

纳米复合相变蓄冷材料黏度特性的影响因素分析

李新芳¹, 朱冬生², 付文亭¹, 郑新¹

(1. 中山火炬职业技术学院, 广州 中山 528436; 2. 中国科学院 广州能源研究所, 广州 510640)

摘要:测量了 Cu-H₂O 纳米复合相变蓄冷材料的黏度,研究了纳米颗粒质量分数、温度、纳米颗粒粒径及颗粒团聚对纳米复合材料黏度的影响。结果表明在最佳 pH 值和分散剂加入量条件下,纳米颗粒质量分数和温度对黏度的影响较大,纳米颗粒粒径和颗粒团聚是影响纳米复合材料黏度的重要因素。添加了 Cu 颗粒的纳米复合材料(质量分数 < 5%),其行为属于牛顿流体。

关键词: Cu-H₂O 纳米复合材料;黏度;粒径;团聚;牛顿流体

中图分类号:TK124 文献标志码:A

文章编号:0367-6358(2017)02-0119-05

DOI:10.19500/j.cnki.0367-6358.2017.02.011

Influencing Factors on the Viscosity of Nanocomposite Phase Change Cool Storage Material

LI Xin-fang^{1*}, ZHU Dong-sheng², FU Wen-ting¹, ZHENG Xin¹

(1. Zhongshan Torch Polytechnic, Guangdong Zhongshan 528436, China;

2. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangdong Guangzhou 510640, China)

Abstract: The viscosity of Cu-H₂O nanocomposite was measured using capillary viscometers, and the effects of temperature, particle concentration, particle size and aggregation on the dynamic viscosity of Cu-H₂O nanocomposite were experimentally investigated. Under optimum pH and SDBS dispersant concentration conditions, particle concentration and temperature greatly affect the dynamic viscosity of Cu-H₂O nanocomposite. Particle size and aggregation are important factors affecting the dynamic viscosity of Cu-H₂O nanocomposite. When the mass fraction of Cu-H₂O nanocomposite is lower than 5%, the material behaves like Newtonian fluid.

Key words: Cu-H₂O nanocomposite; viscosity; particle size; aggregation; Newtonian fluid

纳米复合材料作为一种新型传热材料,因其各方面的特殊性能,成为传热领域的研究热点。近年来,对纳米复合材料的研究主要侧重于制备、热物性参数、传导性能、对流换热性能及沸腾换热性能等方面^[1-4],而对黏度特性的研究相对较少。黏度和导热系数一样,也是纳米复合材料的主要参数,对流动及换热过程起着重要作用,许多工程应用技术需要确

定流体的黏度,因此有必要对纳米复合材料的黏度进行深入研究。宋汝彤等^[5]研究了不同类型的表面活性剂对低浓度纳米 SiO₂ 流体黏度的影响规律,研究发现,阴离子表面活性剂对纳米复合材料黏度的影响较小,而阳离子和非离子表面活性剂对纳米复合材料黏度的变化影响较大。凌智勇等^[6]研究了温度和颗粒浓度对 TiO₂-水纳米复合材料黏度的影

