

碳系复合纳米流体于光伏/光热集热器中的应用

勾昱君, 赵海川, 安越, 符永琪

(华北理工大学 冶金与能源学院, 河北 唐山 063200)

摘要: 与其他纳米流体相比,碳系纳米流体具有较高的传热系数,且价格较为低廉,其中石墨烯纳米流体具有较高的传热系数,但稳定性较差,而还原氧化石墨烯纳米流体具有较好的稳定性。文章通过两步法研发了一种新型的碳系复合纳米流体(水基石墨烯/还原氧化石墨烯复合纳米流体)作为光伏/光热集热器中的传热介质,分析了辐射强度、流速以及纳米流体的复合比例对光伏/光热集热器出口水温的影响。实验结果表明:辐射强度越高,流速越快,光伏/光热集热器出口水温越高,纳米流体的传热效果越佳;当复合比例为 8:2 时,纳米流体的传热效果最佳,光伏/光热系统的热效率和电效率分别为 23.49%和 20.18%。相较于水基石墨烯和还原氧化石墨烯纳米流体,文章研发的复合纳米流体传热效果更佳。该研究为碳系纳米流体作为传热介质提供实用参考。

关键词: 光伏/光热; 纳米流体; 复合比例; 液冷型

中图分类号: TK519 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2025)04-0449-09

0 引言

光伏/光热 (Photovoltaic/Thermal, PV/T) 集热器是一种太阳能利用装置,该装置以固体、液体或者相变材料等作为工作介质,收集和传递光伏电池光伏特效应产生的热量以及 PV/T 集热板吸收太阳辐射的热量,降低 PV/T 集热板的温度,进而提高光伏电池的发电效率。由于额外利用了热量,PV/T 系统比光伏 (Photovoltaic, PV) 系统有着较高的太阳能利用率。光伏/光热集热器工作介质的导热系数对热量的传输起关键作用。由有效介质理论可知,通常情况下固体的导热系数比液体的导热系数高。因此 Maxwell J C 通过在传热介质中增加固体颗粒来提高这种悬浮液的传热性能^[1]。随着纳米技术的发展,1995 年 Choi S U S 在 Maxwell J C 理论的基础上首次提出“纳米流体”的概念^[2],在传热介质中加入纳米级金属颗粒,大幅提升传热介质的传热能力。21 世纪以来,学者们发现碳系纳米流体比其他纳米流体具有更高的传热系数,因此,碳系物质逐渐成为研制纳米流体的主要介质颗粒^[3]。

Askari S 研发了质量分数为 0.1%~0.5%的水基多孔石墨烯纳米流体,研究表明其稳定性可保持 2 个月,且石墨烯质量分数为 0.1%时,热导率提升了 16%^[4]。Ghozatloo A 研发了质量分数为

0.07%的硅油基官能化石墨烯纳米流体,当温度为 20~60 °C 时,其热导率提高 0.07%~18.9%^[5]。Alous S 研发了质量分数为 0.05%的水基石墨烯纳米流体,分别在 PV 系统和 PV/T 系统进行对比,研究表明,使用其纳米流体的 PV/T 系统综合效率比 PV 系统提高了 22.4%^[6]。

综上所述,学者对石墨烯纳米流体进行了大量的研究,并逐渐开始应用于 PV/T 系统。水基石墨烯具有较高的传热系数,但稳定性差;水基还原氧化石墨烯稳定性较好,但传热系数较低。对于如何发挥二者优点并应用于 PV/T 系统的研究相对较少。为此,本文使用两步法研发了一种水基石墨烯/还原氧化石墨烯复合纳米流体,并研究其对 PV/T 系统光电效率、光热效率和综合效率的影响,结果表明,其综合效果超越单一水基石墨烯纳米流体。

