



起泡剂 MIBC 和 BK-201 的浮选泡沫特性

曾培, 欧乐明, 冯其明, 李洪强, 张福亚

(中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083)

摘要: 选用非极性基结构不同的起泡剂 MIBC 和 BK-201, 利用自制的泡沫性能测试系统, 在两相泡沫体系下, 测定两相泡沫不同高度处的气泡直径、静压强、表观溢流速度, 研究起泡剂对泡沫特征及夹带的影响。结果表明: 增加起泡剂浓度, 气泡的兼并行为受到抑制, 气泡直径逐渐减小; 当 MIBC 浓度超过 75 mg/L、BK-201 浓度超过 150 mg/L 时, 兼并行为受到显著抑制, 气泡直径基本保持不变。在相同的浓度下, 相比 MIBC, BK-201 产生的泡沫气泡直径大、含液率低、水回收率低。因而, 微细粒脉石在 BK-201 所形成泡沫中夹带更弱, 浮选选择性更好。

关键词: 起泡剂; 泡沫柱; 两相泡沫; 泡沫特征; 泡沫夹带

中图分类号: TD923

文献标志码: A

Froth characteristic of MIBC and BK-201 frothers

ZENG Pei, OU Le-ming, FENG Qi-ming, LI Hong-qiang, ZHANG Fu-ya

(School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: By using self-designed foam property testing system, two nonpolar base structure frothers, MIBC and BK-201 were chosen to study the influences of frothers on the foam characteristic and entrainment by measuring the bubble diameter, static pressure and apparent flooding velocity in the two-phase foam. The results show that bubble merger degree reduces and air bubble diameter decreases with increasing frothers concentration. When the concentrations of MIBC and BK-201 are more than 75 and 150 mg/L, respectively, the air bubble diameter basically remains unchanged because the merger behavior is dramatically depressed. Under the same concentration, BK-201 generates larger diameter bubble, lower liquid holdup and lower water recovery compared with MIBC. As a result, the foam entrainment of fine gangue is weaker and the selectivity of flotation is better when BK-201 is used.

Key words: frother; froth column; two-phase foam; froth characteristic; froth entrainment

在微细粒矿物浮选过程中, 亲水的脉石矿物机械夹带进入精矿中, 导致精矿品位降低, 成为微细粒矿物浮选过程中的一大难题^[1-2]。机械夹带常分为以下几种方式: 矿泥罩盖、颗粒连生、泡沫夹带以及夹杂^[3]。其中, 泡沫夹带指的是亲水的脉石矿物随浮选精矿泡沫中气泡平台区及液膜间的水上浮进入精矿槽。实际矿物浮选中, 普遍存在泡沫夹带现象。在隐晶质石墨矿浮选中, 脉石矿物的泡沫夹带大幅降低浮选的选择性^[4], 在 Au-Cu 硫化矿^[5]、微细粒闪锌矿^[6]、碱金属矿

石^[7]的浮选中, 脉石矿物的泡沫夹带同样显著降低精矿的品位。

大量研究表明, 亲水脉石的泡沫夹带量与泡沫精矿中水的回收率呈线性关系^[8]。LIVSHITS 等^[9]和 JOWETT^[10]是最早研究泡沫夹带的学者, 结果表明脉石泡沫夹带回收率与精矿水回收率呈正比例关系, 所以泡沫水回收率直接影响夹带程度。MELO 等^[11]认为脉石矿物的无选择性机械夹带与精矿中水的回收率密切相关。GÜLER 等^[12]通过研究天青石矿的浮选及夹

带行为发现, 增加捕收剂用量、缩短浮选时间可以减小夹带作用, 提高浮选选择性。卢毅屏等^[13]研究表明, 矿物颗粒越细, 矿浆浓度越大, 泡沫水量越多, 脉石的夹带越严重。

泡沫特性对脉石矿物的泡沫夹带影响显著^[14]。泡沫特性包括气泡大小、泡沫含液率和泡沫均一性等。试验表明, 影响泡沫特性的因素很多, 包括起泡剂的种类及用量, 颗粒尺寸及形状, 捕收剂种类及用量等^[15]。脉石回收率与泡沫特征的一般原则如下: 泡沫中水含量越高, 脉石夹带越严重。

目前, 对泡沫夹带的研究工作已取得一定成果, 但对于浮选过程中泡沫的微观结构及其特性对夹带行为的影响还缺乏细致研究。因此, 本文作者利用泡沫性能测试系统(泡沫柱), 测定了气泡的直径、泡沫的静压强、泡沫柱表观溢流速度, 通过多项式拟合确定压强与高度的关系表达式, 计算出不同高度层泡沫的含液率。研究两相体系下不同非极性基结构的醇类起泡剂的泡沫特征, 为实际矿石浮选时控制脉石矿物的泡沫夹带和提高精矿品位提供理论参考。

