

不同射流配置下燃气轮机涡轮叶片楔形矩阵肋通道耦合传热特性

俞滨烨¹, 李邢伟¹, 李杰¹, 卜诗^{1,2}

(1. 常州大学机械与轨道交通学院, 江苏常州 213164; 2. 江苏省绿色过程装备重点实验室, 江苏常州 213164)

摘要:为解决船用燃气轮机高温涡轮叶片尾缘受冷却空间布置限制而承受较高热负荷的问题,将楔形矩阵肋冷却结构应用于涡轮叶片尾缘,通过“流-固-热”耦合数值模拟,讨论4种不同进气方向的射流配置方案的传热特性、冷却效率及冷却均匀性和流动特性。结果表明:通过优化射流设计,“底进+侧出+顶出”的方案传热性能可提高7%~80%。温度梯度引起的热应力不超过3.1%,相对温度偏差不超过8%,进一步说明了矩阵肋结构在调节冷却均匀性方面有较好的优势;同时,方案对速度大小的分布产生了不同的影响,“底进”设计产生的流速明显高于侧进的设计,纵向涡在形成高协同角的流场中起着至关重要的作用。

关键词:矩阵肋;耦合传热;楔形通道;传热特性;数值模拟

中图分类号:TK221

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.04.004

[引用本文格式]俞滨烨,李邢伟,李杰,等.不同射流配置下燃气轮机涡轮叶片楔形矩阵肋通道耦合传热特性[J].热能动力工程,2025,40(4):33-41. YU Binye, LI Xingwei, LI Jie, et al. Conjugate heat transfer characteristics in wedged latticework cooling ducts with different ejection flow for gas turbine blades[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(4): 33-41.

Conjugate Heat Transfer Characteristics in Wedged Latticework Cooling Ducts with Different Ejection Flow for Gas Turbine Blades

YU Binye¹, LI Xingwei¹, LI Jie¹, BU Shi^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering and Rail Transit, Changzhou University, Changzhou, China, Post Code: 213164;

2. Jiangsu Key Laboratory of Green Process Equipment, Changzhou, China, Post Code: 213164)

Abstract: In order to solve the problem of the high-temperature turbine blade trailing edge of a marine gas turbine, which is subject to significant heat load due to the constraints in cooling space arrangement, the wedge-shaped latticework cooling structure was employed for the turbine blades trailing edge. Using "fluid-solid-thermal" coupled numerical simulations, the heat transfer behaviors, cooling efficiency, cooling uniformity and flow characteristics in four different intake jet configuration schemes were discussed. The result indicates that the "bottom inlet, lateral outlet plus top outlet" scheme's heat transfer performance can be improved by 7% to 80% via optimizing ejection flow design. The thermal stress caused by temperature gradient is no more than 3.1% and relative temperature deviation is no more than 8%, indicating the advantage of latticework in regulating cooling uniformity. At the same time, distribution of velocity magnitude is accordingly affected by different ejection flow configuration schemes, flow rate caused by "bottom inlet" design is significantly higher than that of "lateral inlet" design, and the longitudinal vortexes play an essential role in creation of highly synergy angle flow field.

收稿日期:2024-05-20; 修订日期:2025-01-07

基金项目:国家自然科学基金项目(52201352)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(52201352)

作者简介:俞滨烨(2000-),女,常州大学硕士研究生.

通信作者:卜诗(1988-),男,常州大学副教授.

Key words: latticework, conjugate heat transfer, wedged duct, heat transfer characteristics, numerical simulation

引 言

燃气轮机是现代船舶上的一种重要动力装置,提升涡轮进口温度是提高现代燃气轮机输出功率和热效率的关键^[1]。如今,涡轮叶片工作的环境温度已远超叶片材料的熔点温度,因此,必须采用先进的冷却技术对叶片进行保护。常见的冷却系统包括产生强制对流和冲击传热的内部通道以及覆盖叶片外表面的气膜^[2]。Han 等人^[3]对燃气轮机的多种冷却技术进行了全面总结,为当代研究者提供了系统参考。叶片尾缘是冷却设计中的难点之一,因为与叶片前缘和中弦区域相比,尾缘厚度薄,更易引起热失效。

针翅阵列和带肋通道是应用于涡轮叶片尾缘区域的传统冷却结构^[4-9]。然而,这两类结构不仅在强化传热能力本身的提升上存在瓶颈,而且难以形成更高的尾缘结构强度。矩阵肋是一种具有更高强化传热能力且能为叶片提供更高结构强度的冷却构造,已应用于涡轮叶片的中弦区域。Bu 等人^[10-11]通过实验测得矩阵肋冷却通道中的努塞尔数分布和压降,结合数值模拟分析了其中的流动和传热细节,提出采用端壁槽道和针翅阵列可显著提高通道传热的均匀性,并通过结构寻优提升了矩阵肋结构的总体性能。然而,目前针对矩阵肋的研究多集中于平直模块通道,对矩阵肋应用于尾缘时受叶片型线约束而产生的楔形结构涉及有限。Saha 等人^[12]测试了渐缩矩阵肋结构的表面传热系数和压降,发现在一定雷诺数范围内,矩阵肋的总体热性能高于针翅结构,充分说明矩阵肋应用于尾缘具有一定的潜力。

以上研究尚有不足,一方面,耦合传热研究对叶片内部复杂结构进行了过度简化而使传热结构失真^[13-14];另一方面,基于真实复杂冷却结构的研究仅关注了气动性能和表面传热系数,却忽略了固体部分热传导的影响^[15-16]。本文对矩阵肋结构应用

