

文章编号 1004-924X(2012)03-0506-08

## 流动沸腾条件下微通道壁面温度的红外特征

马虎根\*, 涂文静, 谢荣建, 白健美

(上海理工大学热工程研究所, 上海 200093)

**摘要:**设计并搭建了沸腾换热试验台,采用 TH5104 红外热像仪测量微通道壁面温度来研究混合制冷工质在微通道内的沸腾换热特性。测量试件是一外径为 1.22 mm,内径为 0.86 mm,长为 200 mm 的不锈钢单圆管。实验利用红外热像仪测量并记录下质量流量为 1 726~8 635 kg/m<sup>2</sup>·s,热流密度为 65~231 kW/m<sup>2</sup> 时壁面温度的变化情况。实验分析和讨论结果显示:微通道壁面的温度分布沿着轴向变化有明显的规律性;水平微尺度通道内流动沸腾过程中,试件前后段有较大的温差效应,温差的正负与热流密度的大小有关;壁面温度的变化与热流密度、管内工质的流型和换热形式关系密切,流型越复杂,壁面温度变化越剧烈。

**关键词:**红外测量;温度测量;微通道;流动沸腾;壁面温度

中图分类号:TK124;TN219 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20112003.0506

## Infrared characteristics of wall temperature for single microtube during in-tube flow boiling

MA Hu-gen\*, TU Wen-jing, XIE Rong-jian, BAI Jian-mei

(College of Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

\* Corresponding author, E-mail: mahugen406@hotmail.com

**Abstract:** A boiling heat transfer test unit was designed and built. The TH5104 infrared thermography was used to measure the wall temperature of a microtube to research the characteristics of boiling heat transfer of refrigerant in the microtube. The test piece was a single stainless circular tube with an external diameter of 1.22 mm, an internal diameter of 0.86 mm and a length of 200 mm. The infrared photography was used to test and record the wall temperature of the microtube with heat flux ranging from 65 kW/m<sup>2</sup> to 231 kW/m<sup>2</sup> at different mass fluxes from 1 726 kg/m<sup>2</sup>·s to 8 635 kg/m<sup>2</sup>·s. Experimental results indicate that the wall temperature distribution along the axial direction has a regular change obviously. For the flow boiling in the horizontal microtube, a large temperature difference along the whole tube is shown during the evaporation of fluid in the microtube. Whether the difference of wall temperature is positive or negative, it is relative to the heat flux. The variation of the wall temperature is affected by the heat flux, flow patterns of working fluid and the heat transfer model, and the more complex the flow pattern is, the more severe the wall temperature varies.

收稿日期:2011-04-22;修订日期:2011-06-22.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50876068)

**Key words:** infrared measurement; temperature measurement; microtube; flow boiling; wall temperature

## 1 引言

自从20世纪80年代微通道的概念提出以后,对微型管或微型槽内介质的流动与换热的研究日益引起人们的重视。但是,国内外各研究者的结论却大相径庭,所以仍然需要大量实验去认识微尺度效应,以寻出真正引起微尺度效应的机理。研究者普遍认为,在微尺度下的换热明显强于常规尺度下,有些研究者认为微尺度的换热加强是由于在狭窄的槽道里的层流底层比较薄,而另外一些研究者认为更大的努塞尔数( $Nu$ )数是由于各种微尺度效应作用的结果,这些效应主要有:流体的可压缩性、表面粗糙效应、主要作用力变化效应、几何形状和尺度效应、表面静电效应、轴向导热效应及测量误差造成的效应等<sup>[1-2]</sup>。

温度是研究热传递及器件热性能的重要测量参数,其测量精度直接影响实验结果的准确程度。微系统及微结构几何尺寸的减小给温度的精确测量带来了许多困难,在现有的微通道流动沸腾换热中采用最多的还是热电偶直接测温法。最近几年有学者试着用其他非接触的测温法对壁面温度进行测量。如李云红<sup>[3-4]</sup>分析了用红外热像仪进行精确测温的条件,认为真实温度为50℃时,测温是足够准确的。近年来,用红外热像仪进行测温的方法得到了较多的应用<sup>[5]</sup>,特别是对一些无法用常规方法进行温度测量的场合,红外技术无疑是一种好的选择<sup>[6-7]</sup>。白明<sup>[8]</sup>等将非接触式温度测量方法引入到微尺度实验中,这种测量方法不会引起微管实验段温度分布的变化且不需要其它特别的装置。颜晓虹<sup>[9]</sup>等利用红外成像仪对不锈钢管内水的流动沸腾进行了外壁面温度的测量。结果表明,相比传统的热电偶测量方式,在微尺度实验中采用红外温度测量具有更高的可靠性。刘志刚<sup>[10]</sup>等用蒸馏水作为工质,采用红外成像仪加专用红外放大镜头对微型钢管表面温度场做了可视化实验研究,得到了内径为168 μm、外径为406 μm的微型钢管外表面温度场的分布

