

燃气透平双肩壁凹槽叶顶流动传热性能优化研究

李浩玉, 何坤, 晏鑫

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为提升航空发动机透平级第一级动叶双肩壁凹槽叶顶的传热性能, 对其叶顶结构进行了优化设计。采用 Kriging 近似模型和多目标遗传算法, 以面平均传热系数与透平级等熵效率为优化目标, 获得了一种具有优良气热性能的透平级双肩壁凹槽叶顶。通过定常与非定常数值模拟, 对比分析了优化后的双肩壁凹槽叶顶、传统凹槽叶顶及 2 种典型双肩壁凹槽叶顶的气热特性。研究表明: 优化后双肩壁凹槽叶顶的内肩壁高度低于外肩壁, 且内肩壁吸力侧高度高于压力侧。定常计算结果表明: 优化后的凹槽叶顶在保持透平级等熵效率不变的同时, 可显著改善传热性能。与传统凹槽叶顶相比, 凹槽底部、肩壁区域、叶顶整体的传热系数分别降低了 30.36%、2.96%、9.52%。内肩壁结构可有效抑制腔室涡系尺寸, 从而减弱高温泄漏流对凹槽底面的冲击。非定常计算表明: 优化后的双肩壁凹槽叶顶有效降低了凹槽内部温度和压力波动幅值, 同时优化后的内肩壁结构可抑制腔室涡的发展, 从而使得其时均面平均传热系数降低了 5.65%。该研究可为实际透平级第一级动叶的设计提供理论依据。

关键词: 透平级; 凹槽叶顶; 双肩壁; 传热; 优化设计; 非定常

中图分类号: TK47 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202606013 **文章编号:** 0253-987X(2026)06-0154-12

Optimization of Flow and Heat Transfer Performance for Double-Rim Squealer Tip in Gas Turbines

LI Haoyu, HE Kun, YAN Xin

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To enhance the heat transfer performance of a double-rim squealer tip for the first-stage rotor blade in an aero-engine turbine, the squealer tip structure was optimized in this study. A Kriging surrogate model coupled with a multi-objective genetic algorithm (MOGA) was employed to optimize the area-averaged heat transfer coefficient and turbine-stage isentropic efficiency, giving rise to a turbine-stage double-rim squealer tip exhibiting favorable aero-thermal performance. Steady and unsteady numerical simulations were performed to compare and analyze the aero-thermal characteristics of the optimized double-rim squealer tip with those of a conventional squealer tip and two types of typical double-rim squealer tips. The study results showed that the optimized double-rim squealer tip featured an inner rim lower than the outer rim, and a greater inner rim height on the suction side than on the pressure side. Steady computation results indicated that, with the turbine-stage isentropic efficiency unchanged, the optimized squealer tip exhibited noticeably improved heat transfer

performance, for it achieved reductions in heat transfer coefficient at the squealer bottom, in the rim area, and over the entire tip of 30.36%, 2.96%, and 9.52%, respectively, relative to the conventional squealer tip. The inner rim structure was observed to effectively suppress the scale of the cavity vortex system, thereby mitigating the impingement of high-temperature leakage flow on the squealer bottom. Unsteady computation results suggested that the optimized double-rim squealer tip effectively reduced the amplitudes of temperature and pressure fluctuations within the squealer; furthermore, suppression of cavity vortex development by the optimized inner rim structure led to a 5.65% decrease in the time-averaged area-averaged heat transfer coefficient. The study is expected to provide a theoretical basis for the design of first-stage rotor squealer tips in practical turbine stages.

Keywords: turbine stage; squealer tip; double-rim; heat transfer; optimization design; unsteady

航空发动机循环效率的增强与燃气透平进口温度的升高直接相关。目前,第一级动叶的叶顶温度已超过 $1\,400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1], 远超材料的耐热极限。为延长发动机寿命,应当采用可靠的热防护措施。研究表明,优化叶顶构型可改善流场结构并降低热负荷。相比平叶顶,凹槽叶顶因具有低热负荷,低泄漏量等优点,已被广泛应用于燃气透平第一级动叶中。另外,还有学者提出了双肩壁凹槽叶顶结构^[2-3],可进一步改进叶顶流场结构,降低叶顶热负荷。

学者研究表明,改变叶顶结构可提升叶顶区域的气热性能。冯·卡门实验室的 Cernat 等^[2]、Pátý 等^[3]率先提出了双肩壁凹槽叶顶,数值研究表明:该叶顶结构能够限制凹槽内涡流的发展,降低热负荷。吴琛琦等^[4]通过数值方法研究发现,在发动机工况下,带小翼的凹槽叶顶可降低叶顶平均传热系数。Yan 等^[5]在发动机工况下,针对带气膜孔的双肩壁凹槽叶顶进行了优化,相比于传统凹槽叶顶,优化后的叶顶结构使得面平均传热系数降低了约 90.30%,冷却效率提升了约 49.60%。

优化算法在燃气透平领域应用广泛^[6],已成为提升凹槽叶顶气热性能的重要途径。Kang 等^[7]通过 Kriging 近似模型和多目标遗传算法对肩壁厚度、凹槽深度等进行优化,发现了凹槽深度与间隙的最优匹配关系。秦正等^[8]通过优化,得到一种气热性能更优的双肩壁凹槽叶顶。相比于传统凹槽叶顶,其有效提升了叶顶面平均冷却效率,并降低了面积平均传热系数。Vincekovic 等^[9]通过多参数近似法提升了凹槽叶顶的气动性能,相比于传统叶顶,透平级效率提高了 1.40%。李琛玺等^[10]、Schabowski 等^[11]、Maral 等^[12]分别优化了气膜孔分布、小翼结构和凹槽构型,并均证明了叶顶结构的优化,能显著

改善叶顶区域的气动与传热性能。De Maesschalck 等^[13]、Zhou 等^[14]则将神经网络和参数化方法成功应用于叶顶的优化设计中。

透平发动机旋转产生的动静干涉效应,使得叶顶区域的流动与传热呈现出显著的非定常特征,相关研究已广泛开展。Wang 等^[15]通过对比不同叶顶结构的非定常传热性能发现,流场与通道涡发展有明显的差异。Jiang 等^[16]研究表明,上游静叶尾迹使叶顶传热系数呈周期性变化。Ameri 等^[17]指出,尾迹的干扰会影响瞬时传热,但时均值与稳态工况接近。Zhou 等^[18]发现,相比于传统叶顶,带小翼的凹槽叶顶具有更低的泄漏量和更优的气动性能。Rahman 等^[19]与 Atkins 等^[20]均证实了非定常效应对叶顶气热性能的影响显著。

现有研究表明,双肩壁凹槽叶顶具有良好的气热性能,但其叶顶结构的优化及发动机工况下的非定常分析尚需深入研究。为此,本文基于 Kriging 模型与多目标遗传算法,对发动机工况下双肩壁凹槽叶顶的内肩壁构型进行优化,并与传统及 2 种典型双肩壁叶顶进行对比,评估其气热性能。同时,进一步开展透平级非定常计算,结合快速傅里叶变换(FFT)的频域分析揭示其流场结构,并与传统凹槽叶顶对比,阐明优化后双肩壁凹槽叶顶在实际运行中的瞬态性能。

