

装配间隙泄漏流对透平端壁冷却影响的实验研究

刘钊, 张韦馨, 谢晔航, 丁玉强, 丰镇平

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了研究叶栅装配间隙泄漏流对透平叶片端壁气膜冷却特性的影响,依据真实重型燃气透平叶片参数,搭建了端壁气膜冷却实验台。采用压力敏感漆技术测量了不同质量流量比和装配间隙角度下端壁的气膜冷却特性,使用压力扫描阀测量了主流进口雷诺数和叶片表面压力分布。通过数值计算模拟了实验叶片装配间隙的流动结构,得到了装配间隙冷气出流质量流量比及射流角度的气膜冷却特性。结果表明:在装配间隙冷气出流质量流量比为0.1%~1.0%的范围内,在相同射流角度下,增加装配间隙质量流量能够提升透平端壁气膜冷却有效度,并增大装配间隙下游出口气膜覆盖面积,冷气质量流量比为1.0%时端壁气膜冷却有效度达到最高。由于叶片端壁表面的压力梯度导致装配间隙出流集中在流道中部及出口位置。在研究的60°~90°射流角范围内,在相同质量流量比下,减小装配间隙射流角度能够有效提升端壁气膜冷却有效度,75°射流角相较于90°垂直入射条件下的气膜冷却有效度增加接近一倍;射流角为60°时端壁气膜冷却有效度达到最高。

关键词: 端壁;装配间隙;气膜冷却

中图分类号: TK474.7 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202305001 **文章编号:** 0253-987X(2023)05-0001-10

Experimental Study on Influence of Mid-Passage Gap Leakage on Turbine Endwall Film Cooling Characteristics

LIU Zhao, ZHANG Weixin, XIE Yehang, DING Yuqiang, FENG Zhenping

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

Abstract: This paper investigates the influence of the mid-passage gap leakage flow on the film cooling characteristics of the turbine blade endwall. An endwall film cooling experimental linear cascade is built based on real blade parameters of a heavy gas turbine. The film cooling characteristics of the endwall at different mass flow ratios and injection angles are measured using the pressure sensitive paint technique. The Reynolds number of the mainstream inlet and the pressure distribution on the blade surface are measured using the pressure scanning valve. Numerical calculation is carried out to simulate the flow structure at the mid-passage gap, and find out the film cooling effectiveness when the mid-passage gap coolant is at different mass flow ratios and injection angles. The results show that, increasing the mass flow ratio of the mid-passage gap leakage that is kept within the range of 0.1%—1.0% can improve the endwall film cooling effectiveness and enlarge the coverage area of the cooling film at the downstream outlet of the mid-passage gap

when the injection angle remains unchanged. The endwall film cooling effectiveness is the best at a mass flow ratio of 1.0% due to the pressure gradient at the blade endwall surface, the mid-passage gap leakage will concentrate in the middle and at the outlet of the passage. Reducing the injection angle of the mid-passage gap can effectively improve the endwall film cooling effectiveness when the mass flow ratio remains unchanged. According to the study with the injection angle kept in the range of 60° — 90° , the film cooling effectiveness at an injection angle of 75° nearly doubles compared with that at a vertical injection angle of 90° . The endwall film cooling effectiveness is the best when the injection angle is 60° .

Keywords: endwall; mid-passage gap; film cooling

在现代燃气透平设计中,提高透平主流进口温度有利于提升透平的循环热效率和比功,但是也增加了透平热端部件的热负荷^[1]。其中,透平端区由于复杂的流动条件导致热负荷较高且分布极为不均,在实际运行中存在烧蚀风险,因此需要设计高效的气膜冷却结构予以保护^[2]。在透平端壁冷却设计中,许多学者对于端壁表面离散气膜孔以及端壁上游泄漏流进行了充分研究^[3-7],但是对于透平相邻叶片之间的装配间隙的研究较少。叶片装配间隙穿过叶栅通道的中间,将整个端壁分为压力侧和吸力侧。装配间隙及上游槽缝泄漏流对透平叶片端壁气膜冷却特性及流动特性影响很大,一直以来都是透平端壁冷却设计领域研究的热点之一。

在早期研究中,学者们主要研究叶栅装配间隙泄漏流质量流量对叶栅通道气动性能的影响。Aunapu等^[8]通过提高端壁装配间隙泄漏流流量,削弱流道中的通道涡以及其他二次流结构造成的气动损失,但增大泄漏流流量反而会导致更高的端流水平和更高的气动损失。Ranson等^[9]认为增加叶片装配间隙泄漏流流量,不但对叶片端壁冷却性能提升很小,反而会增大通道气动损失,因此需要设计封严结构以尽可能地减少泄漏流的影响。Reid等^[10]测得在无密封结构时,装配间隙泄漏流的存在大约会增加1%的叶栅总压损失。装配间隙贯穿整个叶栅通道,因此其泄漏流对近端壁的热负荷分布有着显著的影响。Piggush等^[11-12]从实验研究中得出,叶片端壁换热特性受到装配间隙泄漏流流量变化影响很大。在后续研究中,对装配间隙泄漏流的非均匀出流现象进行了详细分析。与无装配间隙的情况相比,装配间隙泄漏流增加了叶栅通道入口处边界层厚度,因此装配间隙的存在削弱了此处的换热能力。

受到材料加工工艺限制,早期关于装配间隙的研究较为简单,研究结果与真实冷却结构布置设计时装配间隙对端壁流动和冷却特性的影响有较大区

别。Cardwell等^[13]在Knost等^[14]实验结构的基础上布置了装配间隙,重点研究了气膜孔冷气射流、槽缝泄漏流与装配间隙泄漏流之间的相互作用,以及对冷却特性的影响。Lynch等^[15]综合考虑了上游槽缝和叶片之间装配间隙的影响。结果表明,与无装配间隙相比,布置有装配间隙的端壁在喉部存在一片高换热区域。杨星等^[16-17]研究了装配间隙及其错位对泄漏流冷却的影响,结果表明,装配间隙在一定程度上限制了端壁表面气膜的扩散分布,端壁错位导致通道间隙下游的气膜冷却性能下降。张杰等^[18]研究了槽缝射流和泄漏间隙对轴对称涡轮端壁换热特性的影响,结果表明,受到泄漏涡的影响,端壁吸力面附近区域换热系数明显高于压力面附近区域。张垚垣等^[19]研究了槽缝射流旋流比和密度比对涡轮端壁冷却性能的影响,结果表明,旋流比会影响槽缝射流下游气膜分布,导致靠近吸力面侧气膜覆盖面积减小。高杰等^[20]研究了轴流涡轮端壁损失机理,结果表明,动叶通道中间隙泄漏涡和通道涡之间存在强烈相互作用,只有在适当大小间隙下,才能控制叶栅气动损失。

