

研究论文

减阻型纳米流体在圆管内的流动和换热特性

孙斌, 张志敏, 杨迪, 李洪伟

(东北电力大学能源与动力工程学院, 吉林省 吉林市 132012)

摘要: 实验测定了在 Reynolds 数 4000~16000 范围内, 质量分数 0~0.5% 的石墨、多壁碳纳米管、 Al_2O_3 、Cu、Al、 Fe_2O_3 、Zn 纳米粒子加入到 100~400 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 浓度的十六烷基三甲基氯化铵 (CTAC) 减阻剂中所制备的减阻型纳米流体的摩擦阻力系数和对流传热系数。结果表明: 在 CTAC 中加入水杨酸钠 (NaSal) 与去离子水所配制的减阻剂具有一定的稳定性和很强的减阻特性, 当减阻剂浓度为 200 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时其减阻特性最优。石墨纳米粒子在增强对流换热和减少流动阻力方面具有较佳的综合性能, 当石墨纳米颗粒质量分数为 0.4% 时, 其综合性能因子 K 是去离子水的 5 倍。最后给出了减阻型石墨纳米流体在圆管内的流动阻力和换热关联式, 其计算值和实验值吻合良好。

关键词: 纳米流体; 减阻流体; 稳定性; 湍流; 热传导; 流动阻力

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20150496

中图分类号: TK 124

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2015) 11—4401—11

Heat transfer and flow resistance characteristics with drag reducing nanofluids in circular tube

SUN Bin, ZHANG Zhimin, YANG Di, LI Hongwei

(School of Energy and Power Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, Jilin, China)

Abstract: Drag reducing nanofluids can reduce flow resistance and enhance fluid convective heat transfer. In this study, the convective heat transfer coefficient and flow resistance coefficient were determined experimentally at the Reynolds number of 4000—16000, with 0—0.5% mass fraction of graphite multi-walled carbon nanotubes, Al_2O_3 , Cu, Al, Fe_2O_3 , and Zn nanoparticles added into a concentration of 100—400 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ cetyl trimethyl ammonium chloride (CTAC) drag reducing fluid. The ratio of the two fluids and preparation method were examined and the overall performance on convective heat transfer and flow characteristics was evaluated. The results show that the drag reducing fluid forming by sodium salicylate, CTAC and deionized water presents certain stability and significant drag reduction characteristic. At the drag reducing fluid concentration of 200 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, the drag reduction performance is the best. Graphite nanoparticles give better overall performance in enhancing convective heat transfer and reducing flow resistance among the nanoparticles. At 0.4%(mass) of graphite nanoparticles, the overall performance factor K is five times that with deionized water, presenting the best heat transfer and drag reduction characteristics, so it has good application prospects. Finally, a correlation is obtained by fitting the heat transfer and flow resistance of the drag reducing graphite nanofluid in circular tube, which is in good agreement with the experimental values.

2015-04-20 收到初稿, 2015-06-03 收到修改稿。

联系人及第一作者: 孙斌 (1972—), 男, 教授。

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (NCET-12-0727)。

Received date: 2015-04-20.

Corresponding author: Prof. SUN Bin, jlsunbin@126.com

Foundation item: supported by the Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-12-0727).

Key words: nanofluids; drag reducing fluid; stability; turbulent flow; heat conduction; flow resistance

引 言

将纳米级固体金属或金属氧化物颗粒添加到基液中可显著提高固液混合物的热导率,在工业系统中减阻流体的应用可以减少流体介质的流动阻力。纳米流体和减阻流体在增强换热和降低流动阻力方面各有优劣,因此着重研究纳米流体和减阻流体混合所形成的流体即减阻型纳米流体,互补其各自的优点。

纳米流体的研究始于 Choi 等^[1]的发现,即往液体中添加固体颗粒以提高其热导率,而后越来越多的国内外学者对纳米流体的强化换热^[2-4]和管内应用^[5-8]进行了深入的研究。大多数纳米级固体金属或金属氧化物颗粒添加到基液内会明显提高其对流换热效率,随着粒子质量分数的增加纳米流体的对流传热系数也随之增大。

减阻流体的研究始于 Toms^[9],称在氯苯中添加少量的聚甲基丙烯酸甲酯后摩擦阻力降低约 50%。添加剂减阻流体,即在流体中加入少量的高分子聚合物或表面活性剂分子,湍流流动的摩擦阻力将显著降低。岑仁海等^[10-13]对十六烷基三甲基氯化铵(CTAC)进行实验研究,结果表明:表面活性剂十六烷基三甲基氯化铵和水杨酸钠(NaSal)的混合水溶液较其他减阻流体在减阻性能上有很大的优越性。温度对 CTAC 水溶液有很大的影响,在高温条件下存在明显降解,但温度降低后仍能恢复到原来的减阻能力。同时减阻效果表现在一定的 Reynolds 数范围内,当 Reynolds 数超过一定值时,减阻效果将大幅下降。而且 CTAC 与 NaSal 存在最佳摩尔比即 1:2。

在减阻型纳米流体对流换热特性的研究方面, Liu 等^[14-16]通过研究表明:减阻型纳米流体与传统减阻流体的减阻能力相差不大,但对流体温度、纳米颗粒浓度、减阻剂浓度有强烈的依赖性,纳米流体增强换热的特性可应用于解决减阻流体换热恶化问题。在减阻型纳米流体流动特性的研究方面, Yang 等^[17-21]研究黏弹性流体基纳米流体在管内的换热和流动特性,分析了其剪切黏度的变化原因,结果表明:添加纳米粒子后,增大了非牛顿流体的对流传热系数。表面活性剂在纳米粒子的充分分散方面和促进纳米流体稳定性方面有很大作用,换热特性与表面活性剂和纳米粒子的配比关系有关。随

着粒子体积分数的增加,湍流流动状态下具有很显著的减阻效果。

总之,减阻型纳米流体在增强对流换热和减少流动阻力方面具有非常大的潜力,但如何既能强化对流换热又能减少流动阻力使综合效果达到最佳,同时得出此时表面活性剂和纳米粒子的最佳配比关系在目前的探索中还有待更深的研究。而且现在所研究的减阻型纳米流体种类较少,不能进行系统的分析。因此本文着重研究更多种类的减阻型纳米流体及其达到最佳综合效果时的配比和特性表现,并选取出一种换热性能好且减阻效果突出的减阻型纳米流体,进一步为相关的研究及应用提供实验和理论依据。

1 实验系统及流程简介

1.1 实验系统

采用套管实验装置,如图 1 所示。测试段实验小管采用内径 9 mm,外径 10 mm 的紫铜管,管长 190 cm。该紫铜管内壁已进行抛光,管的粗糙度 Ra 为 0.05 μm ,由三丰 TR-200 表面粗糙度测量仪测得,即相对粗糙度较低,已接近光滑,对实验影响较小,满足实验基本要求。入口稳流段长 60 cm,出口稳流段长 20 cm,进出口的接头件上各安装 1 个 Pt100 热电阻,用来测量流体进出口温度,同时再安装 1 个 Rosemount 3051S 电容式差压变送器,用来测量实验段进出口的压力差。紫铜管外壁均匀布置 6 个 Pt100 热电阻测量外壁温,最后在整个套管装置外面套上石棉保温层,裹上铝箔胶带,以达到保温的效果。实验中,为保持物性稳定,流动阻力在非加热条件下测定。在进行强制对流换热实验时,流体的定性温度取紫铜管的进出口温度算术平均值,管壁平均温度由管外壁 6 个热电阻的平均测量值及圆管壁导热公式计算出,加热量由小管内减阻型纳米流体的能量增加值得出,并由大管内热水的能量损失值进行校验。大管直径为 40 mm,壁厚 2 mm,管长 110 cm,在大管的进出口分别布置 2 个 Pt100 热电阻对进出口的热水温度进行测量。热水箱内布置 2 kW 的加热棒对水进行加热,同时安装温控仪对水温进行控制。预热段也安装温控仪,使实验所用的减阻型纳米流体的温度达到设定的温度。实验最后测得的数据包括:套管内热水的进出口温度,实验段减阻型纳米流体的进出口温度及其进出口

