

基于 DCMFBM 模型的轴流泵叶顶区云状空化脱落预测

张德胜 石磊 陈健 耿琳琳 刘俊龙

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘要: 为了深入研究轴流泵叶顶区云状空化非定常脱落过程,应用二次开发技术将基于密度修正的 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型的滤波器模型(Density correction method filter based model, DCMFBM))嵌入商业软件 ANSYS CFX 中进行数值模拟,并将模拟的结果与高速摄影试验作对比。数值模拟结果表明,DCMFBM 模型能够成功地预测叶顶区云状空化尾缘空穴的周期性脱落过程,与试验值吻合较好。随着叶片的转动,脱落的空穴向相邻叶片的压力面运动,运动过程中的破裂消失不仅影响了相邻叶片压力面载荷分布,同时会影响自身叶片吸力面载荷分布;由于轮毂与叶片的相互作用,形成了从轮毂到轮缘的径向射流,径向射流在运动到靠近叶顶区时,会冲击叶顶区空穴表面,造成叶顶区空穴的脱落,同时径向射流最终被叶顶泄漏涡吸收。

关键词: 轴流泵; 云状空化; 非定常脱落; DCMFBM 湍流模型; 高速摄影

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)08-0022-07

Prediction of Cloud Cavitation Shedding in Tip Region of Axial Flow Pump Based on DCMFBM Turbulence Model

Zhang Desheng Shi Lei Chen Jian Geng Linlin Liu Junlong

(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: A type of cavitation pattern named triangle cloud cavitation structure, which was formed by tip clearance cavitation, shear layer cavitation and tip leakage vortex cavitation, would cause some adverse effects on its shedding cavity at the trailing edge, such as diminished overall performance and efficiency, rotating instabilities, noise and vibration. Thus the mechanism of the phenomenon should be understood. For the sake of deeply studying the process of cloud cavitation shedding in the tip region of an axial-flow model pump, the filter-based model with modified density of RNG $k-\varepsilon$ turbulence model was embedded into the commercial software ANSYS CFX by the secondary development technology for simulation. Simultaneously, the homogenous cavitation model was also adopted to simulate the unsteady cavitating turbulent flows. Some significant results were summarized. The simulation results were compared with experimental values. It could be concluded that the simulation results were agreed well with experimental values by successfully predicting the periodic process of cloud cavitation shedding in the tip region with DCMFBM turbulence model. With the rotation of blade, the shedding cavity was migrated towards the pressure side of neighboring blade and affected the load distribution of the pressure side; meanwhile, it also had impact on its load distribution on the suction side. A radial jet from the hub to the rim was found near the exit of blade, when it reached the blade tip, it eventually impinged on the cavity surface near the wall, which caused the formation of an open cavity with shed bubbly clouds. Then it was entrained into the TLV, forming an unstable and noisy spiraling pattern, which would enhance the instabilities of the flow field in tip region. It was possible that hub vortices characterizing wing-body junctions might have also played a role.

Key words: axial-flow pump; cloud cavitation; unsteady shedding; DCMFBM turbulence model; high speed photography

收稿日期: 2015-08-21 修回日期: 2015-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479083)、江苏省优势学科建设工程项目、江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2015064-08)和江苏省重点研发计划项目(BE2015001-3)

作者简介: 张德胜(1982—),男,副研究员,博士生导师,主要从事流体机械理论与内部流动特性研究,E-mail: zds@ujs.edu.cn

引言

旋转机械、船用螺旋桨叶片以及其他水力设备的空化效应一直以来备受关注。很多相关研究证明了空化的破坏性^[1-2],学者们对于边界层附近空化现象进行了研究^[3-4],与叶顶泄漏流相关的空化就是其中之一。转子叶片的压力面与吸力面的压差迫使泄漏流流过叶片叶顶与转轮室壁面的区域,从叶顶区脱落环量被卷吸形成了对于叶片叶顶区流场影响很大的叶顶泄漏涡(TLV)。国内外很多学者对叶顶泄漏流与泄漏涡相关的湍动能和空化现象进行了研究^[5-7]。由于叶顶泄漏涡涡心固有的低压,旋转机械的空化初生通常伴随着涡结构^[8-10]。因为空化的发生影响了旋转机械的整体水力性能,深入地了解叶顶区空化机理能够为抑制叶顶泄漏涡空化提供基础。其中试验方法是研究叶顶泄漏涡空化最普遍的方法^[11-13]。但是由于试验设备不易安装、试验费用高、周期长以及拍摄难度等因素,研究的发展受到了限制。随着 CFD 技术的发展,数值模拟方法得到了广泛的应用^[14-15]。其中大涡模拟(Large eddy simulation, LES)方法最具有前景^[16-18]。但是大量的网格以及较长的收敛周期等因素给许多研究增加了难度。JOHANSEN 等^[19]结合 LES 思想和 RANS 模型的特点,建立了基于标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型的滤波器模型,对于捕捉流场的非定常特性,具有良好的效果。

