

细粒难选红土镍矿废渣回收铁的试验研究^①

陈志新^{1,2}, 彭先淦^{1,2}, 陆斌刚^{1,2}, 赖秋生¹, 方湘天¹, 梁金荣¹

(1. 镍钴共生资源开发与综合利用全国重点实验室, 甘肃 金昌 737100; 2. 金川集团研发中心, 甘肃 金昌 737100)

摘要: 对某红土镍矿冶炼排放的废渣进行了化学成分、矿物组成、主要矿物特征及嵌布粒度分析; 针对该渣的特性, 开展了一系列回收铁探索试验。结果表明, 采用磁化焙烧-磁选回收该渣中的铁, 在焙烧温度 750 °C、焙烧时间 40 min、煤粉配比 2% 条件下进行磁化焙烧, 焙烧矿磨至 -0.045 mm 粒级占 80% 后经两次弱磁选, 可获得铁品位 60.38%、铁回收率 71.55% 的铁精矿。

关键词: 磁化焙烧; 磁选; 红土镍矿; 废渣; 铁精矿

中图分类号: TD981; X75

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.05.015

文章编号: 0253-6099(2025)05-0088-05

Experimental Study on Iron Recovery from Smelting Slag of Fine-Grained Refractory Nickel Laterite Ore

CHEN Zhixin^{1,2}, PENG Xiangnan^{1,2}, LU Bingang^{1,2}, LAI Qiusheng¹, FANG Xiangtian¹, LIANG Jinrong¹

(1. State Key Laboratory of Ni & Co Associated Minerals Resources Development and Comprehensive Utilization, Jinchang 737100, Gansu, China; 2. Jinchuan Group Research and Development Center, Jinchang 737100, Gansu, China)

Abstract: Based on analysis of chemical composition, mineral composition, main mineral properties and disseminated grain size of slag from smelting of nickel laterite ore, a series of exploratory experiments were carried out. The iron in the slag was recovered by magnetizing roasting and magnetic separation. The magnetizing roasting is performed for 40 min at 750 °C with a coal powder at a ratio of 2%. The roasted ore is subjected to a two-stage low-intensity magnetic separation (LIMS) after being ground to a fineness of -0.045 mm 80%, and an iron concentrate grading 60.38% Fe can be obtained at recovery of 71.55%.

Key words: magnetizing roasting; magnetic separation; nickel laterite; smelting slag; iron concentrate

近年来,随着经济发展以及矿产资源大量开发利用,矿业固体废弃物逐年增加,既占用了土地、又造成资源浪费,也给人类生活环境带来了严重污染和危害。同时,矿产资源日渐贫乏,矿业固体废弃物作为二次能源受到世界各国的重视。冶炼厂的废渣是一种重要的固体废弃物,国外对冶炼废渣的综合利用非常重视,欧美国家冶炼废渣的利用率已经达到 80% 以上,而我国的冶炼废渣利用率很低^[1-2]。

某红土镍矿平均镍品位 1.44%, 其中高品位腐殖土含镍总量 70 万 t, 冶炼厂提取了红土镍矿中镍、钴金属后, 年排放废渣量约 200 万 t; 废渣中富含铁物质, TFe 品位 45% 以上, 若能回收该部分铁, 既可解决尾矿堆积问题, 又能变废为宝, 综合循环利用资源, 增加企业效益。本文针对该废渣进行了一系列回收铁的试验研究。

1 废渣性质

废渣主要化学成分分析结果见表 1。废渣中可工业回收的元素主要是铁; 为了达到提高铁品位的目的, 需要去除的脉石组分主要为 SiO₂ 和 Al₂O₃。

表 1 废渣化学多元素分析结果(质量分数)

Table 1 Multi-elemental analysis of smelting slag %

TFe	SiO ₂	FeO	Mn	MgO	CaO
45.84	18.18	3.58	0.98	1.82	1.52
Al ₂ O ₃	P	S	Zn	As	烧损
11.81	0.022	0.85	0.06	0.02	12.83

