

云南中低品位胶磷矿粗细粒级分级浮选试验研究

张腾¹, 罗惠华^{1,2*}, 蔡忠俊^{3,4}, 杨稳权^{3,4}, 金宇靖¹, 刘子乐¹, 俞新全¹

¹武汉工程大学资源与安全工程学院, 湖北 武汉

²磷矿及其共伴生资源绿色高效开发利用全国重点实验室, 湖北 武汉

³云南磷化集团有限公司, 云南 昆明

⁴国家磷资源开发利用工程技术研究中心, 云南 昆明

收稿日期: 2025年6月25日; 录用日期: 2025年8月19日; 发布日期: 2025年9月25日

摘要

针对云南中低品位胶磷矿, 在磨矿过程中产生成分分异, 粒级不同则成分也不相同, 粗粒级物料中 P_2O_5 有所富集, 杂质成分含量降低, 而细粒级物料趋于贫化, 以云南磷矿为研究对象, 原矿在磨矿细度 -0.074 mm 78.81%时, 沉降虹吸分级获得上、下层粗细颗粒矿物, 采用了分级浮选进行了研究, 试验结果表明, 上层细粒级矿采用反正浮选工艺, 获得精矿的品位为29.41%, MgO 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 的含量分别为0.79%、1.56%、2.71%, MER值为0.172的选矿指标, 下层粗粒级矿采用正反浮选工艺, 获得磷精矿的品位为32.34%, MgO 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 的含量分别为0.93%、0.67%、0.47%, MER值为0.064的选矿指标。因此针对不同粒级的矿石, 采用不同的浮选工艺, 获得了不同工艺指标, 以及不同品质的磷精矿, 可以作为不同磷化工产品的原料。

关键词

分级浮选, 反正浮选, 正反浮选, 成分分异

Experimental Study on Size-Classification Flotation of Medium-Low Grade Collophanite in Yunnan

Teng Zhang¹, Huihua Luo^{1,2*}, Zhongjun Cai^{3,4}, Wenquan Yang^{3,4}, Yujing Jin¹, Zile Liu¹, Xinquan Yu¹

¹School of Resources & Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

²State Key Laboratory of Green and Efficient Development of Phosphorus Resources, Wuhan Hubei

³Yunnan Phosphating Group Co., Ltd., Kunming Yunnan

⁴National Phosphorus Resources Development and Utilization Engineering Technology Research Center, Kunming Yunnan

*通讯作者。

文章引用: 张腾, 罗惠华, 蔡忠俊, 杨稳权, 金宇靖, 刘子乐, 俞新全. 云南中低品位胶磷矿粗细粒级分级浮选试验研究[J]. 矿山工程, 2025, 13(5): 1044-1055. DOI: 10.12677/me.2025.135119

Abstract

For medium-low-grade collophanite in Yunnan, compositional differentiation occurs during the grinding process. Particles of different size fractions have different compositions. P_2O_5 is enriched in the coarse fraction while impurity content decreases. Conversely, the fine fraction tends to be depleted. Using Yunnan phosphate ore as the research subject, when the original ore was ground to a fineness of 78.81% passing 0.074 mm, settling and siphon classification were used to obtain upper (fine) and lower (coarse) particle fractions. Classified flotation was studied. The test results show: For the upper fine fraction, using a reverse-direct flotation process achieved a concentrate grade of 29.41% P_2O_5 , with MgO, Fe_2O_3 , and Al_2O_3 contents of 0.79%, 1.56%, and 2.71% respectively, and an MER value of 0.172. For the lower coarse fraction, using a direct-reverse flotation process achieved a phosphate concentrate grade of 32.34% P_2O_5 , with MgO, Fe_2O_3 , and Al_2O_3 contents of 0.93%, 0.67%, and 0.47% respectively, and an MER value of 0.064. Therefore, by applying different flotation processes tailored to different particle size fractions, distinct process indicators and phosphate concentrates of varying quality were obtained. These concentrates can be used as raw materials for different phosphate chemical products.

Keywords

Classification Flotation, Direct-Reverse Flotation, Reverse-Direct Flotation, Compositional Differentiation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

磷是一种重要的不可再生的非金属矿资源，也是一种重要的生命元素，在植物生长发育的过程中，磷起着至关重要的作用。磷肥一定程度上能保障植物的正常生长和良好发育，也有助于提高植物以及农作物的各种抗性，在农业生产中可以提高农作物的产量[1]。通常把具有经济价值并能被开发利用的磷酸盐类矿物统称为磷矿[2]。磷矿石按其成分主要分成沉积磷块岩、岩浆磷灰岩、鸟粪磷块岩[3]：其中，沉积磷块岩是目前使用最广泛、最重要、储量最广的磷矿石。磷矿选矿中一般以浮选工艺为主要浮选方式，包括正浮选，反浮选，正反浮选，反反浮选，双反浮选等工艺[4] [5]。石波等[6]人研究了一种硅钙质磷矿，采用双反浮选工艺去除其中的硅和镁杂质，最终获得了 P_2O_5 品位为 34.45%、回收率为 79.19% 的磷精矿。同时，MgO、 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 的含量分别降至 0.94%、6.64%、1.67% 和 0.58%。正 - 反浮选工艺主要适用于钙质磷块岩，这类磷矿石含有较高比例的硅质脉石矿物和较低比例的碳酸盐类脉石矿物[7]。相反，反 - 正浮选工艺则主要用于硅钙质磷块岩的分选，其中碳酸盐类脉石矿物含量较高，而硅质脉石矿物含量较低[8]。罗惠华等[9]针对放马山低品位胶磷矿，采用了正浮选和反浮选相结合的试验流程。经过一粗一精的正浮选和一粗的反浮选后，得到了磷精矿的 P_2O_5 品位为 28.26%，回收率为 83.16%。黄齐茂[10]等针对湖北某中低品位硅钙质胶磷矿的矿石性质，采用常温正反浮选工艺，通过优化浮选流程的药剂制度，获得了较好的选别指标，对 P_2O_5 品位只有 17.09% 的难选胶磷矿通过采用正反浮选工艺流程，得

