

浮选起泡剂研究进展

洪欣¹, 罗溪梅^{1,2,3}, 蒋旺强^{1,3}, 贾露繁¹, 宋振国⁴, 王云帆^{2,3}

- 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南昆明 650093;
- 云南省战略金属矿产资源绿色分离与富集重点实验室, 云南昆明 650093;
- 昆明理工大学复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 云南昆明 650093;
- 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 1001603

中图分类号: TD923⁺.12 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)03-0022-12
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.08.001

摘要 基于起泡剂在浮选中的重要作用, 从常规起泡剂、新型(代号)起泡剂以及组合起泡剂三方面介绍了起泡剂的种类及应用, 并阐述了泡沫性能的影响因素及其机制的研究进展, 最后简述了起泡剂与捕收剂间的协同作用, 展望了起泡剂的发展趋势。
关键词 浮选; 起泡剂; 起泡性能; 泡沫稳定性

1 起泡剂在浮选中的作用

泡沫是一种由大量气泡分散在连续液相中所形成的分散体系, 由于热力学不稳定, 具有自发降低结合能和表面能的趋势, 目前广泛应用于日化、食品、矿物浮选、冶金、消防、石油开采等领域。泡沫浮选是一种在气、液、固三相界面上, 利用矿物表面物理化学性质的差异(主要是润湿性), 借助浮选设备使有用矿物与脉石矿物或一种(或几种)有用矿物与其他有用矿物分离的选别方法。大多数矿物表面润湿性大, 可浮性差, 单靠天然可浮性很难将其分离^[1-3], 因此需要使用浮选药剂来改变矿物表面的物理化学性质, 以增大矿物颗粒的疏水性和矿物黏附气泡的牢固度, 改变矿物的可浮性, 实现矿物间的分离。

在浮选过程中, 疏水颗粒黏附在气泡上, 被输送到浮选槽顶部, 形成泡沫层, 亲水颗粒则留在矿浆中。泡沫的形成及其稳定性是决定浮选性能的重要因素。一般矿石(可溶盐类除外)和水组成的矿浆, 不能形成合适的泡沫。在纯水中, 导入水中的气泡, 浮至液面以后, 立即破裂消失。浮选药剂主要有调整剂、捕收剂、起泡剂三大类^[4]。通常加入起泡剂或具有起泡性能的捕收剂来促使空气在矿浆中弥散成合适的气泡, 并提高泡沫稳定性。

起泡剂是指在浮选过程中, 能促使空气在矿浆中有效地分散成细小气泡, 在气泡上升过程中防止其兼并、破灭, 提高泡沫稳定性的药剂。起泡剂主要有以下作用^[5-8]: (1)提高空气在矿浆中的分散度, 形成具有一定尺寸的气泡, 增加矿粒与气泡接触的概率; (2)显著降低气液界面张力, 形成更多的细小气泡; (3)使气泡周围能够形成具有一定厚度的水层, 防止气泡兼并; (4)由于起泡剂分子的极性端朝外, 对水偶极存在引力, 可以减慢气壁间的水层流动, 减小水层变薄速度, 增大气泡的机械强度, 提高泡沫稳定性; (5)由于水化膜的存在, 可降低气泡的运动速度, 增加气泡在矿浆中的停留时间, 从而使矿粒与气泡的碰撞概率增加, 促使气泡矿化, 提高分选效果; (6)起泡剂与捕收剂的非极性烃链间存在着疏水性缔合作用, 当二者的结构与比例配合适当, 会在气液界面或固液界面产生共吸附现象, 从而产生协同作用, 加速矿粒的浮选; (7)起泡剂与捕收剂共存于胶束中, 影响捕收剂的临界胶束浓度, 当捕收剂在矿物表面吸附时, 加入醇等非离子型起泡剂, 将降低捕收剂离子间的静电斥力, 使捕收剂在矿物表面容易达到半胶团浓度而发生半胶团吸附, 提高浮选效果; (8)可使捕收剂乳化或加速捕收剂的溶解, 当使用非极性烃类油捕收剂进行浮选时, 非极性烃类油捕收剂分布在矿浆中, 油滴之间容易发生

收稿日期: 2023-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51964025; 52264030); 矿物加工科学与技术国家重点实验室开放基金资助项目(BGRIMM-KJSKL-2023-10); 昆明理工大学分析测试基金重大项目(2020T20140027)

作者简介: 王云帆(1985—), 男, 博士, 讲师, 从事选矿理论与技术研究, Email: asc_cloud@aliyun.com。

通信作者: 罗溪梅(1986—), 女, 博士, 副教授, 从事选矿理论与技术研究, Email: 85128225@163.com。

积聚,会导致捕收剂在矿浆中不能很好地起到捕收作用。当有起泡剂作用时,起泡剂的非极性端与非极性烃类油吸附,将非极性油滴紧紧包围,在油滴表面形成一层薄薄的水膜,阻碍油滴之间产生积聚,使得捕收剂在矿浆中分布得更加均匀,充分发挥其捕收作用。

2 起泡剂的种类与应用

起泡剂是一种异极性表面活性物质,由极性基(亲水)和非极性基(疏水)两部分组成。其中,起泡剂的非极性基决定着起泡剂的起泡能力。在极性基团固定的情况下,非极性基的长短影响起泡剂的溶解度和表面活性。起泡剂一般要求有中等的溶解度(0.2~5 g/L)。在同系物中表面活性随分子量增大而增强,但同时溶解度则随分子量增大而减小。浮选实践证明,常见的起泡剂分子中的碳原子数5~11个较为适合。极性基则是决定起泡剂性质的关键因素,它既影响起泡剂的物理性质,如溶解度、解离度等,又影响起泡剂的化学性质,如与矿物表面的作用活性、与矿浆离子的化学反应等。目前,大多数起泡剂的极性基团中都有含氧基团,最常见的是羟基-OH和醚基-O-,其次是羧基-COOH、磺酸基-SO₃H,此外胺基-NH₂、吡啶基=N和腈基-CN也有起泡性。一般醇类和醚类的起泡剂较为常用,其极性基既能水化又不离解,且没有捕收作用;而带其他极性基的起泡剂,虽有起泡性,但不是理想的起泡剂。这是由于这些药剂的起泡性能受pH值影响,且多数有一定的捕收性,常常受捕收能力的干扰。因此,只有浮选过程所需捕收的对象与其捕收的对象一致时才使用。例如,在采用胺类或脂肪酸类捕收剂反浮选赤铁矿时,在一定药剂制度下,可以实现提纯的目的,且由于这些捕收剂本身具有起泡性能,故无需额外添加起泡剂^[9]。

2.1 常规起泡剂

按起泡剂原料的来源,可将起泡剂分为天然起泡剂、工业副产品起泡剂以及人工合成起泡剂。按起泡剂在水里的离解情况,可分为离子型起泡剂和非离子型起泡剂。离子型起泡剂则主要有羧酸及其皂类、烷基磺酸及皂类、胺类、吡啶类、酚类等;非离子型起泡剂主要包括醇类、醚类、醇醚类、酯类等。非离子型起泡剂只有起泡性能,而离子型起泡剂既具有捕收性能又具有一定的起泡性。因此,使用离子型起泡剂,可以降低非离子型起泡剂的用量甚至不添加非离子型起泡剂。然而由前述可知,离子型起泡剂由于具有捕收作用,且受pH的影响,只有浮选过程所需捕收的对象与上浮的目的矿物一致时才使用,此时以捕收作用为主,起泡作用为辅。

2.1.1 非离子型起泡剂

(1) 松油

松油是指由松根、松脂经过蒸馏得到的产品,为淡黄色或棕色液体,主要成分为 α -萜烯醇,是应用最广泛的天然起泡剂。起泡能力较强,应用于早期的浮选厂中,但由于化学组成不稳定、选择性差且来源有限,目前工业应用较少。

(2) 松醇油

松醇油,又叫2号油,其主要成分也是 α -萜烯醇(50%左右),为淡黄色油状液体。松醇油本身成分稳定,有效成分含量较高,起泡性能好,能生成大小均匀、黏度中等且稳定性适合的气泡,是我国广泛使用的起泡剂。松醇油的浮选效果优于杂质含量高且性能不稳定的松油,目前松醇油已基本代替了天然起泡剂松油。

(3) 醇类起泡剂

醇类起泡剂,其功能团为羟基(-OH),主要包括C₄~C₈的直链、含支链的烷基醇和脂肪醇。醇的结构(R-OH)与水的结构H-OH相似,尤其是低级醇,R基碳链极短,与H-OH更相近,故低级醇可以与水混合且不具备起泡性;而C₄~C₁₀脂肪醇部分溶于水,能明显降低水的表面张力,使泡沫稳定,具有起泡性能。醇类起泡剂的起泡性能稳定,起泡能力强、泡沫不黏、消泡快,浮选效果好且无捕收性^[10]。

醇类起泡剂主要有甲基异丁基甲醇(MIBC)、甲基戊醇、2-乙基己醇、C₆~C₈混合脂肪醇、混合六碳醇(P-MPA)、C₅~C₇混合仲醇等等。MIBC在美国广泛使用,是目前国外浮选厂应用最广泛的人工合成起泡剂之一^[9],其生成的泡沫脆而细、消泡迅速、选择性好且无捕收性,是我国实验室浮选标准起泡剂。我国研制的P₁-MPA起泡剂与MIBC性能相似,也具有较好的起泡效果^[11]。C₆~C₈混合脂肪醇主要由石油工业副产物合成而来,是一种强有力的起泡剂,可用于多种矿物的浮选,也可用于选煤^[10]。

