

文章编号: 1000-4750(2017)07-0241-08

# 侧喷孔分布对多股燃气射流在充液室中 扩展特性的影响

赵嘉俊, 余永刚

(南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏, 南京 210094)

**摘 要:** 该文对火药燃烧形成的多股高压燃气射流从模拟弹头头部喷入柱形充液室的过程进行了数值研究。采用雷诺平均  $N-S$  方程结合可实现  $k-\varepsilon$  湍流模型来描述单个中心泰勒空腔和多个侧面泰勒空腔在受限液体环境中的扩展过程, 同时分析了侧面喷孔个数对燃气扩展的影响。数值结果表明, 减少侧面喷孔的个数, 泰勒空腔的剖面形状并未发生明显变化, 相邻侧面泰勒空腔的汇聚过程变慢, 泰勒空腔充满充液室的时间增加。侧面喷孔的个数减少, 泰勒空腔内部的静压趋于稳定, 流场内径向截面的平均总压降低。

**关键词:** 流体力学; 水下火炮; 数值研究; 气液相互作用; 多股燃气射流; 湍流掺混

中图分类号: TJ55; O358 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.01.0074

## EFFECTS OF THE DISTRIBUTION OF LATERAL ORIFICES ON EXPANSION OF MULTIPLE COMBUSTION GAS JETS IN WATER-FILLED CHAMBER

ZHAO Jia-jun, YU Yong-gang

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract:** The injection of multiple high-pressure combustion gas jets which is developed by the combustion of powder in a cylindrical water-filled chamber is numerically studied. The Reynolds average Navier-Stokes equations and the  $k-\varepsilon$  realizable turbulent model are adopted to describe the expansion of a single central Taylor cavity and several lateral Taylor cavities in this limited water environment. The effects of the number of lateral orifices on the gas expansion are discussed. The numerical results show that, when the number of lateral orifices decreases, the shape of Taylor cavities on the section in axial direction has no significant change, but the convergence of adjacent lateral Taylor cavities appears later and the time of Taylor cavities to fill the chamber increases. With a decreasing number of lateral orifices, the static pressure in Taylor cavity tends to be stable and the average total pressure on the section in radial direction decreases.

**Key words:** hydromechanics; under-water gun; numerical study; gas-liquid interaction; multiple combustion gas jets; turbulent mixing

采用超空泡技术<sup>[1]</sup>能大大提高弹体在水中的运动速度, 但在发射过程中的超空泡弹丸并不能以超空泡包裹的形式在身管内运动。当弹丸在充满水的身管内运动时, 由于水的密度约为空气的 800 倍, 提高弹丸的速度会使得膛内压力迅速上升而易引

发膛炸。Yagla 等<sup>[2]</sup>提出一种气幕发射方式, 其作用方式是将弹前不利于弹体运动的液体环境转变成利于运动的空气环境。对于弹丸在充满水的身管内运动, 我们设想将燃烧室内的部分燃气导入弹丸前端形成多股燃气射流来形成气腔排开水柱, 从而将

收稿日期: 2016-01-25; 修改日期: 2016-09-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(11372139)

通讯作者: 余永刚(1963—), 男, 江苏南京人, 教授, 工学博士, 博导, 主要从事含能材料燃烧和推进技术研究(E-mail: yygnjust801@163.com).

作者简介: 赵嘉俊(1990—), 男, 湖南娄底人, 博士生, 主要从事多相流数值计算研究(E-mail: njstzhaojiajun@126.com).

液体环境转变为空气环境。采用这种方法可望改善弹丸在身管内的运动过程,大幅降低阻力,从而提高发射安全性。为深入了解这种发射方式的作用机理,需要研究柱形空间内的多股燃气射流与液体的相互作用特性以及射流的结构参数对扩展过程的影响。

对于气液相互作用问题的研究,施红辉等<sup>[3]</sup>和 Vivaldi 等<sup>[4]</sup>分别实验研究了液体环境中水平和垂直气体射流的发展过程。Weiland 等<sup>[5]</sup>和 Harby 等<sup>[6]</sup>研究了气-液界面的不稳定性,对气流发生的夹断现象进行分析。对水下燃气射流,唐嘉宁等<sup>[7]</sup>分析了燃气发展对推力的影响,陈焕龙等<sup>[8]</sup>则考虑发射深度的影响,曹伟等<sup>[9]</sup>和刘海军等<sup>[10]</sup>对垂直燃气射流的形态进行了分析,Arghode 等<sup>[11]</sup>则研究燃气与液体相互作用对上游燃烧带来的影响。对水下航行体的空泡问题,王亚东等<sup>[12]</sup>、王一伟等<sup>[13]</sup>和 Nouri 等<sup>[14]</sup>进行了研究。此外,对气液相互作用伴随的声特征也有相关的研究<sup>[15-16]</sup>。

上述研究大部分为开放的液体环境,而对于有限液体环境内的气液相互作用问题研究相对较少。基于同心筒发射背景,姚琰等<sup>[17]</sup>测量了同心筒内发射过程中有水 and 无水情况下燃气射流冲击的压力分布。曹嘉怡等<sup>[18]</sup>研究了发射筒内的气体射流与液体工质的相互作用过程。基于整装式液体炮的背景,莽珊珊等<sup>[19]</sup>和薛晓春等<sup>[20]</sup>分别研究了单股和双股燃气射流在渐扩型柱形充液室内的扩展过程。随后, Xue 等<sup>[21]</sup>又比较了不同股数燃气射流在阶梯渐扩型充液室内的扩展特征。

