

阳离子捕收剂在磷矿反浮选脱硅中的研究进展*

周波¹, 徐伟², 陈跃², 解田², 张文¹, 朱静¹

(1. 贵州大学, 贵州 贵阳 550025; 2. 瓮福(集团)有限责任公司, 贵州 贵阳 550002)

摘要:反浮选脱除磷矿中硅铝杂质是提高磷精矿质量、充分利用中低品位胶磷矿的一种有效方法。详细介绍了近年来国内磷矿反浮选阳离子捕收剂及其作用机理, 分析了现有阳离子捕收剂存在的不足, 并指出了今后的研究方向。

关键词:阳离子捕收剂; 磷矿; 反浮选; 脱硅

中图分类号:TD971⁺.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0076(2016)03-0062-04

DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2016.03.013

Research Progress of Cationic Collector in Reverse Flotation of Phosphate Ore

ZHOU Bo¹, XU Wei², CHEN Yue², XIE Tian², ZHANG Wen¹, ZHU Jing¹

(1. Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 2. Wengfu (Group) Co. Ltd., Guiyang 550002, Guizhou, China)

Abstract: It's an effective way to improve quality of phosphate concentrate and make full use of mid-low grade phosphate resources by removing silicon and aluminum impurities through reverse flotation. The research progress of cationic collector of phosphate ore and its collecting mechanism in China was introduced in detail, and the disadvantages of the existing cationic collectors were also analyzed. Finally, some feasible research directions of cationic collector were put forward.

Key words: cationic collector; phosphate ore; reverse flotation; desilicication

我国磷矿资源虽然丰富, 但 P_2O_5 大于 30% 的富矿仅占探明总储量的 7%, 沉积型磷块岩约占总储量的 85% 且大部分为中低品位胶磷矿^[1]。对于难选的中低品位硅钙质胶磷矿, 单一的反浮选脱镁工艺已经不能满足湿法制酸及酸法制肥对磷精矿的要求, 越来越多的选矿工作者已经投入到磷矿脱硅除杂的难题中。

在磷矿浮选脱硅中, 正浮选脱硅工艺比较成熟且已经实现工业化, 但该工艺复杂, 添加的浮选药剂以脂肪酸类捕收剂为主, 其种类多、泡沫多且用药量大, 最终磷精矿难于沉降, 后续作业难处理, 环境温度较低时需要加温浮选, 导致选矿成本较高。而反

浮选脱硅工艺简单, 药剂用量省, 符合“浮少抑多”原则, 对温度的要求低, 精矿易于后续处理。

国外对阳离子捕收剂在磷矿反浮选脱硅中的应用研究较早^[2], 20 世纪末国外就有报道采用多种阳离子捕收剂对佛罗里达硅质磷矿进行了反浮选脱硅实验^[3]。国内磷矿阳离子脱硅捕收剂研究主要在脂肪胺类、醚胺类等领域。阳离子胺类捕收剂在铁矿、铝土矿等脱硅应用上的研究报道较多^[4], 而在磷矿反浮选脱硅应用上起步较晚。针对绝大多数胺类阳离子捕收剂一直存在浮选泡沫发粘、尾矿消泡难、成本较高等缺陷, 国内磷矿选矿工作者已经进行了诸多研究, 虽取得了一定的研究成果, 但都未能成

* 收稿日期: 2016-01-19

基金项目: 贵州省科技厅重大专项(黔科合重大专项[20116023])

作者简介: 周波(1989-), 男, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 研究方向为磷矿浮选药剂及工艺, Email: 929688247@qq.com。

通信作者: 朱静, 女, 教授, 研究方向为磷化工, Email: ce.jzhu@gzu.edu.cn。

功用于工业化。本文重点介绍阳离子脱硅捕收剂在磷矿上的近期研究进展。

1 胺类阳离子捕收剂

1.1 脂肪胺类捕收剂

脂肪胺类捕收剂是使用最早,价格低廉的阳离子捕收剂,常用的有十二胺、十八胺等,具有浮选泡沫发粘、对矿泥敏感,在水中的溶解度小等特点。所以,一般使用它们相应的盐酸盐或醋酸盐作为浮选药剂,有效成分是相应的盐电离出的阳离子^[5]。

