

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-09
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20251119004

内肋扭曲椭圆管内超临界 CO₂对流传热强化及多目标优化研究

左建国 宋俊

(大连理工大学能源与动力学院 大连 116024)

摘要 为提高超临界 CO₂(SCO₂)气体冷却器的传热效率与综合性能,本文对 SCO₂在内肋扭曲椭圆管内的流动与传热特性进行了数值研究,结合场协同理论对该管强化传热机理进行了分析。以节距(p)、肋高(h)、长半轴(a)及雷诺数(Re)为设计变量,采用响应面法(RSM)建立了努塞尔数、摩擦系数与综合性能评价指标的二阶响应面模型,并采用非支配遗传算法(NSGA-II)开展多目标优化,获得了 Pareto 最优解。研究表明:扭曲结构与内肋结构的耦合作用可诱导持续的二次流动,增强流体扰动并破坏热边界层,从而显著提升对流传热性能。当 h 为 0.5 mm、 a 在 3.6~3.9 mm 以及 p 在 50~70 mm 范围时,可实现传热增强与流动阻力增长之间的良好平衡。

关键词 超临界 CO₂; 气体冷却器; 内肋扭曲椭圆管; 场协同理论; 多目标优化

中图分类号: TB61⁺1; TB657.5

文献标识码: A

Convective Heat Transfer Enhancement and Multi-Objective Optimization of Supercritical CO₂ in Internally Ribbed Twisted Elliptical Tubes

Zuo Jianguo Song Jun

(School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract To improve the heat transfer efficiency and overall performance of supercritical CO₂ (SCO₂) gas coolers, a numerical study was conducted on the flow and heat-transfer characteristics of SCO₂ in internally ribbed twisted elliptical tubes. The heat transfer enhancement mechanism of the tubes was further analyzed based on the field synergy principle. The pitch (p), rib height (h), major semi-axis (a), and Reynolds number (Re) were used as design variables, and second-order response surface models for the Nusselt number, friction factor, and performance evaluation criterion were established using the response surface methodology (RSM). Multi-objective optimization was then performed using the non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) to obtain Pareto optimal solutions. The results suggest that the combined effects of the twisted geometry and internal ribs induce sustained secondary flows, enhance fluid mixing, and disrupt the thermal boundary layer, thereby significantly improving the convective heat transfer performance of the SCO₂ gas cooler. According to this study, a favorable balance between heat transfer enhancement and flow resistance increase can be achieved when h is 0.5 mm, a ranges from 3.6 to 3.9 mm, and p lies within 50 to 70 mm.

Keywords supercritical CO₂; gas cooler; internally ribbed twisted elliptical tube; field synergy theory; multi-objective optimization

为实现绿色低碳发展的战略目标,国内外制冷行业正积极探索新型环保制冷剂的替代与应用。CO₂作为一种天然制冷剂,具有无毒、不可燃、ODP(臭氧损耗潜值, ozone depletion potential)为0、GWP(全球变暖潜值, Global Warming Potential)为1以及优异的热物理性能等优势,被认为是最受欢迎的制冷剂之一。自 G. Lorentzen 等^[1]提出 CO₂跨临界模式后,跨临界 CO₂制冷系统因环境友好性、高温制热性等优点,成为制冷领域研究热点之一^[2]。

气体冷却器是跨临界 CO₂制冷系统的主要设备,对保障整个系统的高效稳定运行具有举足轻重的作

用,SCO₂(超临界 CO₂, supercritical CO₂)物性剧烈变化以及系统对高压的要求,对气体冷却器的设计、耐高压、高紧凑和高效率均提出巨大挑战^[3]。为提升 SCO₂气体冷却器性能,可采用强化传热技术,主要包括主动法和被动法。被动法无需外部能量供给,具有结构简单、可靠性高、操作便捷等优势,更具有推广价值。基于此,国内外学者围绕 SCO₂在多种结构强化管道内的流动与传热机理开展了一系列研究。Wu Yunlei 等^[4]研究了 SCO₂在螺旋 U 型管中的流动传热特性,发现螺旋结构产生的涡流可显著提升传热性能。Li Wenguang 等^[5]研究偏心螺旋管中 SCO₂的强迫

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修回日期: XXXX-XX-XX; 录用日期: XXXX-XX-XX

对流传热,指出偏心螺旋管内会形成螺旋流型,管脊处的高壁面剪切应力是传热增强的核心原因。K. L. Liaw 等^[6]对带扭曲带插入物的螺旋管内 SCO_2 湍流传热特性进行了数值研究。Yang Zenan 等^[7]研究了 SCO_2 在垂直内肋管中的强化传热,发现内肋结构可减弱浮力对流速分布的影响,通过诱导横向涡流优化传热。

扭曲椭圆管作为被动强化传热元件,因结构简单、易于制造、强化传热及阻垢性能优异,近年来成为被动强化传热领域的研究热点之一。例如,R. Mashayekhi 等^[8]研究内置扭曲带的复合扭曲椭圆管的流动传热特性,指出壁面附近与流体核心区形成双涡流,增强二次流强度。S. Eiamsa-ard 等^[9]提出新型的棱纹扭曲椭圆管,发现带肋扭曲椭圆管使流体流动分离后又重新连接,促进流体混合并提升湍动能。在扭曲椭圆管内增设内肋或管内插入物等复合结构虽可强化传热,但同时也会增加流体的流动阻力损失。

