

# 氨基三亚甲基膦酸在胶磷矿反浮选中的抑制性能及其机制研究

刘闽新<sup>1</sup>, 罗惠华<sup>1</sup>, 肖庆渝<sup>1</sup>, 王学岚<sup>1</sup>, 蔡忠俊<sup>1,2,3</sup>, 杨稳权<sup>2,3</sup>

(1. 武汉工程大学 资源与安全工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 云南磷化集团有限公司, 云南 昆明 650600;  
3. 国家磷资源开发利用工程技术研究中心, 云南 昆明 650600)

**[摘要]** 以宜昌钙质磷矿为实验对象, 采用单一反浮选工艺对乙二胺四亚甲基膦酸钠、羟基乙叉二膦酸钠、2-膦酸丁烷-1,2,4-三羧酸 (PBTCA)、多氨基多醚基亚甲基膦酸、二乙烯三胺五甲叉膦酸、氨基三亚甲基膦酸 (ATMP) 6种小分子有机膦酸或其盐的抑制效果进行研究。研究表明, ATMP对磷矿物的抑制效果较好, 其次是PBTCA。介绍ATMP作为浮选抑制剂的抑制机制。采用单一反浮选一次粗选、一次扫选、中矿返回粗选的闭路流程, 在磨矿细度 $\leq 0.074$  mm占比为60.8%, 粗选硫酸、ATMP、捕收剂LAA-T用量分别为12、1.0、0.9 kg/t, 扫选硫酸用量为3.0 kg/t条件下, 获得的精矿 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 回收率、 $w(\text{MgO})$  分别为31.65%、97.49%、0.75%; 尾矿 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$  为3.12%。

**[关键词]** 胶磷矿; 反浮选; ATMP; 抑制性能

**[中图分类号]** TD97 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2025) 03-0019-05

## Depressing capability of ATMP in the reverse flotation of colophonite and its mechanism

LIU Minxin<sup>1</sup>, LUO Huihua<sup>1</sup>, XIAO Qingyu<sup>1</sup>, WANG Xuelan<sup>1</sup>, CAI Zhongjun<sup>1,2,3</sup>, YANG Wenquan<sup>2,3</sup>

(1. School of Resources & Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China; 2. Yunnan Phosphate Group Co., Ltd., Kunming 650600, China; 3. National Engineering and Technology Research Center for Development and Utilization of Phosphorus Resources, Kunming 650600, China)

**Abstract:** A comparative study is conducted on the inhibitory effects of six small molecule organic phosphonic acids, namely sodium ethylenediaminetetramethyl phosphonate, trisodium hydroxyethyl diphosphonate, 2-phosphate-1,2,4-tricarboxylic acid (PBTCA), polyamino polyether methylene phosphonic acid, diethylenetriamine pentamethylphosphonic acid, and amino trimethylene phosphonic acid (ATMP), using Yichang calcium phosphate ore as the experimental object through single reverse flotation. The research results indicate that ATMP has a good inhibitory effect on phosphate minerals, followed by PBTCA. The inhibition mechanism of ATMP is introduced. A closed-loop process is adopted with a single reverse flotation, one coarse selection, one scavenging, middle ore returning to the coarse selection. When the grinding fineness  $\leq 0.074$  mm accounts for 60.8%, the amount of sulfuric acid, ATMP, collector LAA-T in coarse selection are 12, 1.0 and 0.9 kg/t, respectively, and the amount of sulfuric acid added for scavenging is 3.0 kg/t, the obtained concentrate grade,  $\text{P}_2\text{O}_5$  recovery rate and  $w(\text{MgO})$  are 31.65%, 97.49% and 0.75% respectively; While the concentration of  $\text{P}_2\text{O}_5$  in the tailings is only 3.12%.

