文章编号:1674-2869(2024)02-0119-06

酰基季铵盐脱硅捕收剂的合成与应用

陈友顺,徐廷航,张 逸,龙秉文,邓伏礼,戴亚芬,丁一刚*
武汉工程大学化工与制药学院,绿色化工过程教育部重点实验室(武汉工程大学),
湖北 武汉 430205

摘 要:以十二酰氯、二甲氨基丙胺和溴乙烷为原料,合成出一种高效且能酸性矿浆条件下反浮选脱硅的含酰基季铵盐捕收剂XN-12。浮选结果表明:在石英单矿物浮选实验中,XN-12捕收剂在矿浆pH>5的条件下对石英有很好的浮选效果;用XN-12捕收剂对高硅磷矿直接进行单一反浮选脱硅,在pH=5.6的酸性矿浆条件下,抑制剂三聚磷酸钠用量为5.0 kg/t,XN-12用量1.2 kg/t的药剂制度下,获得了磷精矿中P_2O_5品位30.31%、回收率81.60%、SiO_2品位7.26%和脱硅率69.12%的良好指标。

关键词:磷矿;脱硅;季铵盐;合成;反浮选
中图分类号:TD985 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202311018

Synthesis and application of acyl quaternary ammonium salt desilication collector

CHEN Youshun, *XU Tinghang*, *ZHANG Yi*, *LONG Bingwen*, *DENG Fuli*, *DAI Yafen*, *DING Yigang**
School of Chemical Engineering &Pharmacy, Wuhan Institute of Technology; Key Laboratory for Green Chemical Engineering Process (Wuhan Institute of Technology), Ministry of Education, Wuhan 430205, China

Abstract: Using dodecanoyl chloride, dimethylaminopropylamine, and bromoethane as starting materials, a highly efficient acyl quaternary ammonium salt, i.e. collector XN-12 that can selectively float and remove silica under under acidic pulp conditions was synthesized. Flotation results show that in single quartz mineral flotation experiments, XN-12 has good flotation performance on quartz under conditions of mineral slurry with pH > 5; when directly subjected to single reverse flotation desilication using XN-12 for high-silica phosphate ore, under acidic mineral slurry conditions at pH = 5.6, with a dosage of 5.0 kg/t of sodium tripolyphosphate depressant and 1.2 kg/t of XN-12, the obtained phosphorus concentrate had good indicators of P_2O_5 grade 30.31%, recovery rate 81.60%, SiO_2 grade 7.26%, and desilication rate 69.12%.

Keywords: phosphate rock; desilication; quaternary ammonium salt; synthesis; reverse flotation

磷矿资源是不可再生资源,在国民经济中占有重要地位,我国磷矿资源的主要特点是丰而不富,贫矿多,富矿少,大多数磷矿须通过选矿富集得到磷精矿之后,才能满足后续磷化工生产需要[1-3]。湖北省磷矿资源丰富,主要以沉积型磷块岩和沉积-变质型磷灰石为主,选矿难度大且选矿成本高[4]。

磷矿浮选脱硅药剂主要以胺类捕收剂为主,常用的有伯胺类、叔胺、季铵、醚胺类捕收剂[5]。自1903年浮选法诞生至今,十二胺是最早且最多运用在工业上的磷矿脱硅捕收剂,但十二胺的水溶性不好,浮选的泡沫黏度高,流动性差,因而十

收稿日期:2023-11-24
基金项目:湖北省技术创新专项(2020BED030)
作者简介:陈友顺,硕士研究生。Email:17375685623@163.com
***通信作者**:丁一刚,博士,教授。Email:ygding@wit.edu.cn
引文格式:陈友顺,徐廷航,张逸,等.酰基季铵盐脱硅捕收剂的合成与应用[J].武汉工程大学学报,2024,46(2):119-124.

