文章编号:1001-2060(2015)01-0012-07

# 微通道轴向导热的拉曼测温实验研究及数值模拟

林 莹<sup>1</sup> ,于新海<sup>2</sup>

(1. 上海应用技术学院 机械工程学院 ,上海 201418;

2. 华东理工大学 机械与动力工程学院承压系统与安全教育部重点实验室 ,上海 200237)

摘 要: 建立了使用共焦显微拉曼光谱图的微尺度水温测量 方法,并用于单相水的对流传热实验。将实验与数值模拟相 结合,研究了微通道内轴向导热对流体的传热影响。研究发现,通道入口处壁面热通量最大、液温和壁温均呈非线性发展; 局部 Nu 数曲线出现奇异点,且奇异点位置随着雷诺数 的增大往出口处移动; 努塞尔数随着雷诺数的增大而增大。

关键词:微通道;拉曼光谱;轴向导热

中图分类号: TK124 文献标识码: A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.01.006

A-面积 m<sup>2</sup> *c*<sub>p</sub>─比热 J/(kg • K) D<sub>h</sub>一水力直径 ,m *h*─传热系数 W/(m<sup>2</sup> • K) I─信号强度 a.u. L—通道长度 ,m L<sub>th</sub>一热入口长度 ,m m一质量流率 kg/s P一功率 W q----热通量 ,W/m<sup>2</sup> Q一体积流量  $m^3/s$ T—温度 K M-Maranzana number Nu---努塞尔数 Re-雷诺数 λ--导热系数 ,W/(m・K) μ-动力粘度 kg/(m・s) ρ一密度 kg/m<sup>3</sup> 下标 a—大气环境 f—流体 fe-自然对流 heat—加热 s—固体 w一壁面  $in - \lambda \Box$ out—出口

引 言

近年来的研究表明,宏观传热学理论之所以无 法很好地解释微尺度下传热现象 ,是因为微尺度下 如入口效应、耦合传热、粘性耗散、双电层效应、受温 度影响的物性、表面粗糙度等尺度效应极大地影响 了传热过程<sup>[1]</sup>。其中,耦合传热主要是考虑了固体 壁面的导热问题。微尺度下壁面厚度相对通道尺度 来说可以比拟,壁面的轴向导热就应该被考虑。 Maranzana 等定义了无量纲数 M 为固体导热量与流 体对流传热量的比值<sup>[2]</sup> 经数值分析认为 M < 0.01 时轴向导热能被忽略。Gamart 等通过实验与数值 模拟研究了矩形微通道内的轴向导热与入口效 应<sup>[3]</sup> 发现当水力直径小于1 mm 努塞尔数显著下 降。Celata 等实验分析了圆管的传热参数发现小雷 诺数下努塞尔数低于经典值<sup>[4]</sup>。而轴向导热的研 究主要还是通过数值模拟来实现的。Nonino 等用 有限元方法研究圆管内壁面导热率、壁厚、入口长度 和出口热损失对层流对流传热的影响<sup>[5]</sup>。Moharana 等研究发现轴向导热能够增加入口热通量<sup>[6]</sup>。Rahimi 等用数值计算研究了轴向导热对局部努塞尔 数的影响<sup>[7]</sup>,并得到努塞尔数关联式。

这些研究大多都是通过数值方法进行的,即使 是实验研究也是依赖于传统的热电偶测温技术,所 得到的温度数据精度较低。为了提高精度,一些全 局温度扫描的方法,如热色液晶和荧光法被成功应 用于微通道传热的研究<sup>[8-10]</sup>。然而这些方法都需 要在流体中添加显色物质。本研究提出将拉曼光谱 引入微通道传热实验用于测量水温,真正实现非接 触测量。利用所得温度数据验证轴向导热的数值计 算结果。

收稿日期: 2014 - 01 - 16;修订日期: 2014 - 03 - 17

基金项目:上海高校青年教师培养资助计划(ZZyyy12036);上海应用技术学院引进人才基金项目(YJ2012 - 14) 作者简介:林 莹(1983 -), 友 福建泉州人,上海应用技术学院讲师.

