

DOI: 10.7652/xjtuxb201410021

多段转弯连接回转通道的换热和压力分布研究

赵曙¹, 朱惠人¹, 郭涛¹, 张丽¹, 付猛²

(1. 西北工业大学动力与能源学院, 710072, 西安; 2. 中国航空动力机械研究所, 412002, 湖南株洲)

摘要: 为了掌握涡轮叶片内的多段通道连接关系对回转通道壁面换热和沿程压力分布的影响,采用数值模拟方法研究了带肋单通道、回转通道模型的流动特性,通过瞬态液晶实验测量了回转通道壁面换热分布,揭示了多段通道连接关系对回转通道壁面换热的影响机理。实验结果表明:转弯连接使各段通道的速度分布不均;回转通道沿程压力系数逐渐减小;转弯连接使回转通道各段通道的换热分布不对称,沿流向的努赛尔数 Nu 逐渐减小;沿程展向平均 Nu 呈多波峰状分布,肋的扰流作用沿流向逐渐减弱,且两肋之间的高换热区沿流向逐渐向肋下游的背风面偏移;肋间区域的平均 Nu 沿流向逐渐减小;回转通道各段平均 Nu 随雷诺数的增加而增大,且增加幅度逐渐减小。

关键词: 涡轮叶片;通道连接;压力系数;换热;数值计算;瞬态液晶

中图分类号: V231.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)10-0131-06

Heat Transfer and Pressure Drop on Multi-Turn Connected Internal Cooling Channels

ZHAO Shu¹, ZHU Huiren¹, GUO Tao¹, ZHANG Li¹, FU Meng²

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. China Aviation Power Machinery Research Institute, Zhuzhou, Hunan 412002, China)

Abstract: Numerical simulations for a single channel and muti-turn connected cooling channel model with 90°ribs is conducted to understand the effect of multi-turn connection on heat transfer and pressure coefficient of internal channel in rotor blade. The heat transfer of turned channel is measured by utilizing transient liquid crystal measurement, and the influence mechanism of multi-turn connection in tuning channel is revealed. Experimental results show that the velocity distribution is uneven in each passage due to tuning eddy. Both the pressure coefficient and the Nusset number (Nu) decrease along the flow direction. The Nu distribution is asymmetric in each passage due to turn-connection. The distribution of averaged Nu numbers has a multiple-peak form as a result of secondary flow induced by rib turbulations. The area of high Nu between two continuous ribs is gradually shifted to the rib downstream. The average Nu in each passage gradually increases while the ratio is slowly reduced as the Reynolds number increases.

Keywords: turbine blade; passage connection; pressure coefficient; heat transfer; numerical simulation; transient liquid crystal

现代燃气涡轮发动机燃气的温度已远高于叶片
的耐热温度,因此涡轮叶片内部通常采用多腔带肋

回转通道的冷却结构,叶片外部表面则通过出流隔
热保护,例如前缘、中弦、尾缘表面气膜孔及叶顶除

尘孔等。为保证涡轮叶片的安全、可靠、稳定的持续工作,必须精确掌握多段通道连接的回转通道的流动换热机理。

相关文献中,Han等研究了矩形带肋单通道的流动与换热特征,分别对通道高宽比、肋角度、肋高、肋间距、肋排布等几何因素及进口雷诺数影响进行了深入的研究^[1-2],揭示了带肋直通道的换热机理。近年来,Fu等通过实验和数值模拟研究了旋转数、通道偏角及旋转作用力对光滑及带肋的单通道和U型通道的流动换热的影响^[3-4],得出了旋转条件下径向通道壁面及转弯段的换热增强特点。随着研究的通道逐渐贴近实际叶片内通道结构,Wright等分别研究了前、后缘区域的梯形截面通道、中弦区域的带气膜出流矩形截面通道和U形通道180°转弯区域的流动情况^[5-7],分别揭示了真实叶片各段区域通道的流场及换热分布。陶智等采用有机玻璃可视化实验及数值模拟方法对U型回转通道流动特点进行了深入的研究^[8-10],揭示了回转通道的换热机理。

