

文章编号:1000-8055(2012)12-2799-06

加力燃油泵隔舌倒圆抑制分离的数值模拟

薛梅新, 朴 英

(清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

摘 要: 采用动态亚格子应力模型对加力燃油泵内非定常流场进行大涡模拟, 探讨了原隔舌空蚀机理, 并研究了不同倒圆半径下泵隔舌附近的瞬时流动规律及流量扬程特性. 计算结果表明: 小流量工况原隔舌处分离产生的强剪切涡会诱发空化, 涡脱落形成的分离再附位置与空蚀破坏核心区域相符; 小流量工况下, 隔舌倒圆在扩散管内形成转向涡, 消除了隔舌壁面分离绕流及附着剪切涡, 4 mm 倒圆半径可以避免空化; 设计流量范围内隔舌倒圆提高了泵出口扬程, 流量越小扬程增幅越大, 小流量工况时扬程增幅达 3%.

关 键 词: 加力燃油泵; 隔舌; 流动分离; 倒圆; 大涡模拟

中图分类号: V233.2

文献标志码: A

Numerical simulation on separation control by filleting casing tongue of after-burning fuel pump

XUE Mei-xin, PIAO Ying

(School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Unsteady flow field inside an after-burning fuel pump was investigated by large eddy simulation method with the dynamic subgrid-scale stress model. The cavitation erosion mechanism of the original casing tongue was discussed, and then, the characteristics of transient flow around the casing tongue and pump performance were investigated under different filleting radius conditions. The results show that the flow separation at the original tongue under small flow-rate condition brings strong shearing vortex which induces cavitation. The separation attachment location formed by the vortex shedding agrees well with the real cavitation damage core region. Under small flow-rate condition, tongue filleting results in diversion vortex in the diffuser tube, which suppresses the flow separation around the tongue face as well as the attached shearing vortex, while the 4 mm filleting radius case can avoid tongue cavitation. Within the design flow-rate, tongue filleting raises the pump head, and the smaller the flow-rate, the larger the head increase amplitude, which reaches 3% under small flow-rate condition.

Key words: after-burning fuel pump; casing tongue; flow separation; filleting; large eddy simulation

某型航空发动机的加力燃油泵为采用环形压出室和开式径向直叶轮的高速离心泵. 由于发动机加力燃油控制系统的特殊性, 加力燃油泵长期

运行在低负载小流量工况, 在叶轮与压出室强烈的动静交互作用下, 扩散管内堵塞燃油绕流隔舌返流环形腔室, 在隔舌附近形成了非定常分离流

收稿日期: 2011-11-26

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20121218.0859.201212.2799_024.html

作者简介: 薛梅新(1985—), 男, 湖北公安人, 博士生, 主要从事流体机械内流及空化研究.

动形态,分离伴随的瞬时负压引发了空化,致使压出室隔舌壁面普遍出现了严重的空蚀破坏,部分区域甚至发生了穿透,威胁到航空发动机的安全运行.为了提高发动机的可靠性,亟待探索该加力燃油泵的抗空蚀设计方法.

空化现象广泛存在于离心泵等水力机械中,离心泵空化多位于叶片吸力面前缘等部位^[1-5],通常采用延长叶轮进口及加大叶片安放角等方法改善叶轮进口流态来提高叶轮空化性能,而变动安放角等方法显然不适用于静止的环形压出室隔舌.加力燃油泵隔舌部位的空化源自小流量工况的高速分离流引发的瞬时压力剧烈脉动,与水利工程领域的门槽空化^[6]极为类似.门槽下游角隅进行圆角化处理可以有效抑制分离并改善空化性能,而加力燃油泵锐边隔舌倒圆设计能否抑制分离进而避免空化提高水力性能尚待研究.

随着计算机性能和计算流体动力学(CFD)的飞速发展,三维复杂湍流的数值模拟已日益成为离心泵内流分析和性能优化的重要手段.离心泵内部瞬态湍流流场的数值模拟大多采用非定常雷诺时均(URANS)方法^[7-8],瞬时压力脉动、流激振动及噪声方面^[9-10]的研究表明旨在模拟非定常大尺度涡运动的大涡模拟(LES)方法对瞬时流动及压力特性预测更准确.为了准确预测隔舌瞬时分离流及压力特性,本文采用动态亚格子应力模型^[11-12]对加力燃油泵内流场进行大涡模拟,研究并验证了小流量工况隔舌分离流动导致隔舌空蚀破坏机理,进而分析了不同倒圆半径对隔舌附近瞬时流动特性及泵流量扬程特性的影响规律.

