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

李封元，罗惠华，彭李情，岑　梅，刘　菊，赵李欣然

（武汉工程大学 资源与安全工程学院，湖北 武汉　430074）

［摘　要］以宜昌树垭坪矿区中低品位硅钙质胶磷矿作为研究对象，采用椰油二胺为阳离子捕收剂，研究不同结构的磷酸酯阴离子捕收剂协同反浮选性能。实验结果表明：不同结构的磷酸酯协同作用不同，具有聚氧乙烯醚基团的磷酸酯协同作用优于没有聚氧乙烯醚基团的磷酸酯；具有聚氧乙烯醚基团的磷酸酯的碳链结构不同，协同浮选效果不同；支链烷基醇聚氧乙烯醚磷酸酯的协同作用优于直链烷基醇聚氧乙烯醚磷酸酯。以磷酸酯（E1310P）与椰油二胺分别作为反浮选阴、阳离子捕收剂，可使磷矿$w(P_2O_5)$从25.74%提高到33.66%。

［关键词］磷酸酯阴离子捕收剂；椰油二胺；一步反浮选；胶磷矿；工艺流程

［中图分类号］TD97；TD923　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2024）09-0022-06

One-step reverse flotation of collophane with phosphate ester anionic collector synergized with coconut oil diamine

LI Fengyuan, LUO Huihua, PENG Liqing, CEN Mei, LIU Ju, ZHAO Lixinran

(*School of Resources and Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan* 430074, *China*)

Abstract: The medium and low-grade silica-calcium collophane in the Yichang Shukongping mining area is taken as the object, using coconut oil diamine as the cationic collector, the synergistic reverse flotation performance of phosphate ester anionic collector with different structures is investigated. The results show that: The synergistic effect of phosphate esters with different structures is different, the synergistic effect of phosphate esters with polyoxyethylene ether groups is better than that of phosphate esters without polyoxyethylene ether groups; Different carbon chain structures of phosphate esters with polyoxyethylene ether groups have different synergistic effects; The synergistic effect of branched alkyl alcohol polyoxyethylene ether phosphate is superior to that of straight-chain alkyl alcohol polyoxyethylene ether phosphate. Using phosphate ester E1310P and coconut oil diamine as anionic and cationic collectors, the P_2O_5 grade of phosphate rock can be increased from 25.74% to 33.66% by reverse flotation.

Key words: phosphate ester anionic collector; coconut oil diamine; one-step reverse flotation; collophane; process flow

0　引言

磷矿是重要的战略资源，是生产磷肥和磷复肥的主要原材料[1]，在医药、食品、染料、陶艺、国防等工业领域应用广泛[2-4]。目前国内中低品位磷矿居多，具有嵌布粒度细、与脉石矿物共生紧密、较难分离等特点[5-6]。

磷矿选矿中浮选工艺占主导地位，几乎适用于所有复杂难选的磷矿石[7]，包括正浮选、单一反浮选、正反浮选、双反浮选、反正浮选等。含高硅酸盐矿物和高倍半氧化物矿物的中低品位胶磷矿通常采用双反浮选工艺，但是双反浮选工艺脱硅效果较差，且泡沫发黏，消泡较难，药剂对环境影响较大，在工业中的应用受到影响[8-9]。国内学者针对上述问题提出了不同的解决方案[10-12]，但大多工艺较为复杂，适用性不强。采用一步浮选的方式，可以简化工艺和降低成本，同时还可以减少对环境的影响，提高生产率。罗惠华等[13]通过加

［收稿日期］2024-03-29

［作者简介］李封元(2000-)，男，河南平顶山人，在读硕士研究生，从事磷矿选矿研究。E-mail：609039716@qq.com

［通信作者］罗惠华(1968-)，男，湖北武汉人，教授，从事磷矿选矿理论与药剂及矿产资源综合利用研究。E-mail：luohh68@sina.cn

［基金项目］湖北省揭榜制项目(2021BEC029)；湖北省技术创新重大项目(2018ACA153)；武汉工程大学研究生教育创新基金项目(CX2023188)

