

DOI: 10.7652/xjtuxb201604012

喷射角度和喷嘴数对旋流冷却流动与 传热特性的影响

杜长河, 范小军, 李亮, 丰镇平

(西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安)

摘要: 针对喷射角度和喷嘴数影响旋流冷却流动和传热特性的问题,采用数值方法进行了研究。研究时冷气通过不同的喷嘴进口进入旋流腔并经旋流腔出口流出,当变化喷嘴数时,保持喷嘴进口在轴向上均匀分布。研究表明:冷气从喷嘴射入旋流腔,冲刷壁面并与轴向主流强烈混合,形成了高传热区域;换热强度在轴向和周向沿下游逐渐减弱,高传热区域在下游向出口偏移。喷射角度远离 90° 时,冷气旋流运动减弱,传热强度减小;随着喷嘴数的增多,冷气喷射速度减小,高传热区换热强度减小,冷气周向速度和靶面传热强度分布更为均匀;平均努塞尔数随着喷射角度和喷嘴数的增大而先增大后减小,在喷射角为 90° 、喷嘴数为 9 时平均努塞尔数最大;总压损失系数随着喷射角度和喷嘴数的增大而增大。与简单圆管旋流冷却模型相比,喷射角为 90° 、喷嘴数为 9 的旋流腔结构的换热特性更加优良。

关键词: 旋流冷却;喷射角度;喷嘴数;流动与传热

中图分类号: TK474.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)04-0076-05

Influences of Jet Angle and Jet Nozzle Number on Flow and Heat Transfer Characteristics of Swirl Cooling

DU Changhe, FAN Xiaojun, LI Liang, FENG Zhenping

(Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A numerical method is utilized to investigate effects of jet angle and number of jet nozzles on the aerodynamic and heat transfer behaviors of swirl cooling. Cooling air is injected into the swirl chamber through various jet nozzles, and then flows out from the swirl chamber outlet. The distribution of jet nozzles along the axial direction is kept uniform when the number of jet nozzles is changed. Results show that when the cooling air jets into the swirl chamber from jet nozzles, it scours the wall and mixes with the axial mainstream, then a significant high heat transfer region is generated. The heat transfer intensity gradually decays along the axial and the circumferential directions, and the high heat transfer region shows deflection towards outlet at the downstream. When the jet angle turns away from 90° , the cooling air rotation movement is weakened, leading to a decrease of heat transfer intensity. When the number of jet nozzles increases, the air jet velocity reduces, and the thermal intensity in the high heat transfer region decreases. Moreover, the circumferential air velocity and the distribution of heat transfer intensity in target wall become more uniform. The global average Nusselt number increases at first and then reduces as the jet angle and the number of jet nozzles increase, and reaches the

收稿日期: 2015-10-21。 作者简介: 杜长河(1990—),男,博士生;李亮(通信作者),男,副教授,博士生导师。

网络出版时间: 2016-01-29

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160129.1204.002.html>

highest value when the jet angle arrives 90° and the number of jet nozzles is 9. The total pressure loss ratio increases as the jet angle and the number of jet nozzles increase. A comparison with the traditional simple pipe swirl cooling model shows that the present blade leading edge swirl chamber structure with 90° jet angle and 9 jet nozzles has more remarkable heat transfer property.

Keywords: swirl cooling; jet angle; jet nozzle number; flow and heat transfer

现代航空发动机的叶片承受着强烈的高温燃气冲刷和热腐蚀作用,必须设计开发高效的冷却系统来降低叶片表面温度。旋流冷却因为具有较好的冷却效果、热均匀性和优良的流动特性,受到叶片冷却领域学者的广泛关注。

Kreith 等首次提出高速旋流可以减薄壁面热边界层,从而显著提高换热强度^[1]。Ligrani 等发现旋流腔中产生的旋涡对增强传热有着重要影响^[2]。Segura 等详细对比了旋流和光滑方腔流动在传热和阻力等方面的特点^[3]。Glezer 等首次将旋流冷却引入到燃气透平叶片冷却的设计中,比较了3种旋流冷却结构的传热效果^[4]。Helund 等总结了旋流冷却的传热关联式^[5-7]。Ling 等对比分析了旋流冷却和常规冲击冷却的传热特性^[8]。杜长河等研究了蒸汽旋流冷却的冷却特性,并在径向对流原理的基础上分析了喷嘴面积和长宽比对流动和传热特性的影响规律^[9-10]。刘钊等针对燃气轮机叶片前缘区域,探索了喷嘴宽度对传热性能的作用机理^[11]。

