

基于高速摄像技术的溶气气浮微气泡尺寸原位测量方法及影响因素研究

曾婷¹, 谷原², 赵文涛¹, 隋倩², 宛勇¹

1. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092;
2. 华东理工大学 资源与环境工程学院, 上海 200237

中图分类号: TD91; TD923^{·12} 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)02-0073-07
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.02.011

摘要 微气泡的尺寸及分布对浮选工艺的分离效率有显著影响, 建立操作简便的、能应用于复杂场景的原位检测方法对微气泡技术的发展与应用尤为重要。本研究建立了一种基于高速摄像技术的微气泡尺寸原位测量方法, 适用于工业场景中微气泡的原位测量, 避免了气泡取出过程的形态变化。结果表明, 所建立原位测量方法可识别微气泡最小尺寸为 7.2 μm , 相对标准偏差小于 5%, 具有良好的精度和重现性, 适用于测定流量大、速度高的微气泡系统。采用对数正态分布函数对溶气气浮微气泡尺寸拟合效果优异。当拍摄位置由溶气释放器附近升高至释放器上方 13 cm 处时, 气泡平均直径由 21.0 μm 增加至 27.5 μm , 而水平距离的增加对微气泡尺寸影响较小。在 0.20~0.48 MPa 溶气压力条件下, 随着溶气压力增大, 微气泡尺寸变小, 当溶气压力大于 0.32 MPa 时, 溶气压力的增加对微气泡平均直径影响不明显; 加入十二烷基苯磺酸钠使微气泡平均直径由 26.4 μm 降低至 21.4 μm , 且微气泡尺寸分布更加集中。

关键词 溶气气浮; 微气泡; 尺寸分布; 高速摄像

引言

溶气气浮是将空气在一定压力下溶于水中并呈饱和状态, 然后突然减压释放, 使溶解的空气以微小的气泡从水中析出并进行气浮的一种技术, 主要用于油类、藻类、重金属、矿物等^[1-4]的分离。气泡尺寸对气浮分离效率有显著影响^[5], 降低气泡尺寸能够有效提高浮选效率。尺寸在 10~100 μm 范围的气泡称为微气泡, 具有更大的比表面积、更慢的上升速度以及更强的传质效率, 能够显著提高分离效率^[6]。实现直径为 10~100 μm 微气泡尺寸的准确测定, 能够为优化溶气气浮工艺提供参考, 为判断系统的运行状况提供依据, 因此建立可靠的微气泡尺寸测量方法对溶气气浮技术的研究及优化具有重要意义。

目前, 气泡尺寸的测量方法主要包括电导法、光纤法、毛细管法等接触式测量方法和光散射法、图像法等非接触式测量方法^[7]。电导法测量精度高, 响应速度快^[8]; 光纤法对气相敏感, 能够准确、快速地测量

气泡的尺寸^[9]。由于自身探针尺寸(大于 100 μm)和毛细管直径的限制, 以及探针可能导致气泡的破裂与聚集^[10], 接触式测量方法不适用于微气泡系统的测量。基于光的散射原理建立了激光衍射粒度仪法, 能够简单地实现气泡尺寸测量, 但气泡尺寸在输送至样品池的过程中会发生变化, 且设备昂贵不适用于工业测量^[11-12]。图像法能够获取可见图像并分析气泡的平均直径, 被广泛应用于气泡尺寸分析。近年来, 图像法在拍摄设备、测量方法、图像处理等方面^[13-14]取得了重大进步, 高速摄像技术的应用优化了图像采集质量, 使采集瞬时的微气泡图像成为现实^[15-16], ZHANG 等^[17]基于图像法开发了一种带有采样管的测量方法, 采用 CCD(Charge Coupled Device)相机采集图片, 通过优化观察室与采样管的设计最大程度减少了气泡聚集, 实现微气泡的稳定测量, 潘志成等^[13]利用图像分割和轮廓重建算法精确地获得气泡尺寸分布, 优化了图像处理方法, 但大多数基于图像法开发的气泡测量方法仍需要将气泡从原环境中取出, 而气泡在取出

收稿日期: 2022-11-27

基金项目: 水体污染控制与治理国家科技重大专项(2017ZX07103-004)

作者简介: 曾婷(1998—), 女, 贵州凯里人, 硕士研究生, 主要从事水处理技术研究工作, E-mail: zengting98@126.com。

通信作者: 赵文涛, 副教授, 博士, 博士生导师, E-mail: zhaowt@tongji.edu.cn。

过程中易发生膨胀、聚并,造成一定误差,因此需要一种相对简单的、适用于工业测量的原位检测方法。

本研究基于高速摄像技术建立了一种适用于工业测量的溶气气浮微气泡尺寸原位测量方法,避免微气泡在取出过程中的膨胀、聚并,实现微气泡的原位测量,构成简单,操作便捷,可满足工业复杂场景的微气泡尺寸测量需求。对比了正态分布函数、对数正态分布函数和 Nukiyana-Tanasawa 分布函数对微气泡尺寸分布的拟合效果,并在此基础上分析了拍摄位置、溶气压力、表面活性剂浓度对微气泡尺寸及分布的影响,为溶气气浮技术的优化和应用奠定基础。

