

国家自然科学基金

白云母、电气石、磷灰石对白钨矿浮选过程中矿浆流变性的影响

薛季玮^{1,2}, 屈焱犇¹, 张崇辉¹, 涂华臻¹, 孙健¹, 卜显忠¹

1. 西安建筑科技大学 资源工程学院, 陕西 西安 710055;
2. 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 100260

中图分类号: TD954; TD923 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)01-0024-08
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.01.002

摘要 通过矿浆流变性测试、人工混合矿浮选试验和泡沫稳定性测量研究了白云母、电气石、磷灰石等 3 种常见伴生脉石矿物分别对白钨矿和石英人工混合矿矿浆流变性和白钨矿浮选指标的影响。流变测试表明: 白云母在矿浆中会形成端面-层面和端面-端面结合的三维网状结构, 具有较大的表观黏度, 而电气石、磷灰石在矿浆中仅为简单的堆砌型结构, 其黏度略有增加。浮选试验和泡沫稳定性测量表明: 在白钨矿-白云母-石英的人工混合矿浮选体系中, 随着白云母质量浓度的增大, 其较高的黏度会使浮选泡沫的半衰期和最大高度增加, 使得“二次富集”作用明显提高, 浮选指标在一定范围内变好, 但较高的矿浆黏度同时会抑制气泡和颗粒之间的碰撞以及气泡-颗粒聚集体的流动性, 导致浮选指标变差; 在白钨矿-电气石-石英的人工混合矿浮选体系中, 随着电气石在水中溶解出的 Fe^{3+} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等金属阳离子增加, 抑制了白钨矿的浮选, 使得精矿品位和回收率下降; 在白钨矿-磷灰石-石英的人工混合矿浮选体系中, 磷灰石溶解出的 PO_4^{3-} 在白钨矿表面的吸附会导致矿物的表面转化, 使得白钨矿和磷灰石表面性质相近, 会恶化白钨矿浮选。此外, 由于黏度增长缓慢, 电气石和磷灰石的加入对泡沫稳定性几乎没有影响。研究可为实际矿石浮选过程中矿浆流变性的调控, 以及白钨矿与脉石矿物的高效分离提供理论依据。

关键词 白钨矿; 矿浆流变性; 泡沫稳定性; 浮选; 白云母; 电气石; 磷灰石

引言

在选矿作业中, 矿浆流变行为的改变往往会对矿物加工过程产生较大的影响, 所以矿浆流变学研究备受选矿科研工作者的重视。针对贫、杂难选矿石矿物浮选特性, 国内外研究学者在影响矿浆相流变性质的主要因素、矿浆相流变学测量技术、矿浆相流变学对浮选指标的影响、矿浆相黏度控制方法等方面进行了大量研究工作。

矿浆流变学是研究矿物加工过程中矿浆流体在外加剪切应力作用下流动与变形性质的学科^[1]。通过研究矿浆在矿物组分、粒度组成、化学药剂、外加力场等因素作用下变形与流动的规律, 分析矿浆流体中由于矿物颗粒(包括矿石矿物与脉石矿物)粒度与表面性质差异引起的矿浆整体黏度、屈服应力、黏弹性

等流变特性的变化规律, 揭示矿浆中矿物颗粒之间的相互作用与聚集分散行为, 为磨矿、搅拌、浮选、过滤等矿物加工过程的研究提供参考依据。目前矿浆流变学的研究已经涉及到典型硫化矿^[2-3]、典型氧化矿^[4]、黏土矿物^[5-6]、煤泥^[7]等矿浆中不同矿物颗粒之间相互作用的研究。通过矿浆流变性的测量, 研究矿浆流变学对矿浆中水动力学、气泡分散、颗粒悬浮、气泡-颗粒碰撞、黏附和解体等浮选过程的影响。有研究表明, 矿浆中主要脉石矿物是影响矿浆流变性的重要因素。Cruz 等人发现, 在铜金矿浮选作业中, 由于某些含钙矿物溶解产生的 Ca^{2+} 与黏土矿物作用增大了矿浆的表观黏度与屈服应力, 导致矿浆中形成了稳定的三维结构, 阻碍了气泡的有效分散和浮选药剂与目的矿物的选择性作用, 导致铜矿浮选恶化^[8-9]。而高岭石在对应浮选药剂作用下对矿浆表观黏度没有较大影响, 但是显著地增大了泡沫层的屈服应力, 表明高岭石是以夹

收稿日期: 2022-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52074206); 安徽省 2021 年重点研究与开发计划项目(202104a07020012); 陕西省自然科学基金项目(2021JQ-507); 矿物加工科学与技术国家重点实验室项目(BGRIMM-KJSKL-2021-19); 西安建筑科技大学人才科技基金项目(ZR20066)

作者简介: 薛季玮(1990—), 男, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为铜硫矿物高效浮选分离, E-mail: xjw635171816@outlook.com。

通信作者: 卜显忠(1977—), 男, 教授, 博士, 博士研究生导师, 主要研究方向为界面化学与流变学, E-mail: buxianzhong@xauat.edu.cn。

带的方式进入精矿而恶化浮选^[10-11]。Yan 等人^[12]使用原子力显微镜对云母的层面和端面分别进行了研究, 结果表明: 云母的层面带永久负电荷, 且端面的零电点在 pH 值 7.5。因此推测影响白云母矿浆流变性的主要原因是矿物颗粒在矿浆中形成端面-层面和端面-端面结合的三维网状结构^[13], 表现为具有较大的表观黏度, 严重影响浮选。

