

文章编号:1000-8055(2012)02-0319-07

涡轮叶片尾缘梯形通道异形扰流柱流动 换热特性实验

谭晓茗, 胡训尧, 张靖周

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 针对叶片尾缘梯形通道内叉排排列的圆形、椭圆形、水滴形和哑铃形扰流柱的流动换热特性进行了实验研究. 研究表明: 在相同的进口雷诺数情况下, 水滴形扰流柱的通道压力损失最小, 仅为圆形扰流柱的 57%; 圆形扰流柱和哑铃形扰流柱的换热效果差异不大, 比椭圆形扰流柱的换热效果高约 20%, 比水滴形扰流柱的换热效果高 25% 左右; 进口结构形式对流动换热特性的影响不是非常明显, 双排小孔的挡板通道内压力较大, 但是换热效果也相对较好.

关 键 词: 涡轮叶片; 异形扰流柱; 梯形通道; 压力损失; 强化传热

中图分类号: V231.1; O354

文献标志码: A

Experiment on flow and heat transfer characteristics in trapezoidal passage of turbine blade trailing with different pin-fins

TAN Xiao-ming, HU Xun-yao, ZHANG Jing-zhou

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Experimental study was carried out to analyze the flow and heat transfer characteristic of trapezoidal channel fitted with staggered arrays of circle, ellipse, dumbbell and water-drop shaped pin fins. The results show that: with the same Reynolds number of inlet flow, the pressure loss of drop-shaped pin fins is about 57% of that of the circle pin fins. The cooling effect of the circle pin-fins was almost the same with dumbbell pin-fins which is 20% higher than that of elliptical pin-fins and 25% higher than that of drop-shaped pin-fins. The differences of the flow and heat transfer features of different inlet shapes were not distinct. The inlet flow through double arrays of holes had the higher pressure and better cooling effect in trapezoidal passage.

Key words: turbine vane; different shaped pin fins; trapezoid tunnel; pressure loss; heat transfer

随着推质比为 10 的先进发动机的出现, 涡轮进口温度接近 2000 K^[1], 这对涡轮叶片的安全性和使用寿命都是严峻的挑战. 而叶片尾缘区由于部位比较特别, 厚度比较薄, 内流通道面积较小,

平均温度最高, 因此必须采取可靠的冷却方式^[2].

在叶片尾缘区通常采用的冷却结构是带冲击的扰流柱内冷通道^[3-4]. 扰流柱在这里主要有两个作用: 一是加强尾缘区内部通道的扰动, 扩展表面

收稿日期: 2011-03-16; 修订日期: 2011-11-10

基金项目: 南京航空航天大学基本科研业务费专项科研项目(NS2010045)

作者简介: 谭晓茗(1976—), 女, 江苏徐州人, 副教授, 博士, 主要从事强化传热、流动控制研究.

积,强化换热;二是短扰流柱连接叶片的吸力面和压力面,对尾缘区狭窄内通道起到支撑结构作用.研究短扰流柱排间的流动和换热成为发动机冷却技术中的一个重要的课题.

为了满足发动机推质比提高对涡轮叶片的冷却要求,人们开始寻求换热效果好、流动阻力低的扰流柱结构,国内外的研究人员已开展了许多研究工作以致力于优化扰流元的几何结构. Sparrow 等^[5]对叉排菱形扰流柱群, Uzol^[6], Oguz^[7]和 Li 等^[8]对椭圆形扰流柱进行强化换热和压力损失效果进行研究. 这些研究帮助建立了一些异形扰流柱的流动传热基本概念. 近几年,凌长明等^[9]对束腰型扰流柱换热特性进行研究,发现其流动的压力损失有所降低;Chen 等^[10]设计了一种准水滴形扰流柱,并对其阻力特性进行了实验研究,表明准水滴形扰流柱的阻力性能优于圆形及椭圆形的. 杨成凤^[11]、王奉鸣等^[12]对一种水滴形扰流柱矩形通道内的换热特性和压力损失特性进行了数值研究,对其流动和换热特性获得了初步的认识. 为了更深入地了解扰流柱通道内异形扰流柱的流动与换热特性,本文采用实验方法针对涡轮叶片尾缘梯形通道内冲击射流进口结构形式及异形扰流柱结构换热通道内的流动及换热的特性进行了详细的研究.

