

研究论文

振动圆管外流场的 PIV 实验研究 及场协同分析

姜 波, 田茂诚, 邱 燕, 唐玉峰, 程 林
(山东大学能源与动力工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 采用粒子图像测速 (PIV) 与 CFD 动网格相结合的方法, 对振动圆管外近壁区流场进行了实验及模拟研究, 得到了振幅 1.3 mm、频率 5~25 Hz 范围内的管外流场速度矢量图, 计算了不同工况下管外流场的平均场协同角余弦值。实验及模拟结果表明: 振动能够显著增加管外近壁区的流体速度, 能够在振动方向上的管壁两侧形成有效的冲刷, 随着振动频率的升高其管外近壁区的平均速度近似呈线性增加, 在共振点出现峰值; 相同区域内振动工况的平均场协同角余弦值要明显大于无振动工况, 但不同振动频率间的场协同角余弦值变化较小。同时, 基于场协同分析初步提出了改善振动表面对流换热的措施。

关键词: 粒子图像测速; 动网格; 场协同; 强化传热

中图分类号: TK 124

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2009) 08-1900-06

PIV experimental study and field synergy analysis of external flow field of vibrating tube

JIANG Bo, TIAN Maocheng, QIU Yan, TANG Yufeng, CHENG Lin

(School of Energy Source and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: Using particle image velocimeter (PIV) combined with CFD dynamic mesh, an experimental and simulation study was carried out on flow field in the near-wall region outside a vibrating tube. The charts of velocity vector of flow field outside the tube under five conditions with amplitude 1.3 mm and frequency 5—25 Hz were obtained, and the cosine of average synergy angle of flow field outside the tube was calculated. Experimental and simulation results showed that vibration could significantly increase flow velocity in the near-wall region outside the tube, and cause effective scouring on both sides of tube wall in the vibration direction. The average velocity of near-wall region outside the tube showed an approximate linear increase with the increase of vibrating frequency, and reached a peak when resonance condition appeared. In the same region, the cosine of average synergy angle under vibrating condition was greater than that under non-vibrating condition, but there occurred a narrower change of cosine of average synergy angle at different vibrating frequencies. Besides, preliminary measures were proposed to improve heat transfer of vibration surface by analysis of field synergy.

Key words: particle image velocimeter; dynamic mesh; field synergy; heat transfer enhancement

2008-12-30 收到初稿, 2009-03-18 收到修改稿。

联系人: 田茂诚。第一作者: 姜波 (1982—), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2007CB206903); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (NCET-05-0583)。

Received date: 2008-12-30.

Corresponding author: Prof. TIAN Maocheng, tianmc65@sdu.edu.cn

Foundation item: supported by the National Basic Research Program of China (2007CB206903) and the New Century Excellent Talents in University (NCET-05-0583).

引言

无论对于自然对流, 还是强制对流, 换热表面的振动都能在很大程度上强化传热。许多研究者对此进行了大量的实验及数值研究, 得到了其传热与振动参数间的相互关系^[1-5], 但其中的强化传热机理还不为人们所完全认识。事实上, 热量的传递与传输承载介质的流动状态有着密切关系, 这一点过增元等^[6-8]在场协同理论中进行过详细的论述, 因此可以通过研究振动圆管周围的流场分布和流动结构来深入探讨振动强化传热的本质原因。

近年来, 随着粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术的逐渐成熟, 已经可以通过追踪示踪粒子的方式得到整个测量面上的全场速度信息^[9-10], 这样就使得定量地分析研究振动管外流场成为可能^[11-12], 并且该技术已成功应用于振幅 $A=36、80\text{ mm}$, 频率 $f=0.14、0.56\text{ Hz}$ 的振动管外流场实测研究^[13-15]。本文采用 PIV 实验的方法测量振幅 $A=1.3\text{ mm}$, 频率 $f=5\sim 25\text{ Hz}$ 振动圆管外的速度矢量场, 计算管外振动区域内的平均速度, 并与 CFD 动网格方法的数值计算结果进行对比; 同时通过对振动管外速度场、温度场的场协同分析讨论振动强化传热的机理。