到了磷矿产率 46.05%、 P_2O_5 品位 29.03%、 P_2O_5 回收率 78.22%、 MgO 质量分数 0.71%。

在难选胶磷矿浮选中，矿石颗粒的粒度及其分布对浮选过程产生一定的影响。在中低品位磷块岩矿石中，胶磷矿的嵌布粒度一般较细，要实现胶磷矿的单体解离，必须使磨矿粒度较细，会导致细粒级的含量提高，增加了浮选的难度。云南中低品位硅钙质磷块岩工艺矿物学研究表明，经过细磨之后，不仅胶磷矿、白云石、石英等主要矿物的解离度不同，而且矿物成分也随粒度不同呈现出一定规律的变化，即细粒级中石英、白云石等脉石矿物含量增加，而胶磷矿含量减少[11]，使得细粒级的 P_2O_5 的含量偏低，使得细粒级的浮选难度增大。粗粒级中 P_2O_5 的含量偏高，因此，在磷矿磨矿分级过程中出现成分分异现象[12]，导致不同粒级的浮选性能也不同。本文拟对在磨矿分级过程中出现的成分分异，采用不同的工艺进行浮选，以期对矿物粒度分级实现“分而选之”，是对选矿工艺从粗放走向精细的突破。

2. 试验样品

2.1. 化学组成

试验样品来自云南地区，矿石中主要成分为 CaO 及 P_2O_5 ，含量分别为 37.0% 及 20.80%，同时 SiO_2 含量为 15.4%， MgO 含量为 6.05%，另外倍半氧化物(Al_2O_3 、 Fe_2O_3)含量为 2.80% (见表 1)。

Table 1. Chemical composition of phosphate ore (%)

表 1. 磷矿化学组成(%)

成分	P_2O_5	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	K_2O
含量/%	20.80	0.74	6.05	1.78	15.4	0.47
成分	CaO	Fe_2O_3	S	CO_2	F	/
含量/%	37.0	1.02	0.148	13.68	1.46	/

2.2. 矿物组成

该磷矿中矿物组成，主要由磷灰石、白云石、石英、透辉石和钙长石等矿物组成，少量的钾长石、硅灰石、方解石、高岭石、绿泥石和铁酸钙，微量的铁酸钙、磁铁矿、重晶石、铝酸钙、黑云母和石膏等矿物。矿石中主要组成矿物为胶磷矿(磷灰石)，含量为 53.47%，主要脉石矿物为碳酸盐矿物和硅酸盐矿物，成分分别为白云石及石英，含量分别为 27.88% 及 12.27%，金属矿物含量较少，微量褐铁矿及黄铁矿。

3. 实验设备、药剂与实验过程

3.1. 实验设备

XMB-67 型 200 × 240 棒磨机，XSHF-2-3 湿式分样机，FD0.5 单槽浮选机，PK/ZL-Φ260/Φ200 多功能真空过滤机，电子天平，101-4A 型电热鼓风干燥箱。

3.2. 实验药剂

碳酸钠，工业级，配制成 10% 水溶液；水玻璃，工业级，配制成 5% 水溶液；MON-135，工业级，配制成 2% 水溶液；LSD-Z，工业级，使用胶头滴管滴加；硫酸，工业级，配制成 10% 水溶液；LAA-T，工业级，配制成 2% 水溶液；E1310P，工业级，配制成 1% 水溶液；实验用水为武汉市自来水。

3.3. 实验过程

原矿通过颚式破碎机及辊式破碎机进行破碎，并通过筛分设备将粒级 2 mm 以下颗粒筛出。此后，采用堆锥法将筛分出的颗粒混合均匀，并分样为 1.0 kg 装袋备用。使用 XMB-67 棒磨机(武汉探矿机械

厂), 磨矿浓度为 50%, 进行了不同的磨矿时间试验, 使用 XSHF-2-3 湿式分样机将磨好的矿样均匀分成 6 份, 每一份约为 166.7 g, 以供后续使用。采用湿筛法对矿样进行粒度筛分, 将一定量的磨矿之后的矿浆注入 2000 mL 的量筒, 加水至矿浆的体积为 2000 mL, 充分搅拌之后, 静置一定的时间, 采用虹吸法确定上下层矿浆的体积, 浮选使用 RK/FD 0.5 L 单槽浮选机进行闭路试验。浮选机参数包括: 叶轮转速 2000 r/min, 充气量 60~80 L/h。在试验过程中, 将所得产品进行过滤、烘干、称重、制样后, 采用钼酸铵喹啉容量法对矿样中 P_2O_5 含量进行化验, 并通过化验结果计算 P_2O_5 回收率。

