文章编号:1674-2869(2025)01-0085-08

基于响应面法和灰色关联法的新型螺纹管传热性能优化研究

林 纬[1,2],詹宏阳[1,2],汪 威[1,2],朱家豪[1,2],张 鼎[1,2],龚 程*[1,2],郑小涛[1,2],徐建民[1,2],喻九阳[1,2]
1. 武汉工程大学机电工程学院,湖北 武汉 430205;
2. 化工装备强化与本质安全湖北省重点实验室,湖北 武汉 430205

摘 要:采用响应面法中的Box-Behnken法对新型螺纹管传热性能的优化进行实验设计,以努塞特数(*Nu*)和摩擦因数(*f*)为评价指标,研究螺距(*P*)、肋高(*H*)、螺纹段与光管段的长度比(*L*)对传热性能的影响,同时通过分析响应面图研究各参数对*Nu*和*f*的交互影响。计算各实验组数的灰色关联等级,使用灰色关联法对新型螺纹管进行多目标优化,并通过分析不同换热管的湍流动能(TKE)分布,得到新型螺纹管增强传热性能的机理。研究表明:通过响应面分析可知*L*是影响*Nu*与*f*最显著的参数;通过灰色关联法分析得到的最优结构参数*P*= 5.5 mm、*H*=1.00 mm、*L*=2,这种结构参数下的新型螺纹管*Nu*值为100.741,*f*值为0.024 641;通过对比不同换热管的TKE分布发现,新型螺纹管的独特设计即两个旋转方向相反的相邻螺纹段会导致管内的流体流动方向频繁变化,从而加剧径向扰动,更频繁地产生二次流,导致TKE增加,增强其传热性能。通过优化研究,确定了新型螺纹管最优的结构参数,并深入揭示其传热性能增强的机制,为进一步优化和设计新型螺纹管提供了指导和依据。

关键词:螺纹管;灰色关联法;响应面法;强化传热
中图分类号:TK124 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202401022

Optimization of heat transfer performance of a novel threaded tube based on response surface methodology and grey relational analysis

LIN Wei[1,2], *ZHAN Hongyang*[1,2], *WANG Wei*[1,2], *ZHU Jiahao*[1,2], *ZHANG Ding*[1,2], *GONG Cheng*[*1,2], *ZHENG Xiaotao*[1,2], *XU Jianmin*[1,2], *YU Jiuyang*[1,2]
1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;
2. Hubei Provincial Key Laboratory of Chemical Equipment Intensification and Intrinsic Safety, Wuhan 430205, China

Abstract: To optimize the heat transfer performance of a novel threaded tube, an experimental design was developed utilizing the Box-Behnken method within the framework of response surface methodology. The investigation focused on assessing the impacts of pitch (*P*), rib height (*H*), and the length ratio of the threaded section to the smooth section(*L*) on heat transfer using Nusselt number (*Nu*) and friction factor (*f*) as performance criteria. Through response surface analysis, the interplay between these parameters and *Nu* and *f* was examined. Furthermore, grey relational analysis was conducted to evaluate the experimental groups, and multi-objective optimization was performed using the grey relational method to enhance the heat transfer efficiency of the novel threaded tube. The findings from response surface analysis highlighted *L* as the

收稿日期:2024-01-26
基金项目:国家自然科学基金(52205167);武汉工程大学科学研究基金(K2021020)
作者简介:林 纬,博士,副教授。Email:linwei@wit.edu.cn
***通信作者**:龚 程,博士,讲师。 Email:21080301@wit.edu.cn
引文格式:林纬,詹宏阳,汪威,等.基于响应面法和灰色关联法的新型螺纹管传热性能优化研究[J].武汉工程大学学报,2025,47(1):85-92.

most significant parameter affecting *Nu* and *f*. By employing the grey relational method with optimized structural parameters (P = 5.5 mm, H = 1.00 mm, L = 2), the *Nu* value of the novel threaded tube was determined to be 100.741, accompanied by an *f* value of 0.024 641. An analysis of turbulent kinetic energy (TKE) distributions across three distinct types of heat-exchange tubes revealed that the unique design of the novel threaded tube, featuring adjacent threaded section with opposing rotation directions, induced frequent alterations in fluid flow direction within the tube. This resulted in heightened radial disturbances, increased secondary flows, elevated TKE levels, and ultimately improved heat transfer performance. By identifying the optimal structural parameters for the novel threaded tube, a comprehensive understanding of the mechanisms driving its enhanced heat transfer performance was achieved. These insights serve as a basis for future optimization and design refinements of novel threaded tubes, offering valuable guidance for further research endeavors in this field.