1 实验系统与方法

实验系统主要由 PIV 测试系统、激振系统、水循环系统、实验段 4 部分组成。PIV 系统采用 DANTEC-FLOWMAP, 具体包括激光发生装置、冷却装置、成像装置、数据采集装置及后处理软件。其中激光器为功率 $120\text{ mJ} \cdot \text{Pulse}^{-1}$ 的双腔激光器, CCD 相机分辨率为 1024×1344 。激振系统主要由变频器、电动机、偏心轮、柔性牵引钢条及回拉弹簧组成, 其主要作用为测试段提供不同频率的简谐振动, 振幅 $A=1.3\text{ mm}$, 频率范围 $f=0\sim 25\text{ Hz}$ 。水循环系统由水箱、阀门、循环泵、流量计组成。实验段要求具有良好的透光性, 实验中采用 $1000\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 的有机玻璃通道, 通道中心放置直径 $D=20\text{ mm}$ 有机玻璃柱。实验系统如图 1 所示, 有机玻璃柱在微流 ($u=0.0035\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 水平通道内做简谐运动, 激光从上部发出, 片光与有机玻璃柱垂直, CCD 相机从侧面拍摄, 形成 PIV 图片。

PIV 系统的工作原理是在流场中添加合适的示

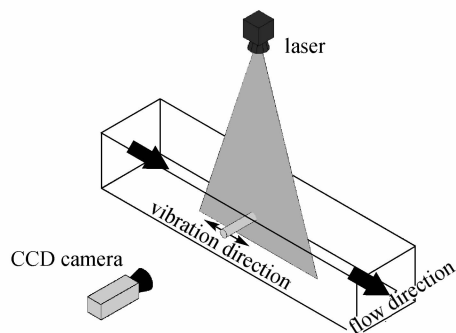


图 1 实验系统

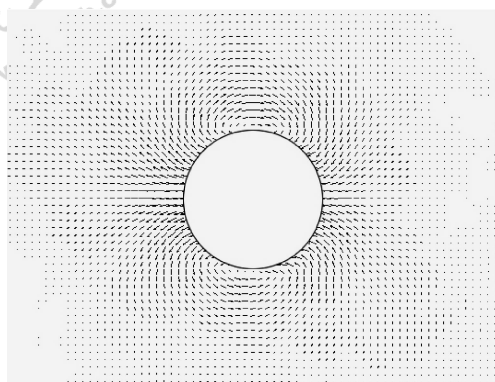
Fig. 1 Experiment system diagram

踪粒子, 用脉冲激光片光源照射所测流场区域, 通过成像记录系统摄取极短时间内两次曝光的粒子图像, 形成 PIV 底片, 然后利用图像处理技术对 PIV 底片进行处理, 获得示踪粒子图像的平均位移, 由此确定并显示测量区域内的速度矢量场。采用 PIV 系统进行速度场测试时, 大致可分为 3 个步骤: 首先进行实验前的准备工作, 包括对实验系统的定位、标定及对焦等操作; 其次用双曝光法摄取流场的粒子图像; 最后处理图像, 显示速度矢量场, 提取速度信息。

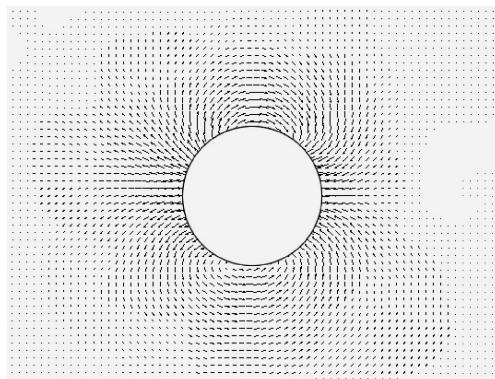
实验所使用的 PIV 系统, 其最大的激光双曝光频率为 10 Hz , 对于文中工况所涉及的振动频率, 还无法跟踪拍摄得到在同一周期不同时刻的流场速度矢量图。为了能够研究该工况下的流场, 文中采用的方法为: 连续拍摄同一振动工况下的 40 组 PIV 图片, 通过计算找出其平均速度最大的图片, 根据简谐振动理论即可以近似认为该图片对应的振动时相位为 90° 或 270° 。

