

# 浮选柱内微孔发泡器发泡性能研究<sup>\*</sup>

黄光耀<sup>1</sup> 陈 雯<sup>1</sup> 冯其明<sup>2</sup> 欧乐明<sup>2</sup>

(1. 中国五矿集团长沙矿冶研究院, 2. 中南大学)

**摘 要** 利用数字摄像技术获得浮选柱内气泡图像,采用 Image-Pro Plus 5.0 图像处理软件对气泡大小及直径分布率进行统计、计算,考查了发泡器平均孔径、润湿性和表观气体速率对气泡大小的影响。研究结果表明,气泡群 Sauter 直径随发泡器的平均孔径、表观气体速率减小而减小;发泡器润湿性对气泡大小有显著影响,与疏水型发泡器相比较,亲水型微孔发泡器有利于产生小气泡。采用小孔径、亲水型微孔发泡器发泡,所产生的气泡群有利于微细粒矿物浮选回收。

**关键词** 微孔发泡器 浮选柱 Sauter 直径 表观气体速率 表面润湿性

## Foaming Performance of Microporous Foaming Generator

Huang Guangyao<sup>1</sup> Chen Wen<sup>1</sup> Feng Qiming<sup>2</sup> Ou Leming<sup>2</sup>

(1. Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy; 2. Central South University)

**Abstract** With the digital imaging processing, the bubbles imaging in flotation column were obtained. By adopting the image processing software of Pro Plus 5.0, the size and the diameter distribution of bubbles are calculated, and the effect of mean size and wettability of foaming generator, superficial gas velocity on the size of the bubbles were studied. The results showed that Sauter diameter of the bubbles decreases with the decrease of superficial gas velocity and mean size of foaming generator, and wettability of foaming generator has obvious effect on the size of bubble. Compared with hydrophobic foaming generator, it is easier to produce micro-bubble for hydrophilic foaming generator. The bubbles produced by foaming generator which with smaller pore and hydrophobic material are beneficial for the recovery of fine particles by flotation.

**Keywords** Microporous foaming generator, Flotation column, Sauter diameter, Superficial gas velocity, Surface wettability

浮选是借助气泡与矿物颗粒之间的相互作用,使矿物颗粒粘附在气泡上,并通过气泡传送至泡沫精选区,从而使有用矿物与脉石矿物分离的技术。矿物颗粒能否粘附在气泡上,与很多因素有关,其中,气泡大小是一个很重要的影响因素。目前的研究结果表明,矿物颗粒的粒度不同,适合负载该颗粒的气泡大小亦不同。机械搅拌浮选机形成的气泡群 Sauter 直径为  $1\ 200 \sim 2\ 900\ \mu\text{m}$ <sup>[1]</sup>,这样大小的气泡可满足  $19 \sim 74\ \mu\text{m}$  粒级矿物颗粒的浮选需要。而对于微细粒( $< 19\ \mu\text{m}$ )矿物浮选,则需要更小的气泡,Yoon 和 Tao 等<sup>[2-3]</sup>认为合适的气泡群 Sauter 直径为  $400 \sim 600\ \mu\text{m}$ 。机械搅拌浮选机较难产生 Sauter 直径为  $400 \sim 600\ \mu\text{m}$  的气泡,故而在微细粒浮选方面不具优势<sup>[4]</sup>。

微泡浮选柱是一种高效的微细粒浮选设备,其技术核心是通过发泡技术,在浮选柱内产生适合于

微细颗粒浮选的气泡群,即气泡群 Sauter 直径为  $400 \sim 600\ \mu\text{m}$ 。气泡可由压缩空气通过发泡器产生,故而发泡器对气泡的形成必然具有较大影响。目前关于浮选柱的研究很多<sup>[5-16]</sup>,但大多侧重于应用研究,对于发泡器与其所产生气泡大小之间的关系研究较少,而这恰恰是柱浮选技术的关键问题之一。开展这方面的研究,无论是对于指导浮选柱优化设计,还是对于认识气泡产生机理,均具有重要的意义。本课题借助数字摄像和图像处理技术,研究了浮选柱内微孔发泡器平均孔径、润湿性及浮选柱表观气体速率与气泡大小的关系,获得了一些重要