1 物理模型和数值方法

加力燃油泵主要由进口活门、转轴、叶轮、环形蜗壳、锥形扩散管等部件组成.叶轮为开式径向直叶片叶轮,环形蜗壳外壁与叶轮同心.泵额定转速 $n_d = 27\,000\text{ r/min}$,比转速约为 65.计算求解区域如图 1 所示,进口边界为进口活门入口圆环面,出口边界为扩散管出口圆面,进出口边界分别向外适当延长以给定边界条件.计算域包括了盘盖侧间隙,其中进口和泵腔内转轴表面进行了适当简化.

壳体隔舌倒圆处理如图 2 所示,计算选取倒圆半径 $R=2\text{ mm}$ 和 $R=4\text{ mm}$,本文着重分析图示区域瞬时分离流及静压特性.计算域采用分块结构化六面体网格划分,总网格数均约为 150 万,压出室区域网格数约 85 万.为了准确捕捉隔舌分离

流,压出室近壁网格单元尺寸法向加密,保证壁面无量纲法向距离 y^+ 大小为 1 的量级,且隔舌附近网格局部加密,轴截面网格分布如图 3 所示.

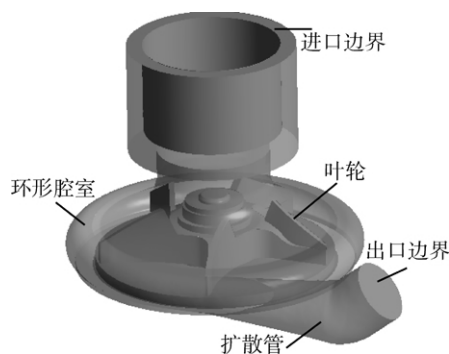


图 1 计算域及边界条件示意图

Fig. 1 Calculation domain and boundary conditions

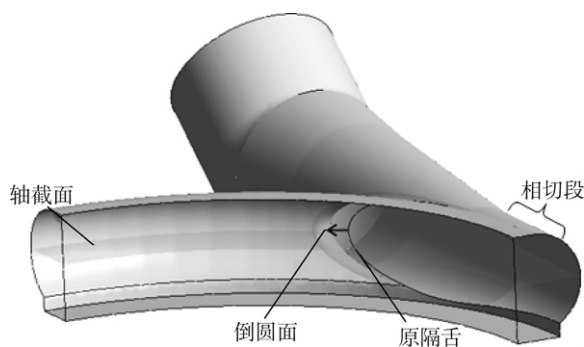


图 2 隔舌倒圆示意图

Fig. 2 Casing tongue filleting demo

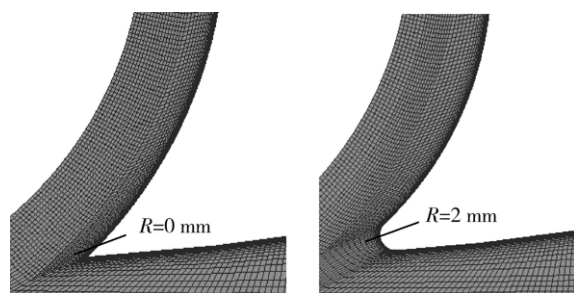


图 3 轴截面隔舌附近局部网格

Fig. 3 Grid around the casing tongue on the axial section

航空煤油为多组分混合物,计算取特征密度 ρ 为 780 kg/m^3 ,黏度 μ 为 $0.0024\text{ Pa}\cdot\text{s}$.进口边界给定进口总压 $p_{in} = 0.8\text{ MPa}$,出口边界给定质量流量 q_m ,动静固壁面采用速度无滑移条件,近壁区采用壁面函数法处理,叶轮动壁面设置转速 n_d .大涡模拟初场为 $k-\omega$ SST(shear stress transport)模型非定常计算结果,对流项离散选取有界中心差分格式,时间项离散采用 2 阶后向欧拉格

式. 计算选取物理时间步长 $\delta t = T_n/140$, 其中 T_n 为叶片通过周期.

