

绕前缘粗糙水翼非定常空化流动实验研究

陈倩, 吴钦*, 黄彪, 张汉哲, 王国玉, 刘韵晴

(北京理工大学 机械与车辆学院, 北京, 100081, Email: wuqin919@bit.edu.cn)

摘要: 为了研究绕前缘粗糙水翼非定常空化流动的流场特性, 以前缘粗糙和光滑的 NACA 66 型水翼为研究对象, 基于高速水洞实验平台对不同空化阶段, 绕水翼空化流动的流场形态、水动力系数等流动特性进行了实验观测。实验结果表明: 由于前缘粗糙度的影响, 无空化状态下前缘粗糙水翼的升力系数小于光滑水翼, 阻力系数大于光滑水翼; 此外, 对比发现, 采用前缘粗糙水翼有效抑制了水翼的初生空化。

关键词: 非定常空化; 水翼; 前缘粗糙度; 实验研究

1 引言

当液体内部的局部压强降低到液体的汽化压强以下时, 在均质液体内部或液固交界面上就会产生蒸汽或气体的空穴(空泡), 这种现象称为空化。空化是水力机械内部不可避免的一种水动力学现象, 会导致流动不稳定, 引起结构的振动及空蚀等, 并造成机械效率的下降及使用寿命的降低^[1,2]。

根据空化的流动现象, 可将空化形态分为: 初生空化^[3]、片状空化^[4]、云状空化^[5]和超空化^[6]。研究表明, 空化的发展受到多种因素的影响, 如流速、压力、边界层流动等^[7], 而边界层流动又受结构壁面粗糙度的影响。Churkin 等^[8]研究了不同粗糙表面对 NACA 0005 型水翼云状空化的影响, 结果表明随着水翼表面粗糙度的增加, 水翼的云状空化现象越剧烈。郝加封等^[9]通过实验研究了全局表面粗糙度对 Clark-Y 水翼云状空化的影响, 结果表明全局表面粗糙度对云状空化的形成有抑制作用。Rood 等^[10]证明了全局表面粗糙度可以加剧流动不稳定性, 对初生空化有着重要的影响。

目前, 国内外学者主要针对全局表面粗糙对空化的影响进行了研究, 部分学者也对局部粗糙度这一影响因素进行了研究, 但缺乏对其流场结构演变及相应水动力特性的分析。因此, 本研究针对前缘粗糙水翼, 基于高速水洞试验平台对水翼空化流动的流场形态、水

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 51839001, 51679005 和 91752105), 北京国家自然科学基金(批准号: 3172029)和中央高校的基础研究经费资助项目。

动力系数等流动特性进行了实验观测。

2 实验设备

实验在 EPFL 空化水洞中进行^[11]，实验中采用 NACA 66 水翼，其弦长 $c=100\text{ mm}$ ，展长 $b=149\text{ mm}$ ，最大厚度比为弦长的 12%。为了研究前缘粗糙度对非定常空化流动的影响，在水翼滞止线下游 4 mm 处设立了粗糙带，其由直径为 0.06 mm 的沙子和胶水组成。这种前缘分布粗糙带与传统粗糙度不同，传统粗糙水翼的吸力面与压力面均布满粗糙带，而本研究采用实验水翼的粗糙带宽度为 4 mm，粗糙高度 $h=0.15\text{ mm}$ ，如图 1 所示。

