

考虑各向异性导热系数的肋壁-气膜冷却 结构流热耦合研究

董良辰, 姜玉廷, 张昊苏, 陈辰霖

(哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:采用数值计算方法开展了肋壁与气膜耦合结构在考虑各向异性导热系数情况下的综合换热特性研究,对比分析了连续肋、光滑和间断肋冷却流通道在各向异性导热系数影响下的综合冷却效率、毕渥数以及气膜与肋壁的相互影响和二者分别对冷却效率的影响。采用平板冷却模型,研究导热系数比为1, 2和5条件下以及主导热方向沿X轴、Y轴和Z轴条件下的综合冷却特性。结果表明:主导热系数的增加对平均综合冷却效率影响不大,但会使冷却分布更加均匀。主导热方向沿Z轴可使平均综合冷却效率提升5%~9%,沿X轴分布的平均综合冷却效率最小且冷却分布更为集中;肋壁的存在可以提高平均综合冷却效率,相较于光滑通道可提高2%~5%,且间断肋作用相较于连续肋更显著;主导热方向沿Z轴时气膜孔出口温度比另两种方向高14~18 K,会对实际气膜冷却效率产生影响;主导热方向沿Z轴时肋面总效率相较于另两种方向高约1.7%,总传热系数约为另两种方向的4.7倍。

关键词:各向异性导热系数;气膜冷却;肋壁通道;流热耦合;数值模拟

中图分类号:V231.1

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.09.002

[引用本文格式]董良辰,姜玉廷,张昊苏,等.考虑各向异性导热系数的肋壁-气膜冷却结构流热耦合研究[J].热能动力工程,2024,39(9):13-22. DONG Liangchen, JIANG Yuting, ZHANG Haosu, et al. Research on conjugate heat transfer and flow of rib and film cooling structures under anisotropic thermal conductivities[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(9):13-22.

Research on Conjugate Heat Transfer and Flow of Rib and Film Cooling Structures under Anisotropic Thermal Conductivities

DONG Liangchen, JIANG Yuting, ZHANG Haosu, CHEN Chenlin

(College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001)

Abstract: Numerical calculations were carried out on the overall heat transfer characteristics of conjugate heat transfer and flow of rib and film cooling structures under anisotropic thermal conductivities. The overall cooling efficiencies, the Biot number, and the interaction of the film cooling with the rib and the effect of both on the cooling under the influence of anisotropic thermal conductivities for cooling channels with continuous rib, smooth and interrupted rib were compared and analyzed. Overall cooling characteristics of different cooling channel models were investigated under the conductivity ratios of 1, 2 and 5 and main thermal conductivity directions along the X, Y and Z axes for flat plane. The results show that the increase of main thermal conductivity coefficients has little effect on the average overall cooling efficiency,

收稿日期:2023-12-25; 修订日期:2024-02-08

基金项目:国家自然科学基金(52071107);中国博士后科学基金(2019M661254, 2021T140147)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (52071107); China Postdoctoral Science Foundation (2019M661254, 2021T140147)

作者简介:董良辰(2000-),男,哈尔滨工程大学硕士研究生。

通信作者:姜玉廷(1987-),男,哈尔滨工程大学副教授。

but makes the cooling distribution more uniform. The average overall cooling efficiency under main thermal conductivity direction along the Z -axis is 5% – 9% higher than any other case, the average overall cooling efficiency under main thermal conductivity direction along the X -axis is the lowest and the distribution of the cooling zone is more concentrated. The ribs can improve the average overall cooling efficiency by 2% to 5% compared with smooth channels, and the interrupted ribs have better performance than continuous ribs. The outlet temperature of the film hole is 14 – 18 K higher under main thermal conductivity direction along the Z -axis than that under the other two directions, and this temperature affects the actual film cooling efficiencies. The total efficiency of the rib is about 1.7% higher under main thermal conductivity direction along the Z -axis compared to that under the other two directions and the total heat transfer coefficient is about 4.7 times higher than that under the other two directions.

Key words: anisotropic thermal conductivity coefficients, film cooling, ribbed channel, conjugate heat transfer and flow, numerical simulation

引 言

近年来,随着燃气轮机性能的不不断提升,对高温涡轮部件的冷却提出了更高的要求。燃气轮机涡轮叶片冷却研究包括冷却结构和高温材料两方面。其中,冷却结构主要包括外部气膜冷却和内部肋壁等多种结构^[1],高温材料研究的一个重要方向则是陶瓷基复合材料的应用^[2]。

针对肋壁 – 气膜耦合结构,国内外已有大量研究。骆剑霞^[3]、Liu 等人^[4]和 Klavetter 等人^[5]分析了考虑横流的带肋内冷通道的肋壁几何参数等对气膜冷却的影响,结果表明,这些因素使内冷通道产生强烈的二次旋流,对气膜冷却有显著的影响。李广超等人^[6]的研究表明,孔 – 肋相对位置对肋壁通道下壁面换热影响最大,而对上壁面影响最小。Peng 等人^[7]的研究表明,V 形肋相较于直肋对气膜冷却的影响更大。Jin 等人^[8]研究了气膜 – 肋壁流热耦合传热特性,结果表明,固体区域内的热传导有助于提高主流和冷流之间的热传递。Zhu 等人^[9]研究了未考虑横流进气的姊妹孔及新月肋的气膜 – 肋壁共轭传热,结果表明,这两种结构有利于提高平板表面综合冷却效率。

陶瓷基复合材料由陶瓷基体和陶瓷纤维构成,其中的陶瓷纤维具有各向异性导热系数特性。侯亚东等人^[10]针对不同编织方式复合材料平板的气膜冷却效率开展了实验研究,结果表明,二维编织的复合材料平板的综合冷却效率最高。Wilkins 等人^[11]的研究表明,扇形气膜孔下陶瓷基复合材料表面编织结构对气膜冷却效率的影响不可忽视。Tu 等

人^[12–14]和杜昆等人^[15]的研究表明,主导热系数较大的方向热量传输能力得到加强,沿不同方向导热系数的变化对气膜冷却有不同的影响。

现有针对涡轮叶片各向异性导热系数的研究往往只考虑了气膜冷却而忽略了其他冷却结构,本文将气膜冷却与肋化通道耦合,在考虑各向异性导热系数下研究了该结构的综合冷却特性,并分析了肋壁和气膜的相互影响,为后续研究提供参考。

