

气膜孔缺陷对冷却性能影响不确定性量化研究

郝铭扬, 李志刚, 李军

(西安交通大学叶轮机机械研究所, 710049, 西安)

摘要: 针对高压涡轮全气膜冷却叶片因气膜孔加工几何偏差(气膜孔几何缺陷)所导致的实际冷却性能难以量化评估的问题,提出了整体参数评估、流动参数降维、流动分区量化的三重不确定性量化策略,以实现其高效精准量化。以锥型气膜孔参数化模型为气膜孔模型,三重不确定性量化策略为不确定性表征方法,混沌多项式展开为量化算法,构建了气膜孔几何缺陷下冷却性能不确定性量化框架。以近实际运行工况的第一级进口导叶端壁为研究对象,详细阐述了所提不确定性量化策略的逐层修正的量化思想以及数理依据,并通过冷却性能统计矩表明其差异性及适用性。研究结果表明:当气膜孔几何偏差影响显著时,采取多气膜孔及独立加工的设计理念以充分利用气膜孔偏差分散性,冷却性能鲁棒性可提高 30% 以上。对比结果表明:在冷气射流主导工况下,流动参数降维策略不确定性预测偏差在 3% 以下。通过统计矩演化趋势论证了在二次流主导工况下,基于涡系/二次流的流动分区量化可实现可靠的不确定性量化。该研究结果验证了所提不确定性量化策略的准确性和可靠性,可为发展高鲁棒性的涡轮叶栅冷却布局提供高效的评估工具。

关键词: 气膜孔几何缺陷;冷却性能;不确定性量化;流动参数

中图分类号: V231.1 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202605012 **文章编号:** 0253-987X(2026)05-0120-11

Research on Uncertainty Quantification of the Effect of Film Cooling Hole Defects on Cooling Performance

HAO Mingyang, LI Zhigang, LI Jun

(Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To address the difficulty in quantitatively evaluating the actual cooling performance of high-pressure turbine full-coverage film-cooling vanes caused by geometric deviations (i. e., film hole geometric imperfections) during film hole processing, a triple uncertainty quantification strategy, integrating overall parameter evaluation, flow parameter dimensionality reduction, and flow partitioning quantification, was proposed to achieve efficient and accurate assessment. A framework for uncertainty quantification of cooling performance under film hole geometric imperfections was established, employing a parameterized conical nozzle film hole imperfection model as the film hole model, the triple uncertainty quantification strategy as the uncertainty characterization approach, and polynomial chaos expansion as the quantification algorithm. Taking the endwall of the first-stage inlet guide vane under near-actual operating conditions as the research subject, the progressive refinement philosophy and theoretical basis of the proposed uncertainty quantification strategy were elaborated, and the

differences and applicability were demonstrated through statistical moments of cooling performance. The results indicate that when the impact of film cooling hole geometric deviations is significant, adopting a design philosophy of multiple film cooling holes and independent processing to leverage the dispersion of hole deviations can improve the robustness of cooling performance by more than 30%. Comparative results show that under conditions dominated by coolant jet flow, the uncertainty prediction deviation of the flow parameter dimensionality reduction strategy is below 3%. The evolution trends of statistical moments demonstrate that under conditions dominated by secondary flows, flow partitioning quantification based on vortex/secondary flow structures can achieve reliable uncertainty quantification. The findings validate the accuracy and reliability of the proposed uncertainty quantification strategy, providing an efficient evaluation tool for developing highly robust cooling configurations in turbine cascades.

Keywords: film hole geometric imperfections; cooling performance; uncertainty quantification; flow parameters

随着燃气轮机热效率的不断提高,其涡轮进口温度也屡创新高,以至于远超金属材料的耐温极限。为保障燃气轮机的耐用性和可靠性,气膜冷却技术被集成到现代燃气轮机设计,其基本原理为:将来自上游压气机的冷气经由离散气膜孔喷射而出,从而在涡轮叶片表面形成保护膜以隔绝高温燃气的侵蚀。

为实现高效的气膜冷却性能,研究人员开展了大量的研究。研究表明,气膜冷却性能与气膜孔几何因素、无量纲流动参数^[1-4]密切相关。为此,提出了一系列新奇的气膜孔结构^[5]以实现高效的冷却性能。

随着燃气轮机性能指标、微型化和轻量化要求的不断提高,气膜孔几何偏差的影响也愈发显著。白波等^[6]、徐柯文等^[7]和 Von Mueller 等^[8]分别针对不同形态气膜孔堵塞对于端壁、叶顶及压力面冷却的影响开展了研究,研究表明,堵塞影响会导致气膜冷却效率(冷效)显著恶化。史伟^[9]和 Veley 等^[10]研究了增材制造技术所导致的随机粗糙微结构对冷却性能的影响,研究表明,在中、高吹风比下,增材制造气膜孔内的随机粗糙微结构增强了孔内流动的湍动度,进而增强与主流的掺混损失,导致冷却性能下降。

激光打孔技术因其能在数 ms 内对覆盖有热障涂层的高温合金完成气膜孔加工而成为当前最广泛使用的气膜孔加工工艺之一。激光打孔技术将激光束聚焦至叶片表面,通过加热、激发电子使得叶片材料发生熔融、蒸发、汽化等现象,并利用反冲压力或核沸腾机制实现熔融体消融,最终实现气膜孔加工^[11]。由于激光加工过程中汽化材料飞溅及熔融材料再凝固现象导致气膜孔通常伴随着不规则孔型及其他影响气膜孔几何精度的随机缺陷,如锥角、微

裂痕、孔径偏差等。Bandyopadhyay 等^[12]指出经激光加工气膜孔最显著的特征为其进口孔径显著大于出口孔径。虽然经由后处理工艺可以提高气膜孔几何精度,但也会削弱激光打孔工艺的快速性和经济性。因此,有必要开展相关研究以了解激光打孔气膜孔缺陷对冷却性能的影响。

Jovanović 等^[13]是最早开展激光打孔气膜孔缺陷对气膜冷却性能影响研究的学者之一。为表征激光打孔造成的孔内熔融体再凝固现象,Jovanović 等提出了壁面熔滴模型。实验结果表明,孔内熔滴堵塞加速了孔内射流,进而影响气膜孔出口下游的涡系结构,最终影响近壁面冷却性能。Nemdili 等^[14]基于壁面熔滴模型开展数值模拟研究,讨论了不同熔滴位置及流动情况对冷却性能的影响。研究表明,熔滴的存在使得冷却性能对流动参数变化更为敏感,堵塞效应越显著,冷却性能恶化更为严重。

Cerantola 等^[15]使用 3D X 光扫描技术对激光加工试件几何特征进行了提取。扫描结果显示,气膜孔具有明显的不规则和喷嘴特征。Cerantola 等的数值模拟结果表明,简化喷嘴型孔与试件冷却性能最为接近。Hao 等^[16]基于 Cerantola 等的研究成果进一步提出了锥形喷嘴气膜孔缺陷参数化模型,并研究了气膜孔缺陷对跨声速叶栅端壁冷却性能的影响。研究表明,气膜孔缺陷导致了冷气近壁面动量显著提高,并限制了马蹄涡强度,最终改变了端壁冷气覆盖。