## 1 实验部分

## 1.1 测试段结构

微通道形成于 PDMS(聚二甲基硅氧烷)与硅之 间。测试段结构如图 1 所示,聚四氟乙烯夹具一方 面为热沉引流,另一方面将加热器紧紧贴合于热沉 底部。蛇形加热器由镍铬合金材料经线切割工艺获 得。在加热器与热沉之间添加云母片保证绝缘。



图1 测试段结构图

Fig. 1 Sructural drawing of the test section

针对轴向导热问题,选用导热系数大的硅作为 微通道热沉的基底材料;通道上表面要求透光以方 便拉曼测量,则选用廉价的 PDMS 作为盖板材料。 微通道形成于 PDMS 盖板上,方便使用简单的软刻 蚀工艺。整体的热沉制作包括模具制备、PDMS 成 型、硅上铝薄膜制作、PDMS 与硅基底键合,如图 2 所示。其中 200 nm 厚的铝薄膜的制作方法可参见 文献[11] 实验中拉曼光谱只在这些位置上测量可 避免激光热效应。考虑到下一步的键合工艺为手工 操作,对准性很难保证到微米级的误差,因此铝薄膜 只沿流动方向等距布置,每个独立的铝薄膜长度略 小于通道宽度,而宽度仅为 10 μm。微通道横截面 宽1 mm、高 0.09 mm,长 40 mm。

## 1.2 传热实验装置

实验系统如图 3 所示 整个系统处于 22 ℃的恒 温环境下。测试段放置于拉曼光谱仪的载物台上, 采集水的拉曼光谱图与测量的准确定位都由计算机 控制。加热器两端经引线接入直流稳压电源,施加 于加热器上的电压电流由数字万用表准确获得,并 计算为加热功率,保证微通道热沉得到恒定热通量。 实验所用介质为充分除去不粘性气体的去离子水, 所需的体积流量由双柱塞微量泵提供。待系统稳定 后,在布有铝薄膜横截面上(即沿通道宽度方向)进 行多点的拉曼光谱采集,同时记录测点坐标。由于 拉曼光谱的深度分辨率较差,采集得到的水的拉曼 光谱图认为是深度方向的平均信号。经数据关联可 得实际温度值。实验得到的水温将与数值模拟结果 对比 以确保数值模拟的可靠性。



#### 图 2 微通道热沉的制作工艺流程

Fig. 2 Flow path for fabrication process of microchannel heat sinks



图3 实验系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the test system

#### 2 数值模拟

为验证实验结果 数值模拟考虑需要入口效应、 轴向导热与随温度变化的物性3个主要因素。而根 据 Morini 所提出判据在本实验条件下粘性耗散可 忽略<sup>[12]</sup> 建面粗糙度小于1 μm 因此表面粗糙度可 以忽略即认为壁面光滑。基于以上几个尺度效应的 考虑 建立 PDMS – 硅的微通道热沉的三维计算模 型 如图4 所示。整体具有对称性 因此只建立一半 的几何结构。由于 PDMS 导热系数小,省略 PDMS 的几何体。固体域尺寸为 60 mm ×12.5 mm ×0.4 mm,流体域尺寸为 40 mm ×0.5 mm ×0.09 mm。 流动计算角度,所考察的是层流状态下水的对流传 热,因此流动为稳态、层流、不可压缩流动,可忽略重 力。传热计算角度,由于通道尺寸较大,忽略粘性; 忽略辐射传热;固体只涉及热传导,而硅导热系数基 本不随温度变化,以148 W/(m・K)的恒定值进行 计算;流体(水)在单相范围内,物性随温度变化较 大,将如表1所示的物性与温度的函数关系代入 计算。



图 4 传热计算模型 Fig. 4 Heat transfer calculation model

## 基于以上假设耦合求解以下守恒方程。 质量守恒( 连续性) 方程:

$$\nabla \cdot (\rho_{\rm f} u) = 0 \tag{1}$$

$$\nabla(\rho_{\rm f} \, u u) = - \nabla p + \nabla \cdot (\mu_{\rm f} \, \nabla u) \tag{2}$$

