

doi:10.3969/j.issn.1671-9492.2024.03.005

云南某钙镁质胶磷矿反浮选工艺研究

潘伟晓¹,徐伟^{1,2,3},田言³,梁群¹,郭灿¹,梅光军^{1,2,3}

(1. 武汉理工大学资源与环境工程学院,武汉 430070;

2. 矿物加工科学与技术国家重点实验室,北京 102628;

3. 中低品位磷矿及其共伴生资源高效利用国家重点实验室,贵阳 550002)

摘要:为解决云南某中低品位胶磷矿因磷灰石与脉石矿物嵌布关系复杂、单体解离困难导致的分选难度大、利用率低的问题,对该矿石进行了主要化学组分和X射线衍射分析,并研究了磨矿细度、捕收剂用量、抑制剂用量、浮选浓度等单因素试验寻求最佳的反浮选条件,最后利用闭路流程试验来探究工业应用的可行性。结果表明,矿石中主要的有用矿物是氟磷灰石,脉石矿物主要是白云石与石英。通过单因素试验获得最佳工艺条件为:磨矿细度 -0.074 mm 占78.16%,WFS用量为 $0.14\text{ m}^3/\text{t}$,WF-01用量为 $0.6\text{ kg}/\text{t}$,矿浆浓度28%;通过一粗一精一扫、中矿分级返回的闭路试验流程,获得了 P_2O_5 品位为32.80%、MgO含量1.01%、 P_2O_5 回收率为92.53%的精矿指标,产品达到酸法加工用优质磷矿石I类标准。本次试验使用磷化工酸性废水WFS作为磷矿的抑制剂,在WFS浮选抑制体系下,WF-01表现出了优异的反浮选提磷脱镁性能,将酸性废水运用到浮选流程中不仅降低了硫酸与磷酸的使用量,节约了浮选药剂成本,而且解决了酸废水排放问题,有利于生态环境保护。同时,由于扫选时矿物颗粒过细导致的浮选分离效果差的问题,通过添加一种优良的无机酸类分散剂YL-1,有效降低了扫选尾矿中磷的含量,提高综合回收率,避免资源浪费,实现了对该细粒磷矿石的高选择性分选。研究成果对同类型难选钙镁质胶磷矿的开发利用具有一定的指导意义。

关键词:钙镁质胶磷矿;脱镁;反浮选

中图分类号:TD923

文献标志码:A

文章编号:1671-9492(2024)03-0047-08

Study on Reverse Flotation Process of a Calcium-Magnesium Collophanite in Yunnan

PAN Weixiao¹, XU Wei^{1,2,3}, TIAN Yan³, LIANG Qun¹, GUO Can¹, MEI Guangjun^{1,2,3}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. State Key Laboratory of Mineral Processing, Beijing 102628, China;

3. State Key Laboratory of Efficient Utilization for Low Grade Phosphate Rock and Its Associated Resources, Guiyang 550002, China)

Abstract: In order to solve the problems of difficult separation and low utilization rate caused by the complex dissemination relationship between apatite and gangue minerals and the difficulty of mineral liberation in a low-grade collophanite ore in Yunnan, the main chemical composition and X-ray diffraction analysis of the ore were carried out, and the single factor tests such as grinding fineness, collector dosage, regulator dosage and flotation pulp density were studied to find the optimal reverse flotation conditions. Finally, the feasibility of industrial application was explored by the locked-cycle test. The results showed that the main useful mineral in the ore was fluorapatite, and the main gangue minerals were dolomite and quartz. Through single factor experiment, the optimum process conditions were obtained as follows: grinding fineness of -0.074 mm accounted for 78.16%, WFS dosage $0.14\text{ m}^3/\text{t}$, WF-01 dosage $0.6\text{ kg}/\text{t}$, and pulp density 28%. Through the locked-cycle test process of one roughing, one cleaning, one

收稿日期:2023-03-07

基金项目:贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2020]2Y048);矿物加工科学与技术国家重点实验室开放基金(BGRIMM-KJSKL-2021-08)

作者简介:潘伟晓(1998—),男,山东青岛人,硕士研究生,主要从事磷矿选矿方向研究。

通信作者:梅光军(1969—),男,湖南常德人,教授,博士生导师,主要从事矿物加工工程技术研究。

scavenging and middling classification return, a concentrate with P_2O_5 grade of 32.80%, MgO content of 1.01% and P_2O_5 recovery of 92.53% was obtained, and the product reached the class I standard of high quality phosphate ore for acid process. In this experiment, acidic wastewater WFS was used as the regulator of phosphate rock. Under the WFS flotation inhibition system, WF-01 showed excellent performance of phosphorus extraction and magnesium removal in reverse flotation. The application of acidic wastewater in the flotation process not only reduced the consumption of sulfuric acid and phosphoric acid, saved the cost of flotation reagents, but also solved the problem of acid wastewater discharge, which was conducive to ecological environment protection. Meanwhile, due to the problem of poor flotation separation effect caused by too fine mineral particles during scavenging, an excellent inorganic acid dispersant YL-1 is added, so that the content of phosphorus in the scavenging tailings is effectively reduced, the comprehensive recovery is improved, the waste of resources is avoided, and the high-selectivity separation of the fine-grained phosphate ore is realized. The research results have certain guiding significance for the development and utilization of the same type of refractory calcium magnesium colophonite.

