

加装螺旋导流板的双层铜管换热器传热性能分析

孙亚茹¹, 李德权², 季家东³, 华子森²

(1. 安徽理工大学数学与大数据学院, 232001, 安徽淮南; 2. 安徽理工大学人工智能学院, 232001, 安徽淮南; 3. 安徽理工大学机械工程学院, 232001, 安徽淮南)

摘要: 为提高螺旋铜管(SCT)换热器的综合传热性能,通过在换热器内加装螺旋形导流板,采用双向流固耦合计算方法,分析了不同入口流速和导流板安装位置下对换热器内部双层 SCT 的振动和传热性能的影响。数值结果表明:双层 SCT 换热器外层 SCT 的振动强度明显高于内层;无振动时内层 SCT 的传热系数高于外层,有振动时外层 SCT 的传热系数高于内层;随着入口流速增加,内外层 SCT 的振幅均增大,传热系数提高;导流板的安装位置会直接影响 SCT 的振动和传热特性,且在 SCT 呈现最大振动强度和最佳传热性能时的安装位置并不相同;对比振动强化传热参数 Q_{PEC} 和综合传热性能因子 R_{JF} 发现,双层 SCT 换热器的 Q_{PEC} 和 R_{JF} 均高于单层,两螺旋导流板分别安装在换热器的左、下位置时, Q_{PEC} 最大,安装在换热器的左、上位置时, R_{JF} 最大且比安装在左、下位置时最高增大了 7.99%。该研究可为高性能 SCT 换热器的设计提供理论和数据支撑。

关键词: 螺旋铜管;换热器;螺旋导流板;综合传热性能;振动强化传热

中图分类号: TH123;TK172 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202408012 **文章编号:** 0253-987X(2024)08-0114-10

Analysis of Heat Transfer Performance of Double-Layer Copper Tube Heat Exchanger Equipped with Helical Deflector

SUN Yaru¹, LI Dequan², JI Jiadong³, HUA Zisen²

(1. School of Mathematics and Big Data, Anhui University of Science & Technology, Huainan, Anhui 232001, China;

2. School of Artificial Intelligence, Anhui University of Science & Technology, Huainan, Anhui 232001, China;

3. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science & Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: In order to improve the comprehensive heat transfer performance of spiral copper tube (SCT) heat exchanger, two helical deflectors are installed in the heat exchanger. The two-way fluid-structure interaction calculation method is used to analyze the effects of different inlet velocities and helical deflector's installed positions on the vibration and heat transfer performances of double-layer SCT in the heat exchanger. The numerical results show that in the double-layer SCT heat exchanger, the vibration intensity of the outer SCT is obviously higher than that of the inner SCT. The heat transfer coefficient of the inner SCT is higher than that of the outer SCT under non-vibration condition, while this coefficient of the outer SCT is higher than that of the inner SCT under vibration condition. With the increase of the inlet velocity, the

收稿日期: 2023-10-30。 作者简介: 孙亚茹(1989—),女,博士生;季家东(通信作者):男,副教授,硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52175070);安徽省自然科学基金资助项目(1908085ME160);安徽高校自然科学基金资助项目(KJ2018A0080)。

网络出版时间: 2023-12-26

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20231226.0938.002>

vibration amplitudes and the heat transfer coefficients of the inner and outer SCT all increase. The deflector's installed position directly affects the vibration and heat transfer performance of the SCT, and the deflector's installed position for the maximum vibration intensity is inconsistent with that for the best heat transfer performance. By comparing the vibration-enhanced heat transfer parameter Q_{PEC} and the comprehensive heat transfer performance factor R_{JF} , it can be observed that the Q_{PEC} and R_{JF} of the double-layer SCT heat exchanger are both higher than those of the single-layer one. The Q_{PEC} value is maximum when the two helical deflectors are installed in the left lower positions of the double-layer SCT heat exchanger. The R_{JF} value is maximum when they are installed at the left upper positions of the heat exchanger, and it increases by 7.99% at most compared with the value when they are installed in the left lower positions. The research results provide theoretical and data support for the design of high-performance SCT heat exchangers.

Keywords: spiral copper tube; heat exchanger; helical deflector; comprehensive heat transfer performance; vibration-enhanced heat transfer

无源强化传热技术^[1-2]因无需额外的能量输入,不会带来附加成本,已成为换热器设计研发领域学术界的研究热点^[3-4]。螺旋铜管(spiral copper tube, SCT)换热器正是该技术在换热器领域应用的典型代表,其利用流体在壳程内部绕流激励 SCT 振动,进而实现被动式强化传热^[5-7]。然而,由于内部流体流动路径较杂乱,导致各管束振动和传热均匀性较差且换热器的综合传热性能不高^[8-9]。因此,通过在 SCT 换热器内部加装螺旋导流板(helical deflector, HD),实现对壳程流体流动路径的优化,期望解决 SCT 换热器存在的技术问题并提升其综合传热性能,对于 SCT 换热器的设计和研发具有重要的理论意义和工程价值。

SCT 换热器方面,Wu 等^[10]研究了 SCT 的结构尺寸对换热器综合传热性能的影响,结果表明:由于流体流动产生的涡流,SCT 近壁面流体的湍动能增大,换热器的综合传热性能得到明显提高。Khosravi-Bizhaem 等^[11]通过搭建换热器实验平台,分析了 SCT 换热器的进出口压力差和传热特性,试验结果表明:随着脉动流频率逐渐增大,SCT 换热器内流体压力波动减小,进出口压降均值增大了 3%~7%;在雷诺数较低情况下,脉动流对流体的层流边界层作用明显,换热器的强化传热效果更好。Ji 等^[12]研究了壳程入口流速对 SCT 换热器振动强化传热特性的影响,结果表明:壳程入口流速增加,换热器内涡流强度显著增强,振动强化传热效果提升明显,但换热器上部 SCT 的平均传热系数是下部的 2.2 倍,存在管束传热不均匀现象。