**Key words:** colophonite; reverse flotation; ATMP; depressing capability

## 0 引言

磷矿资源是一种不可再生且无法替代的非金属战略性矿产资源。我国共有26个省拥有磷矿资源, 集中分布在鄂、湘、川、黔、滇5省, 即华中地区和西南地区, 形成了湖北荆襄、保康、宜昌, 贵州瓮福、开阳, 云南滇中, 四川马边-雷波、德阳八大磷矿生产基地<sup>[1]</sup>。我国磷矿丰而不富, 贫矿多, 富矿少, 难选矿多, 易选矿少, 国内磷矿近90.8%为中低品位磷矿, 平均 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 仅

16.85%。胶磷矿是我国磷矿资源的主要类型, 约占全国总储量的70%<sup>[2]</sup>, 大部分磷矿只有通过分离富

**[收稿日期]** 2025-01-15

**[作者简介]** 刘闽新(2000-), 男, 湖北恩施人, 在读硕士研究生, 研究方向为矿物加工工程。

**[通信作者]** 罗惠华(1968-), 男, 湖北武汉人, 教授, 研究方向为磷矿选矿理论与药剂、矿产资源综合利用。

**[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, 2022ACA004); 武汉工程大学研究生教育创新基金项目(CX2023188)

集之后,才能作为磷肥、磷化工以及新能源材料等的初加工原料。现阶段,我国磷矿选矿以浮选为主,浮选过程中,除了采用捕收剂之外,同时需要添加调整剂,为了提高分选的选择性,不论是正浮选还是反浮选,往往需要添加抑制剂。胶磷矿的浮选抑制剂按作用可以分为正浮选抑制剂和反浮选抑制剂2种,正浮选常用的抑制剂为以水玻璃为主的无机抑制剂,这类抑制剂的作用是抑制硅酸盐脉石矿物,为了同时抑制碳酸盐矿物,往往需要加入有机抑制剂,目前高分子磺酸盐以及S系列抑制剂等是较为成熟的脉石矿物抑制剂,已成功应用于国内大峪口磷矿、宜昌磷矿、黄麦岭磷矿,以及阿尔巴尼亚某地磷矿等。在胶磷矿反浮选中,常用硫酸和磷酸对磷矿物进行抑制,也可利用磷酸衍生物W-98、小分子有机酸PT-4作为抑制剂进行抑制<sup>[3-4]</sup>,较好地实现了目的矿物与脉石的分离,但是这类药剂依然存在选择性较差、反浮选尾矿磷含量偏高、用量大的问题,需要寻求选择性较好以及低用量的抑制剂。由于小分子有机磷酸是一类通式为 $R-P(=O)(OR)_2$ 的化合物,其中R是烷基或芳基。它们是有机磷化合物的一种,含有碳-磷键,具有多种亲水基团,对某些离子具有螯合作用,受到选矿工作者的关注。氨基三亚甲基膦酸(ATMP)是一种环保型螯合剂,在循环水处理和清洗设备中应用广泛<sup>[5]</sup>。在浮选领域ATMP既可作为利蛇纹石的抑制剂用于浮选分离镍黄铁矿,也可作为抑制剂从方解石中浮选分离菱锌矿。鉴于ATMP极强的螯合能力,ATMP有望成为浮选分离菱镁矿和白云石的有效抑制剂<sup>[6]</sup>。目前,反浮选中利用小分子有机膦酸作为抑制剂的研究还比较缺乏,为了研究此类小分子有机膦酸在反浮选中抑制磷矿的作用,以宜昌钙质磷矿为研究对象,采用小分子有机膦酸及其盐作为抑制剂,研究其种类和用量对选矿效果的影响。

## 1 实验样品、药剂及设备

### 1.1 实验矿样

矿样取自湖北神农架林区寨湾磷矿,矿石中有用矿物为隐晶质磷灰石和胶磷矿,脉石矿物主要为白云石、黏土矿物、石英、钾长石等,矿石主要有益组分为 $P_2O_5$ ,主要有害组分为 $MgO$ 、 $Fe_2O_3$ 、 $Al_2O_3$ 。其中 $w(P_2O_5)$ 为17.07%~28.37%, $w(MgO)$ 为0.35%~10.93%, $w(Fe_2O_3)$ 为0.46%~2.93%, $w(Al_2O_3)$ 为0.87%~7.27%。