Key words: calcium-magnesium bearing colophonite; magnesium removal; reverse flotation

磷是重要的战略资源,我国磷矿资源相对丰富,居于世界第二,但是我国磷矿资源存在品位低、缺少优质矿床等问题,磷矿的存在形式以难选的中低品位胶磷矿为主^[1-3]。中低品位胶磷矿中含有大量的硅酸盐矿物、碳酸盐矿物、倍半氧化物和黏土矿物等杂质^[4],其中钙镁质胶磷矿的杂质以白云石为主,且含量较大,如果磷精矿中 $\omega(\text{MgO})$ 大于1%,将会对湿法磷酸及后续磷产品的生产产生不利影响^[5-6]。对于钙镁质胶磷矿的除杂方法主要是在酸性条件下以反浮选脱镁为主^[7-9]。由于不同产地钙镁质胶磷矿贫细杂特征差异较大,针对嵌布粒度细、单体解离难度大的钙镁质胶磷矿,提磷脱镁的高选择性分选往往难以实现。赖伟强^[10]采用单一反浮选的方法,获得了 P_2O_5 品位为30.34%的高质量精矿。胡廷海等^[11]采用反浮选的方法,闭路试验获得了 P_2O_5 品位为33.01%的高质量精矿。齐越超等^[12]针对湖北某高镁磷矿进行反浮选试验研究,使用混酸(硫酸:磷酸=1:2)作为抑制剂、GYP作为捕收剂,最终得到 P_2O_5 品位33.26%、 P_2O_5 回收率96.79%、MgO含量0.74%的优质磷精矿。针对难选硅质磷矿,毛素荣等^[13]采用正浮选与反浮选相结合的工艺获得了 P_2O_5 品位为31.74%的高质量精矿。同样,针对难选磷

矿,李向益等^[14]采用HYY作为正浮选捕收剂、CF-813D作为反浮选捕收剂,通过正反浮选工艺结合获得了磷精矿 P_2O_5 品位29.86%、 P_2O_5 回收率78.88%的磷精矿。本文对云南某中低品位难处理钙镁质胶磷矿进行了系统研究,发现针对复杂难选的实际矿使用复配捕收剂具有良好的效果^[15],本次试验以WF-01^[16]为脱镁捕收剂,WFS为抑制剂,YL-1作为分散剂,经过一粗一精一扫的闭路试验流程,获得了比较优质的磷精矿产品,达到了酸法加工用优质磷矿石I类标准。

1 试样性质

1.1 试样化学分析与X射线衍射分析

试样取自云南某地钙镁质胶磷矿,矿样颜色为黑灰色,形状为块状。采用X射线荧光光谱仪(XRF)对试样进行了化学分析,分析结果见表1。对试样进行了X射线衍射分析,分析结果见图1。由表1可知,试样中 $\omega(P_2O_5) = 23.97\% < 26\%$, $\omega(\text{CaO})/\omega(P_2O_5)$ 为 $1.78 > 1.40$, $\omega(\text{酸不溶}) < 10\%$,从图1可知,试样中的有用矿物为氟磷灰石,脉石矿物以白云石、石英及少量黏土矿物为主。该试验矿样属于中低品位钙镁质胶磷矿,可通过反浮选脱镁的方法获得高品质磷精矿。

表1 矿样XRF分析结果

Table 1 XRF analysis results of the ore sample

/%

成分	P_2O_5	MgO	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3
含量	23.97	6.34	42.62	7.18	0.86	0.76