白钨矿是我国主要的钨金属来源, 但大部分白钨矿赋存于矽卡岩型钨矿床中, 平均品位较低, 嵌布粒度较细, 且大多数脉石矿物为白云母、绿泥石等黏土矿物, 以及与白钨可浮性相近的磷灰石、方解石、萤石等含钙矿物^[14-15]。有研究表明^[16], 在白钨矿-石英-方解石人工混合矿浮选体系中, 通过调节调浆搅拌过程中能量的输入, 改变矿浆的屈服应力, 可以促进微细粒白钨矿形成疏水性颗粒聚团, 同时增强抑制剂海藻酸钠的选择性作用, 提升富集比。但对于脉石矿物, 特别是硅酸盐类脉石的矿浆流变特性研究仍有欠缺。

本文以白钨矿为研究对象, 从流变学的角度开展浮选研究, 通过浮选试验、矿浆流变性及泡沫稳定性

测量等方法, 研究浮选过程中矿浆浓度和不同种类脉石矿物含量对矿浆流变特性和浮选行为的影响, 并分析矿浆流变性与浮选泡沫性能之间的关系, 以便为实现白钨矿与石英、白云母、电气石、磷灰石等脉石矿物的浮选分离提供理论依据。

1 试验及方法

1.1 材料和试剂

试验所用单矿物样品取自湖南某矿山, 白钨矿纯度为 98%, 石英纯度为 99%, 电气石纯度为 99%, 白云母纯度为 97.6%, 磷灰石纯度为 90%, 各单矿物的 XRD 图如图 1 所示。经人工挑选、手碎提纯后, 取-2 mm 粒级用三头研磨机进行干式研磨, 通过干式标准筛筛分, 取-74+38 μm 粒径的矿样, 用于流变学测量、浮选试验及泡沫稳定测量。

试验所用的捕收剂油酸钠为分析纯。所有试验用水均为去离子水。

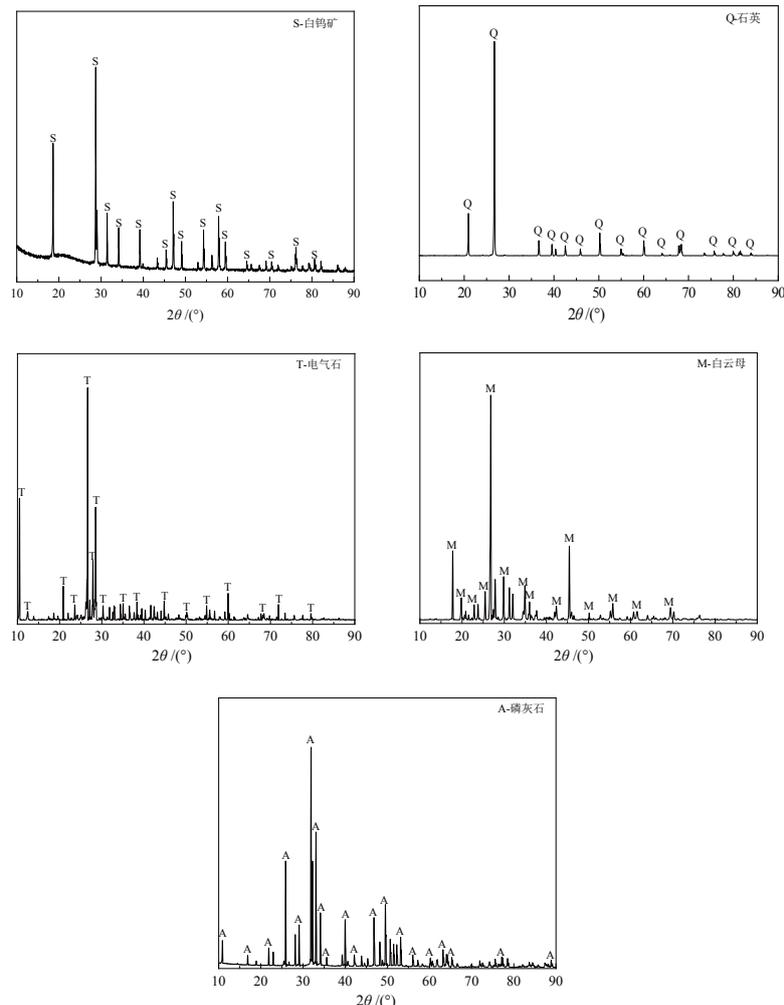


图 1 白钨矿、石英、电气石、白云母、磷灰石 XRD 分析

Fig. 1 XRD analysis of scheelite, quartz, tourmaline, muscovite and apatite

1.2 流变性测量

流变性测量在 Haake Mars40 流变仪上进行。每次将 13 mL 矿浆样品倒入杯中,降低转子位置,直到转子和杯底之间的间隙为 1 mm。流变学测量具体步骤为:

- (1) 矿浆在 100 s^{-1} 的条件下预剪切 60 s;
- (2) 矿浆在 0 s^{-1} 时稳定 10 s;
- (3) 在剪切速率为 $0\sim 180\text{ s}^{-1}$ 的范围内测量流变曲线。

流变图为剪切速率与剪切应力的函数关系图。每个样品测量 3 次,取平均值。在测量过程中,温度保持在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,精确度为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

