

DOI: 10.7652/xjtuxb201505004

尾缘流量分配对涡轮叶片内冷通道 换热影响的实验研究

梁卫颖, 朱惠人, 张丽, 许都纯

(西北工业大学动力与能源学院, 710072, 西安)

摘要: 为掌握某型高压涡轮叶片尾缘出流流量分配比例对叶片内部通道换热特性的影响,根据相似原理采用几何放大模型,利用瞬态液晶测量技术研究了进口雷诺数为 27 000、24 000 时,5 种尾缘出流比下的通道换热特性,获得了通道局部换热分布规律及平均换热变化趋势。实验结果表明:尾缘出流比变化对尾缘通道局部换热分布规律影响最为显著,对中间通道影响明显,对前缘通道影响不明显;中间通道及尾缘通道展向平均换热均随尾缘出流比增大而先增强后减弱,出流比为 25% 时,通道展向平均换热最强,而前缘通道受影响不明显;各通道及测量面平均换热随尾缘出流比增大均先增强后减弱,在出流比为 25% 时,平均换热最强;尾缘出流比在 0~1 范围变化对尾缘通道平均换热影响幅度最大,约为 30%,中间通道次之,约为 20%,前缘通道最小,约为 10%。

关键词: 涡轮叶片;流量分配;换热特性;瞬态液晶;尾缘

中图分类号: V231.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)05-0024-06

Experimental Investigation of the Influence of Trailing Edge Outflow Rate Allocation on the Heat Transfer in Turbine Blade Internal Cooling Channel

LIANG Weiying, ZHU Huiren, ZHANG Li, XU Duchun

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Detailed local heat transfer distribution and average heat transfer variation trend of five different trailing edge outflow rate allocation ratios, with the inlet Reynolds number of 27 000 and 24 000 and in proportionally enlarged model according to similarity principle, were acquired by using transient liquid crystal measurement technique. The purpose of this experimental study is to understand the effect on the heat transfer characteristics of high-pressure turbine blade internal cooling channel with different trailing edge outflow rate allocation ratios. The results show that different trailing edge outflow rate allocation ratios will affect the local heat transfer distribution in trailing edge tunnel remarkably and in middle tunnel obviously, but in leading edge tunnel invisibly; the spanwise average heat transfer in the middle and trailing edge tunnels is enhanced firstly and then depressed with the increase of trailing edge outflow rate allocation ratio, and enhanced mostly at the ratio of 25%, but invisibly in leading edge tunnel; the average heat transfer of each tunnel and measurement surface is strengthened firstly and then depressed while increasing the trailing edge outflow rate allocation ratio, and is also strengthened mostly at the ratio of 25%; different trailing edge outflow rate allocation ratios affect the average heat

收稿日期: 2014-08-18。 作者简介: 梁卫颖(1980—),男,博士生;朱惠人(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2013CB035702)。

网络出版时间: 2015-02-27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150227.1724.016.html>

transfer in each tunnel, mostly in trailing edge tunnel, about 30%; posteriorly in middle tunnel, about 20%; and leastly in leading edge tunnel, only 10%.

Keywords: turbine blade; flow rate allocation; heat transfer characteristics; transient liquid crystal; trailing edge

尾缘冷却通道设计是整个涡轮叶片内冷通道设计重点考虑的部分之一,从国内外的研究来看,多集中于尾缘通道内部不同类型抗流装置^[1-4]及其布局对通道流动与换热的影响。在通道内部结构确定的前提下,尾缘出流是通道流动与换热最重要的影响因素。

通常采用简化的梯形或楔形直通道对叶片尾缘通道流动与换热进行研究。Hwang 第一次考虑到侧壁出流相对主流的比例对楔形通道的影响,在其研究的通道结构中,当出流比为 0.3 时,通道总体换热最差^[5-7]。Schüler 就尾缘出流对矩形带肋 U 型通道的压力损失和换热影响进行研究,所获得的结果显示,尾缘出流增强转弯区的换热而削弱出口通道下游区域的换热^[8]。国内的杨祺对带侧向出流孔的光滑梯形通道内部换热特性进行了实验研究,结果显示侧流比从 0~1 增加,测量面平均换热及通道展向平均换热均逐渐下降,且比例越大,下降趋势越明显^[9]。杨力在侧壁出流条件下,对叶片尾缘为梯形横截面、大宽高比、带 V 型对称和非对称肋的通道流动与换热进行了研究,结果表明侧壁出流增强了出流孔附近区域的换热,而削弱了相对壁面附近区域的换热^[10]。

