

# 太阳能光热转化中金纳米棒流体光学特性的实验研究

杨茜茹<sup>1,2</sup>, 沈朝<sup>1,2</sup>, 张春晓<sup>1,2</sup>, 张承虎<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 建筑学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 寒地城乡人居环境科学与技术工业和信息化部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:** 直接吸收式太阳能集热器是一种经济有效的吸收太阳能的方法。提出了利用流速控制纳米棒流体从而增强其光谱吸收的方案, 并对纳米流体实际光学特性进行实验研究。分析了光照强度、流速以及浓度对纳米棒流体光热特性的影响。纳米流体出口温度随光照强度增大而提升, 当流速为 0.5 mL/min, 辐射强度为 600 W/m<sup>2</sup> 时, 纳米流体出口温度相较 400 W/m<sup>2</sup> 的照射下提升 18.5%。纳米流体的光学性能在很大程度上取决于其浓度。加入金纳米棒颗粒明显提高了去离子水的吸热性能。0.3 ppm 的金纳米棒流体在 0.75 mL/min 流速控制时, 接受 800 W/m<sup>2</sup> 的照射, 光热转换效率可以达到 52.3%, 相较无流速控制的效率提升 162%。在直接吸收式太阳能集热器中添加纳米棒状颗粒, 并进行流速调控, 可有效提升集热器集热性能。

**关键词:** 纳米颗粒; 光学特性; 光照强度; 直接吸收太阳能集热器

中图分类号: TU832; TK51

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)06-0791-06

## Experimental study on optical properties of Gold-nanorods fluid in solar photothermal conversion

YANG Qianru, SHEN Chao, ZHANG Chunxiao, ZHANG Chenghu

(1. School of Architecture, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Key Laboratory of Cold Region Urban and Rural Human Settlement Environment Science and Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** Direct absorption solar collector is an economical and effective way to absorb solar energy. In this paper, a scheme of controlling the flow rate of nanorod fluid to enhance its spectral absorption is proposed, and the actual optical properties of nanorod fluids are experimentally studied. The effects of illumination intensity, flow rate and fluid concentration on the photothermal characteristics of nanorod fluid are analyzed. The outlet temperature of the nanofluid increases with the increase of illumination intensity, especially for the 0.5 mL/min flow rate control, 600 W/m<sup>2</sup> irradiation, the outlet temperature of the nanofluid is increased by 18.5% compared with that under 400 W/m<sup>2</sup> irradiation. The optical properties of nanofluids depend largely on the concentration. The addition of gold nanorods can significantly improve the heat absorption performance of deionized water. When the flow rate of 0.3 ppm gold nanorods is controlled at 0.75 mL/min, the photothermal conversion efficiency reaches to 52.3%, which is 162% higher than that without flow rate control. It is of great significance to add nanometer rod-shaped particles into direct absorption solar collector and control them by flow rate.

**Key words:** nanoparticles; optical characteristics; illumination intensity; direct absorption solar collector

太阳能被广泛认为是最有前途的能源, 并因此引起了许多研究者的关注<sup>[1-4]</sup>。太阳能利用的最基本方法是光热转换。间接吸收太阳能集热器的传热过程存在大量的热量流失, 光热转换效率低。为了改善传热和降低成本, 直接吸收太阳能集热器在 20 世纪 80 年代被引进<sup>[5]</sup>。

纳米流体可以有效地改善液体的热物理性质,

提高工质在太阳光谱波长范围内的吸收性能。Me-hrali 等<sup>[6]</sup>利用石墨烯-银纳米流体研究了直接吸收式太阳能集热器全光谱光热转换。研究结果表明, 集热器的效率可达 77%。西安交通大学张煜等人<sup>[7]</sup>实验测定集热器内为纯水时集热器效率 39.99%, 使用金纳米流体时集热器的效率高达 78.75%, 并且所用金纳米颗粒的等离激元共振发

收稿日期: 2021-07-13

修改稿日期: 2021-09-27

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52178071)

第一作者: 杨茜茹(1997—), 女, 博士生, 主要从事太阳能、热泵等方面的研究。E-mail: 13821336020@163.com

通信作者: 沈朝(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要从事太阳能、制冷与空调、强化传热等方面的研究。E-mail: chaoshen@hit.edu.cn

生在波长 500 nm 左右, 集热器内的光谱强度在该波段附近明显减弱. 这是因为当表面等离子体共振效应被激发时, 光的吸收和散射可显著增强<sup>[8]</sup>.