(4) 醚类起泡剂

醚类起泡剂又称为烷氧类或氧烷类起泡剂,主要功能基团为亲水的醚基。这类药剂中应用较广泛的是1,1,3-三乙氧基丁烷(TEB),国产产品称为丁醚油或4号油。丁醚油无毒,起泡性能好,起泡量大,适用pH范围宽,可作为铜、铅、锌等硫化矿以及辉钼矿的起泡剂^[10]。丁醚油依靠三个乙氧基的氧原子通过氢键分别与偶极水分子缔合发生水化作用,使药剂具有适当的水溶性和在气液界面上的吸附活性,从而具有良好的起泡性能。

(5) 醚醇类起泡剂

醚醇类起泡剂是以石油化工产品为原料人工合成的一类起泡剂,主要功能基团为醚基和羟基,醚基氧原子及醇基氧原子的孤对电子都可以与水分子结

合而亲水、烃基亲气而使气泡稳定。醚醇类起泡剂中常用的药剂有甲基醇醚、乙基醇醚、丁基醇醚等,常用于金属矿的浮选。朱一民^[12]探究了醚醇起泡剂二丙基二醇丁醚的起泡性能,发现这是一种较好的起泡剂,可用于铜矿浮选中。丁基醚醇是株洲选矿药剂厂生产的醚醇类起泡剂,一般用量仅为松醇油的 1/3~2/3,能辅助和强化金、银等贵金属的综合回收,但售价太高^[13]。

(6) 酯类起泡剂

酯类起泡剂也是金属矿浮选常用起泡剂之一,分为脂肪烃酯类起泡剂和芳香烃酯类起泡剂。酯的功能团为 $-\text{COO}-$,其中的氧原子有孤对电子,可以与水亲和;R基及R'基亲气,所以酯类也有起泡性能。酯类起泡剂主要有 $\text{C}_5\sim\text{C}_6$ 以及 $\text{C}_5\sim\text{C}_9$ 的混合脂肪酸乙酯、邻苯二甲酸二乙酯以及RB系列起泡剂等。其中邻苯二甲酸二乙酯对铅锌硫化矿和铜钴黄铁矿的浮选性能较松醇油好^[10]。

2.1.2 离子型起泡剂

(1) 羧酸及其皂类起泡剂

羧酸又分为脂肪酸和芳香酸,通常作为捕收剂使用,但这类药剂还具有一定的起泡性,如油酸、油酸钠等。油酸钠属表面活性物质,在气液界面会发生正吸附,具有很强的起泡性能,一般使用油酸钠浮选时不再加起泡剂。

(2) 烷基磺酸及皂类起泡剂

烷基磺酸类药剂属阴离子型药剂,既有捕收性又有起泡性,主要有十二烷基苯磺酸钠、十二烷基磺酸钠等。十二烷基磺酸钠水溶性较好,捕收性不太强,起泡性好,作为捕收剂使用时浮选过程可不添加起泡剂。

(3) 胺类起泡剂

胺类起泡剂是指具有氨基的一些异极性有机氧化物,主要有一元胺、二元胺、醚胺等。胺类药剂主要以 RNH_2 起作用,除具有捕收性能外,还兼具一定的起泡性。

(4) 酚类起泡剂

具有一个或多个氢氧基并直接与芳香环相连接的化合物都属于酚类。根据酚基数量的多少,又分为一元酚、二元酚和多元酚。这类药剂也既可作为捕收剂,又可作为起泡剂。其中,甲酚酸是一种重要的起泡剂。它是含酚、甲酚及二甲酚等的混合物,起泡能力较松油弱,生成的泡沫较脆,选择性较好^[9]。

(5) 吡啶类起泡剂

吡啶是一种含氮原子的杂环化合物。重吡啶是最具代表性的吡啶类起泡剂。重吡啶是从炼焦所得的煤焦油中分离出来的碱性有机混合物,主要成分为吡啶、喹啉、芳香胺等。它在酸性或碱性矿浆中均有起泡性能。在酸性矿浆中,吡啶将吸引氢离子以吡啶

合氢离子形式存在,芳香烃可插入气体内部,而极性基亲水发生水化作用,使重吡啶在气液界面吸附并使气泡稳定;在碱性溶液中,极性基氮原子上的孤电子对与水分子形成氢键缔合发生水化作用以使气泡稳定^[14]。

2.2 新型(代号)起泡剂

为了适应不同矿石的浮选需求,提高浮选指标,满足可持续发展的要求,近二十年来,众多的选矿药剂研究人员投入大量的人力和物力,以开发性能优良低毒环保的新型起泡剂。新型起泡剂多以代号形式出现在文献中,以醇、醚、酮、酯类为主要成分,其产生的气泡性能良好,能够改善浮选精矿的产率和品位。如BK系列、RB系列、730系列、11号油、BQ-2、矿友-321、W-701、NXP-1、SDJ-2、WHL-3、SK96、矿友-322、YC-111、A-200、JM-208、750B、250A、HCCL、FG25、HG-1、A-3等。

2.2.1 BK系列起泡剂

BK系列起泡剂由北京矿冶研究总院开发,其主要成分为醇类及醚酯类化合物^[15-17]。

BK-201起泡剂属醇类起泡剂,其结构为链状高碳醇类,即 R-CH(OH) 。外观为棕黄色油状液体,密度为 $0.84\sim 0.89\text{ g/cm}^3$ 。曾培等人^[18]研究起泡剂MIBC和BK-201的浮选泡沫特性时发现,与MIBC相比,在相同的浓度下,BK-201产生的泡沫气泡直径大、含液率低、水回收率低,且对微细粒脉石的夹带更弱,浮选选择性更好。

BK-204起泡剂是在BK-201基础上改进的产物。碳链从BK-201的平均8个碳减少到6~7个碳,表现出分散容易、泡沫黏度低等优点。苏建芳等人^[19]根据安徽某含硫铁矿的原矿性质,使用BK-204进行了硫浮选试验研究。试验结果表明,采用BK-204所获得的硫精矿指标比现场精矿指标略好,全硫品位提高了1个百分点,回收率提高了0.27个百分点,且药剂用量大幅度下降,故可用BK-204起泡剂代替松醇油。

BK-206起泡剂的主要成分为高级脂肪醇及醚酯类化合物,外观为浅黄色及浅棕色,微溶于水,密度为 $0.84\sim 0.87\text{ g/cm}^3$,具有起泡速度快、起泡力强、脆散性好的特点。周高云^[17]将其应用于铅锌矿选别时发现,与松醇油相比,BK-206能有效提高铅锌的回收率,使铅回收率提高了2.1个百分点,锌回收率提高了7.04个百分点。

BK208是针对原矿地表土层混入量大、磨矿浮选泥化严重的特性研发的一种专用特效起泡剂。该起泡剂为棕色透明油状液体,微溶于水,性质稳定,为非危化品,可直接原液添加。彭远伦等人^[20]用起泡剂BK208替代原用起泡剂PL-1,大幅降低了起泡剂成本,且铜回收率提高了1.83个百分点,显著提高了资源利

用率。

2.2.2 RB系列起泡剂

基于混合用药比单一用药效果好的经验,朱建光教授使用一种含有羧酸、醇、酯的化工副产物,调整其组分含量,同时加入一定量的辅助成分,配制成了RB系列起泡剂。这类起泡剂共有7个品种,外观为棕黑色油状液体,密度为 $0.90\sim 1.00\text{ g/cm}^3$,微溶于水。其中 RB_1 的黏度较大,低温时流动性差,不便于管道加药,而 RB_1 以后的系列起泡剂克服了这一缺点。

刘曙^[21]将 RB_1 起泡剂用于武钢矿业公司程潮铁矿选矿厂浮选作业时,发现 RB_1 起泡剂起泡能力强,起泡效果好,硫精矿硫回收率提高了37个百分点,药剂消耗降低了 3.22 g/t ,经济效益好;且 RB_1 起泡剂价格便宜,原料来源广,能大量合成,可普遍推广使用。

朱建光教授^[22]使用 RB_3 起泡剂进行了铅锌硫化矿浮选试验。试验结果表明,采用 RB_3 起泡剂替代松醇油,锌精矿的品位和回收率分别提高了0.43个百分点和2.53个百分点,且 RB_3 起泡剂用量仅为松醇油的 $2/3$ 。此外,他们^[23]还采用RB系列起泡剂进行了铜矿石浮选试验。试验结果表明,用 RB_3 或 RB_6 代替松醇油能降低起泡剂用量,提高浮选指标,经济效益显著,可在铜选厂进行推广。

2.2.3 730系列起泡剂

昆明冶研新材料股份有限公司为满足云南省矿产资源对起泡剂性能的不同要求,于1999年开发出了730系列起泡剂,并在实际应用中不断完善和发展。730系列产品有2,2,4-三甲基-3-环己烯-1-甲醇、1,3,3-三甲基双环[2,2,1]庚-2-醇、樟脑、 $\text{C}_6\sim\text{C}_8$ 醇、醚、酮等。根据不同的矿石性质,调整起泡剂中各组分比例,获得最适用于该矿石的产品。

余云柏^[24]将730A起泡剂用于硫化铅锌矿的分选,结果表明,730A起泡剂起泡能力强、有一定持久性、泡沫分布均匀、大小适中、韧性适当、黏度不大,能有效利用二次富集作用,提高精矿质量,是一种分选多金属铅锌矿的优良起泡剂。