Keywords: threaded tubes; grey relational analysis; response surface methodology; heat transfer enhancement

换热器是化工行业的关键设备,提高换热器的传热性能目前是化工领域的热门研究课题。目前,提高换热器传热性能的方法通常分为两类:主动方法和被动方法[1]。主动方法是应用技术来提高其传热性能,需要外部能源的干预[2-3],而被动方法则是通过优化结构和改变换热管材质,不需要外部能源,因此通常认为被动方法更加实用。使用异型换热管替换光管[4-5]就是被动方法中的一种。

徐建民等[6]采用污垢热阻动态试验法研究了波纹管和光管的传热性能,结果表明在清洁状态下波纹管对光管的强化传热比约1:3,在污垢状态下波纹管对光管的强化传热比约1:7。Wang等[7]以乙二醇水溶液为流体,对内螺纹管进行研究,其传热效率是相同参数下光管的1.5~2.0倍,可以看出内螺纹管的传热性能优于光管。张娟等[8]在湍流状态下对凸胞换热管进行数值模拟,研究了肋高、半径及螺距对其换热性能的影响,结果表明,影响最大的参数是肋高。刘爽等[9]分析了三维内肋管的肋宽、肋高、肋间距对其传热性能的影响,发现肋高对传热性能影响最显著,同时内肋管的传热性能可达光管的3.15倍。靳遵龙等[10]使用计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)数值模拟技术研究了螺旋内肋管的螺距、螺旋角和肋高对传热性能的影响。Han等[11]利用CFD技术针对无量纲波纹高度、无量纲波纹间距、无量纲波纹半径和雷诺数对波纹管传热性能的影响展开了深入研究,并使用响应面法建立了研究目标与变量之间的相关性,确定了波纹管的最佳结构。Xie等[12]采用响应面法研究了翅片管换热器,以翅片管换热器的长度(L)、弧角(α)、攻角(β)为变量,以努塞特数(Nu)和摩擦因数(f)作为评价指标,找到了最佳结构。以上研究均使用了响应面法进行优化研究,虽然响应面法在优化研究中具有高效性,并且能绘制出响应面图和等高线图直观地展示结果,但其只能考虑一个评价指标,不能同时研究传热性能和流动阻力。

本文采用数值模拟的方法,研究了螺距、肋高和螺纹段与光管段的长度比对换热管传热性能的影响,使用灰色关联法进行多目标优化,得到同时具有较高*Nu*值和较低*f*值的新型螺纹管结构,最后分析新型螺纹管结构能够强化传热性能的机理,为未来新型螺纹管的优化研究提供参考。

1 数学与物理模型

1.1 模型介绍

新型螺纹管模型如图1所示。计算区域包含7节光管段以及6节螺纹段,光管段与顺、逆时针的螺纹段交替连接,每节光管段与螺纹段长度均为115 mm,D为换热管内径,P为螺纹段螺距,H为螺纹段肋高,新型螺纹管的计算区域总长为1 495 mm。模型共分为3个区域:输入区域、计算区域和输出区域。输入区域是为了获得完全发展的流动条件,其长度设置为250 mm,相当于水力直径的10倍。此外,为了减轻回流现象,即防止流体在出口处产生逆向流动,将输出区域的长度设计为150 mm。研究参数为P(5~6 mm)、H(0.75~1.25 mm)、螺纹段与光管段的长度比L(1~3)。

1.2 计算设置与网格划分

使用Fluent 2021R2软件进行数值模拟。研究介质为水,假设其为不可压缩且物性不变的稳态流体。由于可实现k-ε模型被证明在以旋转和分离为特征的流动现象方面具有较好的稳定性,因此本文选用该湍流模型。在数值模拟过程中假设管壁温度恒定为310 K且忽略壁厚,不考虑热辐射效应的同时将壁面设定为无滑移壁面条件。入口

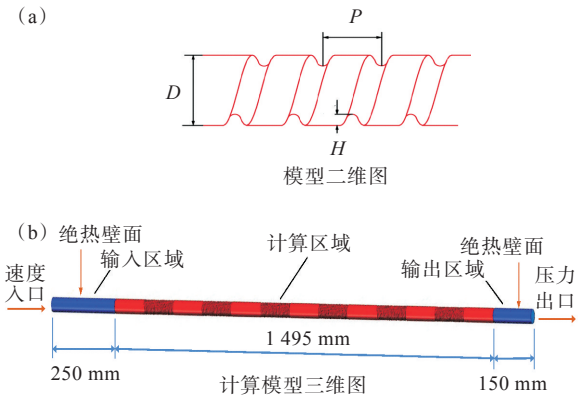


图1　新型螺纹管模型图

Fig. 1　Model diagram of the spirally corrugated tube

设置为速度入口，入口流体温度为290 K，雷诺数（*Re*）为10 000，出口设置为压力出口。求解过程中压力速度耦合采用SIMPLEC算法，梯度求解选用Least Squares Cell Based格式，压力项选取Second order格式，其他项均选择二阶迎风格式。残差监控设置为：能量方程10^{-6}，其他项均为10^{-3}。

使用Meshing软件对模型进行网格划分，考虑到新型螺纹管具有结构复杂的螺纹段，因此网格类型采用非结构化网格。同时考虑到换热管内流体在近壁面区边界层内流动和传热的复杂性，对其内部近壁面进行细化处理并添加边界层，局部网格划分如图2所示。

