

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2025.20240050

石煤钒矿工艺矿物学特性及预富集技术研究

杨帅厚, 靳建平, 祝昕冉, 周振亚
(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 以陕西石煤钒矿为原料, 借助化学元素分析、X射线衍射分析(XRD)和矿物参数自动定量分析系统(MLA), 对原矿的元素组成、矿物组成、钒的赋存状态和含钒矿物的嵌布关系及解离特性进行了系统研究. 在此基础上, 开展了原矿螺旋溜槽抛尾试验、浮选抛尾试验和重选—浮选联合抛尾试验. 结果表明: 在原矿 V_2O_5 质量分数 0.82% 的条件下, 采用重选—浮选联合抛尾工艺, 可以获得预选精矿 V_2O_5 质量分数 1.23%、抛尾产率 41.97%、钒回收率 87.37% 的选别指标. 该研究为我国石煤钒矿的高效开发利用提供了参考.

关键词: 石煤钒矿; 工艺矿物学; 预富集抛尾; 螺旋溜槽; 浮选

中图分类号: TD 954 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)09-0135-08

Research on Process Mineralogy Characteristics and Pre-enrichment Technology of Vanadium-Bearing Stone Coal

YANG Shuai-hou, JIN Jian-ping, ZHU Xin-ran, ZHOU Zhen-ya

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: JIN Jian-ping, E-mail: jinjianping@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Shaanxi vanadium-bearing stone coal was selected as the research object. The raw ore was characterized by chemical element analysis, X-ray diffraction (XRD), and an automatic quantitative analysis system (MLA) of mineral parameters. Systematic investigation into its elemental composition, mineral composition, occurrence state of vanadium, embedding relationship, and dissociation characteristics of vanadium-bearing minerals was conducted. On this basis, the spiral chute tailings discarding tests, flotation tailings discarding tests, and combined gravity-flotation tailings discarding tests of raw ores were carried out. When the mass fraction of V_2O_5 in the raw ore was 0.82%, combined gravity-flotation tailings discarding tests could obtain the pre-concentrate with a V_2O_5 mass fraction of 1.23%, a tailing yield of 41.97%, and a vanadium recovery rate of 87.37%. The study provides a reference for the efficient development and utilization of vanadium-bearing stone coal in China.

Key words: vanadium-bearing stone coal; process mineralogy; pre-enrichment tailing discarding; spiral chute; flotation

石煤钒矿是重要的含钒资源,在我国储量巨大,主要分布于四川、湖南、广西、安徽、湖北等地^[1].目前,我国石煤钒矿储量为618.8亿t,其中含钒总量为1.18亿t, V_2O_5 质量分数高于0.50%的资源储量为7 707.5万t^[2].然而,由于我国石煤钒矿品位低、赋存状态复杂,导致提取钒资源的难度较大.目前,我国石煤钒矿资源大部分没有得

到充分的利用^[3].

我国各地的石煤中钒质量分数差异较大,其中 V_2O_5 质量分数小于0.50%的占60%;在现有的技术条件下,原矿中 V_2O_5 质量分数达到0.80%以上时才具有开采和利用价值^[4].目前,针对我国不同地区石煤钒矿性质的差异,科研人员开发出了多种石煤提钒工艺,包括传统的重选、浮选、重浮

收稿日期: 2025-03-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1909704); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2301017).

作者简介: 杨帅厚(2000—),男,山东德州人,东北大学硕士研究生; 靳建平(1984—),男,内蒙古乌兰察布人,东北大学教授,博士生导师.

联合工艺^[5-8],以及直接浸出、焙烧-浸出、加温加压浸出、拌酸熟化等工艺^[9-17].但是,我国的石煤钒矿 V_2O_5 品位较低,在回收钒的过程中,常出现工艺流程复杂、选别指标恶化等问题,造成钒回收率低、成本较高和环境污染严重等问题^[18].因此,针对石煤钒矿进行预富集抛尾技术研究,有效抛除脉石矿物,提高石煤钒矿入选 V_2O_5 品位,对石煤提钒技术研究具有重要意义^[19-20].

本研究以陕西石煤钒矿为研究对象,在系统的工艺矿物学研究基础上开展预富集抛尾技术研究.采用螺旋溜槽进行重选抛尾试验,考察了磨矿细度对抛尾效果的影响;在十二胺体系下进行浮选抛尾试验,确定了适宜的药剂体系和浮选指标.开展了重选-浮选联合抛尾试验,确定了适宜的工艺条件和技术指标.本研究为石煤钒矿预富集抛尾及提高开发利用效率提供了技术支撑.

1 试验原料与方法

1.1 试样原料

试验所用石煤钒矿样品取自陕西省商洛市,

表 1 原矿化学成分分析(质量分数)

Table 1 Chemical composition analysis of raw ore(mass fraction)

V_2O_5	C	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	TFe	FeO	P	S	K_2O	Na_2O	烧失
0.82	0.93	86.64	2.81	1.42	0.54	1.59	0.23	0.26	0.086	0.863	0.006	2.54

1.2 试验方法

将原矿样品破碎至粒度为-1 mm.重选螺旋溜槽试验采用 BLL-400 型玻璃钢螺旋溜槽(外径 400 mm,螺距 240 mm)进行,给矿速度为 500 mL/min,给矿粒度为-0.074 mm 质量分数 50%~90%.浮选试验在 XFG 型挂槽式浮选机(主轴转速为 1 900 r/min)中进行,将-1 mm 原矿磨矿至粒度为-0.074 mm 质量分数 70%,以十二胺为捕收剂,采用一粗二扫浮选工艺,用 HCl 或 NaOH 调节 pH 并调浆 3 min,记录 pH,试验流程如图 2 所示.