选择 Herschel-Buckley 模型来分析矿浆的流体特性,因为该模型在试验段最符合流变曲线。模型由以下表达式描述^[7]:

$$\tau = \tau_B + \eta_B \cdot \dot{\gamma}^p \quad (1)$$

其中: τ 是剪切应力(Pa), $\dot{\gamma}$ 是剪切速率(s^{-1}), τ_B 是 Herschel-Buckley 屈服应力(Pa), η_B 是流动系数($\text{Pa}\cdot\text{s}^p$), p 是 Herschel-Buckley 流动指数。 τ_B 项是矿浆的外推屈服应力,其定义为在外力影响下的初始变形阻力。流动系数 η_B 是描述矿浆稠度的一个术语,而 Herschel-Buckley 流动指数 p 表示偏离牛顿流体行为。

1.3 微浮选试验

在研究不同脉石矿物对白钨矿和石英人工混合矿浮选的影响时,制备了一系列人工混合矿。每份人工混合矿中白钨矿质量分数固定为 10%,除石英外其他脉石矿物占比分别为 10%、20%、30%、40%、50%、60%,随着其他脉石矿物占比的增加,石英占比减小为 80%、70%、60%、50%、40%、30%。按照前期探索试验,具体浮选流程如图 2 所示。

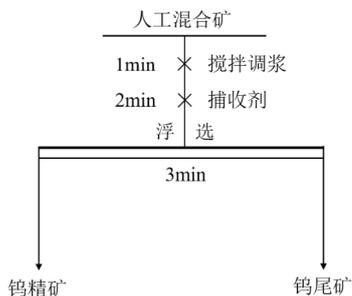


图 2 人工混合矿浮选试验流程
Fig. 2 Flowchart of flotation test for artificial mixed ore

1.4 泡沫稳定性测量

采用气流法测量泡沫稳定性。其装置如图 3 所示。其中 Hallimond 管的内径为 4.5 cm,高度为 100 cm。使用磁力搅拌器调浆后,将矿浆迅速移入泡沫管内并以恒定的速度开始充气,观测管内泡沫高度,当泡沫达到平衡时,立即测量泡沫最大高度 H ;停止充气后,

记录泡沫高度衰减到原来高度的一半时所需的时间 $t_{1/2}$,用于表征泡沫的稳定性。

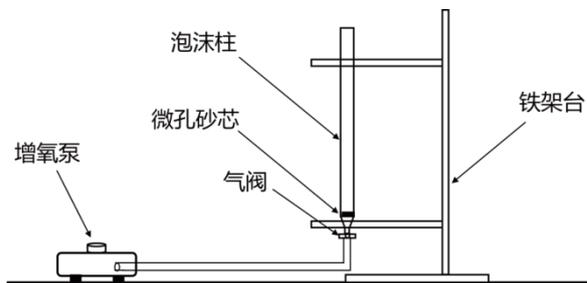


图 3 泡沫稳定性测量装置
Fig. 3 Foam stability measuring device

2 结果和讨论

2.1 脉石矿物对矿浆流变性的影响

2.1.1 单矿物矿浆流变性

为了研究白云母、电气石、磷灰石等脉石矿物在白钨矿浮选过程中的流变学效应,首先研究了单矿物体系中矿浆质量浓度对各矿物矿浆流变性的影响,即将各单矿物分别加入水中,制备成不同质量浓度的矿浆,然后进行流变性测量。

图 4 分别为白钨矿、白云母、电气石、磷灰石、石英在矿浆质量浓度 10%~40% 范围内的剪切速率与剪切应力曲线图。可以看出,无论是在低剪切速率还是高剪切速率下,矿浆的剪切应力随矿浆质量浓度的增加而增加。此外,在矿浆质量浓度为 10% 时,几种矿浆表现出牛顿流体的特征;在矿浆质量浓度大于 10% 时,出现了剪切变稀行为,这是典型的假塑性流体的特征^[8]。说明在较高剪切下,颗粒间的相互作用已被破坏,颗粒趋于分散状态,颗粒间相互作用减弱。而对于白云母来说,当矿浆质量浓度达到 30% 以上时,通过 Herschel-Buckley 模型拟合,此时矿浆表现为具有屈服应力的宾汉流体。

图 5 为不同矿浆质量浓度下脉石种类与表观黏度的关系。由图可知,几种单矿物表观黏度随着矿浆质量浓度的增加而增加,这是因为随着矿物颗粒的含量增加,矿物在矿浆剪切场中内摩擦显著增大,颗粒间的相互作用显著增强,甚至可能形成了具有较大强度的三维网状结构。白钨矿、电气石、磷灰石和石英的表观黏度在矿浆质量浓度为 5%~40% 范围内呈缓慢上升趋势,而白云母在矿浆质量浓度小于 15% 时黏度变化较为平缓,然后随着矿浆质量浓度增加呈指数型变大,远远超过其他几种矿物,这可能与独特的鳞片状结构有关。几种类型矿浆黏度的涨幅顺序为:白云母>电气石>石英>白钨矿/磷灰石。