压差，6 个实验段管壁温度测量值以及转子流量计所测得的流量值。使用研华 USB-4716 对数据进行采集。

热水箱为实验提供稳定的热源，冷却水箱内有循环冷却水，用于冷却减阻型纳米流体，保证其入口温度恒定。

1.2 减阻型纳米流体的制备

本实验使用多壁碳纳米管、石墨、Al₂O₃、Cu、Al、Fe₂O₃、Zn 纳米粒子，其基本物性见表 1，基液为去离子水，减阻添加剂为表面活性剂十六烷基三甲基氯化铵（CTAC），同时添加水杨酸钠（NaSal）作为稳定剂。

减阻型纳米流体的制备过程如下。

（1）采用“两步法”^[22]，按照 1:2 最佳摩尔比，将一定量 CTAC 及 NaSal 加入去离子水中，静置 24 h 待其完全溶解，获得 CTAC 溶液，即减阻流体。然后在电磁搅拌器中搅拌 30 min，CTAC 溶液浓度

以 mg · kg⁻¹ 表示。
（2）在所得的 CTAC 溶液中加入规定质量的纳米粒子，制备得到减阻型纳米流体，并在超声波振荡仪中振荡 60 min，以使粒子充分分散，形成稳定的减阻型纳米流体。

在本实验中，CTAC 浓度为 100~400 mg · kg⁻¹，由于其浓度非常低，有研究证实其对减阻型纳米流体的物性影响可忽略不计^[23-24]，因此在确定减阻型纳米流体的物性时，均选取未添加 CTAC 时同浓度纳米悬浮液的物性。

1.3 减阻型纳米流体稳定性分析

在 48 h 内，每 24 h 对减阻型石墨纳米流体（1 号）和石墨-水纳米流体（2 号）进行沉降观测探究其稳定性，观测结果如图 2 所示。

经过 48 h 的观测，减阻型石墨纳米流体具有很好的稳定性，48 h 内仍然有非常好的悬浮效果，而石墨-水纳米流体的稳定性较差，在 24 h 内石墨

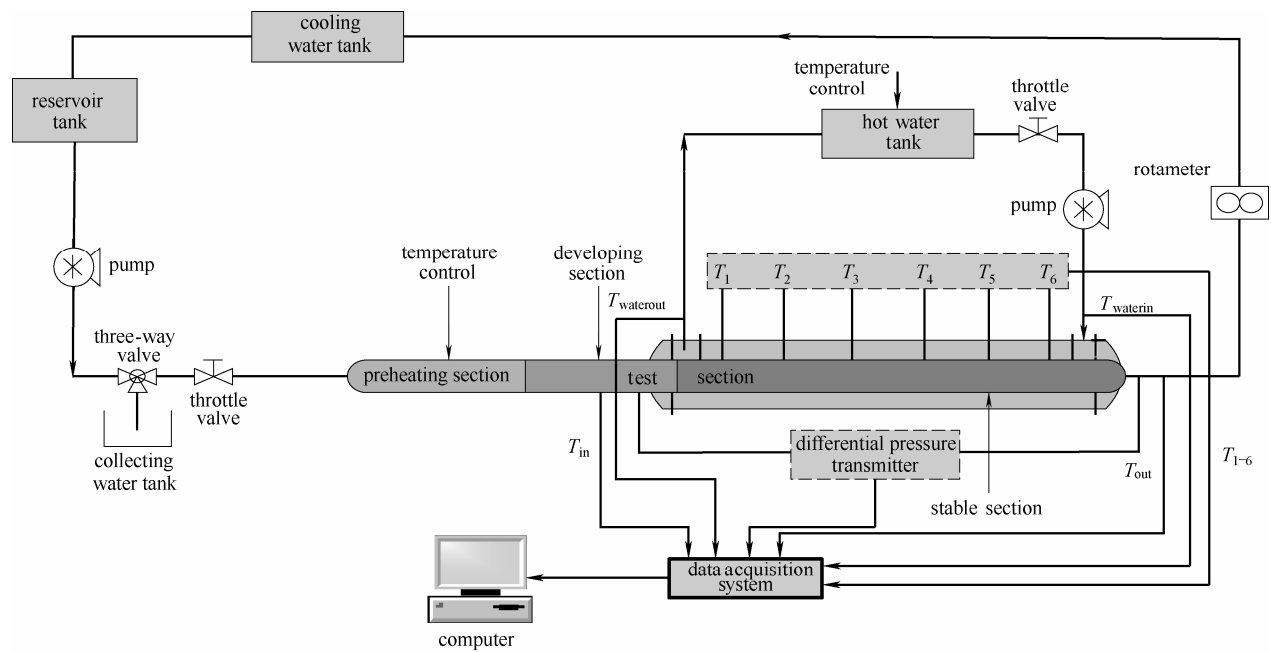


图 1 实验装置系统流程
Fig.1 Experimental device system

表 1 各种纳米粒子物性参数

Table 1 Physical parameters of various nanoparticles							
Properties	Cu	Al	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Zn	Graphite	Multi-walled carbon nanotubes
average particle size/nm	40	40	20	40	40	40	10
purity/%	99.9	99.9	99.99	99.9	99.9	99.9	98
colour	purple brown	black	white	red brown	black	black	black
shape	sphere	sphere	sphere	sphere	sphere	sphere	cylinder
density /kg · cm ⁻³	8900	2700	3900	5240	7140	2180	1300
specific heat capacity /J · kg ⁻¹ · °C ⁻¹	390	880	1300	720	380	710	510

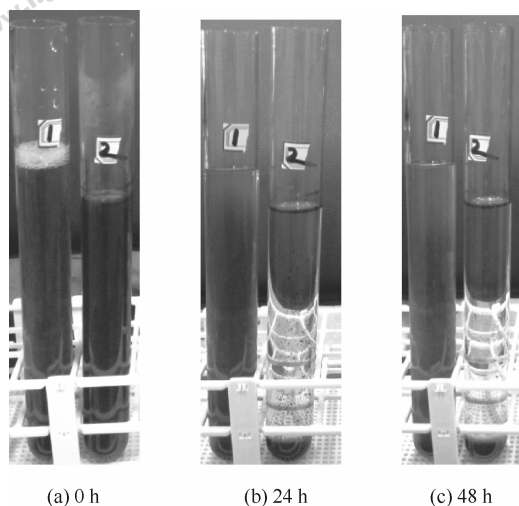


图 2 纳米流体沉降观测结果

Fig.2 Nanofluid settlement observations

纳米粒子基本全部沉积在底部, 因此减阻型石墨纳米流体的稳定性较石墨-水纳米流体有了非常大的提升。

同时采用透射比法对减阻型纳米流体的稳定性进行分析, 其原理是一定波长的光线穿过纳米流体内部时, 有部分光线被吸收。同一工况下, 光线被吸收的比例越大, 纳米颗粒的稳定性越好。所用仪器为 752 型分光光度计, 所用波长为 540 nm, 每间隔 6 h 测量并记录数据, 重复 3~4 次。采用上述实验方法, 对减阻型多壁碳纳米管、石墨、 Al_2O_3 、Cu、Al、 Fe_2O_3 、Zn 纳米流体的稳定性进行了测试与比较, 并选取了其中的减阻型石墨纳米流体与未添加减阻剂的石墨-水纳米流体的稳定性比较, 结果如图 3 所示。在 24 h 的测试时间内, 减阻型石墨纳米流体的透射比远远小于石墨-水纳米流体的透射比, 是后者的 20%。其他种类减阻型纳米流体均表