1.3 检测方法

对原矿进行化学元素分析,研究其主要成分及含量;使用 LECO SC-144DR 硫分析仪测定 S 含量;将样品加热至 1 000 °C 测定烧失量.采用 X 射线衍射仪(PW3040,荷兰)对试验原料及产物进行 XRD 检测分析,研究其主要矿物组成.XRD 工作参数:Cu 靶,镍滤波片,固体探测器,工作电压 40 kV,工作电流 40 mA,扫描角度 $2\theta=5^\circ\sim 90^\circ$,扫描时间 7 min,入射线波长 0.154 1 nm.采用 MLA

对原矿进行 XRD 分析,分析结果见图 1.结果表明,原矿中主要矿物为石英和白云母,其他矿物因质量分数较低无法通过 XRD 检测.对原矿进行化学成分分析,结果如表 1 所示.原矿中 V_2O_5 质量分数为 0.82%;碳质量分数为 0.93%;杂质 SiO_2 , Al_2O_3 , CaO, MgO 质量分数分别为 86.64%, 2.81%, 1.42% 和 0.54%;TFe 质量分数为 1.59%,FeO 质量分数为 0.23%;P, S 质量分数分别为 0.26% 和 0.086%; K_2O , Na_2O 质量分数分别为 0.863% 和 0.006%;烧失量为 2.54%.

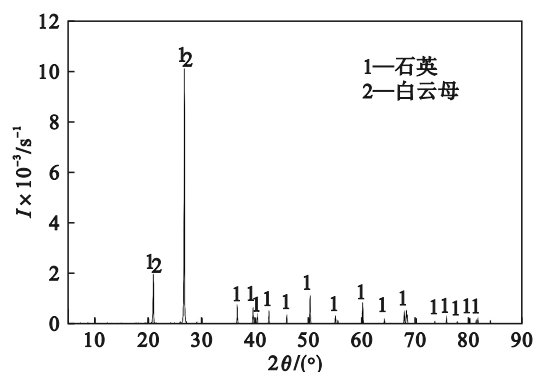


图 1 原矿 XRD 分析

Fig. 1 XRD analysis of raw ores

工艺矿物学参数测试系统进行分析,测试所用设备为 FEI MLA 650,扫描电镜为 FEI QUANTA 650,能谱仪为 EDAX Apollo X.测试条件为: +0.15 mm 样品放大 300×, -0.15~+0.074 mm 样品放大 400×, -0.074~+0.038 mm 样品放大 600×, -0.038 mm 样品放大 800×;加速电压 25 kV,束斑直径 7.5 μ m,标样为自然金,工作距离 10 mm;能谱时间常数 1.6 μ s, CPS 在 12×10^4 左右,DT 为 21%.

2 选矿试验研究

2.1 工艺矿物学特性分析

对-1 mm 原矿进行粒度组成分析,分析结果见图 3.结果表明,-1+0.15 mm 与-0.038 mm 粒级产率较高,分别为 58.27% 和 27.68%;随着粒级的减小, V_2O_5 质量分数呈上升趋势,由最初的 0.31% 逐渐上升至 2.06%,中间粒级增长较为平稳;钒分布率在-1+0.15 mm 与-0.038 mm 粒级较高,分别为 22.03% 和 69.54%,中间粒级钒分布率较低.

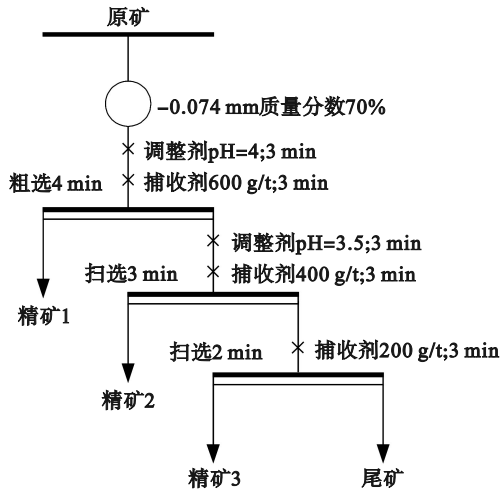


图 2 十二胺体系浮选抛尾开路试验流程

Fig. 2 Open-circuit test process for flotation tailings discarding in dodecylamine system

采用矿物参数自动定量分析系统(MLA)对钒矿的矿物组成进行分析,分析结果见图 4 和表

2. 结果表明,样品中主要含钒矿物为白云母、高岭石、金红石和褐铁矿,其质量分数分别为 4.96%, 0.57%, 0.13% 和 1.48%;主要脉石矿物为石英,质量分数为 88.84%.

对钒(V)元素在矿物中的分布规律进行分析,结果如表 3 所示.结果表明,矿石中钒元素主要分布在白云母中,分布率为 87.62%;其次分布在褐铁矿、金红石和高岭石中,分布率分别为 7.83%, 4.05% 和 0.51%.

对样品中的白云母进行 MLA 粒度分析,结果见图 5.结果表明,白云母在各个粒级中分布相对均匀,在 $-9.6+2 \mu\text{m}$ 粒级中质量分数最高,为 40.64%.根据负累计质量分数分析结果,白云母在 $-75 \mu\text{m}$ 粒级中的质量分数为 67.06%,在 $-38 \mu\text{m}$ 粒级中的质量分数为 61.03%,在 $-19 \mu\text{m}$ 粒级中的质量分数为 55.27%.细粒级白云母含量较多,是该矿石工艺矿物学的难点之一.

