

基于 PIV 技术的复合流道板式结构实验

袁振洋, 贾志刚, 王奎升, 刘欢, 于硕, 冯璐瑶
(北京化工大学, 北京 100029)

摘要: **目的** 在包装工程流场测量的研究中, 验证粒子图像测速(PIV)技术的可行性。**方法** 用超白玻璃制作复合流道板式换热器的模型, 基于 PIV 技术采集被测区域图像, 应用互相关分析法进行计算, 获得流场数据, 并与数值模拟结果比对进行验证。**结果** 实验结果流型清晰, 数据和数值模拟基本一致。**结论** PIV 技术可应用于流动复杂、非接触的包装工程类的流场测量, 且超白玻璃是一种理想实验材料, 能够为拓展该领域的探索思路提供参考。

关键词: 包装工程; 复合流道; PIV; 超白玻璃; 流场测量

中图分类号: TB487; O351.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)15-0009-05

PIV-Technique-based Experiment on Plate Structure with Compound Flow Channel

YUAN Zhen-yang, JIA Zhi-gang, WANG Kui-sheng, LIU Huan, YU Shuo, FENG Lu-yao
(Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

ABSTRACT: The work aims to verify the feasibility of particle image velocimetry (PIV) technique in the process of studying the flow field measurement of packaging engineering. The model of the plate heat exchanger with compound corrugation flow channels was made with ultra clear glass and the images of observed area were collected based on PIV technique. The cross-correlation analysis method was used for calculation to obtain the flow field data. Such data were compared with numerical simulation results for verification. The experiment results showed that the flow pattern was clear, and the data and numerical simulation were basically consistent. PIV technique can be applied to the measurement of flow field of non-contact packaging engineering with complex flow and the ultra clear glass is a kind of ideal material that can provide reference for the exploring ideas to expand such field.

KEY WORDS: packaging engineering; compound corrugation flow channel; PIV; ultra clear glass; flow field measurement

随着社会的不断发展, 包装对于人们的生活越来越重要, 相关研究也更加丰富。学者们在运输安全、包装技术、工艺设计、新材料、自动控制等方面进行了广泛探索, 取得了一系列的成果^[1-3]。其中, 包装领域中的流场检测是深入探究该领域的重要方法, 测量并研究流场的规律与机理可以为其过程监测和优化设计等提供参考依据^[4]。例如杨福馨对灌装机械中黏性流体断流问题进行了理论研究, 得到了静力学条件下的数学模型^[5]。由于整体结构复杂、介质不可接

触、包装材料可视性较差等原因^[6-8], 现阶段关于包装领域流场测量的研究相对较少。

PIV 技术又称粒子图像测速法, 能在同一瞬态记录大量空间点的速度分布信息, 具有非接触、高精度、整场测量的优点, 可广泛应用于复杂结构和湍流的测量^[9-11]。包装工业中的流态较为多样, 复合流道板式换热器内部是一种湍流复杂的结构, 具有一定的普遍性和代表性, 其流动状态可视为包装工业中的流态之一^[12-15]。此前的流场测量基本都选用

收稿日期: 2017-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(51476006)

作者简介: 袁振洋(1990—), 男, 北京化工大学硕士生, 主攻流场测量。

通讯作者: 贾志刚(1969—), 男, 北京化工大学副教授, 主要研究方向为计算流体力学。

PS、亚克力等有机板材作为模型材料，但加工痕迹较重，且难以保证侧面的透光度。文中采用超白玻璃^[16]制作复合流道板式换热器单流道模型，基于PIV技术对其流动状态进行测量，采用互相关分析法处理，将数据与数值模拟结果进行对比，以验证实验思路的可行性。

1 实验

1.1 模型

笔者所在的课题组在2016年的研究成果显示，复合流道板式换热器中综合性能因子最高时，大波纹倾角 β_1 为 55° ，小波纹倾角 β_2 为 25° ，该模型也采用此倾角参数。根据工业应用中的实际尺寸，确定其换热区域为 $100\text{ mm}\times 340\text{ mm}$ ，梯形流上底长度为 3 mm ，下底长度为 8 mm ，波纹高度为 3 mm ，波纹法向截距为 11 mm 。设定理论速度为 0.5 m/s ，则体积流量 $Q=540\text{ L/h}$ ，SolidWorks工程软件绘制的三维模型见图1。



