

纳米流体光热转换特性的研究

宋玲利, 张仁元, 毛凌波

(广东工业大学 材料与能源学院, 广东 广州 510090)

摘要: 采用“两步法”制备了两种用于直接吸收式太阳能集热器的纳米流体循环工质. 对这两种纳米流体及其基液进行闷晒实验, 通过研究其闷晒温度随环境温度的变化情况来判断纳米流体光热转换性能的优劣. 结果表明: 铝纳米流体升温速率较基液和碳纳米管纳米流体快, 闷晒温度高出基液近 25 °C, 高出碳纳米管纳米流体近 10 °C, 显示出很好的光热转换性能.

关键词: 纳米流体; 光热特性; 温度

中图分类号: F407.89

文献标志码: A

文章编号: 1007-7162(2011)02-0056-04

随着纳米技术的不断发展以及其应用领域的不断拓展, 其在对流换热、热辐射、导热等方面都有越来越多的应用, 近年来研究人员开始探索将纳米材料技术应用于强化传热领域, 研究新一代高效传热冷却技术^[1-3]. 1995年, 美国 Argonne 国家实验室的 Choi 等^[4]在国际上首次提出了“纳米流体(Nano-fluids)”的概念. 所谓纳米流体, 是指将金属或非金属纳米粉体分散到水、醇、油等传统换热介质中, 制备成均匀、稳定、高导热的新型换热介质, 这是纳米技术应用于热能工程这一传统领域的创新性研究.

近些年来, 国内外学者对纳米流体技术进行了大量的研究, 对其应用研究主要集中在强化传热领域, 包括纳米流体的热传导、自然对流换热、强迫对流换热、池内沸腾换热以及流动沸腾换热等, 而对于纳米流体其他方面的应用研究则相对较少. 由于纳米流体具有优异的热输运性能和光谱吸收性能, 国内外已有研究者提出将纳米流体用作直接吸收式太阳能集热器的循环工质^[5-9], 利用纳米流体直接吸收太阳辐射能, 以达到提高集热器热效率的目的. 目前已研究用作太阳能集热器循环工质的纳米流体主要有 SiO₂-水、Al₂O₃-水、碳纳米管-水等无机非金属纳米流体^[5-6]、铝-水^[7]、铁-醇水混合物^[8]、碳纳米管、石墨、银纳米流体^[9]等. 作为一种用于直接吸收太阳辐射的集热器循环工质, 纳米流体的光热转换性能是影响其应用的重要因素.

本文将纳米铝粉颗粒和碳纳米管颗粒均匀稳定地分散在体积比为 1:1 的乙二醇水溶液中, 获得用于直接吸收式太阳能集热器的循环工质-铝纳米流体

和碳纳米管纳米流体, 对这两种流体及其基液进行闷晒实验, 通过流体的闷晒温度随环境温度的变化情况来衡量纳米流体光热转换性能的优劣, 并分析可能产生以上情况的原因.

1 实验

1.1 原料和仪器

试验中采用的纳米铝粉由深圳尊业纳米有限公司提供, 平均粒径约为 18 nm, 形貌为球状; 碳纳米管(CNTs)由深圳纳米港有限公司生产的定向多壁碳纳米管(Aligned MWNT), 直径为 10~20 nm, 长度为 5~15 μm; 六偏磷酸钠(SHMP, 分析纯, 无机型); 十六烷基三甲基溴化铵(CTAB, 分析纯); 乙二醇(EG, 分析纯); 去离子水.

KQ-50B 超声波清洗器(昆山超声仪器有限公司); FA1004N 电子天平(上海良平仪器仪表有限公司).

1.2 纳米流体的制备

采用“两步法”制备两种纳米流体. 在“两步法”中, 最重要的是选择合适的液相介质以及合适的分散剂, 然后通过改变分散剂的含量、分散方式、分散时间等方式获得分散均匀、稳定的纳米流体悬浮液. 制备纳米流体的工艺流程如图 1 所示. 具体操作如下: 在烧杯中加入适量的分散剂, 用体积比为 1:1 的乙二醇水溶液使其充分溶解, 然后将一定量的纳米粉体颗粒加入到烧杯中, 搅拌后放入超声频率为 40 kHz 超声波清洗仪中超声振荡一定时间即可制得所需的纳米流体.

收稿日期: 2010-12-14

作者简介: 宋玲利(1985-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为新型能源与环境材料.