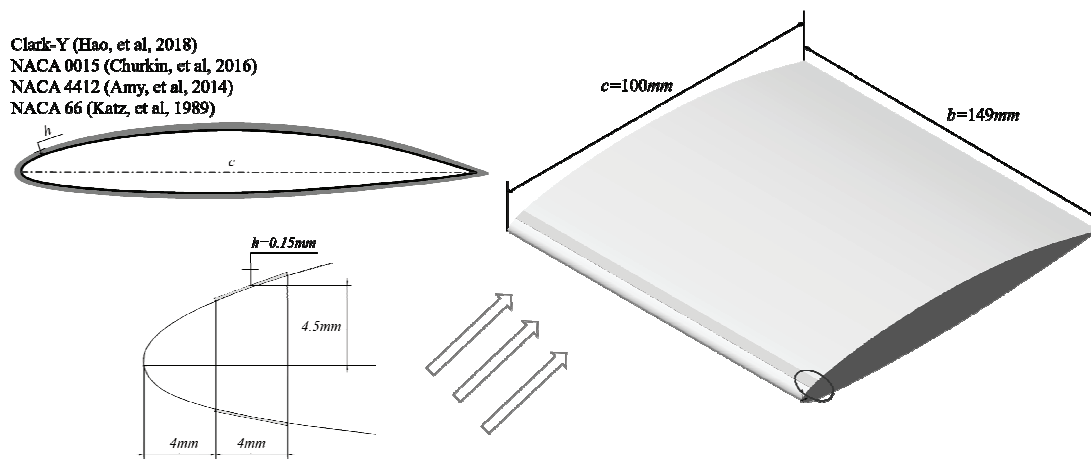


图 1 NACA 66 水翼前缘分布粗糙带示意图

实验水翼在试验段的安装位置及其攻角示意如图 2 所示。实验中，正负攻角定义如图 2 所示，重要的无量纲化参数分别定义为：空化数 $\sigma=(p_\infty-p_v)/(0.5\rho u_i^2)$ ；雷诺数 $Re=u_i c/\nu$ ，其中 p_∞ 、 p_v 分别为流场压力和饱和蒸汽压， ρ 为流体密度， u_i 为来流速度， c 为水翼弦长， ν 为液体的运动黏度。实验采用的流速分别为 $u_1=6\text{ m/s}$ 、 $u_2=8\text{ m/s}$ 、 $u_3=10\text{ m/s}$ 和 $u_4=14\text{ m/s}$ ，对应的雷诺数分别为 $Re_1=0.6\times 10^6$ 、 $Re_2=0.8\times 10^6$ 、 $Re_3=1.0\times 10^6$ 、 $Re_4=1.4\times 10^6$ 。

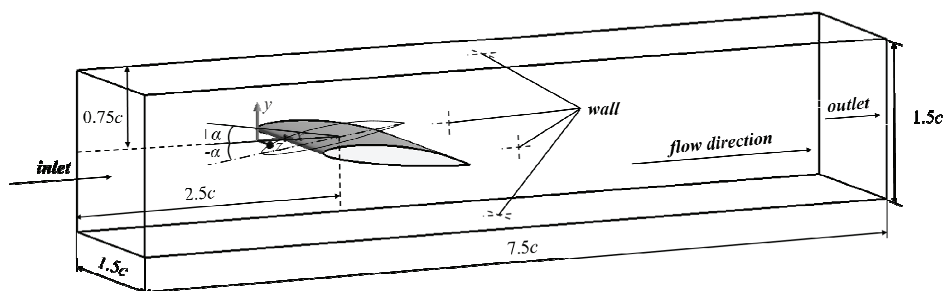


图 2 NACA 66 水翼安装位置及试验段示意图

3 实验结果及分析

3.1 前缘粗糙度水动力性能的影响

为了研究前缘粗糙度对水翼水动力性能的影响,图 3 给出了前缘光滑和粗糙水翼的升力系数($C_l = L/(0.5\rho u^2 bc)$)、阻力系数($C_d = D/(0.5\rho u^2 bc)$)和升阻比($K = C_l/C_d$)随攻角的变化曲线。

由图 3(a)可知,升力系数随着攻角的增加而增加,且在相同攻角和雷诺数工况下,光滑水翼的升力系数大于前缘粗糙水翼的升力系数。在 $Re = 0.6 \times 10^6$, $\alpha = 5^\circ$ 时,光滑水翼的升力系数曲线出现拐点,而前缘粗糙水翼并未发现拐点。这可能是由于光滑水翼前缘的流场出现了层流向湍流的过渡转捩,形成了前缘分离涡,如图 4 所示,且这一现象随着雷诺数的增加逐渐消失。