入硫酸创造弱酸性环境并抑制磷酸盐矿物，然后加入捕收剂浮出白云石，原矿经过一粗二扫的单一反浮选闭路试验，将磷精矿中 $w(P_2O_5)$ 提高至 30.1%，w(MgO) 降至 0.48%，P_2O_5 回收率达到 87.56%。罗鸣坤等[14]在加入水玻璃和L2–Z作为硅酸盐矿物抑制剂的条件下，采用一粗一精的正浮选工艺，将磷精矿中 w(MgO) 降至1%以下，$w(P_2O_5)$ 提高至36%以上。一步浮选常用药剂包括调整剂、抑制剂、阴阳离子捕收剂，常用反浮选阳离子捕收剂是胺类药物，该类药剂的作用机制主要有物理吸附、半胶束吸附及形成络合物吸附等[15]。闫雅雯等[16]通过浮选实验总结出相同胺类浮选性能最好的为二胺，脂肪胺类药剂中椰油二胺浮选捕收硅酸盐矿物性能较优。阴离子捕收剂主要为脂肪酸类，但其选择性较差，易产生静电力作用，难以吸附在脉石矿物表面；而磷酸酯类药物是具有阴离子和非离子双重特性的表面活性剂，因其具有较好的抗静电性、润湿性等[17]，在造纸、塑料等领域广泛应用，其一般由磷酸单酯、磷酸双酯、游离的磷酸等构成[18]。张正虎等[19]探究了12种磷酸酯类药剂对正浮选的影响，发现碳链长度适宜、含有醇或酚的基团，以及聚合度低的聚氧乙烯醚磷酸酯具有合适的低温增效作用。

笔者将磷酸酯类药剂作为研究对象，选择椰油二胺作为阳离子捕收剂，探究阴离子捕收剂磷酸酯协同阳离子捕收剂椰油二胺对反浮选过程中浮选性能的影响。

1　实验矿样的性质

实验矿样取自湖北宜昌树峪坪矿区北部的后坪磷矿第二层矿，灰至灰黑色，薄层状及条带状构造，矿石致密，含磷矿物主要为胶磷矿，其次为磷灰石，脉石矿物主要成分为硅酸盐，主要包括玉髓、石英、绿泥石和少量黏土等，碳酸盐脉石含量较少，主要为白云石。原矿主要化学成分分析结果见表1。

表1　原矿主要化学成分分析结果

Table 1　Analysis results of the main components of the raw rock　%

$w(P_2O_5)$	w(MgO)	w(CaO)	$w(Fe_2O_3)$	$w(Al_2O_3)$	$w(K_2O)$	$w(Na_2O)$	$w(SiO_2)$	$w(CO_2)$	w(F)
25.74	1.40	35.50	2.21	4.65	3.45	0.72	20.47	3.86	2.46

从表1可以看出，原矿 $w(P_2O_5)$ 为25.74%，w(MgO) 为1.40%，$w(SiO_2)$ 为20.47%，倍半氧化物（Al_2O_3、Fe_2O_3）的质量分数较高，达到6.86%，因此需要降低MgO、SiO_2以及倍半氧化物的含量。

2　实验设备、药剂与方法

2.1　实验设备

FA3204B型分析天平，上海天美天平仪器有限公司；DL–1型电磁炉，北京市永光明医疗仪器有限公司；HH–6型恒温水浴锅，常州国华电器有限公司；01–4A型电热鼓风干燥箱，北京市永光明医疗仪器有限公司；XMB–67型棒磨机，武汉探矿机械有限公司；XFD–0.5 L单槽浮选机，武汉探矿机械有限公司；XSHF–2–3型湿式分样机，天津市华联矿山仪器厂；XTLZ型真空过滤机，江西省兴业机械设备有限公司。

2.2　实验药剂

H_3PO_4，工业品，配成质量分数10%的水溶液；H_2SO_4，工业品，配成质量分数10%的水溶液；$Al_2(SO_4)_3$，工业品，配成质量分数10%的水溶液；阳离子捕收剂椰油二胺，工业品，配成质量分数2%的水溶液；磷酸酯类药剂有脂肪醇聚氧乙烯醚磷酸酯（AEO–3P、AEO–9P），2–膦酸基丁烷–1,2,4–三羧酸（PBTCA），月桂醇磷酸酯钾（MAP–K），烷基酚聚氧乙烯醚磷酸酯（APE–10P、AEP–4P），十二烷基聚氧乙烯醚磷酸酯钾盐（MAEP–K），十六十八醇磷酸酯（C1618P），异构十三醇聚氧乙烯醚磷酸酯（E1310P），辛癸醇聚氧乙烯醚磷酸酯钾（ODEP–K），异辛醇聚氧乙烯醚磷酸酯钠（OEP–70、OEP–95），配制成质量分数2%的水溶液。