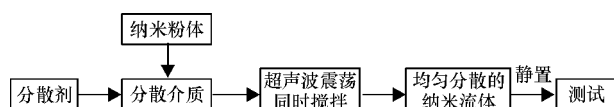


图1 纳米流体制备的工艺流程图

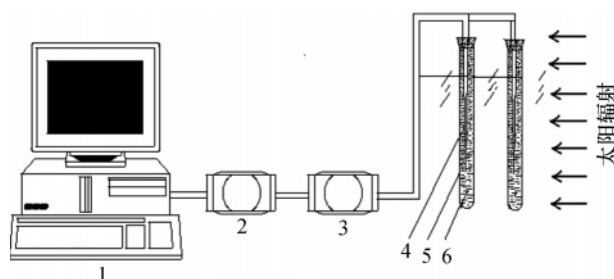
2 纳米流体的光热性能

2.1 实验方法

为了考察纳米流体的光热转换性能,本文分别对真空玻璃试管中不同类型的纳米流体和乙二醇水溶液进行了闷晒实验,利用实验流体的升温速率和闷晒温度等参数来衡量纳米流体光热转换性能的优劣。在闷晒实验中,实验流体具有相同的体积和吸热传热面积。真空玻璃试管的型号为 $\Phi 47 \times 1\ 600\ \text{mm}$,闷晒实验时,真空玻璃试管中充满实验流体,管口用保温材料和橡皮塞密封。

2.2 实验装置

光热性能实验的测试装置示意图如图2所示。太阳辐射透过真空玻璃管后直接被纳米流体或乙二醇水溶液吸收,纳米流体或乙二醇水溶液吸收太阳辐射后,其温度升高。温度信号采用研华公司的 AD-AM4018 模块采集,然后再通过 ADAM4520 模块的 RS-232 输入输出接口输出到计算机的串口(COM口),由 Advantech Adam Utility 组态软件实时显示和记录相应的温度值。所有实验数据均通过本实验室编写的程序存入计算机的文本文件中,以便后续处理。



1. 计算机; 2. A/D 数据转换模块; 3. 数据采集模块; 4. 热偶; 5. $\Phi 47 \times 1\ 600\ \text{mm}$ 真空玻璃管; 6. 待测液体

图2 光热性能实验测试装置示意图

2.3 实验结果与分析

真空玻璃管中的铝纳米流体和乙二醇水溶液的闷晒实验结果如图3所示。很明显,添加纳米铝粉颗粒后,纳米流体的光热转换性能大大增强。从图3中可以看出,铝纳米流体的升温速率明显比乙二醇水溶液的快,而且当闷晒温度趋于稳定后,前者的闷晒温度比后者高了近 $25\ ^\circ\text{C}$ 。

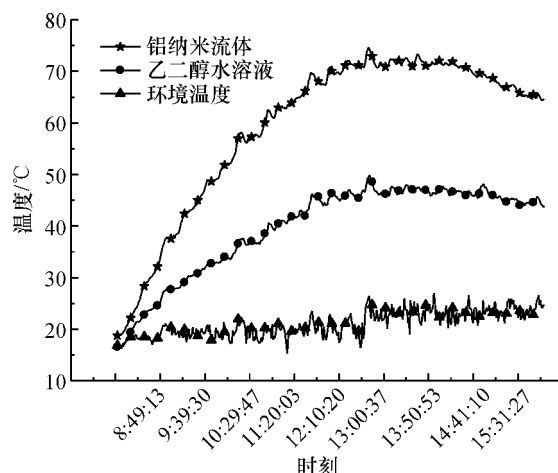


图3 铝纳米流体与基液的光热性能比较

(2010年10月31日,广州)

在相同太阳辐照的条件下,实验流体升温速率和闷晒温度的变化主要取决于实验流体内部的光吸收性能和传热性能。铝纳米流体由于分散相材料的尺寸为纳米级,因此可以近似认为是一种胶体,其光吸收性能可借助于 Rayleigh 散射理论进行分析。根据 Rayleigh 散射理论,铝纳米流体的消光效率等于吸收效率与散射效率之和^[4]。

$$Q_{e,\lambda} = Q_{a,\lambda} + Q_{s,\lambda} = -4\chi \operatorname{Im} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) + \frac{8}{3} \chi^4 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \quad (1)$$

式中: $Q_{e,\lambda}$ 为消光效率; $Q_{a,\lambda}$ 为吸收效率; $Q_{s,\lambda}$ 为散射效率; χ 为尺寸参数, $\chi = \pi d/\lambda$, d 为颗粒粒径, λ 为波长; m 为颗粒的复折射率; Im 为取虚部的符号。由式(1)可以知道,纳米颗粒的吸收效率正比于 χ , 散射效率正比于 χ^4 。当 $\chi \ll 1$ 时,无论纳米颗粒的复折射率为何值,纳米粒子均以吸收为主。由于本工作中所用纳米铝粉颗粒的平均粒径约为 $18\ \text{nm}$,远小于太阳光谱的波长,其光学性质满足 Rayleigh 散射理论。同时,纳米铝粉颗粒本身为黑色,具有很强的光吸收性能。因此,在吸收和散射的共同作用下,铝纳米流体对太阳光谱的整个波长范围具有很强的消光作用。