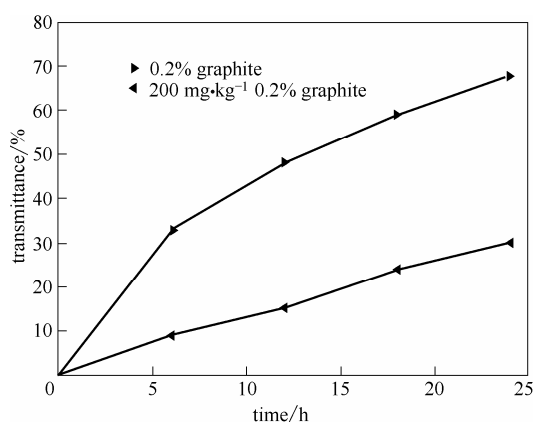


图 3 减阻型石墨纳米流体的稳定性

Fig.3 Stability of drag reducing graphene nanofluid

现出类似的现象, 由此可知, 减阻型纳米流体的稳定性较佳, 在较长时间内不易沉积, 适于后期的实验研究及应用。

运用透射电子显微镜(TEM)对减阻型石墨纳米流体的分散性及稳定性进行了观测研究, 结果如图 4 所示。

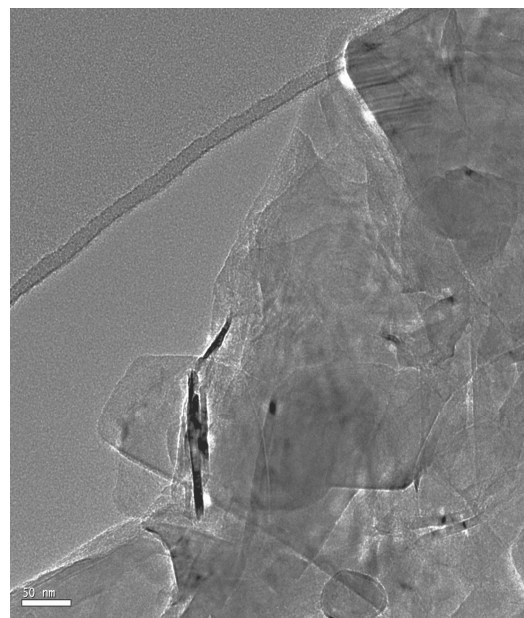


图 4 减阻型石墨纳米流体 TEM 照片

Fig.4 TEM photo of drag reducing graphene nanofluid

1.4 不确定度评估

为了得到更准确的实验结果, 需要对系统进行不确定度评估^[25], 所使用仪器的不确定度见表 2, 变量的不确定度见表 3, 所使用的误差传递分析函数见 2.1 节。

表 2 实验仪器及其不确定度

Table 2 Laboratory instruments and uncertainty

Instruments	Uncertainty/%
thermal resistance	0.5
differential pressure transmitter	0.5
rotameter	0.5

表 3 实验变量及其不确定度

Table 3 Experimental variables and uncertainty

Variable	Uncertainty/%
friction factor, f	1.7
heat transfer factor, h	8.6
Reynolds number, Re	1.1
Nusselt number, Nu	11.5
tube diameter, d	0.1
tube length, l	0.1

2 实验数据分析

2.1 数据处理

平均热通量 $\bar{Q}$ 采用牛顿 (Newton) 冷却公式计算

$$\bar{Q} = h(T_w - T_{nf}) \quad (1)$$

由式 (1) 可得减阻型纳米流体平均对流传热系数

$$\bar{h} = \frac{\bar{Q}}{T_w - T_{nf}} \quad (2)$$

平均热流量计算如下

$$\bar{Q} = Q / A \quad (3)$$

$$Q = c_{nf} q_m \Delta T \quad (4)$$

其中

$$\Delta T = T_{waterin} - T_{waterout} \quad (5)$$

$$q_m = q_v \rho_{nf} \quad (6)$$

$$c_{nf} = \frac{\phi \rho_p c_p + (1 - \phi) \rho_{bf} c_{bf}}{\phi \rho_p + (1 - \phi) \rho_{bf}} \quad (7)$$

水的比热容比纳米颗粒的比热容大, 随着纳米颗粒质量分数的增加, 纳米流体整体的比热容呈减小趋势。

减阻型纳米流体的密度 ρ_{nf} 为

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_{bf} + \phi \rho_p \quad (8)$$

由于减阻型纳米粒子的体积分数难以精确测定, 减阻型纳米流体中的粒子体积份额可以由粒子的质量分数计算

$$\phi = \frac{1}{(1/w)(\rho_p/\rho_{bf})} \quad (9)$$

为了使实验数据更加准确, 在计算管壁温度和流体温度时, 要进行多次测量取平均值。由于铜的热导率较高且铜管的壁厚约为 1 mm, 故铜管壁面的温度梯度在本次实验中可忽略不计, 即 T_w 就是热电阻测量的温度值。

$$\bar{T}_w = \sum_{i=1}^6 T_{wi} / 6 \quad (10)$$

$$\bar{T}_{nf} = (T_{out} + T_{in}) / 2 \quad (11)$$

管内 Reynolds 数可表示为

$$Re = ud / \nu_{nf} \quad (12)$$

其中

$$u = 4q_v / \pi d^2 \quad (13)$$

减阻型纳米流体和去离子水的运动黏度 ν 由 SNB-3 数字式旋转黏度计测得。

由能量方程推导出流动阻力系数, 即

$$f = 2\Delta p d / l \rho_{nf} u^2 \quad (14)$$

实验结果精度的判断需对去离子水在实验设备中所测试的结果与已有理论或经验公式进行对比, 以确定实验系统的误差。

传热系数的相对误差传递函数

$$\frac{\Delta h}{h} = \left| \frac{\partial \ln h}{\partial Q} \right| \Delta Q + \left| \frac{\partial \ln h}{\partial A} \right| \Delta A + \left| \frac{\partial \ln h}{\partial T} \right| \Delta(T_w - T_{nf}) = \frac{\Delta Q}{Q} + \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta(T_w - T_{nf})}{T_w - T_{nf}} \quad (15)$$

平均热流量 Q 误差传递函数

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta q_m}{q_m} + \frac{\Delta(T_{nfout} - T_{nf in})}{T_{nfout} - T_{nf in}} \quad (16)$$