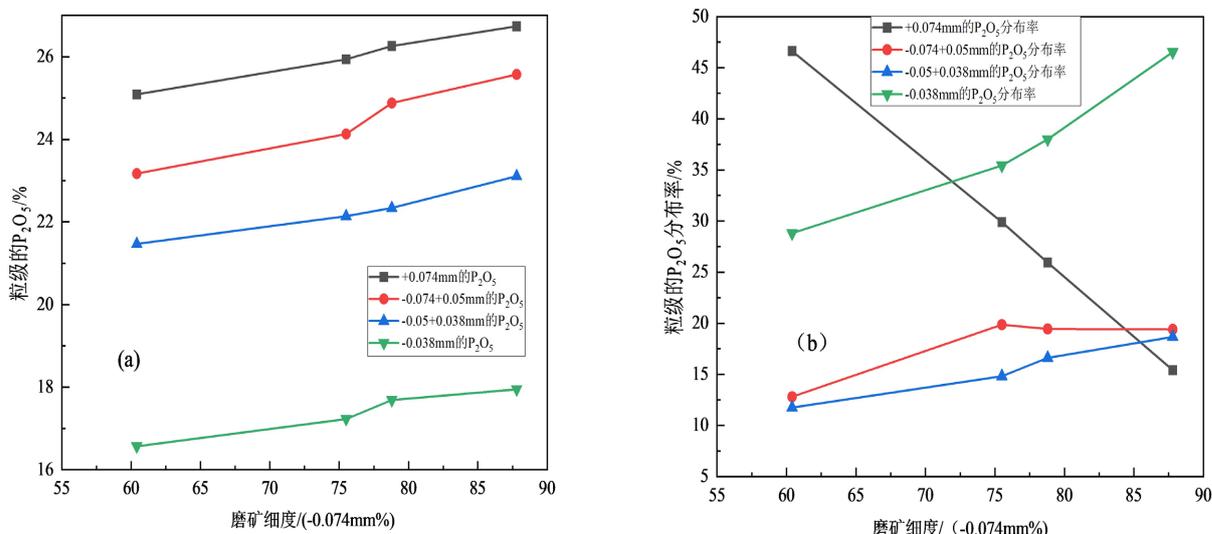
4. 实验结果与讨论

4.1. 化学成分随粒级的变化规律

将同磨矿细度-0.074 mm 分别占 60.4%、75.5%、78.8%、87.8% 的矿样, 进行筛析为+0.074 mm、0.074 mm + 0.05 mm、-0.05 + 0.038 mm 以及-0.038 mm 四个粒级, 图 1 表示了不同磨矿细度下的 P_2O_5 、MgO、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 的含量及其分布率与四个粒级之间的关系。

图 1(a)表明 P_2O_5 随粒度的变化表现出了相似的规律性。随着粒度变细 P_2O_5 含量逐渐降低, +0.074 mm 粒级的 P_2O_5 含量高于其他粒级, 粒度越小, P_2O_5 含量越低, 而图 1(c)、图 1(e)、图 1(g)表明 MgO、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 等成分则呈现粒度越小, 含量有不同程度的提高。即随着粒度变细, 矿石的品位 P_2O_5 降低、有害组分含量增加, 说明随着粒度变细趋于贫化。在 0.038 mm 以上的粒级中, Fe_2O_3 、 Al_2O_3 含量小于 1%, MgO 的含量相对降低, 在 0.038 mm 以下的粒级中, Fe_2O_3 、 Al_2O_3 含量大于 1%, MgO 的含量相对较高, 达到 7% 以上。

图 1(b)、图 1(d)、图 1(f)、图 1(h)组分分布率图表明粗粒级中组分的分布率逐渐降低, 而细粒级中分布率提高, 在磨矿细度-0.074 mm 78.8% 时, -0.038 mm 中 P_2O_5 、MgO、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 的分布率分别为 38%, 56.94%、63.24% 以及 79.73%。在其他粒级中, MgO、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 的分布率均小于 20%, 进一步说明 MgO、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 在细粒级中有所富集, P_2O_5 反而降低。在磷块岩矿石中, 白云石嵌布粒度一般与胶磷矿相当, 但其显微硬度(330 MPa)低于胶磷矿(约为 450~550 MPa), 易磨性较好。因此白云石更容易在细粒级中富集, 层状铝硅酸盐矿物嵌布粒度细、褐铁矿的结晶粒度极细、硬度很低在磨矿过程易于泥化, 富集于细粒级中, 造成 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 等倍半氧化物的含量增加[12]。总之在磨矿过程中将产生成分分异, 细粒级矿石产生贫化, 胶磷矿含量降低、脉石矿物富集。



