

燃气透平榫头/榫槽装配间隙 流动与换热特性研究

刘钊, 孙睿, 樊远航, 丰镇平

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为精确设计燃气轮机二次空气系统, 针对燃气透平动叶榫头/榫槽间隙内的流动与换热问题开展研究。以燃气透平动叶榫头/榫槽配合面 S 形间隙结构为研究对象, 试验研究了榫头/榫槽装配间隙内的流阻与换热特性, 并数值分析了其详细流动结构。首先, 采用压力扫描阀和热色液晶测温技术测量了榫头/榫槽内的流阻和努塞尔数分布。然后, 利用试验结果对所采用的数值计算方法进行了考核, 并进行了网格无关性验证。最后, 详细分析了 5 种雷诺数、5 种结构参数榫头/榫槽高度及 5 种间隙宽度下榫头/榫槽装配间隙结构内部流动与换热特性。结果表明: 在试验测量范围内, 左侧壁面的平均努塞尔数始终比右侧高 10% 左右; 随着雷诺数的增大, 榫头/榫槽装配间隙的阻力损失系数和换热强度均逐渐增大, 当雷诺数从 15 000 增大到 35 000 时, 平均阻力系数增大了 2 倍, 两侧面整体平均努塞尔数均增大了 1.1 倍; 随着榫头/榫槽装配间隙相对高度的增大, 阻力损失系数及壁面努塞尔数均逐渐减小; 随着榫头/榫槽装配间隙宽度的增大, 试验范围内平均阻力系数增大了 30.7%, 左右两侧面平均努塞尔数分别增大了 95.5% 和 94.9%。

关键词: 榫头/榫槽装配间隙; 流动特性; 换热特性

中图分类号: TK474.7 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202405009 **文章编号:** 0253-987X(2024)05-0088-11

Study on Flow and Heat Transfer Characteristics of Tenon Joint Gap Between Gas Turbine Blade and Disk

LIU Zhao, SUN Rui, FAN Yuanhang, FENG Zhenping

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to design the secondary air system of gas turbine accurately, the flow and heat transfer in the tenon joint gap of gas turbine rotor blade and disk are studied. The flow resistance and heat transfer characteristics of the S shaped tenon joint gap between blade and disk in gas turbine are investigated experimentally, and detailed flow field is studied numerically. Firstly, the flow resistance and Nusselt number of the gap are measured by pressure scanning valve and thermochromic liquid crystal, respectively. Then the turbulence model used in numerical calculation is validated by the experimental results, and the grid independence is verified. At last, the effects of flow and structure parameters on tenon joint gap flow and heat transfer are analyzed, in which, five different Reynolds numbers, five different relative heights of the gap and

five different widths of the gap are conducted. The results show that the average Nusselt number on the left wall is consistently around 10% higher than that on the right side. As the Reynolds number increases, the flow resistance coefficient and heat transfer intensity of the assembly gap increase gradually. When the Reynolds number increases from 15 000 to 35 000, the average flow resistance coefficient and the average Nusselt number on both sides increases by 300% and 110% respectively. With the increase of the relative height of the assembly gap, the flow resistance coefficient and the wall average Nusselt number decrease gradually. Increasing the gap width leads to a 30.7% average flow resistance coefficient increase within the test range, with the average Nusselt number on both sides increasing by 95.5% and 94.9% respectively.

Keywords: mortise and tenon assembly gap; flow characteristic; heat transfer characteristics

燃气轮机透平叶片的榫头/榫槽结构中存在一对锯齿状的装配间隙。这种间隙中间通流截面宽,两头通流截面窄,呈现S形,局部还可能出现死角。榫头/榫槽这一复杂间隙结构对其间流体流动和换热会带来较大影响,而流动与换热特性又影响叶片与轮盘的温度分布^[1],进而影响燃气透平的运行安全。为得到较为准确的燃气轮机透平叶片及轮盘温度场,有必要对榫头/榫槽装配间隙中流动与传热机理开展更深入的研究。

国内外针对微小通道流动换热的研究主要采用简化模型,主要包括圆管、三角型管、矩形管、圆环管等形状规则的通道,且集中于换热器微通道流动与换热研究^[2-6],以及透平叶片内部冷却结构的流动与换热研究^[7-10]。对于榫头/榫槽结构,目前基本都集中于对其结构的优化以降低榫头/榫槽连接处的应力集中,进一步提高疲劳寿命,而对其流动传热的研究相对较少。段玉发等^[11]以放大3倍后的实际燃气透平榫头/榫槽结构为研究对象,对S形榫头/榫槽装配间隙结构的流动特性与换热特性进行了试验研究。刘永葆等^[12]在分析燃气轮机高压涡轮的叶片时,将轮盘和叶片之间的榫头/榫槽装配间隙内的传热过程转化为对流传热过程。马晓腾等^[13]通过相似原理将实际燃机透平榫头/榫槽装配间隙结构放大9倍,采用热色液晶测量了榫头/榫槽装配间隙结构通道的换热系数变化情况。常海萍等^[14-15]针对纵树型榫头/榫槽装配间隙结构进行了相关试验研究。Chen等^[16]数值研究了两种典型榫头/榫槽装配间隙结构在静止及旋转状态下的流动与换热特性。Gopinathrao等^[17]在研究高温和高负载下运行的燃气轮机部件时,分析并研究了榫头/榫槽结构的影响。Mabilat等^[18]采用试验和数值模拟方法对轮盘的整体寿命进行了研究,考虑了榫头/榫槽装配

间隙的传热性能对轮盘温度分布的影响。

基于对温度场和流场的干扰较小、响应速度快、测量精度高等优点,热色液晶测温方法在相关实验中得到了越来越广泛的应用。陈伟等^[19]采用瞬态液晶测量技术研究了高温高压涡轮叶片内部通道的冷却和传热特性。李博等^[20]利用瞬态液晶测温技术对球形和椭圆形球凹冷却结构的局部传热和流阻系数进行了实验研究。Shi等^[21-22]运用热色液晶实验研究了环形斜向射流阵列在密闭空间内撞击旋转圆柱表面的对流换热特性。Zhang等^[23]运用热色液晶测温技术通过实验研究涡轮端壁上游喷射冷却剂传热特性以及气膜冷却特性。Luan等^[24]对带肋和气膜孔的涡轮叶片前缘冲击冷却的内部传热系数和压力损失情况进行研究时,运用热色液晶测温技术得到了不同冷却条件下前缘腔内表面的传热系数分布。陈大为等^[25]采用热色液晶测温技术实验研究了尾迹区对于光滑叶片表面换热系数分布的影响。徐国强等^[26]利用热色液晶测温技术实验研究了吹风比和孔布置位置等因素对气膜冷却和传热性能的影响。上述研究表明,热色液晶测温技术已广泛应用于传热实验研究中。