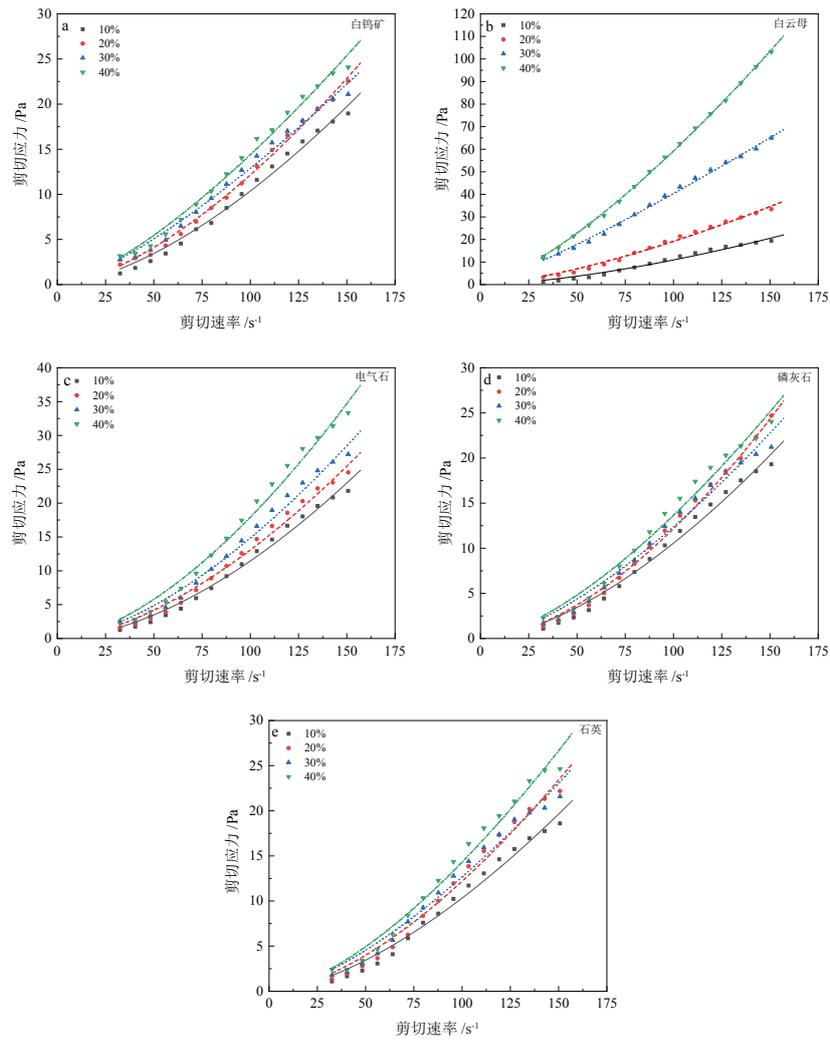


图 4 不同矿浆质量浓度下剪切速率与剪切应力的关系
Fig. 4 Graph of shear rate and shear stress at different pulp concentrations

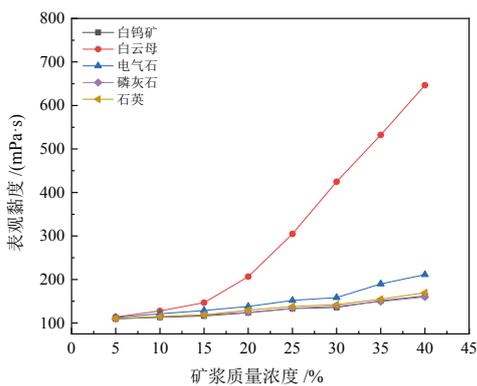


图 5 不同矿浆质量浓度下脉石矿物种类与表观黏度的关系(剪切速率为 100 s⁻¹ 时)
Fig. 5 Relationship between gangue mineral species and apparent viscosity at different pulp concentrations (shear rate: 100 s⁻¹)

2.1.2 人工混合矿矿浆流变性

石英是一种物理性质和化学性质均十分稳定的硅酸盐矿物, 具有简单的结构形态以及表面电荷分布, 对矿浆流变性影响较弱, 常与其他矿物进行比较。因此, 以去离子水为介质, 研究了白云母、电气石、磷灰

石分别对白钨矿与石英人工混合矿矿浆流变性的影响, 在总固体质量不变的情况下, 白钨矿与石英混合矿矿浆剪切应力、表观黏度随剪切速率与各脉石矿物质量浓度的变化关系如图 6、图 7 所示。

如图所示, 在矿浆质量浓度为 20%、除石英外其他脉石矿物质量浓度为 0~60% 范围内, 三种人工混合矿矿浆都表现出假塑性流体特征。随着电气石和磷灰石质量浓度的增加, 矿浆的表观黏度和剪切应力呈缓慢上升的趋势, 两者对矿浆黏度的影响相似, 白云母质量浓度的增加对矿浆黏度和剪切应力影响最大, 由 133.1 mPa·s 迅速增长到 160.5 mPa·s, 是其他脉石矿物黏度涨幅的 4~5 倍。此外, 相对于同一矿浆浓度下单一矿物的黏度, 人工混合矿矿浆黏度有了明显的下降, 这或许与矿物表面电性或表面形态差异有关。

层状硅酸盐矿物颗粒的整体流变特性取决于沉降过程中的颗粒团聚结构情况。根据 Lukham 和 Rossi 的研究^[19], 层状矿物的颗粒团聚主要有三种结构: 层面-层面结构, 端面-层面结构, 端面-端面结构。层面-层面结构会形成层状结构的聚团, 这种结构会减少有效