1 计算模型及方法

1.1 计算模型与边界条件

本文以 GE-E³ 燃气透平第一级^[21]为研究对象,透平级动、静叶型线从 NASA 报告中获得。图 1 展示了双肩壁凹槽叶顶的计算模型。

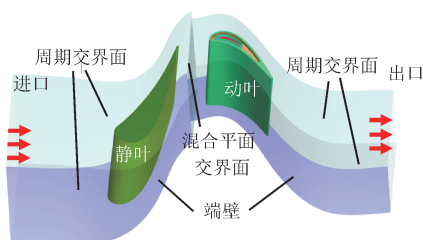


图1 双肩壁凹槽叶顶计算模型

Fig. 1 Computational model of the blade with double-rim squealer tip

表1列出了计算模型的具体参数。本文主要针对内肩壁折构型进行优化设计,故凹槽深度与传统凹槽叶顶保持一致。由于凹槽腔室内空间有限,内肩壁厚度与内外肩壁间距的可变范围很小,因此在本文的优化过程中保持不变。

表1 双肩壁凹槽叶顶计算模型参数

Table 1 Parameters for the computational model of the blade with double-rim squealer tip

参数	数值
静叶数(定常)	46
静叶数(非定常)	38
动叶数	76
动叶叶片高度/mm	39.60
透平级入口气流角/(°)	0
动叶叶顶间隙/mm	0.40
动叶轴向弦长/mm	28.70
凹槽深度/mm	1.65
外凹槽轴向弦长/mm	21.55
外肩壁厚度/mm	1.00

计算工况为发动机海平面起飞工况^[22]。流体设置为理想气体,气体动力黏性系数 μ 需采用Sutherland公式^[23]计算,其表达式为

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1.5} \frac{T_0 + T_s}{T + T_s} \quad (1)$$

式中: μ_0 为气体在标准状况下的黏性系数,取值为 $1.1716 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-5}$; T 为当地的气体温度; T_0 为参考温度,取值为273.15 K; T_s 为Sutherland常数,取值为110.40 K。

表2给出定常计算的边界条件。此外,定常计算的动静交界面采用Stage混合平面模型。在非定常计算中,总时长约为1.2 ms,即动叶旋转一周的时间周期;时间步长设置为旋转过一个动叶通道时间的1/60;每个时间步长迭代步数设置为18步。动静交界面采用瞬态转静子模型。

表2 定常计算边界条件

Table 2 Boundary conditions for steady-state numerical simulations

参数	数值
转速/($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)	1 391.149
进口总温/°C	1 739
进口总压/MPa	2.526
进口湍流强度/%	5.000
出口静压/MPa	1.080
壁面温度/K	1 273

1.2 参数定义

数值计算中,透平级凹槽叶顶的传热系数 h 的计算公式^[24]为

$$h = \frac{q}{T_w - T_0^*} \quad (2)$$

式中: q 为壁面热通量; T_w 为壁面温度; T_0^* 为进口总温。

透平级等熵效率 η_s 的计算公式为

$$\eta_s = \frac{i_{in}^* - i_{local}^*}{k(k-1)^{-1}RT_0^* [1 - (P_1/P_0^*)^{(k-1)/k}]} \quad (3)$$

式中: i_{in}^* 为级进口总焓; i_{local}^* 为当地总焓; k 为绝热指数,取值为1.33; R 为气体常数,取值为 $287 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; P_0^* 为进口总压; P_1 为出口静压。另外,式(3)的分子为透平级实际做功过程中的焓差,分母为理想等熵过程的焓差。

1.3 数值方法验证

图2给出了3种湍流模型计算与实验结果^[25]的叶顶传热系数云图。经对比可知,标准 $k-\omega$ 湍流模型计算得出的叶顶传热系数云图与实验结果最接近。

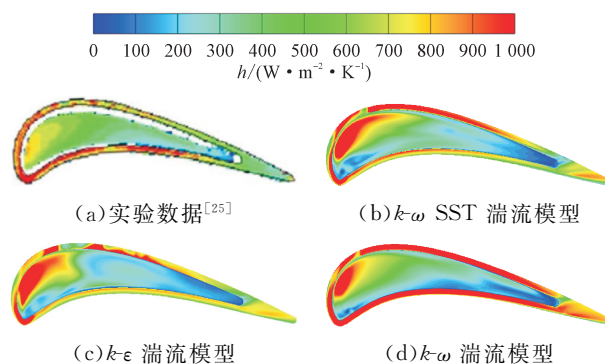


图2 3种湍流模型计算和实验获得的叶顶传热系数分布云图

Fig. 2 Heat transfer coefficient distribution contours on squealer tip obtained from three turbulence models and experimental measurements

图3给出了凹槽底部传热系数的节距平均传热系数 $\bar{h}$ 沿轴向分布(z 为轴向位置, C_{ax} 为叶片轴向弦

长)的曲线。由图可知,标准 $k-\omega$ 湍流模型计算的节距平均传热系数曲线与实验结果更接近。综上所述,本文最终采用 $k-\omega$ 湍流模型进行数值计算。

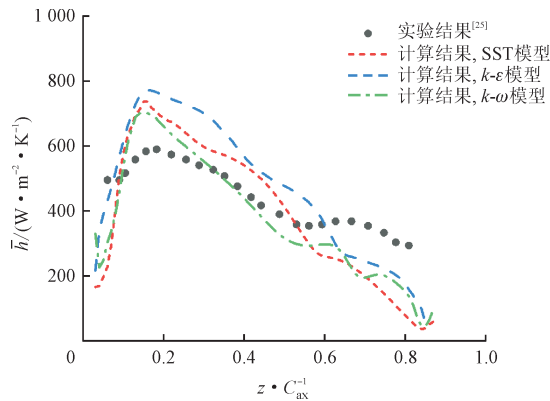


图3 3种湍流模型计算和实验获得的凹槽底部节距平均传热系数沿轴向的分布

Fig. 3 Axial distribution of pitch-averaged heat transfer coefficient at cavity floor obtained from three turbulence models and experimental measurements

1.4 网格无关性验证

图4展示了透平级双肩壁凹槽叶顶模型与结构化网格的划分。计算模型在近壁处的网格均进行了加密,贴近壁面的第一层网格尺寸为 $1\ \mu\text{m}$,增长率为1.2,以此来保证近壁处流动传热的计算精度。

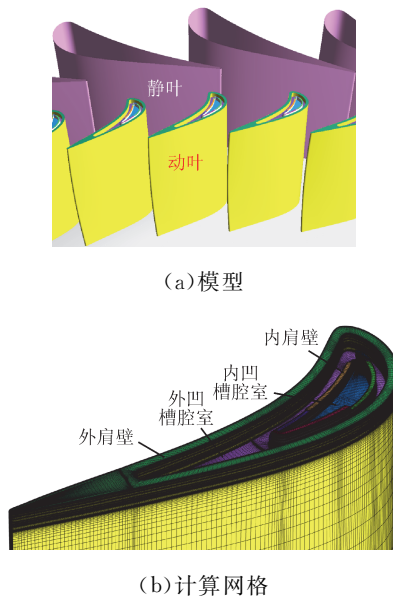


图4 透平级双肩壁凹槽叶顶模型及计算网格
Fig. 4 Model and numerical simulation meshes of turbine double-rim squealer tip

表3给出了叶顶平均传热系数 $\bar{h}$ 的网格无关性分析,所有计算网格最小内角均大于 22° 。由表中

数据可知,当网格数达到 $1\ 169.00 \times 10^4$ 时,已能满足数值计算的精度要求。为节省计算资源,后续计算中,所有模型均采用 $1\ 169.00 \times 10^4$ 级计算网格开展优化设计研究。

