

云南某脱镁磷精矿分级浮选脱硅中试试验研究

杨稳权^{1,2}, 张 华^{1,2}, 何海涛^{1,2}, 李海兵^{1,2}, 杜令攀^{1,2}

(1. 云南磷化集团有限公司, 云南 昆明 650600;
2. 国家磷资源开发利用工程技术研究中心, 云南 昆明 650600)

[摘要] 随着入选磷矿石品位降低, 钙质胶磷矿采用单一反浮选工艺无法脱除石英及倍半氧化物, 不能获得高品质磷精矿。针对云南某选厂反浮选脱镁后磷精矿中SiO₂含量高、P₂O₅品位偏低的问题, 开展分级浮选脱硅中试试验研究。通过两段水力旋流器预先分级脱除≤0.030 8 mm细泥, 有效富集粗粒级矿浆; 采用自主研发的高效阳离子捕收剂YP8-2对粗粒级部分进行反浮选脱硅。考察分级条件、抑制剂YP7-2与捕收剂YP8-2的用量对分选效果的影响。结果表明, 在适宜工艺参数下(1#旋流器压力0.15 MPa, 2#旋流器压力0.17 MPa, 抑制剂用量70 g/t, 捕收剂用量250~350 g/t), 可获得 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 31%~33%、 $w(\text{SiO}_2)$ 9.45%~13.83%的优质磷精矿, P₂O₅回收率超过90%, 脱硅率最高达63.31%。此外, YP8-2捕收剂表现出良好的泡沫流动性且易于消泡, 解决了传统阳离子捕收剂泡沫发黏、回水利用难的问题。该工艺为高效脱除硅质脉石、提升低品位磷矿资源利用率提供了可靠技术途径。

[关键词] 脱镁磷精矿; 分级浮选; 脱硅; 中试试验

[中图分类号] TD97 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2025) 10-0057-05

Pilot test study on classified flotation for desilication of a phosphate concentrate after magnesium removal in Yunnan

YANG Wenquan^{1,2}, ZHANG Hua^{1,2}, HE Haitao, LI Haibing^{1,2}, DU Lingpan^{1,2}

(1. Yunnan Phosphate Group Co., Ltd., Kunming 650600, China;

2. National Engineering and Technology Center for Development & Utilization of Phosphorous Resources, Kunming 650600, China)

Abstract: As the grade of phosphate rock decreases, the use of a single reverse flotation process for calcium phosphate rock cannot remove quartz and sesquioxides, and high-quality phosphate concentrate can't be obtained. In response to the problem of high SiO₂ content and low P₂O₅ grade in the phosphate concentrate of a certain beneficiation plant in Yunnan after reverse flotation magnesium removal, a pilot test of graded flotation desilication is carried out. The mud ≤ 0.030 8 mm is removed by two-stage hydraulic cyclones, enriching coarse-grained slurry; Using the independently developed high-efficiency cation collector YP8-2, the coarse particle fraction is subjected to reverse flotation desilication. The effects of grading conditions, inhibitor YP7-2, and collector YP8-2 dosage on sorting efficiency are systematically investigated. The results show that under suitable process parameters (1# cyclone pressure 0.15 MPa, 2# cyclone pressure 0.17 MPa, inhibitor dosage 70 g/t, collector dosage 250-350 g/t), high-quality phosphate concentrate with a P₂O₅ grade of 31%-33% and SiO₂ content of 9.45%-13.83% can be obtained. The P₂O₅ recovery rate exceeds 90%, and the highest desilication rate is 63.31%. In addition, YP8-2 collector shows good foam fluidity and easy defoaming, which solves the problems of viscosity of traditional cationic collector foam and difficult utilization of backwater. This process provides a reliable technical approach for efficiently removing siliceous gangue and improving the utilization rate of low-grade phosphate resources.

