

绕水翼超空化流动形态与速度分布¹⁾

李向宾²⁾ 王国玉 张敏弟 刘淑艳

(北京理工大学机械与车辆工程学院, 北京 100081)

摘要 为揭示超空化流场结构特性, 利用高速全流场显示技术, 观察了绕 hydronautics 水翼的超空化流动形态, 并利用数字粒子图像测速仪 (DPIV) 测量了其速度分布. 在测量空穴内部流速分布时, 采用空化流场中的空化泡作为示踪粒子来显示流动结构. 结果表明: 随着空化数的降低, 超空化流动显现出了明显的阶段特征, 其中水汽混合相和汽相的分布决定了空化区域的形态与流速分布; 空化区和主流区的汽液交界面处存在着较大的速度梯度; 低速分布区域随着空化数的降低由水翼吸力面中后部向水翼下游移动; 在空化区域内部, 水汽混合区的速度相对较低, 而汽相区则与主流区有着相近的速度分布.

关键词 超空化水翼, DPIV, 高速摄像, 空化形态, 流速分布

中图分类号: TV131.32 **文献标识码:** A **文章编号:** 0459-1879(2008)03-0315-08

引 言

空化是高速水流中一种和旋涡运动有关的非定常复杂流动现象^[1]. 一般地, 按照空化发展随空化数降低表现出来的不同形态特征, 将绕水翼的空化分为初生空化、片状空化、云状空化和超空化 4 个阶段^[2,3]. 随着空化从初始的游离型空泡至附着型片状空泡团再到云状脱落的复杂演化, 其发展机理也不尽相同^[4~7]. 当空化数降低到一定程度, 空泡覆盖整个水翼吸力面, 并从物体表面延伸到其尾部后面的区域, 这就是空化发展的最终阶段——超空化阶段. 与其它阶段相比, 超空化阶段的一个显著特征是: 在主流区和超空化区域存在一明显的分界面. 基于此, Wu 和 Wang^[8] 在势流分析的基础上建立了一种自由流线理论来描述超空化的形态. Furuya 和 Acosta^[9] 应用势流理论和奇点摄动理论计算了绕具有圆型头部形状的超空化水翼的压强分布. 这些计算均基于势流流动模型, 假定超空化空穴内的压强分布是均匀的并且等于当地汽化压强, 而且空穴的界面与流线相一致并且是光滑的. 而超空化流动是一种复杂的湍流流动, 现有的势流理论虽然可以描述超空化时均形态, 但无法揭示其复杂的流动机理, 也无法发现和实际流动相关的流动现象. 例如, 早在 20 世纪 80 年代, Oba 和 Ikohagi^[10] 在采用 LDV

方法测试了绕水翼的超空化流场后指出, 由于水流在分离点突然分离, 故光滑分离的假设是不合理的.

近年来高速水力机械及其减阻研究的发展^[11,12] 使得超空化研究重新引起了人们的极大关注, 人们应用实验方法深入研究超空化流动机理. 王国玉等^[13] 采用高速摄影和激光多普勒测速仪 (LDV) 观测了绕 Clark-Y 水翼的超空化流动, 指出超空化发生时空化区域内充满了空泡和水的混合物. 粒子图像测速 (PIV) 技术由于其无干扰、瞬时和全流场精确定量测量的突出优点^[14], 也开始广泛地应用于空化流动测量. 在播撒固态示踪粒子的情况下, Tassin 等^[15] 讨论了利用 PIV 观测空化流动的可行性; Foeth 等^[16] 利用 PIV 观察了片状空化和云状空化的流动结构. 最近, Wosnik 和 Milosevic^[17] 利用 PIV 成功地观测了空化流动下的泡状尾迹, 指出在足够高并散布均匀的空泡浓度的情况下, 可以利用空化泡作为示踪粒子来有效显示空化流场.

本文以绕 Hydronautics 超空化水翼^[18] 的超空化流动为研究对象, 采用高速全流场显示技术和 DPIV (图像测速技术的数字化方法) 测速系统, 对超空化流动的空化形态特别是速度分布特性进行了观察和测量. 在 DPIV 测量中, 采用空化流场中的空化泡作为示踪粒子, 以此来改善空化区内的信息判读, 并获得相关的瞬时及平均速度分布.

2006-11-16 收到第 1 稿, 2007-11-06 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金 (50276004, 50679001) 和北京理工大学基础研究基金 (BIT-UBF-200503E4206) 资助项目.

2) E-mail: lixiangbin@bit.edu.cn

1 实验装置和方法

1.1 空化水洞

实验在一闭式空化水洞内进行. 如图 1 所示, 空化水洞系统主要由蓄水池、稳流除气罐、电机及调速系统、轴流泵、真空发生装置、实验段及管路组成. 轴流泵位于实验段下方 5m 处, 以防止驱动泵的空化. 实验段上游的稳流除气罐用来分离水流中可能包含的游离型气泡. 在罐的出口与实验段之间安装有一直角导流栅和一直线导流栅以减小水流的湍动度. 罐上部的密闭空腔与一真空泵相连以控制系统中的压力. 由电机驱动轴流泵得到所需循环流动.

