

绿泥石颗粒效应对泡沫稳定性的影响

付亚峰, 印万忠, 姚金, 杨斌

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳, 110819)

摘要: 利用改进的 Hallimond 管, 以甲基异丁基甲醇(MIBC)为起泡剂, 研究起泡剂质量浓度、绿泥石质量分数以及粒度对泡沫稳定性的影响; 基于 Plateau 泡沫结构理论分析矿浆性质对泡沫稳定性的影响, 研究泡沫稳定性对绿泥石夹带行为的影响。研究表明: 随着 MIBC 质量浓度增加, 液体表面张力降低, 导致气泡间 Plateau 通道内排液速率降低, 泡沫稳定性增强; 绿泥石质量分数越大, 颗粒粒度越小, 则矿浆黏度越大, 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。

关键词: 绿泥石; 颗粒效应; 泡沫稳定性; 浮选; 夹带行为

中图分类号: TD923

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2018)08-1857-06

Study on stability of flotation foam influenced by particle effect of chlorite

FU Yafeng, YIN Wanzhong, YAO Jin, YANG Bin

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The effects of foaming agent mass concentration, chlorite mass fraction and particle size on stability of flotation foam were studied by using an improved Hallimond tube, with methyl isobutyl carbinol (MIBC) as the foaming agent. Based on the theory of Plateau foam structure, influence of pulp properties on foam stability was analyzed, and effect of foam stability on entrainment rate of chlorite flotation was studied. The results show that with the increase of MIBC mass concentration, the surface tension of the liquid decreases, which leads to the decrease of foam drainage velocity and increase of foam stability. The larger the mass fraction of chlorites, the finer the particle size is, which leads to greater pulp viscosity, higher height of flotation foam layer and longer half-life of the foam, resulting in more serious non-selective entrainment of the foam.

Key words: chlorite; particle effect; foam stability; flotation; entrainment behavior

浮选是利用不同矿物颗粒表面物理化学性质的差异, 将目的矿物选择性黏附于气泡表面, 进而使之与脉石矿物分离的选矿方法。在该工艺中, 气泡既是矿物与捕收剂作用后的选择性吸附界面, 也是携带疏水性矿物颗粒上浮并最终聚集成矿化泡沫层的载体, 因此, 泡沫的稳定程度对浮选精矿指标有重要影响。目前, 人们针对浮选过程中泡沫稳定性的研究主要集中在液相性质对泡沫稳定性的影响, 如溶液表面张

力^[1-6]、液相黏度^[7-8]、浮选溶液的化学环境^[9-11]及液相温度、气压、pH^[12-13]等, 而有关矿物的颗粒效应(即液相中微细粒固体颗粒物的存在对液相物化性质的改变)对泡沫稳定性的影响研究较少。鉴于此, 本文作者以 MIBC(甲基异丁基甲醇)为起泡剂, 探索易泥化矿物绿泥石在浮选过程中的颗粒效应对浮选泡沫稳定性的影响, 并研究泡沫稳定性对绿泥石无选择性夹带行为的影响规律; 基于 Plateau 泡沫结构理论分析矿浆性质

收稿日期: 2017-08-09; 修回日期: 2017-09-28

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(51504053)(Project(51504053) supported by the National Natural Foundation of China)

通信作者: 杨斌, 博士研究生, 从事微细粒矿物的高效分选技术研究; E-mail: 1985934119@qq.com

对泡沫稳定性的影响机理,为浮选过程中泡沫的稳定性调控提供参考依据。

1 试验

1.1 试验样品及试剂

试验所用绿泥石取自辽宁鞍山地区。矿石经人工砸碎,手选高纯度、高结晶度的矿块,通过陶瓷球磨机磨碎并筛分。经化学多元素分析并结合 X 线衍射(XRD)检测发现,绿泥石单矿物纯度达到 90%以上,符合单矿物浮选试验要求。将磨矿样品经标准筛湿筛制得[45, 74) μm , [25, 45) μm 和小于 25 μm 这 3 个粒级,取其中小于 25 μm 粒级产品进行水析制得[10, 25) μm 和小于 10 μm 这 2 个粒级产品。

