

文章编号: 1672-9897(2010)06-0083-05

# 水中上升气泡体积变化率的图像分析技术

代晓巍<sup>1</sup>, 金良安<sup>1,2</sup>, 迟卫<sup>1</sup>, 彦飞<sup>2</sup>, 田恒斗<sup>1</sup>

(1. 海军大连舰艇学院航海系, 辽宁 大连 116018; 2. 中国科学院大连化学物理研究所, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 水中上升气泡的体积变化率是舰船自消隐特种气幕技术等诸多研究的重要基础。鉴于当前对这一体积变化率研究的紧迫需求, 提出并较为深入地研究了水中上升气泡体积变化率的图像分析技术。首先, 在理论研究的基础上, 专门建立了分析计算的数学模型; 进而给出了分析的实施方法, 即利用摄像法获取水中上升气泡的图像序列, 并从中得出所需图像的相关信息, 再利用建立的模型即可求出其体积变化率; 同时, 设计了专门的实验, 初步验证了这一分析技术的可行性。

**关键词:** 上升气泡; 体积变化率; 图像分析模型; 分析方法; 实验验证

中图分类号: O359.1; TB1 文献标识码: A

## Calculative method for volume changing rate of rising bubble in water based on image parameters

DAI Xiao-wei<sup>1</sup>, JIN Liang-an<sup>1,2</sup>, CHI Wei<sup>1</sup>, YAN Fei<sup>2</sup>, TIAN Heng-dou<sup>1</sup>

(1. Dept. of Navigation, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China; 2. Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China)

**Abstract:** The volume changing rate of rising bubble in water is the research foundation of auto-dissolve bubble curtain for warship and the other fields. A new calculative method about volume changing rate of rising bubble in water which is based on image parameters was put forward. Its special mathematic model was set up on the basis of the theory analysis. And the method to obtain the parameters of serial images of rising bubble in water was studied and it is based on photography. Then the volume changing rate of rising bubble in water can be calculated by the mathematic model. The feasibility of the method was also validated by a corresponding experiment.

**Key words:** rising bubble; volume changing rate; image analysis model; analysis approach; experimental validation

## 0 引言

随着当今科技的不断发展, 对水中上升气泡体积变化的应用需求已越来越广泛, 特别是其军事应用背景越来越强烈<sup>[1]</sup>, 比如由特种气泡形成的“自消隐气幕”, 由于可有效消除原有气幕技术使用中存在的次生暴露、尾流加重等固有问题<sup>[2-3]</sup>, 已成为舰船隔声降噪技术研究的一个重要方向。而实现“自消隐气幕”的原理基础正是利用某些特殊气体在水中能按特定的速率溶解, 因此其研究离不开特定气泡在水中的体积变化问题。并且, 由于不同的战场环境、不同的战术需求, 对自消隐气幕的生存时间都有着不同的要求, 这更需要有针对性地对不同的相应气体在水中的体积变化率展开深入全面的研究。为此, 笔者提出利

用图像法研究气泡在水中上升过程中体积变化率的新思路, 旨在提供具有装置简易、使用方便、处理快捷等优点的水中特定气泡体积变化率研究的一种新方法。

## 1 理论研究

### 1.1 分析的技术思想

水中上升气泡的体积变化率, 特指具有一定溶解性的气体所形成的气泡在水中上升过程中, 由于溶解而引起的气泡体积的单位时间变化量。显然, 水中气泡的体积可以通过气泡上升至不同高度时的图像来加以反映, 并且相应图像的摄取时间间隔容易直接获得, 因此其气泡体积变化率可借助图像分析技术来求解。

收稿日期: 2010-02-09; 修订日期: 2010-04-08

从理论上来说,特定气体所形成气泡的这一体积变化大致应为两种主要作用综合的结果:一是该气体溶解于水造成的气泡体积减小;二是随着气泡的上升,因外界压强减小而导致的气泡体积增大。但在实验中由于气泡所处深度均较浅,上升距离短,使得压强减小导致的气泡体积增大相对不明显,因此研究时仅考虑气体溶解造成的气泡体积减小这一情况。由于气泡本身尺度小,其体积减小的趋势仅凭肉眼显然不易直接观察,因而需借助相应的分析技术。