<sup>\*</sup> 科技部院部基金项目(编号:2010EG113038),中国五矿集团长沙矿冶研究院技术创新项目(编号:2010-2012)。

黄光耀(1970—),男,长沙矿冶研究所矿产资源开发技术研究所,博士,高级工程师,410012 湖南长沙市岳麓区麓山南路 966 号。

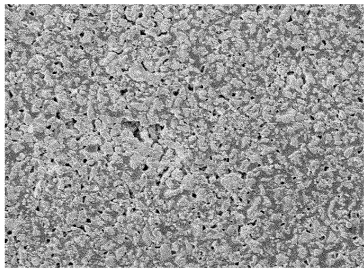
结论。

## 1 试验方法

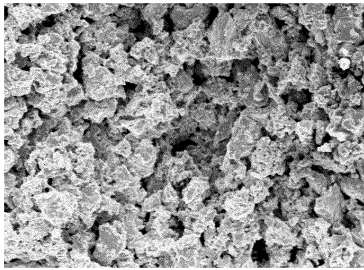
### 1.1 试验仪器及材料

试验仪器及设备:自制实验室型微泡浮选柱、空气压缩机、给料泵、玻璃转子流量计(LZB-15,LZB-10,LZB-6,LZB-3,LZB-2型)、气体压力表、佳能 A610 数字相机、冷光源照明系统。

微孔发泡器:5 只微孔发泡器。其中 4 只为亲水型材质(接触角为 80°),平均孔径分别为 0.45,3,5,10 μm;另外 1 只为疏水型材质(接触角为 110°),平均孔径为 5 μm。图 1 是平均孔径为 10 μm 亲水型材质微孔发泡器的 SEM 图像,从图中可以看出发泡器的孔形状、大小差别较大。



(a) 放大200倍



(b) 放大500倍

图 1 微孔发泡器 SEM 图(平均孔径 10 μm)

### 1.2 研究方法

浮选柱:试验用浮选柱采用微孔发泡器发泡,自来水通过给料泵从浮选柱的上部给入,从底部排出;通过给矿流量计和给矿控制阀调节给水量的大小,浮选柱的液面高度通过底部排矿阀调节。气泡测量处与微孔发泡器的距离 500 mm。

气泡直径测量及统计计算:用佳能 A610 数码相机拍摄浮选柱内气泡图像,采用 Image-Pro Plus 5.0 数值图像识别软件测量气泡直径大小,计算气泡 Sauter 直径,并统计各粒级直径的气泡数量,从而计算其分布率;每个试验条件统计 1 000 ~ 2 000 个气泡。浮选柱气泡测量装置示意图见图 2。

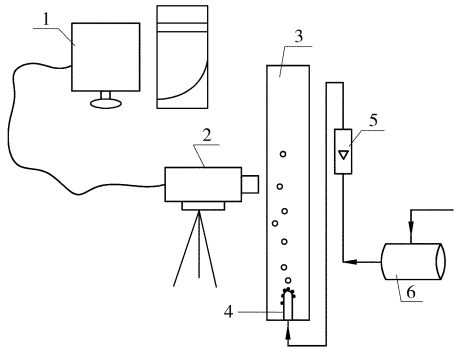


图 2 浮选柱气泡测量装置示意

1—计算机;2—数码相机;3—浮选机;  
4—微孔发泡器;5—流量计;6—空气压缩机

## 2 结果与讨论

### 2.1 发泡器孔径对气泡形成的影响

分别采用 4 只平均孔径不同的亲水型发泡器进行试验,考查发泡器孔径对气泡形成的影响。各发泡器所产生气泡的大小及直径分布率分别见图 3 中的(a)~(d)所示。方柱代表不同直径气泡的分布率,曲线代表累积分布率。

从图 3 中可以看出,微孔发泡器所产生的气泡是一组气泡群,气泡大小满足一定的分布规律,近似服从“中间多,两头少”的正态分布特点。并且,随发泡器平均孔径增加,产生的气泡直径也增大,直径分布范围变宽,各个粒径的分布率分散。