管壁温度绝对误差

$$\Delta T_w = \frac{1}{6} \left[\sum_{i=1}^6 \Delta T_w(i) \right] \quad (17)$$

减阻型纳米流体温度绝对误差

$$\Delta T_{nf} = \frac{\Delta T_{nf in} + \Delta T_{nf out}}{2} \quad (18)$$

而且

$$\Delta(T_w - T_{nf}) = T_w + T_{nf}, \quad \Delta(T_{nfout} - T_{nf in}) = T_{nfout} + T_{nf in}$$

对流传热系数的总误差传递函数

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\Delta q_m}{q_m} + \frac{\Delta T_{nfout}}{T_{nfout} - T_{nf in}} + \frac{\Delta T_{nf in}}{T_{nfout} - T_{nf in}} + \frac{\Delta A}{A} + \frac{1}{6(T_w - T_{nf})} \left[\sum_{i=1}^6 \Delta T_w(i) \right] + \frac{\Delta T_{nfout}}{2(T_w - T_{nf})} + \frac{\Delta T_{nf in}}{2(T_w - T_{nf})} \quad (19)$$

Nusselt 数最大相对误差传递函数

$$\frac{\Delta Nu}{Nu} = \frac{\Delta Q}{Q} + \frac{\Delta \lambda}{\lambda} + \frac{\Delta(T_w - T_{nf})}{T_w - T_{nf}} = \frac{\Delta q_m}{q_m} + \frac{\Delta T_{nfout}}{T_{nfout} - T_{nf in}} + \frac{\Delta T_{nf in}}{T_{nfout} - T_{nf in}} + \frac{\Delta \lambda}{\lambda} + \frac{1}{6(T_w - T_{nf})} \left[\sum_{i=1}^6 \Delta T_w(i) \right] + \frac{\Delta T_{nfout}}{2(T_w - T_{nf})} + \frac{\Delta T_{nf in}}{2(T_w - T_{nf})} \quad (20)$$

单位压降的相对误差传递函数

$$\frac{\Delta(\Delta p / \Delta l)}{\Delta p / \Delta l} = \left| \frac{\partial \ln(\Delta p / \Delta l)}{\partial(\Delta p)} \right| \Delta(\Delta p) + \left| \frac{\partial \ln(\Delta p / \Delta l)}{\partial(\Delta l)} \right| \Delta(\Delta l) = \frac{\Delta(\Delta p)}{\Delta p} + \frac{\Delta(\Delta l)}{\Delta l} \quad (21)$$

流动阻力 f 的相对误差传递函数

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta(\Delta p)}{\Delta p} + 2 \frac{\Delta u}{u} + \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta l}{l} \quad (22)$$

Reynolds 数的相对误差传递函数

$$\frac{\Delta Re}{Re} = \frac{\Delta u}{u} + \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta \nu}{\nu} \quad (23)$$

2.2 实验理论验证

在本实验开始前, 对实验装置进行检测, 验证

装置的精确度。装置校核方法是在 25℃ 常温下测量去离子水在湍流流动状态下的管内对流传热系数 h 和流动阻力系数 f ，然后根据对流传热系数计算出 Nusselt 数，根据公式

$$Nu = hD/\lambda \quad (24)$$

减阻型纳米流体和去离子水的热导率 λ 均由 DRE-III 型热导率测定仪所测。将计算所得的 Nusselt 数和流动阻力系数分别与 Dittus-Boelter 实验关联式^[26]和 Blasius 近似公式^[27]进行比较，其中 Dittus-Boelter 实验关联式适用于湍流流动状态，Blasius 近似公式表示流体在湍流流动状态下的阻力特性。

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (25)$$

$$f = 0.0791 Re^{-0.25} \quad (26)$$

将去离子水在湍流流动状态下所得的实验结果即换热特性和流动特性参数与理论公式所得的结果进行比较，如图 5、图 6 所示，则可知换热特性

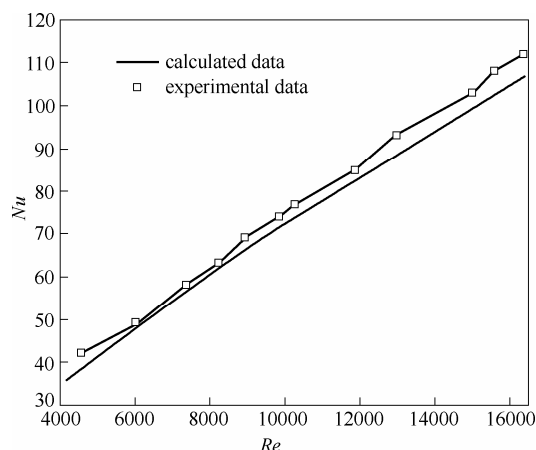


图 5 去离子水换热特性与 Dittus-Boelter 关联式比较
Fig.5 Deionized water heat transfer characteristics compared with Dittus-Boelter experimental correlation

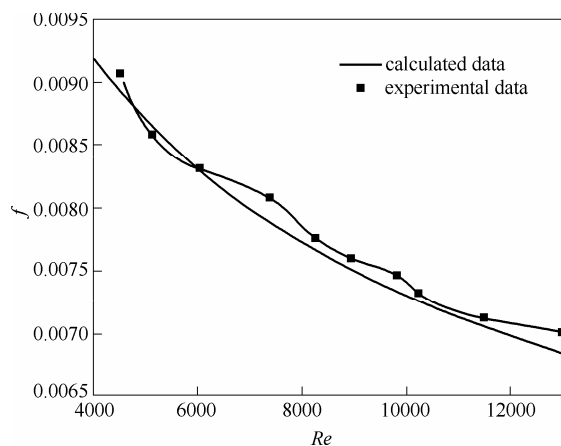


图 6 去离子水流动特性与 Blasius 近似公式比较
Fig.6 Deionized water flow characteristics compared with Blasius approximate formula

实验结果与理论公式结果有较好的吻合度，总体误差基本控制在 8% 以内，流动特性实验结果与理论公式结果也吻合较好，总体误差在 6% 左右，所以实验系统精度满足要求。

3 实验结果讨论

本次实验使用多种纳米粒子，包括金属、非金属及金属氧化物，然后与表面活性剂 CTAC 减阻剂相混合，形成不同种类的减阻型纳米流体，目的是筛选出一种换热性能好且减阻效果突出的减阻型纳米流体。

本实验所用数据均为在同等工况下测得数据的平均值，每组进行平行实验 3~5 次。

3.1 实验分析

3.1.1 减阻剂浓度对去离子水换热和流动特性的影响 图 7 显示了不同浓度表面活性剂十六烷基三甲基氯化铵 (CTAC) 与去离子水所形成的减阻剂和去离子水在流动特性方面的比较结果，分别测得在 4000~14000 的 Reynolds 数范围内浓度为 100~400 mg·kg⁻¹ 的减阻剂和去离子水在紫铜管中的压差，进而换算出流动阻力系数，比较其阻力系数的大小。

去离子水与不同浓度减阻剂均出现如下现象，即随着 Reynolds 数的不断增大，其流动阻力系数均逐渐减小，去离子水的流动阻力系数降低幅度明显低于减阻剂的流动阻力系数降低幅度。当 Reynolds 数在 4000 左右时，去离子水和不同浓度减阻剂的流动阻力系数相差不大，但当 Reynolds 数在 13000 时，不同浓度减阻剂的流动阻力系数远远低于去离子水的流动阻力系数。因此可以得出：不同浓度的减阻