为了解水下枪炮发射过程中燃气排水方法的机理,本文研究锥形分布的多股燃气射流在柱形充液室内与液体相互作用问题,该项工作未见报道。本文重点讨论侧面喷孔个数变化对 Taylor 空腔扩展的影响,分析多个 Taylor 空腔的演化规律以及射流场特征参数的分布特性。

## 1 模型建立

模拟实验装置主要由燃气发生器、仿弹头形状的多孔喷嘴和一个透明柱形观察室组成。火药在燃气发生器内燃烧,生成的燃气通过多孔喷嘴喷入充满水的柱形观察室,同时采用高速摄像机从两个角度同步记录扩展情况。仿弹头的喷嘴顶部开有 7 个直径均为 2 mm 的喷孔,中心 1 个,其余 6 个平均分布在锥形侧面,喷孔轴线与侧面垂直,侧面喷孔

与水平方向有 45° 夹角。观察室内径 55 mm,喷嘴顶部到观察室顶部距离为 127 mm,高速摄像机 (Photron Ultima APX i2) 拍摄频率为 4000 幅/秒。为研究多股燃气射流的扩展及气-液相互掺混的过程,对观察室内的区域进行建模计算,计算模型和实验装置的对比如图 1 所示。在模拟多股燃气扩展时,计算模型的尺寸与模拟实验的参数保持一致,并在建模过程中做出如下假设:

- 1) 多股燃气射流喷入柱形充液室是一个三维非稳态过程,计算可知喷孔附近的雷诺数接近 10000,为高度湍流状态。
- 2) 假设燃气为可压缩气体,其状态方程由理想状态方程描述。
- 3) 假设燃气与液体在初期是分离的,采用流体体积分数法 (VOF) 来描述两相流动。
- 4) 由于实验持续时间仅几毫秒,从而忽略气液界面上的化学反应及相变过程。

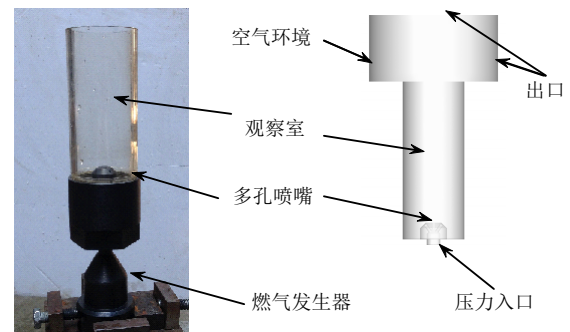


图 1 实验装置及几何模型图

Fig.1 Experimental device and geometric modeling

### 1.1 数学模型

基于上述假设,可得控制方程如下:

- 1) 连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

式中:  $\rho$  代表混合密度,  $\rho = \alpha_g \rho_g + \alpha_l \rho_l$ , 下标  $g$  和  $l$  分别代表燃气和水,  $\alpha$  为相体积分数;  $\mathbf{v}$  代表混合速度,  $\mathbf{v} = (\alpha_g \rho_g \mathbf{v}_g + \alpha_l \rho_l \mathbf{v}_l) / \rho$ 。

- 2) 相分数方程

采用 VOF 模型时,相间界面的追踪是通过相分数方程来计算的,燃气相为主相,其相分数的方程为:

$$\frac{\partial \alpha_g}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \alpha_g = 0 \quad (2)$$

液相通过  $\alpha_g + \alpha_l = 1$  来约束。

3) 动量方程:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [(\mu + \mu_t)(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \rho \mathbf{g} \quad (3)$$

式中:  $\mu = \alpha_g \mu_g + \alpha_l \mu_l$  为混合动力粘性系数;  $\mu_t$  为湍流粘性系数;  $\mathbf{g}$  为重力加速度。

4) 能量方程:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [\mathbf{v}(\rho E + p)] = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) \quad (4)$$

式中,  $k_{\text{eff}}$  代表有效热传导系数,  $k_{\text{eff}} = \alpha_l k_l + \alpha_g k_g$ 。

$$E = (\alpha_l \rho_l E_l + \alpha_g \rho_g E_g) / \rho, \\ T = (\alpha_l \rho_l T_l + \alpha_g \rho_g T_g) / \rho. \quad (5)$$

5) 状态方程

$$p_g = \rho_g R T_g \quad (6)$$

6) 湍流方程

对于实验中形成的柱形燃气射流, 采用可实现的  $k-\varepsilon$  湍流模型来处理湍流, 其湍动能  $k$  和湍流脉动耗散率  $\varepsilon$  采用下述方程计算:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{v}) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \mathbf{v}) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \quad (8)$$

其中:  $G_k$  为速度梯度产生的湍流动能;  $G_b$  为浮力产生的湍流动能;  $Y_M$  为可压缩性的影响, 其参数的详细计算过程按照文献[22]设置。