近年来,更多学者开展了有关装配间隙泄漏流对叶片端壁流动与冷却特性影响的机理研究。Hada等^[21]研究发现,装配间隙内部的流场受装配间隙冷气腔和主流通道之间的压力差影响,而装配间隙的内部流场也会影响泄漏流的气膜冷却有效度。由于来自上游槽缝或气膜孔的冷气被吸入装配间隙、无法迁移到压力面侧,装配间隙冷气无法出流的端壁上游,其冷却有效度甚至低于无叶栅装配间隙的端壁。Shaikh等^[22]提出了一种新的低阶分析模型,基于几何特征和通道压力场来分析装配间隙对气动和换热特性的影响,并通过实验验证了该种计算模型的可靠性。Shiau和Han等^[23-24]研究发现,装配间隙泄漏流的冷却性能随着冷气质量流量比的增加而增加。Liu等^[25]研究了用装配间隙对端壁进行气

动优化的问题,结果发现,装配间隙的存在会增加非轴对称的端壁上的空气动力损失。Park 等^[26]研究发现,由于冷气和主流在间隙中的混合,将导致装配间隙下游的高传热系数。Zhang 等^[27]研究了装配间隙泄漏流对叶片端壁的影响,得出结论,装配间隙对下游的冷气分布有很大的影响。Park 等^[28]研究了在装配间隙中安装密封件的影响。Lange 等^[29]研究发现,前向台阶的错位产生了一个高端流再循环区域,该区域与间隙泄漏流产生了不稳定的相互作用。Denton 等^[30]提出了一种能够减少端壁气动效率损失的装配间隙结构,并通过实验进行了验证。

前人研究主要以数值模拟为主,且主要关注对气动性能的影响,本文在已有工作的基础上,通过实验的方法,着重研究了装配间隙及其存在泄漏流情况下透平端壁的气膜冷却特性,分析了不同质量流量比、射流角度下,装配间隙泄漏流对端壁的冷却特性的影响,从而总结出部分通道间隙设计装配的规律。

1 实验系统与方法

1.1 实验系统建设与工况

图 1 展示了气膜冷却实验台采用的开放式风洞系统,包括主流系统、冷气系统、平面叶栅实验段和数据采集系统。主流由 4 台螺杆压缩机提供,依次经过扩张段、稳流段和收缩段,最后进入实验段。旁通阀可用于调节主流流量。蜂窝整流栅格保证平面叶栅进口主流的稳定性 and 均匀性,湍流栅格保证主流进口湍流度达到 10%,接近燃机透平真实水平。冷气系统相当于实际透平中的二次空气系统,工质选用二氧化碳以模拟实际透平中的密度比条件,由二氧化碳气瓶组联合供气。

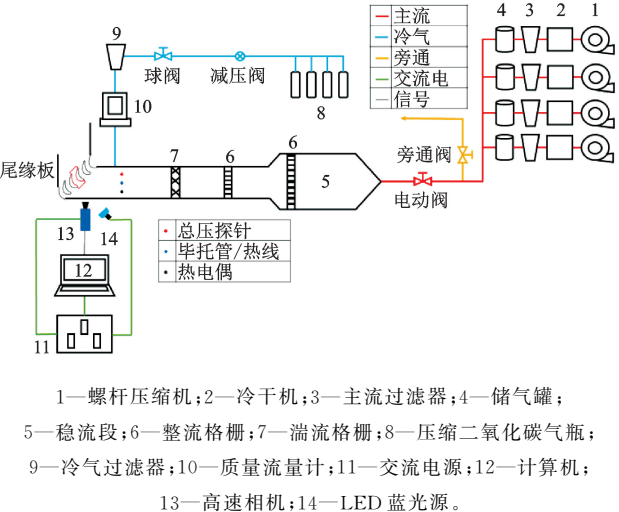


图 1 气膜冷却实验系统示意图

Fig. 1 Schematic of experimental test system

冷气质量流量比的定义为

$$M = \frac{m_c}{m_\infty}$$
(1)

式中: m_c 、 m_∞ 分别为冷气和主流的质量流量。

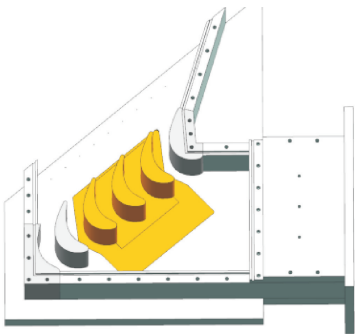
1.2 实验段与实验件设计

本实验研究的叶型选自某重型燃气透平,以该透平第一级动叶 10% 叶高处的型线作为基准型线,沿圆周展开并投影在平面上得到叶片型线。实验叶栅的主要几何参数如表 1 所示。实验段采用可替换式设计,方便实验件的安装和拆卸。为了保证流道周期性要求,设计的实验段包括 6 支叶片和 5 个叶栅流道,并选择在中间流道开展实验测量。图 2 展示了实验段设计图及实际安装图。表 2 给出了实验主要边界条件。叶片表面压力由引压孔引出并由压力扫描阀测量,压力扫描阀测量精度为 0.1% 满量程。

表 1 实验叶栅主要几何参数

Table 1 Main geometric parameters of the linear cascade

几何参数	数值
叶片高度与弦长比 $h \cdot c^{-1}$	1.23
节距与弦长比 $t \cdot c^{-1}$	0.67
进口几何角/(°)	50.85
出口几何角/(°)	57.62