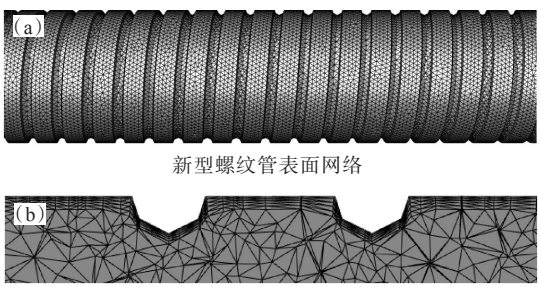


图2　局部网格划分

Fig. 2　Diagram of local grid division

图3为网格无关性验证图，测试的网格数分别为52.049万个、116.523万个、151.441万个、213.761万个、254.123万个和286.842万个，从图3中可以看出网格数为254.123万个和286.842万个时，*Nu*和*f*值已稳定，因此以网格数为254.123万个时的*Nu*和*f*作为参考值进行对比，结果如表1所示。由表1可知测试网格数为213.7 61万个时的*Nu*和*f*偏差与参考值相比均较小，符合网格无关性要求。为了同时保证计算速度及精度，采用网格数为213.761万个的模型进行计算。

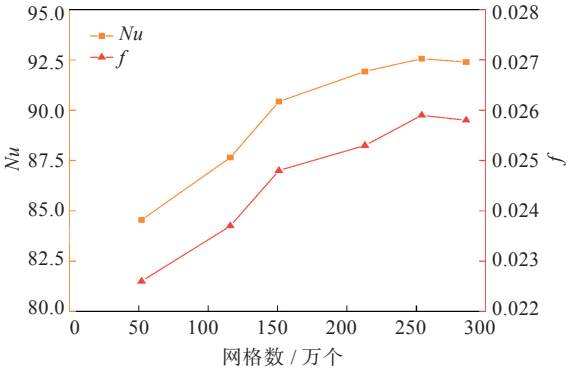


图3　网格无关性验证

Fig. 3　Grid independence verification

表1　不同网格数下换热管的*Nu*和*f*值

Tab. 1　*Nu* and *f* values of heat exchange tubes with different numbers of grids

网格数 / 万个	*Nu*	*Nu*值偏差 / %	*f*	*f*值偏差 / %
254.123	92.56	—	0.025 9	—
213.761	91.93	0.68	0.025 3	2.32
151.441	90.43	2.30	0.024 8	4.25
116.523	87.65	5.30	0.023 7	8.49
52.049	84.55	8.65	0.022 6	12.74

1.3　计算模型验证

为检验边界条件设置与求解设置的正确性与可靠性，采用同等规格、同样边界条件与求解设置的光滑圆管进行数值模拟，圆管的长度为1 495 mm，内径为25 mm。数值模拟的*Re*选取10 000、15 000、20 000、25 000、30 000，对光滑圆管的*Nu*值进行计算。计算公式如下：

$$T_a = (T_{in} + T_{out})/2 = T_{in} + \Delta T/2 \tag{1}$$

$$Q = q_m c_p \Delta T \tag{2}$$

$$h = Q/[A(T_w - T_a)] \tag{3}$$

$$Nu = hD/\lambda \tag{4}$$

$$f = \frac{\Delta p d}{2L\rho u^2} \tag{5}$$

式中：q_m为流体的质量流量，kg/s；ρ为流体的密度，kg/m³；u为进口流速，m/s；d为管内径，mm；T_a为管内流体的平均温度，K；T_{in}为流体的进口温度，恒定为290 K；T_{out}为流体的出口温度，K；ΔT为进口、出口流体温度差，K；Q为换热量，W；c_p为流体的比定压热容，J/(kg·K)；h为换热系数，W/(m²·K)；A为管的表面积，m²；T_w为管壁温，K；λ为热导率，W/(m²·K)；L为管的总长度，m；Δp为压力损失，Pa。

公式（1–5）所需数据均可从模拟计算中得到，最终得出*Nu*值，同时光滑圆管的*Nu*值可以通过经验公式算出，将两者进行比较即可验证模拟计

算的准确性，结果如表2所示。

其中光滑圆管的Nu经验值采用Dittus-Boelter公式获得：

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{n} \quad (6)$$

式(6)中：Re是雷诺数，表示惯性力与黏性力的比值；Pr是普朗特数，表示流体的动量传递和热量传递之间的比率；n是根据流体和流动条件而定的经验常数，当管内流体被加热时，n取值0.4，管内流体被冷却时，n取值0.3，本文中n取值0.4。

表2 光滑圆管Nu值对比表

Tab. 2 Comparison of Nu values of smooth circular tubes

Re	Nu模拟值	Nu计算值	偏差/%
10 000	79.779	79.390	0.48
15 000	107.272	109.809	2.36
20 000	135.517	138.226	1.99
25 000	163.668	165.241	0.96
30 000	191.004	191.789	0.41

