

文章编号:1000-8055(2011)07-1495-07

涡轮叶片内部回转通道的换热实验

王晓增, 张 丽, 朱惠人, 梁卫颖

(西北工业大学 动力与能源学源, 西安 710072)

摘 要: 用实验的方法研究了发动机涡轮叶片内部带肋回转通道壁面的换热特性. 用瞬态液晶测量方法测量了整个叶片内部三个通道的全表面换热分布. 研究了不同的气流雷诺数情况下和三个出口不同的出流比情况下对换热的影响. 结果表明: 在相同的出流比情况下, 通道的平均努塞尔数随着入口雷诺数的增加而增大; 在实验范围内, 当进口雷诺数一定的情况下, 三个出口出流比例为 0%, 75% 和 25% 时整个通道的平均换热最强; 在弯道处布置放射状的肋片, 能够非常好地增强换热.

关 键 词: 涡轮; 液晶; 冷却叶片; 换热; 回转通道

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Heat transfer measurements of turn-over channel in turbine blade

WANG Xiao-zeng, ZHANG Li, ZHU Hui-ren, LIANG Wei-ying

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: An experiment was performed on a facility with ribbed turn-over channel built based on the inner structure of the real turbine blade. A transient liquid crystal was used to measure the heat transfer coefficients of three channels in turbine blade. The influences of Reynolds number and different outlet discharge ratios on the heat transfer of the ribbed walls were studied on the premise that the channel area changes continually. The experiment results show that: the average Nusselt number for the channel increases with the inlet Reynolds number when the outlets discharge ratio is fixed. With the fixed inlet Reynolds number, the average heat transfer of the channel is best when three outlet discharge ratios are 0%, 75% and 25%, respectively. Also, the ribs in the corners can significantly enhance the heat transfer.

Key words: turbine; liquid crystal; cooling blade; heat transfer; turn-over channel

航空发动机提高推质比的主要措施之一是提高涡轮前气流温度, 由此涡轮叶片的冷却技术就成为研究的热点. 目前, 国际上比较流行的涡轮叶片内冷通道的设计是在通道壁面上加入扰流肋和扰流柱排, 破坏边界层并增大换热面积, 强化换热. 用什么形式的扰流方式能获取最佳的换热效果, 以此来提高涡轮的使用寿命是摆在航空发动机科研工作者面前的一大课题. 在国外 Han,

Ekkad, Al-Qahtani 等^[1-6]对不同几何参数下带肋回转通道进行了静态实验研究, 研究表明不同几何参数下通道的换热效果有较大差别. Frank 和 Macro 等^[7]对叶片内部矩形的带肋的双通道的换热特性进行了实验研究. 在国内公开发表的文献中对带肋片回转通道的换热特性也做了不少研究, 裘云, 朱惠人等^[8]对肋的扰流作用和气膜孔出流的抽吸作用共同对通道内的流动和壁面的换热

收稿日期: 2010-06-11; 修订日期: 2010-10-20

作者简介: 王晓增(1984-), 男, 河南平顶山人, 硕士, 主要从事航空发动机高温部件的传热与冷却技术研究.

产生影响作了研究. 李广超, 朱惠人等^[9]对带肋和气膜孔的内冷通道的换热机理进行了研究. 北京航空航天大学陶智, 邓宏武, 丁水汀等对静止状态下和旋转状态下回转通道的换热特性做了大量的研究. 文献[10-13]研究了静止状态下带肋回转变截面通道、带交叉肋变截面回转通道、带肋变截面回转通道和气膜出流条件下回转通道的换热特性. 文献[14-16]研究了旋转状态下带肋 U 型通道、蛇形通道内的流动特性和换热特性. 目前国内研究的主要是 U 型结构回转通道的静止和旋转状态下的换热特性, 还缺少对 S 型结构回转通道的换热分布规律的研究. 本实验对具有 S 型结构且其横截面为梯形和矩形的回转通道的压力面方向上带肋表面的换热特性进行了实验研究. 主要研究流动参数中的通道入口雷诺数和三个出口的出流比对通道内部各表面换热特性的影响, 所获得的结果对于叶片的设计及换热分析具有工程参考价值.