1 实验设备及实验方法

1.1 实验段内结构

整个实验段通道根据某型叶片结构简化为等腰梯形,如图 1 所示. 由于流动空间受到限制,只在扰流柱前 3 排采用了凸台结构. 通道内凸台上扰流柱高度为 2.5 mm 不变,凸台高度根据梯形通道结构变化,宽为 7 mm. 后两排扰流柱直接和通道上下壁面相连.

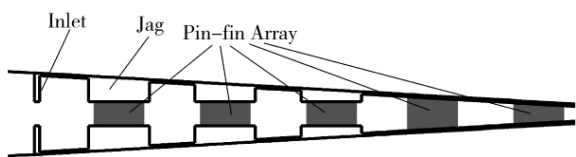


图 1 梯形通道整体结构示意图

Fig. 1 Schematic of trapezoid passage

扰流柱的排列方式采用的是叉排排列,如图 2 所示. 实验中扰流柱群排列为沿流向间距 10.5 mm,展向 8.75 mm.

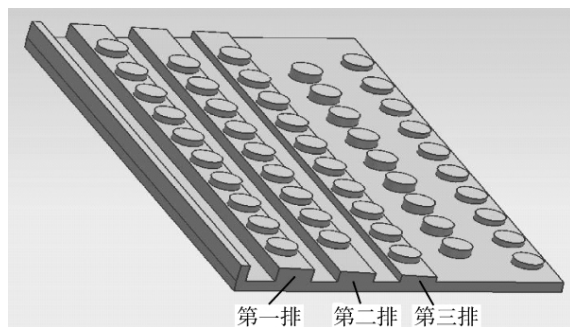


图 2 通道内部结构示意图

Fig. 2 Schematic of inner configuration

1.2 扰流柱的设计

本文共研究 4 种不同截面形状的扰流柱(如图 3 所示),扰流柱尺寸按照在通道内流通面积相同进行设计,扰流柱中心开有定位孔.

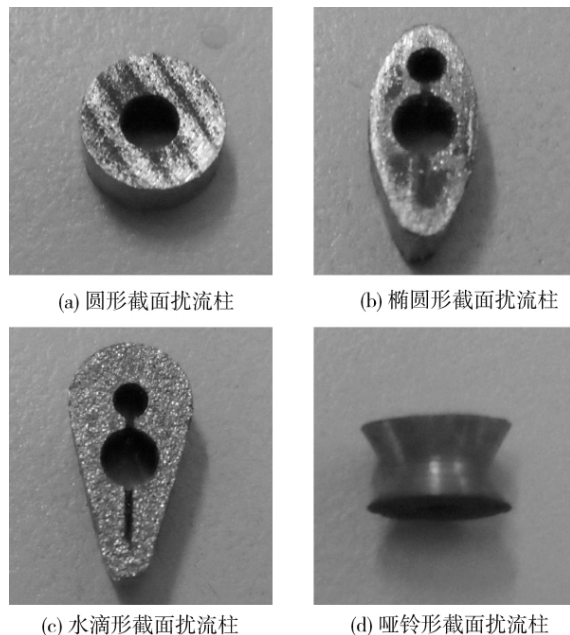


图 3 扰流柱图片

Fig. 3 Pictures of pin-fins

1) 圆形截面扰流柱

直径 $d=5\text{ mm}$, 截面积 $A=19.635\text{ mm}^2$, 周长 $P=15.708\text{ mm}$.

2) 椭圆形截面扰流柱

长半轴 $a=3.54\text{ mm}$, 短半轴 $b=1.77\text{ mm}$, 截面积 $A=19.675\text{ mm}^2$, 周长 $P=17.576\text{ mm}$.

