

# 高效低阻的周向重叠三分螺旋折流板换热器

盛艳军 陈亚平 吴嘉峰

(东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:**介绍一种周向重叠三分螺旋折流板换热器的结构,分析了该种换热器高效强化传热性能的主要机理。周向重叠三分螺旋折流板换热器除了具备螺旋折流板换热器的一般特点外,还同时具有适合正三角形布管方案和防相邻折流板之间短路的功能。指出周向重叠方案相邻折流板连接处三角区内的一排管束可以有效抑制因上下游通道的压差引起的逆向泄漏;介绍了倾斜角为 $20^\circ$ 、 $24^\circ$ 、 $28^\circ$ 和 $32^\circ$ 的单头螺旋,  $32^\circ$ 双头螺旋周向重叠三分螺旋折流板换热器和弓形折流板换热器的试验结果,表明试验范围内的最佳方案是倾斜角 $20^\circ$ 方案,其平均壳侧换热系数、压降和综合指标( $h_o/\Delta p_o$ )与弓形折流板换热器的数值之比分别为1.122、0.566和2.035。

**关键词:**螺旋折流板换热器;周向重叠;三分螺旋折流板;逆向漏流;倾斜角

## High Efficiency and Low Pressure Drop Circumferential Overlap Trisection Helical Baffle Heat Exchangers

SHENG Yanjun CHEN Yaping WU Jiafeng

(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096)

**Abstract:** The structure of circumferential overlap trisection helical baffle heat exchanger is presented, and the main mechanism of efficient performance of heat transfer enhancement of this kind of new heat exchangers is analyzed. The circumferential overlap trisection helical baffle heat exchangers possess not only the general characters of helical baffle heat exchangers but also the features of suitable for equilateral triangles layout of tubes and anti-shortcut at triangular zones of adjacent baffles. It is the row of tubes at the junction triangle of adjacent baffles that effectively dampers the reverse leakage driven by differential pressure between upstream and downstream chambers. The heat transfer performance test results are presented of circumferential overlap trisection helical baffle heat exchangers with single thread schemes of baffle tilt angles of  $20^\circ$ ,  $24^\circ$ ,  $28^\circ$ ,  $32^\circ$ , and dual thread scheme of baffle tilt angle  $32^\circ$ , in contrast to a segmental baffle heat exchanger. The results show that the optimum scheme is the one with baffle tilt angle of  $20^\circ$ , and the ratios of the mean values of shell side heat transfer coefficient, pressure drop, and comprehensive index ( $h_o/\Delta p_o$ ) of the helical scheme with baffle tilt angle of  $20^\circ$  over those of the segmental baffle scheme are 1.122, 0.566 and 2.035 respectively.

**Keywords:** helical baffle heat exchanger; circumferential overlap; trisection helical baffle; reverse leakage; tilt angle

二十年前,捷克科学家 Lutcha, J. 等<sup>[1]</sup>发明了一种用倾斜扇形平板首尾相接形成拟螺旋通道的 1/4 螺旋折流板换热器,可克服常用的弓形折流板管壳式换热器方案存在的流动死区、流动阻力较大、传热系数较低,以及在缺口处管束支撑跨距较大,容易诱导管束振动破坏、容易结垢等缺点,受到了国内外一些学者的关注,国内也有部分单位进行了相关研究和研制<sup>[2-16]</sup>。

螺旋折流板换热器能够降低流动阻力的效果受到一致公认,但对于是否能够提高换热器壳侧换热系数的问题存在分歧。部分试验结果显示其壳侧换热系数低于弓形折流板换热器,这对于用户来说意味着需要更多的换热面积和初投资,因而是不能被接受的。因此,分析螺旋折流板换热器强化传热的机理,掌握其优化设计方法是此类换热器普及应用的前提。