废渣中主要矿物组成见表 2。废渣中主要矿物为

① 收稿日期: 2025-03-25

基金项目: 甘肃省自然科学基金(1610RJZC118)

作者简介: 陈志新(1979—), 男, 广西钦州人, 高级工程师, 主要从事镍铜选矿技术及伴生金属回收研究。E-mail: 20844354@qq.com

褐铁矿,其次为含镍褐铁矿、含铁碳酸盐,其他矿物主要为石英、高岭土和蛇纹石。

表2 废渣中主要矿物组成(质量分数)

Table 2 Main mineral composition in smelting slag %

褐铁矿	铬铁矿	钛铁矿	含钛磁铁矿	含铁碳酸盐	含铁硫酸盐
51.44	4.67	0.07	0.07	9.58	1.06
含镍褐铁矿	含镍蛇纹石	含镍菱铁矿	含镍菱锰矿	金属硫化物	其他矿物
14.00	4.89	4.81	0.05	0.05	9.31

铁在各矿物中的分布情况见表3。由表3可知,主要含铁矿物为褐铁矿,其次为含镍褐铁矿和含铁碳酸盐,以上3种矿物中铁含量总和占总铁的90%以上;其他矿物中含铁量很低。

表3 铁在各矿物中的分布率

Table 3 Iron distribution in minerals %

褐铁矿	铬铁矿	钛铁矿	含钛磁铁矿	含铁碳酸盐	含铁硫酸盐
68.29	2.15	0.04	0.07	8.54	0.02
含镍褐铁矿	含镍蛇纹石	含镍菱锰矿	金属硫化物	其他矿物	
14.80	3.50	2.02	0.04	0.53	

主要铁矿物在各粒级中的分布情况见表4。废渣中主要铁矿物为褐铁矿、含镍褐铁矿和含铁碳酸盐,这3种矿物的含量占矿物总量的75.02%,且主要分布在-19 μm 粒级中,这一粒级中的褐铁矿占褐铁矿总量的92.77%,含镍褐铁矿占含镍褐铁矿总量的91.21%,含铁碳酸盐占含铁碳酸盐总量的94.78%。

表4 主要铁矿物在各粒级中的分布情况

Table 4 Particle size distribution of dominant iron minerals

粒径/μm	铁矿物分布率/%		
	褐铁矿	含镍褐铁矿	含铁碳酸盐
+45	2.25	0.47	0.31
-45+19	1.47	0.76	0.19
-19	47.72	12.77	9.08
合计	51.44	14.00	9.58

2 选矿方案的确定

废渣中主要铁矿物为褐铁矿、含镍褐铁矿和含铁碳酸盐,这3种矿物的含量占总矿物的75%以上,且主要分布在-19 μm 细粒级中,这种微细粒特征采用传统浮选方法回收铁矿物效果不理想;废渣中 TFe 品位45.84%,但磁性率(FeO/TFe)为7.81%,远小于磁性铁的磁性率(36%),因此单一磁选回收也相当困难;同

时,经强磁选、浮选、磁化焙烧-磁选等探索试验实践,强磁选、浮选的精矿产品几乎没有得到富集,证实了单一强磁选、浮选的分选效果较差,而磁化焙烧-磁选^[3-13]是处理褐铁矿、含铁碳酸盐等弱磁性铁矿物的有效方法。

3 试验结果与讨论

3.1 磁化焙烧静态试验

先采用静态磁化焙烧法,将废渣料与还原剂煤粉混匀后,静置于管式电炉内进行还原焙烧,焙烧产品经磨矿后,采用磁选管进行弱磁选,获得磁选精矿,磁化焙烧试验重点考察焙烧温度、焙烧时间、还原剂煤粉用量等条件对焙烧效果的影响。