各种智能优化算法的出现为换热器的优化提供有力的工具,多目标优化算法也越来越受欢迎。Li Xiuzhen 等^[10]以水为工质,以雷诺数、长径比、扭曲比为设计参数,以 Nu 和 f 为目标函数,通过 RSM(响应面法, response surface methodology) 和 NSGA-II(非支配遗传算法, non-dominated sorting genetic algorithm II) 对扭曲椭圆管进行了多目标优化。刘必伟^[11]以水为工质,通过响应面法与遗传算法相结合对矩形双肋椭圆扭曲管进行了多目标优化。王定标等^[12]以水为工质,对双向扭曲椭圆管进行了多目标优化。此外,有研究人员以 SCO_2 为工质对换热器进行了优化。M. Khoshvaght-Aliabadi 等^[13]通过响应面法对 SCO_2 扁管式气体冷却器进行了优化设计,通过调整几何参

数实现 Nu 最大化和 f 最小化。Jin Feng 等^[14]采用神经网络与 NSGA-II,以压降和换热性能为目标对 SCO_2 印刷电路换热器进行了多目标优化。Li Liangxing 等^[15]采用遗传算法,以熵产生数和总泵送功率为目标函数对 SCO_2 换热器进行了优化。

被动强化结构能够有效提升 SCO_2 气体冷却器的传热性能,相关研究对 SCO_2 在偏心螺旋管、U型管及扁管等被动强化结构中的流动与传热特性进行了分析,也对不同形式的扭曲椭圆管开展了研究。但现有研究多集中于单一强化结构或常规工质条件,对内肋结构与扭曲椭圆通道组合后形成的复合强化机理,及其在 SCO_2 强变物性条件下的协同作用对流动与传热特性的影响,仍缺乏系统深入的研究。基于此,本文以内肋扭曲椭圆管内 SCO_2 的流动与传热过程为研究对象,采用 CFD 数值模拟并结合多目标优化方法,对运行参数和结构参数进行优化设计,旨在传热强化与压降增加之间取得最佳平衡,为高效气体冷却器的设计提供参考依据。

1 模型建立和边界条件设置

1.1 几何模型

内肋扭曲椭圆管的核心几何参数包括:基圆管直径 d ($=6 \text{ mm}$)、截面椭圆长半轴 a 、短半轴 b 、节距 p (沿管轴方向扭转 360° 所需的长度)、肋高 h 和肋角 Φ ($=60^\circ$)、有效换热段长度 L ($=500 \text{ mm}$)。为消除入口段效应与出口回流现象,在换热段前后设置 $L_1=360 \text{ mm}$ 、 $L_2=100 \text{ mm}$ 的绝热段,其几何模型如图 1 所示。

1.2 控制方程与评价指标

在三维稳态数值模拟中,描述流体流动与传热过程的基本控制方程包括连续性方程、动量方程及能量方程。对应的控制方程表达式如下:

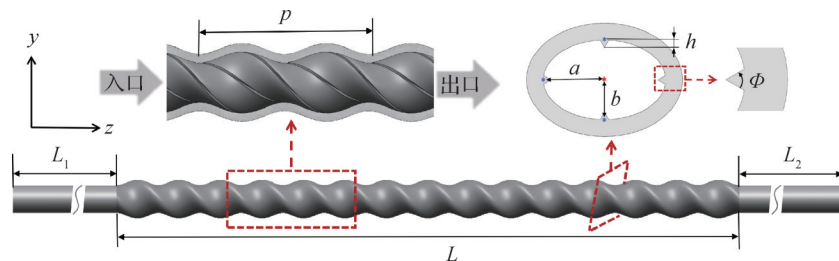


图 1 内肋扭曲椭圆管几何模型

Fig.1 Geometric model of the internally ribbed twisted elliptical tube

连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i \quad (2)$$

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i c_p T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial(c_p T)}{\partial x_i} \right] \quad (3)$$

式中: x_i, x_j, x_k 为空间坐标分量(i, j, k 为张量下标), m ; u 为速度, m/s ; ρ 为密度, kg/m^3 ; c_p 为比定压热容, $J/(kg \cdot K)$; g_i 为重力加速度分量, m/s^2 ; T 为温度, K ; μ 、 μ_t 分别为动力黏度、湍流黏度, $Pa \cdot s$; Pr 和 Pr_t 分别为普朗特数和湍流普朗特数。针对内肋扭曲椭圆管的湍流流动特性与换热规律,本研究选用SST $k-\omega$ 湍流模型进行数值计算。

为定量评估内肋扭曲椭圆管的传热与流动性能,需首先明确其关键评价参数,如式(4)~式(6)所示。其综合性能评价指标(performance evaluation criterion, PEC)用于衡量传热与阻力的综合性能。

$$Nu = \frac{qd}{\Delta T \lambda_b} \quad (4)$$

$$f = \frac{1}{2} \frac{\Delta p}{\rho_b u_b^2} \frac{d}{L} \quad (5)$$

$$\eta = (Nu/Nu_0)/(ff_0)^{1/3} \quad (6)$$

式中: η 为综合性能评价指标PEC; f 为范宁摩擦系数; q 为给定壁面热流密度, W/m^2 ; ρ_b 为流体密度, kg/m^3 ; λ_b 为流体导热系数, $W/(m \cdot K)$; u_b 为流体平均流速, m/s ; d 为当量直径, mm ; L 为管道长度, mm ; ΔT 为流体平均温度与壁面温差, K ; Δp 为压降, Pa ; Nu 、 f 为内肋扭曲椭圆管的值; Nu_0 、 f_0 为对应基圆管的值。