1 材料与方 法

1.1 溶气气浮微气泡尺寸原位测量装置

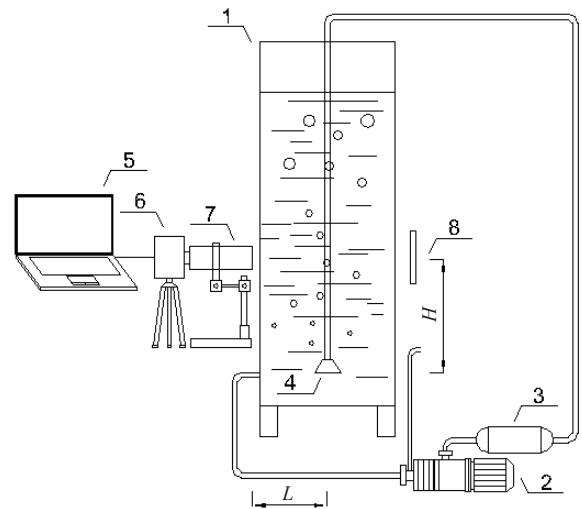
溶气气浮微气泡尺寸原位测量装置主要由气泡生成系统和气泡测量系统两部分组成,装置示意图如图 1 所示。气泡生成系统主要包括溶气泵、溶气包、溶气释放器和透光水箱(外径为 60 cm, 试验时水箱中液体体积为 200 L)等。气泡测量系统主要包括高速摄像机(千眼狼 1F005M)、变倍镜头、LED 光源和计算机等。工作原理如下:气泡生成系统通过溶气泵和溶气包使吸入的空气充分溶解于水达到高压饱和,而后通过溶气释放器减压释放,使溶解的气体以微气泡的形式逸出并弥散在透光水箱中。气泡测量系统采用高速摄像机和变倍镜头进行图像采集,并利用图像处理软件对气泡图像进行处理,得到微气泡尺寸。

拍摄时高速摄像机分辨率为 800×600 像素,曝光时间为 500 μs, 变倍镜头工作距离为 90 mm, 放大倍率为 100。

1.2 溶气气浮微气泡尺寸原位测量方法

微气泡尺寸原位测量方法主要包括尺寸标定、图像采集、图像及数据处理三个步骤:

(1)尺寸标定。测量前,需要首先进行气泡实际尺寸与图像尺寸间的标尺换算,调节镜头焦距,使标



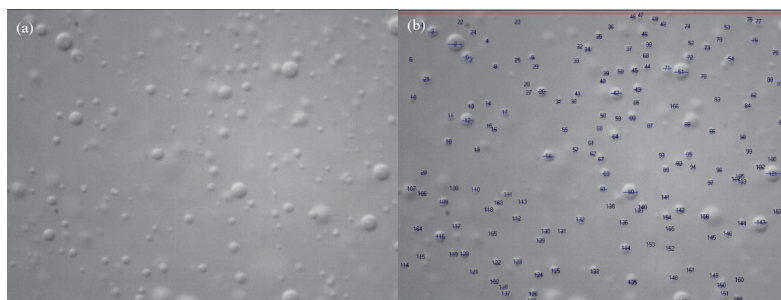
1—透光水箱;2—溶气泵;3—溶气包;4—溶气释放器;5—计算机;6—高速摄像机;7—变倍镜头;8—LED 光源;L—镜头与释放器的水平距离;H—镜头与释放器的垂直距离

图 1 溶气气浮微气泡尺寸原位测量装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of in-situ measuring device for microbubble size

尺清晰成像并拍摄照片,通过图像处理软件将标尺实际的尺寸与图像中标尺所占据的像素进行换算,即可得到每个像素点所代表的实际尺寸。

(2)图像采集。测量时,先向透光水箱中加入一定体积的水,启动溶气系统,待透光水箱内出现连续稳定的微气泡时,连接高速摄像机与计算机,打开 LED 光源并调节位置和强度,通过粗准焦和细准焦螺旋调节变倍镜头的焦距,使气泡成像清晰,记录同一位置面的微气泡的上浮过程。

(3)图像及数据处理(图 2)。视频拍摄完毕后,使用计算机中的高速视频目标跟踪测量软件将拍摄的视频按照 30 s 的时间间隔提取图片,将图片导入 Nano Measurer 软件,设置标尺,标记待测微气泡,软件按照尺寸标定关系自动计算微气泡实际直径,标记完全后导出统计报告,统计报告包含气泡数量和直径,并采用算术平均直径 d_{10} 作为该张图像微气泡尺寸的平均直径。