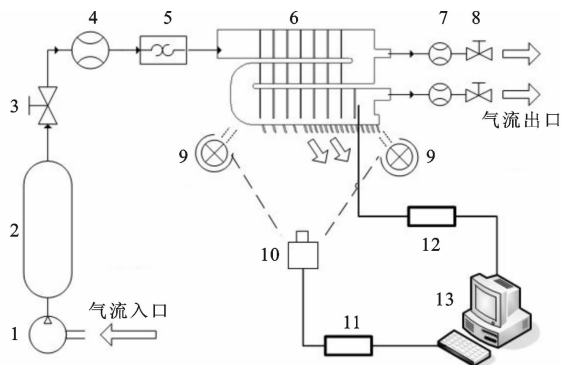
以上研究者多针对叶片的局部单元体通道进行研究,并没有考虑到实际叶片回转通道的多段通道的连接关系及相互影响。本文以某型高压涡轮叶片内部通道为研究对象,利用瞬态液晶测量技术重点研究了相似放大回转通道模型各段通道壁面换热特性,对比了各段通道与单通道三维数值模拟结果的区别,以期对叶片内部冷却通道的优化设计提供参考。

1 实验装置及测量方法

1.1 实验系统

本文研究的实验系统如图1所示,空气压缩机将气体压缩至储气罐,稳定后的气体经快速加热器进入实验件通道,实验件前后用阀门和流量计调节和测量各出口的质量流量,流量计精度为2.5级;通道沿程有15支0.2 mm的热电偶,采用Advantech USB-4718模块记录主流温度,热电偶标定精度为0.2℃;通道内壁面喷涂35℃窄带热色液晶(带宽1℃),采用JAI公司的CV-M71CL摄像机拍摄并存储液晶变色图像,液晶标定精度为0.1℃;通道沿程布置有15个压力测点(测压孔直径为1.5 mm),使用NetScanner Model 98RK型压力扫描阀测量沿程压力,压力扫描阀精度为0.1级。回转通道实验件模型如图2所示,2块有机玻璃板拼接组成由3个带肋通道和2个转弯段连接的回转通道,每个通

道的压力面、吸力面上布置有交错扰流肋。回转通道的入口位于第1通道底部,出口1、2位于回转通道顶部,出口3位于第3通道侧壁,入口水力直径 $d=11.2\text{ mm}$,肋宽 $e=0.107d$,肋间距与肋宽比 $p/e=12.58$ 。压力面的有机玻璃板上喷涂液晶测量壁温,吸力面的有机玻璃板上沿流向布置压力测点和热电偶。



1:压气机;2:气罐;3,8:阀门;4,7:流量计;5:加热器;6:试验件;
9:光源;10:摄像机;11:图像采集卡;12:温度/压力采集模块;
13:计算机

图1 实验系统示意图

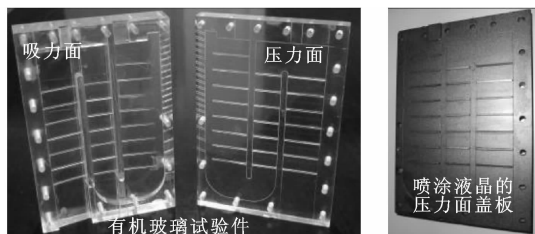


图2 实验件模型照片

1.2 实验工况及测量误差

实验模型的研究工况与真实叶片回转通道的气动工况参数相同,雷诺数定义为 $Re=\rho v_1 d/\mu$,回转通道的流动特性采用压力系数表征各段通道的沿程流动损失,压力系数定义为 $C_p=2(P_i-P_1)/(\rho v_1^2)$;回转通道壁面换热特性采用瞬态液晶实验测量,在满足一维半无限大导热条件下,通过实验件初始温度、热物性参数、液晶测得的壁面温度以及液晶显色的响应时间,得到通道壁面的换热系数分布,努赛尔数定义为 $Nu=hd/\lambda$ 。以上各式中的 ρ 、 v_1 、 d 分别为通道入口的密度、速度和水力直径, μ 为动力黏度, λ 为空气的导热系数, h 为壁面换热系数, P_i 、 P_1 为测点静压和通道入口静压。