目前,关于微气泡的体积测量较为成熟的技术主要有声学法、光散射法、摄像法等。声学法的原理是当气泡流动时会发生振动并产生较高的声压,而其频率大小取决于气泡的直径,这样就可以建立声音频率与气泡直径的关系式,从而通过对声音频谱的测量和分析即可得出气泡的尺寸,但该方法的实验装置复杂且不易实施<sup>[4-6]</sup>。光散射法则是通过检测气泡经过激光照射区域所散射的光来测量气泡直径,其不足是难于对微小气泡和固体粒子进行区分<sup>[4]</sup>。

摄像法也称动态照相法,是直接对设备中的气泡进行拍摄,与其它方法相比,它能很好地反映出气泡实际运动状况,具有实现简单、成本低、测量准确等优点<sup>[7]</sup>,因此正被广泛地研究应用。近年来,随着计算机技术突飞猛进的提高,计算机处理图像的优越性更使得动态照相法获得了全新的发展<sup>[8-9]</sup>。笔者通过图像法研究气泡在上升过程中的体积变化情况,进而研究特定气泡在水中上升时的体积变化率,因此是摄像法的一种实际应用和发展完善,它将不仅易于测量气泡的尺寸,而且可得到连续的数据,更便于分析气泡的体积变化率。

为实现这一技术思想,特从水中气泡图像采集与处理、以及相关数学模型的建立两个方面进行研究,分述如下。

## 1.2 图像采集与处理

通常摄像机的帧速率为 24 帧/s,即每幅图像包含间隔 1/24s 的时间点上的气泡瞬时信息。用专门的视频制作软件将某一个气泡上升过程拆分为多个帧的组合,从中挑选出两幅图像作为研究该气泡的两个样本,要求两样本中的气泡不碰壁、无重大变形;同时要求二者的时间间隔尽量相对较长,这一方面是为了尽量减小误差,另一方面是为了使气泡体积的变化更明显。

为便于数据的处理,特将气泡形状近似视为球体,则摄像机拍摄到的图像为球体的一个圆形投影面,不妨假设:气泡的真实体积为  $V_x$ ,影像投影面面

积为  $S_x$ 、所占像素个数为  $n_x$ ,影像半径长为  $R_x$ ,真实半径长为  $r_x$ ,体积变化率为  $\delta$ ;同时,设实验中所使用的玻璃管影像外径为  $D_x$ ,真实外径为  $D$ ,两幅图像采集的时间间隔为  $t$ (其中  $x$  分别取 1 和 2,表示按时间先后顺序的同一气泡不同时刻的相应参数)。

提取出气泡图像后,需要从中逐一得到所需的参数。结合后文分析,这些参数主要包括:玻璃管的影像外径  $D_1$ 、 $D_2$ ,玻璃管的真实外径  $D$ ,间隔时间  $t$  和气泡投影面所占的像素个数  $n_1$ 、 $n_2$ ,有了这些参数即可求出气泡的体积变化率。其中: $D$  是已知的,  $D_1$ 、 $D_2$  和  $t$  可以直接测出,只有  $n_1$ 、 $n_2$  的值较难得到。为此,特将  $n_1$ 、 $n_2$  的求取方法设计如下:

### (1) $n_1$ 、 $n_2$ 的求解思路

气泡图像可表示为灰度从 0 到 255 取值的像素所构成的集合,故可通过像素进行灰度判别来统计气泡图像所占像素点多少。首先要将气泡图像转换为灰度图像,然后遍历各像素,只要该点不是白色,就视其为组成气泡的一个像素,以此类推,遍历整个气泡图像,最终求出气泡所占像素个数( $n_1$ 、 $n_2$ )。

### (2) 求解 $n_1$ 、 $n_2$ 的计算程序

```
function Test_Image()
clc
clear
ima_date = imread('XXX.bmp'); /* 读入位图文件 */
ima_date = RGB2GRAY(ima_date); /* 将彩色图像转换为灰度图像 */
imshow(ima_date); /* 打开图像 */
[m, n] = size(ima_date); /* 获取灰度图像长、宽所占像素个数 */
ima_date_dark = 0; /* 计数器初始值为 0 */
for x = 1:m // * 遍历行 *
    for y = 1:n // * 遍历列 *
        if(ima_date(x, y) < 255) /* 判断该像素点是否为白色 */
            ima_date_dark = ima_date_dark + 1; /* 如果不是白色则计数器加 1 */
    end
end
b = ima_date_dark; /* 显示像素点个数(n1, n2) */