(a) 微气泡图像原始图片; (b) 微气泡图像标记图

图 2 微气泡图像的数据处理
Fig. 2 Data processing of the image of microbubbles

1.3 试验方法

1.3.1 微气泡尺寸分布函数试验

微气泡尺寸分布可以用概率密度函数进行描述, 其中常用的有正态分布(公式 1)、对数正态分布(公式 2)、Nukiyana-Tanasawa 分布(公式 3)等^[18]。

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(d_b-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

$$\frac{1}{d_b \sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\ln d_b - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

$$ad_b^p e^{-(cd_b)^q} \quad (3)$$

式中: d_b 为微气泡尺寸, μ 为平均直径, σ 为标准偏差, a 、 c 、 p 、 q 为无量纲常数。

为选择最优的分布函数, 采用所建立的微气泡尺寸原位测量方法, 采集分析溶气压力为 0.20 MPa~0.48 MPa 时的微气泡尺寸, 采集分析表面活性剂十二烷基苯磺酸钠投量 0~10 mg/L 时的微气泡尺寸, 使用上述三种函数对不同条件下微气泡尺寸进行拟合, 使用校正决定系数 R_a^2 (Adjusted R-Square) 对三种分布函数的拟合效果进行评价, R_a^2 值越接近于 1, 说明拟合效果越好。

1.3.2 微气泡尺寸影响因素试验

采用所建立的微气泡尺寸原位测量方法, 采集溶气压力为 0.20 MPa~0.48 MPa 下微气泡的图像并分析, 研究溶气压力对气泡平均直径及尺寸分布的影响。以表面活性剂十二烷基苯磺酸钠(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)为代表, 测量溶气压力为 0.32 MPa、表面活性剂投加量为 0~10 mg/L 时微气泡尺寸及分布的变化情况, 研究表面活性剂浓度对气泡尺寸分布的影响。

2 结果与讨论

2.1 测量方法精度和重复性

所采集微气泡图像如图 3 所示。考虑到相机边



图 3 微气泡图像

Fig. 3 A typical image of microbubbles

缘视野的畸变以及系统的稳定性要求等, 一般选择大于等于 4 个像素单位对应一个测量精度值。本试验高速摄像机分辨率为 800×600 像素, 经尺寸标定后视野大小为 1 425 μm×1 070 μm, 单个像素对应的实际尺寸为 1.8 μm。选择 4 个像素单位对应一个测量精度值, 故该方法最小可识别的微气泡尺寸为 7.2 μm。

为验证试验结果的重复性, 分别在溶气压力为 0.28 MPa 和 0.32 MPa, 不添加表面活性剂时, 对微气泡尺寸进行 5 次测量。表 1 为平行试验的结果, 相对标准偏差分别为 3.2% 和 3.9%, 表明所建立的方法具有较好的重现性。

表 1 实验结果重复性验证

Table 1 Repeatability of the experimental results

溶气压力 /MPa	气泡平均直径/μm					均值	相对标准偏差 /%
	1	2	3	4	5		
0.28	29.4	28.4	27.4	27.2	28.7	28.2	3.2
0.32	27.4	26.7	27.7	28.7	25.9	27.3	3.9

2.2 微气泡尺寸分布模型

为选择适合的函数模型, 采用三种分布函数对 0.36 MPa、不添加表面活性剂时系统中的微气泡尺寸进行拟合, 结果如图 4 所示。结果显示, 三种分布函数的 R_a^2 值分别为 0.926、0.964 和 0.925, 对数正态分布函数的拟合效果最好。

进一步地, 使用上述三种分布函数对不同溶气压力和不同表面活性剂浓度下的微气泡尺寸进行拟合, 得到的校正决定系数如表 2 和表 3 所示。结果表明, 在不同试验条件下, 对数正态分布函数的 R_a^2 值均高于正态分布函数和 Nukiyana-Tanasawa 分布函数。因此, 最终选择对数正态分布函数描述微气泡尺寸的分布。

2.3 拍摄位置对微气泡尺寸的影响

在溶气压力为 0.28 MPa、不添加表面活性剂条件下, 测量不同拍摄位置下微气泡的尺寸及分布, 如图 5 所示。当拍摄位置距离溶气释放器水平距离(L)为 10 cm、拍摄点位于溶气释放器附近(垂直距离 $H=0$ cm)时, 微气泡尺寸主要分布在 10~30 μm 范围, 当拍摄点位于溶气释放器上方 13 cm 处($H=13$ cm, $L=10$ cm)时, 微气泡尺寸主要分布在 15~45 μm。垂直距离的增加使微气泡尺寸分布向右移动, 且范围变宽, 峰值降低。当拍摄位置距离溶气释放器水平距离为 30 cm、垂直距离为 13 cm($H=13$, $L=30$)时, 微气泡尺寸主要分布在 15~45 μm, 表明水平距离的增加对微气泡尺寸分布的影响较小。但拍摄位置与溶气释放器水平距离不宜大于 30 cm, 当水平距离为 50 cm 时, 所拍摄的气泡平均直径大于 30 μm, 尺寸分散分布在 10~60 μm。

