通气位置对潜射航行体流体动力特性影响分析

孙铁志 魏英杰 王 聪 曹 伟

(哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 基于均质平衡流理论,通过求解混合介质的 RANS 方程、SST 湍流输运方程和各相之间的质量输运方程,开展了通气位置对潜射航行体流体动力特性影响的三维数值模拟研究,对比分析了不同通气位置条件下空泡形态特性、表面压力分布以及阻力变化特性. 结果表明:当两个通气口间距增加到一定值后,在两个通气口之间区域空泡发生断裂,在断裂区域迎流面和背流面表面压力值升高,且在空泡断裂闭合位置出现压力峰值;在相同通气量条件下,随着通气口间距的增大,压差阻力系数和粘性阻力系数均呈减小趋势变化.

关 键 词: 流体力学; 潜射航行体; 通气位置; 空泡形态; 流体动力

中图分类号: TJ 762.4

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2013)10-1303-06

Analysis of the effect of ventilation positions on hydrodynamic characteristics of submarine-launched vehicle

Sun Tiezhi Wei Yingjie Wang Cong Cao Wei

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Based on the theory of homogeneous equilibrium flow, by solving the RANS equations of mixture media, SST turbulence transport equations and the mass transport equations between each phase, three dimensional numerical simulation was carried out to study how the positions of ventilation holes impact on the submarine-launched vehicle's hydrodynamic characteristics. The characteristics of the cavity shape, the surface pressure distribution and the drag force change under different ventilation positions were compared. The result shows that the cavity shape is fracturing with the space between two ventilation orifices reaches to a certain value; The surface pressures of the face flow surface and the back flow surface will both increase at the region, and also a pressure peak value will occur at the closing position of cavity; The pressure drag coefficient and the viscosity drag coefficient decreasing gradually show a deceasing trend with the space between two ventilation orifices increasing under the same quantity condition of ventilation.

Key words: fluid mechanics; submarine-launched vehicle; ventilation positions; cavity shape; hydrodynamics

潜射航行体在水下运动发生自然空化时空泡内压力相对于周围环境压力较小,一旦空泡发生溃灭将会对航行体产生很大的荷载,通过人工通气的办法提高空泡内压力有助于解决上述问题[1]. 但是人工通气后使航行体周围环境变为气-汽-水三相混合介质,导致对潜射航行体空化问题的研究变得更加复杂.

国内外对通气超空泡流动问题的研究取得了一定的成果,其中文献[2]首次提出了用人工通气的办法生成超空泡,后来许多学者都是基于此

收稿日期: 2013-01-04; **网络出版时间**: 2013-07-22 11:04

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20130722.1104.008.html

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(HIT.NSRIF.201159); 哈尔滨市科技创新人才研究专项资金项目(2013RFLXJ007)

作者简介: 孙铁志(1986-),男,吉林洮南人,博士生,hitstzjg@163.com.

思想实现了超空泡的生成;文献[3]通过对通气空泡的振荡规律进行了试验研究,获得了泡内压力和空泡形态与通气量之间的关系;文献[4]发展了一整套完整计算自然空化、通气空化以及超音速流动的超空泡流动计算程序;文献[5]等基于独立膨胀原理计算了非定常通气超空泡形态,并且对通气超空泡稳定性问题进行了研究. 在潜射航行体通气空化问题研究方面,文献[6]对沿轴线重力场中定常空泡形态进行了数值模拟研究;文献[7]通过水洞试验获得了一些与通气空化行为相关的参数;文献[8]开展了不同形状空化器条件下通气空化问题研究,获得了在模型位置固定条件下空泡的长度;刘筠乔等[9]对潜射航行体出筒过程通气空泡问题开展了数值仿真研究;闵景新等[10]对潜射航行体水下航行阶段流体动力变化以及空泡演化问题开展了研究,并给出了不同头型下流体动力和肩空泡变化特性;文献[11]对不同直径通气孔以及不同形状空化器条件下汽水交界面波动问题进行了研究. 虽然目前对于潜射航行体通气空化问题已有一定的研究成果,但通气位置对潜射航行体流体动力特性影响的数值模拟研究还未见有公开发表的文献.

