

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.01.018

涡轮叶片双层壁冷却结构的优化设计

张王子, 谭晓茗, 路倩倩, 李文

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 为了提高涡轮叶片双层壁冷却结构的工作性能, 采用径向神经网络耦合遗传算法对叶片简化模型——平板双层壁冷却结构展开多目标优化。结合 CFD 计算结果, 对优化前后的结构性能进行对比分析, 并利用 1stOpt 软件分别对综合冷却效率和总压损失进行经验公式拟合。研究结果表明: 综合考量冷却效率与总压损失, 获得两者平衡的最优双层壁结构参数 Opt-C。运用 1stOpt 软件分别对综合冷却效率和总压损失进行经验公式拟合, 获得两者与 6 个变量的多参数经验关系式。

关键词: 涡轮叶片; 双层壁; 径向神经网络; 1stOpt 软件; 遗传算法优化

中图分类号: TP183 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2026)01-0092-08

Optimization Design of Double-wall Cooling Structure of Turbine Blades

ZHANG Wangzi, TAN Xiaoming, LU Qianqian, LI Wen

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to improve the working performance of double-wall cooling structure of turbine blades, radial basis function neural network (RBFNN) coupled with genetic algorithm was used for multi-objective optimization of the simplified model of blade-flat double-wall cooling structure. Based on the results of CFD calculation, the structure performance before and after optimization was compared and analyzed. Empirical formulae were fitted for comprehensive cooling efficiency and total pressure loss respectively using the 1stOpt software. The results showed that the Opt-C achieving a balance between cooling efficiency and total pressure loss was obtained by considering both factors. Empirical formulae for comprehensive cooling efficiency and total pressure loss were fitted with six variables using the 1stOpt software, obtaining a multi-parameter empirical relationship between the two factors.

Keywords: turbine blades; double-wall; radial neural network; 1stOpt software; genetic algorithm optimization

0 引言

随着现代航空技术的发展, 现代航空飞行器对发动机的推力和推进效率提出了更高的要求。航空发动机的工作原理遵循布雷顿热力循环准则, 提升涡轮进口温度是改善其综合性能的重要途径。目前, 先进燃气轮机涡轮进口温度最高达到了 2 200 K, 超过了航空发动机涡轮叶片熔点约 70%, 这对涡轮叶片材料的耐热性提出了巨大的挑战^[1-2]。因此, 在研制新型的耐高温、抗氧化材料和高效热障涂层^[3-4]的基础上, 需要发展更为高效的叶片冷却技术来保证燃气轮机安全可靠地运行^[5]。目前对航空发动机中高温部件实施的基本冷却方式有扰动强化对流冷却、冲击冷却、发散冷却、气膜冷却和喷射冷却等^[6]。单一的冷却方式已经不能满足涡轮叶片冷却的要求, 近年来出

现了一种集冲击、发散、扰流柱为一体的新型复合冷却方式。从国内外发展趋势可知, 双层壁冷却结构必将成为新一代的涡轮叶片冷却结构, 在航空发动机叶片中得到广泛应用^[7-8]。

NAKAMATA 等^[9]对 6 种不同孔柱排布的层板结构进行实验研究。实验结果表明: 扰流柱密度和孔柱排布位置是影响层板结构冷却特性的重要参数。当吹风比 $M < 0.5$ 时, 冲击孔、扰流柱和气膜孔数之比为 1 : 4 : 1 的层板结构冷却效率较好; 反之当吹风比 $M > 0.5$ 时, 1 : 2 : 1 的层板结构冷却效率表现更好。谢浩等^[10]采用数值模拟方法研究了气膜孔叉排方式下孔间距和吹风比对致密孔阵气膜冷却绝热温比和对流换热系数的影响。减小相邻孔间距与孔径比或增加吹风比, 会使平均壁面温度降低, 冷却效果变好。谭晓茗等^[11]对 7 种具有不同内部绕流的层板结构进行

基金项目: 航空发动机及燃气轮机基础科学中心项目 (P2022-A-III-003-001)

第一作者简介: 张王子 (1998—), 江苏徐州人, 硕士, 研究方向为航空发动机热防护, 3246523719@qq.com。

了数值模拟计算,得到了扰流柱、冲击孔、气膜孔之间的排布方式以及堵塞比等参数对层板冷却效率与相对压损的影响规律。黄莺等^[12]采用三维雷诺时均(RANS)和代理优化模型,对涡轮叶片吸力面特定位置的扇形气膜孔结构进行优化,利用径向基神经网络(RBFNN)构建了数学代理模型,采用遗传算法计算最优解,从而获得吹风比 $M=1.5$ 时的扇形气膜孔优化结构,提高了气膜冷却效率。VERSTRAETE、COLETTI等^[13-14]对动叶内部蛇形通道几何构型进行了降低压力损失的优化,优化后通道相对压力损失降低了36%,但是优化后的通道平均努塞耳数降低了6%。

双层壁复合冷却结构涉及冲击孔径、气膜孔径、扰流柱径、冲击间距等多个参数。而国内外学者大多研究单个结构参数变化对于双层壁冷却结构冷却效率或流动损失的影响,鲜有考虑多个结构参数。基于此,本文综合考虑冲击孔直径 d_i 、扰流柱直径 d_p 、气膜孔直径 d_f 、气膜板壁厚 t_f 、冲击间距 H 、孔节距 S 等6个结构参数,采用遗传优化算法以综合冷却效率 η 和总压损失系数 $\Psi_{p,total}$ 为

