基于分离涡模拟的平板气膜涡系结构与流动损失 数值研究^{*}

吴 琼^{1,2}, 尹 钊^{1,2,3}, 张华良^{1,2,3}, 徐玉杰^{1,2,3}, 陈海生^{1,2,3,4}

(1. 中国科学院工程热物理研究所,北京 100190;
 2. 中国科学院大学,北京 100049;
 3. 中科南京未来能源系统研究院,江苏南京 211135;
 4. 中国科学院清洁能源创新研究院,辽宁大连 116023)

摘 要: 气膜冷却在保护高温部件的同时,主流与冷气干涉会形成复杂的涡系结构并造成掺混损 失,研究二者之间的作用机理对指导气冷涡轮优化设计具有重要意义。本文采用DES (Detached-Eddy Simulation)方法对平板圆柱气膜孔的流场进行非定常数值模拟,分析了涡系演变规律以及掺混损失。 结果表明:随着吹风比的提高,冷气射流与主流的流动掺混过程表现为两种不同的模式,低吹风比时下 游冷气主要受顺时针方向的迎风涡控制,高吹风比时逆时针方向的迎风涡和顺时针方向的背风涡同时控 制下游冷气运动;频谱分析显示,流场扰动存在着明显的倍频关系,基频信号由脱落涡产生,频率大小 与吹风比呈线性关系;损失分析表明,流场损失主要由冷气与主流的温差换热导致,占总煽损失的90% 以上。

关键词: 燃气轮机; 气膜冷却; 冷气掺混; 迎风涡; 气动损失; 雷诺应力; 分离涡模拟 中图分类号: V231.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2023) 05-2203067-11 DOI: 10.13675/j.enki. tjjs. 2203067

Detached Eddy Simulation of Vortex Structure and Flow Loss of Flat Film Cooling

WU Qiong^{1,2}, YIN Zhao^{1,2,3}, ZHANG Hua-liang^{1,2,3}, XU Yu-jie^{1,2,3}, CHEN Hai-sheng^{1,2,3,4}

Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Nanjing Institute of Future Energy System, Institute of Engineering Thermophysics,

Chinese Academy of Science, Nanjing 211135, China;

4. Dalian National Laboratory for Clean Energy, CAS, Dalian 116023, China)

Abstract: The interaction between mainstream and cooling air will form a complex vortex structure and cause mixing losses, while the film cooling protects the high temperature parts. It is extremely important to study the interaction mechanism between loss and vortex structure for optimizing air-cooled turbine structure. The DES (Detached Eddy Simulation) method was used to compute the unsteady film-cooling flow field of flat plate cylin-

引用格式: 吴 琼, 尹 钊, 张华良, 等. 基于分离涡模拟的平板气膜涡系结构与流动损失数值研究[J]. 推进技术, 2023, 44(5):2203067. (WU Qiong, YIN Zhao, ZHANG Hua-liang, et al. Detached Eddy Simulation of Vortex Structure and Flow Loss of Flat Film Cooling[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(5):2203067.)

^{*} 收稿日期: 2022-03-21;修订日期: 2022-06-28。

基金项目:国家科技重大专项(J2019-Ⅱ-0008-0028);国家杰出青年科学基金(51925604);中科院洁净能源先导科技专项(XDA21070302);中国科学院国际合作局国际伙伴计划(182211KYSB20170029)。

作者简介: 吴 琼,博士生,研究领域为涡轮气动热力学。

通讯作者:张华良,博士,正高级工程师,研究领域为叶轮机械内部流动分离及其控制方法。E-mail: zhanghl@iet.cn

der hole, then the evolution law of the vortex system and the mixing loss were analyzed. As results, there are two different motion modes in the film flow field dominated by the windward vortex with the increase of the blowing ratio. The downstream cooling air at low blowing ratio is mainly controlled by the clockwise windward vortex, and at high blowing ratio, the anti-clockwise windward vortex and the clockwise leeward vortex simultaneously control the movement of the downstream cooling air. Spectral analysis shows that there is a clear multiple relationship among the flow field disturbance frequencies. The fundamental frequency signal is generated by the shedding vortex, and the frequency is linearly related to the blowing ratio. Loss analysis shows that the flow field loss, which accounts for more than 90% of the entropy loss, is mainly caused by the heat transfer between the cooling air and the mainstream.

