

硫化矿浮选中有有机抑制剂对滑石的抑制机理及研究进展

李金文¹, 孔令宇¹, 吕晋芳^{1,2}, 魏民¹

1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;
2. 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 云南 昆明 650093

中图分类号: TD923¹.14 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)06-0171-08
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.06.018

摘要 滑石是一种含镁硅酸盐矿物, 常与金属硫化矿共伴生。在硫化矿浮选中, 滑石常因其较好的天然可浮性而上浮进入精矿中, 导致精矿中镁含量超标, 从而影响后续的冶炼。有机药剂是一类常见的滑石抑制剂, 对滑石具有较好的抑制作用。为此, 全面总结了硫化矿浮选过程中有机抑制剂对滑石的抑制机理和研究现状, 指明该类抑制剂主要是通过其分子中的羟基、羧基和疏水烃链等与滑石表面的氧原子、金属离子或滑石表面的疏水位点之间形成氢键、化学作用或疏水作用, 从而吸附于滑石的表面, 降低滑石表面的疏水性, 实现对滑石的抑制。

关键词 硫化矿浮选; 滑石; 有机抑制剂; 作用机理

引言

滑石是一种典型的含镁硅酸盐矿物^[1], 常与金属硫化矿物共伴生, 由于其具有较好的天然可浮性, 在浮选过程中极易进入精矿中, 导致精矿品质降低^[2-3]。浮选精矿中滑石含量的升高也会增加后续冶炼炉渣黏度和造成冶炼熔点升高, 对冶炼工艺产生不利影响^[4-5]。因此, 目前金属硫化矿物与滑石的分离已成为研究的热点和重点。

在硫化矿物与滑石的分离中一般有 3 种方法: (1)预先浮选脱除滑石; (2)添加抑制剂来抑制滑石上浮; (3)通过酸浸除去精矿中的滑石^[6]。采用预先浮选的方法脱除滑石时, 很难准确控制滑石的去除量, 而且还可能损失部分目的矿物。采用酸浸除去精矿中的滑石则需要大量的酸性溶液, 会腐蚀设备和增加处理成本、增大环境保护治理难度。因此, 加入选择性抑制剂来抑制滑石是实现硫化矿物与滑石浮选分离的关键技术。

目前, 滑石浮选抑制剂可分为无机抑制剂和有机抑制剂两大类。无机抑制剂主要有水玻璃^[7]、六偏磷

酸钠^[8]、氟硅酸钠^[9]等。有机抑制剂主要有羧甲基纤维素、壳聚糖类、淀粉类、普鲁兰多糖、古尔胶、刺槐豆胶、黄原胶和一些组合抑制剂等。在滑石浮选抑制剂的选择中, 由于无机抑制剂通常具有较高的毒性、用量大和污染严重等缺点, 因此越来越受到限制; 而有机抑制剂因其在浮选中具有可生物降解、污染风险小、种类多、来源广泛等优点, 因此越来越受到研究者和生产企业的青睐^[10]。然而, 有机抑制剂因结构复杂、官能团较多, 且这类抑制剂对滑石的抑制机理和研究现状等缺乏系统的总结, 为此, 本文对其抑制作用机理和研究进展进行了综述。

1 滑石的晶体结构及表面性质

1.1 滑石晶体结构

滑石 ($\text{Mg}_3[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$) 是一种层状结构的含水镁质硅酸盐矿物, 其晶体结构主要由三个基本结构层组成, 如图 1 所示, 中间层是氢氧镁石层, 上下两层是硅氧四面体层。在滑石的晶体结构中, 硅氧四面体层会互相连接形成连续的六方网状层^[11]。而硅氧四面体层中的活性氧则向外排列, 并通过镁阳离子相连接的

收稿日期: 2023-08-28

基金项目: 云南省基础研究计划项目昆明理工大学“双一流”创建联合专项(202101BE070001-036); 云南省重大科技项目昆明理工大学“双一流”科技专项(202202AG050010)

作者简介: 李金文(1999—), 男, 云南文山人, 硕士研究生, 研究方向为浮选理论与工艺, E-mail: 3154698389@qq.com。

通信作者: 吕晋芳(1985—), 女, 山西太原人, 博士, 博士生导师, 研究方向为资源与环境, E-mail: jflv2017@126.com。

方式与另一六方网状层中的活性氧相连,构成双层^[12]。滑石双层之间仅靠弱范德华力相连,连接不牢固,因此滑石极易沿双层之间解离。

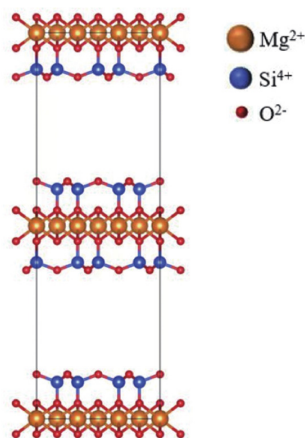


图1 滑石晶体结构

Fig. 1 Crystalline structure of talc

1.2 滑石的表面润湿性

滑石的表面润湿性与其晶体结构密切相关。研究表明,滑石在解离过程中晶体结构遭到破坏后,会形成两种不同性质的表面,即基面和端面。其中,基面仅以非极性键存在,因此,滑石基面表现出了较好的疏水性^[13]。但端面则主要是由 Si-O 和 Mg-O(OH) 断裂形成的不饱和键组成,因此,滑石端面表现出了较好的亲水性^[14]。但是,滑石由于在碎磨过程中极易沿层间解离,导致其在浮选过程中基面的面积比端面的面积占比更大,因此滑石在浮选过程中表现出了较好的天然疏水性。

