

滑石型钼矿选别工艺和药剂研究进展

陈桃^{1,2}, 简胜^{1,3}, 谢贤^{1,2}, 童雄^{1,2}, 张英^{1,2}, 吕向文^{1,3}

(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; 3. 昆明冶金研究院, 云南 昆明 650503)

摘要: 这是一篇矿物加工工程领域的论文。钼具有多项良好的物理化学性质, 在多个领域得到广泛应用。钼主要来源于辉钼矿, 但易选钼矿资源经长期开发而日益减少, 如今滑石型等难选钼矿逐渐成为研究的焦点。滑石与辉钼矿的分离是滑石型钼矿分选的难点, 两者具有相似的表面结构与天然可浮性, 分离十分困难。文章概述了目前滑石型钼矿的选矿工艺与药剂等方面的研究进展, 提出加强对滑石型钼矿选择性磨矿与有机大分子药剂的研究开发, 以及加深药剂与矿物表面的作用机理和对原矿工艺矿物学的研究是今后分选滑石型钼矿的重要方向。

关键词: 矿物加工工程; 滑石; 辉钼矿; 滑石型钼矿; 联合分选; 有机抑制剂

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.04.011

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 04-0076-06

引用格式: 陈桃, 简胜, 谢贤, 等. 滑石型钼矿选别工艺和药剂研究进展[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(4): 76-81+89.

CHEN Tao, JIAN Sheng, XIE Xian, et al. Research progress of the separation technology and reagents of the talc-type molybdenum ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(4): 76-81+89.

钼在地壳中的平均含量仅为 0.001% 左右, 因其具有耐高温、耐腐蚀以及低热膨胀系数等良好的物理化学性质^[1-3], 被广泛用于冶金、航空航天、机械、润滑剂、电子计算机和涂料等行业^[4-5], 有“能源金属”之称, 是一种极其重要的稀有金属和战略性矿产储备资源^[6]。

目前约有 20 多种已知钼矿物, 其中分布最广、工业价值最高的是辉钼矿, 从辉钼矿中获得的钼约占世界上钼产量的 99%^[7-8]。辉钼矿是一种层状结构硫化矿, 具有较好的天然可浮性且颗粒表面表现出各向异性, 疏水性的面和亲水性的棱比值的大小对辉钼矿的表面性质有极大的影响^[9-10]。辉钼矿常与滑石等泥质硅酸盐矿物伴生, 形成滑石型难选钼矿。滑石是一种可浮性与辉钼矿相似的镁质硅酸盐矿物, 颗粒表面具有与辉钼

矿相似的各向异性, 因其硬度极低, 在磨矿过程中易泥化而覆盖于辉钼矿表面, 极大增加了滑石型钼矿的分选难度^[11-12], 如不能有效将滑石从辉钼矿中分离出来, 将严重降低钼精矿品位。此外, 由于滑石是硅酸镁矿物, 即使滑石所含比例很低也会对随后辉钼矿精矿的冶炼产生危害^[13-14]。随着工业的快速发展, 我国对钼资源的需求量越来越大, 虽然我国钼资源十分丰富, 但多以滑石型等难选钼矿为主, 因此对滑石与辉钼矿有效分离技术的研究十分重要。

针对滑石对辉钼矿等有色金属硫化矿影响的问题, 国内外已有大量学者进行了相关研究工作, 取得了较多的成果。本文将针对滑石型钼矿的选矿研究进展展开研究及展望, 从工艺、药剂等方面阐述近些年的研究成果。

收稿日期: 2022-10-09

基金项目: 国家自然科学基金 (51764025)

作者简介: 陈桃 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事矿石分选理论与工艺研究工作。

通信作者: 谢贤 (1981-), 男, 博士, 副教授, 主要从事矿物综合利用研究工作。

1 选矿工艺

不同地区的矿石性质差异较大,根据原矿物组成、嵌布粒度等特性分别采取不同的选别工艺,目前滑石型钼矿选别工艺主要可分为物理分选、脱除滑石浮钼和选-冶联合等方向。

1.1 物理分选

滑石与辉钼矿具有一定的物理性质差异(表1),可考虑采用相应的物理分选方法对两者进行分离。

表1 辉钼矿和滑石的物理性质^[15]