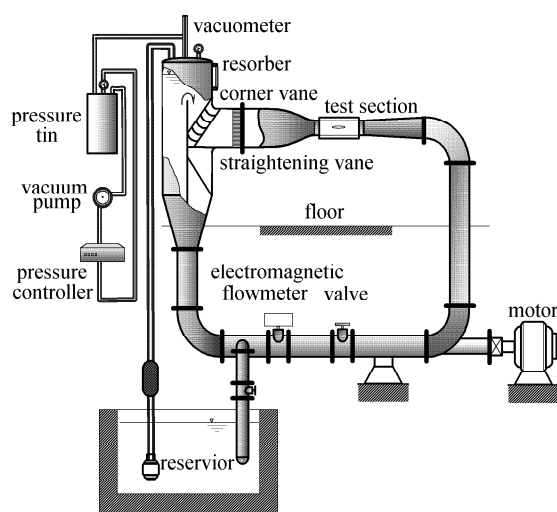


图 1 空化水洞示意图

Fig.1 Schematic of the cavitation tunnel

图 2 是水洞实验段的俯视图. 实验段为一长方体 (700mm 长 × 190mm 高 × 70mm 宽), 水翼安装于实验段中. 实验时, 通过其上下部及前侧面的透明有机玻璃板, 即可观测水翼周围的流场形态.

空化数和雷诺数分别定义如下

$$\sigma = 2(P_{\infty} - P_v) / \rho U^2 \quad (1)$$

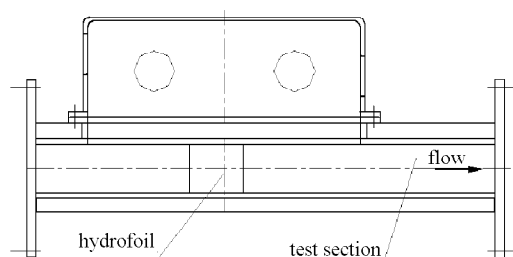


图 2 实验段俯视图

Fig.2 Planform of the test section

$$Re = Uc/\nu \quad (2)$$

这里, P_{∞} , U , ρ 和 P_v 分别为距实验段上游入口 210mm 处参考断面上的平均静压强、平均速度 (速度剖面充分均匀)、水的密度和汽化压强; c 是水翼弦长; ν 是水的运动黏性系数. 本次实验中, 雷诺数分别取为 6×10^5 , 8.2×10^5 和 7×10^5 , 对应的空化数分别为 0.74, 0.54 和 0.48.

1.2 超空化水翼

实验采用 Tulin^[18] 提出的一种特殊的易于产生超空化的翼型——Hydronautics, 其剖面形状如图 3 所示. 实验水翼用不锈钢制成, 翼展和翼弦方向的长度均为 70mm, 表面抛光, 并由机械锁定装置固定于实验段, 可绕轴连续调整所需的攻角. 为方便从底部观察流场, 翼型的吸力面置于下部. 图 3 同时给出了攻角的定义, 本次实验中攻角保持不变, 设定为 $\alpha = 5^\circ$. 流动方向如图 2 中箭头所示.

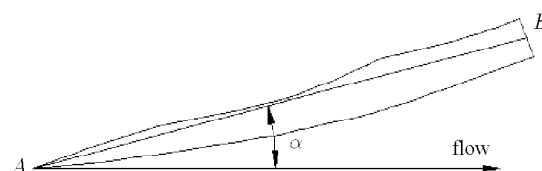


图 3 Hydronautics 水翼及剖面示意图

Fig.3 Schematic of Hydronautics supercavitation foil

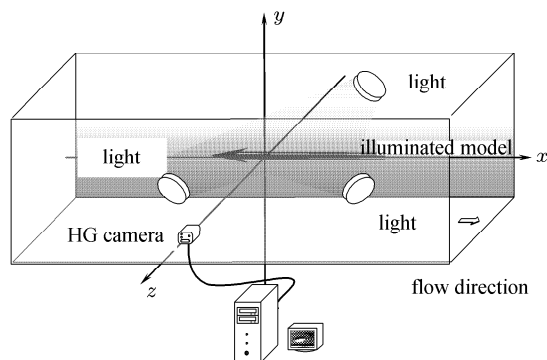
1.3 高速全流场显示系统

图 4(a) 为实验中采用的高速全流场显示系统布置图. 该系统由 3 台镉灯、1 台高速摄像机和 1 台用于控制和显示储存实时图像的计算机组成. 其中 3 台镉灯的功率均为 1kW, 分别用作主、辅光源. 高速摄像机型号为 HG-LE, 采用 CMOS 传感器为记录介质, 最高采集频率可达 10^5 fps (帧/秒), 完全可以满足瞬时空化流动形态采集的需要.

