

边界层内水介质在压差驱动下沿小孔向 气腔射流问题研究

鲍文春, 刘元清, 李岩, 武龙龙

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 对边界层内小孔气水多相流场下射流问题开展数值仿真及定常水洞试验研究, 建立了适用于边界层内压差驱动下小孔向气腔射流多相流场问题研究的数值仿真计算模型, 针对典型孔参数及气水流场条件, 对比分析了仿真试验数据, 验证了数值仿真模型的正确性及模型计算精度。结合流体质点受力及运动模型及平板边界层理论, 分析了气水域压力场特征及水域流动规律对小孔射流过程的作用机理及影响规律, 开展了孔参数对射流多相流场特征及射流量的影响研究。获得了小孔射流量估算方法, 为航行体上防水装置设计提供数据支撑。

关键词: 小孔; 射流; 多相流; 边界层; 水洞试验

中图分类号: O375.5

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2017) 04-0029-09

Study on Jets of Gas-water Multiphase Flow in Small Holes Driven by Pressure Difference within the Boundary Layer

BAO Wen-chun, LIU Yuan-qing, LI Yan, WU Long-long

(Beijing Institute of Aeronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: In this paper, numerical simulations and steady water tunnel experimentals are carried out to study the jets of gas-water multiphase flow in small holes within the boundary layer. A computational model is constructed on the gas jet multiphase flow. Based on the comparison of numerical and experimental results, the correctness and accuracy of numerical model are verified by using typical parameters of small holes and conditions of gas-water flow. Combining the model of force and movement for fluid particle with the theory of plate boundary layer, the characteristics of pressure in the gas-water region is analyzed and the effect of the water region conditions on the process of jets in small holes is studied. Meanwhile, the influence of parameters of small holes on the multiphase flowfield characteristics and jet flow is also studied. The study results of this article can provide methods for the gas-jet mass flow rate calculation and water-seal devices design.

Key words: Small holes; Jets; Multiphase flow; Boundary layer; Water tunnel experimentals

0 引言

在水下高速运动航行体工程设计和研究中, 经常采用通气技术获得良好流体动力特性^[1]。通

气技术可以分为主动通气和被动通气两类, 被动通气又称为排气技术。采用排气技术的航行体内部留有储气腔, 并在表面特定位置开设一定数量的气缝/孔 (见图1)。发射前在气腔内预置一定压

收稿日期: 2017-07-28; 修订日期: 2017-10-11

基金项目: 装备发展部共用技术基金 (41406040402)

作者简介: 鲍文春 (1988-), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为流体力学。E-mail: baowenchun@126.com

力的气体,在航行体向水面运动过程中,外界环境压力逐渐减小,预置气体在内外压差作用下从排气孔/缝排出,形成气泡(气膜)附着在航行体表面。通过气泡或气膜的形态进行航行体运动过程中流体动力调节^[2]。

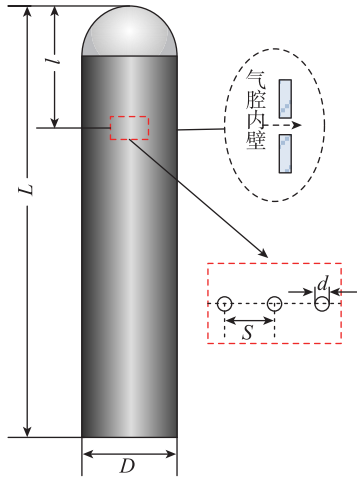


图1 航行体表面排气孔结构示意图

Fig.1 Sketch map small exhaust holes on the under voyage

航行体水下弹射过程属于非定常、非线性、跨介质的多相流动问题,航行体采用高压燃气弹射出筒,燃气介质在发射筒口发展演化,导致筒口区域的介质组成及力学环境复杂多变。当航行体上小孔结构随航行体运动到筒口附近时,复杂的多相流场环境将使小孔面临进水问题,或者称为水介质沿小孔向气腔内射流问题,进水过程将给航行体上仪器设备正常工作带来不可预估的风险。国内外学者针对小孔射流问题进行了一定研究,但研究成果主要集中在气膜冷却问题及压差驱动下小孔向气腔内射流问题,针对气腔进水问题的研究资料较少。李广超等^[4]对发动机叶片的气膜冷却问题进行了数值仿真研究,指出了圆柱孔射流冷却的有害涡流动结构,论述了几何结构和气动参数对气膜冷却特性的影响;戴萍等^[5]研究了不同吹风比下入射角度对缩放槽缝孔气膜冷却效果的影响;刘海涌等^[6]对涡轮叶片错排流出流孔流场进行了试验研究,获得通道和射流孔侧壁静压的变化规律;李芳等^[7]对流体在多孔仿生射流表面上的流动特性进行了数值模拟,探讨了仿生射流表面减阻机理;施瑶等^[8]采用LES与VOF相结合的方法对多载荷AUV后平衡舱空腔的进水过程进行了数值模拟,考察了进水孔直径、进水孔位置以及航行深度等因素对进水过程的影