当前,关于喷射角度和喷嘴数对旋流冷却流动与换热特性影响的研究十分匮乏。Liu 等分析了喷嘴长宽比和喷射角度对旋流冷却的作用规律^[12],遗憾的是他们的研究基于简单的圆管模型。针对以上研究不足,本文利用杜长河等建立的叶片前缘旋流腔模型^[13],利用数值计算方法探索了喷射角度和喷嘴数对旋流冷却流动和传热的影响规律,并将本文研究结果与以往旋流冷却的经典研究进行对比,旨在加强对航空发动机叶片旋流冷却的机理认识。

1 计算模型和数值方法

图1给出喷射角度 $\alpha = 90^\circ$ 、喷嘴数 $N = 9$ 的旋流腔几何模型。如图所示,冷气通过不同的喷嘴进口进入旋流腔,在腔体中流动并经旋流腔出口流出。变化喷嘴数时,保持喷嘴进口在轴向上均匀分布。

计算网格采用 ICEM 软件生成,图2给出旋流腔结构的计算模型和网格图。利用 ANSYS CFX 数值求解全三维 RANS 方程和两方程湍流模型,壁面函数采用 Automatic 处理方式,总体计算精度为二阶。计算边界条件如下:喷嘴进口分别给定相同

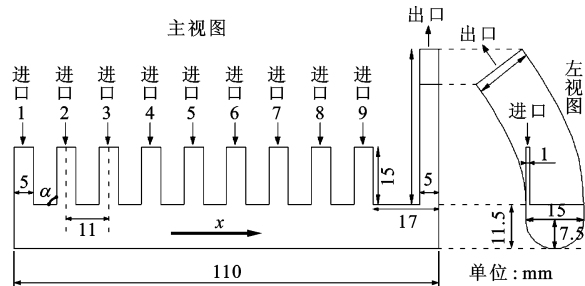


图1 旋流腔几何模型

的质量流量,保证雷诺数 $Re = 10\,000$;进口总温为 350 K;进口湍流强度为 5%;出口给定平均静压为 0.11 MPa。传热靶面取恒定温度 500 K,其他壁面绝热,所有壁面为速度无滑移边界。杜长河等指出标准 $k-\omega$ 湍流模型对于计算旋流冷却问题具有最佳的计算精度^[13],本文也采用标准 $k-\omega$ 湍流模型进行模拟。为了方便对比,采用腔体轴向通流参数定义雷诺数

$$Re = \rho U D_h / \mu \quad (1)$$

式中: ρ 、 U 、 μ 分别为体积平均冷气密度、轴向速度和动力黏性系数; D_h 为旋流腔轴向截面水力直径。

采用归一化换热系数努塞尔数表示换热强度

$$Nu = q_w D_h / (T_j - T_w) \lambda \quad (2)$$

式中: q_w 为壁面热流密度; T_j 为冷气进口总温; T_w 为靶面温度; λ 为导热系数。

采用总压损失系数 C_{pt} 表示冷气的总压损失

$$C_{pt} = (P_{ij} - P_{to}) / P_{ij} \quad (3)$$

式中: P_{ij} 为进口总压; P_{to} 为出口总压。

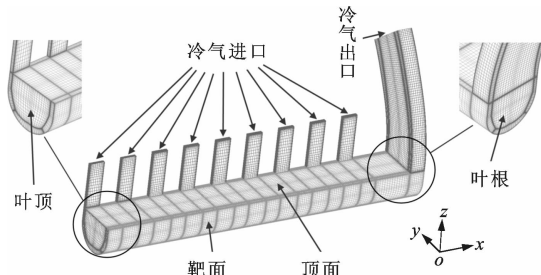


图2 旋流腔计算模型和网格

本文在 $\alpha = 90^\circ$ 、 $N = 9$ 、 $Re = 10\,000$ 的工况下进行网格无关性分析,图3给出了平均努塞尔数 Nu_a 随网格节点数的变化关系。从图中可以看出,当网格