实际叶片内通道入口雷诺数为17 000,出口1、2、3的质量流量分配比为1:2:1,实验研究的入口雷

雷诺数范围定为 6 000~20 000,保持与实物相同的流量分配比例,文中主要以实物典型工作雷诺数17 000 时的流动和换热结果进行分析。

由文献[11]预估本实验热的电偶测量误差小于 0.2℃,响应时间为 0.2 s,换热系数的不确定度小于 7.3%。

1.3 数值计算方法

建立与实验件有相同特征尺寸的矩形截面单通道、回转通道模型,并采用 ICEM 13.0 生成计算网格,借助 Fluent 13.0 进行三维稳态数值模拟研究,选择与实验相同的气动条件进行数值计算。流体为理想气体,选取 realizable $k-\epsilon$ 湍流模型及增强壁面函数。计算边界条件分别为质量流量进口条件,调整 3 个出口的压力条件来得到相应的流量分配比例,给定无滑移壁面条件并确定相应的湍流脉动能和耗散率,壁面热流密度为 2 000 W/m²。对雷诺时均湍流微分控制方程的求解采用压力分离隐式稳态求解器,并采用 SIMPLE 压力速度耦合方法求解各参数。压力修正方程、连续方程、动量方程、 k 和 ϵ 方程均采用亚松弛因子。求解收敛的判断标准为相对残差小于 10⁻⁵。

数值模拟结果定义方式与实验相同,提取单通道、回转通道内部流场结构分析回转通道实验结果。选取的单通道、回转通道计算网格总数分别为 1.43×10⁶、9.45×10⁶,如图 3 所示为换热壁面网格边界层厚度的计算结果(采用 Y^+ 表示),横坐标 l/d 表示流向距离与水力直径之比,纵坐标为流向壁面 Y^+ 。网格边界层厚度满足增强壁面函数使用条件。

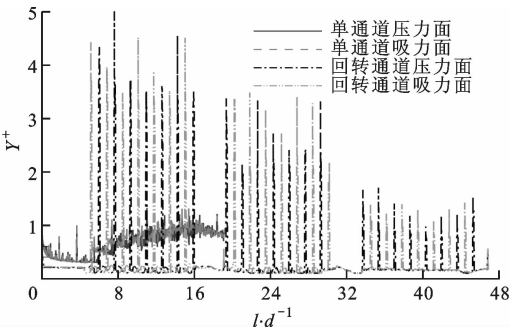


图 3 换热壁面网格边界层计算结果

2 流动结果与分析

2.1 回转通道速度场分布

图 4 是 Re 为 17 000 时数值模拟单通道、回转通道的厚度中截面的速度场。通道内壁交错的肋使

靠近壁面的流体发生边界层脱离而形成不同尺寸和强度的旋涡,这些旋涡与中心截面流体发生周期的质量交换,从而影响主流中截面速度分布。单通道、回转通道的第一通道左侧均可看出沿流向速度的波动,回转通道沿流向受到 180°转弯和出流的影响,在各段通道内形成不同的速度分布。在梯形截面第 1 通道内,左侧窄边区域的流阻较大,而右侧宽边区域的流阻相对较小,这使主流的高速区域逐渐向宽边区域偏移明显,通道左右两侧速度梯度逐渐增加;第 2、3 通道均受 180°转弯分离效应的影响,在下游通道内形成明显的入口速度不均,这与单通道的情况不同,在转弯下游内、外侧分别形成低速回流涡区域和高速冲击流动,主流沿流向受肋的扰流作用减弱,下游通道截面的速度梯度逐渐减小,尾缘第 3 通道的侧向出流使截面速度梯度较大;第 1、2 转弯段内速度场受转弯分离的影响,在转弯上游的内、外侧分别形成高速的抬升冲击射流和反向低速回流涡,在转弯下游内、外侧流动分离形成低速回流涡区和冲击加速区,这会影响下游通道的入口速度分布。

