

等离激元 Au 纳米流体集热器性能研究

张煜, 侯予, 陈良

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了探究含有 Au 纳米流体的二维太阳能体吸收式集热器的性能, 采用控制容积法数值求解了太阳能集热器内部的温度分布, 将集热器出口平均温度作为温升的衡量标准, 分析了影响集热器温升和效率的主要因素。研究表明: 集热器内光谱强度在 Au 等离激元共振波长(500 nm 左右)处大幅衰减, 证明了金属表面等离激元共振效应可大幅强化光谱吸收特性; 集热器内光谱辐射吸收程度影响集热器温度分布, 从而影响集热器温升和效率; 采用纯水作为工作流体时集热器效率仅 39.99%, 添加 Au 纳米粒子比添加 Ag 纳米粒子具有更高的集热器效率, 可达 78.75%; 流体流速主要影响集热器温升, 集热器高度主要影响集热器效率; 当流速为 0.1 m/s 时可获得最大集热器温升 36.63 °C, 集热器高度为 2.5 cm 时可获得最高效率 82.98%; 粒径和集热器长度对集热器温升和效率影响均不大。

关键词: 等离激元共振; 集热器; 纳米粒子; 光谱特性; 光热转换效率

中图分类号: TK512 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202008006 **文章编号:** 0253-987X(2020)08-0044-06



OSID 码

Performance Analysis of the Collector of the Nanofluid with Plasmon Au

ZHANG Yu, HOU Yu, CHEN Liang

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The control volume method is used to numerically solve the temperature distribution in the solar collector and to investigate the performance of a two-dimensional solar collector with Au nanofluids. The average temperature of collector outlet is taken as the measurement standard of temperature rise. The main factors affecting the temperature rise and efficiency of the collector are analyzed. The results show that the spectral intensity of the collector decreases greatly at the wavelength of Au plasmon resonance (about 500 nm), which proves that the effect of metal surface plasmon resonance can greatly enhance the spectral absorption characteristics, and that the degree of spectral radiation absorption in the collector affects the temperature distribution of the collector, thus affecting the temperature rise and efficiency of the collector; the efficiency of the collector is only 39.99% when pure water is used as the working fluid. Adding Au nanoparticles has higher collector efficiency than adding Ag nanoparticles, and the efficiency reaches 78.75%; the fluid velocity mainly affects the collector temperature rise, and the collector height mainly affects the collector efficiency. When the flow velocity is 0.1 m/s, the maximum collector temperature rise of 36.63 °C is obtained, and when the collector height is 2.5 cm, the maximum collector efficiency of 82.98% is reached; particle size and collector length have little effect on the collector temperature rise and efficiency.

收稿日期: 2020-01-14。 作者简介: 张煜(1997—),女,硕士生;陈良(通信作者),男,副教授,硕士生导师。 基金项目: 陕西高校青年创新团队支持计划资助项目。

网络出版时间: 2020-04-21

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200420.1638.006.html>

Keywords: plasmon resonance; collector; nanoparticles; spectral properties; photothermal conversion efficiency

提高太阳能集热器光热转换效率和集热器温升是优化太阳能集热器的关键。水被认为是集热器内部最佳工作基液^[1],而纳米粒子的添加会使集热器综合性能大幅提升^[1-6],若添加具有等离子激元共振效应的金属纳米粒子,可在其共振波长处对入射光进行高效吸收,获得更好的集热器性能^[7]。同时,利用特定方法可使吸收峰在光谱范围内均匀分布,以吸收不同波长的光谱,获得更均匀的集热器温度分布^[8-9]。研究表明,添加等离子激元的单组分金属纳米粒子可提升太阳能集热器性能。单组分金属中相关研究主要集中在 Ag 和 Au,陈梅洁等人发现,在水中添加 Ag 纳米粒子可使溶液温升更高,而且纳米粒子浓度越高,温升越高;添加体积分数为 0.25% 的 Ag 纳米流体可获得最大温升 67.31 °C,为水基液的 1.8 倍^[7]。2014 年,Zhang 等人提出了将等离子激元 Au 纳米颗粒分散到工质中作为工作流体,结果表明体积分数为 0.015% 的 Au 纳米颗粒悬浮液可使得集热器光热转换效率提高 20%^[10]。Wu 等人研究发现,菱形十二面体和立方体的 Au 纳米粒子等离子激元共振吸收峰的带宽随着颗粒粒径的减小变窄,表明颗粒越小,尺寸分布愈加均匀^[11]。相对于 Ag 纳米粒子而言,使用单组分 Au 纳米粒子的相关研究较少,针对影响集热器性能的因素进行系统归纳与分析的报道也较少。本文应用控制容积法^[12]对含 Au 纳米流体的体吸收式集热器进行了数值计算,获得了集热器内部的温度分布,研究了 Au 共振效应与集热器光谱吸收性之间的关系,并分析了影响集热器温升与效率的主要因素。