国外文献<sup>[11-12]</sup>中常用气泡群 Sauter 直径来表示气泡所具有的统计直径,气泡群 Sauter 直径(又称之为  $D_{32}$  或  $d_{32}$ )定义为

$$D_{32} = \frac{\sum_i n_i d_{bi}^3}{\sum_i n_i d_{bi}^2},$$

式中,  $n_i$  为气泡的数目,个;  $d_{bi}$  为气泡的直径,μm。

从图 3 可以计算出这 4 只微孔发泡器的  $d_{32}$  分别为 503.42,414.53,603.06,847.92 μm。从计算结果来看,总体来说,气泡随着发泡器平均孔径减小而减小,但平均孔径为 0.45 μm 发泡器与平均孔径为 3 μm 发泡器相比,前者所产生气泡  $d_{32}$  大于后者;平均孔径为 3 μm 的发泡器产生的气泡群  $d_{32}$  最小。

Yoon 和 Finch<sup>[2,12-13]</sup>等研究发现,浮选速率常数随着气泡群 Sauter 直径减小显著增加,Sauter 直径为 400 ~ 600 μm 气泡群非常适合浮选微细粒级矿物颗粒。从图 3 结果可知,使用平均孔径为 0.45 μm 和 3 μm 的亲水微孔发泡器,所产生气泡 Sauter

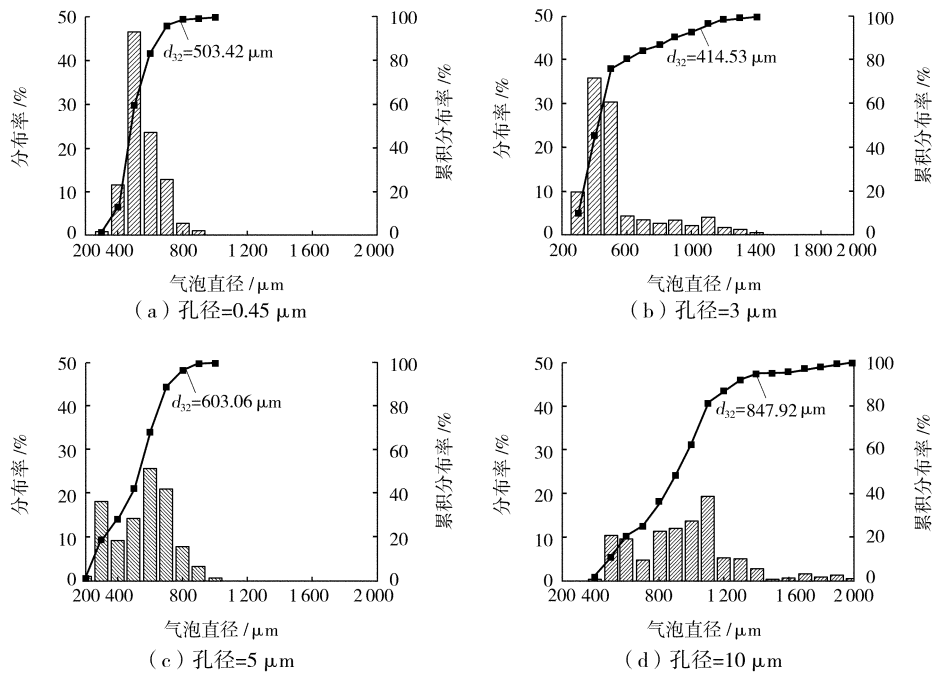


图 3 不同孔径亲水型材质发泡器产生气泡直径分布(充气量 12 mL/min )

直径分别为 503.42 μm 和 414.53 μm,在 400 ~ 600 μm 范围内,由此可见,采用这两种孔径尺寸的发泡器发泡,可用于浮选微细粒矿物<sup>[17]</sup>。

2.2 表观气体速率对气泡形成的影响

图 4 是平均孔径为 5 μm 的疏水型发泡器,在表观气体速率(充气量)不同时,所产生气泡大小及

气泡直径分布率图,图 4 中(a) ~ (d)对应的表观气体速率分别为 0.052 cm/s(60 mL/min ),0.068 cm/s(80 mL/min ),0.085 cm/s(100 mL/min )和 0.102 cm/s(120 mL/min )。计算的气泡群 Sauter 直径分别为1 463.22,1 739.75,1 863.77,1 861.24 μm。

