

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.06.017

## 改善横向波纹隔热屏综合冷却效率的发散冷却结构优化

张小颖, 张靖周, 谭晓茗, 曾文明, 王春华  
(南京航空航天大学能源与动力学院, 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京, 210016)

**摘要:** 为改善横向波纹隔热屏综合冷却效果, 采用三维数值模拟和基于支持向量机的代理优化模型, 在给定的单位面积冷却空气流量下对发散冷却结构参数进行了优化研究。设计变量选取为气膜孔直径、气膜孔排布的展向间距和流向间距, 以面积平均综合冷却效率作为目标函数, 通过遗传算法搜索获得了设计变量区间内的优化设计点。在隔热屏单位表面积冷却空气流量  $G_f = 2.647 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  的工况下, 优化后的  $d$ 、 $P$  和  $S$  分别为 0.8、4 和 5 mm。研究表明, 优化的隔热屏冷却结构应具有较小的气膜孔直径  $d$  和展向间距  $P$ , 以及适中的流向间距  $S$ 。相对于参考结构, 优化后的发散冷却结构能够改善沿流向的气膜覆盖, 缩减发散冷却起始段局部高温段, 起到增强隔热屏发散冷却综合冷却效率的作用。

**关键词:** 横向隔热屏; 发散冷却; 综合冷却效率; 数值优化

中图分类号: V234.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2020)06-0972-08

## Geometric Optimization of Effusion Cooling Configuration to Improve Overall Cooling Effectiveness for Transverse Wavy Shield

ZHANG Xiaoying, ZHANG Jingzhou, TAN Xiaoming, ZENG Wenming, WANG Chunhua  
(College of Energy and Power Engineering, Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power Systems, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** In order to improve the overall cooling effectiveness of a specific transverse wavy shield, we investigate the optimization of structural parameters of effusion cooling configuration. It is under a fixed coolant mass flow rate per unit area on the film-cooled surface, by using three-dimensional numerical simulation and support vector machine (SVM)-based surrogate model approximation. Three design variables are selected as film-hole diameter, streamwise hole-to-hole pitch and spanwise hole-to-hole pitch of an effusion cooling array. The genetic algorithm is used to search the optimal design point among the ranges of design variables, selecting the area-averaged overall cooling effectiveness as the objective function. Under the condition of  $G_f = 2.647 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , the optimized  $d$ ,  $P$  and  $S$  are 0.8, 4, 5 mm. The results show that the optimal cooling configuration of this transverse wavy shield has a smaller film-hole diameter, a smaller spanwise hole-to-hole pitch and a moderate streamwise hole-to-hole pitch. With respect to the reference cooling configuration, the optimized cooling configuration improves the film coverage along the streamwise direction and shortens the length of effusion-cooling initial developing zone with high temperature. As a consequence, the overall cooling effectiveness on the transverse wavy shield is enhanced.

**Key words:** transverse wavy shield; effusion cooling; overall cooling effectiveness; numerical optimization

**基金项目:** 国家自然科学基金(U1508212)资助项目。

**收稿日期:** 2019-10-14; **修订日期:** 2019-12-30

**通信作者:** 张靖周, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zhangjz@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 张小颖, 张靖周, 谭晓茗, 等. 改善横向波纹隔热屏综合冷却效率的发散冷却结构优化[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(6): 972-979. ZHANG Xiaoying, ZHANG Jingzhou, TAN Xiaoming, et al. Geometric optimization of effusion cooling configuration to improve overall cooling effectiveness for transverse wavy shield[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(6): 972-979.

加力燃烧室隔热屏广泛采用致密孔的发散冷却结构。大量研究表明,发散冷却能够在壁面形成全覆盖的气膜,具有较为理想的冷却效果<sup>[1-2]</sup>,影响其冷却效率的因素也众多,譬如,气膜孔参数、阵列排布和吹风比等<sup>[3-8]</sup>。目前大多数的发散冷却研究都是围绕平壁开展,而应用于加力燃烧室的隔热屏往往具有周期性波纹褶曲的结构特征,由于壁面存在周期性曲率变化的影响,气膜射流喷吹后在波纹波峰和波谷附近形成的聚合程度存在显著的差异,因此,与平壁表面发散冷却相比,波纹表面的发散冷却特性还将与周期性波纹结构相关,影响因素更为复杂。

