

插芯结构对旋流冷却流动换热特性的影响

何伟, 肖俊峰, 高松, 李园园, 于飞龙, 伍赫

(西安热工研究院有限公司, 710054, 西安)

摘要: 针对用于透平叶片前缘的旋流冷却结构, 为了改善其冷气发展空间、提高综合冷却性能, 提出了一种布置在冷却腔内的插芯结构。基于简化旋流冷却结构, 采用数值模拟方法研究了插芯结构对旋流冷却靶面换热系数、综合冷却性能、流量分配、流动结构等的改善效果和作用机理。结果表明: 增设插芯结构后, 在射流雷诺数 5 000~20 000 范围内, 旋流冷却结构的靶面面积平均努塞尔数增加了 5.9%~8.3%, 综合冷效因子增加了 5.2%~6.6%, 吸力侧努塞尔数提高了 14.8%~16.6%, 相邻喷嘴间流量的最大差从 18% 削减到 5%。插芯结构削减了上游射流在旋流腔轴心处的发展空间, 抑制了旋流回流和旋流涡核的形成, 降低了上游冷气对新鲜射流的干扰, 强化了旋流对壁面边界层的削弱效果, 从而有效增加了旋流结构的一致性并提高了靶面换热系数的强度和均匀性。

关键词: 旋流冷却; 透平叶片; 内部冷却; 努塞尔数; 射流雷诺数

中图分类号: TK474.7 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202501010 **文章编号:** 0253-987X(2025)01-0105-11

Effect of Plug Structure on the Flow and Heat Transfer Characteristics of Swirl Cooling

HE Wei, XIAO Junfeng, GAO Song, LI Yuanyuan, YU Feilong, WU He

(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: To optimize the coolant air development space and enhance overall cooling performance, a plug structure positioned within the cooling chamber is proposed for swirl cooling structures used at the leading edges of turbine blades. Based on a simplified swirl cooling structure, the effect and mechanism of the plug structure on the heat transfer coefficient, comprehensive cooling performance, flow distribution and flow structure of the swirl cooling target surface are investigated using the numerical simulation method. The results show that by incorporating the plug structure, within the jet Reynolds number range of 5 000 to 20 000, the average Nusselt number on the swirl cooling structure's target surface increases by 5.9% to 8.3%, the overall cooling effectiveness factor rises by 5.2% to 6.6%, the Nusselt number on the suction side experiences a significant increase of 14.8% to 16.6%, and the maximum difference in flow between adjacent nozzles decreases from 18% to 5%. The plug structure reduces the development space of the upstream jets at the cooling chamber axis, thereby inhibiting the formation of swirl backflow and vortex cores. This reduction minimizes the interference of upstream coolant on fresh

jets and strengthens the weakening effect of swirl on the wall boundary layer. Consequently, the plug structure effectively enhances the consistency of the swirl structure and improves the strength and uniformity of the heat transfer coefficient of the target surface.

Keywords: swirl cooling; turbine blades; internal cooling; Nusselt number; jetting Reynolds number

燃气轮机是一种广泛应用在电力生产、船舶动力等领域的高端工业装备。透平叶片是实现燃气轮机热功转换的关键部件,需要设计专门的冷却结构以保障叶片在高温环境中正常工作^[1-3]。前缘部位是透平叶片直接承受燃气来流冲击的位置,也是热负荷最高的位置,通常布置有冲击冷却或旋流冷却结构。其中,旋流冷却结构凭借更高的冷却效率和更均匀分布的换热系数吸引了越来越多的研究者关注。

Kreith等^[4]在20世纪50年代末采用试验方法研究了金属促旋结构对光环圆管内部流动换热特性的影响机制,发现管内旋流的径向压力梯度较强,旋流削弱了壁面边界层,从而显著提升了壁面换热系数。Dhir^[5]将促旋结构发展为切向进口圆管,通过试验研究发现旋流切向速度是决定旋流冷却效果的关键因素,切向进口圆管相比促旋结构具有更低的流动阻力、制造成本和实用价值。Glezer等^[6]将旋流冷却结构布置在燃气轮机透平叶片中,通过试验发现旋流冷却在叶片前缘具有与冲击冷却相似的冷却效果,为叶片冷却设计开辟了新的方向。Du等^[7]研究了温比对旋流冷却流动换热特性的影响,结果表明,冷气与靶面温度比的增加会提高旋流速度,但会降低靶面换热系数和摩擦阻力。Fan等^[8]采用粒子图像测速仪测量了半圆柱形旋流冷却腔内的流动特性,结果发现,旋流涡系在腔室中由一个大尺度的涡流和一个小尺度的反旋角涡组成,核心旋涡被射流涡和壁面边界层包裹,高速射流涡是决定旋流冷却换热强度的主要因素。刘钊等^[9]通过流热耦合研究对比了透平第一级动叶前缘采用不同冷却结构的冷却效果,发现旋流-气膜复合冷却结构能够将前缘位置的综合冷却效率在传统冷却结构的基础上提升6%左右。杜长河等^[10]对旋流冷却叶片在不同温比条件下的温度场与应力场分布进行了流固耦合模拟,结果表明,随着温比提升,冷气流速与湍动能得到增强,旋流冷却靶面的温度与热应力先增高后降低。王杰枫等^[11]采用数值方法研究了拔模斜度对旋流冷却流动换热特性的影响,研究表明,拔模斜度

由 -1° 增大至 1° 时,旋流冷却的流动阻力降低而换热系数提高,综合换热因子提升了约9%。

除了针对旋流冷却流动换热机理的研究外,学者们也以旋流为基础发展了一些复合冷却形式。Kusterer等^[12-13]首先提出了双旋流冷却结构,通过射流孔冲击对称分布的两个旋流腔,实现降低横流影响、提升旋流冷却效率的效果,双旋流冷却结构的有效性也得到了其他学者的验证^[14-16]。周骏飞^[17]研究了气膜-双旋流复合冷却结构的流动换热特性,并总结了气膜-双旋流复合冷却传热毕渥数关联式。王杰枫等^[18]提出了一种将旋流与冲击相结合的新型冷却结构,利用冲击射流与旋流的相互作用产生对转涡系,从而抵抗上游的横流影响,在保障与旋流冷却相似的换热系数的同时较低了流动阻力。严彪等^[19]将肋片布置在旋流腔和供气腔中,通过数值研究发现旋流冷却与靶面环肋的组合结构能够以较小的流动损失代价改善靶面换热系数,将综合换热因子提升约3.4%。马永乐等^[20]提出了一种采用条缝喷嘴的旋流冷却结构,通过数值研究发现条缝喷嘴旋流冷却的靶面努塞尔数相比传统离散喷嘴旋流冷却低约2.1%,但有效改善了换热系数分布均匀性,能将靶面换热的流向不均匀度降低约70%。

