

气泡在波浪中运动的实验研究

刘春嵘 周显初 呼和敖德

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘 要 本文对气泡在波浪中的运动进行了实验研究, 得到了气泡在波浪中运动的平均上升速度及上升运动轨迹, 并同理论进行了比较。发现当气泡直径小于 1mm 时, 气泡在波浪中的平均上升速度与静水中的稳定上升速度基本一致, 波浪的影响很小, 且是随机的。当气泡直径大于 1mm 时, 气泡在波浪中的平均上升速度不再随直径增大而增大, 而是趋向于某一定值。这与气泡在静水中稳定上升速度的变化趋势是一致的。当气泡直径小于 1mm 且气泡到液面的距离大于波高时, 实验和理论符合得很好。当气泡上升到液面附近, 气泡到液面的距离和波高为同一量级时, 由于自由面的影响, 理论和实验有一定差别。

关键词 气泡, 气泡运动, 实验

1 前 言

气泡问题主要应用于声学、化学反应、气蚀、海气相互作用等的研究。本文对气泡的研究以海气相互作用为背景。在气泡上升过程中, 气泡同周围海水要进行动量、热量和质量的交换。这将影响到海洋与大气之间各种通量的交换。了解气泡在海洋环境中的运动规律对于研究海气相互作用十分重要。

以往关于气泡运动的研究主要集中于气泡在静水中的稳定上升速度、阻力系数以及气泡变形等方面。气泡运动的早期研究以球形气泡在静水中的上升为主, 在 Clift(1978)^[1] 的书中对这些早期工作进行了总结。Ryskin & Leal(1984)^[2] 研究了在 Re 数、 We 数较大时气泡发生非球形变形后的阻力系数及稳定上升运动。P. C. Duineveld(1995)^[3] 对大 Re 数下气泡在纯水中的上升运动进行了实验研究, 并与 Moore(1965)^[4] 的理论比较。当气泡半径较小时实验结果与理论符合得很好, 随气泡半径增大实验结果和理论有一定差别。Xiang-Qun SONG(1996)^[5] 采用 PIV(Particle Imaging Velocimetry)和 PTV(Particle Tracking Velocimetry)技术得到气泡的稳定上升速度及气泡周围的流场分布。

上面发表的研究工作都没有考虑波浪对气泡运动的影响。在海洋环境中, 波浪的存在是不可避免的。因此, 研究波浪对气泡运动的影响十分必要。在作了一些假定的基础上, 作者得到了波浪场中气泡运动的方程, 并进行求解^[6]。给出了波浪对气泡上升时间、平均上升速度的影响、气泡上升运动的轨迹。发现当气泡直径小于 1mm 时, 其运动为波浪诱导运动和气泡稳定上升运动的叠加, 非线性耦合效应可以忽略, 且当气泡初始深度远大于波高时, 波浪对气泡平均上升速度的影响很小, 且是随机的。本实验为了验证作者的理论, 研究了不同波况下, 气泡直径同上升时间的关系、气泡上升的运动轨迹, 并和理论结果进行比较, 发现当气泡直径在 1mm

国家自然科学基金委资助课题。本文于 1996 年 9 月 19 日收到。

以下且气泡到液面的距离大于波高时,实验结果与理论符合得很好。当气泡直径大于1mm后,理论不再适合。当气泡到液面的距离和波高为同一量级时,理论与实验有所差别。

2 设备及实验方法

本实验在中科院力学所环境流体实验室15米长、0.5米宽、1.1米高的多功能水槽中进行。水槽两壁为玻璃,可以对流动图象进行观察。水槽底部也开有玻璃窗口,可从底部打光。水槽的一端设有造波机,由力矩电机带动,电机的转速由控速器控制。造波机可造最大波高为10厘米,波频范围在0.5—2.0Hz。水槽的另一端装有消波器,可消除有效的反射波,以达到实验的要求。在水槽中段装有气泡发生器,用于产生气泡。在气泡发生器左下方设有HILUX—HR型1050W的片光源,拍摄和记录气泡粒径和运动轨迹的照相机与摄像机布置在水槽一侧并与片光源垂直。实验装置布置见图1。