1.4 DPIV 装置

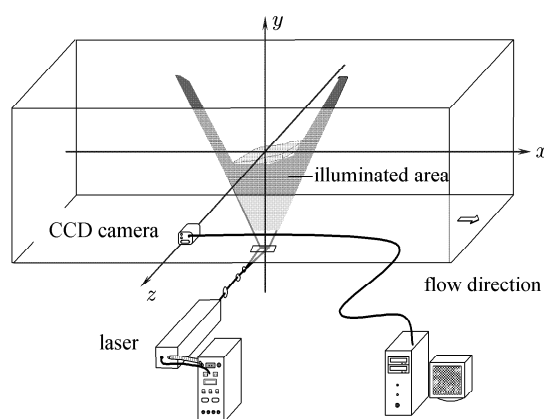
实验采用如图 4(b) 所示的 2D-DPIV 粒子测速系统, 该系统由两台 50mJ 的 Nd:YAG 脉冲激光器、一套分辨率为 1024×1024 的跨帧 CCD 相机以及一台同步器组成, 测量精度为 0.5%~2%. DPIV 系统放置在实验段的前侧面, 激光片光源从下部射入, 照亮水翼翼展中部断面, 采集相关图像.

将 DPIV 应用于空化流动的测量, 需要解决如下问题: (1) 示踪粒子的跟随性: 粒子必须有足够



(a) 高速全流场显示系统布置图

(a) The setup of high-speed visualization system



(b) DPIV 系统布置图

(b) The setup of the DPIV system

图 4 试验设备布置图

Fig.4 Schematic of the layout of the experimental setup

小的直径以及与液(气)体相近的密度；(2)空化区域不规则的汽液界面会导致示踪粒子反射的激光片光的散射，从而造成误判读。采用播撒固态示踪粒子的方法观测，由于粒子不能进入空化区域，只能研究空化区域以外的流动状态，而不能显示空化区域的流动。由于在空化区域内存在着大量的空化泡(包括蒸汽泡和气泡)，采用空化泡作为示踪粒子，使得空化区域流动结构的测量成为可能。同时由于其良好的跟随性，也很好地解决了播撒固态示踪粒子所带来的问题。而空穴内很高的蒸汽体积比率也足够用于 PIV 的多区域判读^[17]。本文在 DPIV 测量时采用了空化泡作为示踪粒子，消除了播撒固态示踪粒子的缺陷。

采用 TSI 公司成熟的 DPIV 商业软件 Insight 来获取速度场。实验中，判读域为 32×32 像素，并设定

50% 的重叠量。图像采用快速傅立叶变换 (FFT) 进行两帧互相关处理，利用高斯法进行峰值检测，同时利用软件本身的多重过滤器来去除噪声等干扰，再经专业后处理软件 Tecplot 对数据文件进行显示。

