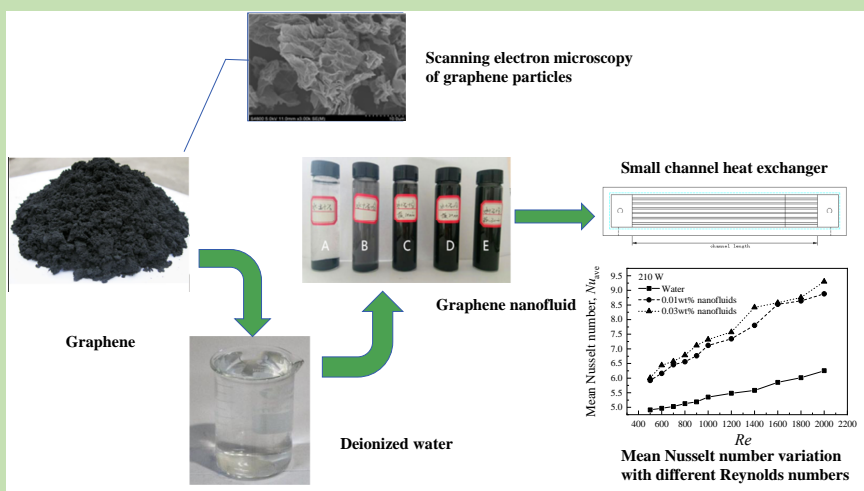


Fluid flow and heat transfer characteristics of water-based graphene nanofluids in small rectangular channels

Dong LIU*, Yu SHU, Anjie HU

School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China

Abstract: A small rectangular channel was designed and fabricated. The convective heat transfer properties of water-based graphene nanofluids in the channel were experimentally investigated by using it as the heat transfer medium under different experimental conditions [different mass concentrations, Reynolds numbers (Re) and heating powers], and some thermal properties of water-based graphene nanofluids were tested.



The experimental results showed that the temperature along the wall of rectangular channel decreased with the increase of Re and increased with the increase of heating power under laminar flow ($Re=500\sim1000$). This change regulation was consistent with the heat transfer characteristics of conventional fluids, however, with the increase of mass concentration of nanofluids at same Re and heating power, the wall temperature decreased gradually because of the Brownian motion of graphene nanoparticles, the enhancement of scrambling by mixing of particles and the enhancement of thermal properties of nanofluids. The heat transfer intensity of water-based graphene nanofluid was higher than that of deionized water. When Re was 2000 and heating power was 210 W, the average Nusselt number (Nu) of water-based graphene nanofluids with 0.03wt% concentration was 9.3, which was 48.8% higher than that of the based water under the same conditions. Under the influence of inlet effect, the local convective heat transfer coefficient along the channel length decreased gradually, and the maximum local heat transfer coefficient of nanofluid increased by 39.1% compared with the deionized water. The flow heat transfer intensity of graphene nanofluids was obviously enhanced by the Brownian motion of graphene particles at certain Re (500~1400). In order to describe the heat transfer characteristics of water-based graphene nanofluids more clearly, a heat transfer relation was fitted by combining experimental data and theoretical models. Compared with the experimental results, the maximum relative error (MRE) was less than 25%, and the mean relative error was only 4.8%.

Key words: graphene; nanoparticles; convection; heat transfer; small channel

收稿: 2018-10-15, 修回: 2018-12-13, 网络发表: 2019-01-17, Received: 2018-10-15, Revised: 2018-12-13, Published online: 2019-01-17
基金项目: 国家自然科学基金(编号: 51036156; 51606159); 四川省科技创新苗子工程项目(编号: 2018041)
作者简介: 刘东(1984-), 男, 山西省大同市人, 博士, 副教授, 热能工程专业, E-mail: dtld123@126.com.

引用格式: 刘东, 舒宇, 胡安杰. 水基石墨烯纳米流体在矩形小槽道内的流动换热特性. 过程工程学报, 2019, 19(2): 289-296.
Liu D, Shu Y, Hu A J. Fluid flow and heat transfer characteristics of water-based graphene nanofluids in small rectangular channels (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2019, 19(2): 289-296, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.218300.

水基石墨烯纳米流体在矩形小槽道内的流动换热特性

刘东*, 舒宇, 胡安杰

西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010

摘要: 测试了水基石墨烯纳米流体的部分热物性, 研究了不同浓度、雷诺数(Re)和加热功率条件下水基石墨烯纳米流体作为换热工质在设计的矩形结构小槽道内的对流换热性能。结果表明, 层流状态($Re=500\sim2000$)下, 矩形槽道壁面温度随 Re 增大逐渐降低, 随加热功率增大逐渐升高, 与常规流体换热特性一致; 在相同 Re 和换热功率条件下, 随纳米流体浓度增大, 壁温逐渐减小; 水基石墨烯纳米流体的换热强度比基液去离子水提升较大, $Re=2000$ 、加热功率为 210 W 时, 浓度为 0.03wt% 的水基石墨烯纳米流体的平均努塞尔数(Nu)为 9.3, 比基液水提升 48.8%; 受入口效应影响, 沿槽道长度局部对流换热系数逐渐减小, 最高可达 25674.5 [W/(m²·℃)], 较基液水最大可提高 39.1%; $Re=500\sim1400$ 时, 石墨烯纳米流体的流动换热强度随 Re 增大明显增强; 由实验数据结合理论模型拟合了适用于石墨烯纳米流体对流换热强度的计算式, 计算结果与实验结果最大相对误差不超过 25%, 平均相对误差仅为 4.8%。

