

采用响应面法的透平冷却通道连接桥 宽度和角度结构优化

刘起隆¹, 谢永慧¹, 张荻¹, 孔祥林^{2,3}, 苏鹏飞^{2,3}, 方宇^{2,3}

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 清洁高效透平动力装备全国重点实验室, 618000, 四川德阳; 3. 东方电气集团东方汽轮机有限公司, 618000, 四川德阳)

摘要: 为满足新一代燃气轮机冷却通道对高效传热和低流动阻力的要求,提出了一种在 U 型通道内构建 3 个不同尺寸的桥结构的方案,旨在缓解转弯区域的过大压降并且竖直区域传热均匀性较差的问题。首先构建了含有可变尺寸和角度连接桥的 U 型通道,由 ANSYS Meshing 生成非结构网格并采用 CFX 软件进行计算,通过中心复合设计法生成初始样本数据。然后将响应面法与多目标遗传算法相结合,用于复杂工程优化问题的求解,并分析了桥尺寸及角度变化对流动和传热性能的影响。最后通过对多个候选方案的综合评估,给出了优化设计的推荐方案。分析结果表明,由于优化后的通道流场分布更加均匀,且连接桥的存在削弱了旋转状态下科氏力带来的旋转前缘面和后缘面传热不均匀的现象,尽管传热强度略有削弱,但通道的流动阻力在静止与旋转状态下分别降低了 62.09% 和 56.26%。这种结构能够减少局部温度升高和减抗降阻,提高冷却效率,从而提升高压透平的安全性和可靠性。该研究为透平叶片高效低阻中弦冷却技术的发展提供了宝贵的数据参考。

关键词: 透平叶片; U 型通道; 旋转; 减抗降阻

中图分类号: TK05 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202511013 **文章编号:** 0253-987X(2025)11-0133-11

Optimization of the Width and Angle Structure of Turbine Cooling Channel Bridges Using Response Surface Method

LIU Qilong¹, XIE Yonghui¹, ZHANG Di¹, KONG Xianglin^{2,3}, SU Pengfei^{2,3}, FANG Yu^{2,3}

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory of Clean and Efficient Turbomachinery Power Equipment, Deyang, Sichuan 618000, China;

3. Dongfang Electric Corporation Dongfang Turbine Co., Ltd., Deyang, Sichuan 618000, China)

Abstract: To meet the requirements of efficient heat transfer and low flow resistance in the cooling channels of the new generation of gas turbines, this study proposes a solution involving the construction of three bridges with varying dimensions within a U-shaped channel. This approach aims to mitigate the excessive pressure drop in the turn region and the uneven heat transfer distribution in the vertical regions. First, a U-shaped channel with adjustable bridge dimensions and angles is constructed. Unstructured meshes are generated using ANSYS Meshing, and computations are performed with CFX. Initial sample data are generated using the central composite design method, followed by the integration of response surface method and multi-

收稿日期: 2025-03-05。 作者简介: 刘起隆(1996—),男,博士生;谢永慧(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金
项目: 国家科技重大专项资助项目(J2019-IV-0022-0090)。

网络出版时间: 2025-07-18

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20250717.1823.002>

objective genetic algorithms to address complex engineering optimization problems. The effects of bridge dimensions and angles on flow and heat transfer performance are analyzed. Through a comprehensive evaluation of multiple candidate solutions, this study presents an optimized design recommendation. The results indicate that the optimized channel exhibits a more uniform flow field distribution, and the presence of the bridges mitigates the uneven heat transfer between the leading and trailing surfaces caused by Coriolis forces under rotating conditions. Although the heat transfer intensity is slightly reduced, the flow resistance of the channel decreases by 62.09% and 56.26% under stationary and rotating conditions, respectively. This structure can reduce local temperature spikes and lower flow resistance, thereby improving cooling efficiency and enhancing the safety and reliability of high-pressure turbines. The study provides valuable data references for the development of mid-chord cooling technologies in turbine blades with high efficiency and low resistance.

Keywords: turbine blade; U-channel; rotation; resistance reduction

燃气轮机透平叶片冷却技术在燃气轮机的运行中具有至关重要的作用。透平叶片在高温、高压的工作环境下易受到热应力与热腐蚀的影响,若未能提供有效的冷却措施,叶片可能会发生热裂纹、脱落或变形等损伤,从而降低燃气轮机的可靠性与安全性^[1]。内部通道冷却因其结构简单且冷却效果均匀,成为了近年来最常用的冷却方法之一。

中弦区域是透平叶片中占比较大的部分,其内部冷却通常采用带有 180°转弯角的 U 型通道或多流程蛇形通道,开发高效的冷却流道一直是研究者们核心目标。在中弦冷却通道中,肋片、翅片以及球窝/球凸结构作为有效的扰流设计,已被广泛应用,其对冷却性能的提升作用已成为研究重点^[2]。随着扰流结构的增多,冷却通道的压力损失成为了必须考虑的问题。

很多研究者致力于 U 型通道的减阻优化,提出了不少有效的减阻方案,如圆角过渡结构^[3]、导流肋^[4]、竖直通道三维结构优化^[5-7]等,均一定程度地降低了 U 型通道的压力损失。Yan 等^[8]分析了带转向叶片的 U 型通道的热阻性能,对形状线和转弯叶片曲率的影响进行了研究。结果表明,与无转向叶片的平滑通道相比,带转向叶片的通道摩擦损失系数降低了 10.5%~31.4%,但是第 2 列通道 Nu 下降了 12.6%~22.1%。Chang 等^[9-11]为了减小肋骨和急弯引起的压降增加,在两个端面上加工了 6 对斜方槽,以诱导进出口支管之间的相邻壁面旁路流动,提出了一种位于蛇形通道肋片通道和针翅片通道之间的内部通道,以同时改善换热和降低针翅片通道中的压降。Luan 等^[12]在有肋和无肋的 U 型槽中使用了连接孔,并分析了不同位置和形式的连

接孔和肋的组合性能。然而,将内部通道设计成简单的直线通道(即 0°连接桥)或其他形式(如两个通道之间的圆柱形通道),会带来相对较高的节流压降,对应的综合性能指标会降低。Ruan 等^[13]建立了带穿孔的 U 型网格冷却结构,将摩擦损失降低了 16.3%~29.2%。Ghosh 等^[14]优化了 U 形通道中转向结构的布局,优化后的通道采用 3D 打印技术建模,以降低通道压降。Jing 等^[15]提出了一种新型的双通道桥加椭圆球窝组合结构,用于叶片中弦区域内冷,讨论了跨桥类型、布置方式和凹窝尺寸、布置方式对冷却性能的影响,探讨了短肋和球凸与连接桥的耦合强化传热与减阻机理。然而,在 Jing 的研究中,所有连接桥的桥宽度和桥角度都被设置为了固定的值,并且变尺寸的多个连接桥组合仍存在一定的性能差距。文献^[16]建立了多个具有不同尺寸和角度的连接桥通道,并通过数值计算分析确定了单一连接桥及组合连接桥中各桥尺寸的选择范围。