收稿日期:2016-11-03;修回日期:2016-11-21

基金项目:广东省科技计划(No. 2016A010104002)和广东省高等学校优秀青年教师培养计划(No. Yq2013197)资助项目。

作者简介:李新芳(1979-),女,山西省人,博士,副教授,主要从事纳米相变材料的表面改性和强化传热研究及应用。E-mail: xtulxf@163.com。

响,结果发现纳米复合材料的黏度随颗粒浓度的增加而增大,随温度的升高以指数形式降低,并结合实验数据,得出一个涉及温度与颗粒浓度的黏度计算公式,且该公式与实验数据相吻合。Estelle 等^[7]研究了剪切历史效应对碳纳米管纳米复合材料黏度的影响,发现该纳米复合材料在低剪切速率下表现为黏弹性流体,但在高剪切速率下具有剪切稀释作用。Srivastava^[8]和 Jeong 等^[9]同时从另一角度研究了纳米复合材料黏度的影响因素,即纳米颗粒形状(不同纵横比)对纳米复合材料黏度的影响,得出结论,具有较高纵横比的纳米颗粒对纳米复合材料的黏度贡献更大。王补宣等^[10]利用毛细管黏度计对添加了十二烷基苯磺酸钠(SDBS)分散剂的 CuO-H₂O (CuO 平均粒径 50 nm) 纳米复合材料黏度进行了测量,实验表明在低浓度下相对黏度测量值远大于经验公式测量值,但是由于分散剂的影响,未对其进行修正。

本文测量了 Cu-H₂O 纳米复合材料的黏度,研究了纳米颗粒质量分数、温度、纳米颗粒粒径及颗粒团聚对纳米复合材料黏度的影响因素。

1 实验

1.1 原料与仪器

原料:纳米 Cu 粉体是采用激光复合加热蒸发法制备的,其透射电子显微镜(TEM)观测结果见图 1,质量分数与粒径的关系见图 2。粒子形状基本为球形或类球形,粒径分布较均匀,呈较好的单分散性,颗粒平均粒径为 25 nm,用分析纯的盐酸或氢氧化钠作为 pH 调节剂;分散剂选用十二烷基苯磺酸钠(SDBS,化学纯,阴离子型)。

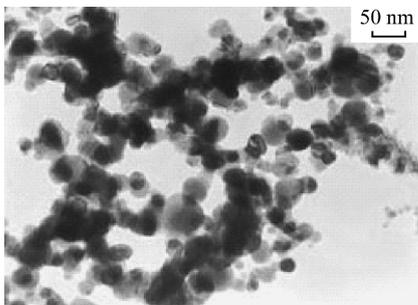


图 1 纳米 Cu 的 TEM 照片

Figure 1 TEM micrograph of nano-copper

仪器:KQ2200DE 型超声波清洗器;FA2004N 型电子天平;PHS-25 型精密 pH 计;ZS Nano S 型马尔文纳米粒度分析仪(英国 Malvern 公司);毛细管黏度计。

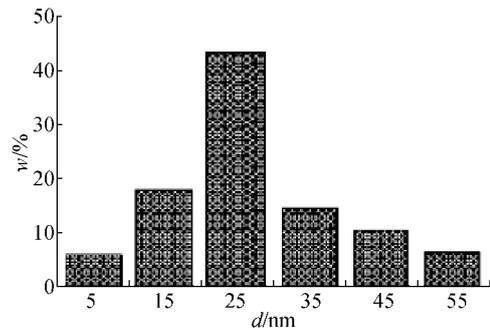


图 2 纳米 Cu 质量分数与粒径的关系

Figure 2 Mass fraction vs. particle size for nano-copper

1.2 测试与表征

选用毛细管黏度计测量纳米复合材料的黏度。毛细管黏度计测试黏度的基本实验依据是一定体积液体在毛细管内因受重力作用而流出的时间。根据 Poiseuille 定律,黏度表示为:

$$\mu = \frac{\pi PR^4 t}{8LV} \quad (1)$$

式中, R 为毛细管半径; L 为毛细管长度; V 为流经毛细管的液体体积; t 为 V 体积液体流经毛细管的时间。当促使液体流动的力为重力时, $P = \rho gh$, ρ 为液体密度; h 为等效平均液柱高度。对于同一黏度计,纯溶剂黏度与纳米复合材料稀溶液的比值为:

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \frac{\rho t}{\rho_0 t_0} \quad (2)$$

式中, μ 为纳米复合材料的黏度; μ_0 为基液的黏度; ρ 为纳米复合材料的密度; ρ_0 为基液的密度; t 为纳米复合材料流经毛细管的时间; t_0 为基液流经毛细管的时间。