1 理论模型

1.1 太阳能集热器模型

体吸收式集热器被证明内部温度分布优于传统板式集热器^[13-14]。本文以体吸收式太阳能集热器为研究对象,集热器顶部为透射率较高的玻璃,它既可将大部分太阳光透射到纳米流体中,也可以防止纳米粒子挥发在空气中,从而维持纳米流体浓度的稳定性。在保证数值计算结果准确的前提下,对模型进行如下简化:①将金属 Au 纳米粒子视为球形;②将集热器设定为长方体模型,集热器的长度 L 、宽度 a 和高度 H 分别对应长方体模型的长、宽和高,如图 1 所示,并规定宽度 a 为单位长度,将模型简化

为二维模型,采用二维稳态常物性对流扩散模型进行计算;③太阳光由上向下垂直入射,流体流动方向为 x 轴正方向,入射光沿 y 方向增长,即集热器高度 H 增加的方向;④集热器底部为绝热边界条件,顶部为对流传热边界条件,考虑到纳米流体的温升不会很高,故忽略辐射项,即忽略盖板的导热以及盖板两侧的对流换热等对集热器顶部边界条件的影响;⑤采用 AM 1.5^[15] 太阳辐射强度作为入射条件。

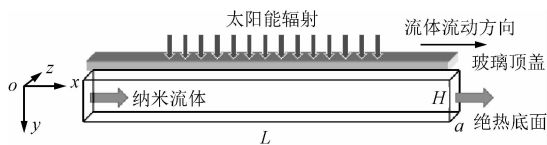


图 1 太阳能集热器示意图

1.2 纳米流体对光谱吸收特性的数值计算

处于纳米级的粒子,其诸多性质会发生很大的变化。根据瑞利散射理论^[16-17],当入射光照到远小于其波长的粒子上时会发生散射,散射前后光波频率不变,但各个方向散射光强不同。本文使用瑞利散射理论求解纳米粒子的光谱特性。在计算纳米流体光谱吸收特性时,需考虑基液的消光特性对瑞利散射理论进行修正,以获得太阳能集热器内部光谱及温度分布。

1.2.1 理论方法 若粒子直径远小于辐射波长,则使用瑞利散射求解。纳米粒子的消光效率

$$Q_e = Q_a + Q_s \quad (1)$$

式中: Q_s 为散射效率; Q_a 为吸收效率。

$$Q_a =$$

$$4\alpha \text{Im} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \left[1 + \frac{\partial^2}{15} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \frac{m^4 + 27m^2 + 38}{2m^2 + 3} \right] \quad (2)$$

$$Q_s = \frac{8}{3} \alpha^4 \left| \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \right|^2 \quad (3)$$

式中: Im 为虚部; m 为粒子对于光传播介质的相对折射率, α 为无量纲尺寸度量参数。

1.2.2 纳米流体消光特性理论方法的修正 纳米流体的光学特性与基液和纳米粒子相关。消光系数的计算公式为

$$K_{\text{water}} = \frac{4\pi\kappa}{\lambda} \quad (4)$$

$$K_{e,\text{nan}} = \frac{3fQ_{ca}(\alpha, m)}{D} \quad (5)$$

$$K_{e,fluid} = K_{e,nan} + K_{water} \quad (6)$$

式中: K_{water} 为基液的消光系数, m^{-1} ; κ 为基液的对光吸收指数; λ 为入射光的波长, nm; $K_{e,nan}$ 为纳米粒子的消光系数, m^{-1} ; f 为粒子浓度; Q_{ca} 为消光效率, 仅与无量纲尺寸度量参数 α 和相对折射率 m 有关; D 为粒子直径; $K_{e,fluid}$ 为纳米流体的消光系数, m^{-1} 。