节点数增大到 539 万时,计算结果对网格数不敏感。

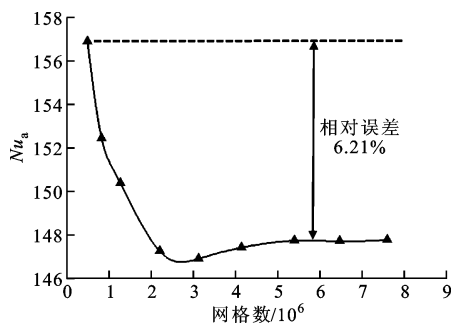


图3 网格无关性分析

2 结果分析

2.1 喷射角度的影响

本节选取 60° 、 70° 、 80° 、 90° 、 100° 、 110° 、 120° 共 7 种喷射角度分析旋流冷却的流动和换热特性,保持喷嘴数 $N=9$ 。图 4 给出了 $\alpha=90^\circ$ 时传热靶面的传热系数云图。冷气从喷嘴进口射入旋流腔,冲刷腔体壁面并与轴向主流强烈混合,因此靠近喷嘴进口的壁面区域热边界层较薄,形成明显的高传热区域。同时,由于二次流的影响作用,图 4 标记的喷嘴进口下游区域的换热强度较强。随着冷气向下游运动,热边界层加厚,壁面换热强度在轴向和周向沿下游方向逐渐减弱。另外,冷气主流的流量在轴向沿下游方向显著增大,主流对进口冷气的横向冲击作用增强。所以在旋流腔下游区域,高传热区域向下游偏移。

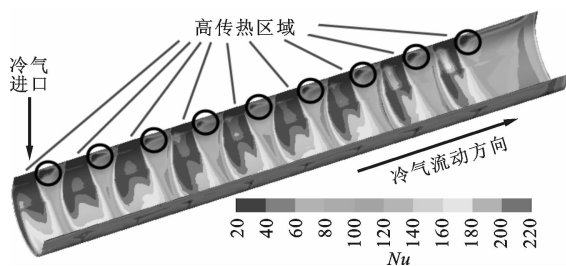


图4 旋流冷却传热系数分布

图 5 给出了不同喷射角度时沿腔体轴向 4 个横截面处的流场细节,横截面位置分别对应进口 1、进口 4、进口 7 和进口 9。冷气高速射入旋流腔,并形成大尺度旋流运动。由于喷嘴在周向布置的不对称性,旋流中心随轴向位置和喷嘴角度的变化而变化。冷气的旋流运动强度主要受冷气周向速度和主流对进口冷气的轴向冲击作用影响。周向速度增大和轴向冲击作用减弱都会使得冷气旋流强度增大。因为主流对进口冷气的横向冲击作用沿下游逐渐增强,冷气的旋转速度减小。在 $\alpha=90^\circ$ 时,冷气垂直射入

旋流腔,此时冷气旋流运动最强烈。当喷射角度从 $\alpha=90^\circ$ 减小到 $\alpha=60^\circ$ 时,冷气的周向速度减小,旋流运动明显减弱。另一方面,冷气轴向速度沿下游方向,使得主流对进口冷气的横向冲击作用进一步增强,旋流运动进一步减弱。当喷射角度从 $\alpha=90^\circ$ 增大到 $\alpha=120^\circ$ 时,冷气的周向速度减小,旋流运动也会明显减弱。但是,冷气轴向速度沿上游方向,这在一定程度上削弱了主流对进口冷气的横向冲击作用,使得旋流运动增强。因此,在 $\alpha=90^\circ$ 两侧偏离相同角度的时候, $\alpha>90^\circ$ 比 $\alpha<90^\circ$ 的旋流运动强烈。同时, $\alpha=100^\circ$ 的进口 1 和进口 9 对应的旋流运动强于 $\alpha=90^\circ$ 对应位置的旋流运动,这是由周向速度和轴向冲击耦合作用引起的。

