

冷却孔非均匀排布波纹板隔热屏冷却特性仿真

梁喜源, 刘海涌, 白晓辉, 王子文, 刘存良
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘要: 为了更加合理地分配冷却气体流量, 提高纵向波纹板隔热屏结构的气膜冷却效率, 提出了非均匀孔排布波纹板隔热屏结构, 即保持开孔率不变, 构建了上游波纹结构气膜孔排布密集、下游波纹结构气膜孔排布稀疏的非均匀结构。在发动机真实工况下, 采用数值仿真的方法研究了非均匀孔排布方式对沿程冷却气体流量分配特性和气膜冷却特性的影响规律, 揭示了振幅比变化对波纹板隔热屏冷却效果的影响规律。结果表明: 前密后疏型非均匀孔排布布局可以改变冷却气体在隔热屏不同位置处的出流量, 从而显著提高隔热屏的气膜冷却效率。在气膜孔孔参数以及开孔率不变时, 增大隔热屏上游孔排密度既可以提高隔热屏上游的冷却效果, 又不会明显降低隔热屏下游的冷却效果, 使隔热屏整体面平均气膜冷却效率有所提高, 相比于均匀孔排结构, 前密后疏孔排布局最高可使隔热屏面平均气膜冷却效率提高 12.66%; 在相同工况下, 当振幅比从 0.035 增大至 0.075 时, 隔热屏的面平均气膜冷却效率显著提高, 最高可使其面平均气膜冷却效率提高 16.32%。

关键词: 波纹板隔热屏; 非均匀排布冷却孔; 振幅比; 冷却气体流量; 气膜冷却效率; 加力燃烧室

中图分类号: V233.7

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2023.04.004

Simulation of Cooling Characteristics of Corrugated Heat Shield with Non-uniformly Disposed Cooling Holes

LIANG Xi-yuan, LIU Hai-yong, BAI Xiao-hui, WANG Zi-wen, LIU Cun-liang

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to distribute cooling gas flow more rationally and improve the film cooling effectiveness, a corrugated heat shield structure with non-uniformly disposed cooling holes was proposed, which maintains the same open area and constructs patterns with high row-density cooling holes at upstream position and low row-density cooling holes at downstream position. Under real engine operating conditions, numerical simulations of the non-uniform cooling structures were carried out to obtain the characteristics of the cooling gas flow distribution and the film cooling effectiveness along the flow path, and the influence of the amplitude ratio on film cooling effectiveness was also obtained. The results show that the cooling gas flow at different positions of the heat shield are changed by the non-uniform layout, thereby significantly increasing the film cooling effectiveness of the heat shield. While keeping the parameters of the film cooling hole and the open area unchanged, increasing the row density of the cooling holes at the upstream position can not only improve the cooling effectiveness of the upstream section but also keep the reduction in cooling effectiveness of the downstream section acceptable. Compared with the uniform layout, the maximum increase in area-averaged film cooling effectiveness is 12.66%. Under the same conditions, as the amplitude ratio increases from 0.035 to 0.075, the area-averaged film cooling effectiveness is significantly increased, with the highest increase of 16.32%.

Key words: corrugated heat shield; non-uniformly disposed cooling holes; amplitude ratio; cooling gas flow; film cooling effectiveness; afterburner

0 引言

加力燃烧是提升航空飞行器机动性能和作战能力的有效方法^[1]。目前, 航空发动机加力燃烧室内的

燃气温度最高可达 2200 K, 远超燃烧室筒体以及承力部件的耐温极限^[2-3], 使得发动机的寿命受到极大威胁。发动机加力燃烧室内多采用隔热屏冷却结构、以气膜冷却的方式来实现对加力燃烧室筒体的热防护。

收稿日期: 2023-03-01

作者简介: 梁喜源(2000), 男, 在读硕士研究生。

引用格式: 梁喜源, 刘海涌, 白晓辉, 等. 冷却孔非均匀排布波纹板隔热屏冷却特性仿真[J]. 航空发动机, 2023, 49(4): 26-31. LIANG Xiyuan, LIU Haiyong, BAI Xiaohui, et al. Simulation of cooling characteristics of corrugated heat shield with non-uniformly disposed cooling holes[J]. Aeroengine, 2023, 49(4): 26-31.