由于受试验条件和相关技术的制约,开展重力条件下伴有牵连速度的相关试验研究具有较大困难,本文通过开展通气位置对潜射航行体流体动力特性影响的三维数值模拟研究,不仅可弥补在试验研究方面的不足,同时获得不同通气位置条件下空泡形态、表面压力分布以及阻力变化特性等规律,为潜射航行体通气结构设计及流体动力预测提供一定的参考.

1 数值计算方法

1.1 控制方程

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho_{\mathrm{m}}}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_{\mathrm{m}}u_j)=0 \tag{1}$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{\mathrm{m}}u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_{\mathrm{m}}u_iu_j)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu_{\mathrm{m}}+\mu_{\mathrm{t}})\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right] \tag{2}$$

式中,$\rho_{\mathrm{m}}=\sum_{k=1}^{n}\alpha_k\rho_k$ 为混合物密度;u_j 为第j相的速度;$u_{\mathrm{m}}=\sum_{k=1}^{n}\alpha_k u_k$ 为混合物的动力粘性系数.

1.2 湍流模型

本文计算选取 SST(Shear Stress Transport)湍流模型,SST 湍流模型通过在 Baseline k-ω 湍流模型(简称 BSL 湍流模型)添加涡粘度限制方程解决了湍流剪切应力的传输问题,从而可对逆压梯度下的流动分离问题进行更为精准的预测,BSL 湍流模型控制方程如下[12]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k)=\frac{\partial}{x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_{\mathrm{t}}}{\sigma_{k3}}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+P_k-\beta'\rho k\omega+P_{k\mathrm{b}} \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j\omega)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_{\mathrm{t}}}{\sigma_{\omega3}}\right)\frac{\partial\omega}{\partial x_j}\right]+(1-F_1)2\rho\frac{1}{\sigma_{\omega2}\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial\omega}{\partial x_j}+\alpha_3\frac{\omega}{k}P_k-\beta_3\rho\omega+P_{\omega\mathrm{b}} \tag{4}$$

SST 湍流模型中添加的涡粘度限制方程形式为

$$\nu_{\mathrm{t}}=\frac{a_1k}{\max(a_1\omega,SF_2)} \tag{5}$$

式中,μ 为流体的粘性系数;μ_{t}为湍流粘度;$P_{k\mathrm{b}}$表示浮力引起的湍动能的产生项;P_k 表示由于粘性力引起的湍动能的产生项;常数 $\beta'=0.09$,$\alpha_1=5/9$;F_1 和 F_2 为混合函数;S 为应变率的不变测度.

1.3 空化模型

当流场空化时水与水蒸汽之间会发生质量转换,转换的输运方程定义为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i\rho_i)+\nabla\cdot(\alpha_i\rho_iU_i)=S_i+\Gamma_i \tag{6}$$

式中,S_i 为广义源项;Γ_i 为进入 i 相的单位体积质量源;$\Gamma_i=\sum_{b=j}^{N_p}\Gamma_{ij}$,$\Gamma_{ij}=\dot{m}_{ij}A_{ij}$ 为由 j 相到 i 相的单位质量流率;$\dot{m}_{ij}$是 j 相到 i 相单位相间交界面质量流率;A_{ij}为相间界面面积.

空化模型基于 Rayleigh Plesset 模型建立,该方程将水中水蒸汽气泡生长过程描述如下:

$$R_{\mathrm{B}}\frac{\mathrm{d}^2R_{\mathrm{B}}}{\mathrm{d}t^2}+\frac{3}{2}\left(\frac{\mathrm{d}R_{\mathrm{B}}}{\mathrm{d}t}\right)^2+\frac{2\tau}{\rho R_{\mathrm{B}}}=\frac{p_{\mathrm{c}}-p}{\rho} \tag{7}$$

式中,R_{B} 为气泡半径;τ 为水与水蒸汽之间的表面张力系数;P_{c} 为饱和蒸汽压;P 为气泡周围流场压强.

