

# 水下航行体垂直发射过程气幕形态特性研究

刘海军<sup>1,2</sup>, 王 聪<sup>1</sup>, 彭兴芝<sup>2</sup>, 邹振祝<sup>1</sup>, 王本利<sup>1</sup>, 隗喜斌<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 航天学院, 150001 哈尔滨; 2. 河北大学 建筑工程学院, 071002 河北 保定)

**摘要:** 采用 VOF 多相流混合模型和标准  $k - \varepsilon$  湍流模型对水下航行体气幕垂直发射过程中气幕形态特性进行了深入研究. 研究了气幕的形态、长度和夹断点距离随马赫数的变化规律, 与实验结果进行了对比分析, 分析结果说明了本数值方法的正确性和可靠性. 得到了气幕垂直发射过程中的气幕的长度和夹断点距离在  $Ma < 1.1$  时随马赫增大逐渐增加, 而  $Ma \geq 1.1$  时, 介于 21 ~ 22 之间的气幕夹断点距离随马赫数的增加而基本不再变化. 获得的气幕形态轮廓随马赫数的增大而增大.

**关键词:** 水下航行体; 垂直发射; 多相流; 水下气幕; 夹断点

中图分类号: O351.2

文献标志码: A

文章编号: 0367 - 6234(2013)05 - 0007 - 06

## Shape characteristics of gas screen of underwater vehicle vertical launch

LIU Haijun<sup>1,2</sup>, WANG Cong<sup>1</sup>, PENG Xingzhi<sup>2</sup>, ZOU Zhenzhu<sup>1</sup>, WANG Benli<sup>1</sup>, WEI Xibin<sup>1</sup>

(1. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Hebei University, 071002 Hebei Baoding, China)

**Abstract:** The shape characteristics of gas screen in water are thoroughly studied by adopting the multiphase VOF model and the standard  $k - \varepsilon$  turbulence model. The shape, length and location of pinch-off of the gas screen have been calculated by numerical method, and the results are well consistent with the experimental results, which prove the accuracy and reliability of the numerical method. The length and pinch-off position of the gas screen gradually increase as the Mach number is increased in the process of the vertical launching technology of the gas screen when  $Ma < 1.1$ . However, when  $Ma < 1.1$ , the length of pinch-off position from 21 to 22 does not vary, and the shape contour of the gas screen increases as the Mach number is increased.

**Key words:** underwater vehicle; vertical launch; multiphase flow; the gas screen; pinch-off

深水垂直发射的水下航行体具有隐蔽性能好及生存能力强等优点, 若能够实现较高速发射, 还能够大幅提高其突防能力, 具有较大的应用价值. 水下航行体在垂直发射、水下运动及出水的全过程中, 都处于多相流场环境下, 同时还可能受到水锤冲击、空泡溃灭、载体运动及波浪等因素的干扰作用, 流场结构复杂, 力学环境恶劣. 为提高水

下垂直发射的成功率, 必须深入掌握航行体发射过程中的流体动力特性, 并通过改进其发射方式或弹体结构的方法, 以改善出筒过程、水下运动及出水过程的航行体受力情况, 降低航行体的结构破坏和弹道失稳等风险.

Yagla 等<sup>[1]</sup>提出一种新型的水下航行体垂直发射方式——气幕发射方式, 指的是利用气体射流在发射筒筒口上方形成一个气体通道, 航行体在气体通道中发射出筒、水下运动并出水的发射方式. 沾湿发射和密封发射是常规的发射方式, 而气幕发射是一种新型发射方式.

为研究气幕发射, 需研究形成气幕的气体射流形态特性. Helmholtz<sup>[2]</sup>, Kelvin<sup>[3]</sup> 和 Rayleigh<sup>[4]</sup> 等给出了控制射流的非稳定性理论的数学模型.

收稿日期: 2012 - 04 - 11.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10802026).

作者简介: 刘海军(1979—), 男, 博士研究生;

王 聪(1968—), 男, 教授, 博士生导师;

邹振祝(1937—), 男, 教授, 博士生导师;

王本利(1944—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 刘海军, dadingzichi@163.com.