导流板方面,Stehlik 等^[13]对 HD 换热器和分段式导流板换热器的压降修正系数及面均传热系数进行了对比分析,结果表明:与分段式导流板相比,

HD 不仅提高了换热器的传热系数,而且有效降低了进出口压降。Peng 等^[14]的研究进一步表明,基于相同进出口压降条件下,HD 使得传热元件的传热系数较分段式导流板提高了近 10%,且具有减少壳侧污垢和防止流激振动的作用。Cao 等^[15]对加装连续 HD、四分 HD、六分 HD 换热器的壳程流体流动特性及传热性能进行了数值分析和实验研究,结果表明:相较于四分和六分 HD,连续 HD 有减少流体滞留区及增强传热元件传热均匀性的作用。Gu 等^[16]对分别带有螺旋和分段式导流板的刚性直管换热器的传热特性进行了研究,结果表明:与分段导流板相比,采用螺旋导流板的换热器流体滞留区体积分数降低了 1.61%,传热性能提高了 13.23%。综上所述,将 HD 安装在 SCT 换热器内对其传热性能的提高具有积极作用。然而,在上述研究中,采用的传热元件均为刚性管束,并没有充分利用壳程流体引起的弹性管束振动增强传热性能。

本文通过在 SCT 换热器内部加装 HD,采用双向流固耦合(fluid structure interaction, FSI)计算方法,分析了不同壳程入口流速和 HD 安装位置条件下,换热器内双层 SCT 对振动和传热性能的影响,以求找到两 HD 在换热器内的最佳安装位置,获取综合性能更高的 SCT 换热器。

1 数值计算方法

1.1 螺旋铜管换热器

在 SCT 换热器内部加装并合理布置两 HD,得到的双层 SCT 换热器模型如图 1 所示。双层 SCT 的两端分别均匀安装在 SCT 换热器的左、右管板上,两 HD 和 SCT 同向螺旋,分别和换热器的内壁面和外壁面无缝焊接。换热器的工作原理参见文献

[5]。为分析两 HD 安装位置的变化对 SCT 换热器振动特性及传热特性的影响,定义两 HD 安装位置编号如表 1 所示。

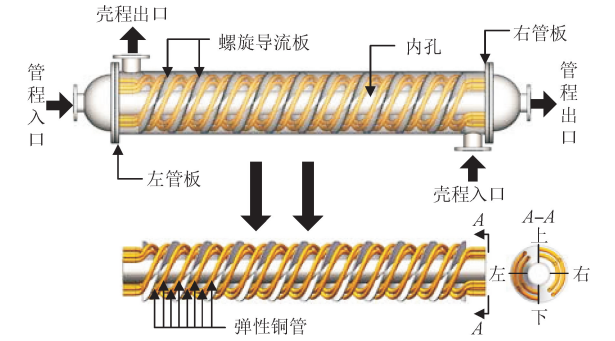


图 1 双层 SCT 换热器模型
Fig. 1 Model of the double-layer SCT heat exchanger

表 1 两 HD 的安装位置
Table 1 Installed position of two HD

位置编号	两 HD 安装位置			
	上	下	左	右
I	有	有	无	无
II	无	无	有	有
III	有	无	有	无
IV	有	无	无	有
V	无	有	有	无
VI	无	有	无	有

1.2 计算域

由于 HD 及换热器内外壳均采用不锈钢材质,在冷热流体诱导下产生的振动非常微弱,因此计算模型的结构场仅保留 SCT。因壳程冷流体为 SCT 振动的主要因素^[17-20],本文仅对壳程冷流体诱导下 SCT 的振动特性与传热特性进行研究。

图 2 给出了双层 SCT 换热器物理模型的计算域。结构域中,设置内层 SCT 编号从左到右依次为 g_1 、 g_2 、 g_3 、 g_4 ,外层 SCT 编号从左到右依次为 g_5 、 g_6 、 g_7 、 g_8 ,取中间截面为 B-B,监测点 $P_1 \sim P_8$ 分别对应设置在 $g_1 \sim g_8$ 上。流体域的进口和出口结构尺寸相同。根据实际经验,计算过程中的物性和结构参数如表 2 所示。

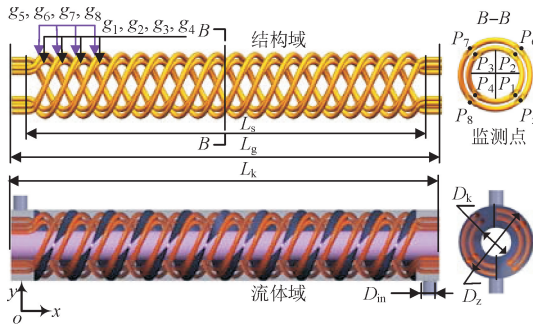


图 2 双层 SCT 换热器模型计算域
Fig. 2 Calculation domain of the double-layer SCT heat exchanger model

表 2 计算过程中的结构和物性参数

Table 2 Values of the structural and physical parameters during simulation

参数	数值	参数	数值
管束长度 L_g /mm	900	流体域长度 L_k /mm	900
螺旋总长 L_s /mm	800	流体域内径 D_k /mm	60
螺旋内径 D_H /mm	100	流体域外径 D_z /mm	150
螺旋外径 D_w /mm	130	入口直径 D_m /mm	30
螺旋圈数 C	5	HD 厚度 δ /mm	2
螺旋直径 D_g /mm	10	管密度 ρ_c /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	8 900
螺距 M /mm	160	管弹性模量 E_c /Pa	1.29×10^{11}
螺旋管壁厚 ϵ /mm	1	管泊松比 ν_c	0.33

1.3 求解流程

采用 ANSYS 和 CFX 求解器进行双向 FSI^[21]计算,图 3 为 FSI 方法的求解流程。为实现冷热流体传热的动态平衡,采取粗算+精算的计算策略,FSI 交界面作为结构域和壳程流体域之间压力、位移数据双向传递的桥梁。具体的计算过程可参考文献[5]。

