

文章编号: 1672-9897(2010)02-0019-05

## 螺旋折流板换热器壳程流动特性研究

王 晨, 桑芝富

(南京工业大学机械与动力工程学院, 南京 210009)

**摘要:**利用激光粒子图像测速(PIV)技术在有机玻璃模型上对螺旋折流板换热器的壳程流动特性进行了实验研究。结果表明,螺旋折流板换热器管间流体斜向冲刷管束。管间流场中非稳定区的流体由于接近换热器的轴心,受三角区漏流的影响,流速沿轴线方向呈上升趋势,且具有较强的轴向速度。稳定区内的流体流动较为平稳,其切向速度较高,具有明显的旋流特征,是换热效果较好的区域。管间流场的流体具有沿轴线方向波动的径向速度,可以增加流体的扰动,有利于传热。在管束外围,折流板与筒体之间的漏流会增加流体的轴向速度,而搭接区的漏流则使得流体的切向速度增加而轴向速度减小。漏流对流体流速的影响会沿着轴线方向不断减小,流体流速趋于稳定。

**关键词:**换热器;螺旋折流板;粒子图像测速仪

**中图分类号:**TK124 **文献标识码:**A

### Flow characteristics in shell side of heat exchanger with helical baffles

WANG Chen, SANG Zhi-fu

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** The shell-side flow field in the heat exchanger with helical baffles was measured using PIV technique. The experimental results show that the fluid flow in tube bundles is angled to the tubes. Because the unstable flow field in tube bundles is near the heat exchanger's axes and the fluid is affected by the leakage flow from the triangular area, the flow velocity in this field rise along the axial direction and exhibits high axial velocity. There is strong spiral flow character for high tangential velocity in the stable flow field in tube bundles, where the heat transfer effect is better. The fluid in tube bundles has the radial velocity which is fluctuant along the axial direction. The radial velocity could enhance fluid's disturbance and is helpful to heat transfer. Out of the tube bundles, the leakage flow between the shell and baffle could raise the fluid's axial velocity. The leakage flow from the lapping area could raise the fluid's tangential velocity and decrease the axial velocity. The effect of the leakage flow will weaken along axial direction and the flow velocity of the fluid tends to steady.

**Key words:** heat exchanger; helical baffle; PIV

## 0 引言

螺旋折流板换热器是一种具有壳程压力损失小,单位压降下壳程传热系数高等诸多优点的新型换热装置<sup>[1]</sup>,其设计思想是将多块部分椭圆平板相互连接,每块折流板与壳体轴线呈相同的夹角,从而形成近似螺旋面,使壳程流体产生螺旋状流动(如图1所示),壳程流体流动方式的改变是螺旋折流板换热器性能优越的主要原因<sup>[2-3]</sup>。目前有关螺旋折流板换热器的文献多集中于对其传热、阻力和积垢性能的研究

究<sup>[4-9]</sup>,而有关螺旋折流板换热器壳程流动状态的研究多采用数值模拟的方法<sup>[10-15]</sup>,这是由于壳程流体的流动特性复杂,且管壳式换热器内换热管数量众多,相邻换热管之间的距离小,使得运用实验手段对壳程流场进行测量十分困难,相关研究也相对滞后。国内仅王素华、王树立<sup>[16-17]</sup>以及孙琪<sup>[18]</sup>等人利用PLDV激光测速仪,在有机玻璃实验模型上比较测量了不同螺旋角度和搭接量的螺旋折流板换热器壳侧程流速的分布特点。

粒子图像测速仪(Particle Image Velocimetry, PIV)

收稿日期: 2009-03-09; 修订日期: 2009-08-06

基金项目: 南京工业大学博士论文创新基金(BSCX200815)

是 20 世纪 80 年代末发展起来的一种非接触式瞬态速度测量技术,其重要特点就是突破了空间单点测量技术的局限性,可在同一时刻记录下整个测量平面的有关信息<sup>[19-20]</sup>。运用 PIV 技术对螺旋折流板换热器壳程流场进行了测量,并通过测量结果计算出不同区域的轴向、切向和径向速度。



图 1 螺旋折流板换热器结构示意图  
Fig. 1 Sketch of heat exchanger with helical baffles

1 实验设备

PIV 系统主要由激光器、同步控制器、CCD 相机及图像分析采集系统组成。实验所用光源为双谐振脉冲式 Nd : YAG 激光器,脉冲能量为 200mJ,重复频率为 15Hz,脉冲宽度小于 8ns,双脉冲时间间隔小于 1 $\mu$ s。同步控制器是 PIV 系统的时序控制机构,型号为 MicroPluse710。高速互相关 CCD 型号为 ES2001,分辨率为 1600 (H) $\times$ 1200 (V) pixel,8~12bit 电子快门,视频率为 15~30 帧/s,16 级电子增