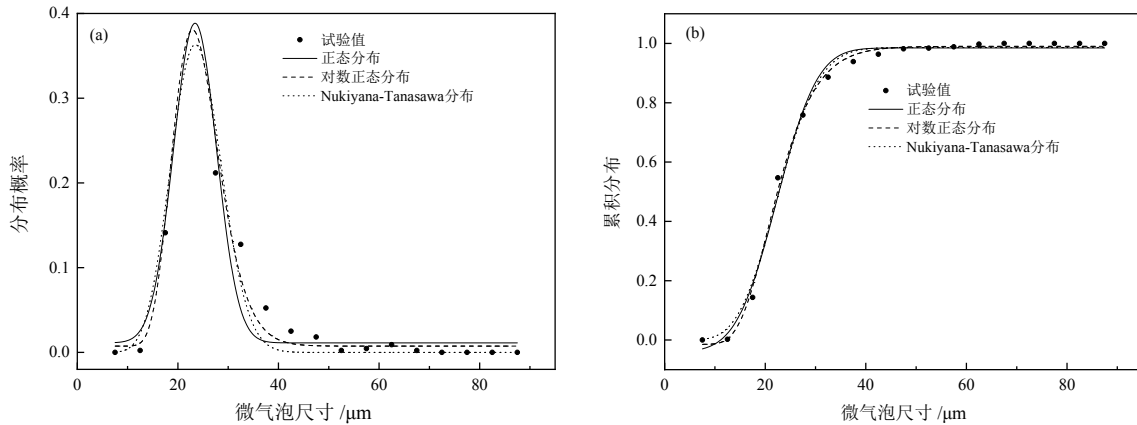


图 4 0.36 MPa 下微气泡尺寸分布拟合曲线
Fig. 4 Fitting curves of microbubble size distribution at 0.36 MPa

表 2 不同溶气压力条件下三种分布函数的校正决定系数 (R_a^2)

Table 2 Adjusted R-Square values of three functions under different pressure

分布函数	溶气压力/MPa							
	0.20	0.24	0.28	0.32	0.36	0.40	0.44	0.48
正态分布	0.777	0.823	0.872	0.847	0.926	0.876	0.961	0.943
对数正态分布	0.879	0.896	0.932	0.912	0.964	0.900	0.970	0.982
Nukiyana-Tanasawa分布	0.854	0.872	0.886	0.866	0.925	0.859	0.938	0.956

表 3 不同表面活性剂浓度下三种分布函数的校正决定系数 (R_a^2)

Table 3 Adjusted R-Square values of three functions under different surfactant concentration

分布函数	表面活性剂浓度 / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)					
	0	2	4	6	8	10
正态分布	0.905	0.902	0.930	0.947	0.979	0.973
对数正态分布	0.947	0.973	0.980	0.970	0.994	0.983
Nukiyana-Tanasawa分布	0.891	0.937	0.957	0.933	0.981	0.965

图 6 为不同拍摄位置下微气泡平均直径变化。当观测点位置由释放器附近升高至释放器上方 13 cm 处时, 气泡平均直径由 21.0 μm 增加至 27.5 μm , 变化幅度较大。这与张义科等^[19]研究所得气浮池接触区内微气泡粒径随高度升高而增大的结论一致。当观测位置和溶气释放器间水平距离由 10 cm 增加至 30 cm 处时, 气泡平均直径由 27.5 μm 增加至 28.4 μm , 变化幅度较小。水箱中的静水压力随深度增加而变大, 拍摄位置垂直距离的增加使微气泡受到的静水压力变小, 且微气泡在上浮过程中相互碰撞而发生聚并, 导致微气泡尺寸变大; 而水平距离的增加不会改变微气泡所受到的静水压力, 因此微气泡尺寸变化较小。

2.4 溶气压力对微气泡尺寸的影响

溶气压力是影响微气泡尺寸及分布的主要因素之一^[20]。溶气压力为 0.20~0.48 MPa 条件下微气泡尺

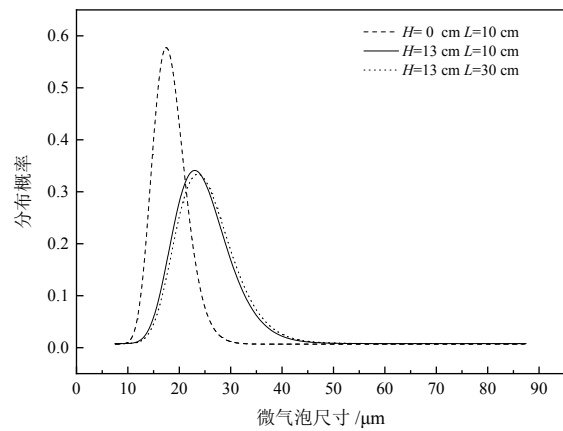


图 5 不同拍摄位置下微气泡尺寸分布
Fig. 5 Distribution of microbubble size under different vertical and horizontal distance

