DOI: 10.3901/JME.2014.06.135

阻流板对轴向搭接螺旋折流板换热器流动和传热性能的影响*

董 聪^{1,2} 陈亚平¹

(1. 东南大学能源与环境学院 南京 210096;

2. 浙江科技学院轻工学院 杭州 310023)

摘要: 对倾斜角为 36° 的 X 型缺口是否采用阻流板堵死的 4 种轴向搭接螺旋折流板换热器的流动和传热性能进行数值模拟研究, 其中 4 种方案均采用三分螺旋折流板, 正三角形布管且螺距近似相同, 分别为无阻流板(36°MO)、最外侧一条缺口堵死(36°MOB1)、外侧缺口堵死(36°MOB2)和内外缺口全堵死(36°MOBA)。构建子午切片 M_1 , 正六边形切片 H_2 和 H_3 , 采用速度矢量叠加速度或压力云图的方式全方位阐释壳侧流场特性。结果表明, 在分别穿过 X 型缺口外、内三角区的正六边形切片 H_2 和 H_3 上所显示的相邻折流板之间的泄漏情况 4 种方案有明显不同; 同时这 4 种方案的每个螺旋周期内都出现二次流, 其中 36°MOB2 方案二次流强度最大; 虽然阻流板阻挡面积越多的方案其传热系数越高, 但流动阻力也越大, 从壳侧综合性能 $h_o/\Delta p_o$ 来说, 36°MOB1 方案和 36°MOB2 方案分列前两名, 而 36°MO 方案最低; 与 36°MO 方案相比, 36°MOB1 、 36°MOB2 和 36°MOBA 方案的壳侧传热系数 h_o 和壳侧综合性能 $h_o/\Delta p_o$ 的平均值分别高 36.76%、38.59%、41.13%和 19.88%、10.14%、9.30%。由于 36°MOB1 方案的综合性能指标较高且阻流板在管束最外侧, 制造工艺可行, 所以其应用价值较好。

关键词: 三分螺旋折流板换热器; 数值模拟; 中间轴向搭接; X 型缺口; 阻流板

中图分类号: TK124

Impact of Block Plates on the Flow and Heat Transfer Performance of Middle-axial-overlap Helical Baffle Heat Exchangers

DONG Cong^{1,2} CHEN Yaping¹

(1. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096;

2. School of Light Industry, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023)

Abstract: The flow and heat transfer performances are numerically simulated for four middle-axial-overlap trisection helical baffle heat exchangers with 36° baffle incline angle, approximate spiral pitch and equilateral triangle tube layout, including one scheme without block plates (36°MO), one scheme with the outermost strip notches blocked (36°MOB1), one scheme with outer triangle notches blocked (36°MOB2) and one scheme with all notches blocked (36°MOBA). The meridian slices M_1 and unfolded concentric hexagonal slices H_2 and H_3 are constructed to obtain the full-angular view of shell-side flow characteristics by using pressure or velocity contours plus velocity vectors. The results show that the leakage patterns of the four schemes on concentric hexagonal slices H_2 and H_3 located respectively in outer and inner triangles of X-notch are quite different; each baffle chamber contains secondary flow, but the secondary flow of 36°MOB2 scheme is the strongest. Both heat transfer coefficient and pressure drop increase with the increase in blocked area, but in term of shell-side comprehensive performance $h_o/\Delta p_o$, the 36°MOB1 and 36°MOB2 schemes rank the first and second highest, while that of 36°MO scheme falls to the last. The average values of shell-side heat transfer coefficient h_o and shell-side comprehensive performance $h_o/\Delta p_o$ for 36°MOB1 , 36°MOB2 and 36°MOBA schemes are 36.76%, 38.59%, 41.13% and 19.88%, 10.14%, 9.30% higher than those of 36°MO scheme. The 36°MOB1 scheme possesses strong application promise because of its better comprehensive performance and feasibility in installation of the outmost block plates on the tube bundle.