1.3 模拟设置和边界条件

为简化数值模拟模型,本研究仅考虑流体域。压力与速度耦合采用SIMPLE算法,动量、能量、湍动能及比耗散率方程均采用二阶迎风格式。入口采用质量流速入口,恒定入口温度为333.15 K;出口为压力出口;壁面采用恒热流边界,进出口延长段为绝热条件。CO₂在拟临界点附近物性参数随温度发生剧烈变化,为准确获取SCO₂物性数据以保证模拟准确度,本文由NIST REFPROP 10.0数据库获取CO₂的物性数据,采用分段线性插值处理并导入ANSYS FLUENT 2022中。当能量方程的残差小于10⁻⁶,其余方程的残差小于10⁻⁵时认为计算收敛,确保模拟结果的稳定性和准确性。

1.4 网格划分及无关性验证

本研究采用ICEM CFD 2022进行结构化网格划分,如图2所示为 $a=3.6\text{ mm}$ 、 $p=60\text{ mm}$ 、 $h=0.4\text{ mm}$ 的网格示意图。为消除网格数量对模拟结果的影响,分别采用89.36万、131.39万、171.85万和219.91万网格数量,在进口压力为8 MPa、进口温度为333.15 K,

壁面热流密度为12 kW/m²下进行模拟,当网格单元数大于171.85万时,传热系数变化幅度减小,偏差约为0.22%,满足精度要求,后续模拟采用171.85万网格进行计算。

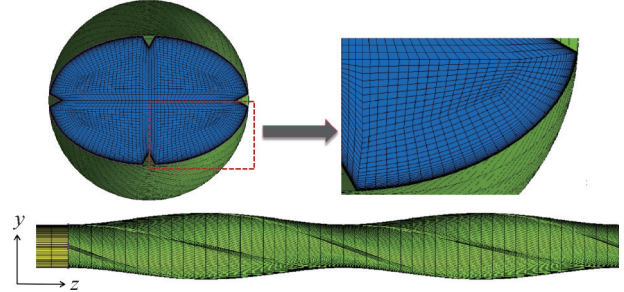


图2 内肋扭曲椭圆管网格示意图

Fig.2 Schematic diagram of the mesh for the internally ribbed twisted elliptical tube

1.5 模型验证

根据Dang Chaobin等^[16]逆流套管换热器实验数据,对内径为6 mm和2 mm的圆管进行CFD数值模拟,并将计算结果与实验数据进行了对比,如图3所示。结果表明,传热系数和压降的误差分别在4.6%和10%以内,说明数值模拟结果和实验结果吻合很好,所采用的数值模型能够较为准确地预测SCO₂的流动与传热特性。需要指出的是,模拟值整体略高于实验值,主要与超临界区域CO₂物性拟合偏差、湍流模型表征偏差等因素有关。

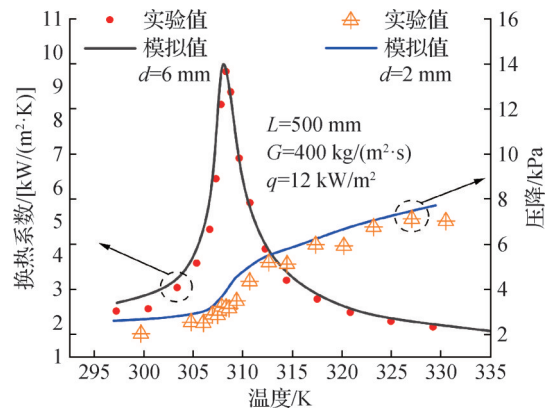


图3 传热系数与压降的模拟值与实验值对比

Fig.3 Comparison of simulated and experimental results for heat transfer coefficient and pressure drop

2 响应面法

响应面法可通过建立响应变量与设计变量间的二次多项式模型,揭示参数间的显著性与交互作用关系^[17]。如式(7)所示:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (7)$$

式中： y 为响应变量； x_i, x_j 为设计变量； β_0 为常数项； β_i 为一阶响应系数； β_{ii} 为二次响应系数； β_{ij} 为交互效应系数。

本研究选取节距 p 、肋高 h 、长半轴 a 和 Re 为设计变量，以努塞尔数 Nu 、摩擦因子 f 和综合性能评价指标 η 为响应目标，采用Box - Behnken设计方法(BBD)进行四因素三水平实验设计，该方法既能保证建模精度，又有效减少数值计算量。设计变量的水平设置为-1、0和+1，具体设计如表1所示。共生成29组样本点，每组样本点均通过CFD数值模拟获得相应的传热与流动结果。

表1 设计变量和水平

Tab.1 Design variables and their levels

因数	水平		
	-1	0	1
节距 p/mm	40	60	80
肋高 h/mm	0.3	0.4	0.5
长半轴 a/mm	3.2	3.6	4
雷诺数 Re	20 000	70 000	120 000

3 结果与讨论

3.1 场协同原理及二次流分析

为了描述速度场与温度场协同的程度，场协同原理^[18]将速度矢量与温度梯度之间的协同角 θ 定义为：

$$\theta = \arccos \frac{\vec{u} \cdot \nabla T}{|\vec{u}| |\nabla T|} \quad (8)$$

式中： \vec{u} 为速度矢量，m/s； ∇T 为相对应的温度梯度，K/m； θ 为速度矢量和温度梯度的夹角，(°)。

二次流是指沿主流方向以外产生的横向流动，通常在管截面内形成旋涡结构。为了定量描述二次流强度，定义无量纲二次流速度 U_{2nd} 表征截面内二次流强度^[19]：

$$U_{2nd} = \frac{\sqrt{u_x^2 + u_y^2}}{u_b} \quad (9)$$

式中： u_x, u_y 分别为垂直于主流方向的2个速度分量，m/s。

由图4可知，不同雷诺数条件下，内肋扭曲椭圆管的二次流强度明显大于圆管，协同角均小于圆管，表明该强化结构能够有效诱导产生二次流。二次流引起截面流体的剧烈混合，从而改善速度矢量与温

