

含硼铁矿分离与提质试验研究^①

袁壮, 陈雯, 王祥, 刘小银, 彭泽友, 李家林

(长沙矿冶研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012)

摘要: 对某含硼铁矿进行了分离和提质试验研究, 提出提硼降硫的研究方案, 并制定了活化焙烧-磨矿-碱浸-磁选的选冶联合工艺。结果表明: 中性气氛下, 在焙烧温度 650 °C、焙烧时间 90 min 条件下活化焙烧, 所得焙烧矿在磨矿细度 -0.075 mm 粒级占 83.28%、浸出温度 100 °C、浸出时间 60 min、液固比 3:1、浸出剂氢氧化钠浓度(质量分数) 15%、搅拌速度 180 r/min 条件下浸出, 可得到 B₂O₃ 浸出率 94.62% 的含硼母液, 浸出渣经常规磁选, 能获得 TFe 品位 54.94%、B₂O₃ 含量 0.24%、S 含量 0.077% 的铁精矿, 成功实现了硼的充分回收和铁精矿品质的提升。

关键词: 硼铁矿; 活化焙烧; 选冶联合; 浸出; 铁精矿; 硼铁分离

中图分类号: TD951; TF111

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.03.022

文章编号: 0253-6099(2025)03-0130-06

Experimental Study on Separation and Quality Improvement of Boron-Bearing Iron Ore

YUAN Zhuang, CHEN Wen, WANG Xiang, LIU Xiaoyin, PENG Zeyou, LI Jialin

(Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd., Changsha 410012, Hunan, China)

Abstract: Based on experimental studies on separation and quality improvement for a boron-bearing iron ore, a scheme for boron extraction and sulfur reduction was proposed, and a metallurgical process combined with mineral processing was determined, which consists of activation roasting, grinding, alkali leaching and magnetic separation. After activation roasting at 650 °C for 90 min in a neutral atmosphere, the obtained roasted ore was ground to a fineness of -0.075 mm 83.28%, and then leached for 60 min at 100 °C, with liquid-to-solid ratio of 3:1, leaching reagent of NaOH at a concentration of 15%, and stirring speed of 180 r/min. A boron-bearing mother liquor was obtained, with leaching rate of B₂O₃ at 94.62%. The leaching residue was subjected to conventional magnetic separation, resulting in an iron concentrate grading 54.94% TFe, containing 0.24% B₂O₃ and 0.077% S. It is concluded that boron can be fully recovered and the quality of iron concentrate can be also improved by adopting this processing scheme.

Key words: boron-bearing iron ore; activation roasting; beneficiation-metallurgy combination process; leaching; iron concentrate; boron-iron separation

硼是我国战略性非金属矿产资源, 对外依存度高, 高效开发与利用国内硼资源意义重大^[1-2]。硼及硼化合物凭借质轻、阻燃、耐热、高硬、高强、耐磨及催化等特殊性能, 广泛应用于信息技术、新能源、新材料、电子信息、高端制造及传统应用领域^[2-4]。随着新能源、新材料学科的迅猛发展, 我国对硼矿的需求持续攀升^[5]。辽宁省硼矿储量占全国硼矿储量的 64%, 硼镁铁矿储量达 2.8 亿 t, 其中凤城翁泉沟硼镁铁矿是我国

最大的硼矿生产基地, 历经 60 多年的开采, 高品质硼镁铁矿资源已濒临枯竭, 而低品质硼镁铁矿由于硼、铁、镁、硫等多组分复杂共生, 加工难度大, 利用效率低^[5-6]。在现有硼镁铁矿生产工艺中^[5-8], 主要存在两大问题: 其一, 大量硼进入铁精矿, 造成硼资源的浪费; 其二, 主要产品铁精矿硫含量过高, 严重影响铁精矿的品质。因此, 迫切需要开发新的工艺来实现提硼除杂, 提高硼的回收率并提升铁精矿品质。本文对某硼铁矿

① 收稿日期: 2025-01-15

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFC1909802)