罗惠华^[6]等对海口某胶磷矿进行了单反、正反及双反浮选工艺的对比试验。其中双反浮选在常温酸性条件下,以脂肪酸和脂肪胺分别选出碳酸盐及硅酸盐矿物,由入选原矿 P_2O_5 25.53%、 SiO_2 20.30%,经双反浮选得到精矿 P_2O_5 30.10%, P_2O_5 回收率 78.88%。

王巍^[7]等通过对十二胺化学改性合成新型阳离子捕收剂 W-2,并用于湖北某中低品位硅钙质胶磷矿双反浮选工艺的脱硅段,使胶磷矿和硅质矿物得到有效分离。

李亮^[8]等通过单泡管实验,对比研究了在不同 pH 下椰油二胺、工业二胺、月桂胺、脂肪一胺 86D 等对胶磷矿的浮选性能。试验结果表明:同一胺类捕收剂在不同的 pH 下浮选能力不同。在相同 pH 下,胺基个数越多捕收能力越强,且脂肪一胺的捕收能力会随着碳链的增长而减弱。胺类捕收剂在碱性条件下具有更好的捕收性能。

刘养春^[9]等通过单因素试验采用双反浮选工艺对湖北某硅钙质磷矿进行了处理,对原矿脱镁精矿在中性或弱碱性条件下利用自主研发的脂肪胺类阳离子捕收剂 YG-12 反浮选脱除硅酸盐矿物,浮选时加入适量的泡沫调整剂 JD-02 能够改善 YG-12 浮选泡沫粘而多的技术难题。

1.2 醚胺类捕收剂

醚胺是在脂肪胺中引入一个醚基,醚基提高了脂肪胺在水中的溶解度,改善了起泡性能,这使得醚胺对硅酸盐矿物的捕收能力和选择性均比脂肪胺要好。醚胺合成工艺较为复杂,合成条件苛刻,作为浮选药剂成本较高。

GE 系列醚胺类捕收剂是武汉理工大学^[10-11]经过多年研究自主研发的高效阳离子捕收剂,对磷矿的反浮选脱硅效果较好,但仍存在浮选泡沫流动性

差、尾矿难以处理的问题。葛英勇^[10-13]等先后对湖北宜昌某中低品位胶磷矿、湖北某地高镁硅难选胶磷矿以及远安低品位胶磷矿进行双反浮选试验,选用 GE-609 作为阳离子脱硅捕收剂,针对 GE-609 泡沫性能差对消泡剂进行了相应的研究,成功解决了阳离子捕收剂反浮选的泡沫粘性大、尾矿泡沫难以处理的问题。

余媛元^[14]等设计合成了两类共 4 种烷基醚胺或酰基醚胺类阳离子脱硅捕收剂 YA-12、YA-14、YA-16、YB-14。将其用于某胶磷矿反浮选脱镁精矿的脱硅性能试验,并与常规阳离子捕收剂十二胺进行比较,结果表明:除 YB-14 外其余三种药剂的脱硅性能明显优于十二胺,其中以 YA-12 最为优越。

赵凤婷^[15]采用双反浮选工艺处理云南某硅钙质磷块岩 P_2O_5 23.39%、 SiO_2 26.18%,用新型阴离子捕收剂 LS 反浮选脱镁,脱镁精矿在酸性条件下用醚胺反浮选脱硅,虽获得磷精矿 P_2O_5 品位大于 30%,但尾矿中磷损失大、 SiO_2 脱除率低,脱硅效果不理想。

王灿霞^[16]等采用硫酸、磷酸和碳酸钠作为抑制剂及矿浆 pH 调整剂,短链醚胺作为脱镁精矿中硅酸盐矿物的捕收剂,对云南某中低品位胶磷矿进行双反浮选,试验结果表明:短链醚胺具有选择性差,泡沫发粘等缺点。