以上研究是针对叶片尾缘这一局部区域并采用简化直通道或 U 型通道所进行的研究,其结果只反映尾缘通道的流动和换热特点,有一定局限性。实际叶片内部通道是多通道通过弯道连接的整体通道,尾缘通道只是其中一部分,尾缘出流比变化对全叶片通道流动与换热的影响及影响程度如何,在公开发表的文献中还未见到。本文以某型高压涡轮叶片内部冷却通道为研究对象,利用瞬态液晶测量技术研究尾缘出流比变化对全叶片通道换热特性的影响,其结果更贴近实际,对叶片内部冷却通道的优化设计具有重要参考价值。

1 实验装置与测量方法

1.1 实验装置

1.1.1 实验系统 如图 1 所示,压缩空气经浮子流量计 1 和 2 进入电加热器进行加热,在气流温度尚未达到实验要求前,由控制盒控制电磁阀 1 关闭,电

磁阀 2 打开,对气流进行旁通,这时指示灯亮。当旁通出口气流温度达到实验要求时,通过控制盒按钮切换,电磁阀 2 关闭,电磁阀 1 打开,这时指示灯熄灭,温度较高的气流经电磁阀 1 进入实验段,经由实验件顶部和尾缘出流,且对流量及出口压力进行测量。通过调节出口处的压力及流量使该出口的出流比达到工况要求。液晶显色过程由摄像机全程记录。气流温度由通道内的 14 个热电偶进行实时测量,并由温度采集模块将数据传输到计算机进行记录。实验中采用的流量计测量精度为 2.5 级。

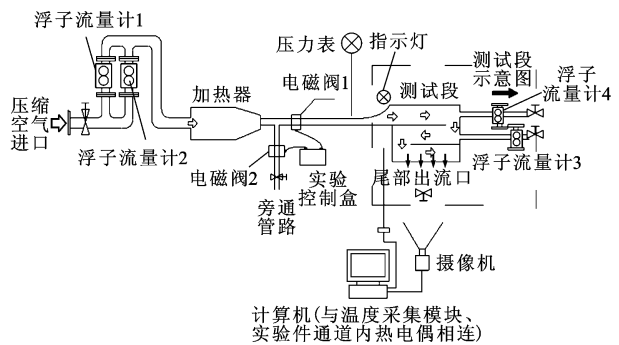


图 1 实验系统组成

1.1.2 实验模型及工况 根据相似原理,实验采用研究对象的几何放大模型。与实际叶片较高的进口气流温度不同,本实验使用的瞬态液晶显色范围在 34.5~35.5℃ 之间,所以采用低温气流,并对气流适当加热,最高温度在 60℃ 以下。根据相似原理,在保证相同进口雷诺数条件下,低温实验下的换热结果可以反映实际叶片内流通道的换热情况。

图 2 所示为叶片内部冷却通道结构,从左到右有 2 个隔墙将 S 型通道分成 3 个直通道及 2 个转弯区。从左到右依次为涡轮叶片前缘通道,即图中标示的通道 1;叶片中部通道,为图中标示的通道 2;叶片尾缘通道,即图中标示的通道 3。图 3 所示为叶片通道横截面,其中通道 1 和通道 2 的横截面均为矩形,通道 3 的横截面为梯形,3 者的宽高比分别为 2.7、2.4、6.6。进气口位于通道 1 底部入口。整个 S 型通道共有 3 处出流位置,叶尖有 2 处除尘孔,尾缘通道侧壁布有孔排。如图 2 所示,除尘孔 1 位于通道 1 顶部,除尘孔 2 位于通道 3 顶部靠近第二个隔墙;第三处出流位置为尾缘通道右侧壁上的出流孔