1 实验平台介绍

PV/T 集热系统实验平台如图 1 所示。其原理如图 2 所示。

由图 2 可知,构建的 PV/T 集热系统主要由平板式太阳能 PV/T 集热器、氙灯、循环水箱、流量计、温度计、循环水泵等组成。

本文采用型号为 EN450-36V-MH 的光伏/光热一体板,几何尺寸为 1 038 mm×2 094 mm×41 mm,

收稿日期: 2023-12-27。

基金项目: 北京市自然科学基金(3172040);中国科学院战略性先导科技专项资助。

作者简介: 勾昱君(1978-),女,博士,副教授,主要从事制冷节能、光伏热泵与储能系统的研究。E-mail:hbtsygyj2008@163.com



图1 PV/T 系统实验平台
Fig.1 PV/T system experimental platform

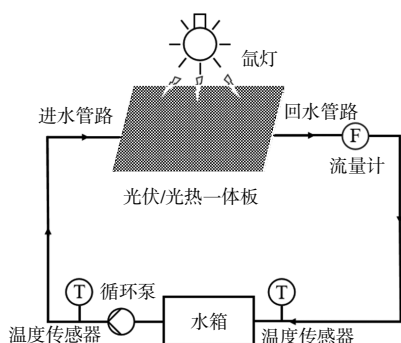


图2 PV/T 原理图
Fig.2 PV/T schematic diagram

集热面积为 2.17 m²。其他参数见表 1。

表 1 PV/T 集热板参数

Table 1 The performance parameters of PV/T collector

参数	数值
最大功率/W	450
额定电压/V	41.5
额定电流/A	10.85
开路电压/V	49.3
短路电流/A	11.6
最大系统电压/V	1 500
最大反向电流/A	20

PV/T 集热器的结构如图 3 所示。

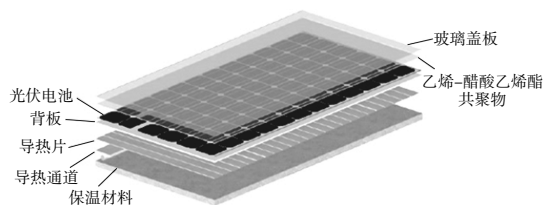


图3 光伏/光热组件示意图

Fig.3 Schematic diagram of PV/T components

该 PV/T 集热器采用的是“工”型管道布局, 相邻两根管道的间距为 100 mm, 如图 4 所示。

PV/T 集热系统实验平台的氙灯模拟太阳, 为实验过程提供稳定光源。氙灯模拟的太阳辐射到

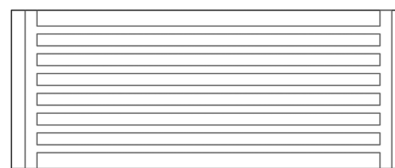


图4 PV/T 集热器管道布局

Fig.4 PV/T collector piping layout

达 PV/T 集热器后, 大部分被光伏/光热一体板吸收、转化为电能和热能。其中热能被背板里的工作介质吸收、储存, 通过循环水泵将热量储存于循环水箱中, 从而降低光伏板的温度, 提高发电效率。

实验使用的仪器如表 2 所示。

表 2 测量仪器

Table 2 Measuring instruments

名称	型号	量程	精度
太阳辐射仪	SM206E-SOLAR	0.1~1999 W/m ²	±10%
电子涡轮流量计	LWGY-15	0.01~999 L/min	±0.5%
数显温度计	GJD-200	-50~200 °C	±0.1 °C
温度传感器	PT100	-50~420 °C	±0.1 °C

2 水基石墨烯/还原氧化石墨烯复合纳米流体配制

2.1 碳系纳米颗粒选择

碳系材料在紫外波段至近红外波段均有较好的光吸收特性^[7], 因此碳系纳米流体的光热转换性能相较于传统流体具有更好的光热转换效应。目前, 市面上常见的碳系材料为石墨烯、氧化石墨烯、碳纳米管等。本文采用石墨烯、还原氧化石墨烯和碳纳米管进行初步的研究。碳系材料的制备方法^[8]主要分为振荡法、氧化还原法和气相沉积法。本文采用振荡法配制纳米流体。

实验以去离子水为基液, 聚乙烯吡咯烷酮 K30 (Polyvinyl Pyrrolidone K30, PVP K30) 为分散剂, 分别以石墨烯、还原氧化石墨烯、碳纳米管为纳米固体颗粒, 依次通过电子天平称重, 磁力搅拌器搅拌均匀, 超声波清洗机将纳米固体颗粒均匀分散于悬浮液, 配制出碳系纳米流体。

分别称取 0.02 g 石墨烯、还原氧化石墨烯、碳纳米管与 0.04 g PVP K30 混合一体, 与 19.94 mL 去离子水充分混合搅拌, 期间保持水温在室温范围内, 避免由于高温引发的纳米颗粒团聚^[9]。充分搅拌 1 h 后将悬浊液放入超声波清洗机中, 超声振荡 2 h 后即可得到质量分数为 0.1% 的水基碳系纳米流体。

