

文章编号:1008-7524(2026)02-0001-07

DOI:10.16283/j.cnki.hgkwyjg.2026.02.001

湖北后坪磷矿工艺矿物学特征与混合反浮选试验研究*

阮耀阳¹,周锦华¹,周芳¹,罗惠华¹,王辛龙²,池汝安¹,邓博纳¹

(1. 武汉工程大学 资源与安全工程学院,湖北 武汉 430073;

2. 四川大学 教育部磷资源综合利用与清洁加工工程中心,四川 成都 610065)

摘要:后坪磷矿是湖北省内发现的特大型磷矿床,磷矿资源量超2亿t,且 P_2O_5 品位较高。然而,该磷矿原矿中的倍半氧化物含量高,开发利用难度较大。本文利用矿物自动分析仪(Mineral liberation analyser, MLA)对该磷矿的工艺矿物学特征进行了分析,在此基础上开展了反浮选试验研究,结果表明:该磷矿中主要脉石矿物为钾长石、石英和白云石,有用矿物磷灰石嵌布粒度较粗,较易实现单体解离;混合反浮选流程采用十二胺和MON-135复合捕收剂,在其用量分别为500、1.5 kg/t,磨矿细度-0.074 mm占69.54%的条件下,经“1粗2扫”反浮选闭路流程,获得了 P_2O_5 品位为29.46%、回收率为82.04%的磷精矿;该浮选工艺药剂制度简单,泡沫易破裂,可为后坪磷矿的高效开发提供技术参考。

关键词:磷矿;工艺矿物学;反浮选;脱硅;十二胺;泡沫;药剂制度**中图分类号:**TD97 **文献标志码:**A

Study on process mineralogy characteristics and mixed reverse flotation test of Houping phosphate rock in Hubei

Ruan Yaoyang¹, Zhou Jinhua¹, Zhou Fang¹, Luo Huihua¹,
Wang Xinlong², Chi Ru'an¹, Deng Bona¹

(1. School of Resources & Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei 430073, China;

2. Engineering Research Center of Comprehensive Utilization and Clean Processing of Phosphorus Resources, Ministry of Education, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

Abstract: Houping phosphate rock is a super-large phosphate deposit discovered in Hubei Province. The resource of phosphate rock is more than 200 million tons, and the grade of P_2O_5 is high. However, the content of sesquioxide in the phosphate ore is high, and it is difficult to develop and utilize. In this paper, the process mineralogy characteristics of the phosphate rock were analyzed by mineral liberation analyser (MLA). On this basis, the reverse flotation test was carried out. The results show that the main gangue minerals in the phosphate rock are potassium feldspar, quartz and dolomite, and the useful mineral apatite has a coarse particle size, which is easy to realize monomer dissociation. The mixed reverse flotation process used dodecylamine and MON-135 composite collectors. Under the conditions of 500 kg/t and 1.5 kg/t, respectively, and the grinding fineness of -0.074 mm was 69.54%, the phosphate concentrate with P_2O_5 grade of 29.46% and recovery of 82.04% was obtained by 'one roughing and two scavenging' reverse flotation closed-circuit process. The reagent system of the flotation process is simple and the foam is easy to burst, which can provide technical reference for the efficient development of Houping phosphate rock.

Keywords: phosphate ore; process mineralogy; reverse flotation; desilication; dodecylamine; foam; pharmaceutical regime

* 收稿日期:2025-04-25

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC2904701);湖北省自然科学基金联合基金项目(2023AFD208);教育部磷资源综合利用与清洁加工工程研究中心开放课题基金项目(2022CUCPPR03);武汉知识创新专项-曙光计划项目(2023020201020437)。

作者简介:阮耀阳(1987-),男,博士,副教授,从事磷矿分选工艺与浮选药剂研究,E-mail:ruanyaoyang@163.com。

通信作者:邓博纳(1991-),女,博士,讲师,从事磷矿分选及固体废弃物资源化利用研究,E-mail:bdeng@126.com。

引用格式:阮耀阳,周锦华,周芳,等.湖北后坪磷矿工艺矿物学特征与混合反浮选试验研究[J].化工矿物与加工,2026,55(2):1-7.
Ruan Y Y, Zhou J H, Zhou F, et al. Study on process mineralogy characteristics and mixed reverse flotation test of Houping phosphate rock in Hubei[J]. Industrial Minerals & Processing, 2026, 55(2): 1-7.

