

文章编号: 1001-4888(2011)04-0417-08

非定常空化流场结构的实验研究^{*}

黄彪, 王国玉, 王复峰, 高德明

(北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要: 为深入研究非定常空化流场结构, 本文用实验方法研究了绕 Clark-Y 型水翼的非定常空化流动现象。实验在空化水洞中进行, 采用高速摄像技术观测了云状空化阶段的非定常空穴形态, 并应用粒子成像测速系统(PIV)对绕水翼空化流场的速度场和涡量场等流动特性进行了同步的实验分析。研究表明: 空化现象对流场结构有着重要的影响, 在无空化和空化状态下, 水翼前缘处的速度分布基本相同, 但水翼中后部的流场结构存在较大的差异, 在空化状态下, 水翼中后部存在明显的水汽混相结构, 该区域内的速度要低于主流区域, 但涡量要大于其它区域, 说明该区域存在明显的漩涡结构。在非定常云状空化的一个完整的发展周期中, 空穴形态经历了初生—增长—溃灭的准周期过程, 水汽混合相和汽相的分布决定了空化区域的形态结构与速度和涡量分布, 在空穴的持续生长阶段, 水翼中后部流场的低速高涡量区域的影响范围不断增大。在空穴周期型发展的后期, 随着反向射流的发展, 水翼中后部的流场结构处于强烈的非定常状态, 水翼尾部的空化漩涡运动剧烈, 空泡内部呈现出更为明显的漩涡结构, 直至空泡完全脱落。

关键词: 非定常空穴形态; 高速摄像技术; 粒子成像测速系统

中图分类号: TU391; TU392.5 **文献标识码:** A

0 引言

空化是工程实际中经常遇到的物理现象。由于空化现象伴随着强烈的非定常流动特性, 空化的产生往往会带来剧烈的噪声和振动, 空化现象在许多水力机械中均有发生, 诸如泵、喷嘴、喷射器、船舶推进器以及水翼等^[1]。近年来, 水力机械趋于高速小型化, 高负荷叶片带来的非定常空化问题成了水动力学的难点和热点之一。因此, 针对非定常空化流动现象的研究具有重要的现实意义和工程应用价值。

空化现象的早期研究主要是通过实验观察空化发生的区域及结构形态, 早在 1906 年, Parsons 认识到了蒸汽空化现象, 并进行了首次空化实验, 由于空化现象对系统性能产生很多不利的影响, 如空化噪声、空蚀等, 因此, 以后对空化现象进行的研究越来越多, 并逐渐作为一个学科发展起来。Arakeri 和 Acosta^[2]采用全息摄影的方法研究了绕轴对称物体水流中的空化现象, 发现空化发生在水流的分离区域。随着实验技术及配套设备的逐步成熟, 人们开始采用高速摄像技术、LDV(激光多普勒测速)、PIV(粒子图像测速)、激光诱导荧光(LIF)、微型传感器以及与计算机图像处理技术相结合等手段, 观察高速流场中空化发生和发展的瞬态过程, 研究其发生机理以及和紊流流动的相互作用和关系。Kubota^[3]利用激光多普勒技术并结合有条件的采样分析, 得到了空穴尾部脱落的空泡团是有许多小空泡组成的大尺度漩涡, 空穴尾部存在反向射流。Le^[4]和 Kawanami^[5]等采用高速摄影技术证实了 Kubota 的观

^{*} 收稿日期: 2010-09-15; 修订日期: 2010-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(50979004)资助

通讯作者: 黄彪(1985—), 男, 博士研究生。主要研究领域: 多相空化流动。E-mail: huangbiao@bit.edu.cn

点。近年来,国内对水翼空化问题的实验研究也逐渐重视并进行了一些研究。李向宾等^[6]利用数字式粒子图像测速系统测量了空穴发展与流场中涡量变化的关系。张博^[7]等对水翼在亚空化阶段的升阻力进行了测量,结合小波分析技术研究了水翼升阻力的频谱特性,探讨了亚空化流动空穴的脱落机理。

本文采用实验方法研究了绕水翼在云状工况下的空化流场结构。实验采用高速录像技术观察了空穴形态随时间变化的非定常发展过程,并应用 PIV 技术对空化流场中的速度场与涡量场进行了时均流场分析与瞬时分析,研究了空穴形态与流场结构之间的关系。