Key words: phosphate concentrate after magnesium removal; classified flotation; desilication; pilot test

0 引言

云南磷矿资源储量丰富, 磷矿储量位居全国前列^[1]。目前钙质胶磷矿采用单一反浮选脱除碳酸盐矿物富集磷精矿技术较为成熟^[2], 国内主要磷矿山均采用此技术进行工业生产^[3], 但该工艺无法脱除石英及倍半氧化物等脉石矿物。随着入选原矿 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$

逐年降低, 单一反浮选工艺无法获得高品质的磷精

[收稿日期] 2024-07-30; **[修回日期]** 2025-09-25

[作者简介] 杨稳权(1976-), 男, 云南富源人, 选矿正高级工程师, 主要研究方向为浮选药剂开发与磷矿选矿。

[通信作者] 张 华(1985-), 女, 湖北襄阳人, 化工高级工程师, 主要从事浮选药剂开发与磷矿选矿。

矿。国内外主要采用反浮选工艺脱除石英类脉石矿物提升磷精矿品位，如沙特矿业 (Maadan) 公司二期 1 680 万 t/a 浮选装置^[4]、湖北兴发化工集团股份有限公司 100 万 t/a 全反浮选工业装置^[5] 等。但都存在阳离子捕收剂脱硅浮选效率低、反浮选泡沫发黏、回水难以直接利用等问题^[6-7]。

本试验以云南某选厂单一反浮选脱镁磷精矿为原料，开展分级脱硅中试试验研究，开发出高效脱硅捕收剂和分级-反浮选脱硅工艺，获得高品质磷精矿，并解决反浮选脱硅过程中泡沫发黏、脱硅效率低等难题。

1 矿样性质

1.1 矿样多元素分析

中试原料取自云南磷化集团有限公司下属某选厂生产的反浮选脱镁磷精矿，矿样的多元素分析结果如表 1 所示。

表 1 脱镁磷精矿元素分析结果

phosphate concentrate						%
<i>w</i> (P ₂ O ₅)	<i>w</i> (MgO)	<i>w</i> (SiO ₂)	<i>w</i> (Fe ₂ O ₃)	<i>w</i> (Al ₂ O ₃)	<i>w</i> (CaO)	
27.00	0.89	22.08	1.12	1.94	37.71	

从表 1 可以看出，经过反浮选脱镁作业后的磷精矿 *w*(P₂O₅) 为 27%，*w*(SiO₂) 为 22.08%。*w*(P₂O₅) 偏低，未达到酸法加工用磷矿石技术指标中一等品 II 类 *w*(P₂O₅) ≥ 28.0% 的要求^[8]。需脱

表 3 脱镁磷精矿粒度筛析结果

Table 3 Particle size sieve analysis result of magnesium phosphate concentrate

粒度/mm	占比/%	<i>w</i> (P ₂ O ₅)/%	<i>w</i> (MgO)/%	<i>w</i> (SiO ₂)/%	<i>w</i> (Fe ₂ O ₃)/%	<i>w</i> (Al ₂ O ₃)/%
>0.075	11.08	23.03	1.18	21.08	0.76	1.6
>0.050~0.075	16.11	28.55	0.96	19.77	0.66	1.54
>0.038 5~0.050	7.49	28.94	0.76	21.08	0.76	1.42
>0.030 8~0.038 5	8.50	28.68	0.65	21.00	0.81	1.42
≤0.030 8	56.82	26.82	0.89	21.98	1.34	2.73

2 试验试剂、流程及设备

2.1 试验试剂

试验试剂：YP8-2^[9] 捕收剂，自制，配制成质量分数为 2% 使用；YP7-2 抑制剂，自制，配制成质量分数为 2% 使用。

此次中试试验使用的反浮选脱硅捕收剂 YP8-2 是由云南磷化集团研发中心研发，具有以下特点：(1) 该捕收剂水溶性好，配制过程中不需要加热；(2) 该捕收剂适用于酸性及中性矿浆浮选，无须对脱镁精矿的矿浆 pH 进行调整，在 pH 为 5.5~6.5 时，直接浮选；(3) 该捕收剂具有较强的捕收性和

