

纳米流体在太阳能利用领域的研究进展

宋敏宇^{a,b}, 汪玲玲^{a,b}, 邵斐龙^{a,b}, 于伟^{a,b}

(上海第二工业大学 a. 能源与材料学院; b. 上海先进热功能材料工程技术研究中心, 上海 201209)

摘要: 太阳能作为可再生能源, 因其储量丰富, 绿色安全, 成为希望能源, 被广泛应用在工农业和居民生活中。传统流体的缺点是不能充分有效地利用太阳能, 造成能量损耗, 而纳米流体因其优异的光学特性和热特性改善了这一点。分析了纳米流体的浓度、颗粒类型、稳定性和基液类型等参数对于光热特性的影响, 并介绍了纳米流体在太阳能集热器、光伏热、太阳能海水淡化和热能储存等系统的最新应用。最后总结了目前纳米流体应用在太阳能系统的一些缺点, 为未来纳米流体的改善提供了方向。

关键词: 太阳能; 纳米流体; 太阳能集热器; 光伏热; 太阳能海水淡化; 热能储存

中图分类号: TK519

文献标志码: A

Research Progress of Nanofluids in the Field of Solar Energy Utilization

SONG Minyu^{a,b}, WANG Lingling^{a,b}, SHAO Feilong^{a,b}, YU Wei^{a,b}

(a. School of Energy and Materials; b. Shanghai Engineering Research Center of Advanced Thermal Functional Materials, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China)

Abstract: As a renewable energy source, solar energy has become a hope energy source due to its abundant reserves, green and safe property, and is widely used in industry, agriculture and residents' lives. The disadvantage of traditional fluids is that they cannot make full and efficient use of solar energy, resulting in energy loss, while nanofluids improve this because of their excellent optical and thermal properties. The influence of nanofluid concentration, particle type, stability and substrate type on photothermal properties was analyzed, and the latest applications of nanofluids in solar collectors, photovoltaic heat, solar seawater desalination and thermal energy storage systems were introduced. Finally, some shortcomings of the current application of nanofluids in solar energy systems were summarized, which provided a direction for the improvement of nanofluids in the future.

Keywords: solar energy; nanofluids; solar collector; photovoltaic heat; solar desalination; thermal energy storage

0 引言

目前, 在社会可持续发展和能源短缺的压力下, 能源转型升级已成为全球首要解决的任务。太阳能绿色环保, 取之不尽, 用之不竭, 被誉为 21 世纪最有希望的可再生能源^[1-2]。太阳能热利用以工作流体作为介质将光能转换为热能, 其包括供暖、蒸馏、发电、消毒杀菌等技术。然而, 传统流体如水、油和乙

二醇等的光热转换效率低下, 不能满足对于工业、农业和居民生活上的能量需求^[3-5]。

近年来, 伴随着科技发展, 纳米技术趋近于成熟。Choi 等^[6]于 1995 年首次提出纳米流体的概念, 即在传统流体的基础上, 添加金属或非金属纳米粒子, 形成均匀、稳定的高导热悬浮液。随着纳米流体概念的出现, 人们开始关注这种新型流体并对其特性开展了大量研究。得益于研究人员地不断深入,

收稿日期: 2022-05-19

通信作者: 汪玲玲 (1982-), 女, 安徽黄山人, 教授, 博士, 主要研究方向为纳米流体、热功能材料。E-mail: llwang@sspu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (51906132, 51876112) 资助

纳米流体目前已被广泛运用于各行各业中,包括制冷系统^[7-8]、电子设备散热^[9-10]、余热回收^[11]、航天器热控制^[12]、生物医学^[13]、石油开采^[14]、纳米润滑剂^[15]。这些研究表明,新型纳米流体有着许多超越传统流体的优越性能,使得它们被称为新一代工作流体。

随着太阳能热利用不断发展,光热纳米流体逐渐引起人们的重视。本文根据其成分分为:碳基纳米流体、金属基纳米流体、金属氧化物基纳米流体、等离子体纳米流体和混合纳米流体。Sayed等^[16]发现相较于纯水,引入Cu纳米粒子可至多提升40%的传热效率。Seifkar等^[17]利用聚乙二醇合成了超稳定碳量子点纳米流体,用0.8个太阳照射纳米流体100 min,温度可达到60℃以上。Gao等^[18]设计了一种石墨烯基深共晶溶剂的新型纳米流体,静止45 d内没有发生沉降,展现出超高的稳定性。基于

纳米流体的优异特性,研究者探讨了其在太阳能领域的潜在应用。Guo等^[19]研究了质量分数为0.02%的等离子体六硼化镧纳米流体的太阳能光热转换效率高达98.65%。Mashhadian等^[20]研究发现在集热器上使用混合纳米流体的热效率要比单一流体高出70%。Mahamude等^[21]综述了关于碳基纳米流体在太阳能集热器的应用,表明这类材料在光热领域具有很大的潜力和未来。

本文综述了纳米流体在光热领域的应用。首先,介绍纳米流体的光热机理和影响因素。其次根据不同技术类型讨论它们在太阳能领域的不同应用,包括太阳能集热器、太阳能光伏热系统、热能储存^[22]、太阳能海水淡化^[23]、其他应用(见图1)。总结纳米流体在实际应用中所面临的困难,提出对未来纳米流体性能的展望。

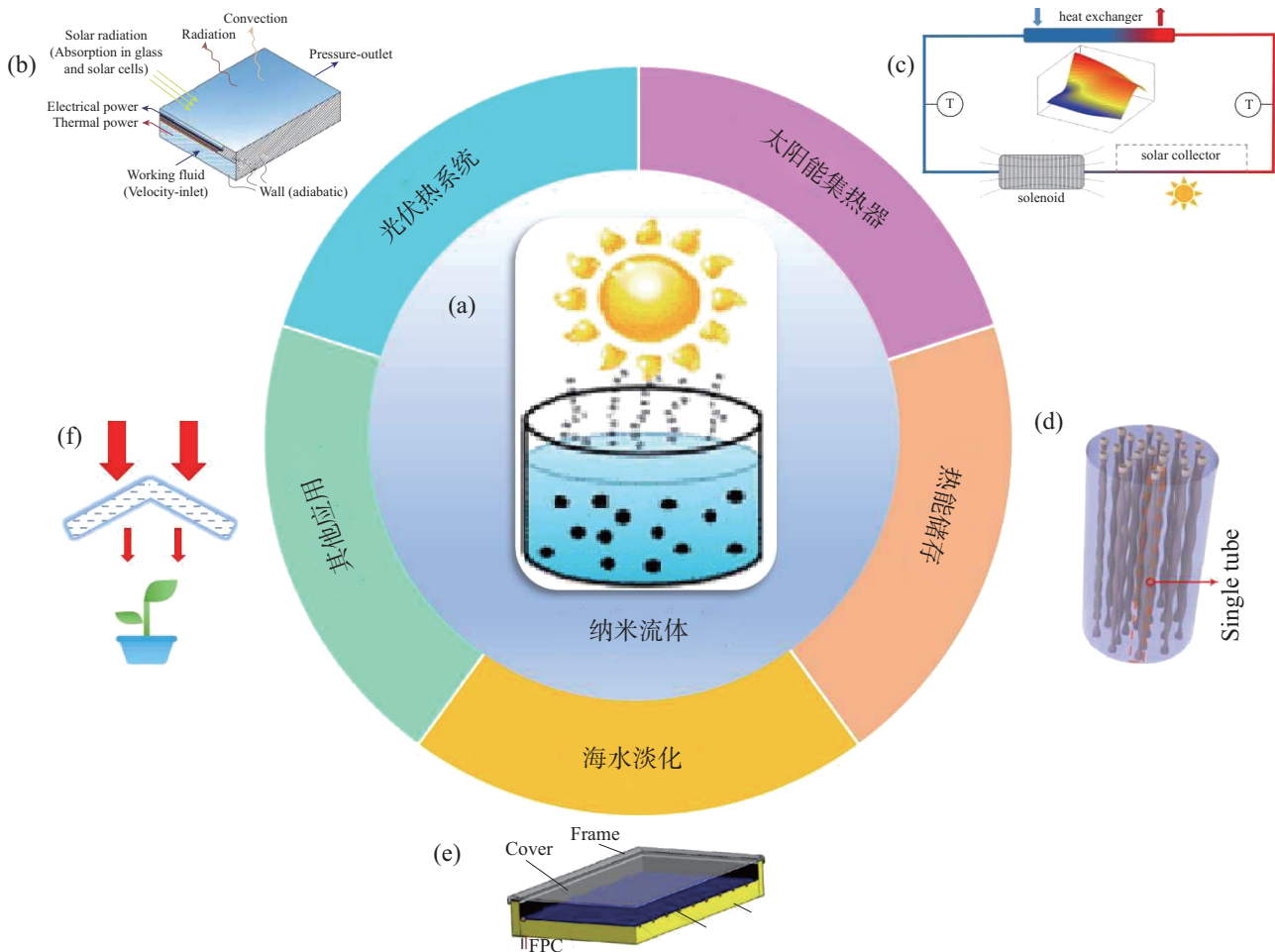


图1 纳米流体(a)在太阳能领域的应用^[24]; (b)光伏热系统^[25]; (c)太阳能集热器^[26]; (d)热能储存^[22]; (e)海水淡化^[23]; (f)其他应用