作者简介: 袁壮(1994—), 男, 湖北孝昌人, 硕士, 主要研究方向为矿产资源综合利用。E-mail: 872240548@qq.com

通信作者: 陈雯(1965—), 女, 四川资阳人, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为铁矿石选冶。E-mail: chen_wen@vip.sina.com

进行分离提质试验研究,提出提硼除杂的研究方案,制定活化焙烧-磨矿-碱浸-磁选的选冶联合工艺,并对各工艺参数进行优化,实现硼的充分回收及铁精矿品质的提升。

1 试验原料及试验方法

1.1 试验原料

试验原料为某硼铁矿公司阶段生产样,矿样粒度为-0.075 mm 粒级占 44.69%。对矿样进行了化学成分分析、铁物相分析、X 射线衍射及矿物参数自动定量分析系统综合分析,结果分别如表 1~3 所示。矿样中主要有价元素为铁和硼,铁主要分布在磁铁矿中,少量分布在菱铁矿中;硼以硼镁石为主,其次为硼铁矿;有害杂质 S 主要以黄铁矿与磁黄铁矿形式存在。样品中绝大部分磁铁矿以连生体形式产出,与硼镁石、硼铁矿、蛇纹石等镶嵌关系均十分复杂。

表 1 原料化学成分分析结果(质量分数)

Table 1 Chemical composition of raw material %						
Fe	B ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Ca	Mg	Mn
47.15	6.58	6.48	0.52	0.21	8.41	0.074
K ₂ O	Na ₂ O	P	S	C	烧失	
0.10	0.044	0.020	0.83	0.26	2.96	

表 2 原料铁物相分析结果

Table 2 Analysis results of iron phase in raw material		
铁物相	含量(质量分数)/%	分布率/%
磁铁矿中铁	44.40	94.17
硅酸铁中铁	1.27	2.69
碳酸铁中铁	0.80	1.70
磁黄铁矿中铁	0.48	1.02
黄铁矿中铁	0.10	0.21
赤褐铁矿中铁	0.10	0.21
合计	47.15	100.00

表 3 矿样中主要矿物含量(质量分数)

Table 3 Contents of main minerals in ore sample %						
磁铁矿	硼镁石	硼铁矿	磁黄铁矿	黄铁矿	蛇纹石	金云母
58.13	13.63	5.52	1.26	1.13	13.40	1.11
黑云母	菱铁矿	绿泥石	角闪石	白云石	其他	
0.45	1.80	1.20	1.27	0.85	0.25	

1.2 试验方法

矿样中硼、铁、硫嵌布关系极为紧密,即使细磨也很难使它们完全解离形成单体。在此情况下,采用单一的选矿工艺难以达到硼、铁分离以及铁精矿提质的

目标。为解决硼、铁、硫的分离难题,拟采用活化焙烧-磨矿-碱浸-磁选的选冶联合工艺对该矿样进行处理,试验流程如图 1 所示。该工艺中,矿样经焙烧发生矿相转化,硼矿物的活性得以改变;活化后的硼矿物与硫矿物能通过碱浸进入溶液,从而实现它们与铁矿物的有效分离。

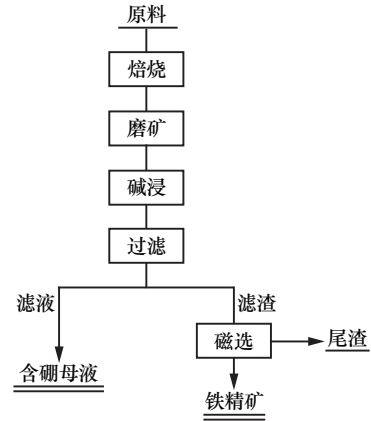


图 1 试验流程

Fig.1 Experimental flowchart

2 结果与讨论

2.1 焙烧试验

在中性气氛下进行焙烧^[9],能够实现硼矿物的活化,同时还可对磁铁矿起到保护作用,避免其被氧化。选择中性气氛进行焙烧试验研究。

2.1.1 焙烧温度试验

焙烧时间 90 min 条件下,进行了不同焙烧温度的焙烧试验,对所得焙烧矿在磨矿细度-0.075 mm 粒级占 83.28%、浸出温度 100 ℃、浸出时间 60 min、液固比 3:1、浸出剂氢氧化钠浓度(质量分数,下同) 15%、搅拌速度 180 r/min 条件下浸出,焙烧温度对浸出效果的影响如图 2 所示。分析图 2 可知,随着焙烧温度升高,浸出渣中 B₂O₃ 含量先降低后增加,B₂O₃ 浸出率先

