

# 水-油连续螺旋折流板换热器热力性能研究

吕思聪,代守宝,潘思言,杨光

(中国船舶集团有限公司第七〇三研究所,黑龙江哈尔滨 150078)

**摘要:**利用计算流体力学(Computational Fluid Dynamic, CFD)方法,针对连续螺旋折流板换热器建立物理模型和数学模型,在管侧介质为水和壳侧介质为原油条件下,研究不同原油流量及螺旋角对螺旋折流板换热器内部流场、换热性能及阻力性能的影响,并拟合了水油换热时螺旋折流板换热器的  $Nu_f$  与  $Re$  的关联式。结果表明:  $22^\circ$  螺旋角的螺旋折流板换热器与其它较小螺旋角换热器对比,壳侧压降和换热系数逐渐减小,综合换热性能最佳。通过对壳侧原油为层流状态下的阻力系数和对流换热系数关系式进行拟合,更好地指导水-油连续螺旋折流板换热器的热力设计。

**关键词:**连续螺旋折流板;CFD;单位压降对流换热系数

中图分类号:TK221 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.04.017

[引用本文格式]吕思聪,代守宝,潘思言,等.水-油连续螺旋折流板换热器热力性能研究[J].热能动力工程,2022,37(4):124-129. LYU Si-cong, DAI Shou-bao, PAN Si-yan, et al. Study on thermal performance of water-oil continuous spiral baffled heat exchanger[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(4): 124-129.

## Study on Thermal Performance of Water-Oil Continuous Spiral Baffled Heat Exchanger

LYU Si-cong, DAI Shou-bao, PAN Si-yan, YANG Guang

(No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code: 150078)

**Abstract:** The physical and mathematical models of continuous spiral baffled heat exchanger were established by the method of CFD (Computational Fluid Dynamic). The effects of different crude oil flow rates and helix angles on the flow field, heat transfer and resistance performance of spiral baffled heat exchanger were studied under the conditions of water in the tube side and crude oil in the shell side, and the correlations of  $Nu_f$  and  $Re$  of the spiral baffled heat exchanger during water-oil heat exchange were fitted. The results show that compared with other smaller helix angle heat exchangers, the shell side pressure drop and heat transfer coefficients of spiral baffled heat exchanger with helix angle of  $22^\circ$  gradually decrease, and its comprehensive heat transfer performance is the best. The relationship between the resistance coefficient and the convective heat transfer coefficient in the case that the crude oil in the shell side is laminar flow is fitted to better guide the thermal design of the water-oil continuous spiral baffled heat exchanger.

**Key words:** continuous spiral baffle, CFD, convective heat transfer coefficient at unit pressure drop

## 引言

螺旋折流板换热器与传统管壳式换热器相比,其具有对流换热系数高、压降低、旁通流减少、污垢

减少及振动小等优势。Lutcha 等人<sup>[1]</sup>得出不同  $Re$  数下,非连续型螺旋折流板使用中心管较不使用情况下传热效果差,且  $40^\circ$  螺旋角时壳侧同压降下对流换热系数最大的结论。S. Z. Movassang 等人<sup>[2]</sup>通过试验对弓形折流板和螺旋折流板换热器热力性能

进行了对比分析,发现螺旋折流板换热器的综合性能更好。现有文献[3-10]较多分析螺旋折流板形式、螺旋升角、换热管等方面对换热器热力特性的影响,较少考虑适用于螺旋折流板换热器热力设计的阻力和对流换热系数的研究分析。

本文采用计算流体力学的方法对大壳径、连续螺旋折流板换热器进行了数值模拟研究,建立了7种不同螺旋角的连续螺旋折流板换热器的物理模型和数学模型,在管侧介质为水和壳侧介质为原油条件下,研究不同原油流量及螺旋角对螺旋折流板换热器内部流场、换热及阻力性能的影响,并对水-油壳侧阻力系数和对流换热系数关系式进行了拟合,以便更好的指导水-油连续螺旋折流板换热器的热力设计。