双向 FSI 计算中,结构域和流体域的边界条件设置详见文献[5]。为了更好地对振动强化传热性能进行比较,基于前人研究结果^[3,5,18,20],设置冷流体的入口水温 T_{in} 为 293.15 K,换热器出口相对压力 P_{out} 为 0,壁面温度 T_g 为 333.15 K,壳程入口流速 v_{in} 分别为 0.10、0.15、0.20、0.25 m/s。

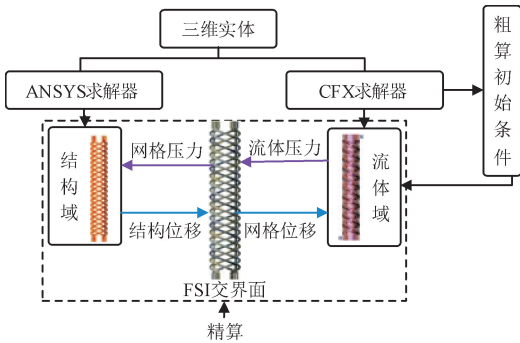


图 3 FSI 计算流程图

Fig. 3 Calculation strategy flow diagram

1.4 数据处理

换热器中 SCT 的传热特性可通过努塞尔数 Nu 进行表征^[22],表达式写为

$$Nu = hd_T/k \tag{1}$$

式中: d_T 为 SCT 的直径; k 为流体导热系数; h 为 SCT 面均传热系数,表示如下

$$h = q/\Delta T \tag{2}$$

其中 q 为管束壁面热通量, ΔT 为对数平均温差,可表示为

$$\Delta T = \frac{T_{out} - T_{in}}{\ln[(T_{in} - T_g)/(T_{out} - T_g)]} \tag{3}$$

其中 T_{out} 、 T_{in} 分别为壳程流体出口和入口处的温度, T_g 为 SCT 的壁面温度。

采用评价参数 Q_{PEC} 衡量换热器的振动强化传热性能^[23],若该数值大于 1,则表明换热器实现了振动强化传热。其表达式可写为

$$Q_{PEC} = (Nu_v/Nu)/(f_v/f)^{1/3} \tag{4}$$

式中: Nu 、 Nu_v 、 f 、 f_v 分别为无、有振动工况下的努塞尔数和壳程冷流体阻力。 f 的表达式可写为

$$f = \frac{2\Delta Pd_T}{L_k \rho u_m^2} \tag{5}$$

式中: ΔP 为冷流体流入换热器入口与出口的压力差,即压降; L_k 为流体长度; ρ 为流体密度; u_m 为壳程冷流体的平均流速。

采用综合传热性能因子 R_{JF} ^[24],对比分析内、外层 SCT 和单、双层 SCT 换热器的综合传热性能,表

达式可写为

$$R_{JF} = \frac{J/J_r}{(F/F_r)^{1/3}} \tag{6}$$

式中: J 、 F 分别为柯尔本系数和范宁摩擦系数; J_r 、 F_r 分别为 J 和 F 的参考项。

J 和 F 的表达式分别可写为

$$J = \frac{Nu_a}{RePr^{1/3}} \tag{7}$$

$$F = \frac{\Delta Pd_T}{2\rho u_m^2 L_k} \tag{8}$$

式中: Nu_a 为 4 根弹性传热元件的平均努塞尔数; Re 为雷诺数; Pr 为普朗特数。

1.5 网格方法验证

双层 SCT 换热器的网格划分如图 4 所示。其中,结构域的单元数为 14 400,节点数为 101 040;流体域的单元数为 7 204 687,节点数为 1 343 011。在流体域的 SCT 近壁面处设置边界层数为 6,以提高物理模型的计算精度。

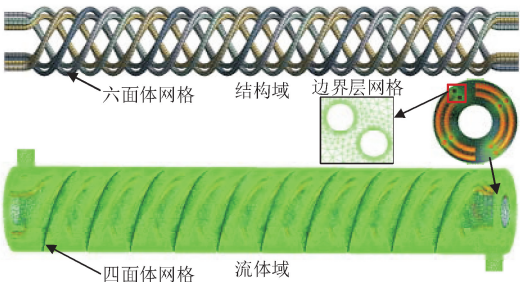


图 4 双层 SCT 换热器模型网格划分

Fig. 4 Grid division of the double-layer SCT heat exchanger model

网格方法验证如下:设置入口流速为 0.20 m/s,双 HD 安装在位置 I。将不同网格数计算得到 g_2 的(见图 2)面均传热系数进行对比,如表 3 所示。需要说明的是:本文计算采用方法 2;方法 1 是在方法 2 的基础上,不改变边界层层数仅减小网格密度;方法 3 是在方法 2 的基础上增大网格密度,同时将边界层层数增加到 8。

表 3 网格方法验证

Table 3 Grid method verification

方法	流体域网格		g_2 面均传热系数	误差/%	计算时间/h
	单元数	节点数			
1	4 108 159	671 024	271.311	5.22	94.4
2	7 204 687	1 343 011	286.255		178.3
3	209 781 262	4 921 507	292.347	2.13	384.2

由表 3 可见,当采用方法 2 对计算模型进行网格划分时,与方法 1 相比, g_2 面均传热系数的结果误差为 5.22%,计算时间减少了 83.9 h;与方法 3 相比, g_2 面均传热系数的计算结果误差虽仅为 2.13%,但计算时间增加了 205.9 h。从计算时间和精度两方面综合考虑,采用方法 2 可满足数值计算要求。

1.6 数值方法验证

Jamshidi 等^[25]通过搭建单根螺旋管换热器实验平台,研究了换热器螺旋管束在流体诱导下的强化传热性能。为验证本文求解方法及结果的有效性,采用与文献^[25]实验条件相同的参数开展数值计算,得到努塞尔数 Nu 随螺旋直径 D_g 、雷诺数 Re 的变化规律,并与实验结果进行对比,如图 5 所示。由图可知,当螺旋直径、雷诺数发生改变时,实验和模拟结果的最大相对误差分别为 3.87%、5.71%,误差均在允许范围内,表明本文采用的数值方法是合理的。