为了建立轴流泵叶顶区非定常空化流的数值计算方法,本文基于密度修正的滤波器湍流模型,模拟某一模型轴流泵叶顶区空化流场结构,并捕捉云状空化脱落过程,通过与高速摄影试验结果的对比评价 DCMFBM 湍流模型在轴流泵叶顶区云状空化非定常脱落数值计算中的应用效果。

1 模型泵

1.1 几何模型及计算域

选取某一模型轴流泵为研究对象,参数为:叶轮直径 200 mm,额定流量 365 m³/h,额定扬程 3.02 m,额定转速 1 450 r/min,比转数 736;叶轮叶片数 $Z = 3$,导叶叶片数 $Z_d = 7$,叶顶间隙 $h_{tip} = 1$ mm。

研究对象几何模型建立的准确性直接决定数值模拟能否真实反映轴流泵内部流场的流动情况,将直接影响数值计算结果的可靠性。因此在 3D 构型过程中,考虑了轮缘与泵段内壁的间隙,叶轮与导叶段的轴向间隙等尺寸,以保证数值计算的结果尽可能接近真实情况。取泵进口到弯管出口的整个泵段作为流动数值模拟的计算域,包括进口段、叶轮段、

导叶段、支撑板以及出口段 5 部分,如图 1 所示。

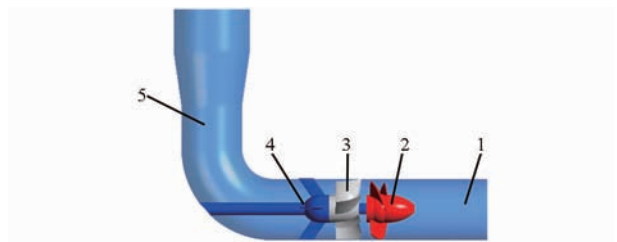


图 1 模型计算域

Fig. 1 Calculation domain of model

1. 进口段 2. 叶轮段 3. 导叶段 4. 支撑板 5. 出口段

1.2 网格划分

网格生成技术是 CFD 成功实现数值模拟的前提,网格质量的好坏直接影响到数值计算的收敛性及结果的精确性与可信度。而叶轮是轴流泵最核心的水力部件,其叶顶区的网格对于计算结果有着直接的影响。对整个水体计算域采用六面体结构化网格,叶轮采用“J”型拓扑,并在叶片附近采用“O”型网格布置边界层,在叶顶区布置 20 层网格,确保能够精确捕捉叶顶区的流场结构,叶轮网格如图 2 所示。

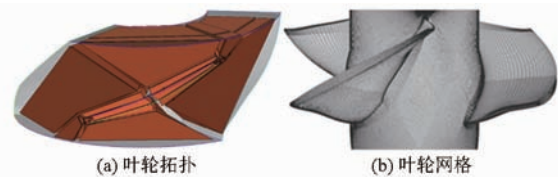


图 2 叶轮网格划分

Fig. 2 Impeller meshing

2 数值模拟计算方法

2.1 数值模拟方法

与基于标准 $k-\varepsilon$ 的 FBM 模型相比,基于 RNG $k-\varepsilon$ 的 FBM 模型考虑了各向异性,能够更好地求解具有大量旋涡运动以及高剪切率的流场。基于 RNG $k-\varepsilon$ 的 FBM 模型保持了 RNG $k-\varepsilon$ 模型中的输运方程不变,在湍动粘度中加入一个滤波函数 F ,但是这样又过高计算了气液混合区的湍流粘度,限制了空化的发展^[20-21]。考虑到气液混合相的可压缩特性,通过添加关于液相体积分数的密度函数 $f(n)$ 来减小湍流粘度,对 RNG $k-\varepsilon$ 模型的湍流粘度 μ_t 作修正,即

$$\mu_{t-mod} = \mu_t f(n) \tag{1}$$

其中
$$f(n) = \frac{\rho_v + \alpha_l^n (\rho_l - \rho_v)}{\rho_v + \alpha_l (\rho_l - \rho_v)}$$

式中 α_l ——液相体积分数

ρ_l ——液相密度, kg/m³

ρ_v ——气相密度, kg/m³

n ——修正系数

这样就得到了基于修正的 RNG $k-\varepsilon$ 的滤波器模型 (DCMFBM), 表达式为

$$\mu_{t-MFBM} = C_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon} F \tag{2}$$

其中 $F = \min \left(f(n), C_3 \frac{\Delta}{l_{RANS}} \right)$ $l_{RANS} = k^{3/2} / \varepsilon$

式中 Δ ——滤波尺寸, m

l_{RANS} ——湍流尺寸, m

ρ ——混合介质密度, kg/m³

其中 $C_3 = 1.0$, $C_\mu = 0.085$, 根据文献[22]的推荐值, $n = 10$ 对湍流粘度的修正效果较好。基于修正的 RNG $k-\varepsilon$ 的滤波器模型在水翼云状空化流动中得到了很好的验证^[23-24], 但是并未在轴流泵中应用, 本文将把这一湍流模型应用到轴流泵中, 验证其适用性。