在图 3(b)中,当 $\alpha = -12^\circ \sim -10^\circ$,阻力系数随着攻角的减小而减小;当 $\alpha = -10^\circ \sim 0^\circ$,阻力系数随着攻角的减小而缓慢增加;当 $\alpha = 0^\circ \sim 12^\circ$,阻力系数随着攻角的增加而减小。同时,当 $Re = 0.8 \times 10^6$ 和 $Re = 1.0 \times 10^6$ 时,前缘粗糙水翼的阻力系数大于光滑水翼的阻力系数,而当 $Re = 0.6 \times 10^6$ 且 $\alpha > 10^\circ$ 时,光滑水翼的阻力系数大于前缘粗糙水翼的阻力系数。

从图 3(c)可知,当 $\alpha = -12^\circ \sim -6^\circ$,升阻比随着攻角的减小而下降,其中前缘粗糙水翼的升阻比大于或等于光滑水翼的升阻比。当攻角由 -6° 减小至 0° 再增加到有利迎角 α_c (最大升阻比对应的攻角)时,升阻比随着攻角的变化均呈现上升趋势。其中当 $\alpha < -3^\circ$ 时,前缘粗糙水翼的升阻比大于光滑水翼的升阻比,当 $\alpha > -3^\circ$ 时,光滑水翼的升阻比反而大于前缘粗糙水翼的升阻比。在达到最佳迎角之后,升阻比随着攻角的增加而减小,且光滑水翼的升阻比大于前缘粗糙水翼的升阻比,同时前缘粗糙水翼的最佳迎角增大。

