

文章编号: 1001-3806(2013)05-0622-05

电解水产生氢气泡尺度分布的测量

孙春生, 张晓晖

(海军工程大学 兵器工程系, 武汉 430033)

摘要: 为了便捷地测量出电解水产生的氢气泡场的尺度分布, 提出了一种利用显微照相、微气泡图像处理 and 统计分析技术的方法。首先通过显微照相系统拍摄同一区域不同时刻电解水产生的氢气泡图像; 然后采用图像增强、分割、形态学处理、颗粒测量等手段获取每张图像中微气泡的数量和尺度; 最后利用测量区域内微气泡数量变化的平稳随机特性, 用测量区域内微气泡在时间轴上的统计尺度分布特性代替空间特性, 获得氢气泡在整个气泡生成空间的尺度分布。结果表明, 3种电解电流密度条件下, 电解水产生氢气泡的尺度分布基本符合高斯分布, 平方相关系数大于0.95; 且电解电流越大, 气泡尺度分布越分散; 但电解电流的大小对氢气泡的平均尺度的影响不明显。该方法可有效地测量电解水产生氢气泡的尺度分布。

关键词: 测量与计量; 图像处理; 统计分析; 氢气泡; 尺度分布; 高斯分布

中图分类号: TP274; TP911.73 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.05.013

Measurement of size distribution of hydrogen-bubbles in water electrolysis

SUN Chun-sheng, ZHANG Xiao-hui

(Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: A method for conveniently measuring the size distribution of hydrogen-bubbles in water electrolysis was presented based on micrograph, image proceeding and statistical analysis. Firstly, pictures of hydrogen-bubbles produced by water electrolysis in the same space and at different time were taken by an optical microscopy apparatus. Secondly, image enhancement, image segmentation, morphological transformation and particle measurements were adopted to get number and size micro-bubbles in each picture. Finally, based on ergodicity of the amount of micro-bubbles in measuring space, the size distribution of bubbles in the whole bubble-producing space was obtained by substituting statistical size distribution in time sequence for spatial size distribution. The experimental results show that the hydrogen-bubbles' size distribution in water electrolysis quite fits Gaussian function and the square correlative coefficients are all beyond 0.95 under three electrolytic currents, and the larger electrolytic current is, the more dispersive the size distribution is, but the influence of electrolytic current on average size of hydrogen-bubbles is little. Analysis and experiment make sure that the presented method can measure the size distribution effectively.

Key words: measurement and metrology; image processing; statistical analysis; hydrogen bubble; size distribution; Gaussian distribution

引言

电解水产生的氢气泡与自然水体中稳定存在的空气泡大小相近, 且其数密度可通过电解电流控制, 故经常用多根铂丝电解水产生的氢气泡场来模拟水下气泡场, 进而在实验室研究水下气泡场的激光探

测机理^[1-2]。在这种应用领域, 为确定气泡场特征参量与探测系统之间的影响关系, 以便优化设计探测系统, 需要事先知道模拟气泡场的尺度分布, 而有关电解水产生氢气泡尺度分布的研究报道很少, 因此, 有必要寻求一种合适的方法来确定电解水产生氢气泡的尺度分布。

电解水产生的氢气泡是一种典型的水中气泡。目前测量水中气泡场尺度分布的方法主要有声学法和光学法。声学法通过测量声波对气泡群的后向散射、衰减, 或者测量气泡场对声波传播速率的改变, 然后利用声学反演方法获得气泡数密度及其尺度分

