

静盘螺栓对离心压气机背腔流动换热特性影响数值研究

曾培能,董伟林,史善广,杨元英

(中国航发湖南动力机械研究所,湖南 株洲 412002)

摘要:采用数值模拟方法研究了静盘螺栓对离心压气机背腔流动换热特性的影响,通过将有/无螺栓两种盘腔模型进行对比,分析了静盘螺栓对离心压气机背腔旋流系数、转盘风阻扭矩系数及对流传热系数的影响规律。结果表明:静盘上安装螺栓后,背腔原本的顺时针大涡将会破碎成多个小涡,流动变得复杂、无规律;静盘螺栓主要对盘腔低半径范围的旋流系数产生影响,使得无量纲半径 r/R 在 $0.3 \sim 0.75$ 范围内的旋流系数整体低于无螺栓盘腔;在流量系数 $C_w = 0.92 \times 10^{-4}$ 、旋转雷诺数 $Re_\omega = 1.39 \times 10^6$ 流动工况下,在低半径位置静盘螺栓对边界层内流体周向运动存在抑制作用,在高半径位置静盘螺栓作用则反之,综合导致转盘风阻扭矩系数上升 72.7% ;静盘上安装螺栓后,转子表面对流传热系数明显降低,使得背腔流体和转盘的溫度均降低。

关键词:螺栓;离心压气机;背腔;流动换热;数值模拟

中图分类号:V231.1

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.09.005

[引用本文格式]曾培能,董伟林,史善广,等.静盘螺栓对离心压气机背腔流动换热特性影响数值研究[J].热能动力工程,2024,39(9):38-44. ZENG Peineng, DONG Weilin, SHI Shanguang, et al. Numerical study on the influence of stator bolts on flow and heat transfer characteristics of centrifugal compressor back cavity[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(9): 38-44.

Numerical Study on the Influence of Stator Bolts on Flow and Heat Transfer Characteristics of Centrifugal Compressor Back Cavity

ZENG Peineng, DONG Weilin, SHI Shanguang, YANG Yuanying

(AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou, China, Post Code: 412002)

Abstract: The influence of stator bolts on flow and heat transfer characteristics of centrifugal compressor back cavity was studied using numerical simulation methods. By comparing the two kinds of disk cavity models with and without bolts, the influence law of stator bolts on the swirl coefficient, rotor disk windage torque coefficient and convective heat transfer coefficient of the centrifugal compressor back cavity was analyzed. The results show that the original clockwise large vortex in the back cavity will break into multiple small vortices with bolts on stator disk, making the flow in back cavity more complex and irregular. The stator disk bolts mainly affect the swirl coefficient in the low radius range of the disk cavity, resulting in an overall lower swirl coefficient within the non-dimensional radius $r/R = 0.3 \sim 0.75$ range compared with smooth back cavity. At low radius positions, stator bolts have an inhibitory effect on the circumferential motion of fluid in the boundary layer, while at high radius positions, the effect of stator bolts is opposite, resulting in a comprehensive increase of about 72.7% in the windage torque coefficient of rotor disk under the flow condition of $C_w = 0.92 \times 10^{-4}$ and $Re_\omega = 1.39 \times 10^6$. After installing bolts on the stator disk, the convective heat transfer coefficient of rotor significantly decreases, resulting in a temperature decrease in both the back cavity fluid and rotor disk.

Key words: bolts, centrifugal compressor, back cavity, flow and heat transfer, numerical simulation

收稿日期:2024-02-03; 修订日期:2024-04-24

作者简介:曾培能(1980-),男,中国航发湖南动力机械研究所高级工程师。

通信作者:董伟林(1992-),男,中国航发湖南动力机械研究所高级工程师。

引 言

离心压气机具有结构简单、单级压比高和稳定工作范围广等优点,广泛应用于中小型航空发动机及燃气轮机上^[1]。离心叶轮背腔是压气机的固有结构,腔内流动是复杂的径向向内转-静旋转盘腔流动,具有径向压力梯度大、突扩和突缩效应明显及腔内存在旋涡流动等特点^[2]。压气机虽然是传统意义上的冷端部件,但是随着发动机热力循环参数的不断提升,以 T901 为代表的国外先进组合压气机压比已经达到 30 左右,其离心压气机出口温度也到达了 800 K,这给离心压气机特别是背腔结构强度的设计带来巨大的挑战。因此,开展离心压气机背腔流动换热特性影响研究具有重要意义^[3]。

