

壳体开槽对诱导轮空化性能影响的数值分析

李炎栋, 赵强, 胡海峰, 项乐

(西安航天动力研究所 航天液体动力全国重点实验室, 陕西 西安 710100)

摘要: 为了提高诱导轮的空化性能, 建立了壳体开槽诱导轮模型, 采用数值计算方法对比了基准结构诱导轮和壳体开槽诱导轮的空化流动特性, 通过分析不同空化数下叶片吸力面压力分布、诱导轮内部空化区的分布状态及扬程系数的变化, 揭示了壳体开槽提高诱导轮空化性能的详细机理。结果表明: 壳体开槽改变了叶尖泄漏流的发展方向, 在叶尖附近形成大尺度涡流, 减小了压力面和吸力面之间的压力梯度, 改善了诱导轮内部的压力分布。壳体开槽诱导轮的初生空化数小于基准结构诱导轮, 对空化的产生有抑制作用; 随着空化数从 0.37 减小到 0.086, 空化区域不断扩大, 扬程系数几乎保持不变。相同空化数下, 壳体开槽诱导轮的扬程系数略低于基准结构, 但空化区明显较小, 对空化的发展有一定的抑制作用。随着空化数的进一步减小, 当空化数达到某个值附近, 扬程系数先略微上升后再陡降直至发生空化断裂, 壳体开槽诱导轮的临界空化数更小; 从空化初生至空化断裂, 壳体开槽诱导轮较基准结构诱导轮空化性能均有所提升。

关键词: 壳体开槽; 空化数; 扬程系数; 空化性能

中图分类号: V434.21

文献标志码: A

文章编号: 1672-9374(2024)02-0122-08

Numerical analysis on effects of case grooving on cavitation performance of inducer

LI Yandong, ZHAO Qiang, HU Haifeng, XIANG Le

(National Key Laboratory of Aerospace Liquid Propulsion,
Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: In order to improve the cavitation performance of the inducer, a case grooving inducer was established, cavitation performance and flow characteristics of the reference structure inducer and the case grooving inducer were compared with numerical computation method. The detailed mechanism of improving cavitation performance in case grooving manner was revealed by analyzing pressure distribution on the suction surface of the blade, the distribution of the cavitation area inside the inducer, and head coefficient change with different cavitation number. The results show that case grooving changes direction of the tip leakage flow, which makes a large-scale vortex near the tip, reduces pressure gradient between the pressure surface and the suction surface, and improves pressure distribution inside the inducer. The inception cavitation number of the case grooving inducer is smaller than that of the reference structure

收稿日期: 2023-07-10 修回日期: 2023-08-26

基金项目: 国家联合基金(U1737112)

作者简介: 李炎栋(1993—), 男, 硕士, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机流动、传热与燃烧。

引用格式: 李炎栋, 赵强, 胡海峰, 等. 壳体开槽对诱导轮空化性能影响的数值分析[J]. 火箭推进, 2024, 50(2): 122-129.

LI Y D, ZHAO Q, HU H F, et al. Numerical analysis on effects of case grooving on cavitation performance of inducer[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2024, 50(2): 122-129.

inducer, which has an inhibiting effect on cavitation. As the cavitation number decreases from 0.370 to 0.086, the cavitation area continues to expand, and head coefficient almost remains constant. At the same cavitation number, head coefficient of the case grooving inducer is slightly lower than the reference structure, but the cavitation area is significantly smaller, which has a certain inhibitory effect on the expansion of cavitation. As the cavitation number further decreases, when the cavitation number reaches a certain value, the head coefficient first rises slightly and then drops sharply until cavitation crisis occurs. The critical cavitation number of case grooving inducer is smaller. From cavitation inception to cavitation crisis, cavitation performance of the case grooving inducer improves compared with that of the reference structure inducer.

