

水下超声速气体射流初期流场特性的实验研究

施红辉,汪剑锋,陈帅,董若凌

(浙江理工大学机械与自动控制学院,浙江杭州 310018)

摘要:实验研究三维水下超声速气体射流,重点分析气体射流初期气泡运动演化过程,对射流初期数值模拟结果做相关辅证.同时引进非圆整度概念,定量分析水下气体射流初期气泡运动及形态变化的某些规律,得到一些实验分析结果,为工程实践提供了有用的参考数据.

关键词:水下气体射流;气泡运动;动量射流

中图分类号:O358 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.0253-2778.2014.03.012

引用格式: Shi Honghui, Wang Jianfeng, Chen Shuai, et al. Experimental study on flow characteristics at the initial injection stage of underwater supersonic gas jets [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014, 44(3): 233-237.

施红辉,汪剑锋,陈帅,等.水下超声速气体射流初期流场特性的实验研究[J].中国科学技术大学学报,2014,44(3):233-237.

Experimental study on flow characteristics at the initial injection stage of underwater supersonic gas jets

SHI Honghui, WANG Jianfeng, CHEN Shuai, DONG Ruoling

(College of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: An experimental research was carried out to study three-dimensional underwater supersonic gas jets. The evolutionary process of initial bubble motion of the gas jets was analyzed, providing some comparable evidence for the results of prior numerical simulation. In addition, quantitative data of the initial bubble motion and some laws of the morphological change of the underwater gas jets by introducing the concept of non-roundness were given. This paper is presented as a useful reference for engineering practice.

Key words: underwater supersonic gas jets; bubble motion; momentum jet

0 引言

水下气体射流广泛应用于国防及其他工业领域中.特别是在水下推进器的研发中,水下气体射流具有重要的研究价值.在21世纪初,有学者就提出了

潜射导弹破水发射技术应用于潜艇中的想法^[1],并且已开展了与该项技术相关的实验研究,从已知文献中可以看到,此项新技术的关键就是对于水下高速气体射流的掌握.现今,水下气体射流的研究包括了实验研究与数值模拟,而数值模拟的研究工作突

收稿日期:2012-09-24;修回日期:2013-01-07

基金项目:国家自然科学基金(10672144),浙江省自然科学基金(Y107073)资助.

作者简介:施红辉(通讯作者),男,1962年生,博士/教授.研究方向:可压缩性多相流动,湍流复杂流动,水下推进技术.

E-mail: hhshi@zstu.edu.cn

出表现在模拟水下燃气泡的生长过程以及对初期气水流场的物理参数的分布计算,这其中主要成果包括文献[2-5]关于水下气体射流初期情况的模拟结果.他们都在各自的研究中重点探讨了水下初期燃气泡的生长和演化过程,但是,有能与数值模拟结果进行相互辅证的气体射流初期气泡生长的实验结果较少.本文进行了三维水下气体射流的可视化工作,并分析了气体射流初期气泡的运动演化过程及气泡定量刻画,为数值模拟工作提供了参考.

1 实验系统

图 1 是三维水下超声速气体射流实验装置图.采用高压气体(压缩空气)作气源,经过减压器将压力稳定至实验所需的压力,利用电磁阀控制三维水下气体射流的启闭.三维水槽的尺寸为 $3\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1.5\text{ m}$,并在前后两侧分别开有大小为 $0.8\text{ m} \times 1.1\text{ m}$ 的 6 个观察窗,观察窗上覆盖有机玻璃,足够大的三维水槽保证了射流的完全自由充分发展.高速摄影仪为 KEYENCE VW-6000/5000,拍摄速度为 500 FPS,并且在实验过程中额外补充了两盏各 1 300 W 的光源以保证能记录清晰的射流影像.

