

纳米颗粒/矿物冷冻油的流变特性研究

毕胜山¹, 史琳²

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室, 100084, 北京)

摘要: 对纳米颗粒/矿物冷冻油的流变特性进行了全面的实验研究, 重点分析了颗粒浓度、颗粒种类和温度对冷冻油流变特性的影响. 结果表明: 对于纳米颗粒 TiO_2 /矿物冷冻油, 当 $w(\text{TiO}_2) \leq 0.2\%$ 时, 为牛顿流体, 当 $w(\text{TiO}_2) > 0.2\%$ 时, 表现为剪切变稀特性. 纳米颗粒 TiO_2 /矿物冷冻油的黏度大于纯质冷冻油, 且随着颗粒质量分数的提高而增大, 当 $w(\text{TiO}_2) = 0.4\%$ 时, 黏度可提高 11.2% , 拟合得到的混合物黏度模型预测值与实验值吻合良好. 纳米颗粒种类对混合物的流变特性有一定的影响, 这与颗粒的形状有关. 纳米颗粒/矿物冷冻油的黏温曲线趋势与纯油相似.

关键词: 纳米颗粒; 矿物油; 流变; 黏度

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)01-0027-04

Rheological Properties of Mineral Oil and Nanoparticles Mixture

BI Shengshan¹, SHI Lin²

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The rheological properties of the mixture of nanoparticles and mineral oil were investigated experimentally. The results indicate that the mixtures of TiO_2 nanoparticles and mineral oil are the Newtonian fluid when the nanoparticles mass fraction is less than or equal to 0.2% , and the mixture viscosity decreases with the increase in the shear rate when the fraction is larger than 0.2% . The viscosity of the mixture of TiO_2 nanoparticles and mineral oil is greater than that of the mineral oil, and it increases with the increase in the nanoparticles fractions. When the nanoparticles fraction is 0.4% , the viscosity can increase by 11.2% . The experimental data are consistent with the data calculated from the model prediction. Different kinds of the nanoparticles have some effect on the rheological properties of the mixtures because of the particle shape. In addition, the viscosity-temperature curve of the mixture is similar to that of pure mineral oil.

Keywords: nanoparticle; mineral oil; rheology; viscosity

在制冷系统中, 润滑油主要起到减少摩擦、密封和带走摩擦产生的热量和磨屑等方面的作用^[1]. 纳米材料由于其特殊的物理化学性质作为润滑添加剂得到了广泛的应用, 特别是在减磨耐磨、噪声控制等方面表现出很多优势^[2]. 在传热学领域, 研究人员发现添加纳米颗粒到液体中制备成纳米流体^[3], 可以有效地提高流体的导热系数和对流换热性能, 有望

成为新一代的换热工质. 近期, 研究人员^[4]发现: 在矿物冷冻油中添加一定量的纳米颗粒, 可以改善 HFC 制冷剂与矿物冷冻油(MO)的相容性, 从而解决了 HFC/酯类油体系容易出现的絮状物沉淀、膨胀装置堵塞等不良现象. 作者在前期开展的纳米颗粒对制冷系统材料的影响以及对添加纳米颗粒的家用冰箱热工性能的研究工作中^[5-6]发现, 纳米颗粒和

矿物冷冻油制备的纳米冷冻油,与原有制冷系统材料是相容的,采用这种纳米冷冻油的冰箱运行稳定,热工性能稍优于原有系统。

黏度作为润滑油的重要评价参数决定了滑动轴承中油膜的承载能力、摩擦功耗和密封能力。添加纳米颗粒之后,润滑油的黏度和流变特性会发生变化,并直接影响其在制冷系统中的性能。本文重点研究纳米颗粒/矿物冷冻油的流变特性,为纳米颗粒在制冷系统中的应用研究提供基础依据。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料

纳米材料选用 TiO_2 、 Al_2O_3 、多壁碳纳米管(CNTs)3 种,由浙江弘晟材料科技股份有限公司和深圳纳米港有限公司生产,表 1 列出了纳米材料的相关物性。矿物冷冻油为太阳牌,型号为 SUNISO 3GS。

表 1 纳米材料的相关物性

纳米材料	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	导热系数/ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	粒径/ nm	比表面积/ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$
TiO_2	4 270	8.99	50	210 ± 10
Al_2O_3	3 965	36.48	50	14
CNTs		$1\,812 \pm 300$	10~20	40~300

注:CNTs 的长度为 1~2 μm 。

1.2 实验方法

纳米颗粒与冷冻油的混合液制备采用两步法,使用梅特勒 AB204-N 精密天平称量纳米颗粒和冷冻油的质量,精度为 0.1 mg。将称量好的纳米颗粒与冷冻油直接混合,并使用超声波振动 2 h,使其完全分散。