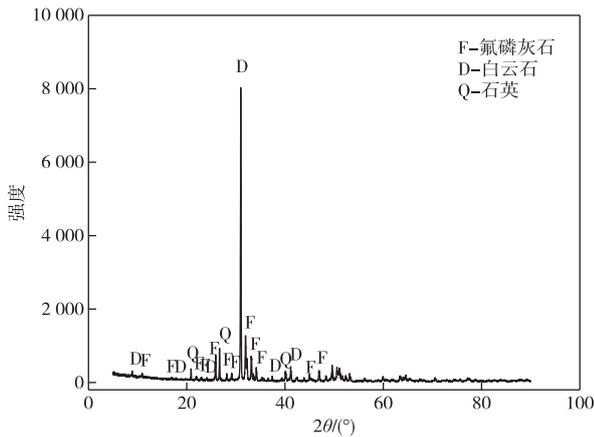


图1 矿样 XRD 分析结果

Fig. 1 XRD analysis results of the ore sample

1.2 试样中主要矿物的嵌布特征与赋存状态

利用扫描电镜加能谱分析(SEM-EDS)对矿物颗粒局部微区进行形貌分析和面扫描及元素分析,结果见图2。从图2可知,矿样中有益矿物为氟磷灰石,形状为不规则颗粒,且粒度较细;主要脉石矿物为白云石、石英及少量黏土矿物。通过XRF分析可知,该矿石着重需要处理的脉石矿物为白云石且含量较高, $\omega(\text{MgO})=6.34\%$,如果磷精矿中 $\omega(\text{MgO})$ 大于1%,将会对湿法磷酸及后续磷产品的生产产生不利影响,因此需要通过反浮选将MgO脱除至1%以下。同时由SEM-EDS分析结果可知,该矿石的主要处理难点在于有益矿物氟磷灰石与脉石矿物白云石、石英互为包裹、紧密共生,矿石单体解离困难,在生产过程中通过提高磨矿细度来增加矿石解离度,但这会导致过细的矿石颗粒被机械夹带从而使回收率降低;微细粒矿物颗粒之间共生关系复杂,胶结连生特征明显,其中与白云石共生的磷灰石较难回收,容易与脉石矿物一同被分选,从尾矿中流失。因此,需要结合矿石性质,对现场的工艺条件进

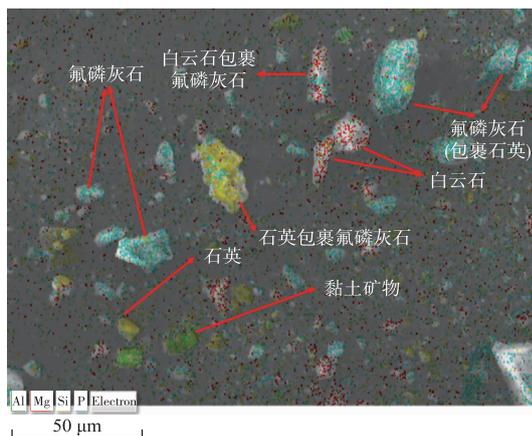


图2 矿样 SEM-EDS 分析结果

Fig. 2 SEM-EDS analysis results of ore samples

行优化,为提高磷精矿的选别指标提供最佳工艺参数和条件。

2 试验药剂、设备与方法

2.1 试验药剂与设备

试验药剂:使用WF-01作为白云石捕收剂,使用时配置成质量分数为1%的溶液;使用磷化工企业酸废水WFS作为磷灰石的抑制剂及pH调整剂(酸废水中含有 H_3PO_4 与HF,pH=1~2);使用无机酸类分散剂YL-1与无机碱类分散剂YL-2作为扫选分散剂,使用时配置成质量分数为5%的溶液(注:浮选药剂均来自瓮福集团)。

试验设备:浮选采用1L单槽浮选机(武汉洛克);磨矿采用筒体为2L的棒磨机(武汉洛克)。

2.2 试验方法

矿石中有害杂质主要为MgO,且含量较高,可通过单一反浮选的方法脱除白云石获得高品质磷精矿,试验拟采用一粗一精流程进行,见图3。

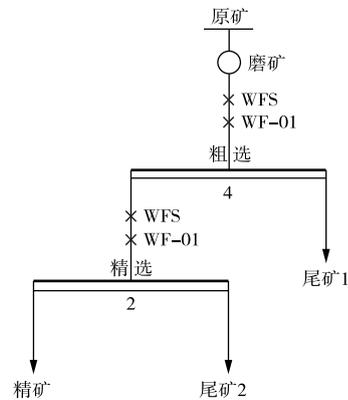


图3 条件试验流程

Fig. 3 Flowsheet of condition tests

3 试验结果与讨论

为最终获得精矿 P_2O_5 品位32%以上、MgO含量1%以下的选别指标,试验主要进行了磨矿细度、捕收剂用量、矿浆浓度、分散剂种类等条件的优化试验。

3.1 磨矿细度试验

为考察入选矿石粒度对浮选指标的影响,确定合适的磨矿细度,首先使用棒磨机进行了磨矿时间为12、13.5、15、20 min的磨矿试验。每次磨矿称取矿样300 g,使用2.0 L滚筒,固定磨矿浓度为65%,分别重复磨矿三组(磨矿细度取平均值),不同磨矿时间条件下的磨矿细度见图4。固定WFS粗选+精选药剂用量为 $0.12+0.02 \text{ m}^3/\text{t}$ 、WF-01用量为

