

曲面双层壁结构的内外复合流动及综合冷却特性数值研究

张垚垣, 栗智宇, 李志刚, 李军

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对双层壁在曲面条件下的内、外流动与冷却耦合特性不明晰的问题,在3种典型冷气吹风比0.4、0.6和0.8下,采用共轭传热数值模拟方法及实验验证,研究了平面和凹、凸曲面双层壁的内、外流动相互影响规律和综合冷却特性。结果表明,曲面显著改变了双层壁的孔内入侵、冲击腔室横流和外壁冷气贴壁特性。低吹风比下,凹面双层壁的气膜孔出流面积最大,冲击驻点区域的冷气横流强度和换热效果显著提升,外壁平均综合冷效能够达到0.54;凸面双层壁的下游气膜冷却和冲击冷却有所增强,同时主流入侵能够到达气膜孔下部;高吹风比下,凹面双层壁气膜孔下方冷气出流区的二次涡面积最大,出射角增加导致气膜孔下游冷却效率略低;凸面双层壁冲击腔内冷气向上游回流最弱,在冲击腔内获得最强的横流累积效果,凸壁面平均综合冷效在第4排孔能达到0.73。研究结果对于叶片等曲面部件的双层壁结构布局设计具有指导意义。

关键词: 曲面双层壁;流动交互;气膜冷却;冲击冷却

中图分类号: TK474.7 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202502006 **文章编号:** 0253-987X(2025)02-0050-11

Numerical Investigation of Internal and External Flow Interaction and Overall Cooling Characteristics of Curvature Double-Wall Structures

ZHANG Kaiyuan, LI Zhiyu, LI Zhigang, LI Jun

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

Abstract: To address the unclear internal and external flow interaction and cooling characteristics of curvature double-walls, the conjugate heat transfer numerical simulation method with experimental validation was used in this paper, and the internal and external flow interaction and overall cooling characteristics of planar, concave, and convex double-wall structures were compared under three typical blowing ratios (0.4, 0.6 and 0.8). The study analyzed the mutual influences of internal and external flows in curvature double-wall structures and revealed the overall cooling characteristics resulting from the combined effects of internal and external flows. The results show that curvature feature significantly changed the characteristics of hole ingestion, impingement chamber crossflow, and outer wall attachment in double-wall structures. At low blowing ratios, the concave double-wall structure had the largest film hole outflow area, with significantly enhanced crossflow intensity and heat transfer in the impingement stagnation region. The averaged overall cooling effectiveness of the outer wall can reach 0.54. The convex double-

wall structure showed enhanced downstream film cooling and impingement cooling, while mainstream ingestion can reach the lower side of the film holes. At high blowing ratios, the concave double-wall structure had the largest secondary vortex area in the coolant outflow region below the film holes. The increased injection angle resulted in slightly lower cooling effectiveness downstream of film holes. The convex double-wall structure had the weakest upstream backflow in the impingement chamber, thereby achieving the strongest crossflow accumulation effect. The averaged overall cooling effectiveness of the convex wall surface can reach 0.73 at the fourth row holes. This study can provide insights for the design of double-wall structural layouts in curved components, e. g., turbine blades.

Keywords: curvature double-wall; flow interaction; film cooling; impingement cooling

对于先进燃气轮机更高热负荷和更高运行效率的追求,使得透平部件急需更为高效的冷却技术^[1]。传统透平部件的冷却一般采用外部气膜冷却和内部强化传热相结合的方式,但其较难满足更高热负荷的透平冷却需求^[2]。双层壁是目前最有潜力的透平先进冷却技术之一^[3],一般由内部冲击冷却、内部肋柱强化换热和外部发散冷却等复合结构组成,相比于传统透平冷却技术,具有薄外壁、内部支撑结构等特征,能够显著增强内部冷气对透平叶片壁面的换热,有望使得透平部件综合冷效提升到0.7以上^[4]。

双层壁结构首先在燃烧室的筒壁开展了应用,学者对比了双层壁和典型透平冷却结构的性能,并在燃烧室环境研究了冷却与传热特性^[5]。Ignatious等^[6]数值研究了不同吹风比与孔直径下冲击/发散冷却平板双层壁的温度分布特性,发现在高吹风比下,冷效几乎不随吹风比的增加而提升。Shrager等^[7]采用红外测温技术研究了燃烧室掺混孔周围发散冷却排布方式对双层壁冷却性能的影响,结果表明,向心布置方法在掺混孔下游的冷却效果较差。Li等^[8]数值研究了不同冷气流量下双层壁结构应用于火焰稳定器时的性能,气膜覆盖面积随冷气流量的增加而减小。Jackowski等^[9]在不同吹风比和腔室高度等参数下数值研究了燃烧室中冲击/发散结构的综合冷却性能。Kim等^[10]采用红外测温方法研究了多层壁结构的流动与冷却特性,通过内部流场的合理组织,相比于单层发散冷却,冷却性能提升了47%~141%。

针对双层壁结构的孔间距、冲击高度和壁厚等结构参数,学者首先针对平板双层壁结构单元的性能开展了研究,以探究对双层壁流动及冷却性能的影响规律^[11]。Rogers等^[12]在典型吹风比范围内实验测量了双层壁上游及下游区域的冷却特性,结果表明,孔上游的传热随轴向坐标的增加而增强。

Han等^[13]提出了具有旋流与气膜复合冷却的双层壁结构,数值结果表明,相比于典型双层壁,冷却性能提升了8.92%,并且冷却分布更加均匀。Ritchie等^[14]实验测量了考虑冲击腔内横流的双层壁冷却性能,结果表明,相比于垂直冲击的冷却效果有所降低。Niu等^[15]实验研究了冲击板开孔率、冷气流量和主流雷诺数对双层壁冷却性能的影响。王一等^[16]数值研究了多孔介质作为扰流结构对双层壁性能的影响,面综合冷效提升了3%~5%,而压力损失几乎无变化。

随后,学者将双层壁技术应用于透平叶片等部件,研究了不同叶栅气热参数及叶片结构参数下的双层壁综合冷却性能。Ngetich等^[17]采用压力敏感漆方法测量了不同肋柱高度、肋柱直径和冷却孔直径下双层壁叶片的冷却特性。章锁诚等^[18]提出了基于一维管网模型的叶片双层壁快速设计方法,并采用三维气热耦合计算进行了修正。Zhang等^[19]实验对比了不同吹风比与密度比下的单层和双层壁叶片的冷却特性,发现双层壁叶片的冷却性能几乎不受冷气密度比的影响。栾永先等^[20]在叶片前缘、叶盆和叶背的高温区进行了双层壁冷却结构设计,结果表明其能够在叶片实现主流温度44%的温度降低。

