

凹槽参数对通气空泡融合的影响

任泽宇, 孙龙泉, 姚熊亮, 赵纪鹏

(哈尔滨工程大学船舶工程学院, 哈尔滨 150000)

摘要: 水下航行体通气技术形成的空泡能够有效降低航行阻力并调节运动姿态, 但通气空泡在航行体表面不易融合, 空泡形态不稳定, 因此开展通气空泡的融合控制具有重要工程应用价值。采用有限体积法进行数值计算, 研究了航行体孔后开槽对通气空泡融合的控制作用, 并探究了不同凹槽参数对通气空泡融合的影响。研究发现, 凹槽改变了空泡的流场特性, 槽内产生的旋涡卷吸流经凹槽的气体, 使槽内气体向航行体周向发展并融合; 当槽宽取 $0.125D$, 孔槽间距取 $0.075D$ 时, 对空泡融合的促进以及稳压效果最佳。

关键词: 水下航行体; 凹槽参数; 被动控制; 主动通气; 空泡融合

中图分类号: TJ762.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-4080 (2021) 03-0028-09

Influence of Groove Parameters on Ventilated Bubble Fusion

REN Zeyu, SUN Longquan, YAO Xiongliang, ZHAO Jipeng

(College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150000, China)

Abstract: The bubble formed by the ventilation of the underwater vehicle can effectively reduce the navigation resistance and adjust the movement posture. However, ventilated bubbles are not easy to fuse on the surface of the vehicle, and the cavitation shape is unstable. Therefore, the fusion control of ventilated bubble has important engineering application value. The finite volume method is used in this paper for numerical calculation. The effect of adding a groove behind stoma on the ventilated bubble fusion is studied. The influence of groove parameters on bubble fusion is studied. The results show that the groove changes the flow field characteristics of the bubble. The vortex generated in the groove entrains the gas flowing through the groove, and the gas in the groove develops and merges in the circumferential direction of the vehicle. When the groove width is $0.125D$ and the hole-groove distance is $0.075D$, the effect of promoting bubble fusion and stabilizing pressure is the best.

Key words: Underwater vehicle; Groove parameters; Passive control; Ventilating; Cavity coalescence

0 引言

水下航行体高速运动过程中, 覆盖于航行体表面的自然空泡经历初生、发展以及出水溃灭, 改变了航行体表面的载荷分布, 同时冲击、腐蚀

航行体表面, 威胁航行体的结构及弹道稳定性^[1], 改善自然空泡的负面影响成为兵器制造的核心问题之一^[2]。通过注入不可凝气体形成覆盖于航行体表面的通气空泡, 即主动通气技术, 可增加气泡稳定性, 降低航行体阻力, 并调节航行体的姿态

收稿日期: 2020-12-16; 修订日期: 2021-03-01

基金项目: 国防科技基金项目 (2019-JCJQ-JJ-293); 国家自然科学基金企业创新发展联合基金重点支持项目 (U20B2005)

作者简介: 任泽宇 (1997-), 男, 硕士, 主要研究方向为水下发射技术。E-mail: renzeyu@hrbeu.edu.cn

通信作者简介: 孙龙泉 (1983-), 男, 教授, 主要研究方向为水下发射技术。E-mail: sunlongquan@hrbeu.edu.cn

参数^[3-4]。

通气空泡流在本质上是一种非线性非稳态湍动的复杂多相流动问题^[5]，国内外学者在此方面进行了诸多研究。在通气空泡发展过程中，杨武刚等^[6]和张纪华等^[7]发现通气量是影响空泡几何尺寸和表面稳定性的重要因素，而空泡界面的波动和空泡的震荡是影响通气空泡表面不稳定的主要因素^[8]。龚瑞岩^[9]通过自主设计的垂直约束式水下发射平台开展水下航行体单排气孔通气试验，对通气空泡的流动形态变化规律进行了总结。Li 等^[5]采用边界元法对三维通气空泡进行了研究，结果表明入流速度是影响气泡发展过程的主要因素，通气量和孔口直径对气泡的发展过程有一定的影响。Zhang 等^[10]和刘涛涛等^[4]通过湍流模型对通气空泡流场特性进行研究，结果表明，在回射流与主流的相互作用下，反向旋转的涡对导致了空泡的脱落。

为了形成覆盖于航行体表面的通气空泡，当前工程上的主动通气主要采用多孔排气技术，但是通气空泡在航行体表面不易融合，空泡形态不稳定，龚瑞岩^[9]在研究中发现，通气孔形式下的通气空泡受到通气率、气孔数量以及空泡外界流场等因素的影响，空泡的融合存在困难，未融合的通气空泡表面凹凸不平存在大量褶皱，空泡尾部气水混合严重，存在大量的空泡脱落及断裂现象，不利于航行体的稳定性，气泡融合成为主动通气技术的难点之一^[11]。为解决空泡融合问题，改变航行体结构的被动控制方法被大量应用，胡少峰^[12]和孙铁志等^[13]针对气孔数量对通气空泡融合的影响进行研究，发现气孔数量的增加有利于空泡的融合，气孔数量的增加实际上减小了气孔间距，随着气孔间距的减小，气泡轴向发展速度减缓，并开始向航行体周向发展并促进空泡的融合^[14]。马贵辉等^[15]和时俊雯^[16]通过 CFD 对双排气孔排气的流动特性进行研究，发现由于前排气孔的影响，气体经后排气孔流出能较快地形成近似等压区，有利于空泡的周向发展以及融合。但龚瑞岩^[9]通过双排气孔排气试验发现，虽然双排气孔通气促进了空泡的融合，但是通气空泡表面不稳定，尾部泄气现象严重，不利于空泡的稳定性。崔震宇^[17]在航行体表面设置环形凹槽并在槽内开孔通气，研究表明该通气方式能够有效降低航行体表面波动，并促进空泡的融合，但是环形槽内开孔又会造成航行体结构强度的损失。

