

# 纳米流体导热系数影响因素分析

夏国栋, 刘冉, 杜墨

(北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100124)

**摘要:** 为了全面分析纳米流体的稳定性及导热系数影响因素, 采用两步法配置了以去离子水和乙二醇为基液的氧化铝纳米流体, 并添加了不同种类的分散剂. 利用紫外可见分光光度计对纳米流体吸光度值进行测试, 并基于 Hot Disk 热物性分析仪测试其导热系数. 结果表明: 吸光度法可有效评价纳米流体稳定性, 但需要考虑分散剂对基液吸光度值的影响. 超声波振荡可破坏粒子团聚, 且当超声时间为 1 h 时纳米流体稳定性最佳. 分散剂、粒子体积分数、温度、基液等因素均会影响纳米流体的导热性能. 当温度为 50 °C 时, 添加质量分数 0.2% 的 PVP 分散剂, 体积分数为 0.5% 的氧化铝-水纳米流体导热系数提高约 20%. 纳米流体可有效提供工质导热系数, 提升系统散热性能.

**关键词:** 纳米流体; 导热系数; 吸光度

中图分类号: TK 124

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2016)08-1252-07

doi: 10.11936/bjtxb2015100029

## Analysis of the Thermal Conductivity of Nanofluids

XIA Guodong, LIU Ran, DU Mo

(College of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** In order to analyze the stability and thermal conductivity of nanofluids,  $Al_2O_3$  nanofluids based on DI-water and EG were prepared by a two-step method, and different dispersant were added to avoid particle aggregation. The UV/VIS Spectrophotometer and Hot Disk thermal constant analyzer were used. The results reveal that absorbance can appraise the stability of nanofluids effectively, but the influence of dispersant should be considered. Ultrasonic oscillations can destroy the accumulation of nanoparticles, and it is 1h for the best effect. Moreover, dispersant, particle volume fraction, temperature and based fluids are all the influencing factors on thermal conductivity of nanofluids. When the temperature is 50 °C, the thermal conductivity of 0.5%  $Al_2O_3$ -water nanofluids with 0.2% PVP has been improved by about 20%. Nanofluids can enhance the thermal conductivity of working fluids effectively, and the heat transfer performance of system can also be improved.

**Key words:** nanofluids; thermal conductivity; absorbance

随着电子设备的迅猛发展, 热交换设备高传热负荷和传热强度成为了制约电子器件微型化、集成化的首要问题. 纳米流体是指以一定的方式和比例在液体工质中添加 1 ~ 100 nm 级金属或金属氧化物

粒子而形成的纳米颗粒稳定悬浮液. 由于纳米粒子具有小尺寸效应, 可使其分散行为更接近液体分子并保证了工质流体的稳定性. 同时, 布朗运动的存在提高了粒子间相互碰撞的机会, 促进热量传递并

收稿日期: 2015-10-12

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(3142004); 北京市优秀博士学位论文指导教师科技项目资助(20131000503)

作者简介: 夏国栋(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事微电子设备的冷却及微尺度流动与传热、气液两相流动与传热方面的研究, E-mail: xgd@bjut.edu.cn

进一步提高工质的导热性能。但粒子粒径越小,比表面积越大,表面能就越高,越易发生团聚导致固体颗粒沉淀,降低流体的稳定性,并有可能恶化纳米流体的强化换热效果。

为提高纳米流体稳定性,分散剂被广泛应用<sup>[1-3]</sup>,实验结果说明分散剂可以显著降低粒子的表面张力,防止颗粒聚集,且分散剂质量分数与粒子体积分数间存在一定的最佳比例关系。纳米流体的光学性质能高度反映出溶液内纳米微粒的分散性和不均匀性,因此,诸多学者对纳米流体的吸光度展开研究。当纳米流体内存在均匀分散的固体粒子时,流体的透光率较差,大部分入射光被吸收或反射。随着粒子的沉淀,流体会呈现明显的分层现象,此时,纳米流体的透光率不断增加,吸光度大幅降低。李金凯等<sup>[4]</sup>通过实验发现,氧化铝纳米流体在振荡 3 h 后吸光度值最高,稳定性最好。宋玲利等<sup>[5]</sup>对纳米铝粉颗粒的分散性展开研究,研究结果表明:当乙醇与去离子水以 1:1 比例混合作为基液时,纳米流体吸光度值最大,分散效果最佳。