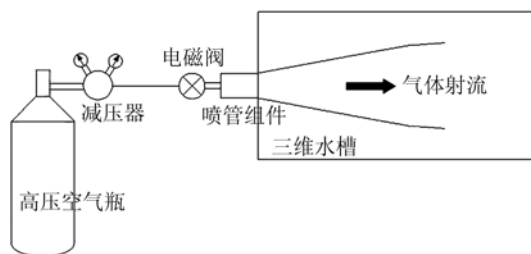


图 1 三维水下超声速气体射流实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of three-dimensional underwater supersonic gas jets

实验在室温室压、注水高度(自由液面到喷管中心的距离) $h=21.5\text{ cm}$ 下进行,采用两个不同设计马赫数的 Laval 喷嘴,分别实验 4 个设定工况下的气体射流. Laval 喷嘴标示为 A, B 喷嘴,其相关参数如表 1 所示,表 2 是实验参数表,其中驻室压力值为绝对压值.

表 1 A, B 喷嘴相关参数

Tab. 1 Relevant parameters of nozzle A and B

喷嘴	喉部截面直径 d/mm	出口截面直径 d_e/mm	出口设计马赫数 Ma
A	4.5	8.7	2.87
B	4.3	5.0	1.72

表 2 气体射流实验参数表

Tab. 2 Experimental parameters of the gas jets

实验 工况	驻室压力 P/MPa	注水高度 h/cm	射流气体 膨胀状态		喷嘴出 口波系	
			A 喷嘴	B 喷嘴	A 喷嘴	B 喷嘴
工况 1	1.1	21.5	过膨胀	欠膨胀	斜激波	膨胀波
工况 2	1.6	21.5	过膨胀	欠膨胀	斜激波	膨胀波
工况 3	2.1	21.5	过膨胀	欠膨胀	斜激波	膨胀波
工况 4	3.1	21.5	过膨胀	欠膨胀	斜激波	膨胀波

2 实验结果分析与讨论

2.1 气泡运动演化过程

图 2 是 A 喷嘴在工况 1 下的演化过程,是射流从未开始到开始后,气泡慢慢生成,继而长大的一个过程.

根据实验结果,这里简述气泡生成与生长的基本过程:当设定好驻室压力后,随着电磁阀的开启,驻室里的气体经过 Laval 喷嘴后以超声速入射,当超声速气体入射到水中后,会在水中慢慢形成一个由水包裹的气囊,称之为“气泡”.随着连续不断喷射而出的气体,气泡在水中慢慢长大,并且其形状也随时间而变化;因为入射气体的初始动量都较大,使得气泡的生长沿着轴线方向拉伸为一个“椭球体”形状(图 $t=34\text{ ms} \sim t=52\text{ ms}$).随后,因为液相环境的巨大惯性,使得气体在水的阻滞作用下开始向径向方向扩展(图 $t=54\text{ ms} \sim t=72\text{ ms}$),但同时因为有气体源源不断地输入射流,“椭球体”气体在不断膨胀,并促使“椭球体”同时向前流动,气体在轴向方向与径向方向同时拓展,气泡也就慢慢长大起来.这个过程就是气体射流初期气泡的形成过程,也称之为射流初期发展阶段,随后,射流进入持续增长的过程.

图 3 是引自文献[4]的燃气射流初期数值模拟的结果,通过对比数值模拟结果与气泡生成实验可视化结果,可以看到实验气泡的生成与数值模拟气泡生成的过程基本一致.数值计算指出:喷射主要包含 3 个主要过程,即射流气泡拉伸向下游运动(图 3(a)),气泡径向扩张长大(图 3(b)),气泡轴向与径向的同时扩张长大(图 3(c)、(d)).由此可知,从图 2 的实验结果中观察到的现象可以被文献[4]的数值计算很好地解释.