杨勇^[17]等以宜昌某磷矿为研究对象,采用单反浮选脱硅工艺将十二烷基醚丙胺盐酸盐(ON_{12})作为脱硅捕收剂,对入选 P_2O_5 24.96%、 SiO_2 29.84% 的高硅磷矿进行了一次加药和多次加药对比试验,结果表明:分批加药磷精矿质量及脱硅效率得到明显提高。

1.3 酰胺类捕收剂

酰胺合成的原料来源广泛,合成的条件易于实现。酰胺具有水溶性好、毒性低、容易降解等优点,在煤矿、铝土矿中的研究较多,在磷矿反浮选脱硅中的研究较晚。

杨松^[18]等发明了一种含双酰胺结构的阳离子脱硅捕收剂 LF,该捕收剂具有良好的捕收能力和选择性,耐低温,易于生物降解等特点。将其用于贵州某沉积型硅钙质胶磷矿双反浮选脱硅试验,经三段脱硅工艺,可将入选品位 P_2O_5 25% 左右的原矿选别到 P_2O_5 31.5%。

兰丰^[19]等对自行合成的阳离子捕收剂 OTH

与十二胺在贵州某沉积型胶磷矿双反浮选中的脱硅性能进行了研究。OTPH 克服了醚胺合成条件苛刻、合成成本高的问题,且捕收能力强、选择性好。

1.4 两性捕收剂

两性捕收剂是分子中同时带有阴离子和阳离子的异极性捕收剂,水溶性好且具有抗低温性能。pH 适应范围广,在酸性和碱性条件下显现不同的电性,可根据矿物的性质适当调整 pH 从而调整药剂对不同矿物的选择性。目前两性捕收剂仍面临合成工艺复杂、合成成本高的问题。

BK430 捕收剂是一种由混合胺改性的两性捕收剂。任爱军^[20]等对贵州某硅钙质胶磷矿采用了反浮选脱镁-反浮选脱硅-磁选脱铁-反浮选脱铝等耦合工艺,获得 SiO_2 7.93% 的磷精矿,并证实了 BK430 具有很好的脱硅性能。李松清^[21]等将 BK430 用于某高硅胶磷矿反浮选脱镁精矿的脱硅试验,与常规阳离子脱硅捕收剂十二胺、醚胺、GE、十六烷基三甲基溴化铵等相比,醚胺和 BK430 对硅酸盐矿物的捕收能力稍弱,但对硅酸盐和磷酸盐矿物的分离效果好,而 BK430 比醚胺的成本更低。

2 未知代号阳离子捕收剂

以代号表示的阳离子捕收剂更有利于知识产权的保护,是磷矿脱硅捕收剂的重要组成部分,其中不乏有些药剂取得了较好的效果,但由于种种原因未有成功的工业应用实例。

冯春晖等^[22]以 PA-64 为选镁捕收剂,TA-06 为脱硅捕收剂,针对某中低品位硅钙质胶磷矿,经双反浮选闭路流程,获得磷精矿 P_2O_5 30.35%, P_2O_5 回收率 83.82% 的优异选别指标。与传统十二胺相比,TA-06 具有选择性高、泡沫流动性好、尾矿泡沫易消的优点。

苏迪等^[23]对贵州某中低品位磷矿采用双反浮选处理。脱镁精矿采用一系列自主合成的阳离子捕收剂:CH401、CH402、CH403 进行对比研究,最后得出 CH403 具有良好的选择性和捕收性,且在碱性和酸性条件下均可使用。

谢春妹^[24]等应用双反工艺对瓮福 A 层矿进行了处理,脱镁精矿筛析了十二胺、十八胺、混合胺、3#HAY 等多种阳离子脱硅捕收剂。3#HAY 的水溶性好、捕收能力强,加入消泡剂后能解决泡沫量大的问题,但尾矿中五氧化二磷品位较高,磷的损失较大。

曾理等^[25]考察了磨矿细度、矿浆 pH 值等因素

对贵州某中低品位硅钙质磷矿各项选矿指标的影响。以硫酸为抑制剂,WF-01 和阳离子捕收剂 BY 分别为脱镁捕收剂和脱硅捕收剂,经两粗一精浮选工艺,获得含 P_2O_5 31.38%、 SiO_2 10.32% 的磷精矿。阳离子捕收剂 BY 虽具有良好的脱硅效果,但浮选时泡沫量大。

