

胺类捕收剂的应用现状及发展前景

闫雅雯¹, 罗惠华¹, 赵军¹, 刘宇桐¹, 张振翼²

1. 武汉工程大学 资源与安全工程学院, 湖北 武汉 430073;
2. 孝感市天翔矿业科技有限公司, 湖北 孝感 432818

中图分类号: TD923⁺.13 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2022)02-0059-08
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2022.02.007

摘要 胺类表面活性剂是矿物浮选常用的一类阳离子捕收剂, 详细阐述了胺类药剂在磷矿、铝土矿、铁矿以及菱镁矿和氧化铅锌矿浮选中的应用, 分析了胺类药剂对矿物表面的电性影响与吸附性能, 并且对不同碳链长度、不同类型以及不同取代基位点的胺类捕收剂进行对比。评述并总结了胺类捕收剂的实际应用及其作用机理, 并进一步展望了未来胺类药剂研究的发展方向。

关键词 浮选; 胺类药剂; 捕收剂; 磷矿; 铝土矿; 铁矿; 菱镁矿; 氧化铅锌矿

0 引言

胺类表面活性剂是矿物浮选常用的一类阳离子捕收剂, 由于其在水中水解形成 $-NH_3^+$ 基团, 这种带正电的基团与矿物表面发生吸附作用, 烃基部分具有很强的疏水性, 使得矿物表面疏水, 所以称之为阳离子捕收剂^[1]。在一定的介质条件下, $-NH_3^+$ 基团能有效捕收呈负电性的硅酸盐矿物以及金属氧化物等^[2], 阳离子表面活性剂与矿物表面有较强的半胶束吸附, 进一步形成矿物与捕收剂分子的吸附基团, 且在使用时受温度影响较小^[3], 基本不存在低温条件下捕收能力减弱的弊端, 所以胺类药剂成为浮选硅酸盐矿物、金属氧化物等较优的选择。但是, 由于胺类捕收剂在浮选中泡沫黏、选择性差、对矿泥较敏感等缺点, 限制了其在实际应用中的推广。因此, 许多研究者在胺类药剂在矿物浮选的应用以及表面电性、吸附能以及模拟计算方面进行了深入研究, 同时针对胺类捕收剂的弊端进行改良, 提高其浮选性能, 不断研制出新型的胺类捕收剂, 以便更好应用于矿物浮选中。

1 胺类捕收剂

胺类阳离子捕收剂大致可以分为以下几类^[4]:
(1) 脂肪胺, 分为伯胺、仲胺和季胺, 一般含有 RNH_2 基

团, 其中 R 一般为 $C_{12}-C_{14}$, 固体或膏状物; (2) 醚胺液体, 一般含有 $R-O-(CH_2)_3 \cdot NH_2$, 其中 R 为 C_8-C_{13} ; (3) 季铵盐, 结构多为四个烷基与中心氮离子相连接; (4) 脂肪二胺, 一般结构式为 $RNH_2(CH_2)_3 \cdot NH_2$, 其中 R 为 C_{12-24} 产品为固体或者膏状物; (5) 醚二胺, 结构多为 $R-O-(CH_2)_3 \cdot NH-(CH_2)_3 \cdot NH_2$, R 碳链与上述醚胺类似, 产物一般为液体; (6) 松香胺和芳香胺; (7) 胺类缩合物和吗啉。

使用胺类捕收剂时, 应特别注意矿浆 pH 值的调节和控制, 矿浆中 RNH_3^+ 和 RNH_2 相对浓度的大小影响矿物的浮选, 同时, 矿浆中其他无机盐阳离子对胺类阳离子在矿物表面双电层的静电物理吸附也有同样重要的作用。胺盐作为捕收剂在酸性或中性矿浆中 RNH_3^+ 的浓度较高, 且比较稳定; 当浮选需要在弱碱性介质下进行, 可直接采用脂肪胺或者季铵盐药剂进行浮选; 而在较高 pH 值的强碱性矿浆中, 胺盐易形成游离胺分子 (或沉淀), 如果必须要在碱性较高的矿浆中进行浮选, 可以直接使用脂肪胺的煤油、燃烧油或酒精等溶液, 而不必使用伯胺的胺盐水溶液。胺类捕收剂在矿物表面的吸附不牢固^[5], 胺的阳离子 (RNH_3^+) 在氧化物表面吸附主要是靠静电引力的作用 (包括分子间作用力), 这种吸附不牢固, 易于从矿物表面上解吸, 为了造成有利于半胶团吸附的条件, 必要时可以

收稿日期: 2022-04-11

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(CX2021487)

作者简介: 闫雅雯(1997-), 女, 硕士研究生, 从事磷矿浮选药剂开发, E-mail: 290788552@qq.com。

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

加入适宜长度的烃链中性分子等,这样可显著改善浮选效果(即改善胺类捕收剂的临界胶束浓度);但从另一方面来看,矿物与药剂基团吸附不牢固,有利于混合精矿的进一步浮选分离。

由于胺类捕收剂对矿泥较为敏感,在使用前要重点关注对矿浆性质的调节。胺类捕收剂中的 RNH_3^+ 易于吸附在荷负电的矿泥颗粒表面,这样不仅会消耗大量的捕收剂,而且会产生大量的黏性泡沫,使浮选过程失去选择性,降低浮选效果,所以使用胺类捕收剂时,矿浆常需要预先脱泥。当矿物表面风化、污染时,为了提高胺类捕收剂的选择性,一般可用酸、碱性溶液在较高的矿浆浓度条件下进行强烈搅拌和擦洗,脱除矿泥后再用新鲜水调浆,可改善矿物的浮选效果。一般而言,胺类捕收剂对水的硬度不太敏感,但当水的硬度过高时,水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 产生竞争吸附,增大了胺类药剂的用量,此时应当采取适当的措施软化水^[6]。针对胺类捕收剂使用时泡沫黏性大、选择性差等常见问题,可以采用改性、复配或者与其他类药剂混合使用等方法改善。

2 胺类捕收剂作用机理

浮选药剂作用机理分析一般从两个方面考虑:一个方面是作用机理解释,另一个方面是对试验研究中的现象和表征作机制分析。对于胺类捕收剂与矿物的作用机理主要用双电层理论和水解理论两个基本理论来解释。在实际矿物浮选中,究其吸附本质,应归结于胺的阳离子 RNH_3^+ 在矿物表面双电层上发生静电物理吸附。很多学者进而研究了胺类药剂与矿物作用的表面基团特性以及电位变化,从微观的角度对其进行了表征,甚至利用计算机构建算法模型对胺类捕收剂的表面反应进行模拟演算。