刘述忠等人^[25]将730E起泡剂用于氧化铜矿浮选时发现,730E是汤丹铜矿的优良起泡剂,与2号油相比,在精矿品位相近或略有提高的情况下,可使汤丹铜矿3种矿石的回收率分别提高3.26、1.45和2.84个百分点。

胡卫新等人^[26]研究了730系列起泡剂在浮选柱的气含率,并结合云南大红山铜矿的选矿实践,比较了5种起泡剂的性能指标。结果表明,730C更适用于旋流-静态微泡浮选柱,可提高精矿品位和回收率。

2.2.4 其他代号起泡剂

王雅言^[27]研制出了一种起泡剂-11号油。11号

油是石油化工副产品,为浅黄色稍带浅绿色的黏性液体,产品稳定性好,有微弱的气味、不溶于水,能溶于其他有机溶剂。工业试验结果表明,11号油起泡性能好,浮选速度快,在浮选指标相近的情况下用量比松醇油可减少 $1/3\sim 1/2$ 。

为了提高金渠金矿的选矿指标和降低成本,许善^[28]选用三门峡温塘化工厂研究的BQ-2高效起泡剂进行了工业试验,并获得了较好的选矿效果。BQ-2起泡剂学名为1,1-2-萘烯松醇油,呈棕黄色液体,性能良好,起泡较少,泡沫层厚,浮选过程平稳,不跑槽,不发黏,操作方便。

吕金玲等人^[29]研制出了起泡剂矿友-321,并将其用于铅锌矿以及铜矿的浮选。矿友-321的主要成分为复合醇类,选矿性能优良,成本较低,对铅、锌、铜矿有较好的起泡效果。通过试验研究发现,矿友-321的性能达到或优于松醇油,且在青城子铅锌矿应用效果较好,可提高铅回收率1.025个百分点、锌回收率0.958个百分点,且用量比松醇油减少 50.7 g/t ,经济效益显著。

雷鸣^[30]针对湖北大冶铜录山矿低品位高含泥($-10\text{ }\mu\text{m}$ 含量占 $10\%\sim 20\%$)氧化铜矿石的特性,研制了一种新型起泡剂W-701。W-701为复合极性基-非全-OH极性基团结构,外观为桔红色透明液体,密度 $0.85\sim 0.89\text{ g/mL}$ 。通过试验发现,W-701的起泡性能良好,泡沫层稳定,流动性好,可减少细泥对浮选的干扰,且该泡沫对Cu及伴生Au、Ag有较强的吸附能力(特别是对微细粒Cu、Au、Ag矿物)。采用W-701代替2号油,大大改善了泡沫性能,大幅度提高了铜精矿品位及铜和伴生金银的回收率。

李永战等人^[31]研制了一种铜选择性捕收起泡剂NXP-1,发现与乙黄药、丁黄药相比,NXP-1在高碱性条件下($\text{pH}\geq 13$)优先浮铜,可使铜回收率提高1.06个百分点,铜精矿铜品位提高3.05个百分点。

柴垣民等人^[32]将山东淄博选矿药剂厂研制的起泡剂SDJ-2用于铜矿峪矿选矿厂,取得了与现场松醇油相近的浮选指标。SDJ-2主要为高级脂肪醇类及醚酯类化合物,产品性能稳定,原料来源广泛,价格低廉,毒性较小,较松醇油易降解,有利于环境保护,可在铜矿峪矿选矿厂全面推广使用。

罗廉明等人^[33]介绍了一种起泡剂WHL-3,WHL-3属五环三萜类化合物,基本无毒、无刺激味,溶解性好,使用方便,提取工艺简单,技术路线成熟。通过试验发现,WHL-3与松醇油相比,可提高铜精矿品位0.73个百分点,硫精矿品位1.34个百分点,故可作硫化矿的浮选起泡剂。

刘安平等人^[34]将沈阳矿冶研究所研制的起泡剂SK96应用于梅山选矿厂,与2号油相比,在原矿品位相当条件下,铁精矿含硫、回收率等指标基本一致,

硫精矿品位提高了 0.93 个百分点,改善了硫精矿质量,有利于优化浮选操作管理。SK96 起泡剂成分较为复杂,是脂肪醇—酮酯类的同系物及衍生物,具有浮选速度快、起泡性能强、泡沫干净、操作稳定、无刺激性臭味的特点。

吕金玲等人^[35]研制了一种起泡剂矿友-322,矿友-322 的主要原料为石油化工产品,外观为红棕色油状液体,密度 0.936~0.940 g/cm³,冬季流动性好,泡沫大小适中,黏度略大,泡沫层稳定。工业试验结果表明,采用矿友-322 可使选硫回收率提高 1.64 个百分点,用量降低 13.973 g/t,是一种优良的选硫起泡剂。

万盛辉等人^[36]使用一种主要成分为高级混合醇和混合酯类的起泡剂 YC-111 对德兴铜矿的生产流程进行了改进,结果表明,YC-111 起泡剂起泡速度快、泡沫清晰、不发黏,可以提高粗选段铜品位和铜回收率。

A-200 是山东安丘选矿药剂厂生产的一种醇类起泡剂,外观为棕色油状液体,产品密度为 0.83 g/m³,有效醇含量大于 70%。俞国庆^[37]利用 A-200 进行选钼试验表明,A-200 起泡能力强,起泡速度快,泡沫脆散性好,药剂用量小,比松醇油易生物降解,有利于矿山环境保护。代替现用起泡剂,可降低选矿药剂消耗及成本,年节约药剂费用 98.6 万元。

JM-208 是金堆城铝业集团研发的起泡剂,主要成分是 C₈ 醇,同时含有其他醇类、酯类、酮、醛等成分,为黄~棕黄色油状液体,无毒,密度为 0.85~0.9 g/cm³。钟在定等人^[38]利用 JM-208 进行钼矿浮选试验,试验结果表明,JM-208 替代钼浮选现用杂醇类起泡剂,可有效改善操作条件,提高技术指标,降低药剂成本。

廖佳等人^[39]针对铅锌矿浮选起泡剂的应用现状,研制出了新型浮选起泡剂 750B。750B 是一种以醇类为主的组合起泡剂,具有泡沫脆、起泡时间长、选择性好的优点,能降低泡沫的黏度。通过试验发现,在不改变其他条件的前提下,仅用 750B 起泡剂代替松醇油,在铅精矿铅品位相近时,可提高铅回收率 2.02 个百分点;在锌精矿锌品位相近时,锌回收率提高 0.22 个百分点,经济和社会效益显著。

杨自立等人^[40]研制出一种新型、价廉、易降解、低污染的选铜起泡剂 250A,并以安徽铜陵某低品位原生铜矿石为试样进行了选铜试验。试验结果表明,250A 比松醇油更高效,有助于选铜企业降本增效。

田小松等^[41]针对羊拉铜矿的矿石性质,采用新型高效起泡剂 HCCL 进行探索试验发现,采用 HCCL 可获得较好的技术指标,与松醇油和 YL-1 相比,精矿品位分别提高了 1.20 个百分点和 0.56 个百分点,回收率分别提高了 9.14 个百分点和 6.78 个百分点。

李了艳等^[42]以环己烷氧化副产物 X 油为原料,通过化学改性和复配增效等方法,自主研制出了一种新型浮选起泡剂 FG25。FG25 的主要活性组分为环己基

磷酸酯、环己烯基环己酮、环己基环己酮、环己醚、脂肪醇等,平均密度为 0.97 g/cm³,微溶于水,溶于醇等多种有机溶剂。通过对比 FG25、MIBC 及松醇油的起泡高度、泡沫半衰期、表面活性发现,FG25 起泡剂的起泡性能优于 MIBC 及松醇油。将 FG25 和松醇油分别用于硫化铜矿和铅锌矿浮选,结果表明,与松醇油相比,采用 FG25 可使铜回收率提高 1.60 个百分点,品位提高 5.71 个百分点,可使铅回收率提高 0.65 个百分点,锌回收率提高 0.40 个百分点。

张月等人^[43]针对金钼股份百花岭选矿厂和三十亩地选矿厂的生产现状进行改进,研制出了新型 HG-1 起泡剂。HG-1 主要由 C₈~C₁₀ 醇类、醛类、醇酯类化合物组成,具有起泡速度快、泡沫稳定性适中、单耗低、泡沫不黏等优点。通过工业试验发现,用 HG-1 作为起泡剂,可使钼精矿品位达到 52.78%,回收率达到 87.57%。同时,HG-1 起泡剂亦能满足高品位(≥57%)钼精矿的生产需求,且技术指标依然良好。故 HG-1 能很好地应用于普通钼精矿和品位 57% 钼精矿的生产中。

张海龙等人^[44]针对辽宁某铜矿山的矿石性质,研制出了一种新型起泡剂 A-3。通过将 A-3 与 GF 油、MIBC 进行对比试验发现,A-3 起泡性能好,泡沫层稳定,泡沫黏度低、破裂快,价格较低,是一款非常好的硫化矿浮选起泡剂。

2.3 组合起泡剂

某些浮选药剂按一定比例组合使用后,能达到 1+1>2 的效果。因此,除了研发新型起泡剂,对现有药剂进行组合使用也是提高药剂浮选效果、增加生产效益的重要措施。

侯鹏辉^[45]以曙光煤业选煤厂原生煤泥为研究对象,分析了不同起泡剂种类和用量对煤泥浮选效果的影响。通过试验发现,在要求精煤灰分 A₁≤11% 的条件下,将煤油与仲辛醇组合使用,可获得较好的浮选效果。邓维亮等人^[46]根据昆钢大红山铁矿矿石性质变化和起泡剂性能,将 730A 与松醇油配合使用,发现将两者混合使用可以增强起泡剂的适应性,稳定浮选泡沫层,提高选矿指标,降低药剂成本。