目标进行优化,确定较优双层壁冷却结构;通过1stOpt拟合软件拟合关于综合冷却效率和总压损失系数的多参数关联式,并通过样本结果验证关联式的有效性。

1 计算模型

1.1 物理模型和边界条件

图1(a)为双层壁冷却结构的几何模型, x 轴方向表示主流高温气体来流方向,将热流体流动方向规定为正方向,双层壁平板的长度 L_1 与主流流域长度 L_2 随孔节距变化($L_1=6.5S$, $L_2=14S$); y 轴方向为垂直于热流体的展向方向,并且规定向外延伸为正方向,双层壁平板的宽度 L_3 随孔节距变化($L_3=3S$),两侧设置为周期性边界; z 轴方向垂直于底面与冷流体流动方向一致并且规定向上为正方向,主流流域高为8 mm,次流流域高为4 mm。孔柱(图1(b))采用叉排分布,共有3行6列,其中冲击孔有9个,气膜孔有9个,20个扰流柱分布其间。

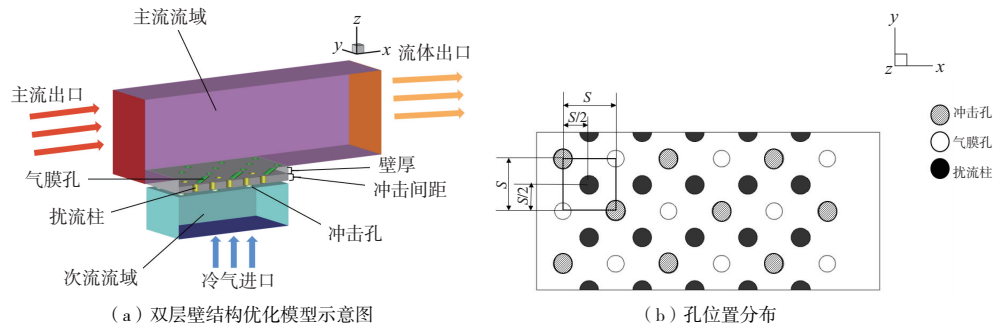


图1 双层壁冷却结构优化模型

双层壁冷却结构优化模型划分为主流高温燃气区域、次流冷却气体区域、双层壁流体区域、双层壁固体区域,模型两侧壁面设置为平移周期性边界条件,流体与固体交界面设置为流固耦合面,其余面设置为无滑移绝热边界条件;计算工质为理想气体。对应的边界条件如下:主流入口与次流入口均采用总压入口,主流入口总压为236 700 Pa,温度为666.6 K;次流入口总压为332 165 Pa,温度为300 K。出口采用压力出口,设定为151 700 Pa。叶片材料属性为 $\rho=8\ 290\text{ kg/m}^3$, $c_p=689\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$,导热系数与温度的依变关系为 $\lambda=0.012\ 97T+3.86$ 。

1) 综合冷却效率 η

综合冷却效率 η 取双层壁冷却结构的面积平

均综合冷却效率,定义如式(1)所示。

$$\eta = \frac{T_{\infty} - T_{w,ave}}{T_{\infty} - T_c} \quad (1)$$

式中: T_{∞} 为主流入口温度; T_c 为次流冷气入口温度; $T_{w,ave}$ 为双层壁结构热侧壁面平均温度。

2) 总压损失系数 $\Psi_{p,total}$

总压损失系数 $\Psi_{p,total}$ 可以体现双层壁结构的压力损失,其定义如式(2)所示。

$$\Psi_{p,total} = \frac{\frac{m_c}{m_c+m_{\infty}}p_{t,cin} + \frac{m_c}{m_c+m_{\infty}}p_{t,\infty} - p_{t,o}}{\frac{m_c}{m_c+m_{\infty}}p_{t,cin} + \frac{m_{\infty}}{m_c+m_{\infty}}p_{t,\infty} - p_o} \quad (2)$$

式中: m_c 为次流入口质量流量; m_{∞} 为主流入口质量流量; $p_{t,cin}$ 为冲击孔入口平均总压; $p_{t,\infty}$ 为主流

入口总压; $p_{t,out}$ 为主流出口总压; p_o 为主流出口静压;

3) 吹风比 M

吹风比是射流与主流的质量流量之比,其定义如式(3)所示。

$$M = \frac{\rho_c u_c}{\rho_g u_g} = \frac{m_c A_c}{m_g A_g} \quad (3)$$

式中: ρ_c 和 u_c 分别为冷气的密度和平均速度; ρ_g 和 u_g 分别为主流的密度和平均速度; A_c 为气膜孔的总出口面积; m_g 为主流的质量流量; A_g 为主流通道截面积。

1.2 设计变量和目标函数

在双层壁冷却结构的应用中,冲击板的厚度一般调整范围很小,因此本文将其作为固定结构参数不参与优化设计($t_i = 0.3 \text{ mm}$)。双层壁冷却结构的设计变量有6个,分别是 d_i 、 d_p 、 d_f 、 t_f 、 H 、 S 。选定双层壁结构的参数范围如表1所示。