1 实验装置与方法

1.1 空化水洞

实验在循环式空化水洞中进行,图 1 是空化水洞示意图。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。驱动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直角导流栅和直线导流栅,以减小水流的紊动度。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实验所需循环流动。实验段尺寸为 $70\text{mm} \times 190\text{mm} \times 700\text{mm}$,其上部、下部和侧面分别装有三个高强度有机玻璃窗,以观察水洞中的空化流场情况。

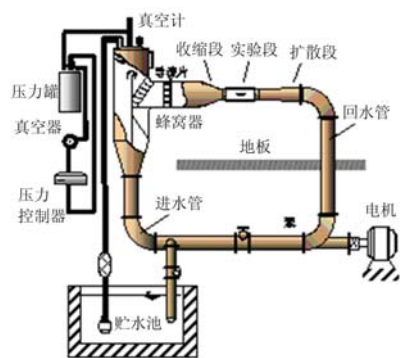


图 1 空化水洞布置图

Fig. 1 Setup of cavitation tunnel

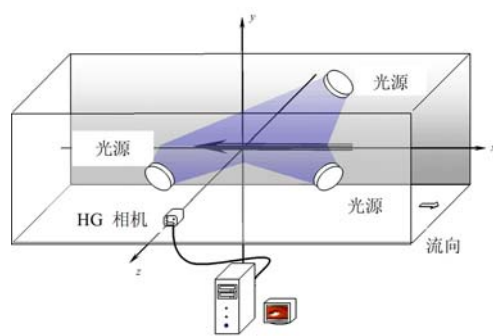


图 2 高速全流场显示系统布置图

Fig. 2 The setup of high-speed visualization system

1.2 高速录像观察系统与粒子成像测试仪

图 2 给出了实验中所采用的高速录像观察系统,本系统包括作为光源的镉灯、高速摄像机和存储图像的计算机,记录流场图像的高速摄像机的记录速度最高可达到 100,000 帧/秒(fps),完全能够满足空化流场研究的需要,本次实验所设定的采集频率为 5000fps。

如图 3 所示,粒子成像测速仪(Particle Image Velocimetry 简称 PIV)的基本组成包括以下几个部分:CCD 相机、激光器、片光源及光路系统、数据采集系统等,粒子图像速度场仪通过用激光器转换出的片光源照亮流场中的粒子,然后用可由计算机控制的 CCD/CMOS 照相机拍摄,图像存储于计算机内。在进行图像处理时,由同步器对整个系统进行时序控制。实验中,其采像速率为 30 帧/秒,即每秒钟可获得 15 对图像,从而获得 15 个速度矢量场。每两帧图之间的时间间隔 Δt 设为一定值(该值可以根据粒子的运动速度来设定,以保证 CCD 成像的清晰和测试的精度,在本次研究中,每两帧图之间的时间间隔 Δt 为 $40\mu\text{s}$)。每两帧图通过粒子的相关位移计算就可以得到粒子的运动速度矢量,以数据形式输出,并通过后处理软件从而得到速度场与涡量场等流场信息。

1.3 实验模型及参数定义

实验采用的模型为 Clark-Y 型水翼,水翼由不锈钢制成,其表面充分光滑,厚度比为 11.7%,翼展和翼弦方向的长度均为 70mm,攻角定义为翼弦与来流的夹角。实验时,水翼放置在实验段中,攻角设定为 8 度。图 4 是水翼模型实物图片,图 5 是 Clark-Y 水翼断面形状示意图,并表明了本研究中采用的