本文采用响应面法探讨了在静止与旋转状态下,各连接桥的尺寸和角度对通道整体性能的影响,并提出了综合考虑不同形式连接桥组合的优化方案。

1 物理模型及计算方法

1.1 物理模型

本文基于燃气轮机透平叶片中弦区域,对 U 型冷却通道开展研究。基准通道的三维结构示意图如图 1 所示,第 1 列和第 2 列通道截面均为正方形, U 型通道径向长度为 $8D_h$,转弯区域宽度为 $1.2D_h$,转弯肋的厚度为 $0.4D_h$ 。工质从左侧进入第 1 列通

道,然后经转弯区域进入第 2 列通道,完成换热后通过右侧的出口排出。连接桥即为均匀设置在第 1 列和第 2 列通道转弯前的单个或者多个通道,连接桥的角度设置为 θ ,沿流向长度设置为 D ,如图 2 所示。

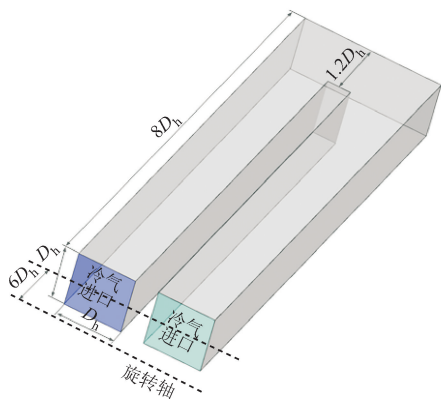


图 1 基准通道结构示意图

Fig. 1 Schematic of reference channel structure

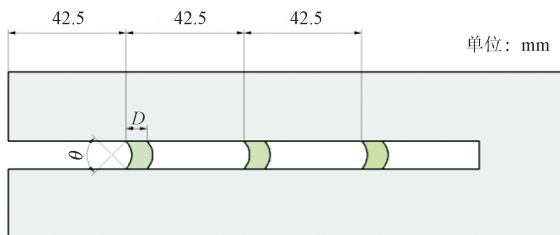


图 2 连接桥位置和结构示意图

Fig. 2 Schematic of location and structure of connecting bridge

1.2 数值计算方法

本文通过计算 Nu 来量化传热强化特性

$$Nu = \frac{hD_h}{\lambda} \quad (1)$$

式中: h 为对流传热系数; λ 为流体导热系数。

通过计算阻力 f 与基准阻力复数 f_0 的比值 f/f_0 来量化阻力特性。阻力系数 f 为^[17]

$$f = \frac{\Delta p}{0.5\rho u^2} \frac{D_h}{L} \quad (2)$$

基准阻力系数 f_0 为^[18]

$$f_0 = 0.507 Re^{-0.3} \quad (3)$$

式中: Δp 为通道的进出口压差; L 为流动长度; ρ 为流体密度; u 为流速。

采用商业软件 CFX 进行数值计算,并基于有限体积法进行离散,计算边界条件为:①入口温度为 298 K,入口速度按 $Re=20\,000$ 设定;②出口设定为自由出流;③通道上、下壁面(即旋转前缘面和旋转后缘面)设为 335 K 的恒温壁面,其余侧壁面均为绝热壁面;④所有壁面均为无滑移边界条件;⑤转速设置为 500 r/min。计算过程中,当各项参数的残差降至 10^{-6} ,认为计算收敛。在先前的研究中,大量的文献证实针对 U 型通道热阻性能采用 SST $k-\omega$ 模型,在拥有较快计算速度的同时可以获得最佳预测精度^[18-25],因此本文选用了 SST $k-\omega$ 模型作为湍流模型。

为了配合优化算法实现自动计算,由 ANSYS Meshing 生成非结构网格进行计算,并对装有连接桥的 U 形通道进行了网格独立性验证。构建了 5 套网格,分别为 483 000、825 000、1 440 000、1 680 000 和 2 300 000 个单元。表 1 列出了每个方案的壁面 Nu 和通道 f/f_0 的相对偏差(各方案与方案 5 比较),发现网格方案 4 和 5 的相对偏差小于 1%,因此选择方案 4 用于后续分析。网格的最大尺寸设置为 0.8 mm,为了满足 SST 模型的计算需求,对流动所有区域的壁面网格进行加密,边界层网格尺寸为 0.2 mm,增长率设置为 1.2,确保所有壁面位置的无量纲距离 $y^+ < 1$ 。

表 1 网格无关性分析

Table 1 Grid independence analysis

转速/ (r · min ⁻¹)	参数	方案 1		方案 2		方案 3		方案 4		方案 5
		数值	偏差/%	数值	偏差/%	数值	偏差/%	数值	偏差/%	数值
0	f/f_0	2.106	10.84	2.048	7.79	1.972	3.79	1.915	0.79	1.900
	Nu	110.25	1.72	110.00	1.49	109.37	0.91	108.86	0.44	108.38
500	f/f_0	2.032	9.90	1.974	6.76	1.904	2.97	1.861	0.65	1.849
	Nu	109.36	2.08	108.86	1.61	107.72	0.55	107.63	0.47	107.13

在验证热传递性能过程中,仿照 Singh 等^[26]的实验 U 型通道,采用等比方法建立了三维通道模型,通过计算液体动力学(CFD)软件计算与实

验结果进行对比。在静止条件下,平均 Nu/Nu_0 (Nu_0 为基准 Nu) 的偏差为 0.71%,而在旋转条件下,平均 Nu/Nu_0 的偏差为 1.17%。这表明总

体热传递的计算值和实验值之间存在很强的一致性。此外,为了验证阻力特性,基于 Saravani 等^[27]描述的结构,创建了三维通道模型。与热传递分析类似,采用了 SST $k-\omega$ 模型进行数值计算,

并与文献中 Re 最接近的工况 ($Re=18\ 000$) 进行对比分析。比较结果表明, f/f_0 的模拟值与实验值非常吻合,在静态和旋转状态下,最大偏差为 6.96%,如表 2 所示。