2.2 边界条件设置

在进行非定常计算时, 空化模型采用 CFX 自带的 Zwart 空化模型, 同时为了与试验条件一致, 采用相对于一个大气压的总压进口, 同时设置进口处初始液相体积分数为 1, 气相体积分数为 0; 质量流量为出口边界条件; 为了使转轮室壁面相对于静态结构静止, 采用反向旋转壁面, 其他采用无滑移壁面; 域交界面采用 Transient rotor stator 形式。在计算时, 以旋转 0.5° 为一个时间步长, 一个时间步长的最大迭代步数为 20 步。考虑到非定常计算前期的不准确性, 故计算轴流泵旋转 6 周的时间, 且只对最后 1 周的计算结果进行分析。为了提高计算的收敛速度和精度, 以无空化结果作为非定常计算的初始值。在使用基于修正的 RNG $k-\varepsilon$ 的滤波器模型时, 滤波尺寸 Δ 的取值对于计算结果非常关键, 在本文中, 取叶顶区单元网格尺寸长度的最小值为滤波尺寸, 即 0.000 4 m。

3 试验装置及方法

高速摄影借助了光电同步装置, 利用光线被遮挡的瞬间, 引发电控信号, 通过电信号来控制快门的释放。本次高速摄影试验系统布置图如图 3 所示, 相机图片采集频率设置为 5 000 Hz, 曝光时间为 107 μs。试验中, 转轮室由有机玻璃制造, 形状外方内圆, 且折射率与清水相似, 叶轮表面涂黑, 用以吸收激光。



图 3 高速摄影布置图

Fig. 3 High speed photography setup

1. 补光片 2. 相机 3. 透明模型泵 4. 计算机采集系统

4 计算结果分析与讨论

4.1 湍流模型验证

图 4 为 RNG $k-\varepsilon$ 、FBM 以及 DCMFBM 湍流模型在弦长系数 $\lambda = 0.5$ 位置处的叶顶区平面涡粘度以及相对应的空间涡系示意图。定义弦长系数 $\lambda = S/C$, 其中 S 表示不同弦长位置, C 表示叶顶区翼型弦长。轴向距离指叶轮出口到叶轮进口的距离。径向系数 $r^* = 2r/D$ (r 为从轮毂到轮缘的不同位置, D 为转轮室直径)。轴向系数 $\gamma = 2Z_{imp}/D$ (Z_{imp} 为叶轮轴向距离)。从涡粘度分布可以看出, DCMFBM 湍流模型预测的轴流泵叶顶区涡粘度更小, 这样就会减少对湍流粘度的过度预测使涡难以脱落的情况, 提高了不稳定空化流的预测精度。图 4d ~ 4f 为

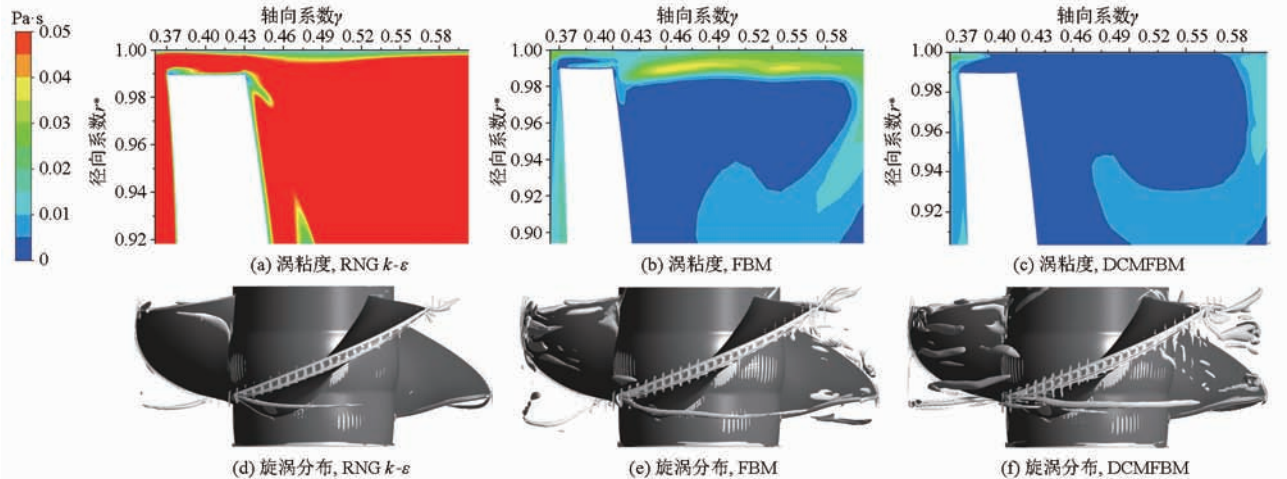


图 4 叶顶区涡粘度以及旋涡分布对比

Fig. 4 Comparisons of eddy viscosity and vortex distribution in tip region

利用旋涡强度法则^[5,25]显示的叶顶区三维涡结构分布图,旋涡强度等级为 0.035。从图中可以看出,DCMFBM 模型预测精度更高,叶顶泄漏涡涡带以及在叶片出口处的尾缘涡脱落更加明显,从而证明 DCMFBM 模型在预测不稳定涡脱落方面的适用性。