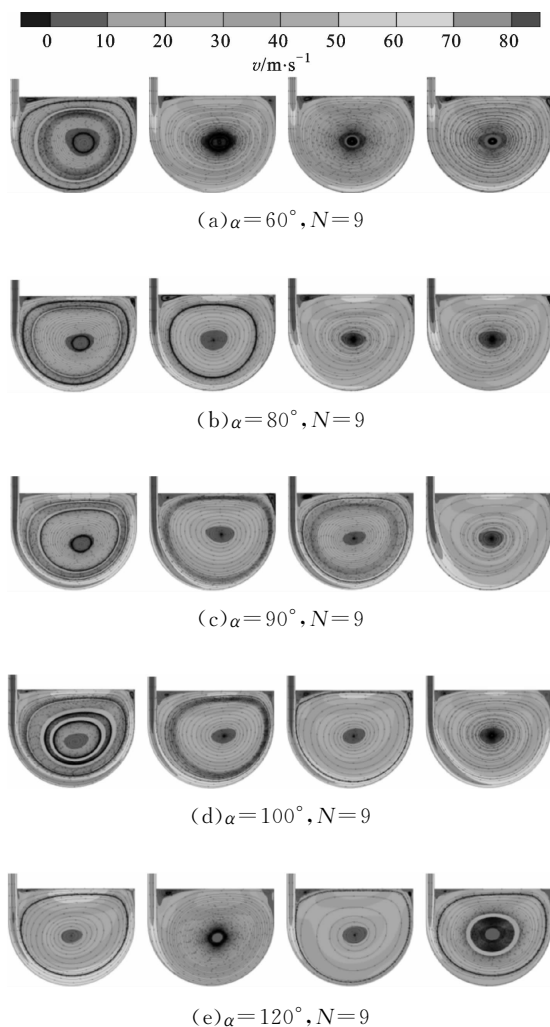


图5 不同喷射角度的 yz 截面流线和速度云图

旋流冷却的传热特性与流场细节密切相关。图 6 给出不同喷射角度下的旋流腔壁面 Nu 分布,可以看到喷射角度对旋流冷却传热影响较大。一方面,由于进口冷气的轴向速度方向与喷射角度保持一致,进一步导致高传热区域的位置在轴向发生偏

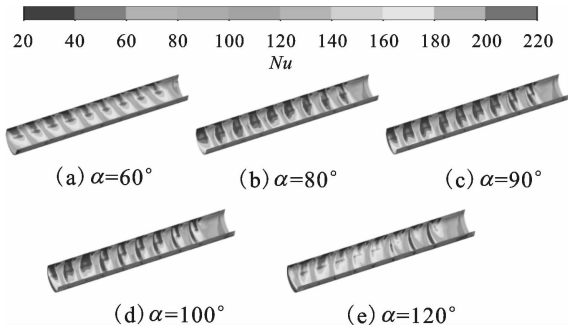


图 6 不同喷射角度时的 Nu 云图

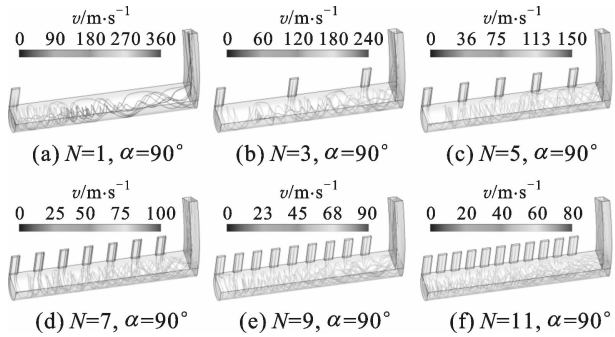


图 8 不同喷嘴数的旋流腔三维流线

移。另一方面,当喷射角度远离 90° 时,冷气的周向速度减小,冷气对靶面的冲刷作用减弱,传热强度减小。

增大换热强度和减小冷气压力损失对于旋流冷却而言至关重要。图 7 给出了平均努塞尔数 Nu_a 和总压损失系数随喷嘴角度的变化曲线。可以看到,平均努塞尔数 Nu_a 随着喷射角度的增大先增大后减小,在 $\alpha = 90^\circ$ 时平均努塞尔数 Nu_a 达到最大。总压损失系数随着喷射角度的增加而增大,这是由于更强烈的横向冲击作用引起的。

