

结构参数对缠绕管式换热器传热性能的影响

张安龙, 赵雨, 汪枫, 吕婉婷

(四川润动力设备有限公司, 四川 自贡 643000)

摘要: 缠绕管式换热器作为一种新型高效的换热器, 具有传热系数高、结构紧凑, 且能够同时适用于多种流体进行换热的特点。在基于某 CO₂ 与导热油实际工程换热项目基础上, 研究换热器的螺旋倾角 θ 、缠绕管外径 D 、径向间隙 P_d 、轴向间隙 P_l 、中芯筒直径 D_z 与缠绕管层数 C_s 对换热器传热性能、壳程压降 ΔP_s 与管程压降 ΔP_t 的影响。结果表明: 随着 θ 、 D 、 P_d 、 D_z 与 C_s 的增加以及 P_l 的减小, 换热器的传热性能逐渐降低; 在这些结构参数中, 对传热性能影响最大的是 θ , 最小的是 P_l ; 在改变结构参数增大换热器传热性能的同时, 往往会导致 ΔP_s 与 ΔP_t 增加。因此, 在工程实际项目中进行换热器的设计计算时, 需要综合考虑传热性能与压降, 最终设计出 ΔP_s 与 ΔP_t 在允许范围内具有更大传热性能的缠绕管式换热器。

关键词: 缠绕管式换热器; 结构参数; 传热性能; 压降

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)19-0258-06

随着社会与科技的发展, 对换热器的传热需求不断增大。传统管壳式换热器的传热效率不高, 许多学者通过改变换热管管型, 改变管内外流体的流动状态从而达到强化换热的效果^[1-4]。缠绕管式换热器作为一种新型换热器, 与传统管壳式换热器相比, 具有传热系数大、换热管热膨胀可以自行补偿等优点。同时它的换热特性与流动特性与传统管壳式换热器相比有显著不同, 因此引起了中外学者的广泛研究。

吴增发等^[5]对缠绕管式换热器壳程流体的流动特性与换热特性进行了数值模拟研究, 结果发现, 缠绕管外径、层间距、管间距与缠绕角度均会对壳程流体的流动与换热特性产生显著影响。徐启等^[6]指出, 在管程中, 管子内壁面存在旋流, 会破坏流体与管壁间的边界层, 减小了流体与壁面间的传热热阻, 从而增强了流体的传热性能; 在壳程中, 由于缠绕管的特殊缠绕结构, 使得流体在壳程中会产生较大的回流带。吴金星等^[7]运用数值研究的方法, 研究了绕管式换热器内壳侧流体的流动特性, 结果表明, 在径向截面上存在着大量速度旋涡, 在相邻绕管层之间, 壳侧流体会产生射流现象, 显著提高了流体的速度, 从而破坏了绕管管壁间的边界层, 进而降低了传热热阻, 增强了壳侧流体的换热特性。

田杨等^[8]研究了缠绕管式换热器内 3 种换热管排列方式(平行排列、错位排列和交叉排列)对换热器壳侧流体换热性能与阻力性能的影响。结果发现, 在 3 种换热管排列方式中, 错位排列中壳侧流体的综合换热性能最好。曹佳铭等^[9]通过 Python 语言优化了缠绕管换热器的设计以及优化程序, 通过实例验证了该优化程序可以有效优化缠绕管换热器的整体性能。张超等^[10]指出, 在其余条件不变的情况下, 随着缠绕管的缠绕角度增加, 壳侧流体的湍动能分布更加均匀, 在所研究的缠绕管角度范围内, 当角度为 67° 时, 绕管式换热器壳侧流体的综合换热性能最好。Mirgolbabaei 等^[11]利用数值模拟的方法, 对绕管式换热器壳侧流体的换热进行了研究, 结果发现, 缠绕管间距与缠绕管直径对壳侧流体的换热有显著影响, 壳侧流体的对流换热系数随着缠绕管间距的增大呈现先增大后减小再增大的趋势; 而随着缠绕管直径增大, 对流换热系数逐渐减小。Ghorbani 等^[12]通过实验的方法研究了绕管式换热器壳侧流体的流动与换热, 研究发现, 缠绕管表面积越大, 壳侧流体的换热性能越不佳, 随着表面积增大, 壳侧换热系数逐渐降低。Neeraas 等^[13-14]通过实验研究了绕管式换热器壳侧流体在过热蒸汽流以及两相液膜流的工况下流体的流动