针对波纹隔热屏,Shinbo等<sup>[9]</sup>实验研究了纵向波纹表面的对流换热系数,研究表明,由于表面褶曲对近壁区流动的影响而导致其对流换热系数高于平壁表面。Champion等<sup>[10]</sup>对流向非对称式纵向波纹隔热屏开展了实验研究,研究表明改变气膜孔倾斜角可以改善气膜孔局部射流,提高气膜冷却效率。Funazaki等<sup>[11]</sup>实验研究了纵向波纹表面上的离散孔气膜冷却,研究表明波谷区的低动量主流流动影响气膜射流和主流的相干性以及气膜冷却效率。唐婵等<sup>[12-13]</sup>针对波纹高度、气膜孔开孔率及孔径对纵向波纹隔热屏冷却效率的影响进行了数值研究,研究表明,减小波纹高度和离散孔孔径能够有效地改善冷却效率。常国强等<sup>[14]</sup>实验研究了吹风比、雷诺数及开孔率等因素对纵向波纹隔热屏换热特性的影响;Singh等<sup>[15-16]</sup>对二维流向倾斜式波纹板的流动和换热特性进行了数值和实验研究,研究表明随着主流雷诺数和吹风比的增大,气膜冷却效率也随之增大,气膜孔倾角的增大导致冷却效率的降低。Ren等<sup>[17-18]</sup>对纵向波纹隔热屏多孔全覆盖气膜冷却开展实验研究,分析了非对称波纹结构、切向进气缝和冷却通道局部堵塞等因素的影响。渠立红等<sup>[19-21]</sup>和曾文明等<sup>[22]</sup>系统研究了结构参数对横向波纹板发散冷却效率的影响规律,结果表明孔径、开孔率、展向和流向间距均对冷却效率具有重要的影响。

从以上研究工作中可以发现,发散冷却结构的开孔率及孔排布对于波纹隔热屏的冷却效率影响很大,然而,由于波纹隔热屏的结构影响因素多、变化规律复杂,在工程设计中必需通过多参数影响的耦合分析才能遴选出合理的冷却结构参数匹配,以实现其综合冷却效果的优化。对此,本文采用基于CFD的数值优化设计方法,针对特定的波纹结构和接近真实的加力燃烧室气热条件下,对横向波纹隔热屏发散冷却结构的主要结构参

数,如气膜孔直径( $d$ )、展向间距( $P$ )和流向间距( $S$ )进行优化设计分析,以获得高的隔热屏壁面综合冷却效率。

## 1 计算模型

### 1.1 计算域和边界条件

如图1所示,针对横向波纹隔热屏,选取正弦型横向隔热屏为研究对象,将机匣和加力燃烧室筒体抽象简化为计算模型。考虑到横向隔热屏周向具有周期性分布的几何特征,沿周向选取横向隔热屏的1个正弦周期,流向选取3个波长展开研究。主流、次流通道高度 $H_1$ 、 $H_2$ 分别为69和20 mm,为了削弱进出口效应的影响,分别在发散段上下游设置长度为150 mm的平直段。隔热屏结构和气膜孔排布如图1(c)所示,气膜孔垂直于壁面交错排布,壁厚 $t$ 为1.0 mm,隔热屏的波幅 $A$ 和波长 $l$ 分别为4和58 mm。

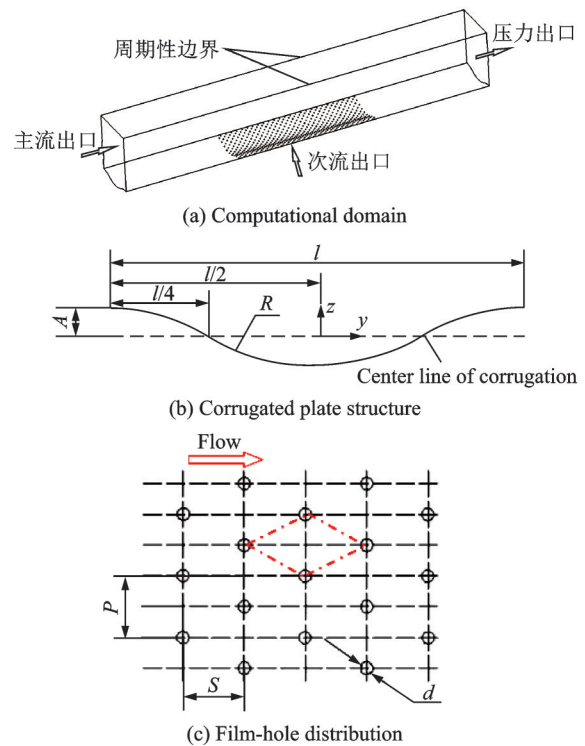


图1 计算域示意图

Fig.1 Schematic sketch of computational domain

计算域边界条件设置如下:主次流进口均为质量流量进口,主流进口质量流量为0.185 9 kg/s,温度为2 250 K,总压为2.562 MPa;次流进口温度为900 K,质量流量按照隔热屏单位表面积冷却空气流量 $G_f = 2.647 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 设定;计算域展向方向两侧面设置为周期性边界条件,隔热屏壁面为流固耦合面,隔热屏材料选为高温合金,其导热系数随温度变化关系如表1所示。

表1 壁面材料的导热系数

Table 1 Thermal conductivity of wall material

$T/^{\circ}\text{C}$	$k/(\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1})$	$T/^{\circ}\text{C}$	$k/(\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1})$
600	26.79	1 000	35.74
700	29.05	1 100	37.96
800	31.14	1 200	40.12
900	33.44	1 300	42.14