二胺应用在浮选脱硅方面有局限性[5-7]。为了解决这一问题，研究人员开发了醚胺类捕收剂，以（—O—CH_2—）极性基团插入脂肪胺中，使得药剂在水中溶解度变大。然而醚胺捕收剂相较十二胺，泡沫黏稠现象并未得到很大改善，而且生物降解性能较差，合成原料丙烯腈有剧毒[8-9]。通常这两种捕收剂在高硅镁反浮选中需在弱碱性矿浆条件下进行浮选，导致了双反浮选工艺需要对矿浆pH进行调整，将酸性调至碱性，增加了选矿厂回水和药剂成本负担。因此，开发一种在水中溶解性好、适应酸性矿浆条件、捕收性能强的反浮选药剂对中低品位胶磷矿资源的高效利用有重大意义。

常用捕收剂的分子一般由碳原子个数大于10的非极性长碳链和极性的亲固基团构成，亲固基团包括—NR_2、—SR、COO—等。对于含氮亲固基团的磷矿脱硅捕收剂，浮选脱硅的作用机理是矿浆中硅酸盐矿物颗粒表面的动电位为负，捕收剂分子能产生季铵（—NR_3^+）阳离子基团，使得捕收剂分子能以静电作用的方式吸附在硅酸盐矿物颗粒表面，再由于捕收剂的长链碳链，使其有可浮性，所以捕收剂分子易于阳离子化会增强与硅酸盐矿物的静电吸附作用[10-12]。李光音[13]采用分子动力学模拟的方法，对相同链长不同头基的胺（伯胺、仲胺、叔胺以及季胺）类捕收剂与石英表面的相互作用能进行考察，以及量子化学计算，并将不同胺类作为捕收剂来对硅酸盐矿物进行浮选验证，计算及浮选结果表明胺类捕收剂的头基对浮选效果影响较大，其对所选硅酸盐矿物表面的浮选作用强弱顺序为：季胺>叔胺>仲胺>伯胺。周琼波等[14]探究了不同胺类捕收剂对石英单矿物的浮选，发现季铵盐捕收剂适应pH范围较广，浮选石英效果最好。有文献报道酰胺阳离子捕收剂具有水溶性好、毒性低、容易降解等优点[7]。

因此，本研究设计合成出一种反浮选脱硅捕收剂XN-12，其为含酰基的季铵盐，先以XN-12为石英捕收剂对石英进行正浮选实验，探究其是否具有脱硅能力，进而以XN-12为反浮选脱硅捕收剂对中低品位高硅质胶磷矿进行反浮选实验，以磷精矿中P_2O_5品位提至30%以上、磷回收率高于80%为目标，探究XN-12反浮选脱硅的药剂制度。同样以十二胺为反浮选脱硅捕收剂对中低品位高硅质胶磷矿进行反浮选实验，比较XN-12与十二胺的浮选性能，最终评估XN-12对中低品位高硅质胶磷矿的反浮选脱硅性能。

1 实验部分

1.1 试剂及原料

实验用化学试剂均为分析纯试剂，十二酰氯、溴乙烷、二甲氨基丙胺、三聚磷酸钠（sodium tripolyphosphate，STPP）、十二胺等试剂由上海麦克林生化科技有限公司提供，二氯甲烷、异丙醇、乙酸乙酯等试剂由西陇科学股份有限公司提供，石英砂由郑州派尼化学试剂厂生产提供。

石英砂需将其预处理才可进行浮选实验，先进入陶瓷球磨机进行细磨，再用75 μm和38 μm标准试样筛进行湿筛，取得粒径38~75 μm的样品，用体积分数为10%的盐酸搅拌浸泡1 d后过滤，再用乙醇洗涤，烘干备用。将经盐酸浸泡处理前后的石英砂进行X-射线衍射（X-ray diffraction，XRD）表征，与SiO_2标准卡片的数据进行比较，结果如图1所示。