表 2 CFD 数值计算结果与文献实验结果的对比

Table 2 Comparison of CFD numerical calculation and experimental results in the literature

参数	静止			旋转		
	模拟值	实验值	偏差/%	模拟值	实验值	偏差/%
Nu/Nu_0	1.78	1.77	0.71	2.12	2.10	1.17
f/f_0	5.30	4.98	6.25	4.77	5.13	6.96

响应面法(RSM)是一种基于统计学的建模与优化方法,通过构建参数与目标间的显式代理模型,可有效揭示多变量非线性耦合关系并实现全局设计空间探索^[28]。相较于传统优化方法,响应面法在保证计算效率(典型样本量降低 40%~60%)的同时,兼具参数敏感性可视化与多目标权衡分析优势。

本文基于 ANSYS CFX 的高保真数值来模拟数据。在优化模块中,将响应面法与多目标遗传算法(MOGA)相结合用于复杂工程优化问题的求解。首先,通过设计实验方法(中心复合设计,CCD)生成初始样本数据,利用这些数据构建响应面模型,该模型通过二次多项式近似描述输入与输出之间的关系。接着,采用 MOGA 在该响应面模型上进行多目标优化,通过遗传算法的选择、交叉和变异操作,搜索目标空间中的 Pareto 前沿解集。MOGA 能够处理多个目标函数,找到不同目标之间的最优折中解,进而实现全局优化。响应面法通过减少实验次

数和计算量,提高了优化过程的效率,而 MOGA 则通过其全局搜索能力有效避免了局部最优解,从而实现了高效且可靠的多目标优化。

本文优化变量 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 分别代表第 1 通道流动方向上第 1 个桥的宽度、第 2 个桥的宽度、第 3 个桥的宽度、所有桥的角度。根据作者之前的研究结论^[16],每个桥的宽度变化范围设置为 $(0.2\sim0.4)D_h$,所有桥的角度变化范围设置为 $30^\circ\sim120^\circ$ 。优化目标函数即为通道阻力 f/f_0 、上下壁面平均 Nu 。

2 结果与讨论

2.1 静止状态

每组 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 对应一个 U 型通道模型,基于 CCD 法得到多组试验设计点。针对静止和旋转状态下含有 3 个桥的连接桥通道,给出的设计点和响应值如表 3 所示。

表 3 静止和旋转的试验设计及响应值

Table 3 Experimental design and loudness value of static and rotating

序号	P_1/mm	P_2/mm	P_3/mm	$P_4/(^\circ)$	静止		转速为 500 r/min	
					$f \cdot f_0^{-1}$	平均 Nu	$f \cdot f_0^{-1}$	平均 Nu
1	7.500	7.500	7.500	75.000	1.871 09	103.663	1.918 69	106.659
2	5.000	7.500	7.500	75.000	1.966 97	105.526	2.023 89	108.317
3	10.000	7.500	7.500	75.000	1.807 91	101.656	1.844 96	104.893
4	7.500	5.000	7.500	75.000	1.929 96	104.792	1.984 98	107.555
5	7.500	10.000	7.500	75.000	1.831 67	102.289	1.867 76	105.595
6	7.500	7.500	5.000	75.000	1.909 33	104.225	1.961 29	107.000
7	7.500	7.500	10.000	75.000	1.849 95	102.978	1.881 52	106.019
8	7.500	7.500	7.500	30.000	2.075 11	103.002	2.087 56	106.779
9	7.500	7.500	7.500	120.000	1.764 23	104.993	1.815 92	107.432
10	5.739	5.739	5.739	43.311	2.161 93	106.594	2.215 01	108.859
11	9.261	5.739	5.739	43.311	2.017 80	102.867	2.052 02	106.355

续表

序号	P_1/mm	P_2/mm	P_3/mm	$P_4/(\circ)$	静止		转速为 500 r/min	
					$f \cdot f_0^{-1}$	平均 Nu	$f \cdot f_0^{-1}$	平均 Nu
12	5.739	9.261	5.739	43.311	2.069 91	104.465	2.097 09	107.576
13	9.261	9.261	5.739	43.311	1.961 08	101.248	1.969 57	105.092
14	5.739	5.739	9.261	43.311	2.105 20	104.965	2.139 11	108.166
15	9.261	5.739	9.261	43.311	1.980 64	102.161	1.990 88	105.651
16	5.739	9.261	9.261	43.311	2.036 34	103.569	2.037 77	106.679
17	9.261	9.261	9.261	43.311	1.931 10	100.101	1.926 04	104.104
18	5.739	5.739	5.739	106.689	1.948 30	106.984	2.012 72	109.185
19	9.261	5.739	5.739	106.689	1.800 65	104.352	1.849 99	106.693
20	5.739	9.261	5.739	106.689	1.835 07	105.539	1.888 37	107.923
21	9.261	9.261	5.739	106.689	1.718 63	102.780	1.761 77	105.463
22	5.739	5.739	9.261	106.689	1.872 98	106.470	1.925 17	108.569
23	9.261	5.739	9.261	106.689	1.741 68	103.501	1.785 15	106.125
24	5.739	9.261	9.261	106.689	1.779 05	104.632	1.822 04	107.188
25	9.261	9.261	9.261	106.689	1.676 30	101.819	1.716 59	104.788

基于最小二乘原理,通过使误差的平方和最小,求得多项式系数,进行多元回归拟合分析,进而建立目标函数。为了表征观察到的数据与预测数据的接近程度,构建拟合优度图,如图 3 所示。由图可见,响应面的预测精度比较高,响应面计算值与 CFD 仿真值之间具有较好的拟合度。

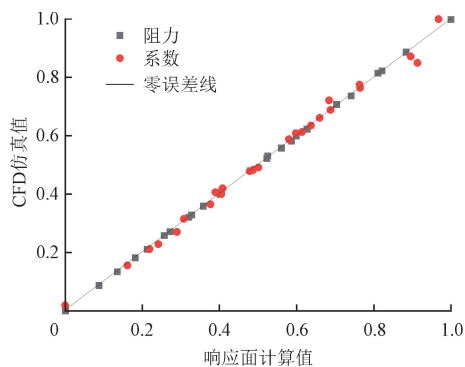


图 3 静止状态阻力和传热的拟合优度

Fig. 3 Goodness of fit plot of resistance and heat transfer at static state

通过软件进一步求解响应面,可以分别得到组合最低阻力和最高平均 Nu 及各参数的局部敏感度,如图 4 所示。由图可见,影响阻力和传热性能的主要因素是连接桥的宽度,越靠前的桥影响越大。另外,敏感性分析通常是基于变量的相对变化进行的,即变化量和模型输出的变化之间的比率,相较于 $P_1 \sim P_3$, P_4 对目标函数的影响较小,甚至在角度较小的情况下,增大 P_4 后传热先下降后上升,所以