响,相关研究成果主要针对大孔径进水孔。本文对运动航行体边界层内水介质沿小孔径向航行体内部气域射流问题进行研究,并分析孔参数及内外压条件等影响因素对射流流体体积的影响规律,为小孔射流总量估算及航行体上防水装置设计提供数据支撑。

1 数值计算模型

1.1 多相流模型

在研究气水多相流场射流问题时,气水流体介质具有清晰的相界面,相界面的分布情况直接影响流场中的物性分布及气水介质间的相互作用力。为精确构造非定常流场中的相界面,采用PLIC^[9]技术进行界面捕捉。在多相流模型方面,VOF^[10-11]类方法因为可以较好保持流体质量守恒,且能轻易处理界面拓扑结构的变化,受到很多学者的青睐。本文采用VOF方法来构造相界面。VOF多相流模型中的控制方程形式如下:

混合物连续方程:

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

空气相连续方程:

$$\frac{\partial(\alpha_g)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_g u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

混合物相动量方程:

$$\frac{\partial(\rho_m u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu_m + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \rho_m g \quad (3)$$

其中, α_g 为空气相的体积分数; u_i 、 u_j 为速度分量; ρ_m 为混合物密度, $\rho_m = (1 - \alpha_g) \rho_l + \alpha_g \rho_g$, ρ_l 、 ρ_g 分别为水的密度及空气的密度; μ_m 为混合物的动力黏性系数, $\mu_m = (1 - \alpha_g) \mu_l + \alpha_g \mu_g$, μ_l 、 μ_g 分别为水和空气的动力黏性系数, μ_t 为湍流黏性系数。

气相体积分数方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_g u_i) = 0 \quad (4)$$

计算过程中先求解气相的体积分数,然后根据单元内体积分守恒条件来获得主相的体积分数及混合物密度等。

1.2 湍流模型

采用标准 κ - ϵ 湍流模型^[12],湍流动能 κ 及耗散

率 ϵ 的控制方程分别为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_m \kappa u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_m + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + G_\kappa + \rho_m \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_m \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_m + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{\kappa} G_\kappa - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{\kappa} \rho_m \quad (6)$$

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho_m \kappa^2}{\epsilon} \quad (7)$$

其中, $\sigma_t = \rho_m C_\mu \kappa^2 / \epsilon$ 为湍流黏性系数; 经验常数 $C_\mu = 0.09$, $C_{\epsilon 1} = 1.44$, $C_{\epsilon 2} = 1.42$; $\sigma_\epsilon = 1.3$, $\sigma_\kappa = 1.0$ 表征基于湍流动能及耗散率的湍流普朗特数; $G_\kappa = -\rho_m \overline{u'_i u'_j} (\partial u_j / \partial x_i)$ 为由平均速度梯度引起的湍流动能生成项。

1.3 计算域及边界条件设置

本文计算采用三维数值仿真计算模型, 计算域尺度及边界条件定义方式见图 2。数值离散方法采用有限体积法, 湍流输运方程采用 1 阶差分格式, 时间离散为 1 阶显式。压力速度耦合方式采用 SIMPLEC 算法, 压力及动量方程离散采用 2 阶迎风格式。