排,共有 15 个大小一致的出流孔,直径均为 3 mm,3 处出流面积分别为 $S_1=16\text{ mm}^2$, $S_2=387\text{ mm}^2$, $S_3=106\text{ mm}^2$ 。通道中所有扰流肋横截面均为半圆形,半径均为 3 mm,其中在通道 2、3 测量面及其相对面上布置有错排 90° 的扰流肋,肋间距为 23 mm,特别指出通道 3 的扰流肋没有完全延伸到尾缘侧壁,而在第一个转弯区则布置了放射状扰流肋,测量面上有 4 根,其相对面上有 3 根,通道 1 则为光滑通道,没有布置扰流肋。本实验着重针对尾缘孔排(简称为尾缘)出流比对涡轮叶片通道换热特性的影响,不考虑除尘孔 1 出流,即该处出流比为 0%。整个实验件由有机玻璃制造。

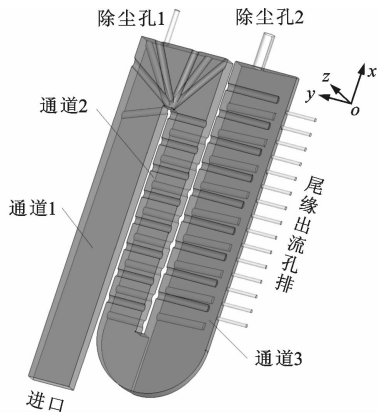


图 2 叶片内部冷却通道

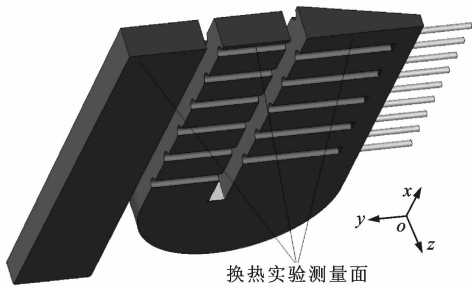


图 3 通道横截面

进口雷诺数定义为

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{p Q_v d}{3\,600 R_g T_{g0} S_{in} \mu} \tag{1}$$

根据进口压力 p 、初始温度 T_{g0} 、气体常数 R_g 可确定密度 ρ ;根据进口体积流量 Q_v 、进口面积 S_{in} 可确定进口平均流速 v ;最后由进口水力直径 d 、空气动力黏性系数 μ 可最终确定进口雷诺数。

实验工况见表 1,其中 27 000 为设计单位提供的特定进口雷诺数,24 000 是在特定进口雷诺数以下选择的另一进口雷诺数。

表 1 进口雷诺数及出流比

Re	出流比/%		
	除尘孔 1	除尘孔 2	尾缘
27 000	0	100	0
	0	75	25
	0	50	50
	0	25	75
	0	0	100
24 000	0	100	0
	0	75	25
	0	50	50
	0	25	75
	0	0	100

注:出流比是各出流位置质量流量与进口总质量流量之比。

1.2 测量方法及误差

本实验为瞬态实验。有机玻璃实验件壁面厚度在实验时段内满足一维半无限大导热条件^[11]。实验采用加热气流进行,且气流温度随时间变化的曲线如图 4 所示。由此得到

$$T_w(t) = T_0 + \sum_{i=1}^n (T_{gi} - T_{g(i-1)}) U(t - \tau_i) \cdot [1 - \exp(\beta^2(t - \tau_i)) \operatorname{erfc}(\beta(t - \tau_i)^{1/2})] \tag{2}$$

$$T_g(t) = T_0 + \sum_{i=1}^n (T_{gi} - T_{g(i-1)}) U(t - \tau_i) \tag{3}$$

式(2)中的 β 为

$$\beta = h \left(\frac{t}{\rho c \lambda} \right)^{1/2} \tag{4}$$

本实验中:初始时刻 $t=0$,实验件初始温度 T_0 为环境温度, $T_{g0}=T_0$ 。由气流温度 T_g 、实验件初始温度 T_0 和热物性参数 $\rho c \lambda$ 、壁面温度 $T_w(t)$ 及液晶显色响应时间 t ,就可获取叶片通道全表面局部换热系数分布。液晶显色过程由松下 310 万像素 CCD 摄录机记录。用努赛尔数表征通道换热特性,其定义如下