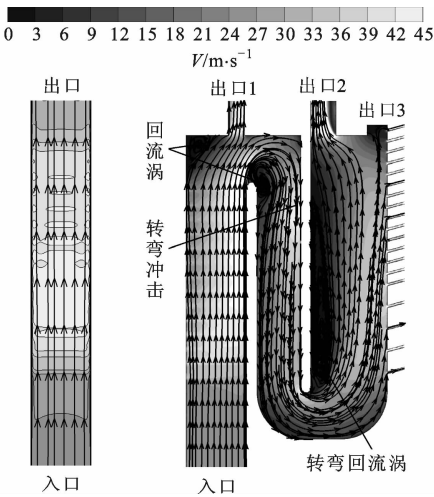


图 4 内通道厚度中截面速度场

2.2 回转通道的压力系数分布

图 5 为 $Re=17\ 000$ 时单通道和回转通道的沿程压力系数(C_p)。回转通道的第 1 通道与单通道的 C_p 变化基本相同,沿流向降低幅度最大,流动损失最大,肋的扰动使 C_p 呈多波峰状分布,且 C_p 在两肋之间沿着流向逐渐增加;回转通道的第 2、3 通道与单通道的 C_p 明显不同,第 2 通道的 C_p 受肋扰动作用减小,沿程降低幅度减小,流动损失相对较小,第 3 通道的 C_p 受肋扰动作用最小,沿程略有增加趋势,流动损失最小。实验测量 C_p 变化与数值模拟结果基本一致。

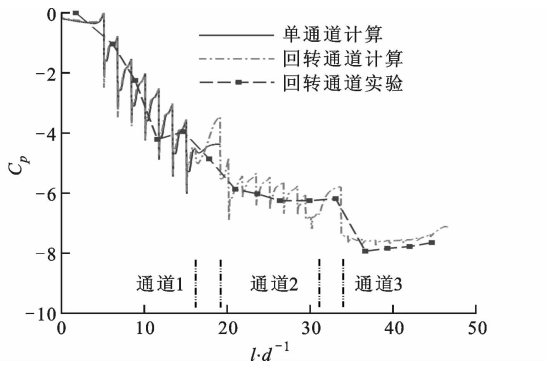


图5 实验与计算沿程压力系数分布比较

2.3 雷诺数对回转通道压力系数的影响

图6为实验测量的不同 Re 时沿程压力系数变化。在不同雷诺数下 C_p 在各段通道内的变化规律相同,第1通道的 C_p 降低幅度最快,是由于肋的扰流使流动损失最大,第1通道末端的 C_p 回升是由于出口1的分流使流阻减小;第2通道的 C_p 降低幅度逐渐减小,是由于转弯下游的速度场趋于均匀,流动损失逐渐减小;第3通道的 C_p 缓慢增加,这是因为第3通道的侧向出流使沿程流动阻力减小;第1转弯段的 C_p 下降较快,而第2转弯段的 C_p 变化较小,转弯效应使得转弯下游通道入口段 C_p 下降幅度较大。各测点的 C_p 随 Re 的增大而先减小后增大,沿流向的 C_p 变化幅度受 Re 的影响逐渐增强。

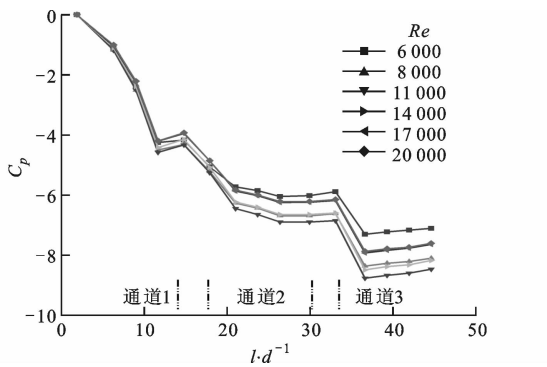


图6 沿程压力系数实验结果

3 换热结果与分析

3.1 回转通道换热系数分布

图7是 Re 为17 000时单通道、回转通道的壁面换热计算结果,可见多段连接通道的换热分布明显不同,单通道沿流向的 Nu 对称分布,且沿流向 Nu 逐渐增加;回转通道的第1通道沿流向 Nu 较高