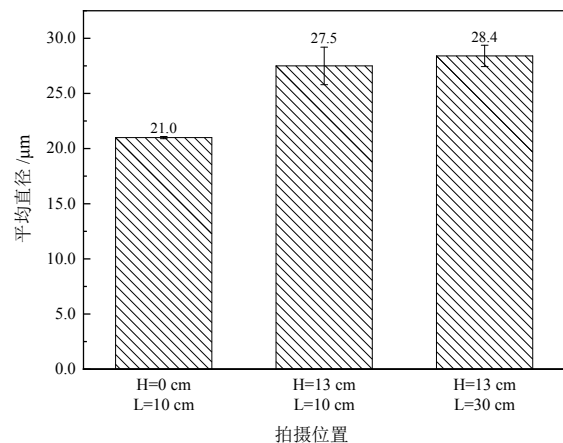


图 6 不同拍摄位置下微气泡平均直径变化
Fig. 6 Effect of different vertical and horizontal distance on mean diameter of microbubbles

寸分布如图 7 所示。随着溶气压力的增加, 微气泡尺寸分布范围由 10~55 μm 逐渐缩小至 15~35 μm 。当溶气压力较低(0.20、0.24 MPa)时, 分布范围较宽且存在较多大尺寸气泡; 当溶气压力较高(0.28 MPa 及以上)时, 分布范围变窄且大尺寸气泡较少, 微气泡尺寸分布更集中。此外, 溶气压力的增加使曲线的峰值逐

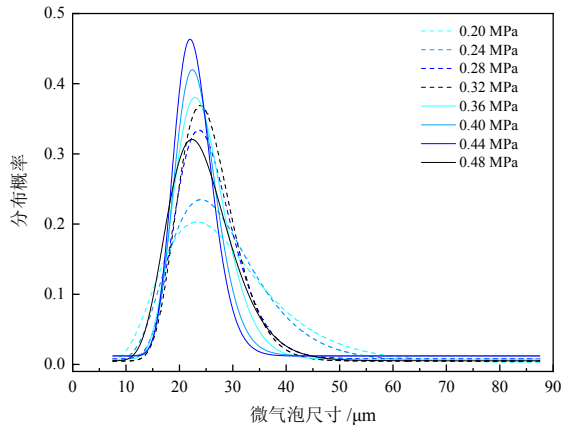


图 7 不同溶气压力下微气泡尺寸分布
Fig. 7 Distribution of microbubble size under different pressure

渐上升且向左移动, 说明大多数微气泡尺寸变小且分布更均匀。

图 8 为不同溶气压力下微气泡平均直径和能耗变化。随着溶气压力增加, 微气泡平均直径逐渐减小且降幅也逐渐变缓。当溶气压力由 0.20 MPa 增加至 0.32 MPa 时, 微气泡平均直径由 31.2 μm 降低至 27.6 μm; 当溶气压力大于 0.32 MPa, 随着溶气压力的增加, 微气泡平均直径变化不明显, Wang 等^[21]也得出了类似的结论。

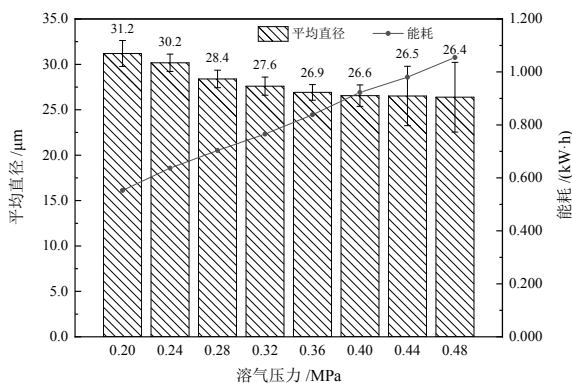


图 8 不同溶气压力下微气泡平均直径和能耗变化
Fig. 8 Effect of different pressure on mean diameter and energy consumption

最小气泡半径可由公式(4)计算:

$$r_{\min} = \frac{2\sigma_{\text{WG}}}{\Delta P} \quad (4)$$

式中: r_{\min} 为最小气泡半径, σ_{WG} 为气液之间的界面张力, ΔP 为气浮时变压前后的压力差。由式(4)可知, 最小气泡半径与压力差成反比, 溶气压力的升高导致其变压前后压力差变大, 使得气泡尺寸变小。当气泡尺寸变小后, 气泡密度变大, 使得气泡间更容易进行聚并, 从而导致气泡尺寸增大^[22]。因此, 继续增加溶气压力对微气泡尺寸的影响较小。同时, 随着溶气压力的增加, 装置运行所需的能耗由 0.553 kW·h 持续增加至 1.055 kW·h。因此, 考虑节能等因素, 在实际应用中溶气压力不宜过大。

