

石煤酸浸提钒尾渣资源化利用试验研究^①

李鑫源, 刘有才, 符剑刚, 张作庆, 邓惠贤, 柏景涛

(中南大学 化学化工学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 针对湘西某石煤酸浸提钒后尾渣堆存占用土地资源、造成巨大环境安全隐患等问题, 提出了尾渣深度炭灰分离的资源化利用方案。采用筛分-浮选的方法, 通过筛分得到灰分大于94%的粗粒级灰分矿物后, 对筛下细粒级矿物进行浮选, 闭路浮选所得富炭精矿固定碳含量可达32.86%, 高位发热量为9 832 kJ/kg, 可满足锅炉掺烧煤的热值要求, 可燃体回收率为73.50%; 尾矿灰分96.14%, 产率78.42%, 烧失量为4.98%, 浸出毒性检测结果显示高灰分尾矿产品危害成分含量均未超出限值。简单的经济估算结果表明, 该技术方案具有一定经济可行性。

关键词: 石煤提钒; 尾渣; 浮选; 资源化利用; 灰分; 碳

中图分类号: TF841.3; TD981

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.03.018

文章编号: 0253-6099(2025)03-0110-05

Experimental Study on Resource Utilization of Residue After Vanadium Extraction from Stone-Like Coal by Acid Leaching

LI Xinyuan, LIU Youcai, FU Jiangang, ZHANG Zuoqing, DENG Huixian, BAI Jingtao

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: To address issues such as land occupation and environmental hazards caused by stockpiling residues that are left after vanadium extraction from stone-like coal in the Western Hunan, a resource utilization scheme involving deep separation of carbon and ash was proposed. Firstly, coarse-grained minerals with ash content more than 94% were obtained by sieving, and the fine-grained undersize minerals were then subjected to flotation. A closed-circuit flotation test produced a concentrate with fixed carbon content of 32.86% and a higher heating value of 9 832 kJ/kg, which could meet the calorific requirement for the coal added in boilers. The recovery of combustible matter was 73.50%, while the obtained tailings had an ash content of 96.14%, with a yield of 78.42%, and the loss on ignition was 4.98%. The toxicity test confirmed that hazardous components in the high-ash tailings did not exceed limits. Based on preliminary economic estimates, it is concluded that this technical approach is economically feasible.

Key words: vanadium extraction from stone-like coal; residue; flotation; resource utilization; ash; carbon

石煤钒矿作为有多种伴生金属元素的含钒炭质页岩矿物, 是我国极具特色和优势的提钒资源^[1]。随着钒需求的日益增长, 越来越多的石煤钒矿作为重要的提钒资源被开采。石煤钒矿的有序开发和高效资源化利用已成为支撑我国提钒产业可持续发展的重要保障。目前石煤提钒工艺主要包括焙烧、浸出、离子净化、沉淀和煅烧等^[2]。就酸浸提钒工艺而言, 石煤中钒品位较低, 在浸出过程中需要加入大量硫酸熟化, 产生的提钒尾渣含酸量高导致腐蚀性强从而不能丢弃、

填埋, 而且提钒尾渣没有经过焙烧导致其烧失量大不能被直接作为建筑材料使用^[3]。如果能将提钒尾渣中的炭质富集起来, 使其热值满足锅炉掺烧煤的要求, 将有利于缓解贫煤地区的能源紧张, 剩余的石英和铝硅酸盐等无机脉石矿物可用于合成地质聚合物、作胶固充填材料、制备免烧陶粒等^[4-7]。

本文以湘西某石煤钒矿酸浸提钒尾渣为研究对象, 通过浮选条件试验, 研究了矿浆 pH 值、抑制剂、捕收剂及其用量对浮选效果的影响。利用“筛分-浮选”

① 收稿日期: 2024-12-27

基金项目: 湖南省自然科学基金(2022JJ30680)

作者简介: 李鑫源(2002—), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为矿产资源综合利用。E-mail: 2438384249@qq.com