0.4+0.2 kg/t、矿浆浓度为 28%、粗选时间 4 min、精选时间 2 min,进行了上述 4 个磨矿细度条件下的浮选试验,试验结果见图 5。

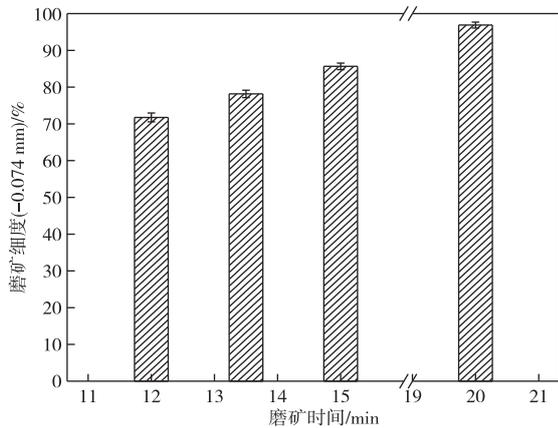


图 4 磨矿细度与磨矿时间之间的关系

Fig. 4 Relationship between grinding fineness and grinding time

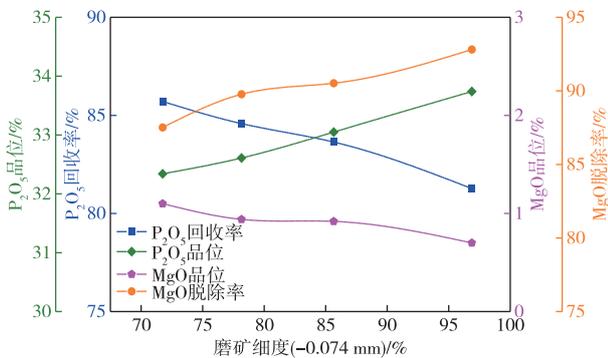


图 5 磨矿细度对磷精矿选别指标的影响

Fig. 5 Effect of grinding fineness on beneficiation indexes of the phosphate concentrate

从图 4 可知,磨矿时间越长,磨矿粒度越细,磨机造成的粒度误差越小。在浮选过程中微细粒级矿物会与浮选药剂发生吸附,消耗浮选药剂,从而降低精矿磷的回收率。从图 5 可知,随着-0.074 mm 粒级含量的上升,精矿 P₂O₅ 品位虽有所上升,但 P₂O₅ 回收率大幅度下降。综合考虑,确定合适的磨矿细度为-0.074 mm 占 78.16%。

3.2 捕收剂用量试验

固定磨矿细度为-0.074 mm 占 78%,WFS 粗选+精选药剂用量为 0.12+0.02 m³/t、矿浆浓度为 28%、粗选时间 4 min、精选时间 2 min,进行了捕收剂 WF-01 的用量试验(粗选药剂用量为 WF-01 总用量的 2/3,精选为 1/3),试验结果见图 6。由图 6 可知,随着捕收剂用量的增加,精矿中 P₂O₅ 品位逐渐增加,MgO 品位逐渐下降,但精矿 P₂O₅ 回收率也随之下降,故不宜过度增加捕收剂用量。综合考虑精

矿中 P₂O₅、MgO 品位要求以及 P₂O₅ 回收率,确定捕收剂总用量为 0.6 kg/t。

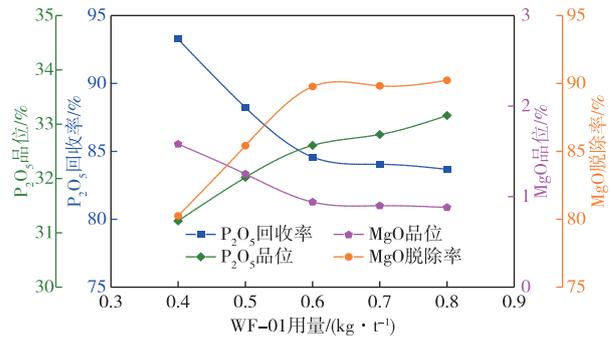


图 6 捕收剂 WF-01 用量对磷精矿选别指标的影响

Fig. 6 Effect of collector WF-01 dosage on beneficiation indexes of the phosphate concentrate

3.3 抑制剂 pH 试验

在胶磷矿反浮选中抑制剂通常使用硫酸或磷酸,但硫酸的抑制效果不及磷酸,同时磷酸成本过高不适合单独使用。本次试验使用抑制剂 WFS 为磷化工企业生产排放的酸废水,含有 H₃PO₄ 与 HF。酸废水中的 H₃PO₄ 可与表面活性 Ca 位点反应形成 CaHPO₄ 和 Ca(H₂PO₄)₂,阻止捕收剂吸附、降低胶磷石表面疏水性从而抑制胶磷矿的浮选,WFS 作为抑制剂的同时也能作为 pH 调整剂。固定磨矿细度为-0.074 mm 占 78%,WF-01 粗选+精选药剂用量为 0.4+0.2 kg/t、矿浆浓度为 28%、粗选时间 4 min、精选时间 2 min,进行抑制剂 WFS 的用量试验,试验结果见图 7。从图 7 可知,pH 值在增大的过程中精矿 P₂O₅ 的品位提升不大但精矿 P₂O₅ 回收率却大幅度下降,这说明随着矿浆中 pH 值上升抑制效果变差。当 pH 值过低时,精矿 P₂O₅ 回收率过高是因为矿浆 pH 值不在捕收剂的最佳作用范围内,捕收剂活性下降,捕收能力下降。综合精矿品位与回收率确定最佳 pH 值为 4。