稳定持续时长是纳米流体测试中重要的一环。通常测试纳米流体的稳定性有直接和间接两种方式。直接法一般为目视沉降法、Zeta 电位测试法、电镜法和分光光度法,这些都是通过直接观察纳米流体稳定性的相关参数来判别纳米流体的稳定性。目视沉降法是用眼睛直接观察纳米流体的沉降情况;固体颗粒之间存在斥力和引力,可以用电位反映固体颗粒之间的斥力和引力的大小,电位值越高,纳米流体越稳定,Zeta 电位测试就是通过测量这个电位来表示纳米流体的稳定性;电镜法是指利用扫描电镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 或透射电镜 (Transmission Electron Microscope, TEM) 等观测纳米流体中固体颗粒的分布与团聚情况;分光光度法一般用于固体颗粒有吸光特性的纳米流体,观测某种波长光照射纳米流体后被纳米流体吸收的强弱来判断其吸光物质的浓度与稳定性。间接法一般为导热系数测量法和流变法,这两种方式都是在某些不便于直接观察或辅助验证时,可通过测量其参数来判断。导热系数和流变特性均为稳定性的相关参数。导热系数测量法是利用导热系数测量仪测量纳米流体的导热系数的变化来判断纳米流体的稳定性,导热系数越高,纳米流体越稳定,导热系数越低,纳米流体越容易沉降。流变法是利用旋转流变仪测量纳米流体的粘度来判断纳米流体的稳定性,在一定范围内,粘度越大,纳米流体越稳定,粘度越小,纳米流体越容易沉降。一般可采用直观法与间接法相验证的方式来综合判断纳米流体的稳定性。由于是初步选定,故本文选择目视沉降法来判断稳定性。

配制后的溶液经过 7 d 的静置实验后,结果如图 5 所示。

由图 5 可知,稳定性大小为水基石墨烯纳米流体<水基碳纳米管<水基还原氧化石墨烯。比较导热系数,还原氧化石墨烯 $1\ 280\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ <碳纳米管 $3\ 000\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ <石墨烯 $5\ 000\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,因此本文选用石墨烯和还原氧化石墨烯作为复合纳米流体的纳米固体颗粒,将石墨烯的高导热性与还原氧化石墨烯的高稳定性相结合。

2.2 复合纳米流体的配制

使用上述相同的配制方法配制水基石墨烯/还原氧化石墨烯复合纳米流体。通过不同复合比



图 5 水基碳系纳米流体静置 7 d

Fig.5 Water-based carbon-based nanofluid is allowed to stand for 7 days

1-水基石墨烯纳米流体;2-水基还原氧化石墨烯纳米流体;3-水基碳纳米管纳米流体

例的石墨烯与还原氧化石墨烯来配制质量分数为 0.05%的复合纳米流体。配制后经过 7 d 的静置实验后,结果如图 6 所示。7 d 内没有发生严重沉降现象,稳定性较好。



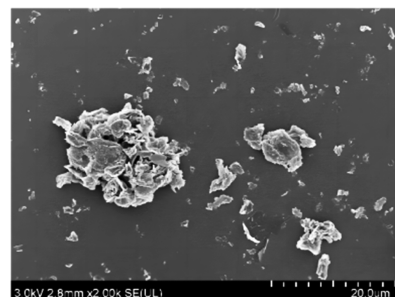
图 6 不同复合比例石墨烯/还原氧化石墨烯复合纳米流体静置 7 d

Fig.6 Graphene/reduced graphene oxide composite nanofluids with different compound proportions were left standing for 7 days

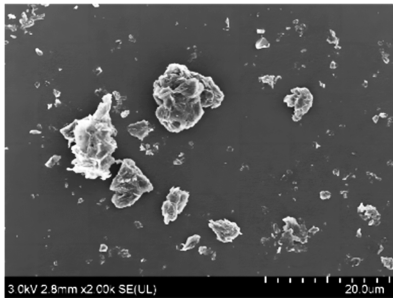
1-复合比例 9:1;2-复合比例 8:2;3-复合比例 7:3;4-复合比例 6:4;5-复合比例 5:5;6-复合比例 4:6;7-复合比例 3:7;8-复合比例 2:8;9-复合比例 1:9