孙伟等^[26]对湖北某沉积型胶磷矿进行了双反浮选试验研究。脱镁精矿用氢氧化钠调节矿浆至碱性,对比了阳离子捕收剂 B-2 与十二胺的浮选性能,结果表明:B-2 的选择性和捕收能力均较好,能有效实现磷矿石与硅酸盐矿物的分离。

钟晋等^[27]采用单反脱硅浮选对云南风化胶磷矿进行了研究,采用自行研制的 ZP 系列阳离子捕收剂作为脱硅捕收剂,ZP 系列捕收剂具有药剂用量少,浮选性能好的特点,尾矿经扫选后品位较低,但中矿需返回的量较大,浮选机的处理能力较低。

3 阳离子的组合使用

虽然胺类捕收剂是磷矿反浮选脱硅的首选捕收剂,但是其单独使用时有时很难达到较好的脱硅效果。因此,许多选矿工作者试图将其与其他阳离子捕收剂或其他药剂诸如分散剂、调整剂、消泡剂等按一定比例组合使用来提高药剂脱硅性能、解决泡沫难题、节约成本等。在磷矿反浮选脱硅捕收剂的优化、改性上,组合药剂以及高效增效剂的研制、开发,通常可以实现“1+1>2”的协同作用;合理使用阳离子捕收剂与调整剂,有利于增强磷矿物与脉石矿物的可浮性,有望实现工业化。

杨丽珍^[28]对宜昌某磷块岩进行了浮选试验研究。针对该磷矿品位低、含泥量高的特点对比研究多种浮选工艺,最终确定了以分级粒度为 25 μm ,矿泥采用双反浮选、矿砂采用单反浮选脱硅的工艺。以脂肪酸皂脱除碳酸盐矿物,混合胺脱除硅酸盐矿物,获得综合磷精矿 P_2O_5 35.22%、回收率 80.00% 的较好选矿指标。

罗惠华^[29]等通过筛选了几种胺类捕收剂,最后确定将二胺类捕收剂 S-2A 与某非极性多元醇搭配作为宜昌中低品位胶磷矿双反浮选的脱硅捕收剂,脱镁段经过一粗一扫、脱硅段经过一粗一扫,得到 P_2O_5 30.05%、回收率 84.41% 的磷精矿指标。

刘丽芬^[30]等在某地低品位高镁胶磷矿的反浮选脱镁的基础上,对比了在反浮选脱硅段添加增效剂和不添加增效剂的浮选性能。研究表明,增效剂

能与矿物表面反应形成活化膜,有利于提高硅酸盐脉石矿物的可浮性,从而提高了反浮选脱硅药剂的选择性。

张万峰^[31]等将改性的醚胺类药剂与几种表面活性剂复配得到的阳离子捕收剂 SP 用于某胶磷矿的双反浮选脱硅工艺中,有效的改善了阳离子捕收剂浮选泡沫发粘的问题,且选择性和捕收能力得到提高。

4 阳离子捕收剂的作用机理

脂肪胺类阳离子捕收剂在磷矿反浮选中使用较早,随着阳离子捕收剂种类的不断开发,阳离子捕收剂与硅酸盐矿物的作用机理也逐渐得到重视。目前,对于机理的研究主要集中在:阳离子捕收剂对溶液表面张力及石英、目标矿物的接触角的影响,表面活性剂能够有效降低溶液的表面张力而使矿物与捕收剂的接触面积增大,从而增大对矿物的浮选能力;通过红外光谱可以看到阳离子捕收剂对矿物表面峰的影响,由吸附的强弱可以判断捕收剂在矿物表面是物理吸附还是化学吸附;XPS 可以直观的观察矿物表面元素价位的变化情况。