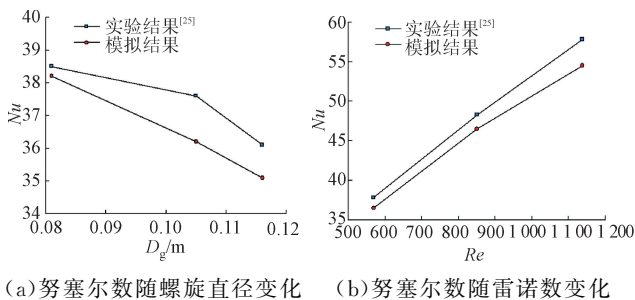


图 5 本文模拟结果与实验结果^[25]对比

Fig. 5 Comparison between simulation results in this paper and experimental results^[25]

2 结果与讨论

2.1 振动特性分析

图 6 给出了入口流速为 0.20 m/s、两 HD 安装在换热器位置 I 时,无 HD 和带两 HD 双层 SCT 换热器的速度流线图,此时的速度为内部流体在流动路径上的实际速度。

由图 6 可见,当冷流体流入换热器时,对无 HD 的 SCT 换热器而言,流体流经 SCT 的位置不均匀,近出口处上部流体流动较慢,底部流体流动较快,从而导致 SCT 振动及传热不均。对带两 HD 的 SCT 换热器而言,流体被两 HD 分成两部分在换热器内绕流,壳程流体绕流路径增加,流体对 SCT 的冲刷增大,能够达到均匀振动和增强传热的效果。

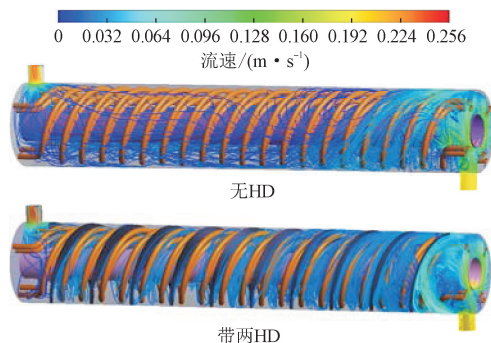


图 6 无 HD 和带两 HD 双层 SCT 换热器速度流线图
Fig. 6 Velocity streamline diagram of double-layer SCT heat exchanger without HD and with two HDs

图 7 给出了两 HD 安装在位置 I 时,双层 SCT 换热器内、外层 SCT 监测点的平均振幅随入口流速 v_{in} 的变化规律。其中,内层和外层 SCT 的平均振幅分别为监测点 $P_1 \sim P_4$ 、 $P_5 \sim P_8$ 振幅的平均值。

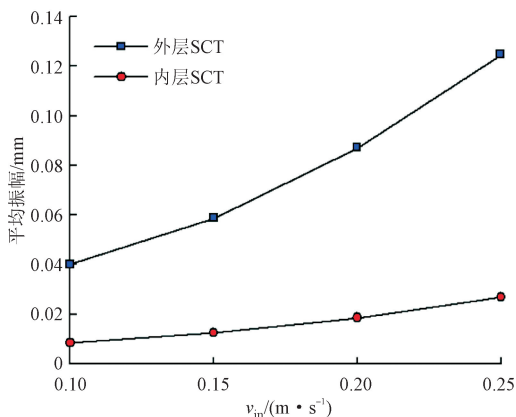


图 7 内、外层 SCT 平均振幅随入口流速的变化
Fig. 7 Average amplitudes of inner and outer SCT vary with the inlet velocity

由图 7 可见,随着入口流速增加,双层 SCT 换热器内、外层 SCT 监测点的平均振幅均增加,且外层 SCT 监测点的平均振幅高于内层。此外,随着入口流速增大,相较于内层 SCT,外层 SCT 监测点的平均振幅变化幅度增大,表明入口流速越大,外层 SCT 的振动越较内层 SCT 强烈。这是由于外层 SCT 直径较大,因而发生弹性形变的幅度较大;而入口流速增加,流体对内外层 SCT 的冲击力会明显增大。

图 8 展示了入口流速为 0.20 m/s 时,双层 SCT 换热器内、外层 SCT 监测点的平均振幅随 HD 安装位置的变化规律。由图可见,当两 HD 安装在双层 SCT 换热器位置 I ~ VI 时,外层 SCT 的平均振幅均高于内层,这是由于当材料相同时,外层 SCT 的螺旋直径大于内层,因而弹性变形较大,导致平均振

幅大于内层 SCT。此外,当两 HD 安装在换热器位置 I 时,内层和外层 SCT 总的(包含 $P_1 \sim P_8$)平均振幅最大,这是由于流体从入口流入并直接冲击内孔壁,流体分散在内孔左右,两 HD 安装在该位置下可把换热器内部分成左、右两部分,此时冷流体可直接进入换热器的左、右腔。而两 HD 安装在其它位置时,冷流体会先冲击导流板,然后再进入换热器内腔,导致 SCT 振动减弱。

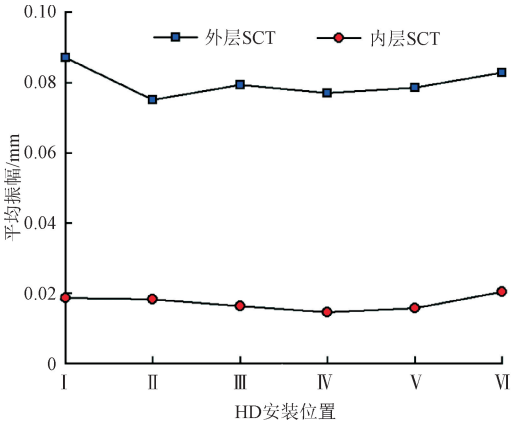


图 8 内、外层 SCT 平均振幅随 HD 安装位置的变化
Fig. 8 Average heat transfer coefficients of inner and outer SCT vary with the HD's installed position