1993 年,日本东北大学 Masuda 等<sup>[6]</sup>分别测量了平均粒径为 13 nm 的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和 27 nm 的  $\text{TiO}_2$  纳米粒子悬浮液导热系数,研究结果表明:当  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{TiO}_2$  粒子体积分数均为 4.3% 时,其悬浮液导热系数比水分别提高 32% 和 11%。纳米流体导热性能得到明显提高。谢华清等<sup>[7]</sup>采用两步法分别制备了以去离子水、乙二醇、泵油为基液的等体积分数氧化铝纳米流体。研究结果表明:纳米流体导热系数增加率随基液导热系数的增加而减小,以水为基液的氧化铝悬浮液导热系数仅为以泵油为基液时的一半。寿青云等<sup>[8]</sup>对几种纳米流体导热系数进行测试,研究结果表明:随粒子体积分数和温度的增加,纳米流

体导热能力得到明显提升。Putnam 等<sup>[9]</sup>和 Utomo 等<sup>[10]</sup>等发现纳米流体导热系数相比于水并没有显著提高。

综上,纳米流体的导热机理明显不同于传统换热工质,针对其导热性能的研究需考虑更多的影响因素。此外,尽管吸光度法被逐渐应用于纳米流体的稳定性测试,但是关于工质内物质成分对吸光度影响的研究却很少。

因此,本文通过两步法制备出不同的氧化铝纳米流体,采用紫外可见分光光度计对其吸光度值进行测试,并基于 Hot Disk 热物性分析仪得到纳米流体的导热系数,从分散性能和导热性能两方面对纳米流体的影响因素展开更加全面地分析。

## 1 纳米流体制备

纳米流体的制备是应用纳米粒子增强液体工质传热性能的关键环节。两步法制备纳米流体是将一定比例的金属或金属氧化物纳米粒子添加到基液中,形成纳米粒子悬浮液,再根据基液的种类和理化属性,添加相应的表面分散剂,辅以超声振动,获得悬浮稳定性较好的纳米流体<sup>[11]</sup>。由于两步法的程序简单方便,易于批量化生产,适用于制备较大体积分数的纳米流体,因此,本文选用两步法制备氧化铝纳米流体。

实验所用氧化铝粉体由北京德科岛金科技有限公司提供,粒径为 20 nm,纯度为 99.9%,密度为  $3.68 \text{ g/cm}^3$ 。为研究分散剂对纳米流体稳定性的影响,分别选用了由天津市福晨化学试剂厂提供的非离子型聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、阳离子型十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)、阴离子型十二烷基硫酸钠(SDS)作为分散剂,详细参数如表 1 所示。

表 1 表面活性剂参数

Table 1 The parameters of dispersant

简称	中文名	化学式	分子质量	属性
SDS	十二烷基硫酸钠	$\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{NaSO}_4$	288.38	阴离子型
CTAB	十六烷基三甲基溴化铵	$\text{C}_{19}\text{H}_{42}\text{NBr}$	364.45	阳离子型
PVP	聚乙烯吡咯烷酮	$(\text{C}_6\text{H}_9\text{NO})_n$	30 000.00	非离子型

制备过程中,首先采用瑞士梅特勒-托利多 XS403S 专业型精密天平称量出相应粒子体积分数下的纳米粉体质量以及分散剂的质量,再将其均匀分散到基液中,最后通过机械搅拌(79-1 磁力加热搅拌器)和超声波振荡(KB-100DB 型超声波振荡

器)的方法提高其稳定性。

由于纳米粒子的体积分数通常难以精确测定,因此,纳米流体中粒子的体积分数可以通过计算得到<sup>[11]</sup>

$$\varphi = \frac{\rho_f w}{\rho_f w + \rho_p (1 - w)}$$

式中:  $\rho_f$  和  $\rho_p$  分别为基液和纳米粒子的密度;  $\varphi$  和  $w$  分别表示纳米流体中粒子的体积分数和质量分数.

## 2 实验设备

### 2.1 纳米流体稳定性测试

选用上海美析仪器有限公司 UV-1500PC 紫外可见分光光度计对纳米流体吸光度进行测试. 该设备的波长范围为 190 ~ 1 100 nm, 波长准确度为  $\pm 0.5$  nm. 实验过程中, 以去离子水作为空白溶液, 并依次对待测纳米流体进行全波长扫描, 选取最佳吸收波长下测得的吸光度值进行对比分析. 为保证实验结果有效, 对体积分数为 0.5% 的氧化铝纳米流体进行多次波长扫描, 最佳吸收波长如表 2 所示. 结果显示最佳吸收波长  $\lambda$  波动范围为  $\pm 3$  nm, 实验结果有效.

