

水-乙二醇基 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体的 制备及其性能研究

Ninsemon Jean Francois Dazihem¹, 陈薇¹, 肖一啸¹, 李爱蓉^{1*}, 武新慧²

(1.西南石油大学化学化工学院, 四川 成都 610500; 2.西南石油大学理学院, 四川 成都 610500)

摘要:以水-乙二醇为基液,通过两步法制备了质量分数为0.1%的 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体。考察了乙二醇体积分数、分散剂质量分数及种类、超声时间对纳米流体稳定性的影响。结果表明,乙二醇体积分数为35%时更适用于水-乙二醇基纳米流体的制备;质量分数为0.2%的阿拉伯树胶(GA)可有效提高 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米颗粒在水-乙二醇基液中的分散稳定性;超声30 min即可改善纳米流体的稳定性。最后评价了纳米流体的热物性,当与基液水浴加热到60℃时,水-乙二醇基 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体的导热性能提升幅度最大,为基液的1.35倍;在20~60℃加热过程中, Al_2O_3 乙二醇基纳米流体黏度最低达0.97 mPa·s,所制备的纳米流体可适用于流动换热。

关键词:纳米流体;乙二醇; $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$;稳定性;导热性

中图分类号: TB34; TK124

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2023)03-0183-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.03.033

Study on stability and thermal properties of water-ethylene glycol based $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ nanofluids

Ninsemon Jean Francois Dazihem, CHEN Wei¹, XIAO Yi-xiao¹, LI Ai-rong^{1*}, WU Xin-hui²

(1.College of Chemistry & Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2.School of Sciences, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: Taking water-ethylene glycol as substrate solution, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ nanofluid with a mass fraction of 0.1% is prepared via a two-step method. The effects of ethylene glycol concentration, the type and concentration of dispersant, and sonication time on the stability of nanofluids are investigated by means of static sedimentation method, spectrophotometric method and particle size analysis. Experimental results show that ethylene glycol with a volume fraction of 35% is more suitable for the preparation of water-ethylene glycol based nanofluids. Gum arabic (GA) with a mass fraction of 0.2% can effectively improve the dispersion stability of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ nanoparticles in water-ethylene glycol substrate solution. And the stability of nanofluids can be improved by 30 min of sonication. Thermal properties of the nanofluid are evaluated. As the nanofluid is heated to 60℃ with the water bath of the substrate solution, its thermal conductivity is enhanced the most, which is 1.35 times that of the substrate solution. During the heating process from 20℃ to 60℃, the minimum viscosity of Al_2O_3 glycol-based nanofluid is 0.97 mPa·s, suitable for flow heat transfer.

Key words: nanofluids; ethylene glycol; $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$; stability; thermal conductivity

随着科学技术的不断发展,换热设备的传热强度和负荷显著增加,对工业、电子设备的传热和散热性能提出了更高的要求。针对此情况,从换热工质的角度进行改进是一种有效的解决办法^[1-3]。纳米流体是指按照一定比例,在液体中加入纳米金属颗粒或非金属颗粒,从而形成一类新型换热工质^[4-6]。由于颗粒粒径由毫米级、微米级降为纳米级,具备了很多新的特性,如表面效应和小尺寸效应^[7];布朗运动使纳米颗粒间相互排斥,可使其较稳定地分散于基液中,而不发生沉降^[8-9];此外,其比表面积增加,传热能力也得到了增强^[10-11]。纳米流体将成为

未来液体换热工质的重要选择之一。为了促进纳米流体的产业化规模应用,当前研究主要聚焦于提高纳米流体的导热性和稳定性。

在导热性上, Lee 等^[12]在1999年就研究了CuO/水、CuO/乙二醇、 Al_2O_3 /水、 Al_2O_3 /乙二醇4种氧化物纳米流体,通过对比其导热系数发现,纳米流体的导热系数取决于基液导热系数和纳米颗粒的导热系数,纳米流体的导热系数随纳米颗粒体积分数的增加几乎呈线性增加。Mohammad Hemmat Esfe 等^[13]测量了 Al_2O_3 /EG纳米流体的导热系数,结果表明,纳米流体的导热系数随浓度和温度的升高而

收稿日期:2022-03-31;修回日期:2023-01-03

基金项目:南充市校科技战略合作项目(SXHZ036, SXHZ017)