对式(7)忽略高阶项以及表面张力项,方程简化为

$$\frac{\mathrm{d}R_{\mathrm{B}}}{\mathrm{d}t}=\pm\sqrt{\frac{2}{3}\frac{p_{\mathrm{c}}-p}{\rho}} \tag{8}$$

若单位体积内具有 N_{B} 个气泡,气体体积分数为

$$\gamma_{\mathrm{b}}=V_{\mathrm{B}}N_{\mathrm{B}}=\frac{4}{3}\pi R_{\mathrm{B}}^3N_{\mathrm{B}} \tag{9}$$

则考虑气泡的生长与凝结时,质量转换表达

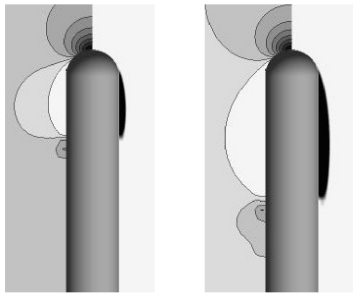
式为

$$\dot{m}_{\mathrm{fg}} = F\frac{3\gamma_{\mathrm{fg}}\rho_{\mathrm{g}}}{R_{\mathrm{B}}}\sqrt{\frac{2}{3}\frac{|\,p_{\mathrm{c}}-p_{\infty}\,|}{\rho}}\,\mathrm{sgn}(p_{\mathrm{c}}-p) \tag{10}$$

式中,F 为经验常数.

1.4　计算方法验证

为保证所采用的计算方法可信性,现针对无重力条件下半球头回转体空化问题进行数值模拟,并将结果与文献试验结果进行对比. 模型直径 $D=40$ mm,后体柱段长 $L=240$ mm,计算流域为三维圆柱流域,流域长度为 $8L$,径向宽度为 $20D$,弹头前段流域长为 $2.5L$,弹体后端流域长为 $4.5L$. 选取自然空化数分别为 $\sigma=0.2$ 和 $\sigma=0.3$,计算所得航行体水相体积分数及压力分布如图 1 所示,将提取的航行体表面压力分布结果与文献[13]试验数据对比如图 2 所示. 从曲线中可以看出,数值计算结果与试验数据相比具有较好的一致性,从而验证了计算方法的有效性.



a　$\sigma=0.3$　　b　$\sigma=0.2$

图 1　压力云图(左)及水相体积分数(右)

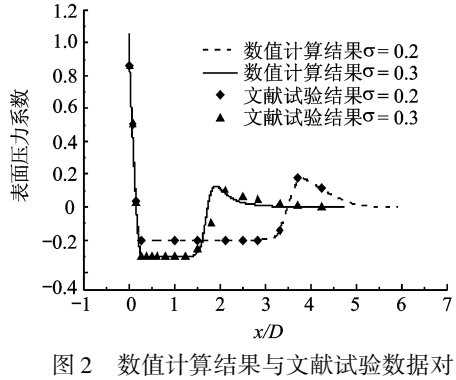


图 2　数值计算结果与文献试验数据对比

2　计算模型

2.1　计算模型设置及网格划分

计算模型以法国 M51 型号潜射航行体几何外形为参考,开展不同位置通气条件下空泡形态及流体动力问题的数值模拟研究,模型几何外形如图 3 所示. 模型总长 $L=268$ mm,其中后体长为 240 mm,后体直径为 $D=40$ mm,由于本文研究问题侧重于通气位置对空泡连续性的影响,所以将航行体尾部推进结构简化为圆柱结构时,有助于计算模型的网格划分的同时,又不会对航行体肩部空泡形态以及航行体表面压力分布产生影响. 虽然简化后会对压差阻力的准确度产生一定的影响,但简化后可满足本文研究问题的需求. 环形通气口在航行体轴向不同位置沿周向呈环形分布,将离航行体头部最近的通气口命名通气口 A,向后依次命名为通气口 B、通气口 C、通气口 D 和通气口 E,通气口具体分布位置及尺寸如表 1 所示.