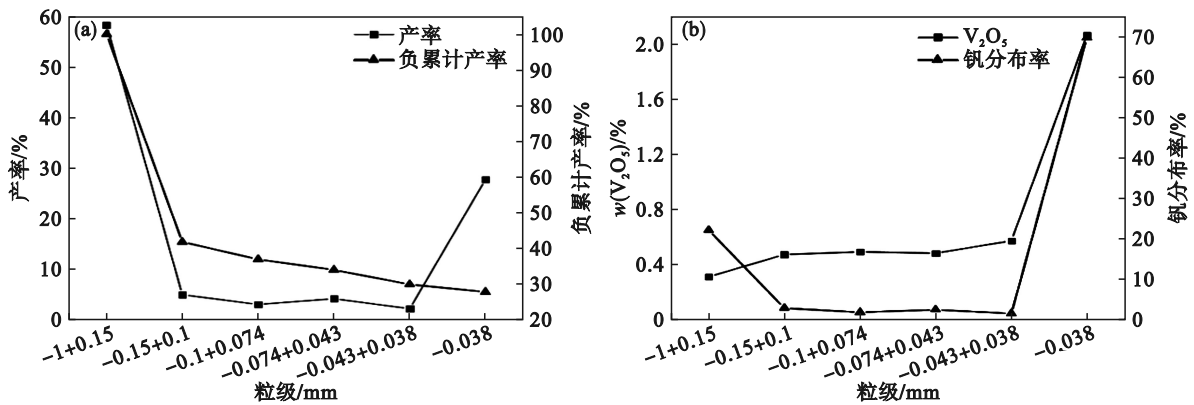
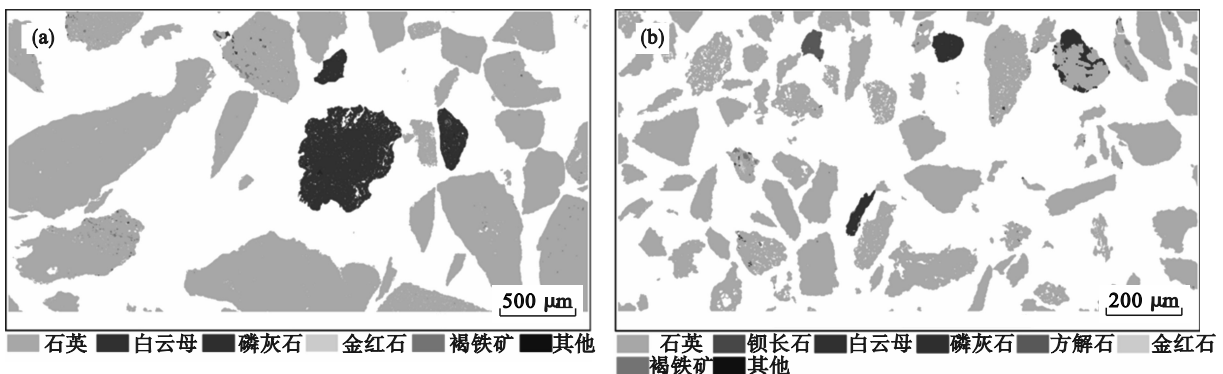


图 3 -1 mm 原矿粒度组成及钒分布率

Fig. 3 Particle size composition and vanadium distribution ratio of -1 mm raw ore
(a)—-1 mm 原矿粒度组成; (b)—-1 mm 原矿钒分布率.

对-1 mm 原矿样品中的白云母进行 MLA 解离度分析,分析结果见图 6 和图 7.结果表明,白云母单体质量分数为 49.74%,50% 以上的富连生体质量分

数为 37.88%.单体的白云母包裹少量石英、高岭石、磷灰石、金红石和褐铁矿,被包裹的白云母则主要被石英等矿物所包裹;富连生体中含有较多的石英.



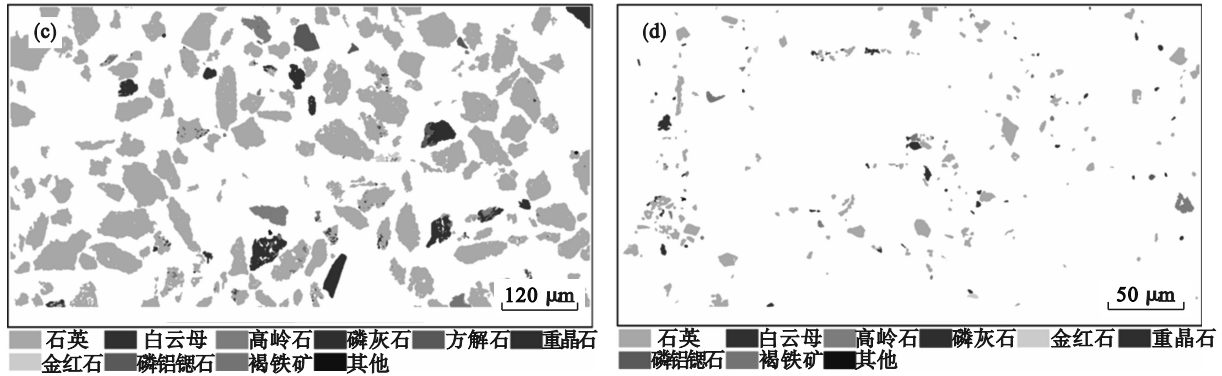


图 4 原矿矿物组成及矿物关系分布图

Fig. 4 Distribution of mineral composition and mineral relationship of raw ore
(a)—+0.15 mm; (b)—-0.15+0.074 mm; (c)—-0.074+0.038 mm; (d)—-0.038 mm.