作者简介:Ninsemon Jean Francois Dazihem(1996-),男,硕士研究生,主要从事纳米流体强化传热技术研究,201927000006@stu.swpu.edu.cn;

李爱蓉(1979-),女,博士,教授,主要从事强化过程换热工质研究,通讯联系人,liairong@swpu.edu.cn。

显著提高。在稳定性上, Choudhary 等^[14]研究了在使用 SDS 作分散剂时, pH 与超声时间对 γ - Al_2O_3 /水纳米流体的稳定性的影响。Zhai^[15]研究了添加聚乙烯吡咯烷酮(PVP)和十二烷基硫酸钠(SDS)两种不同的表面活性剂的 Al_2O_3 /乙二醇纳米流体,发现 PVP 能为 Al_2O_3 -EG 纳米流体提供最佳的稳定性。李艳娇等^[16]通过两步法制备了氯化铝/乙二醇纳米流体,在稳定性测试中发现非超声震荡时间越长,纳米流体的稳定性越好。周登青等^[17]通过对乙二醇基纳米流体黏度的研究发现,在纳米粒子质量浓度较高时,纳米流体的黏度随温度波动较大。刘冉^[18]在制备 Al_2O_3 和 TiO_2 纳米流体的过程中添加乙二醇,发现乙二醇一定程度上可以降低粒子沉降速率,但会使流体的导热性能有所降低。

因此,笔者以两步法制备水-乙二醇基 γ - Al_2O_3 纳米流体,系统研究乙二醇体积分数、分散剂种类与质量分数、超声时间对 γ - Al_2O_3 纳米流体稳定性的影响,并测定了该纳米流体的基础物性。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

试剂: γ - Al_2O_3 纳米颗粒(20 nm, 99.99%), 上海麦克林生化科技有限公司生产;乙二醇(EG)、阿拉伯树胶(GA)、聚乙烯吡咯烷酮 K30(PVP), 均为分析纯,成都科隆化学品有限公司生产。

仪器:SM-1000C 型超声波纳米材料分散器,南京舜玛仪器设备有限公司生产;V-1800 型可见光分光光度计,上海美谱达仪器有限公司生产;KD2-pro 型热物性分析仪,美国 Decagon 公司生产;90Plus PALS 高灵敏 Zeta 电位及粒度分析仪,美国布鲁克海文仪器公司生产;Haake 旋转黏度计,德国赛默飞公司生产。

1.2 纳米流体的制备

用两步法制备质量分数为 0.1% 的 γ - Al_2O_3 纳米流体。首先,将一定比例的水与乙二醇混合,添加适当质量分数的分散剂后制备为基液,磁力搅拌 30 min,将基液混合均匀;然后再向基液中加入纳米颗粒;最后经过一定时间的超声分散,制得稳定性较好的纳米流体。

1.3 性能测试

1.3.1 稳定性测试

(1) 分光光度法

利用 V-1800 型可见光分光光度计对纳米流体的分光度进行测试,以 24 h 为一个间隔,考察纳米

流体在 5 d 内的吸光度变化趋势,从而判断纳米流体的稳定性。通过分光光度计测量纳米流体的吸光度,判断纳米流体的分散稳定性^[13]。实验前已对比过纳米流体测试的合适波长,最后确定了 340 nm 为测试波长。

(2) 粒径分析法

利用 Zeta 电位及粒度分析仪测量基液中纳米颗粒的粒径分布与粒度,从而判断悬浮液的分散稳定性。

1.3.2 导热性能测试

通过 KD2-Pro 型热特性分析仪测试纳米流体及其基液随温度变化而变化的导热系数值,确定纳米流体的导热性能,对纳米流体的导热性能进行评估。测试时,整套导热系数测量系统需放置水平,周围无明显震动,探针必须处于液体中心位置并注意不要贴壁,每组实验需进行 3 次平行测量,并保持温度恒定。