综上,榫头/榫槽结构的流动与换热特性对透平的安全稳定运行具有重要影响,而目前相关研究还较少,其流动与换热机理尚有待进一步研究。因此,本文采用试验与数值计算相结合的方式研究了雷诺数与装配间隙高度和宽度等流动和结构参数对榫头/榫槽装配间隙内流动与换热特性的影响规律。本文搭建了榫头/榫槽装配间隙流动与传热试验台,采用瞬态热色液晶测量了不同雷诺数及结构参数下榫头/榫槽表面的换热系数分布情况,同时通过测量沿程压力分布获得了试验件的阻力特性,并数值计算分析了不同雷诺数及结构参数对榫头/榫槽装配

间隙内流动特性的影响。

1 试验测量与数值计算方法

本文对流阻和传热采用试验测量的方法进行，对具体流场细节采用数值计算的方法获得。

1.1 试验系统和试验段

试验系统图如图 1 所示。试验系统分为主流系统、试验段以及数据采集系统。主流由螺杆压缩机提供，气体经过冷干机、过滤器后进入储气罐，之后进入试验段部分。试验段选用有机玻璃板加工而成。考虑到密封性等因素，根据相似原理将真实榫头/榫槽装配间隙放大 5 倍后进行相关试验。由于榫头/榫槽 S 形装配间隙结构具有对称性，因此本文试验取一半高度的榫头/榫槽结构进行研究，榫头/榫槽装配间隙结构提取及试验台实物图如图 2 所示。图中 H 表示榫头 / 榫槽的高度， d 表示榫头/榫槽装配间隙宽度。

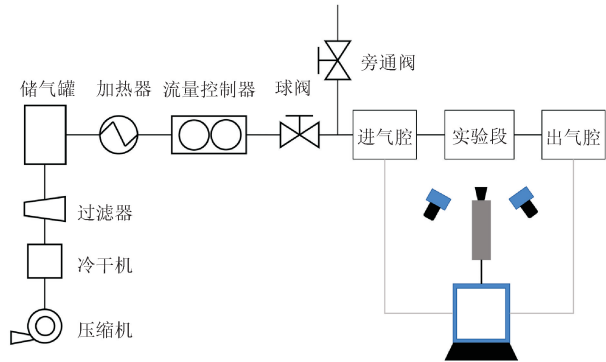
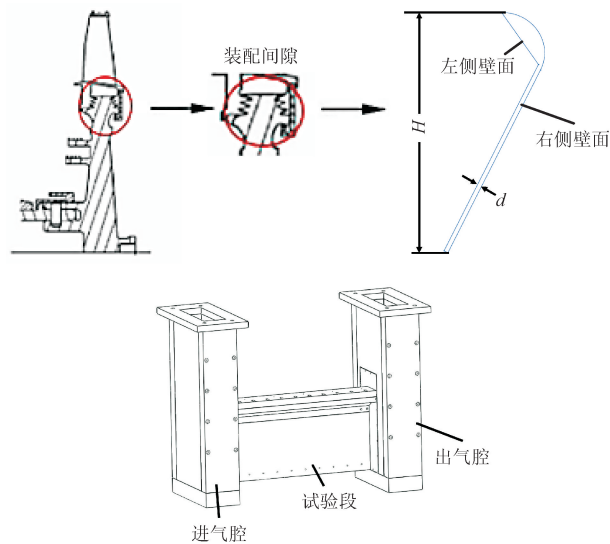


图 1 试验系统示意图
Fig. 1 Diagram of experimental system



(a) 试验件结构提取及试验段结构示意图



(b) 试验台实物图

图 2 试验件结构及试验台实物图

Fig. 2 Diagram of experimental section and experimental test rig

1.2 试验测量原理

试验采用 Azbil 热式质量流量计测量流量，量程精度为 $\pm 1.0\%$ ，压力采用 PSI9216 压力扫描阀进行测量，量程精度为 $\pm 0.05\%$ 。

换热试验根据热色液晶的颜色与温度相对应的特性，找出温度与颜色之间的对应关系。对于颜色有多种描述方法。对于数字图像的获取和处理系统，通常采用 RGB(红色、绿色和蓝色)颜色模型。RGB 颜色模型可以很好地再现颜色，但由于光强等因素的影响，有时同一颜色会有不同的 R、G、B 色值，这种情况不利于温度与颜色的相互转换。HIS 色彩模型用色调(H)、饱和度(I)、亮度(S)来描述一种颜色。色调是颜色彼此互相区分的特性，不同的颜色具有不同的色调，饱和度指一种颜色中纯光所占的比例，亮度则指的是颜色的强度。用色调区分颜色只需一个变量，不需要考虑饱和度和亮度的影响，从而解决了光照不均匀及光照条件不同的影响^[27-28]。因此，本文将拍摄的 RGB 色彩图像转换为 HIS 色调图像来确定温度。

由于需要确定色调与温度之间一一对应的关系，因此需要对热色液晶提前进行标定。标定装置如图 3 所示。

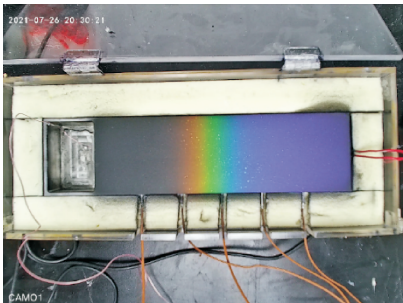


图 3 热色液晶标定装置

Fig. 3 Calibration for thermochromic liquid crystal

瞬态热色液晶测试技术是基于一维半无限大平板的非稳态导热理论的试验测量方法。试验开始时,试验模型的温度应均匀且等于气流的温度。如果测试表面气流的温度突然上升,则气流和测试表面之间会发生对流传热,导致测试表面的温度突然升高,并开始对试验模型内部进行导热,这一问题可以用式(1)进行描述

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \\ t = 0, T(x, 0) = T_0 \\ x = 0, \lambda \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = h(T_w - T_g) \\ x \rightarrow \infty, T(x, t) = T_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $T(x, t)$ 为试验模型内部 x 处在 t 时刻下的温度; T_0 为初始时刻温度; T_w 为所研究表面的壁面温度; T_g 为升高后的气流温度; ρ, λ, c 分别为试验模型的密度、导热系数、比热容。

壁面温度解析解为

$$T_w = T_0 + (T_g - T_0) \left[1 - \exp\left(\frac{h^2 t_h}{\rho \lambda c}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{h \sqrt{t}}{(\rho c \lambda)^{\frac{1}{2}}}\right) \right] \quad (2)$$