目前,针对旋流冷却的改进设计主要集中在将旋流冷却与传统冷却结构进行组合上,针对旋流冷却本身的流动特点进行优化的研究还比较少。为了保证壁厚一致,旋流冷却腔在叶高方向上的横截面积通常变化不大,而冷气则是渐次递加的,这就意味着上游冷气的发展空间过大,容易产生旋流回流,对上游的冷气射流产生干扰,从而导致靶面换热系数分布不均匀、冷气利用率低等问题。

本文提出一种用于优化旋流冷却效果的插芯结构,系统研究了插芯旋流冷却相对于传统旋流冷却在不同射流雷诺数下的流动换热特性差异,包括静压系数、流量分配、流动结构、靶面努塞尔数分布等,深入分析了插芯旋流冷却的流场结构,揭示了插芯对提升旋流冷却靶面换热系数分布均匀性和冷气利用率的作用机理。

表 1 计算域主要几何参数

Table 1 Main geometric parameters of computational domain

单位:mm	
参数	数值
喷嘴长度 L_{jet}	15
喷嘴宽度 W_{jet}	3
喷嘴高度 H_{jet}	30
喷嘴水力直径 D_{jet}	5
旋流腔水力直径 D	40
旋流腔长度 L	300
出口段长度 L_{out}	200
插芯顶端直径 D_{plug1}	10
插芯尾端直径 D_{plug2}	34

1.2 边界条件

为了指导后续的试验研究,本文参照文献[11],按照透平叶片内部冷却试验条件设定了计算域的边界条件,具体参数列于表 2。模拟工质为理想空气,冷却空气进口给定流量边界条件,具体数值与喷嘴射流雷诺数相匹配。雷诺数是流体力学中用于表征流体流动状态的重要无量纲参数,其定义为流体惯性力与黏性力之比,其计算公式如下

$$Re = \rho v d / \mu \tag{1}$$

式中: ρ 为流体密度; v 为流体速度; μ 为流体动力黏性系数; d 为流动特征长度。

表 2 边界条件参数

Table 2 Boundary condition parameters	
边界参数	数值
进口湍流度	0.05
进口总温/K	350
靶面温度/K	500
出口静压/MPa	0.11

在表征射流流动状态时,特征长度 d 按照射流喷嘴水力直径 D_{jet} 取值,后者定义如下

$$D_{\text{jet}} = 4S/C \tag{2}$$

式中: S 为射流喷嘴的横截面积; C 为射流喷嘴的横截面周长。由于旋流腔内的压力分布不均匀,不同喷嘴的雷诺数存在差异,因此本文喷嘴射流雷诺数取所有喷嘴的平均值。雷诺数设置了 5 000、10 000、15 000、20 000 共 4 组。进口湍流度为 5%,进口总温为 350 K,靶面温度为 500 K,冷气与壁面温度比为 0.7,与燃气轮机实际工况一致。计算域出口静压设定为 0.11 MPa。

1.3 湍流模型验证

努塞尔数 Nu 是研究内部冷却常用的无量纲换热系数,其定义如下所示

$$Nu = \frac{q_w D}{(T_w - T_c) \lambda} \tag{3}$$

式中: q_w 为靶面热流量; T_w 为靶面温度; T_c 为冷气进口总温; λ 为空气导热系数。

作者在之前的工作[24]中已经对定常计算旋流冷却结构进行了详细的湍流模型验证,结果如图 3 所示,图中 x 为旋流腔流向距离, r 为旋流腔半径。

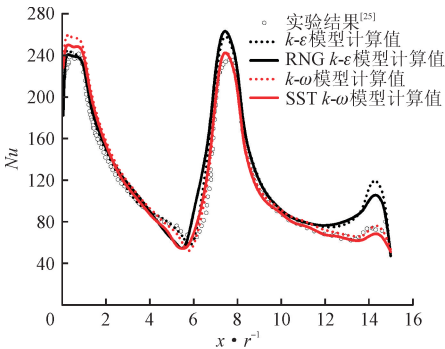


图 3 湍流模型验证结果

Fig. 3 Results of turbulence model validation

通过对比内部冷却结构定常数值模拟常用的 4 种湍流模型($k-\epsilon$ 、 $RNG\ k-\epsilon$ 、 $k-\omega$ 和 $SST\ k-\omega$)对旋流冷却靶面换热系数的预测能力,发现 $SST\ k-\omega$ 湍流模型与实验值[25]吻合程度最好,相对其他 3 种湍流模型在旋流冷却计算方面具有最高的模拟精度。因此,本文采用 $SST\ k-\omega$ 湍流模型对插芯旋流结构开展数值仿真研究。

1.4 网格无关性验证

本文采用非结构化网格对流体计算域进行剖分。近壁面第一层网格厚度设置为 0.001 mm,增长率为 1.2,棱柱层网格(边界层)总层数为 30。经计算验证,流体域壁面 y^+ 均小于 1.0,符合 $SST\ k-\omega$ 湍流模型的计算要求。计算域网格及边界层网格放大图如图 4 所示。壁面与主流区域的网格尺度保持一致,局部加密策略为按曲率(18°)和狭窄区(3 层)加密,加密网格集中在喷嘴与旋流腔的连接处。通过 7 套不同精细程度的网格进行无关性验证,网格数分别设置为