孙龙泉等^[20]通过在航行体通气孔后开槽的方式控制通气空泡的融合，并对开槽控制空泡融合的机理进行了细致的分析，但对如何选择合理的凹槽参数并未给出合理方案。本文通过有限体积法进行数值计算，采用 VOF 模型和动网格技术，分析了凹槽参数（槽宽和孔槽间距）对空泡融合控制效果的影响，给出最佳凹槽参数。

1 数值计算方法及验证

1.1 几何模型及边界条件设置

数值模型示意如图 1 所示。行进方向为航行体长度 L 方向（方向垂直于水平面），零点设置在航行体尾部中点处， x 为航行体截面到尾部的垂直距离。半球头型的水下航行体直径 $D = 40$ mm，总长度 $L = 4.5D$ ，凹槽宽度为 d_1 ，气孔和凹槽的距离为 d_2 ，设置 30 个通气孔均布于航行体头部气孔直径 $d = 0.01D$ 。

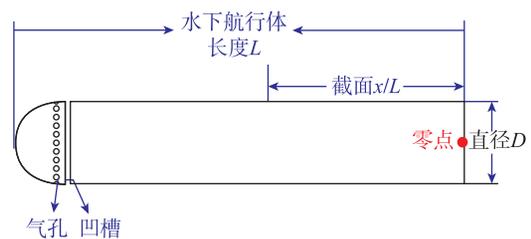


图 1 几何模型示意图

Fig. 1 Geometric model

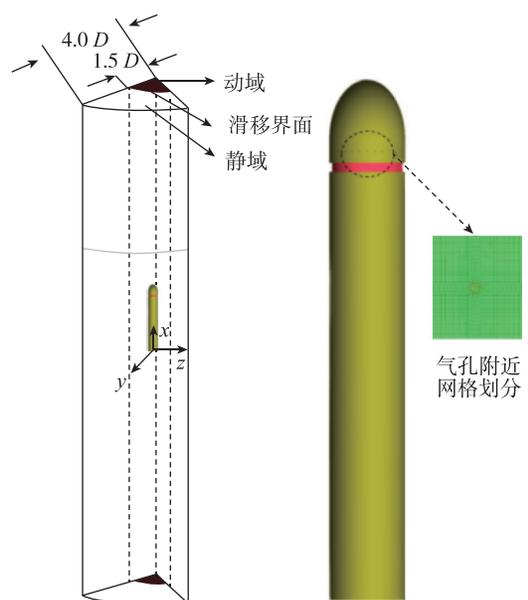


图 2 三维模型、计算域示意图

Fig. 2 Three dimensional model and computational domain

图2为三维模型及计算域示意图。计算域分为静域、动域，静域不参与航行体的运动，半径为 $4.0D$ ；通过滑移界面与静域相连的为动域，半径为 $1.5D$ ，用相同的UDF定义动域和航行体的运动。计算域的上下表面设置为恒定压力出口，侧面设置为压力随水深变化的压力出口，由于本文计算不考虑航行体出水，所以出口处的回流均设置为水相，航行体表面设为无滑移、绝热，气孔边界设置为恒定的质量流量入口。由图2可见，通过布置节点，实现孔内网格到孔外网格由密到疏的过渡。为保证捕捉精细流场，设置半径为 $1.0D$ 的包裹域，给定10层边界层，第一层网格高度设置为 $0.002D$ ，边界层内网格增长率为1.2。经过网格无关性验证，同时考虑计算的准确性和有效性，最终整体网格数量确定为260万。

将本文部分参数进行无量纲化处理，得到无量纲时间 T ，无量纲压力 P ，通气率 Q ，傅汝德数 Fr ，空泡长度 L_p

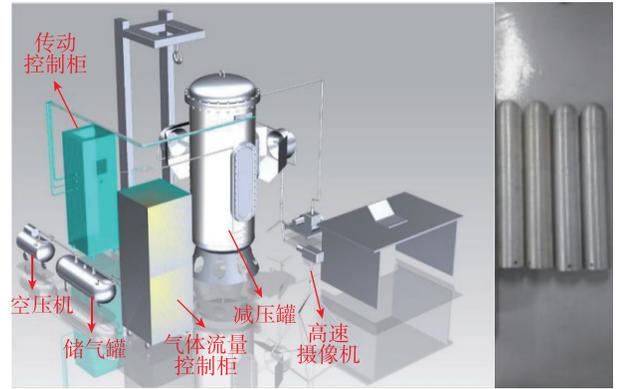
$$T = \frac{tV}{D}, P = \frac{p}{\rho V^2}, Q = \frac{Q_{\text{body}}}{VD^2}, Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}}, L_p = \frac{l_p}{L} \quad (1)$$

式中， V 为航行体的运动速度， p 为航行体壁面压力， Q_{body} 为气孔通气量， l_p 为空泡长度。

1.2 数值计算方法及有效性验证

计算采用有限体积法对控制微分方程进行求解，采用隐式VOF模型和Level Set方法进行相间界面的多相流计算，气体设置为主相，水设置为副相（相函数 α 表征主相所占体积分数， $\alpha=1$ 时表示该区域只存在气相， $\alpha=0$ 时表示该区域只存在水相）。湍流模型采用RNG $k-\epsilon$ 模型，对于雷诺数低、湍流发展不充分的近壁面区域，通过标准壁面函数进行近壁面处理；压力速度耦合算法采用PISO算法。