式中: erfc 为余差函数。

利用热色液晶测温技术测出所研究表面的壁面温度 (T_w) 以及加热时间 (t_h), 测得气流温度 (T_g) 随时间的变化规律, 结合初始温度 (T_0) 以及试验模型的物性参数即可求出换热系数 (h)。

1.3 不确定度分析

由热色液晶标定的结果可知, 此热色液晶不确定度误差为 $\pm 0.2\text{ K}$, 热电偶的测量误差也为 $\pm 0.2\text{ K}$, 时间测量误差为 $\pm 0.1\text{ s}$ 。采用 Moffat 实验误差分析方法^[29], 选择两个特征换热系数的数值进行计算。结果表明, 换热系数测量结果的相对误差约在 11% 以下, 低换热系数 ($h = 100\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) 下不确定度为 5%, 高换热系数 ($h = 2\,000\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) 下不确定度为 11.2%。

1.4 数值计算方法及验证

采用与试验研究相同的结构进行数值研究, 计算模型如图 4 所示。进口给定流量和温度, 出口给定平均静压, 榫头/榫槽通道两侧面给恒定壁温条件, 其他壁面为光滑无滑移绝热壁面。进、出口边界条件与试验一致, 进口温度给定为试验中进口在进气腔内靠近榫头榫槽间隙进口处测量的温度。网格为非结构化网格, 边界层内采用 prism 网格, 壁面处第一层网格高度设置为 0.001 mm , 并以 1.15 的比

率沿垂直壁面方向增长, prism 网格层数为 15 层。数值计算采用商用软件 ANSYS CFX。

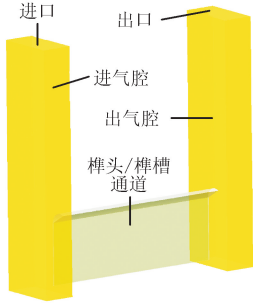


图 4 数值计算模型及边界
Fig. 4 Model and boundaries for numerical study

1.4.1 湍流模型考核

通过与相同工况下的试验值进行对比, 对标准 $k-\epsilon$ 模型、RNG $k-\epsilon$ 模型、标准 $k-\omega$ 模型、SST $k-\omega$ 模型共 4 种湍流模型在计算榫头/榫槽结构流动换热的精度进行了考核。计算所采用的试验工况如表 1 所示。

表 1 湍流模型考核计算边界条件

Table 1 Boundary conditions for turbulence model validation	
参数	数值
进口温度 T_h/K	323.15
进口质量流量 $/(\text{g} \cdot \text{s}^{-1})$	63.37
榫头/榫槽结构壁面温度 T_w/K	293.15
出口压力 $P_{\text{out}}/\text{MPa}$	0.1

努塞尔数定义式如下

$$Nu = \frac{q_w}{T_w - T_h} \frac{D_h}{\lambda} \quad (3)$$

式中: q_w 表示热流密度; T_h 表示进口气流温度; D_h 表示水力直径。

周向平均努塞尔数 Nu_{cir} 的定义如下

$$Nu_{\text{cir}} = \sum_{i=1}^n (Nu_i, l_i) / l \quad (4)$$

式中: Nu_i 表示对应网格节点 (i, j) 的 Nu ; l_i 表示各节点之间的曲线长度, m ; l 表示通道长度。

不同湍流模型计算的周向平均努塞尔数与试验结果的对比如图 5 所示。图中横轴 Z 表示坐标系的 Z 轴, 与气体流动方向平行。由图 5 可知, 采用 SST $k-\omega$ 湍流模型计算的结果与试验结果吻合得最好, 因此本文后续计算都选用 SST $k-\omega$ 湍流模型进行。

1.4.2 网格无关性验证

选取 140 万、304 万、550 万节点共 3 套网格进行网格无关性验证。比较了不同网格数下右侧壁面的周向平均努塞尔数, 网格无关性验证结果如图 6 所示。

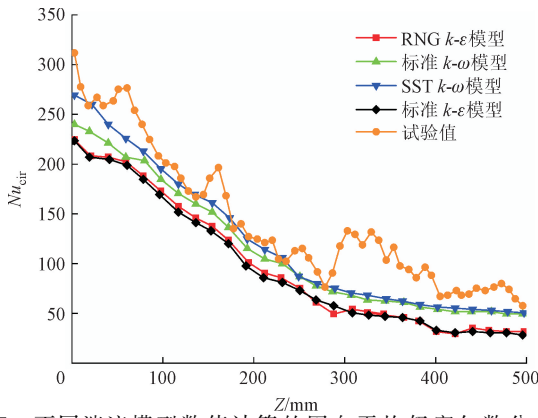


图 5 不同湍流模型数值计算的固向平均努塞尔数分布与试验结果的比较

Fig. 5 Comparison of circumferentially-averaged Nu distribution predicted by different turbulence models and experiment results

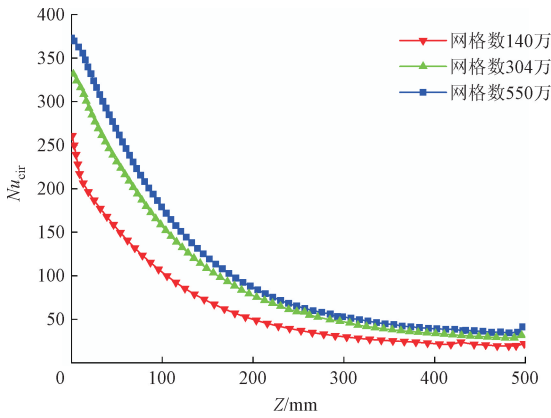


图 6 不同网格数下右侧壁面的周向平均努塞尔数

Fig. 6 Circumferentially-averaged Nu on the right side wall under different grid numbers

通过分析比较不同网格数下右侧壁面的周向平均努塞尔数 Nu_{cir} , 可以看出当网格数大于 304 万时, 网格数继续增加对计算精度影响不大。因此, 后续计算选择网格数为 304 万的网格开展数值计算。

2 结果与讨论

2.1 雷诺数对榫头/榫槽结构流动与换热特性的影响

试验并数值研究了 5 种雷诺数 ($Re = 15\,000, 20\,000, 25\,000, 30\,000, 35\,000$) 下榫头/榫槽装配间隙内的流动与换热特性。