石墨烯与还原氧化石墨烯比例为 10:0 和 8:2 的 SEM 图如图 7 所示。

由图 7 可知,在石墨烯纳米流体中添加还原氧化石墨烯可以改善纳米流体中固体颗粒的分布情况,固体颗粒更均匀地分散在悬浮液之中,团聚较小。



(a)石墨烯/还原氧化石墨烯比例为 10:0



(b) 石墨烯/还原氧化石墨烯比例为 8:2

图 7 石墨烯/还原氧化石墨烯 SEM 图

Fig.7 Graphene/reduced graphene oxide SEM image

不同复合比例石墨烯/还原氧化石墨烯的粘度大小如表 3 所示。由表 3 可知,复合比例为 8:2 时纳米流体的粘性最大,复合比例为 0:10 时纳米流体的粘度最低。结合图 5~7 和表 3 可知,在石墨烯纳米流体中增加少量还原氧化石墨烯可增强纳米流体的稳定性,当复合比例为 8:2 时纳米流体的稳定性最佳。

表 3 不同复合比例石墨烯/还原氧化石墨烯复合纳米流体粘度

Table 3 Viscosity of graphene/reduced graphene oxide composite nanofluids with different compound proportions

石墨烯/还原氧化石墨烯复合比例	粘度/ 10^{-3} Pa·s
10:0	3.20
8:2	3.52
6:4	3.20
4:6	2.88
2:8	2.56
0:10	2.88

3 实验测试及结果分析

本文的实验平台搭建于华北理工大学 D7 实验室中,实验时间为 2023 年 06-10 月,数据采集时间为 3 h,间隔为 20 min。

3.1 评价方法

当太阳辐射投射到 PV/T 系统上时,一部分太阳辐射被玻璃盖板吸收、反射,另一部分则透过玻璃盖板,透过玻璃盖板的部分太阳辐射能被光伏电池吸收利用后转化为电能,其余部分转化为热能,这些热能的一部分被背板的工作介质吸收、转移、利用,其余则以辐射换热以及对流换热的方式散失在环境中。整个过程用能量平衡^[10]可表示为

$$Q = Q_a + Q_u + Q_s + Q_c + Q_r \quad (1)$$

式中: Q 为吸收的太阳辐射能, J ; Q_u 为输出的电

能, J ; Q_s 为 PV/T 板储能, J ; Q_c 为 PV/T 系统内的水箱储能, J ; Q_e 为辐射换热损失, J ; Q_r 为对流换热损失, J 。

PV/T 系统的性能评价指标通常表示为光电效率、光热效率和光电/光热综合效率^[11]。

当 PV/T 系统稳定运行时,PV/T 系统的光电效率即光伏电池的实际发电量与 PV/T 系统表面接收到的太阳辐射量之比,可表示为

$$\eta_e = \frac{P}{\varepsilon A E} \times 100\% = \frac{UI}{\varepsilon A E} \times 100\% \quad (2)$$

式中: η_e 为光电效率; P 为输出功率, W ; ε 为光电系统表面的覆盖因子; A 为光伏电池面积, m^2 ; E 为太阳辐射强度, W/m^2 ; U 为实时电压值, V ; I 为实时电流值, A 。

当 PV/T 系统稳定运行时,PV/T 系统的光热效率即 PV/T 系统实际获得的热量与 PV/T 系统表面接收到的太阳辐射量之比,可表示为

$$\eta_h = \frac{Q}{A E} \times 100\% = \frac{m c_w \Delta T}{A E} \times 100\% \quad (3)$$

式中: η_h 为光热效率; m 为工作介质的质量流量, kg/s ; c_w 为工作介质的比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; ΔT 为进、出口温度之差, $^\circ C$ 。

当 PV/T 系统稳定运行时,PV/T 系统的光电光热综合效率即 PV/T 系统的光电效率与 PV/T 系统的光热效率之和,可表示为

$$\eta_z = \eta_e + \eta_h \quad (4)$$

式中: η_z 为光电光热综合效率。

3.2 结果与分析

3.2.1 不同辐射强度下复合纳米流体的换热

本文选用 4 种功率(代表辐射强度)的氙灯,分别为 500,1 000,1 500,2 000 W。工作介质分别为 10:0,8:2,6:4,4:6,2:8,0:10 复合比例的石墨烯/还原氧化石墨烯纳米流体。实验环境的初始出口温度均为 $29.5^\circ C$,流速为 $13 m/s$,室温为 $32 \sim 34^\circ C$ 。实验结果如图 8 所示。

