

# 基于图像处理的小通道内气液两相流 含气率的实验研究

周云龙, 王红波, 顾杨杨

(东北电力大学 能源与动力工程学院, 吉林 吉林 132012)

**摘 要:** 采用高速摄像机对水力直径为 1.15 mm 的正三角形小通道内气液两相流型进行实时拍摄和图像采集, 提出一种利用数字图像处理技术检测小通道内气液两相弹状流体积含气率的方法。针对小通道内两相流型中气泡间相互无遮掩的优势, 利用图像处理技术对各流型图像进行消噪、边缘提取、二值化、区域标记和填充等处理。根据提出的三维气相体积计算模型得到体积含气率。最后与漂移流模型计算结果进行比较, 比较和实验结果都表明: 对于弹状流, 该方法得到的含气率与真实值的误差在  $\pm 15\%$  以内, 具有较高的测量精度; 并对实验数据进行回归分析得到了截面含气率公式, 可用于微小通道内气液两相流参数的在线检测, 为今后微小通道内的两相流动特性研究提供参考。

**关 键 词:** 气液两相流; 小通道; 体积含气率; 图像处理; 漂移流模型

中图分类号: O359.1      文献标识码: A  
符号说明

- $L$ —被处理的图像中流道的总长度/mm
- $L_i$ —被处理的图像中第  $i$  个弹状气泡的长度/mm
- $n$ —被处理的图像的总和
- $S_i$ —被处理的图像中第  $i$  个弹状气泡的宽度/mm
- $V$ —被处理的图像中流道的总体积/ $\text{mm}^3$
- $V_i$ —被处理的图像中第  $i$  个弹状气泡的体积/ $\text{mm}^3$
- 下脚标
- G—气相
- L—液相

## 引 言

微化工技术是 20 世纪 90 年代初顺应可持续发展与高技术发展的需要兴起的一门新的学科。微化工过程相对于常规化工过程具有高效性、快速性、灵活性、轻便性、易控制、及高度集成等优点<sup>[1-3]</sup>。微型设备的面积体积比很大, 表面作用增强, 其传质效应比在常规尺度的设备中提高了 2~3 个数量级<sup>[4]</sup>。因此, 国内外学者对微小通道内气液两相流

动特性进行了大量研究工作: 如流型及转变界限、含气率、压降特性等。

气液两相流系统中计算由重力引起的压降和流场加速引起的压降时, 含气率的计算是必不可少的。所以含气率作为气液两相流动的重要参数之一, 含气率的检测对于气液两相流动的研究和工程应用有着重要的意义。目前计算空泡份额的关系式主要有简化的一维两相流模型, Bankoff 变密度模型, 漂移流模型等<sup>[5]</sup>。但是目前关于正三角形小通道内气液两相流含气率的研究还不多见, 而且根据已有文献报道, 对于小通道内的含气率的研究大多采用漂移流模型<sup>[6-10]</sup>。近年来随着计算机技术和高速摄像技术的高速发展, 数字图像处理技术因为在两相流实验研究中具有直观可见性、测量非接触性、测量精度较高、可观察两相间的瞬态变化等优点已得到广泛应用。周云龙等人用数字图像检测的方法得到了气液两相流容积含气率<sup>[11]</sup>。王红一等人采用可视化方法计算出了气液两相流中上升气泡的体积<sup>[12]</sup>。本研究采用数字图像处理技术, 根据小通道内气泡相互间无遮掩这一优势, 对高速摄像机拍摄的小通道内弹状流型图像进行处理分析, 得到了一种含气率的计算方法, 以期工程实际中有关微小通道内两相流含气率的研究提供新的思路。

## 1 实验系统及方法

实验台如图 1 所示。液路: 从高压氮气瓶流出的氮气经减压阀减压后由三通引入恒温水箱保持 0.2 MPa 稳定压力来驱动水流动。从水箱流出的水依次流经过滤器, 球阀, 液体金属浮子流量计, 高精度针形阀后进入实验通道。气路: 经减压后的氮气流经气体质量流量计, 再由气体高精度针形阀调节

收稿日期: 2010-11-24; 修订日期: 2011-09-01

基金项目: 吉林省科技发展项目基金资助(20060704)