Keywords: case grooving; cavitation number; head coefficient; cavitation performance

0 引言

涡轮泵是液体火箭发动机的关键部件,通常在第一级叶轮上游加装诱导轮对推进剂进行增压,这样不仅可以减轻推进剂贮箱的质量,而且可以提高主泵的空化余量储备,从而达到增加发动机安全可靠性的目的^[1-3]。诱导轮类似于轴流泵,可以在一定空化条件下正常工作,但严重的空化会破坏诱导轮的结构,提高发生故障的概率,甚至造成火箭发射失败^[4]。因此,如何改进诱导轮的结构设计、提高空化性能已成为液体火箭发动机研制的关键技术之一。

为了提高诱导轮的空化性能,国内外学者开展了大量研究工作,包括入口加装挡板^[5]、入口增加射流^[6]、采用环形入口壳体^[7]、安装螺旋静叶^[8]、改变叶尖间隙^[9-12]等。Hashimoto 等^[13]在针对 H-2 火箭 LE-7 发动机氧泵诱导轮空化性能试验的研究中发现改变入口壳体结构可以改善诱导轮内部空化不稳定现象。Shimagaki 等通过试验发现阶梯槽可以使诱导轮叶片前缘叶尖处的回流增大,抑制超同步旋转空化的发生^[14]。Tomaru 等^[15]研究了回流限制槽对诱导轮空化喘振的影响,发现在入口壳体处设计回流限制槽可以有效抑制空化喘振并稳定空化产生的压力脉动。文献[16-17]通过试验研究了 J 型槽对诱导轮空化性能的影响,结果表明入口壳体处设计 J 型槽不仅能改善小流量下诱导轮的空化性能,而且能有效抑制空化不稳定现象,提高诱导轮的空化性能。岳恒茂等^[18]采用试验和数值仿真方法研究发现入口安装螺旋槽后气穴生长的位置发生变化,从而改善内部流道的通流能力,进一步提高诱导轮的扬程。李欣等^[19]对比了安装螺旋槽和 J 型槽时诱导轮空化的性能,结果表明安装螺旋

槽可以提高诱导轮的空化性能,但在特定工况下,螺旋槽对同步旋转空化的抑制作用要弱于 J 型槽。

以上研究表明改变壳体结构会影响诱导轮的空化性能,本文建立了壳体开槽诱导轮模型,采用数值计算方法分析了壳体开槽对诱导轮内部空化流动特性影响的详细机理,为诱导轮结构优化提供参考。

1 计算模型

本文以 Xiang 等^[20]实验研究的诱导轮模型为基准结构,如图 1 所示。诱导轮转速为 5 000 r/min,流量系数为 $\Phi=0.085$,主要几何参数见表 1。

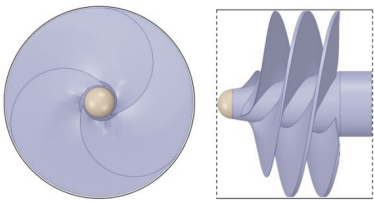


图 1 诱导轮模型
Fig. 1 Inducer model

表 1 诱导轮几何参数

Tab. 1 Structure parameters of inducer	
参数	数值
叶片数	3.0
轮缘直径/mm	100.0
进口轮毂直径/mm	16.0
出口轮毂直径/mm	35.5
叶尖间隙/mm	0.5
叶尖稠度	3.2
叶片安装角/(°)	9.6
叶片前缘修圆包角/(°)	150.0

流量系数 Φ 、扬程系数 ψ 和空化数 σ 的表达式分别为^[21]

$$\Phi = \frac{Q}{Av_{\text{tip}}} \quad (1)$$

$$\psi = \frac{P_{\text{out}} - P_{\text{in}}}{0.5 \rho_l v_{\text{tip}}^2} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{P_{\text{in}} - P_v}{0.5 \rho_l v_{\text{tip}}^2} \quad (3)$$

式中: Q 为工质的体积流量; A 为来流横截面积; v_{tip} 为诱导轮叶尖速度; P_{out} 、 P_{in} 分别为出口压力和入口压力; ρ_l 为液相密度; P_v 为工质的饱和蒸气压。

开槽位置在诱导轮入口壳体处, 图 2 为开槽示意图, 其中 h 为槽高, b 为槽宽, θ 为开槽斜度, δ 为叶尖间隙, d 为开槽处相对于叶片前缘进口的位置。具体开槽参数见表 2, 开槽诱导轮模型如图 3 所示。为了使入口处流动充分发展且出口处不产生回流, 分别对诱导轮上、下游进行 10 倍和 5 倍叶轮直径的延长作为进口段与出口段。