度梯度之间的方向一致性，为对流传热强化提供有利条件。为进一步揭示流动结构沿程演化及其对传热特性的影响机理，图5所示为 $Re=40\ 000$ 时内肋扭曲椭圆管在不同轴向位置的温度场-速度矢量分布。在入口段($S=45.45\text{ mm}$ 处，其中 S 表示沿流动方向的轴向距离)，存在明显的温度分层，核心区域温度较高，近壁区温度较低，存在明显的径向温度梯度；速度矢量显示出两股相对旋转的二次流涡旋结构，促使高温核心流体向壁面运动、低温流体向中心回流，从而产生显著的径向混合效应。在中间段($S=227.25\text{ mm}$ 处)，二次流涡旋范围扩大，温度分布逐渐均匀，表明边界层持续被扰动。在出口段($S=409.05\text{ mm}$ 处)，二次流结构仍然存在，流场趋于稳定，表明管内流体已实现充分混合与高效传热。综上所述，扭曲与肋化结构通过诱导持续的二次流来破坏热边界层并提高场协同，从而实现对流传热强化效果。尽管协同角 θ 随 Re 略有增大，但由二次流带来的径向混合仍是传热性能提升的主导因素。

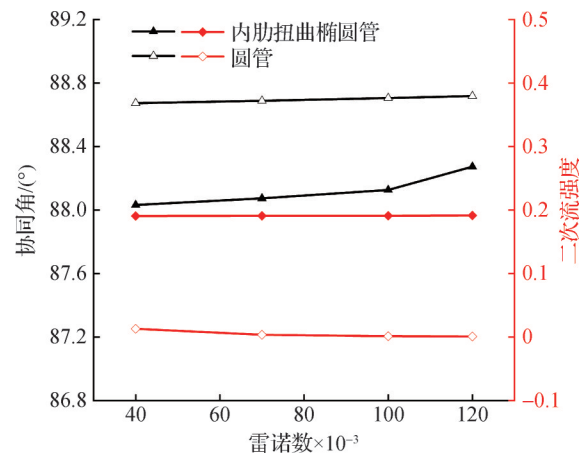


图4 内肋扭曲椭圆管与圆管的协同角和二次流强度对比
Fig.4 Comparison of synergy angle and secondary flow intensity in internally ribbed twisted elliptical and circular tubes

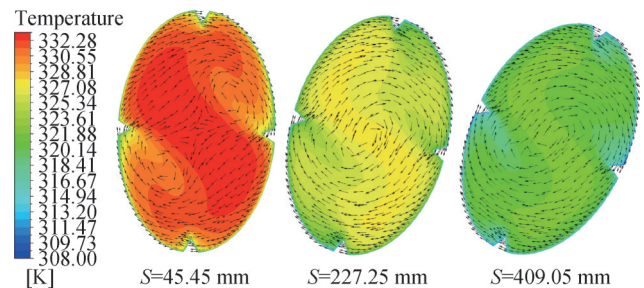


图5 温度场-速度矢量分布

Fig.5 Distribution of temperature and velocity vector

3.2 方差分析

方差分析与响应面法结合能够有效筛选显著因

素、检验回归模型的可靠性,并为多目标优化提供统计依据,通常根据模型 F 值和 P 值判断模型及各因子的显著性: $P < 0.05$, 且 F 值越大,表明该项越显著。同时引入决定系数 R^2 、调整 R^2 和预测 R^2 来评估模型拟合优度及预测能力, R^2 越大表示数据与模型的拟合程度越高。

Nu 、 f 和 η 方差分析结果如表 2~表 4 所示,各响应模型的 F 值均较大,且模型 P 值均小于 0.000 1,表明模型均具有良好的显著性。对 Nu 而言, p 、 h 、 a 和 Re 主效应均显著,且 $p-Re$ 、 $h-a$ 、 $h-Re$ 及 $a-Re$ 交互项显著,表明几何结构对传热的影响依赖于流动强度。对 f 而言, p 、 a 和 Re 为显著因素,交互效应中仅 $p-Re$ 与 $h-a$ 显著。对 η 而言, p 、 h 、 a 和 Re 的主效应均显著,其中 Re 和 h 的影响更为突出;同时, $h-a$ 与 $a-Re$ 交互项显著。综合来看, Re 是主导因素,扭曲结构主要通过流动强度的耦合作用来发挥影响。相较于内肋结构的局部扰动,扭曲结构通过诱导螺旋流对流体产生全域扰动,其扰流效果更为显著。

回归模型中, Nu 、 f 和 η 的决定系数 R^2 分别为 0.999 7、0.996 4、0.982 8,调整 R^2 分别为 0.999 4、0.992 8、0.965 7,预测 R^2 分别为 0.998 4、0.979 24、0.901 1,说明回归模型准确度较高,能准确描述设计参数与目标函数的非线性关系。 Nu 、 f 和 η 的拟合式如式(10)~式(12)所示。