图,并在实验的基础上建立了简化的数学模型,通过推导获得了沿轴向的导热对内部对流换热的关系式。实验与理论分析表明,在微圆管单相流情况下,其轴向导热对管内对流换热影响很小,可以忽略不计。王涛<sup>[11]</sup>等则以红外测温仪测得液体在受热微槽表面的温度场分布,且对不同热流密度、微槽深度的情况做了分析。Hetsroni<sup>[12]</sup>等利用红外成像仪对微通道内液体的温度场分布做了可视化研究,观察发现当雷诺数( $Re$ )在10~100之间时, $Nu$ 会随着 $Re$ 变小而发生骤降。Krebs<sup>[13]</sup>等利用红外成像仪的测量结果分析了微通道中介质流动沸腾时通道壁温随时间和空间的变化关系,通过一系列与时间有关的数据分析得出,弹状流流过后会引起近2℃的温升。Bufone<sup>[14]</sup>等利用红外成像仪解决了对微通道内弯液面的观测,得出易挥发的液体在弯液面处发生的蒸发现象比在毛细管中发生的蒸发现象要明显的结论。Barber<sup>[15]</sup>采用了高灵敏度红外相机拍摄了微通道的外壁温,以此来分析微通道流动沸腾的稳定特性。

由于热电偶只能测量有限点的壁温值,无法反映整体温度分布,故本文用红外热像仪测量流动沸腾条件下微通道壁面的温度并对其结果进行研究,目的是通过壁温变化来分析管内两相流体的流型和换热情况。

## 2 试验系统

### 2.1 试验装置

本实验对原有的沸腾换热实验台进行了改进,整个试验系统包括制冷循环系统和实验工质循环系统。制冷循环系统主要由活塞式压缩机、蒸发器、冷凝器和盐水(载冷剂)箱及管道组成。其中蒸发器用来冷却载冷剂(载冷剂用来冷却储液筒及实验循环系统中的实验工质),盐水箱中存放的载冷剂是乙二醇溶液,溶液最低温度可达-20℃,冷凝器用自来水冷却。实验前须将盐水箱内的载冷剂冷却到-20℃,以保证进入流量计

的实验工质为液相。实验工质循环系统由屏蔽泵,观察镜、流量计、预热段、可视段、实验段、冷凝器和储液筒及管道组成。实验时,实验工质由屏蔽泵压出,经流量计、预热段、可视段和实验段,在预热段和实验段受热,形成汽液混合物或蒸汽,然后进入冷凝器由盐水箱中的载冷剂冷却成液体,再与储液筒中的液体混合(系统启动时),或单独被屏蔽泵吸入(实验时)加压,完成一个循环。本文采用红外成像仪测量了壁面平均温度。试验系统如图 1。

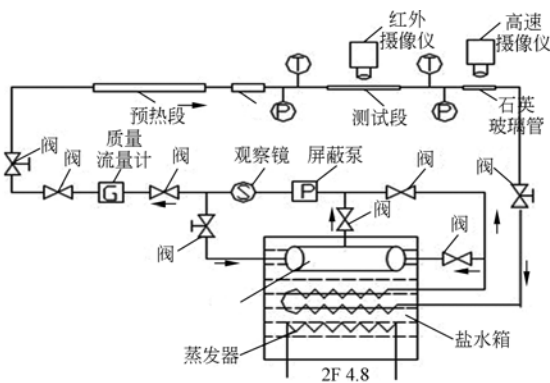


图 1 试验系统图

Fig. 1 Schematic of test system

## 2.2 实验试件

本论文中将特征尺寸在 1 mm 以内但又大于  $1 \mu\text{m}$  的通道称为微尺度通道。根据课题的研究需要,专门设计加工了不锈钢单圆管作为实验段,试件外径  $d_o=1.22 \text{ mm}$ ,内径  $d_i=0.86 \text{ mm}$ ,管长 200 mm。

## 2.3 红外测试原理

红外系统本质上是一个光学-电子系统,用于接收波长  $0.75 \sim 1000 \mu\text{m}$  的电磁辐射。它的基本功能是将接收到的红外辐射转换为电信号,通过测定物体的红外辐射大小来确定物体的温度。红外仪器和可见光仪器的工作原理几乎相同,红外成像是被动地接收物体红外辐射而成像的,用灰度表示物体的温度分布。红外图像局部具有较强的空间相关性,物体热图像由物体自身辐射所形成,反映了物体自身的辐射能力。