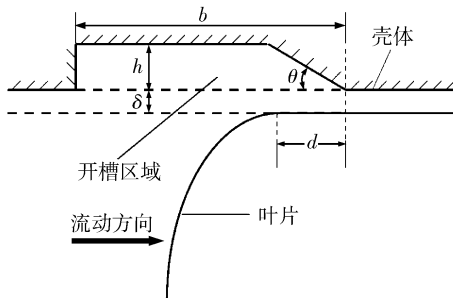


图 2 开槽示意图

Fig. 2 Sketch of the slotting

表 2 开槽几何参数

Tab. 2 Structure parameters of slotting

参数	数值
槽高 h/mm	2
槽宽 b/mm	10
开槽位置 d/mm	1
开槽斜度 $\theta/(\circ)$	30

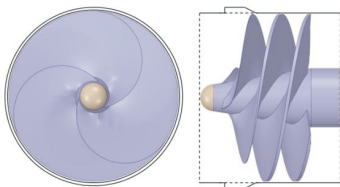


图 3 壳体开槽诱导轮模型

Fig. 3 Inducer model of the slotting

2 数值求解方法

诱导轮叶片前缘进口与轮毂近似于相切, 对网格的适应性要求较高, 因此选择多面体网格离散整个计算域。对静止域和旋转域交界面处的网格结构进行拓扑共享, 使节点一一对应以减小交界面处的数据传递误差。由于叶尖间隙较小, 为了更好地捕捉叶尖处的气泡, 对叶尖和开槽区域的网格局部加密, 并在壁面附近划分边界层网格, 图 4 为诱导轮网格示意图。

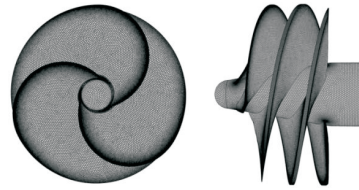


图 4 诱导轮网格

Fig. 4 Mesh of inducer

针对诱导轮空化流动特性的数值计算, 扬程系数是判断网格无关性的重要指标。为了消除网格数量对计算结果的影响, 本文采用 4 套网格进行网格无关性验证, 计算了基准结构在空化数 $\sigma = 0.37$ 时的扬程系数。表 3 为不同网格数下诱导轮的扬程系数, 随着网格数量的增加, 扬程系数逐渐减小, 方案 3 与方案 4 扬程系数的相对误差在 0.1% 以内, 综合考虑数值计算精度和效率, 基准结构网格数量选取 597.8 万。当几何结构变化时, 采用相同的网格尺度和加密方法。

表 3 不同网格数下诱导轮的扬程系数

Tab. 3 Inducer head coefficient with different grid number

方案	网格数/ 10^4	扬程系数 ψ	相对误差/%
1	355.4	0.157 092	—
2	476.3	0.155 984	0.705
3	597.8	0.155 455	0.339
4	724.6	0.155 351	0.067

利用 ANSYS Fluent 求解稳态三维雷诺时均方程, 湍流模型选择 SST $k-\omega$ 模型, 空化模型选择 Schnerr-Sauer 模型, 汽化和凝结速率的表达式为

$$R_e = \frac{\rho_l \rho_v}{\rho_m} \frac{3\alpha_v(1-\alpha_v)}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_l}} \quad p_v > p \quad (4)$$

$$R_c = \frac{\rho_l \rho_v}{\rho_m} \frac{3\alpha_v(1-\alpha_v)}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_l}} \quad p_v < p \quad (5)$$

式中: R_e 为气相生成速率; R_c 为气相凝结速率; p 为远场压力; ρ_v 为气相密度; ρ_m 为混合相密度; α_v 为气相体积分数; R_B 为气泡直径。

为了准确反映真实流场信息,数值计算的边界条件与 Xiang 等^[20] 的实验保持一致。工质选取 25 ℃ 下的常温水,饱和蒸气压为 3.169 9 kPa。进口设置为总压边界条件,出口设置为质量流量边界条件,进出口段壁面和诱导轮壳体壁面设置为静止无滑移壁面边界条件,其余壁面设置为旋转壁面边界条件,动静交界面采用“frozen rotor”模型。方程离散采用二阶格式,收敛精度设置为 1×10^{-6} 。图 5 为数值计算结果与实验数据对比,扬程系数随空化数的变化趋势基本一致,计算结果与实验结果吻合较好,数值计算精度满足工程应用需求。