基金项目: 海军工程大学科学研究基金资助项目

作者简介: 孙春生(1977-), 男, 博士, 讲师, 主要研究领域为光电探测与信息处理。

E-mail: scs96581@163.com

收稿日期: 2012-10-27; 收到修改稿日期: 2013-01-21

布。声学方法测量需要处理不适定的反演问题,获得的气泡尺度分布的精度较低^[3]。光学方法包括光学散射/消光法、光学全息术和光学照相法等。其中光学散射/消光法与声学方法相似,通过测量光束通过气泡场的散射或衰减量,然后利用反演方法获得气泡场的数密度和尺度分布,其中利用气泡的光散射特性反演气泡尺度分布是一种不错的方法^[4-5],这种方法已成功应用于水中悬浮粒子尺度、组成等特性的研究,但这种反演过程仍然是复杂的^[6-7];光学全息术是基于光的干涉和衍射原理的二次成像技术,能够得到水下气泡场的 3 维图像,进而准确地得到气泡的尺度分布、数密度和运动速度等信息,但其系统结构和使用复杂^[8-9];光学照相法通过 CCD 接收气泡和水体的散射光信号,并将它们转换为图像信号,再经数字图像处理得到拍摄视场和景深范围内的气泡尺度分布和数密度信息,通过对时间序列图像的相关处理还可获得气泡的运动速度信息。光学照相法具有简单实用、精度较高、可现场测量等优点^[5,10],能够在实验室便捷地获得氢气泡的尺度分布。

现有基于光学照相法测量气泡参量的研究^[10-11]一般针对提高某项测量精度提出相应处理方法,参考文献[5]和参考文献[12]中用图像分析法测量了电解水产生氢气泡的尺度分布,但只是对其中的 1 幅或几幅气泡图片进行了测量和分析,由于采样的空间有限且测量次数少,得到的结果不能代表整个气泡生成空间的气泡尺度分布。本文中给出一种基于显微照相、图像处理和统计分析测量电解水产生氢气泡尺度分布的方法,实际上是光学照相法的一种拓展,它既可获得任意幅图片的尺度分布,也可获得整个气泡生成空间的尺度分布。

1 测量装置与测量方法

显微照相测量装置包括气泡发生器、照明光源、显微镜、CCD 摄像机和图像采集与分析系统等,如图 1 所示。气泡发生器由电解电极、电解液、可控直流电源和定制玻璃容器组成,其中电解电极分别由单根 $\varnothing 200\mu\text{m}$ 钼丝和不锈钢片做阴、阳极,电解液直接取自自来水;照明光源以显微镜自带环形白光光源为主,辅以外置白光光源;显微镜用的是 LEICA S6D,它的放大倍率为 6.3 倍~40 倍,直接连接 CCD;CCD 摄像机采用的是 Pixelink PL-A662;图

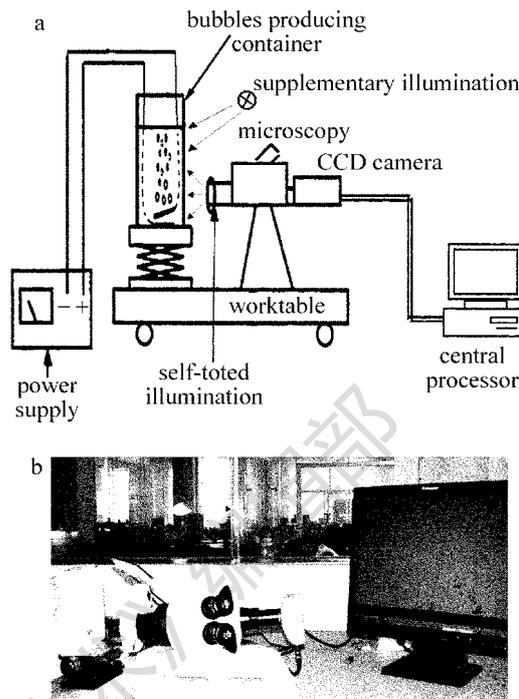


Fig. 1 Optical microscopy measuring apparatus

a—schematic drawing of optical microscopy apparatus b—photo of optical microscopy apparatus

像采集装置与 CCD 摄像机配套,可设置曝光时间和连续采集的时间间隔及总时长,图像处理与分析软件自制。

采用图 1 所示的显微测量照相装置,分别采集了钼丝上消耗不同的电流时产生的气泡照片,为便于统计测量,每种电流下采集的照片数不少于 600 张。每张照片的曝光时间为 2ms,以避免因气泡浮升造成的模糊;相邻两张照片的采集时间间隔为 5s,以保证每一张照片代表一个独立的样本;照相区域位于钼丝的上方且刚好包含钼丝,照相系统的物空间置于钼丝所在的垂直平面前后,照相测量区域的截面大小约 4mm(宽)×2mm(高)。