0 引言

我国磷矿资源丰富,但易选富矿资源日益枯竭,多为中低品位磷矿,且随着开采深度不断增加,矿石结构和矿物组成更加复杂多样,需经分选富集才能满足湿法磷酸用矿要求^[1]。常见脉石包括石英、长石、白云石、方解石以及少量倍半氧化物、云母等^[2]。中低品位磷矿中有益矿物磷灰石由于常以隐晶或细晶形式与脉石矿物紧密连生,嵌布粒度细,故被称作胶磷矿^[3]。重选、光电选和擦洗脱泥等工艺具有预抛尾效果^[4-5],而75%以上的磷矿是采用浮选工艺进行处理的,尤其是单一反浮选脱镁工艺在工业生产中得到了广泛应用^[6-8]。

长期以来,脱硅是中低品位磷矿开发利用中面临的关键技术难题。磷矿的浮选脱硅工艺分为正浮选和反浮选,其中:正浮选分别以碳酸钠和水玻璃为pH调整剂和硅酸盐抑制剂,有用矿物磷灰石与脂肪酸类阴离子捕收剂作用后浮出^[9];反浮选则通常在中性或弱碱性条件下,采用胺类阳离子表面活性剂浮选硅酸盐脉石矿物^[10]。正浮选工艺不仅药剂用量大,成本高,且精矿为浮选泡沫产品,浓缩脱水过程不易沉降,主要适用于低品位岩浆型磷矿^[11]。反浮选工艺胺类阳离子表面活性剂普遍选择性差,泡沫黏度大,磷回收率低,但其工艺流程与药剂制度简单,药耗少,更适用于中低品位胶磷矿脱除硅酸盐脉石^[12]。

本文以湖北后坪磷矿为研究对象,利用MLA对该矿石进行工艺矿物学分析,以掌握原矿的矿物组成和嵌布规律,为矿石可选性研究提供科学依据。基于双反浮选工艺,提出十二胺与混合脂肪酸类捕收剂MON-135协同浮选方案,以期在获得良好磷精矿指标的同时,解决分选过程中阳离子表面活性剂泡沫黏度大的问题。

1 矿石性质与研究方法

1.1 矿石性质

试样取自湖北后坪磷矿,先后采用颚式破碎机和辊式破碎机将其破碎至2 mm以下,破碎产品通过“堆锥法”和“环锥法”混匀,每份取1 kg原矿装袋并用于磨矿和浮选试验。原矿代表性样品的X射线衍射(XRD)分析和多元素分析结果分别见图1、表1。

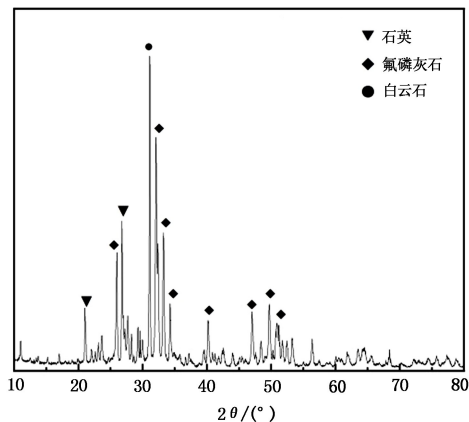


图1 后坪磷矿试样的XRD图谱

Fig.1 XRD pattern of Houping phosphate ore sample

由图1可知,原矿中主要含磷矿物为氟磷灰石,脉石矿物主要为石英和白云石。由表1可知,后坪磷矿属于低镁高倍半磷矿,原矿中MgO质量分数为2.26%,倍半氧化物含量较高且伴生一定量的SiO₂。由此可见,影响最终精矿产品P₂O₅品位与质量的杂质组分为SiO₂、Al₂O₃及MgO。

表1 后坪磷矿多元素分析结果

Table 1 Multi-elements analysis results of Houping phosphate ore

	P ₂ O ₅	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
质量分数/%	24.68	16.48	2.26	3.24	2.42
	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	F	TiO ₂
质量分数/%	36.85	2.25	0.58	2.13	0.21

