

半圆柱空间异形孔板换热器热工水力性能的数值模拟

费凤繁,陈亚平,吴嘉峰,苏金栋

(东南大学 能源与环境学院,江苏 南京 210096)

摘要:为研究半圆柱空间异形孔板换热器的流动与传热特性,建立换热器简化物理模型,运用ANSYS软件建立CFD模型进行数值模拟,分析了开孔形状与板间距的影响,并对比了半圆柱空间异形孔板换热器与弓形板换热器的联系与区别。研究结果表明:半圆柱异形孔板换热器壳侧流体呈纵向流动,壳侧流体通过孔隙形成射流冲刷管壁,具有强化传热作用;板间距一定,开孔面积相近时,开孔形状对壳侧压降的影响较小,对换热性能的影响稍大;板间距越小壳侧换热系数越高但其综合性能指标越小;圆头三角孔板换热器在板间距30 mm时的壳侧换热系数比40及50 mm方案分别高5.62%,10.06%,综合性能指标低1.44%,2.07%;异形孔板换热器的综合性能指标比弓形折流板换热器平均约高27.89%。

关键词:强化传热;换热器;半圆柱空间;异形孔板形状;板间距

中图分类号:TK172 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2023.03.017

[引用本文格式]费凤繁,陈亚平,吴嘉峰,等.半圆柱空间异形孔板换热器热工水力性能的数值模拟[J].热能动力工程,2023,38(3):126-132.FEI Feng-fan,CHEN Ya-ping,WU Jia-feng,et al.Numerical simulation of thermal and hydraulic performance of heat exchanger with orifice baffles in half cylindrical space[J].Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2023,38(3):126-132.

Numerical Simulation of Thermal and Hydraulic Performance of Heat Exchanger with Orifice Baffles in Half Cylindrical Space

FEI Feng-fan, CHEN Ya-ping, WU Jia-feng, SU Jin-dong

(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096)

Abstract: To study the flow and heat transfer characteristics of the heat exchanger with orifice baffles in half cylindrical space, a simplified physical model of heat exchanger was established. The ANSYS software was adopted to establish CFD model and conduct simulation analysis. The influences of orifice shape and baffle pitch as well as the correlation and difference between the heat exchangers with orifice and segmental baffles in half cylindrical space were compared. The results show that the shell side flow pattern of the heat exchanger with orifice baffles in half cylindrical space is mainly longitudinal, and the tube bundle is swept by jet flow formed through the gaps between baffle orifices and tubes which enhances heat transfer. The influence of the orifice shape on the heat transfer performance is more obvious than on the shell side pressure drop with same baffle pitch and similar orifice area. It is also revealed that the smaller the baffle pitch is, the higher the shell side heat transfer coefficient is, but the smaller the comprehensive performance index is. As for the fillet triangular baffles scheme, the shell side heat transfer coefficient of the scheme of 30 mm baffle pitch is 5.62% and 10.06% higher and the comprehensive performance index is

收稿日期:2022-01-24; 修订日期:2022-03-16

基金项目:国家自然科学基金(51776035,51976033)

Fund-supported Project:National Natural Science Foundation of China (51776035,51976033)

作者简介:费凤繁(1996-),女,东南大学硕士研究生。

通讯作者:陈亚平(1956-),男,东南大学教授。

1.44% and 2.07% lower than those of the schemes of 40 mm and 50 mm respectively. Furthermore, the comprehensive performance index of the heat exchanger with orifice baffles is about 27.89% higher than that of the segmental one averagely.