曲率是透平叶片冷却结构性能的关键影响因素之一,在平板双层壁单元冷却特性研究的基础上,学者开展了曲面双层壁单元的气热性能研究^[21]。缪国君^[22]采用烟线法研究了凹面靶板的流动及换热特性,凹靶面斜向冲击会形成一系列串涡而不是大涡旋结构。黄鑫等^[23]数值研究了热障涂层厚度对曲面双层壁冷却的影响,结果表明,曲面对内部传热影响微弱,但会显著影响气膜效率。Zhou等^[24]数值研究了曲率及吹风比分别对双层壁气膜冷却、冲击冷却及压损的影响。Skamniotis等^[25]采用有限

元方法研究了曲面双层壁单元的应力分布特性,内外及轴向的热负荷不均匀是应力集中的主要原因之一。刘友宏等^[26]数值研究了流向和周向曲率对双层壁冷却传热特性的影响,冲击靶面传热强度随周向曲率减小逐渐降低。

目前,国内外针对不同曲率及变曲率特征的双层壁的性能研究尚不充分,主要关注了其在典型流动及结构参数下的冷却及传热性能,尚缺乏对曲面条件下双层壁内部、外部复合流动及其对综合冷效影响的深入研究。本文分别对平面和凹、凸曲面双层壁单元排布以及内、外流动强相互作用特征,在不同典型冷气吹风比下,采用共轭传热法研究了曲面双层壁结构的内部与外部流动的相互影响规律,并分析了对外壁和孔内综合冷却性能的影响。

1 数值计算方法

1.1 几何模型与边界条件

本研究所采用的双层壁冷却结构如图1所示,双层壁主要由冲击冷却和气膜冷却的复合结构组成。本文以平板双层壁结构为参考,对凹、凸曲面双层壁结构的综合冷却性能及流动特性开展数值研究,其中曲面双层壁结构的曲率半径为 $65D$ 。

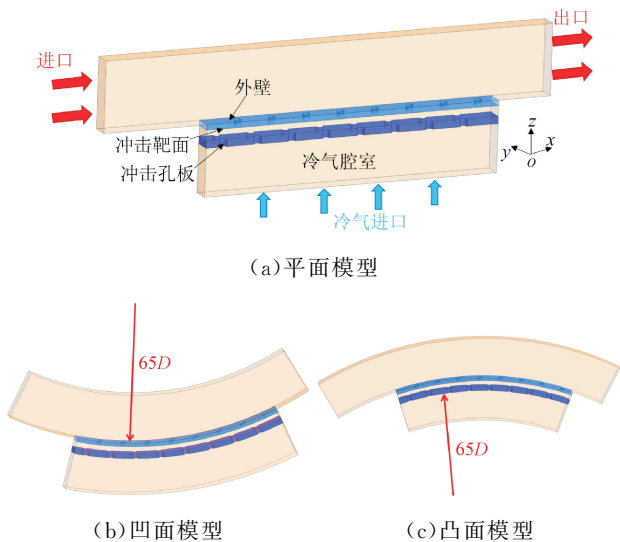


图1 曲面双层壁几何模型

Fig. 1 Geometries of curved double-wall structure

气膜孔与冲击孔在双层壁结构中的相对位置如图2所示,与文献^[27]实验保持一致,气膜孔与冲击孔采用叉排的排布方式,主流腔室高度为40 mm,为了使得主流在进口区域充分发展同时避免回流的影响,上游及下游延伸段的长度分别设置为60、40 mm,均匀进气的冷气腔室设置在冲击孔板的下

方。各排气膜孔间距和冲击孔间距均与实验保持一致^[27],沿 x 、 y 方向的间距分别为20、10 mm,沿流向共布置8排气膜孔和8排冲击孔,其中冲击孔位于由4个气膜孔组成的冷却单元的中心位置,与实验一致,本研究主要关注第2排到第4排孔的冷却特性。气膜孔板与冲击孔板的厚度分别为3、4 mm,冲击腔室高度为6 mm。气膜孔的出射角为 90° ,气膜孔直径 D_f 和冲击孔直径 D_i 均为4 mm。

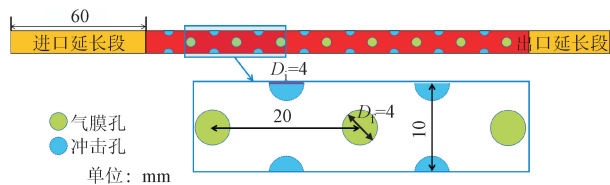


图2 双层壁冷却布局

Fig. 2 Cooling layouts of double-wall structure

双层壁结构计算域的边界条件与实验^[27]保持一致。主流的进、出口均为平均压力边界条件,主流与冷气温度分别为673、300 K,进口雷诺数为 3.8×10^5 ,湍流度为10%,本文选择3个典型冷气吹风比0.4、0.6和0.8进行对比分析。冷气腔室进口给定流量边界条件,而流体域和固体域的两侧均为平移周期性边界条件。冷气的吹风比 M 定义为

$$M = \frac{\rho_c V_c}{\rho_\infty V_\infty} \quad (1)$$

式中: V 、 ρ 分别为流体的速度和密度,下标 c 、 ∞ 表示冷气、主流边界。

为了采用共轭传热方法对双层壁结构气膜冷却与冲击冷却的综合性能进行数值模拟,将气膜孔板和冲击孔板分别设置为固体域,固体材料与实验一致为不锈钢,其导热系数为 $16.27 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。流体域、固体域的交界边界设置为Coupled边界,以实现双层壁综合冷效的共轭传热计算。

为了衡量冲击及气膜冷却对壁面的综合冷却效果,定义壁面的综合冷效 Φ 、流体无量纲温度 θ

$$\Phi = \frac{T_\infty - T_w}{T_\infty - T_c} \quad (2)$$

$$\theta = \frac{T - T_c}{T_\infty - T_c} \quad (3)$$

式中: T_w 为壁面温度。

1.2 网格与计算方法

图3给出了双层壁流体域和固体域的网格示意图。双层壁的非结构化多面体网格由Fluent Meshing生成,并将流体域和固体域网格在交界面进行对齐,以提升其对于传热的预测精度。网格最

大尺寸为 0.5 mm,网格在气膜孔及冲击孔临近区域进行了加密,同时在气膜孔板和冲击孔板的边界层内进行了加密,从而保证近固体壁面无量纲距离 y^+ 满足各湍流模型壁面函数的要求,其中 $k-\omega$ 模型的 y^+ 值小于 1,而 $k-\epsilon$ 模型的 y^+ 值小于 30。