Key words: trisection helical baffle heat exchanger; numerical simulation; middle-axial-overlap; X-notch; block plate

0 前言

捷克科学家 LUTCHA 等^[1]最早提出了一种由 4

块扇形折流板首尾相连组成一个螺旋周期的 1/4 非连续螺旋折流板换热器, 这种新型换热器能有效克服传统弓形折流板换热器大壳侧压降、折流板根部的流动死区和折流板缺口处大距离管束支撑诱导的振动等缺点。

与传统的弓形折流板管壳式换热器相比, 螺旋折流板换热器的众多优点受到广泛关注^[2], 研究人

* 国家自然科学基金(50976022, 51276035)和江苏省科技创新与成果转化专项引导资金(BY2011155)资助项目。20130307 收到初稿, 20130912 收到修改稿

员主要通过试验研究或数值模拟对其进行研究,但关于何种折流板结构或连接方式或倾斜角(有些文献称螺旋角)的性能最佳,不同学者持不同的观点。KRAL 等^[3]对 5 组不同螺旋角四分首尾相连折流板方案进行了试验研究,认为 40° 螺旋角方案壳侧综合性能 $h_o/\Delta p_o$ 最优。STEHLIK 等^[4]提到可采用轴向搭接方式来减少折流板连接处 V 型缺口的泄漏。ZHANG 等^[5]的不同螺旋角和不同壳径比的中间搭接方案试验得出 30° 螺旋角方案壳侧综合性能最好。WANG^[6]采用激光测速仪测量了轴向搭接螺旋折流板换热器内的冷态流场,认为轴向搭接有利于提高换热器的性能。ZHANG 等^[7]对 40° 螺旋角的中间轴向搭接四分螺旋折流板换热器进行数值模拟研究。曹兴等^[8]借助数值模拟方法研究了轴向搭接量对壳侧传热系数的影响。NEMATİ 等^[9]对倾斜角为 40° 的不同轴向搭接量的螺旋折流板换热器进行了数值模拟研究,得出壳侧综合性能与轴向搭接量成反比的结论。王良等^[10]试图采用阻流板来堵死首尾相连螺旋折流板换热器相邻折流板间 V 型缺口,但试验表明加阻流板后虽然壳侧传热系数有所提高,但压降增加更多,其壳侧综合性能反而不如没加阻流板方案。结合管壳式换热器普遍采用正三角形布管的特点,陈亚平等^[11-12]设计了一种适合正三角形布管的三分螺旋折流板换热器,相关试验研究结果表明中间轴向搭接方案壳侧传热系数高于相同倾斜角首尾相连方案但其壳侧综合性能却不如相同倾斜角首尾相连方案。

中间轴向搭接方案的 X 型缺口由内外两个顶对顶 V 型缺口组成, X 型缺口会对换热器的性能产生怎样的影响,与缺口没堵死的中间轴向搭接方案相比,将外侧 X 型缺口或整个 X 型缺口用阻流板堵死,其性能如何变化。

本文采用数值模拟的方法对相同壳体、相同螺距、相同换热管数、相同拉杆数以及采用正三角布管的无阻流板(36°MO)、最外侧一条缺口堵死(36°MOB1)、外侧缺口堵死(36°MOB2)和内外缺口全堵死(36°MOBA) 4 种不同结构中间轴向搭接方案的三分螺旋折流板换热器的壳侧进行流动和传热性能研究。

1 三维计算模型

1.1 物理模型

中间轴向搭接三分螺旋折流板换热器的物理模型和几何参数见图 1 和表 1,其中布管方式采用正三角形。物理模型由换热管、拉杆、折流板、壳

体、封头以及管侧和壳侧进出口接管组成;壳侧通道由 10 个螺旋周期组成,管侧有 34 根换热管,30 块折流板由 3 根拉杆固定^[13]。36°MO、36°MOB1、36°MOB2、36°MOBA 和 4 种方案折流板连接方式如图 1b~1e 所示,其中图 1b 和图 1d 中相连折流板之间的深色区域为阻流板。

图 1 三分螺旋折流板换热器几何模型和 4 种折流板结构

表 1 壳体以及管束的基本几何尺寸

参数	数值
壳体内径/mm	126
折流板直径/mm	123
换热管外径/mm	10
换热管中心距/mm	17
换热管长度/mm	1 300
进出口接管内径/mm	40
换热管数	34
拉杆数	3
螺距/mm	129
螺旋周期数	10