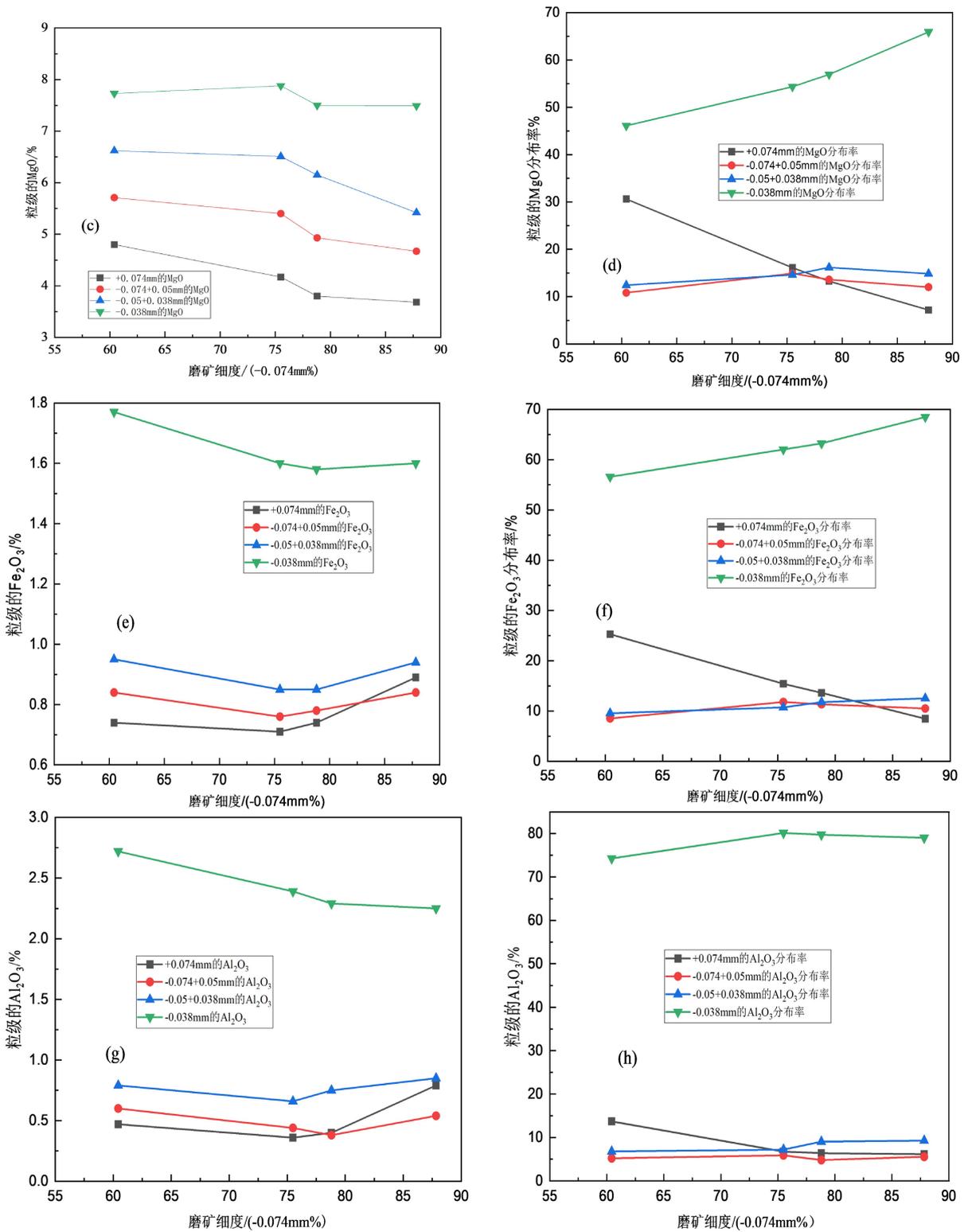


Figure 1. Relationship between the content and distribution rate of main chemical components and particle size at different grinding fineness levels (a) (c), (e), and (g) represent the changes in the content of P_2O_5 , MgO, Fe_2O_3 , and Al_2O_3 , respectively (b), (d), (f), and (h) represent the distribution rate changes of P_2O_5 , MgO, Fe_2O_3 , and Al_2O_3 , respectively

图 1. 不同磨矿细度下的主要化学成分的含量及其分布率与粒级的关系(a)、(c)、(e)、(g)分别为 P_2O_5 、MgO、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 的含量变化(b)、(d)、(f)、(h)分别为 P_2O_5 、MgO、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 的分布率变化

4.2. 沉降分级

通过上面的筛分分析, MgO 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 在 -0.038 mm 的矿样中富集, P_2O_5 的含量较低, 因此采用沉降分层进行分级, 将磨矿细度分别为 -0.074 mm 占 60.4%、75.5%、78.8%、87.8%的矿浆注入 2000 mL 的量筒, 加水至矿浆的体积为 2000 mL, 使矿浆的浓度为 8%, 充分搅拌之后, 静置 20S 的时间, 采用虹吸法吸出体积为 1900 mL 的上层矿浆, 吸出的矿浆中主要为细颗粒的物料, 之后将量筒中下层余下的矿浆倒出, 此部分为粗粒级的物料, 上下层粗细粒级矿的 P_2O_5 的含量与分布率的变化如图 2。

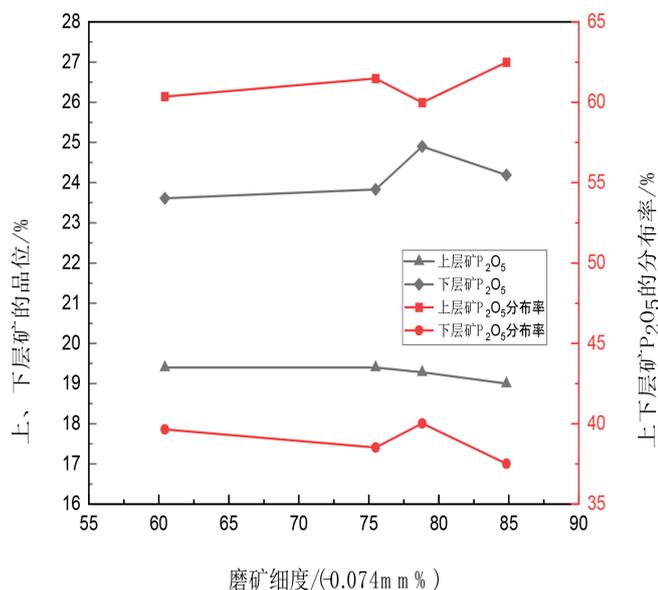


Figure 2. Changes in the content and distribution of P_2O_5 in the upper and lower coarse and fine particle sizes of different grinding fineness levels