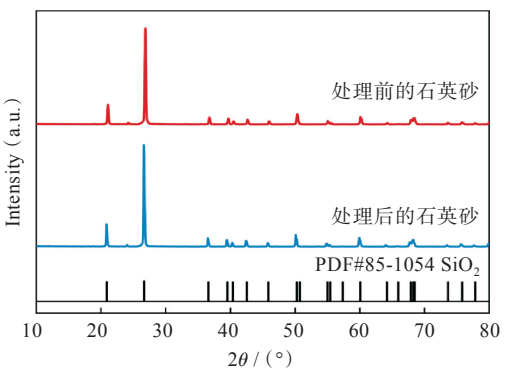

图1 处理后石英砂的XRD谱图

Fig. 1 XRD patterns of quartz sand after treatment

由图1可知，经处理前后的石英砂与标准卡片的XRD谱图基本一致，说明经盐酸处理并不会对石英砂造成影响，可作为纯矿物浮选的试验对象。

实验用硅镁质胶磷矿由湖北某磷矿公司提供。对矿样进行全元素分析，分析结果如表1所示。

从表1可知，该磷矿P_2O_5品位25.74%，SiO_2品位16.33%，可作为单一反浮选脱硅的试验对象。

1.2 浮选药剂的合成

以十二酰氯、二甲氨基丙胺、溴乙烷为反应物，在一定条件下合成目的产物。反应原理如图2所示。

合成步骤：将三口烧瓶置于0~5 ℃冰水浴中，加入一定量的二甲氨基丙胺（$C_5H_{14}N_2$），以适量二氯甲烷溶解，称取物质的量为二甲氨基丙胺1.2倍的十二酰氯，也以适量二氯甲烷溶解于恒压漏斗中，搅拌下缓慢滴加，滴加结束后搅拌回流6 h。反

表1　硅镁质胶磷矿化学组成分析

Tab. 1　Chemical composition analysis of siliceous magnesium phosphate rock　%

成分	P_2O_5	SiO_2	MgO	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	F	Na_2O	TiO_2
质量分数	25.74	16.33	2.18	43.73	4.29	1.99	1.84	1.47	0.63	0.37

应结束后,用适量质量分数为5%的碳酸氢钠溶液洗涤,将分液得到的下层油相继续洗涤3次,除去反应混合物中盐酸和未反应的二甲氨基丙胺。将洗涤后得到的下层油相加入适量无水硫酸镁,除去油相中在洗涤时夹杂的水,过滤后再减压蒸馏去除油相中的溶剂,最后得到淡黄色的中间产物酰胺。

在四口烧瓶中加入一定量的酰胺,以适量异丙醇溶解,在氮气保护下,升高至反应温度60 ℃,缓慢加入摩尔数是中间产物的2倍的溴乙烷,搅拌回流8 h。反应结束后,将烧瓶内产物移至单口烧瓶内进行旋蒸,除去未反应完的溴乙烷和溶剂,以乙酸乙酯重结晶3次,过滤,低温烘干,得到乳白色固体即为目标产物,将其命名为XN-12,活性物质(季铵盐)的化学名称为十二烷酰胺丙基二甲基乙基溴化铵。