1.2 试验过程与研究方法

取1 kg原矿进行棒磨,磨矿质量分数约为50%,磨至一定时间后采用湿式分样机进行分样,获得6组原矿用于浮选试验。浮选试验使用XFDⅢ-0.5L型单槽浮选机,叶轮转速为2 000 r/min,浮选时间为6 min左右。浮选药剂为硫酸、MON-135(由棉油脂肪酸皂复配一定比例的聚氧乙烯醚制成)和十二胺,其中硫酸搅拌时间为1 min,捕收剂MON-135和十二胺搅拌时间均为2 min。浮选产品经过滤、烘干、称质量及制样后,采用容量法计算P₂O₅品位和回收率。另取磨后代表性原矿样品外送检测单位进行MLA测试,以分析原矿工艺矿物学特征。

2 磷矿原矿工艺矿物学分析

磷矿原矿主要物相组成及元素赋存状态分别见表2、表3。由表2可知,主要脉石矿物为钾长

石、石英和白云石,是磷矿分选富集过程的分离对象。由表3可知,磷灰石主要为含磷、含钙矿物,其占有率分别为98.71%和96.49%,大部分镁元素赋存于白云石中,少量赋存于钙长石和透辉石中。钾长石为主要的铝硅酸盐脉石矿物,其铝、硅元素占有率分别为87.00%和68.42%。此外,还有少部分硅元素赋存于石英中,黄铁矿、硅灰石和

磁铁矿为主要的含铁矿物。

表2 原矿物相组成

Table 2 Mineral phase composition of raw ore

	磷灰石	钾长石	钙长石	石英	高岭石	白云石
质量分数/%	72.70	17.70	1.11	4.14	0.18	2.13
	黄铁矿	硅灰石	方解石	透辉石	白云母	其他
质量分数/%	0.36	0.66	0.17	0.10	0.08	0.67

注:其他包括磁铁矿、石膏、金红石等。

表3 原矿样品主要组成元素赋存状态

Table 3 Occurrence state of main elements in raw ore samples

单位:%

Unit:%

	磷灰石	钾长石	钙长石	石英	高岭石	白云石	黄铁矿	硅灰石	方解石	透辉石	磁铁矿
P	98.71	—	0.47	—	—	0.11	—	0.56	—	—	—
Mg	0.61	0.83	3.77	0.49	0.49	87.46	—	1.38	—	2.57	—
Ca	96.49	—	0.52	—	—	2.12	—	0.39	0.05	0.05	—
Al	0.57	87.00	3.21	4.75	1.75	—	0.05	0.74	—	0.12	—
Si	0.45	68.42	2.36	25.24	—	0.14	—	1.12	—	0.19	—
Fe	0.35	0.66	3.49	—	—	0.37	56.33	20.06	—	—	6.83

利用 MLA 进一步分析原矿中主要矿物嵌布特征和解离情况,结果见图2、表4。由图2可知:原矿磨后有用矿物磷灰石多以较粗粒级的独立矿物形式存在,少量与白云石、长石和石英紧密连生;脉石矿物白云石、长石和石英等多以无定形形态与磷灰石连生,大部分长石和石英相对较易解离,而白云石主要以浸染状与磷灰石连生(见图2a、图2b),解离难度较大;有害杂质组分黄铁矿则零散分布于磷灰石和长石矿物结构中(见图2a、图2c),且嵌布粒度微细,粒径基本小于10 μm,故原矿中黄铁矿的浮选分离可能性极低。

