

综合评述

## 铝土矿浮选抑制剂及作用机理研究进展\*

张坤<sup>1,2</sup>, 郭珍旭<sup>1,2</sup>, 刘长森<sup>1,2</sup>, 方霖<sup>1,2</sup>, 卫敏<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006; 2. 国土资源部多金属矿评价与综合利用重点实验室, 河南 郑州 450006)

**摘要:**阐述了铝土矿浮选脱硅抑制剂作用的基本原理,叙述了铝土矿浮选常用的无机抑制剂、有机抑制剂及其他新型抑制剂的研究现状,并提出了研究新型抑制剂的思路 and 方向。

**关键词:**铝土矿;浮选;抑制剂;研究进展

**中图分类号:**TD952.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0076(2015)06-0065-06

**DOI:**10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2015.06.012

### Research Progress on Bauxite Flotation Depressants and Its Mechanism

ZHANG Kun<sup>1,2</sup>, GUO Zhenxu<sup>1,2</sup>, LIU Changmiao<sup>1,2</sup>, FANG Lin<sup>1,2</sup>, WEI Min<sup>1,2</sup>

(1. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources CAGS, Zhengzhou 450006, China; 2. Key Laboratory of Evaluation and Multipurpose Utilization of Polymetallic Ores, Ministry of Land and Resources, Zhengzhou 450006, China)

**Abstract:** The inhibition mechanism of depressants in bauxite flotation was expounded in this paper. The research progress on inorganic depressants, organic depressants and other new depressants of bauxite flotation was reviewed, and the research directions of novel depressants were also proposed.

**Key words:** bauxite; flotation; depressant; research progress

铝土矿是生产氧化铝的主要原料,目前世界已探明的铝土矿地质储量为230亿t,中国铝土矿资源丰富,主要为沉积型一水硬铝石型铝土矿,矿石特点是高铝高硅,铝硅比低,且贫矿资源比例较大<sup>[1-4]</sup>。为了更好地利用低品位铝土矿,目前大多先采用浮选法提高矿石的铝硅比,再采用拜耳法生产氧化铝,用拜耳法生产氧化铝时,矿石中SiO<sub>2</sub>含量每增加1%,每吨矿石就多消耗NaOH 6.6 kg,因此提高铝硅比可以大大减少氧化铝工业的成本<sup>[5-8]</sup>。

目前对于铝土矿降硅提铝应用最广泛的方法是

浮选法<sup>[9-11]</sup>,对于浮选法,适宜的药剂制度是取得优良浮选脱硅指标的重要保障。在药剂制度中,抑制剂的选择和用量会直接影响浮选的效果和后续拜耳法生产氧化铝的技术指标,因此,选择合适的抑制剂对于铝土矿的浮选至关重要<sup>[1]</sup>。本文将对铝土矿浮选的抑制剂进行综述。

### 1 浮选脱硅作用的基本原理

铝土矿浮选脱硅主要是将一水硬铝石与高岭

\* 收稿日期:2015-10-16

**基金项目:**国土资源部公益性行业科研专项项目(201211003;201511062);国家自然科学基金项目(U1304519);地质矿产调查评价项目(12120113088200);中国地质调查局百名青年地质英才培养计划资助

**作者简介:**张坤(1991-),男,河南商丘人,在读硕士研究生,研究方向为选矿药剂。

**通讯作者:**郭珍旭(1965-),男,河南平顶山人,研究员,主要从事选矿技术与管理工作。

石、伊利石和叶腊石等铝硅酸盐矿物进行有效分离<sup>[12]</sup>。文献资料<sup>[12-13]</sup>显示,叶腊石呈无孔的薄片状,而高岭石和伊利石则呈多孔的不规则颗粒状,三种铝硅酸盐矿物均为层状硅酸盐矿物,且与目的矿物—水硬铝石可浮性差别不大。铝土矿浮选可分为正浮选和反浮选,采用正浮选法分离时,多用脂肪酸盐类和油酸类为捕收剂,以六偏磷酸钠、水玻璃等为抑制剂,浮选—水硬铝石等铝矿物,抑制铝硅酸盐矿物;采用反浮选法分离时,多采用阳离子捕收剂浮选铝硅酸盐矿物,并用调整剂抑制铝矿物或活化铝硅酸盐矿物,达到分离目的。