1.3 滑石的表面电性

滑石破碎解离后,产生的基面和端面会携带不同的电荷。在解离过程中,由于滑石双层之间主要由范德华力相连,因此解离后基面表面主要以低表面能的形式存在,而且解离后基面表面正负电荷也会达到平衡,所以基面表面通常不显电性。不过,有时滑石四面体层中的 Si 会被低价原子如 Al、Ti、Fe 等所取代,也会使基面表面携带一定量的负电荷^[15]。在破碎解离时,滑石端面上的 Si-O 和 Mg-O(OH) 会断裂形成不饱和键,产生较高的表面能,同时端面边缘也会暴露出具有较强键合羟基能力的 O²⁻ 和 Si⁴⁺,所以滑石端面通常带负电^[16]。根据研究,滑石通常在较宽 pH 范围内荷负电,其表面等电点在 2.0~3.5 之间^[17-18]。

2 滑石有机抑制剂

2.1 羧甲基纤维素

羧甲基纤维素(CMC)是一种由纤维素羧化而得

的多糖,在硫化矿浮选中常用作滑石的抑制剂,结构如图2所示。从图2可以看出,羧甲基纤维素单元中含有大量的羧基和羟基。在水中,羧基可水解成-COO⁻,能够与某些金属离子发生化学反应来抑制滑石。而羟基作为一种极性基团,则能够与水分子形成氢键,从而改变滑石表面的疏水性,达到对滑石产生抑制和分散的作用^[19]。

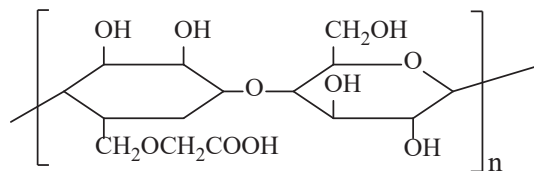


图2 羧甲基纤维素的结构

Fig. 2 Structure of carboxymethyl cellulose

在硫化矿与滑石的浮选分离中,羧甲基纤维素通常主要是通过其特殊的分子结构和官能团与滑石表面发生吸附,从而使滑石亲水受到抑制。薛季玮等^[7]研究认为,羧甲基纤维素分子中含有-OH 和-COOH 这两大基团,当溶于水时-OH 会与滑石表面形成氢键,从而吸附在滑石的表面;而-COOH 则能与滑石表面的金属离子发生化学反应,形成化学键吸附在滑石的表面,从而改变滑石表面的疏水性,对滑石产生抑制。羧甲基纤维素对滑石的影响是多方面的,除了具有抑制作用外,还具有分散作用。羧甲基纤维素本身带负电荷,在滑石表面吸附后,可进一步增强滑石颗粒之间的静电斥力,使滑石颗粒之间充分分散,从而减少滑石对硫化矿浮选的影响,同时也能提高其对滑石的抑制作用。罗春华等^[20]对青海某硫化铜镍矿进行了浮选试验研究,发现羧甲基纤维素可以有效抑制滑石,最终将氧化镁含量从 15.05% 降至 2.93%。

羧甲基纤维素尽管对滑石有较好的抑制作用,但其选择性及分散性较弱。因此,需要对其官能团或分子结构进行优化来强化其选择性和分散性,从而提高硫化矿与滑石的分离效率。

2.2 壳聚糖类

壳聚糖是一种由甲壳素脱去乙酰胺而形成的天然碱性多糖^[21-22],类似于纤维素,其结构如图3所示。壳聚糖分子中含有许多羟基,通常能够与滑石表面形成氢键,吸附在滑石的表面,使滑石亲水而受到抑制。

壳聚糖对滑石的抑制机理不仅与本身官能团有关,而且还跟其溶解度有关。研究发现^[23],在酸性条件下,壳聚糖分子中的氨基会发生质子化反应,从而使其溶于水,而在中性或碱性条件下,壳聚糖分子则会失去部分电荷而带正电,此时壳聚糖会变得疏水,只能微溶于水。因此,在中性或碱性条件下会有部分壳聚糖从溶液中析出。通过 X 射线光电子能谱研究发现,在酸性和碱性条件下,壳聚糖都是通过物理作用

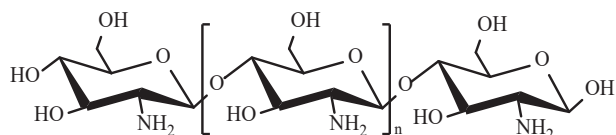


图 3 壳聚糖的结构
Fig. 3 Structure of chitosan

吸附在滑石的表面。在酸性条件下,壳聚糖通过分子中-OH 的氢键作用实现在滑石表面吸附;在碱性条件下,除了氢键引起的吸附外,还会有一部分不溶性壳聚糖沉积在滑石的表面,有效增加壳聚糖在滑石表面的吸附量,从而增强对滑石的抑制效果。此外,钟春晖等^[24]发现壳聚糖对滑石具有明显的抑制效果,当壳聚糖用量约为 40 mg/L 时,滑石几乎被完全抑制。而且通过研究也认为壳聚糖主要是通过其分子中-OH 产生氢键吸附在滑石的表面。