Key words: Gas turbine; Film cooling; Cooling air mixing; Upright vortex; Aerodynamic loss; Reynolds stress; Detached-eddy simulation

1 引 言

气膜冷却技术广泛应用在先进的燃气轮机和航 空发动机中,用以保证高温部件尤其是高压涡轮的 正常工作。但气膜冷却在实现高冷却效率的同时却 也不可避免地为流场带来掺混损失,冷气掺混造成 的损失成为了制约高压涡轮进一步发展的重要 因素。

早期为了详细地了解气膜冷气的射流流场运动和掺混机制,做了大量的试验研究。Andreopoulos^[1] 通过对射流运动的可视化研究揭示了大尺度旋涡结构的存在,指出其运动频率与主流流速和气膜孔径成比例,与雷诺数和速度比无关。Kelso等^[2]和Camussi等^[3]利用低雷诺数流动研究了射流在横流中的 发展,发现涡系运动与速度比密切相关,使得流场存 在不同的流动模式。低速比时受主流影响较大,高 速比时射流影响更大。Blanchard等^[4]认为流动模式 取决于流动失稳,应用Landman等^[5]的椭圆理论较好 地预测了射流失稳状态并从实验中得到了验证。

随着数值计算的发展,大涡模拟(LES)和脱落涡 模拟(DES)等已经可以实现对气膜冷却非定常流场 的精细化研究。Kim等^[6]使用DES方法研究了吹风 比为1的平板气膜冷却流场,识别出了气膜孔内反向 旋转涡对、主流的马蹄涡、发卡涡等典型结构,数值 计算的气膜冷却效率与试验结果取得了良好的一致 性。Gräf等^[7]采用LES方法研究了双排孔冷却效率 的优化及其损失特性,发现总压损失系数与动量比 的法向分量成正比,熵损失系数与其展向分量成正 比。Sarkar等^[8]采用LES方法研究了上游尾迹对气膜 冷却影响机理,发现合理控制尾迹的运动可以有效 改善气膜冷却效率。Qenawy等^[9]采用试验和LES相 结合的方法研究气膜冷却效率的影响机制,发现气 膜孔内的螺旋状涡管是在孔外形成剪切涡的重要 原因。

国内对于气膜流场的研究相对较晚,也主要以 数值计算为主。王扬平等^[10]和刘斌等^[11]利用DES和 LES方法复现了三维动态涡结构,指出大尺度相干涡 结构在流场演化中的主导作用。王鹏^[12]对方孔射流 的研究指出流场存在的拟序结构主导着冷却气膜的 覆盖效果。林晓春等^[13-14]基于DES和SAS方法对冷 气出流的涡结构和脱体机理进行了详细的分析,提 出了一种基于总压损失概念的掺混损失模型。梁俊 宇等^[15-16]运用二维PIV测试技术和DES方法研究了 平板气膜冷却效率的影响机理,发现发卡涡的上抛 运动会降低当地的气膜冷却效率,弯孔可以有效抑 制上抛运动,改善气膜冷却。根据上述研究,史万 里^[17]、常建龙等^[18]和Zhao等^[19]先后利用脉冲射流来 控制非定常涡系结构,结果表明利用脉冲效应合理 控制脱落涡的形成频率可以显著提高冷却效率。

综上所述,目前国内外对气膜冷却非定常流场 的涡系结构与气膜冷却效率之间的联系展开了广泛 而深入的研究;对于涡系运动与掺混损失的内在联 系研究则较少。然而随着涡轮的进口温度不断提 高,冷气的需求量增大,气膜冷却引起的掺混损失会 严重抵消涡轮前温度提高带来的性能收益。针对该 问题,本文以单孔的平板气膜流场为研究对象,采用 DES方法对气膜流场进行深入分析,详细地研究不同 吹风比下旋涡结构的演化规律和损失特征,以期获 得涡系发展与流场气动损失间的联系。

2 方 法

2.1 计算域及网格划分

本文基于平板气膜开展冷气掺混的气动损失研 究,计算域如图1所示,气膜孔选取目前航空发动机 和燃气轮机中广泛使用的圆柱孔,气膜孔直径D取为 5mm,长径比为4D,倾角为30°,孔间距为3D,为减小 边界层加厚造成的流场加速效应,主流计算域高度 取为10D,孔前长度取为18D以保证来流充分发展, 计算域总长为50D,坐标原点设在气膜孔出口后缘。



