

基于响应面法的 X 型桁架阵列通道冷却性能优化

席 雷, 高建民, 徐 亮, 赵 振, 李云龙

(西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049)

摘 要: 基于数值结果构建了有关 X 型桁架通道壁面平均努塞尔数、摩擦因数和综合热力系数的 2 阶响应面模型, 分析了桁架杆直径比、桁架杆夹角和桁架杆倾角等对 X 型桁架通道冷却性能的影响规律, 并优化得到了最佳参数。结果表明: 增大桁架杆直径比和桁架杆夹角均可以快速地提高平均努塞尔数, 但也相应地增大了摩擦因数; 增大桁架杆倾角先提高后又降低了平均努塞尔数和摩擦因数; 增大桁架杆直径比、桁架杆夹角和桁架杆倾角均会使综合热力系数先增大后减小。当桁架杆直径比为 0.075 0、桁架杆夹角为 60° 和桁架杆倾角为 33.79° 时通道的传热性能最优; 当桁架杆直径比为 0.067、桁架杆夹角为 37.88° 和桁架杆倾角为 31.36° 时通道的综合热力性能最优。

关 键 词: 桁架阵列; 冷却通道; 流动与传热; 响应面法; 优化设计

中图分类号: V233.5; TK47

文献标志码: A

Optimization of cooling performance of X-type truss array channel based on response surface methodology

XI Lei, GAO Jianmin, XU Liang, ZHAO Zhen, LI Yunlong

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Based on the numerical results, the second-order response surface models with high prediction accuracy for the wall average Nusselt number, friction coefficient and comprehensive thermal coefficient of X-type truss channel were built. The influence laws of truss rod diameter ratio, truss rod included angle and truss rod inclination angle on the cooling performance of X-type truss array channel were analyzed, and the optimal parameters were obtained by optimization. The results showed that increasing truss rod diameter ratio and truss rod's included angle both can greatly improve average Nusselt number, but also increased the friction coefficient accordingly. Enlarging truss rod's inclination angle first increased and then decreased the average Nusselt number and friction coefficient. Increasing truss rod diameter ratio, truss rod's included angle and truss rod's inclination angle made the comprehensive thermal coefficient first increase and then decrease. When truss rod diameter ratio was 0.075 0, truss rod's included angle was 60° and truss rod's inclination angle was 33.79°, the heat transfer performance of the channel reached the best. When truss rod diameter ratio was 0.067, truss rod's included angle was 37.88° and truss rod's inclination angle was 31.36°, the comprehensive thermal performance of the channel was the best.

Keywords: truss array; cooling channel; flow and heat transfer; response surface methodology; optimization design

收稿日期: 2022-03-15

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划青年项目(2022JQ-545); 中国博士后科学基金(2021M702573)

作者简介: 席雷(1990—), 男, 助理教授, 博士, 研究方向为涡轮叶片冷却技术。E-mail: xilei100@mail.xjtu.edu.cn

通信作者: 徐亮(1980—), 男, 教授, 博士, 研究方向为涡轮叶片冷却技术。E-mail: xuliang@mail.xjtu.edu.cn

引用格式: 席雷, 高建民, 徐亮, 等. 基于响应面法的 X 型桁架阵列通道冷却性能优化[J]. 航空动力学报, 2024, 39(1): 20220135. XI Lei, GAO Jianmin, XU Liang, et al. Optimization of cooling performance of X-type truss array channel based on response surface methodology[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(1): 20220135.

先进燃气轮机涡轮叶片的运行环境极其恶劣,需要集强度和传热一体的有效冷却措施来保证其安全运行^[1]。桁架结构具有轻质、高比刚度、高比强度、高吸能、减噪等多种优异性能^[2],已在诸多研究领域得到了应用。桁架结构还具有良好的导热和对流传热性能^[3],使其在涡轮叶片冷却结构中的应用成为可能。

在桁架阵列结构的机械力学性能方面,已经有很多学者进行了研究和报道,并证明了桁架阵列结构具有非常优异的机械力学性能^[4-6]。在桁架阵列通道流动及传热特性方面, Maloney 等实验研究了空心桁架阵列结构换热器的传热性能,指出该换热器在交叉流动条件下的传热性能处于中等水平,但具有较好的吸能性能^[7]。Moon 等研究了孔隙率对桁架阵列结构传热特性的影响,并得到了相应的努塞尔数经验关联式^[8]。Yang 等对比分析了 Kagome 和四面体桁架阵列夹芯板的对流传热性能,指出 Kagome 桁架阵列夹芯板的传热系数较四面体桁架阵列夹芯板提高了 8%~37%^[9]。Hou 等研究了几何各向异性的 Kagome 桁架阵列通道的热流特性,结果表明不同方向布置的 Kagome 阵列的传热系数差别较大,最大差值可达 22.5%^[10]。Chaudhari 等实验研究了八叉型桁架结构的传热与流动性能,指出八叉型桁架结构具有优异的传热性能,并能够很好地应用于散热器之中^[11]。Liang 等分析了桁架单元形状对冷却通道传热特性的影响,得到了性能较好的桁架单元结构^[12]。Xu 等研究了 Kagome 桁架阵列冷却通道的流动和传热机理,并进行了结构参数优化设计^[13-14]。高亮针对桁架阵列结构夹芯板的主动传热性能进行了优化设计,得到了最优 Pareto 解集^[15]。闫宏斌研究了某 X 型桁架结构的对流传热特性,并将其应用到了汽车刹车盘之中^[16]。张南详细探讨了微桁架阵列结构的传热机理,指出该结构的隔热性能主要由流道的强迫对流传热来实现^[17]。徐亮等研究了内冷通道填充微类桁架结构的传热性能,并通过优化设计得到了微类桁架的最佳结构参数^[18]。

上述文献表明桁架阵列结构具有优异的机械力学性能和良好的传热性能。目前尽管一些学者对桁架阵列通道的流动和传热性能进行了详细研究,但针对高温涡轮叶片内冷通道中桁架阵列结构的流动和传热性能的研究还很鲜见,有关涡轮叶片内冷通道填充桁架阵列结构的优化设计也鲜有报道。