表 2 原矿矿物组成成分(质量分数)

Table 2 Mineral composition of raw ore(mass fraction)

										%
石英	白云母	高岭石	金红石	褐铁矿	磷灰石	重晶石	钡长石	方解石	其他	
88.84	4.96	0.57	0.13	1.48	1.92	0.84	0.39	0.48	0.38	

表 3 钒元素在含钒矿物中的分布率

Table 3 Distribution ratio of vanadium in vanadium-bearing minerals

				%
白云母	褐铁矿	金红石	高岭石	
87.62	7.83	4.05	0.51	

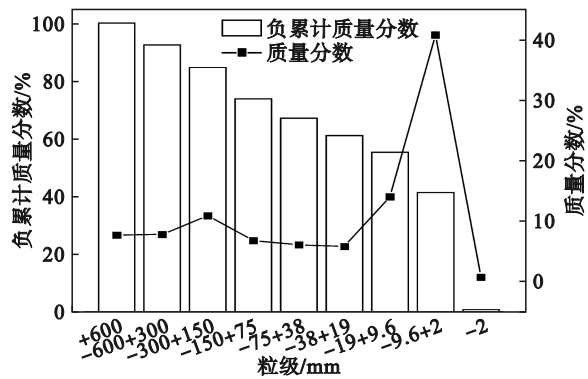


图 5 白云母粒度分布

Fig. 5 Particle size distribution of muscovite

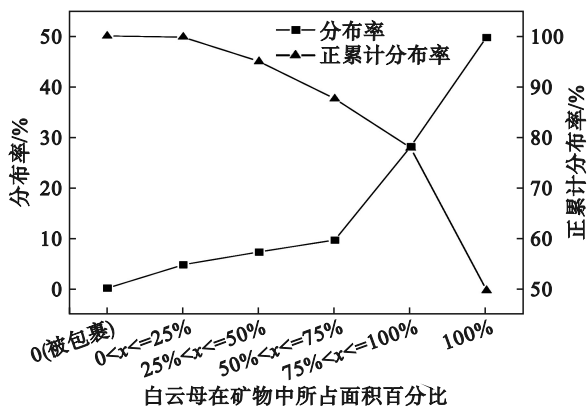


图 6 白云母解离情况图

Fig. 6 Diagram of dissociation of muscovite

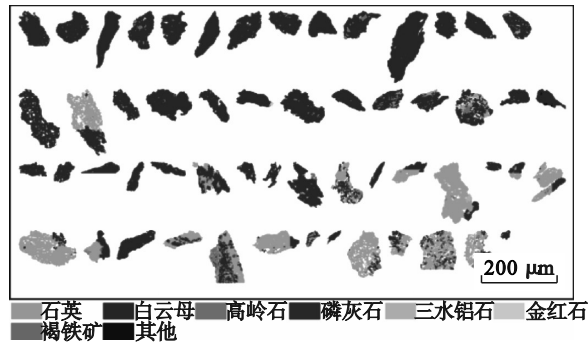


图 7 白云母解离与连生关系示意图

Fig. 7 Schematic diagram of dissociation and association relationships of muscovite

对样品中的石英进行 MLA 粒度分析, 结果见图 8. 结果表明, 石英在各粒级中分布相对均匀, 在+600 μm 粒级中质量分数最高, 为 27.38%. 根据负累计质量分数分析结果, 石英在-150 μm 粒级中的质量分数为 35.20%, 在-75 μm 粒级中的质量分数为 27.63%, 粒度较粗.

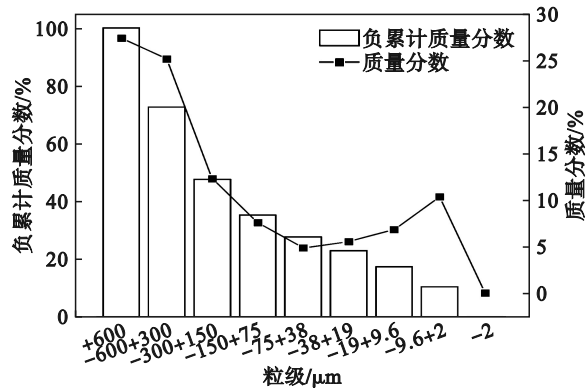


图 8 石英颗粒粒度分布

Fig. 8 Particle size distribution of quartz particles

对-1 mm原矿样品中的石英进行MLA解离度分析,分析结果见图9和图10.结果表明,石英单体质量分数为59.12%,50%以上的富连生体质量分数为40.18%.单体的石英包裹少量白云母、高岭石、金红石、磷灰石和褐铁矿,被包裹的石英则主要被白云母等矿物所包裹,石英的连生体质量分数较低;富连生体中含有较多的白云母.根据-1 mm原矿的工艺矿物学性质和主要矿物解离特性,可以考虑采用预富集工艺提前抛除石英等脉石矿物,提高矿石中钒的质量分数.