从 20 世纪 40 年代至今,已经发展了平板^[4-6]、层板^[7-9]、波纹板^[10-11]以及冲击/发散双层壁^[12-13]等隔热屏结构。由于加力燃烧室内气体流速过大,在不稳定燃烧的情况下,会在隔热屏局部位置产生强烈震荡,对燃烧室结构造成破坏。纵向波纹板隔热屏的出现很好地解决了这一问题。

目前所使用的纵向波纹板隔热屏主要为薄壁结构。相比于平板隔热屏,纵向波纹板隔热屏冷气射流的反向对流涡消失速度较快,隔热屏表面气膜贴附程度更好,冷却效率更高^[14]。振幅比是纵向波纹板隔热屏最主要的特征,对于离散孔波纹板隔热屏来说,振幅比的增大会加强隔热屏次流迎风侧表面的冲击换热强度,进而提高隔热屏的冷却效率^[15-17]。合适的孔排方式可进一步改善隔热屏的冷却效率。Wakeman 等^[18]率先提出一种局部非均匀孔排布局波纹板隔热屏结构,即增加隔热屏波峰前高温区处的气膜孔数量、减少波峰后低温区处的气膜孔数量,该种孔排方式可以合理分配单个波纹处的冷气用量,进而提高隔热屏的冷却效率;王敏敏等^[17]对此展开进一步研究发现,在相同条件下,增加隔热屏主流迎风侧表面气膜孔数量可以有效提高隔热屏的冷却效率。

目前关于非均匀孔排布局对隔热屏冷却效果影响的研究较少,且前人所研究的非均匀孔排布局结构波纹板隔热屏的开孔率较大,冷气用量较多,所得结论并不能很好地应用到发动机加力燃烧室隔热屏设计中。为了解决真实工况下因冷却气体流量分配不合理所导致的隔热屏上游冷却效率较低的问题,本文提出了前密后疏型非均匀孔排布局结构,采用数值仿真的方法,研究了非均匀孔排布局对纵向波纹板隔热屏沿程冷却气体流量分配以及气膜冷却效率的影响,并在相同吹风比下,揭示了振幅比变化对隔热屏气膜冷却效率的影响。

1 计算方法

1.1 物理模型

纵向波纹板隔热屏表面气膜孔孔排方式采用顺排布局,其几何结构如图 1 所示,其参数见表 1。其中, d 为隔热屏壁厚, n 为波纹总数, A 为振幅高度, L 为波长, j 为隔热屏开孔

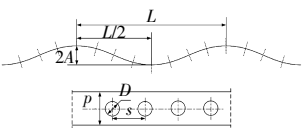


图 1 纵向波纹板隔热屏几何结构

表 1 均匀孔排布局纵向波纹板隔热屏结构参数

d/mm	n	A/L	D/mm	s/p	$j/\%$
1	10	0.035/0.055/0.075	1.5	0.83	2.62

率, D 为气膜孔孔径, p 为气膜孔展向间距, s 为气膜孔流向间距。

当 $A/L=0.035$, 吹风比 $M=0.6$ 时,均匀孔排布局波纹板隔热屏沿程冷却气体质量流量 $\dot{m}_{cool}$ 的变化如图 2 所示。从图中可见,在隔热屏上游($X/L=0\sim3$),由于主流对隔热屏表面较强的冲击作用减小了隔热屏两侧的压力差,恶化了隔热屏表面气膜孔处的冷气出流,导致隔热屏上游单个波纹处的冷却气体用量较小。而沿着流动方向,隔热屏两侧压力差逐渐增大,且波纹板波峰结构对主流来流的抬升作用削弱了主流对隔热屏表面的冲击。受到二者的共同影响,在隔热屏下游($X/L=7\sim10$),波纹板表面气膜孔处冷气出流情况较好,使得隔热屏下游单个波纹处的冷却气体用量较大。