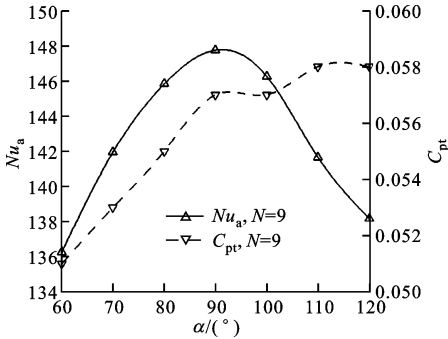


图 7 喷射角度对平均努塞尔数和总压损失系数的影响

2.2 喷嘴数的影响

本节分析了喷嘴数分别为 1、2、3、5、7、9、11 时的旋流冷却流动和换热特性,保持喷射角 $\alpha = 90^\circ$ 。图 8 给出了不同喷嘴数的旋流腔三维流线。随着喷嘴数增大,进口冷气的喷射速度明显减小,喷嘴附近的冷气旋流运动减弱。但是,旋流冷气的衰减距离随着喷嘴数增大而减小,导致冷气的旋流运动沿轴向的衰减减弱,因此喷嘴数增大时,冷气在腔体内的周向速度分布较为均匀。

图 9 给出了不同喷嘴数下的旋流腔壁面 Nu 分布。在喷嘴数较少时,由于冷气喷射速度高,高传热区的换热强度较高。但是,冷气旋流运动沿轴向的衰减强烈,导致旋流腔壁面的 Nu 呈现出上游区域高、下游区域低差异比较明显的分布。随着喷嘴数的增大,进口冷气的喷射速度减小,导致高传热区的

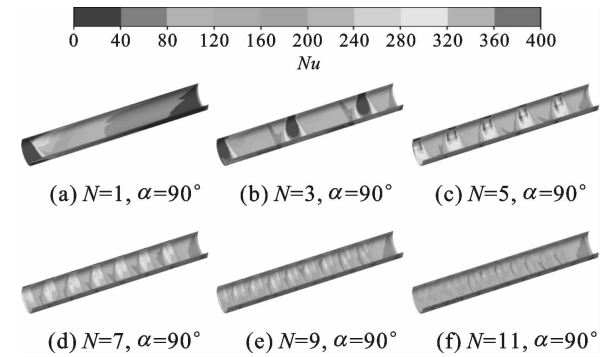


图 9 不同喷嘴数时的 Nu 云图

换热强度显著减小,靶面的 Nu 均匀性随之变好。

图 10 给出了平均努塞尔数 Nu_a 和总压损失系数随喷嘴数的变化曲线。从图中可以看出,平均努塞尔数 Nu_a 随着喷嘴数的增大先增大后减小,在 $N = 3, 4$ 时平均努塞尔数 Nu_a 达到最大,总压损失系数随着喷嘴数的增加而增大。考虑到航空发动机叶片对冷却系统的换热强度、传热均匀性和总压损失特性,喷嘴数 $N = 5 \sim 7$ 时旋流冷却的综合性能较好。

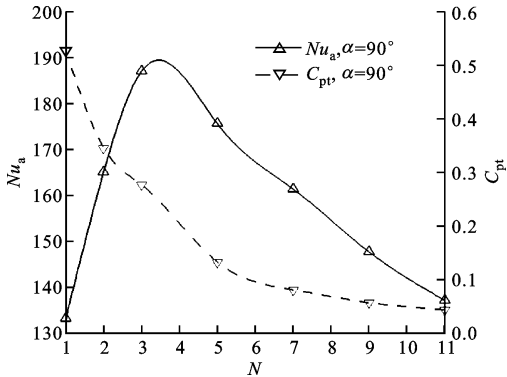


图 10 喷嘴数对平均努塞尔数和总压损失系数的影响

2.3 旋流冷却传热对比

以往关于旋流冷却的研究主要基于简单圆管模型,且模型尺寸较大,偏离实际燃机叶片尺寸,同时以往模型的喷嘴数较少,不符合实际燃机的喷嘴分

布规律。为了更加清晰地评估本文叶片前缘旋流腔结构的换热性能,图11给出了本文研究的 $N=9$ 、 $\alpha=90^\circ$ 工况和以往旋流冷却经典研究的传热特性对比。显然,与普通光滑圆管流动(D-B换热关联式)相比,旋转流动因其独特的流动特性,传热强度得到显著提高。本文研究的旋流冷却结构的换热特性略高于 Helund 等和 Ling 等研究的旋流结构^[5-8], Glezer 等研究的结构1^[4]与本文旋流腔结构换热特性相当,结构2和结构3的换热特性低于本文旋流腔结构。因为以往旋流冷却研究大多是基于简单的圆管模型,这说明本文研究采用的叶片前缘旋流腔结构具有更优良的换热特性。