Fig. 1 Computational domain parameters

网格划分采用商业软件ICEM-CFD,全域采用结构化网格,圆柱气膜孔区域采用O-block结构,其中网格最小角度为27°,边界层第一层网格Y*<0.6,边界层增长率为1.1,近壁处的湍流核心区网格纵横比不大于2,为保证网格无关性,对四种数量的网格(120万、230万、310万、420万)在吹风比M=0.6时进行了无关性验证,见图2,当网格数量为310万时,展向平均的气膜冷却效率偏差不大于1%,综合考虑计算的效率和精度,选取的网格数为310万,网格划分情况如图3所示。







Fig. 3 Structured grids

2.2 计算方法

本文数值计算采用商业软件 ANSYS CFX 17.0, 湍流模型分别采用 SST 和 DES。计算时为减少壁面 边界层影响,将上壁面设置为对称边界,两侧壁面设 置为周期性边界条件,计算域只含有一个气膜孔。 主流进口速度 u₀=60m/s,温度 T₀=450K,来流湍流度 设定为 1%;冷气温度设定为 T₀=300K,湍流度取中等 湍流度 5%;出口背压为大气压。

采用 DES 方法进行计算时,在气膜孔内 10%, 50%,90%高度位置设置监测点 P1~P3,在气膜孔出 口下游 1D,3D,5D,高 0.8D 的中心位置设置监测点 P4~P6,监测流场的温度、速度和压力变化,时间步长 Δt取 1.5μs,内循环步数为10步。

为验证数值方法的正确性,将吹风比*M*=1.475时的计算结果与文献[20]中试验工况进行对比,如图4 所示,为气膜孔下游流场中沿壁面法向的速度分布, DES和SST湍流模型都能较好地模拟流场中的速度 分布。采用均方根误差对两种模型预测值的误差进 行量化分析,如表1所示,DES方法预测值的均方根 误差相对较小,与试验值取得了更好的一致性,因此 本文主要根据DES方法的计算结果对平板气膜流场 进行分析。

2.3 参数定义

定义吹风比M为

$$I = \frac{\rho_c u_c}{\rho_0 u_0} \tag{1}$$



式中 ρ_{e} 为冷气的密度, u_{e} 为冷气的流速, ρ_{0} 为主流的

M

ertical distribution of velocity for numerical method va

Table 1 RMSE of numerical simulation

Measuring position	X=1D	X=2D	X=5D	X=10D
DES	0.219	0.113	0.140	0.068
SST	0.231	0.121	0.138	0.109

密度, u₀为主流的流速。

气膜冷却效率η定义为

$$=\frac{T_{0}-T_{aw}}{T_{0}-T_{c}}$$
(2)

式中 T_0 为主流的温度, T_{aw} 为绝热壁面的温度, T_o 为冷 气的温度。

展向平均气膜冷却效率 π定义为

η

$$\bar{\eta} = \frac{1}{\Delta y} \int \eta \left(X, Y \right) dY \tag{3}$$

式中X为流向方向,Y为展向方向。

3 结果与讨论

3.1 流场涡系结构分析

图 5 是不同吹风比下瞬时时刻平板纵向截面的 速度云图,由于气膜孔的倾斜进气,致使气膜孔进气 口下壁附近出现一低速区,该区域挤压孔内自由流 动的空间并沿着流动方向发展,占据了孔内大部分 区域,自由流体绕过该区域受到加速作用,这使得气 膜孔内流体分成高速流体和低速流体两部分。在高 速流体与低速流体的交界面上(见图 5 中 Interface), 强烈的剪切促进了孔内剪切涡的形成;随着吹风比 增大,剪切水平增强,孔内涡系强度随之加强。

在冷气出口后,由于吹风比不同,冷气在主流中 形成的流动结构也有所不同,如图6所示。在低吹风 比时,孔内的高速流体出流后在迎风面与主流发生 剪切形成迎风涡;而背风面流体由于射流动量较小, 被压制在近壁面,难以直接与主流接触。此时,气膜 孔下游流场主要受迎风涡控制。当吹风比较高时, 冷却射流入射高度增加,背风面流体可以与孔后的 高温主流直接接触,在两股流体的剪切作用下形成 背风涡,此后,背风涡与迎风涡一同控制下游冷气的 发展。