激光打孔工艺的固有特性使得加工而成的气膜孔几何偏差存在显著随机性,如何高效准确量化不确定参数的影响尤为重要。近年来,为了量化不确定参数影响下燃气轮机气热性能的波动性,国内外

学者基于研究对象发展了多种高效不确定性量化方法。Montomoli 团队依次提出了基于统计矩的任意混沌多项式稀疏逼近法和多保真神经网络不确定性量化方法,量化了涡轮叶片型线偏差的影响^[17-18]。黄明等^[19]提出了遗传算法加速的不确定性分析系统,用以研究涡轮动叶叶顶气热性能不确定性。郭振东等^[20]提出了自适应稀疏混沌多项式的不确定性量化方法,实现了高效的叶栅型线鲁棒性优化。王嘉骏等^[21]结合拉丁超立方、多项式混沌以及 Sobol 敏感性分析,建立了排气扩压器不确定性量化框架。罗宇轩等^[22]提出了基于 Kriging 模型主动学习法(AK-MCS)的透平轮盘概率疲劳寿命量化方法。

尽管发展了一系列高效的不确定性量化方法,但气膜孔缺陷对涡轮叶栅冷却性能影响的不确定性量化研究在公开文献中少有涉及。限制该方面研究的主要原因是涡轮叶片通常布置有数十乃至上百个气膜孔,即使是参数化的气膜孔缺陷模型及目前最先进的不确定性量化算法也会因“维度灾难”问题而无法开展。

本文针对激光打孔缺陷提出了一种三重不确定性量化策略,以实现对于涡轮叶栅缺陷气膜孔冷却性能不确定性量化。该不确定性量化策略包含整体参数评估、流动参数降维和流动分区量化 3 个组成部分,各部分计算精度依次提升以应对不同工程问题的需求。本文以近实际运行工况的第一级进口导叶端壁为研究对象,阐述了多重不确定性量化思想及数理依据,并通过量化结果对比验证了方法的有效性。所提方法旨在为评估激光打孔工艺加工的全气膜冷却叶栅提供准确高效的鲁棒性评估工具。

1 计算模型和数值方法

1.1 计算模型和网格

本研究采用 Virginia Tech 跨声速叶栅试验台试验件为研究对象。叶栅几何放大 1.5 倍以匹配目标出口马赫数。图 1 给出了叶栅计算模型和网格。表 1 列举了实验叶栅的主要几何参数和流动条件。如图 1(a)所示,计算域包含 1 个完整的叶栅通道、20 个上游双排离散气膜孔和 1 个冷气供应腔。

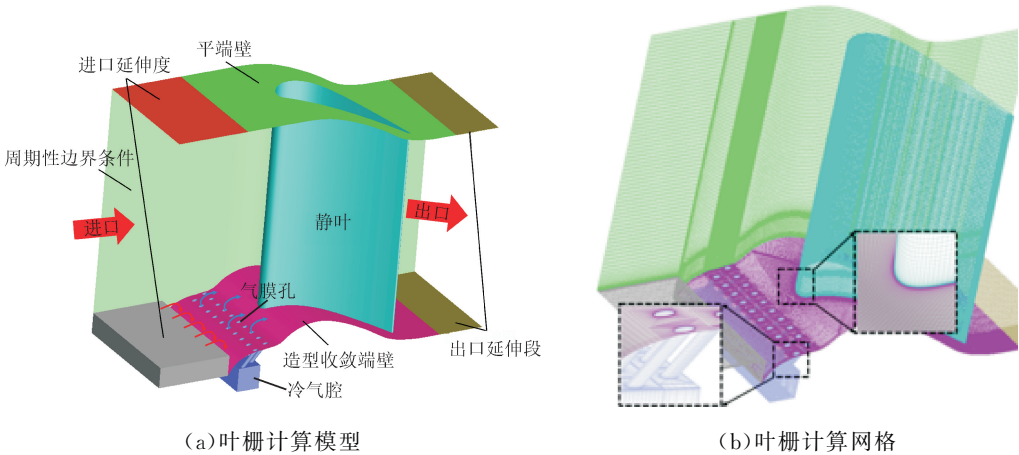


图 1 叶栅计算模型和网格
Fig. 1 Computational model and computational mesh of the vane

表 1 叶栅几何参数和流动条件

Table 1 Vane geometry parameters and flow conditions	
参数	数值
轴向弦长 C_x /mm	50
叶片弦长 C /mm	91.2
叶片节距 t /mm	83.1
叶高 S /mm	152.4
气膜孔射流角/(°)	50
气膜孔孔径 D /mm	2.4
出口雷诺数 Re_{ex}	1.7×10^6
出口马赫数 Ma_{ex}	0.85

采用 ICEM CFD 划分多块结构化网格。为充分解析近壁面流动传热特性,近壁面网格采用加密处理,端壁第一层网格高度约为 0.001 5 mm,膨胀比为 1.12,最大无量纲壁面距离 $y^+ < 1$,满足可实现 $k-\epsilon$ (realizable $k-\epsilon$)模型近壁面要求。图 2 给出了网格无关性验证结果,当网格数达到 1 200 万时,周向平均绝热气膜有效度 $\bar{\eta}$ 相比 1 400 万时变化较小,满足网格无关性要求。其中跨声速叶栅研究中绝热气膜有效度 η 及周向平均绝热气膜有效度 $\bar{\eta}$ 的定义如下

$$\eta = (T_r - T_{aw}) / (T_r - T_c)$$

(1)

$$\bar{\eta} = \frac{1}{L_x} \int_0^{L_x} \eta_x(s) ds$$

(2)

式中: T_r 表示恢复温度; T_{aw} 表示绝热壁面温度; T_c 表示冷气温度; L_x 表示轴向位置 x 处的周向长度; $\eta_x(s)$ 表示轴向位置 x 处、周向位置 s 处的绝热气膜有效度。

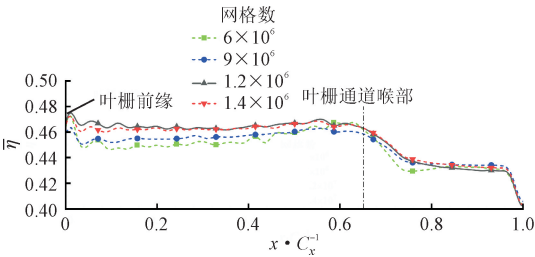


图 2 网格无关性验证

Fig. 2 Grid independence verification

1.2 数值方法

采用 ANSYS FLUENT 求解三维稳态雷诺平均 Navier-Stokes(RANS)方程,选用可实现 $k-\epsilon$ 模型及增强近壁面处理,计算分析端壁的气膜冷却效率。计算域进口给定实验实测沿叶高分布总温总压,冷气进口给定质量流量,详细边界条件如表 2 所示。

表 2 叶栅模型边界条件

Table 2 Vane computational boundary conditions

参数	属性或数值
工质	理想气体
湍流强度/%	16
湍流尺度/mm	3
主流进口条件	总温总压
冷气进口条件	质量流率
出口条件	平均压力
吹风比 B_R	2.5
密度比 D_R	1.95
冷气温度/K	298/295