纳米铝粉颗粒的添加对于强化纳米流体传热性能的作用则更加明显: 因纳米铝粉颗粒的导热系数远远大于基液,纳米铝粉颗粒的添加,改变了基液的结构,增强了纳米流体内部的能量传递过程,而且纳米流体中的纳米铝粉颗粒由于受布朗力等力的作用,容易在纳米流体中形成布朗扩散和热扩散等微对流现象,这种微对流进一步增强了纳米颗粒和基液间的能量传递过程。实验测得添加了质量浓度为

0.5 g/L 的纳米铝粉颗粒后,铝纳米流体的导热系数比基液提高了 24.2%。根据以上分析可以知道,由于铝纳米流体的光吸收性能和传热性能均显著优于乙二醇水溶液,所以铝纳米流体的升温速率和闷晒温度要明显高于乙二醇水溶液。

图4中所示为真空玻璃管中的质量体积浓度为 0.5 g/L 的铝纳米流体和碳纳米管纳米流体闷晒 1 d 后,实验流体的闷晒温度随时间的变化关系曲线。从图4中可以看出,尽管两种实验流体能够同时达到最高闷晒温度,但当闷晒温度趋于稳定后,两种纳米流体的最高闷晒温度随纳米流体属性的不同而不同。铝纳米流体的最高闷晒温度比碳纳米管纳米流体高了近 10℃。从两者的升温过程来看,真空玻璃管中的铝纳米流体在升温过程中的闷晒温度始终高于碳纳米管纳米流体。由于上述两种实验流体在闷晒实验时的体积和太阳辐照强度相同,因此两者的升温速率和闷晒温度的变化可能与纳米流体热物性有关。发射率是物体本身的热物性之一,其数值变化仅与物体的种类、性质和表面状态有关。太阳光的热发射率包括两部分:热反射率和热发射率。前者指材料在红外光源照射下反射红外线的强度,后者指一定温度下材料的红外本征辐射强度。低发射率的材料一般反射率较高;低反射率的材料则发射率较高^[1]。材料的发射率不但取决于材料本身的性质,而且取决于其表现的物理状态^[2]。一般认为:金属的发射率较低,并随温度上升而增加,若表面形成氧化层,则发射率可以成十倍或更大倍数的增加。

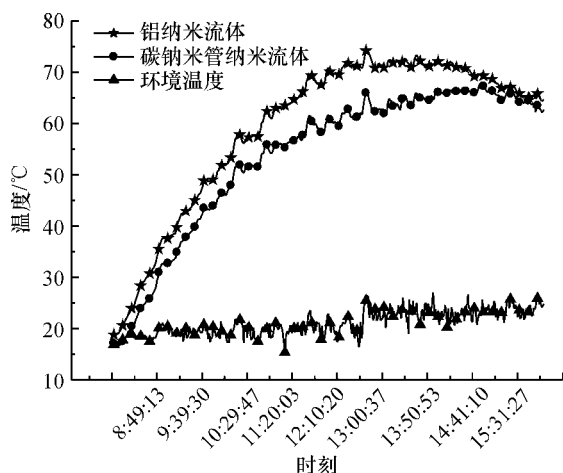


图4 不同纳米流体的光热性能比较
(2010年10月31日,广州)

本文测试纳米流体的发射率后得出铝纳米流体的发射率比碳纳米管纳米流体的大 0.047,导致其

反射率降低,吸热增加。因此铝纳米流体的升温速率较碳纳米管纳米流体的快,而且当闷晒温度趋于稳定后,前者的闷晒温度比后者高了近 10℃。当达到最高闷晒温度后,铝纳米流体的降温速率较碳纳米流体的快,这是由于铝纳米流体的发射率较大,它能够以热发射的形式将吸收的热量辐射出去。

3 结论

通过对铝纳米流体、碳纳米管纳米流体及其基液进行闷晒实验得出:铝纳米流体升温速率较基液和碳纳米管纳米流体的快,闷晒温度高出基液近 25℃,高出碳纳米管纳米流体近 10℃,显示出很好的光热转换性能。这是由于铝纳米流体的导热系数比乙二醇水溶液提高了 24.2%,而铝纳米流体的发射率比碳纳米管纳米流体的大 0.047,导致其反射率降低的缘故。

参考文献:

- [1] Das S K, Putra N, Roetzel W. Pool boiling characteristics of nano-fluids [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(5): 851-862.
- [2] Xie H, Wang J, Xi T, et al. Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles [J]. Journal of Applied Physics, 2002, 91(7): 4568-4572.
- [3] Koblinski P, Eastman J A, Cahill D G. nanofluids for thermal transport [J]. Materials Today, 2005, 6: 35-44.
- [4] Choi S U S. Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles [J]. ASME, 1995, 231: 99-105.
- [5] Mao L B, Zhang R Y, Ke X F, et al. Review of direct absorption solar collection systems [J]. Materials Review, 2007, 21(12): 12-45.
- [6] 骆仲决,倪明江,余春江,等. 纳米流体太阳能窗式集热器:中国,200610053634.9 [P]. 2006-09-27.
- [7] 赵佳飞,骆仲决,寿春晖,等. 纳米流体辐射特性与太阳能窗式集热器研究 [C] // 可再生能源规模化发展国际研讨会暨第三届泛长三角能源科技论坛论文集. 南京:江苏省能源研究会,2006: 63-67.
- [8] Tyagi H, Phelan P E, Prasher R. Predicted Efficiency of a Nanofluid-Based Direct Absorption Solar Receiver [C] // ASME Energy Sustainability Conference. California, 2007: 729-736.
- [9] 王瑞金. 磁流体太阳能集热器的温度和热流量特性的实验研究 [J]. 功能材料, 2007, 38: 1227-1230.

(下转第62页)

- [8] Anderson J, Bedin L R, Piotto G, et al. Ground-based CCD astrometry with wide field imagers-I. Observations just a few years apart allow decontamination of field objects from members in two globular clusters [J]. A&A, 2006, 454 (3): 1029-1045.
- [9] 王娴, 苏成悦, 王婷婷. 基于有效点扩散函数的高精度测光 [J]. 天文研究与技术, 2011, 8(1): 58-63.
- [10] 谢小君. CCD 图像星象自动搜索算法的设计与实现 [D]. 广州: 暨南大学信息科学与技术学院, 2005.
- [11] 王娴, 苏成悦, 王婷婷, 等. 一种新的星象自动搜索算法 [J]. 广东工业大学学报, 2009, 26(3): 77-81.
- [12] 王婷婷, 苏成悦, 王娴. 基于多幅图像的有效点扩散函数的高精度测量 [J]. 广东工业大学学报, 2010, 27(3): 51-55.
- [13] 张志渊, 彭青玉. ePSF 拟合法与 Gaussian 拟合法的比较 [J]. 天文研究与技术, 2010, 7(2): 132-139.

A Comparative Study of Photometry on Bright Stars and Dark Stars

Wang Ting-ting, Su Cheng-yue, Wang Xian, Zhou Zhen, Zhou Dong-yue

(Faculty of Physics and Optoelectronic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510009, China)

Abstract: It conducts a comparative study of photometry on the bright stars and dark stars, using e-PSF (effective-Point-Spread-Function) and Gaussian function. The stars in the 16 CCD images observed by National Astronomical 1 m telescope were divided into two types of stars, bright stars and dark stars according to the average luminosity, and each of the e-PSF was calculated and used to measure the stars. The results reveal that the precision rate is higher if the e-PSF of bright stars is used to measure bright stars, and the precision rate is higher if the Gauss-fitting is used to measure dark stars. The e-PSF has obvious advantages to measure the precision of bright stars while the Gauss-fitting is better for dark stars, which shows that the morphological structure of the dark star is closer to Gaussian distribution.

Key words: effective-point-spread-function (ePSF); Gauss-fitting; photometry; precision

(上接第 58 页)

- [1] 余其铮. 辐射换热原理 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000: 169.
- [2] 余其铮. 辐射换热原理 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003, 25(5): 7-14.
- [3] 蒋耀庭, 王跃. 红外隐身技术与发展 [J]. 红外技术, 2003, 25(5): 7-14.
- [4] 郦江涛, 姜卫陵, 赵云峰. 红外隐身涂料的研究进展 [J]. 宇航材料工艺, 2000(5): 15-18.

A Study of Photothermal Conversion of Nanofluids

Song Ling-li, Zhang Ren-yuan, Mao Ling-bo

(Faculty of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China)

Abstract: Two kinds of Nanofluids, used as recycle fluids for collectors with direct absorption of solar energy, were prepared by the "two-step method". The photothermal conversion properties of the two kinds of nanofluids and their base fluids were studied, the temperature changing with the environmental temperature through the insolation experiment. The results show that Al-nanofluids have higher rise velocity and insolation temperature than the base fluids and Carbon Nanotube Nanofluids, and that when the insolation temperature is stable, the insolation temperature of Al-nanofluids is nearly 25 °C higher than that of the base fluids and 10 °C higher than that of the Carbon Nanotube Nanofluids. Thus, Al-nanofluids show better photo-thermal conversion properties.

Key words: nanofluids; photothermal property; temperature