### 1.2 初边条件

初始状态下圆柱形观察室内充满液体:  $\rho_0 = \rho_l$ ,  $T_0 = T_l$ ,  $p_0 = p_l$ 。依照实验研究条件, 入口为高温高压燃气, 其参数为燃气参数:  $\rho_i = \rho_g$ ,  $p_i = p_g$ ,  $T_i = T_g$ , 出口为大气环境, 其参数为大气环境参数:  $p_o = p_\infty$ ,  $T_o = T_\infty$ 。壁面定义为绝热且无滑移。

### 1.3 计算几何模型和计算方法

如图 1 所示, 数值模型的计算区域包括多孔喷嘴内的部分燃气通道、观察室区域和部分外界空气区域, 入口在多孔喷嘴内部燃气通道的某一截面上, 出口在周围空气区域内。基于多孔喷嘴的对称性, 将计算区域简化为四分之一来计算, 网格划分

平行于流动方向并在壁面有加密处理。为了检验网格无关性, 对比计算了 3 种不同网格数(30 万、48 万和 60 万)的模型, 最终选取 48 万的网格。

数值研究采用 FLUENT 软件来进行模拟计算, 压力和速度的耦合采用相间耦合 PISO 算法。部分方程采用二阶迎风格式, 相间界面的重构采用 Geo-Reconstruct, 时间采用隐式步进方式。为了保持计算的收敛, 能量和湍流方程的松弛因子设置为 0.4~0.8, 时间步长为  $5 \times 10^{-8} \text{ s} \sim 5 \times 10^{-7} \text{ s}$ 。

## 2 结果及分析

### 2.1 数值结果与实验对比

针对某一实验工况: 入口处燃气喷射总压为 3.8 MPa, 燃气温度为 2000 K 进行数值模拟。在实验过程中, 燃气通过多孔喷嘴喷入充液室后, 便形成了多个相互独立的 Taylor 空腔。随着后续燃气的补充, Taylor 空腔被“吹离”喷孔, 空腔头部与喷孔之间仅留有狭小的气体通道。Taylor 空腔在进一步扩大的过程中, 侧面 Taylor 空腔由于喷孔与水平方向存在夹角而撞击壁面, 继而侧面 Taylor 空腔的形状及其内部气流方向被迫发生改变。之后, 可观察到侧面 Taylor 空腔沿着壁面扩展, 相邻的空腔之间出现聚并的趋势。由于侧面 Taylor 空腔个数较多, 中心射流仅可观测到其空腔头部随着时间的变化。图 2 为数值计算与实验观测的气液界面对比图。在图 2(a)中, 空腔还未撞击壁面, 各个空腔之间存在明显的间隙。在此时的数值结果中可见, Taylor 空腔与喷孔之间仅通过细小的气体通道相连。由图 2(b)可见侧面 Taylor 空腔在撞击壁面时发生的变化, 侧面空腔头部由平滑变得尖锐。而由于空腔撞击壁面时与液体之间的相互作用, 其气液界面上呈现出许多明显的凹坑。在图 2(c)中, 相邻的侧面空腔由下部开始汇聚, 同时可见其撞击壁面后主要进行竖直方向上的扩展。图 3 给出了 Taylor 空腔头部位移值的比较图, 可见数值计算与实验测量的空腔头部位移值相差较小。结合图 2 和图 3 的对比可以看出, 数值计算结果反映了柱形充液室内多股燃气射流扩展的主要特征。



(a)  $t=0.5 \text{ ms}$

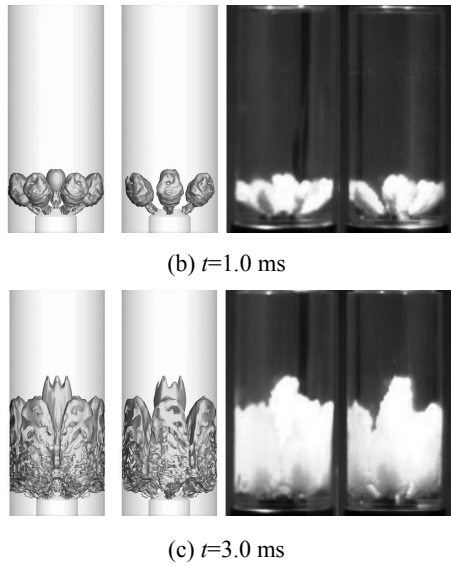
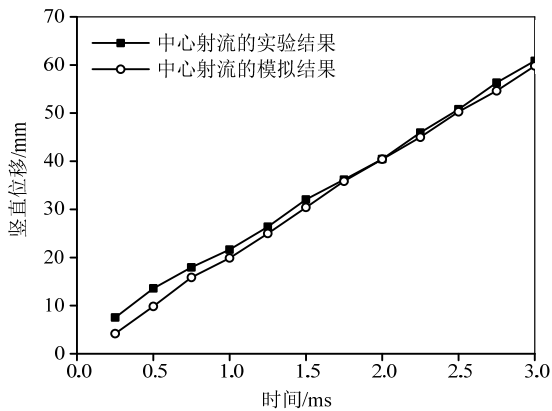
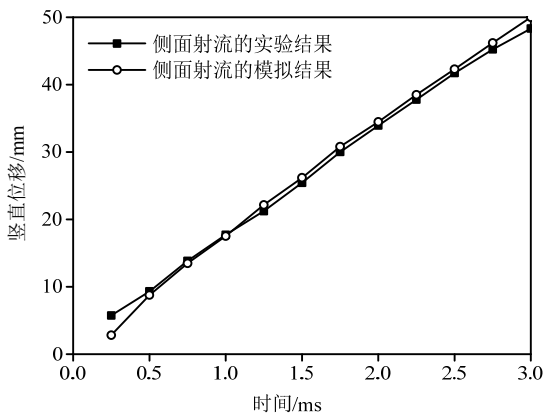