表1 双层壁结构参数取值范围

参数名称	取值下限	取值上限
d_i/mm	0.5	1.0
d_p/mm	0.5	1.0
d_f/mm	0.5	0.8
t_f/mm	0.5	1.1
H/mm	0.5	1.1
S/d_i	3.0	5.0

将平板双层壁冷却结构的最大综合冷却效率和最小总压损失作为优化目标,构建适应度函数,优化问题表述为:

$$\min F(d_i, d_f/d_i, m, n, H/d_i) = 1/\eta \quad (4)$$

$$\min F(d_i, d_f/d_i, m, n, H/d_i) = (1/\Delta p)^{-1} \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} 0.8 \leq d_i \leq 1.5 \\ 0.4 \leq d_f/d_i \leq 1.0 \\ 37 \leq m \leq 73 \\ 4 \leq n \leq 7 \\ 1 \leq H/d_i \leq 2.5 \end{cases} \quad (6)$$

式中 $F(d_i, d_f/d_i, m, n, H/d_i)$ 为适应度函数; Δp 为总压损失。

2 计算方法

2.1 CFD 计算

基于 Fluent 求解器,采用 RANS 方法进行三维数值模拟,同时考虑扩散、黏性及传热等影响因素,数值计算中采用 Realize $k-\varepsilon$ 湍流模型进行求

解。动量方程和能量方程采用2阶迎风格式进行离散,其余采用1阶迎风格式,计算结果以能量方程收敛残差达到 10^{-6} ,其他参数达到 10^{-5} 为标准。

综合考虑计算规模及精确度,在离散过程中采用四面体网格,计算模型网格示意图如图2(a)所示。为了观察双层壁上壁面与主流热流体的流动换热特性,对双层壁冷却结构进行局部加密,将整个壁面通过网格尺寸约束进行加密,在气膜孔出口面边缘进行分块约束,并在主流流域的下表面加设10层边界层网格,规定第一层边界层厚度为0.001 mm,增长因子为1.2。双层壁热壁面网格示意图如图2(b)所示。

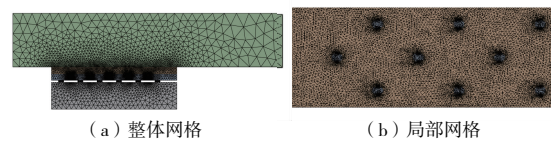


图2 网格示意图

实际中连续的物理模型在数值模拟中被离散的网格节点所代替,进行近似计算的结果准确度与网格尺寸具有一定的关联。为保证计算的精确度和计算规模,本文进行了网格独立性验证,将网格数目由174万逐渐增加至680万,分析该过程中双层壁结构热侧壁面平均温度的变化情况,如图3所示。可以看出,网格数目174万后,增大网格数量,壁面平均温度近似保持不变,此时可认为计算结果对于网格数目的影响不敏感。为了保证精度和节约计算资源,在之后的数值计算中选择网格数目为224万的网格划分方法,即网格最大尺寸1.8 mm,网格单元尺寸1.8 mm,气膜板壁面局部加密单元尺寸0.2 mm,气膜孔边缘分区数量调整为30,在后续算例计算中均采用同样的网格尺寸控制,以尽量减小网格差异对不同模型计算结果的影响。

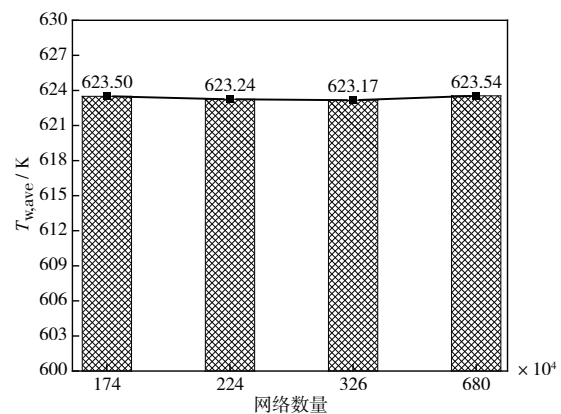


图3 网格无关性验证

2.2 优化方法

采用 RBF 神经网络耦合遗传优化算法对平板双层壁冷却结构进行全局寻优。RBF 神经网络是一种使用径向基函数作为激活函数的人工神经网络,属于前馈型神经网络,具有全局逼近能力,且收敛速度快^[15]。遗传算法是一种全局优化概率算法,通过模仿自然界的遗传规律来寻找最优解,可以有效地进行概率意义的全局搜索^[16-19]。遗传算法的操作包括自适应函数、染色体的编码与解码、选择操作、交叉算子、变异算子。