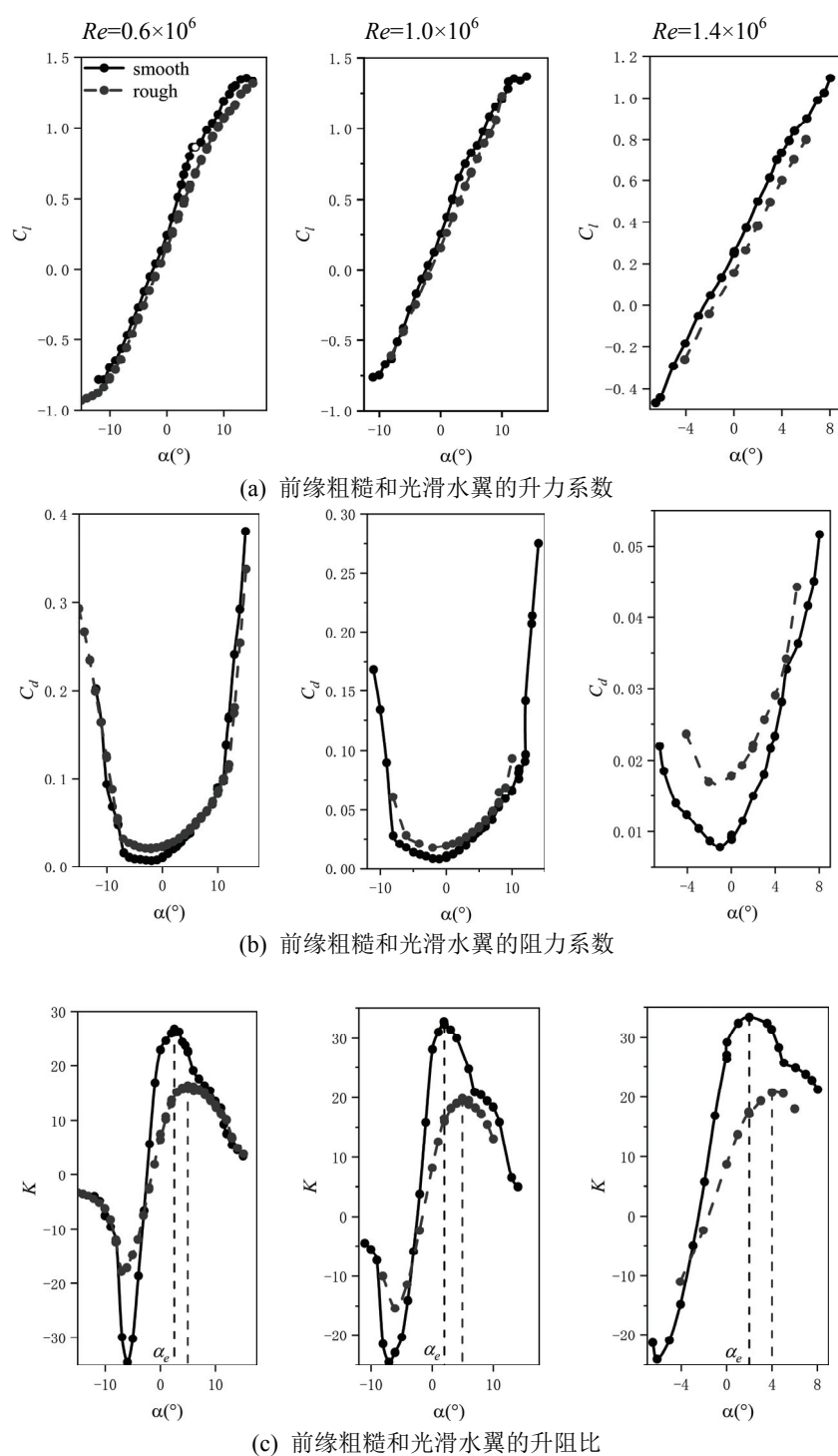


图 3 前缘粗糙和光滑水翼升力系数(C_l)、阻力系数(C_d)和升阻比(K)随攻角 α 的变化曲线

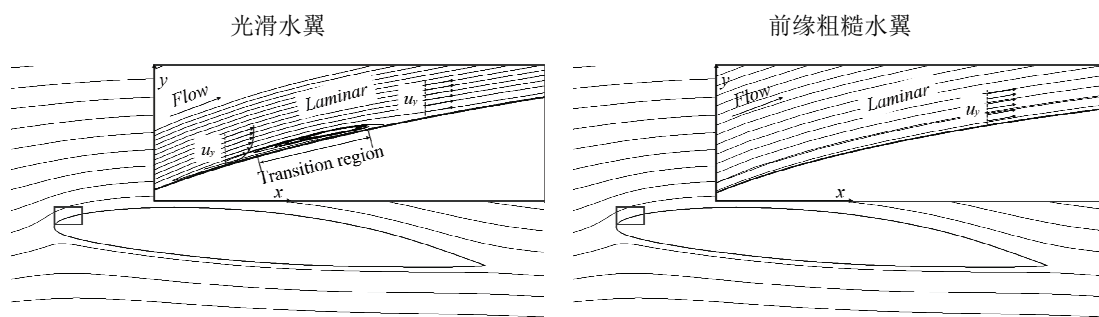
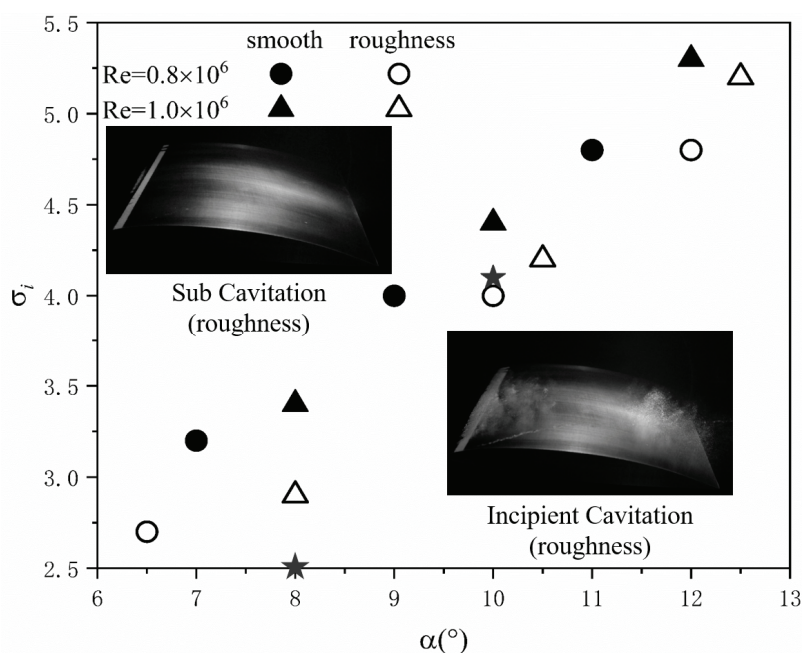