2.3　实验方法

将原矿经过粗碎、中碎、细碎后筛分至粒径2 mm以下，采用堆锥法与环锥法将原矿混合均匀后装袋，每袋约1.0 kg。在进行浮选实验之前，使用棒磨机磨矿，加水使 w(固) 为50%，通过分样机将磨好的矿样均匀分为12份，对角取样，共取6份，用于浮选。浮选机转速设定为2 000 r/min，充气量设定为60 ~ 80 L/h。通过单因素条件实验选定浮选过程的药剂制度。浮选结束后，将磷精矿和尾矿产品经过过滤、烘干、称量、制样后，采用钼酸铵容量法分析 P_2O_5 含量，并且计算矿物的回收率以及选矿效率（选矿效率=回收率–产率）[20]。

3　实验结果与分析

3.1　磨矿细度对浮选指标的影响

磨矿细度对浮选性能影响很大，磨矿细度是否合理主要看有用矿物是否单体解离，并且得到合适浮选的给料粒级。在温度20 ℃，硫酸、磷

酸、MAP-K、椰油二胺用量分别为 9.0、2.0、0.3、0.9 kg/t 的条件下，进行磨矿细度实验，结果见图 1。

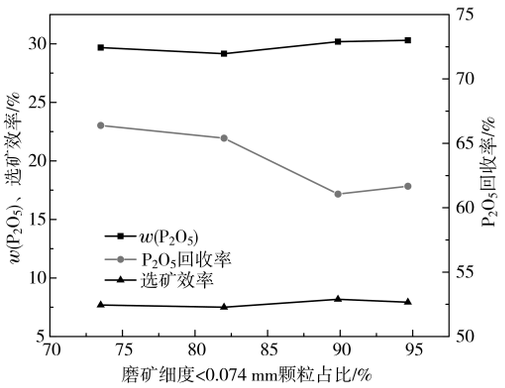

图 1　磨矿细度对磷精矿浮选指标的影响

Fig. 1　Effect of grinding fineness on flotation index of phosphorus concentrate

从图 1 可知，磨矿细度 <0.074 mm 的颗粒占比从 73.50% 增至 94.67%，磷精矿 $w(P_2O_5)$ 在 29.1% ~ 30.3%，P_2O_5 回收率整体呈逐渐下降趋势，从 66% 降至 61% 左右。在磨矿细度 <0.074 mm 的颗粒占比为 89.9% 时，磷精矿 $w(P_2O_5)$ 为 30.18%，选矿效率为 8.18%。磨矿细度 < 0.074 mm 的颗粒占比为 94.7% 时，选矿效率比磨矿细度 < 0.074 mm 占比 89.9% 时低 0.25 百分点，$w(P_2O_5)$ 仅提高了 0.12 百分点，但矿石粒度偏细，泥化程度较高，不利于浮选，并且会增加磨矿成本，因此，确定磨矿细度为 < 0.074 mm 的颗粒占 89.9%。

3.2　硫酸用量对浮选指标的影响

反浮选通常是在弱酸性环境下抑制磷酸盐矿物，捕收出含镁的碳酸盐脉石矿物，H_2SO_4 不仅可以作为 pH 调整剂，而且会使碳酸盐矿物溶解，在其表面形成 CO_2 微泡，增加浮选过程的气泡量，增加矿物与气泡附着的概率，有利于反浮选；同时 H_2SO_4 优先溶解碳酸盐矿物表面的 CO_3^{2-}，使得矿物表面有更多阳离子活化质点，更加有利于捕收剂对矿物的吸附 [21]。然而，加入 H_2SO_4 的瞬间，会导致矿浆局部范围内酸性升高，与碳酸盐矿物发生反应，生成硫酸钙沉淀，这些沉淀可能会附着在浮选机的槽体以及管壁上，时间长了甚至堵塞矿浆管道，影响工艺正常进行。因此，在反浮选过程中，H_2SO_4 用量应控制在合适的范围内，在磨矿细度 < 0.074 mm 颗粒占比为 89.9%，磷酸、MAP-K、椰油二胺用量分别为 2.0、0.3、0.9 kg/t 的条件下，探究硫酸用量对浮选指标的影响，结果见图 2。

