

纳米流体研究进展

丁婷婷 李子成 周 颖 韩书广*

(南京林业大学材料科学与工程学院, 南京 210037)

摘 要 纳米流体是近几年才出现的概念,它是纳米粒子和液体介质共存的一种悬浮液。纳米流体高导热性研究为提高能源利用效率提供了一种新的解决方案,已经成为研究者关注的热点。主要介绍了纳米流体的制备和 3 种提高纳米流体稳定性的方法;探讨了纳米流体黏度的变化规律以及黏度对传热的影响;阐述了纳米流体在传热和传质领域中的应用;最后提出了纳米流体研究中尚需解决的问题,并对纳米流体的应用前景进行了展望。

关键词 纳米流体,制备,稳定性,黏度,应用

Latest research progress of nanofluid

Ding Tingting Li Zicheng Zhou Ying Han Shuguang

(College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037)

Abstract As a concept that emerges in recent years, nanofluid is a kind of suspension liquid, in which nanoparticles and fluid media coexist. The study on the high thermal conductivity of nanofluid which provides a new solution to improve efficiency of energy utilization has become a research focus that many researchers pay great attention to. Nanofluid preparation methods and three methods to ensure nanofluid stability were introduced. The change law of nanofluid viscosity and the effects of viscosity on heat transmission were discussed. Then, applications of nanofluid in the fields of heat transmission and mass transfer were elaborated. At last, problems that should be solved in the study of nanofluid were proposed, and an outlook for application prospect of nanofluid was provided.

Key words nanofluid, preparation, stability, viscosity, application

纳米流体 1995 年由美国 Argonne 国家实验室 Choi 等率先提出^[1],是一种将少量纳米颗粒(粒径小于 100nm 的金属、金属氧化物、非金属无机化合物、有机化合物)按照一定的比例和方法添加到液体介质(基液)中所形成的稳定悬浮液^[2-3]。纳米流体具有导热性能较原基液大幅度提高的特性,对提高能源利用率意义重大。从近几年的研究发现:纳米流体的导热性是研究的重点,而在应用中,纳米流体的导热性又受到流体稳定性和黏度的影响,如何控制纳米流体稳定性和黏度是目前纳米流体应用中需要解决的问题。除了在传热方面的研究与应用外,纳米流体在传质方面,主要是在气液传质方面也有少量的研究和应用。下面主要从纳米流体的制备、稳定性、黏度、应用等方面阐述纳米流体的研究进展。

1 纳米流体的制备

1.1 一步法制备纳米流体

一步法是先利用化学或者物理方法制备出纳米粒

子,然后将纳米粒子直接分散在基液中的方法。一步法不存在纳米粒子的干燥、贮存、运输和再分散过程,所以纳米粒子不易团聚,可直接获得分散稳定的纳米流体^[4-5]。Lee 等^[6]以铜球为模板,通过单脉冲激光灼烧的一步法和两步法分别制备了 CuO-H₂O 纳米流体,一步法制备的 CuO-H₂O 纳米流体的电动电势和 pH 均大于两步法制备的 CuO-H₂O 纳米流体,说明一步法制备的纳米流体的颗粒静电斥力大,颗粒不容易团聚,制备的纳米流体比较稳定。但是,一步法制备纳米流体的方法复杂,成本高,不适宜大批量生产^[7]。

1.2 两步法制备纳米流体

两步法是先制备出纳米粒子,干燥后再分散到合适的基液中。该方法可以很好地解决工业生产中纳米粒子的干燥、贮存和运输问题。两步法制备纳米流体比一步法操作简单,成本低,是一种很适合工业生产的方法。夏国栋等^[8]将 Al₂O₃ 分散到去离子水和乙二醇的混合基液中,制得体积分数为

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31470590)