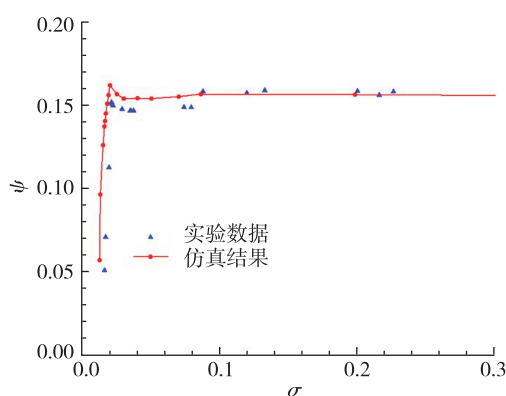


图 5 数值计算结果与实验数据对比

Fig. 5 Comparison of simulation and test

3 计算结果与分析

低压是空化现象出现的根本原因,通过不断降低进口段入口总压计算出不同空化数下诱导轮内部的流场参数。图 6 为空化数 $\sigma = 0.69$ 时基准结构和壳体开槽诱导轮子午面上叶尖附近的压力云图和流线图。在叶片前缘进口修圆区附近,诱导轮对进入流道内的工质做功,使得压力面和吸力面之间形成很大的压差,由于存在叶尖间隙,在压力梯度的作用下形成由压力面到吸力面的泄漏流。泄漏流沿壳体壁面向上游发展过程中,与主流相互作用产生泄漏涡,涡核处的压力较

低,当压力低于饱和蒸气压时就会发生空化。空化通常首先出现在叶片修圆区叶尖吸力面附近的泄漏涡内,并随着空化数的降低,不断向诱导轮内部低压区域扩展。从压力云图可以看出,基准结构在叶尖附近存在明显的低压区,对于壳体开槽诱导轮,泄漏流的流动方向由于槽道结构而发生改变,不再沿壁面向上游发展,而是在叶尖附近产生一个大尺度旋涡,阻挡了主流向叶尖流动,在一定程度上抑制了泄漏涡的形成。由于压力面和吸力面之间的压力梯度减小,诱导轮内部的压力分布得到改善,从而提高了空化性能。

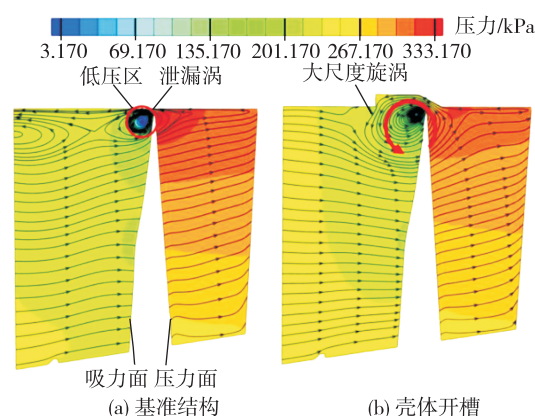


图 6 子午面上叶尖附近的压力云图和流线图

Fig. 6 Pressure contour and streamline chart near blade tip on meridian plane

图 7 是空化数 $\sigma = 0.69$ 时两种诱导轮在叶高 0.95 处的气相体积分数云图。基准结构在叶尖吸力面附近已经发生明显的空化,壳体开槽结构尚未出现空化现象。

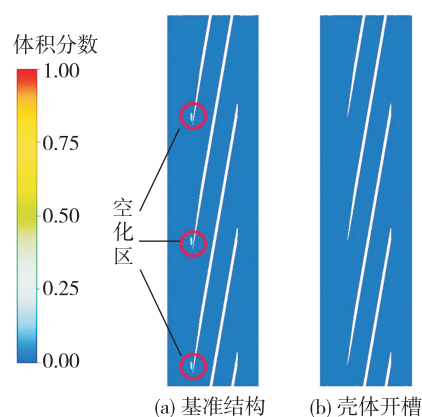


图 7 空化数 $\sigma = 0.69$ 时诱导轮叶高 0.95 处的气相体积分数云图

Fig. 7 Water vapor fraction contour when induce blade height is 0.95 with cavitation number $\sigma = 0.69$