本文采用质量流率比 M 、吹风比、密度比及动量流率比 I 4 种无量纲流动参数描述冷却射流特性。采用绝热气膜有效度 η 评估端壁气膜冷却效率。

质量流率比、吹风比及密度比分别定义如下

$$M = m_c / m_m$$

(3)

$$B_R = \rho_c V_c / (\rho_m V_m)$$

(4)

$$D_R = \rho_c / \rho_m$$

(5)

式中: m_c 和 m_m 分别是冷气和主流的质量流率; ρ_c 和

ρ_m 分别是冷气和主流的密度; V_c 和 V_m 分别是冷气和主流的流速。

Ornano 等^[23]建议采用动量流率比表征冷气和主流的交互作用以量化冷气射流状态

$$I = \rho_c V_c^2 / (\rho_m V_m^2)$$

(6)

为实现冷气性能的准确评估,采用了白波等^[6]提出的基于双冷气温度模型的冷却性能预测方法,即在每个工况下,开展两次独立的 CFD 计算,除冷气温度外其他计算参数保持一致,冷气温度 (T_{c1} , T_{c2}) 设置如表 2 所示。在绝热无滑移壁面条件下,2 次不同冷气温度 CFD 计算的近壁面流体温度 ($T_{f,c1}$, $T_{f,c2}$) 近似等于绝热壁面温度 ($T_{aw,c1}$, $T_{aw,c2}$), 则基于双冷气温度模型的绝热气膜有效度 η 表达式如下

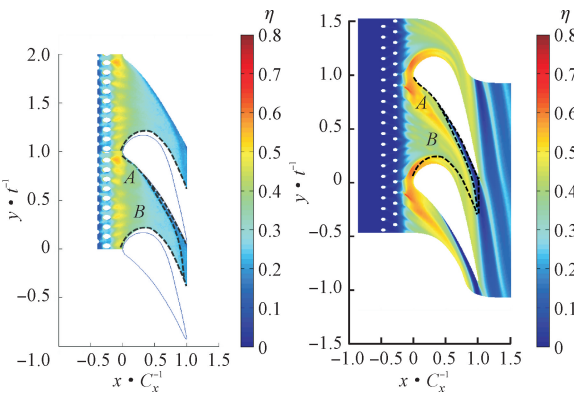
$$\eta = \frac{T_{aw,c1} - T_{aw,c2}}{T_{c1} - T_{c2}}$$

(7)

1.3 数值方法验证

为实现对所研究的 Virginia Tech 跨声速叶栅的端壁流动特征的精准捕捉, Li 等^[24]对湍流模型进行了充分对比,其中可实现 $k-\epsilon$ 模型实现了最佳的预测精度。本节将聚焦于实验数据^[25]和数值预测结果的定性与定量比较。

图 3 给出了实验测量和数值预测结果的气膜冷却效率分布云图的定性对比。图 4 给出了实验测量和数值预测的沿叶栅中央特征流线的气膜冷却效率分布。数值方法所关注区域的预测结果与实验测量结果拟合良好,特别是数值方法捕捉到了近压力面(A 区)和叶栅通道中央(B 区)的冷却特征。其中所关注的叶栅通道区域的冷效偏差均位于实验不确定度 (± 0.1) 范围内,该区域内的最大相对偏差小于 30%。



(a)实验测量 (b)CFD 计算结果

图 3 端壁实验测量和数值预测结果对比

Fig. 3 Film cooling effectiveness distributions gained by experiment and numerical prediction

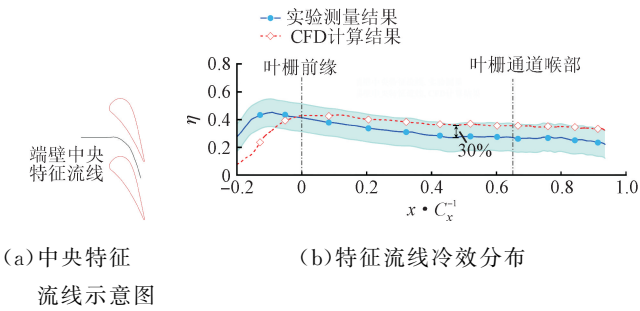


图 4 端壁中央特征流线冷效分布

Fig. 4 Film cooling effectiveness distribution along the middle pitch streamline in cascade gained by experiment and numerical prediction

2 不确定性量化

2.1 不确定性量化方法

为实现激光打孔几何随机缺陷对叶栅冷却性能影响的高效准确的量化,本文采用了广义混沌多项式展开开展不确定性量化研究。相比于传统的蒙特卡罗法,该方法能以较少的样本实现满足工程精度需求的不确定性量化。

假定 $\mathbf{Y}$ 是几何存在随机偏差及流动参数波动下叶栅系统的响应性能, $\boldsymbol{\xi}$ 表示所研究的 d 维叶栅不确定性参数向量,则广义混沌多项式展开可以表示为

$$\mathbf{Y} = \sum_{j=0}^{\infty} \boldsymbol{\alpha}_j \Psi_j(\boldsymbol{\xi}) \tag{8}$$

式中: $\boldsymbol{\alpha}_j$ 是概率密度函数; Ψ_j 是一组正交多项式基。当不确定参数的高阶精度(q 阶)满足工程所需时,可将式(8)截断至有限项 P_n ,表达式为

$$\mathbf{Y} = \sum_{j=0}^{P_n} \boldsymbol{\alpha}_j \Psi_j(\boldsymbol{\xi}) \tag{9}$$

多项式的项数 N_t 可以通过下式计算

$$N_t = P_n + 1 = \frac{(q+d)!}{q!d!} \tag{10}$$

式(9)中不确定系数 $\boldsymbol{\alpha}_j$ 可以通过如下 Galerkin 投影法进行求解

$$\boldsymbol{\alpha}_j = \frac{\langle \mathbf{Y}, \Psi_j \rangle}{\langle \Psi_j^2 \rangle} = \frac{1}{\langle \Psi_j^2 \rangle} \int_{\Omega} \mathbf{Y} \Psi_j \rho(\boldsymbol{\xi}) d\boldsymbol{\xi} \tag{11}$$

式中: $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示多项式的内积; $\rho(\boldsymbol{\xi})$ 表示联合概率密度。

采用全张量积确定不确定参数的采样点组合。通过下式评估全张量积法所需的采样点组合数

$$N_{\text{sample}} = (q+1)^d \tag{12}$$

基于广义混沌多项式展开的正交性,可以利用多项式系数推导出系统响应性能 $\mathbf{Y}$ 的均值 $\boldsymbol{\mu}$ 和标准

差 $\boldsymbol{\sigma}$,表达式如下

$$\boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\alpha}_0 \tag{13}$$

$$\boldsymbol{\sigma}^2 = E[(\mathbf{Y} - \boldsymbol{\mu})^2] = \sum_{j=1}^{P_n} \boldsymbol{\alpha}_j^2 \langle \Psi_j^2 \rangle \tag{14}$$

2.2 不确定性参数

本文采用 Hao 等^[16]所提出的锥形喷嘴气膜孔缺陷参数化模型针对激光打孔气膜几何随机缺陷影响下冷却性能的不确定性开展研究。

该模型采用了相同的气膜孔进、出口面积比来模型化实际气膜孔,如图 5 所示。通过相互独立的气膜孔进口孔径 D_{in} 和气膜孔锥角 ϕ 实现面积比($D_{\text{ex}}^2/D_{\text{in}}^2$)的控制,其中 D_{ex} 表示气膜孔出口孔径。表 3 给出了锥形喷嘴模型参数及其概率密度分布。 D_{ideal} 表示理想圆柱孔的直径,用以表征锥型喷嘴孔孔径与设计条件下的理想圆柱孔孔径之间的关系。根据 Karimi 等^[26]对统计矩收敛性的讨论, $q=3$ 足以满足工程不确定性分析,因此在后续研究中均采用三阶多项式进行不确定性量化。



