

研究论文

纳米流体在芯片微通道中的流动与换热特性

吴信宇, 吴慧英, 屈 健, 郑 平

(上海交通大学机械与动力工程学院动力机械与工程教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要: 对去离子水及体积分数分别为 0.15% 和 0.26% 的水基 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体在当量直径为 194.5 μm 的硅基梯形芯片微通道内的层流流动和换热特性进行了实验研究。考察了 Reynolds 数、Prandtl 数以及体积分数对流动换热的影响。结果发现, 使用纳米流体后, 压降无明显增加, 纳米流体的流动阻力特性与去离子水基本相同; 对流换热 Nusselt 数较去离子水有明显提高, 且随着体积分数的增加而增加; 相同泵功下换热热阻显著下降。实验还发现纳米流体的强化传热效果在较高温度时更加明显。根据实验数据得到了梯形硅微通道内低浓度纳米流体的层流对流换热关联式。研究结果对于集成高效芯片散热系统设计具有重要意义。

关键词: 纳米流体; 硅微通道; 对流换热; 强化换热; 流动阻力

中图分类号: TK 124

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2008) 09-2181-07

Flow and heat transfer characteristics of nanofluids in silicon chip microchannels

WU Xinyu, WU Huiying, QU Jian, ZHENG Ping

(School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: An experimental investigation was performed on the single-phase flow and heat transfer characteristics through silicon-based trapezoidal microchannels with a hydraulic diameter of 194.5 μm using deionized (DI) water and $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ nanofluids of volume fractions 0.15 % and 0.26 % respectively. The effects of Reynolds number, Prandtl number and nanoparticle concentration on the convective heat transfer characteristics were investigated. The results showed that the pressure drop and flow resistance for nanofluids and DI water were approximately the same, but the Nusselt number of nanofluids increased considerably as compared with that of DI water. With the same pumping power, using nanofluids instead of DI water caused the reduction in thermal resistance. It was also found that Nusselt number increased with the increase in nanoparticle concentration, and the heat transfer enhancement was more obvious at the higher bulk temperature of nanofluids. Based on the experimental data, a dimensionless correlation of Nusselt number was proposed. The results presented in this paper help to guide the design of high efficiency integrated chip cooling system.

Key words: nanofluids; silicon microchannels; convective heat transfer; enhanced heat transfer; flow resistance

2008-01-03 收到初稿, 2008-03-23 收到修改稿。

联系人: 吴慧英。第一作者: 吴信宇 (1982-), 男, 博士研究生。

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (NCET-06-0406); 上海市教委科研创新项目 (08ZZ10)。

Received date: 2008-01-03.

Corresponding author: Prof. WU Huiying. E-mail: whysrj@sjtu.edu.cn

Foundation item: supported by the Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-06-0406) and the Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission (08ZZ10).

引 言

近年来,随着微电子工业和 MEMS 技术的快速发展,电子芯片的高集成度所带来的高热流密度使其性能的进一步提高受到了制约,如何实现电子芯片的快速高效散热已成为研究的热点^[1]。由于传统的换热工质如水、矿物油和乙二醇等的热导率都较低,无法满足高热流密度电子冷却的需要,因此提高工质热导率成为研究新一代高效冷却技术的关键。1995 年美国 Argonne 国家实验室的 Choi 等^[2]提出纳米流体概念,是将纳米技术应用于热工领域的创新性研究。纳米流体是一种将固体纳米粒子分散到基液中形成的胶状混合物。由于分散的固体粒子的热导率一般比液体高出几个数量级,因此形成的纳米流体有较高的热导率^[3-5]。同时,由于分散的粒子尺度在纳米量级,不会带来像毫微米级粒子那样对器件的磨损问题,这使得纳米流体作为强化换热的新型工质受到了工程技术专家的重视。