图 4 前缘粗糙和光滑水翼转捩位置及速度示意图

3.2 前缘粗糙度对初生空化的影响

图 5 给出了在 $Re=0.8 \times 10^6$ 和 $Re=1.0 \times 10^6$ 工况下, 前缘粗糙和光滑水翼的初生空化数 σ_i 分布。由图可知, 前缘粗糙水翼和光滑水翼的初生空化数均随着攻角的增加而增加, 光滑水翼的初生空化数大于前缘粗糙度水翼。因此图 6 给出了图 5 中典型工况下前缘粗糙和光滑水翼的空化形态, 当空化数 $\sigma=4.1$, 攻角 $\alpha=10^\circ$ 时, 光滑水翼可以观察到初始空化现象, 而前缘粗糙的水翼处于无化状态; 当空化数 $\sigma=3.3$, 攻角 $\alpha=8^\circ$ 时, 前缘粗糙的水翼观察到初生空化现象, 而光滑水翼已处于片状空化状态。

图 5 前缘粗糙和光滑水翼在 $Re=0.8 \times 10^6$ 和 $Re=1.0 \times 10^6$ 工况下初生空化数分布

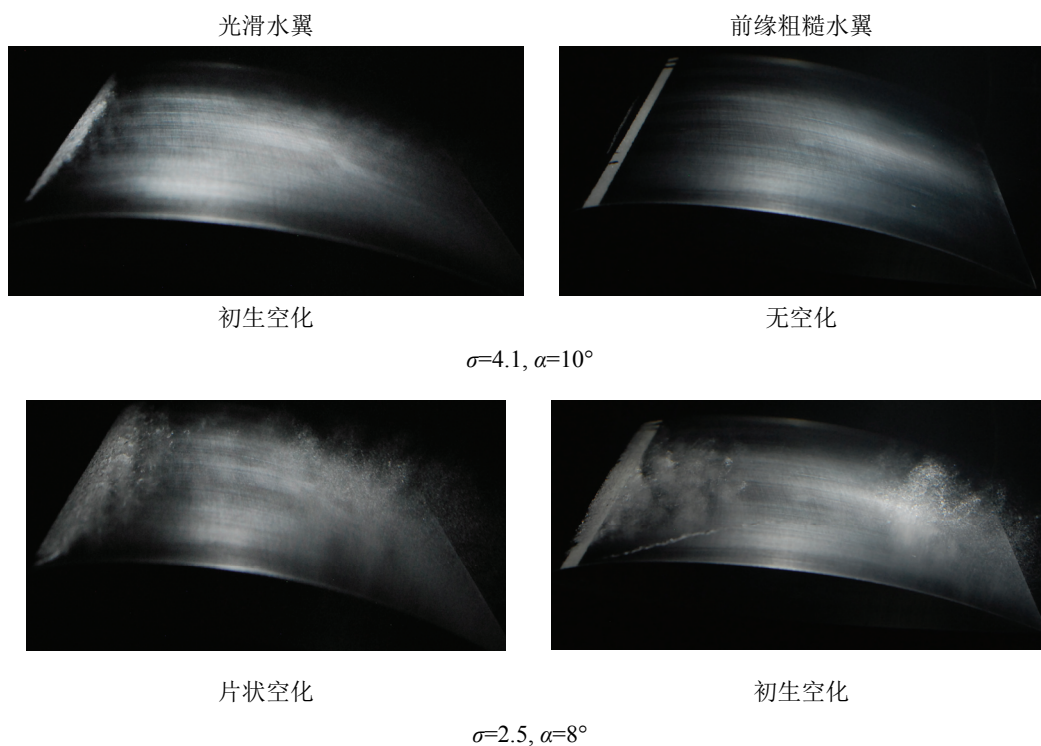
图 6 前缘粗糙和光滑水翼的空化形态($Re=0.8 \times 10^6$)

