

DOI: 10.7652/xjtub201705002

缠绕管式换热器结构参数多目标优化 数值模拟研究

王斯民¹, 简冠平¹, 肖娟¹, 王家瑞¹, 文键²

(1. 西安交通大学化学工程与技术学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为分析缠绕管式换热器关键几何结构对其流动和传热性能的影响,采用多目标遗传优化算法对壳侧的流动和传热特性进行了数值模拟研究,并对通过中心复合设计得出的实验点进行了计算。研究表明:缠绕管式换热器的壳侧压降随着层间距、缠绕角、同层管间距的增大而减小;壳侧换热系数随着层间距的增大而减小,随着管外径的增大而增大,随着螺旋角的增大先增大后减小。通过敏感度分析可知:螺旋角和层间距对缠绕管式换热器的流动和传热性能影响最大,在计算工况下,层间距对压降和换热系数都呈负相关;螺旋角与压降呈负相关,与换热系数呈正相关。同时,应用多目标遗传算法在连续响应面的基础上对原结构进行优化,得到3组优化结果,换热系数平均增加了2.93%,压降平均降低了40.27%,综合传热性能均好于原结构。该研究成果可为缠绕管式换热器的优化设计提供理论基础。

关键词: 缠绕管式换热器;结构参数;多目标优化;数值模拟

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)05-0009-07

Multi-Objective Optimization on the Structural Parameters of Spiral Wound Heat Exchanger

WANG Simin¹, JIAN Guanping¹, XIAO Juan¹, WANG Jiarui¹, WEN Jian²

(1. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Combining multi-objective optimization and numerical simulation, the effects of the key structural parameters of a spiral wound heat exchanger on its flow and heat transfer characteristics were studied. And the simulation groups generated by central composite design were calculated. Simulation results show that the shell-side pressure drop of the spiral wound heat exchanger decreases with the increase of the layer pitch, spiral angle and tube pitch; the shell-side heat transfer coefficient of the spiral heat exchanger decreases with the increase of the layer pitch and increases with the external diameter of the tube, however the coefficient increases firstly with the spiral angle then decreases. The sensitivity analysis also shows that the shell-side flow and heat transfer characteristics are most affected by the spiral angle. Under the working conditions, both pressure drop and heat transfer coefficient are negatively correlated with the layer pitch, and the spiral angle is negatively correlated with the pressure drop but positively correlated with the heat transfer coefficient. Three sets of optimal results were obtained by

收稿日期: 2016-09-17。 作者简介: 王斯民(1977—),男,副教授;文键(通信作者),女,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51676146)。

网络出版时间: 2017-02-22

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170222.0931.002.html>

employing multi-objective genetic algorithm to minimize the shell-side pressure drop and maximize the heat transfer coefficient on successive response surfaces. Compared with the original group, the average heat transfer coefficient is increased by 2.93% while the average pressure drop is reduced by 40.27%, which is of great significance for the study of spiral wound heat exchanger.

Keywords: spiral wound heat exchanger; structural parameters; multi-objective optimization; numerical simulation

缠绕管式换热器以其结构紧凑、耐高压、换热效率高和较低的投入费用等优点在石油化工、制药、核能以及 LNG 工业中得到了广泛的应用^[1-2],但由于其结构复杂,且缺乏相关的制造标准,近年来逐渐受到国内外学者的关注和研究。Neerass 使用多种低温工质对缠绕管式换热器壳侧进行了上百组实验研究,推荐了适用于各工况的数据处理方法和经验公式^[3-4]。Lu 等结合简化实验结果,分析了 3 层缠绕管式换热器在不同边界条件下壳侧的传热情况,并且拟合 Nu 计算公式,同时得出垫条厚度(层间距)、换热管外径、缠绕管层数以及芯桶直径等结构参数为影响流动和换热性能的主要参数^[5-6]。这些实验研究为国内外学者对缠绕管式换热器进行模拟研究提供了重要的数据支持。吴志勇等对几何模型进行简化后,对壳侧制冷剂过热流动进行了数值模拟,分析了流动过程中压力、速度及温度的分布规律^[7]。邱国栋等采用计算流体力学方法,对缠绕管式换热器单根换热管管内丙烷冷凝换热进行了模拟,结果表明在不同质量流量和干度下测量段出现了分层流、环状流等流型^[8]。李淑恒等分析了缠绕管式换热器几何结构对流动和传热性能的影响,结果表明随着换热管径和径向比的增大,换热系数逐渐减小^[9]。Zeng 通过数值模拟,分析了缠绕管式换热器关键几何参数对壳侧流动和换热的影响,且对这些几何结构的变化对流动和换热的影响大小进行了评估,得出了 f 和 Nu 的计算经验式^[10]。付平等利用 Auto LISP 语言对换热器参数化设计进行了研究,直接将参数输入菜单和对话框中实现了自动设计^[11]。但是,现有文献对于缠绕管式换热器几何结构参数的研究多为离散点,且较少考虑多参数之间的耦合关系对换热器流动和传热性能的影响,不能准确地找出缠绕管式换热器的性能最优点。