目前,对于纳米流体在常规通道及普通毫米级小通道内的对流换热研究已取得了一些进展^[6]。李强等^[7]对当量直径为 1.29 mm 的小扁管进行了水-铜纳米流体的对流换热实验研究,发现相同 Reynolds 数下,换热得到强化,阻力并未明显增加。戴闻亭等^[8]对当量直径 0.68、1.01 和 1.28 mm 的细圆管进行了水基氧化铜纳米流体的对流换热实验研究,发现纳米颗粒的加入可以使流体的换热性能得到显著改善。Lee 等^[9]对当量直径 341 μm 铜基矩形微热沉内 Al_2O_3 纳米流体的换热特性进行了实验研究,发现纳米流体对于单相层流换热有强化效果,但在两相时,由于粒子沉积附着在通道壁,致使换热恶化。迄今,对当量直径小于 200 μm 的芯片微通道纳米流体的流动换热特性还很少有研究报道。

鉴于微电子芯片冷却对高效换热介质的需求,本文将开展当量直径小于 200 μm 芯片微通道中纳米流体流动换热特性的研究,考察不同 Reynolds 数、不同 Prandtl 数和不同体积分数对换热特性的影响,探索纳米流体强化芯片微通道传热规律,以期对高效微电子芯片冷却设计提供指导。

1 实验系统及方法

1.1 实验装置

实验装置如图 1 所示,主要由测试流体供给系

统、恒温系统、实验测试段、压力传感器(Druck,精度 0.06%)、稳压电源、数据采集系统和称重计量系统组成。储液罐中的工质在高压氮气压送下,依次经过流量调节阀、恒温水浴(精度 0.1℃)、过滤器和入口压力传感器,进入水平放置的平行硅片微通道测试段。流经测试段的工质平均质量流量由电子天平计量,天平精度为 0.01 g,秒表精度为 0.01 s。加热功率由高精度稳压电源提供,精度为 0.1%。

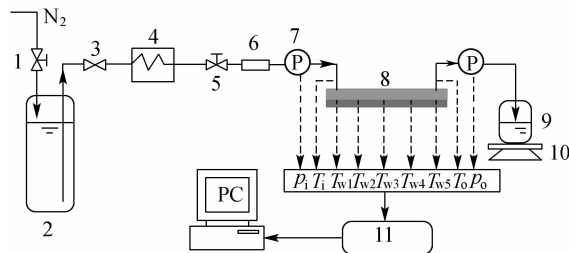


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

- 1—gas valve; 2—liquid tank; 3—liquid valve; 4—thermostat;
5—liquid mass flow controller; 6—filter; 7—pressure transducer;
8—test section; 9—liquid collection tank; 10—electronic balance;
11—data acquisition system

测试段(图 2)由硅片、热电偶、电绝缘层、加热丝以及保温层等组成,硅片底部沿通道方向均匀布置有 5 个热电偶测点(直径为 0.1 mm,精度为 0.1℃),用以测量硅片底面温度。加热薄片布置在硅片底面,并覆盖整个微通道区域。硅片和加热层中间布置有一层高导热性的电绝缘层,以保证热电偶信号不受干扰,如图 2(a)所示。为减少热损失,硅片四周及金属加热薄膜底部布置有绝热层。实验所用硅片微通道采用 MEMS 湿法刻蚀工艺加工而成,微通道截面为梯形,如图 2(b)所示,通道尺寸见表 1。

1.2 纳米流体的制备及物性

本实验采用两步法制备纳米流体,所使用的 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米粒子购自美国的纳米相公司(Nanophase Technologies Corporation),粒形为球状,平均粒径为 56 nm,样品的透射电镜照片如图 3 所示。由于实验中粒子的体积分数很小,又考虑到添加分散剂会对纳米流体物性如黏度、热导率等造成影响,故本实验中没有使用分散剂,而是利用静电稳定机制配制得到稳定的纳米流体。Lee 等^[10]的研究表明,纳米粒子表面荷电是影响纳米