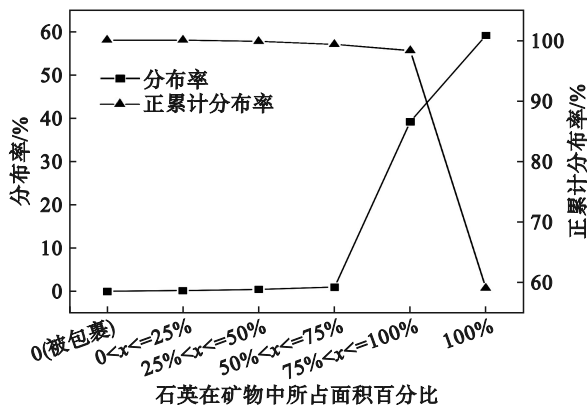


图9 石英解离情况
Fig. 9 Dissociation of quartz

矿粒度-0.074 mm质量分数分别为60%,70%,80%和90%条件下预富集抛尾效果.将矿浆均匀给入螺旋溜槽后,槽内不同比重的矿物在自身重力、离心力、水流动力、摩擦力和浮力的合力作用下发生分层分带现象,矿浆在重力作用下沿螺旋溜槽呈螺旋线形向下流动,同时在离心力作用下向外缘扩展,运动一圈后即出现分带现象,使石英等脉石与目的矿物得到有效分离^[21],试验结果如图11所示.结果表明,通过磨矿和螺旋溜槽工艺可以有效进行抛尾,给料粒度越细, V_2O_5 的回收率越高.当-0.074 mm质量分数为90%时,抛尾产率为27.14%,尾矿中 V_2O_5 质量分数为0.23%,预富集精矿中 V_2O_5 质量分数为1.04%,钒回收率为92.39%.

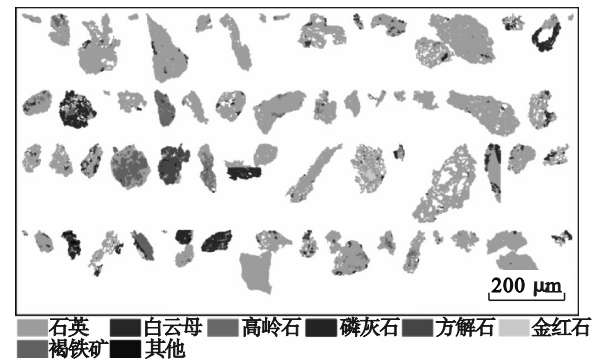


图10 石英解离与连生关系示意
Fig. 10 Schematic diagram of dissociation and association relationships of quartz

2.2 螺旋溜槽抛尾试验

采用螺旋溜槽进行预富集抛尾试验,考察给

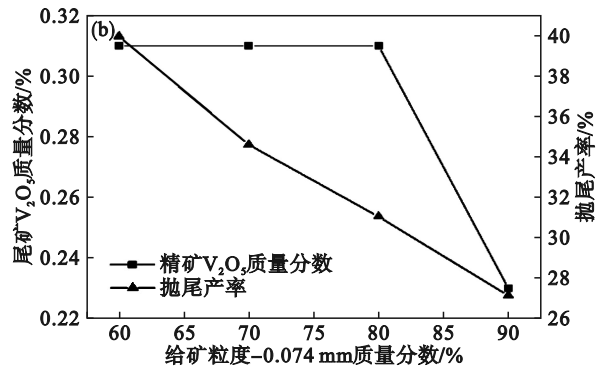
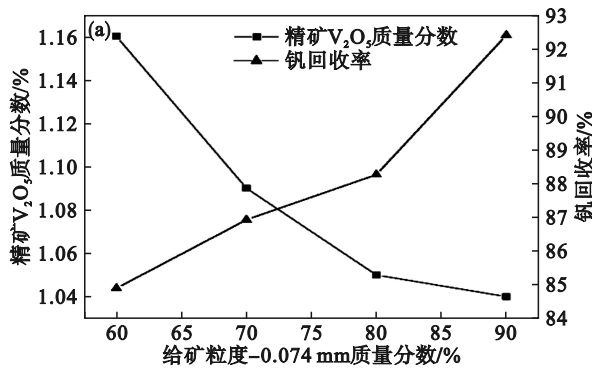


图11 螺旋溜槽给矿粒度抛尾试验
Fig. 11 Spiral chute tailings discarding test of feeding particle size
(a)—精矿 V_2O_5 质量分数及钒回收率; (b)—尾矿 V_2O_5 质量分数及抛尾产率.

2.3 浮选pH条件试验

将原矿磨至-0.074 mm质量分数为70%,在十二胺用量为600 g/t条件下,考察矿浆pH分别为3,4,5,6,7,8时对浮选指标的影响,结果如图12所示.结果表明:当pH为3~5时,浮选精矿产率为33.68%~41.43%,预富集精矿钒回收率为60.37%~62.14%;当pH超过6以后,尾矿中 V_2O_5 质量分数明显增加,预富集精矿中钒回收率降

低,导致浮选指标变差.由静电吸附理论可知,当十二胺作为阳离子捕收剂时,会吸附在带负电的含钒云母表面,此时云母出现上浮现象,钒质量分数较高;当pH为3~4时,含钒云母以及少量脉石矿物的集合体会随云母上浮进入精矿,导致钒质量分数降低而回收率升高;当pH大于4时,含钒云母、石英均带负电荷,十二胺对石英及硅酸盐矿物的选择性降低,石英、长石与含钒云母均

上浮,导致分选效果变差.因此确定适宜的浮选

矿浆 pH 为 4.