1 数值计算方法

1.1 物理模型

研究基于平板肋壁 – 气膜冷却结构开展,物理模型如图 1 所示。定义 X 轴与主流流向一致, Y 轴沿平板展向, Z 轴垂直于平板平面,气膜孔出口中心为坐标原点。气膜孔直径为 D ,模型中的长度单位均基于气膜孔直径无量纲化。 X/D 为沿流向的无量纲长度, Y/D 为沿展向的无量纲长度;主流通道长 $45D$ 、宽 $4D$ 、高 $8D$;冷却通道的长和宽与主流通道一致,高 $4D$ 。气膜孔与主流夹角为 45° ,平板厚度为 D 。

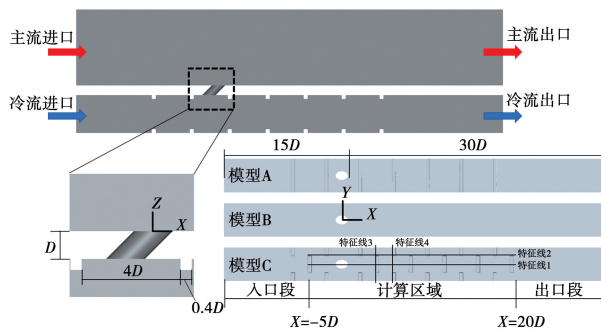


图 1 物理模型

Fig. 1 Physical model

根据带肋情况将冷却流通道分为模型 A、模型 B 和模型 C。其中,模型 A 为带有连续肋冷却流通道,肋宽和肋高均为 $0.4D$,肋间距为 $4D$;模型 B 为光滑冷却流通道;模型 C 为带有基于模型 A 改良的间断肋冷却流通道。入口段和出口段长度为 $10D$,不计入后续数据处理。选取 $Y=0$ 、 $Y=D$ 、 $X=3D$ 和 $X=5D$ 4 条特征线用于结果分析。

1.2 网格划分

使用 ICEM CFD 软件进行结构网格划分,计算网格包含流体域网格和固体域网格,如图 2 所示,对流体域网格各壁面处划分边界层网格,第 1 层边界层高度为 0.01 mm ,增长率为 1.2,确保 y^+ 值满足计算要求。气膜孔附近及其贯穿区域采用 O 型网格切分。固体域网格对肋壁处进行加密处理。

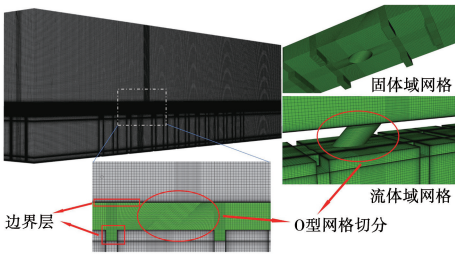


图 2 网格划分

Fig. 2 Mesh generation

图 3 给出了连续肋模型在两种不同主导热方向条件下的 4 种网格数量的平均综合冷却效率计算结果。

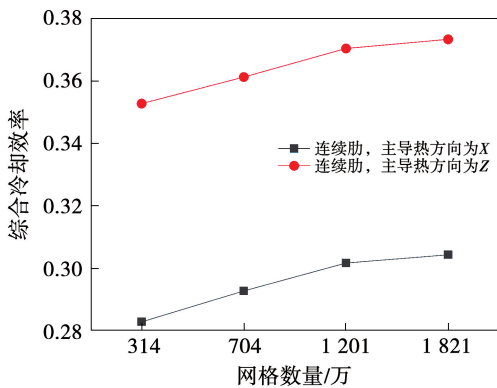


图 3 网格无关性验证

Fig. 3 Mesh independence verification

例的综合冷却效率相较于 1 821 万网格数量的结果相对误差均在 1% 以内,综合考虑计算成本和网格无关性验证结果,计算采用 1 201 万数量的网格模型。

1.3 参数定义

吹风比定义为:

$$M = \rho_c v_c / \rho_\infty v_\infty \quad (1)$$

式中: ρ_c —冷气密度, kg/m^3 ; ρ_∞ —主流密度, kg/m^3 ; v_c —气膜孔出口处冷气均速, m/s ; v_∞ —主流速度, m/s 。

综合冷却效率定义为:

$$\eta = (T_\infty - T_w) / (T_\infty - T_c) \quad (2)$$

式中: T_∞ —主流进口温度, K ; T_c —冷流进口温度, K ; T_w —流热耦合计算壁面温度, K 。

平均综合冷却效率定义为:

$$\bar{\eta} = (T_\infty - \bar{T}_w) / (T_\infty - T_c) \quad (3)$$

式中: $\bar{T}_w$ —流热耦合计算壁面平均温度, K 。

综合冷却效率标准差定义为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\eta_i - \bar{\eta})^2} \quad (4)$$

式中: η_i —局部综合冷却效率; $\bar{\eta}$ —平均综合冷却效率。

毕渥数定义为:

$$Bi = \delta h_c / 2\lambda_z \quad (5)$$

式中: δ —平板的厚度, m ; h_c —冷侧平板表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; λ_z —导热系数张量沿 Z 轴的导热系数分量, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

肋面总效率^[16]定义为:

$$\eta_0 = [A_1 + \left(\frac{\text{th}(mH')}{mH'} \right) A_2] / (A_1 + A_2) \quad (6)$$

$$m = \sqrt{\frac{2h_c}{\lambda_z b}} \quad (7)$$

$$H' = H + \frac{b}{2} \quad (8)$$

式中: A_1 —肋与肋间平整部分的面积, m^2 ; A_2 —肋面突出部分的面积, m^2 ; th —双曲正切函数; H' —等效肋高, m ; b —肋宽, m ; H —肋高, m 。

可以看到,在 1 201 万网格数量情况下两种算

总传热系数定义为：

$$h = 1 / \left[\frac{1}{\bar{h}_h} + \frac{\delta}{\lambda_z} + \frac{A_h}{\bar{h}_c \eta_0 (A_1 + A_2)} \right] \tag{9}$$