图 7 根据 Dai 等^[12]的研究推测出了图 6 中产生实验现象的原因。图中最小压力系数 $C_{p,\min}=(p_i-p_\infty)/(0.5\rho u_i^2)$ ，式中 p_i 表示粗糙高度处的最小压力。由图 7 可知，最小压力系数 $C_{p,\min}$ 随着粗糙高度 h 的增加而增加，且在相同工况下，前缘粗糙水翼的最小压力系数 $C_{p,r}$ 、饱和蒸汽压的压力系数 $C_{p,v}$ 和光滑水翼的最小压力系数 $C_{p,s}$ 存在以下关系： $C_{p,r} > C_{p,v} > C_{p,s}$ 。因此根据图 7 可推测在本研究中，当粗糙度为 0.15 mm 时，它对壁面附近的湍流动能有显著影响，并且它可以将前缘区域的最小表面压力提高到饱和蒸汽压力以上，使空化现象消失。因此，前缘粗糙水翼有效抑制了水翼的初生空化。

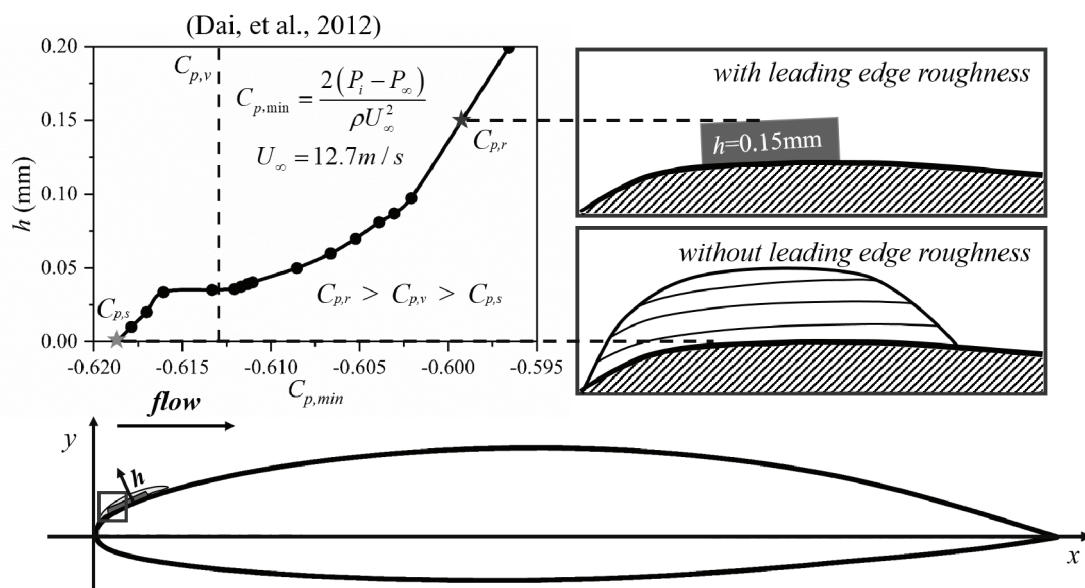


图 7 前缘粗糙和光滑水翼局部压力示意图

4 结论

本研究以绕前缘粗糙和光滑的 NACA 66 型水翼的非定常空化流动为研究对象,采用空化水洞实验平台获取了水翼空化流动的流场形态,并结合水动力系数等流动特性进行了研究分析,得出以下结论:

- (1) 无空化状态下前缘粗糙水翼的升力系数小于光滑水翼,阻力系数大于光滑水翼,当 $\alpha < -3^\circ$ 时,升阻比大于光滑水翼;当 $\alpha > -3^\circ$ 时,反之。同时,前缘粗糙水翼的最佳迎角增大。
- (2) 初生空化状态下前缘粗糙水翼的发展速度慢于光滑水翼,这可能是由于粗糙度提高了前缘局部压力至饱和蒸汽压力以上,从而有效抑制了水翼的初生空化的形成。

参考文献

- 1 陈喜阳, 郭庆, 孙建平, 等. 空化对离心泵低频水力振动影响的数值研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014(6).
- 2 李忠, 杨敏官, 高波, 等. 空化诱发的轴流泵振动特性实验研究[J]. 工程热物理学报, 2012, V33(11):1888-1891.

- 3 Amromin, E., 2014. Development and validation of CFD models for initial stages of cavitation. *J. Fluids Eng.* 136, 1–33. doi: 10.1115/1.4026883 .
- 4 Foeth, E.J., Van Doorne, C.W.H., Van Terwisga, T., Wieneke, B., 2006. Time resolved PIV and flow visualization of 3D sheet cavitation. *Exp. Fluids* 40, 503–513. doi: 10.1007/s00348-005-0082-9 .
- 5 Wu Q , Huang B , Wang G , et al. The transient characteristics of cloud cavitating flow over a flexible hydrofoil[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2018, 99.
- 6 Long, X., Zhang, J., Wang, Q., Xiao, L., Xu, M., Lyu, Q., Ji, B., 2016. Experimental investigation on the performance of jet pump cavitation reactor at different area ratios. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 78, 309–321. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2016.06.018 .
- 7 Wang, Z.Y., Huang, B., Wang, G.Y., et al.: Experimental and numerical investigation of ventilated cavitating flow with special emphasis on gas leakage behavior and re-entrant jet dynamics. *Ocean Eng.* 108, 191–201 (2015).
- 8 Churkin S A , Pervunin K S , Kravtsova A Y , et al. Cavitation on NACA0015 hydrofoils with different wall roughness: high-speed visualization of the surface texture effects[J]. *Journal of Visualization*, 2016, 19(4):587-590.
- 9 Hao J , Zhang M , Huang X . The influence of surface roughness on cloud cavitation flow around hydrofoils[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2017.
- 10 Rood, E.P.: Review—mechanisms of cavitation inception. *J. Fluids Eng.* 113, 85680U–85680U-7 (1991)
- 11 Avellan, F., Henry, P., and Rhyming, I. A new high speed cavitation tunnel for cavitation studies in hydraulic machinery. In *American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division FED* ,1987, 57: 49-60.
- 12 Dai Yuejin, Zhang Yuanyuan, Huang Dianguai. Numerical Study on the Effect of Rough Surface of Hydrofoil on Cavitation[J], *Journal of Engineering Thermophysics*, 2012, V33(5):770-773.

Experiment study on unsteady cavitating flow around hydrofoil with the leading edge roughness

CHEN Qian, WU Qin^{*}, HUANG Biao, ZHANG Han-zhe, WANG Guo-yu, LIU Yun-qing

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081.

Email: wuqin919@bit.edu.cn)

Abstract: The unsteady cavitating flows around a NACA 66 hydrofoil with and without the leading edge roughness is studied by using the high-speed cavitation tunnel, which used to measure the cavitation shapes and hydrodynamic parameters. The experiment results show that, firstly, in the sub cavitation, the lift coefficients of the hydrofoil with the leading edge roughness

is less than that of the hydrofoil without the leading edge roughness and also, the drag coefficients of the hydrofoil with the leading edge roughness is large than that of the hydrofoil without the leading edge roughness; for the evolution of the incipient cavitation, the developmental velocity of the hydrofoil with the leading edge roughness is slower than that of the hydrofoil without the leading edge roughness, which displays the leading edge roughness can be used to suppress the incipient cavitation.

Key words: Unsteady cavitating; Hydrofoil; Leading edge roughness; Experiment study.