因为黏度测定是在稀溶液中进行,所以 $\rho = \rho_0$, 则有:

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \frac{t}{t_0} \quad (3)$$

图 3 为纳米复合材料黏度测试系统简图。

2 结果与讨论

2.1 纳米 Cu 颗粒含量对纳米复合材料黏度的影响

在文献^[15]报道的 pH 9 左右和分散剂加入的条件下,研究了纳米 Cu 颗粒含量对纳米复合材料黏度的影响。图 4 为 SDBS 水溶液和 Cu-H₂O 纳米复合材料黏度随着粒子质量分数变化的情况($T = 303$ K),从实验结果可以看出:SDBS 水溶液(包括

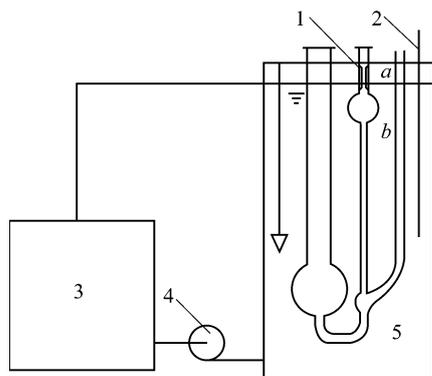


图 3 黏度测试实验示意图

Figure 3 Schematic diagram of the viscosity

1—毛细管黏度计, 2—水银标准温度计, 3—恒温水浴, 4—水泵, 5—玻璃水箱

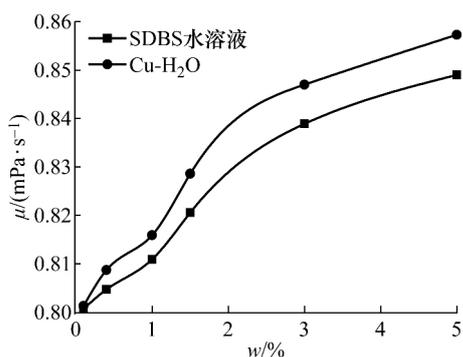


图 4 Cu-H₂O 纳米复合材料的黏度与粒子质量分数的关系
Figure 4 Variation of the viscosity of Cu-H₂O nanofluids with the particle concentration

SDBS 和水)和 Cu-H₂O 纳米复合材料(包括 Cu 颗粒、SDBS 和水, $m(\text{Cu}) : m(\text{SDBS}) = 1 : 0.7$)黏度均比基液大,这说明在水中加入纳米颗粒和分散剂均使得流体的黏度增加。当纳米粒子质量分数较低时(如质量分数为 0.1%),Cu-H₂O 纳米复合材料的黏度与 SDBS 水溶液的黏度差不多,说明较低浓度下,纳米复合材料的黏度基本是由于分散剂加入引起的。但是随着粒子质量分数的增大,Cu-H₂O 纳米复合材料黏度比相同浓度下 SDBS 水溶液的黏度大,这可能是分散剂和纳米颗粒共同作用的结果。同时还可以看出,纳米复合材料的黏度随着纳米颗粒质量分数的增加而增加。Cu 纳米粒子的质量分数由 0.4% 增大到 1.0%,则形成的 Cu-H₂O 纳米复合材料的黏度与去离子水的黏度之比从 1.0 增大到 1.9。其原因是纳米复合材料流动时,为了克服内摩擦阻力需要消耗一定的能量,纳米复合材料内存在的颗粒越多,消耗的能量越多,所以纳米颗粒的质量分数越大,纳米复合材料的黏度也就越高。这表明纳米颗粒质量分数是影响纳米复合材料黏度的一个