2.2 气泡运动定量刻画

通过不同驻室压力下的气泡可视化结果,发现气泡初期生长拉伸的长度的不同.这是因为初期生长的过程中,是射流气体初始动量占主导,驻室压力

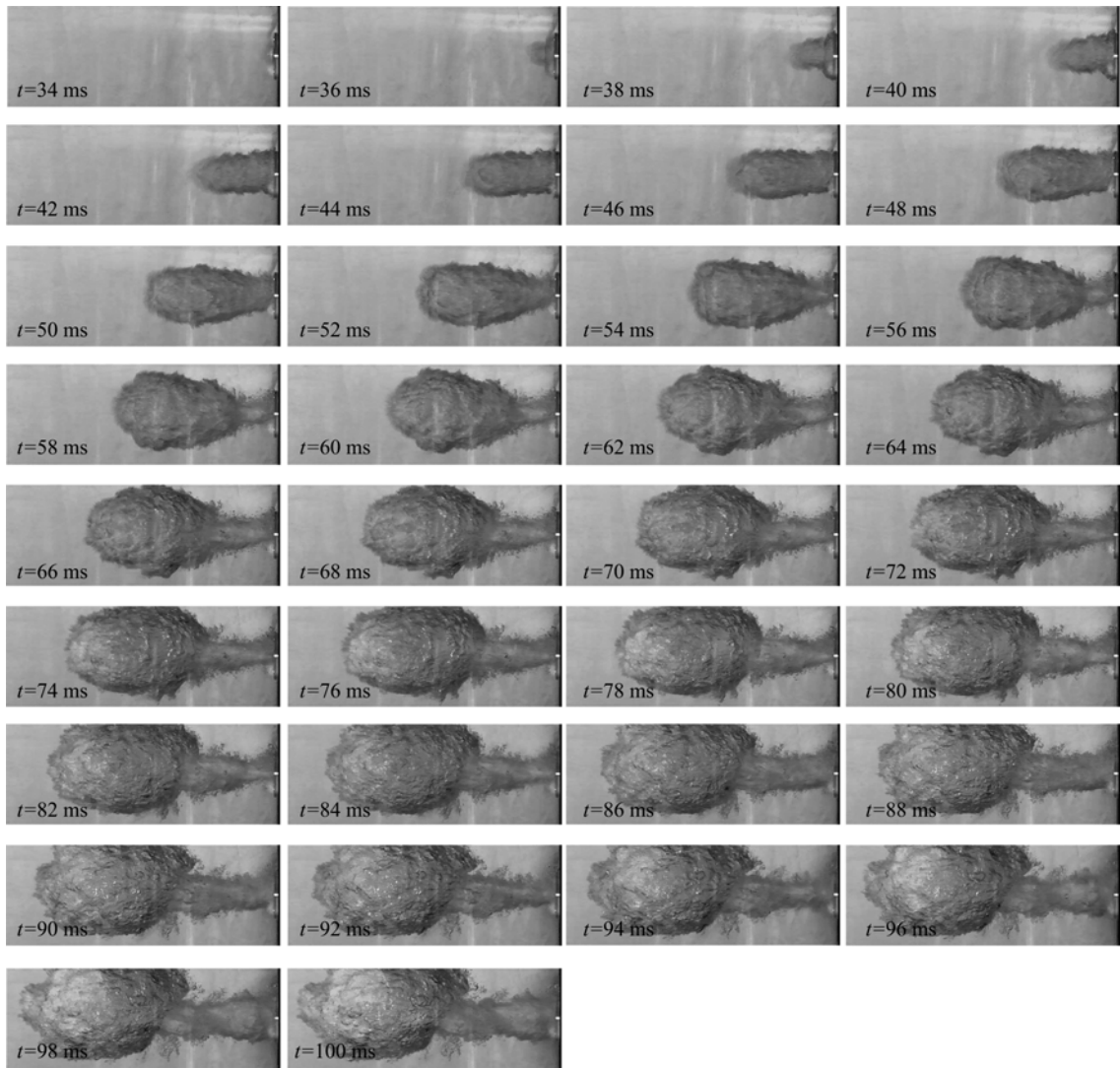


图 2 气泡生长过程演化(A 喷嘴, 驻室压力 $P_{01} = 1.1 \text{ MPa}$)

Fig. 2 Evolution of the bubble growth(nozzle A, $P_{01} = 1.1 \text{ MPa}$)