对于铝土矿的浮选脱硅,单纯地依靠捕收剂很难将—水硬铝石与铝硅酸盐矿物浮选分离:采用阳离子捕收剂时,阳离子捕收剂中阳离子与矿物表面的氧与氢氧根等活性点主要通过静电力或氢键力作用,而铝矿物、铝硅酸盐矿物的零电点都小于6,差别较小,加上表面电荷的不均匀性和铝硅矿物之间的异凝聚现象,需要抑制剂以静电力、氢键力、化学反应等作用选择性吸附于矿物表面,改变矿物表面性质,增大捕收剂对铝矿物和铝硅酸盐矿物的捕收作用差异。采用阴离子捕收剂时,捕收剂主要通过发生化学反应吸附于矿物表面,又由于—水硬铝石与铝硅酸盐矿物表面活性点的不同,导致—水硬铝石与捕收剂的作用更加强烈,可造成—水硬铝石的疏水上浮。但是铝硅酸盐矿物在开采、运输和加工过程中,极易被金属离子污染。当矿浆中存在金属阳离子(如 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 等)时,铝硅酸盐矿物会吸附这些金属阳离子而得到活化,缩小了铝硅酸盐矿物和铝矿物可浮性的差异,需要抑制剂选择性地吸附于矿物表面,增大有用矿物、脉石矿物与捕收剂作用的差异或者达到分散的效果,从而实现浮选分离<sup>[14-16]</sup>。

## 2 抑制剂及其作用机理

根据不同捕收剂的作用效果及浮选分离需求的不同,铝土矿的浮选抑制剂可分为无机抑制剂、有机抑制剂和其他新型抑制剂。有机抑制剂按照分子量大小,又可以分为小分子有机抑制剂和大分子有机抑制剂两种。

### 2.1 无机抑制剂

常用的铝土矿无机抑制剂有六偏磷酸钠、水玻璃和氟化物等<sup>[17]</sup>,其中最具代表性的是六偏磷酸

钠。

#### 2.1.1 六偏磷酸钠及磷酸盐

六偏磷酸钠是浮选常用的调整剂,主要用于抑制石英和硅酸盐矿物等<sup>[17-18]</sup>。六偏磷酸钠( $\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$ ),并非一个简单的化合物,而是一种多磷酸盐<sup>[19]</sup>。六偏磷酸钠作为铝土矿浮选抑制剂的研究比较系统:研究表明六偏磷酸钠是铝土矿浮选的有效抑制剂和分散剂,六偏磷酸钠的主要作用在于对矿物表面的阴离子捕收剂进行解吸并吸附在矿物表面使之亲水<sup>[20-22]</sup>。Gong W Q等<sup>[23]</sup>通过红外光谱测试表明,磷酸盐与二氧化硅不发生化学反应,六偏磷酸钠的P—O键与矿物表面的Al原子形成P—O—Al键。张国范等<sup>[24]</sup>系统地研究了六偏磷酸钠在—水硬铝石和高岭石的浮选中的作用,指出在油酸钠为捕收剂时,六偏磷酸钠对这两种矿物均具有抑制作用,六偏磷酸钠和油酸钠在矿物表面发生竞争吸附,六偏磷酸钠的存在影响了油酸钠在两种矿物表面的吸附。Choi I K等<sup>[25]</sup>的研究表明,高岭石只在边缘存在带正电的 $\text{Al}^{3+}$ 活性区,而—水硬铝石在表面和棱角均存在带正电的 $\text{Al}^{3+}$ 活性区,六偏磷酸钠强烈地吸附在这些活性区上。胡岳华等<sup>[26]</sup>研究了磷酸盐对—水铝石和高岭石的浮选性能,研究表明正磷酸盐和多聚磷酸盐对—水硬铝石和高岭石的浮选影响不大,六偏磷酸盐在低用量条件下对高岭石的抑制作用大于一水硬铝石,可以进行正浮选;在高用量条件下六偏磷酸盐对—水硬铝石抑制作用显著增强,而对高岭石的抑制作用与低用量时相当,可以实现反浮选脱硅。动电位、吸附量的测定和浮选溶液化学的进一步研究表明,六偏磷酸钠与矿物表面上的Al元素络合,对—水硬铝石完全罩盖而产生抑制作用,对高岭石的部分吸附使得阳离子捕收剂可以栅栏吸附而使高岭石矿物表面疏水上浮。

