

通气空泡界面流动特征

王志英¹, 张敏弟², 王国玉², 黄彪², 王展¹, 王一伟¹

(1 中国科学院力学研究所 流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190, Email: wangzhiying@imech.ac.cn;

2 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要: 通气空泡稳定性是超空泡减阻技术的关键, 空泡界面的演化与发展与通气空泡稳定性密切相关。本文将基于高速摄像和粒子图像测速技术 (PIV), 分析了不同雷诺数下, 透明空泡界面特征及其内部流动结构。结果表明, 雷诺数较小时, 可以看到相对透明清晰的界面波向下游传播, 随着雷诺数的增加, 湍流在钝体附近发生转捩, 水气掺混剧烈, 空泡界面厚度增加。此外, 空泡界面的特征会影响空泡内部流动结构特征。

关键词: 通气空泡; 空泡界面; 流场结构; 流动稳定性

1 引言

超空泡减阻技术是一种实现水下航形体高速航行的重要手段, 已被广泛应用于水下超高速武器的研制。超空泡包裹水下航形体, 航行体的运动阻力系数能够减少 90%以上^[1]。为了保障超空泡减阻能力, 航形体周围必须要形成稳定可控的空泡。

在过去的研究中主要关注空泡的非定常特性, 其表现为大尺度空泡的断裂和脱落, 并伴随着流动分离和湍流旋涡结构的产生、演化及其相互作用等复杂的流动现象, 使得航行体的航行稳定性和所受流体动力的预测面临巨大的挑战^[2-3]。Wang 等^[4]根据空泡图像特征指出片状空泡呈现出不稳定的波, 随着空化数的减小, 波生长直至在下游形成大尺度涡的脱落, 从而形成云状空化。Karn 等^[5]和 Wu 等^[6]结合高速摄像和 PIV 流场测量技术研究了通气空泡尾部闭合方式及其转变规律, 表明空泡尾部闭合方式的形成及转变机制与空泡内部流场结构及空泡界面边界层的发展密切相关。Kravtsova 等^[7]通过 PIV 获得了云状空泡湍流场分布特性, 表明空泡界面处存在强剪切和湍流旋涡结构。王聪等^[8]基于空化水洞对空泡形态及其稳定性进行了研究, 结果表明, 空泡形态的不稳定主要体现在空泡振荡、界面波动及界面扭动。张宇文等^[10]开展了轴对称细长体通气空泡流的实验研究, 讨论了不同空泡流型下的运动特性和稳定性。过去的研究均表明, 空泡的稳定性与空泡的演化、内部湍流流场结构和空泡界面波密切相关, 是复杂的多场耦合机制, 空泡界面的演化发展及其稳定性也是空泡失稳的重要因素。因此, 本文将基于实验开展不同雷诺数下, 通气空泡界面

特征以及空泡内部流动结构的研究。

2 实验方法

2.1 实验装置与模型

通气空泡实验在一闭式循环水洞进行,该水洞实验段的尺寸为 $0.7\text{m}\times 0.07\text{m}\times 0.19\text{m}$,通过中间支撑杆将模型固定在实验段后侧,上、下和前侧均由透明有机玻璃组成,便于实验的观测。实验工作段的速度通过电机转速进行调节,其最大流速可达到 20m/s 。

为了避免回转体对空泡内部的影响,且能够有效通入示踪粒子,实现空泡内部流场结构的测量,设计了钝体实验模型(图 1)。该模型由 60° 二维空化器和半圆柱组成,半圆柱直径为 20mm ,在圆柱上均布有直径为 2mm 的通气孔。