Y方向的涡量云图显示主流中的冷气存在两种 不同的运动模式。低吹风比时,如图7(a)(M=0.6)所 示,迎风涡、背风涡和孔内剪切涡的涡量全为正,旋 转方向为顺时针方向。此刻,迎风涡的涡量主要来 自于上游壁面边界层、主射流剪切以及孔内剪切涡, 气膜孔内的剪切涡进入主流后与迎风涡融合,接着 在气膜孔下游附近又与背风涡发生融合,涡脱落后 形成典型的发卡涡结构,如图8(a)的A所示。



Fig. 5 Instantaneous flat plate velocity contours of center spanwise plane







(b) *M*=1.475





Fig. 8 Instantaneous vortex structure for DES colored by vorticity (Isosurface of *Q*=6.195×10⁷s⁻²)

在较高吹风比时,如图7(b)(*M*=1.475)所示,迎 风面冷气流速提高,迎风涡发展成逆时针方向;受到 上游壁面边界层和顺时针方向的孔内剪切涡影响, 迎风涡强度有所减弱,此刻由于冷气流速较高,背风 涡强度增加,主流不再能把射流压制在近壁面,迎风 涡与背风涡发生涡脱落后,涡团成对地向下游发展 并缓慢融合,如图8(b)所示,B结构为迎风涡的脱落 涡,A为背风涡的脱落涡。

因此,结合上述分析,将射流引起的流场演化简

化为迎风涡、背风涡和孔内剪切涡主导的涡系运动。 如图9所示,为三种涡系在不同吹风比下的运动结构。在低吹风比时,迎风面的冷气流速要低于来流 主流的流速,主流对冷气入侵形成顺时针方向的迎 风涡,涡系结构见图9(a)。当吹风比逐步提高,冷气 和主流的速度差逐渐减小,迎风面的流体剪切强度 减弱,当迎风面射流冷气的流速大于主流时,迎风涡 受冷气主导发展成逆时针方向。此后随着吹风比提 高,迎风涡强度不断增强,涡系结构见图9(b)。



为了进一步了解主流中涡系的发展历程,在气 膜孔出口下游(X/D=0为气膜孔出口位置)沿流向的 截面上通过流量平均得到了X,Y,Z三个方向涡量幅 值的变化过程,如图10所示。当吹风比不高时,涡量 幅值仅在孔出口下游3D范围内有所下降;随着吹风 比逐渐升高,X和Y方向涡量幅值在气膜孔下游较长 范围内大幅下降;Z方向的涡量幅值则始终对吹风比 变化不够敏感。

在三个工况的气膜流场下游位置(X=20D~30D), 各个涡量幅值均"恢复"到相同水平,而与吹风比不 再相关,这说明此刻的涡量主要受来流主流控制,而 上游冷气对下游流场发展的影响则越来越弱。

由于壁面边界层的存在,大量涡量由壁面向主 流输运,边界层内主要是 Y方向涡量,因此主流中 Y 方向涡量幅值最高。

冷气的加入使得*X*,*Y*,*Z*三个方向涡量幅值出现 显著性变化,观察图10可知,*X*和*Y*方向涡量幅值受 冷气影响最大,尤其在高吹风比时*X*方向涡量幅值增 幅最大,这主要是由于吹风比的提高增强了肾形涡, 使得*X*方向涡量大幅增加,其衰减速度相对于*Y*方向



Fig. 10 Distribution of vorticity amplitude along the flow direction

涡量稍慢,对气膜孔下游流场的影响范围更广。

因此,在气膜流场的发展中横向涡(涡X方向的 投影)和纵向涡(涡Y方向的投影)占据着重要地位, 尤其在气膜流场的发展初期,纵向涡强度最高,直接 决定了流场的流动状态。

3.2 流场波动的频谱分析

涡系运动会在局部造成流场波动,借助频谱分 析可以获得旋涡结构的强度和频率(运动周期)信 息。因此,为了进一步研究气膜冷却流场中涡系结构的运动特性,对关键位置的流场数据进行了FFT变换以分析其频谱规律。