针对平板双层壁冷却结构的优化流程如图 4 所示。该优化基本步骤包括:明确优化设计要求,确定待优化设计变量及其范围;利用拉丁超立方抽样方法设计前 32 组具有代表性的样本作为 RBF 神经网络的训练样本,再随机抽取最后 4 组样本作为测试样本,并将样本数据归一化处理,选取样本如表 2 所示;通过 CFD 计算选取样本的目标函数;在 MATLAB 平台上自编程,基于训练样本建立 RBF 神经网络的数学模型,利用测试样本验证模型正确性,输出 RBF 神经网络的扩散速度;调用 MATLAB 自带的遗传算法与直接搜索工具箱(GADS),采用 RBF 神经网络数学模型编写适应度函数,并在工具箱内设置种群大小为 100,选择参与个体数量为 2.0 的锦标赛选择算法,选择高斯函数作为变异函数,选择中间比率为 1 的交叉函数,设置最大迭代步长为 200,引入遗传算法对平板双层壁结构进行全局寻优。

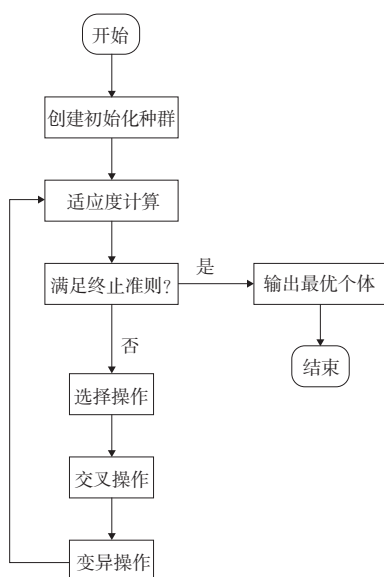


图 4 遗传优化计算流程

表 2 归一化后的样本数据

序号	d_i	d_p	d_f	t_f	H	S/d_i
1	0.933 2	0.849 9	0.576 9	0.204 2	0.979 8	0.673 8
2	0.696 3	0.883 9	0.166 0	0.111 8	0.351 3	0.254 7
3	0.403 3	0.500 9	0.066 5	0.359 0	0.645 0	0.106 8
4	0.882 5	0.822 0	0.219 1	0.178 1	0.932 3	0.904 0
5	0.544 5	0.587 7	0.849 8	0.099 6	0.154 5	0.649 5
6	0.897 1	0.177 4	0.892 1	0.630 3	0.193 1	0.974 1
7	0.040 0	0.461 8	0.595 9	0.881 6	0.387 5	0.060 1
8	0.590 1	0.309 0	0.656 4	0.923 4	0.886 4	0.614 0
9	0.777 9	0.117 1	0.188 7	0.250 1	0.427 9	0.289 4
10	0.139 9	0.209 3	0.543 3	0.550 4	0.298 9	0.872 7
11	0.429 6	0.227 4	0.751 2	0.422 7	0.115 5	0.198 5
12	0.167 7	0.669 5	0.385 4	0.577 9	0.448 4	0.471 3
13	0.385 7	0.404 7	0.986 9	0.305 8	0.389 9	0.419 8
14	0.498 6	0.740 7	0.031 8	0.061 0	0.097 5	0.849 8
15	0.658 2	0.261 2	0.359 9	0.516 0	0.493 9	0.749 0
16	0.067 2	0.002 7	0.425 2	0.146 4	0.077 0	0.229 3
17	0.679 7	0.480 5	0.000 6	0.041 7	0.679 5	0.329 0
18	0.280 5	0.295 1	0.686 6	0.949 8	0.006 6	0.134 9
19	0.235 0	0.951 8	0.524 1	0.490 1	0.629 2	0.705 4
20	0.265 8	0.917 9	0.481 0	0.998 0	0.792 7	0.604 0
21	0.096 0	0.373 8	0.780 3	0.761 4	0.232 2	0.185 4
22	0.980 2	0.040 6	0.871 9	0.002 5	0.502 3	0.155 5
23	0.971 8	0.658 0	0.725 0	0.716 8	0.606 6	0.516 5
24	0.838 9	0.914 7	0.328 0	0.738 0	0.035 7	0.961 5
25	0.829 4	0.994 9	0.395 7	0.673 6	0.539 5	0.566 4
26	0.125 6	0.080 8	0.712 6	0.610 0	0.738 0	0.023 1
27	0.465 1	0.431 6	0.127 3	0.223 7	0.197 7	0.050 3
28	0.212 0	0.583 1	0.106 8	0.784 3	0.822 4	0.830 7
29	0.009 4	0.696 8	0.227 2	0.290 0	0.967 3	0.491 0
30	0.356 4	0.759 9	0.454 9	0.411 6	0.843 5	0.395 3
31	0.770 0	0.638 8	0.951 7	0.847 3	0.566 0	0.799 1
32	0.744 5	0.804 7	0.616 5	0.818 9	0.324 2	0.368 3
33	0.633 5	0.355 3	0.303 7	0.444 6	0.755 5	0.536 3
34	0.518 7	0.542 9	0.251 4	0.365 1	0.250 0	0.754 9
35	0.308 9	0.163 1	0.819 5	0.639 9	0.889 4	0.921 4
36	0.570 2	0.110 9	0.923 5	0.897 8	0.718 7	0.353 0