表3 叶顶平均传热系数的网格无关性分析

网格数/ 10^4	$\bar{h}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	相对误差/%
507.70	1 999.07	3.63
774.60	2 102.69	-1.38
1 169.00	2 073.84	0.02
1 446.60	2 080.46	-0.30
2 177.05	2 074.22	0

1.5 优化设计方法

前期研究^[5,8]表明,内肩壁上下分层的结构对叶顶传热与流场结构有显著影响。内肩壁高度的变化会改变泄漏流对凹槽叶顶壁面的冲击位置与强度。但此前的优化未考虑内肩壁轴向弦长的变化,且其高度的变化也有限。因此,本文提出了一种新的内肩壁结构参数化定义方法,将内肩壁轴向弦长的变化纳入考量,并在内肩壁高度的设计上提供了更多样的变化,从而在理论上可覆盖更广泛的优化情形。

图5给出了内肩壁的设计变量,包括:轴向弦长 l 、分割面 P_1 、 P_2 与内肩壁高度 $b_1 \sim b_6$ 。通过轴向弦长 l (范围为 $11 \sim 15\ \text{mm}$) 控制内肩壁总长度,分割面 P_1 和 P_2 分别在内肩壁前后半段内移动,并与前缘和尾缘的固定分割面共同将内肩壁划分为6个独立区域。各区域高度分别为 $b_1 \sim b_6$,并可在 $0 \sim 1.65\ \text{mm}$ 内变化。内肩壁厚度 d_1 及内肩壁偏移距离 Δx 保持不变。

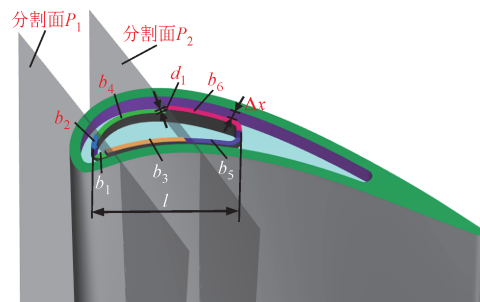


图5 内肩壁的设计变量
Fig. 5 Design variables for the inner rim wall

图6给出了以叶顶平均传热系数和透平级等熵效率为目标的优化流程。设计变量 n 共9个,采用

Latin-Hypercube 抽样方法生成 30 个初始样本(基于 $2n+1$ 的原则,其最小容量为 19 个)。每个样本点通过 Solidworks 建模;ICEM 划分结构化网格;CFX 求解;再将结果代入 Kriging 近似模型进行优化搜索。优化完成后在 Pareto 前沿区域寻找最优解,重新建模并计算验证。若结果未收敛,则将新解加入样本库迭代优化;若收敛,则输出最终结果。

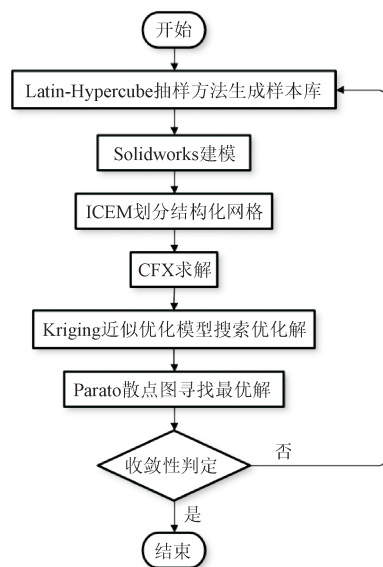


图6 优化设计流程图

ig. 6 Flowchart of optimization procedures

图7给出了优化目标散点图,横、纵坐标分别为叶顶平均传热系数 $\bar{h}$ 和透平级等熵效率 η_s 。由图可知,优化数据集中分布在图的左下区域。最终的优化方案在保证透平级等熵效率基本与传统凹槽叶顶一致的同时,实现了叶顶平均传热系数的降低。经过4次优化后,叶顶平均传热系数、透平级等熵效率与优化预测结果的相对误差分别为 0.12% 和 0.02%。因此可认为优化结果已完全收敛。

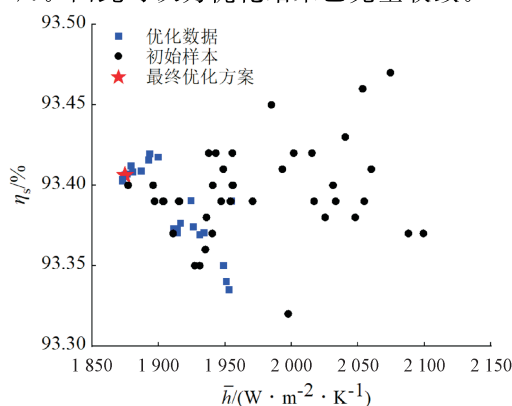


图7 优化目标散点图

Fig. 7 Scatter plot of optimized objectives

2 结果与讨论

2.1 优化结果分析

图8给出了4种叶顶模型结构图。其中,优化后的双肩壁结构C(设计变量参数见表4)具有以下结构特征:内肩壁轴向弦长占外凹槽轴向弦长的 60.97%; P_1 位于内凹槽轴向长度的 4.99%处, P_2 位于 73.29%处;内肩壁吸力侧的高度整体高于压力侧,且从前缘向后逐渐增高,前、中、后段高度分别为外肩壁高度的 72.51%、74.53%和 82.38%;压力侧肩壁相应前、中、后段高度约为外肩壁高度的 37.85%、46.67%和 47.74%。

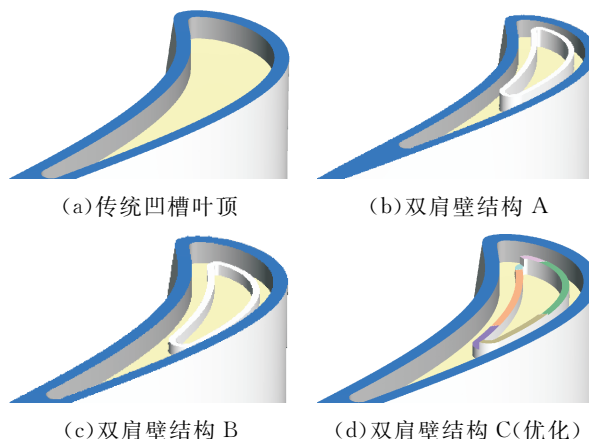


图8 叶顶模型的优化设计结果

Fig. 8 Optimization design results of the tip model

表4 双肩壁结构C的几何变量参数

Table 4 Geometric variable parameters of double-rim structure C

参数	数值
l/mm	13.140 0
b_1/mm	0.624 6
b_2/mm	1.196 5
b_3/mm	0.766 7
b_4/mm	1.229 7
b_5/mm	0.787 7
b_6/mm	1.359 3

2.1.1 优化后叶顶的传热系数分布

图9给出了4种凹槽叶顶的传热系数云图,图中用箭头标出了最高传热系数出现的位置。在传统凹槽叶顶云图中,存在2个高热区,分别为凹槽底部前缘靠近吸力面处的G区和凹槽中部的K区。双肩壁结构A(内外肩壁等高)的前缘高热区G被内肩壁分为内外两部分,虽然高热区K的面积减小了,但内肩壁整体传热系数偏高。双肩壁结构B(内肩壁高度为外肩壁的50%)的高传热区K面