Loth 等<sup>[5]</sup>使用皮托探测设备对圆形的湍流气体垂直喷入到静止水中进行测量,得到喷嘴平面的压力不同导致可压缩气体射流的膨胀. Drozdov 等<sup>[6]</sup>采用试验的方法对液体射流进行了研究,分析了压力和动力特性对气液交界面的影响. Vaibhav 等<sup>[7]</sup>研究了气体射流与周围液体之间的相互影响,获得气体射流产生非稳定性频率随喷出气体动量的增加而增大. Aydemir 等<sup>[8]</sup>观测了水下圆形射流形成涡环的周期,得到流场中产生涡环的平移速度大于层流的切向速度,说明气体射流的增长速度加快. Mohamad 等<sup>[9]</sup>使用可视化技术研究了水下气体射流的结构,可知其随受纳流体的密度和粘性不同而不同,水的密度和粘度较大,故喷入水中的气体射流的长度较小和锥角较大. Dahikar 等<sup>[10]</sup>采用数值仿真的方法对水下气体射流进行了研究,得到了水下气体射流的长度随喷管喷口的方向自上而下转动逐渐减小. Chris J. Weiland 等<sup>[11-13]</sup>对水下气体射流进行了研究,设计了一种新的水下发射平台,并使用高速摄像机对水下气体射流的边界进行了直接测量,他利用强大的图像处理方法,分析了实验图像的边界条件,得到了马赫数对内面稳定性的影响和 Rayleigh-Taylor 和 Kelvin-Helmholtz 机理对内面运动的重要性.

姚琰等<sup>[14]</sup>对高速空气射流在受限约束下的动力学行为进行了试验研究,探究发射筒内充水情况下气体射流的排导过程. 施红辉等<sup>[15-16]</sup>对水下高速气体射流进行试验研究,得到胀鼓频率与回击频率的关系. 朱卫兵等<sup>[17]</sup>采用多相流 VOF 模型对水下高速气体射流的流场进行了数值模拟,得到了高速气体射流的初期气泡的变化过程,初步给出了气泡颈缩产生断裂的原因是气泡内外的压力差.

综上所述,国内外大多数科研工作者对气体射流的形成原理和特性进行了研究,但是将气幕技术应用在水下航行体垂直发射问题中的文献较少,有待开展系统的研究工作. 针对有重力影响的水下航行体气幕发射方式下气幕形态特性,本文采用基于均质平衡流理论的多相流 VOF 模型和标准  $k-\varepsilon$  湍流模型对其进行了数值模拟,在水的发射深度不变的情况下研究了水下气幕的形态、长度和夹断点距离随马赫数的变化规律.

## 1 数学模型

### 1.1 控制方程

描述高速气体射流运动过程的控制方程主要

包括混合物的连续方程、动量方程和湍流模型.

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0. \quad (1)$$

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(u_j \rho T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_T. \quad (2)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu_i) \left( \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right) \right] - \rho g. \quad (3)$$

气体状态方程:

$$p = \rho RT. \quad (4)$$

式(1)~(4)中: $\rho$ 为流体的密度; $p$ 为混合物的压强; $\mu$ 为流体的动力粘性系数; $\mu_i$ 为湍流粘性系数; $g$ 为重力加速度; $c_p$ 是比热容; $T$ 是流场温度; $k$ 为流体导热系数; $S_T$ 为黏性耗散项; $R$ 为气体常数.

### 1.2 湍流模型

标准的  $k-\varepsilon$  湍流模型如下:

$$k = \frac{u'_i u'_i}{2}, \varepsilon = \frac{\mu}{\rho_m} \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right), \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon, \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (G_k - G_b) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (7)$$

式中: $k$ 和 $\varepsilon$ 分别为湍动能和耗散率; $G_b$ 由浮力引起的湍动能 $k$ 的产生项; $G_k$ 为由平均速度梯度引起的湍动能 $k$ 的产生项; $\mu_t$ 为湍流粘性系数; $\sigma_k$ 和 $\sigma_\varepsilon$ 分别为 $k$ 和 $\varepsilon$ 的普朗特数;5个经验常数取值分别为 $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ,  $C_\mu = 0.09$ .