图 11 为所选流场监测点速度波动的功率谱密 度。图中的尖峰信号是由涡运动引起^[1],大尺度的涡 不断从主流获得能量,通过涡的拉伸、破碎,能量逐 渐向小尺度的涡传递,最后在流体黏性的作用下,小 尺度的涡将机械能转化为流体的热能,这一系列的 涡运动在流场中引发了不同的波动信号。当大尺度 脉动在传输过程中不存在黏性耗散时,流体的能谱 图将服从柯尔莫哥洛夫-5/3律,即功率谱与频率对数 坐标下的曲线斜率近似为-5/3,如图 11 中黑色虚线 所示。

图 11 中第一个高能、低频的信号(流场基频)由 大尺度旋涡运动引起,即涡脱落;涡破碎后的小尺度 结构拥有更复杂的运动机制,引发着流场的高频波 动。进一步分析发现,基频与吹风比呈线性关系,如 图 12 所示。

文献[1]提到大尺度涡的运动频率和速度比无 关,然而吹风比是速度比与密度比的乘积,吹风比提 高,孔内流速随之提高,速度比会增大,密度比则会 逐渐减小,对于图12所展示的线性关系来说,涡脱落 的频率必然与速度比存在强烈的相关性。

观察图 11 中孔内监测点 P1~P3,在气膜孔入口 位置放置的监测点 P1 的速度波动的功率较低,主要 以基频信号为主,高频信号较弱,此时,孔内涡系处 于发展初期,功率谱密度的组成相对简单;而在气膜 孔中部的监测点 P2 和接近孔出口的监测点 P3,由于 孔内流体在沿流向发展的过程中,经过交界面上的 剪切,并伴随着涡脱落、破碎、融合等现象发生,涡系 得到显著加强,高频信号增强,功率谱密度的组成愈 加复杂。

随着吹风比提高,可以明显观察到孔内基频、2 倍频、3倍频等大尺度结构的运动引发的波动信号能 量逐步加强,P2和P3高频信号能量差值也在逐步缩 小。这是由于孔内流速提高,交界面上低速区与高 速区剪切加强,涡团从流动中获得了更多的能量,发 展加速。根据涡耗散理论,涡团获得的能量与其耗 散相当,因此孔内的涡耗散也随着吹风比提高而 加强。

对于主流区的监测点 P4~P6来说, 主频及其邻近 倍频信号能量随着吹风比提高呈现出先减弱再增强 的趋势。低吹风比时, 随着吹风比的提高主射流速 度差逐渐减小, 迎风面剪切变弱, 主导流场的迎风涡





Fig. 12 Fundamental frequency varies with blowing ratio

强度也随之减弱,涡团能量呈下降趋势;而在高吹风 比时,随着吹风比继续提高,主、射流速度差不断增 大,迎风面和背风面的流体剪切加强,涡强度和能量 不断增加,因此,主流的涡耗散也随吹风比提高先减 弱后增强。

此外,在低吹风比时,高频信号能量沿流动方向 呈上升趋势,而随着吹风比提高,沿流动方向的高频 信号能量则呈现出逐渐下降的相反趋势。这是由于 低吹风比时,主导流场运动的迎风涡、背风涡、孔内 剪切涡等都是顺时针方向,随着流动向下游发展,涡 团融合,能量则有所提高。而在高吹风比时,迎风涡 变向,逆时针的迎风涡与顺时针的背风涡沿流向相 互抵消,涡团能量必然逐渐降低,监测点的信号强度 亦随之降低。

3.3 雷诺应力分析

雷诺应力是单位面积上脉动动量通量平均的负值,可以表现出速度脉动引起的动量输运和掺混强度。因此本文采用式(4)^[21]对非定常流场中的雷诺应力进行分析

$$\tau_{ij,\text{DES}} = -\rho \,\overline{u_i' u_j'} \tag{4}$$

式中 $\tau_{ij,\text{DES}}$ 为DES方法中的雷诺应力, ρ 为流体密度, u'_i 为瞬时速度的脉动分量。

如图 13 所示,为不同吹风比下气膜孔下游流量 平均的雷诺应力幅值,图中分别展现了雷诺正应力 和切应力沿流向的发展过程。其中正应力幅值相对 较高,由于冷却射流具有法向和流向的速度分量,因 此 τ_{ww} 和 τ_{uw} 幅值相对 τ_{vv} 更高,为主要的贡献项。切应 力产生于正应力,幅值相对较小,为掺混的主要 动力。