4.2 三维叶顶空化特性

图 5 是总时间内叶轮整体空泡体积随时间变化图。从图中可以看出,叶轮整体空泡体积随时间呈现周期性变化,这是由于云状空化尾部空泡的周期性脱落引起的空泡总体积变化,从而验证了 DCMFBM 模型可以很好地预测云状空化尾缘空泡脱落的特性。

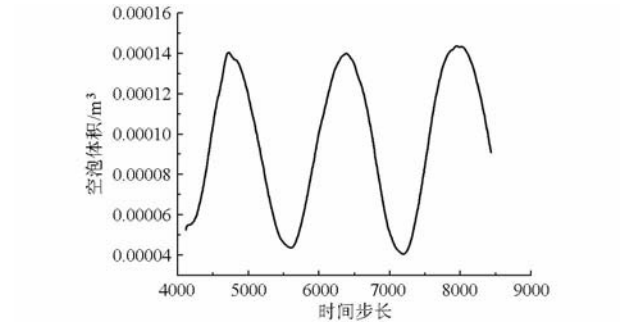


图 5 空泡总体积随时间的变化曲线
Fig.5 Time evolution scheme of total vapor volume

空化是显示涡轨迹的一种很方便的方法^[26]。在测试段中通过不断降低进口压力导致涡心的气化,使得涡轨迹可视化。图 6 是额定流量下气蚀余量 3.11 m 时叶顶区云状空穴瞬态变化过程,规定轴流泵旋转一周为 1 个周期 T ,取轴流泵旋转 $1/3$ 周

期的过程进行研究,即 $T_0 = T/3$,模拟得到的叶顶区空穴分布定义为空泡体积分数为 0.1 的空化等值面图,其中 PS 表示叶片压力面,SS 表示叶片吸力面。通过对比模拟和试验图可以看出,基于修正的 RNG $k-\varepsilon$ 的滤波器模型能够很好地得到轴流泵叶顶区云状空化非定常脱落的过程,与试验结果吻合较好。图 6 中所示 A 为三角形云状空化结构,它由叶顶泄漏涡空化、射流剪切层空化以及叶顶间隙空化组成。而 B 为不稳定云状空化结构,从试验图中可以看出,随着空化的发展,其不稳定区域不断向叶顶区前缘发展,导致三角形云状空化结构 A 在不断减小,同时可以看出在 B 的尾缘有大片的空穴脱落,如 C 所示。从模拟中可以看出,云状空化的脱落过程基本与试验相符,随着叶轮的转动,在云状空化的尾部有大片空穴脱落,脱落后空穴会向相邻叶片的压力面运动,如 D 所示,会严重阻塞流道,造成相邻叶片压力面的流动产生分离,同时脱落的大片空穴在运动过程中会突然减小并消失,只留下小片的空穴,如 E 所示,这种现象表明了泄漏涡的多重结构,由于涡心的振荡特性,没有一个确定的低压中心,而涡心的消失是由于逆压梯度引起的涡破裂^[12]。

图 7 为不同时刻叶片压力面与吸力面叶顶区的载荷分布。从图 7 可以看出,叶片叶顶区压力面由于受到相邻叶片脱落空穴的影响,其载荷分布不均匀,压力的脉动强度很大,当 $t = T_0/2$ 时刻,叶顶压力面载荷突然变得很大,特别是在弦长系数 $\lambda = 0.5$ 位置上,这是由于 $t = 2T_0/5$ 时刻脱落的空穴 D 靠近