由图 8 对比可知,当辐射强度上升时,所有复合比例的水基石墨烯/还原氧化石墨烯复合纳米流体 PV/T 系统的出口温度变化速率都会随着辐射强度的上升而增加。氙灯功率为 2 000 W 时,温度变化速率最快,实验后温度最高;氙灯功率为 500 W 时,温度变化速率最慢,实验后温度最低。辐射强度越高,PV/T 系统的出口温度上升速率越

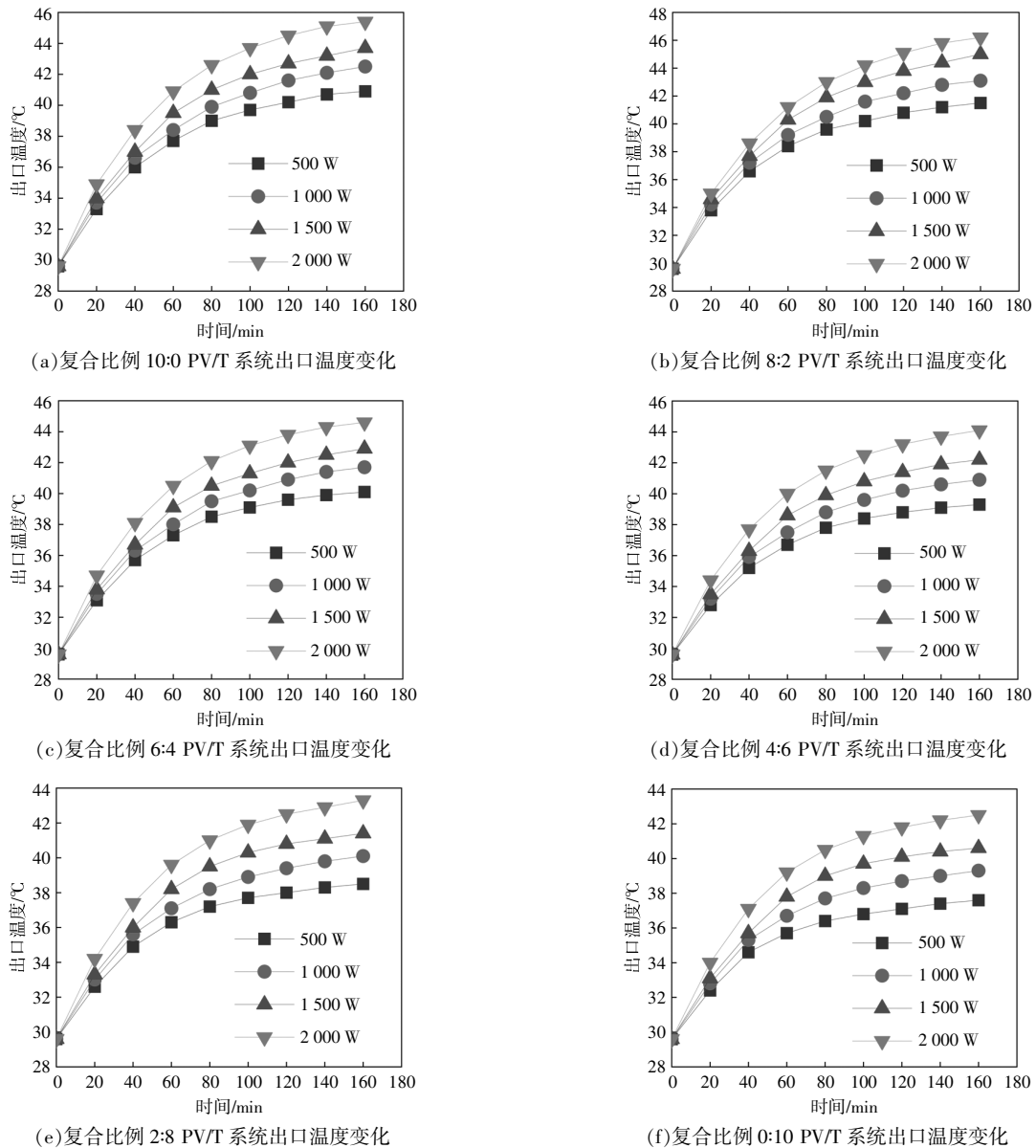


图 8 不同辐射强度下不同复合比例的纳米流体的 PV/T 系统出口温度

Fig.8 PV/T system outlet temperature of nanofluids with different compound proportions under different radiation intensities