Table 1	Physical properties of molybdenite and talc ^[15]		
	比重	导电性/(S/cm)	介电常数
辉钼矿	4.6~5.0	$10^{-5} \sim 10$	>81
滑石	2.58~2.83	$10^{-15} \sim 10^{-12}$	9.41

Mathieu等^[16]分别采用韦德分离器、淘析柱和水力旋流器研究分离辉钼矿与滑石的效果,结果,粗粒滑石会随辉钼矿底流下沉,超微细粒辉钼矿也会随滑石溢流而流失,三种重选方式都没能达到较好的分离效果。由于颗粒在流体介质中的运动不仅取决于密度,还受粒径和颗粒形状的影响,而辉钼矿与滑石一般嵌布粒度较细,需细磨以实现单体解离,所以单独使用重力分选很难实现辉钼矿与滑石的有效分离^[17]。

由表1可知,辉钼矿是半导体,而滑石是非导体,且两者的表面组分组成具有差异,进而会影响表面电荷的运动,可考虑使用电选对两者进行分离。Jiang等^[18]使用干摩擦电荷-静电的工艺分离滑石和辉钼矿,结果表明该工艺分选效果主要取决于进料的粒度分布,且此研究尚处于实验室阶段,离实现工业应用还有一段距离。

1.2 脱除滑石浮钼

为减少滑石对辉钼矿浮选的不利影响,利用滑石天然可浮性好和硬度低、易被磨细等特点,可对滑石进行预先脱除。

彭团儿等^[19]以某滑石型难选钼矿为研究对象,采用水力旋流器+斜板分级机的组合对滑石进行预先处理,实验结果表明滑石得到有效分离,最终脱除率高达70.44%,使辉钼矿的选别效果得到极大改善。郑州矿产综合利用所^[20]对河南栾川上房某滑石型钼矿采用重选+水力旋流器的组合对滑石进行预先脱除,脱除率为10%左右,减少了滑石对后续辉钼矿浮选的不利影响。利用滑石与辉钼矿间较大的比重差异,张小云等^[21]对某高滑

石型钼矿采用重-浮联合工艺,脱除滑石后得到浮选钼精矿的钼品位为45.22%、回收率为77.35%。

某矿石中辉钼矿、闪锌矿和磁黄铁矿等有用矿物嵌布粒度较细且不均匀,所含大量的滑石的是造成矿石难分选的主要原因。董燧珍^[22]根据矿石性质,选择脱除滑石-浮选钼的工艺流程,采用FT药剂预先脱除滑石等脉石矿物,再浮选钼,最终经过8次精选的全流程闭路试验得到钼品位为45.54%、回收率为82.29%的钼精矿。

对滑石进行预选脱除可有效减少滑石对辉钼矿等硫化矿浮选的不利影响,脱除率的高低直接影响后续的浮选指标,太低则不能有效提高后续的浮选指标,太高则容易把目的矿物与脉石矿物一同带出,造成损失,所以应根据矿石性质,采用合适的脱泥流程。

1.3 选-冶联合流程

当矿石中辉钼矿嵌布粒度较细且含有滑石等泥质脉石矿物时,单一浮选很难得到钼品位大于54%的钼精矿,有时甚至达到国标($\geq 45\%$)都比较困难,选-冶联合分选工艺可有效提高钼精矿品位,从低品位钼粗精矿(10%~40%)生产纯二钼酸铵、三氧化钼和仲钼酸铵的方法是目前研究的一个重要方向。

某滑石型钼矿采用常规选矿方法很难实现滑石与辉钼矿的分离,张文钰等^[23-24]先对浮选所得低品位钼粗精矿进行氧压氧化,得到可溶性钼酸和不溶性氧化钼,再采用碱浸、溶剂萃取、反萃等方法获得二钼酸铵,实现钼的富集。阿麦克斯钼矿公司采用选冶联合工艺,将浮选所得低品位钼粗精矿通过氧化、浸出、萃取、浓缩结晶等工艺得到二氧化钼,再热解得到三氧化钼,最终钼精矿的钼回收率高达73%^[25]。

辉钼矿是典型的硫化矿,被氧化后会使颗粒表面亲水性增加。Tang等^[26]研究了浮选分离前在空气条件下煅烧矿石来分离辉钼矿和滑石,结果表明,经400℃以上热预处理后辉钼矿表面会发生剧烈氧化,使其天然可浮性极大降低,而对滑石的天然可浮性几乎没有影响,最终在混合浮选中实现了辉钼矿与滑石的有效分离。

