湖南某低品位砂质高岭土矿物学特征与综合利用试验研究①

范洋武，王光奇，李桂秀，罗招恩，舒成樑
（湖南省自然资源调查所，湖南 长沙 410007）

摘　要：针对湖南某品位较低、赋存状态较复杂的砂质高岭土矿，开发了捣浆-旋流器分级-磨矿脱泥-反浮选工艺流程，闭路试验获得了综合产率 49.74%、Al_2O_3 品位 28.64%的高岭土精矿和产率 32.24%、SiO_2 品位 93.61%的石英精矿，实现了高岭石、石英等矿物的有效分离，达到了资源综合利用的目的。

关键词：高岭土矿；矿物学特征；旋流器分级；反浮选；高岭石；石英；脱泥
中图分类号：TD92；TD985　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.02.019
文章编号：0253-6099(2026)02-0124-05

Experimental Study on Mineralogical Characteristics and Comprehensive Utilization of a Low Grade Sandy Kaolin in Hunan Province

FAN Yangwu, WANG Guangqi, LI Guixiu, LUO Zhaoen, SHU Chengliang
(*Natural Resources Survey Institute of Hunan Province*, *Changsha* 410007, *Hunan*, *China*)

Abstract: Aiming at a low-grade sandy kaolin with complex occurrence state in Hunan, a process consisting of pulping, cyclone classification, grinding for desliming and reverse flotation was developed. A closed-circuit test produced a kaolin concentrate grading 28.64% Al_2O_3 with a comprehensive yield of 49.74%, as well as a quartz concentrate grading 93.61% SiO_2 with a yield of 32.24%. It is concluded that minerals such as kaolinite and quartz can be effectively separated, thus comprehensive utilization of resources can be actualized.

Key words: kaolin ore; mineralogical characteristics; cyclone classification; reverse flotation; kaolinite; quartz; desliming

我国是陶瓷生产大国，日用陶瓷和建筑卫生陶瓷产量均位居世界第一位[1-2]。高岭土矿是以高岭石族矿物为主要成分的黏土矿物，是陶瓷生产的主要原料之一。高岭石族矿物属层状硅酸盐，主要矿物成分是高岭石。高岭石的晶体化学式为 $2SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 2H_2O$，其理论化学组成为 46.54% SiO_2，39.50% Al_2O_3，13.96% H_2O[3-4]。随着高岭土矿资源日渐枯竭，优质的原生高岭土矿资源越来越少，对中低品质的高岭土原料进行选矿加工提纯势在必行[5-7]。本文以湖南某低品位砂质高岭土矿为研究对象，通过研究其物质组成及各元素赋存状态，以工艺矿物学研究结果为指导，确定适宜的旋流器分级-反浮选试验流程及工艺参数，得到高岭土精矿和石英精矿产品，最终实现高岭土矿的综合利用。

1　原矿性质

高岭土原矿主要化学成分分析结果见表 1，铁化学物相分析结果见表 2。由表 1~2 可以看出：矿石化学成分主要为 SiO_2 和 Al_2O_3，其次为 K_2O 和 MgO；伴生的有价组分为 Li_2O、Rb_2O、Nb_2O_5 和 Ta_2O_5，但其含量偏低。铁为主要杂质成分，主要分布于硅酸盐中。

表 1　原矿主要化学成分分析结果(质量分数)
Table 1　Main chemical composition of raw ore　%

Al_2O_3	Li_2O	Rb_2O	Nb_2O_5	Ta_2O_5	TFe	FeO	Fe_2O_3	SiO_2
17.89	0.30	0.14	0.012	0.01	0.34	0.28	0.17	70.50
TiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	S	C	烧失	
0.009	0.18	0.63	2.13	0.29	0.008	0.04	6.02	

① **收稿日期**：2025-10-30
作者简介：范洋武(1984—)，男，湖南长沙人，工程师，主要研究方向为地质采矿与勘探。E-mail：120469370@qq.com
通信作者：王光奇(1985—)，男，湖南娄底人，硕士，高级工程师，主要研究方向为地质找矿。E-mail：307754662@qq.com

表 2　铁化学物相分析结果

Table 2　Chemical phase analysis results of iron

铁物相	含量(质量分数)/%	分布率/%
磁性铁	0.01	2.95
赤褐铁	0.11	32.35
碳酸铁	0.01	2.95
硫化铁	0.01	2.94
硅酸铁	0.20	58.82
合计	0.34	100.00