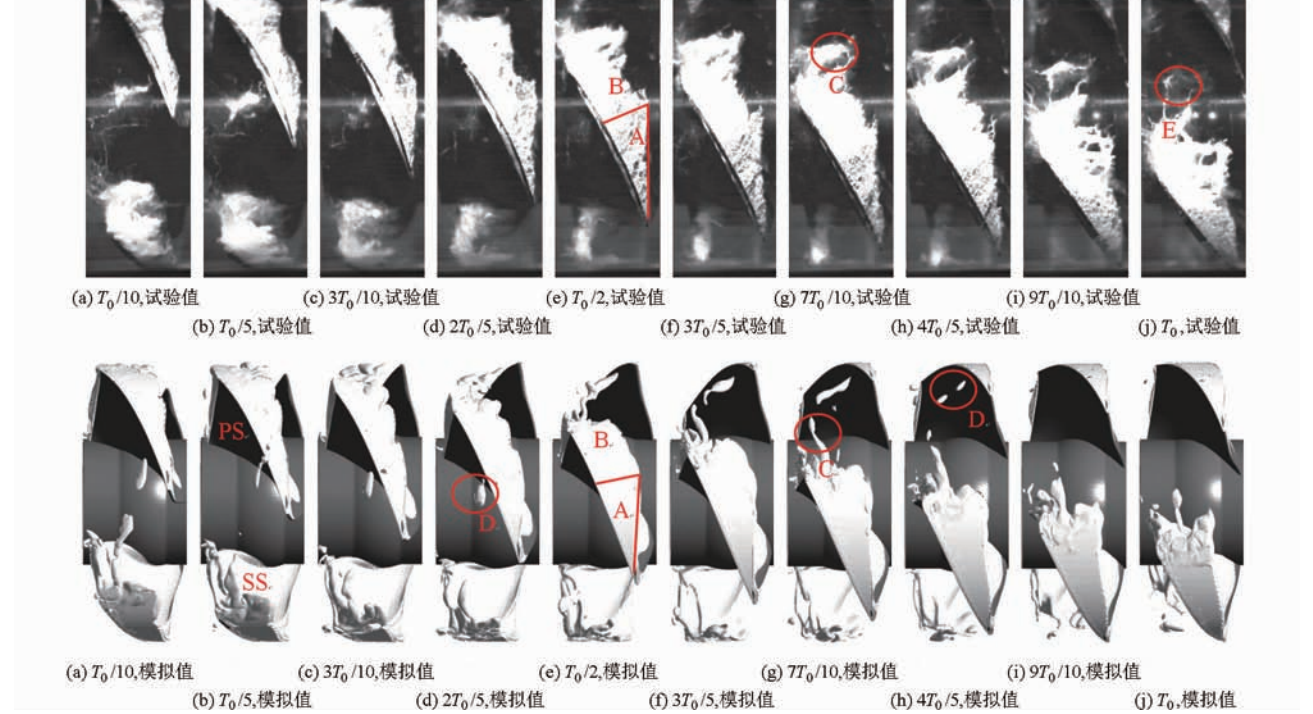


图 6 叶顶区云状空穴非定常脱落过程
Fig.6 Transient processes of cloud cavitation shedding in tip region

叶片压力面时突然破裂,造成的局部高压,如图6中所示。而叶片吸力面的载荷除了在叶片出口处波动比较大之外,在弦长系数 $\lambda = 0.1 \sim 0.3$ 时,吸力面载荷呈现上升的趋势,说明了空化初生的位置不是在叶顶区弦长系数 $\lambda = 0.1 \sim 0.3$ 处,随着气蚀余量的降低,这一区域的空化还会继续发展。而在弦长系数 $\lambda = 0.3 \sim 0.9$,吸力面载荷几乎不变,说明其得到了充分发展,这一区域很有可能是诱导空化初生处,随着弦长系数的增大,在弦长系数 $\lambda = 0.9 \sim 1.0$

处,叶片吸力面的载荷分布出现了很明显的波动, $t = 4T_0/5$ 时刻,吸力面载荷突然增大,从图6中可以看出,是 $t = 7T_0/10$ 时刻脱落的大片空穴突然破裂为小尺度空穴所引起的局部高压导致的。从上述可知,叶片脱落的空穴会对自身吸力面以及相邻叶片的压力面的载荷分布产生影响,造成叶片吸力面与压力面的压差变化,进而又进一步促进空化发展,这样形成了叶顶区空化的脱落—发展—再脱落的周期性特性。

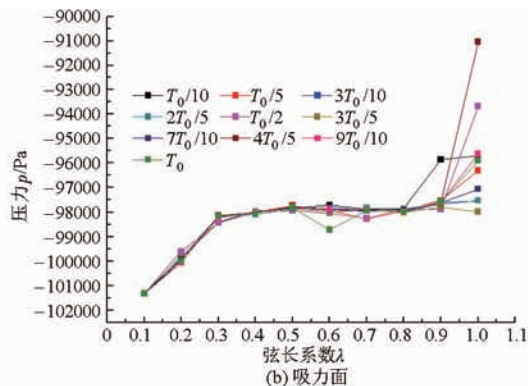
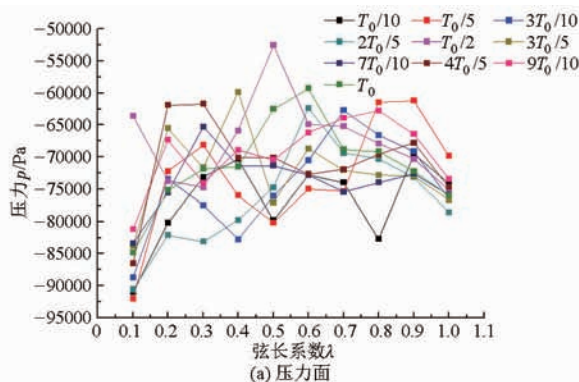