国内外学者开展了关于压气机背腔流动换热特性的相关研究。孙志刚等人^[4]通过离心压气机主流与叶轮背腔耦合流场的计算分析,得到了背腔流动的基本流场结构和动力特性;柳光等人^[5]采用数值方法研究了不同来流条件下不同间距比的转静系盘腔流动特点及盘腔内压力分布;邵冬等人^[6]分析了轮盖空腔及泄漏流对叶轮的影响,发现当空腔存在泄漏后,压气机的压比和效率都会降低,而总轴向推力会增加;唐永洪等人^[7]开展了离心压缩机盖盘密封及空腔流动的源项建模方法研究,并将源项建模方法和完整建模方法进行了对比;Han 等人^[8]开发了一套能够进行离心压气机主流与背腔耦合计算的方法;Fischer 等人^[9]针对 1 台压比为 2.0 的离心压气机背腔开展了研究,认为如果要降低风阻,应该尽可能缩小背腔的轴向宽度;Liu 等人^[10]认为在压气机背腔增加挡板后,流体和壁面的相对速度将会减小,进而降低风阻温升;Legare 等人^[11-12]研究发现,在背腔设置规则的凸起结构可以一定程度上降低旋流所带来的压力损失;Watanabe 等人^[13]和 Chew 等人^[14]分别提出了螺旋沟槽结构和肋条结构以进行背腔减阻;Sun 等人^[15]研究发现,背腔存在引气后叶轮出口的流动不均匀性增加的情况,进而导致压气机效率降低。

目前,国内外学者们的研究主要集中在带有光滑静盘的离心叶轮背腔流动换热特性方面,并通过各种仿真/试验方法揭示离心压气机背腔流动传热

机理。事实上,由于结构方面原因,经常需要在离心背腔静盘安装螺栓以固定其他发动机零件,而静盘螺栓对离心压气机背腔流动换热特性的影响仍然未知。基于此,本文针对静盘螺栓对离心压气机背腔流动换热特性的影响开展了研究,获得了静盘螺栓对离心压气机背腔旋流系数、转盘风阻扭矩系数和对流传热系数的影响规律,为离心压气机背腔设计提供参考。

1 研究模型、参数定义及边界条件

1.1 研究模型

图 1(a) 为小型航空发动机/燃气轮机离心叶轮背腔结构剖面。冷气经高半径环形缝隙通道轴向流入转盘与静止盘罩构成的转静系盘腔,随后在盘腔内与转、静盘表面对流传热,再经低半径环形缝隙通道轴向流出盘腔。本文对上述工程离心叶轮背腔结构进行适当简化,将盘腔简化为规则矩形结构^[16],但保留了“高半径环形通道轴向进气、转静封闭结构、低半径环形通道轴向出气”等主要特征,得到如图 1(b) 所示的简化低半径环形缝隙出气转静系结构,作为仿真研究对象。具体结构参数见表 1。

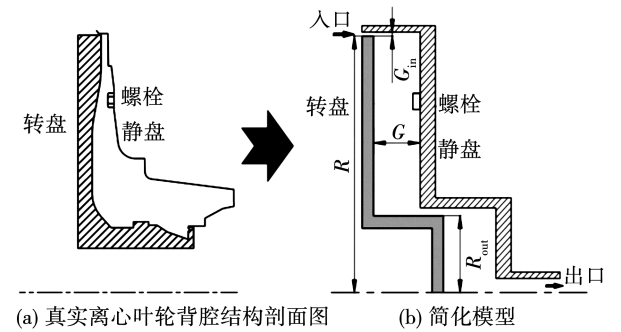


图 1 真实离心叶轮背腔结构与简化模型图
Fig. 1 Diagram of real centrifugal impeller structure and simplified model

表 1 计算模型结构参数(mm)	
Tab. 1 Structural parameters of calculation model(mm)	
参 数	数 值
进气间隙 G_{in}	3
转静间隙 G	40
出气半径 R_{out}	60
转盘半径 R	200

图2为带螺栓离心背腔模型及网格划分。由于螺栓安装时由盘腔自内向外伸出,通过螺母固定在静盘上,因此盘腔内仅留有螺栓头结构,螺栓剩余部分及螺母则位于盘腔外空间,故研究结构中仅将螺栓头纳入计算域。40个螺栓周向均布安装于无量纲半径 $r/R=0.75$ 的位置,为减少计算量,仿真结构选取周向 45° 扇形结构为计算域。网格采用结构化六面体网格,湍流模型采用 SST $k-\omega$ 湍流模型。SST $k-\omega$ 模型对静叶传热系数的预测精度明显优于其他两方程湍流模型,与试验结果最吻合^[17]。转盘壁面第1层网格高度为 0.001 mm ,静盘壁面为 0.005 mm ,保证所有工况下壁面 $y^+ < 1$,以满足该湍流模型计算要求。