表 2 体积分数为 0.5% 的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纳米流体最佳吸收波长

Table 2 Optimal absorptive wavemeter of 0.5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanofluid

扫描次数	1	2	3	4
$\lambda/\text{nm}$	205	203	206	205

### 2.2 纳米流体导热系数测试

利用瑞典 Hot Disk 2500S 型热物性分析仪对纳米流体的导热系数  $k$  进行测试, 该仪器的工作原理是基于瞬变平面热源技术, 测试系统如图 1 所示. 实验过程中, 纳米流体被注入不锈钢夹套内并沉浸于油浴内, 探头放置于样品中间, 利用恒温油浴为纳米流体提供稳定的外界环境温度. 由热阻性材料镍制作的双螺旋形状平面探头既可以作为增加样品温度的热源, 也可作为温度传感器用于记录温度随时间的变化. 测试过程中, 施加在探头上的电流会产生一定的热量并向两侧样品扩散, 热量传递的速度依赖于样品的热传导特性, 因此, 可以根据探头热阻变化得出热量损失, 进而反映出样品的导热性能.

为确保实验误差, 首先对去离子水导热系数  $k_0$  进行测试, 实验结果如表 3 所示. 结果表明, 去离子水的测试结果重复性较好, 在温度为 20 °C 时其导热系数平均值为 0.6019 W/(m·K), 相比于理论值 0.5999 W/(m·K) 误差仅为 0.33%, 实验结果有效.

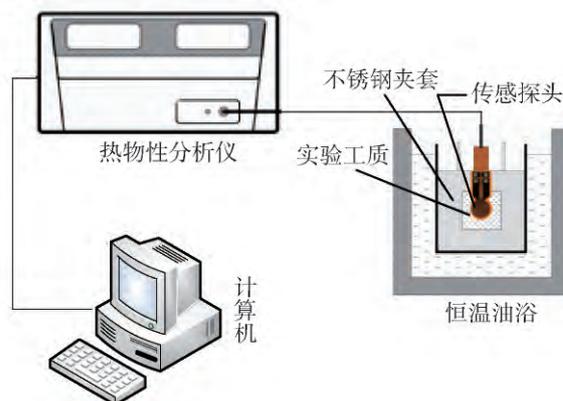


图 1 热物性分析仪测试系统

Fig. 1 Schematic diagram of the thermal constant analyzer

表 3 去离子水导热系数测试结果

Table 3 Thermal conductivity of DI-water

测试次数	1	2	3	4
$k_0 / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	0.6015	0.6017	0.6023	0.6022

## 3 实验结果与分析

### 3.1 振荡时间对纳米流体稳定性的影响

纳米流体内固体粒子在受力作用下会不断聚集絮凝, 体积分数由上到下呈现梯度增加, 最终形成明显的分层现象. 机械搅拌可以使固体颗粒在宏观条件下均匀分散在基液中, 超声波振荡可以提供局部高温高压条件, 在强冲击波或微射流的作用下破坏分子间作用力, 打破粒子间的团聚, 提高纳米流体稳定性. 但超声波振荡时间过长将导致流体温度升高, 剧烈的布朗运动会增加粒子间的碰撞机会, 巨大的表面活性会加速粒子间聚集.

为研究超声波振荡时间对纳米流体稳定性的影响, 制备了体积分数为 0.5% 的氧化铝纳米流体, 并添加了相同质量分数 (0.2%) 的 PVP 作为分散剂, 在超声波振荡前后均进行了 5 min 的机械搅拌以提高粒子的稳定性. 图 2 为 3 d 内超声波振荡时间对相同体积分数的氧化铝纳米流体稳定性影响的沉降图, 振荡时间从左到右依次降低, 分别为 3 h、2 h、1 h、30 min、5 min. 可以看出, 新制备的纳米流体均呈现较好的悬浮性, 在静置 3 d 后开始出现明显的分层现象. 尤其是当振荡时间仅为 5 min 时, 悬浮液透光率大幅增加, 而振荡时间为 1 h 甚至更长时, 纳米流体分散性得到了较好的保证.