流体的能量守恒方程:

λ

$$\nabla \cdot \left( \rho_{\rm f} \stackrel{\rightarrow}{u} T \right) = \nabla \cdot \left( \frac{\lambda_{\rm f}}{c_{\rm pf}} \nabla T \right) \tag{3}$$

固体的能量守恒方程:

$$\int_{S} \nabla^2 T = 0 \tag{4}$$

数值模拟使用商业软件 ANSYS CFX 11(流体 分析及仿真),基于有限体积法进行三维计算。入 口为质量流速条件,出口恒定 0.1 MPa 的压力,无滑 移的壁面条件。恒定入口温度 T = 295.15 K 和无能 量传递的出口,流体域的侧壁与顶面为绝热条件,底 面与固体域的温度和热通量传递的耦合由 ANSYS CFX 处理。恒定热通量施加于实验中加热器大小 的区域,如图 4 中双点划线的区域,位于硅底面通道 正下方,宽于微通道,而长度方向的边界离微通道的 进出口分别为 5 mm。热通量  $q_{heat}$ 为加热功率除以 加热器面积  $A_{heat}$ ,见式(5);顶面(与 PDMS 连接面) 为绝热条件;其它壁面为空气自然对流,其中传热系 数为 10 W/(m<sup>2</sup> • K)<sup>[13]</sup>,空气环境温度  $T_a$ 以 295.15 K估计。

$$q_{\rm heat} = P/A_{\rm heat} \tag{5}$$

流体域初始条件: 速度为 0 ,温度为 295.15 K; 固体域初始条件: 温度为 295.15 K。计算残差小 于 10<sup>-6</sup>。

流体域与固体域分别建立网格单元,其中流体 域由六面体单元组成、数量为 2.0×10<sup>6</sup>,固体域由 四面体单元组成、数量为 5.98×10<sup>6</sup>,在流体与固体 连接面及其对称面进行局部加密。为验证网格无关 性,网格总数量再提高 20%,对于研究范围内的截 面平均水温的改变小于 0.1%、对 Nu 数的改变小于 0.5%。

	表1	水的物性	14]
Tab. 1	Physical	properties	of water <sup>[14]</sup>

物性名称	与温度的函数关系		
密度/kg•m <sup>-3</sup>	$\rho(T) = 219.91154 + 6.89062T - 0.01917T^2 + 1.61033 \times 10^5T^3$		
动力粘度/kg・( m・s) <sup>-1</sup>	$\mu(T) = 0.001788 \times (T/273.15)^{-5.84962}$		
比热/J・(kg・K) <sup>-1</sup>	$c_p(T) = 8.94519 - 0.03951T + 1.06492 \times 10^{-4}T^2 - 9.25926 \times 10^{-8}T^3$		
	$\lambda(T) = 6.33972 - 0.10481T + 6.77695 \times 10^{-4}T^2 - 2.04509 \times 10^{-6}T^3 + 2.96466 \times 10^{-9}T^4 - 1.67699 \times 10^{-12}T^5$		

## 3 结果与讨论

## 3.1 拉曼光谱图的处理与数据分析

水的 OH 对称和非对称伸缩振动使得液态水在

2 700 -4 000 cm<sup>-1</sup>波数范围产生拉曼散射信号,且 其拉曼谱图随水温的改变而呈现出规律的变化: 位 于高波数段的非结合氢(NHB) OH 伸缩峰随着温度 的上升而增强,而低波数段的结合氢(HB) OH 伸缩 峰则随着温度上升而减弱。图 5 为室温下水的拉曼 光谱图,根据 Walrafen 等报导水的拉曼峰在 3 403 cm<sup>-1</sup>波数的拉曼强度不随温度变化<sup>[15]</sup>,于是在这一 位置将水的拉曼峰分割,图中左边(2 700 – 3 403 cm<sup>-1</sup>)的峰面积为结合氢 OH 伸缩峰的强度( $I_{HB}$ ), 右边(3 403 – 4 000 cm<sup>-1</sup>)的峰面积为非结合氢 OH 伸缩 峰的强度( $I_{NHB}$ ),它们与温度具有如下 关系<sup>[16]</sup>:

 $ln(I_{NHB}/I_{HB}) = C_1 \cdot T + C_2$  (6) 式中:  $C_1 \cdot C_2$  一待定系数。将所有水的拉曼光谱图 处理后,与热电偶示值建立关系作图 6,关联度  $R^2 = 0.998$  1。



图 5 室温下水的拉曼光谱图

Fig. 5 Raman spectrum of water at the room temperature





实验中采集到的拉曼光谱需要先进行处理,这 是因为 PDMS 会产生很强的拉曼信号干扰,如图 7 (a) 所示,样品在 2 850 – 3 000 cm<sup>-1</sup>的波数范围内 出现了干扰峰。参考 Sarrazin 等报导的方法<sup>[17]</sup>,在 相同的微通道内通入硅油(在采集波数段下不出 峰) 在相同的聚焦深度下采集得到图 7(a) 中的 PDMS 光谱。引入两个定值参数 α、β,可以将水的 光谱信号表达成与图 7(a) 两种信号的关系:

$$I_{\rm H_2O} = I_{\rm sample} - \alpha (I_{\rm PDMS} + \beta)$$
(7)

修正处理后的拉曼光谱信号如图 7(b)所示。 将实验得到的所有拉曼光谱图进行修正处理后,再 关联温度数据。



Fig. 7 Raman spectrum

3.2 实验结果及与数值模拟的对比

将实测与模拟的水温数据相比较,如图 8 所示, *x* 为被测截面与通道入口的距离。图中的实验数据 点为该轴向位置截面上所有测得温度的平均值,误 差棒为该截面上所有温度数据的标准偏差,模拟结 果的数据点则为该截面上所有节点温度的平均值。 在相同的质量流率 *m* = 0.058 3 g/s,如图 8(a) - 图 8(c) ,实验结果与模拟预测具有较高的吻合度;而 进一步比较相同加热功率下的图 8(b)、图 8(d) 和 图 8(e) ,只有在质量流率减小到 0.023 5 g/s 才发 现实验数据偏离模拟的预测值,这可能是由于流量 越小 相同加热功率下所产生的温度越高,PDMS 两 侧的温度梯度就越大,PDMS 上的导热量越大,而 PDMS 的导热在模拟中被忽略,而产生了图 8(e) 的 偏离。另外,由图 8 还可以看出,冰温的变化均呈现 非线性发展 .便否定了以流体进出口温度线性插值 估算局部液温的方法。随着流量的减小 ,水温发展 的非线性程度越明显,壁温逐渐接近水温甚至发生 曲线交叉,这是轴向导热问题的显著体现<sup>[2]</sup>。





Fig. 8 Temperature distribution under various operating conditions

### 3.3 轴向导热的影响

图9为固体与流体连接面所在平面上的温度分 布图。流体入口处持续进入冷流体,使得这一区域 温度最低。由于微通道处于硅基底的中心,冷流体 在微通道中流过,固体发生严重导热来补偿流体所 需的热量,于是等温线以微通道为中心发展。在微通道附近呈弯曲状的等温线表明温度梯度同时存在于轴向与径向。而远离微通道的固体区域等温线则较直,只存在轴向的温度梯度。总体上,轴向的温度梯度远大于径向的,因此轴向导热的贡献更大。



m = 0.058 3 g/s) Fig. 9 Atlas showing the overall temperature (P = 6.33 W m = 0.0583 g/s)

为讨论轴向导热的影响,模拟了多个雷诺数下的耦合传热。首先提取流体与固体连接面的法向热 通量如图 10 所示,显然最大热通量出现在通道入口 处,而沿轴向方向显著下降 *Re* = 20 时在下游 *x/L* ≈ 0.8 之后出现负值,即流体往固体传热,Tiselj 等也 报导过相似的现象<sup>[13]</sup>,而热通量变号也只能在三维 耦合传热模拟中才能捕捉到。由于总输入功率较 小,负热通量的数值不大。