2 未倒圆隔舌瞬时分离流特性

工作温度下燃油的饱和蒸气压力仅几千帕, 远低于燃油工作压力, 隔舌空化空蚀取决于该处瞬时静压及分离流动特性. 加力燃油泵长期运行在低流量工况, 故取小加力典型工况进行分析. 图 4 为加力燃油泵隔舌处最低静压在 8 个叶片通过周期 T_n 内的脉动曲线. 图中 q_d 为设计流量, 短划虚线为全加力流量 $0.5q_d$ 工况, 隔舌处未发生空化, 与该泵作为地面油源泵无空蚀破坏的情形相符; 细实线为小加力流量 $0.1q_d$ 工况, 隔舌处瞬时静压达到负值无疑会促发空化, 该工况简称为小流量工况.

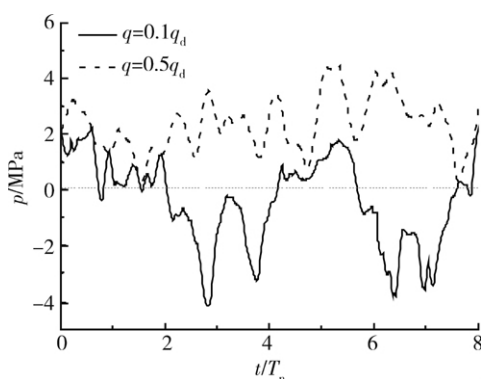


图 4 $0.5q_d$ 和 $0.1q_d$ 工况下原隔舌最低压力瞬时脉动

Fig. 4 Fluctuation curve of minimal pressure at original casing tongue under $0.5q_d$ and $0.1q_d$ conditions

小流量工况下, 隔舌静压达到负值某时刻, 隔舌附近瞬时静压及流线分布如图 5 所示, 图中泡状曲面群为速度梯度张量第二不变量^[13] $Q_c = 10^9 \text{ s}^{-2}$ 等值面, 表征瞬时流动涡核形态. 由图 5(a) 可知扩散管内燃油减速增压可达 8 MPa, 而部分燃油绕流隔舌中部返回环形腔室, 在隔舌处形成强剪切涡面, 随后涡面卷起扭曲失稳, 导致了涡破裂, 产生了发夹状脱落涡及尾部二次流向涡. 分离区涡旋核心静压急剧降低, 隔舌处强剪切涡会形成局部负压区, 如图 5(b) 所示, 负压诱发的空泡会随脱落涡运动到分离再附点溃灭而形成空蚀, 与图 5(c) 中实物破坏照片十分吻合, 而图 5(d) 中隔舌顶部类似分离流动也产生了空蚀, 这也表明本文采用的大涡模拟方法能准确预测隔舌分离流瞬时特性.