Key words: heat transfer enhancement, heat exchangers, half cylindrical space, shapes of orifice baffles, baffle pitch

引言

半圆柱空间换热器应用于发电厂的给水加热器和某些流体温度变化很大需要逆流传热的逆流式U型管换热器等场合,其壳侧被纵向分隔板分隔为两个半圆柱形空间。在半圆柱空间换热器中使用最广泛的壳侧支撑板形式为弓形折流板,但其存在流动传热死区、流动阻力较大、容易诱导振动和结垢等问题^[1-5]。为提升传热性能,Yang等人^[6]提出逆流型梯式螺旋折流板U型管束换热器结构,相较于弓形折流板提高了传热系数并降低流动阻力,不过其结构较为复杂,对生产加工的要求较高。异形孔折流板是一种全管束支撑形式,不受壳侧空间形状的影响,使壳侧流体形成纵向流动,在减小压力损失的同时也能防止振动和结垢,但其强化传热性能较弱。由于激光切割机的普及,使得异形孔板的加工变得较为简单容易。

王思等人^[7]通过模拟研究,得出多叶孔支撑板对高粘度流体油的传热有强化作用。曾舟华等人^[8]研究得到,梅花孔板换热系数约是弓形折流板的1.8倍。Sun等人^[9]对蒸汽发生器流体的流动与换热特性进行研究。Ma等人^[10]得出三叶孔换热器具有较好的强化换热性能。盛艳军等人^[11]对几种异形孔板换热器的壳侧传热与阻力性能进行了试验研究。

上述关于异形孔板的研究大多是针对整圆柱形空间的换热器,关于半圆柱空间异形孔板换热器的流动与传热研究并不多见。为此,本文运用数值模拟方法,建立简化模型,研究半圆柱空间异形孔板壳侧流体的流动与传热特性,分析开孔形状、板间距等因素对其性能的影响,并比较其与弓形折流板换热器性能。

1 模型和计算方法

1.1 物理模型

表1为半圆柱异形孔换热器相关尺寸,图1为折流板结构示意图。冷流体流经管侧,热流体流经壳侧,进行逆流换热。为简化模型,忽略折流板与壳壁间的漏流,换热管厚度视为零,所有固体材料均为碳钢,换热器外表面为绝热边界。工作介质为液态水,物性参数视为常数,进行定常的湍流流动。

表1 半圆柱换热器参数

Tab. 1 Parameters of heat exchanger in half cylindrical space

参数/mm	数值
换热管有效长度 L	840
换热器壳体内径 D	80
换热管直径 d_o	10
换热管中心距 s	15
折流板间距 l	50, 40, 30
入口管直径 $d_{n,in}$	30
出口管直径 $d_{n,out}$	30

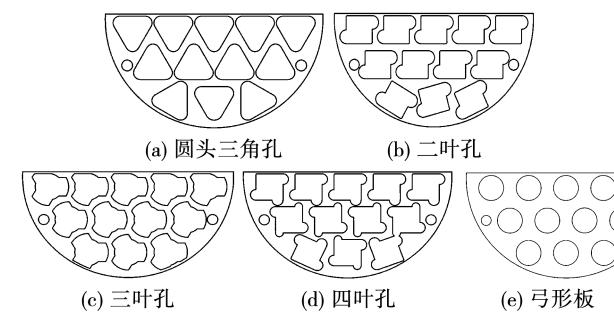


图1 折流板结构图

Fig. 1 Structure diagram of baffles

1.2 CFD模型

使用ANSYS的Design Modeler建立换热器的物理模型,用Fluent meshing绘制网格,Fluent Solution进行模拟计算。模拟某高压加热器中过冷段的参数

设定边界条件为:壳侧和管侧水的入口温度分别为 539 和 510 K;壳侧和管侧出口压力分别为 6.5 和 19.6 MPa。

由于计算工况为湍流,计算模型采用雷诺时均后的控制方程并耦合 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型来求解。采用 SIMPLE 算法求解压力耦合方程,动量方程、能量方程、湍流方程中的对流项采用二阶迎风格式。通过残差与观测点变化差距来判断模拟是否收敛。控制方程组包括连续性方程、动量方程、能量方程、湍动能 k 方程和耗散率 ε 方程^[6,10]。