通过通气系统将气体通入流场中,该装置由空气压气机、压力控制阀、气体稳压储存罐、转子流量计组成,气体的体积流量由转子流量计定量调节控制。

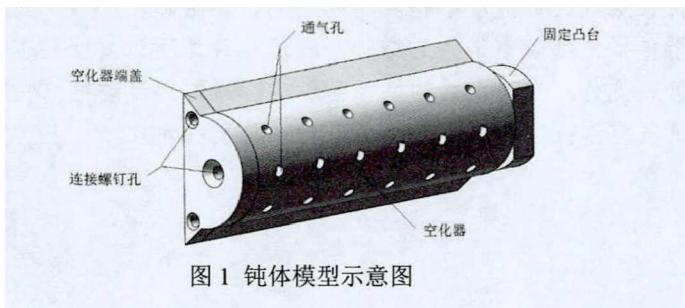


图 1 钝体模型示意图

2.2 PIV 测速系统

PIV 测速系统由相机 (SpeedSense M310)、激光器 (RayPower 5000)、同步器和采集系统组成(图 2)。相机的频率为 3260Hz ,分辨率为 1280×800 像素(像素尺寸为 $20\mu\text{m}$),激光器选择连续发光模式。在其表面涂有荧光漆(FP R6G)并结合光学滤波片,可有效防止模型壁面反光。实验中设计了示踪粒子播撒装置,示踪粒子选择平均粒径为 $20\sim 50\mu\text{m}$ 的空心玻璃珠。在 PIV 后处理与分析中,询问窗尺寸为 32×32 像素,设置 50% 的重叠区域。

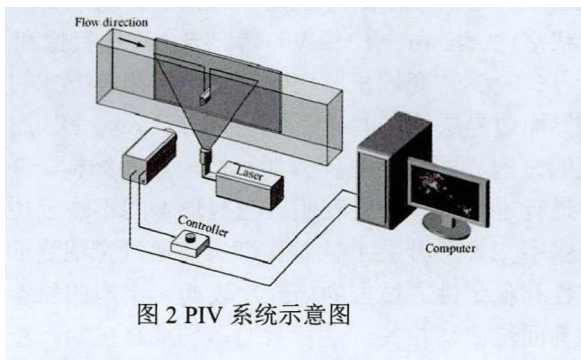


图 2 PIV 系统示意图

3 结果与讨论

3.1 空泡界面特征

图 3 和图 4 分别给出了透明空泡示意图和不同雷诺数下透明空泡界面形态特征。图 5 给出了空泡界面轮廓线。从空泡界面轮廓线可知, 雷诺数的改变, 对透明空泡尺寸影响较小, 但会影响空泡界面特征。从图 3 和图 4 中可以看出, 通入的气体经过通气孔后分为两部分, 一部分是在钝体后发展, 形成气体发展区, 该区域随着雷诺数的增加, 发展区长度变化不明显; 另一部分沿着空泡界面向下游发展, 在该部分区域雷诺数对界面特征有一定的影响, 在此主要针对上界面分析。当雷诺数为 $Re=5.6 \times 10^4$, 空泡界面为透明清晰的界面, 可以看到界面以不规则界面波向下游传播, 这是由于受到通入气体的影响, 空泡界面容易受扰动而发生变形。随着雷诺数增加, 速度增大, 转捩位置向前移动, 在钝体附近就发生了转捩, 形成湍流界面, 空泡界面由透明清晰的界面转变为具有一定厚度的水气混合界面, 界面波的波长减小。且随着雷诺数的增加, 水气掺混剧烈, 空泡界面厚度增加。

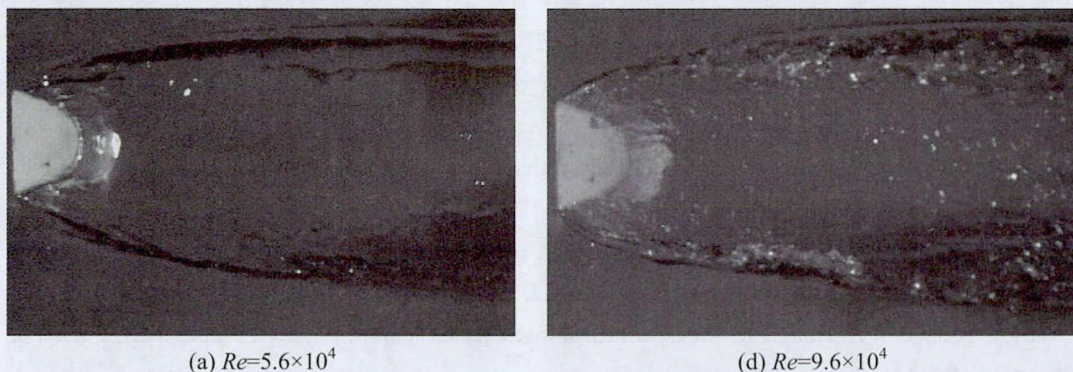
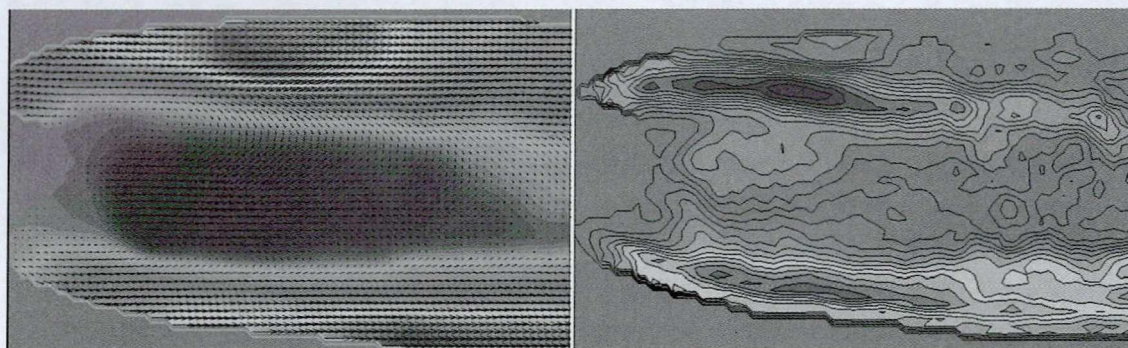
(a) $Re=5.6 \times 10^4$ (d) $Re=9.6 \times 10^4$