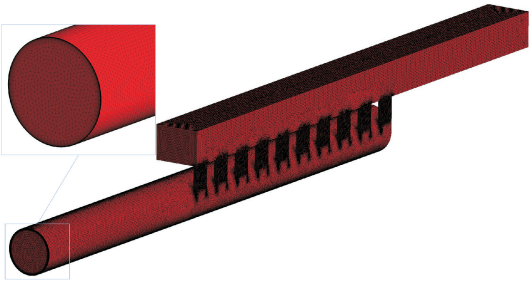


图 4 计算域网格

Fig. 4 Computational domain mesh

100 万、300 万、500 万、700 万、900 万、1 100 万、1 400 万。采用旋流冷却结构进行验证,喷嘴射流雷诺数为 10 000,对比数据为靶面周向角 180° 位置沿轴向分布的努塞尔数和靶面面积平均努塞尔数。

周向角为描述旋流腔靶面周向位置的几何参数,示意图如图 5 所示。图中视角为沿冷气流动方向观察供气腔和旋流腔的角度。在此视角下,以旋流腔靶面最高位置($y=20\text{ mm}$)作为周向角定义的起点($\theta=0^\circ$),周向角沿逆时针方向逐渐增大,直至再次返回最高点($\theta=360^\circ$)。网格无关性验证的数据采样位置为 $\theta=180^\circ$ ($y=-20\text{ mm}$) 处,对应的是透平叶片热负荷最高的前缘滞止线位置。

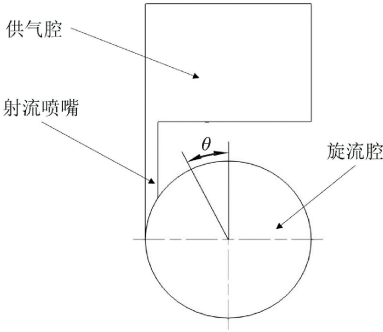
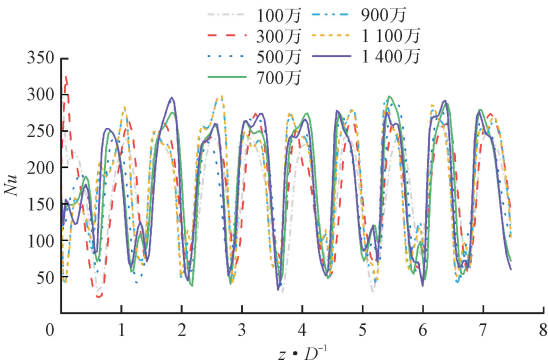


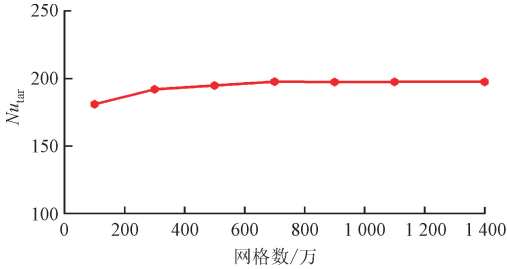
图 5 周向角示意图

Fig. 5 Schematic of circumferential angle

网格无关性验证结果如图 6 所示。图 6(a) 为靶面周向角 180° 位置处的努塞尔数对比结果, z 为旋流腔流向距离, D 为旋流腔直径。可以看出,7 套网格模拟得到的努塞尔数分布基本一致,在网格数较小时对上游努塞尔数 Nu_{tar} 的峰值预测过高,而且各个高换热区位置与加密网格的预测结果相比更偏向下游一些,但整体换热分布情况预测结果基本一致。靶面面积平均努塞尔数的对比结果如图 6(b) 所示,与 1 400 万网格计算结果相比,100 万至 1 100 万网格的偏差依次为 8.36%、2.78%、1.34%、0.08%、0.07%、0.01%。



(a) 靶面努塞尔数对比 ($\theta=180^\circ$)



(b) 靶面面积平均努塞尔数对比

图 6 网格无关性验证

Fig. 6 Mesh independence validation

综上,为了平衡计算精度与计算资源消耗,本文选择 700 万网格进行数值模拟研究。

2 结果与分析

本研究对比了旋流冷却与插芯旋流冷却两种结构,冷气进口流量有 4 种,用于匹配 4 种喷嘴射流雷诺数 Re_j (5 000、10 000、15 000、20 000),以旋流腔直径 D 作为特征长度的旋流雷诺数 Re 则依次为 1 400、29 000、43 000、57 000。下面将从综合冷却性能、换热特性、流动特性等方面研究加入插芯结构对旋流冷却的影响。

2.1 插芯结构对旋流冷却综合冷却性能的影响

本节主要关注旋流冷却与插芯旋流冷却在靶面面积平均努塞尔数、摩擦因子和综合冷效因子等参数上的表现,以评估插芯结构对旋流冷却综合冷却性能的影响。靶面面积平均努塞尔数是用于评估内部冷却结构换热系数的常用参数。摩擦因子 f 用于评估冷却结构所产生的流动损失,其定义如下

$$f = \frac{2D\Delta P^*}{\rho v^2 L} \quad (4)$$

式中: ΔP^* 为旋流腔内的总压损失。

综合冷效因子 J 是综合评估冷却结构在换热系数增强和流动阻力提高两个方面作用下的无量纲参数,其定义如下

$$J = \frac{Nu_{tar}}{Nu_0} \left(\frac{f}{f_0} \right)^{-1/3} \quad (5)$$

式中: Nu_{tar} 为靶面面积平均努塞尔数; Nu_0 为相同边界条件下圆管结构充分发展段的壁面面积平均努塞尔数; f_0 为相同雷诺数条件下圆管内的摩擦因子。分别定义 Nu_0 、 f_0 如下

$$Nu_0 = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (6)$$

$$f_0 = 0.3164 Re^{-1/4} \quad (7)$$

其中: Re 为旋流腔雷诺数; Pr 为冷却空气普朗特数。

普朗特数是表征流体中能量与动量在输运过程中相互关系的无量纲参数,其定义如下

$$Pr = c_p \mu / \lambda \quad (8)$$

式中: c_p 为空气比定压热容。

旋流冷却与插芯旋流冷却在靶面面积平均努塞尔数和综合冷效因子对比见图7。可以看到,插芯旋流冷却的靶面换热强度始终高于旋流冷却,相对后者的提高程度随着雷诺数的增加由5.9%不断扩大到8.3%。增设插芯结构后,旋流冷却的综合冷效因子也有了提高,提高幅度由射流雷诺数为5000时的5.2%不断扩大到射流雷诺数为20000时的6.6%。

