

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.017

叶顶形状对轴流泵空化性能的影响*

施卫东 吴苏青 张德胜 姚捷 程成

(江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘要: 轴流泵叶轮与转轮室之间间隙内的泄漏流动与主流相互掺混形成的泄漏涡是导致轴流泵叶顶空化的重要原因。为研究合适的叶顶形状来控制 and 改善叶顶泄漏空化, 通过高速摄影空化试验, 比较了试验结果和数值计算结果, 验证了本次数值计算的正确性。再在原始平面叶顶方案的基础上, 通过数值计算, 分别研究了3种叶顶形状(倒圆叶顶、斜切叶顶以及倒圆斜切叶顶)对轴流泵叶顶空化的影响。叶轮水体采用结构网格划分, 以便精确捕捉间隙区域的流场特性。结果表明: 倒圆叶顶和倒圆斜切叶顶方案的扬程和效率都有所下降, 但斜切叶顶有所升高。虽然倒圆叶顶消除了角涡空化, 但泄漏涡空化加剧; 而斜切叶顶得到的结果却与之相反, 且斜切叶顶的间隙内会有漩涡空化产生; 相比之下, 倒圆斜切叶顶的角涡空化和泄漏涡空化都得到了较好的控制。根据研究结果, 建议在满足外特性性能要求的情况下, 采用倒圆斜切叶顶方案可以较好地控制轴流泵的叶顶空化。

关键词: 轴流泵 空化 叶顶形状 空泡分布 叶顶泄漏涡

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)09-0101-06

引言

在轴流泵中, 叶片轮缘与端壁的相对运动以及叶顶间隙前后压差作用产生了叶顶泄漏流, 其与叶片吸力面的主流相交形成叶顶泄漏涡(Tip leakage vortex, TLV), 泄漏涡是导致轴流泵叶顶空化的重要原因^[1-2]。1954年, Rain^[3]建立了间隙流动模型, 该模型不能计算流场的微观流动结构。Wu和Miorini R等^[4-6]用丙烯酸材料制成全透明泵段, 碘化钠溶液作为工作介质, 利用PIV技术清晰地观测了叶片间隙区域的空化现象, 发现了空化随着泄漏流发展的变化规律。李忠^[7-8]运用高速摄影研究了某比转速轴流泵的间隙空化特性, 捕捉到空化发生位置和空泡团形态随空化程度变化的演变过程。吴光焱等^[9]基于完整空化模型和混合流体两相流模型, 模拟了轴流泵叶轮内空化流动, 并用高速摄像机对叶轮内的空化流进行了拍摄, 试验结果与数值模拟结果吻合较好。为了降低叶顶间隙空化, 国内外学者对涡轮叶栅的叶顶形状已有广泛的研究^[10-11], 轴流泵叶顶区流场的研究已取得了一定的研究进展^[12-14], 但关于叶顶形状的研究却只有在透平机械中有所涉及^[15-20]。

为了研究轴流泵内不同叶顶形状对间隙泄漏流

和空化性能的影响, 本文以南水北调同台试验模型(编号TJ-ZL-02)的等比例缩放泵作为研究对象, 以试验结果验证为前提, 通过数值计算的手段, 分析比较4种方案叶顶形状下(平面叶顶、倒圆叶顶、斜切叶顶以及倒圆斜切叶顶)轴流泵的泄漏涡特性和空化性能。

1 数值模拟

1.1 模型泵的主要参数

选比转数 $n_s = 700$ 的南水北调同台试验模型泵, 额定转速 $n = 1450$ r/min, 额定流量 $Q = 392$ m³/h, 叶轮直径 $D_2 = 200$ mm, 叶轮叶片数 $Z = 5$, 导叶叶片数 $Z' = 7$, 叶顶间隙 $\delta = 1$ mm。如图1所示。