1.2 控制方程和模拟方法

螺旋折流板换热器在流动与传热数值模拟过程中遵守质量守恒、动量守恒和能量守恒三个基本守恒定律,黏性方程选用各向异性的基于 RNG 的 $k-\varepsilon$ 湍流模型,上述控制方程参考文献[14]。

数值模拟采用 Fluent 软件计算,时间项选择定常求解,启用能量方程,压力和速度耦合选择 Simple 算法,湍流模型启用基于重整化群的 RNG- $k-\varepsilon$ 模型,激活近壁面增强热作用选项。冷热侧流体之间壁面换热通过耦合计算实现,动量、能量和湍流参数的求解均采用二阶迎风格式。计算收敛的条件是连续性方程, u 、 v 、 w 、 k 和 ε 的残差值小于 1×10^{-4} ,能

量的残差值小于 1×10^{-7} 和冷热侧进出口压力达到稳定以及冷热侧流体质量守恒和能量守恒。

1.3 边界条件与基本假设

边界条件设置如下: ① 管侧与壳侧流体进口采用速度入口边界条件, 假设入口面流体为均匀流动, 需要设定入口速度, 入口温度及湍流条件; ② 管侧与壳侧出口均采用压力出口边界条件, 设定出口压力及湍流条件, 出口压力为零; ③ 管侧外壁面、壳侧外壁面、管侧进出口壁面和壳侧进出口壁面设置为无渗透、无滑移和绝热边界条件; 换热管壁面、折流板壁面设置为无渗透、无滑移和耦合换热边界条件; ④ 物性参数, 数值模拟中管侧与壳侧流体介质均为水, 换热器材质为碳钢, 水物性参数随温度变化而变化, 将密度、定压比热、动力黏度和热导率拟合为温度的函数。

数值模拟时需要满足以下假设: ① 壳侧流体在湍流状态下的流动处于充分发展并达到稳定状态; ② 螺旋通道内流体为不可压缩流体; ③ 忽略重力和壳体外壁面对外散热; ④ 忽略折流板与管子之间的间隙泄漏, 忽略换热管壁厚。

1.4 网格划分和模拟结果验证

采用 Gambit 软件建立中间轴向搭接三分螺旋折流板换热器几何模型。复杂的几何结构无法生成结构化网格, 所以对几何模型采用 Tet/Hybrid 复合结构切块划分非结构化网格。mesh 格式网格导入 Fluent 后使用 smooth/swap 命令, 把网格质量 skewness 值控制在 0.8 以内。为验证网格方案的独立性, 对中间轴向搭接三分螺旋折流板换热器五套 270 万、320 万、390 万、450 万和 530 万网格数进行网格独立性检查, 综合考虑计算能力和计算精度, 最终确定网格数为 390 万; 考虑流体边界层效应, 对换热管壁面进行局部网格加密, 见图 2。

为验证模拟结果的可靠性, 对 20° 倾斜角周向重叠三分螺旋折流板换热器的模拟数据和试验数据进行对比^[14]。壳侧传热系数模拟值与试验值之间的

图 2 横截面和偏心切片(一周期内)方向网格示意图

平均误差为 18.50%, 壳侧压降模拟值与试验值之间的平均误差为 11.06%, 且误差随流量的增加而减少。计算值与试验值之间的偏差受忽略折流板管孔与管子间隙的泄漏和忽略外壁面散热等因素影响, 但误差在合理范围内, 所以计算模型和数值计算结果是合理的和可信的。

2 模拟结果分析

对 36°MO 、 36°MOB2 、 36°MOBA 和 36°MOB14 种方案螺旋折流板换热器的传热性能和阻力特性进行数值模拟, 螺旋折流板换热器壳侧通道由 10 个螺旋周期 $C_1 \sim C_{10}$ 组成, 如图 3 所示。4 种方案几何参数和冷热侧进口参数设置与文献[15]中的 20° 倾斜角周向重叠三分螺旋折流板换热器方案一致: 即热流体水走管侧, 入口速度和温度分别为 $v_{h,i}=1.37 \text{ m/s}$ 和 $T_{h,i}=339.4 \text{ K}$; 冷流体水走壳侧, 入口速度和温度分别为 $v_{c,i}=2.86 \text{ m/s}$ 和 $T_{c,i}=324.9 \text{ K}$ 。

