

歧管式微通道流动特性的研究

刘启明 夏国栋 刘青 马晓雁 马重芳

(传热强化与过程节能教育部重点实验室, 北京工业大学环能学院, 北京 100022)

摘要 歧管式微通道(MMC)热沉具有热阻小、结构紧凑、冷却液流量小、流速低、沿流动方向温度分布均匀等优点。本文针对以去离子水为介质的歧管式微通道(宽 $W = 100 \mu\text{m}$, 深 $H = 300 \mu\text{m}$)的流动特性进行了实验研究, 实验的雷诺数范围为 $50 \sim 3500$ 。结果表明工质在微通道内流态由层流向紊流转变的临界雷诺数提前, 此外数值模拟结果与实验值也吻合较好。最后在实验基础上, 拟合出工质在层流和紊流下的流动阻力经验关联式。

关键词 歧管式微通道; 压降; 摩擦系数; 实验关联式

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2007)01-0080-03

INVESTIGATION ON FLOW CHARACTERISTICS IN A MANIFOLD MICROCHANNEL (MMC)

LIU Qi-Ming XIA Guo-Dong LIU Qing MA Xiao-Yan MA Chong-Fang

(College of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Technology, The Key Laboratory of Ministry of Education, Beijing 100022, China)

Abstract The manifold microchannel (MMC) heat sinks have many advantages such as low thermal resistance, compact structure, little amount of coolant, low flow rate, uniform temperature distribution along the flow direction and many others. Experiments are conducted to investigate flow characteristics of water through a MMC (width= $100 \mu\text{m}$, height= $300 \mu\text{m}$), where the Reynolds Number range from 50 to 3500. Experimental results indicate that the critical Reynolds Number transited from the laminar flow to turbulent flow is in advance. Furthermore, the results given by numerical simulation are almost the same to those of experiments. Based on the experiments, the flow resistance empirical correlations are obtained in laminar flow and turbulent flow regions.

Key words microchannel; pressure drop; friction factor; empirical correlation

1 引言

微冷却器的发展源于解决高度集成电路的散热问题, 主要目的是为了降低电子设备因过热而发生故障损坏的机率, 同时提高电子设备性能及可靠度。其中, 微通道热沉已被证实是传热性能最佳且最具应用潜力的冷却方式之一。目前, 普遍公认的两种有代表性的微通道热沉是: 传统微通道型(TMC)和歧管微通道型(MMC)。

近年来国内外许多研究者开展了针对 TMC 热沉内流体流动和换热的研究工作。Tuckerman 和 Pease 最早于 1981 年研究了水受迫流过直接加工在电子芯片背面的微槽道的冷却性能^[1], 其研究发现流体在微槽道中的摩擦系数比经典理论中预计的略高。辛明道等对 6 种不同尺度的微矩形槽道内的受

迫流动阻力和换热性能进行了研究^[2], 测出冷态水流动时流态转变雷诺数临界值为 $Re = 1400 \sim 1800$ 。

与 TMC 热沉相比, MMC 热沉具有热阻小、结构紧凑、冷却液量小、流速低、沿流动方向温度分布均匀等优点。Copeland 等^[3]测试了一系列不同几何参数的 MMC 热沉, 研究了热沉结构以及冷却剂流量对热沉性能的影响。夏国栋等^[4]用 Fluent 软件对用于激光二极管列阵冷却的 MMC 热沉进行三维数值优化, 结果表明热沉结构对热阻、泵功、激光二极管列阵表面温度分布有重要影响, 特别是微通道进出口宽度对泵功影响很大。

上述工作从总体上看, 微尺度通道内的流动和传热研究目前还处于起步阶段, 许多问题尚未澄清。虽然已证实微通道内流动和传热与常规尺度下情况

收稿日期: 2005-12-05; 修订日期: 2006-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(No.50476035); 北京市自然科学基金(No.3052004); 北京市教委科技发展项目(No.KM200410005008)

作者简介: 刘启明(1982-), 男, 湖北荆州人, 硕士研究生, 主要从事强化传热及其在高新技术中的应用研究

不同,但由于实验误差和分析比较基础不同,不同研究者研究结果不同,有的甚至相差很大。

本文采用实验的研究方法,对歧管式微通道内流体的流动状况进行了详细研究,实验测定出工质在微通道内由层流向紊流转变的临界雷诺数并拟合出工质在层流和紊流区流动阻力特性经验关联式。

2 实验设备和研究方法

本文研究的歧管式微通道选用价格低廉且导热系数高的无氧紫铜作为基板,采用精密线切割技术在铜片中央刻出一道长 10 mm 宽 100 μm 的微通道。同时采用两块有机玻璃板作为铜片的上下盖板,并用数控机床在有机玻璃板上对应微通道两端和中部处分别铣出三道截面积相等的导流槽道,并将铜片和两块有机玻璃盖板接合封装成封闭的流道。