关键词: 石墨烯; 纳米粒子; 对流; 传热; 小槽道

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2019)02-0289-08

1 前言

通过添加纳米颗粒提高换热器内的对流换热系数, 从而提高换热效率的方式已被广泛用于化工、能源和建筑等领域。纳米颗粒强化换热特性的机理受到广泛关注, 已进行了大量理论和实验研究。文献^[1-3]对 TiO₂ 纳米流体流动换热的实验研究发现, 纳米流体的粘度随粒子浓度和尺寸增加而增加, 给定雷诺数(Re)和粒子尺寸条件下, 流体的换热系数在层流和紊流条件下均随溶液浓度增大而增大, 而对溶液进行超声振荡后流体努塞尔数(Nu)提高显著, 随 Re 变化 Nu 并无较大变化。文献^[4-8]对碳纳米管(CNT)纳米流体进行了实验研究, 发现 CNT 浓度对流动换热影响很大, 而溶液的 pH 值对流动换热强度影响不大。Ding 等^[4]在圆管对流换热实验中发现, CNT 纳米流体的换热系数随管道入口段轴向距离增大而增大, 随后沿管道长度逐渐减小。Amirsaleh 等^[9]和 Baby 等^[10]分别通过实验研究了水基石墨烯纳米流体在水平圆管内的对流换热, 得出较低浓度时石墨烯纳米流体的对流换热强度均比基液提高至少 30%。Sobti 等^[11]综述了基于提高纳米流体热导率的实验结果, 得出导热系数提高取决于颗粒体积分数、温度、颗粒大小、基液性质、纳米流体 pH 值和纳米粒子结构, 发现布朗运动、热电泳、能量载体的弹道传输和近场辐射是热导率提高

的主要机制。

通过改变换热装置结构强化换热的方式也被广泛采用。Tuckerman 等^[12]研究了将流体高效传热与材料的高导热特性相结合的微通道冷却器, 其因具有散热量大、低热阻、易密封等优点而被采用^[13-15]。Peng 等^[16,17]研究了不同微通道结构对流动和换热的影响, 发现微通道结构虽然换热能力强, 但存在压降大的缺点。Kim^[18]实验研究了槽道宽度 155~580 μm 的 10 种矩形微通道在 $Re=30\sim2500$ 的层流流动中的换热特性, 发现 $Re<180$ 时, Nu 低于理论值, 并随 Re 增大迅速增加; $Re>180$ 时, Nu 增加速度逐渐降低。刘东等^[19]设计了带针肋小槽道并实验研究了去离子水在其中的流动换热性能, 得出 $Re<650$ 、最高壁温低于 77℃时, 单位面积散热量可达 21.32 W/cm²。

石墨烯作为一种新型高导热的纳米材料, 将其加入现有换热工质中形成纳米流体, 理论上可提高换热特性。本工作配制了水基石墨烯纳米流体, 研究其在矩形小槽道散热器内的流动换热特性, 为后续工程应用奠定基础。

2 水基石墨烯纳米流体配制及物性测试

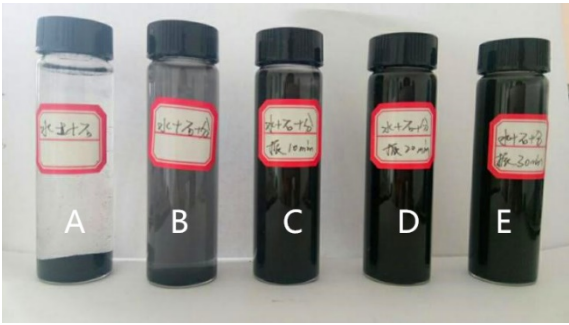
SE1430 加强型石墨烯(常州第六元素材料科技股份有限公司)的物性参数见表 1。

表 1 石墨烯的物性参数
Table 1 Physical parameters of graphene

Model	Exterior	pH	Specific area/(m ² /g)	Particle size, $D_{50}/\mu\text{m}$	Mass fraction of carbon/%
SE1430	Black powder	2.0~5.0	180~280	10.0	75±5

纳米流体的配制方法分为一步法和两步法, 一步法指在制备纳米颗粒的同时制备纳米流体; 两步法指先制备纳米颗粒, 再将其分散在基液中。本工作用两步法配制纳米流体, 将预制的增强型石墨烯和非离子类含石墨烯亲和团的亲水性高分子聚合物(表面活性剂)按质量比 1:5 加入去离子水中, 在约 50℃ 下搅拌、超声振荡分散。图 1 为不同配制方法所得石墨烯放置 72 h 后的沉降情况, 可看出添加表面活性剂并超声 180 min 后沉降不明显, 流体性质稳定。