2 实验结果分析

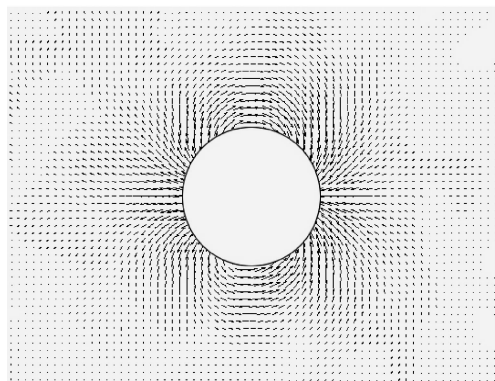
图 2 为振幅 1.3 mm , 振动频率分别为 $5、15、25\text{ Hz}$ 时振动圆管外流场的速度矢量图, 3 幅图片均为向左运动到平衡位置, 即振动最大速度处。观察不同频率下的速度矢量图, 可以看出其近壁区的速度值要明显大于远离区; 在平行于振动方向的管外左右两侧, 其速度矢量方向很大程度上垂直壁面, 在垂直于振动方向的上下两侧, 其速度方向则近似平行于壁面。产生这种矢量场的原因因为圆管在自右向左运动的过程中, 其左侧区域内的流体要为振动管体“让出”空间, 区域内的流体因此获得了向左运动的动力。同时, 其右侧的流体会迅速汇集以填充由于管体离开而出现的空位, 包括极少数从



(a) 5 Hz



(b) 15 Hz



(c) 25 Hz

图 2 不同频率时振动圆管外流场速度矢量图
Fig. 2 External flow field velocity vector chart of vibrating tube at different frequency

左上方及左下方侧排挤出来的流体,这样就形成了图 2 所示的左右两侧垂直壁面、上下两侧平行壁面的速度矢量场。

3 实验及模拟流场对比分析

采用 CFD 动网格方法对实验工况下振动圆管外流场进行了数值模拟研究。湍流模型选用 $k-\epsilon$

RNG 模型,压力项选用 STANDARD 格式,压力速度耦合选用 SIMPLEC 算法,动量方程与能量方程均选用 QUICK 格式。振动壁面的运动为简谐振动,壁面附近设为无滑移速度边界条件。设置通道入口为 VELOCITY _ INLET 条件 ($u = 0.0035 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),出口为 OUTFLOW 条件。图 3 为振幅 1.3 mm、振动频率 15 Hz 时振动管外流场的速度矢量图,与实验结果 [图 2 (b)] 对比,可以看出二者在近壁区的速度矢量场基本一致,但二者在部分区域内的流体速度方向存在细微差别,作者认为产生此现象的原因可能为:①实验中,圆管在水平振动的过程中可能存在微小的纵向振动;②激光透过实验件后(由于折射现象)所形成的明暗相间的区域可能对 PIV 图片的后处理造成干扰。为方便对比,文中选取以振动圆柱的圆心为中心的 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 方形区域,计算区域内部的管外平均速度。图 4 为计算区域内平均管外速度值随振动频率变化的实验及模拟计算结果。可以看出,在文中讨论的频率范围内,随着振动频率的升高其管外平

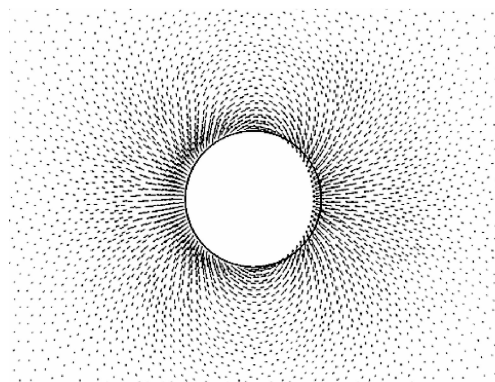


图 3 15 Hz 时振动管外流场模拟速度矢量图
Fig. 3 External flow field simulated velocity vector chart of vibrating tube at 15 Hz

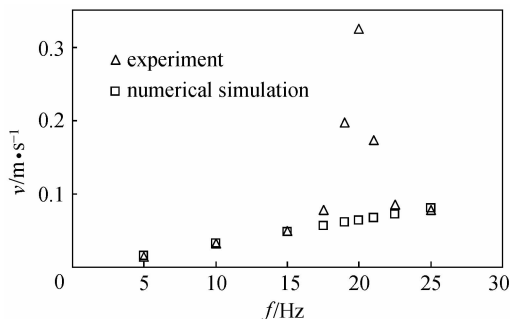


图 4 管外平均速度的实验及模拟计算结果对比
Fig. 4 Experimental and simulation results of average external velocity in calculation region