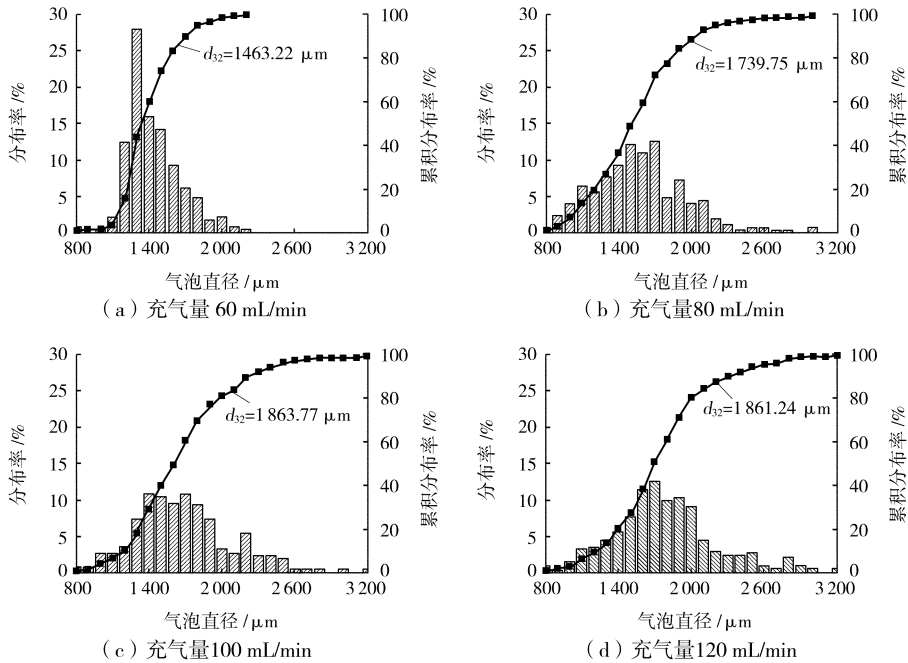


图 4 不同充气量时气泡分布规律

从图 4 中可知,表观气体速率为 0.085,0.068,0.052 cm/s 时,气泡 Sauter 直径分别为1 863.77,

1 739.75和1 463.22 μm。即随着表观气体速率减小,其形成的气泡直径减小,粒级分布范围变小,各

粒级的分布率集中。同时,表观气体速率由 0.085 cm/s (100 mL/min) 增加到 0.102 cm/s (120 mL/min) 时,气泡 Sauter 直径变化不大,表明充气量增加到一定值时,对气泡 Sauter 直径影响不大。

### 2.3 发泡器润湿性对气泡形成的影响

比较了两种平均孔径均为 5  $\mu\text{m}$  的发泡器所产生气泡的区别,一种为亲水型材质,一种为疏水型材质。试验中发现,亲水型材质发泡器在较小的充气量时,便可产生足够量的气泡,充气量过大时则形成气流;疏水型材质发泡器在较小的充气量时,不足以产生气泡,需要较大的充气量才能产生气泡。通过试验确定了亲水型材质发泡器发泡时,充气量采用 12 mL/min,而疏水型材质发泡器发泡时,充气量采用 120 mL/min。

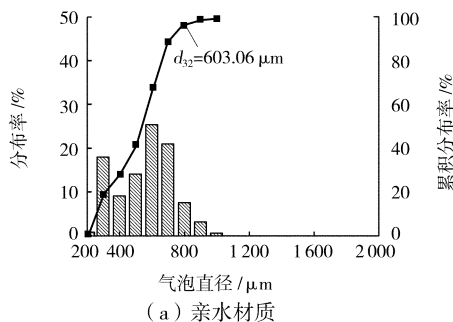


图 5(a)为亲水型材质发泡器所产生气泡直径分布,图 5(b)为疏水型材质发泡器所产生气泡直径分布。计算得到图 5(a)气泡 Sauter 直径为 603.06  $\mu\text{m}$ ,图 5(b)气泡 Sauter 直径为 1 585.47  $\mu\text{m}$ 。两种材质发泡器相比,亲水型材质发泡器所产生气泡 Sauter 直径明显小于疏水型材质发泡器。虽然试验时所采用的充气量不同,但依据 2.2 节的讨论结果可知,充气量达到一定值时对气泡 Sauter 直径影响不大,故而,疏水型材质发泡器发泡时,气泡 Sauter 直径增大的主要原因是由其润湿性变化引起,不是充气量增大所导致的。