作者简介:丁婷婷(1992-),女,硕士研究生,研究方向为纳米流体及其在胶粘剂中的应用。

联系人:韩书广(1971-),男,博士,副教授,研究方向为纳米材料及其在胶粘剂中的应用。

0.5%的 Al_2O_3 纳米流体,静置 3d 后,出现明显沉淀现象。在 50℃时,体积分数为 0.5%的 Al_2O_3 纳米流体的导热系数较去离子水提高了 20%。陈立飞^[9]把先用强酸处理、再用机械球磨处理的碳纳米管分散到乙二醇中,制备纳米流体,1 周内没有明显沉淀现象。在机械球磨 10h、温度 65℃条件下,碳纳米管-乙二醇纳米流体的导热系数较乙二醇提高了 28%。

2 纳米流体的稳定性

两步法虽然满足了工业生产的需要,但在实际应用中仍存在纳米粒子在基液中的分散稳定性问题。纳米颗粒本身的粒径小,体积分数小于 10%,比表面积大^[10],在基液中极易团聚而沉降,进而影响纳米流体的稳定性。Zafarani-Moattar 等^[11]将 ZnO 放入 110℃的电炉中干燥 24h,然后分散到聚乙二醇的水溶液中,制备了 ZnO-聚乙二醇纳米流体。由于 ZnO 本身易团聚,所以 ZnO-聚乙二醇纳米流体只能稳定 140min 左右。另外,纳米流体的分散稳定性也容易受到温度等因素的影响。邵雪峰等^[12]将 1g Al_2O_3 纳米粉体添加到 100mL 无水乙醇中,制备出 Al_2O_3 -乙醇纳米流体,将其置于中低温环境,研究温度变化对 Al_2O_3 -乙醇纳米流体稳定性的影响。如图 1 所示,在低温条件下,随着时间的延长, Al_2O_3 -乙醇纳米流体的沉降速率低于高温下的沉降速率,说明 Al_2O_3 -乙醇纳米流体在低温下能保持较好的稳定性。所以,纳米流体的稳定性是纳米流体制备过程中必须优先考虑的问题。判断稳定性的好坏,最直观的方法就是观察纳米流体有无沉淀现象。目前提高纳米流体稳定性的方法主要有 3 种:物理方法、化学方法以及物理化学混合法。物理方法包括:磁力搅拌、超声分散、声波破碎,但一般是两种物理方法配合使用。化学方法包括:加入分散剂(一般用表面活性剂),调节基液的 pH 等。物理化学混合法是先用一种化学方法分散,再用一种或一种以上的物理方法辅助。

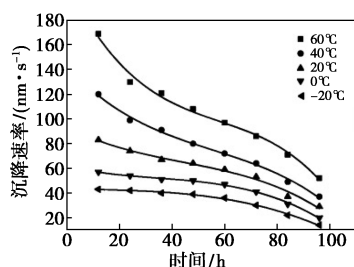


图 1 不同温度下纳米颗粒沉降速率曲线

2.1 物理方法

磁力搅拌的主要目的是让纳米颗粒充分分散到基液中,方法简单,易操作。但受磁力搅拌器转速的限制,一般无法达到理想的分散效果,往往需要配合超声分散或声波破碎使用。王亚妹等^[13]用 FA114 型精密电子天平(分度值为 0.00001g)称取粒径 40nm 的 CuO 纳米颗粒,然后将质量分数为 0.04% 的 CuO 纳米颗粒分散到去离子水中,用 78-1 型磁力加热搅拌器搅拌 30min,最后在室温下用 KQ200VDE 型三频数控超声波清洗器进行超声振荡(振荡频率 45kHz,功率 140W,振荡时间 70min),制得 CuO- H_2O 纳米流体,该流体在 3h 内保持稳定无沉淀现象。

超声分散是利用超声波将纳米颗粒均匀分散到基液中,此方法适宜不易团聚的纳米粒子,是提高纳米流体稳定性最常用的方法。Fazeli 等^[14]将体积分数分别为 3.5%、4%、4.5%、5% 的 SiO_2 纳米颗粒(粒径 18nm、纯度 99.9%)分散到蒸馏水中,超声分散 90min 以上,制得 SiO_2 - H_2O 纳米流体,纳米流体在 72h 内均无明显沉淀现象。