## 1 螺旋折流板换热器研究现状

螺旋折流板的倾斜角(一些文献称为螺旋角)大小无疑是影响换热器性能的主要因素,但这种影响究竟是单调的增或减还是有最佳值存在,可以说是众说纷纭。主流的观点认为最佳螺旋角的值约为 40° 左右。另一方面,由于换热器的壳侧由非连续折流板形成的拟螺旋通道的相邻折流板之间存在三角区的漏流,也引起了不少专家学者的关注。Stehlik P 等<sup>[2]</sup>建议采用轴向搭接来减少此处的泄漏。孙琪等<sup>[12]</sup>采用激光测速仪测量了轴向搭接螺旋折流板换热器的冷态流场特性,认为轴向搭接有利于强化传热。陈亚平则认为轴向搭接是一种不合理的设计<sup>[8]</sup>。考察图 1 可知,轴向搭接方案将原来的一个大三角形缺口变为两个较小的三角形缺口,貌似缩小了泄漏面积,实质上则是在外侧的三角区开启了一条指向下游通道的旁通捷径,将严重影响绕行主流的流动与传热。随后进行的油-水<sup>[8]</sup>,水-水<sup>[9]</sup>传热性能试验都表明轴向搭接尽管增加了折流板数量,制造费用增加,但无论是壳侧换热系数还是单位压降的壳侧换热系数综合指标,折流板轴向搭接方案都不如同样倾斜角的首尾相接方案。

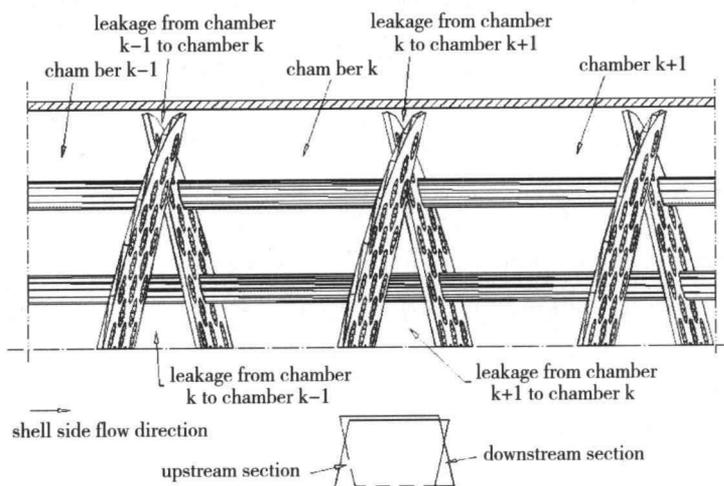


图 1 轴向搭接折流板上 X 形缺口的漏流

王良等<sup>[13]</sup>试图采用阻流板来堵住相邻折流板的三角形缺口,但实验得出的结果表明虽然其壳侧换热系数有所提高,但其压降增大更多,因而其综合指标反不如没有堵缺口的方案。曾敏等<sup>[14]</sup>转而进行了连续螺旋折流板换热器的研发,但出乎意料的是试验结果表明连续螺旋折流板换热器方案的综合性能反而不如非连续折流板换热器方案,甚至还不如弓形折流板方案。其中可能的原因在于连续螺旋折流板换热器的螺旋角不容易做大,严重偏离了最佳的角度。Wang 等<sup>[15]</sup>进行了双壳程的复合型螺旋折流板换热器的数值模拟研究,将连续螺旋折流板换热器所不能利用的中心管区域利用起来,按弓形折流板通道布置一个壳程,结果表明在同样的压降下复合型方案比弓形折流板换热器方案传热量提高 5.6%,流量提高 6.6%。可见上述研究方案虽然复杂,但效果并不佳,实用价值不大。

针对相邻折流板之间的三角形区可能发生的逆向泄漏,宋小平等<sup>[16,17]</sup>设计了一种防短路的折流板结构,将扇形折流板的两条直边加宽。此方法经试验结果表明其传热性能有明显改善。并且认为这种重叠搭接方式,可以对流经管束的介质起到良好的引导作用,减少两相邻扇形板直边交叉形成三角形空间的短路,确保换热效率的提高。由于有同一排换热管穿过相邻两扇形板,强化了管束刚性,避免了象限间分离的趋势。同时有重叠部分的螺旋折流板结构将起到良好的防振效果。然而在1/4螺旋折流板换热器的框框下,上述防短路的折流板结构只能适合于正方形布管方案,却无法适合正三角布管的方案。因为1/4螺旋折流板用于正三角形排列布管时,折流板的直边与正三角形排列布置管束的自然间隔不符,每块折流板至少有一条边所在的部分管子会出现半个孔的情况,当然就不能满足相邻折流板之间包含一排管子的条件。