## 1.2 设计变量和目标函数

选取气膜孔直径 $d$ 、展向间距 $P$ 和流向间距 $S$ 为设计变量,设计变量的选取参考某航空发动机的横向波纹隔热屏几何尺寸,设计区间如表2所示。

表2 设计变量和范围

Table 2 Design variables and scopes

Design variable	Lower bound / mm	Upper bound / mm
$d$	0.6	1.4
$P$	3	7
$S$	3	7

对于发散冷却,以追求冷却壁面的综合冷却效率为目标,构建优化模型

$$\min F(d, P, S) = 1/\eta_{\text{av},A} \quad (1)$$

约束条件为

$$0.6 \leq d \leq 1.4, 3 \leq P \leq 7, 3 \leq S \leq 7$$

式中: $F$ 为适应度函数; $\eta_{\text{av},A}$ 为隔热屏发散冷却段面积平均综合冷却效率。

局部综合冷却效率 $\eta$ 定义为

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

式中: $T_c$ 和 $T_{\infty}$ 分别表示次流和主流的入口温度; $T_w$ 为壁面温度。

## 2 计算方法和优化过程

### 2.1 优化基本流程

采用支持向量机(Support vector machine, SVM)构建代理模型,结合遗传算法(Genetic algorithm, GA)对设计变量进行全局寻优。该优化基本流程如下:

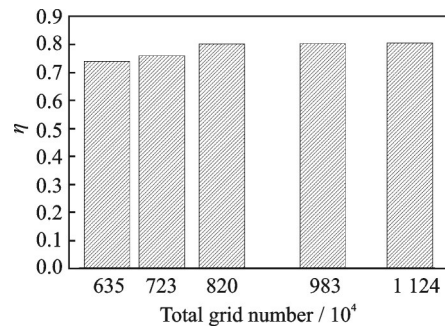
(1) 确定优化问题与目标函数,采用拉丁方设计法构建正交实验表<sup>[23]</sup>;

(2) 采用ANSYS Fluent计算软件进行流场数值模拟,获得综合冷却效率随设计变量变化的数据样本,建立支持向量机优化代理模型;

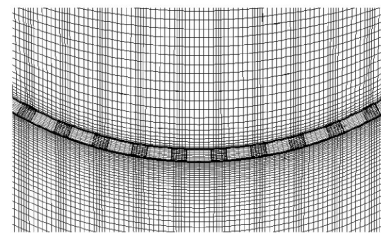
(3) 结合遗传算法对设计变量进行全局寻优,以壁面综合冷却效率为目标函数获得最优值下的横向波纹隔热屏发散冷却结构。

### 2.2 数值计算过程

采用ICEM软件对计算域进行网格划分。为保证网格质量,网格划分采用结构化网格。在气膜孔、壁面处采用附面层局部加密,保证 $y^+$ 在30~50之间,边界层网格在12层,以满足湍流模型的要求。图2(a)所示为横向波纹隔热屏壁面局部综合冷却效率 $\eta$ 随网格数的变化图。通过网格独立性测试发现网格数为820万左右时,网格数量再增大,局部综合冷却效率 $\eta$ 几乎不再变化。因此最终确定网格数量为8 200 000,可以满足计算要求。计算网格局部划分示意图如图2(b)所示。



(a) Grid independence verification



(b) Grid generation diagram

图2 计算网格

Fig.2 Computational grids

基于ANSYS Fluent软件进行求解,湍流模型选择参考已有的研究<sup>[24-26]</sup>,采用Realizable  $k-\epsilon$ 湍流模型进行数值计算,壁面函数选择标准壁面函数。离散格式均采用二阶迎风格式;压力与速度耦合采用Simple算法,解收敛的标准为各项残差均小于 $10^{-5}$ ,同时监测隔热屏内壁面温度不再变化。

湍流模型验证按照文献<sup>[27]</sup>中的发散冷却结构实验参数选取为气膜孔数 $n=80$ 的光滑平板结构。选用Standard  $k-\epsilon$ 、Standard  $k-\omega$ 、Realizable  $k-\epsilon$ 、RNG  $k-\epsilon$ 和SST  $k-\omega$ 5种湍流模型进行对比分析,图3为光滑平板上沿程的 $T_w^{\text{Max}}/T_c$ 与文献<sup>[27]</sup>实验数据对比,比较得出计算结果与实验数据在平板上沿程 $T_w^{\text{Max}}/T_c$ 呈现相同的趋势,几种湍流模型中,Realizable  $k-\epsilon$ 的预测结果与实验数据吻合较好。