积进一步减小,且被限制在内凹槽吸力面侧,外肩壁前缘低传热区扩大。优化后的双肩壁结构 C 的高传热区 G 和 K 的面积显著减小,外肩壁前缘处的低传热区扩大,仅在内肩壁吸力侧局部有高传热区。优化后的双肩壁结构使凹槽底部的高传热区转移至内凹槽底部。双肩壁结构抑制了凹槽腔内的涡流,减小了高温气流对凹槽底部的侵蚀,但内肩壁因受到泄漏流的刮削作用,形成了新的高传热区。综合来看,优化后的双肩壁结构有效降低了叶顶整体热负荷。

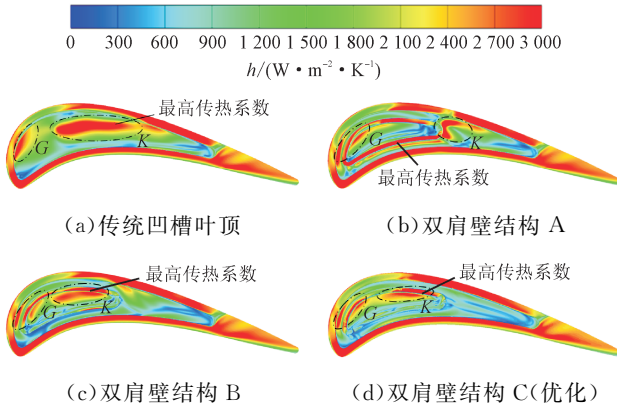


图 9 4 种凹槽叶顶的传热系数云图

Fig. 9 Heat transfer coefficient contours on four squealer tips

图 10 对比了 4 种叶顶结构的面积平均传热系数。相对于传统结构,双肩壁结构 C 叶顶的底面平均传热系数降低了 30.36%,这说明内肩壁结构可显著降低底面平均传热系数。肩壁区域平均传热系数在双肩壁结构 C 中仅下降了 2.96%,在双肩壁结构 A 中甚至还有上升,这表明内肩壁高度的变化对肩壁传热作用有限。整体平均传热系数在双肩壁结构 C 中下降了 9.52%,这说明优化后的双肩壁结构主要通过降低凹槽底面的传热系数,从而实现了整体热负荷的减少。

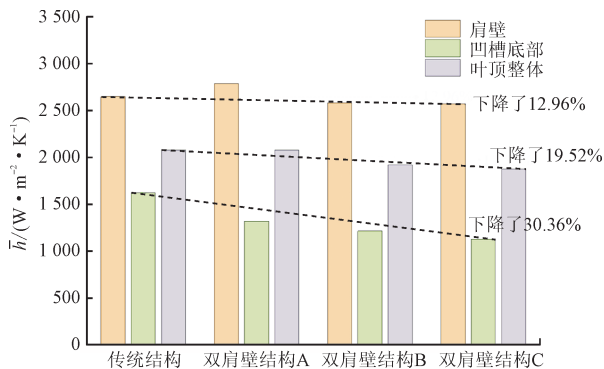


图 10 肩壁、底面和叶顶整体的面平均传热系数对比

Fig. 10 Comparison of area-averaged heat transfer coefficient on rim, cavity floor, and entire tip

图 11 给出了 4 种叶顶结构在凹槽底部、肩壁和整体的节距平均传热系数沿轴向的分布曲线。

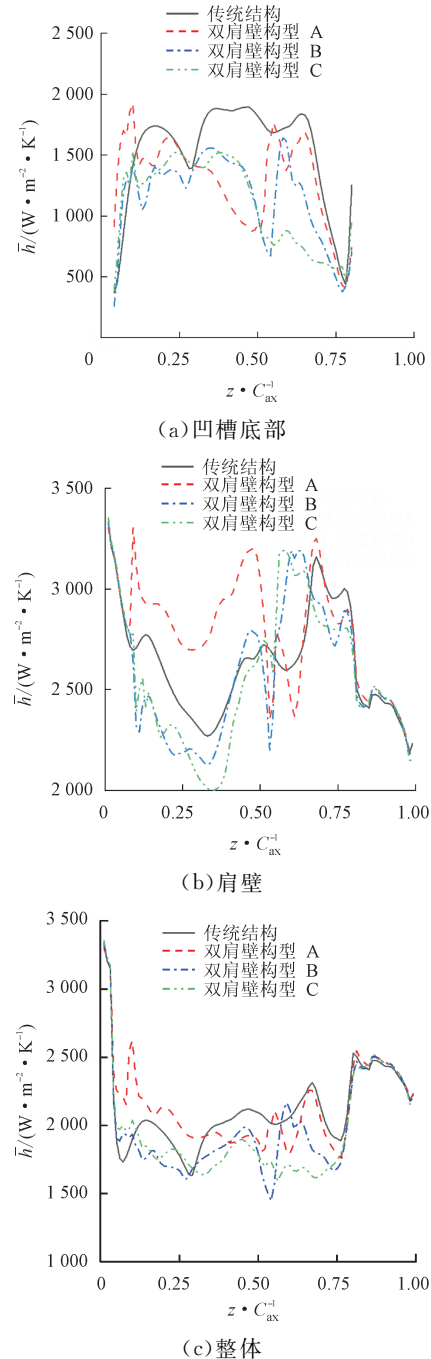


图 11 4 种凹槽叶顶节距平均传热系数的分布

Fig. 11 Pitch-averaged heat transfer coefficient distribution for four types of squealer tips

由图 11(a) 可知,在叶片轴向长度的 12%~55% 范围内,内肩壁结构使得凹槽底部节距平均传热系数降低;但在叶片轴向长度的 55% (内肩壁尾缘) 处,双肩壁结构 A 与 B 的节距平均传热系数突增,结合图 9 可知,这是由于内肩壁尾缘处的凹槽底部出现高传热区导致的。而双肩壁结构 C (优化) 从

叶片轴向长度的 55% 处开始,其节距平均传热系数持续降低,且在轴向长度的 12%~75% 范围内大幅低于传统凹槽叶顶。

图 11(b) 表明:双肩壁结构 A 在叶片轴向长度的 51% 范围内,由于内肩壁传热系数偏高导致肩壁整体传热明显高于其他结构;而在叶片轴向长度的约 55% 处,3 种双肩壁结构的肩壁平均传热系数均出现突降,这是由内肩壁尾缘传热系数降低所导致。另外,在叶片轴向长度的 75% 之后,3 种双肩壁叶顶结构的节距平均传热系数均与传统叶顶结构近似。

图 11(c) 表明:双肩壁结构 A 在叶片轴向长度的 30% 范围内,因内肩壁传热系数偏高导致整体传热系数偏高;结构 B 整体的传热略低于传统结构,但在叶片轴向长度的约 55% 处因肩壁传热升高而突增;双肩壁结构 C 在叶片轴向长度的 80% 范围内(凹槽区域),其节距平均传热系数始终低于传统结构,且在 30%~80% 区间内表现最优;在尾缘区域,4 种结构差异不明显。

综上所述,双肩壁结构可以显著降低凹槽底部的传热系数,但对内肩壁的传热改善有限。双肩壁结构 C 虽在局部传热系数偏高,但从整体来看,其传热性能的改善效果最佳。

2.1.2 优化后叶顶的流场结构和气动性能分析

图 12 中,4 种凹槽叶顶的三维流线图揭示了间隙内的 5 种主要流动特征:前缘涡、吸力侧刮削涡、压力侧腔室涡、吸力侧腔室涡和穿越流。叶顶传热主要受吸力侧与压力侧腔室涡影响,而内肩壁结构可有效减小两者的涡流尺度。双肩壁结构 A 内、外腔室相对独立,压力侧腔室涡主要进入外腔室,吸力侧刮削涡大部分流入内腔室。双肩壁结构 B 因内肩壁高度降低,压力侧腔室涡大部分进入内腔室,吸力侧刮削涡受内肩壁结构的阻碍也流入内腔室,吸力侧腔室涡则在吸力侧内肩壁上发展。在优化结构 C 中,吸力侧内肩壁整体较高且向后渐增,压力侧腔室涡多集中于内腔室,吸力侧腔室涡主要也进入内腔室并与前者掺混,受限于空间,其涡流尺度显著减小。