刘述忠等人^[47]采用组合起泡剂对福建丁家山铅锌硫化矿进行了优化浮选试验。结果表明,采用 $m(\text{MIBC}) : m(\text{松醇油}) = 3 : 2$ 的组合起泡剂,可使浮选泡沫尺寸、黏度适宜,同时在保证回收率的基础上,提高精矿品位。为了提高微细矿物颗粒的回收率,郭万富等人^[48]以 $m(\text{松醇油}) : m(\text{MIBC}) = 1 : 1$ 的组合起泡剂对福建某铅锌尾矿进行了浮选试验,得到硫品位 31.29%、回收率 83.56% 的硫精矿。

林上勇等人^[49]针对湖南某钨选厂使用杂醇类起泡剂 BK205 造成的问题,采用 BK205 与新型醚类起

泡剂 CU 组合使用来实现钨的高效回收。通过试验证明,组合起泡剂不仅可改善浮选泡沫,且能获得更好的工业指标,使钨矿物得到更高效的回收。郭芳余等人^[50]为了探究复配起泡剂对低阶煤浮选的强化效果,选取正戊醇、MIBC、仲辛醇和聚乙二醇(PEG)进行了浮选动力学试验。试验结果表明,正戊醇和 PEG 复配后降低表面张力的能力最强,起泡能力和泡沫稳定性最好。其原因为长链与短链协同吸附,在气-液界面形成了紧密结合的吸附层,增强了 Gibbs-Marangoni 效应,提高了泡沫稳定性。

3 起泡剂的性能研究

在泡沫浮选中,气泡既是各种矿物选择性分离的分界面,又是疏水性矿粒的载体和运载工具,其性能的好坏对浮选过程的进行及其指标的好坏有着重要的影响。而起泡剂是产生性能良好气泡的关键所在,因此,起泡剂的性能与气泡性能及浮选指标的好坏密切相关。泡沫性能主要包括起泡性(泡沫高度或者泡沫体积)和泡沫稳定性(泡沫半衰期和析液半衰期)^[51]。目前,国内外学者们针对泡沫性能的影响因素,主要从外部环境、起泡剂的影响以及矿物颗粒的影响等方面展开研究;同时还针对泡沫稳定性的影响机制进行了研究。

3.1 泡沫性能的影响因素

3.1.1 外部环境

在浮选过程中,不同的外界条件,如温度、压力、声波、溶剂极性也会影响泡沫性能。刘德生^[52]、孙焜^[53]、陈楠^[54]等人探究了温度、压力对烷基磺酸类起泡剂以及 CT5-20 泡沫稳定性的影响。结果发现,随着温度增加,溶液表面张力下降,表面黏度降低,Marangoni 效应作用减弱,泡沫稳定性降低;而随着压力增大,泡沫稳定性增强。Chun 等人^[55]研究了低频声波作用下不同浓度的聚丙烯二醇溶液的泡沫动态稳定性,发现声频和振幅是影响稳定效果的重要因素,平衡泡沫高度的增加只能在一定的声频范围内实现,振幅越大,平衡泡沫高度增加越大。薛托托^[56]通过在极性溶剂中分别加入酯类、烷基磺酸类、醇类、醚类起泡剂,研究了溶剂极性对非水相溶液体系起泡性能的影响。结果发现,溶液极性对表面活性剂体系的发泡性能与泡沫稳定性具有积极和消极两重影响。随着溶液极性的增大,醚类起泡剂的发泡性能与泡沫稳定性不断降低,醇类表面活性剂的发泡性能和泡沫稳定性不断增加。

3.1.2 起泡剂

起泡剂的结构、用量、组合使用不仅会影响泡沫

性能,还会影响浮选指标。赵龙梅^[57]、郑继龙^[58]、Huang^[59]等人探究了起泡剂分子结构对泡沫性能的影响。结果表明,离子型起泡剂比非离子型起泡剂的起泡性能好,带有支链的起泡剂可以使表面膜的强度增大,提高泡沫稳定性。Kirsten 等^[60]以异丁基黄原酸钠(SIBX)为捕收剂,Senfroth 200 为起泡剂,探究了浮选条件下起泡剂用量与离子强度之间的相互关系及其对泡沫稳定性的影响。发现高起泡剂用量和高离子强度的组合将产生最稳定的泡沫,使水、矿物以及脉石的回收率上升,从而导致精矿品位下降。药剂的组合使用有时会带来与单一药剂不一样的起泡效果。蒋昊等人^[61]研究了阴离子-非离子组合药剂油酸钠(NaOL)-辛醇(OCT)对一水硬铝石浮选和泡沫稳定性的影响,发现组合药剂之间表现出明显的正协同效应,有利于一水硬铝石的浮选,且 NaOL 的摩尔分数越高,泡沫稳定性越强。Zhang 等人^[62]研究表明,将聚氧乙烯烷基醚(AEO)添加到十二烷基硫酸钠(SDS)溶液后,SDS 溶液的泡沫稳定性降低。通过分子动力学模拟表明,AEO 的加入会降低 SDS 液膜的稳定性,从而起到消泡作用。

3.1.3 矿物颗粒

矿物颗粒是泡沫浮选的主要对象,其自身性质对泡沫性能也有较大影响。吴轶君等人^[63]考察了矿化度对非离子起泡剂烷基糖苷(WT)、两性离子起泡剂甜菜碱(YX)泡沫性能的影响,发现随着矿化度的增加,泡沫稳定性增强,且表现出一定的盐增效性。谭佳琨等人^[64]针对三相浮选泡沫,以仲辛醇为起泡剂,探索了不同粒度煤炭颗粒在浮选过程中产率和灰分的变化规律及其对浮选泡沫性质的影响。发现粗颗粒促使气泡破裂并破坏泡沫稳定性,中颗粒能够显著提高起泡速度,细颗粒能够增强泡沫稳定性并降低起泡速度。Fu 等人^[65]以甲基异丁基甲醇(MIBC)为起泡剂,利用改进的 Hallimond 管研究了绿泥石的颗粒效应对泡沫稳定性的影响。结果表明,绿泥石质量分数越大、颗粒粒度越小则矿浆越黏,泡沫最大高度及半衰期越大,泡沫的无选择性夹带行为越显著。

矿泥和过稳定泡沫一直是困扰氧化锌矿硫化一铵盐浮选过程的难题。赵一帆等人^[66]通过泡沫稳定性试验,研究了硫化一铵盐浮选体系中矿泥对泡沫稳定性的影响。结果表明,在相同条件下三相泡沫的最大高度和半衰期明显大于两相泡沫,矿泥对泡沫稳定性具有显著的强化作用,并且这种强化作用随着矿泥的粒度减小而增强。矿物纳米颗粒是指粒度在 1~100 nm 的微观颗粒,其与起泡剂结合会改变它的润湿性,影响泡沫的形成;并且纳米颗粒会在泡沫表面形成致密层,产生协同稳泡作用。张阳^[67]、岳野^[68]、Du^[69]等人探究了纳米颗粒对水相泡沫稳定性的影响。结

果发现,随着纳米颗粒质量分数的增加,泡沫稳定性逐渐增强。

3.2 泡沫稳定性的影响机制

针对起泡剂的机理,学者们主要采用分子动力学模拟、表面张力、ToF-SIMS 等检测手段从气液界面、分子结构等微观层面分析了起泡剂对泡沫稳定性的影响机制,也从泡沫动力学角度开展了大量工作。

Zhang 等人^[70]以 α -松油醇、MIBC、DF200 起泡剂为例,采用密度泛函理论(DFT)模拟研究了起泡剂与气液界面的吸附机理。结果发现,起泡剂在气液界面的吸附与起泡剂分子的极性头基和非极性基团的结构有关。吴刚^[71]采用实验和分子模拟相结合的方法研究了无机盐对 SDS、AOS、SDBS、 $C_{12}E_5$ 等起泡剂复合泡沫体系稳定性影响的微观机制。结果表明,当无机盐浓度较低时,盐离子会吸附到起泡剂头基周围,削弱头基之间的静电排斥作用,增强泡沫稳定性;当无机盐浓度较高时,过量的盐离子与聚合物的带电基团相互作用,降低其周围结合水分子的数目,降低泡沫体系的黏度,不利于泡沫稳定。

朱一民等人^[72]以不同的胺类捕收剂对石英的浮选为例,探究了胺类捕收剂的分子结构与泡沫浮选性能之间的构效关系。结果表明,随着疏水碳链碳原子数的增加,胺类捕收剂与石英颗粒形成的矿化泡沫体积逐渐减少,但泡沫液膜中所结合的水分子量上升,单位体积泡沫上所携带的石英颗粒也同时增加。乘舟越洋等人^[73]借助分子动力学对不同药剂的牛顿黑膜进行模拟,研究非硫化矿药剂分子结构与泡沫性能间的关系。结果表明,对于非极性基药剂来说,疏水链越长,CMC 值越低,发泡效率越高。对于极性基药剂来说,在疏水作用力相当时,离子间排斥作用越强,CMC 越高,发泡效率越低。