图1 三维模型
Fig.1 Three-dimensional model

PIV光路系统为绿色激光束，因此要降低其对绿色波段的吸收作用，经过前期的调研和对比，选择透光度高、对绿色波吸收较少的超白玻璃作为模型材料。加工路线：绘图→切割→磨削→抛光→粘合→密封。板片组合见图2，模型基底选用厚度为 3 mm 的玻璃板，切割成2块 $112\text{ mm}\times 310\text{ mm}$ 的矩形作为基底，切割2块 $6\text{ mm}\times 310\text{ mm}$ 和 $6\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的矩形板片作为模型的密封条。

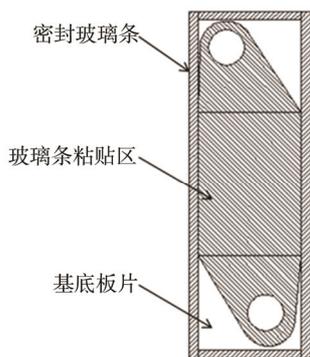


图2 板片组合
Fig.2 Plate package

玻璃模型在组合过程中不能使用机械加工，因此选用奥斯邦品牌的UV无影胶水和超白玻璃片进行密封，见图3。玻璃条3与基底5粘贴，在内部成为第1道密封；外侧密封条与基底5粘贴，在中间形成第2道密封；外侧加固片粘贴在基底外，加大外侧密封条的胶水粘贴面积，形成第3道密封；外侧密封条与加固片粘贴，形成第4道密封。

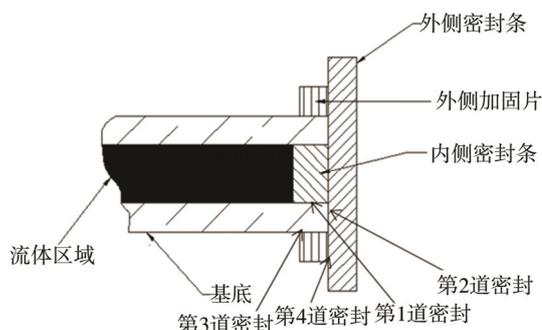


图3 密封
Fig.3 Sealing

1.2 实验系统

实验系统主要由循环水路系统和PIV测量系统所组成。

1.2.1 循环水路系统

循环水路系统由被测模型、水泵、阀门、管路、流量计、水槽组成，见图4。溶解示踪微粒的流体在水槽中被水泵吸入管路，控制阀门来调整流量，通过流量计的显示观察流量，进入被测模型后，再次经由管路回到水槽，进入下一个循环。

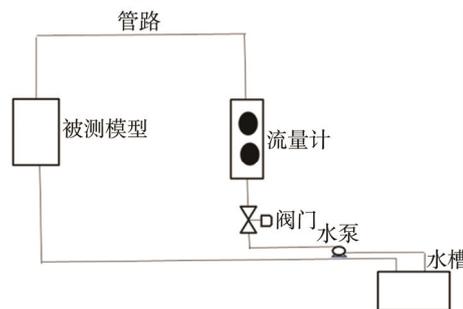


图4 循环水路系统
Fig.4 Circulatory water system

经过计算和对比，选取德国奥德杰集团有限公司生产的型号为LRS15-9的屏蔽泵，工作电压为 220 V ，频率为 50 Hz ，最高扬程为 9 m ，功率为 100 W ，最大流量为 $39\ 000\text{ L/h}$ ；选取玉环奥德华阀门有限公司生产的截止阀，型号为J41H，公称直径为 25 mm ；选取科达品牌型号为LZS的转子流量计，量程为 1000 L/h ，公称直径为 15 mm 。

1.2.2 PIV测量系统

PIV技术应用广泛，其原理为：在流场中布撒大

量粒径小于 $10\ \mu\text{m}$ 的示踪粒子跟随流场运动, 把激光束经过组合透镜扩束成片光照明流场, 使用数码相机拍摄流场照片, 得到前后两帧粒子图像, 对图像中的粒子图像进行互相关计算得到流场一个切面内定量的速度分布。在已知的时间间隔 Δt 内, 跟随流体运动的示踪粒子被脉冲激光片光照射, 瞬时位置记录在 CCD 芯片上。若已知在 t_1 与 t_2 这 2 个时刻同一颗粒微团的位移变化, 从记录所得颗粒图像中, 根据速度的定义式 $v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta s / \Delta t$, 就可以获得颗粒群在 t_1 时刻的运动速度。