纳米冷冻油制备好之后需要对其分散稳定性进行评价,根据作者前期研究^[7],采用目测沉降观察和分光光度计光吸收度分析的评价方法,最终确定较稳定的纳米颗粒的质量分数为 0.01%~0.4%。

流变实验采用德国 Physica 公司生产的 MCR300 型高级扩展式流变仪,实验中选用 CC27 标准圆筒和 CP75-1 锥板,剪切速率 D 为 0~100 s^{-1} ,实验温度 T 为 25~50 $^{\circ}\text{C}$ 。流变实验分两部分进行:第 1 部分为在固定温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下,剪切速率为 0~100 s^{-1} 时,测量剪切应力 τ 和黏度 η 的变化;第 2 部分为在固定剪切速率为 50 s^{-1} 的条件下,当温度从 25 $^{\circ}\text{C}$ 升高到 50 $^{\circ}\text{C}$ 时,测量黏度的

变化。

2 实验结果和分析

2.1 纳米颗粒 TiO_2 /冷冻油的流变特性

为了研究 $w(\text{TiO}_2)$ 对流变特性的影响,制备了 6 种浓度的 TiO_2 /冷冻油混合液, $w(\text{TiO}_2)$ 分别为 0.01%、0.06%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%。图 1、2 示出了剪切应力和黏度随剪切速率的变化规律。

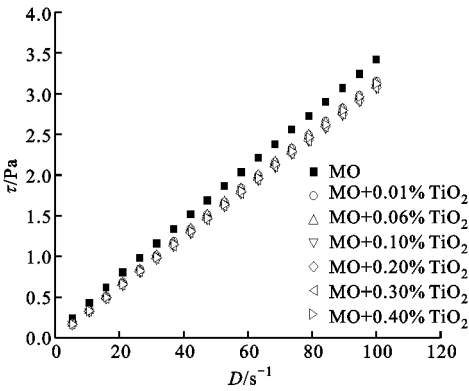


图 1 $w(\text{TiO}_2)$ 不同时剪切应力随剪切速率的变化

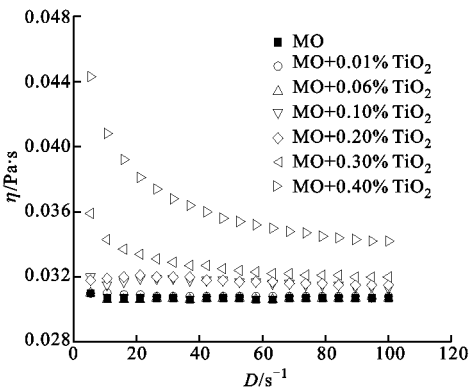


图 2 $w(\text{TiO}_2)$ 不同时黏度随剪切速率的变化

根据悬浮液流变学观点,剪切应力和剪切速率成正比的流体为牛顿流体。从图 1、2 中可以看出,当 $w(\text{TiO}_2) \leq 0.2\%$ 时, TiO_2 /冷冻油混合液表现出牛顿流体特性,而当 $w(\text{TiO}_2) \geq 0.2\%$ 时,表现出剪切变稀的非牛顿特性。整体上, TiO_2 /冷冻油混合液的黏度比纯冷冻油大,且随着 $w(\text{TiO}_2)$ 的增大,混合液的黏度也随之增大。

2.2 纳米颗粒种类的影响

为了研究颗粒种类对流变特性的影响,分别制备了颗粒质量分数为 0.2% 的 TiO_2 /冷冻油、 Al_2O_3 /冷冻油和 CNTs/冷冻油混合液。图 3、4 分别示出了剪切应力和黏度随剪切速率的变化规律。