## 2.4 TH5104 红外摄像仪介绍

试验中使用的 TH5104 温度跟踪仪是一种非接触式的高灵敏度红外热成像仪,便于携带,能

对被测物辐射的红外能量进行光学扫描。红外热成像仪可将光学扫描得到的温度信号转换成二维的数据信号,输出得到一组热像图(温度分布图)。模拟信号通过探测器反馈进入控制器,并在 LCD 监测器上显示彩色或黑白的热图像。

表 1 TH5104 测试视场表

Tab. 1 Test visual field of TH5104

测试距离 /m	最小可检测尺寸 /mm(L)×mm(V)	水平扫描 范围/m	垂直扫描 范围/m
0.300	0.894×0.894	0.137	0.137
0.500	1.33×1.33	0.211	0.211
1.00	2.43×2.43	0.400	0.400
5.00	11.23×11.23	1.89	1.89
10.0	22.23×22.23	3.74	3.74

表 1 列出了 TH5104 的测试视场在不同的测试距离下的具体值。另外试件(不锈钢管)外表面的发射率根据文献[16]选取为  $\epsilon=0.6$ 。同时,为了验证红外摄像仪测温的精确度,在管子外表面粘上了 5 对热电偶(直径 0.05 mm),两种测温结果的误差为  $0.3 \sim 0.9 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

## 3 实验结果及数据分析

红外热像仪是利用被测物体表面所发出红外线的强度来感知被测物体温度大小的,其所感知的被测物红外线的强弱除受到被测量物体表面温度的影响外,还受到被测物体的表面材质和状况、被测物体大小以及镜头与被测量物体的距离等因素的影响,为了较为精确地使用红外技术测量微小物体的温度,必须仔细考虑以上因素。

图 2 列出了质量流量( $G$ )为  $2590 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ,热流密度( $q$ )由低到高的红外图像。可以看出在低热流密度下,温度沿轴向逐渐升高,当热流密度增大到  $120 \text{ kW/m}^2$  时,整体温度分布比较均匀,没有出现局部温度特别高的情况。热流密度上升到  $150 \text{ kW/m}^2$  时,图中 a 点的温度开始逐渐升高,出现了与热流密度  $65 \text{ kW/m}^2$  相反的布局。

图 3 列出质量流量为  $3453 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$  时热流密度由低到高的红外图像。在热流密度为  $120 \text{ kW/m}^2$  时,整个试件的温度分布越来越均匀,说

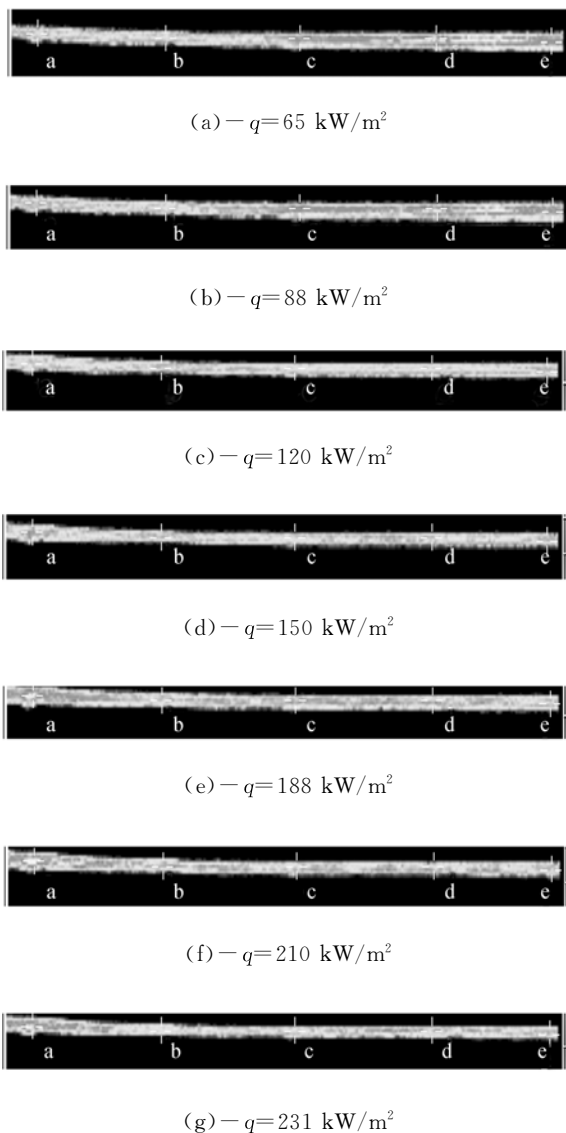


图 2 壁面温度沿轴向分布图( $G=2\ 590\ \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ )  
Fig. 2 Axial distribution of wall temperature ( $G=2\ 590\ \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ )

明此时流型单一, 换热方式以一种为主。当热流密度上升到  $150\ \text{kW/m}^2$  时, 出现了局部温度高局部温度低间隔的过程, 这是因为有两种流型在间隔交替变化的缘故。当热流密度在  $188 \sim 210\ \text{kW/m}^2$  之间时, 只有在最末端的温度较低, 说明 e 点周围已达到了剧烈的核态沸腾阶段。随着热流密度提高到  $231\ \text{kW/m}^2$  时, 该剧烈的核态沸腾前移到 b 点附近。

图 4 列出质量流量为  $6\ 908\ \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$  时热流密度由低到高的红外图像。观察可知: 温度分布情况都是前低后高; 只有当热流密度为  $231\ \text{kW/m}^2$  时, 前半段有几小块温度高的区域, 有可

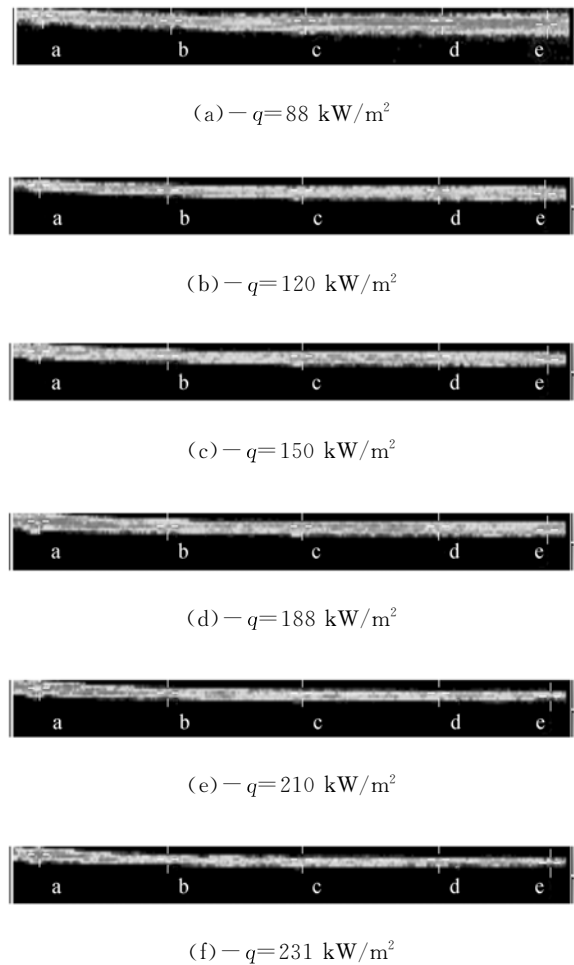


图 3 壁面温度沿轴向分布图( $G=3\ 453\ \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ )  
Fig. 3 Axial distribution of wall temperature ( $G=3\ 453\ \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ )

能是该处的质量干度很高, 换热效果减弱。

图 5 列出质量流量为  $8\ 635\ \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$  时热流密度由低到高的红外图像, 比较可知: 热流密度为  $88\ \text{kW/m}^2$  时, 前后半段的温度差减小, 这可能是质量流量增大促使整体的换热效果一致, 没有出现很大的温度差异。直到热流密度升到  $210\ \text{kW/m}^2$  时, 才出现后段温度明显高于前段。但热流密度等于  $231\ \text{kW/m}^2$  时, 又再次出现了整体温度较均匀的现象。

由以上 4 张图的分析可知: 当质量流量小于  $3\ 453\ \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$  时, 温度分布随热流密度的变化: 从前低后高到整体较均匀, 再到前高后低。当质量流量等于  $6\ 908\ \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$  时, 温度最高区没有移到最前端。最后当质量流量等于  $8\ 635\ \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$  时, 温度分布比较均匀, 这也说明了一个现象, 即在水平微尺度通道内流动沸腾过程中,