矿石为块状或土状,肉眼下呈白色,多数矿块结构较为松散。采用镜下鉴定、X 射线衍射分析、扫描电镜分析和 MLA(矿物参数自动分析系统)对矿样进行综合研究。矿石中主要矿物组成和矿石中高岭石的解离度分别如表 3 和表 4 所示,高岭石连生体与嵌连矿物的比例见表 5。由表 3 可见,矿石中主要矿物为石英和高岭石,其次为云母和长石。高岭石基本以假六方片状晶体产出,晶片厚度一般小于 0.1 μm,仅偶见数颗晶体呈管状、针状形式产出,其集合体常呈团块状形式产出,少量紧密堆积构成叠层状、书册状集合体,集合体粒度一般在 0.1~0.8 mm 之间。由表 4 可见,高岭石的解离度与粒度呈正相关,即粒级越细,解离度越高,其中-0.03 mm 粒级样品中高岭石的解离度达 88.67%。

表 3　矿石中主要矿物组成(质量分数)

Table 3　Main minerals composition　%

高岭石	赤褐铁矿	黄铁矿	石英	长石	云母	磷铝锶石	黄玉	其他
34.04	0.15	0.02	45.96	8.25	10.02	1.27	0.26	0.03

表 4　矿石中高岭石解离度

Table 4　Liberation of kaolinite in ore samples

粒级/mm	单体/%	连生体/%			
		>3/4	3/4~1/2	1/2~1/4	<1/4
+2.00	42.73	32.27	14.45	8.43	2.12
-2.00+0.25	47.95	28.38	14.05	7.55	2.07
-0.25+0.10	57.20	25.92	9.26	4.99	2.63
-0.10+0.045	63.17	19.79	9.96	5.30	1.78
-0.045+0.03	65.72	14.53	10.66	6.93	2.16
-0.03	88.67	5.56	3.57	1.78	0.42

表 5　高岭石连生体与嵌连矿物的比例

Table 5　Ratio of intergrowth to disseminated minerals in kaolinite

粒级/mm	高岭石连生体与嵌连矿物的比例/%					
	石英	长石	云母	磷铝锶石	其他	合计
+2.00	48.05	9.42	40.38	1.50	0.65	100.00
-2.00+0.25	56.98	7.74	34.02	0.68	0.58	100.00
-0.25+0.10	34.05	4.77	59.55	1.24	0.39	100.00
-0.10+0.045	19.49	3.32	75.20	1.62	0.37	100.00
-0.043+0.03	17.12	4.84	75.83	1.71	0.50	100.00
-0.03	18.95	7.52	56.54	16.34	0.65	100.00

由表 5 可见,各粒级样品中,与高岭石嵌布关系密切的矿物为石英和云母,其次为长石和磷铝锶石。

2　试验方法

由高岭土矿的工艺矿物学特征可知,石英主要以粗颗粒形式存在,高岭石主要赋存于细粒级中,因此,拟对该矿进行捣浆-旋流器分级处理,再进行分级精矿提纯、分级尾砂再选。在分散剂用量 0.2%、捣浆浓度(质量分数)50%、捣浆时间 20 min 条件下进行捣浆,捣浆产品采用 Φ100 mm、Φ50 mm、Φ25 mm 水力旋流器进行分级,研究水力旋流器进浆压力、沉砂嘴直径、精选段数等因素的影响;捣浆筛余物及旋流器分级沉砂混合为给矿,进行石英综合回收反浮选试验。试验流程如图 1 所示。

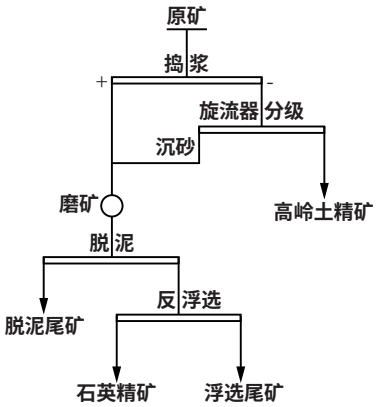


图 1　试验流程

Fig. 1　Test flowchart

3　试验结果与讨论

3.1　旋流器分级试验

3.1.1　粗选试验

进浆浓度(质量分数)18%条件下,采用 Φ100 mm 水力旋流器进行分级,沉砂口直径 8 mm,溢流管直径 26 mm,旋流器粗选进浆压力对高岭土分选效果的影响如图 2 所示。由图 2 可知,随着旋流器粗选进浆压力增加,分级粗选溢流作业产率稍有降低,溢流 Al_2O_3 品位稍有增加。综合考虑产率与品位,旋流器粗选进浆压力选择 0.15 MPa。