攻角 α 的定义。

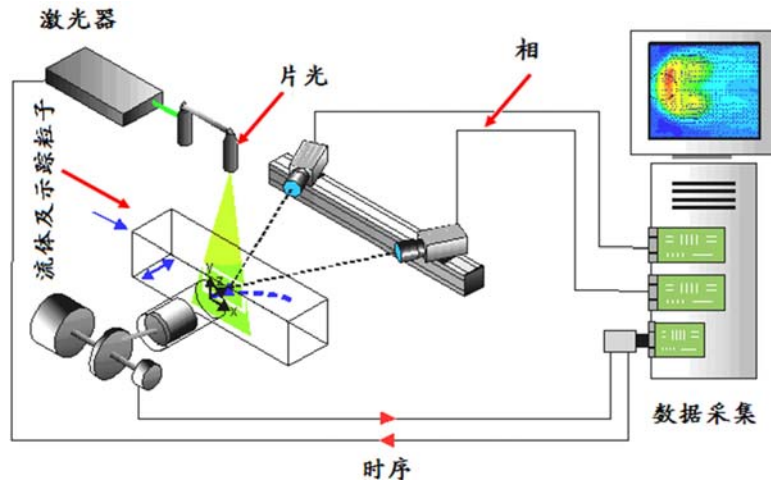


图3 DPIV测速系统示意图

Fig. 3 Arrangement of the DPIV system

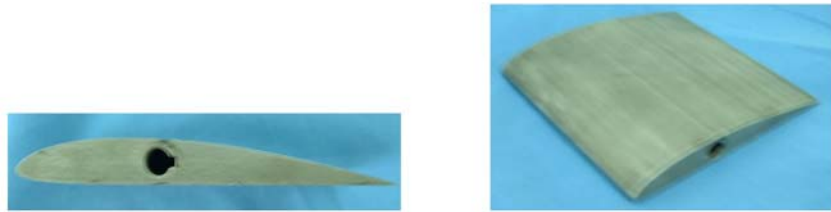


图4 水翼模型实物图

Fig. 4 Schematic of Clark-Y foil

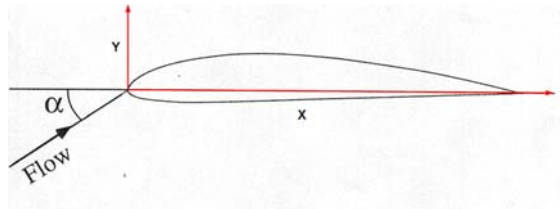


图5 Clark-Y水翼断面形状示意图及攻角的定义

Fig. 5 Clark-Y hydrofoil section and definition of angle of attack

实验中,重要的量纲一化参量分别定义为:

$$\text{空化数:} \quad \sigma = \frac{p_{\infty} - p_v}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2} \quad (1)$$

$$\text{雷诺数:} \quad Re = \frac{U_{\infty} D_n}{\nu} \quad (2)$$

式中 p_{∞} , U_{∞} , ρ , ν 和 p_v 分别为实验段上游 0.21m 处参考断面上的静压力、平均速度(速度剖面充分均匀)、水的密度、运动粘度和汽化压力,实验中,保持流速为 10m/s, 对应的雷诺数为 7×10^5 , 环境压力通过真空泵调节,以实现不同空化数的工况。

2 结果与讨论

2.1 空化对流场结构的影响

图6给出了当空化数为2.0(无空化)与空化数为0.8(云状空化)时,用PIV测速系统的CCD跨帧相机观察得到的水翼周围的典型粒子图像。实验中,由于激光的片光源从实验段底部射入,水翼将部分

激光挡住,因此水翼上方无激光照射,呈黑暗状态,测量断面是翼型纵向中截面。从图中可以看出,无空化与云状空化的流场形态存在明显的差异,当空化数为 0.8 时,水翼的整个吸力面几乎全部被白色水汽混合覆盖,绕水翼的空化流动会发生剧烈而有规则的周期性振动现象,从流动现象表现为水翼尾缘处空泡的强烈的非定常变化和空泡云的周期性脱落。