式中， $\bar{h}_h$ —主流侧壁面平均对流传热系数，W/(m²·K)；
 $\bar{h}_c$ —冷流侧壁面平均对流传热系数，W/(m²·K)；
 A_h —主流侧壁面表面积，m²。

对于光滑冷却流通道，式(9)写为：

$$h = 1 / \left[\frac{1}{\bar{h}_h} + \frac{\delta}{\lambda_z} + \frac{1}{\bar{h}_c} \right] \tag{10}$$

1.4 计算方法与边界条件

综合国内外气膜冷却研究情况，选用连续肋冷却流通道模型计算 Realizable $k-\varepsilon$ 、SA、SST $k-\omega$ 3 种湍流模型的展向平均气膜冷却效率，并参考刘存良等人^[17]和 Liu 等人^[18]气膜-肋壁耦合结构的实验结果进行对比，结果如图 4 所示。从计算结果来看，Realizable $k-\varepsilon$ 模型更贴近文献^[18]的实验结果，因此湍流模型选用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型。

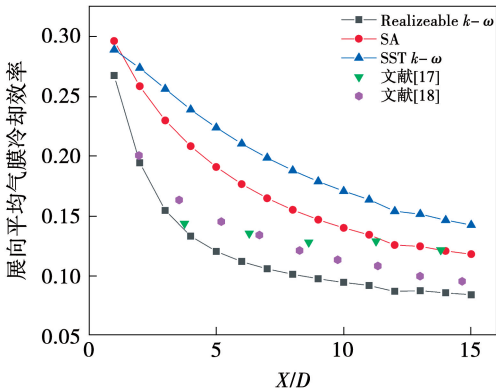


图 4 湍流模型验证

Fig. 4 Turbulence model validation

采用 ANSYS FLUENT 软件进行数值计算。使用 COUPLE 算法进行压力-速度耦合求解压力场，离散方程压力项采用二阶格式，离散项采用二阶迎风格式。计算过程监测连续 100 个步长内主流侧壁面平均温度变化小于 0.001 K、能量残差小于 10⁻⁷ 且其余各项残差小于 10⁻⁵ 即视为收敛。

主流进口为速度进口，速度为 18 m/s，温度为 1 350 K；主流出口为压力出口，压力为 101 325 Pa。

进出口质量根据进口雷诺数和吹风比计算。冷流进口为质量流量进口，温度为 900 K，进口雷诺数为 10⁴；冷流出口为质量流量出口，吹风比为 1。平板上、下表面及气膜孔流固交界面设为耦合面以传递热量。主流、冷流及平板两侧壁面设为周期性边界，其余壁面设为绝热无滑移壁面。

实际的陶瓷基材料导热系数为包含 9 个分量的二阶张量。研究中采用导热主方向坐标系变换的方法^[19]将其简化为一阶张量的 3 个分量，这 3 个分量代表 3 个导热方向及其导热系数，如表 1 所示。其中最大的导热系数分量被称为主导热系数，该分量的方向就是主导热方向。对于算例 1、算例 2 和算例 3，保持 Y 方向和 Z 方向的导热系数不变，改变 X 方向的主导热系数；对于算例 3、算例 4 和算例 5，保持主导热系数和其余方向的导热系数不变，改变主导热方向。下文对这两组算例进行分析。

表 1 各算例导热系数 (W/(m·K))

Tab. 1 Thermal conductivity coefficient for each case (W/(m·K))

算例	X 方向	Y 方向	Z 方向
1	1	1	1
2	2	1	1
3	5	1	1
4	1	5	1
5	1	1	5

2 计算结果分析

2.1 主导热系数对冷却效果的影响

图 5 给出了不同主导热系数情况下综合冷却效率云图。由图 5 可知，相较于光滑通道，带肋通道的整体冷却效果更好；间断肋对气膜孔下游冷却效果提升更大，使外冷却带呈发散状；连续肋对气膜孔上游区域的冷却效果提升更明显。随着主导热方向的导热系数变大，该方向的热阻降低，核心冷却带沿 X 方向的延展更明显，并沿 Y 方向收缩，且在气膜孔

附近上述特征更为明显。

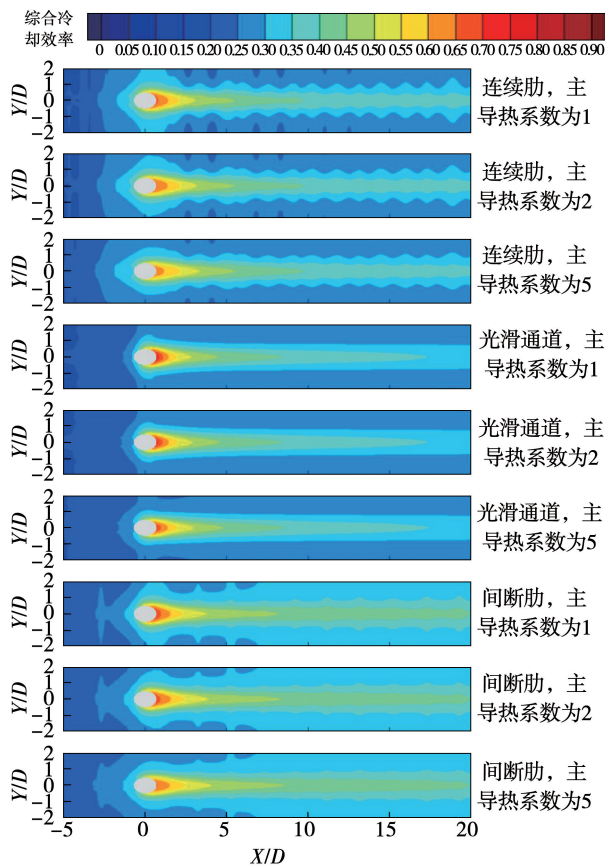


图 5 不同主导热系数下综合冷却效率云图

Fig. 5 Counter of overall cooling efficiencies under different main thermal conductivity coefficients

图 6 给出了不同主导热系数情况下平均综合冷却效率及其标准差。由图 6 可知,光滑通道的综合冷却效率随着主导热系数的增加而增加,两种带肋通道的综合冷却效率随着主导热系数的增加先增加后降低。随着主导热系数的增加,3 种模型的综合冷却效率标准差均降低,说明更高的主导热系数会使冷却分布更加均匀,且肋壁的存在能够大幅提高冷却的均匀性。从热阻分析的角度来看,出现上述现象的原因是 Z 方向的导热热阻主导平板的整体换热,而 X 方向的导热热阻影响气膜孔和肋壁处流固间热量的交换, X 方向的导热系数增加导致这一方向的热阻降低,强化沿流向的热量传递。图 5 中云图整体均匀性和主冷却带延展性的变化也是受热阻这一重要因素的影响。