快。因此氙灯功率即太阳辐射强度是复合纳米流体在 PV/T 集热器应用中较为重要的影响因素。

3.2.2 不同复合比例下复合纳米流体的换热

本文选用 6 种复合比例的水基石墨烯/还原氧化石墨烯纳米流体,分别为 10:0,8:2,6:4,4:6,2:8,0:10。实验环境的初始出口温度均为 29.5 °C,氙灯功率分别为 500,1 000,1 500,2 000 W,流速为 13 m/s,室温为 32~34 °C。实验结果如图 9 所示。

实验环境的初始出口温度均为 29.5 °C,流速分别为 14,13,12,11 L/min,氙灯功率为 1 000 W,室温为 32~34 °C,实验结果如图 10 所示。

由图 9 和图 10 对比可知,PV/T 系统的出口温度变化速率会随着纳米流体复合比例的上升而增加,复合比例为 8:2 时例外。复合比例为 8:2 时,温度变化速率最快,实验后温度最高;复合比例为 0:10 时,温度变化速率最慢,实验后温度最低。石墨烯/还原氧化石墨烯复合比例越大,PV/T 系统的出口温度上升速率越高,温度上升明显,因此复合比例是复合纳米流体在 PV/T 集热器应用中重要的影响因素。在石墨烯纳米流体中添加少量还原氧化石墨烯配制复合纳米流体,可以有效提高纳米流体的传热效果。结合图 7 可知,纳米固体颗

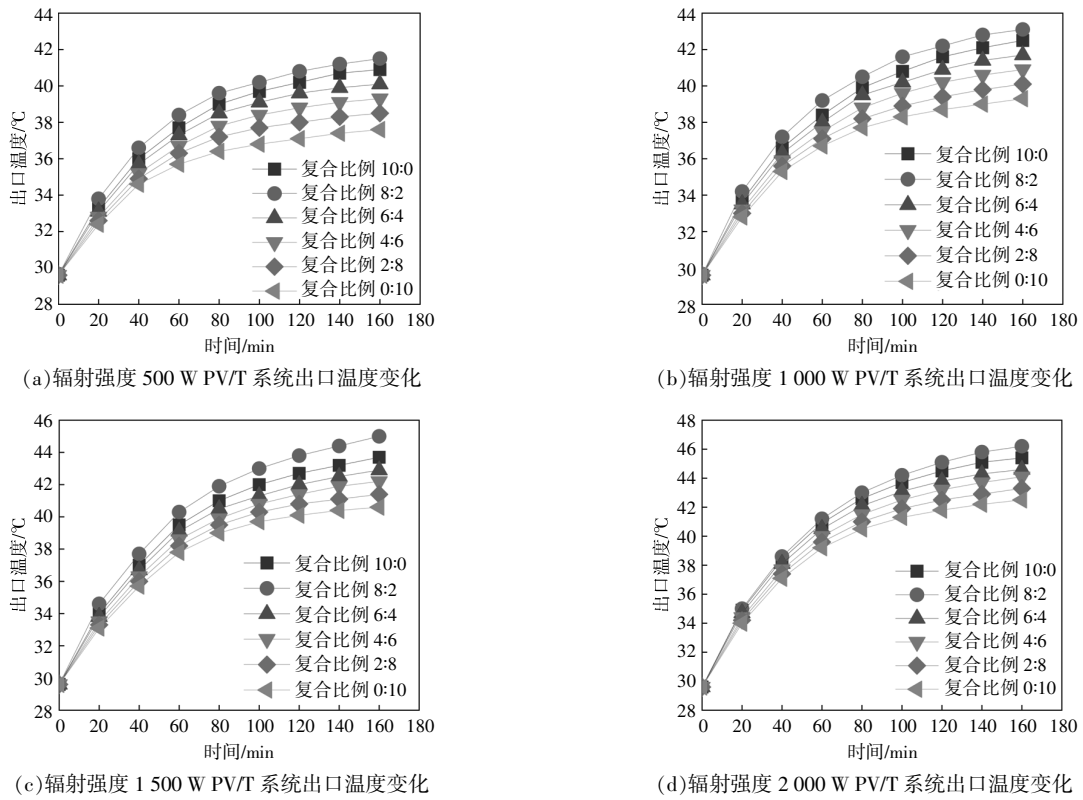


图 9 不同复合比例的纳米流体在不同辐射强度下的 PV/T 系统出口温度

Fig.9 The outlet temperature of PV/T system at different compound proportions of nanofluids under different radiation intensities