采集到氢气泡图像后,经图像处理和分析可以获得每一张图片中氢气泡的尺度和数量。每张图片对应同一局部测量区域在某一时刻的氢气泡信息,对同一电解电流下不同时刻点的气泡数量进行线性叠加,并对气泡尺度进行统计分析,就可以得到氢气泡在时间轴上的尺度分布,如果氢气泡数量和尺度的变化是一个平稳随机过程,那么根据平稳随机过程的特性,就能够用测量区域内时间轴上气泡尺度分布的统计结果,代替相同条件下由多根钼丝电解水产生的氢气泡场在空间上的尺度分布,从而获得模拟气泡场的尺度分布。

2 单幅气泡图片的图像处理

为了获得每张照片中气泡的尺度、数量等特征参量,需要对每张照片进行一系列图像处理。对气泡照片的图像处理包括图像增强、图像分割、形态学图像处理和气泡颗粒测量4个步骤(部分),处理流程如图2所示。图3为对其中某幅气泡图片处理的效果和结果。其中具体的图像处理方法作者已在参考文献[15]中阐明,在此不赘述。

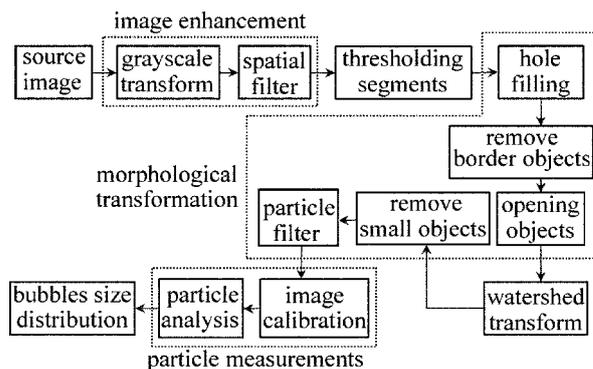


Fig. 2 Image processing flow chart of measuring micro-bubbles size distribution

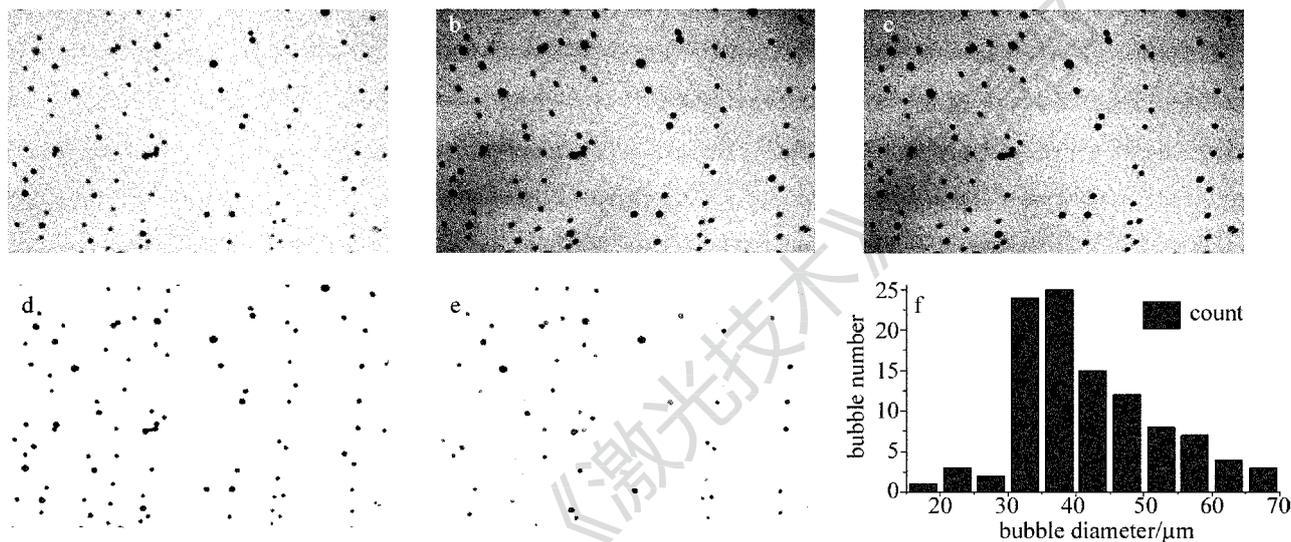


Fig. 3 Comparison among different image processing effect and result

a—source image b—image improved contrast c—image filtered by Laplacian d—image segmented by global threshold e—image segmented by watershed transform f—histogram of bubbles size distribution