(a) 实验段设计图



(b) 实验段安装图

图 2 实验段设计图与安装图

Fig. 2 Schematic and photo of the test linear cascade

表 2 实验主要边界条件

Table 2 Main experimental boundary conditions

边界参数	数值
主流进口雷诺数 Re	4×10^5
主流进口温度/K	293.15~298.15
膨胀比	1.2

该实验台在流道出口侧布置尾缘板来调节 5 个主流通道中的流量,保证主流进入各通道中的流量相等。依据伯努利原理,可以通过测量中间通道两侧叶片表面的静压分布,进而间接地表征流道的周期性是否满足要求。图 3 展示了流道周期性的实验测量与数值计算结果。横坐标(测点位置)和纵坐标(叶片表面静压 P)已经分别用动叶轴向弦长和主流进口总压 P_t 进行无量纲化处理。叶片表面压力分布图表明,相邻两支叶片中叶展的静压分布十分接近,表明此时尾缘板的位置合适,流入各个叶栅通道的主流流量基本相等,实验段流道周期性满足实验测量的要求。图 4 展示了本文实验中的主流进口速度 v 的分布,由于通道对称性,仅展示底部至流道中部数值。

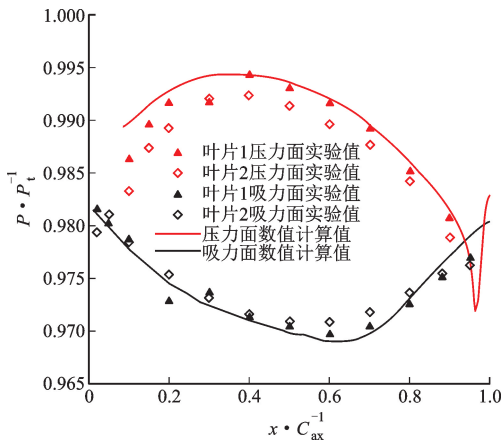


图 3 实验段叶片中叶展位置静压分布

Fig. 3 Distribution of pressure coefficient on midspan

1.3 测量系统与实验方法

采用压力敏感漆(PSP)技术进行气膜冷却有效度测量实验。压力敏感漆测量表面气膜冷却有效度是一种非接触式测量方法,近年来在透平冷却与传热研究领域逐渐得到了广泛应用。

用波长约为 400 nm 的蓝色平行光作为激发光源,照射表面覆盖有压力敏感漆的透平端壁,喷漆表面发出波长介于 620~750 nm 之间的荧光。当喷漆表面氧浓度相对较低时,大量 PSP 分子向环境中释

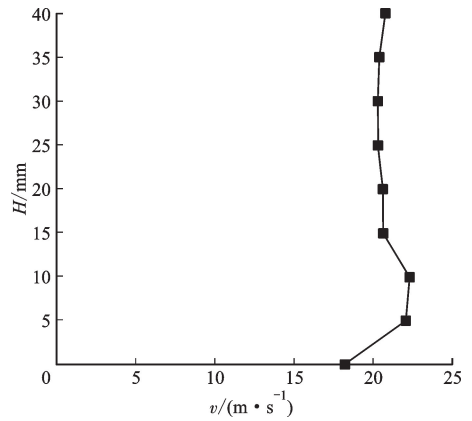


图 4 主流进口速度展向分布

Fig. 4 Velocity distribution of mainstream

放红色光子跃迁回基态,PSP 涂层呈现较强的红色;当喷漆表面氧浓度相对高时,则较多的 PSP 分子的能量被氧分子夺走后跃迁回基态,这部分的 PSP 分子并不向环境释放红色光子,因此 PSP 表面显现较弱的红色。此时,在激光光源的照射下,喷涂 PSP 之后的端壁表面发出的红色荧光强度就与表面的氧气浓度产生了函数的对应关系。

PSP 技术测量的根本原理是用传质类比传热,进而计算得到当地气膜冷却有效度。本文中气膜冷却有效度的定义为

$$\eta = \frac{T_{\infty, t, in} - T_{aw}}{T_{\infty, t, in} - T_{c, s, in}} \quad (2)$$

式中: $T_{\infty, t, in}$ 为主流的进口平均总温; T_{aw} 为绝热壁面边界条件下的壁面温度; $T_{c, s, in}$ 为冷气进口平均温度。依据传质-传热类比原理,式(2)可以改写成以下形式

$$\eta = 1 - \left(1 + \left[\frac{(P_{mix}^{O_2})_{air}}{(P_{mix}^{O_2})_c} - 1 \right] \frac{M_c}{M_{\infty}} \right)^{-1} \quad (3)$$

式中: $(P_{mix}^{O_2})_c$ 表示二氧化碳气体作为冷气工质时气膜混合流体中的氧气分压; $(P_{mix}^{O_2})_{air}$ 表示空气作为冷气工质时气膜混合流体中的氧气分压; M_c 和 M_{∞} 表示冷气和主流工质的气体摩尔质量。此式为 PSP 方法测量气膜冷却有效度的表达式,将气膜冷却有效度表示成氧气分压函数的形式。

为了保证实验结果的准确性,实验首先在 3 种不同环境温度下对压力敏感漆的氧分压-光强曲线进行了标定,结果如图 5 所示。当标定装置内无工质流动时,记录该时刻的压力 p_{ref} 和荧光光强 I_{ref} 作为参考值。横坐标为用参考压力 p_{ref} 进行无量纲化处理之后的氧气压力,更高的氧气压力意味着更高的氧气浓度;纵坐标为用参考光强 I_{ref} 进行无量纲化