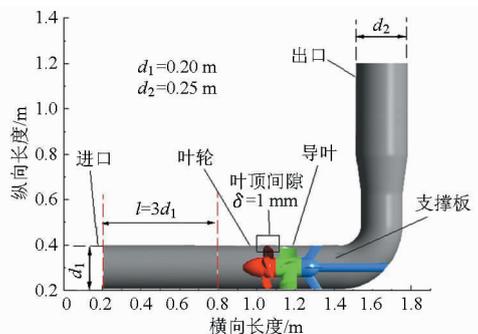


图1 模型泵三维图

Fig. 1 Pump model

收稿日期: 2013-08-05 修回日期: 2013-09-16

* 国家自然科学基金资助项目(51109093, 51079063)、江苏省自然科学基金资助项目(BK2011503)、中国博士后科学基金特别资助项目(2012T50468)和江苏省333高层次人才培养工程资助项目

作者简介: 施卫东, 研究员, 博士生导师, 主要从事流体力学及工程研究, E-mail: wdshi@ujs.edu.cn

1.2 数值模型的选择

物理模型采用混合流体的连续性方程和时均雷诺 N-S 动量方程,并采用 SST $k-\omega$ 模型作为湍流模型,多相流模拟采用匀相多相流模型,即汽液两项具有相同的流场和速度场。空化模型采用基于 Rayleigh Plesset 方程的 Zwart-Gerber-Belamari 模型。

全相单位体积质量传输速率

$$\dot{m}_{fg} = F \frac{3r_{nuc}(1-r_g)\rho_g}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|p_v - p|}{\rho_f}} \operatorname{sgn}(p_v - p) \quad (1)$$

式中 F ——经验系数

r_{nuc} ——汽核初始体积分率

r_g ——空泡体积分率

R_B ——汽泡半径 p_v ——汽化压力

p ——空泡周围液体的压力

ρ_g ——气体密度 ρ_f ——液体密度

1.3 网格划分和边界条件

本文验证计算时为了与试验时的情况一致,故取全流场为计算域。而在研究叶顶形状时,假设叶轮内部流场为周期对称,从而选取叶轮内一个流道为研究对象。采用 ICEM 软件对叶轮旋转计算域进行六面体网格划分,采用 J 型拓扑,并在叶片附近用 O 型网格布置边界层,叶轮总网格数约为 280 万。由于空化余量(NPSH)与泵的进口压力密切相关,因此在计算过程中采用压力进口和质量流量出口的边界条件。在空化条件下,进口空泡相体积分率设为 0,液相体积分率设为 1,如图 2 所示。

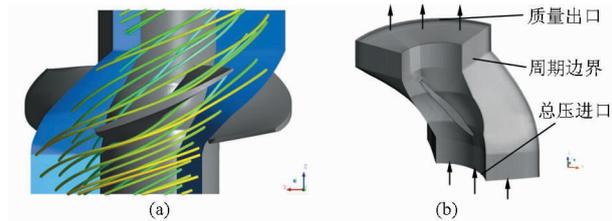


图 2 叶轮水体结构网格图

Fig. 2 Structural mesh of impeller domain

(a) 单流道示意图 (b) 单流道区域结构网格

1.4 计算方法

基于 ANSYS CFX13.0 软件平台,采用有限体积方法对方程组进行离散。在离散过程中,对流项采用高分辨率格式,其他项采用中心差分格式。分别对 4 种方案叶顶形状,即原始的平面叶顶(plane tip, PT)、倒圆(rounding tip, RT)、斜切(chamfered tip, CT)^[10]以及倒圆斜切(rounding chamfered tip, RCT)进行数值模拟,其中倒圆半径 R 为 2 倍的叶顶间隙尺寸, $R=2\text{ mm}$ ^[21],如图 3 所示。