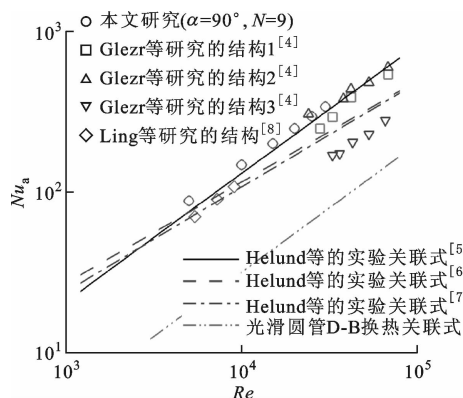


图11 本文研究与以往研究旋流冷却传热强度对比

3 结 论

本文采用数值计算方法研究了航空发动机叶片前缘旋流冷却结构的流动和换热特性,分析了喷射角度和喷嘴数对旋流冷却性能的影响,并与以往旋流冷却经典研究做了对比,得到的主要结论如下。

(1)冷气从喷嘴进口射入旋流腔,冲刷腔体壁面并与轴向主流强烈混合,形成明显的高传热区域。换热强度在冷气轴向和周向沿下游方向逐渐减弱,高传热区域在下游区域向出口方向偏移。

(2)喷射角 $\alpha=90^\circ$ 时,冷气垂直射入旋流腔,旋流运动最强烈。喷射角度远离 90° 时,冷气的旋流运动减弱,冷气的冲刷作用减弱,传热强度减小。

(3)平均努塞尔数 Nu_a 随着喷射角度的增大先增大后减小,在喷射角 $\alpha=90^\circ$ 时平均努塞尔数 Nu_a 达到最大。总压损失系数随着喷射角度的增加而增大。

(4)随着喷嘴数增大,进口冷气的喷射速度减小,高传热区换热强度显著减小,冷气周向速度和靶面传热强度分布更为均匀。

(5)平均努塞尔数 Nu_a 随着喷嘴数的增大先增

大后减小,在喷嘴数 $N=3,4$ 时平均努塞尔数 Nu_a 达到最大。总压损失系数随着喷嘴数的增加而增大。

(6)旋转流动因其独特的流动特性,传热强度显著高于光滑圆管流动。与简单光滑圆管模型相比,本文叶片前缘旋流腔结构换热特性更加优良。

参考文献:

- [1] KREITH F, MARGOLIS D. Heat transfer and friction in turbulent vortex flow [J]. Applied Scientific Research: Section A, 1959, 8(1): 457-473.
- [2] LIGRANI P M, HEDLUND C R, THAMBU R, et al. Flow phenomena in swirl chambers [J]. Experimental in Fluids, 1998, 24(3): 254-264.
- [3] SEGURA D, ACHARYA S. Internal cooling using novel swirl enhancement strategies in a slot shaped single pass channel [C]//Proceedings of the 2010 ASME Turbo Expo. New York, USA: ASME, 2010: 635-644.
- [4] GLEZER B, MOON H K, O'CONNELL T. A novel technique for the internal blade cooling [C]//Proceedings of the 1996 ASME Turbo Expo. New York, USA: ASME, 1996: V004T09A015.
- [5] HEDLUND C R, LIGRANI P M, GLEZER B, et al. Heat transfer in a swirl chamber at different temperature ratios and Reynolds numbers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, 42(22): 4081-4091.
- [6] HEDLUND C R, LIGRANI P M, MOON H K, et al. Heat transfer and flow phenomena in a swirl chamber simulating turbine blade internal cooling [J]. Journal of Turbomachinery, 1999, 121(4): 804-813.
- [7] HEDLUND C R, LIGRANI P M. Local swirl chamber heat transfer and flow structure at different Reynolds numbers [J]. Journal of Turbomachinery, 2000, 122(2): 375-385.
- [8] 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]//Proceedings of the 2006 ASME Turbo Expo. New York, USA: ASME, 2006: 325-340.
- [9] 杜长河, 李森, 李亮, 等. 叶片前缘旋流蒸汽冷却流动和传热的数值研究 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(10): 72-78.

DU Changhe, LI Sen, LI Liang, et al. Numerical study on characteristics of flow and heat transfer of

(下转第146页)