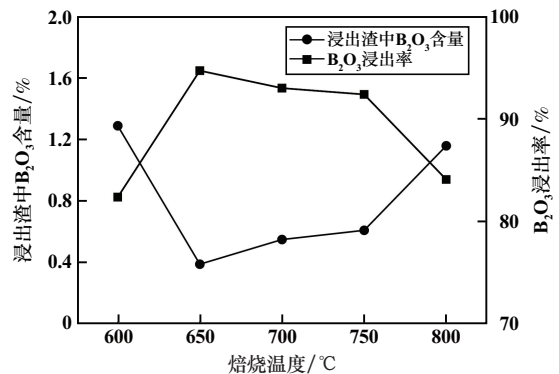


图 2 焙烧温度对硼浸出效果的影响

Fig.2 Effect of roasting temperature on leaching effect of B₂O₃

升高后降低,适宜的焙烧温度为 650 °C,在该温度条件下, B_2O_3 浸出率达到了 94.72%。焙烧温度过低或者过高都会对硼矿物的反应活性产生影响。

对原料、焙烧温度 650 和 800 °C 所得焙烧矿进行了 X 射线衍射分析,结果如图 3 所示。分析图 3 可知,随着焙烧温度逐步升高,主要矿物磁铁矿衍射峰并未发生变化,硼镁石衍射峰呈现逐渐消失的态势,遂安石及镁橄榄石衍射峰逐渐增强。焙烧温度 650 °C 时,硼镁石衍射峰完全消失。焙烧温度 800 °C 时,蛇纹石衍射峰消失,新生成的镁橄榄石包裹在矿物表面,会对焙烧矿的浸出产生不利影响。

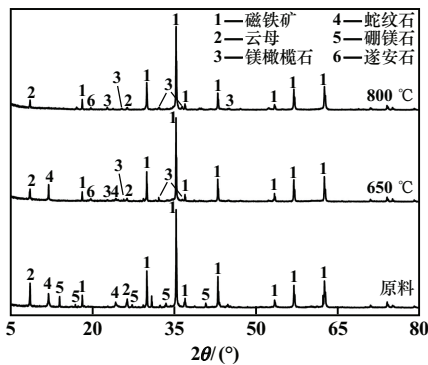


图 3 原料及部分焙烧矿 X 射线衍射分析结果
Fig.3 X-ray analysis results of raw material and some roasted products

2.1.2 焙烧时间试验

焙烧温度 650 °C,其他条件不变,焙烧时间对硼浸出效果的影响见图 4。由图 4 可知,随着焙烧时间增加,硼矿物浸出率先增加后缓慢减少,焙烧时间 90 min 时 B_2O_3 浸出率达到了峰值。适宜的焙烧时间为 90 min。