为了深入研究螺旋通道局部流场特性, 本文构建了充分发展区域内 C_5 和 C_6 周期之间子午切片 M_1 和同心正六边形切片 H_2 和 H_3 。其中, 子午切片 M_1 切到换热管最少且能观察 X 型缺口泄漏情况; H_2 处在由外向内的第一层与第二层换热管之间的空隙中间并穿过 X 型缺口外侧三角区, H_3 处在第二层与第三层换热管之间的空隙中间且穿过 X 型缺口内侧三角区, 见图 3。

图 3 折流板编号(1~30)、子午切片(M_1)、六边形切片(H_2 、 H_3)和螺旋周期编号($C_1 \sim C_{10}$)及位置

2.1 壳侧局部流场分布

图 4 给出了 36°MO 、 36°MOB1 、 36°MOB2 和

36°MOBA 4 个方案子午切片 M_1 上速度矢量叠加压力云图。图 4 中压力在折流板的导流下沿流动方向

呈阶梯状逐渐下降,其中 36°MOBA 方案压降最大, 36°MO 方案压降最小。进入每个螺旋周期中的流体在离心力的作用下形成流向壳体内壁面区域的离心流,随后在向心压差的作用下形成向心流回到轴心区域;在离心流和向心流的共同作用下形成单涡型迪恩涡二次流,迪恩涡二次流能有效促进壳侧强化传热。与 36°MO 方案相比, 36°MOB1 方案和 36°MOB2 方案的外侧缺口部分或整个被阻流板堵死,内侧通道流体流速明显增大,螺旋通道中二次流强度随之增强。 36°MO 方案和 36°MOBA 方案流线分布较 36°MOB1 方案和 36°MOB2 方案均匀。

图 4 子午切片 M_1 速度矢量叠加压力云图

在子午切片 M_1 中无法观察相连两块折流板之间缺口的泄漏情况,于是构建了位于管排中间空隙处的同心六边形切片 H_2 和 H_3 ,见图 3。图 5 展示了 4 种方案充分发展区域的 C_5 和 C_6 两个周期内的正六边形切片 H_2 和 H_3 上速度矢量叠加速度云图的展开图,图 5 中各切片上速度、速度矢量以及缺口泄漏情况分布非常明显且都呈周期性分布。

图 5 正六边形切片 H_2 和 H_3 上速度矢量叠加速度云图

36°MOB1 方案、 36°MOB2 方案和 36°MOBA 方案 H_3 切片上的平均速度均比 H_2 切片大,但 H_2 切片上的流速和流线分布比 H_3 切片均匀; 36°MO 方案 H_2 切片清晰展示了大量流体在 X 型缺口的外侧三角区直接沿轴向从上游通道泄漏到下游周期中,形成连接下一个缺口的一条高速短路捷径;使壳侧通道内螺旋流动被削弱以及传热性能被弱化。 36°MOB1 方案的 H_2 切片处因为没有阻流板故仍然存在泄漏,但短路强度有所降低;受管束最外侧缺口堵死的影响, H_2 和 H_3 切片上的平均速度都有所增大,螺旋通道中低速区减少,通道中二次流强度

增大。36°MOB2 方案 H_2 切片上折流板间没有泄漏, H_2 切片平均速度稍有上升, 但 H_3 切片平均速度上升明显, 内侧三角形缺口泄漏量大于其他 3 个方案, 折流板背面低速面积减少, 其二次流强度最强。36°MOBA 方案不存在缺口泄漏情况, H_2 和 H_3 切片之间平均速度差距缩小, 折流板背面几乎没有低速区, 但在阻流板附近出现新的流动死区。