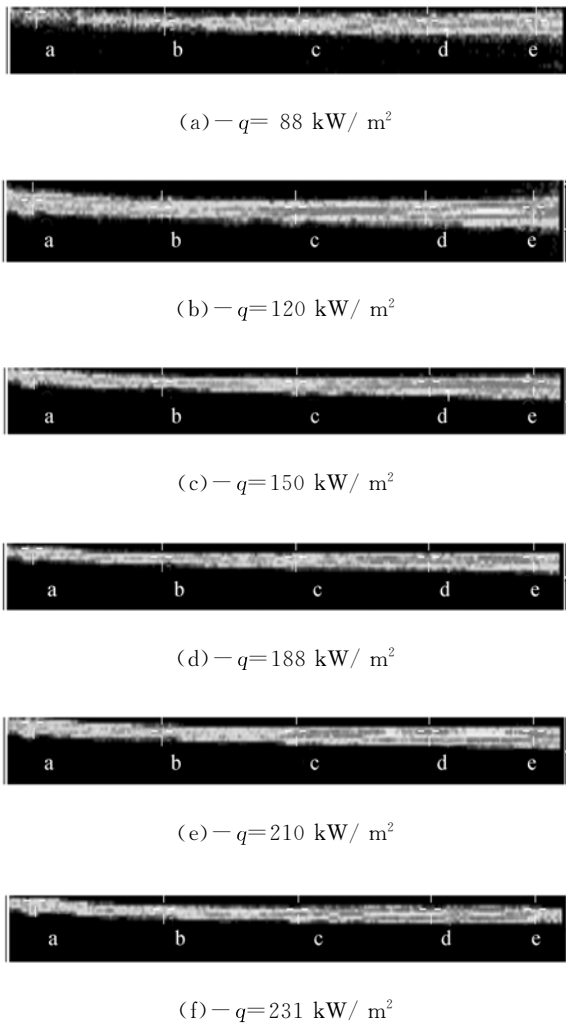


图 4 壁面温度沿轴向分布图( $G=6\ 908\ \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ )  
Fig. 4 Axial distribution of wall temperature ( $G=6\ 908\ \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ )

前后端有较大的温差效应,且热流密度的大小决定温差的正负方向。同时,可以得到这样的推断:在热流密度较小时,试验器件的壁面温度从左向右是升高的;热流密度较大时,壁面温度从左到右则是下降的。

以上 4 组工况下的红外图像定性地反映了试件壁面的温度分布特性。为了从定量上研究壁面温度的特性,本文导出了以上红外图像各个温度点的数据,得到了每张红外热图像的最大温度差值。获得了如图 6 的趋势,可知最大温差随着热流密度的增大而增大,倾斜度随质量流量的增大而增大。温差的最大值为  $10.2\ ^\circ\text{C}$ ,温差的最小值为  $4.9\ ^\circ\text{C}$ 。

为了直观地表示沿着管长方向试件截面平均温度的变化,本文在不同的质量流量和热流密

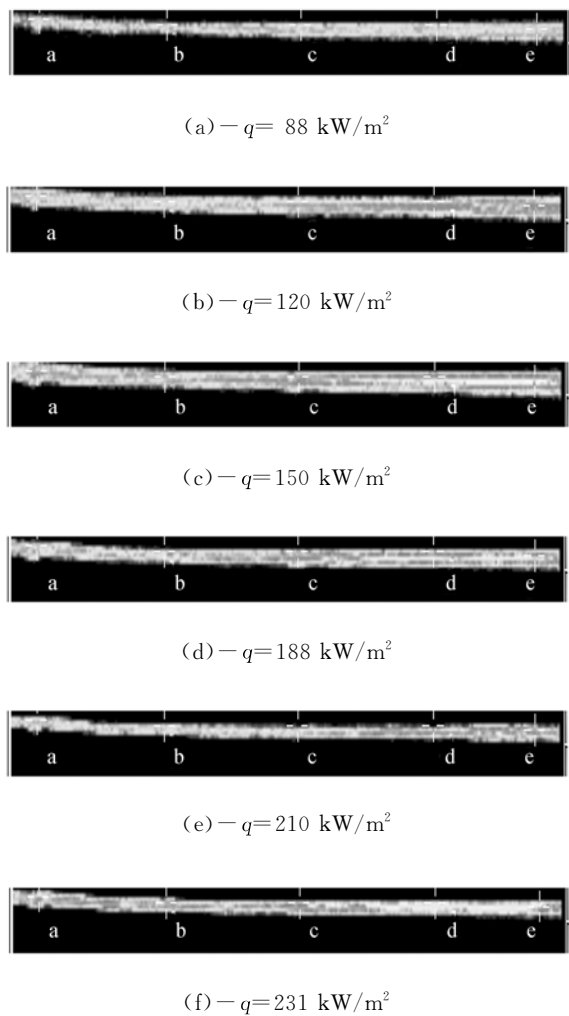


图 5 壁面温度沿轴向分布图( $G=8\ 635\ \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ )  
Fig. 5 Axial distribution of wall temperature ( $G=8\ 635\ \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ )

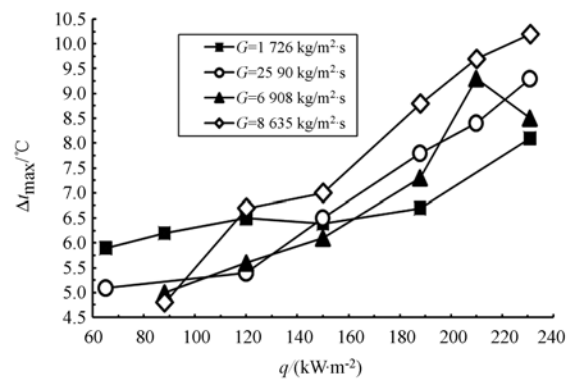
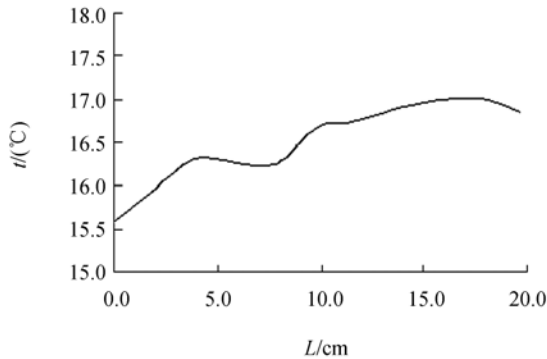


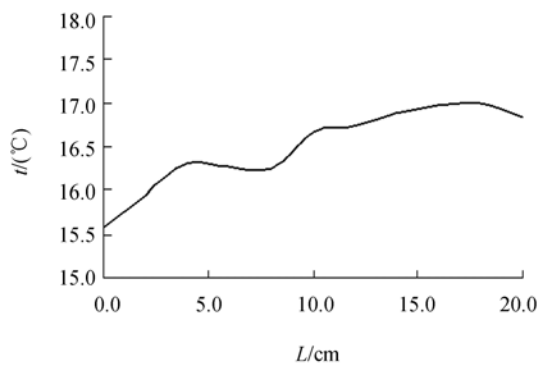
图 6 壁面最大温差随热密度的变化  
Fig. 6 Maximum wall temperature variation with heat flux

度情况下,绘制出沿着管长方向不同截面的平均温度变化趋势(见图 7)。

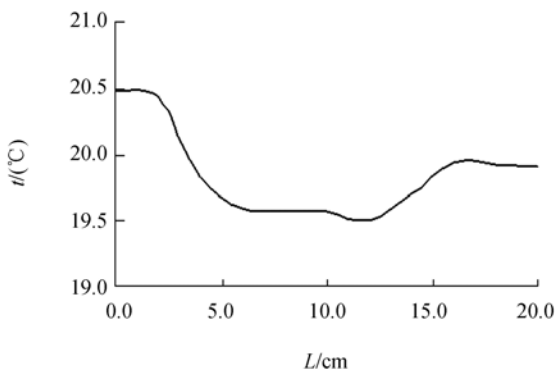
通过红外图像与曲线图的分析对比可以看出: 在低质量流量和低热流密度情况下, 温度变化程度相对较小, 如图 7(a), 可以推测这个阶段流



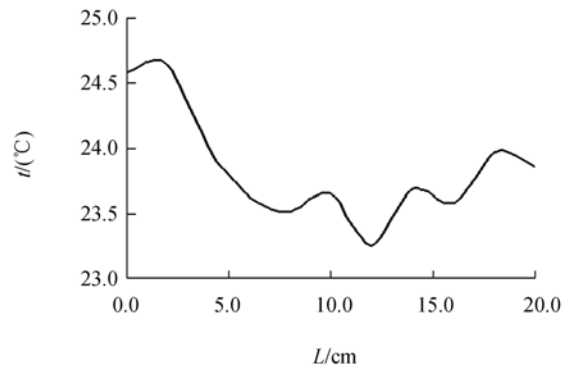
(a) 壁面温度变化( $G=1\ 726\ \text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ,  $q=65\ \text{kW}/\text{m}^2$ )  
(a) Variation of wall temperature at  $G=1\ 726\ \text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ,  $q=65\ \text{kW}/\text{m}^2$



(b) 壁面温度变化( $G=2\ 590\ \text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ,  $q=210\ \text{kW}/\text{m}^2$ )  
(b) Variation of wall temperature at  $G=2\ 590\ \text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ,  $q=210\ \text{kW}/\text{m}^2$