根据图 2 显示，随着硫酸用量从 6.0 kg/t 增加至

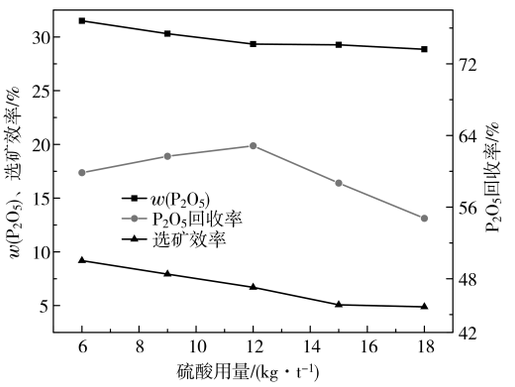

图 2　硫酸用量对磷精矿浮选指标的影响

Fig. 2　Effect of sulfuric acid dosage on flotation index of phosphorus concentrate

18.0 kg/t，磷精矿品位和选矿效率呈持续下降的趋势，说明较高的硫酸用量不利于矿物分选，磷精矿 P_2O_5 回收率先升高后下降，在硫酸用量为 9.0 kg/t 时，P_2O_5 回收率达 61.67%，比硫酸用量为 12.0 kg/t 时低了 1.17 百分点，而 $w(P_2O_5)$ 增加了 0.96 百分点，选矿效率提高了 1.23 百分点。因此，硫酸用量为 9.0 kg/t 较适宜。

3.3　磷酸用量对浮选指标的影响

在磷矿反浮选过程中，为了去除碳酸盐矿物白云石等，一般采用弱酸性介质中浮出碳酸盐矿物，降低 MgO 含量。采用磷酸作为抑制剂，加强抑制作用，使磷酸盐矿物的亲水性增加，从而提高分选效果。在磨矿细度 < 0.074 mm 颗粒占比为 89.9%，硫酸、MAP-K、椰油二胺用量分别为 9.0、0.3、0.9 kg/t 的条件下进行磷酸用量实验，实验结果见图 3。

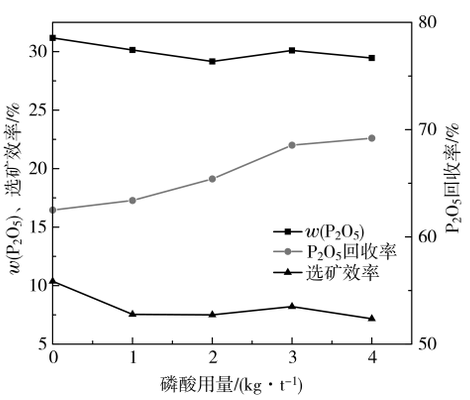

图 3　磷酸用量对磷精矿浮选指标的影响

Fig. 3　Effect of phosphoric acid dosage on flotation index of phosphorus concentrate

由图 3 可知，磷酸用量从 1.0 kg/t 增加至 4.0 kg/t，磷精矿 $w(P_2O_5)$ 在 29% ~ 30%，选矿效率在 7% ~ 8%，P_2O_5 回收率不断升高至 69.2%。而浮选过程不添加磷酸时，磷精矿的品位、选矿效率均优于添加

磷酸，且添加磷酸后，浮选泡沫发黏、难消除，因此后续实验不再加入磷酸。

3.4　捕收剂椰油二胺用量对浮选指标的影响

椰油二胺中存在 2 个胺基基团，作为硅酸盐矿物的捕收剂，有较强捕收性能。在磨矿细度 < 0.074 mm 颗粒占比 89.9%，硫酸、MAP-K 用量分别为 9.0、0.3 kg/t 的条件下进行椰油二胺用量实验，实验结果见图 4。

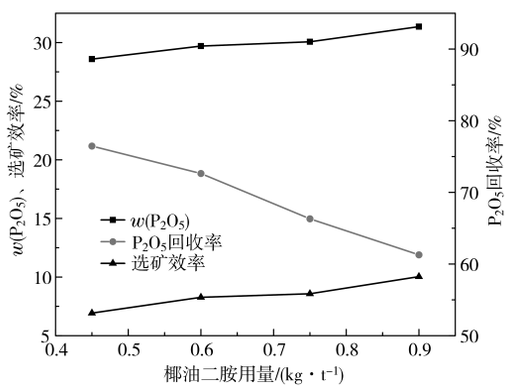

图 4　椰油二胺用量对磷精矿浮选指标的影响

Fig. 4　Effect of coconut oil diamine dosage on flotation index of phosphorus concentrate