## 2 试验与数值仿真

试验室具备进行多次重复性实验条件,还有高性能数值计算系统,因此对实验原形进行了数值仿真.

### 2.1 实验条件及设备

本试验设备示意图见图1,有通气系统、注水及排水系统、图像采集及数据分析处理系统、灯光系统、模型系统和水箱系统6部分组成. 实验条件是采用未加处理自来水,水深是660 mm;  $0.9 \text{ m}^3$ 的储气瓶可为实验提供至少5 s的恒定工作压

力; 发射筒置于水箱底部, 喷管的喷口位于发射筒的筒口, 水箱设计安装了透明的有机玻璃, 便于拍

摄实验过程; 采用 12 个 200 W 的水下灯和一个 1 kW 新闻灯; 一台高速摄像机和一部 DV 摄像机。

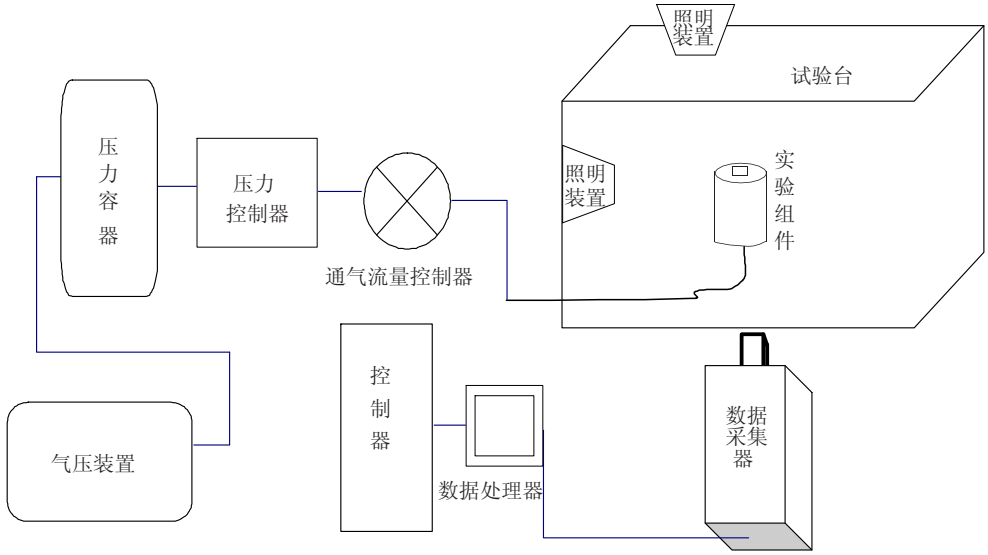


图 1 试验系统示意图

### 2.2 数值仿真方法

采用有限体积法对控制方程进行离散, 利用 Simple 方法求解混合介质 RANS 方程, 采用二阶迎风格式对动量方程、对流项和湍流耗散项进行离散, 采用 PRESTO! 对压力项进行离散。利用 FLUENT 中的自定义函数 (UDF) 和动网格技术, 求解圆柱体出筒过程中的运动速度及位移。

### 2.3 计算模型及边界条件

航行体的长细比  $L/D = 5$ ,  $L$  为航行体的长度,  $D = 60 \text{ mm}$  为航行体喷管的直径。计算域由筒内的气体和筒外的水域组成。图 2 给出了流场计算区域、网格和边界条件的示意图, 对航行体头部附近的网格进行了加密处理。流场的长度是 2 m, 宽度是 1 m。