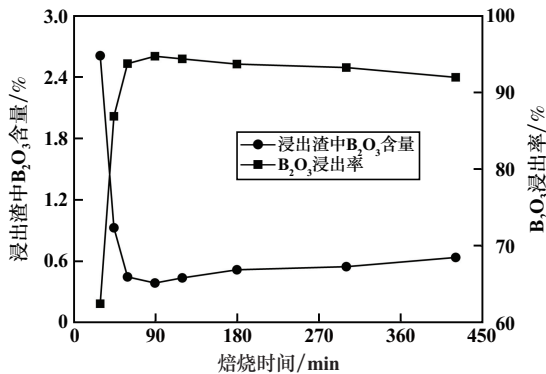


图 4 焙烧时间对硼浸出效果的影响

Fig.4 Influence of roasting time on leaching effect of B_2O_3

对原料及不同焙烧时间下所得焙烧矿进行了 X 射线衍射分析,结果如图 5 所示。分析图 5 可知,随着焙烧时间增加,主要矿物磁铁矿衍射峰无变化,硼镁石

衍射峰逐渐消失,遂安石与镁橄榄石衍射峰峰强逐渐增强。焙烧时间 90 min 时,硼镁石衍射峰完全消失,该条件下浸出效果很好。

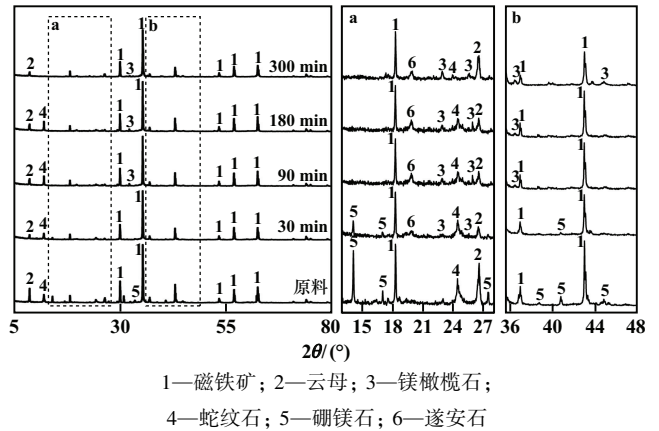


图 5 原料及不同焙烧时间焙烧矿 X 射线衍射分析结果
Fig.5 X-ray analysis results of raw material and roasted products with different roasting time

2.2 磨矿细度试验

对焙烧温度 650 °C、焙烧时间 90 min 条件下获得的焙烧样进行磨矿,不同磨矿细度条件下所得磨矿产品在浸出温度 100 °C、浸出时间 60 min、液固比 3 : 1、浸出剂氢氧化钠浓度 15%、搅拌速度 180 r/min 条件下浸出,磨矿细度对硼浸出效果的影响如图 6 所示。由图 6 可知,随着磨矿细度增加,硼浸出率增加,整体来看,各磨矿细度条件下浸出效果均较好。试验原料中主要矿物为磁铁矿,在确保能选铁的条件下开展硼富集试验。工业选铁生产过程中,磨矿细度通常为 -0.075 mm 粒级占 80%~85%,参考工业生产相关参数,选择磨矿细度 -0.075 mm 粒级占 83.28%。

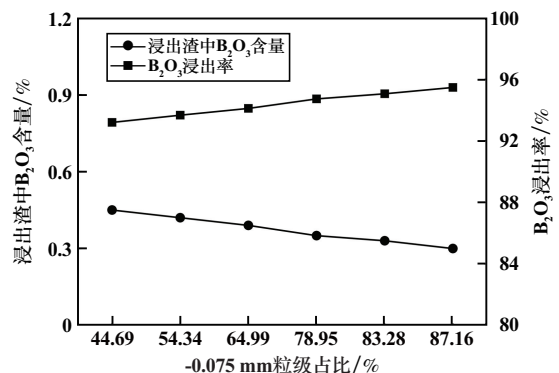


图 6 磨矿细度对硼浸出效果的影响

Fig.6 Effect of grinding fineness on leaching rate of B_2O_3

2.3 浸出试验

对焙烧温度 650 °C、焙烧时间 90 min 条件下获得

的焙烧矿进行磨矿处理,磨矿细度-0.075 mm 粒级占 83.28%。针对该磨矿样品开展浸出条件试验。

2.3.1 浸出温度试验

浸出时间 90 min、浸出剂氢氧化钠浓度 20%、液固比 5:1、搅拌速度 180 r/min 条件下,考察了浸出温度对硼浸出效果的影响,结果如图 7 所示。分析图 7 可知,随着浸出温度逐步升高,硼浸出率逐渐增加。浸出温度超过 100 °C 后,浸出率增幅不明显。适宜的浸出温度为 100 °C。