在计算空化过程中,用非空化条件下的计算结果作为空化计算的初始条件。计算不同进口压力下的流场,得到 4 种不同叶顶形状空化余量下的空化特性。

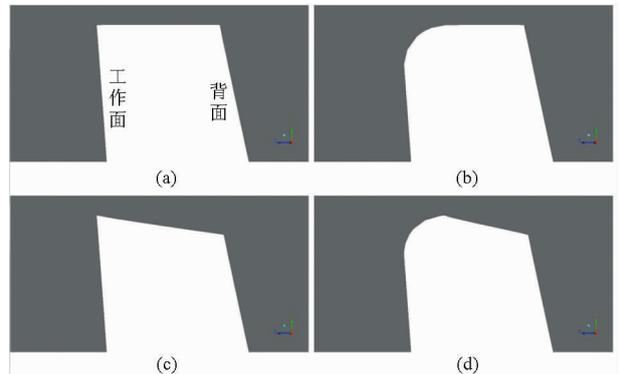


图 3 4 种叶顶形状

Fig. 3 Four kinds of tip shape

(a) 平面叶顶 PT (b) 倒圆叶顶 RT

(c) 斜切叶顶 CT (d) 倒圆斜切叶顶 RCT

2 结果及分析

2.1 数值模拟结果与试验结果的验证

在额定工况下,模拟计算原始模型泵全流场的空化性能,将数值模拟得到的结果与高速摄影试验结果比较。高速摄影试验在江苏大学 $\Phi 250\text{ mm}$ 轴流泵不锈钢闭式试验台上进行。试验装置主要由稳压罐、汽蚀罐、真空泵、进出口测压管、增压泵、涡轮流量计、转速转矩仪、调节阀和模型泵等组成,如图 4 所示。



图 4 高速摄影试验台

Fig. 4 High-speed photograph test platform

1. 补光灯 2. 透明模型泵 3. 高速摄影机

在额定工况,即 $n=1450\text{ r/min}$, $Q=392\text{ m}^3/\text{h}$, 取 3 个 NPSH 下的空化情况作为比较,随着 NPSH 的降低,空泡的分布将计算结果与试验照片相比较,两者能较好的吻合,如图 5 所示;将测到的空化曲线与计算得到的结果相比较,曲线趋势一致,计算所得的空化性能优于试验结果,如图 6 所示。因为数值计算基于空化模型,没有考虑当地温度、空化核等实

际的因素,得到了空化性能偏高的现象是可以接受的。可见上述空化试验结果保证了本次数值模拟结果的准确性。

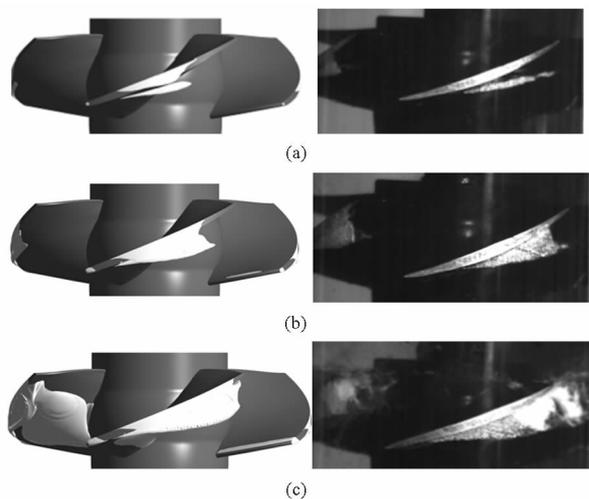


图 5 计算结果与高速摄影试验的对比

Fig. 5 Comparison between experiment cavitation and simulation cavitation

(a) NPSH 为 4.72 (b) NPSH 为 3.83 (c) NPSH 为 2.82

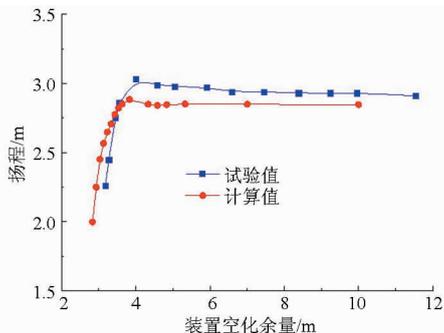


图 6 全流场的空化曲线与试验结果的对比
Fig. 6 Comparison between experiment results and simulative total flow field results

2.2 不同叶顶形状下的数值计算与分析

(1) 不同叶顶形状下的外特性对比

如 1.3 节所述,取叶轮内的一个流道为研究对象,对 4 种方案做外特性分析,计算出不同流量工况下的扬程-流量、效率-流量特性曲线以及空化特性曲线,如图 7 所示。

从图 7a 中可以看到,叶片顶端采用不同的形状处理后,扬程和效率均有不同的变化。采用平面叶顶、倒圆叶顶以及斜切叶顶 3 种方案的扬程和效率特性变化不大,相对于平面叶顶的方案来说,倒圆叶顶方案略有下降而斜切叶顶方案略有升高。倒圆叶顶改善了间隙内的流场,但由于增加了泄漏量,使泵性能有所下降;而斜切叶顶能降低泄漏速度,且不会增加泄漏量。倒圆斜切叶顶方案扬程和效率下降的非常明显,尤其表现在小流量工况下。具体内流场分析将在下一节进一步分析。