2.1 矿物表面电性与捕收剂基团特性

在药剂与矿物作用的表征分析中,通过矿物表面电性和动电位的变化来明确药剂作用的微观表现。相关文献分析了铁矿物和硅质矿物的表面电性与矿浆 pH 的关系,以及胺类捕收剂在矿浆中的水解行为,强碱性条件下,胺类捕收剂主要以 $\text{R}-\text{NH}_2$ 形式存在,导致其不能有效地与硅质矿物作用,难以通过反浮选降硅;酸性过强时,矿浆中胺阳离子(RNH_3^+)浓度过高,胺阳离子之间通过氢键相互作用,减少甚至失去与矿物颗粒的吸附作用,不能取得好的分选效果^[7]。代淑娟等^[8]利用 Zeta 电位测定及红外光谱分析,胺类药剂(如 LKD-1)在石英及滑石表面存在静电吸附作用,胺类阳离子捕收剂与石英的作用方式不是化学吸附而是物理吸附,而滑石与胺类药剂作用后出现了 N-H 伸缩振动的吸收峰,说明既存在物理吸附又存在化学吸附。将昊等^[9]发现烷基胺类阳离子捕收剂以静电作

用力吸附于铝硅酸盐矿物表面的层面使矿物疏水上浮。

除了对矿物表面电性的分析,也可通过原子力显微镜观察对比不同胺类捕收剂吸附在白云母表面的行为,例如在白云母表面吸附的十二胺药剂分子比十二烷基三甲基溴化铵更多。石玉翔等^[10]采用 PCFF phyllosilicates 分子力场,模拟研究白云母表面的水化作用,因为伯铵盐能稳定地吸附在白云母表面,致使改善白云母表面亲水性的能力强于季铵盐,较好地解释了伯铵盐能更好地减弱白云母表面的亲水性^[10]。

2.2 吸附模型与模拟计算

在研究药剂与矿物表面的吸附机制时,常采用专业的建模软件对分子吸附模型进行模拟计算,然后根据吸附量对比多胺类、醚胺类及伯胺类与石英的吸附能力。鄢恒珍等^[11]通过上述电子模型研究,发现多胺类的吸附性能优于伯胺类与醚胺类。杨雪莹等^[12]通过对药剂与矿物吸附前后 Zeta 电位的检测,用基于 MS 软件的 CASTEP 模块计算醚胺类捕收剂 DXY-1 与石英矿物表面的吸附作用能,明确了醚胺类捕收剂 DXY-1 与石英(101)表面之间的吸附为静电吸附和氢键作用。王贤晨等^[13]利用 Material Studio 软件分析氟磷灰石(001)面与石英(001)面的电子性质,表明胺类捕收剂与石英之间的结合能大小顺序为醚胺类 > 多胺类 > 烷基伯胺类,赵声贵等^[14]进一步发现烷基胺捕收剂与铝硅酸盐矿物的作用主要是静电吸附和氢键作用;彭兰等^[15]发现与十二伯胺相比,多胺类药剂在矿物表面的活性基团增多,且计算结果说明,多胺类捕收剂是比十二胺更佳的铝硅酸盐矿物的浮选捕收剂。王本英等^[16]根据遗传算法,构建 20 种胺类捕收剂在石英表面上的吸附能与其结构参数之间的定量构效关系模型,模型能够较好预测胺类捕收剂在石英表面上的吸附能。

很多研究者从模型建立与模拟计算角度,发现相关规律以及新型胺类药剂的合成原则。赵利宁等^[17]从表面活性剂的视角计算了多胺捕收剂的 HLB 值(亲水亲油值)、极性基团电负性和 CMC(临界胶束浓度)值,表明多胺捕收剂中的多个胺基,共同决定其分子电负性、HLB 值和 CMC 值的大小,多胺捕收剂的捕收能力较大,谭凯旋等^[18]结合 Curls 软件中的高岭石晶体模型分析,从亲矿物基和非极性基两方面设计合成多胺类捕收剂 DN12,通过浮选试验、浮选溶液化学计算、动电位测定和红外光谱测定,研究了该新型药剂对铝硅酸盐矿物的浮选作用及其机理。

2.3 不同维度微观对比

在药剂性能方面,主要集中在不同种类、不同取代基或不同碳链长度的胺类药剂的捕收能力的研究。李

仕亮等^[19]通过单矿物浮选试验研究了不同胺类药剂捕收能力的强弱,利用基团电负性、水-油平衡度和疏水链长的计算结果,推测 3 种捕收剂对含钙矿物捕收性能的差异,结果表明极性基决定了它们的差异性。寇玉等^[20]利用石英晶体微天平(QCM-D)并结合电位研究了不同浓度下捕收剂在石英表面上的吸附机理,并在相同条件下,对比乙酸酰胺 PA70 与新型阳离子胺类捕收剂 605G83,发现胺类药剂在石英表面上可以形成规则且牢固的吸附层。王本英等^[21]研究了不同取代基的胺类捕收剂对石英、赤铁矿单矿物的捕收性能,在阳离子捕收剂分子结构中引入羟基(-OH)或胺基(-NH₂)官能团有利于其对石英的捕收。周琼波等^[22]对不同链长的阳离子胺类捕收剂对石英的捕收能力进行了研究,在中性条件下,碳链长度以 12~14 个碳为宜。

3 胺类捕收剂的应用

由于胺类捕收剂具有较好的捕收特性,且受温度影响较小,目前在磷矿、铝土矿、铁矿以及菱镁矿和氧化铅锌矿浮选中均有广泛的应用。浮选中,一般多采用反浮选脱出脉石矿物,有时也采用(硫化-)胺法浮选,许多研究都取得了较好的浮选指标,对实际矿石的综合利用以及资源可持续发展有重要作用。

3.1 反浮选脱硅

反浮选常采用阳离子表面活性剂在弱酸性或中性条件下浮选硅酸盐矿物,降低选矿产品中 SiO₂ 的含量。阳离子表面活性剂在硅酸盐矿物上的吸附比在其他矿物上更有效,可能是由于硅酸盐矿物表面带有更多负电荷^[22]。

3.1.1 磷矿反浮选脱硅

在磷矿反浮选中,阳离子捕收剂主要用于去除硅酸盐矿物,其在水中能解离出 -NH₃⁺,在一定的 pH 范围内,-NH₃⁺能有效捕收石英^[23]。郭芳等^[24]发现粗粒级的硅酸盐矿物可以采用擦洗去除,而细颗粒的硅酸盐矿物则可通过反浮选脱出,与醚胺盐或季铵盐(CTAB)相比,烷基胺盐(DAH)可以更好地浮选去除硅酸盐矿物。Sahoo 等^[25]研究纯石英的浮选行为,证明十六烷基溴化吡啶和苄基二甲基十四烷基氯化铵捕收石英优于传统阳离子捕收剂 DDA(十二胺)和 CTAB。有研究表明乙醚二胺在中粗粒石英浮选中效果较好,而乙醚多胺在细粒石英浮选中效果较好,且在矿浆 pH 为 9 时较好^[26]。Nunes^[27]采用胺类捕收剂反浮选去除硅酸矿物时,由于阳离子捕收剂选择性差、消泡难且仅适用于弱碱性矿浆,致使实际应用效果较差,因此,亟待开发出新型高效、消泡快的阳离子反浮选脱硅捕收剂。吴中贤等^[28]研制出新型胺类捕收剂 KDJ,