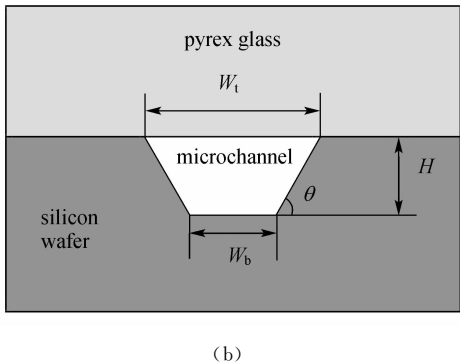
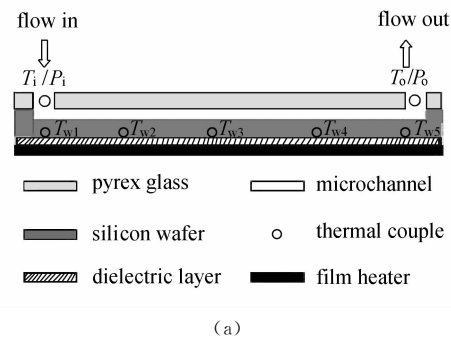


图 2 测试段简图

Fig. 2 Schematic diagram of test section

表 1 微通道尺寸

Table 1 Dimensions of microchannel

$W_t/\mu\text{m}$	$W_b/\mu\text{m}$	$H/\mu\text{m}$	$D_h/\mu\text{m}$	L/mm
447.1	219.6	152.8	194.5	30

流体性质的重要因素，基液的 pH 值直接影响了纳米粒子的表面荷电状况及其在胶体体系中的分布尺寸，通过改变基液 pH 值，可使低浓度的纳米流体具备良好的稳定性。本实验中先将去离子水的 pH 值调至 4.5，使其远离 Al_2O_3 纳米粒子的等电点，之后添加适量纳米粒子经超声振荡（120 W，40 kHz）配制而成，经试验，最佳超声时间约为 90 min。配制的纳米流体在使用前和使用后状况如图 4 所示，使用过程中未见任何沉淀，说明本实验所使用的纳米流体具有良好的分散性。

本文中纳米流体的物性采用式（1）～式（5）计算：

密度^[11]

$$\rho_{\text{nf}} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p \tag{1}$$

动力黏度^[12]

$$\mu_{\text{nf}} = \mu_f \frac{1}{(1 - \phi)^{2.5}} \tag{2}$$

运动黏度

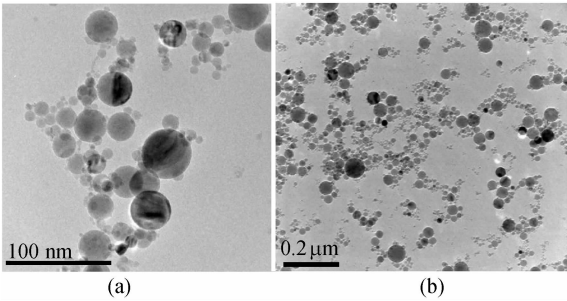


图 3 Al_2O_3 纳米流体电镜照片

Fig. 3 TEM image of Al_2O_3 nanoparticles suspended in water

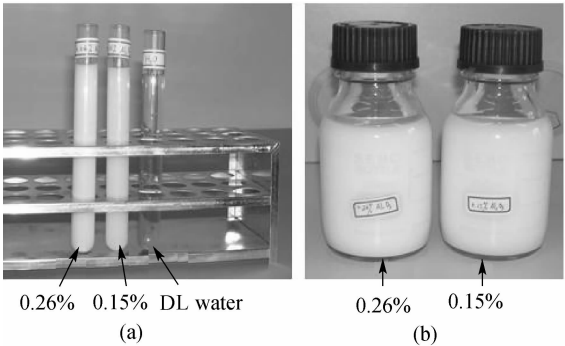


图 4 配制的 Al_2O_3 纳米流体

Fig. 4 Al_2O_3 nanofluid prepared

(a) before and (b) after experiment

$$\nu_{\text{nf}} = \frac{\mu_{\text{nf}}}{\rho_{\text{nf}}} \tag{3}$$

热导率^[13]

$$k_{\text{nf}} = \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)\phi}{k_p + 2k_f - 2(k_p - k_f)\phi} k_f \tag{4}$$