$$Nu = \frac{h d}{\lambda_{air}} \tag{5}$$

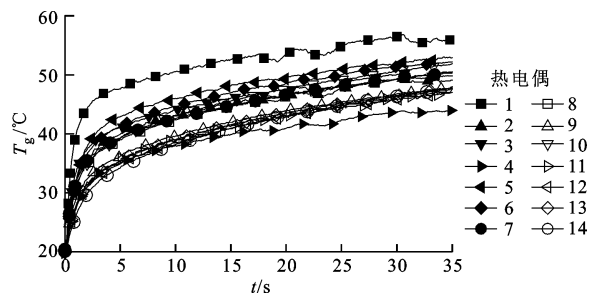


图 4 气流温度随时间的变化曲线

$$d = \frac{4S_{\text{inlet}}}{l_{\text{inlet}}} \quad (6)$$

式中: Nu 是局部努赛尔数; h 是换热系数; λ_{air} 为空气导热系数; d 为通道进口平均水力直径, 由式(6)计算得到; S_{inlet} 为通道进口面积; l_{inlet} 为进口湿周长。据此计算通道平均水力直径为 17.7 mm。

根据文献[12], 本文热电偶测量误差小于 0.2 °C, 时间误差为 0.2 s, 换热系数不确定度小于 7.3%。

2 实验结果与分析

2.1 尾缘出流比对通道局部换热的影响

图 5 是 $Re=27\ 000$ 时, 不同尾缘出流比下的通道局部换热分布云图。云图中局部换热用 Nu 反映, 箭头表示进出气流方向。

从图 5 可以看出, 随着尾缘出流比逐渐增大, 通道 1 局部换热分布规律并没有明显改变, 通道 2 整体换热较通道 1 高, 这是通道内布置了扰流肋的结果。进一步观察可以发现, 随着尾缘出流比增大, 通道 2 局部换热分布规律有明显改变, 其变化是靠近第二个隔墙左侧的两肋间高换热区沿横向先逐渐扩展, 如出流比从 0% 到 25%, 而后有缩小趋势, 如出流比从 25% 到 50% 再到 75%, 出流比在 50%、75% 时, 差别并不明显, 最后尾缘全部出流, 即出流比为 100% 时, 两肋间高换热区沿横向收缩到最小, 整体换热也最低。通道 3 局部换热分布规律及局部换热高低受尾缘出流比变化的影响是最显著的。从图 5 可观察到: 随着尾缘出流比逐渐增大, 从 0% 到 25% 再到 50%, 通道 3 进口附近高换热区沿横向先扩展, 而后随着出流比继续增大至 75% 直到 100%, 高换热区收缩, 到尾缘全部出流, 即出流比为 100% 时, 收缩到最小; 在通道下游区域, 随着尾缘出流比逐渐增加, 从 0% 到 25%, 沿流向换热先增强, 而后随出流比进一步增大, 从 50% 直到 100%, 沿流向换热逐渐减弱, 且横向换热也变得更不均匀。第一个转弯区域由于布置了扰流肋, 所以换热有所增强。随着尾缘出流比增大, 该区域的局部换热分布规律及局部换热高低没有明显改变, 但当出流比达到 100% 时, 高换热区缩小, 局部换热减弱。第二个转弯区域局部换热随尾缘出流比增大而先增强, 如出流比从 0% 到 25% 再到 50%, 该区局部换热达到最强, 而后随着尾缘出流比进一步提高到 75% 直至 100%, 该转弯区的局部换热反而减弱。