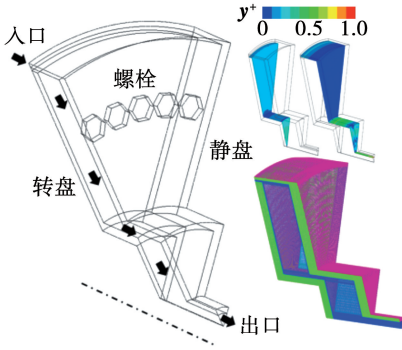


图2 带螺栓背腔模型与网格划分图

Fig. 2 Model and mesh division diagram of bolted back cavity

图3为盘腔平均旋流系数随网格数的变化规律。由图可知,在网格数达到90万后,盘腔平均旋流系数的变化已经小于0.2%。因此,综合考虑到计算资源与精度,最终选取网格数为90万。

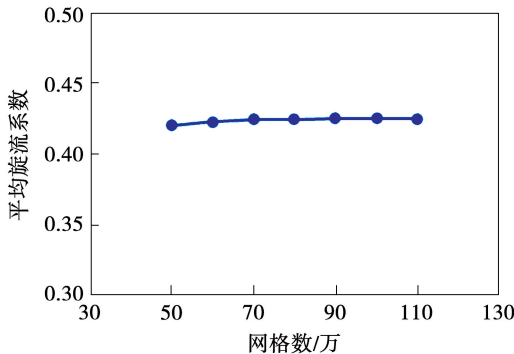


图3 网格数对平均旋流系数的影响

Fig. 3 Effect of grid number on average swirl ratio

1.2 参数定义

(1) 流量系数 C_w , 用于表征流体惯性力和粘性力的相对大小, 在转静系盘腔中主要反映冷气进口流量对于盘腔内流动规律和换热特性的影响。流量系数 C_w 的表达式为:

$$C_w = \frac{\dot{m}}{\mu R} \quad (1)$$

式中: $\dot{m}$ —流体流量; R —转盘半径; μ —动力粘度。

(2) 旋转雷诺数 Re_ω , 用于表征旋转流体的向心力和粘性力的相对大小, 反映转盘的旋转作用对盘腔内流动及换热过程的影响。旋转雷诺数 Re_ω 的表达式为:

$$Re_\omega = \frac{\rho \omega R^2}{\mu} \quad (2)$$

式中: ω —转盘角速度; ρ —流体密度。

(3) 旋流系数 β 的物理含义是流体周向速度与同半径下转盘线速度之比, 衡量流体与转盘间的周向速度差, 是盘腔内流动特性的重要参考量。旋流系数 β 的表达式为:

$$\beta = \frac{v_\phi}{\omega r} \quad (3)$$

式中: v_ϕ —流体周向速度; r —半径。

(4) 扭矩系数 C_m 用于表征固体壁面风阻扭矩。扭矩系数 C_m 的表达式为:

$$C_m = \frac{M}{0.5 \rho \omega^2 R^5} \quad (4)$$

式中: M —流体作用于固体壁面的风阻扭矩。

(5) 对流传热系数反映对流传热的强度。获取对流传热系数的分布规律与具体数值是盘腔研究的重点任务。对流传热系数 h 的表达式为:

$$h = \frac{\dot{q}}{T_{\text{wall}} - T_{\text{ref}}} \quad (5)$$

式中: $\dot{q}$ —流体与固体间换热的热流密度; T_{wall} —固体壁面温度; T_{ref} —参考温度。

在流体进口温度基础上, 考虑流体与固体之间粘性切应力引发的能量耗散作用造成的近壁面处流体温度上升现象, 以更准确地衡量对流传热过程中的实际温差。参考温度 T_{ref} 为:

$$T_{\text{ref}} = T_{\text{in}} + \frac{Pr^{\frac{1}{3}} (\omega r)^2}{2 c_p} \quad (6)$$