1.2 泡沫稳定性测试方法

浮选过程中泡沫稳定性测试装置如图 1 所示。由图 1 可知:测试装置主要由空气压缩机、气体流量计、改进的 Hallimond 管及铁架台组成。

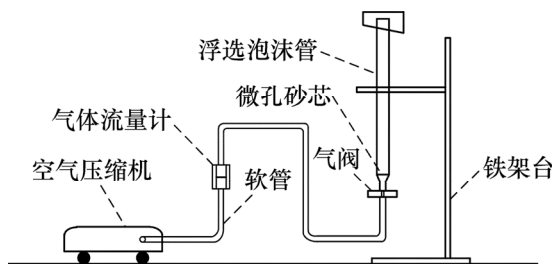


图 1 泡沫稳定性测试装置

Fig. 1 Equipment for testing foam stability

泡沫稳定性测试选用高度为 73 cm 的 Hallimond 管,内径为 3 cm,微孔砂芯孔径为 40~50 μm ,试验温度为室温。每次称取 2 g 绿泥石矿样,加入 80 mL 去离子水,使用磁力搅拌器调浆 2 min,再加入起泡剂 MIBC 调浆 2 min,之后将矿浆迅速移入泡沫管内开始充气,固定充气流量为 0.4 L/min。观测管内泡沫高度,当泡沫达到平衡时,记录泡沫最大高度 H_{max} (表征起泡能力);待泡沫高度稳定后停止充气,并记录泡沫高度衰减一半所需要的时间,即为泡沫半衰期 t 。每个条件下测量 5 次,取平均值作为试验结果。

采用 JK99C 型全自动表面张力仪利用吊环法测量不同质量浓度 MIBC 溶液的表面张力;采用旋转黏度计测量矿浆黏度,测量转速设定为 200 r/min。

1.3 泡沫夹带率试验

采用图 1 中装置进行泡沫夹带率试验,其中

Hallimond 管长度为 8 cm,内径为 3 cm,微孔砂芯孔径为 40~50 μm ,充气流量仍固定为 0.4 L/min,浮选完成后将所得泡沫产品与管内产品分别低温烘干并称质量,最后计算矿物回收率及夹带率。

泡沫夹带率计算方法如下:1) 称取装有去离子水的洗瓶质量 m_1 ,再称取 2 g 矿样。2) 将矿样放入 50 mL 烧杯内,加入约 45 mL 去离子水,再加入起泡剂 MIBC(MIBC 质量浓度为 50 mg/L),经磁力搅拌器搅拌 2 min,使矿样分散均匀后迅速将其移入泡沫管内,添加去离子水定容至 50 mL。3) 开始充气浮选。用已称取质量 m_3 的玻璃皿接取泡沫产品,每隔 10 s 补水 1 次使矿浆液面保持恒定,浮选 3 min。4) 浮选完成后的洗瓶质量记为 m_2 ,接取泡沫产品的玻璃皿质量记为 m_4 ,将泡沫产品烘干后的玻璃皿质量记为 m_5 。浮选过程中的泡沫水回收率 R_w 、矿物回收率 R_s 及泡沫夹带率 e_g 可分别通过下列方程式计算:

$$R_w = \frac{m_4 - m_5}{m_1 - m_2} \quad (1)$$

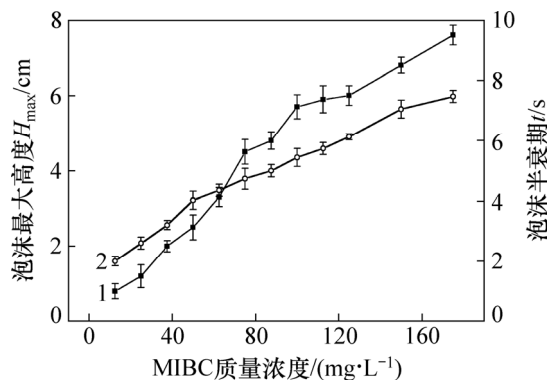
$$R_s = \frac{m_5 - m_3}{2} \quad (2)$$

$$e_g = \frac{R_s}{R_w} \quad (3)$$

2 结果与讨论

2.1 起泡剂质量浓度对泡沫稳定性的影响

试验以 MIBC 为起泡剂,在改进的 Hallimond 管中测量泡沫最大高度 H_{max} 和泡沫半衰期 t 随起泡剂质量浓度变化关系。MIBC 质量浓度对泡沫稳定性的影响如图 2 所示。从图 2 可以看出:随着起泡剂质量浓度增大,溶液中泡沫量显著增加,泡沫最大高度逐渐增大;矿浆中起泡剂质量浓度对泡沫半衰期影响较大,



1—泡沫最大高度;2—泡沫半衰期。

图 2 MIBC 质量浓度对泡沫稳定性的影响

Fig. 2 Effects of MIBC mass concentrations on foam stability

随着 MIBC 质量浓度增加, 矿浆体系中泡沫半衰期亦逐渐增加。在 MIBC 质量浓度从 12.5 mg/L 增加到 175 mg/L 的过程中, 泡沫最大高度从 0.8 cm 增加到 7.6 cm, 泡沫半衰期从 2.01 s 增加到 7.47 s。

2.2 绿泥石颗粒粒度对泡沫稳定性的影响

为了考察绿泥石粒度对泡沫稳定性的影响, 进行不同粒度绿泥石的影响试验。每次矿样添加质量固定为 2 g, MIBC 质量浓度为 50 mg/L, 试验结果如图 3 所示。

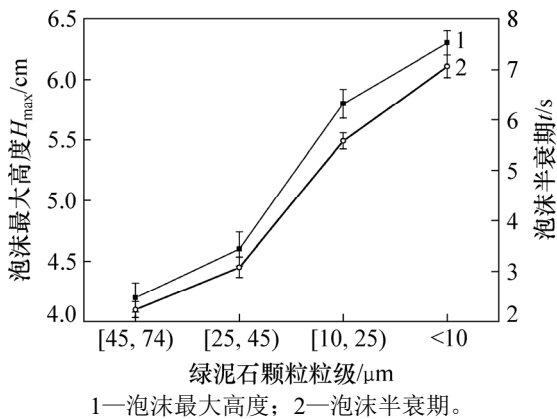


图 3 绿泥石粒度对泡沫稳定性的影响

Fig. 3 Effects of particle sizes of chlorite on foam stability

从图 3 可以看出: 在固定绿泥石质量分数及起泡剂质量浓度的条件下, 绿泥石粒度对泡沫稳定性影响较大; 随着绿泥石粒度降低, 泡沫最大高度及泡沫半衰期均显著增加。当绿泥石粒度从 [45, 74) μm 减小到 10 μm 以下时, 泡沫最大高度从 4.2 cm 增加到 6.3 cm, 泡沫半衰期从 2.24 s 增加到 7.06 s。