由图 4 可知，随着椰油二胺用量由 0.45 kg/t 增加至 0.90 kg/t 时，磷精矿品位与选矿效率不断增加，椰油二胺用量为 0.90 kg/t 时，磷精矿品位达到 31.36%，选矿效率为 10.04%，而 P_2O_5 回收率较低，仅为 61.29%，再增加椰油二胺用量时 P_2O_5 回收率会进一步降低，并增加选矿药剂成本。因此，椰油二胺用量确定为 0.90 kg/t。

3.5　几种磷酸酯浮选性能对比

磷酸酯是一类阴离子型捕收剂，在水中水解产生磷酸基团阴离子，吸附在白云石矿物表面，反浮选白云石，降低 MgO 的含量，其一般由磷酸单酯、磷酸双酯、游离的磷酸等构成。在磨矿细度 < 0.074 mm 颗粒占比 89.9%，H_2SO_4、椰油二胺用量分别为 9.0、0.9 kg/t 条件下，分别研究各磷酸酯类药剂（MAP-K、C1618P、OEP-70、OEP-95、APE-10P、AEP-4P、E1310P、ODEP-K、AEO-3P、AEO-9P、MAEP-K、PBTCA）不同用量对浮选的影响，实验结果如图 5、图 6、图 7 所示。

从图 5 可以看出，在加入少量磷酸酯类药剂时，磷精矿品位均有所提高，可见磷酸酯类药剂能协同椰油二胺同步反浮选硅酸盐与白云石矿物，提高磷精矿的品位。其中用量为 0.5 kg/t 时，E1310P、OEP-70、OEP-95、AEO-9P 处理磷精矿 $w(P_2O_5)$ 可达到 32%以上，E1310P 处理磷精矿 $w(P_2O_5)$ 为 33.66%，协同椰油二胺反浮选效果较好；当 APE-10P、AEP-4P、ODEP-K、AEO-3P 作为捕收剂时，磷精矿 $w(P_2O_5)$ 在 31%左右，也表现出较好的浮选性能；使用 MAP-K、PBTCA、MAEP-K、C1618P 作为捕收剂，磷精矿 $w(P_2O_5)$ 仅在 30%左

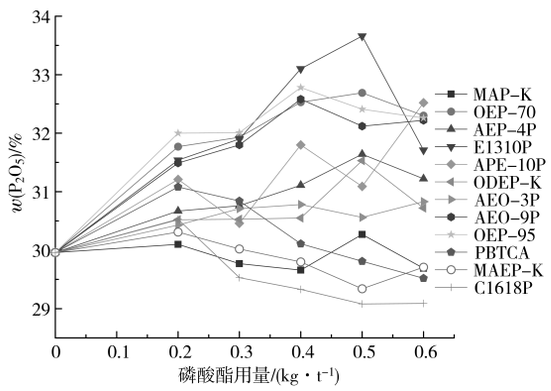

图 5　磷酸酯用量对磷精矿 $w(P_2O_5)$ 的影响

Fig. 5　Effect of phosphate ester on mass fraction of P_2O_5 in phosphorus concentrate

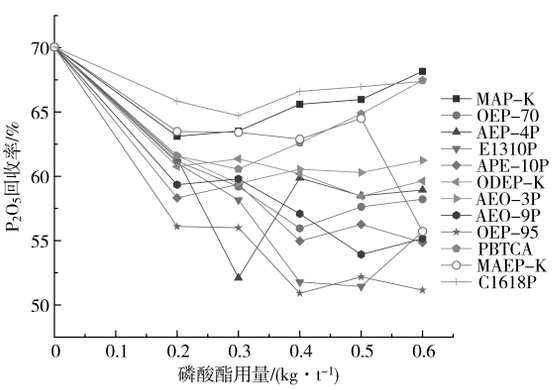

图 6　磷酸酯用量对 P_2O_5 回收率的影响

Fig. 6　Effect of phosphate ester on recovery rate of P_2O_5 in phosphorus concentrate