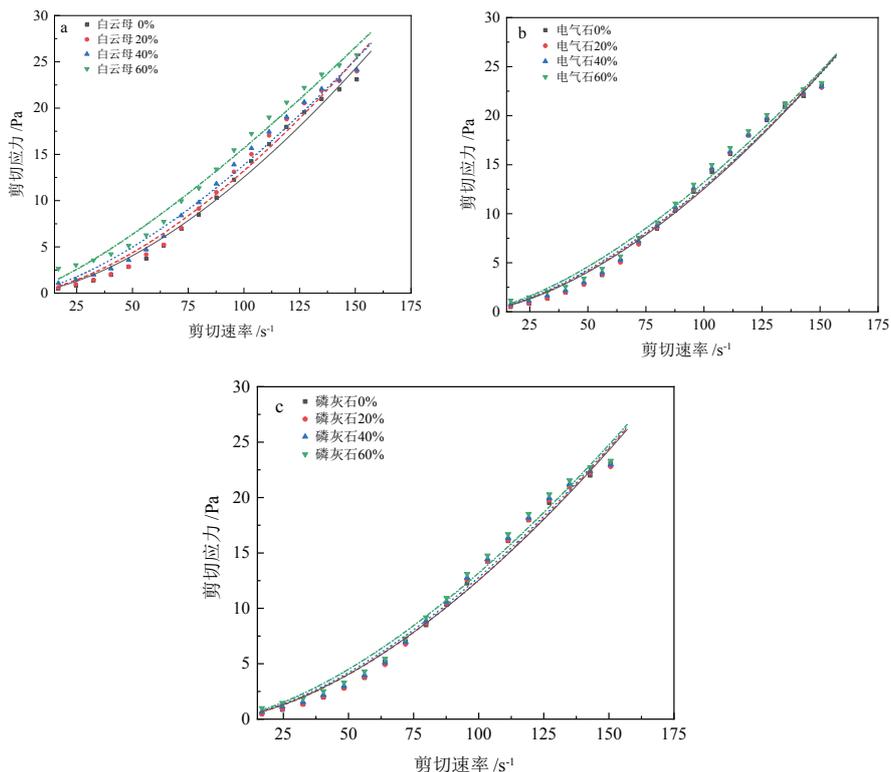


图 6 不同脉石质量浓度下剪切速率与剪切应力关系
Fig. 6 Graph of shear rate and shear stress with different gangue additions

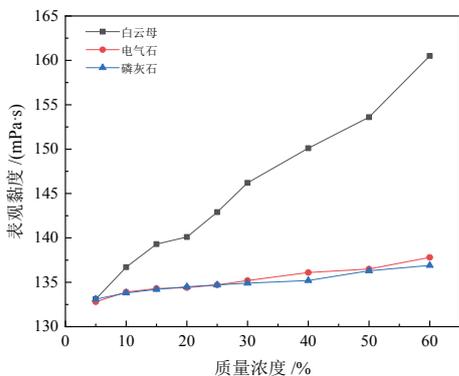


图 7 不同脉石质量浓度下矿物种类与表观黏度关系(剪切速率为 100 s⁻¹ 时)
Fig. 7 Relationship between mineral species and apparent viscosity at different gangue additions (shear rate: 100 s⁻¹)

的凝胶结构单元,也会减少颗粒之间相互作用的有效表面积,因此会降低悬浮液的凝胶强度。端面-层面和端面-端面结构会形成大量的三维立体结构,使其流变性更为复杂。例如蛇纹石^[20]与滑石^[21]在矿物悬浮液中以端面与层面结构沉降,导致矿浆黏度变大。因此推测白云母在矿浆中形成端面-层面和端面-端面结合的三维网状结构,而电气石、磷灰石在矿浆中仅为简单的堆砌型结构,随着质量浓度的增加,矿浆黏度略有增大。

2.2 矿浆流变性对白钨矿浮选指标的影响

在添加不同含量白云母、电气石、磷灰石的情况

下对白钨矿与石英人工混合矿进行浮选试验,以研究脉石矿物矿浆流变性对质量浓度白钨矿浮选指标的影响。

由图 8 可知,在白云母含量小于 40% 时,白钨矿浮选精矿品位和回收率均随着白云母质量浓度增加而逐渐增加,而当白云母含量达到 40% 后,随着白云母质量浓度的增加,白钨矿精矿的品位和回收率均呈现下降趋势。这是因为随着白云母质量浓度增大,矿浆的黏度也不断增加,导致浮选泡沫层厚度增加,使得“二次富集”作用明显提高^[22]。而当黏度增大到一定程度时,较高的矿浆黏度会抑制气泡和颗粒之间的碰撞以及气泡-颗粒聚集体的流动性,从而进一步减少了浮选时产生的泡沫量,导致浮选精矿品位和回收率降低。

对于电气石,随着电气石质量浓度的不断增大,白钨矿精矿的回收率和品位均呈下降的趋势,结合图 7 的研究结果,可以看出除了白云母,其他脉石矿物对人工混合矿的矿浆黏度影响很小,因此可以说明加入电气石后,矿浆流变性不是影响浮选指标的主要原因。根据文献^[23]可知,电气石在水中会溶解出部分 Fe³⁺、Mg²⁺、Ca²⁺等金属阳离子,而在白钨矿的浮选过程中,这几种金属阳离子均会对白钨矿的浮选产生抑制作用, Ca²⁺和 Mg²⁺主要以带正电荷的 CaOH⁺、MgOH⁺形式吸附在白钨矿表面, Fe³⁺主要以亲水性较强的 Fe(OH)₃(s) 吸附在白钨矿表面^[24],不利于捕收剂的吸附。此外,在