影响直接吸收式太阳能集热器转换效率的因素很多, 包括太阳辐射强度、体积分数、质量流率和光学厚度, 很多研究者对这些影响进行了研究. 宗美林等<sup>[9]</sup>实验测定了不同质量浓度水基碳纳米管纳米流体的光热转化效率. 结果表明, 纳米流体的光热转换效率随着质量分数的增加而降低, 最高为 37.31%. Gupta 等<sup>[10]</sup>在研究中指出,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纳米流体直接吸收式太阳能集热器在流量 1.5 L/min 的情况下热效率相比去离子水提高了 8.1%, 2 L/min 的工况下可提高 4.2%.

对于非球状纳米颗粒, 不同入射角度将因尺寸影响引起不同程度的等离子体激发效应. 现有研究对于非球状纳米颗粒入射情况研究甚少. 段慧玲等<sup>[11]</sup>实验测试了不同形状的金纳米颗粒在水中形成的混合等离子体纳米流体的光热特性. 实验表明, 与单组分纳米流体相比, 等离子体混合纳米流体的消光谱得到了拓宽.

为了得到纳米流体的光谱吸收特性, 测定流动过程纳米流体温升, 通过精确流速控制, 测试纳米流体的透射率, 从而准确掌握实际应用效率很有必要. 金纳米棒颗粒较容易地合成, 并且通过调整长径比可以简单地调整其光学性能<sup>[12]</sup>. 为了测试纳米棒流体的光学特性, 设计了实验方案, 研究其于直接吸收式太阳能集热器的实际应用价值, 通过精确流速控制, 准确掌握实际应用效率.

## 1 纳米流体的制备

水基金纳米棒流体从北京百欧泰生物科技有限公司购得. 所购置纳米流体吸光度光谱如图 1 所示.

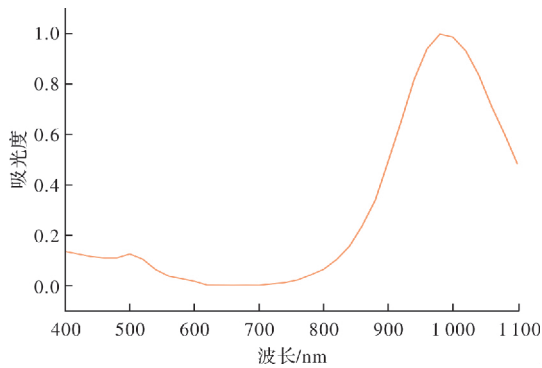


图 1 所购置纳米流体吸光度光谱

Fig. 1 Absorbance spectrum of purchased nanofluids

用去离子水稀释后采用超声波清洗机振荡得到三种不同体积分数的金纳米棒流体 (0.3 ppm、0.1 ppm 和 0.05 ppm), 其吸光度光谱如图 2 所

示. 24 h 后仍未在烧瓶底部观察到颗粒沉降, 可用于本实验研究. 采用分光光度计测试其透过率.

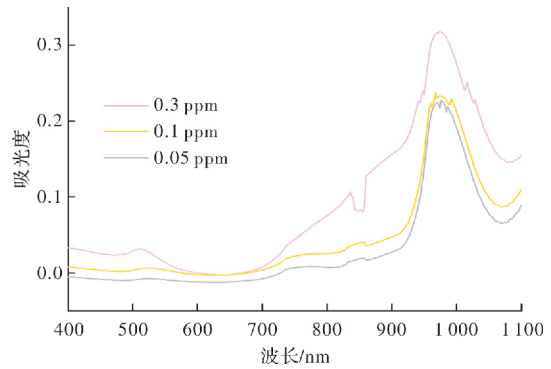


图 2 不同体积分数的纳米流体吸光度

Fig. 2 Absorbance of nanofluids with different volume fractions

## 2 实验测试

### 2.1 实验系统介绍

为了测试纳米棒流体的光学特性, 设计了实验方案, 其原理图如图 3 所示. 直接吸收式太阳能集热器等效实验系统包括蠕动泵、太阳光模拟器、模拟集热器. 将存放待实验的纳米流体的烧杯置于恒温水浴进行入口温度调控, 纳米流体通过蠕动泵驱动. 供回水管道上均设有温度采集点, 利用 T 型热电偶进行流体温度测定. 实验设备参数见表 1.