Fig. 1 Application of nanofluid (a) in the field of solar energy^[24]; (b) photovoltaic thermal system^[25]; (c) solar collector^[26]; (d) thermal energy storage^[22]; (e) seawater desalination^[23]; (f) other applications

1 纳米流体性能

1.1 稳定性

制备具有良好稳定性的纳米流体是研究光热特性和广泛运用的首要前提。纳米流体发生沉淀聚集主要是由于范德华力和重力。在流体中纳米颗粒之间相互碰撞, 聚集进而粒径增大引发沉淀, 最终导致物性的改变。因此大量研究人员对如何制备分散性好, 稳定性高的纳米流体展开了深入研究。

目前来说, 制备纳米流体分为一步法和两步法 2 种方法。一步法是指在基液中直接通过化学方法制备纳米粒子, 省却了干燥分散等步骤。Chaturvedi 等^[27]通过一步法制备浓度为 10^{-3} 的 SiO_2 纳米流体可以在 300 个加热-冷却循环后依然表现稳定。Parsa 等^[28]分别使用一步和两步法进行对

比, 结果发现一步法不仅有着高稳定性且性能优越。Joseph 等^[29]使用经济的一步法合成碳量子点纳米流体在不失稳的情况下还可以获得 92% 的太阳能吸收率。简而言之, 以此法得到的纳米流体稳定性更好但制备成本昂贵。两步法是先制备纳米粒子然后充分均匀地分散在基液当中。这种方法制备简单, 成本低但不可避免地会有颗粒团聚的趋势。如图 2 所示, 通常使用超声处理和搅拌^[30]、改变流体 pH 和添加表面活性剂等方法来提高稳定性。例如, Qi 等^[31]研究不同 pH 对 TiO_2 纳米流体稳定性的影响, 结果发现在 $\text{pH}=8$ 时, 纳米流体具有最低的透射率和最高稳定性。Wang 等^[32]研究不同表面活性剂对纳米流体稳定性的影响, 发现四甲基氢氧化铵 (TMAH)、十二烷基硫酸钠 (SDS) 和十二烷基磺酸钠 (SLS) 具有最佳的稳定性。

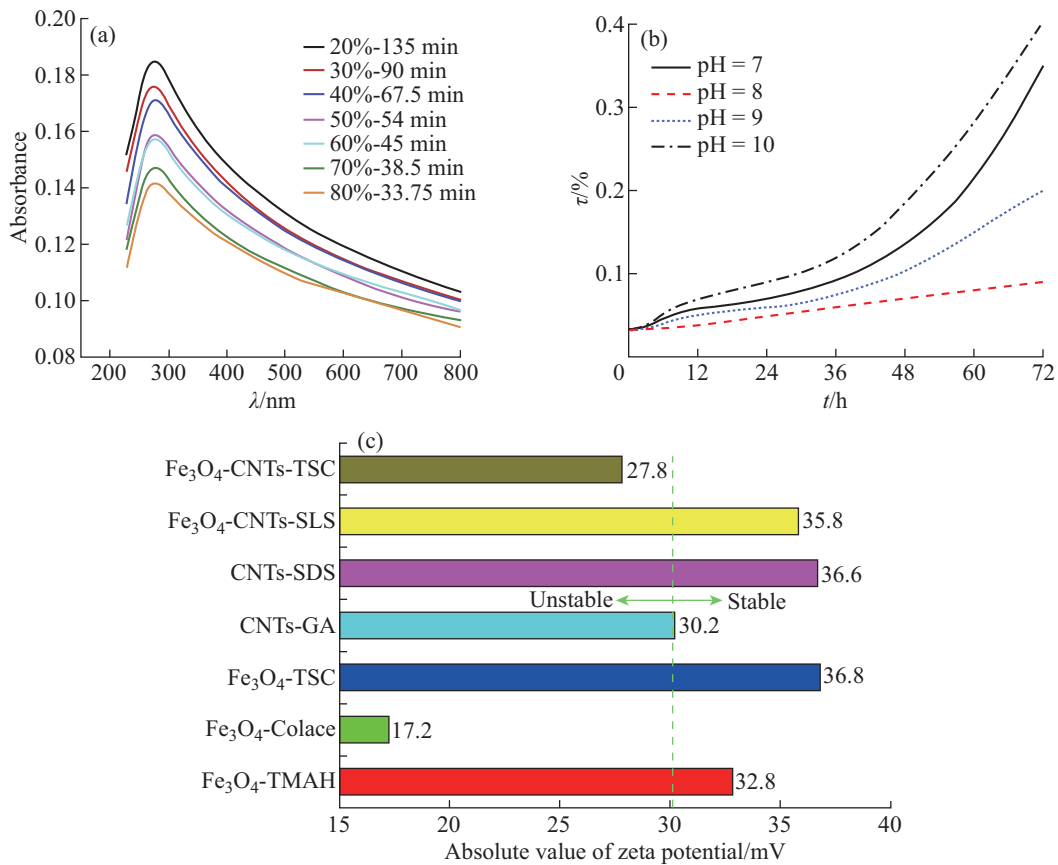


图 2 影响纳米流体稳定性的因素 (a) 超声时间和功率^[30]; (b) pH^[31]; (c) 不同表面活性剂^[32]
 Fig. 2 Effect factors on stability of nanofluids (a) ultrasonic time and power^[30]; (b) pH^[31]; (c) different surfactants^[32]

1.2 光学特性

纳米流体是由纳米颗粒和基液组成的悬浮液, 其中基液和纳米颗粒对太阳光进行吸收并发生散射。消光系数和太阳能加权系数是衡量光学性能的重要指标。

消光系数反映了流体吸光能力的大小, 是纳米流体光学特性的一个重要参数, 可以用比尔-朗伯公式表示^[33]:

$$T(\lambda) = \exp(-K_{e\lambda}d) \tag{1}$$

式中: $T(\lambda)$ 为液体的透射率, 一般在 200~800 nm 的波长范围内测量; d 为穿透距离。

纳米流体的消光系数主要取决于流体浓度, 随着浓度的增加, 光束与粒子发生碰撞, 从而消光系数随之增加。同时它也与颗粒的尺寸、形貌以及自身光学特性有关。Choi 等^[34] 研究填充石蜡的碳纳米管纳米流体时发现当体积分数小于 0.05% 时消光系数呈线性增长, 之后虽然不呈线性, 但仍有所增加, 说明此时流体处于依赖性散射状态, 消光系数在此状态时不随浓度线性增加。Bindu 等^[35] 采用两步法制备三元 MWCNT- Al_2O_3 -ZnO 混合纳米流体, 当处于 200~400 nm 波长下, 消光系数最高, 并且发现 MWCNT 的加入会提高消光系数; 将第 1 d 和第 8 d 的消光系数进行对比, 发现随着静止时间的延长而降低, 推测与颗粒团聚有关。Han 等^[36] 探索不同粒径的纳米流体对光学性能的影响时发现粒径为 40 nm 的 Ag 纳米粒子在短波区时消光系数显著提高, 随着粒径的进一步增加, 消光系数逐渐降低但是吸收带变得更宽。Hosseini 等^[37] 研究具有不同形貌的 Fe_2O_3 纳米流体对光热性能的影响, 通过实验表明, 叶片形貌的纳米流体的消光系数要高于其他样品, 当流体厚度超过 3 cm 时可以吸收近乎全部能量。在太阳能光热转换当中, 叶片形貌的纳米流体效率最高, 可达到 82% 的光热转换效率。

太阳能加权吸收率就是纳米流体在太阳能光谱中吸收能量的比例^[38-40]:

$$S_n(\lambda) = [1 - T(\lambda) - R(\lambda)]S_{\text{AM1.5}} \quad (2)$$

$$A_m = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_n(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_{\text{AM1.5}}(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

式中: $S_n(\lambda)$ 为纳米流体的太阳吸收光谱; $R(\lambda)$ 为反射率; $S_{\text{AM1.5}}$ 为参照 ASTM G173-03 的太阳辐照度; A_m 为太阳能加权吸收率。从式中看出, 太阳能加权吸收率取决于消光系数和纳米流体层厚度。Zhu 等^[40] 制备出等离子体双金属合金和碳纳米材料复合纳米流体, 观察到太阳能加权吸收率与流体的质量浓度成正比, 流体的质量浓度随穿透距离的增加而增加。太阳能加权吸收率受到距离影响, 在 1 cm 的穿透距离下, 浓度为 10^{-4} 的 Ag-Au/ZNG 纳米流体的加权系数达到 0.971, 比纯 EG 高出 5 倍。Hazra 等^[41] 研究了 EG 和氮化硼-乙二醇 (BN-EG) 纳米流体的吸收能量分数, 可以看出随着流体浓度和深度