作者简介: 周云龙(1960-), 男, 吉林扶余人, 东北电大大学教授, 博士生导师。

流量,通过止回阀流入实验通道,从小通道流出的水由水箱收集,氮气排入大气中。

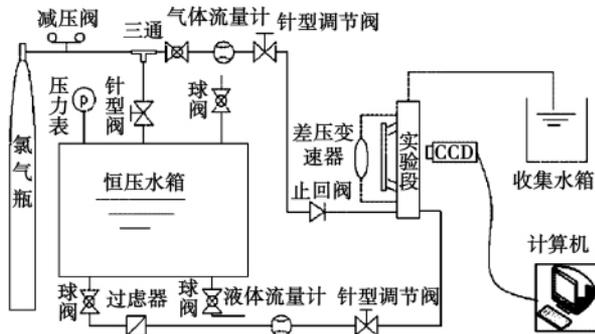


图 1 氮气-水两相流动实验系统图

Fig. 1 Schematic drawing of a nitrogen-water two-phase flow test system

实验段采用透光性较好的有机玻璃制成,边缘用螺栓紧固。在通道上相距 200 mm 处取两个直径为 0.5 mm 的取压小孔,上游小孔距通道入口 100 mm,下游小孔距通道出口 80 mm,实验段通道截面为边长为 2 mm 的等边三角形。

本实验是在大气压力和室温下进行的,实验中水的温度为 20 ℃,氮气温度的为 18 ℃。实验过程中,先固定液体流量,逐渐增加气体流量,用高速摄像机采集流型。再逐渐增加液体流量重复上述过程。实验中流量和压差信号由 4516U 数字采集卡采集后输入计算机,采集频率为 256 Hz。液体和气体流量计的测量精度分别为  $\pm 1.5\%$  和  $\pm 1\%$ 。

实验中选用瑞士 Weinberger 公司研发的 Speed-Cam Visario 系统,高速摄影机的最大分辨率为  $1536 \times 1024$ ,最大帧频达到 10 000 帧/s,能够清晰的抓拍各种运动  $1/10\ 000$  s 的瞬变图像。照明系统采用逆光照明,光源使用 6 400 K 色温的三基色光管,光线明亮无闪烁,在实验段的背侧相应位置贴上两层绘图用的硫酸纸,使光源分布均匀。

## 2 图像处理

本次实验在表观气速为 0.1 ~ 20 m/s,表观液速 0.01 ~ 5 m/s 范围内进行,即:固定某一液体流量,逐渐增加气体流量至最大,依次循环,共采集 25 组实验数据,在每次气液流量稳定后用高速摄像机拍摄弹状流流型图像。但是实验中采集到的图像含有光源和摄像机带来的噪声,会造成气液两相流中气泡的对比度低,图像背景亮度不均匀,部分气泡边

缘信息弱等缺点,所以在实验前先采集全液相的背景图像,该图像同时也包含高速摄像机和光源带来的噪声。然后利用差影算法得到只含有气相信息的图像<sup>[13]</sup>。利用形态学中的开运算和闭运算相结合的方法对图像进行增强,对处理后的图像再进行二值化,边缘检测和区域填充<sup>[14]</sup>。图 2 为数字图像处理技术处理前后的弹状流流型图像,图像的大小为  $16.74 \times 2$  mm,对应的像素值为  $360 \times 43$ 。

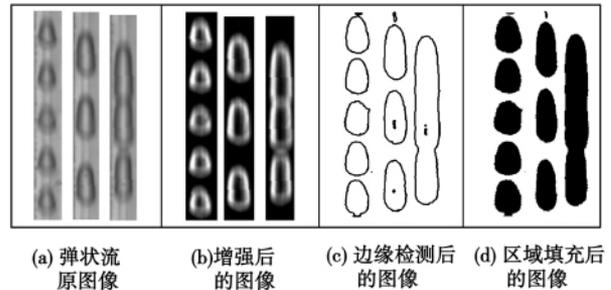


图 2 数字图像技术处理前后的弹状流图像

Fig. 2 Images of a slug flow before and after processing by using digital image technology