2 实验结果与分析

2.1 超空化流动的形态发展

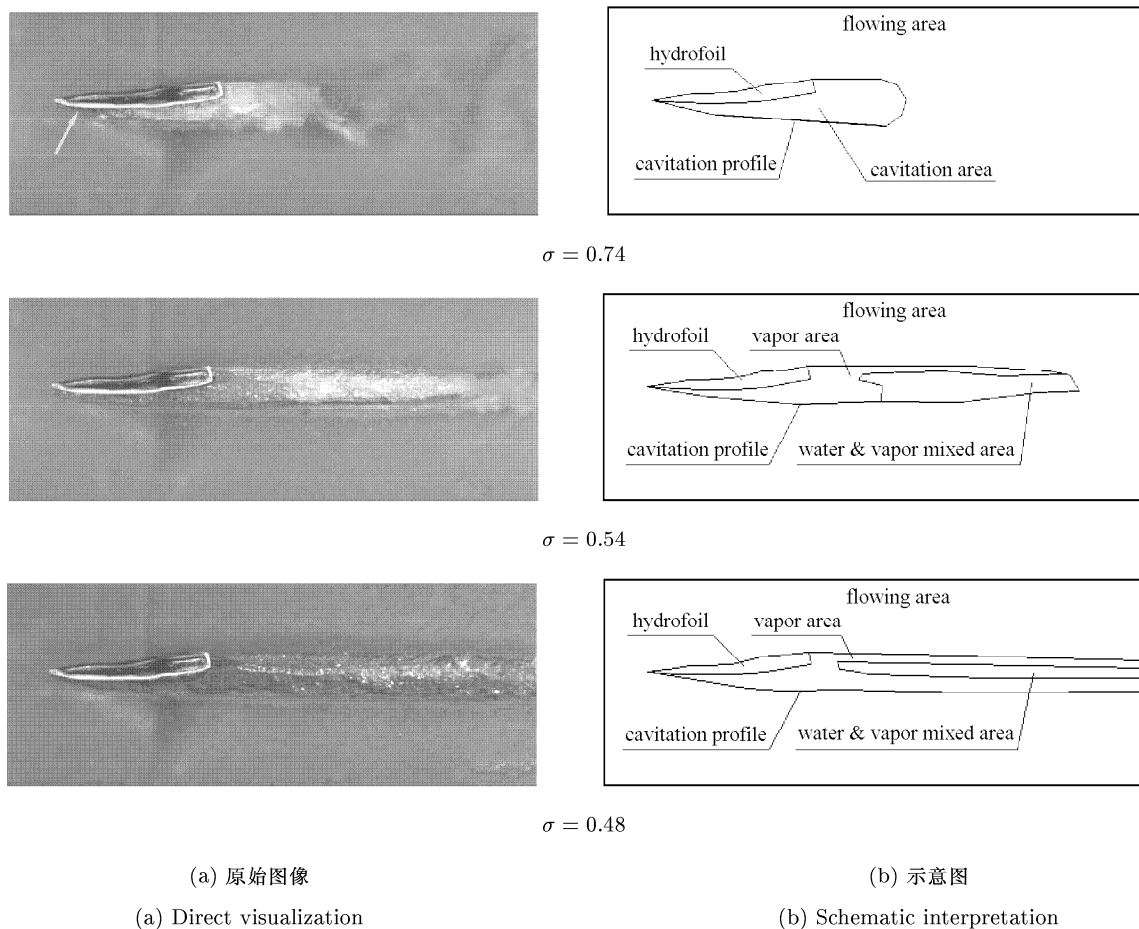
实验中，在一定的流速下，通过调节实验段上游的压强 P_∞ ，得到不同的空化数，采用高速摄像装置观察不同条件下的空化形态。当空化数降到 0.74 时，开始形成超空化现象。继续降低空化数时，超空化流动随着空化数的不同表现出较为明显的流动形态特征差异。根据其主要形态特征，可以将超空化划分为空穴形成、两相共存、完全发展 3 个阶段。表 1 给出了实验中超空化的各个阶段所对应的初始空化数(即各个超空化阶段开始发生时的空化数)。图 5 显示了各个空化数下超空化流的典型流动结构及所对应的示意图。

表 1 超空化的各个阶段及所对应的初始空化数

Table 1 The supercavitation stage with various cavitation number

Supercavitation stage	Cavity forming	Two-phase coexisting	Fully developed
cavitation number	0.74	0.54	0.48

可以看出，空化数 $\sigma = 0.74$ 时，水翼后部的亮白色区域即空化区已完全覆盖吸力面并向下游延伸，形成了一个较大的空穴，超空化初步形成，称之为超空化的空穴形成阶段。在此阶段，空穴内部充满了大量的水汽混合物(定义为水汽混合相)，亮白色即为水汽交界面的反射光所致；仅仅在水翼前缘后部存在小片的透明区域——汽相区(图中箭头所指部分)。当空化数降低至 $\sigma = 0.54$ 时，空穴长度已达两倍多弦长，水汽混合相向空穴后部集中，而空穴前部则基本上均为汽相区。在连续采集的图像中，空化区内部虽然处于剧烈的波动状态，但汽相和水汽混合相始终共存，因此称其为两相共存阶段。继续降低空化数到 $\sigma = 0.48$ 甚至更小时，空化区形成稳定的界面，汽相基本充满了整个空化区域，只是在其中后部仍有部分水汽混合相，呈狭窄的连续带状分布，此时的超空化已处于“相对稳定状态”，称这个最终阶段为超空化的完全发展阶段。

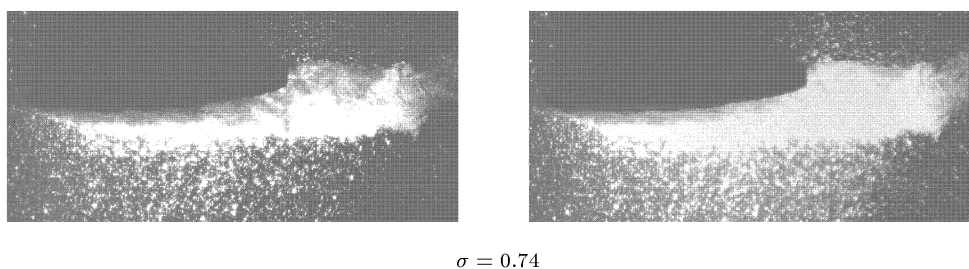
图 5 不同空化数下的超空化流动结构 ($\alpha = 5^\circ$)Fig.5 Three supercavitating flow structures under different cavitation numbers ($\alpha = 5^\circ$)