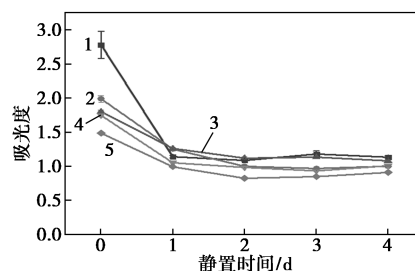
1.3.3 黏温性能测试

利用 Hakke 旋转黏度仪测试纳米流体在 20~60℃ 的黏温变化曲线。剪切速率为 10 s^{-1} 时纳米流体的黏度及其随温度的变化。由于乙二醇黏度相比水要大 1 个数量级左右,以其为基液在不添加分散剂的情况下能制备获得比水基纳米流体更为稳定的纳米流体;但另一方面加入了乙二醇的基液黏度会有一定程度的上升,因此需要测试制备出的乙二醇基纳米流体的黏度。

2 结果与讨论

2.1 乙二醇体积分数对水-乙二醇基 γ - Al_2O_3 纳米流体稳定性的影响

通过两步法制备的水-乙二醇基 γ - Al_2O_3 纳米流体静置 4 d 后肉眼观察并未出现明显分层,稳定性良好。用分光光度法比较不同乙二醇体积分数样品的稳定情况,结果如图 1 所示。由图 1 中可以看



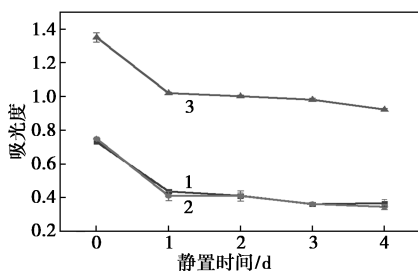
1—5%; 2—20%; 3—35%; 4—50%; 5—65%

图 1 水-乙二醇基 γ - Al_2O_3 纳米流体吸光度随乙二醇体积分数的变化

出,静置0 d的样品吸光度随乙二醇体积分数的增加反而降低。虽然乙二醇的加入可以对纳米流体的稳定性有一定增加,但加入过多的乙二醇不利于 γ - Al_2O_3 颗粒的分散。当加入的乙二醇过少(5%、20%)时,样品的吸光度随静置时间急剧下降。总体上看,在 γ - Al_2O_3 纳米流体中添加体积分数为35%的乙二醇稳定分散性更好。

2.2 分散剂种类对水-乙二醇基 γ - Al_2O_3 纳米流体稳定性的影响

将文献[15-20]中使用的分散剂PVP用于制备 γ - Al_2O_3 纳米流体,与未加入分散剂的 γ - Al_2O_3 纳米流体进行比较,结果如图2所示。由图2中可以看出,添加GA的纳米流体的吸光度虽有波动,但整体维持在一个较高的水平,而添加PVP的纳米流体吸光度变化曲线与不添加分散剂的曲线几乎重合。PVP对 γ - Al_2O_3 并不适用,对纳米流体的稳定性几乎没有改善效果。而将PVP替换为GA,以相同条件重新制备纳米流体后,GA对纳米流体的稳定性具有显著的提升效果。GA和PVP都是高分子聚合物,利用空间位阻实现对纳米粒子的分散:聚合物链吸附在纳米颗粒表面,使纳米颗粒在基流体中运动受限,作为空间屏障防止纳米颗粒聚集。与PVP不同的是,GA的分子质量更大,聚合物链更长,这使其在纳米颗粒的稳定能力更好。另一方面,GA的亲水性没有PVP强,在加入了乙二醇的基液中能更好地降低界面张力。

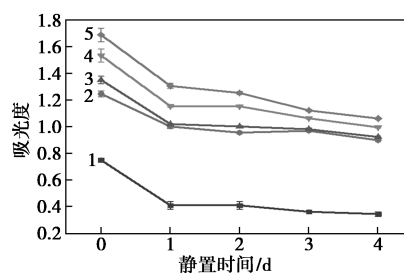


1—0.1% PVP;2—不加入分散剂;3—0.1% GA

图2 不同种类添加剂水-乙二醇基 γ - Al_2O_3 纳米流体吸光度随时间的变化

2.3 分散剂质量分数对水-乙二醇基 γ - Al_2O_3 纳米流体稳定性的影响

在使用GA作分散剂的情况下,逐渐增加GA的质量分数,实验结果如图3所示。从图3中可以看出,不添加GA的纳米流体的吸光度整体低于添加GA的纳米流体,随着添加的GA质量分数的增加,吸光度整体更高,说明GA的增加使纳米颗粒在基液中的分散性更好。