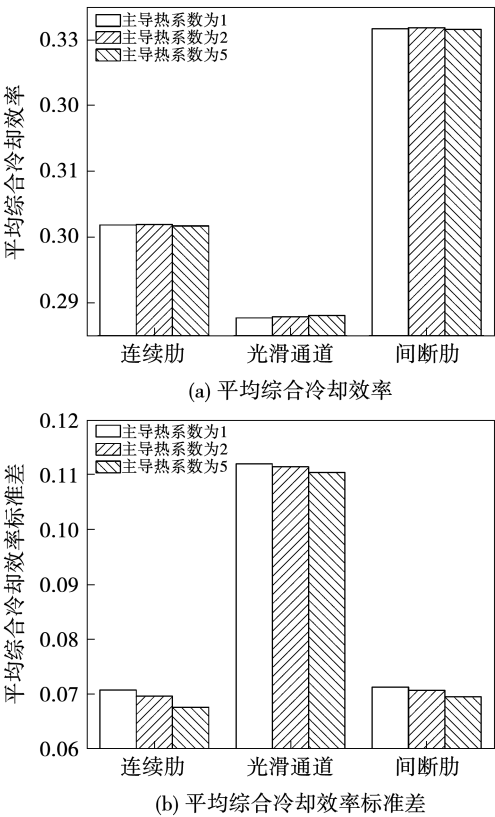


图 6 不同主导热系数下平均综合冷却效率及其标准差

Fig. 6 Average overall cooling efficiencies and standard deviation under different main thermal conductivity coefficients

图 7 给出了不同主导热系数情况下沿 4 条特征线的综合冷却效率。由于流向周期性肋壁的强化换热,特征线 2 带肋模型的综合冷却效率高于光滑通道模型且呈波折上升的趋势,这一特点在特征线 1 中并不显著,这说明肋壁对于气膜孔下游中心线附近的换热强化作用低于两侧。随着 X 方向导热系数的增加,这一方向的热阻减小,更多热量由气膜孔沿 X 方向传递,因此气膜孔展向区域与气膜孔的换热被削弱。随着主导热系数的增加,特征线 1 在 $X/D < 0$ 处综合冷却效率最高提升 2%,且光滑通道模型提升更大;特征线 2 综合冷却效率在 $X/D < 0$ 处表现出与特征线 1 相似的趋势,在 $0 < X/D < 3$ 处最高下降约 5%;特征线 3 在 $Y/D < 0.2$ 的区间以及特征线 4 的 $Y/D > 1$ 的区间综合冷却效率有较小的幅度提升。随着 X/D 的增大,气膜孔对流固换热的影响逐渐削弱,热阻变化对换热的影响逐渐由中心向两侧扩散。

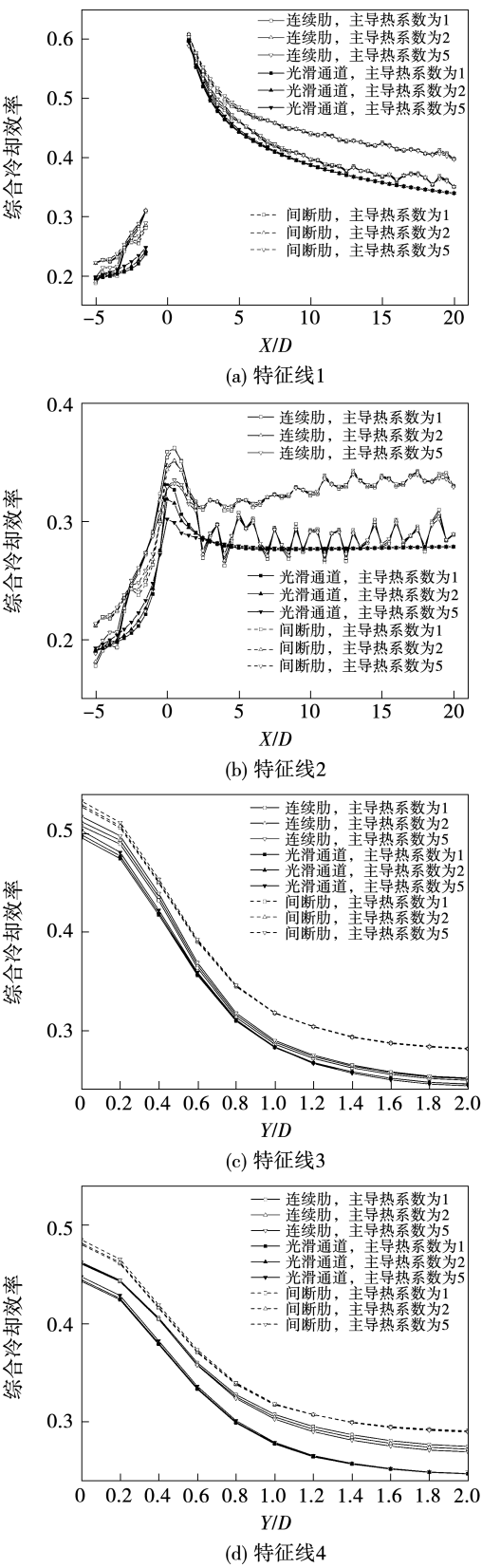


图7 不同主导热系数下沿特征线综合冷却效率
Fig.7 Overall cooling efficiencies along feature line under different main thermal conductivity coefficients

2.2 主导热方向对冷却效果的影响

图8给出了不同主导热方向下的综合冷却效率云图。可以看到,相较于沿 X 轴的情况,主导热方向沿 Y 轴使核心冷却带显著缩短,同时向 Y 轴方向扩展,这是因为主导热方向的变化改变了展向和流向的等效热阻。对于带肋模型,气膜主冷却带呈锯齿状分布,主导热方向为 X 的情况下流向的热阻小,肋壁之间的传热被强化,锯齿分布更为平滑;主导热方向为 Y 的情况下展向的热阻小,所以热量更容易沿展向传递。主导热方向沿 Z 轴使整体冷却效率显著提升,肋壁的强化换热作用更为显著。