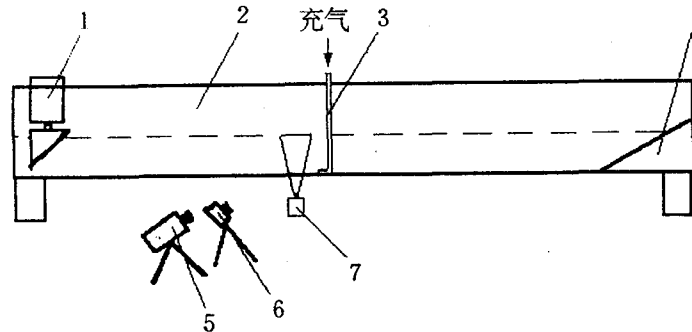


图1 实验装置布置图

1. 造波机 2. 多功能风水槽 3. 气泡发生器
4. 消波器 5. 摄像机 6. 照相机 7. 片光源

气泡由气泡发生器产生。气泡发生器由一根插入水中的金属管和一个用于充气的吸耳球组成。用吸耳球向金属管水面上的一端充气,在金属管插入水面下的一端可产生气泡。控制充气量的大小和速度,可产生大小不同的气泡,根据需要可对不同气泡进行分析。放泡与造波同步进行。放泡同时,摄像和照相同步采集,保证摄像机和照相机记录同一气泡。

2.1 波参数的测量

采用电阻式波高仪测量波面过程,波高仪精度为 $\pm 0.1\text{mm}$ 。波高仪将波面过程信号转换为电信号,经LYL—1型波高应变滤波多用测试仪放大,滤波降低采样过程中的背景噪声。所有电信号经A/D转换为数字信号然后由微机采集。图2为波浪数据采集系统框图。这里采用AST386微机进行采集与处理,采样频率为1024Hz,每周期采100点。经波面过程处理软件给出波浪参数。

2.2 气泡直径的测量

实验过程中气泡直径由照相记录给出,将底片用幻灯机放大。放大后的气泡直径可直接读出。并经比例尺标定给出实际尺寸。照相机的分辨率约为120线/毫米。本实验实际视场对胶

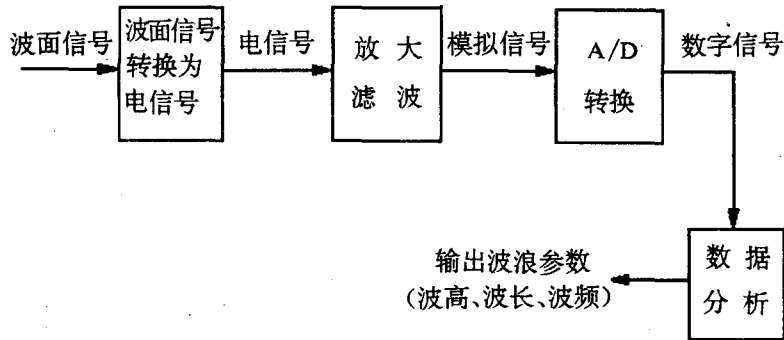


图2 波浪数据采集系统框图

片的比例为 10 : 1。因此,实际视场中的一毫米对应胶片上的 12 线。经幻灯机放大后的视场对胶片的比例为 30 : 1。设在放大视场中测得气泡直径为 D_1 , 气泡实际直径为 D 。则有如下关系: $D = D_1/3$ 。直径测量的精度为 ± 0.083 毫米。