于叶片尾缘时的耦合传热性能进行了数值模拟研究,计算中考虑了尾缘的楔形构造及真实复杂的内部情况,并对不同射流配置方案进行了详细的对比分析。

1 计算模型

1.1 楔形矩阵肋几何结构及射流配置方案

图 1 为楔形矩阵肋的物理模型示意图,通道具有统一的空间约束。

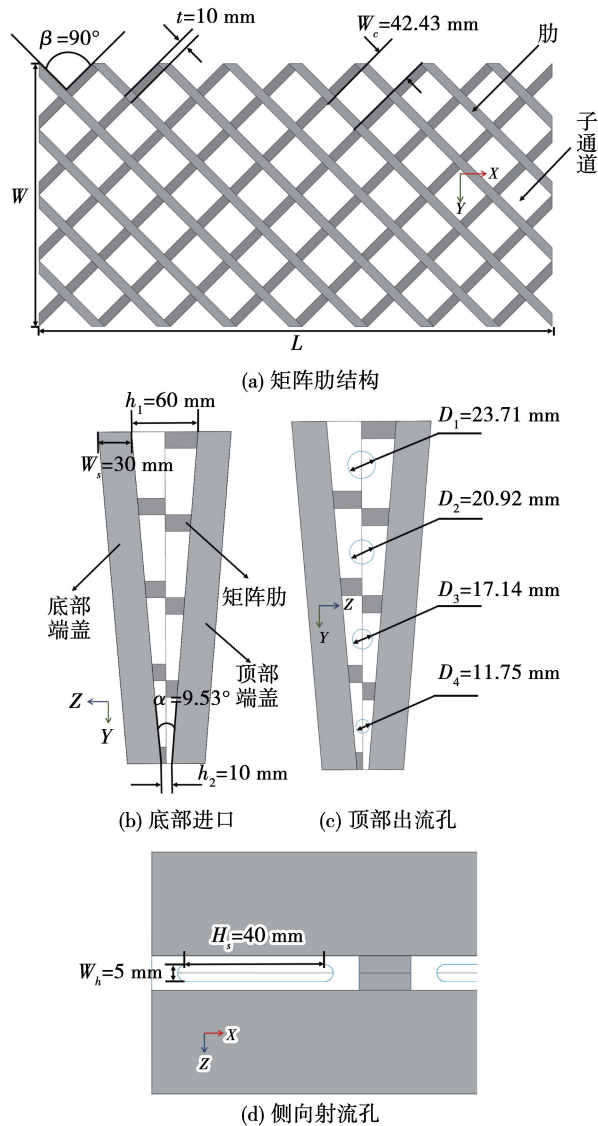


图 1 物理模型的尺寸参数

Fig. 1 Dimension parameters of physical model

图 1 中,矩阵肋结构总长 $L=585\text{ mm}$,总宽 $W=300\text{ mm}$,楔角 $\alpha=9.53^\circ$,宽端高度 $h_1=60\text{ mm}$,窄端高度 $h_2=10\text{ mm}$,上下端盖厚度 $W_s=30\text{ mm}$,肋宽度 $t=10\text{ mm}$,肋间距 $W_c=42.43\text{ mm}$,肋交叉角 $\beta=90^\circ$;8 个侧向射流孔大小及间距相等,其高度 $W_h=5\text{ mm}$,长度 $H_s=40\text{ mm}$;4 个顶部出流孔间距相等,孔径分别为: $D_1=23.71\text{ mm}$ 、 $D_2=20.92\text{ mm}$ 、 $D_3=17.14\text{ mm}$ 、 $D_4=11.75\text{ mm}$ 。4 种典型射流配置方案如图 2 所示,方案 1 为“底进 + 侧出”,方案 2 为“侧进 + 侧出”,方案 3 为“底进 + 侧出 + 顶出”,方案 4 为“底进 + 侧进 + 侧出 + 顶出”。

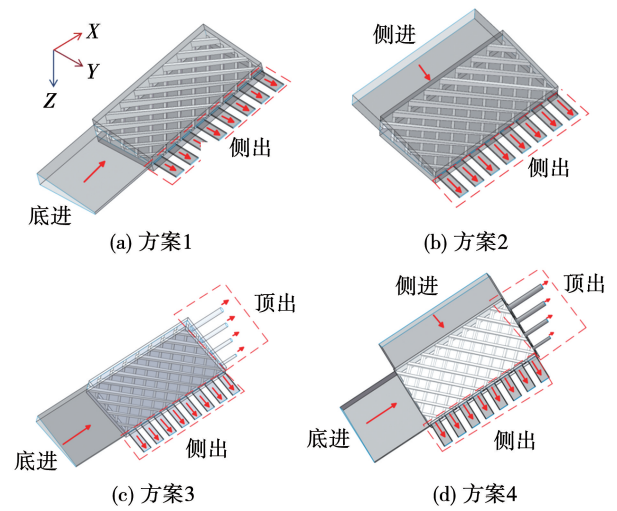


图 2 射流配置方案

Fig. 2 Ejection flow configuration schemes

1.2 网格划分及其无关性验证

鉴于矩阵肋结构的高度复杂性,采用 ANSYS FLUENT 软件内置的 Meshing 模块进行多面体网格划分,这种划分方法能获得相较四面体网格更少的单元总数和更高的计算精确度,在文献[17-19]中的传热数值模拟研究中都有应用。本文的 4 个配置方案,在整个计算域(包括固体域及流体域)都采用多面体非结构化网格划分,并在流-固交界面的流域部分采用棱柱层进行网格细化,第一层网格纵横比为 14,共设 8 层,增长比为 1.2。考虑到方案 4 涵盖 4 种射流配置方案的全部情况,因而只展示了该方案的网格划分情况,图 3(a)和图 3(b)分别为配置方案 4 的流体域和固体域的全域网格及局域网格。通过放大①~③区域,可以清楚的看