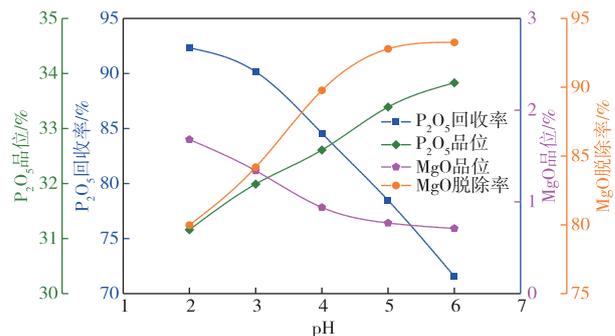


图 7 抑制剂 pH 对磷精矿选别指标的影响

Fig. 7 Effect of pH value on beneficiation indexes of the phosphate concentrate

3.4 矿浆浓度试验

固定磨矿细度为-0.074 mm 占 78%,WFS 粗选+精选药剂用量为 0.12+0.02 m³/t、WF-01 粗选+精选药剂用量为 0.4+0.2 kg/t、矿浆浓度为 28%、粗选时间 4 min、精选时间 2 min,进行不同矿浆浓度的浮选试验,试验结果见图 8。从图 8 可知,相同浮选条件下,随着矿浆浓度的增加,精矿 P₂O₅ 品位上升,但精矿 P₂O₅ 回收率呈下降趋势,说明矿浆浓度的升高导致细粒级矿泥含量增大,矿泥罩盖及机械夹带效应加剧,不利于选择性回收。综合考虑,矿浆浓度确定为 28%。

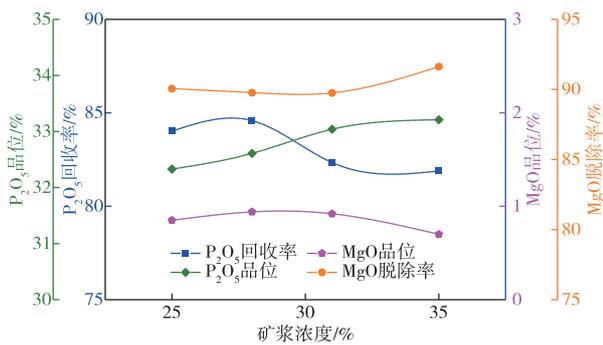


图 8 浮选浓度对磷精矿选别指标的影响

Fig. 8 Effect of flotation pulp density on

beneficiation indexes of the phosphate concentrate

根据上述单因素条件试验,确定了该矿石反浮选工艺流程的最佳参数,即:磨矿细度为-0.074 mm 占 78.16%,WFS 用量 0.14 m³/t,WF-01 用量 0.6 kg/t,矿浆浓度 28%(300 g)。在最佳参数条件下进行开路试验获得产率为 62.79%、P₂O₅ 品位 32.61%、MgO 含量 0.94%、SiO₂ 含量 9.18%、Al₂O₃ 含量 1.13%、Fe₂O₃ 含量 0.83%、P₂O₅ 回收率为 84.58%、MgO 脱除率为 89.77%的磷精矿。

3.5 分散剂种类试验

考虑到浮选时捕收剂对微细粒的选择性较差,为降低尾矿中 P₂O₅ 的含量,进行了扫选分散剂的添加试验,分散剂用量均为 1.0 kg/t。试验流程见图 9,试验结果见表 2。从表 2 可知,未使用分散剂时,尾矿中 P₂O₅ 品位为 6.88%;YL-1 呈酸性,加入分散剂 YL-1 时矿浆 pH 值下降,扫选尾矿 P₂O₅ 品位由 6.88%降至 5.31%,说明 YL-1 的加入有助于扫选时捕收剂的选择性分离;YL-2 呈碱性,加入分散剂 YL-2 时尾矿 P₂O₅ 品位由 6.88%上升至 7.32%,扫选效果变差。因此,扫选时选择加入 YL-1,有利于提升扫选精矿 P₂O₅ 回收率,降低尾矿中 P₂O₅ 的含量,减少资源浪费。