本文将同时对缠绕角度、层间距、同层管间距、换热管外径等缠绕管式换热器的关键几何参数进行参数化驱动建模设计,并采用 CCD-RSM (central composite design-response surface method) 研究几何参数对缠绕管式换热器壳侧流动和传热性能的影响;

同时基于连续响应面,采用多目标遗传算法进行优化,得到了缠绕管式换热器的较优结构。

1 计算模型和数值方法

1.1 参数化驱动建模

图 1 为本文计算所用缠绕管式换热器结构示意图。计算时在换热段高度 H 不变的情况下,改变缠绕角度 θ 、层间距 B 、同层管间距 l 及换热管外径 D_i 等几何参数,得到不同的换热器结构,从而实现参数化驱动建模,参数变化范围见表 1。

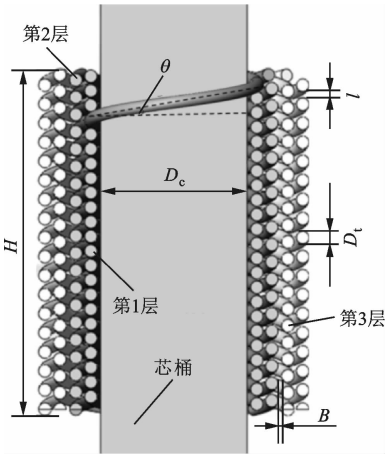


图 1 缠绕管式换热器几何结构

表 1 各几何参数变化范围

几何参数	变化范围
$\theta/(^{\circ})$	6~20
B/mm	2~6
l/mm	1.8~5
D_i/mm	8~16

1.2 网格生成和数值方法

由于缠绕管式换热器的几何结构较为复杂,本文采用混合型网格(进出口延长段为结构化网格,换热段为非结构化网格)对其计算域进行划分。为提高网格质量,在计算前对网格进行了自适应处理及无关性验证,最终的计算网格均选取相同的最大网

格尺寸,不同组合下计算域的网格单元数在 1 200 万~1 800 万之间。

本文计算工质为乙烷;工质入口为速度边界条件,入口温度为 143 K;出口为压力边界条件;换热管为恒壁温,温度为 220 K;壳体及其余壁面均按照无滑移绝热壁面处理。计算所用湍流模型为 RNG $\kappa\epsilon$ 模型^[10],壁面函数为标准壁面函数。采用 SIMPLE 算法分析压力-速度耦合,动量和能量方程均为二阶迎风格式,要求 κ 和 ϵ 两参数及动量收敛于 10^{-4} ;能量及质量计算残差在 10^{-6} 之内。连续性方程、动量方程及能量方程等基本方程表达式如下。

连续性方程

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

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_k) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\eta \frac{\partial u_k}{\partial x_i}) - \frac{\partial p}{\partial x_k} \quad (2)$$

能量方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i t) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial t}{\partial x_i}) \quad (3)$$

式中: ρ 为流体密度; u_i 为矢量速度; η 为黏度; p 为压力; t 为温度; λ 为导热系数; c_p 为比定压热容。

计算所用湍流模型中,湍动能 κ 的计算式如下

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \kappa) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] - \rho \epsilon + P_k \quad (4)$$

式中: P_k 为黏性力引起的湍流生成项。

湍动能耗散率 ϵ 的表达式如下

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\epsilon R}} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1 R} P_k - C_{\epsilon 2 R} \rho \epsilon + C_{\epsilon 1 R} P_{eb}) \quad (5)$$