图 5 锥形喷嘴气膜孔缺陷参数化模型示意图^[16]

Fig. 5 Conical nozzle film hole imperfection model^[16]

表 3 锥形喷嘴气膜孔几何参数及其概率密度分布

Table 3 Conical nozzle model geometric parameters and variation ranges

参数	均值	概率密度分布
进口孔径 D_{in}	$1.45D_{\text{ideal}}$	$N(1.45D_{\text{ideal}}, 0.1D_{\text{ideal}})$
锥角 $\phi/(^\circ)$	2.8	$N(2.8, 0.2)$

3 不确定性分析

本文针对全气膜冷却叶栅多气膜孔随机几何缺陷导致的高维不确定参数困境,建立了整体参数评估、流动参数降维、流动分区量化的三重不确定性量化策略,并基于 Virginia Tech 跨声速叶栅端壁模型对方法的适用性和有效性开展论证。

3.1 整体参数评估

当气膜孔缺陷影响不可忽略,且加工工艺得到的气膜孔偏差一致性较强的情况下,整体参数评估策略对叶栅全气膜孔几何偏差采取一致性设置。此时,该不确定性量化问题可建模为

$$\eta = f(\Gamma = C_{bc}, P_{t,c} = C_{Pt}, D_{in}, \varphi) \tag{15}$$

式中： Γ 是除孔型及冷气进口条件外的边界条件； $P_{t,c}$ 是冷气进口总压； C_{bc} 和 C_{Pt} 分别表示 Γ 和 $P_{t,c}$ 采用恒定边界条件。 D_{in} 和 ϕ 是几何不确定参数并遵从表 3 的概率密度分布。

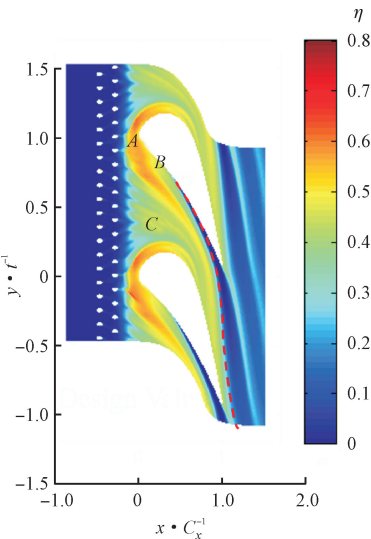
表 4 给出了基于理想圆柱孔的确定性流动参数评估,及基于锥形喷嘴缺陷气膜孔的不确定性流动参数评估结果。由表 4 可以看出,由于缺陷气膜孔的喷嘴型特征导致在气膜孔内存在显著的流动加速现象,具体表现在 I 增加了约 54%。但喷嘴型特征也使得其在孔参数波动影响下,冷气出口动量方面具有良好的鲁棒性,其 3 倍标准差区间(即 $\pm 3 \sigma_I$) 的波动仅为均值 μ_I 的 4.8%。孔几何参数波动的影响主要集中在冷气质量流率比的变化,其标准差高达均值的 21%,这显然为涡轮可靠服役造成巨大隐患。

表 4 设计条件及不确定性条件下流动参数
Table 4 Flow parameters under design conditions and uncertainty conditions

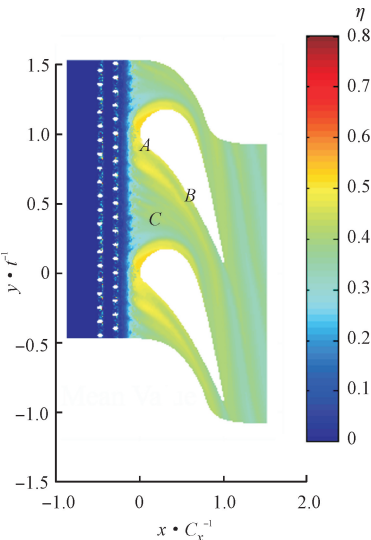
参数	理想圆柱孔	缺陷孔
I	3.10	
μ_I		4.78
σ_I		0.038
$M/\%$	1.27	
$\mu_M/\%$		1.41
$\sigma_M/\%$		0.3

图 6 给出了确定性及不确定体系下端壁绝热气膜有效度。对比图 6(a)和图 7(b)可以看出,随着冷气近壁面动量的显著增强,缺陷气膜孔冷却性能的均值在近压力面难冷却区(B 区)得到有效改善。

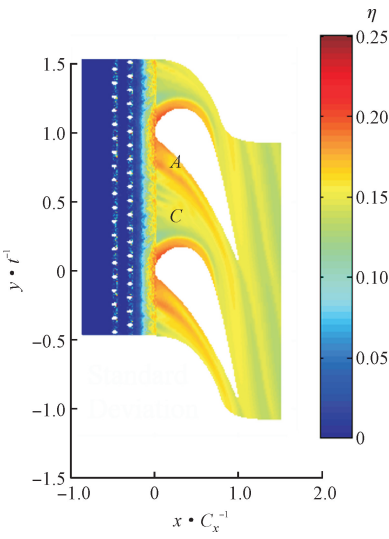
冷气质量流率比的显著波动(0.51%~2.31%)直接导致了端壁冷气性能的显著波动,其中叶栅通道中央(C 区)的绝热气膜有效度标准差约为 0.15,如图 6(c)所示。叶栅前缘区域的冷却性能则对于冷气质量流率比波动更为敏感,其冷气性能标准差约为 0.2。这是由于气膜孔出口的高冷气动量增强了与主流之间的耗散现象,而当冷气供应不足时,冷气向下游迁移的过程中伴随着冷气动量的明显衰减。此时,冷气高动量不仅增强了耗散现象,削弱了冷气附着能力,同时还无法有效限制二次流的强度,最终导致了冷气的低效利用。当冷气供应充足时,叶栅前缘区域附近的当地冷气动量足以抑制马蹄涡的强度,并实现良好的冷气附着。



(a)设计性能



(b)冷却性能均值



(c)冷却性能标准差

图 6 端壁绝热气膜有效度偏差

Fig. 6 Deviations of film cooling effectiveness

3.2 流动参数降维

在实际激光打孔工艺加工气膜孔过程中,受加工工艺及加工材料影响,所加工的气膜孔质量可能具有分散性,即气膜孔的几何特征彼此之间并不一致。为考虑这种气膜孔质量分散性,通常需要独立考虑每个气膜孔的几何参数变化。此时,相比于3.1节的冷气特征会有两点差异:①气膜孔质量极端偏差的概率 P 会显著降低,对于当前叶栅模型极端概率由 P 下降至 P^{20} ($P < 1$);②气膜孔几何偏差的局部影响更为突出,而非全域协同变化。