综上所述,六偏磷酸钠是铝土矿浮选的有效调整剂,兼具抑制和分散作用。其抑制机理是六偏磷酸钠的P—O键与矿物表面活性区的 $\text{Al}^{3+}$ 结合,形成络合物并强烈地吸附在其上,又由于铝硅酸盐矿物和—水硬铝石表面活性区的不同,导致了六偏磷酸钠的选择性吸附,进而六偏磷酸钠和捕收剂在矿物表面发生竞争吸附,抑制矿物的可浮性。六偏磷酸钠的吸附降低矿物表面的动电位,增大了矿物表面的静电斥力,同时由于六偏磷酸钠大分子结构的位阻效应,增加了矿物颗粒之间排斥势能,使矿物颗粒间的分散性变好,从而起到了分散的作用。

### 2.1.2 其他无机抑制剂

水玻璃是多种硅酸钠的混合物,其化学式可以用  $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$  表示,其中  $n$  表示模数,模数越大,抑制效果越好<sup>[17]</sup>。研究表明<sup>[12,15,27-28]</sup>水玻璃是铝土矿浮选的良好抑制剂和分散剂,作用机理是它在水中发生水解和聚合作用,形成带负电的胶粒,而这些胶粒因与铝硅酸盐矿物具有相同的酸根而发生牢固的吸附。一方面,胶粒组分强亲水,吸附于矿物表面后增大了矿物的亲水性,增强了抑制效果;另一方面,这些负胶粒吸附于矿物后会增大矿物表面的负电位,增强排斥作用,起到分散的作用。实践中,有时为了提高水玻璃的抑制效果,可将其与高价金属离子配合使用,增大有效成分的比例。有学者<sup>[29]</sup>对铝土矿实际矿物的研究表明,在十二胺的体系下,采用  $\text{AlCl}_3$  与  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  质量比为 3:1 的混合物为抑制剂,对铝硅比为 2.53 ~ 4.96 的原矿进行反浮选,可以得到铝硅比大于 11 的精矿。

氟化物是硅酸盐矿物浮选的有效调整剂,至今仍然有较多应用和研究<sup>[12,15,30-32]</sup>。Manser<sup>[33]</sup>和陈湘清、胡岳华等<sup>[34]</sup>研究表明,氟化钠可以作为铝土矿反浮选的有效调整剂。综合相关文献<sup>[15,33-34]</sup>可知,氟化物的抑制机理是氟化钠、氢氟酸和氟化铵在矿浆中可电离出  $\text{F}^-$ ,氟离子可以取代硅酸盐矿物表面的羟基<sup>[1]</sup>,降低了矿物表面的动电位,从而促进了阳离子捕收剂的捕收作用。又由于电离出的氟离子,一方面可以腐蚀硅酸盐,使其表面暴露出金属离子(如  $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Be}^{2+}$  等),产生活化作用,另一方面  $\text{F}^-$  可与许多金属离子如  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$  等形成难溶的氟化物和稳定的络合物而发生抑制作用。氟硅酸钠的抑制机理尚不明朗,但有资料显示<sup>[35]</sup>,氟硅酸钠在一定条件下可以活化高岭石,部分人认为氟硅酸钠在水溶液中电离出  $\text{SiF}_6^{2-}$ ,后水解生成硅酸根胶体并强烈地吸附在硅酸盐脉石表面,造成亲水抑制。

## 2.2 有机抑制剂

研究表明<sup>[36-37]</sup>有机抑制剂必须带有两个以上极性基,其中包括对矿物表面作用较强的亲固基(对氧化矿可用羧基 -  $\text{COOH}$ ,磺酸基 -  $\text{SO}_3\text{H}$ ,膦酸基 -  $\text{PO}_3\text{H}_2$  及羟肟酸基 -  $\text{C}(\text{O})\text{NHOH}$  等)和亲水性强的亲水基(-  $\text{COOH}$ , -  $\text{OH}$ , -  $\text{SO}_3\text{H}$  等),可以在矿物表面靠静电力、氢键、范德华力及发生化学反应而吸附,使矿物亲水抑制。有机抑制剂可分为小分子有机抑制剂和大分子有机抑制剂两种。