式中: $C_{\epsilon 1 R} = 1.14 - f_\eta$, 其中

$$f_\eta = \frac{\eta(1 - \eta/4.38)}{(1 + \beta_R \eta^3)} \quad (6)$$

$$\eta = \left(\frac{P_k}{\rho C_{\mu R}} \right)^{1/2} \quad (7)$$

1.3 数值模型验证

模拟值与文献[3]实验数据的对比如图 2 所示。对比结果表明:计算所得的 Nu 与实验值的平均误差为 5.67%;换热管单位长度压降 Δp_m 的平均误差为 7.90%,最大误差在 9% 以内。与实验值对比的两个变量的误差均在合理范围内,证明了计算模型的正确性。实验值与模拟值的偏差主要是由于模拟过程较为理想,未考虑环境漏热以及实验过程中测量仪器和操作过程不准确性等因素。

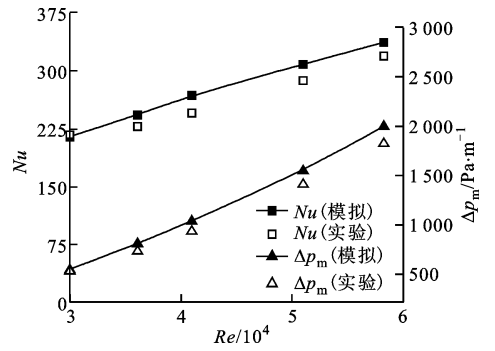


图 2 模拟值与实验值对比

2 优化方法与过程

采用 CCD-RSM 算法将前文提及的 5 个几何参数及换热器壳侧进口流速作为输入变量,生成计算点并计算得出输出变量(壳侧压降 Δp 和换热系数 K);然后根据 CCD-RSM 中的 Genetic Aggregation 算法^[12-13]将计算点中的输入变量和输出变量拟合成响应面。该方法集数学和统计学于一体,与传统正交实验点设计法相比,具有精度高、预测性好、直观等优势,适用于对影响因素较敏感的指标进行优化计算^[14-16]。近年来,这一方法也被广泛应用于换热器优化领域^[17-20]。

本文采用多目标遗传算法,根据输入变量的变化范围及相应的约束条件建立目标函数,通过迭代计算得出目标函数的极值,从而实现缠绕管式换热器结构优化。该方法是在一定的设计参数范围内对多个目标进行同时寻优^[21]。

多目标优化问题的数学表达如下

$$\min y = f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)] \quad (8)$$

$$n = 1, 2, \dots, N$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} g_i(x) \leq 0 \\ h_j(x) = 0 \end{cases}$$

$$i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, k \quad (9)$$

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_d, \dots, x_D] \quad (10)$$

$$x_{d\min} \leq x_d \leq x_{d\max}, d = 1, 2, \dots, D \quad (11)$$

式中: y 为目标函数; x 为设计变量(各几何参数及入口流速); m, n, i, j, d 为状态变量的个数。

根据多目标问题的数学描述,本文优化的目标函数如下

$$\text{minimize } \Delta p = p_{\text{out}} - p_{\text{in}} \quad (12)$$

$$\text{maximize } K = \frac{Q}{\Delta t_m A} \quad (13)$$

式中: $p_{\text{in}}, p_{\text{out}}$ 分别为壳侧进出口压力; Q 为换热量; A 为换热面积; Δt_m 为换热器对数传热温差。

文中各输入变量的变化范围即为约束范围,其中几何参数的变化范围见表1;壳侧入口流速 V_{in} 的范围在 $0.5 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,第1层缠绕直径 $D=205 \text{ mm}$ 。

3 结果分析

为研究缠绕管式换热器壳侧几何结构对换热器内流动与传热的影响,本文根据 CCD-RSM 理论共计算了 45 组实验点算例,得出了优化目标压降和换热系数与各输入参数之间的关系。

3.1 敏感性分析

图3为4个几何参数和入口流速与输出参数 Δp 和 K 的敏感性关系。分析图3可知,流速对两个输出参数的影响明显大于结构参数。在结构参数中, B 对缠绕管式换热器的压降和换热性能影响最大,且都呈负相关。这是因为层间距的大小将直接影响换热器的壳侧有效通流面积。 θ 对压降的影响大于对换热的影响,且与压降呈负相关。 θ 的变化还影响壳侧流体的流动形态,当 θ 很小时,流体近似横掠流过换热管,此时流动损失大;当 θ 较大时,横掠流转变为斜掠流,流动损失变小。受壳侧通流面积及相邻管间相互作用的影响, l 与压降和换热都呈负相关。 D_i 与压降和换热均呈现正相关趋势。缠绕管式换热器这些关键几何结构对其流动性能及换热器的设计有重要意义。