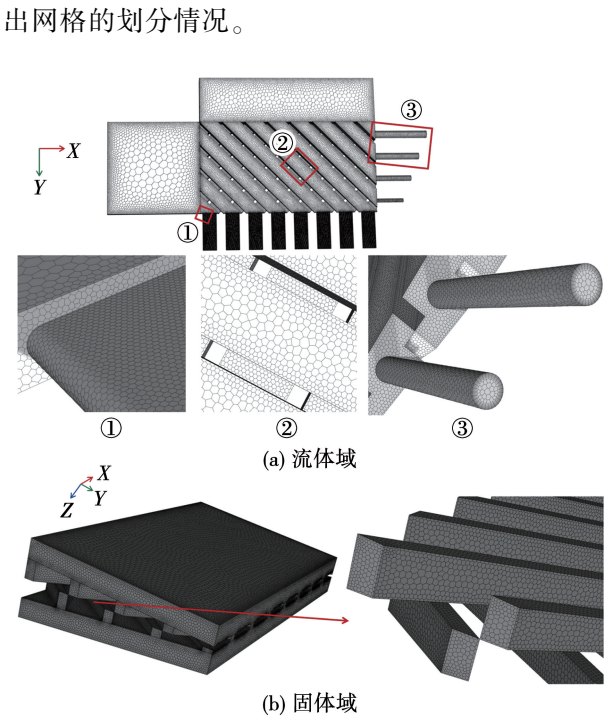


图 3 方案 4 网格划分

Fig. 3 Mesh divisions in scheme 4

选取方案 2 进行网格无关性验证,由于 4 种射流配置方案拥有相同的拓扑结构,因而所得到的网格数适用于其他配置。选用方案 2 顶部端盖与流域交接处 7 个通道的表面平均努塞尔数 $\overline{Nu}$ 分布作为衡量指标,网格无关性验证如图 4 所示。可以发现:当网格总数增加到 361 万以上时,数值结果趋于稳定,因此采用网格数为 361 万的网格尺度对 4 种射流配置方案进行网格划分。

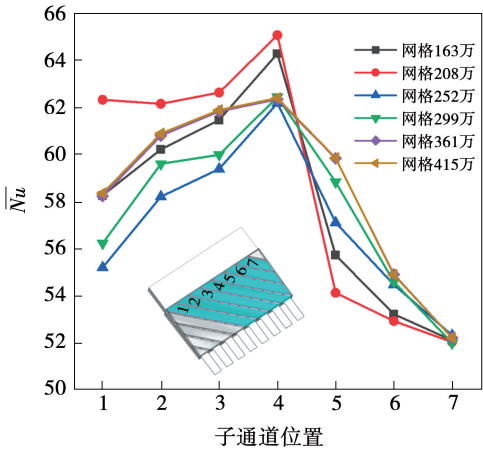


图 4 网格无关性验证

Fig. 4 Mesh independence verification

1.3 数值计算方法及边界条件设置

基于实际工况环境,本文将方案 1 底部、方案 2 侧向和方案 3 底部的入口质量流量设定为 0.19 kg/s 。为确保 4 个方案的总入口质量流量相等,将方案 4 的底部和侧向入口质量流量均设定为 0.095 kg/s ,入口总温 680 K ,湍流强度 5% ,出口为压力出口。在这样的设定下,通道入口雷诺数 $Re_{\text{in}} = 37\,835$ 。所有的流-固交界壁面均为耦合边界条件,固体外壁面设为第三类边界条件,给定对流传热系数 $3\,000 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$,主流参考温度为 $1\,600 \text{ K}$,进出口延长段壁面为绝热面。冷却工质为理想气体,其热导率采用 kinetic-theory,比定压热容为 $1071 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$;动力粘度采用 Sutherland 定律计算,参考粘度 $0.000\,017\,16 \text{ Pa} \cdot \text{s}$;参考温度 273.11 K ,有效温度 110.56 K 。固体采用镍基合金,材料密度为 $8\,810 \text{ kg/m}^3$,比热为 $753 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$,热导率为 $22.7 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 。在 ANSYS FLUENT 中进行求解运算,使用更为准确的 Coupled 算法,压力离散格式设置为二阶迎风式,动量、能量、湍流动能等均设置为二阶迎风式。松弛因子的初始设定范围为 $0.2 \sim 1$,并在计算过程中根据收敛性进行适当调整。

1.4 湍流模型验证

将 5 种常用湍流模型:Realizable $k-\varepsilon$ 、Standard $k-\varepsilon$ 、SST $k-\omega$ 、Standard $k-\omega$ 、SST 的计算结果与 Carcasci 等人^[20]的渐缩矩阵肋通道传热实验数据进行定量对比。选取其中的四通道模型完成不同雷诺数 Re 工况下的数值模拟,图 5 为子通道热分布图,图中纵坐标 Nu/Nu_0 为强化传热系数。如图 5 所示,SST $k-\omega$ 湍流模型的数值计算结果与实验数据相比仅相差 5% ,说明该湍流模型对表面传热系数具有相对更好的预测精度。同时,对于固定的基体强化传热结构,材料的温度分布主要取决于对流传热,因此,本文对 4 种射流配置方案进行耦合传热计算时,流动部分统一采用 SST $k-\omega$ 模型。