壳聚糖除自身能够对滑石产生抑制作用外,还可以通过酰化、羧基化、羟基化、氰化、螯合、水解等修饰反应来改变其结构,形成各种不同的衍生物来抑制滑石^[25-26]。其中,N-亚甲基膦酸壳聚糖是以壳聚糖为基础,引入膦酸基团后得到的。它是目前已报道出来对滑石具有良好选择性抑制效果的壳聚糖衍生物^[27],在单矿物浮选中,当其用量达到 10 mg/L 时,滑石回收率会降低 77 百分点,有效抑制了滑石的上浮,其结构如图 4 所示。为研究 N-亚甲基膦酸壳聚糖在滑石表面的吸附机理,有学者进行了红外光谱研究^[28],发现经 N-亚甲基膦酸壳聚糖处理后,滑石红外光谱中没有出现新的峰,所以认为 N-亚甲基膦酸壳聚糖是以物理吸附的形式吸附在滑石的表面。通过 XPS 进一步分析发现,经 N-亚甲基膦酸壳聚糖处理后的滑石光谱在 Si 2p 和 Mg 1s 处的光谱在分析误差范围内 (<0.2 eV) 有所改变。因此,推测 N-亚甲基膦酸壳聚糖对滑石的抑制作用可能是由氢键和疏水作用引起。

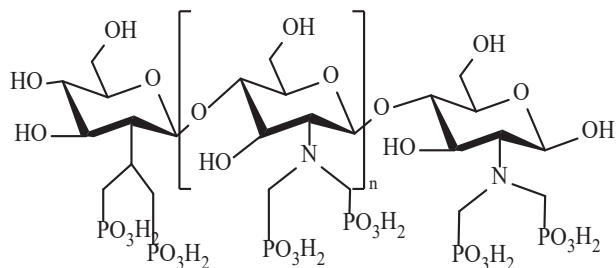


图 4 N-亚甲基膦酸壳聚糖的结构
Fig. 4 Structure of N-methylene phosphonic acid chitosan

壳聚糖对滑石表现出较好的抑制效果,但它的溶解度较低且通常易受到各种因素的影响。因此,可能需要进一步加强对壳聚糖分子结构进行研究,以寻找或改性合成出一种适应性强、溶解性好的新型壳聚糖抑制剂。

2.3 淀粉类

淀粉是一种由葡萄糖分子聚合而成的多糖,有直

链淀粉和支链淀粉两类,主要存在于各种植物的根茎和果实中,其分子结构中含有许多羟基,通常会与水发生相互作用吸附在固体矿物表面^[29]。玉米淀粉是最常见的淀粉种类之一,在矿物浮选过程中,常被用作抑制剂来抑制脉石矿物,防止脉石矿物进入精矿中^[30],其结构如图 5 所示。Shrimal K 等^[31]发现玉米淀粉可以稳定吸附在滑石的表面,当玉米淀粉质量浓度为 100 mg/L 时,滑石回收率会从 85% 以上急剧下降到 22%,对滑石产生较好的抑制作用。通过研究发现,经玉米淀粉处理后的滑石表面均方根粗糙度和峰谷距离均会显著增加,但经玉米淀粉处理后的滑石接触角则会逐渐降低,因此认为玉米淀粉在滑石表面上的吸附主要是由疏水作用引起。

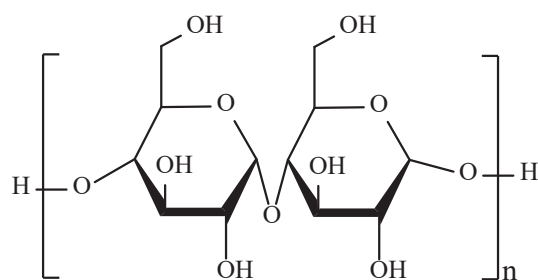


图 5 玉米淀粉的结构
Fig. 5 Structure of corn starch

羧甲基淀粉是一种新型的改性淀粉,是基于原淀粉中的官能团进行酯化或醚化反应生成的一种淀粉,对滑石具有较好的抑制作用。羧甲基淀粉由于其独特的结构和官能团,经常能够与滑石表面的某些金属离子发生螯合作用,使滑石亲水受到抑制。陈代雄等^[32]研究发现,在 pH 值为 5~6 之间的条件下,加入 Al^{3+} 会明显增强羧甲基淀粉对滑石的抑制效果,可以使滑石去除率达到 95.69%。通过检测发现在该 pH 条件下, Al^{3+} 会优先通过静电作用吸附在滑石的表面上,而优先吸附在滑石表面上的 Al^{3+} 则随后再与羧甲基淀粉形成非常强的螯合物,使滑石亲水受到抑制。同时,在这个 pH 条件下羧甲基淀粉分子中的一部分羟基也能通过氢键的作用直接吸附在滑石的表面上,实现对滑石双重抑制,增强对滑石的抑制效果。

淀粉是一种常见的高分子化合物,它能够在一定程度上抑制滑石等含镁脉石矿物。然而,淀粉的抑制性能、溶解性、选择性及分散性等易受到矿浆 pH 值、温度和其他药剂用量等因素的影响。因此,人们通常对淀粉的结构进行研究,希望通过改变其结构来提高对滑石的抑制效果。

2.4 普鲁兰多糖

普鲁兰多糖是一种胞外水溶性黏质多糖,类似于葡聚糖^[33],单体结构如图 6 所示。Zhang 等^[34]研究者发现,当普鲁兰多糖用量为 20 mg/L 时,滑石回收率会

从 90% 急剧降到 20%, 对滑石具有较好的选择性抑制作用, 经过红外光谱分析发现: 普鲁兰多糖与滑石反应后, 普鲁兰多糖分子中的 O-H 和 C-O 键与滑石光谱中 O 1s 处的峰均会显著增加, 但滑石光谱中的 Si 2p 和 Mg 1s 处的峰则未发生变化, 因此推测普鲁兰多糖与滑石表面之间仅发生了氢键作用。普鲁兰多糖来源广泛, 且存在多种类型, 可适应不同矿石类型的需求, 但其缺点是浮选时用量及分散性容易受到温度、浓度等因素的影响, 不易控制。