2.1.1 雷诺数对榫头/榫槽结构流动特性的影响

阻力损失系数的定义为

$$f = \frac{2(P_1^* - P_5^*)D}{l\rho v^2} \quad (5)$$

式中: P_1^* 表示进口处的总压; P_5^* 表示出口处的总压; D 表示通道水力直径; v 表示气流速度。

图 7 展示了不同雷诺数下榫头/榫槽装配间隙通道入口处的三维流线。由图可以看出, 在任意雷诺数下, 由于从气流盘腔大空间进入榫头/榫槽间隙时气流与壁面存在刮削作用, 因此通道入口处都存在入口涡; 入口涡的强度及尺寸会受雷诺数的影响, 随着雷诺数的增加, 通道入口涡的尺寸趋于稳定; 入口涡的存在会导致通道入口处摩擦损失及换热强度较大。

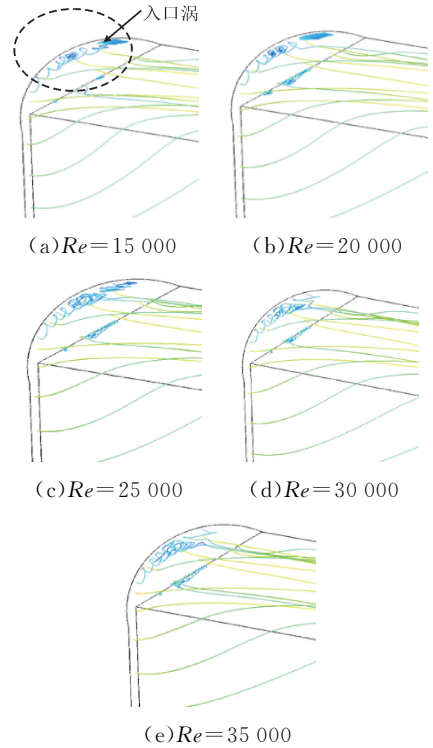


图 7 不同雷诺数下榫头/榫槽装配间隙通道入口处的流线
Fig. 7 Streamlines at the entrance of the mortise and tenon assembly gap at different Re

图 8 给出了不同雷诺数下榫头/榫槽结构的平均阻力系数的试验结果。由图可知, 随着雷诺数的增大, 榫头/榫槽通道结构的阻力系数随之增加。这

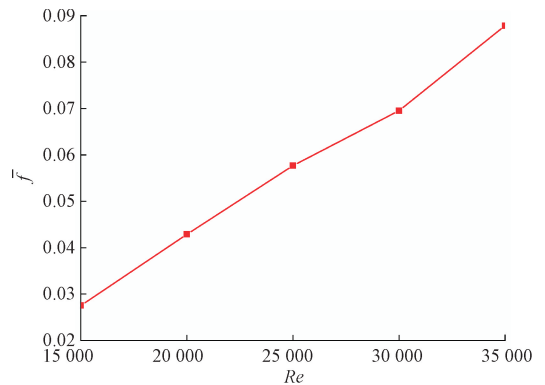


图 8 不同雷诺数下榫头/榫槽结构平均阻力系数试验结果
Fig. 8 Experimental results of drag coefficients of mortise and tenon gaps at different Re

主要是因为结构不变的条件下,增大雷诺数是通过增大流速实现的,而流速增大时,通道进出口的压差增大,从而会导致阻力系数增大。当雷诺数从 15 000 增大到 35 000 时,榫头/榫槽间隙平均阻力系数增大近 2 倍。

2.1.2 雷诺数对榫头/榫槽结构换热特性的影响

图 9 为不同雷诺数下榫头/榫槽通道 Nu 的试验结果,其中右侧为通道进口,左侧为出口。由图可知,在榫头/榫槽通道进口处,换热较为强烈,这主要是因为通道的入口处边界层的生成,且随着流动向下游发展,边界层逐渐增厚,因此换热强度逐渐降低。同时可以观察到,在中部狭窄的缝隙处换热强度较低,在顶部间隙较宽的处换热强度较高,这主要是因为气流在较宽处形成了旋涡,湍动度较大,而在中部较狭窄处旋涡的尺寸较小。

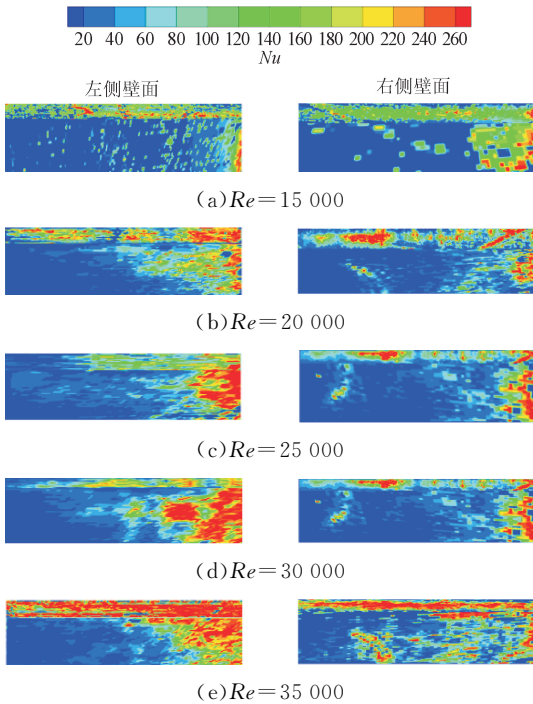


图 9 不同雷诺数下榫头/榫槽 Nu 分布试验结果
Fig. 9 Experimental results of Nu distribution on mortise and tenon gap at different Re

图 10 为不同雷诺数下榫头/榫槽通道左侧与右侧壁面面积平均努塞尔数(Nu_{ave})的试验结果。由图可知,随着雷诺数的增加,通道的 Nu_{ave} 随之增加,当雷诺数从 15 000 增大到 35 000 时,榫头/榫槽两侧面平均努塞尔数均增大了 1.1 倍。通道左侧壁面的 Nu_{ave} 始终比右侧壁面高 10% 左右,这主要是由两个原因造成的:①在顶部间隙较宽处靠近左侧壁面处生成了旋涡,造成左侧壁面换热强度更高;②左

侧壁面在间隙较宽处是弧形,而该处的换热较中部狭窄处的高,即左侧壁面高换热区面积更大。左右两侧壁面指榫头/榫槽通道的左右两侧,视图方向为通道的进气方向。左右两侧壁面示意图可见图 2(a)。

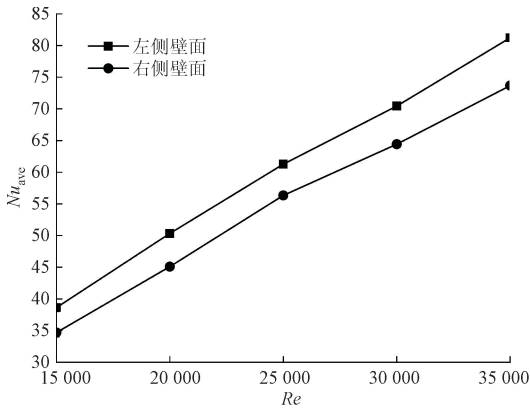


图 10 不同雷诺数下榫头/榫槽通道两侧壁面 Nu_{ave} 试验结果
Fig. 10 Experimental results of Nu_{ave} on the walls of mortise and tenon gap at different Re