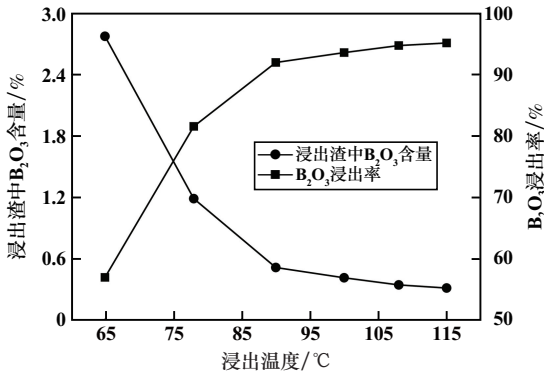


图 7 浸出温度对硼浸出效果的影响

Fig. 7 Effect of leaching temperature on leaching rate of B₂O₃

2.3.2 浸出时间试验

浸出温度 100 °C,其他条件不变,考察了浸出时间对硼浸出效果的影响,结果如图 8 所示。由图 8 能够看出,随着浸出时间增加,硼浸出率逐渐上升。浸出时间超过 60 min 后,硼浸出率增幅不明显。适宜的浸出时间为 60 min。

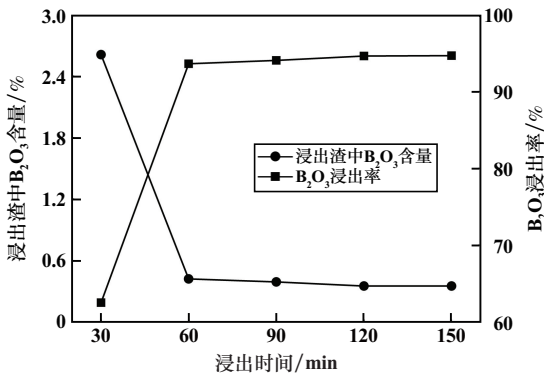


图 8 浸出时间对硼浸出效果的影响

Fig. 8 Effect of leaching time on leaching rate of B₂O₃

2.3.3 液固比试验

浸出时间 60 min,其他条件不变,考察了液固比对硼浸出率的影响,结果如图 9 所示。分析图 9 可知,随着液固比逐步增大,硼浸出率逐渐增加。液固比超过 3:1 后,硼浸出率增幅较小。适宜的液固比为 3:1。

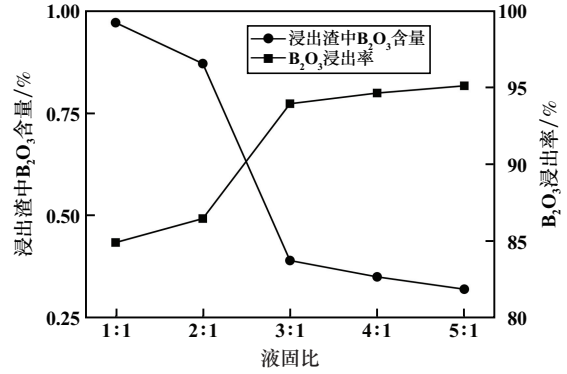


图 9 液固比对硼浸出效果的影响

Fig. 9 Effect of liquid-solid ratio on leaching rate of B₂O₃

2.3.4 氢氧化钠浓度试验

液固比 3:1,其他条件不变,考察了浸出剂氢氧化钠浓度对硼浸出率的影响,结果如图 10 所示。由图 10 能够看出,随着氢氧化钠浓度升高,硼浸出率持续增加。适宜的氢氧化钠浓度为 15%。