1.3 参数计算

壳侧总体换热量 Q 、总体换热系数 K 、壳侧换热系数 h_o 的计算式为:

$$Q = \dot{m}_i c_{p,i} (T_{i,out} - T_{i,in}) = \dot{m}_o c_{p,o} (T_{o,out} - T_{o,in}) \quad (1)$$

$$K = Q / (N\pi d_o L \Delta T_m) \quad (2)$$

$$h_o = \frac{Q_o}{N\pi d_o L (T_w - T_f)} \quad (3)$$

式中: \dot{m}_i —质量流量, kg/s; ΔT_m —对数平均温度, K; N —换热管数量; d —直径, mm; L —有效长度, mm。下标: i—管侧; o—壳侧; w—壁面; f—壳侧流体; in—入口; out—出口。

为综合比较换热器的换热与流动性能,采用综合性能指标 $J = h_o \cdot \Delta p_o^{-1/3}$ 进行综合性评价^[6]。

1.4 模型验证

对圆头三角孔板换热器进行了网格独立性验证,网格划分如图 2 所示。图 3 为在壳侧流量为 0.33 kg/m³ 时,分别取 679 万、812 万和 1 070 万 3 组网格数的模拟计算结果。812 万与 1 070 万相比,总体换热系数及壳侧压降十分接近,差值分别为 2.18% 和 0.21%,说明网格数的增加对结果影响不大。综合考虑计算所需资源时间与精度,选择计算网格数量为 812 万。

为验证模型准确性,将圆头三角孔板换热器模拟数据与实验结果进行比较^[12]。取 6 组工况,保持管侧流量不变,对比结果如图 4 所示。其中,壳侧换热系数与壳侧压降的平均误差分别为 17.07% 和 5.77%,均在允许误差范围之内。

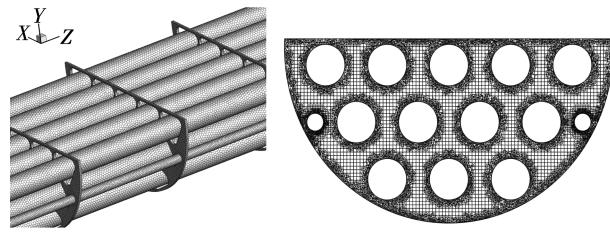


图 2 网格示意图

Fig. 2 Diagram of grids

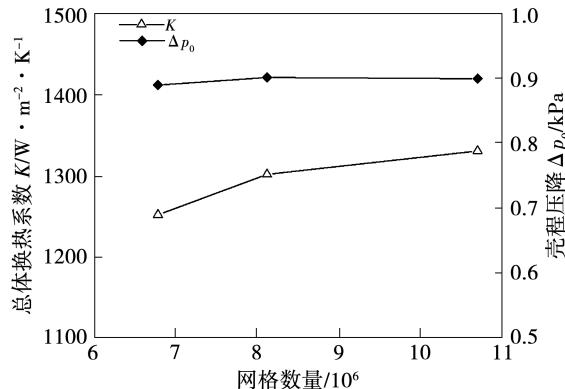


图 3 网格独立性验证

Fig. 3 Grid independence verification

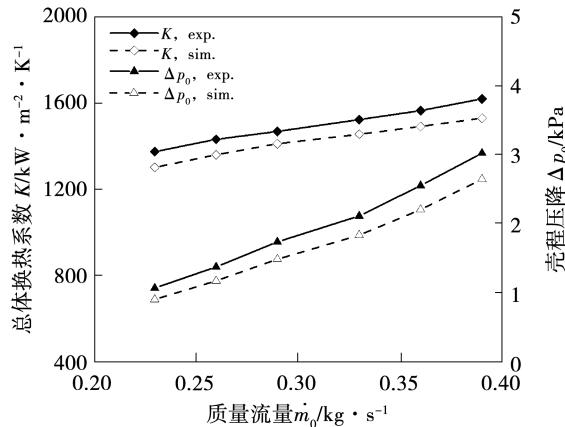


图 4 模型验证

Fig. 4 Model validation

2 结果与分析

2.1 异形孔形状对换热性能的影响

异形孔开孔形状会影响壳侧流道形状,从而影响流体的流动。对开孔总面积相近的 4 种异形孔进行模拟分析,图 5 为壳侧流体通过孔隙接近管壁处的速度云图。不同形状的异形孔形成的射流有所不