为验证算法的有效性，本文针对无槽多孔通气进行仿真，并在哈尔滨工程大学减压罐中进行排气试验，试验装置总体示意图如图3(a)所示。试验系统包括3个主要部分：由空压机和储气罐以及气体流量控制柜组成的通气控制系统，由高速摄像机组成的数据采集系统，由传动控制柜和减压罐组成的运动系统。试验模型如图3(b)所示，模型由航行体本身、气室、通气管等部分组成，航行体直径为 D ，长度为 $4.75D$ ，气孔直径为 $0.02D$ 。



(a) 试验操作系统

(b) 实验模型

图3 试验装置

Fig. 3 The experimental device

在 $Fr=4.79$ ， $Q=0.025$ 的工况进行试验以及数值仿真，定义空泡长度 L_p 为从通气孔到空泡尾部的距离，图4给出了空泡无量纲长度的时历曲线。通过对比发现，数值模拟结果和试验结果吻合程度良好，可以认为本文所采用的数值方法有效。

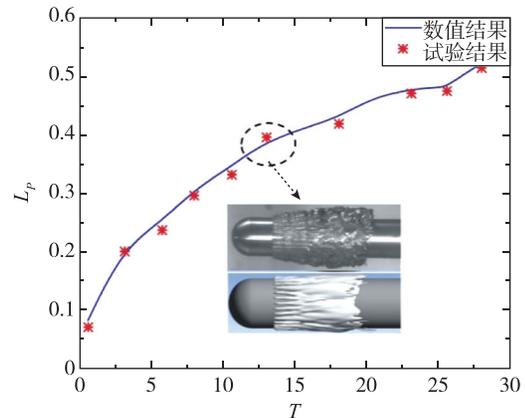


图4 试验和数值空泡无量纲长度对比

Fig. 4 Comparison of experimental and numerical cavity dimensionless length

2 凹槽对通气空泡融合的控制作用

对孔后开槽的空泡流动进行研究，取槽宽 $d_1=0.125D$ ，孔槽间距 $d_2=0.075D$ 的典型工况进行分析(本文所有计算工况的傅汝德数 $Fr=4.75$ ，通气率 $Q=0.025$)。图5为空泡充分发展时的三维泡型；图6为当 $X/L=0.80$ ， $X/L=0.68$ 和 $X/L=0.57$ 时，这3个典型截面位置的气水相体积分布；图7为3个典型截面位置的涡量云图。

涡量云图中涡量值的大小反映该位置漩涡作用的强度和剪切作用的大小^[17]。图 6 和图 7 分别为航行体截面的气水相云图和涡量云图，可以看出，涡量云图中数值较大的红色区域大多位于气水相云图的纯气相区与纯水相区域的交界位置，这说明在这一位置存在强度较大的漩涡作用或受到较大的流体剪切作用。在截面 $X/L=0.80$ 位置，未开槽模型的涡量云图呈现花瓣状，涡量值较大的红色区域位于瓣状空泡内，因为在此区域刚从排气孔排出的气体沿轴线方向相对航行体速度较小，因此受到较强的水流黏性拖拽作用所致。对于开槽模型的涡量云图涡量值较大的红色区域周向联通，因为此处通气空泡周向融合充分，融合的空泡外表面受到流体黏性拖拽作用从而产生较大的剪切力所致。这说明通气空泡由于同时受到浮力和空泡外流体黏性拖拽力的作用，在空泡外表面附近往往会产生较大的流体剪切作用，即涡量云图中涡量值较大的位置实际反映的就是通气空泡外表面或空泡内纯气相区与泡内水团的交界面。因此，本文主要以涡量云图作为重要的通气空泡融合判据，并结合气水相云图和流线图对空泡融合进行分析。

如图 7 所示，开槽模型涡量值较大的红色区域联通程度较好，尤其在截面位置 $X/L=0.68$ 和 0.58 ，相比红色区域联通较好的开槽模型，开槽模型的涡量分布更为分散，说明开槽模型空泡融合程度较好。

如图 6 所示，相比未开槽模型，开槽模型空泡的气相整体分布均匀，空泡外缘形状规律，空泡的融合效果较好，开槽改变了空泡的流场特性，泡内流线对比如图 5 (b) 所示。通气空泡流经凹槽时，由于壁面的突然扩张，空泡与壁面发生分离并形成自由剪切层^[19-20]，与凹槽发生碰撞后形成旋涡，流经凹槽的气体受到旋涡的卷吸作用进入槽中。来流的冲刷对槽内气体流出凹槽造成困难，导致槽内气体会向周向扩散，促进上游通气空泡的融合，如图 5 (a) 所示。与无槽模型的空泡相比，有槽模型的空泡在凹槽附近已经发生融合并向空泡下游扩张，空泡整体的融合程度较好；凹槽的存在会增加近壁面处的速度梯度，增大流体的动能，阻碍空泡尾部回射流的发展，降低回射流的速度^[20]，如图 5 (a) 所示。与无槽模型的相比较，由于开槽模型的回射流强度低，泡尾无