从图 3、4 中可以看出,3 种纳米颗粒和冷冻油的混合液的流变特性存在差异,其中 CNTs/冷冻油的黏度最大,并表现出较强的剪切变稀特性。

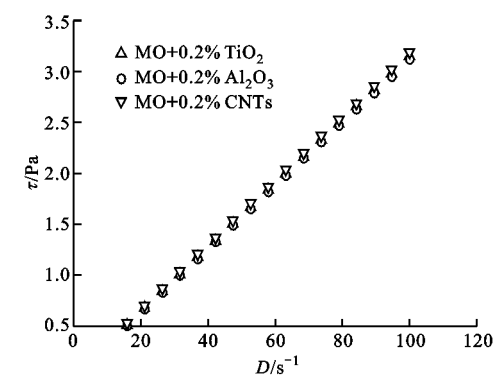


图 3 颗粒种类不同时剪切应力随剪切速率的变化

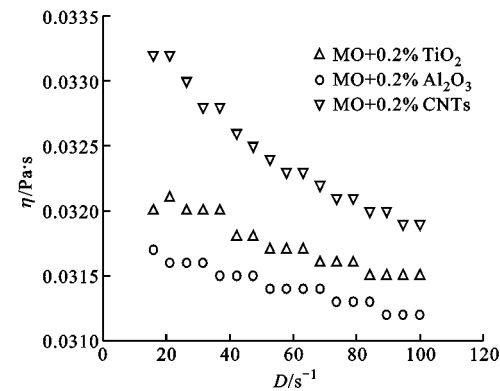


图 4 颗粒种类不同时黏度随剪切速率的变化

黏度是液体流动时所消耗动量的一种量度,如果介质中有分散颗粒,液体的流动推动颗粒时要受到阻力,需要消耗额外的能量,因此黏度就增加了,且随着颗粒质量分数的增大而增加,这一点从图 2 的结果得到了很好的证实。另外,颗粒间的相互作用或颗粒的不对称性能结构,都会产生干扰。碳纳米管的结构是具有一定长径比的圆柱体,因此会增大流动过程的耗能,从而使得其黏度变化最大。

2.3 温度的影响

图 5、6 示出了不同质量分数和不同颗粒种类时黏度随温度的变化规律,可以看出与纯质冷冻油相同,纳米颗粒的加入并没有改变其黏度随温度的变化关系,即随着温度的升高,黏度也随之降低。

2.4 黏度关联式

关于悬浮液的黏度,有很多经典的两相流体关联式,当颗粒体积分数小于 0.02 时,比较著名的是 Einstein-Batchelor^[8]关联式

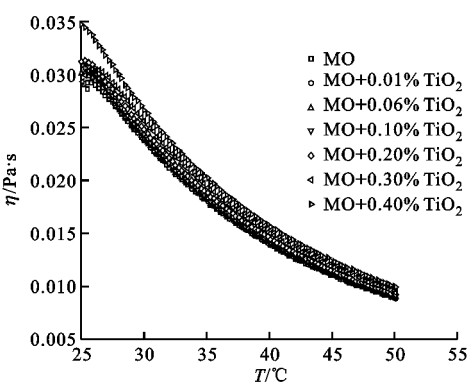


图 5 $w(\text{TiO}_2)$ 不同时黏度随温度的变化

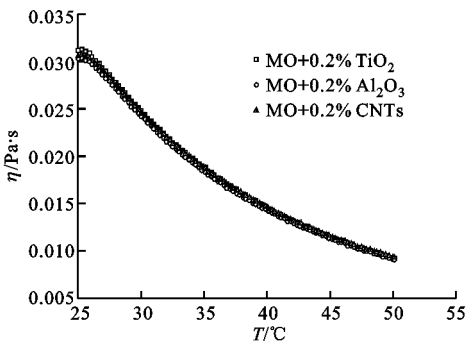


图 6 颗粒种类不同时黏度随温度的变化

$$\eta = \eta_i (1 + 2.5\phi + 6.25\phi^2) \tag{1}$$

式中: η 为混合液黏度; η_i 为冷冻油黏度; ϕ 为颗粒体积分数。

图 7 示出了几种温度下的 TiO_2 /矿物冷冻油黏度相对于纯质冷冻油黏度增量的实验值与 Einstein-Batchelor 关联式计算值的比较,由图可见:实验值远大于预测值,并随着颗粒质量分数增大,表现出非线性增大趋势。这与经典关联式的推导假设有关,纳米颗粒的尺寸与液体分子大小相当,纳米颗粒的微观运动、颗粒与液体以及颗粒之间的相互作用力都会导致分散体系的黏度增大。此外,纳米颗粒表面的溶剂化作用也是一个重要的影响因素。刘玉东等^[9]将所有影响因素归结为溶剂化效应的影响,利用实验测得的 TiO_2 -水纳米流体的黏度实验数据对 Einstein 关联式进行修正,得到了比较满意的结果,其修正式为

$$\eta = \eta_i (1 + 141\phi) \tag{2}$$

图 7 中利用修正后的关联式的结果与本文实验数据符合较好。此外,Prasher 等^[10]还认为颗粒的聚合也是造成偏差的主要原因。为了能够对纳米颗粒 TiO_2 /矿物冷冻油的黏度进行定量预测,利用实验