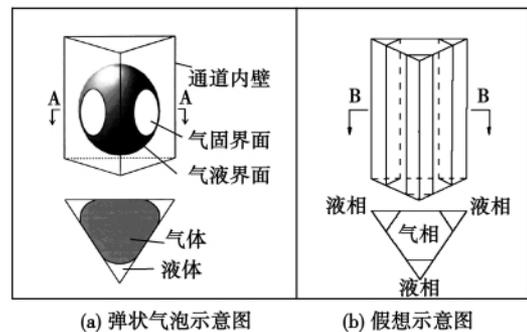


图 3 弹状流体积假想模型

Fig. 3 Slug flow volume assumption model

## 3 气泡的特征参数提取

出于简化计算,气相的面积定义为图像中连通域中像素的总数,周长为包括某个连通域的边界轮廓线的长度。根据图像检测出的是二维气泡的周长和面积来计算三维的气泡体积。根据弹状流流型,考虑小通道截面是等边三角形,提出假想的气泡体积计算模型,如图 3 所示。根据检测出的二维图像中的第  $i$  个气弹最大宽度  $s_i$ ,假定正三角形三个棱角处气相是完全均匀分布的,所以气相的体积可由下式计算:

$$V_i = \frac{\sqrt{3}}{8} (a - s_i)^2 \cdot L_i \quad (1)$$

式中:  $a$ —三角形边长  $a=2 \text{ mm}$  统计计算发现上式模型中气相的高取  $2/3L_i$  时计算值较贴近实际。

统计每一种弹状流中所有气弹的体积, 就可以计算出对应的体积含气率:

$$\beta = V^{-1} \sum_{i=1}^n V_i \quad (2)$$

本研究实验段是等边三角形, 即:

$$V = \frac{\sqrt{3}}{2} L^2 \quad (3)$$

平均截面含气率的计算式为:

$$\beta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{V} \quad (4)$$

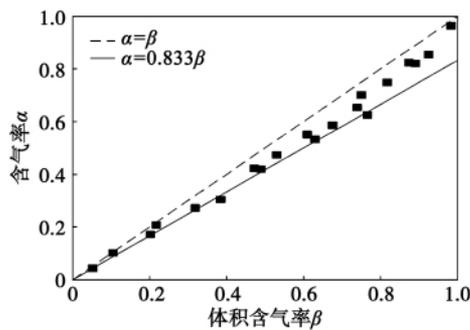


图 4 本研究截面含气率与文献 [15] 和均相流模型比较

Fig. 4 Comparison of the gas content in a section with those calculated by using the method mentioned in the literature [15] and a homogeneous-phase flow model

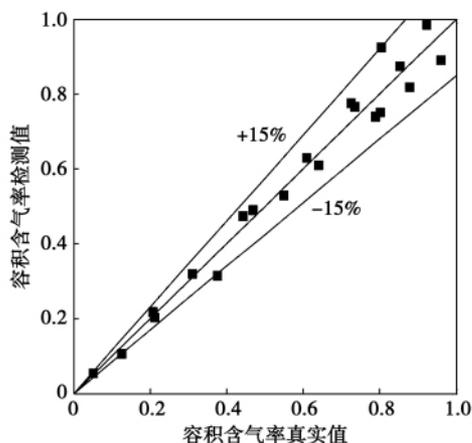


图 5 容积含气率检测值和真实值的比较  
Fig. 5 Comparison of the tested value of the volumetric gas content with the actual one

根据上述方法计算出来的截面含气率计算结果如图 4 所示, 当容积含气率在 0.75 以下时, 截面含气率与文献 [15] 中 Armand 给出的常规尺寸的圆管截面含气率公式  $\alpha = 0.833\beta$  较吻合, 而当容积含气率大于 0.8 时, 含气率检测值趋向于均相流模型预测值。将所得实验数据回归分析, 得到了适合本实验中弹状流含气率的关系式:

$$\alpha = 0.2529\beta^2 + 0.6751\beta + 0.0257 \quad (5)$$

图 5 是容积含气率的真实值与容积含气率检测值的比较结果, 其中容积含气率的真实值  $\beta_b$ , 由液相和气相的分相流量计算得出:

$$\beta_b = Q_G / (Q_G + Q_L) \quad (6)$$

由图 5 看出所有数据点都落在  $\pm 15\%$  误差带范围内, 测量精度较高, 可以满足实际测量的要求。

#### 4 与漂移流模型进行比较

文献 [10] 采用漂移流模型对水力直径分别为 0.866、1.443 和 2.886 mm 的正三角形小通道内气液两相流含气率进行计算, 在  $\beta < 0.8$  时有 95% 的数据点在 10% 的误差范围内。本研究也根据文献 [10] 中的方法对含气率进行了验证计算:

$$v_G = j_g / \alpha = C_0 j + V_b \quad (7)$$

式中:  $v_G$ —气相速度, 利用文献 [16] 中的方法来计算弹状流中的气相速度。由高速摄像机采集的弹状流视频, 截取连续两帧含有弹状气泡的图像, 这里认为气泡在连续两帧图像间隔时间内无变形, 从而检测出气弹顶部在这段时间间隔移动的像素值, 然后转化成长度单位即为气相速度,  $C_0$  是分布参数:

$$C_0 = 1.2 - 0.2 \sqrt{\rho_G / \rho_L} \quad (8)$$

漂移速度  $V_b$ :

$$V_b = 0.35 \sqrt{\Delta \rho g d_h / \rho_L} \quad (9)$$

式中:  $d_h$ —小通道的水力直径。

由图 6 看出实验计算出的气相速度与忽略漂移速度的漂移流模型预测值有较高的吻合度。根据上面分析, 忽略漂移速度  $V_b$  后, 由式 (7) 得到:

$$\alpha = \frac{1}{C_0} \beta = 0.838\beta \quad (10)$$

图 7 是本研究的实验数据与 (10) 式的比较结果, 在容积含气率 0.8 以下, 本实验数据与漂移流模型有较高的吻合度, 当容积含气率大于 0.8 时看出, 实验截面含气率趋向于均相流模型预测值。

图 8 是含气率检测值与文献 [10] 采用的漂移

流模型计算出的截面含气率的比较结果,两者计算结果有 90% 的点落在  $\pm 10\%$  误差范围内。

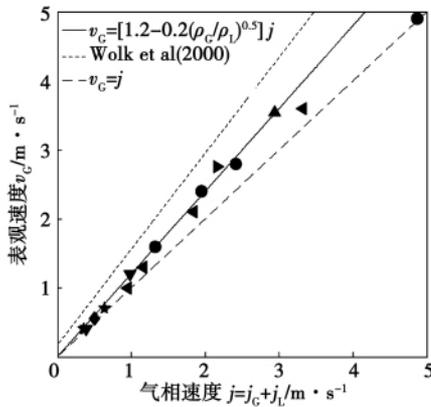


图 6 气相速度  $j$  和表观速度  $v_c$

Fig. 6 Gas-phase speed  $j$  and apparent speed  $v_c$

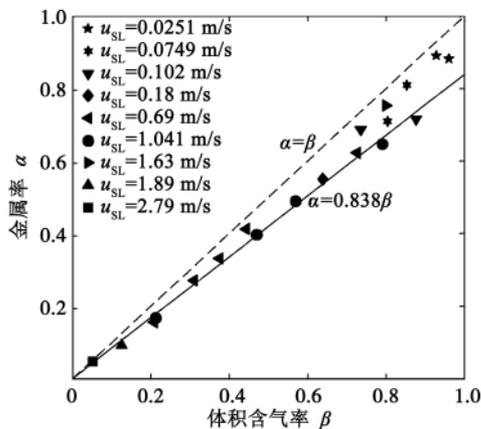


图 7 由文献 [10] 中的漂移流模型计算的截面含气率

Fig. 7 Gas content in a section calculated by using the drifting flow model given in the literature [10]

## 5 结 论

(1) 在气液两相不同表观速度下,采用高速摄像机得到水力直径为 1.15 mm 正三角形小通道内垂直向上流动时弹状流的典型流型图像;运用数字图像处理技术,根据本文提出的弹状气泡假象模型检测得到了容积含气率,计算结果与真实值比较,相对误差在  $\pm 15\%$  以内,具有较高的测量精度。回归分析得到截面含气率的计算公式,在  $\beta < 0.75$  范围内与文献 [15] 中给出的截面含气率公式吻合度较高。