式(7)是能量沿集热器高度方向的传输方程, 式(8)表示光照强度随高度的增加而衰减。

$$\frac{\partial I_{\lambda}}{\partial y} = -K_{e,fluid} I_{\lambda} = -(K_{e,nan} + K_{water}) I_{\lambda} \quad (7)$$

$$J = I_{\lambda} e^{-yK_{e,fluid}} \quad (8)$$

式中: I_{λ} 为太阳能在波长 λ 范围内的辐射强度; J 表示透射光强度, $W/(m^2 \cdot nm)$; y 为集热器入口沿高度方向增加的距离, m。综上, 可求得集热器内部任意高度的太阳光辐射强度分布。

2 纳米流体光谱特性及温度分布

由于金属纳米粒子浓度过高会发生聚沉和多重散射现象^[18], 若浓度过低, 纳米粒子的优势则不能明显地体现^[19], 因此, 选取 $f=0.6\%$ ^[1,20], $D=10\text{ nm}$ ^[20]。

2.1 纳米粒子光谱特性

忽略粒子相互散射的影响和粒子对水的影响, 探究纳米粒子的散射系数、吸收系数和消光系数与太阳光入射波长的关系。通过瑞利散射理论对粒子消光特性进行求解, 结果如图2所示, 可以看出: ①金属纳米粒子共振吸收峰波长约为500 nm; ②吸收系数和消光系数图像几乎重合, 这是因为散射系数较吸收系数和消光系数低2个数量级, 计算时对消光效率几乎没有影响, 因此可以将消光系数近似为吸收系数; ③当波长大于1000 nm时, 吸收系数、消光系数和散射系数几乎均为0。

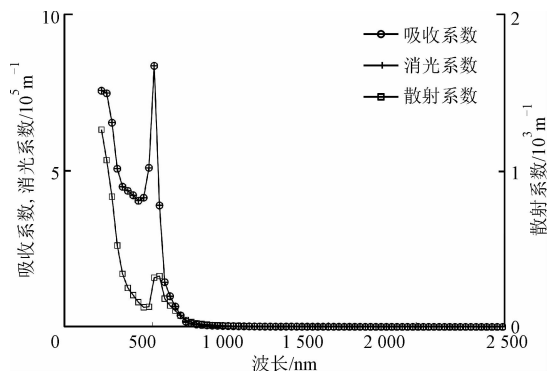


图2 Au纳米粒子光谱特性随波长的变化

2.2 集热器内辐射吸收强度

图3为集热器内不同高度辐射吸收强度。从图

3可看出, 太阳光辐射强度最大衰减发生在可见光波长范围内, 约400~500 nm, 表明Au纳米粒子的表面等离子共振效应促使纳米粒子对入射光进行了大量吸收(Au纳米粒子等离子共振吸收峰约在500 nm处); 随着 y/H 的增加, 太阳光辐射强度逐渐减小, Au的等离子共振效应降低。

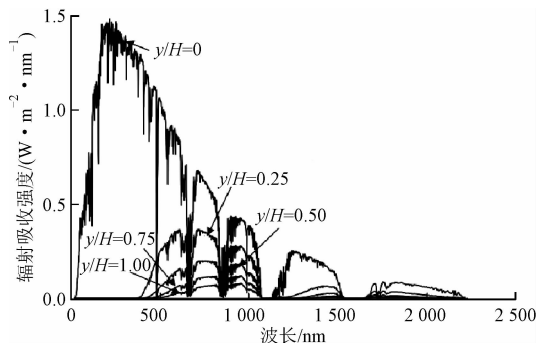


图3 集热器内不同高度辐射吸收强度分布

2.3 集热器内部温度分布

采用控制容积法对集热器内部节点进行离散, 根据能量守恒方程和动量守恒方程, 设置初始条件, 建立边界条件, 进而求得温度分布。

图4为集热器内的温度分布, 其中 x 为集热器入口沿长度方向增加的距离。可以看出位于集热器顶层的流体温度较高, 随着高度的增加, 温度降低。说明集热器顶部接收到的太阳辐射较强, 随着高度增加, 辐射减弱; 相同高度下, 靠近出口的纳米流体温度高, 表明纳米流体因流动传递了热量, 这也是体吸收式集热器的典型特征。结合图3和图4可得: 太阳能集热器内光谱的辐射强度很大程度决定了集热器内部的温度分布。