若考虑气膜孔的偏差各异性,则会面临显著的维度灾难困境,这也是当前限制开展相关研究的主要因素。以本文所采用的方法及模型为例,此时不确定参数高达40个(2×20)。采用式(12)进行评估,需开展 $(q+1)^{40}$ 次计算流体力学(CFD)计算,这无疑是工程设计所无法接受的。

本文提出了流动参数降维策略,其主要思想是将高维几何不确定参数转化为受气膜孔缺陷影响的流动参数波动,该过程可以建模为

$$(M, I) = f(\Gamma = C_{bc}, P_{t,c} = C_{Pt}, D_{in}, \varphi) \quad (16)$$

$$\eta = f(\Gamma = C_{bc}, M, I) \quad (17)$$

如3.1节所述, I 的波动幅度仅为4.8%,因此可以忽略其波动性的影响。此时,冷气性能的波动主要来源于冷气质量流率比的波动。流量系数 C_d 可以有效量化不同几何特征的气膜孔的供气能力,其定义如下

$$C_d = m/m_{ise} = m / \left\{ p_{t,c} (1/\pi)^{(\kappa+1)/2\kappa} \sqrt{2\kappa [\pi^{(\kappa-1)/\kappa} - 1] A_{ideal} / [(\kappa-1) R_g T_{t,c}]} \right\} \quad (18)$$

$$\pi = p_{t,c} / p_m \quad (19)$$

式中: A_{ideal} 是理想气膜孔截面积; m_{ise} 是冷气进口总压 $p_{t,c}$ 和主流静压 p_m 的压比 π 基于等熵膨胀所评估的理想质量流率; k 为比热比; R_g 为气体常数。

基于单气膜孔的流量系数 $C_{d,i}$ 概率分布可以求得全气膜孔流量系数 $\bar{C}_{d,20}$ 的联合概率密度分布。基于上述流程,实现了气膜孔几何质量具有分散性时对冷气总供应能力影响的评估,避免了对于冷气总质量流率比偏差的高估,即差异①的影响。修正冷气总质量流量的概率密度计算式如下

$$M = \bar{C}_{d,20} m_{ise} / m_m \quad (20)$$

图7给出了修正冷气总质量流率比的概率密度。由图7可以看出,修正冷气总质量流率比的概率密度近似 $N(1.41\%, 0.07\%)$ 的高斯分布。

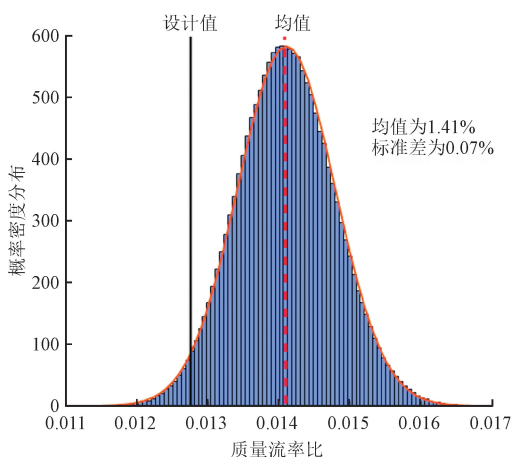


图7 冷气总质量流率比概率密度分布

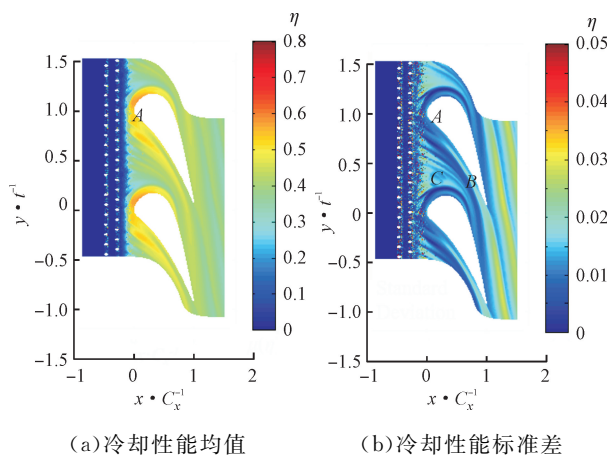
Fig. 7 Probability density distribution of total mass flow ratio with film hole imperfection

基于上述分析,该不确定性量化问题可建模为

$$\eta = f(\Gamma = C_{bc}, M, I = 4.78) \quad (21)$$

式中:仅有 M 为不确定参数,并服从 $N(1.41\%, 0.07\%)$ 的概率分布。

图8给出了基于流动参数降维法的端壁绝热气膜有效度不确定性量化结果。对比图8(a)和图6(b)可以看出,其冷气分布样式基本一致,但流动参数降维法评估的冷却性能均值有所提高,其中前缘区域(A区)提升约0.1。



(a) 冷却性能均值

(b) 冷却性能标准差

图8 流动参数降维法评估端壁绝热气膜有效度偏差

Fig. 8 Deviations of film cooling effectiveness on the endwall with coolant mass flow fluctuation

对比图8(b)和图6(c)可以看出,两种不确定量化策略下冷却性能敏感区存在显著差异。参数降维法评估的冷却性能波动幅度较小,其主要敏感区位于近压力面难冷却区(B区)。这是由于参数降维法中冷气质量流率比的小幅波动(由0.3%降至0.07%)

不足以显著影响马蹄涡强度,以至于叶片前缘(A区)的高冷效波动区消失。在局部冷气动量不足以限制叶栅通道横流梯度的作用时,冷气流量的波动造成冷气向近压力面难冷却区的迁移能力的波动。

3.3 流动分区量化

3.2 节中流动参数降维方法将高维几何不确定参数转化为受气膜孔缺陷影响的流动参数波动,通过冷气质量流率比修正考虑了气膜孔供气能力存在差异时对总冷气供应能力的影响。但该方法仍忽略了气膜孔偏差造成的局部影响,以及间接造成的场域影响。

综合上文分析,考虑任意气膜孔几何质量会导致计算成本无法接受,并且单气膜孔的质量流率波动范围有限,其对冷气效率的影响也易被周围气膜孔的影响抵消。Van De Noort 等^[27]建议采用叶片区域分区思想实现公差区域化分析。

文献[28-29]研究结果表明,冷气与叶栅二次流结构存在明显的拮抗作用,即其相对强度直接影响冷气覆盖效果及二次流损失。此外,3.2 节研究结果也表明,冷气性能的波动性除与冷气质量流率波动相关外,与二次流强度的变化密切相关。因此,在本节中提出了基于涡系/二次流结构的流动分区量化策略。

近端壁二次流结构与冷气的拮抗作用主要体现在马蹄涡压力侧分支、马蹄涡吸力侧分支及叶栅通道内横流。图 9 给出了气膜孔冷气射流流线及端壁冷效云图。根据图 9 中冷气流线及冷气覆盖分布对冷气供应腔进行分区,由上至下分别体现冷气与马蹄涡压力侧分支、叶栅通道横流梯度和马蹄涡吸力侧分支的拮抗作用。由此,流动分区策略将高维几何不确定参数的不确定性问题转化为冷气波动之下与各二次流结构拮抗程度变化的不确定性问题,该