P_4 的敏感度小于 $P_1 \sim P_3$ 的敏感度。

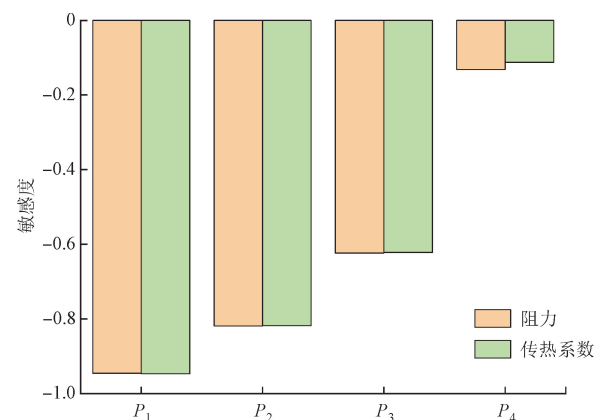


图 4 静止状态下通道阻力和传热对各参数的敏感度

Fig. 4 Sensitivity of channel resistance and heat transfer to various parameters at static state

为了更直观地对比连接桥尺寸和角度对性能的影响,本研究通过试验点拟合构造的响应面见图 5,分析了通道尺寸(P_1 、 P_2 、 P_3)和角度(P_4)对传热与阻力的影响。从阻力响应面分析可知, P_1 和 P_2 对阻力的影响较为显著,且 P_1 的影响略大于 P_2 。进一步分析发现,随着 P_1 和 P_2 的减小,通道的传热显著增强,且 P_1 对传热的影响也大于 P_2 。与阻力响应面的显著变化不同,传热响应面较为平坦,且随着桥尺寸增大,传热性能呈接近线性增长趋势,表明较小尺寸且位置靠前的桥在尺寸稍微增大时,传热性能改善较为缓慢,阻力则大幅下降。

通过对 P_3 和 P_4 响应面的分析可知, P_4 对传热和阻力的影响显著大于 P_3 , 表明通道末端桥的尺寸对性能的影响较小。随着桥角度(P_4) 的增大, 通道阻力持续下降, 而传热则呈现先稳定后升高的趋势, 拐点大约出现在 50° ; 超过此拐点后, 传热性能迅速提升, 并且含有较大角度桥的通道能达到传热的最大值。这是因为, 在静止状态下, 随着角度的增加, 流动阻力急剧下降, 这与流线偏转和二次流抑制效应密切相关。较大的角度使流体流动更加平稳, 减少了流动过渡的不稳定性, 从而降低了阻力。同时, 传热性能也得到了提升, 这主要归因于流动过渡的平滑性和热边界层的优化。

对设计变量 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 进行优化求解, 目标为阻力最小化和传热最大化, 可以得到基于响应面模型的 3 个优化候选点, 并根据候选点进行仿真计算, 给出的 3 个候选点如表 4 所示, 3 个候选点均接近于 $(5.0 \text{ mm}, 7.5 \text{ mm}, 7.5 \text{ mm}, 120^\circ)$ 的组合方式。在这种情况下响应面计算值和 CFD 仿真值依旧非常接近, 偏差均在 0.38% 以内。

2.2 旋转状态

将计算域的转速设置为 500 r/min , 其余条件不变, 再次进行响应面法优化计算, 得出的拟合优度如图 6 所示。

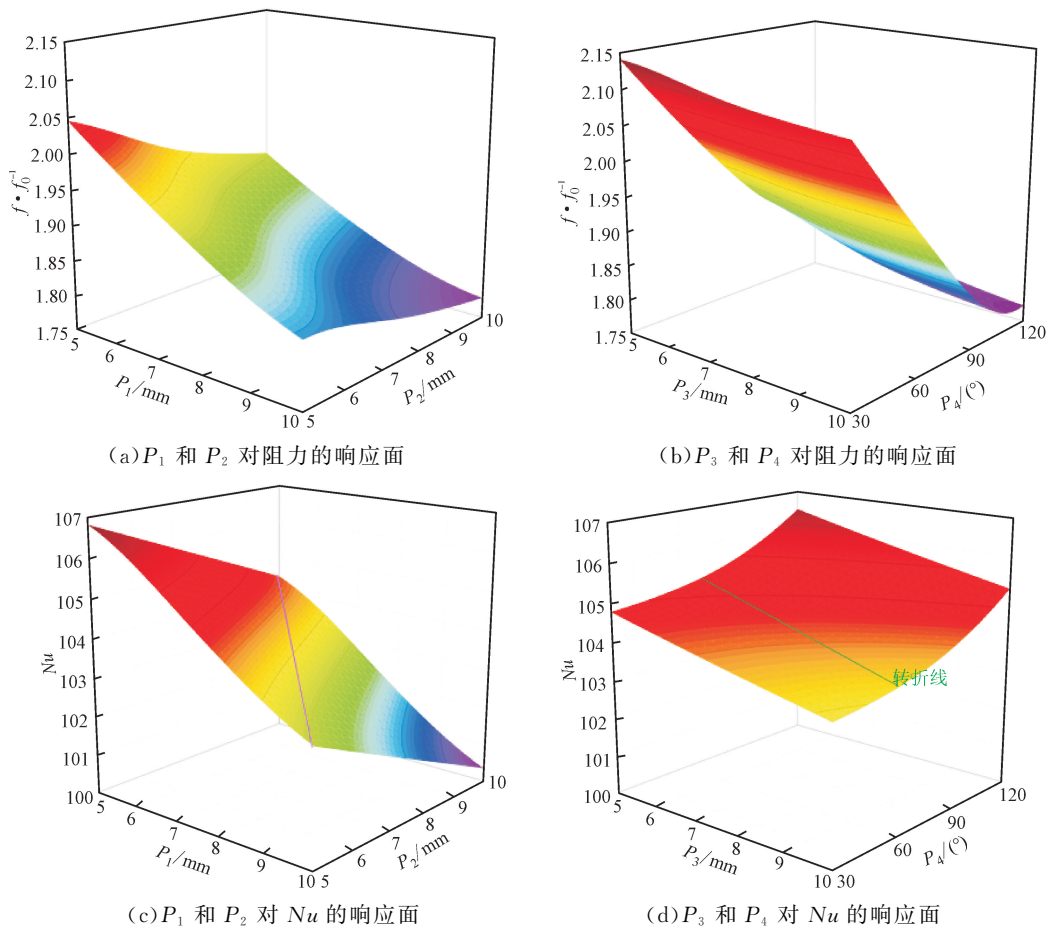


图 5 静止状态下通道阻力和平均 Nu 的响应曲面

Fig. 5 Response surface for channel resistance and average Nu at static state

表 4 基于响应面模型的优化设计计算值及 CFD 仿真值

Table 4 Calculation and CFD simulation values of optimization design based on response surface model