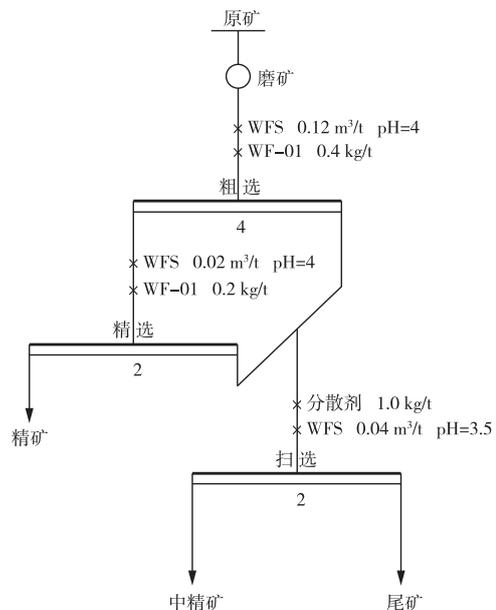


图 9 分散剂种类试验流程

Fig. 9 Flowsheet of dispersant type tests

表 2 分散剂种类试验结果

Table 2 Results of dispersant type tests

/%

分散剂种类	产品名称	产率	品位		回收率	
			P ₂ O ₅	MgO	P ₂ O ₅	MgO
未添加分散剂	精矿	62.55	33.31	0.89	84.56	9.63
	中精矿	7.61	23.59	4.87	7.04	6.20
	扫选尾矿	27.55	6.88	16.16	8.40	84.17
	原矿	100.0	24.64	5.78	100.0	100.0
YL-1	精矿	61.69	33.15	0.99	83.50	10.40
	中精矿	12.21	24.06	6.38	10.85	13.27
	扫选尾矿	26.10	5.31	16.83	5.65	76.33
	原矿	100.0	24.49	5.87	100.0	100.0
YL-2	精矿	60.22	33.03	0.87	81.05	8.79
	中精矿	10.37	21.77	4.99	10.17	8.68
	扫选尾矿	29.41	7.32	16.74	8.78	82.53
	原矿	100.0	24.54	5.96	100.0	100.0

3.6 闭路试验

对扫选中矿进行筛分并对各粒级进行 XRF 测试,结果见表 3。对中矿来说,−0.074 mm 粒级含量占比 89.27%,其中−0.038 mm 粒级含量占比为 65.73%。含镁、硅、铝、铁杂质矿物在−0.038 mm 粒度范围内高度富集,对于这部分矿物颗粒的选择性分选难度较大,即使借助分散剂的使用,可能也难以实现高效浮选分离。对于复杂难处理的微细粒中矿,不建议单独再磨再选,分选效果不佳。因中矿产率不高,可以适当考虑将其分级返回闭路循环,以降低该部分的负面影响。

为进一步提升 P_2O_5 回收率,决定对中矿进行闭路循环,将+0.038 mm 中矿返回磨矿系统,−0.038 mm 中矿返回第一道粗选,先后闭路循环 3 次,工艺流程见图 10,试验结果见表 4。由表 4 可知,闭路试验在第一次循环即趋于平衡,取三次循环数据进行加权计算,将精矿、尾矿、产率及回收率分别求取平均值。结果表明,经优化后,磷精矿平均 P_2O_5 品位 32.80%、 P_2O_5 回收率 92.53%、MgO 含量 1.01%、MER 值 9.36%、磷尾矿 P_2O_5 品位为 6.12%。获得的磷精矿产品达到酸法加工用优质磷矿石 I 类标准,实现了对该中低品位钙镁质胶磷矿的高效回收。

表 3 中矿各粒级 XRF 测试结果

Table 3 XRF test results of each size fraction of middlings

/%

粒度/mm	产率	品位						分配率					
		P_2O_5	MgO	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	P_2O_5	MgO	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3
+0.074	10.73	26.15	5.22	43.87	6.73	0.63	0.62	12.95	8.72	12.09	6.89	4.60	4.96
−0.074+0.038	23.54	23.32	6.52	41.78	7.54	0.66	0.73	25.35	23.91	25.25	16.94	10.57	12.82
−0.038	65.73	20.33	6.58	37.13	12.14	1.90	1.67	61.70	67.37	62.66	76.17	84.83	82.22
给矿	100.0	21.66	6.42	38.95	10.48	1.47	1.34	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