同。圆头三角孔、四叶孔射流分布较均匀,而二叶孔相对不够均匀,通孔面积分布越均匀,射流效果越好,强化传热效果越好。

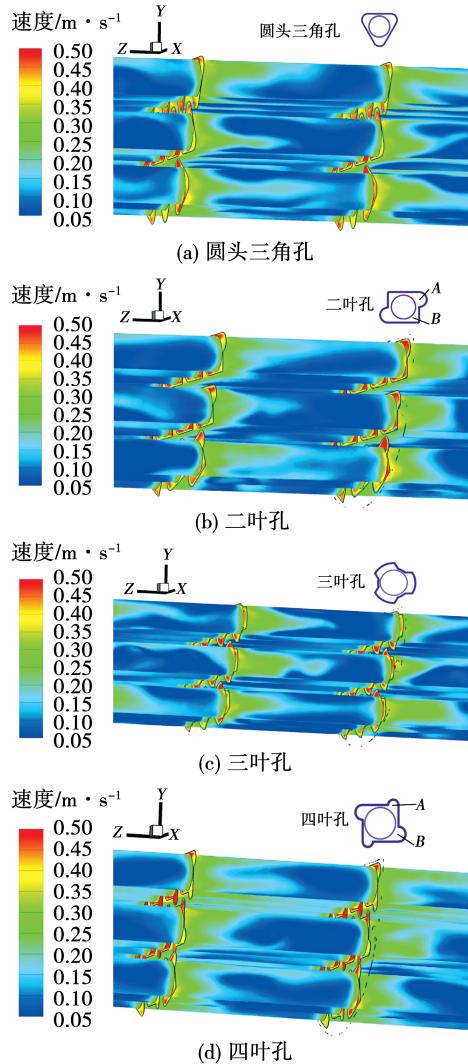


图5 半圆柱异形孔板换热器壳侧接近管壁面处速度云图

($z=420 \sim 470 \text{ mm}$)

Fig. 5 Velocity contour at the shell side close to tube wall surface of heat exchanger with orifice baffles in half cylindrical space ($z=420 \sim 470 \text{ mm}$)

图6为4种异形孔换热器的性能。其中,二叶孔、三叶孔、四叶孔和圆头三角孔分别用D、T、Q、F表示,后面的数字代表板间距(mm)。比较4种异形孔板换热器,总体换热系数和壳侧换热系数都有一定差别,两者数值最大的均为圆头三角孔。4者壳程压降相近,圆头三角孔板的综合性能指标最高。