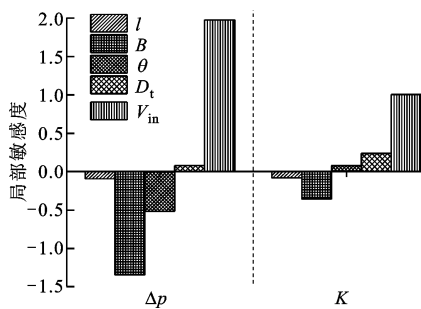


图3 输入参数与输出参数之间的敏感性

3.2 结构参数对壳侧压降的影响

图4为不同层间距下压降随入口流速的变化趋势。从图中可以看出,压降随着层间距的增大而减小,即层间距为 2 mm 时换热器壳侧的压降最大,且流速小时,不同层间距下的压力损失小于流速较大时的工况。这是因为在其他结构参数不变的情况下,换热管各层层间距决定了壳侧的通流面积,层间距较小时,通流面积也相应减小,以致流速增大,压力损失也必然增大。

图5为不同螺旋角下压降随入口流速的变化趋

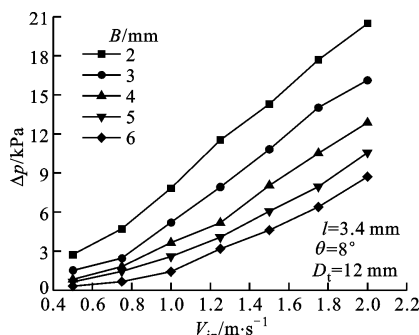


图4 不同层间距下压降随入口流速的变化

势。由图可知,压降随着缠绕角的增大而减小,流速较大时,缠绕角的变化对压降的影响较大。换热管缠绕角的变化可以改变壳侧局部的流动形态。在壳侧,换热介质的整体流动方向是沿着换热器轴向从壳侧入口流向出口的,但由于换热管沿着中心筒以一定的缠绕角度均匀缠绕,换热管会对流体起到导流作用。导流作用与换热管在壳侧的缠绕角有关,缠绕角大时导流作用明显,缠绕角小时导流作用则被弱化,当缠绕角无限小时,流体流动形态则趋近于横掠流。

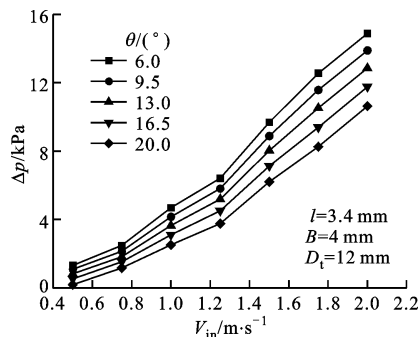


图5 不同缠绕角下压降随入口流速的变化

图6、图7分别为不同 l 和 D_i 下压降随入口流速的变化关系。从图6可以看出,在相同入口流速下,随着管间距的增大,壳侧整体压降随之减小,如入口流速为 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,管间距为 1.8 mm 的压降比管间距为 5 mm 的压降大 39.86% 。这表明管间距的减小会改变壳侧通流面积。图7表明,在壳侧其他结构参数不变的情况下,管外径对壳侧压降的影响则相对小很多。

3.3 结构参数对壳侧换热性能的影响

图8为不同层间距下换热系数随入口流速的变化规律。从图中可以看出:随着流速的增大,换热系数增大;随着层间距的增大,换热系数减小。这是由于层间距变小后,壳侧通流截面相对变小,壳侧介质局部流速增大;与此同时,换热介质对管壁的冲刷也