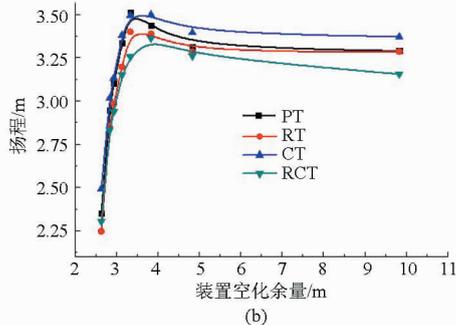
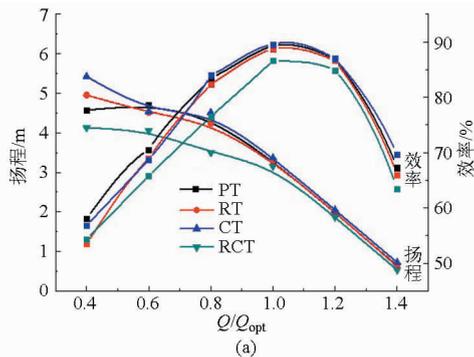


图 7 4 种方案的外特性曲线

Fig. 7 External characteristics of four schemes

(a) 扬程、效率与流量特性曲线 (b) 空化特性曲线

图 7b 所示为额定流量工况下,4 种方案的空化特性曲线,装置空化余量 NPSH 为 $\frac{p_{in}}{\rho g} + \frac{v_{in}^2}{2g} - \frac{p_v}{\rho g}$ 。其中, p_{in} 为进口绝对压力, Pa; v_{in} 为进口速度, m/s; p_v 为水的汽化压力, 取 3 574 Pa。

4 种方案总体表现为随着 NPSH 的降低扬程逐渐降低,且在最终的断裂工况出现之前泵的扬程出现升高,这种升高是由于叶面空穴空化的发展形成的^[22]。取扬程下降 3% 时的空化余量称为临界空化点 NPSH_c,分别得到 4 种方案的 NPSH_c,见表 1。

表 1 不同方案额定流量工况下的性能参数

Tab. 1 Performance parameters under different flow conditions

参数	方案			
	PT	RT	CT	RCT
扬程/m	3.29	3.29	3.37	3.16
效率/%	89.30	88.76	89.56	86.62
NPSH _c /m	3.02	3.10	3.07	2.97

从表 1 可以看到,3 种叶顶形状下的 NPSH_c 都较原始方案有不同程度的变化。RT 方案较原先的 NPSH_c 大约升高了 2.7%,空化性能最差;CT 方案较原方案升高了 1.7%;而 RCT 方案的空化性能较其他 3 种方案要好,且与 PT 方案比较降低了 1.6%。可见 RCT 方案在扬程效率方面表现不佳,但在空化性能方面却有所提高。

从外特性的角度考察 4 种方案的空化性能较粗

糙,下面对内流场的涡量场和空泡分布情况进行深入的分析。

(2)不同叶顶形状下的内流场分析

取经过叶片弦长中间位置的轴截面为研究对象,比较4种方案在额定流量工况下的间隙处流场的平面涡量和空泡分布。其中平面涡量为中间弦长断面上的二维涡量,空泡分布是NPSH为4.83m时叶顶空化情况。图8为4种方案的平面涡量等值线,涡量正值表示方向垂直于平面向外。比较图8a、8b发现,叶顶工作面处的修圆处理大大降低了该处角涡的大小,改善了间隙内的流动情况,如图中A处。但由于增加了泄漏量,使从间隙泄漏处的

流体以更快的速度进入主流,形成较大的脱离涡和泄漏涡,如图中B处和C处。比较图8a、8c得出,叶顶向背面斜切后,泄漏流绕过工作面进入间隙,泄漏速度在径向上有分量,使角涡更加明显,影响的范围更大,但B处的脱离涡消失,且间隙的宽度不断地增加,从工作面往背面泄漏的速度减慢,泄漏涡的范围在轴向和径向上较PT方案明显减小。综合两者的RCT方案可以看出,泄漏量增加和间隙宽度不断地增加,导致了泄漏涡在轴向范围的减小,且涡量大小也有所降低。综上所述,RCT方案既消除了A处的角涡和B处的脱离涡,同时降低了泄漏涡的大小和范围。