矿石主要结构有胶状结构、砂屑结构、团粒结

构、核形石结构、假鲕粒结构、含砂泥质结构、微晶结构等。矿石主要构造有块状构造、条带状构造、条纹状构造、层状构造等。

磷灰石为主要磷酸盐矿物,分为粒状和纤维状两种。晶粒大小一般为0.01~0.03 mm,少数可达0.60 mm。纤维状磷灰石多分布于泥硅质磷块岩内。

胶磷矿多呈凝胶状、团块状、砂屑状、不规则球粒状,内含微粒包裹体,主要为石英、白云石、方解石、黏土矿物以及铁质有机质等。

白云石多与磷酸盐矿物相间,呈条纹、条带状,或为云质砂屑,或为生物遗骸,或呈白云石细脉穿切于磷灰岩内,嵌布粒度为0.01~0.60 mm。

石英多集中于泥硅质矿石中,按其形状可分为棱角状、次滚圆状和显微粒状,粒度为0.01~0.40 mm。

入选矿石多元素分析结果(平均值)见表1。

表1 矿石多元素分析结果

$w(P_2O_5)$	$w(SiO_2)$	$w(Fe_2O_3)$	$w(CaO)$	$w(MgO)$	$w(Al_2O_3)$	$w(CO_2)$	$w(F)$
25.45	12.08	1.20	39.52	4.27	0.83	10.63	2.13

### 1.2 试剂及设备

实验反浮选流程中采用硫酸作为pH调整剂,磷酸以及氨基三亚甲基膦酸(ATMP)作为抑制剂,LAA-T作为捕收剂。实验所用设备主要有XMB-67型 $\phi 200\text{ mm} \times 240\text{ mm}$ 棒磨机,XFD-0.5 L单槽浮选机,XSHF-2-3型湿式分样机,RK/ZL $\phi 260\text{ mm}/\phi 200\text{ mm}$ 多功能真空过滤机,101-4A型电热鼓风干燥箱,WMZ-200数显温度计。

### 1.3 实验过程

原矿先使用颚式破碎机粗碎、筛分后,使用对辊式破碎机细碎至粒度2 mm以下,混匀后以堆锥与环锥法分样、装袋备用,每袋1.0 kg。浮选实验前使用XMB-67型 $\phi 200\text{ mm} \times 240\text{ mm}$ 棒磨机进行磨矿,磨矿矿浆 $w(\text{固})$ 为50%,磨好的矿样利用XSHF-2-3型湿式分样机分成6份,采用XFD-0.5 L型单槽浮选机进行浮选,通过单因素实验确定浮选的药剂制度,浮选时,其他参数设定如下:叶轮转速2 000 r/min,充气量60~80 L/h。所得精矿和尾矿产品经过滤、烘干、称量、制样后,采用钼酸铵容量法分析 $P_2O_5$ 品位,并计算 $P_2O_5$ 回收率以及选矿效率(选矿效率=回收率-产率)<sup>[7]</sup>。

## 2 实验结果与分析

钙质磷矿反浮选脱镁过程中,常常采用硫酸为pH调整剂、阴离子脂肪酸皂作为捕收剂,在弱酸

介质中浮选白云石矿物，降低磷精矿中的MgO含量。磷酸以及磷酸的衍生物作为磷矿物的抑制剂时，根据磷酸的解离常数，pH=5.0~5.5时，磷酸主要以 $H_2PO_4^-$ 形态存在，吸附在磷矿物表面阻止了阴离子捕收剂的吸附<sup>[8]</sup>。采用一次粗选单因素实验，确定了此磷矿反浮选的磨矿细度为 $\leq 0.074$  mm占60.8%，粗选硫酸以及捕收剂LAA-T的用量分别为12、0.9 kg/t。

### 2.1 有机膦酸抑制剂对浮选指标的影响

有机膦酸分子是含有一个P—C键或P—H键，同时含有一个膦酰基的四配位磷化合物，具有较强的络合性能，不易水解，表现出一定的酸性，且分子中含有多种亲水基团，表现出基于此类膦酸的诸多特性，在磷矿反浮选中，对乙二胺四亚甲基膦酸钠（EDTMPS）、羟基乙叉二膦酸四钠（HEDP-4Na）、2-膦酸丁烷-1, 2, 4-三羧酸（PBTCA）、多氨基多醚基亚甲基膦酸（PAPEMP）、二乙烯三胺五甲叉膦酸（DTPMPA）、氨基三亚甲基膦酸（ATMP）6种小分子有机膦酸或其盐的抑制效果进行对比研究。