按照图 1 方法(E)配制不同浓度的石墨烯纳米流体, 测试其导热系数 K_n 和热逸散率 e_n 、基液水导热系数 K_f 和热逸散率 e_f , 计算石墨烯纳米流体比热容 $C_{p,n}$ 、基液水比热容 $C_{p,f}$ 和动力粘度, 结果见表 2。



A. Water+graphene with stir
B. Water+graphene+surface active agent with stir
C. Water+graphene+surface active agent with ultrasonic water bath for 60 min
D. Water+graphene+surface active agent with ultrasonic water bath for 120 min
E. Water+graphene+surface active agent with ultrasonic water bath for 180 min

图 1 水基石墨烯纳米流体沉降情况
Fig.1 Settlement situation of water-based graphene nanofluids

表 2 石墨烯纳米流体的热物性
Table 2 The thermo-physical properties of graphene nanofluids

Graphene content/wt%	Conductivity, K_n /[W/(m·K)]	Effusivity, e_n /[W·s ^{0.5} /(m ² ·K)]	Specific heat, $C_{p,n}$ /[J/(kg·K)]	Dynamic viscosity, μ_n /(mPa·s)
0	0.6101	1587.6	4131.2	1.00
0.01	0.6245	1611.8	4159.9	1.06
0.03	0.6253	1613.3	4162.3	1.23
0.05	0.6280	1617.8	4167.6	1.36

石墨烯纳米流体与基液的热物性增强比见图 2。由图可知, 溶液的导热系数、比热容、热逸散率和粘度均随浓度增大而增大。流体浓度为 0.05wt% 时, 其导热系数比基液增强了 2.9%, 比热容增强了 3.8%, 热逸散率增大了 1.9%, 粘度增大了 36%。纳米流体导热系数的增强机制被认为是纳米颗粒的无规则运动, 类似于布朗运动, 随浓度增大, 颗粒碰撞几率、次数和强度增大, 导热系数增大。

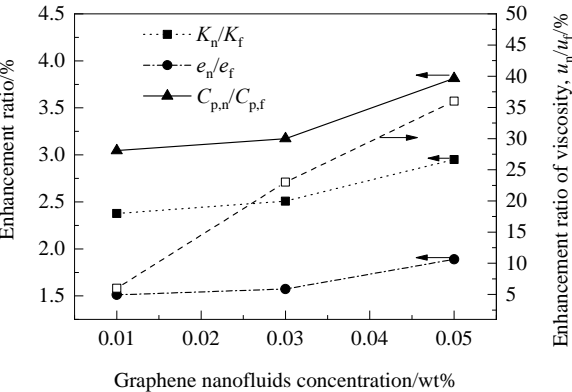


图 2 石墨烯纳米流体与基液的热物性增强比
Fig.2 Thermal property enhancement ratio of water-based graphene nanofluids compared with water

由表 2 中石墨烯纳米流体的粘度, 根据流体力学层

流沿程损失计算式得出不同 Re 和浓度下纳米流体在实验槽道内的压降, 结果见图 3。由图可知, 管内压降随 Re 增大而增大, 且浓度越大增加越快, 0.03% 浓度纳米流体在 $Re=2000$ 时的压降比基液水增大 1984.9 Pa。

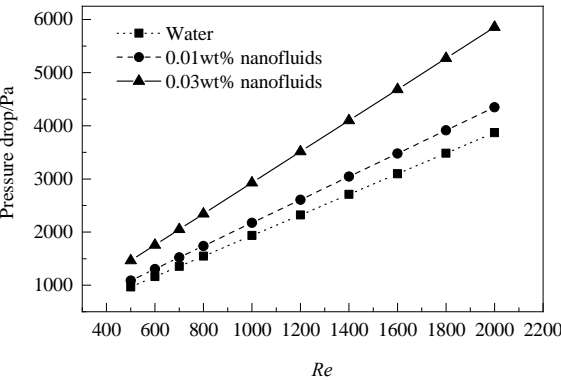


图 3 槽道内压降的变化
Fig.3 Variation of pressure drop in channel

3 实验系统及数据处理

3.1 实验系统

图 4 为水基石墨烯纳米流体在矩形小槽道内流动换热实验系统图。实验系统由 DC-0530 低温恒温槽(无锡久平仪器公司)、YSJ7114-1HS 机械隔膜泵(上海金陵

雷戈伯劳伊特电机公司)、脉动阻尼器、主循环回路流量调节阀、LZB-10 转子流量计(杭州鹤山仪表公司)、实验段、MS1003S 电子天平秤(瑞士梅特勒-托利多仪器公司)、旁通回路流量调节阀、IV1002 高精度功率计(深圳市艾维泰科仪器公司)、变压器(德力西集团有限公司)、34970A 数据采集仪(美国 Agilent 公司)和电脑等组成。其中实验段为散热核心部件,外部尺寸为 282 mm×46 mm×18 mm,核心槽道长 200 mm,宽 16 mm,采用机械加工方式用纯铜加工而成,几何参数见表 3。为使流入槽道的流体流量均匀及方便安装槽道流体进出管段,槽道的前后两端各设计了一个进、出集液口(长 30 mm×宽 16/17 mm×高 5 mm 的矩形腔体)。为测量槽道底部壁面温度,在距离槽道底部 3 mm 的侧边每隔一定距离打一个深 8 mm 的孔用于安装 K 型测温热电偶,前 10 个间隔 5 mm,后 14 个间隔 10 mm;在进、出集液口上各打一个 1 mm 通孔用于安装测温热电偶,测量进出口流体温度,矩形小槽道实验段示意图见图 5。实验时,先将石墨烯纳米流体在低温恒温槽内加热到预定温度,由机械隔膜泵吸出,通过调节主循环回路流量调节阀及旁通流量调节阀使预定流量的溶液流过流量计,进入实验段进行换热,换热后通过电子天平秤上的烧杯流回低温