图 3 不同雷诺数下通气空泡界面特征

为了进一步揭示透明空泡流动特征, 图 4 给出了雷诺数分别为 $Re=5.6 \times 10^4$ 下的无量纲速度场 u/U 和涡量场 $\omega_z = \omega D/U$ 的分布云图。从图中可以看出, 在空泡界面处, 由于水流的剪切作用, 速度相对较大, 在空泡内部中间存在一个低速区。在两个区域之间存在一个速度相对小的过渡区。随着雷诺数的增加, 由于喷出的气体的影响, 使速度充分发展的位置向后移动。对于涡量分布云图, 在空泡界面附近存在两条方向相反的涡带, 且沿着空泡界面向下游延伸。



(a)速度云图

(b)涡量云图

图4 雷诺数 $Re=5.6 \times 10^4$ 时, 通气空泡速度场和涡量场分布

参考文献

- 1 颜开, 褚学森, 许晟, 等. 超空泡流体动力学研究进展[J]. 船舶力学, 2006, 10(4): 148-155.
- 2 Knapp R T. Recent investigation of the mechanics of cavitations and cavitation damage[J]. Trans ASME, 1955, 77: 1045-1054.
- 3 Kawanami Y, Kato H, Yamauchi H, et al. Mechanism and control of cloud cavitation[J]. Journal of Fluids Engineering, 1997, 119(4): 788-794.
- 4 Wang Y W, Huang C G, Du T Z, et al. Shedding phenomenon of ventilated partial cavitation around underwater projectile[J]. Chinese Physics Letters, 2012, 29(1): 014601.
- 5 Karn A, Arndt R E A, Hong J R. An experimental investigation into the physics of supercavity closure[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2016, 789: 259-284.
- 6 Wu Y, Liu Y, Shao S Y, Hong J R. On the internal flow of a ventilated supercavity [J]. J. Fluid Mech, 2019, 862: 1135-1165.
- 7 Kravtsova A Y, Markovich D M, Pervunin K S, et al. High-speed visualization and PIV measurements of cavitating flows around a semi-circular leading-edge flat plate and NACA0015 hydrofoil[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2014, 60:119-134.
- 8 张学伟, 张嘉钟, 王聪等. 通气空泡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, 28(4): 381-387.
- 9 王志英. 通气空泡湍流旋涡特性与机理研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2018.

The characteristics and instability of ventilated cavity interface

WANG Zhi-ying¹, ZHANG Min-di², WANG Guo-yu², Huang Biao², WANG Zhan¹,
WANG Yi-wei¹

(1 Institute of Mechanics Chinese Academy of Science, Beijing, 100190. Email: wangzhiying@imech.ac.cn;

2 Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081)

Abstract: The stability of ventilated cavity is the key to the drag reduction technology of supercavity. The evolution and development of cavitation interface are closely related to the stability of ventilated cavity. In this paper, the interface characteristics and internal flow structures of transparent cavity at different Reynolds numbers are analyzed, based on high-speed photography and particle image velocimetry (PIV). The results indicate that when the Reynolds number is small, a relatively transparent and clear interface wave propagates downstream. With the increase of Reynolds number, the turbulent transition occurs near the bluff body, the mix intensity of water and air increases, and the thickness of the cavitation interface increases. In addition, the characteristics of cavitation interface play an important role in the characteristics of internal flow structures.

Key words: Ventilated cavitation; Cavity interface; Internal flow; Stability.