区域逐渐向通道的宽边侧偏移,这与中截面的速度场分布类似;第2、3通道的 Nu 受转弯分离的影响,形成通道内 Nu 的不对称分布,在转弯下游内、外侧分别形成低换热区域和高换热区域,且沿流向的 Nu 不均匀性逐渐减弱,出口3的侧向出流使第3通道的高换热区向着出口密集区偏移;第1、2转弯段的转弯效应使转弯上游的内、外侧分别形成高、低 Nu 区,并在转弯下游的内、外侧分别形成分离冲击的低、高 Nu 区。图7a中肋及转弯段将壁面划分为25个换热区域。

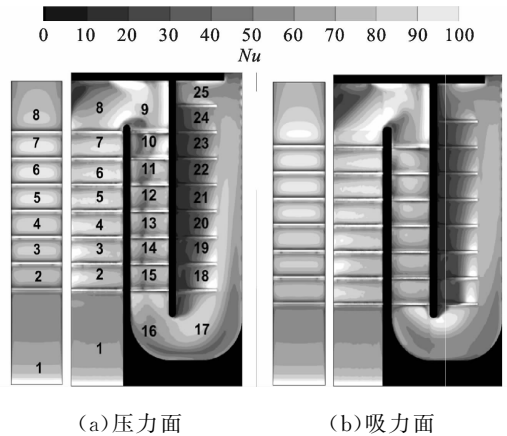


图7 单通道、回转通道的 Nu 计算结果

图8为实验测量的3个 Re 的回转通道压力面换热分布,可见不同 Re 的压力面 Nu 分布规律相同,压力面的 Nu 随着 Re 的增加而增大。比较图8c和图7a的结果可以看出,实验与数值模拟回转通道的 Nu 在3个带肋通道内的分布基本相似,在转弯和入口段的差别较大,这说明数值模拟基本揭示了带肋通道的换热分布,但转弯段和入口区域的换热分布偏差较大;实验测量的 Nu 值相对较大,数值模拟不能准确预测 Nu 的大小。

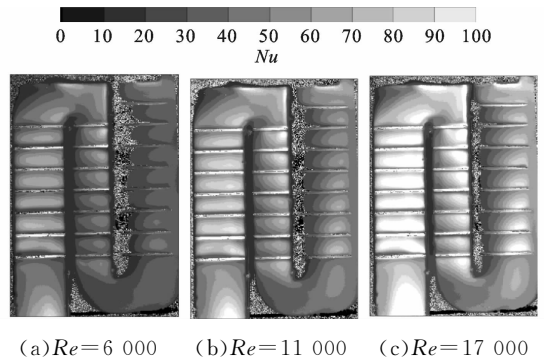


图8 不同雷诺数的压力面换热实验结果

3.2 回转通道沿程平均换热系数

图 9 是在 Re 为 17 000 时单通道、回转通道的压力面沿程展向平均 Nu 分布。可以看出,数值模拟单通道与回转通道第 1 通道的 Nu 分布基本相同,且沿流向的 Nu 均呈多波峰状分布,而实验测量壁面的 Nu 分布趋势相同,实验结果较数值计算结果偏高;单通道、回转通道两肋之间的 Nu 波峰分别出现在两肋的中间位置和靠近肋的后缘面处,回转通道沿流向的 Nu 逐渐减小,且受肋扰流作用逐渐减弱,两肋之间的 Nu 增大区域逐渐靠近肋的背风面。