2.2 传热特性分析

为研究入口流速和 HD 安装位置对双层 SCT 换热器传热性能的影响,需使冷流体充盈换热器壳程流体域,从而实现动态平稳状态。为实现冷热流体传热的动态平衡,采取粗算+精算的计算策略。粗算以 0.2 s 为时间间隔、总时长为 300 s,然后将计算结果作为初始边界条件,以 0.001 s 为时间间隔、总时长为 1.2 s 进行 FSI 精算。由于精算在粗算(已达到稳定状态)后进行且时间非常短,故仅分析粗算时间对出口温度的影响。

以入口流速为 0.20、0.25 m/s,两 HD 安装在换热器位置 I、V 为例,分析了出口温度随计算时间的动态变化趋势,如图 9 所示。

图 9(a)展示了两 HD 安装在双层 SCT 换热器位置 I 时,不同入口流速下双层 SCT 换热器出口温度随计算时间的变化规律。图 9(b)展示了入口流速为 0.2 m/s 时,不同 HD 安装位置下双层 SCT 换热器出口温度随计算时间的变化规律。可以看出,随着计算时间增加,换热器的出口温度逐步增大,直到冷流体充盈整个换热器,出口温度才逐渐达到动态平稳。

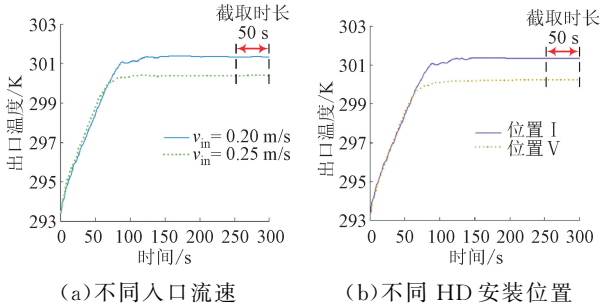


图 9 双层 SCT 换热器出口温度随计算时间的变化
Fig. 9 Outlet temperatures of double-layer SCT heat exchanger vary with the computing time

为定量分析双层 SCT 换热器出口温度随入口流速和 HD 安装位置的变化情况,取粗算过程中后 50 s 的平均出口温度进行对比,列于表 4。

表 4 不同入口流速和 HD 安装位置时的出口温度对比

Table 4 Comparison of outlet temperature with different inlet velocity and HD's installed position

$v_{in}/(m \cdot s^{-1})$	出口温度/ K	安装位置	出口温度/ K
0.10	303.71	I	301.32
0.15	303.06	II	301.15
0.20	301.32	III	301.46
0.25	300.39	IV	301.41
		V	300.24
		VI	301.18

结合图 9 和表 4 分析可得,随着入口流速增加,换热器的出口温度逐渐降低。在入口流速为 0.10、0.15、0.20、0.25 m/s 时,平均出口温度分别为 303.71、303.06、301.32、300.39 K。相比低入口流速的情况,出口温度在高入口流速时可更快地达到平稳状态。HD 的安装位置直接影响双层 SCT 换热器的出口温度,当两 HD 安装在换热器位置 III 时出口温度最高,为 301.41 K,安装在位置 V 时出口温度最低,为 300.24 K,两位置的出口温度差为 1.22 K。

图 10 展示了入口流速为 0.2 m/s 时,无 HD 单层和带两 HD 双层 SCT 换热器的温度场分布。取 HD 安装在位置 III、V 的双层 SCT 换热器进行分析,可为振动强化传热能力及综合传热性能的研究提供有利依据。取截面 a、b 把换热器等分成 3 部分,以便于观察温度场过渡的均匀性。

由图 10 可见,冷流体流入 SCT 换热器后,经过 SCT 的振动和传热作用温度逐渐升高,最后从换热器出口流出。单层 SCT 换热器出口温度明显低于

双层 SCT 换热器,且在流体近出口处呈现出上部流动较慢、下部流动较快现象,造成 SCT 振动和传热均匀性较差。对比 HD 安装在不同位置的换热器截面温度分布云图发现,HD 安装在位置Ⅲ时,各 SCT 和流体均匀接触,换热器各个区域温度场过渡均匀,因此 HD 安装在该位置时换热器的出口温度最高。HD 安装在位置Ⅴ时, g_2 和 g_6 (见图 2)所在区域流体的流速缓慢,降低了 SCT 的传热性能,因此 HD 安装在该位置时换热器的出口温度最低。

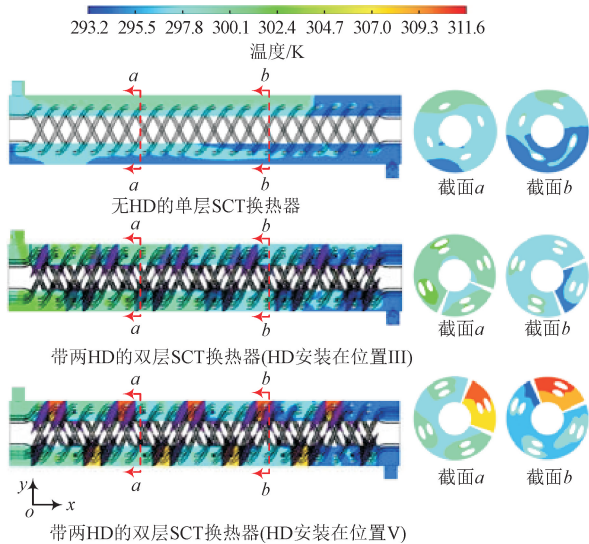


图 10 无 HD 单层和带两 HD 双层 SCT 换热器温度场分布
Fig. 10 Temperature field distributions of single-layer SCT heat exchanger without HD and double-layer SCT heat exchanger with two HD

为研究入口流速对双层 SCT 换热器传热性能的影响,分析了两 HD 安装在双层 SCT 换热器位置Ⅰ时,双层 SCT 在有、无振动下的平均传热系数随入口流速的变化规律,结果如图 11 所示。设有、无振动下,外、内层 SCT 的平均传热系数分别为铜管 $g_5 \sim g_8$ 、 $g_1 \sim g_4$ 面均传热系数的平均值。因此,可将对应的上述 4 种情况分别简称为外层有振、外层无振、内层有振和内层无振。