收稿日期: 2024-05-30

作者简介: 张安龙(1997—), 男, 四川遂宁人, 硕士, 助理工程师, 研究方向为锅炉与换热器性能; 赵雨(1977—), 男, 山东新泰人, 高级工程师, 研究方向为锅炉性能设计; 汪枫(1994—), 男, 四川巴中人, 助理工程师, 研究方向为锅炉性能; 吕婉婷(2000—), 女, 四川绵阳人, 助理工程师, 研究方向为锅炉性能。

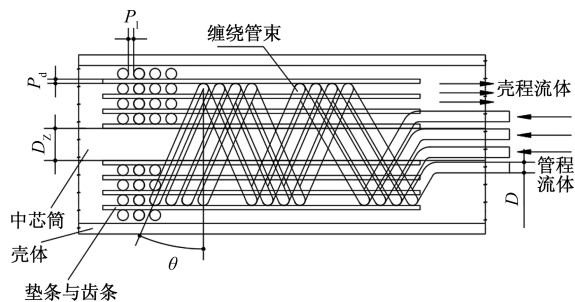
与换热特性,得出的实验结果数据与经验公式所得的结果数据相差不大。

综上所述,虽然已有相关文献对缠绕管式换热器进行了一定的研究,但大多只是单独研究换热器壳程或者管程内流体的换热及流动特性,而对于整个换热器的总传热性能还未进行系统研究。换热器的传热性能不仅跟壳程内流体的换热性能有关,且跟管程内流体的换热性能密不可分。因此本文在基于某壳程 CO_2 与管程导热油工程换热项目基础上,研究换热器结构参数对总传热性能的影响。只有准确了解结构参数对缠绕管式换热器传热性能的影响规律,才能更好地设计出一款更加高效、成本更低的缠绕管式换热器,可为缠绕管式换热器工程上的应用提供重要参考。

1 缠绕管式换热器模型

1.1 几何模型

缠绕管式换热器是一种新型高效换热器,主要由中芯筒、缠绕管束、垫条与齿条、壳体等组成^[15]。与传统管壳式换热器相比,缠绕管式换热器中传热管是螺旋缠绕在中芯筒上,相邻两层间传热管分别呈相反方向缠绕,且两层间由垫条与齿条隔开。为了固定同一层中传热管之间的轴向间距,传热管之间采用齿条进行定位与固定。缠绕管式换热器结构如图1所示。



D_z 为中芯筒直径; P_d 为垫条厚度,即为缠绕管径向间隙;

P_l 为轴向间隙; θ 为螺旋倾角; D 为缠绕管的外径

图1 缠绕管式换热器结构示意图

1.2 数学模型

在整个缠绕管式换热器进行换热过程中,壳程与管程中的冷热流体通过缠绕管进行换热,整个换热器满足的传热计算公式为

$$Q = KA\Delta T \quad (1)$$

式中: Q 为换热器的总换热量, W ; K 为换热器的总传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; A 为换热器的总传热面积, m^2 ; ΔT 为换热器的对数传热温差, $^{\circ}\text{C}$ 。

对数传热温差 ΔT 的计算公式为

$$\Delta T = \frac{(T_2 - t_1) - (T_1 - t_2)}{\ln \frac{T_2 - t_1}{T_1 - t_2}} \quad (2)$$

式中: T_1 、 T_2 分别为热流体进口与出口温度, $^{\circ}\text{C}$; t_1 、 t_2 分别为冷流体进口与出口温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

换热器总传热系数 K 的计算公式为

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + R_{z_o} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{D}{\alpha_2 D_i} + \frac{DR_{z_i}}{D_i} \quad (3)$$

式中: α_1 、 α_2 分别为壳侧流体与管侧流体的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; R_{z_o} 、 R_{z_i} 分别为壳侧与管侧污垢系数, $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$; D 、 D_i 分别为缠绕管外径与内径, m ; δ 为缠绕管壁厚, m ; λ 为缠绕管导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