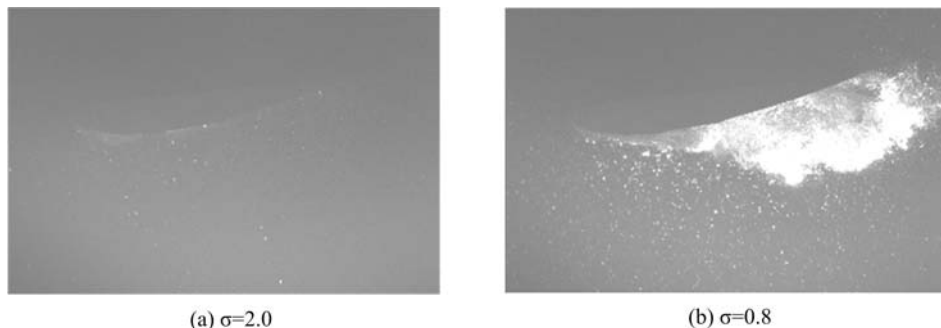


图 6 不同空化阶段流场粒子图像

Fig. 6 The particle images in different cavitation stage

为了说明空化对流场结构的影响,图 7 给出了在无空化与云状空化状态下的时均速度场与时均涡量场。图 7(a)、(b)分别给出了上述两种工况下的时均速度场,从图中可以看出,在两种工况下,水翼前缘的速度分布基本相同,其主要区别体现在水翼中后部,当 $\sigma=0.8$ 时,在水翼吸力面的中后部,会出现明显的低速区域,空化核心区域内的速度大约在 2.5m/s 左右,远小于主流速度。图 8(a)、(b)给出了在两种工况下,水翼周围的时均 z 向涡量分布,这里, z 向涡量定义为:

$$\omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3)$$

涡量来源于流场存在速度梯度,是描述有旋流动的一个运动学物理量,图 8(a)中,对应于自水翼前后缘开始剪切流所在的位置,出现了两个高涡量聚集区——涡带。上下涡带的涡量符号相反,说明两处的漩涡方向不同,而其它区域的漩涡特性并不明显,表现为涡量峰值较小。图 8(b)相应给出了在云状工况($\sigma=0.8$)下,空化流场的时均涡量分布情况,此时,水翼尾缘处大尺度空泡团的脉动脱落现象导致流场处于不稳定的状态,致使水翼尾缘处的漩涡特性得到发展,上下涡带随着空化区域的延伸而逐渐向后拉长,涡量聚集区由最初的涡带转化为大涡量团的分散分布情况,而且影响区域明显扩大,由此说明,空化产生与漩涡有明显的依赖关系,空化加剧了流场中的质量与速度交换,体现出更为明显的漩涡特性。