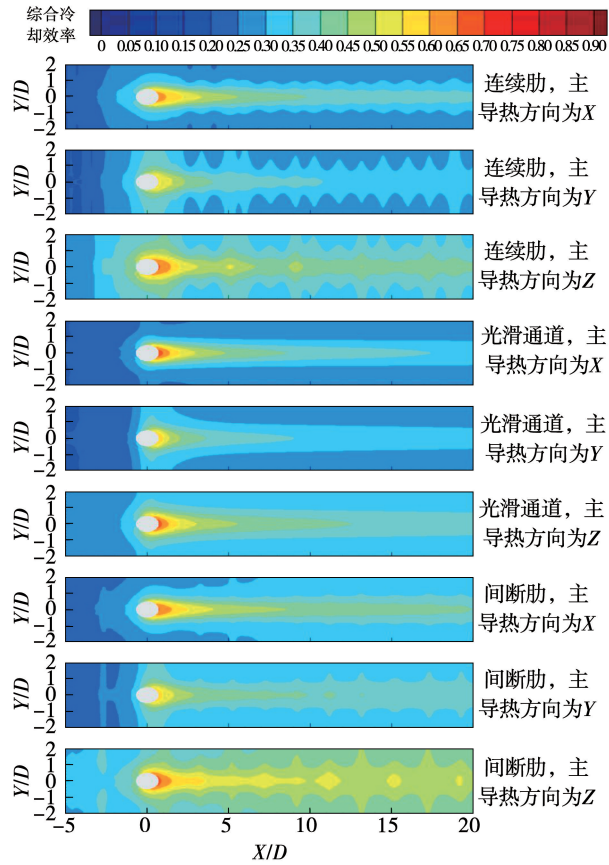


图8 不同主导热方向下的综合冷却效率云图
Fig.8 Counter of overall cooling efficiencies under different main thermal conductivity directions

图9给出了不同主导热方向下平均综合冷却效率及标准差。对于这3种模型,主导热方向沿 Y 轴相较于主导热方向沿 X 轴的平均综合冷却效率略有提升,主导热方向沿 Z 轴相较于前两种情况的平均综合冷却效率提升5%~9%。由图9(b)可知,主导热方向为 Y 的情况下综合冷却效率标准差更低,意味着冷却分布更加均匀。

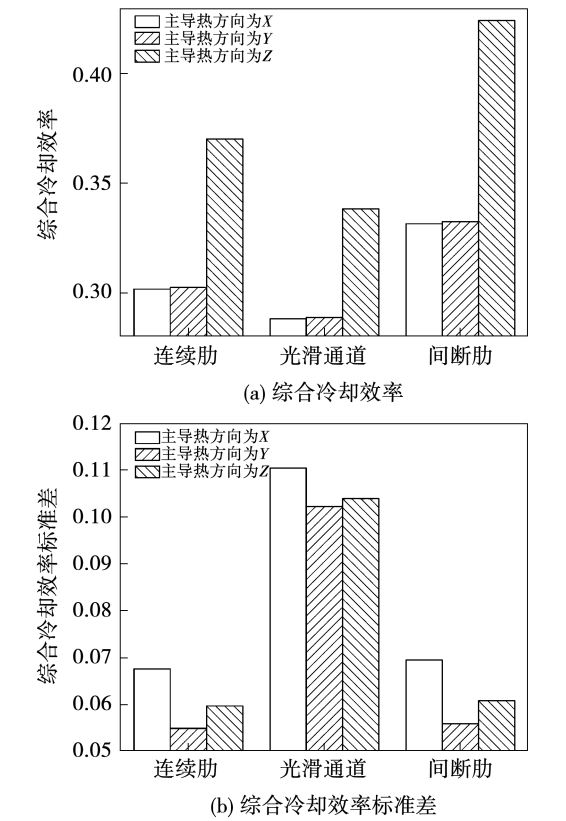


图9 不同主导热方向下平均综合冷却效率及其标准差

Fig.9 Average overall cooling efficiencies and standard deviation under different main thermal conductivity directions

图10给出了不同主导热方向情况下4条特征线的综合冷却效率。从整体上看,对于特征线1和特征线2,3个模型的任何区域都是主导热方向沿Z轴的综合冷却效率最高,进一步说明Z方向热阻在综合换热的主导地位。而在特征线1的任何区域均是主导热方向沿X轴综合冷却效率最低,特征线2在 $X/D > 2$ 区间和 $X/D < -1$ 区间的主导热方向沿Y轴的综合冷却效率最低。带肋模型沿这两条特征线的流向冷却效率分布呈周期性震荡,这是由于肋壁改变Z方向的热阻以及内冷通道的流场分布,强化了平板在肋壁周围的换热能力。对于特征线3和特征线4,主导热方向沿Z轴综合冷却效率最高,在靠近 $Y=0$ 处主导热方向沿Y轴最低。当主导热方向沿X轴时,这一方向的热阻降低,中心区域的热量能够更好地通过气膜孔传递,当主导热方向沿Y轴时,这一方向的热阻降低,导致气膜孔两侧温度降低。在上述的各条特征线上,主导热方向的改变使综合冷却效率最高提升约15%。