2.2 装配间隙相对高度对榫头/榫槽流动及换热特性的影响

在研究雷诺数对榫头/榫槽间隙流动与传热特性研究的基础上,研究了榫头/榫槽装配间隙高度对其流动换热特性的影响。榫头/榫槽间隙高度采用无量纲参数榫头/榫槽装配间隙相对高度(h^*),其定义为

$$h^* = H/d \tag{6}$$

利用图 2 所示的模型结构,试验并数值研究 5 种榫头/榫槽装配间隙结构相对高度($h^* = 54.00, 49.85, 45.68, 41.52, 37.35$)对榫头/榫槽结构内部流动与换热特性的影响。

2.2.1 榫头/榫槽装配间隙相对高度对榫头/榫槽结构流动特性的影响

图 11 展示了不同榫头/榫槽结构相对高度下装配间隙通道不同截面处的流线分布情况。由图可以看出,在通道入口处($Z/L=0$),在上方流动空间较大的左侧与右侧壁面附近均生成了旋涡,在下方流动空间较小的窄长部分也有旋涡的生成。旋涡的生成会造成流动损失增加。随着结构高度的增加,靠近左侧与右侧壁面的旋涡数量减少,且尺寸有所减小,下方的窄长部分长度增加,旋涡的数量增加,此处流动损失增大。在通道中间部分($Z/L=0.5$)处,随着结构高度的增加,靠近左侧与右侧壁面处的旋涡生成数量及尺寸均略有减小,在此处通道下方的窄长部分没有旋涡的生成,在通道中间处随着流动

的发展流动损失逐渐减小。在通道的出口处($Z/L=1.0$),随着流动的发展,边界层厚度及流体温度均

逐渐增加,旋涡尺寸减小明显,在通道出口处流动损失减小。

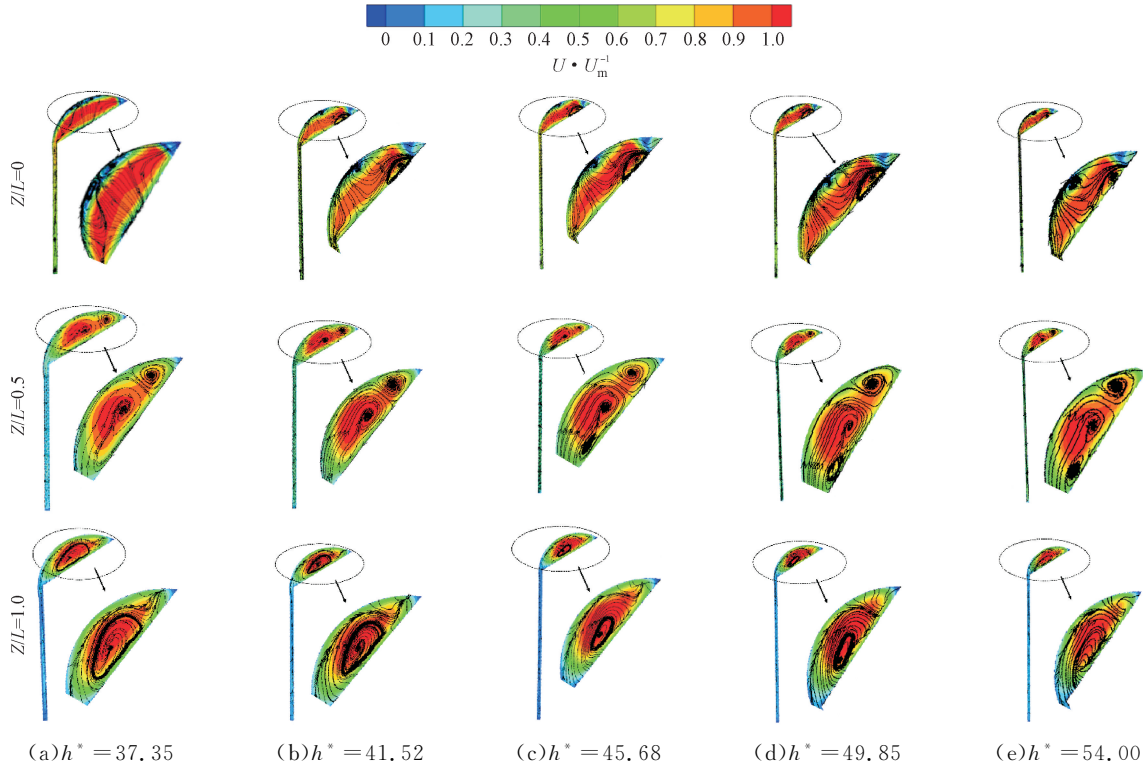


图 11 不同结构高度下通道不同截面处的流线分布

Fig. 11 Distribution of streamlines at different sections of the channel under different heights

图 12 为试验测量的不同榫头/榫槽结构相对高度下榫头/榫槽结构的平均阻力系数。由图可知,随着榫头/榫槽结构相对高度的增加,间隙通道平均阻力系数逐渐减小;在试验范围内,平均阻力系数降低了 65%。与图 11 的分析结果一致,随着榫头/榫槽结构高度的增加,通道中流动的旋涡减少,流动损失降低;装配间隙中狭窄的平直部分长度增加,而该部分流速较低,阻力较小,造成整体平均阻力系数降低。

2.2.2 榫头/榫槽装配间隙相对高度对其换热特性的影响

图 13 为不同榫头/榫槽结构相对高度下榫头/榫槽装配间隙 Nu 分布的试验结果。由图可得,随着装配间隙相对高度的增加,在入口处所生成的旋涡的尺寸及数量均逐渐减小,因此换热强度也逐渐降低;随着流动的发展,流动边界层逐渐变厚,努塞尔数逐渐降低,特别是在通道下方的窄长部分,由于流动速度较低,且未形成旋涡,湍动度较低,因此 Nu 降低更快;但是随着结构高度的增加,靠近左侧与右侧壁面处的旋涡尺寸均略有减小,因此 Nu 逐渐减小;在通道的出口处,旋涡的尺寸明显减小,因此在通道的出口 Nu 减小明显,与图 11 分析结果一致。总体而言,随着流动的发展,沿程 Nu 逐渐减小;随着结构高度的增加,通道的换热强度逐渐减弱。