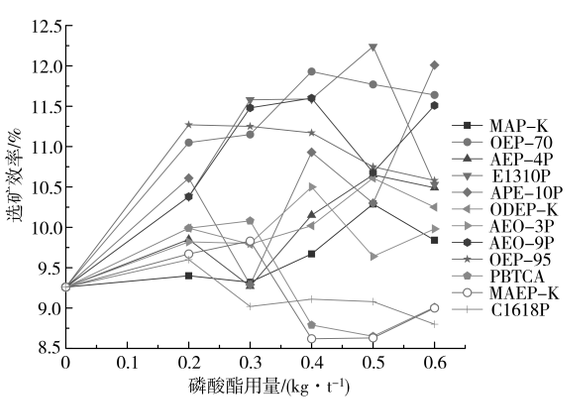

图 7　磷酸酯用量对选矿效率的影响

Fig. 7　Effect of phosphate ester on concentration efficiency

右，与椰油二胺协同反浮选碳酸盐与硅酸盐矿物的能力较弱。

从图6可以看出，在加入磷酸酯类药剂后，磷精矿P_2O_5回收率都有所下降，且用量越高，精矿P_2O_5回收率越低，说明该类型的捕收剂也对磷矿物有一定的捕收能力。因此，磷酸酯在与椰油二胺协同反浮选碳酸盐与硅酸盐矿物时，用量不宜较高。

从图7可以看出，磷酸酯类药剂E1310P、OEP-70、OEP-95、AEO-9P的选矿效率较高，在药剂用量为0.3～0.5 kg/t时，选矿效率在11.5%左右，E1310P用量为0.5 kg/t时，选矿效率达12.24%。在药剂用量为0.3～0.5 kg/t时，APE-10P、AEP-4P、AEO-3P、ODEP-K、MAP-K作为捕收剂时选矿效率在10%左右，而PBTCA、MAEP-K、C1618P 3种药剂的选矿效率均在9%左右。

从磷酸酯用量对磷精矿品位和选矿效率影响综合分析，在磷酸酯协同椰油二胺进行磷矿反浮选时，不同结构的磷酸酯协同作用不同，具有聚氧乙烯醚基团的磷酸酯协同作用优于没有聚氧乙烯醚基团的磷酸酯（PBTCA、C1618P）；具有聚氧乙烯醚基团的磷酸酯的碳链结构不同，浮选效果不同，烷基醇聚氧乙烯醚磷酸酯（E1310P、OEP-70、OEP-95、ODEP-K）的协同效果较优，其次是烷基酚聚氧乙烯醚磷酸酯（APE-10P、AEP-4P）、脂肪醇聚氧乙烯醚磷酸酯（AEO-3P、AEO-9P），再次为直链烷基聚氧乙烯醚磷酸酯（MAEP-K）；支链烷基醇聚氧乙烯醚磷酸酯（E1310P）的协同作用优于直链醇烷基醇聚氧乙烯醚磷酸酯。综合精矿品位、P_2O_5回收率、选矿效率，异构十三醇聚氧乙烯醚磷酸酯（E1310P）与椰油二胺协同作用最优。

3.6　E1310P协同椰油二胺反浮选实验

在磨矿细度＜0.074 mm的颗粒占比89.9%、H_2SO_4用量9 kg/t、磷酸酯E1310P用量0.5 kg/t、椰油二胺用量0.9 kg/t条件下，进行了一次粗选两次扫选的开路流程实验，磷精矿$w(P_2O_5)$达到33.72%，P_2O_5回收率为48.76%，但是磷尾矿$w(P_2O_5)$较高，为18.05%。为了降低尾矿品位，在第一次扫选中添加硫酸铝作为抑制剂，发现在浮选过程中硫酸铝能改变浮选泡沫的特性，使浮选泡沫较脆易碎，其他条件不变，硫酸铝用量为3 kg/t时，尾矿$w(P_2O_5)$为15.82%。在此基础上进行了闭路流程实验（实验流程如图8所示），所得磷精矿$w(P_2O_5)$为29.72%、P_2O_5回收率为85.63%，磷尾矿$w(P_2O_5)$、P_2O_5回收率分别是16.05%、14.38%。