图2 不同时刻数值计算与实验观测的气液界面  
Fig.2 Gas-liquid interface in numerical and experimental results at different moments



(a) 中心射流的头部位移值



(b) 侧面射流的头部位移值

图3 射流头部位移

Fig.3 Jet head displacement

2.2 侧面喷孔个数对多股射流扩展的影响

为研究侧面喷孔个数对充液室中多股燃气射流扩展特性的影响,对另一个型号喷嘴的多股燃气

射流进行了模拟,其喷射压力均为 3.8 MPa,燃气温度为 2000 K,所有喷孔直径均为 2 mm。为方便比较,将有 6 个侧面喷孔的喷嘴定义为 A 型喷嘴,4 个侧面喷孔的喷嘴定义为 B 型喷嘴。对于两种型号喷嘴的模拟结果,主要从 Taylor 空腔的演化及空腔内部流场参数的变化来分析侧喷孔方向带来的影响。

2.2.1 Taylor 空腔的演化过程

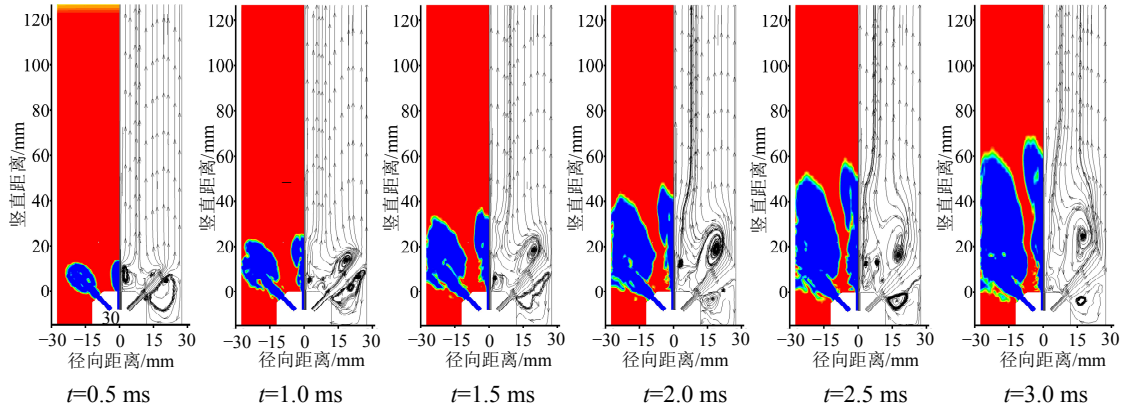
燃气通过多孔喷嘴喷入柱形充液室,生成的 Taylor 空腔在观察室内部的演化过程如图 4 所示,选取了 A 型和 B 型喷嘴的剖面来进行比较,喷孔轴线左侧为相分布图(燃气区域与喷嘴相连分别代表水和燃气),右侧为流线图。由图 4 可见,A 型喷嘴和 B 型喷嘴所形成的多个 Taylor 空腔的演化过程具有相似性。从相分布来看,不同时刻所对应的 Taylor 空腔的轮廓具有相似性,包括侧面空腔撞击壁面之后头部的形变和中心空腔头部所演化出的突起,同时其右侧流线图所显示的涡结构规模和位置也相似。稍有不同的是,截面上显示的 A 型喷嘴侧面 Taylor 空腔卷吸的液滴要少于 B 型喷嘴卷吸的液滴。图 5 给出了 A 型喷嘴和 B 型喷嘴 Taylor 空腔演化的顶部视图,可见不同喷嘴所形成的 Taylor 空腔在  $t=0.5\text{ ms}$  和  $t=1.0\text{ ms}$  时刻时还具有相同的大小。由于 A 型喷嘴的侧面喷孔个数多,其形成的侧面 Taylor 空腔可扩展的空间变小,因此在  $t=1.5\text{ ms}$  时,相邻的 Taylor 空腔已较为接近。到  $t=2.0\text{ ms}$  时刻,A 型喷嘴相邻侧面 Taylor 空腔便已出现汇聚,而 B 型喷嘴在  $t=3.0\text{ ms}$  时刻才出现相似情况。结合图 4 和图 5 可见,A 型喷嘴和 B 型喷嘴的 Taylor 空腔有相似的演化过程,同时 A 型喷嘴的燃气能更迅速的充满整个柱形充液室。