通信作者: 符剑刚(1975—), 男, 湖南益阳人, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境化工和资源化工。E-mail: 15111123919@126.com

的分选方法,将尾渣中的炭质物与石英等无机脉石矿物分离开来。对分离所得的产品进行相关检测来验证其生产价值,并以此为基础对技术方案进行了简单的经济估算。

1 试验部分

1.1 试验原料性质

试验原料取自湘西某石煤钒矿酸浸提钒尾渣。对样品进行了全工业分析,结果如表1所示。该石煤提钒尾渣中固定碳含量(质量分数,下同)7.98%,干燥基高位发热量为3251 kJ/kg,热值低不能直接作为锅炉掺烧煤,必须将炭质富集使其热值超过8368 kJ/kg才能作为锅炉掺烧煤使用。挥发分只有2.28%,表明尾渣中炭以无烟煤为主,煤阶较高。空气干燥基全硫含量较高,硫分主要来源于尾渣中的硫酸盐。

表1 石煤钒矿酸浸提钒尾渣全工业分析结果

Table 1 Industrial analysis results of tailings from acid extraction of vanadium from stone-like coal

含量(质量分数)/%					热值/(kJ·kg ⁻¹)	
固定碳	挥发分	灰分	全水	全硫	高位	低位
7.98	2.28	88.67	1.07	7.43	3251	3046

为探究样品中无机灰分矿物组成,对样品进行了X射线荧光和衍射光谱分析(为防止样品中的无固定晶型的碳影响其他元素的分析结果,测试前对样品进行了灼烧处理)。XRF元素分析结果见表2,XRD衍射图谱见图1。

表2 灼烧后尾渣样品XRF元素分析结果(质量分数)

Table 2 XRF analysis of tailings sample after ignition %

O	Si	S	Ca	Fe	Al	Ba	K	Mg
53.84	34.00	7.616	4.883	1.233	0.665	0.520	0.300	0.214
P	V	Na	Zn	Ti	Ni	Cu	Mn	
0.214	0.116	0.091	0.079	0.071	0.032	0.026	0.023	

由于提钒工序中加入了大量的硫酸熟化,石煤中的金属氧化物大都以硫酸盐形式赋存。XRD和XRF元素分析结果显示样品中无机灰分矿物包含大量二氧化硅、少量硫酸盐(硫酸钙、硫酸铁、硫酸铝和少量其他金属硫酸盐)。上述灰分矿物均有极强的亲水性,这为通过浮选实现炭灰分离的技术方案提供了先决条件。

石煤钒矿酸浸提钒尾渣筛析结果如表3所示。样

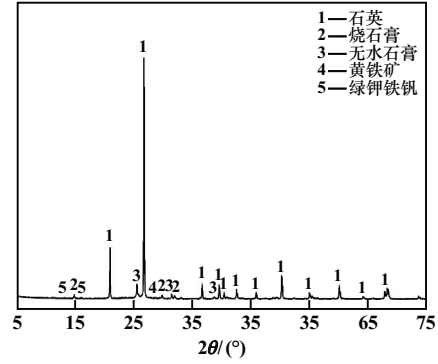


图1 灼烧后尾渣样品XRD衍射图谱

Fig.1 XRD pattern of tailings sample after ignition

表3 石煤钒矿酸浸提钒尾渣筛析结果

Table 3 Sieve analysis results of tailings after acid leaching of vanadium from stone-like coal

粒度/mm	产率/%	灰分/%	累计产率/%	累计灰分/%
-0.420+0.100	13.75	94.01	13.75	94.01
-0.100+0.074	6.56	91.57	20.31	93.22
-0.074+0.048	11.34	91.38	31.65	92.56
-0.048+0.038	8.60	89.27	40.25	91.86
-0.038	59.75	88.52	100.00	89.86
合计	100.00	89.86		