1 实验

1.1 试验装置

泡沫柱工作系统。将半径为 150 mm 的 2.0 L 搅拌槽通过一个锥型的过渡件与直径为 50 mm 的玻璃柱相连。下部的搅拌槽由有机玻璃制成, 而上部的泡沫柱子由普通石英玻璃制成, 可以防止泡沫牢牢粘在内壁干扰检测。利用氮气作为气源, 氮气通过砂芯进入搅拌槽底部而产生气泡, 通过矿浆循环装置使溢流泡沫重新进入泡沫柱实现循环工作。

1.2 试验方法

1.2.1 表面张力测定

本实验中选取了两种烃链结构的醇类起泡剂。一种为带支链的醇类起泡剂甲基异丁基甲醇, 即 MIBC; 另一种为八碳的高级脂肪醇及有机含氧化合物 BK-201, 脂肪醇含量超过 60%, 其疏水碳链较 MIBC

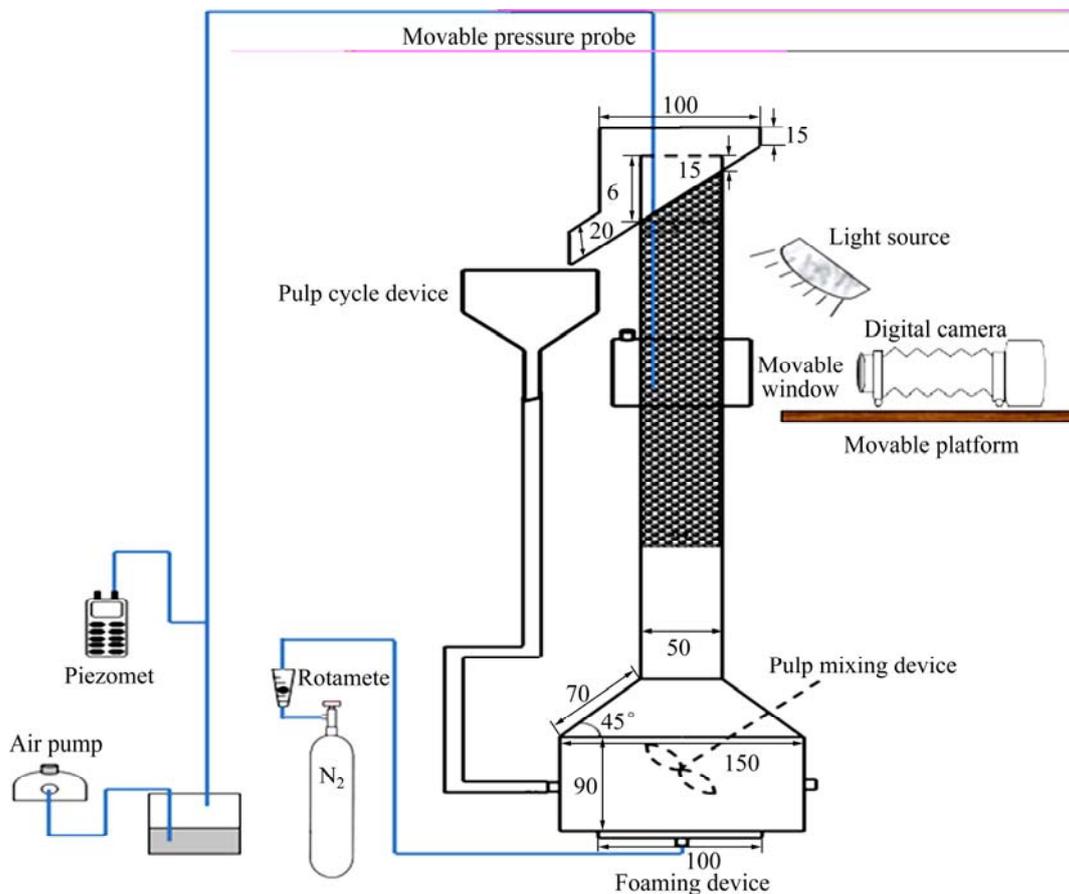


图 1 泡沫性能测试系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laboratory equipment arrangement (Unit: mm)

更长^[16]。当气泡集合在一起形成泡沫,其结构随着时间延长发生演变和变形,并产生排液作用^[17]。

起泡剂溶液表面张力的测定采用法国 GBX 公司生产的 MiniLab ILMS 表面张力综合测试系统。使用 Wilhmy 铂吊片法测定不同起泡剂在不同浓度下的表面张力,每次固定待测溶液体积为 30 mL,于玻璃器皿中配置不同浓度的 MIBC、BK-201 水溶液,重复测量 3 次取平均值。