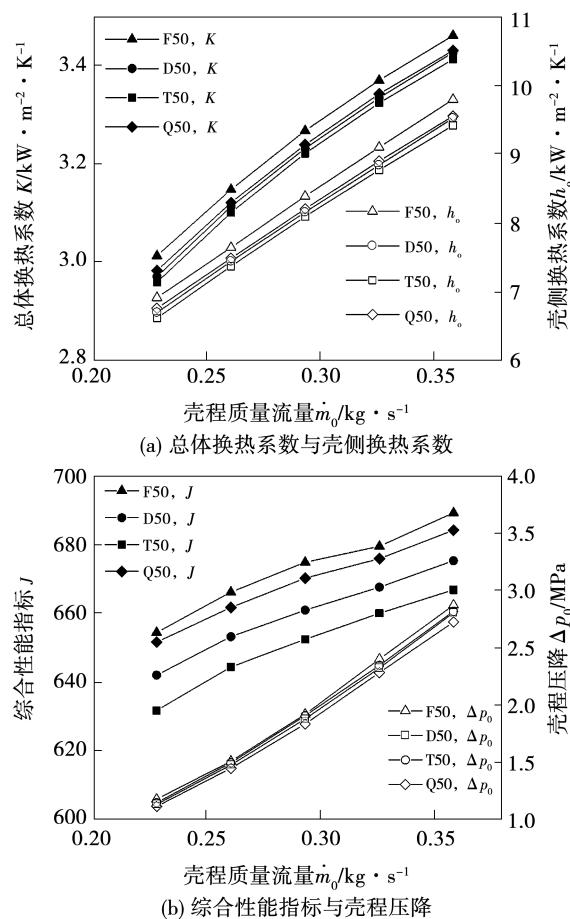


图6 二叶孔、三叶孔、四叶孔、圆头三角孔性能

Fig. 6 Performance of heat exchangers with dual-foil square baffle, trefoil baffle, quatrefoil square baffle and fillet triangular baffle

2.2 异形孔板间距对换热性能的影响

研究了3组板间距(50, 40和30 mm)对换热器性能的影响。图例中板间距以数值后缀形式表达。由图7(a)可知,随着板间距减小,换热器的总体换热系数和壳侧换热系数逐渐增大。其中,F30总体传热系数比F40, F50分别大3.70%, 2.05%, 其壳侧换热系数比F40, F50分别大5.62%, 10.06%。这是由于折流板数量变多,流体通过孔隙形成的射流次数变多,距离变短,扰动变强,从而换热系数变高。由图7(b)可知,随着板间距减少,壳侧压降也逐渐增大,F30壳侧压降比F40, F50分别大20.11%, 41.89%。然而,所有换热器的综合性能指标均随着板间距的减小而有所降低,其中,F30综合性能指标比F40, F50分别低0.62%, 2.02%。可见,不同的板间距影响壳侧整体空间分布,对换热器

流动阻力与换热效果影响均较大,但对换热器的综合性能指标影响不大。由于传热系数直接影响所需的换热器面积,异形孔换热器宜采用较密的板间距方案。

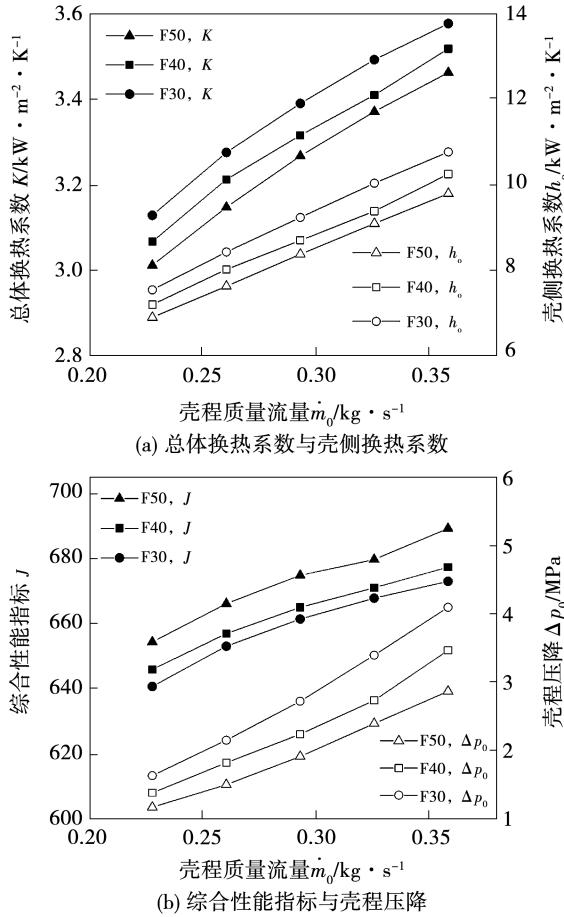


图 7 板间距对半圆柱异形孔换热器的影响

Fig. 7 Influence of baffle pitch on heat exchanger with orifice baffles in half cylindrical space