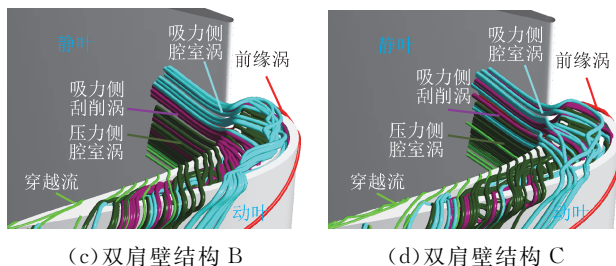
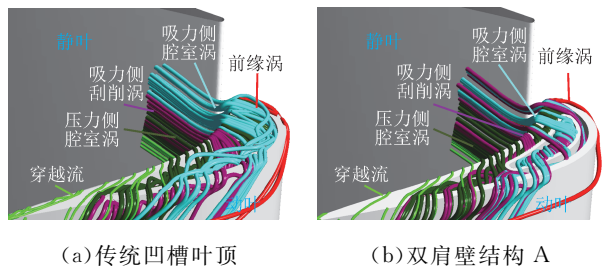


图 12 4 种凹槽叶顶的三维流线分布

Fig. 12 Comparison of the 3D flow streamline distributions for four types of squealer tips

图 13 展示了 4 种叶顶在流向截面上的速度与流线分布。压力侧与吸力侧腔室涡在凹槽内形成反向涡对,其尺度和位置对传热分布影响显著。双肩壁结构 B 因内肩壁高度变为外肩壁的一半,减小了内腔室涡尺度,传热也相应降低,但吸力侧肩壁上方形成的小尺度涡流使其上出现高传热区域。优化结构 C 腔室的涡尺度进一步减小,内肩壁不等高的设计,使得内肩壁上的高传热区大幅减小。从 4 种叶顶结构的泄漏涡与通道涡来看,内肩壁改变对其基本无影响。

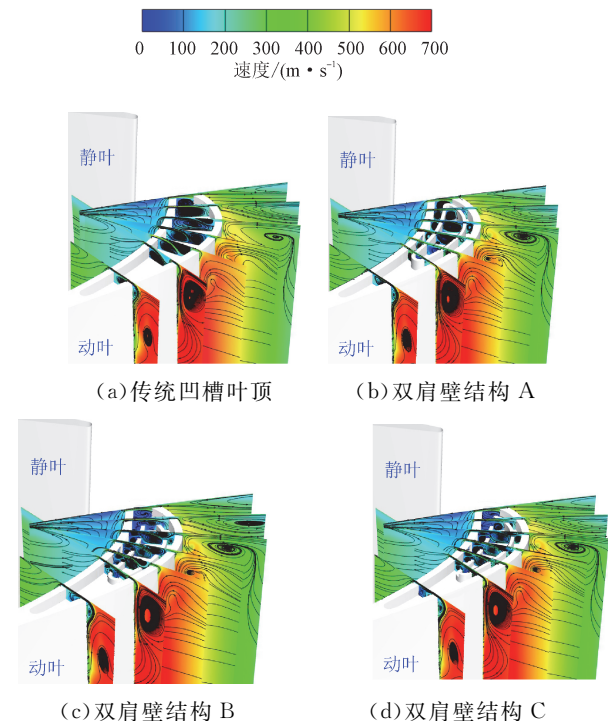


图 13 4 种凹槽叶顶流向截面上的速度与流线分布

Fig. 13 Distribution of velocity contours and streamlines distribution on streamwise cut-planes for four types of squealer tips

2.1.3 优化后叶顶结构的透平级等熵效率分析

表 5 给出了 4 种叶顶结构的透平级等熵效率,

图14给出了叶顶结构轴向剖面的等熵效率云图。3种双肩壁叶顶与传统结构效率基本一致,优化结构C的等熵效率云图分布与传统叶顶基本相同,说明内肩壁的改变基本不影响整体等熵效率。

表5 4种凹槽叶顶的透平级等熵效率

Table 5 Isentropic efficiency of turbine stages with four types of grooved blade tips model

叶顶结构	$\eta_s / \%$
传统凹槽叶顶	93.45
双肩壁结构 A	93.43
双肩壁结构 B	93.41
双肩壁结构 C	93.43

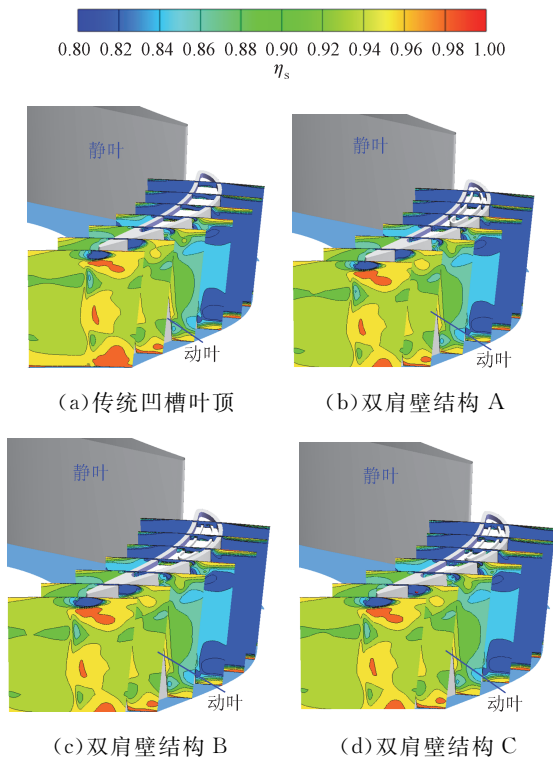


图14 4种凹槽叶顶在轴向剖面上的等熵效率云图

Fig. 14 Contours of isentropic efficiency on the axial plane for four types of squealer tips

2.2 非定常计算中的优化结果分析

2.2.1 非定常计算FFT分析

图15给出了2种凹槽叶顶,11个监测点的分布位置,监测点1~4位于凹槽底部,其中在双肩壁结构C中的监测点1、2位于内凹槽底部,监测点5位于肩壁前缘,监测点6、7位于压力侧肩壁上,监测点8、9位于吸力侧肩壁上,监测点10、11位于尾缘。

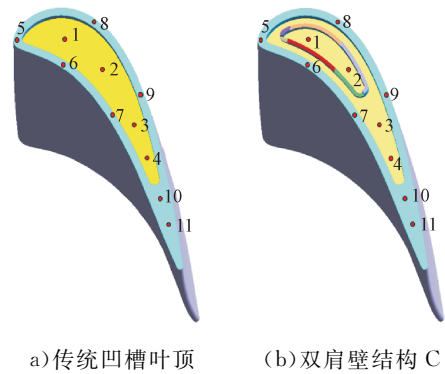


图15 数值计算中监测点位置

Fig. 15 Locations of monitoring points in numerical simulations

图16为在非定常计算中,2种凹槽叶顶上11个监测点的总压与总温收敛历史。各监测点在后期均呈现周期性波动,这是由于受到了上游静叶尾流周期性摆动所致,计算在经过25个动叶周期后完全收敛。