主要因素。

2.2 温度对纳米复合材料黏度的影响

图 5 为去离子水、SDBS 水溶液和 Cu-H₂O 纳米复合材料黏度与温度的变化关系。从图 5 中可以看出: SDBS 水溶液和 Cu-H₂O 纳米复合材料黏度的变化趋势与去离子水基本一致,这说明加入纳米颗粒和分散剂后流体黏度随温度变化的特性未发生根本变化。随着温度的升高,纳米复合材料的黏度不断降低。在质量分数为 1.0% 的 Cu-H₂O 纳米复合材料中,313 K 相对于 303 K,其黏度降低了 18.0%;333 K 相对于 303 K,其黏度降低了 41.4%。显然,温度是影响纳米复合材料黏度的一个主要因素。

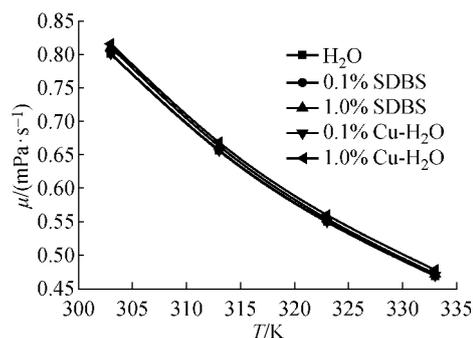
图 5 Cu-H₂O 纳米复合材料的黏度与温度的关系

Figure 5 Variation of the viscosity of Cu-H₂O nanofluids with the temperature

2.3 纳米颗粒粒径对纳米复合材料黏度的影响

实验分别测试了 Cu-H₂O 纳米复合材料的黏度与粒子水合粒径的关系。形成的两种 Cu-H₂O 纳米复合材料的水合粒径分别为 110 和 210 nm。图 6 给出了这两种纳米复合材料黏度随粒子质量分数的变化情况。从图 6 中可以看出,纳米粒子粒径也是纳米复合材料黏度的影响因素之一。在相同的纳米粒子质量分数下,水合粒径小的体系的黏度比水合粒径大的体系的黏度小。如质量分数为 0.8% 的 Cu-H₂O 纳米复合材料,水合粒径小的体系黏度比水合粒径大的体系黏度降低 0.9%。表明粒子的粒径越小,纳米复合材料的黏度越小。其原因是粒子越小,不规则自由运动越显著,颗粒间的黏滞力越小,粒子移动阻力越小,则黏度就越小;另一方面,粒子粒径越小,其分散稳定性越好,则黏度越小。

2.4 纳米颗粒团聚对纳米复合材料黏度的影响

图 7 给出了 Cu-H₂O 纳米复合材料不同沉降时间的黏度。从图 7 中可以看出:随着沉降时间的增大,Cu-H₂O 纳米复合材料的黏度呈增大趋势。在

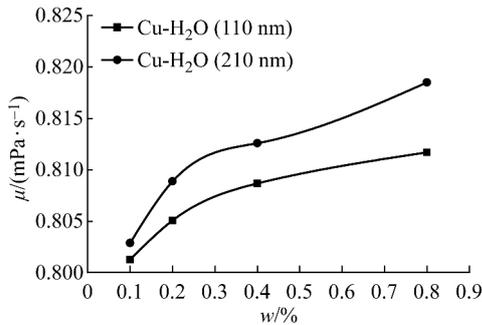


图 6 Cu-H₂O 纳米复合材料的黏度与水合粒径的关系

Figure 6 Variation of the viscosity of Cu-H₂O nanofluids with the hydrodynamic size

沉降时间为 15 d 内,体系的黏度几乎不变;沉降时间继续增大,体系的黏度很快地增大,最大增量为 1.7%。其原因是,随着沉降时间的增大,体系的分散稳定性变差,颗粒之间由于相互之间的吸引而团聚在一起,则体系中粒子团的平均尺寸变大,颗粒间的黏滞力增大,流体中的粒子移动阻力增大,导致体系的黏度增大。另一方面,纳米复合材料中颗粒由于相互之间的吸引而形成具有一定空间分布的团聚体,团聚体的流体力学半径 r 是纳米颗粒半径 a 的 i 倍,团聚体的有效体积浓度则不同于纳米颗粒的体积浓度。分子运动论表明,流体的黏滞现象可以由分子的动量运输予以解释。大量的实验工作表明^[16-18],纳米复合材料中颗粒团聚及其空间分布函数会导致颗粒有效体积浓度的显著增加,因此纳米复合材料中颗粒团聚导致纳米复合材料的黏度增加。