2.3 气泡运动轨迹及上升时间的测量

摄像机将气泡运动轨迹记录在录像带上。对气泡摄像之前,将上面提到的标尺记录在录像带上用以确定图像和实际视场的比例关系。录像机的输出端接图像板,将图像数字化后进行处理。图 3 为图像采集系统框图。采用 COMPAQ486 微机进行图像采集与处理;微机配有图像板和处理软件,具有多种图像处理功能。录像机可逐帧放映,每帧间隔时间为 0.02 秒。将录像带上记录的气泡运动轨迹逐帧采入微机,利用图像处理软件可读出各帧图像上气泡的位置。由图像上气泡的位置,根据图像与实际视场的比例关系,可得到气泡在实际视场中的位置。本实验中,图像与实际视场的比例关系为 512 像素:40 厘米。设气泡在图像上的位置为 x_1, y_1 (单位:像素)。在实际视场中的位置为 x, y (单位:厘米)。则有如下关系: $x = 0.078x_1, y = 0.078y_1$ 。测量精度 ± 0.08 厘米。这样就可得到气泡运动轨迹。由气泡从底部上升到水面所放帧数便可得到气泡上升时间。测量精度 ± 0.02 秒。

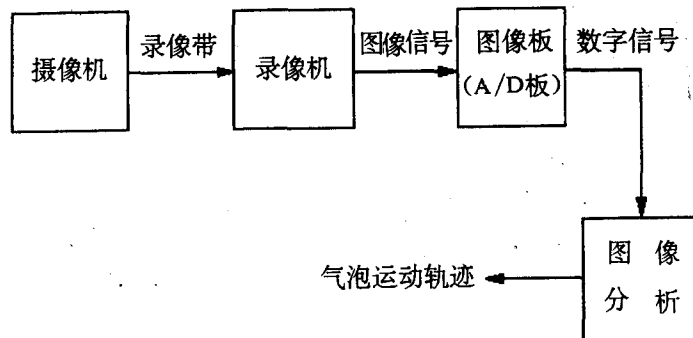


图3 图像采集系统框图

3 实验结果与讨论

3.1 气泡直径与平均上升速度关系

在同一波况下进行多次实验,记录每次实验的气泡直径和上升时间。选取气泡直径在 0.5—3mm 的气泡进行分析。用气泡初始深度除以上升时间得到平均上升速度。我们得到了三种波况下的气泡直径与平均上升速度的关系,并将其和静水中稳定上升速度及理论计算得到的平均上升速度比较,见图 4。气泡在静水中稳定上升速度 W_0 可由阻力与浮力的平衡关系 $\frac{4}{3}(\rho_f - \rho_g)\pi R^3 g = \frac{1}{2}AW_0^2 C_d$ 求出,其中 ρ_f 为气泡周围流体的密度; ρ_g 为气泡内气体的密度; $A = \pi R^2$, R 为气泡半径;阻力系数 C_d 取文献[1]的结果, $C_d = 14.9Re^{-0.78}$, 其中 $Re = \frac{2U_0 R}{\nu}$ Re 数的范围在 1—200。由图可见,无论波况如何变化,当气泡直径在 1mm 以下时,气泡在波浪中的平均上升速度总是在其静水中稳定上升速度附近。这可用一个式子来表示, $V = W_0 + v'$, 这里 V 为气泡在波浪中的平均上升速度; v' 为气泡在波浪中平均上升速度与静水中稳定上升速度