均速度近似呈线性增加。前 3 种工况的实验与模拟结果吻合较好; 在 20 Hz 附近实验值出现峰值, 与模拟值产生较大差异, 这是由于实验装置在该频率下产生较为明显的共振现象, 致使在振动时的真实振幅远远高于 1.3 mm; 而当振动频率升高到 25 Hz 时, 共振现象消失, 两值又吻合较好。实验及模拟流场的对比分析结果可以证明文中所采用的实验及模拟方法具有较好的可靠性。

4 速度场与温度场的协同分析

采用 CFD 方法对振幅 1.3 mm, 频率 5~25 Hz 的振动圆管进行了传热数值研究。圆管温度恒为 320 K, 流体温度为 300 K, 其他设定条件与第 3 节相同。图 5 为频率 15 Hz, 时相位 90° (即向左运动至最大速度处) 的管外流体温度分布图, 图 6 则为圆管静止状态下的温度分布图。由图可以看出, 流体温度自管壁向外逐渐降低, 靠近管壁的不同温区呈近似环带状分布; 对比两图可以发现在相同的传热温差下振动工况的热边界层薄、温度梯度大, 这一点较好地解释了振动能够强化传热的原因。

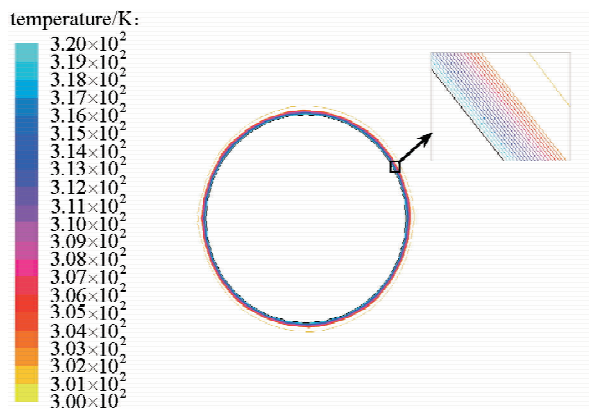


图 5 时相位为 90° 时的振动管外流体温度分布

Fig. 5 External fluid temperature distribution chart of vibrating tube at time-phase angle 90°

根据场协同理论, 速度矢量与温度梯度之间的夹角 θ (场协同角) 按式 (1) 确定^[6]

$$\cos\theta = (|\mathbf{U} \cdot \nabla T|) / (|\mathbf{U}| \cdot |\nabla T|) \quad (1)$$

文中采用的计算方法为: 首先用 CFD 方法计算振动管外的速度场与温度场; 其次利用 TECPLOT 软件提取 CFD 计算结果, 同时计算温度梯度; 最后编写 FORTRAN 程序读取所需数据并计算流体场协同角余弦值。为了便于观察整个场的协同情况, 文中引入了平均场协同角的概念^[16],

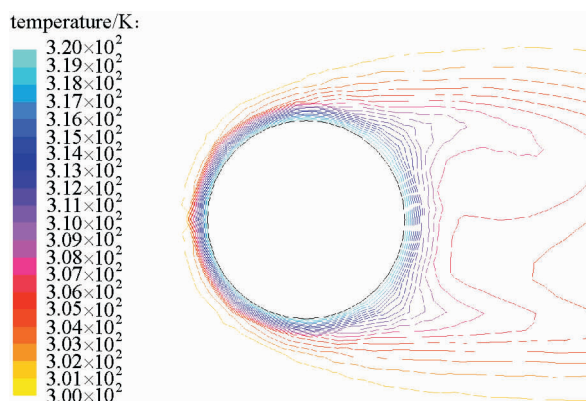


图 6 静止管外流体温度分布

Fig. 6 External fluid temperature distribution chart of stationary tube

其定义如式 (2) 所示

$$\cos\theta_a = \frac{\int_s \cos\theta ds}{s} \quad (2)$$

式中 θ_a 为平均场协同角。

图 7 为该工况下管外表面传热系数随振动频率的变化曲线。从图中可以看出, 管外传热系数随振动频率的升高而增大, 且频率越高其增加的幅度越大。图 8 为时相位为 90° 时计算区域内平均场协同角余弦值的模拟计算结果, 可以看出, 振动工况下的平均场协同角余弦值要高于无振动工况, 且不同频率间 (5~25 Hz) 的场协同角余弦值变化较小, 呈微增趋势。综合图 4、图 7、图 8 可以得出: 在文中讨论的振动工况下, 影响传热性能的主要参数为管外流体速度, 而非场协同角。