的增加太阳能加权系数也随之增加。在 2.0 cm 的穿透深度下, 9×10^{-5} 的 BN-EG 纳米流体的加权系数为 89.51%, 比基础流体高了近 40 倍。

1.3 热特性

作为新一代工作流体, 从开始考虑粒子布朗运动、界面效应、粒子团簇等动力学机制并提出相关模型, 到利用神经网络预测热导率, 纳米流体的传热特性自从问世以来已被广泛研究。大多数研究者认为传热机理分为静态和动态导热。静态导热机理是指由于纳米粒子的热导率比基液高很多, 所以即使添加少量纳米粒子也能得到高的热导率; 动态导热机理是指纳米流体内部的布朗运动和热扩散性质增强了热导率。下面将从颗粒的尺寸和形貌、浓度、颗粒聚集以及基液的选择这几个方面阐述对热导率的影响。

1.3.1 颗粒的尺寸和形貌

Murshed 等^[42] 早在 2005 年已经发现颗粒的尺寸和形状对热导率有影响。图 3(a) 所示为不同温度下纳米颗粒尺寸对纳米流体热导率的影响。可以看出在相同的浓度下, 随着粒径的减小, 纳米流体的热导率逐渐增加; 小尺寸的纳米粒子相较于大尺寸更为活跃^[43]。Main 等^[44] 发现了小尺寸的纳米粒子更利于导热。Timofeeva 等^[45] 则有着不同的观点, 他们发现大颗粒的纳米流体有着高导热率。目前文献还没有很好地解释其中机理, 需要研究人员更进一步的研究。Cui 等^[46] 研究了 4 种不同形状 TiO_2 纳米粒子对热导率的影响, 发现片状的热导率最高。

1.3.2 颗粒的浓度

Nfawa 等^[47] 研究了不同温度下导热系数与浓度的关系, 如图 3(b) 所示, 随着浓度的增加, 导热系数也随之增加。Ezekwem 等^[48] 研究碳化硅浓度对纳米流体热导率的影响, 当浓度从 1% 提高到 2% 时, 热导率变化不明显, 但在 2%~3% 时, 热导率提高显著。Çolak^[49] 通过建立人工神经网络成功预测了纳米流体的热导率, 结果发现随着浓度增加, 热导率也随之增加, 与大多数研究一致。Judran 等^[50] 不仅发现颗粒浓度对热导率的影响, 同样超声时间也会产生影响, 最大可提高 25.08%。

1.3.3 颗粒聚集

颗粒之间的团聚会导致纳米流体失稳, 最终导致其导热性能下降。影响团聚的因素很多, 如温度、

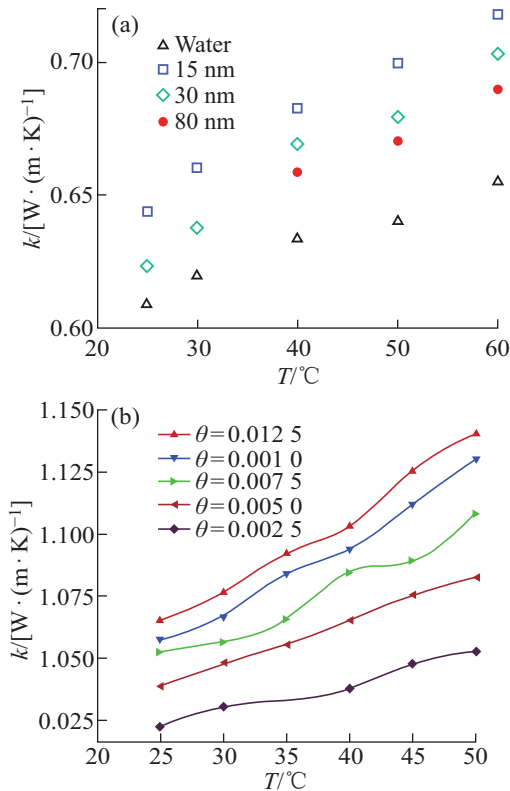


图3 热导率的影响因素 (a) 尺寸^[43]; (b) 浓度^[47]

Fig. 3 Influencing factors of thermal conductivity (a) dimensions^[43]; (b) concentration^[47]

pH、表面活性剂等。Li等^[51]研究温度对于纳米流体的影响,结果发现热导率随温度的升高而增加。Jabbari等^[52]也获得了同样的发现。Wang等^[53]研究pH对于流体稳定性和传热性能的影响,结果表明最佳的pH可以提高热导率且黏度最低。添加表面活性剂可以提高纳米流体的稳定性,但也会改变它的热物性。Abu-Hamdeh等^[54]利用分子动力学模拟表面活性剂对纳米流体热性能的影响。研究表明,添加表面活性剂有助于提高热导率,但随着进一步增加,热导率反而降低,原因是添加的颗粒影响了纳米颗粒的运动。Ma等^[55]研究不同比例的聚乙烯吡咯烷酮(PVP)对流体性能的影响,同样也发现表面活性剂存在最佳浓度使得各项性能参数达到最佳。

1.3.4 基液属性

关于纳米流体热导率影响因素的探索,人们对纳米颗粒的属性进行了广泛的研究,但却忽视了选择合适基液的重要性。选择合适的基液有助于纳米流体稳定性和热导率的提高。Nikkam等^[56]通过对比乙二醇和二甘醇两种不同基液对于热导率的影响,发现乙二醇更有利于传热应用。Bakthavatchalam等^[57]添加多壁碳纳米管研究不同种类的基液对热

导率的影响,结果表明,相较于水基流体,多壁碳纳米管的引入使得油基具有更高的热导率。Vandurangi等^[58]以不同比例混合水与乙二醇作为基液对比,结果发现含有40%乙二醇的基液的纳米流体的导热性能最好。Kalidoss等^[59]通过对比水基和Therminol55基的光热性能,发现水基纳米流体适合中温应用,Therminol55则适合高温应用。Gao等^[18]制备了以尿素/氯化胆碱低共熔溶剂(DES)为基液的石墨烯纳米流体,研究发现这种新型基液有高沸点和小比热容的特点,光热效率比纯水和乙二醇分别高36.4%和11%。

2 应用领域

纳米流体的稳定性和光热特性为其在太阳能领域的广泛应用奠定了基础。本文将详细介绍纳米流体在太阳能集热器、光伏热系统、太阳能海水淡化、温室和热能存储中的最新研究。

2.1 太阳能集热器

太阳能集热器是一种通过太阳能与集热器内部的工作流体进行热交换,将其转换为热能的装置。由于其结构不同,划分为平板太阳能集热器(flat panel solar collector, FPSC)、真空管太阳能集热器(evacuated tube solar collector, ETSC)、直接吸收式太阳能集热器(direct absorption solar collector, DASC)和抛物面槽式太阳能集热器(parabolic trough solar collector, PTSC)。与传统流体不同,将纳米流体引入太阳能集热器,会显著提高它的光热转换效率。

2.1.1 FPSC

FPSC广泛应用于中低温度。为了进一步提高FPSC的集热效率,科学家们把目光放在了纳米流体身上^[60](见图4)。Akram等^[61]使用自制实验装置测试了纳米流体在平板集热器上的热性能,使用铜管和吸收板焊接减少热量损失。研究金属氧化物基纳米流体、碳基纳米流体和去离子水在FPSC的热效率,结果表明所有纳米流体的热效率均优于去离子水,其中碳基纳米流体的热效率最高。Ahmadlouydarab等^[62]研究 TiO_2 纳米流体在FPSC中的性能。分别使用120 min和240 min的吸热测试,发现耗时120 min的吸热实验效率最高并且随着流体浓度的增加,集热效率也随之提高。在FPSC中使用金刚石/水纳米流体作为工作流体,

集热效率比纯水高了 12.7%，达到了 69.85%。同时发现集热效率受太阳光照强度的影响显著，在下午 13:00 点时能效最高 [63]。

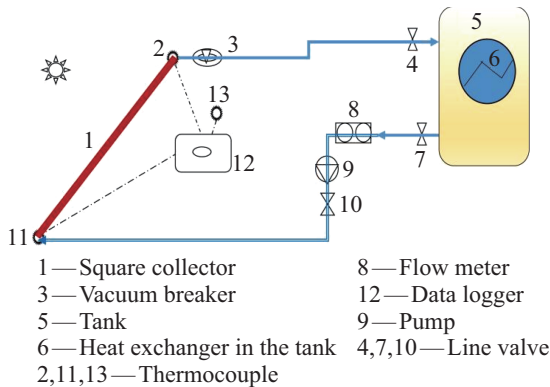


图 4 FPSC 装置示意图 [60]

Fig. 4 Schematic diagram of FPSC [60]