## 1 模型建立

### 1.1 研究对象

表1为连续螺旋折流板换热器的结构参数,换热管为正方形排列。表2为折流板几何参数。

表1 换热器结构参数

Tab.1 Structural parameters of heat exchanger

参数	数值
壳体外径、壁厚/mm	377 × 12
换热管外径、壁厚/mm	19 × 2
换热管数量	82
有效单程管长/mm	2 400
换热管中心距/mm	25
中心管直径/mm	73
壳侧进出口内径/mm	40
管程进出口内径/mm	40

表2 折流板几何参数

Tab.2 Geometric parameters of baffle

折流板种类	螺旋升角/(°)	螺距/mm
1	10	194
2	12	234
3	14	274
4	16	315
5	18	357
6	20	400
7	22	444

### 1.2 物理模型

利用 Gambit 软件建立上述表格中7种螺旋折

流板换热器的几何模型如图1所示(仅以螺旋升角为10°的螺旋折流板换热器为例介绍)。

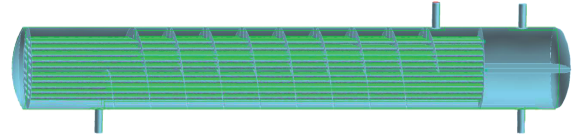


图1 连续螺旋折流板换热器(剖视图)

Fig.1 Continuous spiral baffled heat exchanger (cross-sectional view)

### 1.3 数学模型

换热工质为水-原油时,壳侧原油的流动状态为层流。层流条件下的数学模型如下:

连续性方程:

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

惯性坐标系下, $i$ 方向的动量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

式中: $\rho$ —壳侧介质介质密度; $p$ —静压; $u$ —介质流速;下标 $i, j$ 为速度方向; $\rho g_i, F_i$ —重力体积力和其他体积力; $\tau_{ij}$ —应力张量,定义为:

$$\tau_{ij} = \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (3)$$

其中:下标 $l$ 为液相。

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\rho E + P)) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_j} - \sum_{j'} h_{j'} J_{j'} + u_j (\tau_{ij})_{\text{eff}} \right) + S_h \quad (4)$$

式中, $k_{\text{eff}} = k_t + k$ 为有效导热系数。方程右边前3项分别为导热项、组分扩散项和粘性扩散项。 $S_h$ 是包括化学反应热和其他体积热源的原项。其中 $E$ 为流体自身具有能量

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_i^2}{2} \quad (5)$$

### 1.4 边界条件

管程和壳侧入口均采用速度和温度条件,并假定在入口面上均匀流动。管程和壳侧出口均采用压力及相应的回流条件。

壁面边界采用粘附条件,即认为主流区流体速度与壁面处的速度相同。壳侧壁面设定为无滑移、无渗透及绝热,换热管壁面设定为无滑移、无渗透,并选择连接的耦合条件将换热面与两侧流体耦合起来。螺旋面设为零厚度、无滑移、无渗透及连接的耦合条件,壁厚层选择壳体导热方式处理。

## 2 模型验证

对于螺旋折流板换热器而言,至今没有国标或者普遍应用的经验公式来计算换热系数或阻力系数<sup>[7-10]</sup>。为了验证物理模型简化、数学模型选择和边界条件定义的合理性以及模拟结果的正确性,作者针对进行了试验螺旋升角为 10°螺旋折流板换热器实验数据为参考,管程工质为水,壳侧工质为油,边界条件完全一致,对实验和数值计算结果进行对比,如表 3 所示。

表 3 实验与模拟的结果对比

Tab.3 Comparison of experimental and simulated results

工况	总传热系数/ $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$	壳侧传热系数/ $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$	壳侧压 降/Pa
实验	77.05	80.09	1 340
模拟	76.67	79.79	1 310

实验结果和模拟结果的对比表明,在模拟过程中对物理模型的简化合理,选择的数学模型和定义的边界条件能够得出较为符合实际的计算结果,因此由模拟得出的规律具有一定的合理性,能够对换热器的设计及应用提供一定的依据。