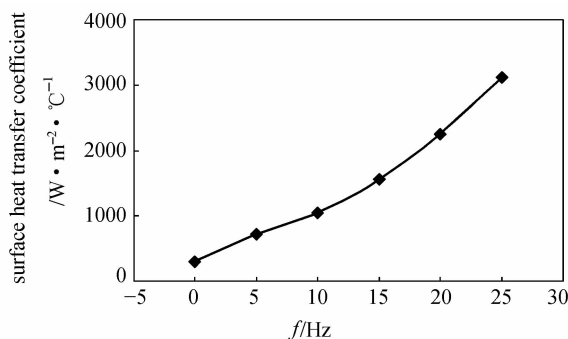


图 7 管外表面传热系数随振动频率的变化

Fig. 7 Heat transfer coefficient outside vibrating tube with frequency

为方便对流场进行分析, 人为地将振动管外流场区分成 4 个子区, 即 A、B、C、D 区, 如图 9 所示。其中 A、B 两区为平行于振动方向的左右两区, 在振动的过程中其内部流体存在剧烈垂直壁面

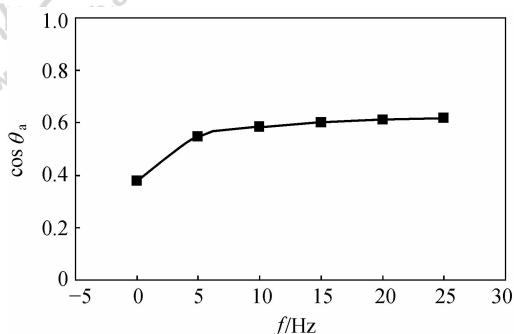


图 8 平均场协同角余弦值随振动频率的变化

Fig. 8 Average field synergy angle cosine with frequency in calculation region

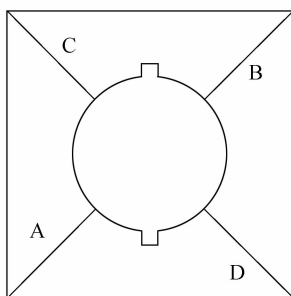


图 9 振动管外流场分区示意图

Fig. 9 External flow field partition schematic diagram of vibrating tube

流动, 冲刷作用十分明显, 场协同性最好, 这些特征能够揭示振动强化传热的根本原因。对于 A、B 两区, 继续提高场协同性比较困难, 而且提高的幅度也不会很大, 该两区内的强化传热应该以提高近壁流速为主, 但提高流速就意味着输入更多的能量, 同时采用更高的振幅和频率也会对结构和材料提出更高的要求。C、D 为垂直振动方向的两区, 其内部流体以平行壁面流为主, 速度较高, 但场协同角余弦值较小, 因此可以通过优化结构来改善该区域内的场协同性, 即在输入能量变化不大的工况下得到较好的场协同性。文中对此进行了数值验证, 在圆管的正上及正下方各安置一个 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 矩形肋, 初步数值计算可得在 $A = 1.3\text{ mm}$, $f = 15\text{ Hz}$ 工况下其计算区域内的平均场协同角余弦值为 0.656, 高于未加肋时的 0.595。图 10 为时相位 90° 圆周方向上肋管、光管的管外场协同角余弦值对比分布, 图中的起始位置为圆管的上端点, 旋转方向为顺时针。由图可以看出, 肋管的场协同角余弦值在较大区域内均高于光管, 如此可以使肋管的场协同角余弦值在整个圆周上维持一个相对较高的数值。同时, 数值计算结果表明在该工况下肋

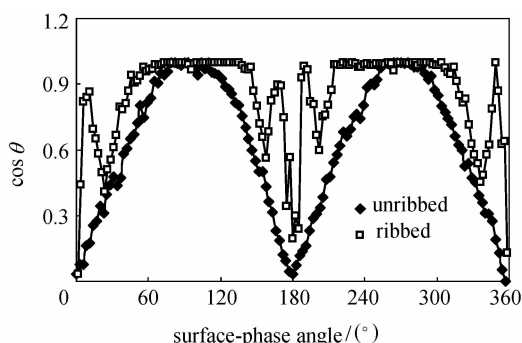


图 10 肋管、光管的管外场协同角余弦值对比分布

Fig. 10 Contrast scatter diagram of field synergy angle cosine between ribbed and unribbed tube