2.5 表面活性剂浓度对微气泡尺寸的影响

十二烷基苯磺酸钠作为一种常用的阴离子型表面活性剂, 可以降低气液间的界面张力, 常被作为表面结构改性剂以处理含乳化油废水^[23], 也常被应用于精矿助滤^[24]。以十二烷基苯磺酸钠为代表, 在溶气压力为 0.32 MPa 时, 测量浓度在 0~10 mg/L 范围表面活性剂存在条件下微气泡尺寸及分布的变化情况。如图 9 所示, 随着表面活性剂浓度的增加, 微气泡尺寸主要分布范围由 10~45 μm 减小至 10~35 μm, 微气泡尺寸分布更集中, 曲线峰值逐渐上升且向小尺寸气泡的方向移动, 微气泡尺寸分布更均匀。

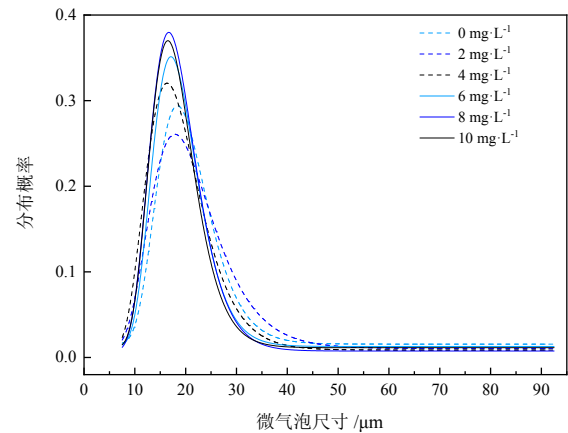


图 9 不同表面活性剂浓度下微气泡尺寸分布
Fig. 9 Distribution of microbubble size under different surfactant concentration

图 10 为不同表面活性剂浓度下微气泡直径和能耗变化。随着表面活性剂浓度的增加, 微气泡平均直径由 26.4 μm 降低至 21.4 μm, 整体上呈现下降趋势, 但当表面活性剂浓度达到 4 mg/L 后下降降幅变缓。由最小气泡半径公式(4)可知微气泡尺寸与气泡界面张力的大小成正比, 表面活性剂的存在降低了气液间的界面张力, 使得微气泡尺寸减小。与溶气压力影响相似, 气泡尺寸减小后, 气泡密度增加, 微气泡间的聚并作用变大, 导致微气泡尺寸降幅变缓。但当表面活

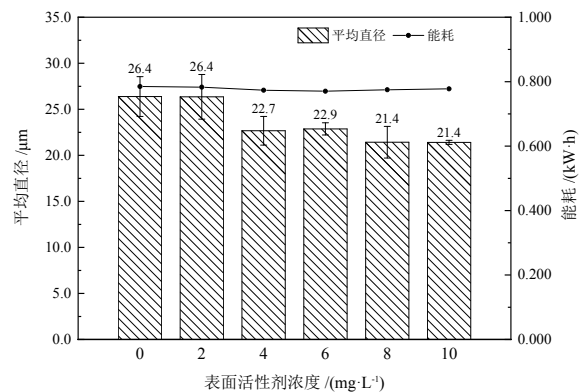


图 10 不同表面活性剂浓度下微气泡平均直径和能耗变化
Fig. 10 Effect of surfactant concentration on mean diameter and energy consumption

性剂浓度较低时,并不能完全阻止气泡的聚并,只能延长聚并过程开始的时间^[25]。随着表面活性剂浓度的增加,吸附在微气泡表面的表面活性剂分子数量增加,气液界面的稳定性进一步提高,可以在一定程度上抑制微气泡的聚并^[26]。不同表面活性剂浓度条件下,装置运行所需的能耗始终维持在 0.780 kW·h 左右,不受表面活性剂的影响。

3 结论

(1)建立了一种基于高速摄像技术的溶气气浮微气泡尺寸测量方法,最小可识别微气泡尺寸为 7.2 μm ,相对标准偏差 $<5\%$,具有良好的精度和重现性,可用于流量大、速度高的微气泡系统测量。