处理之后的荧光光强, I_{ref} 为各自标定温度时大气压下对应的光强; I_{back} 为无主流、冷气和激发光源时, 端壁表面的背景光强。

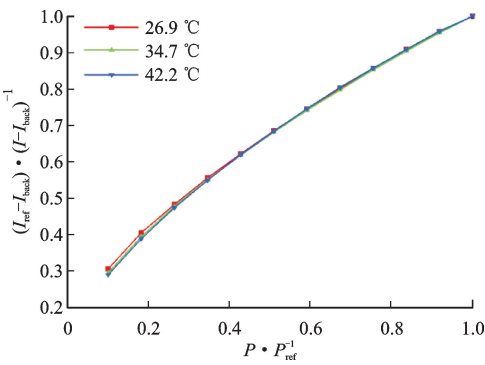


图 5 不同温度下压力敏感漆标定结果
Fig. 5 Calibration results for PSP in different temperature

1.4 不确定度分析

通过传质-传热类比法和一系列推导, 将气膜冷却有效度表示成关于氧气分压力的函数

$$\eta = f[(P_{mix}^{O_2})_{air}, (P_{mix}^{O_2})_c] \tag{4}$$

由不确定度的分析方法, 气膜冷却有效度的不确定度绝对值计算式为

$$\Delta \eta = \sqrt{\left[\frac{\partial \eta}{\partial (P_{mix}^{O_2})_{air}}\right]^2 \Delta (P_{mix}^{O_2})_{air}^2 + \left[\frac{\partial \eta}{\partial (P_{mix}^{O_2})_c}\right]^2 \Delta (P_{mix}^{O_2})_c^2} \tag{5}$$

不确定度相对值的计算式为

$$\delta_\eta = \frac{\Delta \eta}{\eta} = \sqrt{\left[\frac{(P_{mix}^{O_2})_{air}}{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial (P_{mix}^{O_2})_{air}}\right]^2 \delta_{(P_{mix}^{O_2})_{air}}^2 + \left[\frac{(P_{mix}^{O_2})_c}{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial (P_{mix}^{O_2})_c}\right]^2 \delta_{(P_{mix}^{O_2})_c}^2} \tag{6}$$

在实验过程中, 空气和冷工质的分压力均以 PSP 涂料表面的荧光光强表征, 而在标定时选用的是精度为 0.5% 的压力表, 因此实验中的直接测量量 $(P_{mix}^{O_2})_{air}$ 和 $(P_{mix}^{O_2})_c$ 的不确定度均为 0.5%。此外, $(P_{mix}^{O_2})_{air}$ 的实验测量值为 21 kPa, $(P_{mix}^{O_2})_c$ 的实验测量范围为 5 ~ 20 kPa, 将其代入式(6)可得气膜冷却有效度的相对值。表 3 展示了不同气膜冷却有效度下的不确定度相对值。

表 3 不同气膜冷却有效度下的不确定度	
Table 3 Uncertainty under different film cooling effectiveness	
气膜冷却有效度	不确定度相对值/%
0.1	16.5
0.3	3.9
0.5	1.8
0.8	0.9

2 结论与分析

2.1 研究对象

本文研究了不同的叶片装配间隙泄漏流质量流量比和射流角对端壁气膜冷却特性的影响规律。图 6 展示了叶栅装配间隙模型的几何参数, t 为叶栅节距。取一个与装配间隙垂直的截面, 剖开装配间隙模型, 本文装配间隙宽度取为固定值 $d = 1.0 \text{ mm}$; α 为装配间隙的角度, 方向偏向通道的吸力面侧。本节对装配间隙射流角度分别为 90° 、 75° 和 60° 的模型展开研究, 其中将射流角度为 90° 的装配间隙模型作为原始构型。在研究装配间隙泄漏流质量流量比或是角度的影响时, 采用控制变量的方法使其其他的边界条件保持不变。对于每种间隙角度, 研究了泄漏流质量流量比为 0.2%、0.6% 和 1.0% 冷气流量工况的气膜冷却特性。

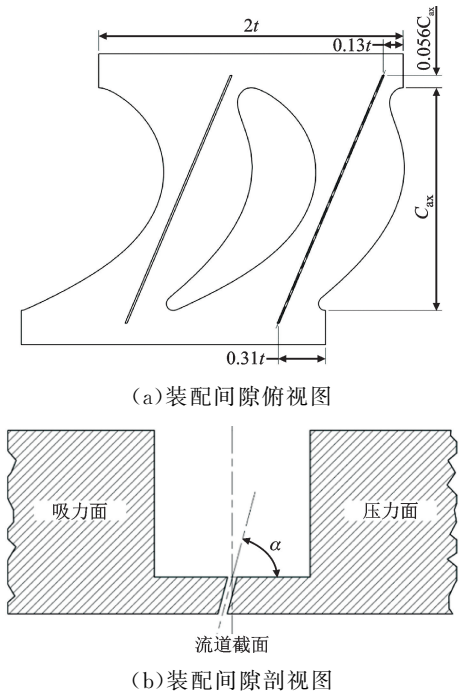


图 6 叶栅装配间隙几何参数示意图
Fig. 6 Definition of mid-passage gap injection angle

2.2 不同质量流量比下装配间隙气膜冷却特性

装配间隙泄漏流的质量流量是决定端壁冷却性能的最直接变量之一。本节通过实验测量的方法, 研究了装配间隙泄漏流的冷气质量流量比对叶片端壁冷却特性的影响规律。根据国内燃机相关单位提供的数据, 在真实燃气透平端壁中, 端区安装间隙的中间通道间隙质量流量一般为主流量的 0.1% ~ 0.3%。为了使实验工况能够覆盖真实燃机工况, 并

显示一定趋势,遂选定装配间隙角度为 90° 的原始构型,研究了泄漏流质量流量比为 $0.1\% \sim 1.0\%$ 时的透平端壁气膜冷却特性。图 7 展示了不同质量流量比下端壁表面气膜冷却有效度的分布云图。