从图 13 中可以观察到正应力沿流向的变化呈现 出两种不同的趋势,低吹风比时,正应力是先增高后 降低;高吹风比时则是沿流向逐步降低。这是由于 低吹风比时,冷气被主流压制在近壁面,顺时针方向 的迎风涡、背风涡和孔内剪切涡可以较好地融合形 成新的涡团,在气膜孔出口附近,涡团间的相互作 用、影响范围都相对较小,而随着流动发展,涡团影



Fig. 13 Distribution of Reynolds stress amplitude along the flow direction with different blowing ratio

响范围逐步扩大,相互作用增强,雷诺正应力随之提高;在气膜流场下游,受黏性耗散作用,涡团强度逐渐衰减,雷诺正应力开始降低。在高吹风比时,迎风涡变为逆时针方向与背风涡旋转方向相反,在形成初期涡量时最强,正、负涡团在气膜孔后相遇发生强烈的相互作用,因此正应力在冷气出流后拥有最高的幅值,而随着流动发展,黏性耗散以及正、负涡团的融合使得涡系衰减加快,雷诺应力随之快速降低。

雷诺切应力来源于正应力,有着相似的发展过 程,即在低吹风比时呈现出先增长后降低的趋势;而 在高吹风比时,切应力沿流向迅速下降;因此,切应 力幅值较高的区域在中上游,故掺混主要发生在气 膜流场的中上游区域。

3.4 损失分析

由于主流和冷却射流存在着速度和温度差异, 在冷气与主流发生掺混时,黏性耗散和温差换热将 引起流场中的不可逆损失,因此人们对气膜冷却的 损失采取了多种的评价方式,包括动能损失、焓损 失、总压损失、熵等,本文选用了文献中使用较多的 总压损失和熵来分析平板气膜流场中的流动损失。 其中熵生成率(Entropy Generation Rate, EGR)如式 (5)^[22]所示

$$\dot{S}_{\text{gen,total}} = \underbrace{\frac{1}{T} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i}}_{\dot{S} \rightarrow i} + \underbrace{\frac{1}{T^2} \frac{\partial T}{\partial x_i} \frac{\partial T}{\partial x_i}}_{\dot{S} \rightarrow i}$$
(5)

式中 τ_{ij} 为黏性应力,T为温度, $\dot{S}_{gen, visc}$ 表示流场黏性造成的损失, $\dot{S}_{gen, thermal}$ 表示流场不可逆换热造成的损失。

图 14给出了不同吹风比下平板纵向截面的熵生 成率云图,定性地反映出流场中损失的贡献情况。 图 14(a)为流场中总熵生成率的分布,熵损失的发生 与涡系运动存在着密切的联系,尤其在气膜孔出口 附近,主流中涡系的形成和发展引起的损失为总损 失的重要组成部分。随着吹风比提高,损失的生成 和影响区域也逐渐增大。

图 14(b)显示了流场中热损失的分布情况。其 中,热损失主要发生在主流区域,由冷气与高温主流 掺混产生。冷却射流在主流区域中与高温来流发生 掺混,温差换热导致此处产生大量的热损失。在低 吹风比时迎风涡为冷气掺混的主要动力,换热损失 主要集中在迎风涡及下游的脱落涡中。当吹风比提 高,冷气的入射高度增加,背风涡的强度和影响增 加,因此换热损失主要集中在迎风涡、背风涡及下游 的脱落涡中。

图 14(c)显示了流场中黏性损失的分布情况,黏 性损失主要发生在气膜孔以及孔出口附近。如前所 述,孔内的剪切涡是气膜孔内黏性损失发生的主要 原因,随着吹风比提高,损失逐渐增大。主流中的黏 性损失则主要集中在气膜孔出口附近,由孔内剪切 涡、迎风涡、背风涡以及边界层共同贡献。