品中粗粒级矿物灰分高于94%,可以直接作为高灰分尾矿分离出去,余下的细粒级矿物需要依靠浮选实现炭灰分离。

1.2 试验设备与药剂

主要试验设备包括GB/T 6003.1—2012标准筛、ATY124分析天平、XFD-II单槽自吸式浮选机、5E-MAG6600工业分析仪、JSX-1000S型X射线荧光光谱仪、Thermo Scientific K-Alpha型X射线光电子能谱仪、SX-4-10马弗炉等。

浮选试验主要药剂包括捕收剂V401(非极性烃类油,混合酯和工业洗油以特定比例配伍)、起泡剂T82(仲辛醇、二号油和少量添加剂以特定比例配伍)、抑制剂P601(羧甲基纤维素钠和少量添加剂按一定比例配伍)、模数为1.5的水玻璃、无水碳酸钠等。试验用水为自来水。

1.3 试验方法

对尾渣样品进行筛分,+0.100 mm粗粒级筛上产品直接作为高灰分尾矿产品进行收集,筛下产品则在1.5 L浮选槽中进行浮选。试验流程见图2。浮选矿浆浓度(质量分数)30%,浮选机转子搅拌速率1800 r/min,充气速率0.4 m³/h。采用缓慢灰化法检测样品灰分,并计算回收率。

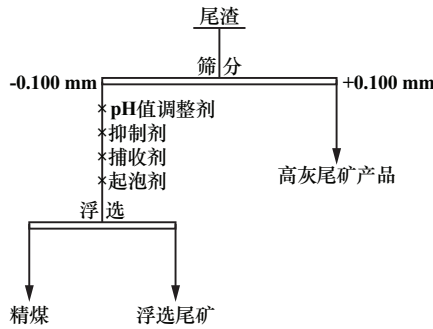


图2 试验流程

Fig.2 Flowchart in test

2 试验结果与讨论

2.1 矿浆 pH 值的影响

采用自来水制浆,矿浆浓度 30% 时矿浆 pH 值约为 3.0。按照图 2 所示流程,在抑制剂水玻璃用量 800 g/t、捕收剂煤油用量 700 g/t、起泡剂 T82 用量 60 g/t 条件下,研究了矿浆 pH 值对浮选效果的影响,结果见表 4。结果表明,pH=3.0 时虽然可以收获较高的可燃体回收率,但富炭精矿固定碳含量较低,难以满足掺烧煤的热值要求;pH=4.0~5.0 时,可燃体回收率变化不大,但精矿固定碳含量下降,尾矿中残存炭质增加;pH 值 5.0~7.0 时,随着 pH 值增大,富炭精矿固定碳含量急剧降低,大量炭质残留在浮选尾矿中未被富集,浮选指标下降。pH 值较低时收获了较高的可燃体回收率,一方面可能是样品中石墨化程度较高的表面基团在氢离子浓度较高时被活化,有利于捕收剂在其表面发生化学吸附,表现出更高的选择性和捕收能力;另一方面 pH 值对起泡剂的起泡性能有较大影响,所使用的起泡剂在较低 pH 值时可以更好地维持气泡的稳定性。考虑到 pH=3.0 时泡沫夹带严重且会急剧加快不锈钢设备腐蚀,后续试验皆采用碳酸钠调整矿浆 pH 值至 4.0,此时碳酸钠用量为 200 g/t。

表4 矿浆 pH 值对浮选效果的影响

Table 4 Influence of pulp pH on flotation results

pH 值	可燃体回收率/%	富炭精矿固定碳含量/%	尾矿产率/%	尾矿灰分/%
3.0	30.63	30.05	53.98	92.25
4.0	30.12	31.82	53.16	92.53
5.0	29.66	29.89	54.33	92.14
6.0	24.35	28.06	55.68	91.65
7.0	22.09	25.62	62.33	90.94