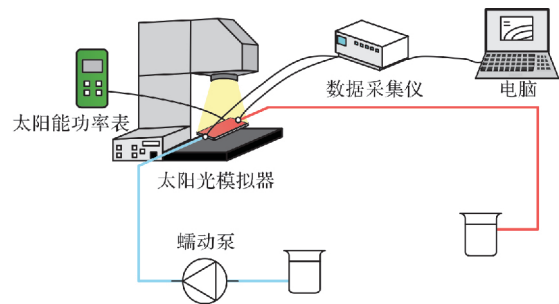


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental device

表 1 实验设备

Tab. 1 Experimental equipment

仪器名称	产品型号	生产厂家
超声波清洗机	F-031S	深圳福洋科技集团有限公司
均匀光氙光源系统	CEL-PE300L-3A	北京中教金源科技有限公司
蠕动泵	LabV1-MC1	保定申辰泵业有限公司
低温恒温槽	DWC-05-A	上海坤诚科学仪器有限公司
无纸记录仪	SIN-R6000C	杭州联测自动化技术有限公司

实验测试平台的搭建, 如图 4. 本系统的模拟集热器采用设计的玻璃器皿, 如图 5 所示, 该器皿为方形结构(60 mm×60 mm,  $h=10$  mm), 置于木板上, 内部空腔注入所研究纳米流体, 进水口和出水口设在器皿对称端面.

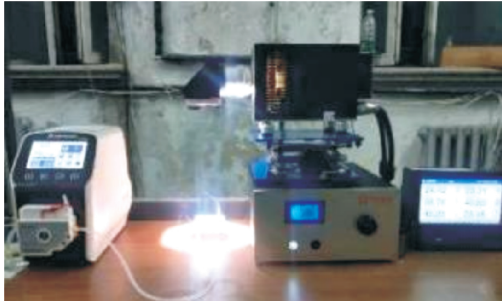


图 4 纳米流体光学特性测试实验台  
Fig. 4 Experiment platform for optical properties of nanofluids



图 5 纳米流体载液实物图  
Fig. 5 Physical picture of nanofluid carrying liquid

2.2 数据分析方法

金纳米棒流体的有效热增益可以用公式(1)计算.

$$Q_u = Q_m c_p (T_o - T_i) \quad (1)$$

式中:  $Q_m$  是金纳米棒流体质量流量, kg/min; 纳米流体入口温度  $T_i$ ; 纳米流体出口温度  $T_o$ ; 纳米流体热容量  $c_p$  (J/kg·°C).

进入系统的太阳能总量可由式(2)计算, 环境温度  $T_a$ , 太阳辐射照度  $I_T$  (W/m<sup>2</sup>), 集热器表面积  $A_c$ .

$$Q_{in} = A_c I_T \quad (2)$$

集热器光热转换效率  $\eta_i$  由式(3)计算.

$$\eta_i = \frac{Q_u}{Q_{in}} = \frac{Q_m c_p (T_o - T_i)}{A_c I_T} \quad (3)$$

2.3 实验运行工况

通过实验探讨了纳米流体的流速在不同工况运行条件下对金纳米棒流体光热转换效率的影响.

本次研究所开展实验运行工况如表 2 所示.