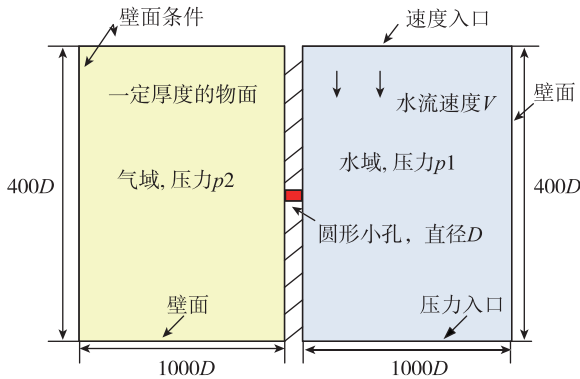


图 2 计算域及边界条件定义

Fig. 2 Computation region and boundary conditions

2 数值计算有效性验证

为验证该方法计算结果的准确程度, 在中尺度水洞中开展小孔气水射流问题试验, 测量获得一定压差条件下小孔的射流质量流率。试验设施及测量设备情况见图 3。

针对直径 D 为 6mm, 孔深 H 为 10mm 小孔, 水域流速为 3.7m/s, 水流与壁面之间攻角为 0° ,

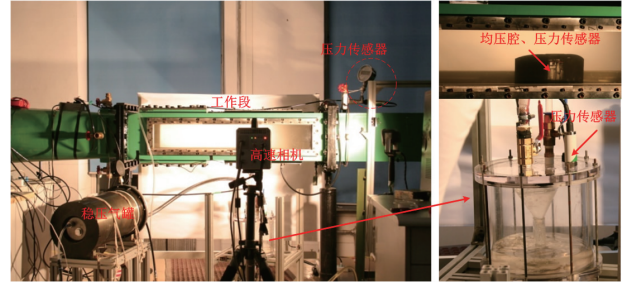


图 3 小孔气水射流水洞试验整体方案

Fig. 3 The plane of experimental of small holes jet

在不同气水流域外压条件下进行小孔射流过程仿真计算及水洞试验。

数值仿真计算获得的小孔射流体积流率与相应工况试验测量工况的对比情况见表 1。不同射流条件下, 数值仿真获得的小孔射流体积流率随气水流域压比变化规律与试验测量结果基本一致, 数值仿真获得的进水量大于试验测量值, 二者相对误差约为 29%。产生上述差异的主要原因有两点: 第一, 因孔面积及孔内外压差均较小, 试验中对小进水量的测量存在一定的差异; 第二, 基于 RANS 方程的数值模型对小孔边界层内的流动不能完全模拟, 但上述差异满足工程设计的需求。故初步验证了本文建立的小孔气水射流数值仿真计算模型的正确性及适用性。

表 1 射流体积流率值仿真与试验数据对比

Tab. 1 Comparisons of jet volume flow rate in numerical results and experimentals

条件	试验/ (ml/s)	仿真/ (ml/s)	相对误差/%
$P_{气}/P_{水} = 1.00$	0.78	0.90	15.4
$P_{气}/P_{水} = 0.995$	5.82	7.36	26.4
$P_{气}/P_{水} = 0.990$	9.74	12.60	29.3

3 流场特征对小孔气水射流流动机理分析

3.1 射流驱动力影响分析

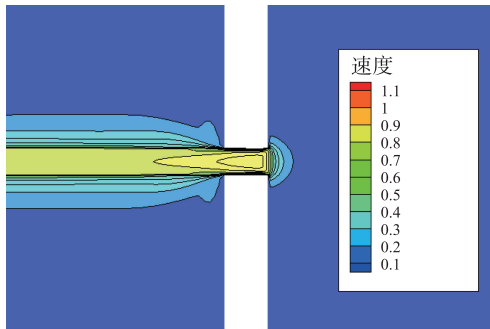
为分析流体沿小孔向气域射流机理问题, 对不同气水域外压条件作用下小孔射流问题进行仿真计算。

表 2 给出了水域无运动时小孔射流控制参数对比结果, 图 4 给出了相应的小孔射流多相流场情况。表明水域无运动时, 射流多相流场特征由小孔两侧气水介质压比决定。

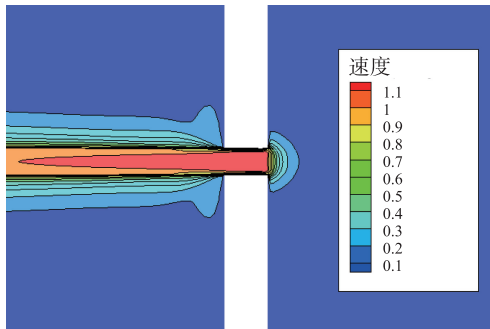
表2 水域无运动工况射流控制参数对比

Tab. 2 Comparisons of jet parameters with no movement in water region

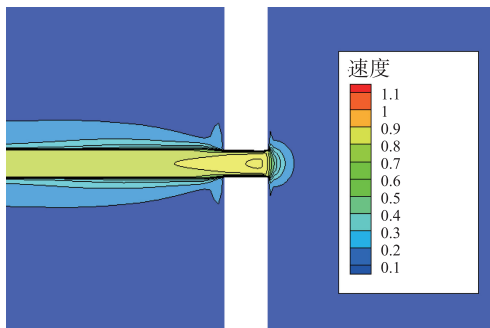
压比	压差/kPa	平均射流速度/(m/s)	射流体积流率/(ml/s)
0.995	0.5	0.711	20.1
0.990	1.0	1.023	28.9
0.995	1.0	0.733	20.7



(a) 压比 0.995 压差 0.5kPa



(b) 压比 0.990 压差 1.0kPa



(c) 压比 0.995 压差 1.0kPa

图4 水域无运动时气水射流速度场分布情况对比

Fig. 4 Comparisons of velocity distribution of gas-water jet with no movement in water region

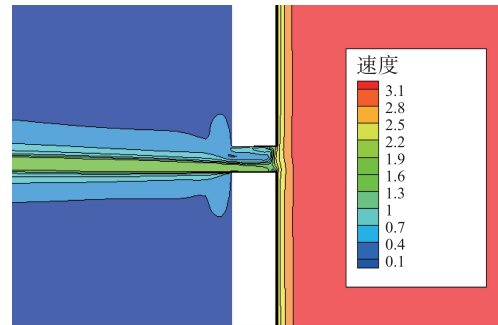
表3给出了水域有运动时孔射流控制参数对比结果，图5给出了相应的小孔射流多相流场情况。