正三角形布管是绝大多数换热器所采用的高效、紧凑的优先布管结构。陈亚平等在1/4螺旋折流板换热器基础上进一步提出了适合正三角布管的三分螺旋折流板换热器方案,并进行了相关研究<sup>[8-11]</sup>。本文介绍一种把周向重叠的防短路结构与正三角形布管相结合的周向重叠三分螺旋折流板换热器方案,具有更高的应用价值。

## 2 周向重叠三分螺旋折流板换热器

陈亚平<sup>[8]</sup>提出的三分螺旋折流板换热器方案主要有2种对称布管方式:分区布管方案和周向重叠布管方案,如图2所示。已经完成的试验表明,前者的最优方案之综合性能( $h_o/\Delta p_o$ )比弓形折流板换热器方案提高幅度分别为:油-水为36.8%,水-水为64.4%,而后的最优方案之综合性能( $h_o/\Delta p_o$ )可比弓形折流板换热器方案平均提高100%左右。由于两者都是在20°倾斜角处获得最佳值,因此周向重叠与否是两者性能差异的关键因素。可见周向重叠方案对传热强化的增益是巨大的。

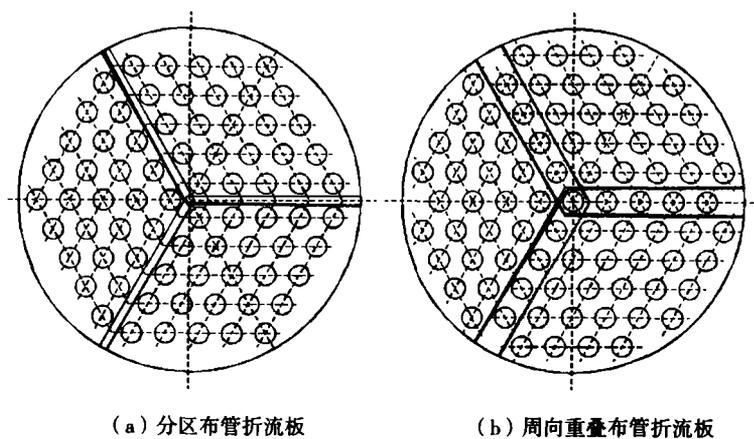


图2 三分螺旋折流板换热器布管方式投影图

三分螺旋折流板换热器的周向重叠布管折流板结构与上述宋小平等提出的防短路方案是异曲同工,区别只是折流板的投影相对于整个换热器横截面是三分(扇形折流板的投影夹角120°)还是四分(扇形折流板的投影夹角90°),因而分别适合于正三角布管和正方形布管。

周向重叠三分螺旋折流板换热器强化传热的机理主要有以下几方面:

首先,螺旋折流板通道消除了流动死区。一般认为弓形折流板换热器中流动死区占30%左右,即在这些区域的流体只在原地旋转停留,不能被裹挟到主流区内,浪费了大量的换热面积。螺旋折流板换热器即使按增大有效面积20%计,也是很大的数值。

其次,根据流动分析,壳侧流体沿螺旋折流板呈总体螺旋流动时,在离心力作用下流体将向外围流动,中心部分流体将变少,外围流体增多,造成外围静压大于中心部分,在径向压差的作用下,流体将沿折流板附近流速较低的区域返回轴心,产生二次流迪恩涡。迪恩涡将产生揉面团的效应,增强流体之间的

混合,从而强化传热<sup>[17]</sup>。

第三,采用正三角布管在相同管间距下可以比正方形布管增加约 15.5% 的布管数量,同时在正三角布管管束之间的流动肯定是错排的,而正方形布管则存在顺排的可能,错排流动比顺排流动对传热强化更有利。