2.2.2 压力特性

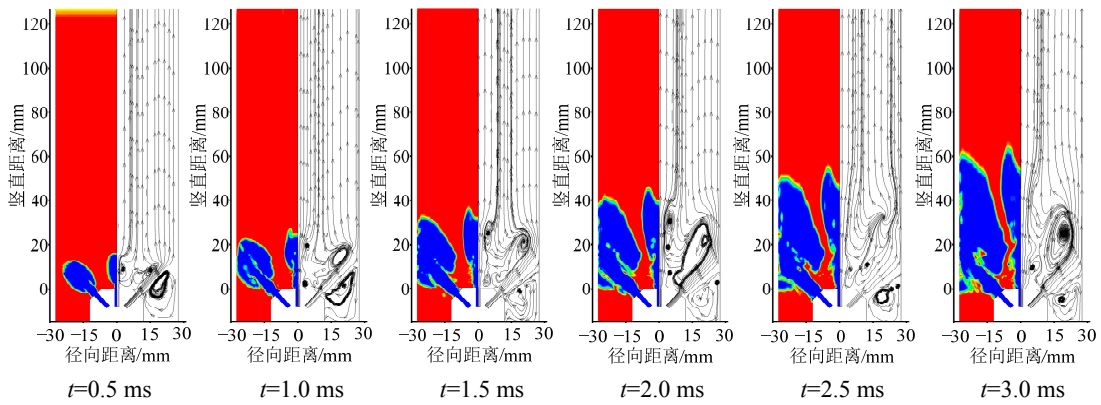
在 Taylor 空腔的发展过程中,高压燃气不断喷入空腔。由于喷孔处燃气压力达 1.5 MPa,远高于环境背压,因而在喷孔附近出现膨胀-压缩区域,燃气流经该区域时静压出现下降和上升过程。图 6 为不同型号喷嘴下燃气射流的静压对比图,由喷孔处开始,选取静压变化明显的区域,侧面射流的压力范围为侧面喷孔到壁面。由图 6 可见,A 型喷嘴和 B 型喷嘴的静压分布在侧面 Taylor 空腔的轴线上较为相似,但 B 型喷嘴中心轴线上的静压波动次数要少,压力相对稳定些。图 6(a)为中心 Taylor 空腔轴线上的静压分布,可见在  $t=0.5\text{ ms}$  时刻,A 型喷嘴

的气流在喷孔附近出现多次波动，并伴随一个较高的压力峰出现在  $x=15\text{ mm}$  附近。喷孔附近的这种波动可见于气-气系统，而在气-液系统中，由于压力衰减的幅度要大，其压力波动的次数要少，在  $x=15\text{ mm}$  附近的压力峰值可能是由于燃气与周围低速

液体相互作用引起的。同样在  $t=0.5\text{ ms}$  时刻，B 型喷嘴的压力波动要比 A 型喷嘴的少，说明 B 型喷嘴形成的气流要稳定一些。在  $t=1.5\text{ ms}$  时刻和  $t=3.0\text{ ms}$  时刻，A 型喷嘴的波动次数可见也多于 B 型喷嘴。