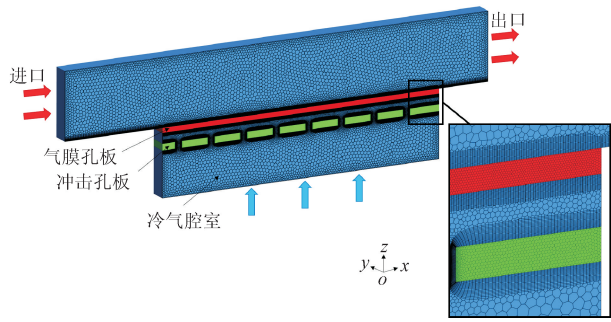


图 3 双层壁计算域网格

Fig. 3 Computational domain meshes of double-wall structure

图 4 给出了网格无关性验证的结果,本文选择 4 套不同数量的网格进行计算与平均综合冷效 $\bar{\Phi}$ 结果对比,在冷气 $M = 0.6$ 的工况下进行网格无关性验证。图 4 结果表明,429 万网格数能够满足本文双层壁冷却性能数值计算的精度要求。

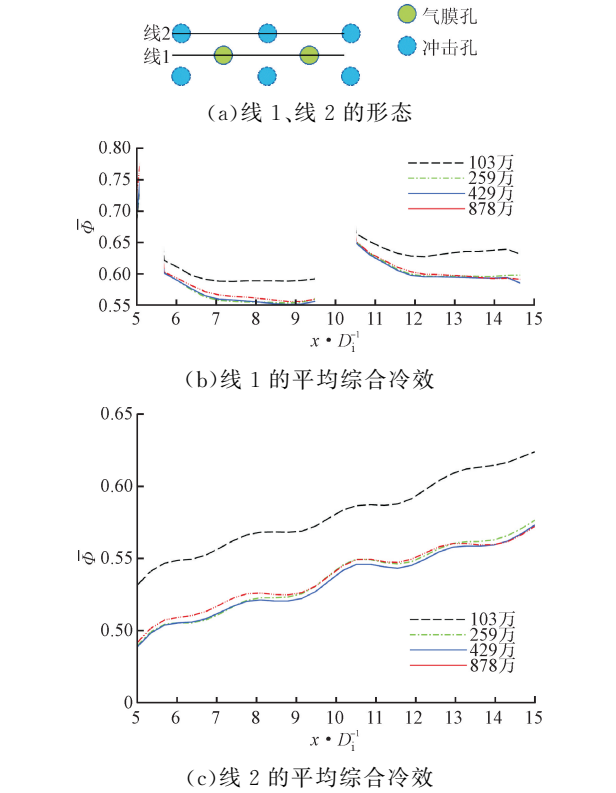


图 4 网格无关性验证

Fig. 4 Grid independence test

数值计算采用 Fluent 完成。计算采用基于压力基的求解器,对雷诺时均 N-S 方程求解,主流与冷气

均设定为理想气体,流体的黏度、热导率和热容都由分子动理论进行计算。当外壁平均综合冷效的计算值在近 50 迭代步的波动小于 0.1%,认为计算达到收敛。

图 5 给出了湍流模型验证结果,本文选择了 4 种湍流模型对平面双层壁的冷却性能进行计算,并与实验结果^[27]进行对比。图 5(a)、(b)分别给出了各湍流模型对外壁沿气膜孔和冲击孔中心线综合冷效的预测结果与实验结果的对比,结果显示,标准 $k-\epsilon$ 模型在 4 种湍流模型中对于双层壁冷却性能具有最高的预测精度,其对于双层壁冷却性能沿轴向分布趋势的预测与实验结果基本一致,这表明对于双层壁的内、外流动特性的预测较为准确,数值结果与实验值的偏差小于 0.1,预测误差来源于湍流模型对主流与冷气射流的掺混强度预测普遍偏低,这导致冷气向主流中及向下游扩散程度的预测值偏高,使得下游区域冷却性能的预测偏差略高于上游区域。由图 5 可知,平均综合冷效的预测误差小于 0.06,并且随吹风比的增加,数值结果中面平均综合冷效的提升趋势与实验一致。因此,本文采用标准 $k-\epsilon$ 模型对双层壁的冷却与流动特性进行数值计算。

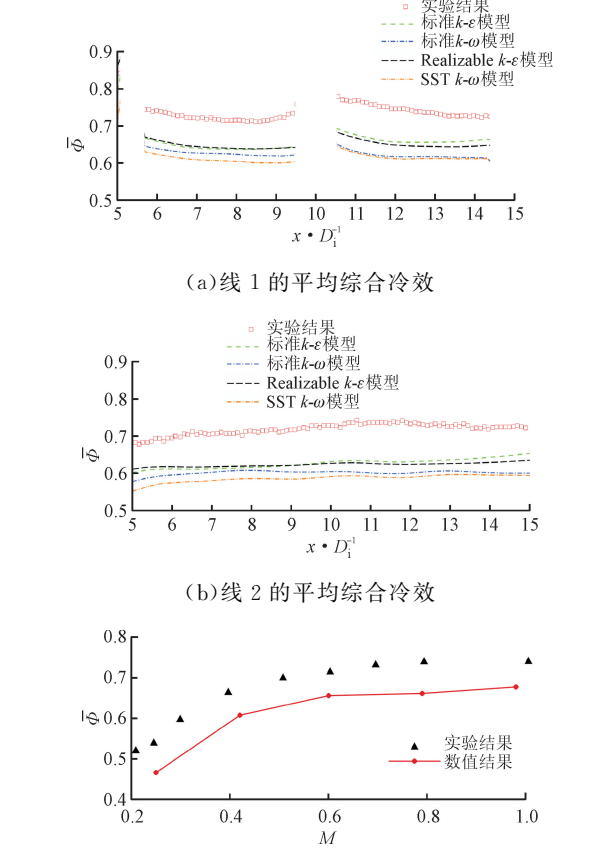


图 5 湍流模型验证

Fig. 5 Turbulence model validation

2 结果与讨论

2.1 曲面双层壁的综合冷却特性

图6给出了各双层壁模型在不同吹风比下的外壁面综合冷效云图。一般情况下,双层壁的综合冷效随 x 增加而显著增大,这主要是由冷气在冲击腔室内的强横流和向下游累积所造成的。由于气膜冷气射流对外壁具有直接覆盖与冷却作用,高冷效区域一般集中于气膜孔下游,位于下游位置的气膜孔射流对双层壁外壁的冷效效果更为显著。在气膜孔与冲击孔错列排布方式下,冲击冷气在靶面形成的喷泉状流动能够在一定程度上提升两个相邻气膜孔之间区域的冷却效果,但由于冲击冷气对于外壁的冷却效果主要通过对流换热形成,其对于气膜孔板外壁的冷却效果分布更为均匀。当 $M = 0.4$ 时,由于冷气流量较低,在平面模型中,第2排孔下游区域,即 $5 < x/D_i < 10$ 的综合冷效低于0.5,而第3、4排气膜孔下游的综合冷效分别为0.57、0.62。气膜孔下游综合冷效呈现典型的带状高冷效分布,而 $x/D_i = 12.5$ 对应的喷泉流区域冷却效率较低, $x/D_i = 17.5$ 驻点区域冷气冲击导致的外壁综合冷却效率能够达到0.57。在凹面模型中, $5 < x/D_i < 10$ 时的综合冷效相比于平面模型具有显著提升, $x/D_i = 12.5$ 附近喷泉流区域的冷却效率也有提升。在凸面模型中, $x/D_i > 10$ 时的综合冷效提升较为明显,尤其是 $15 < x/D_i < 20$ 时的。