图 3、4 分别为体积分数为 0.5% 的氧化铝纳米流体吸光度随振荡时间  $t_o$  和静置时间  $t_s$  的变化曲

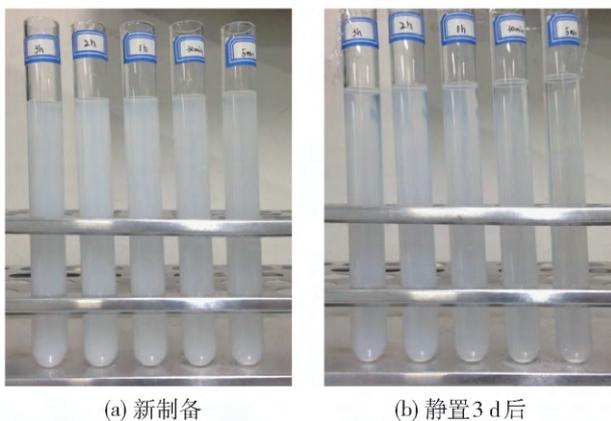


图 2 氧化铝纳米流体沉降图  
Fig. 2 Sedimentation of  $Al_2O_3$  nanofluids

线. 实验过程中对纳米流体进行了全波长扫描, 并选取最佳吸收波长下测试得到的吸光度值进行分析. 从图 3 可以看出, 纳米流体吸光度值随超声波振荡时间的增加呈现先增大后降低的变化趋势. 当振荡时间为 1 h 时, 吸光度值最大, 说明在该振荡时间下单位体积溶液内粒子体积分数最大, 粒子分散性较好. 当振荡时间过长时, 由于温度升高增加粒子碰撞机会, 加速粒子团聚. 当振荡时间较短时, 超声波提供的高温环境使得纳米粒子在较短时间内聚集却没有更长时间破坏团聚, 造成分散性较差, 吸光度值低于未振荡的纳米流体. 但在静置 18 h 后, 未振荡的纳米流体吸光度值迅速降低, 在重力作用下粒子几乎全部沉淀, 说明超声波能够明显改善粒子分散性, 但存在最佳超声时间.

从图 4 还可以看出, 新制备的纳米流体吸光度值均明显大于静置后, 说明悬浮液内固体粒子能够在初始时刻均匀分散并吸收较多的入射光, 但随着时间的推移粒子不断积聚沉淀, 稳定性逐渐降低. 纳米流体的稳定性对其实际应用存在至关重要的影响, 在制备过程中需要选取合适的超声时间, 并添加适用的分散剂以改善粒子的分散性. 此外, 可以考虑利用较低体积分数的纳米流体进行强化换热, 在提高工质传热性能的同时避免粒子团聚, 保证工质的稳定性.

### 3.2 分散剂对纳米流体稳定性的影响

由于纳米粒子粒径较小, 比表面积较大, 表面原子数较多, 因此, 表面原子的配位不平衡而形成大量的带电粒子, 在粒子间库仑力等相互作用下会形成带有弱连接界面的大尺寸团聚体. 分散剂能够均匀包覆在粒子周围形成微胞状态, 降低粒子的表面活性并防止由于粒子接触导致的絮凝.

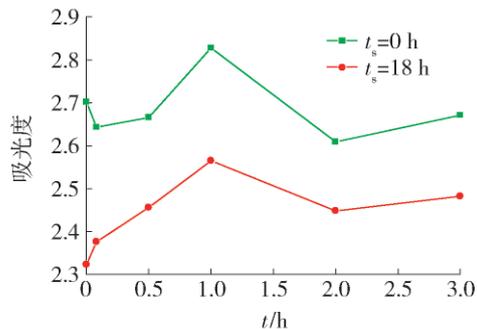


图 3 吸光度随振荡时间变化  
Fig. 3 Varies of absorbance with ultrasonic oscillation

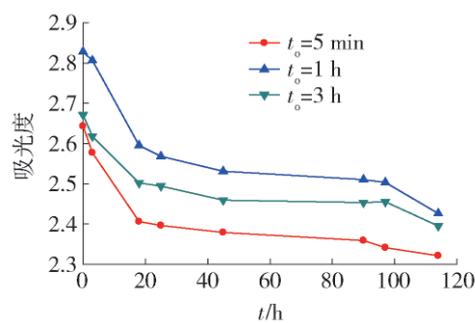
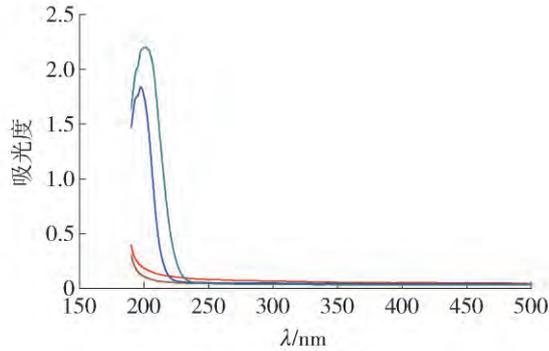