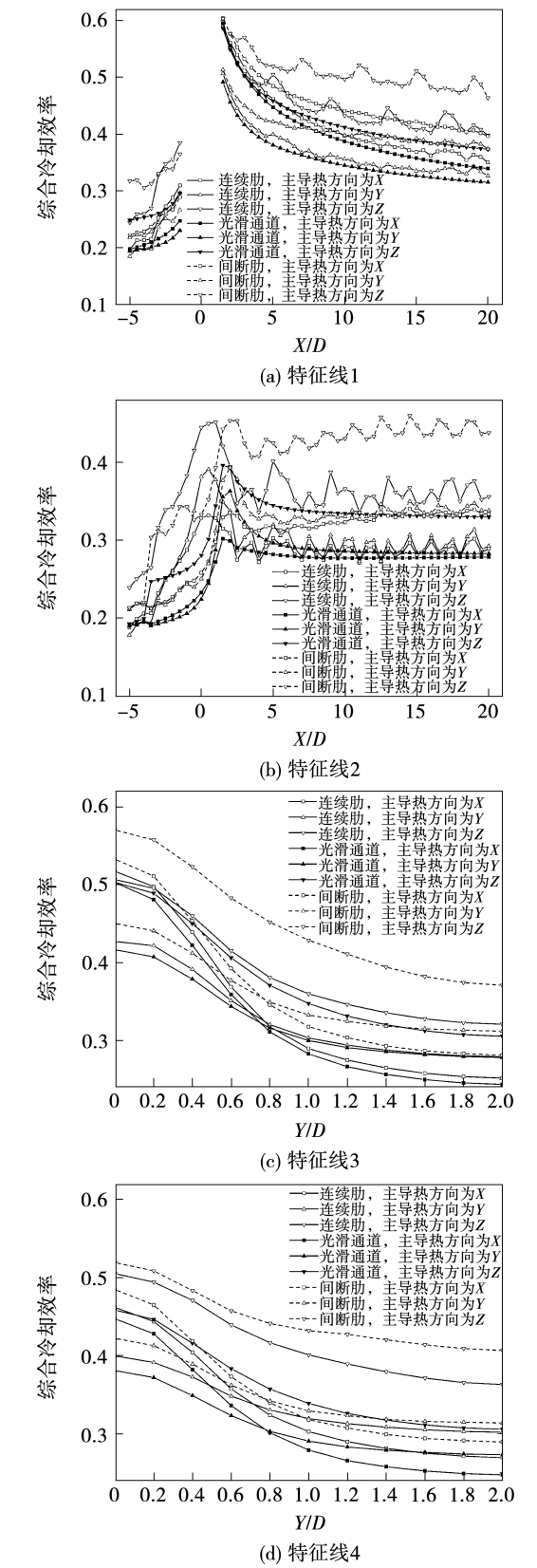


图10 不同主导热方向下沿特征线综合冷却效率

Fig.10 Overall cooling efficiencies along feature line under different main thermal conductivity coefficients

2.3 各向异性导热系数换热综合分析

考虑到主导热系数对综合冷却效率的影响远小于主导热方向,以算例3、算例4和算例5为例分析变主导热方向下的换热情况。

图11给出了不同主导热方向情况下的冷流侧表面毕渥数分布。主导热方向为 Z 的整体毕渥数显著低于另外两个方向,这是因为沿 Z 轴方向的导热系数分量提高,导热热阻降低,因此综合换热中导热相较于对流占据主导地位。由于肋壁处平板的壁厚增大,导热热阻升高,因此肋壁处毕渥数更高。在冷流通道的肋壁之间会产生诱导涡,造成能量耗散,降低肋壁上游的表面传热系数,导致肋壁的上游毕渥数降低。间断肋模型下,冷却流沿着间断肋交叉流动,在这一流动情况下平板表面传热系数得到强化。

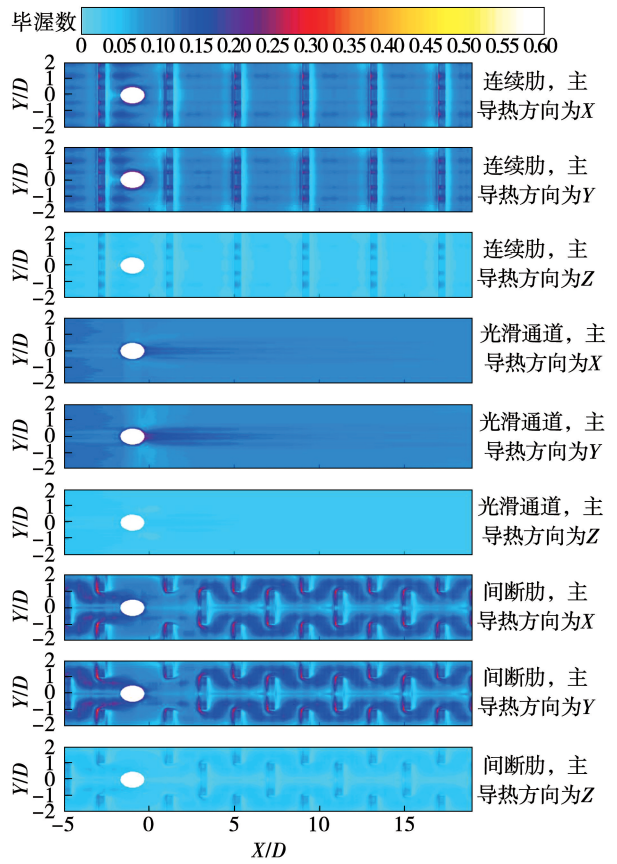


图 11 不同主导热方向下毕渥数分布云图
Fig. 11 Counter of Biwer number distribution under different main thermal conductivity directions

图12给出了不同主导热方向情况下 $Y=0$ 截面的温度场。从温度场来看,主导热方向沿 Z 轴使肋壁的强化换热作用最大化,在该方向上的温度梯度

最小;主导热方向沿 Y 轴的情况下气膜孔附近沿平板流向的温度梯度最小。肋壁与气膜冷却的影响是相互的,在肋壁改变气膜孔前、后流场和气膜孔内温度场的同时,气膜冷却也改变了肋壁换热的主流侧温度和气膜孔上、下游肋壁的温度场。肋壁使沿平板厚度方向的温度梯度变大,对于间断肋模型这一特征更显著。