与超声分散相比,声波破碎频率高,可以将团聚的纳米粒子破碎,缩小纳米粒子的粒径,使纳米粒子能更好地分散到基液中。声波破碎适合易团聚的纳米粒子,对于极易团聚的纳米粒子,也可以将超声分散与声波破碎结合使用,以提高纳米流体的稳定性。Kole 等^[15]将体积分数为 1% 的 ZnO 分散到乙二醇中,声波破碎 60h 后,制得 ZnO-乙二醇纳米流体。该纳米流体的粒径由 459nm 缩小到 91nm,静置 30d 后,仍无明显沉淀现象,说明用声波破碎可以减少粒子团聚的现象。Sheikhabahai 等^[16]将粒径小于 50nm 的 Fe_3O_4 纳米粒子分散到含 50% 乙二醇的去离子水中,先超声分散 1h,再用 UP200S 型近距离声波定位器破碎 1h,制备的纳米流体在 8h 内没有出现沉淀。Tajik 等^[17]将 TiO_2 和 Al_2O_3 纳米颗粒分散到水中,先用声波破碎 30min,再超声分散 20min,制备的纳米流体可以稳定 24h。

物理方法虽然操作简单,但是无法解决纳米粒子间互相吸引而团聚的问题,仅用物理方法处理的纳米流体,只能在短时间内处于稳定状态。

2.2 化学方法

化学方法中最常用的是在纳米流体体系中添加分散剂,分散剂可以降低纳米粒子表面张力,在纳米粒子之间形成有效的空间位阻,使纳米粒子因无法相互吸引而团聚。凌智勇等^[18]研究了十二烷基苯

磺酸钠(SDBS)对 $\text{Cu-H}_2\text{O}$ 和 $\text{ZrO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 纳米流体分散稳定性的影响。如图 2 所示,添加 SDBS 的纳米流体明显比未添加的要稳定,特别是当 SDBS 加入量为 0.1% (质量分数) 时,纳米流体的稳定效果最好。静置 5d 都没有出现沉淀,说明添加表面活性剂可以有效提升纳米流体的稳定性。

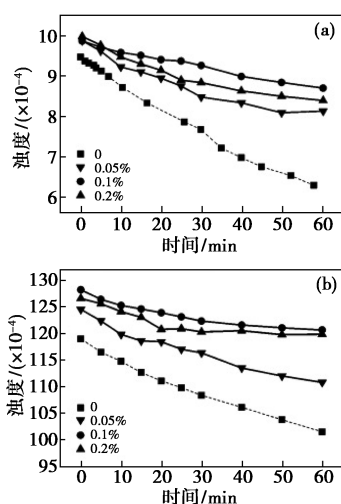


图 2 添加不同质量分数 SDBS 的纳米流体浊度随时间变化曲线

[(a) $\text{Cu-H}_2\text{O}$ 纳米流体; (b) $\text{ZrO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 纳米流体]

由于分散剂的成本较高,添加过量的分散剂会影响纳米粒子的亲水性,破坏纳米流体的稳定性。而通过调节纳米流体体系的 pH 来提高纳米流体的稳定性则成本低,操作更简单。其原理是通过调节纳米流体的 pH 来改变体系的 zeta 电位绝对值 $|\zeta|$, $|\zeta|$ 越大,纳米粒子静电斥力越强,粒子越不易相互吸引团聚,稳定性越好,所以测量 zeta 电位是公认的测定纳米流体稳定性的方法^[19]。袁群等^[20]配制了质量分数为 0.1% 的 Al_2O_3 纳米流体,考察了溶液 pH 对 zeta 电位的影响。如图 3 所示, pH 为 5~8 时, $|\zeta|$ 上升; pH 在 8~9 时, $|\zeta|$ 呈下降趋势。而 pH 为 8 时, $|\zeta|$ 值最大,说明此时纳米流体最稳定。

