

研究论文

圆弧型与 X 型开缝翅片空气侧流动与 传热特性可视化试验

李红智, 罗毓珊, 王海军, 陈听宽, 熊伟, 李晨飞
(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 利用粒子图像测速 (PIV, particle image velocimetry) 技术和红外热成像技术对增压空冷器空气侧的 4 排叉排圆弧型和 X 型开缝翅片的流动和传热特性进行了可视化试验研究。在试验的 Reynolds 数范围内, 得到了阻力和换热特性曲线以及能反映流动和传热细节的流场和温度场。试验结果表明: X 型开缝翅片的波动强度、流动阻力大于圆弧型开缝翅片, 但前者的换热性能和场协同性优于后者。提出的新概念波动强度是表征翅片结构对流场扰动程度的物理量, 波动强度越大, 流场内的速度梯度、涡量强度越大, 翅片结构对流场的扰动越大。可视化的试验结果为后续数值模拟和翅片结构优化设计提供了可靠的试验依据。

关键词: 开缝翅片; 粒子图像测速; 红外热成像; 场协同原理; 波动强度

中图分类号: TK 124

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2008) 08-1936-06

Visualization experiments on air side heat transfer and fluid flow characteristics of arc-type and X-type slotted fin surfaces

LI Hongzhi, LUO Yushan, WANG Haijun, CHEN Tingkuan, XIONG Wei, LI Chenfei

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

Abstract: Air side heat transfer and fluid flow characteristics of four-row slotted fin surfaces with arc-type and X-type strip arrangement in pressurized air cooler were studied by visualization experiments. Experiments were carried out with PIV (particle image velocimetry) system and infrared thermo tracer to visualize the flow field and the temperature distribution of two slotted fin surfaces. The experiment results showed that the fluctuation intensity and pressure drop of the X-type slotted fin surface were higher than those of the arc-type slotted fin surface. However, the heat transfer performance and field synergy property of the X-type slotted fin surface were superior to those of the arc-type fin surface. A new definition of fluctuation intensity was proposed to indicate the magnitude of flow disturbance enforced by the configuration and arrangement of slotted fin surface. The higher the fluctuation intensity, the larger the velocity gradient and the vorticity magnitude. The visualization experiment results provide a reliable experimental support for later numerical simulation and optimization design for new fin structures.

Key words: slotted fin; PIV; infrared thermo-vision; field synergy principle; fluctuation intensity

引 言

在能源化工等领域的换热器中, 空气侧的换热

表面广泛采用整体套片翅片管。在普通的平直翅片表面上开缝是强化传热的有效方法。近年来, 许多研究人员对开缝翅片管换热器空气侧的流动与换热

性能进行了大量的研究。文献 [1-3] 对不同翅片间距、不同管外径、不同纵横向管间距、不同管排数以及不同翅片厚度等 49 种开缝翅片进行了较为全面的试验研究。文献 [4-5] 研究了开缝翅片在湿工况下的性能。文献 [6-8] 研究了开缝高度、开缝宽度、开缝角度以及开缝位置等设计参数对翅片阻力和换热性能的影响。然而以上文献只是从传统的角度出发, 通过比较宏观的实验结果得出翅片阻力和换热性能的优劣, 并未用新的原理来分析强化传热的机理。文献 [9] 提出了场协同原理来评价单相对流换热性能的优劣。文献 [10-13] 利用该理论通过实验和数值模拟研究了翅片的换热性能。但迄今未见关于翅片流场和温度场细节试验研究的报道。

本文利用 PIV 粒子图像测速和红外热成像技术测量圆弧型和 X 型开缝翅片的流场和温度场, 从流动角度以及流场和温度场关系的角度比较分析两种不同开缝形式翅片阻力和传热特性的优劣, 为数值模拟研究和翅片结构的优化设计提供有力的试验依据。

1 试验元件与系统

1.1 试验元件

试验元件为两种不同形式的开缝翅片, 如图 1 所示。基管外径均为 14.6 mm, 片间距均为 3 mm。管束布置为叉排, 纵向(沿流动方向) 4 排, 横向(垂直于流动方向) 5 排。翅片材料为铜。