大量凸起且边界形状较为规则。

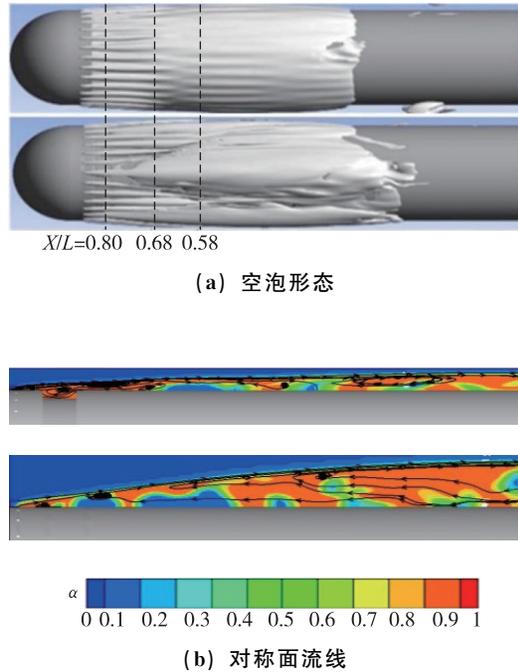


图 5 开槽模型和未开槽模型通气空泡对比
Fig. 5 Comparison of bubble between slotted model and unslotted model

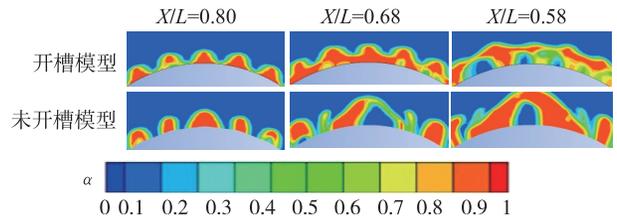


图 6 开槽模型和未开槽模型典型位置气水相分布图
Fig. 6 Gas-water phase distribution at typical positions of slotted model and unslotted model

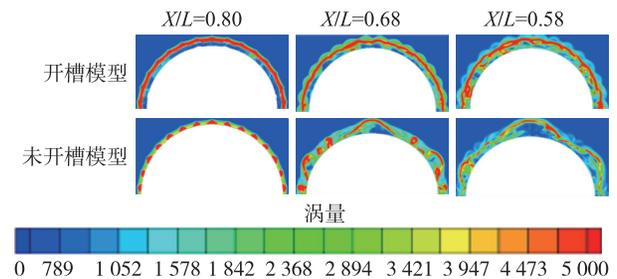


图 7 开槽模型和未开槽模型典型位置涡量图
Fig. 7 Vorticity magnitude at typical positions of slotted model and unslotted model

空泡的融合程度和回射流的强度影响航行体表面的压力波动，进而影响航行体的结构稳定

性^[16],为简化航行体表面的压力波动描述,引入航行体周向压力标准差 S

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2} \quad (2)$$

式中, N 为航行体某截面处的压力取点个数, P_i 为航行体 i 点处的压力值, \bar{P} 为所取截面航行体表面压力的平均值。

分别计算截面位置 $X/L = 0.81, 0.70, 0.58$ 时, 3 个典型位置的两种模型的压力标准差 S , 所得结果如图 8 所示。可以发现, 随着截面位置向空泡下游推进, 未开槽模型的压力标准差 S 逐渐增大, 航行体表面的整体压力波动较大, 因为未开槽模型的空泡融合效果较差。如图 6 所示, 随着截面位置向泡尾推进, 泡内水相占比逐渐增加, 空泡融合程度较差; 而开槽模型的稳压效果较好, 随着截面位置向下游推进, 压力标准差 S 逐渐降低, 在截面位置 $X/L = 0.68$, 空泡已经发生了一定程度上的融合, 气相分布较为均匀, 在截面位置 $X/L = 0.58$, 虽然受到了尾部回射流的影响, 泡内存在水相, 但空泡总体融合程度高。

开槽模型 3 个截面位置的压力标准差 S 均小于未开槽模型的压力标准差 S , 说明凹槽可以降低航行体表面的压力波动。

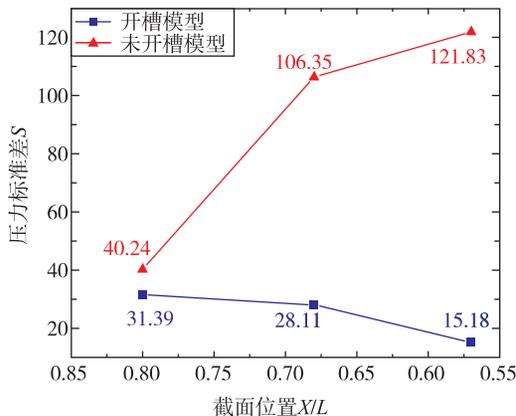


图 8 开槽和未开槽模型典型截面位置压力标准差 S 对比

Fig. 8 Comparison of standard deviation of pressure at typical positions of slotted and unslotted models

3 不同开槽方案下的通气空泡融合控制分析

通过气孔后开槽的被动控制方式能促进通气空泡的融合, 但凹槽尺寸和开槽位置是影响控制效果的关键因素, 选择合理的凹槽尺寸以及开槽位置不仅有利于空泡的融合, 而且能够降低开槽

对航行体结构强度的负影响。本节主要针对凹槽宽度 d_1 和孔槽间距 d_2 对通气空泡融合的影响进行分析, 并确定最佳的开槽方案。

3.1 凹槽宽度对通气空泡融合的影响

槽宽是影响空泡融合控制效果的重要因素, 但在航行体表面开槽势必会对航行体的结构产生负面影响, 所以在保证空泡融合效果良好的前提下, 尽量减小槽宽。为探究槽宽对通气空泡融合的影响, 分别取 $0.075D, 0.100D, 0.125D$ 和 $0.150D$ 这 4 种槽宽进行计算, 孔槽间距 $d_2 = 0.075D$ 。