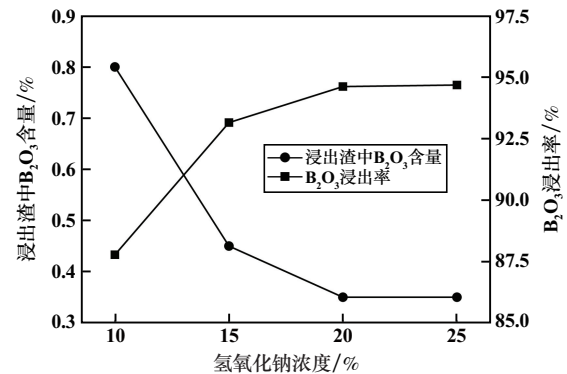


图 10 氢氧化钠浓度对硼浸出效果的影响

Fig. 10 Effect of NaOH concentration on leaching rate of B₂O₃

2.3.5 浸出综合试验

适宜的浸出条件为:浸出温度 100 °C,浸出时间 60 min,液固比 3:1,浸出剂氢氧化钠浓度 15%,搅拌转速 180 r/min。该条件下获得的浸出母液 B₂O₃ 浸出率可达 94.62%,为后续进一步提取硼元素提供了良好的基础。浸出渣中 B₂O₃ 含量为 0.35%,S 含量为 0.086%,实现了含硼铁矿的提硼降硫。

2.4 产品分析

对浸出综合试验获得的浸出渣进行磁选,在磁场强度 0.1 T 条件下获得了 TFe 品位 54.94%、B₂O₃ 含量 0.24%、S 含量 0.077% 的铁精矿。虽然所得铁精矿 B₂O₃ 和 S 含量极低,但铁精矿品位并未得到有效提升。为了清晰探究导致这一现象的原因,对不同样品进行了 X 射线衍射分析,结果如图 11 所示。由图 11 可知,焙烧能促使含硼矿物发生矿相转化,在后续浸出过

程中,还有新的物质氢氧化镁生成。

鉴于硼相对原子质量较小,采用扫描电镜难以对其存在与否进行准确识别,实际操作中借助镁元素的存在情况来判定含硼矿物的相关情况。浸出前后样品微观形貌如图12~13所示。对比分析发现,硼元素被成功浸出,镁元素依旧残留在渣中,浸出后镁以氢氧化镁形式存在,这是铁精矿品位难以进一步提升的根本原因。

浸出母液及洗涤液化学成分分析结果如表4所示。由表4可知,B₂O₃和S均进入浸出母液,含量分别达到了19160和2490 mg/L。MgO含量低于0.1 mg/L,进一步佐证了镁并未进入浸出母液。

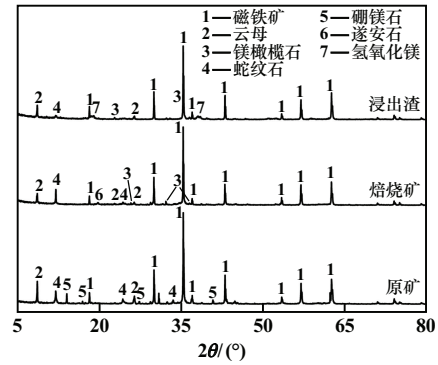
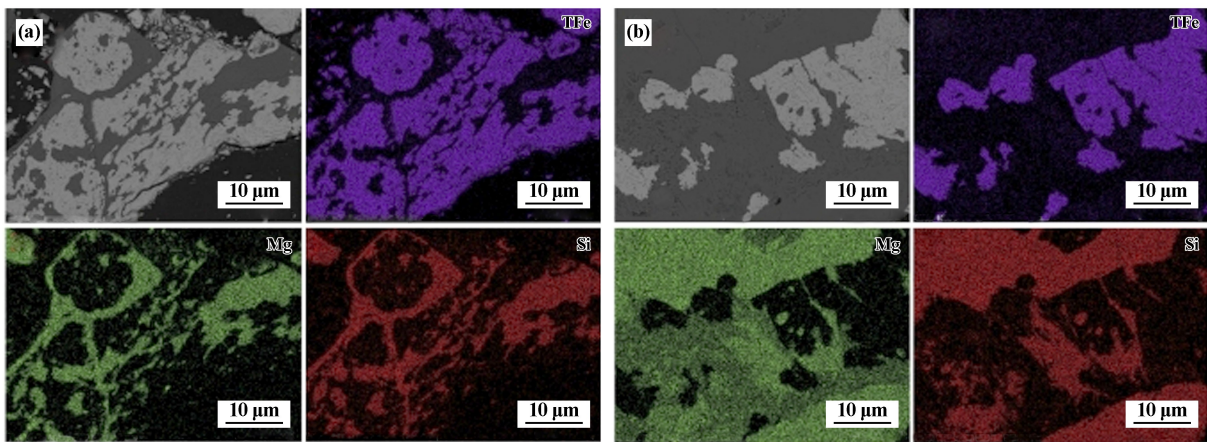