3.1.1 焙烧温度试验

弱磁性铁矿石的磁化焙烧一般都在高温条件下进行,焙烧温度对焙烧矿质量影响极为重要。焙烧温度过高,容易造成过度焙烧,使已经生成的强磁性铁矿物性质发生变化,磁性大幅度降低,影响焙烧效果。必须严格控制焙烧温度范围,以确保获得好的焙烧效果。焙烧时间30 min,还原剂煤粉用量(占物料总量的质量分数)2%,在不同焙烧温度下进行磁化焙烧,焙烧产品磨矿至-0.045 mm 粒级占70%,采用磁选管进行一次弱磁选,磁选场强96 kA/m,焙烧温度对磁选精矿指标的影响见图1。由图1可知,焙烧温度由650 ℃升高到750 ℃,弱磁选精矿铁品位和铁回收率提升幅度很大,在750 ℃时达到了最高值;焙烧温度超过800 ℃后,弱磁选精矿铁品位呈下降趋势,说明物料已经发生过度焙烧了。确定适宜的焙烧温度为750 ℃。

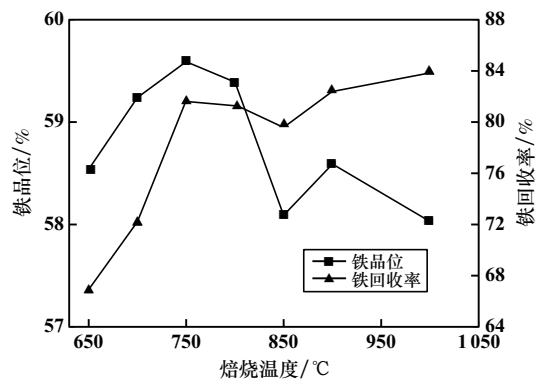


图1 焙烧温度对磁选精矿指标的影响

Fig.1 Effect of roasting temperature on indices of magnetic separation concentrate

3.1.2 焙烧时间试验

焙烧温度750 ℃,其他条件不变,考察了焙烧时间对磁选精矿指标的影响,结果见图2。由图2可知:焙

烧时间 10~60 min 范围内,弱磁选精矿铁品位在 30 min 时达到峰值,为 59.59%,此时铁回收率为 81.63%;弱磁选精矿铁回收率在 40 min 时达到峰值,为 83.71%,此时铁品位为 58.89%;焙烧 40 min 后铁品位和铁回收率都明显下降,说明物料已经发生过度焙烧。确定适宜的焙烧时间为 40 min。

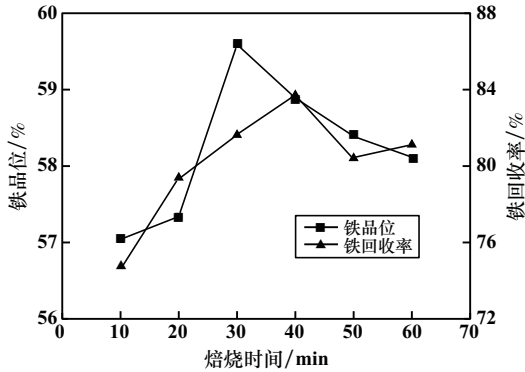


图2 焙烧时间对磁选精矿指标的影响

Fig.2 Effect of roasting time on indices of magnetic separation concentrate

3.1.3 煤粉用量试验

还原剂配比是影响矿物还原程度的重要因素。还原剂不足时,一部分弱磁性矿物不能充分还原成磁铁矿,从而降低矿石磁性;还原剂过剩会使部分磁铁矿过度还原成非磁性的富氏体,磁化率反而下降,导致矿石磁性下降。焙烧时间 40 min,其他条件不变,考察了还原剂煤粉用量对磁选精矿指标的影响,结果见图 3。由图 3 可知,随着煤粉用量增加,弱磁选精矿铁品位变化不大,回收率先增加后大幅下降,煤粉用量 2% 时铁回收率达到峰值。确定适宜的煤粉用量为物料总量的 2%。