1.2.2 泡沫性能测试

利用泡沫性能测试系统,测定两相泡沫的静压强、气泡直径、泡沫柱溢流流量,研究 MIBC 和 BK-201 在不同浓度下的泡沫特性,对比两种起泡剂的夹带特性。

静压强测定。将压强探测管伸入某一泡沫层高度处,打开气泵,并调节大小,使气体刚好能平稳地冒出探测管管口,读取压强计示数。依据连通器原理,气管内各处压强相同,从而测定的压强即为此高度处的静压强。

气泡直径的测定。用可上下自由移动的佳能 550D 数码相机拍摄靠近玻璃壁上的气泡,通过专业图像分析软件 Image-Pro Plus Version 6.0 处理气泡照片,测量出气泡的尺寸。

泡沫柱溢流流量。用量筒测量出单位时间内泡沫柱顶部的溢流水体积,即可求得泡沫层顶部的溢流流量。

为便于考察起泡剂的浓度对泡沫特征的影响,试验过程中将泡沫层的厚度固定为 0.29 m,充气量固定在 190 L/h。

1.3 两相泡沫含液率的计算方法

含液率 ε_1 是通过泡沫某处的静压强计算而来,静压强与某处的泡沫含液率计算公式推导如下:对于一个厚度为 Δh 的泡沫层,在高度 h 处受到的压强为 p ,则 $h+\Delta h$ 处受到的压强为 $p-\Delta p$, Δp 源于厚度为 Δh 的泡沫层受重力作用而产生的压强,即

$$\Delta p = -\rho g \Delta h \quad (1)$$

$$dp = -\rho g dh \quad (2)$$

忽略气泡中空气的质量,则

$$\rho = \rho_w \varepsilon_1 \quad (3)$$

式中: ρ 为泡沫层密度; ε_1 为含液率; ρ_w 为水密度。

规定 h 的方向向上为正,则:

$$\varepsilon_1 = -\frac{1}{\rho_w g} \frac{dp}{dh} \quad (4)$$

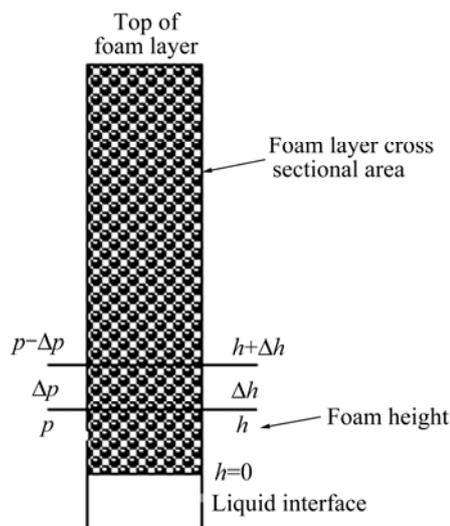


图2 泡沫柱内部泡沫层受力分析

Fig. 2 Force analysis of foam layer in foam column

即某泡沫高度处的含液率可以通过对该处的静压强求导而得出。

2 结果与讨论

2.1 起泡剂对溶液表面张力的影响

测定了 MIBC、BK-201 对溶液表面张力的影响,其结果如图 3 所示。

从图 3 可知, BK-201 的表面活性高于 MIBC 的。根据降低溶液表面张力能力的大小,可以明显地观察到这两种起泡剂性质差异: 1) MIBC 降低溶液表面张力的能力较弱,且随着其浓度的增大,表面张力变化很小; 2) 随着起泡剂 BK-201 浓度的增大,溶液表面张力显著下降。BK-201 中脂肪醇含有较长的支链疏水基团,分子中的粘结力低,更能降低水的表面张力^[18]。

2.2 起泡剂对泡沫特性的影响

2.2.1 起泡剂对气泡直径的影响

起泡剂的浓度对气泡直径有很大的影响。随着 BK-201 和 MIBC 浓度的提高,溶液表面张力降低(见图 3),气泡的液膜强度提高,液相中气泡间的兼并速率降低,从而有效控制了气泡直径的增大^[19]。CHO 等^[20]的研究表明,每种起泡剂存在一个临界兼并浓度 (c_c),当起泡剂的浓度低于 c_c 时,气泡直径随起泡剂浓度的增加而减小;当起泡剂浓度超过 c_c 时,气泡间的兼并将很难发生,继续增加起泡剂浓度,气泡直径保持不变^[21]。图 4 所示为 BK-201 浓度对气泡直径的影响。图 5 所示为 MIBC 浓度对气泡直径的影响。由

