿，提高铁品位和降低磷含量都很困难。

刘万峰等^[6]对某鲕状赤铁矿进行了反浮选脱磷脱硅研究。结果表明，采用反浮选工艺处理铁品位 48.97%、磷质量分数 0.92% 的铁矿石，能得到精矿铁品位和磷质量分数分别为 54.21% 和 0.28%、铁回收率 64.60% 的精矿。此外，他们对另一处高磷鲕状赤铁矿进行了反浮选脱磷扩大试验研究，试验稳定运行了 80h，在磨矿细度为 -0.074mm 质量分数占 70.73% 的条件下，得到的精矿的铁品位为 57.43%，磷质量分数为 0.22%，铁的回收率达到了 78.24%^[7]。

唐云等^[8]采用强磁选—反浮选工艺对贵州赫章鲕状赤铁矿进行提铁降磷试验研究。在磨矿细度 -0.075mm 占 77.50%、磁感应强度 1.55T、棒介质的条件下进

行1次强磁选粗选;强磁选粗精矿在磨矿细度 -0.038mm 占84.00%、磁感应强度1.40T和网介质的条件下进行1次精选;强磁选粗尾矿在磁感应强度1.40T和网介质的条件下进行1次扫选,然后精选尾矿和扫选精矿合并返回磨矿,获得铁品位52.13%、磷质量分数0.45%、回收率72.16%的铁精矿。采用高效调整剂和高效捕收剂将强磁选精矿进行1次反浮选,获得了铁品位56.14%、磷质量分数0.22%、回收率62.48%的铁精矿。

上述研究结果表明,采用常规的工艺得到的铁精矿的铁品位很难达到60%,铁的回收率也比较低,一般只有50%~70%,但是磷的质量分数仍然在0.2%以上。一些新研制的药剂显现出了较好的脱磷效果,但提高铁精矿品位仍很困难,这说明采用常规手段难以实现选别高磷鲕状赤铁矿。

1.2.1.2 高磷鲕状铁矿石化学处理工艺研究现状

由于用常用物理分选方法处理高磷鲕状赤铁矿很难获得铁品位和磷含量都符合要求的铁精矿,很多学者研究用化学方法处理该矿石,以期获得好的效果。主要研究有酸浸降磷、生物浸出降磷、磁化焙烧磁选等。

A 高磷鲕状铁矿石酸浸工艺研究现状

酸浸工艺是用硝酸、硫酸或盐酸等对鲕状赤铁矿进行浸出,酸液选择性地溶解矿石中的含磷矿物,从而实现脱磷目的。这种工艺的优点是矿石中的含磷矿物不需要完全单体解离,只要使含磷矿物暴露出来与酸液接触就可以使含磷矿物溶解。

余锦涛等^[9]以铁品位为51.7%、磷质量分数为0.56%的某鄂西高磷鲕状赤铁矿为研究对象,采用硫酸浸出脱磷,在浸出时间为1h,液固比为100mL:8g,酸度为0.2mol/L,振荡频率为150Hz的条件下,获得了含磷质量分数为0.07%左右产品,铁损失率仅为0.18%。同时研究了微波预处理铁矿石对浸出的影响,结果发现微波预处理虽然能使铁矿石产生微裂缝,但是因为酸液的表面张力过大,难以渗入微裂缝中,因此没有促进脱磷。由上可知,采用酸浸的方法能够有效脱磷。对采用常规的选矿方法预富集的高磷鲕状铁矿精矿,通过酸浸的手段,或是酸浸后再配合其他选矿手段,能够得到含磷质量分数0.1%以下的铁精矿,但铁精矿铁品位仍难以提高。同时酸浸工艺复杂,对设备腐蚀性大、成本较高,且浸出液需专门处理,容易造成环境污染。

尹双良等^[10]提出了一种高磷鲕状赤铁矿蚀硅保铁脱磷的酸浸工艺,该工艺首先采用常规选矿工艺对高磷鲕状赤铁矿石进行富集得到铁粗精矿矿浆,然后将精矿的质量分数调整至50%~70%;再加入工业盐酸、保铁剂和蚀硅剂,搅拌浸出15~45min;过滤得低磷铁精矿。最终可获得铁品位不低于60%、 P_2O_5 质量分数不高于0.15%的低磷铁精矿。工业盐酸的加入量为铁粗精矿质量的20%~25%,酸用量过高。