当 $M = 0.6$ 时,在平面模型中,冲击冷却的驻点及喷泉流附近区域冷却效果分布较为平均, $x/D_i = 12.5$ 附近的低冷却区面积相比于平面模型有所减小。凹面模型中,气膜孔下游的综合冷效略低于平面模型,尤其是对于较为下游的气膜孔临近区域,主要是因为较高动量的冷气难以贴附在凹壁面。凸面模型的横流累积效应较为显著,表现在第2个气膜孔下游的综合冷效与其他两种模型相似,而 $10 < x/D_i < 20$ 时的累积冷效远高于其他2种模型。当 $M = 0.8$ 时,与 $M = 0.6$ 不同,凹面模型上游气膜孔的综合冷效相比于平面模型有所降低,下游气膜孔的冷效分布与平面模型较为相似,但喷泉流区域在凹面模型中相比于平面模型的综合冷效均有所降低。与 $M = 0.6$ 相同,凸面模型的冷气横流累积效应相比于与平面模型更为显著。

图7给出了外壁的横向平均综合冷效分布。受冲击腔室内冷气横流累积效应的影响,外壁综合冷效均随 x 的增加而逐渐上升。当吹风比 $M = 0.4$ 较低

时,凹面和凸面模型的横向平均综合冷效均高于平面模型。在第2排气膜孔位置 $x/D_i = 5$,凹、凸面模型的平均综合冷效分别为0.54、0.515,在 $x/D_i > 9$ 下游,凸面模型的平均综合冷效逐渐高于凹面模型。在低吹风比的作用下,平面模型的横流累积效应最为显著,表现在平均综合冷效随 x 的上升幅度最大,在 $x/D_i > 12$ 区域已经接近凹面模型的平均综合冷效。

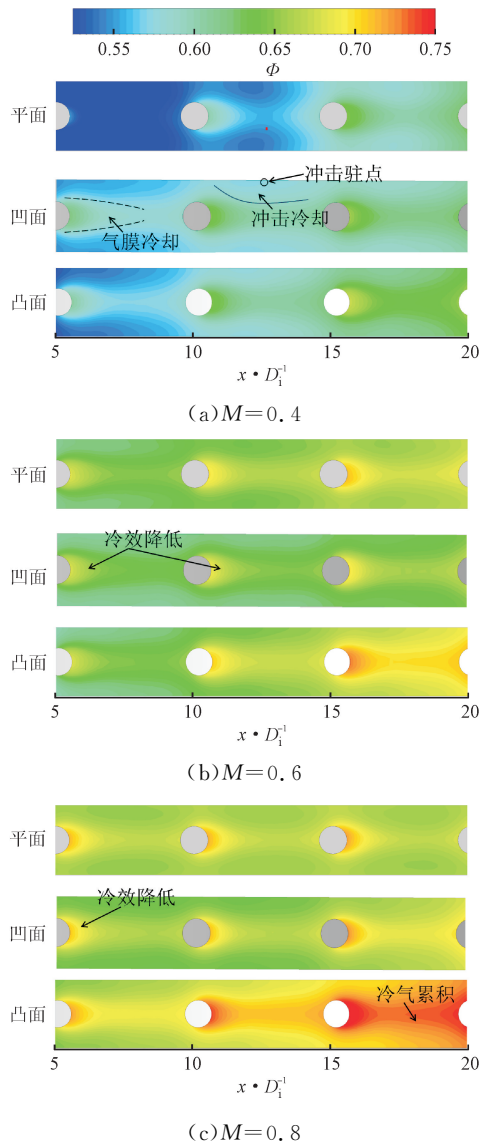
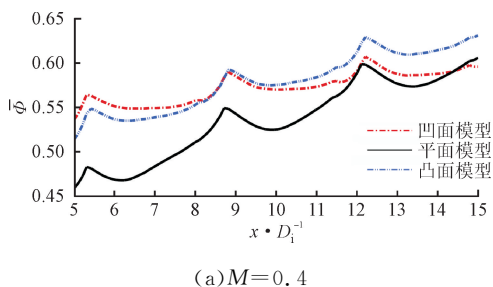


图6 外壁面综合冷效云图

Fig. 6 Overall cooling effectiveness contours on outer wall



(a) $M = 0.4$

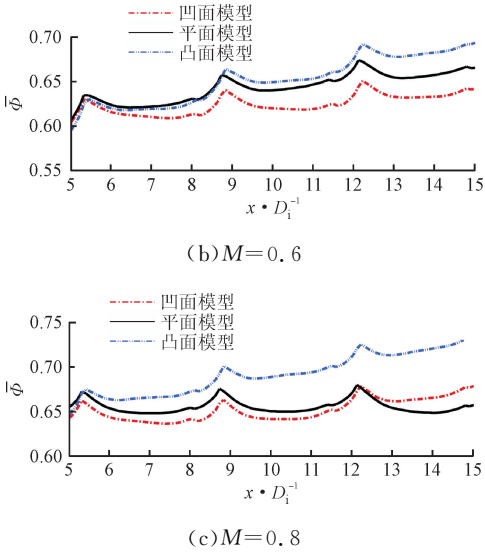


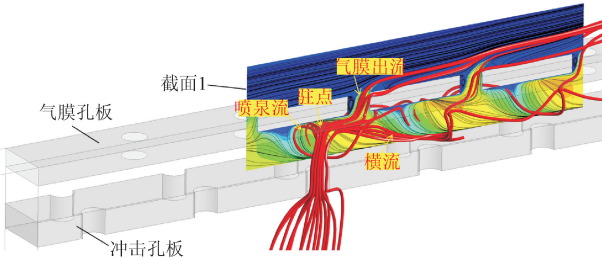
图 7 外壁面横向平均冷却效率

Fig. 7 Laterally averaged overall cooling effectiveness

当吹风比 $M = 0.6, 0.8$ 较高时,凹面模型的平均综合冷效略低于其他模型,主要是由于高动量冷气脱离外壁面的趋势较强。当 $M = 0.6$ 时,凸面模型的平均综合冷效与平面模型较为接近,但凸面模型平均综合冷效随 x 增加的上升趋势更大。当 $M = 0.8$ 时,凸面模型取得了最高的冷却效果,在 $x/D_1 = 15$ 位置的平均综合冷效为 0.73;凹面模型和平面模型的平均综合冷效较为接近,二者的外壁综合冷效随 x 增加无显著上升趋势。