针对上述问题,本课题组提出将新型的 X 型桁架阵列结构布置于涡轮叶片内冷通道之中,并开展了 X 型桁架阵列冷却通道的流动及传热特性研究^[19-20]。与传统涡轮叶片内部冷却结构如肋片等相比, X 型桁架阵列结构不仅具有更大的传热面积和更强的扰流作用,还能有效增强冷却通道的强度^[18]。因此,合理地设计 X 型桁架阵列结构定能够有效提高涡轮叶片的冷却效果和结构强度,并有望在未来先进燃气轮机高温涡轮叶片、燃烧室火焰筒等热端部件中得到良好的应用。

本文在文献 [20] 的研究基础上,开展 X 型桁架阵列通道冷却性能的优化研究。首先,基于数值模拟结果构建了有关 X 型桁架通道壁面平均努塞尔数 Nu_a 、摩擦因数 f 和综合热力系数 F 的高预测精度的二阶响应面模型;接着,分析了桁架杆直径比 d/D (0.0375~0.075)、桁架杆夹角 α (30°~60°) 和桁架杆倾角 β (15°~45°) 等结构参数对 X 型桁架通道流动和传热性能影响的显著性以及两两参数的综合影响规律;最后,优化得到了使 X 型桁架通道流动和传热性能最佳的结构参数。本文的新发现可以为未来先进燃机高温叶片的冷却结构设计提供借鉴。

1 数值方法

1.1 研究对象

如图 1 所示,将某燃机涡轮叶片中弦区内冷

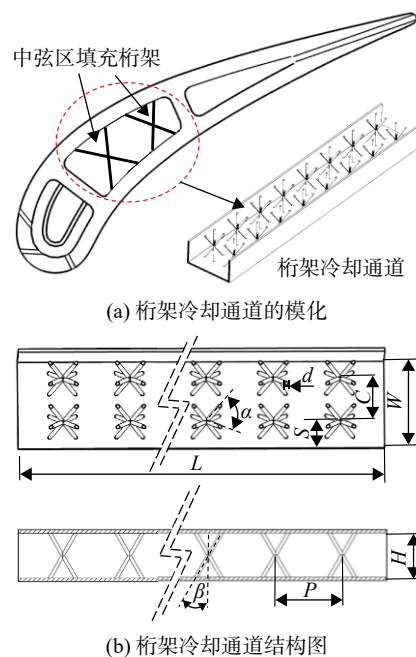


图 1 研究对象

Fig. 1 Research object

通道模化为宽高比为 2 的矩形通道, 并填充 X 型桁架阵列结构, 形成 X 型桁架阵列冷却通道。桁架及通道的材质均为 304 不锈钢。通道的长 L 、宽 W 和高 H 分别为 500、80 mm 和 40 mm, 相应的当量直径 $D=53.33$ mm, 壁厚 δ 为 3 mm。由于通道宽度的限制, 在通道宽度方向上对称布置了 2 列 X 型桁架单元, C 为列间距, 相对列间距 $C/D=0.75$ 。在通道长度方向上布置了 8 排 X 型桁架单元, P 为排间距, 相对排间距 $P/D=1.125$ 。通过当量直径 D 将桁架杆直径 d 处理为无量纲的桁架杆直径比 d/D 。研究参数的中等水平值为 $Re=30\,000$ 、 $d/D=0.056\,3$, 桁架杆夹角 $\alpha=45^\circ$, 桁架杆倾角 $\beta=30^\circ$, 参数值的选取原则见文献 [20]。各输入参数的水平值范围详见表 1。

表 1 设计变量及其水平
Table 1 Design variables and their levels

变量	水平		
	低	中	高
d/D	0.037 5	0.056 3	0.075 0
$\alpha/(^\circ)$	30	45	60
$\beta/(^\circ)$	15	30	45

1.2 计算方法

本文采用 CFX 对 X 型桁架阵列通道的流动和传热性能进行了三维稳态求解。采用的流固耦合计算模型如图 2 所示, 包括桁架阵列通道的流体域和固体域以及 1 倍桁架通道长度的进、出口整流段流体域。数值计算时, 控制方程采用基于有限元的有限体积法来离散。固体域只求导热方程。流体域不考虑重力的影响, 求解三维可压缩的雷诺时均 Navier-Stokes 方程, 其中对流项、源项和扩散项的离散格式均设置为高精度格式。当各方程的残差水平均低于 10^{-6} 时数值计算达到收敛要求并终止。

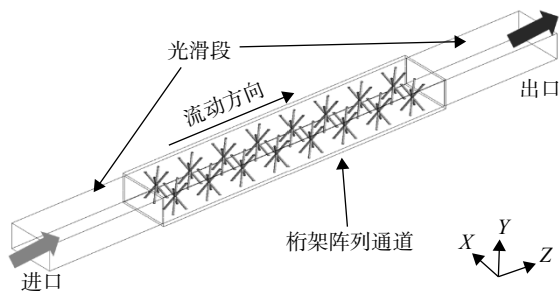
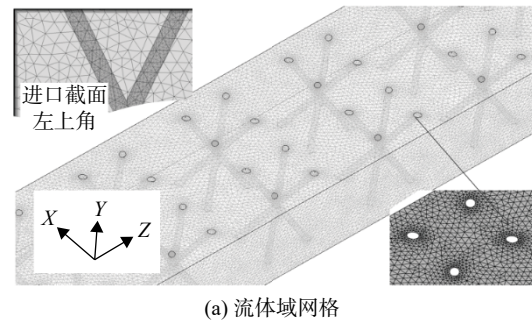


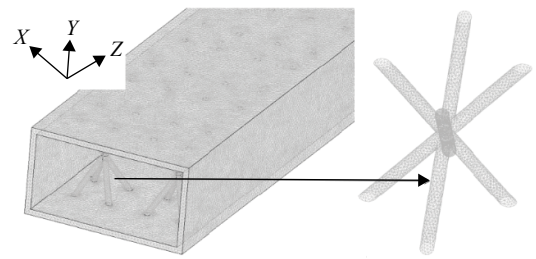
图 2 数值模型

Fig. 2 Numerical model

采用 Workbench 中的 meshing 模块进行 X 型桁架阵列通道的网格划分, 网格模型如图 3 所示。流体域网格和固体域网格采用相同的划分策略, 最小网格尺寸为 0.05 mm, 通过改变最大网格尺寸来改变总网格数。为了准确预测近壁面区域的流动和传热边界层, 在流体域近壁面区域添加了棱柱体边界层网格, 网格增长率为 1.2, 层数为 15, 第 1 层的网格尺寸为 0.001 mm, 以保证壁面 $y^+ \leq 1$ [21]。对弧面和尺寸较小面的网格进行了细化, 以提高数值模拟的准确性。