在酸性矿浆条件下,采用一次粗选两次扫选的脱硅闭路流程,获得了磷精矿中 P₂O₅ 品位 29.75% 的良好指标;张华等^[29]采用自主研发的 YP-ZYS 胺类脱硅捕收剂,硅脱除率提高至 91.87%;程仁举等^[30]对于矿石 P₂O₅ 含量低,矿物组成简单的贵州中低品位胶磷矿,以改性的胺类捕收剂 EM-FM-01 作为反浮脱硅捕收剂,获得了 P₂O₅ 品位 31.26% 的磷精矿。胺类药剂选择性差的主要原因是胺类捕收剂优先附着于矿泥中,消耗了胺类捕收剂但未浮出脉石矿物。针对这一问题,杜橙幻等^[31]采用预先脱泥再反浮选脱硅的方法,并搭配使用多胺类捕收剂 T609 和消泡剂 TOP,从而改善阳离子捕收剂反浮选过程中泡沫多、黏度大、难冲消的问题。浮选中胺类捕收剂与矿物一般为半胶束吸附,为了增强胺类捕收剂的半胶束吸附,可以采用胺类捕收剂与工业杂醇或脂肪酸类表面活性剂复配。复配后的捕收剂在矿物颗粒表面形成了相互平行的吸附,其非极性基能够相互缔合,从而加大捕收剂在矿物表面上的吸附量,使其更容易与气泡接触上浮,以取得较好的浮选效果^[32-33]。

胺类捕收剂在磷矿浮选中多采用反浮选流程以达到脱硅的目的,胺类药剂对温度适应性强但存在泡沫黏以及选择性差的特点,所以许多研究者常搭配泡沫调整剂或采用先脱泥后浮选的处理方法。

3.1.2 铝土矿反浮选脱硅

在铝土矿浮选中,胺类捕收剂能够有效脱除硅酸盐矿物,提高精矿的铝硅比。不同胺类捕收剂的浮选脱硅性能有一定的差异,相较于单胺类药剂,多胺类捕收剂的浮选效果更佳。刘水红^[34]等对比几种胺类药剂的捕收性能,多胺类捕收剂 1228、1227 的捕收性能强于十二胺与十八胺。周杰强等^[35]使用某种自主研发的多胺类组合药剂,采用一次粗选两次扫选一次精选、中矿顺序返回流程处理,可获得 Al₂O₃ 含量为 65.35% 的铝精矿。还有一些新型胺类药剂,比如 N-十二烷基-1,3-丙二胺^[36]、Wj-13^[37]以及四种胺类药剂合成的 C401^[38]等,其应用于铝土矿反浮选中,均得到了较好的精矿指标。刘安荣等^[39]针对高硅高硫铝土矿,使用胺类混合捕收剂(主要含十二胺和十八胺),松醇油为起泡剂,采用一次粗选两次精选两次扫选闭路流程,得到 Al₂O₃ 回收率为 84.92%、铝硅比为 7.11 的铝土矿精矿。

铝土矿和铝硅酸盐矿物的分离主要依附于两者表面所带电荷相反,铝硅酸盐矿物表面带负电荷,易于同阳离子捕收剂作用而上浮,碱性较强时,捕收剂以 RNH₂ 存在不能在铝硅酸盐矿物表面上较好的吸附。为了保持适当的 RNH₃⁺ 浓度,所以多选择在稍偏酸性的矿浆条件下进行浮选。

3.1.3 铁矿反浮选脱硅

铁矿石反浮选常用的阳离子捕收剂多为胺类捕收剂。胺类捕收剂品种繁多,如我国生产的混合胺,前苏联生产的 AMII 等都属于胺类捕收剂。但是与磷矿浮选类似,应用中同样存在选择性较差、泡沫黏性大的问题。针对上述问题,刘文刚等^[40]利用常见的胺类表面活性剂—月桂酰基丙基叔胺为原料,合成新型的低毒高降解性胺类表面活性剂—月桂酰基丙基氧化胺(LAO),其对石英和赤铁矿具有良好的选择性,在适宜条件下,LAO 对赤铁矿和石英的分离效率可达 88.86%;新型醚胺类阳离子捕收剂 DCZ^[41]与石英及赤铁矿发生了氢键吸附,与磁铁矿发生了静电吸附,可实现石英与赤铁矿及磁铁矿有效分选;朱一民等^[42]采用 N-十二烷基乙二胺与 N-十二烷基-1,3-丙二胺两种捕收剂,赤铁矿反浮选脱硅时,获得 TFe 品位分别为 67.2% 和 66.78% 的精矿。刘文刚等^[43]在常规胺类阳离子捕收剂分子结构中引入第二个基团(羟丙基)合成了羟丙基胺类捕收剂,在弱酸或中性条件下,有效分选赤铁矿与石英。徐冬林等^[44]采用醚胺类复配捕收剂 DLT-1,对鞍山千贫赤铁矿进行一次粗选一次精选三次扫选的浮选闭路试验,反浮选获得铁精矿 TFe 品位 67.01% 的技术指标。夏光华等^[45]在铁精矿脱硅反浮选过程中,根据矿石性质,调整矿浆 pH 值在一定的范围内,能使矿浆中的胺阳离子捕收剂保持适当的浓度,可获得更好的浮选指标。

罗立群等^[46]发现单独使用胺 A24 比混合胺(C₈~C₁₆)类捕收剂更加有效,获得了较好的浮选脱硅效果,采用胺类组合皂化油酸表面活性剂作为高岭土中含铁矿物的捕收剂,使北海高岭土精矿自然白度达到 85%~86%,煅烧(1 200 ℃)白度达到 88%~89%。

在一定 pH 范围内(多为弱碱性),常采用阳离子捕收剂将含硅脉石矿物(主要为石英)浮选到泡沫相中,采用淀粉等抑制剂抑制赤铁矿后,阳离子反浮选石英是一种最重要的分选铁矿石的方法^[47]。我国对阳离子捕收剂的研究还远远不够,目前,国内使用和研究的阳离子捕收剂主要有十二胺^[48]、季铵盐、醚胺、醚多胺系列、多胺(如 N-十二烷基乙二胺、N-十二烷基-1,3-丙二胺)CS 系列、GE 系列、DHPA、N-十二烷基-β-氨基丙酰胺(DAPA)等。铁矿阳离子反浮选脱硅工艺具有较大的优势,如药剂制度简单,同时兼具起泡性,又可节省加温费用,但是由于阳离子捕收剂现有种类较少(以伯胺类为主)、对矿泥敏感、泡沫产品黏度高且难处理等因素,使阳离子反浮选工艺现在未能在我国的大多数铁矿选厂广泛应用。为满足节能减排及选矿技术工艺的要求,研发出常温具备高效回收目的矿物的浮选药剂具有重要意义。