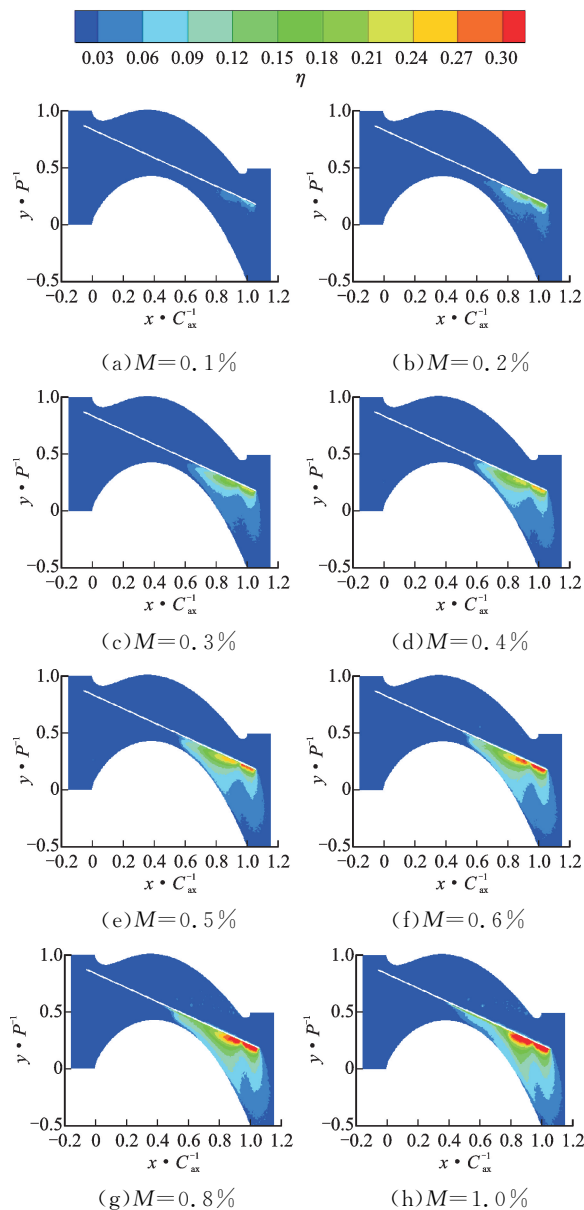


图 7 不同质量流量比下端壁气膜冷却有效度分布

Fig. 7 η contours of the mid-passage gap at different M

由图 7 可知,受到端壁二次流影响,装配间隙泄漏流只在吸力面侧的端壁形成气膜覆盖,压力面侧的端壁不存在气膜。在流向上,泄漏流呈现出上游阻塞、下游出流的流动特性。图 8 为对应实验工况的数值计算结果装配间隙中截面流线分布,从流线分布中可以更加清楚显示装配间隙泄漏流的流动特性。由于叶栅流道的压力梯度,造成装配间隙通道上游出口压力较高,当高于冷气进口压力时,产生阻

塞,甚至部分主流进入装配间隙内部,而装配间隙泄漏流将从出口压力较低的通道后半部流出。

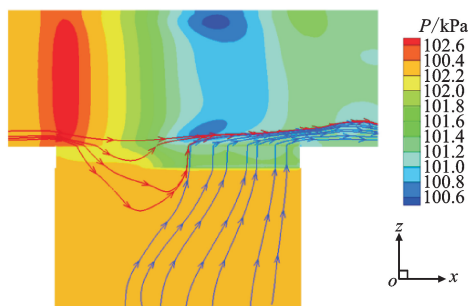


图 8 装配间隙流道中截面流线分布

Fig. 8 streamlines of the mid-passage gap cross section

当质量流量比为 0.1% 时,由于此时泄漏流冷气出流量较小,冷气从 $(x/C_{ax}) \geq 0.8$ 之后才从间隙中出流,冷气气膜仅能覆盖装配间隙末端的一小片区域,同时气膜覆盖的区域整体冷却有效度数值很低,冷却效果十分有限。随着冷气质量流量比的增大,泄漏流冷气出流量随之增大,冷却气膜在端壁上的覆盖面积单调增大。

在流向方向上,泄漏流冷气出流的截面积随质量流量比的增大逐渐增加,在质量流量比为 1.0% 时,泄漏流冷气在 $(x/C_{ax}) = 0.4$ 的位置开始出流,原因是高质量流量工况下的冷气腔内部压力更高,在出流时能够克服的主流压力也更高。因此,提高质量流量能够增加装配间隙出流截面积。

在周向方向上,此部分中泄漏流出口面积保持不变,因此更高的泄漏流流量意味着更高的泄漏流出流量,使冷气穿透主流的作用增强,气膜能够延伸到更远的端壁表面。在质量流量比为 1.0% 时,冷气已经能够较为完整地中对中下游的吸力面侧端壁表面形成良好的气膜覆盖。

随着冷气质量流量比的逐渐增加,端壁表面气膜覆盖面积逐渐增大,靠近装配间隙出口的区域气膜冷却有效度也在单调增加,尤其是在间隙的下游区域,原因是更多的冷气出流使得此处获得了更好的气膜覆盖效果。不足的是,在端壁的压力面侧和吸力面侧的上游,即使在较高的冷气质量流量比下依然无法被气膜覆盖,存在大面积无气膜冷却的区域。因此,仅依靠装配间隙泄漏流不足以对端壁形成全气膜冷却,需要布置其他的冷却结构,例如布置离散气膜孔或是风影冷却。

图 9 给出了不同质量流量比下端壁周向平均气膜冷却有效度沿轴向分布。由该分布可知,在所有

实验测量的质量流量比工况下,周向平均气膜冷却有效度曲线均呈现前低后高的整体趋势,这一规律与冷却有效度云图的分布规律是一致的。当泄漏流的质量流量比较低时,由于此时气膜覆盖面积较小,且泄漏流的冷却效果有限,气膜有效度沿轴向分布平缓。随着冷气质量流量比的增大,泄漏流产生的气膜影响区域增大,冷却有效度平均值曲线上升的起点逐渐提前。在最高的冷气质量流量比 1.0% 时,冷却气膜的影响在 $(x/C_{ax})=0.4$ 时就已经显现,与云图中的结论吻合。与此同时,冷却有效度平均值曲线的整体和最高点的数值也随质量流量比的增大而提高,且变化趋势单调。

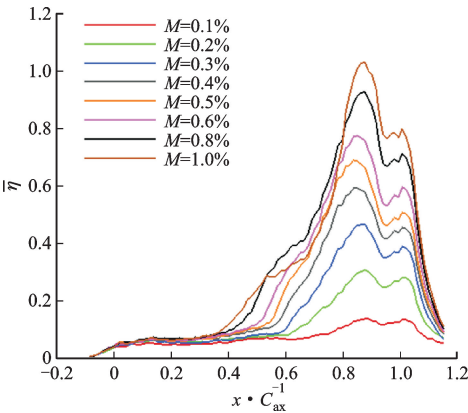


图 9 不同质量流量下端壁周向平均气膜冷却有效度
Fig. 9 Laterally-averaged η of the mid-passage gap at different M