进浆压力 0.15 MPa,其他条件不变,旋流器分级粗选沉砂嘴直径对高岭土分选效果的影响如图 3 所示。由图 3 可知,随着旋流器沉砂嘴直径减小,分级粗选溢流作业产率增加,溢流 Al_2O_3 品位增加。沉砂嘴直径 6 mm 时,旋流器分级溢流作业产率为78.48%,Al_2O_3 品位为 27.23%,自然白度为 55%。适宜的旋流器分级粗选沉砂嘴直径为 6 mm。

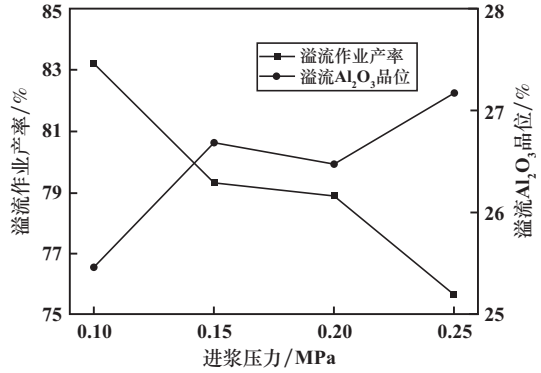


图2 旋流器粗选进浆压力对高岭土分选效果的影响

Fig.2 Influence of cyclone feeding pressure on kaolin separation effect

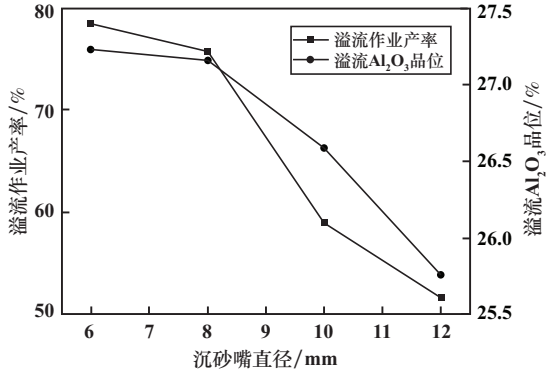


图3 旋流器分级粗选沉砂嘴直径对高岭土分选效果的影响

Fig.3 Influence of underflow orifice diameter of cyclone on kaolin separation effect

3.1.2 精选试验

以旋流器分级粗选溢流为给矿,在进浆浓度15.7%、进浆压力0.25 MPa、溢流管直径12 mm条件下,采用Φ50 mm水力旋流器进行分级精选,沉砂嘴直径对高岭土精选效果的影响如图4所示。由图4可知,随着旋流器精选沉砂嘴直径减小,分级精选溢流作业产率和溢流Al_2O_3品位均增加。适宜的旋流器精选沉砂嘴直径为4 mm,此时获得的旋流器分级精选溢流产品(高岭土精矿)Al_2O_3品位为29.13%。

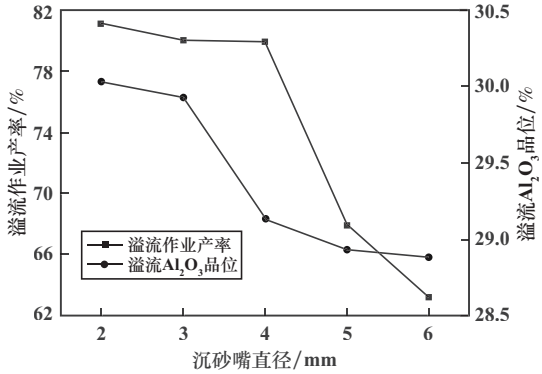


图4 旋流器分级精选沉砂嘴直径对高岭土精选效果的影响

Fig.4 Influence of underflow orifice diameter of cyclone on cleaning of kaolin

3.2 石英回收反浮选条件试验

为综合回收高岭土伴生石英资源,将捣浆筛余物及旋流器分级沉砂混合,进行综合回收石英的反浮选试验。沉砂经磨矿后,进行脱泥,脱泥后矿浆进行反浮选,以硫酸为抑制剂、水玻璃为分散剂、阳离子捕收剂椰油胺与阴离子捕收剂油酸钠按质量比2∶1复配成自制阴阳离子混合捕收剂。试验流程如图5所示。