由表4可知:原矿在-0.074 mm占31.78%的磨矿细度下,磷灰石单体解离度达85.42%;继续增大磨矿细度,解离度并未显著提高,说明磷灰

石在原矿中以粗粒嵌布颗粒为主,未解离磷灰石大部分仍与主要脉石长石、石英和白云石连生。

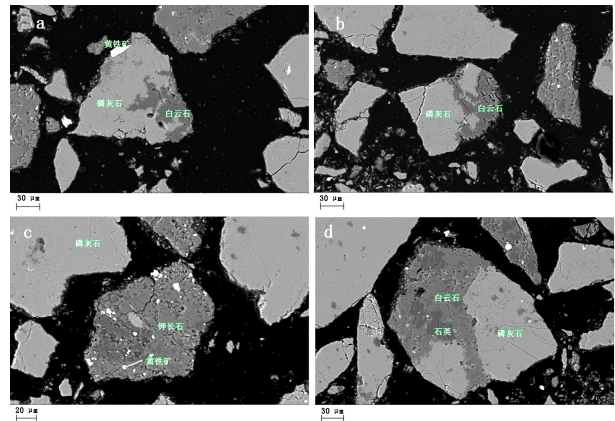


图2 磷灰石与脉石矿物的嵌布特征

Fig. 2 Disseminated characteristics of apatite and gangue minerals

表4 不同磨矿细度下的磷灰石解离度

Table 4 Dissociation degree of apatite under different grinding fineness

单位:%

Unit:%

磨矿细度	解离情况	方解石	白云石	钙长石	钾长石	石英	硅灰石	高岭石	黄铁矿	其他
-0.074 mm 占 54.79%	单体解离					85.82				
	二元共生	0.12	0.74	0.97	3.15	1.38	0.68	0.54	0.28	0.26
	三元包裹	0.06	0.45	0.84	1.49	0.85	0.64	0.41	0.13	0.30
-0.074 mm 占 40.22%	单体解离					85.11				
	二元共生	0.16	1.01	0.40	2.90	1.79	0.08	0.10	0.19	0.27
	三元包裹	0.40	0.18	0.78	2.07	1.68	0.50	0.39	0.33	0.04
-0.074 mm 占 31.78%	单体解离					85.42				
	二元共生	0.33	0.75	0.58	3.20	2.08	0.34	0.31	0.15	0.15
	三元包裹	0.26	0.25	1.05	1.66	1.17	0.79	0.33	0.30	0.30

3 结果与讨论

3.1 磨矿细度试验

磨矿细度是影响浮选效率的关键工艺参数。以十二胺为磷矿反浮选脱硅捕收剂,该药剂对矿泥具有较强的敏感性,过高的磨矿细度易导致泡沫黏度增大和消泡困难。为确定最佳磨矿细度,在固定十二胺用量为 400 g/t 的条件下,考察了不同磨矿细度对磷矿反浮选脱硅指标的影响,结果见图 3。

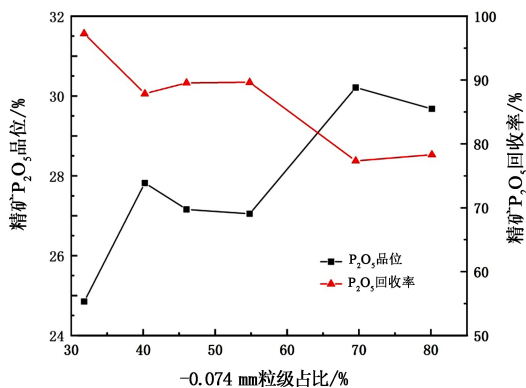


图 3 磨矿细度对磷矿反浮选脱硅指标的影响

Fig. 3 Effect of grinding fineness on reverse flotation desilication index of phosphate ore

由图 3 可知,精矿中 P₂O₅ 品位随磨矿细度 -0.074 mm 占比从 31.79% 升至 80.12% 呈先升高后降低的趋势,最高达 30.23%,而回收率则持续下降。由表 4 可知,当磨矿细度 -0.074 mm 占 31.79% 时,虽然磷灰石解离度较高,但浮选分离效果不佳,表明该磨矿细度下矿物粒度过粗,不利于十二胺作为捕收剂时的脱硅浮选过程。当磨矿细度 -0.074 mm 占比超过 70% 时,细粒级物料质量分数显著升高,对十二胺浮选硅酸盐矿物产生不利影响。综合分析表明,当磨矿细度 -0.074 mm 占 69.54% 时,既能保证有用矿物的充分解离,又能获得较好的浮选分离效果。

3.2 硫酸用量试验

通过试验发现,十二胺在中性和弱碱性矿浆体系中普遍存在泡沫稳定性过高、消泡困难等问题。因此,选用硫酸作为 pH 调整剂,考察酸性条件下浮选泡沫的改善效果,并探究硫酸用量对磷矿反浮选脱硅指标的影响。基于前期优化结果,试验采用磨矿细度 -0.074 mm 占 69.54%、十二胺用量为 400 g/t 的工艺参数,试验结果见图 4。

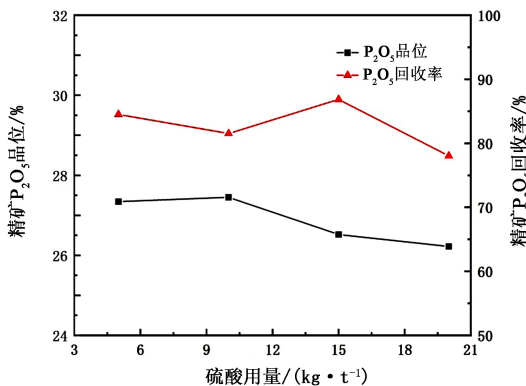


图 4 硫酸用量对磷矿反浮选脱硅指标的影响

Fig. 4 Effect of sulfuric acid dosage on desilication index of phosphate ore reverse flotation