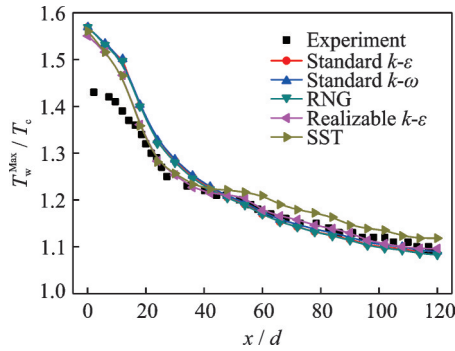


图3 湍流模型验证

Fig.3 Validation of numerical results of turbulence model

### 2.3 基于代理模型的优化过程

SVM 是一种小样本的机器学习算法<sup>[28]</sup>,在工程应用和理论研究中得到了广泛应用。SVM 通过核函数,将低维空间中难以划分的训练数据样本非线性映射到较高维数空间进行线性划分。

表 3 为依据拉丁方设计法得到的数据样本,前

表 3 训练样本和测试样本

Table 3 Training samples and testing samples

样本	No.	$d / \text{mm}$	$P / \text{mm}$	$S / \text{mm}$
Training	1	0.6	3	3
	2	0.6	4	4
	3	0.6	5	5
	4	0.6	6	6
	5	0.6	7	7
	6	0.8	3	4
	7	0.8	4	5
	8	0.8	5	6
	9	0.8	6	7
	10	0.8	7	3
	11	1.0	3	5
	12	1.0	4	6
	13	1.0	5	7
	14	1.0	6	3
	15	1.0	7	4
	16	1.2	3	6
	17	1.2	4	7
	18	1.2	5	3
	19	1.2	6	4
	20	1.2	7	5
	21	1.4	3	7
	22	1.4	4	3
	23	1.4	5	4
	24	1.4	6	5
	25	1.4	7	6
Testing	1	0.6	4	7
	2	0.7	6	6
	3	0.8	5	5
	4	0.9	3	6
	5	1.0	4	5
	6	1.1	5	6
	7	1.2	7	4
	8	1.3	4	5

25组为支持向量机的训练样本,后8组为支持向量机的测试样本。

基于对数据样本  $G = \{(X_i, y_i), i=1, 2, \dots, N_s\}$  ( $X_i$ 为输入向量, $y_i$ 为输出值, $N_s$ 为样本容量)的机器学习,SVM通过式(2)来拟合输入向量与输出量之间的数值关联,即

$$f(X) = \sum_{i=1}^n y_i a_i k(X, X_i) + b \quad (3)$$

式中: $k$ 为核函数;参数  $a$  和参数  $b$  可通过求解式(4)和式(5)确定,即有

$$\begin{aligned} \min & \left\{ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n y_i y_j a_i a_j k(X_i, X_j) - \sum_{i=1}^n a_i \right\} \\ \text{s.t.} & \sum_{i=1}^n y_i a_i = 0 \quad a_i \in [0, c] \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $c$  为惩罚因子。

$$b = y_j - \sum_{i=1}^n y_i a_i k(X, X_i) \quad (5)$$

核函数  $k$  选用径向基函数

$$k(X_i, X_j) = \exp\left\{-\frac{\|X_i - X_j\|^2}{2\delta^2}\right\} \quad (6)$$

式中  $\delta$  为核函数参数。

SVM 的预测性能取决于惩罚因子和核参数。本文通过试错法来确定这两个参数,获得的最佳核参数和惩罚因子分别为 0.8 和 2.5。图 4 为  $G_t = 2.647 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  下测试样本局部综合冷却效率  $\eta$  的 SVM 预测值与 CFD 计算值的对比,图中虚线表示 SVM 预测值与 CFD 计算值相等的线,点的横坐标为 CFD 计算值,纵坐标为 SVM 预测值,两者的相对误差在 8% 以内。

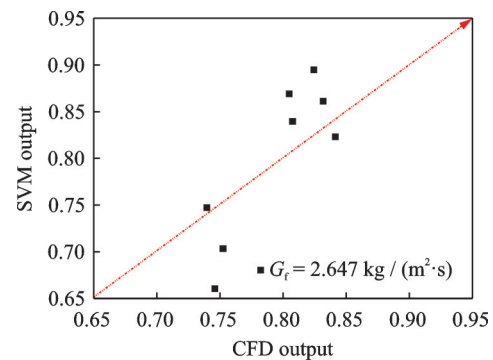


图4 SVM 预测值与 CFD 计算值

Fig.4 SVM estimated values vs. CFD computed values

利用基于支持向量机构建的代理模型,采用遗传算法搜索最优设计点。遗传算法是一种模拟生物进化机制、全局概率化寻找最优解的算法。其主要特点是直接对结构对象进行操作,具有较好的全局寻优能力<sup>[29-30]</sup>。优化过程通过 MATLAB 遗传算法工具箱实现。

### 3 结果与分析

通过优化过程,获得了在给定隔热屏单位表面积冷却空气流量下的优化结构参数(表4)。参见表1所示的设计变量(气膜孔直径 $d$ 、展向间距 $P$ 和流向间距 $S$ )区间,可以发现,气膜孔直径 $d$ 和展向间距 $P$ 的取值接近于设计区间的下限,而流向间距 $S$ 则为设计区间的中间值。这表明,优化的隔热屏结构应具有较小的气膜孔直径和展向间距,以及适中的流向间距。