Luo 等人^[74]通过 MD 模拟和 ToF-SIMS 研究了十二胺在气液界面的吸附构型及其与泡沫稳定性的关系。结果发现,在不同条件下,泡沫稳定性受水分子与 DDA 头部基团之间的相互作用强度的影响。他们^[75]还研究了不同粒径赤铁矿和石英对十二胺(DDA)作为捕收剂的三相泡沫稳定性的影响,并探讨了石英提高泡沫稳定性的机理。结果发现,石英颗粒能显著增强泡沫稳定性,粒径越细,泡沫越稳定。从气液界面分析发现,由于极性头基和反离子之间的静电相互作用石英被吸附在液-气界面上,当液膜变薄时,气泡两表面间的相互排斥力阻止液膜进一步变薄,从而提高了泡沫稳定性。此外,他们^[76]还考察了十二烷基磺酸钠(SDS)对十二胺(DDA)泡沫稳定性及其在气液界面吸附构型的影响。结果发现,由于气液界面 SDS 横截面积大,表面活性剂在气液界面吸附能力低,表面张力高,气液界面层厚度小,表面活性剂头基与水分子

相互作用强度弱,导致添加 SDS 会降低 DDA 的泡沫稳定性。

Pandey^[77]、Schelero^[78] 等人研究了抗衡离子对十二烷基硫酸盐泡沫性能的影响。结果发现,离子对空气-水界面的亲和力以及离子与十二烷基硫酸盐的直接相互作用会影响泡沫薄膜的稳定性和厚度,泡沫稳定性受吸附膜中的分子填料以及泡沫液膜中稳定胶束的影响,胶束稳定性越高,泡沫稳定性越大。郭余芳^[79]探究了醇类起泡剂与长链聚乙二醇的混合表面活性剂强化低阶煤浮选泡沫稳定性机理。结果发现,起泡剂的加入可以减小体系疏水力,显著减缓液膜薄化速率,增加液膜寿命,提高了液膜稳定性。

李国胜^[80]在浮选泡沫的稳定性调控及粉煤灰脱炭的研究中,以 OP-10 为起泡剂,采用高速显微技术研究了 Plateau 通道内的颗粒运动过程和泡状流附近的气泡兼并过程。为了阐明表面流变和分子间相互作用力对泡沫稳定性的影响,Wang 等人^[81]通过采用加入 DOH 和 NaCl 来改变表面黏弹性和表面电荷方法,研究了 SDS 作阴离子表面活性剂产生的泡沫破裂情况,并提出了动力学模型以描述泡沫的破裂过程和比较泡沫的稳定性。研究表明,尽管在气-液界面 DOH 分子能够替代 SDS 分子从而减少表面电荷,但加入 DOH 后能够增加表面黏弹性,其原因是减少了泡沫排水并增加了液膜的稳定性。加入 NaCl 后能够降低泡沫稳定性,是由于削弱了液膜表面间的斥力。Bai B 等人^[82]研究了 CD1045 起泡剂在贝雷砂岩表面的吸附动力学以及吸附对泡沫动力学的影响,结果表明,起泡剂在砂岩表面的吸附符合拟二级动力学模型,吸附量随药剂浓度的增加而增加,符合 Freundlich 吸附模型。与二相泡沫相比,添加砂岩的三相泡沫稳定性降低。

4 起泡剂与捕收剂的协同作用

在实际的浮选过程中,药剂与药剂之间往往会相互影响,产生促进或抑制作用。起泡剂和捕收剂二者非极性烃链间存在着疏水性缔合作用,只要捕收剂和起泡剂的结构和比例适当,就可在气液或固液界面产生共吸附现象。此外,起泡剂还与捕收剂共存于胶束中,影响捕收剂的临界胶束浓度;起泡剂也可使捕收剂乳化或加速捕收剂的溶解^[83]。

沈笑君等人^[84]通过选煤试验探究了浮选捕收剂与起泡剂的相互作用,发现捕收剂和起泡剂的药剂配比对浮选效果有较大的影响,其原因主要是捕收剂和起泡剂间存在复杂的交互作用,即捕收剂对泡沫稳定性的影响,以及起泡剂对矿物表面疏水性和捕收剂的乳化作用。程雅丽^[85]探究了煤泥浮选中捕收剂与起泡剂的交互作用机理,研究发现,在两相泡沫中,低浓度捕收剂的加入会使得少量的捕收剂分子与起泡剂

分子的非极性端相吸附,从而增强了起泡剂分子非极性端的疏水能力,使之更易附着在气液界面,有利于提高气泡稳定性;在三相泡沫中,不同的捕收剂结构会对泡沫特性产生不同的影响,其与起泡剂组合时的交互作用也存在差异。

Cao 等人^[86]研究了十二烷基磺酸钠(SDS)与混合脂肪酸捕收剂在磷灰石浮选中的协同作用,试验发现 SDS 的加入,提高了捕收剂在浮选体系中的分散性,有利于混合溶液在气/液界面的吸附,增强了磷灰石表面的疏水性。此外,SDS 似乎在一定程度上抑制了混合脂肪酸捕收剂在磷灰石表面形成双层/多层结构。Cheng 等人^[87]探究了辛烷酚聚氧乙烯-10(OP-10)和油酸在磷灰石浮选中的协同作用。研究发现,在油酸中添加质量分数 2.5% 的 OP-10 可以提高磷灰石表面电位的绝对值,提高油酸在低温下磷灰石表面的吸附量,有助于磷酸盐矿石的有效分离。

Kapiamba 等^[88]用工业起泡剂部分替代胺类捕收剂进行赤铁矿阳离子反浮选,将胺类捕收剂替代 10% 以上可提高石英的可浮性,从而提高赤铁矿浮选的总体回收率。Matos 等人^[89]探究了起泡剂部分替代醚胺捕收剂对铁矿石阳离子反浮选选择性的影响。试验发现,用非离子型起泡剂 MIBC 和 Dowfroth 1012 部分代替醚胺捕收剂,两者能在气液和固液界面产生共吸附现象,提高铁矿石阳离子反浮选的选择性。Batjargal 等人^[90]利用动态泡沫分析仪测定泡沫捕收剂混合物的起泡性能及其对浮选的影响,通过试验发现,起泡剂和捕收剂的混合会产生累加效应或相互作用,从而降低或增加混合物的 FP(foam production)值,对浮选效果产生影响。

汤家焰等人^[91-92]探究了表面活性剂在油酸钠浮磷脱硅过程中的增效作用。结果发现,以 APE 或 OP 表面活性剂作为油酸钠的增效剂,将其与油酸钠复配,可提高磷矿脱硅浮选的产率。增效作用机理主要为表面活性剂的增溶作用及起泡作用。王纪镇^[93]、刘三军^[94]、朱海玲^[95]、JIA^[96]等人探究了醚醇类药剂与油酸钠混合使用对白钨矿浮选的影响。结果发现,醚醇类药剂与油酸钠在白钨矿浮选中存在正协同效应,可提高白钨矿的回收率。两者产生协同效应的原因因为醚醇增加了油酸钠在矿物表面的吸附量。

5 结论

(1)随着环保意识的加强,开发新型高效、环保、节能、低成本的起泡剂仍是今后研究的重点。在浮选实践中,传统起泡剂的使用仍占较大比例,但容易对环境造成污染,且成本较高。因此,开发新型起泡剂,拓宽其适用条件和范围,以期降低浮选成本和对环境的影响,并获得更好的浮选指标。此外,生物起泡剂的开发也很有可能成为起泡剂研究的热点。

(2)合理利用现有药剂,发挥药剂间的协同作用,是提高起泡剂性能的重要手段。往往高效的起泡剂开发周期较长,且成本较高,不利于快速推广。因此,合理利用现有药剂,将现有起泡剂进行复配或组合使用,发挥药剂间的协同作用,得到 1+1 > 2 的效果,是值得进一步探索的方向。

(3)借助各种微观与宏观相结合的现代检测仪器是起泡剂机理研究的重要方向,尤其是针对泡沫相中复杂的气液、固液界面性质开展攻关,将宏观与微观相结合,对建立起泡剂稳定机制、指导起泡剂的开发、提高选矿指标、指导工业实践具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 黄建平,卢毅屏,赵刚,等.浮选起泡剂及其研究新进展[J].*金属矿山*,2012(12):66-74.
HUANG G S, LU Y P, ZHAO G, et al. Review on flotation frothers and its research progress[J]. *Metal Mine*, 2012(12): 66-74.
- [2] 杨磊,孙玉龙.浮选起泡剂的研究现状和发展趋势[J].*科技视界*,2016(2):137.
YANH L, SUN Y L. Research status and development trend of flotation frother[J]. *Science & Technology Vision*, 2016(2): 137.
- [3] 程雅丽,付晓恒,杨晓冉,等.浮选起泡剂的研究进展[J].*煤炭工程*,2017,49(9):142-145.
CHENG Y L, FU X H, YANG X R, et al. A review: research of flotation frother[J]. *Coal Engineering*, 2017, 49(9): 142-145.
- [4] 罗忠岩.浮选药剂的国内外研究综述[J].*当代化工研究*,2018,35(11):54-55.
LUO Z Y. An overview of flotation reagent in domestic and abroad[J]. *Modern Chemical Research*, 2018, 35(11): 54-55.
- [5] 胡熙庚,黄和慰.浮选理论与工艺[M].长沙:中南大学出版社,1991.
HU X G, HUANG H W. Flotation theory and technology[M]. Changsha: Central South University Press, 1991.
- [6] 胡岳华.矿物浮选[M].长沙:中南工业大学出版社,2014.
HU Y H. Ore flotation[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 2014.
- [7] 龚明光.泡沫浮选[M].北京:冶金工业出版社,2007.
GONG M G. Froth flotation[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.
- [8] 谢广元.选矿学[M].徐州:中国矿业大学出版社,2016.
XIE G Y. Mineral processing[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2016.
- [9] 刘文刚,魏德洲,崔宝玉,等.新型捕收剂在赤铁矿反浮选中的应用[J].*东北大学学报(自然科学版)*,2011,32(4):575-578.
LIU W G, WEI D Z, CUI B Y, et al. Application of a new collector in reverse flotation of hematite[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2011, 32(4): 575-578.
- [10] 朱玉霜,朱建光.浮选药剂的化学原理[M].长沙:中南工业大学出版社,1996.
ZHU Y S, ZHU J G. Chemical principles of flotation reagents[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1996.
- [11] 董贞允,韩毓丽,孙小凤. P₁-MPA新合成起泡剂[J].*有色金属(选矿部分)*,1982(3):4-10.
DONG Z Y, HAN Y L, SUN X F. New synthetic frother for P₁-MPA[J]. *Nonferrous Metals(Mineral processing section)*, 1982(3):