文中设计采用的二维 PIV 系统从北京立方天地科技发展有限责任公司引进, 主要包括照明激光器、同步控制器、图像采集板、高速数码相机和计算机等。选用光波长为 $532\ \text{nm}$ 、脉宽为 $8\ \text{ns}$ 的固体脉冲激光器, 型号为 Vlite-380; CCD 高速摄像机, 型号为 CLB-B2520, 分辨率为 2456×2058 ; 同步控制器为 SM-MicroPulse725, 精度为 $0.25\ \text{ns}$, 独立 7 通道, 信号格式为 TTL; 计算机为戴尔 XPS8700-R37N8 台式机, i7-4790 处理器, GTX 745 独显 4G; 软件系统运用 MicroVec V3 图像控制系统; 示踪粒子是平均粒径为 $7\ \mu\text{m}$ 的罗丹明荧光颗粒, 荧光波长为 $590\ \text{nm}$ 。

1.3 实验操作

在流体稳定、无气泡、无泄漏的状态下, 调整设备和模型, 使流量稳定在 $540\ \text{L/h}$ 。激光从模型上方打入片光源, 距离边缘 $6\ \text{mm}$ 处, 利用激光诱导荧光, 然后用 CCD 进行捕捉拍摄, 在控制器和显示器中调整相机位置, 确保位置合适, 视野明亮。待图像采集完成后, 再移动相机, 继续采集下一区域。

首先, 在稳定的工况下连续采集 300 张图片, 每

张时间间隔为 $0.25\ \mu\text{s}$ 。然后, 对图像进行预处理, 使用图像边界模板, 设置判读区和步长, 采用互相关算法进行计算, 获得每个点的流动参数数值后, 采用 Tecplot 软件绘制数据的矢量图和分布云图, 进行观察和分析。再基于 Gambit 2.4 软件和 Fluent 17.0, 构建与实验模型尺寸相同、结构一致的几何模型, 格数为 1000 万左右, 选取的流体设定为 water-liquid, 并认为温度与物性之间没有关系, 比热容、密度等均设置为默认值。将理论速度设定为 $0.5\ \text{m/s}$, 采用无滑移速度和绝热边界。最后设定湍流模型为 LES 模型, 时间步长设定为 $0.1\ \text{ms}$, 完成数值模拟并与实验结果进行对比。

2 结果与讨论

2.1 实验测算结果

4 个换热区分别对应的截面实验测算数据结果转化的流型见图 5。箭头长度与合速度成正比。由图 5 可知, 截面 1 和 2 的来流方向为右侧, 显示形状均大致为对接的梯形, 速度带高度约为 $3\ \text{mm}$, 长度约为 $10\ \text{mm}$, 高速区都在进口和出口附近, 左上部分的流体速度比右下部分更高, 矢量方向基本均为从入口处向上折进, 沿上槽往下螺旋前进。截面 3 和 4 的来流方向为左侧, 截面 3 的形状类似等腰梯形, 速度带高度约为 $3\ \text{mm}$, 长度约为 $12\ \text{mm}$, 高速区在出口附近, 右侧速度高于左侧, 矢量方向基本沿对角线呈对称分布, 在入口左下方有漩涡区形成; 截面 4 的形状类似 2 个梯形对接, 速度带高度约为 $6\ \text{mm}$, 长度约为 $14\ \text{mm}$, 高速区在进口和出口附近, 右上部分比左下部分的速度更高, 矢量方向部分从入口处向上折进, 沿上槽往下螺旋前进, 部分从下侧沿槽折流前进。