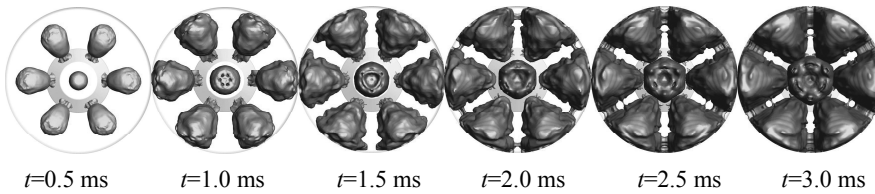
(a) A 型喷嘴 Taylor 空腔的演化过程



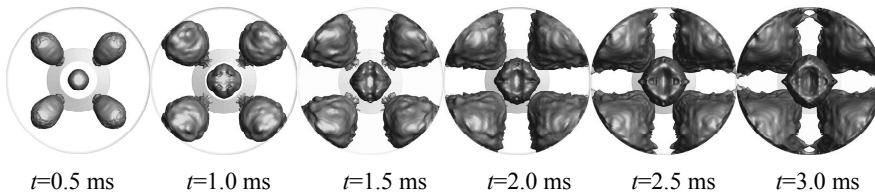
(b) B 型喷嘴 Taylor 空腔的演化过程

图 4 Taylor 空腔的演化过程

Fig.4 Evolution of Taylor cavities



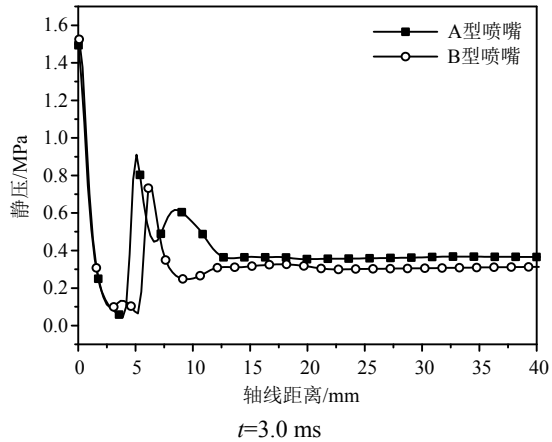
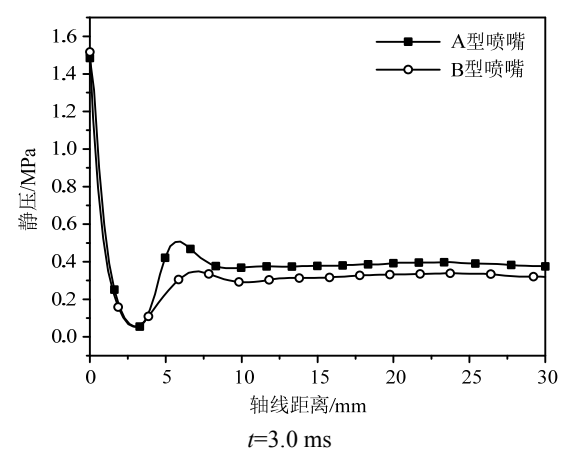
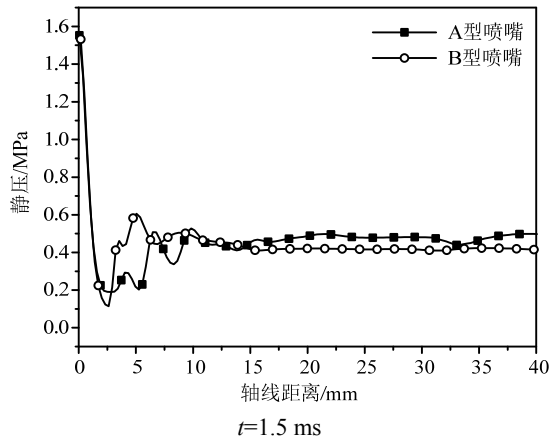
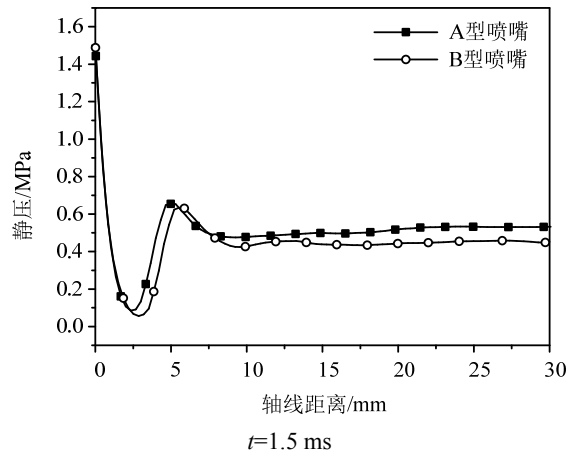
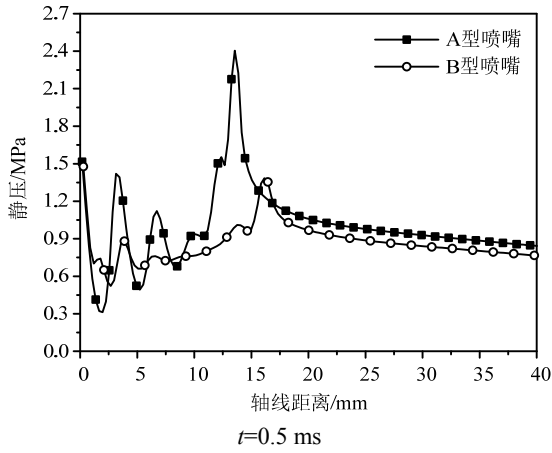
(a) A 型喷嘴的顶部视图