(a) 流体域网格



(b) 固体域

图 3 网格模型

Fig. 3 Grid models

边界条件与文献 [20] 一致, 具体如下: 通道进口总温为 446 K, 总压为 0.3 MPa, 湍流度为 5%。出口给定质量流量, 其值由进口 Re 计算得出。固体通道的外壁面设置为加热壁面, 给定值为 $3\,000\text{ W/m}^2$ 的均匀热流密度。固体域和流体域相对应的面设置为流固耦合交界面, 其余壁面均设置为绝热、无滑移壁面。

1.3 参数定义

雷诺数

$$Re = uD/\nu \quad (1)$$

式中 ν 为运动黏度, 单位为 m^2/s ; u 为进口速度, 单位为 m/s 。

当地努塞尔数

$$Nu = qD/[(T_w - T_f)\lambda] \quad (2)$$

式中 T_w 为当地壁面温度, 单位为 K; T_f 为当地流体温度, 单位为 K; q 为当地壁面热流密度, 单位

为 W/m^2 ; λ 为冷气热导率, 单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

平均努塞尔数

$$Nu_a = qD / [(T_a - T_f) \lambda] \quad (3)$$

式中 T_a 为壁面平均温度, 单位为 K 。

摩擦因数

$$f = \Delta p D / (2 \rho L u^2) \quad (4)$$

式中 ρ 为密度, 单位为 kg/m^3 ; Δp 为进出口压差, 单位为 Pa 。

综合热力系数

$$F = (Nu_a / Nu_0) / (f / f_0)^{1/3} \quad (5)$$

式中 $f_0 = (1.58 \ln Re - 3.28)^{-2}$; $Nu_0 = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$ 。

1.4 数值方法验证

开展了网格无关性验证工作, 结果表明 X 型桁架冷却通道的总网格数达 783 万 (最大网格尺寸为 0.6 mm) 时满足了网格无关性要求, 具体可参见文献 [20]。采用 $k-\varepsilon$ 、 $k-\omega$ 和 SST (shear stress transport) $k-\omega$ 等 3 种湍流模型对文献 [22] 中的 Kagome 型桁架阵列通道的传热性能进行了数值计算, 并与其实验结果进行了对比 (如图 4 所示)。由图 4 可知, 3 种湍流模型的计算结果与实验结果的分布规律较为一致, 其中 $k-\varepsilon$ 和 $k-\omega$ 模型的计算结果分别比实验结果偏高了 14.78% 和偏低了 10.93%, SST $k-\omega$ 模型的计算结果在雷诺数大于 10 000 时也较实验结果偏高, 但最大偏差只有 8%。因此, SST $k-\omega$ 模型更适合桁架阵列通道传热性能的预测。本文将采用 SST $k-\omega$ 模型进行后续的数值计算, 以保证数值结果的可靠性。

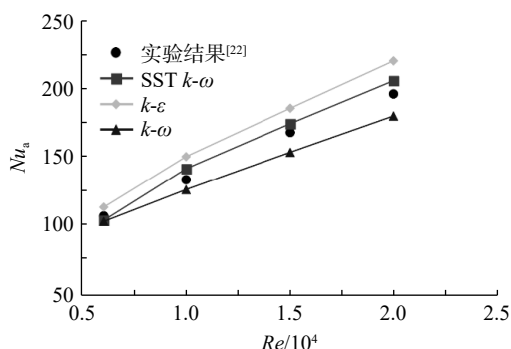


图 4 数值方法验证

Fig. 4 Numerical method verification

2 响应面模型构建

2.1 响应面方法

响应面方法是在试验设计的基础上采用多元

二次回归方程来拟合输入变量与输出变量之间函数关系的一种统计方法。响应面方法可以通过较少的试验在局部范围内比较精确地逼近函数关系, 并用简单的代数表达式展现出来, 给设计计算和优化带来极大的方便。响应面法主要包括以下内容: ①采用试验设计确定一组用于建立响应函数的数据样本; ②选择响应面逼近函数; ③基于数据样本拟合响应面函数, 并进行参数显著性检验和拟合优良性判别; ④通过响应曲面分析各输入参数对输出参数的影响规律; ⑤基于响应面模型开展优化设计。

一般来讲, 考虑了全部线性、平方和交互项的 2 阶响应面模型能够高精度地逼近大部分的输出变量。因此, 本文采用 2 阶响应面模型:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^k b_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (6)$$

式中 b_0 代表截距; b_i 、 b_{ii} 、 b_{ij} 分别为线性、平方和交互作用的回归系数; x_i 和 x_j 代表独立的输入变量; y 代表输出变量; ε 为预测偏差。

2.2 试验设计

为了在较少的试验次数下得到可靠的响应面函数, 本文采用中心复合表面 CCF (central composite face-centered) 设计方法来设计试验样本点。CCF 具有设计简单、试验次数少、预测较准确等优点, 是最常应用于 2 阶响应面模型中的一种试验设计方法^[23]。本文 CCF 试验设计在 Minitab 中完成。

表 2 给出了基于 CCF 试验设计的数值计算案例的输入参数排布和相应的输出变量值。在同一雷诺数下, 输入参数包括 d/D 、 α 和 β 。输出变量 Nu_a 、 f 和 F 由 CFX 计算得出。基于 3 个输入参数的 3 个水平值, 本文 CCF 试验设计共安排了 20 个案例点, 其中 8 个全因子设计点, 6 个零水平的中心点和 6 个轴向点, 轴向点位于全因子设计表面的中心。由于相同输入参数下数值计算结果不变, 因此表 2 中 6 个零水平中心点所对应的 6 组数据是重复的。