在 MATLAB 软件中,采用如下函数建立径向基神经网络:

$$\text{net} = \text{RBF}(P, T, s_{\text{pread}}) \quad (7)$$

式中: P 为输入值; T 为目标值; s_{pread} 为扩散系数。

针对本节的优化需求, P 为双层壁的结构参数, T 为对应的综合冷却效率和总压损失系数,在 MATLAB 中调用自编函数来确定径向基神经网络的扩散系数,同时用函数预测结果与测试样本对比,对径向基神经网络的正确性进行验证,测试样本的 CFD 计算结果与 RBFNN 数学模型的计算结果对比如图 5 所示。RBFNN 数学模型得到的综

合冷却效率与总压损失系数计算结果和 CFD 计算结果较为相近,证明代理模型的正确性和适用性。

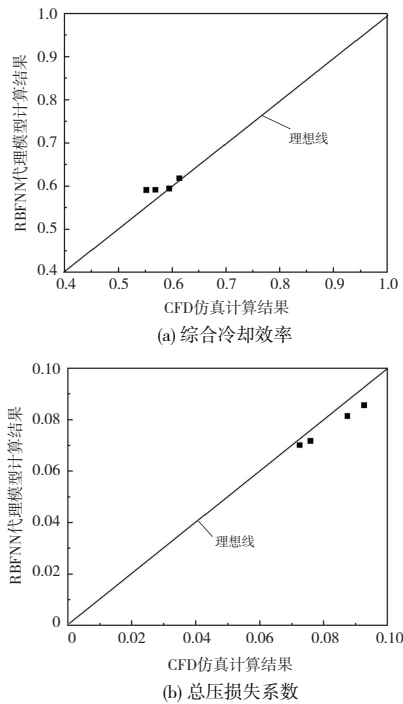


图5 CFD与RBFNN计算结果对比

本文设定 spread 值的初始取值范围为(0,1),经过迭代求解计算,以最大综合冷却效率为优化目标建立的径向基神经网络的 spread 值为 0.7,以最小总压损失系数为优化目标建立的径向基神经网络的 spread 值为 0.35。

2.3 经验公式拟合

采用 1stOpt 拟合软件进行曲线拟合的分析和计算^[20]。多参数关联式拟合流程如下:首先确定拟合目标为综合冷却效率和总压损失系数,拟合目标相关参数为 6 个尺寸参数: d_i 、 d_p 、 d_f 、 t_f 、 H 和 S/d_f ;采用表 2 中设计的 36 组样本作为经验公式的拟合样本,确定经验公式的数学模型,利用通用全局优化算法(UGO1)进行拟合计算,得到经验公式。

本节选定的关于综合冷却效率和总压损失系数的经验关系式数学模型表达式如下:

$$y = p_0 + p_1 x_1^{p_2} + p_3 x_2^{p_4} + p_5 x_3^{p_6} + p_7 x_4^{p_8} + p_9 x_5^{p_{10}} + p_{11} x_6^{p_{12}} \quad (8)$$

式中: $x_1 \sim x_6$ 为自变量,分别对应 d_i 、 d_p 、 d_f 、 t_f 、 H 、 S/d_f ; $p_0 \sim p_{12}$ 为经验系数,具体值如表 3 所示。

表3 经验系数值

参数	η	$\Psi_{p, \text{total}}$
p_0	-0.941 2	0.003 9
p_1	-0.000 2	0.000 0
p_2	0.000 8	2.292 8
p_3	2.880 7	0.472 1
p_4	0.133 0	0.961 0
p_5	-2.513 1	0.145 5
p_6	-0.878 5	1.219 9
p_7	2.357 6	0.352 4
p_8	-0.901 5	0.916 7
p_9	-2.812 2	-0.374 2
p_{10}	0.433 0	0.562 2
p_{11}	2.028 9	0.388 0
p_{12}	0.630 4	0.608 6

综合冷却效率经验公式拟合均方差为 $9.525 6 \times 10^{-8}$,相关系数 R_1 为 1.000 0,总压损失系数经验公式拟合均方差为 $2.342 56 \times 10^{-7}$,相关系数 R_2 为 0.999 9。图 6 为综合冷却效率和总压损失系数经验公式计算结果与 CFD 数值模拟结果的对比如,由图 6 可知拟合效果较好。

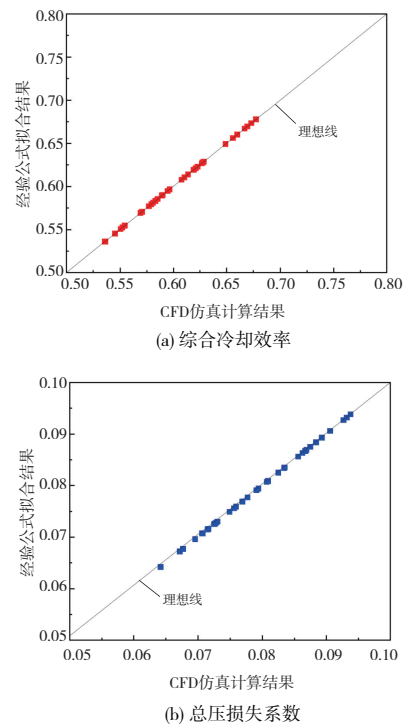


图6 经验公式计算结果与CFD数值模拟结果对比图

3 结果与分析

通过遗传优化,计算出针对最大综合冷却效

率和最小总压损失系数损失多目标优化的 Pareto 前缘解集。如图 7 所示,解集构成了一条单调非线性的曲线,其中,A 点为最大综合冷却效率解,B 点为最小总压损失系数解,C 点是综合考虑综合冷却效率和总压损失系数两个目标函数值的设计点。