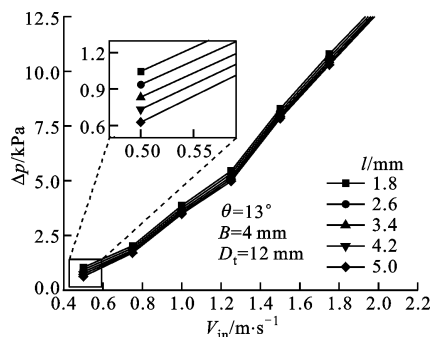


图 6 不同管间距下压降随入口流速的变化

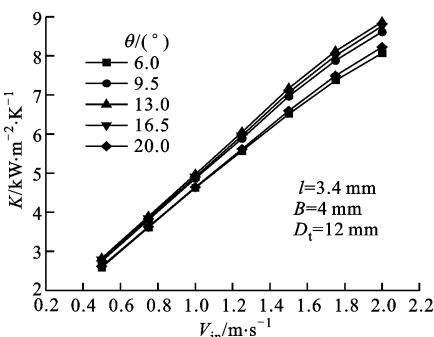


图 9 不同缠绕角下换热系数随入口流速的变化

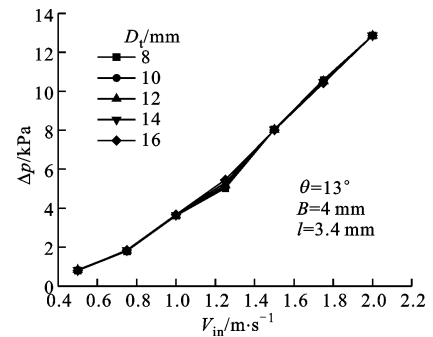


图 7 不同管外径下压降随入口流速的变化

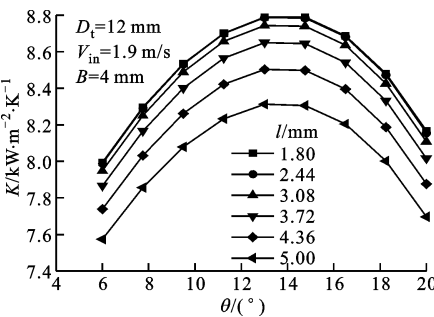


图 10 不同管间距下换热系数随缠绕角的变化

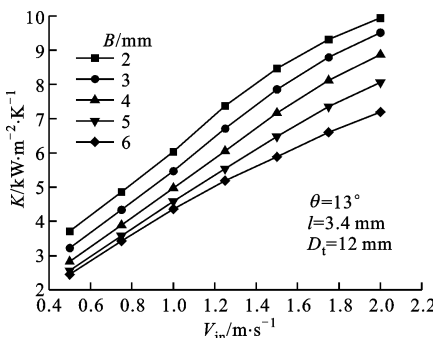


图 8 不同层间距下换热系数随入口流速的变化

管的迎流面的局部换热系数也较小,进而影响整体换热效果。当缠绕角度过大时,换热管对介质的导流现象凸显,极限情况下为换热介质沿着换热管顺流,此时的换热效果也较差,故在图 10 中表现为随着缠绕角的增大换热系数先增大后减小。图 11 为不同换热管外径下换热系数随入口流速变化的规律。从图中可以看出,换热系数随着流速和管外径的增大而增大。随着管外径的增大换热系数增加是因为当管外径增大时,换热面积也增加,下游换热管处于上游换热管尾迹区的面积占比减小,局部换热增强,故整体换热也增强。

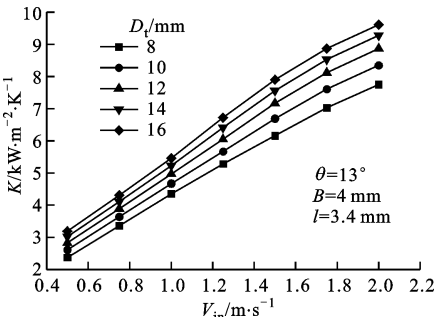


图 11 不同换热管外径下换热系数随入口流速的变化

3.4 多目标优化分析

在计算得出各个输入参数与输出参数的数据点后,对其进行寻优分析。优化方法选择多目标遗传算法(MOGA),这一算法支持在多个目标和约束条

变得剧烈,进而整场换热增强。

图 9 和图 10 分别为不同缠绕角下换热系数随入口流速的变化关系和不同管间距下换热系数随缠绕角的变化关系。结合两图分析可知,随着换热管缠绕角度的变化,换热系数先增大后减小,在某一流速下存在极值。如图 10 所示,随着同层管间距的增大换热系数逐渐减小,且当管间距较小时其变化对换热系数的影响较小。这些现象可以从介质在壳侧的流动形态解释。当缠绕角度较小时,介质冲刷换热管的流动形态可以近似认为是横向冲刷管束,若此时的管间距也较小,对于同层相邻的两根换热管则会出现这样一种情况:相邻的下游换热管的迎流面处于上游换热管的冲刷尾迹区。相对于换热管层与层之间的“主流区”,尾迹区的流速较小,下游换热