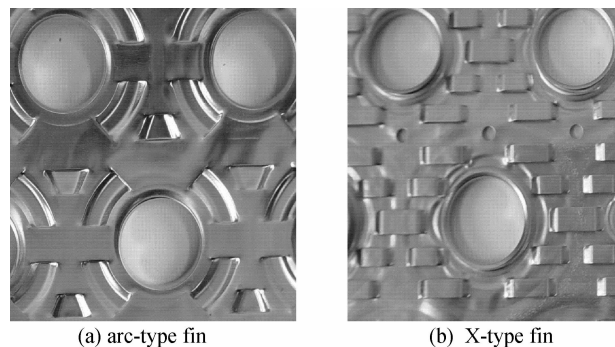


图 1 翅片结构与布置

Fig. 1 Configuration and arrangement of fin surfaces

1.2 PIV 试验系统

PIV 试验系统如图 2 所示, 主要由气源管路流量测量系统、示踪粒子引入系统和 PIV 试验段测速系统组成。试验管道气体由滑片式空气压缩机提供。管路流量由旁路调节并由转子流量计测量。示

踪粒子由油滴雾化为 5~15 μm 的粒子并由氮气携带经引射口进入试验段。PIV 试验段如图 3 (a) 所示, 高速摄像机垂直于试验段顶面的玻璃视窗, 激光打出的片光源从 3 mm 的侧面缝隙中进入空气流道。试验段压差由电子微压计测量。入口空气流速为 1~4 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。PIV 测量系统由 4 部分组成: 激光器及其片光源系统, 数字摄像机, 同步控制器和计算机后处理软件。PIV 工作原理及其测量系统组成详见文献 [14-15]。

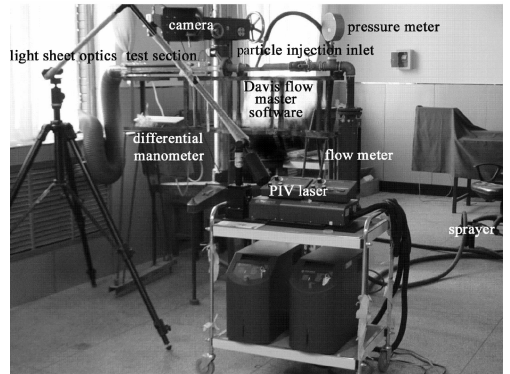


图 2 PIV 试验系统

Fig. 2 PIV experiment system

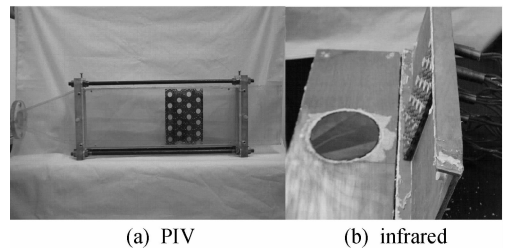


图 3 PIV 和红外热成像试验段

Fig. 3 PIV and infrared thermovision test section

由于试验段通道很薄, 仅有 3 mm, 并且有管壁的阻挡, 使得激光无法覆盖整个流场。考虑到翅片的对称性, 采取两种角度拍摄: 拍摄角度激光垂直于试验段侧面和拍摄角度激光与试验段侧面成 60° , 如图 4 所示, 最后将两组照片合成就可以得到一个完整的速度矢量场。

1.3 红外热成像试验系统

红外热成像试验系统是在 PIV 试验系统上改装而成, 将 PIV 试验段改为红外测温试验段, 如图 3 (b) 所示。试验段主体为矩形通道, 在主体顶部嵌入红外视窗, 用红外热像仪 NEC Thermo Tracer (TH9100MV) 透过红外视窗对翅片表面温度进行测量。翅片由电加热棒加热, 最大加热功率为 600 W。热电偶均匀布置在试验段的进出口对

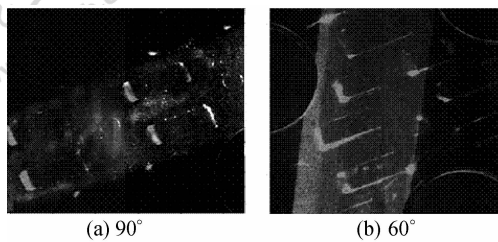


图 4 PIV 拍摄角度

Fig. 4 PIV shooting angle

流体温度进行测量。当空气侧换热量和电加热源提供的热量之间的热平衡偏差在±5%以内时，即工况稳定后，由 National Instruments 数据采集系统和红外热像仪同时采集数据。