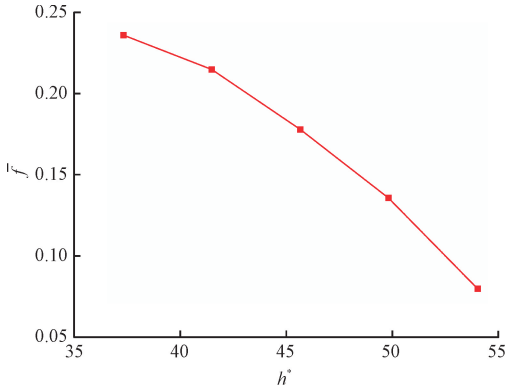
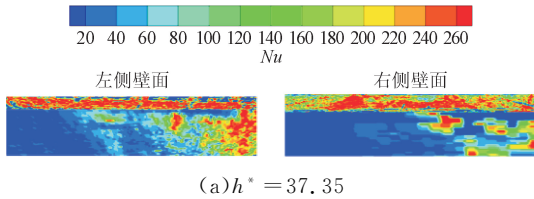


图 12 不同相对高度下榫头/榫槽间隙平均阻力系数试验结果

Fig. 12 Experimental results of averaged resistance coefficients of mortise and tenon gaps in different heights



(a) $h^* = 37.35$

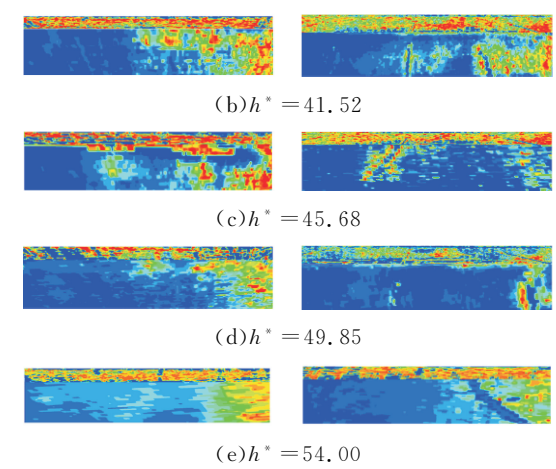


图 13 不同榫头/榫槽结构相对高度下两侧壁面 Nu 分布试验结果

Fig. 13 Experimental results of mortise and tenon gap Nu at different heights

图 14 为不同榫头/榫槽装配间隙结构相对高度下榫头/榫槽通道左侧与右侧壁面平均努塞尔数的试验结果。由图可知,随着榫头/榫槽结构相对高度的增加,通道平均努塞尔数逐渐减小,即换热强度随着榫头/榫槽结构高度的增加而降低;在试验范围内,当榫头/榫槽间隙相对高度从 37.35 增加到 54.00 时,左右两侧壁面的平均努塞尔数分别降低了 12.1% 和 14.1%。这主要是因为:①结构高度的增加,导致间隙通道内气流流速降低;②增加高度过程中增加的是平直且窄的部分的高度,而该部分换热强度低,因此降低了间隙通道努塞尔数的面积平均值;③通道内部所生成的旋涡尺寸以及数量均有所减小,换热强度逐渐减小。在任何结构高度下,靠近左侧壁面的利于流体混合的旋涡始终多于右侧壁面,因此左侧壁面的换热强度始终高于右侧壁面的。

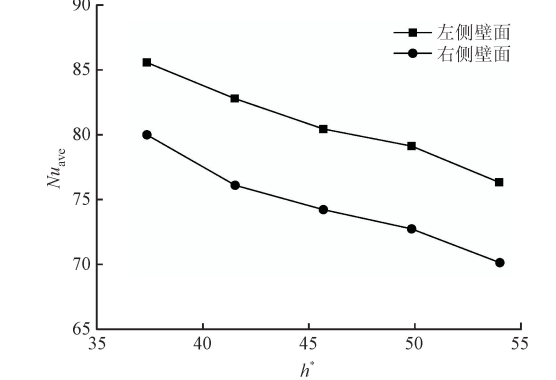


图 14 不同榫头/榫槽装配间隙相对高度下通道两侧壁面的 Nu_{ave} 试验结果

Fig. 14 Nu_{ave} on the walls of the mortise and tenon gap under different heights

在试验的榫头/榫槽结构高度下,左侧壁面的平均努塞尔数始终比右侧高 10% 左右。

2.3 装配间隙宽度对榫头/榫槽流动与传热特性的影响

利用图 2(a)所示模型,试验与数值研究了 5 种榫头/榫槽装配间隙结构宽度($d=1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$ mm)对榫头/榫槽结构内部流动与换热特性的影响。

2.3.1 装配间隙宽度榫头/榫槽流动特性的影响

图 15 为不同榫头/榫槽装配间隙宽度下榫头/榫槽结构平均阻力系数。由图可知,随着榫头/榫槽结构宽度的增加,平均阻力系数逐渐增大。这是由于榫头/榫槽装配间隙内月牙形较宽处旋涡强度随间隙宽度增大而增强,并且狭窄的平直部分流速随宽度的增大而增大,导致流阻增大,即阻力系数增大。在试验范围内,当榫头/榫槽间隙宽度从 1.0 mm 增大到 3.0 mm 时,平均阻力系数增大了 30.7%。

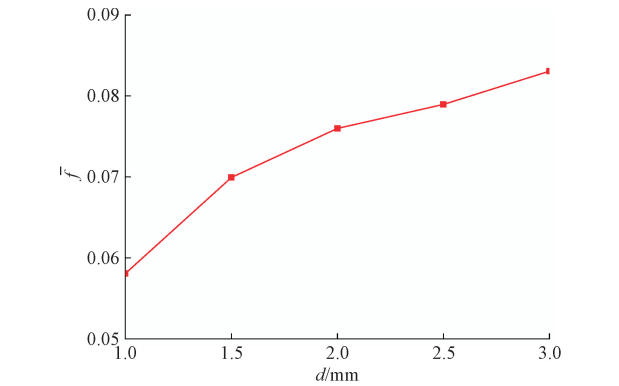


图 15 不同装配间隙宽度下榫头/榫槽间隙平均阻力系数试验结果

Fig. 15 Experimental results of averaged resistance coefficients of mortise and tenon gap with different widths

2.3.2 装配间隙宽度对榫头/榫槽结构传热特性的影响

图 16 为不同装配间隙宽度下榫头/榫槽装配间隙结构 Nu 分布的试验结果,其中 $d=3$ mm 工况下的 Nu 分布如图 13(e)所示。由图 16 可知,随着结构宽度的增加, Nu 有所增大。在通道中间部分,随着结构宽度的增加,大空间处的旋涡尺寸先增加后减小,因此此处的换热强度也先升高后减弱。而在狭窄的平直间隙处,随间隙宽度的增大,该部分气流速度增大,努塞尔数增大。在通道出口处,随着结构宽度的增加,大空间处的旋涡尺寸增加,因此此处的换热强度也随之升高,并且左侧壁面的 Nu 始终高于右侧壁面。