式中: T_{in} —流体入口温度; Pr —流体普朗特数; c_p —流体比定压热容。

1.3 边界条件

在计算中,进口给定总温 700 K、总压 645 kPa,出口给定不同静压以改变流量,工质采用理想气体。转速计算范围为 3 000 ~ 8 000 r/min,对应旋转雷诺数范围为 $0.83 \times 10^6 \sim 2.22 \times 10^6$;质量流量计算范围为 120 ~ 380 kg/h,对应流量系数范围为 $9.2 \times 10^{-3} \sim 2.92 \times 10^{-4}$ 。

2 结果与分析

2.1 光滑背腔流场分析

图 4 为旋转雷诺数和流量系数对盘腔旋流系数的影响。由图可知,随着无量纲半径的增加,旋流系数越来越低,这是由于计算模型为径向向内流动,而光滑壁面的粘性剪切力做功能力有限,因此半径越低,旋流系数越高。当无量纲半径 r/R 约小于 0.4 时,旋流系数已经大于 1,即流体的切向速度已经超过了壁面的切向速度。从做功的角度看,在高半径位置,转子壁面对流体做功,背腔表现为“压气机”状态,流体的总焓将会增加;在低半径位置,流体对转子壁面做功,背腔表现为“涡轮”状态,流体的总焓将会降低。随流量系数的增加,背腔的旋流系数会降低,但是随着旋转雷诺数的增加,流量系数对旋流系数的影响会逐渐削弱。

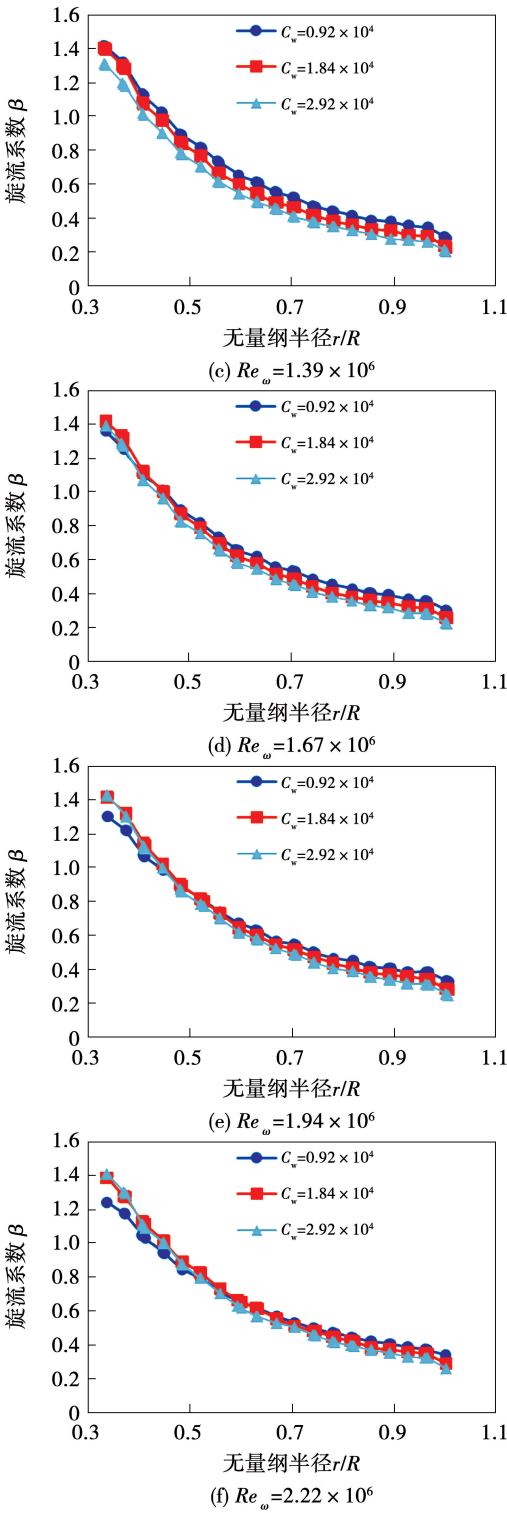
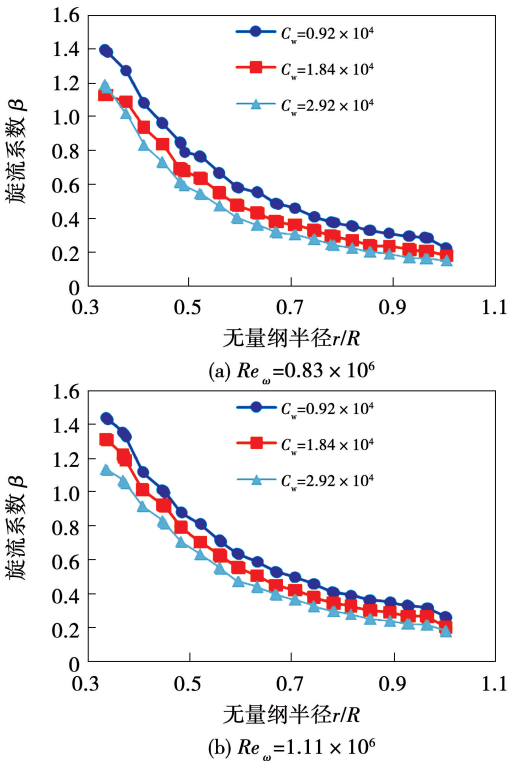