第四,周向重叠方案抑制了在相邻折流板交接处的逆向泄漏。在图 3 所示的三角区处,静压力较低处的流体挟速度头动压由下而上流向静压力较高的上游通道内,若三角区处相邻通道内的静压差小于速度头动压,就可能流向上游通道;反之则可能出现通过此三角区的逆向漏流。流向上游通道的后果只是增大流量,延长流体逗留时间,对传热是有利的;而逆向漏流形成了流体的短路,减少了主流通道的流量,降低了流体速度,因而不利于换热。由于周向重叠方案在三角区处存在一排管子,可形成对相邻通道压差泄漏的阻尼作用,因而可抑制逆向漏流,所以,将这种结构称为防短路结构是有道理的。

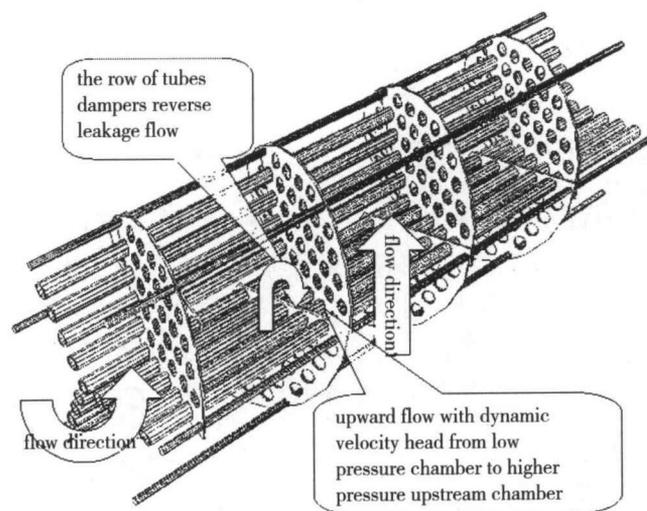


图 3 周向重叠相邻折流板三角区的流动

最后,用非连续的倾斜扇形平板替代曲面连续螺旋折流板不仅使制造工艺的可行性提高,而且避免了中心管所占空间对布管面积的减少。但通常都认为连续螺旋折流板是理想的方案,而非连续螺旋折流板方案因相邻 2 块折流板连接处有三角区缺口是无奈的选择。其实此缺口不一定是坏事。其一,由于壳侧流体通过相邻两组折流板交接处的三角形缺口时的流动方向是使部分流体携速度动能克服压差又返回上游通道,客观上可以增大流速,起到增强传热的作用;其二,折流板的间断有利于抑制边界层的增大,促进主流区与壁面区流体的混合,这与锯齿翅片的性能高于连续翅片的性能之道理是一样的。

### 3 换热器性能试验装置

在现阶段尽管数值模拟研究越来越普遍,但实验依然是判断换热器性能优劣的唯一权威手段。本次换热器性能试验是利用课题组与某企业合作建造的换热器性能试验台实施的。该性能试验台配备的测试仪表精度极高,质量流量计的精度为 0.1 级,铂电阻的精度为  $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$ ,压力传感器的精度为 0.1 级;试验状态控制方便准确,参数达稳快,热平衡偏差通常在  $-3\%$  至  $+5\%$  范围内。该试验台有风冷和水冷 2 种冷却源,有油、压缩空气、水和乙二醇水溶液 4 套热流体系统;可以对冷热流体之间的任意组合以及 2 种或 3 种热流体对风的复合式换热器进行传热和流动阻力性能试验。在本试验中两侧流体均为水,热水走管程,冷却水走壳程。采用在壳侧冷却水出口再串联一个板翅式换热器,通过风洞冷却的方法,通过变频器调节风机流量来控制进水温度。试验系统流程如图 4。