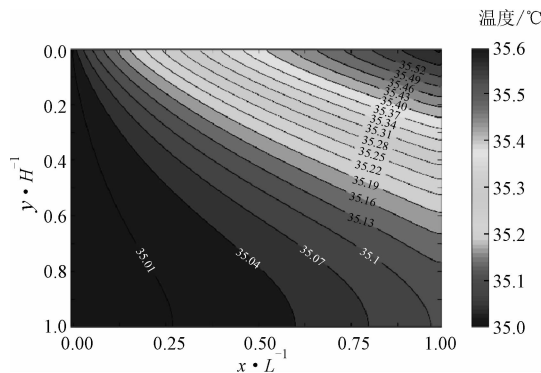


图4 集热器内的温度分布

3 集热器温升与效率的影响因素

将集热器内的太阳能辐射能等效为一内热源 $q_r (W/m^3)$, 其为全部太阳波长范围内的积分, 计算公式为

$$q_r = \int_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda \quad (9)$$

通过式(10)建立二维稳态能量传导方程,对集热器进行网格划分即可求得集热器内部的温度分布情况。

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - \frac{\partial q_r}{\partial y} = \rho c v \frac{\partial T}{\partial x} \quad (10)$$

式中: k 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; T 为集热器内部的节点温度, $^{\circ}\text{C}$; ρ 为密度, kg/m^3 ; c 是纳米流体的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; v 是纳米流体的流速, m/s 。

集热器顶部边界条件为自然对流传热,由式(12)可求得太阳能集热器的效率。

$$Q_{\text{conv}} = h_{\text{conv}} A (T - T_a) \quad (11)$$

$$\eta = \frac{qc(T_{\text{out}} - T_{\text{in}})}{AG_T} \quad (12)$$

式中: Q_{conv} 为对流换热量, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; T_a 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$; h_{conv} 为对流换热系数; η 为集热器效率; q 为质量流量, kg/s ; T_{out} 与 T_{in} 分别为集热器出口、入口的平均温度, $^{\circ}\text{C}$; A 为集热器接受太阳能辐射的面积,取 1 m^2 ; $G_T = 1\,000 \text{ W}/\text{m}^2$ 为太阳辐射强度。

将集热器出口平均温度 T_{out} 作为衡量集热器温升的指标。 $H = 1.2 \text{ cm}$, $L = 1 \text{ m}$ 。根据参考文献[19],假设玻璃的透射率为 0.9,底板绝热,无热量通过,选择环境温度为 25°C ,流体入口温度为 35°C , $h_{\text{conv}} = 6.43 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ [19],Au 纳米流体体积分数取 0.6%^[1,20],进行计算求解。

3.1 粒子类别的影响

从图 5 可以看出,使用纯水作为传热工质时,太阳能集光器的光热转换效率约为 39.99%。与纯水相比,添加纳米粒子的混合溶液可大幅提高集热器效率,添加了相同粒径和浓度 ($D = 10 \text{ nm}$, $f = 0.6\%$) 的 Ag 和 Au 的纳米流体的集热器效率分别为 73.72% 和 78.75%。