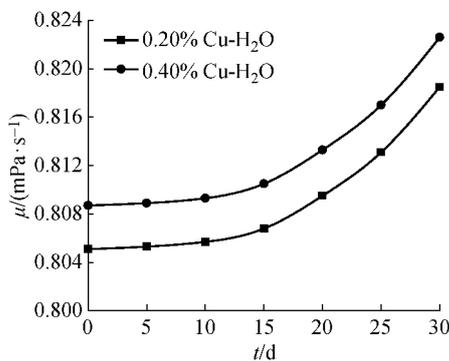


图 7 Cu-H₂O 纳米复合材料的黏度与颗粒团聚的关系

Figure 7 Variation of the viscosity of Cu-H₂O nanofluids with aggregation

2.5 纳米复合材料的黏度与剪切速率的关系

根据纳米复合材料的黏度和剪切速率(γ)的关系是否遵循牛顿定律,可以判断纳米复合材料是牛顿流体还是非牛顿流体。实验采用旋转黏度计测量

在不同剪切速率下,纳米复合材料黏度的变化情况。图 8 给出了不同质量分数 Cu-H₂O 纳米复合材料黏度与剪切速率的曲线。实验结果显示:当剪切速率大于 80 s⁻¹时,纳米复合材料的黏度保持一个常数,因此在本试验范围内,Cu 颗粒质量分数低于 5% 时,Cu-H₂O 纳米复合材料属于牛顿流体,这个结论和 Tseng 等^[19-20]测量的结果一致,Tseng 分别测量了 Al₂O₃ 和 TiO₂ 纳米复合材料的黏度,发现颗粒的体积分数小于 11% 时,纳米复合材料的黏度不随剪切力的变化而变化,纳米复合材料属于牛顿流体。

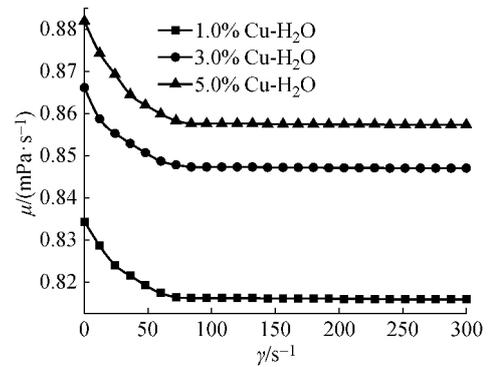


图 8 Cu-H₂O 纳米复合材料的黏度与剪切速率的关系

Figure 8 Variation of the viscosity of Cu-H₂O nanofluids with the shear rate

3 结论

测量了 Cu-H₂O 纳米复合材料的黏度,研究了纳米颗粒质量分数、温度、纳米颗粒粒径及颗粒团聚对纳米复合材料黏度的影响。结果表明在文献^[15]报道的 pH 9 左右和分散剂加入的条件下,纳米颗粒质量分数和温度对黏度的影响较大,纳米颗粒粒径和颗粒团聚也是影响纳米复合材料黏度的重要因素。添加了 Cu 颗粒的纳米复合材料(质量分数 < 5%),其行为属于牛顿流体。

参考文献

- [1] FARBOD M, AHANGARPOUR A, ETEMAD S G. Stability and Thermal Conductivity of Water-based Carbon Nanotube Nanofluids [J]. Particuology, 2015, 22(5): 59-65.
- [2] ESFE M H, SAEDODIN S, MAHIAN O, *et al.* Thermal Conductivity of Al₂O₃/water Nanofluids: Measurement, Correlation, Sensitivity Analysis, and Comparisons with Literature Reports [J]. J Therm Anal Calorim, 2014, 117(2): 675-681.
- [3] 李新芳, 吴淑英, 朱冬生. 碳纳米管石蜡复合相变储能