由图 11 可见,随着入口流速增加,双层 SCT 换热器内外层 SCT 在有、无振动时的平均传热系数均增大。无振动时,内层 SCT 的平均传热系数高于外层;有振动时,外层 SCT 的平均传热系数高于内层。此外,外层 SCT 在有、无振动下的平均传热系数增幅均大于内层,表明外层 SCT 振动强化的传热效果更好。

图 12 展示了入口流速为 0.20 m/s 时,双层 SCT 换热器在有、无振动下内、外层 SCT 平均传热系数随 HD 安装位置的变化规律。

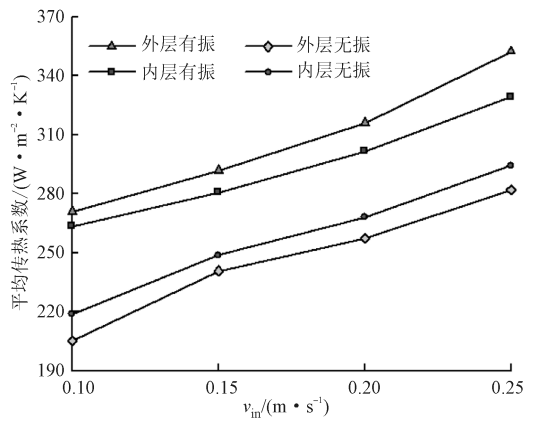


图 11 内、外层 SCT 平均传热系数随入口流速的变化
Fig. 11 Average heat transfer coefficients of inner and outer SCT vary with the inlet velocity

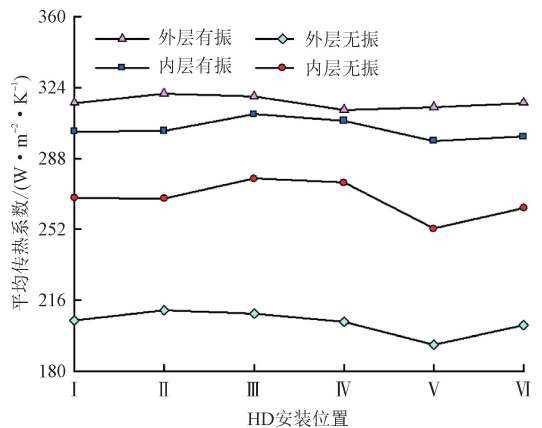


图 12 内、外层 SCT 平均传热系数随 HD 安装位置的变化
Fig. 12 Average heat transfer coefficients of inner and outer SCT vary with the HD's installed position

由图 12 可见,不管安装位置如何变化,与无振动相比,内、外层 SCT 在有振动下的平均传热系数均大幅提高。无振动时,内层 SCT 的平均传热系数高于外层;有振动时,外层 SCT 的平均传热系数高于内层。相较于无振动,有振动下外层 SCT 平均传热系数的变化幅度总是大于内层,表明外层 SCT 的振动强化传热效果更佳。两 HD 安装在位置Ⅴ时,有振动和无振动下内、外层 SCT 平均传热系数的变化幅度均最大,表明两 HD 安装在此位置时,换热器的振动强化传热效果最佳。

2.3 振动强化传热特性分析

为分析双层 SCT 换热器内、外层 SCT 的振动强化传热特性,图 13 给出了两 HD 安装在位置Ⅰ时,内、外层 SCT 的振动强化传热参数 Q_{PEC} 随入口流速的变化情况。

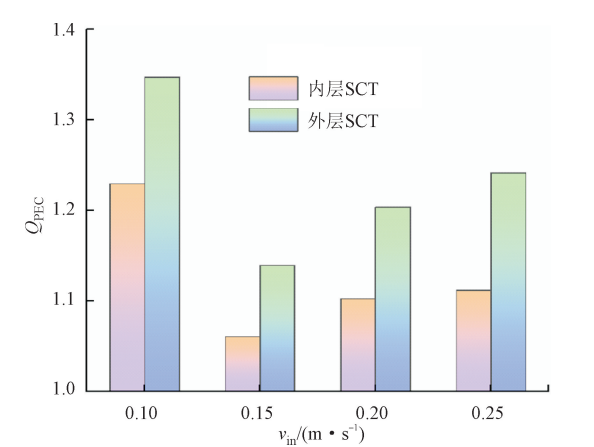


图 13 内、外层 SCT 振动强化传热参数随入口流速的变化
Fig. 13 Vibration-enhanced heat transfer parameter of inner and outer layer SCT vary with the inlet velocity

由图 13 可见,随着入口流速增加,内、外层 SCT 的振动强化传热参数均先减小后增加,且外层 SCT 总是大于内层。结合图 11 分析可知,内、外层 SCT 均实现了振动强化传热,且外层 SCT 的振动强化传热能力更强。在入口流速为 0.10 m/s 时,内、外层 SCT 的平均传热系数均最小,而振动强化传热参数均最大,表明振动强化传热能力最强。

图 14 展示了入口流速为 0.20 m/s 时,单层和双层 SCT 换热器振动强化传热参数随 HD 安装位置的变化情况。

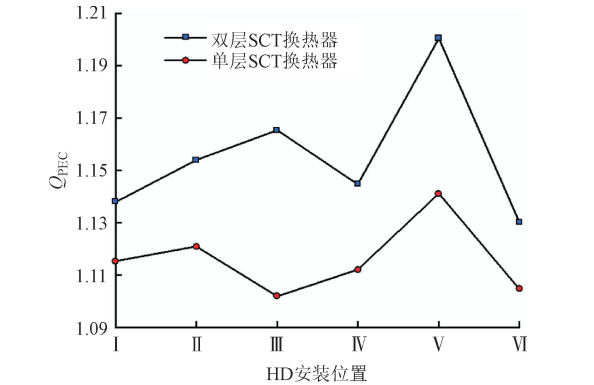


图 14 单层和双层 SCT 换热器振动强化传热参数随 HD 安装位置的变化
Fig. 14 Vibration-enhanced heat transfer parameter of single-layer and double-layer SCT heat exchanger vary with the HD's installed position