图 4 吸光度随静置时间变化  
Fig. 4 Varies of absorbance with time

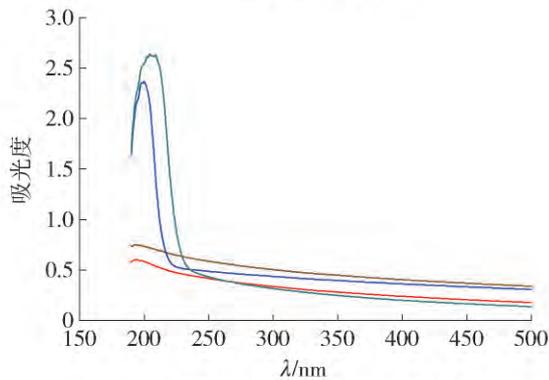
图 5 分别为添加不同种类分散剂的去离子水和体积分数为 0.5% 的氧化铝纳米流体波长扫描图, 分散剂的质量分数均为 0.2%. 可以看出, 分散剂溶液和纳米流体的最佳吸收波长均为 190 ~ 210 nm, 添加了 PVP 和 CTAB 分散剂的溶液吸光度值明显偏高. 由于阳离子型分散剂 CTAB 的烷基碳链较长导致水溶性较低, 非离子型分散剂 PVP 分子质量较大且碳链越长越难于溶于水, 在水中可以分解出更多能够有效吸收入射光的物质, 导致添加该 2 种分散剂的溶液吸光度值较大. 而阴离子型分散剂 SDS 的直链烷基取代基碳原子数较少, 在室温下水溶解量最大, 其溶液的吸光度值与水差别较小.

纳米粒子的添加提高了溶液内悬浮物体积分数, 其溶液吸光度值相比于水有所提高. 因此, 在利用吸光度法对纳米流体稳定性进行评价时, 吸光度绝对值的大小并不能直观反映出悬浮液内粒子的分散程度, 需要考虑分散剂的影响, 并对吸光度相对值的大小进行研究.

为分析分散剂添加量对纳米流体导热系数的影响, 选用非离子型 PVP 作为分散剂配置了氧化铝纳米流体,  $Al_2O_3$  纳米粒子的体积分数分别为 0.1% 和 2.5%, 相应的质量分数分别为 0.027% 和 0.643%,



(a) 不同分散剂基液



(b) 不同分散剂氧化铝纳米流体

—DI-water —SDS —CTAB —PVP

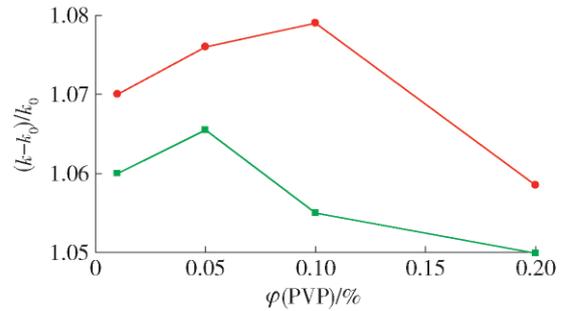
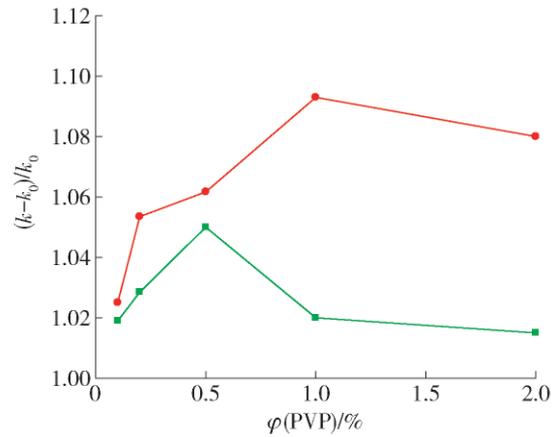
图5 基液与纳米流体的波长扫描图

Fig. 5 Wavelength scanning of based fluids and nanofluids

振荡时间均为 1 h, 结果如图 6 所示. 可以看出, 分散剂的添加量会随温度的升高而增加, 在不同粒子体积分数和环境温度下, 氧化铝纳米流体导热系数提高比例最大时所需的分散剂添加量不同.