2.2 曲面双层壁的内、外流动特性

为了揭示不同双层壁形状下内外冷气的流动情况,图 8 给出了冲击腔内纵截面(截面 1)的二维流线分布。在垂直出射的冲击冷气的作用下,冲击腔室内驻点临近区域的喷泉流显著增强了当地的旋流强度,体现在流线垂直于冲击滞止方向。在驻点区域外,冲击冷气向下游迁移的趋势更强,体现在二维流线指向下游并偏向冲击孔板方向。在到达靶面之后,大部分冲击冷气从气膜孔出流,而小部分冷气在冲击腔内向下游流动。



(a)截面 1 及三维流线

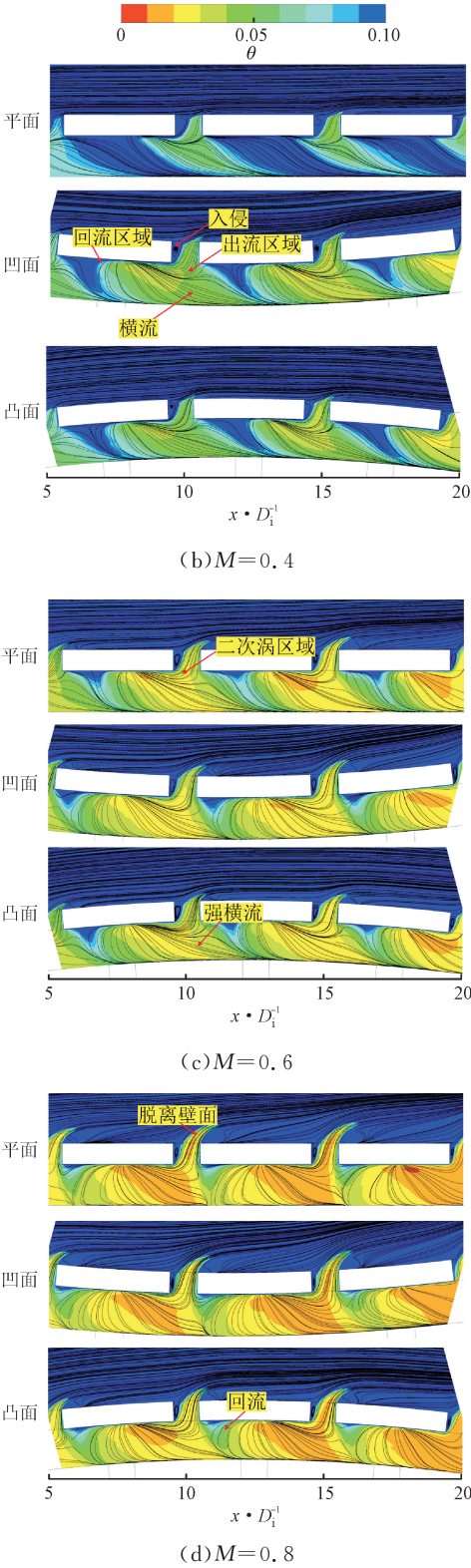


图 8 冲击腔内纵截面流线及温度分布

Fig. 8 2D streamline and temperature distributions on the longitudinal section

由图 8 可知,当 $M = 0.4$ 时,3 个模型的气膜冷气出射后抬升高度较低,冷气贴壁性能较好。由于

此时冷气流量较小,冲击腔内几乎无向上游的回流现象,所有流线均指向下游从而具有显著的向下游的横流累积效应,但各冲击孔的冷却区域之间存在较大间隔。在凹面模型中,由于凹面曲面方向与冷气横流方向相反, $x/D_i = 12.5, 17.5$ 驻点区域的横流强度最弱,这造成了图6中驻点范围内综合冷效相比于平面模型显著提升,这也同时导致每个气膜孔下方的冷气聚集,3种模型中最为严重,气膜孔横截面内冷气出流面积最大。在凸面模型中,冲击腔室内出流区域的面积有所扩大,尤其是下游气膜孔排,同时气膜孔内的入侵区域面积减小,凸面曲面使得喷泉流的范围增大,这使得驻点附近的横流强度相比于平面模型更弱。

当 $M=0.6$ 时,与小吹风比不同,冲击冷气在到达靶面后小部分向上游回流,体现在冲击腔内部分面流线指向 x 负向。各冲击孔冷气影响区域的间隔相比于 $M=0.4$ 显著减小,其中冲击驻点附近的温度较低,这是因为该处具有较强的冷气聚集,下游驻点的低温区面积更大,更靠近其下游的气膜孔,这主要是由冷气的横流累积所导致的。在平面模型中,出流区的二次涡影响面积最小,这使得气膜孔内冷气出流更顺畅,孔内入侵区域面积与凹面模型无显著区别。在凹面模型中,气膜孔下方出流区的二次涡面积最大,导致凹面模型的气膜冷气出流的出射角最大,并在一定程度降低了外壁的冷却效果。在凸面模型中,冲击腔内的冷气横流及向下游聚集效应最为显著,导致图6中下游区域的综合冷效最高。

当 $M=0.8$ 时,冷气流经气膜孔后在主流中具有最大的抬升高度,冲击驻点附近向上游回流的冷气流量显著增加,并且回流区更加靠近其上游气膜孔,这导致其上游气膜孔的垂直出流趋势有所增强。在高吹风比下,冲击冷气向上游的回流导致冲击腔内横流累积效应相比于低吹风比下有所减弱,尤其是平面和凹面模型,而凸面模型的冷气横流强度最高,并且冲击腔室下游区域的低温区面积更大,这是因为图6中凸面模型的累积冷效更为显著。在凹面模型中,冲击冷气在达到靶面后具有更强的脱离壁面的趋势,因此对壁面的冷却效果比平面模型更差。

相比于主流速度,图9给出了近气膜孔出口处的无量纲速度云图。由于双层壁结构的气膜孔长径比较小,气膜孔内的冷气出流速度分布相比于大长径比气膜孔更为不均匀。图8中,主流在气

膜孔的上游区域入侵孔内,并形成回流涡,回流涡占据了气膜孔内上游区域,在主流与冷气腔室压差的作用下,孔内入侵区域呈月牙形,回流涡使得气膜孔内下游的冷气出流面积有所减小,出射速度有所增加。

当 $M=0.4$ 时,双层壁曲面对冷气出射在3个吹风比中具有最大的影响。在平面模型中,下游气膜孔相比于上游气膜孔的入侵及冷气出流速度都有所增加,尤其是第2排气膜孔,这使得 $x/D_i=5$ 位置的气膜孔内冷气抬升高度能够到达气膜孔出口,从而显著改善了平面模型中 $5 < x/D_i < 10$ 时的冷效不足。在凹面模型中,主流入侵使得冲击腔内回流区的面积最大,同时孔内冷气出流面积最大,从而导致上游气膜孔出流在外壁具有最大的冷气覆盖面积。在凸面模型中,3个气膜孔的入侵及出流面积差距较小;下游2个气膜孔的冷气出流较凹面模型较弱,但图6中外壁综合冷效更高,这是因为脱离壁面的趋势比凹面模型更弱。