图7 不同时刻叶顶区载荷分布

Fig. 7 Load distributions in tip region at different times

4.3 二维叶顶空化特性

图8是不同时刻平面叶顶区涡空化结构示意图,通过固定一个平面,旋转叶片,得到了不同弦长系数断面上的空泡体积分数和速度矢量分布图,其中PS表示叶片压力面,SS表示叶片吸力面。图8a~8c的右图为相对左图的局部放大图。从速度矢量图可以看出泄漏流高速进入间隙,在靠近叶片吸力面处与主流卷吸形成泄漏涡。而由于泄漏涡涡心的低压,加上不断减小的进口压力,导致了叶顶区的涡空化现象。图中a表示在压力面拐角处由于流动分离形成的角涡空化,与之相连的为叶顶间隙空化,b为从叶顶以射流形式形成的剪切层空化,c为组成叶顶区空化初生的泄漏涡空化,三者共同构成了叶顶区云状空化结构,而在泄漏涡上游壁面产生了较大的空化区域e,这是由于壁面剪切层内高涡量导致的低压区生成的剪切层空化。从图8中 $t = T_0/5$ 可以看出,在叶片压力面上游流道内,尽管脱落的空穴已经离开这个位置,此处的流场仍然受到脱落空穴的影响,造成流线的弯曲。叶顶泄漏涡空化c紧贴着叶片吸力面,与叶顶泄漏涡空化相连的叶片背面的片状空化d在不断向轮毂方向发展。随着空化的发展,当 $t = 2T_0/5$ 时,脱落的空穴f已经到达叶片的压力面,造成了流道内流动的不稳定性,由于叶顶泄漏涡空化的发展,剪切层空化在轴向位置上不断被拉长,同时片状空化几乎已经发展到了轮毂位置,且

在轴向位置上不断加厚。同时与叶顶泄漏涡空化相连的转轮室壁面剪切层空化在此时也得到了发展。在下一时刻,壁面剪切层空化已经完全与叶顶泄漏涡空化分开,表明叶顶泄漏涡运动的空间特性,吸收了壁面剪切层的高涡量后,逐渐远离壁面,径向距离变大。在图8d中,平面到达叶片出口边,由于空穴的脱落造成了此处流场的不稳定,靠近叶片吸力面处,发现有从轮毂到轮缘的由于轮毂与叶片的相互作用形成的径向射流g,它会撞击壁面附近的空穴表面,造成叶顶区开式空穴的形成,导致空穴的脱落,同时其最终会被泄漏涡吸收^[27]。当到达图8e时,平面已经离开了叶片表面,此处叶片间的流道受到脱落空穴的影响较大,形成了很多小尺度的漩涡。

5 结论

(1) 利用 DCMFBM 湍流模型对轴流泵叶顶区云状空化非定常脱落进行了模拟。模拟结果与试验吻合较好,成功地预测了叶顶区云状空化尾缘空穴的周期性脱落。

(2) 叶顶云状空化尾缘空穴脱落后向相邻叶片的压力面运动,运动过程中的突然破裂消失造成了相邻叶片压力面载荷的突然增大,同时也会使自身叶片吸力面的载荷突然增大,造成叶片吸力面与压力面的压差变化,从而构成了叶顶区空化的周期性变化。