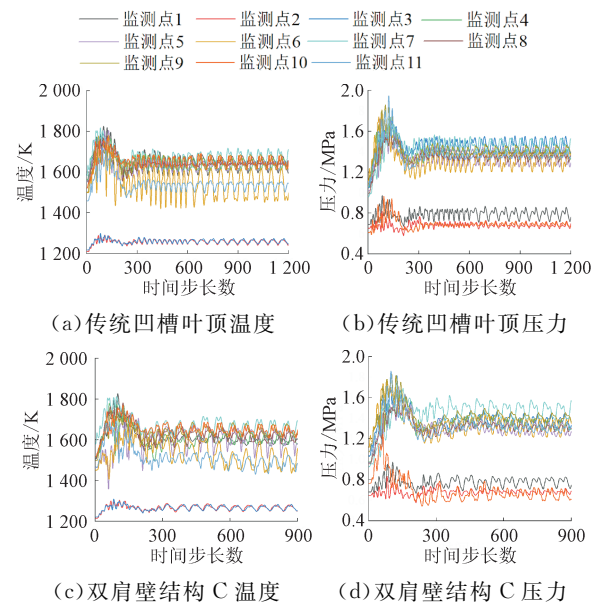


图16 不同叶顶结构下测点的温度与压力的瞬态历程

Fig. 16 Transient history of temperature and pressure at monitoring points for different squealer tips

图17的FFT分析显示,双肩壁结构C在监测点1、11处的频域信号与传统凹槽叶顶的基本一致,均以16554 Hz为基频(f_0),同时伴有 $f_1 \sim f_6$ 的高阶倍频。监测点1处,传统凹槽叶顶的基频振幅远远大于双肩壁结构C,随着频率的升高,振幅有所衰减。在监测点11处,双肩壁结构C监测点的振幅与传统凹槽叶顶的基本相近;以 $f_0 \sim f_2$ 为主导频率,在 f_0 和 f_2 频率下略高于传统凹槽叶顶。分析显示,双肩壁结构C可降低凹槽内部压力与温度的

振幅,但对尾缘的影响较小。计算中动叶旋转频率(16 830 Hz)与监测点主导频率一致,这说明压力、温度的波动是由动叶旋转导致的。

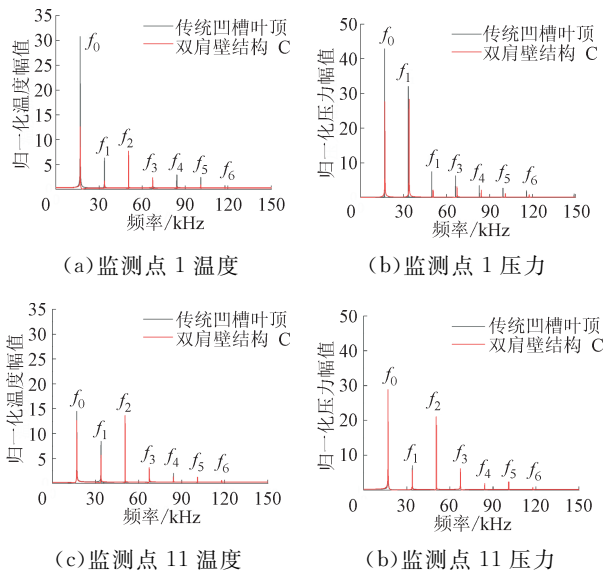


图 17 传统凹槽叶顶与双肩壁结构 C 叶顶监测点的频域分析对比

Fig. 17 Spectral analysis between the conventional squealer tip and the double-rim squealer tip configuration C

2.2.2 非定常计算优化后叶顶的传热系数分布

如图 18 所示,1 个静叶周期内,2 种叶顶的面积平均传热系数均呈双波峰双波谷的变化规律。传统凹槽叶顶的传热系数范围为 $3\,163.12 \sim 3\,726.32 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, 时均值为 $3\,471.12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$; 双肩壁结构 C 的传热系数范围为 $2\,968.58 \sim 3\,534.10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, 时均值降为 $3\,274.95 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。双肩壁结构 C 在各时刻($T_1 \sim T_4$)的传热系数均低于传统结构,整体时均值减少了 5.65%。

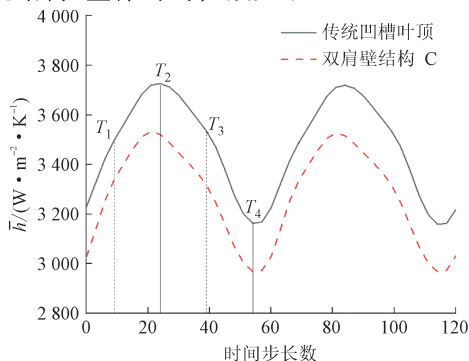


图 18 传统凹槽叶顶与双肩壁结构 C 叶顶的非定常面积平均传热系数的对比

Fig. 18 Comparison of unsteady area-averaged heat transfer coefficient between traditional squealer tip and double-rim squealer tip configuration C

图 19 给出了传统凹槽叶顶瞬时传热云图的演变过程。 T_3 时刻凹槽底部高传热区面积最大, T_4 时刻最小。结合面积平均传热系数, T_2 时刻的高传热区面积虽不是最大,但平均传热系数达到了峰值,这表明该时刻的局部传热更剧烈。云图演变趋势为高传热区从压力侧前缘(T_1 时刻)逐渐向凹槽中部扩展(T_2 时刻),再向下游迁移(T_3 时刻),最终衰减至最小(T_4 时刻)。受上游尾迹波动影响,非定常计算中某些时刻的传热系数较定常计算偏高。

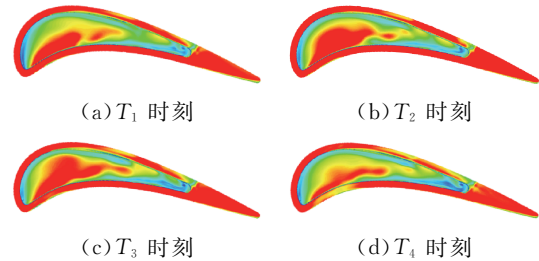


图 19 传统凹槽叶顶非定常传热系数云图的演变
Fig. 19 Evolution of transient heat transfer coefficient contour for the conventional squealer tip

图 20 给出了双肩壁结构 C 的瞬时传热系数云图的演变过程。优化后的内肩壁结构消除了凹槽底部大面积的高传热区,仅在外凹槽前缘压力侧、内凹槽底部及内肩壁尾缘外,存在小范围高传热区。云图演变趋势为:内凹槽尾缘外的高热区 F (T_1 时刻)向下游发展(T_2 时刻)后逐渐消退(T_3 、 T_4 时刻);内凹槽底部圆形高热区 J (T_2 时刻)向尾缘移动并缩小。

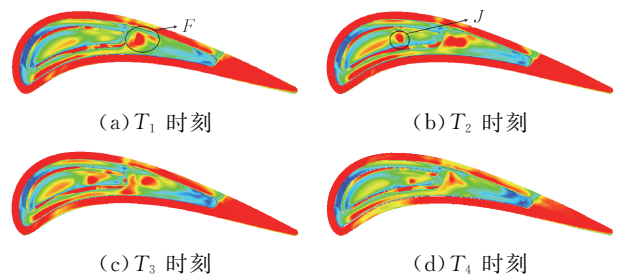


图 20 双肩壁结构 C 的叶顶非定常叶顶传热系数云图的演变
Fig. 20 Evolution of transient heat transfer coefficient contour for the double-rim squealer tip configuration C