表 2 纳米流体光学特性测试实验  
Tab. 2 Test experiment of optical properties of nanofluids

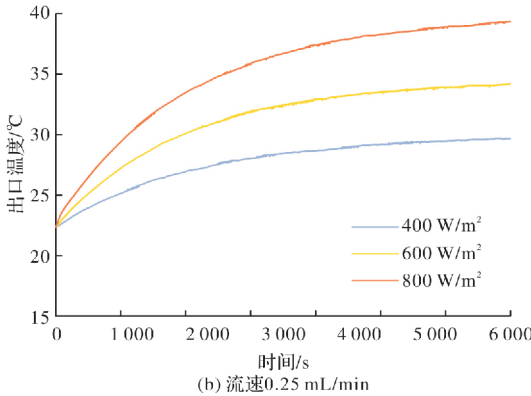
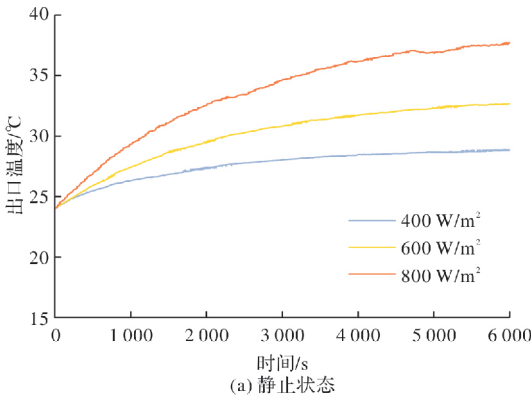
实验组数	体积分数 /ppm	流速 /mL·min <sup>-1</sup>	光照强度 /W·m <sup>-2</sup>
1	去离子水	0/0.25/0.5/0.75	400/600/800
2	0.3	0/0.25/0.5/0.75	400/600/800
3	0.1	0/0.25/0.5/0.75	400/600/800
4	0.05	0/0.25/0.5/0.75	400/600/800

3 实验结果与分析

3.1 光照强度对纳米流体光学特性的影响

3.1.1 光照强度对纳米流体出口温度的影响

为了探究光照强度对纳米流体出口温度的影响, 测试分析了 0.05 ppm 金纳米棒流体, 400 W/m<sup>2</sup>、600 W/m<sup>2</sup> 和 800 W/m<sup>2</sup> 三种辐射强度的等效太阳光照射时金纳米棒流体的温升情况. 从图 6 中可以看出, 随着时间推移, 集热器出口流体温度逐渐升高. 光照强度越大, 金纳米棒流体所能达到的终温越高, 升温幅度越大. 对于静止进口温度为 24°C 的纳米流体, 在 800 W/m<sup>2</sup> 的辐射照度下, 出口温度可以达到 37.7°C, 温度都能提高 13.7°C.



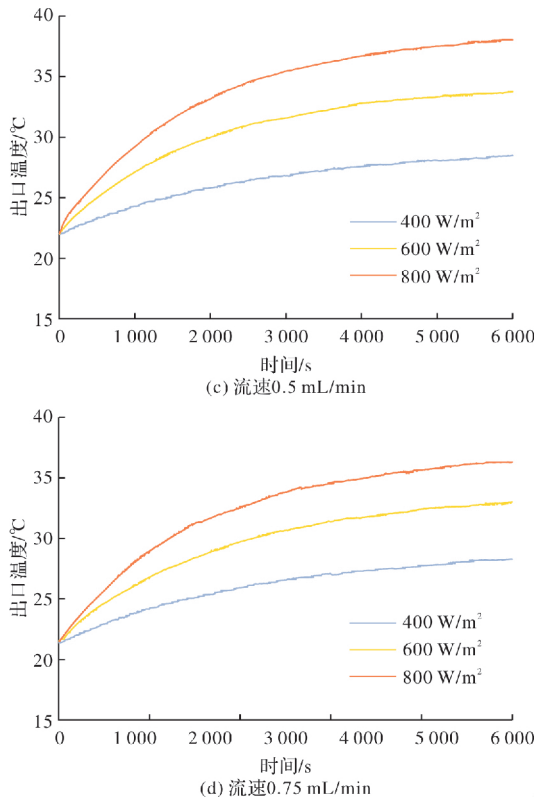


图6 纳米流体不同光照强度金纳米棒流体温升曲线  
Fig. 6 Temperature rise curve of gold nanorods fluid under different light intensity

### 3.1.2 光照强度对纳米流体吸热量的影响

流速是所探究影响纳米流体吸热能力的重要因素,流速影响金纳米棒颗粒的排列形式,从而影响纳米流体的光谱透射率。图7显示了不同流速情况下的0.05 ppm金纳米棒流体在不同光照强度下的吸热量。光照强度越大,纳米流体的吸热量越大。例如,对于0.5 mL/min流速,在400 W/m²照射下,达到稳定温度的过程中能吸收3 474.68 J热量,在600 W/m²照射下,达到稳定温度的过程中能吸收5 400.76 J热量,在800 W/m²照射下,过程中能吸收6 629.98 J热量。