为了说明优化参数的作用和影响机制,从表1的训练样本中遴选3个结构作为参考(表4)。可见,在本文设定的隔热屏单位表面积冷却空气流量下,通过优化可以将隔热屏发散冷却段面积平均综合冷却效率提高3.3%以上。

表4 优化前后冷却结构对比

Table 4 Cooling structures before and after optimization

参数	$d / \text{mm}$	$P / \text{mm}$	$S / \text{mm}$	$\eta_{av,A}$
参考结构1	1	3	5	0.842
参考结构2	1.2	3	6	0.835
参考结构3	0.8	6	7	0.738
优化结构	0.8	4	5	0.870

诸多研究表明,发散冷却结构的气膜孔开孔率是影响冷却效率的一种重要无因次结构参数。开孔率越大意味着气膜孔在壁面上的分布越加致密,有利于相邻气膜射流之间的融合,形成更好的表面气膜层覆盖。如图5所示,无论是对于几种参考的发散冷却结构还是优化的横向波纹隔热屏冷却结构,壁面温度分布云图均呈现出以下两个共同的特征:(1)隔热屏的壁面温度沿流向逐渐降低,这是因为沿着横向隔热屏流向,气膜叠加效应逐渐显现,气膜冷却效果沿流向逐渐强化,导致隔热屏沿程壁温不断降低;(2)处于横向波纹板波谷区域比波峰区域可以形成更强的气膜射流集聚效应,因此在沿展向的壁面温度变化中,处于横向波纹波谷处的壁温相对波峰处较低。从图5中也可以看出,不同的阵列气膜孔结构参数对于全覆盖气膜冷却的热防护具有很大的影响,对比图5(a)—(c)和图5(d)可以看出,优化后的隔热屏结构,隔热屏发散冷却起始段局部高温段温度得到一定的缩减,表明优化后的隔热屏发散冷却沿流向更易形成气膜覆盖。

3种参考冷却结构中,参考结构3的开孔率仅为1.2%,由于其相邻气膜孔之间的展向和流向节距比( $P/d$ 和 $S/d$ )大,相邻气膜射流在喷吹后的聚合发展较为缓慢,尤其是在发散段的前区,气膜在

壁面上的覆盖效果差(图6),因此在发散段前区存在较大的壁面温度(图5(c)),沿流向气膜射流的叠加使得在隔热屏下游位于高温气流侧的表面附近逐渐被低温的混合气流所覆盖,进而使得综合冷却效率逐渐增强、壁面温度逐渐降低。在相同的气膜孔径下,优化的气膜孔在流向间距和展向间距变