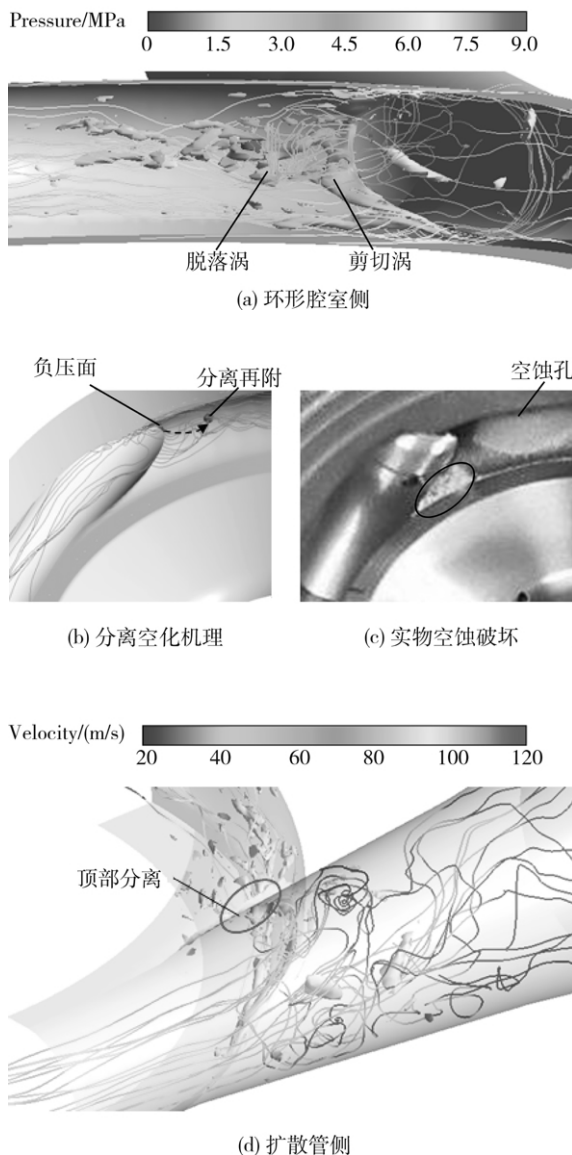


图 5 $0.1q_d$ 工况下原隔舌附近瞬时静压及流线分布

Fig. 5 Transient pressure and streamline distribution around the original casing tongue under $0.1q_d$ condition

3 倒圆对隔舌瞬时流动的影响

图 6 为小流量工况下加力燃油泵倒圆隔舌处最低静压在 8 个叶片通过周期 T_n 内的脉动曲线. 由图可知, 倒圆半径 $R=2 \text{ mm}$ 隔舌处瞬时静压仍可达到负值, 其脉动幅值也高于倒圆半径 $R=4 \text{ mm}$ 算例, 因而前者隔舌处仍可能产生空化.

图 7 和图 8 分别为小流量工况下倒圆半径 $R=2 \text{ mm}$ 和 $R=4 \text{ mm}$ 隔舌附近瞬时静压及流线分布, 其中 t_1 时刻隔舌处最低静压达到峰值, t_2 时刻隔舌处最低静压达到波谷, 图中泡状曲面群

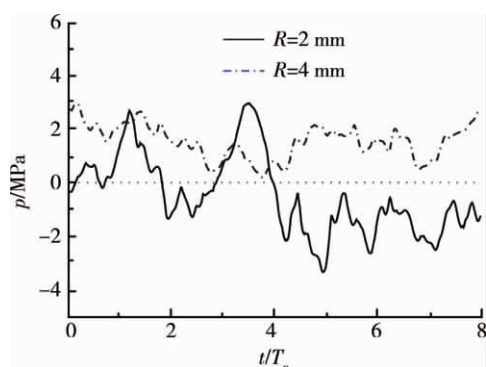


图 6 $0.1q_d$ 工况下倒圆隔舌最低压力瞬时脉动

Fig. 6 Fluctuation curve of minimal pressure at filleted casing tongue under $0.1q_d$ condition

为速度梯度张量第二不变量 $Q_c = 10^9 \text{ s}^{-2}$ 等值面。图 7(b)和图 8(b)中, t_1 时刻隔舌绕流卷吸扩散管内低速燃油均明显多于 t_2 时刻, 表明扩散管低速流体返流环形腔室有助于减弱分离进而提高隔舌壁面静压。

由图 7 可知, 隔舌倒圆半径为 2 mm, t_1 时刻扩散管流动受阻, 相切段部分燃油返流环形腔室并卷吸管内低速燃油在隔舌壁面前方形成转向涡, 燃油经扰动后较为平顺的绕流隔舌中下部, 隔舌壁面未形成剪切附着涡, 瞬时静压也明显较高; t_2 时刻扩散管堵塞减轻, 转向涡运动到隔舌壁面处, 相切段燃油流入扩散管内更远, 高速燃油在转向涡作用下绕流隔舌壁面, 局部静压明显降低, 达到负压后会引发空化。由于隔舌壁面绕流无分离, 空泡溃灭不会对下游壁面产生空蚀破坏。