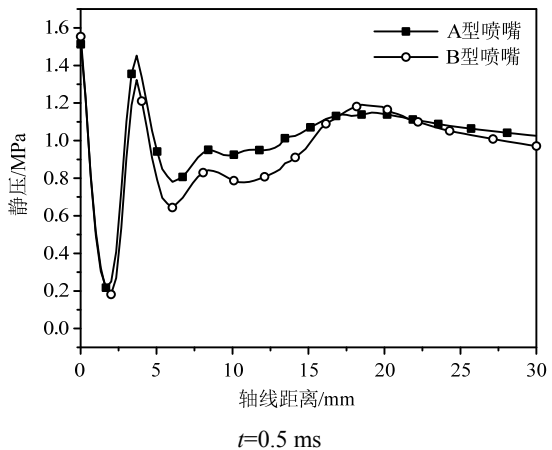
(b) B 型喷嘴的顶部视图

图 5 多股射流的顶部视图

Fig.5 Top view of multiple gas jets



(a) 中心射流沿喷嘴轴线的静压



(b) 侧面射流沿喷嘴轴线的静压

图 6 不同型号喷嘴下静压的比较

Fig.6 Comparison of static pressure

上述的静压分析是 Taylor 空腔内部流动的特征，图 7 给出了不同喷嘴下总压的对比，横坐标为截面到喷嘴的距离，纵坐标对应着横坐标所处截面的平均总压。由图 7 可见，不同喷嘴下总压的变化趋势是相同的。在  $t=0.5\text{ ms}$  时刻，燃气形成的 Taylor 空腔扩展到  $x=15\text{ mm}$  附近，因此  $x=0\text{ mm}\sim x=15\text{ mm}$  区域内的截面上同时存在气体和液体，总压先下降后上升。到  $x=15\text{ mm}$  之后，截面上仅有液体存在，因此总压沿  $x$  方向线性下降。在  $t=1.5\text{ ms}$  和  $t=3.0\text{ ms}$  时刻，同样可见总压在气液共存的截面呈现先下降后上升的过程。此外，可以发现总压随着时间的增长在逐渐降低，如 A 型喷嘴在  $x=0\text{ mm}$  处的截面总压由  $t=0.5\text{ ms}$  时刻的  $1.2\text{ MPa}$  下降到了  $t=3.0\text{ ms}$  时刻的  $0.6\text{ MPa}$ 。比较同一时刻下的 A 型和 B 型喷嘴的总压曲线，可见 A 型喷嘴的总压相对要高，这是由于水在初始时刻处在低压静止状态，流场总压的升高是由高压燃气带来的，A 型喷嘴通过较多的喷嘴能带来更多的高压燃气，从而使得流场的总压升高。

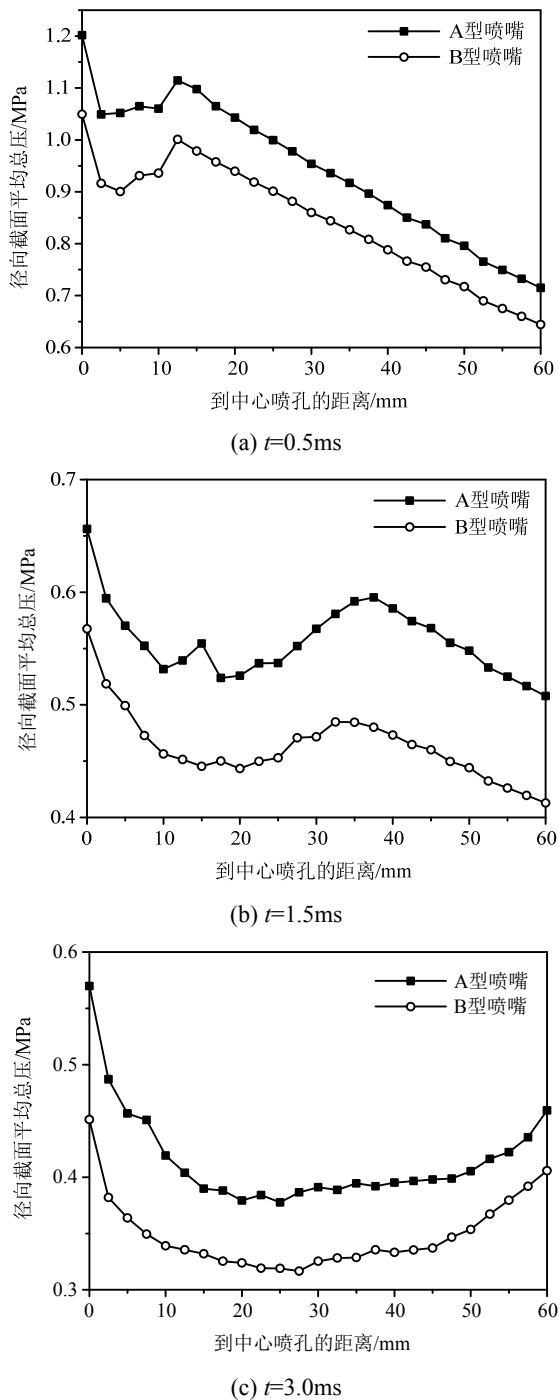


图7 不同型号喷嘴下径向截面平均总压的比较

Fig.7 Comparison of average total pressure on sections in radial direction

### 3 结论

本文针对多股燃气喷入柱形充液室的过程，建立了三维非稳态两相流模型来描述气-液流场中 Taylor 空腔的演化，考虑了侧面喷孔个数对空腔演化带来的影响。通过对数值结果的分析得到以下结论：

(1) 减少侧面喷孔的个数，剖面上 Taylor 空腔的轮廓及涡结构并未发生明显改变，但侧面 Taylor 空腔的聚并过程减慢，燃气充满柱形空间需要的时间延长。

(2) 减少侧面喷孔的个数，Taylor 空腔内中心喷孔轴线上的静压波动次数变少，侧面喷孔轴线上的静压变化趋势不变，压力下降。

(3) 减少侧面喷孔的个数，流场内截面的平均总压整体下降，但其变化趋势未发生改变。在整个计算区域内，截面平均总压随着时间逐渐下降。在不同时刻，气-液区域内的截面平均总压经历先下降后上升的过程，液体区域内的平均总压线性下降。