### 2.2.1 小分子有机抑制剂

小分子有机物作为铝土矿抑制剂在工业应用不多,研究也仅限于实验室阶段。付保军等<sup>[38]</sup>研究表明,草酸钠、柠檬酸钠对高岭石和一水硬铝石有抑制作用,水杨酸钠、乳酸钠只对高岭石有抑制作用,四种调整剂对叶蜡石的可浮性均无影响。张剑锋<sup>[36]</sup>研究得出苯氧乙酸类化合物可以作为一水硬铝石的抑制剂。

付保军<sup>[12]</sup>等研究的四种小分子有机抑制剂属于络合物调整剂,其抑制机理为极性基团与矿物表面的金属阳离子发生络合作用而吸附于矿物表面,或者解吸相应捕收剂,以提高矿物表面的电负性和亲水性。对于苯氧乙酸类化合物,酚由羟基和苯环组成,O原子的2p轨道与C原子的sp<sup>2</sup>杂化轨道的侧面重叠产生共轭效应,使得O向C上离域电子,降低了H-O原子间的电子密度,使得其呈酸性,易电离出负离子从而使其亲水性较大,合成苯氧乙酸类有机物后其亲水性进一步加大,且含有羧基,更易与  $\text{Al}^{3+}$  阳离子形成螯合物发生吸附,因此可以作为一水硬铝石的抑制剂。

### 2.2.2 大分子有机抑制剂

大分子有机抑制剂相对小分子有机抑制剂而言,具有分子量大、分子链较长等特点,其长链上往往带有多个亲固基团,吸附于矿物表面,中和电性,使得矿物的动电位处于不稳定状态,其还可以通过桥连作用使得矿物颗粒悬浮液失去稳定性而产生絮凝作用。常见的铝土矿大分子有机抑制剂有淀粉及改性淀粉、人工合成的羧甲基聚乙烯醇、聚丙烯醇和聚丙烯酰胺等。

#### (1) 淀粉及其变性淀粉

淀粉是一种非离子型的有机高分子聚合物,是由大量的  $\alpha$ -葡萄糖单体通过 1,4 缩水而成,因此含有大量的羟基。经改性的淀粉同时含有亲固基团和亲水基团,可以作为氧化矿浮选的抑制剂<sup>[39-40]</sup>。淀粉及变性淀粉作为铝土矿抑制剂方面的研究已经比较系统:Balajee<sup>[41]</sup>等人认为,带正电的淀粉可与带负电的矿物颗粒发生静电吸附作用。C. P. Massola 等<sup>[42]</sup>以醚胺为捕收剂,淀粉为抑制剂,在 pH 为 10 左右的条件下,对三水铝石进行反浮选,得到了较好的浮选指标。李长凯、孙伟等<sup>[43]</sup>研究了淀粉对高硫铝土矿的浮选脱硫行为的影响,得出变性淀粉可以很好地抑制一水硬铝石。Xia Liuyin 等<sup>[44-45]</sup>研究表明,可溶性淀粉可以很好地抑制一水硬铝石,而

对高岭石的抑制效果不是很明显。动点位试验、吸附研究和 D-IR 光谱分析等表明,可溶性淀粉可与一水硬铝石和高岭石矿物表面形成五元环的配合物,而一水硬铝石表面断裂的 Al-O 键数目远大于高岭石,从而产生选择性吸附达到抑制效果。李海普、胡岳华<sup>[46]</sup>在十二胺为捕收剂的体系下,研究得出氧羟肟酸淀粉在酸性条件下对一水硬铝石有强烈的抑制作用,对高岭石有活化作用。动电位及后续研究表明,氧羟肟酸淀粉通过氢键或化学作用吸附于矿物表面,使其动电位的电负性增加,同时在一水硬铝石表面,氧羟肟酸淀粉吸附于矿物表面,对捕收剂十二胺进行了罩盖,使其亲水而产生抑制作用。李海普等<sup>[47-48]</sup>进一步研究表明,变性淀粉是一水硬铝石的有效抑制剂,在酸性条件下,几种变性淀粉对一水硬铝石抑制作用大小的顺序为氧羟肟酸淀粉 > 双醛淀粉 > 羧甲基淀粉 > 阳离子淀粉 > 原淀粉,阴离子淀粉、阳离子淀粉和原淀粉对于高岭石的活化作用依次减弱,且氧羟肟酸淀粉和羧甲基淀粉对高岭石有活化作用,阴离子淀粉使矿物表面  $\zeta$ -电位更负,阳离子淀粉使矿物表面  $\zeta$ -电位更正,非离子淀粉使矿物表面电位绝对值减小。非离子淀粉主要通过氢键作用吸附于矿物表面,而静电力和化学键合力在阴离子淀粉和阳离子淀粉吸附中发挥着重要作用。