## 3 螺旋升角对螺旋折流板换热器性能的影响

螺旋升角是影响连续螺旋折流板换热器性能的一个关键因素,很大程度上决定换热器中壳侧流体的流动形态、流体速度,从而决定整个螺旋折流板换热器的换热效果和阻力损失。

### 3.1 螺旋升角对壳侧传热性能的影响

图 2 显示了不同的壳侧流量和螺旋角条件下,壳侧对流传热系数的对比曲线下。

经分析相同流量下,由于折流板螺旋角大的换

热器,内壳侧介质流体在管束间的流线与换热管的轴线夹角小,介质流体在最小截面上的流速越低,横向冲刷换热管能力越弱,不利于换热。而折流板螺旋角越小的换热器在同样条件下,壳侧介质流体在最小截面上的速度越高,沿切向方向的分量越大,流体更有利用横向冲刷管束,减薄边界层,加强换热能力,同时还延长了流体的流动行程。

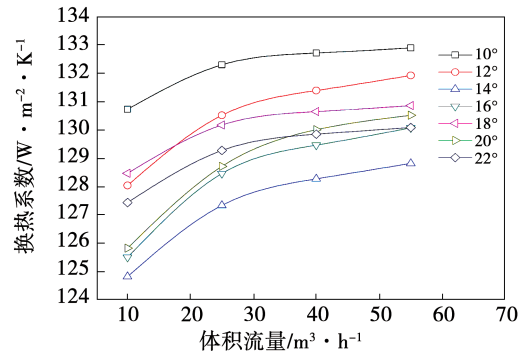


图 2 壳侧对流传热系数对比曲线

Fig.2 Contrast curves of convective heat transfer coefficients in the shell side

### 3.2 螺旋角对壳侧阻力性能的影响

图 3 为不同的壳侧流量和螺旋角下,壳侧压降变化对比曲线,相同流量下的壳侧压降均随着螺旋角的增大而迅速下降,然后趋于平缓。经分析折流板螺旋角大的换热器壳侧管束外围的介质流体轴向运动更强,折流板的扰动作用和介质流体横向冲刷管束的强度减弱,因此阻力损失减小。同时壳侧流体的切向分量较小,减弱了径向的二次流动和造成的流动损失,最终壳侧压降减小。

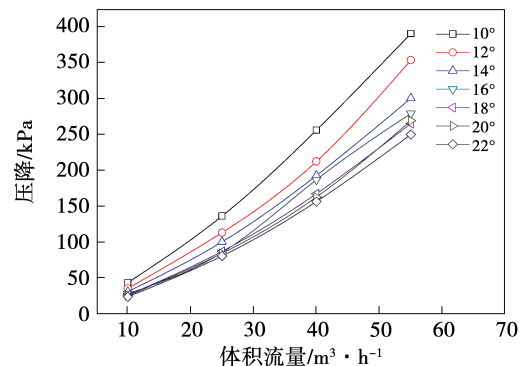


图 3 壳侧压降对比曲线

Fig.3 Contrast curves of pressure drops in the shell side

因此换热器折流板螺旋角的设计和选择应综合考虑换热系数和压降两方面。

### 3.3 螺旋角对综合性能的影响

图 4 为不同的壳侧流量下,壳侧流体单位压降下的对流传热系数随螺旋角的变化规律。由图 4 可知,在相同流量下,壳侧单位压降下对流传热系数随螺旋角的增大而增大,增大到一定程度后趋于平缓。随着螺旋角的增大,壳侧压降逐渐减小,其换热系数也呈现减小趋势。这主要是因为随着螺旋角的增大,壳侧的横向冲刷减弱,所以流动损失减小,换热效果也减弱。从综合性能角度来考虑,螺旋角为 22°时,螺旋折流板换热器的综合换热性能最佳。

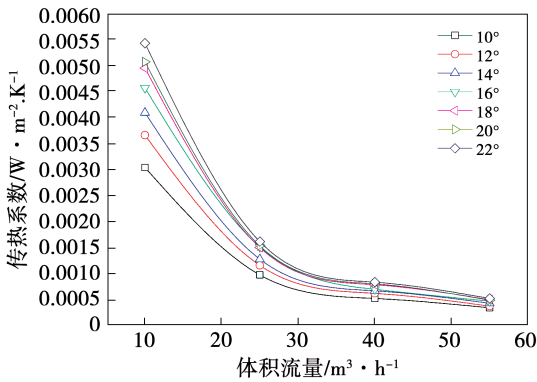


图 4 单位压降壳侧对流传热系数对比曲线

Fig.4 Contrast curves of convective heat transfer coefficients at unit pressure drop in the shell side