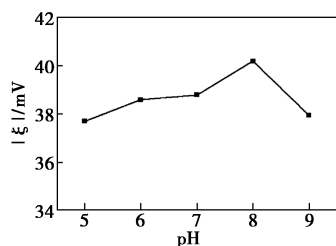


图 3 溶液 pH 对 zeta 电位的影响

化学方法适合解决极易团聚的纳米粒子分散的问题,但是此方法相对比较复杂,对于不同纳米粒

子,需要综合考虑添加的分散剂种类和数量,以及通过调整纳米流体体系的 pH 来获得最佳稳定效果。

2.3 物理化学复合法

物理化学复合法结合了物理方法和化学方法的优点,操作相对简单,是目前使用最多的方法。Suresh 等^[21]用化学沉积法制备 Al_2O_3 纳米颗粒,超声分散 6h,将 pH 调节到 4.8,发现制备的纳米流体可以稳定近 7d。Kole 等^[22]在 $\text{Cu-H}_2\text{O}$ 纳米流体中加入表面活性剂,超声处理 10h,电磁搅拌 10h,通过电子显微镜发现其纳米颗粒尺寸在 122~164nm,放置 15d 没有出现沉淀。

纳米流体稳定性是目前纳米流体研究中面临的一大难题,从目前的研究来看,多数侧重于先将纳米粒子直接分散到基液中,然后再研究如何提高纳米流体的稳定性。而实际上,纳米流体稳定性差是由纳米粒子本身易团聚导致的,所以提高纳米流体稳定性的新思路是先将纳米粒子进行化学处理,以解决纳米粒子自身易团聚的问题,再将经过处理的、不易再团聚的纳米粒子分散到基液中。Meng 等^[23]将 1g 碳纳米管(CNTs)放入 120℃、60mL 的硝酸中回流 6h,然后用蒸馏水洗涤,冷冻干燥,最后将处理过的 CNTs 分散到乙二醇中,超声分散后制得 CNTs-乙二醇纳米流体,稳定性可以达到两个月。

3 纳米流体的黏度

除了难以获得稳定的纳米流体外,纳米流体的黏度及其变化也会对纳米流体的制备和应用产生重要影响。与基液相比,纳米流体的黏度会有较大的提高。郭守柱等^[24]将体积分数为 5.0% 的 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米粒子分散于乙二醇中,之后在超声发生器中超声 35min,制得 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米流体。在 15℃ 时, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米流体的黏度与乙二醇基液的黏度相比,增加了近 3 倍。纳米流体黏度的变化,在合适的范围内则有利于纳米流体的传热。因此纳米流体的黏度及其变化也是纳米流体研究中另一个需要考虑的问题。

纳米流体的黏度直接影响纳米流体的有效导热率,合适的黏度范围还可以增加界面的润湿性,提高纳米流体的流动性,有利于纳米流体的传热^[25-26]。Prasher 等^[27]认为:纳米流体的黏度不是越大越好,只有在合适的黏度范围内才有利于传热。课题组这样定义了一个范围,当纳米流体黏度与基液黏度的比值小于 4~5 倍的纳米流体导热系数与基液导热系数的比值时,有利于纳米流体的传热。因此,研究

黏度及其变化对纳米流体在传热上的应用有重要意义。

目前的研究表明,影响纳米流体黏度变化的主要因素有温度、质量分数、剪切速率等。牛广清等^[28]用“两步法”制备了质量分数分别为 0.1%, 0.5%, 1.0% 的 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ 纳米流体,在研究 25~50℃ 范围内纳米流体黏度的变化规律时观察到,黏度随温度的升高而减小。凌智勇等^[29]制备了不同质量分数的 $\text{TiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 纳米流体,考察了纳米流体黏度随温度变化的情况。从图 4 可以看出,在相同温度条件下, $\text{TiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 纳米流体的黏度随着质量分数的增加而略微增大,相同质量分数的纳米流体的黏度随着温度的升高而呈指数形式减小,说明温度对纳米流体黏度的影响比质量分数对黏度的影响大。Zyla 等^[30]对 $\text{MgAl}_2\text{O}_4\text{-二元醇}$ 纳米流体各向异性的压力和电场黏度进行了研究,发现在恒温(15±0.5)℃ 和 7.5MPa 压力下,纳米流体的剪切速率在 10s^{-1} 到 1000s^{-1} 范围内,其黏度呈增加的趋势。