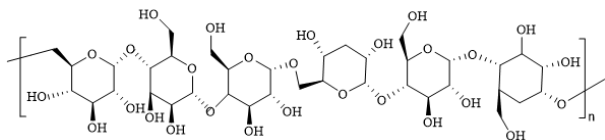


图 6 普鲁兰多糖单体结构

Fig. 6 Monomer structure of pullulan polysaccharide

2.5 古尔胶

古尔胶是一种由半乳甘露聚糖组成的多糖。在硫化矿浮选过程中, 它常用作滑石的抑制剂, 分子结构如图 7 所示。古尔胶分子中含有许多羟基^[35], 其中一些为顺位羟基, 可彼此加固, 有助于与滑石表面形成氢键作用。

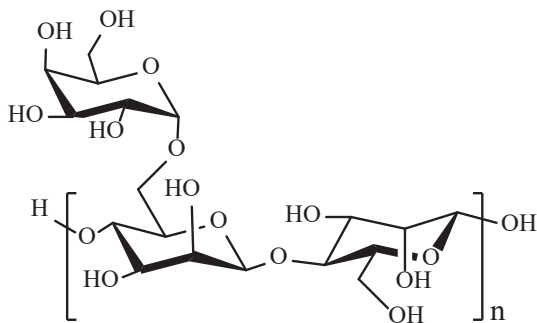


图 7 古尔胶的结构

Fig. 7 Structure of guar gum

在硫化矿浮选中, 古尔胶是一种比较常用的滑石有机抑制剂, 对滑石具有较好的选择性吸附作用, 而且其在滑石表面的吸附密度并不会受到矿浆 pH 和离子强度的影响。Wang J 等^[36]通过研究发现, 古尔胶在滑石表面的吸附对滑石表面等电点几乎没有影响, 但是其在滑石表面的吸附密度却受到氢键破坏剂(尿素)的影响较为严重, 因此认为其在滑石表面的吸附一定程度上受到了氢键的驱动。潘高产等^[37-38]发现当古尔胶用量为 50 mg/L 时, 滑石回收率会降低 64.60 百分点。而且通过研究, 发现古尔胶也主要是通过其分子中的 -OH 形成氢键的方式吸附在滑石的表面, 从而抑制滑石, 实现了硫化矿与滑石的浮选分离。

古尔胶是一种常用的滑石抑制剂, 对滑石具有较好的抑制作用。但其分散性相对较差, 特别是在低浓

度下, 其分散性可能不适用于某些特定浮选矿浆体系中。未来应加强对其分子结构进行研究, 通过化学合成或改性方法来提高其分散性, 进而提高其对滑石的抑制性能。

2.6 刺槐豆胶

刺槐豆胶是一种从角豆树中提取出来的植物胶, 分子结构与古尔胶相似, 同样由半乳甘露聚糖组成, 具有良好的溶解、分散和凝聚等特性^[39], 结构如图 8 所示。在浮选领域, 刺槐豆胶常常用作脉石矿物的抑制剂, 特别是在硫化矿浮选中, 它对滑石的选择性抑制效果显著。Bo Feng 等人^[40]通过 X 射线光电子能谱研究了刺槐豆胶对滑石的抑制机理, 发现滑石与刺槐豆胶作用前后能谱中的 Si 2p 和 Mg 1s 处的结合能没有发生变化。因此, 认为其对滑石的抑制作用是由物理作用引起, 并且认为这种物理作用可能是氢键作用和疏水作用。此外, 钟春晖等人^[24]用红外光谱进一步分析其抑制机理, 发现用刺槐豆胶处理后的滑石在 2850~2930 cm⁻¹ 区域的 -CH₂ 和 -CH 基团的吸收峰强度会明显增强, 在 1023 cm⁻¹ 附近的 C-O-H 的伸缩振动带明显宽化, 说明刺槐豆胶在滑石表面发生了吸附, 并且认为这种吸附也是由氢键和疏水作用引起。为了探究刺槐豆胶在抑制滑石方面的效果, 朱贤文等^[41]用刺槐豆胶对黄铜矿和滑石进行了浮选分离试验研究, 发现其用量为 100 mg/L 时, 滑石就会被完全抑制, 而黄铜矿几乎不受影响, 表现出了优异的选择性抑制效果。但在实际应用中由于刺槐豆胶分散性相对较差, 因此在应用过程中受到了一定的限制。

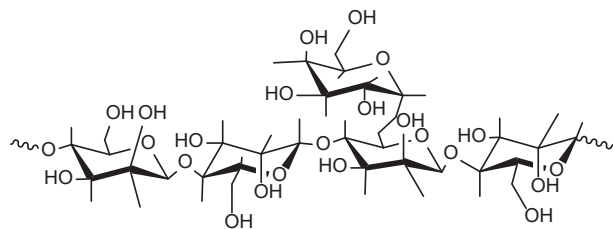


图 8 刺槐豆胶的结构

Fig. 8 Structure of locust bean gum

2.7 黄原胶

黄原胶是一种微生物多糖, 通常经过发酵生产得到^[42]。其分子结构由 1, 4 连接的 β -D-葡萄糖残基组成, 三糖侧链连接到交替的 D-葡萄糖残基上^[43], 如图 9 所示。在硫化矿浮选中, 黄原胶作为胶类抑制剂的一种, 被广泛用作滑石、蛇纹石等脉石矿物的抑制剂。有学者^[41]通过红外光谱研究了黄原胶对滑石的抑制机理, 发现滑石与黄原胶相互作用后, 滑石光谱中 Si 2p 和 Mg 1s 处的结合能发生了可忽略的位移, 而且这些位移在仪器误差范围内。所以认为黄原胶在滑石表面的吸附是物理吸附。为确定黄原胶与滑石吸附