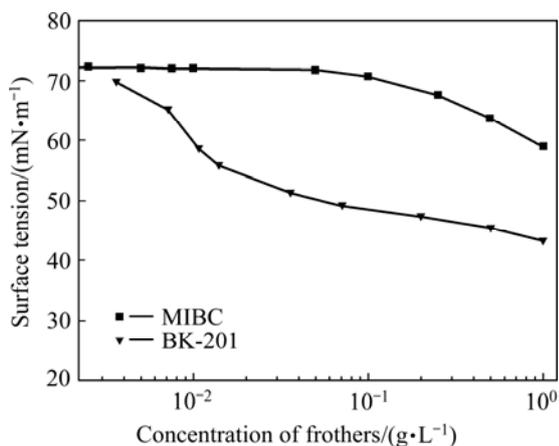


图 3 MIBC 与 BK-201 浓度对溶液表面张力的影响
 Fig. 3 Effect of MIBC and BK-201 concentrations on solution surface tension

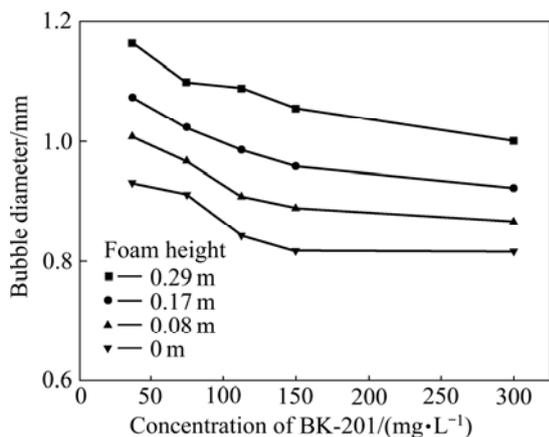


图 4 不同泡沫高度下 BK-201 浓度对气泡直径的影响
 Fig. 4 Effect of BK-201 concentration on bubble diameter under different foam heights

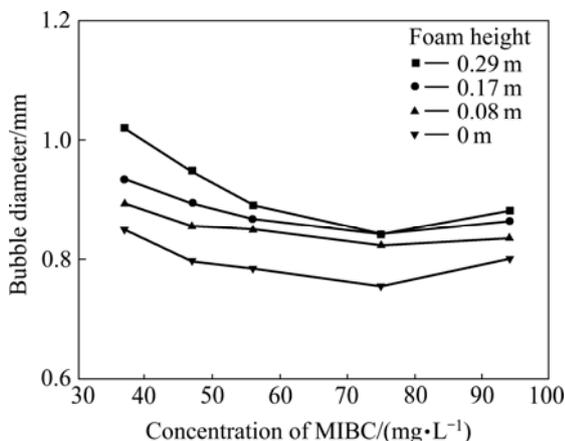


图 5 不同泡沫高度下 MIBC 浓度对气泡直径的影响
 Fig. 5 Effect of MIBC concentration on bubble diameter under different foam heights

图 4 和 5 可知, BK-201 的临界兼并浓度为 150 mg/L, MIBC 的临界兼并浓度是 75 mg/L。

在泡沫随着上升的气流而向上运动过程中, 泡沫层中自发进行了两个过程: 1) 奥斯特瓦尔德陈化 (Ostwald ripening), 即泡沫中气泡直径差异产生曲面压力差, 导致气体从高拉普拉斯压力的小气泡中扩散到低拉普拉斯压力的大气泡中, 大气泡持续变大而小气泡逐渐减小直至消失; 2) 气泡的兼并, 即气泡液膜、泡沫平台区及顶点处的液体因重力作用而排液, 导致气泡膜逐渐变薄, 当气泡间液膜的含液率低于临界含液率时, 受到外力作用, 气泡膜便发生破裂, 两个小气泡兼并为一个大气泡。以上两个过程导致气泡的平均直径随停留时间的延长而增大, 因而, 随着高度的提高, 泡沫停留时间延长, 泡沫中气泡群平均直径逐渐增大。当 BK-201 浓度为 37 mg/L 时, 气泡直径从高处 0 m 处的 0.93 mm 增大到高度 0.08 m 处的 1.00 mm; 高度 0.17m 处, 气泡直径进一步增大到 1.08 mm, 当到达最高点 0.29 m 处时, 气泡直径为 1.16 mm。

BK-201 非极性基的结构与 MIBC 的不同, BK-201 的表面活性强于 MIBC 的, 其所形成的泡沫特征也很不一样。可以直观地对比 75 mg/L 下, MIBC 和 BK-201 在高度 $h=0$ m 的泡沫照片, 两种起泡剂产生泡沫的气泡直径大小如图 6 所示。

与 BK-201 相比, MIBC 所形成的气泡直径更小, 在相同的药剂浓度 75 mg/L 下, 在泡沫层高度为 0 m 处, MIBC 的气泡直径为 0.757 mm, 而 BK-201 的气泡直径为 0.913 mm。在其他各泡沫层高度下, MIBC 的气泡直径也明显小于 BK-201 的气泡直径。气泡直径越小, 气泡大小就会越均匀, 气泡会更加紧密的堆积在一起, 阻碍泡沫的排液, 从而使泡沫含液率更高^[15]。