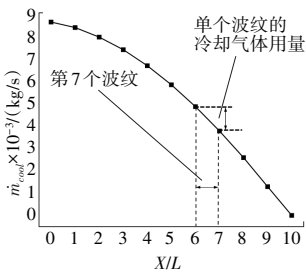


图 2 均匀孔排布局波纹板隔热屏沿程冷却气体质量流量变化

然而,由于纵向波纹板隔热屏的结构特性,主流对隔热屏表面气膜的冲刷作用以及燃气倒灌现象导致其上游气膜冷却效率较低。而隔热屏波谷内可容纳大量冷却气体,同时由于气膜叠加作用使其下游气膜冷却效率较高。这便导致隔热屏上游处冷却效果差的地方冷气用量较小,而在隔热屏下游处冷却效果好的地方冷气用量较大,造成了冷却气体利用率不高以及冷却气体的浪费。对此,为了提高冷却气体利用率且更加合理地分配冷气用量,保持隔热屏开孔率不变,通过改变隔热屏表面气膜孔的孔排密度,设计了前密后疏型非均匀孔排布局波纹板隔热屏结构。同时,为了探究局部孔排密度变化对非均匀孔排布局波纹板隔热屏气膜冷却效率的影响,逐渐增大隔热屏上游孔排密度、减小下游孔排密度,获得了 3 种非均匀孔排布局结构,其结构参数见表 2。

然而,由于纵向波纹板隔热屏的结构特性,主流对隔热屏表面气膜的冲刷作用以及燃气倒灌现象导致其上游气膜冷却效率较低。而隔热屏波谷内可容纳大量冷却气体,同时由于气膜叠加作用使其下游气膜冷却效率较高。这便导致隔热屏上游处冷却效果差的地方冷气用量较小,而在隔热屏下游处冷却效果好的地方冷气用量较大,造成了冷却气体利用率不高以及冷却气体的浪费。对此,为了提高冷却气体利用率且更加合理地分配冷气用量,保持隔热屏开孔率不变,通过改变隔热屏表面气膜孔的孔排密度,设计了前密后疏型非均匀孔排布局波纹板隔热屏结构。同时,为了探究局部孔排密度变化对非均匀孔排布局波纹板隔热屏气膜冷却效率的影响,逐渐增大隔热屏上游孔排密度、减小下游孔排密度,获得了 3 种非均匀孔排布局结构,其结构参数见表 2。

1.2 计算模型

由于隔热屏展向曲率对隔热屏冷却效果的影响可以忽略不计。因此,在展向方向上截取 1 个周期进行计算。而且纵向波纹板隔热屏的波纹结构对远离壁面处的流场并未产生影响^[15-16],为了简化计算模

表2 非均匀孔排布局结构参数

模型	单个波纹上气膜孔数量(均布)									
	波纹1	波纹2	波纹3	波纹4	波纹5	波纹6	波纹7	波纹8	波纹9	波纹10
Uniform	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Non-uniform1	10	10	10	10	10	8	6	6	6	4
Non-uniform2	12	12	10	10	8	8	6	6	4	4
Non-uniform3	12	12	12	12	12	4	4	4	4	4

型,减少计算量,本文的计算模型中主流通道高度小于燃烧室筒体半径。取主流通道高度 $H_g=60$ mm,二次流通道高度 $H_c=30$ mm。为了使流体进入隔热屏区域时充分发展,流体域向上游方向延长90 mm。为了避免回流,出口处流体域向下游延长150 mm。计算模型如图3所示。

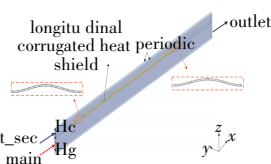


图3 计算模型

由于SST $k-w$ 模型已经在混合层、边界层和高速流动中得到了广泛的应用和验证^[19-23],同时也涵盖了本文所关注的区域,因此,为确保本文所选的湍流模型的计算精度,本文采用标准的SST $k-w$ 模型进行计算,控制方程中各离散项均采用二阶迎风格式,数值解的收敛准则为各离散量的残差小于 10^{-6} 且出口流量保持直线,波动不超过0.5%。此外,辐射换热对隔热屏表面温度场影响较大,而对速度场、压力场等影响较小^[24]。因此,本文不考虑辐射换热对冷气流量分配的影响。

在计算模型中,次流入口和主流入口设为质量流量入口,出口设置为压力出口。在加力燃烧室隔热屏研究计算中,通常将燃烧室入口处的主流雷诺数折算成基于气膜孔孔径的雷诺数,因此,本文主流雷诺数中的特征长度取为气膜孔孔径 D 。由主流雷诺数、吹风比以及通道入口面积可以计算出主流入口与次流入口处的质量流量。计算模型两侧设置为平移性周期性边界条件,其余壁面均设置成绝热壁面。计算域中流体为理想气体,气体的比热,导热系数均采用温度的多项式,其动力粘度系数采用萨瑟兰定律。计算工况见表3。主流入口与二次流入口的温度、压力等均参照加力燃烧室工作中实际工况下的参数进行设置。