不同槽宽模型的涡量云图如图 9 所示。按前文涡量云图的分析方式, 各槽宽模型涡量分布存在明显差别, 特别是在截面位置 $X/L = 0.80$ 处, 截面位置位于各开槽模型凹槽上缘处。可以看到, 此处槽宽 $0.100D, 0.125D$ 和 $0.150D$ 模型涡量云图红色区域基本联通, 说明空泡融合状态较好, 特别是槽宽 $0.125D$ 效果最佳。在 $X/L = 0.68$ 和 0.58 位置, 槽宽 $0.125D$ 模型涡量值较大的红色区域联通效果最好说明该模型空泡融合最佳, 槽宽 $0.150D$ 模型较其他模型也有较好的改善。所以, 槽宽 $0.125D$ 对空泡融合的控制效果最佳。

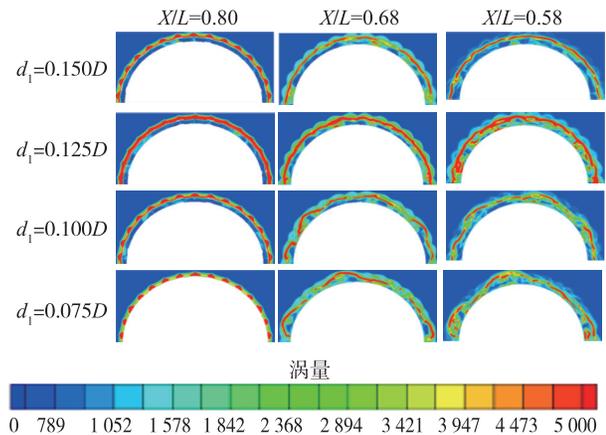


图 9 不同槽宽模型的涡量云图

Fig. 9 Vorticity magnitude at typical positions under different groove widths

气水相分布如图 10 所示, 在截面位置 $X/L = 0.80$ 处, 该位置在气孔下游附近, 气体从气孔中排出形成的空泡呈瓣状, 槽宽 $0.150D, 0.125D$ 和 $0.100D$ 模型的相邻瓣状空泡受到凹槽的影响发生连通, 而槽宽 $0.075D$ 模型的相邻瓣状空泡的连通现象不明显, 如图 11 (a) 所示。槽宽 $0.150D, 0.125D$ 和 $0.100D$ 模型的空泡在凹槽后发生了融

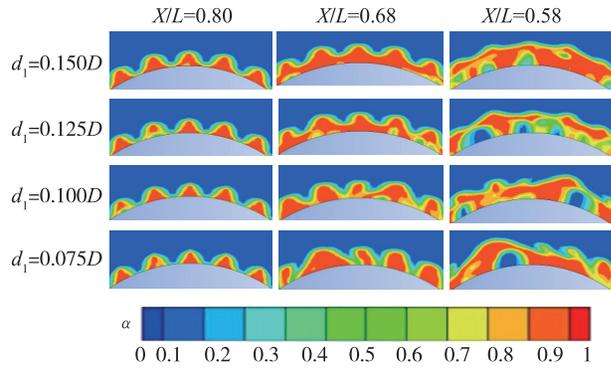
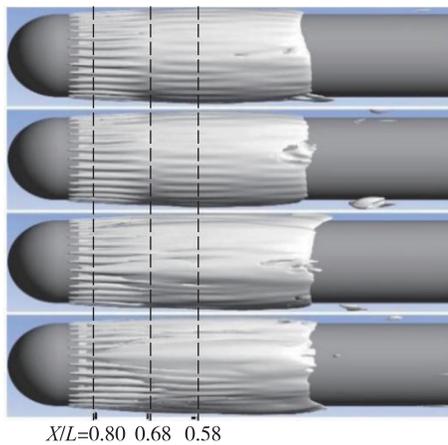
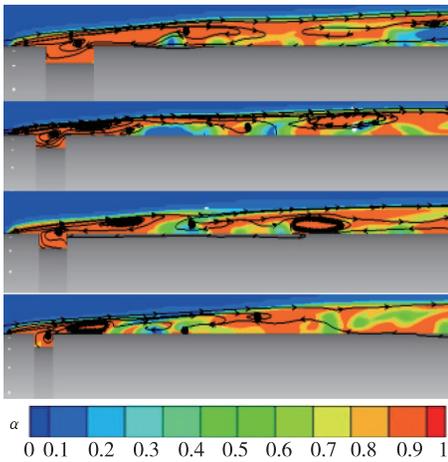


图 10 不同槽宽模型的气水相体积分布

Fig. 10 Gas-water phase distribution at typical positions under different groove widths



(a) 空泡形态



(b) 对称面流线

图 11 不同槽宽下通气空泡对比(从上到下槽宽依次为 0.150D, 0.125D, 0.100D, 0.075D)

Fig. 11 Comparison of bubble under different groove widths

合，而槽宽 0.075D 模型的空泡未发生融合，航行体壁面裸露在外，各个辫状空泡相对较为独立。在截面位置 $X/L = 0.68$ 和 0.58 处，凹槽对空泡融合的促进作用明显，各个模型的空泡均已经融

合，但观察图 10 的气水相分布云图可以发现，相比于槽宽 0.100D 和 0.075D 模型，槽宽 0.150D 和 0.125D 模型的气相分布更均匀，泡型更稳定，如图 11 (a) 所示，槽宽 0.100D 和 0.075D 模型的空泡中部存在凸起，而宽 0.150D 和 0.125D 模型的空泡中部形状更为规则。