当 $M=0.6$ 时,高吹风比下气膜孔的冷气出流面积显著增加,并使得主流对气膜孔的入侵从靠近孔中间位置移动到了孔上游边沿。在凹面模型中,凹面弯曲使得冲击腔内冷气横流更弱,冷气更倾向于从临近气膜孔射出而不是向下游聚积,因此气膜孔的冷气出射趋势显著增强,并显著增加了其从壁面的抬升高度及脱离趋势,因此凹面模型的综合冷效在3种模型中较低。在凸面模型中,第2排气膜孔内的冷气出流面积比平面模型更大;下游气膜孔的冷气出流情况和平面模型无显著差异,但图6中凸面模型的综合冷效相比于平面模型有所提高,主要是由于凸壁面改善了气膜冷气的贴壁效果,同时主流对气膜孔的入侵相比于平面模型也略微增强。

当 $M=0.8$ 时,气膜孔的出流区域仍然集中于气膜孔下游边沿。在凹面模型中,气膜孔内主流入侵、冷气出流的位置与 $M=0.6$ 时几乎相同,凹面模型相比于其他两种模型具有更强的冷气出流趋势,同时凹外壁使得气膜冷气更难以附着,因此平均综合冷效比其他两种模型略低。在凸面模型中,在此高吹风比下,主流对凸面模型的气膜孔入侵更为明显,同时在冲击腔室强横流的共同作用下,3排气膜孔的冷气出流均弱于平面模型,但主流入侵的位置几乎不发生变化,使得外壁气膜冷气具有较强的贴壁性能,显著增强了外壁的综合冷效。

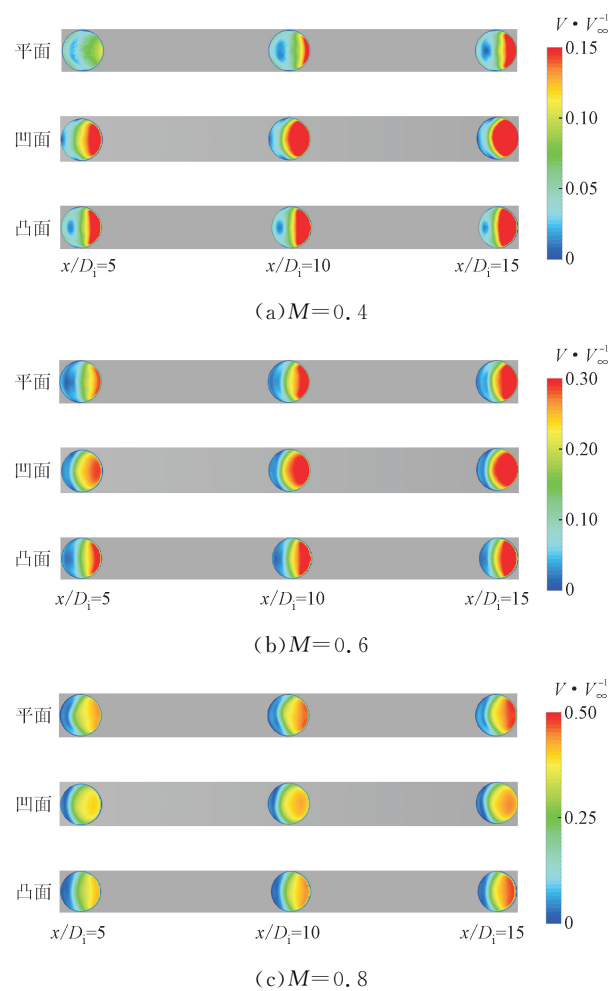


图 9 气膜孔横截面的无量纲速度云图

Fig. 9 Nondimensional velocity contours on the cross section of film cooling holes

为了揭示不同壁面弯曲情况下主流入侵对双层壁内部冷气横流及扩散的影响,图 10 给出了冲击腔内横截面(截面 2)的二维流线分布,可知壁面弯曲对冲击冷气的横向扩散具有显著的影响。当 $M=0.4$ 时,来自不同冲击孔的冷气的影响区域仍具有较大间隔,在冲击腔内横流效应的影响下,冲击冷气在到达靶面前向下游扩散,并向气膜孔进口处汇聚。在平面模型中,冲击腔室内冷气向下游均匀流动,且两个相邻冲击孔之间区域的横流更为显著,并且无明显回流现象。在凹面和凸面模型中,由于图 8 中喷泉流导致的冷气回流作用,冲击冷气向其上游有一定的扩散,并且向下游的扩散相比于平面模型也更为强烈,从而使得图 6 中由热传导导致的外壁冷却效果更为均匀,其中凹面模型的扩散远强于凸面模型,导致靶面驻点范围内具有良好的冷却效果。当 $M=0.6$ 时,上游冲击冷气能够扩散到下游冲击孔位置,而大部分冷气从气膜孔流出,使得其下游仍然存在小部分高温区。与小吹风比有所不同,气膜孔进口上游的冷

气同样会从气膜孔流出,体现在气膜孔上游流线指向气膜孔,凹、凸面模型中气膜孔上游的回流都显著强于平面模型,尤其是对于凹面模型,这与图 8 中凹面模型气膜孔下方最大的二次涡面积相对应。当 $M=0.8$ 时,在此高吹风比下,冲击腔内的温度分布最为均匀。3 种双层壁模型的气膜孔进口上游回流都显著增强,从而显著扩大了气膜孔内的冷气出流面积。3 种模型中,冲击冷气向气膜孔的扩散程度无显著区别,但回流区面积在平面模型中达到最大,这使得平面模型具有最大的气膜孔内出流面积。此外,凸面模型具有最强的冲击腔室横流强度,从而导致图 6 中凸面模型的下游横流累积冷效达到最大值。