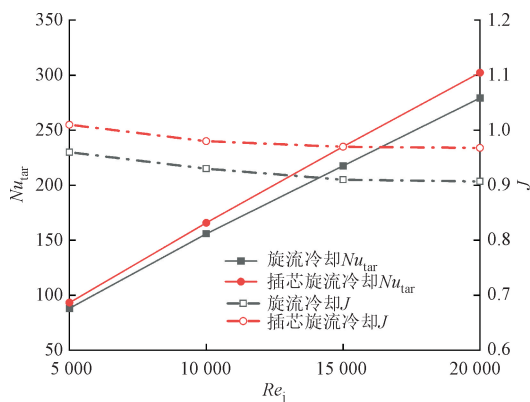


图7 靶面面积平均努塞尔数与综合冷效因子

Fig. 7 Area-averaged Nusselt number on target surface and overall cooling factor

图8中的实线为旋流冷却或插芯旋流冷却相对于圆管充分发展段的壁面努塞尔数之比,表征两种旋流结构带来的换热增强效果;虚线则是旋流冷却或插芯旋流冷却相对于圆管充分发展段的摩擦因子之比,表征两种旋流结构带来的流动损失代价。

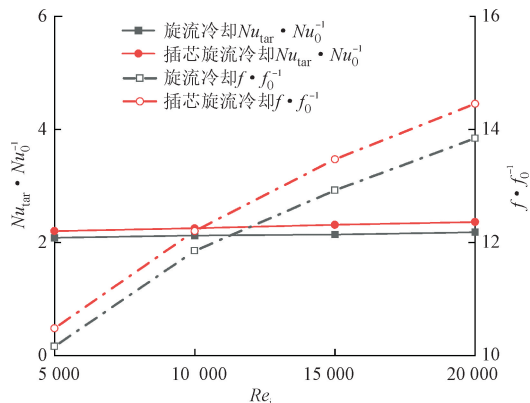


图8 两种冷却结构在换热和流动损失上的对比

Fig. 8 Comparison of the two cooling structures in heat transfer and flow loss

可以看到,随着射流雷诺数由5000增加到20000,旋流冷却和插芯旋流冷却的努塞尔数之比分别提高了4.8%和7.3%,摩擦因子比分别提高了36.2%和37.9%。在所研究的雷诺数范围内,插芯旋流冷却的努塞尔数比相对于旋流冷却高5.8%~8.3%,摩擦因子之比相对于旋流冷却高3.1%~4.4%。在综合冷效因子的定义中,努塞尔数之比的权重要高于摩擦因子之比,因此插芯旋流冷却的优势更加明显。

上述数据说明,对旋流冷却结构来说,引入插芯结构后,虽然流动阻力有小幅增加,但靶面努塞尔数得到了更大程度的加强,因此综合冷效因子得到了提高,而且提高程度随着射流雷诺数的增大而增加。

2.2 插芯结构对旋流冷却换热特性的影响

2.1节的数据已经展现了插芯结构在提高旋流冷却靶面整体换热强度和综合冷效因子方面的优势,但冷却效果的均匀性同样重要。作为透平叶片前缘内部冷却结构,旋流冷却靶面在前缘滞止线附近会承受极高的热负荷,这就要求冷却结构能够在该位置提供最高的换热系数,同时高低换热区之间的差和梯度都尽可能地小。本节从轴向平均努塞尔数、周向平均努塞尔数和靶面努塞尔数分布等方面分析插芯结构对旋流冷却靶面换热特性的影响。

轴向平均努塞尔数 Nu_{sa} 对比结果如图9所示,其中,横坐标为周向角 θ ,前缘滞止线对应位置为 $\theta = 180^\circ$ 处, $90^\circ < \theta < 180^\circ$ 范围对应的是压力侧, $180^\circ < \theta < 270^\circ$ 范围对应的是吸力侧。可以看到,旋流冷却的射流会在喷嘴处形成极高的换热峰值,然后在压力侧形成比较平稳均匀的换热区域,但在 $\theta > 180^\circ$ 后,努塞尔数有明显的下降,直至旋转一周后在喷嘴的周向上游位置 ($\theta = 65^\circ$) 形成一个较小的换热峰值,但此峰值的绝对值较低,仅比轴向平均努塞尔数最小值高12%左右。在增设插芯结构后,除压力侧外所有位置的轴向平均努塞尔数均有提升,最大提升幅度随射流雷诺数的提高由14.8%扩大到16.6%。同时,靶面在 $120^\circ < \theta < 240^\circ$ 的范围内始终保持了较高的换热系数,说明插芯旋流冷却解决了旋流冷却在压力侧换热系数高而吸力侧换热系数低的不均匀性问题。

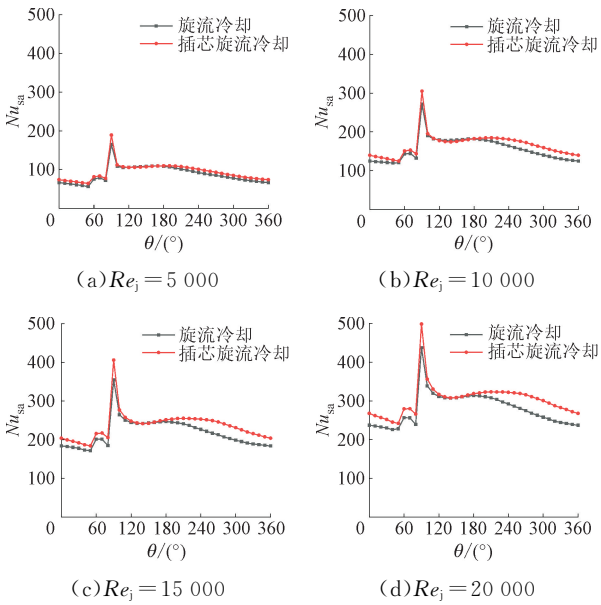


图 9 轴向平均努塞尔数

Fig. 9 Spanwise averaged Nusselt number

图 10 展示的是旋流冷却与插芯旋流冷却结构在 4 种射流雷诺数下的靶面周向平均努塞尔数 Nu_{ca} , 其横坐标 z/D 为旋流腔轴向长度。可以看到, 两种结构的周向平均努塞尔数分布趋势大体一致, 均为换热系数的峰值、谷值交替出现。旋流冷却的换热峰值随着轴向距离的增加而呈增加趋势。插芯旋流冷却的换热峰值、谷值相对旋流冷却向下游偏移一些, 其数值则整体高于旋流冷却, 另外上游的换热系数得到了有效加强, 各个峰值之间偏差较小, 因此换热峰值沿轴向距离分布更加均匀。