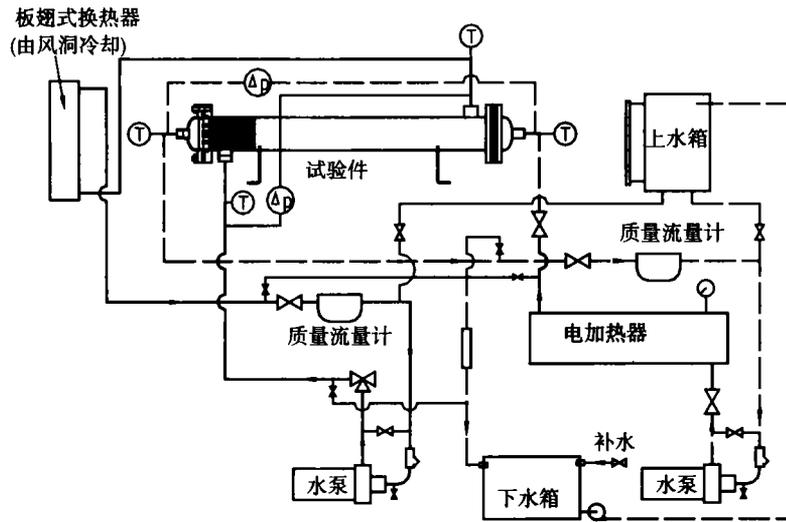


图 4 试验系统流程示意图

试验件换热器的壳体是公用的,管束芯体可更换,管程和壳程都是单程,逆流布置。换热器壳体内径  $\Phi 126\text{mm}$ ,折流板外径  $\Phi 123\text{mm}$ ;传热管子  $\Phi 10 \times 1 \times 1196(\text{mm}^3)$ ,正三角布管 34 根。图 5 显示了试验件管束芯体图片。对周向重叠倾斜角为  $20^\circ$ 、 $24^\circ$ 、 $28^\circ$  和  $32^\circ$  的单头螺旋折流板、 $32^\circ$  双头螺旋折流板和弓形折流板换热器(图 5 从左到右)进行了性能试验。

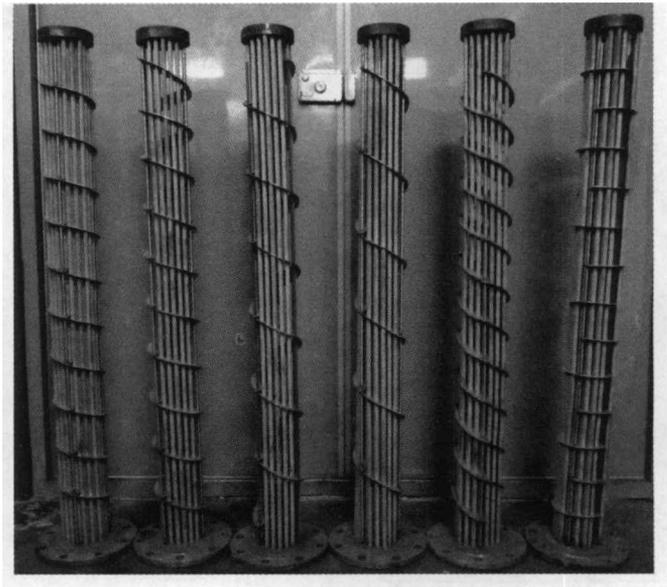


图 5 试验件管束

#### 4 周向重叠三分螺旋折流板换热器的试验结果与分析

从试验测量获得的换热量  $Q$  和对数平均温差  $\Delta t_m$  可求得总体传热系数  $K$ 。

$$K = \frac{Q}{A \Delta t_m} \quad (1)$$

式中  $A$  为换热面积。管内水侧的换热系数  $h_i$  可用 Dittus-Boelter 公式(2)估算求得,水的物性都采用温度为自变量的多项式拟合,用进出口平均温度对应的数据。然后根据式(3)分离出壳侧的换热系数

$h_o$ 。由于是新换热器,可不计污垢热阻,只需扣除管壁热阻。壳侧压降  $\Delta p_o$  需要从测量值中扣除进出口处的局部阻力损失。

$$h_i = 0.023 \frac{\lambda_i}{d_i} Re_i^{0.8} Pr_i^{0.3} \quad (2)$$

$$h_o = \frac{1}{\left[ \frac{1}{K} - \frac{d_o}{d_i h_i} - \frac{d_o}{2\lambda} \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right) \right]} \quad (3)$$