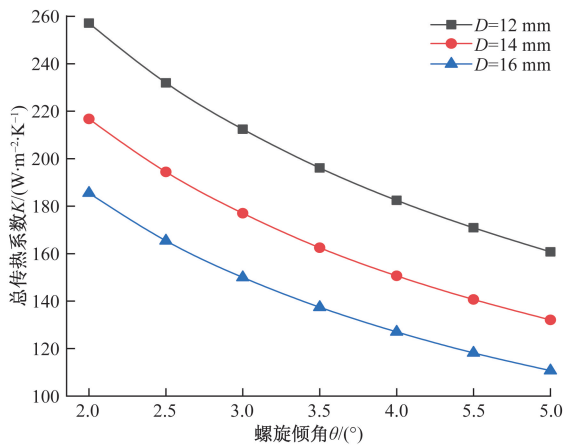
由式(1)与式(3)可以看出,对于整个换热器的传热性能来说,不仅仅跟壳侧流体的换热有关,跟管侧流体的换热也是密不可分。同时,在换热器的总换热量 Q 、对数平均温差 ΔT 一定的情况下,总传热系数 K 越大,则所需的总传热面积 A 越小,此时所需要的换热器成本就越低。在缠绕管式换热器中,结构的不同往往直接影响到换热器的总传热系数。因此研究缠绕管式换热器中结构参数对换热器整体传热性能的影响是很有必要的。几个主要的结构参数分别为螺旋倾角 θ 、缠绕管外径 D 、缠绕管径向间隙 P_d 、缠绕管轴向间隙 P_l 、中芯筒直径 D_z 以及缠绕管层数 C_s 。

在该项目中,给出了壳程流体与管程流体的物性参数以及一些基本参数,作为设计换热器已知条件。其中壳程流体为 CO_2 ,进口温度为 298.5°C ,出口温度为 60°C ,允许压降为 100 kPa ,进口流量为 40 kg/s ,污垢热阻为 $0.000176 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$;管程流体为导热油,进口温度为 25°C ,出口温度为 283°C ,允许压降为 200 kPa ,进口流量为 18.5 kg/s ,污垢热阻为 $0.000176 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$;同时给出了缠绕管式换热器在设计时所需要考虑的面积裕量为 10% 。在设计缠绕管式换热器时,一般在工业上对面积裕量的选择为 $10\% \sim 30\%$ ^[16]。

2 传热性能分析

2.1 螺旋倾角与缠绕管外径对传热性能的影响

换热器总传热系数 K 随螺旋倾角 θ 与缠绕管外径 D 的变化规律如图2所示。由图2可知,螺旋倾角 θ 与缠绕管外径 D 对总传热系数 K 的影响显著。随着 θ 增大,总传热系数 K 逐渐降低,但降低的幅度在逐渐减小;同时从图2还可以看出,在其他变量一定下, K 随着缠绕管外径 D 的增大而逐渐降

图2 K 随 θ 与 D 的变化规律

低。在较小螺旋倾角 θ 与缠绕管外径 D 下,缠绕管式换热器具有较高的传热性能。

2.2 径向间隙与轴向间隙对传热性能的影响

图3表示换热器总传热系数 K 随缠绕管径向间隙 P_d 与轴向间隙 P_l 的变化规律。由图3(a)可知,随着缠绕管径向间隙 P_d 增加,总传热系数 K 逐渐降低;而从图3(b)可以看出,随着缠绕管轴向间隙 P_l 逐渐增大,总传热系数 K 略有上升。同时从图3可以发现,与轴向间隙 P_l 相比,径向间隙 P_d 对总传热系数 K 的影响更显著,同时发现在较小的 P_d 与较大的 P_l 下,缠绕管式换热器具有较好的传热性能。