比热容^[14]

$$(\rho c_p)_{\text{nf}} = (1 - \phi)(\rho c_p)_f + \phi(\rho c_p)_p \tag{5}$$

1.3 数据处理与误差分析

1.3.1 流动特性 Reynolds 数计算式为

$$Re = \frac{\bar{u}D_h}{\nu} \tag{6}$$

其中

$$\bar{u} = \frac{M}{N\rho A_c} \tag{7}$$

其中，M 由电子天平计量得到。

摩擦阻力系数

$$f = \frac{\Delta p D_h}{2\rho L \bar{u}^2} \tag{8}$$

泵功

$$PP = \Delta p V = \Delta p M / (N\rho) \tag{9}$$

1.3.2 换热特性 Prandtl 数

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \tag{10}$$

流动工质与微通道壁面之间的平均传热系数可由下式计算

$$h = \frac{Q}{NA_w \Delta T_m}$$

(11)

其中, A_w 为对流换热面积, 即微通道下底和两侧总面积, 不包括微通道上表面绝热玻璃面积; Q 为流动工质带走的总热量

$$Q = Mc_p(T_o - T_i)$$

(12)

流体与壁面的平均温差由下式得出

$$\Delta T_m = \frac{1}{5}(T_{w1} + T_{w2} + T_{w3} + T_{w4} + T_{w5}) - \frac{1}{2}(T_i + T_o)$$

(13)

平均 Nusselt 数

$$Nu = \frac{hD_h}{k}$$

(14)

换热热阻定义为

$$R = \frac{\Delta T_m}{Q} = \frac{1}{NhA_w}$$

(15)

工质的所有物性参数均以 $(T_i + T_o)/2$ 为定性温度进行计算。根据实验仪器精度及误差传递原理, 可得到各测量值的最大相对误差, 见表 2。

表 2 测量误差

Table 2 Measurement errors

Parameter	Maximum error/ %	Parameter	Maximum error/ %
D_h	1.88	Pr	2.8
L	0.2	Re	6.5
M	0.98	f	8.9
Δp	1.11	Nu	7.8
$T_o - T_i$	0.73	R	7.5
ΔT_m	2.37	PP	2.3

2 实验结果与分析

本实验控制参数主要有: 工质流量、工质入口温度和加热功率。流量调节阀可改变流量, 同时实现 Reynolds 数的改变。通过恒温槽调节工质入口温度则可以控制换热的平均 Prandtl 数。

2.1 流动特性

纳米流体的流动阻力特性是影响其工程应用的重要因素。流动阻力特性实验在流体温度恒定 24℃ 时进行, Reynolds 数范围为 191~1020, 属层流范围。图 5 给出了相同体积流量下纳米流体与去离子水进出口压差的比较。由图可见相同体积流量下, 纳米流体进出口压差比去离子水略有增加, 但增加并不明显, 对 0.26% 纳米流体, 进出口压差平均增幅 3.5%, 最大不超过 5%, 说明低浓度的

纳米流体不会比水耗用过多的泵功; 体积分数对纳米流体进出压差影响不明显, 0.15% 纳米流体和 0.26% 纳米流体进出口压差相差小于 1%。为比较纳米流体与水的流动阻力特性, 绘制了图 6 所示的量纲 1 流动摩擦因数与 Reynolds 数关系图。从图中可以看出, 纳米流体摩擦因数与 Re 的变化关系与去离子水相似; 相同 Re 下, 纳米流体摩擦因数较去离子水略有增加, 但并不明显, 平均增幅 4.4%, 最大不超过 5.6%; 体积分数对纳米流体摩擦因数影响较小。