2.2 捕收剂种类及用量的影响

按照图 2 所示流程,在矿浆 pH 值 4.0、抑制剂 P601

用量 800 g/t、起泡剂 T82 用量 60 g/t 条件下,分别使用 V401、煤油和柴油为捕收剂,捕收剂用量均为 700 g/t,进行了捕收剂种类试验,结果见表 5。结果表明,在上述条件下,以 V401 为捕收剂时,精矿固定碳含量高,尾矿灰分高、残碳少,可燃体回收率高,说明 V401 对石煤酸浸渣中的炭质有良好的选择性和捕收能力。后续采用 V401 为捕收剂进行试验。

表5 捕收剂种类对浮选效果的影响

Table 5 Influence of collector types on flotation results

捕收剂种类	可燃体回收率/%	富炭精矿固定碳含量/%	尾矿产率/%	尾矿灰分/%
煤油	40.56	27.69	49.97	93.53
柴油	35.62	30.21	54.89	92.89
V401	55.90	35.35	46.45	95.03

相同条件下,进行了捕收剂 V401 用量试验,结果见表 6。结果表明,V401 用量大于 800 g/t 时,随着其用量增加,可燃体回收率和尾矿灰分增加速率明显变缓,但富炭精矿固定碳含量和尾矿产率减少速率明显变快,这表明 V401 用量大于 800 g/t 后,大量多灰少炭的连生体矿粒开始进入泡沫层,使得浮选指标开始恶化。兼顾精矿中可燃体回收率、精矿固定碳含量、尾矿灰分和药剂的成本,V401 用量 800 g/t 为宜。

表6 V401 用量对浮选效果的影响

Table 6 Influence of collector dosage on flotation results

V401 用量/(g·t ⁻¹)	可燃体回收率/%	富炭精矿固定碳含量/%	尾矿产率/%	尾矿灰分/%
500	45.95	38.87	50.92	93.96
600	50.98	36.79	48.61	94.35
700	55.90	35.35	46.65	95.03
800	59.67	34.64	44.98	95.29
900	61.08	31.69	40.29	95.38
1000	62.78	28.20	37.29	95.43

2.3 抑制剂种类的影响

样品浸钎渣中灰分矿物主要为石英、金属硫酸盐,在浮选过程中,要实现尾渣中有机炭质与石英等无机灰分矿物的有效分离,在炭灰充分解离的先决条件下,还依赖于抑制剂的作用。按照图 2 所示流程,在矿浆 pH 值 4.0、抑制剂用量 800 g/t、捕收剂 V401 用量 800 g/t、起泡剂 T82 用量 60 g/t 条件下,研究了抑制剂种类对浮选效果的影响,结果见表 7。结果表明,以水玻璃为抑制剂时,富炭精矿固定碳含量略高但可燃体回收率较小,可能是酸浸渣中部分炭质与无机矿物

致密共生,很难完全解离,水玻璃极大增强了石英等硅酸盐矿物的表面疏水性,使得连生体可浮性急剧降低,从而减少了连生体中炭质的回收。在酸性矿浆中,抑制剂 P601 中的羧甲基纤维素钠在少量添加剂的作用下,对石英有良好的抑制效果,同时又不会对多炭少灰连生体产生过强的抑制作用。精矿固定碳含量的微小差距对其热值的影响不会很大,综合考虑可燃体回收率和尾矿的炭质残留,采用 P601 作为抑制剂。

表 7 抑制剂种类对浮选效果的影响

Table 7 Influence of inhibitor types on flotation results

抑制剂种类	可燃体回收率/%	富炭精矿固定碳含量/%	尾矿产率/%	尾矿灰分/%
水玻璃	59.67	34.64	44.98	95.29
P601	64.68	33.89	43.83	96.59

2.4 闭路浮选试验

在条件试验和开路试验基础上,对试验条件进行优化,最后确定的闭路试验流程如图 3 所示,结果见表 8。一粗一扫二精闭路浮选获得的富炭精矿固定碳含量为 32.86%,可燃体回收率达到了 73.50%,综合尾矿(高灰分尾矿+浮选尾矿)灰分为 96.14%,产率为 78.42%。