图 4 旋转雷诺数和流量系数对盘腔旋流系数的影响
Fig. 4 Effects of rotational Reynolds number and flow coefficient on swirl coefficient of the disk cavity

2.2 螺栓对背腔的影响

2.2.1 螺栓对背腔流场的影响

在静盘上安装螺栓后,对盘腔内的流动与换热状

况有较明显的影响。图 5 为流量系数 $C_w = 0.92 \times 10^4$ 、旋转雷诺数 $Re_\omega = 1.39 \times 10^6$ 工况下无螺栓盘腔与静盘安装螺栓盘腔的子午面流场结构的对比。可以看到,静盘上安装螺栓后,破坏了原本规律的流动结构,使得盘腔内形成多个破碎的小涡,流动变得复杂无规律。流动结构的改变进一步影响了盘腔旋流系数、对流传热系数及转盘所受的扭矩。

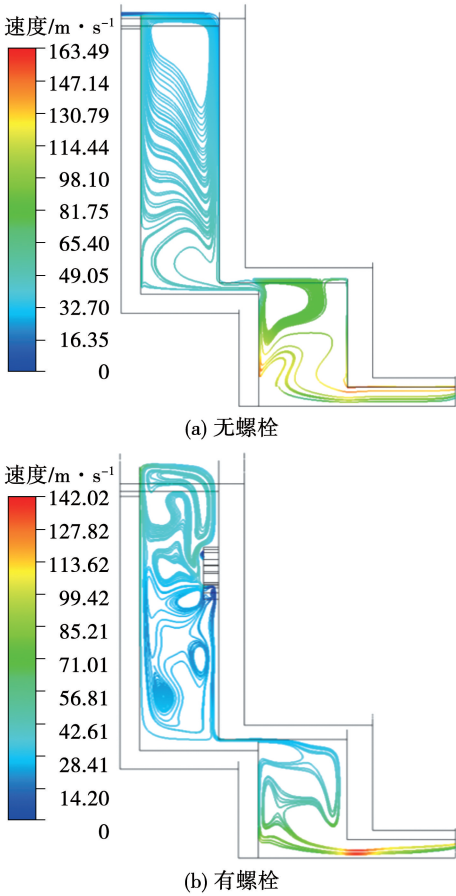


图 5 静盘螺栓对盘腔流场结构的影响
Fig.5 Effects of stator bolts on the flow structure of disk cavity

2.2.2 螺栓对旋流系数的影响

在静盘周向均布安装螺栓。无螺栓盘腔及静盘分布螺栓盘腔在 $C_w = 0.92 \times 10^4$ 、 $Re_\omega = 1.39 \times 10^6$ 流动工况下的仿真结果如图 6 所示。从图中可以看出,静盘螺栓主要对盘腔低半径范围的旋流系数产生影响,使得无量纲半径在 0.3 ~ 0.75 范围内的旋流系数整体低于无螺栓盘腔。其原因在于,螺栓结构对盘腔内流体周向运动产生了明显的限制作用。

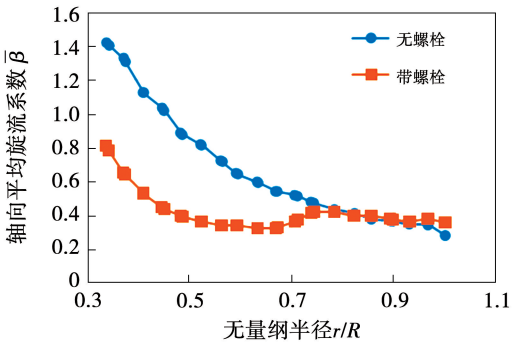


图 6 静盘螺栓对盘腔轴向平均旋流系数的影响
Fig.6 Effect of stator bolts on axial average swirl coefficient of disk cavity