除脱镁磷精矿中含 SiO₂ 硅酸盐脉石矿物，提升 P₂O₅ 品位。

1.2 矿物组成 XRD 分析

利用 Equinox100 XRD 分析仪对试验样品进行分析，反浮选脱镁磷精矿主要矿物为胶磷矿和石英，其次为白云石、褐铁矿、绢云母。矿样的矿物组成如表 2 所示。

表 2 脱镁磷精矿矿物组成

Table 2 Mineral composition of magnesium phosphate

concentrate						%
<i>w</i> (胶磷矿)	<i>w</i> (石英)	<i>w</i> (白云石)	<i>w</i> (褐铁矿)	<i>w</i> (绢云母)	<i>w</i> (其他)	
64.29	19.89	1.64	1.80	2.53	9.85	

1.3 矿样粒度组成分析

为了查明脱镁磷精矿各粒级的分布情况，采用 59302 OELDE 型振动筛分仪将脱镁磷精矿筛分成 5 个粒度等级，并进行多元素分析，结果如表 3 所示。

由表 3 可知，该浮选脱镁磷精矿较细，粒径 > 0.075 mm 占比仅为 11.08%，粒径 ≤ 0.030 8 mm 占比高达 56.82%，泥化程度较高。主要杂质 SiO₂ 在各粒度分布较均匀，其他杂质 Fe₂O₃、Al₂O₃ 在粒径 ≤ 0.030 8 mm 粒级富集。为获得优质磷精矿，同时需要克服胺类阳离子捕收剂泡沫发黏的问题，中试试验采用分级脱除粒径 ≤ 0.030 8 mm 粒级后再进行反浮选脱硅。

选择性，提磷降硅效果好，能够获得较高 P₂O₅ 的脱硅磷精矿和较高的回收率；(4) 该捕收剂适用于粗粒级磷矿物浮选，泡沫易消，不需要额外添加消泡剂就可以实现泡沫的流动和输送。

2.2 主要设备及选型

1#旋流器，φ165 mm；2#旋流器，φ100 mm；1#泵、2#泵，流量 60 m³/h，扬程 35 m，功率 18.5 kW；浮选柱，加拿大 CPT 公司，φ900 mm；浮选机，KYF 型，1 m³。

2.3 试验流程

试验流程如图 1 所示。

5所示。

由表5试验结果可知，随着抑制剂用量的增大，精矿产率和精矿P₂O₅回收率呈增大趋势，但精

矿w(P₂O₅)呈减小趋势。当抑制剂YP7-2用量为70 g/t时，精矿w(P₂O₅)为32.20%，此时精矿产率和P₂O₅回收率也较高，选择该用量较为合适。

表5 脱硅中试抑制剂用量试验

Table 5 Dosage test of silicon removal pilot inhibitors

抑制剂用量/(g·t ⁻¹)	w(P ₂ O ₅)/%	w(MgO)/%	w(SiO ₂)/%	w(Fe ₂ O ₃)/%	w(Al ₂ O ₃)/%	产率/%	回收率/%
40	33.00	0.60	13.35	0.68	0.72	80.95	92.63
50	32.59	0.63	12.51	0.68	0.78	82.80	93.57
60	32.68	0.62	11.89	0.68	0.75	83.14	94.21
70	32.20	0.63	11.47	0.67	0.74	85.14	95.06
80	32.04	0.63	10.93	0.66	0.74	85.14	95.36
90	31.96	0.62	10.93	0.65	0.73	86.19	95.51
100	31.53	0.63	10.03	0.66	0.72	88.55	96.81

3.3 捕收剂用量试验

在抑制剂用量为70 g/t时进行捕收剂YP8-2用量试验，每天开展一个捕收剂用量参数试验，装置运行稳定后每2 h取样1次，每个班的综合数据作为捕收剂用量试验指标，试验结果见表6。

由表6可知，针对w(P₂O₅) 28.01%~29.16%、w(SiO₂) 17.96%~19.70%的反浮选脱镁磷精矿分级沉砂，通过添加反浮选脱硅捕收剂YP8-2可获得w(P₂O₅) 31%~33%的精矿产品。当捕收剂YP8-2