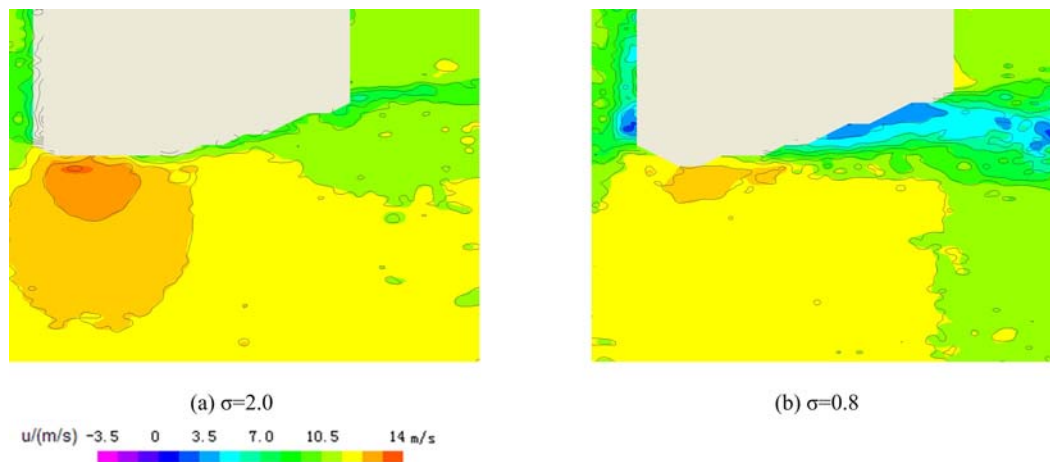


图 7 不同空化数下的时均速度分布

Fig. 7 The time-averaged velocity distribution under different cavitation number

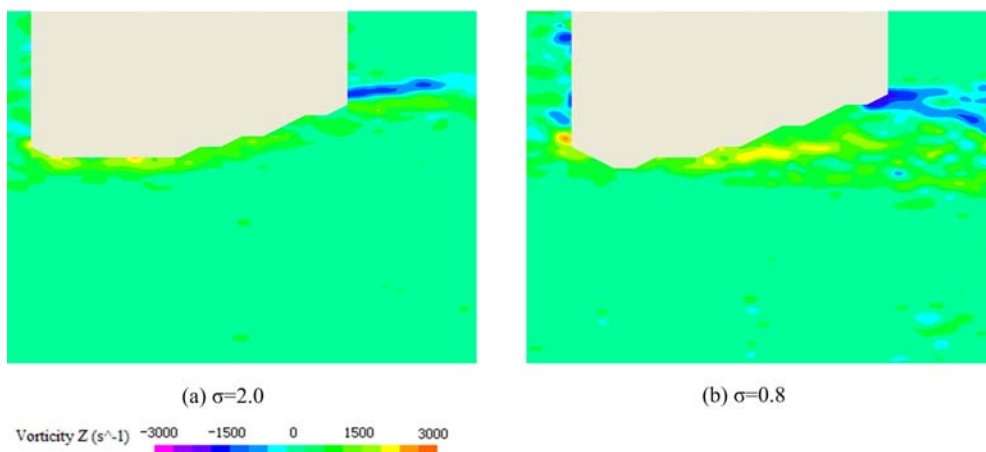


图8 不同空化数下的时均涡量分布

Fig. 8 The time-averaged vorticity distribution under different cavitation number

2.2 非定常空穴形态的发展过程

在大多数情况下,空化往往呈现出强烈的非定常流动特性。图9给出了当空化数 $\sigma=0.8$ 时,空穴形态随时间的变化情况,研究中,分别观察了流场侧视图和仰视图。为了更清晰描述空穴内部流场结构,图中标出了空穴内部流场的流动方向与漩涡的发展规律,在 $t=t_0+5\text{ms}$ 时刻,水翼前缘处形成透明状附着型汽相空穴,随后,该空穴处于持续的增长状态,在 $t=t_0+15\text{ms}$ 时刻,逐渐覆盖了水翼的整个吸力面,并开始在空穴尾部产生顺时针的空化漩涡。 $t=t_0+15\text{ms}\sim t=t_0+34\text{ms}$ 的发展过程为空化云的扩大阶段,在紧贴壁面的区域内诱导了一股指向上游的反向流动,该反向流动一直向上游运动,水翼尾部的水汽混相区域逐渐形成并扩大,而透明状的汽相空穴区域则逐渐减小。在空穴前缘附近,反向流动与主流相遇,两股流动方向相反的流动相互作用, $t=t_0+40\text{ms}$ 时刻,在空化流与主流的界面处,产生一速度为零的奇点,随即产生了漩涡脱落。从上面的分析可知:空穴尾部的漩涡运动本身导致了反向流的产生,而反向流动在空化流的前缘附近和主流的相互作用,造成了空化云的周期性脱落。

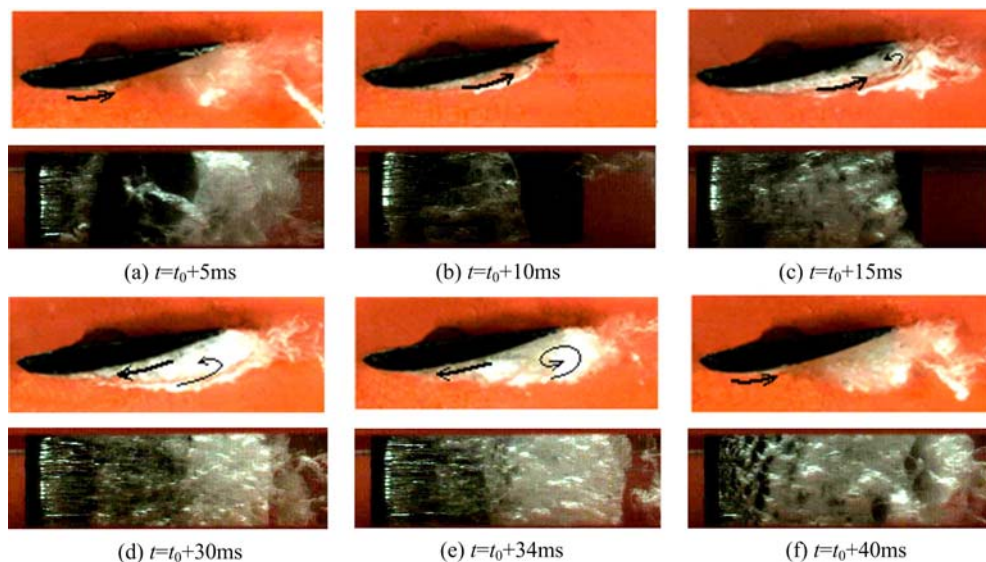


图9 空穴形态随时间的变化

Fig. 9 Time evolution of cavity shape in the experiment

为了对空穴形态进行定量描述,如图10所示,针对绕水翼空穴图像的特点,采用图像二值处理方法,对空穴界面以及水汽界面进行了提取,用以分析图像的边界和面积。图11给出了空化数 $\sigma=0.8$ 时,无量纲空穴面积 S/S_c (S 是空穴面积, S_c 是水翼剖面面积)随时间的变化曲线。对比图9的非定常空穴形态,从图10可以看出,空穴面积呈现明显的周期性变化,空穴面积的最小值接近零,最大值在