1.5 参数定义

矩阵肋通道入口处的水力直径 D_h 为:

$$D_h = \frac{4S}{C} \quad (1)$$

式中: S —通道入口的面积, m^2 ; C —通道入口的周长, m 。

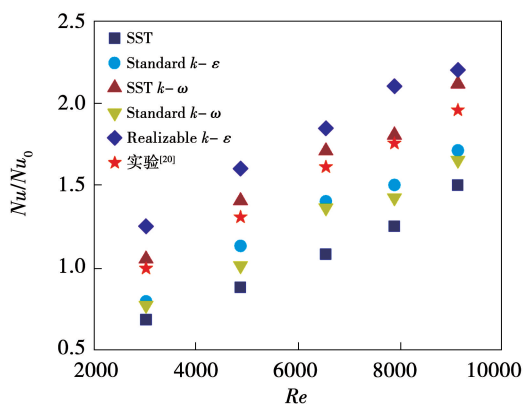


图 5 子通道传热分布(模型验证)

Fig. 5 Sub-channel heat transfer distribution (model validation)

在恒定雷诺数下,可以通过对不同设计的光滑管道性能进行归一化,其定义为:

$$Re = \frac{V_{\text{in}} D_h}{\nu} \quad (2)$$

式中: V_{in} —空气入口流速, m/s ; ν —空气运动粘度, m^2/s 。

通道内的摩擦 f 定义为:

$$f = \frac{\Delta p}{4(L_s/D_h)(1/2)\rho V_{\text{in}}^2} \quad (3)$$

式中: Δp —质量平均入口及质量平均出口之间的压力差, Pa ; L_s —通道长度, m ; ρ —空气密度, kg/m^3 。

摩擦系数比 f/f_0 由方程 Karman-Nikurade equation^[17]归一化获得:

$$f_0 = 2(2.236 \ln Re - 4.639)^{-2} \quad (4)$$

努塞尔数 Nu 表征对流换热的强烈程度,即:

$$Nu = \frac{h D_h}{\lambda} \quad \text{其中, } h = \frac{q}{T_m - T_w} \quad (5)$$

式中: h —表面传热系数, $\text{W/(m}^2 \cdot \text{K)}$; λ —空气导热系数, $\text{W/(m} \cdot \text{K)}$; q —固体与流域之间的热通量, W/m^2 ; T_m —矩阵冷却通道进出口之间的气体平均温度, K ; T_w —壁面的温度, K 。

为了分析不同配置的传热性能,将 Nu 无量纲化,将实际努塞尔数与光滑通道充分发展湍流的努塞尔数的比值 Nu/Nu_0 定义为强化传热系数。对于光滑通道内充分发展流动, Nu_0 的计算采用 Dittus-Boelter 经验公式^[21]:

$$Nu_0 = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (6)$$

综合热效率 TPF 定义为:

$$TPF = (Nu/Nu_0) \times (f/f_0)^{-1/3} \tag{7}$$

2 结果与分析

2.1 传热特性

图 6 为不同射流配置方案的热力性能参数,方案 1 和方案 3 的 Nu/Nu_0 水平明显高于方案 2 和方案 4 的 Nu/Nu_0 水平,表明“底进”的传热比“侧进”的传热强得多。此外,将方案 3 与其他 3 个方案相比,可发现 Nu/Nu_0 提高了 7% ~ 80%,说明流体流动对冷却性能的影响很大。更高的传热并不一定会带来更大的压力损失,因为方案 1 和方案 3 的摩擦系数比 f/f_0 低于方案 2 和方案 4,这说明传热效率受射流配置影响很大。如表 1 可知,综合热效率 TPF 与固体材料的温降密切相关。

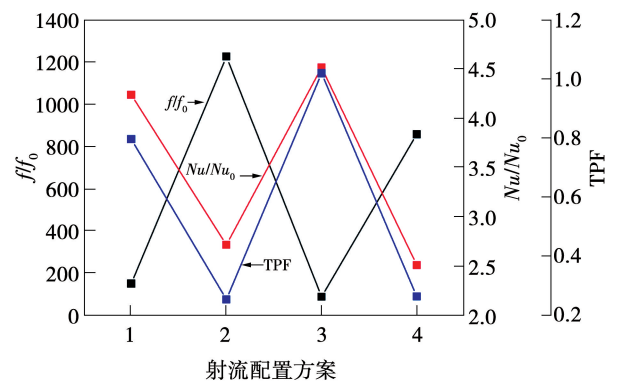


图 6 不同射流配置方案的热力性能参数
Fig. 6 Thermo-hydrodynamic parameters in different ejection configuration schemes

表 1 不同射流配置方案下固体温度

Tab. 1 Solid temperature in different ejection flow configuration schemes			
方案	最低温度 T_{min}/K	平均温度 T_{ave}/K	最高温度 T_{max}/K
1	1 041.00	1 499.58	1 599.53
2	1 261.52	1 522.86	1 599.31
3	1 027.82	1 491.27	1 598.54
4	1 114.75	1 527.20	1 598.81

图 7 为不同射流配置方案下矩阵肋温度分布云图。局部材料温度在很大程度上取决于冷却工质的流动方向,左下角往往比右上角冷却效果更佳。同时,表 1 给出了固体全域最高温度 T_{max} 、平均温度 T_{ave} 和最低温度 T_{min} 之间的比较。可以看出,由于气

膜冷却孔不在本研究范围内,因此 T_{max} 始终接近于主流气体温度,四者几乎没有差别。然而, T_{ave} 和 T_{min} 差异较大,方案 1 和方案 3 的冷却性能相较于方案 2 和方案 4 更优异,表明“底进”的设计优于“侧进”的设计。比较方案 1 和方案 3,可以发现在保留“底进 + 侧出”的基础上增加“顶出”更有助于降低材料温度,这与图 6 的结果相对应。值得注意的是,只有 T_{ave} 和 T_{min} 可以通过更好的内部冷却设计实现降低,但如果要降低 T_{max} ,则必须考虑气膜冷却。