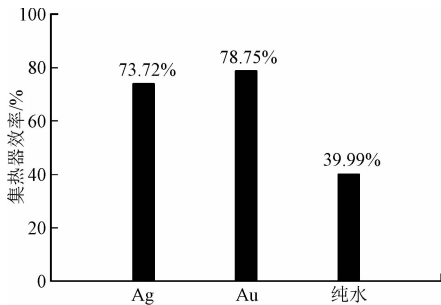


图 5 集热器效率与纳米粒子类别的关系

3.2 纳米粒子粒径的影响

考虑到瑞利理论成立的条件,粒径不宜太大,同时考虑到粒子间相互散射作用,加之聚沉现象,取 f

$= 0.6\%$ 。如图 6 所示,在一定范围内,随着粒子直径增大,温升与效率呈现增长趋势,但变化幅度均很小(温度几乎没有发生变化,效率最大变化约为 0.1%)。因此,纳米粒子直径不是影响温升和效率的主要因素。

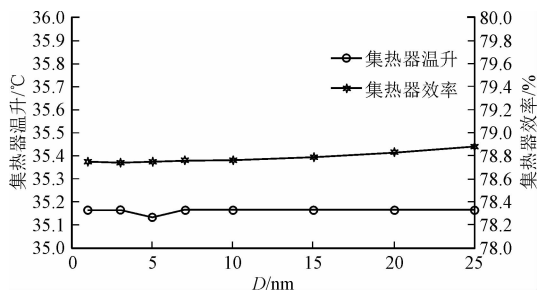


图 6 集热器温升与效率随纳米粒子粒径的变化

3.3 纳米流体流速的影响

根据文献[13],选择直径 $D = 10 \text{ nm}$ 的纳米粒子进行计算。假设稳定流动,由流体微团相互碰撞产生的温升忽略不计。从图 7 可看出,流体流速变大时,集热器温升降低,这是因为辐射还未将流体温度升高便流向出口,流速为 $0.1 \text{ m}/\text{s}$ 时获得最大温升为 36.63°C ;随着流速的增加,温升降低的幅度逐渐变小,温度总体变化约为 2°C ;流体速度越大,集热器效率越高,集热器效率升高的幅度逐渐减小,总体效率升高值较小,仅为 0.8%。可见流体流速对集热器效率影响较小,对温升影响相对较大。

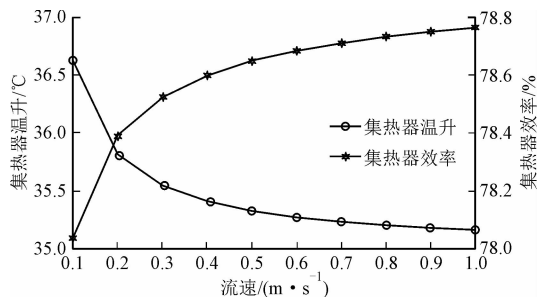


图 7 集热器温升与效率随纳米粒子流速的变化

3.4 集热器高度的影响

选择 $v = 0.6 \text{ m}/\text{s}$, $L = 1.0 \text{ m}$, $D = 10 \text{ nm}$, $f = 0.6\%$ 的纳米流体作为研究对象,集热器高度对温升和效率的影响如图 8 所示:随着集热器高度的增加,流量增大,光的辐射强度不变,出口温度降低,集热器温升减小,但总体减小幅度不大;集热器效率随集热器高度的增加而增高,最后趋近一个定值,高度为 2.5 cm 时为 82.98%;继续增加集热器高度,效率几乎不变。因此,集热器高度对集热器温升影响较小,但对其效率的影响较大。

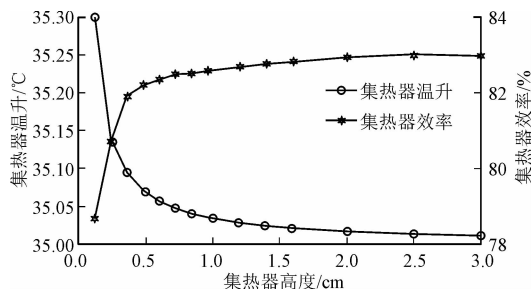


图8 集热器温升与效率随集热器高度的变化

3.5 集热器长度的影响

取 $D = 10 \text{ nm}$, $H = 1.4 \text{ cm}$, $v = 0.6 \text{ m/s}$, $f = 0.6\%$, 改变集热器的长度, 计算集热器的温升和效率, 结果如图9所示: 集热器长度增加时, 流体流过更长的截面时接收的光照时间长(规定光照强度仅在高度方向衰减), 集热器温升增加, 但总幅度较小, 仅变化 0.02°C ; 集热器效率先增加, 后稳定在一个定值(约为 82.76%), 当继续增加集热器长度时, 效率下降(约为 82.72%)。因此, 集热器长度对集热器温升和效率的影响均较小。