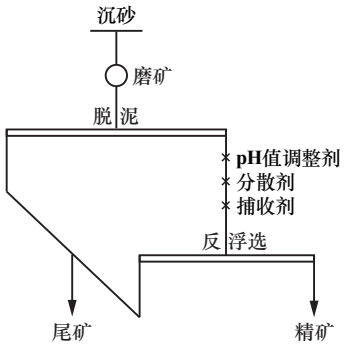


图5 石英综合回收反浮选试验流程

Fig.5 Reverse flotation flowchart for utilization recovery of quartz

3.2.1 磨矿细度试验

pH值为2,分散剂水玻璃用量200 g/t、阴阳离子混合捕收剂用量350 g/t条件下,磨矿细度对石英反浮选效果的影响如图6所示。由图6可知,随着磨矿细度增加,反浮选石英粗精矿产率降低、SiO_2品位提高。适宜的磨矿细度为-0.074 mm粒级占89%。

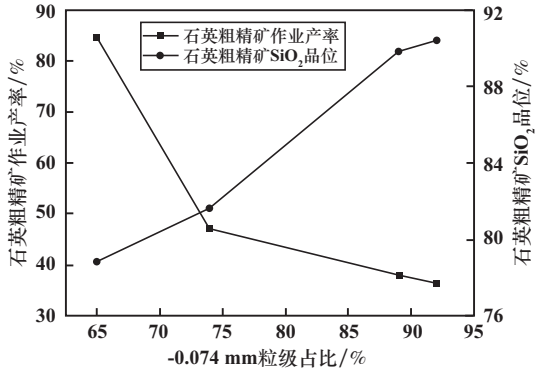


图6 磨矿细度对石英反浮选效果的影响

Fig.6 Influence of grinding fineness on reverse flotation of quartz

3.2.2 pH值试验

磨矿细度-0.074 mm粒级占89%,其他条件不变,矿浆pH值对石英反浮选效果的影响见图7。由图7可知,随着pH值升高,石英粗精矿作业产率升高,SiO_2品位下降。适宜的矿浆浮选pH值约为2。

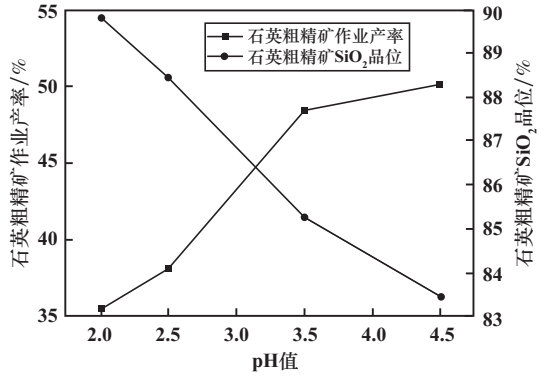


图 7　矿浆 pH 值对石英反浮选效果的影响

Fig. 7　Influence of pH value on reverse flotation of quartz

3.2.3　捕收剂用量试验

矿浆 pH 值为 2,其他条件不变,混合捕收剂用量对石英反浮选效果的影响如图 8 所示。由图 8 可知,混合捕收剂用量对石英反浮选影响较大,混合捕收剂用量 300 g/t 时,石英粗精矿作业产率 35.44%、SiO_2 品位 90.38%,作业回收率为 42.35%。混合捕收剂用量 500 g/t 时,石英粗精矿作业产率 50.12%、SiO_2 品位 86.68%,作业回收率为 55.53%。综合考虑石英反浮选品位及回收率,适宜的阴阳离子混合捕收剂用量为 300 g/t。