3.1.4 菱镁矿反浮选脱硅

菱镁矿反浮选捕收剂通常采用以十二胺、十八胺、醚胺为主的胺类阳离子捕收剂。在浮选过程中,胺类捕收剂主要通过解离后疏水的 RNH₃⁺ 离子对硅酸盐矿物起捕收作用^[49-50]。卢惠民等^[51]结合辽南地区菱镁矿的高硅低钙特点,首次以醚胺作为反浮选捕收剂,很好地捕收石英和滑石。新型阳离子捕收剂的研制也取得了一定成果,新型胺类药剂 Wely^[52]、KD-I^[53]在菱镁矿反浮选除硅中取得了良好效果,该药剂具有选择性好、能低温浮选、泡沫稳定、易消泡等特点。于连涛等^[54]使用辽宁科技大学自主研发的新型捕收剂 LKD,得到了 MgO 含量为 97.10% 的菱镁矿精矿。

菱镁矿石中的石英与胺类药剂的主要作用机制是:石英中氧原子的 2p 轨道对费米能级附近的态密度贡献最大,且石英的导带能级大于菱镁矿的导带能级,所以使得石英容易参与反应,氧活性强,易与阳离子捕收剂作用。石英的零电点为 2~3.7,而菱镁矿的零电点为 5.5,此时药剂同时吸附于菱镁矿表面上,致使两者不能有效分离,因此,多在碱性条件下进行反浮选,此时石英电负性远大于菱镁矿电负性,使得石英优先吸附捕收剂,使菱镁矿与石英得到有效分选。

3.2 铅锌氧化矿中锌的富集

浮选氧化铅锌矿石时,矿浆中胺类捕收剂发生解离和水解反应,RNH₂ 中的 N 原子的孤对电子与矿物表面的 Pb²⁺ 离子和 Zn²⁺ 可以生成络合物,发生化学吸附。硫化-胺浮选法是较为常用的方法,且多使用自主研发的醚胺类或伯胺类与脂肪酸复配药剂。在铅锌氧化矿浮选中,先加入硫化剂硫化矿物表面,使其在表面生成一层疏水性的硫化膜,然后采用巯基捕收剂浮铅,后脱泥,最后采用胺类捕收剂进行浮锌。很多实际矿物浮选都采用了上述方法,皇甫明柱等^[55]针对云南某大型铅锌矿低品位氧化带的矿石采用硫化-黄药浮铅和脱泥—硫化—新型胺类捕收剂 KZF 浮锌的工艺流程,取得了铅精矿铅品位 39.92%,锌精矿锌品位 37.03% 的工艺指标。余正华等^[56]针对预先脱泥造成大量金属流失,且直接硫化-胺法浮选很难富集的硫氧混合铅锌矿,可在浮选过程中加入分散剂腐殖酸钠+LA 处理硫化锌浮选尾矿矿浆,再加入高效的选择性絮凝剂 KN 絮凝细泥,絮凝沉降后的精矿再加入硫化钠及胺类捕收剂 SA 进行硫化—胺法浮选,可获得氧化锌精矿品位达 35.26%、总回收率达 81.26% 的良好指标。针对云南某氧化铅锌矿,在不脱泥的条件下,李来顺等^[57]采用硫化—黄药法浮铅和硫化—胺法浮锌工艺流程,也获得了锌矿回收率 71.02% 和锌精矿品位 23.51% 的良好指标,且经过对比伯胺类和醚胺类药剂的浮选性能,最终选择醚胺类捕收剂 CE-619 应

用于闭路试验。罗仙平等^[58]先采用 Na_2CO_3 调浆,再硫化浮铅,然后不脱泥直接采用胺类组合捕收剂 ZP-05 浮选的方法,可获得含铅 40.42%、含锌 16.28% 的锌精矿。余江鸿等^[59]采用先硫化浮铅,然后脱泥浮锌的工艺流程,并选用浮铅的高效辅助捕收剂 S-8 和氧化锌矿物的胺类组合捕收剂 A-9,使铅、锌得到了较好的分选。硫化-胺法对菱锌矿、硅锌矿和水锌矿的回收效果较好,但对云母、云母、绿泥石或碳质页岩含量较高的矿石,若使用该法回收效果不好。目前,该工艺还常常使用组合药剂,即伯胺类捕收剂与黄药混用,具有较强的捕收作用,可以捕收氧化锌矿石和铁菱锌矿等异极矿,从而对铅锌矿物实现有效分选。

叶军建等^[60]则采用复配药剂直接浮选,贵州某地氧化锌矿石泥化严重,试验结果表明使用脂肪酸类捕收剂 FA-1 和胺类捕收剂 GA-1 组合捕收剂时浮选指标较好,通过一次粗选可以获得精矿锌品位 22.59%、锌作业回收率 74.03% 的指标。相关新型胺类捕收剂的研发也推动着胺类捕收剂在铅锌矿领域的应用,靳晨曦等^[61]开发了一种新型胺类捕收剂 F210,采用两次粗选两次精选闭路浮选流程,得到锌品位为 28.64%、回收率为 52.24% 的锌精矿,实现了对极低品位氧化锌矿的有效回收。谢丹丹等^[62]采用十八伯胺醋酸盐作为氧化锌矿的捕收剂,效果较好,泡沫黏度较低,捕收能力强,药剂效果较稳定。

3.3 其他矿物浮选

胺类捕收剂还可以应用于煤矿、钒矿、重晶石等的浮选。在煤矿中有较好的应用,主要是胺类捕收剂由于其物理吸附和络合物吸附作用,对褐煤中石英、硅酸盐和碳酸盐等矿物质具有较好的捕收作用。宁可佳等^[63]以内蒙古宝日希勒的褐煤为研究对象,通过煤泥反浮选试验和正交试验等研究了褐煤的表面特性和浮选特性,试验发现十二胺(DDA)对褐煤的反浮选效果优于十八胺(ODA)和十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)。针对江西某石煤型钒矿中的钒主要赋存于钒云母、含钒云母及褐铁矿中,且部分含钒矿物具有弱磁性的特点,陈志强等^[64]采用磁选-浮选联合工艺,浮选中使用高效抑制剂抑制 GZS 及胺类捕收剂 TAN 回收钒,在原矿钒品位为 0.86% 时,可获得钒品位 1.41%、回收率 84.01 的钒精矿,尾矿钒品位为 0.26。刘西分等^[65]使用脂肪酸类捕收剂 8#油与胺类捕收剂 F-102 处理锆英石强磁尾矿,经 1 次粗选 2 次精选 1 次扫选优先浮选重晶石,最终可获得产率 22.51%、品位为 63.18、回收率为 95.44% 的重晶石精矿。

