

水下回转体边界层通气减阻的研究

于嫻嫻 王一伟 黄晨光 杜特专

(中国科学院力学研究所水动力学与海洋工程重点实验室, 北京, 100190,
Email: yuxianxian110@mails.gucas.ac.cn)

摘要:在水下运动的航行体表面和水之间通入气体是航行体减阻增速的重要手段。本研究采用单一流体多种组分的混合物模型和修正的 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型, 对流线型回转体在边界层通气这种新的减阻方式下的流场进行了数值模拟, 探究了减阻机理和阻力非定常演化的规律。研究表明, 回转体壁面附近气层的存在及其性质是减阻的主要原因; 航行过程中回转体受到的阻力呈现出先降低后回升最终趋于稳定的非定常变化; 进一步分析表明, 气体覆盖率和通气流量变化是阻力演化趋势的主要原因。

关键字: 边界层通气; 流线型回转体; 减阻作用; 阻力非定常演化

1 引言

所谓通气减阻, 就是在水下航行体的壁面与水之间通入气体, 形成气液薄层, 从而减小航行体受到的阻力, 提高航行速度, 达到减阻增效的目的。这种通过注入气体来减小阻力的技术具有较高的减阻效率, 因而得到了国内外的广泛关注和研究。

Elbing 等^[1]通过实验分析认为通气减阻随着气体流量的变化可以分为三种类型: 气泡减阻 BDR(Bubble Drag Reduction), 气泡减阻向气层减阻的过渡以及气层减阻 ALDR(Air Layer Drag Reduction); ALDR 具有更好的减阻效果, 到达这一阶段的临界气体流量与自由来流速度的平方成比例。Sanders 等^[2]研究了高雷诺数下平板的通气减阻现象, 认为减阻作用与壁面附近的空隙率及气泡受到的浮力有关; 当流速较低时, 平板下方的气体在浮力的推动作用下向板面靠近, 形成覆盖整个板面的连续均匀的气体薄层, 可达到接近 100%的减阻率。Ceccio^[3]从数值和实验两方面总结了通气外流的减阻作用, 比较全面地分析了空化, 通气以及两者相结合的减阻作用及减阻机理。国内的董文才等^[4]也对断阶滑艇进行了通气减阻的研究并取得了突破应用, 滑艇阻力可减小 25%, 航速可达到 100km/h。

目前关于通气减阻的研究取得了一定的进展和应用, 但是大部分研究主要集中在平板的通气减阻和相应的定常研究上, 对于减阻机理和减阻方式等方面的研究还不够充分。因此我们针对边界层通气这种新的减阻方式, 对水下流线性回转体这种典型的工程构型进行了流场的数值模拟, 初步探究了减阻的机理, 分析了阻力非定常演化的规律和原因。

2 控制方程

2.1 基本方程

本研究的流场涉及气液两相的相互作用，是多相流动问题。我们采取单一流体多种组分的混合物模型，用体积分数 α 表征各相的占有率。模型的控制方程如下。

质量方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \bar{v}_m) = 0 \quad (1)$$

其中， $\rho_m = \alpha_l \rho_l + \alpha_g \rho_g$ 为混合物的密度， $\bar{v}_m = \frac{\alpha_l \rho_l \bar{v}_l + \alpha_g \rho_g \bar{v}_g}{\rho_m}$ 为混合物的平均速度。

下标 l, g 分别代表液相和气相，两相体积分数满足 $\alpha_l + \alpha_g = 1$ 。

动量方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \bar{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \bar{v}_m \bar{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \bar{v}_m + \nabla \bar{v}_m^T)] + \rho_m \bar{g} + \bar{F} \quad (2)$$

其中， $\mu_m = \alpha_l \mu_l + \alpha_v \mu_v + \alpha_g \mu_g$ 为混合物的粘性系数， \bar{F} 为体力项。

能量方程：

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n [\alpha_k \bar{v}_k (\rho_k E_k + p)] = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (3)$$