在截面位置 $X/L = 0.58$ 处，该位置距离泡尾最近，空泡受到尾部回射流的影响，融合的空泡中混入水相，如图 10 所示。但比于槽宽 0.100D 和 0.075D 模型，槽宽 0.150D 和 0.125D 模型的水相占比更小，泡型更加平稳。

闫宸锋^[19]在研究中发现，流体顺速度方向遇到横截面突然扩张时，会与壁面分离并在分离区产生旋涡，旋涡经历生成、发展、迁移和破碎 4 个阶段。如图 11 (b) 所示，槽宽 0.100D 和 0.075D 模型由于槽宽太小，产生的旋涡在发展之前就会接触到凹槽末端的壁面而发生破碎，而槽宽 0.150D 和 0.125D 模型在凹槽产生的旋涡有一定程度上的发展，旋涡状流动特征更明显，这样凹槽的卷吸作用明显，促进了通气空泡的轴向分离，对通气空泡的轴向发展产生阻碍，槽外流经的气体更容易汇入槽内并向周向发展，相邻辫状空泡更易周向发展融合，空泡的融合效果更好。

不同槽宽下经典位置的压力标准差 S 如图 12 所示。随着截面位置向空泡尾部推进，压力标准差 S 逐渐降低，在截面位置 $X/L = 0.80$ 处，虽然辫状空泡受到凹槽的影响在航行体周向产生了一定程度上的连通，但是空泡融合程度低，受到流体扰动严重，导致压力标准差 S 较大；在截面位置 $X/L = 0.68$ 处，空泡已经发生了融合，但是融合程度较低，如图 10 所示，该位置的空泡外缘仍然呈辫状，导致该位置的压力标准差 S 只相对于截面位置 $X/L = 0.80$ 处有所降低；在截面位置 $X/L = 0.58$ 处，该位置空泡的融合程度较好，虽然受到了回射流的影响，泡内存在一定的水相，但是总体上稳压效果较好，压力标准差 S 最低。

各个截面位置的压力标准差 S 受到空泡融合程度的影响在稳压效果上存在差异，相比于槽宽 0.100D 和 0.075D 模型，槽宽 0.150D 和 0.125D 模型对航行体表面稳压效果较好而且二者的稳压效果相近，同时通过对 $T = 20$ 时的空泡形态和汽水相分布的分析发现，二者对通气空泡融合的控制效果也近似，但槽宽的增加会降低航行体的结

构稳定性，取槽宽 $0.125D$ 为最佳。

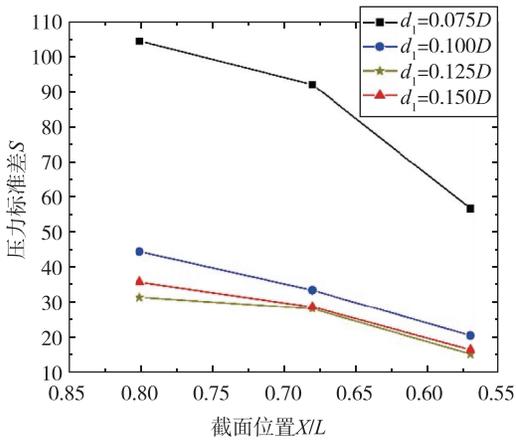


图 12 不同槽宽模型典型截面位置压力标准差 S 对比
Fig. 12 Comparison of standard deviation of pressure at typical positions under different groove widths

3.2 孔槽间距对通气空泡融合的影响

孔槽间距也是影响空泡融合控制效果的关键因素，合理选择开槽位置可以有效避开水下航行体的关键部位，从而降低开槽对航行体局部强度的负影响。为探究孔槽间距对空泡融合的影响，分别取 $0.025D$ ， $0.075D$ ， $0.150D$ ， $0.300D$ 这 4 种不同的孔槽间距，槽宽 $d_1 = 0.125D$ 。

如图 13 所示，无论在任何截面位置，各模型涡量分布存在明显差别，特别是在截面位置 $X/L = 0.68$ 和 0.57 处。可以看到，只有孔槽间距 $0.075D$ 模型涡量云图红色区域联通，其他模型的涡量分布散乱，说明孔槽间距 $0.075D$ 对空泡融合的促进效果较好。因此，孔槽间距 $0.075D$ 对空泡融合的控制效果最佳。

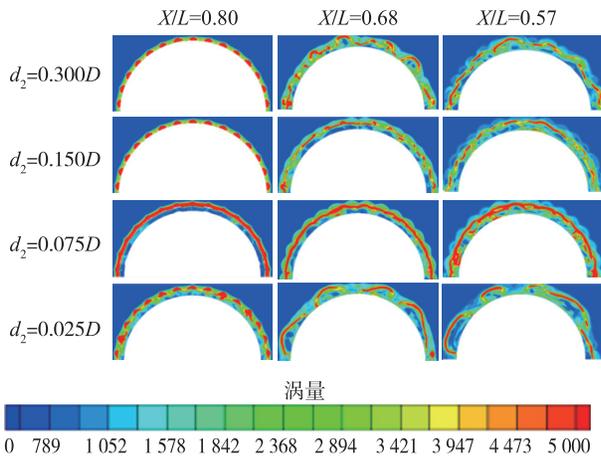


图 13 不同孔槽间距模型的涡量云图

Fig. 13 Vorticity magnitude at at typical positions under different hole-groove spacing