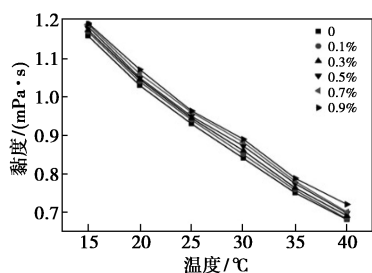


图 4 不同质量分数 $\text{TiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 纳米流体的黏度随温度变化的曲线

4 纳米流体的应用

4.1 纳米流体在传热中的应用

纳米流体的高导热系数强化了基液的传热性能,为提高能源利用率、降低能耗提供了一种新的解决方案。纳米流体在强化传热领域有着广阔的应用前景,特别是在制冷系统、太阳能、航天器等方面,引起了学者的关注。

纳米流体可以明显提高制冷剂的冷却能力,加快制冷剂的流动,降低制冷系统能耗,目前在制冷系统中应用最为广泛。Bi 等^[31]在家用冰箱制冷剂 R600a 中加入 TiO_2 纳米粒子形成纳米流体,测试发现:当 TiO_2 纳米粒子的质量浓度分别为 0.1, 0.5g/L 时,与无纳米颗粒的制冷剂相比,冰箱能耗分别降低了 5.94%、9.60%。

如何提高集热器的集热效率是太阳能利用研究中面临的最大难题,目前大部分太阳能集热工质都

是水,如果用纳米流体作为集热工质,可以显著提高集热效率。郑兆志等^[32]用 $\text{Cu-H}_2\text{O}$ 纳米流体平板作为太阳能热水器的集热工质,实验结果表明:当纳米流体中 Cu 的粒径为 25nm,质量分数为 0.10% 时,集热效率比水提高了 23.83%。

航天器系统中的热交换是利用液体工质对流换热来实现的,目前使用的液体工质的导热系数非常低,而且随温度的上升而下降,无法满足航天器不同温度下的传热及冷却要求。用纳米流体作为航天用液体工质,可以明显改善航天用液体工质的导热性能,为航天器热控制技术提供了一种新的思路。李强等^[33]将粒径 26nm 的 Cu 纳米颗粒加入到航天用液体工质中,然后加入少量分散剂,超声分散后得到纳米流体。研究发现:在温度 10℃、体积比为 2.5% 的条件下,相对于纯液体,纳米流体的导热系数提高了 45%;当温度从 10℃ 升到 50℃ 时,纳米流体的导热系数由 0.1498 变为 0.1420,减小了 5.2%。而纯液体的导热系数由 0.1375 变为 0.1210,减小了 12%。

4.2 纳米流体在传质中应用

纳米流体传质特性的研究要落后于纳米流体传热特性的研究。从目前的传质研究中可以发现,大部分纳米流体的传质研究都集中在强化气液传质方面^[34-37]。与一般气液传质相比,纳米流体具有较大的比表面积和表面活性,能够大幅度地增大气液的接触面积,提高吸收速率,在环境保护和天然气储存上有巨大优势。

CO_2 的过量排放是全球变暖的重要原因,利用纳米流体吸收 CO_2 前景广阔。Samadi 等^[38]分别用粒径 25nm 的 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、粒径 15nm 的 TiO_2 、粒径(8±3)nm 的 Fe_3O_4 纳米粒子和水制备纳米流体,并在纳米流体中加入磁场,对比 CO_2 的吸附量。结果表明:相对水的吸附量,添加磁场的 TiO_2 、 Fe_3O_4 纳米流体, CO_2 吸附量分别提高了 22.35%、59%。孙超杰^[39]在传统有机胺吸附 CO_2 方法中加入 TiO_2 等纳米粒子,结果表明:纳米流体对 CO_2 的吸附量明显大于传统有机胺的吸附量。