为了科学评价流动掺混损失,本文采用熵损失





系数和总压损失系数分别对流场损失进行定量研究。式(6)^[7]为熵损失系数的定义

$$\zeta = \frac{\Delta ST}{0.5u_0^2} \tag{6}$$

式中 ΔS 为流场熵增, u_0 为来流主流的速度。

总压损失系数、参数压力定义分别为

$$\xi = \frac{p_{\text{t,ref}} - p_{\text{t,out}}}{p_{\text{t,ref}} - p_{\text{out}}} \tag{7}$$

$$p_{\rm t,ref} = \frac{\dot{m}_{\rm m} p_{\rm t,in} + \dot{m}_{\rm c} p_{\rm t,inc}}{\dot{m}_{\rm m} + \dot{m}_{\rm c}} \tag{8}$$

式中 $p_{t,in}$ 为入口总压, $p_{t,out}$ 为出口总压, p_{out} 为出口静 压, $p_{t,inc}$ 为冷气入口总压, \dot{m}_{m} 为主流流量, \dot{m}_{o} 为冷气 流量。

图 15 是不同吹风比下平板气膜流场的熵损失系数,结果显示冷气与主流掺混导致的熵增占整体熵 增的绝对主导地位。其中ζ_{total}为总的熵损失系数,ζ_{mix} 为主流部分的熵损失系数,ζ_{hole}为气膜孔内的熵损失 系数。对于主流区的熵增来说,温差换热是不可逆



损失的主要来源,主要发生在冷气与主流的掺混过 程中,且随着吹风比的提高,温差换热造成的熵增更 多;而孔内损失相对于总损失占比较小,当吹风比为 2.0时,孔内的熵损失系数仅占总的熵损失系数的 7.3%,主要以粘性熵增为主。对于SST湍流模型和 DES方法两种方式的计算结果来说,整体的熵增计算 偏差不大,由于SST湍流模型难以捕捉涡团的精细结 构,低估了涡系运动对掺混的促进作用,使得主流区 域的熵增相对于 DES 的计算结果偏低。

图 16 是不同吹风比下平板气膜流场的总压损失,结果显示低吹风比时主流中的冷气掺混造成的 总压损失占主导地位,而随着吹风比提高,孔内的总 压损失在总损失中逐渐占据重要的影响地位。吹风 比为 1.6 时孔内总压损失占比达到最高,约占流场总 损失的 45%。



Fig. 16 Total pressure loss coefficient

对比图 15 可以发现气膜孔内的总压损失占比随 吹风比迅速提高, 而气膜孔内的熵损失则相对于整 体流场来说占比极小, 这是由于总压损失是从能量 总量的角度评价了冷气掺混过程中的部分损失, 无 法体现流场中温差换热导致的不可逆损失, 而温差 换热引起的不可逆损失在气膜流场总损失中占据主 导地位, 因此流场的总压损失系数比熵损失系数小 了一个量级。

采用 SST 湍流模型计算与 DES 方法计算的总压 损失偏差不大。但由于 SST 湍流模型难以精细捕捉 涡系运动,使得涡团主导的冷气扩散预测偏低,冷气 掺混较弱,导致熵损失系数预测偏小;冷气分布相较 于真实流场更加集中,在主、射流交界面上剪切增 强,致使总压损失预测偏高。

4 结 论

本文通过数值模拟方法研究了平板气膜流场大 尺度的涡系结构及发展过程,分析了旋涡运动的频 率特性和损失规律,得到了如下结论:

(1)在平板气膜的射流流场中,受迎风面主、射流速度、密度的影响,随着吹风比增大,迎风涡逐渐从顺时针涡旋方向转变为逆时针方向,临界状态前后存在两种不同的流动模式。迎风涡为顺时针方向时为低吹风比工况,流场涡系主要由迎风涡主导,下

游的脱落涡会出现典型的发卡涡结构;迎风涡为逆时针方向时为高吹风比工况,气膜孔下游流场同时 受迎风涡和背风涡控制,两者的脱落涡成对向下游 发展。

(2)气膜流场中的波动存在着明显的倍频关系, 其中基频为涡脱落的频率,与吹风比呈现出线性增长的规律。

(3)冷气掺混主要发生在气膜流场的中上游;受 流场结构影响冷气掺混也存在两种趋势,低吹风比 时沿流向掺混先增强后减弱;高吹风比时掺混沿流 向迅速减弱。

(4)气膜冷却的损失主要由黏性耗散和温差换 热引起,在本文工况下温差换热造成的熵损失占总 熵损失的90%以上,总压损失系数无法体现温差换 热熵增所代表的做功损失,因此,相比于总压损失系 数,熵损失系数更适合对气膜冷却的气动性能进行 客观评价。