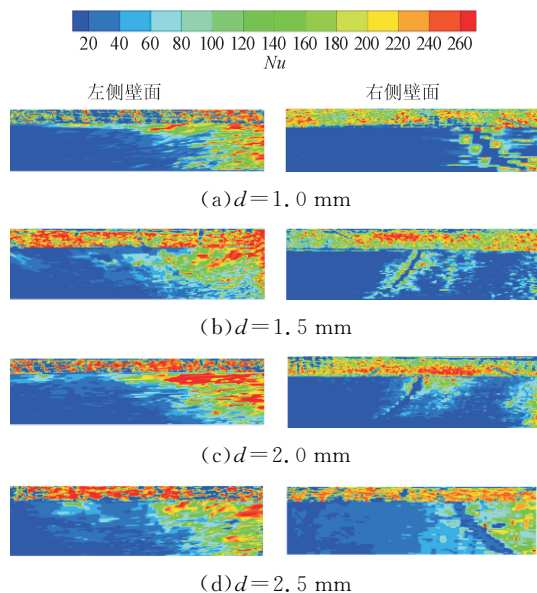


图 16 不同装配间隙宽度下榫头/榫槽结构 Nu 分布的试验结果

Fig. 16 Experimental results of Nu distribution of mortise and tenon gap under different widths

图 17 为不同榫头/榫槽装配间隙宽度下左侧与右侧壁面的 Nu_{ave} 分布情况。由图可知,随着榫头/榫槽间隙宽度的增加,通道 Nu_{ave} 逐渐增加,即换热强度随着榫头/榫槽间隙宽度的增加而升高。在试验范围内,当榫头/榫槽间隙宽度从 1.0 mm 增大到 3.0 mm 时,左右两侧面平均努塞尔数分别增大了 95.5% 和 94.9%,并且左侧壁面的 Nu_{ave} 始终比右侧壁面高 10% 左右。这主要是因为,随着榫头/榫槽间隙宽度的增加,旋涡生成的尺寸逐渐增加,一方面下方狭窄的平直部分宽度增大,气体流速增大,换热增强;另一方面流体与壁面的热量交换过程更为剧烈,因此整体换热强度随装配间隙宽度的增大而增大。

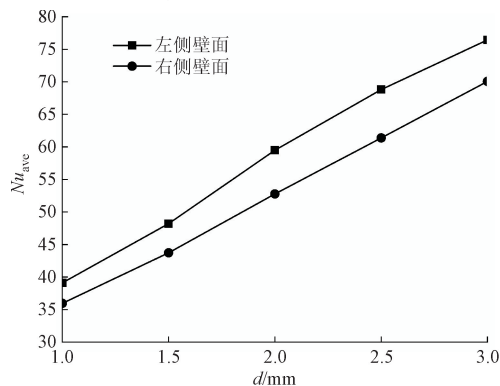


图 17 不同榫头/榫槽装配间隙宽度下两侧壁面的 Nu_{ave} 试验结果

Fig. 17 Experimental results of Nu_{ave} on the two sides wall with different gap widths

3 结 论

采用试验研究了雷诺数、装配间隙高度和宽度等结构参数对榫头/榫槽装配间隙流动与换热特性的影响,并结合数值计算分析了榫头/榫槽间隙内的详细流动情况,得到的主要结论如下。

(1) 由于通道入口处存在入口涡,因此阻力系数及努塞尔数在通道入口处最大,随着流动的发展,榫头/榫槽装配间隙通道的阻力系数及努塞尔数逐渐减小。在通道的同一截面上,由于流动阻力不同,在上方较宽的月牙形区域内,工质流速较高,努塞尔数较大;在下方狭窄的平直区域内,工质流速很低,努塞尔数较小。在试验范围内,左侧壁面努塞尔数始终比右侧壁面高 10% 左右。

(2) 随着雷诺数的增加,榫头/榫槽通道结构的阻力系数逐渐增大,通道的平均努塞尔数也随之增加,通道换热强度逐渐升高。在试验范围内(雷诺数从 15 000 增大到 35 000),平均阻力系数增大了 2 倍,努塞尔数增大了 1.1 倍。

(3) 随着榫头/榫槽装配间隙相对高度的增加,阻力损失及壁面努塞尔数均逐渐减小。在试验范围内(榫头/榫槽间隙相对高度从 37.35 增加到 54.00),间隙内平均阻力系数降低了 65%,左右两侧壁面的平均努塞尔数分别降低了 12.1% 和 14.1%。

(4) 随着榫头/榫槽装配间隙宽度的增加,阻力系数逐渐增加,壁面努塞尔数逐渐升高。在试验范围内(榫头/榫槽间隙宽度从 1.0 mm 增大到 3.0 mm),平均阻力系数增大了 30.7%,左右两侧面平均努塞尔数分别增大了 95.5% 和 94.9%。

参考文献:

- [1] DHANASEKARAN T S, WANG Ting. Simulation of mist film cooling on rotating gas turbine blades [J]. Journal of Heat Transfer, 2012, 134(1): 011501.
- [2] XU B, OOTI K T, WONG N T, et al. Experimental investigation of flow friction for liquid flow in micro-channels [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2000, 27(8): 1165-1176.
- [3] HETSRONI G, MOSYAK A, POGREBNYAK E, et al. Heat transfer in micro-channels: comparison of experiments with theory and numerical results [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(25/26): 5580-5601.
- [4] 丁耀东, 李平. 脉动流与波纹壁通道耦合强化换热及优化研究 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(7): 120-