```

## 1.3 数学模型的建立

有了上述各参数,即可建立其数学模型。对于 17 寸液晶显示器,点距约为 0.264 mm,显然有气泡

的圆形投影面面积

$$S_x = \pi R_x^2 = n_x \times 0.264^2 \quad (1)$$

由上式可得

$$R_x = 0.264 \sqrt{\frac{n_x}{\pi}} \quad (2)$$

在提取气泡图像的同时也可以得到玻璃管在此高度的图像,因此气泡与玻璃管在此处有相同的放大/缩小倍数。则有

$$\frac{D}{D_x} = \frac{r_x}{R_x} \quad (3)$$

由于  $D$  已知,  $D_x$  可以测出,  $R_x$  可求, 因此将(2)式代入(3)式, 有

$$r_x = 0.264 \frac{D}{D_x} \sqrt{\frac{n_x}{\pi}} \quad (4)$$

已知气泡被视为球体, 则其体积为

$$V_x = \frac{4}{3} \pi r_x^3 \quad (5)$$

将(4)式代入(5)式, 有

$$V_x = \frac{4}{3} \pi (0.264 \frac{D}{D_x} \sqrt{\frac{n_x}{\pi}})^3 \quad (6)$$

由上式即可求出气泡的两个体积  $V_1$ 、 $V_2$ , 于是可得气泡体积变化率  $\delta$  为

$$\delta = \frac{V_1 - V_2}{t} = \frac{4\pi(0.264D)^3}{3t} \left[ \left( \frac{1}{D_1} \sqrt{\frac{n_1}{\pi}} \right)^3 - \left( \frac{1}{D_2} \sqrt{\frac{n_2}{\pi}} \right)^3 \right] \quad (7)$$

## 2 实验研究

### 2.1 实验装置与方法

实验研究目的是得出特定气体所形成的气泡在水中上升过程中的体积变化率。实验时以室温、常压下的  $\text{SO}_2$  气体为例, 实验装置和方法如下。

实验装置如图 1 所示, 其主要设备为: 1、计算机, 2、光源, 3、摄像机, 4、玻璃管, 5、消光板, 6、气源。其中, 计算机的显示器为 17 寸液晶屏幕; 光源为 1300W 新闻灯, 用于减少由圆管引起的光线折射; 摄像机为富士 S5500 数码相机, 拍摄采用的分辨率为极精细格式; 玻璃管的外径为 12.5mm, 其底端有一个进气孔并与高压气瓶连接, 它有两个作用: 一是作为实验容器, 二是作为比对标尺(计算气泡真实半径时, 将玻璃管的真实外径与其影像外径的比值作为比例尺)。

实验的具体方法如下:

第一步, 数据采集。首先将室温、常压下的  $\text{SO}_2$  气体从玻璃管底部的进气孔缓慢注入, 形成孤立气

泡, 并对所产生气泡的上升过程用置于玻璃管正前方的摄像机进行跟踪记录;

第二步, 数据存储。将所得孤立气泡的摄像机图像经过图像输入板展现于电脑屏幕上, 并以 AVI 文件格式保存于电脑中;

第三步, 图像筛选。从上述气泡的 AVI 文件中, 逐一挑选气泡不碰壁、无重大变形的各帧图像作为样本图像, 并记录其对应的上升时间(以图像帧序表示);

第四步, 数据处理。从筛选出来的图像中, 选取时间间隔(以图像的间隔帧数表示)合适的两帧气泡图像作为样本图像, 即可按前述方法研究水中上升气泡的体积变化率, 具体见后文所述。

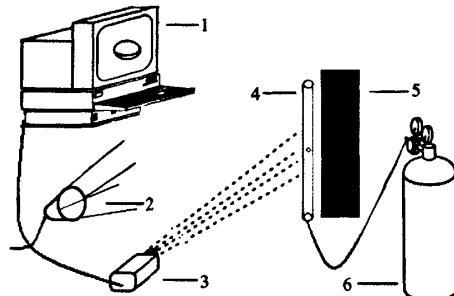
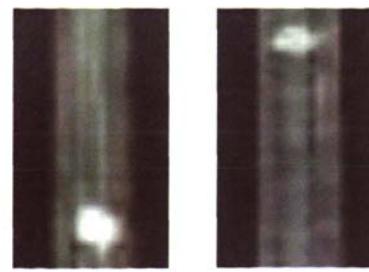