- 4-10.
- [12] 朱一民. 1, 1, 3-三乙氧基丁烷与二丙基二醇丁醚的起泡性能[J]. *矿产保护与利用*, 2011(4): 28-30.
ZHU Y M. Foaming properties of 1, 1, 3-triethoxy butane and dipropyl glycol butyl ether[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2011(4): 28-30.
- [13] 丁大森, 曹光明, 李永战. 新药剂的研制与推广应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2003(1): 30-33.
DIN D S, CAO G M, LI Y Z. Development and application of new drug[J]. *Nonferrous Metals(Mineral processing section)*, 2003(1): 30-33.
- [14] Somasundaran, P., et al. 12th IMPC[Z] San Paulo, 1977.
- [15] 宋庆福, 周高云. 几种合成起泡剂的应用实践[J]. *矿冶*, 2000(1): 36-40.
SONG Q F, ZHOU G Y. Application of several synthetic frothers[J]. *Mining and Metallurgy*, 2000(1): 36-40.
- [16] 周高云, 曾新民, 刘元科, 等. 新起泡剂BK-206在金川镍矿的应用研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2000(6): 32-35.
ZHOU G Y, ZENG X M, LIU Y K, et al. Application of a new frother BK-206 in Jinchuan nickel mine[J]. *Nonferrous Metals(Mineral processing section)*, 2000(6): 32-35.
- [17] 周高云. 起泡剂BK-206在铅锌矿的应用研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2001(6): 32-35.
ZHOU G Y. Study on application of frother BK-206 in lead-zinc ore[J]. *Nonferrous Metals(Mineral processing section)*, 2001(6): 32-35.
- [18] 曾培, 欧乐明, 冯其明, 等. 起泡剂MIBC和BK-201的浮选泡沫特性[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(8): 2276-2283.
ZENG P, OU L M, FENG Q M, et al. Froth characteristic of MIBC and BK-201 frothers[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(8): 2276-2283.
- [19] 苏建芳, 王中明, 刘书杰, 等. 新型选硫药剂AT608及BK204在安徽某铁矿硫浮选中的应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2013(z1): 253-255+263.
SU J F, WANG Z M, LIU S J, et al. Application of new sulfur separation agents AT608 and BK204 in sulfur flotation of an Anhui iron ore[J]. *Nonferrous Metals(Mineral processing section)*, 2013(z1): 253-255+263.
- [20] 彭远伦, 凌石生, 罗科华. 云南某铜矿特效起泡剂BK208工业应用实践[J]. 有色金属(选矿部分), 2022(1): 138-141.
PENG Y L, LING S S, LUO K H. Industrial application of special frother BK208 in copper mine of Yunnan[J]. *Nonferrous Metals(Mineral processing section)*, 2022(1): 138-141.
- [21] 刘曙. RB₁起泡剂在浮硫作业中的应用[J]. *金属矿山*, 1998(1): 50.
LIU S. Application of RB₁ frother in sulfur floating operation[J]. *Metal Mine*, 1998(1): 50.
- [22] 朱建光, 朱玉霜. RB₃起泡剂对铅锌硫化矿的浮选性能[J]. *矿冶工程*, 1994(4): 20-23+26.
ZHU J G, ZHU Y S. Flotation performance of RB₃ frother in lead-zinc sulfide ore[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 1994(4): 20-23+26.
- [23] 朱建光, 朱玉霜. RB系列起泡剂浮选铜矿试验[J]. *有色矿山*, 1995(5): 26-31.
ZHU J G, ZHU Y S. Experiment on flotation of copper mine with RB series frothers[J]. *Nonferrous Mines*, 1995(5): 26-31.
- [24] 余云柏. 起泡剂730A在硫化铅锌矿分选中的研究与实践[J]. 有色金属(选矿部分), 2002(4): 37-38+30.
YU Y B. Research and practice of foaming agent 730A in the separation of lead-zinc sulfide ore[J]. *Nonferrous Metals(Mineral processing section)*, 2002(4): 37-38+30.
- [25] 刘述忠, 李晓阳, 杨新华, 等. 氧化铜矿浮选的新起泡剂[J]. *金属矿山*, 2004(4): 41-43.
LIU S Z, LI X Y, YANG X H, et al. New frother for oxide copper mine flotation[J]. *Metal Mine*, 2004(4): 41-43.
- [26] 胡卫新, 刘炯天, 李延峰, 等. 浮选柱选用适宜起泡剂的试验研究[J]. *矿山机械*, 2010, 38(7): 98-101.
HU W X, LIU J T, LI Y F, et al. Experimental research on selecting the optimum frother for the flotation column[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2010, 38(7): 98-101.
- [27] 王雅言. 新型浮选起泡剂—11号油[J]. 有色金属(选矿部分), 1988(6): 56-57.
WANG Y Y. New flotation frother-No. 11 oil[J]. *Nonferrous Metals(Mineral processing section)*, 1988(6): 56-57.
- [28] 许善. BQ-2新型高效起泡剂工业试验和生产实践[J]. *黄金*, 1993(4): 48-49.
XU S. Industrial test and production practice of BQ-2 new effervescent agent[J]. *Gold*, 1993(4): 48-49.
- [29] 吕金玲, 马广清, 杨元章, 等. 矿友-321新型起泡剂的开发应用[J]. 有色金属(选矿部分), 1999(6): 19-21+25.
LU J L, MA G Q, YANG Y Z, et al. Development and application of a new frother for Mine -321[J]. *Nonferrous Metals(Mineral processing section)*, 1999(6): 19-21+25.
- [30] 罗传胜, 雷鸣. 新型起泡剂W-701浮选铜矿山低品位高含泥氧化铜矿的研究[J]. *矿产综合利用*, 2000(4): 25-28.
LUO C S, LEI M. Flotation of low-grade oxidized copper ores using new type of frother W-701[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2000(4): 25-28.
- [31] 李永战, 丁大森, 尹新玉, 等. 新型捕收剂NXP-1浮选铜硫矿的工艺研究与应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2001(5): 27-28+31.
LI Y Z, DING D S, YI X Y, et al. Research and application of new collector frother NXP-1 in flotation of copper sulfide ore[J]. *Nonferrous Metals(Mineral processing section)*, 2001(5): 27-28+31.
- [32] 柴垣民, 王忠民. 新型起泡剂SDJ-2在铜矿峪选矿厂的应用研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2001(5): 29-31.
CHAI Y M, WANG Z M. Study on application of new frother SDJ-2 in concentrator of Tongkuangyu[J]. *Nonferrous Metals(Mineral processing section)*, 2001(5): 29-31.
- [33] 罗廉明, 顾德付, 胡立嵩. 介绍一种新型起泡剂[J]. *国外金属矿选矿*, 2001(12): 10-12.
LUO L M, GU D F, HU L S. A new frother is introduced[J]. *Metallic Ore Dressing Abroad*, 2001(12): 10-12.
- [34] 刘安平, 尤六亿. 新型起泡剂SK96在梅山选矿厂的应用研究[J]. *金属矿山*, 2001(12): 43-45.
LIU A P, YOU L Y. Application research of new frother SK96 in meishan concentrator[J]. *Metal Mine*, 2001(12): 43-45.
- [35] 吕金玲, 杨文柱. 新型起泡剂矿友-322[J]. 有色金属(选矿部分), 2002(5): 40-41.
LU J L, YANG W Z. New frother mine friend-322[J]. *Nonferrous Metals(Mineral processing section)*, 2002(5): 40-41.
- [36] 万盛辉. YC-111起泡剂在德兴铜矿的应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2004(5): 43-44+9.
WAN S H. Application of frother YC-111 in Dexing copper mine[J]. *Nonferrous Metals(Mineral processing section)*, 2004(5): 43-44+9.
- [37] 俞国庆. A-200起泡剂选钼试验研究[J]. *中国钼业*, 2007(1): 20-22.
YU G Q. Study on the experiment of A-200 frother flotation