表明水域有运动时，射流多相流场特征由小孔两侧气水介质压差决定。

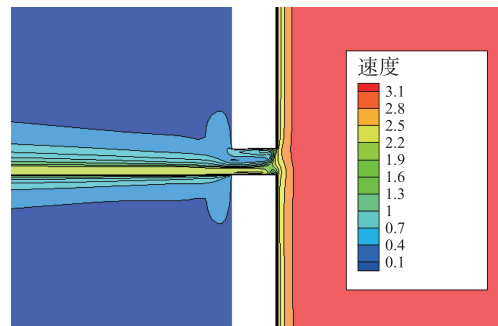
表3 水域有运动工况射流控制参数对比 ($U_0=3.7\text{m/s}$)

Tab. 3 Comparisons of jet parameters with movement in water region

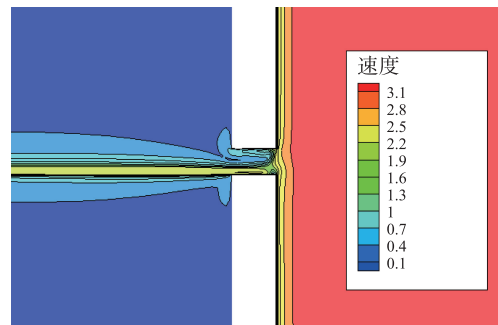
压比	压差/kPa	平均射流速度/(m/s)	射流体积流率/(ml/s)
0.995	0.5	0.626	7.36
0.990	1.0	0.864	12.63
0.995	1.0	0.862	12.59



(a) 压比 0.995 压差 0.5kPa



(b) 压比 0.990 压差 1.0kPa

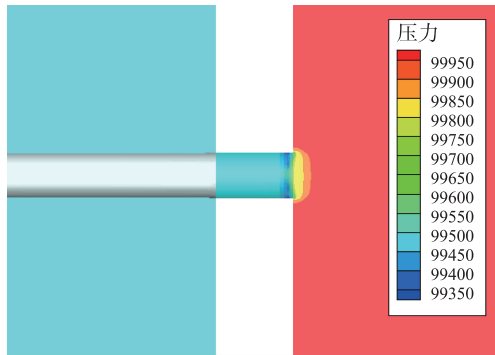


(c) 压比 0.995 压差 1.0kPa

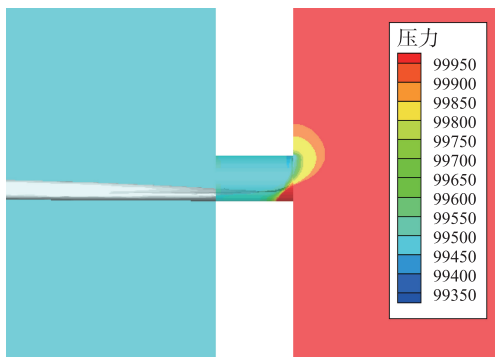
图5 水域运动速度 $U_0=3.7\text{m/s}$ 气水射流速度场分布情况对比

Fig. 5 Comparisons of velocity distribution of gas-water jet with movement in water region is $U_0=3.7\text{m/s}$

数值仿真结果表明, 有无水域运动速度下小孔气水射流问题具有不同的流动机理及多相流场特征, 如图 6 所示。无来流情况下, 射流充满整个射流孔; 有来流情况下, 水流仅沿小孔部分区域进入气域。分析认为流动边界层的有无是上述射流景象差异的主要原因, 外流场有来流情况下, 孔附近存在发展较为充分的流动边界层。



(a) 水介质无流速



(b) 水域速度 3.56m/s

图 6 小孔气水射流景象 (压比=0.995, 压差 0.5kPa)

Fig. 6 Sketch of the gas-water jet in small holes

3.2 水域运动参数对小孔射流影响分析

针对直径 D 为 6mm, 孔深 H 为 10mm 小孔, 开展不同水域来流条件下, 小孔射流过程仿真计算及水洞试验, 分析水域运动参数的影响机理及作用规律分析。

综合分析所有进水的工况, 得到了腔内外压差与进水量之间的初步关系。定义考虑动压的表面压力系数:

$$C_p = \frac{\Delta p + \frac{1}{2}\rho (U \sin\alpha)^2}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (8)$$

其中, Δp 为气水域压强差, U 为水域流速, α 为水域流动相对壁面攻角, ρ 为水的密度。

从水流速度为 6.5m/s 和 9m/s 的工况可以看到, 进水量随压力系数 C_p 线性增加。而来流速度等于 3.7m/s 时进水量随压力系数增加而增加, 最后趋于一个定值。压力系数相同时, 攻角为 0° 和 6° 进水量差别不大, 而攻角等于 9° 时进水量明显增加。