2.1.2 ETSC

真空管作为 ETSC 的重要部件，人们研究不同类型的管道（热管、热虹吸管、U 型管）用于增强集热效率。但随着纳米流体的引入，人们观察到 ETSC 的热性能极大地增强。Mercan 等 [64] 早在 2019 年利用数值分析验证了纳米流体对于热虹吸管 ETSC 性能的影响，并且通过获得的参数确定了纳米流体的最佳工作状态。Sharafeldin 等 [65] 研究 WO_3 纳米流体对于 ETSC 的性能影响。结果表明，不同的流体浓度引起导热性的变化是提高集热效率的主要因素。在质量流量速率为 $0.017 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 下，浓度为 0.042% 的纳米流体光热效率达到 70% 以上。Abid 等 [66] 发现与单一纳米流体相比，使用多壁碳纳米管和 TiO_2 混合的纳米流体提高了 10.42% 的热效率。Yıldırım 等 [67] 发现在 U 型管中混合纳米流体改善了单纳米流体的缺点并且有助于减少有害气体的排放。Henein 等 [68] 研究以不同比例混合 MgO/MWCNT 纳米流体，发现 1:1 比例的纳米流体有着良好的热性能和更低的原料成本，可作为 MWCNT 纳米流体的替代品（见图 5）。

2.1.3 DASC

Minardi 等 [69] 在 1975 年首次提出 DASC，其工作原理是利用工作流体直接吸收太阳光并将其转化为热能。与传统的太阳能集热器相比，DASC 直接将工作流体暴露在太阳光下，降低热阻，实现了高效的光热转换和热损失的降低 [26]。Wang 等 [70] 采用两步法制备了含有多层 MXene 的纳米流体，将其静止两周依然表现出良好的稳定性。与之相比的石

墨烯纳米流体则出现了明显沉淀。在 6×10^{-5} 浓度下实现了近乎 0% 的透射比，与 DASC 系统相结合，最高可实现 63.35% 的光热转换效率。Struchalin 等 [71] 利用自制 DASC 装置对碳基纳米流体的性质进行了探讨。他们研究了不同浓度对于热效率的影响，结果发现当质量浓度为 0.01% 时拥有最大热效率为 96.7%。这种情况主要是因为绝大多数太阳辐射被纳米流体的顶部区域吸收并转化为热量。因此，纳米流体的顶部区域成为整个系统的最热部分，这导致大量热量损失到环境中，而不是传递到底部。Gong 等 [72] 设计一种新型三层圆柱形混合纳米颗粒用于 DASC。 SiO_2 粒子在中间，被内外两层的 Ag 包裹，这种设计可以拓宽吸收带，提高太阳能吸收性能。

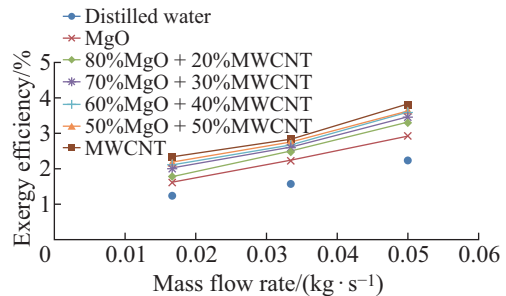


图 5 不同比例混合的纳米流体在 ETSC 的性能 [68]

Fig. 5 Performance of nano fluids mixed in different proportions in ETSC [68]

近几年，碳量子点和等离子体以其优异的性能受到广泛关注。其中碳量子拥有良好的稳定性，使得在 DASC 长期应用中不会损失性能。等离子体的局部表面等离子体共振效应 (LSPR) 使得 DASC 拥有超高的光热转换效率，与其他类型相比极具竞争力。Chen 等 [73] 制备了超稳定的碳量子点纳米流体以用于 DASC，在一个太阳下可以达到 81% 的光热转换效率，在此基础上可以通过改变基液或者与等离子体混合来达到更高的效率。Sun 等 [74] 制备出 $\text{SiO}_2@Au$ 核壳复合纳米棒，发现其有利于提高 DASC 的性能，有着 95.3% 的太阳能吸收能力。进一步探索其几何尺寸，对比了完美、3/4、1/2、1/4 外壳对光吸收能力的影响。结果表明 1/4 壳层只拥有 64.4% 的吸收能力，且核壳大小也会对其产生不同程度的影响。Bårdsgård 等 [75] 通过流体动力学 (CFD) 模型对 DASC 进行数值分析，优化了收集器高度、颗粒浓度和底面特性等参数，将集热器综合性能提高 12%（见图 6）。

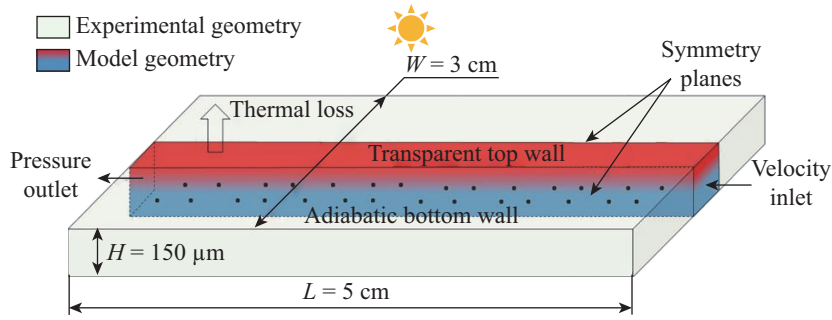


图 6 DASC 装置模型 [75]
Fig. 6 DASC device model [75]

2.1.4 PTSC

太阳能集热器分为聚光型和非聚光型两种类别。PTSC 是聚光型太阳能集热器, 广泛应用于中高温领域。它将太阳能聚集, 并反射到接收器上收集热能。传统的工作流体由水、熔盐和空气组成, 导热性较差, 因此限制了 PTSC 的发展。目前科学家通过研究各种各样的纳米流体来提升它的光热利用。Peng 等 [76] 提出使用液态金属来提高 PTSC 的效率, 研究表明液态金属降低了因温度不均引起的热应力, 提高了安全性。在液态金属中添加纳米颗粒, 可以进一步提高热性能。同时对比了两种纳米颗粒, 发现添加了 CNT 纳米颗粒的热力学性能优于 Cu 纳米颗粒。Hosseini 等 [77] 将 GO 和 Al₂O₃ 分别制备成两种水基纳米流体, 发现 GO 血小板状的颗粒形状拥有更高的热导率, 而 Al₂O₃ 由于尺寸较小, 颗粒之间存在空隙导致热导率较低。随后测试了纳米流体在不同流速下对 PTSC 的影响, 发现 GO 在高流速下效率降低, 主要是因为 GO 纳米流体的高黏度影响, 相反 Al₂O₃ 在高流速下有着更好的性能。Martínez-Merín 等 [78] 将 MoS₂ 基纳米流体代替传统导热油用于 PTSC 中, 研究发现 MoS₂ 的引入并没有增加流体黏度, 与导热油相比, 纳米流体的等压比热增加高达 13%, 热导率增加 6%, PTSC 整体效率提高 5% (见图 7)。

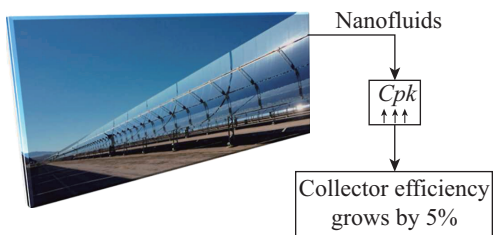


图 7 PTSC 装置 [78]
Fig. 7 PTSC device [78]

2.2 光伏热系统

太阳能利用方式一般分为光热转化和光电转换两种。光伏热系统结合了光热和光电利用, 同时产生热能和电能。纳米流体在光伏热系统中起到冷却滤光器的作用。Lee 等 [79] 搭建了一个光伏热系统如图 8(a) 所示, 将 Cu 与 Al₂O₃ 两种纳米流体放到光伏热系统进行性能研究, 发现这两种纳米流体的热效率与水相比, 分别提高了 21.30% 和 15.4%。Abdelrazik 等 [80] 评估使用 Ag 纳米流体对光伏热系统的性能影响。结果发现透射率随着纳米颗粒浓度和纳米流体高度的增加而降低。这对单个光伏系统是有利的,

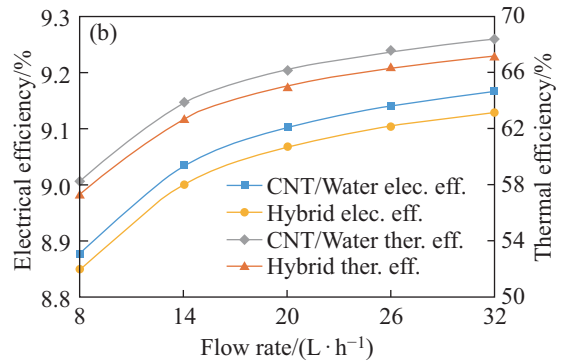
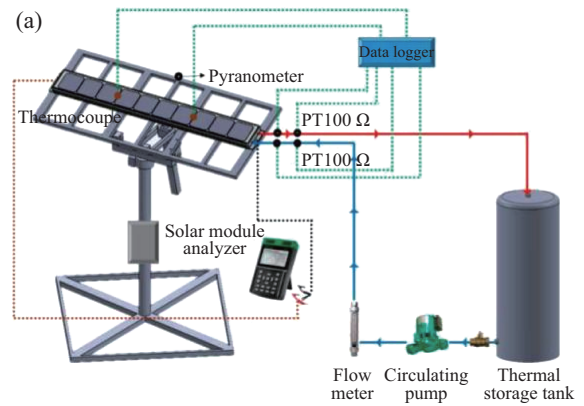