4 结语

胺类药剂主要分为脂肪胺、醚胺、季铵盐、脂肪二胺、醚二胺等,其酸性盐在不同的介质条件下,组成不

同,酸性以及弱碱性矿浆中主要以 $\text{R}-\text{NH}_3^+$ 离子形式存在,而 $\text{R}-\text{NH}_2$ 分子存在于强碱介质,当胺类药剂作为矿物浮选捕收剂时,需要特别注意的是矿浆 pH 值的调控,浮选较细粒级的矿石时,前期有必要进行脱泥、脱药等处理。在阳离子捕收剂分子结构中引入羟基(-OH)或胺基(-NH₂)官能团有利于其对石英的捕收,浮选采用的胺类捕收剂的碳链长度以 12~14 个碳为宜,通过对现有的胺类药剂进行改性、复配或合成,可获得性能更好的新型胺类捕收剂。多胺类捕收剂优于单一胺类捕收剂,复配捕收剂优于单一胺类捕收剂,胺基基团越多,更加容易与石英颗粒表面产生物理吸附,其次是其含有混合碳链,多种碳链复合药剂更容易提高捕收剂选择性和增强胺类捕收剂的半胶束吸附。

通过红外光谱、Zeta 电位、模型设计或模拟计算等现代测试以及技术手段研究胺类药剂的浮选机理。胺类捕收剂药剂只要是以物理吸附的形式附着在硅酸盐矿物的表面,而不是化学吸附,有时存在氢键的作用,主要用于在磷矿、铝土矿、铁矿以及菱镁矿等矿物反浮选脱硅;由于胺类药剂中的 N 原子的孤对电子与矿物表面的金属离子可以生成络合物,在金属氧化矿的表面吸附方式多为化学-物理混合吸附,因此,在氧化铅锌矿浮选中,采用(硫化-)胺法浮选,富集金属氧化矿降低精矿的脉石含量。

对于未来胺类药剂的发展趋势,主要总结为如下几点:

(1) 揭示药剂分子与矿物表面的作用机理

借助于现代检测分析手段,结合理论知识与计算化学(分子轨道概论、电子结构理论、固体能带理论、密度泛函理论、分子动力学、统计热力学等),明确胺类捕收剂与不同矿物的作用本质。目前开展的胺类捕收剂方面的研究多是借助微观模型与分子模拟计算,初步判断胺类捕收剂在矿物表面的吸附机理和计算分子作用能,未来从模拟计算和模型构建上更加深入和广泛地研究胺类药剂与矿物作用的吸附模型,明确离子及键能之间的协同作用,并根据离子效应,进一步降低胺类捕收剂泡沫黏性大的问题。

(2) 研究胺类药剂构效关系与分子设计

传统的胺类捕收剂构效关系研究仅仅考虑了药剂分子本身的结构,忽略药剂在实际浮选过程中与水分子、矿物作用表面的相互作用,虽然基于模型构建的模拟计算可以一定程度上体现胺类药剂在溶液体系中的性能,却不能描述其与矿物、水界面的相互作用微观机制,无法提供准确的微观结构信息。未来有关药剂分子设计的研究应对不同的矿物界面体系提出合适的分子模拟,是胺类药剂发展的重要方向。

(3) 扩大胺类捕收剂工业应用

开展新型脂肪胺类捕收剂性能研究,开发出泡沫

黏度小、选择性好的阳离子胺类捕收剂。目前,胺类捕收剂的研究多集中在单一药剂的使用,而近年来开发出的高效新型阳离子捕收剂较少,应当进一步考察新型阳离子捕收剂作用机理和不同类矿石的性质,以更好的研发适用于特定矿石性质的新型胺类捕收剂。

参考文献:

- [1] LUO Y J, ZHANG G F, MAI Q Y, et al. Flotation separation of smithsonite from calcite using depressant sodium alginate and mixed cationic/anionic collectors [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, 124227(586): 1-7.
- [2] 刘文彪,马航,傅英,等.云南某反浮选脱镁磷精矿再反浮选脱硅除MER值试验研究[J].*化工矿物与加工*,2021,50(3):13-15+42.
LIU W B, MA H, FU Y, et al. Experimental study on desilication and MER reduction of a reverse flotation magnesium phosphorus concentrate in Yunnan [J]. *Chemical Minerals & Processing*, 2021, 50(3): 13-15+42.
- [3] 马丽娜,沙景华,闫晶晶,等.基于系统动力学的我国磷矿资源需求情景预测[J].*中国矿业*,2020,29(3):33-39.
MA L N, SHA J H, YAN J J, et al. A system dynamics-based scenario for predicting the demand for phosphate resources in China [J]. *China Mining*, 2020, 29(3): 33-39.
- [4] 张泾生,阙焯兰.矿用药剂[M].北京:冶金工业出版社,2008:277-279.
ZHANG J S, QUE X L. *Beneficiation Reagent* [M]. Beijing: Metallurgical Engineering Press, 2008: 277-279
- [5] 刘树永,韩百岁,赵通林,等.中低品位磷矿浮选药剂研究现状与展望[J].*矿产综合利用*,2021(6):91-100.
LIU S Y, HAN B S, ZHAO T L, et al. Current status and prospects of research on flotation chemicals for low and medium grade phosphate ores [J]. *Comprehensive Utilization of Mineral Resources*, 2021(6): 91-100.
- [6] 高子蕙,朱一民.疏水碳链长度对胺类捕收剂起泡性能的影响研究[J].*金属矿山*,2019(2):129-134.
GAO Z H, ZHU Y M. The hydrophobic carbon chain length of amine collector foaming performance study [J]. *The influence of metal mines*, 2019(2): 129-134.
- [7] 谢国先,刘朝竹,李帆,等.低品位混合型硅质磷块岩的工业化应用研究[J].*矿业研究与开发*,2021,41(10):153-157.
XIE G X, LIU C Z, LI F, et al. Industrial application of low grade mixed siliceous phosphorus block [J]. *Mining Research and Development*, 2021, 41(10): 153-157.
- [8] 代淑娟,于连涛,李晓安,等.捕收剂LKD-1对石英和滑石的作用机理[J].*中国矿业*,2015,24(10):141-144.
DAI S J, YU L T, LI X A, et al. Mechanism of collector lkd-1 on quartz and talc [J]. *China mining*, 2015, 24(10): 141-144.
- [9] 蒋昊,胡岳华,覃文庆,等.直链烷基胺浮选铝硅矿物机理[J].*中国有色金属学报*,2001(4):688-692.
JIANG H, HU Y H, QIN W Q, et al. Mechanism of straight chain alkyl amine flotation of Aluminum-silicon minerals [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2001(4): 688-692.
- [10] 石玉翔,王林林,刘跃龙,等.相同链长伯胺盐和季铵盐对云母表面润湿性的影响[J].*有色金属(选矿部分)*,2017(4):93-98.
SHI Y X, WANG L L, LIU Y L, et al. Effect of primary ammonium salt and quaternary ammonium salt with same chain length on surface wettability of mica [J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2017(4): 93-98
- [11] 鄢恒珍,龚文琪.胺类捕收剂生物降解性能与其结构相关性研究[J].*上海环境科学*,2014,33(6):255-259.
YAN H Z, GONG W Q. Biodegradation of amines and their structures [J]. *Shanghai Environmental Science*, 2014, 33(6): 255-259.
- [12] 杨雪莹,朱一民,李艳军,等.捕收剂DXY-1在石英表面的捕收性能及机理研究[J].*金属矿山*,2020(6):110-113.
YANG X Y, ZHU Y M, LI Y J, et al. Study on the trapping performance and mechanism of trapping agent DXY-1 on quartz surface [J]. *Metal Mining*, 2020(6): 110-113.
- [13] 赵声贵.烷基胍硫酸盐系列捕收剂的合成及其对铝硅酸盐矿物的浮选性能[D].长沙:中南大学,2007.
ZHAO S G. *Synthesis and flotation performance of alkylguanidine sulfate series collectors for Aluminum silicate minerals* [D]. Changsha: Central South University, 2007.
- [14] 彭兰,曹学锋,杜平.铝硅酸盐矿物捕收剂的设计研究[J].*广西民族大学学报(自然科学版)*,2005(2):90-93.
PENG L, CAO X F, DU P. Design and study of aluminosilicate mineral collector [J]. *Journal of Guangxi University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 2005(2): 90-93.
- [15] 王本英,徐新阳,段浩,等.胺类捕收剂在石英表面吸附的定量构效关系[J].*东北大学学报(自然科学版)*,2020,41(1):131-136.
WANG B Y, XU X Y, DUAN H, et al. Quantitative conformational relationships for the adsorption of amine traps on quartz surfaces [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2020, 41(1): 131-136.
- [16] 赵利宁,裴建.多胺捕收剂结构与其浮选性能关系的研究[J].*广州化工*,2019,47(2):72-74+148.
ZHAO L N, PEI J. Study on the relationship between structure and flotation performance of polyamine collector [J]. *Guangzhou chemical industry*, 2019, 47(2): 72-74+148.
- [17] 谭凯旋,曹杨,王清良,等.铝硅酸盐矿物浮选中捕收剂的设计合成及浮选机理的研究[J].*南华大学学报(自然科学版)*,2013,27(3):10-15.
TAN K X, CAO Y, WANG Q L, et al. Design, synthesis and flotation mechanism of collector in aluminum silicate flotation [J]. *Journal of university of south China (Natural Science Edition)*, 2013, 27(3): 10-15.
- [18] 李仕亮,王毓华.胺类捕收剂对含钙矿物浮选行为的研究[J].*矿冶工程*,2010,30(5):55-58+61.
LI S L, WANG Y H. Research on flotation behavior of calcium bearing minerals with amine collector [J]. *Mining and metallurgy engineering*, 2010, 30(5): 55-58+61.
- [19] 寇珏,陶东平,孙体昌,等.新型阳离子捕收剂在磷酸盐矿反浮选中的应用及机理研究[J].*有色金属(选矿部分)*,2010(6):51-56.
KOU J, TAO D P, SUN T C, et al. Application and mechanism of new cationic collector in reverse flotation of phosphate ore [J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Part)*, 2010(6): 51-56.
- [20] 王本英,徐新阳,陈熙,等.十二烷基胺类捕收剂的取代基基因特性对其浮选性能的影响研究[J].*金属矿山*,2020(6):31-35.
WANG B Y, XU X Y, CHEN X, et al. Effect of substituent gene characteristics on flotation performance of dodecylamine collectors [J]. *Metal Mine*, 2020(6): 31-35.
- [21] 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+8.
ZHOU Q B, HAN Z H, GONG L, et al. Study on quartz flotation performance of cationic amine collector [J]. *Chemical minerals & processing*, 2017, 46(12): 1-3+8.
- [22] RUAN Y, ZHANG Z, LUO H, et al. Effects of metal ions on the flotation of apatite, dolomite and quartz [J]. *Minerals*, 2018(8): 141.
- [23] GUO F, LI J. Selective separation of silica from siliceous-calcareous phosphate rock [J]. *Min. Sci. Technol. (China)*, 2011, 21: 135-139.
- [24] SAHOO H, RATH S S, DAS, B, et al. Flotation of quartz using ionic liquid collectors with different functional groups and varying chain lengths [J]. *Miner. Eng.* 2016, 95: 107-112.
- [25] VIEIRA A M, Peres A E C. The effect of amine type, pH, and size range in the flotation of quartz [J]. *Min. Eng.* 2007, 20: 1008-1013.