由上述可知,淀粉以及变性淀粉在矿物表面的作用方式包括氢键、范德华力、静电力和化学键力及化学吸附等。淀粉及变性淀粉通过这些作用方式,吸附于一水硬铝石和铝硅酸盐矿物表面,由于一水硬铝石和铝硅酸盐矿物表面性质的差异导致该类药剂选择性吸附于一水硬铝石表面而产生抑制作用。同时,淀粉和变性淀粉分子量大,碳链长且支链多,吸附后可以完全罩盖住已经吸附在一水硬铝石表面的捕收剂,使得矿物表面亲水,产生抑制作用。

## (2) 合成高分子有机抑制剂

某些有机高聚物可以作为铝土矿浮选脱硅的抑制剂,如聚丙烯酰胺、氧羟肟酸聚丙烯酰胺和羧甲基聚乙烯醇等。刘广义等<sup>[49]</sup>的研究表明,在十二胺醋酸盐为捕收剂时,在适宜的 pH 条件下,聚丙烯酰胺可以选择性抑制一水硬铝石,其抑制机理是聚丙烯酰胺中的季铵基团与一水硬铝石表面的 Al-O 通过静电力作用吸附,同时酰胺基团与水溶液中的基团通过氢键发生作用,这样就造成了一水硬铝石表面亲水而发生抑制作用。李海普、胡岳华<sup>[46]</sup>在十二胺捕收剂体系下,研究了氧羟肟酸聚丙烯酰胺在铝土矿

反浮选中的作用,得出氧羟肟酸聚丙烯酰胺在整个试验 pH 值范围内对一水硬铝石和高岭石均有活化作用,该药剂通过氢键或化学作用吸附于矿物表面,使这两种矿物的动电位负移,且高岭石负移更多,从而更易于用阳离子捕收剂通过静电力吸附,实现反浮选。聚乙烯醇是亲水性的高分子化合物,常被用于絮凝剂、钾盐浮选的捕收剂和起泡剂等用途<sup>[50]</sup>。聚乙烯醇与一氯乙酸在碱性条件下合成的羧甲基聚乙烯醇形成了羟基羧酸类调整剂,亲水性进一步加大,且可与  $Al^{3+}$  阳离子形成螯合物发生吸附,可以作为一水硬铝石的抑制剂。

## 2.3 其他新型抑制剂

根据当前铝土矿浮选脱硅工艺,众多选矿工作者以传统浮选抑制剂的抑制机理为参考,开发出了许多新型高效抑制剂,并应用于实践,取得了良好的浮选指标。

刘长森等<sup>[5]</sup>经过大量的药剂复配试验,研制出一种新型含硅矿物抑制剂 ZMD,并在油酸钠为捕收剂的正浮选体系下,以六偏磷酸钠为参照,进行了对比试验,结果表明 ZMD 的浮选效果更优良,且针对原矿铝硅比为 5 左右的铝土矿,获得了铝硅比 7.08、氧化铝回收率 90.22% 的精矿;针对原矿铝硅比为 3 左右的铝土矿,获得了铝硅比 7.72、氧化铝回收率 70.56% 的精矿。

张云海等<sup>[51]</sup>以 YC 为捕收剂,研究了抑制剂 BK501 在一水硬铝石与高岭石反浮选分离中的作用效果和机理。研究表明,该药剂通过氢键和强烈的化学键合吸附于一水硬铝石矿物表面,对高岭石则通过静电力、化学作用和化学吸附方式作用,使其产生絮凝作用而显现活化上浮。对抑制剂 BK501A<sup>[52]</sup>的研究表明,BK501A 与一水硬铝石及高岭石之间主要通过氢键作用,但是对前者作用更为强烈,并且形成亲水性絮凝,从而实现抑制。

中南大学陈湘清等<sup>[53]</sup>在季铵盐 DTAL 作用下,研究了调整剂 SFL 对一水硬铝石和高岭石的浮选分离,试验得出,在酸性条件下,SFL 可以活化高岭石的浮选,且不影响一水硬铝石的浮选。动电位和吸附量测试研究得出,SFL 吸附在高岭石和一水硬铝石表面减弱其质子化反应并使其显著带负电,使得阳离子捕收剂更易于通过静电力吸附在矿物表面,且 SFL 增加了在高岭石表面的捕收剂吸附量,而在一水硬铝石表面的捕收剂吸附量有所减少。因此,SFL 是铝土矿反浮选的有效抑制剂。