气水相分布如图 14 所示。孔槽间距 $0.025D$ 模型 3 个典型位置的气水混合现象严重而且分布散乱，如图 15 (a) 所示，通气空泡整体的融合程度较差，空泡尾部存在严重的空泡脱落现象，这是因为从气孔排出的气体需要一定发展距离，而孔槽间距 $0.025D$ 模型的气孔和凹槽的距离过近，如图 15 (b) 所示，流经凹槽的气体未在槽内形成较强的漩涡将气体卷入凹槽内，相比于其他模型，孔槽间距 $0.075D$ 模型的槽内存在大量水相。

观察图 14 可知，相比于孔槽间距 $0.025D$ 模型，孔槽间距 $0.300D$ ， $0.150D$ 和 $0.075D$ 模型对空泡融合的控制效果较好，不同截面位置的空泡都已经发生了不同程度的融合，但孔槽间距 $0.300D$ 模型空泡在周向分布不均匀，在图 15 (a) 中表现为该模型的空泡表面存在凸起，泡尾边界参差不齐，这是因为孔槽间距过大，在回射流的

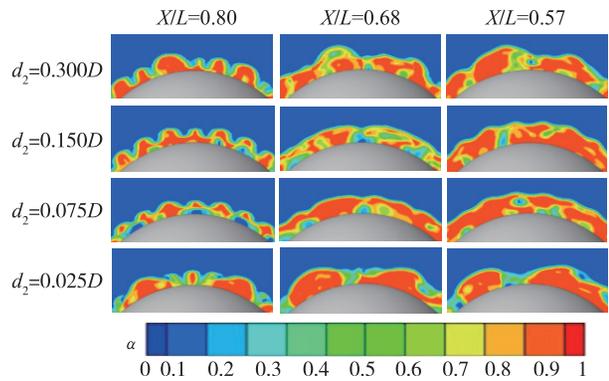
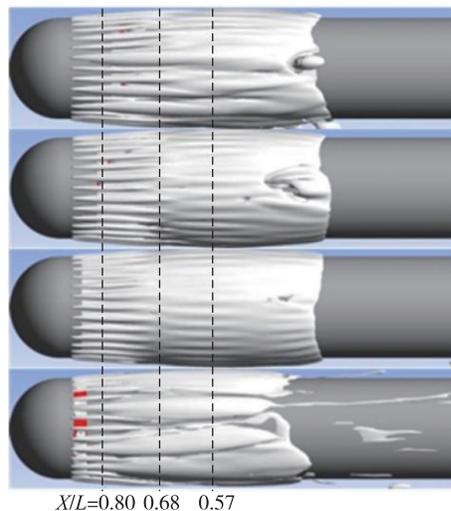


图 14 不同孔槽间距模型的气水相体积分布
Fig. 14 Gas-water phase distribution at typical positions under different hole-groove spacing



(a) 空泡形态

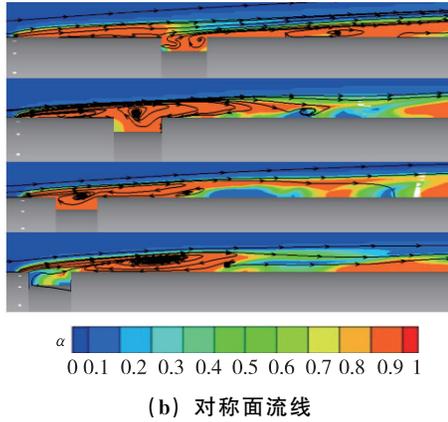


图 15 不同孔槽间距下通气空泡对比 (从上到下孔槽间距依次为 $0.300D$, $0.150D$, $0.075D$, $0.025D$)

Fig. 15 Comparison of bubble under different hole-groove spacing

影响下凹槽位置附近存在大小不一的漩涡, 如图 15 (b) 所示。从而影响了槽内漩涡对气体的卷吸作用, 造成空泡周向分布不均的现象。

不同孔槽间距下经典位置的压力标准差 S 如图 16 所示, 相比于槽宽对压力标准差 S 的影响, 孔槽间距改变了压力标准差 S 沿空泡下游推进的规律。孔槽间距 $0.025D$ 和 $0.300D$ 模型压力标准差 S 变化规律和相同, 在截面位置 $X/L = 0.80$ 处各个瓣状空泡相对独立, 气水相混合严重, 压力标准差 S 较大; 在截面位置 $X/L = 0.68$ 处, 空泡发生融合, 压力标准差 S 较截面位置 $X/L = 0.80$ 处有所下降; 在截面位置 $X/L = 0.57$ 处, 该位置距离空泡尾部较近, 受到回射流的影响程度大, 空泡内部存在大量水相, 故压力标准差 S 最大。但相比孔槽间距 $0.025D$ 模型, 孔槽间距 $0.300D$ 模型的

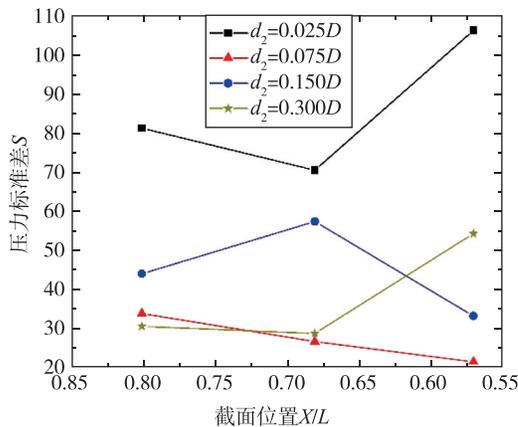


图 16 不同孔槽间距模型典型截面位置压力标准差 S 对比

Fig. 16 Comparison of standard deviation of pressure at typical positions under different hole-groove spacing