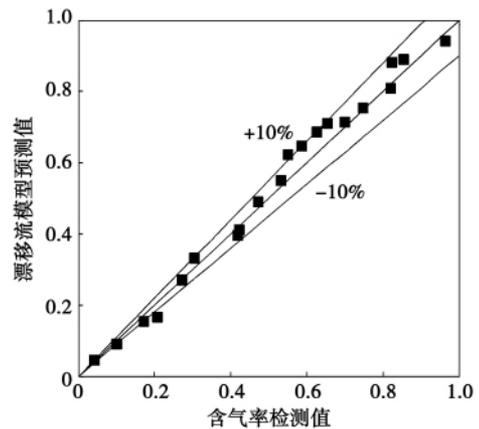


图 8 两种方法得到的截面含气率的比较

Fig. 8 Comparison of the gas contents in a section obtained by using the two methods

(2) 本研究同时采用漂移流模型对含气率进行了验证分析,结果表明该模型同样能在  $\beta < 0.82$  范围内预测本实验数据;最后把两种方法计算出的截面含气率对比,90% 的数据点在误差 10% 范围内。针对小通道内弹状气泡相互无遮掩的优势,提出一种非接触在线检测容积含气率的方法,对今后小通道内两相流动研究有一定的适用性。

## 参考文献:

- [1] Gavrilidis A, Angeli P, Cao E, et al. Technology and applications of microengineered reactors [J]. Chem Eng Res Des, 2002, 80 (A1): 3-30.
- [2] Service R. F1 miniaturization puts chemical plants where you want them [R]. Science, 1998.
- [3] Benson R S, Ponton J W. Process miniaturization—a route to total environmental acceptability [J]. Chem Eng Res Des, 1993, 71 (A1): 160-168.
- [4] 陈光文,袁 权. 微化工技术 [J]. 化工学报, 2003, 54(4): 427-439.
- CHEN Guang-wen, YUAN Quan. MICRO-CHEMICAL TECHNOLOGY [J]. Journal of Chemical Industry, 2003, 54(4): 427-439.
- [5] 车得福,李会雄. 多相流及其应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- CHE De-fu, LI Hui-xiong. Multiphase Flow and Its Applications [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007.
- [6] Mishima K, Hibiki T, Nishihara H. Some characteristics of gas-liquid flow in narrow rectangular ducts [J]. Int J Multiphase Flow, 1993, 19: 115-124.
- [7] Mishima K, Hibiki T. Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes [J]. Int J Multiphase Flow,

- 1996(22):703-712.
- [8] Ide H, Kariyasaki A, Fukano T. Fundamental data on the gas-liquid two-phase flow in minichannels [J]. Int J Therm Sci 2007(46): 519-530.
- [9] Triplett K A, Ghiaasiaan S M, Abdel S I, et al. Gas-liquid two-phase flow in microchannels. Part II: Void fraction and pressure drop [J]. Int J Multi Flow, 1999(25): 395-410.
- [10] Zhao T S, Bi Q C. Pressure drop characteristics of gas-liquid two-phase flow in vertical miniature triangular channels [J]. Int J Heat and Mass Transfer 2001(44): 2523-2534.
- [11] 周云龙, 尚秋华, 范振儒, 等. 气液两相流容积含气率的图像检测方法 [J]. 热能动力工程 2008, 23(3): 507-511.  
ZHOU Yun-long, SHANG Qiu-hua, FAN Zhen-ru, et al. Image processing-based detection method for measuring a volumetric gas content in a gas-liquid two-phase flow [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2008, 23(3): 507-511.
- [12] 王红一, 董峰. 气液两相流中上升气泡体积的计算方法. 仪器仪表学报 [J]. 2009, 30(11): 2444-2449.  
WANG Hong-yi, DONG Feng. Method for calculating the volume of a rising bubble in a gas-liquid two-phase flow [J]. Journal of Instrumentation 2009, 30(11): 2444-2449.
- [13] 施丽莲, 周泽魁, 任沙蒲. 垂直管道中气液两相流参数的图像检测方法 [J]. 流体机械 2004, 32(9): 4-9.  
SHI Li-lian, ZHOU Ze-kui, REN Sha-pu. Image method for testing the parameters of a gas-liquid two-phase flow in a vertical pipeline [J]. Fluid Machinery 2004, 32(9): 4-9.
- [14] 张东衡, 唐志航, 叶鸿明, 等. 一种气液两相流气相参数图像检测方法 [J]. 计算机测量与控制 2006, 14(5): 597-599.  
ZHANG Dong-heng, TANG Zhi-hang, YE Hong-ming, et al. An image method for testing the gas-phase parameters of a gas-liquid two-phase flow [J]. Computer Measurement and Control 2006, 14(5): 597-599.
- [15] Armaand A A. The resistance during the movement of a two-phase system in horizontal pipes [J]. Izv Vses Teplotekh Inst, 1946(1): 16-23.
- [16] 高浩军, 杜宇人. 基于视频序列图像的车辆测速研究 [J]. 电子测量技术 2007, (2): 42-46.  
GAO Hao-jun, DU Yu-ren. Study of the methods for measuring the speed of a vehicle based on the video sequence images [J]. Electronic Measurement Technology 2007(2): 42-46.