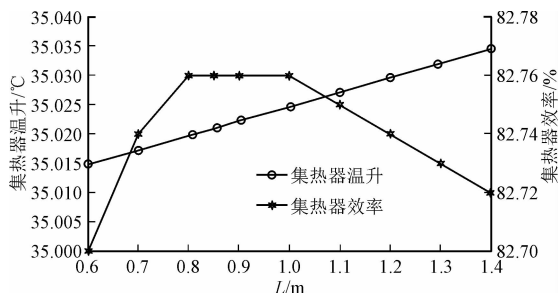


图9 集热器温升与效率随集热器长度的变化

4 结论

将添加 Au 纳米粒子的纳米流体应用于体吸收式太阳能集热器, 对二维集热器模型进行了数值计算, 获得了纳米粒子的光谱吸收特性和集热器内部光照强度分布, 分析了影响集热器温升与效率的因素。

(1) 纳米粒子光谱特性决定了集热器内光谱分布, 由于等离子共振效应, 添加 Au 纳米粒子的流体入射光在 500 nm 处表现出尖锐的吸收峰; 集热器内光谱分布很大程度上影响了集热器温度分布, 温度分布决定了集热器的温升和效率。

(2) 添加 Au 纳米流体的集热器效率可达 78.75% , 然而纯水可获得效率仅 39.99% 。

(3) 影响集热器温升的主要因素为流体流速, 影响集热器效率主要因素为集热器高度。流速为 0.1 m/s 时可获得最大集热器温升 36.63°C , 集热器高

度为 2.5 cm 时可获得最高效率 82.98% 。

(4) 纳米粒子直径和集热器长度对集热器温升和效率的影响均不大。

参考文献:

- [1] TYAGI H, PHELAN P, PRASHER R. Predicted efficiency of a low-temperature nanofluid-based direct absorption solar collector [J]. *Journal of the Solar Energy Engineering*, 2009, 131(4): 041004.
- [2] HUSSEIN A K. Applications of nanotechnology to improve the performance of solar collectors: recent advances and overview [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 62: 767-792.
- [3] ZHANG L, LIU J, HE G D, et al. Radiative properties of ionic liquid-based nanofluids for medium-to-high-temperature direct absorption solar collectors [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2014, 130: 521-528.
- [4] JEON J, PARK S, LEE B J. Analysis on the performance of a flat-plate volumetric solar collector using blended plasmonic nanofluid [J]. *Solar Energy*, 2016, 132: 247-256.
- [5] EASTMAN J A, CHOI S U S, LI S P, et al. Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles [J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 78(6): 718-720.
- [6] ASSAEL M J, CHEN C F, METAXA I, et al. Thermal conductivity of suspensions of carbon nanotubes in water [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2004, 25(4): 971-985.
- [7] 陈梅洁, 唐天琪, 刘子玉, 等. TFFU 离激元 Ag 纳米流体光热转换特性 [J]. *中国科学院大学学报*, 2018, 35(2): 222-226.
- [8] CHEN Meijie, TANG Tianqi, LIU Ziyu, et al. Investigating on photothermal conversion properties of plasmonic Ag nanofluids [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 35(2): 222-226.
- [9] DUAN H L, TANG L L, ZHENG Y, et al. Effect of plasmonic nanoshell-based nanofluid on efficiency of direct solar thermal collector [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 133: 188-193.
- [10] YU X X, XUAN Y M. Investigation on thermo-optical properties of CuO/Ag plasmonic nanofluids [J]. *Solar Energy*, 2018, 160: 200-207.
- [11] ZHANG H, CHEN H J, DU X Z, et al. Photothermal conversion characteristics of gold nanoparticle dispersions [J]. *Solar Energy*, 2014, 100: 141-147.