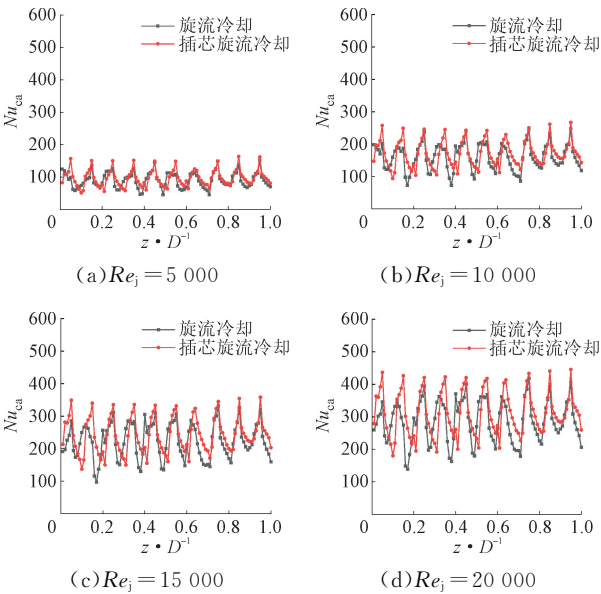


图 10 周向平均努塞尔数

Fig. 10 Circumferentially-averaged Nusselt number

图 11 给出了靶面努塞尔数分布云图, 这里将旋流腔靶面展开为二维图像以方便展示, 其横坐标 s/D 为周向坐标, 方向与图 3 中周向角的定义一致。图中空白矩形即为射流喷嘴的位置。可以发现, 旋流冷却的射流在离开喷嘴后大部分向轴向下流动, 有部分射流在轴向上向上游“逆流”发展, 射流高换热区 ($Nu > 180$) 的周向长度也缺乏明显的规律性。相比之下, 插芯旋流冷却的射流均在离开喷嘴后均向轴向下流动, 射流产生的高换热区的分布一致性较好。

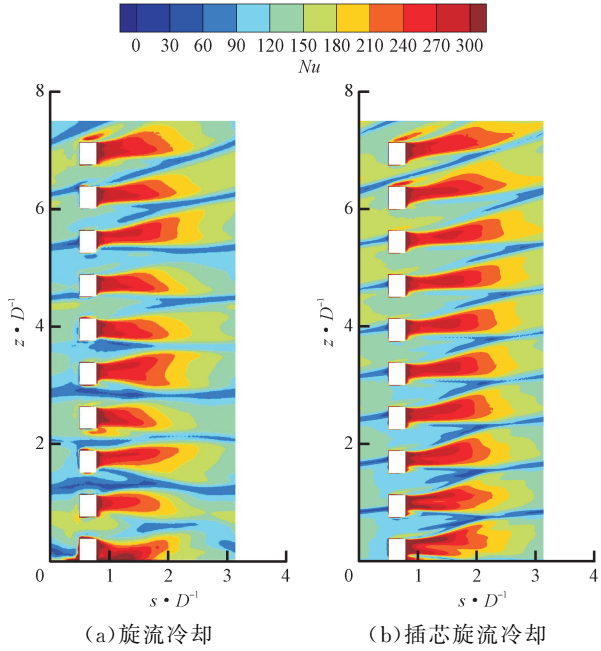
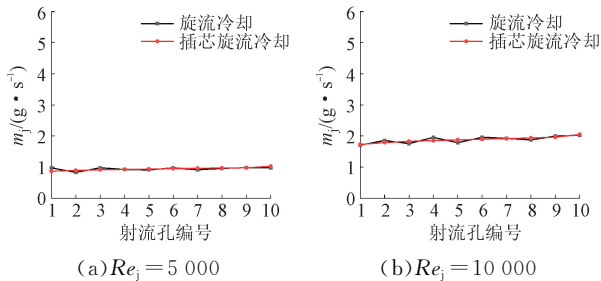


图 11 靶面努塞尔数分布 ($Re_j = 10\ 000$)

Fig. 11 Distribution of Nusselt number on target surface ($Re_j = 10\ 000$)

2.3 插芯结构对旋流冷却流动特性的影响

本节从流动特性的角度研究插芯结构对旋流冷却靶面换热特性的影响机理。不同射流雷诺数下的喷嘴流量 (m_j) 分布见图 12, 横坐标为射流孔沿流向的编号。可以看出, 旋流冷却与插芯旋流冷却的喷嘴流量分布趋势一致, 但是旋流冷却相邻喷嘴间的流量差最大为 18%, 插芯旋流冷却则为 5%。这说明增设插芯结构能够有效降低喷嘴的流量波动, 使旋流腔靶面得到更均匀的冷却效果。



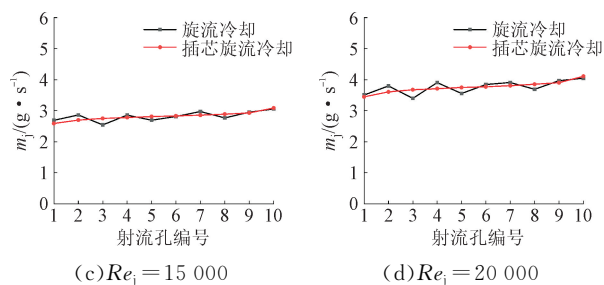


图 12 喷嘴流量分布

Fig. 12 Mass flow rate distribution of nozzles

静压压力系数 C_{sp} 是用来衡量靶面压力的无量纲参数,定义如下

$$C_{sp} = \frac{P - P_{out}}{P_{in}^* - P_{out}} \quad (9)$$

式中: P 为靶面静压; P_{out} 为旋流腔出口静压; P_{in}^* 为旋流腔进口总压。

图 13 给出了旋流冷却与插芯旋流冷却的周向平均静压压力系数。由图可见,旋流冷却与插芯旋流冷却的静压分布曲线均存在周期性的波动,旋流冷却的静压分布曲线大体呈沿流向逐渐下降的分布趋势,但在 $Re_j \geq 10\,000$ 时第 1 个喷嘴对应的静压峰值比较低。相比之下,插芯旋流冷却的静压压力系数整体比旋流冷却高 0.1 左右,第 1 个喷嘴对应的靶面静压峰值相对旋流冷却提升了 80% 左右,有效改善了旋流冷却第 1 个喷嘴对靶面的贴附效果。