图 1 实验装置图  
Fig. 1 Sketch of the system

### 2.2 实验数据处理与结果

以  $\text{SO}_2$  气体进行的上述实验, 所得的数据及其处理情况如下:

(1) 挑选出样本图像(如图 2), 分别记为样本图像 1 和样本图像 2, 二者之间间隔的帧数为 43 帧, 即  $t = 43/24 = 1.79\text{s}$ 。



(a) 样本图像 1 (b) 样本图像 2  
图 2 不同时刻的气泡图像样本  
Fig. 2 Image of gas bubble

(2) 分别提取出样本 1 和 2 中气泡对应的圆形投影面, 如图 3 所示。利用前述计算程序即可得其象素点数分别为 664、576。

(3) 分别测量相应样本图像上与样本气泡 1 和 2 同一高度上的玻璃管影像外径  $D_1$ 、 $D_2$ , 见图 4。

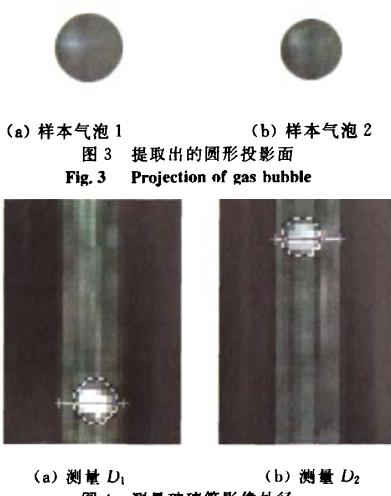


Fig. 4 Measuring the outer diameter of glass pipe

(4) 分别对样本气泡 1 和 2, 按照公式(7)计算气泡的体积变化率, 如表 1 所示。

表 1 气泡相关参数  
Table 1 Parameters of the gas bubble

序号	管的真实外径/mm	管的影像外径/mm	投影圆的像素个数	时间间隔/s	体积变化率/(mm <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )
1	12.50	13.20	664	1.79	20.99
2	13.50	13.50	576		

### 2.3 实验结果分析与结论

从表 1 可知, 由  $\text{SO}_2$  气体产生的气泡的体积变化率为  $20.99\text{mm}^3/\text{s}$ , 这一结果是否合理显然有待于进一步分析。下面特以一简单实验来加以初步说明, 基本思路是: 采用溶解性合适的  $\text{SO}_2$  气体, 通过便于操作的类似方式得出其体积变化率, 再与该文方法求得的气泡体积变化率进行比较, 分析其合理性。具体过程为:

(1) 选择容量为 5mL 和 20mL 的注射器两支, 测得二者内径分别为 12.5mm、18.5mm, 计算其横截面积分别为  $S_5 = 122.66\text{mm}^2$ 、 $S_{20} = 268.67\text{mm}^2$ 。为便于实验操作, 可先测出各注射器的总容量, 再根据注射器的总容量和实验后剩下的气体量, 求出已经溶解的气体量, 为此专门测得两支注射器全部装满的容量分别约为 5.8mL 和 24mL。

(2) 两注射器中均抽满  $\text{SO}_2$  气体, 堵住针头一侧, 拔出活塞, 将其活塞拔出端至于水中, 同时开始计时, 计时结束时刻分别为针筒内水位达到刻度 5 和 20 的时刻(由于注射器中气体全部溶解耗时较长, 且随着气体在注射器中溶解其溶解速率逐渐减慢, 必然导致实验误差增大, 因此计时结束时刻宜选择在溶解过程的初期)。

(3) 对于满容量 5.8mL 注射器, 测得计时结束时的剩余气体为 5.0mL, 用时 129s, 因此其气体的体积变化率为  $(5.8-5) \times 1000/129 = 6.20(\text{mm}^3/\text{s})$ ; 对于满容量 24mL 注射器, 测得计时结束时的剩余气体为 20mL, 用时 93s, 因此其气体的体积变化率为  $(24-20) \times 1000/93 = 43.01(\text{mm}^3/\text{s})$ 。

(4) 利用该文所得公式(4), 分别求得样本气泡 1 和 2 的真实半径  $r_1 = 3.64\text{mm}$ 、 $r_2 = 3.31\text{mm}$ , 再根据球体表面积公式  $S = 4\pi r^2$  即可得  $S_1 = 166.41\text{mm}^2$ 、 $S_2 = 137.61\text{mm}^2$ 。