甲烷水合物是指在特定的温度和压力下,水分子和甲烷气体通过物理作用形成的天然气水合物,利用甲烷水合物储存天然气比液化天然气的成本低。标准条件下,1m³ 甲烷水合物可以分解 164m³ 甲烷气体,但是由于水与甲烷之间作用缓慢,导致固定在水中的甲烷气体量相对较低,纳米流体气液传质加快了气体运输到液体的速率,所以纳米流体在

提高甲烷水合物生成上有较大潜能。Park 等^[40]分别研究了添加多壁纳米碳管(MWCNTs)、氧化多壁纳米碳管(OMWCNTs)纳米流体和去离子水对天然气的吸收量。结果表明:添加了 MWCNTs 或 OMWCNTs 的纳米流体吸收天然气量明显多于水吸收量。特别是质量分数 0.004% MWCNTs 的纳米流体吸收的天然气量最多,说明纳米流体可以增加对天然气的吸收量,加快了甲烷水合物的形成。

5 结语

纳米流体的研究目前还处于起步阶段,纳米流体许多方面的研究还有待完善:

(1)纳米流体中纳米粒子的类型、结构、特性和含量与纳米流体的传热、传质特性的对应关系尚缺乏具有指导意义的研究结果,构建不同应用目的的纳米流体需要进行较多的探索性研究。

(2)纳米流体中的纳米颗粒基本是以金属或者金属氧化物为主,虽然理论上非金属或有机聚合物也可以用来制备纳米流体,但这方面的研究非常少。如果能将纳米材料的范围扩展到有机纳米粒子,纳米流体的研究将更加完善。