候选点	P_1/mm	P_2/mm	P_3/mm	$P_4/^\circ$	$f \cdot f_0^{-1}$		Nu	
					响应面计算值	CFD 仿真值	响应面计算值	CFD 仿真值
1	5.681	7.252	7.951	119.27	1.832 7	1.837 1	106.37	106.38
2	5.718	7.427	7.813	117.75	1.826 7	1.833 6	106.25	106.15
3	5.593	6.775	7.412	116.03	1.861 0	1.865 2	106.67	106.55

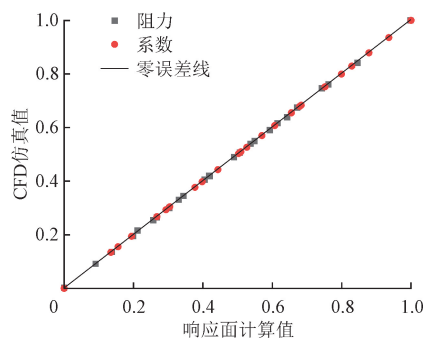


图 6 转速为 500 r/min 时阻力和 Nu 的拟合优度
Fig. 6 Goodness of fit plot of resistance and heat transfer at a rotational speed of 500 r/min

在旋转工况下,敏感性分析结果如图 7 所示。与静止工况类似,阻力和平均传热敏感度排序从大到小依旧是 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 。

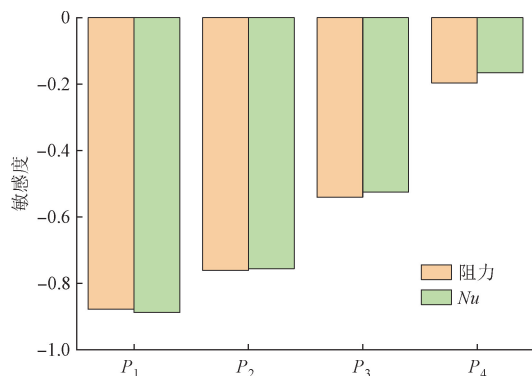
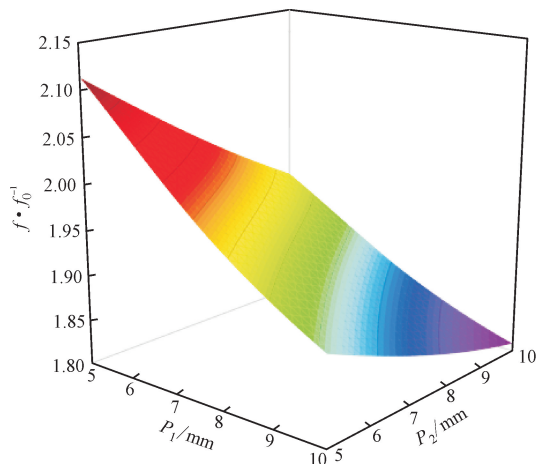


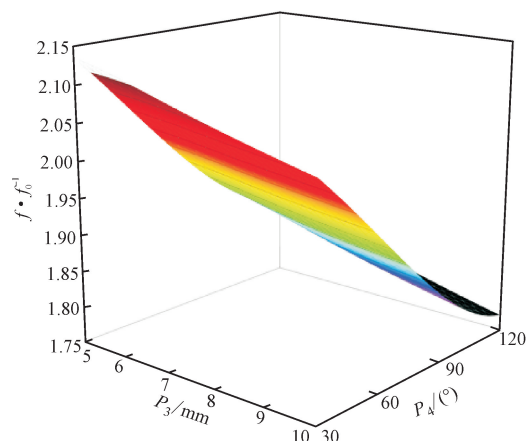
图 7 转速为 500 r/min 时通道阻力和 Nu 对各参数的敏感度

Fig. 7 Sensitivity of channel resistance and heat transfer to various parameters at a rotational speed of 500 r/min

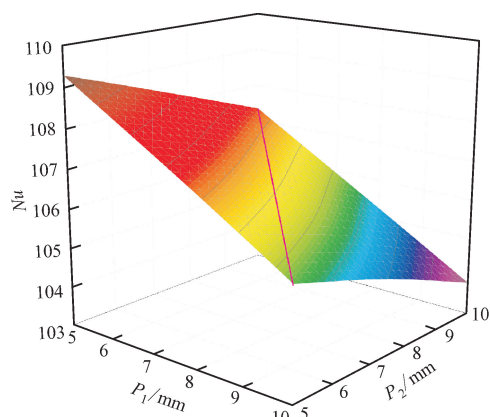
在旋转状态根据试验点拟合构建的响应面,如图 8 所示。所有的响应曲面和静止状态基本相似,仅仅是 P_4 对阻力的影响变成了先下降后升高的变化规律,拐点出现在 50° 区域,通道的传热性能迅速提升。



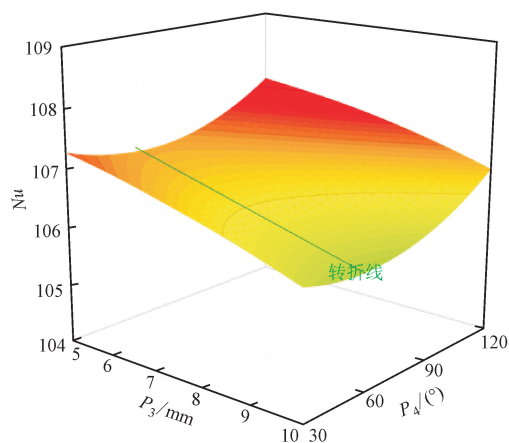
(a) P_1 和 P_2 对阻力的响应面



(b) P_3 和 P_4 对阻力的响应面



(c) P_1 和 P_2 对传热的响应面



(d) P_3 和 P_4 对传热的响应面

图 8 转速为 500 r/min 时通道阻力和平均 Nu 的响应曲面
Fig. 8 Response surface for channel resistance and average Nu at a rotational speed of 500 r/min