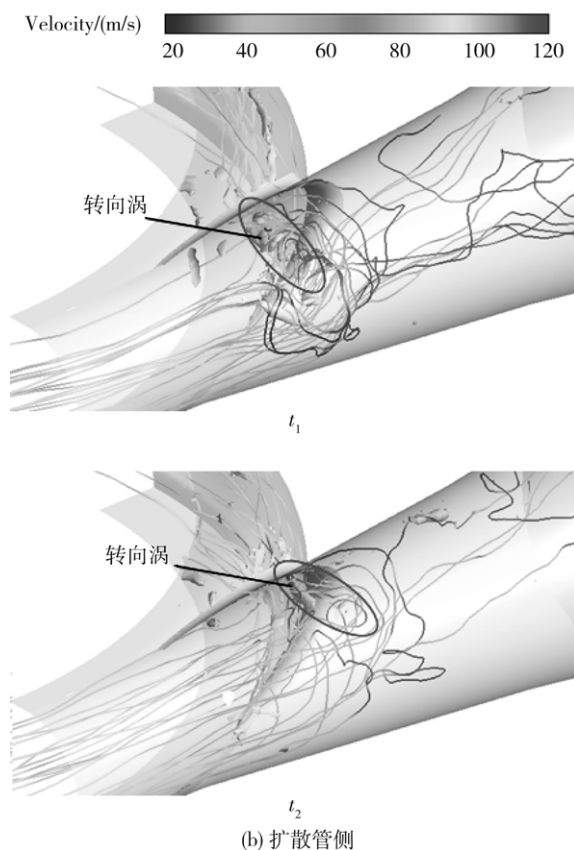
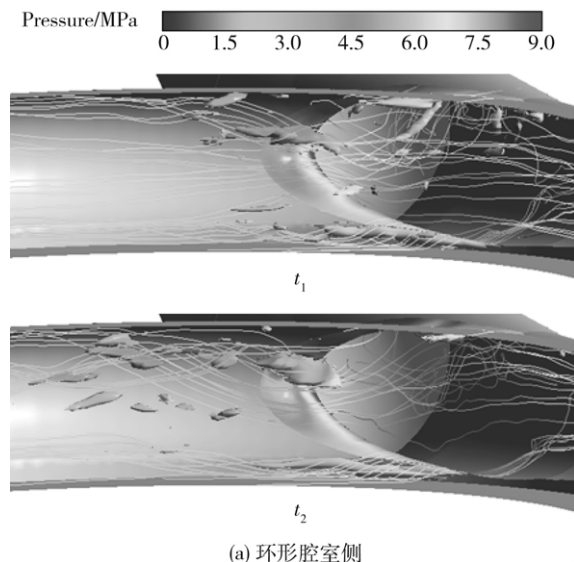
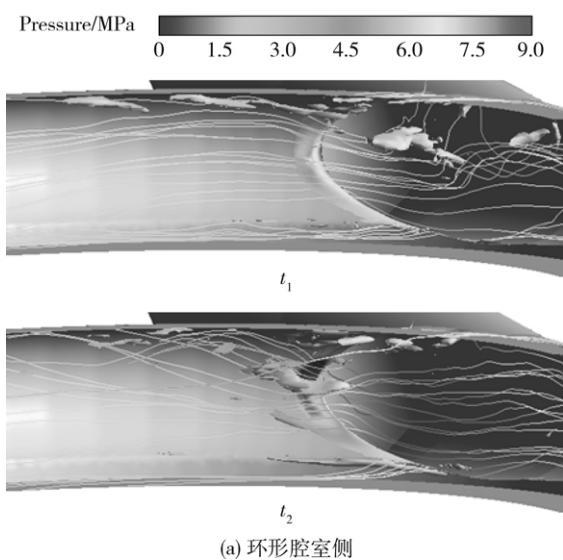


图 7 $0.1q_d$ 工况下 $R=2 \text{ mm}$ 隔舌附近瞬时静压及流线分布

Fig. 7 Transient pressure and streamline distribution around the $R=2 \text{ mm}$ casing tongue under $0.1q_d$ condition