(3)纳米流体在强化传热或者强化传质下的黏度变化与稳定性的关系研究较少,如果将其作为一个整体来研究,得到的研究结果可能会更加明确。

参考文献

- [1] Choi S U S. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles[J]. ASME-Publications-Fed, 1995, 231: 99-106.
- [2] Meyer J P, Adio S A, Sharifpur M, et al. The viscosity of nanofluids: a review of the theoretical, empirical, and numerical models[J]. Heat Transfer Engineering, 2016, 37(5): 387-421.
- [3] Wan M, Yadav R R, Yadav K L, et al. Synthesis and experimental investigation on thermal conductivity of nanofluids containing functionalized Polyaniline nanofibers[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2012, 41: 158-164.
- [4] Munkhbayer B, Tanshen M R, Jeoun J, et al. Surfactant-free dispersion of silver nanoparticles into MWCNT-aqueous nanofluids prepared by one-step technique and their thermal characteristics[J]. Ceramics International, 2013, 39(6): 6415-6425.
- [5] Yu W, Xie H. A review on nanofluids: preparation, stability mechanisms, and applications[J]. Journal of Nanomaterials, 2012, 2012: 1-17.
- [6] Lee S W, Park S D, Bang I C. Critical heat flux for CuO nanofluid fabricated by pulsed laser ablation differentiating deposition characteristics[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(23): 6908-6915.
- [7] Pang C, Lee J W, Kang Y T. Review on combined heat and mass transfer characteristics in nanofluids[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2015, 87: 49-67.
- [8] 夏国栋, 刘冉, 杜墨. 纳米流体导热系数影响因素分析[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(8): 1252-1258.
- [9] 陈立飞. 含碳纳米管纳米流体制备及其性能研究[J]. 上海第二工业大学学报, 2011, 28(2): 124-129.
- [10] Mukherjee S, Paria S. Preparation and stability of nanofluids-A review[J]. IOSR Journal of Mechanical and civil engineering, 2013, 9(2): 63-69.
- [11] Zafarani-Moattar M T, Majdan-Cegincara R. Effect of temperature on volumetric and transport properties of nanofluids containing ZnO nanoparticles poly (ethylene glycol) and water[J]. The Journal of Chemical Thermodynamics, 2012, 54: 55-67.
- [12] 邵雪峰, 陈颖, 贾莉斯, 等. 中低温环境下 Al_2O_3 -乙醇纳米流体稳定性的研究[J]. 功能材料, 2014, 45(20): 20024-20027.
- [13] 王亚妹, 苏新军, 穆延非, 等. 纳米流体悬浮稳定性和电导率的关系研究[J]. Journal of Functional Materials, 2012, 43(16): 2200-2202.
- [14] Fazeli S A, Hashemi S M H, Zirakzadeh H, et al. Experimental and numerical investigation of heat transfer in a miniature heat sink utilizing silica nanofluid[J]. Superlattices and Microstructures, 2012, 51(2): 247-264.
- [15] Kole M, Dey T K. Thermophysical and pool boiling characteristics of ZnO-ethylene glycol nanofluids[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2012, 62: 61-70.
- [16] Sheikhbahai M, Esfahany M N, Etesami N. Experimental investigation of pool boiling of Fe_3O_4 /ethylene glycol-water nanofluid in electric field[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2012, 62: 149-153.
- [17] Tajik B, Abbassi A, Saffar-Avval M, et al. Ultrasonic properties of suspensions of TiO_2 and Al_2O_3 nanoparticles in water[J]. Powder Technology, 2012, 217: 171-176.
- [18] 凌智勇, 黄跃涛, 张忠强, 等. 表面活性剂对 $\text{Cu-H}_2\text{O}$ 和 $\text{ZrO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 纳米流体稳定性的影响[J]. 功能材料, 2015, 46(10): 10100-10103.
- [19] Ghadimi A, Saidur R, Metselaar H S C. A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54(17): 4051-4068.
- [20] 袁群, 葛红花, 蒋以奎, 等. 模拟冷却水中 Al_2O_3 纳米颗粒分散条件的优化[J]. 功能材料, 2015, 46(23): 23101-23105.
- [21] Suresh S, Chandrasekar M, Selvakumar P, et al. Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of Al_2O_3 /water nanofluid under laminar flow with spiralled rod inserts[J]. International Journal of Nanoparticles, 2012, 5(1): 37-55.
- [22] Kole M, Dey T K. Thermal performance of screen mesh wick heat pipes using water-based copper nanofluids[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 50(1): 763-770.