由表2可以看出，在5种不同的Re下计算得到的Nu值与通过Dittus-Boelter公式计算得到的值偏差均在5%以内，由此可知边界条件和求解设置的可靠性较高，得到的模拟结果值得信赖。

2 结构优化及分析

2.1 响应面法优化分析

本文选择了3个研究参数，每个参数选择了3个水平值，即低水平、中间水平和高水平，结构参数及取值见表3。

表3 优化参数取值

Tab. 3 Optimization parameter value

水平值	P/mm	H/mm	L
低水平	5.0	0.75	1
中间水平	5.5	1.00	2
高水平	6.0	1.25	3

采用响应面法中使用最广泛的Box-Behnken法对优化方案进行实验设计，最终得到17组实验，通过模拟计算得到17组实验的Nu值与f值，见表4。

图4为各参数分别对Nu和f影响的响应面图。通过响应面图可以清晰直观地看出各参数对Nu和f的影响。

由图4(a,b)可以看出，在L与P两个参数的影响中，L明显占主要作用。当L增大时，Nu与f均随之增大且变化明显。这是因为当L增大时，新型螺纹管的螺纹段长度会增加，螺纹段相较于光管段具有更大的换热面积，且螺纹会对管内流体产生扰动，形成二次流，加剧径向扰动，导致Nu增强。然而管壁与流体的接触面积增大会增加流体与管壁的摩擦力，同时管壁附近流体的紊乱程度增强，导致管内流体的阻力增加从而使新型螺纹管的f增大。

表4 优化设计及结果

Tab. 4 Optimization design and results

组号	参数			结果	
	P/mm	H/mm	L	Nu	f
1	6.0	0.75	2	99.776	0.024 266
2	5.0	1.00	1	89.943	0.025 433
3	6.0	1.00	1	89.065	0.025 471
4	5.5	1.25	3	104.145	0.030 752
5	5.0	0.75	2	94.357	0.022 304
6	5.5	1.00	2	100.741	0.024 641
7	5.5	0.75	1	87.185	0.019 234
8	6.0	1.00	3	105.483	0.032 727
9	5.5	1.00	2	100.741	0.024 641
10	5.5	1.00	2	100.741	0.024 641
11	5.5	1.00	2	100.741	0.024 641
12	6.0	1.25	2	107.895	0.028 979
13	5.5	1.00	2	100.741	0.024 641
14	5.0	1.00	3	99.791	0.032 517
15	5.5	1.25	1	90.051	0.025 446
16	5.0	1.25	2	98.675	0.028 053
17	5.5	0.75	3	98.512	0.029 398

由图4(c,d)可以看出，当P增大时，Nu虽然不断增大但变化并不显著，f则呈现先减小后增大的趋势。当P增大时，螺纹段的螺纹数虽然会减少，但流体在管内的流动会变平缓，导致Nu略微增大，当P较小时，较多的螺纹会阻碍流体的流动，导致f值较大，随着P增大，螺纹的阻碍变小导致f减小，然而，当P超过一定阈值，f又开始增大。这是由于P的增加导致管内流体的流动变得复杂，进而影响了f。

从图4(e,f)可以看出，随着H增加，Nu与f均随之增加，H的增大导致换热管与流体的接触面积增大，其次，随着H的增大，壁面形状的作用愈加强烈，流体发生旋转，并在壁面产生显著的二次流，从而增强径向扰动。在此过程中，边界层的厚度直接减小，从而产生涡旋，促进主流与壁面附近流体之间的能量和动量交换，导致Nu增加[13]。同理随着H增大，对流体的阻力也会变大导致f增大。