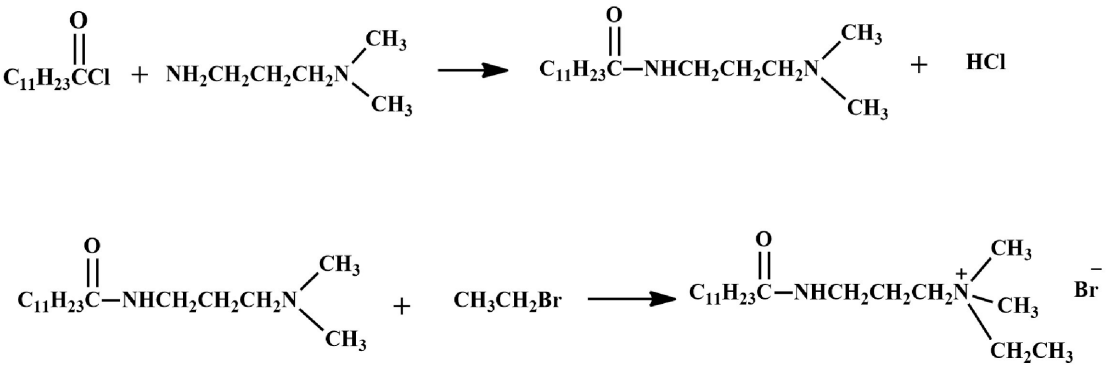

图2　酰基季铵盐XN-12合成步骤

Fig. 2　Synthesis steps of acyl quaternary ammonium salt XN-12

1.3　方　法

1.3.1　*石英纯矿物浮选试验*　使用SFG挂式浮选机进行石英砂纯矿物浮选。称取3.0 g的38~75 μm粒径的矿样置于50 mL的浮选槽中,加入蒸馏水,打开搅拌开关,在转速1 800 r/min下,调浆1 min,迅速调节pH值至中性,继续搅拌1 min后加入配制好的XN-12溶液,再搅拌3 min,打开进气口,控制通气量为0.45 L/min,开始刮泡,收集泡沫产品。浮选结束后将收集到的泡沫产品进行消泡、过滤、干燥、称重并计算回收率。

1.3.2　*硅镁质胶磷矿浮选试验*　将1 kg磷矿与1 kg自来水加入XMB-67球磨机研磨,矿物颗粒细度为−75 μm粒径质量分数约占80%,再用XSHF-2-3湿式分样机进行分样,均分成6份。取1份矿样置于XFD 0.75 L单槽浮选机的浮选槽中,用自来水调制成固液比为1.0∶3.5的矿浆,打开搅拌开关,进行反浮选脱硅试验。在2 100 r/min的转速下,搅拌调浆3 min,先加入抑制剂STPP溶液,以HCl溶液调节pH值,再搅拌2 min,最后加入XN-12溶液,再搅拌5 min,打开气阀开关,刮泡。浮选流程如图3所示。

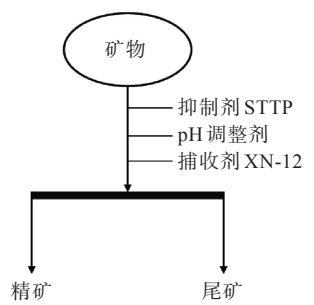

图3　XN-12捕收剂的反浮选流程

Fig. 3　Reverse flotation process of XN-12 collector

对浮选结束后的磷精矿和磷尾矿分别进行过滤、干燥、称质量及分样操作,化验五氧化二磷品位和二氧化硅含量,计算磷精矿产率、磷回收率和脱硅率。

2　结果与讨论

2.1　药剂的红外谱图分析

XN-12捕收剂红外谱图如图4所示,图中3 322.65、1 548.22 cm^{-1}分别是酰胺(—CONH—)中氮氢键(N—H)的伸缩振动峰和弯曲振动峰,2 916.24、2 847.40 cm^{-1}为亚甲基(—CH_2—)和甲基

(—CH_3)中碳氢键(C—H)的伸缩振动峰,1 639.28 cm^{-1}处为酰胺(—CONH—)中羰基(C=O)的伸缩振动吸收峰,1 470.49 cm^{-1}处为亚甲基(—CH_2—)中碳氢键(C—H)的弯曲振动吸收峰,1 248.41、1 019.67 cm^{-1}处为碳氮键(C—N)的特征吸收峰,975.25、684.33 cm^{-1}处为季铵基[—$N^+(CH_3)_2$]的特征吸收峰。这些红外特征吸收峰表示的结构与目标产物的结构基本吻合。