的具体作用机制, Pan G 等^[44]用氢键破坏剂(尿素)进行研究,发现黄原胶在滑石表面的吸附密度并未随着尿素的加入而减少,表明黄原胶在吸附过程中并未有氢键的参与,因此认为黄原胶在滑石表面的吸附可能是由疏水作用引起的。陈渊淦等^[45]通过红外光谱研究了胶类抑制剂在滑石表面的吸附机理,发现经黄原胶处理后的滑石光谱也并没有发生光谱位移。所以也认为黄原胶在滑石表面的吸附也是由疏水作用引起。Zhong 等^[46]用黄原胶对辉钼矿和滑石进行了单矿物浮选分离试验,并研究其在矿物表面的吸附机理,发现当 pH 在 3~9 范围内,辉钼矿的回收率始终保持在 80%,而滑石回收率却受到较大的影响,回收率不到 20%,而且通过研究也认为黄原胶自身的疏水特性对其在矿物表面吸附起到了极其重要的作用。

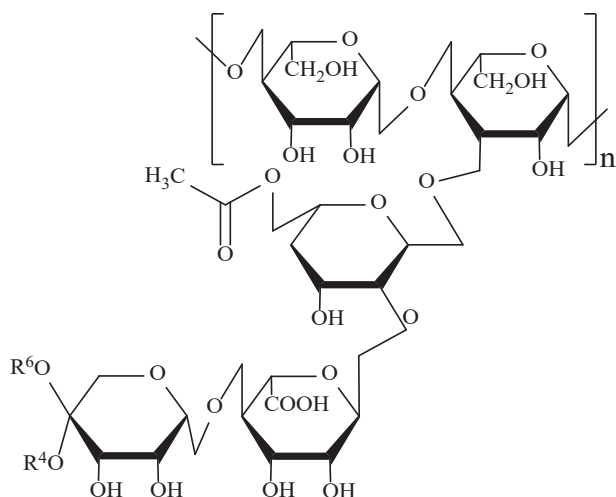


图9 黄原胶的结构

Fig. 9 Structure of xanthan gum

黄原胶是一种有效的滑石抑制剂,通常在低用量下即可有效抑制滑石。但其对滑石的抑制性能往往受到浮选条件的影响,因此可能需要深入研究其抑制机理或对其进行改性,以保证其在实际应用中的有效性。

2.8 组合抑制剂

矿浆中泥化的滑石通常会罩盖在硫化矿表面,不仅会增加药剂的使用量,有时还可能会减弱抑制剂的抑制能力。为此,有时需将几种药剂进行组合来抑制滑石,这样不仅可以提高抑制效果,还能减少药剂的使用量。

李国栋等^[47]以六偏磷酸钠配合羧甲基纤维素进行试验,在原矿含铜 0.4%、氧化镁为 16.79% 的条件下,经过该组合抑制剂的处理,最终获得铜品位为 17.81%、回收率为 83.00% 的铜精矿。此外,羧甲基纤维素除了可以与六偏磷酸钠进行组合,也可以与硫酸铝、糊精及水玻璃这三种物质的混合物进行组合形成一种新型的抑制剂来抑制滑石,通常这种新型组合抑制剂

可以将精矿中的滑石含量降低约 20 个百分点^[48]。陈志强等^[49]将六偏磷酸钠和阿拉伯胶进行组合对新疆哈密含滑石铜镍矿进行浮选试验研究,最终将铜镍精矿中的镁由 21.92% 降低到 5% 左右。蔡教忠等^[50]发现采用单宁酸和酸化硅酸钠进行组合也可以有效抑制滑石。在原矿含铜 0.32% 的条件下,经该组合抑制剂处理后,最终获得铜品位为 21.86%、回收率为 84.70% 的铜精矿,有效降低滑石对硫化矿浮选的影响,同时滑石等含镁脉石矿物也被很好地抑制。OL-3C^[51]是一种由中南大学自主研发的新型组合抑制剂,其分子结构中含有大量的羧基、羟基及磺酸基等官能团,这些官能团能加强其在滑石表面的吸附,改变滑石表面的疏水性,从而使滑石亲水被抑制。麦琼尹等用 OL-3C 作为抑制剂对云南某硫化铜矿进行试验研究,发现 OL-3C 这种组合抑制剂对滑石的抑制效果强于羧甲基纤维素、淀粉以及古尔胶等抑制剂,最终将氧化镁含量由 9.40% 降至 3.45%。

组合抑制剂在抑制滑石方面具有较大的发展潜力,相较于单一药剂的使用,组合抑制剂往往能够对滑石产生较好的抑制作用。但在配制组合抑制剂时,往往需要对不同抑制剂的性质及相互作用进行深入了解,而且还可能需要更多的技术和试验工作,才能达到很好的抑制效果。

3 结论

(1) 滑石是一种具有层状结构的含镁硅酸盐矿物,由于其特殊的晶体结构与表面性质,在碎磨过程中会极易沿层间解离,导致其在浮选过程中基面的面积比端面的面积占比更大。因此,在浮选过程中滑石表现出了较好的天然疏水性,极易上浮进入硫化矿精矿中,导致精矿中镁含量超标,从而影响后续的冶炼。

(2) 滑石有机抑制剂由于具有可生物降解、污染风险小、种类多样、来源广泛等优点,在工业应用中受到了人们的广泛关注。目前,滑石有机抑制剂主要有羧甲基纤维素、壳聚糖类、淀粉类、普鲁兰多糖、古尔胶、刺槐豆胶、黄原胶及一些组合抑制剂等。这些抑制剂通常主要是通过其分子中的疏水基团、羟基、羧基等与滑石表面的疏水位点、表面氧原子或金属离子形成疏水作用、氢键或化学作用吸附在滑石的表面,从而降低滑石表面的疏水性,实现对滑石的抑制。