Guo Fang 等^[32]研究了三种不同的阳离子捕收剂对某磷矿的 Zeta 电位的影响,由于磷矿中含有磷灰石、硅酸盐和碳酸盐三种主要成分,三种组分的零电点不同导致该磷矿在不同的 pH 值下出现三个零电点;不同 pH 下的红外光谱图表明,阳离子 DAH 与该磷矿的结合属于物理吸附,方解石的红外峰强度随着 pH 值的降低而减弱;用 XPS 观察了原矿表面原子浓度,在酸性条件下矿物表面的某些物质与酸反应,使硅暴露在矿物表面,从而使矿物表面硅的含量增大、提高了阳离子捕收剂的吸附量,使阳离子捕收剂具有良好的捕收性能。

葛英勇等^[33]通过表面张力和 Zeta 电位研究了消泡剂 CA 在 GE609 磷矿反浮选脱硅中的消泡机理。CA 降低了固液界面的结合力、降低了泡沫表面捕收剂的浓度,使泡沫的稳定性下降;CA 与 GE609 水解产生的阳离子吸附在石英表面能够抵消石英表面的部分负电荷从而使石英的零电位点发生偏移,CA 电离出的阳离子吸附在石英表面降低了 GE609 在石英表面的吸附量,改善了泡沫的强度,从而达到消泡的目的。

张富青等^[34]对不同 pH 下的石英和胶磷矿的可浮性进行了研究, W-2 与石英的可浮性比对胶

磷矿的可浮性好,有利于脉石矿物的脱除;表面张力和接触角试验, W-2 能有效降低溶液的表面张力,使药剂的起泡能力增强,随着药剂浓度的增大,石英表面吸附 W-2 达到饱和,但是由于溶液的表面张力降低,接触角还会继续减小;红外光谱图分析胺盐在 $34\ 000\ \text{cm}^{-1}$ 处的 N-H 键伸缩振动吸收峰消失,在石英的表面出现了微弱的有机碳链的伸缩振动峰,表明捕收剂与石英有微弱的静电吸附。

周坤等^[35]研究了金属 Ca^{2+} 离子和 Mg^{2+} 离子对阳离子捕收剂 HAY 浮选石英和胶磷矿的影响,通过对石英表面的 Zeta 电位的测定发现:碱性条件下 Ca 和 Mg 离子能显著提高石英表面的电位,对阳离子捕收剂浮选石英有利。

曾李明等^[36]对 GE-609 和消泡剂进行了研究。通过对表面张力的测定发现消泡剂以较低的表面张力加快了液膜的排液速度,从而达到了改善阳离子泡沫稳定性的效果;石英吸附药剂的红外光谱图中明显有药剂的红外特征峰,表明药剂吸附于石英表面;pH 值大于 5 时阳离子捕收剂对石英表面的 Zeta 电势影响较大,表明药剂对石英的捕收能力较强。

5 结语

综上所述,我国在磷矿反浮选脱硅上的技术研究已经取得了一定的成果,但仍有较大的发展空间:一方面调整剂的开发和利用能有效改善阳离子捕收剂浮选泡沫存在的问题,能加快阳离子捕收剂在磷矿应用中的进程;另一方面在总结铝土矿、铁矿等领域的阳离子脱硅捕收剂之后,必须加快研发适用于胶磷矿且浮选性能好、经济可行的新药剂。

参考文献:

- [1] 刘建雄. 我国磷矿资源特点及开发利用建议[J]. 化工矿物与加工, 2009(3): 36-39.
- [2] H. Sis, S. Chander. Reagents used in the flotation of phosphate ores: a critical review [J]. Minerals Engineering, 2003(16): 577-585.
- [3] P. Zhang, Y. Yu, M. Bogan. Challenging the "Crago" double float process II. Amine-fatty acid flotation of siliceous phosphates [J]. Mineral Engineering, 1997, 10(9): 983-994.
- [4] 张永, 钟宏, 谭鑫, 等. 阳离子捕收剂研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2011(3): 44-49.
- [5] 朱建光. 浮选药剂[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- [6] 罗惠华, 柏中能, 钟康年, 等. 云南海口中低品位胶磷矿选矿工艺研究[J]. 武汉工程大学学报, 2008(2): 12-14.
- [7] 王巍, 黄齐茂, 蔡坤, 等. 中低品位胶磷矿阳离子捕收剂应用研究[J]. 化工矿物与加工, 2012, 41(4): 1-4.