通过响应面法的分析，能够明显发现L对于Nu和f的影响都是最显著的，但为了同时针对Nu

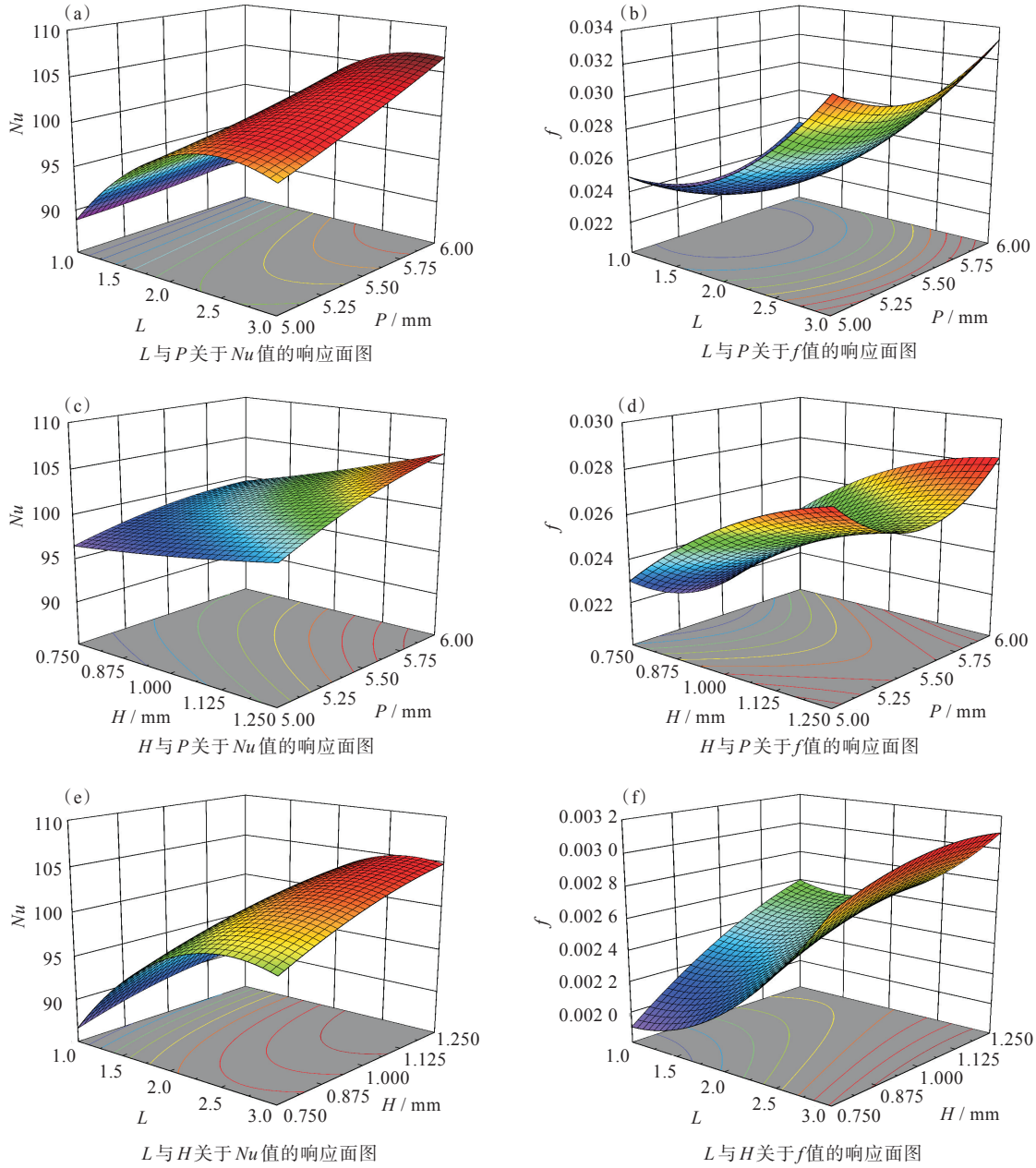


图4　各参数的响应面图

Fig. 4　Response surface plots for each parameter

和f两个评价指标对新型螺纹管进行优化，继续使用灰色关联法进行优化分析。

2.2　灰色关联法优化分析

由于针对新型螺纹管的优化使用Nu和f两个评价指标，使用响应面法分析难以同时兼顾两者，因此采用灰色关联法同时对两个评价指标进行优化，找到同时具有较高Nu和较低f的最佳结构。

灰色关联法主要分为以下几个步骤：

（1）原始数据的初始化：

$$x_i'(k)=\frac{x_i(k)}{\overline{x_i}} \tag{7}$$

其中，$x_i(k)$为原始数据，$\overline{x_i}$为原始数据均值，$x_i'(k)$为初始化后的值，$i=1,\cdots,m$；$k=1,\cdots,n$（m为因素个数，n为水平个数）。

（2）计算比较数列和参考数列的绝对差值：

$$\Delta_i x_i'(k)=\left|x_0'(k)-x_i'(k)\right| \tag{8}$$

其中，$x_0'(k)$为参考数列，初始化后的值$x_i'(k)$作为比较数列。

（3）计算指标体系的灰色系数：

$$\gamma(x_0(k),x_i(k))=\frac{\min\limits_j\min\limits_k\Delta_i x_i'(k)+\xi\max\limits_j\max\limits_k\Delta_i x_i'(k)}{\Delta_i x_i'(k)+\xi\max\limits_j\max\limits_k\Delta_i x_i'(k)} \tag{9}$$

其中$j=1,\cdots,n$，ξ为常数且$0<\xi<1$，本文中ξ取值为0.5[14-15]。

(4)计算灰色关联等级：

$$\gamma(x_0,x_i)=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\gamma(x_0(k),x_i(k)) \quad (10)$$

将表4中的数据代入式(7-10)，经计算得到如表5所示的灰色关联分析结果。将各组的灰色关联等级进行排序，发现第6、9、10、11和13组的灰色关联等级值最大，其对应的新型螺纹管参数P=5.5 mm、H= 1.00 mm、L=2，Nu值为100.741，f值为0.024 641，上述结果通过对已计算出的灰色关联等级直接排序得出。