表3 计算工况

M	Re_g	T_g/T_c	p_g/p_c
0.6	2200	2161.5/500.5	0.469/0.490

注: M 为吹风比; Re_g 为主流雷诺数; T_g 为主流总温; T_c 为二次流总温; p_g 为主流总压; p_c 为二次流总压。

此外,对计算域进行非结构化网格划分,考虑到边界层对流动换热的影响,在壁面处增加边界层网格,同时为了满足计算模型的要求,保证壁面处 $y^+ \approx 1$ 。通过调整网格尺寸,总共获得3种网格数量,即236万、265万、298万。采用纵向波纹板隔热屏展向平均气膜冷却效率作为无关性验证的指标。结果发现,当网格数量从236万增加至298万时,隔热屏的气膜冷却效率基本不变。对此,本文采用265万网格的划分方法。

1.3 参数定义

(1)吹风比 M 定义为

$$M = (m_j/A_j)/(u_g \rho_g) = (u_j \rho_j)/(u_g \rho_g) \quad (1)$$

式中: m_j 为从气膜孔射出的射流总流量(折算成二次流入口的质量流量),kg/s; A_j 为气膜孔的总面积, m^2 ; u_j 为气膜射流的速度,m/s; ρ_j 为射流的密度,kg/ m^3 ; u_g 为主流入口速度,m/s; ρ_g 为主流入口密度,kg/ m^3 。

(2)展向平均气膜冷却效率 F_{aw} 定义为

$$\Phi_{aw} = (T_g - T_{aw})/(T_g - T_c) \quad (2)$$

式中: T_g 为主流入口温度,K; T_c 为次流入口温度,K; T_{aw} 为波纹板表面绝热温度,K。该式也是无量纲温度 q 的定义式。

(3)面平均气膜冷却效率 $\bar{\Phi}_{aw}$ 定义为

$$\bar{\Phi}_{aw} = \sum_{i=1}^j \Phi_i / j \quad (3)$$

式中: j 为沿着隔热屏流向方向所选取数据点数,本文取 $j=2000$; Φ_i 为所选取数据点对应的展向平均气膜冷却效率。

2 计算结果与分析

2.1 非均匀孔排布局对隔热屏冷却效果的影响

本文所研究的不同孔排布局波纹板隔热屏沿程冷却气体质量流量的变化如图4所示。前4个波纹气膜孔中间截面处的无量纲温度分布如图5所示。从图5中可见,较强的主流冲击作用导致隔热屏上游前2个波纹处发生燃气倒灌现象,恶化了该处气膜孔冷气流出,使得隔热屏上游单个波纹处($X/L=0 \sim 3$)的冷气用量较少。结合图

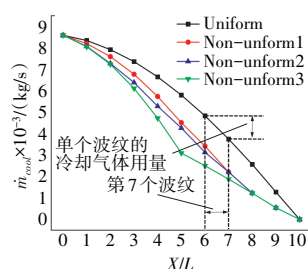


图4 不同孔排布局结构隔热屏冷却气体质量流量沿程变化

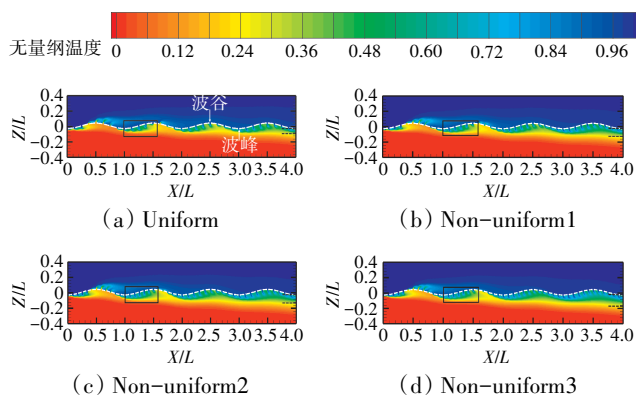


图5 $A/L=0.035$ 时,不同孔排布局结构隔热屏前4个波峰处的无量纲温度分布

4、5可见,非均匀孔排布局结构可以明显增加隔热屏前5个波纹周期处的冷气用量,并且可以抑制第2个波纹处的燃气倒灌现象。因此,相比于均匀孔排布局结构,非均匀孔排布局结构可以改善隔热屏上游冷气用量较少的情况,使冷气用量分配更加合理,从而提高隔热屏上游的气膜冷却效率并抑制燃气倒灌现象。