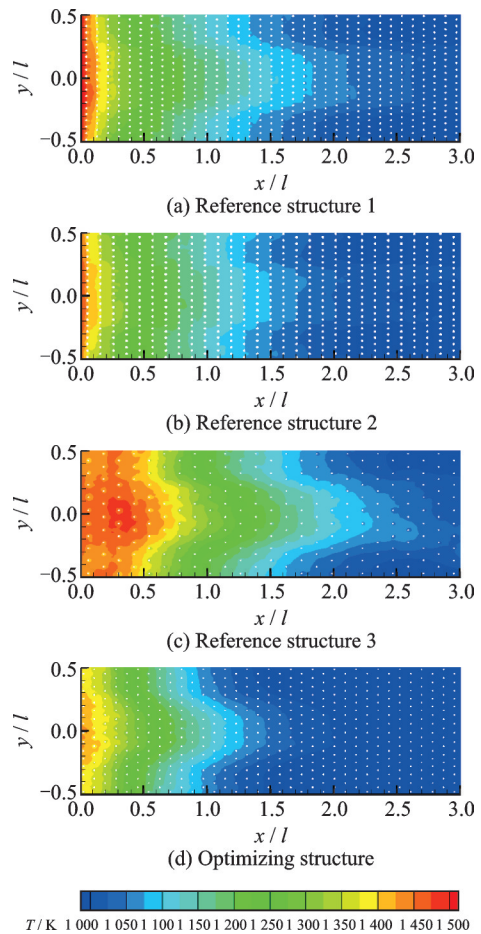


图5 壁面温度分布云图

Fig.5 Temperature distributions on wall surface

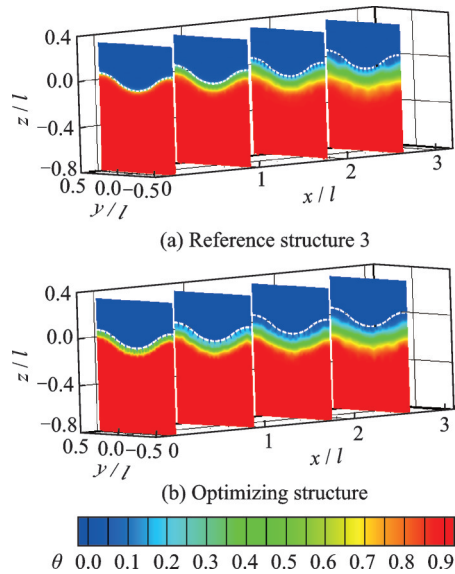


图6 典型截面无量纲温度分布云图

Fig.6 Dimensionless temperature distributions on several sections

缩减,使得展向上单位面积的隔热屏气膜孔排布更加密集,开孔率为 2.51%,气膜孔之间出流的相互作用增强,气膜展向覆盖效果增强,从而显著提高了冷却效率。对于参考结构 1 和参考结构 2,两者的开孔率分别为 5.23% 和 6.28%,由于其具有高的开孔率,气膜孔排布较为致密,因此,两者均能在发散段前区形成良好的气膜层覆盖以及较高的综合冷却效率(表 4)。然而通过增加气膜孔开孔率达成冷却效果的改善往往在应用中受到结构本身机械强度的制约,尤其值得关注的是,在给定隔热屏单位表面积冷却空气流量下,单纯提高开孔率尽管可以改善气膜射流的聚合和气膜层在壁面上的覆盖,但是,开孔率的增加却导致气膜射流的喷吹速度或动量的降低,一方面影响气膜孔内部的对流换热能力,另一方面,由于气膜射流喷吹动量的下降,气膜射流易于受到高温主流的掺混卷吸影响进而影响其在壁面覆盖的稳定性以及向下游的延伸能力,如图 7 所示,相对于参考结构 1,优化冷却结构的气膜层更贴近壁面,表明气膜射流喷吹后能够在壁面附近形成更加稳定的覆盖。因此在气膜孔开孔率有所减小时可以通过优化取得更好的综合冷却效果。同时,从图 7 也可以看出,气膜射流在横向波纹板波谷区域的聚合效应要强于波峰区域,因此在横向波纹波谷处的气膜覆盖作用更优。

图 8 和图 9 为横向波纹隔热屏沿流向和展向的局部综合冷却效率分布对比。可以看出,在横向波纹隔热屏的起始段,优化前后流向综合冷效相差不大,这是因为在波纹板的前端,气膜尚未完全贴近壁面,形成对壁面的气膜覆盖,气膜冷却效果微

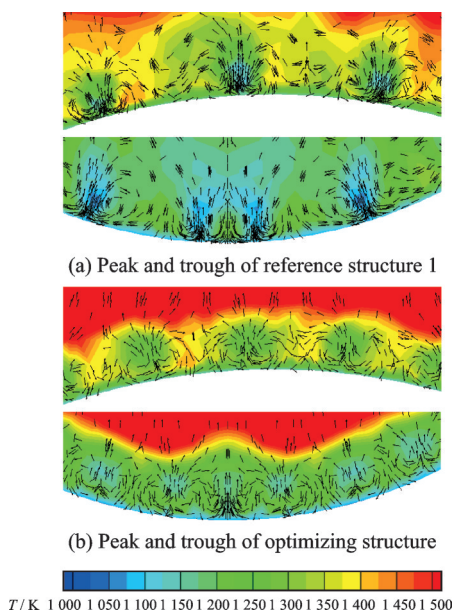


图 7 典型截面速度矢量图  
Fig.7 Cross sectional velocity vector

弱。相对于参考结构 3,优化后的发散冷却结构冷却效率有显著的增加,在 1 个波纹波长和 2 波纹波长所对应的流向位置上,展向平均综合冷却效率提升幅度约为 20% 和 15%;即便是相对具有更大开

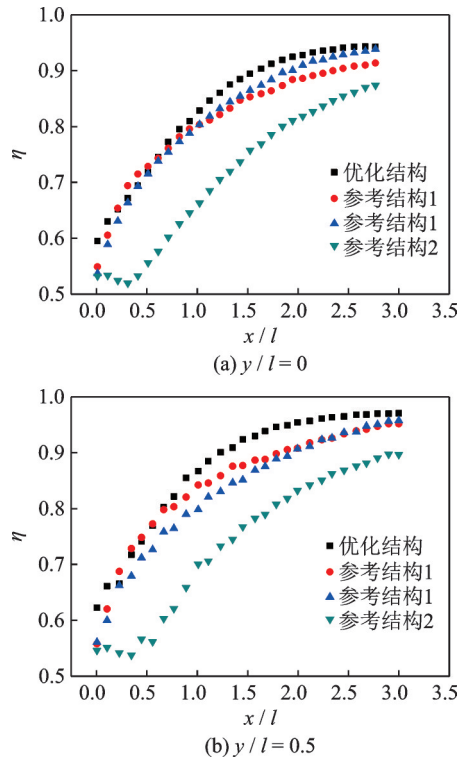


图 8 沿流向局部综合冷却效率分布  
Fig.8 Local overall cooling effectiveness along streamwise direction