将诱导轮内部刚开始出现空化时的空化数定义为初生空化数,表 4 为两种诱导轮的初生空化数,壳体开槽诱导轮的初生空化数小于基准结构诱导轮,这表明壳体开槽对空化的产生有抑制作用。

表 4 初生空化数

Tab. 4 Inception cavitation number

诱导轮模型	基准结构	壳体开槽
初生空化数	0.874	0.688

空化首先产生于叶片前缘修圆区叶尖吸力面附近,所以叶片表面的压力分布对空化的产生和发展有着至关重要的影响。图 8 给出了两种诱导轮空化数分别为 0.37、0.198、0.133、0.086 时叶片吸力面的压力云图。随着空化数减小,叶片表面上出现压力低于饱和蒸气压的区域,这表明叶片表面上局部区域已经发生空化,并且逐渐由叶尖沿周向和轴向扩展。相同空化数下,壳体开槽诱导轮叶片表面的低压区小于基准结构,说明壳体开槽对叶片表面上空化区的发展有抑制作用。

为了分析不同空化数下空化区在诱导轮内部的分布状态,选择气相体积分数为 0.01 的等值面进行研究。图 9 为两种诱导轮在不同空化数时气相体积分数等值面。随着空化数的减小,空化区域不断扩大,此时诱导轮的扬程系数几乎保持不变。这是因为空化区停留在叶片前缘进口叶尖处及叶片表面局部区域,并未进入流道内部,对流道的通流能力影响较小。基准结构空化区沿叶尖吸力面向流道下游发展的同时不断向壳体壁面上游扩展,对于开槽结构,随着入口压力不断降低,由于大尺度涡流的存在更容易在槽道内形成低压区,所以空化区沿槽道方向发展。相同空化数下,壳体开槽诱导轮的空化区明显较小,但扬程系数却略低于基准结构。这是因为槽道一方面改变了叶尖泄漏流的流动方向,抑制了空化的发展;另一方面形成的大尺度旋涡造成一部分能量损失,降低了诱导轮的增压能力。