2.3 模型评估

通过 2 阶响应面模型获得的输出参数 (Nu_a 、 f 和 F , 用 y 代替) 与输入参数 (d/D 、 α 和 β) 之间关系的回归方程为

$$y = b_0 + b_1 (d/D) + b_2 \alpha + b_3 \beta + b_{11} (d/D)^2 + b_{22} \alpha^2 + b_{33} \beta^2 + b_{12} (d/D) \alpha + b_{13} (d/D) \beta + b_{23} \alpha \beta \quad (7)$$

表 2 CCF 试验设计

Table 2 CCF experimental design

序号	输入参数			输出参数			序号	输入参数			输出参数		
	d/D	$\alpha/(^{\circ})$	$\beta/(^{\circ})$	Nu_a	f	F		d/D	$\alpha/(^{\circ})$	$\beta/(^{\circ})$	Nu_a	f	F
1	0.037 5	45	30	100.678	0.038	0.619	11	0.075 0	30	15	114.529	0.060	0.606
2	0.056 3	45	30	120.464	0.054	0.660	12	0.075 0	60	45	134.040	0.103	0.592
3	0.037 5	30	45	94.262	0.038	0.582	13	0.075 0	60	15	129.925	0.084	0.615
4	0.056 3	45	15	111.956	0.048	0.637	14	0.075 0	45	30	138.637	0.075	0.680
5	0.056 3	45	30	120.464	0.054	0.660	15	0.056 3	30	30	114.142	0.047	0.653
6	0.056 3	60	30	124.294	0.061	0.655	16	0.056 3	45	30	120.464	0.054	0.660
7	0.075 0	30	45	129.400	0.070	0.651	17	0.037 5	60	45	97.120	0.048	0.554
8	0.056 3	45	30	120.464	0.054	0.660	18	0.056 3	45	30	120.464	0.054	0.660
9	0.056 3	45	45	114.864	0.053	0.633	19	0.037 5	30	15	98.238	0.035	0.620
10	0.037 5	60	15	103.233	0.042	0.616	20	0.056 3	45	30	120.464	0.054	0.660

式中 $b_0 \sim b_{23}$ 为待求的响应面模型的回归系数。

采用 Minitab 拟合得到的 Nu_a 、 f 和 F 与输入

变量之间的函数关系式(相应的回归系数在表 3

中列出)分别为

$$Nu_a = 49.7 + 299(d/D) + 0.483\alpha + 1.435\beta - 1\,016(d/D)^2 - 0.003\,54\alpha^2 - 0.029\,4\beta^2 + 5.41(d/D)\alpha + 12.92(d/D)\beta - 0.007\,16\alpha\beta \quad (8)$$

$$f = 0.095\,6 - 1.706(d/D) - 0.001\,61\alpha - 0.000\,278\beta + 14.54(d/D)^2 + 0.000\,011\alpha^2 - 0.000\,005\beta^2 - 0.018(d/D)\alpha + 0.009\,25(d/D)\beta + 0.000\,007\alpha\beta \quad (9)$$

$$F = 0.298\,3 + 4.54(d/D) + 0.005\,89\alpha + 0.006\,73\beta - 44.3(d/D)^2 - 0.000\,049\alpha^2 - 0.000\,134\beta^2 - 0.008\,0(d/D)\alpha + 0.0542(d/D)\beta - 0.000\,051\alpha\beta \quad (10)$$

其中式(8)~式(10)的适用范围为 $0.037\,5 \leq d/D \leq 0.075$; $30^{\circ} \leq \alpha \leq 60^{\circ}$; $15^{\circ} \leq \beta \leq 45^{\circ}$ 。

采用决定系数 R^2 来评价 2 阶响应面模型拟合程度的好坏。 R^2 越靠近于 1, 说明拟合效果越好, 即模型对输出参数的预测精度越高。 R^2 的定义如下:

$$R^2 = 1 - S_{se}/S_{st} \quad (11)$$

表 3 Nu_a 、 f 和 F 模型的回归系数Table 3 Regression coefficients for models of Nu_a , f and F

回归系数	Nu_a	f	F
b_0	49.7	0.095 6	-0.014
b_1	299	-1.706	9.68
b_2	0.483	-0.001 613	0.025 46
b_3	1.435	-0.000 278	0.005 77
b_{11}	-1 016	14.54	-83.7
b_{22}	-0.003 54	0.000 011	-0.000 25
b_{33}	-0.029 35	-0.000 005	0.000 015
b_{12}	5.41	0.018 09	-0.016 9
b_{13}	12.92	0.009 25	-0.057 7
b_{23}	-0.007 16	0.000 007	0.000 008

式中 S_{st} 为总平方和; S_{se} 为残差平方和。

本文拟合得到的有关 Nu_a 、 f 和 F 的 2 阶响应面模型的决定系数 R^2 分别为 98.38%、99.13% 和 93.99%, 表明本文构建的 2 阶响应面模型拟合精度较高。同时, 图 5 给出了 3 个 2 阶响应面模型的拟合偏差分布, 可以看出拟合得到的 2 阶响应面模型对 Nu_a 、 f 和 F 的最大拟合偏差分别为 3.92%、6.2% 和 -2.68%, 平均拟合偏差分别为 0.91%、2.19% 和 0.93%。再次表明本文拟合的 2

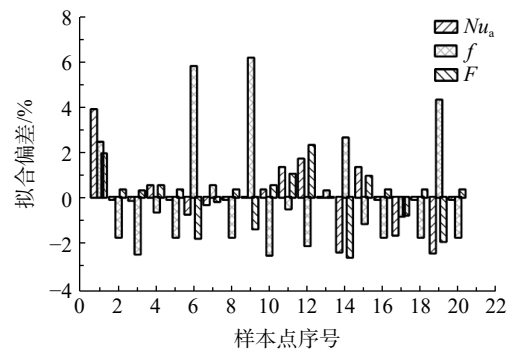


图 5 响应面模型的拟合偏差

Fig. 5 Fitting deviations of response surface models

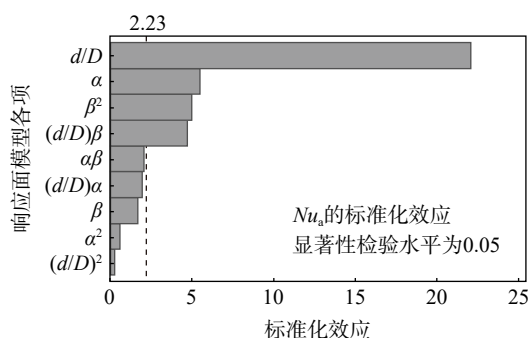
阶响应面模型是准确的,可以用于对 X 型桁架阵列通道流动及传热性能的预测和结构参数的优化设计。