1 实验装置及测试方法

1.1 实验装置

以发动机涡轮叶片为实验件设计原型, 将其内部冷却通道简化为上下表面带肋的回转通道, 研究其静止状态下的换热特性. 为了便于更好地实验, 根据相似原理将涡轮叶片放大 10 倍来加工实验件. 实验装置如图 1, 由压气机提供的空气流经浮子流量计, 经过快速加热器之后进入供气道, 之后与通道内表面进行换热, 最后由出口流出.

实验件采用有机玻璃制成, 具有良好的透光性和绝热性. 实验件的示意图如图 2. 实验件通道内部的肋片是上下交错等间距排列. 其中实线所示的肋为通道上表面肋的排列结构, 虚线所示的为通道下表面肋的排列结构. 实验件分为三个通道, 第一通道是不带肋的通道, 在第一通道的转弯处有发射状的肋, 第二通道和第三通道布置有等间距的横肋, 其中在第二通道的转弯处是不带肋的. 实验件有一个入口和三个出口, 入口位于第一通道根部, 三个出口分别位于第一、第二通道的顶部和尾缝. 如图 2 中 A-A 剖面图所示, 通道均为等截面通道, 进口通道和第二通道横截面为矩形通道, 第三通道横截面为梯形通道. 通道中所有肋的横截面均为半圆形.

1.2 测试方法及误差

本实验采用热色液晶瞬态技术对换热面进行全表面传热系数测量, 具体做法是: 在实验件表面均匀喷涂热色液晶, 液晶的颜色与壁面温度有对应关系, 当流经表面的气流温度迅速升高时, 会使壁面温度升高, 壁面温度的分布和变化过程即由热色液晶的变色过程展现出来. 液晶变色的快慢与实验件初始温度、气流温度及研究表面的传热系数等有关, 因此当实验时间足够短时, 只要准确记录实验件初始温度、气流温度及研究表面温度变化的过程, 并已知实验件物性, 就可以依据一维半无限大非稳态导热理论计算出传热系数. 热色液晶瞬态测量技术在国外已经发展得较为成熟, 国内也取得了初步进展. 文献[17]对其原理和方