2.2 湍流模型

在湍流模拟方面，本研究采用修正的 $k-\varepsilon$ RNG 模型^[5]，求解关于湍动能及耗散率的输运方程。

模型如下

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_m k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\beta_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_K + \rho_m \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_m \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\beta_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} G_K - C_{2\varepsilon} \rho_m \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中 $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ ， $\mu_t = \rho_m C_\mu k^2 / \varepsilon$ 为湍流黏性系数。

由于原始RNG $k-\varepsilon$ 模型在气液掺混区黏性远大于实际情况，耗散过强，因此根据Dular^[6]和Reboud^[7]的文献，通过UDF，引入对黏性系数的密度修正函数

$$\mu_t = f(\rho) C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

$$f(\rho) = \rho_v + \frac{(\rho_m - \rho_v)^n}{(\rho_l - \rho_v)^{n-1}} \quad n=10 \quad (7)$$

3 数值计算

计算模型选为椭圆头型的流线型回转体，直径为 37mm（头部除外），总长为 530mm，并在回转体肩部设置气腔和喷孔来实现通气（图 1）。计算域采用分块的结构化网格进行划分。入口设置为常速度入口边界，出口为压力出口，具体设置参见表 1。

表 1 边界条件设置（背景压力 1atm）

边界条件	设置
流体域, 气腔	液、气混合物, 理想气体
速度入口	18m/s
压力出口	0
气腔压力	100 Pa
回转体表面	无滑移壁面

根据物理问题确定相关计算参数，压力与速度耦合采用收敛速度较快的 SIMPLEC 算法，动量方程的差分格式采取二阶迎风格式，时间步长设为 10 μ s。初始时，流体域为水，气腔中为理想气体。计算时，首先将喷口处边界设为壁面条件（wall）；然后当计算到 100 μ s 时，肩部喷口附近形成低压区，这时改变喷口处的边界条件为内点（interer），气腔内的气体就在腔内相对高压的作用下喷出，实现通气（图 2），为喷气后的组分云图，在图 2 中可以看到明显的通气现象。

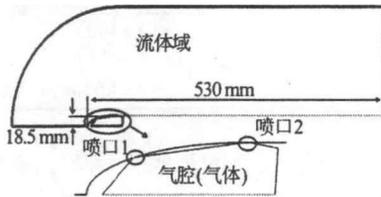


图 1 计算模型

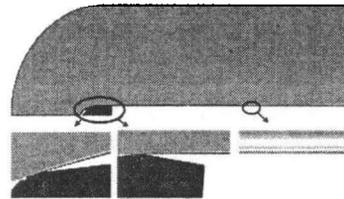


图 2 通气后某时刻组分云图

4 结果与讨论

4.1 减阻作用及机理探究

我们对通气与不通气时的回转体流场的进行了数值模拟，通过计算得到了两种情况下的阻力系数曲线（图 3）。由图 3 中可以看出，通气时的阻力比不通气时小很多，最大减阻量可以达到 67%，边界层通气这种减阻方式具有十分良好的减阻效果。

此外，我们知道，水下的航行体受到的总阻力是由压差阻力和黏性阻力两部分构成的。图 4 给出了通气过程中各阻力系数的变化曲线。由图 4 可见，在演化过程中压差阻力相对稳定，而黏性阻力与总阻力变化趋势一致。因此，边界层通气主要减小的是回转体受到的黏性阻力部分；而黏性阻力与回转体壁面附近的流场性质关系密切，因此，我们对此进行了分析。

(1) 沿流向方向, 紧贴回转体的壁面区域的组分云图如表 2 所示。x 表示到喷口 2 的平均距离。我们可以看出, 在长为 0.53m 的回转体壁面区域中, 除紧靠喷口的极小区域处气体含量较高外, 95%以上的区域水分含量超过 85%。因此在紧贴回转体壁面处为一水层, 且此水层厚度极小, 速度接近为零。所以我们认为回转体壁面处为一层极薄的附着水膜。