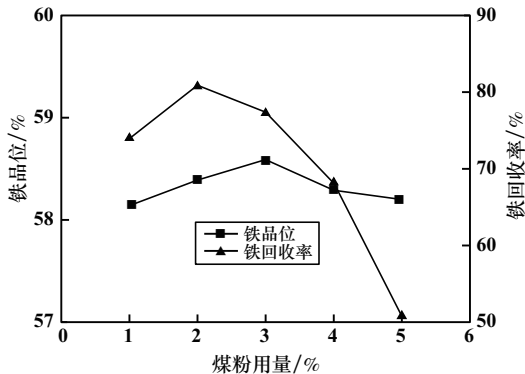


图3 煤粉用量对磁选精矿指标的影响

Fig.3 Effect of coal powder dosage on indices of magnetic separation concentrate

3.1.4 磨矿细度试验

合适的磨矿细度有助于矿物单体解离,对提高铁

精矿品质有重要影响。对焙烧温度 750 °C、焙烧时间 40 min、煤粉用量 2% 条件下所得焙烧矿进行磨矿,然后在磁场强度 96 kA/m 条件下采用磁选管进行一次弱磁选,磨矿细度对磁选精矿指标的影响见图 4。由图 4 可知,磨矿细度-0.045 mm 粒级占比超过 75% 后,随着磨矿细度增加,弱磁选精矿铁品位、铁回收率变化相对平缓,说明铁矿物大部分已经单体解离。综合考虑铁品位、铁回收率及磨矿成本,确定适宜的磨矿细度为-0.045 mm 粒级占 80%。

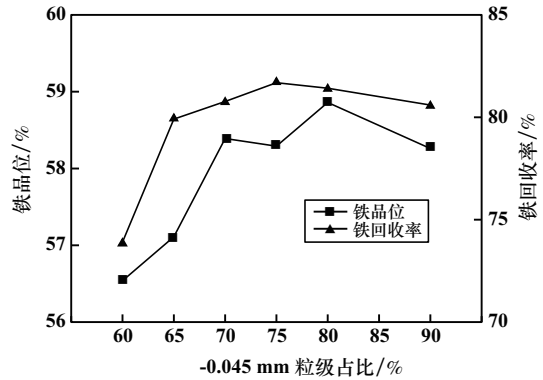


图4 磨矿细度对磁选精矿指标的影响

Fig.4 Effect of grinding fineness on indices of magnetic separation concentrate

3.1.5 磁场强度试验

磨矿细度-0.045 mm 粒级占 80%,其他条件不变,考察了磁选管磁场强度对磁选精矿指标的影响,结果见图 5。由图 5 可知,随着磁场强度增加,磁选精矿品位急速下降,铁回收率缓慢增加,综合考虑磁选铁精矿品位和回收率,确定粗选磁场强度 96 kA/m、精选磁场强度 80 kA/m 为宜。

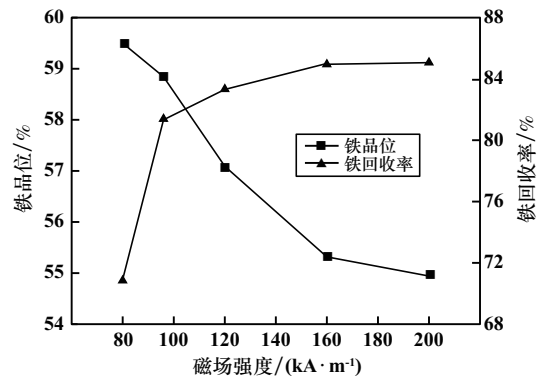


图5 磁场强度对磁选精矿指标的影响

Fig.5 Effect of magnetic field intensity on indices of magnetic separation concentrate