1—0 wt%;2—0.05 wt%;3—0.1 wt%;4—0.15 wt%;5—0.2 wt%

图3 水-乙二醇基 γ - Al_2O_3 纳米流体吸光度随GA的质量分数的变化情况

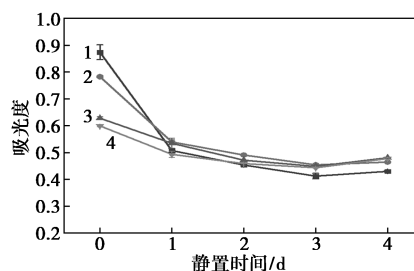
添加不同质量分数的GA的样品的粒径如表1所示,该粒径为样品的有效粒径。由表1中可以看出,GA的添加抑制了氧化铝纳米颗粒的团聚,添加0.2%的GA使纳米颗粒有效粒径由2334.2 nm降低到592.6 nm。这是由于GA吸附在纳米颗粒表面,有效减少了纳米粒子之间的团聚。

表1 水-乙二醇基 γ - Al_2O_3 纳米流体有效粒径随GA质量分数的变化情况

GA 质量分数/%	0	0.05	0.1	0.15	0.2
有效粒径/nm	2334.2	2068.5	1819.7	1390.6	593.6

2.4 超声时间对水-乙二醇基 γ - Al_2O_3 纳米流体稳定性的影响

固定超声功率为1000 W,考察超声时间对水-乙二醇基 γ - Al_2O_3 纳米流体稳定性的影响,结果如图4所示。由图4中可以发现,超声15 min及以上可以使溶液完全分散,但15 min的超声样品的吸光度降低幅度最大,无法保证后续纳米流体的稳定性,随着静置时间的增长,吸光度持续降低。超声处理可以在微观上打乱纳米颗粒的团聚,打碎纳米颗粒之间已经形成的团聚体,在宏观上则表现为纳米流体的稳定性增强。当超声时间过短、超声处理强度不够时,则不能对纳米粒子的团聚起太多作用。



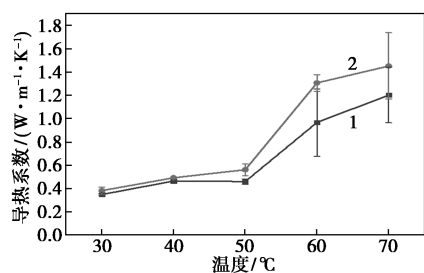
1—15 min;2—30 min;3—60 min;4—90 min

图4 水-乙二醇基 γ - Al_2O_3 纳米流体吸光度随超声时间的变化情况

30~90 min 的超声效果类似,从能耗上考虑,最佳超声时间为 30 min。

2.5 水-乙二醇基 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体的导热性能评价

对稳定性较好的 Al_2O_3 纳米流体进行导热性能评价,验证添加 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米颗粒是否对基液的导热性能有良好的改善作用。纳米流体的导热性能结果如图 5 所示。由图 5 中可以发现,随着温度的上升,2 组的导热系数都出现了正增长。在 60℃ 前,纳米颗粒的添加对导热系数的改善不明显,而 70℃ 时则出现小幅度回落。这种现象可以用纳米颗粒之间的运动过程解释:随着温度的上升,纳米颗粒间的布朗运动加剧,粒子之间的剧烈运动使其导热能力显著上升。但温度增长对导热系数的提升也有一定的限度,当温度升高时,纳米颗粒之间的碰撞加剧也增加了碰撞发生团聚的概率,因此当温度达到一定高度时,纳米颗粒的传热能力将恶化。整体来说,纳米颗粒的加入对工质的导热能力有较大的改善。



1—基液;2— $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体

图 5 水-乙二醇基 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体及基液的导热系数随温度的变化

2.6 水-乙二醇基 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体的黏温性能评价

对纳米流体进行了黏温性能测试,结果如图 6 所示。由图 6 可知,从 20~48℃,黏度呈线性下降(3.08~0.97 mPa·s)。在 48℃ 以上,由于水-乙二醇基 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体温度升高, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米颗