## 3 计算结果及分析

采用 FLUENT 软件计算了多种工况下的高速气体射流的气幕演化过程, 并分析了气幕的形态、长度、夹断点的距离及其形成时间。

### 3.1 气幕形态分析

喷管流出的高速气体射入周围静止的水中形成干燥的气体通道, 称为气幕。气幕形态和流场结构变化过程见图 3(a), 图中黑色是水, 灰色是空气。现在分析云图变化过程的形成原因及机理。

$Ma = 1.23$  的超音速气体喷入水中, 其受到发射筒口附近水的惯性及水静压力作用, 气团在气幕射流方向上的成长速度依然较慢, 在筒口附近的气幕形态, 径向上气团生成较快, 因此气幕形成了圆锥型。气团在径向的生长受到气体与液体的卷吸作用变慢, 气团在气幕方向上的生长速度变快, 气团向上运动, 气团尾部的压力减小, 气幕出现收缩, 气团的压力没有得到及时的补充, 气幕出现了颈缩, 气团内部的压力开始增大, 当压力增大到与周围水的压力相等时, 气幕的颈缩结束, 后面的气团追上了气幕前端的气团两者开始融合, 气团开始膨胀, 气幕交界面继续向上运动, 在气幕的后部又开始出现了收缩, 这样气幕周期性出现膨胀、收缩和颈缩过程。在发射筒口喷出气体作用下气幕继续沿着气幕方向向上运动, 气幕接近水面时, 自由液面开始向上隆起, 气幕继续向上运动, 隆起的自由液面开始破裂, 气幕中的气体与大气形成了贯通的气体通道, 因水的密度较大, 在重力的作用下, 隆起的液面破裂后开始回落到液体

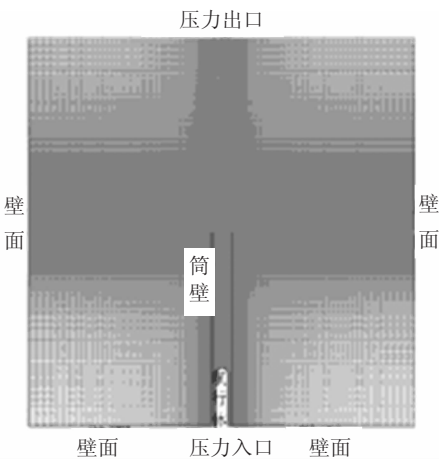
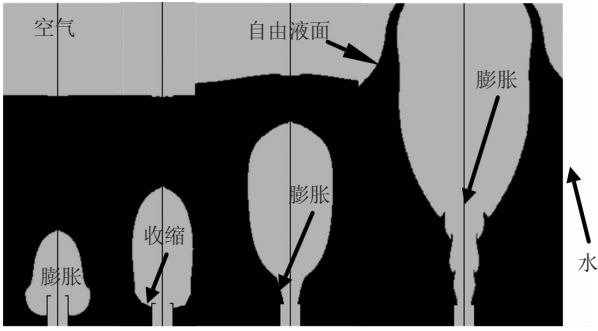


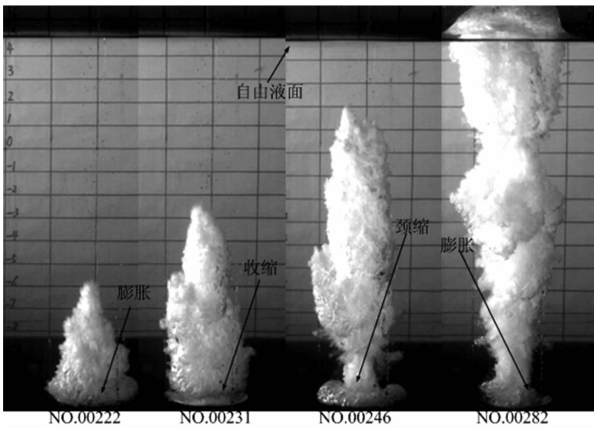
图 2 计算区域与网格

中,至此形成了连续的出水气幕,气幕形态的变化过程是周期性的。

图3(b)是试验云图,气幕在此工况下数值与试验的结果均未出现夹断点,水下气幕形成了连续的出水气幕.因此,采用数值模拟的方法可以对多种工况复杂条件的气幕形态进行研究和气幕垂直发射研究。