由图 4 可知,当硫酸用量从 5 kg/t 增至 20 kg/t 时,精矿 P₂O₅ 品位在 26.50%~27.50%,分选效果未出现显著变化,表明酸性条件不利于磷矿反浮选脱硅。通过对比精矿品位与回收率,可以确定在以十二胺为捕收剂的反浮选过程中,若采用硫酸作为 pH 调整剂,其最佳用量为 15 kg/t。需要指出的是,在酸性条件下,十二胺导致的泡沫问题仍未得到有效改善。

3.3 十二胺用量试验

在磨矿细度 -0.074 mm 占 69.54% 的条件下,仅添加十二胺浮选磷矿中的硅酸盐矿物,考察十二胺用量对磷矿反浮选脱硅指标的影响,结果见图 5。

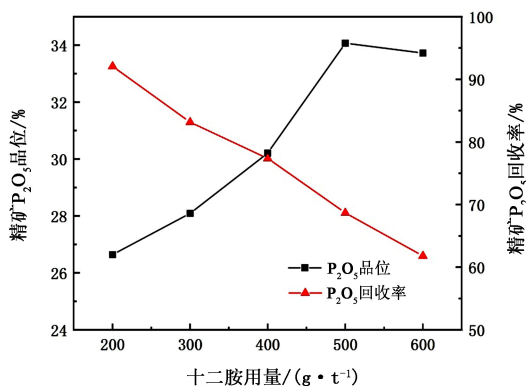


图 5 十二胺用量对磷矿反浮选脱硅指标的影响

Fig. 5 Effect of dodecylamine dosage on desilication index of reverse flotation of phosphate ore

由图 5 可知,随着十二胺用量从 200 g/t 增至 600 g/t,精矿 P₂O₅ 品位呈上升趋势,而回收率则由 92.08% 降至 61.80%。综合考虑品位与回收率,十二胺的最佳用量确定为 400 g/t。然而,因十二胺的浮选选择性较差,闭路试验中精矿 P₂O₅ 品

位预计将降至30%以下。因此,在优先保证精矿品位的前提下,建议选择500 g/t作为十二胺的适宜用量。

3.4 反浮粗选尾矿再选流程对比试验

在既定浮选条件下(磨矿细度-0.074 mm占

69.54%,十二胺用量500 g/t),精矿 P_2O_5 品位达34.02%,回收率为68.67%。然而,反浮粗选尾矿中 P_2O_5 品位偏高,需通过再选工艺进一步提高回收率。再选流程包括脱硅正浮选、无药剂扫选及脱镁反浮选工艺,各流程的药剂制度及试验结果见表5。

表5 反浮粗选尾矿不同再选流程试验结果

单位:%

Table 5 Test results of different reconcentration processes of reverse flotation roughing tailings Unit:%

药剂制度	产品名称	产率	P_2O_5 品位	作业回收率	中矿选矿效率
碳酸钠用量 3 kg/t, 水玻璃用量 3 kg/t, MON-135 1.5 用量 kg/t	中矿	84.09	17.05	89.82	
	再选尾矿	15.91	10.21	10.18	5.73
	反粗尾矿	100.00	15.96	100.00	
直接扫选, 无药剂添加	中矿	35.12	23.90	51.53	
	再选尾矿	64.88	12.17	48.47	16.41
	反粗尾矿	100.00	16.29	100.00	
硫酸用量 15 kg/t, MON-135 用量 1.5 kg/t	中矿	32.08	21.74	43.80	
	再选尾矿	67.92	13.17	56.20	11.72
	反粗尾矿	100.00	15.92	100.00	

注:选矿效率=作业回收率-产率。

由表5可知,直接扫选工艺获得的精矿 P_2O_5 品位最高(接近原矿品位),且选矿效率也最高。然而,该工艺存在泡沫量过大、消泡困难及浮选时间长等问题,这将直接影响闭路试验的选别指标。当采用脱镁反浮选工艺时,泡沫现象得到显著改善,表明矿浆中残留的十二胺可能与脂肪酸类表面活性剂发生了缔合反应^[13-15]。基于上述研究结果,最终确定采用十二胺与MON-135复合药剂的协同反浮选工艺。