3.2 连续稳定试验

在条件试验基础上适当调整工艺参数进行回转窑

连续动态磁化焙烧试验。动态焙烧试验在实验室 SHY-1 型回转窑中进行,磁化焙烧条件为:焙烧温度 750 ℃、焙烧时间 40 min、煤粉配比 2%,焙烧矿经球磨机磨至-0.045 mm 粒级占 80%,采用 Φ400×300 湿式弱磁选机进行磁选,一次磁选磁场强度 96 kA/m、二次磁选磁场强度 80 kA/m,试验流程见图 6,结果见表 5。由表 5 可知,红土镍矿废渣铁品位 45.84% 条件下,通过磁化焙烧-磁选工艺,可获得 TFe 品位 60.38%、铁回收率 71.55% 的铁精矿。

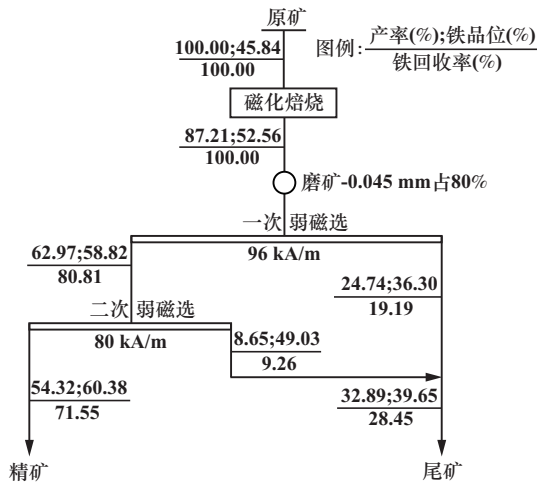


图 6 连续稳定试验流程

Fig. 6 Flowchart for continuous stability test

表 5 连续稳定试验结果

Table 5 Continuous stability test results

产品名称	产率/%	铁品位/%	铁回收率/%
精矿	54.32	60.38	71.55
烧失	12.79	—	—
尾矿	32.89	39.65	28.45
原矿	100.00	45.84	100.00

3.3 铁精矿产品分析

对磁化焙烧-磁选连续稳定试验的铁精矿产品进行化学多元素分析,结果见表 6。采用磁化焙烧-磁选工艺处理该红土镍矿废渣,可将铁品位由 45.84% 提高到 60.38%。红土镍矿废渣在高温条件下焙烧,褐铁矿、针铁矿等水合铁氧化物中水以蒸汽形式挥发,含铁碳酸盐分解,二氧化碳逸出,焙砂中 FeO 含量由焙烧

表 6 铁精矿化学多元素分析结果(质量分数)

Table 6 Multi-elemental analysis results of iron concentrate %

TFe	FeO	S	SiO ₂	CaO	MgO	P	Al ₂ O ₃	As
60.38	33.68	0.13	5.40	0.20	1.22	0.01	5.60	0.02

前的 3.58% 提升到 21.48%,说明大部分铁转化成为磁铁矿;焙砂经两次磁选剔除大部分 SiO₂、Al₂O₃ 杂质,硫品位也由 0.85% 降到了 0.13%,铁精矿品质得到提升。

4 结论

1) 红土镍矿废渣中矿物以铁氧化物为主,包括褐铁矿、铬铁矿、钛铁矿和含钛磁铁矿等,其次为含镍褐铁矿、含镍菱铁矿、含镍蛇纹石和含镍菱锰矿等,另有部分含铁碳酸盐和含铁硫酸盐,脉石矿物主要有石英、高岭石和蛇纹石等;褐铁矿、含镍褐铁矿和含铁碳酸盐主要分布在-19 μm 细粒级中。

2) 磁化焙烧-磁选工艺是处理红土镍矿废渣有效方法,在焙烧温度 750 ℃、焙烧时间 40 min、煤粉用量 2% 条件下磁化焙烧,焙烧产品磨至-0.045 mm 粒级占 80%,经两次弱磁选,可获得 TFe 品位 60.38%、铁回收率 71.55% 的铁精矿,其中硫、磷、硅等杂质含量低。

参考文献(References):

[1] 杨国清. 固体废物处理工程[M]. 北京:科学出版社, 2001.
YANG Guoqing. Solid waste treatment project[M]. Beijing: Science Press, 2001.