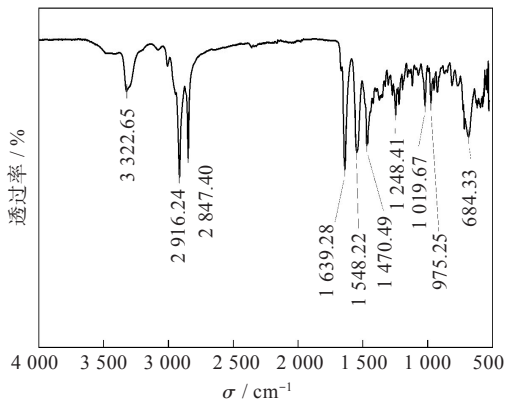

图4 XN-12的红外谱图分析

Fig. 4 Infrared spectrum analysis of XN-12

2.2 石英纯矿物浮选实验

2.2.1 *不同XN-12用量对石英单矿物浮选影响* 以中性蒸馏水调制石英矿浆,改变捕收剂XN-12用量,探究捕收剂XN-12的用量对石英可浮性的影响,XN-12的用量依次为0.05、0.10、0.25、0.50、0.75、1.00 mmol/L,试验结果如图5所示。

由图5可知,在矿浆为中性条件下,当XN-12的用量为0.05 mmol/L时,石英回收率仅为78.43%,增加用量至0.10 mmol/L时,石英回收率达到99.04%,继续增加XN-12的用量至1.0 mmol/L,石英回收率无明显改变,但石英回收率总体在98.5%以上。说明在中性矿浆条件下,以XN-12为捕收剂浮选石英有良好的效果。

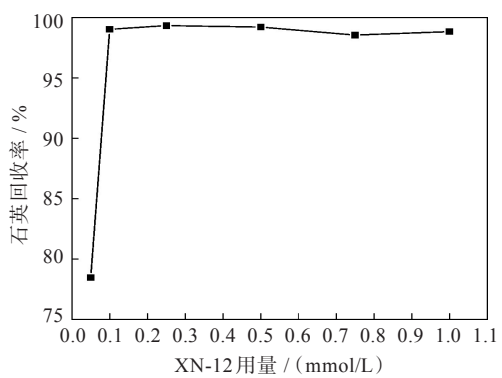

图5 XN-12用量对石英回收率的影响

Fig. 5 The effect of XN-12 dosage on quartz recovery rate

2.2.2 *不同pH对石英纯矿物浮选的影响* 选取XN-12捕收剂用量在0.10 mmol/L,改变石英矿浆的pH,探究矿浆pH对石英可浮性的影响,矿浆pH值分别调节为1、3、5、7、9,试验结果如图6所示。

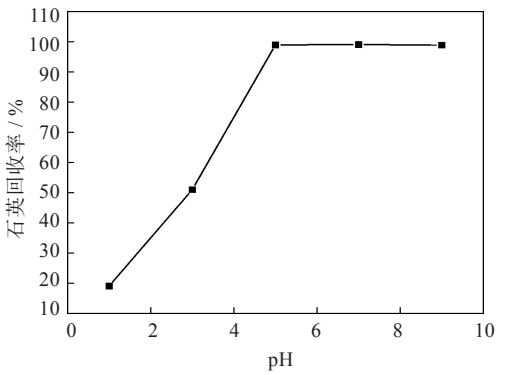

图6 不同矿浆pH条件下XN-12对石英矿物浮选的影响

Fig. 6 The effect of XN-12 on quartz mineral flotation under different pulp pH conditions

从图6中可知,当矿浆pH=1时,石英的回收率仅18.24%。当pH上升到3时,石英回收率上升至50.78%,继续增加pH,当pH>=5时,石英回收率在98.5%以上。

上述研究结果与报道的纯水中石英的零电点在2.0~3.7之间有关[15-16]。当纯水体系pH<3时,石英表面荷正电,阳离子捕收剂很难吸附在表面荷正电的石英矿物表面达到浮选效果。

综上所述,理论上,酰基季铵盐可以在矿浆pH>5的条件下浮选石英,且对石英有较好的浮选效果。

2.3 硅镁质胶磷矿脱硅条件实验

2.3.1 *XN-12捕收剂用量实验* 在抑制剂三聚磷酸钠用量为4.0 kg/t,矿浆pH=5.6时,改变捕收剂XN-12的用量,依次为0.3、0.6、0.9、1.2、1.5 kg/t进行浮选实验,实验结果如图7所示。