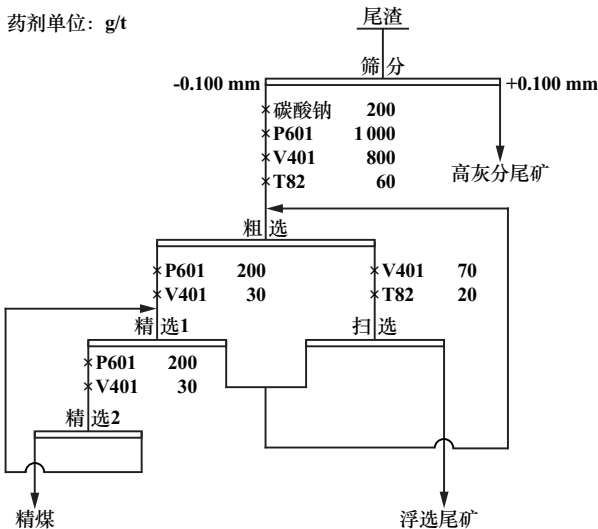


图 3 闭路试验流程

Fig. 3 Flowchart for closed-circuit test

表 8 闭路试验结果

Table 8 Closed-circuit test results

产品名称	产率/%	灰分/%	固定碳含量/%	可燃体回收率/%
精煤	21.58	61.14	32.86	73.50
高灰分尾矿	12.98	94.16	1.52	6.64
浮选尾矿	65.44	96.53	1.06	19.90
给矿	100.00	88.59	7.98	100.00

2.5 产品检测

2.5.1 富炭精矿产品热值分析

富炭精矿产品固定碳含量与热值的关系如图 4 所示。结果表明,固定碳品位大于 30%的富炭精矿产品才能满足锅炉掺烧煤的要求(即热值大于 8 368 kJ/kg)。

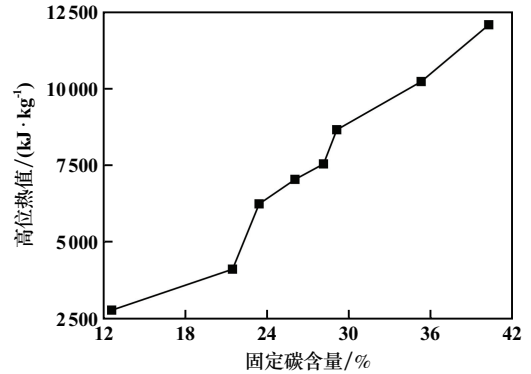


图 4 富炭精矿产品固定碳含量与热值的关系

Fig. 4 Relationship between fixed carbon content and calorific value of carbon-rich concentrate

浮选精矿全工业分析结果如表 9 所示。浮选所获得的富炭精矿产品全硫含量低于 1%,且其干燥基高位热值为 9 832 kJ/kg,满足锅炉掺烧煤的热值要求。

表 9 浮选精矿全工业分析结果

Table 9 Industrial analysis results of flotation concentrate

固定碳	含量(质量分数)/%				热值/(kJ·kg ⁻¹)	
	挥发分	灰分	全水	全硫	高位	低位
32.86	3.92	61.11	2.11	0.80	9 832	9 263

2.5.2 尾矿烧失量测定和浸出毒性检测

对浮选尾矿分别进行了浸出毒性检测,结果见表 10。尾矿产品的浸出毒性检测结果显示其中的危害成分均未超出限值。

表 10 尾矿浸出毒性检测结果

Table 10 Toxicity test results of leaching tailings

检验项目	检验结果/(mg·L ⁻¹)	浸出液中危害成分限值/(mg·L ⁻¹)
铜(以总铜计)	1.13	100
锌(以总锌计)	5.30	100
铬(以总铬计)	0.17	1
铅(以总铅计)	0.039	5
铍(以总铍计)	<0.001	0.02
钡(以总钡计)	0.20	100
砷(以总砷计)	0.24	5
硒(以总硒计)	0.071	1
镍(以总镍计)	1.54	5
汞(以总汞计)	0.000 13	0.1
氰化物(以 CN ⁻ 计)	<0.000 01	5
无机氟化物(除氟化钙外)	3.80	100