(a) 数值仿真云图



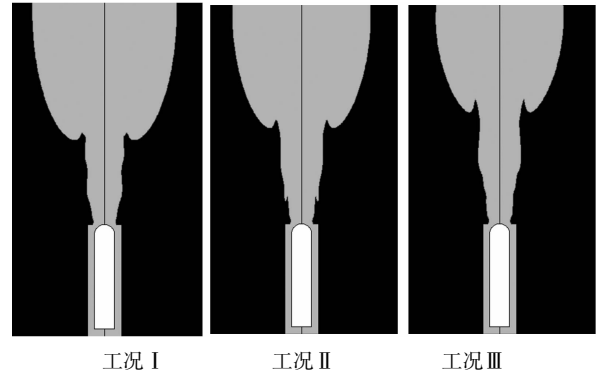
(b) 试验云图

图3  $Ma = 1.23$  的气幕变化云图

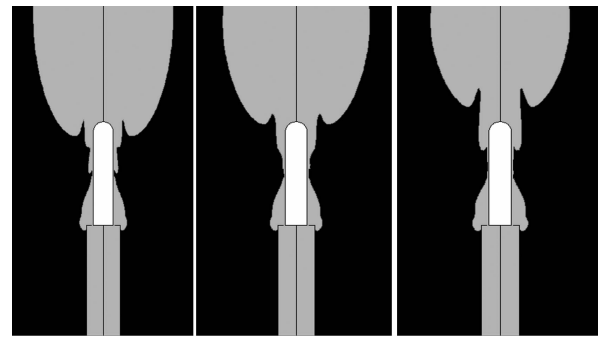
三种工况分别是:  $Ma = 1.34$  为工况 I,  $Ma = 1.41$  为工况 II,  $Ma = 1.61$  为工况 III. 图4(a)是航行体出筒过程 ( $h = 0$ ) 时的气幕云图,三种工况气幕无太大区别. 图4(b)航行体出筒过程 ( $h = L$ ) 时,与筒口相连的气幕出现了不同形态: 工况 I 的气幕在航行体周围出现3次膨胀、2次收缩及2次颈缩现象; 工况 II 出现2次膨胀和1次收缩现象, 工况 III 出现2次膨胀和1次收缩现象。

航行体头部到达发射筒口即 ( $h = 0$ ) 时,三种工况的气幕均形成了连续出水气幕,三种工况的气幕形曲线变化规律如图5所示. 从图中可以看出,  $h/L \leq 3$  时,三种工况的气幕形态半径沿气幕轴向长度的增大逐渐增大,且重合;  $3 < h/L$  时,气幕形态的半径随着气幕轴向长度的增加而

逐渐增大至极大值后变化趋缓,气幕形态轮廓随着马赫数的增大而增大。



(a) 水下航行体出筒过程 ( $h = 0$ )



(b) 水下航行体出筒过程 ( $h = L$ )

图4 航行体出筒过程气幕云图

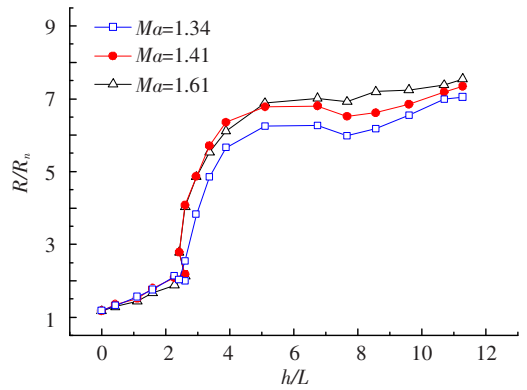


图5 航行体发射出筒过程中气幕形态曲线

水下航行体出筒过程中 ( $h = L$ ) 时的气幕形态变化曲线,见图6,  $h/L \leq 3$  时,气幕形态半径随着气幕轴向长度的增加逐渐减小至极小值后又逐渐上升;  $3 < h/L$  时,气幕形态半径随着气幕轴向长度的增加逐渐增大至极大值后变化趋缓,气幕形态轮廓随着马赫数的增大而逐渐增大。