当氧化铝纳米粒子体积分数为 0.1% 时, 室温为 20 °C 的条件下分散剂与粒子质量分数比约为 2:1, 当温度升高至 40 °C 时该质量分数比增加至 4:1. 当氧化铝粒子体积分数为 2.5% 时, 分散剂与粒子质量分数比随温度的升高从 1:5 增加至 2:5. 单位体积溶液内粒子体积分数越低, 粒子间碰撞几率越小, 颗粒自由运动空间越大, 即需要较多分散剂吸附在粒子表面降低其表面张力, 防止粒子团聚. 反之, 当粒子体积分数增加时, 单位体积内固体颗粒体积分数增加, 布朗运动会加剧粒子间碰撞, 促进热量传递, 此时若分散剂的质量分数过大有可能造成颗粒表面活性分子富集, 导致大量粒子聚集沉淀.

此外, 分散剂溶液内的氢键会随着温度的升高被破坏, 减弱分散剂的亲水性, 导致 PVP 分散剂水溶解量逐渐降低. 因此, 对于相同体积分数的纳米流体, 导热系数达到最大值时对应的 PVP 质量分数会随温度增加而增大. 当温度达到 40 °C, PVP 分散

(a)  $\varphi(\text{Al}_2\text{O}_3)=0.1\%$ ,  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)=0.027\%$ (b)  $\varphi(\text{Al}_2\text{O}_3)=2.5\%$ ,  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)=0.643\%$ 

— 20 °C — 40 °C

图6 分散剂对氧化铝纳米流体稳定性的影响

Fig. 6 Effect on stability of nanofluids with different dispersant

剂质量分数为 1.0% 时, 体积分数为 2.5% 的氧化铝纳米流体的导热系数提高比例达到 10%.

### 3.3 粒子体积分数和温度对纳米流体导热性能影响

纳米流体内粒子体积分数越高, 单位体积内固体颗粒含量越大, 比表面积越大, 能够用来传递热量的换热面积越大, 且粒子间碰撞几率的增加大幅提升了热交换效率, 能够有效改善工质的导热性能. 随外界环境温度的升高, 纳米流体内均匀分布的固体粒子会加速粒子间的热量传递, 但是在高温环境下, 纳米粒子易聚集产生沉淀进而恶化工质导热性能.

图 7 为不同温度环境下氧化铝纳米流体导热系数随粒子体积分数的变化曲线, 纳米流体内添加了相同质量分数的 PVP 作为分散剂. 可以看出, 氧化铝纳米流体导热系数随粒子体积分数的增加呈现先增大后降低的变化趋势, 且温度越高, 导热系数越大, 变化趋势越明显. 当温度升高至 50 °C 时, 体积分数为 0.5% 的氧化铝导热系数相比去离子水提高了约 20%, 导热性能得到大幅提升.

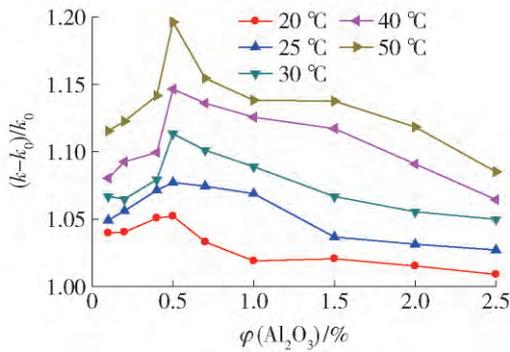


图 7 粒子体积分数对纳米流体导热系数的影响

Fig. 7 Effect on thermal conductivity of  $Al_2O_3$  nanofluids with different particle volume fraction

图 8 为粒子体积分数为 0.5% 和 1.5% 的氧化铝纳米流体导热系数随温度  $\theta$  的变化曲线. 随温度的不断升高, 导热系数均呈现不断上升的趋势, 但是, 当温度升高至 50 °C 后导热系数值反而降低. 常温环境下, 分子热运动水平较低, 纳米流体导热系数相比去离子水没有明显改善. 随着温度的升高, 粒子布朗运动逐渐剧烈, 增加了固体颗粒表面的接触机会, 促进了热量传递, 提高了工质的导热能力, 但温度过高会促使粒子相互聚集, 导致传热恶化, 导热系数降低.