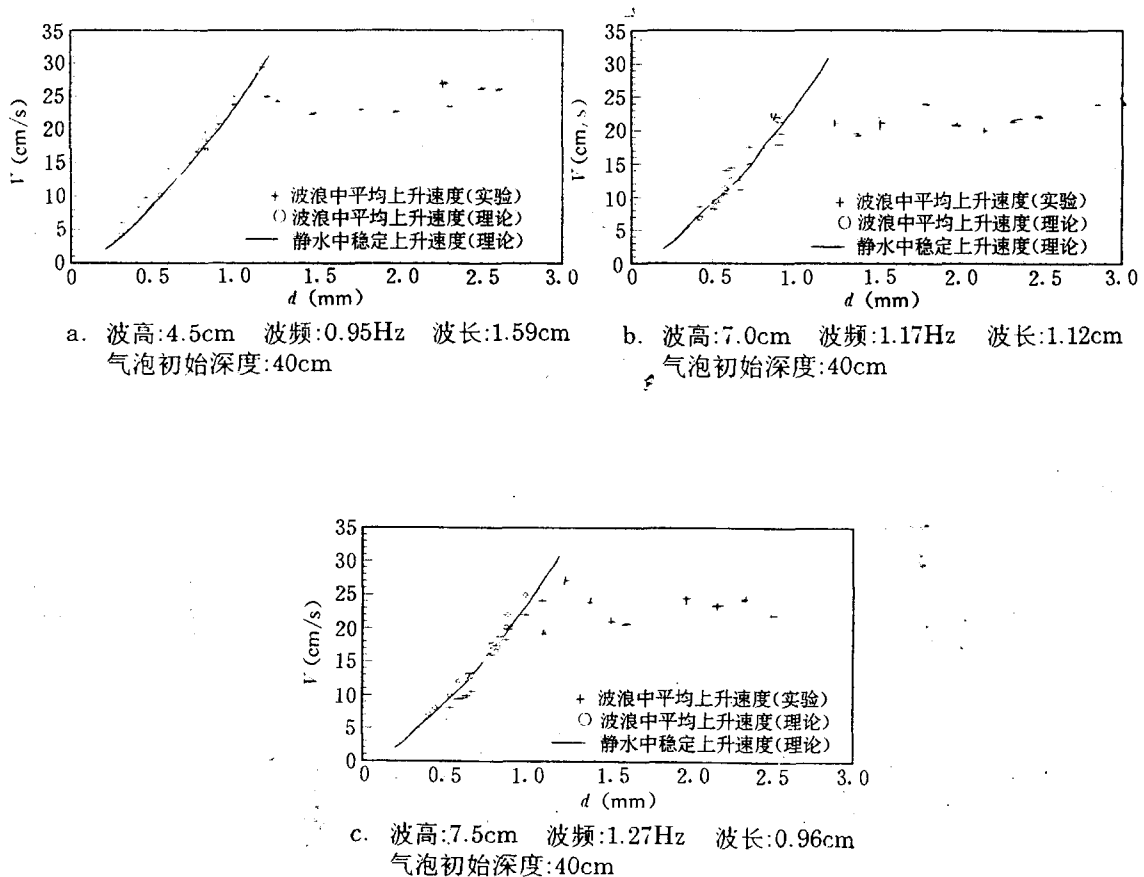


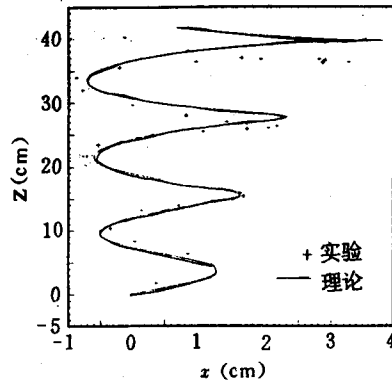
图 4 气泡上升速度与气泡直径的关系

之差 $\frac{v'}{V}$ 很小,且其大小和方向都是随机的。这同文献[6]的计算结果是一致的。当气泡直径大于 1mm 时, Re 数大于 200,文献[1]的结果不再适用。气泡在波浪中的平均上升速度在三种

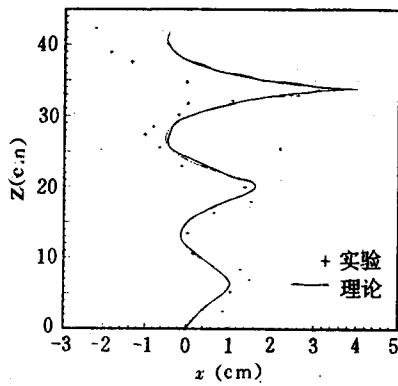
波况下都不再随气泡直径的增大而增大,而是趋向于某一定值。这与文献[3]、[4]中气泡在静水中稳定上升速度的变化趋势基本一致。