图 6~8 分别是总体传热系数  $K$ 、壳侧压降  $\Delta p_o$ 、壳侧换热系数  $h_o$  随壳侧流量  $M_o$  的变化曲线;由图可见,弓形折流板方案具有最高的压降,但其总体传热系数和壳侧换热系数都排列第二位;而倾斜角  $20^\circ$  螺旋折流板方案的总体传热系数和壳侧换热系数都排列第一,其压降在大部分区域都排在第二;在试验参数范围内,螺旋折流板方案的总体传热系数和壳侧换热系数以及压降都是随着倾斜角的增大而减小;倾斜角  $32^\circ$  的双头螺旋折流板方案( $2^\circ-32^\circ$ )的壳侧换热系数和压降都大于单头倾斜角为  $32^\circ$  和  $28^\circ$  方案的数值。

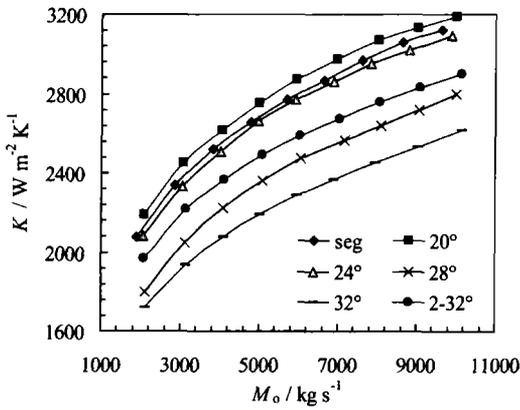


图 6 总体传热系数随壳侧流量的变化

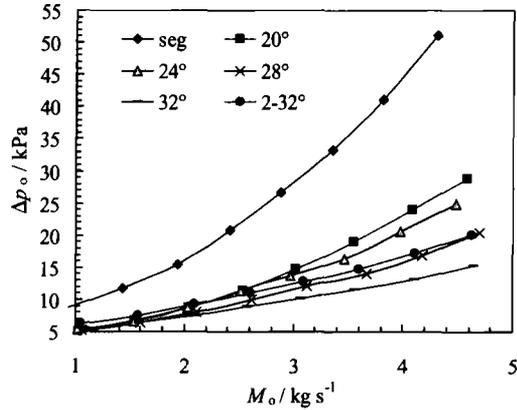


图 7 壳侧压降随壳侧流量的变化

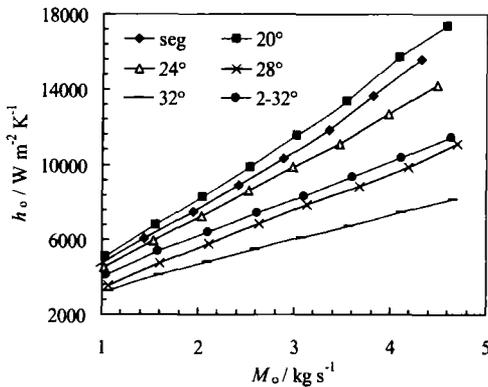


图 8 壳侧换热系数随壳侧流量的变化

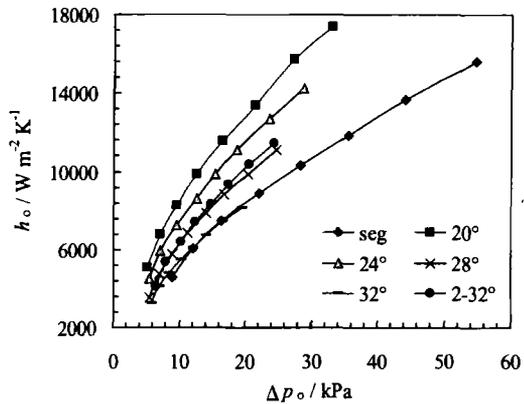


图 9 壳侧换热系数随壳侧压降的变化

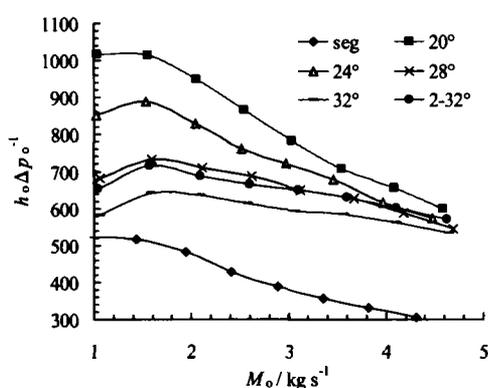


图 10 壳侧综合指标( $h_o/\Delta p_o$ )随壳侧流量的变化

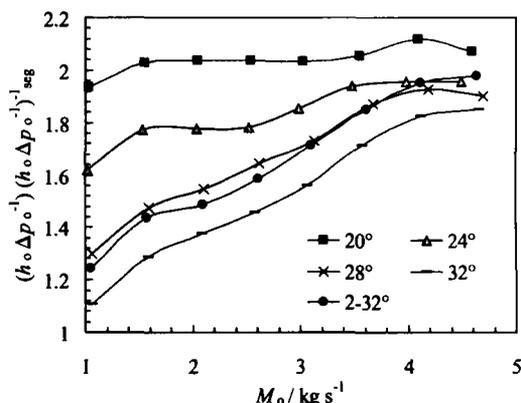


图 11 相对于弓形折流板换热器方案的壳侧综合指标比值( $h_o/\Delta p_o$ )/( $h_o/\Delta p_o$ )<sub>seg</sub>随壳侧流量的变化

图 9 显示了壳侧换热系数  $h_o$  随壳侧压降  $\Delta p_o$  的变化曲线。图 10 是壳侧单位压降的换热系数综合指标  $h_o/\Delta p_o$  随壳侧流量  $M_o$  的变化曲线。由图可见,弓形折流板换热器方案的综合指标最差,明显低于其他螺旋折流板换热器方案。