- 材料的导热性能研究[J]. 现代化工, 2015, 35(5): 113-116.
- [4] 吴淑英, 朱冬生, 汪南. 改善有机储热材料传热性能的研究进展及应用[J]. 现代化工, 2009, 9(10): 19-23.
- [5] 宋汝彤, 郭立娟, 郭拥军, 等. 不同类型表面活性剂对纳米 SiO₂ 流体黏度的影响[J]. 应用化学, 2014, 31(9): 1 083-1 088.
- [6] 凌智勇, 孙东健, 张忠强, 等. 温度和颗粒浓度对纳米复合材料黏度的影响[J]. 功能材料, 2013, 1(14): 92-95.
- [7] ESTELLE P, HALELFADL S, DONER N, *et al.* Shear History Effect on the Viscosity of Carbon Nanotubes Water-based Nanofluid [J]. *Curr Nanosci*, 2013, 9(2): 225-230.
- [8] GAGANPREET, SRIVASTAVA S. Influence of Particle Shape on Viscosity of Nanofluids; Proceedings of the AIP Conference Proceedings[C]. *Indian Inst Technol, India*, 2013, 1512(1): 984-987.
- [9] JEONG J, LI C, KWON Y, *et al.* Particle Shape Effect on the Viscosity and Thermal Conductivity of ZnO Nanofluids [J]. *Int J Refrig*, 2013, 36(8): 2 233-2 241.
- [10] 王补宣, 李春辉, 彭晓峰. 纳米颗粒悬浮液的黏度、热扩散系数与 Pr 数[J]. 自然科学进展, 2004(7): 799-803.
- [11] JAMSHIDI N, FARHADI M, GANJI D, *et al.* Experimental Investigation on Viscosity of Nanofluids [J]. *Int J Eng*, 2012, 25(3): 201-209.
- [12] ZHAO J F, LUO Z Y, NI M J, *et al.* Dependence of Nanofluid Viscosity on Particle Size and pH Value [J]. *Chin Phys Lett*, 2009, 26(6): 225-227.
- [13] 何钦波, 郑兆志. 低温相变蓄冷纳米复合材料粘度特性实验研究[J]. 化工机械, 2011, 38(4): 420-422.
- [14] YU W, XIE H Q, LI Y, *et al.* Experimental Investigation on Thermal Conductivity and Viscosity of Aluminium Nitride Nanofluid [J]. *Particuology*, 2011, 9(2): 187-191.
- [15] 李新芳, 朱冬生. Cu-H₂O 纳米复合材料的黏度研究[J]. 湖南工程学院学报, 2009, 19(2): 21-24.
- [16] PRASHER R, EVANS W, MEAKIN P, *et al.* Effect of Aggregation on Thermal Conduction in Colloidal Nanofluids [J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 89(14): 143 119.
- [17] KEBLINSKI P, PHILLPOT S R, CHOI S U S, *et al.* Mechanisms of Heat Flow in Suspensions of Nano-sized Particles (Nanofluids) [J]. *Int J Heat Mass Trans*, 2002, 45(4): 855-863.
- [18] KEBLINSKI P, EASTMAN J A, CAHILL D G. Nanofluids for Thermal Transport [J]. *Mater Today*, 2005, 8(6): 36-44.
- [19] TSENG W J, WU C H. Aggregation, Rheology and Electrophoretic Packing Structure of Aqueous Al₂O₃ Nanoparticle Suspensions [J]. *Acta Mater*, 2002, 50(15): 3 757-3 766.
- [20] TSENG W J, LIN K C. Rheology and Colloidal Structure of Aqueous TiO₂ Nanoparticle Suspensions [J]. *Mater Sci Eng A*, 2003, 355(1-2): 186-192.