为便于分析比较, 特将上述所得有关数据列于表 2。

表 2 体积变化率的比较

Table 2 Comparison of volume variation rate

名称	5mL 注射器	气泡	20mL 注射器
气液接触面积/mm <sup>2</sup>	122.66	166.41	268.67
体积变化率/(mm <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	6.20	20.99	43.01

从表 2 中第 2、4 列数据可知, 气体的体积变化率随其与水接触面积的增大而增大。根据表 2 中第 2 行数据可知, 气泡的表面积大小( $166.41\text{mm}^2$ )介于两注射器横截面积(对应的气液接触面积) $122.66\text{mm}^2$  和  $268.67\text{mm}^2$  之间, 则其对应的体积变化率也应近似介于二者之间。显然, 表中第 3 行的数据 20.99 正好介于 6.20 和 43.01 之间, 并且  $20.99\text{mm}^3/\text{s}$  这一数值与由  $6.20\text{mm}^3/\text{s}$  和  $43.01\text{mm}^3/\text{s}$  进行内插得到的体积变化率  $17.23\text{mm}^3/\text{s}$  是很接近的。

综上可见, 该方法求得的水中上升气泡体积变化率可以认为是合理的, 这进而说明利用图像分析技术来求解气泡在水中上升时的体积变化率是可行的。

### 3 结语

水中气泡的体积变化率是自消隐特种气幕的高效实施等实际应用研究的重要基础。文中提出并较为深入研究的水中上升气泡体积变化率的图像分析技术, 其可行性得到了相应实验的初步验证, 可望丰富和完善这一基础性研究。由于该研究中作了一些简化, 比如将产生的气泡形状按球形处理, 忽略了气泡体积变化率的复杂影响因素等等, 因此如何提高实验精度, 更换不同气体以及改变水的温度、盐度、酸碱度和压强等条件所带来的影响等诸多问题, 值得后续深入研究。

#### 参考文献:

- [1] 海军司令部. 海军高技术知识教材[M]. 北京: 海军司令部, 2007.
- [2] 迟卫. 自消隐气幕的生成理论与特性试验研究[D]. 哈

- 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2006.
- [3] 田恒斗,迟卫,金良安,等.特种气幕降噪技术研究[J].造船技术,2007(1):20-22.
- [4] 张蓉生,郑源,程云山.微小气泡粒径的测量研究[J].实验流体力学,2005,19(2):91-95.
- [5] 高川真一.音响減衰率からの气泡分布推定方法に関する研究(第2報:実験的研究)[A].日本造船学論文集[C],1989,164:66-73.
- [6] 画像解析ハンドブック编集委员会, 画像解析ハンドブック[M]. 东京:东京大学出版会,1991.
- [7] 张建生,吕青,孙传东,等.高速摄影技术对水中气泡运动规律的研究[J].光子学报,2000,29(10):952-955.
- [8] FUJIKAWA S, ZHANG R, HAYAMA S, et al. The control of micro-air-bubble generation by a rotational porous plate. Int. [J]. Multiphase Flow, 2003, 29: 1221-1236.
- [9] 张蓉生,葉山真治,藤川重雄,等.微細気泡生成装置の气泡計測に関する研究[J].混相流,2000,13:329-338.

## 作者简介:



代晓巍(1980-),女,辽宁沈阳人,博士研究生。研究方向:舰船安全保障与防护技术。通讯地址:海军大连舰艇学院研究生管理大队博士生队(116018)。E-mail: 2003sls1@163.com

(上接第76页)

- [15] 陈志敏,苏耀西.利用侧壁抽气进行二维风洞的侧壁干扰研究[J].气动实验与测量控制,1993,7(2):33-39.
- [16] 陈志敏,王大海.优化翼型试验流动二维性的抽气技术研究[J].中国民航飞行学院学报,2002,13(1):36-40.
- [17] 陈志敏,王大海.二维翼型风洞的侧壁干扰与抽气研究[J].实验力学,2002,17(2):147-152.
- [18] 陈志敏,王大海.二维翼型实验的侧壁影响研究[J].中国民航飞行学院学报,2001,12(1):4-7.
- [19] 恽起麟.风洞实验数据的误差与修正[M].北京:国防工

业出版社,1996.

## 作者简介:



惠增宏(1969-),男,陕西富平县人,高级工程师,博士。研究方向:流体力学测量与控制。通讯地址:陕西省西安市西北工业大学111信箱(710072)。电话:029-88493775转6201,13572282305, E-mail: huizh@nwpu.edu.cn