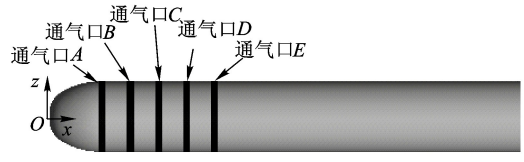


图 3　计算几何模型

表 1　通气口分布位置

通气口	A	B	C	D	E
分布位置/mm	28 ~ 32	44 ~ 48	60 ~ 64	76 ~ 80	92 ~ 96

计算过程中选用的笛卡尔坐标系设置如图 3 所示,重力沿 x 轴正方向,牵连速度沿 z 轴正方向. 在 $x=0$ 位置处环境压力值 $p_0=57\,497.55$ Pa,压力沿 x 轴方向呈 $p_0+\rho gx$ 分布,参考压力 101 325 Pa,饱和蒸汽压为 3 510 Pa. 计算时航行体头部初始空化数 $\sigma=0.5$,牵连速度 $V_{\text{牵连}}=0.8$ m/s. 流域经过无关性验证之后弹体前端流域设置为 $3L$,弹体后端流域长为 $8.7L$,流域径向为 $22D$,这样设置可避免流域大小对计算结果的影响,同时又可满足计算精度. 入口和流域壁面设置为速度入口,流域壁面设置为速度入口可避免壁面带来的阻塞效应,出口边界条件设置为压力开口,航行体表面边界设置为不可滑移壁面,通气口边界条件设置为质量流量入口,同时为了分析不同位置通气口通气对空泡形态及流体动力影响情况,计算时选定不同工况下总通气量为 0.002 4 kg/s 不变,只把通气位置作为单一变量,在本文计算的通气量范围内,对应的气体流速较低,所以在计算过程中可忽略气体的可压缩性.

为了提高计算效率,划分网格时将压力梯度变化较大的位置,即航行体头部、通气口处、空泡闭合位置以及弹体尾部区域网格进行加密处理,远场网格进行稀疏化处理,航行体壁面网格第 1 层厚度为 1×10^{-4} m,计算模型及流域网格划分如图 4 所示.

2.2　网格无关性验证

针对 M51 模型,开展了粗糙网格(50 万)、中

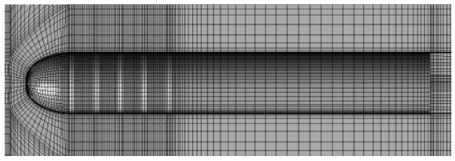


图 4 计算网格划分

等精细网格(85 万)和精细网格(115 万)3 种不同精度网格的计算结果对比,不同数量网格下弹体表面压力分布如图 5 所示,从图中可以看出粗糙网格计算结果与精细网格相比相差较大,中等精度网格与精细网格计算结果几乎相同,所以为节省计算资源,计算时选用中等精细网格(85 万)可满足计算要求.

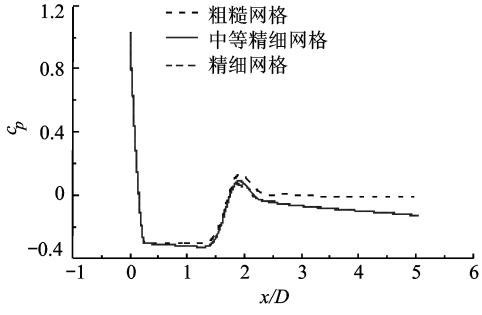


图 5 不同网格数量下弹体表面压力对比

3 计算结果与分析

3.1 通气空泡形态分析

将环境压力为 p_0(见第 2 节)对应水深的不同位置通气条件下的空泡形态进行分析,如图 6 所示,从图中对比可以看出,当通气口为 *A*,*AB* 和 *AC* 时,发生空化的区域大小差别很小,空泡形态相近,且空泡形态的连续性较好;当通气口为 *AE* 时,在通气口 *E* 上游空泡发生断裂,且在空泡断裂闭合位置出现回射流现象.



图 6 不同通气位置下空泡形态

将图 6 中空泡形态轮廓在 *xOy* 平面上投影,可得到空泡形态轮廓曲线,对空泡轮廓半径进行无量纲化处理,得到航行体表面空泡无量纲半径变化 R_c/D_n(其中 R_c 为空泡轮廓半径,D_n 为特征长度,本文取模型后体直径 *D*),如图 7 所示.

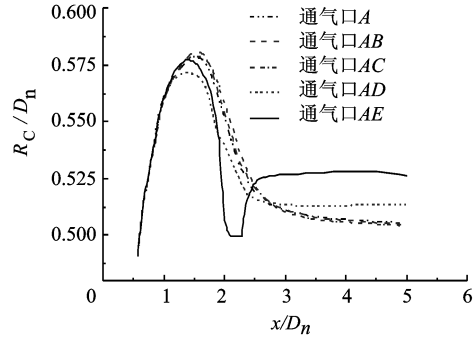


图 7 不同通气位置下空泡形态轮廓

从图 7 中可以看出,当通气口为 *A*,*AB* 和 *AC* 时,空泡半径、空长度几乎相同;当通气口为 *AD* 时,在 $x/D_n<2.7$ 航行体表面区域空泡半径减小,通气口 *D* 下游的航行体表面空泡半径增大;当通气口为 *AE* 时,在通气口 *E* 上游空泡断裂闭合区域,空泡半径变化梯度较大,且通气口 *E* 下游的空泡半径明显增加.