2.2 壳侧总体性能分析

图 6~8 分别是壳侧传热系数 h_o 、壳侧压降 Δp_o 和壳侧综合性能指标 $h_o/\Delta p_o$ 随壳侧流量 G_o 的变化曲线。4 种三分螺旋折流板换热器方案的壳侧传热系数 h_o 和壳侧压降 Δp_o 都随着流量的增大而增大, 而壳侧壳侧综合性能指标 $h_o/\Delta p_o$ 随着流量的增大而减小。36°MO 方案的壳侧传热系数 h_o 、壳侧压降 Δp_o 和壳侧壳侧综合性能 $h_o/\Delta p_o$ 都最低。在相同质量流量下, 36°MOBA 方案的壳侧传热系数 $h_o/\Delta p_o$ 和壳侧压降 Δp_o 都最大; 但 3 种有阻流板方案的壳侧传热系数 h_o 的最大偏差只有 3.19%。36°MOB2 方案和 36°MOBA 方案的壳侧压降 Δp_o 也几乎一样; 而 36°MOB1 方案的壳侧压降 Δp_o 明显低于其他 2 种方案。所以 36°MOB1 方案的壳侧综合性能 $h_o/\Delta p_o$ 跃居最大, 36°MOBA 方案的壳侧综合性能 $h_o/\Delta p_o$ 则降至第三。考虑到轴向搭接方案形成的 X 型缺口的内侧泄漏是逆向泄漏, 即上游流体失去了速度头靠静压差逆向与顺向的主流对冲, 其泄漏量较有限; 而外缺口处流体则是顺向泄漏, 即上下游流体的流动方向相同, 因而泄漏量较大, 故对顺向泄漏的外缺口进行阻挡的效果较好。其中最外侧的管子与壳体之间的缺口面积较大, 对其进行阻挡的效果最明显。

壳侧综合性能 $h_o/\Delta p_o$ 不能作为衡量换热器性能优劣的唯一标准, 在换热器设计时首先要满足用户对传热系数的要求, 即满足工艺流程的传热量要求, 其次再考虑尽量有较低的压降以节省泵功消耗, 综合指标正是反映了付出的代价所获得的单位收益。36°MOB1 方案的壳侧传热系数 h_o 排在第三, 然而其平均值仅比 36°MOBA 方案和 36°MOB2 方案低 3.19% 和 1.33%, 但比 36°MO 方案高出了 36.76%, 其壳侧综合性能指标 $h_o/\Delta p_o$ 最高, 比 36°MOBA 方案、36°MOB2 方案和 36°MO 方案分别高出了 9.68%、8.85% 和 19.88%。由于 36°MOBA 方案和 36°MOB2 方案的阻流板数量较多, 在加工制造上的困难使得此两者在应用上都没有优势。

3 结论

(1) 采用子午切片 M_1 揭示了压力沿流动方向

图 6 壳侧传热系数随壳侧流量的变化

图 7 壳侧压降随壳侧流量的变化

图 8 壳侧壳侧综合性能($h_o/\Delta p_o$)随壳侧流量的变化

逐渐减小, 每个螺旋通道中流体在离心力和向心力的相互作用下形成二次流, 二次流能有效促进强化传热和阻碍壳侧结垢。

(2) 采用同心六边形切片 H_2 和 H_3 展示了中间轴向搭接方案 X 型缺口泄漏情况。36°MO 方案外侧泄漏减弱了主螺旋流和二次流强度, 使整个流道平均流速降低。36°MOB1 方案 X 型缺口外侧因设置阻流板而使区域内流速明显增大, 螺旋通道流体二次流扰动增强。36°MOB2 方案外侧 X 型缺口没有泄漏, 折流板背面低速区减少, 其通道内的二次流扰动最强。36°MOBA 方案所有缺口没有泄漏, 但

在折流板连接处上游产生流动死区。

(3) 相对于无阻流板的 36°MO 方案, 3 种有阻流板方案的壳侧传热系数 h_o 和压降 Δp_o 都随着阻流板面积的增大而增大, 但在 X 型缺口外侧设置阻流板的效果要优于内侧设置阻流板的效果, 其中仅在管束最外侧管子与壳体之间设置阻流板的 36°MOB1 方案的壳侧综合性能 $h_o/\Delta p_o$ 最佳, 其传热系数 h_o 和壳侧综合性能 $h_o/\Delta p_o$ 分别比无阻流板的 36°MO 方案提高了 36.76% 和 19.88%。