恒温槽。接通加热器电源,通过调节变压器调节实验段两端所加电压,进而控制加热功率,实验段的加热功率由高精度功率计测得。当输入加热功率准确且稳定后,通过调节流量调节阀及流量调节阀的阀门开度,使预定流量的溶液通过流量计,流量计读数稳定在设定值后,用数据采集仪测量溶液出入口及槽道底部壁面温度,数据读取时间为 10 min。

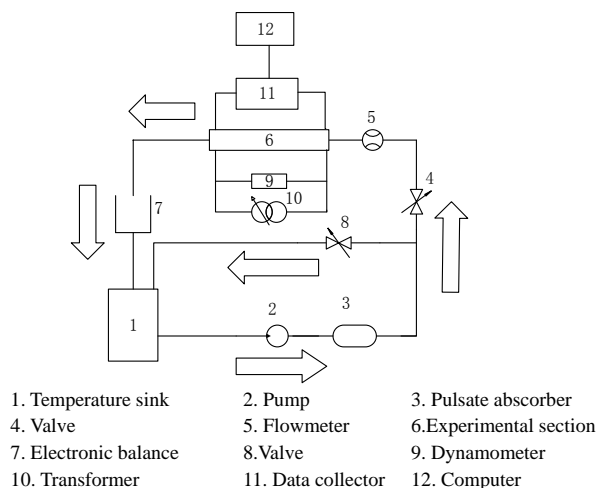


图4 实验系统图

Fig.4 Experimental system diagram

表3 矩形小槽道的结构参数

Table 3 The structure parameters of rectangular small channel

Length of channel/mm	Height of channel/mm	Width of channel/mm	Width of fin/mm	Number of channel
200	4	1.5	1.5	6

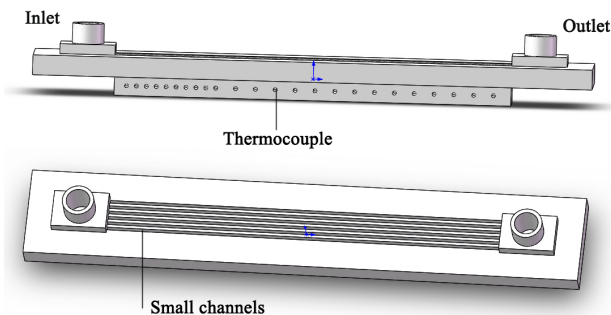


图5 矩形小槽道实验段示意图

Fig.5 Diagram of experimental section

3.2 数据处理

流体与小槽道壁面流动换热过程中单位时间内流体换热量 q_f 为

$$q_f = mC_p(T_{out} - T_{in}) \quad (1)$$

式中, T_{in} 为流体入口温度($^{\circ}\text{C}$), T_{out} 为流体出口温度($^{\circ}\text{C}$); C_p 为流体比热容 [$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$], m 为流体质量流量 (kg/s)。

通过稳定热传导计算槽道局部表面温度 $T_{w,x}$:

$$T_{w,x} = T_{tc,x} - \frac{q_f H_{tc}}{NL_{ch} K_s (w_{ch} + w_{fin})} \quad (2)$$

式中, $T_{tc,x}$ 为测点处温度, H_{tc} 为热电偶距槽道表面的距离, K_s 为槽道导热系数, L_{ch} 为槽道长度, N 为槽道数, w_{ch} 和 w_{fin} 分别为槽道和肋片宽度。

沿槽道的局部流体温度 $T_{b,x}$ 为

$$T_{b,x} = T_{in} + \frac{q_{conv} (2\eta_{fin} H_{ch} + w_{ch}) x N}{mC_p} \quad (3)$$

式中, q_{conv} 为热流密度, η_{fin} 为肋片效率, H_{ch} 为槽道高, x 为距槽道入口距离。

局部换热系数为

$$h_x = \frac{q_{conv}}{T_{w,x} - T_{b,x}} = \frac{q_f}{(2\eta_{fin} H_{ch} + w_{ch}) L_{ch} N (T_{w,x} - T_{b,x})} \quad (4)$$

$$\eta_{fin} = \frac{\tanh(m_l H_{ch})}{m_l H_{ch}} \quad (5)$$

式中, m_l 为肋片参数:

$$m_l = \sqrt{2 \frac{h_x}{K_s w_{fin}}} \quad (6)$$

平均换热系数 h_{avg} 和 Nu 可由下式计算:

$$h_{\text{avg}} = \frac{\int h_x dA}{A} \tag{7}$$

$$Nu = \frac{h_{\text{avg}} D_h}{K_f} \tag{8}$$

式中, A 为槽道换热面积, D_h 为槽道当量直径。

3.3 误差分析

标定后的热电偶精度为 $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$, 转子流量计采用质量称量法标定, 电子秤精度为 $\pm 1\text{ g}$, 用电子显微镜测量槽道宽度和高度, 根据误差分析理论, 间接误差为