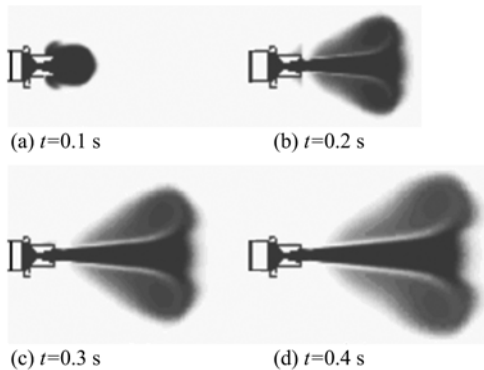


图 3 燃气射流初期数值模拟结果^[4]

Fig. 3 Results of numerical simulation of initial gas jet^[4]

的不同导致了初始射流动量的不同,因此也使得气泡开始生长的拉伸向下游运动的不同.同时,气泡在水环境下会因剪切不稳定性、不断地变化的气液边

界影响下,气泡形态会随着时间的变化而不同.气泡形态的变化也正是反映了超声速气体射流作为气液两相流流动,具有复杂湍流作用及边界运动,且射流内部包含复杂波系结构的发展的各种变化和趋势.下面我们介绍气泡运动过程中定量刻画的参量方法及相关含义.

2.2.1 参量定义

定义参量非圆整数度 ϵ ,

$$\epsilon = \frac{a/b}{x/d} \tag{1}$$

式中, ϵ 为非圆整数度, a 为气泡轴向扩张尺寸, b 为气泡径向扩张尺寸, x 为气泡最前缘到喷管出口的距离,如图 4 所示; d 为喷嘴喉部截面直径,其值见表 1.

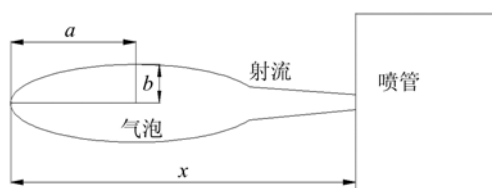


图 4 气泡参量非圆整度的定义

Fig. 4 Definition of non-roundness of a bubble

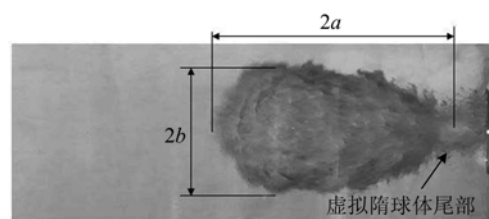
关于非圆整度 ϵ 的含义作以下几点说明. 第一, 由以上可视化结果可知, 气泡的形态是随着时间的推移而发生不断的变化的. 为消除时间参数, 特别定义气泡前缘到喷管出口的距离为变量值 x , 同时选取喷嘴喉部截面直径 d , 经过 x/d 的转化处理后得到的结果里将不会有时间的显函数表达. 第二, 因为在最初的时间间隔上, 气泡还未完全形成, 为此, 在定量刻画气泡形态的时候, 选择气泡在向径向扩展之前(即气泡已经相对稳定)且即将向径向扩展的时刻作为开始点. 第三, 由可视化得到的图片, 后续的气体是紧随着前面气泡的, 因此气泡尾部的范围作如下处理: 以上下边缘椭圆延伸的交点为虚拟尾部. 第四, 因为气体射流的不稳定性, 气液掺混以及边界层的运动而导致气体向四周蔓延, 有些气体在破碎后以小气泡的形式运动. 第五, 因为随着时间的推移, 浮力的作用越加明显, 气泡整体向上偏移, 有的部分已经超出拍摄视野范围, 于是对于上下边沿的界定也做相关处理. 这里还分为两种情况: 如果气泡还在扩展中, 上边界在图片视野内, 取上下边界的平均值; 如果气泡还在扩展中而上边界已不在图片视野内, b 值就取为从平均下边界到射流中心线的距离. 如果气泡的形态已经转变为羽流了, 或者已经超出图片视野了, 则不在测量范围内. 有了以上的假设及近似处理, 就可以对气泡形态的变化做相关测量. 图 5 是实际测量中的情况.