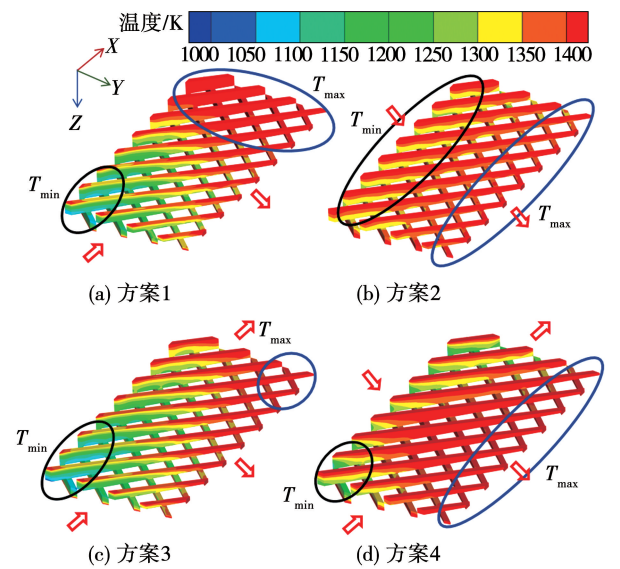


图 7 矩阵肋温度分布云图
Fig. 7 Latticework temperature distribution contours

图 8 为不同射流配置方案下所有流 - 固耦合面的 Nu/Nu_0 水平,包括矩阵肋、顶部端壁和底部端壁。

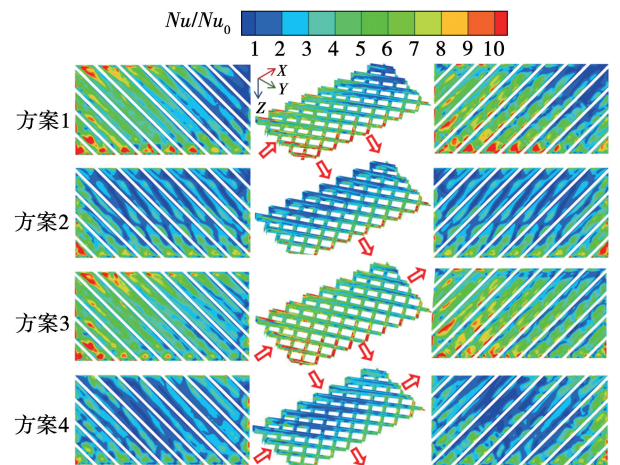


图 8 流 - 固耦合面的强化传热水平
Fig. 8 Heat transfer enhancement level on fluid-solid coupled interfaces

方案 1 和方案 3 的整体传热水平要高于方案 2 和方案 4。4 个方案的端壁和矩阵肋都拥有一定的传热效果,说明了矩阵肋结构在传热均匀性上有一定的优势。值得注意的是,在方案 1 和方案 3 中,有超过 10 的超高强化传热水平,该部分主要集中在发生转换流和层间传质区域,而这些在方案 2 和方案 4 中是随着侧向出流方向逐渐消失的。此外,增加射流孔能对矩阵肋结构产生一定的吸力作用,从而增强局部传热,这种效应在顶部出流的设计工况中比在侧向出流的设计工况中更为显著。

2.2 冷却效率及其均匀性

较高的冷却效率代表较好的冷却性能。冷却效率 η 的定义为:

$$\eta = \frac{T_g - T_i}{T_g - T_{in}} \tag{8}$$

式中: T_g —主流燃气温度,K; T_{in} —冷却工质入口温度,K; T_i —当地材料温度,K。

冷却均匀性是影响叶片寿命的一个重要因素,因为过大的温度梯度可能会导致热失效。采用相对温度偏差 C_T 来评估典型横截面的冷却均匀性,从而进行定量分析。相对温度偏差 C_T 公式定义为:

$$C_T = \frac{\sigma}{T_a} \times 100\% \tag{9}$$

其中, $\sigma = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - T_a)^2 \right]^{0.5}$

式中: T_a —材料平均温度,K; σ —标准温度偏差,K。

图 9 为典型固体截面的热力性能。图 9(a) 和图 9(b)沿着矩阵肋结构方向提取了 6 个典型的横截面:位置 1, $X_1/L = 19/78$;位置 2, $X_2/L = 39/78$;位置 3, $X_3/L = 59/78$;位置 4, $Y_1/W = 1/4$;位置 5, $Y_2/W = 1/2$;位置 6, $Y_3/W = 3/4$,用来说明 η 分布。 η 由内而外逐渐降低,其中矩阵肋具有较高的冷却效率,而顶部和底部端盖的冷却效率较低,这是由冷/热源的位置引起的。此外,方案 1 和方案 3 的冷却效率高于方案 2 和方案 4,这与上述分析一致。

较低的 C_T 代表较好的冷却均匀性,由图 9(c)可知,冷却效率较低的方案 2 和方案 4 的相对温度偏差 C_T 低于冷却效率较高的方案 1 和方案 3。可见,整体冷却效率越低,冷却均匀性越好。