2.2 尾缘出流比对通道展向平均换热的影响

图 6 是 $Re=27\ 000$ 时, 不同尾缘出流比下通道

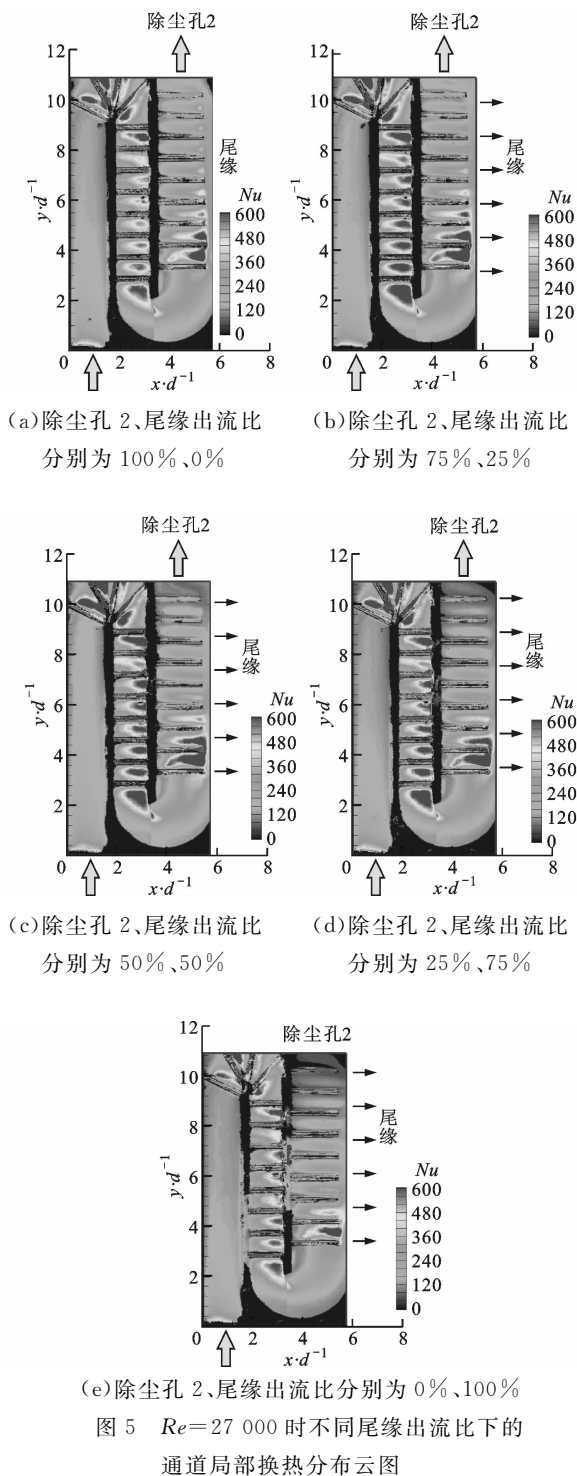


图 5 $Re=27\ 000$ 时不同尾缘出流比下的通道局部换热分布云图

展向平均换热曲线, 纵坐标 $\overline{Nu}_s$ 表示通道展向平均努赛尔数。

由图 6 可以看出, 通道 1、2 展向平均换热沿流程均下降, 通道 3 展向平均换热沿流程先上升后下降。尾缘出流比变化对通道 1 展向平均换热影响不大。通道 2 展向平均换热随尾缘出流比增大先增强, 如出流比从 0% 到 25% 再到 50%, 通道展向平均换热最强, 而后随着尾缘出流比进一步增大, 从

75%直到100%,通道展向平均换热减弱,尾缘全部出流时,通道2展向平均换热最弱。通道3展向平均换热随尾缘出流比增加也是先增强,当出流比达到25%时,展向平均换热最强,随着出流比进一步增大,从50%到75%直到100%,通道3展向平均换热逐渐减弱,当尾缘全部出流时,通道3展向平均换热最弱。第一个转弯区,当尾缘全部出流时,展向平均换热与其余出流比下有明显差别,展向平均换热最弱。第二个转弯区展向平均换热随尾缘出流比增大先增强,当出流比达到50%时,展向平均换热最强,随后尾缘出流比进一步增大,该区域展向平均换热减弱,直到出流比为100%即气流全部从尾缘出流,第二个转弯区展向平均换热最弱。