B 高磷鲕状铁矿石微生物浸出工艺研究现状

微生物法浸出脱磷是利用了微生物代谢产生的酸或利用微生物进行间接脱磷,如利用一些具有氧化硫硫杆菌可使含硫矿物中的硫转化为硫酸,来降低体系的 pH 值, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 等离子还会与微生物代谢酸螯合,形成络合物,从而使磷矿物的溶解得到了加速;微生物法去除磷具有高效、环境友好等优点。

鲍光明等^[11~13]以全铁质量分数 43.50%、磷质量分数 0.85% 的鲕状赤铁矿石为对象,利用嗜酸氧化亚铁硫杆菌 (At. f 菌) 和嗜酸氧化硫硫杆菌 (At. t 菌) 的协同作用进行脱磷。结果表明,在 At. t 菌与 At. f 菌接种量为 2:1 混合时,浸出 24 天,脱磷率达到了 88.70%。同时对不同矿浆初始 pH 值和矿浆浓度的试验条件下发现,在 pH=1.8~2.5 条件下,细菌脱磷能力较强,当矿浆浓度超过 5% 时对细菌脱磷具有明显抑制作用,说明用微生物浸出时浓度不能高。

王劲等^[14]对大冶地区某铁品位 47.89%、磷质量分数 1.04% 的鲕状赤铁矿,采用嗜酸氧化硫硫杆菌浸出脱磷,浸出 41 天后,得到了平均铁品位 51.7%、磷质量分数 0.21% 的产品,脱磷率达到了 82.3%,而铁损率仅为 1.7%。固体浓度对产品的磷含量、铁品位和铁损失率均有明显影响,最佳的固体浓度为 250g/L。

上述研究结果表明,虽然微生物浸出脱磷具有低能耗、无污染等特点,但是浸出时间长,而且对浸出液的固体浓度要求严格,且只对降磷有效,对提高铁精矿铁品位作用有限,目前也还未有工业应用的实例。

C 高磷鲕状铁矿石磁化焙烧工艺研究现状

磁化焙烧是处理难选铁矿石的有效手段之一,对高磷鲕状赤铁矿进行磁选焙烧的效果也进行了研究。

李艳军等^[15]对湖北某地高磷鲕状赤铁矿进行了磁化焙烧—磁选—反浮选研究,针对此原矿铁品位为 46.31%、磷质量分数为 1.25% 的高磷鲕状赤铁矿进行了磁化焙烧及磨选工艺技术条件试验研究。确定了磁化焙烧—磁选、一次粗选、一次扫选反浮选工艺,在磨矿细度-0.074mm 占 75%、配煤量 11%、焙烧温度 800℃、焙烧时间 30min 的条件下可获得铁品位 57.17%、回收率 82.74%、磷质量分数 1.12% 的磁选铁精矿产品。磁选精矿采用一次粗选、一次扫选反浮选工艺提铁降磷,通过该工艺分选后,可获得铁品位 60.53%、铁回收率 70.22%、磷质量分数 0.32% 的铁精矿产品。

唐双华^[16]对鄂西某鲕状赤铁矿进行了磁化焙烧—弱磁选—细磨脱泥—阴离子反浮选工艺流程研究。结果表明,对全铁品位为 43.65%、磷质量分数 0.91% 的铁矿石,焙烧温度 800℃,混配煤粉 12%,焙烧时间 60min。选择一段磨矿细度-0.045mm 占 89.96%,二段磨矿细度-0.0385mm 占 95%,脱泥浮选后可以获得产率 55.95%、全铁品位达到 61.56%、铁的回收率为 78.90%、含磷质量分数 0.24% 的铁精矿。

罗立群等^[17]以鄂西某鲕状赤铁矿为研究对象,考察焙烧温度、焙烧时间和物料粒度等因素对磁化焙烧效果的影响,当温度不大于 800℃ 时,很少发生过还原生成 FeO 和 Fe_2SiO_4 ,但含磷与含硅矿物均有相变;当温度为 900℃ 时,生成 FeO 的质量分数达 23.61%,形成弱磁性的 Fe_3O_4 -FeO 固熔体,不利于焙烧矿的弱磁选分离。磁化焙烧过程仅改变铁相,而鲕粒结构未变,磁化还原由表及里受扩散作用控制,与鲕粒粒径和致密度密切相关。