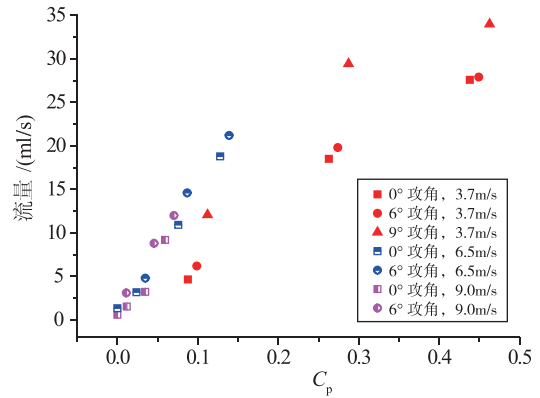


图 7 表面压力系数与进水量的关系

Fig. 7 Relationship between surface pressure coefficient and water inflow

从图 7 中可以看到速度 3.7m/s 与 6.5m/s 和 9m/s 有明显的分界, 下面将从流体边界层理论来定性分析该现象。物体在黏性流体运动时表面有一层很薄的边界层。现定义坐标系原点在翼型头部与孔中心高度一致, 沿水流方向为 X 正方向, 沿孔深方向指向外部为 Y 正 (如图 8 所示)。雷诺数定义为:

$$Re = \frac{V_x L}{\nu} \quad (9)$$

其中, V_x 为 x 处速度 (文中取水流动速度 U); L 为孔中心距原点的 x 方向坐标, 文中取值为 77.2mm; ν 为流体运动黏度, 文中取值为 $1.007 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

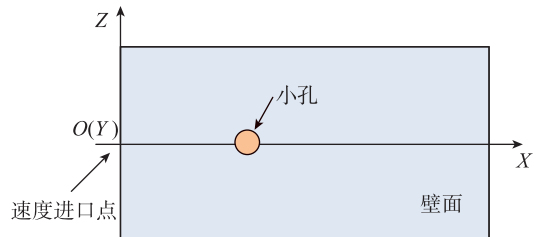


图 8 坐标系定义

Fig. 8 Definition of the coordinate system

来流速度为 3.7m/s 时, 雷诺数 $Re = 2.84 \times 10^5$, 小孔处于层流边界层内; 来流速度等于 6.5m/s 时, $Re = 4.98 \times 10^5$ 。计算表明来流速度

$v > 6.5 \text{ m/s}$ 时, 小孔附近为湍流边界层。由平板边界层理论可知^[12]: 由层流转变为紊流的临界雷诺数 $Re = 5 \times 10^5 \sim 3 \times 10^6$ 。此时从前驻点开始的一段距离为层流边界层, 随着离前驻点距离增大, 边界层逐渐变厚。

图 9 为壁面附近边界层内单个微元流体质点 c 流经孔口附近的运动示意图, 以及忽略流体质点剪切变形的受力分析。假设流体质点在 Δx 和 Δy 上无能量耗散, 所以

$$\begin{cases} \Delta p_x = p_{x+\Delta x} - p_x = 0 \\ \Delta p_y = p_{y+\Delta y} - p_y \approx p_w - p_c = \Delta p \end{cases} \quad (10)$$

式 (10) 表明流体质点 c 主要受到 Y 方向的作用力, 其大小约为

$$f_c = \Delta A * \Delta p_y \quad (11)$$

其中, ΔA 表示流体质点 Y 方向的微元面积。流体质点流经孔口的时间 Δt 为:

$$\Delta t = \frac{d_y}{v_c} = \frac{d_y}{\sqrt{\frac{2E_x}{m_c}}} \quad (12)$$

其中, d_y 为流线位置孔宽, m_c 为微元流体质点质量, E_x 为质点动能。

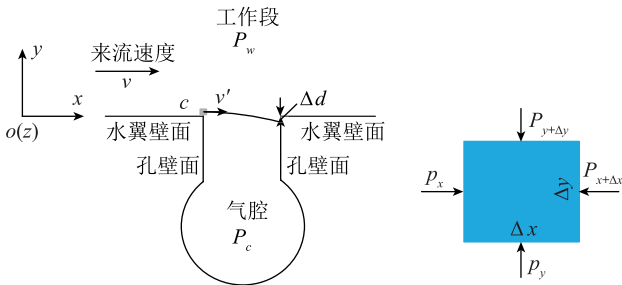


图 9 流体质点运动及受力示意图

Fig. 9 Sketch of movement and force for fluid particle

由牛顿第二定律知流体质点向孔口偏移距离 Δd 为

$$\Delta d = \frac{d_y^2 \Delta A}{4} \cdot \frac{\Delta p}{E_x} \quad (13)$$

单位时间内的射流量为

$$\Delta q = C \frac{\sqrt{2} d_y^2 \Delta A \Delta z}{4 \sqrt{m_c}} \frac{\Delta p}{\sqrt{E_x}} \quad (14)$$