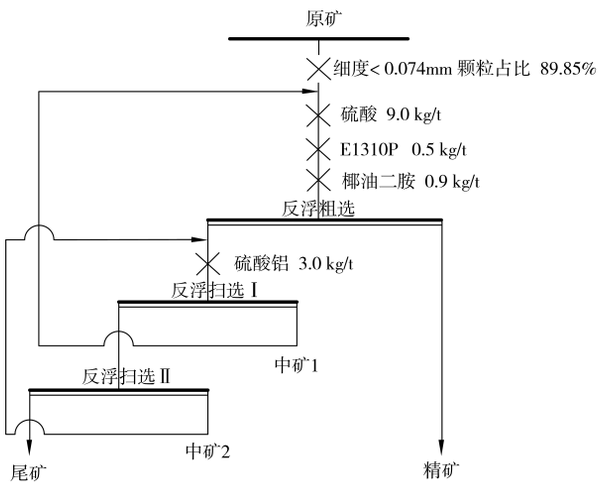

图8　闭路实验流程

Fig. 8　Closed-circuit experimental process

4　结论

针对宜昌硅钙质胶磷矿，采用阴阳离子捕收剂协同作用反浮选捕收硅酸盐与碳酸盐矿物，提高磷精矿的品位是可行的。实验的磨矿细度为＜0.074 mm的颗粒占比89.9%，硫酸为pH调整剂和抑制剂，在弱酸性介质中，以椰油二胺为阳离子捕收剂，研究不同结构的磷酸酯阴离子捕收剂与之协同反浮选的性能。结果表明，不同结构的磷酸酯协同作用不同，具有聚氧乙烯醚基团的磷酸酯协同作用优于没有聚氧乙烯醚基团的磷酸酯（PBTCA、C1618P）；具有聚氧乙烯醚基团的磷酸酯的碳链结构不同，协同浮选效果不同，烷基醇聚氧乙烯醚磷酸酯（E1310P、OEP-70、OEP-95、ODEP-K）的协同效果较优，其次是烷基酚聚氧乙烯醚磷酸酯（APE-10P、APE-4P）、脂肪醇聚氧乙烯醚磷酸酯（AEO-3P、AEO-9P），再次为直链烷基聚氧乙烯醚磷酸酯（MAEP-K）；支链烷基醇聚氧乙烯醚磷酸酯（E1310P）的协同作用优于直链烷基醇聚氧乙烯醚磷酸酯。

通过对比实验，选出支链烷基醇聚氧乙烯醚磷酸酯（E1310P）作为阴离子捕收剂协同椰油二胺，采用反浮选一次粗选两次扫选工艺流程，在硫酸、阳离子捕收剂椰油二胺、阴离子捕收剂E1310P的用量分别为9.0、0.9、0.5 kg/t，扫选中$Al_2(SO_4)_3$用量为3 kg/t的药剂制度下，闭路流程实验得到磷精矿$w(P_2O_5)$、P_2O_5回收率分别为29.72%、85.63%的选矿指标。

［参考文献］

［1］　胡敏.我国磷矿产业现状与发展趋势[J].磷肥与复肥，2023，

38(11):1-5.
HU M. Current situation and development trends of phosphate rock industry in China[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2023, 38(11):1-5.

[2] 黄志华,苏秀珠,覃文庆,等.西南地区典型胶磷矿中稀土元素的赋存特征[J].稀有金属,2021,45(6):695-701.
HUANG Z H, SU X Z, QIN W Q, et al. Occurrence Characteristics of Rare Earth Elements in Typical Collophanite in Southwest China[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2021, 45(6):695-701.

[3] 杜春丽,黄曼,洪诗佳.我国磷矿资源开发利用研究综述[J].中国国土资源经济,2019,32(4):32-38.
DU C L, HUANG M, HONG S J. Research Review on Development and Utilization of Phosphate Resources in China [J]. Natural Resource Economics of China, 2019, 32(4):32-38.

[4] 马一嘉,武俊杰,倪天阳.我国磷矿资源的开发利用现状及进展[J].矿冶,2018,27(2):53-56.
MA Y J, WU J J, NI T Y. Current Situation and Development of the Exploitation and Utilization of Phosphate Ore Resources in China[J]. Mining and Metallurgy, 2018, 27(2):53-56.

[5] 张亚明,李文超,王海军.我国磷矿资源开发利用现状[J].化工矿物与加工,2020,49(6):43-46.
ZHANG Y M, LI W C, WANG H J. Status quo of development and utilization of phosphate resources in China[J]. Industrial Minerals & Processing, 2020, 49(6):43-46.

[6] 王莹,熊先孝.中国磷矿成矿系列、成矿规律与找矿方向[J].地球学报,2023,44(4):625-634.
WANG Y, XIONG X X. Phosphate Ore Series, Metallogenic Regularity, and Prospecting Direction in China [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2023, 44(4):625-634.

[7] 刘宇桐,罗惠华,赵军,等.中国磷矿选矿研究现状与展望[J].中国非金属矿工业导刊,2023(5):1-5,35.
LIU Y T, LUO H H, ZHAO J, et al. Research Status and Development of Phosphate Ore Dressing in China[J]. China Non-metallic Mining Industry, 2023(5):1-5,35.