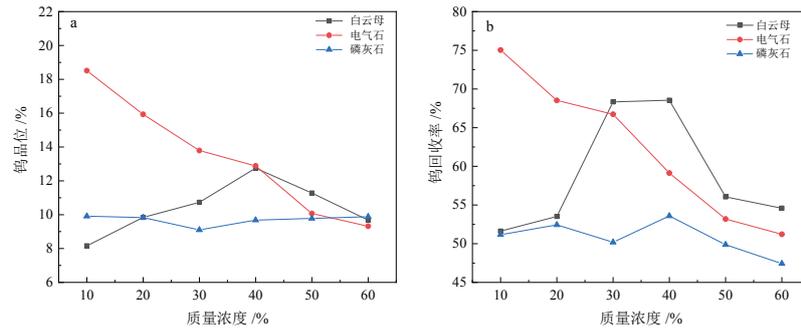


图 8 脉石矿物质量浓度对白钨矿精矿品位(a)和回收率(b)的影响
Fig. 8 Effect of gangue mineral addition on scheelite grade (a) and recovery (b)

油酸钠浮选体系中, 电气石表面暴露出部分不溶的 Fe^{3+} 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 会与油酸根离子反应, 削弱捕收剂在矿物表面的吸附^[25], 不利于白钨矿浮选回收。

对于磷灰石, 随着磷灰石质量浓度的增加, 白钨矿精矿的品位和回收率基本没有变化。这是因为白钨矿和磷灰石都属于含钙盐类矿物, 表面性质接近。研究^[26]表明, 磷灰石溶解出的 PO_4^{3-} 在白钨矿表面的吸附会导致矿物的表面转化使得白钨矿和磷灰石表面性质相近, 二者难以分离; 其次少量磷灰石的添加会恶化白钨矿的浮选, 磷灰石质量浓度为 0% 时, 钨精矿品位和回收率分别为 18.52% 和 80.52%, 当磷灰石质量浓度为 10% 时, 钨精矿品位和回收率迅速下降到 9.91% 和 51.16%。Zhong 等人^[27]在不添加任何抑制剂的条件下, 用油酸钠捕收白钨矿与磷灰石的人工混合矿(质量比为 1 : 1), 钨品位仅为 41.55%, 说明此时白

钨矿浮选已被严重恶化。因此继续添加磷灰石对钨精矿的浮选指标影响不大。

总体而言, 白云母主要通过改变矿浆的表观黏度来影响白钨矿的浮选指标, 而电气石和磷灰石主要是其矿物表面性质和溶解组分的差异, 导致浮选结果的不同。

2.3 泡沫稳定性测量

在浮选过程中, 矿浆的流变特性也会影响泡沫性能, 泡沫结构和稳定性在决定矿物浮选回收率和选择性方面起着关键作用^[28-29]。因此, 在添加白云母、电气石、磷灰石的情况下对白钨矿与石英人工混合矿进行泡沫稳定性测量, 泡沫稳定性主要以泡沫半衰期和泡沫最大高度表征。结果如图 9 所示。

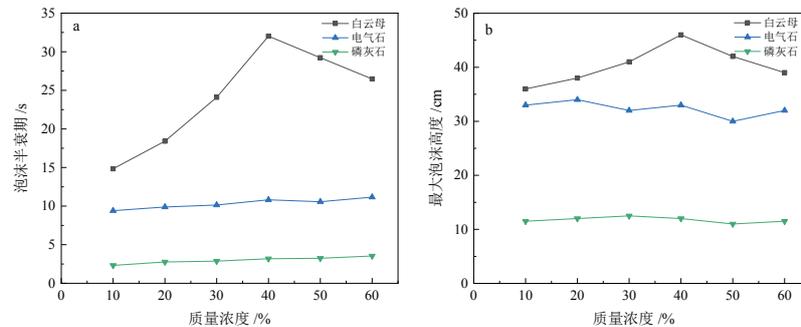


图 9 不同脉石矿物对泡沫半衰期(a)和最大泡沫高度(b)的影响
Fig. 9 Influence of gangue minerals on foam half-life (a) and maximum foam height (b)

由图 9 可知, 含有电气石和磷灰石的人工混合矿的泡沫稳定性几乎不受其质量浓度的影响, 其泡沫半衰期分别在 10.33 s 和 2.98 s 左右, 泡沫最大高度分别在 32.33 cm 和 11.75 cm 左右。而随着白云母质量浓度的增加, 其泡沫半衰期和最大泡沫高度在 40% 时达到最大, 分别为 32.02 s 和 46 cm, 然后逐渐减小到 26.47 s 和 39 cm。

根据 Plateau 边界效应^[30]可知, 泡沫稳定性主要与气泡兼并、泡沫排液等过程有关。矿浆的表观黏度越大, 气泡表面液体的黏度也就越大, 则流体微元的

平均流速越小, 从而导致泡沫 Plateau 通道内排液速度变慢, 泡沫稳定性增强, 泡沫层厚度变大, “二次富集”作用增强, 使得精矿品位提高。而当黏度增大到一定程度时, 泡沫难以生成, 浮选泡沫层较薄, 气泡在上浮过程中的兼并现象很难发生, 且在刮出过程中容易将矿浆带入精矿中, 使得精矿品位降低。

因此, 白钨矿-白云母-石英的人工混合矿浮选体系中泡沫稳定性先随着白云母质量浓度的增加而增加, 而后降低。白钨矿-电气石-石英和白钨矿-磷灰石-石英人工混合矿浮选体系中泡沫稳定性没有变化。