2.2.2 气泡运动形态变化定量分析

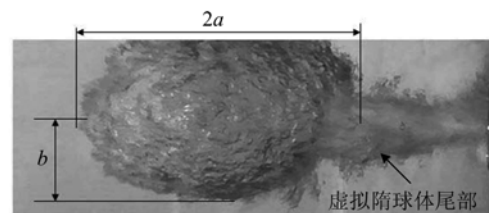
按照前述的原则, 对图片进行测量作图分析, 图 6 是 A, B 喷嘴在 4 个工况下的数据和一次拟合曲线.

在图 6 中, 可以看出在不同驻室压力下的 a/b 与 x/d 的变化关系. 很明显, 除 A 喷嘴工况 2 外, A, B 喷嘴各个工况下的一次拟合曲线斜率都为负值. 由斜率定义得到

$$k = \frac{a_2/b_2 - a_1/b_1}{x_2/d - x_1/d} \quad (2)$$



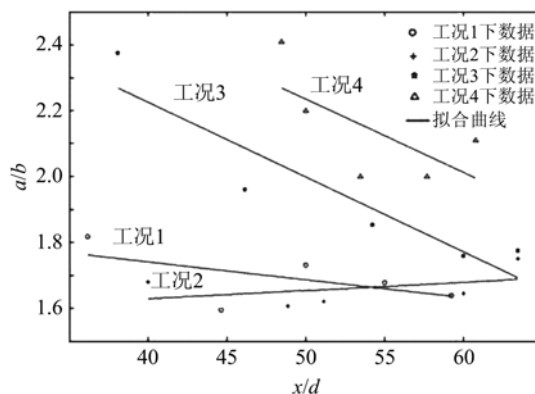
(a) 气泡在视野内的情况



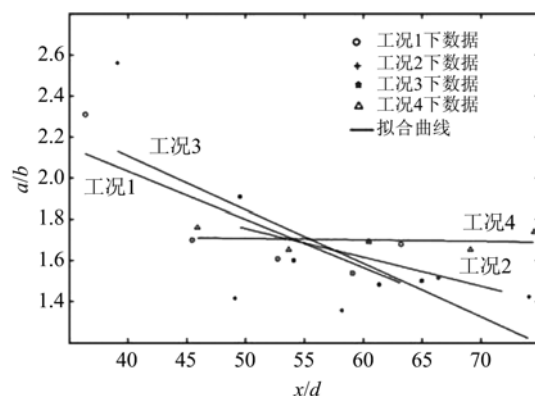
(b) 气泡上界不在视野内的情况

图 5 实际测量示意图

Fig. 5 Illustration of the measuring positions



(a) A 喷嘴



(b) B 喷嘴

图 6 A, B 喷嘴在各个工况下测量数据及一次拟合曲线

Fig. 6 Measurement data and fitting curves of nozzle A and B

式中, a, b, x, d 的定义见式(1), 下标 1 与 2 分别表示某时刻与下一个时刻. 因为 $k < 0$, 于是

$$\frac{a_2/b_2 - a_1/b_1}{x_2/d - x_1/d} < 0,$$

而 $x_2 > x_1$, 所以得 $a_2/b_2 - a_1/b_1 < 0$, 最后得到

$$a_2/b_2 < a_1/b_1 \quad (3)$$

因为随着时间的推移, 气泡在轴向与径向都变大, 即 $a_2 > a_1$, $b_2 > b_1$, 但同时, 如式(3)指出的那样, 随着 b 的增加, a 没有相应地等量增加; 换句话说, a 的变化趋势没有 b 的变化趋势快, 这意味着气泡由“椭球体”慢慢向趋近于“球体”的方向发展. 然而文献[5]指出, 气水界面随着射流的发展继续沿纵向和横向发展, 更因为受燃气的冲击, 其纵向推进速度要远大于横向推进速度. 这个不一致是因为测量的 a 值选取的标准造成的. 文献[5]中的气泡指的是尚未完全发展为成型的气泡, 甚至其气泡尾部还没有形成, 只有气泡前缘, 它的 a 值测量长度是气泡前缘到喷嘴出口的距离. 本文的实验发现, 因为气泡的虚拟尾部后面存在有含高初始动量的射流^[6-7], 该段射流把气泡的虚拟尾部推向了下游, 所以虚拟尾部不是位于喷嘴出口处. 这样造成 a 的增加变化趋势没有 b 的增加变化趋势快, 这也契合了图 6 中各个工况下的趋势变化, 即斜率都为负值.