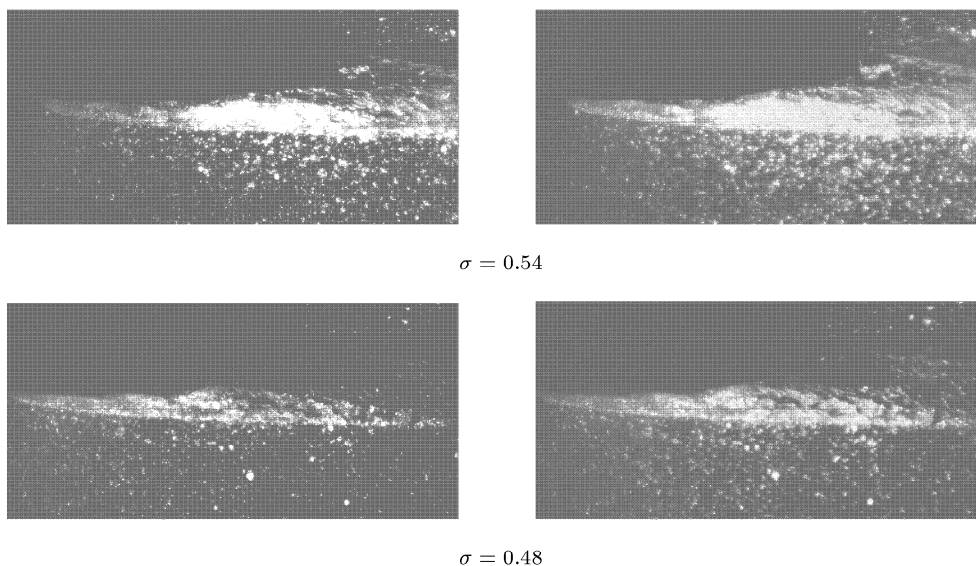
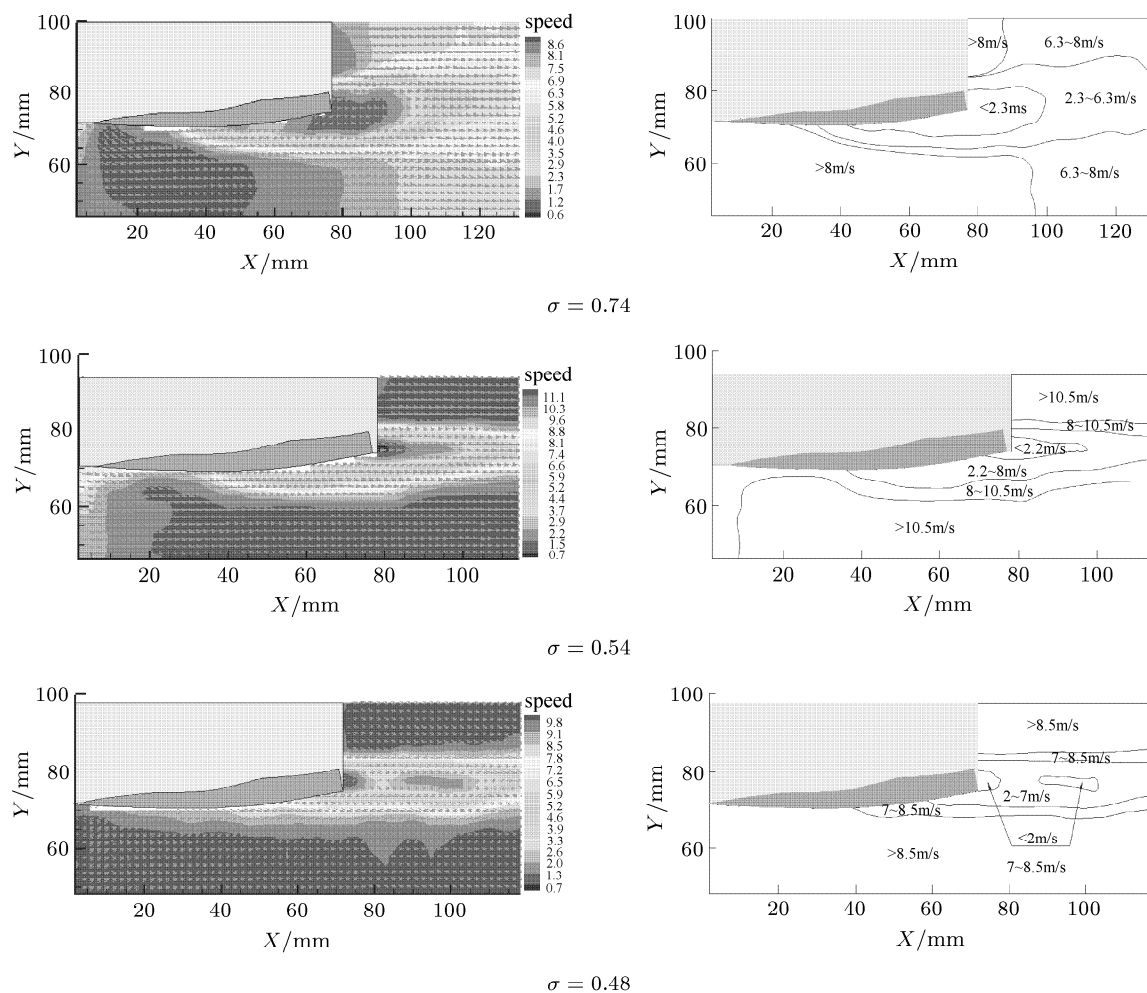
2.2 速度分布