图 2. 不同磨矿细度上、下层粗细粒级 P_2O_5 的含量与分布率的变化

从图 2 可知, 在磨矿细度为 -0.074 mm 占 60%~75%之间, 上层细粒级的品位在 19%左右, 而下层粗粒级的品位仅为 23%左右, 在磨矿细度为 -0.074 mm 为 78.8%, 上层细粒级的品位在 19%左右, 而下层粗粒级的品位可以达到 24.9%, 在此磨矿细度下, 沉降分级获得上层细颗粒矿与下层粗颗粒矿进行了多元素分析, 分析结果见表 2。

Table 2. Multi element analysis results of upper and lower ore layers

表 2. 上层矿与下层矿的多元素分析结果

矿物	多元素 X 荧光分析结果/%					
	P_2O_5	MgO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	CaO
上层细颗粒矿	19.28	6.69	1.28	1.33	15.58	34.82
下层粗颗粒矿	24.90	4.65	0.86	0.52	13.35	39.85

从表 2 可知, 上层细颗粒矿石中, MgO 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 SiO_2 的含量高于下层的粗颗粒矿石, 而 P_2O_5 较低, 仅为 19.28%, MgO 达到 6.69%, 倍半氧化物的含量为 2.61%, 下层粗粒级矿的品位可以达到 24.9%, MgO 低于上层细颗粒矿, 为 4.65%, 倍半氧化物的含量为 1.38%, 为了叙述方面, 将上层细颗粒矿与下

层粗颗粒矿简称为上层矿与下层矿，通过分级之后所获得上下层粗细粒级的矿物性质不同，因此，采用分级浮选。

4.3. 上、下层粗细矿的浮选

分级浮选是一种预先根据矿石颗粒的粒度大小进行分级(分离)，然后对不同粒级的矿粒分别采用最适合其粒度特性的浮选工艺和条件进行处理的选矿方法。通过对上、下层矿的化学组成分析，可知上层矿为低品位高硅镁高倍半的磷矿，适宜工艺为多步浮选，包括正反浮选、双反浮选以及反正浮选等工艺，而下层矿为高镁的中低品位磷矿，适宜工艺为正反浮选工艺与单一反浮选。对于上层矿采用正反浮选与双反浮选时，由于颗粒粒度较小，表面积较大，导致选择性下降，且药剂用量较大，正浮选浮出磷矿物的同时必然浮选大量的白云石，违背了浮少抑多的原则，使得工艺难以控制，利用胺类捕收剂进行反浮选时，矿物颗粒较细，泥化程度严重，浮选过程中，导致泡沫量大，黏度高，不利于流程的实现，因此正反浮选与双反浮选不适宜上层矿。对于上层矿而言，单一反浮选能够获得高品位的磷精矿，但是倍半氧化物难以降低可能还会富集，使得磷精矿品质下降，MER 值提高，而采用正浮选能降低 MER 值，获得品质较优的磷精矿。

通过系统的实验研究，确定了上层矿的反正浮选为反浮选为一次粗选一次精选两次扫选，正浮选为一次粗选一次精选一次扫选的中矿顺序返回的闭路工艺，试验的流程图如图 3，反浮选粗选硫酸、磷酸、捕收剂 LAA-T 的用量分别为 15 kg/t、2.0 kg/t、0.52 kg/t，精选的捕收剂用量为 0.2 kg/t，第一次扫选与第二次扫选的硫酸用量分别为 6.0 kg/t 与 3.0 kg/t，反浮选精矿进行正浮选，正浮选粗选水玻璃、E1310P、以及助剂 LSD-Z 的用量分别为 3.0 kg/t、420 g/t、150 g/t，扫选捕收剂 E1310P 用量为 150 g/t，获得实验结果见表 3。试验获得精矿的品位为 29.41%，回收率为 82.17%，MgO、Fe₂O₃、Al₂O₃ 的含量分别为 0.79%、1.56%、2.71%，MER 值为 0.172。

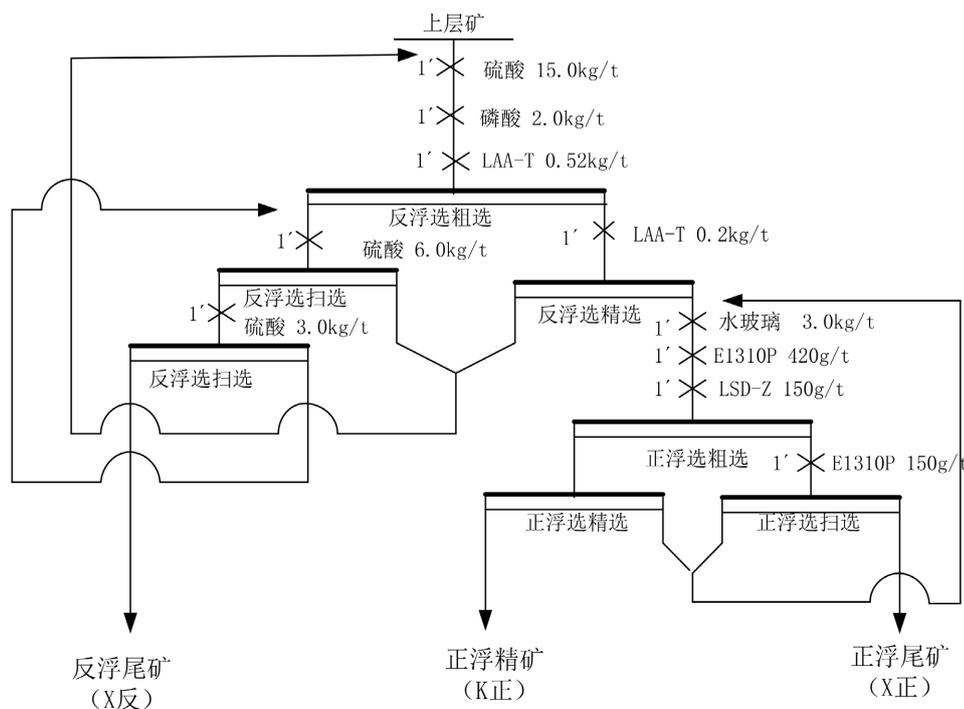


Figure 3. Closed-circuit test flowsheet for reverse-direct flotation of upper-layer ore