- 129.
- DING Yaodong, LI Ping. Research on coupling of pulsating flow and corrugated channels for heat transfer enhancement and genetic algorithm optimization [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(7): 120-129.
- [5] 罗伟, 贺静, 罗兵, 等. 截面形状对微通道流动沸腾影响的数值研究 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(11): 101-111.
- LUO Wei, HE Jing, LUO Bing, et al. Numerical study on the effect of cross-sectional shape of micro-channels on flow boiling [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(11): 101-111.
- [6] 陈秋扬, 曾敏, 王令, 等. 纵向涡发生器对矩形窄通道内对流换热的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(9): 1010-1013.
- CHEN Qiuyang, ZENG Min, WANG Ling, et al. Effect of longitudinal vortex generators on convective heat transfer in rectangular narrow channel [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(9): 1010-1013.
- [7] 马世岩, 徐国强, 邓宏武, 等. 微小通道在叶片冷却结构中的应用研究 [J]. 航空动力学报, 2009, 24(9): 1989-1993.
- MA Shiyan, XU Guoqiang, DENG Hongwu, et al. Research on application of micro channel in the blade cooling structure [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(9): 1989-1993.
- [8] 梁钊, 王新军. 绕流肋片通道内的流动与换热特性数值研究 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(11): 8-16.
- LIANG Zhao, WANG Xinjun. Numerical investigation on the flow and heat transfer characteristics of the flow-around rib channel [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(11): 8-16.
- [9] 陈宇佳, 杜长河, 李亮. 蒸汽冷却带肋矩形通道流动和换热特性数值研究 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(3): 62-67.
- CHEN Yujia, DU Changhe, LI Liang. Numerical simulation for flow and heat transfer characteristics in steam-cooled square ribbed channel [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(3): 62-67.
- [10] 高炎, 晏鑫, 李军. 燃气透平叶片尾缘开缝结构冷却性能的数值研究 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(3): 29-37.
- GAO Yan, YAN Xin, LI Jun. Numerical investigations on the cooling performance of trailing edge cut-back in gas turbine blade [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(3): 29-37.
- [11] 段玉发, 张丽, 陆海鹰, 等. 一种榫头榫槽啮合间隙流动特性的试验研究 [J]. 机械与电子, 2014(2): 7-10.
- DUAN Yufa, ZHANG Li, LU Haiying, et al. Experimental investigation on flow characteristics in tenon joint gap between turbine blade and disk [J]. Machinery & Electronics, 2014(2): 7-10.
- [12] 刘永葆, 房友龙. 燃气轮机高压涡轮叶顶间隙变化规律的有限元分析 [J]. 中国舰船研究, 2011, 6(6): 78-82.
- LIU Yongbao, FANG Youlong. The finite element analysis for HPT blade tip clearance variation of gas turbine [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2011, 6(6): 78-82.
- [13] 马晓腾, 崔峥, 许都纯, 等. "S"型装配间隙流动及换热特性研究 [J]. 工程热物理学报, 2016, 37(8): 1721-1727.
- MA Xiaoteng, CUI Zheng, XU Duchun, et al. Flow and heat transfer characteristics of the "S" type assembly clearance [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(8): 1721-1727.
- [14] CHANG Haiping, HUANG Taiping, CHEN Wanbing. Experimental investigation on flow and heat transfer characteristics in tenon joint gap between turbine blade and disk [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1995, 12(1): 52-56.
- [15] 常海萍, 黄太平, 杨燕生. 复杂非圆管流动与换热特性实验研究 [J]. 航空动力学报, 1993, 8(4): 358-362.
- CHANG Haiping, HUANG Taiping, YANG Yansheng. An experimental study on fluid friction and heat transfer in complex noncircular passages [J]. Journal of Aerospace Power, 1993, 8(4): 358-362.
- [16] CHEN Dawei, ZHU Hui ren, XU Yang, et al. Numerical simulations of flow fields and heat transfer characteristics in tenon joint gap between turbine blade and disk under rotating conditions [C]//ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2017: V05BT15A017.
- [17] GOPINATHRAO N, MABILAT C, ALIZADEH S, et al. Conjugate heat transfer study of a spin pit rig: application to the lifing of HP turbine disc firtrrees [C]//ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air. New York, USA: ASME, 2008: 1693-1702.
- [18] MABILAT C, ALIZADEH S, JACKSON D, et al. Conjugate heat transfer study of a biaxial rig: application to the lifing of HP turbine disc firtrrees [C]//ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and

- Air. New York, USA: ASME, 2008: 1703-1715.
- [19] 陈伟, 杨力, 任静, 等. 瞬态液晶技术在涡轮叶片内部冷却研究中的应用 [J]. 工程热物理学报, 2012, 33(4): 665-669.
- CHEN Wei, YANG Li, REN Jing, et al. Application of transient liquid crystal on internal cooling research of gas turbine airfoil [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(4): 665-669.
- [20] 李博, 饶宇, 陈鹏. 应用瞬态液晶热像研究凹陷涡发生器传热性能 [J]. 工程热物理学报, 2015, 36(11): 2356-2360.
- LI Bo, RAO Yu, CHEN Peng. An experimental study of local heat transfer of dimple vortex generator using transient liquid crystal thermography [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(11): 2356-2360.
- [21] SHI Lei, ZHU Xiaocheng, DU Zhaohui. Study on convective heat transfer characteristics of inclined jet impinging cylindrical target surface in the confined space [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 218: 119316.
- [22] SHI Lei, ZHU Xiaocheng, DU Zhaohui. Experimental investigation on convective heat transfer of inclined jets impinging on the rotating cylindrical surface in the confined space [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, 202: 123744.
- [23] ZHANG Jie, LIU Cunliang, ZHANG Li, et al. Experimental study of heat transfer and film cooling performance of upstream ejected coolant on a turbine end-wall [J]. Journal of Thermal Science, 2023, 32(2): 718-728.
- [24] LUAN Yong, RAO Yu, XU Chao. Experimental and numerical study on an enhanced swirl cooling with convergent tube wall and local dimple arrangements [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 185: 108083.
- [25] 陈大为, 朱惠人, 李华太, 等. 基于热色液晶技术的尾迹对涡轮动叶表面换热系数影响研究 [J]. 推进技术, 2019, 40(3): 653-659.
- CHEN Dawei, ZHU Huiren, LI Huatai, et al. Effects of unsteady wake on heat transfer distribution of turbine blade using thermochromic liquid crystal technique [J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(3): 653-659.
- [26] 徐国强, 田宁, 陶智, 等. 液晶测温法对平板气膜冷却的实验研究 [J]. 航空动力学报, 2007, 22(5): 704-708.
- XU Guoqiang, TIAN Ning, TAO Zhi, et al. Experimental research on flat surface film cooling by TLC [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(5): 704-708.
- [27] 赵熙, 徐国强, 罗翔, 等. 热色液晶标定和使用的影响因素 [J]. 航空动力学报, 2013, 28(6): 1409-1414.
- ZHAO Xi, XU Guoqiang, LUO Xiang, et al. Effects on calibration and use of thermochromic liquid crystal [J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(6): 1409-1414.
- [28] 郭涛, 朱惠人, 许都纯, 等. 热色液晶瞬态测量全表面换热系数的技术研究 [J]. 测控技术, 2006, 25(9): 67-69.
- GUO Tao, ZHU Huiren, XU Duchun, et al. Research on transient measurement of heat transfer coefficient distribution with liquid crystal technique [J]. Measurement & Control Technology, 2006, 25(9): 67-69.
- [29] MOFFAT R J. Describing the uncertainties in experimental results [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1988, 1(1): 3-17.

(编辑 亢列梅)