1.1 S_c 左右。图 12 给出了在上述工况下,不同翼弦处空化云的厚度随时间的变化,水翼中后部的空化云厚度要明显大于水翼前缘处的厚度,空化云的厚度随时间出现更大幅度的变化,并且,越往水翼的后部这种趋势越明显,厚度脉动的最大幅度发生在 80%与 100%的弦长位置处。由上面的分析可以看出,空穴形态存在强烈的非定常变化,这是云状空化之所以能导致结构的强烈振动和噪声的主要原因。



图 10 水翼空化流场图像处理

Fig. 10 Cavitation image processing

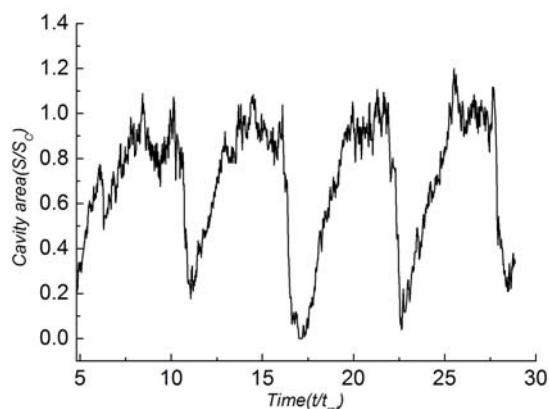


图 11 空泡长度随时间的变化

Fig. 11 Time evolution of cavity length

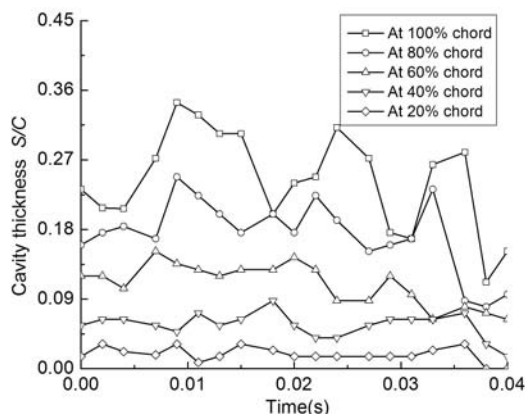


图 12 不同翼弦处空穴厚度随时间的变化

Fig. 12 Time evolutions of the thickness of cloud cavitation at different chord positions

2.3 非定常空化流场的 PIV 分析

为深入了解各阶段空穴发展过程对流场的影响,图 13 给出了在云状空化状态下($\sigma=0.8$),流场中速度及涡量分布随时间的变化情况。从图中可以看出,随着时间的推移,非定常空化流场的速度分布体现出明显的特征差异,空化区域内的速度分布与主流区有明显的不同,最低速度总是分布于空穴核心区域。在 $t=t_0+5\text{ms}$ 时刻,由图 9 可知,在水翼前缘处形成附着型空化,水翼尾部伴随着空泡团的脱落现象,此时,水翼吸力面前部始终存在一速度与主流区相近的区域,这部分区域对应于附着型汽相空穴区,低速区域依然集中于水翼中后部。此时,绕水翼的流场比较稳定,仅在水翼尾部存在小范围的高涡量区。随着空穴的发展,在 $t=t_0+15\text{ms}$ 时刻,空穴逐渐覆盖整个水翼吸力面,低速区的影响范围移动至尾流场,此区域对应于高涡量聚集区,流场中的漩涡特性得以加强。在 $t=t_0+30\text{ms}$ 时刻,对比相应的高速摄像图像可知,水翼尾部的空化漩涡运动更为剧烈,空化区域内的厚度及长度迅速增长,此时,低速区域的影响范围明显增大,在空化区域内也存在更为明显的涡团结构。从上面的分析可以看出:在非定常空化的不同发展阶段,空化流场结构体现出不同的特征,空化云的剧烈脱落造成了空化流场大范围的波动。