- [23] Meng Z, Wu D, Wang L, et al. Carbon nanotube glycol nanofluids: photo-thermal properties, thermal conductivities and rheological behavior[J]. *Particuology*, 2012, 10(5): 614-618.
- [24] 郭守柱, 黎阳, 谢华清, 等. γ - Fe_2O_3 /EG 纳米流体热输运性质的研究[J]. *材料导报*, 2010, 24(2B): 30-32.
- [25] Mahbubul I M, Saidur R, Amalina M A. Thermal conductivity, viscosity and density of R141b refrigerant based nanofluid [J]. *Procedia Engineering*, 2013, 56: 310-315.
- [26] Saleh R, Putra N, Prakoso S P, et al. Experimental investigation of thermal conductivity and heat pipe thermal performance of ZnO nanofluids[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2013, 63: 125-132.
- [27] Prasher R, Song D, Wang J, et al. Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(13): 133108.
- [28] 牛广清, 凌智勇, 张忠强, 等. 温度对 Al_2O_3 - H_2O 纳米流体粘度特性影响研究[J]. *传感器与微系统*, 2015, 34(12): 54-56.
- [29] 凌智勇, 孙东健, 张忠强, 等. 温度和颗粒浓度对纳米流体粘度的影响[J]. *功能材料*, 2013, 44(1): 92-95.
- [30] Żyła G, Grzywa J, Witek A, et al. Influence of anisotropic pressure on viscosity and electrorheology of diethylene glycol-based MgAl_2O_4 nanofluids [J]. *Nanoscale research letters*, 2014, 9(1): 1-13.
- [31] Bi S, Guo K, Liu Z, et al. Performance of a domestic refrigerator using TiO_2 -R600a nano-refrigerant as working fluid[J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52(1): 733-737.
- [32] 郑兆志, 何钦波, 殷少有. $\text{Cu-H}_2\text{O}$ 纳米流体平板太阳集热器集热性能研究[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(3): 562-567.
- [33] 李强, 宣益民, 姜军, 等. 航天用传热强化工质导热系数和粘度的实验研究[J]. *宇航学报*, 2002, 23(6): 73-76.
- [34] Pineda I T, Lee J W, Jung I, et al. CO_2 absorption enhancement by methanol-based Al_2O_3 and SiO_2 nanofluids in a tray column absorber [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2012, 35(5): 1402-1409.
- [35] Pineda I T, Choi C K, Kang Y T. CO_2 gas absorption by CH_3OH based nanofluids in an annular contactor at low rotational speeds [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2014, 23: 105-112.
- [36] Pang C, Jung J Y, Lee J W, et al. Thermal conductivity measurement of methanol-based nanofluids with Al_2O_3 and SiO_2 nanoparticles [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(21): 5597-5602.
- [37] Pang C, Wu W, Sheng W, et al. Mass transfer enhancement by binary nanofluids ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O} + \text{Ag}$ nanoparticles) for bubble absorption process [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2012, 35(8): 2240-2247.
- [38] Samadi Z, Haghshenasfard M, Moheb A. CO_2 absorption using nanofluids in a wetted-wall column with external magnetic field [J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2014, 37(3): 462-470.
- [39] 孙超杰. 纳米颗粒强化胺法吸收 CO_2 的实验及模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [40] Park S S, An E J, Lee S B, et al. Characteristics of methane hydrate formation in carbon nanofluids [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2012, 18(1): 443-448.

收稿日期: 2017-04-19

修稿日期: 2018-04-19

(上接第 8 页)

- [25] Hao X Q, Jiang Z Q, Tian X N, et al. Facile assembly of Co-Ni layered double hydroxide nanoflakes on carbon nitride coated N-doped graphene hollow spheres with high electrochemical capacitive performance [J]. *Electrochimica Acta*, 2017, 253(31): 21-30.
- [26] Hatui G, Nayak G C, Udayabhanu G. One pot solvothermal synthesis of sandwich-like Mg-Al layered double hydroxide anchored reduced graphene oxide: An excellent electrode material for supercapacitor [J]. *Electrochimica Acta*, 2016, 219(33): 214-226.
- [27] Zheng C H, Yao T, Xu T R, et al. Growth of ultrathin NiCoAl layered double hydroxide on reduced graphene oxide and supercapacitive performance of the resulting composite [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, (678): 93-101.
- [28] Lee I, Gyoung H J, Soyeon A, et al. Facile synthesis of 3D Mn-Ni-layered double hydroxides (LDH)/graphene composites from directly graphites for pseudocapacitor and their electrochemical analysis [J]. *Applied Surface Science*, 2018, 429(3): 196-202.
- [29] Du Q H, Su L, Hou L Y, et al. Rationally designed ultrathin Ni-Al layered double hydroxide and graphene heterostructure for high-performance asymmetric Supercapacitor [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 740(11): 1051-1059.
- [30] Chu X Y, Deng T, Zhang W, et al. Architecture of Co-layered double hydroxide nanocages/graphene composite electrode with high electrochemical performance for supercapacitor [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2018, 27(2): 507-512.
- [31] Shahrokhian S, Rahimi S, Mohammadi R. Nickel-cobalt layered double hydroxide ultrathin nanosheets coated on reduced graphene oxide nonosheets/nickel foam for high performance asymmetric supercapacitors [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(4): 2256-2267.

收稿日期: 2018-03-31

修稿日期: 2018-05-15