刘炯天院士<sup>[54]</sup>等研究了某废菌在铝土矿反浮选中的抑制效果。研究表明,该菌对一水硬铝石抑制效果明显,而对高岭石的上浮影响不大。经对比试验,废菌对一水硬铝石的抑制效果明显优于传统的淀粉类抑制剂,在适宜的条件下,可改善一水硬铝石和高岭石的分离效果。进一步分析机理可知,该废菌中的羟基、胺基和羧基等通过氢键作用,使废菌吸附于一水硬铝石表面,从而使铝土矿亲水而受到抑制。

### 3 研究新型抑制剂的思路 and 方向

目前,我国铝土矿抑制剂研究取得了一定的成果。但由于我国铝土矿贫矿比例不断增大,铝土矿浮选脱硅工艺(尤其是反浮选脱硅工艺)需要新型高效药剂,特别是高效、无毒、环保的抑制剂。结合当前实际情况,笔者认为铝土矿浮选抑制剂的研究应注重以下几个方面。

(1)根据铝矿物和铝硅酸盐矿物表面晶体结构性质的差异,结合晶体化学和配位化学理论探索高效的亲固基团和亲水基团,并利用分子设计软件模拟设计新型抑制剂。根据价键因素(B)、亲水—疏水因素(H)和立体因素(S)具体评判新型抑制剂的抑制效果<sup>[36,55]</sup>,或者采用活性能量方程考察抑制剂与矿物的选择性作用效果,综合评判新型抑制剂的结构性能关系。

(2)对于铝土矿有机抑制剂设计和合成方面,张国范<sup>[56]</sup>和张剑锋<sup>[36]</sup>研究表明,可以在有机抑制剂的分子结构中引入 $-COOH$ 、 $-OH$ 、 $-CONH_2$ 等基团。而且对于有机抑制剂,其浮选抑制性能随着取代度的增大而增强,因此可以通过改变取代基的数目与结构调控抑制剂的抑制性能。同时由于有机药剂在合成时产生的副反应产物会直接影响浮选,因此需要探讨有机抑制剂的绿色合成方法与工艺,最大程度地减少副反应产物的生成。

(3)开发新型抑制剂时可以参考已存在抑制剂的结构、同系物和同分异构体。如根据六偏磷酸钠的分子结构,可以推测出结构相近的磷酸盐抑制剂,如正磷酸三钠、三聚磷酸盐等。朱建光、朱一民等<sup>[57]</sup>认为浮选药剂对矿物的浮选性能是它们物理和化学性质的集中体现,且药剂的同系列物和同分异构体与浮选性能关系密切。同系物化学性质相似,非同系物的同分异构体,在官能团相似时,对矿物也有相似的浮选作用,因此可以利用同分异构原理指导新型药剂的合成。

(4)开发的新型铝土矿抑制剂,还应特别注意环境保护、操作安全以及对后续生产氧化铝工艺和赤泥处理等方面的影响。新型抑制剂应在高效的基础上,尽量兼顾低成本、无毒、无腐蚀性、易降解、对环境友好、对后续工艺影响小或无影响等方面。

### 4 结语

随着高铝硅比铝土矿资源的开发殆尽,低品位、低铝硅比铝土矿的开发势必需要新型高效低成本、选择性好、无毒和环境友好的浮选抑制剂。抑制剂的研制,应注意与捕收剂产生的协同效应,强化对目的矿物的捕收和对脉石的抑制。同时,应注意抑制剂的同分异构原理和混合用药,提高浮选效率。此外,加强计算分子动力学模拟,以模拟计算来部分代替试验研究,可以大大缩短研发周期和减少研发成本,这部分也应作为今后研究的重点。