#### 2.1.1 抑制剂用量对精矿以及尾矿品位的影响

以6种不同的有机膦酸或其盐为抑制剂，在相同的反浮选条件下，进行一次粗选实验，研究其用量对浮选精矿以及尾矿品位的影响，实验结果分别见图1、图2。

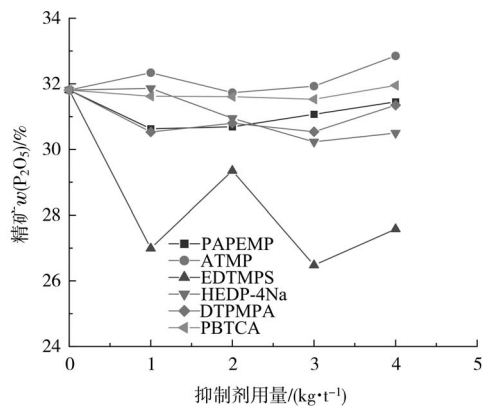


图1 抑制剂用量对精矿品位的影响

Fig.1 Effect of inhibitor dosage on grade of concentrate

从图1、图2可以看出，在反浮选中，只添加硫酸时，可调整矿浆的pH为酸性，同时酸解磷矿物，产生的磷酸根离子起到抑制磷矿物的作用，添加硫酸用量为12 kg/t，精矿 $w(P_2O_5)$ 为31.81%，尾矿的 $w(P_2O_5)$ 为12.71%，尾矿品位较高。当添加EDTMPS作为反浮选磷矿物的抑制剂，精矿 $w(P_2O_5)$ 在30%以下，低于其他的药剂，在用量低于3.0 kg/t

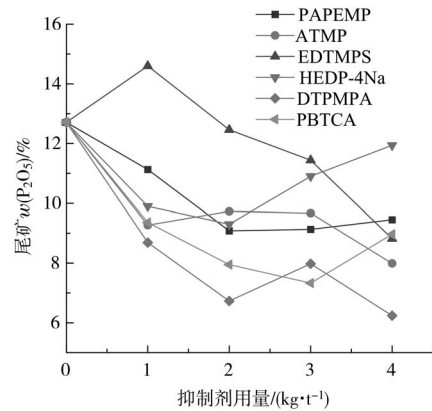


图2 抑制剂用量对尾矿品位的影响

Fig.2 Effect of inhibitor dosage on grade of tailings

时，尾矿 $w(P_2O_5)$ 在12%以上，当用量在4.0 kg/t时尾矿 $w(P_2O_5)$ 为8.82%，表明此药剂抑制磷矿物能力较差；当HEDP-4Na用量在1~2 kg/t时，精矿 $w(P_2O_5)$ 在31%以上，增加用量时，精矿 $w(P_2O_5)$ 在30%左右波动，且尾矿的品位逐渐升高，说明HEDP-4Na抑制磷矿的性能较弱。其他4种抑制剂PBTCA、PAPEMP、DTPMPA、ATMP对磷矿物有较好的抑制性能，随着用量增加，精矿的品位整体上呈逐渐增大趋势，尾矿品位整体上呈逐渐下降趋势。当PAPEMP、DTPMPA用量均为1~4 kg/t时，精矿 $w(P_2O_5)$ 在30.5%~31.5%，而前者的尾矿 $w(P_2O_5)$ 偏高，在9%~11%，后者的尾矿 $w(P_2O_5)$ 较低，在6.2%~8.7%。当ATMP、PBTCA作为抑制剂时，其用量为1~4 kg/t时，精矿 $w(P_2O_5)$ 可以达到31.5%以上，尾矿 $w(P_2O_5)$ 则在7.3%~9.8%，说明ATMP、PBTCA能有效抑制磷矿物，提高分选性能。

#### 2.1.2 抑制剂用量对 $P_2O_5$ 回收率以及选矿效率的影响

6种抑制剂的用量对 $P_2O_5$ 回收率以及选矿效率的影响见图3。

从图3可以看出，在反浮选中，只添加硫酸时，由于未添加抑制剂，尾矿 $w(P_2O_5)$ 达到12.71%，尾矿品位较高，精矿 $P_2O_5$ 回收率仅为82.56%。添加硫酸的同时添加小分子有机膦酸或其盐为抑制剂时，在用量为1.0 kg/t时，选矿回收率都在86%以上，采用DTPMPA、EDTMPS、PBTCA、ATMP、HEDP-4Na 5种有机膦酸或其盐为抑制剂进行浮选， $P_2O_5$ 回收率达到了88%以上。且除DTPMPA、HEDP-4Na外，其余处理随着有机膦酸或其盐用量提高， $P_2O_5$ 回收率呈逐渐上升趋势，说明添加此类药剂能有效提高 $P_2O_5$ 回收率。