3) 水滴形截面扰流柱

前缘半径 $R_1=1.8\text{ mm}$, 尾缘半径 $R_2=0.8\text{ mm}$, 圆心距 $L=5\text{ mm}$, 截面积 $A=19.143\text{ mm}^2$.

4) 哑铃形扰流柱

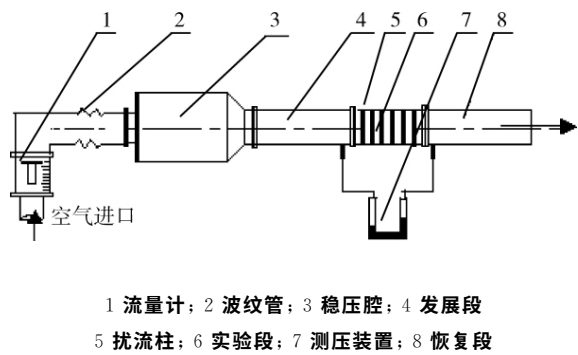
最大半径 $R_{\max}=2.9\text{ mm}$, 最小半径 $R_{\min}=2.2\text{ mm}$.

1.3 测试系统

整个实验系统分为供气系统、实验管路、加热系统、测温系统和测压系统 5 部分组成,如图 4 所示.实验气流由压气机供给,通过涡街流量计后的调节阀门控制通过实验段的空气流量大小.气流经过稳压腔后再进入实验管路.稳压腔靠近实验段入口的地方和恢复段靠近实验段出口的地方分别布置测温热电偶和测压孔,用来测量进出口气流的温度和压力大小.

实验段采用电阻丝加热法,如图 5 所示,电阻丝以 U 形布置在胶木板的凹槽内,两端引出导线和硅整流器相连进行通电加热.为了使实验段获得均匀的热流,电阻丝通过一块铜板导热使热流均匀分布,为了绝缘在两者之间敷设了云母片,在最外层以石棉片作为保温层,如图 6 所示.

实验段壁面外侧沿流向布置了 10 排热电偶,每排 15 个,用来测量实验段壁面的温度分布.为了测量实验段腔内沿程静压分布,在端壁上开有 6×6 个静压孔,通过 U 型管测量静压值.为减小两侧端壁效应的影响,测温和测压点均对称布置在实验段中心线附近.



1 流量计; 2 波纹管; 3 稳压腔; 4 发展段
5 扰流柱; 6 实验段; 7 测压装置; 8 恢复段

图 4 实验设备示意图

Fig. 4 Schematic of experimental system

本次实验从两个方面对抗流柱的换热特性进行研究:一是在相同进口挡板形状下,研究不同形状的扰流柱的换热特性;二是相同形状扰流柱通道,研究不同进口挡板形状下的换热特性.

1.4 实验数据处理方法

1) 雷诺数 Re 的定义

$$Re = UD_h/\nu \tag{1}$$

式中: U —气流进口速度; D_h —扰流柱当量直径大小; ν —空气的运动黏度.实验过程中通过调节进气阀门控制流量以满足相应的雷诺数要求.

2) 平均表面传热系数的定义

$$h_{av} = \frac{q}{T_w - T_0} \tag{2}$$

式中 $T_0 = \frac{T_{in} + T_{out}}{2}$, 是实验段气流进出口温度的平均值. T_w 为平均温度,在处理数据时,将径向 15 个测点的温度值做算术平均处理,即 $T_w = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} T_i$, i 为每个热电偶沿展向的编号; $q = q_{tol} - q_{cond1} - q_{rad}$ 为有效热流量; q_{tol} 为电阻丝发出的总热量, q_{cond1} 为通道端壁导热损失, q_{rad} 为加热