(下转 72 页)

- [20] 梅明, 胡桂周, 魏阳, 等. 大冶铜绿山矿给排水方案的优化设计[J]. 武汉工程大学学报, 2012, 34(9): 44-53.
- [21] 陈典勋. 瑶岗仙裕新多金属白钨矿选矿厂设计实践[J]. 湖南有色金属, 2012, 28(5): 10-13.
- [22] 严群, 桂勇刚, 周娜娜, 等. 混凝沉淀法处理含砷选矿废水[J]. 环境工程学报, 2014(9): 3683-3688.
- [23] 刘亚龙, 缪建成, 范寻, 等. 西藏唐加选矿厂尾矿脱水干堆和选矿废水回用研究[J]. 有色金属, 2013(6): 52-55.
- [24] 赵玮, 刘小飞, 宋红春. 河南某萤石矿废水处理及回用措施分析[J]. 资源节约与环保, 2014(12): 76-77.
- [25] 李琛. 天然有机吸附剂在重金属废水处理中的应用[J]. 化工技术与开发, 2013(9): 53-58.
- [26] 李琛. 无机吸附剂在重金属废水处理中的应用[J]. 安徽化工, 2013, 39(6): 9-12.
- [27] 杨震, 金立忠. 粉煤灰在废水处理中的应用[J]. 科技创新导报, 2012(32): 114-114.
- [28] Qiu J Y, Wang Z Y. Adsorption of Cr(VI) using silicabased adsorbent prepared by radiation-induced grafting[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 166: 270-276.
- [29] 罗道成, 易平贵, 陈安国, 等. 改性海泡石对废水中 Pb^{2+} 、 Hg^{2+} 、 Cd^{2+} 的吸附性能的研究[J]. 水处理技术, 2003, 29(2): 89-91.
- [30] 郝鹏飞, 梁靖. 改性沸石对含铅废水的处理研究[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(6): 106-108.
- [31] 董栋, 郭保万, 孙伟, 等. 铅锌选矿废水净化处理试验[J]. 现代矿业, 2013(9): 143-145, 152.
- [32] 严群, 谢明辉, 罗仙平, 等. 会理锌选矿废水循环利用的研究[J]. 给排水, 2006, 32(4): 54-56.
- [33] 顾泽平, 孙水裕, 肖华花. 用次氯酸钠法处理选矿废水[J]. 化工环保, 2006, 26(1): 35-37.
- [34] 李亚峰, 顾涛. 金矿含氰废水处理技术[J]. 当代化工, 2003, 32(1): 1-4.
- [35] 金洁蓉, 陈赛松, 杨岳平, 等. 铁粉还原—Fenton 氧化处理络合铜废水的研究[J]. 环境工程学报, 2010(6): 1353-1356.
- [36] 唐灿富. 西藏某铜铅锌选矿废水处理及回用探析[J]. 湖南有色金属, 2012, 28(4): 55-57.
- [37] 郑明东. 含氰废水处理技术评述[J]. 有色矿冶, 199(5): 41-43.
- [38] 王斌喜. 凝聚沉淀法处理焦化废水中氰化物试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2000.
- [39] 赵永红, 谢明辉, 罗仙平, 等. 去除水中黄药的试验研究[J]. 金属矿山, 2006(6): 75-77.

(上接第 65 页)