3.2 气泡运动轨迹

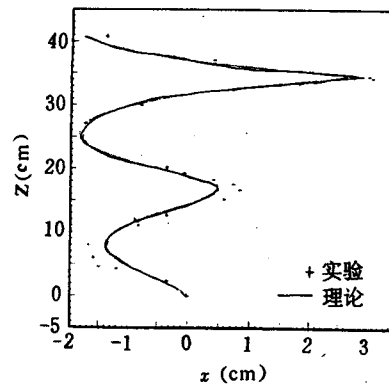
在研究气泡运动轨迹时,我们对三种波况各选取一个典型的气泡进行研究。在气泡上升过



a. 波高:4.5cm
波频:0.95Hz
波长:1.59m
气泡直径:0.6mm
气泡初始深度:40cm



b. 波高:7.0cm
波频:1.17Hz
波长:1.12m
气泡直径:0.87mm
气泡初始深度:40cm



c. 波高:7.5cm
波频:1.27Hz
波长:0.96m
气泡直径:0.83mm
气泡初始深度:40cm

图5 气泡的运动轨迹

程中,每隔五帧图像记录一次气泡位置,得到运动轨迹。根据文献[6]的理论模型计算实验条件下的气泡运动轨迹,并与实验结果比较。其结果见图5。由图可见,当气泡离液面较远,与其距离大于波高时,三种波况下理论和实验结果都符合得很好。当气泡上升到液面附近,与其距离和波高为同一量级后,图5(a)、(c)中理论和实验出现一定差异。这主要是因为理论模型没有考虑自由液面的影响。

4 结 论

当气泡直径小于1mm时,气泡在波浪中平均上升速度与其在静水中稳定上升速度的差别不大。波浪对气泡平均上升速度的影响很小,且是随机的。当气泡直径大于1mm时,气泡的平均上升速度不再随气泡半径而增大,而是稳定在某一定值附近。这与静水中稳定上升速度的变化趋势基本一致。

当气泡直径小于1mm且气泡到液面的距离大于波高时,实验结果与理论符合得很好。当气泡上升到液面附近,与其距离和波高为同一量级后,由于自由液面的影响,理论和实验有所差异。

致 谢

中国科学院力学研究所的黄振华、唐驰同志在实验中给予巨大帮助,特此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Clift R., Grace J R. and Weber M E. Bubbles, Drops and Particles. Academic Press, 1978.
- 2 Ryskin G. and Leal L G. Bubble Deformation in an Axisymmetric Straining Flow. J. Fluid Mech., 1984, 148:37.
- 3 Duineveld P C. The Rise Velocity and Shape of Bubbles in Pure Water at High Reynolds Number. J. Fluid Mech., 1995, 292:325.
- 4 Meere D W. The Velocity of Rise of Distorted Gas Bubbles in a Liquid of Small Viscosity. J. Fluid Mech., 1965, 23:749.
- 5 Xiang-qun Song, Fujio Yamamoto, Mitsuyuki Koketsu, Manabu Lguchi, Junichi Ohta, Yuichi Murai. PIV Measurement and Numerical Analysis of a Single-Rising Bubble Two-phase Flow. Proceedings of The Fourth Asian Symposium on Visualization, 1996, 347.
- 6 刘春嵘,周显初. 气泡在波浪中的运动. 水动力学研究与进展, 1996, 11(5):576.

The Experimental Research of Bubble Motion Waves

Lu Chun-rong Zhou Xian-chu Huhe Ao-de

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract The motion of a bubble in waves was investigated experimentally in this article. The mean rising velocity of a bubble in waves and the motion orbits of bubbles were gotten and compared with theory. It was found that when the diameter of a bubble was smaller than 1mm, the mean rising velocity of a bubble in waves was almost the same as the steady rising velocity in quiescent water. The effect of waves was small and random. When the diameter of a bubble was greater than 1mm, the mean velocity of a bubble in waves did not increase with the increase of the bubble diameter, and it would get to a constant value. This was the same as the situation in quiescent water. When the diameter of a bubble was smaller than 1mm and the distance from the free surface was greater than the wave height, the theoretical results were in close agreement with measurements.

When a bubble was near the free surface, there were some differences between experiment and theory because of the effect of the free surface.

Key words bubble, bubble motion, experiment.