由图 14 可见,单层 SCT 换热器的振动强化传热参数总是小于双层 SCT 且始终大于 1,实现了振动强化传热。结合图 12 分析可得,在双层 SCT 换热器内,两 HD 安装在位置 V 时,SCT 的平均传热系数较小,振动强化传热参数最大;在单层 SCT 换

热器内,振动强化传热参数的最大值仍出现在位置 V,表明 HD 安装在该位置时,换热器的振动强化传热效果最佳。当两 HD 安装在位置 III 时,双层 SCT 换热器的振动强化传热参数比单层增大了 8.65%。

2.4 综合传热特性分析

为分析外层 SCT 的综合传热特性,将内层 SCT 的 J 、 F 作为参考值,计算外层 SCT 的综合传热性能因子 R_{JF} ,如图 15 所示。图 15(a)给出了 HD 安装在位置 I 时,外层 SCT 的综合传热性能因子随入口流速的变化规律。图 15(b)给出了入口流速为 0.20 m/s 时,外层 SCT 的综合传热性能因子随 HD 安装位置的变化情况。

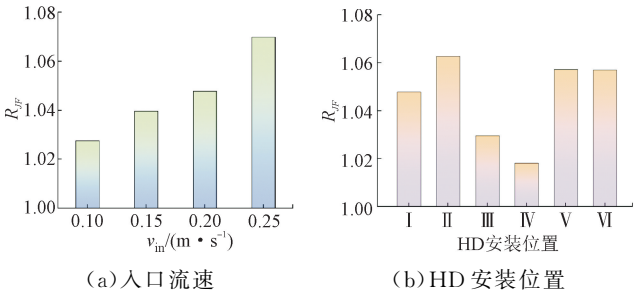


图 15 外层 SCT 综合传热性能因子随入口流速和 HD 安装位置的变化

Fig. 15 Comprehensive heat transfer performance factor of outer SCT vary with the inlet velocity and HD's installed position

从图 15 可知,外层 SCT 的综合传热性能因子总是大于 1,表明外层 SCT 的综合传热能力高于内层。随着入口流速增加,综合传热性能因子逐渐增大,外层 SCT 的综合传热能力越强。两 HD 安装在位置 IV 时,外层 SCT 的综合传热性能因子最小,综合传热能力较弱;安装在位置 II 时,外层 SCT 的综合传热性能因子最大,综合传热能力较强,比安装在位置 IV 时提高了 4.37%。

为分析双层 SCT 换热器的综合传热特性,将单层 SCT 换热器的 J 、 F 作为参考值,计算出综合传热性能因子,如图 16 所示。图 16(a)和(b)分别给出了双层 SCT 换热器综合传热性能因子随入口流速及 HD 安装位置的变化规律。

图 16 中的综合传热性能因子均大于 1,表明双层 SCT 换热器的综合传热能力高于单层。随着入口流速增加,综合传热性能因子逐渐减小,且降幅也逐渐减小。当入口流速为 0.10 m/s 时,综合传热性能因子最大,表明双层 SCT 换热器在此入口流速下的综合传热能力最强。

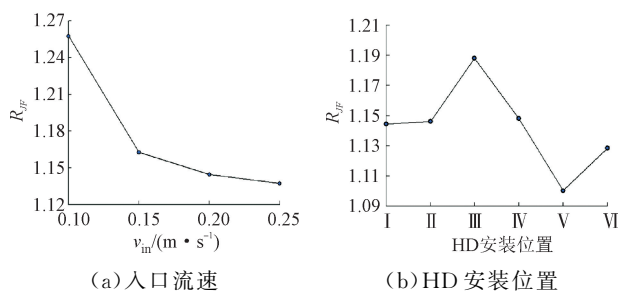


图 16 双层 SCT 换热器的综合传热性能因子随入口流速和 HD 安装位置的变化

Fig. 16 Comprehensive heat transfer performance factor of double-layer SCT heat exchanger vary with the inlet velocity and HD's installed position

结合表 4、图 10 和图 14 可知,两 HD 安装在位置 V 时,双层 SCT 换热器的出口温度最低,强化传热能力最佳,综合传热能力最差;安装在位置 III 时,出口温度最高,强化传热性能仅次于位置 V,而综合传热性能最佳,且与安装在位置 V 相比,综合传热性能因子增大了 7.99%,表明换热器呈现最强振动强化传热能力和最优综合传热性能时,导流板的安装位置并不相同。对比图 15 和图 16 发现,随着入口流速增加,外层 SCT 的综合传热性能因子逐渐增大,双层 SCT 换热器的综合传热性能因子逐渐减小。此外,外层 SCT 相对于内层以及双层 SCT 换热器相对于单层的综合传热性能因子在出现最大和最小值时,两 HD 的安装位置并不相同,表明换热器的综合传热性能在相同参照下的比较才会有意义。

3 结 论

通过在双层 SCT 换热器内加装两 HD,采用双向 FSI 数值计算方法,在不同入口流速和螺旋导流板安装位置下对换热器内、外层 SCT 的振动强化传热性能进行了研究,得出以下结论。

(1) 在 SCT 换热器内增设并合理布置螺旋导流板,可有效改善冷流体在壳程区域的绕流路径,实现流体诱导 SCT 振动,提高换热器的强化传热能力和综合传热性能。

(2) 双层 SCT 换热器的振动强化传热能力和综合传热能力均高于单层 SCT 换热器。当两螺旋导流板分别安装在换热器的左、上位置时,双层 SCT 换热器的振动强化传热参数比单层提高了 8.65%。

(3) 在双层 SCT 换热器内,外层 SCT 的振动

强化传热能力和综合传热能力均高于内层。当两螺旋导流板分别安装在换热器的左、右位置时,外层 SCT 的综合传热性能因子最大,比安装在换热器的右、上位置时提高了 4.37%。