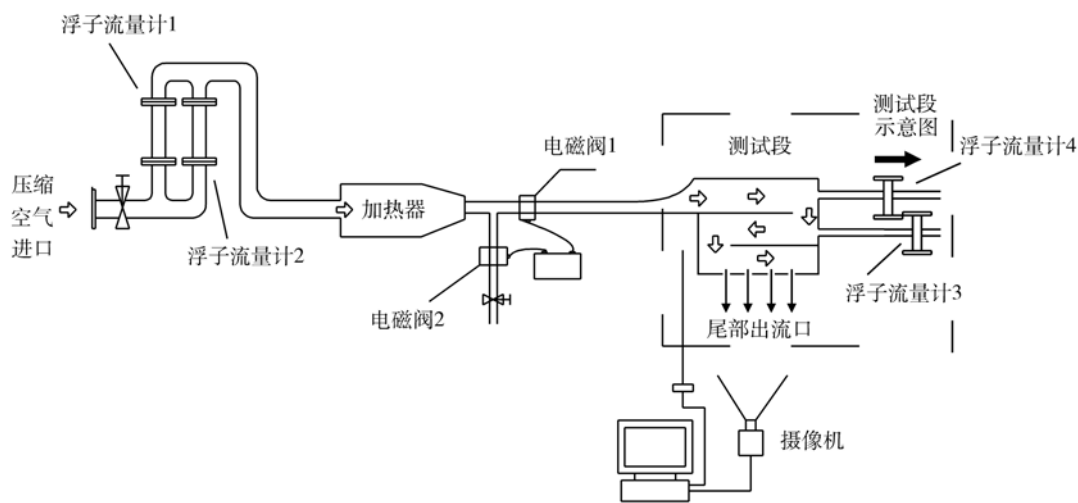


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic of experimental facility

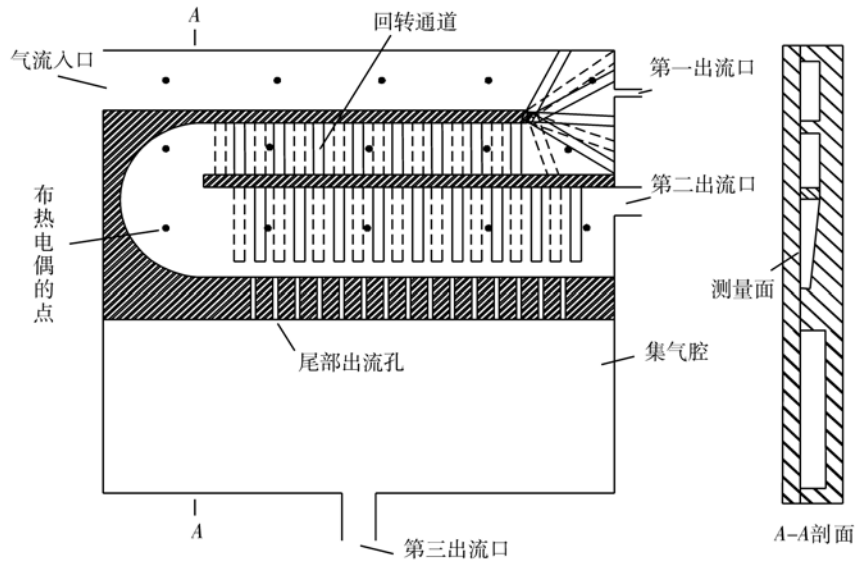


图 2 实验件及其剖面示意图

Fig. 2 Schematic of the test section and cross section

法做了详细的介绍,这里就不再赘述.本文采用的热色液晶为 R35C1W 型,即显色范围在 $35\sim 36\text{ }^{\circ}\text{C}$,环境温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,主流温度范围为 $45\sim 65\text{ }^{\circ}\text{C}$.

本实验测量了除肋表面外其他表面区域的传热系数.实验中冷却介质为压缩空气,空气流量由浮子流量计测量.主流温度由 K 型热电偶测量,热电偶从实验件的后面伸入通道内部,沿通道等间距的布置在通道的中线位置,如图 2 所示.实验所测得的主流温度信号由 Pressure System 公司的 NetScannerTM model 9046 温度扫描阀采集.实验中通过电磁阀来控制切换气流,采用电加热的方式对气流进行加热,加热时首先把电磁阀切换到旁通电磁阀 2,对气体进行加热,等温度达到实验的要求时,将电磁阀切换到实验电磁阀 1 然后开始实验.

本实验中,温度测量误差为 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,时间测量误差为 0.1 s ,测量面材料的不确定度为 5% ,根据文献[18]中方法计算得到传热系数测量的最大不确定度为 6.9% .

2 实验结果分析

2.1 局部换热分析

2.1.1 雷诺数对努塞尔数的影响

实验的主要工况参数包括进口雷诺数和各出口的出流比,进口雷诺数定义为

$$Re = \rho v d / \mu \quad (1)$$

其中 ρ, μ 分别为空气的密度和动力黏度; v 为实验段进口气流速度; d 为进口当量直径.出流比定义为

$$S_i = \frac{m_i}{m_{in}} \times 100\% \quad (2)$$

其中 m_{in}, m_i 分别为进口质量流量和出口质量流量. i 的取值为 1, 2, 3, 即出口 1, 出口 2 和出口 3.

努塞尔数定义为

$$Nu = h d / \lambda \quad (3)$$

式中 h 为传热系数; λ 为空气的导热系数.

图 3 和图 4 给出了出口出流比为 0% , 75% ,

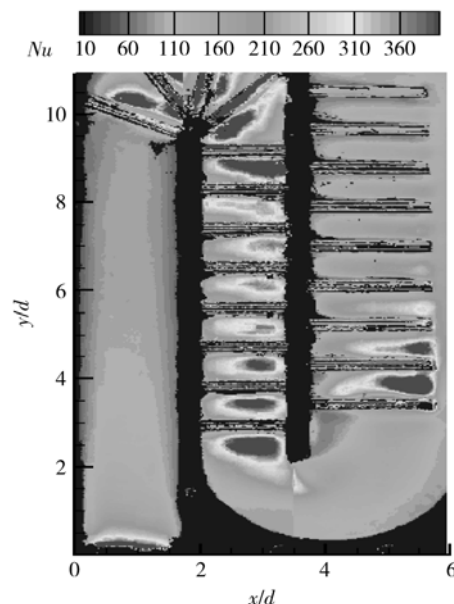


图 3 带肋壁面努塞尔数分布云图

($Re=17000$; 1: 0% ; 2: 75% ; 3: 25%)

Fig. 3 Contour of the Nusselt number distribution on the ribbed surface

($Re=17000$; 1: 0% ; 2: 75% ; 3: 25%)

25%, 雷诺数分别为 $Re=17\,000$ 和 $Re=27\,000$ 时通道内的 Nu 分布云图。图中 x/d , y/d 为无量纲长度, d 为通道进口当量直径。

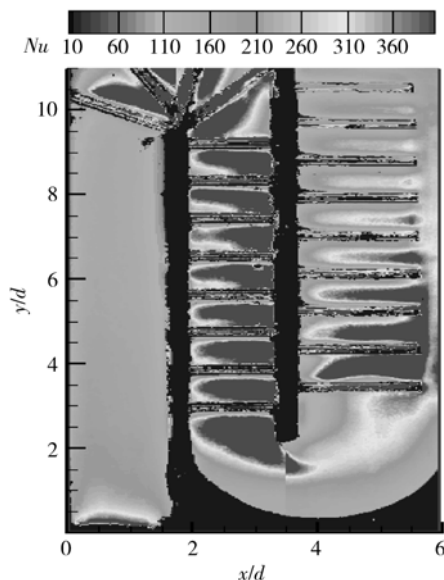


图4 带肋壁面努塞尔数分布云图

($Re=27\,000$; 1:0%; 2:75%; 3:25%)

Fig. 4 Contour of the Nusselt number distribution on the ribbed surface

($Re=27\,000$; 1:0%; 2:75%; 3:25%)

从图3和图4中可以明显地看出,第一通道与第二通道的转弯处以及整个第二通道的换热效果相对其他通道比较强,特别是第一通道与第二通道的转弯区域,换热很强。一方面是因为转弯处的肋不是横肋,而是成一定角度的放射状的肋,因为斜置的肋在横向方向产生了二次流,由于二次流的影响使得这种结构的肋强化换热效果要比其他通道中的横肋换热效果好;另一方面由于弯道效应,使得该区域换热很强。第二通道中的传热系数较高是因为第一通道是不带肋的光滑通道,当气流从第一通道进入第二通道时,由于第二通道的宽高比相对于第一通道比较小,此处的第一个出口也没有出流,气流在这个通道中的流速会有所增强,所以第二通道中的 Nu 比较高。在这两个区域中的局部高换热区出现在相邻两根扰流肋之间,这是因为扰流肋对附面层的破坏所致。且通道展向换热分布也比较均匀。第三通道的 Nu 低于第二通道高于第一通道,这是由于第三通道的宽高比相对于第二通道较大,当气流从第二通道流入第三通道时,且由于第二出流口和第三出流口均有出流,所以该通道内流速有所减弱,整体换热

效果不如第二通道,因此 Nu 较低。同时由于流动惯性的影响,气流贴着通道右侧壁面流动。所以可以看到通道右侧换热比左侧强烈。第一通道由于是一个不带肋的通道,没有肋的扰流作用,所以换热效果最低。

可以看出在相同的出口出流比,不同雷诺数的情况下,努塞尔数在整个回转通道中的分布趋势基本一致,同时在高雷诺数的情况下,整个通道中的努塞尔数比较高。

2.1.2 出口出流比对努塞尔数的影响

图5给出了 $Re=24\,000$ 、三个出口的出流比分别为 0%, 0%, 100%; 27%, 40%, 33%; 0%, 75%, 25%; 0%, 100%, 0% 时通道的努塞尔数分

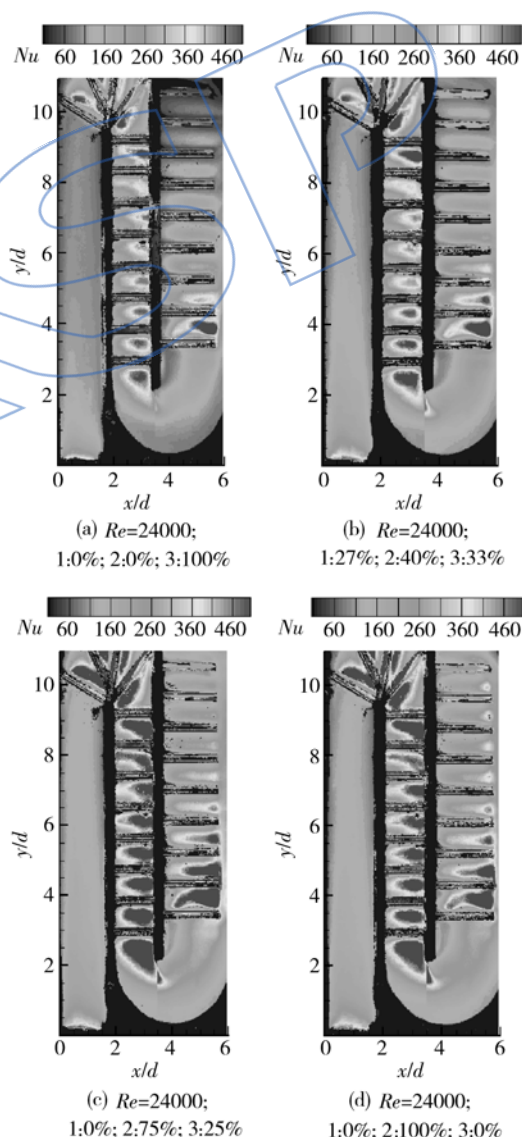


图5 不同出流比情况下通道努塞尔数分布云图

Fig. 5 Contour of the Nusselt number distribution in discharge ratio

布云图。

如图 4(a) 所示, 气流从尾部出流进入集气腔, 然后全部从第三个出口流出, 这时在第三通道的末端出现了换热死区这是由于气流吹不到这个区域导致的。如图 5(b) 所示, 当三个出流口都有出流时, 整个通道中的换热稍微平均一些, 不像另外三种出流比时, 第二通道的努塞尔数比第一通道、第三通道高出很多。如图 5(c), 当在这种出流比的情况下, 相对于其他三种出流比, 整个通道中的换热是最强的。如图 5(d), 当气流都从第二个出流口流出时, 通道中的换热效果要比图 5(a), (b) 好, 但不如图 5(c) 好。

从图中还可以看出在雷诺数一定的情况下, 从图 5(a) 到图 5(c), 随着第二个出口的气流量所占比例的增加, 通道中换热效果是增强的, 特别是在第二个转弯区域的努塞尔数有很明显的增强。但是, 如图 5(d), 当气流全部从第二个出流口流出时, 通道中的换热效果又相对于图 5(c) 有所降低。可见当第一个出流口没有出流, 大部分气流都从第二个出口流出, 可以看到第三通道的整体换热效果要好一些, 展向分布也较为均匀。在通道顶端出流口附近换热略有增加, 但不太明显。特别当出流比为 0%, 75%, 25% 时, 在实验范围内整个通道中的换热特性是最好的。

2.2 平均换热分析

2.2.1 出流比对展向平均努塞尔数的影响

图 6 为通道进口雷诺数 $Re=24\,000$, 七种不同出流比的情况下, 通道展向平均努塞尔数沿流

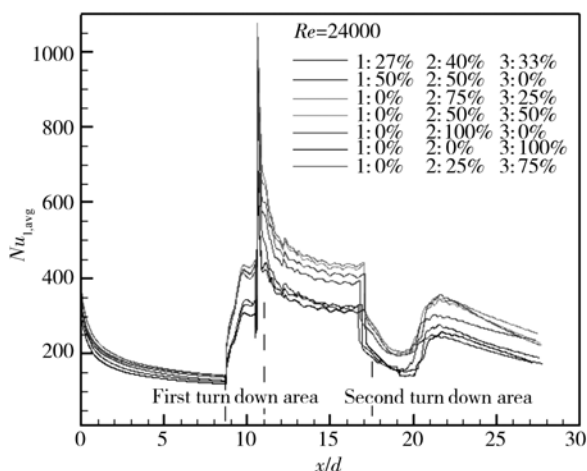


图 6 展向平均努塞尔数沿流程变化曲线

Fig. 6 Curve of the average Nusselt number of the lateral direction on the ribbed surface

程的变化曲线。图中虚线所包含的区域表示第一个和第二个弯道区域。 x/d 为无量纲长度, 其中 d 为通道进口当量直径。从图中可以看出, 在进口雷诺数一定, 出流比不同的情况下, 通道展向平均努塞尔数沿流程分布整体趋势基本相似。其中出流比为 0%, 75%, 25% 时整个通道的换热效果最好, 出流比为 27%, 40%, 33% 时换热效果最弱, 其他五种出流比的换热效果介于两者之间。在第一通道中, 由于该通道是光滑通道, 没有扰流肋的存在, 各种出流比情况下展向平均努塞尔数分布基本都很平稳, 只是沿着气流流向方向稍微有所下降。在第二通道和第三通道中, 展向平均努塞尔数流程的变化是逐渐降低的。其中在第一个弯道区域出现了一个高换热区, 且展向平均努塞尔数的峰值出现在转弯区域的下游, 这一方面是由于肋片的存在降低了离心力对气流的影响, 另一方面是因为斜置肋片产生的二次流增强了换热。在第二个弯道区域由于没有扰流肋的存在, 使得展向平均努塞尔数相对于整个第二通道和第三通道较低, 但由于弯道效应, 使得转弯之后区域的展向平均努塞尔数相对于转弯处高出 100 左右。且沿流程, 后两个通道带肋壁面上展向平均努塞尔数呈多波峰分布, 其中波峰表示两肋之间的高换热区。

2.2.2 雷诺数及出流比对平均努塞尔数的影响

图 7 所示为整个通道平均努塞尔数随雷诺数

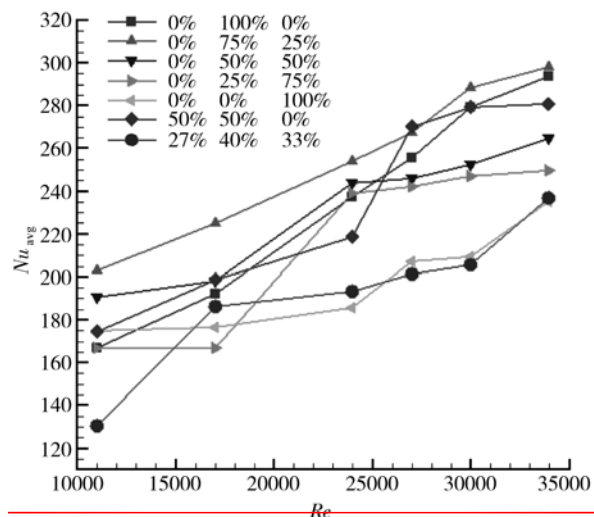


图 7 通道平均努塞尔数随进口雷诺数及出口出流比的变化趋势

Fig. 7 Curve of the average Nusselt number on the ribbed surface at different inlet Reynolds numbers and discharge ratios

和出口出流比的分布情况.从图中可以看出,在出流比例一定的情况下,随着通道进口雷诺数增加,通道平均换热增强.当进口雷诺数一定,出口出流比例为0%,75%,25%的情况下,通道平均换热最强,出口出流比为27%,40%,33%时通道的平均换热最弱.当第一个出口没有出流时,随着第二个出口出流比低于75%,通道的平均努塞尔数在逐渐降低.当出口出流比为0%,100%,0%;50%,50%,0%时通道平均换热低于出口出流比为0%,75%,25%时,而高于其他几种情况.

3 结 论

本文采用瞬态液晶测量技术对带肋的回转通道进行了换热实验研究.研究了雷诺数及三个出口的出流比对通道内表面的换热特性的影响,主要有以下结论:

1) 在相同的出流比情况下,通道的平均努塞尔数随着入口雷诺数的增加而增大.

2) 在本研究范围内,当进口雷诺数一定的情况下,三个出口出流比例为0%,75%,25%时整个通道平均换热最强.

3) 在弯道处布置了放射状的肋片,能够很好地加强弯道处的换热效果.

4) 在进口雷诺数一定,各种不同出口出流比情况下,沿流程展向平均换热整体趋势相似.由于壁面上扰流肋的作用,在相邻两根扰流肋之间的区域出现局部高换热区,其中横向肋片的高热区出现在两肋的中间,斜置肋片的高换热区在两根肋中接近第一根肋的区域,展向平均换热曲线在第二和第三通道内呈多波峰分布特点,波峰出现在两肋之间.

参考文献:

- [1] Han J C. Gas turbine heat transfer and cooling technology [M]. America: Taylor & Francis, 2001.
- [2] Han J C, Clicksman L R. An investigation of heat transfer and friction for rib-roughened surfaces [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1978, 21(9): 1143-1156.
- [3] Ekkad S V, Han J C. Detailed heat transfer distributions in two-pass square channels with rib turbulators [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1997, 40(11): 2525-2537.
- [4] Han J C. Heat transfer and friction characteristics in rectangular channels with rib turbulators [J]. ASME International Journal of Heat and Mass Transfer, 1988, 110(2): 321-328.
- [5] Ekkad S V, Huang Y Z, Han J C. Detailed heat transfer distributions in two-pass square channels with rib turbulators and bleed holes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41(23): 3781-3791.
- [6] Al-Qahtani M, Jang Y J, Chen H C, et al. Prediction of flow and heat transfer in rotating two-pass rectangular channels with 45-deg rib turbulators [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2002, 124(4): 146-152.
- [7] Zehnder F, Schüler M, Weigand B, et al. The effect of turning vanes on pressure loss and heat transfer of a ribbed rectangular two-pass internal cooling channel [R]. ASME Paper GT2009-59482, 2009.
- [8] 裴云, 朱惠人, 倪萌, 等. 带肋壁与出流孔内流通道中肋角度对流量系数的影响 [J]. 航空动力学报, 2003, 18(2): 233-238.
QIU Yun, ZHU Huiren, NI Meng, et al. Effect of rib turbulator orientation on the discharge coefficient of suction-hole in the internal passage [J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(2): 233-238. (in Chinese)
- [9] 李广超, 朱惠人, 郭涛. 带肋和气膜孔内冷通道换热机理研究 [J]. 西北工业大学学报, 2006, 24(4): 505-509.
LI Guangchao, ZHU Huiren, GUO Tao. Heat transfer in rectangular channel with rib turbulators and film-cooling holes considered [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2006, 24(4): 505-509. (in Chinese)
- [10] 邓宏武, 魏喆, 丁水汀, 等. 带肋回转变截面通道内换热特性的实验研究 [J]. 航空动力学报, 2004, 25(4): 343-348.
DENG Hongwu, WEI Zhe, DING Shuiting, et al. Experimental investigation of heat transfer in a turn-over variable cross section channel with ribs [J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 25(4): 343-348. (in Chinese)
- [11] 魏喆, 邓宏武, 陶智, 等. 带交叉肋变截面回转通道内换热的实验研究 [J]. 航空动力学报, 2004, 19(5): 645-649.
WEI Zhe, DENG Hongwu, TAO Zhi, et al. Experiment investigation of heat transfer in turn-over variable cross section channels with interleaving ribs [J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(5): 645-649. (in Chinese)
- [12] 戚磊, 丁水汀, 徐国强, 等. 带肋变截面回转通道内换热特性的实验研究 [J]. 航空动力学报, 2003, 18(5): 629-633.
QI Lei, DING Shuiting, XU Guoqiang, et al. An experimental study of flow performance in a 180° turn-over channel with ribs [J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(5): 629-633. (in Chinese)
- [13] 张广礼, 丁水汀, 陶智, 等. 气膜出流条件下回转通道换热特性实验研究 [J]. 推进技术, 2004, 25(1): 32-35.
ZHANG Guangli, DING Shuiting, TAO Zhi, et al. An experimental study of heat transfer characteristics in a turn-over channel with rib and film cooling [J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(1): 32-35. (in Chinese)
- [14] 邓宏武, 张伟, 陶智. 旋转状态下带肋 U 形通道内换热的实验研究 [J]. 推进技术, 2000, 21(1): 26-29.
DENG Hongwu, ZHANG Wei, TAO Zhi. Experiment investigation on heat transfer within a rotating ribbed ser-

- penting passage[J]. Journal of Propulsion Technology, 2000, 21(1): 26-29. (in Chinese)
- [15] 邓宏武, 陶智, 徐国强, 等. 旋转带肋 U 型通道内流动与换热的数值模拟[J]. 推进技术, 2005, 26(4): 296-301.
DENG Hongwu, TAO Zhi, XU Guoqiang, et al. Simulation of turbulent flow and heat transfer in a rotating ribbed serpentine passage[J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(4): 296-301. (in Chinese)
- [16] 邓宏武, 魏喆, 陶智, 等. 旋转状态下蛇形通道内流动与换热的机理研究[J]. 航空学报, 2005, 26(4): 411-416.
DENG Hongwu, WEI Zhe, TAO Zhi, et al. Study on mechanism of turbulent flow and heat transfer in rotating passages[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(4): 411-416. (in Chinese)
- [17] 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. (in Chinese)
- [18] 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.