## 4 关系式拟合

### 4.1 壳侧阻力系数关系式拟合

壳侧阻力系数定义:

$$f = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho u^2} \quad (6)$$

式中:  $\Delta p$ —壳侧压降;  $u$ —壳侧流体平均流速;  $\rho$ —壳侧流体密度; 壳侧流速  $u$  直接从 Fluent 里读取。

为了进行关系式拟合,通过因次分析方法,可以将阻力系数写成下面形式:

$$f = C Re^m \quad (7)$$

式中:  $C$ —常数; 壳侧阻力系数为  $Re$  的指数形式。为了进行关系式拟合,将壳侧阻力系数和雷诺数均取对数,  $\log(f)$  和  $\log(Re)$  之间呈一次函数关系,数据如表 4 所示。

表 4 壳侧阻力系数关系式拟合参数

Tab.4 Fitting parameters of resistance coefficient relationship in the shell side

序号	壳侧压降/Pa	壳侧阻力系数 $f$	雷诺数 $Re$
1	43 064.28	1 276.475	5.971 741
2	34 982.56	1 508.603	4.950 932
3	30 521.46	1 804.671	4.228 175
4	27 505.67	2 149.488	3.677 841
5	25 970.37	2 606.791	3.245152
6	24 830.67	3 128.96	2.896 296
7	23 487.24	3 646.612	2.609 276
8	135 986.3	644.926 6	14.929 39
9	113 018.6	779.818 2	12.377 33
10	99 937.58	945.456 6	10.570 44
11	85 000.36	1 062.805	9.194 603
12	86 837.26	1 394.615	8.112 879
13	84 004.62	1 693.693	7.240 741
14	80 217.89	1 992.732	6.523 19
15	255 730.2	473.758 7	23.886 97
16	212 150.4	571.804	19.803 73
17	192 563.5	711.617 6	16.912 7
18	186 601.3	911.396 6	14.711 37
19	167 184.4	1 048.827	12.980 61
20	162 287.6	1 278.136	11.585 19
21	156 202.4	1 515.742	10.437 1
22	390 468.3	382.609 3	32.844 6
23	353 268.6	503.620 1	27.230 15
24	300 104.2	586.596 6	23.254 93
25	278 956.3	720.648 7	20.228 1
26	264 839.1	878.789 5	17.848 35
27	268 753.6	1 119.543	15.929 64
28	249 786.3	1 282.038	14.351 03

使用数据分析软件 origin 进行关系式拟合,以  $\log(f)$  为纵坐标,  $\log(Re)$  为横坐标作图,如图 5 所示。采用最小二乘法并对数据进行回归分析,由拟合出的一次函数关系式的斜率和截距可以求得常数  $C$  及指数  $m$ 。

由图 5 拟合出的关系式,可以求得  $C = 6 571$ ,  $m = -0.761$ 。由于注聚原油粘度特别大,从表 4 可以看出壳侧流动状态为层流,此状态下拟合出的壳侧阻力系数关系式为:

$$f = 6571 Re^{-0.761} (2 < Re < 32) \quad (8)$$

参考表 4, 该关系式的适用范围约为  $Re$  在 2 ~ 32 之间。

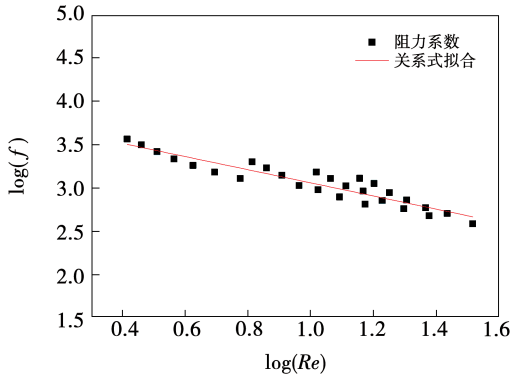


图 5 壳侧阻力系数拟合关系

Fig.5 Fitting correlation of resistance coefficient in the shell side

#### 4.2 壳侧对流传热系数关系式拟合

影响壳侧对流传热系数大小的因素复杂, 一般与壳侧是否安装折流板、折流板的形式、各种漏流、旁流的大小等因素有关。通过因次分析方法, 采用与管内对流传热相同的形式:

$$Nu = C Re^m Pr^n \quad (9)$$

式中:  $Nu$ —努塞尔数;  $Pr$ —普朗特数;  $m, n$ —常数。

根据列管换热器流体流有过折流板的管束时, 壳侧对流传热计算经验公式, 通常  $0.3 \leq n \leq 0.4$ , 其中  $n = 1/3$ 。使用数据分析软件 origin 进行关系式拟合, 以  $\log(Nu/Pr^{1/3})$  为纵坐标,  $\log(Re)$  为横坐标作图, 如图 6 所示。并采用最小二乘法对数据进行回归分析, 由拟合出的一次函数关系式的斜率和截距可以求得常数  $C$  及指数  $m$ 。

由图 6 中拟合出的关系式, 可以得出  $C = 9.88$ ,  $m = 0.0185$ 。从表 5 可以看出, 壳侧流动状态为层流, 主要是因为注聚原油粘度特别大, 此状态下拟合出的壳侧对流传热系数关系式为:

$$Nu = 9.88 Re^{0.0185} Pr^{1/3} (2 < Re < 32) \quad (10)$$

公式可以进一步表达为:

$$h = 9.88(k/d_e) Re^{0.0185} Pr^{1/3} (2 < Re < 32) \quad (11)$$

式中:  $d_e$ —壳侧当量直径;  $k$ —原油导热系数。

参考表 5, 该关系式的适用范围约为  $Re$  在 2 ~ 32 之间。

表 5 壳侧对流传热系数关系式拟合参数

Tab.5 Fitting parameters of convective heat transfer coefficient relationship in the shell side

序号	努塞尔数 $Nu$	$Nu/Pr^{1/3}$	雷诺数 $Re$
1	17.686 44	0.793 469	5.971 741
2	17.322 43	0.777 123	4.950 932
3	17.031 62	0.764 082	4.228 175
4	16.980 31	0.761 781	3.677 841
5	17.236 63	0.773 286	3.245 152
6	17.023 34	0.763 713	2.896 296
7	17.241 22	0.773 482	2.609 276
8	17.898 63	0.802 99	14.929 39
9	17.657 43	0.792 155	12.377 33
10	17.371 27	0.779 327	10.570 44
11	17.379 86	0.779 704	9.194 603
12	17.324 04	0.777 195	8.112 879
13	17.413 65	0.781 232	7.240 741
14	17.489 47	0.784 621	6.523 19
15	17.954 65	0.805 49	23.886 97
16	17.775 2	0.797 444	19.803 73
17	17.497 58	0.784 983	16.912 7
18	17.515 45	0.785 796	14.711 37
19	17.675 13	0.792 958	12.980 61
20	17.588 45	0.789 06	11.585 19
21	17.596 19	0.789 405	10.437 1
22	17.979 01	0.806 585	32.844 6
23	17.847 66	0.800 7	27.230 15
24	17.643 38	0.791 535	23.254 93
25	17.597 26	0.789 46	20.228 1
26	17.703 73	0.794 237	17.848 35
27	17.657 2	0.792 155	15.929 64
28	17.642 32	0.791 48	14.351 03

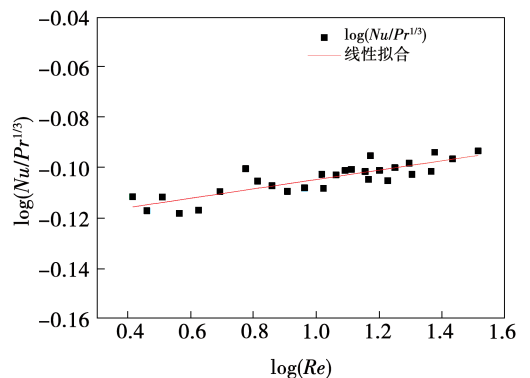


图 6 壳侧传热系数拟合关系

Fig.6 Fitting correlation of heat transfer coefficient in the shell side

## 5 结 论

采用数值模拟方法,建立了7种连续螺旋折流板换热器的物理模型和数学模型,研究不同流量及螺旋角对螺旋折流板换热器内部流场、换热及阻力性能的影响,并拟合水-油换热时螺旋折流板换热器的  $Nu_f$  与  $Re$  的关联式,分析结论如下:

(1) 水-原油工质条件下,相同流量的壳侧对流传热系数和压降均随螺旋角的增大而迅速下降。壳侧单位压降下对流传热系数随螺旋角的增大而增大,增大到一定程度后趋于平缓。这主要是因为随着螺旋角的增大,壳侧的横向冲刷减弱,所以流动损失减小,换热效果也减弱了。从综合性能角度来考虑的话,螺旋升角为  $22^\circ$  时,螺旋折流板换热器的综合换热性能最佳。

(2) 对水-原油壳侧阻力系数和对流传热系数关系式进行了拟合,以便更好的指导水-原油连续螺旋折流板油换热器的热力设计。

## 参考文献:

[1] LUTCHA J, NEMCANSKY J. Performance improvement of tubular heat exchangers by helical baffles [J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 1990, 68(5): 263-270.

[2] MOVASSAG S Z, TAHER F N, RAZMI K, et al. Tube bundle replacement for segmental and helical shell and tube heat exchangers: performance comparison and fouling investigation on the shell side [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012.

[3] 梁 帅, 黄雪琴. 不同螺旋角折流板换热器流动与传热性能研究 [J]. *化工设备与管道*, 2019, 56(5): 32-37.

LIANG Shuai, HUANG Xue-qin. Research of flowing and heat transfer characteristics for heat exchanger with various helix angle in baffles [J]. *Process Equipment & Piping*, 2019, 56(5): 32-37.

[4] ZHANG Jian-fei, HE Ya-Ling, TAO Wen-quan. 3D numerical simulation on shell-and-tube heat exchangers with middle-overlapped helical baffles and continuous baffles, part I: numerical model and results of whole heat exchanger with middle-overlapped helical baffles [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52: 5371-5380.

[5] 王 良, 罗来勒. 螺旋折流板换热器中阻流板对换热及沿程压降的影响 [C] // 济南: 中国工程热物理学会传热传质学术会议, 2000.

WANG Liang, LUO Lai-le. Effect of baffles on heat transfer and pressure drop along the path in spiral baffles heat exchanger [C] // Jinan. Academic Conference on Heat and Mass Transfer of Chinese Society of Engineering Thermophysics, 2000.

[6] 刘红禹. 单弓形和螺旋形折流板换热器的数值模拟及性能分析 [J]. *炼油技术与工程*, 2007(11): 45-49.

LIU Hong-yu. Numerical simulation and performance analysis of single bow and spiral baffle heat exchanger [J]. *Petroleum Refinery Engineering*, 2007(11): 45-49.

[7] 曹 兴. 连续与搭接螺旋折流板换热器理论分析与实验研究 [D]. 济南: 山东大学, 2012.

CAO Xing. Theoretical analysis and experimental study on heat exchanger with continuous and overlapping helical baffles [D]. Jinan: Shandong University, 2012.

[8] WANG S L. Hydrodynamic studies on heat exchangers with helical baffles [J]. *Heat Transfer Engineering*, 2002, 23(3): 43-49.

[9] 汲 水. 螺旋折流板管壳式换热器壳侧流动与传热机理分析与性能研究 [D]. 济南: 山东大学, 2011.

Ji Shui. Study on mechanism and performance of shell-side flow and heat transfer in shell-and-tube heat exchanger with helical baffles [D]. Jinan: Shandong University, 2011.

[10] 邵海磊, 刘 彤. 折流板结构对换热器壳侧性能影响的对比研究 [J]. *化工设备与管道*, 2016, 53(1): 24-27.

SHAO Hai-lei, LIU Tong. Comparative study on the effect of baffle structure on shell-side performance of heat exchangers [J]. *Process Equipment & Piping*, 2016, 53(1): 24-27.

(金圣迪 编辑)