3.3 响应面分析

基于 RSM 绘制了不同因数交互作用下的响应面图。如图 6 所示,图(a)~(c)为结构参数之间交互作用对 Nu 的影响, Nu 随着 p 的减小而增加,随 h 增加而增加;图(b)、(c),曲面呈上凸形态,当 h 增至 0.5 mm、 a 增至 3.8 mm 时, Nu 有最大值。图(d)~(f)为结构参数之间交互作用对 f 的影响, f 随着 p 的增大、 a 的减小而显著减少, h 的影响相对平缓。图(g)~(i)为结构参数之间交互作用对 η 的影响, η 随着 p 的减小、 h 的增大整体呈上升趋势,随着 a 的增大先增大后减小, a 在 3.6~3.9 mm 之间存在最大值。 h 的增加增强了近壁区扰动,而 a 通过改变截面非圆度和离心力分布,影响二次流结构的形成与强度,内肋扰动效应与截面几何诱导的二次流之间存在显著的非线性耦合效应,使得 $h-a$ 交互项在响应面模型中表现显著, η 在特定的参数匹配下能够达到最优。

$$\begin{aligned}
 Nu = & -735.64 - 0.617p + 384.41h + 452.1a \\
 & + 0.0004Re - 0.235ph - 0.143pa - 1.024 \\
 & \times 10^{-5}pRe - 143.18ha + 0.002hRe + 6.5 \\
 & \times 10^{-4}aRe + 0.009p^2 + 236.65h^2 - 56.58a^2 \\
 & + 1.63 \times 10^{-9}Re^2 \quad (10)
 \end{aligned}$$

表 2 Nu 的方差分析结果
Tab.2 ANOVA results for Nu

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	2.70×10^5	14	19 261.83	3 600.56	<0.000 1
A- p	3 711.93	1	3 711.93	693.86	<0.000 1
B- h	2 687.86	1	2 687.86	502.43	<0.000 1
C- a	1117	1	1117	208.8	<0.000 1
D- Re	2.60×10^5	1	2.60×10^5	48 556.72	<0.000 1
AB	0.8842	1	0.884 2	0.165 3	0.690 5
AC	5.23	1	5.23	0.977 2	0.339 7
AD	419.14	1	419.14	78.35	<0.000 1
BC	131.2	1	131.2	24.52	0.000 2
BD	227.02	1	227.02	42.44	<0.000 1
CD	668.86	1	668.86	125.03	<0.000 1
A ²	81.41	1	81.41	15.22	0.001 6
B ²	36.33	1	36.33	6.79	0.020 7
C ²	531.63	1	531.63	99.38	<0.000 1
D ²	108.29	1	108.29	20.24	0.000 5
残差	74.9	14	5.35		
合计	2.70×10^5	28			

表 3 f 的方差分析结果
Tab.3 ANOVA results for f

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	0.000 4	14	0	276.44	<0.000 1
A- p	0.000 1	1	0.0001	1 044.66	<0.000 1
B- h	1.27×10^{-7}	1	1.27×10^{-7}	1.36	0.263 3
C- a	0	1	0	175.39	<0.000 1
D- Re	0.000 2	1	0.0002	2 067.44	<0.000 1
AB	1.05×10^{-8}	1	1.05×10^{-8}	0.112 3	0.742 5
AC	1.65×10^{-9}	1	1.65×10^{-9}	0.017 6	0.896 5
AD	1.60×10^{-6}	1	1.60×10^{-6}	17.08	0.001
BC	5.84×10^{-7}	1	5.84×10^{-7}	6.23	0.025 7
BD	5.53×10^{-8}	1	5.53×10^{-8}	0.589 6	0.455 3
CD	1.42×10^{-8}	1	1.42×10^{-8}	0.150 8	0.703 6
A ²	7.21×10^{-6}	1	7.21×10^{-6}	76.82	<0.000 1
B ²	1.67×10^{-9}	1	1.67×10^{-9}	0.017 8	0.895 7
C ²	2.41×10^{-6}	1	2.41×10^{-6}	25.65	0.000 2
D ²	0	1	0	418.98	<0.000 1
残差	1.31×10^{-6}	14	9.38×10^{-8}		
合计	0.000 4	28			

表4 η 的方差分析结果
Tab.4 ANOVA results for η

来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
模型	0.101 4	14	0.007 2	57.26	<0.000 1
A-p	0.004 7	1	0.004 7	37.29	<0.000 1
B-h	0.033	1	0.033	260.92	<0.000 1
C-a	0.001 5	1	0.001 5	11.88	0.003 9
D-Re	0.042 3	1	0.042 3	334.29	<0.000 1
AB	1.04×10 ⁻⁶	1	1.04×10 ⁻⁶	0.008 2	0.929
AC	0.000 1	1	0.000 1	0.752 2	0.400 4
AD	0.000 4	1	0.000 4	3.11	0.099 8
BC	0.001	1	0.001	8.1	0.012 9
BD	0.000 2	1	0.000 2	1.25	0.282 7
CD	0.006 1	1	0.006 1	48.42	<0.000 1
A ²	6.12×10 ⁻⁶	1	6.12×10 ⁻⁶	0.048 4	0.829 1
B ²	0.000 4	1	0.000 4	3.47	0.083 6
C ²	0.004	1	0.004	31.82	<0.000 1
D ²	0.007 4	1	0.007 4	58.55	<0.000 1
残差	0.001 8	14	0.000 1		
合计	0.103 2	28			

$$f = -0.02 - 0.0005p + 0.037h + 0.034a - 2.36 \times 10^{-7}Re + 2.56 \times 10^{-5}ph + 2.54 \times 10^{-6}pa + 6.33 \times 10^{-10}pRe - 0.01ha - 2.35 \times 10^{-8}hRe - 2.97 \times 10^{-9}aRe + 2.64 \times 10^{-6}p^2 - 0.0016h^2 - 0.004a^2 + 9.85 \times 10^{-13}Re^2 \quad (11)$$

$$\eta = -1.42 + 0.0023p + 1.234h + 1.208a - 3.87 \times 10^{-6}Re - 0.00026ph - 0.00061pa - 9.91 \times 10^{-9}pRe - 0.4ha + 1.26 \times 10^{-6}hRe + 1.96 \times 10^{-6}aRe - 2.43 \times 10^{-6}p^2 + 0.82h^2 - 0.156a^2 - 1.35 \times 10^{-11}Re^2 \quad (12)$$