[2] 韩跃新,李艳军,高鹏,等. 复杂难选铁矿石悬浮磁化焙烧-高效分选技术[J]. 钢铁研究学报, 2019,31(2):89-94.
HAN Yuexin, LI Yanjun, GAO Peng, et al. Innovative and efficient beneficiation technology of refractory iron ores based on suspended magnetization roasting[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2019, 31(2):89-94.

[3] 陈志新,艾光华,赖秋生,等. 提高某铁精矿铁品位试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2014,34(7):75-77.
CHEN Zhixin, AI Guanghua, LAI Qiusheng, et al. Experimental study on improving iron grade of an iron concentrate[J]. Mining Research and Development. 2014,34(7):75-77.

[4] 韦东,郭泽,张鹏飞,等. 鄂西某高磷鲕状赤铁矿煤基磁化焙烧—磁选试验研究[J]. 金属矿山, 2022(4):90-95.
WEI Dong, GUO Ze, ZHANG Pengfei, et al. Experimental study on coal-based magnetization roasting-magnetic separation of high phosphorus oolitic hematite in western Hubei[J]. Metal Mine, 2022(4):90-95.

[5] 李家林,陈雯,刘小银,等. 某低品位难选菱铁矿分级磁化焙烧试验研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(3):51-54.
LI Jialin, CHEN Wen, LIU Xiaoyin, et al. Experimental study on classification-magnetization roasting of lean and refractory siderite[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019,39(3):51-54.

[6] TANG Z D, HAN Y X, CAO Y, et al. Clean recycling of low-grade refractory limonitic waste using suspension magnetization roasting coupled with magnetic separation: A semi-industrial approach towards a waste utilization plan[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 173: 61-74.