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2} \tag{9}$$

式中, n 为测量数量, f 为测量值与结果的函数关系。

由式(9)计算各参数误差, 结果见表 4。

表 4 实验参数的相对误差

Parameter	Max error/%
q_f	2.4
$T_{w,x}, T_{b,x}$	5.8
h_x, h_{avg}	6.7
D_h	2.1
Re	7.8
Nu	8.1

4 结果与讨论

实验段入口温度约 20°C , 测定去离子水及 0.01wt% 和 0.03wt% 石墨烯纳米流体在 $Re=500\sim 2000$ 、加热功率 128, 180, 210 W 条件下的对流换热特性。为保证测量数据的准确性, 换热稳定后 40 min 时记录数据, 取 20 min 内的平均值作为实验数据。

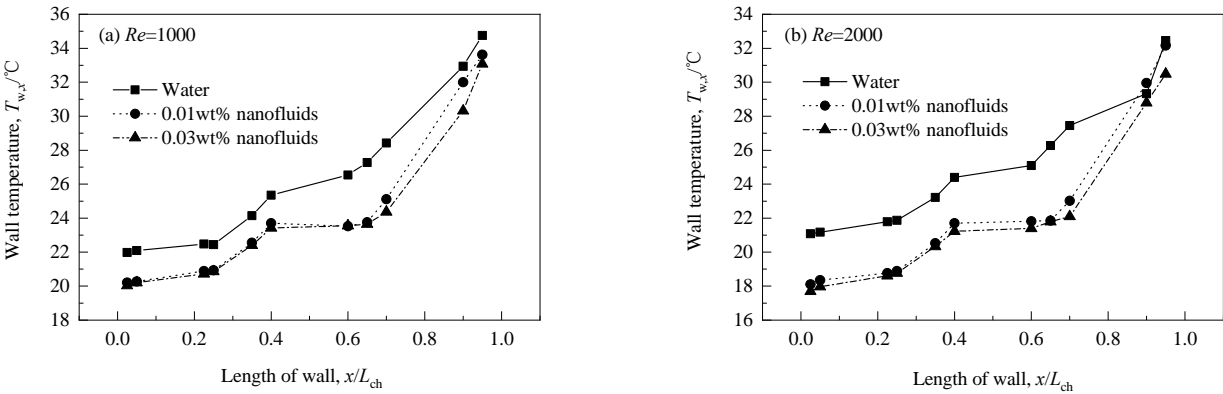


图 6 不同浓度石墨烯纳米流体在加热功率 128 W 条件下壁温沿管长的变化
Fig.6 Wall temperature variation along the channel with different graphene nanofluids concentrations and heat power of 128 W

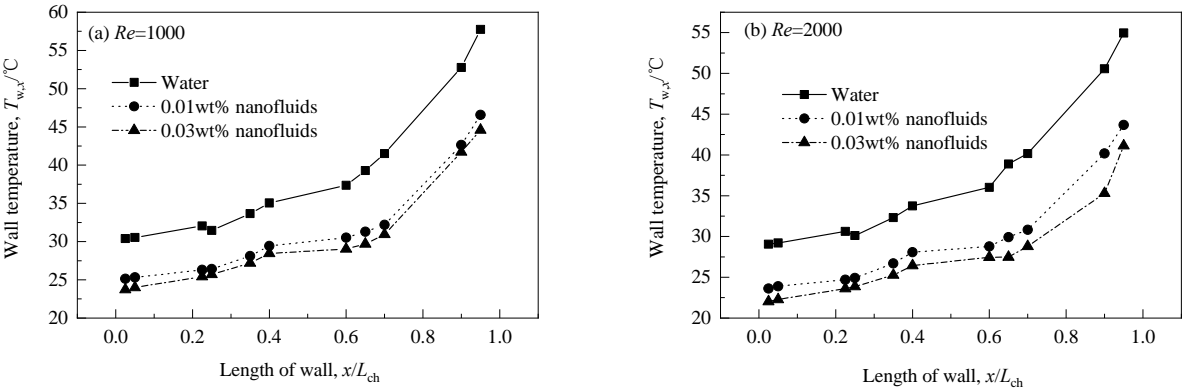


图 7 不同浓度石墨烯纳米流体在加热功率 210 W 条件下壁温沿管长的变化
Fig.7 Wall temperature variation along the channel with different graphene nanofluids concentrations and heat power of 210 W

4.1 壁面温度沿流动长度变化关系

图 6 和 7 分别为加热功率 128 和 210 W 下壁面温度沿管长的变化。由图可知, 相同加热功率和 Re 下, 壁面温度随管长增加而增加。相同 Re 和位置的壁面温度随石墨烯纳米流体浓度增加而降低。相同加热功率

下, 流体带走的热量相同, 壁面温度越低, 换热能力越强, 水基石墨烯纳米流体的换热能力随浓度增加而增大。纳米颗粒加入基液中后, 一方面由于石墨烯自身的高导热性增加了流体的导热系数, 换热增强; 另一方面, 石墨烯纳米颗粒的布朗效应使层流情况下管内的流体