同时,在 $X/L>2$ 时,3种非均匀孔排布局结构隔热屏单个波纹处的冷气用量快速增加。这是因为,3种非均匀孔排布局结构隔热屏前2个波纹处主流背风侧表面所聚集的冷气量较多。而该处聚集的冷却气体加强了波纹板波峰结构对主流来流的抬升作用,削弱了主流来流对隔热屏表面的冲击,使得后续隔热屏表面气膜孔处冷气出流情况有所改善。因此,在 $X/L>2$ 时,隔热屏单个波纹冷气用量迅速增加。此外,在隔热屏下游,3种非均匀孔排布局结构隔热屏单个波纹处的冷气用量变化较为均匀,且隔热屏上游气膜孔数量越多,该现象越明显。

隔热屏表面高无量纲温度区宽度在一定程度上可以反映隔热屏表面所聚集的气膜厚度,如图5中2条虚线间距离所示。综上所述可知,非均匀孔排布局结构上游较大的冷气用量以及较弱的主流冲击作用使得隔热屏表面气膜发展程度较好,其表面的气膜厚度明显厚于Uniform结构。且随着隔热屏上游孔排密度的增加,隔热屏表面所形成的气膜厚度有所增加,即Non-uniform3结构隔热屏表面气膜厚度最大,而Non-uniform1结构隔热屏表面气膜厚度最小。

当 $A/L=0.035$ 时,将不同孔排布局结构隔热屏的展向平均气膜冷却效率进行对比,如图6所示。在 $X/L=0\sim 2$ 处,主流燃气倒灌现象导致不同孔排布局结构

隔热屏气膜冷却效率相差不多。在 $X/L>2$ 时,相比于Uniform结构,由于Non-uniform1、Non-uniform2和Non-uniform3结构冷气用量分配较为合理,使得隔热屏表面气膜发展充分,进而显著提高了隔热屏的气膜冷却效率。同时,这也是三者气膜冷却效率波动性小于Uniform结构的主要原因。且随着隔热屏上游气膜孔排密度的增加,隔热屏的气膜冷却效率逐渐增大,且波动性逐渐减小。同时仍可发现,沿着流动方向,Uniform结构的气膜冷却效率逐渐增大,而Non-uniform1、Non-uniform2和Non-uniform3结构的气膜冷却效率则呈现出先增大后不变的趋势。这一方面是因为非均匀孔排布局可以更加合理地分配冷气用量,使得隔热屏下游单个波纹处冷气用量变化不大;另一方面由于该3种结构隔热屏上游表面所形成的气膜较厚,在主流来流的裹挟下,隔热屏表面会有部分气膜向下游移动。2股冷却气体的相互掺混、叠加使得隔热屏下游表面处的气膜厚度以及气膜冷却效率保持不变。

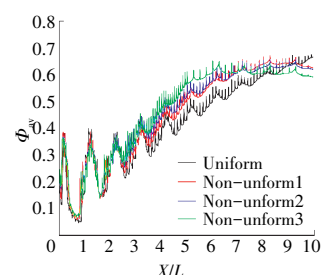


图6 $A/L=0.035$ 时,不同孔排布局结构隔热屏展向平均气膜冷却效率

此外,对比Non-uniform1、Non-uniform2、Non-uniform3结构的气膜冷却效率曲线可见,随着隔热屏上游气膜孔排密度的增大,其气膜冷却效率平衡位置逐渐向上游移动,但是其下游的气膜冷却效率却相对较低,即Non-uniform3结构的气膜冷却效率最先达到平衡位置,但是其下游的气膜冷却效率略低于Non-uniform1和Non-uniform2结构。这是因为Non-uniform3结构隔热屏上游气膜孔排密度较大,其上游冷却气体消耗量较大使得隔热屏表面气膜充分发展的位置更靠近隔热屏上游。然而,由于其下游单个波纹处可使用冷气量低于其余2种结构,使得隔热屏表面气膜厚度无法进一步提升,进而导致其气膜冷却效率略微低于其余2种结构。但在隔热屏中上游,Non-uniform3结构显著提高了隔热屏的气膜冷却效率,隔热屏的冷却效果相比于其余2种结构的更佳。