2 试验数据整理

为了比较两种开缝形式对流场的影响，引入场均速度、波动速度和波动强度 3 个概念，见式 (1) ~ 式 (3)。场均速度 \bar{U} 即全流场速度的平均值，波动速度 U' 为当地速度与场均速度的差值，波动强度 ϵ 定义为波动速度的均方根与场均速度的比值，它的大小定量地反映了翅片结构对流场扰动的影响。

$$\bar{U} = \frac{1}{A} \int U dA \quad (1)$$

$$U' = U - \bar{U} \quad (2)$$

$$\epsilon = \frac{\sqrt{(U')^2}}{\bar{U}} \quad (3)$$

Re 、 Nu 和摩擦因数 f 的定义见式 (4)，定性尺寸取为基管外径 d ，定性温度为空气进出口平均温度。同时为了从速度场和温度场的关系分析两种翅片强化传热的机理，根据 PIV 测量的速度场与红外热成像得到的温度场数据计算了当地场协同角 θ 与全场平均场协同角 θ_m ，见式 (5) 和式 (6)。式 (7) 为涡量强度的表达式。

$$Re = \frac{U_{max} d}{\nu}; Nu = \frac{hd}{\lambda}; f = - \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho U_{max}^2 L/d} \quad (4)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left[\frac{u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}}{|\mathbf{U}| |\text{grad} T|} \right] \quad (5)$$

$$\theta_m = \sum \frac{dA_i}{\sum dA_i} \theta_i \quad (6)$$

$$|\Omega_z| = \left| \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right| \quad (7)$$

3 试验结果与分析

3.1 流动与阻力特性

由于翅片开缝，使得翅片内的流动具有脉动性

和非定常性。为了从统计学上分析其运动特性，对每一个试验工况利用 PIV 系统拍摄了 10 组瞬态图片，对每组里的两帧图片进行互相关处理就可以得到翅片的瞬态速度矢量场。为了提高信噪比，降低随机误差，可以将同一工况下所有的瞬态速度矢量场进行时均化处理，从而得到时均的速度矢量场。

图 5 即是利用上述处理方法得到的两种翅片在入口风速为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的时均化速度矢量场，箭头的长短代表速度大小，箭头的方向代表速度方向，灰度大小表示涡量的强度。从图中可以看出由于流通面积的减小，流动速度从管子前缘沿流动方向逐渐增大，直到最小截面处达到最大。由于管子诱发产生的涡旋流动的影响，在管子前缘产生绕流涡旋流动，而在管子后缘产生绕流脱体涡旋流动，速度急剧下降，并且产生局部回流。同时还可以看出，由于翅片开缝，使得整个流场的涡量分布极不均匀，在翅片的开缝边缘处和开缝间狭小缝隙处涡量强度高于周边区域。

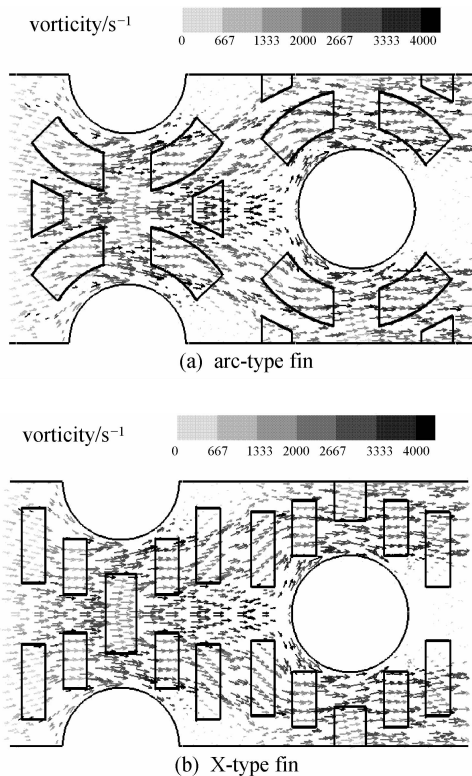


图 5 入口风速为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的流场

Fig. 5 Air flow field at $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ velocity

图 6 和图 7 分别给出了两种翅片的波动速度均方根 (RMS) 值和波动强度随入口风速的变化曲线。从图 6 中可以看出随着入口速度的增大，两种翅片的波动速度均方根值均在增大。这表明入口速