掺混更强烈,强化了流体内部换热。Sobti 等^[11]发现大多数纳米流体在强化换热工程中普遍存在颗粒微对流,主要因为纳米颗粒自身的布朗运动使流体的紊流更强烈。

不同加热功率下平均壁面温度随 Re 的变化见图 8。由图可知,水基石墨烯纳米流体浓度和加热功率相同时,平均壁温 $T_{w,ave}$ 随 Re 增加逐渐减小,与常规流体换热特性一致。由于 Re 增加时流体流量增大,平均流体温度降低,相同的换热系数下壁面温度降低。 Re 和加热功率相同时,平均壁温随石墨烯纳米流体浓度增加而减小,这是石墨烯颗粒的布朗运动和颗粒掺混增强了扰流及流体导热系数增大等因素共同作用所致。

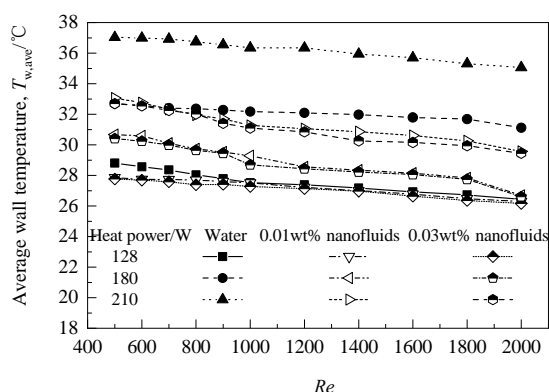


图 8 平均壁温随 Re 的变化
Fig.8 Average wall temperature variation with Reynolds number

4.2 流体在小槽道内的换热特性

图 9 为加热功率 210 W 下对流换热系数沿管长的变化。由图可知,相同加热功率和 Re 数下,对流换热系数沿管长逐渐降低,这是由于整个槽道处于入口段,

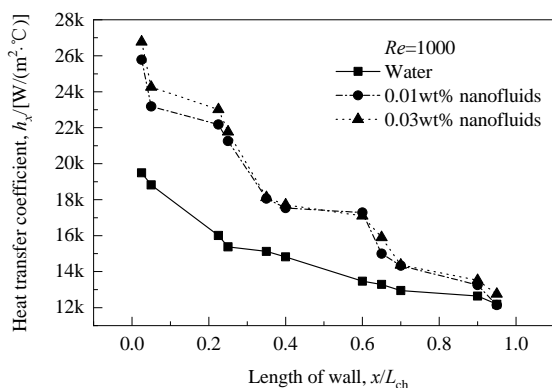


图 9 不同浓度石墨烯纳米流体在加热功率 210 W 下换热系数沿管长的变化
Fig.9 Heat transfer coefficient variation along the channel with different graphene nanofluids concentrations and heat power of 210 W

入口效应使换热强度随管长增加而减小。 Re 相同时,相同位置的局部对流换热系数随石墨烯流体浓度增加而增大, $Re=1000$ 时,去离子水的最大对流换热系数为 $18451.8 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{°C)}$,而水基石墨烯纳米流体的最大对流换热系数达 $25674.5 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{°C)}$,强化率为 39.1%。 Re 较小时,流体流动状态为层流,层流底层对换热影响明显。基液中加入石墨烯纳米颗粒后,颗粒的布朗运动加剧,导热系数提升,换热明显增强。

平均换热系数增强比见图 10。由图可知,不同浓度的水基石墨烯纳米流体在小槽道中的换热增强比在 $Re=500 \sim 1400$ 时随 Re 增大而增大,之后随 Re 继续增大,石墨烯纳米粒子的布朗运动效应的影响与流体紊流强度的影响相比可忽略,换热增强比不再增大。石墨烯纳米流体较基液在高 Re 下仍具有更高的对流换热系数。

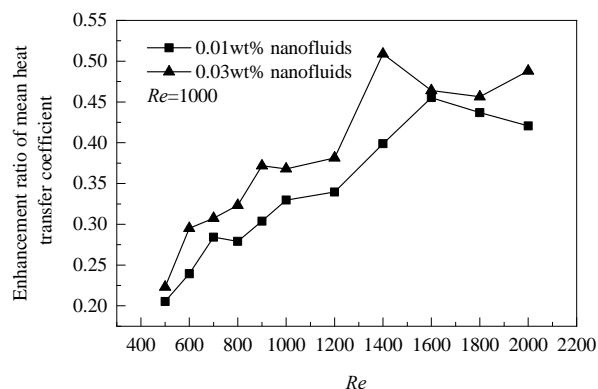


图 10 平均换热系数增强比
Fig.10 Enhancement ratio of mean heat transfer coefficient

Nu 能充分体现出矩形小槽道内的对流换热强度,图 11 为平均努塞尔数 Nu_{ave} 随 Re 的变化。由图可知,纳米流体在槽道内的换热强度随 Re 增大而增大,随石