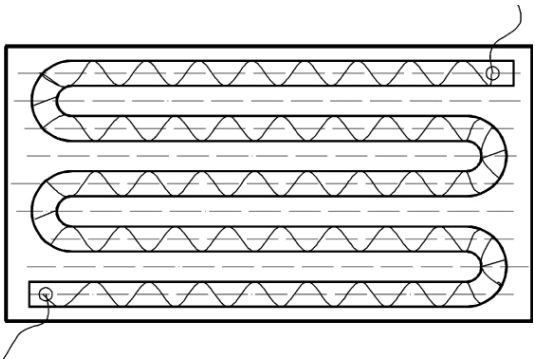


图 5 电阻丝加热方式示意图

Fig. 5 Schematic of resistance coil

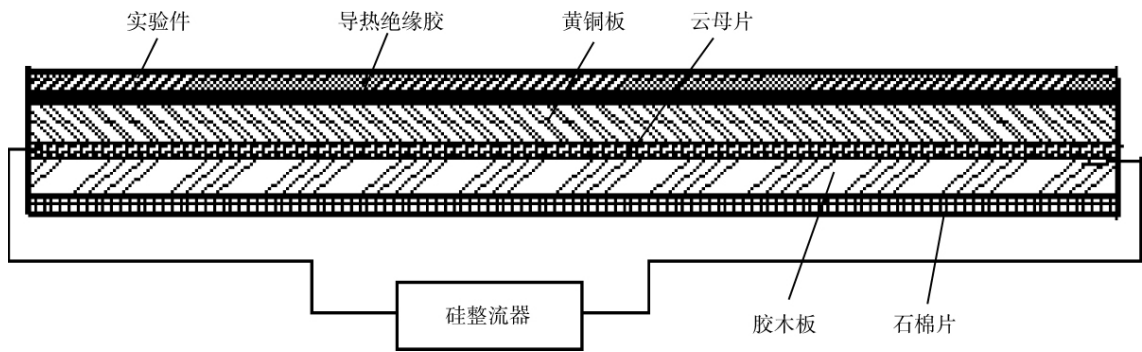


图 6 加热结构示意图

Fig. 6 Schematic of heating system

面的辐射散热量损失, $q_{\text{cond1}}, q_{\text{rad}}$ 均可按传热学基本原理进行测量计算。

3) 壁面平均努塞尔数的定义

$$\overline{Nu} = h_{\text{av}} D_h / \lambda \quad (3)$$

4) 通道压力损失系数的定义

$$Eu = \frac{2\Delta p}{\rho u_{\text{in}}^2} \quad (4)$$

式中 Δp 为进出口的静压差, 同时为了综合评价通道内的传热和流动阻力特性, 还引入了综合性能评价系数 $f = \overline{Nu} / Eu$ 。

1.5 实验误差分析

本次实验用热电偶的测量误差为 $\pm 0.3^\circ\text{C}$; U 型管水排测量压力的误差在 $\pm 0.5\text{ mm}$ 水柱高; 涡街流量计的精度为 1%, 加热量的相对误差为 0.5%。根据实验误差传递公式, 可以估算出本次实验的间接测量量的误差。雷诺数 Re 的相对误差为 2.97%; 压力损失系数的相对误差为 19%; 努塞尔数的相对误差为 15%。

2 结果分析

2.1 扰流柱形状的影响

实验段通道内分别安装圆形、椭圆形、水滴形、哑铃形的扰流柱, 在一定的 Re 变化范围内, 加热热流不变的情况下, 通道内压力损失系数的变化曲线如图 7 所示。从图中可以发现几种曲线分布趋势相同, 随着雷诺数增大压力损失系数呈现逐渐下降的趋势。圆形扰流柱的压力损失系数最大, 哑铃型的次之, 椭圆形的较小, 水滴形扰流柱通道的压力损失系数最小, 仅为圆形扰流柱通道的 57%。根据文献[12]可知气流流过水滴形扰流柱时几乎不发生流动分离, 而流过圆形扰流柱

后在后半周会发生流动分离和脱落。由此可见扰流柱型面变化对流场产生较大的影响, 流线型面越好, 流体越不发生分离, 流动阻力越小。所以几种型面的扰流柱相比可知水滴形扰流柱的型面最好, 压力损失系数小。