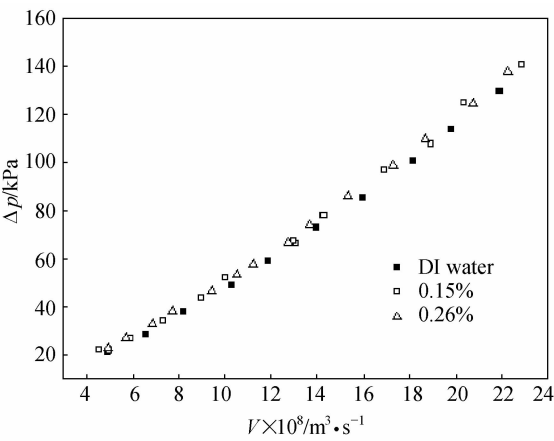


图 5 纳米流体和去离子水在相同体积流量下压降的比较
Fig. 5 Comparison of pressure drop between nanofluids and DI water

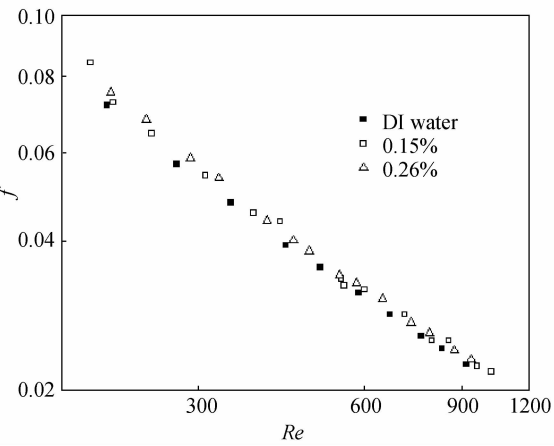


图 6 纳米流体和去离子水流动阻力特性比较
Fig. 6 Comparison of friction factor between nanofluids and DI water

2.2 换热特性

2.2.1 体积分数的影响 图 7 显示不同浓度纳米流体和去离子水在平均 Prandtl 数为 5.8 时的换热特性。由图可以看出芯片微通道内纳米流体和水存在相似的对流换热特性, 即 Nu 都随 Re 的增大而

增大；使用纳米流体以后，换热得到明显强化，且体积分数越大，纳米流体强化换热效果越明显。在实验范围内，体积分数 0.15% 的纳米流体换热 Nu 比去离子水增强 4.2%~5.7%，平均增强 5%；而 0.26% 的纳米流体则增强 10.1%~15.7%，平均增强 13%。其原因为：由于纳米流体的热导率比水高，且体积分数越大，热导率也越大；添加纳米粒子以后，由于粒子的微运动使得通道截面的温度分布更趋均匀；纳米粒子与微通道壁的相互作用使得换热边界层受到扰动，从而起到强化换热效果。