图 10 壁面热通量分布

Fig. 10 Wall surface heat flux distribution

局部 Nu 数是传热问题的关键参数,它沿轴向的分布情况如图 11 所示。

对于恒热通量单壁加热条件,宽高比无限大的 通道 Nu 数的经典值为 5.39,且宽高比越小,Nu 数 越小<sup>[18]</sup>。依此推断,本研究所讨论的微通道截面 1 mm × 0.09 mm,Nu 数应小于5.39,在所有考察的 雷诺数范围( $1 \le Re \le 500$ )内局部 Nu 数均在 4 – 5 之间,认为模拟结果合理。



(8)

局部 Nu 数沿轴向的发展存在奇异点,奇异点 出现的位置随着雷诺数的增加而越来越靠近出口 处。奇异点的出现是由于在这个位置上通道内壁温 度比主体水温低,于是这一内壁面(即水与硅接触 面)上的热通量方向发生反向变化,热量反向由流 体进入固体壁面,如图 10 的讨论。图 8(e)的质量 流率0.023 5 g/s 产生的雷诺数约为 50,可以看出在 出口处水温与壁温的曲线十分接近且有微弱交叉, 即壁温略低于水温,导致了图 11 中 Re = 50 时奇异 点出现在出口处,又一次证明了上述局部 Nu 数出 现奇异点的原因。而在更大的 Re 数下 Nu 数没有 发生突变,这是由于 Re 数逐渐增大可以削弱直至消 除轴向导热效应。

平均努塞尔数与雷诺数的关系如图 12 所示。 总体上 *Nu* 数随着 *Re* 数的上升而上升 ,是由于入口 效应与轴向导热共同作用的结果。入口效应在大雷 诺数下影响显著 相反地 轴向导热在小雷诺数下影 响显著 ,很难分离讨论。根据 Incropera 等给出的式 (8)估计入口长度<sup>[18]</sup> ,在 *Re* = 500 时入口长度已达 到 24.44 mm 占通道总长度的 61.1%。



图 12 努塞尔数与雷诺数

Fig. 12 Nusselt number vs. Reynolds number

4 结 论

将共焦显微拉曼光谱测量水温的技术应用于水的单相对流传热研究,得到了轴向导热作用下水温 分布;与模拟结果相比证明了数值结果的可靠性,并 利用数值模拟对轴向导热问题进行研究。

结果表明,轴向导热的存在使得液温和壁温均 呈非线性发展;壁面热通量最大值出现在通道入口 处;局部出现液温高于壁温的情况,使得热量反向由 流体传递给固体,导致局部 Nu 数曲线出现奇异点; 且随着雷诺数的增大,奇异点往出口处移动;由轴向 导热和入口效应共同作用导致 Nu 数随着 Re 数的 上升而上升;基于传统 NS 方程和能量方程的数值 模拟,在全面考虑了尺度效应的前提下,能够准确可 靠地描述单相对流传热问题。