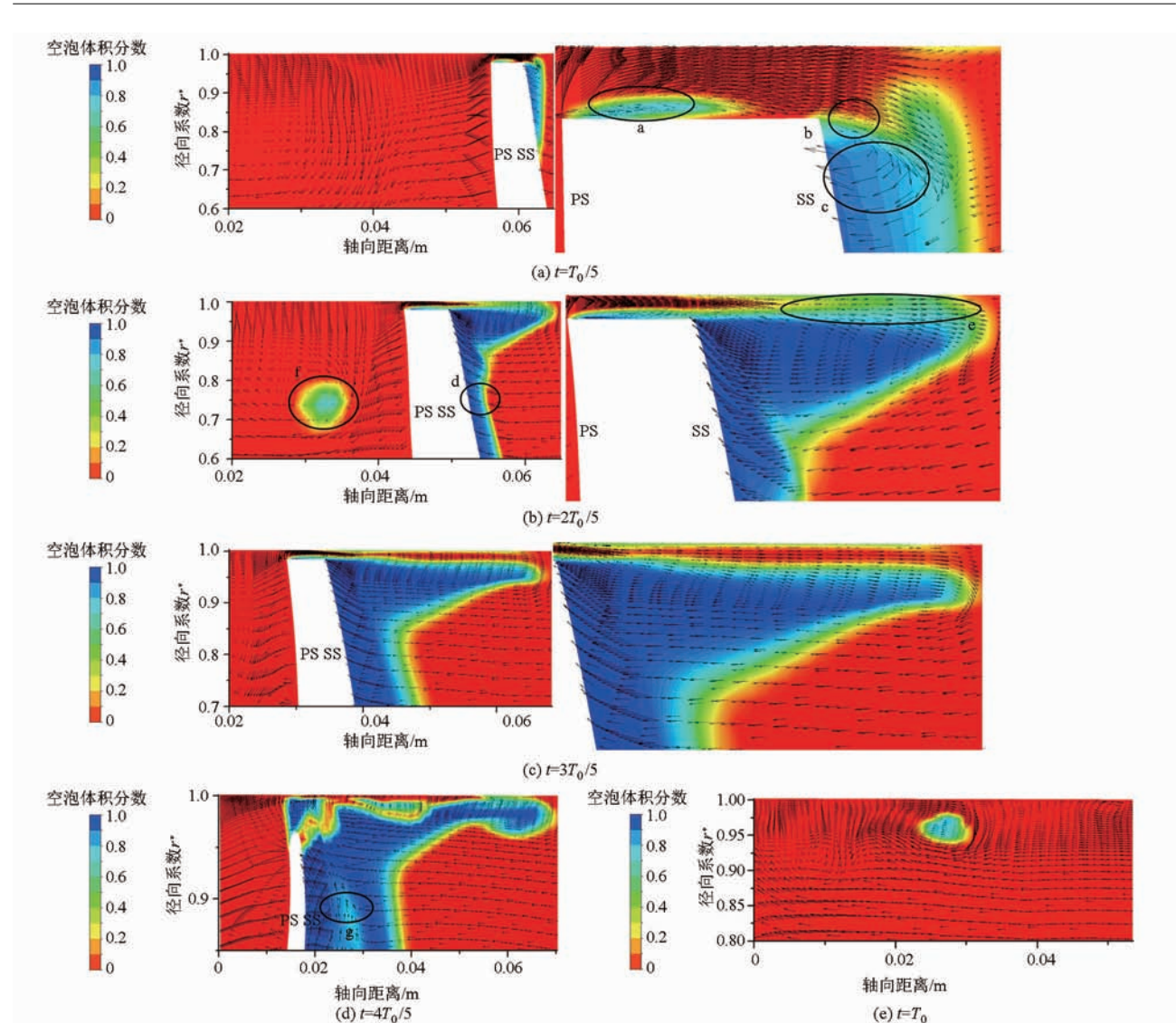


图 8 不同时刻平面涡空化结构

Fig. 8 In-plane vortex cavitation structure at different times

(3)从空化发展来看,叶片吸力面表面的片状空穴沿轴向方向的厚度和翼展方向的长度在不断增加,同时发现在叶片出口处,由于轮毂与叶片相互作用形成的从轮毂向轮缘的径向射流,会冲击叶顶区空穴的表面,造成空穴的脱落,且其最终被叶顶泄漏涡吸收。

参 考 文 献

- 1 BENJAMIN T B, ELLIS A T. The collapse of cavitation bubbles and the pressures thereby produced against solid boundaries[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science, 1966, 260(1110): 221 – 240.
- 2 CHAPMAN R B, PLESSET M S. Nonlinear effects in the collapse of a nearly spherical cavity in a liquid[J]. Journal of Fluids Engineering, 1972, 94(1): 142 – 145.
- 3 YU Xianjun, LIU Baojie, LIANG Haokang. Characteristics of the tip leakage vortex in a low-speed axial compressor[J]. AIAA Journal, 2007, 45(4): 870 – 878.
- 4 梁开洪,张克危,许丽. 轴流泵叶顶间隙流动的计算流体动力学分析[J]. 华中科技大学学报,2004,32(9): 36 – 38. LIANG Kaihong, ZHANG Kewei, XU Li. Analysis of the flow through the blade tip clearances of axial pumps by CFD[J]. Journal of Huazhong University of Sci. & Tech., 2004, 32(9): 36 – 38. (in Chinese)
- 5 ZHANG Desheng, SHI Weidong, van ESCH B P M B, et al. Numerical and experimental investigation of tip leakage vortex trajectory and dynamics in an axial flow pump[J]. Computers & Fluids, 2015, 112: 61 – 71.
- 6 张德胜,施卫东,张华,等. 轴流泵叶轮端壁区流动特性数值模拟[J]. 农业机械学报,2012, 43(3): 73 – 77. ZHANG Desheng, SHI Weidong, ZHANG Hua, et al. Numerical simulations of flow field characteristics in tip clearance region of axial-flow impeller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 73 – 77. (in Chinese)