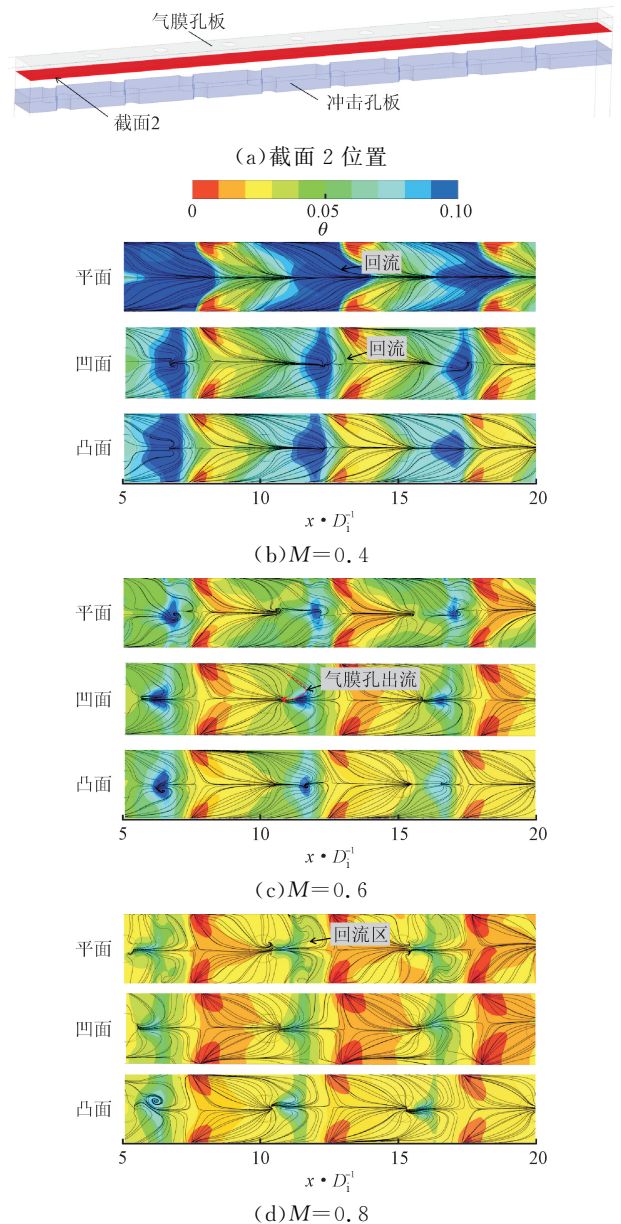
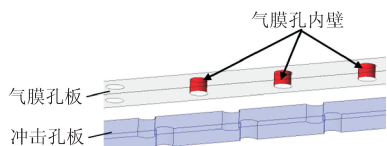


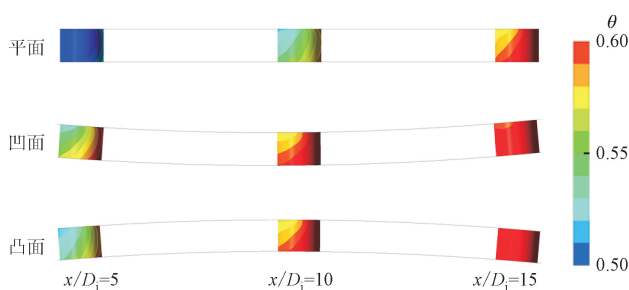
图 10 横截面流线及温度分布

Fig. 10 2D streamline and temperature distributions on cross section

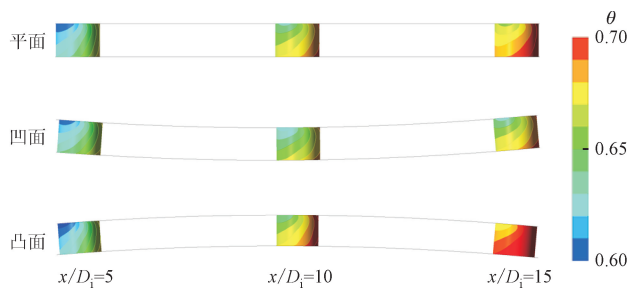
图 11 给出了气膜孔内壁的综合冷效分布云图。一般来说,主流入侵主要发生于气膜孔的上游边沿区域,而气膜孔的冷气出流主要发生于其下游边沿。在冲击腔冷气横流累积效应的作用下,下游气膜孔的出流比上游气膜孔更为强烈,孔内冷效也更高。壁面弯曲通过影响孔内流动直接影响了孔内的冷效分布。在低吹风比 $M=0.4$ 下,第 2 排气膜孔内的低冷效区同时出现在上游的上部及下部,而更下游气膜孔的低冷效区仅出现于上游的上部,表明主流在上游气膜孔的入侵更为强烈,且主流入侵深度相比于下游气膜孔有所增加,导致气膜孔进口处冷气入流面积显著减小。相比于平面模型,凹面及凸面模型的气膜孔内冷效都有显著提高,尤其是上游气膜孔。在高吹风比 $M=0.6, 0.8$ 时,相比于低吹风比,低冷效区集中于气膜孔内上游的上部区域,主流入侵对冲击腔室内的流动影响较小。相比于凹面模型,凸面模型的下游气膜孔内低冷效区的面积显著减小,主要是因为凸面模型冲击腔室内的横流效应更为明显,冷气更倾向于从下游的气膜孔内流出。



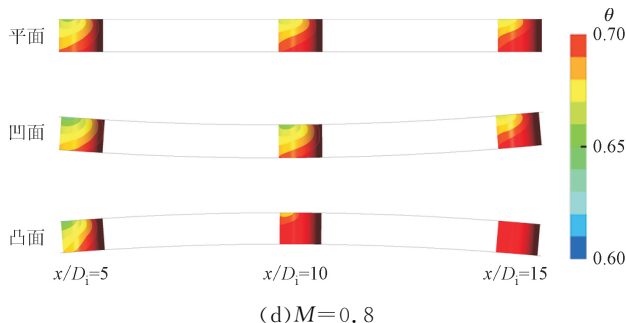
(a) 气膜孔内壁位置



(b) $M=0.4$



(c) $M=0.6$



(d) $M=0.8$

图 11 气膜孔内壁综合冷效云图

Fig. 11 Overall cooling effectiveness contours on the inner wall of film cooling holes

3 结 论

针对双层壁在曲面条件下内、外流动与冷却耦合特性不明晰的问题,本文在不同典型冷气吹风比下,采用共轭传热法对比研究了平面和凹、凸曲面双层壁的流动及综合冷却特性,分析了曲面双层壁的内外流动相互影响规律,得到如下主要结论。

(1)在低冷气吹风比下,凹面双层壁的气膜孔内截面的冷气出流面积最大,其上游气膜孔射流的冷却效果相比于平面双层壁有所提升,外壁平均综合冷效能够达到 0.54,同时冲击驻点临近区域的冷气横流强度和换热效果也显著提升。凸面双层壁的下游气膜孔冷却和冲击冷却效果相比于平面双层壁均有所增强,气膜孔内的主流入侵面积有所减小,同时主流入侵能够到达气膜孔下部,而气膜射流在凸外壁的贴壁性能更好。

(2)在高冷气吹风比下,凹面双层壁的气膜孔下方冷气出流区的二次涡面积最大,气膜孔进口的上游冷气能够从气膜孔流出,同时气膜孔内主流入侵深度最小,导致凹面双层壁气膜冷气的出射角度最大,冷气更容易脱离凹壁面,因此气膜孔下游冷却效率略低于平面模型。凸面双层壁中气膜孔内入侵出现于上游边沿,冲击腔内冷气向上游回流最弱,从而在冲击腔内获得最强的横流累积效果,凸壁面平均综合冷效在 $x/D_i = 15$ 时能够达到 0.73。

参考文献:

- [1] BUNKER R S. Evolution of turbine cooling [C]// ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME,