另外, 比较图 6(a) 中的工况 1、工况 3 和工况 4 可知, 随着驻室压力增大, 其斜率的绝对值是呈增大趋势的, 因此说, 气泡虚拟尾部后面的含高初始动量的射流段是随着驻室压力的变大而更加强烈与稳定; 或者说, 驻室压力的变大, 能够得到更加稳定的动量射流. 图 6(b) 中的趋势也是如此. 由于实验数据比较分散, 很难比较从 A 喷嘴和 B 喷嘴产生的射流的差别. 然而, 图 6 中所示的数据的差距也不是很大, 再根据实验得到的影像资料, 初步判断从这两个喷嘴产生的射流的形态基本接近或相似. 当然, 有关射流马赫数以及喷嘴出口直径的影响, 还有待进一步分析和讨论.

3 结论

(I) 流动可视化的结果得到初期气泡的形成与发展的 3 个过程, 即射流气泡在初始动量作用下的拉伸向下游运动, 气泡在液相大惯性的阻滞下的径向扩张长大和气泡轴向与径向的同时扩张长大这 3 个过程.

(II) 定义了非圆整度这个参量, 说明了非圆整度表示的物理含义, 即表示气泡在某时刻下, 其下一时刻相对这一时刻的变化趋势.

(III) 通过测量得到 $a/b \sim x/d$ 图, 能判断气泡

运动的变化趋势, 在图上得到的斜率为负值时, 表示含有高动量的初始气泡运动中轴向运动比径向运动变化快, 斜率为正时则反之.

(IV) 在初期气泡运动过程分析中, 指出动量射流在气体射流中的重要作用及其影响, 并且指出同一喷嘴下, 随着驻室压力的提高, $a/b \sim x/d$ 图中斜率的绝对值越大, 动量射流段越长, 射流也愈加稳定.

参考文献 (References)

- [1] Weiland C J, Vlachos P P, Yagla J J. Concept analysis and laboratory observations on a water piercing missile launcher[J]. *Ocean Engineering*, 2010, 37: 959-965.
- [2] Wang Cheng, Ye Qu Yuan, He You Sheng. Calculation of an exhausted gas cavity behind an under-water launched missile [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 1997, 14(3): 1-7.
王诚, 叶取源, 何友声. 导弹水下发射燃气泡计算[J]. *应用力学学报*, 1997, 14(3): 1-7.
- [3] He Xiaoyan, Ma Handong, Ji Chuqun. Numerical simulation of gas jets in water [J]. *Journal of Hydrodynamics Ser A*, 2004, 19(2): 207-212.
贺小艳, 马汉东, 纪楚群. 水下气体射流初期数值研究 [J]. *水动力学研究与进展 (A 辑)*, 2004, 19(2): 207-212.
- [4] Cao Jiayi, Lu Chuanjin, Li Jie, et al. Research on dynamic characteristics of underwater supersonic gas jets [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2009, 24(5): 575-582.
曹嘉怡, 鲁传敬, 李杰, 等. 水下超声速燃气射流动力学特性研究 [J]. *水动力学研究与进展*, 2009, 24(5): 575-582.
- [5] Wei Haipeng, Guo Fengmei, Quan Xiaobo. Numerical research on gas jet in water [J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2009, 300(2): 37-39, 47.
魏海鹏, 郭凤美, 权晓波. 水下气体射流数值研究 [J]. *导弹与航天运载技术*, 2009, 300(2): 37-39, 47.
- [6] Shi Honghui, Chen Shuai, Dong Ruoling, et al. Investigation on the momentum jet during upward high-speed underwater gas jets injection [J]. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University*, 2012, 29(3): 366-369.
施红辉, 陈帅, 董若凌, 等. 水下超声速气体向上喷射时的动量射流特性研究 [J]. *浙江理工大学学报*, 2012, 29(3): 366-369.
- [7] 陈帅. 三维水下超声速气体射流的实验研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2012.