由此可见,发泡器材质的润湿性对其所产生的气泡 Sauter 直径有显著的影响,亲水型材质发泡器更容易产生小气泡。

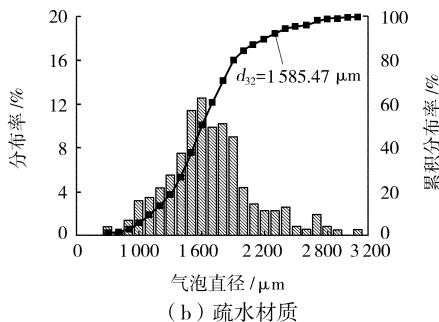


图 5 孔径 5  $\mu\text{m}$  亲水型、疏水型发泡器产生气泡对比

微孔发泡器的润湿性对气泡形成影响的作用机理可以通过润湿方程进行解释。在微孔发泡器表面存在固、液、气三相,气泡在形成的瞬间三者之间的作用力应该满足杨氏 (T, Yong) 方程或润湿方程 (参考图 6):

$$\sigma_{S-G} = \sigma_{S-L} + \sigma_{L-G}(1 - \cos\theta).$$

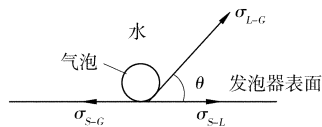


图 6 气泡在微孔发泡器形成示意

在空气与自来水的气-液体系中,因为亲水微孔发泡器亲水疏气,气泡难以在其表面粘附,  $\theta$  值较大,故其形成的气泡较小。但疏水微孔发泡器疏水亲气,气泡易于在发泡器表面附着,  $\theta$  值较小,其形成的气泡较大。

### 3 结 论

(1)微孔发泡器的平均孔径对所产生气泡直径有重要影响,随微孔发泡器的平均孔径变小,其形成的气泡群 Sauter 直径减小。

(2)表观气体速率对发泡器产生气泡直径大小

有显著影响,表观气体速率减小,气泡 Sauter 直径减小。

(3)发泡器所产生气泡大小与发泡器材质有关,亲水型材质比疏水型材质更容易产生小气泡。

### 参 考 文 献

- [1] Grau R A, Heiskanen K. Bubble size distribution in laboratory scale flotation cells [J]. Minerals Engineering, 2005, 18 (12): 1164-1172.
- [2] Yoon R H. Microbubble flotation [J]. Minerals Engineering, 1993, 6(6): 619-630.
- [3] Tao D, Luttrell G H, Yoon R H. A parametric study of froth stability and its effect on column flotation of fine particles [J]. Int J Miner Process, 2000, 59(1): 25-43.
- [4] Nigar Kantarcia, Fahir Borakb, Kutlu O Ulgen. Bubble column reactors [J]. Process Biochemistry, 2005, 40: 2263-2283.
- [5] Demir U, Yamik A, Kelebek S, et al. Characterization and column flotation of bottom ashes from Tuncbilek power plant [J]. Fuel, 2008, 87(6): 666-672.
- [6] Eisele T C, Kawatra K S. Reverse column flotation of iron ore [J]. Minerals & Metallurgical processing, 2007, 24(1): 61-65.
- [7] Banisi S, Finch J A. Testing a flotation column at the sarcheshmeh

copper mine[J]. Minerals Engineering,2001,14(7):785-789.

[8] Valderrama L, Rubio J. Unconventional column flotation of low-grade gold fine particles from tailings[J]. Int J Miner Process, 2008,86(1/4):75-84.

[9] Yianatos J B, Bergh L G, Cortés G A. Forth zone modeling of an industrial flotation column[J]. Minerals Engineering, 1998, 11(5):423-435.

[10] Saxena S C, Saxena A C. Heat-transfer and gas hold-up studies in a bubble column: air-water-glass bead system[J]. Chemical Engineering Communications, 1990, 96:31-55.