其中 C 为修正常系数, 由坐标定义可知

$$d_y = 2\sqrt{R^2 - (R - z)^2} \quad (z \in [-R, R]) \quad (15)$$

代入式 (14) 得

$$\Delta q = 2\sqrt{2}C = \frac{\Delta p}{\sqrt{m_c E_x}} (2Rz - z^2) \Delta A \Delta z$$

$$(z \in [-R, R]) \quad (16)$$

其中 Mc 表示流体质点的动量, 对式 (16) 积分得

$$\Delta Q = C \frac{4}{3} \pi R^5 \frac{\Delta P}{m_c \cdot v(y)} = C \frac{4}{3} \pi R^5 \frac{\Delta P}{Mc} \quad (17)$$

其中 $v(y)$ 表示壁面速度分布规律。

图 10 是孔附近壁面边界层流场示意图, 图中 3 条流速抛物面线, 从左到右依次表示来流速度等于 3.7 m/s 、 6.5 m/s 和 9 m/s 。当来流速度为 3.7 m/s 时, 空口附近雷诺数没有达到临界雷诺数, 壁面附近边界层为层流边界层。边界层内 (δ^-) 的流体质点与边界层外 (δ^+) 的流体质点几乎没有相互交换, 且贴近水翼壁面的流体质点摩擦能量耗散, 此时边界层内流体质点动能较小, 在相同压差阻力作用下较易改变运动状态。而来流速度 U 大于 6.5 m/s 时, 雷诺数接近临界雷诺数, 而一般转捩点位置都非常靠前, 故此时只有孔附近边界层发展为剧烈的紊流边界层, 边界层内的流体质点与边界层外的流体质点交换剧烈, 即边界层内的流体质点保持较大动能, 此时在相同压差阻力作用下较难改变运动状态。另一方面, 孔口孔径相同, 流速小的流体质点经过孔口所用的时间 Δt 长, 反之时间 Δt 短。

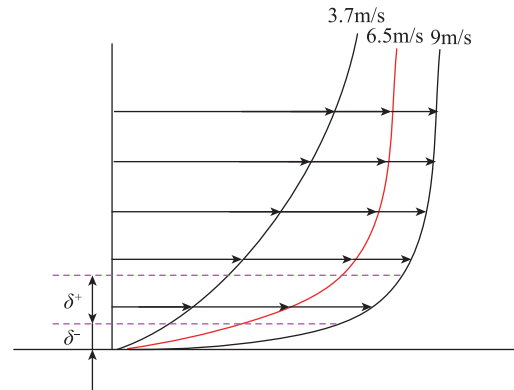


图 10 边界层流场示意图

Fig. 10 Sketch of the boundary layer flow

综上所述可知, 压差相同时来流速度小于临界雷诺数需要的速度时, 壁面附近边界层为层流边界层, 流体质点水平动能 E_x 小, 即单个微元流体质点流过孔口偏移距离 Δd 越大。壁面的水介质由无数微元流体质点组成, 从概率上来讲 E_x 越小, 进入孔内的流体质点越多, 宏观表现是流体射流量越大。同理可知, 水域流动速度相同时, 压差 Δp 越大, 流体射流量越多。

4 孔参数对气水射流流动机理分析

4.1 小孔径深比影响分析

在上述研究基础上, 进一步分析小孔径深比 H/D (径深比定义为射流孔深度与小孔直径之比) 对射流过程的影响。对以下径深比的小孔射流过程进行仿真研究, 见表 4。

表 4 小孔径深比影响数值仿真工况

Tab. 4 Effect of diameter-depth ratio on numerical simulation

$H/(mm)$	$D/(mm)$	H/D	$U_0/(m/s)$	属性
18	6	3.00	3.56	深孔
10	6	1.67	3.56	—
2	6	0.33	3.56	薄壁孔

图 11 给出了不同径深比下小孔射流速度随压比变化规律, 结果表明, 薄壁孔的射流面平均流速相对较大。

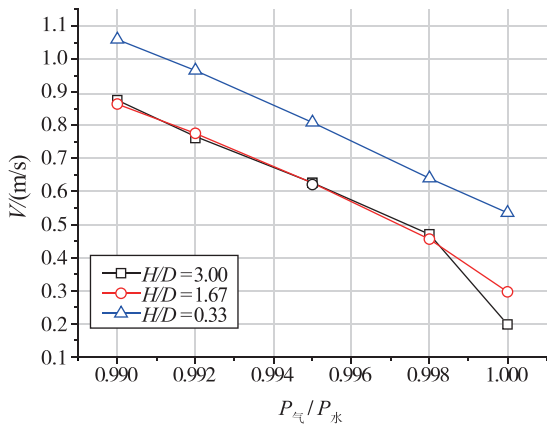


图 11 径深比对射流速度影响

Fig. 11 Effect of diameter-depth ratio on the velocity of jet flow

不同径深比下小孔射流质量流率随气水介质压比变化规律见图 12, 研究结果表明, 小孔射流质量流率不受径深比影响。

图 13 给出了不同径深比下多相流场特征。可见: 径深比为 3.00 及 1.67 时, 小孔射流的流动特征相近, 在小孔内壁存在局部回流涡, 气流沿小孔下缘逆向水流方向进入气域; 当径深比为 0.33 时, 小孔内部的局部流动涡消失, 气流沿小孔下缘顺水流方向进入气域。