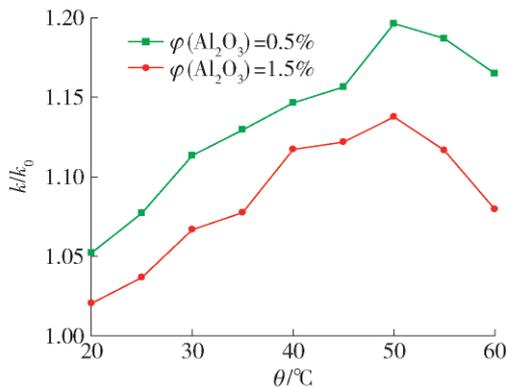


图 8 温度对纳米流体导热系数影响

Fig. 8 Effect on thermal conductivity with different temperature

此外, 在相同温度环境下, 粒子体积分数越高, 导热系数越低. 由于纳米流体内添加了相同质量分数的非离子型 PVP 作为分散剂, 当粒子体积分数较小时, 分散剂量过多会导致固体颗粒周围富集更多的表面活性剂分子产生弱化作用. 而随着粒子体积分数的增加, 分散剂分子无法有效包覆在粒子表面, 导致固体颗粒量越多, PVP 分散效果反而会有所降低. 且 PVP 在高温环境下会放热, 造成纳米粒子在

过高温度下导热性能恶化.

### 3.4 基液对纳米流体导热性能的影响

乙二醇可以作为制冷剂应用于制冷制热系统中, 由于其导热系数较低、黏度较大, 可以与水以一定比例混合作为基液, 在提高基液导热系数的同时利用乙二醇的黏度改善纳米流体的分散性. 图 9 为不同乙二醇/去离子水混合比例下, 基液与体积分数 0.5% 氧化铝纳米流体导热系数的关系图. 结果表明, 随基液中乙二醇质量分数的增加, 基液和纳米流体的导热系数值均不断降低. 以去离子水为基液时, 纳米流体导热系数提高比例最大, 其次为水与乙二醇混合比例为 1:1 时. 在其他混合比例下, 纳米流体导热系数几乎与基液相同.

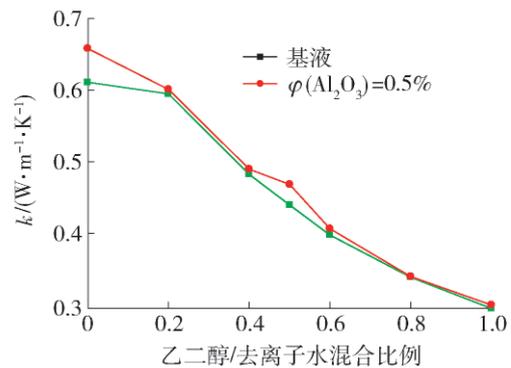


图 9 导热系数随乙二醇/去离子水比例关系的变化

Fig. 9 Varies of thermal conductivity with EG/DI-water

图 10 分别为去离子水、质量分数分别为 50%、80% 的乙二醇 3 种不同基液条件下, 粒子体积分数为 0.5% 的氧化铝纳米流体导热系数随温度的变化曲线. 以去离子水基液时, 纳米流体导热系数最高且随温度的变化趋势最为明显, 随基液中乙二醇含量的增加, 纳米流体导热系数迅速降低, 且随温度的升高其值变化趋势平缓.

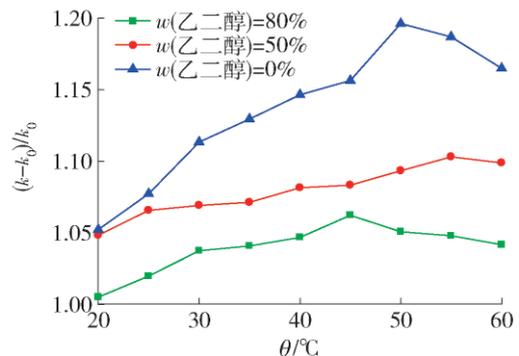


图 10 不同基液下纳米流体导热系数变化曲线

Fig. 10 Thermal conductivity of nanofluids with different based fluids

由于在去离子水中混合乙二醇可以增加基液的黏度,使纳米粒子能够在黏度的作用下沉降速率降低,提高其分散性。因此,当乙二醇混合比例较低时,基液中水起主要作用,分散性改善效果较差且乙二醇的添加降低了基液的导热系数,导致工质整体导热性能未有明显提高。当乙二醇混合比例不断增加时,基液中乙二醇逐渐占据主导地位,黏度的大幅增加可以阻止纳米粒子的沉降。但是当基液黏度过大时,粒子运动得到阻碍并且有可能在水和乙二醇比例差的影响下导致纳米流体出现从上到下密度梯度增加的情况,纳米粒子最终会在重力作用下逐渐沉积到底层,纳米流体的分散性能和导热性能同时恶化。