称取约 1 g 尾矿样品,精确至 0.000 1 g,置于已灼烧恒重的瓷坩埚中,将盖斜置于坩埚上,放在高温炉内从低温开始逐渐升高温度,在 1 000 ℃ 下灼烧直至恒重,测得烧失量为 4.98%,烧失量小于 5%,满足 P·O 普通硅酸盐水泥的烧失量要求^[8]和高强度抗压陶粒的烧失量要求^[9]。

3 经济估算

石煤中钒的品位一般为 0.13%~1%^[10],酸浸提钒尾渣基数巨大而又无法直接利用,如果不对其进行资源化处理,就必须建设相当面积的符合危险废物堆存要求的尾矿库,土地成本费和维护管理费高昂。酸浸尾渣吨位之大决定了堆存并非长远之法,若对其进行深度的炭灰分离从而实现全资源化利用,便可变废为宝,将巨大成本消耗转为低利润大吨位的产品营收。为验证方案的经济可行性,对原料、浮选药剂、能耗、设备折旧等进行简单的成本估算和产品价值估算,结果见表 11~12。该方案所得税前收益为 91.08 元/t。

表 11 每吨提钒尾渣处理成本估算

Table 11 Cost estimate of treating vanadium extraction tailings

名称	耗量/ (kg·t ⁻¹)	成本/ (元·t ⁻¹)	备注
捕收剂	0.93	11.16	工业级纯度约 12 000 元/t
起泡剂	0.08	0.92	工业级纯度约 11 500 元/t
调整剂	0.20	1.60	工业级纯度约 8 000 元/t
抑制剂	1.40	6.72	工业级纯度约 4 800 元/t
能耗	—	63.00	热能按 50 元/t 计,电费按 0.8 元/度计
设备	—	24.00	按 24 000 万元固定资产(年处理量 30 万 t)10 年折旧无残值
修理费	—	12.00	按折旧费的 50%
合计		119.40	

表 12 每吨提钒尾渣产品收入及利润估算

Table 12 Estimate of revenue and profit for products from vanadium extraction tailings

产品名称	产量/t	产品单价/ (元·t ⁻¹)	产品价值/ (元·t ⁻¹)	备注
富炭精矿	0.215 8	60	12.85	热值约 9 832 kJ/kg
高灰分尾矿	0.784 2	150	117.63	烧失量小于 5%
所节约的尾矿堆存成本	—	—	80.00	按尾矿库占地面积、维护管理成本折算
合计			210.48	

4 结论

1) 通过筛分-浮选的技术方案,以碳酸钠为 pH 值调整剂,调整矿浆 pH 值至 4.0,以 V401 为捕收剂、P601 为抑制剂,一粗一扫二精浮选闭路试验获得的富炭精矿

固定碳含量可达 32.86%,可燃体回收率 73.50%,所得综合尾矿灰分 96.14%、产率 78.42%、烧失量 4.98%。

2) 富炭精矿产品热值达到了 9 832 kJ/kg,满足锅炉掺烧煤的热值要求;尾矿危害成分未超限值且满足 P·O 普通硅酸盐水泥的烧失量要求、高强度抗压陶粒烧失量要求。

3) 该技术方案对不可直接利用的石煤酸浸提钒尾渣进行深度炭灰分离,具有一定经济可行性和重要的生态环境意义及工程意义,为该类型危险工业固体废物废弃物提供了一种可行的资源化利用路径。

参考文献(References):