由图 7 得到的优化结果,选取 A、B、C 三点处的结构双层壁结构(Opt-A, Opt-B, Opt-C)的最优解,开展 CFD 数值模拟进行验证,并从样本中随机挑选 2 组结构(Ref-1, Ref-2)与优化结构进行对比。5 组双层壁结构的具体参数如表 4 所示。

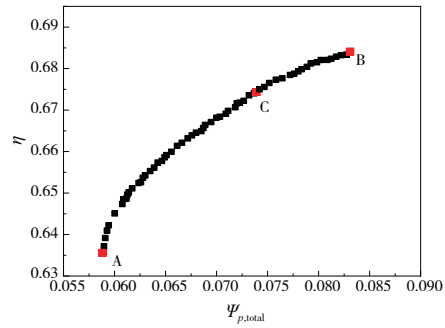


图 7 Pareto 前缘解集

表 4 双层壁优化结构与参考结构参数

工况	d_i/mm	d_t/mm	d_p/mm	t_t/mm	H/mm	S/mm	η	$\Psi_{p,\text{total}}$
Opt-A	0.583 7	0.650 8	0.652 5	1.054 6	0.632 0	1.964 2	0.693 1	0.079 4
Opt-B	0.803 4	0.751 9	0.529 1	0.688 7	0.818 8	1.894 4	0.644 9	0.064 8
Opt-C	0.683 1	0.667 1	0.586 1	0.707 6	0.662 6	1.859 6	0.667 3	0.073 4
Ref-1	0.933 2	0.849 9	0.576 9	0.204 2	0.979 8	0.673 8	0.570 6	0.082 5
Ref-2	0.280 5	0.295 1	0.686 6	0.949 8	0.006 6	0.134 9	0.670 0	0.086 7

图 8 为 3 组优化结构与 2 组参考结构的热侧壁面综合冷却效率 η 分布云图。由图可知, η 沿 x 轴正方向都呈现先增长而后逐渐趋于平缓的发展趋势。在壁面的前部位置,主要是冲击孔冲击冷却起主要作用,且先接触主流高温燃气,故冷却效果较差, η 整体水平较低;在壁面的中下游,多排气膜孔出流的叠加效应使得热侧壁面形成良好的气膜覆盖,此时在冲击冷却和气膜冷却的共同作用下,使得 η 大幅提升。图 9 为 5 组结构的 $\Psi_{p,\text{total}}$

与面平均综合冷效 η_{ave} 分布图。可以发现,优化选出的 3 组结构的综合冷却效率和总压损失都明显优于随机选取的 Ref-1 结构,Ref-2 结构虽然 η 较高,冷却效果与 Opt-C 几乎相同,但 $\Psi_{p,\text{total}}$ 明显大于 3 组优化结构,流动损失太大,并不适合实际应用。分析可得优化得出的 3 组双层壁冷却结构在综合冷却效率和总压损失两方面都得到了提升。