- [11] WU H, KUO C H, HUANG M H. Seed-mediated synthesis of gold nanocrystals with systematic shape evolution from cubic to trisoctahedral and rhombic dodecahedral structures [J]. *Langmuir*, 2010, 26(14): 12307-12313.
- [12] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 23.
- [13] OTANICAR T P, PHELAN P E, GOLDEN J S. Optical properties of liquids for direct absorption solar thermal energy systems [J]. *Solar Energy*, 2009, 83(7): 969-977.
- [14] NATARAJAN E, SATHISH R. Role of nanofluids in solar water heater [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 45: 1-5.
- [15] QIN C Y, KANG K, LEE I, et al. Optimization of the spectral absorption coefficient of a plasmonic nanofluid for a direct absorption solar collector [J]. *Solar Energy*, 2018, 169: 231-236.
- [16] BOHREN C F. Huffman: absorption and scattering of light by small particles [EB/OL]. [2019-11-13]. https://www.researchgate.net/publication/243700653_Huffman_Absorption_and_Scattering_of_Light_by_Small_Particles.
- [17] 米凤文. 激光衍射粒度分析仪粒度分布求解方法的研究 [J]. *光子学报*, 1999, 28(2): 151-154.
- MI Fengwen. The laser diffraction particle size analyzer for methods to calculate particle size distribution [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, 28(2): 151-154.
- [18] PRASHER R. Thermal radiation in dense nano-and microparticulate media [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 102(7): 074316.
- [19] STREED E R, HILL J E, THOMAS W C, et al. Results and analysis of a round robin test program for liquid-heating flat-plate solar collectors [J]. *Solar Energy*, 1979, 22(3): 235-249.
- [20] OTANICAR T, PHELAN P E, PRASHER R, et al. Nanofluid-based direct absorption solar collector [J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2010, 2(3): 033102.

(编辑 亢列梅)

(上接第 26 页)

- [17] RINKENBURGER A, TORIYAMA T, YASUDA K, et al. Catalytic effect of potassium compounds in soot oxidation [J]. *ChemCatChem*, 2017, 9(18): 3513-3525.
- [18] CHEN Hui, ZHANG Yexin, ZHANG Jian. Dipole-moment-driven diesel soot oxidation in the presence of alkali metal chlorides [J]. *Catalysis Science & Technology*, 2018, 8(4): 970-974.
- [19] ANEGGI E, LEITENBURG C D, DOLCETTI G, et al. Diesel soot combustion activity of ceria promoted with alkali metals [J]. *Catalysis Today*, 2008, 136(1/2): 3-10.
- [20] LI Yan, TAN Houzhang, WANG Xuebin, et al. Characteristics and mechanism of soot formation during the fast pyrolysis of biomass in an entrained flow reactor [J]. *Energy & Fuels*, 2018, 32(11): 11477-11488.
- [21] FAN X L, YANG F, ZHANG W, et al. Variation of the crystalline structure of coal char during pyrolysis and its effect on gasification reactivity [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2006, 34(4): 395-398.
- [22] YEHLIU K, VANDER WAL R L, ARMAS O, et al. Impact of fuel formulation on the nanostructure and reactivity of diesel soot [J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(12): 3597-3606.
- [23] VANDER WAL R L, TOMASEK A J. Soot nanostructure: dependence upon synthesis conditions [J]. *Combustion and Flame*, 2004, 136(1/2): 129-140.
- [24] YEHLIU K, VANDER WAL R L, ARMAS O, et al. Impact of fuel formulation on the nanostructure and reactivity of diesel soot [J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(12): 3597-3606.
- [25] WANG Xuebin, LI Shuaishuai, ADEOSUN A, et al. Effect of potassium-doping and oxygen concentration on soot oxidation in O₂/CO₂ atmosphere: a kinetics study by thermogravimetric analysis [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 149: 686-697.
- [26] VAN SETTEN B A A L, MAKKEE M, MOULIJN J A. Science and technology of catalytic diesel particulate filters [J]. *Catalysis Reviews*, 2001, 43(4): 489-564.
- [27] LI Qian, WANG Xiao, XIN Ying, et al. A unified intermediate and mechanism for soot combustion on potassium-supported oxides [J]. *Scientific Reports*, 2015, 4(1): 4725.

(编辑 亢列梅)