图 7 对比了无螺栓盘腔与静盘有螺栓盘腔在相同流动参数下盘腔子午面的周向速度场。可以看到,在螺栓所在半径位置以上,即无量纲半径在 0.75 ~ 1.0 范围内时,螺栓对周向速度的影响较小,仅造成了周向速度场的扰动,但其绝对值与标准结构盘腔处于同一水平。在螺栓覆盖的半径位置内,即无量纲半径在 0.705 ~ 0.795 范围内时,流体沿静盘表面的径向内流运动因螺栓的阻挡形成的小涡加强了流体间的扰动与掺混,并将螺栓的阻碍作用传递至盘腔内部,造成流体周向运动被抑制,表现出静盘螺栓旋流系数分布曲线随无量纲半径减小而减小的趋势。在螺栓分布的半径范围以下,即无量纲半径在 0.3 ~ 0.705 范围内时,虽然静盘有螺栓盘腔流体周向速度与无螺栓盘腔数值不同,但是变化规律类似,两者均随无量纲半径减小而逐渐增加,说明此时螺栓的作用已较弱。

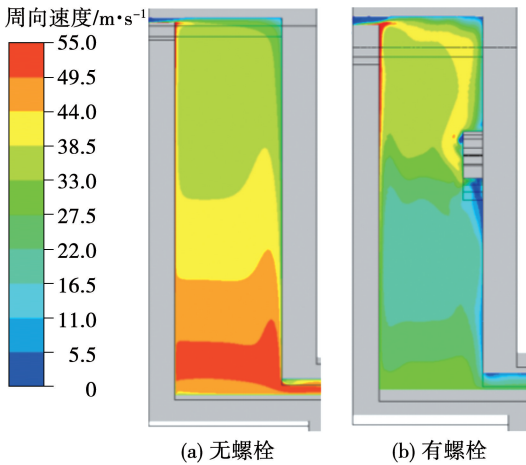


图 7 静盘螺栓对子午面周向速度场的影响
Fig.7 Effects of stator bolts on circumferential velocity field of meridian plane

2.2.3 螺栓对风阻扭矩系数的影响

在 $C_w=0.92 \times 10^4$ 、 $Re_\omega=1.39 \times 10^6$ 流动工况下,无螺栓盘腔与静盘有螺栓盘腔两种结构下流体作用在转盘内表面上的风阻扭矩系数如图 8 所示,从图中可以看出,静盘上分布螺栓后,会增加转盘风阻扭矩系数。

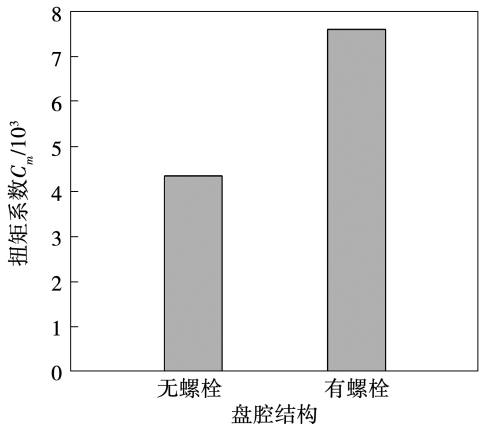


图 8 静盘螺栓对扭矩系数的影响

Fig. 8 Effect of stator bolts on torque coefficient

转盘边界层内流体旋流系数径向分布如图 9 所示。图中旋流系数为距离转盘主盘面 0.5 mm 处平面旋流系数周向平均值。

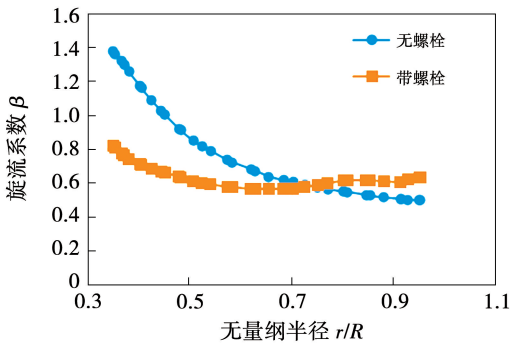


图 9 静盘螺栓对边界层旋流系数径向分布的影响

Fig. 9 Effect of stator bolts on radial distribution of boundary layer swirl coefficient