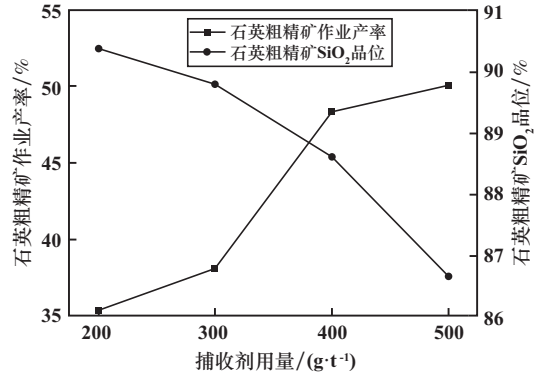


图 8　捕收剂用量对石英反浮选效果的影响

Fig. 8　Influence of collector dosage on reverse flotation of quartz

3.3　综合回收试验

采用捣浆-旋流器分级-磨矿-脱泥-反浮选工艺综合回收该高岭土资源,综合回收试验流程见图 9。综合回收试验得到了综合产率 49.74%、Al_2O_3 品位 28.64%的高岭土精矿和产率 32.24%、SiO_2 品位 93.61%、SiO_2 回收率 42.81%的石英精矿。石英精矿质量达到普通石英砂三级品要求。测得高岭土精矿白度为 52.2%,其化学成分分析结果如表 6 所示。该高岭土精矿质量达到 GB/T 14563—2020《高岭土及其试验方法》陶瓷工业用高岭土产品标准。经镜下观察可知,高岭土精矿中主要矿物为高岭石,高岭石呈粒度微细的片状晶体产出,多数单独聚集形成团块呈单体形式产出,部分与石英、云母和长石混杂构成大小不一的团块状集合体。

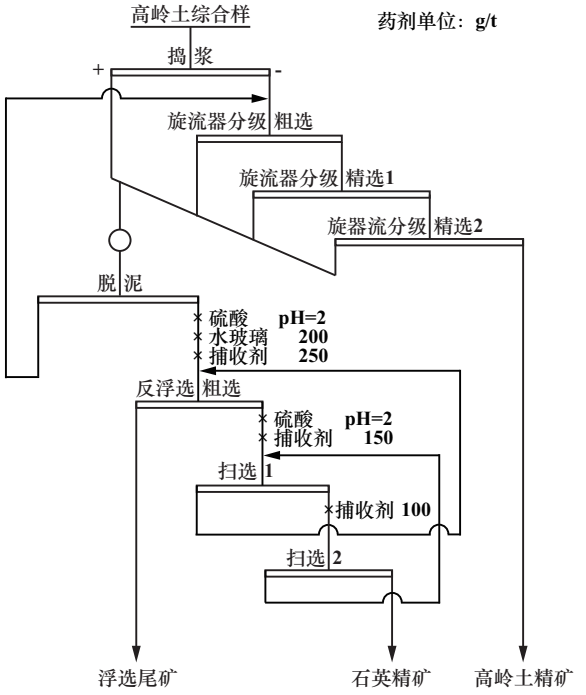


图 9　综合回收试验流程

Fig. 9　Flowchart for comprehensive recovery test

表 6　高岭土精矿主要化学成分分析结果(质量分数)

Table 6　Main chemical composition of kaolin concentrate %

Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	Ta_2O_5	Nb_2O_5	Rb_2O	Li_2O	SO_3
28.64	0.52	53.86	0.005	0.019	0.07	0.04	0.02

4　结论

1)某低品位砂质高岭土矿 Al_2O_3 和 SiO_2 含量分别为 17.89%和 70.50%。高岭石晶体粒度极为微细,呈微晶质形式存在,多以假六方片状晶体形式产出,晶片厚度一般小于 0.1 μm,其集合体常呈团块状形式产出。矿石中杂质 Fe 含量 0.34%,有回收价值的 Li_2O、Rb_2O、Nb_2O_5 和 Ta_2O_5 含量分别为 0.30%、0.14%、0.012%和 0.01%。铁赋存较复杂,赤褐铁与磁性铁合计占比为 35.29%。

2)原矿经捣浆-旋流器分级-磨矿-脱泥-反浮选可获得合格的高岭土精矿和石英精矿。其中高岭土精矿综合产率 49.74%、Al_2O_3 品位 28.64%、SiO_2 品位53.86%,自然白度为 52.2%,符合陶瓷工业用高岭土要求。石英精矿 SiO_2 品位 93.61%、SiO_2 回收率42.81%,符合普通石英砂三级品要求,实现了不同矿物的有效分离,达到

了低品位高岭土矿综合回收利用的目的。

参考文献(References):

[1] 李海东,方志斌. “一带一路”与中国建筑陶瓷产业发展研究[J]. 河北大学学报(哲学社会科学版), 2018,43(2):126-137.
LI Haidong, FANG Zhibin. Research on the development of Chinese ceramic tile industry under One Belt and One Road initiative[J]. Journal of Hebei University (Philosophy and Social Science), 2018, 43(2):126-137.

[2] 韩复兴. 多孔陶瓷在陶瓷产业应用现状分析[J]. 陶瓷, 2022(8):28-33.
HAN Fuxing. Analysis of application status of porous ceramics in ceramic industry[J]. Ceramics, 2022(8):28-33.