采用平面粒子图像测速仪 (2D - DPIV) 进行了全流场速度的测定. 实验时, 在所用的 CCD 相机镜头前面加装滤波镜, 使其只通过所发射激光的反射光 (波长在 $532 \pm 5 \text{ nm}$ 范围内), 从而滤去其它干扰源. 图 6 给出了所采集的具有代表性的双曝光 PIV 图像对, 其曝光时间间隔为 $50 \mu\text{s}$. 因激光片光源从下方垂直射入流场, 故图像左上方被水翼阻挡而成

为一暗色区域, 水翼即位于暗色区域的底部. 从这些 PIV 图像对可以看出, 在所研究的空化条件下, 观察区域内有足够多的空化泡分布, 可以满足后处理要求.

利用相关后处理软件得到了对应空化数下的时间平均速度矢量和等值线图, 如图 7 所示 (图中灰色区域表示无激光射入). 可以看出, 空化区域的速度分布与主流区有明显不同. 在所有超空化阶段, 最

图 6 PIV 采集的原始图像对 ($\alpha = 5^\circ$)Fig.6 Double-pulsed image pairs ($\alpha = 5^\circ$)

图 6 PIV 采集的原始图像对 ($\alpha = 5^\circ$)(续)Fig.6 Double-pulsed image pairs ($\alpha = 5^\circ$)(continued)图 7 不同空化数下的平均速度分布 ($\alpha = 5^\circ$)Fig.7 The average velocity distribution under different cavitation numbers ($\alpha = 5^\circ$)

低速度总是分布于空穴核心区域. 例如, 当空化数 $\sigma = 0.74$ 时, 实验段平均流速为 8.6 m/s , 而空化区域内的最小速度为 0.6 m/s , 贴近水翼吸力面并向后延伸的整个空化核心区的速度不大于 2.3 m/s , 因此在汽液界面处存在着非常大的速度梯度. 随着空化数的降低, 速度分布表现出明显的特征差异: (1) 低速区域向下游移动, 并逐渐变小. 空化数 $\sigma = 0.74$ 时, 水翼后部整个流域速度均有不同程度的降低, 低速区集中于水翼中后部; 空化数 $\sigma = 0.48$ 时, 低速区则移动至尾流场. 对比图 5 的高速摄像图像可知, 空化数 $\sigma = 0.74$ 时超空化处于初步形成阶段, 在空穴尾部仍存在明显的尾涡脱落和溃灭, 导致了速度场的大范围变化. 当空化数降低至 $\sigma = 0.54$ 和 $\sigma = 0.48$ 时, 空化尾部的溃灭区域后移, 表现为主流区域的向后延伸, 最终形成了以低速分布区域为带状中心, 上下分层对称的速度分布轮廓 (见图 8(b) 速度等值线图); (2) 空化区域前部的汽相区与主流区有着相近的速度分布, 而不同于空化区域后部水汽混合相所在的低速区. 可以看出, 水翼吸力面前部始终存在一速度与主流区相近的区域, 并随着空化数的降低而不断扩大. 对比图 5 可知, 这部分区域对应于空化区域的汽相区, 水汽混合相所在的两相区则对应于较低速度分布区域.

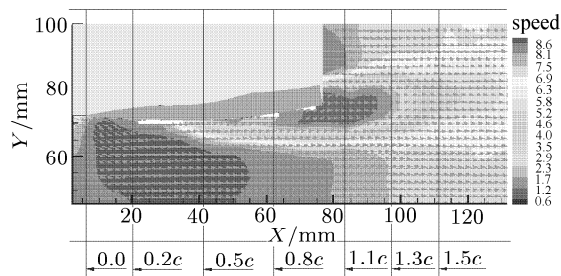


图 8 各截面位置示意图 ($\sigma = 0.74$, $\alpha = 5^\circ$)

Fig.8 Schematic of special locations ($\sigma = 0.74$, $\alpha = 5^\circ$)