- molybdenum ore[J]. *China Molybdenum Industry*, 2007(1): 20-22.
- [38] 钟在定,王永超,温晓婵. 新型JM-208起泡剂在钼浮选中的应用研究[J]. *金属矿山*, 2009(9): 102-103+119.
ZHONG Z D, WANG Y C, WEN X C. Application of new frother JM-208 in the flotation of molybdenum ore[J]. *Metal Mine*, 2009(9): 102-103+119.
- [39] 廖佳,李松春,李霞,等. 新型起泡剂750B在铅锌矿浮选中的应用研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2014(4): 92-95.
LIAO J, LI S C, LI X, et al. Study on application of a novel frother of 750B in lead-zinc ore flotation[J]. *Nonferrous Metals(Mineral processing section)*, 2014(4): 92-95.
- [40] 杨自立,马子龙,桂夏辉,等. 新型起泡剂250A对安徽某铜矿石的浮选效果[J]. *金属矿山*, 2015(11): 78-81.
YANG Z L, MA Z L, GUI X H, et al. Flotation performance of the new frother 250A on a copper ore in Anhui[J]. *Metal Mine*, 2015(11): 78-81.
- [41] 田小松,高利坤. 新型高效起泡剂HCCL在羊拉铜矿的应用研究[J]. *价值工程*, 2015, 34(32): 129-131.
TIAN X S, GAO L K. Study on the application of new frother HCCL in Yangla copper mine[J]. *Value Engineering*, 2015, 34(32): 129-131.
- [42] 李了艳,钟宏,方若晨. 新型起泡剂FG25在硫化铜矿和铅锌矿浮选中的应用研究[J]. *矿冶工程*, 2017, 37(3): 43-46.
LI L Y, ZHONG H, FANG R C. Application of new frother FG25 in flotation of copper sulfide ore and lead-zinc ore[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2017, 37(3): 43-46.
- [43] 张月,吴金鑫,王恩祥,等. 新型高效起泡剂HG-1在钼矿浮选中的应用研究[J]. *中国钼业*, 2019, 43(2): 26-30.
ZHANG Y, WU J X, WANG E X, et al. Application of new high-efficiency HG-1 foaming agent in molybdenum flotation[J]. *China Molybdenum Industry*, 2019, 43(2): 26-30.
- [44] 张海龙,李乔松,关蕴,等. A-3新型起泡剂在某铜矿山浮选应用研究[J]. *有色矿冶*, 2021, 37(4): 22-24.
ZHANG H L, LI Q S, GUAN Y, et al. Application of A-3 new foaming agent in flotation of a copper mine[J]. *Non-ferrous Mining and Metallurgy*, 2021, 37(4): 22-24.
- [45] 侯鹏辉. 煤泥浮选起泡剂的优化试验[J]. *洁净煤技术*, 2012, 18(4): 13-15+29.
HOU P H. Optimization test of frother for slime flotation[J]. *Journal of Clean Coal Technology*, 2012, 18(4): 13-15+29.
- [46] 邓维亮,郑旭,柳振星. 起泡剂730A与松醇油在昆钢大红山铁矿150万t/a选矿厂的生产应用[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2015(3): 87-90.
DENG W L, ZHENG X, LIU Z X. Production application of frothers between 730A and terpineol oil in 1.5M t/a dressing plant of Dahongshan iron mine of Kunsteel[J]. *Nonferrous Metals(Mineral processing section)*, 2015(3): 87-90.
- [47] 刘述忠,郭万富,李宝铸,等. 福建丁家山铅锌硫化矿组合起泡剂优化浮选[J]. *有色金属工程*, 2015, 5(6): 55-59.
LIU S Z, GUO W F, LI B Z, et al. Flotation technology optimization of lead-zinc sulfide ore in Fujian Dingjiashan mine by combined frother Nonferrous[J]. *Metals Engineering*, 2015, 5(6): 55-59.
- [48] 郭万富,黄石,陈享享,等. 组合起泡剂改进硫铁矿浮选工艺试验研究[J]. *化工矿物与加工*, 2016, 45(2): 19-22.
GUO W F, HUANG S, CHEN X X, et al. Experimental research on improving gpyrrhotite and pyrite flotation process by combined frother[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2016, 45(2): 19-22.
- [49] 林上勇,曹学锋,孙伟,等. 应用组合起泡剂优化黑、白钨混合浮选[J]. *有色金属工程*, 2018, 8(2): 101-106.
LIN S Y, CAO X F, SUN W, et al. Optimizing bulk flotation of wolframite and scheelite by assemble foaming agent[J]. *Metals Engineering*, 2018, 8(2): 101-106.
- [50] 郭芳余,黄露露,何琳等. 复配起泡剂强化低阶煤浮选的试验研究[J]. *选煤技术*, 2021(1): 92-97.
GUO F Y, HUANG L L, HE L, et al. Experimental study on enhancement of low-rank coal flotation with compound frother[J]. *Goal Preparation Technology*, 2021(1): 92-97.
- [51] 曹文学. 浅谈浮选起泡剂的泡沫性能及在选矿中的应用[J]. *科技视界*, 2020(28): 119-120.
CAO W X. The foam property of flotation frother and its application in mineral processing are discussed briefly[J]. *Science & Technology Vision*, 2020(28): 119-120.
- [52] 刘德生,陈小榆,周承富. 温度对泡沫稳定性的影响[J]. *钻井液与完井液*, 2006(4): 10-12+86.
LIU D S, CHEN X Y, ZHOU C F. Effects of temperature on the stability of foam[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2006(4): 10-12+86.
- [53] 孙烜,苏宇峰,魏博磊,等. 温度和浓度对发泡剂表面张力和泡沫稳定性的影响[J]. *墙材革新与建筑节能*, 2016, 214(9): 28-32.
SUN X, SU Y F, WEI B L, et al. Effect of temperature and concentration on surface tension and foam stability of frother[J]. *Wall Materials Innovation & Energy Saving in Buildings*, 2016, 214(9): 28-32.
- [54] 陈楠,王治红,刘友权,等. 温度压力下起泡剂的起泡性和泡沫稳定性研究[J]. *石油与天然气化工*, 2017, 46(5): 65-68.
CHEN N, WANG Z H, LIU Y Q, et al. Research on foaming ability and foam stability of foaming agent at the temperature and pressure[J]. *Chemical Engineering of Oil and Gas*, 2017, 46(5): 65-68.
- [55] CHUN YONG NG, YANG B Y, HANGIL PARK, et al. Improvement of dynamic foam stability with low-frequency acoustic sound[J]. *Minerals Engineering*, 2022, 184: 107654.
- [56] 薛托托. 溶剂极性对其发泡性能的影响机理研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2019.
XUE T T. Study on the influence of solvent polarity on its foaming properties[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2019.
- [57] 赵龙梅,冯莉,燕传勇,等. 常用起泡剂起泡性能的研究[J]. *中国科技论文在线*, 2010, 5(6): 419-422.
ZHAO L M, FENG L, YAN C Y, et al. The foaming properties of common frother[J]. *Sciencepaper Online*, 2010, 5(6): 419-422.
- [58] 郑继龙. 分子结构对起泡剂泡沫性能的影响[J]. *应用科技*, 2021, 48(2): 116-119.
ZHENG J L. Study on the influence of molecular structure on the foam properties of foaming agent[J]. *Applied Science and Application*, 2021, 48(2): 116-119.
- [59] HUANG B, ZHOU M M, WANG Z Y, et al. The influence of functional groups in frothers on foaming performance and foam stability[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 7(3): 371-380.
- [60] KIRSTEN C CORIN, SARAH TETLOW, MALIBONGWE S MANONO. Considering the action of frothers under degrading water quality[J]. *Minerals Engineering*, 2022, 181: 107546.
- [61] 蒋昊,彭伟文,杨沁红,等. 阴离子-非离子组合药剂对一水硬铝石浮选和泡沫稳定性的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2017, 27(8): 1708-1714.
JIANG H, PENG W W, YANG Q H, et al. Effect of mixed anionic-nonionic reagents on flotation of diasporite and stability of froth[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(8): 1708-1714.