2.2.3 非定常计算优化后叶顶的流场结构分析

图 21 展示了非定常流动中传统凹槽叶顶的三维流线,流动结构主要有压力侧腔室涡、吸力侧腔室涡和穿越流。前两者在凹槽内形成反向旋转涡对,冲击凹槽底部并形成高传热区。在 T_2 、 T_3 时刻,压力侧腔室涡尺度增大,反向涡对增强,导致底部传热系数升高。随着时间的推移,前缘腔室涡的尺度先增

后减, T_4 时刻为最小, 对应凹槽底部高传热区范围则先扩大后缩小。

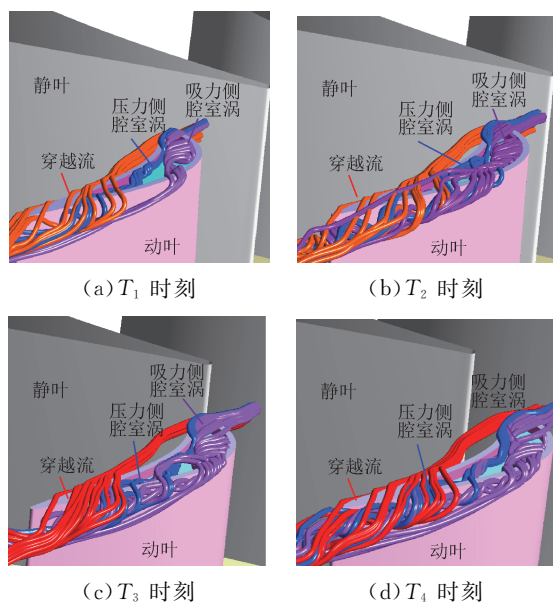


图 21 传统凹槽叶顶的非定常流动三维流线

Fig. 21 3D transient flow streamlines in traditional squealer tip

图 22 给出了传统凹槽叶顶在非定常流动中的截面流线和速度 V 云图, 从叶片前缘至尾缘分别为截面 1~7。在截面 2、3、4 处出现了明显的反向旋转涡对, 卷吸部分泄漏流形成局部加速, 对凹槽底部冲击, 从而形成高传热区。截面 5、6 处, 因吸力侧腔室涡已离开凹槽腔室, 反向涡对消失, 传热系数降低。随时间发展, T_2 与 T_3 时刻反向涡对形成的流动加速最强, 对应凹槽底部高传热区范围最大。

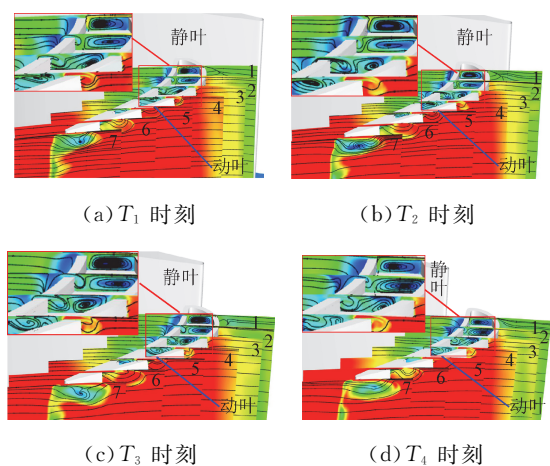


图 22 传统凹槽叶顶在非定常流动中的轴向截面流线与速度分布的演变

Fig. 22 Evolution of streamlines and velocity distribution in the unsteady axial-plane flow of the traditional squealer tip

图 23 给出了非定常流动中双肩壁结构 C 的三维流线图。压力侧腔室涡进入后, 受内肩壁结构的限制, 主要在外凹槽腔室内流动, 仅有小部分从内凹槽前缘进入内腔室, 其涡的尺度明显降低, 减小了对凹槽底部的冲击。吸力侧腔室涡大部分进入内腔室, 其余流向外凹槽吸力侧, 对凹槽底部的冲击减小。内肩壁的优化有效改进了流场结构, 虽在内凹槽尾缘仍存在局部小尺度涡, 但在整个凹槽腔室内已无大尺度涡。

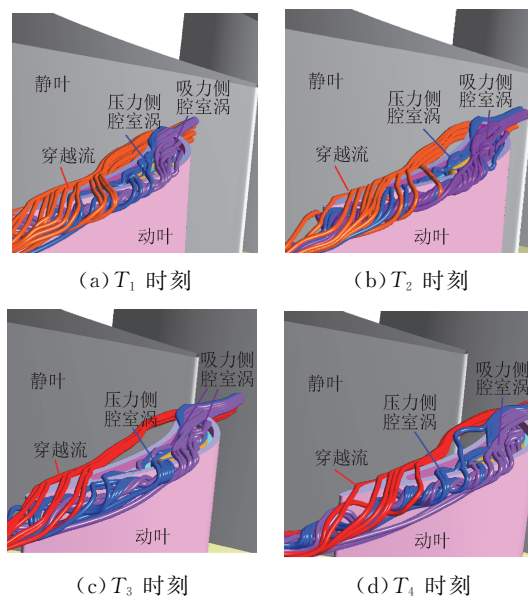
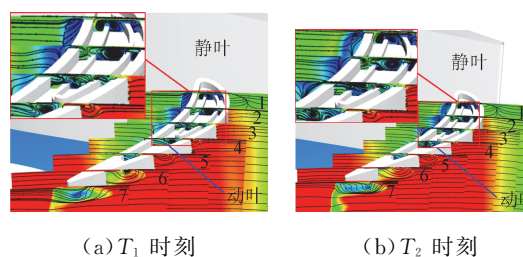


图 23 双肩壁结构 C 叶顶的非定常流动三维流线

Fig. 23 3D transient flow streamlines in the double-rim squealer tip configuration C

图 24 展示了非定常流动中双肩壁结构 C 的截面流线与速度云图, 从叶片前缘至尾缘分别为截面 1~7。在第 2、3 截面处, 内凹槽腔室内有明显的反向旋转涡对, 形成的流体加速区使得高温泄漏流对内凹槽底部形成剧烈的冲击, 因此, 此处有一个条状高传热区, T_2 时刻该处的反向涡对最强烈, 对应传热区最大。在 T_1 与 T_2 时刻, 第 4 截面处的反向旋转涡对最明显, 对应此处传热系数较高。整体来看, 内肩壁结构有效减小了腔室内涡尺度, 减轻了反向涡对对凹槽底部的冲击。



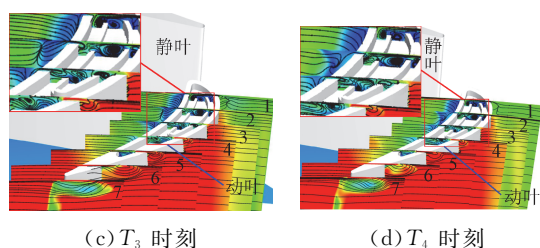


图24 双肩壁结构C叶顶在非定常流动中的轴向截面流线
与速度分布演变

Fig. 24 Evolution of streamlines and velocity distribution in the unsteady axial-plane flow of the double-rim squealer tip configuration C

3 结 论

本文通过 Kriging 模型与多目标遗传算法,以叶顶面平均传热系数与透平级等熵效率为目标,设计出一种新型双肩壁凹槽叶顶。采用定常与非定常数值模拟,与传统凹槽叶顶、2 种典型双肩壁叶顶进行对比,并分析了其气热性能,得到如下主要结论。