2.3 中芯筒直径与缠绕管层数对传热性能的影响

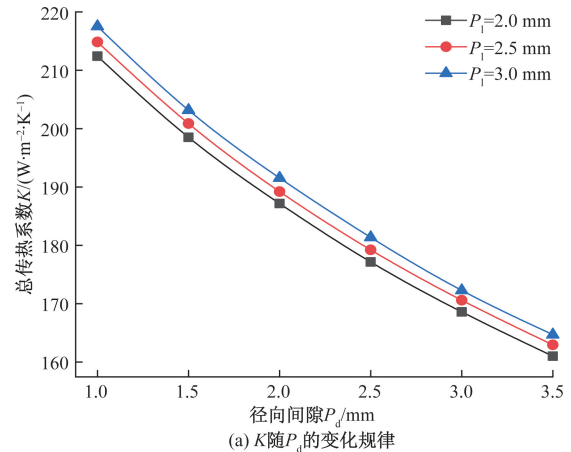
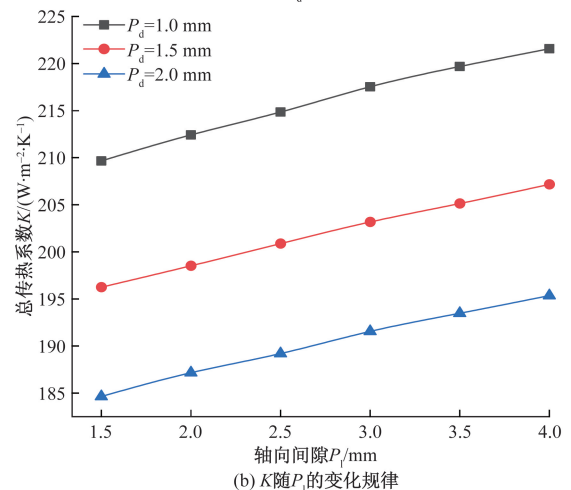
换热器总传热系数 K 随中芯筒直径 D_z 与缠绕管层数 C_s 的变化规律如图4所示。从图4可以看出,随着中芯筒直径 D_z 与缠绕管层数 C_s 增加,换热器总传热系数 K 逐渐降低,在较小的 D_z 与 C_s 下,换热器具有较大的 K ,此时具有较优的传热性能。

3 壳程与管程压降性能分析

通过上述研究结构参数对缠绕管式换热器传热性能的影响分析,发现结构参数螺旋倾角 θ 、缠绕管外径 D 、径向间隙 P_d 、轴向间隙 P_l 以及中芯筒直径 D_z 和缠绕管层数 C_s 均会对总传热系数 K 产生较大的影响。但在实际工程中,不仅仅要关注换热器的传热性能,还需要对壳程与管程的压降进行分析研究,需要综合考虑换热器总传热系数 K 、壳程压降 ΔP_s 与管程压降 ΔP_T 。

3.1 螺旋倾角与缠绕管外径对壳程与管程压降的影响

图5为换热器壳程压降 ΔP_s 与管程压降 ΔP_T 随螺旋倾角 θ 和缠绕管外径 D 的变化规律。由图5

(a) K 随 P_d 的变化规律(b) K 随 P_l 的变化规律图3 K 随 P_d 与 P_l 的变化规律

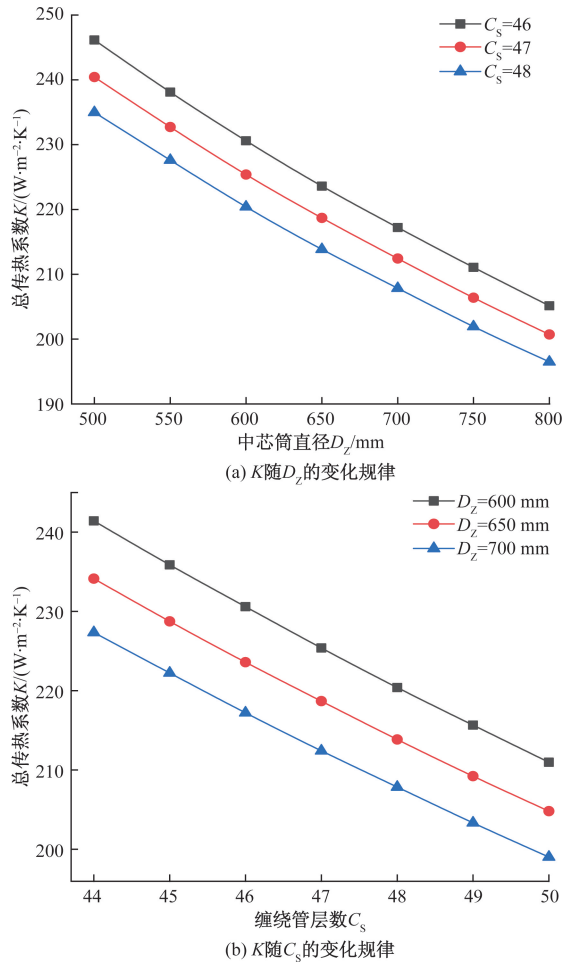
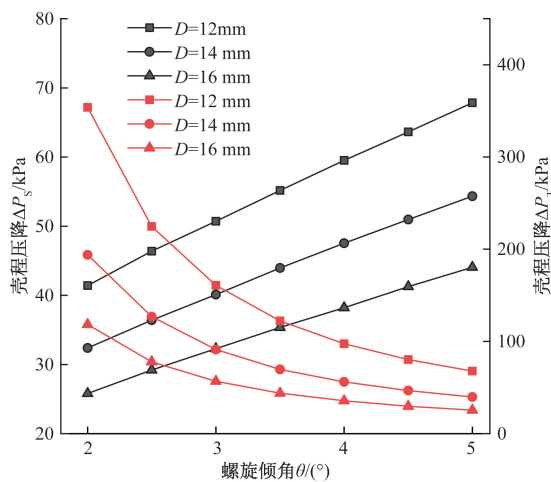
可知,随着螺旋倾角 θ 与缠绕管外径 D 逐渐增加,管程压降 ΔP_T 逐渐下降,但下降的幅度在逐渐降低。同时发现,壳程压降 ΔP_s 与螺旋倾角 θ 成正相关,而与缠绕管外径 D 成反相关。结合图2可以发现,虽然在较小的 θ 与 D 下,换热器具有较大的传热系数 K ,但此时的管程压降 ΔP_T 却是较大,明显高于换热器的允许压降,因此在实际工程项目中需要综合考虑 K 与 ΔP_s 和 ΔP_T 。