- [1] 张一敏,薛楠楠,郑秋实,等. 钒页岩资源全产业链利用研究现状及发展[J]. 中国有色冶金, 2023,52(5):2-17.
ZHANG Yimin, XUE Nannan, ZHENG Qiushi, et al. Research status and development of the full industrial chain utilization of vanadium shale resources[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2023,52(5):2-17.
- [2] 胡艺博,叶国华,王恒,等. 钒市场分析 with 石煤提钒工艺进展[J]. 钢铁钒钛, 2019,40(2):31-40.
HU Yibo, YE Guohua, WANG Heng, et al. Market analysis of vanadium and progress on technologies of vanadium extraction from stone coal[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2019,40(2):31-40.
- [3] 陈三喜,苏佳,曾兴. 湖南某石煤矿区重金属污染现状及生态风险评估[J]. 矿冶工程, 2023,43(5):103-108.
CHEN Sanxi, SU Jia, ZENG Xing. Current situation of heavy metal pollution and ecological risk assessment of stone coal mine in Hunan Province[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(5):103-108.
- [4] 张海玲. 添加石煤提钒尾渣对建筑用烧结砖性能的影响[J]. 矿产综合利用, 2023(2):191-196.
ZHANG Hailing. Influence of vanadium tailings from stone coal on sintering brick for building[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(2):191-196.
- [5] 杜金晶,鲍彦如,王雪,等. 提钒尾矿综合回收利用研究现状[J]. 矿冶工程, 2024,44(2):153-159.
DU Jinjing, BAO Yanru, WANG Xue, et al. Research status of comprehensive recycling of vanadium tailings[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(2):153-159.
- [6] 易龙生,许元洪,赵立华,等. 粉煤灰地质聚合物凝结时间的影响因素研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(01):114-117.
YI Longsheng, XU Yuanhong, ZHAO Lihua, et al. Influencing factors for setting time of fly ash-based geopolymer[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(01):114-117.
- [7] 陈佳,陈铁军,张一敏,等. 利用石煤提钒尾矿制备免烧陶粒[J]. 金属矿山, 2013(1):164-167.
CHEN Jia, CHEN Tiejun, ZHANG Yimin, et al. Preparation of burn-free ceramics with stone-coal vanadium tailings[J]. Metal Mine, 2013(1):164-167.

(下转第 124 页)

- application of titanium metal[J]. *Yunnan Metallurgy*, 2010,39(5):58-60.
- [2] 崇霄霄,栾文楼,王丰翔,等. 全球钛资源现状概述及我国钛消费趋势[J]. *矿产保护与利用*, 2020(2):162-170.
CHONG Xiaoxiao, LUAN Wenlou, WANG Fengxiang, et al. Overview of global titanium resources status and titanium consumption trend in China[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2020(2):162-170.
- [3] 邹建新,徐国印. 攀西钒钛磁铁矿采选生产技术现状与转型升级策略[J]. *轻金属*, 2020(9):51-55.
ZOU Jianxin, XU Guoyin. Mining & dressing production technology status and transformation & upgrading strategies of Panxi vanadium titanium magnetite[J]. *Light Metals*, 2020(9):51-55.
- [4] 严伟平,李维斯,杨耀辉,等. 攀西地区超微细粒级钛铁矿资源选矿工艺研究[J]. *矿产综合利用*, 2023(4):55-61.
YAN Weiping, LI Weisi, YANG Yaohui, et al. Research on mineral processing technology of ultrafine ilmenite resources in Panzhihua-Xichang area [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2023(4):55-61.
- [5] YUAN Z T, ZHAO X, LU J W, et al. Innovative pre-concentration technology for recovering ultrafine ilmenite using superconducting high gradient magnetic separator[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021,31:1043-1052.
- [6] ZHENG X Y, WANG Y H, LU D F. A realistic description of influence of the magnetic field strength on high gradient magnetic separation[J]. *Minerals Engineering*, 2015,79:94-101.
- [7] ZHENG X Y, JING Z H, SUN Z X, et al. Significantly improved separation efficiency of refractory weakly magnetic minerals by pulsating high-gradient magnetic separation coupling with magnetic fluid[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2022,10:10105-10118.
- [8] WANG Y H, XUE Z X, ZHENG X Y, et al. Matching relation between matrix aspect ratio and applied magnetic induction for maximum particle capture in transversal high gradient magnetic separation[J]. *Minerals Engineering*, 2020,151:106316.
- [9] XIE J, ZHANG C Q, JIA Y H, et al. Automatic and continuous separation of mixed waste plastics via magneto; Archimedes levitation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022,287:120537.
- [10] 郑霞裕,王毓华,卢东方,等. 一种磁流体耦合高梯度磁选方法; CN113426576A[P].
ZHENG Xiayu, WANG Yuhua, LU Dongfang, et al. A magnetic fluid coupling high-gradient magnetic separation method; CN113426576A[P].
- [11] ZHAO W J, CHENG R, MILLER J R, et al. Label-free microfluidic manipulation of particles and cells in magnetic liquids[J]. *Advanced Functional Materials*, 2016,26:3916-3932.
- [12] 熊涛,陈禄政,谢美芳,等. 周期式振动脉动高梯度磁选机的研制与试验研究[J]. *金属矿山*, 2023(3):227-233.
XIONG Tao, CHEN Luzheng, XIE Meifang, et al. Development and test research of a periodic vibrating-pulsing high gradient magnetic separator[J]. *Metal Mine*, 2023(3):227-233.
- 引用本文:唐海芬,曙瓦克·赛力克,岳鑫慧,等. 磁流体耦合高梯度磁选高效回收攀西钛铁矿的研究[J]. *矿冶工程*, 2025,45(3):120-124.
TANG Haifen, Shuwake·Sailike, YUE Xinhui, et al. Efficient recovery of Panxi ilmenite by magnetic fluid coupling high-gradient magnetic separation[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025,45(3):120-124.