2.3 半圆柱异形孔板与弓形折流板换热器比较

为进一步深入研究半圆柱异形孔折流板与弓形板换热器的整体流动模式的差别,对两者的流场与整体性能进行了分析。异形孔板和弓形折流板引导的流动形态差别较大,而 4 种异形孔换热器(圆头三角孔、二叶孔、三叶孔及四叶孔)壳侧流体形态相似,故以圆头三角孔方案为例进行分析。

半圆柱换热器速度流线如图 8 所示。两类半圆柱空间换热器壳侧流体均具有周期性。圆头三角孔板换热器壳侧整体呈纵向流,流速较低,最高流速为 0.75 m/s。入口与出口处壳壁处易形成流动滞留

区,因此两端的空间余量不宜过多。弓形折流板换热器壳侧流体呈蛇形横向流,流速较大,最大流速约为 1.8 m/s,每块折流板后方都存在流动死区,因其引导的流动模式对管束形成的冲击比异形孔板大,更易引起振动。

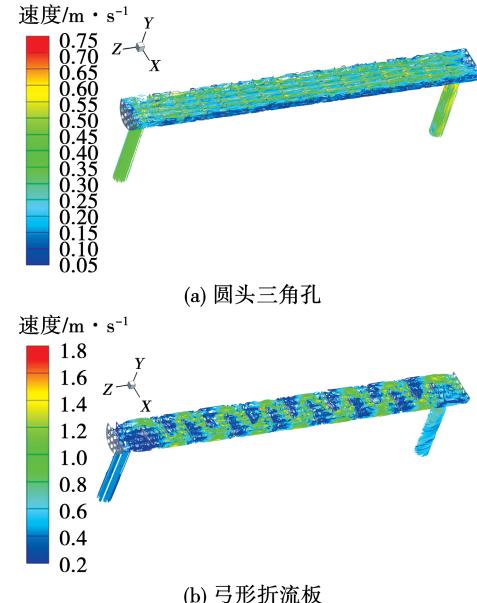


图 8 半圆柱换热器速度流线图

Fig. 8 Velocity streamline of heat exchanger in half cylindrical space

为深入研究两者的强化机理,对其局部放大的流场图进行分析,如图 9 所示。由图 9(a)可知,圆头三角孔方案孔隙处流通横截面积陡然变小,流体流过时速度会突然变大,从而形成射流。由图 9(b)可知,由于弓形板缺口的存在,使得流体呈蛇形的横向流动,且折流板后方形成近乎停滞的流动死区。

弓形折流板壳侧流体的蛇形流态会造成较大振动,较大的流动死区也容易使污垢淤积,增加管壁的热阻。而异形孔板方案的壳侧流体通过孔隙后形成的射流,会冲刷管壁,破坏边界层,增强紊流,从而强化传热。此外,射流冲刷管壁还可以减少管壁结垢,防止管壁污垢导致热阻增大;射流使流动呈纵向流,可减少振动,延长换热器使用寿命。同时,异形孔板方案贴近折流板后方及管壁处,流体受旁侧流体挤压可形成二次涡流。流体的二次流动增强了紊流,增加壳侧流体与换热管的接触时间,从而增强壳侧高温流体与管内低温流体的换热效果。

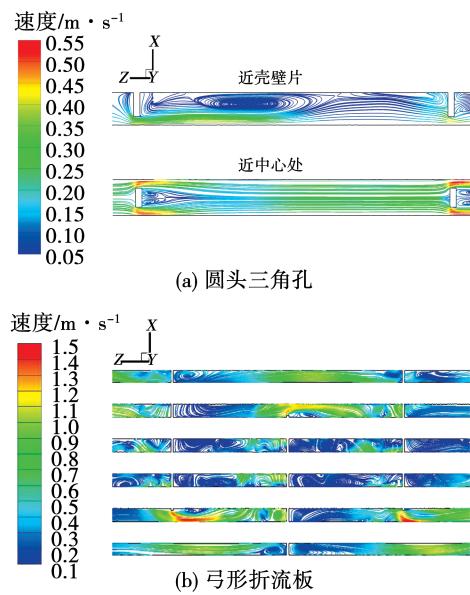
图9 $y = -4 \text{ mm}$, $z = 420 \sim 470 \text{ mm}$ 截面局部速度流线图Fig. 9 Velocity streamline on section part of shell side space at $y = -4 \text{ mm}$, $z = 420 \sim 470 \text{ mm}$