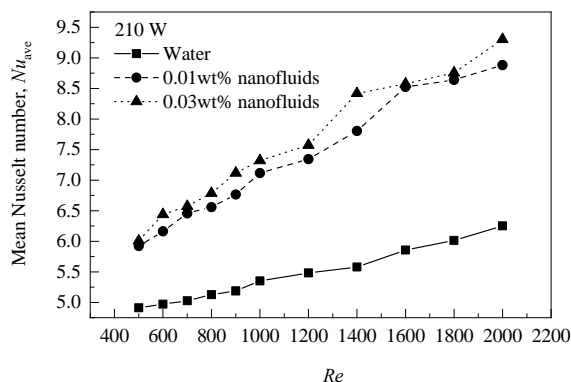


图 11 平均努塞尔数随 Re 的变化
Fig.11 Variation of mean Nusselt number with different Reynolds number

墨烯颗粒浓度增大而增大。实验范围内 Nu 可增大 48.8%。随 Re 增大, 石墨烯纳米流体换热效果提升比水更明显, 原因是 Re 增大时, 石墨烯纳米流体的布朗运动剧烈, 有效增强了换热。

4.3 对流换热关系式拟合

建立预测多组物质流动的理论公式^[20]很困难。纳米流体的传热特性(Nu)取决于基液和超细颗粒的热导率、热容、流态、纳米流体的粘度、悬浮颗粒的体积分数、颗粒尺寸和形状及流动结构等。为分析纳米流体的传热性能, 推导出预测纳米流体对流换热的基本关联式, 目前的方法一种是将纳米流体作为单相流体处理, 另一种是考虑纳米流体和分散纳米粒子的多相特性。本工作将纳米流体作两相流体处理。Nield 等^[21]拟合纳米流体的对流换热关系式时考虑了纳米粒子的尺寸和体积分数:

$$Nu_x = (1 + C^* Pe^n f_{(0)}) \theta_{(0)} Re^m \quad (10)$$

式中, 参数 m 与 n 取决于流态, 无量纲流速 f 与无量纲温度 θ 由实际情况而定, 未知系数 C^* 需通过实验数据计算, 当 $C^*=0$ 时体系无热扩散效应。由该式可知, 纳米流体的传热随佩克莱特数(Pe)增大而增大, Pe 为表征纳米颗粒在流体中微对流强度的一个参数:

$$Pe = \frac{Ru_m}{\alpha_{nf}} \quad (11)$$

式中, R 为颗粒粒径, u_m 为流体流速, α_{nf} 为纳米流体的热扩散率。

本工作在式(10)基础上根据实验数据拟合了适用于计算石墨烯纳米流体在矩形小槽道内对流换热强度的公式:

$$Nu = 0.184 \left[1 + 0.532(\phi Re Pe)^{0.165} \right] Pr^{1.065} \quad (12)$$

式中, Pr 为石墨烯纳米流体的普朗特数, ϕ 为石墨烯纳米流体的质量分数。

为验证式(12)的准确性, 将计算结果与实验结果进行比较, 引入平均相对误差(MRE):

$$MRE = \frac{1}{M} \sum \frac{|Nu_{ave,exp} - Nu_{ave,pred}|}{Nu_{ave,exp}} \times 100\% \quad (13)$$

式中, M 为数据数, $Nu_{ave,exp}$ 和 $Nu_{ave,pred}$ 分别为平均努塞尔数的实验结果和计算结果。

图 12 为平均努塞尔数计算结果与实验结果的对比。由图可知, 计算结果与实验结果的最大相对误差不超过 25%, 平均相对误差仅为 4.8%, 式(12)能较准确地计算石墨烯纳米流体在矩形小槽道内的对流换热强度。

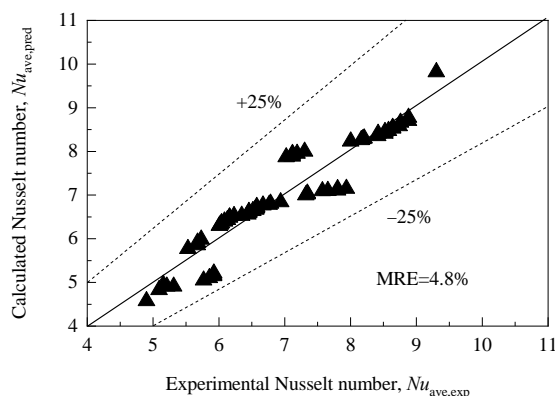


图 12 平均努塞尔数计算结果与实验结果的对比

Fig.12 Comparison of calculated and experimental results of average Nusselt number

5 结论

配制了水基石墨烯纳米流体, 并搭建矩形小槽道流动换热实验台, 研究了不同浓度的水基石墨烯纳米流体在矩形小槽道内的层流流动传热特性, 得到如下结论:

(1) 水基石墨烯纳米流体的导热系数和比热容等物性参数较基液去离子水提升明显。

(2) 雷诺数 $Re=500 \sim 2000$ 时, 石墨烯纳米流体的换热能力比水更好, 浓度为 0.03wt% 时, 壁面温度可降低 16%。

(3) 受入口效应影响, 水基石墨烯纳米流体在矩形小槽道内的换热系数沿管长逐渐降低, 但随石墨烯浓度增大而增大, 实验范围内以水为换热介质, 矩形小槽道内的局部换热系数最大可达 $18451.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 以石墨烯纳米流体为换热介质, 矩形小槽道内的局部换热系数最大可达 $25674.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 提升 39.1%。