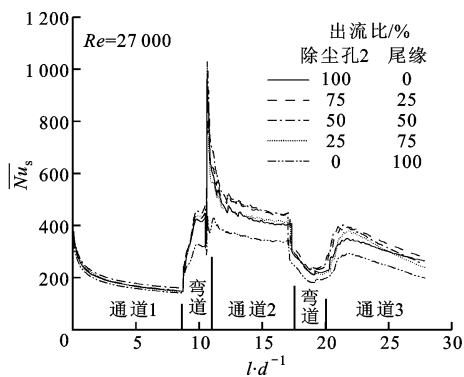


图6 通道展向平均换热

2.3 尾缘出流比对各通道平均换热的影响

图7~9是 Re 分别为27 000、24 000时,各直通道平均换热随尾缘出流比变化的曲线,纵坐标 $\overline{Nu_c}$ 表示各通道平均努赛尔数,横坐标 D_r 表示尾缘出流比。从图7~9可以看到,进口雷诺数对各直通道平均换热变化趋势没有影响,只影响通道平均换热的高低。随着尾缘出流比增大,各通道平均换热均有先上升后下降的趋势,即存在一个平均换热最强的尾缘出流比。由图7~9还可以看出,该出流比约为25%。超过该比例,随着尾缘出流比增大,各通道平均换热均下降,其中通道2、3平均换热下降较快。

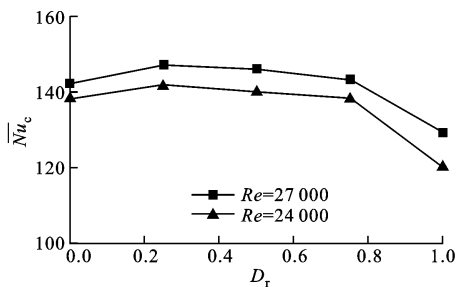


图7 通道1平均换热

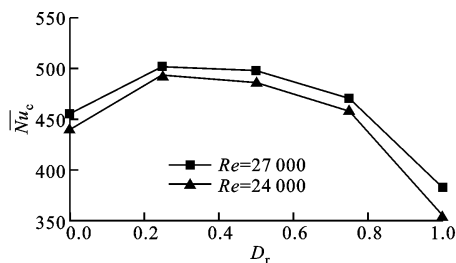


图8 通道2平均换热

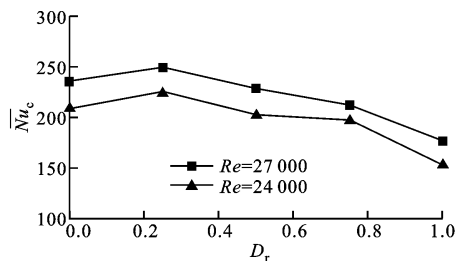


图9 通道3平均换热

2.4 尾缘出流比对测量面平均换热的影响

图10是 Re 分别为27 000、24 000时,测量面平均换热随尾缘出流比变化的曲线,纵坐标 $\overline{Nu}$ 表示测量面平均努赛尔数。由图10可以看出,不同进口雷诺数对测量面平均换热变化趋势没有影响,只影响测量面平均换热高低,进口雷诺数高,其测量面平均换热也高。随着尾缘出流比增大,测量面平均换热也是先上升后下降,即同样存在一个最佳尾缘出流比,在此比例下,测量面平均换热最强,该出流比约为25%。超过该比例,测量面平均换热将减弱。

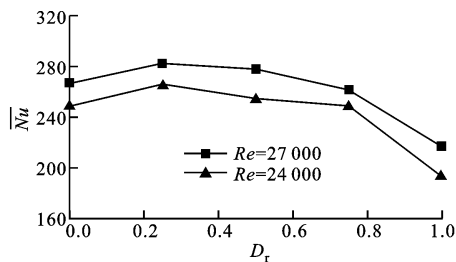


图10 测量面平均换热随尾缘出流比的变化

3 结 论

本文利用瞬态液晶测量技术,通过实验研究了尾缘流量分配对涡轮叶片内部通道换热特性的影响,获得了全叶片通道局部换热及平均换热的实验结果,通过对实验结果进行分析,得到以下结论。

(1)在进口雷诺数一定的条件下,尾缘流量分配比例变化对各通道局部换热分布影响的作用递减,对尾缘通道影响最显著,中间通道次之,前缘通道影响不明显。随着尾缘出流比增大,中间通道高换热

区沿横向先扩展后缩小;尾缘通道下游局部换热先增强后减弱且横向分布变得越不均匀。

(2)随着尾缘出流比增大,中间及尾缘通道展向平均换热均先增强后减弱,出流比为25%时,展向平均换热最强,而前缘通道变化不明显。

(3)随着尾缘出流比增大,各通道及测量面平均换热均先增强后减弱,出流比为25%时,平均换热最强。

(4)在尾缘出流比从0~1变化的范围内,出流比对各通道平均换热的影响幅度递减,对尾缘通道影响幅度最大,约为30%;中间通道次之,约为20%;前缘通道最小,约为10%;对测量面平均换热影响的幅度在20%左右。