为了进一步探究非均匀孔排布局对波纹板隔热屏冷却效果的影响,保持其余参数不变,在不同振幅比下计算隔热屏的面平均气膜冷却效率,如图7所示。

示。同时,以 Uniform 结构为基准,计算了非均匀孔排布局结构隔热屏的面平均气膜冷却效率增长率,见表4。从图7和表4中可见,在相同振幅比下,采用非均匀孔排布局结构可以显著提高隔热屏面平均气膜冷却效率,且随着隔热屏上游表面气膜孔排密度的增加,其面平均气膜冷却效率提升效果更加明显,最多可使其提升12.66%。

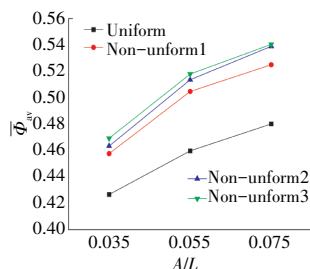


图7 4种孔排布局结构隔热屏面平均气膜冷却效率

表4 非均匀孔排布局结构对隔热屏面平均气膜冷却效率增长率的影响 %

Model	$A/L=0.035$	$A/L=0.055$	$A/L=0.075$
Non-uniform1	7.26	9.78	9.35
Non-uniform2	8.60	11.71	12.25
Non-uniform3	9.99	12.66	12.56

2.2 振幅比对隔热屏气膜冷却效果的影响

为了进一步探究振幅比变化对不同孔排布局结构隔热屏冷却效果的影响,在相同工况下计算4种孔排结构的面平均气膜冷却效率。同时,以 $A/L=0.035$ 的4种孔排结构隔热屏面平均气膜冷却效率为基准,计算其余2种振幅比下隔热屏的面平均气膜冷却效率增长率,见表5。从表中可以发现,当隔热屏表面

表5 振幅比变化对4种孔排结构隔热屏面平均气膜冷却效率增长率的影响 %

Model	$A/L=0.055$	$A/L=0.075$
Uniform	7.75	12.54
Non-uniform1	10.28	14.73
Non-uniform2	10.84	16.32
Non-uniform3	10.37	15.17

气膜孔排布局结构不变时,随着振幅比的增大,隔热屏面平均气膜冷却效率显著增加,最多可使其提升16.32%。由于振幅比变化对本文所研究的非均匀孔排布局结构隔热屏的气膜冷却效率的影响相似,且 Non-uniform2 结构隔热屏的冷却特性变化最为明显,取 Non-uniform2 结构与 Uniform 结构进行对比分析。

当 $A/L=0.075$ 时,Uniform 结构以及 Non-uniform2 结构前4个波纹气膜孔中间截面处的无量纲温度分布如图8所示。在不同振幅比下,Uniform 结构以及 Non-uniform2 结构的展向平均气膜冷却效率如图9