2 浮选药剂

国内外学者研究了不同选别工艺分离辉钼矿

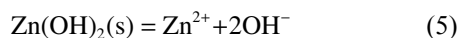
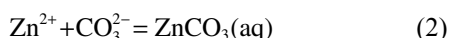
与滑石, 经过多年研究发展, 浮选仍是目前分离辉钼矿与滑石最广泛、最有效的手段。辉钼矿和滑石为“等可浮矿物”, 要利用浮选实现两者的有效分离, 需所用抑制剂具有较好的选择性, 因此两者的选择性抑制剂的研究已是当今一个热点。

2.1 无机抑制剂

用于辉钼矿与滑石分离的无机抑制剂主要为水溶性金属盐和水玻璃, 其中水溶性金属盐以不用的方式组合已是目前滑石无机抑制剂研究的主要方向。

Richard.O.Huch^[27] 比较详细地研究了辉钼矿中滑石的抑制, 认为以硫酸锌、硫酸铝、硫酸高铁等水溶性弱碱强酸盐和 Na_2SiO_4 、 Na_2CO_3 、六偏磷酸钠等水溶性弱酸强碱盐混合使用可作为滑石的强抑制剂, 用起泡剂作辉钼矿捕收剂, 可有效将辉钼矿和滑石分离。

Wang 等^[28] 发现 ZnSO_4 与 Na_2CO_3 组合抑制剂在矿浆 pH 值为 7.5~9.5 时对滑石的抑制效果非常明显, 同时对辉钼矿的回收率几乎没有影响。通过溶液化学计算和 Zeta 电位分析表明, 对滑石起抑制作用的主要成分是溶液中反应生成的固态 ZnCO_3 和 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ (式 1~10), 覆盖于滑石表面形成亲水性薄膜, 使滑石受到选择性抑制, 并且 ZnSO_4 的初始浓度应高于 $2.5 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$, 而 Na_2CO_3 的加入量应控制在适合固态 ZnSO_4 形成的水平。



张晶等^[29] 发现水玻璃和硫酸锌组合使用能加强对滑石的抑制效果, 推测其机理可能是水玻璃在溶液中发生水解 (式 11) 生成硅酸胶束, 以及

ZnSO_4 水解形成的 Zn^{2+} 与 OH^- 作用生成羟基化金属物 $\text{Zn}(\text{OH})_2$, 两者作用形成亲水性胶束交织、物理吸附在滑石表面, 从而增强了滑石表面的疏水性。



2.2 有机抑制剂

有机抑制剂与无机抑制剂相比具有对环境污染小、毒性较低等优点, 是目前抑制剂研究领域中的一个重要方向。经大量学者实验研究, 用于辉钼矿与滑石的选择性有机抑制剂主要有木质素磺酸盐、羧甲基纤维素 (CMC)、腐殖酸 (HA)、古尔胶和葡聚糖等。

2.2.1 木质素磺酸盐

木质素磺酸盐是一种具有强阴离子特性的聚电解质, 主要以副产物来源于木材加工提取纤维素的过程中。目前木质素磺酸盐的分子结构还未完全确定, 但普遍认为其分子中存在脂肪族、芳香族、磺酸、羧基和羟基等多种官能团, 导致其带有较强的负电性。

研究发现, 浮选分离过程中木质素磺酸钠在辉钼矿表面的吸附量多于滑石表面, 从而木质素磺酸钠对辉钼矿的抑制作用强于滑石, 并且吸附密度的差异是造成滑石与辉钼矿选择性分离的主要原因, 因此提出木质素磺酸钠吸附的机理很可能是疏水键合作用^[30]。Ma 等^[31] 发现木质素磺酸盐在滑石上的吸附密度随滑石表面负电荷和药剂阴离子度的增加而降低, 表明静电斥力对木质素磺酸盐在滑石表面的吸附有极大的影响作用。研究表明, 吸附在滑石表面上的 Ca^{2+} 能减小木质素磺酸盐与滑石之间的静电斥力, 促进木质素磺酸盐在滑石表面的吸附^[32]。可知, 木质素磺酸盐在滑石表面的吸附程度主要取决于疏水键合和静电斥力的共同作用。