反浮选中只添加硫酸时，选矿效率仅为17.14%，当EDTMPS为抑制剂时，选矿效率有所

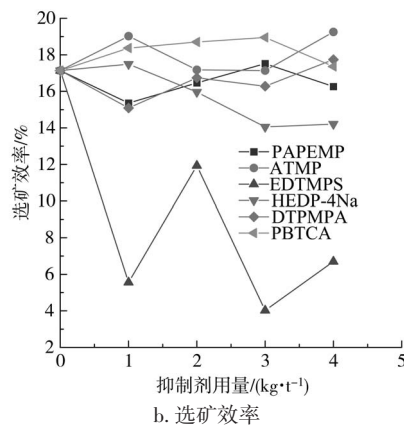
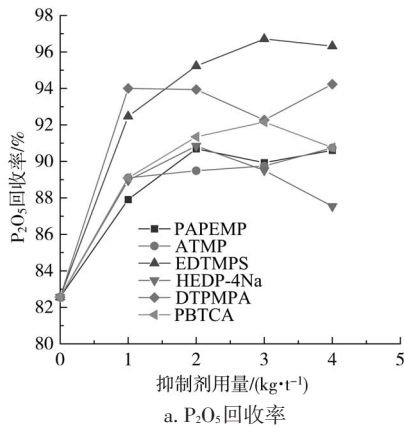


图3 抑制剂用量对P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>回收率以及选矿效率的影响  
Fig. 3 Effect of inhibitor dosage on P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> recovery rate and beneficiation efficiency

降低,进一步说明此药剂的抑制性能较差,不适宜作为磷矿反浮选的抑制剂;HEDP-4Na是一种磷酸的钠盐,选矿效率低于17.14%,抑制效果也不明显;而PAPEMP、DTPMPA为抑制剂时,浮选的选择性也不凸出;ATMP用量在1.0 kg/t时选矿效率达到19.02%,继续增加用量时,选矿效率下降,增至4.0 kg/t时选矿效率提升至19.25%,说明该药剂在低用量时抑制性能较好。PBTCa作为抑制剂时,随着用量增加,选矿效率逐渐上升,当用量为3.0 kg/t时,选矿效率达到18.95%,如果继续增加用量,选矿效率反而下降。

通过实验结果分析,6种有机磷酸或其盐对磷矿的抑制性能不同,ATMP对磷矿物的抑制效果较好,其次是PBTCa,抑制性能较弱的是HEDP-4Na、PAPEMP、DTPMPA,而EDTMPS对磷矿物的抑制效果不明显。

### 2.2 PBTCa、ATMP与磷酸反浮选抑制效果比较

对比反浮选中PBTCa、ATMP与磷酸作为抑制剂时对浮选指标的影响,结果见图4。

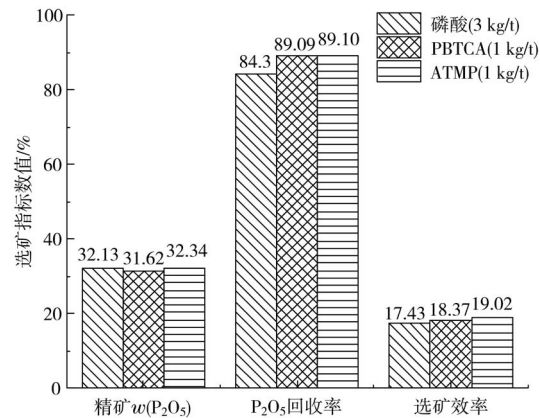


图4 PBTCa、ATMP与磷酸反浮选抑制效果比较  
Fig. 4 Comparison of inhibition effects of PBTCa, ATMP and phosphoric acid in reverse flotation