2.3 绿泥石质量分数对泡沫稳定性的影响

为了研究绿泥石质量分数对泡沫稳定性的影响, 选取粒径小于 10 μm 的绿泥石进行试验, 其中 MIBC 质量浓度为 50 mg/L, 试验结果如图 4 所示。

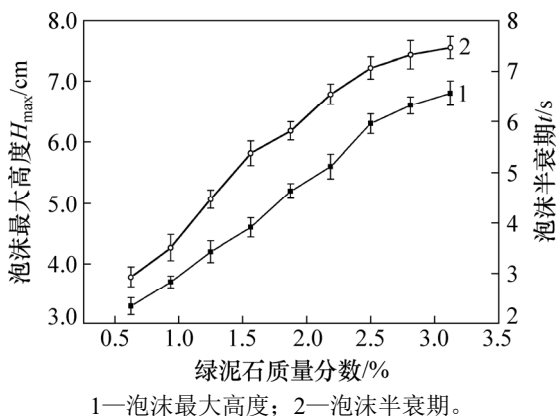


图 4 绿泥石质量分数对泡沫稳定性的影响

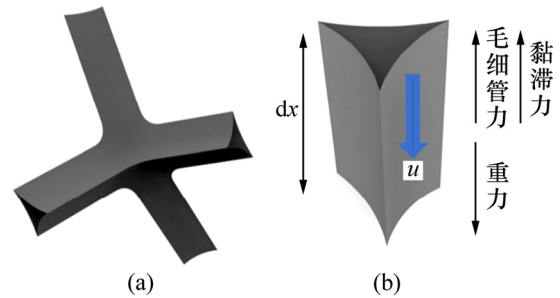
Fig. 4 Effects of chlorite mass fractions on foam stability

由图 4 可知: 绿泥石质量分数对泡沫稳定性影响较大。随着绿泥石质量分数增加, 泡沫稳定性越来越强。当矿浆质量分数由 0.625% 增加到 3.125% 时, 泡沫最大高度由 3.3 cm 增加到 6.8 cm, 泡沫半衰期由 2.94 s 增加到 7.46 s。

3 机理分析

3.1 液体表面张力对泡沫稳定性的影响

针对泡沫稳定存在时的气泡结构模型, 比利时物理学家 Plateau 从几何拓扑的角度, 阐明了泡沫结构的平衡条件, 提出了 Plateau 泡沫结构平衡法则, 其结构要素包括液膜、Plateau 边界和节点。泡沫物理学研究表明^[14], 液膜中含水量极少, 泡沫中绝大部分液体赋存于 Plateau 边界和节点处。Plateau 边界流体微元受力示意图如图 5 所示(其中, x 为 Plateau 边界流体微元长度)。



(a) Plateau 边界; (b) 流体微元受力图

图 5 Plateau 边界流体微元受力示意图

Fig. 5 Diagram of Plateau boundary fluid element under stress

图 5 中流体微元所受到的作用力如下。

1) 重力:

$$G = \rho g \tag{4}$$

式中: G 为流体微元重力; ρ 为矿浆密度; g 为重力加速度。

2) 毛细管力:

$$F_c = \frac{\partial P_L}{\partial x} \tag{5}$$

式中: F_c 为毛细管力; P_L 为通道内的液体压力。

3) 矿浆黏滞力:

$$F_v = -f\mu u / A \tag{6}$$

式中: μ 为矿浆粘度; u 为流体微元的平均速度; A 为 Plateau 通道的横截面积; f 为与 Plateau 边界形状有关的参数。由 Laplace 方程^[15]可知:

$$P_L = P_g + \frac{2\gamma}{r_p} \tag{7}$$

式中： P_g 为气泡内的压力； γ 为液体表面张力； r_p 为 Plateau 边界的曲率半径。Plateau 通道横截面示意图如图 6 所示。假设曲率半径 r_p 和 Plateau 通道横截面的外接三角形边长相等，通过计算可得到 Plateau 通道横截面积为