2.3 不同装配间隙角度下的端壁气膜冷却特性

装配间隙的角度(α)同样是影响端壁冷却特性的一个关键变量,角度的变化能够改变冷气泄漏流的入射角度,进而对近端壁区域的流场产生重要影响。合理选取装配间隙的角度能够改善近端壁区域的流场,优化端壁表面的气膜冷却特性,对透平设计水平的提升具有积极影响。

图 10 给出了不同叶栅装配间隙角度的实验件在 3 种冷气质量流量比工况下的气膜冷却有效度分布云图。观察分布云图可知,纵向比较同一角度模型、不同冷气质量流量比工况的实验结果发现,对于每一种研究的装配间隙角度,端壁表面的气膜覆盖面积随着冷气质量流量比的增加而增大。

横向比较同一冷气质量流量比工况、不同角度模型的实验结果发现,在实验研究的 3 种冷气质量流量比工况下,更小的间隙角度使得装配间隙出口处的气膜冷却有效度更高。上述现象产生的主要原因是较小的装配间隙角度减小了冷气泄漏流在叶高

方向上的动量分量,抑制了冷气出流之后冲入主流的趋势,使得泄漏流冷气在出流后更加紧密地贴附在端壁表面,对端壁形成的气膜覆盖效果也更佳,从而获得了较高的冷却水平。

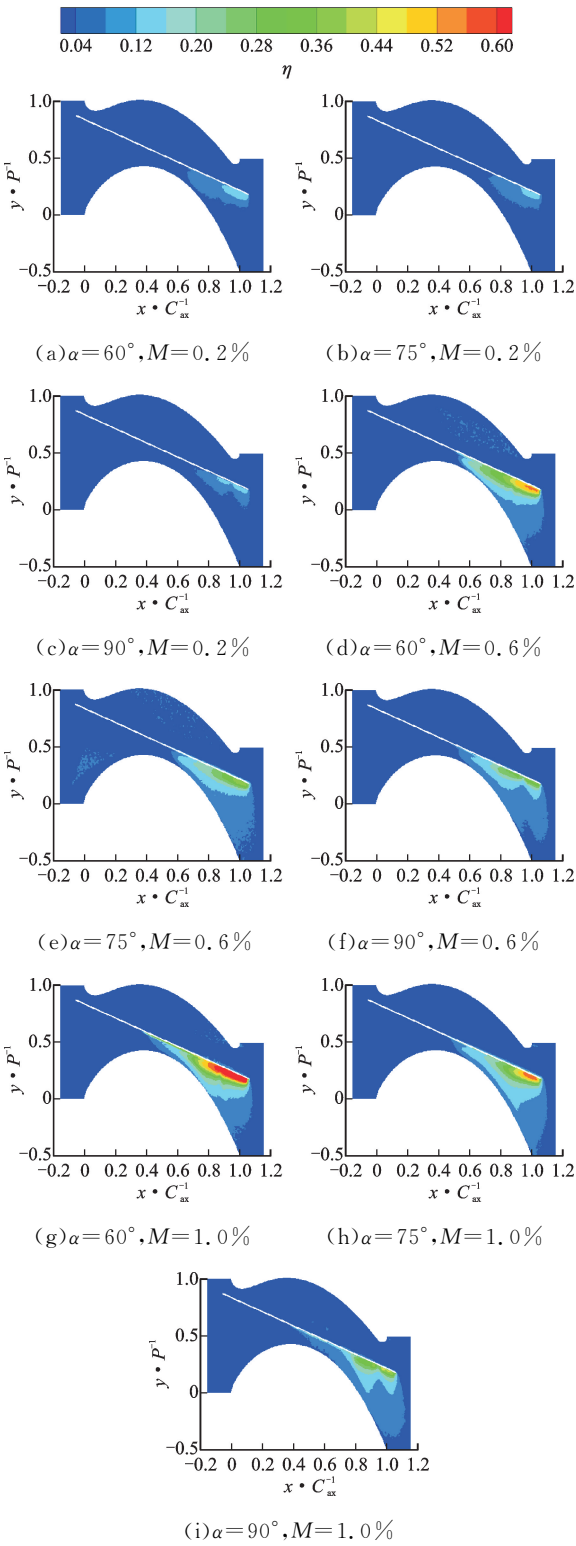


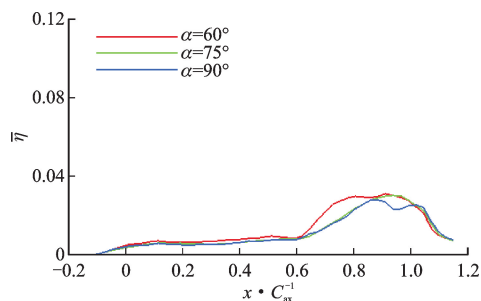
图 10 不同装配间隙角度下的气膜冷却有效度分布
Fig. 10 Laterally-averaged η of the mid-passage gap at different injection angle

与泄漏流质量流量比的影响规律不同的是,较小的间隙角度设计虽然使装配间隙出口产生了较高的冷却有效度,但对于冷气的出流位置、冷却气膜的覆盖面积并没有明显的影响。冷气从装配间隙的冷气腔室中出流后,与主流发生强烈的掺混,此种作用使得气膜迅速耗散,离开端壁表面。减小装配间隙的角度并没能有效地抑制这一冷气耗散的过程,因此在周向和轴向方向上,冷却气膜的覆盖面积关于装配间隙角度的变化并不敏感。