图11 样品XRD衍射分析结果

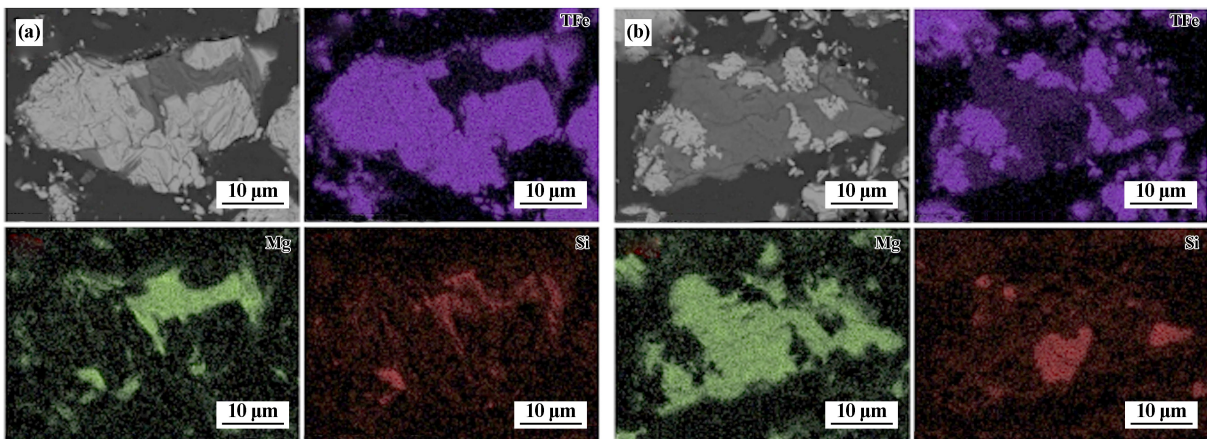
Fig.11 XRD analysis result of samples



(a) 蛇纹石/镁橄榄石与磁铁矿; (b) 蛇纹石/镁橄榄石、遂安石及磁铁矿

图12 浸出前样品微观形貌

Fig.12 Microscopic analysis of samples before leaching



(a) 蛇纹石/镁橄榄石与磁铁矿; (b) 蛇纹石/镁橄榄石、氢氧化镁及磁铁矿

图13 浸出后样品微观形貌

Fig.13 Microscopic analysis of samples after leaching

整个工艺中,遂安石会与碱发生化学反应,生成硼酸钠及氢氧化镁沉淀,生成的氢氧化镁沉淀最终会进入浸出渣,这使得铁品位无法进一步提升,化学反应方

程式为:

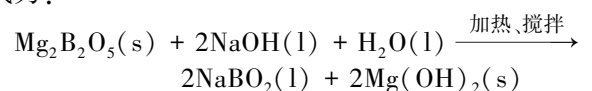


表4 浸出母液及洗涤液化学成分分析结果

Table 4 Chemical composition of mother liquid and washing liquid

化学成分	浓度/(mg · L ⁻¹)	
	浸出母液	洗涤液
Fe	1.33	2.52
B ₂ O ₃	19 160	1 910
SiO ₂	2 200	224.22
Al ₂ O ₃	181.15	12.11
CaO	9.11	8.23
MgO	<0.1	<0.1
K	150.95	18.41
Na	107 240	10 170
P	3.70	2.16
S	2 490	250

3 结论

1) 采用活化焙烧-浸出工艺实现了含硼铁精矿中硼与铁的有效分离,一方面将含硼铁精矿中极具利用价值的硼元素成功提取出来,实现资源的有效回收利用;另一方面,降低了铁精矿中有害元素硫的含量,有效提升铁精矿品质。