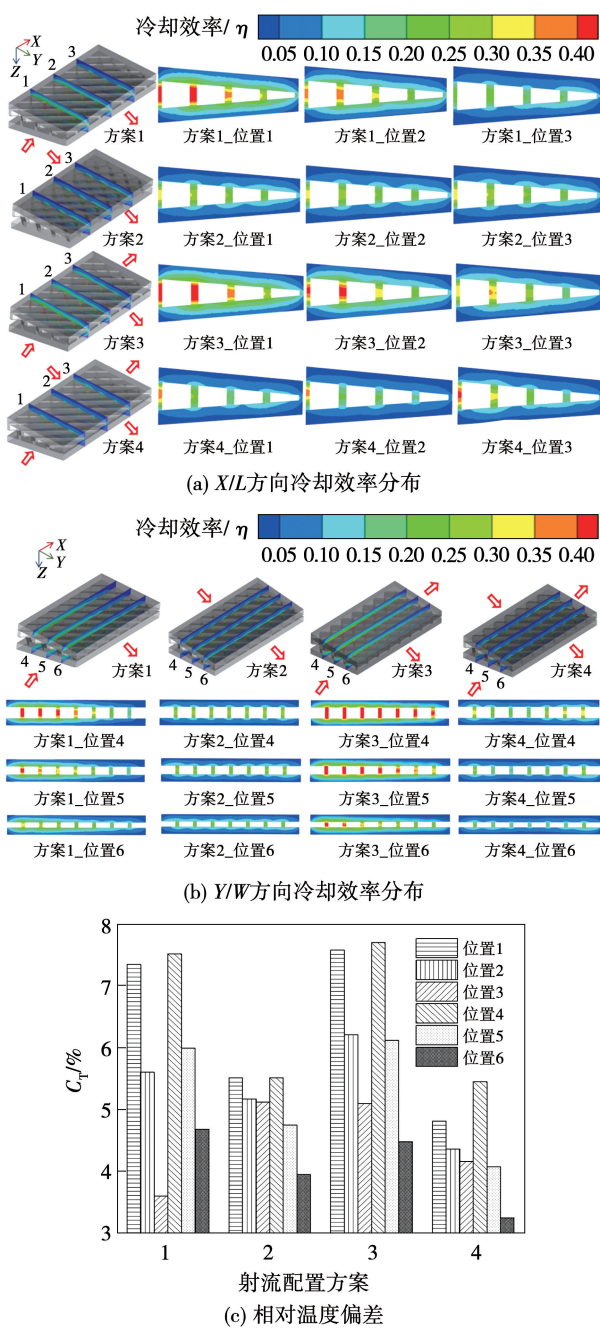


图 9 典型固体截面的热力性能

Fig. 9 Thermal performance on typical solid sections

表 2 给出了不同射流配置方案下固体热力学计算结果。在“侧进”的情况下,方案 2 和方案 4 拉应力和压应力都相对较低,冷却均匀性较好。此外,温度梯度引起的热应力变化不超过 3.1%,表明矩阵肋结构在调节冷却均匀性方面有较好的优势。

表2 不同射流配置方案的固体热应力比较

Tab.2 Solid thermal stress comparison in different ejection configuration schemes

方案	压应力/MPa	平均应力/MPa	拉应力/MPa
1	-100.480 0	-2.155 1	55.690 0
2	-100.323 8	-2.073 5	54.411 3
3	-100.585 0	-2.177 6	55.996 3
4	-100.302 5	-2.036 8	54.302 5

2.3 流动特性

图10为矩阵肋子通道中的流场。选取具有代表性的2个子通道截面,通过可视化速度和流线来分析其流动特性。

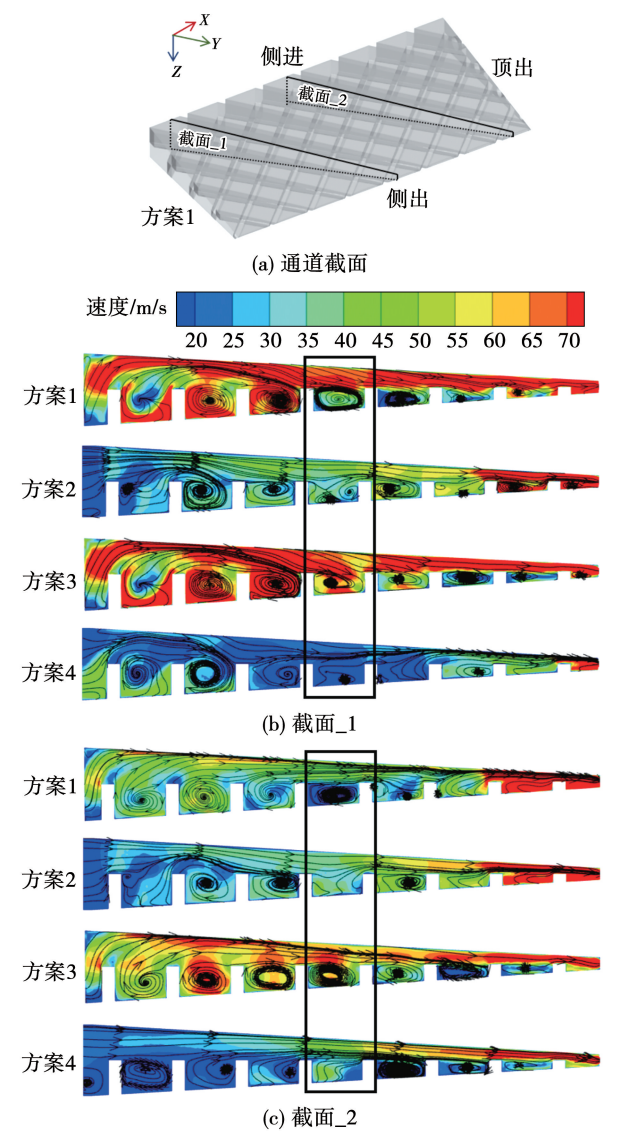


图10 矩阵肋子通道中的流场

Fig. 10 Flow fields in latticework sub-duct

由图可见,不同的射流配置对速度大小的分布产生了强烈的影响,“底进”的设计产生的速度明显高于“侧进”的设计,从而在流-固交界面上产生更高的传热。纵向涡阵列是由矩阵肋结构产生的,然而在方案2和方案4中(黑框标出),这种涡流部分消失,这是因为“侧进”的设计会使得冷却工质在通道中转弯的几率降低。