黄冬波等^[18]对鄂西高磷鲕状赤铁矿进行了生物质低温磁化焙烧—磁选试验研究。研究表明,生物质替代煤基还原剂进行磁化焙烧具有一定的可行性,利用生物质热解产生的还原性气体在 600℃ 可以完全磁化铁矿石。最佳磁化焙烧工艺条件为:磁化温度 600℃,磁化时间 30min,赤铁矿石与生物质质量比 10:2,矿石粒度 0.074mm (>72.5%)。矿石粒度对精矿品位有很大的影响。当矿石粒度为 0.043mm 占 100%,经 140kA/m 的磁场强度,通过磁选管磁选别得到了铁品位为 55.12%的铁精矿,铁回收率为 79.81%。

聂程等^[19]对湖南某高磷鲕状赤铁矿进行了磁化焙烧—磁选—酸浸工艺研究,并在硫酸浸出脱磷过程中对试验工艺条件进行了优化。结果表明,经还原焙烧—磁选得到的粗精矿,在硫酸浓度为 0.2mol/L、反应时间为 10min、液固比为 3:1、常温搅拌速率为 300r/min 的条件下,可使磷质量分数降低到 0.2%,最终全流程获得了产率为 62.47%、铁品位为 59.52%、铁回收率为 90.53%、磷质量分数为 0.2%的铁精矿。

祁超英等^[20]以铁品位 42.59%、磷质量分数 0.87%、二氧化硅质量分数 22.32%、三氧化二铝质量分数 6.99%的赤铁矿为原料,研究了用闪速磁化焙烧—磁选技术处理鄂西鲕状赤铁的可行性。结果表明,通过研发的闪速磁化焙烧磁选可得到铁精矿产率 60.17%、含铁质量分数 58.32%、磷质量分数 0.32%、铁回收率 81.18%的粗精矿。经细磨反浮选脱磷后,铁精矿品位可以提高到 60.35%,磷质量分数降低到 0.24%,但是铁精矿中的三氧化二铝质量分数达到 6.30%,仍然很高,且目前还没有有效的去除方法。闪速磁化焙烧—磁选反浮选工艺所得铁精矿主要化学成分结果见表 1-2。

表 1-2 铁精矿主要化学成分分析结果 (质量分数/%)

成 分	TFe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
含 量	60.35	27.45	6.46	6.30	0.57	0.60
成 分	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	P	S	Ig
含 量	0.12	0.080	0.31	0.24	0.060	1.17

上述研究结果表明,用磁化焙烧—磁选方法处理高磷鲕状赤铁矿可以提高铁的品位,但对降磷效果有限,增加反浮选或酸浸可以降低铁精矿中磷的含量,但

仍偏高,同时发现铁精矿中铝含量高,不能满足冶炼的要求,且很难降低。研究还从理论和实践上证明,鄂西高磷鲕状赤铁矿石不只在降磷的问题上有难度,在降硅、降铝方面也有难度,而且降铝的难度更大。

1.2.2 其他难选铁矿石选矿研究现状

1.2.2.1 难选赤(褐)铁矿石选矿研究现状

本节难选赤铁矿石是指低品位或嵌布粒度很细、用强磁—阴离子反浮选工艺处理效果不好的赤铁矿石。

高雅巍等^[21]对新疆某高硅低品位难选赤铁矿石采用阶段磨矿、阶段高梯度强磁选—反浮选原则流程进行了研究。结果表明,可获得铁品位为 61.10%、铁回收率为 65.63% 的铁精矿,精矿品位和回收率都偏低。

张丛香等^[22]对某地复杂难选贫赤铁矿进行了选别试验研究。采用两段连续磨矿—弱磁—强磁—中矿再磨—阴离子反浮选工艺流程,在原矿品位 30.50% 条件下,获得了精矿品位 64.93%、产率 32.26%、金属回收率 68.68%,尾矿品位 14.10%、产率 67.76%、金属回收率 31.32% 的选别指标,使废弃多年的矿石得以充分回收利用,既节能降耗又可提高资源利用率,具有较好的经济效益和社会效益。

邵安林等^[23]研究了含碳酸盐赤铁矿石浮选试验,针对纯矿物配成的含赤铁矿、菱铁矿、石英的混合矿进行浮选试验。随着铁矿石中菱铁矿质量分数的提高,铁精矿铁品位、产率和回收率等指标迅速下降,说明现有反浮选流程不能将含有菱铁矿的铁矿石有效分选。提出将菱铁矿预先分离、然后再将赤铁矿和石英分离的分步浮选流程,相比常规反浮选流程,铁精矿铁质量分数由 42.34% 上升至 59.09%,铁的回收率由 53.18% 提高到 79.84%。