#### 参考文献:

- Rosa P ,Karayiannis T G ,Collins M W. Single-phase heat transfer in microchannels: The importance of scaling effects [J]. Applied Thermal Engineering 2009 29(17-18): 3447-3468.
- [2] Maranzana G Perry I Maillet D. Mini-and micro-channels: influence of axial conduction in the walls [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2004 47(17-18): 3993-4004.
- [3] Gamrat G ,Favre-Marinet M ,Asendrych D. Conduction and entrance effects on laminar liquid flow and heat transfer in rectangular microchannels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2005 A8(14): 2943 – 2954.
- [4] Celata G P ,Cumo M ,Marconi V ,McPhail S J ,Zummo G. Microtube liquid single-phase heat transfer in laminar flow [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2006 49(19-20):3538 - 3546.
- [5] Nonino C ,Savino S ,Del Giudice S ,Mansutti L. Conjugate forced convection and heat conduction in circular microchannels [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow ,2009 ,30 (5): 823 -830.
- [6] Moharana M K ,Agarwal G ,Khandekar S. Axial conduction in single-phase simultaneously developing flow in a rectangular minichannel array [J]. International Journal of Thermal Sciences , 2011 50(6):1001-1012.
- [7] Rahimi M ,Mehryar R. Numerical study of axial heat conduction effects on the local Nusselt number at the entrance and ending regions of a circular microchannel [J]. International Journal of Thermal Sciences 2012 59(0):87 - 94.
- [8] Rao M ,Khandekar S. Simultaneously Developing Flows Under Conjugated Conditions in a Mini-Channel Array: Liquid Crystal Thermography and Computational Simulations [J]. Heat Transfer Engineering 2009 30(9):751-761.
- [9] Chamarthy P ,Garimella S V ,Wereley S T. Measurement of the temperature non-uniformity in a microchannel heat sink using microscale laser-induced fluorescence [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2010 53(15-16): 3275-3283.
- [10] Huang C-Y , Wu C-M , Chen Y-N , Liou T-M. The experimental investigation of axial heat conduction effect on the heat transfer analysis in microchannel flow [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2014 70(0): 169 – 173.
- [11] Lin Y ,Yu X ,Wang Z ,Tu S-T ,Wang Z. Measurement of temperature-dependent diffusion coefficients using a confocal Raman microscope with microfluidic chips considering laser-induced heating effect [J]. Analytica Chimica Acta 2010 667(1-2):103-112.

(下转第156页)

的顶棚管上方,减少了应力集中。自2011年4月完 成高温再热器出口异种钢焊口改造至今,高温再热 器运行正常,没有出现异种钢焊口泄漏的问题,彻底 解决了异种钢焊口位置设计不合理的缺陷。

## 7 结 论

锅炉高温再热器出口异种钢焊口由于结构设计 不合理,同时焊口焊接完成后未进行热处理,管排间 距不均匀,造成异种钢焊口处产生较大的拉应力,长 时间运行导致焊口处产生裂纹。通过焊口位置上 移,彻底解决了异种钢焊口设计缺陷,提高了锅炉设 备的利用率,保证机组安全可靠长周期运行。

#### 参考文献:

- [1] 吕玉坤,王 建,卢 权,等. 电厂锅炉高温再热器泄漏原因分析与对策[J]. 锅炉技术 2008,39(4):58-61.
  LU Yu-kun, WANG Jian, LU Quan, et al. Analysis of the causes and countermeasures for leakages from the high temperature reheaters of a utility boiler [J]. Boiler Technology, 2008, 39(4):58-61.
- [2] 李 鹏, 郭军, 徐德录. T91 钢及其异种钢焊接接头裂纹敏感性 分析[J]. 电力建设, 1999, 39(7): 20-23.

LI Peng GUO Jun ,XU De-lu. Sensitivity analysis of the cracks at the welding joint between T91 steel and other kinds [J]. Electric Power Construction ,1999 ,39(7):20-23.

[3] 杜文敏.火电厂金属材料焊接技术与管[M].北京:中国电力 出版社.2012.

DU Wen-min. Welding technologies for metal materials in thermal power plants and management [M]. Beijing: China Electric Power Press 2012.

- [4] Ska W ,Keny F S. Microstructure and Properties of Nippon Fire-Resistant Steels [J]. Journal of Materials Engineering and Performance ,1999 ,10(8): 117 - 120.
- [5] ROBERTS D I Performance of Dissmilar Welds in Service [J]. Journal of Pressure Vessel Technology ,1985 ,107(8):247 - 254.
- [6] 许江晓. 马氏体钢与奥氏体钢的焊接工艺 [J]. 焊接技术,
   2010 ρ5(7):4-41.
   XU Jiang-xiao. Martensitic steel and austenitic steel welding technology [J]. Welding Technology 2010 ρ5(7):4-41.
- [7] 李 勇. TP347H 与 T91 异种钢焊接性能分析[J]. 广东电力, 2007 20(7):19-21.
  LI Yong. Analysis of the welding performance between the TP347H and T91 steel material [J]. Guangdong Electric Power, 2007, 20