3 结果分析与讨论

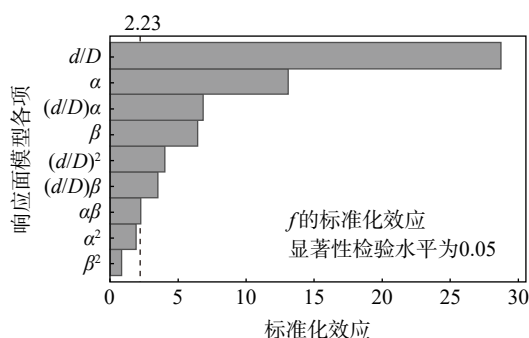
由文献 [20] 中的分析可知,雷诺数的增大降低了通道的摩擦因数,提高了通道壁面的平均努塞尔数。由于通道摩擦因数和壁面平均努塞尔数随雷诺数的增大都呈现出接近线性的变化趋势^[20],因此本文只对雷诺数为 30 000 的情况进行了深入研究。

3.1 参数显著性分析

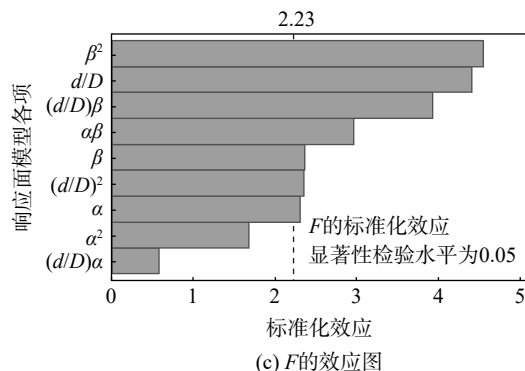
在给定显著性检验水平为 0.05 时,利用 Min-itab 对拟合得到的二次多项式回归方程进行了统计分析。为了直观地分析各项参数对响应影响的显著性,图 6 绘出了 Nu_a 、 f 和 F 的标准化 Pareto 效应图。从图 6(a)中可以看出,响应面模型各项中对 Nu_a 影响的显著性水平由高到低依次为 d/D 、 α 、 β^2 、 $(d/D)\beta$ 、 $\alpha\beta$ 、 $(d/D)\alpha$ 、 β 、 α^2 和 $(d/D)^2$,其中 d/D 对 Nu_a 的影响最显著。从图 6(b)中可以看出,响应面模型各项中对 f 影响的显著性水平由高到低依次为 d/D 、 α 、 $(d/D)\alpha$ 、 β 、 $(d/D)^2$ 、 $(d/D)\beta$ 、 $\alpha\beta$ 、 α^2 和 β^2 ,表明 d/D 对 X 型桁架阵列通道流动性能的影响也最为显著,同时再次说明 X 型桁架阵列结构对传热的强化作用会带来更大的压力损失。



(a) Nu_a 的效应图



(b) f 的效应图



(c) F 的效应图

图 6 标准化效应的 Pareto 图($Re=30\ 000$)

Fig. 6 Pareto diagrams of standardization effects

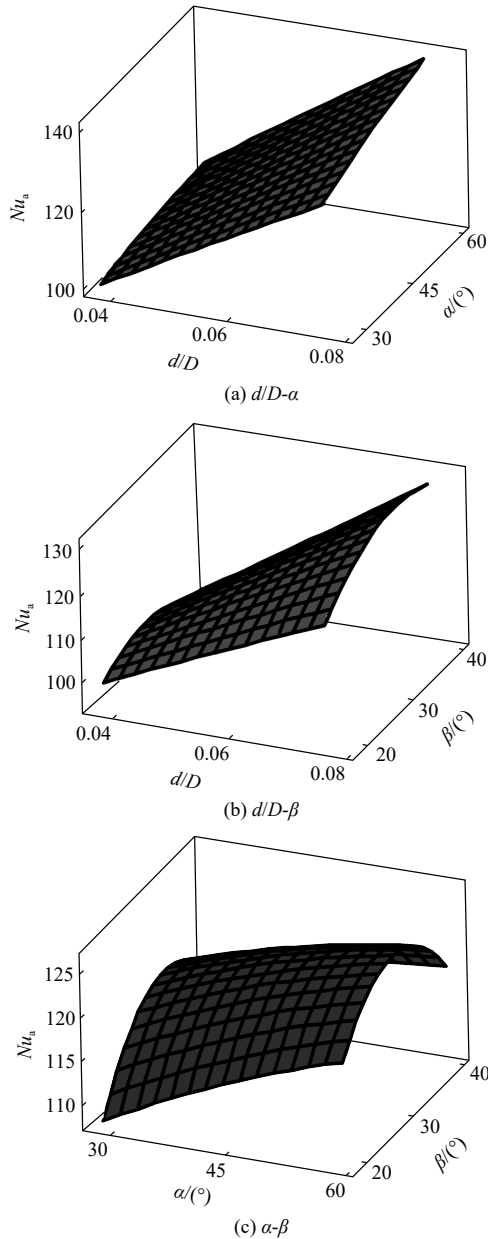
($Re=30\ 000$)

从图 6(c)可知,响应面模型各项中对 F 影响的显著性水平由高到低依次为 β^2 、 d/D 、 $(d/D)\beta$ 、 $\alpha\beta$ 、 β 、 $(d/D)^2$ 、 α 、 α^2 和 $(d/D)\alpha$,这表明 β 对 X 型桁架阵列通道综合热力性能的影响最为显著。

3.2 响应面分析

图 7~图 9 依次给出了 Nu_a 、 f 和 F 的三维响应面图,以同时分析两个输入参数对 X 型桁架阵列通道流动、传热以及综合热力性能的影响。各图(a)~图(c)所示依次为 d/D - α 、 d/D - β 和 α - β 对响应 Nu_a 、 f 和 F 的影响。在研究其中两个输入参数对输出参数的影响时,其他输入参数的值保持为各自的中等水平值。