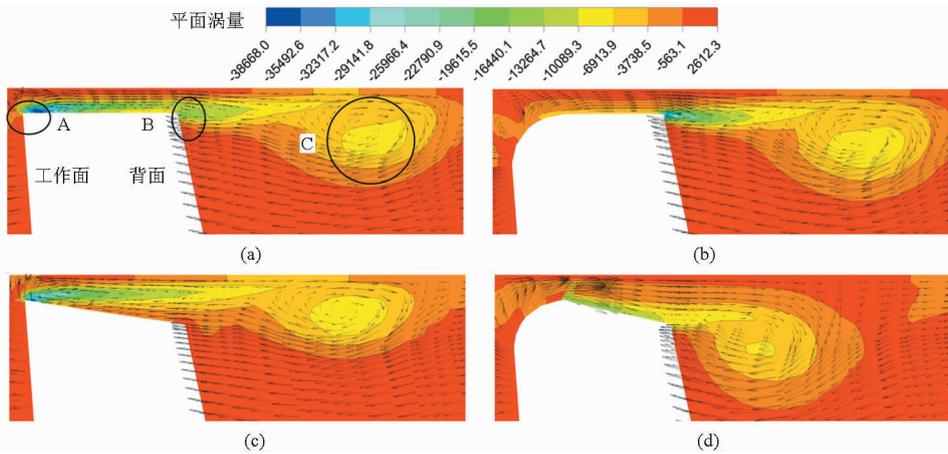


图8 平面涡量等值线

Fig.8 In-plane vorticity contour

(a) 平面叶顶 PT (b) 倒圆叶顶 RT (c) 斜切叶顶 CT (d) 倒圆斜切叶顶 RCT

图9所示为弦长中截面的空泡体积分数等值线,标尺范围为0~1。从图9a、9b中可以得到,只修圆工作面处的叶顶,可以降低叶顶间隙内的空化,但是由上文的分析知道,RT方案较大的泄漏涡量导致了更严重的泄漏涡空化。比较图9a、9c可以看出,斜切叶顶后角涡空化和间隙内部的空化更

加严重,但间隙内由于泄漏涡量的减弱,泄漏涡诱导的空化降低。而RCT方案的角涡空化较CT方案大大降低,但是流体绕过圆角后,倾斜的叶顶使流体分离形成旋涡。与RT方案比较,泄漏涡空化的程度和影响范围都有所降低,但与PT方案比较后发现,斜切的形状会增加间隙内的空化情况。