图 8 (a) 光伏热系统 [79]; (b) 质量流速对热电效率的影响 [25]
Fig. 8 (a) Photovoltaic thermal system [79]; (b) effect of mass flow rate on thermoelectric efficiency [25]

但是流体浓度和高度的增加会导致混合光伏热系统只有在高温度和高辐射的情况下才有更多的电能产出。质量流速对于透射率没影响,增加流速会更有利于提高电效率。Moghaddam 等^[25]研究混合纳米流体与单一纳米流体对于光伏热系统的影响。图8(b)所示为在20 L/h流速下,采用CNT纳米流体的系统电效率、热效率和摩擦因数比使用Ag-MgO纳米流体分别高出0.03%、0.89%和53%。虽然CNT纳米流体提高了系统效率,但却由于摩擦因数和压降的增加导致泵送功率增加造成能量损失。混合纳米流体的性能虽然略逊于CNT纳米流体,但使液压系统的性能得到改善。Walshe 等^[81]研究发现由不同尺寸的Ag纳米颗粒组成的纳米流体对太阳能的吸收提高50.4%,可以额外增加光伏热系统产生的热能。

2.3 太阳能海水淡化

目前,全球水资源匮乏,太阳能海水淡化是缓解淡水问题的有效措施。低下的传热效率是制约太阳能海水淡化发展的关键因素。纳米流体具有较高的吸收能力和导热效率,可以显著提高光热转换效率,因而被广泛运用于太阳能海水淡化领域。Meng 等^[82]制备了碳化钨纳米流体,并设计了一种新型海水淡化装置。通过测试发现碳化钨纳米流体的淡化能力明显优于水,而且新型装置会进一步提高其光热转换能力。经实验测试,质量分数0.3%的碳化钨纳米流体在1 cm穿透距离内性能最佳,近乎吸收100%的太阳光,光热转换效率为97.7%。Abdelgaied 等^[83]使用CuO纳米流体用在自制的半球形蒸馏器中以提高光热效率,同时有效地降低了成本。Parsa 等^[84]首次在高原地区使用太阳能蒸馏器,并利用Ag纳米粒子的抗菌性和紫外线消毒进一步净化水源。

海水淡化中不仅要提高光热效率,而且还要考虑盐污的危害。Li 等^[85]制备了由疏水性MXene/Poly(dimethylsiloxane)涂层和亲水性聚乳酸/TiO₂纳米流体多孔纤维膜组成的光热多孔纤维膜,在一个太阳照射下,达到60%的光热效率。由于纳米流体的排盐性,脱盐率高达99.95%,抗菌活性高达100%。Peng 等^[86]通过在亲水棉织物上不成比例地沉积光热MXene纳米片,成功制备出可重复利用、抗菌的不对称纳米流体光热蒸发器,在进行海水蒸发的同时进行发电。在1次太阳照射下,

拥有83.1%光热效率和产生363 mV电压。

2.4 热能存储

虽然太阳能资源取之不尽,用之不竭,但是属于间歇性能源。热能储存技术可以充分有效地利用太阳能。常用的储能介质是熔盐,因其成本低,良好的阻燃性,被人们广泛使用。Nithiyantham 等^[87]采用SiO₂来研究熔盐纳米流体的热物理性质。结果发现,大尺寸的纳米流体具有高稳定性却影响了热导率,所以优化尺寸也是增强热性能的一种途径。Li 等^[88]探索纳米颗粒引入导致流体比热容增高的机制,结果发现,纳米流体内颗粒与基液之间强相互作用是比热容增大的真正原因。但是高温下熔盐会对热能存储系统发生腐蚀,通过引入纳米粒子可以降低腐蚀速率,碳钢在添加纳米颗粒的二元硝酸盐中的腐蚀速率降低了3倍^[89]。Singh 等^[90]提出“纳米流体填充外壳”作为潜在的光热能转换和显热存储设备,描述了体积分数对其传导机制的影响,肯定了未来广泛的应用空间。Rong 等^[91]制备了复合纳米流体,使热导率提高了31%,并从分子动力学基础上解释了强化传热机制。

太阳能池塘是一个由盐水组成的池塘,收集和储存太阳能。而其中的盐被用来产生盐度梯度,防止热量损失。经研究人员发现,纳米流体的应用使得太阳能池的整体效率得到提高。Al-Nimr 等^[92]设计了一种新型两层太阳能池。池塘上层为矿物油,用作绝缘体,下层为纳米流体,充当热能存储。通过建立数学模型模拟,纳米流体池比传统盐水池的储存能量高出两倍。遏制太阳能池塘发展的主要是下层储热效率低,Beiki 等^[93]研究3种不同颗粒(SiO₂、Fe₃O₄和ZnO)分别在不同浓度下的性能状况,发现浓度为0.06%的ZnO纳米流体性能最好。Appadurai 等^[94]使用数值模拟Al₂O₃纳米流体在浅水池的应用,随着浓度的增加太阳能池的导热系数不断增加,同时提高流速也会增加整体效率,最大效率为27.55%。

2.5 其他

广泛的太阳光谱中,植物光合作用所需的光谱在300~800 nm范围,剩下的会对室内产生多余的热量,不利于植物的生长。Yuan 等^[95]利用纳米流体作为光谱分频器,把不利的光谱加以吸收。这样不仅可以保证植物生长,降低温度,还可以将以此产生的热能供给温室。并且探究了纳米流体的厚度对

太阳能利用的影响,厚度的增加导致透射率降低,影响光利用,但加强了光热效率。综合来看,10 mm 厚度的效果较好。同时流速不会改变流体的透射率,因此光利用率基本没有改变,但高流速可以提高热效率。Sajid 等^[96]将光伏热系统与温室结合起来,纳米流体被放置到温室房顶,过滤红外射线并将其转换为电能和热能,其中电能为温室提供能量,热能输送给海水淡化生产淡水,最终实现温室自给自足

(见图9)。

Shen 等^[97]研究将纳米流体用于太阳能照明/加热系统。该系统需要利用纳米流体对可见光的高透明和对红外的高吸收特性,选择了氧化锡锑(ATO)纳米流体满足以上要求。该系统的透光效率为19.5%,与目前的太阳能照明系统相同,并额外提供25.35%的光热转换效率,可满足人们生活热水的需求。

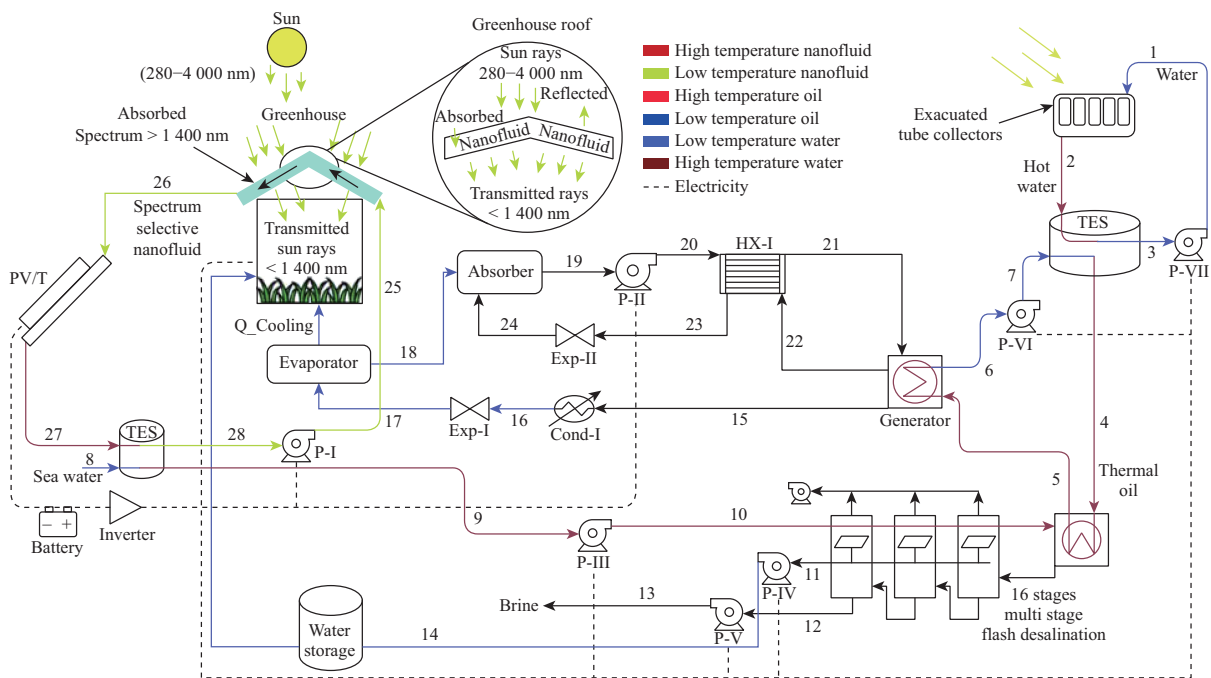


图9 光伏热和温室的混合系统示意图^[96]