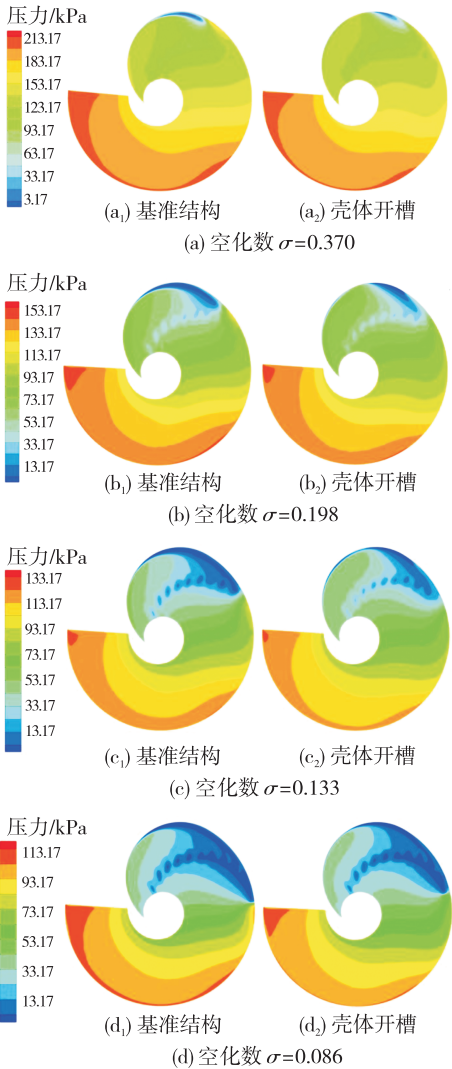


图 8 诱导轮叶片吸力面压力云图
Fig. 8 Pressure contour of inducer blade suction surface

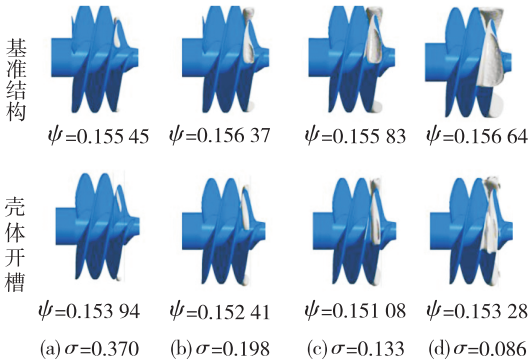


图 9 不同空化数时气相体积分数等值面
Fig. 9 Vapor fraction isosurface with different cavitation number

将诱导轮扬程下降 10% 时的空化数定义为临界空化数 σ_0 ^[22],即空化断裂工况点。关闭空化模型后,计算出基准结构诱导轮的平均扬程系数为 0.156 7。为了统一比较标准,本文将基准诱导轮无空化平均扬程系数下降 10% 时的空化数定义为临界空化数,即 $\psi = 0.141$ 时所对应的空化数为临界空化数 σ_0 。表 5 为两种诱导轮的临界空化数,壳体开槽诱导轮的临界空化数较小,具有更好的空化性能。

表 5 临界空化数

Tab.5 Critical cavitation number

诱导轮模型	基准结构	壳体开槽
临界空化数	0.016 4	0.015 4

由于空化数较大时,扬程系数几乎保持不变,图 10 给出基准结构和壳体开槽诱导轮在空化数小于 0.05 时的空化性能曲线。可以看出,两条曲线的变化趋势基本一致,当空化数达到某个值($\sigma = 0.019$)附近,扬程系数先略微上升后再陡降直至发生空化断裂,壳体开槽诱导轮的临界空化数更小。

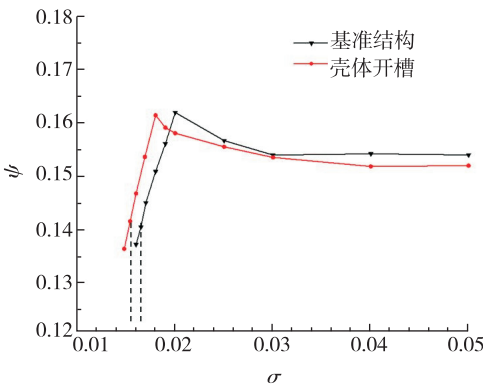


图 10 空化性能曲线

Fig.10 Cavitation performance

图 11 为空化数 $\sigma = 0.019$ 时两种诱导轮叶片通道内气相体积分数云图。叶片前缘几乎整个叶尖处均被空化区覆盖,由于空化区的阻挡作用使叶尖泄漏流大大减少,流道的通流能力增强,使得诱导轮的扬程系数略微升高。基准结构诱导轮空化区约占据了整个流道长度的 2/3,而壳体开槽诱导轮空化区约占据了整个流道长度的 1/2。

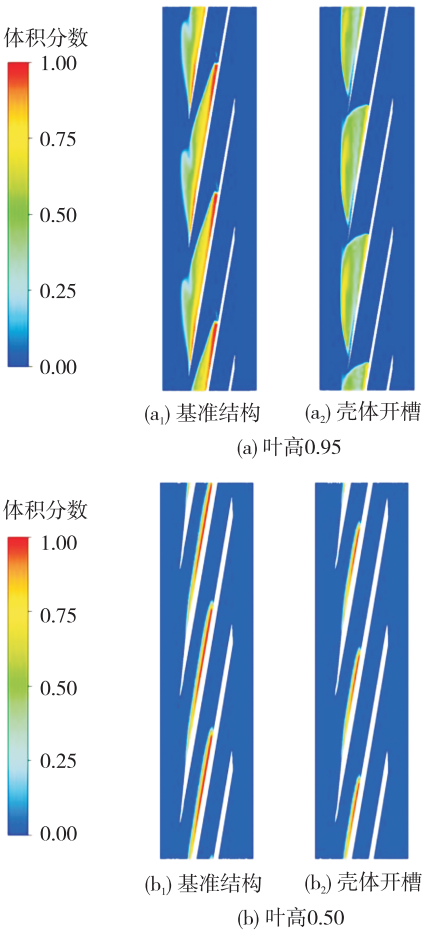


图 11 空化数 $\sigma = 0.019$ 时诱导轮叶片通道内气相体积分数云图

Fig.11 Water vapor fraction contour in induce blade channels with cavitation number $\sigma = 0.019$