3.4 多目标优化

对于多目标优化,一个目标的改进一般以牺牲其它目标的性能为代价,为此,K. Deb等^[20]提出了NSGA-II来处理多目标优化问题。NSGA-II算法基于帕累托最优理论,采用快速非支配排序与拥挤度距离机制,在保持解集多样性的同时提高了收敛性能,因而被广泛应用于多目标优化设计中。本文采用MATLAB R2024a的非支配遗传算法工具箱来求解响应面模型。NSGA-II的参数设置为:种群规模为200,最大进化代数为600,最优个体系数为0.5,适应度函数偏差为 1×10^{-10} 。在NSGA-II多目标优化中,一般需把目标函数写成统一的数学映射形式, F_1 、 F_2 和 F_3 分别表示对应优化目标 Nu 、 f 、 η 的数学表达函数。

最大化: $Nu=F_1(p, h, a, Re)$;

最小化: $f=F_2(p, h, a, Re)$;

最大化: $\eta=F_3(p, h, a, Re)$;

优化结果如图7所示,通过多目标优化获得了一组帕累托最优解集。为从中筛选出具有代表性的最优方案,本文采用TOPSIS多属性决策方法对帕累托解进行综合评价,其中换热性能、流动阻力及综合性评价指标的权重均设为1/3。通过计算各方案与正理想解和负理想解之间的相对贴近度,对帕累托解集进行排序,并选取3次独立优化中贴近度排名靠前的最优解,其结果如表5所示。将上述最优解代入CFD数值模型进行验证,结果表明预测值与模拟值之间的误差均处于允许范围内,说明所建立的多目标优化模型具有较好的准确性和可靠性。

3.5 运行参数分析

为评估所获得最优结构在不同运行工况下的适用性,选取表5中的第3组最优解进行单因素分析。所有计算均基于典型制冷热泵工况范围,计算结果如图8所示。

由图8(a)可知,随着压力升高, Nu 和 f 同步增加,对应的 η 虽呈略微下降趋势,但内肋扭曲椭圆管的 η 在整个压力范围内始终高于圆管,表明其综合性能始终优于圆管。由图8(b)可知, Nu 在拟临界温度附近出现峰值,且无论处于远临界、近临界还是跨临界状态, η 均大于1,说明该强化结构在整个温度区间内均能持续强化传热。图8(c)中,随着入口速度提高, Nu 和 η 均随之增加, η 始终大于1。由图8(d)可知,随着壁面热流密度增加, Nu 逐渐变大, f 逐渐降低, η 虽呈下降趋势但整体仍大于1。综上所述,内肋扭曲椭圆管在超临界CO₂制冷热泵的典型工况范围内具备优异的传热强化特性。 η 在全工况区间内均大于1,且在近临界区及高流速工况下性能优势尤为显著,表明该优化结构具有极佳的工况适应性。

4 结论

采用内肋扭曲椭圆管来提高跨临界CO₂制冷系统中气体冷却器的性能。研究几何参数和流动参数变化对该管流动和换热性能的影响,基于场协同原理揭示强化传热机理;同时应用响应面法分析了设计参数之间相互作用所产生的影响,采用NSGA-II确定结构参数与流动参数最优组合。得到结论如下:

1)内肋扭曲椭圆管的平均协同角均小于光管,说明该管传热性能显著优于圆管。其扭曲和内肋结构诱导形成持续的二次流,推动核心区高温流体向管壁移动、低温流体向中心回流,增强流体的径向混