2) 活化焙烧-浸出适宜的工艺条件为:中性气氛、焙烧温度 650 ℃、焙烧时间 90 min、焙烧矿磨矿细度 -0.075 mm 粒级占 83.28%、浸出温度 100 ℃、液固比 3:1、浸出时间 60 min、浸出剂氢氧化钠浓度 15%、搅拌速度 180 r/min。该条件下可获得 B₂O₃ 浸出率 94.62% 的浸出母液,浸出渣经常规磁选可获得 TFe 品位 54.94%、B₂O₃ 含量 0.24%、S 含量 0.077% 的铁精矿。

3) 浸出过程中,透安石有较高的反应活性,容易与氢氧化钠发生化学反应,生成氢氧化镁沉淀,这是铁精矿品位难以继续提升的主要原因。

参考文献(References):

- [1] 王庚亮. 中国硼资源进口依赖性分析[J]. 化工矿产地质, 2016(增刊1):116-121.
WANG Gengliang. Analysis on the import dependency of boron resources in China[J]. Geology of Chemical Minerals, 2016(S1):116-121.
- [2] 王春连,王九一,游超,等. 战略性非金属矿产厘定、关键应用和供需形势研究[J]. 地球学报, 2022,43(3):267-278.
WANG Chunlian, WANG Jiuyi, YOU Chao, et al. A study on strategic

non-metallic mineral definition, key applications, and supply and demand situation[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2022,43(3):267-278.

- [3] 聂宾汗,陈甲斌,余良晖. 国内外硼资源供需形势分析[J]. 自然资源情报, 2023(4):14-20.
NIE Binhan, CHEN Jiabin, YU Lianghui. Analysis of supply and demand situation of global boron resources[J]. Natural Resources Information, 2023(4):14-20.
- [4] 张福祥,赵莎,刘卓,等. 全球硼矿资源现状与利用趋势[J]. 矿产保护与利用, 2019,39(6):142-151.
ZHANG Fuxiang, ZHAO Sha, LIU Zhuo, et al. Current situation and utilization trend of the global boron resources[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019,39(6):142-151.
- [5] 焦森,郑厚义,屈云燕,等. 全球硼矿资源供需形势分析[J]. 国土资源情报, 2020(10):85-89.
JIAO Sen, ZHENG Houyi, QU Yunyan, et al. Supply and demand situation of global boron resources[J]. Land and Resources Information, 2020(10):85-89.
- [6] 瞿思思,鄂继涛,朱家祥,等. 辽宁翁泉沟硼铁矿的选矿工艺矿物学研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(2):60-62.
QU Sisi, E Jitao, ZHU Jiexiang, et al. Process mineralogy of paigeite ore from Wengquangou mine in Liaoning Province[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(2):60-62.
- [7] 肖涛. 硼镁铁矿富镁渣制备镁橄榄石质复相耐火材料的研究[D]. 长沙:中南大学, 2022.
XIAO Tao. Preparation of forsterite biphasic refractories from MgO-rich slag derived from ludwigite ore[D]. Changsha: Central South University, 2022.
- [8] 代英秋,周弘强. 复杂共伴生硼镁铁矿矿化联产综合利用工艺研究[J]. 现代矿业, 2020,36(9):159-161.
DAI Yingqiu, ZHOU Hongqiang. Study on the comprehensive utilization method and process of a complex coassociated ludwigite[J]. Modern Mining, 2020,36(9):159-161.
- [9] 杨孟华,杨洪玉,朱晓玉,等. 硫精矿焙烧、浸出提金试验研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):124-127.
YANG Menghua, YANG Hongyu, ZHU Xiaoyu, et al. Experimental study on gold extraction from sulfur concentrate by roasting and leaching[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(3):124-127.
- 引用本文:袁壮,陈雯,王祥,等. 含硼铁矿分离与提质试验研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):130-135.
YUAN Zhuang, CHEN Wen, WANG Xiang, et al. Experimental study on separation and quality improvement of boron-bearing iron ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):130-135.