Fig. 9 Schematic diagram of hybrid system of photovoltaic thermal system and greenhouse^[96]

3 挑战

纳米流体虽然有着优异的特性,但需要注意其中纳米颗粒的危害性。随着纳米材料的广泛应用,不可避免的进入到环境当中。纳米颗粒在大气、土壤及水体中迁移、累积和相互作用,对生物产生不同程度的影响。Shi 等^[98]研究 ZnO 纳米颗粒对环境的潜在风险,发现其破坏土壤酸碱平衡,抑制植物生长。研究人员探究了接触纳米颗粒对人体的健康影响。Miller 等^[99]研究发现纳米颗粒会诱导炎症,损坏人体健康。Luo 等^[100]综述了关于 TiO₂ 对人体的健康危害,并阐述了毒性机理。Pourahmad 等^[101]研究发现吸入 CuO 纳米颗粒会对人体的红细胞造成损害。但是现在对于纳米颗粒对人体危害还需要进一步了解,评估其对整个环境的影响,并制定相关策略以降低纳米颗粒的未知风险性。

纳米流体在实际应用中可能会面临成本高、稳

定性差以及能效低的挑战。首先,在制备纳米颗粒的过程中为获得高性能的收益通常要牺牲成本。研究者们通过改善制备流程,替代组合等方法来降低经济成本。Esfe 等^[102]通过多目标优化的方法在保证热性能同时降低成本。Karthikeyan 等^[103]通过对纳米流体的应用案例进行经济分析,结果发现高生产成本(382 美元/kg)、维护成本和泵送电力成本等是造成系统经济不可持续的原因。纳米流体的稳定性是影响太阳能应用的关键,流体沉降会导致管道堵塞和磨损。Sharaf 等^[104]制备出了超稳定等离子纳米流体,可以在 16 个月内保持稳定。颗粒的尺寸和形状也会影响系统的性能。受温度影响,大尺寸的颗粒在中低温应用中有很好的表现,而小尺寸更适合高温应用。纳米流体浓度增加虽然有利于提高光热性能,但是会提高整体能耗。Mohammad 等^[105]研究发现随着浓度的增加,导致流体黏度增加、摩擦压降增大,因此提高了泵送功率。图 10 所示为泵

送功率与系统的每日电力成本之间的关系。因此,通过选择合适的浓度来达到效率与能耗之间的平衡。若要在系统中获得最佳效益,需要不断调整性能参数。

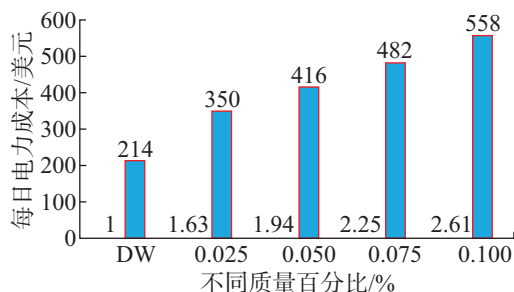


图10 相对泵送功率和每天使用不同质量百分比的基础流体和纳米流体的电力成本^[105]

Fig. 10 Relative pumping power and power cost of using different mass percentages of base fluid and nanofluid per day^[105]

4 结论

本文重点阐述纳米流体的光学和热学特性,并介绍了不同纳米流体在不同太阳能应用中的效果和面临的挑战。在上述文献的基础上,总结出以下要点:

(1) 与传统流体相比,纳米流体作为新一代工作流体可以明显改善光热性能,提高太阳能系统整体效率。

(2) 太阳能集热器的效率随着纳米流体的浓度增加而增加,但是进一步增加浓度,性能反而下降。这些结果为纳米流体的浓度存在最佳值提供了依据。

(3) 在太阳能系统中,调节质量流速会影响系统的光热效率,高流速虽然会提高光热效率,但也会增加系统整体能耗。

(4) 纳米流体的成本、稳定性、安全性以及自身属性的选择是应用在太阳能系统中需要考虑的问题,也是纳米流体能否走上工业化道路的重要因素。

(5) 在未来应用中,研究者们需要更进一步评估纳米流体在太阳能应用中的生命周期,重视系统经济的可持续性。

参考文献:

[1] LI G, LI M, TAYLOR R, et al. Solar energy utilisation: Current status and roll-out potential [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 209: 118285.

[2] SUN X D, JIANG S Y, HUANG H W, et al. Solar energy catalysis [J]. *Angewandte Chemie*, 2022, 61(29): 202204880.

[3] MARTÍNEZ-MERINO P, ALCÁNTARA R, GÓMEZ-LARRÁN P, et al. MoS₂-based nanofluids as heat transfer fluid in parabolic trough collector technology [J]. *Renewable Energy*, 2022, 188: 721-730.

[4] ZHANG L, TIAN L C, JING Y Y, et al. Molecular dynamics study on the mechanism of nanofluid coolant's thermal conductivity improvement [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 345: 118228.

[5] KOUTRAS K N, ANTONELOU A E, NAXAKIS I A, et al. In-situ high temperature study of the long-term stability and dielectric properties of nanofluids based on TiO₂ and SiC dispersions in natural ester oil at various concentrations [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 359: 119284.

[6] CHOI S U S, EASTMAN J. *Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles* [C]. San Francisco, [s.n.], 1995.

[7] GÜRBÜZ E Y, KEÇEBA A, SÖZEN A. Exergy and thermoeconomic analyses of the diffusion absorption refrigeration system with various nanoparticles and their different ratios as work fluid [J]. *Energy*, 2022, 248: 123579.

[8] AHMED F. Experimental investigation of Al₂O₃-water nanofluid as a secondary fluid in a refrigeration system [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, 26: 101024.

[9] SONG Y D, MA X, WANG Y, et al. Amelioration of boiling heat transfer by 3D deposition structure of graphene-silver hybrid nanoparticle [J]. *Energy Conversion and Management*: X, 2021, 12: 100109.

[10] ZHOU J Y, LUO X P, HE B L, et al. Comprehensive evaluation of graphene/R141b nanofluids enhanced heat transfer performance of minichannel heat sinks [J]. *Powder Technology*, 2022, 397: 116997.

[11] NANDHINI R, SIVAPRAKASH B, RAJAMOCHAN N. Waste heat recovery at low temperature from heat pumps, power cycles and integrated systems: Review on system performance and environmental perspectives [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, 52: 102214.

[12] FAROOQ U, WAQAS H, IMRAN M, et al. On melting heat transport and nanofluid in a nozzle of liquid rocket engine with entropy generation [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 14: 3059-3069.

[13] MATHEKGA B S P, NXUMALO Z, RAJ D B T G. Chapter four-micro and nanofluidics for high throughput drug screening [J]. *Progress in Molecular Biology and*