图 11 是与弓形折流板方案对比的综合指标比值  $(h_o/\Delta p_o)/(h_o/\Delta p_o)_{seg}$  随壳侧流量的变化曲线。由图可见,最佳方案是倾斜角  $20^\circ$  螺旋折流板方案,然后是  $24^\circ$ 、 $28^\circ$  和双头  $32^\circ$  的方案,单头  $32^\circ$  方案的综合指标较低,但其综合指标比值  $(h_o/\Delta p_o)/(h_o/\Delta p_o)_{seg}$  的平均值也有 1.522;在壳侧流量增大时, $20^\circ$  螺旋折流板方案的综合指标比值几乎不变,其他各螺旋折流板方案的综合指标比值则都有所增大,但差别变小。 $20^\circ$  螺旋折流板方案的壳侧换热系数、压降和综合指标 ( $h_o/\Delta p_o$ ) 平均值与弓形折流板方案的数值之比分别为 1.122、0.566 和 2.035。

双头螺旋折流板方案的传热性能优于同样倾斜角的单头螺旋折流板方案,两者的壳侧换热系数、压降和综合指标 ( $h_o/\Delta p_o$ ) 的平均比值分别为 1.36、1.26 和 1.09。由于双头螺旋折流板方案具有减小管束支撑间距,有利于避免管束振动破坏等优点,因此这项结论对于大型换热器尤其重要。

上述试验结果表明对于周向重叠三分螺旋折流板换热器来说,最佳的倾斜角在  $20^\circ$  左右,而不是如一些文献对  $1/4$  螺旋折流板换热器的研究得出的  $40^\circ$  左右。这对于倾斜折流板的加工是个福音。当然此结论是否适合于更大尺寸的换热器还有待进一步的研究实践证实。

## 6 结 语

(1) 周向重叠三分螺旋折流板换热器能同时满足适合正三角形排列布管的换热器方案和抑制三角区的逆向漏流的要求,有效强化了其传热性能。

(2) 试验结果表明  $20^\circ$  倾斜角的周向重叠三分螺旋折流板换热器与弓形折流板换热器相比不仅壳侧压降减小而且壳侧换热系数亦可提高,其单位压降的换热系数综合指标接近翻倍;但其他倾斜角方案的换热系数则低于弓形折流板换热器方案,尽管压降都较低。