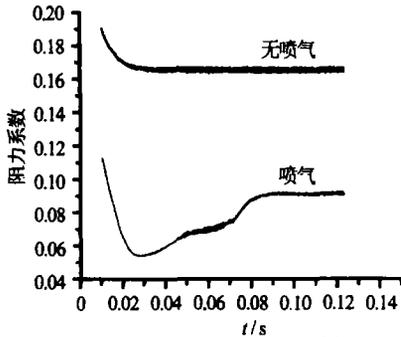


图 3 通气与不通气时的阻力系数曲线

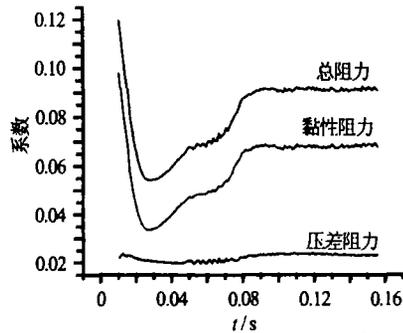


图 4 通气时各阻力系数曲线

表 2 沿流向紧贴壁面处的组分云图

近壁处 (航行体壁面长 0.53m)			
	0.00498 0.005 0.00502	0.02498 0.025 0.02502	0.02998 0.03 0.03002
	x 0.005	0.025	0.03
	密度 240	800	850
水 24%	80%	85%	

(2) 表 3 给出了附着水膜外侧的组分云图。可以看出在这层极薄的水膜外侧, 大部分区域气体的含量较高 (60%以上区域气体含量在 65%以上), 因此, 我们认为水膜外侧是一层气层。

表 3 近壁水膜外侧的组分云图

近壁水膜外侧			
	0.04998 0.05 0.05002	0.09998 0.1 0.10002	0.2998 0.2999 0.3 0.3001
	x 0.05	0.1	0.3
	密度 96	135	340
气体 90%	85%	65%	

综上,沿外法线方向,回转体壁面外侧的组分为水—气—水的结构(图 5),这与 Bogdevich^[9]得到的结论是一致的。因此,通气后,回转体表面附着一层极薄水膜,再经由一层气层与外部水域隔离而进行运动。由于气体的黏性和密度小于水,气层的存在极大地减小了回转体受到的黏性阻力从而提高了航速。

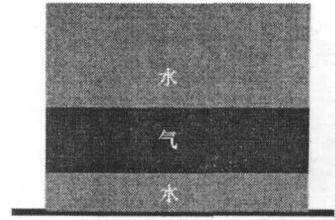


图 5 壁面外侧组分结构

4.2 阻力非正常演化分析

由图 3 可以看到,通气时回转体的阻力系数曲线呈现出先降低后回升最终趋于稳定的演化趋势,对此可以从回转体壁面的气体覆盖率和喷口气体流量的影响两方面进行分析。气体覆盖率是指气层存在的区域与回转体壁面总面积的比值,直接关系到通气减阻面积的大小。喷口气体进入到回转体壁面气层内,其流量大小影响气层的厚度。

阻力非正常演化过程可以分为两个阶段。在阶段 1,通气前期,气体覆盖率起主导作用。随着气体的喷射,回转体壁面的气体覆盖率迅速增大,回转体壁面起到减阻作用的区域增加,阻力迅速减小(图 6)。在阶段 2,随着气体的喷射,壁面气体覆盖率达到最大值,其影响趋于稳定,这时喷口气体流量的影响凸显出来。当气体覆盖至壁面整体后,在回转体尾部会出现气体的流失,而喷口喷射的气体起到补充的作用。由于在回转体运动过程中,气腔和外部流域压力差逐渐减小,喷口气体流量逐渐的减小,气层中气体的补充量减小,厚度有所降低,因此减阻作用降低,阻力系数有所回升。当最终喷口气体流量稳定时,阻力系数也趋于稳定(图 7)。由以上分析可以看出,气体覆盖率和受喷气流量影响的气层厚度是边界层通气减阻效果的主要影响参数。

