

作者简介: 苏风民(1978-),男,博士;马学虎*(1965-),男,教授,博士生导师, E-mail: xuehuma@dlut.edu.cn

理,然后将一定质量的纳米颗粒直接加入到氨水中,通过2 h的超声分散,最终形成稳定的双组分纳米流体.测量配制好的纳米流体密度,再假设颗粒加入前后氨水的体积不变,利用颗粒的质量、氨水的质量和氨水的体积算出纳米流体的密度,比较两者,发现两种方法得到的密度值很接近,证明所配制的纳米流体有很好的稳定性,没有颗粒沉淀.图2是制备好的双组分纳米流体的透射电镜照片.

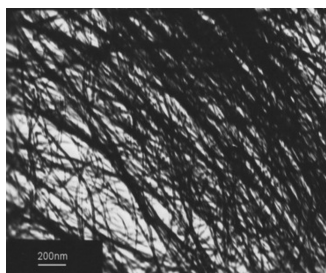


图1 定向碳纳米管(A-MCNTs)的透射电镜照片

Fig.1 TEM photo of the A-MCNTs



图2 纳米碳管-氨双组分纳米流体的透射电镜照片

Fig.2 TEM photo of the carbon nanotubes-ammonia binary nanofluids

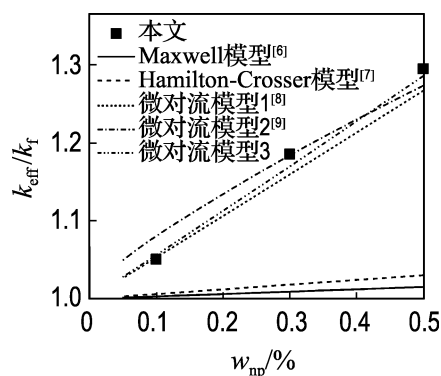
精确测量液体导热系数的主要困难在于如何将导热从其他传热过程中分离出来,本文采用瞬态热丝法来测量双组分纳米流体的导热系数.传统的瞬态热丝法采用的是一根细铂丝,不可避免地存在端部效应,因此本文采用李强等发展的双瞬态热丝法来避免由于端部效应带来的误差.详细的原理和实验系统见文献[5].

实验系统建成后对水的导热系数进行了测量,实验结果显示该测量系统的测量精度在3%以内.

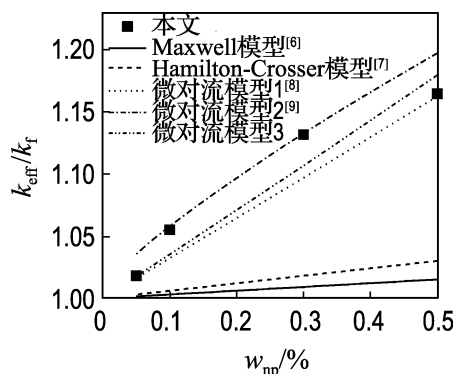
2 实验结果及讨论

2.1 颗粒质量分数对双组分纳米流体导热系数的影响

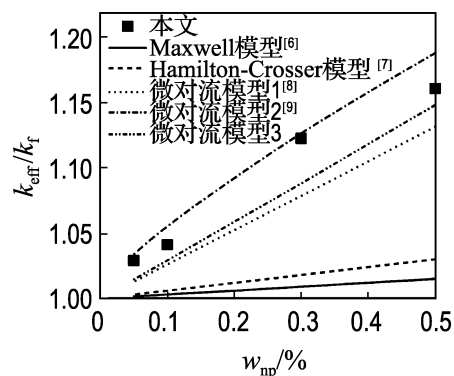
实验中,分别测量了水、12.5%氨水及25.0%氨水为基液的纳米流体的导热系数,颗粒的质量分数 w_{np} 分别是0.05%、0.1%、0.3%、0.5%.图3是



(a) 水



(b) 12.5%氨水



(c) 25.0%氨水

图3 颗粒的质量分数对双组分纳米流体导热系数的影响

Fig.3 Variation of the thermal conductivity of the binary nanofluids with the mass fraction of nanoparticles

颗粒的质量分数对纳米流体导热系数的影响情况.从图3可以看出,用碳纳米管制备的纳米流体对基液的导热系数有非常好的强化效果,在颗粒的质量分数为0.5%时,以水为基液的纳米流体导热系数提高了近30%.氨水双组分纳米流体的导热系数也提高了16%.颗粒的质量分数对双组分纳米流体的导热系数影响规律与水纳米流体基本一样,都是随着颗粒质量分数的增加而增加.

2.2 温度对双组分纳米流体导热系数的影响

实验中,测量了氨水质量分数分别为25.0%和12.5%,颗粒质量分数为0.05%的两种双组分纳米流体在不同温度下的导热系数,温度的变化范围为18~34℃.图4是双组分纳米流体在不同温度下的测量结果.从实验结果看,随着温度的增加,双组分纳米流体的导热系数呈增加趋势,而且这种增加是非线性的.