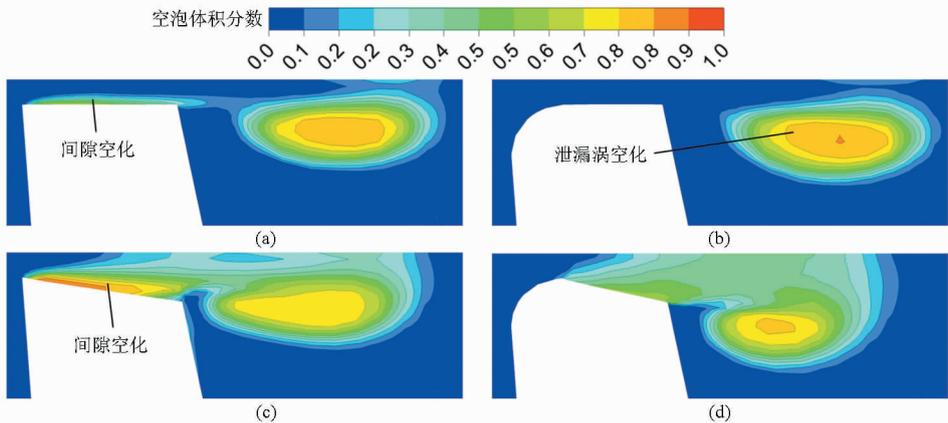


图9 平面空泡体积分数等值线

Fig.9 In-plane bubble volume fraction contour

(a) 平面叶顶 PT (b) 倒圆叶顶 RT (c) 斜切叶顶 CT (d) 倒圆斜切叶顶 RCT

因此,从涡量分布和空化情况来看,倒圆斜切叶顶改善了角涡的空化,有利于降低叶片边缘的空蚀效果。又由于斜切的叶顶使流体绕过圆角后产生旋涡,间隙内的空化加剧。间隙逐渐扩大降低了泄漏涡的大小,从而降低了泄漏涡空化,这不仅表现在空泡的体积含量上,而且空泡的分布范围也有所降低。

3 结论

(1)通过全流场的空化计算,得到不同 NPSH 下的空泡分布与高速摄影捕捉得到的空泡分布吻合较好,空化特性曲线也与试验结果较为接近,证明了数值计算空化特性的可行性与准确性。

(2)叶片顶端采用不同的形状处理后,扬程和

效率均有不同程度的变化。相对于原始的平面叶顶方案来说,倒圆叶顶增加了泄漏量,使泵性能有所下降;而斜切叶顶能降低泄漏速度,性能有所升高;倒圆斜切叶顶扬程和效率下降最为明显。

(3)在空化方面,总的来说倒圆斜切方案的 NPSH_c 比其他 3 种方案有所降低。从内部流场分析看出,倒圆叶顶的泄漏涡空化加剧,但有效地消除了角涡空化,改善了轮缘的空蚀影响;斜切叶顶效果与之相反;倒圆斜切叶顶改善了角涡的空化,但间隙内的空化加剧。斜切的间隙能够降低泄漏涡涡量的大小,从而降低了泄漏涡空化的程度和影响的范围。因此,在满足外特性性能要求的情况下,建议采用倒圆斜切叶顶方案可以较好地控制轴流泵的叶顶空化。

参 考 文 献

- 1 黄继汤. 空化与空蚀的原理及应用[M]. 北京:清华大学出版社,1991.
- 2 Tian Qing. Near wall behavior of vertical flow around the tip of an axial pump rotor blade[D]. Virginia: Virginia Polytech Institute State University, 2006.
- 3 Rains D A. Tip clearance flows in axial compressors and pumps[D]. Pasadena: California Institute of Technology, 1954.
- 4 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.
- 5 Wu H, Tan D, Miorini R L, et al. Three-dimensional flow structures and associated turbulence in the tip region of a waterjet pump rotor blade[J]. Experiments in Fluids, 2011, 51(6): 1721 - 1737.
- 6 Miorini R, Wu H, Katz J. The internal structure of the tip leakage vortex within the rotor of an axial water-jet pump[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2011, 134(3): 031018.
- 7 李忠,杨敏官,姬凯,等. 轴流泵叶顶间隙空化流可视化实验研究[J]. 工程热物理学报,2011,32(8):1315 - 1318.
Li Zhong, Yang Minguan, Ji Kai, et al. Visualization research on cavitating flow in tip clearance of axial-flow pump[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(8): 1315 - 1318. (in Chinese)
- 8 李忠. 轴流泵内部空化流动的研究[D]. 镇江:江苏大学,2011.
- 9 吴光焱,杨敏官,康灿. 轴流泵叶轮内空化的数值模拟与实验研究[J]. 中国机械工程,2010,21(18):2229 - 2232.
Wu Guangyan, Yang Minguan, Kang Can. Numerical simulation and experimental study of cavitation in axial-flow pump impeller[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 21(18): 2229 - 2232. (in Chinese)
- 10 Nho Y C, Park J S, Lee Y J, et al. Effects of turbine blade tip shape on total pressure loss and secondary flow of a linear turbine cascade[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2012, 33(1): 92 - 100.
- 11 李鹏,张超,王振军. 燃气透平动叶不同叶顶结构对顶部泄漏流动和换热的影响[J]. 热能动力工程,2012,27(5):535 - 539.
Li Peng, Zhang Chao, Wang Zhenjun. Influence of various rotating blade tip structures on the blade tip leakage flow and heat exchange of a gas turbine[J]. Journal of Engineering for Research Thermal Energy & Power, 2012, 27(5): 535 - 539. (in Chinese)
- 12 杨昌明,陈次昌,王金诺. 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. 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)
- 13 施卫东,张华,陈斌. 不同叶顶间隙下的轴流泵内部流场数值计算[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(5):374 - 377.
Shi Weidong, Zhang Hua, Chen Bin. 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)
- 14 黎耀军,沈金峰,洪益平. 轮缘间隙对轴流泵内部非定常流场的影响[J]. 排灌机械工程学报,2013,31(8):667 - 672.
Li Yaojun, Shen Jinfeng, Hong Yiping. Effect of swept blade on hump and cavitation characteristics of axial flow pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(8): 667 - 672. (in Chinese)
- 15 Li Wei, Qiao Weiyang, Xu Kaifu, et al. Numerical simulation of tip clearance flow passive control in axial turbine[J]. Journal of Thermal Science, 2008, 17(2): 147 - 155.
- 16 王维,楚武利,张浩光. 基于泄漏流控制的轴流压气机叶顶前缘端削设计[J]. 热能动力工程,2012,27(5):529 - 534.
Wang Wei, Chu Wuli, Zhang Haoguang. Leakage flow control-based leading edge blade tip machined design of an axial flow compressor[J]. Journal of Engineering for Research Thermal Energy & Power, 2012, 27(5): 529 - 534. (in Chinese)

