

# 高阻塞比肋化通道对流换热特性实验研究\*

周明轩<sup>1</sup>, 薛树林<sup>1</sup>, 贺宜红<sup>2</sup>, 李 维<sup>2</sup>, 杨卫华<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016;  
2. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 421002)

**摘要:** 采用实验方法对高阻塞比肋化通道的对流换热特性进行了研究。实验的  $Re$  数为 1400~4500, 肋高( $e$ )和通道水力直径( $H$ )的比值( $e/H$ )为 0.2 和 0.33, 肋间距( $S$ )与肋高( $e$ )的比值( $S/e$ )为 5, 10 和 15。肋化通道中的肋有顺排和叉排两种排列形式。研究表明:(1)随着阻塞比和  $Re$  数的增加, 对流换热系数逐渐增大, 但相应的流动损失亦不断升高。(2)无论是顺排还是叉排肋化通道, 在肋间距比分别为 5, 10 和 15 三种情况下, 间距比为 10 的对流换热系数和流阻损失均高于其它两种情况。(3)在实验几何参数范围内, 顺排肋化通道的对流换热系数和流动压损均高于叉排通道。

**关键词:** 涡轮叶片; 肋化通道; 对流换热; 实验研究

中图分类号: V231.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2018) 02-0335-07

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2018.02.011

## Experimental Investigation on Convective Heat Transfer Characteristics of High Blockage Ribs Channel

ZHOU Ming-xuan<sup>1</sup>, XUE Shu-lin<sup>1</sup>, HE Yi-hong<sup>2</sup>, LI Wei<sup>2</sup>, YANG Wei-hua<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;  
2. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

**Abstract:** The convective heat transfer characteristics on high blockage ribs channel are measured by experimental method. Reynolds number studied in this experiment is from 1400 to 4500. The rib height( $e$ ) to hydraulic diameter( $H$ ) ratios are 0.2 and 0.33, respectively. The rib spacing( $S$ ) to rib height( $e$ ) ratios( $S/e$ ) are 5, 10 and 15. The rib orientations in the ribs channel are symmetric and staggered arrangement. The experimental results show that: (1)The convective heat transfer coefficients increased with the increase of rib height and Reynolds number, though at the cost of higher pressure losses. (2)When the rib spacing to height ratio( $S/e$ ) is 10, it keeps a highest heat transfer coefficient and flow pressure loss in three kinds of rib spacing to height ratio 5, 10 and 15. (3)The convective heat transfer coefficient and flow pressure loss in symmetric arrangement ribs channel are higher than that in the staggered arrangement ribs channel.

**Key words:** Turbine blade; Rib channel; Convective heat transfer; Experimental investigation

### 1 引言

随着航空科学技术的飞速发展,航空发动机涡轮叶片的工作温度愈来愈高,环境愈来愈恶劣,如何确保涡轮叶片安全可靠地工作已成为当前急需解决

的一个难点与关键。对涡轮叶片进行有效的冷却是确保其安全稳定工作,提高其使用寿命的一个重要措施。一般而言,对涡轮叶片进行冷却主要从两方面着手,一是在涡轮叶片表面实施气膜冷却,阻隔高温燃气与叶片壁面的对流换热,降低燃气对壁面的

\* 收稿日期: 2016-11-05; 修订日期: 2016-12-07。

基金项目: 国家自然科学基金(51276088)。

作者简介: 周明轩,男,硕士生,研究领域为飞机发动机热端部件热防护技术。E-mail: yangwh-sjtu@163.com

对流热负荷;二是在涡轮叶片内部采取措施强化冷却空气与叶片内部通道间的对流换热,以吸收高温燃气对涡轮叶片施加的热负荷。在叶片内部采用肋化通道是一种非常有效的强化换热方式,目前已在涡轮叶片内冷结构设计中得到了广泛应用。对于大型航空发动机或燃气轮机涡轮叶片,其内部肋化通道的阻塞比一般为5%~10%,通道内气流 $Re$ 数均大于 $8 \times 10^3$ ,而对于小型涡轴发动机或者中小型涡扇发动机涡轮叶片,其内部肋化通道阻塞比一般大于15%,气流 $Re$ 数一般低于 $6 \times 10^3$ 。目前,国内外对肋化通道流动换热特性的研究大都集中在阻塞比小于0.1,流动 $Re$ 数大于 $8 \times 10^3$ 时的状态<sup>[1~6]</sup>。Han和Wagner等<sup>[7~11]</sup>研究了两种肋化通道间距比(10,20)对对流换热系数的影响规律,结果表明,随着 $Re$ 数的增大,换热增强比呈现略微减小的趋势。Bailey和Han<sup>[12,13]</sup>指出,在肋化通道中,最佳的肋间距比在7~15,同时Han<sup>[7,14]</sup>又指出,带有倾斜角的肋化通道的对流换热特性要明显好于直肋情况,但同时亦会显著增大流阻损失。Dae<sup>[15]</sup>采用实验方法研究了进口速度型对于肋化通道流动换热特性的影响规律,研究发现,在入口区域,进口速度型对肋后部的流动分离与再附着有着较大的影响,同时,流动阻力系数亦随着速度型的不同而发生明显变化。Maurer等<sup>[16,17]</sup>对W型肋化通道的对流换热和流阻特性进行了实验研究数值模拟,肋化通道的无量纲肋高为0.02,肋间距比为5和10,流动 $Re$ 数最大为 $5 \times 10^5$ 。研究发现,随着 $Re$ 数的增大,肋化通道对流换热系数的峰值逐渐减弱,并且这种现象对于两侧均有肋的肋化通道更为显著。裘云等<sup>[18]</sup>对带有出流孔的肋化通道的流阻特性进行了实验研究,其流动 $Re$ 数为 $4 \times 10^4 \sim 8 \times 10^4$ ,通道的出流比为0.3~0.6。结果表明,在通道总出流比一定时,通道进口雷诺数对流量系数无显著影响。另外,在比较了当前内流通道流阻工程算法与实验结果的基础上,提出了对当前流阻算法的改进措施。邓宏武等<sup>[19]</sup>对旋转情况下带肋U型通道内的流动与换热特性进行了数值模拟,结果发现,旋转状态下,通道内各面换热的变化是和通道内流场的变化密切相关的;哥氏力在垂直于旋转半径截面上的不均匀分布引起流动较大变化,对通道内各面换热的影响比较大。朱强华等<sup>[20]</sup>对肋开孔高度对大宽高比矩形通道流动传热的影响开展了实验研究。结果表明,开孔肋能够减小通道的摩擦系数并提高其壁面温度分布的均匀性,但是传热增强因子有所减小;随着孔排高度的提升,通道的摩擦系数单调减小,壁

面温度分布的不均匀度增大,而传热增强因子则先增大后减小,因此存在一最优孔排高度0.65,使开孔肋的强化传热综合指标达到最大值。

综上所述,目前国内外对小阻塞比、大雷诺数情况下的肋化通道的流动换热特性已经进行了较为充分的研究,取得了大量的研究成果,但对于阻塞比大于20%, $Re < 6 \times 10^3$ 时的肋化通道的流动换热特性,目前还未见报道。

基于此,本文设计了阻塞比分别为20%和30%的两种高阻塞比肋化通道,在 $Re = 1 \times 10^3 \sim 6 \times 10^3$ 内对其流动换热特性开展了实验研究,以期获得几何参数和流动参数对高阻塞比肋化通道流阻及换热特性的影响规律,为涡轮叶片内部冷却结构的设计提供有益的参考。

## 2 实验系统及实验件

实验系统如图1所示。压缩空气由压气机进入稳压罐中以保持气流平稳,随后进入实验段,通过调节管路上的阀门控制进入实验段的空气流量,并由质量流量计(精度为1%)读出,气流流经实验段后直接排入大气。进入实验段的空气温度为25℃。实验段壁面温度采用红外热像仪直接读出,其精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ (0~100℃)。为了准确得到红外热像温度分布,需对红外热像仪的测量结果进行标定,具体方法和标定结果见文献[21]所述。所有的流量、温度及红外热像数据均由HP34970A数据采集系统实时采集。

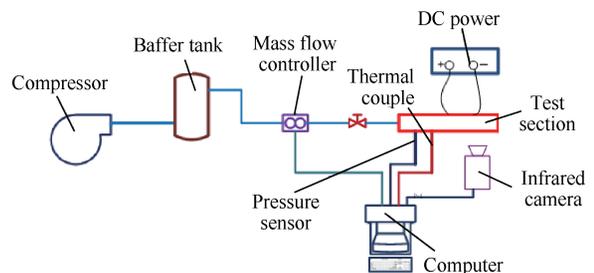


Fig. 1 Experimental setup

实验段为两种尺寸的矩形通道,分别为180mm (Length)×60mm (Width)×15mm (Height)和180mm (Length)×60mm (Width)×9mm (Height),如图2所示。在实验段的入口布置有一支T型热电偶(精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ )和一支静压探针,分别用于测量入口气流温度和静压。为了保证通道壁面处于绝热状态,实验段底部为20mm厚的胶木板,在其上面粘贴有厚度为0.02mm的鍍铜膜,对其通以直流电以得到均匀

热流。在加热膜表面喷涂黑漆以确保加热膜表面的黑度为0.96。在通道的上部为红外玻璃,红外热像仪可以透过红外玻璃直接测量加热膜表面的温度分布。粗糙肋采用不锈钢加工而成,其截面为边长3mm的正方形。将粗糙肋根据实验要求用502胶粘贴到加热膜和红外玻璃表面,构成了顺排和叉排两种粗糙肋通道,如图3所示。粗糙肋通道的几何尺寸见表1所示。为了消除位于红外玻璃表面的粗糙肋对红外热像仪拍摄壁温的遮挡,试验过程中需用三台完全相同的红外热像仪分别在-45°,0°和+45°三个方向同时拍摄壁面温度(如图2所示),在试验处理过

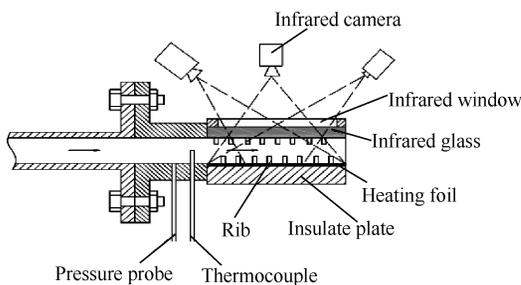


Fig. 2 Schematic of test section

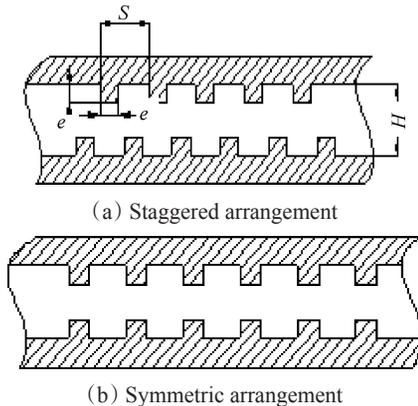


Fig. 3 Schematic of rib arrangement

Table 1 Geometry dimensions of rib roughened channel

| Rib arrangement       | <i>e</i> /mm | <i>H</i> /mm | <i>S</i> /mm | <i>S</i> / <i>e</i> | <i>e</i> / <i>H</i> |
|-----------------------|--------------|--------------|--------------|---------------------|---------------------|
| Symmetric arrangement | 3            | 15           | 15           | 5                   | 0.2                 |
|                       |              |              | 30           | 10                  |                     |
|                       |              |              | 45           | 15                  |                     |
| Symmetric arrangement | 3            | 9            | 15           | 5                   | 0.33                |
|                       |              |              | 30           | 10                  |                     |
|                       |              |              | 45           | 15                  |                     |
| Staggered arrangement | 3            | 15           | 15           | 5                   | 0.2                 |
|                       |              |              | 30           | 10                  |                     |
|                       |              |              | 45           | 15                  |                     |
| Staggered arrangement | 3            | 9            | 15           | 5                   | 0.33                |
|                       |              |              | 30           | 10                  |                     |
|                       |              |              | 45           | 15                  |                     |

程中将三台热像仪测量结果进行整合,从而得到完整的壁面红外温度分布。

### 3 实验数据处理

肋化通道的雷诺数为

$$Re = \frac{uD}{\nu} \tag{1}$$

式中 *u* 为通道入口气流平均流速(m/s), *D* 为通道的当量直径(m),  $\nu$  为气流的运动粘度(m<sup>2</sup>/s)。

肋化通道对流换热系数表达式为

$$h = \frac{Q - Q_{loss}}{A(T_w - T_a)} \tag{2}$$

$$Nu = \frac{hD}{\lambda} \tag{3}$$

式中  $Q = UI$  为加热膜加热热流(W), *A* 为加热膜面积(m<sup>2</sup>),  $T_w$  和  $T_a$  分别为加热膜表面温度和通道入口气流温度(°C),  $Q_{loss}$  为加热膜热损失。在实验过程中,在胶木板外侧表面布置有3支热电偶,用于测量胶木板外表面温度,实验,  $\lambda$  为气流的导热系数(W/(m·K))。环境温度为25°C,热电偶测得的胶木板外表面温度为26.5°C,二者相差1.5°C,因此可以近似认为  $Q_{loss} = 0$ 。

实验过程中对肋化通道单面加热,加热膜最高温度不超过35°C,空气进口温度为25°C,空气出口最高温度不超过27°C,因此通道内气流温度对壁温的影响可忽略不计,由此可以推得,即使在双面加热的情况下,通道内空气温度对壁面影响亦可忽略。故本文得到的实验结果可以满足双面加热的肋化通道中。

肋化通道的摩擦系数为

$$f = \frac{1}{2} \frac{D}{\rho u^2} \frac{p_{in} - p_{out}}{\Delta L} \tag{4}$$

式中  $p_{in}$  和  $p_{out}$  分别为肋化通道进出口静压(Pa),  $\Delta L$  为肋化通道的长度(m)。

根据文献[22]所述的误差分析方法,对流换热系数以及摩擦系数的误差分别为±9.5%和±6.3%。

### 4 实验结果及分析

#### 4.1 间距比对对流换热系数的影响

图4示出了顺排和叉排两种肋化通道中肋间距比对对流换热系数的影响。可以看出,肋间距比对对流换热系数有较大的影响。不管是顺排还是叉排肋化通道,肋间距比  $S/e=10$  对应着最大的对流换热系数,而肋间距比  $S/e=15$  对应着最小的对流换热系数,  $S/e=5$  的对流换热系数居于二者之间。这表明,对

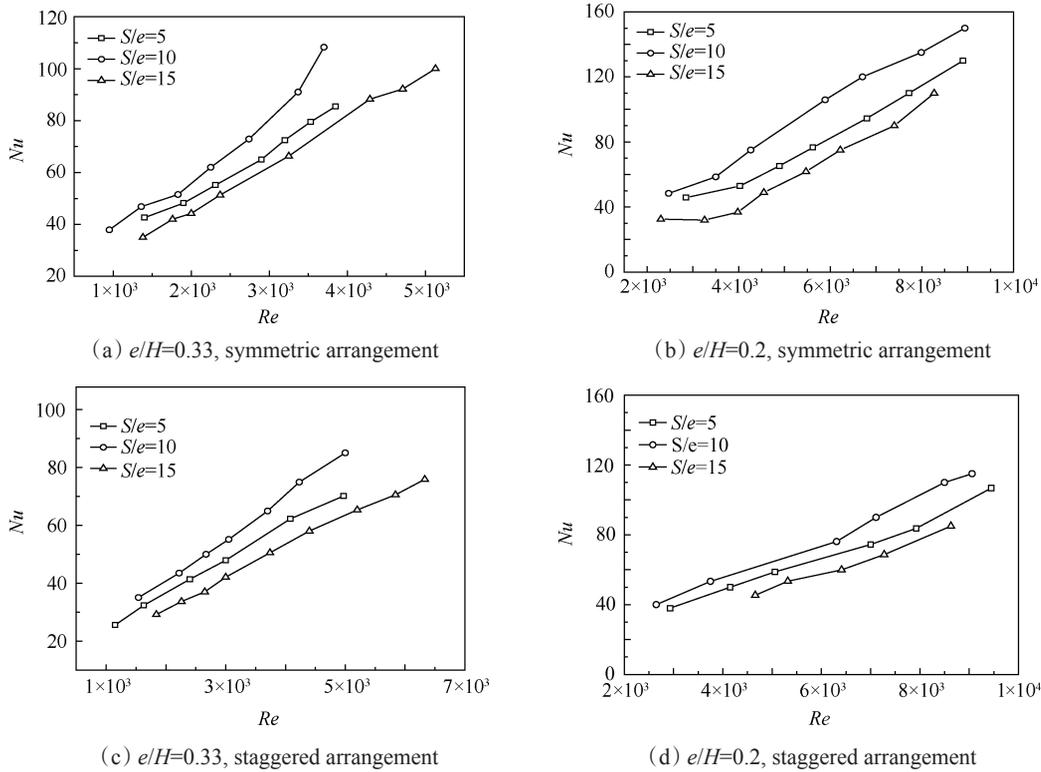


Fig. 4 Effect of rib pitch-to-height ratio  $S/e$  on  $Nu$

于具有高阻塞比的肋化通道,当肋间距比是  $S/e=5, 10$  和  $15$  时,存在一个最佳的肋间距比  $S/e=10$ 。同时还可明显看出,对流换热系数随着  $Re$  数的增大而呈线性增加的趋势。一般而言,影响肋化通道对流换热特性的因素主要是粗糙肋后部的气流分离和气流再附着,如图 5 所示。随着肋间距比的增大,气流的分离与再附着现象对对流换热的作用愈来愈弱,而气流横掠平板对流换热现象的影响愈来愈明显,当肋间距比  $S/e=15$  时,气流横掠平壁对流换热现象在整个肋化通道对流换热中起到了主导作用,因此对应着最小的对流换热系数。另一方面,随着肋间距比  $S/e$  逐渐减小,流体在壁面的再附着现象愈来愈弱,当肋间距比足够小时 ( $S/e=5$ ),气流在壁面出的再附着现象消失,故造成其对应的肋化通道壁面对流换热系数亦较小,只有当肋间距比适中时 ( $S/e=10$ ),肋后的气流分离与再附着现象最为明显,其对应着最大的对流换热系数。

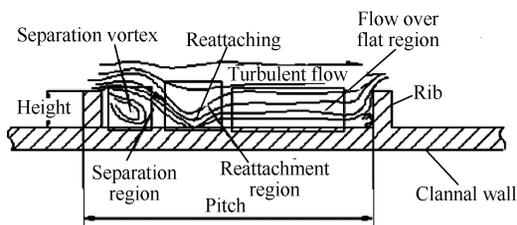


Fig. 5 Schematic flow field of rib roughened channel

#### 4.2 肋化通道排布形式对对流换热系数的影响

图 6 示出了肋化通道肋的排列形式对对流换热系数的影响。可以看出,肋排列形式对对流换热系数有着较大的影响,在本文研究范围内,顺排肋化通道的对流换热系数要明显高于叉排肋化通道的对流换热系数,这种差异亦随着堵塞比  $e/H$  的不同而略有不同。随着堵塞比的增大,这种差异亦逐渐升高,具体而言,在堵塞比  $e/H=0.33$  时,两种肋排布形式所对应的对流换热系数差异要高于  $e/H=0.2$  时的对流换热系数差异。造成上述现象的原因主要是,对于高阻塞比肋化通道,当粗糙肋顺排时,上下肋间的流通面积骤然减小,造成气流在肋前后呈现剧烈的收缩扩张,气流扰动加剧,不仅在肋后部形成强烈的气流分离,而且气流在壁面处的再附着亦得到强化,且此现象随着阻塞比的增大而愈加强烈,有效强化了壁面的对流换热。而对于叉排肋化通道,肋截面处的流通面积虽有减小,但程度远小于顺排,虽然壁面处的肋亦能够使气流在肋后形成分离和再附着,但其强度远低于顺排情况,此时的肋片对通道气流而言更接近于导流作用,故其对应的对流换热系数要明显低于顺排肋化通道的对流换热系数。

#### 4.3 阻塞比对对流换热系数的影响

图 7 示出了肋化通道阻塞比对对流换热系数的影响。可以明显看出,随着阻塞比的增大,对流换热

系数亦呈现增大的趋势,具体而言,堵塞比  $e/H=0.33$  所对应的对流换热系数要明显高于  $e/H=0.2$  所对应的对流换热系数。然而,由于肋化通道排列形式的不同使得二者的差异亦有所不同。很明显,在顺排肋化通道中阻塞比对对流换热系数的影响程度要明显高于叉排肋化通道。原因显而易见,随着阻塞比的

增加,气流在通道内部的扰动愈加强烈,且在顺排肋化通道中气流的扰动要明显强于叉排通道,故造成在顺排通道中肋阻塞比对对流换热系数的影响要明显高于叉排。

#### 4.4 肋化通道的对流换热系数比

图8示出了肋化通道的对流换热系数比  $Nu/Nu_0$  随  $Re$  数的变化,其中  $Nu_0$  为光滑通道中对流换热系数。显而易见,当通道内部  $Re < 2.3 \times 10^3$  时,通道内部的流动为层流流动,故其对应的  $Nu_0 = 6.1^{[23]}$ ,而当  $Re > 2.3 \times 10^3$  时,通道内部流动为湍流流动,其对应的  $Nu_0 = 0.023 Re_i^{0.8} Pr_i^{0.4}$ 。因此,肋化通道对流换热系数比分为两个区域,分别为  $Re < 2.3 \times 10^3$  的层流区域与  $Re > 2.3 \times 10^3$  的湍流区域。在层流区域,通道中肋的存在明显增强了对流换热,其换热增强比随着  $Re$  数的增加而显著增大。具体而言,对于顺排肋化通道,当其  $Re$  数由  $1 \times 10^3$  增大到  $2.3 \times 10^3$  时,其对应的换热系数强化比比增大了 5~10 倍,而对于叉排通道,当  $Re$  数由  $1 \times 10^3$  增大到  $2.2 \times 10^3$  时,其对应的换热系数增加约 4~7 倍。而在湍流区域,当  $Re$  数由  $3 \times 10^3$  增大到  $6 \times 10^3$  时,对于  $S/e=10$  的顺排和叉排通道所对应的换热系数增强分别为 6~7 倍和 4.5 倍,而对于  $S/e=15$  的肋化通道,换热系数增强比随  $Re$  数的增大基本保持不变。上述现象表明,在层流区域增强肋片更有助于强化通道的对流换热。

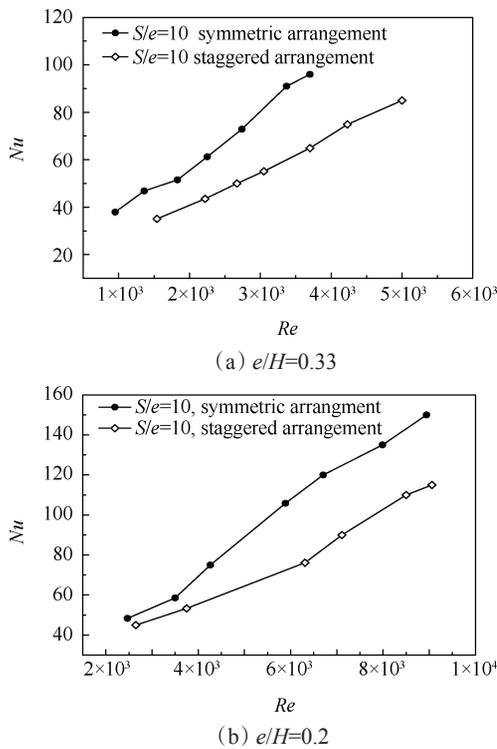


Fig. 6 Effect of rib arrangement on  $Nu$

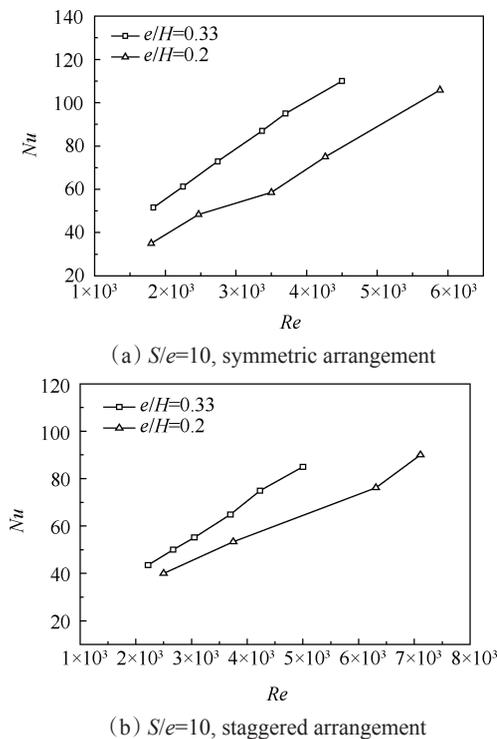


Fig. 7 Effect of blockage ratio on heat transfer coefficient

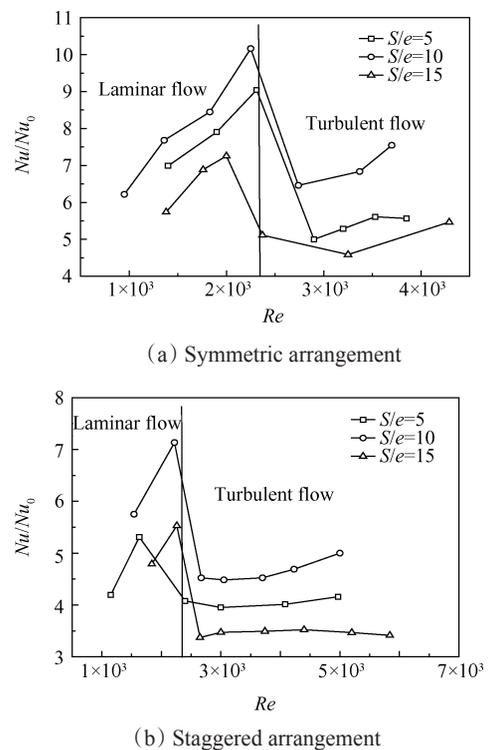
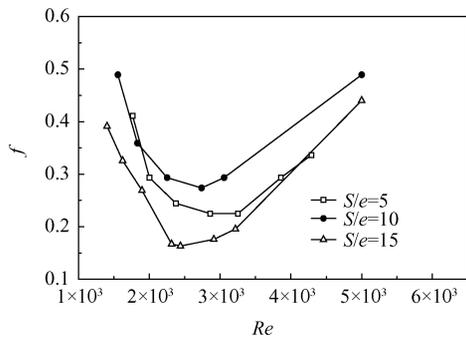


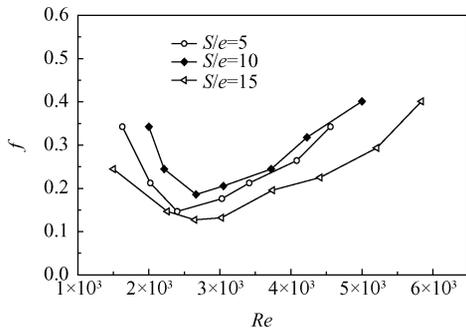
Fig. 8 Average Nusselt number ratio as a function of Reynolds number ( $H/W=0.15$ )

#### 4.5 肋化通道的流阻损失

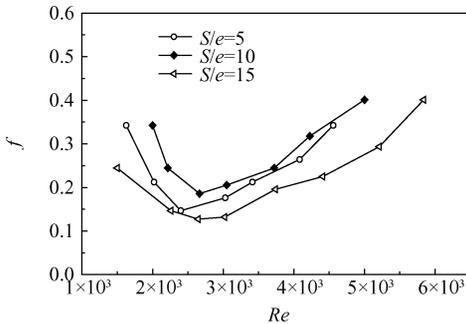
图9示出了肋化通道流阻损失随 $Re$ 数的变化。可以明显看出,以 $Re=2.5\times 10^3$ 为界,流阻系数曲线分成明显的两个区域。当 $Re<2.5\times 10^3$ 时,流阻系数随着 $Re$ 数的增加而呈现线性降低的趋势,这与传统的管内层流流阻特性相同,在 $Re=2\times 10^3\sim 3\times 10^3$ ,流阻系数达到最小值,随后,随着 $Re$ 数的增大,流阻系数逐渐升高,这亦与传统的管内湍流流阻特性相同。这表明,当流体在高阻塞比肋化通道( $e/H=0.2, 0.33$ )中流动时,在 $Re=2\times 10^3\sim 3\times 10^3$ 时,流体由层流向湍流过渡,这与传统的水力光滑管内流体由层流向湍流过渡的临界 $Re$ 数相同。同时也可以明显看出,肋间距比 $S/e=10$ 的肋化通道对应着最大的流阻损失,相应地最小的流阻损失发生在 $S/e=15$ 的肋化通道中。这表明,当采用肋化通道强化对流换热时,最大的对流换热系数对应着最大的流阻损失,因此,在涡轮叶片内部冷却结构设计时要综合考虑增强换热与增大流



(a)  $e/H=0.33$ , symmetric arrangement



(b)  $e/H=0.33$ , staggered arrangement



(c)  $e/H=0.2$ , staggered arrangement

Fig. 9 Friction factor versus Reynolds number

阻二者之间的关系,做到二者兼顾,使得叶片内部冷却结构设计达到最优。

## 5 结论

本文对高阻塞比肋化通道的流动换热特性进行了实验研究,结果表明:

(1)肋间距比对肋化通道的对流换热系数有很大影响,在本文实验参数范围内,肋间距比 $S/e=10$ 的对流换热系数要高于其它两种间距比。

(2)肋排布形式对肋化通道的对流换热特性有着很大的影响,在本文实验参数范围内,顺排肋化通道的对流换热系数要明显高于叉排肋化通道的对流换热系数;较大的阻塞比肋化通道对应着较高的对流换热系数。

(3)当流体在层流区域流动时,在通道壁面加装肋片对对流换热的强化作用要明显高于湍流流动区域。在肋化通道中,较大的对流换热系数必然对应着较大的流阻损失,因此在设计涡轮叶片内部冷却结构时,应综合考虑换热的强化与流阻损失二者间的关系。

(4)在高阻塞比肋化通道中流阻特性的变化规律与流动状态的转变规律与常规水力光滑管的规律基本相同。

## 参考文献:

- [1] Liou T, Hwang J. Effect of Ridge Shapes on Turbulent Heat Transfer and Friction in a Rectangular Channel[J]. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 1993, 136: 931-940.
- [2] Han J C, Glicksman L R, Rohsenow W M. An Investigation of Heat Transfer and Friction for Rib-Roughened Surfaces[J]. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 1978, (2): 1143-1156.
- [3] Taslim M E, Li T, Kercher D M. Experimental Heat Transfer and Friction in Channels Roughened with Angled, V-Shaped, and Discrete Ribs on Two Opposite Walls [J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 1996, 118: 20-28.
- [4] Kim K M, Lee H, Kim B S. Optimal Design of Angled Rib Turbulators in a Cooling Channel[J]. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 2009, 45: 1617-1625.
- [5] Astarita T, Cardone G. Convective Heat Transfer in a Square Channel with Angled Ribs on Two Opposite Walls [J]. *Experiment Fluids*, 2003, 34: 625-634.
- [6] Taslim M E, Liu H A. A Combined Numerical and Experimental Study of Heat Transfer in a Roughened

- Square Channel with 45° Ribs[J]. *International Journal of Rotating Machine*, 2005, (1): 60-66.
- [ 7 ] Han J C. Heat Transfer and Friction Characteristics in Rectangular Channels with Rib Turbulators [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1988, 110: 321-328.
- [ 8 ] Han J C, Dutta S, Ekkad S V. Gas Turbine Heat Transfer and Cooling Technology [M]. *New York: Taylor & Francis*, 2000.
- [ 9 ] Wagner J H, Johnson B V, Hajek T J. Heat Transfer in Rotating Passages with Smooth Walls and Radial Outward Flow[J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 1991, 113: 42-51.
- [ 10 ] Wagner J H, Johnson B V, Kooper F C. Heat Transfer in Rotating Passage with Smooth Walls[J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 1991, 113: 321-330.
- [ 11 ] Han J C, Zhang Y M, Kalkuehler K. Uneven Wall Temperature Effect on Local Heat Transfer in a Rotating Two-Pass Square Channel with Smooth Walls[J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1993, 115: 912-920.
- [ 12 ] Bailey J C, Bunker R S. Heat transfer and Friction with Very High Blockage 45° Staggered Turbulators [R]. *ASME GT 2003-38611*.
- [ 13 ] Han J C. Heat Transfer and Friction in Channels with Two Opposite Rib Roughened Walls[J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1984, 106: 774-781.
- [ 14 ] Han J C, Park J S. Developing Heat Transfer in Rectangular Channels with Rib Turbulators [J]. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 1988, 31: 183-195.
- [ 15 ] Dae Hyun Kim, Byung Ju Lee, Jung Shin Park, et al. Effects of Inlet Velocity Profile on Flow and Heat Transfer in the Entrance Region of a Ribbed Channel[J]. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 2016, 92: 838-849.
- [ 16 ] Maurer M, Wolfersdorf J, Gritsch M. Experimental and Numerical Study of Heat Transfer and Pressure Loss in a Rectangular Channel with V-Shaped Ribs [R]. *ASME GT 2006-90006*.
- [ 17 ] Maurer M, Wolfersdorf J, Gritsch M. An Experimental and Numerical Study of Heat Transfer and Pressure Losses of V- and W-Shaped Ribs at High Reynolds Numbers [R]. *ASME GT 2007-27167*.
- [ 18 ] 裘云, 朱惠人, 许都纯, 等. 带肋壁与出流孔内流通道的流阻特性[J]. *推进技术*, 2003, 24(4): 341-343. (QIU Yun, ZHU Hui-ren, XU Du-chun, et al. Pressure Loss of the Internal Passage with Rib Turbulators and Suction Holes[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2003, 24(4): 341-343.)
- [ 19 ] 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 Hong-wu, TAO Zhi, XU Guo-qiang, 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.)
- [ 20 ] 朱强华, 崔苗, 高效伟. 肋开孔高度对大宽高比矩形通道流动传热的影响[J]. *推进技术*, 2014, 35(12): 1631-1638. (ZHU Qiang-hua, CUI Miao, GAO Xiao-wei. Effects of Holes Height on Flow and Heat Transfer in a Ribbed Rectangular Channel with Large Aspect Ratio [J]. *Journal of Propulsion Technology*. 2014, 35(12): 1631-1638.)
- [ 21 ] Weihua Yang, Xue Liu, Guohui Li, et al. Experimental Investigation on Heat Transfer Characteristics of Film Cooling Using Parallel-Inlet Holes [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2012, 60: 32-40.
- [ 22 ] Holman J P. Experimental Methods for Engineerings [M]. *New York: McGraw\_Hill*, 1984.
- [ 23 ] Holman J P. Heat Transfer [M]. *Beijing: China Machine Press*, 2005.

(编辑:史亚红)