$$A = \left(\sqrt{3} - \frac{\pi}{2}\right)r_p^2 \quad (8)$$

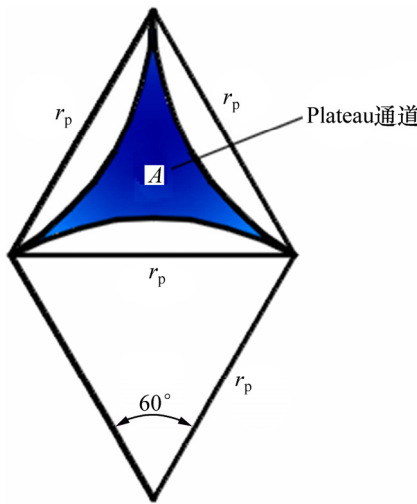


图 6 Plateau 通道横截面示意图

Fig. 6 Schematic diagram of cross section of Plateau boundary

将式(7)和(8)代入式(5)，可以得到毛细管力 F_c 计算公式为

$$F_c = \frac{0.4015\gamma}{A\sqrt{A}} \frac{\partial A}{\partial x} \quad (9)$$

当泡沫稳定存在时，流体微元受力近似平衡，此时 3 种作用力存在如下关系：

$$G + F_c + F_v = \rho g + \frac{0.4015\gamma}{A\sqrt{A}} \frac{\partial A}{\partial x} - \frac{f\mu u}{A} = 0 \quad (10)$$

因此，可以得到 Plateau 边界内流体微元的平均流速计算式如下：

$$u = \frac{1}{f\mu} \left(\rho g A + \frac{0.4015\gamma}{\sqrt{A}} \frac{\partial A}{\partial x} \right) \quad (11)$$

依据上述流体微元的平均流速表达式可以分析泡沫排液过程的快慢程度，从而得知泡沫的稳定程度。由式(11)可知：液体表面张力 γ 越小，流体微元平均流动速度 u 越小，表明泡沫 Plateau 通道内排液速度越缓慢，因此，泡沫层越稳定；矿浆黏度 μ 越大，流体微元平均流速 u 越小，此时泡沫排液速度越缓慢，泡沫稳定性越强。

在此基础上，测量不同 MIBC 起泡剂质量浓度下溶液的表面张力，结果如图 7 所示。由图 7 可知：随着 MIBC 质量浓度增加，液体表面张力逐渐降低，依

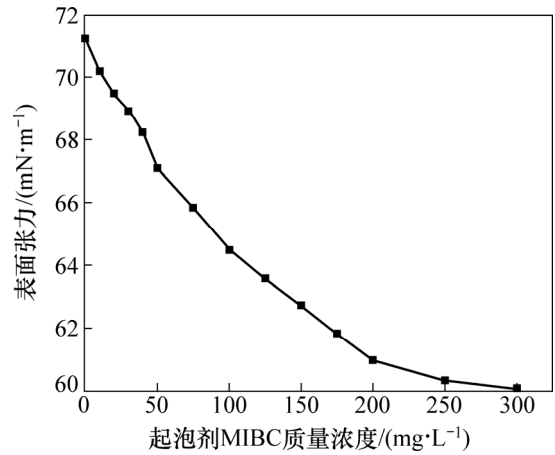


图 7 MIBC 质量浓度对表面张力的影响

Fig. 7 Effects of MIBC mass concentrations on surface tension

据流体微元平均流速公式可知，此时流体微元平均流速降低，泡沫排液速度趋缓，从而泡沫最大高度和泡沫半衰期增加，泡沫稳定性增强。但当 MIBC 质量浓度超过 250 mg/L 后，液体表面张力基本保持稳定。

3.2 矿浆黏度及绿泥石粒度对泡沫稳定性的影响

为了进一步研究绿泥石的颗粒效应对泡沫稳定性的影响，通过试验分析在相同质量分数(绿泥石质量分数为 2%)下绿泥石粒度对矿浆黏度的影响，并研究细粒绿泥石(粒径小于 10 μm)质量分数对矿浆黏度的影响，测试结果分别如图 8 和图 9 所示。

由图 8 可知：绿泥石粒度对矿浆黏度影响较大。在相同矿浆质量分数下，绿泥石粒度越细，矿浆黏度越大。当绿泥石粒径为[45, 74) μm 时，矿浆黏度为 2.23 mPa·s；当绿泥石粒径小于 10 μm 时，矿浆黏度增至 5.85 mPa·s。从图 9 可以看出：绿泥石质量分数对矿浆黏度也有较大影响。绿泥石质量分数越大，矿