表5 灰色关联分析结果

Tab. 5 Results by grey relation analysis

组号	关联系数		关联等级	排序
	Nu	f		
1	0.743 576 4	0.645 411 0	0.700 151 67	6
2	0.711 175 8	0.702 148 6	0.702 403 54	5
3	0.581 381 3	0.617 208 6	0.607 237 02	9
4	0.589 009 0	0.588 516 9	0.593 271 45	10
5	0.761 530 8	0.718 638 3	0.741 303 30	3
6	0.901 894 5	0.769 969 7	0.865 955 37	1
7	0.586 751 4	0.639 021 3	0.618 587 79	8
8	0.716 161 2	0.557 737 6	0.623 573 42	7
9	0.901 894 5	0.7699 69 7	0.865 955 37	1
10	0.901 894 5	0.769 969 7	0.865 955 37	1
11	0.901 894 5	0.769 969 7	0.865 955 37	1
12	0.775 886 5	0.792 530 9	0.783 131 26	2
13	0.901 894 5	0.769 969 7	0.865 955 37	1
14	0.660 983 6	0.484 373 0	0.573 761 32	11
15	0.535 312 0	0.551 197 6	0.549 576 52	13
16	0.740 380 3	0.695 811 2	0.708 749 68	4
17	0.607 703 6	0.510 836 9	0.555 438 25	12

此外，还可以通过计算各参数对应的灰色关联等级实现多目标优化，结果如图5所示。由图5可知，最优结构对应P=5.5 mm、H=1.00 mm和L=2，Nu值为100.741，f值为0.024 641。这一结果与直接排序得到的结果一致，因此使用灰色关联法优化得到的新型螺纹管最优结构参数P=5.5 mm、H=1.00 mm和L=2。

将得到的灰色关联等级代入响应面法中再次分析，可以得到3个参数对灰色关联等级交互影响的等高线图，如图6所示。图6(a)表明，将P固定为5.5 mm，当H=1.00 mm、L=2时可得到最高的灰色关联等级值。此外，从图6(b)可知，将L固定为2，当P=5.5 mm、H=1.00 mm时，可获得最大的灰色关联等级值。而图6(c)表明，将H固定为1.00 mm，

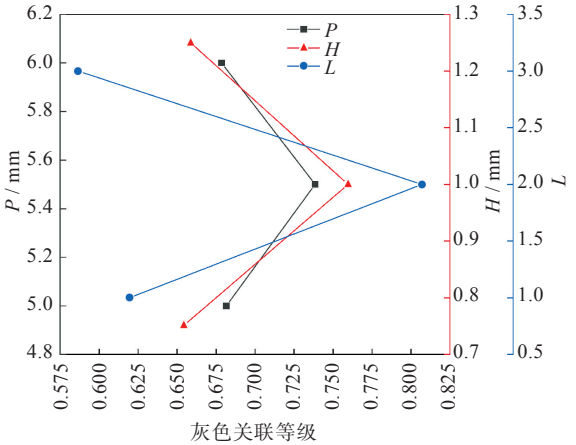
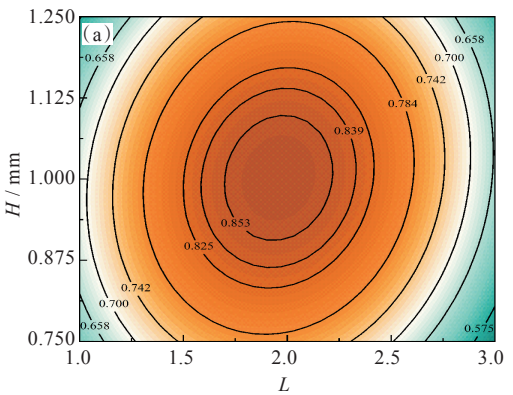
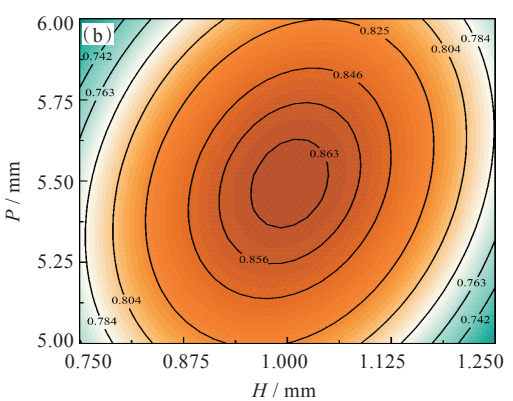