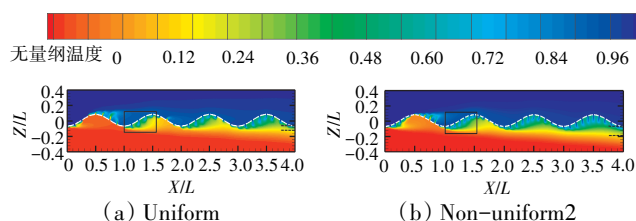


图8 $A/L=0.075$ 时,2种结构隔热屏前4个波纹处的无量纲温度分布

所示。从图8、9中可见,在 $X/L=0\sim1$ 处,主流燃气倒灌抑制了振幅比变化对隔热屏气膜冷却效率的影响,使得第1个波纹处的气膜冷却效率变化不大。

在 $X/L>2$ 时,2种结构的气膜冷却效率显著提高,但

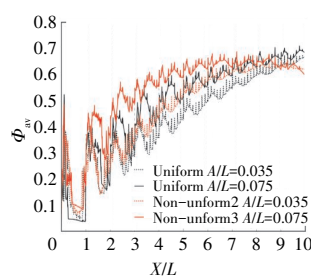


图9 振幅比变化对隔热屏气膜冷却效率的影响

是相比于 Non-uniform2 结构,Uniform 结构气膜冷却效率提升位置相对滞后。这是因为,振幅比的增大加强了次流迎风侧表面气膜出的动压出流情况,此处隔热屏表面聚集的冷气量增多。而由于 Non-uniform2 结构上游波纹表面气膜孔排密度较大,使得其主流背风侧表面所聚集的冷气量较多,而该部分冷却气体增强了波纹板波峰结构对主流来流的抬升作用,削弱了主流对隔热屏表面的冲击,使得隔热屏表面气膜发展更加充分。因此,Non-uniform2 结构隔热屏气膜冷却效率显著提升的位置相对靠近上游。此外,随着振幅比的增大,隔热屏波谷内所能容纳的冷气量增多,使得隔热屏表面气膜发展更加充分,其气膜厚度有所增加,进而使得隔热屏的气膜冷却效率显著提高。

3 结论

(1)前密后疏型非均匀孔排布局可以更加合理地分配隔热屏沿程的冷气用量,使隔热屏的气膜冷却效率显著提高。在相同参数下,隔热屏上游表面气膜孔排密度越大,其气膜冷却效率提高越明显,最高可使隔热屏面平均气膜冷却效率提高12.66%。

(2)在隔热屏下游,前密后疏型孔排布局波纹板隔热屏的气膜冷却效率趋于平稳,且隔热屏上游气膜孔排密度越大,其气膜冷却效率平衡位置越靠近隔热屏上游。

(3)当振幅比从0.035增大至0.075时,隔热屏波谷内所能容纳的冷气量增多,使得隔热屏的气膜冷却

效率显著提高,最高可使其面平均气膜冷却效率提高16.32%。

参考文献:

- [1] 张孝春,孙雨超,刘涛.先进加力燃烧室设计技术综述[J].航空发动机,2014,40(2):24-30.
ZHANG Xiaochun, SUN Yuchao, LIU Tao. Summary of advanced afterburner design technology[J]. Aeroengine, 2014, 40(2): 24-30. (in Chinese)
- [2] 刘松龄,陶智.燃气涡轮发动机的传热和空气系统[M].上海:上海交通大学出版社,2018:576-582.
LIU Songling, TAO Zhi. Heat transfer and secondary air system of gas turbine engine[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2018. (in Chinese)
- [3] 王利峰,朱惠人,裴云,等.混合气膜冷却隔热屏壁温计算与冷却特性分析[J].机械设计与制造,2008(1):33-35.
WANG Lifeng, ZHU Hui ren, QIU Yun, et al. Temperature calculation and cooling effectiveness analysis of mix-film cooling of chamber barrier[J]. Machinery Design & Manufacture, 2008(1): 33-35. (in Chinese)
- [4] Andrews G E, Asere A A, Gupta M L, et al. Full coverage discrete hole film cooling: the influence of hole size[J]. International Journal of Turbo & Jet-Engines, 1985(2): 213-225.
- [5] Andrews G E, Khalifa I M, Asere A A, et al. Full coverage effusion film cooling with inclined holes[R]. ASME 1995-GT-274.
- [6] 谭晓茗.出流孔复合角对发散孔板冷却效率的影响研究[J].推进技术,2016,37(6):1092-1097.
TAN Xiaoming. Research on cooling characteristics of effusion wall with compound angle[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(6): 1092-1097. (in Chinese)
- [7] Yamawaki S, Nakamata C, Imai R, et al. Cooling performance of an integrated impingement and pin fin cooling configuration[R]. ASME 2003-GT-38215.
- [8] 何跃龙,徐华胜,刘堃.扰流柱形状对层板流阻特性的影响研究[J].燃气涡轮试验与研究,2010,23(4):39-43.
HE Yuelong, XU Huasheng, LIU Kun. Research on the effect of laminate plate pin-fin shape on internal-flow resistance characteristics[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2010, 23(4): 39-43. (in Chinese)
- [9] 季均,张靖周,王春华.稀疏孔阵层板冷却结构的主要参数影响数值研究[J].南京航空航天大学学报,2019,51(6):848-856.
JI Jun, ZHANG Jingzhou, WANG Chunhua. Numerical investigation on influence of main structural parameters in lamilloy cooling configuration with a sparse hole array [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 51(6): 848-856. (in Chinese)
- [10] 渠立红.壁面波纹结构和主流压力梯度对发散冷却的影响[D].南京:南京航空航天大学,2018.
QU Lihong. Effects of corrugated wall structure and streamwise pressure gradient on effusion cooling performances[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics The Graduate School, 2018. (in Chinese)
- [11] Singh K, Premachandran B, Ravi M R. Experimental and numerical studies of film cooling of a corrugated surface[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 108(7): 312-329.
- [12] 代威,夏东坤,张雯,等.一种小型发动机燃烧室冷却方式对出口温度场的影响[J].兵器装备工程学报,2018,39(5):21-25.
DAI Wei, XIA Dongkun, ZHANG Wen, et al. Influence of the cooling mode of a small engine combustion chamber on the outlet temperature distribution[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(5): 21-25. (in Chinese)
- [13] 杨旭,刘友宏.孔径比与冲击距对冲击/发散冷却隔热屏冷却性能影响[J].推进技术,2014,35(5):669-674.
YANG Xu, LIU Youhong. Effects of diameter ratio of holes and impingement distance on cooling performance of impingement/effusion cooled heat shield[J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(5): 669-674. (in Chinese)
- [14] Funazaki K, Igarashi T, Koide Y, et al. Studies on cooling air ejected over a corrugated wall: its acro-dynamic behavior and film effectiveness[J]. ASME 2001-GT-143.
- [15] 唐婵,常海萍.发散孔纵向波纹隔热屏气膜冷却特性[J].航空动力学报,2009,24(1):18-24.
TANG Chan, CHANG Haiping. Numerical simulation of effusion holes on the longitudinal ripple heat shield[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(1): 18-24. (in Chinese)
- [16] 唐婵,常海萍,毛军逵.离散孔纵向波纹隔热屏气膜冷却特性研究[J].工程热物理学报,2007,28(3):487-489.
TANG Chan, CHANG Haiping, MAO Junkui. Numerical simulation of discrete holes on the longitudinal ripple wave liner[J]. Journal of Engineering Thermophysic, 2007, 28(3): 487-489. (in Chinese)
- [17] 王敏敏.纵向波纹隔热屏气膜冷却特性研究[D].南京:南京航空航天大学,2016.
WANG Minmin. Numerical study on the film cooling characteristics for the longitudinal ripple heat shield in the afterburner[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [18] Wakeman T G, Walker A, Maclin H M. Gas turbine engine multi-hole film cooled combustor liner and method of manufacture: USA, 518379[P]. 1996-02-06.
- [19] Liu J, Hussain S, Wang J, et al. Heat transfer enhancement and turbulent flow in a high aspect ratio channel (4:1) with ribs of various truncation types and arrangements[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2018, 123: 99-116.
- [20] Khwanchit, Wongcharee, Wayo, et al. Numerical investigation of flow friction and heat transfer in a channel with various shaped ribs mounted on two opposite ribbed walls[J]. International Journal of Chemical Reactor Engineering, 2011, 9(1): 566-572.
- [21] Gao T, Zhu J, Liu C, et al. Numerical study of conjugate heat transfer of steam and air in high aspect ratio rectangular ribbed cooling channel[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(3): 1431-1442.
- [22] Kim D H, Lee B J, Park J S, et al. Effects of inlet velocity profile on flow and heat transfer in the entrance region of a ribbed channel[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 92: 838-849.
- [23] 陆犇,李凌波,姜培学,等.气膜冷却平板通道的数值模拟[J].热能动力工程,2005,20(4):411-413.
LU Ben, LI Lingbo, JIANG Peixue. Numerical simulation of a gas film-cooled flat plate channel[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2005, 20(4): 411-413. (in Chinese)
- [24] 刘友宏,任浩亮.辐射换热对平板气膜冷却性能影响[J].推进技术,2017,38(3):588-596.
LIU Youhong, REN Haoliang. Effects of radiation heat transfer on film cooling performance of flat plat[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(3): 588-596. (in Chinese)

(编辑:刘 静)