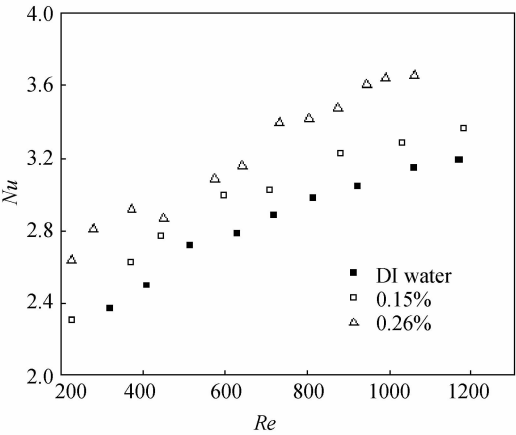


图 7 浓度对流动换热特性的影响

Fig. 7 Effect of nanoparticle concentration on Nu

流体换热性能的提高通常伴随耗用泵功的增加，为进一步评价纳米流体的强化换热效果，对相同泵功下纳米流体和去离子水的换热热阻进行了分析。图 8 表明在相同泵功下，纳米流体的换热热阻与去离子水相比有明显下降，且纳米流体的体积分数对热阻影响明显，浓度升高热阻下降。体积分数为 0.15% 和 0.26% 的纳米流体的热阻比去离子水平均分别下降了 4.8% 和 11.5%，显示了纳米流体作为强化换热工质的优势所在。从图中还可以看出，无论是去离子水还是纳米流体，其换热热阻均随泵功增加而减小，在低流量时，热阻随泵功增加下降较快，高流量时则趋于平缓，这一现象与文献 [15] 的数值模拟结果相似。

2.2.2 Prandtl 数的影响 图 9 通过改变入口温度和流量调节，分别得出体积分数为 0.15% 的纳米流体和去离子水在不同 Pr 和 Re 下的换热特性。由图可见：纳米流体 Nu 随 Pr 降低而降低，但比同等条件下去离子水有明显增加。计算表明，体积分数为 0.15% 的纳米流体在 $Pr=4.6$ 时换热平均增强 6.2%，在 $Pr=5.8$ 时换热平均增强 5.0%。

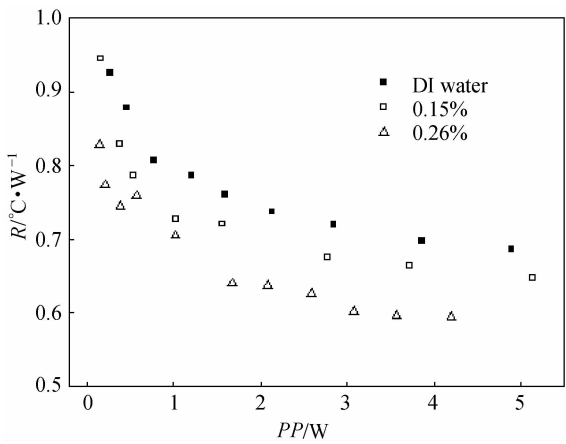


图 8 浓度对热阻的影响

Fig. 8 Effect of nanoparticle concentration on thermal resistance

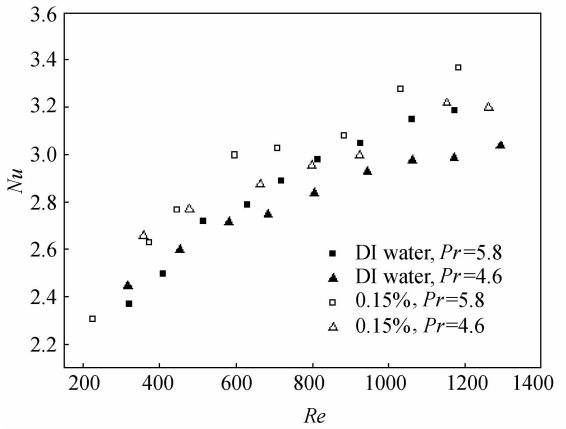


图 9 Prandtl 数对流动换热的影响

Fig. 9 Effect of Pr on Nu

这是由于在较低 Pr 时，流体平均换热温度较高，所对应的纳米流体热导率也较高^[16-17]，同时在较高温度时，纳米粒子的热运动更加剧烈，纳米粒子与微通道壁的作用也更加频繁，从而加快了热量的传递。图 9 还显示， Pr 对纳米流体和去离子水换热 Nu 的影响随 Re 的增加而更为明显。

图 10 为体积分数 0.15% 的 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体与去离子水在相同泵功下的换热热阻比较。图 10 表明使用纳米流体后，热阻下降较为明显。对于同一种工质， Pr 越小，换热热阻也越小，但是与纳米流体的体积分数对热阻的影响（图 8）相比， Pr 对换热热阻的影响相对较小。