3 多幅气泡图片的统计测量

为了得到电解水产生的氢气泡在时间轴上的尺度分布,进而在保证测量区域内氢气泡数量和尺度的变化是一个平稳随机过程的条件下,用时间轴上气泡尺度分布的统计结果代替相同条件下电解水产生的氢气泡场在空间上的尺度分布,同时比较电解电流密度对气泡尺度分布的影响,作者将同一电解电流密度下拍摄到的几百张气泡图片的图像处理与分析结果进行线性叠加和统计分析,结果如图4~图6所示。其中图4a、图5a和图6a为采用第2节中图像处理方法得到的同一电解电流密度下所有气泡的直径数据,横坐标表示气泡数量;图4b、图5b和图6b是图4a、图5a和图6a中气泡直径数据的统计分布结果,直方图为原始数据统计结果,虚线为根据直方图分布特点进行高斯拟合的结果。采用的高斯拟合函数见下式:

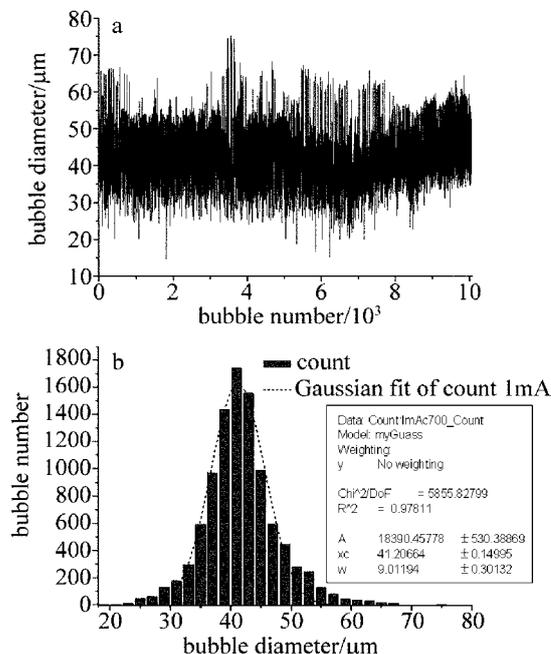


Fig. 4 Hydrogen-bubbles produced at current density of $2.12\text{mA}/\text{cm}^2$
a—bubbles diameter from image processing b—statistical result of bubbles size distribution

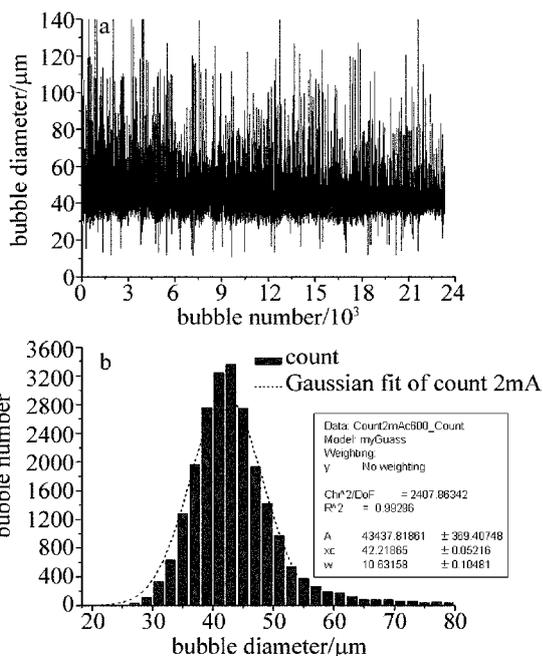


Fig. 5 Hydrogen-bubbles produced at current density of 4.24mA/cm² a—bubbles diameter from image processing b—statistical result of bubbles size distribution