- Translational Science, 2022, 187(1): 93-120.
- [14] KHORAMIAN R, KHARRAT R, GOLSHOKOOH S. The development of novel nanofluid for enhanced oil recovery application [J]. Fuel, 2022, 311: 122558.
- [15] CUI X B, SUN N N, CAO P C, et al. Preparation and application of sustainable nanofluid lubricant from waste soybean oil and waste serpentine for green intermittent machining process [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 77: 508-524.
- [16] SAYED E A, FATHY M. Numerical study of flow and heat transfer of a nanofluid past a vertical cone [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2022, 34: 102038.
- [17] SEIFIKAR F, AZIZIAN S. Super-stable carbon quantum dots nanofluid for efficient solar-thermal conversion [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 228: 113675.
- [18] GAO J Q, YU W, XIE H Q, et al. Graphene-based deep eutectic solvent nanofluids with high photothermal conversion and high-grade energy [J]. Renewable Energy, 2022, 190: 935-944.
- [19] GUO H R, LIU W, SHU Q W, et al. Full-spectrum photothermal conversion of plasmonic LaB₆ nanofluids [J]. Materials Letters, 2022, 308: 131261.
- [20] MASHHADIAN A, HEYHAT M M, MAHIAN O. Improving environmental performance of a direct absorption parabolic trough collector by using hybrid nanofluids [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 244: 114450.
- [21] MAHAMUDE A S F, HARUN W S W, KADIRGAMA K, et al. Thermal performance of nanomaterial in solar collector: State-of-play for graphene [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 42: 103022.
- [22] GHALAMBAZ M, MEHRYAN S A M, HAJJAR A, et al. Thermal charging optimization of a wavy-shaped nano-enhanced thermal storage unit [J]. Molecules, 2021, 26(5): 1496.
- [23] ZAKARIA M, SHARAKY A M, AL-SHERBINI A, et al. Water desalination using solar thermal collectors enhanced by nanofluids [J]. Chemical Engineering & Technology, 2022, 45(1): 15-25.
- [24] ISHII S, SUGAVANESHWAR R P, NAGAO T. Titanium nitride nanoparticles as plasmonic solar heat transducers [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2016, 120(4): 2343-2348.
- [25] MOGHADDAM M H, KARAMI M. Heat transfer and pressure drop through mono and hybrid nanofluid-based photovoltaic-thermal systems [J]. Energy Science & Engineering, 2022, 10(3): 918-931.
- [26] BALAKIN B V, STAVA M, KOSINSKA A. Photothermal convection of a magnetic nanofluid in a direct absorption solar collector [J]. Solar Energy, 2022, 239: 33-39.
- [27] CHATURVEDI K R, FOGAT M, SHARMA T. Low temperature rheological characterization of single-step silica nanofluids: An additive in refrigeration and gas hydrate drilling applications [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 204: 108742.
- [28] PARSA S M, YAZDANI A, ABEROUMAND H, et al. A critical analysis on the energy and exergy performance of photovoltaic/thermal (PV/T) system: The role of nanofluids stability and synthesizing method [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 51: 101887.
- [29] JOSEPH A, THOMAS S. Energy, exergy and corrosion analysis of direct absorption solar collector employed with ultra-high stable carbon quantum dot nanofluid [J]. Renewable Energy, 2022, 181: 725-737.
- [30] ZHENG N B, WANG L, SUN Z Q. The effects of ultrasonication power and time on the dispersion stability of few-layer graphene nanofluids under the constant ultrasonic energy consumption condition [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 80: 105816.
- [31] QI C, WANG G Q, MA Y F, et al. Experimental research on stability and natural convection of TiO₂-water nanofluid in enclosures with different rotation angles [J]. Nanoscale Research Letters, 2017, 12: 396.
- [32] WANG J, LI G L, LI T, et al. Effect of various surfactants on stability and thermophysical properties of nanofluids [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2021, 143: 4057-4070.
- [33] WANG L L, WANG M, XU Z P, et al. Well oil dispersed Au/oxygen-deficient TiO₂ nanofluids towards full spectrum solar thermal conversion [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2020, 212: 110575.
- [34] CHOI T J, KIM S H, JANG S P, et al. Aqueous nanofluids containing paraffin-filled MWCNTs for improving effective specific heat and extinction coefficient [J]. Energy, 2020, 210: 118523.
- [35] BINDU M V, HERBERT G M J. Experimental investigation of stability, optical property and thermal conductivity of water based MWCNT-Al₂O₃-ZnO mono, binary and ternary nanofluid [J]. Synthetic Metals, 2022, 287: 117058.
- [36] HAN X Y, ZHAO X B, HUANG J, et al. Optical properties optimization of plasmonic nanofluid to enhance the performance of spectral splitting photovoltaic/thermal systems [J]. Renewable Energy, 2022, 188: 573-587.
- [37] HOSSEINI S M S, AYAR D, TALEBIZADEH A, et al. An experimental investigation on the solar-thermal energy conversion performance of Fe₂O₃ nanofluid with the focus on nanoparticles shape and concentration [J]. International Journal of Energy Research, 2022, 46: 6126-

- 6143.
- [38] WANG L L, ZHU G H, WANG M, et al. Dual plasmonic Au/TiN nanofluids for efficient solar photothermal conversion [J]. *Solar Energy*, 2019, 184: 240-248.
- [39] WANG D B, JIA Y L, HE Y, et al. Photothermal efficiency enhancement of a nanofluid-based direct absorption solar collector utilizing magnetic nano-rotor [J]. *Energy Convers Manag*, 2019, 199: 111996.
- [40] ZHU G H, WANG L L, BING N C, et al. Enhancement of photothermal conversion performance using nanofluids based on bimetallic Ag-Au alloys in nitrogen-doped graphitic polyhedrons [J]. *Energy*, 2019, 183: 747-755.
- [41] HAZRA S K, MICHAEL M, NANDI T K. Investigations on optical and photo-thermal conversion characteristics of BN-EG and BN/CB-EG hybrid nanofluids for applications in direct absorption solar collectors [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2021, 230: 111245.
- [42] MURSHED S M S, LEONG K C, YANG C. Enhanced thermal conductivity of TiO₂-water based nanofluids [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2005, 44: 367-373.
- [43] ZHANG L, ZHANG A L, JING Y Y, et al. Effect of particle size on the heat transfer performance of SiO₂-water nanofluids [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2021, 125(24): 13590-13600.
- [44] MAIN K L, EBERL B K, MCDANIEL D, et al. Nanoparticles size effect on thermophysical properties of ionic liquids based nanofluids [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2021, 343: 117609.
- [45] TIMOFEEVA E V, SMITH D S, YU W H, et al. Particle size and interfacial effects on thermo-physical and heat transfer characteristics of water-based alpha-SiC nanofluids [J]. *Nanotechnology*, 2010(21): 215703.
- [46] CUI W, CAO Z H, LI X Y, et al. Experimental investigation and artificial intelligent estimation of thermal conductivity of nanofluids with different nanoparticles shapes [J]. *Powder Technology*, 2022, 398: 117078.
- [47] NFAWA S R, TALIB A R A, BASRI A A, et al. Novel use of MgO nanoparticle additive for enhancing the thermal conductivity of CuO/water nanofluid [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, 27: 101279.
- [48] EZEKWE M C, DARE A. Experimental investigation on viscosity of AlN and SiC nanofluids [J]. *Chemical Engineering Communications*, 2022, 209(2): 229-245.
- [49] ÇOLAK A B. Experimental study for thermal conductivity of water-based zirconium oxide nanofluid: Developing optimal artificial neural network and proposing new correlation [J]. *International Journal of Environmental Research*, 2021, 45: 2912-2930.
- [50] JUDRAN H K, AL-HASNAWI A G T, AL-ZUBAIDI F N, et al. High thermal conductivity of MgO-H₂O nanofluid prepared by two-step technique [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(5): 2655.
- [51] LI Z X, ASADI S, KARIMIPOUR A, et al. Experimental study of temperature and mass fraction effects on thermal conductivity and dynamic viscosity of SiO₂-oleic acid/liquid paraffin nanofluid [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2020, 110: 104436.
- [52] JABBARI F, RAJABPOUR A, SAEDODIN S. Thermal conductivity of CNT-water nanofluid at different temperatures, volume fractions, and diameters: Experimental investigation and molecular dynamics simulations [J]. *Microfluid Nanofluid*, 2021, 25: 102.
- [53] WANG X J, LI X F. Influence of pH on nanofluids' viscosity and thermal conductivity [J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26: 056601.
- [54] ABU-HAMDEH N H, BANTAN R A R, GOLMOHAMMADZADEH A, et al. The thermal properties of water-copper nanofluid in the presence of surfactant molecules using molecular dynamics simulation [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2021, 325: 115149.
- [55] MA M Y, ZHAI Y L, YAO P T, et al. Effect of surfactant on the rheological behavior and thermophysical properties of hybrid nanofluids [J]. *Powder Technology*, 2021, 379: 373-383.
- [56] NIKKAM N, GHANBARPOUR M, KHODABANDEH R, et al. The effect of particle size and base liquid on thermo-physical properties of ethylene and diethylene glycol based copper micro- and nanofluids [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2017, 86: 143-149.
- [57] BAKTHAVATCHALAM B, HABIB K, SAIDUR R, et al. Influence of solvents on the enhancement of thermo-physical properties and stability of multi-walled carbon nanotubes nanofluid [J]. *Nanotechnology*, 2020, 31(23): 235402.
- [58] VANDRANGI K S, HASSAN S, SHARMA K V, et al. Effect of base fluids on thermo-physical properties of SiO₂ nanofluids and development of new correlations [J]. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 2020, 1-19. DOI: 10.1002/mma.6535.
- [59] KALIDOSS P, VENKATACHALAPATHY S G, SURESH S. Photothermal performance of hybrid nanofluids with different base fluids for solar energy applications [J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2021, 1-16. DOI: 10.1080/15567036.2021.1936697.
- [60] NOGHREHABADI A, HAJIDAVALLOO E, MORAVEJ