从图4可以看出,与磷酸作为磷矿反浮选抑制剂相比,2种有机磷酸作抑制剂时,回收率均较磷酸高4.5个百分点以上,选矿效率高0.94个百分点以上,但磷酸作为抑制剂时精矿品位较PBTCa作为抑制剂高0.51个百分点,较ATMP作为抑制剂时低0.21个百分点,三者相差不大。由此可见有机磷酸抑制剂PBTCa和ATMP在用量为1.0 kg/t的抑制效果好于磷酸用量为3.0 kg/t。选择小分子有机磷酸作为抑制剂不仅可以提高选矿指标,而且需要更少的药剂用量。而两种有机磷酸相比,ATMP作为抑制剂进行浮选所得的精矿品位、回收率以及选矿效率均高于PBTCa。

### 2.3 反浮选流程实验

ATMP作为磷矿反浮选抑制剂,它可以抑制磷酸盐矿物与气泡之间的结合能力,从而提高磷酸盐矿物的回收率。此外,ATMP还可以稳定浮选体系,抑制铁、铝等有害离子对反浮选效果的影响,进一步提高了磷酸盐矿物的品位和回收率。由于粗选尾矿品位仍然较高,精矿回收率较低,因此,采用扫选对粗选尾矿进一步浮选,以降低尾矿品位。在磨矿细度为≤0.074 mm占比60.8%,粗选H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、ATMP、LAA-T用量分别为12、1.0、0.9 kg/t,扫选硫酸用量为3.0 kg/t时,将w(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)为25.78%的原矿通过一次粗选一次扫选的反浮选,所获得的精矿w(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)为31.02%,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>回收率为89.43%,尾矿w(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)为4.51%。在此基础上进行了闭路实验,实验的工艺流程见图5,结果见图6。

实验结果表明,采用单一反浮选一次粗选一次扫选中矿顺序返回的闭路流程,在磨矿细度为≤0.074 mm占比60.8%,粗选硫酸、ATMP、捕

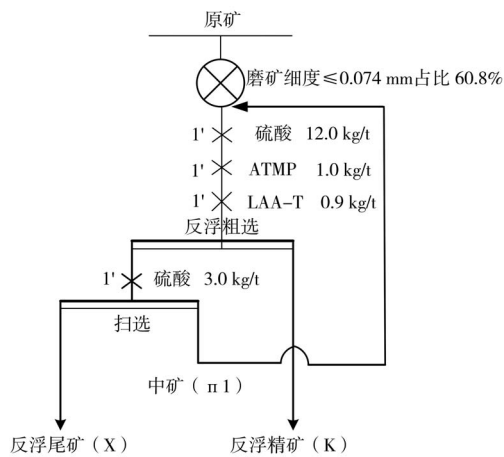


图5 反浮选工艺流程

Fig. 5 Process flow of reverse flotation

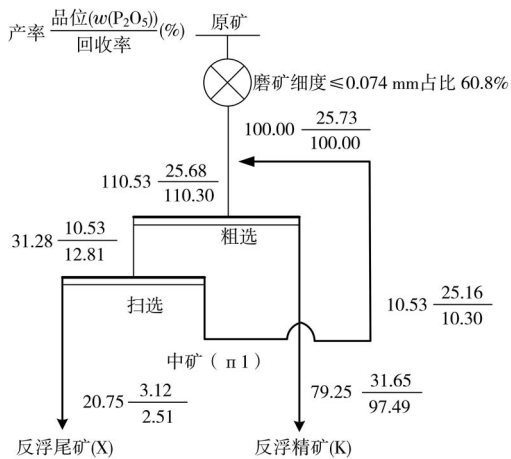


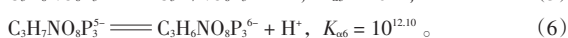
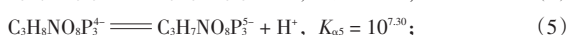
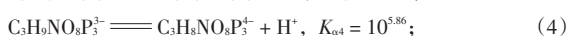
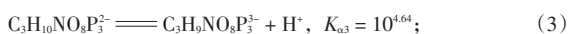
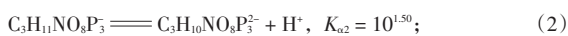
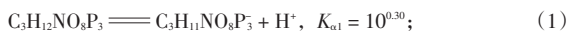
图6 反浮选实验结果