件下计算全局最优解。以式(12)和式(13)作为优化目标,各输入变量作为边界条件,在 100 个初始样本点中经过迭代计算得出最优点,优化结果列于表 2。与原结构相比,优化结构 1 在压降减小 44.38%的情况下,换热系数增大了 2.73%;优化结构 2 与原结构相比,在压降下降 29.62%的同时换热系数增加了 8.16%;优化结构 3 与原结构相比,压降下降

46.81%,而换热系数仅下降 2.09%。此外,表 2 中的换热器综合评价因子($Nuf^{-1/3}$)^[19]也说明了 3 种优化结构的换热器综合性能要优于原结构。通过 CCD-RSM 算法计算所得的响应面,结合多目标遗传算法,可在各参数的计算范围内精确地找到各结构参数组合下的性能最优结构,这对于缠绕管式换热器结构优化设计具有重要意义。

表 2 多目标优化结果($V_{in}=1.73\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

结构	l/mm	B/mm	$\theta/(\text{^\circ})$	D_i/mm	$\Delta p/\text{Pa}$	$K/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	$Nuf^{-1/3}$
原结构	1.8	4.0	10.00	10	11 774	7 586	8 843.50
优化结构 1	2.1	5.1	17.50	16	6 548	7 793	16 441.16
优化结构 2	2.4	4.3	17.70	16	8 286	8 205	15 088.48
优化结构 3	3.3	5.7	19.56	16	6 262	7 427	20 759.34

4 结 论

本文对缠绕管式换热器进行参数化建模,通过分析壳侧几何参数及工况对流动和传热性能的影响,得到如下结论。

(1)通过敏感性分析可知,在各个输入参数中,入口流速对流动和换热性能的影响最大,且均呈正相关,层间距、缠绕角及管间距与压降呈负相关,换热管外径与压降则呈正相关,其中层间距和缠绕角对压降的影响较大。在换热方面,层间距和管间距与换热系数呈负相关,缠绕角和管外径在该工况下则呈现负相关,缠绕角对换热的影响较大。

(2)随层间距的增大,压降和换热系数均减小。缠绕角对局部流动有导流作用,缠绕角的增大会使局部流动方向与换热管之间的夹角 α 减小,同时压降也减小;在换热方面,由于同层相邻换热管之间的相互影响,在缠绕角增大的同时,换热系数先增大后减小。

(3)通过多目标遗传算法对缠绕管式换热器进行了优化计算,分析壳侧压降与换热系数等指标,得到了 3 种优化结构。以换热器综合评价指标 $Nu\cdot f^{-1/3}$ 对原结构和 3 种优化结构进行对比表明,优化结构的综合性能均优于原结构换热器,与原结构相比,3 种优化结构的压降在平均降低 40.27%的同时,换热系数增加了 2.93%。这些结论表明,采用响应面和多目标遗传算法相结合的优化方式对缠绕管式换热器进行优化是可行的,且对缠绕管式换热器的设计制造具有重要意义。

参考文献:

[1] 于清野. 缠绕管式换热器计算方法研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2011: 8-24.

[2] 薛佳幸. 缠绕管式换热器换热工艺研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015: 4-14.

[3] NEERAAS B O, FREDHEIM A O, AUNAN B. Experimental shell-side heat transfer and pressure drop in gas flow for spiral-wound LNG heat exchanger [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(2): 353-361.

[4] NEERAAS B O, FREDHEIM A O, AUNAN B. Experimental data and model for heat transfer, in liquid falling film flow on shell-side, for spiral-wound LNG heat exchanger [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(14/15/16): 3565-3572.

[5] LU X, ZHANG G, CHEN Y-T, et al. Effect of geometrical parameters on flow and heat transfer performances in multi-stream spiral-wound heat exchangers [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 89: 1104-1116.

[6] LU X, DU X, ZENG M, et al. Shell-side thermal-hydraulic performances of multilayer spiral-wound heat exchangers under different wall thermal boundary conditions [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 70(2): 1216-1227.

[7] 吴志勇, 陈杰, 浦晖, 等. LNG 绕管式换热器壳侧过热态流动的数值模拟 [J]. 煤气与热力, 2014, 34(8): 6-11.

WU Zhiyong, CHEN Jie, PU Hui, et al. Numerical study on overheat flow in the shell side of spiral wound heat exchanger [J]. Gas & Heat, 2014, 34(8): 6-11.