3.2 径向间隙与轴向间隙对壳程与管程压降的影响

换热器壳程压降 ΔP_s 与管程压降 ΔP_T 随缠绕管径向间隙 P_d 和轴向间隙 P_l 的变化规律如图6所示。由图6(a)可知,随着径向间隙 P_d 逐渐增加,壳程压降 ΔP_s 逐渐降低,而管程压降 ΔP_T 几乎不发生变化;由图6(b)可知,随着轴向间隙 P_l 增加,壳程压降 ΔP_s 逐渐降低,但降低的幅度很小,而管程压降 ΔP_T 逐渐升高。

3.3 中芯筒直径与缠绕管层数对壳程与管程压降的影响

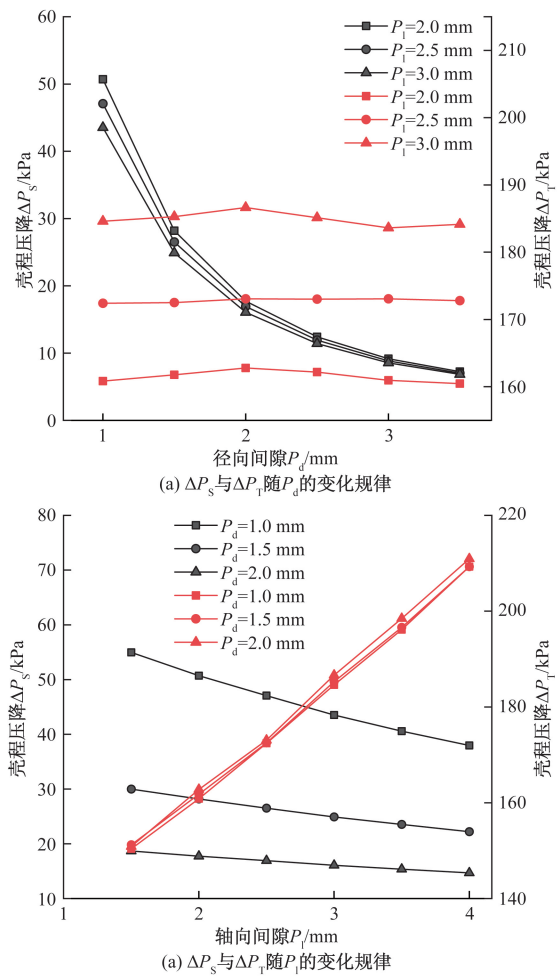
图7表示换热器壳程压降 ΔP_s 与管程压降 ΔP_T

图4 K 随 D_z 与 C_s 的变化规律图5 ΔP_s 与 ΔP_t 随 θ 和 D 的变化规律

随中芯筒直径 D_z 和缠绕管层数 C_s 的变化规律。由图 7 可知,壳程压降 ΔP_s 与管程压降 ΔP_t 均随着中芯筒直径 D_z 与缠绕管层数 C_s 的增加而逐渐下降。