2.2.2 羧甲基纤维素

CMC 是一种纤维素衍生物, 其分子中每个葡萄糖单元上有三个羟基, 其中羟基中氢原子被羧甲基取代的数量称为取代度, 其大小是影响羧甲基纤维素溶解特性的重要因素^[33-34]。

CMC 对滑石的抑制作用受其分子量和取代度的共同影响, 分子量越大抑制作用越强, 取代度越高抑制作用越小; CMC 对辉钼矿的抑制作用只受其取代度的影响, 取代度越高抑制作用越小, 因此分离辉钼矿与滑石应尽量使用分子量和取代

度都较大的CMC作为抑制剂^[35]。KUHNM C等^[36]在使用CMC作为抑制剂的基础上,对辉钼矿和滑石的分离工艺流程进行创新,因CMC对辉钼矿和滑石都有较好的抑制作用,先将两者均抑制在尾矿中,再对尾矿进行加热处理,高温下CMC从辉钼矿表面解析,使辉钼矿恢复可浮性,而滑石被抑制,之后对浮选出的钼粗精矿进行高温焙烧,使辉钼矿失去可浮性,再进行反浮选脱除滑石,最终得到合格的钼精矿。

2.2.3 腐殖酸

腐殖酸通常来源于动植物残留物的分解以及随后生物降解产物的聚合,是腐殖质和土壤的主要有机成分^[37]。腐殖酸主要由带有大量羧基、羟基、羰基、醌基以及甲氧基等多种官能团的脂肪链和芳香环组成,且分子带有较强的负电荷^[38]。

腐殖酸可与矿物表面的金属离子络合而吸附在矿物表面上,其分子中含有羧基和羟基等亲水性基团,可在矿物表面形成亲水层,对矿物产生抑制作用。Yuan Duowei等^[39]在以腐殖酸为选择性抑制剂分离滑石与辉钼矿的试验中发现,添加微量(5×10^{-6})的腐殖酸可在较宽的pH值范围(3~11)内强烈抑制辉钼矿的浮选,而只在强酸性(pH值=3)条件下才对滑石有抑制作用。吸附等温线结果表明,吸附于辉钼矿表面的腐殖酸远远高于滑石表面,AFM(原子力显微镜)和红外光谱的检测结果表明腐殖酸与辉钼矿的亲合力强于滑石,并且溶液pH值对腐殖酸在滑石上吸附的影响较大,但对在辉钼矿上吸附没有显著影响。以上结果表明,以腐殖酸为选择性抑制剂,可在碱性条件下实现滑石与辉钼矿的有效分离。

2.2.4 古尔胶

古尔胶是一种天然的高分子非离子型分枝多糖,常作为硫化矿中滑石、叶腊石等脉石矿物的抑制剂。

研究发现,古尔胶在较低浓度下即可实现对滑石的抑制,且分子量越大,古尔胶对滑石的抑制作用越强,但溶液pH值和离子强度对古尔胶的抑制作用没有显著影响^[40-41]。P·G·肖特里奇^[41]认为古尔胶以三维结构吸附于滑石表面,吸附时分支朝外,当古尔胶分子量增大时,其在滑石表面的覆盖面积和吸附层厚度均会增大,在滑石表面形成亲水层,降低滑石的可浮性。潘高产^[42]和

J.王^[40]等研究发现,由于古尔胶主要通过-OH和氢键吸附于滑石表面,因此古尔胶会使滑石表面负电性减弱,但不会改变其电荷符号。

2.2.5 葡聚糖

葡聚糖是一种由 α -D-吡喃葡萄糖单体组成的细菌性多糖,分子式为 $(C_6H_{10}O_5)_n$,广泛存在于某些微生物、植物以及动物体中^[43]。

张其东等^[44]对辉钼矿与滑石的浮选特性做了系统性研究,表明辉钼矿和滑石都具有良好的天然可浮性,但滑石天然可浮性不受溶液pH值的影响,而辉钼矿天然可浮性在碱性溶液中受抑制。以葡聚糖为抑制剂,通过单矿物浮选试验发现,在矿浆pH值=8.5、葡聚糖用量400 mg/L的相同条件下,辉钼矿回收率降低至14.37%,而滑石回收率仍高达83.22%,两者的浮选回收率差值为68.85%,说明辉钼矿得到有效抑制,而滑石却未受显著影响,为葡聚糖作为滑石与辉钼矿的选择性抑制剂打下理论基础。