- [8] 邱国栋,蔡伟华,吴志勇,等. 绕管换热器两相流冷凝换热及沿程压力降模拟 [J]. 煤气与热力, 2015, 35(2): 30-34.
- QIU Guodong, CAI Weihua, WU Zhiyong, et al. Numerical study on two phase flow condensation and pressure drop of spiral wound heat exchanger [J]. Gas & Heat, 2015, 35(2): 30-34.
- [9] 李淑恒,李庆生,刘博. LNG 绕管式换热器管内压降和传热的数值模拟 [J]. 轻工机械, 2016, 34(2): 15-19, 29.
- LI Shuheng, LI Qingsheng, LIU Bo. Numerical simulation of pressure drop and heat transfer inside tube of LNG coiled wound heat exchanger [J]. Light Industry Machinery, 2016, 34(2): 15-19, 29.
- [10] ZENG M, ZHANG G, LI Y, et al. Geometrical parametric analysis of flow and heat transfer in the shell side of a spiral-wound heat exchanger [J]. Heat Transfer Engineering, 2015, 36(9): 790-805.
- [11] 付平,吴俊飞,栾德玉,等. 固定管板换热器参数化设计 [J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2002, 15(3): 79-83.
- FU Ping, WU Junfei, LUAN Deyu, et al. Parameterize design of fix tube-sheet heat exchanger [J]. Journal of Qingdao University (Natural Science), 2002, 15(3): 79-83.
- [12] VIANA F A C, HAFTKA R T, STEFFEN V. Multiple surrogates: how cross-validation errors can help us to obtain the best predictor [J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2009, 39(4): 439-457.
- [13] ACAR E. Various approaches for constructing an ensemble of metamodels using local measures [J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2010, 42(6): 879-896.
- [14] 刘伟. 中心复合设计在裂区试验中的实现 [D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [15] 吴伟,崔光华. 星点设计-效应面优化法及其在药学中的应用 [J]. 国外医学: 药学分册, 2000, 27(5): 292-298.
- WU Wei, CUI Guanghua. Application of central composite-response surface optimizing design in pharmacy [J]. Foreign Medical Sciences Section on Pharmacy, 2000, 27(5): 292-298.
- [16] 李颖,王悦,邹梅娟,等. 中心复合设计-效应面法优化阿魏酸哌嗪缓释片处方 [J]. 中国药剂学杂志(网络版), 2009, 7(4): 242-250.
- LI Ying, WANG Yue, ZOU Meijuan, et al. Central composite-response surface optimizing design of Ferulic acid piperazine zyban prescription [J]. Chinese Journal of Pharmaceutice, 2009, 7(4): 242-250.
- [17] 季家东,葛培琪,毕文波. 换热器内弹性管束流体组合诱导振动响应的数值分析 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(9): 24-29.
- JI Jiadong, GE Peiqi, BI Wenbo. Numerical analysis on the combined flow induced vibration response of elastic tube bundle in heat exchanger [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(9): 24-29.
- [18] 文键,杨辉著,杜冬冬,等. 螺旋折流板换热器换热的数值研究 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(9): 43-48.
- WEN Jian, YANG Huizhu, DU Dongdong, et al. Numerical simulation for heat transfer enhancement of a heat exchanger with helical baffles [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(9): 43-48.
- [19] 王斯民,王萌萌,顾昕,等. 螺旋折流板换热器结构参数多目标优化的数值模拟 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(11): 14-19.
- WANG Simin, WANG Mengmeng, GU Xin, et al. Multi-objective optimization on the structural parameters of shell and tube heat exchanger with helical baffles [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(11): 14-19.
- [20] 文键,杨辉著,王斯民,等. 旋梯式螺旋折流板换热器优化结构的数值模拟 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(11): 8-14.
- WEN Jian, YANG Huizhu, WANG Simin, et al. Numerical simulation for configuration optimization of heat exchanger with helical baffles [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(11): 8-14.
- [21] 肖晓伟,肖迪,林锦国,等. 多目标优化问题的研究概述 [J]. 计算机应用研究, 2011, 28(3): 805-808.
- XIAO Xiaowei, XIAO Di, LIN Guojing, et al. Overview on multi-objective optimization research [J]. Application Research of Computer, 2011, 28(3): 805-808.

(编辑 荆树蓉)