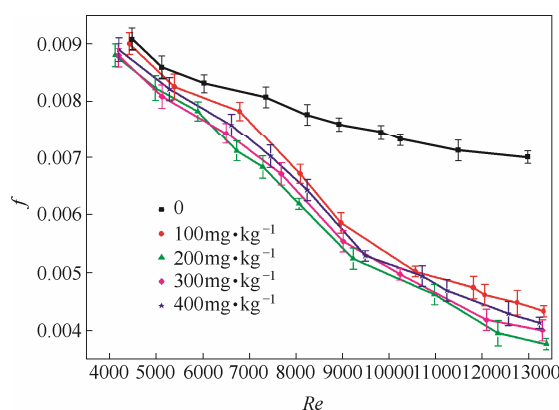


图 7 减阻剂浓度与流体流动阻力系数的关系
Fig.7 Drag reducing fluid concentration relationship with fluid flow resistance coefficient

剂与去离子水相比均出现明显减阻趋势, 且当 Reynolds 数在 13000 左右时处于减阻平稳状态下, 其流动阻力系数约为去离子水的 50%~60%。而且由图可知, 浓度为 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的减阻剂具有最佳的减阻效果, 当减阻剂浓度大于 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 随着浓度的增加, 其减阻效果呈现减弱趋势。这是因为流体中减阻剂浓度到 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 已经达到形成棒状胶束结构产生减阻现象的最高浓度要求, 而继续增加浓度不会对减阻起促进作用, 反而会增加流体黏度, 削弱减阻剂的减阻效果。

由图 8 可知, 随着 Reynolds 数的逐渐增大, 去离子水与不同浓度减阻剂的对流传热系数均逐渐增大。在流体温度为 25°C 下, 随着减阻剂浓度的增大, 其对流传热系数与去离子水相比均逐渐减小, 减小比例在 15%~25%。 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 减阻剂对流传热系数降低幅度最小大约为 9%, $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 减阻剂次之大约为 14%, $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 与 $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 减阻剂的对流传热系数降低幅度大致相等, 约为 25%。所以 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的减阻剂具有最优的减阻和换热特性, 因此本次实验所使用的减阻型纳米流体的减阻剂浓度均为 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。而且由图可知减阻剂具有很好的减阻优势, 但是在流动阻力降低的同时其换热性能也在发生恶化。

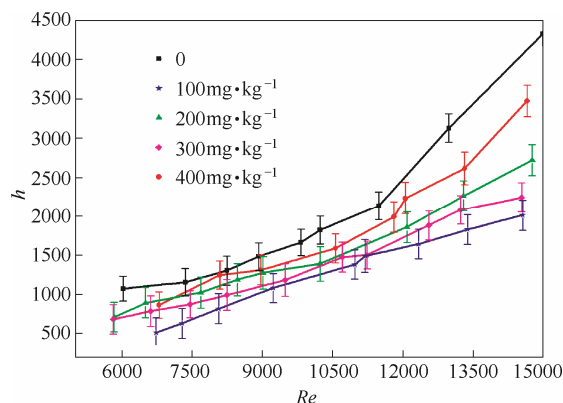


图 8 25°C 下减阻剂浓度与流体对流传热系数的关系

Fig.8 Drag reducing fluid concentration relationship with convective heat transfer coefficient under 25°C

3.1.2 纳米颗粒种类对减阻型纳米流体换热特性和流动特性的影响 在常温 25°C 条件下, 纳米粒子质量分数小于或等于 0.2% 时, 纳米流体悬浮液对流换热特性可以按传统工质处理, 而当纳米粒子质量分数大于 0.2% 时, 其悬浮液的换热能力与纯水相比将有所提高, 体现出一定的纳米特性^[16]。所以本文首先研究各种纳米粒子质量分数为 0.2% 时的减阻型纳米流体的对流换热特性, 进而分析并筛选出哪

种减阻型纳米流体的对流换热特性和流动特性表现效果最佳。

图 9 显示出各种减阻型纳米流体的对流传热系数均随着 Reynolds 数的增大而增大, 且减阻型 Cu 纳米流体具有最佳的换热效果, 减阻型石墨纳米流体次之, 大约均为去离子水换热效果的 2~3 倍。而减阻型多壁碳纳米管纳米流体与去离子水的换热效果基本相同, 减阻型 Al_2O_3 和 Al 纳米流体的换热效果较差, 次于去离子水的换热效果。分析其原因是因为 0.2% 的质量分数对于多壁碳纳米管、 Al_2O_3 和 Al 来说较小, 导致其所形成的流体黏度过低^[28], 通过使用 SNB-3 数字式旋转黏度计对减阻型多壁碳纳米管、 Al_2O_3 、Al 纳米流体的黏度进行测量, 其值明显小于减阻型 Cu、石墨纳米流体, 平均约为后者的 70%~80%, 影响其换热效果的表现。

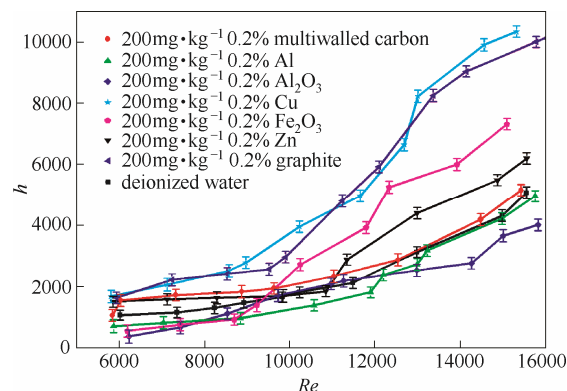


图 9 各种减阻型纳米流体对流传热系数与 Reynolds 数的关系

Fig.9 Variety of drag reducing nanofluid coefficient of convective heat transfer relationship with Reynolds number

通常情况下对于在同一质量分数下不同减阻型纳米流体, 密度大的热导大, 因为密度大的体积小, 而且分子间排列紧密, 因此会加速热传递。以石墨为例, 石墨与多壁碳纳米管本质是同一种物质, 所以其密度数值应该相差不大, 但是石墨的原子架构排列有规律, 而多壁碳纳米管原子架构相对石墨而言较杂乱无章, 存在许多缝隙, 所以其热导率和黏度较差于石墨。而且石墨具有非常良好的耐高温型、可塑性和润滑性, 其导电性比一般非金属高百倍以上, 导热性能超过钢、铁、铅等金属材料。再以铜为例, 其具有仅次于银的非常良好的导电性和导热性能, 因此这两种物质所形成的减阻型纳米流体与多壁碳纳米管、 Al_2O_3 、Al、 Fe_2O_3 、Zn 所形成的减阻型纳米流体相比具有更好的换热表现。所以不同颗粒减阻型纳米流体, 其密度不同导致物性也

有较大差别, 因此所形成的减阻型纳米流体的性能也有所不同。

图 10 展示了各种减阻型纳米流体的流动阻力系数随着 Reynolds 数的增大而减小且均低于去离子水的流动阻力系数即这几种减阻型纳米流体均带有明显的减阻特性。减阻型 Cu 纳米流体和减阻型 Fe_2O_3 纳米流体的流动阻力系数较大, 减阻型石墨纳米流体的流动阻力系数最小, 其流动阻力减小幅度与去离子水相比可达到 60%, 减阻型多壁碳纳米管纳米流体的流动阻力系数次之。当 Reynolds 数大于 14000 时, 大多数减阻型纳米流体的流动阻力系数呈现平缓的趋势, 表明流速对流动特性具有一定的影响。