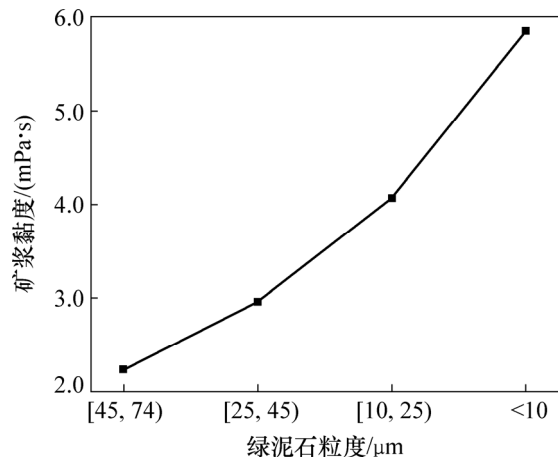


图 8 绿泥石粒度对矿浆黏度的影响

Fig. 8 Effect of chlorite granularity on viscosity of slurry

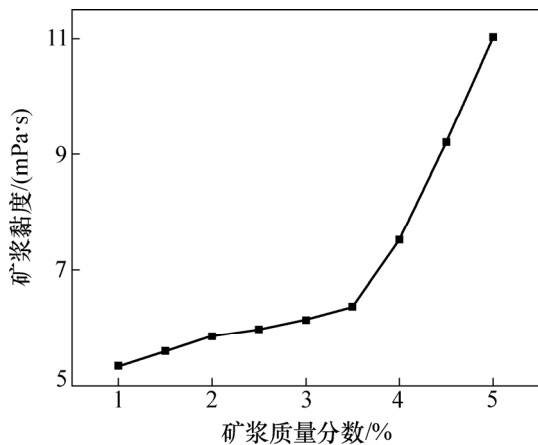


图 9 绿泥石质量分数对矿浆黏度的影响

Fig. 9 Effects of chlorite mass fractions on viscosity of slurry

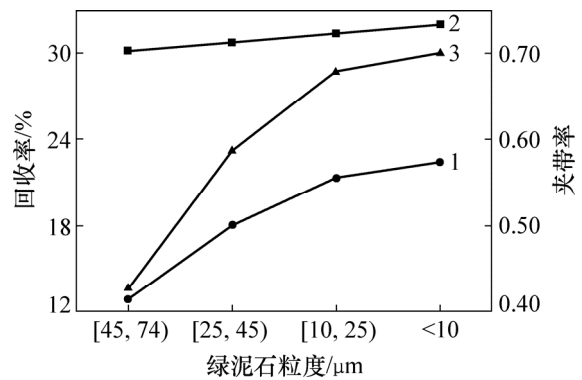
浆分数越高, 则矿浆黏度越大。当绿泥石质量分数从 1.0% 增加到 3.5% 时, 矿浆黏度增加较缓慢; 当绿泥石质量分数从 3.5% 增加到 5% 时, 矿浆黏度急剧增加, 从 6.37 mPa·s 增大到 11.03 mPa·s。

结合 Plateau 边界中流体微元平均流速公式可知, 流体微元平均流速与矿浆黏度呈反比例关系, 因此, 当绿泥石颗粒粒度变细时, 矿浆黏度增大, Plateau 通道中流体微元平均流速变缓, 泡沫稳定性增加(见图 3); 而当绿泥石质量分数增加(见图 4), 矿浆黏度增大, 因此, 泡沫稳定性亦增强。