- [62] ZHENYU ZHANG, MIN QIAO, HONGXIA ZHAO, et al. Effect of mixed surfactants on foam stabilization: A molecular dynamics simulation[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 365: 120096.
- [63] 吴轶君, 孙琳, 蒲万芬. 高温下高矿化度对泡沫性能的影响[J]. *石油化工*, 2017, 46(5): 619–625.
WU Y J, SUN L, PU W F. Effect of salinity on foaming properties at high temperature[J]. *Petrochemical Technology*, 2017, 46(5): 619–625.
- [64] 谭佳琨, 梁龙, 彭耀丽, 等. 煤泥浮选过程中粒度对泡沫性质的影响[J]. *中国矿业大学学报*, 2019, 48(1): 195–203.
TAN J K, LIANG L, PENG Y L, et al. Effect of particle size on the froth property in coal flotation[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019, 48(1): 195–203.
- [65] YAFENG FU, WANZHONG YIN, JIN YAO, et al. Study on stability of flotation foam influenced by particle effect of chlorite[J]. *Journal of Central South University of Science and Technology*, 2018, 49(8): 1857–1862.
- [66] 赵一帆, 来庆腾, 廖寅飞, 等. 硫化-胺盐浮选体系中矿泥对泡沫稳定性的影响[J]. *矿产保护与利用*, 2017(3): 52–57+64.
ZHAO Y F, LAI Q T, LIAO Y F, et al. Effect of slime on foam stability in ammonium sulfide flotation system[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2017(3): 52–57+64.
- [67] 张阳, 燕永利, 奚琪, 等. SiO₂纳米颗粒对水相泡沫稳定性的影响[J]. *日用化学工业*, 2020, 50(1): 26–31.
ZHANG Y, YAN Y L, XI Q, et al. Effects of SiO₂ nanoparticles on the stability of aqueous foams[J]. *China Surfactant Detergent & Cosmetics*, 2020, 50(1): 26–31.
- [68] 岳野. 改性纳米SiO₂颗粒对泡沫稳定性的影响研究[J]. *当代化工*, 2020, 49(3): 597–600.
YUE Y. Influence of modified silicon dioxide particles on the stability of foams[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2020, 49(3): 597–600.
- [69] DU R T, LI N, CUI Z J, et al. Effect of janus nanoparticles on foam stability[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2418(1).
- [70] ZHANG Y B, CHEN J H, LI Y Q, et al. Adsorption structures of frothers at gas-liquid interface using DFT method[J]. *Journal of Central South University*, 2019, 26(3): 536–549.
- [71] 吴刚. 无机盐对表面活性剂及其复合体系泡沫稳定性影响的机理研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
WU G. Effect of inorganic salts on foam stability of surfactant and its composite systems[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.
- [72] 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.
ZHU Y M, YANG X Y, CHENG Z Y Y, et al. Study on the foam properties and mechanisms of different amines collectors[J]. *Metal Mine*, 2020(7): 99–104.
- [73] 乘舟越洋, 朱一民, 毛毛, 等. 5种非硫化矿捕收剂泡沫性能及机理研究[C]//2018年第九届中国矿业科技大会论文集. 2018: 75-79.
CHENG Z Y Y, ZHU Y M, MAO M, et al. Study on foam properties and mechanism of five kinds of unsulfide ore collector[C]// Proceedings of the 9th China Mining Science and Technology Conference 2018. 2018: 75-79.
- [74] XIMEI L, LINPING Q, SHUMING W, et al. Adsorption configuration of dodecylamine at gas-liquid interface and its relationship with foam stability: MD simulation and ToF-SIMS investigation[J]. *Minerals Engineering*, 2021, 164: 106830.
- [75] RONGJIAO L, XIMEI L, SHUMING W, et al. Three-phase froth stability in hematite flotation using DDA as a collector[J]. *Minerals Engineering*, 2023, 195: 108023.
- [76] XIMEI L, QIQIANG L, SHUMING W, et al. Effect of Sodium Dodecyl Sulfonate on the Foam Stability and Adsorption Configuration of Dodecylamine at the Gas-Liquid Interface[J]. *Langmuir*, 2021, 37(3): 1235–1246.
- [77] PANDEY SAMIR, BAGWE RAHUL P, SHAH DINESH O. Effect of counterions on surface and foaming properties of dodecyl sulfate[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2003, 267(1): 160–166.
- [78] SCHELERO NATASCHA, HEDICKE GABI, LINSE PER, et al. Effects of counterions and co-ions on foam films stabilized by anionic dodecyl sulfate[J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2010, 114(47): 15523–15529.
- [79] 郭芳余. 混合表面活性剂强化低阶煤浮选泡沫稳定性机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
GUO F Y. Study on foam stability mechanism of low rank coal flotation enhanced by mixed surfactant[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [80] 李国胜. 浮选泡沫的稳定性调控及粉煤灰脱炭研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
LI G S. Regulation of flotation froth stability and removal of unburned-carbon coal fly ash[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.
- [81] WANG J L, ANH V. NGUYEN, SAEED FARROKHPAY. Effects of surface rheology and surface potential on foam stability[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2016, 488: 70–81.
- [82] BAI B J, REID B. GRIGG, YI SVEC, WU Y F. Adsorption of a foam agent porous sandstone and its effect on foam stability[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2010, 353(2/3): 189–196.
- [83] 孟晓光. 捕收剂和起泡剂作用机理分析[J]. *煤炭加工与综合利用*, 2017(5): 44–46.
MENG X G. Analysis of action mechanism of collector and foaming agent[J]. *Coal Processing and Comprehensive Utilization*, 2017(5): 44–46.
- [84] 沈笑君, 刘元晖. 浮选捕收剂与起泡剂的相互作用研究[J]. *洁净煤技术*, 2009, 15(1): 14–16.
SHEN X J, LIU Y H. Study on the interaction between the collectors and the frothers in flotation[J]. *Journal of Clean Coal Technology*, 2009, 15(1): 14–16.
- [85] 程雅丽. 煤泥浮选中捕收剂与起泡剂交互作用机理的研究[D]. 北京市: 中国矿业大学(北京), 2021.
CHENG Y L. Study on the interaction mechanism of collector and frother in slime flotation[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2021.
- [86] CAO Q B, CHENG J H, WEN S M, et al. Synergistic effect of dodecyl sulfonate on apatite flotation with fatty acid collector[J]. *Separation Science and Technology*, 2016, 51(8): 1389–1396.
- [87] CHENG R J, LI C X, LIU X, et al. Synergism of octane phenol polyoxyethylene-10 and oleic acid in apatite flotation[J]. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2017, 53(2): 1214–1227.
- [88] KAPIAMBA, K FABRICE, MERVEILLE KIMPIAB. The effects of partially replacing amine collectors by a commercial frother in a reverse cationic hematite flotation[J]. *Heliyon*, 2021, 7(3): e06559.
- [89] VANDERSON E. MATOS, STEPHÂNIA C. S. NOGUEIRA, GILBERTO R. SILVA, et al. Effects of surfactants combination on iron ore flotation[J]. *Minerals Engineering*, 2022, 190, 107910.
- [90] KHANDJAMTS BATJARGAL, ONUR GUVEN, ORHAN OZDEMIR,

- et al. Frothing performance of frother-collector mixtures as determined by dynamic foam analyzer and its implications in flotation[J]. *Minerals*, 2023, 13(2): 242.
- [91] 汤家焰,张静茹,李养岚,等. APE表面活性剂在磷矿浮选脱硅中的增效作用[J]. *非金属矿*, 2019, 42(6): 49-52.
TANG J Y, ZHANG J R, LI Y L, et al. Synergistic effect of APE surfactants on phosphorus ore flotation desilication[J]. *Non-Metallic Mines*, 2019, 42(6): 49-52.
- [92] 汤家焰,张静茹,王志芳,等. OP表面活性剂在磷矿浮选脱硅中的增效作用[J]. *中国矿业*, 2021, 30(1): 121-126.
TANG J Y, ZHANG J R, WANG Z F, et al. Synergistic effect of OP surfactants on phosphorus ore flotation desilication[J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(1): 121-126.
- [93] 王纪镇,程雅芝,肖雨辰,等. 油酸钠/TX-100组合药剂对白钨矿的捕收性能及机理研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2019(1): 100-104.
WANG J Z, CHENG Y Z, XIAO Y C, et al. Collecting performance of mixed NaOL/TX-100 for scheelite flotation and its mechanism[J]. *Nonferrous Metals(Mineral processing section)*, 2019(1): 100-104.
- [94] 刘三军,覃文庆,刘维,等. 铝土矿浮选中Tween-20对油酸的增效机理[J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(8): 2284-2289.
LIU S J, QIN W Q, LIU W, et al. Synergistic mechanism of Tween-20 to oleic acid in bauxite flotation[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(8): 2284-2289.
- [95] 朱海玲,覃文庆,陈臣,等. 阴-非离子复配表面活性剂对白钨矿的低温捕收性能及其应用[J]. *中国有色金属学报*, 2016, 26(10): 2188-2196.
ZHU H L, QIN W Q, CHEN C, et al. Low-temperature collecting performance of mixed anionic-nonionic surfactants for scheelite flotation and its application[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2016, 26(10): 2188-2196.
- [96] JIA W H, QIN W Q, CHEN C, et al. Collecting performance of vegetable oils in scheelite flotation and differential analysis[J]. *Journal of Central South University*, 2019, 26(4): 787-795.

Research Progress of Flotation Frother

HONG Xin¹, LUO Ximei^{1,2,3}, JIANG Wangqiang^{1,3}, JIA Lufan¹, SONG Zhenguo⁴, WANG Yunfan^{2,3}

1. Faculty of Land and Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Yunnan Key Laboratory of Green Separation and Enrichment of Strategic Mineral Resources, Kunming 650093, China;

3. State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

4. State Key Laboratory of Mineral Processing Science and Technology, BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China

Abstract: Based on the important role of flotation frother, the types and applications of frother were introduced in this paper from three aspects of conventional frothers, novel(code) frothers and combined frothers. The influence factors of foam performance and their mechanism were summarized. Finally, the synergistic effect between frothers and collectors was briefly described, and the development trend of frother in the future was predicted.

Keywords: flotation; frother; foam performance; foam stability

引用格式: 洪欣,罗溪梅,蒋旺强,贾路繁,宋振国,王云帆. 浮选起泡剂研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2023, 43(3): 22-33.

HONG Xin, LUO Ximei, JIANG Wangqiang, JIA Lufan, SONG Zhenguo, WANG Yunfan. Research progress of flotation frother[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2023, 43(3): 22-33.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn



通信作者简介:

罗溪梅(1986—),女,四川绵阳人,昆明理工大学副教授,红云园丁模范教师。研究方向为选矿理论与工艺、资源综合利用。在 *Langmuir*、*Minerals Engineering* 等国内外期刊发表学术论文 40 余篇,参编学术书籍 2 部,申请国家发明专利 9 项。主持国家自然科学基金项目 3 项、云南省应用基础研究项目 1 项、云南省级人才培养项目 1 项、云南省教育厅基金项目 1 项、矿物加工科学与技术国家重点实验室基金项目 1 项以及多项横向科研项目。荣获中国有色金属工业科学技术奖一等奖、红云园丁奖、教学比赛二等奖、优秀学术论文奖等。担任矿加卓越 15 级班主任,班级荣获云南省级和校级优秀班集体。作为核心成员入选云南省创新团队、云南省博士研究生导师团队,兼任国家自然科学基金项目评议人以及多个期刊评审专家。