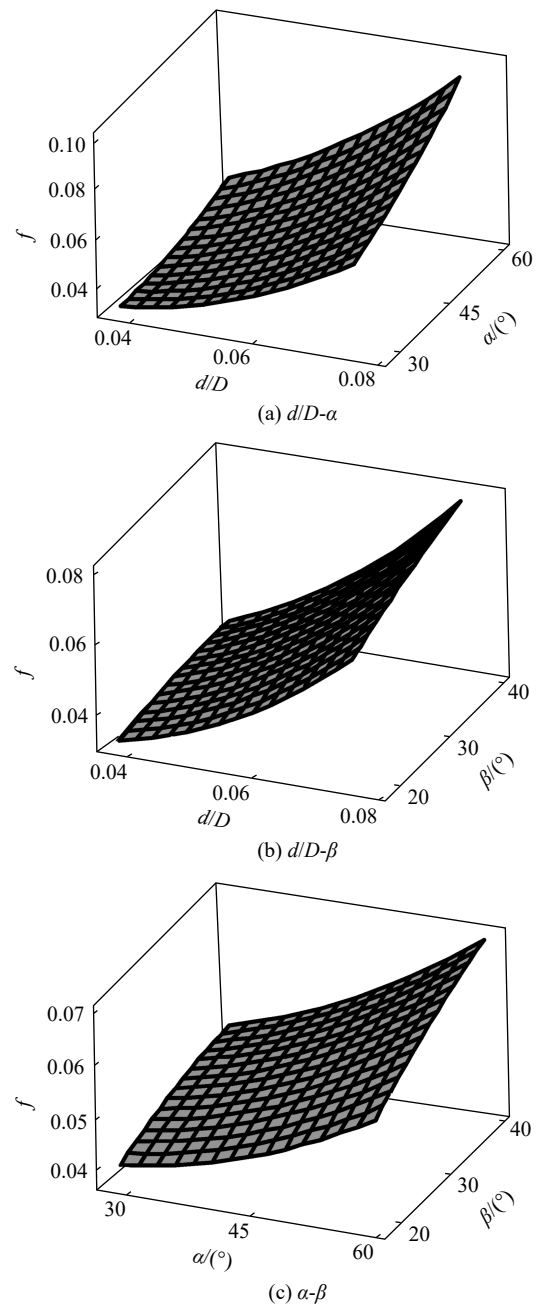
从图 7(a)可以看出,保持 $\beta=30^\circ$ 时,增大 d/D 和 α 均可以快速地提高 Nu_a ,这是因为增大 d/D 使得桁架杆端面增大,而增大 α 使得桁架杆变长,这都会增强桁架单元的扰流作用,从而增强了通道壁面的传热性能(具体的传热分布特性可见文献 [20])。此外,在 $\beta=30^\circ$ 时, Nu_a 的最大值出现在 d/D 为 0.075 0 和 α 为 60° 时, Nu_a 的最小值出现在 d/D 为 0.037 5 和 α 为 30° 时。从图 7(b)可以看出,保持 $\alpha=45^\circ$ 时,在不同的 β 下,增大 d/D 可以明显地提高 Nu_a ,而在不同的 d/D 下, β 的增大都使 Nu_a 先提高后又降低。这是因为当 β 较小时, β 的增大使得桁架杆变长,从而增大了桁架单元的扰流作用,当 β 继续增大时,桁架杆的倾斜方向更加接近主流流动方向,这又会降低桁架单元的扰流作用,从而导致了通道壁面传热系数随 β 呈现出先增大后减小的变化趋势; d/D 为 0.075 0 和 β 约为 30° 时, Nu_a 达到其最大值, d/D 为 0.037 5 和 β 为 15° 时, Nu_a 达到其最小值。从图 7(c)可以看出,保持 $d/D=0.065\ 3$ 时,在不同的 β 下,增大 α 均可

图7 Nu_a 的响应图($Re=30\,000$)Fig. 7 Response diagrams of Nu_a ($Re=30\,000$)

以有效地提高 Nu_a , 而在不同的 α 下, 增大 β 先提高后又降低了 Nu_a ; α 为 60° 和 β 约为 30° 时, Nu_a 达到其最大值, α 为 30° 和 β 为 15° 时, Nu_a 达到其最小值。

从图8(a)可以看出, 保持 $\beta=30^\circ$ 时, 在不同的 α 下, f 均随着 d/D 的增加而增大, 且随着 α 的增大, f 随着 d/D 变化的增幅有所提高; 同样地, 在不同的 d/D 下, f 随着 α 的增大而增大, 且 d/D 较大时, f 随着 α 变化的增速更快。在 $\beta=30^\circ$ 时, f 的最小值出现在 d/D 为 0.037 5 和 α 为 30° 时。从图8(b)可以看出, 保持 $\alpha=45^\circ$ 时, 不同的 β 下, 增大 d/D 都会明显地增大 f ; 而在不同的 d/D 下, 增大 β 都

会使 f 先增大后又略微减小。在 $\alpha=45^\circ$ 时, f 的最小值出现在 d/D 为 0.037 5 和 β 为 15° 时。从图8(c)可以看出, 保持 $d/D=0.065\,3$ 时, 在不同的 β 下, f 均随着 α 的增加而增大, 且增速逐渐变快; 当 α 较小时, f 随着 β 的增加呈现出先增大后又略微减小的变化趋势, 当 α 较大时, f 随着 β 的增加呈现出逐渐升高的变化趋势。因此, 在 $d/D=0.065\,3$ 时, f 的最小值出现在 α 为 30° 和 β 为 15° 时。上述 f 随 d/D 、 α 和 β 所表现的变化规律的原因与 Nu_a 随 d/D 、 α 和 β 变化的原因相同, 具体可见对图7分析的内容。

图8 f 的响应面图($Re=30\,000$)Fig. 8 Response diagrams of f ($Re=30\,000$)