2.2.3 实验关联式 根据实验数据拟合得到梯形硅微通道内低浓度纳米流体层流对流换热准则关联式如下

$$Nu = 0.566(1 + 100\phi)^{0.57} Re^{0.20} Pr^{0.18} \tag{16}$$

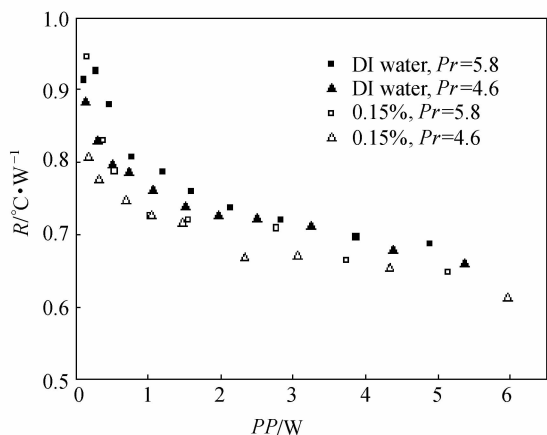


图 10 Prandtl 数对换热热阻的影响

Fig. 10 Effect of Pr on thermal resistance

拟合值与实验值的比较如图 11 所示, 平均绝对偏差为 2.4%, 最大正偏差为 6.7%, 最大负偏差为 -4.8%, 拟合相关系数 0.94, 说明上式能较好地预测实验结果。式 (16) 适用于本实验段尺寸、低浓度 ($\phi \leq 0.26\%$) 下 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体在梯形硅微通道中的层流对流换热 Nu 的预测, 其中 Re 范围 200~1300, Pr 范围 4.6~5.8, 对于其他范围的适用性有待验证。

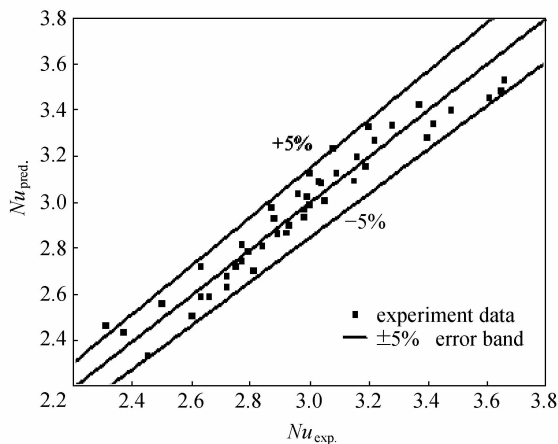


图 11 Nusselt 数预测值与实验值的比较

Fig. 11 Comparison between predicted and experimental value of Nu

微通道内纳米流体的对流换热还处于初步研究阶段, 由于微尺度效应, 硅微通道内纳米流体的换热机理与常规通道有所不同。在微通道内, 纳米粒子本身的微运动以及其与微通道壁面的相互作用对流动换热的影响比常规通道显著, 深入的物理解释有待进一步研究。

3 结 论

对去离子水、体积分数分别为 0.15% 和 0.26% 的水基 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体在当量直径为 194.5 μm 的梯形硅基微通道内的层流流动和换热特性进行了实验研究, 得到以下结论。

(1) 使用低浓度 ($\phi \leq 0.26\%$) 的纳米流体, 微通道进出口压降与去离子水相比基本相同, 流动阻力特性与去离子水相似。

(2) 无论是去离子水还是纳米流体, 硅微通道内 Nusselt 数都随着 Reynolds 数和 Prandtl 数的增加而增大, 纳米流体体积分数是影响换热的重要因素, 浓度越大, 换热越强; 纳米流体的强化换热效果在较低 Prandtl 数时, 即流体平均温度较高时有所增强。