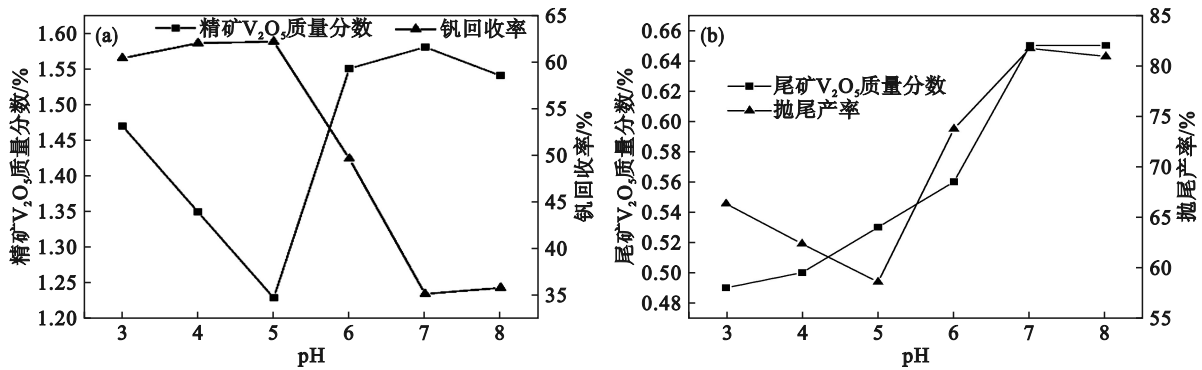


图 12 浮选 pH 条件试验结果

Fig. 12 Test results of flotation pH condition

(a)—精矿 V₂O₅ 质量分数及钒回收率; (b)—尾矿 V₂O₅ 质量分数及抛尾产率.

2.4 捕收剂用量条件实验

将原矿磨至 -0.074 mm 质量分数为 70%, 在 pH 为 4 时, 考察捕收剂十二胺用量分别为 400, 600, 800, 1 000, 1 200 g/t 时对浮选抛尾指标的影响, 结果如图 13 所示. 结果表明, 随着十二胺用量的增加, 预富集精矿中钒的回收率提升. 但是, 伴

随着十二胺用量的增加, 部分脉石矿物进入精矿, 导致 V₂O₅ 的质量分数下降及浮选抛尾产率降低. 因此, 为保证钒的回收率并提高钒的质量分数, 最佳的十二胺用量为 600 g/t. 此时, 浮选抛尾产率为 62.50%, 预富集精矿中 V₂O₅ 质量分数为 1.37%, 钒回收率为 62.65%.

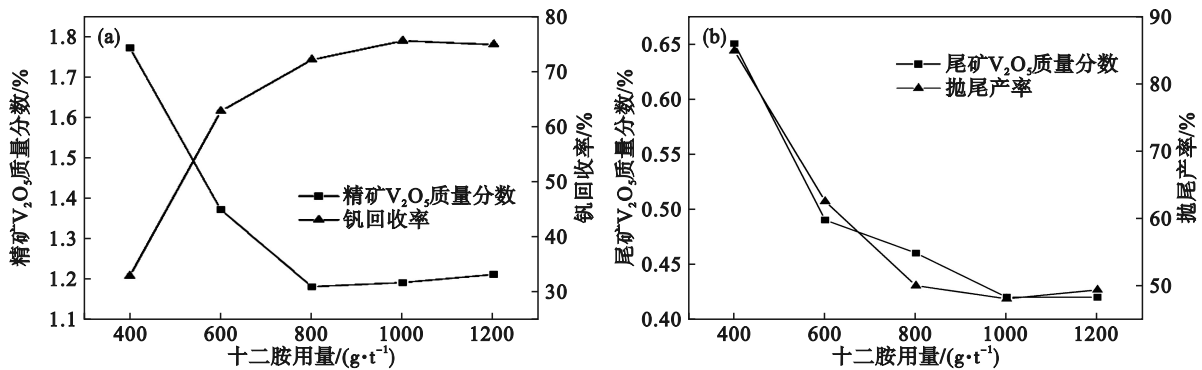


图 13 十二胺用量与分选指标关系图

Fig. 13 Relationship between dodecylamine dosage and separation index

(a)—精矿 V₂O₅ 质量分数及钒回收率; (b)—尾矿 V₂O₅ 质量分数及抛尾产率.

2.5 浮选开路试验

将 -1 mm 原矿磨矿至 -0.074 mm 质量分数为 70%, 以十二胺为捕收剂, 采用一粗二扫浮选工艺进行浮选抛尾开路试验, 试验流程如图 2 所示, 浮选结果见表 4. 结果表明, 使用十二胺为捕收剂进行浮选抛尾, 可以有效抛除脉石矿物, 得到精矿 1 产率为 38.16%, V₂O₅ 质量分数为 1.38%, 钒回收率为 64.22%; 精矿 2 产率为 11.97%, V₂O₅ 质量分数为 1.26%, 钒回收率为 18.39%; 精矿 3 产率为 9.12%, V₂O₅ 质量分数为 0.58%, 钒回收率为 6.45%. 最终可达到抛尾产率为 40.75%, 精矿 V₂O₅ 质量分数为 1.23%, 钒回收率为 89.06% 的指标.