### 3.2 气幕长度分析

用统计学的方法定义气体射流形成气幕的长度,即在气幕的中心线上气体体积分数不低于

95%的气体所占的空间.图7给出了气幕长度随马赫数的变化曲线,图中 $L$ 为气幕的顶端与首次出现夹断点位置之间在中心线上的长度. $Ma < 1.1$ ,气幕长度曲线随马赫数的增加逐渐上升; $Ma \geq 1.1$ 气幕长度随马赫数增加基本不变,此时,气幕没有夹断点出现,并且完全出水,在该试验条件下, $Ma \geq 1.1$ 时,气幕形成了连续的出水气幕,气幕的长度就是水的深度,故气幕的长度介于21~22之间不随马赫数的增大而变化.数值模拟结果与试验结果吻合较好.

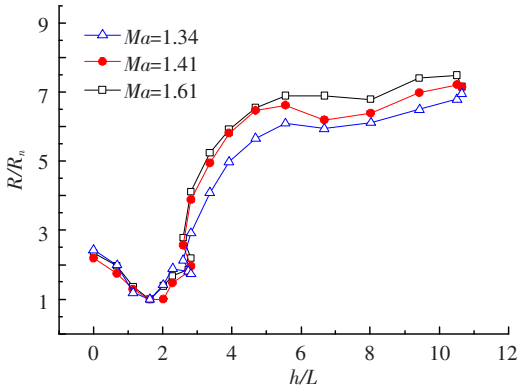


图6 航行体发射出筒过程中气幕形态曲线

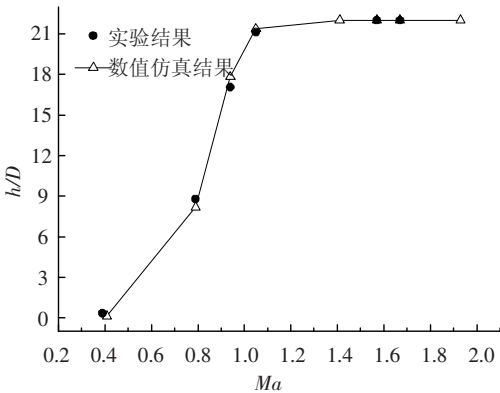


图7 气幕长度随马赫数变化曲线

### 3.3 气幕夹断点距离分析

假设水的静压不变,对夹断点距离和马赫数进行定量研究.夹断点是气体射流不再连续的状态位置.本试验和数值模拟均假设水的深度和喷口的几何尺寸恒定,研究马赫数与气幕夹断点的变化规律,见图8, $h$ 是夹断点与发射筒口的距离, $D$ 为喷管喷口直径, $Ma$ 为气流的马赫数. $Ma < 1.1$ ,气幕夹断点逐渐增大, $1.1 \leq Ma$ 时,气幕夹断高度介于21~22之间,这是因为该试验条件下,气幕夹断点在 $Ma = 1.1$ 附近时,气幕夹断点的位置出现在水面附近.数值模拟与试验结果吻合较好.

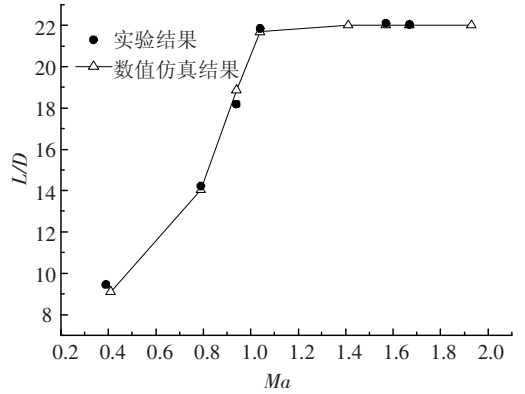


图8 气幕夹断点距离与马赫数的变化曲线

## 4 结论

采用试验与数值相结合的方法研究了水下航行体气幕发射过程中气幕的发展过程和形态特性,得到以下结论:

1)气幕的形态半径随气幕轴向长度的增加逐渐增大至极大值后变化趋缓,气幕形态轮廓随马赫数的增大逐渐增大.