(3) 双头周向重叠三分螺旋折流板方案的换热系数和单位压降的换热系数综合指标都优于相同倾斜角的单头周向重叠三分螺旋折流板方案,虽然压降有所增大。

### 符号说明

- A ——— 换热面积,  $m^2$
- $d_i, d_o$  ——— 分别表示管子内径和外径, m
- $h_i, h_o$  ——— 分别表示管侧和壳侧的换热系数,  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
- K ——— 总体传热系数,  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
- $M_o$  ——— 壳侧流量,  $kg \cdot s^{-1}$

$Pr$	——	普朗特数
$Q$	——	换热量, W
$Re$	——	雷诺数
$\Delta p$	——	压降, Pa
$\Delta t_m$	——	对数平均温差, K
$\lambda$	——	管材的导热系数, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\lambda_i$	——	管侧流体的导热系数, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

**下角标**

$i, o$	——	分别为管侧和壳侧
seg		弓形折流板

**参考文献**

- [1] Lutchaj, Nemcansky J. Performance improvement of tu-bular heat exchangers by helical baffles [J]. Chemical Engineering Research & Design. 1990, 68(3): 263—270.
- [2] Stehlik P, Nemcansky J, Kral 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.
- [3] Stehlik P, Wadekar V. Different strategies to improve industrial heat exchange [J]. Heat Transfer Engineering. 2002, 23(6): 36—48.
- [4] Andrews M, Master B I. Three-dimensional modeling of a helixchanger heat exchanger using CFD [J]. Heat Transfer Engineering. 2005, 26(6): 22—31.
- [5] Jafari Nasra MR, Shafeghat A. Fluid flow analysis and extension of rapid design algorithm for helical baffle heat exchangers [J]. Applied Thermal Engineering. 2008, 28(11—12): 1324—1332.
- [6] 王秋旺. 螺旋折流板管壳式换热器壳程传热强化研究进展 [J]. 西安交通大学学报. 2004, 38(9): 881—886.
- [7] 陈世醒, 张克铮, 张强. 螺旋折流板换热器的开发与研究 (I)——高粘度流体下的中试研究 [J]. 抚顺石油学院学报, 1998, 18(3): 31—35.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Chen Yaping, Cao Ruibing, Wu Jiafeng, et. al. Experimental study on shell side heat transfer performance of circumferential overlap trisection helical baffle heat exchangers. Proceedings of the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Nov., 2011, Denver, Colorado, USA. IMECE2011—63254.
- [11] Wang Weihang, Chen Yaping, Cao Ruibing, et. al. Analysis of secondary flow in shell-side channel of trisection helix heat exchangers [J]. Journal of Southeast University (English Edition). 2010, 26(3): 426—430.
- [12] 孙琪, 陈佳佳, 朱莹. 搭接螺旋折流板换热器壳程流动特性研究 [J]. 化工机械. 2008, 35(1): 10—13.
- [13] 王良, 罗来勤, 王秋旺等. 螺旋折流板换热器中阻流板对换热系数及沿程压降的影响 [J]. 工程热物理学报, 2001, 22(Sup): 173—176.
- [14] 曾敏, 彭波涛, 喻澎清等. 连续螺旋折流板换热器传热与阻力性能实验研究 [J]. 核动力工程.

2006, 27(1-s1):102-106。

[15] Qiuwang Wang, Qiuyang Chen, Guidong Chen, et. al. Numerical investigation on combined multiple shell-pass shell-and-tube heat exchanger with continuous helical baffles. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2009, 52(5-6):1214-1222.

[16] 宋小平, 裴志中. 防短路螺旋折流板管壳式换热器[J]. 石油化工设备技术, 2007, 28(3): 13-17。

作者简介: 陈亚平, ypgchen@sina.com。

第一作者: 盛艳军(1986-), 男, 硕士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金(50976022)。