(1)经过优化后的双肩壁凹槽叶顶的内肩壁具有以下特征:内肩壁结构轴向弦长占外凹槽轴向弦长的 60.97%;内肩壁吸力侧的高度整体高于压力侧,且从前缘向后逐渐增高;压力侧肩壁的高度从前缘向后逐渐递增。

(2)相较于传统凹槽叶顶,优化后的双肩壁叶顶在肩壁、凹槽底部和整体叶顶的平均传热系数分别降低了 2.96%、30.36%、9.52%。内肩壁结构可减小腔室涡尺度,减弱高温泄漏流对凹槽底部的冲击,因此可大幅改善凹槽底部的传热性能,但对内肩壁的传热性能改善效果有限。优化后的叶顶结构在保持与传统凹槽叶顶基本一致的透平等熵效率的同时,大幅降低了凹槽底面的平均传热系数,同时使肩壁上的高传热区面积减小。

(3)非定常 FFT 分析表明,数据波动主要源于旋转激励。优化后的双肩壁叶顶结构能降低凹槽内部温度、压力的振幅,但对尾缘处的影响有限。优化后的双肩壁叶顶,其平均传热系数始终低于传统结构,时均值降低了约 5.65%。与传统凹槽叶顶对比,优化后的叶顶结构可减小腔室涡尺度,减小高温泄漏流对凹槽底部的冲击,使前缘高传热区面积大幅减小。由此可知,优化后的双肩壁叶顶结构在非定常计算工况中的气热性能优于传统凹槽叶顶。

参考文献:

[1] BUNKER R S. Axial turbine blade tips: function, de-

sign, and durability [J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(2): 271-285.

[2] CERNAT B C, PÁTÝ M, DE MAESSCHALCK C, et al. Experimental and numerical investigation of optimized blade tip shapes: part I turbine rainbow rotor testing and numerical methods [J]. Journal of Turbomachinery, 2019, 141(1): 011006.

[3] PÁTÝ M, CERNAT B C, DE MAESSCHALCK C, et al. Experimental and numerical investigation of optimized blade tip shapes: part II tip flow analysis and loss mechanisms [J]. Journal of Turbomachinery, 2019, 141(1): 011007.

[4] 吴琛琦,何坤,晏鑫.透平级带压力侧小翼凹槽叶顶的传热与气膜冷却性能研究[J].西安交通大学学报,2022,56(3):147-159.

WU Chenqi, HE Kun, YAN Xin. Investigation into heat transfer and film cooling performance at pressure-side winglet-squealer tip in a turbine stage [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(3): 147-159.

[5] YAN Xin, YU Jinxing, HE Kun. Modifications of double-rim geometry to improve thermal performance of squealer tip in a turbine stage [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy, 2023, 237(6): 1203-1219.

[6] DE MAESSCHALCK C, LAVAGNOLI S, PANIAGUA G. Blade tip shape optimization for enhanced turbine aerothermal performance [J]. Journal of Turbomachinery, 2014, 136(4): 041016.

[7] KANG Y S, RHEE D H, KIM C T, et al. Aerodynamic optimization of axial turbine tip cavity with approximation model [C]//ASME 2013 Turbine Blade Tip Symposium. New York, NY, USA: ASME, 2013: V001T01A005.

[8] 秦正,何坤,晏鑫.双肩壁凹槽叶顶冷却传热性能的优化研究[J].西安交通大学学报,2024,58(1):68-80.

QIN Zheng, HE Kun, YAN Xin. A study of film cooling and heat transfer optimization for double-rim squealer tip [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(1): 68-80.

[9] VINCEKOVIC L, JOHN A, QIN Ning, et al. Exploring topology optimization for high pressure turbine blade tips [J]. Journal of Turbomachinery, 2022, 144(7): 071013.

[10] 李琛玺,郭振东,宋立明,等.凹槽状叶顶气膜孔优化设计与知识挖掘[J].推进技术,2019,40(2):276-284.

LI Chenxi, GUO Zhendong, SONG Liming, et al. Film-cooling holes design optimization and knowledge mining of a squealer tip [J]. Journal of Propulsion

- Technology, 2019, 40(2): 276-284.
- [11] SCHABOWSKI Z, HODSON H, GIACCHE D, et al. Aeromechanical optimization of a winglet-squealer tip for an axial turbine [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2014, 136(7): 071004.
- [12] MARAL H, ALPMAN E, KAVURMACIOGLU L, et al. A genetic algorithm based aerothermal optimization of tip carving for an axial turbine blade [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 143: 118419.
- [13] DE MAESSCHALCK C, ANDREOLI V, PANIAGUA G, et al. Aerothermal optimization of turbine squealer tip geometries with arbitrary cooling injection [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2021, 143(11): 111010.
- [14] ZHOU Zhihua, CHEN Shaowen, WANG Songtao. Aerodynamic optimisation of a winglet-cavity tip in a high-pressure axial turbine cascade [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part G Journal of Aerospace Engineering*, 2018, 232(4): 649-663.
- [15] WANG Haichao, TAO Zhi, ZHOU Zhiyu, et al. A study for the film cooling performance on the turbine blade suction side tip region under rotating conditions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 138: 483-495.
- [16] JIANG Shijie, LI Zhigang, LI Jun. Effect of unsteady passing wake on the aerodynamic and heat transfer performance of the turbine blade squealer tip [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy*, 2023, 237(1): 19-32.
- [17] AMERI A A, RIGBY D L, STEINTHORSSON E, et al. Unsteady analysis of blade and tip heat transfer as influenced by the upstream momentum and thermal wakes [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2010, 132(4): 041007.
- [18] ZHOU Zhihua, CHEN Shaowen, WANG Songtao. Unsteady winglet-cavity tip on leakage flow in a high-pressure turbine stage of low-aspect ratio [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part C Journal of Mechanical Engineering Science*, 2018, 232(20): 3708-3721.
- [19] RAHMAN M H, KIM S I, HASSAN I, et al. Unsteady tip leakage flow characteristics and heat transfer on turbine blade tip and casing [C]//ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air. New York, NY, USA: ASME, 2010: 2353-2362.
- [20] ATKINS N R, THORPE S J, AINSWORTH R W. Unsteady effects on transonic turbine blade-tip heat transfer [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2012, 134(6): 061002.
- [21] HALILA E E, LENAHAAN D T, THOMAS T T. Energy efficient engine high pressure turbine test hardware detailed design report [EB/OL]. (1982-06-01) [2025-08-10]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19850002687>.
- [22] NASIR H, EKKAD S V, BUNKER R S. Effect of tip and pressure side coolant injection on heat transfer distributions for a plane and recessed tip [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2007, 129(1): 151-163.
- [23] 于金杏, 叶明亮, 何坤, 等. 压力侧冷却流对凹槽叶顶气膜冷却与传热性能的影响 [J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(3): 160-172.
- YU Jinxing, YE Mingliang, HE Kun, et al. Effect of pressure-side cooling flow on film cooling and heat transfer performance at squealer tip [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(3): 160-172.
- [24] ANSYS INC. ANSYS CFX-solver theory guide; version 11.0 [EB/OL]. [2026-01-09]. <https://www.docin.com/p-294427286.html>.
- [25] KWAK J S, RESEARCHERS, HAN J C, et al. Heat transfer coefficients on the squealer tip and near squealer tip regions of a gas turbine blade [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2003, 125(4): 669-677.

(编辑 刘懿莹)