实验工质为去离子水,储存在恒温水槽中的去离子水经平流泵升压后送入实验系统,经过滤器过滤后进入试验件,从试验件流出的水进入液体收集器,经电子天平称重校核后重新注入恒温水槽中以循环使用。图 1 为系统流程图,实验系统测试模块采用自带液晶显示流量装置的平流泵作为压力源。为避免杂质堵塞微通道,在实验件进口前安装最小过滤膜孔径为 10 μm 的过滤器。系统取压方式是在试验件进口和出口段上分别开两个 0.8 mm 的测压孔以连接引压管,采用 Rosemount3051C 型差压变送器测量实验件进出口的压差,系统管路用耐高压的 PVC 塑料尼龙管进行连接。

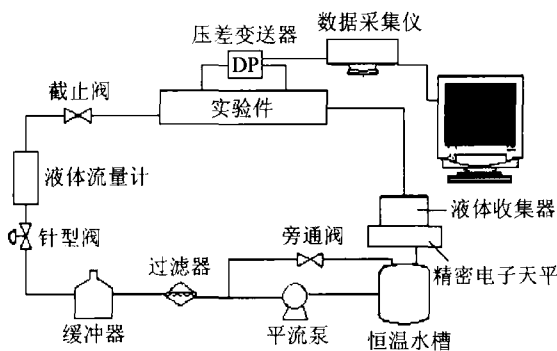


图 1 系统流程图

微通道截面的尺寸为 $W \times H = 100 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$, 通道长 $L = 11 \text{ mm}$; 流量范围为 $Q = 0 \sim 80 \text{ ml/min}$, 流速范围为 $U = 0.28 \sim 22 \text{ m/s}$, Re 数变化范围为 $50 \sim 3500$ 。去离子水流量由计量泵液晶屏显示,同时采用电子称重法进行校核;进出口压差则由数据采集仪 (HP34970A) 采集并储存在计算机中便于分析。

实验步骤为逐渐增加去离子水流量,并在每次

调节流量后观察数据采集仪压降波动情况,待压降出现小幅的周期性波动时记录 200 个左右的数据。分析压降时取采样数据的平均值,采样时间间隔为 3 s。测量中去离子水流量测量值偏差 $\pm 0.5\%$, 压降测量值偏差 $\pm 1.5\%$ 。整个实验过程中系统压降波动较小,最大波动不超过 2%。

3 实验结果及分析

实验系统工质的流速 u 、雷诺数 Re 、水力直径 D_h 和摩擦阻力系数 f 的计算公式如下:

$$u = Q / (W \cdot H) \quad (1)$$

$$D_h = 2WH / (W + H) \quad (2)$$

$$Re = UD_h \rho / \mu \quad (3)$$

$$f = 2D_h \Delta p / (\rho U^2 L) \quad (4)$$

流体进入微通道前进口段和出口段流速较低,但在微通道进出口处流道突然收缩扩大,从而产生较大的压力损失。此外由于流体进入微通道后直接以高速冲击微通道底部,之后流体速度方向由垂直折为水平方向进入流体分配器上部的水平直通道后流体陡然交汇从出口流出,此过程也带来不小的压力损失。文献 [5] 认为,冷却液流经歧管式微通道的总压降中只有不到 10% 是由微通道引起的,而大约 90% 损失产生于通道转弯处,其中 13% 为摩擦损失,26% 为流体陡然交汇,61% 为流体在直角通道改向。

由上面分析可知歧管式微通道中局部阻力非常大,相对于微通道的沿程压降,它不可忽略。为了计算摩擦系数 f 必须知道微通道沿程压降 Δp ,由于微通道尺寸太小很难在上面直接取压,只能在实验中测得整个系统的进出口压差,而它包括了不可忽略的局部阻力,所以先通过实验得出微通道的局部阻力以求得微通道的沿程压降从而计算出 f 。将局部阻力的实验值与数值模拟结果相比较,所得结果见图 2 和图 3。

由图 2 可以看出数值模拟的结果与实验值吻合较好,偏差小于 12%。从图 3 则可看到随着雷诺数 Re 增加,沿程阻力逐渐减小而局部阻力逐渐增大, Re 大于 3300 时局部阻力大于沿程阻力。由此可推断若 Re 继续增加局部阻力将超过沿程阻力而占主导地位,这与文献 [5] 给出的结论是一致的。