数据拟合得到了黏度关联式

$$\eta = \eta_i (1 + 51.86\phi + 98\,310.3\phi^2) \quad (3)$$

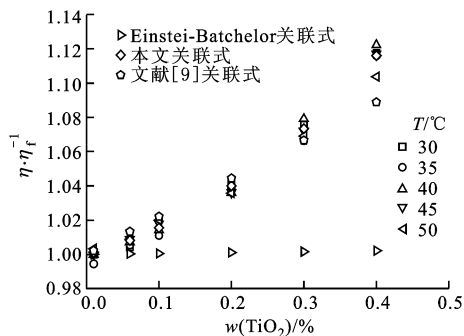


图7 黏度实验值与关联式计算值的比较

图7也同时列出了拟合关联式计算值与实验数据的比较,吻合情况很好.从图7中的实验数据可以得到,相对于纯质冷冻油,当 $w(\text{TiO}_2) = 0.2\%$ 时,黏度提高4.2%,而当 $w(\text{TiO}_2) = 0.4\%$ 时,黏度可提高11.2%.温度不同时,黏度增大的程度无明显差别.

3 结论

从流变特性角度对纳米颗粒/矿物冷冻油进行了实验研究.结果表明:对于纳米颗粒 TiO_2 /矿物冷冻油混合液,当 $w(\text{TiO}_2) \leq 0.2\%$ 时,为牛顿流体,当 $w(\text{TiO}_2) > 0.2\%$ 时,表现为剪切变稀特性.纳米颗粒 TiO_2 /矿物冷冻油混合液的黏度大于纯质冷冻油,且随着颗粒质量分数的提高而增大,实验值高于经典混合物黏度预测值.纳米颗粒种类对混合物的流变特性有一定的影响.纳米颗粒/矿物冷冻油混合物的黏温曲线趋势与纯油相似.

纳米颗粒/矿物冷冻油黏度的提高,一方面会增强摩擦润滑性能,同时也会使得摩擦功率增大.对于润滑油黏度的选择,应在保证压缩机气缸、活塞环间润滑与密封的前提下,尽量选择较低的黏度.因此,纳米颗粒在制冷系统的实际应用中,应在保证纳米颗粒作用的基础上尽量减小纳米颗粒的添加配比.

参考文献:

- [1] 繇道平, 吴业正. 制冷压缩机[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [2] 张锋, 宋宝玉, 曲建俊, 等. 纳米添加剂在润滑剂中的应用现状[J]. 密封与润滑, 2006, 179(7): 190-

195.

ZHANG Feng, SONG Baoyu, QU Jianjun, et al. Application of nanoadditives in lubricants[J]. Lubrication Engineering, 2006, 179(7): 190-195.

- [3] CHOI S U S. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles[J]. ASME FED, 1995, 231(66): 99-103.
- [4] WANG Ruixiang, HAO Bin, XIE Guozhen, et al. A refrigerating system using HFC134a and mineral lubricant appended with N-TiO₂ (R) as working fluids[C] // Proceedings of the 4th International Symposium on HAVC. Beijing, China; Tsinghua University Press, 2003: 888-892.
- [5] 毕胜山, 史琳, 雍翰林, 等. 纳米颗粒添加剂对制冷系统材料影响的实验研究[J]. 制冷学报, 2006, 27(6): 1-4.
- BI Shengshan, SHI Lin, YONG Hanlin, et al. Investigation on materials compatibility using nanoparticles additive in refrigerating system[J]. Journal of Refrigeration, 2006, 27(6): 1-4.
- [6] BI Shengshan, SHI Lin, ZHANG Lili. Application of nanoparticles in domestic refrigerators [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(14/15): 1834-1843.
- [7] 毕胜山, 史琳. 纳米颗粒在制冷剂中的分散特性研究[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(2): 185-188.
- BI Shengshan, SHI Lin. Dispersion behavior of nanoparticles in refrigerant[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(2): 185-188.
- [8] BATCHELOR G K. The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles [J]. J Fluid Mech, 1977, 83(1): 97-117.
- [9] 刘玉东, 李夔宁, 童明伟, 等. TiO₂-水纳米流体的黏度修正公式[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2006, 29(9): 52-55.
- LIU Yudong, LI Kuining, TONG Mingwei, et al. Viscosity-correction equations of TiO₂-water nanofluids [J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2006, 29(9): 52-55.
- [10] PRASHER R, SONG D, WANG Jinlin. Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications[J/OL]. Applied Physics Letters, 2006, 89(13): 133108[2009-05-20]. <http://link.aip.org/link/?APPLAB/89/133108/1>.

(编辑 荆树蓉)