图 12 为空化数 $\sigma = 0.016$ 时两种诱导轮叶片通道内气相体积分数等值面。此时基准结构空化数已经小于临界空化数,可以看出,大片空化区脱落进入流道内部,降低了流道的通流能力。壳体开槽诱导轮空化区由叶尖和叶片表面向流道内部蔓延,但尚未发生空化断裂。随着空化数的进一步降低,空化区迅速扩大导致扬程系数陡降,直至整个流道堵塞后,两种诱导轮均失去增压能力。

本文研究了从空化初生至空化断裂整个过程中两种诱导轮的空化流动特性,相同空化数下壳体开槽诱导轮较基准结构诱导轮空化性能均有所提升。虽然正常工作时壳体开槽诱导轮的扬程系数略有降低,但泵在设计过程中扬程尚有一定余量,另外,这种开槽方式加工起来简单方便,因此可以满足工程应用需求。

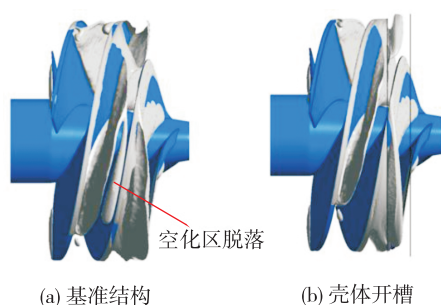


图 12 空化数 $\sigma=0.016$ 时气相体积分数等值面

Fig. 12 Vapor fraction isosurface with cavitation number $\sigma=0.016$

4 结论

通过数值计算方法对比了壳体开槽诱导轮和基准结构诱导轮在不同空化数下叶片吸力面压力分布、诱导轮内部空化区的分布状态及扬程系数的变化,得到以下结论。

1) 壳体开槽诱导轮会在叶尖附近产生大尺度旋涡,通过阻挡泄漏流和主流之间的相互作用抑制泄漏涡的形成,同时减小了压力面和吸力面之间的压力梯度,改善了诱导轮内部的压力分布,从而提高了空化性能。壳体开槽诱导轮的初生空化数小于基准结构诱导轮,表明壳体开槽对空化的产生有抑制作用。

2) 空化数从 0.370 减小到 0.086 过程中,叶尖处空化区域不断扩大,扬程系数几乎保持不变。相同空化数下,壳体开槽诱导轮的扬程系数略低于基准结构,但空化区相对较小,对空化的发展有一定的抑制作用。随着空化数的进一步减小,当空化数达到某个值附近,扬程系数先略微上升后再陡降直至发生空化断裂,壳体开槽诱导轮的临界空化数更小。

3) 从空化初生至空化断裂,壳体开槽诱导轮较基准结构诱导轮空化性能均有所提升。

参考文献

[1] 颜子初. 高性能螺旋轮设计的探讨[J]. 导弹与航天运载技术, 1998(5): 12-20.
YAN Z C. A study on the design of high performance inducers[J]. Missiles and Space Vehicles, 1998(5): 12-20.

[2] 陈士强, 黄辉, 邵业涛, 等. 航天动力系统未来需求方向及发展建议的思考[J]. 宇航总体技术, 2019(1): 62-70.
CHEN S Q, HUANG H, SHAO Y T, et al. Study on the requirement trend and development suggestion for China space propulsion system [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2019(1): 62-70.

[3] 杨宝锋, 金路, 许开富, 等. 考虑密封耦合效应的涡轮泵转子动力学特性[J]. 火箭推进, 2022, 48(3): 16-24.
YANG B F, JIN L, XU K F, et al. Analysis on rotor dynamic of a turbopump considering seal coupling effect[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2022, 48(3): 16-24.