参考文献:

- [1] HAN J C. Turbine blade cooling studies at Texas A&M University: 1980-2004 [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2006, 20(2): 161-187.
- [2] HAN J C, CHEN H C. Turbine blade internal cooling passages with rib turbulators [J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(2): 226-248.
- [3] WRIGHT L M, GOHARDANI A S. Effect of the coolant ejection in rectangular and trapezoidal trailing-edge cooling passages [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2009, 23(2): 316-326.
- [4] KUMARAN T K, HAN J C, LAU S C. Augmented heat transfer in a pin fin channel with short or long ejection holes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1991, 34(10): 2617-2628.
- [5] HWANG J J, LAI D Y, TSIA Y P. Heat transfer and pressure drop in pin fin trapezoidal ducts [J]. Journal of Turbomachinery, 1999, 121(2): 264-271.
- [6] HWANG J J, LU C. Lateral-flow effect on endwall heat transfer and pressure drop in a pin-fin trapezoidal duct of various pin shapes [J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123(1): 133-139.
- [7] HWANG J J, LUI C C. Measurement of endwall heat transfer and pressure drop in a pin-fin wedge duct [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(4): 877-889.
- [8] SCHÜLER M, ZEHNDER F, WEIGAND B, et al. The effect of side wall mass extraction on pressure loss and heat transfer of a ribbed rectangular two-pass internal cooling channel [J]. Journal of Turbomachinery, 2010, 133(2): 021002.
- [9] 杨祺,朱惠人,周雷声,等.带侧向出流孔的梯形通

道内部换热特性实验[J].空军工程大学学报:自然科学版,2009,10(2):14-18.

YANG Qi, ZHU Hui ren, ZHOU Leisheng, et al. Heat transfer investigation of internal passage in trapezoidal ducts with ejection through the suction holes [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2009, 10(2): 14-18.

- [10] KAN R, YANG L, REN J, et al. Effect of rib configuration and lateral ejection on a high aspect ratio trailing edge channel [C] // ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2013: V03AT12A018.
- [11] 杨世铭. 传热学 [M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 1987.
- [12] 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.

[本刊相关文献链接]

- 高庆,李军.间隙结构对轮缘密封封严性能及透平级气动性影响的数值研究.2015,49(3):25-31.[doi:10.7652/xjtuxb201503005]
- 杜昆,李军,晏鑫.槽缝射流对静叶端壁冷却性能的影响.2015,49(1):21-26.[doi:10.7652/xjtuxb201501004]
- 陶加银,高庆,宋立明,等.涡轮轮缘密封非定常主流入侵特性的数值研究.2014,48(1):53-59.[doi:10.7652/xjtuxb201401010]
- 赵曙,朱惠人,郭涛,等.旋转带肋回转通道流动换热数值模拟.2014,48(2):125-130.[doi:10.7652/xjtuxb201402021]
- 郭朋华,王元,李景银.太阳能烟囱发电系统内传热问题的数值分析.2014,48(3):102-107.[doi:10.7652/xjtuxb201403019]
- 赵曙,朱惠人,郭涛,等.出流比及旋转数对回转通道流动换热的影响.2014,48(6):117-121.[doi:10.7652/xjtuxb201406020]
- 高庆,李军.径向轮缘密封封严效率的数值研究.2014,48(9):55-61.[doi:10.7652/xjtuxb201409010]
- 赵曙,朱惠人,郭涛,等.多段转弯连接回转通道的换热和压力分布研究.2014,48(10):131-136.[doi:10.7652/xjtuxb201410021]
- 高庆,陶加银,宋立明,等.涡轮轮缘密封封严效率的数值研究.2013,47(5):12-17.[doi:10.7652/xjtuxb201305003]
- 张宗卫,朱惠人,刘聪,等.全气膜冷却叶片表面换热系数和冷却效率研究.2012,46(7):103-107.[doi:10.7652/xjtuxb201207019]

(编辑 荆树蓉)