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 (3): 263-270.
- [2] TAM Houkuan, TAM Lapmou, TAM Sikchung, et al. New optimization method, the algorithms of changes, for heat exchanger design[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(1): 55-62.
- [3] KRAL D, STELIK P, VAN DER PLOEG H J, et al. Helical baffles in shell-and-tube heat exchangers, Part I: Experimental verification[J]. Heat Transfer Engineering, 1996, 17(1): 93-101.
- [4] STEHLIK P, WADEKAR V. Different strategies to improve industrial heat exchange[J]. Heat Transfer Engineering, 2002, 23(6): 36-48.
- [5] ZHANG Jianfei, LI Bing, HUANG Wenjiang, et al. Experimental performance comparison of shell-side heat transfer for shell-and-tube heat exchangers with middle-overlapped helical baffles and segmental baffles[J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64: 1643-1653.
- [6] WANG Shuli. Hydrodynamic studies on heat exchangers with helical baffles[J]. Heat Transfer Engineering, 2002, 23(3): 43-49.
- [7] ZHANG Jianfei, HE Yaling, TAO Wenquan, et al. 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(23-24): 5371-5380.
- [8] 曹兴, 杜文静, 汲水, 等. 搭接方式对螺旋折流板换热器壳侧性能的影响[J]. 化工学报, 2011, 62(12): 3367-3372.
CAO Xing, DU Wenjing, JI Shui, et al. Effects of baffle connection manner on shell-side performance of heat exchanger with helical baffles[J]. CIESC Journal, 2011, 62(12): 3367-3372.
- [9] NEMATI T F, ZEYNINEJAD M S, RAZMI K, et al. Baffle space impact on the performance of helical baffle shell and tube heat exchangers[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 44(11): 143-149.
- [10] 王良, 罗来勤, 王秋旺, 等. 螺旋折流板换热器中阻流板对换热及沿程压降的影响[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(增刊): 173-176.
WANG Liang, LUO Laiqin, WANG Qiuwang, et al. Effect of inserting block plates on pressure drop and heat transfer in shell-and-tube heat exchangers with helical baffles[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, 22(Suppl.): 173-176.
- [11] 陈亚平. 适合于正三角形排列布管的螺旋折流板换热器[J]. 石油化工设备, 2008, 37(6): 1-5.
CHEN Yaping. A novel helix baffled heat exchanger suitable for tube bundle arrangement with equilateral triangles[J]. Petro-Chemical Equipment, 2008, 37(6): 1-5.
- [12] 陈亚平, 王伟晗, 李彦晴, 等. 三分螺旋折流板换热器壳侧传热特性研究[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(11): 1905-1908.
CHEN Yaping, WANG Weiham, LI Yanqing, et al. Study on heat transfer performance at shell-side of trisection baffled helix heat exchangers[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(11): 1905-1908.
- [13] CHEN Yaping, SHENG Yanjun, DONG Cong, et al. Numerical simulation on flow field in circumferential overlap trisection helical baffle heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 50(1): 1035-1043.
- [14] 仇嘉, 魏文建, 张绍志, 等. 基于 CFD 数值模拟的板式换热器分配器性能研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 130-137.
QIU Jia, WEI Wenjian, ZHANG Shaozhi, et al. Research on performance of distributors used in plate heat exchangers based on CFD numerical simulation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(14): 130-137.
- [15] CHEN Yaping, CAO Ruibing, WU Jiafeng, et al. Experimental study on shell side heat transfer performance of circumferential overlap trisection helical baffle heat exchangers[C]// Proceedings of the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 11-17, 2011, Denver, Colorado, USA. New York: ASME, 2011: 27-33.

作者简介: 董聪, 男, 1982 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为换热器强化传热。

E-mail: lanyuanshishe@163.com

陈亚平(通信作者), 男, 1956 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为换热器强化传热。

E-mail: ypgchen@sina.com