从图 9 可以看出,保持值 $d/D=0.0563$ 或 $\alpha=45^\circ$ 或 $\beta=30^\circ$ 时,同时增大 d/D 、 α 和 β 中的两个参数,都可以使得 F 先增大后减小。这是因为 f 随 d/D 和 α 的增大速率大于 Nu_a 随 d/D 和 α 的增大速率,导致 F 随 d/D 和 α 的增大而先升高后降低;同时 Nu_a 随 β 先增大后减小,而 f 随 β 大致呈现增大的趋势,这使得 F 随 β 的增大也表现出先升高后降低的变化规律。以上结果表明当 d/D 、 α 和 β 的值都接近中等水平时 F 可以达到最大值。

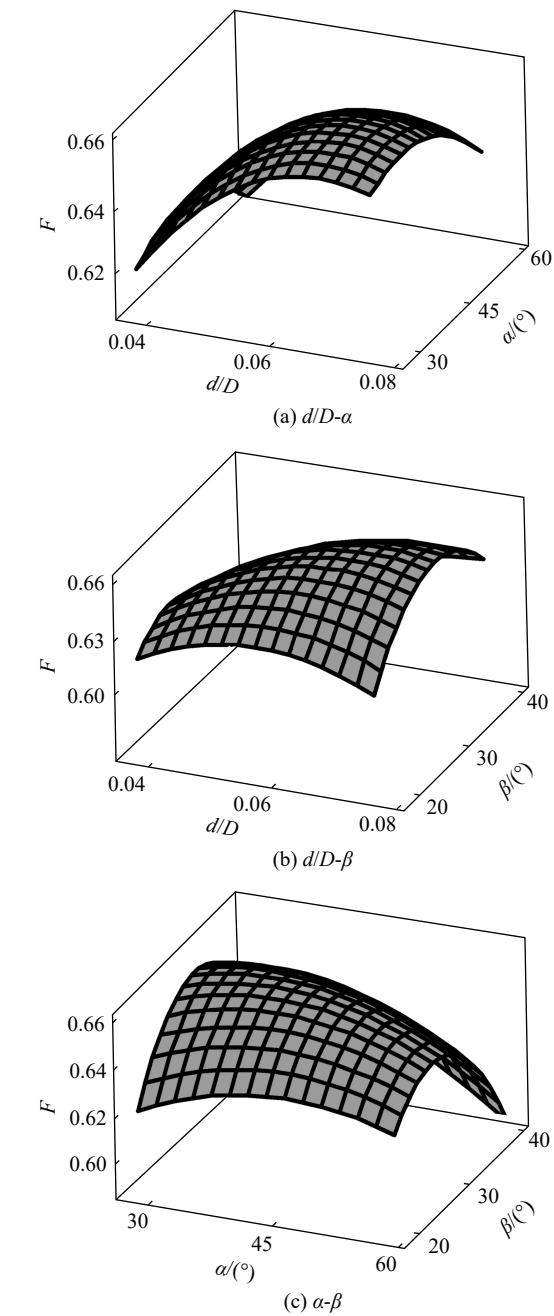


图 9 F 的响应面($Re=30\ 000$)
Fig. 9 Response diagrams of F ($Re=30\ 000$)

3.3 结构参数优化

采用 Minitab 中的响应优化器对 X 型桁架阵列通道进行了结构参数的优化设计。图 10 给出了 $Re=30\ 000$ 时相应的优化图,其中图 10(a)、图 10(b)和图 10(c)分别表示 Nu_a 最大化、 f 最小化以及 F 最大化的单目标优化。由图 10(a)可知, d/D 为 0.075 0(高水平), α 为 60° (高水平), β 为 33.79° (中水平)时,通道 Nu_a 的预测值达到了最大,即 140.15。由图 10(b)可知, d/D 为 0.037 5(低水平), α 为 38.79° (中水平), β 为 15° (低水平)时, f 的预测值达到了最小,即 0.036。由图 10(c)可知, d/D 为 0.067(中水平), α 为 37.88° (中偏低水平), β 为 31.36° (中水平)时, F 的预测值达到了最大,即 0.667 9。

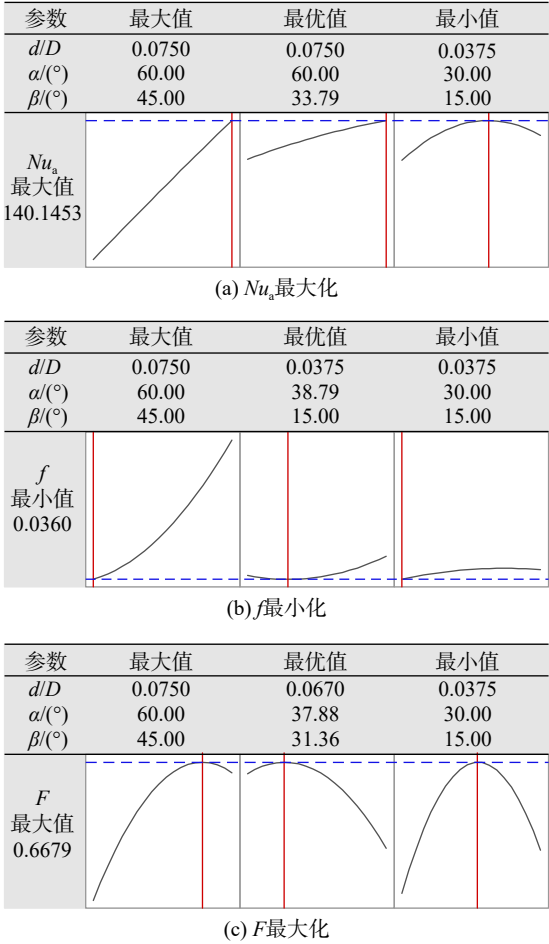


图 10 优化结果($Re=30\ 000$)
Fig. 10 Optimization results ($Re=30\ 000$)

4 结 论

本文基于响应面方法开展了 X 型桁架阵列通道的冷却性能优化研究,主要发现如下:

- 1) 拟合得到了预测精度较高的 2 阶响应面

模型, 其对 Nu_a 、 f 和 F 的最大拟合偏差分别为 3.92%、6.2% 和 -2.68%, 可以用于对 X 型桁架阵列通道流动及传热性能的预测和结构参数的优化。