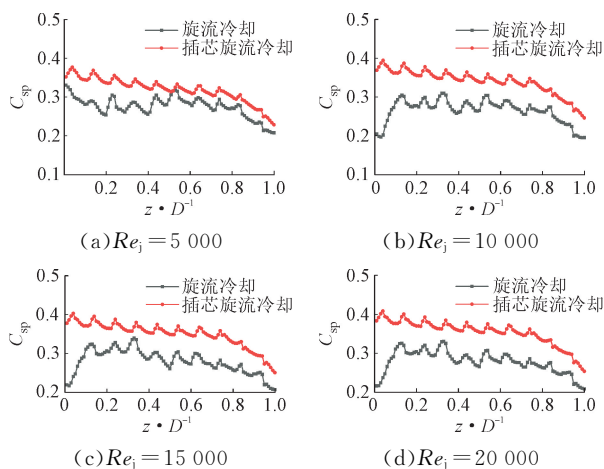
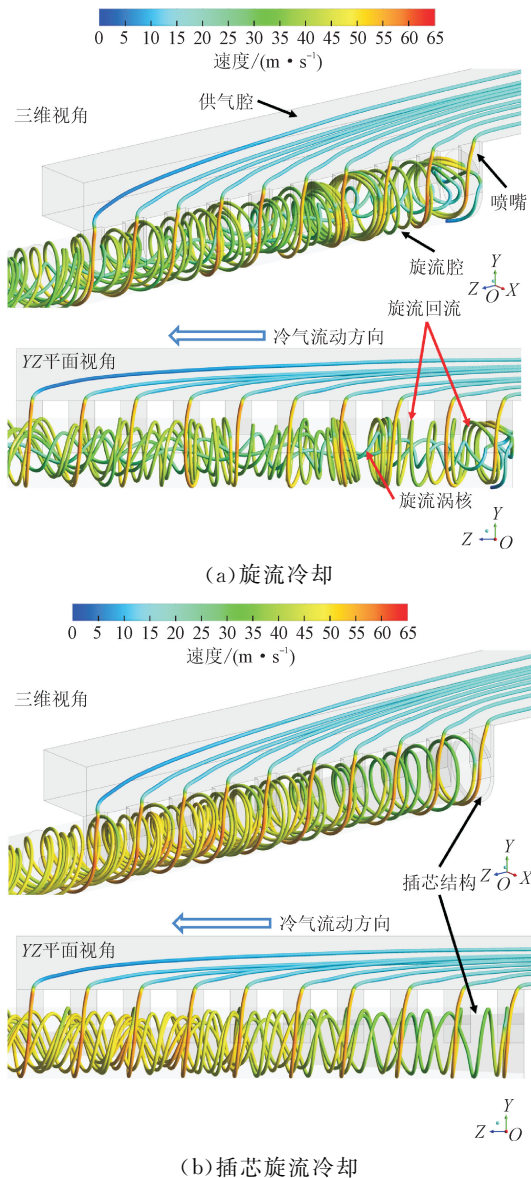


图 13 周向平均静压压力系数

Fig. 13 Circumferentially-averaged static pressure factor

图 14 展示了旋流冷却与插芯旋流冷却结构内部的流线分布情况。由图 14(a) 可见,冷却空气从供气腔经由射流喷嘴进入旋流腔后会首先在靶面环绕若干圈,上游的第 1、2 个射流喷嘴中的冷气会在靶面上形成旋流回流涡核,其他射流喷嘴的冷气在脱离靶面后也会卷入旋流涡核一并向出口流动。由图 14(b) 可见,插芯结构削减了上游射流在旋流腔

轴心处的发展空间,抑制了旋流回流现象和旋流涡核的形成,降低了上游冷气对新鲜射流的干扰,从而有效提高了射流在靶面附近形成的旋流结构的一致性。

图 14 流线分布对比 ($Re_j = 10\,000$)Fig. 14 Comparison of streamline distributions ($Re_j = 10\,000$)

旋流腔内部的冷气发展空间过大会降低核心区冷气周向流速,增加旋流结构的不稳定性和掺混损失,这一点可以从图 15 的旋流腔截面速度分布和图 16 的旋流腔截面湍动能分布中得到体现。图 15 中选取的 5 个截面分别为旋流腔第 1、3、5、7、9 个射流喷嘴的轴向中心位置。由图 15(a) 可以看到,旋流冷却在旋流腔轴心位置处存在明显的低速涡核,这种涡核的位置和速度沿流向的发展是非常不稳定的,对冷气射流的旋流冷却结构形成了干涉扰动。相比之下,在图 15(b) 中,通过轴向通流流量控制冷

气发展空间就可以有效抑制低速区的形成,显著增强旋流结构的稳定性和旋流的周向速度,从而优化旋流对壁面边界层的削弱效果,提高冷气利用率,改善旋流冷却在靶面换热系数分布的均匀性。

插芯结构增强旋流结构稳定性还会降低掺混损失。从图 16 所示的截面湍动能分布对比可以看出,旋流核心处的新旧冷气相互扰动会造成显著的高湍动能区,而增加插芯后,核心区域的流动稳定性大大

增强,湍动能水平有效降低,抑制了掺混损失。不过,结合图 13 中的靶面静压压力系数对比可知,插芯结构提高了旋流腔内的静压压力水平,而且插芯结构壁面边界层也成了流动阻力的新的来源。对于旋流冷却来说,流动损失是掺混损失和壁面流动损失之和。由图 8 可知,插芯旋流冷却的流动阻力比旋流冷却提高了 4% 左右,这说明插芯结构本身所增加的流动阻力高于其降低的掺混损失。