图 8 中隔舌倒圆半径为 4 mm, 隔舌壁面后移, 扩散管相切段燃油转向路径变长, 减速增压更



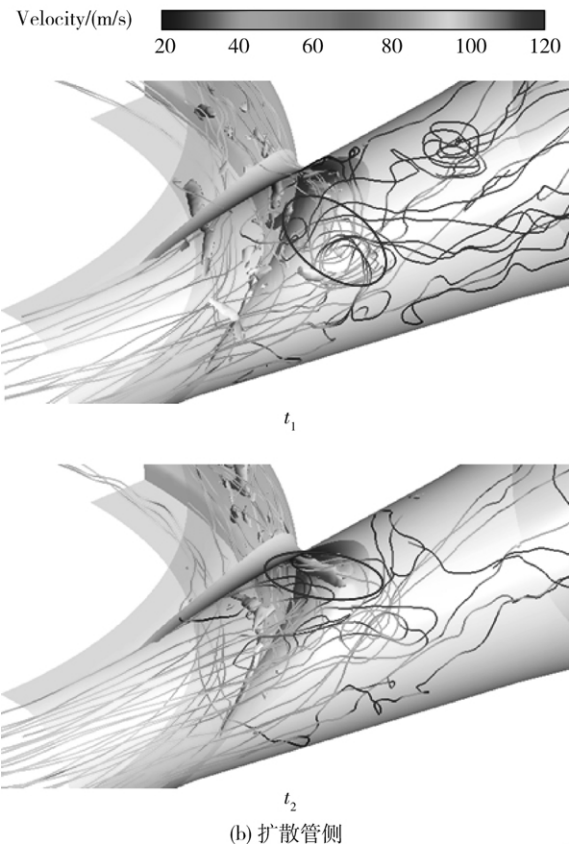


图 8 0.1 q_d 工况下 $R=4$ mm 隔舌附近瞬时静压及流线分布

Fig. 8 Transient pressure and streamline distribution around the $R=4$ mm casing tongue under 0.1 q_d condition

充分. t_1 时刻, 燃油转向卷吸更多的低速燃油, 转向涡强度明显减弱, 隔舌壁面形成低速贴壁绕流, 无剪切附着涡; t_2 时刻, 扩散管堵塞减轻, 转向涡运动到隔舌壁面附近, 壁面绕流产生部分分离, 流速增加, 静压略有降低, 未产生空化.

图 7 和图 8 中倒圆隔舌顶部绕流基本类似, 与原隔舌相比, 剪切附着涡消失, 分离明显改善, 流向二次涡减弱提高了瞬时静压, 隔舌顶部壁面不会发生空化.

4 倒圆对流量扬程特性的影响

加力燃油泵开式叶轮与环形压出室强烈的动静干扰使得瞬时扬程脉动幅值较高, 故对进出口总压进行时间平均来预测泵的有效扬程, 如表 1 所示, 表中下标 R_0, R_2, R_4 分别表示隔舌未倒圆、倒圆半径 2 mm、倒圆半径 4 mm, H_d 为设计扬程. 由表 1 可知, 在设计流量范围内, 隔舌倒圆后出口扬程均增加, 随流量降低, 扬程增幅也变大. 由内流分析可知, 泵出口流量越低, 隔舌分离越严重, 倒圆抑制分离的效果越显著, 不仅避免了空化而且降低了流动损失. 0.1 q_d 小流量工况, 倒圆隔舌泵出口扬程增幅可达 3%, 但其绝对值仍然低于大流量工况, 未完全消除小流量工况工作不稳定性. 倒圆半径 4 mm 的泵出口扬程增幅在 0.1 $q_d \sim 0.5q_d$ 加力流量范围高于倒圆半径 2 mm 的泵.

表 1 额定转速下不同倒圆半径流量扬程对比

Table 1 Comparison of flow capacity-heads for different filleting radii at rated rotation speed

Mass flow q/q_d	Head			$\left(\frac{H_{R2}-H_{R0}}{H_d}\right)/\%$	$\left(\frac{H_{R4}-H_{R0}}{H_d}\right)/\%$
	H_{R0}/H_d	H_{R2}/H_d	H_{R4}/H_d		
0.1	0.977	1.007	1.008	2.99	3.08
0.3	1.029	1.052	1.054	2.25	2.49
0.5	1.055	1.058	1.060	0.26	0.53
0.75	1.043	1.051	1.046	0.75	0.27
1.0	1.004	1.010	1.005	0.61	0.08