#### 参考文献:

- [1] 刘中凡,杜雅君.我国铝土矿资源综合分析[J].轻金属,2000(12):8-12.
- [2] 梁汉轩,鹿爱莉,李翠平,等.我国铝土矿贫矿资源的开发利用条件及方向[J].中国矿业,2011,20(7):10-13.
- [3] 徐政和,汪镜亮,杨辉亚.硬水铝石矿石反浮选的新进展—中国的经验[J].国外金属矿选矿,2005(2):13-18.
- [4] 马智敏,陈兴华,王玉才,等.铝土矿选矿脱硅技术研究现状及前景展望[J].矿产综合利用,2015(1):1-6+13.
- [5] 刘长森,方霖,吕子虎,等.新型抑制剂ZMD在铝土矿正浮选中的应用[J].矿产保护与利用,2013(5):27-30.
- [6] 牛宏斌,闫旭方,侯炳毅.石灰拜耳法工业试验存在问题及措施[J].有色冶金节能,2003,20(5):19-20+26.
- [7] 吴边华,董洁.关于铝土矿浮选脱硅的综述[J].煤炭技术,2008,27(4):120-122.
- [8] 罗琳,邱冠周,刘永康,等.论中国高硅低铁一水硬铝型铝土矿的几种处理方法[J].轻金属,1996(2):14-17.
- [9] 黄攀峰,张国范,冯其明.铝土矿浮选脱硅研究进展[J].矿产保护与利用,2003(1):50-54.
- [10] 冯其明,卢毅屏,欧乐明,等.铝土矿的选矿实践[J].金属矿山,2008(10):1-4+12.
- [11] 凌石生,章晓林,尚旭,等.铝土矿物理选矿脱硅研究概述[J].国外金属矿选矿,2006(7):9-12.
- [12] 孙传尧,印万忠,硅酸盐矿物浮选原理[M].北京:科学出版社,2001.
- [13] Zhao S M, Wang D Z, Hu Y H, et al. The flotation behaviour of N-(3-aminopropyl)-dodecanamide on three aluminosilicates[J]. Minerals Engineering, 2003,16(12):1391-1395.
- [14] 王淀佐,邱冠周,胡岳华.资源加工学[M].北京:科学出版社,2005.