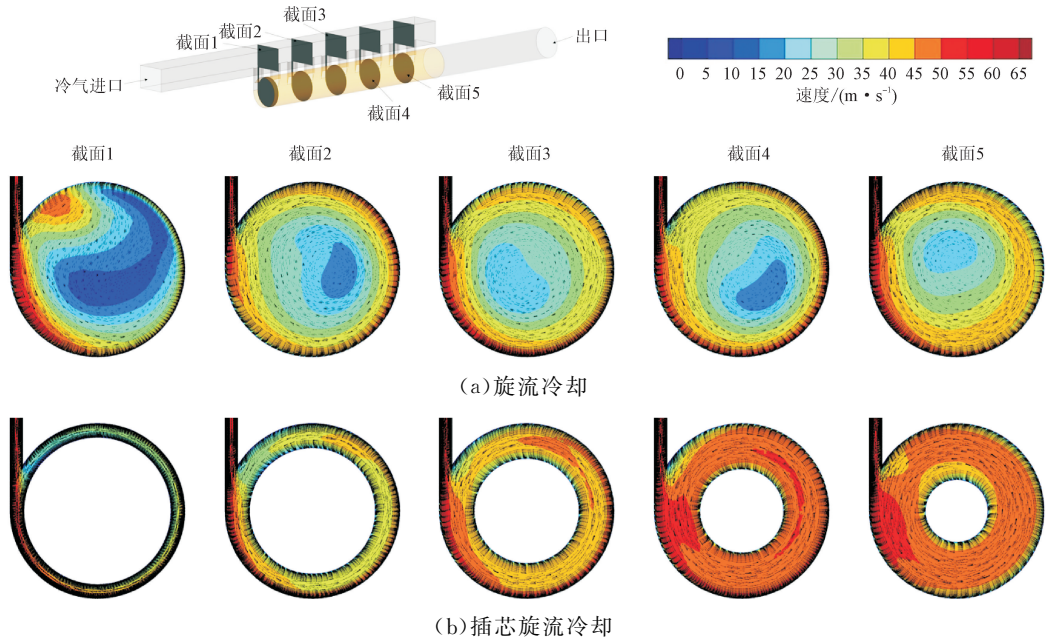


图 15 不同流向截面上的速度分布 ($Re_j=10\ 000$)
Fig. 15 Velocity distributions on streamwise sections ($Re_j=10\ 000$)

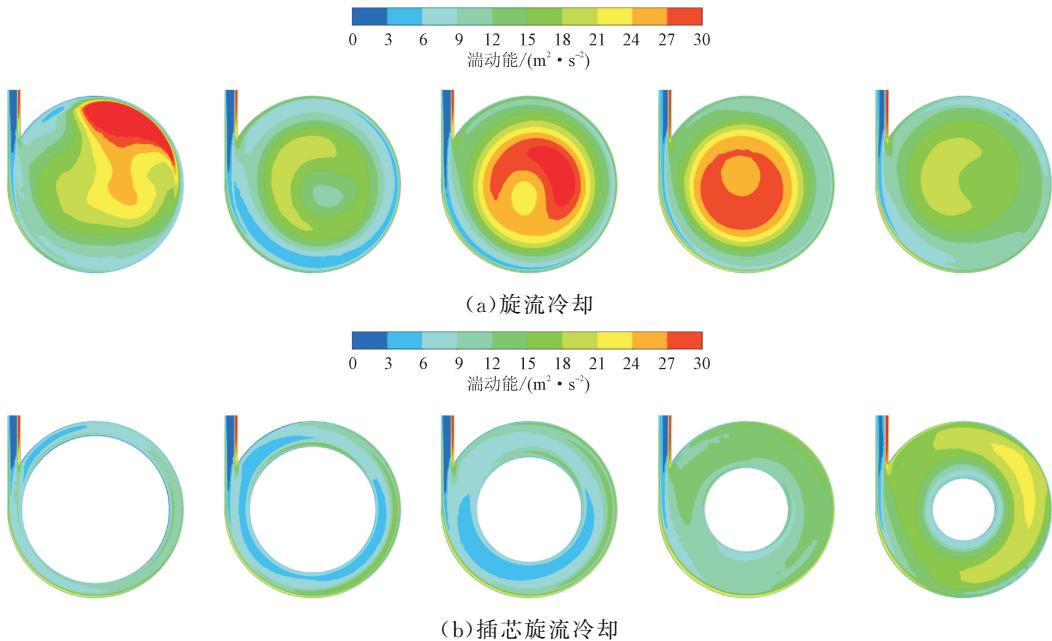


图 16 不同流向截面上的湍动能分布 ($Re_j=10\ 000$)
Fig. 16 Turbulence kinetic energy distributions on streamwise sections ($Re_j=10\ 000$)

3 结 论

本文针对插芯旋流冷却进行了数值研究,详细分析了旋流冷却结构在增设插芯结构前后的流动与换热特性,对比了这2种冷却结构在4种射流雷诺数条件下的速度、流量、努塞尔数等参数,揭示了插芯结构改善旋流冷却效果的作用机理,主要结论如下。

(1)在所研究的射流雷诺数范围内,增设插芯结构后,旋流冷却结构的靶面面积平均努塞尔数和综合冷效因子分别增加了5.9%~8.3%和5.2%~6.6%,增加幅度均随射流雷诺数的增大而增加。

(2)增加插芯结构后,旋流冷却的摩擦因子增加了3.1%~4.4%,周向平均静压压力系数提高了0.1左右,整体流动损失有所增加。

(3)插芯旋流冷却能够在透平叶片承受热负荷最高的前缘滞止线附近提供均匀的冷却效果,将吸力侧努塞尔数提高14.8%~16.6%,解决了旋流冷却在压力侧换热系数高而吸力侧换热系数低的不均匀性问题。