相同工况下, 不同扰流柱通道内平均努塞尔数随雷诺数的变化曲线如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 不同模型下努塞尔数的变化趋势相同, 都呈现出随着雷诺数增大而增大的趋势。哑铃形扰流柱和圆形扰流柱的换热效果差异不大, 椭圆形次之, 水滴形换热效果较差。圆柱形扰流柱的平均 $\overline{Nu}$ 比哑铃形扰流柱的稍大, 比椭圆形扰流柱的高约 20%, 比水滴形扰流柱的高 25% 左右。这其实是与其流动特征分不开的。气流流过圆形扰流柱时发生的流动分离现象在增大了流动阻力的同时也因为涡的产生和脱落而增强了扰流柱周围的换热, 因此圆形扰流柱的换热最好。

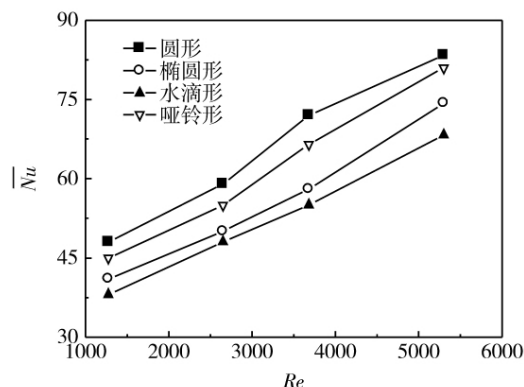


图 8 $\overline{Nu}$ 随雷诺数变化曲线

Fig. 8 Lines of $\overline{Nu}$ at different Re

为了衡量各种型面扰流柱的综合换热性能, 引入了综合性能评价系数 $f = \overline{Nu} / Eu$ 来衡量换热强化与流阻增加之间的协调。图 9 所示为综合性能参数 f 随 Re 的变化曲线。如图 9 所示, 随着雷诺数增大, 几种不同形状扰流柱之间的差异逐渐增大。整体上看圆形扰流柱与哑铃形扰流柱的综合换热效果差异较小。水滴形扰流柱的综合性能最好, 其次是椭圆形扰流柱。由此可见水滴形扰流柱是一种高效低阻的换热结构。

调节电阻丝两端的电压大小可以得到不同的热流。在不同的加热热流下, 圆形扰流柱通道在流动参数不变的情况下壁面沿流向通道的平均 $\overline{Nu}$ 的变化如图 10 所示。可以看出: $\overline{Nu}$ 随着流动方向总体趋势是下降的, 但是在数值上加热热流对

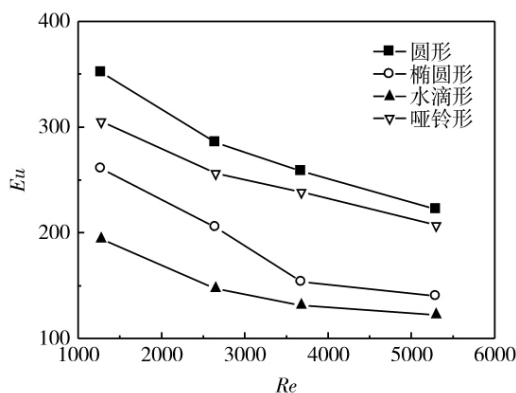


图 7 压力损失系数随雷诺数变化曲线

Fig. 7 Lines of pressure loss at different Re

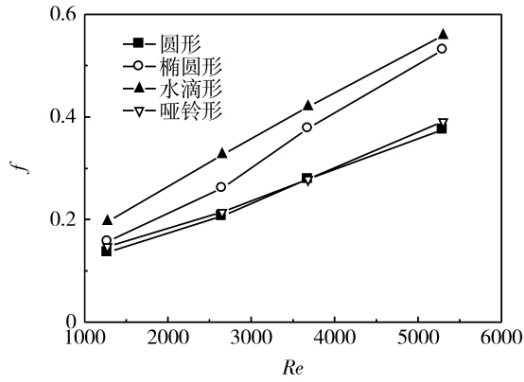


图 9 f 随雷诺数变化曲线

Fig. 9 Lines of f at different Re

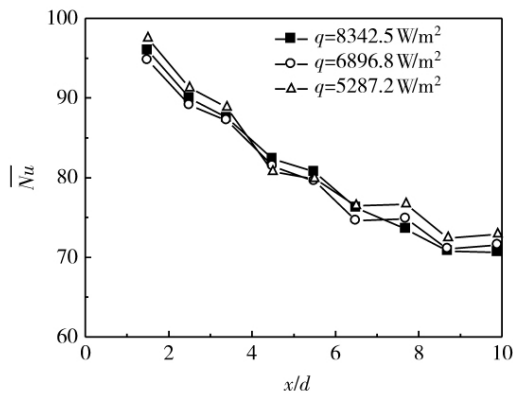


图 10 平均 Nu 沿流向的变化曲线

Fig. 10 Lines of average Nu along streamline

Nu 的影响非常小, 因此实验过程中可以忽略加热热流大小对整体换热效果的影响。

2.2 进口挡板形状的影响

进口气流经过挡板后冲击扰流柱通道, 因此挡板形状对冲击换热的效果肯定会产生不容忽视的影响。图 11 所示为几种不同的挡板形状示意图。图 11 中(a), (c), (d), (f)开口面积一样大, 图 11(b), (e)开口面积相等, 但是开口面积减小一半。

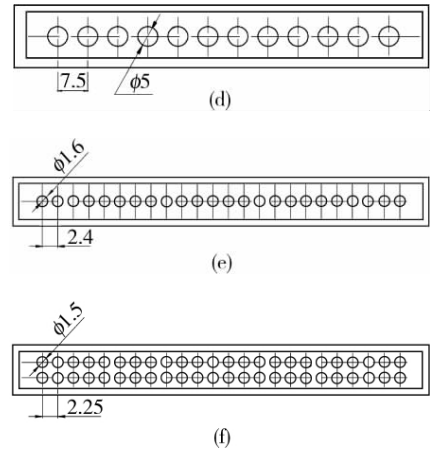
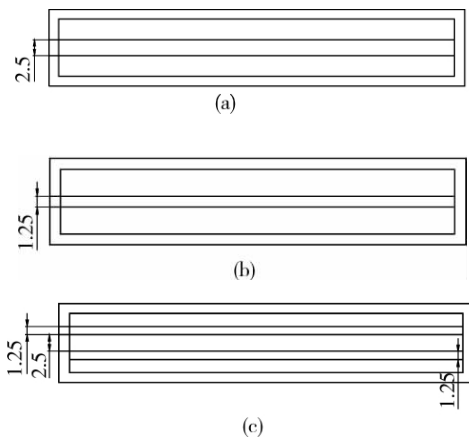
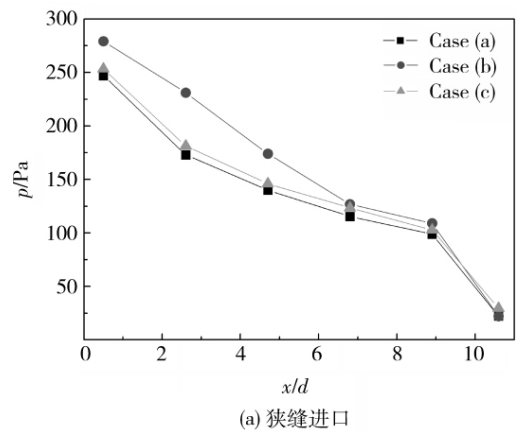


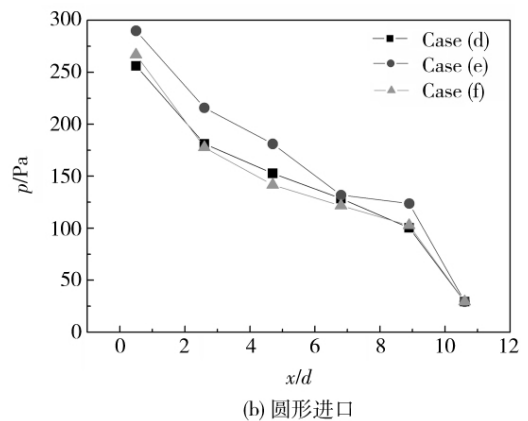
图 11 进口挡板形状简图(单位: mm)

Fig. 11 Schematic of jet flow inlet (unit: mm)

在同一进口雷诺数下, 不同进口挡板形状对压力分布的影响规律如图 12 所示。图中压力分布曲线沿流向逐渐降低, 几种挡板形状对通道内的压力分布影响趋势规律一致, 相比较而言, 相同进口 Re 下, 挡板为图 11(b), 图 11(e)的通道内压力相对较大。主要是因为挡板进口面积减小了, 在进



(a) 狭缝进口



(b) 圆形进口

图 12 通道内沿程压力分布曲线

Fig. 12 Pressure distribution along streamline

气流量相同的情况下进口压力必然增大,所以通道内压力也相对增大。

保持同一加热量和进口 $Re=5\ 300$ 这些参数不变,更换进口挡板,如图 13 所示,实验段壁面平均 $\overline{Nu}$ 沿程分布曲线规律基本一致,沿流向逐渐降低。整体上看圆形进口比狭缝进口的换热效果好。分析其原因在于同样的进气流量下,圆形射流比狭缝射流的冲击效果好。同样是圆形射流进口,形状为 case(f) 的换热效果相对较好。两排射流位置靠近上下壁面更近,气流在通道内分布更加均匀,因此换热增强。

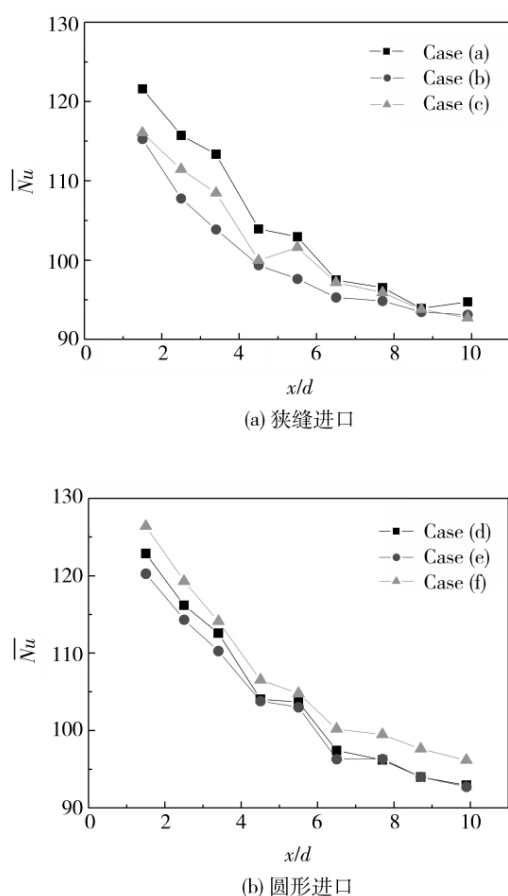


图 13 不同进口挡板下平均 $\overline{Nu}$ 沿程分布

Fig. 13 $\overline{Nu}$ lines along streamline at different inlet shapes

3 结 论

本文针对某一排列方式下扰流柱梯形通道的流动和换热特性进行了实验研究,在本文的研究参数范围内获得以下结论:

1) 单纯从强化换热角度分析,圆形扰流柱的换热能力最强,水滴形扰流柱的换热效果最差;圆柱形扰流柱的平均 $\overline{Nu}$ 比哑铃形扰流柱的平均

$\overline{Nu}$ 稍大,比椭圆形扰流柱的平均 $\overline{Nu}$ 高约 20%,比水滴形扰流柱的平均 $\overline{Nu}$ 高 25% 左右。

2) 从流动损失分析,随着进口气流雷诺数的增大,压力损失系数减小。圆形扰流柱的压力损失系数最大,哑铃型的压力损失系数次之,水滴形扰流柱通道的压力损失系数最小,仅为圆形扰流柱的压力损失系数的 57%。由此可见扰流柱型面变化对流场产生较大的影响。

3) 整体上看,圆形扰流柱与哑铃形扰流柱换热通道的综合性能差别不大,水滴形扰流柱比传统的圆形和椭圆形扰流柱具有更优的综合性能。由此可见水滴形扰流柱是一种高效低阻的换热结构。

4) 不同的射流进口挡板对通道内的压力分布与换热影响不大,case(f) 双排小孔的挡板通道内压力较大,但是换热效果也相对较好。

参考文献:

- [1] 倪萌,朱惠人,裘云,等.航空发动机涡轮叶片冷却技术综述[J].燃气轮机技术,2005,18(4):25-33.
NI Meng,ZHU Hui ren,QIU Yun,et. al, Review of aero-engine blade cooling technologies[J]. Gas Turbine Technology,2005,18(4):25-33. (in Chinese)
- [2] 刘大响,陈光.航空发动机:飞机的心脏[M].北京:航空工业出版社,2003.
LIU Daxiang, CHEN Guang. Gas turbine: heart of aero plane[M]. Beijing: Aviation Industry Press,2003. (in Chinese)
- [3] Tahat M,Kodah Z H. Heat transfers from pin-fin arrays experimenting forced convection [J]. Applied Energy, 2000,67(4):419-442.
- [4] 向安定,张丽,刘松龄.带射流冲击的短扰流柱排内的流动和损失[J].推进技术,2002,23(3):226-229.
XIANG Anding, ZHANG Li, LIU Songling. Pressure fields measurements and flow losses around a row of short cylinder with jet impingement[J]. Journal of Propulsion Technology,2002,23(3):226-229. (in Chinese)
- [5] Sparrow E M, Grannis V B. Pressure drop characteristics of heat exchangers consisting of arrays of diamond-shaped pin fin[J]. International Journal of Heat and Mass transfer,1991,34(3):589-600.
- [6] Uzol Q,Camci C. Elliptical pin fins as an alternative to circular pin fins for gas turbine blade cooling applications Part 1: endwall heat transfer and total pressure loss characteristics[R]. ASME GT2001-0180,2001.
- [7] Oguz U, Cengiz C. Heat transfer pressure loss and flow field measurements downstream of staggered two-row circular and elliptical pin fin arrays [J]. ASME J. Heat Transfer,2005,127(5):458-471.
- [8] Li Q L, Chen Z, Flechtner U. Heat transfer and pressure

- drop characteristics in rectangular channel with elliptic pin fins[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1998, 19(2): 245-250.
- [9] 凌长明, 赵广超, 黄小新, 等. 束腰结构扰流柱通道的传热和阻力特性[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(5): 815-817. LING Changming, ZHAO Guangchao, HUANG Xiaoxin, et al. Heat transfer and characteristics of pressure drop in wedge passage with waist-shaped pin-fin arrays[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(5): 815-817. (in Chinese)
- [10] Chen Z, Li Q, Meierand D, et al. Convective heat transfer and pressure loss in rectangular ducts with drop-shaped pin fins [J]. Heat and Mass Transfer, 1997, 33 (2): 219-224.
- [11] 杨成凤, 张靖周, 谭晓茗. 水滴形叉排扰流柱阵列矩形通道内流动和换热数值模拟[J]. 航空动力学报, 2004, 19(3): 361-365. YANG Chengfeng, ZHANG Jingzhou, TAN Xiaoming. Simulation of flow and heat transfer in a rectangular channel with water drop pin-fin array[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(3): 361-365. (in Chinese)
- [12] 王奉明, 张靖周, 王锁芳. 不同形状扰流柱矩形通道内流动特征研究[J]. 航空学报, 2007, 28(1): 37-41. WANG Fengming, ZHANG Jingzhou, WANG Suofang. Study of flow characteristics inside rectangular channel with different pin fins[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(1): 37-41. (in Chinese)