- M. Experimental investigation of efficiency of square flat-plate solar collector using SiO_2 /water nanofluid [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2016, 8: 378-386.
- [61] AKRAM N, MONTAZER E, KAZI S N, et al. Experimental investigations of the performance of a flat-plate solar collector using carbon and metal oxides based nanofluids [J]. *Energy*, 2021, 227: 120452.
- [62] AHMADLOUYDARAB M, ANARI T D, AKBARZADEH A. Experimental study on cylindrical and flat plate solar collectors' thermal efficiency comparison [J]. *Renewable Energy*, 2022, 190: 848-864.
- [63] ALKLAIBI A M, SUNDAR L S, SOUSA A C M. Experimental analysis of exergy efficiency and entropy generation of diamond/water nanofluids flow in a thermosyphon flat plate solar collector [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2021, 120: 105057.
- [64] MERCAN M, YURDDA A. Numerical analysis of evacuated tube solar collectors using nanofluids [J]. *Solar Energy*, 2019, 191: 167-179.
- [65] SHARAFELDIN M A, GRÓF G. Efficiency of evacuated tube solar collector using WO_3 /water nanofluid [J]. *Renewable Energy*, 2019, 134: 453-460.
- [66] ABID M, KHAN M S, RATLAMWALA T A H, et al. Thermodynamic analysis and comparison of different absorption cycles driven by evacuated tube solar collector utilizing hybrid nanofluids [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 246: 114673.
- [67] YILDIRIM E, YURDDA A. Assessments of thermal performance of hybrid and mono nanofluid U-tube solar collector system [J]. *Renewable Energy*, 2021, 171: 1079-1096.
- [68] HENEIN S M, ABDEL-REHIM A A. The performance response of a heat pipe evacuated tube solar collector using MgO/MWCNT hybrid nanofluid as a working fluid [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 33: 101957.
- [69] MINARDI J E, CHUANG H N. Performance of a "black" liquid flat-plate solar collector [J]. *Solar Energy*, 1975, 17(3): 179-183.
- [70] WANG H, LI X K, LUO B Q, et al. The MXene/water nanofluids with high stability and photo-thermal conversion for direct absorption solar collectors: A comparative study [J]. *Energy*, 2021, 227: 120483.
- [71] STRUCHALIN P G, YUNIN V S, KUTSENKO K V, et al. Performance of a tubular direct absorption solar collector with a carbon-based nanofluid [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 179: 121717.
- [72] GONG H, SHAO W, MA X T, et al. Absorption properties of a multilayer composite nanoparticle for solar thermal utilization [J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 150: 107914.
- [73] CHEN X Y, XIONG Z K, CHEN M J, et al. Ultra-stable carbon quantum dot nanofluids for direct absorption solar collectors [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2022, 240: 111720.
- [74] SUN C L, ZOU Y, QIN C Y, et al. Solar absorption characteristics of SiO_2 @Au core-shell composite nanorods for the direct absorption solar collector [J]. *Renewable Energy*, 2022, 189: 402-411.
- [75] BÅRDSESGÅRD R, KUZMENKOV D M, KOSINSKI P, et al. Eulerian CFD model of direct absorption solar collector with nanofluid [J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2020, 12: 033701.
- [76] PENG H, GUO W H, LI M L. Thermal-hydraulic and thermodynamic performances of liquid metal based nanofluid in parabolic trough solar receiver tube [J]. *Energy*, 2020, 192: 116564.
- [77] HOSSEINI S M S, DEHAJ M S. An experimental study on energetic performance evaluation of a parabolic trough solar collector operating with Al_2O_3 /water and GO/water nanofluids [J]. *Energy*, 2021, 234: 121317.
- [78] MARTÍNEZ-MERINO P, ALCÁNTARA R, GÓMEZ-LARRÁN P, et al. MoS_2 -based nanofluids as heat transfer fluid in parabolic trough collector technology [J]. *Renewable Energy*, 2022, 188: 721-730.
- [79] LEE J H, HWANG S G, LEE G H. Efficiency improvement of a photovoltaic thermal (PVT) system using nanofluids [J]. *Energies*, 2019, 12(16): 3063.
- [80] ABDELRAZIK A S, SAIDUR R, AL-SULAIMAN F A. Investigation of the performance of a hybrid PV/thermal system using water/silver nanofluid-based optical filter [J]. *Energy*, 2021, 215: 119172.
- [81] WALSHE J, DORAN J, AMARANDEI G. Evaluation of the potential of nanofluids containing different Ag nanoparticle size distributions for enhanced solar energy conversion in hybrid photovoltaic-thermal (PVT) applications [J]. *Nano Express*, 2022, 3(1): 015001.
- [82] MENG Z G, LI Z L, LI Y, et al. Novel nanofluid based efficient solar vaporization systems with applications in desalination and wastewater treatment [J]. *Energy*, 2022, 247: 123513.
- [83] ABDELGAIED M, ATTIA M E H, KABEEL A E, et al. Improving the thermo-economic performance of hemispherical solar distiller using copper oxide nanofluids and phase change materials: Experimental and theoretical investigation [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2022, 238: 111596.
- [84] PARSA S M, RAHBAR A, KOLEINI M H, et al. First

- approach on nanofluid-based solar still in high altitude for water desalination and solar water disinfection (SODIS) [J]. *Desalination*, 2020, 491: 114592.
- [85] LI Y S, WU T, SHEN H, et al. Flexible MXene-based Janus porous fibrous membranes for sustainable solar-driven desalination and emulsions separation [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 347: 131324.
- [86] PENG H Y, WANG D, FU S H. Unidirectionally driving nanofluidic transportation via an asymmetric textile pump for simultaneous salt-resistant solar desalination and drenching-induced power generation [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(32): 38405-38415.
- [87] NITHIYANANTHAM U, ZAKI A, GROSU Y, et al. Effect of silica nanoparticle size on the stability and thermo-physical properties of molten salts based nanofluids for thermal energy storage applications at concentrated solar power plants [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 51: 104276.
- [88] LI Z, CUI L, LI B R, et al. Mechanism exploration of the enhancement of thermal energy storage in molten salt nanofluid [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2021, 23: 13181-13189.
- [89] NITHIYANANTHAM U, GROSU Y, GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ L, et al. Corrosion aspects of molten nitrate salt-based nanofluids for thermal energy storage applications [J]. *Solar Energy*, 2019, 189: 219-227.
- [90] SINGH I, SEHGAL S S, KHULLAR V. Nanofluid filled enclosures: Potential photo-thermal energy conversion and sensible heat storage devices [J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2022, 33: 101376.
- [91] RONG Z Z, DING J, LU J F, et al. Experimental and theoretical investigation of an innovative composite nanofluid for solar energy photothermal conversion and storage [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 52: 104800.
- [92] AL-NIMR M A, AL-DAFAIE A M A. Using nanofluids in enhancing the performance of a novel two-layer solar pond [J]. *Energy*, 2014, 68: 318-326.
- [93] BEIKI H, SOUKHTANLOU E. Improvement of salt gradient solar ponds' performance using nanoparticles inside the storage layer [J]. *Applied Nanoscience*, 2019, 9: 243-254.
- [94] APPADURAI M, RAJ E F I, JENISH I. Application of aluminium oxide-water nanofluids to augment the performance of shallow pond: A numerical study [J]. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 2022, 6: 211-222.
- [95] YUAN Y, FANG H, WU G, et al. Experimental investigation of full solar spectrum utilization based on nanofluid spectral splitter for greenhouse applications [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 254: 115215.
- [96] SAJID M U, BICER Y. Performance assessment of spectrum selective nanofluid-based cooling for a self-sustaining greenhouse [J]. *Energy Technology*, 2021, 9(1): 2000875.
- [97] SHEN C, LV G Q, WEI S, et al. Investigating the performance of a novel solar lighting/heating system using spectrum-sensitive nanofluids [J]. *Applied Energy*, 2020, 270: 115208.
- [98] SHI Y, XIAO Y M, LI Z Q, et al. Microorganism structure variation in urban soil microenvironment upon ZnO nanoparticles contamination [J]. *Chemosphere*, 2021, 273: 128565.
- [99] MILLER M R, POLAND C A. Nanotoxicology: The need for a human touch? [J]. *Small*, 2020, 16(36): 2001516.
- [100] LUO Z, LI Z Q, XIE Z, et al. Rethinking nano-TiO₂ safety: Overview of toxic effects in humans and aquatic animals [J]. *Small*, 2020, 16(36): 2002019.
- [101] POURAHMAD J, SALAMI M, ZAREI M H. Comparative toxic effect of bulk copper oxide (CuO) and CuO nanoparticles on human red blood cells [J]. *Biological Trace Element Research*, 2022. DOI: 10.1007/s12011-022-03149-y.
- [102] ESFE M H, HAJMOHAMMAD H, MORADI R, et al. Multi-objective optimization of cost and thermal performance of double walled carbon nanotubes/water nanofluids by NSGA-II using response surface method [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 112: 1648-1657.
- [103] KARTHIKEYAN A, RAPHAEL W, TAVARES J R. Nanofluids as heat transfer fluids: Hurdles to industrial application and economic considerations [J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2022, 100(11): 3311-3320.
- [104] SHARAF O Z, RIZK N, JOSHI C P, et al. Ultrastable plasmonic nanofluids in optimized direct absorption solar collectors [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 199: 112010.
- [105] MOHAMMAD R S, ALDLEMY M S, HASSAN M S A, et al. Frictional pressure drop and cost savings for graphene nanoplatelets nanofluids in turbulent flow environments [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(11): 3094.