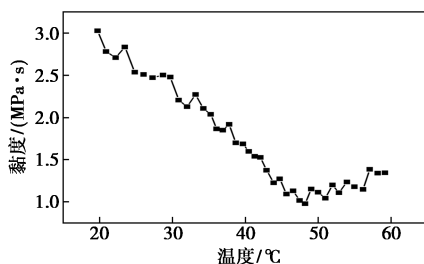


图 6 水-乙二醇基 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体的黏度随温度的变化

粒之间的布朗运动增加,颗粒之间的剧烈相互作用导致 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米颗粒大量聚集,黏度开始增加。水-乙二醇基 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体在 20~60℃ 时具有较低的黏度,制备的水-乙二醇基 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体适合于流动体系的传热过程。

3 结论

通过两步法制备了水-乙二醇基 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体,考察了乙二醇体积分数、分散剂质量分数及种类、超声时间对所制备的水-乙二醇基的 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体稳定性的影响,并测定了纳米流体的热物性。根据实验得出了以下结论:

(1) Al_2O_3 质量分数为 0.1% 的水-乙二醇基纳米流体,在乙二醇体积分数为 35% 时,纳米流体稳定性最好。

(2) 相较于 PVP, GA 具有更好的稳定和分散效果;相比不加 GA 的水-乙二醇基纳米流体,加入质量分数为 0.2% 的 GA 的样品有效粒径能从 2 334.2 nm 降低到 592.6 nm。

(3) 超声功率固定为 1 000 W、超声时间为 30 min 时水-乙二醇基 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体稳定性更好。

(4) 当水-乙二醇基 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体与基液水浴加热到 60℃ 时,纳米流体的导热性能提升幅度最大,为基液的 1.35 倍。

(5) 在 48℃ 之前, Al_2O_3 乙二醇基纳米流体的黏度随温度的增加而下降,由 3.08 mPa·s 线性下降到 0.97 mPa·s;而在 48℃ 以后,纳米流体的黏度因布朗运动出现增加。制备的水-乙二醇基 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体适合于流动体系的传热过程。

参考文献

- [1] 韦宝杰. TiO_2/SiC -导热油纳米流体的传热性能研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
- [2] Ravi Agarwal, Kamalesh Verma, Narendra Kumar Agrawal, *et al.* Sensitivity of thermal conductivity for Al_2O_3 nanofluids[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 80: 19-26.
- [3] Fuskele V, Sarviya R M. Recent developments in nanoparticles synthesis, preparation and stability of nanofluids[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2017, 4(2): 4049-4060.
- [4] 张胜寒, 韩晓雪. 颗粒亲水性对纳米流体表面张力的影响研究进展[J]. *化工新型材料*, 2018, 46(5): 38-43.
- [5] Chakraborty S, Panigrahi P K. Stability of nanofluid: A review[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 174: 115259.
- [6] 吕伦春. 纳米流体强化毛细泵回路(CPL)换热特性实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.

(下转第 191 页)