(3) 随着矿产资源日趋复杂化和环境保护意识的增强,滑石有机抑制剂的开发和应用变得越发重要。尽管现阶段滑石有机抑制剂的研究已取得了较好的成果,但未来仍需加强其结构和官能团的研究,进一步提高其对滑石的抑制性能。同时,还应在现有研究的基础上,继续深入探究有机抑制剂对滑石抑制机理的研究,从而开发出选择性更高、抑制效果更好的新型绿色有机抑制剂,为矿产资源的综合利用做出贡献。

参考文献:

- [1] 龙涛, 冯其明, 卢毅屏, 等. 羧甲基纤维素对层状硅酸盐矿物浮选的抑制与分散作用[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(5): 1145-1150.
LONG T, FENG Q M, LU Y P, et al. Depression and dispersion effect of carboxy methyl cellulose on flotation of layered magnesium-silicates[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(5): 1145-1150.
- [2] LOTTER N O, BRADSHAW D J, BECKER M, et al. A discussion of the occurrence and undesirable flotation behaviour of orthopyroxene and talc in the processing of mafic deposits[J]. Minerals Engineering, 2008, 21(12): 905-912.
- [3] BEATTIE D A, HUYNH L, KAGGWA G B N, et al. The effect of polysaccharides and polyacrylamides on the depression of talc and the flotation of sulphide minerals[J]. Minerals Engineering, 2006, 19(6): 598-608.
- [4] YUAN D, XIE L, SHI X, et al. Selective flotation separation of molybdenite and talc by humic substances[J]. Minerals Engineering, 2018, 117(3): 34-41.
- [5] BEATTIE D A, HUYNH L, KAGGWA G B, et al. Influence of adsorbed polysaccharides and polyacrylamides on talc flotation[J]. International Journal of Mineral Processing, 2006, 78(4): 238-249.
- [6] 严海军, 罗仙平, 朱贤文, 等. 硫化矿浮选中滑石抑制剂的进展[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(1): 138-144.
YAN H J, LUO X P, ZHU X W, et al. Research progress on talc inhibitors in sulfide ore flotation[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(1): 138-144.
- [7] XUE J W, TU H Z, SHI J, et al. Enhanced inhibition of talc flotation using acidified sodium silicate and sodium carboxymethyl cellulose as the combined inhibitor[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2023, 30(7): 1310-1319.
- [8] 李强, 尚超, 师长伟, 等. 抑制剂对滑石和透闪石可浮性影响试验研究[J]. 非金属矿, 2017, 40(5): 76-78.
LI Q, SHANG C, SHI C W, et al. Influences of depressants on the floatability of talc and tremolite[J]. Non-metal Ores, 2017, 40(5): 76-78.
- [9] 非金属矿加工专利文摘(国内)[J]. 化工矿物与加工, 2001, 30(7): 37.
Patent abstracts for non-metallic ore processing (domestic) [J]. Chemical Minerals and Processing, 2001, 30(7): 37.
- [10] CHIMONYO W, FLETCHER B, PENG Y. The differential depression of an oxidized starch on the flotation of chalcopyrite and graphite[J]. Minerals Engineering, 2020, 146: 106-114.
- [11] 地质矿产部矿床地质研究所. 矿石学[M]. 2008.
Institute of Mineral Deposits, Ministry of Geology and Mineral Resources. Ore petrology [M]. 2008.
- [12] 彭小平. 滑石之分析与应用[J]. 陶瓷研究, 1995(2): 89-94.
PENG X P. Analysis and application of talc[J]. Ceramic Research, 1995(2): 89-94.
- [13] 潘高产. 硫化矿浮选体系中滑石的可浮性研究[J]. 湖南有色金属, 2012, 28(1): 9-12.
PAN G C. Study on talc floatability in the system of sulfide minerals flotation[J]. Hu'nan Nonferrous Metals, 2012, 28(1): 9-12.
- [14] ZBIK M, SMART R S C. Dispersion of kaolinite and talc in aqueous solution: nano-morphology and nano-bubble entrapment[J]. Minerals Engineering, 2002, 15(4): 277-286.
- [15] BEATTIE D A, ADDAI-MENSAH J, BEAUSSART A, et al. In situ particle film ATR FTIR spectroscopy of poly (N-isopropyl acrylamide) (PNIPAM) adsorption onto talc[J]. Phys Chem Chem Phys, 2014, 16(45): 25143-2551.
- [16] 卢烁十. 滑石的晶体化学研究及其在有色金属硫化矿选矿中的浮选现状和实践[J]. 矿冶, 2010, 19(3): 8-11.
LU S S. Research on crystal chemistry of talc and review and application of talc flotation in mineral processing of nonferrous sulphide ores[J]. Mining and Metallurgy, 2010, 19(3): 8-11.
- [17] MA X, PAWLIK M. The effect of lignosulfonates on the floatability of talc[J]. International Journal of Mineral Processing, 2007, 83(1): 19-27.
- [18] 刘谷山, 冯其明, 欧乐明, 等. 铜离子和镍离子对滑石浮选的影响及作用机理[J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(8): 1018-1022.
LIU G S, FENG Q M, OU L M, et al. Influence and mechanism of copper ions and nickel ions on flotation of talc[J]. Journal of Ceramics, 2005, 33(8): 1018-1022.
- [19] 孔令宇, 吕晋芳, 魏民, 等. 镍黄铁矿与蛇纹石浮选分离中有机抑制剂的机理研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(2): 33-41.
KONG L Y, LV J F, WEI M, et al. Research progress of mechanism on organic depressants for the flotation separation of pentlandite and serpentine[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(2): 33-41.
- [20] 罗春华, 张秀品, 苏晓晖. 抑制剂CMC在青海某硫化铜镍矿浮选中的应用研究[J]. 有色金属工程, 2017, 7(1): 55-59.
LUO C H, ZHANG X P, SU X H. Application of CMC depressant during the flotation of copper-nickel sulphide ore in Qinhai[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2017, 7(1): 55-59.
- [21] JEON Y J, SHAHIDI F, KIM S K. Preparation of chitin and chitosan oligomers and their applications in physiological functional foods[J]. Food Reviews International, 2000, 16(2): 159-176.
- [22] 杨俊杰, 胡广敏, 相恒学, 等. 壳聚糖的溶解行为及其纤维研究进展[J]. 中国材料进展, 2014, 33(11): 641-648.
YANG J J, HU G M, XIANG H X, et al. Progress in the research of chitosan dissolution behavior and its fibers[J]. Progress in Materials in China, 2014, 33(11): 641-648.
- [23] FENG B, PENG J, GUO W, et al. The effect of changes in pH on the depression of talc by chitosan and the associated mechanisms[J]. Powder Technology, 2018, 325: 58-63.
- [24] 钟春晖, 冯博, 严华山, 等. 三种有机抑制剂在辉钼矿与滑石浮选分离中的作用[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(12): 3843-3852.
ZHONG C H, FENG B, YAN H S, et al. Effects of three organic depressants on flotation separation of molybdenite and talc[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(12): 3843-3852.
- [25] 王美娜, 李苑新, 蔡兴. 羧甲基壳聚糖的性能及应用概况[J]. 中国实验方剂学杂志, 2015, 21(1): 228-232.
WANG M N, LI Y X, CAI X, et al. Performances and applications overview of carboxymethyl chitosan[J]. Chinese Journal of Experimental Formulary, 2015, 21(1): 228-232.
- [26] 易喻, 江威, 王鸿, 等. 羧甲基壳聚糖的制备及性能研究[J]. 浙江工业大学学报, 2011, 39(1): 16-20.
YI Y, JIANG W, WANG H, et al. Study on preparation and the performance of the carboxymethyl chitosan[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2011, 39(1): 16-20.
- [27] HERAS A, RODRÍGUEZ N M, RAMOS V M, et al. N-methylene phosphonic chitosan: a novel soluble derivative[J]. Carbohydrate Polymers, 2001, 44(1): 1-8.
- [28] YE W L, ZHANG X G, PAN C L, et al. Selective flotation separation of chalcopyrite from talc by a novel depressant: N-methylene phosphonic chitosan[J]. Minerals Engineering, 2022, 117(1): 107-367.
- [29] 田付强, 李亚超, 曹亦俊, 等. 淀粉及其衍生物抑制剂在矿物浮选中的应用和作用机理研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(1):