在旋转状态下,尽管流动阻力的变化趋势与静止状态相似,但传热性能的表现有所不同。较大的角度在某些特定区域表现出更高的传热效率,这与旋转流动中的气旋效应和涡流抑制有关。

综上所述,无论在静止还是旋转状态下, P_1 和 P_2 在一定范围内可以适当增大, P_3 的影响相对较小,而 P_4 应选择其最大值。此选择策略能够在有效减小阻力的同时,保持较高的传热效率。

表 5 为旋转工况下基于响应面图分析出的 3 个优化候选点。可以看出,候选点 1 和候选点 2 各

项参数较为接近,但在阻力和传热强度方面,候选点 1 均优于候选点 2。结合之前对静止状态下三桥通道的候选点分析,因为 (5.0 mm, 7.5 mm, 7.5 mm) 最接近两种工况下的最佳候选点,因此可以被选择为推荐组合,连接桥的角度也应该设置为 120° 。

表 5 基于响应面模型的优化设计计算值及仿真值

Table 5 Calculation and simulation values of optimization design based on response surface mode

候选点	P_1/mm	P_2/mm	P_3/mm	$P_4/(^\circ)$	$f \cdot f_0^{-1}$		Nu	
					响应面计算值	仿真值	响应面计算值	仿真值
1	5.156	6.212	8.046	119.290	1.953 0	1.953 6	109.37	109.39
2	5.177	5.394	8.549	110.040	1.977 0	1.977 4	109.31	109.33
3	5.000	5.001	5.001	30.011	2.354 3	2.364 7	109.94	109.70

2.3 优化结果

综合考虑静止和旋转优化候选点的传热和阻力性能,推荐的含有 3 个连接桥的 U 型通道的最佳组合选择如表 6 所示。为了保证设计的实际可适用性,宽度和角度尽量设置为整数,角度 119.29° 非常接近 120° ,因此选择 120° 作为桥角度。 P_1 、 P_2 、 P_3 选择 5.0、7.5、7.5 mm 的布置是因为它能更好地保证总体连接桥尺寸接近静止和旋转工况候选点 1 的整数方案,推荐的通道命名为 ABB 通道。

图 9 展示了静止和旋转状态下的 Pareto 前沿以及 ABB 通道所在位置。ABB 通道的性能非常接近 Pareto 前沿,说明这种整数化的近似调整是可以接受的。另外,与没有连接桥的通道相比,3 个连接桥的加入虽然略微减少了通道的换热强度,但显著

减少了通道的阻力。在静止情况下,通道阻力下降了 62.09%,旋转情况下下降了 56.26%。

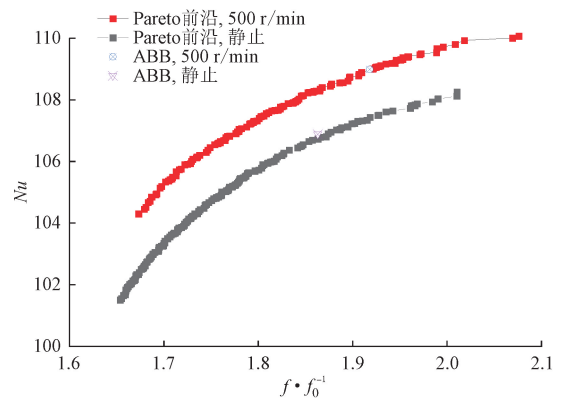


图 9 连接桥尺寸及角度优化后的最终 Pareto 前沿图
Fig. 9 Size and angle optimization of connecting bridge final Pareto front diagram

表 6 基于响应面模型连接桥的 U 型通道的最佳组合

Table 6 Optimal combination of U-shaped channels for connecting bridges based on response surface model

连接桥数	P_1/mm	P_2/mm	P_3/mm	$P_4/(^\circ)$	静止		500 r/min		通道命名
					$f \cdot f_0^{-1}$	Nu	$f \cdot f_0^{-1}$	Nu	
0					4.915 0	123.620	4.386	121.990	无桥通道
3	5.681	7.252	7.951	119.27	1.832 7	106.380			候选点 1 静止
3	5.156	6.212	8.046	119.29			1.953	109.390	候选点 1 旋转
3	5.000	7.500	7.500	120.00	1.863 0	106.881	1.918	108.987	ABB 通道

本文以无桥和 ABB 三桥组合为例,对静止和旋转状态下通道整体流动特性进行分析。图 10 给出了静止及旋转状态下通道的典型截面湍动能分布及流线图。对于无桥通道,从中截面来看,静止状态下第 1 列通道的流动较为均匀,且湍动能一直处于较

低水平;从整体来看,第 2 列通道的湍动能远大于第 1 列通道的。在旋转状态下,在转弯区域靠近前缘面区域的湍动能率先增长,但是经过转弯后在后缘面形成了一个高湍动能区域。同时,在中截面上可以看到,转弯后存在面积较大的高湍动能区域,并一

直延续至第 2 列通道中部。

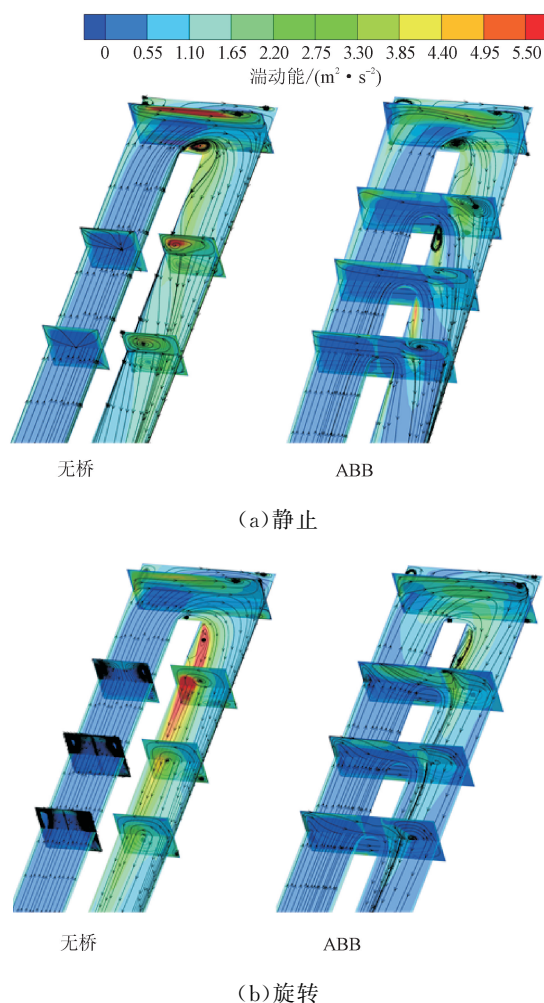


图 10 两种通道的典型截面湍动能及流线图

Fig. 10 Typical section turbine kinetic energy and streamline diagram of two channels