由图7可知,当XN-12用量从0.3 kg/t逐渐增加至1.5 kg/t,精矿P_2O_5品位从27.21%增加到31.38%,精矿SiO_2品位从13.56%下降至4.95%,脱硅率从25.83%提高到83.48%,但是,P_2O_5回收率从95.04%降至62.57%。XN-12用量在0.9、1.2、1.5 kg/t时,精矿P_2O_5品位分别达到30.19%、30.92%、31.38%,虽然脱硅率一直在增大,但捕收剂用量在1.5 kg/t时,P_2O_5回收率为62.57%,低于70%。

综上所述,选择XN-12捕收剂用量为0.9、1.2 kg/t来研究抑制剂STPP的用量对浮选脱硅指标的影响。

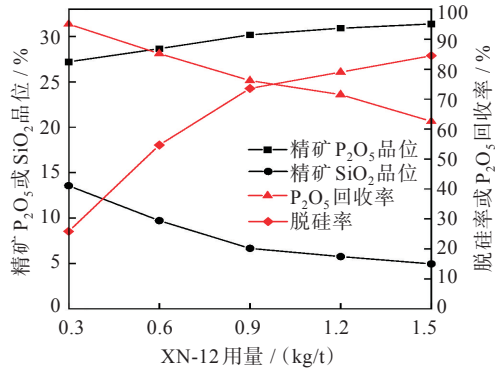

图7　XN-12用量对浮选指标的影响

Fig. 7　The effect of XN-12 dosage on flotation index

2.3.2　抑制剂用量实验　（1）在XN-12用量为0.9 kg/t，矿浆pH=5.6时，STPP用量从3.0 kg/t增加到7.0 kg/t，浮选结果如图8所示。

从图7中可以看出，随着STPP用量从3.0 kg/t增加到7.0 kg/t，尾矿 P_2O_5 品位不断减小，精矿产率不断增大，产率从60.32%增至76.86%，P_2O_5 回收率也随之上升，回收率从70.72%增大到86.97%。当STPP用量在4.0 kg/t时，精矿 P_2O_5 品位出现极大值30.19%，P_2O_5 回收率为76.21%，低于80%，但再增大当STPP的用量，当STPP用量大于4.0 kg/t时，虽然 P_2O_5 回收率有所增加，但精矿 P_2O_5 品位开始低于30%。

因此，当XN-12捕收剂用量在0.9 kg/t时，通过考察STPP用量对指标的影响可知，虽然精矿 P_2O_5 品位能达到理想指标，即精矿 P_2O_5 品位大于30%，但对应的 P_2O_5 回收率（<80%）并不理想。

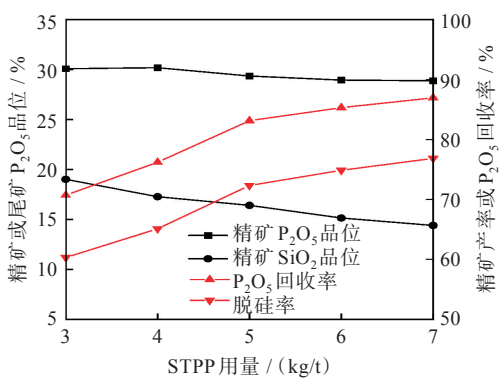

图8　STPP用量对XN-12用量为0.9 kg/t浮选指标的影响

Fig. 8　The effect of STPP dosage on flotation index of XN-12 dosage of 0.9 kg/t

（2）在XN-12用量为1.2 kg/t，矿浆pH=5.6时，STPP用量依次为0、3.0、4.0、5.0、6.0、7.0 kg/t，实验结果如图9所示。

从图9中可以看出，与未加STPP的实验组对比，STPP用量从0增加至3.0 kg/t，精矿 SiO_2 品位从7.89%减小至5.49%，精矿 P_2O_5 品位从29.57%增大到30.70%，而脱硅率从74.43%增大到80.54%，这说明STPP的加入增强了XN-12对硅酸盐矿物的浮选选择性。继续增大STPP的用量，当STPP用量增加至4.0 kg/t时，精矿 P_2O_5 品位达到最高30.92%，且精矿 SiO_2 品位为5.75%，但 P_2O_5 回收率仅为71.52%。当STPP用量为5.0 kg/t时，P_2O_5 回收率81.6%，精矿 P_2O_5 品位30.31%，再继续增大STPP的用量，精矿 P_2O_5 品位均小于30%。