3.5 磷矿混合反浮选试验

磷矿混合反浮选“1粗1扫”工艺流程及药剂制度见图6,开路试验结果见表6。

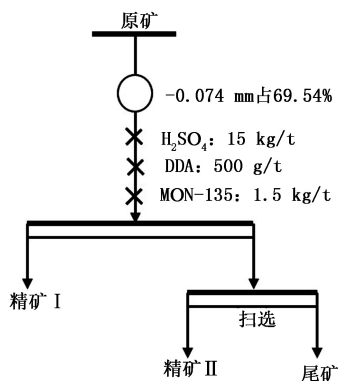


图6 磷矿混合反浮选工艺流程

Fig. 6 Mixed reverse flotation process of phosphate rock

表6 磷矿混合反浮选试验结果

单位:%

Table 6 Test results of mixed reverse flotation of phosphate rock Unit:%

产品名称	产率	品位	回收率
精矿 K	57.72	29.30	69.04
中矿 II	12.11	24.44	12.08
尾矿 X	30.16	15.33	18.87
原矿	100.00	24.50	100.00

由表6可知,采用混合反浮选“1粗1扫”工艺流程,最终获得了精矿 P_2O_5 品位为29.30%、回收率为69.04%的选别指标。虽然该指标较3.3节中单一十二胺反浮选工艺有所降低,但浮选泡沫特性得到了显著改善,在机械搅拌条件下能够快速消泡。鉴于1次扫选尾矿品位仍有进一步降低空间,最终确定在图6的基础上,增加二次扫选作业,并采用中矿顺序返回的处理方式,磷矿混合反浮选闭路试验结果见表7。

表7 磷矿混合反浮选闭路试验结果

单位:%

Table 7 Closed-circuit test results of mixed reverse flotation of phosphate rock Unit:%

产品名称	产率	品位	回收率
精矿 K	70.68	29.46	82.04
尾矿 X	29.32	15.54	17.96
原矿	100.00	25.38	100.00
中矿 II ₁	22.23	23.25	20.37
中矿 II ₂	14.74	20.08	11.66

由表7可知,采用“1粗2扫”闭路工艺流程,可获得 P_2O_5 品位为29.46%、回收率为82.04%的磷精矿产品。若要实现精矿品位在30%以上,需在现有流程中增设精选作业。值得注意的是,最终尾矿 P_2O_5 品位仍维持在15.54%的较高水平,证实了以十二胺为捕收剂时存在选择性不足的缺陷。即使在2次扫选作业条件下,仍难以将尾矿品位控制在12%以下,建议后续研究可用选择性更好的新型阳离子表面活性剂替代十二胺。

4 结论

a. 后坪磷矿工艺矿物学研究结果表明,原矿中主要脉石矿物为钾长石、石英和白云石,有用矿物磷灰石嵌布粒度较粗,在磨矿细度 -0.074 mm 占31.78%时磷灰石单体解离度达85.42%。有害杂质铁元素主要以黄铁矿形式零散分布于磷灰石和长石矿物结构中,且嵌布粒度微细,导致原矿中含铁矿物的浮选分离难度极大。因此,后坪磷矿的分离脱除对象主要是钾长石、石英和白云石,需依次脱铝脱硅和降镁。

b. 采用十二胺作为捕收剂进行反浮选开路试验,在磨矿细度 -0.074 mm 占69.54%、十二胺用量为 500 g/t 的条件下,可获得精矿 P_2O_5 品位为34.02%、回收率为68.67%的分选指标,但是存在泡沫量大、难消泡的问题。将十二胺和MON-135进行混合反浮选后,浮选泡沫易碎裂,药剂制度为硫酸、十二胺和MON-135用量分别为15、500、1.5 kg/t,经“1粗2扫”反浮选闭路流程试验,获得了 P_2O_5 品位为29.46%、回收率为82.04%的磷精矿。

5 参考文献

[1] 薛珂,张润宇. 中国磷矿资源分布及其成矿特征研究进展[J]. 矿物学报,2019,39(1):7-14.
Xue K,Zhang R Y. Advances of researches on the distribution and metallogenic characteristics of phosphorous deposits in China[J]. Acta Mineralogica Sinica,2019,39(1):7-14.