(c) 壁面温度变化( $G=6\ 908\ \text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ,  $q=188\ \text{kW}/\text{m}^2$ )  
(c) Variation of wall temperature at  $G=6\ 908\ \text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ,  $q=188\ \text{kW}/\text{m}^2$



(d) 壁面温度变化( $G=8\ 635\ \text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ,  $q=231\ \text{kW}/\text{m}^2$ )  
(d) Variation of wall temperature at  $G=8\ 635\ \text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ,  $q=231\ \text{kW}/\text{m}^2$

图 7 微通道管外表面平均温度沿程变化图

Fig. 7 Average wall temperature of microtube

型比较单一。在中等质量流量和中等热流密度时, 如图 7(b), 温度变化逐渐出现高低相互交错的现象, 出口段温度比较低, 这与图 7(a) 中现象截然不同。当质量流量和热流密度都比较大时, 沿程壁面温度变化波动比较大, 如图 7(c) 和(d)。

### 4 结 论

本文研究了混合制冷工质在微通道内的沸腾换热特性, 得出以下结论: (1) 水平微尺度通道内工质流动沸腾过程中, 前后端有较大的温差效应, 最大温差随热流密度的增大而增大。热流密度的大小决定了温差的正负方向, 在热流密度较小时, 壁面温度从左向右是升高的; 热流密度较大时, 壁面温度从左到右则是下降的。(2) 壁面温度沿着轴向分布规律性较好而且其分布特点与微道内的流型和工质物性状态有密切关系。流型比较单一时, 壁面温度变化较为缓和; 两种流型在间隔交替变化时, 壁面温度出现局部温度高/局部温度低间隔变化的过程; 到达核态沸腾阶段时, 只有在最末端的壁面温度比较低。(3) 在低质量流量  $G=1\ 726\ \text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$  和低热流密度  $q=65\ \text{kW}/\text{m}^2$  的情况下, 壁面温度变化比较缓和; 在中等质量流量  $G=2\ 590\ \text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$  和中等热流密度  $q=210\ \text{kW}/\text{m}^2$  时, 壁面温度变化高低相互交错; 当质量流量和热流密度两者都比较大时, 如  $G=6\ 908\ \text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$  和  $G=8\ 635\ \text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$  而  $q=188\ \text{kW}/\text{m}^2$  和  $q=231\ \text{kW}/\text{m}^2$  时, 壁面温度变化波动比较