此外,随着温度的升高,基液和纳米流体的黏度会逐渐降低,流动阻力也会随之降低,更加有利于粒子迁移,促进热量交换,提高导热系数。

#### 4 结论

1) 吸光度法可有效评价纳米流体的分散性,但需考虑分散剂等物质的添加对基液吸光度值的影响。

2) 超声波振荡和分散剂的添加可以提高纳米流体稳定性,但振荡时间过长会引起温度升高导致粒子快速聚集沉淀,分散剂添加量与固体粒子体积分数的比值也会影响纳米流体的导热性能。

3) 在分散剂添加量相同的条件下,纳米流体导热系数随粒子体积分数的增加呈现先增大后减小的变化趋势,且随温度的升高得到大幅提升,但当温度过高时导热性能恶化。体积分数为 0.5% 氧化铝纳米流体在温度为 50 °C 导热性能得到最大幅度提升,相比去离子水提高约 20%。

4) 在去离子水中以一定比例混合乙二醇可以改善纳米流体的分散性,但存在最佳的混合比例。由于乙二醇导热系数降低,纳米流体导热性能没有得到更好改善。

#### 参考文献:

[1] XIE H Q, WANG J C, XI T G, et al. Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles [J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 91(7): 4568-4572.

[2] 莫松平,陈颖,李兴. 表面活性剂对二氧化钛纳米流体分散性的影响[J]. *材料导报 B: 研究篇*, 2013, 27(6): 43-46.

MO S P, CHEN Y, LI X. The effect of surfactants on the stability of TiO<sub>2</sub> nanofluids [J]. *Materials Review B: Study*, 2013, 27(6): 43-46. (in Chinese)

[3] 江宦明,夏国栋,刘冉.  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米流体导热系数与稳定性影响因素分析[J]. *工程热物理学报*, 2014, 35(8): 1550-1553.

JIANG H M, XIA G D, LIU R. Analysis of factors influencing the thermal conductivity and stability of  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014, 35(8): 1550-1553. (in Chinese)

[4] 李金凯,赵蔚琳,刘宗明,等. 低浓度 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-水纳米流体流制备及导热性能测试[J]. *硅酸盐通报*, 2010, 29(1): 204-208.

LI J K, ZHAO W L, LIU Z M. The preparation and thermal conductivity test for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluids at low particles concentration [J]. *Bulletion of the Chinese Ceramic Society*, 2010, 29(1): 204-208. (in Chinese)

[5] 宋玲利,张仁元,毛凌波. 纳米铝粉颗粒分散稳定性的研究[J]. *中国粉体技术*, 2011, 17(2): 53-56.

SONG L L, ZHANG R Y, MAO L B. The study on stability of Al nanoparticles [J]. *China Powder Science and Technology*, 2011, 17(2): 53-56. (in Chinese)

[6] MASUDA H, EBATA A, TERAMAE K. Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles [J]. *Netsu Bussei*, 1993, 7(14): 227-233.

[7] 谢华清,奚同庚. 纳米流体导热系数研究[J]. *上海第二工业大学学报*, 2006, 23(3): 200-204.

XIE H Q, XI T G. The study on thermal conductivity of nanofluids [J]. *Journal of Shanghai Second Polytechnic University*, 2006, 23(3): 200-204. (in Chinese)

[8] 寿青云,陈汝东. 金属氧化物纳米流体的导热性能研究[J]. *材料导报*, 2006, 20(5): 117-119.

SHOU Q Y, CHEN R D. Study on thermal conductivity of metal oxides nanofluids [J]. *Materials Review*, 2006, 20(5): 117-119. (in Chinese)

[9] PUTNAM S A, CAHILL D G, BRAUN P V. Thermal conductivity of nanoparticle suspensions [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006(99): 084308.

[10] UTOMO A T, POTTH H, ROBBINS P T. Experimental and theoretical studies of thermal conductivity, viscosity and heat transfer coefficient of titania and alumina nanofluids [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012(55): 7772-7781.

[11] 宣益民,李强. 纳米流体能量传递理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 20-21.

(责任编辑 郑筱梅)