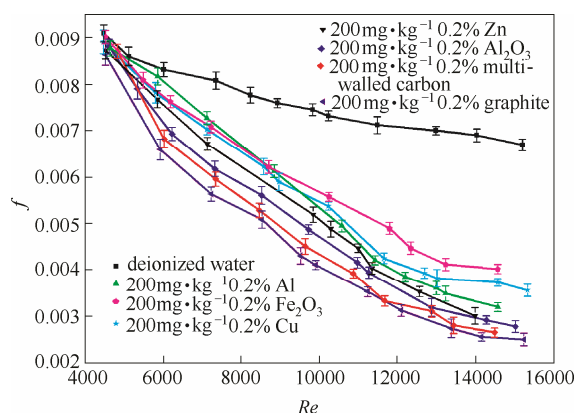


图 10 各种减阻型纳米流体流动阻力系数与 Reynolds 数的关系

Fig.10 Variety of drag reducing nanofluid coefficient of flow resistance relationship with Reynolds number

总之减阻型石墨纳米流体在增强对流换热和减少流动阻力方面具有最佳的综合特性, 而且其性价比较高, 因此后续的实验对其开展详细的研究。

3.1.3 石墨纳米颗粒浓度对减阻型纳米流体换热特性和流动特性的影响 随着 Reynolds 数的增加, 减阻型石墨纳米流体的对流传热系数也逐渐增大, 而且增长幅度越来越大如图 11 所示。在石墨纳米颗粒质量分数分别为 0.1%~0.4%时, 减阻型石墨纳米流体的对流传热系数随着质量分数的增加而增大, 当达到 0.5%时, 减阻型石墨纳米流体的对流传热系数基本上不再增加, 与质量分数为 0.4%时大致持平, 因此石墨纳米颗粒质量分数为 0.4%时, 减阻型石墨纳米流体的对流传热系数达到最大值。

由图 12 得出随着 Reynolds 数的增大, 减阻型石墨纳米流体的流动阻力系数逐渐减小。同时随着石墨纳米颗粒质量分数由 0.1%增大到 0.4%, 减阻

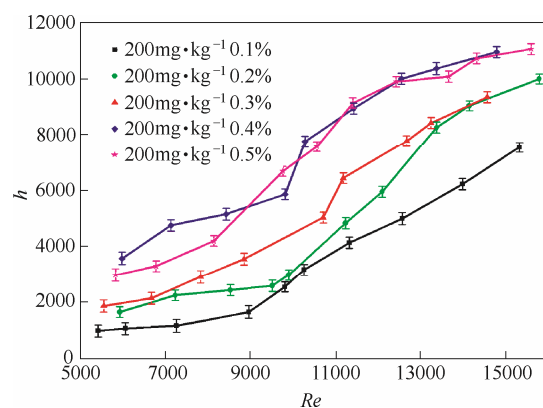


图 11 石墨纳米颗粒浓度对流体对流传热系数的影响

Fig.11 Effect of graphite nanoparticles concentration on fluid convective heat transfer coefficient

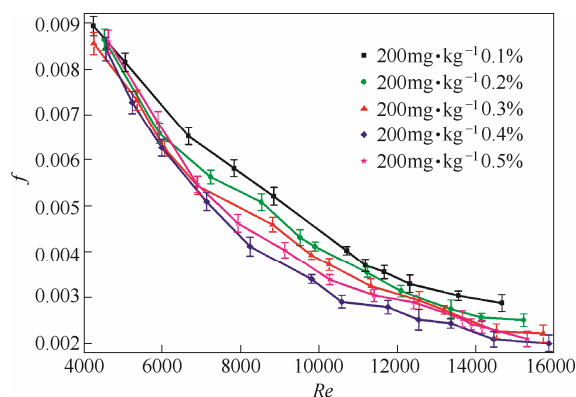


图 12 石墨纳米颗粒浓度对流体流动阻力系数的影响

Fig.12 Effect of graphite nanoparticles concentration on fluid flow resistance coefficient

型石墨纳米流体的流动阻力系数呈现递减的趋势。当其浓度增大到 0.5%时, 减阻型石墨纳米流体的流动阻力系数呈现增大的趋势, 大于石墨纳米颗粒浓度为 0.4%时的减阻型石墨纳米流体的流动阻力系数。而且当 Reynolds 数大于 14000 时, 减阻型石墨纳米流体的流动阻力系数逐渐趋于平缓, 减小幅度逐渐降低。

因此, 综合图 11 和图 12 可得: 石墨纳米颗粒浓度为 0.4%时, 减阻型石墨纳米流体具有最佳的换热和减阻特性, 体现出一定的纳米特性, 当浓度大于 0.4%时, 减阻型石墨纳米流体的换热和减阻特性均发生恶化。分析其原因为: 在额定的浓度范围内, 纳米粒子的热运动会随着浓度的增加而变得更为强烈, 粒子与粒子、粒子与基液间的热交换也会变得更加频繁。而当超过这一额定浓度范围时, 流体的黏度随之增大成为影响热交换的主要因素, 所形成的棒状胶束结构也随着黏度的增加而产生粘连现象, 使得纳米粒子的热运动和粒子与粒子、粒子与

基液之间的热交换变得缓慢, 削弱了流体的换热效果和减阻效果。

3.2 验证回归方程

Pak 等^[29]和 Xuan 等^[30]通过对纳米流体对流换热实验数据进行拟合, 得到了纳米流体在湍流流动状态下的换热关联式。Reddy 等^[31]研究了基液为乙二醇和水的 TiO_2 纳米流体在内螺纹管、圆管中的换热特性和流动摩擦阻力, 给出了流动阻力关联式。在此基础上, 考虑到 Re 、 Pr 、 w 相关的影响因素, 并结合所得的实验数据, 提出了减阻型石墨纳米流体的换热关联式以及流动阻力关联式分别为

$$Nu_{\text{Reg}} = 0.0000318 Re^{1.9164} Pr^{-0.7725} w^{0.3232} \quad (27)$$

$$f_{\text{Reg}} = 40.612 Re^{-1.077} w^{-0.1072} \quad (28)$$

其中, 纳米粒子质量分数 w 范围为 0.1%~0.5%; Reynolds 数范围为 6000~14000。

图 13、图 14 分别给出了式(27)、式(28)的计算值与实验结果的比较。图中显示出本实验 95% 的数

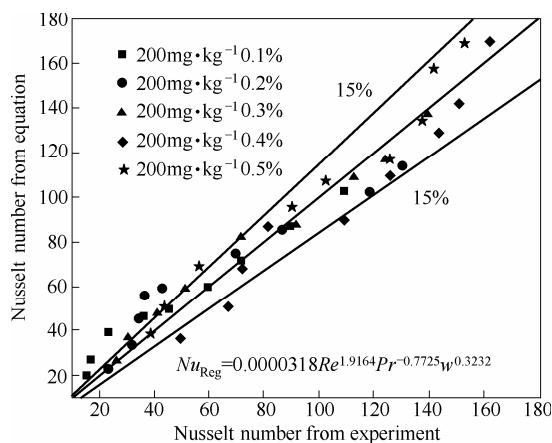


图 13 减阻型石墨纳米流体对流传热系数与计算值的比较

Fig.13 Comparison of drag reducing graphene nanofluid convective heat transfer coefficient and calculated values