通过不同位置条件下通气空泡形态计算结果对比可以得出:当两个通气口间距较小时,上端的通气口形成的通气空泡会抑制下端通气口下游的空泡发展,即使下端通气口下游的空泡半径减小;当两个通气口间距增大到一定值后,在两通气口之间区域航行体表面空泡会发生断裂,且断裂后下端通气口下游区域的空泡半径增加.

3.2 航行体表面压力分析

为了对比分析不同通气位置条件下航行体表面荷载,现提取不同通气位置下迎流面、背流面以及侧流面表面压力系数,并且将通气口为 *AD* 时的迎流面、背流面以及侧流面表面压力系数进行对比,为了清晰显示通气空化区域的表面压力值,只取航行体 x/D_n 为 0.1 ~ 5.0 区域的表面压力系数,下面详细介绍分析过程(其中 *z* 轴负方向为迎流面,*z* 轴正方向为背流面).

图 8 给出了不同通气位置下的航行体迎流面表面压力系数变化曲线.

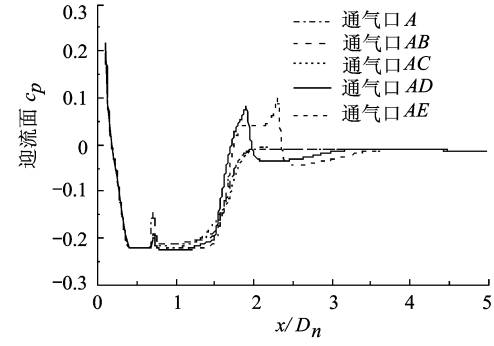


图 8 迎流面表面压力系数

由图 8 可看出,在 A 通气口 $x/D_n=0.67$ 处,由于通气口 A 通气时会抑制自然空化,所以在 A 通气口上端存在一个较小的压力峰值;在空泡闭合区域表面压力系数增大,且当通气位置为 AD 时,由于空泡在通气口 D 处有闭合的趋势,导致此处存在压力峰值;当通气位置为 AE 时,AE 通气口之间区域的空泡发生断裂,断裂后弹体表面压力增大,且在空泡闭合位置产生压力峰值.

图 9 给出了不同通气位置下的航行体背流面表面压力系数变化曲线,曲线整体变化趋势与迎流面类似,但是当通气口为 AD 时,由于背流面空泡形态连续性较好,使通气口 D 附近几乎没有出现压力峰值;当通气位置为 AE 时,航行体表面仍有压力峰值出现.

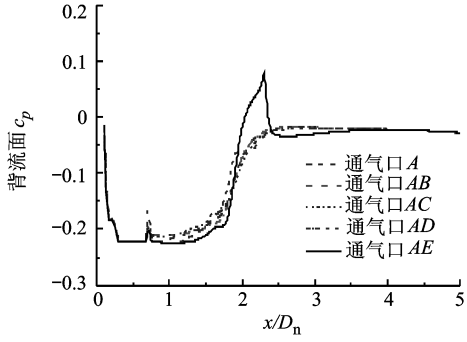


图 9　背流面表面压力系数

图 10 给出了不同通气位置下的航行体侧流面表面压力系数变化曲线,从图中曲线可以明显看出,不同通气位置下的表面压力值差别很小,且表面压力系数值未出现突变现象.

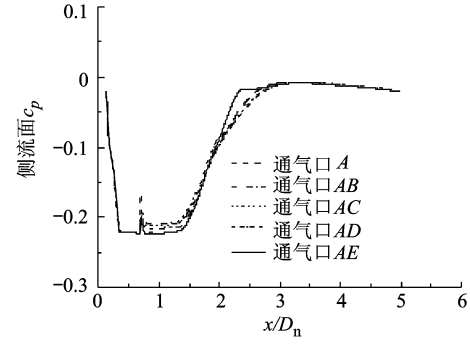


图 10　侧流面表面压力系数

以通气口位置为 AD 时为例,对比分析迎流面、背流面和侧流面表面压力系数,如图 11 所示.