2.2.2 起泡剂对泡沫含液率的影响

1) BK-201 浓度对泡沫含液率的影响

利用数字式微压计测定各高度处泡沫的静压强, 对压强曲线进行二阶多项式拟合 $y=A+B_1h+B_2h^2$ 。式中: A 、 B_1 、 B_2 均为参数。对拟合的曲线一阶求导, 便可得到泡沫含液率与泡沫高度的关系函数。

以 BK-201 为起泡剂, 研究其浓度对泡沫含液率的影响。泡沫静压强随浓度的变化规律如图 7 所示。

由图 7 可知, 随着 BK-201 浓度的提高, 泡沫的静压强逐步增大, 表明泡沫含液率与 BK-201 的浓度呈正相关关系。

表 1 所列为不同起泡剂浓度下泡沫静压强与泡沫层高度的多项式拟合结果相关性系数是指实际曲线与

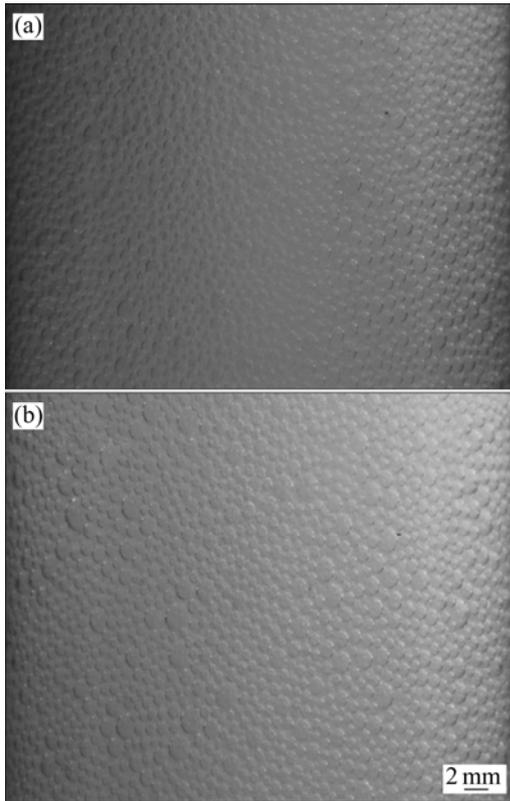


图6 高度为0时MIBC与BK-201气泡直径的比较
Fig. 6 Comparison of bubble diameter of MIBC and BK-201 at height of 0: (a) MIBC; (b) BK-201

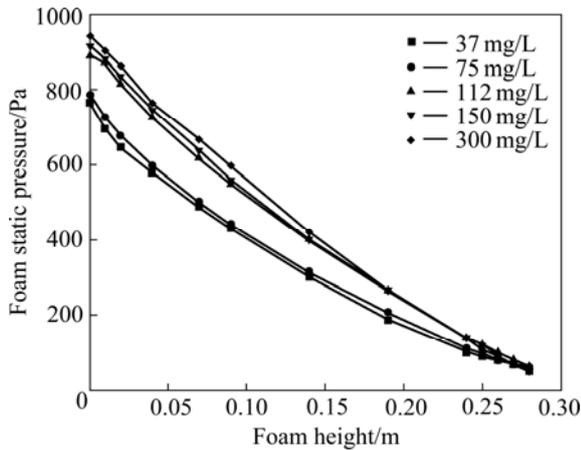


图7 不同BK-201浓度下泡沫高度与泡沫静压强的关系
Fig. 7 Relationship between foam static pressure and foam height at different BK-201 concentrations

该二次曲线模型的相关性，能代表静压强与泡沫层高度之间的变化规律。对压强与泡沫层高度多项式一阶求导，其结果见表2，得到的含液率(ϵ_1)随泡沫层高度的变化如式(5)所示：

$$\epsilon_1 = a + bh \tag{5}$$

式中： a 为0 m高度处(泡沫/溶液界面处)的泡沫含液率； b 的大小与泡沫的排液性能有关， b 的绝对值越大，随高度的上升泡沫含液率下降得越快。将含液率随泡沫层高度变化的函数作图，得到泡沫含液率随泡沫层高度变化的曲线图，如图8所示。

表1 使用BK-201起泡剂时泡沫静压强与泡沫层高度的多项式拟合结果

Table 1 Polynomial fitting results of foam static pressure and height using BK-201 as frother

BK-201 concentration/ (mg·L ⁻¹)	Parameter			Correlation coefficient
	A	B_1	B_2	
37	739.85	-3919.91	5258.19	0.9983
75	764.67	-4045.03	5469.29	0.9987
112	896.92	-4185.62	4283.78	0.9994
150	915.17	-4251.55	4169.69	0.9997
300	942.51	-4252.62	3737.51	0.99971