### 参考文献：

- [1] Ceccio S L. Friction drag reduction of external flows with bubble and gas injection [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2010, 42: 183–203.
- [2] Yagla J J, Busic J, Koski S, et al. Launch dynamics environment of a water piercing missile launcher [C]// 24th International Symposium on Ballistics. New Orleans, Louisiana, 2008: 1–17.
- [3] 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.
- [4] 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. (in Chinese)
- [5] Vivaldi D, Gruy F, Simon N, et al. Modelling of a CO<sub>2</sub>-gas jet into liquid-sodium following a heat exchanger leakage scenario in sodium fast reactors [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2013, 91(4): 640–648.
- [6] Weiland C, Vlachos P P. Round gas jets submerged in water [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2013, 48: 46–57.
- [7] Harby K, Chiva S, Muñoz-Cobo J L. An experimental investigation on the characteristics of submerged horizontal gas jets in liquid ambient [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 53: 26–39.
- [8] 唐嘉宁, 李世鹏, 王宁飞. 水下固体火箭发动机的负推力现象研究[J]. 固体火箭技术, 2012, 35(3): 325–329, 343.
- [9] Tang Jianing, Li Shipeng, Wang Ningfei. Study of the negative thrust of the underwater solid rocket engines [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2012, 35(3): 325–329, 343. (in Chinese)
- [10] 陈焕龙, 王柠, 刘华坪, 等. 不同发射深度下喷管燃气射流特性研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2012,

- 27(6): 659—666.
- Chen Huanlong, Wang Ning, Liu Huaping, et al. Investigation of nozzle gas jet characteristics with different launch depth underwater [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2012, 27(6): 659—666. (in Chinese)
- [9] 曹伟, 刘海军, 王聪. 射流速度对气幕发射方式下航行体运动过程的影响研究[J]. *工程力学*, 2012, 30(9): 288—292.
- Cao Wei, Liu Haijun, Wang Cong. The effect of gas jet speed on the motion process of the underwater vehicle vertical launching by using gas curtain [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(9): 288—292. (in Chinese)
- [10] 刘海军, 王聪, 彭兴芝, 等. 水下航行体垂直发射过程气幕形态特性研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2013, 45(5): 7—12.
- Liu Haijun, Wang Cong, Peng Xingzhi, et al. Shape characteristics of gas screen of underwater vehicle vertical launch [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2013, 45(5): 7—12. (in Chinese)
- [11] Arghode V K, Gupta A K. Jet characteristics from a submerged combustion system [J]. *Applied Energy*, 2012, 89(1): 246—253.
- [12] 王亚东, 袁绪龙, 张宇文. 潜射导弹空化特性水洞模型试验研究[J]. *工程力学*, 2013, 30(4): 442—447.
- Wang Yadong, Yuan Xulong, Zhang Yuwen. Experimental investigation of cavitation characteristics of sub-launched missile models in water tunnel [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(4): 442—447. (in Chinese)
- [13] 王一伟, 黄晨光, 吴小翠, 等. 航行体水下垂直发射空泡脱落条件研究[J]. *工程力学*, 2015, 32(11): 33—39.
- Wang Yiwei, Huang Chenguang, Wu Xiaocui, et al. Investigation of cavities shedding condition on underwater vehicles in the vertical launch process [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(11): 33—39. (in Chinese)
- [14] Nouri N M, Madoliat R, Jahangardy Y, et al. A study on the effects of fluctuations of the supercavity parameters [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2015, 60: 188—200.
- [15] Xu W, Lai Z, Wu D, et al. Acoustic emission characteristics of underwater gas jet from a horizontal exhaust nozzle [J]. *Applied Acoustics*, 2013, 74(6): 845—849.
- [16] Hao Z R, Zhou Z H. Experimental studies on the effects of nozzle structures on characteristics of submerged gas jet noise [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 204/205/206/207/208: 4620—4623.
- [17] 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.
- Yao Yan, Lu Chuanjing, Zhu Kun. Experimental study on confined high-speed gas jets in water [J]. *Journal of Hydrodynamics Ser. A*, 2009, 24(5): 590—595. (in Chinese)
- [18] 曹嘉怡, 鲁传敬, 李杰, 等. 潜射导弹水下垂直自抛发射过程研究[J]. *水动力学研究与进展 A 辑*, 2006, 21(6): 752—759.
- Cao Jiayi, Lu Chuanjing, Li Jie, et al. Research on the vertical launching of direct ignition underwater missile [J]. *Journal of Hydrodynamics Ser. A*, 2006, 21(6): 752—759. (in Chinese)
- [19] 莽珊珊, 余永刚. 高压燃气射流在整装液体中扩展过程的实验和数值模拟[J]. *爆炸与冲击*, 2011, 31(3): 300—305.
- Mang Shanshan, Yu Yonggang. Experiment and numerical simulation for high pressure combustible gas jet expansion process in a bulk-loaded liquid [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(3): 300—305. (in Chinese)
- [20] 薛晓春, 余永刚, 张琦. 双束燃气射流与整装式液体装药相互作用的实验和数值模拟[J]. *兵工学报*, 2013, 34(6): 669—677.
- Xue Xiaochun, Yu Yonggang, Zhang Qi. Experiment and numerical simulation for interaction of twin gas jets and bulk-loaded liquid charge [J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(6): 669—677. (in Chinese)
- [21] Xue X, Yu Y, Zhang Q. Study on the influences of interaction behaviors between multiple combustion-gas jets on expansion characteristics of Taylor cavities [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2015, 31(5): 720—731.
- [22] Evgenevna I E, Evgenevna I T, Viktorovich B P. Analysis of the application of turbulence models in the calculation of supersonic gas jet [J]. *American Journal of Applied Sciences*, 2014, 11(11): 1914—1920.