[7] 李艳军,余建文,韩跃新,等. 难选铁矿石流态化磁化焙烧研究新

- 进展[J]. 金属矿山, 2019(2):2-9.
- LI Yanjun, YU Jianwen, HAN Yuexin, et al. Recent progress in magnetic reduction roasting of refractory iron ore via fluidized bed[J]. Metal Mine, 2019(2):2-9.
- [8] 高恩霞, 钟国万, 蒋曼, 等. 硫酸渣与高炉灰共还原-磁选回收铁试验研究[J]. 矿冶工程, 2022, 42(4):95-99.
- GAO Enxia, ZHONG Guowan, JIANG Man, et al. Research on recovery of iron from sulfuric acid residue and blast furnace ash by co-reduction followed by magnetic separation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42(4):95-99.
- [9] 万军营, 陈铁军, 周仙霖, 等. 细粒级镜铁矿造球-磁化焙烧试验研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(5):119-123.
- WAN Junying, CHEN Tiejun, ZHOU Xianlin, et al. Experimental study on pelletizing and magnetization roasting process for fine-grained specularite[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024, 44(5):119-123.
- [10] 姜亚雄, 黄丽娟, 黄恩旭, 等. 难选褐铁矿流态化磁化焙烧—弱磁选工艺研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2023(1):64-70.
- JIANG Yaxiong, HUANG Lijuan, HUANG Enxu, et al. Study on fluidized magnetizing roasting-low intensity magnetic separation process for refractory limonite[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2023(1):64-70.
- [11] 张小龙, 韩跃新, 李艳军, 等. 綦江菱-赤混合型铁矿石磁化焙烧动力学研究[J]. 金属矿山, 2018(2):70-75.
- ZHANG Xiaolong, HAN Yuexin, LI Yanjun, et al. Research on kinetics of magnetization roasting for siderite and hematite iron mixtures from Qijiang[J]. Metal Mine, 2018(2):70-75.
- [12] 彭泽友, 刘旭, 陈雯, 等. 大西沟菱褐铁矿表面磁化焙烧-强磁选新工艺研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(6):93-100.
- PENG Zeyou, LIU Xu, CHEN Wen, et al. New technology of surface magnetization roasting and high intensity magnetic separation for Daxigou siderite and limonite ores[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41(6):93-95.
- [13] ZHANG Q, SUN Y S, HAN Y X, et al. Reaction behavior and non-isothermal kinetics of suspension magnetization roasting of limonite and siderite[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2023, 30(5):824-833.
- 引用本文: 陈志新, 彭先淦, 陆斌刚, 等. 细粒难选红土镍矿废渣回收铁的试验研究[J]. 矿冶工程, 2025, 45(5):88-92.
- CHEN Zhixin, PENG Xiangan, LU Bingang, et al. Experimental study on iron recovery from smelting slag of fine-grained refractory nickel laterite ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(5):88-92.
- (上接第87页)
- [3] 李潇煜, 姜丽帅, 韩百岁, 等. 硫化铅锌矿浮选药剂研究进展[J]. 矿产综合利用, 2023(6):63-70.
- LI Xiaoyu, JIANG Lishuai, HAN Baisui, et al. Research progress on flotation reagents of lead-zinc sulfide ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(6):63-70.
- [4] 鱼博, 王宇斌, 王妍, 等. 某铜铅锌多金属硫化矿工艺矿物学研究[J]. 中国铝业, 2021, 45(1):34-38.
- YU Bo, WANG Yubin, WANG Yan, et al. Process mineralogy of a copper-lead-zinc polymetallic sulphide ore[J]. China Molybdenum Industry, 2021, 45(1):34-38.
- [5] 周华荣, 许永伟, 张慧婷, 等. 青海某硫化铅锌矿选矿工艺优化研究[J]. 金属矿山, 2019(7):103-107.
- ZHOU Huarong, XU Yongwei, ZHANG Huiting, et al. Optimization research of a lead-zinc sulfide ore beneficiation process in Qinghai[J]. Metal Mine, 2019(7):103-107.
- [6] 苏振华, 刘兵, 钟旭群, 等. 铅锌矿无石灰分支快速浮选回收铅[J]. 矿冶, 2024, 33(3):416-422.
- SU Zhenhua, LIU Bing, ZHONG Xuqun, et al. Rapid flotation recovery of lead from lead-zinc ore without lime branching[J]. Mining and Metallurgy, 2024, 33(3):416-422.
- [7] 文涵睿, 李利娟. 四川某混合铅锌矿优先浮选试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(6):121-126.
- WEN Hanrui, LI Lijuan. Experimental study on preferential flotation of a mixed lead-zinc deposit in Sichuan[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(6):121-126.
- [8] 董艳红, 陈代雄, 杨建文, 等. 某铜铅锌多金属硫化矿石的浮选试验[J]. 金属矿山, 2019, 48(7):92-96.
- DONG Yanhong, CHEN Daixiong, YANG Jianwen, et al. Research on flotation tests of a Cu-Pb-Zn polymetallic sulfide ore[J]. Metal Mine, 2019, 48(7):92-96.
- [9] 梁溢强, 刘鹏, 宋涛, 等. 低碱度下高硫铅锌矿的无钙浮选分离工艺研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2019, 43(5):71-75.
- LIANG Yiqiang, LIU Peng, SONG Tao, et al. Study on calcium-free ion flotation process for separation of high sulfur lead-zinc ores at low basicity[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2019(5):71-75.
- [10] 魏宗武, 杨谦, 黄涛, 等. 某低品位难选铜铅锌硫化矿浮选分离试验研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(5):58-61.
- WEI Zongwu, YANG Qian, HUANG Tao, et al. Flotation of low-grade refractory copper-lead-zinc sulfide ore for mineral separation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(5):58-61.
- 引用本文: 梁溢强, 张宇, 徐安勳, 等. 青海某多金属矿综合利用回收工艺研究[J]. 矿冶工程, 2025, 45(5):82-87.
- LIANG Yiqiang, ZHANG Yu, XU Anxun, et al. Comprehensive utilization and recovery of polymetallic ore in Qinghai[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(5):82-87.