- [26] NUNES A P L, PINTO C L L, VALADAO G E S, et al. Floatability studies of wavellite and preliminary results on phosphorus removal from Brazilian iron ore by froth flotation[J]. *Miner. Eng.* 2012, 39: 206 – 212.
- [27] 吴中贤,姜效军,陶东平. 新型胶磷矿反浮选脱硅阳离子捕收剂试验研究[J]. *矿产综合利用*,2020(5):92 – 100.
WU Z X, JIANG X J, TAO D P. Experimental study on a new collophosphate reverse flotation desilication cationic collector [J]. *Comprehensive Utilization of Mineral Resources*, 2020(5): 92 – 100.
- [28] 张华,李海兵,赵凤婷,等. 胶磷矿反浮选脱硅捕收剂选矿试验研究[J]. *化工矿物与加工*,2020,49(7):35 – 37.
ZHANG H, LI H B, ZHAO F T, et al. Experimental study on the beneficiation of colophane reverse flotation desilication collector [J]. *Chemical Minerals and Processing*, 2020, 49(7): 35 – 37.
- [29] 程仁举,李成秀,罗惠华,等. 贵州某中低品位胶磷矿双反浮选试验研究[J]. *非金属矿*,2014,37(5):31 – 33.
CHENG R J, LI C X, LUO H H, et al. Experimental study on dual reverse flotation of a medium and low grade colophane ore in Guizhou [J]. *Non – metallic ores*, 2014, 37(5): 31 – 33.
- [30] 杜橙灯,葛英勇,刘鸣. 贵州某硅钙(镁)质磷矿石双反浮选试验[J]. *金属矿山*,2019(1):92 – 95.
DU C H, GE Y Y, LIU M. Experimental Study on double reverse flotation of a silicon – calcium (magnesium) phosphate ore in Guizhou [J]. *Metal Mine*, 2019(1): 92 – 95.
- [31] 刘鑫,罗廉明,刘旋. 一种表面活性物质在胶磷矿脱硅反浮选中的应用研究[J]. *化工矿物与加工*,2009,38(12):7 – 9.
LIU X, LUO L M, LIU X. Study on the application of a surface active substance in the desilication and reverse flotation of colloidal phosphate ore[J]. *Chemical Minerals & Processing*, 2009, 38(12): 7 – 9.
- [32] 罗金洋,卯松,谢俊,等. 中低品位硅钙质磷矿石双反浮选的探索试验[J]. *武汉工程大学学报*,2017,39(6):576 – 581.
LUO J Y, MAO S, XIE J, et al. Exploratory experiments on double reverse flotation of low – grade siliciclastic phosphate ores [J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2017, 39(6): 576 – 581.
- [33] 刘水红,郑桂兵,任爱军,等. 一水硬铝石和含铝硅酸盐在胺类捕收剂作用下的浮选行为[J]. *有色金属*,2007(4):127 – 130.
LIU S H, ZHENG G B, REN A J, et al. Flotation behavior of diaspore and Aluminosilicate with amine collector [J]. *Nonferrous Metals*, 2007(4): 127 – 130.
- [34] 周杰强,梅光军,于明明,等. 低品位高硫铝土矿反浮选同步脱硫脱硅试验[J]. *金属矿山*,2018(7):123 – 126.
ZHOU J Q, MEI G J, YU M M, et al. Experimental study on synchronous desulfurization of silicon by reverse flotation of low – grade high – sulfur Bauxite [J]. *Metal Mine*, 2018(7): 123 – 126.
- [35] 彭兰,曹学锋,杜平. 胺类捕收剂对铝硅矿物的浮选性能研究[J]. *广西民族学院学报(自然科学版)*,2006(1):68 – 74.
PENG L, CAO X F, DU P. Study on the flotation performance of amine trap for Al – Si minerals [J]. *Journal of Guangxi University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 2006(1): 68 – 74.
- [36] 简胜,李晓阳,付丹. 中低品位铝土矿反浮选脱硅研究[J]. *有色金属(选矿部分)*,2012(5):40 – 43.
JIAN SHENG, LI X Y, FU D. Study on the desilication of low – grade bauxite by reverse flotation [J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2012(5): 40 – 43.
- [37] 苏欢欢,程敢,马俊伟,等. 胺类捕收剂对铝硅矿物反浮选脱硅试验[J]. *轻金属*,2021(8):5 – 9.
SU H H, CHENG G, MA J W, et al. Study on desilication of Aluminum – silicon minerals by reverse flotation with amine Collector [J]. *Light Metals*, 2021(8): 5 – 9.
- [38] 刘安荣,彭伟,刘洪波,等. 贵州某铝土矿浮选脱硫脱硅试验研究[J]. *金属矿山*,2020(8):102 – 106.
LIU A R, PENG W, LIU H B, et al. Experimental study on desulfurization and desilication of a Guizhou Bauxite by Flotation [J]. *Metal Mine*, 2020(8): 102 – 106.
- [39] 刘文刚,王鑫阳,刘文宝,等. 高降解性月桂酰基丙基氧化胺的合成及浮选性能研究[J]. *金属矿山*,2021(2):65 – 70.
LIU W G, WANG X Y, LIU W B, et al. High degradability laurel acyl propyl amine oxide synthesis and flotation performance study [J]. *Journal of Metal Mine*, 2021(2): 65 – 70.
- [40] 朱一民,骆斌斌. 一种新型阳离子捕收剂 DCZ 浮选性能研究[J]. *矿产综合利用*,2017(1):32 – 36.
ZHU Y M, LUO B B. Study on flotation performance of a new cationic collector DCZ [J]. *Comprehensive Utilization of Mineral Resources*, 2017(1): 32 – 36.
- [41] 刘文刚. 新型赤铁矿反浮选脱硅捕收剂的合成及浮选性能研究[D]. 沈阳:东北大学,2010.
LIU W G. Synthesis and flotation performance of new desilication collector for hematite reverse flotation [D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.
- [42] 刘文宝. 羟丙基胺类捕收剂的合成及在铁矿石反浮选中的应用研究[D]. 沈阳:东北大学,2015.
LIU W B. Synthesis of hydroxypropyl amine collector and its application in reverse flotation of iron ore [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [43] 刘文刚. 新型赤铁矿反浮选脱硅捕收剂的合成及浮选性能研究[D]. 沈阳:东北大学,2010.
LIU W G. Synthesis and flotation performance of new desilication collector for hematite reverse flotation [D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.
- [44] 徐冬林,李佩昱,李艳军,等. 鞍千贫赤铁矿磁选精矿反浮选提纯试验[J]. *矿产保护与利用*,2020,40(2):70 – 73.
XU D L, LI P Y, LI Y J, et al. Purification of magnetic separation concentrate from anqian lean hematite by reverse flotation [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2020, 40(2): 70 – 73.
- [45] 夏光华,李晓鸣,苏小丽. 混合捕收剂去除高岭土中含铁矿物试验研究[J]. *地质找矿论丛*,2012,27(1):121 – 124.
XIA G H, LI X M, SU X L. Experimental study on removal of iron bearing minerals from kaolin by mixed collector [J]. *Journal of Geological Prospecting*, 2012, 27(1): 121 – 124.
- [46] 罗立群,高远扬,陈雯. 提高酒钢焙烧磁选精矿质量的试验研究[J]. *矿冶工程*,2001(1):29 – 32.
LUO L Q, GAO Y Y, CHEN W. Experimental study on improving the quality of Roasting magnetic separation concentrate of Jiusteel [J]. *Mining and Metallurgy Engineering*, 2001(1): 29 – 32.
- [47] 谢国先,罗廉明,张树洪. 胺类捕收剂在铁精矿脱硅反浮选中的作用机制[J]. *金属矿山*,2009(8):42 – 44.
XIE G X, LUO L M, ZHANG S H. Mechanism of amine collector in reverse flotation of iron concentrate desilication [J]. *Metal Mine*, 2009(8): 42 – 44.
- [48] 杨雪莹,朱一民,李艳军,等. 捕收剂 DXY – 1 在石英表面的捕收性能及机理研究[J]. *金属矿山*,2020(6):110 – 113.
YANG X Y, ZHU Y M, LI Y J, et al. Collector DXY – 1 on the surface of the quartz, collecting performance and mechanism study [J]. *Journal of Metal Mine*, 2020(6): 110 – 113.
- [49] 代淑娟,于连涛,李晓安,等. 捕收剂 LKD – 1 对石英和滑石的作用机理[J]. *中国矿业*,2015,24(10):141 – 144.
DAI S J, YU L T, LI X A, et al. Mechanism of collector lkd – 1 on quartz and talc [J]. *China Mining*, 2015, 24(10): 141 – 144.
- [50] 石玉翔,王林林,刘跃龙,等. 相同链长伯铵盐和季铵盐对云母表面润湿性的影响[J]. *有色金属(选矿部分)*,2017(4):93 – 98.
SHI Y X, WANG L L, LIU Y L, et al. Effect of primary ammonium salt and quaternary ammonium salt with same chain length on surface wettability of mica [J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2017(4): 93 – 98.
- [51] 卢惠民,薛问亚. 胺类浮选菱镁矿新工艺的研究[J]. *有色金属*,1993(3):9 – 13.