3 结论

(1)在低矿浆浓度下,几种单矿物悬浮液都表现为牛顿流体,随着矿浆浓度增加,表现为剪切变稀行为的假塑性流体和具有屈服应力的宾汉流体,此时矿浆流变性变得复杂。矿物类型影响矿浆流变性的大小关系为:白云母>电气石>石英>白钨矿/磷灰石。

(2)随着人工混合矿中脉石矿物含量的增加,几种矿浆的表观黏度均增加,但对浮选的影响各不相同。在白钨矿-白云母-石英的人工混合矿浮选体系中,钨精矿的品位和回收率随着白云母质量浓度的增加先增加后减少,在白钨矿-电气石-石英的人工混合矿浮选体系中,电气石质量浓度的增加会使钨精矿的品位和回收率下降。在白钨矿-磷灰石-石英的人工混合矿浮选体系中,磷灰石质量浓度的增加不会影响浮选指标。

(3)浮选过程中矿物类型不仅影响着矿浆流变性,还影响着泡沫性能,随着脉石矿物质量浓度的增加,含有白云母的人工混合矿矿浆的泡沫半衰期和最大泡沫高度变化最为显著,含有电气石和磷灰石的泡沫稳定性几乎不受其质量浓度的影响。

参考文献:

- [1] BOGER D V. Rheology and the resource industries[J]. *Chemical Engineering Science*, 2009, 64(22): 4525-4536.
- [2] MUSTER T H, PRESTIDGE C A. Rheological investigations of sulphide mineral slurries[J]. *Minerals Engineering*, 1995, 8(12): 1541-1555.
- [3] PATRA P, BHAMBHABI T, NAGARAJ D R, et al. Impact of pulp rheological behavior on selective separation of Ni minerals from fibrous serpentine ores[J]. *Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects*, 2012, 411: 24-26.
- [4] ZHOU Z, SCALES P J, BOGER D V. Chemical and physical control of the rheology of concentrated metal oxide suspensions[J]. *Chemical Engineering Science*, 2001, 56(9): 2901-2920.
- [5] FARROKHPAY S, NDLOVU B, BRADSHAW D. Behaviour of swelling clays versus non-swelling clays in flotation[J]. *Minerals Engineering*, 2016, 96-97: 59-66.
- [6] NDLOVU B, FORBES E, FARROKHPAY S, et al. A preliminary rheological classification of phyllosilicate group minerals[J]. *Minerals Engineering*, 2014, 55: 190-200.
- [7] BOYLU F, DINCER H, ATEGOK G. Effect of coal particle size distribution, volume fraction and rank on the rheology of coal-water slurries[J]. *Fuel Processing Technology*, 2004, 85(4): 241-250.
- [8] CRUZ N, PENG Y J, FARROKHPAY S, et al. Interactions of clay minerals in copper-gold flotation: Part 1-Rheological properties of clay mineral suspensions in the presence of flotation reagents[J]. *Minerals Engineering*, 2013, 50/51: 30-37.
- [9] CRUZ N, PENG Y J, WIGHTMAN E. Interactions of clay minerals in copper-gold flotation: Part 2-Influence of some calcium bearing gangue minerals on the rheological behaviour[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2015, 141: 51-60.
- [10] CRUZ N, PENG Y J, WIGHTMAN E. The interaction of pH modifiers with kaolinite in copper-gold flotation[J]. *Minerals Engineering*, 2015, 84: 27-33.
- [11] CRUZ N, PENG Y J, WIGHTMAN E. The interaction of clay minerals with gypsum and its effects on copper-gold flotation[J]. *Minerals Engineering*, 2015, 77: 121-130.
- [12] YAN L, ENGLERT A H, MASLIYAH J H, et al. Determination of anisotropic surface characteristics of different phyllosilicates by direct force measurements[J]. *Langmuir*, 2011, 27(21): 12996-13007.
- [13] NDLOVU B, BECKER M, FORBES E, et al. The influence of phyllosilicate mineralogy on the rheology of mineral slurries[J]. *Minerals Engineering*, 2011, 24(12): 1314-1322.
- [14] 孙伟, 胡岳华. 钨矿回收工艺研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2000(1): 42-46.
SUN W, HU Y H. The status about research of wolfram-mineral-recovery-technology[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2000(1): 42-46.
- [15] 李小康, 张英, 管侦皓等. 白钨矿浮选药剂研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2022, 42(2): 14-24.
LI X K, ZHANG Y, GUAN Z H, et al. Research progress of scheelite flotation reagents[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2022, 42(2): 14-24.
- [16] 龙涛, 陈伟. 调浆过程能量输入对微细粒白钨浮选矿浆流变特性的影响研究[J]. *矿冶工程*, 2019, 39(5): 49-52+55.
LONG T, CHEN W. Effect of energy input in pulp-conditioning process on rheological properties of fine scheelite flotation pulp[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2019, 39(5): 49-52+55.
- [17] CHEN W, CHEN F F, BU X Z, et al. A significant improvement of fine scheelite flotation through rheological control of flotation pulp by using garnet[J]. *Minerals Engineering*, 2019, 138(C): 257-266.
- [18] 张福亚, 张跃军. 矿浆浓度对流变性的影响[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2017(Z1): 118-112.
ZHANG F Y, ZHANG Y J. Effect of pulp concentration on rheology[J]. *Nonferrous Metals(Mineral Processing Section)*, 2017(Z1): 118-112.
- [19] LUCKHAM P F, ROSSI S. The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 1999, 82(13): 43-92.
- [20] YANG D, XIE L, BOBICKI E, et al. Probing anisotropic surface properties and interaction forces of chrysotile rods by atomic force microscopy and rheology[J]. *Langmuir*, 2014, 30(36): 10809-10817.
- [21] YAN L, MASLIYAH J H, XU Z. Understanding suspension rheology of anisotropically-charged platy minerals from direct interaction force measurement using AFM[J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2013, 18(2): 149-156.
- [22] 许灿辉. 矿物浮选气泡速度和尺寸分布特征提取方法与应用[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
XU C H. Bubble velocity measurement and size distribution estimation for mineral flotation process[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [23] 任飞. 内蒙电气石特性、加工及利用研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2005.
REN F. Studies on characteristics, processing and utilization of Inner Mongolian tourmaline[D]. Shenyang: Northeastern University, 2005.
- [24] 杨飞, 周晓彤. 难免金属离子对白钨矿浮选的影响[J]. *材料研究与应用*, 2017, 11(03): 192-196.
YANG F, ZHOU X T. Study on the influence of metal ions on flotability of scheelite[J]. *Materials Research and Application*, 2017, 11(03): 192-196.
- [25] 任飞, 韩跃新, 印万忠, 等. 油酸钠浮选电气石的溶液化学分析[J]. *有色矿冶*, 2005(S1): 158-159.