管的管外平均表面传热系数要比光管高 7.1%。

5 结 论

本文采用粒子图像测速 (PIV) 与 CFD 动网格相结合的方法, 对振动圆管外近壁区流场进行了实验及模拟研究, 得到如下结论。

(1) 振动能增加管外近壁区的流体速度, 能够在振动方向上的管壁两侧形成有效的冲刷, 随着振动频率的升高, 其管外平均速度近似呈线性增加。

(2) 计算了振动管外流场的平均场协同角余弦值, 振动工况的平均场协同角余弦值要大于无振动工况, 且不同频率间的平均场协同角余弦值变化较小, 可以得出在文中讨论的振动工况下影响传热性能的主要参数为管外流体速度, 而非场协同角。

(3) 基于场协同分析结果初步提出了改善振动表面换热的措施, 数值计算表明其能够较为有效地提高振动管外的场协同性, 强化传热效果。

References

- [1] Tian Maocheng (田茂诚), Lin Yiqing (林颐清), Cheng Lin (程林), Zhang Guanmin (张冠敏), Zhou Qiangtai (周强泰). Experimental investigation of heat transfer enhancement by flow induced vibration in steam-water heat exchangers. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2001, **52** (3): 257-260
- [2] Leng Xueli (冷学礼), Cheng Lin (程林), Du Wenjing (杜文静). Heat transfer properties of the vibrational pipe when fluid passes by it slowly. *Journal of Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), 2003, **24** (2): 328-330
- [3] Jiang Bo, Tian Maocheng, Leng Xueli, Tang Yufeng, Pan Jihong. Numerical simulation of flow and heat transfer

- characteristics outside a periodically vibrating tube. *Journal of Hydrodynamics*, 2008, **20** (5): 629-636
- [4] Go J S. Design of a microfin array heat sink using flow-induced vibration to enhance the heat transfer in the laminar flow regime. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2003, **105** (2): 201-210
- [5] Fu W S, Tong B H. Numerical investigation of heat transfer from a heated oscillating cylinder in a cross flow. *Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, **45** (14): 3033-3043
- [6] Guo Z Y, Tao W Q, Shah R K. The field synergy (coordination) principle and its applications in enhancing single phase convective heat transfer. *Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, **48** (9): 1797-1807
- [7] Guo Z Y, Li D Y, Wang B X. A novel concept for convective heat transfer enhancement. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1998, **41** (2): 2221-2225
- [8] Guo Zengyuan (过增元). Principle of field coordination in heat exchangers and its application. *Chinese Journal of Mechanical Engineering* (机械工程学报), 2003, **39** (12): 1-9
- [9] Lee S H, Kim J H, Sung H J. PIV measurements of turbulent boundary layer over a rod-roughened wall. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2008, **29** (6): 1679-1687
- [10] Weier T, Cierpka C, Gerbeth G. Coherent structure eduction from PIV data of an electromagnetically forced separated flow. *Journal of Fluids and Structures*, 2008, **24** (8): 1339-1348
- [11] Li Hongzhi (李红智), Luo Yushan (罗毓珊), Wang Haijun (王海军), Chen Tingkuan (陈听宽), Xiong Wei (熊伟), Li Chenfei (李晨飞). Visualization experiments on air side heat transfer and fluid flow characteristics of arc-type and X-type slotted fin surfaces. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*(化工学报), 2008, **59** (8): 1936-1941
- [12] Li Yong (李永), Wu Yulin (吴玉林), Yuan Huijing (袁辉靖), Pan Hailin (潘海林). Application of 3-D-PIV in measuring the entrained vortex. *Advances in Water Science* (水科学进展), 2007, **18** (3): 368-373
- [13] Dai Guangqing (戴光清), Wang Binrong (王滨蓉), Yang Qing (杨庆). DPIV measurement of a circular cylinder oscillating in water. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition* (四川大学学报: 工程科学版), 2001, **33** (6): 1-5
- [14] Lin J C, Rockwell D. Quantitative interpretation of vortices from a cylinder oscillating in quiescent fluid. *Experiments in Fluids*, 1997, **23**: 99-104
- [15] Unal M F, Lin J C, Rockwell D. Force prediction by PIV imaging: a momentum-based approach. *Journal of Fluids and Structures*, 1997, **11**: 965-971
- [16] Leng Xueli (冷学礼). Heat transfer enhancement mechanism and fouling development outside vibrating pipe [D]. Jinan: Shandong University, 2007