3 结论及展望

随着易选辉钼矿资源的减少,对滑石型等难选钼矿资源的开发利用逐渐成为研究的重要方向。分选滑石型钼矿主要是实现滑石与辉钼矿的分离,但两者具有相似的表面结构与天然可浮性,实现有效分离比较困难。针对辉钼矿与滑石的分选技术一直是选矿领域的研究热点,目前主要是在工艺和药剂方面取得了一定进步,但在工业生产中辉钼矿与滑石高效分离的难题尚未得到有效解决。

通过对目前滑石型钼矿的选矿工艺与药剂等方面的研究进展进行总结,要实现滑石与辉钼矿的高效分离,可考虑从以下几个方面入手:

(1) 加强对滑石型钼矿选择性磨矿的研究。滑石因硬度低从而易过磨而泥化,影响后续与辉钼矿的分离效果,选择性磨矿可在一定程度上减轻滑石过磨现象,改善分离效果。

(2) 加深有机大分子药剂与矿物作用的机理研究,并大力开展绿色高效无毒有机药剂的研发。有机药剂毒性较低,对环境的污染小,符合“绿色矿山”的环保理念,但其与矿物表面的作用机理尚存在较多争议,可加强相关研究。

(3) 根据原矿工艺矿物学的研究,采用适宜

的选矿工艺流程。原矿矿石性质因地区不同而具有较大差异,可根据原矿矿物组成、嵌布粒度等特性分别采取不同的分选工艺,特别是联合分选工艺流程,是今后工艺发展的重要方向。

参考文献:

- [1] 张汉鑫,李慧,梁精龙,等.稀有金属钼资源回收现状及进展[J].[矿产综合利用](#),2020(1):47-49.
- ZHANG H X, LI H, LIANG J L, et al. Status and progress of rare metal molybdenum resource recovery[J]. [Multipurpose Utilization of Mineral Resources](#), 2020(1):47-49.
- [2] Anilkumar K R, Parveen A, Badiger G R, et al. Effect of molybdenum trioxide (MoO_3) on the electrical conductivity of polyaniline[J]. *Physica B Condensed Matter*, 2009(12-13):1664-1667.
- [3] 杨若瑜,张建国,彭远伦,等.云南某铜矿铜钼分离浮选工艺优化研究及工业应用[J].[矿产综合利用](#),2021(5):182-185.
- YANG R Y, ZHANG J G, PENG Y L, et al. Optimization research and industrial application of copper and molybdenum separation flotation process in a copper mine in Yunnan[J]. [Multipurpose Utilization of Mineral Resources](#), 2021(5):182-185.
- [4] 王国彬,蓝卓越,赵清平,等.钼尾矿中有价金属的综合回收研究现状[J].[矿产综合利用](#),2021(3):140-148.
- WANG G B, LAN Z Y, ZHAO Q P, et al. Research status of comprehensive recovery of valuable metals in molybdenum tailings[J]. [Multipurpose Utilization of Mineral Resources](#), 2021(3):140-148.
- [5] 张成强,李洪潮,张颖新,等.我国复杂难选钼矿资源选矿技术进展[J].[中国矿业](#),2009(10):64-66,86.
- ZHANG C Q, LI H C, ZHANG Y X, et al. Progress in the beneficiation technology of complex refractory molybdenum ore resources in my country[J]. [China Mining Industry](#), 2009(10):64-66,86.
- [6] 张亮,杨卉芃,冯安生.全球钼矿资源现状及市场分析[J].[矿产综合利用](#),2019(3):11-16.
- ZHANG L, YANG H P, FENG A S. Study on general situation and analysis of supply and demand of global molybdenum resource[J]. [Multipurpose Utilization of Mineral Resources](#), 2019(3):11-16.
- [7] 黄凡,王登红,陈毓川,等.中国钼矿中辉钼矿的稀土元素地球化学及其应用[J].[中国地质](#),2013(1):287-301.
- HUANG F, WANG D H, CHEN Y C, et al. Rare earth element geochemistry and application of molybdenite in Chinese molybdenum deposits[J]. [Chinese Geology](#), 2013(1):287-301.
- [8] 陈建华,冯其明.钼矿的选矿现状[J].[矿产保护与利用](#),1994(6):26-28.
- CHEN J H, FENG Q M. Current status of molybdenum ore beneficiation[J]. *Mineral Resources Conservation and Utilization*, 1994(6):26-28.
- [9] 魏桢伦,李育彪.辉钼矿晶面各向异性及其对浮选的影响机制[J].[矿产保护与利用](#),2018(3):31-36.
- WEI Z L, LI Y B. The crystal plane anisotropy of molybdenite and its influence mechanism on flotation[J]. *Mineral Resources Conservation and Utilization*, 2018(3):31-36.
- [10] 刘佳,李解,李保卫,等.伊春辉钼矿浮选工艺优化试验研究[J].[矿产综合利用](#),2017(6):50-56.
- LIU J, LI J, LI B W, et al. Experimental study on optimization of flotation process of Yichun molybdenite[J]. [Multipurpose Utilization of Mineral Resources](#), 2017(6):50-56.
- [11] Smit F J, Bhasin A K. Relationship of petroleum hydrocarbon characteristics and molybdenite flotation[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 1985(1-2):19-40.
- [12] 赵玉卿,黄秉雄,刘磊,等.蛇纹石,绿泥石,滑石的可浮性及抑制方法综述[J].[矿产综合利用](#),2018(2):7-11.
- ZHAO Y Q, HUANG B X, LIU L, et al. Overview of the floatability and inhibition methods of serpentine, chlorite and talc[J]. [Multipurpose Utilization of Mineral Resources](#), 2018(2):7-11.
- [13] Beattie D A, Le H, Kaggwa G B, et al. Influence of adsorbed polysaccharides and polyacrylamides on talc flotation[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2006(4):238-249.
- [14] Beattie D A, Le H, Kaggwa G B, et al. The effect of polysaccharides and polyacrylamides on the depression of talc and the flotation of sulphide minerals[J]. *Minerals Engineering*, 2006(6-8):598-608.
- [15] Rosenholtz J L, Smith D T. The dielectric constant of mineral powders[J]. *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials*, 1936(2):115-120.
- [16] Mathieu G I, RW B. Getting the talc out of molybdenite ores[J]. 1974(6): 75-77.
- [17] Yuan D, Cadien K, Liu Q, et al. Separation of talc and molybdenite: challenges and opportunities[J]. [Minerals Engineering](#), 2019, 143:105923.
- [18] Jiang X K, Ban H, Neathery J K, et al. New approach for removing talc for upgrading molybdenite ores[C]//1999 SME Annual Meeting: Mining in a New Era. 1999: 126.
- [19] 彭团儿,郭珍旭,张艳娇.斜板分级机在某难选滑石型钼矿的应用研究[J].[矿产保护与利用](#),2013(3):31-34.
- PENG T E, GUO Z X, ZHANG Y J. Application of inclined plate classifier in a refractory talc-type molybdenum mine[J]. [Mineral Resources Conservation and Utilization](#), 2013(3):31-34.
- [20] 赵平.栾川滑石型辉钼矿选矿新工艺、新药剂工业试验[A].中国地质科学院“九五”科技成果汇编[C].中国地质学会,2001: 1.
- ZHAO P. Luanchuan talc-type molybdenite beneficiation new technology and new chemical industrial test[A]. *Compilation of scientific and technological achievements of the Chinese Academy of Geological Sciences during the Ninth Five-Year Plan period*[C]. Chinese Geological Society, 2001: 1.
- [21] 张小云,黎铨海.辉钼矿与滑石的分选试验[J].[湖南有色金属](#),1997(1):15-16.
- ZHANG X Y, LI X H. Separation test of molybdenite and