益,配备尼康(NIKON)50mm/F1.4 镜头。图像采集分析系统软件为 MicroVec V2.0。

PIV 测量时需加入示踪粒子,鉴于本实验的测量介质是水,选用与水密度相近的空心玻璃微珠作为示踪粒子。

2 实验方案

2.1 实验模型

实验所用螺旋折流板换热器模型的结构参数如表 1 所示。模型由透明有机玻璃制作,壳程工作介质为水,流量为 14m<sup>3</sup>/h。筒体外部套有一个矩形光学补偿盒,其内充满水,以抵消光在圆形筒体壁面上的折射。图 2 所示为实验模型的结构示意图。换热管及折流板涂以亚光黑漆,防止其表面反光,影响测量结果。

表 1 试件结构参数

Table 1 Structure parameters of test samples	
名称	数值
壳体规格	$\Phi 250\text{mm} \times 5\text{mm}$
换热管外径	$\Phi 20\text{mm}$
换热管数量	32
换热管有效长度	1500mm
换热管排列方式	正方形
换热管中心距	35mm
螺旋角度	30 $^{\circ}$
进、出口接管规格	$\Phi 55\text{mm} \times 2.5\text{mm}$

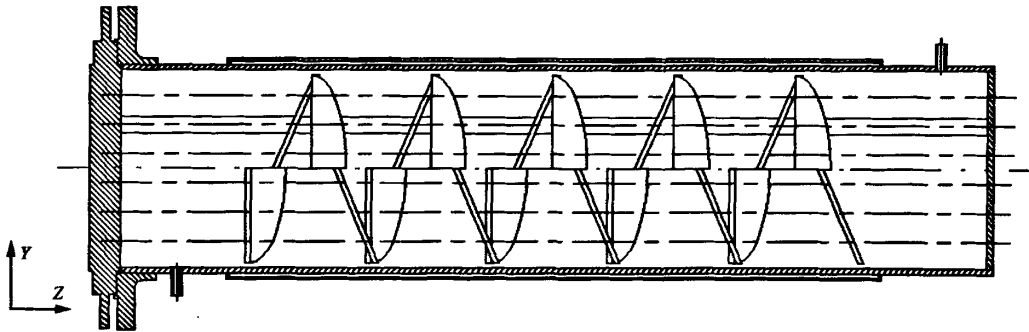


图 2 实验模型结构示意图  
Fig. 2 Sketch diagram of experimental model

测试区域为第三螺距的第二象限,轴向位置  $Z=825\text{mm} \sim 925\text{mm}$ 。由于螺旋折流板为空间连续布置,无法进行三维测试,因此本实验采用了二维测试。片光入射的位置如图 3 所示,其中纵向  $Y$  剖面可以得到  $Y$  和  $Z$  方向的速度,而从横向  $X$  剖面可以得到  $X$  和  $Z$  方向的速度。在光学补偿盒上贴有坐标,以保证片光入射位置的准确。

2.2 PIV 参数设定

实验中激光强度设置为 120mJ,以保证粒子的成

像亮度适中。片光厚度控制在 1mm 以内,以光学补偿盒为基准调节片光的平行度。CCD 相机正对片光照亮的区域,与片光保持合适的距离(约 300mm),调节焦距,直至成像清晰。互相关 CCD 相机的查询区大小为 32 $\times$ 32 像素,查询区重叠率为 25%,双曝光时间间隔为 1000 $\mu$ s。

3 数据处理

以相交截面的编号表示测试区域的不同位置,

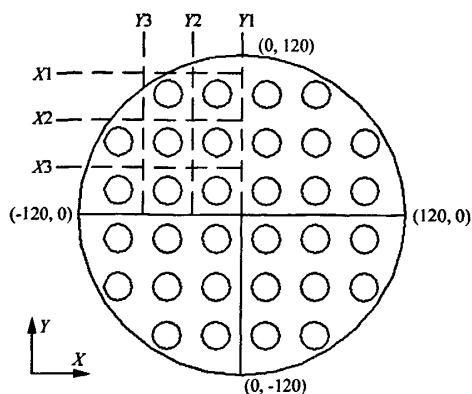


图3 片光入射示意图

Fig. 3 Sketch diagram of light sheet incident location

由纵向和横向截面交线上各点的  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的速度  $v_x$ 、 $v_y$ 、 $v_z$  可以得到轴向速度

$$v_A = v_z \quad (1)$$

切向速度和径向速度

$$v_T = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \times \cos(\arctg \frac{v_y}{v_x} - \arctg \frac{y}{x}) \quad (2)$$

$$v_R = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \times \sin(\arctg \frac{v_y}{v_x} - \arctg \frac{y}{x}) \quad (3)$$