(4)增设插芯结构能够将旋流冷却相邻喷嘴间的流量差从18%削减到5%,有效降低喷嘴的流量波动,使旋流腔靶面在轴向上得到更均匀的冷却效果。

(5)插芯结构削减了上游射流在旋流腔轴心处的发展空间,抑制了旋流回流现象和旋流涡核的形成,降低了上游冷气对新鲜射流的干扰,从而有效提高了旋流结构的一致性并改善了靶面换热系数分布的均匀性。

参考文献:

- [1] 谢永慧,王雨琦,施东波,等. 重型燃气轮机透平叶片流热固特性研究进展[J]. 热力透平, 2022, 51(3): 170-177.
- XIE Yonghui, WANG Yuqi, SHI Dongbo, et al. Review on research of fluid-thermal-solid characteristics for turbine blade in heavy-duty gas turbine[J]. Thermal Turbine, 2022, 51(3): 170-177.
- [2] 赵振,高建民,徐亮,等. 某型高温涡轮叶片冷却性能的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(1): 54-67.
- ZHAO Zhen, GAO Jianmin, XU Liang, et al. Experimental study on cooling performance of a high temperature turbine blade[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(1): 54-67.

- [3] 蒲思宇. 涡轮叶片前缘旋流冷却特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
- [4] KREITH F, MARGOLIS D. Heat transfer and friction in turbulent vortex flow[J]. Applied Scientific Research: Section A, 1959, 8(1): 457-473.
- [5] DHIR V K. Heat transfer enhancement using tangential injection: US5291943A[P]. 1994-03-08.
- [6] GLEZER B, MOON H K, O'CONNELL T. A novel technique for the internal blade cooling[C]//ASME 1996 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition. New York, USA: ASME, 1996: V004T09A015.
- [7] DU Changhe, LI Liang, LI Sen, et al. Effects of aerodynamic parameters on steam vortex cooling behavior for gas turbine blade leading edge[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy, 2016, 230(4): 354-365.
- [8] FAN Xiaojun, HE Chuangxin, GAN Lian, et al. Experimental study of swirling flow characteristics in a semi cylinder vortex cooling configuration[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2020, 113: 110036.
- [9] 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.
- [10] 杜长河,高银峰,李洪伟,等. 不同冷气/燃气温比下高温涡轮叶片旋流冷却流固耦合特性研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(8): 27-33.
- DU Changhe, GAO Yinfeng, LI Hongwei, et al. Study on fluid-structure coupling characteristics of gas turbine blade swirl cooling under different coolant-gas temperature ratios[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(8): 27-33.
- [11] 王杰枫,杜长河,吴凡,等. 喷嘴周向位置和旋流腔拔模斜度对旋流冷却的影响[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(11): 65-72.
- WANG Jiefeng, DU Changhe, WU Fan, et al. Effects of jet nozzle circumferential position and vortex chamber draft angle on the flow and heat transfer characteristics of vortex cooling[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(11): 65-72.
- [12] KUSTERER K, LIN Gang, BOHN D, et al. Heat transfer enhancement for gas turbine internal cooling by application of double swirl cooling chambers[C]//

- ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2013; V03AT12A027.
- [13] KUSTERER K, LIN Gang, BOHN D, et al. Leading edge cooling of a gas turbine blade with double swirl chambers [C]//ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2014; V05AT12A024.
- [14] ZHOU Junfei, WANG Xinjun, LI Jun, et al. Effects of impinging hole shapes on double swirl cooling performance at gas turbine blade leading edge [C]//ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2018; V05AT11A003.
- [15] ZHOU Junfei, WANG Xinjun, LI Jun, et al. Effects of target channel shapes on double swirl cooling performance at gas turbine blade leading edge [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2019, 141(7): 071004.
- [16] 何娟, 邓清华, 高铁瑜, 等. 周向角和直径比对切向双旋流冷却流动与传热特性的作用机理 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(9): 89-99.
- HE Juan, DENG Qinghua, GAO Tieyu, et al. Effects of circumferential angle and diameter ratio on the flow and heat transfer characteristics of double swirl cooling [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(9): 89-99.
- [17] 周骏飞. 燃机透平叶片前缘双旋流冲击冷却流动与换热特性的数值研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2017.
- [18] 王杰枫, 栾宇轩, 杜长河, 等. 一种新型组合内部冷却的流动和换热特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(5): 108-115.
- WANG Jiefeng, LUAN Yuxuan, DU Changhe, et al. Investigation on the flow and heat transfer behavior of a new composite internal cooling model [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(5): 108-115.
- [19] 严彪, 朱华, 刘雨松, 等. 涡轮叶片中旋流冷却的肋片对流动换热的影响 [J]. 航空动力学报, 2023, 38(11): 2729-2737.
- YAN Biao, ZHU Hua, LIU Yusong, et al. Effects of finned structure on flow and heat transfer characteristics in vortex cooling of turbine blade [J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(11): 2729-2737.
- [20] 马永乐, 成克用, 淮秀兰. 条缝喷嘴几何结构对旋流冷却特性的影响 [J]. 航空动力学报, 2024, 39(1): 40-48.
- MA Yongle, CHENG Keyong, HUAI Xiulan. Effects of slot nozzle geometry on the cooling characteristics of swirl flow [J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(1): 40-48.
- [21] 刘钊. 燃气轮机透平叶片前缘内部冷却的数值模拟 [D]. 西安: 西安交通大学, 2012.
- [22] FAN Xiaojun, LI Liang, ZOU Jiasheng, et al. Local heat transfer of vortex cooling with multiple tangential nozzles in a gas turbine blade leading edge cooling passage [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 126, Part B: 377-389.
- [23] ZHANG Luzeng, YIN Juan, MOON H K. Airfoil for turbomachine and airfoil cooling method; US 2017/0248022 A1[P]. 2017-08-31.
- [24] HE Wei, DENG Qinghua, HE Juan, et al. Effects of jetting orifice geometry parameters and channel Reynolds number on bended channel cooling for a novel internal cooling structure [C]//ASME Turbo Expo 2019: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2019; V05AT11A005.
- [25] LING J P C W, IRELAND P T, HARVEY N W. Measurement of heat transfer coefficient distributions and flow field in a model of a turbine blade cooling passage with tangential injection [C]//ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air. New York, USA: ASME, 2006: 325-340.

(编辑 亢列梅)