图10为半圆柱圆头三角孔板与弓形折流板换热器性能比较。分析可知,弓形板壳侧为横向流,圆头三角孔板壳侧为纵向流,故弓形板有效换热面积和流速会大于圆头三角孔,故换热系数会更大。但横向冲击管束以及不断改变方向的蛇形流动时会产生较大压力损失,故弓形板的壳侧压降会大得多。圆头三角孔板换热器的总体换热系数、壳侧换热系数和壳侧压降均低于弓形折流板换热器,分别平均约小6.96%,17.60%和73.39%;圆头三角孔板的综合性能指标平均比弓形折流板方案约高27.89%。

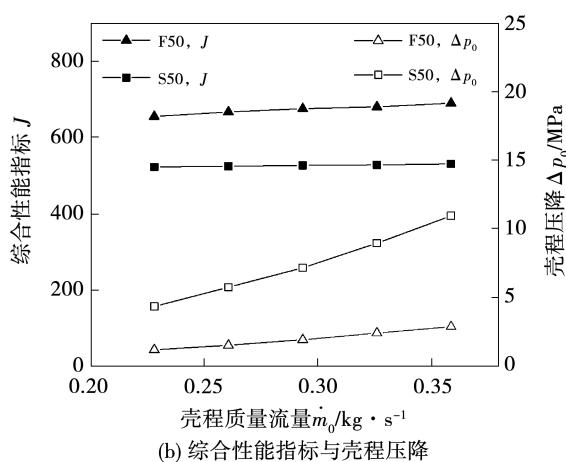
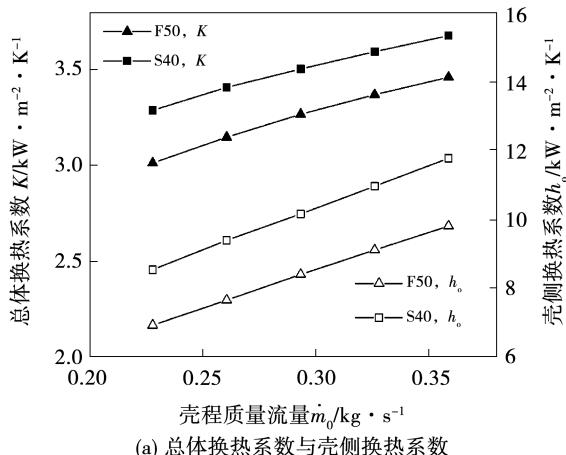


图10 半圆柱圆头三角孔板与弓形折流板换热器性能比较

Fig. 10 Comparison of characteristics between heat exchangers with fillet triangular baffle and segmental baffle in half cylindrical space

3 结 论

(1) 对于半圆柱空间异形孔折流板换热器,板间距相同,开孔面积相近时,开孔形状对换热器压降的影响较小,对换热性能则有一定的影响。对于同一种异形孔,随着折流板间距减小,半圆柱异形孔换热器壳侧换热系数和流动阻力都增大,但其综合性能指标略有下降。因此,在设计换热器时应设计合理的开孔形状与板间距,以达到使用要求。

(2) 在半圆柱空间异形孔换热器壳侧流体呈周期性纵向流动,几乎无流动死区;流体通过孔隙形成射流,冲刷管壁、破坏边界层、增强扰动、减少振动和结垢;壳壁与折流板后方存在二次涡流,可增强换热。虽然因其纵向流动的速度偏低而壳侧换热系数偏低,其壳侧压降亦远低于弓形折流板方案,但其综合性能指标平均约比弓形折流板方案高27.89%。