## 4 实验结果分析

图4为管间纵向和横向截面相交区域的流场矢量图。可以看出,管间流体的流动方向与换热器轴线呈一定角度,流体斜向冲刷换热管。

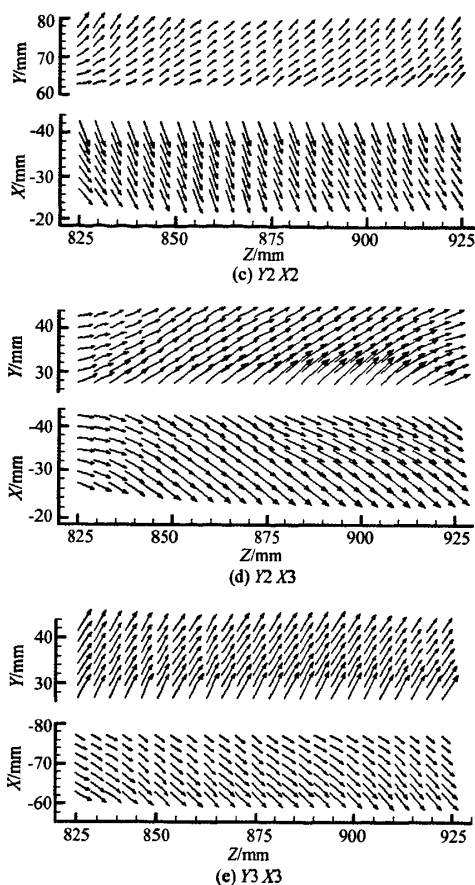
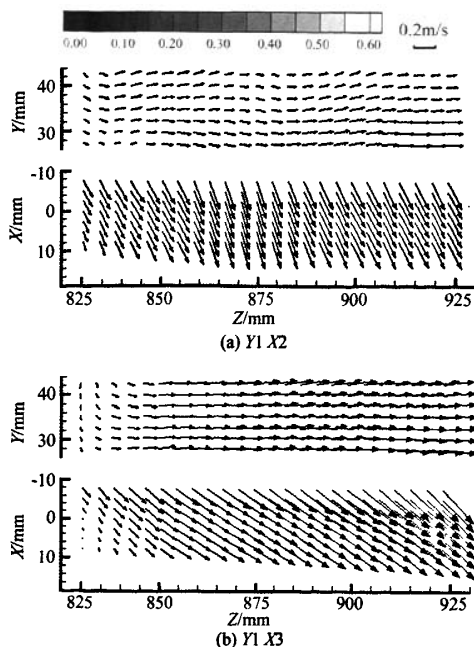
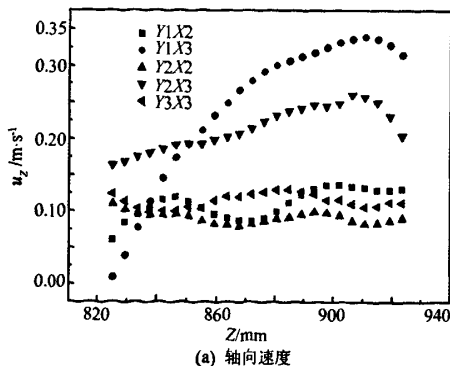


图4 速度矢量

Fig. 4 Velocity vector

图5为管间不同位置纵向截面和横向截面交线处的轴向速度、切向速度和径向速度的比较。由图5(a)、(b)可以看出,根据实验结果可以将螺旋折流板换热器管间流动结构沿径向分为2个区域:(a)非稳定区,包括Y1X3和Y2X3;(b)稳定区,包括Y1X2、Y2X2和Y3X3。