4 结论

非定常空化现象是目前水动力学研究的难点和热点之一,本文以 Clark-Y 水翼作为研究对象,采用高速摄像技术对非定常空穴形态进行了观察,并结合 PIV 测速系统,研究了非定常空化流动过程中的速度场和涡量分布,得到了以下结论:

(1) 空化现象的产生会对流场结构产生重要的影响,水翼中后部的低速高涡量区对应于空化核心区域。空化的产生加剧了流场中的质量与速度交换,体现出更为明显的漩涡特性。

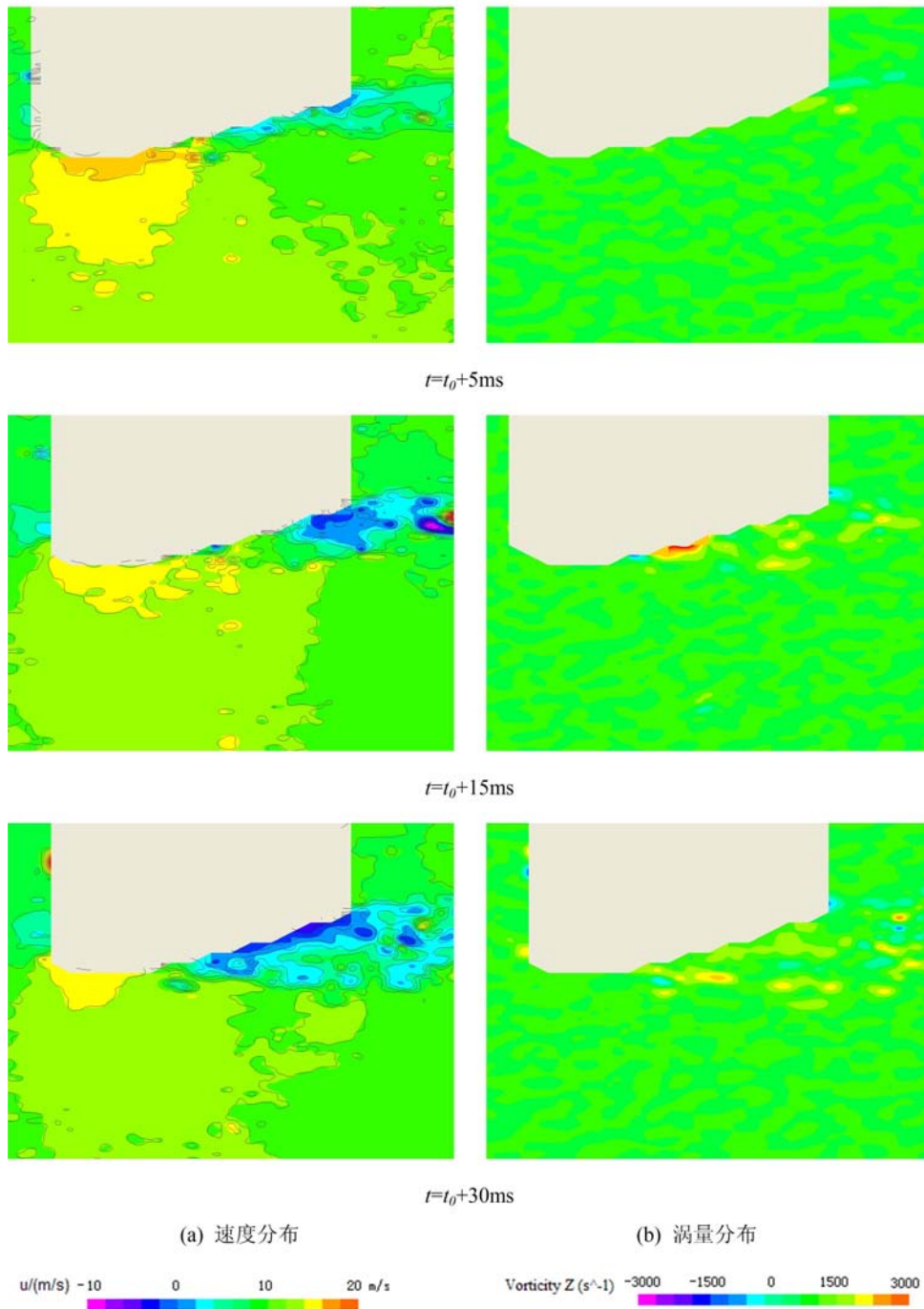


图 13 云状空化阶段的瞬时速度和涡量分布图

Fig. 13 Instantaneous velocity and vorticity distributions at the unsteady cloud-cavitation stage