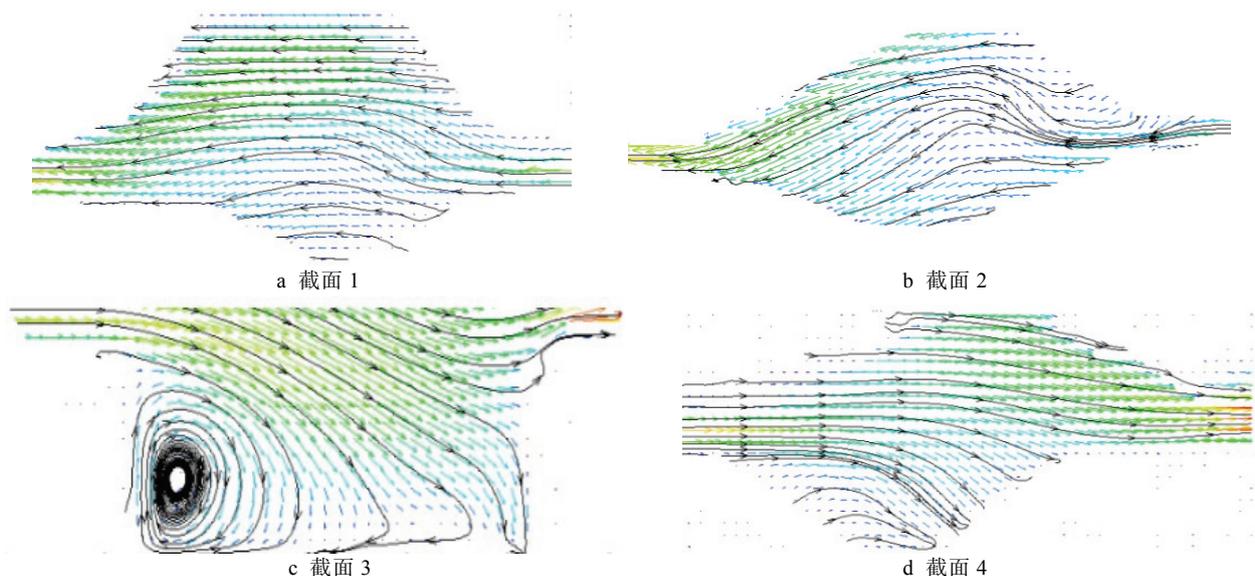


图 5 实验测算流型

Fig.5 Experimental measurement pathlines

2.2 数值模拟结果

数值模拟流型见图6。由图6可知,截面1和2的来流方向为左侧,显示形状均大致为对接的梯形,速度带高度约为3 mm,长度约为11 mm,高速区都在进口附近,截面1左上部分的流体速度比右下部分更高,截面2左边部分速度高于右侧,矢量方向基本为从入口处向上折进。截面3和4的来流方向为左侧,

截面3的形状为等腰梯形,速度带高度约为3 mm,长度约为12 mm,高速区在出口附近,右侧速度高于左侧,矢量方向基本沿对角线呈对称分布,在入口左下方有较明显的漩涡区形成;截面4的形状为2个梯形错位相对接,速度带高度约为6 mm,长度约为15 mm,高速区在进口附近,矢量方向部分从入口处向上折进,沿上槽往下螺旋前进,部分从下侧沿槽折流前进。

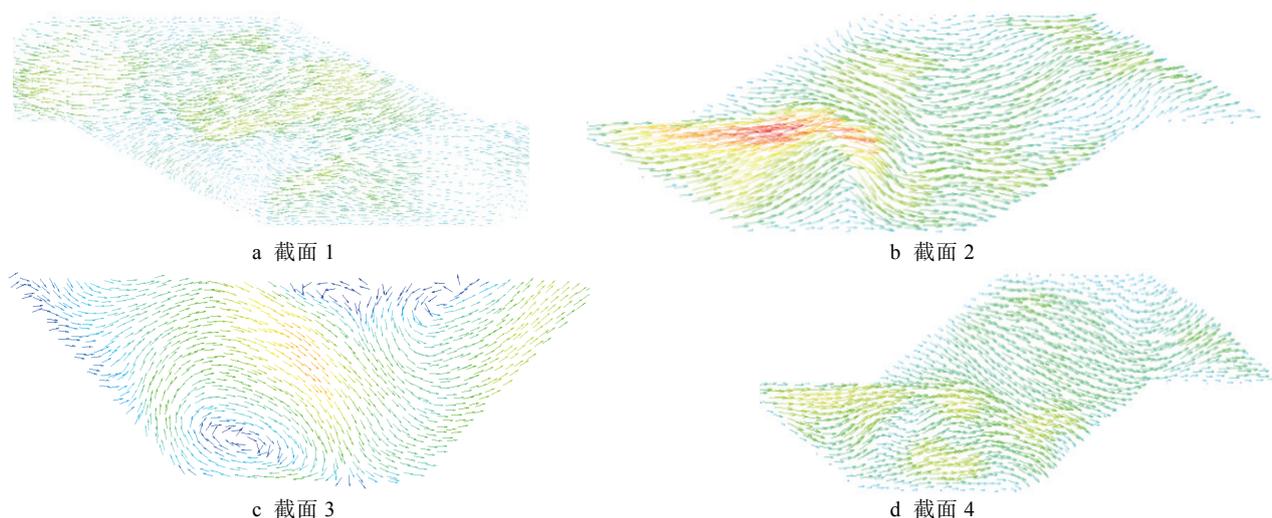


图6 数值模拟流型

Fig.6 Computational simulation pathlines

2.3 对比与讨论

对比截面形状可知,实验测量所用模型的形状和大小与数值模拟中的基本相同,说明模型的制作精度可达到要求。对比流型特征可以发现,实验测算得出各个区域的流动方向、漩涡分布等比较清晰,且与数值模拟基本一致,说明超白玻璃作为模型材料的实验效果较好。对比速度分布可以发现,实验与模拟误差较小,在合理范围内,说明基于PIV技术对该流道的实验研究与数值模拟可相互验证,实验思路可行。