图 3. 上层矿反正浮选闭路试验流程图

针对不同粒级的矿石, 采用不同的浮选工艺, 获得了不同工艺指标以及不同品质的磷精矿, 上层细粒级矿采用反浮选, 遵循了浮少抑多的原则, 同时采用了磷酸酯类作为捕收剂, 避免了弱酸性介质下浮选效果差的问题; 下层粗粒级矿的正反浮选工艺, 在弱碱性介质有效进行正浮选, 同时获得了高品质的磷精矿, 品位达到 32% 以上, MER 值仅为 0.064, 可以作为饲料级磷酸钙的优质原料。

5. 机理分析

5.1. 表面张力

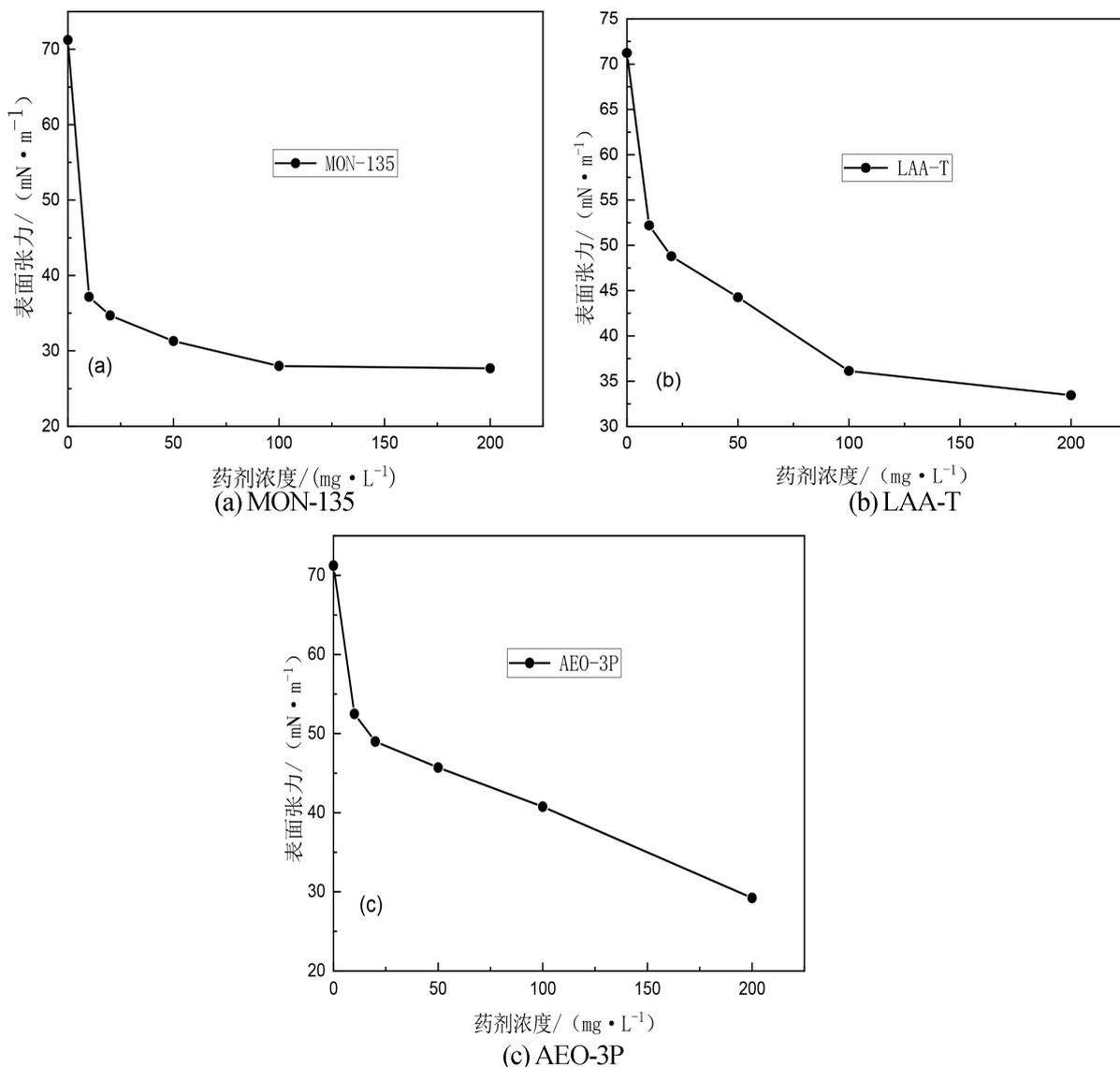


Figure 5. Variation in surface tension of the agent at different concentrations

图 5. 不同浓度下药剂表面张力变化

气体与液体在接触时, 可形成表面层, 表面张力就是液体表面层分子间相互作用导致的收缩趋势的量化表征。在浮选过程中, 表面张力是影响气泡稳定性与形成难易的重要因素之一。临界胶束浓度(CMC)是反映药剂降低水溶液表面张力的重要指标, 同时也是确定药剂最佳用量的指标之一, 现在对于几种捕