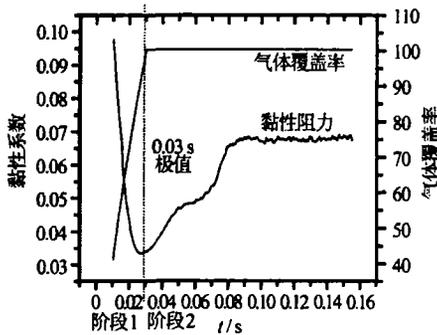


图 6 气体覆盖率与阻力系数

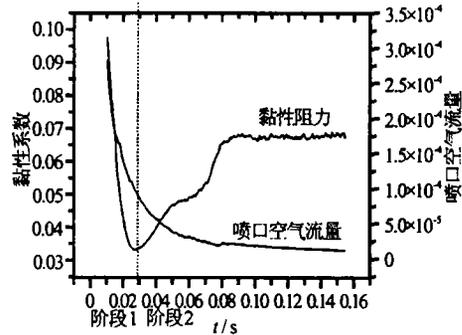


图 7 喷口气体流量与阻力系数

5 结论

(1) 对于水中回转航行体,边界层通气具有十分良好的减阻效果。回转体壁面附近的组分是水—气—水的结构,中间气层的存在及其较小的密度和黏性是阻力减小的主要原因。

(2) 航行过程中,回转体阻力呈现出先降低后回升最终趋于稳定的非正常变化。经分析知气体覆盖率影响到减阻面积,喷口气体流量影响到气层厚度:两者是通气减阻效果的主要影响参数。

本研究结果表明边界层通气这种减阻方式具有较好的应用前景, 下步将通过实验来分析并对通气参数以及回转体加速/减速对减阻作用的影响做进一步研究。

参 考 文 献

- 1 Elbing B R, E S Winkel, et al. Bubble-induced skin-friction drag reduction and the abrupt transition to air-layer drag reduction. *Journal of Fluid Mechanics*, 2008.612.
- 2 Sanders W C, E S Winkel, et al. Bubble friction drag reduction in a high-Reynolds-number flat-plate turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*.2006.552:353
- 3 Ceccio S L. Friction drag reduction of external flows with bubble and gas injection. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2010.42: 183-203.
- 4 董文才, 郭日修等. 断阶滑行艇气层减阻试验研究. *水动力学研究与进展*, 2002.17(4): 440-447
- 5 王福军. *计算流体力学分析-CFD 软件原理与应用*.
- 6 Dular M, etc. Experimental evaluation of numerical simulation of cavitating flow around hydrofoil. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 2005, 24(4):522.
- 7 Reboud J L, Stutz B, Coutier O. Two-phase flow Structure of cavitation:eExperiment and modeling of unsteady effect. *Third International Symposium on Cavitation*, Grenoble, France, 1998
- 8 Bogdevich V G, et al. The distribution of skin friction in a turbulent boundary layer in water beyond the location of gas injection. In *Investigation of Boundary Layer Control*, 1976.62

Investigation of drag reduction by gas injection into boundary layer of underwater gyroidal bodies

YU Xian-xian, WANG Yi-wei, HUANG Chen-guang, DU Te-zhuan

(Key Laboratory for Hydrodynamics and Ocean Engineering Institute of Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, Email: yuxianxian110@mails.gucas.ac.cn)

Abstract: Injection of gas is an important way to reduce drag of underwater vehicle. Mixture model and modified RNG k- ϵ turbulence model is adopted to simulate the flow field of streamlined gyroidal bodies with gas injection into the boundary layer. Results show that air layer near the wall can significantly reduce drag of the gyroidal bodies. As gas injecting, the drag drops at first, then increases and keeps stable at last. Air covered area percentage near the wall and gas flux of the nozzle are the main reasons of this unsteady evolution.

Key words: gas injection into boundary layer, streamlined gyroidal bodies, drag reduction, unsteady evolution of drag