- 17 Markus H, Reinhard W. An innovative passive tip leakage control method for axial turbine; linear cascade wind tunnel results [C]//ASME Turbo Expo 2008; Power for Land, Sea, and Air, 2008, 6:927-938.
- 18 石夔,李少军,李军,等. 动叶栅倒角对透平级气动性能的影响[J]. 航空动力学报, 2010,25(8):1842-1849.
Shi Yan, Li Shaojun, Li Jun, et al. Influence of the chamfer of a rotor cascade on the turbine stage aerodynamic performance[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(8): 1842-1849. (in Chinese)
- 19 Storer J A, Cumpsty N A. Tip clearance flow in axial compressor[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1991, 113(2): 252-259.
- 20 You D, Wang M, Moin P, et al. Effects of tip-gap size on the tip-leakage flow in a turbomachinery cascade[J]. Physics of Fluids, 2006, 18(10): 103605.
- 21 杨军虎,马静先,张人会,等. 轴流泵叶片外缘修圆对泵性能的影响[J]. 兰州理工大学学报,2007,33(5):60-63.
Yang Junhu, Ma Jingxian, Zhang Renhui, et al. Influence of blade tip rounding on performance of axial flow pump [J]. Journal of Lanzhou University of Technology,2007, 33(5): 60-63. (in Chinese)
- 22 潘中永,袁寿其. 泵空化基础[M]. 1版. 镇江:江苏大学出版社,2013.

Effects of Blade Tip Shape on Cavitating Flow in Axial Flow Pumps

Shi Weidong Wu Suqing Zhang Desheng Yao Jie Cheng Cheng

(Research Center of National Pump and System Engineering Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Tip leakage vortex in axial flow pump mainly caused by the rolling of the main flow and leakage flow from the tip clearance between blade tip and end wall is the main cause of the tip leakage vortex cavitation and blade tip cavitation erosion. In order to find an appropriate tip shape to control and reduce TLV cavitation, experimental results, from high-speed photography cavitation test, and numerical results were compared to validate the correctness of the simulation. Then on the basis of original plane tip shape, the cavitation performance of the other three tip shapes, rounding, chamfered, and rounding chamfered, were studied by simulation. Fluid domain was calculated by structural mesh so as to get fluid characteristic in tip clearance region, precisely. The results show that the rounding tip and rounding chamfered tip make head and efficiency decline while the chamfered tip makes them raise a little. Although the rounding tip eliminates the corner vortex cavitation, it makes TLV cavitation worse. The chamfered tip is in contrast to the rounding tip, and there is cavitation existing in clearance. The rounding chamfered tip does well in controlling corner vortex cavitation and TLV cavitation simultaneously, compared with the others. The study suggests the rounding chamfered tip scheme can be adopt to control the tip cavitation, if the cavitation performance is the primary factor.

Key words: Axial-flow pump Cavitation Blade tip shape Cavitating distribution TLV