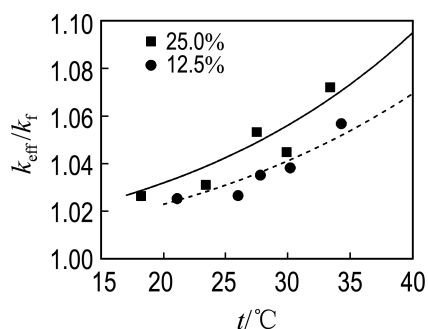


图4 温度对双组分纳米流体导热系数的影响

Fig. 4 Variation of the thermal conductivity of the binary nanofluids with temperature

分析原因主要是温度对基液的黏度、颗粒布朗运动都有影响,而且温度对它们的影响都是非线性的关系.根据文献[9]的分析,温度对纳米流体导热系数的影响可以归结为下面公式的形式:

$$\frac{k_{\text{eff}}}{k_f} = 1 + A \cdot \left(\frac{1}{d_p} \right)^{0.369} \left[\frac{t^{1.232}}{10^{2.464 - 2B/(t-C)}} \right] \quad (1)$$

式中: k_{eff} 、 k_f 分别为纳米流体的有效导热系数和基液的导热系数; A 、 B 、 C 均为常数; d_p 为颗粒的直径; t 为温度.

图4中实线和虚线分别是利用式(1)计算的在双组分纳米流体中氨的质量分数为25.0%和12.5%时,其导热系数的强化效果的计算值.可以看出两者是比较吻合的,都呈现相同的非线性增长趋势.

2.3 氨的质量分数对双组分纳米流体导热系数的影响

因为双组分纳米流体的基液是氨水,而氨的质量分数对基液的导热系数、颗粒的团聚程度都有影响,所以很有必要研究氨的质量分数对双组分纳米流体导热系数的影响.实验中在相同的温度下测量了25.0%氨水、12.5%氨水、纯水3种基液下的双组分纳米流体的导热系数,颗粒的质量分数为0.05%、0.1%、0.3%和0.5%.实验结果如图5所示,由图5可看出,以氨水为基液的纳米流体导热系数的强化效果要比以水为基液的纳米流体的效果要差,特别是随着碳纳米管含量的增加,两者的强化效果差得会更多.分析原因主要是氨是一种弱电解质,在水中会发生一定程度的电离,而根据胶体稳定理论,电解质电离出的离子会加剧碳纳米管的团聚,影响到纳米流体的稳定性,从而降低纳米流体导热系数的强化效果,随着纳米颗粒体积分数的增加,这种影响会更加明显.除了这个主要原因外,双组分纳米流体的黏度、密度和比热容等物性也与水纳米流体有差异.从图5中可以看出两种以氨水为基液的纳米流体的导热系数的强化效果相差不大,12.5%氨的纳米流体的导热系数的强化效果略强于25.0%氨的纳米流体,可能是因为氨为弱电解质,氨本身的质量分数对它自身的电离情况影响不大,对纳米流体稳定性的影响也就相差不多,所以在本文实验范围内,氨的质量分数对纳米流体导热系数的强化效果影响不大.

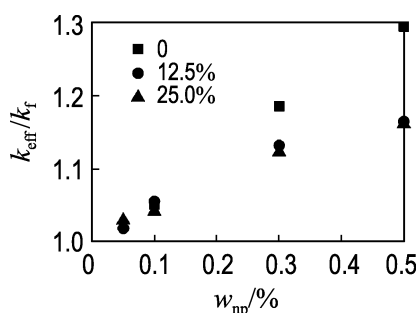


图5 氨的质量分数对双组分纳米流体导热系数的影响

Fig. 5 Variation of the thermal conductivity of the binary nanofluids with mass fraction of ammonia

3 双组分纳米流体导热系数的模拟计算

针对双组分纳米流体的导热系数,本文采用了 5 种不同的模型进行计算,分别是 Maxwell 模型^[6]、Hamilton-Crosser 模型^[7]、微对流模型 1^[8]、微对流模型 2^[9]、微对流模型 3。微对流模型 3 主要综

合考虑了纳米颗粒布朗运动引起液体的微对流以及碳纳米管的线性形状两个因素对纳米流体导热系数的影响,是在微对流模型 1 和 Hamilton-Crosser 模型的基础上给出的。各个模型的表达式见表 1。计算中需要将实验中颗粒的质量分数转换成体积分。

表 1 纳米流体导热系数的模型

Tab. 1 The models for effective thermal conductivity of nanofluids

模型名称	表达式
Maxwell ^[6]	$\frac{k_{\text{eff}}}{k_f} = 1 + \frac{3(\alpha - 1)\varphi}{(\alpha + 2) - (\alpha - 1)\varphi}$
Hamilton-Crosser ^[7] (H-C)	$\frac{k_{\text{eff}}}{k_f} = \frac{\alpha + (n - 1) - (n - 1)(1 - \alpha)\varphi}{\alpha + (n - 1) + (1 - \alpha)\varphi}$
微对流模型 1 ^[8]	$\frac{k_{\text{eff}}}{k_f} = (1 + DRe^{2.4} Pr^{0.333} \varphi) \frac{(1 + 2\alpha) + 2\varphi(1 - \alpha)}{(1 + 2\alpha) - \varphi(1 - \alpha)}$
微对流模型 2 ^[9]	$\frac{k_{\text{eff}}}{k_f} = 1 + E\varphi^{0.7460} \left(\frac{d_f}{d_p}\right)^{0.369} \alpha^{0.7476} Pr^{0.9955} Re^{1.2321}$
微对流模型 3	$\frac{k_{\text{eff}}}{k_f} = (1 + DRe^{2.4} Pr^{0.333} \varphi) \frac{\alpha + (n - 1) - (n - 1)(1 - \alpha)\varphi}{\alpha + (n - 1) + (1 - \alpha)\varphi}$