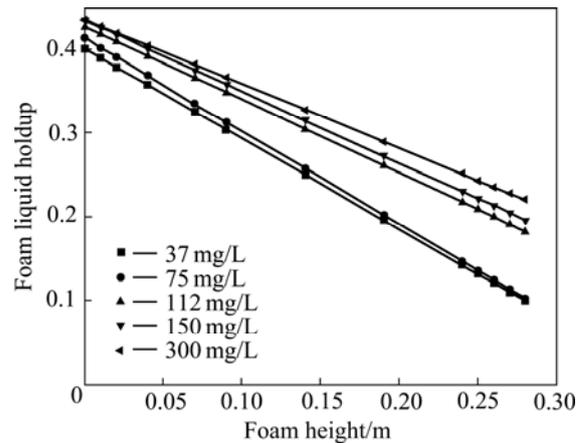


图8 不同BK-201浓度时泡沫高度对泡沫含液率的影响
Fig. 8 Effect of foam height on foam liquid holdup at different BK-201 concentrations

表2 使用BK-201起泡剂时泡沫含液率与泡沫层高度关系线性拟合结果

Table 2 Linear fitting results of relationship between foam liquid holdup and height using BK-201 as frother

BK-201 concentration/ (mg·L ⁻¹)	Liquid holdup formula	Correlation coefficient
37	$\epsilon_1=0.400-1.073h$	0.9983
75	$\epsilon_1=0.413-1.116h$	0.9987
112	$\epsilon_1=0.427-0.874h$	0.9994
150	$\epsilon_1=0.434-0.851h$	0.9997
300	$\epsilon_1=0.434-0.763h$	0.9997

由图 8 及表 2 可知, 泡沫的含液率随起泡剂浓度增大而增大, 在泡沫/液体界面处, BK-201 的浓度分别为 37、75、112、150 和 300 mg/L 时, 泡沫的含液率为含液率函数的截距, 分别为 0.400、0.413、0.427、0.434 和 0.434。起泡剂浓度的提高, 泡沫含液率的降低幅度(斜率的绝对值)减缓, 从 1.073 逐渐降低到 0.763。相应地, 泡沫顶部的含液率分别降低到 0.100、0.1005、0.1823、0.1952 及 0.2204。

2) MIBC 浓度对泡沫含液率的影响

当起泡剂为 MIBC 时, 测定各泡沫层高度下的静压强, 得到含液率随 MIBC 浓度的变化规律。含液率与泡沫层高度关系拟合结果见表 3 和图 9。

与 BK-201 类似, MIBC 泡沫的含液率随起泡剂浓度增大而增大。当 MIBC 的浓度从 37 mg/L 增大到 94 mg/L 时, 泡沫高度 0 m 处, 泡沫的含液率从 0.489 增大到 0.588; MIBC 的泡沫含液率函数斜率的绝对值却逐渐增大, 从 0.993 逐渐增大到 1.262, 相应地, 泡

表 3 泡沫含液率与泡沫层高度关系拟合结果(MIBC)

Table 3 Relationship between foam liquid holdup and height of linear fitting (MIBC)

MIBC concentration/ (mg·L ⁻¹)	Liquid holdup formula	Correlation coefficient
37	$\epsilon_l=0.489-0.993h$	0.9992
47	$\epsilon_l=0.498-1.006h$	0.9997
56	$\epsilon_l=0.569-1.140h$	0.9999
75	$\epsilon_l=0.573-1.167h$	0.9998
94	$\epsilon_l=0.588-1.262h$	0.9998

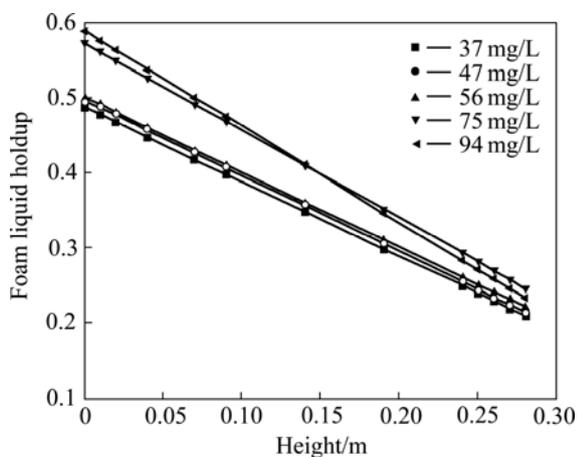


图 9 不同 MIBC 浓度下泡沫高度对泡沫含液率的影响

Fig. 9 Effect of foam height on foam liquid holdup at different MIBC concentrations

沫顶部的含液率差别变小, 仅从 0.211 增大到 0.250。

3) BK-201 和 MIBC 含液率的对比

图 10 所示为起泡剂浓度均为 75 mg/L 时两种起泡剂产生的泡沫含液率的对比。很明显地, BK-201 所产生的气泡含液率显著低于 MIBC 的。泡沫高度 0 m 处, 两种起泡剂泡沫的含液率分别为 0.44 和 0.57; 在泡沫层顶部, 含液率分别为 0.10 和 0.22。