图5 灰色关联等级对应图

Fig. 5 Grey relation grade corresponding graph





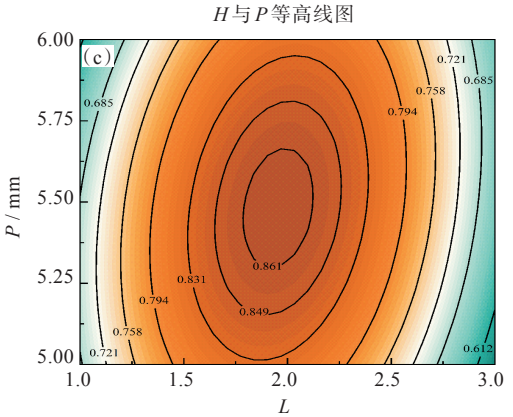


图6 灰色关联等级等高线图

Fig. 6 Grey corelation grade contour plot

当 P=5.5 mm、L=2 时，可获得最大的灰色关联等级值。若等高线图越近似圆形，则交互作用越不明显；若等高线图越近似椭圆形，则表示两个参数交互作用强烈。从图 6 中可以看出 3 个参数在影响灰色关联等级方面均起着重要作用。

2.3　流场分析

湍流动能（turbulence kinetic energy，TKE）是流体中湍流程度的重要量化指标，反映了湍流的程度，描述为单位质量动能的平均变化[16]。TKE 值越大，表示流动中的湍流强度越大。为了研究新型螺纹管独特结构对管内流体的流动影响，对比研究了新型螺纹管、螺纹全为顺时针的新型螺纹管和螺纹全为逆时针的新型螺纹管的 TKE 云图。

如图 7 所示，可以看出管壁附近的 TKE 值明显大于中心区域，这归因于螺纹结构的存在，在流体流动过程中诱发了二次流和涡流，大大增强壁面附近的湍流强度。湍流强度在提高传热性能方面起着至关重要的作用。湍流强度的增加会加强流体混合，改善热对流，提高流体与传热表面之间热能交换的效率[17]。

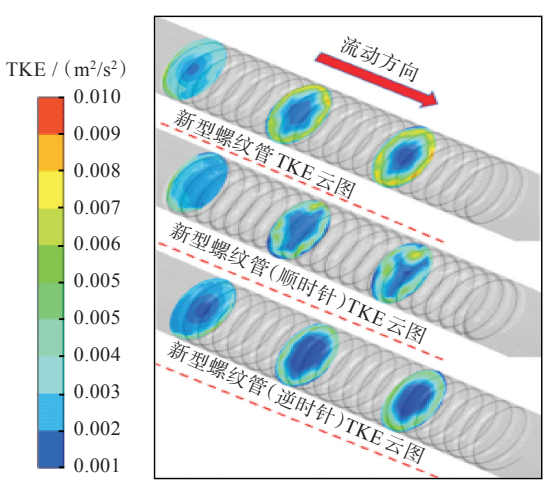


图 7　3 种不同管型的 TKE 值比较

Fig. 7　Comparison of TKE values of the three different tube types

同时比较图 7 中 3 种管型的 TKE 云图，可以发现新型螺纹管的 TKE 值明显高于其他两种管型。这可归因于新型螺纹管独特的结构，即两个旋转方向相反的相邻螺纹部分。这种设计导致管内的流体流动方向频繁变化，从而加剧了径向扰动，更频繁地产生二次流。因此，管壁附近的流体湍流加剧，边界层减弱。这些因素导致 TKE 增加，热传导性能得到改善。从上述分析可知新型螺纹管可以明显增强传热性能。

3　结　论

在 Re =10 000 的情况下使用 CFD 软件进行数值模拟，并对新型螺纹管进行结构优化。利用响应面法研究 P、H 和 L 对 Nu 和 f 的影响。使用灰色关联法进行多目标优化，得到优化结果，并对得到的灰色关联等级进行响应面分析，了解 3 个参数对灰色关联等级的影响。通过研究 3 种不同换热管的 TKE 分布，分析新型螺纹管增强传热性能的机理。主要结论如下：

（1）当 L 增大时，Nu 与 f 均随之增大且数值变化十分显著；随着 P 增大，Nu 虽然不断增大但数值变化不明显，f 则呈现先减小后增大的趋势；随着 H 增大，Nu 与 f 都随之增加，且 L 对 Nu 和 f 的影响最为显著。

（2）使用灰色关联法对新型螺纹管进行多目标优化，结果表明当 P=5.5 mm、H=1.00 mm、L=2 时，其为新型螺纹管的最佳结构，此时的 Nu 值为 100.741，f 值为 0.024 641。

（3）由于新型螺纹管拥有两个旋转方向相反的相邻螺纹段这种独特的结构，导致管内的流体流动方向频繁变化，从而加剧了径向扰动，更频繁地产生二次流。因此，管壁附近的流体湍流程度增强，管壁附近的边界层减弱。这些因素导致 TKE 增加，热传导性能得到改善，新型螺纹管传热性能明显增强。

参考文献

[1] LIU S, SAKR M. A comprehensive review on passive heat transfer enhancements in pipe exchangers [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 19: 64-81.

[2] GNANAVEL C, SARAVANAN R, CHANDRASEKARAN M. Heat transfer augmentation by nano-fluids and circular fin insert in double tube heat exchanger—a numerical exploration [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 21(Part 1): 934-939.

[3] LI J J, CHEN J Y, CHEN Y. Effectiveness of actively adjusting vapour-liquid in the evaporator for heat transfer enhancement [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 200: 117696.