(陈 滨 编辑)

#### (上接第18页)

- [12] Morini G L. Scaling effects for liquid flows in microchannels [J]. Heat Transfer Engineering 2006 27(4):64 - 73.
- [13] Tiselj I ,Hetsroni G ,Mavko B ,Mosyak A Pogrebnyak E Segal Z.
   Effect of axial conduction on the heat transfer in micro-channels
   [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer ,2004 ,47 (12-13):2551-2565.
- [14] 王国栋. 微通道内稳定流动沸腾的特性及沸腾不稳定性研究
  [D]. 上海: 上海交通大学 2008.
  WANG Guo-dong. Investigation of the boiling characteristics and boiling instability of a steady flow in a microchannelD]. Shang-hai: Shanhai Jiao-tong University 2008.
- [15] Walrafen G E ,Hokmabadi M S ,Yang W H. Raman isosbestic points from liquid water [J]. Journal of Chemical Physics ,1986 ,

85(12):6964.

(7): 19 - 21.

- [16] Walrafen G E ,Fisher M R ,Hokmabadi M S ,Yang W H. Temperature dependence of the low- and high-frequency Raman scattering from liquid water [J]. Journal of Chemical Physics ,1986 85 (12):6970.
- [17] Sarrazin F ,Salmon J B ,Talaga D ,Servant L. Chemical reaction imaging within microfluidic devices using confocal Raman spectroscopy: The case of water and deuterium oxide as a model system [J]. Analytical Chemistry 2008 80(5): 1689 - 1695.
- [18] Incropera F P ,DeWitt D P ,Bergman T L ,Lavine A S. Fundamentals of heat and mass transfer [M]. 6th ed. : New York: John Wiley 2006.

(陈 滨 编辑)

ertial stage of a gas turbine. Firstly through the test obtained were the separation characteristic data of the inertial stage and then through a numerical simulation of the discrete phase a qualitative analysis was made of the main mechanism controlling the separation of salt content in the flow passages of the device and factors influencing the separation characteristics. A comparison of the test data with the numerical simulation ones show that the separation efficiency of the separation device in the inertial stage can reach approximately 97% the maximal value being 98. 71% and the minimal value being 95.90% nearing to the full separation. To increase the guide blade interval can somewhat reduce the separation efficiency and to increase the initial speed at the inlet can somehow increase the separation efficiency. **Key Words**: inertial stage experimental study separation characteristics discrete phase numerical simulation

微通道轴向导热的拉曼测温实验研究及数值模拟 = Experimental Study of the Raman Temperature Measurement of the Axial Heat Conduction Inside a Micro-channel and Its Numerical Simulation [刊,汉]LIN Ying (College of Mechanical Engineering ,Shanghai Applied Technology College ,Shanghai ,China ,Post Code: 201418) ,YU Xin-hai (Education Ministry Key Laboratory on Pressurized Systems and Safety ,College of Mechanical and Power Engineering ,East China University of Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200237) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 30(1). -12-18

Proposed was a method for micro-scale measuring water temperature based on the confocal microscopic Raman spectrum and used was the method in question in the convection heat transfer test of single-phase water. In combination of the test with the numerical simulation the authors studied the influence of the heat conduction in the axial direction inside a micro-channel on the heat transfer of the fluid. It has been found that the heat flux on the wall surfaces at the inlet of the micro-channel is maximal and the liquid and wall temperature all assume a nonlinear development. A singular point will locally appear on Nu number curves and its location will shift to the outlet with an increase of the Reynolds number. In addition the Nusselt number will increase with an increase of the Reynolds number. **Key Words**: micro-channel Raman spectrum axial heat conduction

双侧强化管池沸腾传热试验及数据处理方法 = Pool Boiling Heat Exchange Experiment of a Tube Intensified at Both Sides and Its Data Processing Method [刊,汉]OUYANG Xin-ping ,LIN Meng ,YUAN Dao-an (Refrigeration Technology Research Institute ,Shanghai University of Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200093) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(1). - 19 - 23