- [15] 胡岳华,王毓华,王淀佐,等. 铝硅矿物浮选化学与铝土矿脱硅[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [16] 刘晓文. 一水硬铝石和层状硅酸盐矿物的晶体结构与表面性质研究[D]. 长沙:中南大学,2003.
- [17] 朱建光. 浮选药剂[M]. 北京:冶金工业出版社,1993.
- [18] 朱玉箱,朱建光,等. 浮选药剂的化学原理[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1982:260-262.
- [19] 戴安邦,等. 无机化学教程[M]. 北京:人民教育出版社,1962.
- [20] Xu Z, Plitt V, Liu Q. Recent advances in reverse flotation of diasporic ores—a Chinese experience[J]. *Minerals Engineering*, 2004,17(9):1007-1015.
- [21] 欧阳坚,卢寿慈. 微细矿粒的凝聚与分散[J]. 矿产综合利用,1996(2):43-48.
- [22] 刘亚川,龚焕高,张克仁. 六偏磷酸钠的作用机理研究[J]. 东北工学院学报,1993(3):231-235.
- [23] Gong W. A real time in situ Atr-Ftir spectroscopic study of linear phosphate adsorption on titania surfaces[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2001,63(3):147-165.
- [24] 张国范,冯其明,卢毅屏,等. 六偏磷酸钠在铝土矿浮选中的作用[J]. 中南工业大学学报(自然科学版),2001,32(2):127-130.
- [25] Choi I K, Wen W W, Smith R W. The effect of a long chain phosphate on the adsorption of collectors on kaolinite[J]. *Minerals Engineering*, 1993,6(11):1191-1197.
- [26] 胡岳华,陈湘清,王毓华. 磷酸盐对一水硬铝石和高岭石浮选的选择性作用[J]. 中国有色金属学报,2003,13(1):22-28.
- [27] 曹学锋,高建德,刘润清,等. 低铝硅比铝土矿正浮选脱硅试验研究[J]. 矿冶,2015,24(2):1-4,10.
- [28] 松岡功,等. 浮选中硅酸钠作用的研究[J]. 国外金属矿选矿,1976(4):1-7.
- [29] Guo J. A novel depressor useful for flotation separation of diasporic and kaolinite[J]. *Mining Science and Technology (China)*, 2010,20(2):292-295.
- [30] Manser R M,李长根. 硅酸盐矿物的浮选[J]. 国外金属矿选矿,1979(7):20-37.
- [31] Bruckard W J, Heyes G W, Guy P J. Flotation and screening recovery of titanium minerals from a monazite mineral sands circuit[J]. *Aus I M M Proceedings*,2001,306(1):11-21.
- [32] Andrews P. Activating anions in the topaz and tourmaline dodecylamine hydrochloride system[J]. *Minerals & Metallurgical Processing*, 1990,7(3):121-126.
- [33] Manser R M. *Handbook of silicate flotation*[M]. England: Warren Spring Laboratory,1975.
- [34] 陈湘清,胡岳华,王毓华. 氟化钠在铝硅酸盐矿物浮选中的作用机理研究[J]. 金属矿山,2004(10):32-35.
- [35] 程平平,钟宏,余新阳,等. 铝土矿反浮选抑制剂的研制进展[J]. 河南化工,2008(1):1-4.
- [36] 张剑锋. 新型有机抑制剂的合成及结构与性能关系研究[D]. 长沙:中南大学,2002.
- [37] 王淀佐,白世斌. 浮选有机抑制剂的结构与性能[J]. 有色金属,1983,35(2):47-54.
- [38] 付保军,郭爽. 铝土矿浮选的抑制剂研究[J]. 矿产保护与利用,2004(3):32-36.
- [39] 李海普,蒋玉仁,曹学锋,等. 变性淀粉的合成及其性能[J]. 矿冶工程,2001,21(4):29-32.
- [40] 吴永云. 淀粉在选矿工艺中的应用[J]. 国外金属矿选矿,1999(11):26-30.
- [41] Balajee S R, Iwasaki I. Adsorption mechanism of starches in flotation and flocculation of iron ores[J]. *Trans. Aime*,1969(244):401-406.
- [42] Massola C P, Chaves A P, Lima J R B, et al. Separation of silica from bauxite via froth flotation[J]. *Minerals Engineering*, 2009,22(4):315-318.
- [43] 李长凯,孙伟,张刚,等. 调整剂对高硫铝土矿浮选脱硫行为的影响[J]. 有色金属(选矿部分),2011(1):56-59.
- [44] Xia L, Zhong H, Liu G, et al. Utilization of soluble starch as a depressant for the reverse flotation of diasporic from kaolinite[J]. *Minerals Engineering*, 2009,22(6):560-565.
- [45] Xia L, Zhong H, Liu G, et al. Flotation separation of the aluminosilicates from diasporic by a Gemini cationic collector[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2009,92(1):74-83.
- [46] 李海普,胡岳华. 氧肟酸高分子药剂在铝土矿反浮选中的作用[J]. 金属矿山,2004(6):26-28+71.
- [47] 李海普,胡岳华,蒋玉仁,等. 变性淀粉在铝硅矿物浮选分离中的作用机理[J]. 中国有色金属学报,2001,11(4):697-701.
- [48] 李海普. 改性高分子药剂对铝硅矿物浮选作用机理及其结构—性能研究[D]. 长沙:中南大学,2002.
- [49] Liu G, Zhong H, Hu Y, et al. The role of cationic polyacrylamide in the reverse flotation of diasporic bauxite[J]. *Minerals Engineering*, 2007,20(13):1191-1199.
- [50] 见百熙. 浮选药剂[M]. 北京:冶金工业出版社,1981:317-352.
- [51] 张云海,吴熙群,曾克文,等. 铝土矿反浮选脱硅中BK501抑制剂的研制与应用[J]. 金属矿山,2006(11):41-44.
- [52] 张云海,魏德州,曾克文,等. 选择性抑制剂BK501A在铝土矿反浮选脱硅中的应用[J]. 有色金属(选矿部分),2007(5):42-45.
- [53] 陈湘清,王毓华,胡岳华,等. 调整剂在浮选分离一水硬铝石和高岭石中的研究[J]. 矿冶工程,2004,24(5):35-38.
- [54] 代淑娟,刘炯天,杨树勇,等. 某废菌在铝土矿反浮选中的抑制效果[J]. 金属矿山,2012(5):96-99,125.
- [55] 蒋玉仁. 黄金浮选剂设计与合成及结构性能关系研究[D]. 长沙:中南工业大学,1994.
- [56] 张国范. 铝土矿浮选脱硅基础理论及工艺研究[D]. 长沙:中南大学,2001.
- [57] 朱建光. 朱一民. 浮选药剂的同分异构体原理和混合用药[M]. 长沙:中南大学出版社,2011.