图 9 显示,当无量纲半径在 0.3 ~ 0.75 范围内,即螺栓所在半径位置以下时,静盘螺栓导致边界层流体周向速度明显下降,从而增大了流体与转盘间的粘性切应力。无量纲半径 r/R 在 0.75 ~ 1.0 范围内时,静盘螺栓对转盘边界层流体周向运动有增益作用,有螺栓结构盘腔转盘边界层流体与转盘周向速度差更小。结合图 8 可知,静盘螺栓对边界层内

流体周向运动的抑制作用相比促进作用更显著,最终表现出转盘风阻扭矩系数上升的结果,在静盘上安装螺栓后导致转盘风阻扭矩系数约上升 72.7%。

2.2.4 螺栓对对流传热的影响

在流量系数 $C_w=0.92 \times 10^4$ 、旋转雷诺数 $Re_\omega=1.39 \times 10^6$ 工况下无螺栓盘腔与静盘有螺栓盘腔子午面温度场及盘腔转盘表面对流传热系数径向分布如图 10 和图 11 所示。由图 10 和图 11 可知,静盘上安装螺栓后,进口环形缝隙内流体与固体间的换热得到加强,盘腔内流体温度总体下降,且因腔内形成多个小涡,加强流体间的掺混,腔内流体温度分布趋于均匀。

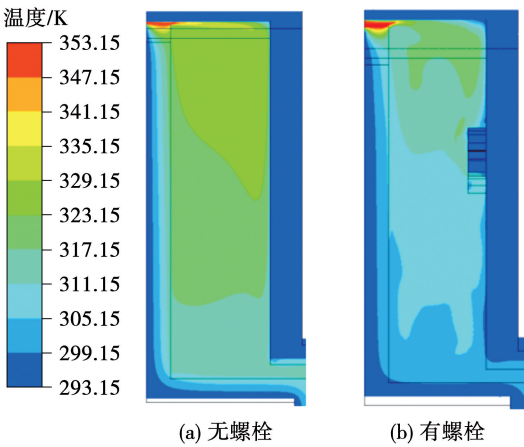


图 10 静盘螺栓对子午面温度场的影响

Fig. 10 Effects of stator bolts on temperature field of meridian surface

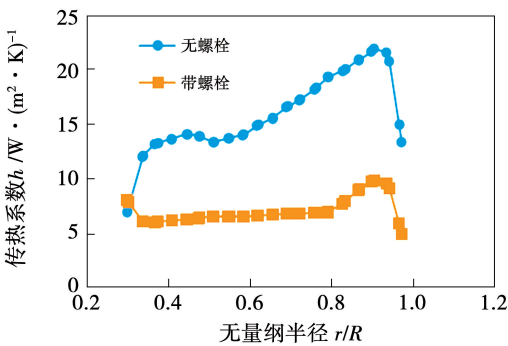


图 11 静盘螺栓对对流传热系数径向分布的影响

Fig. 11 Effect of stator bolts on radial distribution of convective heat transfer coefficient

结合图 11 可以看出,进口环形缝隙内换热加强后使得转盘高半径位置具有更高的温度,腔内流体

温度下降缩小了腔内流体与转盘间的温差,无量纲半径 r/R 在 $0.9 \sim 1.0$ 范围内对流传热系数下降;腔内流体温度下降且分布更为均匀后,使得流体与转盘在盘腔半径范围内温差相近,无量纲半径 r/R 在 $0.3 \sim 0.8$ 范围内对流传热系数低于无螺栓盘腔且分布曲线较为平缓。

3 结 论

本文采用数值模拟方法研究了静盘螺栓对离心压机背腔流动换热特性的影响,得到以下结论:

(1) 静盘上安装螺栓后,背腔内流体原本规律的流动结构被破坏,在螺栓的阻碍下破碎成多个小涡,流动变得复杂、无规律。

(2) 在 $C_w = 0.92 \times 10^4$ 、 $Re_\omega = 1.39 \times 10^6$ 流动工况下,静盘螺栓主要对盘腔低半径范围的旋流系数产生影响,使得无量纲半径 r/R 在 $0.3 \sim 0.75$ 范围内旋流系数整体低于无螺栓盘腔;在低半径位置,静盘螺栓对边界层内流体周向运动存在抑制作用,在高半径位置处静盘螺栓作用则反之,综合导致转盘风阻扭矩系数上升约 72.7%。