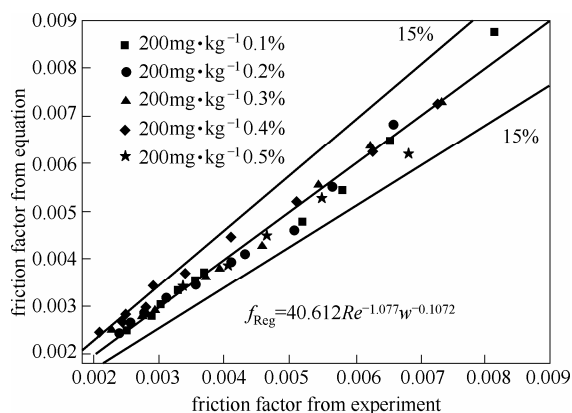


图 14 减阻型石墨纳米流体流动阻力系数与计算值的比较

Fig.14 Comparison of drag reducing graphene nanofluid flow resistance coefficient and calculated values

据其平均偏差均在 15% 以内, 计算与实验结果吻合良好, 故换热关联式和流动阻力关联式都成立, 较好地反映了减阻型石墨纳米流体的传热特性和流动阻力特性。

3.3 综合性能分析

减阻型纳米流体与去离子水相比表现出强化对流换热和减少流动阻力的特性, 这两种特性哪一种表现得更为突出则直接决定了减阻型纳米流体的实际应用方向, 更好地表现减阻型纳米流体的应用效果。因此, 本节通过定义综合性能因子 K 来分析减阻型纳米流体的强化对流换热和减少流动阻力的效果。

$$K = \frac{\Delta h / h_{\text{bf}}}{\Delta f / f_{\text{bf}}} = \frac{(h_{\text{nf}} - h_{\text{bf}}) / h_{\text{bf}}}{(f_{\text{bf}} - f_{\text{nf}}) / f_{\text{bf}}} \quad (29)$$

当 $K > 1$ 时, 表明该种减阻型纳米流体的对流换热强化效果强于流动阻力的减少效果, 流体表现出最佳的强化换热特性, 而且其也具有一定的减少流动阻力特性; 当 $K < 1$ 时, 表明该种减阻型纳米流体的对流换热强化效果弱于流动阻力的减少效果, 流体表现出最佳的降低流动阻力特性, 而且其也表现出一定的强化换热效果; 当 $K = 1$ 时, 表明该种减阻型纳米流体所表现的对流换热特性和流动阻力特性与去离子水所表现的效果相差不大; 当 K 为负数且其绝对值大于 1 时, 表明该种减阻型纳米流体的强化对流换热效果较好, 但其流动阻力值明显大于去离子水的流动阻力, 减少流动阻力特性表现得十分不突出; 当 K 为负数且其绝对值小于 1 时, 表明该种减阻型纳米流体的对流换热效果较差, 而其减少流动阻力特性较明显。图 15 显示了在 25℃ 温度下, Reynolds 数为 8000、10000、12000 时综合性能因子 K 的分布情况。

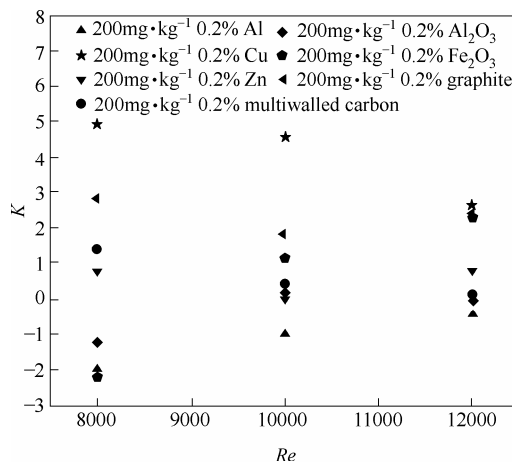


图 15 各种减阻型纳米流体的综合性能因子

Fig.15 Overall performance factors of various drag reducing nanofluids

如图 15 所示, 减阻型石墨纳米流体的综合性能因子 K 较大, 仅次于减阻型 Cu 纳米流体, 并且大于其他减阻型纳米流体的综合性能因子 K , 表现出较佳的强制对流换热和减少流动阻力效果。因此减阻型石墨纳米流体在实际工程中具有广泛的应用前景, 同时能够达到节能的目的。而减阻型 Al 和 Al_2O_3 纳米流体的对流换热和减少流动阻力效果表现得较差, 不具备应用价值。由图中还可看出, 各种减阻型纳米流体在 K 值为 0~1 之间时所分布的点最多, 所以大多数的减阻型纳米流体如减阻型多壁碳纳米管、 Fe_2O_3 、Zn 纳米流体均表现出很好的降低流动阻力特性, 而强化对流换热特性则稍显逊色。

图 16 显示出当石墨纳米颗粒质量分数为 0.5% 时, 减阻型石墨纳米流体有个别点的综合性能因子 K 已达到最大值, 优于其他质量分数时的减阻型纳米流体。但从图中总的趋势可以看出: 随着 Reynolds 数的继续增大纳米颗粒质量分数为 0.4% 时的综合性能因子 K 将大于或等于纳米颗粒质量分数为 0.5% 时的综合性能因子 K 。而且此时其综合性能因子 K 是去离子水的 5 倍。因此减阻型石墨纳米流体的最佳质量分数为 0.4%, 此时能够表现出最优的对流换热和减少流动阻力的综合效果, 表明其具有广阔的研究和应用前景。

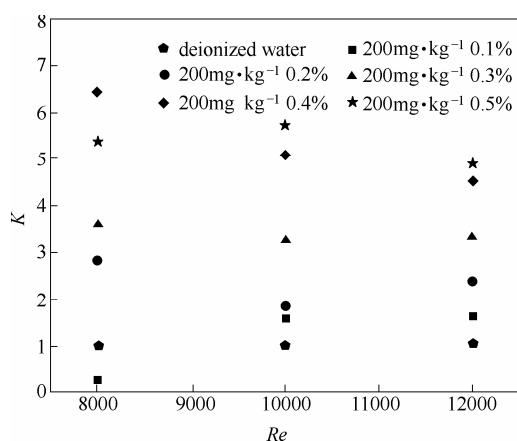


图 16 不同浓度石墨纳米颗粒的综合性能因子
Fig.16 Overall performance factors of different concentrations of graphite nanoparticle

4 结 论

本文通过对不同浓度的减阻剂和不同种类、不同质量分数减阻型纳米流体的流动和换热特性进行了实验研究, 结果表明:

(1) 当减阻剂浓度为 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时具有最优

的减阻特性, 随着减阻剂浓度的增加, 其减阻效果呈现减弱趋势, 而且在流动阻力降低的同时其换热性能也在发生恶化;

(2) 减阻型石墨纳米流体在增强对流换热和减少流动阻力方面具有较为突出的综合表现, 并且具有很高的性价比, 其流动特性与减阻流体几乎相同, 但换热特性有很大提高, 同时得出了其在圆管内的换热关联式和流动阻力关联式;