4.2 小孔面积影响分析

保持小孔径深比不变, 开展射流孔面积影响分析, 设置如表 5 所示仿真研究工况。

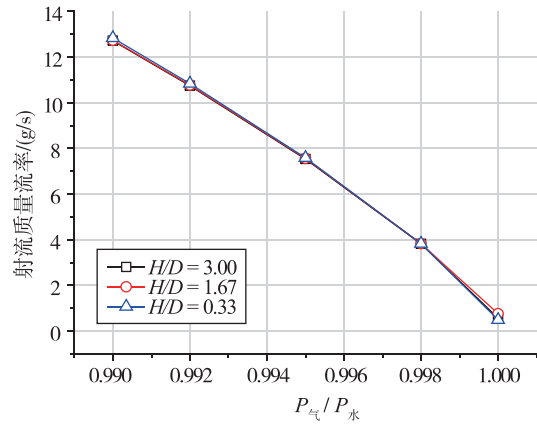


图 12 小孔径深比对射流质量流率影响规律

Fig. 12 Effect of diameter-depth ratio on the mass flow rate of jet

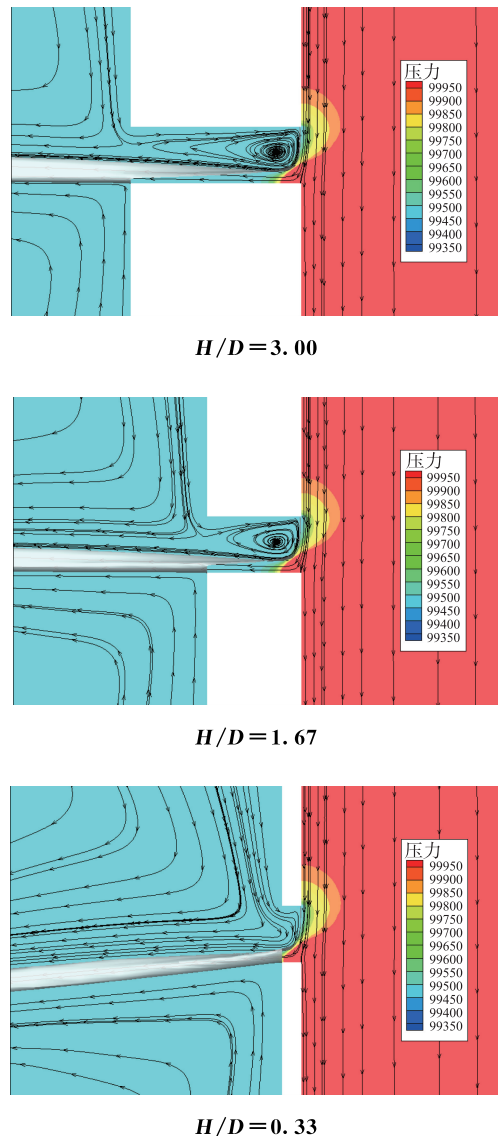


图 13 径深比对射流影响分析 ($P_g/P_w=0.995$)

Fig. 13 Analysis of the diameter-depth ratio on the jet flow

表5 小孔面积影响研究数值仿真工况

Tab. 5 Effect of the small holes on numerical simulations

工况	D/mm	面积/ mm^2	$U_0/(\text{m/s})$	H/D
1	12	113.10	3.7	1.67
2	9	63.62	3.7	1.67
3	6	28.27	3.7	1.67
4	4	12.57	3.7	1.67