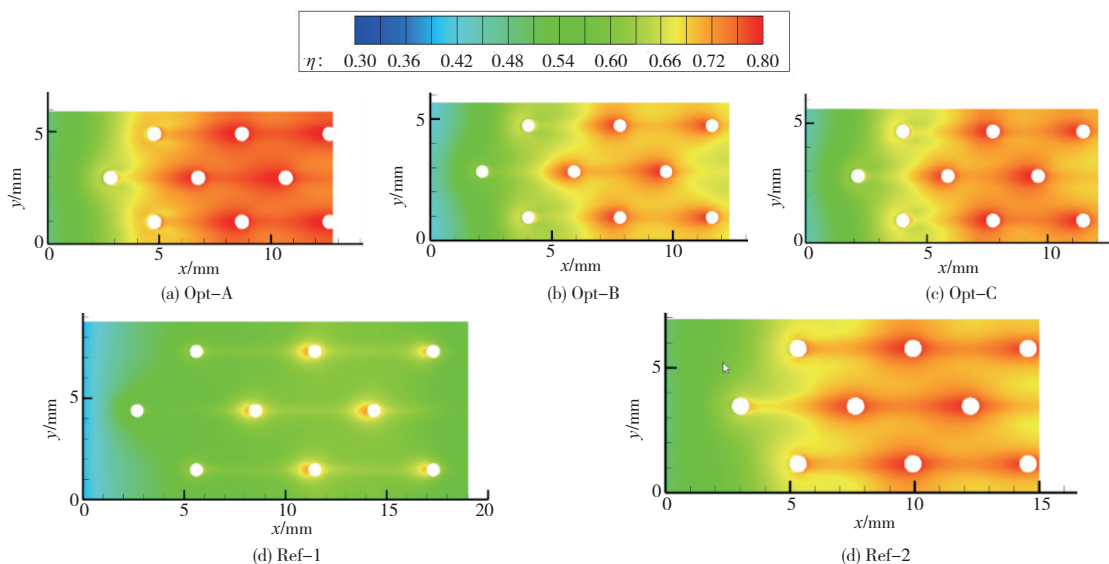


图 8 双层壁热侧壁面综合冷却效率分布

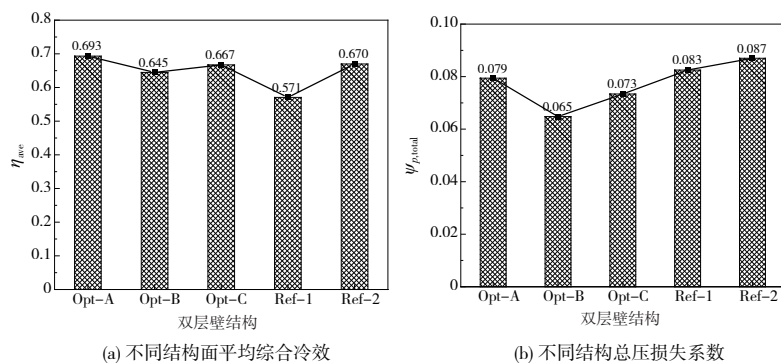


图9 双层壁冷却结构综合冷效与总压损失系数对比

3组优化结构的热侧壁面的沿 x 轴平均综合冷却效率如图10所示。由图10可知,3组结构的综合冷却效率整体上Opt-A最大,Opt-B最小,Opt-C居中;在 $0 < x < 5$ 阶段,最初气膜未覆盖,主要依靠冲击冷却,综合冷却效率较低,但随着气膜孔的出现,喷出的冷却气体在热侧壁面形成气膜覆盖,隔绝主流高温气体,冷却效果逐渐增强,所以3组结构的综合冷却效率在双层壁前部区域大幅提升;在 $x > 5$ 阶段,气膜冷却逐渐形成,在冲击冷却和气膜冷却的共同作用下,双层壁结构的综合冷却效率趋于稳定,受冲击孔和气膜孔位置分布的影响有较小的上下波动,但整体上仍是 $\eta_A > \eta_C > \eta_B$ 的关系。

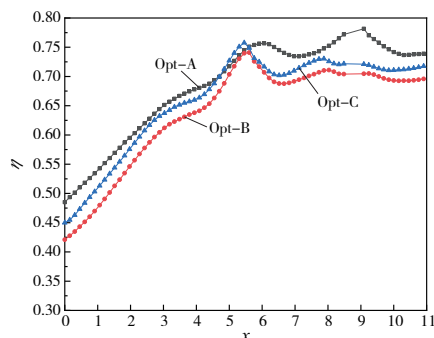
图10 沿 x 轴展向平均综合冷却效率

图11为3组优化结构沿 y 方向第2排气膜孔中心线处的截面上双层壁流域截面流线图。通过图11中流线可以看出,高速的冷却气体从冲击孔进入,冲击环腔壁面,与壁面发生对流换热,然后气流受壁面限制改变方向朝四周分散,遇扰流柱后开始出现涡旋,最后气流经通过气膜孔汇入主流。不同的结构参数会使环腔中出现涡旋的位置不同,涡旋的存在会使气流在两侧壁面间多次往返运动,增强对流换热强度,但是涡旋会增加流体的阻力和能量损失,会导致压降增大,例如

图11中Opt-A结构的涡旋最强其综合冷却效率最大,压损最小。

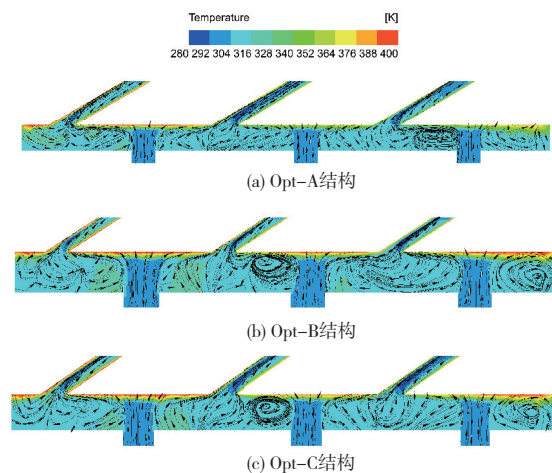


图11 3组双层壁结构的双层壁流域截面流线图

对比3组优化得出的双层壁冷却结构的具体参数可知,Opt-A结构的气膜孔孔径和气膜板壁厚与另外两组结构相比是最大的,气膜孔直径较大,使气膜孔出口速度减小,穿透能力减弱,贴壁性能提升,气膜冷却效果增强。Opt-A结构的射流冲击孔孔径最小,小的冲击孔径具有大的射流冲击速度,从而有利于双层壁结构的内部对流换热,进而强化双层壁的综合冷却效果,因此其热侧壁面综合冷却效率最大。然而,Opt-A结构冲击孔孔径和射流孔孔径相差较大导致了总压损失较大;与之相比Opt-B结构虽然总压损失较小,但综合冷却效率较低,不满足工程应用对冷却效果的需求;Opt-C结构兼顾了综合冷却效率和总压损失,故本文最终选取Opt-C结构为设计点。

4 结语

通过研究,得到以下主要结论:

1) 针对平板双层壁冷却结构,以其最大综合

冷却效率和最小总压损失作为优化目标,以冲击孔直径 d_i 、扰流柱直径 d_p 、气膜孔直径 d_f 、气膜板壁厚 t_f 、冲击间距 H 、孔节距 S 这 6 个结构参数为待优化参数,建立径向基神经网络数学模型并耦合遗传优化算法在设计区间进行全局寻优,获得了双层壁冷却结构的最优参数;

2) 双层壁环腔中,不同冷却结构参数形成不同位置处的涡旋,涡旋的存在会使气流在两侧壁面间多次往返运动,增强对流换热强度,但是涡旋会增加流体的阻力和能量损失,会导致压降增大;

3) 利用 1stOpt 软件分别对综合冷却效率和总压损失进行经验公式拟合,选用决定系数最大,方均根误差最小的数学公式,获得经验关联式。

参考文献:

- [1] 曹玉璋,陶智. 航空发动机传热学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.
- [2] HAN J C, DUTTA S, EKKAD S. Gas turbine heat transfer and cooling technology[M]. Boca Raton: CRC Press, 2012.
- [3] 赵云松,张迈,戴建伟,等. 航空发动机涡轮叶片热障涂层研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(6): 77-83.
- [4] 周益春,杨丽,刘志远,等. 涡轮叶片热障涂层隔热效果的研究进展[J]. 中国材料进展, 2020, 39(10): 707-722.
- [5] 倪萌,朱惠人,裘云,等. 航空发动机涡轮叶片冷却技术综述[J]. 燃气轮机技术, 2005, 18(4): 25-33, 38.
- [6] 范小军,杜长河,李亮,等. 4 种冷却结构对叶片前缘流动换热影响的比较研究[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(7): 37-43.
- [7] 韦宏,祖迎庆. 双层壁冷却结构中多排射流冲击冷却的换热和流阻特性[J]. 航空动力学报, 2021, 36(8): 1621-1632.
- [8] 叶秀. 薄壁双层壁叶片气膜孔结构优化研究[D]. 无锡:江南大学, 2021.
- [9] NAKAMATA C, OKITA Y, MATSUNO S, et al. Spatial arrangement dependance of cooling performance of an integrated impingement and pin fin cooling configuration[C]//ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air, Reno, Nevada, USA: ASME. 2008: 385-395.
- [10] 谢浩,张靖周. 致密孔阵气膜冷却绝热温比和对流换热系数的数值研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(6): 1229-1235.
- [11] 谭晓茗,李业芳,张靖周. 致密多孔层板冷却结构研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(12): 144-149.
- [12] 黄莺,张靖周,王春华. 涡轮叶片吸力面扇形孔气膜冷却效率优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(11): 2868-2876.
- [13] VERSTRAETE T, COLETTI F, BULLE J, et al. Optimization of a U-bend for minimal pressure loss in internal cooling channels: part I—numerical method[C]//ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition, Vancouver, British Columbia, Canada: ASME. 2012: 1665-1676.
- [14] COLETTI F, VERSTRAETE T, VANDERWIELEN T, et al. Optimization of a U-bend for minimal pressure loss in internal cooling channels: part II—experimental validation [C]//ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition, Vancouver, British Columbia, Canada: ASME. 2012: 1689-1699.
- [15] 许敏,胡丽丹. 径向基函数神经网络快速算法及其应用[J]. 统计与决策, 2021, 37(16): 52-56.
- [16] 李恒,李茂军. 基于状态空间模型序号编码进化算法的航班优化调度[J]. 计算技术与自动化, 2023, 42(4): 64-68.
- [17] 才洋,于功志,纪雅悦. 多目标遗传算法下焊接机器人焊接路径规划方法研究[J]. 焊接技术, 2023, 52(12): 112-116.
- [18] 丁宇恒,代玉姣,王留芳. 基于 BP 神经网络与遗传算法的航空薄壁件装夹位置选择[J]. 工业控制计算机, 2023, 36(12): 35-36, 39.
- [19] 丁锦,姜文刚. 基于拉丁超立方算法的永磁同步电机设计优化[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(8): 66-72.
- [20] 孙立珍,赵乐乐. 基于 MATLAB 和 1stOpt 的非线性曲线拟合比较[J]. 现代计算机, 2020, 26(31): 28-30, 37.
- [21] 孙富建,万上,肖罡,等. 电脉冲处理及其辅助金属加工技术研究现状[J]. 机械工程材料, 2021, 45(12): 1-6.
- [22] 敖冬威. Ti-6Al-4V 钛合金板材电脉冲辅助单点渐进成形研究[D]. 济南:山东大学, 2019.
- [23] 于彦东,李彩霞. 镁合金 AZ31B 板材热拉深成形工艺参数优化[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(5): 786-792.

收稿日期: 2023-12-07

(上接第 76 页)

- [21] 孙富建,万上,肖罡,等. 电脉冲处理及其辅助金属加工技术研究现状[J]. 机械工程材料, 2021, 45(12): 1-6.
- [22] 敖冬威. Ti-6Al-4V 钛合金板材电脉冲辅助单点渐进成形研究[D]. 济南:山东大学, 2019.

- [23] 于彦东,李彩霞. 镁合金 AZ31B 板材热拉深成形工艺参数优化[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(5): 786-792.

收稿日期: 2024-01-22