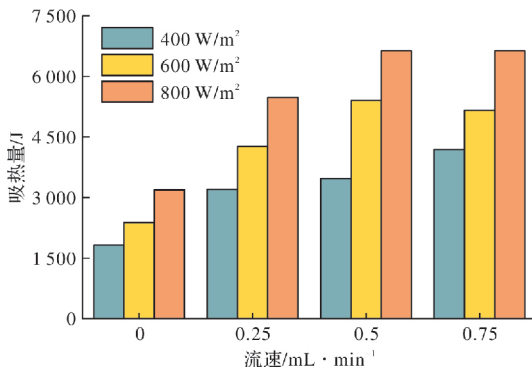


图7 金纳米棒流体不同光照强度吸热量对比  
Fig. 7 Comparison of heat absorption of gold nanorods under different light intensities

### 3.1.3 光照强度对集热器光热转化效率的影响

研究了不同流速下不同光照强度金纳米棒流体的光热转换效率,如图8所示,光照强度的增加会导致光热转换效率的降低,流速越低,光热转换效率越低。对于光照强度为400 W/m²的情况来说,随着流速的增大,光热转换效率逐渐增大,在流速为0.75 mL/min时达到接近58%的值。在一定流速控制下,光照强度越小,纳米流体的光热转换效率越高,在一定辐照时间内,入射太阳辐射会被纳米流体吸收,光照强度越大,纳米流体达到了更高的平衡温度,吸热量的增加导致集热器表面以及顶部纳米流体温度的升高从而增加散失到环境中的热量。

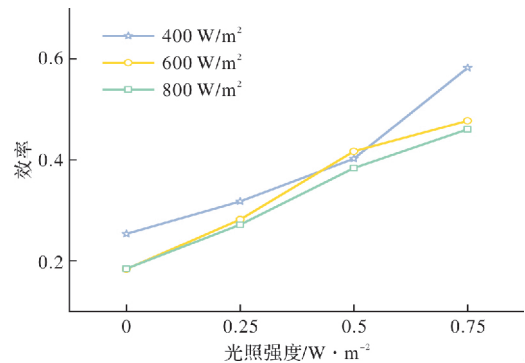


图8 不同流速金纳米棒流体光热转换效率  
Fig. 8 Photothermal conversion efficiency of gold nanorods at different flow rates

### 3.2 纳米流体浓度对纳米流体光学特性的影响

#### 3.2.1 纳米流体浓度对纳米流体出口温度的影响

调整太阳光模拟器使得辐射照度为800 W/m²,不同流速不同浓度金纳米棒流体集热器出口纳米流体温度如图9所示。随着金纳米棒颗粒浓度的增加,纳米流体进出口温差增大。纳米流体的温升速率和达到稳定后的最大平衡温度均有所提高。例如对于静止进口温度为22.29 °C的纳米流体,在800 W/m²的辐射照度下,去离子水的出口温度可以达到37.53 °C,0.3 ppm的金纳米棒流体的出口温度可以达到40.1 °C。

#### 3.2.2 纳米流体浓度对纳米流体吸热量的影响

如图10所示,增大浓度纳米流体的吸热量会增加。当纳米粒子数目增加时,纳米流体对所有波段辐射能量的消光能力均增加,这导致了纳米流体体积内的光谱辐射热流通量的衰减而引起纳米流体吸热量的增加。对于0.75 mL/min流速,在800 W/m²照射下,达到稳定温度的过程中,去