对于 ABB 的组合来说,与无桥通道相比,在静止状态下转弯区域上、下壁面湍动能水平有所减小。同时,第 2 列通道大尺寸连接桥后部近壁面处出现了两个较高湍动能区域,延缓了沿流向的湍动能下降,加强了桥后部区域的传热。在旋转情况下,第 2 列通道横向及纵向湍动能在静止通道的基础上进一步减小,流动趋于稳定。

综合来看,连接桥降低了转弯区域的湍动能水平,但通过工质分配提高了流场参数分布的均匀性,因此通道整体的流动阻力大大减少。

为更加清晰地对比各通道壁面的 Nu 分布,图 10 给出了无桥和 ABB 两种通道静止状态流动传热分析结果云图。可以看出:对于无桥通道,第 1 列通道的 Nu 逐步减小,进入转弯区域后,在顶面附近,由于冷却气体冲击传热产生了大面积的高 Nu 区

域;在经过第 2 个转弯之后,冷却气体向外部汇聚,并且在贴近下壁面的区域达到了 Nu 最大,之后 Nu 开始逐渐下降。

随着 3 个连接桥的引入,进入转弯区域的工质逐渐减少,因此在转弯区域和第 2 列通道出现了传热减弱但减弱的幅度明显小于单桥的情况。对于 ABB 通道来说,第 3 个连接桥的加入增加了近壁面处的高 Nu 区域的数量,同时并没有在其他区域带来明显的传热恶化。

旋转状态下,科氏力对流体流动路径的影响显著。在 U 型通道中,科氏力分别指向第 1 通道的后缘面和第 2 通道的前缘面,导致相反方向上的传热恶化。这一点在图 11 的基准通道中得到了明显体现,尤其是在流动经过竖直通道的末端时,流体两侧的传热差异较大。引入连接桥相当于在竖直通道中部为流动工质提供了侧向抽气作用,使工质撞击连接桥后部区域。由于连接桥出口的科氏力方向与流动方向相反,流体在连接桥内部表现出从后缘面向前缘面偏转的趋势。这两个因素共同作用,导致进入竖直通

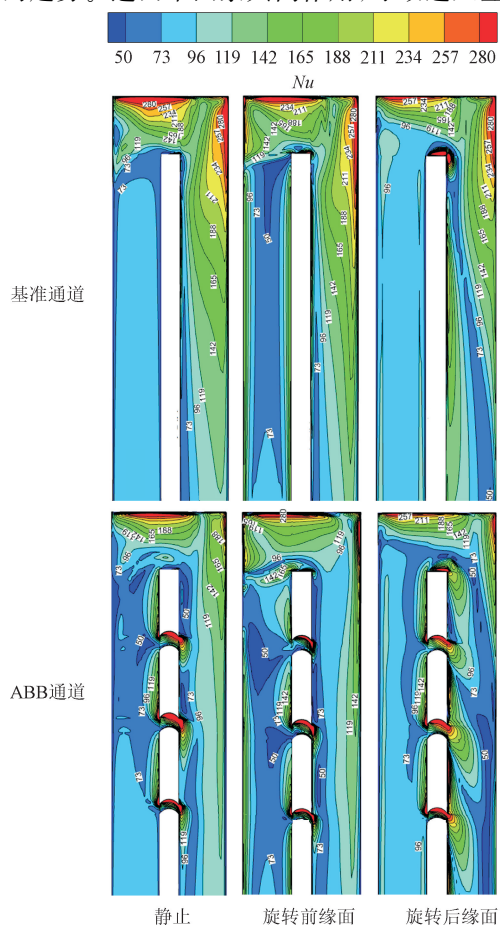


图 11 两种通道静止及旋转状态 Nu 分布云图

Fig. 11 Nu distribution for two channels in static and rotating states

道末端的流体量减少,并在桥后部形成高努塞尔数区域,从而在一定程度上抑制了科氏力的影响。

为了进一步展示组合连接桥的传热经济性优势,将 ABB 通道与文献[12-13,15]推荐的最优通道进行对比,如图 12 所示,其中横坐标是无量纲传热系数,纵坐标是通道的无量纲阻力。可以看出,ABB 通道静止和转速为 500 r/min 的两个点非常靠近横坐标轴,说明在传热经济性方面,这种变尺寸的组合连接桥有非常大的换热经济性优势。

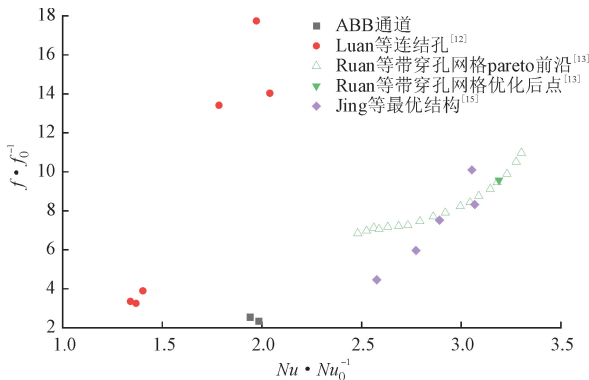


图 12 ABB 通道与近似结构的传热经济性对比

Fig. 12 Comparison of heat transfer economy between ABB channel and approximate structure

结合以上分析不难看出,在静止和旋转情况下,ABB 通道实现了对通道传热的削峰填谷。因为多个桥分散了对主流的扰动,阻力明显减少,相较于其他降阻结构传热经济性的优势非常明显。

3 结 论

(1)在透平 U 型通道中引入连接桥能够缓解转弯区域压降过大,以及平衡两个竖直通道区域旋转科氏力带来的传热不均匀现象。无论是在静止还是旋转状态下,通道中加入多个尺寸不同的连接桥能够优化通道整体流动状态,明显降低通道阻力。