褐铁矿是由针铁矿、纤铁矿、水针铁矿、水纤铁矿以及含水氧化硅、泥质等组成的混合物,其化学成分不固定,通常是以 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ($n=0.5\sim 3$) 形态存在的天然多矿物混合体,含铁量随分布区域不同而不同,脉石中多以 SiO_2 为主,矿石嵌布粒度细,且碎磨过程中易泥化,属于复杂难选铁矿石。

张晋霞等^[24]针对内蒙古某褐铁矿矿石的性质和特点,进行了单一反浮选方案的试验研究。试验结果表明:在原矿品位为 41.85%,铁矿物以赤褐铁矿为主,约占全铁成分的 99% 以上的条件下,通过反浮选工艺流程试验可获得精矿产率 48.69%、品位 54.07%、回收率 62.65% 的铁精矿。

刘勇^[25]研究了组合捕收剂作用于褐铁矿强磁粗精矿提铁降硅的试验,实际矿石浮选分离试验结果表明,用碳酸钠作 pH 调整剂、变性淀粉作褐铁矿抑制剂,用组合捕收剂对铁品位为 49.31%、含 SiO_2 质量分数为 20.53% 的高硅强磁选粗精矿进行反浮选试验,经过一段磨矿—粗—精,得到铁品位 58.79%、回收率

79.19%的良好指标。

张裕书等^[26]针对四川某难选褐铁矿性质和特点,采用重选、强磁选、强磁一反浮选工艺进行选矿试验,所得铁精矿品位和回收率都很低;在条件优化试验基础上,采用磁化焙烧—磁选一反浮选工艺,最终可获得铁品位 60.59%、回收率 79.30%的铁精矿。

刘兴华等^[27]对云南某褐铁矿进行了强磁—阳离子反浮选和焙烧—弱磁选两种工艺的详细对比试验研究,结果表明,采用强磁—阳离子反浮选工艺可以获得铁品位 50.97%、回收率 68.50%的铁精矿;而采用焙烧—弱磁选工艺可以得到精矿铁品位 60.36%、回收率 89.71%的铁精矿。

由上可知,褐铁矿选别主要有单一选矿法和联合选矿法处理褐铁矿,如重选、磁选、浮选及磁化焙烧—磁选联合、磁选—浮选、联合等方法。对于品位高、杂质少的褐铁矿采取单一反浮选流程就可获得良好分选指标。但通常褐铁矿常含 S、P 等有害杂质,高硅高铝,易泥化,品位较低,对选矿带来一定困难,采用重、磁、浮工艺的联合流程方法,所得铁精矿品位和回收率都不高。说明褐铁矿用常规选矿方法处理指标不理想。

1.2.2.2 菱铁矿石选矿研究现状

菱铁矿是一种常见的碳酸盐矿物,理论铁品位只有 48.02%。通常呈现粒状、土状或者致密块状集合体。 Mg^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Co^{2+} 、 Mn^{2+} 等离子置换 Fe^{2+} ,形成多元类质同象系列矿物。我国已经探明菱铁矿储量为 18 多亿吨,占铁矿石总量的 14%,储量居世界前列,重点分布在陕西、甘肃、云南、新疆等地,尤其是在贵州、陕西等西部省区,菱铁矿资源占全省铁矿资源总储量的一半以上,陕西大西沟菱铁矿资源储量就超过 3 亿吨。目前对菱铁矿的利用是将部分富矿和部分与磁铁矿、赤铁矿共生的混合矿混合使用,其用量还不足菱铁矿总量的 10%。

王成等^[28]对云南某菱铁矿石进行了选矿试验研究。通过磨矿试验、脱硫浮选条件试验、脱泥磁选试验、碱浸条件试验及最终的磁选试验,获得铁品位为 37.46%、硫质量分数为 0.064%的铁精矿,铁回收率为 77.34%,铁精矿品位和回收率都比较低。

刘军等^[29]针对某菱铁矿矿物组成和结构构造简单、理论品位低等性质进行了磨矿—高梯度强磁选和焙烧—弱磁选两种工艺流程的选矿试验研究,在原矿铁品位为 37.06%的条件下,磨矿—高梯度强磁选流程可获得铁品位为 42.14%、回收率为 70.08%的铁精矿,焙烧—弱磁选流程可获得铁品位为 63.21%、作业回收率为 92.62%的铁精矿。

朱德庆等^[30]对新疆某菱铁矿磁化焙烧—磁选试验。结果表明:16~10mm 的菱铁矿在不加还原煤、焙烧温度为 800℃、焙烧时间为 15min 条件下的焙烧产物磨至 -0.074mm 占 90%,经 1 次弱磁选 (151.20kA/m),可获得铁品位 63.55%、