- 2017; V001T51A001.
- [2] 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.
- [3] NGETICH G C, MURRAY A V, IRELAND P T, et al. A three-dimensional conjugate approach for analyzing a double-walled effusion-cooled turbine blade [J]. Journal of Turbomachinery, 2019, 141(1): 011002.
- [4] 黄俊杰, 朱剑琴, 程泽源. 基于卷积神经网络双层壁三维热应力预测方法 [J]. 航空动力学报, 2023, 38(7): 1658-1667.
- HUANG Junjie, ZHU Jianqin, CHENG Zeyuan. Three-dimensional thermal stress prediction method in double-wall structure using convolutional neural networks [J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(7): 1658-1667.
- [5] XIE Rong, WANG Hao, XU Baopeng, et al. A review of impingement jet cooling in combustor liner [C]//ASME Turbo Expo 2018; Turbomachinery Technical Conference and Exposition. New York, NY, USA: ASME, 2018; V05CT17A006.
- [6] IGNATIUS I, JANARDANAN SARASAMMA J. Numerical analysis of impingement/effusion cooling effectiveness on flat plates [C]//ASME 2015 Gas Turbine India Conference. New York, NY, USA: ASME, 2015; V001T04A004.
- [7] SHRAGER A C, THOLE K A, MONGILLO D. Effects of effusion cooling pattern near the dilution hole for a double-walled combustor liner: part 1 overall effectiveness measurements [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2019, 141(1): 011022.
- [8] LI Wen, TAN Xiaoming, HUANG Xiaofeng, et al. Application of double-wall cooling structure in the integrated strut flame stabilizer [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2022, 36: 101526.
- [9] JACKOWSKI T, ELFNER M, BAUER H J. Numerical investigation of conjugate heat transfer in an effusion and impingement cooled combustor wall [C]//ASME Turbo Expo 2020; Turbomachinery Technical Conference and Exposition. New York, NY, USA: ASME, 2020; V07AT11A009.
- [10] KIM S H, AHN K H, JUNG E Y, et al. Total cooling effectiveness on laminated multilayer for impingement/effusion cooling system [C]//ASME Turbo Expo 2014; Turbine Technical Conference and Exposition. New York, NY, USA: ASME, 2014; V05BT13A050.
- [11] AHMED A, WRIGHT E, ABDEL-AZIZ F, et al. Numerical investigation of heat transfer and flow characteristics of a double-wall cooling structure: reverse circular jet impingement [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 189: 116720.
- [12] ROGERS N, REN Zhong, BUZZARD W, et al. Effects of double wall cooling configuration and conditions on performance of full-coverage effusion cooling [J]. Journal of Turbomachinery, 2017, 139(5): 051009.
- [13] HAN Shaohua, XIANG Zhen, XING Jiangjiang, et al. Numerical simulation of composite swirl/film double-wall cooling structures and chamber designs for enhanced overall cooling effectiveness [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 228: 125664.
- [14] RITCHIE D, CLICK A, LIGRANI P M, et al. Double wall cooling of an effusion plate with simultaneous cross flow and impingement jet array internal cooling [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2019, 141(9): 091008.
- [15] NIU Jiajia, LIU Cunliang, LIU Haiyong, et al. Theoretical and experimental analysis of overall cooling effectiveness for afterburner double-wall heat shield [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 176: 121360.
- [16] 王一, 汪翔宇, 李家龙, 等. 多孔介质扰流柱对双层壁冷却系统性能影响的数值研究 [J/OL]. 西安交通大学学报. (2024-06-05) [2024-06-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20240529.1512.004.html>.
- WANG Yi, WANG Xiangyu, LI Jialong, et al. Numerical study on effects of porous medium on performance of double wall cooling system [J/OL]. Journal of Xi'an Jiaotong University. (2024-06-05) [2024-06-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20240529.1512.004.html>.

- [17] NGETICH G C, IRELAND P T, ROMERO E. Study of film cooling effectiveness on a double-walled effusion-cooled turbine blade in a high-speed flow using pressure sensitive paint [C]//ASME Turbo Expo 2019; Turbomachinery Technical Conference and Exposition. New York, NY, USA: ASME, 2019; V05BT19A008.
- [18] 章锁诚, 夏硕成, 迟重然, 等. 双层壁叶片的模型化方法与冷却设计流程研究 [J]. 热能动力工程, 2021, 36(10): 11-17.
- ZHANG Suocheng, XIA Shuocheng, CHI Zhongran, et al. Study on the modeling method and cooling design procedure of double-wall turbine blades [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(10): 11-17.
- [19] ZHANG Jie, LIU Cunliang, XU Weijiang, et al. Experimental investigation of full-coverage film cooling characteristic of single/double-wall cooling vane [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2024, 47: 102261.
- [20] 栾永先, 沈跃. 层板冷却导向叶片设计及试验验证 [J]. 航空发动机, 2021, 47(6): 20-25.
- LUAN Yongxian, SHEN Yue. Design and test validation for laminated cooling turbine vane [J]. Aero-engine, 2021, 47(6): 20-25.
- [21] SKAMNIOTIS C, COCKS A C F. Minimising stresses in double wall transpiration cooled components for high temperature applications [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 189: 105983.
- [22] 缪国君. 狭小受限曲面空间内冲击流动与换热特性研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- [23] 黄鑫, 浦健, 王建华, 等. 曲面对层板/热障涂层耦合结构冷却特性的影响 [J]. 工程热物理学报, 2023, 44(7): 1800-1807.
- HUANG Xin, PU Jian, WANG Jianhua, et al. Effects of wall curvature on cooling characteristics of a laminated cooling configuration coupled by thermal barrier coatings [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(7): 1800-1807.
- [24] ZHOU Weilun, DENG Qinghua, FENG Zhenping. Conjugate heat transfer analysis for laminated cooling effectiveness; effects of surface curvature [C]//ASME Turbo Expo 2016; Turbomachinery Technical Conference and Exposition. New York, NY, USA: ASME, 2016; V05AT10A008.
- [25] SKAMNIOTIS C, COCKS A C F. Thermal and centrifugal stresses in curved double wall transpiration cooled components with temperature dependent thermoelastic properties [J]. International Journal of Solids and Structures, 2022, 234-235: 111273.
- [26] 刘友宏, 赵云洋, 任浩亮. 流向/周向曲率对加力尾部双层壁隔热屏冷却性能影响 [J]. 推进技术, 2019, 40(5): 1073-1082.
- LIU Youhong, ZHAO Yunyang, REN Haoliang. Effects of flow and circumferential curvature radius on cooling performance of double wall heat shield of afterburner tail [J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(5): 1073-1082.
- [27] NAKAMATA C, MIMURA F, MATSUSHITA M, et al. Local cooling effectiveness distribution of an integrated impingement and pin fin cooling configuration [C]//ASME Turbo Expo 2007; Power for Land, Sea, and Air. New York, NY, USA: ASME, 2007; 23-34.

(编辑 赵炜)