表 4 十二胺体系浮选抛尾开路试验结果

Table 4 Open-circuit test results of flotation tailings discarding in dodecylamine system %

产品名称	产率	V ₂ O ₅ 质量分数	钒回收率
精矿 1	38.16	1.38	64.22
精矿 2	11.97	1.26	18.39
精矿 3	9.12	0.58	6.45
尾矿	40.75	0.22	10.94
合计	100.00	0.82	100.00

2.6 浮选闭路试验

以十二胺为捕收剂, 采用一粗二扫浮选工艺进行浮选抛尾闭路试验, 试验数质量流程见图 14. 结果表明, 采用十二胺捕收剂进行浮选抛尾,

可有效抛除脉石矿物.预富集精矿产率为55.86%, V_2O_5 质量分数为1.29%,钒回收率为87.88%;尾矿产率为44.14%, V_2O_5 质量分数为0.23%,钒回收率为12.38%.

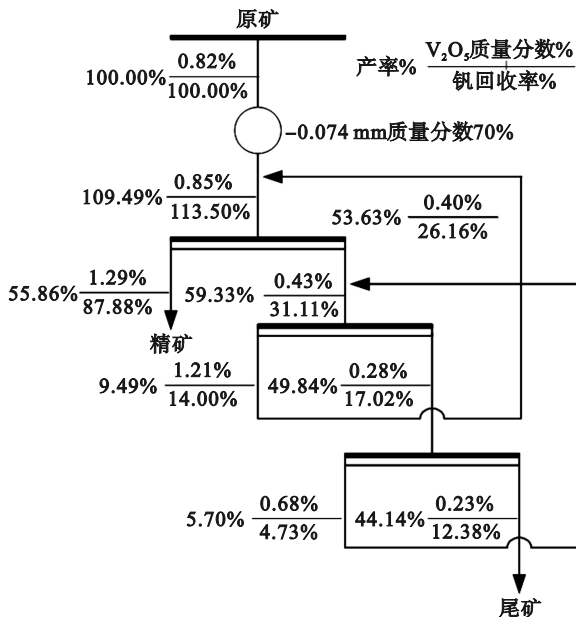


图 14 十二胺体系浮选抛尾闭路数质量流程

Fig. 14 Mass flow sheet of closed circuit for flotation tailings discarding in dodecylamine system

2.7 重浮联合抛尾试验

在使用螺旋溜槽进行预富集抛尾试验过程中发现,随着物料细粒级含量的提高,抛尾效果有明显提升,故选择-0.074 mm 质量分数为90%作为最佳实验条件,进行重选—浮选联合工艺抛尾试验.在给矿速度为500 mL/min 条件下,针对螺旋溜槽精矿,以十二胺为捕收剂,采用一粗一扫浮选工艺进行浮选抛尾开路试验.试验流程见图15,浮选结果如表5所示.结果表明,采用重选—浮选联合抛尾工艺,可以获得浮选精矿1中 V_2O_5 质量分数为1.33%、产率为44.86%、钒回收率为72.76%;浮选精矿2中 V_2O_5 质量分数为0.91%、产率为13.17%、钒回收率为14.61%的选别指标,预富集精矿合计可达到 V_2O_5 质量分数为1.23%、产率为58.03%、钒回收率为87.37%的选别指标.

表 5 重选—浮选联合抛尾试验结果

Table 5 Test results of combined gravity-flotation tailings discarding %

产品名称	产率	V_2O_5 质量分数	钒回收率
重选尾矿	27.49	0.24	8.04
浮选精矿1	44.86	1.33	72.76
浮选精矿2	13.17	0.91	14.61
浮选尾矿	14.48	0.26	4.59
合计	100.00	0.82	100.00

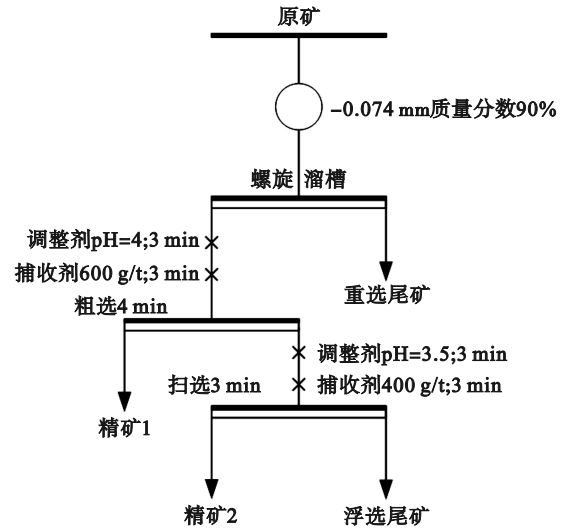


图 15 重选—浮选联合抛尾试验流程图

Fig. 15 Test process of combined gravity-flotation tailings discarding

3 结 论

1) 钒矿样品中 V_2O_5 质量分数为0.82%,样品主要含钒矿物为白云母、高岭石、金红石和褐铁矿,其质量分数分别为4.96%、0.57%、0.13%和1.48%;主要脉石矿物为石英,质量分数为88.84%.矿石中的钒主要分布在白云母中,分布率为87.62%;其次分布在褐铁矿、金红石和高岭石中,分布率分别为7.83%、4.05%和0.51%.白云母单体质量分数为49.74%,50%以上的富连生体质量分数为37.88%;石英单体质量分数为59.12%,50%以上的富连生体质量分数为40.18%,石英连生体含量较低.因此,可以考虑采用预富集工艺提前抛除粗粒级石英等脉石.