涡识别采用方程(10)定义的 Ω 方法:

$$\Omega = \frac{\|B\|_F^2}{\|A\|_F^2 + \|B\|_F^2 + \varepsilon} \tag{10}$$

式中: A —涡流的对称涡张量; B —涡流的反对称涡张量; ε —取值0.000 1; Ω 取值0.52^[22]。

通过以协同角 θ 为特征的可视化涡流,研究了矩阵肋结构的热力性能。一般来说,协同角越小,对流传热效果越好。图11展示了以协同角 θ 为特征的可视化涡流在不同射流配置方案下矩阵肋通道顶部出流段的比较。

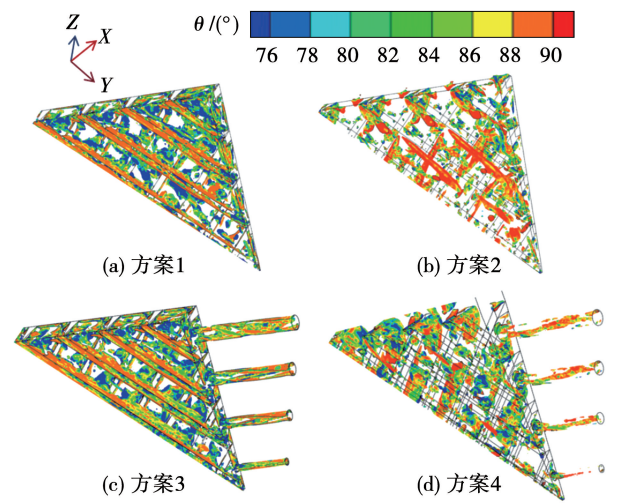


图11 以协同角 θ 为特征的可视化涡流在不同射流配置方案下矩阵肋通道顶部出流段的比较

Fig. 11 Comparison of top outflow of latticework duct for visualizing vortex characterized by synergy angle θ in different ejection flow configuration schemes

由图可知,方案2和方案4相对方案1和方案3的涡流更加稀疏,从而不可避免地导致这些区域的传热降低,这与上述讨论相一致。纵向涡在在形成高协同角的流场中起着至关重要的作用,因此,方案1和方案3的协同角相较方案2和方案4的协同角更低,从而传热性能也更高。

3 结 论

对船用燃气轮机涡轮叶片尾缘的矩阵肋结构进行了计算研究,依据真实叶片构造设计出 4 种不同的射流配置方案。在“流-固-热”耦合的基础上,从传热特性、冷却效率及其均匀性和流动特性三大角度进行对比分析。主要结论如下:

(1) “底进”的设计相较于“侧进”的设计传热水平更强,综合热效率 TPF 与固体温降密切相关。同时,“底进+顶出+侧出”的配置性能最优,固体冷却水平最高,相比于其他配置可以提升 7%~80%。

(2) 拥有较高冷却效率的“底进”设计其冷却均匀性较差。温度梯度引起的热应力变化不超过 3.1%,相对温度偏差不得超过 8%,表明矩阵肋结构在调节冷却均匀性方面有较好的优势。

(3) 不同的射流设计对速度大小的分布产生了强烈的影响,“底进”设计产生的流速明显高于“侧进”的设计,从而在流-固耦合面产生更高的传热,纵向涡在形成高协同角的流场中起着至关重要的作用。

参考文献:

- [1] 宋汉江,刘云生,关涛,等.舰艇常规动力装备体系发展综述[J].舰船科学技术,2022,44(13):122-125.
SONG Hanjiang, LIU Yunsheng, GUAN Tao, et al. Summary of the development of conventional naval power equipment system[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(13): 122-125.
- [2] 周旭,于子杰,韩蕊,等.冷却空气量对涡轮冷却性能影响综述[J].热能动力工程,2023,38(12):76-83.
ZHOU Xu, YU Zijie, HAN Rui, et al. Review of the effect of cooling air volume on turbine cooling performance[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(12): 76-83.
- [3] HAN J C, DUTTA S, EKKAD S. Gas turbine heat transfer and cooling technology[M]. Boca Raton: CRC Press, 2012.
- [4] LING C, MIN C, XIAO Y. Three dimensional numerical investigation on the effect of wedge angle of a passage with pin-fin arrays[J]. Journal of Thermal Science, 2004, 13: 138-142.
- [5] VAN FOSSEN G J. Heat-Transfer coefficients for staggered arrays of short pin fins[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1982, 104(2): 268-274.
- [6] ARMELLINI A, CASARSA L, MUCIGNAT C. Experimental assessment of the aero-thermal performance of rib roughened trailing edge