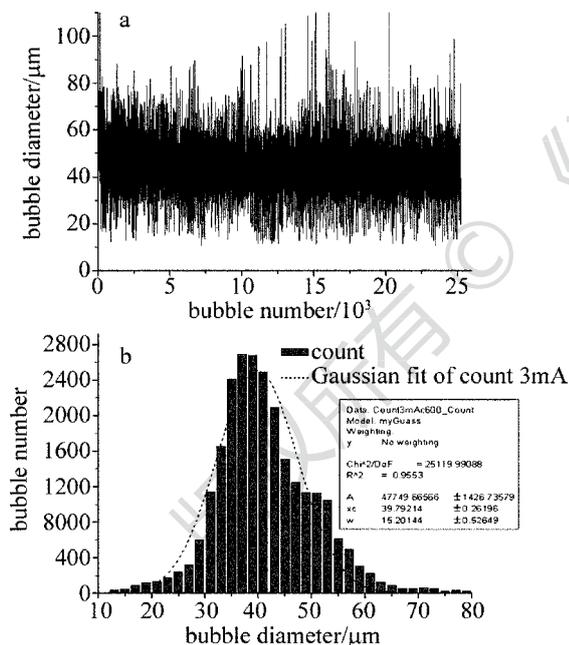


Fig. 6 Hydrogen-bubbles produced at current density of 6.37mA/cm² a—bubbles diameter from image processing b—statistical result of bubbles size distribution

$$y = \frac{A}{w \sqrt{\pi/2}} \exp\left[-\frac{(x - x_c)^2}{w^2/2}\right] \quad (1)$$

式中, y 为气泡直径分布的统计量; x 为气泡直径; x_c 为气泡直径的均值; w 为气泡直径分布的半峰值宽度, 即两倍的方差; A 为气泡直径分布曲线所占面积; x_c, w 和 A 是待拟合的参量。3 种电解电流密度条件下拟合得到的高斯分布特征参量如表 1 所示。

Table 1 Fit parameters of bubbles size distribution at three electrolytic current density

electrolytic current density	$x_c/\mu\text{m}$	$w/\mu\text{m}$	$A/\mu\text{m}^2$	R^2
2.12mA/cm ²	41.20664	9.01194	18390.45778	0.978
4.24mA/cm ²	42.21865	10.63158	43437.81861	0.993
6.37mA/cm ²	39.79214	15.20144	47749.66566	0.955

从图 4 ~ 图 6 可以看出, 单根铂丝上的电解电流密度为 2.12mA/cm², 4.24mA/cm² 和 6.37mA/cm² 时, 产生的氢气泡尺度基本符合高斯分布。表 1 中的 R^2 为平方相关系数, 越接近 1 说明实际气泡尺度分布与高斯分布的一致性越好; 从表 1 可以看出, 3 种电流密度条件下平方相关系数都大于 0.95, 说明拟合得较好。将拟合得到的参量值代入 (1) 式, 根据概率密度分布函数的特性对其进行归一化, 可分别得到 3 种电解电流密度下产生的氢气泡尺度分布的概率密度函数。

(1) 电流密度为 2.12mA/cm² 时:

$$y = \frac{1}{9.012\sqrt{\pi/2}} \exp\left[-\frac{(x - 41.207)^2}{9.012^2/2}\right] \quad (2)$$

(2) 电流密度为 4.24mA/cm² 时:

$$y = \frac{1}{10.632\sqrt{\pi/2}} \exp\left[-\frac{(x - 42.219)^2}{10.632^2/2}\right] \quad (3)$$

(3) 电流密度为 6.37mA/cm² 时:

$$y = \frac{1}{15.201\sqrt{\pi/2}} \exp\left[-\frac{(x - 39.792)^2}{15.201^2/2}\right] \quad (4)$$

4 测量结果与方法分析

从前面的分析可以看出, 要得到整个气泡生成空间的微气泡尺度分布, 需保证测量区域内气泡数量和尺度变化是一个平稳随机过程。如果气泡的生成过程是稳定的, 且气泡的溶解过程可以忽略, 那么测量区域内气泡数量和尺度变化的平稳性就可以得到保证。因为电解水的电流效率接近 100%, 将电解电源控制为恒流模式可以使气泡的生成过程稳定, 电解一段时间使电解液中的氢气泡处于饱和状态后再开始微气泡图片的拍摄, 就可以忽略气泡的溶解对气泡数量的影响, 这样基本上可以保证测量区域内气泡数量和尺度变化的平稳性。