收剂进行表面张力测试, 结果如图 5 所示。

由图 5 可得, 在室温 26℃下, 纯水的表面张力为 72.087 mN/m, 符合理论值, 图 5(a)药剂中 MON-135 随着药剂浓度的升高, 其表面张力快速下降然后趋于稳定, 可得其临界胶束浓度(CMC)为 50 mg/L, 图 5(b)药剂中 LAA-T 随着药剂浓度的升高, 其表面张力降低的幅度较低, 然后趋于稳定, 可得其临界胶束浓度(CMC)为 100 mg/L, 图 5(c)药剂中 AEO-3p 随着药剂浓度的升高, 表面张力也呈现降低, 浓度达到 200 mg/L 时, 表面张力为 30 mN/m, 三种捕收剂都可以改善液体的表面张力。

5.2. 接触角试验

为了判断矿物表面润湿性的大小, 常用接触角来进行对比, 接触角越大, 说明该矿物疏水性越强, 矿物更容易被浮选出来, 反之, 接触角越小, 表明该矿物亲水性越强, 矿物更难被浮选出来。图 6 是三种药剂在不同浓度下与胶磷矿、石英和白云石反应后的接触角试验。

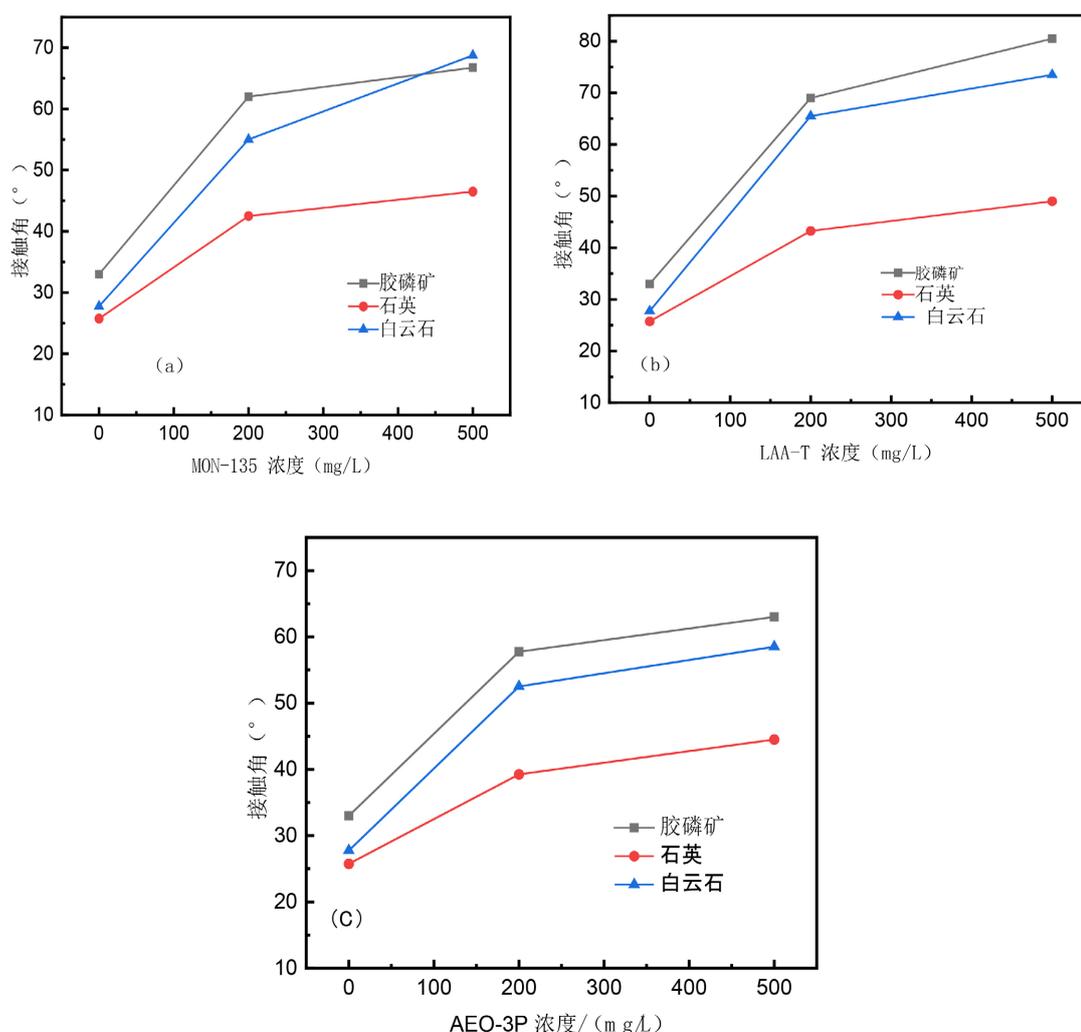


Figure 6. Contact angle variations of Collophane, Quartz and Dolomite with concentrations of MON-135, LAA-T and AEO-3P

图 6. 不同浓度下 MON-135、LAA-T 和 AEO-3P 与胶磷矿、石英和白云石接触角变化

由图 6 可知, 未经处理的胶磷矿、石英和白云石接触角分别为 33°、25.75°和 27.75°, 此时说明这三

种矿物都具有一定的亲水性,使用三种药剂对矿物进行作用后,三种矿物的接触角都变大,矿物表面疏水性增加且随着药剂浓度的增大而增加。图 6(a)表明 MON-135 浓度为 500 mg/L 时,胶磷矿、石英和白云石接触角分别为 66.75°、46.5°和 68.75°;图 6(b)表明 LAA-T 浓度为 500 mg/L 时,胶磷矿、石英和白云石接触角分别为 80.5°、49°和 73.5°;图 6(c)表明 AEO-3p 用量为 500 mg/L 时,胶磷矿、石英和白云石接触角分别为 63°、44.5°和 58.5°。MON-135 和 LAA-T 都可以大幅提高矿物疏水性,但相同浓度下 AEO-3p 对矿物疏水性提升较小。