4 结果分析

通过上述基于 CO₂ 与导热油换热项目的基础上

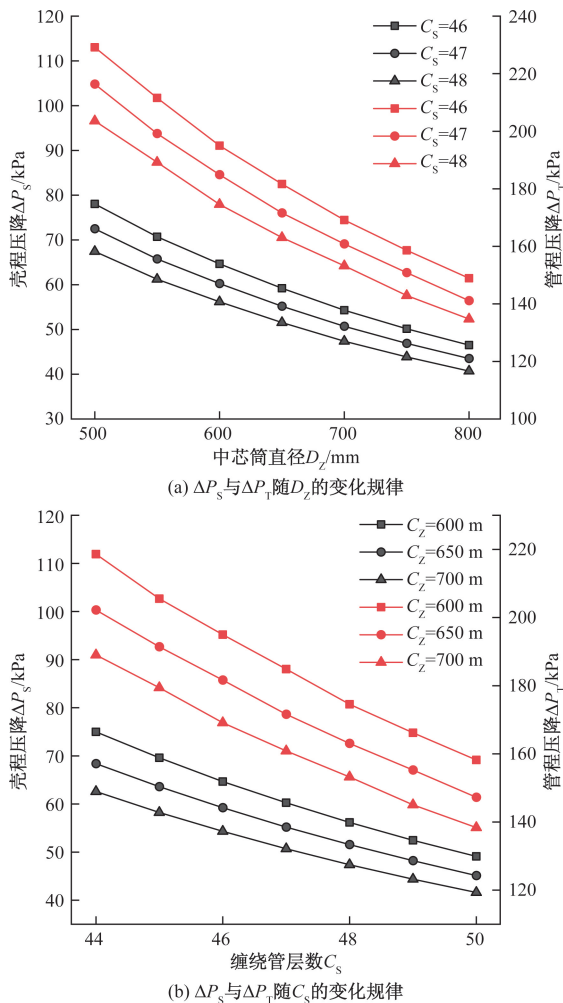
图6 ΔP_s 与 ΔP_t 随 P_d 和 P_1 的变化规律

研究了缠绕管式换热器结构参数对换热器传热性能与壳程压降以及管程压降的影响。最终设计了一款壳程、管程压降均在允许压降范围内,且传热系数较大的缠绕管式换热器。最终选择的结构参数分别为 $\theta = 3^\circ$, $D = 12$ mm, $P_d = 1$ mm, $P_1 = 2$ mm, $D_z = 650$ mm, $C_s = 47$ 。所计算结果中总传热系数 $K = 218.7$ W/(m²·K),壳程压降 $\Delta P_s = 55.2$ kPa,管程压降 $\Delta P_t = 171.6$ kPa。

5 结论

在基于某 CO₂ 与导热油换热项目的基础上研究了缠绕管式换热器结构参数对换热器传热性能的影响规律,得出以下结论。

(1) 换热器的总传热系数 K 随着螺旋倾角 θ 、缠绕管外径 D 、径向间隙 P_d 、中芯筒直径 D_z 与缠绕管层数 C_s 的增加而逐渐降低,而随着轴向间隙 P_1 的增加逐渐增大。在几个结构参数中,对换热器总传热系数 K 影响最大的是螺旋倾角 θ ,而影响最小的是轴向间隙 P_1 。

图7 ΔP_s 与 ΔP_t 随 D_z 和 C_s 的变化规律

(2)对换热器壳程压降 ΔP_s 与管程压降 ΔP_t 进行了分析研究,发现随着螺旋倾角 θ 、缠绕管外径 D 、径向间隙 P_d 、轴向间隙 P_1 、中芯筒直径 D_z 与缠绕管层数 C_s 逐渐增加, ΔP_s 逐渐降低,而随着螺旋倾角 θ 增大, ΔP_s 逐渐增加。同时发现 ΔP_t 随着 θ 、 D 、 D_z 与 C_s 成反相关,与 P_1 成正相关,而 P_d 对 ΔP_t 的影响不大。

(3)通过改变结构参数 θ 、 D 、 P_d 、 P_1 、 D_z 与 C_s ,虽然可以增大缠绕管式换热器的传热性能,但是也会相应地增加壳程压降 ΔP_s 与管程压降 ΔP_t 。因此在实际的工程设计缠绕管式换热器时,需要对 K 与 ΔP_s 以及 ΔP_t 进行综合考虑,选择 ΔP_s 与 ΔP_t 在允许压降范围内传热系数更大的换热器。

参考文献

[1] 张亮,曲平平,张安龙,等.波壁管式换热器内壳侧流体

流动与换热特性[J].科学技术与工程,2022,22(23):10086-10091.