(2) 非定常空化处于极不稳定的流动状态, 呈现出生成—生长—断裂—脱落准周期性过程。空穴尾部的漩涡运动本身导致了反向流动的产生, 而反向流动在空化流的前缘附近和主流的相互作用, 造成了空化云的周期性脱落。

(3) 空穴形态与流场结构存在高度的相关性, 水翼吸力面前部始终存在速度与主流区相近的区域, 该区域对应于附着型汽相区。流场中的低速高涡量区对应于水翼中的水汽混相区, 并随时间呈现强烈的非定常变化。

参考文献:

- [1] Utturkar Y, Wu J, Wang G, Shyy W. Recent Progress in Modeling of Cryogenic Cavitation for Liquid Rocket Propulsion[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2005, 41(7): 558—608.
- [2] Arakeri V H, Acosta A J. Viscous effects in the inception of cavitation on axisymmetric bodies[J]. Journal of Fluids Engineering, 1973, 95(4): 519—527.
- [3] Kubota A, Kato H, Yamauchi H, Maeda M. Unsteady structure measurement of cloud cavitation on a foil section using conditional sampling technique[J]. Journal of Fluids Engineering, 1989, 111(2): 204—210.
- [4] Le Q, Franc J P, Michel J M. Partial cavities: Global behavior and mean pressure distribution[J]. Journal of Fluids Engineering, 1993, 115(2): 243—248.
- [5] Kawanami Y, Kato H, Yamauchi H, et al. Mechanism and control of cloud cavitation[J]. Journal of Fluids Engineering, 1997, 119(4): 788—794.
- [6] 李向宾, 刘淑艳, 王国玉 等. 绕水翼空化流动速度分布的 DPIV 测量与分析[J]. 兵工学报, 2009, 3(30): 276—281 (Li Xiang-bin, Liu Shu-yan, Wang Guo-yu, et al. Digital Particle Image Velocimetry Measurement and Analysis of Velocity Distribution in Cavitating Flows Around a Hydrofoil[J]. Acta Armamentarill, 2009, 3(30): 276—281 (in Chinese))
- [7] Wang G, Zhang B, Huang B, Zhang M. Unsteady dynamics of cloudy cavitating flows around a hydrofoil. CAV2009, Paper No. 9, Proceedings of the 7th International Symposium on Cavitation, August 17-22, 2009, Ann Arbor, Michigan, USA.

Experimental Investigation on Flow Field Structure of Unsteady Cavitation Flow

HUANG Biao, WANG Guo-yu, WANG Fu-feng, GAO De-ming

(School of Mechanical and Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Flow field structure of unsteady cavitation flow around a Clark-Y type hydrofoil was experimentally investigated. Experiments were carried out in a rectangular test section of a cavitation tunnel. A high-speed video camera was used to visualize the unsteady cloud cavitation flow pattern, and a particle image velocimetry (PIV) was also used to measure instantaneous velocity field and vortex field in cavitation flow field around the hydrofoil. Experimental results show that cavitation phenomenon has an important effect on flow field structure; whether or not cavitation, the velocity distribution is basically same around the leading edge of hydrofoil, but there is noticeable difference at the rear part of hydrofoil. In the unsteady cloud cavitation state, water and vapor mixture phase locates at the rear part, velocity in this region is lower than that of main flow area, but the vortex is larger than that in other regions, which indicates that obvious vortex structures exist at the rear part. For cloud cavitation, a self-oscillatory periodic behavior of the whole sheet cavitation is obtained, with large length fluctuations and vapor cloud shedding. The distribution of vapor and vapor-water mixture phase determines the velocity and vortex distribution in cavitation area. When the attached cavity continues to grow, the region with lower velocity and high vortex at middle and rear parts of hydrofoil gradually expands. At the rear part of a cavitation development period, with the development of reverse flow, the flow field structure around hydrofoil is strongly unstable, and more vortex structures can be seen in the cavitation area due to the frequently mass and momentum transformation.

Keywords: unsteady cavitation; high-speed video camera; particle image velocimetry