(a) 轴向速度

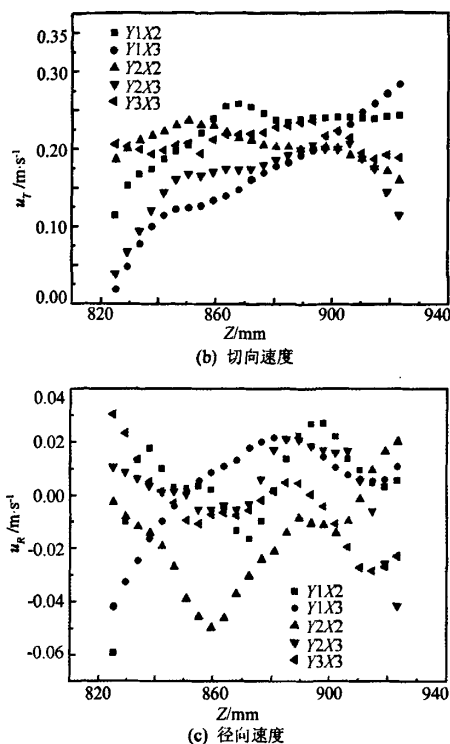


图5 管间流速沿Z轴的分布  
Fig. 5 Velocity distribution among tubes along Z axis

非稳定区由于接近换热器的轴心,受到三角区漏流的影响,速度沿轴线方向出现了较大的变化。Y2X3在沿着轴线方向的开始阶段具有一定的轴向速度,并缓慢上升。Y2X3的切向速度以及Y1X3的轴向速度和切向速度在沿着轴线方向的开始阶段很低,而后迅速上升。Y2X3的轴向速度和切向速度以及Y1X3的轴向速度在 $Z=910\text{mm}$ 处出现峰值。从整体上看,非稳定区的流体具有比稳定区的流体更强烈的轴向速度。稳定区的切向速度和轴向速度沿轴线方向的变化不大,较为稳定,其切向速度要高于非稳定区,并高于相同位置的轴向速度,说明该区域有明显的旋流特征,是换热效果较好的区域。

由图5(c)可以看出,管间区域存在着沿轴线方向波动的径向速度。径向速度可以增加流体的扰动,有利于增强换热。

图6所示为管束外围Y1X1和Y3X2处的轴向速度和切向速度。管束外围由于流动空间较大,且受到管束的影响较小,流体流动应该较为稳定。但从图中可以看出,在Y3X2处,由于受到折流板与筒体之间漏流的影响,轴向速度在沿着轴线方向的开始阶段较高,但随着漏流影响的逐渐减小,轴向速度沿着轴线方向不断减小。Y3X2处的切向速度受漏流影响

不大,较为稳定。相邻螺旋折流板在搭接时,除了会形成三角区外,还会在半径外侧形成搭接区(如图7所示)。Y1X1处流体受到搭接区漏流的影响在沿着轴线方向的开始阶段具有较高的切向速度和较低的轴向速度。随着漏流影响沿轴线方向的不断减小,切向速度不断降低,轴向速度不断增加,并趋于稳定。

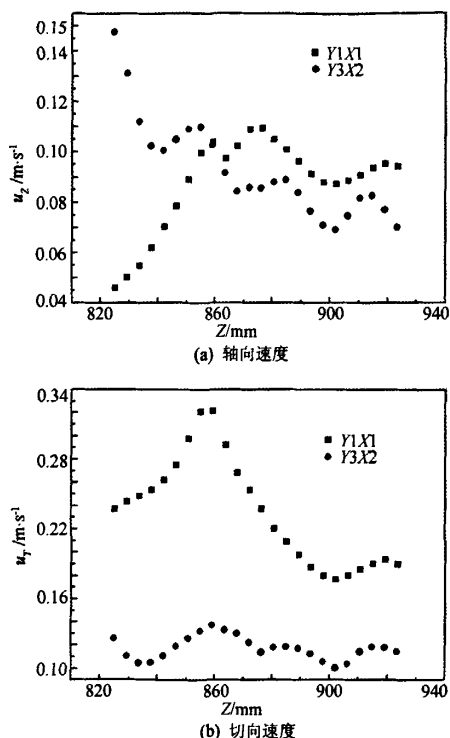


图6 管束外围流速沿Z轴的分布  
Fig. 6 Velocity distribution out of tube bundle along Z axis

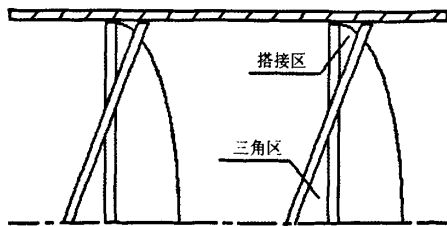


图7 折流板搭接示意图  
Fig. 7 Sketch of overlapping helical baffles

## 5 结论

利用 PIV 激光粒子图像测速技术,对螺旋折流板换热器壳程流体的流动特性进行了实验研究,结果表明:

- (1)螺旋折流板换热器壳程管间流体的流动方向与换热器的轴线呈一定角度,流体斜向冲刷换热管;
- (2)沿换热器半径,可将管间流场分为非稳定区

和稳定区。非稳定区由于接近换热器的轴心,受三角区漏流的影响,流速沿轴线方向呈上升趋势,且显示出较强的轴向速度。稳定区的流速沿轴线方向分布较为平稳,其切向速度要高于非稳定区,并高于相同位置的轴向速度,具有明显的旋流特征,是换热效果较好的区域;

(3)管间流场存在着沿轴线方向波动的径向速度,可以增加流体的扰动,有利于传热;

(4)在管束外围,折流板与筒体之间的漏流会增加流体的轴向速度,而搭接区的漏流则使得流体的切向速度增加而轴向速度减小。漏流对流体流速的影响会沿着轴线方向不断减小,流体流速趋于稳定。

#### 参考文献:

- [1] LUTCHA J, NEMCANSKY J. Performance improvement of tubular heat exchanger by helical baffles[J]. Chemical Engineering Research and Design, 1990, 68, Part A: 263-270.
- [2] STEHLIK P, NEMCANSKY 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.
- [3] KRÁL D, STEHLIK P, VAN DER PLOEG H J, et al. Helical baffles in shell-and-tube heat exchangers[J]. part I: experimental verification. Heat Transfer Engineering, 1996, 17(1): 93-101.
- [4] AL-BAGAWI J J, SAID S A M, ZUBAIR S M. Shear enhancing fouling reduction in heat exchangers[J]. International Journal of Heat Exchangers, 2005, 6(2): 165-178.
- [5] 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.
- [6] ZHANG Z G, FANG X M. Comparison of heat transfer and pressure drop for the helically baffled heat exchanger combined with three-dimensional and two-dimensional finned tubes[J]. Heat Transfer Engineering, 2006, 27(7): 17-22.
- [7] LEI Y G, HE Y L, CHU P. Design and optimization of heat exchangers with helical baffles[J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63(17): 4386-4395.
- [8] ZHANG J F, LI B, HUANG W J, 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(8): 1643-1653.
- [9] WANG C, ZHU J G, SANG Z F. Experimental studies on thermal performance and flow resistance of heat exchangers with helical baffles[J]. Heat Transfer Engineering, 2009, 30(5): 353-358.
- [10] 张少维, 桑芝富. 螺旋折流板换热器壳程流体流动的数值模拟[J]. 南京工业大学学报, 2004, 26(2): 81-84.
- [11] 张少维, 桑芝富. 结构和操作参数对螺旋折流板换热器性能影响[J]. 石油化工设备, 2004, 33(3): 17-20.
- [12] 邓斌, 吴扬, 陶文铨. 螺旋折流板换热器壳侧流动的数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(11): 1106-1109.
- [13] 徐百平, 王铭伟, 江楠等. 螺旋折流板换热器壳程流动与传热数值模拟研究[J]. 石油炼制与化工, 2005, 36(10): 33-37.
- [14] 王晨, 桑芝富. 单螺旋和双螺旋折流板换热器性能的研究[J]. 高校化学工程学报, 2007, 21(6): 930-935.
- [15] JAFARI NASR M R, SHAFEGHAT A. Fluid flow analysis and extension of rapid design algorithm for helical baffle heat exchangers[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28: 1324-1332.
- [16] 王素华, 王树立, 赵志勇. 螺旋折流板换热器流动特性研究[J]. 石油化工高等学校学报, 2001, 14(1): 64-67.
- [17] WANG S L. Hydrodynamic studies on heat exchangers with helical baffles[J]. Heat Transfer Engineering, 2002, 23(3): 43-49.
- [18] 孙琪, 陈佳佳, 朱莹等. 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.
- [19] WESTERWEEL J. Fundamentals of digital particle image velocimetry[J]. Measurement Science and Technology, 1997, 8(12): 1379-1392.
- [20] ADIAN R J. Twenty years of particle image velocimetry[J]. Experiments in Fluids, 2005, 39: 159-169.

#### 作者简介:



王晨(1981-),男,江苏南京人,南京工业大学化工过程机械专业博士研究生。研究方向:高效传热传质设备研究。通信地址:南京工业大学机械与动力工程学院热管楼222室(210009)。联系电话:025-83587309, 13851749554, E-mail: chenwang8102@163.com