2) 同一雷诺数下, d/D 对 X 型桁架阵列通道传热性能和流动性能的影响均最为显著, β 对 X 型桁架阵列通道综合热力性能的影响最为显著。

3) 增大 d/D 和 α 均可以快速地提高 Nu_a , 但也相应地增大了 f ; 增大 β 先提高后又降低了 Nu_a 和 f ; 增大 d/D 、 α 和 β 均会使 F 先增大后减小。

4) $d/D=0.0750$ 、 $\alpha=60^\circ$ 和 $\beta=33.79^\circ$ 时, 通道的传热性能达到了最优; $d/D=0.0375$ 、 $\alpha=38.79^\circ$ 和 $\beta=15^\circ$ 时, 通道的流动阻力达到了最小; $d/D=0.067$ 、 $\alpha=37.88^\circ$ 和 $\beta=31.36^\circ$ 时, 通道的综合热力性能最优。

参考文献:

- [1] 席雷, 高建民, 徐亮, 等. 涡轮叶片前缘阵列冲击冷却流动及传热特性数值研究[J]. 工程热物学报, 2021, 42(2): 430-437.
XI Lei, GAO Jianmin, XU Liang, et al. Numerical study on flow and heat transfer characteristics of jet array impingement cooling in turbine blade leading edge[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(2): 430-437. (in Chinese)
- [2] 李拓. 点阵多孔金属夹芯板振动特性分析及优化分析[D]. 西安: 西安交通大学, 2008.
LI Tuo. Research on vibration characteristics and optimization of truss-cored metal sandwich plate[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [3] 吴林志, 殷莎, 马力. 复合材料点阵夹芯结构的耦合换热及热应力分析[J]. 功能材料, 2010, 41(6): 969-972.
WU Linzhi, YIN Sha, MA Li. Coupled heat transfer and thermal stress analysis of composite lattice core sandwich structure[J]. Journal of Functional Materials, 2010, 41(6): 969-972. (in Chinese)
- [4] SCHAEGLER T A, JACOBSEN A J, TORRENTS A, et al. Ultra-light metallic microlattices[J]. Science, 2011, 334(6058): 962-965.
- [5] ZHANG Qian, JIANG Wenchun, ZHAO Bing, et al. A study of the effective elastic modulus of a lattice truss panel structure by experimental and theoretical analysis[J]. Composite Structures, 2017, 165: 130-137.
- [6] 易长炎. 基于SLM的应力匹配变密度轻质金属点阵结构设计及力学性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
YI Changyan. Design of stress-matched variable density light metal lattice structure based on SLM and study on its mechanical properties[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese)
- [7] MALONEY K J, FINK K D, SCHAEGLER T A, et al. Multifunctional heat exchangers derived from three-dimensional micro-lattice structures[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(9/10): 2486-2493.
- [8] MOON C, KIM D, ABADI G B, et al. Effect of ligament hollowness on heat transfer characteristics of open-cell metal foam[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 102: 911-918.
- [9] YANG Guangmeng, HOU Chi, ZHAO Meiyang, et al. Comparison of convective heat transfer for Kagome and tetrahedral truss-cored lattice sandwich panels[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 3731.
- [10] HOU Chi, YANG Guangmeng, WAN Xiaopeng, et al. Study of thermo-fluidic characteristics for geometric-anisotropy Kagome truss-cored lattice[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(7): 1635-1645.
- [11] CHAUDHARI A, EKADE P, KRISHNAN S. Experimental investigation of heat transfer and fluid flow in octet-truss lattice geometry[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 143: 64-75.
- [12] LIANG Dong, CHEN Wei, JU Yinchao, et al. Comparing endwall heat transfer among staggered pin fin, Kagome and body centered cubic arrays[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 185: 116306.1-116306.12.
- [13] XU Liang, CHEN Hanghang, XI Lei, et al. Flow and heat transfer characteristics of a staggered array of Kagome lattice structures in rectangular channels[J]. Heat and Mass Transfer, 2022, 58(1): 41-64.
- [14] XU L, RUAN Q, SHEN Q, et al. Optimization design of lattice structures in internal cooling channel with variable aspect ratio of gas turbine blade[J]. Energies, 2021, 14(13): 3954.1-3954.27.
- [15] 高亮. 多功能复合点阵夹芯结构主动换热及优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
GAO Liang. Active heat transfer and optimization design for multi-functional composite sandwich structure with lattice truss cores[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [16] 闫宏斌. 基于X型金属点阵的通风制动盘对流换热强化研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2015.
YAN Hongbin. Convective heat transfer enhancement by X-type metallic lattice in ventilated brake disc[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [17] 张南. 增材制造含流道微桁架夹层壁板热—力性能分析[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2016.
ZHANG Nan. Thermo-mechanical performance of micro-truss sandwiched panel with flow channels made by 3D printing[D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [18] 徐亮, 湛清云, 席雷, 等. 微类桁架点阵结构填充内冷通道的多目标优化设计[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(3): 1-11.
XU Liang, CHEN Qingyun, XI Lei, et al. Multi-objective optimization design of micro-class truss lattice structure for filling internal cooling channel[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(3): 1-11. (in Chinese)
- [19] XI Lei, XU Liang, GAO Jianmin, et al. Study on flow and heat transfer performance of X-type truss array cooling channel[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 26: 101034.1-101034.16.
- [20] 席雷, 徐亮, 高建民, 等. X型桁架阵列通道流动及传热性能的数值研究[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(8): 101-110.
XI Lei, XU Liang, GAO Jianmin, et al. Numerical research on flow and heat transfer performance of X-type truss array channels[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(8): 101-110. (in Chinese)
- [21] LI Weihong, REN Jing, JIANG Hongde, et al. Assessment of six turbulence models for modeling and predicting narrow passage flows: Part 2 pin fin arrays[J]. Numerical Heat Transfer: Part A Applications, 2016, 69(5): 445-463.
- [22] HOFFMANN F, HODSON H, LU T J. Heat transfer performance and pressure drop of Kagome core metal truss panels[D]. Cambridge, UK: University of Cambridge, 2002.
- [23] WYANTUTI S, SETYORINI Z, ISHMAYANA S, et al. Optimization of voltammetric determination of dysprosium (III) using plackett-burman and RSM-CCD experimental designs[J]. Baghdad Science Journal, 2020, 17(4): 1198-1206.

(编辑: 王碧珺)