- 7 张德胜,邵佩佩,施卫东,等.轴流泵叶顶泄漏涡流体动力学特性数值模拟[J].农业机械学报,2014,45(3):72-76.
ZHANG Desheng, SHAO Peipei, SHI Weidong, et al. Numerical simulation of tip leakage vortex hydrodynamics characteristics in an axial flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 72-76. (in Chinese)
- 8 GOPALAN S, ABRAHAM B M, KATZ J. The structure of a jet in cross flow at low velocity ratios[J]. Physics of Fluids, 2004, 16(6): 2067-2087.
- 9 ZHANG Desheng, SHI Weidong, PAN Dazhi, et al. Numerical and experimental investigation of tip leakage vortex cavitation patterns and mechanisms in an axial flow pump[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2015, 137(12): 121103-1-121103-14.
- 10 ZHANG Desheng, PAN Dazhi, SHI Weidong, et al. Study on tip leakage vortex in an axial flow pump based on modified shear stress transport $k-\omega$ turbulence model[J]. Thermal Science, 2013, 17(5): 1551-1555.
- 11 WU H, SORANNA F, MICHAEL T, et al. Cavitation in the tip region of the rotor blades within a waterjet pump[C]//ASME Fluids Engineering Conference, 2008, 8: 10-14.
- 12 TAN D Y, MIORINI R L, KELLER J, et al. Flow visualization using cavitation within blade passage of an axial waterjet pump rotor[C]//ASME 2012 Fluids Engineering Division Summer Meeting, 2012: 395-404.
- 13 WU H, SORANNA F, MICHAEL T, et al. Cavitation visualizes the flow structure in the tip region of a waterjet pump rotor blade [C]//27th Symposium on Naval Hydrodynamic, 2008, 2: 1013-1022.
- 14 杨昌明,陈次昌,王金诺,等.轴流泵端壁间隙流动特性的数值研究[J].机械工程学报,2003,39(9):49-51.
YANG Changming, CHEN Cichang, WANG Jinnuo, et al. Numerical study for behavior of tip clearance flow in axial-flow pump [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(9): 49-51. (in Chinese)
- 15 施卫东,张华,张德胜,等.不同叶顶间隙下的轴流泵内部流场数值计算[J].排灌工程机械学报,2010,28(5):374-377.
SHI Weidong, ZHANG Hua, ZHANG Desheng, et al. Numerical simulation of internal flow field in axial-flow pump with different blade tip clearance sizes[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(5): 374-377. (in Chinese)
- 16 YOU D, WANG M, MOIN P, et al. Study of tip-clearance flow in turbomachines using large-eddy simulation[J]. Computing in Science & Engineering, 2004, 6(6): 38-46.
- 17 张德胜,石磊,陈健,等.基于大涡模拟的轴流泵叶顶泄漏涡瞬态特性分析[J].农业工程学报,2015,31(11):74-80.
ZHANG Desheng, SHI Lei, CHEN Jian, et al. Analysis on transient characteristics of tip leakage vortex in axial flow pump using large eddy simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11): 74-80. (in Chinese)
- 18 黎耀军,沈金峰,刘竹清,等.轴流泵轮缘间隙非定常流动的大涡模拟[J].农业机械学报,2013,44(1):113-118.
LI Yaojun, SHEN Jinfeng, LIU Zhuqing, et al. Large eddy simulation of unsteady flow in tip region of axial-flow pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 113-118. (in Chinese)
- 19 JOHANSEN S T, WU J, SHYY W. Filter-based unsteady RANS computations[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2004, 25(1): 10-21.
- 20 时素果,王国玉,黄彪.绕栅中水翼空化流动的数值和实验研究[J].力学学报,2011,43(3):625-629.
SHI Suguo, WANG Guoyu, HUANG Biao. The structure analysis about the cavitating flow around the cascade hydrofoil by numerical and experimental study[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2011, 43(3): 625-629. (in Chinese)
- 21 余志毅,时素果,黄彪,等.FBM模型在栅中翼型空化流动计算中的应用[J].工程热物理学报,2010,31(5):777-780.
YU Zhiyi, SHI Suguo, HUANG Biao, et al. Application of the FBM model for the computations of cavitation flow around a cascade hydrofoil[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(5): 777-780. (in Chinese)
- 22 COUTIER-DELGOSHA O, FORTES-PATELLA J L. Evaluation of the turbulence model influence on the numerical simulations of unsteady cavitation[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2003, 125(1): 38-45.
- 23 张博,王国玉,张淑丽,等.修正的RNG $k-\varepsilon$ 模型在云状空化流动计算中的应用评价[J].北京理工大学学报,2008,28(12):1065-1069.
ZHANG Bo, WANG Guoyu, ZHANG Shuli, et al. Evaluation of a modified RNG $k-\varepsilon$ model for computations of cloud cavitation flows[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2008, 28(12): 1065-1069. (in Chinese)
- 24 张博,王国玉,黄彪,等.云状空化非定常脱落机理的数值与实验研究[J].力学学报,2009,41(5):651-659.
ZHANG Bo, WANG Guoyu, HUANG Biao, et al. Numerical and experimental study on unsteady shedding mechanisms of cloud cavitation[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2009, 41(5): 651-659. (in Chinese)
- 25 WU H, MIORINI R L, KATZ J. Measurements of the tip leakage vortex structures and turbulence in the meridional plane of an axial water-jet pump[J]. Experiments in Fluids, 2011, 50(4): 989-1003.
- 26 CHANG N A, YAKUSHIJI R, DOWLING D R, et al. Cavitation visualization of vorticity bridging during the merger of co-rotating line vortices[J]. Physics of Fluids, 2007, 19(5): 058106.
- 27 LABERTEAUX K R, CECCIO S L. Partial cavity flows. Part 2. Cavities forming on test objects with spanwise variation[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2001, 431: 43-63.