[8] 赵凤婷.双反浮选工艺在胶磷矿选别中的应用[J].磷肥与复肥,2010,25(2):70-72.
ZHAO F T. Application of double-reverse flotation in mineral separation of collophanite[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2010, 25(2):70-72.

[9] 卢香.低品位磷矿的浮选工艺及浮选机理研究[D].贵阳:贵州大学,2018.
LU X. Study on Flotation Process and Mechanism of Low-grade Phosphate Ores[D]. Guiyang:Guizhou University, 2018.

[10] 何海涛,蔡忠俊,张华,等.某中低品位胶磷矿浮选试验研究[J].云南化工,2023,50(4):45-47.
HE H T, CAI Z J, ZHANG H, et al. Experimental Study on Flotation of Middle-low Grade of Collophanite Ore[J]. Yunnan Chemical Technology, 2023, 50(4):45-47.

[11] 黄鹏,张凡,李洪强,等.湖北某低品位高镁质磷矿反浮选试验研究[J].矿产保护与利用,2023,43(2):138-141.
HUANG P, ZHANG F, LI H Q, et al. Study on Reverse Flotation of Low Grade Phosphate Ore with High Magnesium in Hubei Province[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(2):138-141.

[12] 孙建业,姜振胜,李玲,等.湖北某胶磷矿正反浮选试验研究[J].化工矿物与加工,2023,52(3):16-19,25.
SUN J Y, JIANG Z S, LI L, et al. Experimental study on direct-reverse flotation of a phosphate rock in Hubei province [J]. Industrial Minerals & Processing, 2023, 52(3):16-19,25.

[13] 罗惠华,余爱萍.宜昌中低品位胶磷矿的反浮选试验研究[J].矿业快报,2007(4):38-40.
LUO H H, YU A P. Experimental Research on Reverse Flotation of Middle-low Grade Collophanite of Yichang [J]. Express Information of Mining Industry, 2007(4):38-40.

[14] 罗鸣坤,朱鹏程,王国栋.磁选含磷尾矿正浮选硅酸盐矿物抑制剂的选择[J].云南化工,2015,42(2):18-20,26.
LUO M K, ZHU P C, WANG G D. Inhibitors Choice for Magnetic Flotation Tailings Containing Phosphorus Silicate Minerals[J]. Yunnan Chemical Technology, 2015, 42(2):18-20,26.

[15] 闫雅雯,罗惠华,赵军,等.胺类捕收剂的应用现状及发展前景[J].矿产保护与利用,2022,42(2):59-66.
YAN Y W, LUO H H, ZHAO J, et al. Application Status and Development Prospect of Amine Collectors [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(2):59-66.

[16] 闫雅雯,罗惠华,国亚非,等.磷矿反浮选几种胺离子捕收剂脱硅性能对比[J].矿产综合利用,2022(6):124-130.
YAN Y W, LUO H H, GUO Y F, et al. Comparison of Desilication Performance of Several Amine Ion Collectorsin Reverse Flotation of Phosphate Rock[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(6):124-130.

[17] 方艮辉.延展型磷酸酯表面活性剂的合成和性能研究[D].无锡:江南大学,2020.
FANG G H. Synthesis and Properties of Phosphate Extended Surfactants[D]. Wuxi:Jiangnan University, 2020.

[18] 罗廉明,柳扬波.醚烷基磷酸酯浮选磷矿石的研究[J].化工矿山技术,1998,27(1):16-18.
LUO L M, LIU Y B. Study on phosphate ore flotation by ether alkyl phosphate[J]. Industrial Minerals & Processing, 1998,27(1):16-18.

[19] 张正虎,罗惠华,陈慧,等.磷酸酯类表面活性剂强化某磷重选尾矿低温浮磷研究[J].现代矿业,2023,39(2):153-155,159.
ZHANG Z H, LUO H H, CHEN H, et al. Study of Phosphate-ester Surfactants Strengthening the Low-temperature Floating Phosphorus from Gravity Separation Tailings of a Phosphate Mine[J]. Modern Mining, 2023, 39(2):153-155, 159.

[20] 中南矿冶学院,许时.矿石可选性研究[M].北京:冶金工业出版社,1981.
South Central Institute of Mining and Metallurgy, XU S. Research on ore selectivity [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1981.

[21] 郑其.胶磷矿的反浮选[J].中国矿业,1998(2):59-62.
ZHENG Q. Reverse flotation of collophanite[J]. China Mining Magazine, 1998(2):59-62.