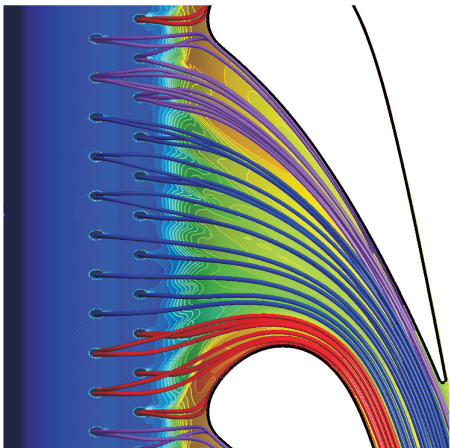


图 9 气膜孔冷气射流流线

Fig. 9 Near endwall streamline of cooling jets

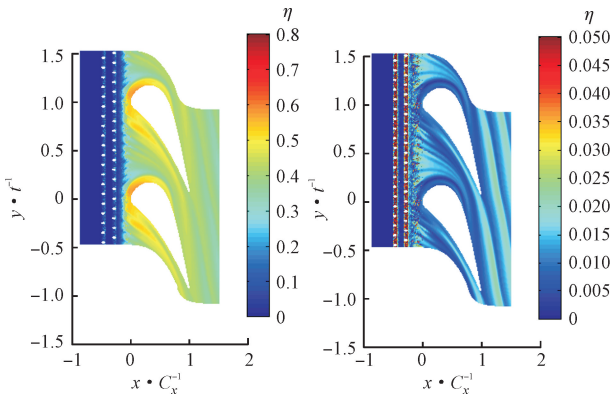
问题可以建模为

$$\eta = f(\Gamma = C_{bc}, \sum_{i=1}^3 M, I = 4.78) \tag{22}$$

式中: M 为 3 个冷气区的不确定参数。

图 10 给出了基于流动分区量化策略的端壁绝热气膜有效度不确定性量化结果。对比图 8 和图 10 可以看出,在本文所研究的叶栅模型下两种方法预测的冷却性能均值及标准差分布体现出了相似性。图 11 给出了流动分区量化策略与流动参数降维策略预测结果的绝对偏差。由图 11(a)看出,流动分区量化法在前缘上游区域(A区)的预测结果略低于流动参数降维法。这是由于在流动参数降维法中将流动波动平均至每一个气膜孔处,从而削弱了局部区域内冷气流量波动幅度。流动分区量化策略中,前缘上游气膜孔射流削弱了马蹄涡的强度,马蹄涡对冷气的滞止及卷吸作用减小导致了 A 区冷效的降低。伴随着马蹄涡压力侧和吸力侧分支的削弱,冷气对叶片根部实现了更好的覆盖,如 B 区及马蹄涡吸力面分支(D区)的冷效增长所示。叶栅通道分区冷气流量波动的增强也同样实现了 C 区的冷效增长。

由图 11(b)可以看出,相比于流动参数降维法,流动分区量化法的冷气性能波动程度整体降低,特别是压力面角区(B区)及喉部下游区域。这是由于随着冷气向下游迁移,局部冷气附着受多个二次流结构直接或间接影响,其波动极易受其余二次流结构强度所削弱,这与流动参数降维法中冷气对全域二次流的同步削弱不同。C 区周向上、下边界受马蹄涡压力侧分支及吸力侧分支强度变化的影响,其波动程度也呈缩小现象。在单一冷气分区内,伴随着对二次流结构的削弱能力的增强,冷气分区内气膜孔下游冷气性能波动有所增强。



(a)冷却性能均值 (b)冷却性能标准差

图 10 流动分区量化法评估绝热气膜有效度偏差
Fig. 10 Deviations of film cooling effectiveness with separating sections

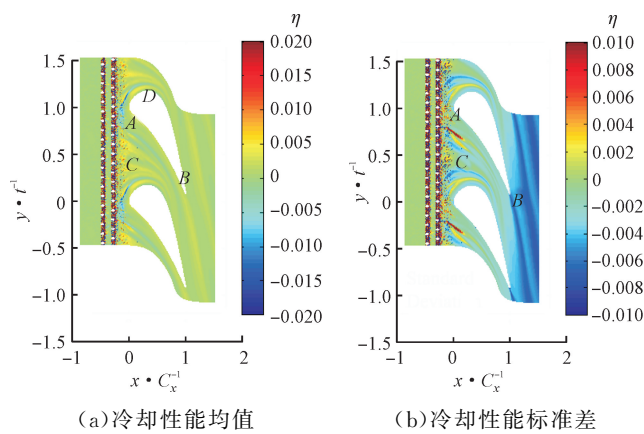


图 11 流动分区量化法与流动参数降维法对比

Fig.11 Comparisons between separating sections and flow parameter dimensionality reduction

3.4 对比与分析

本文针对激光打孔缺陷提出了一种三重不确定性量化策略以实现对于涡轮叶栅缺陷气膜孔冷却性能不确定性量化。该不确定性量化策略包含整体参数评估、流动参数降维和流动分区量化 3 个组成部分。

图 12 给出了三重不确定性量化策略下沿流向周向平均绝热气膜有效度的统计分布($\mu\pm\sigma$)。3.2 节的分析结果表明,气膜孔几何质量的分散程度会导致冷气质量流率比相差高达 400%,其中整体参数评估策略预测冷气质量流率比标准差为 0.3%,而流动参数降维策略则为 0.07%。对比图 12(a)、图 12(b)和图 12(c)可以看出,气膜孔几何质量的分散程度最终导致了冷气性能鲁棒性的显著差异,具体表现为:整体参数评估策略得到冷气性能波动高达 38%,显著高于流动参数降维策略(8%)和流动分区量化(5%)。因此,当气膜孔加工偏差影响不可忽略时,涡轮工程师在保证相同供气能力的情况下,可采取多气膜孔布局及气膜孔独立加工的设计理念,充分利用气膜孔偏差分散性以提高冷气性能鲁棒性。

针对所加工的气膜孔质量具有分散性的场合,进一步发展了流动参数降维策略和流动分区量化策略。3.3 节中的定性比较及图 12(b)和图 12(c)的定量对比结果均显示了流动参数降维策略和流动分区量化策略预测结果高度的相似性。这表明当冷气射流对二次流结构实现较好抑制时,流动参数降维策略可以通过较低的计算成本实现满足工程精度的不确定性量化,而避免了因细化任意气膜孔影响所导致的维度灾难困境。

尽管流动参数降维策略和流动分区量化策略在

本研究所采用的叶栅模型的预测方法显示出了高度相似性,但定性及定量对比也反映了流动分区量化策略在二次流主导工况下潜在的差异。结合图 12(b)和图 12(c)的定量对比结果可以发现,流动分区量化策略预测的气膜孔及气膜孔下游冷效波动会有所增强,其原因在于考虑了局部波动的作用,而非整体均化。伴随着冷气向下游迁移,增强的冷气波动受其余二次流结构影响而被削弱,其表现为叶栅通道内冷却效率波动范围由图 12(b)的 4%~8%下降为图 12(c)的 3%~5%。通过流动参数降维策略和流动分区量化策略预测结果进行对比可以得出,当考虑任意气膜孔偏差时其气膜孔及气膜孔下游波动会有所增强,但偏差程度有限。并且这种差异会在向下游迁移过程中受其余二次流结构影响而迅速衰减,最终与具有相同冷气与二次流拮抗作用的工况的冷却性能一致。