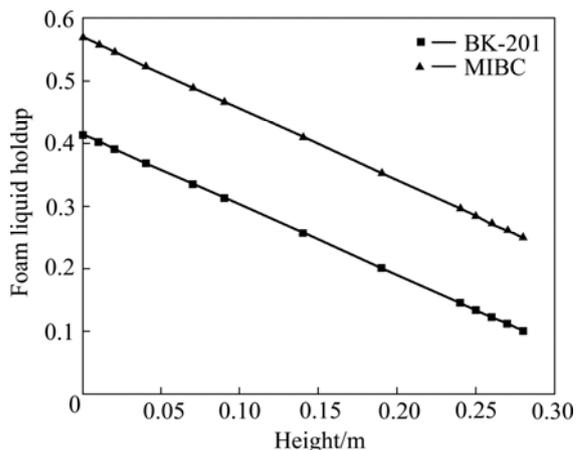


图 10 起泡剂 MIBC 与 BK-201 浓度为 75 mg/L 时泡沫高度对泡沫含液率的影响对比

Fig. 10 Comparison of effect of foam height on foam liquid holdup at MIBC and BK-201 frothers of 75 mg/L

2.3 起泡剂对泡沫夹带的影响

对于微细粒脉石矿物, 质量小, 可假定在泡沫层中脉石与液体无相对运动。因而, 脉石在泡沫层中的质量分数 w 与矿浆中一致, 脉石的夹带回收速率 $R_g(t)$ 符合式(6):

$$R_g(t) = J_1^{\max} w = \frac{\epsilon^{\max} J_g^{\max}}{(1 - \epsilon^{\max})} w \quad (6)$$

式中: $R_g(t)$ 为脉石的夹带回收速率; J_1^{\max} 为泡沫层顶部的表观溢流流速, 即泡沫柱的水回收速率。本实验中所使用泡沫柱的最大高度 h^{\max} 为 0.29m, 0.29m 处的净表观溢流流速即为 J_1^{\max} ; J_g^{\max} 为泡沫层顶部的表观气流速度; ϵ^{\max} 为泡沫层顶部的含液率。

图 11 所示为起泡剂对泡沫表观溢流速度的影响。由图 11 可知, 试验浓度范围, 在相同的浓度下, BK-201 产生泡沫的表观溢流速度要低于 MIBC 的, 即使用 BK-201 时, 泡沫柱的水回收速率小于 MIBC 的。当固体质量分数固定时, J_1^{\max} 决定脉石的夹带回收速率 $R_g(t)$ 。因而, 使用 BK-201 时, 脉石的泡沫夹带更弱。

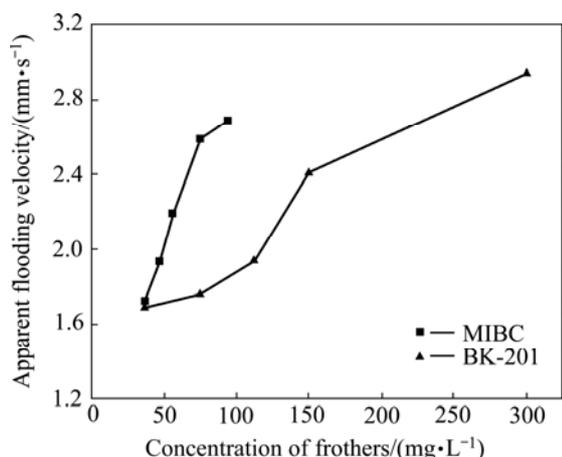


图 11 起泡剂浓度对泡沫表观溢流速度的影响

Fig. 11 Effect of frothers on froth apparent flooding velocity

3 结论

1) 在同一浓度下, 表面活性更强的起泡剂 BK-201 所产生的气泡直径明显大于 MIBC 的。起泡剂 BK-201 的气泡临界兼并浓度为 150 mg/L, MIBC 的气泡临界兼并浓度为 75 mg/L。当起泡剂浓度低于气泡临界兼并浓度时, 起泡剂浓度越高, 气泡的兼并速度越小, 气泡直径减小; 当起泡剂浓度高于临界兼并浓度时, 兼并作用非常弱, 气泡直径基本不变。