为获得更多的定量信息, 在不同的空化条件下, 提取了图 8 所示的一组特定截面上的速度分布. 所取截面的位置, 以水翼前缘顶点所在截面为起始, 分别距其水平距离为 $0.2c, 0.5c$, 直至 $1.5c$. 图 9 是图 8 所示各流动截面上的速度分布. 当空化数 $\sigma = 0.74$ 时, 在小于一个弦长距离的 3 个截面上, 第 1 个截面位置 ($x = 0.2c$) 仍处于汽相区, 因此其速度突变点更靠近水翼吸力面, 而后两个截面的速度突变点则明显降低. 空化数 $\sigma = 0.54$ 时亦有相似分布. 在大于一个弦长距离的 3 个截面上, 图中的波谷状分

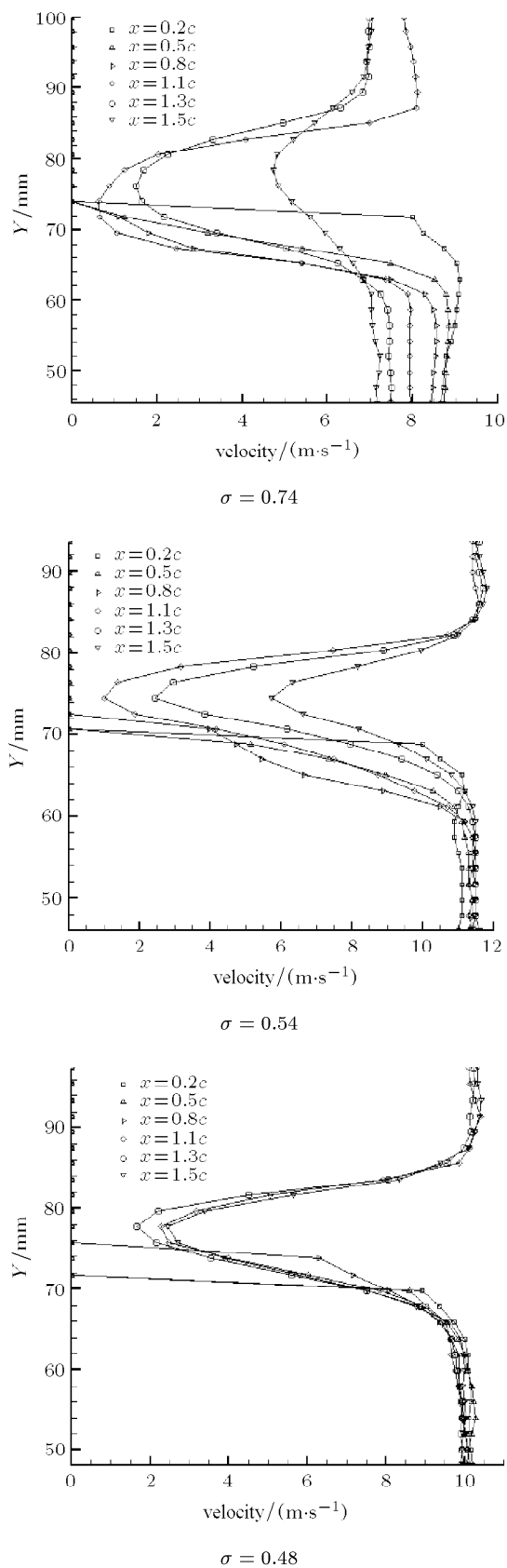


图 9 不同截面上的平均速度分布 ($\alpha = 5^\circ$)

Fig.9 The average velocity distributions in various sections ($\alpha = 5^\circ$)

布均对应于水翼后部的速度场。空化数 $\sigma = 0.74$ 和 $\sigma = 0.54$ 时, 空化影响随着距水翼距离的增加而明显减小。而空化数 $\sigma = 0.48$ 时, 所有截面的速度突变点基本一致, 说明此时水翼吸力面及其后的大部分区域已和主流区有相近的速度, 这也对应于高速摄像所观察到的汽相区, 而最低速度即波谷位置均分布于空化核心区域。

3 结 论

使用高速全流场显示技术和 DPIV 方法对超空化流动进行了实验观测。在 DPIV 测量中, 采用空化流场中的空化泡作为示踪粒子来显示流动结构。所得结论如下:

(1) 随着空化数的降低, 超空化流动表现出明显的阶段性特征, 其中水汽混合相和汽相的分布决定了空化区域的形态与流速分布。

(2) 空化区和主流区的汽液交界面处存在着较大的速度梯度。

(3) 随着空化数的降低, 近水翼流场空化区域内的低速区由水翼吸力面中后部向水翼下游移动, 其影响范围逐渐减小。

(4) 在空化区域内部, 水汽混合区的速度相对较低, 而汽相区则与主流区有着相近的速度分布。

参 考 文 献

- 1 Wang GY, Cao SL, Ikohagi T. Study on behaviors of cavitating vortices in flows around a hollow-jet valve. In: Proc. Third international Conference on Fluid Machinery and Fluid Engineering. Beijing, China, 2000. 451~455
- 2 Brennen CE. Cavitation and Bubble Dynamics. UK: Oxford University Press, 1995
- 3 Wang GY, Senocak I, Shyy W, et al. Dynamics of attached turbulent cavitating flows. *Progress in Aerospace Sciences*, 2001, 37(6): 551~581
- 4 Rood EP. Review-mechanisms of cavitation inception. *Journal of Fluids Engineering*, 1991, 113(2): 163~175
- 5 Leger AT, Ceccio SL. Examination of the flow near the leading edge of attached cavitation. Part 1. Detachment of two-dimensional and axisymmetric cavities. *Journal of Fluid Mechanics*, 1998, 376(1): 61~90
- 6 Gopalan S, Katz J. Flow structure and modeling issues in the closure region of attached cavitation. *Physics of Fluids*, 2000, 16(4): 895~911
- 7 Kawanami Y, Kato H, Yamauchi H, et al. Mechanism and control of cloud cavitation. *Journal of Fluids Engineering*, 1997, 119(4): 788~794
- 8 Wu YT, Wang DP. A wake model for free-streamline flow theory, part 2. Cavity flows past obstacles of arbitrary profile. *Journal of Fluid Mechanics*, 1963, 18(1): 65~93
- 9 Furuya O, Acosta AJ. A note on the calculation of supercavitating hydrofoils with rounded noses. *Journal of Fluid Engineering, Transactions of the ASME*, 1973. 221~228
- 10 Oba R, Ikohagi T, Yasu S. Supercavitating cavity observation by mean of laser velocimeter. *Journal of Fluids Engineering*, 1980, 102(4): 433~440
- 11 Hrubec JD. High-speed imaging of supercavitating underwater projectiles. *Experiments in Fluids*, 2001, 30(1): 57~64
- 12 陈兢. 新概念武器——超空泡水下高速武器. 飞航导弹, 2004, 10: 34~37 (Chen Jing. New conception arms-high-speed supercavitating arms underwater. *Voyage Missile*, 2004, 10: 34~37(in Chinese))
- 13 王国玉, 曹树良, 刘淑艳等. 绕水翼超空化现象的实验研究. 工程热物理学报, 2003, 24(4): 606~608 (Wang Guoyu, Cao Shuliang, Liu Shuyan, et al. Experimental study of supercavitation phenomenon around a hydrofoil. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2003, 24(4): 606~608(in Chinese))
- 14 Adrian RJ. Twenty years of particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, 2005, 39(2): 159~169
- 15 Tassin AL, Li CY, Ceccio SL, et al. Velocity field measurements of cavitating flows. *Experiments in Fluids*, 1995, 20(2): 125~130
- 16 Foeth EJ, van Doorne CWH, van Tersiege T, et al. Time resolved piv and flow visualization of 3D sheet cavitation. *Experiments in Fluids*, 2006, 40(4): 503~513
- 17 Wosnik M, Milosevic I. Time-resolved particle image velocimetry(TR-PIV) in ventilated and naturally cavitating flows. In: The Sixth International Symposium on Particle Image Velocimetry. Pasadena, California, USA, 2005
- 18 Tulin MP. The history and principles of operation of supercavitating propellers, RTO AVT/VKI special course: supercavitating flows. Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Rhode-Saint-Genese, Belgium, 2001

CHARACTERISTICS OF SUPERCAVITATING FLOWS AROUND A HYDROFOIL¹⁾

Li Xiangbin²⁾ Wang Guoyu Zhang Mindi Liu Shuyan

(School of Mechanics and Vehicle Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract Supercavitation around a hydrofoil is studied experimentally to address the flowing characteristics. A high-speed video camera is used to visualize the flow structures under different cavitation numbers. The digital particle image velocimetry (DPIV) is employed to measure the velocity fields. The bubbles among the cavitating fields are used as the tracer particles to survey the velocity distribution inside the cavity and improve the tracking capability of the tracer particles. The results show that three distinct supercavitating flow regimes can be observed with the decreasing cavitation numbers, in which the cavitation structure varies with the distribution of the water-vapor mixing phase and vapor phase. A large velocity gradient exists around the interface between the cavitation area and the free stream. In the cavitation area, the lower-velocity region moves from the foil's middle part to the downstream with the decrease of the cavitation number. The fluid velocity is low in the water-vapor mixture region, while with the similar distribution in the free stream and the vapor region.

Key words supercavitation hydrofoil, DPIV, high-speed video camera, cavitation characteristics, velocity distribution

Received 16 November 2006, revised 6 November 2007.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (50276004, 50679001) and the Fundamental Research Foundation of Beijing Institute of Technology (BIT-UBF-200503E4206).

2) E-mail: lixiangbin@bit.edu.cn