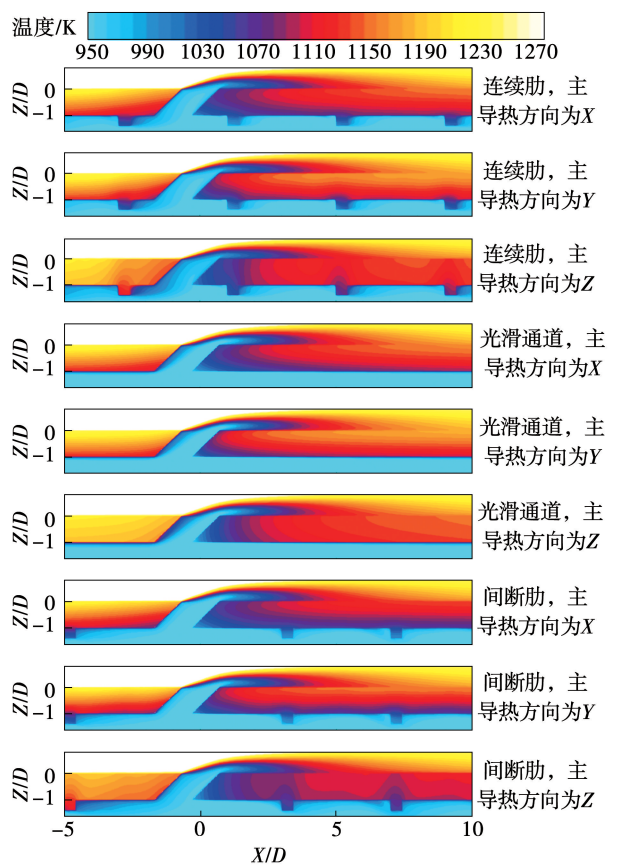


图 12 不同主导热方向下 $Y=0$ 截面的温度场
Fig. 12 Temperature field on $Y=0$ section under different main thermal conductivity directions

图13给出了不同主导热方向下气膜孔出口处温度场。图14给出了不同主导热方向下气膜孔进口和出口平均温度。在过往研究中通常使用冷却流进口温度作为气膜孔出口温度计算气膜冷却效率,然而在实际传热中,气膜孔出口温度远高于冷流进口温度,因此本文引入气膜孔进出口温度这一变量。当主导热方向沿 Z 轴时,气膜孔出口温度整体高于另外两种主导热方向。在不同的主导热方向情况下,气膜孔出口的温度变化最高可达 $14 \sim 18$ K。

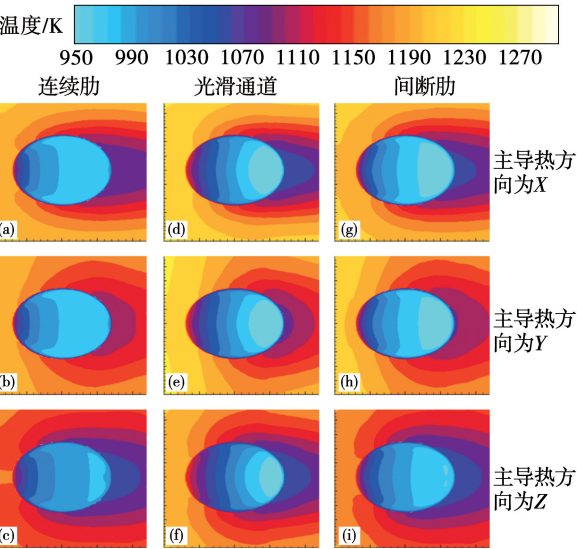


图 13 不同主导热方向下气膜孔出口温度场

Fig. 13 Temperature field at outlet of film hole under different main thermal conductivity directions

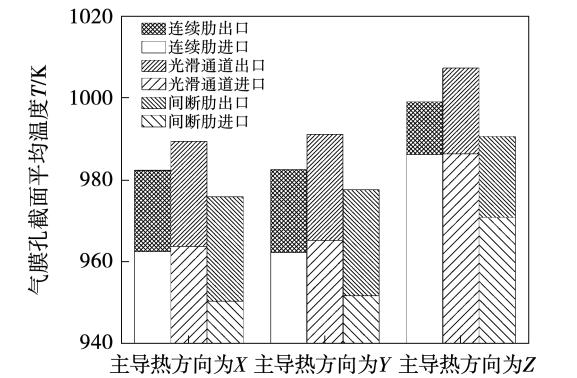


图 14 不同主导热方向下气膜孔进出口平均温度

Fig. 14 Average temperature at inlet and outlet of film hole under different main thermal conductivity directions

图 14 中可以看出,气膜孔出口与冷流通道进口的温度差由两部分组成,一是冷流进入气膜孔前与冷侧壁面换热使温度升高,称为通道温升;二是冷流在气膜孔内与平板换热造成的温升,称为孔内温升。比较 3 种模型,间断肋的总温升最低,光滑通道的总温升最高,这主要受冷流流场结构影响,肋壁的存在使冷流通道中被加热的高温流远离气膜孔,且气膜孔前后的肋壁释放了更多热量,从而使气膜孔壁面的热通量减小,导致气膜孔出口的温度场分布更均匀。对于同一主导热方向,导热系数越大则热阻越小。当主导热方向沿 Z 轴时,总温升最高但孔内温升最低;当主导热方向沿 X 轴时,总温升和通道温升最低,这是因为 Z 方向热阻影响冷流与通道的换

热, Y 方向热阻主导气膜孔孔内与平板的热量交换。表 2 给出了各情况下肋面总效率和总传热系数。对于不同的主导热方向,主导热方向沿 Z 轴时肋面总效率最高,沿 X 轴时肋面总效率最低,两者相差约 1.7%;主导热方向沿 Z 轴时总传热系数大约是另外两种主导热方向的 4.7 倍。对于同一主导热方向,间断肋总传热系数最高。在各算例中,主导热方向沿 Z 轴光滑通道总传热系数最低,主导热方向沿 Y 轴的连续肋模型总传热系数最低。

表 2 不同主导热方向下肋面总效率和总传热系数

Tab. 2 Total rib efficiencies and total heat transfer coefficients under different main thermal conductivity directions

模型	主导热方向	肋面总效率	总传热系数/ $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$
连续肋	X	0.775 33	98.105 8
连续肋	Y	0.775 42	98.100 5
连续肋	Z	0.793 63	465.142 4
光滑通道	X	—	98.121 3
光滑通道	Y	—	98.128 4
光滑通道	Z	—	463.854 1
间断肋	X	0.752 08	98.271 9
间断肋	Y	0.752 17	98.270 1
间断肋	Z	0.769 95	469.942 6

注:“—”表示无数据。

3 结 论

通过数值模拟的方法研究了肋壁-气膜耦合结构考虑各向异性导热系数的流热耦合特性。主要结论如下:

- (1) 主导热系数的增加会使得冷却带朝主传热方向延展而向次传热方向收缩,冷却带分布更为均匀。主导热方向沿 Z 轴可得到最大的综合冷却效率,沿 X 轴分布的综合冷却效率最小且冷却带分布更为集中。随主导热系数的增加,主冷却带的综合冷却效率略微提高,在主冷却带两侧 $0 < X/D < 3$ 区域综合冷却效率下降约 5%。主导热方向沿 Z 轴相较于另外两种主导热方向的平均综合冷却效率提升 5%~9%,局部综合冷却效率最高提升约 15%。
- (2) 肋壁的存在可使平均综合冷却效率提高 2%~5%,且间断肋的提升更显著。肋壁与气膜冷却的影响是相互的,肋壁改变气膜孔附近的流场以及气膜孔的温度场,间断肋模型相较于光滑通道的综合冷却效率有所提高。气膜冷却覆盖主流表面,

降低表面温度,这会削弱肋壁的强化换热作用。

(3) 从气膜冷却和肋壁结构两方面单独考虑各向异性导热系数的影响。当主导热方向沿 Z 轴时气膜孔出口温度最高,主导热方向沿 X 轴时该温度最低,两者相差 $14 \sim 18 \text{ K}$,这个温度会影响实际气膜冷却效率。当主导热方向沿 Z 轴时肋面总效率相较于其他情况高约 1.7% ,总传热系数约为其他情况的 4.7 倍。

参考文献:

- [1] 韩介勤,桑地普·杜达,斯瑞纳斯·艾卡德.燃气轮机传热和冷却技术[M].程代京,谢永慧,译.西安:西安交通大学出版社,2005.
HAN Jieqin, DUTTA S, EKKAD S. Gas turbines heat transfer and cooling technology [M]. CHENG Daijing, XIE Yonghui, trans. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2005.
- [2] 杜 昆,陈麒好,孟宪龙,等.陶瓷基复合材料在航空发动机热端部件应用及热分析研究进展[J].推进技术,2022,43(2): 113 - 131.
DU Kun, CHEN Qihao, MENG Xianlong, et al. Advancement in application and thermal analysis of ceramic matrix composites in aero-engine hot components [J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(2): 113 - 131.
- [3] 骆剑霞.涡轮叶片内冷结构对外部气膜冷却特性的影响研究[D].西安:西北工业大学,2015.
LUO Jianxia. Research of external film cooling performance of turbine blade with different internal cooling structures [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015.
- [4] LIU C, LI B, YE L, et al. Film cooling characteristics of cross-flow coolant passage with various relative positions of holes and inclined ribs[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021, 167: 106975.
- [5] KLAVETTER S R, MCCLINTIC J W, BOGARD D G, et al. The effect of rib turbulators on film cooling effectiveness of round compound angle holes fed by an internal cross-flow[J]. Journal of Turbomachinery, 2016, 138(12): 121006.
- [6] 李广超,吴超林,张 魏,等.孔-肋相对位置对通道各壁面换热影响[J].热能动力工程,2012,27(6): 655 - 659, 734 - 735.
LI Guangchao, WU Chaolin, ZHANG Wei, et al. Influence of the relative positions of holes and ribs on the heat exchange through various wall surfaces in the passages[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2012, 27(6): 655 - 659, 734 - 735.
- [7] PENG W, SYUN X, JIANG P, et al. Effect of ribbed and smooth coolant cross-flow channel on film Cooling[J]. Nuclear Engineering and Design, 2017, 316: 186 - 197.
- [8] JIN W, JIA Y X, LEI J, et al. Coupled heat transfer analysis of internal and film cooling of turbine blade under medium temperature conditions[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 214: 118792.
- [9] ZHU R, LI S, XIE G. Conjugate heat transfer and flow features of single-hole and combined-hole film cooling with rib-roughened in-

ternal passages[J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2022, 14(9): 091006.

- [10] 侯亚东,单 勇,李江宁,等.各向异性复合材料平板气膜冷却特性实验和数值研究[J].航空动力学报,2017,32(10): 2384 - 2393.
HOU Yadong, SHAN Yong, LI Jiangning, et al. Experimental and numerical studies on the film cooling characteristics of anisotropic composite plates[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(10): 2384 - 2393.
- [11] WILKINS P H, LYNCH S P, THOLE K A, et al. Effect of a ceramic matrix composite surface on film cooling[J]. Journal of Turbomachinery, 2022, 144(8): 081014.
- [12] TU Z, MAO J, HAN X. Numerical study of film cooling over a flat plate with anisotropic thermal Conductivity[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 111: 968 - 980.
- [13] TU Z, MAO J, HAN X, et al. Experimental study of film cooling over a Fiber-reinforced composite plate with anisotropic thermal Conductivity [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 148: 447 - 456.
- [14] 屠泽灿,毛军逵,赵 晓.各向异性复合材料平板气膜冷却试验研究[J].工程热物理学报,2018,39(4): 852 - 859.
TU Zecan, MAO Junkui, ZHAO Xiao. Experimental study of film cooling over a composite flat plate with anisotropic thermal conductivity [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(4): 852 - 859.
- [15] 杜 昆,陈麒好,孟宪龙,等.陶瓷基复合材料端壁气膜冷却特性实验数值研究[J].推进技术,2022,43(12): 180 - 190.
DU Kun, CHEN Qihao, MENG Xianlong, et al. Numerical and experimental study of ceramic matrix composite on endwall film cooling performance[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(12): 180 - 190.
- [16] 陶文铨.传热学[M].北京:高等教育出版社,2019.
TAO Wenquan. Heat transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2019.
- [17] 刘存良,宋 辉,郭 涛,等.带肋横流进气方式下的圆柱形孔气膜冷却特性[J].工程热物理学报,2015,36(10): 2211 - 2216.
LIU Cunliang, SONG Hui, GUO Tao, et al. Film cooling characteristics of cylindrical holes with ribbed crossflow[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(10): 2211 - 2216.
- [18] LIU C, LI B, YE L, et al. Film cooling characteristics of cross-flow coolant passage with various relative positions of holes and inclined ribs[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021, 167: 106975.
- [19] 屠泽灿.陶瓷基复合材料导热机理及其在气冷涡轮叶片热分析中的应用研究[D].南京:南京航空航天大学,2018.
TU Zecan. Investigation of CMC's thermal conduction mechanism and its application in thermal analysis for turbine vane[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.

(刘 颖 编辑)