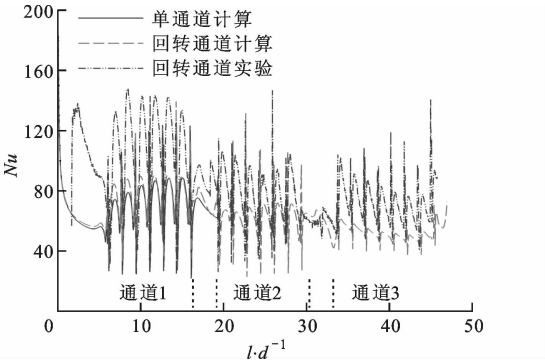


图 9 回转通道压力面沿程平均 Nu 分布

图 10 是按照图 7a 的编号区域对压力面肋间区域的 Nu 求取的平均值,横坐标为流向区域。数值计算单通道的 Nu 沿流向逐渐增加,而回转通道各段的 Nu 沿流向增减与单通道不同,第 1 通道 Nu 先增加而后减小,第 2 通道 Nu 先减小后逐渐增加,第 3 通道 Nu 先减小而后缓慢增加,沿流向的 Nu 逐渐减小。回转通道的实验测量的 Nu 较高,沿流向的变化规律与计算结果基本相似。图 11 为实验测量各段通道平均 Nu ,可见随 Re 的增加, Nu 均逐渐增大且增幅逐渐减小,沿流向各区域的 Nu 差距逐渐增大。

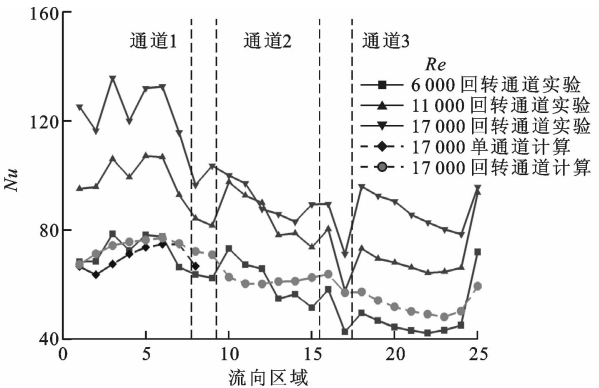


图 10 压力面肋间平均 Nu 分布

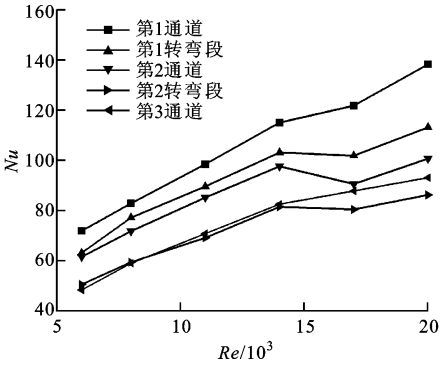


图 11 压力面各段通道平均 Nu 随雷诺数的变化

4 结 论

本文采用数值和实验方法研究了回转通道模型的流动换热特性,得到以下结论:

- (1)回转通道的各段通道内速度场与单通道明显不同,转弯段连接使转弯上、下游通道及转弯通道内的速度分布不均匀;
- (2)回转通道的第 1 通道压力系数降低幅度与单通道相同,第 2、3 通道的压力系数降低幅度逐渐减小,沿流向受肋的扰流作用使压力系数在两肋之间呈增长趋势,且肋的扰流作用逐渐减弱;
- (3)单通道的壁面努赛尔数呈对称分布,且沿流向逐渐增强,回转通道各通道壁面努赛尔数沿流向呈不对称分布,换热增强区域受转弯及出口分流的影响明显,数值模拟的努赛尔数比实验结果偏低,与实验结果存在一定的偏差;
- (4)单通道、回转通道的沿程展向平均努赛尔数呈多波峰状分布,单通道的努赛尔数沿流向逐渐增加,回转通道的努赛尔数沿流向逐渐减小,而各段通道内努赛尔数的沿程变化与单通道均不同,沿流向的肋间高努赛尔数区域逐渐向肋的背风面偏移;
- (5)回转通道沿流向肋间区域的平均努赛尔数逐渐降低,各段通道的平均努赛尔数随雷诺数的增加而增大,且沿流向的区域平均努赛尔数差距增大。

参考文献:

[1] SU Guoguang, CHEN Hamnching, HAN Jechin. Computation of flow and heat transfer in two-pass rotating rectangular channels ($AR=1:1$, $AR=1:2$, $AR=1:4$) with 45-deg angled ribs by a Reynolds stress turbulence model [C] // Proceedings of the 2004 ASME Turbo Expo. Norcross, GA, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2004: 603-612.