度越大，流场内的速度梯度、湍动度和涡量强度越大。同时，还可以看出 X 型开缝翅片的波动速度均方根比圆弧型的要高，表明 X 型开缝形式对流场的扰动要强于圆弧型开缝形式。这一点同样可从图 7 中看出，X 型开缝翅片的波动强度明显大于圆弧型开缝翅片。图 7 还表明两种翅片的波动强度并不像波动速度均方根那样随入口速度的增加而增加，而是围绕着各自的平均值上下波动，在试验误差允许的范围，可以认为对于一种特定的翅片形式，波动强度是一个定值。

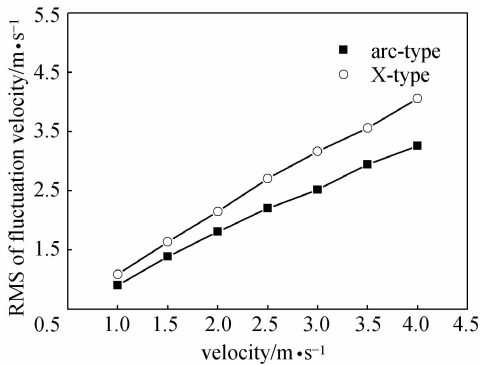


图 6 波动速度均方根随入口速度的变化

Fig. 6 Variation of RMS of fluctuation velocity with inlet velocity

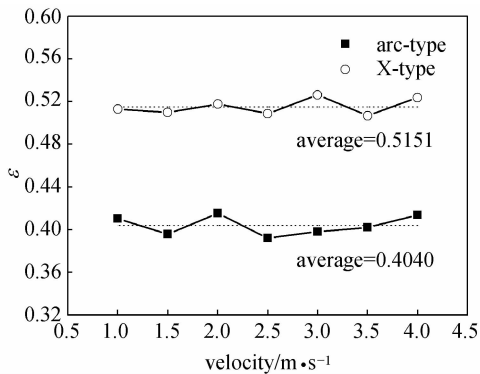


图 7 波动强度随入口速度的变化

Fig. 7 Variation of fluctuation intensity with inlet velocity

从以上的分析可以看出，波动速度均方根和波动强度都可以反映流场内的速度梯度大小，前者不仅取决于翅片的结构还与流动速度本身的大小有关，而后者完全反映了翅片结构本身对流场速度梯度的影响。它的大小直接表征了翅片结构对流场的扰动程度。波动强度越大，对流场的扰动程度越大，速度梯度越大，涡量强度越大。可以推测，波动强度越大，流动阻力越大，换热越好。

图 8 给出了两种翅片的摩擦因数随 Re 的变化，

从图中可以看出，随 Re 增大，摩擦因数减小。X 型开缝翅片的摩擦因数在整个 Re 范围内均高于圆弧型开缝翅片，前者的摩擦因数比后者高 6.79%~18.59%，表明 X 型开缝翅片的流动阻力大于圆弧型开缝翅片。这与前面关于流动特性分析的结果相吻合，验证了关于波动强度越大，流动阻力越大的推测。

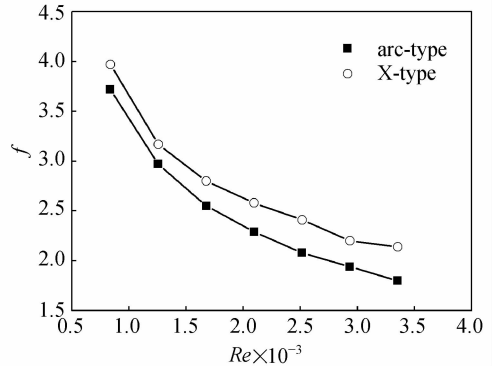


图 8 摩擦因数随 Re 的变化

Fig. 8 Variation of friction factor with Re

3.2 传热特性分析

图 9 为红外热像仪拍摄的两种翅片在入口风速为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时一个换热单元的温度场。灰度表示温度的大小，为了更加直观地观察温度的分布，在图中的一些特征部位标出了当地的温度。从图中可以看出，开缝处的温度梯度明显大于其他区域，强化了换热。