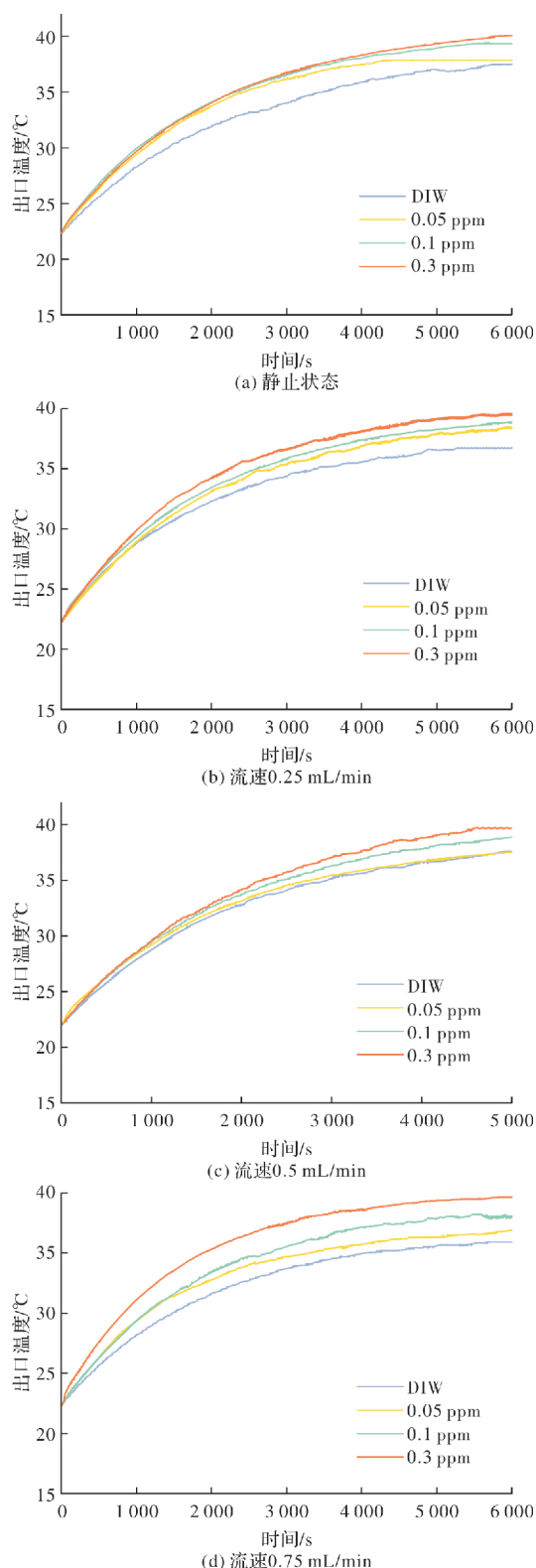


图 9 纳米流体不同浓度金纳米棒流体温升曲线

Fig. 9 Temperature rise curves of gold nanorods with different concentrations of nanorods

离子水能吸收 6 630.04 J 热量, 0.05 ppm 的纳米流体能吸收 7 330.39 J 热量, 0.1 ppm 的纳米流体能吸收 8 157.15 J 热量, 0.3 ppm 的纳米流体能吸收 9 044.93 J 热量。

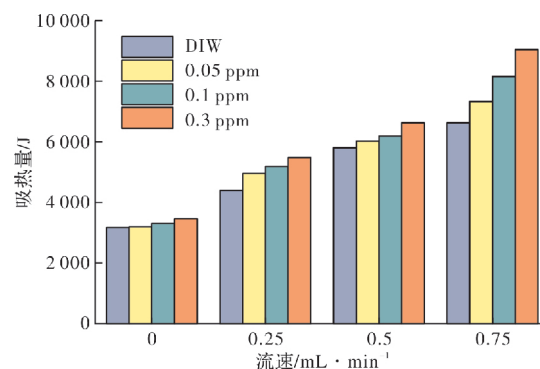


图 10 金纳米棒流体不同浓度吸热量对比

Fig. 10 Comparison of heat absorption of gold nanorods fluid at different concentrations

### 3.2.3 纳米流体浓度对集热器光热转化效率的影响

分析了相同光照强度条件下的不同浓度金纳米棒流体的光热转换效率, 不同流速金纳米棒流体光热转换效率如图 11 所示, 可以看出浓度的增加可以提高纳米流体光热转换效率, 流速越大, 纳米流体光热转换效率越大, 对于 0.3 ppm 浓度的金纳米棒流体在 0.75 mL/min 流速控制下的光热转换效率可以达到 52.3% 相比较同条件下的去离子水光热转换效率在 20%, 纳米流体的光热转换效率提高了 162% 左右。