新技术、新工艺

## 综合使用可再生能源的能量转换装置

应用领域:

可再生能源发电领域、电机领域

项目简介:

本项目提出了一种综合使用可再生能源的能量转换装置。太阳能预先转化为电能,风能(海洋能、生物质能、地热能等)预先转化为机械能,如果把这两种能量输入到新型能量转换装置中,在出口获得的是两个能量总和(电能)。这是一种用于非传统能源系统新型结构的二维电机。本项目给出了综合使用能量转换装置的合理结构、工作原理及其相关理论基础,拥有两项俄罗斯发明专利。已经研制出小功率综合使用可再生能源的能量转换装置样机,可模拟同时使用太阳能和风能进行发电。

(如有需要者,请与编辑部联系)

On the basis of an analysis of the mechanism governing the flow in a full-arc water admission type steam-liquid two-phase ejector, studied and developed was a new method for optimizing ejectors. By adopting a mode that several holes in the side direction along the wall surface of the mixture chamber in the cylindrical section are additionally provided, the low temperature water in the outside world can be introduced into the said chamber through these holes, forming a second stage ejection and thus enhancing the ejection coefficient. A test rig was designed with wet steam serving as the working steam and a multi-nozzle ejector as the test piece. The pressure of the wet steam ranged from 0.15 MPa to 0.4 Mpa and the dryness of the wet steam was within a range of 0.25 - 1. During the test, the performance of the test piece before and after the optimization was compared, verifying that the optimization method under discussion is feasible. The research results show that at a same steam dryness, the ejector system has realized a stepped increase and with an increase of the steam dryness, the increment of the ejection coefficient will also increase. **Key words:** steam-liquid two phase flow, ejector, second-stage ejection, ejection coefficient, wet steam, optimization, steam dryness

基于图像处理的小通道内气液两相流含气率的实验研究 = **Experimental Study of the Gas-liquid Two-phase Flow Gas Content in a Small Channel Based on Image Processing** [刊 汉] ZHOU Yun-long, WANG Hong-bo, GU Yang-yang ( College of Energy Source and Power Engineering, Northeast University of Electric Power, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(1). - 38 ~ 42

By using a high speed video camera, real-time photographed and image acquired were the flow patterns of a gas-liquid two-phase flow in a small regular triangular channel with a hydraulic radius of 1.15 mm. On this basis, a method for inspecting and measuring gas-liquid two-phase slug flow volumetric gas content in a small channel by utilizing digital image processing technology was proposed. By utilizing the advantage that the bubbles in two-phase flow in small channels are not covered with each other and such processing methods as noise elimination, edge detection, binarization, zone marking and filling etc., the volumetric gas content was obtained based on the three-dimensional gas phase volume calculation model. Finally, a comparison was made with the results calculated by using the drifting flow model. Both the comparison and the test results show that for a slug flow, the method in question has a relatively high measurement precision with the error between the gas content obtained by using the method and the practical value being in a range of  $\pm 15\%$  and a gas content formula in a section being obtained by regression analyzing the test data. The above-mentioned method can be used for on-line testing the parameters of a gas-liquid two-phase flow in small channels, thus, offering reference for studying two-phase flow characteristics in small channels. **Key words:** gas-liquid two-phase flow, small channel, volumetric gas content, image processing, drift flow model

新型拐角式整体针翅回转热管设计与试验 = **Design and Test of a New Elbow Type Integral Pin-fin Rotary**