(3) 当石墨纳米颗粒质量分数为 0.4% 时, 减阻型石墨纳米流体具有最佳的换热和减阻特性, 其综合性能因子 K 是去离子水的 5 倍。

符 号 说 明

- A ——有效换热面积, m^2
- c ——比热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
- D ——内径, m
- f ——流动摩擦阻力系数
- h ——对流传热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
- l ——长度, m
- Pr ——Prandtl 数
- Δp ——压降, Pa
- Q ——平均热流量, W
- $\bar{Q}$ ——平均热通量, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
- q ——流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
- Ra ——粗糙度, μm
- Re ——Reynolds 数
- $T, \Delta T$ ——分别为温度、温差, $^\circ\text{C}$
- u ——流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
- w ——纳米颗粒质量分数, %
- λ ——热导率, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- ν ——运动黏度, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- ρ ——密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- ϕ ——纳米颗粒体积分数, %
- 下角标
- bf ——基液
- in,out ——进口、出口
- m ——质量
- nf ——减阻型纳米流体
- p ——纳米颗粒
- Reg ——回归方程
- v ——体积
- w ——管壁
- water ——水

References

- [1] Choi S U S, Eastman J A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles in developments and applications of non-Newtonian flows// ASME International Mechanical Engineering

- Congress and Exposition [C]. New York, 1995, **231**: 99-105.
- [2] Li Qiang (李强), Xuan Yimin (宣益民). Copper-water nano fluid flow and convective heat transfer characteristics [J]. *Science China: E* (中国科学:E 辑), 2002, **32**(3): 331-337.
- [3] Li Qiang (李强), Xuan Yimin (宣益民). The experimental research of nanometer fluid convection heat transfer [J]. *Journal of Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), 2002, **23**(6): 721-723.
- [4] Zhong Xun (钟勋), Yu Xiaoli (俞小莉), Wu Jun (吴俊). Alumina organic nanofluids base flow and heat transfer characteristics [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2009, **60**(1): 35-41.
- [5] Wang Peng (王鹏), Bai Minli (白敏丽), Lü Jizu (吕继组), Hu Chengzhi (胡成志), Wang Yuyan (王玉艳). Turbulent pipe flow characteristics within nanofluids [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2014, **65**(S1): 17-26.
- [6] Halefadi S, Estellé P, Maré T. Heat transfer properties of aqueous carbon nanotubes nanofluids in coaxial heat exchanger under laminar regime [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2014, **55**: 174-180.
- [7] Rabienataj Darzi A A, Farhadi M, Sedighi K. Heat transfer and flow characteristics of Al_2O_3 -water nanofluid in a double tube heat exchanger [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2013, **47**: 105-112.
- [8] Utomo A T, Haghighi E B, Zavareh A I T, Ghanbarpourgeravi M, Poth H, Khodabandeh R, Palm B, Pacek A W. The effect of nanoparticles on laminar heat transfer in a horizontal tube [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, **69**: 77-91.
- [9] Toms B A. Some observation on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers// Proceedings of the First International Congress Rheology [C]. Amsterdam, North Holland, 1949: 135-141.
- [10] Ceng Renhai (岑仁海). Cetyl trimethyl ammonium chloride of drag reduction experiment research [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [11] Wang Dezhong (王德忠), Hu Youqing (胡友情), Wang Songping (王松平), Sun Shan (孙杉). The performance of the low concentration of surfactant drag reduction of fluid [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University* (上海交通大学学报), 2005, **39**(2): 225-229.
- [12] Rózański J. Flow of drag-reducing surfactant solutions in rough pipes [J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2011, **166**: 279-288.
- [13] Ge Wu, Kesselman E, Talmon E, Hart D J, Zakin J L. Effects of chemical structures of parahalobenzoates on micelle nanostructure, drag reduction and rheological behaviors of dilute CTAC solutions [J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2008, **154**: 1-12.
- [14] Liu Zhenhua, Liao Liang. Forced convective flow and heat transfer characteristics of aqueous drag-reducing fluid with carbon nanotubes added [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2010, **49**: 2331-2338.
- [15] Song Bin (宋斌), Liao Liang (廖亮), Liu Zhenhua (刘振华). Drag fluid flow and heat transfer characteristics of carbon nanotubes [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University* (上海交通大学学报), 2010, **44**(10): 1332-1336.
- [16] Liao Liang (廖亮). Drag reduction nanofluid flow and heat transfer characteristics of the experimental study [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [17] Yang Juancheng, Li Fengchen, He Yurong, Huang Yimin, Jiang Baocheng. Experimental study on the characteristics of heat transfer and flow resistance in turbulent pipe flows of viscoelastic-fluid-based Cu nanofluid [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, **62**: 303-313.
- [18] Yang Juancheng (阳倦成), Xu Hongpeng (徐鸿鹏), Li Fengchen (李凤臣). Nanofluid viscoelastic fluid rheological properties [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2014, **65**(S1): 199-205.
- [19] Baheri Islami S, Dastvareh B, Gharraei R. An investigation on the hydrodynamic and heat transfer of nanofluid flow with non-Newtonian base fluid in micromixers [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, **78**: 917-929.
- [20] Xia Guodong, Jiang Huanming, Liu Ran, Zhai Yuling. Effects of surfactant on the stability and thermal conductivity of Al_2O_3 /de-ionized water nanofluids [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, **84**: 118-124.
- [21] Li Xing (李兴), Chen Ying (陈颖), Mo Songping (莫松平), Jia Lisi (贾利斯). Influence of surfactants on solid-liquid phase change of water-based nanofluids properties [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2013, **64**(9): 3324-3330.
- [22] Cheng Bo (程波), Du Kai (杜培), Zhang Xiaosong (张小松), Niu Xiaofeng (牛晓峰). Stability of ammonia-black nanofluids [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2008, **59**(S2): 49-52.
- [23] Li Peiwen, Kawaguchi Y, Daisaka H, Yabe A, Hishida K, Maeda M. Heat transfer enhancement to the drag-reducing flow of surfactant solution in two-dimensional channel with mesh-screen inserts at the inlet [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2001, **123**(4): 779-789.
- [24] Li F C, Kawaguchi Y. Investigation of turbulence structures in a drag-reduced turbulent channel flow with surfactant additive by stereoscopic particle image velocimetry [J]. *Experiments in Fluids*, 2006, **40**(2): 218-230.
- [25] Moffat R J. Describing the uncertainties in experimental results [J]. *Experimental Fluid and Thermal Science*, 1988, **1**(1): 3-17.
- [26] Dittus P W, Boelter L M K. Heat transfer in automobile radiators of the tubular type [J]. *Univ. Calif. Publ. Eng.*, 1930, **2**: 443-461.
- [27] Dean R B. Reynolds number dependence of skin friction and other bulk flow variables in two-dimensional rectangular duct flow [J]. *Fluid Eng.*, 1978, **100**(3): 215-223.
- [28] Ling Zhiyong (凌志勇), Zou Tao (邹涛), Ding Jianing (丁建宁), Cheng Guanggui (程广贵), Zhang Zhongqiang (张忠强), Sun Dongjian (孙东建), Qian Long (钱龙). Nanofluids viscosity characteristics [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2012, **63**(5): 1409-1414.
- [29] Pak B C, Cho Y I. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles [J]. *Exp. Heat Transfer*, 1998, **11**(2): 151-170.
- [30] Xuan Yimin, Li Qiang. Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids [J]. *ASME J. Heat Transfer*, 2003, **125**(1): 151-155.
- [31] M Chandra Sekhara Reddy, Veeredhi Vasudeva Rao. Experimental investigation of heat transfer coefficient and friction factor of ethylene glycol water based TiO_2 nanofluid in double pipe heat exchanger with and without helical coil inserts [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2014, **50**: 68-76.