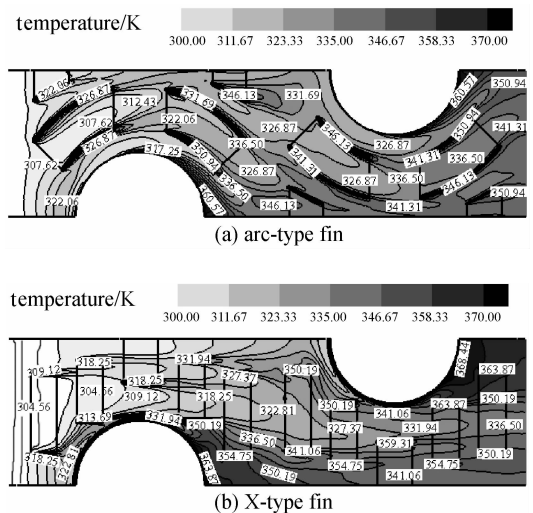


图 9 入口风速为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的温度场

Fig. 9 Air temperature field at $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ velocity

图 10 为两种翅片的 Nu 随 Re 的变化曲线。可以看出，随 Re 增加， Nu 增加。X 型开缝翅片的 Nu 在整个 Re 范围内均高于圆弧型开缝翅片，前

者的 Nu 比后者高 8.21%~11.1%。这表明 X 型开缝翅片的换热能力强于圆弧型开缝翅片。这也验证了前面关于波动强度越大，换热越好的推测。

场协同理论认为^[9]，速度矢量与温度梯度方向夹角的大小反映了换热的强弱，夹角越小，换热越强。从图 5 与图 9 的对比可以看出，在开缝翅片的前缘，速度矢量的方向与温度梯度的方向几乎平行，协同角很小，换热很强，而在翅片的后部，两者几乎垂直，协同角很大，换热很差。这与传统理论分析的结果是吻合的。

图 11 给出了两种翅片的平均协同角随 Re 的变化，从图中可以看出，平均协同角随着 Re 的增加而增大，但增加的幅度有所减小。可见增大速度虽然可以通过增加流量来增大换热量，但同时使得速度场和温度场的协同性变差。因此总的传热系数不是线性地增加，而是随着 Re 的增加，增加的幅度有所减小。X 型开缝翅片的平均协同角在整个 Re 范围内均小于圆弧型开缝翅片，这表明 X 型开缝翅片的场协同性好于圆弧型开缝翅片，因此前者的换热强于后者，这与前面分析的结论一致。