2)  $Ma < 1.1$ 时,气幕长度随马赫数的增加单调增大; $Ma \geq 1.1$ 时,气幕长度随马赫数的增大介于21~22之间基本不再变化,数值模拟与实验吻合较好.

3) 在水的静压不变的条件下, $Ma < 1.1$ 时,气幕夹断点距离随马赫数的增加逐渐增大; $Ma \geq 1.1$ 时,气幕夹断点距离介于21~22之间; $Ma = 1.1$ 附近,形成连续的出水气幕.

## 参考文献

- [1] YAGLA J J. Launch dynamics environment of a water piercing missile launcher [C]//24th International Symposium on Ballistics. New Orleans, Louisiana: International Symposium on Ballistics, 2008:1-17.
- [2] HELMHOLTZ H. On discontinuous movements of fluids [J]. Phil Mag, 1868, 36(4):337-345.
- [3] KELVIN W. Hydrokinetic solutions and observations [J]. Phil Mag, 1871, 42(4):15.
- [4] RAYLEIGH J. On the instability of jets [J]. Proc Lond Math Soc, 1879, 1-10(1):10.
- [5] LOTH E, FAETH G M. Structure of underexpanded round air jets submerged in water [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1989, 15(4):589-603.
- [6] DROZDOV A N, MALYAVKO E A, ALEKSEEV Y L, et al. Stand research and analysis of liquid-gas jet-pump's operation characteristics for oil and gas production [C]//Proceedings-SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Colorado:[s. n.], 2011, 3:2122-2130.

- [7] VAIBHAV K A, ASHWANI K G. Jet characteristics from a submerged combustion system [J]. *Journal of Applied Energy*, 2012, 89(1):246 - 253.
- [8] AYDEMIR E, WORTH N A, DAWSON J R. The formation of vortex rings in a strongly forced round jet [J]. *Experiments in Fluids*, 2012, 52(3):729 - 742.
- [9] MOHAMAD T I, GEOK H H. Visualization of gas jet in water: a new approach for gaseous fuel injection measurement [C]//*Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists*. Hong Kong:[s. n.], 2009, 2174:897 - 901.
- [10] DAHIKAR S K, JOSHI S S, SHAH J B, *et al.* Effect of nozzle diameter and its orientation on the flow pattern and plume dimensions in gas-liquid jet reactors [J]. *Chemical Engineering Science*, 2007, 62(24):7471 - 7483.
- [11] WEILAND C J, VLACHOS P. Experimental study of the stability and trajectory of a high speed gas jet under the influence of liquid cross flow [C]//*ASME Joint U. S. European Fluids Engineering Meeting*. San Diego, CA:[s. n.], 2007.
- [12] WEILAND C J. Characteristics of the high speed gas liquid interface [D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2010:27 - 30.
- [13] WEILAND C J. Characteristics of the high speed gas-liquid interface christopher [D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2009.
- [14] 姚琰, 鲁传敬, 朱坤. 水下高速气体射流的实验研究 [J]. *水动力学研究与进展 (A 辑)*, 2009, 24(5):590 - 595.
- [15] 施红辉, 郭强, 王超, 等. 水下超声速气体射流胀鼓和回击的关联性研究 [J]. *力学学报*, 2010, 42(6):1206 - 1210.
- [16] 施红辉, 王柏懿, 戴振卿. 水下超声速气体射流的力学机制研究 [J]. *中国科学*, 2010, 40(1):92 - 100.
- [17] 朱卫兵, 陈宏, 黄舜. 水下高速气体射流气泡变化过程数值研究 [J]. *推进技术*, 2010, 31(30):496 - 502.

(编辑 张 宏)