实际测量过程中, 由于显微照相景深有限和气泡随机运动的影响, 可能会有部分气泡脱离采样景深范围, 给测量结果带来误差。通过以下两方面可降低这些影响, 一是采样区域选择在铂丝的上方且

刚好包含钼丝,此时生成的气泡幕大部分都在事先调整好的景深范围内;二是通过图像处理中移除杂散点和颗粒过滤操作可剔除一部分近景深范围内的气泡,近景深范围内的气泡一般较模糊、像点偏大且灰度偏高,通过阈值分割后,像点会偏小且不成圆形,通过移除杂散点和颗粒过滤可移除一部分这类气泡像点,而移除少量不准确的气泡像点对统计测量的影响不大。如果少量气泡偏离景深范围较远,则不能成像,对统计测量基本没有影响。总体说来,气泡随机运动导致脱离采样景深范围会带来一定的测量误差,不会影响本文中提出方法的有效性。

5 结 论

根据电解水生成的氢气泡模拟水下气泡场时量化其尺度分布的需求,本文中提出一种基于图像处理和统计分析测量电解水产生氢气泡尺度分布的方法,设计了实验装置并测量了 $\varnothing 200\mu\text{m}$ 钼丝附近氢气泡的尺度分布。测量结果如下:(1)电解水产生氢气泡的尺度分布基本符合高斯分布,实际气泡尺度分布与高斯分布在3种电解电流密度条件下平方相关系数都大于0.95;(2)电解电流越大,气泡尺度分布越分散;(3)电解电流的大小对产生氢气泡的平均尺度的影响不明显。

作者旨在提出一种简单便捷地测量电解水产生氢气泡尺度分布的方法,为氢气泡模拟水下气泡场时量化其尺度分布提供一种实用的方法,此方法也可应用于水中其它微小颗粒尺度分布的测量。

参 考 文 献

[1] LI W, YANG K C, XIA M, *et al.* Influence of characteristics of micro-bubble clouds on backscatter lidar signal[J]. Optics Ex-

press,2009,17(20):17772-17783.

- [2] SUN Ch Sh. Investigation into the forward light scattered by ship wakes and its detecting technology [D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology,2008:72-113 (in Chinese).
- [3] WU X J, CHAHINE G L. Development of an acoustic instrument for bubble size distribution measurement[J]. Journal of Hydrodynamics,2010,22(s5):330-336.
- [4] ASLAN M M, CROFCHECK C, TAO D, *et al.* Evaluation of micro-bubble size and gas hold-up in two-phase gas-liquid columns via scattered light measurements[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer,2006,101(3):527-539.
- [5] LUMANAUW D. Hydrogen bubble characterization in alkaline water electrolysis[D]. Ottawa,Canada:Graduate Department of Metallurgy and Materials Science University of Toronto,2000:43-71.
- [6] ZHANG X, TWARDOWSKI M, LEWIS M. Retrieving composition and sizes of oceanic particle subpopulations from the volume scattering function [J]. Applied Optics,2011,50(9):1240-1259.
- [7] LI W, JAFFE J S. Sizing homogeneous spherical particles from intensity-only angular scatter [J]. Journal of the Optical Society of America,2010,A27(2):151-158.
- [8] TIAN L, LOOMIS N, DOMINGUEZ-CABALLERO J A, *et al.* Quantitative measurement of size and three-dimensional position of fast-moving bubbles in air-water mixture flows using digital holography[J]. Applied Optics,2010,49(9):1549-1554.
- [9] SATAKE S I, YONEMOTO Y, KIKUCHI T, *et al.* Detection of microbubble position by a digital hologram[J]. Applied Optics,2011,50(31):5999-6005.
- [10] ZHANG R Sh, ZHENG Y, CHENG Y Sh. Study of measuring micro-bubble diameter[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics,2005,19(2):91-95 (in Chinese).
- [11] ZHANG R Sh, ZHANG W H, CAO D. Micro-bubble recognition within depth region near focal plane based on single CCD video of bubbly flow[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2010,31(11):2521-2527 (in Chinese).
- [12] SUN Ch Sh, ZHANG X H, HAN H W. Image proceeding of micro-bubbles' size distribution in water[J]. Opto-Electronic Engineering,2012,39(1):7-11 (in Chinese).