大,密度先减小后增大,当水用量为 2.5 phr 时,泡沫密度最小,为 57 kg/m^3 。

(2) DSC 测试结果表明, SMPF 软段具有结晶熔融性能,且随着水用量的增加,软段结晶熔融温度向高温区偏移。

(3) SMPF 具有热激发和水激发形状记忆效应,随着水用量的增加, R_f 逐渐减小, R_r 先减小后增大。

参考文献

- [1] 李兴建,白宝仕,刘升,等.具有相分离结构的 PMMA/PEG 半互穿网络形状记忆高分子[J].材料导报,2020,34(2):2142-2146.
- [2] Bonfil M, Sirkecioglu A, Bingol-Ozakpinar O, et al. Castor oil and PEG-based shape memory polyurethane films for biomedical applications [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131(15):40590.
- [3] Gu X, Mather P T. Water-triggered shape memory of multiblock thermoplastic polyurethanes (TPUs) [J]. RSC Advances, 2013, 3(36):15783-15791.
- [4] Jung Y C, So H H, Cho J W. Water-responsive shape memory polyurethane block copolymer modified with polyhedral oligomeric silsesquioxane [J]. Journal of Macromolecular Science Part B, 2006, 45(4):453-461.
- [5] Zhou L, Yu L, Ding M, et al. Synthesis and characterization of pH-sensitive biodegradable polyurethane for potential drug delivery applications [J]. Macromolecules, 2011, 44(4):857-864.
- [6] Chan B, Heng S, Liow S S, et al. Dual-responsive hybrid thermo-plastic shape memory polyurethane [J]. Materials Chemistry Frontiers, 2017, 1(4):767-779.
- [7] 李帅,张均,陈建君,等.形状记忆聚氨酯泡沫的制备与性能研究[J].聚氨酯工业,2019,34(2):20-22.
- [8] 李帅,张均,何成汉,等.发泡剂对形状记忆聚氨酯泡沫性能的影响[J].化工新型材料,2019,47(9):249-252.
- [9] Singhal P, Small W, Cosgriff-Hernandez E, et al. Low density biodegradable shape memory polyurethane foams for embolic biomedical applications [J]. Acta Biomaterialia, 2014, 10(1):67-76.
- [10] Ravey M, Pearce E M. Flexible polyurethane foam. I. Thermal decomposition of a polyether-based, water-blown commercial type of flexible polyurethane foam [J]. Journal of Applied Polymer Science, 1997, 63(1):47-74.
- [11] 陈涛,杜海晶,米岩,等.水用量对全水发泡聚氨酯泡沫形态和力学性能的影响[J].高分子材料科学与工程,2012,28(7):67-71.
- [12] Tang X, Zhang Z, Zhang X, et al. Design and formulation of polyurethane foam used for porous alumina ceramics [J]. Journal of Polymer Research, 2018, 25(6):1-10.
- [13] Zhang J, Chen J, Yao M, et al. Hydrolysis-resistant polyurethane elastomers synthesized from hydrophobic bio-based polyfarnesene diol [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(25):47673.
- [14] Chattopadhyay D K, Webster D C. Thermal stability and flame retardancy of polyurethanes [J]. Progress in Polymer Science, 2019, 34(10):1068-1133.
- [15] 崔航,王锋,胡剑青,等.形状记忆聚氨酯材料的研究进展[J].材料导报,2017,31(2):1-6. ■
- [7] 莫松平,陈颖,李兴等.基于粒子吸附层的纳米流体有效导热系数模型[J].材料导报,2014,28(10):137-140.
- [8] Lu R, Liang R, Duan W. (2021). Dispersion and stability of fine-grained soils under different pretreatments based on the particle size distribution [J]. Journal of Soils and Sediments, 2021, 21(1):96-105.
- [9] 陈亚凤.纳米流体池沸腾传热特性研究[D].南京:南京航空航天大学航空工程,2017.
- [10] Sezer, Nurettin, Atieh, et al. A comprehensive review on synthesis, stability, thermophysical properties, and characterization of nanofluids (Review) [J]. Powder Technology, 2019, 344:404-431.
- [11] 徐鑫鑫.用于直接吸收式太阳能集热器的水-乙二醇基纳米流体研究[D].广州:华南理工大学,2019.
- [12] Lee S, Choi S U, Li S, et al. (May 1, 1999). measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles [J]. ASME J Heat Transfer, 1999, 121(2):280-289.
- [13] Mohammad Hemmat Esfe, Arash Karimipour, Wei-Mon Yan, et al. Experimental study on thermal conductivity of ethylene glycol based nanofluids containing Al_2O_3 nanoparticles [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 88:728-734.
- [14] Choudhary R, Khurana D, Kumar A, et al. Stability analysis of Al_2O_3 /water nanofluids [J]. Journal of Experimental Nanoscience, 2017, 12(1):1-12.
- [15] Zhai Y L, Li L, Wang J, et al. Evaluation of surfactant on stability and thermal performance of Al_2O_3 -ethylene glycol (EG) nanofluids [J]. Powder Technology, 2019, 343:215-224.
- [16] 李艳娇,孙崇锋,郭剑锋等. AIN/EG 纳米流体的制备及稳定性研究[J].功能材料,2015,46(8):8018-8022.
- [17] 周登青,吴慧英.乙二醇基纳米流体黏度的实验研究[J].化工学报,2014,65(6):2021-2026.
- [18] 刘冉.纳米流体稳定性和导热系数测试及其流动与换热特性研究[D].北京:北京工业大学,2016.
- [19] Norlin Pauzi, Norashikin Mat Zain, Nurul Amira Ahmad Yusof. Gum arabic as natural stabilizing agent in green synthesis of ZnO nanofluids for antibacterial application [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2020, 8(3):103331.
- [20] Chakraborty S. An investigation on the long-term stability of TiO_2 nanofluid [J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 11:714-718. ■

(上接第 186 页)