Fig. 6 Results of reverse flotation test

收剂LAA-T用量分别为12、1.0、0.9 kg/t, 扫选硫酸用量为3.0 kg/t条件下, 获得的精矿 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 回收率、 $w(\text{MgO})$ 分别为31.65%、97.49%、0.75%; 尾矿 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 仅为3.12%。

#### 2.4 ATMP作为反浮选抑制剂机制分析

ATMP是一种六元弱酸<sup>[9]</sup>, 在溶液中存在以下水解电离平衡:



根据式(1)至(6)进行了溶液化学计算<sup>[10-12]</sup>, 可知, 当矿浆pH为4~5时, 矿浆中的ATMP主要以ATMP<sup>2-</sup>的形式存在<sup>[9]</sup>。ATMP易与Mg<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup>、Ca<sup>2+</sup>等多种金属离子螯合, 其多磷酸基团ATMP<sup>2-</sup>也

表现出了较强的亲水性<sup>[13]</sup>。白云石表面存在Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>, 在酸性介质中其溶解能力不同, 在pH为4~5时, 白云石溶出的Ca<sup>2+</sup>的浓度约是Mg<sup>2+</sup>的3倍, 反浮选中, 白云石表面的Mg<sup>2+</sup>的数量大于Ca<sup>2+</sup>的数量<sup>[8]</sup>, Mg<sup>2+</sup>是阳离子活性质点, 易与脂肪酸类捕收剂作用, 而磷矿物表面的阳离子主要为Ca<sup>2+</sup>, 氟磷灰石中的Ca位点是浮选药剂的吸附位点, 与脂肪酸类捕收剂作用后的FTIR谱图出现了2 852.26 cm<sup>-1</sup>和2 922.87 cm<sup>-1</sup>两个新峰, 分别代表捕收剂中的—CH<sub>3</sub>和—CH<sub>2</sub>—基团<sup>[14]</sup>, 表明油酸组分吸附在了氟磷灰石表面。但经过ATMP作用过后的氟磷灰石表面在2 852.26 cm<sup>-1</sup>处的特征峰消失, 在2 922.87 cm<sup>-1</sup>处的特征峰强度明显减弱, 说明ATMP<sup>2-</sup>与油酸阴离子(OL<sup>-</sup>)产生竞争吸附, ATMP<sup>2-</sup>占据Ca位点, 减少了OL<sup>-</sup>的吸附位点, 导致氟磷灰石被抑制。而白云石的表面主要为Mg<sup>2+</sup>, 由于油酸组分在白云石表面的吸附作用, 在2 922 cm<sup>-1</sup>附近出现了新的特征峰, 在经过ATMP作用过后, 白云石表面新生成的特征峰并未发生变化, 表明ATMP<sup>2-</sup>对OL<sup>-</sup>在白云石表面的吸附未产生明显影响<sup>[15]</sup>, 因此, ATMP增大白云石与氟磷灰石之间的可浮性差异, 抑制氟磷灰石的浮起。

### 3 结论

6种小分子有机膦酸或其盐对磷矿的抑制性能不同, ATMP对磷矿物的抑制效果较好, 其次是PBTCA, 抑制性能较弱的是HEDP-4Na、PAPEMP、DTPMPA, EDTMPS抑制效果不明显。ATMP作为抑制剂进行浮选所得的精矿的品位、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>回收率以及选矿效率均高于PBTCA, 且优于磷酸。当矿浆pH为4~5时, ATMP主要以ATMP<sup>2-</sup>的形式存在, ATMP在氟磷灰石表面占据Ca位点, 减少了NaOL的吸附位点, 增大白云石与氟磷灰石之间的可浮性差异, 抑制氟磷灰石的浮起。

采用单一反浮选一次粗选一次扫选中矿顺序返回的闭路流程, 在磨矿细度为≤0.074 mm占比60.8%, 粗选硫酸、ATMP、捕收剂LAA-T用量分别为12、1.0、0.9 kg/t, 扫选硫酸用量为3.0 kg/t条件下, 获得的精矿 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>回收率、 $w(\text{MgO})$ 分别为31.65%、97.49%、0.75%; 尾矿 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 仅为3.12%。

[参考文献]

[1] 许秀成. 钙镁磷肥发展现状及前景[J]. 中国农资, 2006(4): 54-56.