图14给出了射流体积流率随气水介质压比变化规律。不同排气面积下,射流体积流率随压比变化规律一致,射流体积流率随小孔面积增加而增大。

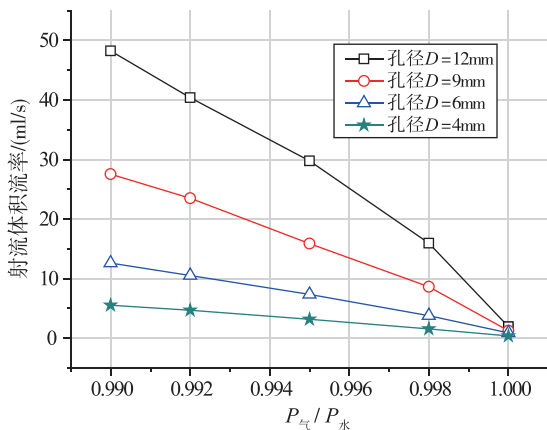


图14 小孔面积对射流质量流率影响

Fig. 14 Effect of the area of small holes on the velocity of jet flow

图15给出了射流体积流率与排气面积之比。不同孔径下,射流体积流率与孔面积之比为常值,即射流体积流率随孔面积成正比。

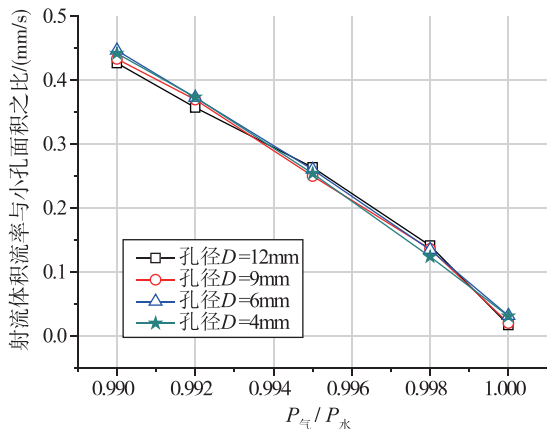


图15 射流体积流率与排气面积之比

Fig. 15 The ratio between jet volume flow rate and ventilation area

5 结论

本文针对边界层内小孔气水多相流场下射流

问题开展数值仿真及定常水洞试验研究,对比相同工况下数值仿真及水洞试验结果,验证了数值模型的正确性及模型计算精度。并针对不同气水两侧流场外压条件、不同水域运动状态、不同小孔类型及小孔面积下小孔射流问题开展数值仿真研究,获得了小孔进水量工程估算公式,为航行体上防进水结构的设计提供数据支撑,本文获得如下结论:

1) 水域无运动时,气水射流问题主要受小孔两侧压比驱动,水域有运动时,气水射流问题由孔两侧气水介质压差驱动,小孔射流量随着气水压差的增加而增大;

2) 小孔射流过程可归纳为层流边界层内射流状态及湍流边界层内射流状态,相同气水流场外压条件下,处于湍流边界层内的小孔射流体积流率更小;

3) 从小孔径深比角度来看,压差驱动下小孔气水多相流场射流问题,射流流量不受径深比影响。但射流孔局部流动特征可分为两种典型射流,即薄壁孔($H/D < 0.5$)射流及深孔($H/D > 2$)射流。对于深孔射流,小孔内壁存在局部回流涡,随着孔径深比的减小,回流涡消失;

4) 相同来流条件下,射流体积流率随小孔面积增加而增大,且射流体积流率与孔面积之比为常值。

参考文献

- [1] 李杰,鲁传敬,陈鑫,等. 附着空泡对潜射导弹弹道影响分析[J]. 弹道学报, 2014, 26(3): 54-58.
- [2] 鲍文春,权晓波,魏海鹏. 航行体排气水下发射流体动力数值仿真研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2014(5): 14-18.
- [3] 陈浮,马贵辉,程少华,等. 直、斜孔排气对航行体绕流流动影响: Part 1——流场结构[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(3): 507-513.
- [4] 李广超,柏树生,吴冬,等. 气膜孔形状对涡轮叶片气膜冷却影响的研究进展[J]. 热能动力工程, 2010, 25(6): 581-585.
- [5] 戴萍,林枫. 入射角度对缩放槽缝孔气膜冷却效果的影响[J]. 汽轮机技术, 2010, 52(4): 263-267.
- [6] 刘海涌,孔满昭,刘松龄,等. 有错排射流冲击的受限长通道及出流孔流场的实验研究[J]. 推进技术, 2006, 27(4): 307-311.
- [7] 李芳,赵刚,刘维新,等. 多孔仿生射流表面减阻特性数值模拟[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 44(6): 1698-1703.

- [8] 施瑶, 潘光. 多载荷 AUV 进水过程的 LES/VOF 数值模拟 [J]. 西北工业大学学报, 2015 (3): 438-443.
- [9] 郭建红, 鲁传敬, 陈瑛, 等. 基于高阶和高分辨率格式的自然空泡流数值模拟 [J]. 水动力学研究与进展, 2009, 24 (2): 224-231.
- [10] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39 (1): 201-225.
- [11] 李国杰, 黄萌, 陈斌. 基于 PISO 算法的非结构化网格 VOF 算法 [J]. 工程热物理学报, 2013, 34 (3): 476-479.
- [12] 王聪, 何春涛, 权晓波, 等. 空气压强对垂直入水空泡影响的数值研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44 (5): 14-19.
- [13] 张兆顺. 湍流 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 199-242.