- 82-88.
- TIAN F Q, LI Y C, CAO Y J, et al. Research progress in application and mechanism of starch and its derivative depressants in mineral flotation[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2022, 42(1): 82-88.
- [30] GE W, LI H, REN Y, et al. Flocculation of pyrite fines in aqueous suspensions with corn starch to eliminate mechanical entrainment in flotation [J/OL]. *Minerals*, 2015, 5(4): 654-664.
- [31] SHRIMALI K, ATLURI V, WANG X, et al. Adsorption of corn starch molecules at hydrophobic mineral surfaces[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2018, 546(1): 194-202.
- [32] 陈代雄, 薛伟, 杨建文, 等. 一种硫化铜矿物与滑石浮选分离方法: CN103008113A [P/OL]. 2013-01-07.
- CHEN D X, XUE W, YANG J W, et al. The invention relates to a flotation separation method of copper sulfide mineral and talc: CN103008113A [P/OL]. 2013-01-07.
- [33] 刘艳, 冯印, 王丽. 普鲁兰多糖应用进展[J]. *北京农业*, 2014, 1(30): 19-19.
- LIU Y, FENG Y, WANG L. Progress in the application of pullulan polysaccharide[J]. *Beijing Agriculture*, 2014, 1(30): 19-19.
- [34] ZHANG W, TAO L, XUN L, et al. Improved flotation of molybdenite from talc using a selective reagent scheme[J]. *Minerals Engineering*, 2022, 176: 107-324.
- [35] 刘一山. 瓜尔胶及其衍生物在造纸行业的应用[J]. *西南造纸*, 2006, 35(2): 48-51.
- LIU Y S. Application of guar gum and its derivatives in paper industry[J]. *Southwest Paper Making*, 2006, 35(2): 48-51.
- [36] WANG J, SOMASUNDARAN P, NAGARAJ D R. Adsorption mechanism of guar gum at solid-liquid interfaces[J]. *Minerals Engineering*, 2005, 18(1): 77-81.
- [37] 潘高产, 卢毅屏, 冯其明, 等. 羧甲基纤维素钠对滑石可浮性及分散性的影响[J]. *金属矿山*, 2010, 1(6): 96-100.
- PAN G C, LU Y P, FENG Q M, et al. Effect of sodium carboxymethyl cellulose on flotability and dispersion of talc[J]. *Metal Mine*, 2010, 1(6): 96-100.
- [38] J-王, 罗科华, 王荣生, 等. 古尔胶在固-液界面上的吸附机理[J]. *国外金属矿选矿*, 2006, 43(4): 30-33.
- WANG J, LUO K H, WANG R S, et al. Adsorption mechanism of Gul gum at solid-liquid interface[J]. *Mineral Processing of Metal Ore Abroad*, 2006, 43(4): 30-33.
- [39] 宋永芳. 刺槐资源的开发利用[J]. *林业科技开发*, 2002, 16(5): 11-13.
- SONG Y F. Exploitation and utilization of robinia pseudoacacia resources[J]. *Forestry Science and Technology Development*, 2002, 16(5): 11-13.
- [40] FENG B, PENG J, ZHANG W, et al. Use of locust bean gum in flotation separation of chalcopyrite and talc[J]. *Minerals Engineering*, 2018, 122: 79-83.
- [41] 朱贤文. 高分子抑制剂在黄铜矿和滑石浮选分离中的应用与机理研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2017.
- ZHU X W. Study on the application and mechanism of high polymer inhibitor in flotation separation of chalcopyrite and talcum[D]. Ganzhou: Jiangxi university of science and technology, 2017.
- [42] PALANIRAJ A, JAYARAMAN V. Production recovery and applications of xanthan gum by xanthomonas campestris[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 106(1): 1-12.
- [43] 周盛华, 黄龙, 张洪斌. 黄原胶结构、性能及其应用的研究[J]. *食品科技*, 2008, 33(7): 156-160.
- ZHOU S H, HUANG L, ZHANG H B. Research development 013 the structure, property and application of xanthan gum[J]. *Food Technology*, 2008, 33(7): 156-160.
- [44] PAN G, SHI Q, ZHANG G, et al. Selective depression of talc in chalcopyrite flotation by xanthan gum: flotation response and adsorption mechanism[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, 600: 124-902.
- [45] 陈渊淦, 杨思琦, 汪惠惠, 等. 胶类抑制剂对滑石的抑制行为及机理[J]. *非金属矿*, 2020, 43(4): 1-3.
- CHEN Y G, YANG S Q, WANG H H, et al. The depression behavior and mechanisms of gum depressants to talc[J]. *Non-Metal Ores*, 2020, 43(4): 1-3.
- [46] ZHONG C, WANG H, ZHANG L, et al. Flotation separation of molybdenite and talc by xanthan gum[J]. *Powder Technology*, 2021, 388: 158-165.
- [47] 李国栋, 陈梁, 高利坤, 等. 某含滑石硫化铜矿浮选试验研究[J]. *矿产保护与利用*, 2015(1): 37-40.
- LI G D, CHEN L, GAO L K, et al. Research on the flotation of copper sulphide containing talcum[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2015(1): 37-40.
- [48] 祁忠旭, 孙大勇, 冯程, 等. 一种抑制易浮脉石矿物的组合抑制剂及其使用方法: CN108499743B [P/OL]. 2017-04-21.
- QI Z X, SUN D Y, FENG C, et al. The invention relates to a combination inhibitor for inhibiting easily floating gangue minerals and an application method thereof: CN108499743B [P/OL]. 2017-04-21.
- [49] 陈志强. 优化组合抑制剂对哈密铜镍矿浮选分离的影响研究[D]. 成都: 西南科技大学, 2021.
- CHEN Z Q. The effect of optimized combination of depressants on the flotation separation of copper-nickel ore in Hami[D]. Chengdu: Southwest University of Science and Technology, 2021.
- [50] 蔡教忠, 邓建英, 邓久帅, 等. 一种提高滑石型硫化铜矿浮选指标的抑制剂、制备方法及应用: CN115999777A [P/OL]. 2023-01-31.
- CAI J Z, WANG J Y, DEN J S, et al. The invention relates to an inhibitor for improving the flotation index of talc type copper sulfide, a preparation method and application: CN115999777A [P/OL]. 2023-01-31.
- [51] 麦琼尹, 欧乐明, 王晨亮, 等. 降低云南某硫化铜矿氧化镁含量试验研究[J]. *矿冶工程* 2021, 41(3): 57-63.
- MAI Q Y, OU L M, WANG X C, et al. Experimental study on reducing MgO content in copper sulfide ore from Yunnan[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2021, 41(3): 57-63.