(上接第 114 页)

- [8] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 通用硅酸盐水泥;GB 175—2023[S]. 北京:中国标准出版社, 2023.
State administration for market regulation, National standardization administration. Common portland cement; GB 175—2023[S]. Beijing: Standards Press for China, 2023.
- [9] 王继蕊,王旭旭,秦育红,等. 烧失量对循环流化床粉煤灰高强陶粒烧结的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2023,54(12):4662-4672.
WANG Jirui, WANG Xuxu, QIN Yuhong, et al. Effect of loss on ignition on sintering of high-strength ceramics made from CFB fly ash [J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2023, 54(12):4662-4672.
- [10] 叶国华,朱思琴,陈子杨,等. 石煤钒矿的选矿预富集研究评述[J]. *稀有金属*, 2022,46(1):120-130.
YE Guohua, ZHU Siqin, CHEN Ziyang, et al. A research review on beneficiation pre-concentration of vanadium-bearing stone coal [J]. *Rare Metals*, 2022,46(1):120-130.
- 引用本文:李鑫源,刘有才,符剑刚,等. 石煤酸浸提钒尾渣资源化利用试验研究[J]. *矿冶工程*, 2025,45(3):110-114.
LI Xinyuan, LIU Youcai, FU Jiangang, et al. Experimental study on resource utilization of residue after vanadium extraction from stone-like coal by acid leaching[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025,45(3):110-114.

(上接第 119 页)

- [10] WANG L, SUN N, LIU J, et al. Effect of chain length compatibility of alcohols on muscovite flotation by dodecyl amine[J]. *Minerals*, 2018,8(4):168.
- [11] CHEN X, GU G H, LI L J, et al. The selective effect of food-grade guar gum on chalcopyrite-monoclinic pyrrhotite separation using mixed aerofloat (CSU11) as collector[J]. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 2018,25(10):1123-1131.
- [12] WANG Y L, HE G C, ABUDUKADE D, et al. Selective inhibition of sodium tripolyphosphate on calcite in the process of magnesite flotation[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022,345:117412.
- 引用本文:彭磊红,邓政斌,唐云,等. 季铵盐 Y28 对一水硬铝石与脉石硅酸盐矿物的浮选性能[J]. *矿冶工程*, 2025,45(3):115-119.
PENG Leihong, DENG Zhengbin, TANG Yun, et al. Effect of quaternary ammonium salt Y28 on flotation performance of diaspore and gangue silicate minerals[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025,45(3):115-119.