(2)对数正态分布函数对不同操作条件下溶气气浮微气泡尺寸的拟合效果优于正态分布函数和 Nukiyana-Tanasawa 分布函数。

(3)拍摄位置与溶气释放器垂直距离的增加导致观测微气泡平均直径变大,水平距离增加对微气泡尺寸及分布影响较小。

(4)在 0.20~0.48 MPa 溶气压力条件下,随着溶气压力的增加,微气泡尺寸分布更集中,平均直径由 31.2 μm 降低至 27.6 μm ,当溶气压力大于 0.32 MPa 时,溶气压力增加对微气泡平均直径影响不明显;装置运行所需的能耗则随溶气压力增加持续增大。

(5)加入十二烷基苯磺酸钠使微气泡平均直径由 26.4 μm 降低至 21.4 μm ,微气泡尺寸分布更加集中,对装置运行所需的能耗无明显影响。

参考文献:

- [1] ETCHEPARE R, OLIVEIRA H, AZEVEDO A, et al. Separation of emulsified crude oil in saline water by dissolved air flotation with micro and nanobubbles[J]. Separation and Purification Technology, 2017, 186: 326-332.
- [2] 王亚峰,张明,李梦婷,等.基于溶气法制备的混凝型胶体气泡用于高效去除水体中蓝藻并抑制其再生的效果[J].环境工程学报, 2021, 15(2): 481-492.
WANG Y F, ZHANG M, LI M T, et al. Efficient elimination and re-growth inhibition of harmful bloom forming cyanobacteria using coagulative colloidal gas aphrons prepared by pressure dissolved air[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(2): 481-492.
- [3] ORTIZ-OLIVEROS H B, FLORES-ESPINOSA R M. Simultaneous removal of oil, total Co and Co-60 from radioactive liquid waste by dissolved air flotation[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2019, 16(7): 3679-3686.
- [4] 陈文胜,付君浩,韩海生,等.微细粒矿物分选技术研究进展[J].矿产保护与利用, 2020, 40(4): 134-145.
CHEN W S, FU J H, HAN H S, et al. Advance in the separation of ultrafine minerals[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(4): 134-145.
- [5] 王振波,陈阿强,杨文三,等.溶气气浮分离乳化油的影响因素及其作用机制[J].水处理技术, 2017, 43(4): 27-30.
WANG Z B, CHEN A Q, YANG W S, et al. The influence factors and mechanisms of emulsified by dissolved air flotation[J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(4): 27-30.
- [6] TEMESGEN T, BUI T T, HAN M, et al. Micro and nanobubble technologies as a new horizon for water-treatment techniques: A review[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2017, 246: 40-51.
- [7] 王永磊,刘威,田立平,等.气浮工艺中微纳米气泡应用特性与检测技术研究[J].工业水处理, 2020, 40(4): 18-23.
WANG Y L, LIU W, TIAN L P, et al. Research progress on micro-nano bubble characteristics detection method and its application in air flotation process[J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(4): 18-23.
- [8] 杨涵曦,苏子旭,李娟,等.浮选多相流体系中的流场测量方法[J].矿业研究与开发, 2020, 40(11): 142-149.
YANG H X, SU Z X, LI J, et al. Flow field measurement method in flotation multiphase flow system[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(11): 142-149.
- [9] 刘志成,王晰晨,贺超,等.基于光纤光谱的气泡特征参数检测方法研究[J].光学学报, 2022, 42(20): 226-232.
LIU Z C, WANG X C, HE C, et al. Detection method of bubble characteristic parameters based on optical fiber spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(20): 226-232.
- [10] YAQUB M W, MARAOOAGOUNDER R, RUSLI R, et al. Flow pattern identification and measurement techniques in gas-liquid-liquid three-phase flow: a review[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2020, 76: 101834.
- [11] COUTO H J B, NUNES D G, NEUMANN R, et al. Micro-bubble size distribution measurements by laser diffraction technique[J]. Minerals Engineering, 2009, 22: 330-335.
- [12] MAZAHERNASAB R, AHMADI R. Determination of bubble size distribution in a laboratory mechanical flotation cell by a laser diffraction technique[J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2016, 52(2): 690-702.
- [13] 潘志成,赵陆海波,张彪,等.多尺度气泡尺寸分布数字图像测量方法研究[J].仪器仪表学报, 2019, 40(7): 129-137.
PAN Z C, ZHAO L H B, ZHANG B, et al. Multi-scale bubble size distribution measurement by digital imaging technique[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(7): 129-137.
- [14] ZHANG W H, JIANG X Y, LIU Y M Z. A method for recognizing overlapping elliptical bubbles in bubble image[J]. Pattern Recognition Letters, 2012, 33(12): 1543-1548.
- [15] 张伯涵,许萧,杨强.气泡尺寸对清洗固体表面油脂及颗粒污染物的影响[J].环境工程学报, 2021, 15(1): 375-382.
ZHANG B H, XU X, YANG Q. Effect of bubble size on cleaning of oil and particles on solid surface[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(1): 375-382.
- [16] 韩继康,王伟之,张伟,等.浮选设备流体力学特征参数研究现状[J].过程工程学报, 2020, 20(10): 1121-1133.
HAN J K, WANG W Z, ZHANG W, et al. Research status of hydrodynamic characteristic parameters of flotation equipment[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2020, 20(10): 1121-1133.
- [17] ZHANG W H, ZHANG J Z, ZHAO B, et al. Microbubble size distribution measurement in a DAF system[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2015, 54: 5179-5183.
- [18] 张世杰.煤泥浮选过程中颗粒与气泡碰撞、吸附规律研究[D].北京:中国矿业大学, 2015.
ZHANG S J. Study on collision and attachment behavior between particle and bubble in coal slime flotation[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2015.
- [19] 张义科,陈阿强,王振波.气浮池接触区微气泡粒径及气含率分