3 结语

PIV实验结果与数值模拟基本一致,并得到了相互验证。将PIV技术应用于包装工程流场检测,该新思路具有可行性和科学性,并具有可解决非接触限制的优越性。超白玻璃是制作包装工业中PIV检测模型的理想材料,能够提高准确率和效率。

参考文献:

- [1] 孙智慧,张莉,刘壮,等.包装工程专业的学科体系研究[J].中国印刷与包装研究,2010(4):17—21.
SUN Zhi-hui, ZHANG Li, LIU Zhuang, et al. Research on Discipline System of Packaging Engineering Specialty[J]. China Printing and Packaging Study, 2010(4): 17—21.
- [2] 孙晓,吴昭昀,陈俊成,等.废旧利乐包/木屑复合板热压优化工艺研究[J].包装工程,2013,34(1):5—11.
SUN Xiao, WU Zhao-jun, CHEN Jun-cheng, et al. Study on Optimum Hot-pressing Process of Waste Tetra Pack/Wood Composite Board[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(1): 5—11.
- [3] 任丽敏,王逢瑚,张利.包装用薄型稻草刨花板的制备工艺研究[J].包装工程,2013,34(11):10—15.
REN Li-min, WANG Feng-hu, ZHANG Li. Preparation Technology of Thin Rice-straw Particleboard for Packaging[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(11): 10—15.
- [4] 杨福馨.灌装机械中粘性流体断流机理与技术研究[D].上海:东华大学,2011.
YANG Fu-xin. Study on Breaking Mechanism and Technology of Viscous Fluid in Filling Machine[D]. Shanghai: Donghua University, 2011.
- [5] 付长江.强制給料定量包装机的研究[D].天津:天津科技大学,2010.
FU Chang-jiang. Study on Forced Feeding Dosing Machine[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2010.
- [6] 孙容芳,伍军.绿色包装的发展趋势[J].塑料包装,2011,21(6):6—8.
SUN Rong-fang, WU Jun. The Development Trend of Green Packaging[J]. Plastic Packaging, 2011, 21(6): 6—8.

- 6—8.
- [7] 张方文, 于文吉. 木质包装材料的发展现状和前景展望[J]. 包装工程, 2007, 28(2): 27—30.
ZHANG Fang-wen, YU Wen-ji. Current Status and Development of Wood-based Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(2): 27—30.
- [8] 苟进胜, 方健, 蔡静蕊, 等. 包装行业用秸秆刨花板的研制[J]. 包装工程, 2013, 34(23): 23—26.
GOU Jin-sheng, FANG Jian, CAI Jing-rui, et al. Development of Straw Particleboard for Packaging Industry[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(23): 23—26.
- [9] GRAFONINGEN S, JENSEN A. Simultaneous PIV/LIF Measurements of a Transitional Buoyant Plume Above a Horizontal Cylinder[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012(5): 4195—4206.
- [10] SACHIN K, SATHE M J, JOSHI J B. Investigation of Flow and Temperature Patterns Indirect Contact Condensation Using PIV, PLIF and CFD[J]. Chemical Engineering Science, 2010(5): 4606—4620.
- [11] NOVARA M, SCARANO F. A Particle-tracking Approach for Accurate Material Derivative Measurements with Tomographic PIV[J]. Experiments in Fluids, 2013, 54(8): 1—12.
- [12] LI W, LI H, LI G, et al. Numerical and Experimental Analysis of Composite Fouling in Corrugated Plate Heat Exchangers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013(3): 351—360.
- [13] GULENOGLU C, AKTURK F, ARADAG S, et al. Experimental Comparison of Performances of Three Different Plates for Gasketed Plate Heat Exchangers [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2014, 75(1): 249—256.
- [14] FAIZAL M, AHMED M R. Experimental Studies on a Corrugated Plate Heat Exchanger for Small Temperature Difference Applications[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2012(6): 242—248.
- [15] VIKAS K, ARUN K T, SUBRATA K G. Effect of Variable Spacing on Performance of Plate Heat Exchanger Using Nanofluids[J]. Energy, 2016(4): 1107—1119.
- [16] 曹慧群, 张启龙, 汪海燕, 等. 超白玻璃组成、结构及性能的研究[J]. 中国西部科技, 2010(18): 1—2.
CAO Hui-qun, ZHANG Qi-long, WANG Hai-yan, et al. Study on Composition, Structure and Properties of Ultra Clear Glass[J]. Science and Technology of West China, 2010(18): 1—2.