致 谢:感谢国家科技重大专项、国家杰出青年科学基金、中科院洁净能源先导科技专项和中国科学院国际合作局国际伙伴计划的资助。

参考文献

- [1] Andreopoulos J. On the Structure of Jets in a Crossflow
 [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1985, 157: 163-197.
- [2] Kelso R M, LimT T, Perry A E. An Experimental Study of Round Jets in Cross-Flow [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1996, 306: 111-144.
- [3] Camussi R, Guj G, Stella A. Experimental Study of a Jet in a Crossflow at Very Low Reynolds Number [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2002, 454: 113-114.
- [4] Blanchard J N, Brunet Y, Merlen A. Influence of a Counter Rotating Vortex Pair on the Stability of a Jet in a Cross Flow: An Experimental Study by Flow Visualizations[J]. Experiments in Fluids, 1999, 26: 63-74.
- [5] Landman M J, Saffman P G. The Three-Dimensional Instability of Strained Vortices in a Viscous Fluid[J]. Physics of Fluids, 1987, 30: 2339-2342.
- [6] Kim S I, Hassan I. Unsteady Heat Transfer Analysis of a Film Cooling Flow[R]. AIAA 2008-1287.
- Gräf L, Kleiser L. Film Cooling Using Antikidney Vortex Pairs: Effect of Blowing Conditions and Yaw Angle on Cooling and Losses [J]. Journal of Turbomachinery, 2014, 136(1): 011008.
- [8] Sarkar S, Babu H. Large Eddy Simulation on the Interactions of Wake and Film-Cooling near a Leading Edge[J]. Journal of Turbomachinery, 2015, 137(1).

- [9] Qenawy M, Chen H, Peng D, et al. Flow Structures and Unsteady Behaviors of Film Cooling from Discrete Holes Fed by Internal Crossflow [J]. Journal of Turbomachinery, 2020, 142(4): 041007.
- [10] 王扬平,姜培学.应用分离涡模型计算斜圆柱孔气膜
 冷却[J].工程热物理学报,2005(4):668-670.
- [11] 刘 斌,任丽芸,叶 建,等.方孔横向射流的大涡 模拟研究[J].航空科学技术,2009(2):40-43.
- [12] 王 鹏. 基于 SST-DDES 方法的孤立气膜孔流动研究 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 2018(2): 47-54.
- [13] 林晓春.透平叶片气膜冷却及冷气掺混损失研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究 所),2018.
- [14] Lin X C, Liu J J, An B T. Calculation of Film-Cooling Effectiveness and Aerodynamic Losses Using DES/SAS and RANS Methods and Compared with Experimental Results[R]. ASME GT 2016-57084.
- [15] 梁俊宇,康 顺.基于 DES 方法的平板孤立冷却孔数 值模拟研究[J].工程热物理学报,2011(3):395-398.
- [16] 梁俊宇.涡轮叶片气膜冷却孔绕流的实验与数值模拟 研究[D].北京:华北电力大学,2012.

- [17] 史万里.涡轮流场大涡模拟与拟序结构研究[D].南京:南京航空航天大学,2012.
- [18] 常建龙,陈连华,杜 洋,等. 气膜冷却流场中不同 影响因素下涡结构的变化[J]. 战术导弹技术,2020
 (4):144-154.
- [19] Zhao Zhiyuan, Wen Fengbo, Tang Xiaolei, et al. Large Eddy Simulation of Pulsed Film Cooling with Vortex Generators[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 180: 121806.
- [20] 张笑雷,吕骋予.平板单孔气膜冷却流动特性的实验 研究[J].机械工程与自动化,2015(4):8-10.
- [21] 卞修涛,林 敦,苏欣荣,等.高负荷透平叶片流动机理及湍流特性研究[J].工程热物理学报,2019
 (8):1758-1766.
- [22] 卞修涛,林 敦,苏欣荣,等.基于DDES的跨声速导 叶中激波与边界层干涉机理研究[J].推进技术, 2017,38(10):2254-2261.(BIAN Xiu-tao, LIN Dun, SU Xin-rong, et al. Study of Shock Wave-Boundary Layer Interaction Mechanism in a Transonic Vane Based on DDES[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017,38 (10):2254-2261.)

(编辑:朱立影)