[4] SUN M, ZENG M. Investigation on turbulent flow and heat transfer characteristics and technical economy of corrugated tube [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 129: 1-11.

[5] 陈鑫，王维，李炳熙，等. 非对称波节管换热和阻力性能的实验研究[J]. 工程热物理学报，2020，41(7)：1797-1807.

[6] 徐建民,曾凯,李智勇,等.波纹管传热性能与污垢特性实验[J].武汉工程大学学报,2014,36(6):64-67.
[7] WANG Y H, ZHANG J L, MA Z X. Experimental determination of single-phase pressure drop and heat transfer in a horizontal internal helically-finned tube [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 104:240-246.
[8] 张娟,陈海峰,谢宵虎,等.对排凸胞换热管内传热分析及多目标优化[J].热能动力工程,2020,35(3):138-144.
[9] 刘爽,周杰.三维内肋管紊流换热和阻力特性的试验研究[J].建筑节能,2017,45(8):88-90.
[10] 靳遵龙,赵金阳,王永庆.螺旋内肋管换热及流体流动数值研究[J].郑州大学学报(工学版),2014,35(4):41-44.
[11] HAN H Z, LI B X, SHAO W. Multi-objective optimization of outward convex corrugated tubes using response surface methodology [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 70(1): 250-262.
[12] XIE C G, YAN G X, MA Q, et al. Flow and heat transfer optimization of a fin-tube heat exchanger with vortex generators using response surface methodology and artificial neural network [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2022, 39:102445.
[13] 李永华, 何仑, 张莎,等.多向扰流换热管管内传热与流动特性数值模拟[J].电力科学与工程,2019,35(6):71-78.
[14] DAGDEVIR T, OZCEYHAN V. Optimization of process parameters in terms of stabilization and thermal conductivity on water based TiO_2 nanofluid preparation by using Taguchi method and grey relation analysis [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2021, 120:105047.
[15] NAQIUDDIN N H, SAW L H, YEW M C, et al. Numerical investigation for optimizing segmented micro-channel heat sink by Taguchi-grey method [J]. Applied Energy, 2018, 222:437-450.
[16] KIRKAR S M, GÖNÜL A, CELEN A, er al. Multi-objective optimization of single-phase flow heat transfer characteristics in corrugated tubes [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 186:108119.
[17] YANG P, ZHANG H W, ZHENG Y Y, et al. Investigation and optimization of heat transfer performance of a spirally corrugated tube using the Taguchi method [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2021, 127:105577.

本文编辑:霍淑利

☆

(上接第84页)

像效果且有较好的稳定性,实现了准确评估损伤的目的[11]。

4 结 论

由于模拟中去除了杂波信号,在缺陷检测中TFM的模拟成果优于实际实验结果。Lamb波TFM采用单发多收的方式对结构进行检测,相对于常规相控阵检测技术成像更加直观。使用PCI加权处理后的TFM,通过相干因子处理后放大了缺陷信号的贡献,提高了缺陷的信噪比,抑制了铝板周围的结构噪声,该方法能够更加准确地识别各向同性板状结构中单损伤和多损伤的位置以及形状大小。数值模拟和实验相互验证,证明了该方法兼具理论和实践应用意义。

参考文献

[1] 孙侠生,肖迎春.飞机结构健康监测技术的机遇与挑战[J].航空学报,2014,35(12):3199-3212.
[2] 张华,吕涛,徐长航,等.基于声发射的导管架海洋平台结构健康实时监测研究[J].中国海洋平台,2016,31(1):86-90,95.
[3] 王高平,陈云,李波,等.基于Lamb波的铝板损伤定位检测方法[J].武汉工程大学学报,2022,44(2):190-196.
[4] 刘增华,徐庆龙,董拓灿,等.基于时间反转法的Lamb波检测技术的研究进展[J].实验力学,2015,30(2):131-141.
[5] HOLMES C, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation[J]. NDT & E International, 2005, 38(8): 701-711.
[6] 周正干,李洋,周文彬.相控阵超声后处理成像技术研究、应用和发展[J].机械工程学报,2016,52(6):1-11.
[7] 陈乾伟,吴辛,鞠全勇,等.PZT压电材料参数在ANSYS中的定义方法[J].金陵科技学院学报,2018,34(4):33-37.
[8] 丁辉.计算超声学:声场分析及应用[M].北京:科学出版社, 2010:41-43.
[9] 蔡笑风,刘继方,李永峰,等.复合材料Lamb波时间反转检测方法研究现状[J].无损检测,2018,40(11):64-69.
[10] 王高平,李波,徐志勇,等.基于ABAQUS的Lamb波时间反转薄板损伤研究[J].压电与声光,2021,43(3):346-351.
[11] 马立印, 李洋, 周正干.整体叶盘叶片焊缝裂纹相控阵超声检测[J].北京航空航天大学学报,2017,43(9): 1900-1908.

本文编辑:霍淑利