[2] 彭丽群,刘润哲,李若兰,等. 高硅高倍伴氧化物胶磷矿擦洗浮选试验研究[J]. 云南化工,2024,51(11):69-71.
Peng L Q,Liu R Z,Li R L, et al. The scrubbing-flotation research on colophonite with higher silica and sesquioxide content[J]. Yunnan Chemical Technology, 2024, 51(11): 69-71.

[3] 吴中贤,陶东平. 云南某胶磷矿 AMICS 工艺矿物学研究及其

难选机理探讨[J]. 工程科学学报,2021,43(4):503-511.

Wu Z X,Tao D P. Mineralogical analysis of colophonite in Yunnan using AMICS and exploration of difficult flotation mechanisms[J]. Chinese Journal of Engineering,2021,43(4): 503-511.

- [4] Abouzeid A M. Physical and thermal treatment of phosphate ores; an overview[J]. International Journal of Mineral Processing,2008,85(4):59-84.
- [5] Ruan Y Y,He D S,Chi R, et al. Review on beneficiation techniques and reagents used for phosphate ores[J]. Minerals, 2019,9(4):253.
- [6] 杨晓健,胡国涛,王诗瀚. 中低品位磷矿脱镁技术研究进展[J]. 矿产保护与利用,2022,42(2):67-73.
Yang X J,Hu G T,Wang S H. Research progress of magnesium removal technology from medium and low grade phosphate rocks [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2022,42(2):67-73.
- [7] 周政,彭有强,彭昊. 贵州某磷矿 RC-F02 新型捕收剂反浮选试验[J]. 现代矿业,2025,41(1):85-90.
Zhou Z,Peng Y Q,Peng H. Reverse flotation test of RC-F02 new collector in a phosphate ore in Guizhou [J]. Modern Mining,2025,41(1):85-90.
- [8] 何翔昊,李智力,唐远,等. 湖北某中低品位胶磷矿反浮选脱镁试验研究[J]. 化工矿物与加工,2024,53(3):16-21.
He X H,Li Z L,Tang Y, et al. Experimental study on reverse flotation for magnesium removal of a medium and low-grade colophonite in Hubei Province[J]. Industrial Minerals & Processing,2024,53(3):16-21.
- [9] 邓荣东,刘全军,胡婷,等. 云南某低品位硅质胶磷矿浮选试验研究[J]. 非金属矿,2013,36(3):37-40.
Deng R D,Liu Q J,Hu T, et al. Study on flotation of low-grade and siliceous colophonite of Yunnan [J]. Non-Metallic Mines,2013,36(3):37-40.
- [10] 徐伟,梁群,石波,等. 贵州某复杂难处理硅质胶磷矿双反浮选试验研究[J]. 化工矿物与加工,2022,51(8):27-34.
Xu W,Liang Q,Shi B, et al. Experimental study on double reverse flotation of a siliceous phosphate rock in Guizhou [J]. Industrial Minerals & Processing,2022,51(8):27-34.
- [11] 赵丙辉,史有俊,康志谦,等. 河北某低品位磷铁矿石选矿试验[J]. 金属矿山,2013(7):93-96.
Zhao B H,Shi Y J,Kang Z Q, et al. Beneficiation tests of a low grade phosphate in Hebei [J]. Metal Mine, 2013(7): 93-96.
- [12] 李封元,罗惠华,彭李情,等. 磷酸酯阴离子捕收剂协同椰油二胺一步反浮选胶磷矿实验研究[J]. 生态产业科学与磷氟工程,2024,39(9):22-27.
Li F Y,Luo H H,Peng L Q, et al. One-step reverse flotation of colophonite with phosphate ester anionic collector syner-

gized with coconut oil diamine[J]. *Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering*, 2024, 39(9): 22-27.

[13] Xu L H, Hu Y H, Tian J, et al. Synergistic effect of mixed cationic/anionic collectors on flotation and adsorption of muscovite[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2016, 492: 181-189.

[14] Di Y L, Jiang A, Huang H Y, et al. Molecular dynamics simulations of adsorption behavior of DDAH, NaOL and mixed DDAH/NaOL surfactants on muscovite (001) sur-

face in aqueous solution[J]. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, 2022, 113: 108161.

[15] Bai Y, Wen W X, Gao Y J, et al. Molecular dynamics simulations of the structure-property relationships of DDA/anionic surfactant mixtures at the air/water interface[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 368: 120804.

投稿网址: <https://hgkj.cbpt.cnki.net/portal>