- 布实验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(1): 73-78.
ZHANG Y K, CHEN A Q, WANG Z B. The experiment research on the distribution of micro bubble size and gas content at the contact zone of dissolved air flotation tank[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(1): 73-78.
- [20] 刘颖, 金鑫, 金鹏康, 等. 溶气气浮的微气泡影响因素及其与絮体的结合特性[J]. 中国给水排水, 2018, 34(5): 1-5.
LIU Y, JIN X, JIN P K, et al. Characteristics of microbubbles and microbubble-flocs in dissolved ozone flotation process[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(5): 1-5.
- [21] WANG Y, MA H, WANG X, et al. Study on the operation performance and floc adhesion mechanism of dissolved air flotation equipment[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(36): 54219-54233.
- [22] WANG X H, WANG Y L, TIAN L P, et al. Pilot test study on the performance of multiphase flow pump DAF equipment and reservoir water pollution removal by the DAF process[J]. Journal of Water Process Engineering, 46, 102543.
- [23] 王丹, 常青. 乳化油废水稳定性研究[J]. 净水技术, 2008, 27(1): 41-45.
WANG D, CHANG Q. Study on the stability of emulsified oil wastewater[J]. Water Purification Technology, 2008, 27(1): 41-45.
- [24] 邹昀, 张芹, 郭贞强. 表面活性剂对赤铁矿精矿助滤试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(4): 64-69.
ZOU Y, ZHANG Q, GUO Z Q. Study on filtration of hematite concentrate with surfactant[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(4): 64-69.
- [25] 费之奎, 朱金波, 朱宏政, 等. 喷射-搅拌自吸气浮选装置气泡尺度分布及影响因素[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(3): 662-670.
FEI Z K, ZHU J B, ZHU H Z, et al. Bubble size distribution and its influencing factors of jet-stirring self-air-suction flotation device[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(3): 662-670.
- [26] HAN Y L, ZHU J B, SHEN L, et al. Bubble size distribution characteristics of a jet-stirring copling flotation device[J]. Minerals, 2019, 9(6): 369.

In-situ Measurement Method and Influencing Factors of Microbubble Size in Dissolved Air Flotation Process Based on High-speed Camera Technology

ZENG Ting¹, GU Yuan², ZHAO Wentao¹, SUI Qian², WAN Yong¹

1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

Abstract: The size and distribution of microbubbles have an important impact on the separation efficiency of flotation processes, and the establishment of an easy-to-operate in-situ detection method that can be applied to complex scenarios is particularly important for the development and application of microbubble technology. In this study, an in-situ microbubble size measurement method based on high-speed camera technology was established, which was applicable to in-situ measurement of microbubbles in industrial scenarios and avoids morphological changes when the bubbles were removed. The results showed that minimum microbubble size recognized by this method was 7.2 μm , and the relative standard deviation was <5%, indicating that the developed method had high sensitivity and precision, and could be used for the in-situ measurement of microbubble system with large flow and high velocity. The size distribution of microbubbles in DAF process could be better fitted by the log-normal distribution. The microbubble size increased from 21.0 μm to 27.5 μm when the vertical distance between shooting position and releaser was increased from 0 to 13 cm, while the increase of the horizontal distance had little effect on the microbubble size. The microbubble size decreased with increased pressure (0.20~0.48 MPa), and when the pressure was greater than 0.32 MPa, the increase of pressure had no obvious effect on the microbubble size. Addition of sodium dodecyl benzene sulfonate (SDBS) led to a decrease of microbubble size from 26.4 μm to 21.4 μm , and the size distribution was more concentrated.

Keywords: dissolved air flotation (DAF); microbubble; size distribution; high-speed camera

引用格式: 曾婷, 谷原, 赵文涛, 隋倩, 宛勇. 基于高速摄像技术的溶气气浮微气泡尺寸原位测量方法及影响因素研究[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(2): 73-79.

ZENG Ting, GU Yuan, ZHAO Wentao, SUI Qian, WAN Yong. In-situ measurement method and influencing factors of microbubble size in dissolved air flotation process based on high-speed camera technology[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(2): 73-79.