从图 11 中可以看出,在航行体头部区域迎流面的表面压力系数最大,背流面的表面压力系数最小;在通气空化区域各个方向的表面压力系数差别很小,在空泡闭合区域表面压力系数从大到小顺序为迎流面、背流面和侧流面.

可见,不同位置通气导致航行体表面压力分布不同,所以合理地设计通气口位置有利于改变航行体表面压力分布,从而减小对航行体结构的荷载.

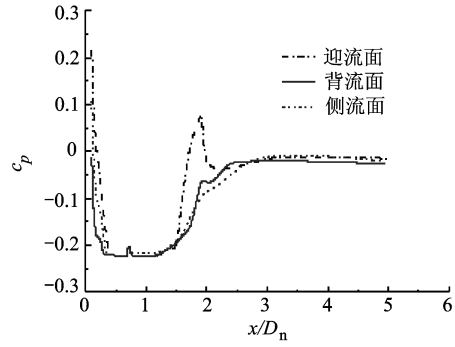


图 11　迎流面、背流面、侧流面表面压力系数对比

3.3　航行体阻力特性分析

通过计算获得的不同通气位置下航行体阻力变化特性如表 2 所示(其中 C_w 表示压差阻力系数,C_ν 表示粘性阻力系数,C_d 表示总阻力系数).

表 2　不同通气位置下阻力系数对比

通气口	C_w	C_ν	C_d
A	0.2112	0.0262	0.2375
AB	0.2108	0.0257	0.2365
AC	0.2105	0.0256	0.2363
AD	0.2097	0.0118	0.2215
AE	0.1954	0.0107	0.2061

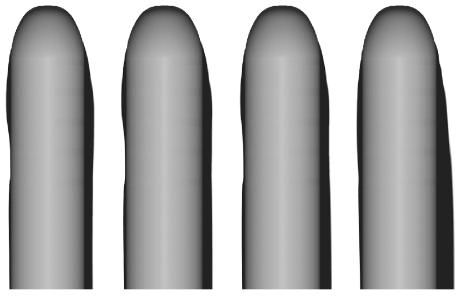
从表中数据看出,在相同通气量条件下,随着通气口由 A 到 AE 变化时,航行体压差阻力系数和粘性阻力系数逐渐减小,总阻力系数也呈减小趋势变化;当通气口分别为 A,AB 和 AC 时压差阻力变化较小,由空泡形态和表面压力对比可知,这 3 种工况下空泡形态接近,航行体头部压力相差较小,导致压差阻力变化较小;当通气口为 AE 时,压差阻力最小,从通气口为 AE 时的航行体空泡形态可知,航行体尾部气相体积分数明显增大,气体给航行体提供一定的升力,导致压差阻力减小;当通气口由 A 到 AC 变化时,航行体沾湿区域相差较小,导致粘性阻力系数相差不大;当通气口为 AD 和 AE 时,航行体表面沾湿面积很小,导致粘性阻力大幅减小;总阻力由压差阻力和粘性阻力组成,所以总阻力系数随着通气位置由 A 向 AE 变化时,呈减小趋势变化.

可见,在总通气量相同的条件下,通气位置的分布直接影响着航行体的阻力特性,所以合理地设计通气口位置布局可有效减阻.

3.4　不同通气量下空泡形态变化

在开展不同通气位置条件下计算时发现通气口间距过大会出现空泡断裂现象,为研究通气量对空泡形态影响,现初步开展通气口 AE 通气时

不同通气量下空泡形态变化,计算结果如图 12 所示. 从图中可以看出,当通气量从 2.4 ~ 5.0 g 变化时,通气口 E 上游空化区域仍未较好地覆盖通气口 E,当通气量由当通气量为 6.0 g 时,空泡连续性较好. 可见,增大通气量可弥补开口间距较大对空泡连续性的不利影响.