(3) 静盘上安装螺栓后,盘腔内流体温度总体下降,且因腔内形成多个小涡,加强流体间的掺混,腔内流体温度分布趋于均匀,使得流传热系数和背腔流体及转盘的温度均降低。

参考文献:

- [1] 胡晓煜. 世界中小型航空发动机手册[M]. 北京:航空工业出版社,2006.
HU Xiaoyu. Handbook of the world's small and medium-sized aero engines [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2006.
- [2] 曹玉璋. 航空发动机传热学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.
CAO Yuzhang. Aircraft engine heat transfer [M]. Beijing: Beihang University Press, 2005.
- [3] 伊卫林,邓海涛. 离心叶轮背腔复杂流态及调控方法研究进展[J]. 推进技术,2022,43(1):34-43.
YI Weilin, DENG Haitao. Review of complex flow status and control methods for rear disk cavity in centrifugal impeller[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(1): 34-43.
- [4] 孙志刚,左志涛,王英杰,等. 离心压机轮盘空腔流场计算与分析[J]. 工程热物理学报,2009,30(4):569-573.
SUN Zhigang, ZUO Zhitao, WANG Yingjie, et al. Computation and analysis on the impeller backside cavity of a centrifugal compressor [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(4): 569-573.
- [5] 柳 光,杜 强,胡嘉麟,等. 不同进口条件下向心流转静盘

腔流动特性研究[J]. 推进技术,2017,38(10):2381-2392.

- LIU Guang, DU Qiang, HU Jialin, et al. Flow characteristics in a rotor-stator cavity with various radial inflow[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(10): 2381-2392.
- [6] 邵 冬,孙志刚,谭春青,等. 闭式叶轮轮盖空腔流场的数值研究[J]. 推进技术,2017,38(6):1241-1248.
SHAO Dong, SUN Zhigang, TAN Chunqing, et al. Numerical investigation on flow field of impeller front-side cavity for shrouded impeller[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(6): 1241-1248.
- [7] 唐永洪,席 光,金志宏,等. 离心压缩机密封及空腔流动的一维/三维耦合建模研究[J]. 航空动力学报,2019(9):2019,34(9):2038-2047.
TANG Yonghong, XI Guang, JIN Zhihong, et al. Research on one-dimensional/three-dimensional coupled modeling for seal and cavity flow of centrifugal compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(9): 2038-2047.
- [8] HAN Z X, CIZMAS P G A. A CFD method for axial thrust load prediction of centrifugal compressors[J]. International Journal of Turbo & Jet-Engines, 2003, 20(1): 1-16.
- [9] FISCHER T, PETERS M, RAETZ H. Low inertia centrifugal compressor wheels; Influence of back disk cavity on aerodynamic losses and axial thrust load[C]. London: 12th International Conference on Turbochargers and Turbocharging, 2016.
- [10] LIU X, PATEL K V. A CFD analysis of the flow in the impeller rear cavity of aeroengines[R]. ASME 93-GT-259.
- [11] LEGARE P V, HERBORTH J T, ARTHUR G O. Impeller baffle with air cavity deswirlers[P]. USA: US7682131B2, 2010-03-23.
- [12] LEGARE P V. Impeller rear cavity thrust adjustor[P]. USA: US7775758B2, 2010-08-17.
- [13] WATANABE K, BUDIARSO, OGATA S, et al. Drag reduction of an enclosed rotating disk with fine spiral grooves[J]. Journal of Environment and Engineering, 2007, 2(1): 97-107.
- [14] CHEW J W, FARTHING P R, OWEN J M, et al. The use of fins to reduce the pressure drop in a rotating cavity with a radial inflow[J]. Journal of Turbomachinery, 1989, 111(3): 349-356.
- [15] SUN Z, TAN C, ZHANG D. Flow field structures of the impeller backside cavity and its influences on the centrifugal compressor [R]. ASME GT 2009-59879.
- [16] WILL B C. Theoretical, numerical and experimental investigation of the flow in rotor-stator cavities with application to a centrifugal pump [D]. Nordrhein-Westfalen: University of Duisburg-Essen, 2011.
- [17] 王志多,刘兆方,丰镇平. 不同湍流模型对燃气透平静叶及动叶叶顶传热预测精度的研究[J]. 工程热物理学报,2015,36(9):1894-1897.
WANG Zhiduo, LIU Zhaofang, FENG Zhenping. Prediction of heat transfer on gas turbine stator and rotor blade tip by using different turbulence models[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(9): 1894-1897.

(刘 颖 编辑)