(2)U 型通道中的多个连接桥对热阻性能的影响程度从大到小顺序为排布靠前的桥尺寸、桥的角度、排布靠后的桥尺寸。

(3)推荐的连接桥通道组合 ABB 能够在略微降低通道换热强度的情况下,大幅降低通道阻力。在静止状态下,通道阻力降低了 62.09%;在旋转状态下,通道阻力降低了 56.26%。经过对比证明,优化方案的组合连接桥设计在高转速燃机的冷却系统设计中具有重要应用价值。其优异的传热性能和较低的流动阻力使其成为高转速工况下理想的选择,能够显著提升冷却系统的效率和运行安全性。

团队未来会进一步探索多物理场耦合优化,如流固耦合模型和机器学习方法,以更全面地优化连接桥的性能。此外,还会对连接桥结构带来的强度和振动影响进行系统分析,为实际应用提供更全面的支持。通过这些研究,旨在追求连接桥设计的科学性和实用性的进一步提升,为更复杂的工况提供更优解。

参考文献:

- [1] HAN J C, DUTTA S, EKKAD S. Gas turbine heat transfer and cooling technology [M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.
- [2] ZHANG Guohua, ZHU Rui, XIE Gongnan, et al. Optimization of cooling structures in gas turbines: a review [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35 (6): 18-46.
- [3] 由儒全,刘泽萱,李海旺,等. 旋转条件下 U 形通道转弯段形状对流动和传热特性的影响(英文) [J]. 风机技术, 2023, 65(3): 33-42.
YOU Ruquan, LIU Zexuan, LI Haiwang, et al. Effects of turn shapes on flow and heat transfer characteristics in U-shaped channel under rotating conditions [J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2023, 65(3): 33-42.
- [4] XU Tao, SHI Dongbo, ZHANG Di, et al. Flow and heat transfer characteristics of the turbine blade variable cross-section internal cooling channel with turning vane [J]. Applied Sciences, 2023, 13(3): 1446.
- [5] LIU Qilong, SHI Dongbo, XIE Yonghui, et al. A new spiral cooling structure located in the U-shaped cooling channel for turbine rotating blades [J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 265: 125620.
- [6] GUO Xinxin, WANG Shanyou, LI Xueying, et al. Aerothermodynamic features of a Coriolis-applied smooth U channel for gas turbine blade [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2024, 197: 108815.
- [7] LIU Jie, WANG Jiabing, YANG Kun. Heat transfer enhancement in a triple-layered turbine blade internal cooling channel [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 248(Part B): 123341.
- [8] YAN Han, LUO Lei, ZHU Peimo, et al. Effects of varied bend turning vanes on flow control and heat transfer performance in a smooth two-pass channel [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2022, 135: 106044.
- [9] CHANG S W, CHEN Chian, LU Yongen. Experimental study of heat-transfer and pressure-drop performances of a rotating two-pass channel with compos-

- ite stepped skew ribs and internal effusion [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 212: 124308.
- [10] CHANG S W, HSU C J. Effect of internal effusion on aerothermal performance of a three-pass channel roughened by angled ribs and pin-fins with lateral flow exit [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 198: 123387.
- [11] CHANG S W, WU P S, LU Yongen, et al. Aerothermal performances improvement by novel stepped zebra-ribs in two-pass channel [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023, 142: 106632.
- [12] LUAN Yigang, YANG Lianfeng, BU Shi, et al. Effect of connecting holes on flow and heat transfer in a two-pass channel with and without rib turbulators [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 133: 80-95.
- [13] RUAN Qicheng, XU Liang, XI Lei, et al. Optimization design and experimental research on cooling performance of U-shaped latticework cooling structure with perforations used for gas turbine blade [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 247: 123044.
- [14] GHOSH S, WARDELL R, MONDAL S, et al. Topology optimization and experimental validation of an additively manufactured U-bend channel [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2022, 144(7): 071206.
- [15] JING Qi, ZHU Fahui, LIU Zhufeng, et al. Rotating cooling performance of two-pass rectangular channels with cross bridge and oval-shaped dimple [C]//ASME Turbo Expo 2021: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2021: V05BT15A022.
- [16] LIU Qilong, SHI Dongbo, ZHANG Di, et al. Optimization of heat transfer and friction characteristics of a rotating U-channel with a combination of variable size connecting bridges [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 220: 124913.
- [17] MUJUMDAR A S. Handbook of single-phase convective heat transfer [J]. *Drying Technology*, 1989, 7(1): 149-150.
- [18] WANG Longfei, WANG Songtao, WEN Fengbo, et al. Heat transfer and flow characteristics of U-shaped cooling channels with novel wavy ribs under stationary and rotating conditions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 126(Part B): 312-333.
- [19] SHI Dongbo, HUANG Chengming, XU Tao, et al. Thermal-fluid-solid coupling mechanism of a novel friction reduction cooling structure for gas turbine [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 213: 124343.
- [20] 刘娜, 刘钊, 丰镇平. U型通道内部流动与换热的数值研究 [J]. *工程热物理学报*, 2014, 35(9): 1733-1738.
- LIU Na, LIU Zhao, FENG Zhenping. Numerical study on flow and heat transfer in U-bend channel [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014, 35(9): 1733-1738.
- [21] 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.
- [22] WANG Zhongyi, YIN Yue, WANG Yanhua, et al. Similarity characteristics of geometric scaling matrix cooling channels in turbine blade [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 212: 118601.
- [23] ZHANGQiang, WANG Tao, HOU Qingzhi, et al. Thermal hydraulic performance augmentation by petal-shaped ribs in a two-pass cooling channel [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 40: 102542.
- [24] FAIZAN M, SHUJA S Z, YILBAS B S, et al. Flow analysis of a rectangular channel with triangular and semi-spherical protrusions [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, 162: 106793.
- [25] GUO Xinxin, XU Haonan, LI Xueying, et al. Flow and heat transfer characteristics of Coriolis-utilization rotating rectangular smooth cooling U-channel [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 211: 118420.
- [26] SINGH P, LI Weihong, EKKAD S V, et al. Experimental and numerical investigation of heat transfer inside two-pass rib roughened duct ($AR=1:2$) under rotating and stationary conditions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 113: 384-398.
- [27] SARAVANI M S, DIPASQUALE N J, ABBAS A I, et al. Heat transfer evaluation for a two-pass smooth wall channel: stationary and rotating cases [J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2020, 142(6): 061305.
- [28] 席雷, 高建民, 徐亮, 等. 基于响应面法的 X 型桁架阵列通道冷却性能优化 [J]. *航空动力学报*, 2024, 39(1): 19-27.
- XI Lei, GAO Jianmin, XU Liang, et al. Optimization of cooling performance of X-type truss array channel based on response surface methodology [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2024, 39(1): 19-27.

(编辑 杜秀杰)