注: $Re = \frac{\rho \mu}{\mu} \sqrt{\frac{18k_b T}{\pi \rho_p d_p}}$; $Pr = \frac{C_p \mu}{k_f}$; $\alpha = k_p / k_f$; D 和 E 是常数; n 是颗粒的形状因子; φ 是颗粒的体积分数; d_f 是液体分子的半径; d_p 是颗粒的半径; k_b 是波尔兹曼常数; C_p 为基液的比热容; k_f 为基液的导热系数; ρ_p 是颗粒的密度; μ 为纳米流体的黏度

计算结果如图 3 所示,从计算结果可以看出,Maxwell 模型和 Hamilton-Crosser 模型这两个传统的模型由于没有考虑颗粒的布朗运动带来的微对流,其计算值远低于实验值;而另外 3 种微对流模型的模拟结果相差不多,微对流模型 2 的计算值最大,微对流模型 3 次之,微对流模型 1 最小。它们的计算结果与实验结果都比较接近。因此可以应用纳米流体导热系数的微对流模型来计算双组分纳米流体的导热系数。

4 结 论

(1)以氨水为基液、碳纳米管为颗粒的双组分纳米流体的导热系数有很大提高,在颗粒质量分数为 0.5% 时,流体的导热系数提高了 16%;并且

随着纳米碳管质量分数的增加,强化效果也增强。

(2)随着流体温度的增加,双组分纳米流体导热系数的强化因子呈现一种非线性增长趋势。

(3)以氨水为基液的双组分纳米流体的导热系数的强化效果要低于以水为基液的纳米流体。氨的质量分数对双组分纳米流体的导热系数的强化影响不大。

(4)氨水-碳纳米管双组分纳米流体的导热系数的强化规律与以水为基液的纳米流体的强化规律基本相同,并可以应用普通纳米流体的导热系数计算模型来预测双组分纳米流体的导热系数。

参考文献:

[1] CHOI U S. Enhancing thermal conductivity of fluids

- with nanoparticles [C] // SINGER D A, WANG H P. **Development and Application of Non-Newtonian Flows**. New York: ASME, 1995
- [2] KEBLINSKI P, EASTMAN J A, CAHILL D G. Nanofluids for thermal transport [J]. **Materials Today**, 2005, **8**(6):36-44
- [3] KRISHNAMURTHY S, BHATTACHARYA P, PHELAN P E, *et al.* Enhanced mass transport in nanofluids [J]. **Nano Letter**, 2006, **6**(3):419-423
- [4] KIM J K, JUNG J Y, KANG Y T. The effect of nano-particles on the bubble absorption performance in a binary nanofluid [J]. **International Journal of Refrigeration**, 2006, **29**:22-29
- [5] 李 强, 宣益民. 纳米流体热导率的测量[J]. 化工学报, 2003, **54**(1):42-36
- [6] MAXWELL J C. **A Treatise on Electricity and Magnetism: 2nd ed** [M]. Cambridge: Oxford University Press, 1904:435-441
- [7] HAMILTON R L, CROSSER O K. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems [J]. **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**, 1962, **1**:187-191
- [8] PRASHER R, BHATTACHARYA P, PHELAN P E. Thermal conductivity of nanoscale colloidal solutions(nanofluids) [J]. **Physical Review Letters**, 2005, **94**:025901-1-4
- [9] CHON C H, KIHM K D, LEE S P, *et al.* Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al_2O_3) thermal conductivity enhancement [J]. **Applied Physics Letter**, 2005, **87**:153107-1-3

Study of thermal conductivity of binary nanofluids

SU Feng-min, MA Xue-hu*, CHEN Jia-bin, ZHANG Yong

(Institute of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116012, China)

Abstract: Carbon nanotubes-ammonia nanofluids (the binary nanofluids) were prepared in aqueous ammonia by two steps method. And the thermal conductivities of nanofluids were measured by the transient hot-wire method. The effects of the mass fraction of carbon nanotubes (CNTs), the concentration of ammonia and temperature on the thermal conductivity of the binary nanofluids were systematically studied. The results show that the addition of CNTs can significantly enhance the thermal conductivity of the base liquid-aqueous ammonia. On the basis, the thermal conductivities of the binary nanofluids were calculated using the models in the literatures, and were compared with the experimental values. The results show that the micro-convection models can predict the thermal conductivity of the binary nanofluids through adjusting the parameters in the models.

Key words: binary nanofluids; thermal conductivity; aqueous ammonia; carbon nanotubes; transient hot-wire method