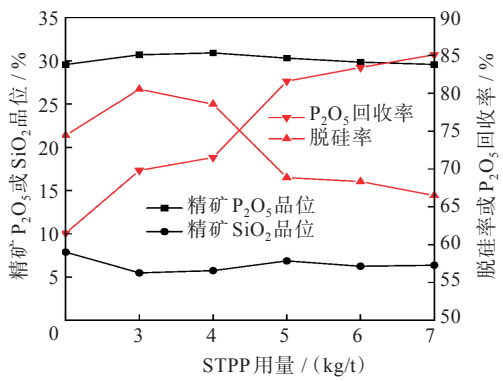

图9　STPP用量对XN-12用量为1.2 kg/t浮选指标的影响

Fig. 9　The effect of STPP dosage on flotation index of XN-12 dosage of 1.2 kg/t

综合考虑，在矿浆pH=5.6，XN-12的用量为1.2 kg/t时，抑制剂三聚磷酸钠的最佳用量为5.0 kg/t，在此药剂制度下，可获得精矿 P_2O_5 品位30.31%，P_2O_5 回收率81.60%，脱硅率69.12%的良好指标。

2.3.3　与十二胺捕收剂浮选指标对比　十二胺不溶于水，加入醋酸将其配成质量分数为2%的十二胺醋酸盐溶液。由于十二胺在磷矿浮选中通常适合在弱碱性矿浆中进行浮选，因此用 Na_2CO_3 溶液将矿浆调至pH=9.8。而XN-12捕收剂的设计旨在酸性条件下进行脱硅浮选，所以用对矿物没有抑制作用的盐酸将矿浆调至酸性条件，再进行浮选。

STPP用量在5.0 kg/t，由于两种捕收剂的相对分子质量不同，考虑到捕收剂的浮选与捕收剂分子的数量有关，固定这两种捕收剂在矿浆中的分子数量，即摩尔量。十二胺相对分子量仅185.35，酰基季铵盐的相对分子量为393.45，所以固定十二胺的用量在0.56 kg/t。

从表2中可以看出，当STPP用量和矿浆中捕收剂分子数量一定时，十二胺浮选的精矿 P_2O_5 品位29.85%、SiO_2 品位9.61%，相比XN-12浮选的精矿指标：P_2O_5 品位30.31%、SiO_2 品位7.26%，十二胺的浮选指标不太理想，而且十二胺浮选泡沫黏稠现象比XN-12的更为严重。

XN-12可以在酸性条件下进行选矿，相较于传统伯胺类捕收剂需在弱碱性条件下脱硅，使用XN-12捕收剂将节省选矿成本，在硅镁质磷矿双反浮选中不再需求进行酸碱调节，也便于选矿厂的回水利用。

2.3.4 XN-12浮选精矿化学成分分析 从表3中可以看出，与原矿对比，精矿中的SiO_2品位明显下降了9.1%，P_2O_5品位>30%。精矿中MgO和CaO的质量分数相比原矿中的要高，说明XN-12捕收剂对碳酸盐矿物并无浮选作用。数据表明，XN-12与STPP在磷矿反浮选“提磷降硅”过程中起到较好的协调作用。

表2 两种不同脱硅药剂的浮选指标

Tab. 2 Flotation indexes of two different desilication reagents

捕收剂	STPP用量/(kg/t)	pH	捕收剂用量/(kg/t)	精矿P_2O_5品位/%	精矿SiO_2品位/%	P_2O_5回收率/%
XN-12	5.0	5.6	1.2	30.31	7.26	81.60
十二胺	5.0	9.8	0.56	29.85	9.61	84.70