- [8] 李亮, 陈慧, 李成秀, 等. 几种阳离子捕收剂浮选胶磷矿性能比较[J]. 武汉工程大学学报, 2014, 36(1): 42-46.
- [9] 刘养春, 宋文义, 徐会会, 等. 某胶磷矿双反浮选试验研究[J]. 化工矿物与加工, 2014(9): 1-3.
- [10] 葛英勇, 曾小波, 甘顺鹏, 等. 中、低品位胶磷矿双反浮选研究[J]. 矿产保护与利用, 2006(3): 34-36.
- [11] 葛英勇, 甘顺鹏, 曾小波. 胶磷矿双反浮选工艺研究[J]. 化工矿物与加工, 2006, 35(8): 8-10.
- [12] 葛英勇, 季荣, 袁武谱. 远安低品位胶磷矿双反浮选试验研究[J]. 矿产综合利用, 2008(6): 7-10.
- [13] 曾小波, 葛英勇. 胶磷矿阳离子反浮选泡沫行为调控研究[J]. 化工矿物与加工, 2008(1): 1-3.
- [14] 余媛元. 醚胺类脱硅药剂的合成及在胶磷矿反浮选工艺中的应用[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2008.
- [15] 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.
- [16] 王灿霞, 杨稳权, 庞建涛. 云南某中低品位胶磷矿双反浮选试验研究[J]. 化工矿物与加工, 2015(1): 5-8.
- [17] 杨勇, 刘云涛, 李丰. 磷矿反浮选脱硅分批加药优化研究[J]. 化工矿物与加工, 2015(1): 1-4, 8.
- [18] 杨松, 兰丰, 宋宝安, 等. 沉积型硅钙质胶磷矿脱硅捕收剂及其制备方法和使用方法: 102205276 [P], 2011-10-05.
- [19] 兰丰, 陈跃, 解田. 沉积型胶磷矿脱硅新型捕收剂 OTHP 的合成及应用[J]. 化工矿物与加工, 2012(8): 1-2, 8.
- [20] 任爱军, 魏明安, 郑桂佳, 等. 贵州某沉积型磷块岩矿选矿试验研究[J]. 化工矿物与加工, 2013(11): 1-3, 34.
- [21] 李松清, 魏明安, 任爱军. 某高硅胶磷矿反浮选脱硅研究[J]. 矿冶, 2014, 23(2): 1-4, 10.
- [22] 冯春晖, 马晓青. 某中低品位硅钙质磷块岩双反浮选试验研究[J]. 化工矿物与加工, 2013(2): 13-15.
- [23] 苏迪, 解田, 邱树毅, 等. 某硅钙质胶磷矿双反浮选工艺的研究[J]. 化工矿物与加工, 2010(1): 7-9.
- [24] 谢春妹, 刘志红. 瓮福 A 层磷矿石的双反浮选试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2010(5): 38-40, 80.
- [25] 曾理, 姜小明, 杨远敏. 贵州某硅钙质磷矿的浮选试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2011(5-6): 79-82.
- [26] 孙伟, 陈臣, 刘令. 某硅钙质胶磷矿双反浮选试验研究[J]. 化工矿物与加工, 2011(9): 1-2, 12.
- [27] 钟晋, 郭永杰, 杜令攀, 等. 云南风化胶磷矿浮选脱硅试验研究[J]. 化工矿物与加工, 2014(5): 7-8, 25.
- [28] 杨丽珍. 湖北省宜昌硅钙质磷块岩选矿工艺研究[J]. 化工矿产地质, 2009(1): 35-38.
- [29] 罗惠华, 陈婷婷, 陈慧. 宜昌中品位胶磷矿双反浮选试验研究[J]. 化工矿物与加工, 2010(1): 4-6, 9.
- [30] 刘丽芬, 赵凤婷, 张路丽. 浅谈反浮选脱硅增效剂在磷矿选别中的作用[J]. 化工矿物与加工, 2009(9): 9-11.
- [31] 张万峰, 王德强. 某中低品位钙硅质胶磷矿双反浮选工艺研究[J]. 化工矿物与加工, 2014(5): 5-6, 11.
- [32] Guo Fang, Li Jun. Selective separation of silica from a siliceous-calcareous phosphate rock [J]. Mining Science and Technology (China), 21(2011): 135-139.
- [33] Ge Yingyong, Gan Shunpeng, Zeng Xiaobo, Yu Yongfu. Double reverse flotation process of collophanite and regulating froth action [J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2008(18): 449-453.
- [34] 张富青, 王巍, 潘志权, 等. 一种新型磷矿反浮选硅酸盐捕收剂机理研究[J]. 中国矿业, 2013(8): 108-111.
- [35] 周坤, 张覃, 唐云. Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 对石英浮选的影响研究[J]. 化工矿物与加工, 2014(5): 12-15.
- [36] 曾李明. 胶磷矿双反浮选工艺优化试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.