参考文献:

- [1] 刘辰玥,郑通,刘渊博,等.异形仿生换热器壳侧对流换热的高效低阻特性研究[J].化工学报,2021,72(9):4511-4522,4439.
LIU Chen-yue, ZHENG Tong, LIU Yuan-bo, et al. Shell side high efficiency and low resistance performance of heat exchanger with bionic structures [J]. CIESC Journal, 2021, 72 (9): 4511 - 4522, 4439.

4522,4439.

- [2] LI Hua-dong, KOTTKE V. Effect of baffle spacing on pressure drop and local heat transfer in shell-and-tube heat exchangers for staggered tube arrangement [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41(10): 1303–1311.
- [3] 许晓红, 郭建辉, 雷勇刚, 等. 双壳程管壳式换热器的传热和阻力特性 [J]. 热能动力工程, 2018, 33(12): 20–25.
XU Xiao-hong, GUO Jian-hui, LEI Yong-gang, et al. Heat transfer and flow resistance performance of a double shell-pass shell-and-tube heat exchanger [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(12): 20–25.
- [4] AMBEKAR A S, SIVAKUMAR R, ANANTHARAMAN N, et al. CFD simulation study of shell and tube heat exchangers with different baffle segment configurations [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 108: 999–1007.
- [5] 古新, 罗元坤, 熊晓朝, 等. 扭转流换热器结构参数对流场和温度场的影响 [J]. 化工学报, 2018, 69(8): 3390–3397.
GU Xin, LUO Yuan-kun, XIONG Xiao-chao, et al. Influence of twisty flow heat exchanger's structural parameters on flow field and temperature field [J]. CIESC Journal, 2018, 69(8): 3390–3397.
- [6] YANG Shi-fan, CHEN Ya-ping, WU Jia-feng, et al. Performance simulation on unilateral ladder type helical baffle heat exchanger in half cylindrical space [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 150: 134–147.
- [7] 王思, 孙费梅, 刘志春, 等. 新型油冷器壳程流动与强化传热数值模拟 [J]. 热能动力工程, 2018, 33(9): 7–13.
WANG Si, SUN Fei-mei, LIU Zhi-chun, et al. Numerical simulation on flow field and enhanced heat transfer of shell side in a new oil cooler [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,

2018, 33(9): 7–13.

- [8] 曾舟华, 钱颂文. 低传热“死区”异形孔板纵向流管壳式换热器传热研究 [J]. 化工设备设计, 1997(2): 15–18.
- ZENG Zhou-hua, QIAN Song-wen. Research on low heat transfer "dead zone" orifice baffle shell and tube heat exchanger with longitudinal flow [J]. Process Equipment & Piping, 1997(2): 15–18.
- [9] SUN Bao-zhi, YANG Yuan-long. Numerically investigating the influence of tube support plates on thermal-hydraulic characteristics in a steam generator [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 51: 611–622.
- [10] MA Lu, WANG Ke, LIU Min-shan, et al. Numerical study on performances of shell-side in trefoil-hole and quatrefoil-hole baffle heat exchangers [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 123: 1444–1455.
- [11] 盛艳军, 陈亚平, 操瑞兵, 等. 异型孔隔板换热器壳侧传热与阻力性能的试验研究 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(2): 318–322.
SHENG Yan-jun, CHEN Ya-ping, CAO Rui-bing, et al. Experimental study on shell-side heat transfer and flow resistance performance of heat exchangers with non-round orifice baffles [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, 42(2): 318–322.
- [12] SU Jin-dong, CHEN Ya-ping, WU Jia-feng, et al. Experimental investigation on heat transfer performances in half-cylindrical shell space of different heat exchangers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 189: 122684.

(丛敏 编辑)