(4) 槽道内的努塞尔数 Nu 随 Re 和石墨烯浓度增大而增大。石墨烯自身的布朗运动和高导热特性可明显强化换热, 相同条件下 0.03wt% 的石墨烯纳米流体的 Nu 比水高 48.8%。

(5) 石墨烯纳米流体在矩形小槽道内对流换热强度的拟合关系式的计算结果与实验结果的平均相对误差仅为 4.8%。

参考文献

- [1] He Y R, Jin Y, Chen H S, et al. Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO_2 nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2007, 50(11/12): 2272–2281.
- [2] Kayhani M H, Soltanzadeh H, Heyhat M M, et al. Experimental study of convective heat transfer and pressure drop of TiO_2 /water nanofluid [J]. International Communications in Heat & Mass Transfer, 2012, 39(3): 456–462.
- [3] Rayatzadeh H R, Saffar-Avval M, Mansourkiaei M, et al. Effects of continuous sonication on laminar convective heat transfer inside a

- tube using water-TiO₂ nanofluid [J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2013, 48(7): 8–14.
- [4] Ding Y L, Alias H, Wen D S, et al. Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids) [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2006, 49(1/2): 240–250.
- [5] Chen H S, Yang W, He Y R, et al. Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of titanate nanotubes (nanofluids) [J]. *Powder Technology*, 2008, 183(1): 63–72.
- [6] Garg P, Alvarado J L, Marsh C, et al. An experimental study on the effect of ultrasonication on viscosity and heat transfer performance of multi-wall carbon nanotube-based aqueous nanofluids [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2009, 52(21/22): 5090–5101.
- [7] Saeedinia M, Akhavan-Behabadi M A, Nasr M. Experimental study on heat transfer and pressure drop of nanofluid flow in a horizontal coiled wire inserted tube under constant heat flux [J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2012, 36(1): 158–168.
- [8] Wang J L, Zhu J J, Zhang X, et al. Heat transfer and pressure drop of nanofluids containing carbon nanotubes in laminar flows [J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2013, 44(44): 716–721.
- [9] Naghash A, Sattari S, Rashidi A. Experimental assessment of convective heat transfer coefficient enhancement of nanofluids prepared from high surface area nanoporous graphene [J]. *International Communications in Heat & Mass Transfer*, 2016, 78: 127–134.
- [10] Baby T T, Ramaprabhu S. Enhanced convective heat transfer using graphene dispersed nanofluids [J]. *Nanoscale Research Letters*, 2011, 6(1): 1–9.
- [11] Sobti A, Wanchoo R K. Thermal conductivity of nanofluids [J]. *Materials Science Forum*, 2013, 757: 111–137.
- [12] Tuckerman D B, Pease R F W. High-performance heat sinking for VLSI [J]. *IEEE Electron Device Letter*, 1981, 2(5): 126–129.
- [13] 吴信宇, 吴慧英, 屈健, 等. 纳米流体在芯片微通道中的流动与换热特性 [J]. *化工学报*, 2008, 59(9): 2181–2187.
- Wu X Y, Wu H Y, Qu J, et al. Flow and heat transfer characteristics of nanofluids in silicon chip microchannels [J]. *CIESC Journal*, 2008, 59(9): 2181–2187.
- [14] 周继军, 申盛, 徐进良, 等. 微槽道内单相流动阻力与传热特性 [J]. *化工学报*, 2005, 56(10): 1849–1855.
- Zhou J J, Shen S, Xu J L, et al. Single-phase flow and heat transfer in micro-channels [J]. *CIESC Journal*, 2005, 56(10): 1849–1855.
- [15] 李孝军, 屈健, 韩新月, 等. 微槽道脉动热管的启动及传热特性 [J]. *化工学报*, 2016, 67(6): 2263–2270.
- Li X J, Qu J, Han X Y, et al. Start-up and heat transfer performance of micro-grooved oscillating heat pipe [J]. *CIESC Journal*, 2016, 67(6): 2263–2270.
- [16] Peng X F, Peterson G P. The effect of thermofluid and geometrical parameters on convection of liquids through rectangular microchannels [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 1995, 38(4): 755–758.
- [17] Peng X F, Peterson G P. Convective heat transfer and flow friction for water flow in microchannel structures [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 1996, 39(12): 2599–2608.
- [18] Kim B. An experimental study on fully developed laminar flow and heat transfer in rectangular microchannels [J]. *International Journal of Heat & Fluid Flow*, 2016, 62(Part B): 224–232.
- [19] 刘东, 舒宇, 何蔚然, 等. 微针肋槽道内去离子水换热特性 [J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30(4): 25–30.
- Liu D, Shu Y, He W R, et al. Heat transfer characteristics of mini pin-fin channels [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30(4): 25–30.
- [20] Drew D A, Passman S L. *Theory of multicomponent fluids* [M]. Berlin: Springer, 1999: 600.
- [21] Nield D A, Bejan A. *Convection in porous media* [M]. Berlin: Springer, 2011: 284–290.