[11] Finch J A, Dobby G S. Column flotation: A selected review. Part I [J]. International Journal of Mineral Processing, 1991, 33:343-354.

[12] Dobby G S, Finch J A. Column flotation: A selected review. Part II [J]. Minerals Engineering, 1991, 33:911-923.

[13] Li H P A. Influence of slurry concentrations on bubble population and their rise velocities in three-phase slurry bubble column [J]. Power Technology, 2000, 113:158-167.

[14] Fukuma M M K, Morooka S. Properties of bubble swarm in a slurry bubble column [J]. Journal of Chemistry Engineer of Japan, 1987, 20:28-33.

[15] Chen F, Gomez C O, Finch J A. Bubble size measurement in flotation machines [J]. Minerals Engineering, 2001, 14(4):427-432.

[16] Hernandez-aguilar J R, Finch J A. Validation of bubble sizes obtained with incoherent imaging on a sloped viewing window [J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(12):3323-3336.

[17] 赵建华, 贺国, 黄次浩, 等. 静态混合器内气泡直径研究[J]. 石油化工设备, 2004, 33(1):18-20.

(收稿日期 2010-08-12)

(上接第 93 页)

(5)在后期测量数据处理过程中,为了平滑数据与突出小的异常区域采用了三点数据滤波,最后发现滤波后的图形较滤波前的确能更好地反应出异常区域。

参 考 文 献

[1] 葛良全,周四春. 原位 X 辐射取样技术[M]. 成都:四川科学技术出版社,1997.

[2] 李正文,贺振华. 勘查技术工程学[M]. 北京:地质出版社, 2002.

[3] 周四春,赵琦,陈慈德. 现场多元素 X 荧光测量技术勘查金

矿研究[J]. 核技术,1999,22(9):540-544.

[4] 杨岳衡,刘铁兵,李厚民. 多元素 X 射线荧光分析方法在山东郭城金矿成矿预测中的应用[J]. 黄金科学技术,2000,8(5):14-19.

[5] 吴信才. MAPGIS 地理信息系统[M]. 北京:电子工业出版社, 2004.

[6] 钟晓鸣,万小笠. Excel 在统计分析中的应用[M]. 北京:科学出版社,2009.

[7] 王崇云. 地球化学找矿基础[M]. 北京:地质出版社,1987.

[8] 杨金玉,张训华,徐世浙,等. Surfer 和 Grapher 在地球物理位场延拓可视化软件开发中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2007,29(3):265-268.

(收稿日期 2010-08-12)

(上接第 119 页)

(3)该设备的机械系统具有 5 个自由度,配备专用工具,可实现冲击破碎、钳碎、挑动、勾动、扒动、挖动、铲动、抓动等多功能作业;液压系统采用负载反馈式电磁比例先导传动,系统节能性好;控制系统采用无线遥控、电控和手动 3 种方式,并能快速相互转换,电气系统采用 PLC 控制,操作方便,工作可靠。

(4)与国内外同类产品比较,该设备采用低重心设计,利用油缸推动回转支承,具有强度大、稳定性高的特点;采用负载反馈式电磁比例控制和无线遥控、电控及手动 3 种方式能快速转换等新技术,具有创新性。

(5)该设备在安徽霍邱诺普矿业公司得到成功应用,经过工业试验,各项技术指标达到设计要求,

产生明显的经济效益和社会效益,具有广阔的推广应用前景。

鉴定委员会一致同意通过鉴定。并建议加快该设备在不同采选条件矿山的推广应用,尽快批量生产。

参 考 文 献

[1] 李更,胡明一. 科技查新报告:DPQ30HW 型多功能破碎清塞机开发与研制[R]. 合肥:安徽省科学技术情报研究所,2008.

[2] 尚启文,吉万健,郝其昌. 多功能破碎清塞机液压系统分析与研究[J]. 金属矿山,2009(4):118-120.

[3] 郝其昌,吉万健,尚启文. DPQ30HW 型多功能破碎机研制报告[R]. 马鞍山:中钢集团马鞍山矿山研究院有限公司, 2008.

[4] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京:化学工业出版社,1993.

(收稿日期 2010-08-11)