- [2] 徐裕民,孙伟珂,于哲,等.换热器螺旋管冷凝换热的数值模拟与实验研究[J].科学技术与工程,2023,23(32):13845-13853.
- [3] 唐琳,何丹,谭礼斌,等.基于CFD的散热器性能仿真及实验对比分析[J].科技和产业,2022,22(1):279-283.
- [4] 张亮,张安龙,曲平平,等.脉动流场下波壁管内流体流动与换热特性[J].科学技术与工程,2022,22(1):173-178.
- [5] 吴增发,徐宏,徐鹏.缠绕管式换热器壳程参数的流动换热数值研究[J].化学工程,2019,49(7):12-18.
- [6] 徐启,刘家森,李书金,等.缠绕管式换热器流体流动换热性能分析[J].能源研究与管理,2022,14(4):122-128.
- [7] 吴金星,刘少林,彭旭.绕管式换热器壳侧流动及传热模拟与实验研究[J].郑州大学学报(工学版),2019,40(1):77-82.
- [8] 田杨,范军领,李升大,等.缠绕管排列方式对缠绕管式换热器内壳程流场影响的数值模拟[J].青岛科技大学学报(自然科学版),2018,39(4):98-104.
- [9] 曹佳铭,王学生,陈琴珠,等.含相变的缠绕管换热器设计及多目标优化[J].科学技术与工程,2022,22(9):3543-3550.
- [10] 张超,汪世益,张超,等.换热管缠绕角参数对管壳式换热器壳程流场的影响[J].化工机械,2023,50(2):187-191,243.
- [11] MIRGOLBABAIE H, TAHERIAN H, DOMAIRRY G, et al. Numerical estimation of mixed convection heat transfer in vertical helically coiled tube heat exchangers[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2011, 66(7): 805-819.
- [12] GHORBANI N, TAHERIAN H, GORJI M, et al. Experimental study of mixed convection heat transfer in vertical helically coiled tube heat exchangers[J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2010, 34(7): 900-905.
- [13] NEERAAS B O, FREDHEIM A, OAUNAN B. Experimental shell-side heat transfer and pressure drop in gas flow for spiral-wound LNG heat exchanger[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2004, 47(2): 353-361.
- [14] 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 & Mass Transfer, 2004, 47(14/15/16): 3565-3572.
- [15] 丁超. LNG 绕管式换热器壳侧两相流动与传热特性实验研究[D].上海:上海交通大学,2018.
- [16] 孔祥力.绕管式换热器及其传热的计算方法[J].化工管理,2021(26):120-121.

Influence of Structural Parameters on the Heat Transfer Performance of Wound Tube Heat Exchangers

ZHANG Anlong, ZHAO Yu, WANG Feng, LÜ Wanting

(Sichuan Chuanrun Power Equipment Limited Company, Zigong 643000, Sichuan, China)

Abstract: As a new and efficient heat exchanger, the wrapped tube heat exchanger has the characteristics of high heat transfer coefficient, compact structure, and can be used for heat exchange of multiple fluids simultaneously. On the basis of an actual engineering heat exchange project involving CO₂ and thermal oil, the effects of the spiral inclination angle θ , outer diameter of the wound tube D , radial clearance P_d , axial clearance P_l , core tube diameter D_z , and number of layers C_s of the wound tube on the heat transfer performance, shell side pressure drop ΔP_s , and tube side pressure drop ΔP_T of the heat exchanger were studied. The results indicate that as θ , D , P_d , D_z and C_s increase, as well as P_l decreases, the heat transfer performance of the heat exchanger gradually decreases. Among these structural parameters, the one with the greatest impact on heat transfer performance is θ , the smallest one is P_l . While changing the structural parameters to increase the heat transfer performance of the heat exchanger, it often leads to an increase in ΔP_s and ΔP_T . Therefore, when designing and calculating heat exchangers in practical engineering projects, it is necessary to comprehensively consider heat transfer performance and pressure drop, and ultimately design a wound tube heat exchanger with greater heat transfer performance within the allowable range for ΔP_s and ΔP_T .

Keywords: wrapped tube heat exchanger; structural parameters; heat transfer performance; pressure drop