- REN F, HAN Y X, YIN W Z. Solution chemical analysis of sodium oleate flotation on tourmaline[J]. *Non-Ferrous Mining and Metallurgy*, 2005(S1): 158-159.
- [26] 许豪杰. 白钨矿和磷灰石的浮选分离及其机理研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- XU H J. Research on flotation separation of scheelite and apatite and its mechanism[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [27] ZHONG C H, WANG H H, FENG B, et al. Flotation separation of scheelite and apatite by polysaccharide depressant xanthan gum[J]. *Minerals Engineering*, 2021, 170: 107045.
- [28] 郭贞强, 张芹, 朱应贤, 等. 油酸钠体系下浮选泡沫稳定性研究[J]. *矿产保护与利用*, 2019, 39(4): 131-134, 139.
- GUO Z Q, ZHANG Q, ZHU Y X. Study on the stability of flotation foam in sodium oleate system[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2019, 39(4): 131-134, 139.
- [29] 冯其明, 穆泉, 张国范. 浮选生产过程中的泡沫及消泡技术[J]. *矿产保护与利用*, 2005(4): 31-35.
- FENG Q M, MU X, ZHANG G F. Foaming and defoaming technology in flotation processes[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2005(4): 31-35.
- [30] 付亚峰, 印万忠, 姚金, 等. 绿泥石颗粒效应对泡沫稳定性的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(8): 1857-1862.
- FU Y F, YIN W Z, YAO J, et al. Study on stability of flotation foam influenced by particle effect of chlorite[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2018, 49(8): 1857-1862.

Effect of Muscovite, Tourmaline and Apatite on Slurry Rheological Property of Scheelite Flotation

XUE Jiwei^{1,2}, QU Yaoben¹, ZHANG Chonghui¹, TU Huazhen¹, SUN Jian¹, BU Xianzhong¹

1. School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Mineral Processing, Beijing 100260, China

Abstract: The effects of three commonly associated gangue minerals, such as Muscovite, tourmaline and apatite, on the slurry rheological properties and scheelite flotation indexes of scheelite were studied by slurry rheological test, flotation test of artificial mixed ore and foam stability measurement. Rheological test showed that muscovite in the pulp would form a three-dimensional network structure of edge-face(EF) and edge-edge(EE) combination, which had a large apparent viscosity, while tourmaline and apatite in the pulp was only a simple pile structure, the viscosity was slightly increased. Flotation test and foam stability measurement showed that: In the artificial mixed flotation system of scheelite-muscovite-quartz, with the increase of mass concentration of muscovite, its higher viscosity would increase the half-life and maximum height of the flotation foam, so that the "secondary enrichment" effect was obviously improved, and the flotation index became better within a certain range. However, the higher pulp viscosity would inhibit the collision between bubbles and particles and the fluidity of bubble-particle aggregates, which led to the deterioration of flotation index. In the artificial mixed flotation system of scheelite-tourmaline-quartz, with the increase of metal cations such as Fe³⁺, Mg²⁺ and Ca²⁺ dissolved from tourmaline in water, the flotation of scheelite was inhibited, and the concentrate grade and recovery were reduced. In the artificial mixed flotation system of scheelite-apatite-quartz, adsorption of PO₄³⁻ dissolved from apatite on scheelite surface would lead to surface conversion of minerals, which resulted in similar surface properties of scheelite and apatite, which would worsen the flotation of scheelite. In addition, the addition of tourmaline and apatite had little effect on the stability of foam due to the slow increase of viscosity. The research can provide theoretical basis for the control of slurry rheology and the efficient separation of scheelite and gangue minerals in the process of ore flotation.

Keywords: scheelite; slurry rheology; foam stability; flotation; muscovite; tourmaline; apatite

引用格式: 薛季玮, 屈壹森, 张崇辉, 涂华臻, 孙健, 卜显忠. 白云母、电气石、磷灰石对白钨矿浮选过程中矿浆流变性的影响[J]. *矿产保护与利用*, 2023, 43(1): 24-31.

XUE Jiwei, QU Yaoben, ZHANG Chonghui, TU Huazhen, SUN Jian, BU Xianzhong. Effect of muscovite, tourmaline and apatite on slurry rheological property of scheelite flotation[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2023, 43(1): 24-31.