2) 采用螺旋溜槽进行预富集抛尾试验,当-0.074 mm 质量分数为90%时,抛尾产率为27.14%,尾矿中 V_2O_5 质量分数为0.23%,预富集精矿中 V_2O_5 质量分数为1.04%,钒回收率为92.39%.十二胺体系浮选抛尾试验采用一粗二扫浮选工艺,可以获得抛尾产率40.75%,精矿 V_2O_5 质量分数1.23%,钒回收率89.06%的指标.重选—浮选联合抛尾试验:在给料细度为-0.074 mm 质量分数为90%的条件下,采用螺旋溜槽进行重选;以十二胺为捕收剂,对重选精矿开展一粗一扫浮选试验,可以获得精矿 V_2O_5 质量分数1.23%、产率58.03%、钒回收率87.37%的指标.

参考文献:

[1] 刘志逊,代鸿章,刘佳,等.我国石煤资源勘查开发利用现状及建议[J].中国矿业,2016,25(sup1):18-21.

- (Liu Zhi-xun, Dai Hong-zhang, Liu Jia, et al. Suggestions and current situation of exploration, development and utilization of stone-coal resources in China [J]. *China Mining Magazine*, 2016, 25(sup1): 18–21.)
- [2] 胡艺博, 叶国华, 左琪, 等. 石煤钒矿酸浸液中萃取提钒的研究进展与前景[J]. 矿产综合利用, 2020, 1(1): 10–15. (Hu Yi-bo, Ye Guo-hua, Zuo Qi, et al. Research progress and prospect of extractants for vanadium from acid leaching solution of stone coal vanadium ore [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020, 1(1): 10–15.)
- [3] Zhang Y M, Bao S X, Liu T, et al. The technology of extracting vanadium from stone coal in China: history, current status and future prospects [J]. *Hydrometallurgy*, 2011, 109(1/2): 116–124.
- [4] 李学字, 林浩宇. 石煤钒矿加工生产 V_2O_5 技术现状与展望[J]. 化工矿物与加工, 2011, 40(4): 38–40. (Li Xue-zi, Lin Hao-yu. Status and prospect of technology of producing V_2O_5 from stone-like coal vanadium ore [J]. *Industrial Minerals and Processing*, 2011, 40(4): 38–40.)
- [5] Wang L, Sun W, Liu R Q, et al. Flotation recovery of vanadium from low-grade stone coal [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(4): 1145–1151.
- [6] Wang L, Sun W, Zhang Q P, et al. Recovery of vanadium and carbon from low-grade stone coal by flotation [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(11): 3767–3773.
- [7] Zhao Y L, Zhang Y M, Liu T, et al. Pre-concentration of vanadium from stone coal by gravity separation [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2013, 121: 1–5.
- [8] Yan B J, Wang D Y, Wu L S, et al. A novel approach for pre-concentrating vanadium from stone coal ore [J]. *Minerals Engineering*, 2018, 125: 231–238.
- [9] Zhu X R, Zhou Z Y, Jin J P, et al. Vanadium extraction from V-bearing shale using oxidation roasting and acid leaching[J]. *Minerals Engineering*, 2023, 192: 107985.
- [10] Tang Z D, Zhou Z Y, Jin J P, et al. Vanadium extraction from stone coal using a novel two-stage roasting technology [J]. *Fuel*, 2022, 321: 124031.
- [11] Zhao Y L, Zhang Y M, Bao S X, et al. Calculation of mineral phase and liquid phase formation temperature during roasting of vanadium-bearing stone coal using fact sage software [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2013, 124: 150–153.
- [12] Zhang Y M, Hu Y J, Bao S X. Vanadium emission during roasting of vanadium-bearing stone coal in chlorine [J]. *Minerals Engineering*, 2012, 30: 95–98.
- [13] Wang F, Zhang Y M, Liu T, et al. Comparison of direct acid leaching process and blank roasting acid leaching process in extracting vanadium from stone coal [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2014, 128: 40–47.
- [14] Wang F, Zhang Y M, Liu T, et al. A mechanism of calcium fluoride-enhanced vanadium leaching from stone coal [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2015, 145: 87–93.
- [15] Zhao Y L, Wang W, Zhang Y M, et al. In-situ investigation on mineral phase transition during roasting of vanadium-bearing stone coal [J]. *Advanced Powder Technology*, 2017, 28(3): 1103–1107.
- [16] Liu C, Zhang Y M, Bao S X. Vanadium recovery from stone coal through roasting and flotation[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(1): 197–203.
- [17] Yuan S, Qin Y H, Jin Y P, et al. Improving vanadium extraction from refractory stone coal by suspension roasting [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2023, 33(3): 902–916.
- [18] Xu M, Huang X F, Gui L. Study on a technics of flotation and vanadium extraction from low-grade stone coal [J]. *Shan xi Metallurgy*, 2013, 36(6): 6.
- [19] Zhou Z Y, Zhu Y M, Jin J P, et al. Enhanced vanadium extraction from Muscovite-type Vanadium-bearing shale by suspension oxidation roasting pretreatment-acid leaching [J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 309: 123066.
- [20] 汪大亚. 含钒石煤中钒预富集分离相关的基础研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020. (Wang Da-ya. Fundamental studies on the pre-concentration and separation of vanadium from stone coal ore [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.)
- [21] 沈新春, 古吉汉, 黄云松. 螺旋选矿设备在钨选矿中的应用研究现状[J]. 矿山机械, 2017, 45(10): 44–49. (Shen Xin-chun, Gu Ji-han, Huang Yun-song. Research status on application of spiral dressing equipments in tungsten ore beneficiation [J]. *Mining Processing Equipment*, 2017, 45(10): 44–49.)