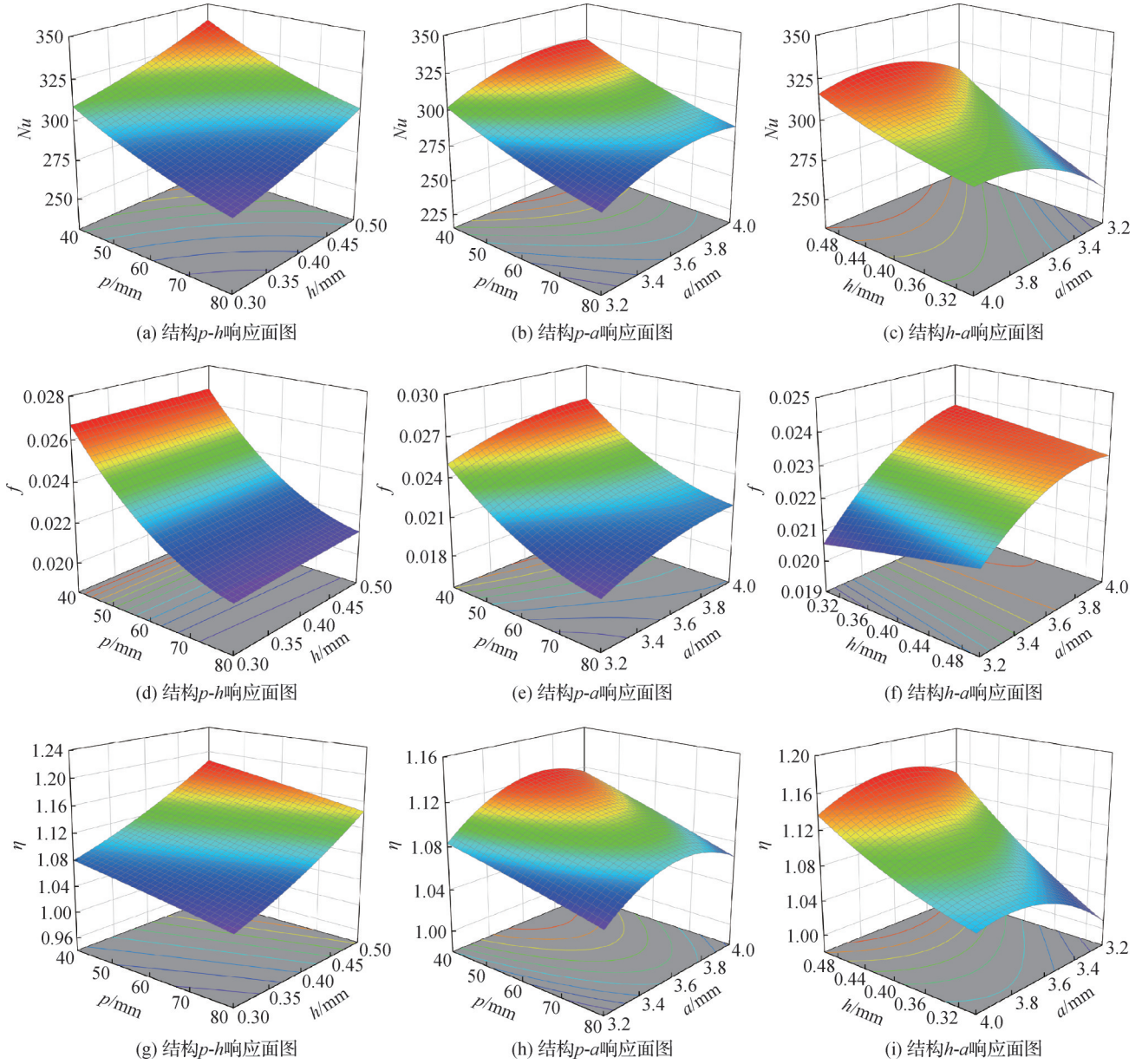


图6 不同因数相互作用的响应面图

Fig.6 Response surface plots for the interactions between different factors

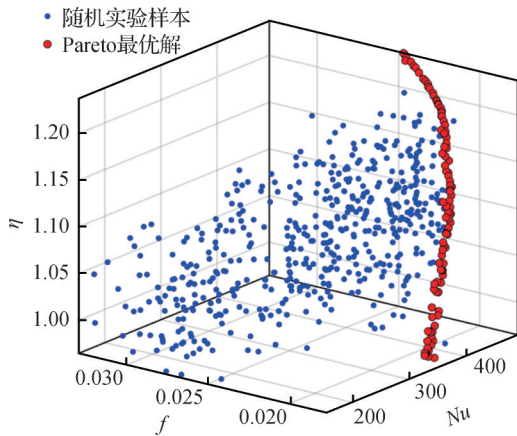


图7 多目标优化帕累托解集

Fig.7 Pareto solution set for multi-objective optimization

表5 多目标优化最优解

Tab.5 Optimal solutions for multi-objective optimization

方案	p/mm	h/mm	a/mm	Re	Nu	f	η
1	68	0.5	3.59	117430	456.06	0.023	1.182
2	64	0.5	3.91	119708	476.97	0.026	1.200
3	57	0.5	3.78	115727	472.96	0.024	1.209

合,破坏热边界层,实现强化传热。

2) Nu , f 和 η 的 P 值均小于 0.001, R^2 均大于 0.9, 说明回归模型显著性高,能准确描述设计参数与目标函数的非线性关系。方差分析得出, Re 是主导因素,对 Nu , f , η 的影响最大,扭曲结构整体上比内肋结构影响更显著。

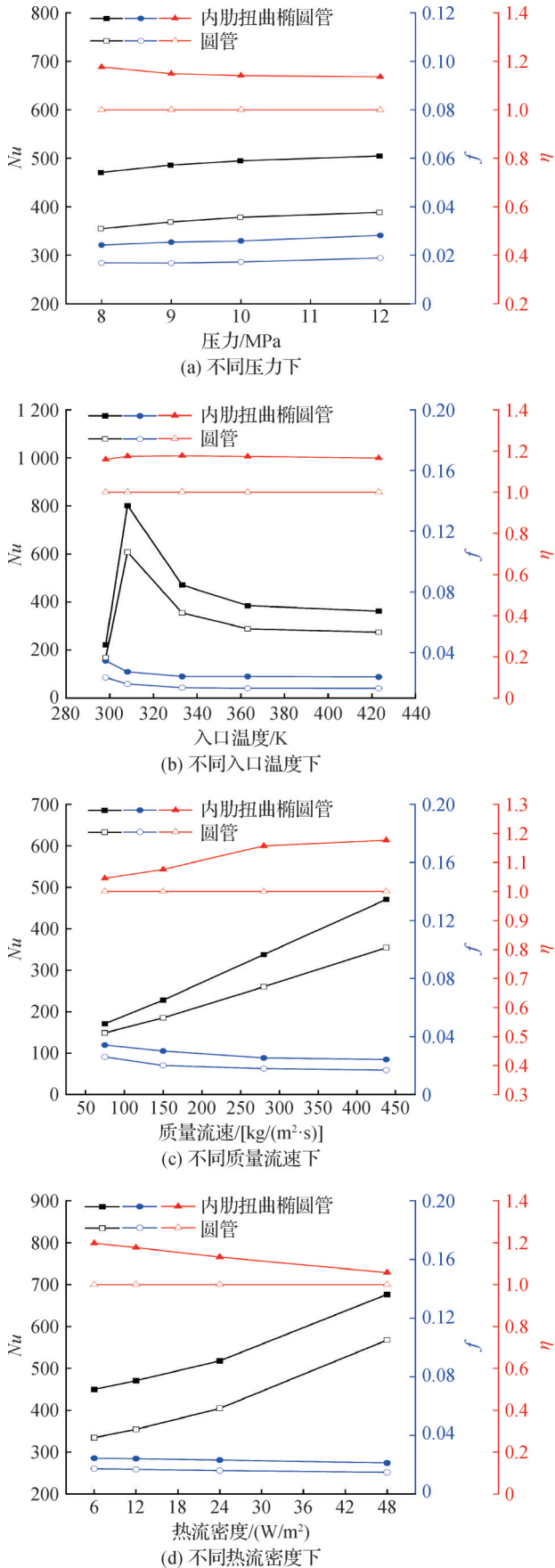


图8 不同工况下内肋扭曲椭圆管与圆管对比分析

Fig.8 Comparison of internally ribbed twisted elliptical and circular tubes under different conditions