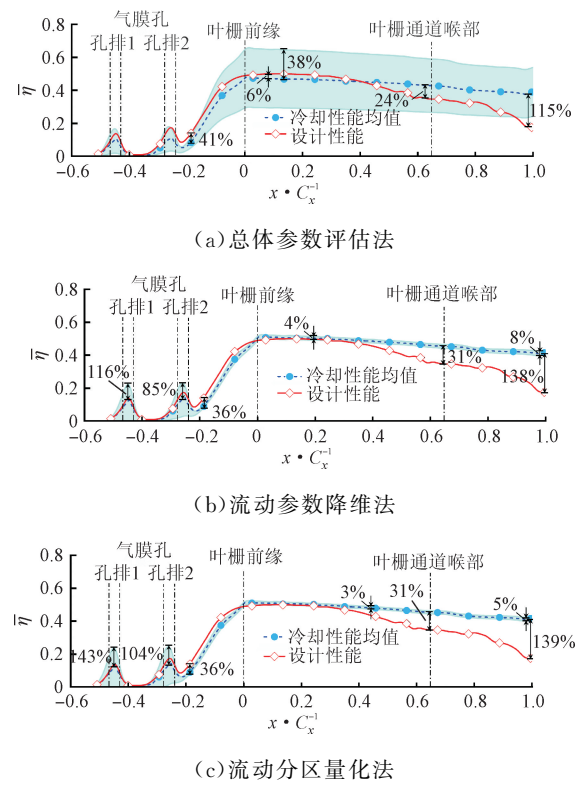


图 12 三重不确定性量化策略下周向平均绝热气膜有效度的统计分布

Fig.12 Statistical distribution of pitch-averaged values of adiabatic film cooling under triple uncertainty quantification strategy

表 5 总结了三重不确定性量化策略的特点及其适用性。三重策略依所研究不确定问题的特征有其最适应用场景。

表 5 三重不确定性量化策略特点

Table 5 Characteristics of the triple uncertainty quantification strategy

不确定性 量化策略	策略核心思想	不确定 参数	计算成本	计算量	量化精度	最适用场景
总体参数评估	全气膜几何偏差一致性设置	气膜几何偏差	低	$(q+1)^d$	低	气膜孔加工质量一致性较高的场合
流动参数降维	受几何偏差影响的总流动参数波动	流动参数波动	中	$+(q+1)^F$	中	气膜孔加工质量呈显著分散性,但二次流强度被显著抑制的场合
流动分区量化	冷气与各二次流结构拮抗程度变化	分区流动参数	高	$+(q+1)^{R \times F}$	高	气膜孔加工质量呈显著分散性,且二次流作用显著的场合

注: q 为多项式阶数; d 为气膜孔缺陷几何不确定参数数; F 为受几何偏差影响的流动不确定参数数; R 为基于涡系/二次流的冷气分区数; + 为在前一种计算量的基础上增加计算量。

4 结 论

本文针对激光打孔缺陷提出了一种三重不确定性量化策略,以实现对于涡轮叶栅缺陷气膜孔冷却性能不确定性量化。本文以近实际运行工况的第一级进口导叶端壁为研究对象,利用所提不确定性量化策略开展不确定性量化研究,主要结论如下。

(1)基于气膜孔几何质量分散性及二次流强度特征分别针对性地发展出了总体参数评估、流动参数降维及流动分区量化策略。

(2)当气膜孔几何偏差影响显著时,采取多气膜孔布局及气膜孔独立加工的理念,充分利用气膜孔偏差分散性,冷却性能波动幅度可降低 30% 以上。

(3)在二次流结构强度被抑制时,流动参数降维策略可以通过较低的计算成本实现冷却性能不确定性量化,其与流动分区量化策略在叶栅通道冷效不确定预测偏差小于 3%。

(4)流动参数降维和流动分区量化策略之间统计矩演化趋势论证了在二次流主导的工况下,基于涡系/二次流的流动分区量化策略可有效实现叶栅通道冷效不确定量化。

参考文献:

[1] NARZARY D P, LIU Kuochun, RALLABANDI A P, et al. Influence of coolant density on turbine blade film-cooling using pressure sensitive paint technique [J]. Journal of Turbomachinery, 2012, 134(3): 031006.

[2] 姚春意, 朱惠人, 李鑫磊, 等. 主流湍流度对涡轮导叶压力面扩张型气膜孔冷却特性的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(3): 58-69.

YAO Chunyi, ZHU Huiren, LI Xinlei, et al. Effects of mainstream turbulence intensity on film cooling characteristics of diffused holes on turbine vane pres-

sure side [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(3): 58-69.

[3] 刘存良, 谢刚, 朱惠人. 高主流湍流度下倾斜角对圆柱孔气膜冷却特性影响的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(1): 47-53.

LIU Cunliang, XIE Gang, ZHU Huiren. Experimental research on the effect of hole-inclined angle on the film cooling characteristics under high mainstream turbulence intensity [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(1): 47-53.

[4] 郭嘉杰, 王新军, 鲍宇航. 椭圆孔及偏转角对凹槽叶顶气膜冷却流动换热特性的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(1): 153-161.

GUO Jiajie, WANG Xinjun, BAO Yuhang. Effects of oval-hole and inclination angle on the flow and heat transfer performance of the turbine blade with squealer tip [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(1): 153-161.

[5] BUNKER R S. A review of shaped hole turbine Film-Cooling technology [J]. Journal of Heat Transfer, 2005, 127(4): 441-453.

[6] 白波, 郝铭扬, 张垣坦, 等. 气膜孔堵塞对涡轮叶栅端壁气热和叶片泛冷冷却性能影响的研究 [J]. 推进技术, 2025, 46(6): 177-188.

BAI Bo, HAO Mingyang, ZHANG Kaiyuan, et al. Effects of film hole blockage on endwall aerothermal and vane phantom cooling performances of turbine cascade [J]. Journal of Propulsion Technology, 2025, 46(6): 177-188.

[7] 徐柯文, 何坤, 晏鑫. 气膜孔堵塞对凹槽叶顶冷却传热性能的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(6): 139-152.

XU Kewen, HE Kun, YAN Xin. Effects of film cooling hole blockage on cooling and heat transfer performance at squealer tip [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(6): 139-152.