- cooling channels for gas turbine blades[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 58: 455-464.
- [7] BENIAICHE A, GHENAIET A, CARCASI C, et al. Heat transfer investigation in new cooling schemes of a stationary blade trailing edge[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 87: 816-825.
- [8] 刘锐,税琳棋,王新军,等.带肋矩形直通道内的冷却空气换热特性研究[J].热能动力工程,2011,26(5):543-546.
LIU Rui, SHUI Linqi, WANG Xinjun, et al. Study of the heat exchange characteristics of the cooling air inside a straight ribbed rectangular channel[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2011, 26(5): 543-546.
- [9] 李皓璠,云雪.涡轮叶片带肋通道换热性能数值和试验研究[J].西北工业大学学报,2023,41(4):750-756.
LI Haofan, YUN Xue. Numerical simulation and experimental investigation of heat transfer performance of turbine blade with ribbed channel[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2023, 41(4): 750-756.
- [10] BU S, YANG Z, ZHANG W, et al. Research on the thermal performance of matrix cooling channel with response surface methodology[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 109: 75-86.
- [11] BU S, YANG L, QIU H, et al. Effect of sidewall slots and pin fins on the performance of latticework cooling channel for turbine blades[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 117: 275-288.
- [12] SAHA K, ACHARYA S, NAKAMATA C. Heat transfer enhancement and thermal performance of lattice structures for internal cooling of airfoil trailing edges[J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2013, 5(1): 011001.
- [13] KHADSE A, CURBELO A, VESELY L, et al. A numerical study on conjugate heat transfer for supercritical CO₂ turbine blade with cooling channels[C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2020, 84232; V011T31A007.
- [14] 杜长河,高银峰,李洪伟,等.不同冷气/燃气温比下高温涡轮叶片旋流冷却流固耦合特性研究[J].热能动力工程,2023,38(8):27-33.
DU Changhe, GAO Yinfeng, LI Hongwei, et al. Study on fluid-structure coupling characteristics of gas turbine blade swirl cooling under different coolant-gas temperature ratios[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(8): 27-33.
- [15] 叶绿,陈显赞,汪翔宇,等.燃气透平叶片尾缘内部冷却通道流动与换热特性研究[J].热能动力工程,2022,37(1):96-104.
YE Lyu, CHEN Xianyun, WANG Xiangyu, et al. Study on flow and heat transfer characteristics in the trailing edge cooling channel of gas turbine blade[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(1): 96-104.
- [16] 黄春光,姚世传,谢海军.透平叶片尾缘冷却结构唇板构型对

流动和传热的影响[J]. 热能动力工程,2019,34(6):47-52.

HUANG Chunguang, YAO Shichuan, XIE Haijun. Effect of the lip configuration of cutback on the flow and heat transfer at turbine blade trailing edge[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2019,34(6):47-52.

[17] BALAFAS G. Polyhedral mesh generation for CFD-analysis of complex structures[J]. Diplomityö. Münchenin teknillinen yliopisto, 2014.

[18] COSTA R, NOBREGA J M, CLAIN S, et al. Efficient very high-order accurate polyhedral mesh finite volume scheme for 3D conjugate heat transfer problems in curved domains[J]. Journal of Computational Physics, 2021, 445:110604.

[19] LIU Y, RAO Y, YANG L, et al. Flow and heat transfer characteristics of double-wall cooling with multi-row short film cooling hole arrangements[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021, 165:106878.

[20] CARCASI C, FACCHINI B, PIEVAROLI M, et al. Heat transfer and pressure drop measurements on rotating matrix cooling geometries for airfoil trailing edges[C]//Turbo Expo; Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2015, 56710:V05AT11A011.

[21] SHEN Z, QU H, ZHANG D, et al. Effect of bleed hole on flow and heat transfer performance of U-shaped channel with dimple structure[J]. International of Heat and Mass Transfer, 2013, 66:10-22.

[22] LIU C, WANG Y, YANG Y, et al. New omega vortex identification method[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2016, 59:1-9.

(姜雪梅 编辑)

(上接第 10 页)

[13] 杨 星, 丰镇平. 一种燃气轮机纳米气溶胶闭式冷却循环系统; CN115199408A[P]. 2022-10-18.

YANG Xing, FENG Zhenping. A gas turbine nano aerosol closed cooling cycle system; CN115199408A[P]. 2022-10-18.

[14] SCHÜLER M, NEUMANN S O, WEIGAND B. Numerical investigations of pressure loss and heat transfer in a 180° bend of a ribbed two-pass internal cooling channel with engine-similar cross-sections[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2010, 224(3):349-361.

[15] KALTEH M, ABBASSI A, SAFFAR-AVVAL M, et al. Experimental and numerical investigation of nanofluid forced convection inside a wide microchannel heat sink[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 36:260-268.

[16] DEPEW C A, FARBAR L. Heat transfer to pneumatically conveyed glass particles of fixed size[J]. Journal of Heat Transfer, 1963, 85(2):164-171.

[17] SHIMIZU A, ECHIGO R, HASEGAWA S, et al. Experimental study on the pressure drop and the entry length of the gas-solid suspension flow in a circular tube[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1978, 4(1):53-64.

[18] METZGER D E, FAN C S, YU Y. Compact heat exchangers; A festschrift for A. L. [M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1990.

[19] FANN S, YANG W J, ZHANG N. Local heat transfer in a rotating serpentine passage with rib-roughened surfaces[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1994, 37(2):217-228.

[20] 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]. Journal of Turbomachinery, 1994, 118(1):20-28.

[21] TASLIM M E, LI T, SPRING S D. Measurements of heat transfer coefficients and friction factors in rib-roughened channels simulating leading-edge cavities of a modern turbine blade[J]. Journal of Turbomachinery, 1997, 119(3):601-609.

[22] HENK T, JOHN L L. A First course in turbulence[M]. Cambridge: The MIT Press, 1972.

[23] HOLMAN J P. Heat transfer, ninth edition[M]. New York: McGraw-Hill, 2002.

[24] JI W T, FAN J F, ZHAO C Y, et al. A revised performance evaluation method for energy saving effectiveness of heat transfer enhancement techniques[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 138:1142-1153.

(姜雪梅 编辑)