[4] 姚尚鹏, 黄红, 赵佳敏, 等. 涡轮泵典型故障仿真与辨识系统设计[J]. 火箭推进, 2023, 49(3): 96-104.
YAO S P, HUANG H, ZHAO J M, et al. Typical fault simulation and identification system design for turbopump[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2023, 49(3): 96-104.

[5] ENOMOTO N. Suppression of cavitation surge of a helical inducer occurring in partial flow condition[C]//5th International Symposium on Cavitation. Osaka, Japan: [s. n.], 2003.

[6] FUJII A, MIZUNO S, HORIGUCHI H, et al. Suppression of cavitation instabilities by jet injection at inducer inlet [C]//ASME 2005 Fluids Engineering Division Summer Meeting. Texas, USA: ASME, 2008.

[7] 唐飞, 李家文, 陈晖, 等. 采用环形入口壳体的诱导轮汽蚀性能研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(4): 171-176.
TANG F, LI J W, CHEN H, et al. Study on cavitation performance of inducer with annulus inlet casing [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(4): 171-176.

[8] 李欣, 李家文, 王珏, 等. 带螺旋静叶诱导轮的气蚀性能[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(12): 2654-2661.
LI X, LI J W, WANG J, et al. Cavitation performance of inducer with helical static blades [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(12): 2654-2661.

[9] TORRE L, PASINI A, CERVONE A, et al. Effect of tip clearance on the performance of a three-bladed axial

- inducer[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2011, 27(4): 890-898.
- [10] KIM S, CHOI C, KIM J, et al. Effects of tip clearance on performance and characteristics of backflow in a turbopump inducer[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2013, 227(8): 847-857.
- [11] KIM S, CHOI C, KIM J, et al. Tip clearance effects on cavitation evolution and head breakdown in turbopump inducer[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2013, 29(6): 1357-1366.
- [12] LI X, LI J W, WANG J, et al. Study on cavitation instabilities in a three-bladed inducer[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2015, 31(4): 1051-1056.
- [13] HASHIMOTO T, YOSHIDA M, WATANABE M, et al. Experimental study on rotating cavitation of rocket propellant pump inducers[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1997, 13(4): 488-494.
- [14] SHIMAGAKI M, WATANABE M, HASHIMOTO T, et al. Effect of the casing configurations on the internal flow in rocket pump inducer[C]//42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2006.
- [15] TOMARU H, UGAJIN H, KAWASAKI S, et al. Suppression of cavitation surge in a turbopump inducer by the backflow restriction step[C]//43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2007.
- [16] CHOI Y D, KUROKAWA J, IMAMURA H. Suppression of cavitation in inducers by J-grooves[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2007, 129(1): 15-22.
- [17] SHIMIYA N, FUJII A, HORIGUCHI H, et al. Suppression of cavitation instabilities in an inducer by J groove[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2008, 130(2): 1.
- [18] 岳恒茂, 张静, 李家文. 带螺旋槽诱导轮的气蚀性能研究[J]. *导弹与航天运载技术*, 2019(6): 52-57.
- YUE H M, ZHANG J, LI J W. Study on the cavitation performance of an inducer with helical grooves[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2019(6): 52-57.
- [19] 李欣, 胡声超, 周佑君, 等. 螺旋槽对诱导轮气蚀性能影响研究[J]. *推进技术*, 2020, 41(3): 553-558.
- LI X, HU S C, ZHOU Y J, et al. Study on cavitation performance of a inducer with helical grooves[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(3): 553-558.
- [20] XIANG L, TAN Y H, CHEN H, et al. Experimental investigation of cavitation instabilities in inducer with different tip clearances[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(9): 168-177.
- [21] 项乐, 陈晖, 谭永华, 等. 诱导轮空化流动特性实验研究[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(12): 125-132.
- XIANG L, CHEN H, TAN Y H, et al. Experiment of cavitating flow characteristics of inducer[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(12): 125-132.
- [22] 李欣, 肖立明, 刘畅, 等. 变螺距诱导轮的气蚀性能研究[J]. *火箭推进*, 2017, 43(2): 1-8.
- LI X, XIAO L M, LIU C, et al. Study on cavitation performance of variable-pitch inducer[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2017, 43(2): 1-8.