参考文献:

- [1] BERGLES A E. Recent developments in enhanced heat transfer [J]. Heat and Mass Transfer, 2011, 47(8): 1001-1008.
- [2] JI Jiadong, GE Peiqi, LIU Ping, et al. Design and application of a new distributed pulsating flow generator in elastic tube bundle heat exchanger [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2018, 130: 216-226.
- [3] JI Jiadong, LI Feiyang, SHI Baojun, et al. Analysis of the effect of baffles on vibration and heat transfer characteristics of elastic tube bundles [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2022, 136: 106206.
- [4] 孙亚茹, 季家东, 华子森, 等. 带螺旋折流板的中空换热器振动和传热特性分析 [J]. 振动与冲击, 2023, 42(8): 251-258.
SUN Yaru, JI Jiadong, HUA Zisen, et al. Vibration and heat transfer performances analysis of a hollow helical baffle heat exchanger [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(8): 251-258.
- [5] DUAN Derong, GE Peiqi, BI Wenbo. Numerical investigation on heat transfer performance of planar elastic tube bundle by flow-induced vibration in heat exchanger [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 103: 868-878.
- [6] JI Jiadong, NI Xuwang, SHI Baojun, et al. Influence of deflector direction on heat transfer capacity of spiral elastic tube heat exchanger [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 236: 121754.
- [7] 李科, 文键, 厉彦忠, 等. 错流板翅式换热器分布参数模型构建和优化研究 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(10): 81-90.
LI Ke, WEN Jian, LI Yanzhong, et al. Research on construction of distributed parameter model and optimization of cross-flow plate fin heat exchanger [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(10): 81-90.
- [8] 季家东, 周蓉, 高润淼, 等. 基于不同截面形状的螺旋弹性管束换热器传热特性分析 [J]. 振动与冲击, 2022, 41(22): 219-225.
JI Jiadong, ZHOU Rong, GAO Runmiao, et al. Analysis on the heat transfer characteristics of spiral elastic tube bundle heat exchangers with different cross sec-

- tion shapes [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(22): 219-225.
- [9] SUN Yaru, JI Jiadong, HUA Zisen, et al. Flow-induced vibration and heat transfer analysis for a novel hollow heat exchanger [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2023, 37(1): 94-103.
- [10] WU Jinxing, TIAN Qianhui, SUN Xuezhen, et al. Numerical simulation and experimental research on the comprehensive performance of the shell side of the spiral wound heat exchanger [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 163: 114381.
- [11] KHOSRAVI-BIZHAEM H, ABBASSI A, ZIVARI RAVAN A. Heat transfer enhancement and pressure drop by pulsating flow through helically coiled tube; an experimental study [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 160: 114012.
- [12] JI Jiadong, GAO Runmiao, CHEN Qinghua, et al. Analysis on fluid-induced vibration and heat transfer of helical elastic tube bundles [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2021, 35(1): 171-178.
- [13] STEHLÍK P, NĚMCANSKY J, KRÁL D, et al. Comparison of correction factors for shell-and-tube heat exchangers with segmental or helical baffles [J]. *Heat Transfer Engineering*, 1994, 15(1): 55-65.
- [14] PENG B, WANG Q W, ZHANG C, et al. An experimental study of shell-and-tube heat exchangers with continuous helical baffles [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2007, 129(10): 1425-1431.
- [15] CAO Xing, ZHANG Ruiqi, CHEN Dongming, et al. Performance investigation and multi-objective optimization of helical baffle heat exchangers based on thermodynamic and economic analyses [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 176: 121489.
- [16] GU Xin, LI Ning, CHEN Cheng, et al. Analysis of fluid retention zones in heat exchangers with segmental baffle and helical baffle [J]. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 2022, 20(7): 681-696.
- [17] 季家东, 葛培琪, 毕文波, 等. 采用不同管排组合的换热器弹性管束壳程流体诱导振动响应 [J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(3): 69-75.
- JI Jiadong, GE Peiqi, BI Wenbo, et al. Shell-side flow-induced vibration responses of elastic tube bundle based on different tube combinations [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(3): 69-75.
- [18] JI Jiadong, GAO Runmiao, SHI Baojun, et al. Improved tube structure and segmental baffle to enhance heat transfer performance of elastic tube bundle heat exchanger [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 200: 117703.
- [19] MASTER B I, CHUNANGAD K S, BOXMA A J, et al. Most frequently used heat exchangers from pioneering research to worldwide applications [J]. *Heat Transfer Engineering*, 2006, 27(6): 4-11.
- [20] JI Jiadong, ZHANG Jingwei, LI Feiyang, et al. Numerical research on vibration-enhanced heat transfer of improved elastic tube bundle heat exchanger [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 33: 101936.
- [21] 季家东, 邓如意, 卢钰, 等. 椭圆截面螺旋铜管换热器传热性能分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2023, 57(6): 123-132.
- JI Jiadong, DENG Ruyi, LU Yu, et al. Heat transfer characteristic of elliptical section spiral copper tube heat exchanger [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2023, 57(6): 123-132.
- [22] 季家东, 葛培琪, 毕文波. 流体诱导弹性管束振动响应数值分析 [J]. *振动与冲击*, 2016, 35(6): 80-84.
- JI Jiadong, GE Peiqi, BI Wenbo. Numerical analysis on flow-induced vibration responses of elastic tube bundle [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(6): 80-84.
- [23] WEBB R L. Performance evaluation criteria for use of enhanced heat transfer surfaces in heat exchanger design [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1981, 24(4): 715-726.
- [24] YUN J Y, LEE K S. Influence of design parameters on the heat transfer and flow friction characteristics of the heat exchanger with slit fins [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, 43(14): 2529-2539.
- [25] JAMSHIDI N, FARHADI M, GANJI D D, et al. Experimental analysis of heat transfer enhancement in shell and helical tube heat exchangers [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 51(1/2): 644-652.

(编辑 李慧敏)