3) 基于RSM和NSGA-II, 得到Pareto最优解, 最优值出现在 h 为0.5 mm, a 在3.6~3.9 mm以及 p 在50~70 mm区间, 此时 η 有最大值, 强化传热和流动阻力可以达到较好的平衡。该优化结构具有良好的工况适应性, 适用于超临界CO₂制冷热泵系统。

参考文献

[1] Lorentzen G, Pettersen J. A new, efficient and environmentally benign system for car air-conditioning[J]. International Journal of Refrigeration, 1993, 16(1): 4-12.

[2] 宋昱龙, 王海丹, 殷翔, 等. 跨临界CO₂蒸气压缩式制冷与热泵技术综述[J]. 制冷学报, 2021, 42(2): 1-24. (Song Yulong, Wang Haidan, Yin Xiang, et al. Review of transcritical CO₂ vapor compression technology in refrigeration and heat pump [J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(2): 1-24.)

[3] 黄俊杰, 韩增孝, 郭江峰, 等. 超临界CO₂微通道换热器研究进展[J]. 制冷学报, 2023, 44(4): 1-14. (Huang Junjie, Han Zengxiao, Guo Jiangfeng, et al. Research progress in supercritical CO₂ microchannel heat exchangers [J]. Journal of Refrigeration, 2023, 44(4): 1-14.)

[4] Wu Yunlei, Ren Tingting, Huang Lu, et al. Numerical analysis on flow and heat transfer performance of sCO₂ in a vertical helically U-tube[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2025, 249: 127265.

[5] Li Wenguang, Yu Zhibin. Heat transfer enhancement of supercritical carbon dioxide in eccentric helical tubes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 221: 125041.

[6] Liaw K L, Kurnia J C, Sasmito A P. Enhancing supercritical carbon dioxide heat transfer in helical tube heat exchangers with twisted tape inserts: a computational investigation [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 227: 125598.

[7] Yang Zenan, Chen Wei, Chyu M K. Numerical study on the heat transfer enhancement of supercritical CO₂ in vertical ribbed tubes [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 145: 705-715.

[8] Mashayekhi R, Eisapour A H, Eisapour M, et al. Hydrothermal performance of twisted elliptical tube equipped with twisted tape insert [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 172: 107233.

[9] Eiamsa-ard S, Maruyama N, Hirota M, et al. Heat transfer mechanism in ribbed twisted-oval tubes [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 193: 108532.

[10] Li Xiuzhen, Feng Junqi, Tan Yingying, et al.

- Examination of convective heat transfer and entropy generation performance in twisted elliptical tubes using response surface method [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 248: 123164.
- [11] 刘必伟. 内肋椭圆扭曲管管内传热与流动特性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2022. (Liu Biwei. Study on heat transfer and flow characteristics in elliptical twisted tube with inner ribs [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.)
- [12] 王定标, 王光辉, 彭旭, 等. 双向扭曲管传热与流阻特性及其多目标优化[J]. *热科学与技术*, 2018, 17(5): 380–386. (Wang Dingbiao, Wang Guanghui, Peng Xu, et al. Heat transfer and flow resistance characteristics of bidirectional twisted tube and multi-objective optimization [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2018, 17(5): 380–386.)
- [13] Khoshvaght-Aliabadi M, Ghodrati P, Rashidi M M, et al. Structural analysis and optimization of flattened tube gas cooler for transcritical CO₂ heat pump systems[J]. *Energy*, 2024, 307: 132588.
- [14] Jin Feng, Chen Deqi, Hu Lian, et al. Optimization of zigzag parameters in printed circuit heat exchanger for supercritical CO₂ Brayton cycle based on multi-objective genetic algorithm[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 270: 116243.
- [15] Li Liangxing, Zhao Haoxiang, Zhao Jiayuan, et al. Single/multi-objective optimization design and numerical studies for lead-to-supercritical carbon dioxide heat exchanger based on genetic algorithm [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(15): 7656.
- [16] Dang Chaobin, Hihara E. In-tube cooling heat transfer of supercritical carbon dioxide. Part 1. Experimental measurement [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2004, 27(7): 736–747.
- [17] Myers R H, Montgomery D C, Anderson-Cook C M. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments [M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2016.
- [18] Guo Z Y, Li D Y, Wang B X. A novel concept for convective heat transfer enhancement [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1998, 41(14): 2221–2225.
- [19] Ko T H. Numerical investigation of laminar forced convection and entropy generation in a helical coil with constant wall heat flux[J]. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2006, 49(3): 257–278.
- [20] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182–197.

通信作者简介

左建国,男,副教授,大连理工大学能源与动力学院,13998582950, E-mail: jgzuo@dlut.edu.cn。研究方向:换热器,强化传热。

About the corresponding author

Zuo Jianguo, male, associate professor, School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, 86-13998582950, E-mail: jgzuo@dlut.edu.cn. Research fields: heat exchangers, heat transfer enhancement.

(责任编辑:王亚薇)