(3) 热阻随流量增加而减小, 且在低流量时减小得较快, 高流量时则趋于平缓; 相同泵功条件下, 纳米流体换热热阻比去离子水有明显下降; 纳米流体在硅微通道中的流动换热总体性能优于水。

(4) 基于实验数据, 拟合了梯形硅微通道中低浓度纳米流体层流对流换热 Nusselt 数的实验关联式。

符 号 说 明

- A_c ——微通道截面积, m^2
- A_w ——微通道换热面积, m^2
- c_p ——比定压热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- D_h ——微通道当量直径, μm
- f ——阻力系数
- H ——微通道深度, μm
- h ——传热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
- k ——工质热导率, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- L ——微通道长度, mm
- M ——质量流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
- N ——微通道数
- PP ——泵功, W
- Δp ——压差, kPa
- R ——热阻, $^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$
- T ——温度, $^\circ\text{C}$
- $\bar{u}$ ——平均流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
- V ——体积流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}$
- W_b ——微通道下底, μm
- W_t ——微通道上底, μm
- ν ——运动黏度, $\text{m}^2 \cdot \text{s}$
- ρ ——密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

ϕ ——体积分数, %

μ ——动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$

下角标

f——基液

i——入口

m——平均

nf——纳米流体

o——出口

p——纳米粒子

w——壁面

References

- [1] Guo Zengyuan (过增元). Hot subject of the international heat transfer community—microelectronic cooling. *China Science Foundation* (中国科学基金), 1988, **2**: 20-25
- [2] Choi S U S. Enhancing thermal conductivity of fluid with nanoparticles. *ASME, FED*, 1995, **231**: 99-105
- [3] Lee S, Choi S U S, Li S, Eastman J A. Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles. *Journal of Heat Transfer*, 1999, **121**: 280-289
- [4] Wang Xinwei, Xu Xianfan, Choi S U S. Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1999, **13** (4): 474-480
- [5] Xuan Y M, Li Q. Heat transfer enhancement of nanofluids. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2000, **21** (1): 58-64
- [6] Wang Xiangqi, Mujumdar A S. Heat transfer characteristics of nanofluids: a review. *International Journal of Thermal Sciences*, 2007, **46**: 1-19
- [7] Li Qiang (李强), Xuan Yimin (宣益民). Flow and heat transfer performances of nanofluids inside small hydraulic diameter flat tube. *Journal of Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), 2004, **25** (2): 305-307
- [8] Dai Wenting (戴闻亭), Li Junming (李俊明), Chen Xiao (陈骁), Wang Buxuan (王补宣). Experiment investigations on convective heat transfer of copper oxide nanoparticle suspensions inside mini-diameter tubes. *Journal of Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), 2003, **24** (4): 633-636
- [9] Lee Jaeseon, Mudawar Issam. Assessment of the effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in microchannels. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2007, **50**: 452-463
- [10] Lee Donggeun, Kim Jaewon, Kim Bog G. A new parameter to control heat transport in nanofluids: surface charge state of the particle in suspension. *J. Phys. Chem. B*, 2006, **110**: 4323-4328
- [11] Drew D A. Theory of Multicomponent Fluids. Berlin: Springer, 1999
- [12] Einstein A. Investigation on the Theory of the Brownian Movement. New York: Dover Publication, 1956
- [13] Maxwell J C. A Treatise on Electricity and Magnetism. 2nd ed. Cambridge, UK: Oxford University Press, 1904: 435
- [14] Xuan Y, Roetzel W. Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2000, **43**: 3701-3707
- [15] Tsai Tsunghsun, Chein Reiyu. Performance analysis of nanofluid-cooled microchannel heat sinks. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2007, **28**: 1013-1026
- [16] Das Sarit Kumar, Putra Nandy, Thiesen Peter, Roetzel Wilfried. Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids. *Journal of Heat Transfer*, 2003, **125**: 567-574
- [17] Li C H, Peterson G P. Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids). *Journal of Applied Physics*, 2006, **99** (084314): 1-8