大。(4)红外摄像技术用来测量微管的温度时,虽然会有一定的测量误差,但却有助于分析管内流

动沸腾时的流体传热情况,且对预测管内两相流的流型有很大帮助。

#### 参考文献:

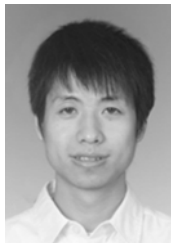
- [1] GUO Z Y, LI Z X. Size effect on microscale single-phase flow and heat transfer[J]. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 2003,46(1):149-159.
- [2] 张鹏,付鑫,王如竹. 微通道内流动沸腾的研究进展[J]. *制冷学报*, 2009,20(2):1-7.  
ZHANG P, FU X, WANG R ZH. Review on flow boiling in micro-channels[J]. *Journal of Refrigeration*, 2009, 20(2):1-7. (in Chinese)
- [3] 李云红,孙晓刚,原桂彬. 红外热像仪精确测温技术[J]. *光学精密工程*, 2007,15(9):1336-1341.  
LI Y H, SUN X G, YUAN G B. Accurate measuring temperature with infrared thermal imager[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(9):1336-1341. (in Chinese)
- [4] 李云红,张龙,王延年. 红外热像仪外场测温的大气透过率二次标定[J]. *光学精密工程*, 2010,18(10):2143-2150.  
LI Y H, ZHANG L, WANG Y N. Second calibration of atmospheric transmission coefficients on temperature measurement of infrared thermal imager in fields[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10):2143-2150. (in Chinese)
- [5] 孙晓刚,李云红. 红外热像仪测温技术发展综述[J]. *激光与红外*, 2008,18(2):101-105.  
SUN X G, LI Y H. Review of the development of temperature measurement technology with infrared thermal imager[J]. *Laser & Infrared*, 2008,18(2):101-105. (in Chinese)
- [6] 邓国明. 电气设备过温红外远程在线监测系统在线监测系统在变电站的应用[J]. *激光与红外*, 2010,40(11):1211-1215.  
DENG G M. Application of network thermal imaging system in power transformer substation for over-heating electronic instrument[J]. *Laser & Infrared*, 2010,40(11):1211-1215. (in Chinese)
- [7] 丁金伟,张葆,李永刚,等. 气象测云红外成像系统的设计与分析[J]. *光学精密工程*, 2008,16(12):2429-2435.  
DING J W, ZHANG B, LI Y G, et al.. Design and analysis of infrared imaging system for cloud meteorological observation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(12):2429-2435. (in Chinese)
- [8] 白明,崔新雨,侯延进. 非接触式温度测量方法在微尺度实验中的应用[J]. *科技信息*, 2008(22):79-80.  
BAI M, CUI X Y, HOU Y J. Application of non-contact temperature measurement in microscale experiments[J]. *Informations of Science and Technology*, 2008(22):79-80. (in Chinese)
- [9] 颜晓虹,唐大伟,王际辉. 利用红外温度测量方式预测微管内流动沸腾流型[J]. *工程热物理学报*, 2006,27(4):679-681.  
YAN X H, TANG D W, WANG J H. Evaluation on flow boiling patterns in an opaque microtube by infrared radiometry[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2006,27(4):679-681. (in Chinese)
- [10] 刘志刚,徐建中,赵耀华. 微型钢管外表面温度场可视化实验研究[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2006,23(3):318-322.  
LIU ZH G, XU J ZH, ZHAO Y H. A visual experimental study on surface temperature field in stainless steel microtube[J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2006,23(3):318-322. (in Chinese)
- [11] 王涛,胡学功,唐大伟. 微槽群内汽液界面温度分布的红外热成像[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2008,36(10):129-132.  
WANG T, HU X G, TANG D W. Infrared thermal images of vapor-liquid interface's temperature distribution in microgrooves[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2008, 36(10):129-132. (in Chinese)
- [12] HETSRONI G, GUREVICH M, MOSYAK A, et al.. Surface temperature measurement of a heated capillary tube by means of an infrared technique[J]. *Measurement Science and Technology*, 2003, 14: 807-814.
- [13] KREBS D, NARAYANAN V, LIBURDY J, et al.. Spatially resolved wall temperature measurements during flow boiling in microchannels[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2010, 34:434-445.
- [14] BUFFONE C, SEFIANE K. IR measurements of interfacial temperature during phase change in a confined environment [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2004,29:65-74.

- [15] BARBER J, SEFIANE K, BRUTIN D, *et al.*. Hydrodynamics and heat transfer during flow boiling instabilities in a single microchannel[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(7):1299-1308.
- [16] HOLMAN J P. *Heat Transfer*[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
- HOLMAN J P. *Heat Transfer*[M]. Beijing:Mechanical Industrial Press, 2005. (in Chinese)

#### 作者简介:



马虎根(1950—),男,浙江宁波人,博士,教授,1987年、2002年于上海理工大学分别获得硕士和博士学位,主要从事高效换热器、微尺度传热、相变换热和强化传热等方面的研究。E-mail: mahugen406@hotmail.com



谢荣建(1983—),男,福建福州人,2006年于郑州轻工业学院获学士学位,2009年于上海理工大学获硕士学位,主要从事强化传热和相变换热的研究。E-mail: lian996701@163.com



涂文静(1988—),女,湖北武汉人,硕士研究生,2010年于武汉工程大学获得学士学位,主要从事强化换热及相变换热的研究。E-mail: tcolour@163.com



白健美(1984—),女,陕西榆林人,2007年于西安建筑科技大学获学士学位,2010年于上海理工大学获硕士学位,主要从事强化传热的研究。E-mail: baijianmei0502@163.com

#### ●下期预告

## 光学元件数控非接触式超光滑加工机床设计

李显凌

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,吉林 长春 130033)

开展光学元件表面超光滑加工方法和技术研究,对于微电子装备等的发展具有十分重要的现实意义。本文提出了一种数控非接触式光学元件表面超光滑液体抛光新方法,通过磨头中心孔为抛光表面提供抛光液,抛光液在磨头自转的带动下与光学元件表面相互作用,从而实现光学元件表面材料的微量去除。利用计算机控制抛光磨头的运动轨迹就能够对平面、球面、非球面光学元件表面进行抛光。根据所提原理,设计和研制出数控非接触光学元件表面超光滑加工机床样机,样机直线运动轴最低进给速度为 0.000 1 m/s、定位精度为 0.008 mm,摆动轴最低转速为 0.002 8 rpm、定位精度为 15",进行了实验验证,结果表明,经过 20 min 的超光滑加工,熔石英材质光学元件的表面粗糙度 Ra 值分别由加工前的 1.03 nm 和 0.92 nm 提高到加工后的 0.48 nm 和 0.44 nm。