2) 在水-气两相体系中, 泡沫的含液率随起泡剂浓度增加而增大。BK-201 所产生的泡沫含液率显著低于 MIBC 的, 其水回收速率也低。

3) 在相同起泡剂用量条件下, 微细粒脉石在 BK-201 所形成的泡沫中夹带更弱, 浮选选择性更好。

REFERENCES

- [1] MELO F, LASKOWSKI J S. Fundamental properties of flotation frothers and their effect on flotation[J]. Minerals Engineering, 2005, 19(6): 766-773.
- [2] 梁永忠, 薛闻亚. 滑石浮选泡沫稳定性及浮选行为研究[J]. 非金属矿, 1994(4): 21-23.
LIANG Yong-zhong, XUE Wen-ya. Research of talc flotation foam stability and flotation behavior[J]. Non-Metallic Mines, 1994(4): 21-23.
- [3] KIRJAVAINEN V M. Review and analysis of factors controlling the mechanical flotation of gangue minerals[J]. International Journal of Mineral Processing, 1996, 46(1/2): 21-34.
- [4] LI Hong-qiang, FENG Qi-ming, YANG Si-yuan, OU Le-ming, LU Ying. The entrainment behaviour of sericite in microcrystalline graphite flotation[J]. International Journal of Mineral Processing, 2014, 127: 1-9.
- [5] GONG J, PENG Y, BOUJIL A, OURRIBAN M, YEUNG A, LIU Q. Reducing quartz gangue entrainment in sulphide ore flotation by high molecular weight polyethylene oxide[J]. International Journal of Mineral Processing, 2010, 97(1): 44-51.
- [6] DUARTE A C P, GRANO S R. Mechanism for the recovery of silicate gangue minerals in the flotation of ultrafine sphalerite[J]. Minerals Engineering, 2007, 20(8): 766-775.
- [7] SILVESTER E J, HEYES G W, BRUCKARD W J, WOODCOCK J T. The recovery of sericite in flotation concentrates[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 2011, 120(1): 10-14.
- [8] NEETHLING S J, CILLIERS J J. The entrainment of gangue into a flotation froth[J]. International Journal of Mineral Processing, 2002, 64(2): 123-134.
- [9] LIVSHITS A K, BEZRODNAYA R M. Rate of water and solids passage into flotation froth products[J]. Tsvetnye Metally, 1961, 2(11): 14-16.
- [10] JOWETT A. Gangue mineral contamination of froth[J]. British Chemical Engineering, 1966, 11: 330-333.
- [11] MELO F, LASKOWSKI J S. Fundamental properties of flotation frothers and their effect on flotation[J]. Minerals Engineering, 2006, 19(6/8): 766-773.
- [12] GÜLER T, AKDEMIR Ü. Statistical evaluation of flotation and entrainment behavior of an artificial ore[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(1): 199-205.
- [13] 卢毅屏, 龙涛, 冯其明, 欧乐明, 张国范. 微细粒蛇纹石的可浮性及其机理[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(8): 1493-1497.
LU Yi-ping, LONG Tao, FENG Qi-ming, OU Le-ming, ZHANG Guo-fan. Flotation and its mechanism of fine serpentine[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(8): 1493-1497.
- [14] ATA S. Phenomena in the froth phase of flotation: A review[J]. International Journal of Mineral Processing, 2012, 102/103: 1-12.
- [15] 谷艳玲, 冯其明, 欧乐明. 起泡剂对硫化矿浮选的影响[J]. 矿冶工程, 2013, 33(4): 52-55.
GU Yan-ling, FENG Qi-ming, OU Le-ming. Effect of frothers on sulfide flotation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2013, 33(4): 52-55.
- [16] 黄建平, 卢毅屏, 赵刚, 王德庭, 钟宏, 顾敏洲, 刘广义. 浮选起泡剂及其研究新进展[J]. 金属矿山, 2012(12): 66-73.
HUANG Jian-ping, LU Yi-ping, ZHAO Gang, WANG De-ting, ZHONG Hong, GU Min-zhou, LIU Guang-yi. Review on flotation and its research progress[J]. Metal Mine, 2012(12):

- 66-73.
- [17] STEVENSON P. Foam engineering: Fundamentals and applications[M]. John Wiley & Sons, 2012.
- [18] 宋奇, 赵修太, 王彦玲, 邱广敏, 倪洁. 疏水链对双子表面活性剂性能的影响[J]. 石油与天然气化工, 2011, 40(3): 266-270.
SONG Qi, ZHAO Xiu-tai, WANG Yan-ling, QIU Guang-min, NI Jie. Study on the effect of hydrophobic chain on gemini surfactants[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2011, 40(3): 266-270.
- [19] GRAU R A, LASKOWSKI J S, HEISKANEN K. Effect of frothers on bubble size[J]. International Journal of Mineral Processing, 2005, 76(4): 225-233.
- [20] CHO Y S, LASKOWSKI J S. Effect of flotation frothers on bubble size and foam stability[J]. International Journal of Mineral Processing, 2002, 64(2): 69-80.
- [21] 胡卫新. 浮选柱气含率的影响机制与调控研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010: 48-51.
HU Wei-xin. Study on influence mechanism and regulation of flotation column gas hold-up[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2010: 48-51.

(编辑 龙怀中)