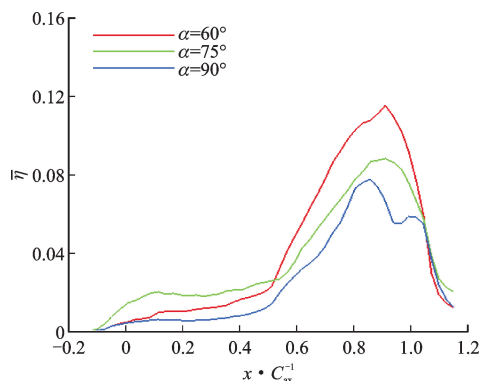
3 种泄漏流质量流量比工况下,不同间隙角度的周向气膜冷却有效度沿轴向分布见图 11。当质量流量比较小($M=0.2\%$)时,角度的变化给气膜冷却有效度周向平均值带来的变化并不明显,不同角度模型的气膜冷却有效度周向平均值曲线较为接近。随着泄漏流质量流量比的增加,装配间隙角度对端壁冷却水平的影响逐渐显现。

当装配间隙泄漏流质量流量比为 1.0% 时,减小装配间隙角度对端壁冷却效率有效度的影响已十分明显,在图 10 上体现为 3 条冷却效率周向平均曲线之间差距明显,并且影响的区域主要是端壁的下游区域($x/C_{ax} \geq 0.5$)。

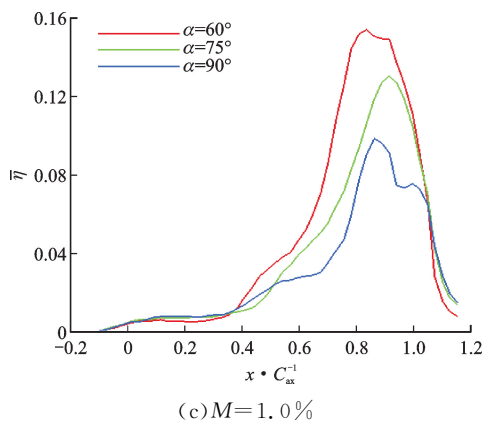
在装配间隙泄漏流质量流量比为 1.0% 的工况下,对比装配间隙角度分别为 90° 和 60° 的两种实验模型,在叶栅装配间隙的下游位置,装配间隙角度 60°



(a) $M=0.2\%$



(b) $M=0.6\%$



(c) $M=1.0\%$

图 11 不同装配间隙角度下的气膜冷却有效度沿轴向分布
Fig. 11 Laterally-averaged η of the mid-passage gap at different injection angle

模型的气膜冷却有效度周向平均值大致为 90° 模型的两倍,说明减小间隙角度能够提升端壁表面气膜冷却有效度。对于实验测量的 3 种质量流量比工况,在轴向上,不同装配间隙模型的曲线几乎在同一位置起伏,这说明冷气出流位置关于射流角的变化不敏感。

3 结 论

本文以透平叶片装配间隙泄漏流为研究对象,采用实验测量的方法,分析了装配间隙泄漏流的分布特点,以及间隙泄漏流的质量流量比和角度对端壁气膜冷却特性的影响规律,研究得到的主要结论如下。

(1) 装配间隙泄漏流受到端壁表面压力梯度及二次流的影响,主要分布在中下游吸力面侧的端壁上,对端壁的压力面侧无法形成冷却气膜覆盖。前半部分(前缘到通道中部)端壁的装配间隙发生阻塞,无冷气出流。

(2) 增大叶栅装配间隙泄漏流的质量流量比使得泄漏流出流截面积增加,能够扩大冷却气膜的有效覆盖面积,同时可以提升气膜覆盖区域内的冷却有效度数值,进而提升透平端壁的冷却性能。但是,过大的质量流量会增加叶栅通道的气动损失,在研究范围内,当质量流量比为 1.0% 时,端壁气膜冷却有效度达到最高。

(3) 减小叶栅装配间隙的角度能够使冷气泄漏流更好地贴附在端壁表面,进而在间隙的出口处产生更高的冷却有效度,但并不能改变泄漏流在轴向方向上的出流位置,也无法增大气膜的覆盖面积。当质量流量比较大时,端壁的气膜冷却有效度对装

配间隙角度的变化更加敏感,不同角度模型之间冷却有效度的差异更加显著,在当前实验工况范围内,装配间隙角度为 60° 时相同流量下的气膜冷却有效度达到最高。

参考文献:

- [1] 任静,李雪英,郭欣欣,等. 燃气涡轮高效冷却技术及设计方法发展趋势 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(4): 794-801.
REN Jing, LI Xueying, GUO Xinxin, et al. Development trends in high-efficiency gas turbine cooling methods [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(4): 794-801.
- [2] 杨星,刘钊,丰镇平. 燃气轮机透平叶片传热和冷却研究:端壁冷却 [J]. 热力透平, 2014, 43(2): 85-93, 106.
YANG Xing, LIU Zhao, FENG Zhenping. Study on heat transfer and cooling in gas turbine blade: endwall cooling [J]. Thermal Turbine, 2014, 43(2): 85-93, 106.
- [3] 张韦馨,刘战胜,杨星,等. 射流角和质量流量比对涡轮端壁气膜冷却特性的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(4): 107-115.
ZHANG Weixin, LIU Zhansheng, YANG Xing, et al. Effects of mass flow ratio and film hole orientation angle on turbine endwall film cooling characteristics [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(4): 107-115.
- [4] 刘钊,贾哲,张志欣,等. 透平动叶前缘冲击-气膜复合冷却与旋流-气膜复合冷却的热流耦合对比研究 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(4): 116-125.
LIU Zhao, JIA Zhe, ZHANG Zhixin, et al. A comparative study on conjugate heat transfer of impingement-film composite cooling and swirl-film composite cooling on leading edge of a turbine blade [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(4): 116-125.
- [5] 祝培源,陶志,姚韵嘉,等. 槽缝射流对环形叶栅端壁气膜冷却性能影响的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(11): 63-70.
ZHU Peiyuan, TAO Zhi, YAO Yunjia, et al. Experimental study on the effect of purge flow on film cooling performance of an annular cascade endwall [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(11): 63-70.
- [6] 姚韵嘉,祝培源,陶志,等. 间隙射流对端壁气膜冷却性能影响的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(3): 43-49, 55.
YAO Yunjia, ZHU Peiyuan, TAO Zhi, et al. Experimental study on the effect of gap jet on film cooling performance of endwall [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(3): 43-49, 55.
- [7] 杜昆,李军,晏鑫. 槽缝射流对静叶端壁冷却性能的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(1): 21-26.
DU Kun, LI Jun, YAN Xin. Effect of the slot jet impingement on the cooling performance of the vane end-wall [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(1): 21-26.
- [8] AUNAPU N V, VOLINO R J, FLACK K A, et al. Secondary flow measurements in a turbine passage with endwall flow modification [J]. Journal of Turbomachinery, 2000, 122(4): 651-658.
- [9] RANSON W W, THOLE K A, CUNHA F J. Adiabatic effectiveness measurements and predictions of leakage flows along a blade endwall [J]. Journal of Turbomachinery, 2005, 127(3): 609-618.
- [10] REID K, DENTON J, PULLAN G, et al. The interaction of turbine inter-platform leakage flow with the mainstream flow [J]. Journal of Turbomachinery, 2007, 129(2): 303-310.
- [11] PIGGUSH J D, SIMON T W. Heat transfer measurements in a first stage nozzle cascade having endwall contouring, leakage and assembly features [C]//ASME 2005 Summer Heat Transfer Conference collocated with the ASME 2005 Pacific Rim Technical Conference and Exhibition on Integration and Packaging of MEMS, NEMS, and Electronic Systems. New York, NY, USA: ASME, 2005: 85-94.
- [12] PIGGUSH J D, SIMON T W. Heat transfer measurements in a first-stage nozzle cascade having endwall contouring: misalignment and leakage studies [J]. Journal of Turbomachinery, 2007, 129(4): 782-790.
- [13] CARDWELL N D, SUNDARAM N, THOLE K A. Effect of midpassage gap, endwall misalignment, and roughness on endwall film-cooling [J]. Journal of Turbomachinery, 2006, 128(1): 62-70.
- [14] KNOST D G, THOLE K A. Adiabatic effectiveness measurements of endwall film-cooling for a first-stage vane [J]. Journal of Turbomachinery, 2005, 127(2): 297-305.
- [15] LYNCH S P, THOLE K A. The effect of the combustor-turbine slot and mid-passage gap on vane end-wall heat transfer [C]//ASME 2009 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York, NY, USA: ASME, 2009: 2167-2178.
- [16] 杨星,刘钊,刘战胜,等. 端壁通道间隙对端壁泄漏流冷却的影响 [J]. 工程热物理学报, 2017, 38(1):

- 44-48.
- YANG Xing, LIU Zhao, LIU Zhansheng, et al. Effects of mid-passage gap on endwall purge flow film cooling [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(1): 44-48.
- [17] 杨星, 刘钊, 刘战胜, 等. 端壁错位对端壁泄漏流冷却的影响研究 [J]. *工程热物理学报*, 2017, 38(4): 719-725.
- YANG Xing, LIU Zhao, LIU Zhansheng, et al. Effects of endwall misalignment on endwall purge flow film cooling [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(4): 719-725.
- [18] 张杰, 刘存良, 张丽, 等. 槽缝射流和泄漏间隙对轴对称涡轮端壁换热特性的影响 [J]. *推进技术*, 2022, 43(4): 195-203.
- ZHANG Jie, LIU Cunliang, ZHANG Li, et al. Effects of slot injection and leakage gap on heat transfer characteristics of an axisymmetric turbine endwall [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(4): 195-203.
- [19] 张垚垣, 李志刚, 宋立明, 等. 槽缝射流旋流比和密度比对涡轮端壁冷却和吸力面泛冷却性能的影响 [J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(9): 95-101, 126.
- ZHANG Kaiyuan, LI Zhigang, SONG Liming, et al. Effects of swirl ratio and density ratio of slot jet flow on the turbine endwall cooling and suction surface phantom cooling performance [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(9): 95-101, 126.
- [20] 高杰, 郑群, 姜玉廷. 涡轮间隙流动结构及其损失产生机理研究 [J]. *工程热物理学报*, 2013, 34(10): 1833-1837.
- GAO Jie, ZHENG Qun, JIANG Yuting. Investigation on tip clearance flow structure and its loss generation mechanism in turbine rotors [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, 34(10): 1833-1837.
- [21] HADA S, THOLE K A. Computational study of a midpassage gap and upstream slot on vane endwall film-cooling [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2011, 133(1): 011024.
- [22] SHAIKH F, ROSIC B. Aerodynamics and heat transfer inside a gas turbine mid-passage gap [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2022, 144(4): 041010.
- [23] CHEN A F, SHIAU C C, HAN J C. Turbine blade platform film cooling with simulated swirl purge flow and slashface leakage conditions [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2017, 139(3): 031012.
- [24] CHOWDHURY N H K, SHIAU C C, HAN J C, et al. Turbine vane endwall film cooling with slashface leakage and discrete hole configuration [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2017, 139(6): 061003.
- [25] LIU Hao, HU Chenxing, SHEN Xin, et al. The aerodynamic optimization design of turbine cascade nonaxisymmetric endwall and the midgap influence assessment [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part G Journal of Aerospace Engineering*, 2018, 232(15): 2760-2774.
- [26] PARK S, SOHN H S, SHIN S, et al. Film cooling characteristics on blade platform with a leakage flow through mid-passage gap [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 167: 120800.
- [27] ZHANG Kaiyuan, LI Jun, LI Zhigang, et al. Effects of simulated swirl purge flow and mid-passage gap leakage on turbine blade platform cooling and suction surface phantom cooling performance [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 129: 618-634.
- [28] PARK S, KIM J J, BANG M, et al. Effects of seal installation in the mid-passage gap between turbine blade platforms on film cooling [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 189: 116683.
- [29] LANGE E, LYNCH S, LEWIS S. Computational and experimental studies of midpassage gap leakage and misalignment for a non-axisymmetric contoured turbine blade endwall [C]//ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. New York, NY, USA: ASME, 2016: V05AT13A001.
- [30] REID K, DENTON J, PULLAN G, et al. Reducing the performance penalty due to turbine inter-platform gaps [C]//ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air. New York, NY, USA: ASME, 2006: 799-808.

(编辑 杜秀杰)