3.3 绿泥石粒度对夹带行为的影响

浮选过程中的夹带现象是指一些层状结构硅酸盐矿物由于颗粒硬度小, 在磨矿过程中极易发生过磨而出现泥化, 由于其颗粒粒度小、比表面积大、表面能高等性质, 在浮选过程中易被气泡之间水相的无选择性夹带进入泡沫层而成为精矿产品, 降低精矿质量^[16]。浮选过程中泥化矿物的泡沫夹带现象显著, 它不依赖于气泡与颗粒之间的矿化过程, 但却始终存在于浮选过程中, 进而影响最终的分选指标。为了进一步研究颗粒粒度对泡沫夹带行为的影响, 进行绿泥石粒度对其回收率及夹带率的影响试验, 试验中固定起泡剂 MIBC 质量浓度为 50 mg/L, 绿泥石添加量为 2 g, 试验结果如图 10 所示。

由图 10 可知: 绿泥石粒度对矿物回收率及夹带率均有影响。随着颗粒粒度减小, 绿泥石回收率逐渐增大, 从 [45, 74) μm 粒级时的 12.91% 增加到小于 10 μm 粒级时的 22.43%; 而水回收率略有上升, 仅从 30.15% 增加到 32%; 泡沫夹带率增加显著, 从 [45, 74) μm 粒级时的夹带率 0.428 增大到小于 10 μm 粒级时的夹



1—绿泥石回收率; 2—水回收率; 3—夹带率。

图 10 绿泥石粒度对浮选回收率及夹带率的影响

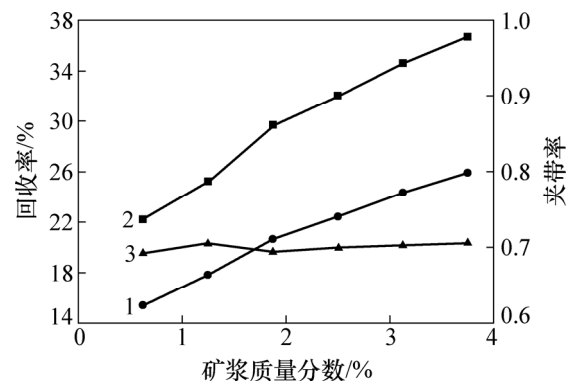
Fig. 10 Effects of chlorite particle sizes on the recovery rate and entrainment rate of flotation

带率 0.699, 增幅近 63.32%。结合图 3 及图 8 试验结果可知: 当矿浆浓度相同时, 绿泥石颗粒粒度越细, 矿浆黏度越大, 从而导致泡沫 Plateau 通道内排液速度变慢, 泡沫最大高度及泡沫半衰期增大, 泡沫稳定性增强, 致使被气泡无选择性夹带成为泡沫产品的绿泥石上浮量增加, 夹带率增大。

3.4 矿浆质量分数对夹带行为的影响

由于矿浆质量分数对泡沫稳定性有显著影响, 为了进一步研究矿浆质量分数对绿泥石夹带行为的影响, 进行绿泥石质量分数对其回收率及夹带率的影响试验, 试验中固定 MIBC 质量浓度为 50 mg/L, 绿泥石粒径小于 10 μm 粒级, 试验结果如图 11 所示。

由图 11 可知: 绿泥石质量分数对矿物回收率有较大影响, 但夹带率却基本稳定。随着矿浆质量分数增大, 绿泥石回收率及水回收率均显著增加, 当矿浆质量分数从 0.63% 增大到 3.75% 时, 绿泥石回收率从



1—绿泥石回收率; 2—水回收率; 3—夹带率。

图 11 矿浆质量分数对浮选回收率及夹带率的影响

Fig. 11 Effects of pulp mass fractions on recovery rate and entrainment rate

15.41%增加到 25.91%，水回收率从 22.23%增大到 36.68%，而夹带率则稳定在 0.7 左右。结合图 4 及图 9 可知：随着绿泥石质量分数增加，矿浆黏度增大，泡沫排液速度变缓，泡沫稳定性增加，因而绿泥石回收率及水回收率均增加。但由于二者增加幅度基本相同，故夹带率基本保持稳定。