[3] 冯雪茹,邓建,严伟平,等. 我国高岭土开发现状及综合利用进展[J]. 矿产综合利用, 2022(6):1-10.
FENG Xueru, DENG Jian, YAN Weiping, et al. Development status and comprehensive utilization of kaolin[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(6):1-10.

[4] 王邦猛,丁定,杨成亮,等. 云南省某高岭土矿的工艺矿物学研究[J]. 矿产保护与利用, 2022,42(3):151-154.
WANG Bangmeng, DING Ding, YANG Chengliang, et al. Study on process mineralogy of the kaolin ore in Yunnan Province[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022,42(3):151-154.

[5] 赵靖. 阳江某矿区砂质高岭土开发利用试验研究[J]. 非金属矿, 2024,47(5):73-75.
ZHAO Jing. Experimental study on the development and utilization of sandy kaolin in a mining area of Yangjiang[J]. Non-Metallic Mines, 2024,47(5):73-75.

[6] 尚兴科,付广钦,关通,等. 广东某高岭土矿综合利用试验研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(2):56-59.
SHANG Xingke, FU Guangqin, GUAN Tong, et al. Experimental study on comprehensive utilization of kaolin ore in Guangdong[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(2):56-59.

[7] 周立军,刘永祥,赵绎钧. 内蒙古某低品位高岭土提纯试验研究[J]. 现代矿业, 2022,38(5):111-113.
ZHOU Lijun, LIU Yongxiang, ZHAO Yijun. Study on purification experiment of a low-grade kaolin from Inner Mongolia[J]. Modern Mining, 2022,38(5):111-113.

引用本文:范洋武,王光奇,李桂秀,等. 湖南某低品位砂质高岭土矿物学特征与综合利用试验研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(2):124-128.
FAN Yangwu, WANG Guangqi, LI Guixiu, et al. Experimental study on mineralogical characteristics and comprehensive utilization of a low grade sandy kaolin in Hunan Province[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(2):124-128.

(上接第123页)

[2] 牛芳银,郭彩莲,宁新霞,等. 某难选金矿石选矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(5):79-83.
NIU Fangyin, GUO Cailian, NING Xinxia, et al. Beneficiation experiment of refractory gold ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(5):79-83.

[3] 董振海,程福超,施建军,等. 腐殖酸钠对铁矿物和石英可浮性的影响[J]. 金属矿山, 2022(12):85-91.
DONG Zhenhai, CHENG Fuchao, SHI Jianjun, et al. Effect of sodium humate on floatability of iron minerals and quartz[J]. Metal Mine, 2022(12):85-91.

[4] 刘杰,王洪杰,周宽达,等. 刚果(金)某渣选硫化铜矿再磨再选试验研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):203-206.
LIU Jie, WANG Hongjie, ZHOU Kuanda, et al. Regrinding and reseparation of slag-beneficiated copper sulfide ore from Congo (Kinshasa)[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):203-206.

[5] 张硕,李茂林,曾志飞,等. 提高湖南某选矿厂磨矿产品浓度工业试验研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(3):53-56.
ZHANG Shuo, LI Maolin, ZENG Zhifei, et al. Industrial experimental research on increasing concentration of grinding products in a concentrator in Hunan[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024, 44(3):53-56.

[6] 范宛惠,谢蕾,郭泽,等. 某高硫低品位铜矿浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):185-188.
FAN Wanhui, XIE Lei, GUO Ze, et al. Investigation on flotation of low-grade high-sulfur copper ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):185-188.

[7] 耿亮,钟志刚,曾建红,等. 某地区磁黄铁矿型铅锌硫化矿浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(2):69-73.
GENG Liang, ZHONG Zhigang, ZENG Jianhong, et al. Experimental study on flotation of pyrrhotite-type lead-zinc sulfide ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(2):69-73.

[8] 丁林芳,刘有才,符剑刚,等. 俄罗斯某高硫锑金混合精矿降硫提质试验研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(1):77-79.
DING Linfang, LIU Youcai, FU Jiangang, et al. Sulfur reduction and upgrading of high-sulfur antimony-gold bulk concentrate from Russia[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(1):77-79.

引用本文:姚凯,白成庆,潘仁球,等. 硫精矿金银提质试验研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(2):118-123.
YAO Kai, BAI Chengqing, PAN Renqiu, et al. Experimental study on improvement of gold and silver grade of sulfide concentrate[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(2):118-123.