气相分布更加均匀, 故整体的压力标准 S 差较小。

相比于空泡融合程度最好的孔槽间距 $0.075D$ 模型孔, 孔槽间距 $0.150D$ 模型的凹槽参数使空泡完全融合区向空泡下游推移, 截面位置 $X/L = 0.80$ 处, 瓣状空泡在航行体周向发生了一定程度的连通, 而在截面位置 $X/L = 0.68$ 处, 该位置位于空泡融合的上边界附近, 气水混合复杂, 故该位置处压力标准差 S 有所提高; 在截面位置 $X/L = 0.57$ 处, 气相分布均匀, 空泡的融合程度较好, 故压力标准差 S 降低。

通过对比发现孔槽间距 $0.075D$ 模型的稳压效果和对空泡融合的促进作用最好, 所以孔槽间距选取 $0.075D$ 最佳。

4 结论

本文针对凹槽对通气空泡融合的控制效果, 开展了计算分析, 得出以下结论:

1) 凹槽改变了航行体表面的流场特性, 在凹槽内部产生旋涡, 将流经凹槽的气体卷吸到槽内, 槽内气体向航行体周向扩散促进空泡的融合, 能够降低航行体表面的压力波动。

2) 槽宽 d_1 取 $0.125D$ 时, 对空泡融合的促进以及稳压效果最佳。槽宽过小时, 槽内旋涡没有足够的空间发展就已经发生破碎, 对空泡融合的促进作用不明显; 槽宽过大时, 相比于槽宽 $0.125D$, 对空泡的融合促进作用以及稳压效果提升不明显, 而且不利于航行体的结构稳定性。

3) 孔槽间距 d_2 取 $0.075D$ 时, 对空泡融合的促进以及稳压效果最佳。孔槽间距过小时, 无法诱导空泡在槽内产生旋涡并促进空泡融合; 孔槽间距过大时, 在回射流的影响下凹槽位置附近存在大小不一的漩涡, 影响了凹槽对气体的卷吸作用, 降低了凹槽对空泡融合的促进作用。

参考文献

- [1] 潘森森, 彭晓星. 空化机理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [2] 黄彪, 吴钦, 王国玉. 非常空化流动研究现状与进展[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(1): 1-14.
- [3] Wan C R, Wang B L, Wang Q, et al. Probing and imaging of vapor-water mixture properties inside partial/cloud cavitating flows[J]. Journal of Fluids Engineering, 2017, 139(3): 031303.
- [4] 刘涛涛, 黄彪, 王国玉, 等. 垂直发射水下航行体的通

- 气空化数值模拟研究[J].宇航总体技术,2017,1(4):22-28.
- [5] Li Z P, Sun L Q, Xiao W, et al. Three-dimensional numerical analysis of near-wall single-orifice ventilated bubble dynamics[J]. Ocean Engineering, 2019, 186: 1-13.
- [6] 杨武刚,张宇文,邓飞,等.通气流量对超空泡外形特征影响实验研究[J].西北工业大学学报,2007(3):358-362.
- [7] 张纪华,张宇文,李雨田.水下航行器通气超空泡生成与维持实验研究[J].实验力学,2011,26(6):715-720.
- [8] 张学伟,张嘉钟,王聪,等.通气超空泡形态及其稳定性实验研究[J].哈尔滨工程大学学报,2007(4):381-387.
- [9] 龚瑞岩.均压排气气泡在水下航行体表面的融合特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018.
- [10] Zhang D S, Pan D Z, Wang H Y, et al. Numerical prediction of cavitating flow around a hydrofoil using pans and improved shear stress transport k-omega model[J]. Thermal Science,2015,19(4): 1211-1216.
- [11] 张耐民,赵阳,魏海鹏,等.水下垂直发射航行体多孔排气气泡融合特性研究[J].船舶力学,2018,22(2):135-143.
- [12] 胡少峰.高速出水航行体表面均匀排气控制方法实验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018.
- [13] 孙铁志,魏英杰,王聪,等.孔状通气条件下潜射航行体流体动力特性研究[J].兵工学报,2013,34(11):1424-1430.
- [14] 马贵辉,陈浮,俞建阳.孔间距变化对带等压排气的航行体绕流流动特性影响研究[A]//中国力学学会流体力学专业委员会.第九届全国流体力学学术会议论文摘要集[C].中国力学学会流体力学专业委员会:中国力学学会,2016:1.
- [15] 马贵辉,陈浮,俞建阳.气孔排数对带排气航行体绕流流动影响研究[J].工程热物理学报,2018,39(9):1945-1951.
- [16] 时俊雯.非定常出水柱体周向多孔排气流态特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.
- [17] 崔震宇.水下发射航行体通气空泡流动特性研究[D].北京:北京理工大学,2016.
- [18] 孙龙泉,颜皓,马贵辉,等.环形槽对通气空泡融合的促进作用分析[J/OL].力学学报:1-10[2020-11-27].
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2062.O3.20201126.1737.011.html>.
- [19] 闫宸锋.台阶后水流水力特性的试验及其数值模拟研究[D].兰州:兰州理工大学,2019.
- [20] 王巍,唐滔,卢盛鹏,等.水翼吸力面布置凹槽抑制空化研究[J].农业工程学报,2019,35(2):40-47.

引用格式:任泽宇,孙龙泉,姚熊亮,等.凹槽参数对通气空泡融合的影响[J].宇航总体技术,2021,5(3):28-36.

Citation: Ren Z Y, Sun L Q, Yao X L, et al. Influence of groove parameters on ventilated bubble fusion[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2021, 5(3): 28-36.