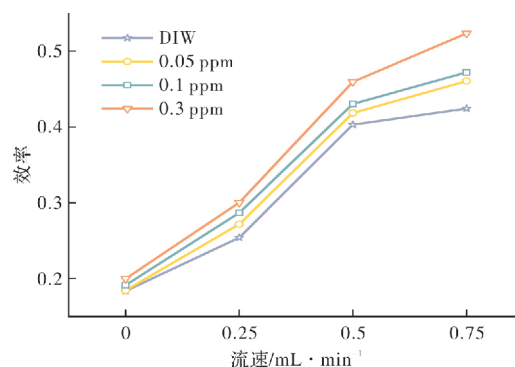


图 11 不同流速金纳米棒流体光热转换效率

Fig. 11 Photothermal conversion efficiency of gold nanorods at different flow rates

## 4 结论

本文对金纳米棒流体光热特性的影响因素进行了分析, 探究了光照强度以及纳米流体浓度对于金纳米棒流体光热特性的影响, 所研究的纳米流体在所探究的浓度范围内表现出良好的光热转换效率, 随着浓度的增加, 光热转换效率提高, 得出以下结论:

(1) 对于 0.5 mL/min 流速控制时,  $600 \text{ W/m}^2$

的照射, 纳米流体出口温度相较  $400 \text{ W/m}^2$  的照射下提升 18.5%;

(2) 纳米流体浓度增大, 吸热量会增加. 对于 0.3 ppm 浓度的金纳米棒流体在  $0.75 \text{ mL/min}$  流速控制下的光热转换效率相比同条件下的去离子水提高了 162% 左右;

(3) 0.3 ppm 的金纳米棒流体在  $0.75 \text{ mL/min}$  流速控制时, 接受  $800 \text{ W/m}^2$  的照射, 光热转换效率可以达到 52.3%, 相较无流速控制的效率提升 162%.

## 参考文献 References

- [1] SAIDUR R, ABDELAZIZ E A, DEMIRBAS A, et al. A review on biomass as a fuel for boilers[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(5): 2262-2289.
- [2] HEPBASLI A, BIYIK E, EKREN O, et al. A key review of wastewater source heat pump (WWSHP) systems[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 88: 700-722.
- [3] ZHANG Chunxiao, SHEN Chao, WEI Shen, et al. A review on recent development of cooling technologies for photovoltaic modules[J]. *Journal of Thermal Science*, 2020, 29(prepublish): 1-21.
- [4] ZHANG Chunxiao, SHEN Chao, YANG Qianru, et al. Blended Ag nanofluids with optimized optical properties to regulate the performance of PV/T systems[J]. *Solar Energy*, 2020, 208: 623-636.
- [5] MINARDI J, CHUANG H. Performance of a 'black' liquid flat-plate solar collector [J]. 1975, 17(3): 179-183.
- [6] MOHAMMAD M, MURALI K, RENE P. Full-spectrum volumetric solar thermal conversion via graphene/silver hybrid plasmonic nanofluids[J]. *Applied Energy*, 2018, 224: 103-115.
- [7] 张煜, 侯予, 陈良. 等离激元 Au 纳米流体集热器性能研究[J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(8): 44-49.  
ZHANG Yu, HOU Yu, CHEN Liang. Performance analysis of the collector of the nanofluid with plasmon au[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(8): 44-49.
- [8] LEE B, PARK K, WALSH T, et al. Radiative heat transfer analysis in plasmonic nanofluids for direct solar thermal absorption[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2012, 134(2): 1-6.
- [9] 宗美林, 叶晓江, 常怀钟, 等. 水基碳纳米管纳米流体在室外自然条件下的光热性能研究[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(5): 48-53.  
ZONG Meilin, YE Xiaojiang, CHANG Huaizhong, et al. Study on photo-thermal conversion characteristic of water-based carbon nanotubes in outdoor natural condition[J]. *Journal of Solar Energy*, 2020, 41(5): 48-53.
- [10] HEMANT K, GHANSHYAM D, JYOTIRMANY M. Investigations for effect of  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$  nanofluid flow rate on the efficiency of direct absorption solar collector[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2015(5): 70-78.
- [11] HUILING D, YUAN Z, CHANG X, et al. Experimental investigation on the plasmonic blended nanofluid for efficient solar absorption[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019: 161:1-8.
- [12] KYEONG S, MOSTAFA A. Dependence of the enhanced optical scattering efficiency relative to that of absorption for gold metal nanorods on aspect ratio, size, end-cap shape, and medium refractive index[J]. *The Journal of Physical Chemistry. B*, 2005, 109(43): 20331-20338.

(编辑 吴海西 沈 波)