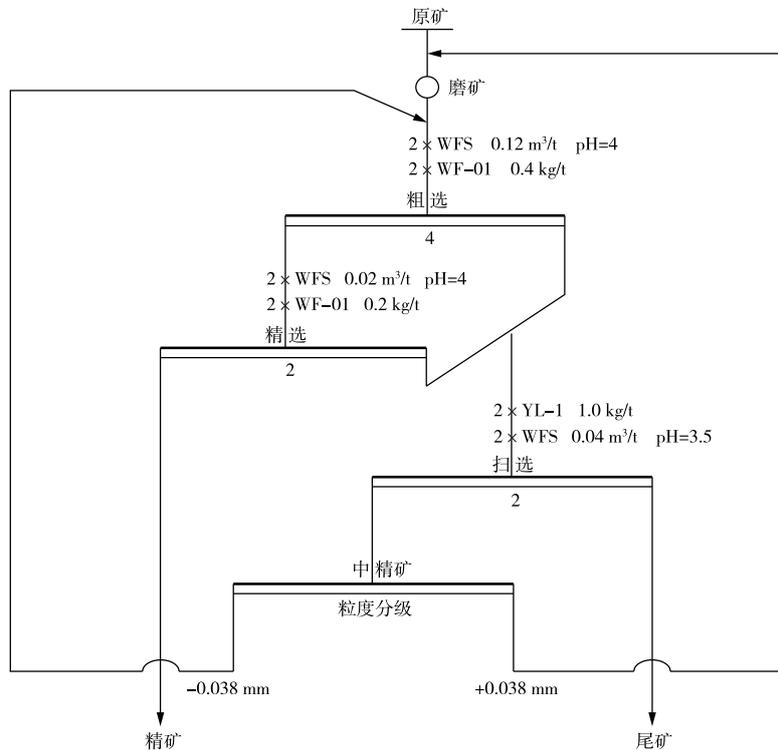


图 10 闭路试验流程

Fig. 10 Flowsheet of the locked-cycle tests

表 4 闭路试验结果

Table 4 Results of the locked-cycle tests

/%

产品名称	产率	品位						回收率	
		P_2O_5	MgO	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	P_2O_5	MgO
精矿	69.82	32.80	1.01	46.96	9.50	1.31	0.75	92.53	12.57
尾矿	30.18	6.12	16.26	31.98	4.63	0.42	1.46	7.47	87.43
原矿	100.0	24.75	5.61	42.44	8.03	1.04	0.97	100.0	100.0

4 结论

1) 试验矿样中 useful 矿物为氟磷灰石, 主要脉石矿物为白云石、石英及少量黏土矿物, 氟磷灰石与脉石矿物白云石、石英互为包裹, 紧密共生; 微细粒矿物颗粒之间共生关系复杂, 胶结连生, 属于中低品位难选钙镁质胶磷矿。

2) 以 WF-01 为捕收剂、WFS 为抑制剂、YL-1 为扫选分散剂, 通过一粗一精一扫、中矿返回闭路试验流程, 最终获得 P_2O_5 品位为 32.8% 的磷精矿, P_2O_5 回收率高达 92.53%, 同时有害金属镁的含量控制在 1% 左右, 尾矿中 P_2O_5 品位降至 6.12%, 实现了对中低品位难处理钙镁质胶磷矿的高效回收。

3) 使用 WFS 代替混酸作为抑制剂, 不仅可以降低浮选流程的成本, 还可以消纳磷化工企业难以处理的废水, 符合当代对环境保护的理念。

4) 值得特别说明的是, 由于入选粒度中细粒级占 78%, 细粒级的磷矿石容易在脱镁过程中被泡沫夹带, 导致回收率降低。因此针对尾矿的扫选显得尤为重要, 分散剂 YL-1 的加入能够有效降低扫选过程中因细粒级过多而产生的絮凝现象, 降低微细粒磷尾矿中 P_2O_5 品位, 更大程度上实现对磷资源的回收, 避免资源浪费。