表3 原矿与精矿化学成分分析

Tab. 3 Analysis of Chemical Composition of Raw Ore and Concentrate %

矿物类别	各成分质量分数									
	P_2O_5	SiO_2	MgO	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	F	Na_2O	TiO_2
原矿	25.74	16.33	2.18	43.73	4.29	1.99	1.84	1.47	0.63	0.37
精矿	30.31	7.26	2.34	53.38	1.74	1.40	0.73	2.36	0.68	0.21

3 结 论

(1)以酰基季铵盐XN-12为石英捕收剂对石英进行单矿物正浮选实验，结果显示，XN-12对石英有着较好的捕收性能，且XN-12还能在酸性(pH>5)矿浆条件下有效地浮选石英。

(2)以P_2O_5品位为25.74%、SiO_2品位为16.33%的高硅质胶磷矿为矿样，在矿物颗粒细度为−75 μm粒径的质量分数约占80%，以酰基季铵盐XN-12为反浮选脱硅捕收剂，XN-12捕收剂用量1.2 kg/t，STPP抑制剂用量为5.0 kg/t和矿浆pH为5.6的条件下，可获得P_2O_5品位30.31%和SiO_2品位7.26%的磷精矿，其P_2O_5回收率为81.60%、脱硅率为69.12%。

(3)当硅镁磷矿双反浮选脱硅过程使用XN-12捕收剂时，矿浆pH为酸性，正好在反浮选脱镁工艺较佳的矿浆pH为酸性条件下，说明在硅镁质磷矿双反浮选中直接使用XN-12进行脱硅，可节省选矿成本，不需要将矿浆pH再进行酸碱调节，也便于选矿厂的回水利用。

参考文献

[1] 朱秀雯，黄沙，高远，等. 某低品位磷矿工艺矿物学研究[J]. 化工矿物与加工，2023，52(10)：8−14.

[2] 杨稳权，张华，何海涛，等. 磷矿浮选药剂研究进展[J]. 化工矿物与加工，2021，50(11)：29−36.

[3] 罗惠华，张正虎，刘幸，等. 胍基阳离子捕收剂反浮选磷矿的性能与机理分析[J]. 武汉工程大学学报，2021，43(5)：546−550.

[4] 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.

[5] 徐廷航，龙秉文，张逸，等. 磷矿反浮选脱硅药剂的合成与应用[J]. 矿产综合利用，2021(3)：57−63.

[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.

[7] CLARK M E, BRAKE I, HULS B J, et al. Creating value through application of flotation science and technology[J]. Minerals Engineering, 2006, 19(6/7/8)：758−765.

[8] 鄢恒珍. 胺类捕收剂可生物降解性能研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2010.

[9] 葛英勇. 新型捕收剂烷基多胺醚(GE-609)的合成及浮选性能研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2010.

[10] 尧章伟，方建军，张琳，等. 我国胶磷矿浮选工艺及药剂研究进展[J]. 矿产保护与利用，2017(4)：107−112.

[11] 朱一民，杨雪莹，乘舟越洋，等. 不同胺类捕收剂泡沫性能及其机理研究[J]. 金属矿山，2020(7)：99−104.

[12] 翁孝卿. 新型季铵盐脱硅浮选阳离子捕收剂的定向合成与定量构效关系研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2014.

[13] 李光音. 硅酸盐矿物浮选过程中胺类捕收剂捕收性能的量子化学分析研究[D]. 郑州：郑州大学，2018.

[14] 周琼波，韩增辉，龚丽，等. 阳离子胺类捕收剂对石英浮选性能研究[J]. 化工矿物与加工，2017，46(12)：1−3.

[15] ABOUZEID A Z M, NEGM A T, ELGILLANI D A. Upgrading of calcareous phosphate ores by flotation: effect of ore characteristics[J]. International Journal of Mineral Processing, 2009, 90(1/2/3/4)：81−89.

[16] FUERSTENAU D W, PRADIP. Zeta potentials in the flotation of oxide and silicate minerals[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2005, 114/115：9−26.

本文编辑：张 瑞