Reaction Mechanism and Research Progress of Organic Depressants on Talc in Flotation of Sulfide Ores

LI Jinwen¹, KONG Lingyu¹, LV Jinfang^{1,2}, WEI Min¹

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

2. State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming 650093, China

Abstract: Talc is a magnesium-containing silicate mineral, which is often associated with metal sulfide ore. In the flotation of sulfide ore, talc often floats into the concentrate due to its excellent natural floatability, resulting in excessive magnesium content in the concentrate, thus affecting the subsequent smelting. Organic reagents are of common talc depressants, which have the outstanding depressant effects on the talc. Therefore, the depressant mechanism and research progress of organic depressants on talc in the flotation process of sulfide ore were comprehensively summarized. It was pointed out that these depressants mainly form hydrogen bonds, chemical interactions or hydrophobic interactions between hydroxyl groups, carboxyl groups, or hydrophobic hydrocarbon chains in the molecules and oxygen atoms, metal ions or hydrophobic points on the surface of talc. Therefore, they were adsorbed on the talc surface, to reduce the hydrophobicity of talc surface, and realize the depressant for talc.

Keywords: sulphide flotation; talc; organic depressants; reaction mechanism

引用格式: 李金文, 孔令宇, 吕晋芳, 魏民. 硫化矿浮选中有有机抑制剂对滑石的抑制机理及研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(6): 171-178.

LI Jinwen, KONG Lingyu, LV Jinfang, WEI Min. Reaction mechanism and research progress of organic depressants on talc in flotation of sulfide ores[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(6): 171-178.

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

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn