

文章编号: 1000-8055(2024)10-20220861-09

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220861

# 基于多级设计概念的肋化内冷通道流动换热特性

刘国庆<sup>1,2</sup>, 郑少飞<sup>1,2</sup>, 杨燕茹<sup>1,2</sup>, 李海旺<sup>3</sup>, 王晓东<sup>1,2</sup>

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 华北电力大学 工程热物理研究中心, 北京 102206;

3. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

**摘 要:** 利用数值仿真方法, 研究了 4 种肋片构型(直肋、斜肋、V 肋和反 V 肋)和两种设计方法(均匀设计和多级设计)下肋化通道的流动换热特性, 进一步明确多级设计概念的有效性和适用性。结果表明: 采用多级设计后, 4 种肋片构型的换热性能均有不同程度的下降, 其中直肋降幅最小(低于 3.00%), 斜肋降幅最大(达到 12.76%); 流动阻力展现出标志性的下降, 其中直肋减阻效果最差, 摩擦因子降低 36.15%~37.67%, 反 V 肋实现最佳的减阻效果, 摩擦因子降低 46.98%~50.32%; 最终, 多级设计有效地增强了肋化通道综合冷却效果, 在雷诺数为 100 000 时, 与现有均匀设计相比, 基于多级设计的反 V 肋综合性能因子提高 81.29%。分析表明: 沿着流动方向线性减少的肋片尺寸, 一方面有效地抑制二次流动, 另一方面促使主流产生下压效应, 强化壁面流体冲击效果, 进而在轻微损失换热性能的基础上, 实现标志性的减阻效果。

**关 键 词:** 涡轮叶片内部冷却; 多级设计概念; 换热性能; 流动阻力; 综合性能

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

## Fluid flow and heat transfer of ribbed channel based on the hierarchical design concept

LIU Guoqing<sup>1,2</sup>, ZHENG Shaofei<sup>1,2</sup>, YANG Yanru<sup>1,2</sup>, LI Haiwang<sup>3</sup>, WANG Xiaodong<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Research Center of Engineering Thermophysics,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

3. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Using the numerical simulation, the fluid flow and heat transfer characteristics of a ribbed channel considering four rib configurations (transverse ribs, inclined ribs, V-shaped ribs, and inverse V-shaped ribs) and two designs (uniform design and hierarchical design) were studied for verifying the effectiveness of the hierarchical design concept. The results demonstrated that using the hierarchical design, the heat transfer performances of four kinds of ribs slightly decreased, the transverse rib had a minimum reduction below than 3.00%, while the inclined rib presented a maximum reduction up to 12.76%; the flow resistance was significantly reduced, the transverse rib had a minimum reduction with the decreased friction factor by 36.15%—37.67%, the inverse V-shaped rib had a maximum reduction with the decreased friction factor by 46.98%—50.32%; as a result, the hierarchical design effectively improved the overall

收稿日期: 2022-11-13

基金项目: 航空发动机及燃气轮机基础科学中心项目(P2022-B-II-029-001); 国家自然科学基金(52006064)

作者简介: 刘国庆(1997—), 男, 硕士生, 主要从事涡轮叶片内冷通道流动与换热研究。E-mail: XTU18390210192@outlook.com

通信作者: 郑少飞(1990—), 男, 讲师, 博士, 主要从事强化换热与冷却技术研究。E-mail: shaofeizheng@ncepu.edu.cn

引用格式: 刘国庆, 郑少飞, 杨燕茹, 等. 基于多级设计概念的肋化内冷通道流动换热特性[J]. 航空动力学报, 2024, 39(10): 20220861. LIU Guoqing, ZHENG Shaofei, YANG Yanru, et al. Fluid flow and heat transfer of ribbed channel based on the hierarchical design concept[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(10): 20220861.

cooling performance of the ribbed channel with a reduction of 81.29% for the inverse V-shaped rib at Reynolds number of 100 000. The slight reduction of the heat transfer performance and the marked resistance reduction came from the combination of the constrained secondary flows and the lowering effect of the mainstream.

**Keywords:** internal cooling of turbine blade; hierarchical design concept; heat transfer; pressure loss; overall thermal performance

为进一步提高航空发动机热效率和输出功率, 涡轮前燃气进口温度随着推质比的增加而不断升高。作为航空发动机典型热端部件的涡轮叶片, 其承受的热负荷也随之大幅增加。受限于材料耐高温水平, 高效冷却技术是降低叶片温度, 维持叶片正常工作, 确保发动机性能和安全的 key 需求<sup>[1-2]</sup>。相比于外部冷却技术, 内部冷却技术主要通过在内冷壁面上布置各种形式的扰流结构, 例如肋片<sup>[2-5]</sup>、球凸/凹<sup>[2-3,6]</sup>、扰流柱<sup>[2-3,7]</sup>、冲击冷却<sup>[2-3,8]</sup>等, 达到强化对流换热的目的。为进一步降低流动阻力, 提高换热性能, 改善局部换热不均匀性, 从而提升叶片整体的冷却性能, 研究者们围绕内冷结构的流动换热机理开展了大量的研究工作<sup>[1-3]</sup>。这些工作主要集中在发展新型扰流结构, 并揭示各种参数和因素对其流动换热性能的影响机制和规律。

对流换热的本质是流体和固体壁面的换热, 其强化换热思路主要可分为以下两类。一是采用二次结构破坏边界层, 促使其重新发展, 充分利用流动进口效应, 达到强化换热的目的; 二是通过诱发流向涡系或截面横向涡系, 强化冷热流体掺混, 实现强化换热。扰流肋片是研究与应用最早、最为广泛的内冷结构之一, 其不仅可以扰动边界层, 促使边界层重新发展, 而且相应的改进型式还可以诱发复杂的流向和横向涡系, 增强流体掺混。Han、Park 等<sup>[9-10]</sup>在肋片结构流动换热方面开展了大量研究工作, 较为系统和全面地研究了肋片型式、通道纵横比、节距比、阻塞比等参数对通道流动换热性能的影响, 并发展出系列经验关系式指导肋片设计。结果进一步表明, 相比于直肋、斜肋和交错肋, V 形肋具有最佳的换热性能, 并伴随着流动阻力的增加。李建华等<sup>[11]</sup>的研究也进一步证实反 V 形 60°肋片具有最佳的强化换热效果。Kamali 等<sup>[12]</sup>通过数值模拟研究了多种形状肋片的冷却通道流动换热性能。发现高度沿主流方向减小的梯形肋具有最高的传热效率, 同时承受最大的压降损失。借助实验测量和数值

模拟, 邱庆刚等<sup>[13]</sup>研究了楔形肋片几何结构对仿螺旋肋片冷却通道的流动换热特性。结果表明, 随着楔形肋片导流角的增大, 通道的强化传热显著增强, 但其流动阻力也明显增大; 当楔形肋片导流角为 7°时具有最佳的综合换热效果。Xie 等<sup>[14]</sup>提出月牙形肋片设计, 数值结果表明月牙形肋片通道的平均努塞尔数和阻力系数分别是传统直肋通道的 1.21~1.41 倍和 1.80 倍。

近年来, 间断肋、孔肋复合结构和微肋片因其优异的换热性能吸引了广泛关注。吴榕等<sup>[15]</sup>通过数值仿真, 在考虑多种结构参数的基础上, 系统研究了内冷通道 V 型间断肋的流动换热特性。相比于连续直肋、斜肋、V 型肋, V 型间断肋表现出优异的冷却性能, 在雷诺数为 30 000 时, 其平均努塞尔数比连续直肋提高 35.75%, 压力损失也相应地增加了 19.46%。主要原因是分离肋的出现, 打破了原有二次回流涡系, 产生了更为强烈的横向涡系, 有效改善了肋后低速流动, 使得通道湍流度大幅提高。朱强华等<sup>[16]</sup>和 Li 等<sup>[4]</sup>发现相比于实心肋, 孔肋复合结构能联合冲击射流和扰流肋片两种冷却方式, 限制肋后回流涡发展, 有效改善肋后区域的换热性能, 使得通道换热性能和流动阻力同时减小。特别地, 李彦霖等<sup>[17]</sup>利用实验和数值方法研究了多种微肋结构的通道流动换热性能, 结果表明 W 型微肋具有最高的平均换热性能和综合冷却性能, 但高的换热性能同时伴随着高的流动阻力。考虑叶片真实工作状态, Zhang 等<sup>[18]</sup>研究了旋转状态下肋化通道的流动换热特性, 哥氏力的作用显著改变了内壁面换热特性, 使得平均努塞尔数随旋转数的增加呈现不同的趋势。

通过不断优化和改进扰流肋片构型式和布局, 内冷通道的流动换热性能已经得到了极大的提高, 然而, 换热性能的提高往往伴随着巨大的流动阻力, 使得综合冷却效果提升有限<sup>[2,19]</sup>。需要指出的是, 现有扰流肋片普遍采用均匀性布置方式, 即单一尺度、规则、周期性的设计方案, 其诱发的

流动涡系较为固定,以强化换热为目的的湍流强化方案,必然伴随着流动阻力的大幅增加。

近期,受肋片截断设计启发,本文作者提出了多级设计概念,即沿流动方向的非连续性肋片设计<sup>[20]</sup>。数值研究结果表明,优化后的多级直肋设计可平均努塞尔数下降 1.33% 的情况下,通道流动阻力减少 49.27%,大幅提升其综合换热性能。考虑节距比、通道纵横比、流动进口效应和侧壁效应等影响因素,多级直肋设计仍然具有较高水平的减阻性能。基于此,本文在前期研究的基础上,考虑将多级设计概念拓展到多种型式的扰流肋结构,进一步研究多级设计的有效性和适用性。

1 物理模型和数值方法

1.1 物理模型

内冷通道模型如图 1 所示,主要包括:进口段、测试段和出口段。进口段长度  $L_1=600\text{ mm}$ , 确保流动充分发展。加热段长度  $L_2=950\text{ mm}$ , 下壁面布置扰流肋片。出口段长度  $L_3=400\text{ mm}$ , 防止回流流动影响。通道截面尺寸为  $80\text{ mm}\times 80\text{ mm}$ , 宽高比  $W/H=1$ 。

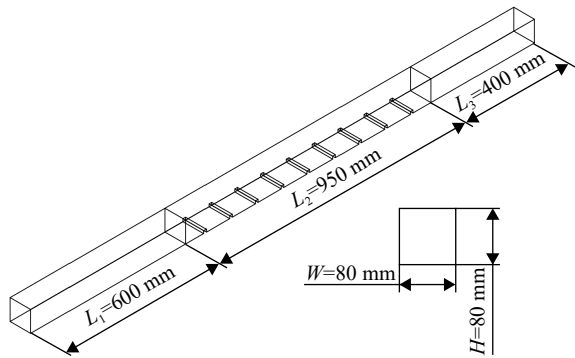


图 1 内冷通道整体模型

Fig. 1 Schematic diagram of the internal cooling channel

为降低流动进口效应的影响,测试段底部布置 9 排方形肋片<sup>[20]</sup>。除直肋外,本外还考虑另外 3 种典型肋片结构,分别是斜肋、V 形肋和反 V 形肋,肋片与壁面的夹角均为  $45^\circ$ , 如图 2 所示。考虑传统均匀性布置方式,肋片高度均为  $e=10\text{ mm}$ , 节距比  $P/e=10$ 。在前期工作中,文献<sup>[20]</sup>针对肋片高度采用多级设计,提出 3 种多级直肋构型。结果表明,肋片高度沿流动方向线性减小的设计方案提供最优的减阻效果和综合冷却性能。基于此,本文考虑斜肋构型,对比研究 3 种多级设计,进一步证实肋片高度沿流动方向线性减小的

多级设计方案是最优的多级设计方案。因此,本文的多级设计方案考虑肋片高度沿流动方向线性减小,第 1 级肋片高度为  $10\text{ mm}$ , 最后一级肋片高度为  $2\text{ mm}$ , 中间肋片的高度采用线性插值的方法确定,肋片间距保持不变( $P=100\text{ mm}$ )。综合考虑参考设计和优化设计,本文共计采用 4 种肋片型式(直肋、斜肋、V 形肋和反 V 形肋)和两种设计方法(均匀性布置方法和多级设计方法),共计 8 种模型方案,详细模型设置见表 1。

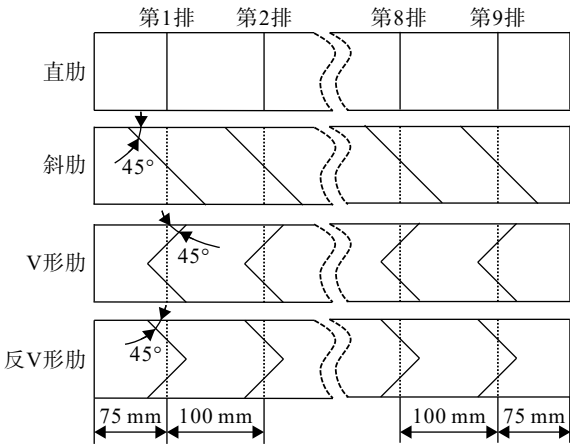


图 2 肋片排布方式示意图

Fig. 2 Schematic of the rib arrangement

表 1 不同模型设计方案

Table 1 Different configurations of the rib arrangement

| 模型方案     | 肋片型式   | 是否采用多级设计 |
|----------|--------|----------|
| 直肋-均匀    | 直肋     | 否        |
| 直肋-多级    | 直肋     | 是        |
| 斜肋-均匀    | 斜肋     | 否        |
| 斜肋-多级    | 斜肋     | 是        |
| V 肋-均匀   | V 形肋   | 否        |
| V 肋-多级   | V 形肋   | 是        |
| 反 V 肋-均匀 | 反 V 形肋 | 否        |
| 反 V 肋-多级 | 反 V 形肋 | 是        |

1.2 计算方法和边界条件

本文采用 Fluent 2020 R2 求解器对三维不可压缩黏性湍流流动和传热模型进行数值求解。流体介质考虑不可压缩空气,采用常物性假设。通道入口给定速度入口边界条件,进口温度为  $300\text{ K}$ , 湍流强度根据下式计算:

$$I = 0.16Re^{-0.125} \tag{1}$$

式中  $Re$  为通道入口雷诺数。通道出口给定自由流动出口边界条件。基于文献中的实验测试,测

试段底部壁面给定  $1000 \text{ W/m}^2$  的均匀恒定热流密度边界条件,用于模拟高温燃气对叶片的加热效应,剩余通道壁面均设置为绝热无滑移壁面<sup>[20-22]</sup>。选择 SIMPLEC 算法对压力和速度进行耦合求解,离散格式选用 2 阶迎风格式。除能量方程的残差小于  $1.0 \times 10^{-11}$  外,其余方程残差均小于  $1.0 \times 10^{-7}$ 。

### 1.3 网格无关性验证

采用 ICEM CFD 对计算模型进行结构化网格划分,如图 3 所示。为准确捕捉边界层内流动换热特征,近壁面处网格均进行加密处理,确保无量纲壁面距离  $y^+ < 1$ 。在计算资源和计算时间有限的情况下,为了保证数值结果的准确性,有必要进行网格独立性验证,以选取合适的网格。针对直肋通道考虑 4 种网格数量 ( $1.97 \times 10^6$ 、 $2.68 \times 10^6$ 、 $4.00 \times 10^6$  和  $5.75 \times 10^6$ ),在  $Re=60\,000$  时求解通道平均努塞尔数  $Nu$ 。表 2 列出了不同网格数量求得的通道平均努塞尔数。以网格数量为  $5.75 \times 10^6$  的计算结果为基准,网格数量为  $2.68 \times 10^6$  的相对偏差仅约  $-0.52\%$ 。综合考虑,本文采用 268 万网格系统进行数值计算。

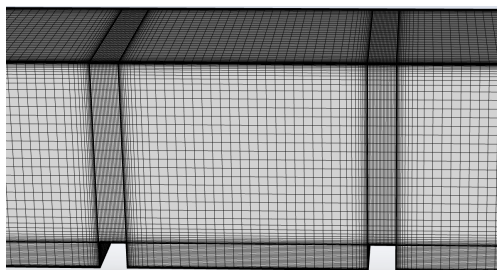


图 3 近肋区域网格示意图

Fig. 3 Computation grids near ribs

表 2 网格无关性验证

Table 2 Mesh independence verification

| 网格数量/ $10^6$ | $Nu$   | 相对偏差/% |
|--------------|--------|--------|
| 1.97         | 183.53 | -33.10 |
| 2.68         | 243.00 | -0.52  |
| 4.00         | 243.96 | -0.13  |
| 5.75         | 244.26 | 0      |

### 1.4 湍流模型验证和数据处理

合适的湍流模型能够准确地预测肋化通道的流动换热特性,直接决定数值求解的精度。因此,和文献<sup>[20]</sup>保持一致,本文考虑剪应力传输(SST)  $k-\omega$ 、重整化群(RNG)  $k-\varepsilon$  和  $v^2f$  在内的 5 种湍流模型,选用文献<sup>[21]</sup>中肋化通道的实验测量结果与数值仿真结果进行对比验证。在  $Re=80\,000$  时,

图 4 比较了肋化通道中第 3 级和第 4 级肋片间底部壁面局部努塞尔数的预测值和实验测量值。可以发现,尽管近肋区域存在相对大的误差, $v^2f$  湍流模型的预测精度仍然是最高的,在变化趋势上也与实验结果保持一致。因此,本文各肋化通道流动换热特性均采用  $v^2f$  湍流模型进行数值求解。

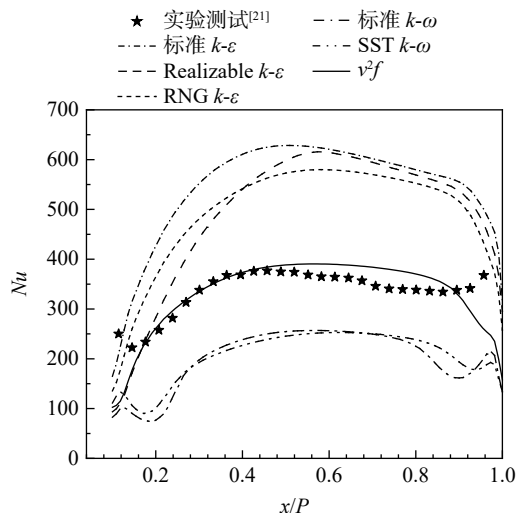


图 4 在  $Re=80\,000$  时,沿流动方向第 3 级和第 4 级肋片间底部壁上局部努塞尔数对比<sup>[20]</sup>

Fig. 4 Comparison of the local  $Nu$  distributions of the bottom wall between row 3 and row 4 along the streamwise direction at  $Re=80\,000$ <sup>[20]</sup>

通道进口雷诺数定义如下:

$$Re = \frac{\rho u_{in} D_h}{\mu} \quad (2)$$

式中  $\rho$  为空气密度,  $u_{in}$  为流体入口速度,  $D_h$  为通道水力直径,  $\mu$  为空气动力黏度。考虑不同的入口速度,本文研究的雷诺数范围为  $20\,000 \sim 100\,000$ 。

为分析换热性能,定义局部努塞尔数  $Nu(i)$  如下:

$$Nu(i) = \frac{q}{T_w(i) - T_f} \cdot \frac{D_h}{\lambda} \quad (3)$$

式中  $q$  表示通道底壁面的热流密度,  $T_w(i)$  为通道底壁面的局部温度,参考温度  $T_f$  为中间测试段的流体平均温度,  $\lambda$  为流体导热系数。通道平均努塞尔数为局部努塞尔数的面积平均值<sup>[20]</sup>。

本文采用摩擦因子表征流体流阻特性,定义如下:

$$f = \frac{\Delta p}{2\rho u_{in}^2} \cdot \frac{D_h}{\lambda} \quad (4)$$

式中  $\Delta p$  为气流流经测试段的压力损失。

流动阻力和换热性能是表征肋化通道冷却性能的两个关键参数, 为同时考虑传热强化和压力损失, 定义综合性能因子  $\eta_1$  和  $\eta_2$ :

$$\eta_1 = \frac{Nu/Nu_0}{f/f_0} \quad (5)$$

$$\eta_2 = \frac{Nu/Nu_0}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (6)$$

其中  $Nu_0$  和  $f_0$  分别表示光滑通道内充分发展流动的平均努塞尔数和摩擦因子, 由 Dittus-Boelter 和 Blasius 经验公式计算<sup>[20, 22]</sup>:

$$Nu_0 = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (7)$$

$$f_0 = 0.079Re^{-0.25} \quad (8)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 换热性能和流动阻力分析

为了对不同设计方案的换热性能和流动阻力进行分析对比, 图 5 给出了不同雷诺数下肋化通道相对换热强化因子  $Nu/Nu_0$  和相对摩擦因子  $f/f_0$ 。如图所示, 考虑传统均匀设计, 直肋换热性能最差, 斜肋和反 V 型肋提供了最佳的换热性能, 该结果也已被现有研究证实<sup>[9-11]</sup>。采用多级设计后, 4 种肋片构型的换热性能均有不同程度的下降, 其中直肋和 V 形肋换热性能下降幅度最小, 而斜肋和反 V 形肋则表现出较为明显的下降。特别地, 在  $Re=20\,000$  时, 多级设计斜肋的相对换热强化因子相比传统均匀设计减少 12.76%。采用多级设计后, 反 V 形肋的换热性能均优于其余 3 种肋片构型。

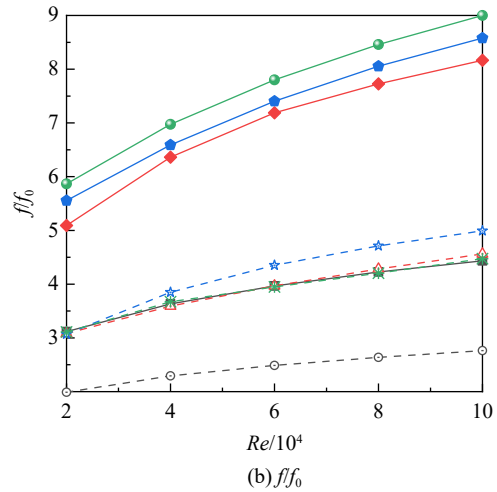
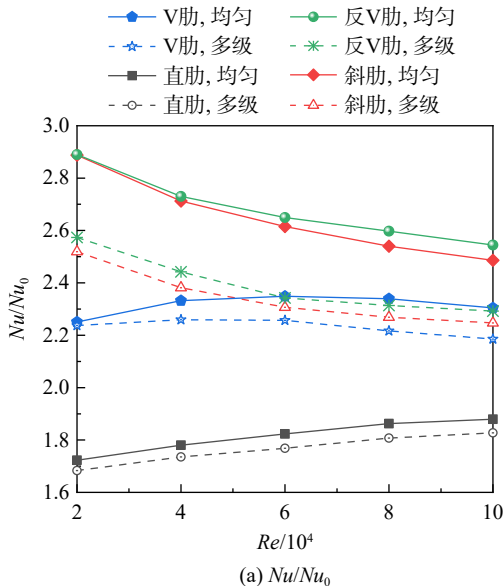


图 5 不同  $Re$  下肋化通道  $Nu/Nu_0$  和  $f/f_0$  对比

Fig. 5  $Nu/Nu_0$  and  $f/f_0$  at different  $Re$

在流动阻力方面, 采用传统均匀设计, 斜肋、V 型肋和反 V 型肋的相对摩擦因子相比直肋设计有较大幅度的增加, 进一步证实传统的强化换热方式往往以牺牲流动阻力为代价。特别地, 采用多级设计后, 4 种肋片构型的相对摩擦因子均出现了大幅下降, 意味着流动阻力的大幅减小。需要指出的是, 采用多级设计后, 反 V 型肋展现出最大幅度的减阻效果, 在当前  $Re$  范围内, 其摩擦因子相比均匀设计减少 46.98%~50.31%。图 5 进一步表明, 雷诺数对上述结果没有造成明显的影响。总的来说, 考虑不同型式的肋片构型, 多级设计使得通道流动阻力大幅下降, 而换热性能只略微下降。

### 2.2 换热特性分析

为了解释通道换热性能, 需要对底部壁面换热特性进行分析。图 6 展示了 4 种肋片构型采用均匀设计和多级设计后的底部壁面的温度分布。从图中可以看出, 相比于直肋, 斜肋、V 肋和反 V 肋均展现出更大的低温区域, 因此具有增强的换热性能。对直肋设计, 低温区域主要存在于相邻肋间的中部, 高温区域分布在肋片的根部和近壁处, 且在流向上分布相对均匀; 斜肋的低温区域起始于肋壁前接触点, 沿肋展方向逐渐收缩; V 型肋的低温区沿通道中心对称地分布在肋后区域, 从肋尖沿两侧逐渐收缩, 并沿流动方向逐渐增大; 相比于 V 型肋, 反 V 肋的低温区域明显增大, 从肋壁处沿肋片方向逐渐收缩, 且在流向上分布相对均匀。基于均匀设计, 斜肋和反 V 肋构型展现出更大的低温区域, 因此提供了最佳的换热性能。采用多级设计后, 底壁面低温区域均有不同程度

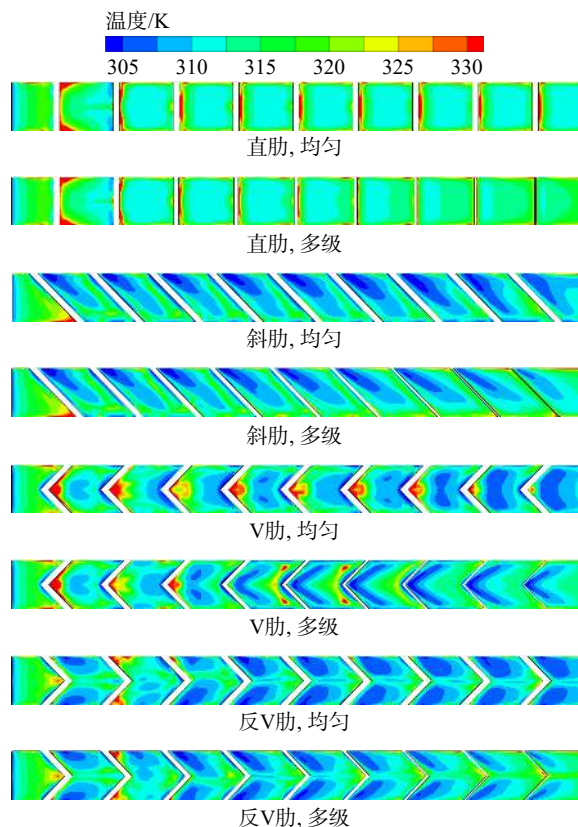


图 6 底部壁面温度云图

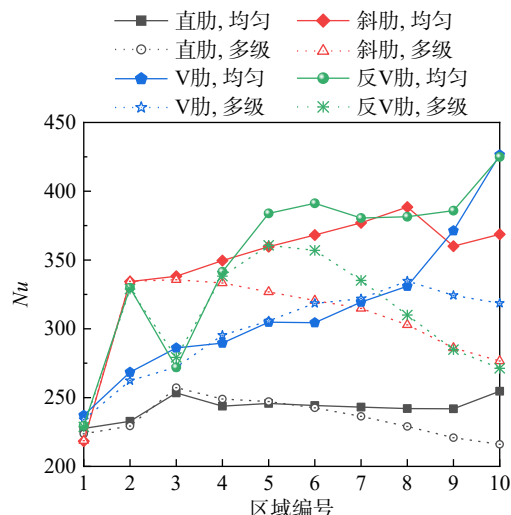
Fig. 6 Temperature distributions on the bottom wall of the channel

的收缩,意味着换热性能的下降,但底壁换热特征并未发生标志性变化。特别地,斜肋和反V肋构型在采用多级设计后,通道后半部分由于肋片尺寸的减小而导致低温区域大幅减小,故其换热性能下降相对较大。

为了进一步量化分析各种肋片构型的换热特性,将底壁面按肋片分割成的10个区域进行编号,沿流动方向从左至右编号依次从1增加到10,并对各个区域的面积平均 $Nu$ 进行统计分析,如图7所示。如图所示,相对均匀设计,采用多级设计后,除V形肋外,从区域5开始,平均努塞尔数随着区域数的增加而迅速减少,在区域10减至最低。而V形肋采用多级设计后,在区域1~区域8平均努塞尔数基本与原设计持平,仅在区域9和区域10出现明显减少,这主要是由于肋片尺寸过小所造成。

### 2.3 流动特性分析

为了解不同构型提供的流动阻力和传热特性以及它们之间的差异,本节将对流动特性进行全面细致的分析。图8展示了通道流向截面上的速度分布和流线,图9展示了第7级和第8级肋片

图 7 底面局部平均  $Nu$ Fig. 7 Local averaged  $Nu$  on the bottom wall

间通道截面流线与速度分布。肋片的存在一方面扰动边界层,促使边界层流体分离再附着,另一方面诱发横向和展向涡系,增强流动掺混,最终使得换热性能得以提高。如图8所示,直肋后部出现了明显的二次回流涡,大量低速流体使得肋后出现低换热区域,因而导致肋后温度较高(如

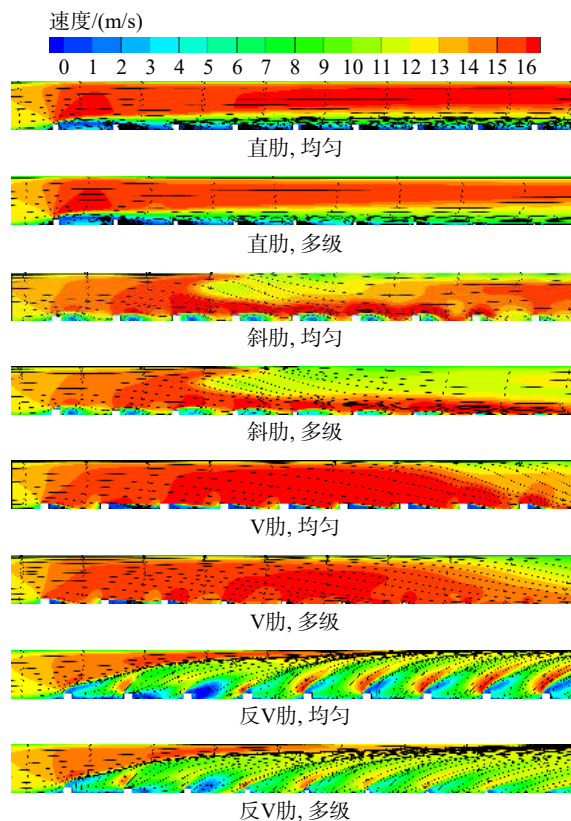


图 8 通道流向截面上流线与速度云图

Fig. 8 Streamline and velocity contour on the central streamwise plane of the channel

图 6 所示)。如图 9 所示, 由于倾斜一定角度, 斜肋可引导流体从壁面一侧流向另一侧, 进而导致横向二次流的发生; V 肋和反 V 肋的对称斜肋能使得流体沿着倾斜方向流动, 诱发两股沿中心线对称的横向二次回流涡。相比于直肋, 斜肋、V 肋和反 V 肋均能产生横向涡, 一方面增强流体掺混, 另一方面抑制肋后回流涡的发生, 使得换热性能大幅提高。此外, 横向涡的出现也使得流向截面上流体速度降低, 并减弱了流体对壁面的冲击效果, 如图 8 所示。采用多级设计后, 肋片尺度的降低促使二次流强度减弱, 一方面降低了换热性能, 另一方面使得流动阻力大幅降低。需要指出的是, 正如文献 [20] 所述, 沿着流动方向逐渐减小的堵塞比使得主流产生下压效应, 可以一定程度上强化流动再附着对壁面的冲击。因此, 如图 8 所示, 采用多级设计后, 尽管主流速度略微下降, 但近壁区速度显著增加。上述流动特性起到强化壁面换热的效果, 因此换热性能并未出现大幅降低。

湍动能和流体扰动密切相关, 可以表征流体掺混强度。图 10 展示了通道底部壁面的流型和湍动能分布。从图中可以看出, 湍动能分布和图 6 的温度分布密切相关。这主要是因为湍动能反应流体掺混强度, 直接决定近壁区换热效率。对于斜肋, 来流流经肋片后, 从左上角沿肋片方向逐渐扩散, 其高湍动能区域主要集中于肋片根部附近, 这与其温度云图相对应; 另外, 采用多级设计后, 其高湍动能区也随着肋片尺寸的减小而迅速减小, 因而其后半部分传热性能出现大幅的下降。对于 V 形肋和反 V 形肋, 其流动特性完全相反, V 形肋相邻肋间流线沿轴向向两边扩散, 而反 V 形肋正好相反, 流线从两边向中心轴线聚拢。因

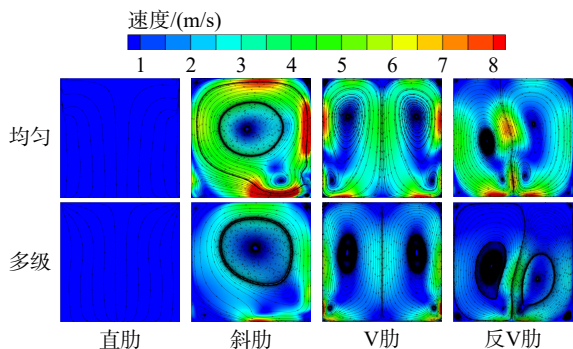


图 9 第 7 级和第 8 级肋片间通道截面流线与速度云图

Fig. 9 Streamline and velocity contour on the transverse section of the channel between row 7 and row 8

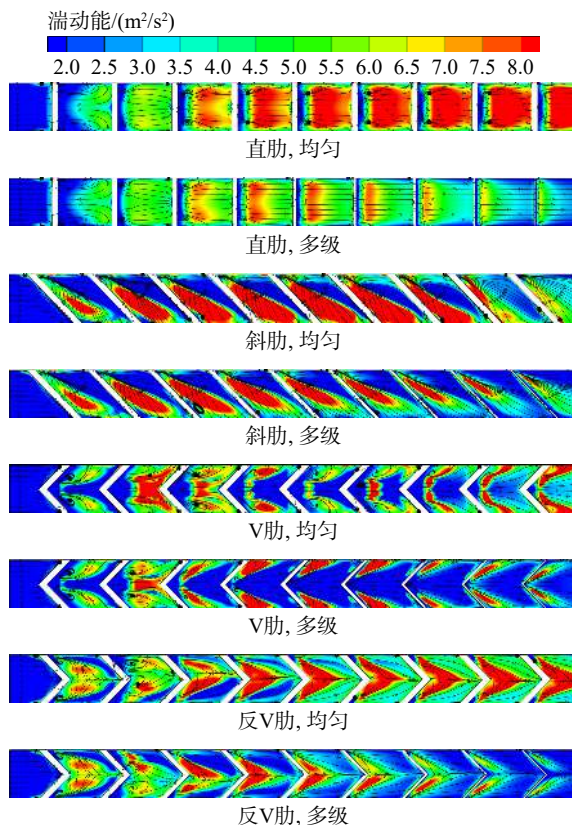


图 10 底壁面流线与湍动能分布

Fig. 10 Distributions of streamlines and turbulent kinetic energy on the bottom wall of the channel

此, V 形肋高湍动能区域沿肋中心向两边扩散, 呈 V 字形; 而反形肋则由两边向中心聚拢, 成三角形。同样地, 两者的高温湍动能区域也随着肋片尺寸的减小而大幅减小。特别地, V 型和反 V 型肋具有比直肋小的壁面湍动能强度, 但他们的换热性能优于直肋构型。主要原因是 V 型和反 V 型肋可产生截面横向涡, 有效地增强流体掺混, 如图 10 所示。总的来说, 采用多级设计后, 肋片诱发的流向和横向涡被显著抑制, 不仅降低了壁面再附着区域冲击强度, 而且减弱了展向方向上冷热流体掺混。然而, 多级设计产生的主流下压效应使得近壁区流动速度在一定程度上得到增加, 有利于增强壁面换热。最终, 多级设计使得换热性能出现小幅度下降, 受涡系决定的流动阻力得到大幅下降。

## 2.4 综合性能因子对比

考虑综合性能对比分析, 图 11 比较了不同雷诺数下 4 种肋片构型采用均匀设计和多级设计后的综合性能因子  $\eta_1$  和  $\eta_2$ 。可以发现, 采用多级设计后, 由于流动阻力的大幅下降, 4 种肋片构型的综合性能均得到了大幅提升。在  $Re=20\,000\sim$

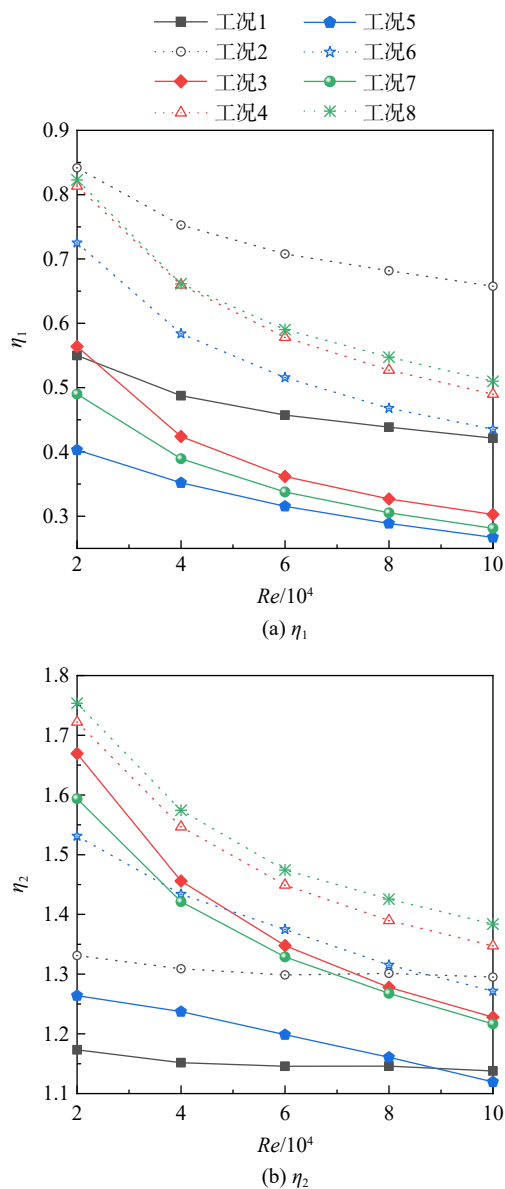


图 11 综合换热性能

Fig. 11 Comprehensive heat transfer performance

100 000 范围内, 多级设计使得 V 肋和反 V 肋构型的综合性能因子  $\eta_1$  分别增加 79.94%~61.99% 和 67.97%~81.29%, 综合性能因子  $\eta_2$  的增幅也均在 10.00% 以上。考虑多级设计, 由于最低水平的流阻, 直肋表现出最高的综合性能因子  $\eta_1$ , 其次是斜肋和反 V 肋; 相比之下, 在综合性能因子  $\eta_2$  方面, 反 V 肋片构型展示出最高的综合性能因子  $\eta_2$ , 这主要是因为其在多级设计下最佳的换热性能, 而直肋提供了最低水平的综合性能因子  $\eta_2$ 。上述结果有效地证实了多级设计概念的有效性和适用性。

### 3 结 论

采用数值计算方法, 本文研究了均匀设计和

多级设计下, 直肋、斜肋、V 肋和反 V 肋这 4 种肋化通道的流动和换热性能, 并分析了换热特征和流动细节, 得到的主要结论有:

1) 相比于现有均匀设计, 多级设计可显著降低肋化通道的流动阻力, 并伴随着轻微的传热恶化。采用多级设计后, 直肋、斜肋、V 肋和反 V 肋的换热性能分布下降 2.30%~3.00%、9.62%~12.76%、0.60%~5.24% 和 9.92%~11.59%; 相应的摩擦因子分别减少 36.15%~37.67%、39.51%~44.79%、41.22%~44.76%、46.98%~50.32%。最终, 综合性能因子  $\eta_1$  提升 44.22%~81.29%, 综合性能因子  $\eta_2$  提升 3.15%~21.15%。在 4 种肋片构型中, 反 V 肋展现出最佳的减阻效果, 因而最高的综合换热性能提升。

2) 基于多级设计思想, 肋片高度沿流动方向线性减小, 逐渐减小的堵塞比促使主流产生下压效应, 可以一定程度上限制二次流发展, 并增强流体再附着冲击强度。此外, 肋片尺寸的减小意味着肋化通道减弱的二次流, 减弱了冷热流体掺混。

本文的研究进一步证实, 多级设计能够在轻微损失换热性能的基础上, 实现流动阻力的大幅下降, 为发展低阻高效的涡轮叶片内冷技术提供了可行的解决方案。需要指出的是, 采用多级设计, 线性减少量和初始肋片高度等参数对肋化通道流动换热性能也具有显著影响。未来, 仍然需要采用多目标优化算法优化多级设计概念在肋化内冷通道方面的应用, 明确主要的影响参数, 进一步改进肋化内冷通道冷却性能。

### 参考文献:

- [1] HAN J C, DUTTA S, EKKAD S. Gas turbine heat transfer and cooling Technology[M]. Boca Raton: CRC Press, 2012.
- [2] HAN J C. Advanced cooling in gas turbines 2016 max Jakob memorial award paper[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2018, 140(11): 113001.
- [3] YERANEE K, RAO Yu. A review of recent studies on rotating internal cooling for gas turbine blades[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(7): 85-113.
- [4] LI Xin, XIE Gongnan, LIU Jian, et al. Parametric study on flow characteristics and heat transfer in rectangular channels with strip slits in ribs on one wall[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 149: 118396.
- [5] 苏生, 胡捷, 刘建军, 等. 交替大小肋片方腔通道内换热性能的数值模拟[J]. *航空动力学报*, 2008, 23(12): 2274-2279.  
SU Sheng, HU Jie, LIU Jianjun, et al. Numerical simulation on heat transfer in duct roughened by periodic alternate scale ribs[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(12): 2274-2279. (in Chinese)

- [6] RAO Yu, ZHANG Peng, XU Yamin, et al. Experimental study and numerical analysis of heat transfer enhancement and turbulent flow over shallowly dimpled channel surfaces[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 160: 120195.
- [7] XIE Yonghui, SHI Dongbo, SHEN Zhongyang. Experimental and numerical investigation of heat transfer and friction performance for turbine blade tip cap with combined pin-fin-dimple/protrusion structure[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 104: 1120-1134.
- [8] LEE J, REN Zhong, LIGRANI P, et al. Crossflows from jet array impingement cooling: hole spacing, target plate distance, Reynolds number effects[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2015, 88: 7-18.
- [9] HAN J C, ZHANG Y M, LEE C P. Augmented heat transfer in square channels with parallel, crossed, and V-shaped angled ribs[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1991, 113(3): 590-596.
- [10] PARK J S, HAN J C, HUANG Y, et al. Heat transfer performance comparisons of five different rectangular channels with parallel angled ribs[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1992, 35(11): 2891-2903.
- [11] 李建华, 宋双文, 杨卫华, 等. 不同结构肋化通道对流换热特性的试验[J]. 航空动力学报, 2007, 22(10): 1663-1666.  
LI Jianhua, SONG Shuangwen, YANG Weihua, et al. Study of convective heat transfer in channels with different geometrical ribs [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2007, 22(10): 1663-1666. (in Chinese)
- [12] KAMALI R, BINESH A R. The importance of rib shape effects on the local heat transfer and flow friction characteristics of square ducts with ribbed internal surfaces[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2008, 35(8): 1032-1040.
- [13] 邱庆刚, 王海鹏, 赵亮, 等. 楔形肋片内冷通道传热与流动阻力特性[J]. 航空动力学报, 2011, 26(12): 2648-2654.  
QIU Qinggang, WANG Haipeng, ZHAO Liang, et al. Heat transfer and friction behavior in internal cooling duct with cuniform-fins [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2011, 26(12): 2648-2654. (in Chinese)
- [14] XIE Gongnan, LIU Xueting, YAN Hongbin, et al. Turbulent flow characteristics and heat transfer enhancement in a square channel with various crescent ribs on one wall[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 115: 283-295.
- [15] 吴榕, 缪克克, 侯昶. 涡轮叶片通道内部 V 型间断肋的传热特性研究[J]. 航空动力学报, 2023, 38(12): 2817-2828.  
WU Rong, MIAO Keke, HOU Chang. Study on heat transfer characteristics of V-shaped discrete ribs in turbine blade passage[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2023, 38(12): 2817-2828. (in Chinese)
- [16] 朱强华, 崔苗, 高效伟. 带斜孔肋大宽高比矩形通道的强化传热特性[J]. 航空动力学报, 2016, 31(4): 780-787.  
ZHU Qianghua, CUI Miao, GAO Xiaowei. Enhanced heat transfer characteristics in a large aspect ratio rectangular channel with inclined perforated rib[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(4): 780-787. (in Chinese)
- [17] 李彦霖, 饶宇, 王德强. 涡轮叶片冷却通道高性能微小肋湍流传热的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(10): 2271-2279.  
LI Yanlin, RAO Yu, WANG Deqiang. Numerical study on turbulent heat transfer of miniature ribs in turbine blade internal passage [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2018, 39(10): 2271-2279. (in Chinese)
- [18] ZHANG Dawei, LI Haiwang, TIAN Yitu, et al. Effects of a high Reynolds number and rotation on the leading-edge heat transfer of a ribbed cooling channel with a cross-section consisting of a semicircle and a rectangle[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 188: 122646.
- [19] LIGRANI P M, OLIVEIRA M M, BLASKOVICH T. Comparison of heat transfer augmentation techniques[J]. *AIAA Journal*, 2003, 41(3): 337-362.
- [20] ZHENG Shaofei, LIU Guoqing, LIAN Wenkai, et al. Fluid flow and heat transfer in a rectangular ribbed channel with a hierarchical design for turbine blade internal cooling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 217: 119183.
- [21] LIU Jian, HUSSAIN S, WANG Wei, et al. Heat transfer enhancement and turbulent flow in a rectangular channel using perforated ribs with inclined holes[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2019, 141(4): 041702.
- [22] ZHANG Guohua, SUNDÉN B, XIE Gongnan. Combined experimental and numerical investigations on heat transfer augmentation in truncated ribbed channels designed by adopting fractal theory[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2021, 121: 105080.

(编辑: 王碧琚)