参考文献

- [1] 柳正. 我国磷矿资源的开发利用现状及发展战略[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2006(1): 21-23.
LIU Zheng. Present situation and development strategy of phosphate rock resources in China [J]. China Non-metallic Mining Industry Herald, 2006(1): 21-23.
- [2] 余永富, 葛英勇, 潘昌林. 磷矿选矿进展及存在的问题[J]. 矿冶工程, 2008, 28(1): 29-33.
YU Yongfu, GE Yingyong, PAN Changlin. Progress and problems in beneficiation of phosphate ore [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2008, 28(1): 29-33.
- [3] 李成秀, 文书明. 我国磷矿选矿现状及其进展[J]. 矿产综合利用, 2010(2): 22-25.
LI Chengxiu, WEN Shuming. Status quo and progress in mineral processing technology of phosphorus ores in China [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2010(2): 22-25.
- [4] 姚炜栋, 石林. 低品位磷矿的资源化利用研究[J]. 矿业研究与开发, 2022, 24(10): 63-68.
YAO Weidong, SHI Lin. Resource utilization of low-grade phosphate rock [J]. Mining Research and Development, 2022, 24(10): 63-68.
- [5] 杨建中. 湿法磷酸企业应对磷矿贫化的技术措施[J]. 磷肥与复肥, 2007, 22(4): 24-25.
YANG Jianzhong. Technical measures for wet process phosphoric acid enterprises to deal with phosphate rock dilution [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2007, 22(4): 24-25.
- [6] 张冬冬, 魏爱斌, 瞿广飞, 等. 磷矿脱镁研究进展[J]. 矿产综合利用, 2015(5): 1-7.
ZHANG Dongdong, WEI Aibin, QU Guangfei, et al. Progress of removing magnesium impurities from phosphoric ore [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2015(5): 1-7.
- [7] 葛英勇, 甘顺鹏, 曾小波. 胶磷矿双反浮选工艺研究[J]. 化工矿物与加工, 2006, 35(8): 8-10.
GE Yingyong, GAN Shunpeng, ZENG Xiaobo. Double reverse flotation process of separating phosphate rock [J]. Industrial Minerals & Processing, 2006, 35(8): 8-10.
- [8] 钟康年, 韩英, 谢恒星. 磷灰石与白云石的浮选分离[J]. 有色金属, 1994, 45(2): 31-38.
ZHONG Kangnian, HAN Ying, XIE Hengxing. Separation of apatite and dolomite [J]. Nonferrous Metals, 1994, 45(2): 31-38.
- [9] 刘树永, 韩百岁, 赵通林, 等. 中低品位磷矿浮选药剂研究现状与展望[J]. 矿产综合利用, 2021(6): 91-100.
LIU Shuyong, HAN Baisui, ZHAO Tonglin, et al. Current status and prospects of the research on flotation reagent for medium and low grade phosphorite ore [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(6): 91-100.
- [10] 赖伟强. 某高镁低品位胶磷矿反浮选试验研究[J]. 化工矿物与加工, 2013, 42(12): 8-10.
LAI Weiqiang. Reverse flotation test on a low-grade colophonite with high magnesium content [J]. Industrial Minerals & Processing, 2013, 42(12): 8-10.
- [11] 胡廷海, 吴杰钢, 罗波, 等. 四川某中低品位高镁胶磷矿反浮选脱镁试验 [J]. 现代矿业, 2021, 37(6): 143-146.
HU Tinghai, WU Jiegang, LUO Bo, et al. Experiment on removing magnesium in reverse flotation of middle-low grade colophonite ore with high magnesium in Sichuan [J]. Modern Mining, 2021, 37(6): 143-146.
- [12] 齐越超, 韩兆元, 张发明, 等. 湖北某高镁质磷矿反浮选试验研究 [J]. 有色金属(选矿部分), 2021(2): 136-139.
QI Yuechao, HAN Zhaoyuan, ZHANG Faming, et al. Study on reverse flotation of high magnesium phosphate ore in Hubei province [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2021(2): 136-139.
- [13] 毛素荣, 何剑, 王君, 等. 云南某难选硅质磷矿选矿试验

- 研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2012(4):50-52.
- MAO Surong, HE Jian, WANG Jun, et al. Experimental study on mineral processing of siliceous phosphate ore of Yunnan[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing section), 2012(4):50-52.
- [14] 李向益, 孙广周, 曾茂青, 等. 云南某难选低品位胶磷矿正一反浮选试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2019(3):51-54, 59.
- LI Xiangyi, SUN Guangzhou, ZENG Maoqing, et al. Experimental research on direct-reverse flotation process for a low grade refractory colophonite in Yunnan [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2019(3):51-54, 59.
- [15] 朱一民. 2021年浮选药剂的进展[J]. 有色金属(选矿部分), 2022(2):1-15.
- ZHU Yimin. Progress of flotation reagents in 2021[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2022(2):1-15.
- [16] 李智力, 张泽强, 池汝安. 几种磷矿反浮选药剂的浮选性能对比[J]. 有色金属(选矿部分), 2013(2):68-70.
- LI Zhili, ZHANG Zeqiang, CHI Ru'an. Performance comparison test of several phosphate reverse flotation reagents[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2013(2):68-70.

(本文编辑 刘水红)

(上接第30页)

- [25] QUAN Y, WANG Y, WU Y, et al. Network transformations of highly dispersed MMT/SBR nanocomposites during processing [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2013, 130(1):113-119.
- [26] 张晋霞, 李新邈, 牛福生, 等. 铁尾矿超细粉体的制备及磨矿动力学试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2023(5):73-80, 144.
- ZHANG Jinxia, LI Xinmiao, NIU Fusheng, et al. Preparation of ultrafine powder from iron tailings and experimental study on grinding kinetics[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2023(5):73-80, 144.
- [27] 罗圣乐, 王鑫, 张富花, 等. 陶瓷球为磨矿介质的长石磨矿动力学研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2023(1):28-34.
- LUO Shengle, WANG Xin, ZHANG Fuhua, et al. Study on the grinding kinetics of feldspar with ceramic balls as grinding media [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2023(1):28-34.

(本文编辑 汪东芳)