用量为150 g/t时，精矿w(P₂O₅) 31.27%、w(SiO₂) 13.83%，尾矿w(P₂O₅) 6.36%，浮选磷精矿w(P₂O₅)提升2.35百分点，脱硅率为31.74%；当捕收剂YP8-2用量为250 g/t时，精矿w(P₂O₅) 32.52%、w(SiO₂) 11.19%，尾矿w(P₂O₅) 8.18%，可将精矿w(P₂O₅)提高3.36百分点，脱硅率为46.29%；当捕收剂YP8-2用量为350 g/t时，精矿w(P₂O₅) 33.10%、w(SiO₂) 9.45%，尾矿w(P₂O₅) 11.45%，可将精矿w(P₂O₅)提高5.09百分点，脱硅率为63.31%。

表6 脱硅中试捕收剂用量试验

Table 6 Experiment on the dosage of collector in the desilication pilot test

捕收剂用量/(g·t ⁻¹)	产品名称	w(P ₂ O ₅)/%	w(MgO)/%	w(SiO ₂)/%	w(Fe ₂ O ₃)/%	w(Al ₂ O ₃)/%	产率/%	回收率/%	脱硅率/%
150	给矿	28.92	0.72	18.35	0.71	1.02	90.57	97.93	31.74
	脱硅精矿	31.27	0.75	13.83	0.68	0.76			
	脱硅尾矿	6.36	0.59	62.63	1.10	3.41			
250	给矿	29.16	0.71	17.96	0.80	0.92	86.20	96.13	46.29
	脱硅精矿	32.52	0.72	11.19	0.66	0.70			
	脱硅尾矿	8.18	0.59	58.81	1.59	2.51			
350	给矿	28.01	0.88	19.70	0.74	1.41	76.49	90.39	63.31
	脱硅精矿	33.10	0.79	9.45	0.66	0.70			
	脱硅尾矿	11.45	0.74	50.93	1.11	2.68			

3.4 脱硅尾矿泡沫评价

当脱硅捕收剂用量为150、250、350 g/t时，尾矿泡沫现象见图2所示。取3种尾矿置于1 000 mL量筒中，测定不同时刻泡沫高度，绘制泡沫高度随时间的变化规律，结果见图3所示。

从图3可以看出，捕收剂用量越小，自身消泡时间越短。总体来看，在150~350 g/t范围内，捕收剂消泡时间较短，是一种流动性较好的捕收剂。



图2 脱硅尾矿泡沫现象

Fig. 2 Foam phenomenon of desilication tailings

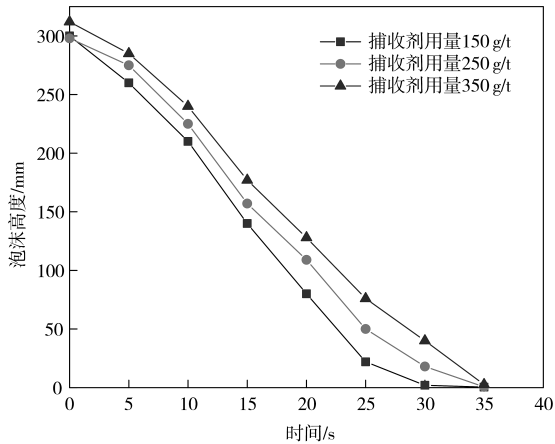


图3 泡沫高度变化规律

Fig. 3 Change rule of foam height

4 结论

(1) 云南某选厂脱镁磷精矿 ≤ 0.0308 mm 粒级含量较高, 泥化程度高。经过两段分级后获得沉砂浓度 69.01%, 沉砂中 > 0.0308 mm 粒级含量为 84.16% 的粗粒级磷矿浆, 有效实现了粗粒级矿浆的富集。