- talc[J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 1997(1):15-16.
- [22] 董燧珍. 含滑石钼矿的选别工艺试验研究[J]. *矿产综合利用*, 2006(1):7-12.
- DONG S Z. Experimental study on the separation technology of talc-bearing molybdenum ore[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2006(1):7-12.
- [23] 张文钰. 钼选矿学技术发展现状与展望[J]. *中国钼业*, 2011(1):1-6.
- ZHANG W Z. The status quo and prospects of the development of molybdenum beneficiation technology[J]. *China Molybdenum Industry*, 2011(1):1-6.
- [24] 俞国庆, 姚云芳. 肯尼柯特犹他铜矿铜-钼选矿厂[J]. *中国钼业*, 1998(4):95-98.
- YU G Q, YAO Y F. Kennecott utah copper mine copper-molybdenum concentrator[J]. *China Molybdenum Industry*, 1998(4):95-98.
- [25] 孙大勇, 祁忠旭, 肖舜元, 等. 高滑石型难选钼矿选矿进展[J]. *现代矿业*, 2019(3):114-117.
- SUN D Y, QI Z X, XIAO S Y, et al. Progress in beneficiation of high-talc refractory molybdenum ore[J]. *Modern Mining*, 2019(3):114-117.
- [26] Tang X, Chen Y, Liu K, et al. Reverse flotation separation of talc from molybdenite without addition of depressant: Effect of surface oxidation by thermal pre-treatment[J]. *Colloids and Surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, 594:124671.
- [27] Huch R O, Valles P. Talc-molybdenite separation[J]. *US*, 1975.
- [28] Qin, Wenqing, Ma, et al. Depression mechanism of the zinc sulfate and sodium carbonate combined inhibitor on talc[J]. *Colloids and Surfaces, A. Physicochemical and Engineering Aspects*, 2016, 501:92-97.
- [29] 马晶, 张文钰, 李枢本. 钼矿选矿[M]. 冶金工业出版社, 2008.
- MA J, ZHANG W Z, LI S B. Beneficiation of molybdenum ore[M]. *Metallurgical Industry Press*, 2008.
- [30] Kelebek S, Yoruk S, Smith G W. Wetting behavior of molybdenite and talc in lignosulphonate/mibc solutions and their separation by flotation[J]. *Separation Science & Technology*, 2001(2):145-157.
- [31] Ma X, Pawlik M. The effect of lignosulfonates on the floatability of talc[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2007(1-2):19-27.
- [32] Fu Y, Zhu Z, Jin Y, et al. Improved depression of talc in chalcopyrite flotation using a novel depressant combination of calcium ions and sodium lignosulfonate[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2018, 558:88-94.
- [33] Khraisheh M, Holland C, Creany C, et al. Effect of molecular weight and concentration on the adsorption of CMC onto talc at different ionic strengths[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2005, 75(3-4):197-206.
- [34] Krizova H, Wiener J. Development of carboxymethyl cellulose/ polyphenols gels for textile applications[J]. *Autex Research Journal*, 2013(2): 33-36.
- [35] 齐超, 欧乐明, 邱章伟, 等. 不同种 CMC 对两种非极性矿物表面的抑制研究[J]. *有色金属科学与工程*, 2015(6):88-94.
- QI C, OU L M, QIU Z W, et al. Study on the inhibition of different kinds of CMC on the surface of two non-polar minerals[J]. *Nonferrous Metal Science and Engineering*, 2015(6):88-94.
- [36] KUHN M C. Methods for the recovery of molybdenum, US200800667112A1[P]. 2008-9-10.
- [37] 龙良俊. 污泥腐殖酸特性及其改性后对重金属的吸附研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- LONG L J. Humic acid characteristics of sludge and its adsorption of heavy metals after modification[D]. *Chongqing: Chongqing University*, 2018.
- [38] 陆宝树. 腐殖质化学-发生, 组成, 反应[J]. *土壤学进展*, 1985(1):56.
- LU B S. Humus Chemistry-Generation, Composition, Reaction[J]. *Progress in Soil Science*, 1985(1):56.
- [39] YUAN D, XIE L, SHI X, et al. Selective flotation separation of molybdenite and talc by humic substances[J]. *Minerals Engineering*, 2017, 117:34-41.
- [40] 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(4):30-33.
- WANG J, LUO K H, WANG R S, et al. Adsorption mechanism of Gu'er gum at the solid-liquid interface[J]. *Foreign Metallic Mineral Processing*, 2006(4):30-33.
- [41] P·G·肖特里奇, 向平, 肖力子. 多糖抑制剂的化学成份和分子量对滑石浮选的影响[J]. *国外金属矿选矿*, 2002(8):29-32+22.
- P·G·Shortridge, XIANG P, XIAO L Z. The influence of the chemical composition and molecular weight of polysaccharide inhibitors on the flotation of talc[J]. *Foreign Metallic Mineral Processing*, 2002(8):29-32+22.
- [42] 潘高产, 卢毅屏. CMC 和古尔胶对滑石浮选的抑制作用研究[J]. *有色金属 (选矿部分)*, 2013(2):74-78.
- PAN G C, LU Y P. Study on the inhibition of CMC and Gu'er gum on the flotation of talc[J]. *Non-Ferrous Metals (Mineral Processing Part)*, 2013(2):74-78.
- [43] 宋少云, 廖威. 葡聚糖的研究进展[J]. *中山大学学报 (自然科学版)*, 2005(A2):229-232.
- SONG S Y, LIAO W. Research progress of dextran[J]. *Journal of Sun Yat-sen University (Natural Science Edition)*, 2005(A2):229-232.
- [44] 张其东, 袁致涛, 刘炯天, 等. 葡聚糖对辉钼矿与滑石浮选分离的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2016(4):884-890.
- ZHANG Q D, YUAN Z T, LIU J T, et al. The effect of dextran on the flotation separation of molybdenite and talc[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2016(4):884-890.