5 结 论

本文采用动态亚格子应力模型对某加力燃油泵内部瞬态流动进行了大涡模拟, 探讨原隔舌空蚀破坏机理, 并研究了不同倒圆半径对隔舌瞬时分离流动及外特性的影响规律, 可以得出以下结论:

- 1) 采用动态亚格子应力模型能较准确地预测加力燃油泵隔舌瞬态分离流动. 小流量工况下, 原隔舌处分离产生的强剪切涡诱发了空化初生, 空泡随脱落涡运动, 在分离再附点溃灭产生空蚀破坏.
- 2) 小流量工况下, 隔舌倒圆使得扩散管相切

段部分燃油在隔舌前方转向,明显抑制了隔舌壁面绕流分离,消除了附着剪切涡并提高了瞬时静压.转向涡靠近隔舌壁面时会加速壁面绕流,降低局部静压,倒圆半径 2 mm 隔舌处会产生空化,倒圆半径 4 mm 隔舌则无空化.

3) 设计流量范围内,隔舌倒圆提高了泵出口扬程,随工作流量降低,扬程增幅明显增加,小流量工况扬程增幅可达 3%. 正常加力流量范围内,倒圆半径 4 mm 的泵扬程增幅高于倒圆半径 2 mm 的泵.

参考文献:

- [1] Friedrichs J, Kosyna G. Rotating cavitation in a centrifugal pump impeller of low specific speed[J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(2): 356-362.
- [2] Medvitz R B, Kunz R F, Boger D A, et al. Performance analysis of cavitating flow in centrifugal pumps using multi-phase CFD[J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(2): 377-383.
- [3] Coutier-Delgosha O, Fortes-Patella R, Reboud J L, et al. Experimental and numerical studies in a centrifugal pump with two-dimensional curved blades in cavitating condition[J]. Journal of Fluids Engineering, 2003, 125(6): 970-978.
- [4] 罗先武, 张瑶, 彭俊奇, 等. 叶轮进口几何参数对离心泵空化性能的影响[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48(5): 836-839.
LUO Xianwu, ZHANG Yao, PENG Junqi, et al. Effect of impeller inlet geometry on centrifugal pump cavitation performance[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2008, 48(5): 836-839. (in Chinese)
- [5] 王勇, 刘厚林, 袁寿其, 等. 叶片进口冲角对离心泵空化特性的影响[J]. 流体机械, 2011, 39(4): 17-20.
WANG Yong, LIU Houlin, YUAN Shouqi, et al. Effect of blade incidence angle on cavitation characteristics in centrifugal pump[J]. Fluid Machinery, 2011, 39(4): 17-20. (in Chinese)
- [6] 张卓. 门槽水流的数值模拟及其空化特性分析[D]. 南京: 河海大学, 2007.
ZHANG Zhuo. The study on the flow field near gate slot by numerical simulation[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese)
- [7] Majidi K. Numerical study of unsteady flow in a centrifugal pump[J]. Journal of Turbomachinery, 2005, 127(2): 363-371.
- [8] Asuaje M, Bakir F, Tremante A, et al. 3D quasi-unsteady flow simulation in a centrifugal pump; comparison with the experimental results[C] // Proceedings of 2004 ASME Heat Transfer/Fluids Engineering Summer Conference. Charlotte, USA: ASME, 2004: 1081-1090.
- [9] Nagahara T, Inoue Y, Sato T, et al. Investigation of the flow field in a multistage pump by using LES[C] // Proceedings of 2005 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting. Houston, USA: ASME, 2005: 1321-1329.
- [10] Byskov R K, Jacobsen C B, Pedersen N. Flow in a centrifugal pump impeller at design and off-design conditions; Part II large eddy simulations[J]. Journal of Fluids Engineering, 2003, 125(1): 73-83.
- [11] Lilly D. A proposed modification of the germano subgrid-scale closure method[J]. Physics of Fluids A, 1992, 4(3): 633-635.
- [12] Germano M. A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model[J]. Physics of Fluids A, 1991, 3(7): 1760-1765.
- [13] Hunt J, Wray A A, Moin P. Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows[R]. [S. l.]: Center for Turbulence Research, Report CTR-S88, 1988.