(2) 针对 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 26.57% ~ 27.64%、 $w(\text{SiO}_2)$ 19.20% ~ 21.29% 的反浮选脱镁磷精矿, 通过分级浮选可以获得: ① $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 31.27%、 P_2O_5 回收率 90.57%、 $w(\text{SiO}_2)$ 13.83% 的脱硅精矿; ② $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 32.52%、 P_2O_5 回收率 96.13%、 $w(\text{SiO}_2)$ 11.19% 的脱硅精矿; ③ $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 33.1%、 P_2O_5 回收率 90.39%、 $w(\text{SiO}_2)$ 9.45% 的脱硅精矿。

(3) 与传统的胶磷矿脱硅捕收剂相比, 捕收剂 YP8-2 表现出较强的脱除 SiO_2 能力, 脱硅尾矿低, P_2O_5 回收率高。捕收剂 YP8-2 脱硅尾矿泡沫流动性较好, 且易消除, 是一种优良的粗粒级反浮选脱硅捕收剂。

[参考文献]

[1] 杨稳权, 张华, 蔡忠俊, 等. 战略性非金属矿产资源现状及加工技术研究进展[J]. 化工矿物与加工, 2024, 53(1): 35-49.
YANG W Q, ZHANG H, CAI Z J, et al. Research progress of strategic non-metallic mineral resources and processing technology[J]. Industrial Minerals & Processing, 2024, 53(1):

35-49.
[2] 柏中能, 张文学. 云南磷矿与选矿[J]. 磷肥与复肥, 2010, 25(2): 73-75.
BAI Z N, ZHANG W X. Phosphate rock and mineral separation in Yunnan province[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2010, 25(2): 73-75.
[3] 李耀基. 云南磷矿选矿研究与实践[J]. 武汉工程大学学报, 2011, 33(2): 12-16, 37.
LI Y J. Research and practice in phosphate beneficiation in Yunnan province [J]. Journal of Wuhan Engineering University, 2011, 33(2): 12-16, 37.
[4] 杜令攀, 吴秋云, 郭永杰, 等. 沙特不同含泥量磷矿石双反浮选试验研究[J]. 化工矿物与加工, 2019, 48(11): 32-33.
DU L P, WU Q Y, GUO Y J, et al. Study on double reverse flotation of phosphate ore with different mud contents in Saudi Arabia [J]. Industrial Minerals & Processing, 2019, 48(11): 32-33.
[5] 林杰. 双反浮选工艺在宜昌难选胶磷矿工业生产中的应用[J]. 化工矿物与加工, 2013, 42(8): 30-31.
LIN J. Application of double reverse flotation process in commercial production of difficult separated colophane in Yichang [J]. Industrial Minerals & Processing, 2013, 42(8): 30-31.
[6] 周波, 徐伟, 陈跃, 等. 阳离子捕收剂在磷矿反浮选脱硅中的研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2016(3): 62-65, 72.
ZHOU B, XU W, CHEN Y, et al. Research progress of cationic collectors in reverse flotation of phosphate ore [J]. Conservation and Utilization Mineral Resources, 2016(3): 62-65, 72.
[7] 姚光前. 胶磷矿双反浮选生产高品位精矿工艺研究[J]. 化工矿物与加工, 2015, 44(8): 1-3, 11.
YAO G Q. Research on the producing high-grade phosphate concentrate by double reverse flotation [J]. Industrial Minerals & Processing, 2015, 44(8): 1-3, 11.
[8] 中华人民共和国自然资源部. 矿产地质勘查规范 磷: DZ/T 0209—2020[S]. 北京: 地质出版社.
[9] 张华, 李海兵, 赵凤婷, 等. 胶磷矿反浮选脱硅捕收剂选矿试验研究[J]. 化工矿物与加工, 2020, 49(7): 35-37.
ZHANG H, LI H B, ZHAO F T, et al. Beneficiation study on a desilication collector in reverse flotation of colophane ore [J]. Industrial Minerals & Processing, 2020, 49(7): 35-37.
[10] 潘伟晓, 徐伟, 田言, 等. 云南某钙镁质胶磷矿反浮选工艺研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(3): 47-54.
PAN W X, XU W, TIAN Y, et al. Study on reverse flotation process of a calcium-magnesium colophanite in Yunnan [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(3): 47-54.