4 结论

1) 液体表面张力越小，矿浆黏度越大，流体微元的平均流速就越小，泡沫排液越缓慢，泡沫越稳定。

2) 绿泥石的颗粒效应对泡沫稳定性有较大影响；颗粒粒度越小，矿浆质量分数越大，则矿浆黏度越大，Plateau 通道内排液越缓慢，泡沫稳定性越强。

3) 绿泥石颗粒粒度越细，矿浆质量分数越大，泡沫稳定性越强，因此，泡沫无选择性夹带行为越显著，绿泥石回收率及水回收率均增大，但矿浆质量分数对绿泥石夹带率影响不大。

参考文献：

- [1] GUPTA A K, BANERJEE P K, MISHRA A, et al. Effect of alcohol and polyglycol ether frothers on foam stability, bubble size and coal flotation[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2007, 82(3): 126–137.
- [2] HERNANDEZ-AGUILAR J R, CUNNINGHAM R, FINCH J A. A test of the Tate equation to predict bubble size at an orifice in the presence of frother[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2006, 79(2): 89–97.
- [3] ZHOU Z A, E GIEBOR N O, PLITT L R. Frother effects on bubble size estimation in a flotation column[J]. *Minerals Engineering*, 1993, 6(1): 55–67.
- [4] FINCH J A, NESSET J E, ACUÑA C. Role of frother on bubble production and behaviour in flotation[J]. *Minerals Engineering*, 2008, 21(12/13/14): 949–957.
- [5] KRACHT W, FINCH J A. Effect of frother on initial bubble shape and velocity[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2010, 94(3/4): 115–120.
- [6] WIESE J G, HARRIS P J, BRADSHAW D J. The effect of increased frother dosage on froth stability at high depressant dosages[J]. *Minerals Engineering*, 2010, 23(11/12/13): 1010–1017.
- [7] 曲彦平, 杜鹤桂. 表面粘度对泡沫稳定性的影响[J]. *沈阳工业大学学报*, 2002, 24(4): 283–286.
QU Yanping, DU Hegui. Effect of surface viscosity on foam stability[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2002, 24(4): 283–286.
- [8] SCHRAMM L L, KUTAY S M, MIKULA R J, et al. The morphology of non-equilibrium foam and gelled foam lamellae in porous media[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 1999, 23(2): 117–132.
- [9] BOURNIVAL G, PUGH R J, ATA S. Examination of NaCl and MIBC as bubble coalescence inhibitor in relation to froth flotation[J]. *Minerals Engineering*, 2012, 25(1): 47–53.
- [10] OZDEMIR O, KARAKASHEV S I, NGUYEN A V, et al. Adsorption and surface tension analysis of concentrated alkali halide brine solutions[J]. *Minerals Engineering*, 2009, 22(3): 263–271.
- [11] OZDEMIR O, TARAN E, HAMPTON M A, et al. Surface chemistry aspects of coal flotation in bore water[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2009, 92(3/4): 177–183.
- [12] 秦波涛, 王德明. 三相泡沫的稳定性及温度的影响[J]. *金属矿山*, 2006, 358(4): 62–65.
QIN Botao, WANG Deming. Stability of three-foam and effect of temperature[J]. *Metal Mine*, 2006, 358(4): 62–65.
- [13] ÖZDEMIR G, PEKER S, HELVACI S S. Effect of pH on the surface and interfacial behavior of rhamnolipids R1 and R2[J]. *Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects*, 2004, 234(1/2/3): 135–143.
- [14] WEAIRE D L, HUTZLER S. *The physics of foams*[M]. Oxford, UK: Oxford University Press, 1999: 311–324.
- [15] 颜肖慈. 罗明道 界面化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 121–135.
YAN Xiaoci, LUO Mingdao. *Interface chemistry*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 121–135.
- [16] WANG Lei, PENG Yongjun, RUNGE K, et al. A review of entrainment: mechanisms, contributing factors and modelling in flotation[J]. *Minerals Engineering*, 2015, 70(3): 77–91.

(编辑 伍锦花)