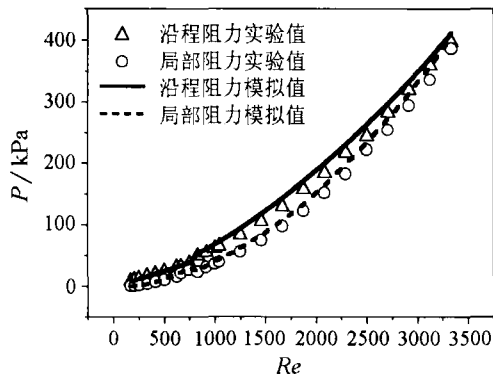


图2 沿程阻力和局部阻力大小的比较

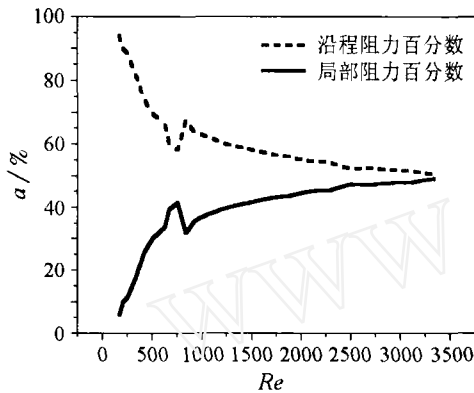


图3 沿程阻力和局部阻力份数的比较

将摩擦系数 f 实验值与理论值和数值模拟结果进行比较, 所得结果见图4和图5。由图可以看出对于本文所研究的歧管式微通道, 流态发生转变的临界雷诺数 Re_{cr} 出现在800左右, 远低于常规尺寸下矩形通道内的转变值 $Re_{cr}=2300$, 也低于文献[2]所给的 $Re_{cr}=1400\sim 1800$ 且 Re 在1250附近时流动已基本进入充分发展的紊流区, 表明在本实验条件下层流向紊流转变的临界雷诺数提前。同时从图中还可看出, 数值模拟结果与实验值仍吻合较好, 大多实验点偏差小于13%。

根据摩擦系数的实验值, 建立起微通道中工质流态为层流和紊流的经验关系式。

当 $Re < 800$ 时, 工质在微通道内的流动为充分

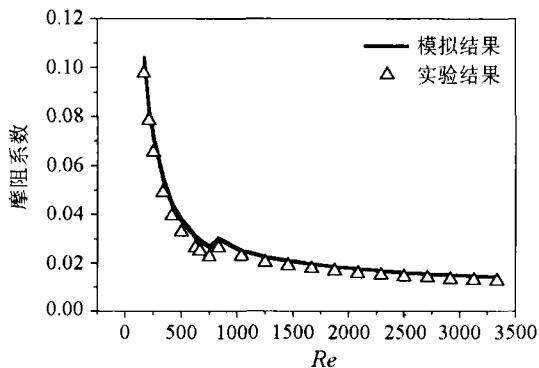


图4 微通道中摩擦阻力实验值与模拟计算结果对比(中间进水)

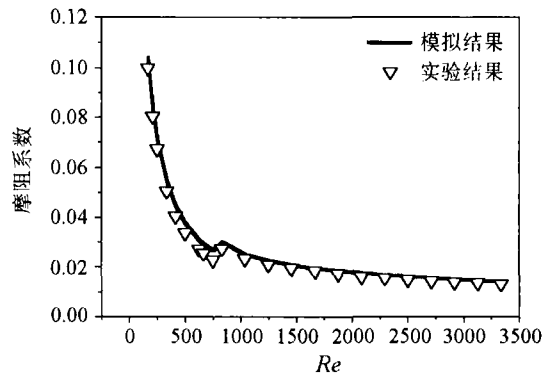


图5 微通道中摩擦阻力实验值与模拟计算结果对比(两端进水)

发展层流, 得出层流区的经验关系式:

$$f = 12.79Re^{-0.95} \quad (5)$$

当 $Re > 1250$ 时, 工质在微通道内的流动进入紊流区, 得出紊流区的经验关系式:

$$f = 0.68Re^{-0.49} \quad (6)$$

由式(5)可以看出, 在微尺度下层流区阻力系数与雷诺数乘积不再是常数而是雷诺数的函数。

4 结 论

本文以去离子水为工质, 对宽 $100\ \mu\text{m}$ 微通道内的流体流动阻力特性进行了实验研究, 并对实验数据与经典理论计算值和数值模拟的结果进行了对比分析, 结论如下:

去离子水在歧管式微通道中的摩擦阻力系数 f 随着雷诺数 Re 的增大而减小, 去离子水在微通道内的流动流态由层流转向紊流的临界雷诺数提前, 出现在 $Re_{cr}=800$ 左右的位置, 临界雷诺数 Re_{cr} 远低于常规尺寸下的矩形通道内的转变值2300。在实验基础上建立起微通道中流态为层流和紊流的经验关联式, 从层流流态下的关联式可以看出, 阻力系数与雷诺数的乘积不再是常数, 而是雷诺数的函数。

参 考 文 献

- [1] Tuckman D B, Pease R F W. Ultrahigh Thermal Conductance Microstructures for Cooling Integrated Circuit. In: Proc. 32nd Electronics Components Conference. 1981. 145-150
- [2] 辛明道, 师普生. 微矩形槽道内的受迫对流换热性能实验. 见: 中国工程热物理学会第八届年会, 1992. 77-82
- [3] Copeland D, Takahira H, Nakayama W. Manifold Microchannel Heat Sink: Theory and Experiment, Therm. Sci. Eng., 1995, 3(2): 9-15
- [4] 夏国栋, 刘青, 王敏, 等. 歧管式微通道冷却热沉三维数值的优化. 工程热物理学报, 2006, 27(1): 145-147
- [5] Loosen P. Cooling and Packaging of High-Power Diode Lasers. in Book Entitled "High-Power Diode Lasers: Fundamentals, Technology, Applications", 2001. Springer