6. 结论

对于硅钙型胶磷矿在磨矿过程中会发生成分分异,粒级不同则成分也不相同,粗粒级物料中 P_2O_5 的含量有所上升,杂质成分含量趋于降低,细粒级物料会趋于贫化;原矿在磨矿细度-0.074 mm,占-78.81%,沉降虹吸分级获得上、下层粗细颗粒矿物,上层细颗粒矿物 P_2O_5 的含量低,杂质含量偏高,下层粗颗粒矿 P_2O_5 的含量较高,杂质含量较少,两者的性质不同,因此,采用了不同的工艺,获得了不同品质的产品。

上层细粒级矿采用反正浮选工艺,反浮选为一次粗选一次精选两次扫选,粗选硫酸、磷酸、捕收剂 LAA-T 的用量分别为 15 kg/t、2.0 kg/t、0.52 kg/t,精选的捕收剂用量为 0.2 kg/t,第一次扫选与第二次扫选的硫酸用量分别为 6.0 kg/t 与 3.0 kg/t,反浮选精矿再正浮选,采用一次粗选一次精选一次扫选的流程,粗选水玻璃、E1310P、以及助剂 LSD-Z 的用量分别为 3.0 kg/t、420 g/t、150 g/t,扫选捕收剂 E1310P 用量为 150 g/t,中矿顺序返回的闭路流程,试验获得精矿的品位为 29.41%,MgO、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 的含量分别为 0.79%、1.56%、2.71%,MER 值为 0.172,该矿可以作为磷铵的原料;下层粗粒级矿采用正反浮选工艺,正浮选一次粗选一次扫选,粗选碳酸钠、水玻璃、MON-35、LSD-Z 的用量分别为 2.0 kg/t、2.0 kg/t、0.56 kg/t 与 75 g/t,扫选捕收剂用量为 0.3 kg/t,反浮选一次粗选一次精选两次扫选的流程,粗选硫酸、捕收剂 LAA-T 的用量分别为 9.0 kg/t、0.60 kg/t,精选捕收剂用量为 0.3 kg/t,反浮选第一次扫选与第二扫选硫酸用量分别为 6.0 kg/t、3.0 kg/t,中矿顺序返回闭路试验,试验获得磷精矿的品位为 32.34%,MgO、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 的含量分别为 0.93%、0.67%、0.47%,MER 值为 0.064,可以作为饲料级磷酸钙的优质原料。

针对不同粒级的矿石,采用不同的浮选工艺,获得了不同工艺指标,上层细粒级矿遵循了浮少抑多的原则,采用了磷酸酯类作为捕收剂,避免了弱酸性介质下浮选效果差的问题;下层粗粒级矿的正反浮选可以获得了高品质的磷精矿。

基金项目

国家自然科学基金(52374272)湖北省揭榜制项目(2021BEC029)湖北省技术创新重大项目(2018ACA153,2022ACA004),武汉工程大学研究生教育创新基金项目(CX2023188)。

参考文献

- [1] 姜树叶. 放眼量长远看磷矿资源的幽思[J]. 化工矿产地质, 2020, 42(1): 95-96.
- [2] 郝庆. 中国磷矿资源开发利用现状及建议[J]. 科学, 2014, 66(5): 51-55, 4.
- [3] Gharabaghi, M., Irannajad, M. and Noaparast, M. (2010) ChemInform Abstract: A Review of the Beneficiation of Calcareous Phosphate Ores Using Organic Acid Leaching. *ChemInform*, **41**, 96-107. <https://doi.org/10.1002/chin.201038230>
- [4] 刘意, 陈婷, 郑松, 等. 贵州织金低磷层磷矿稀土赋存状态与磷矿浮选工艺研究[J]. 矿物学报, 2019, 39(4): 397-402.
- [5] 张胜东, 童雄, 罗惠华, 等. 湖北大峪口磷矿正反浮选试验研究[J]. 化工矿物与加工, 2016, 45(8): 1-3, 83.
- [6] 石波, 徐伟, 田言, 等. 贵州某磷矿双反浮选工艺及机理研究[J]. 矿冶工程, 2022, 42(6): 74-77.

-
- [7] 袁华玮, 刘全军, 张辉, 张一超. 湖北某胶磷矿选矿工艺研究[J]. 化工矿物与加工, 2016, 45(6): 7-9.
 - [8] 李成秀, 程仁举, 罗惠华, 刘飞燕. 贵州某中低品位胶磷矿正反浮选试验研究[J]. 化工矿物与加工, 2015, 44(3): 1-3.
 - [9] 罗惠华, 刘宇桐, 陈官华, 等. 常温正反浮选工艺富集放马山低品位胶磷矿研究[J]. 磷肥与复肥, 2022, 37(8): 9-13.
 - [10] 黄齐茂, 李锋, 蔡坤, 等. 湖北某硅钙质胶磷矿反正浮选工艺研究[J]. 化工矿物与加工, 2010, 39(12): 1-3, 11.
 - [11] 石和彬, 王树林, 梁永忠, 等. 云南中低品位硅钙质磷块岩工艺矿物学研究[J]. 武汉工程大学学报, 2008(2): 5-8.
 - [12] 石和彬, 钟宏, 刘羽, 等. 中低品位磷块岩在磨矿过程中的成分分异[J]. 武汉工程大学学报, 2011, 33(3): 87-91.