- [8] VON MUELLER T, BACCI D, WAMBERSIE A, et al. Effect of blockages on film effectiveness on the pressure surface of a turbine blade [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2025, 147(5): 051018.
- [9] 史伟. 燃机透平气膜孔加工精度对气膜冷却流动传热特性影响 [D]. 北京: 清华大学, 2019.
- [10] VELEY E M, THOLE K A, FURGESON M T, et al. Printability and overall cooling performance of additively manufactured holes with inlet and exit rounding [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2023, 145(3): 031017.
- [11] MCNALLY C A, FOLKES J, PASHBY I R. Laser drilling of cooling holes in aeroengines: state of the art and future challenges [J]. *Materials Science and Technology*, 2004, 20(7): 805-813.
- [12] BANDYOPADHYAY S, SARIN SUNDAR J K, SUNDARARAJAN G, et al. Geometrical features and metallurgical characteristics of Nd: YAG laser drilled holes in thick IN718 and Ti-6Al-4V sheets [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 127(1): 83-95.
- [13] JOVANOVIĆ M B, DE LANGE H C, VAN STEENHOVEN A A. Effect of hole imperfection on adiabatic film cooling effectiveness [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2008, 29(2): 377-386.
- [14] NEMDILI F, AZZI A, JUBRAN B A. Numerical investigation of the influence of a hole imperfection on film cooling effectiveness [J]. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 2011, 21(1): 46-60.
- [15] CERANTOLA D J, BIRK A M. Quantifying blowing ratio for shaped cooling holes [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2018, 140(2): 021008.
- [16] HAO Mingyang, BAI Bo, ZHANG Jiawei, et al. Uncertainty analysis of laser drilling imperfection and impacts on the cooling performance of a transonic turbine vane [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2025, 147(4): 041016.
- [17] AHLFELD R, MONTOMOLI F. A single formulation for uncertainty propagation in turbomachinery: SAMBA PC [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2017, 139(11): 111007.
- [18] LI Zhihui, MONTOMOLI F, CASARI N, et al. High-dimensional uncertainty quantification of high-pressure turbine vane based on multifidelity deep neural networks [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2023, 145(11): 111009.
- [19] 黄明, 张垚垣, 李志刚, 等. 涡轮动叶气膜冷却结构的凹槽状叶顶气热性能不确定性量化 [J]. *航空学报*, 2024, 45(19): 94-106.
- [20] HUANG Ming, ZHANG Kaiyuan, LI Zhigang, et al. Uncertainty quantification of aerothermal performance of squealer tip with film cooling structure [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(19): 94-106.
- [21] 郭振东, 李豪杰, 宋立明, 等. 基于自适应稀疏混沌多项式的鲁棒性优化方法 [J]. *航空学报*, 2024, 45(19): 107-121.
- [22] GUO Zhenhong, LI Haojie, SONG Liming, et al. Robust optimization method based on adaptive sparse polynomial chaos [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(19): 107-121.
- [23] 王嘉骏, 范志泽楷, 闫晨曦, 等. 燃气轮机涡轮排气扩压器气动性能的不确定性量化和敏感性分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2025, 59(9): 165-176.
- [24] WANG Jiajun, FAN Zhizekai, YAN Chenxi, et al. Uncertainty quantification and sensitivity analysis on aerodynamic performance of gas turbine exhaust diffuser [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2025, 59(9): 165-176.
- [25] 罗宇轩, 李金星, 赵名星, 等. 采用 AK-MCS 的燃气轮机轮盘疲劳寿命预测及可靠性评估 [J]. *西安交通大学学报*, 2024, 58(4): 107-116.
- [26] LUO Yuxuan, LI Jinxing, ZHAO Mingxing, et al. Research on the method of low-cycle fatigue life prediction and reliability evaluation of gas turbine discs based on AK-MCS [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2024, 58(4): 107-116.
- [27] ORNANO F, POVEY T. Experimental and computational study of the effect of momentum-flux ratio on high-pressure nozzle guide vane endwall cooling systems [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2017, 139(12): 121002.
- [28] LI Zhigang, BAI Bo, LI Jun, et al. Endwall heat transfer and cooling performance of a transonic turbine vane with upstream injection flow [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2022, 144(4): 041004.
- [29] MAO Shuo, SIBOLD R, NG W F, et al. Experimental study of the endwall heat transfer of a transonic nozzle guide vane with upstream jet purge cooling: part 1 effect of density ratio [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2022, 144(5): 051003.
- [30] KARIMI M S, RAISEE M, SALEHI S, et al. Robust optimization of the NASA C3X gas turbine vane under uncertain operational conditions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 164: 120537.

(下转第 173 页)

SUN Jiaojiao, LI Yinhui, LI Pengwei, et al. Piezoelectric nanogenerator based on ZnO@rGO/PVDF flexible composite film [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2023, 45(2): 306-312.

[20] 谈建强, 李银辉, UWAYEZU E, 等. 毛刷状 ZnO@PVDF 复合纳米纤维柔性压电纳米发电机 [J]. *电子元件与材料*, 2023, 42(2): 173-180.

TAN Jianqiang, LI Yinhui, UWAYEZU E, et al. Piezoelectric nanogenerator based on brush-like ZnO@PVDF composite fiber [J]. *Electronic Components and Materials*, 2023, 42(2): 173-180.

[21] PAN Liang, WANG Ying, JIN Qiuyi, et al. Self-poled PVDF/recycled cellulose composite fibers utilizing cellulose nanocrystals to induce PVDF β -phase formation through wet-spinning as a flexible fabric piezoelectric sensor [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 479: 147742.

[22] FENG Wanqi, CHEN Yixiang, WANG Wei, et al. A waterproof and breathable textile pressure sensor with high sensitivity based on PVDF/ZnO hierarchical structure [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 633 (Part 2): 127890.

[23] WANG Yabing, ZHU Miaomiao, WEI Xuedian, et al. A dual-mode electronic skin textile for pressure and temperature sensing [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 425: 130599.

[24] 申国栋, 刘喜冉, 姚一军, 等. 棉织物基 ZnO/BaTiO₃/PVDF 压电传感器及其性能 [J]. *纺织高校基础科学学报*, 2025, 38(2): 33-40.

SHEN Guodong, LIU Xiran, YAO Yijun, et al. Cotton fabric-based ZnO/BaTiO₃/PVDF piezoelectric sensor and its performances [J]. *Basic Sciences Journal of Textile Universities*, 2025, 38(2): 33-40.

[25] 余兆勇, 王诗雯, 王莉莉, 等. 聚吡咯改性钛酸钡纳米颗粒/聚偏氟乙烯复合压电薄膜的制备及性能分析 [J]. *浙江理工大学学报(自然科学)*, 2024, 51(4): 466-473.

YU Zhaoyong, WANG Shiwen, WANG Lili, et al. Preparation of polypyrrole-modified barium titanate nanoparticles/polyvinylidene fluoride composite piezoelectric films and their performance analysis [J]. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University(Natural Sciences)*, 2024, 51(4): 466-473.

[26] GUO Hang, WAN Ji, WU Hanxiang, et al. Self-powered multifunctional electronic skin for a smart anti-counterfeiting signature system [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(19): 22357-22364.

[27] XIN Feifei, DENG Jinjun, WANG Wenlong, et al. Boosting piezoelectric response of PVDF via synergistic effect of dopamine-treated BaTiO₃ and graphene for self-powered pressure sensor [J]. *Sensors and Actuators; A Physical*, 2025, 387: 116470.

[28] M A H, KARUMUTHIL S C, RAJAN L. Optimization of PVDF nanocomposite based flexible piezoelectric tactile sensors: a comparative investigation [J]. *Sensors and Actuators; A Physical*, 2023, 353: 114215.

(编辑 杜秀杰)

(上接第 130 页)

[27] VAN DE NOORT M, IRELAND P T, TELISINGHE J C. Effects of manufacturing tolerances on double-wall effusion cooling [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2024, 146(1): 011009.

[28] FRIEDRICHS S, HODSON H P, DAWES W N. Heat transfer committee best paper of 1995 award: distribution of film-cooling effectiveness on a turbine endwall measured using the ammonia and diazo technique [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1996, 118(4): 613-621.

[29] FRIEDRICHS S, HODSON H P, DAWES W N. Aerodynamic aspects of endwall film-cooling [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1997, 119(4): 786-793.

(编辑 武红江)