Carbonation of Red Gypsum for CO₂ Sequestration[J]. Energy & Fuels, 2014, 28(9):5953.

[47] PÉREZ-MORENO S, GÁZQUEZ M, BOLIVAR J. CO₂

sequestration by indirect carbonation of artificial gypsum generated in the manufacture of titanium dioxide pigments[J].

[Chemical Engineering Journal](#), 2015, 262:737-46.

Research Progress and Development Suggestion on Resource Utilization of Titanium Gypsum

LUO Dapeng, HOU Jiang, HUANG Xiang, HAN Yuqi, YONG Yi

(Sichuan Academy of Ecological and Environmental Sciences, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: This is an article in the field of metallurgical engineering. Titanium gypsum is an industrial waste residue mainly composed of calcium sulfate dehydrate when the titanium dioxide is produced by the sulfuric acid method. At present, the utilization rate of titanium gypsum is relatively low due to its high impurity content, difficulty in dehydration and poor mechanical properties of the subsequent products. A large amount of titanium gypsum stored in the open air has caused great environmental and economic stress on the titanium dioxide enterprises, which is a serious waste of land resources. In this article, the current situation and research progress of global titanium gypsum in building materials, chemical industry, agriculture and climate change were summarized. The suggestions and prospects for the effective reduction and high-quality resource utilization of titanium gypsum from the aspects of structure adjustment, technological innovation, green development, standard formulation and policy support were provided.

Keywords: Metallurgical engineering; Titanium gypsum; Resource recovery; Research progress; Development proposal

////////////////////////////////////
(上接第 81 页)

Research Progress of the Separation Technology and Reagents of the Talc-type Molybdenum Ore

CHEN Tao^{1,2}, JIAN Sheng^{1,3}, XIE Xian^{1,2}, TONG Xiong^{1,2}, ZHANG Ying^{1,2}, LYU Xiangwen^{1,3}

(1.School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology,

Kunming 650093, Yunnan, China; 2.State Key Laboratory of the Clean Utilization of

Complex Non-ferrous Metal Resources, Kunming 650093, Yunnan, China;

3.Kunming Institute of Metallurgy, Kunming 650503, Yunnan, China)

Abstract: This is an article in the field of mineral processing engineering. Molybdenum has many good physical and chemical properties and is widely used in many fields. Molybdenum is mainly derived from molybdenite, but the resources of the easily beneficiated molybdenum ore have been gradually reduced after long-term development. Nowadays, talc-type and other refractory molybdenum ores have gradually become the focus of research. The separation of talc and molybdenite is a difficult point in the separation of talc-type molybdenum ores. The two has similar surface structures and natural floatability, and the separation is very difficult. This article summarizes the current research progress of talc-type molybdenum ore beneficiation technology and reagents, and proposes to strengthen the research and development of selective grinding of talc-type molybdenum ores and organic macromolecular reagents, and deepen the mechanism and effect of reagents and mineral surfaces. The study of the raw ore technological mineralogy is an important direction for sorting the talc-type molybdenum ore in the future.

Keywords: Mineral processing engineering; Talc; Molybdenite; Talc-type molybdenum ore; Combined separation; Organic inhibitor