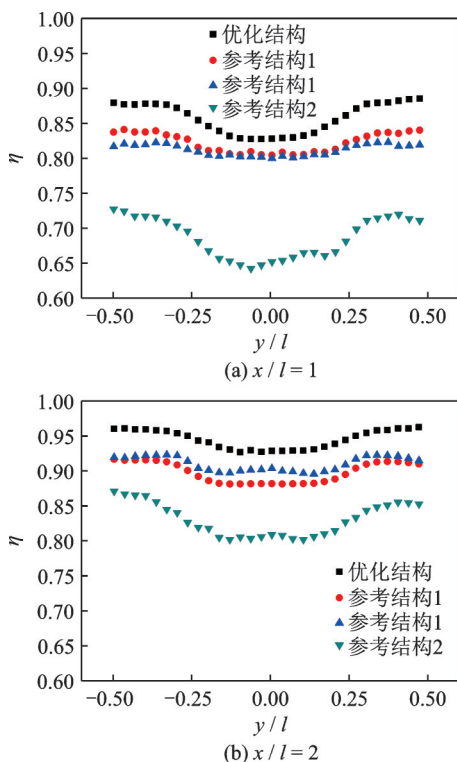


图 9 沿展向局部综合冷却效率分布  
Fig.9 Local overall cooling effectiveness along spanwise direction



孔率的参考结构1和参考结构2,优化后的发散冷却结构无论在横向波纹的波峰还是波谷位置,在大约0.7个波纹长度之后的下游,局部综合冷却效率均有一定幅度的增加,最大增幅超过5%。

由此可见,横向波纹隔热屏发散冷却结构参数影响具有高度的耦合,如何在上述结构参数寻求合理的匹配,涉及多参数的优化设计。

## 4 结 论

针对一种横向波纹隔热屏发散冷却结构,在给定的单位面积冷却空气流量下,以发散冷却结构气膜孔直径 $d$ 、展向间距 $P$ 和流向间距 $S$ 为设计变量,以横向隔热屏综合冷却效率为优化目标,基于支持向量机模型结合遗传算法在设计区间内寻优,获得了横向波纹隔热屏发散冷却结构的优化设计参数。在隔热屏单位表面积冷却空气流量 $G_r = 2.647 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 工况下,优化后的 $d$ 、 $P$ 和 $S$ 分别为0.8、4和5 mm。相比于发散冷却参考结构,优化后的发散冷却结构能够改善沿流向的气膜覆盖,缩减发散冷却起始段局部高温段,在气膜的下游流向冷却效率的得到改善,整个横向波纹隔热屏的展向冷却效率均有提升。研究结构表明优化的隔热屏结构应具有较小的气膜孔直径和展向间距以及适中的流向间距。

### 参考文献:

- [1] CERRI G, GIOVANNELLI A, BATTISTI L, et al. Advances in effusive cooling techniques of gas turbines[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27: 692-698.
- [2] KREWINKEL R. A review of gas turbine effusion cooling studies[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 66: 706-722.
- [3] LIN Y Z, SONG B, LI B, et al. Investigation of film cooling effectiveness of full-coverage inclined multi-hole walls with different hole arrangements: ASME GT2003-38881[R].[S.l.]: ASME, 2003.
- [4] LIGRANI P, GOODRO M, FOX M, et al. Full-coverage film cooling: Film effectiveness and heat transfer coefficients for dense and sparse hole arrays at different blowing ratios[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2012, 134: 061039-1-13.
- [5] 谢婕, 张靖周. 带偏转角气膜出流发散壁冷却特性的数值分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(2): 157-161.  
XIE Jie, ZHANG Jingzhou. Numerical simulation on cooling characteristics of effusion wall with deflection film outflow[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 45(2): 157-161.
- [6] 杨卫华, 卢聪明, 郑建文. 气膜-发散冷却结构冷却效果的实验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(4): 517-523.  
YANG Weihua, LU Congming, ZHENG Jianwen. Experimental investigation on cooling effectiveness of film-effusion cooling[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 46(4): 517-523.
- [7] YANG Zhimin, ZHANG Jingzhou. Experiment on adiabatic film cooling effectiveness in front zone of effusion cooling configuration[J]. Transaction of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 31(3): 338-344.
- [8] 刘友宏, 李英, 杨旭. 冲击/发散冷却层板隔热屏冷却性能及对比[J]. 航空动力学报, 2014, 29(6): 1272-1278.  
LIU Youhong, LI Ying, YANG Xu. Cooling performance and comparison of impingement/effusion cooling lamilloy used as heat shield[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(6): 1272-1278.
- [9] SHINBO K, KOIDE Y, KASHIWAGI T, et al. Research of heat transfer of a liner for an afterburner: AIAA Paper 97-3005[R].[S.l.]: AIAA, 1997.
- [10] CHAMPION J L, DESHAIES B, CURTELIN R, et al. Aerodynamical structure of the wall flow over a wavy surface partially cooled by air injection through multi-perforations: AIAA Paper 99-1016[R].[S.l.]: AIAA, 1999.
- [11] FUNAZAKI K, IGARASHI T, KOIDE Y, et al. Studies on cooling air ejected over a corrugated wall: Its aerodynamic behavior and film effectiveness: ASME 2001-GT-143 [R].[S.l.]: ASME, 2001.
- [12] 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 wavy liner[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(3): 487-489.
- [13] 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, 22(1): 37-41.  
TANG Chan, CHANG Haiping. Numerical simulation of effusion holes on the longitudinal ripple heat shield[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 22(1): 37-41.
- [14] 常国强, 常海萍, 常飞, 等. 多孔纵向波纹表面气膜冷却效率实验研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(3): 513-518.  
CHANG Guoqiang, CHANG Haiping, CHANG Fei, et al. Experimental investigation on film cooling