2.4 g 4.0 g 5.0 g 6.0 g

图 12 通气口 AE 不同通气量下空泡形态变化

4 结 论

本文基于均质平衡流理论,通过求解混合介质的 RANS 方程、SST 湍流输运方程和各相之间的质量输运方程,开展了不同通气位置条件下潜射航行体流体动力特性的三维数值模拟研究,获得了不同通气位置条件下空泡形态、航行体表面压力分布以及航行体阻力变化规律:

1) 空泡形态方面:当两个通气口间距较小时,形成的空泡半径及长度差别很小;当两个通气口间距较大时,两通气口之间区域的空泡发生断裂,且断裂后空泡闭合位置在下端通气口的上游区域,断裂后下端通气口下游的空泡半径变大.

2) 表面压力分布方面:当两个通气口间距较小时,不同工况下航行体表面压力分布差别很小;当两个通气口间距增加到一定值后,在航行体表面空泡发生断裂的区域迎流面和背流面表面压力升高,且在空泡闭合位置出现压力峰值;同一计算工况条件下,航行体空化区域迎流面表面压力最大.

3) 阻力特性方面:在相同通气量条件下,随着通气口间距的增大,航行体压差阻力系数和粘性阻力系数逐渐减小,总阻力系数呈减小趋势变化.

本文虽然对不同通气位置条件下潜射航行体流体动力特性问题的研究取得了一定的成果,但在通气量对不同间距通气口空化问题以及前后通气口通气量优化设计问题还未开展深入系统的研究,下一步将深入开展此类问题的研究.

参考文献 (References)

[1] Savchenko Y N. Control of supercavitation flow and stability of supercavitating motion of bodies[C/OL]. RTO AVT/VKI Special Course:Supercavitating Flows, von Karman Institute for Fluid Dynamics, Rhode-Saint-Genese, Belgium. 2001:12-16

[2] Reichardt H. The laws of cavitation bubbles as axially symmetrical bodies in a flow[C]//Ministry of Aircraft Productuin (Great Britian), Reports and Translations, 1946(766):322-326

[3] Silberman E, Song C S. Instability of ventilated cavities[J]. Journal of Ship Research, 1961, 5(1): 13-33

[4] Lindau J W, Kunz R F, Mulherin J M, et al. Fully coupled 6-DOF to URANS modeling of cavitating flows around a supercavitating vehicle [C]//Fifth International Symposium on Cavitation (CAV2003). Osaka, Japan:[S. l.], 2003

[5] 张学伟,张亮,张嘉钟,等. 通气超空泡稳定性分析的一种数值算法[J]. 力学学报,2008,40(6):820-825
Zhang Xuewei, ZhangLiang, Zhang Jiazhong et al. Numerical method for the stability analysis of ventilated supercavity[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2008, 40(6):820-825 (in Chinese)

[6] Acosta A J. The effect of a longitudinal gravity field on the supercavitating flow over a wedge [J]. Trans ASME, 1961, 28(2): 188-192

[7] Kawakami. Investigation of the behavior of ventilated supercavities[C]//American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division FEDSM. 2010:57-64

[8] Matveev K I, Miller M J. Air cavity with variable length under model hull[J]. Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2011, 225(2):161-169

[9] 刘筠乔,鲁传敬,李杰,等. 导弹垂直发射出筒过程中通气空泡流研究[J]. 水动力研究与进展,2007,22(5): 549-554
Liu Yunqiao, Lu Chuanjing, Li Jie. An investigation of ventilated cavitating flow in vertical launching of a missile[J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 22(5): 549-554 (in Chinese)

[10] 闵景新,魏英杰,王聪,等. 潜射导弹垂直发射过程流体动力特性数值模拟[J]. 兵工学报,2010,31(10):1303-1309
Min Jingxin, Wei Yingjie, Wang Cong, et al. Numerical simulation on hydrodynamic characteristics of submarine missile in the verticallaunch process[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(10): 1303-1309 (in Chinese)

[11] Ramesh S S, Lim K M, Khoo B C. An axisymmetric hypersingular boundary integral formulation for simulating acoustic wave propagation in supercavitating flows[J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 3(31): 4313-4342

[12] Menter F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. AIAA-Journal, 1994, 32 (8): 1598-1605

[13] Rouse H, McNown J S. Cavitation and pressure distribution, head forms at zero angle of yaw[R]. State University of Iowa Engineering Bulletin 32, No. 420, 1948

(编 辑:张 嵘)