- LU H M, XUE W Y. Study of a new process for flotation of magnesite with etheramine[J]. *Nonferrous Metals*, 1993(3): 9-13.
- [52] 王倩倩, 李晓安, 魏德洲. 两捕收剂反浮选菱镁矿的效果对比[J]. *金属矿山*, 2012(2): 82-85.
- WANG Q Q, LI X A, WEI D Z. Comparison of reverse flotation effect of two collectors on magnesite [J]. *Metal Mine*, 2012(2): 82-85.
- [53] 李晓安, 代淑娟, 周凌嘉, 等. 辽宁某高硅低品位镁矿浮选提纯试验研究[J]. *中国矿业*, 2012(2): 63-67.
- LI X A, DAI S J, ZHOU L J, et al. Study on flotation purification of a high silicon low grade magnesium ore in Liaoning [J]. *China Mining*, 2012(2): 63-67.
- [54] 于连涛, 李晓安, 刘文刚. 捕收剂 LKD 对某低品位菱镁矿的浮选效果影响[J]. *矿业研究与开发*, 2015(9): 32-35.
- YU L T, LI X A, LIU W G. Effect of collector LKD on flotation effect of a low grade magnesite [J]. *Mining Research and Development*, 2015(9): 32-35.
- [55] 皇甫明柱, 王宏菊, 刘全军. 云南某低品位氧化铅锌矿石选矿试验研究[J]. *金属矿山*, 2009(8): 49-52+79.
- HUANG F M Z, WANG H J, LIU Q J. Experimental study on beneficiation of a low grade lead-zinc oxide ore in Yunnan [J]. *Metal Mine*, 2009(8): 49-52+79.
- [56] 于正华, 肖骏, 董艳红, 等. 选择性絮凝浮选法处理某低品位硫氧混合铅锌矿选矿试验研究[J]. *湖南有色金属*, 2014, 30(4): 5-9.
- YU Z H, XIAO J, DONG Y H, et al. Experimental Study on Beneficiation of a Low grade Sulfur oxygen mixed Lead-zinc ore by Selective Flocculation Flotation [J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 2014, 30(4): 5-9.
- [57] 李来顺, 刘三军, 朱海玲, 等. 云南某氧化铅锌矿选矿试验研究[J]. *矿冶工程*, 2013, 33(3): 69-73.
- LI L S, LIU S J, ZHU H L, et al. Experimental study on beneficiation of a lead-zinc oxide ore in yunnan [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2013, 33(3): 69-73.
- [58] 罗仙平, 严群, 谢明辉, 等. 某氧化铅锌矿浮选工艺试验研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2005(1): 7-10+6.
- LUO X P, YAN Q, XIE M H, et al. Experimental study on flotation Process of a Lead-zinc oxide ore [J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2005(1): 7-10+6.
- [59] 余江鸿, 周涛, 刘守信. 四川甘洛县某氧化铅锌矿石选矿试验研究[J]. *金属矿山*, 2009(12): 77-79+98.
- YU J H, ZHOU T, LIU S X, et al. Experimental Study on beneficiation of a Lead-zinc oxide ore from Ganluo County, Sichuan Province [J]. *Metal Mine*, 2009(12): 77-79+98.
- [60] 叶军建, 张覃, 姜毛, 等. 组合捕收剂浮选氧化锌矿试验研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2014(6): 46-50.
- YE J J, ZHANG Q, JIANG M, et al. Experimental study on Flotation of Zinc Oxide Ore with Combined Collector [J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Part)*, 2014(6): 46-50.
- [61] 靳晨曦, 马子龙, 曹亦俊, 等. 极低品位泥质难选氧化锌矿浮选试验研究[J]. *矿产综合利用*, 2017(1): 70-75.
- JIN C X, MA Z L, CAO Y J, et al. Experimental study on flotation of very low grade argillous refractory Zinc oxide ore [J]. *Comprehensive Utilization of Mineral Resources*, 2017(1): 70-75.
- [62] 谢丹丹. 四川会理难选氧化铅锌矿选矿试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- XIE D D. Experimental study on Beneficiation of Refractory lead-zinc oxide ore in Huili, Sichuan province [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [63] 宁可佳, 崔家画, 徐宏祥, 等. 褐煤反浮选试验工艺研究[J]. *矿业科学学报*, 2021, 6(2): 228-236.
- NING K J, CUI J H, XU H X, et al. Experimental process study on reverse flotation of lignite [J]. *Journal of Mining Science*, 2021, 6(2): 228-236.
- [64] 陈志强, 罗传胜, 刘超. 某石煤型钒矿选矿新工艺研究[J]. *材料研究与应用*, 2014, 8(4): 254-257.
- CHEN Z Q, LUO C S, LIU C. Research on new beneficiation process of a stone coal vanadium ore [J]. *Materials Research and Application*, 2014, 8(4): 254-257.
- [65] 刘西分, 常红. 某重砂重选精矿重晶石和锆英石的浮选分离试验[J]. *现代矿业*, 2016, 32(2): 58-62.
- LIU X F, CHANG H. Flotation separation of barite and zircon from a heavy sand concentrate [J]. *Modern Mining*, 2016, 32(2): 58-62.

Application Status and Development Prospect of Amine Collectors

YAN Yawen¹, LUO Huihua¹, ZHAO Jun¹, LIU Yutong¹, ZHANG Zhenyi²

1. School of Resources and Safety Engineering. Wuhan Institute of Technology. Wuhan 430073, Hubei, China;

2. Xiaogan Tianxiang Mining Technology Co. Ltd., Xiaogan 432818, Hubei, China

Abstract: In this paper, the application of amine reagents in the flotation of phosphate rock, bauxite, iron ore, magnesite and lead-zinc oxide ore is summarized, and its electrical changes and adsorption properties of amine reagents and mineral surface are reviewed, and the amine collectors with different carbon chain lengths, different types and different substituent sites are compared. The practical application and mechanism of amine collectors were analyzed and summarized, and the development direction of amine collectors in the future was also prospected.

Keywords: flotation; amine reagent; collector; phosphate rock; bauxite; iron ore; magnesite; lead-zinc oxide ore

引用格式: 闫雅雯, 罗惠华, 赵军, 刘宇桐, 张振翼. 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 Yawen, LUO Huihua, ZHAO Jun, LIU Yutong, ZHANG Zhenyi. Application status and development prospect of amine collectors [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2022, 42(2): 59-66.