- [2] HAN Jechin. Heat transfer and friction channels with two opposite rib-roughened walls [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1984, 106(4): 774-781.
- [3] FU Wenlung, WRIGHT L M, HAN Jechin. Heat transfer in two-pass rotating rectangular channels ($AR=1:2$ and $AR=1:4$) with 45 deg angled rib turbulators [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2005, 127(1): 164-174.
- [4] HUANG S C, LIU Y S. High rotation number effect on heat transfer in a leading edge cooling channel with three channel orientations [C] // Proceedings of the 2012 ASME Turbo Expo. Norcross, GA, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2012: 1289-1298.
- [5] KHALATOV A A, DAHEVSKYY Y Y, PYSMENNYI D M. Heat transfer and friction factor in the rib roughened blade leading edge cooling passage [C] // Proceedings of the 2011 ASME Turbo Expo. Norcross, GA, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2011: 1193-1203.
- [6] WRIGHT L M, GOHARDANI A S. Effect of coolant ejection in rectangular and trapezoidal trailing edge cooling passages [C] // Proceedings of the 2008 ASME Turbo Expo. Norcross, GA, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2008: 399-408.
- [7] 苏福斌, 朱惠人, 郭涛, 等. 内冷通道带肋和出流孔壁面的换热研究 [J]. 航空动力学报, 2009, 24(7): 1500-1506.
- SU Fubin, ZHU Hui ren, GUO Tao, et al. Heat transfer enhancement within an internal passage by combinations of ribs and suction holes [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(7): 1500-1506.
- [8] 陈伟, 阚瑞, 任静, 等. 涡轮叶片内部冷却通道传热和压力分布特性的实验 [J]. 航空动力学报, 2010, 25(12): 2779-2786.
- CHEN Wei, KAN Rui, REN Jing, et al. Experimental investigation of heat transfer and pressure drop in a two-pass internal coolant passages of gas turbine airfoil [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(12): 2779-2786.
- [9] 朱剑琴, 徐国强, 陶智, 等. 带肋变截面回转通道内流动与换热的数值模拟 [J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(1): 18-22.
- ZHU Jianqin, XU Guoqiang, TAO Zhi, et al. Numerical investigation of heat transfer and flow resistance in U-shaped variable cross-section channels with different rib heights [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(1): 18-22.
- [10] 赵曙, 朱惠人, 郭涛, 等. 旋转带肋回转通道流动换热数值模拟 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(2): 125-130.
- ZHAO Shu, ZHU Hui ren, GUO Tao, et al. Numerical predictions of flow and heat transfer for rotating internal cooling channels with rib turbulators [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(2): 125-130.
- [11] YAN Y Y, OWEN J M. Uncertainties in transient heat transfer measurements with liquid crystal [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2002, 23(1): 29-35.

(编辑 武红江 荆树蓉)

(上接第125页)

- [13] GAO Xiaozhi, WU Ying, ZENGER K, et al. A knowledge-based artificial fish-swarm algorithm [C] // Proceedings of the 13th International Conference on Computational Science and Engineering. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 327-332.
- [14] 王联国, 洪毅, 施秋红. 全局版人工鱼群算法 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(23): 7483-7486, 7502.
- WANG Lianguo, HONG Yi, SHI Qiu hong. Global edition artificial fish swarm algorithm [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(23): 7483-7486, 7502.
- [15] HARADA F, USHIO T, NAKAMOTO Y. Adaptive resource allocation control for fair QoS management [J]. IEEE Transactions on Computers, 2007, 56(3): 344-357.

(编辑 武红江)