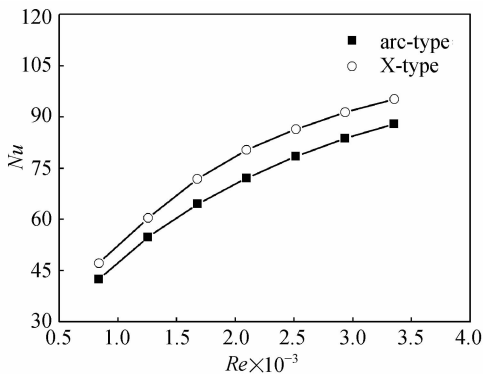


图 10 Nu 随 Re 的变化

Fig. 10 Variation of Nu with Re

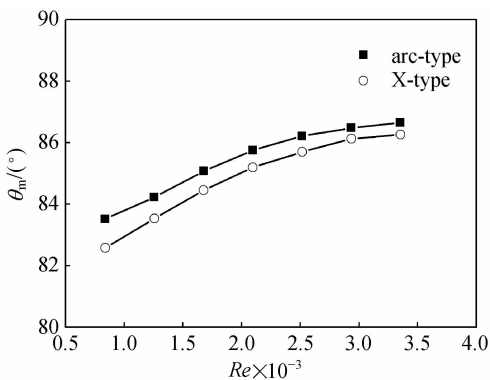


图 11 场协同角随 Re 的变化

Fig. 11 Variation of field synergy angle with Re

4 结论与展望

(1) 提出的新概念波动强度是表征翅片结构对流动扰动的物理量，波动强度越大，流动扰动程度越大，速度梯度越大，涡量强度越大，从而阻力越大，换热越好。

(2) PIV 和红外热成像试验结果表明 X 型开缝翅片的波动强度、流动阻力大于圆弧型开缝翅片。而前者的换热性能和场协同性优于后者。可以结合两者的特点优化片型。

(3) PIV 和红外热成像的可视化试验结果为后续的数值模拟研究和翅片结构优化设计提供了可靠的试验依据。

符 号 说 明

- A ——试验元件整体截面积， m^2
- dA_i ——试验元件一个小单元截面积， m^2
- d ——管子外径， mm
- f ——摩擦因数
- h ——表面传热系数， $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
- L ——实验元件沿流动方向长度， m
- Nu ——Nusselt 数
- Δp ——试验段进出口压差， Pa
- Re ——Reynolds 数
- RMS——均方根
- T ——温度， K
- U, \bar{U}, U' ——分别为当地速度、场均速度和波动速度， $m \cdot s^{-1}$
- U_{max} ——最小流通截面速度， $m \cdot s^{-1}$
- u, v ——分别为 X、Y 方向速度， $m \cdot s^{-1}$
- ϵ ——波动强度
- θ, θ_m ——分别为场协同角、平均场协同角， $(^\circ)$
- λ ——空气热导率， $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
- ν ——空气运动黏度， $m^2 \cdot s^{-1}$
- ρ ——空气密度， $kg \cdot m^{-3}$
- Ω_z ——涡量强度， s^{-1}

References

- [1] Wang C C, Lee W S, Sheu W J. A comparative study of compact enhanced fin-and-tube heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, **44**: 3565-3573
- [2] Du Y J, Wang C C. An experimental study of the airside performance of the superslit fin-and-tube heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, **43**: 4475-4482

- [3] Wang C C, Tao W H, Chang C J. An investigation of the airside performance of the slit fin-and-tube heat exchanger. *International Journal of Refrigeration*, 1999, **22**: 595-603
- [4] Ren Neng (任能), Gu Bo (谷波). Experimental study and numerical simulation of heat and mass transfer on plain fin in wet conditions. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2007, **58** (7): 1626-1631
- [5] Ma Xiaokui (马小魁), Ding Guoliang (丁国良), Zhang Yuanming (张圆明). Airside heat and mass transfer characteristics of split fin-and-tube heat exchangers under dehumidifying conditions. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2007, **58** (8): 1911-1916
- [6] Yun J Y, Lee K S. Investigation of heat transfer characteristics on various kinds of fin-and-tube heat exchangers with interrupted surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999, **42**: 2375-2385
- [7] Yun J Y, Lee K S. Influence of design parameters on the heat transfer and flow friction characteristics of the heat exchanger with slit fins. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, **43**: 2529-2539
- [8] Kang Hie Chan, Kim Moo Hwan. Effect of strip location on the air-side pressure drop and heat transfer in strip fin-and-tube heat exchanger. *International Journal of Refrigeration*, 1999, **22**: 302-312
- [9] Guo Z Y, Tao W Q, Shah R K. The field synergy principle and its applications in enhancing single phase convective heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, **48**: 1797-1807
- [10] Zhou Junjie, Tao Wenquan. Three dimensional numerical simulation and analysis of the airside performance of slotted fin surfaces with radial strips. *Engineering Computations*, 2005, **22** (8): 940-957
- [11] Zhang Baodong (张宝东), Yuan Zhongxian (苑中显). Characteristics of heat transfer in a synergetic rectangular channel. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2007, **58** (3): 562-566
- [12] Li Huizhen (李惠珍), Qu Zhiguo (屈志国), Cheng Yongpan (程永攀), Tao Wenquan (陶文铨). Experimental and numerical study on heat transfer and fluid flow characteristics of slotted fin-and-tube heat transfer surfaces. *Journal of Xi'an Jiaotong University* (西安交通大学学报), 2005, **39** (3): 229-232
- [13] He Y L, Tao W Q, Song F Q, Zhang W. Three-dimensional numerical study of heat transfer characteristics of plain plate fin-and-tube heat exchangers from view point of field synergy principle. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2005, **26**: 459-473
- [14] Waterweel J. Fundamentals of digital particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology*, 1997, **8** (12): 1392-1397
- [15] Zhou Aimin (周爱民), Li Yanzhong (厉彦忠), Wen Jian (文健), Zhang Ke (张科), Wang Jiang (王江). Flow distributions of header configurations in plate-fin heat exchangers with particle image velocimetry (PIV). *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2006, **57** (3): 486-490