- effectiveness of multi-hole at longitudinal wavy surface[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(3): 513-518.
- [15] SINGH K, PREMACHANDRAN B, RAVI M R. Numerical investigation of film cooling on a 2D corrugated surface[J]. *Numerical Heat Transfer, Part A*, 2016, 70(11): 1253-1270.
- [16] SINGH K, PREMACHANDRAN B, RAVI M R. Experimental and numerical studies on film cooling of a corrugated surface[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 108: 312-329.
- [17] REN Haoliang, LIU Youhong. Experimental investigation of fluid flow and heat transfer characteristics of a longitudinal corrugated liner for a combustion chamber[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 108: 1066-1075.
- [18] REN Haoliang, LIU Youhong, DU Liwei. An experimental study of flow and heat transfer performance of a longitudinal corrugated liner for a combustion chamber[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 127: 1305-1316.
- [19] 渠立红, 张靖周, 谭晓茗. 发散孔横向波纹隔热屏气膜冷却特性研究[J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(7): 1532-1537.
- QU Lihong, ZHANG Jingzhou, TAN Xiaoming. Numerical investigation of film cooling characteristics for effusion holes on a transverse ripple heat shield[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, 37(7): 1532-1537.
- [20] QU L H, ZHANG J Z, TAN X M, et al. Numerical investigation on adiabatic film cooling effectiveness and heat transfer coefficient for effusion cooling over a transverse corrugated surface[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017, 30(2): 677-684.
- [21] 渠立红, 张靖周, 谭晓茗. 发散孔结构参数对横向波纹表面气膜绝热冷却效率的影响[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(3): 590-596.
- QU Lihong, ZHANG Jingzhou, TAN Xiaoming. Effects of structural parameters of effusion holes on adiabatic film cooling effectiveness over transverse corrugated surface[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2018, 33(3): 590-596.
- [22] 曾文明, 谭晓茗, 张靖周, 等. 高冷气温度下横向波纹隔热屏气膜冷却特性研究[J]. *推进技术*, 2019, 40: 180305.
- ZENG Wenming, TAN Xiaoming, ZHANG Jingzhou, et al. Numerical investigation of film cooling characteristics of a transverse ripple heat shield with high temperature coolant[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2019, 40: 180305.
- [23] 张玲, 王冲. 不同横斜槽结构对气膜冷却效果影响的正交模拟[J]. *推进技术*, 2016, 37(5): 922-929.
- ZHANG Ling, WANG Chong. Orthogonal simulation of effects of different transverse declining slot structures on film cooling[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2016, 37(5): 922-929.
- [24] HARRISON K, BOGARD D. Comparison of RANS turbulence models for prediction of film cooling performance: ASME GT2008-50366[R].[S.l.]: ASME, 2008.
- [25] SILIETI M, KASSAB A J, DIVO E. Film cooling effectiveness: Comparison of adiabatic and conjugate heat transfer CFD models[J]. *International Journal of Thermal Science*, 2009, 48: 2237-2248.
- [26] 渠立红, 张靖周, 谭晓茗. 狭缝喷注-发散冷却的综合冷却效果数值研究[J]. *推进技术*, 2018, 39(4): 849-856.
- QU Lihong, ZHANG Jingzhou, TAN Xiaoming. Numerical investigation on overall cooling effectiveness for a combined scheme of slot injection and effusion cooling[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2018, 39(4): 849-856.
- [27] GUSTAFSSON K M B, JOHANSSON T G. An experimental study of surface temperature distribution on effusion-cooled plates[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2001, 123(2): 308-316.
- [28] CORTES C, VAPNIK V. Support-vector networks[J]. *Machine Learning*, 1995, 20(3): 273-297.
- [29] WANG C H, ZHANG J Z, ZHOU J H. Optimization of a fan-shaped hole to improve film cooling performance by RBF neural network and genetic algorithm[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2016, 58: 18-25.
- [30] 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 and Power*, 2019, 40(2): 276-284.

(编辑:孙静)