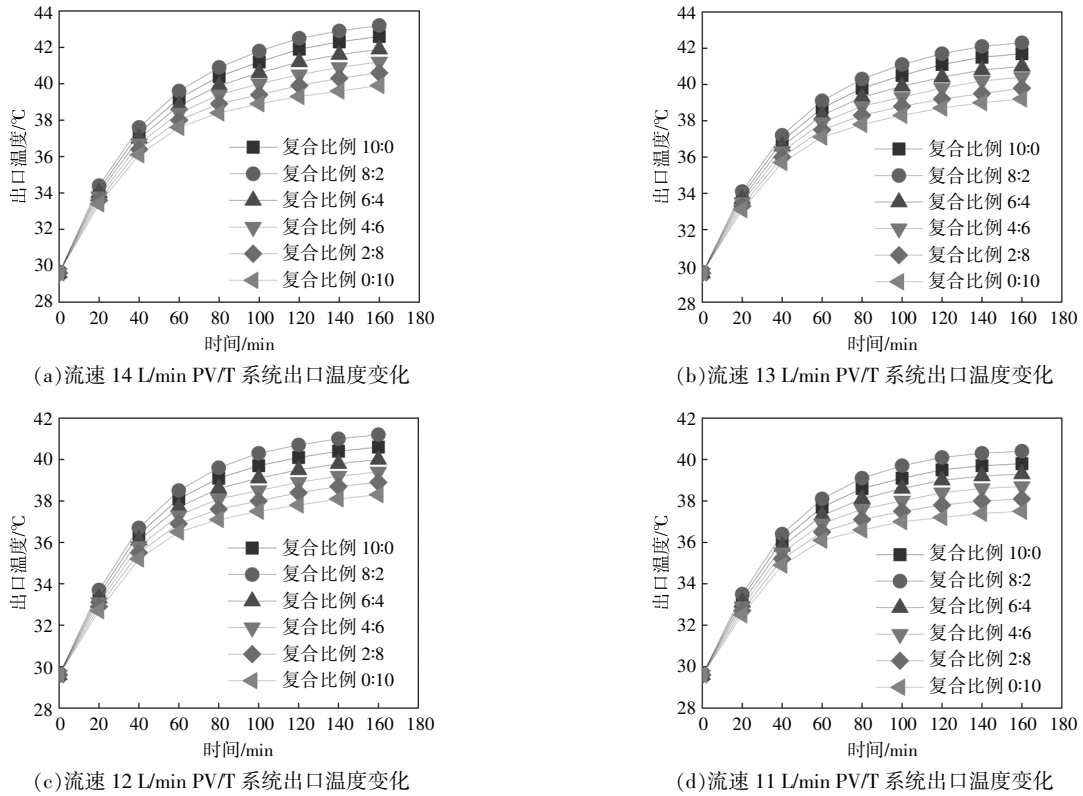


图 10 不同复合比例的纳米流体在不同流速下的 PV/T 系统出口温度

Fig.10 The outlet temperature of PV/T system at different compound proportions of nanofluids under different flow rates

粒的团聚较小,能更好、更均匀地分散在悬浮液中,纳米流体的传热效果更好;若还原氧化石墨烯占比过高,由于其导热系数远低于石墨烯,尽管流变特性较好,但所配制的复合纳米流体的传热效果反而低于石墨烯纳米流体。因此 8:2 的复合比例为复合纳米流体的最佳复合比例。

3.2.3 不同流速下复合纳米流体的换热

分别选用 14,13,12,11 L/min 4 种流速,工作介质分别为 10:0,8:2,6:4,4:6,2:8,0:10 复合比例的石墨烯/还原氧化石墨烯纳米流体。实验环境的初始出口温度均为 29.5 °C,氙灯强度为 1 000 W,室温为 32~34 °C。实验结果如图 11 所示。

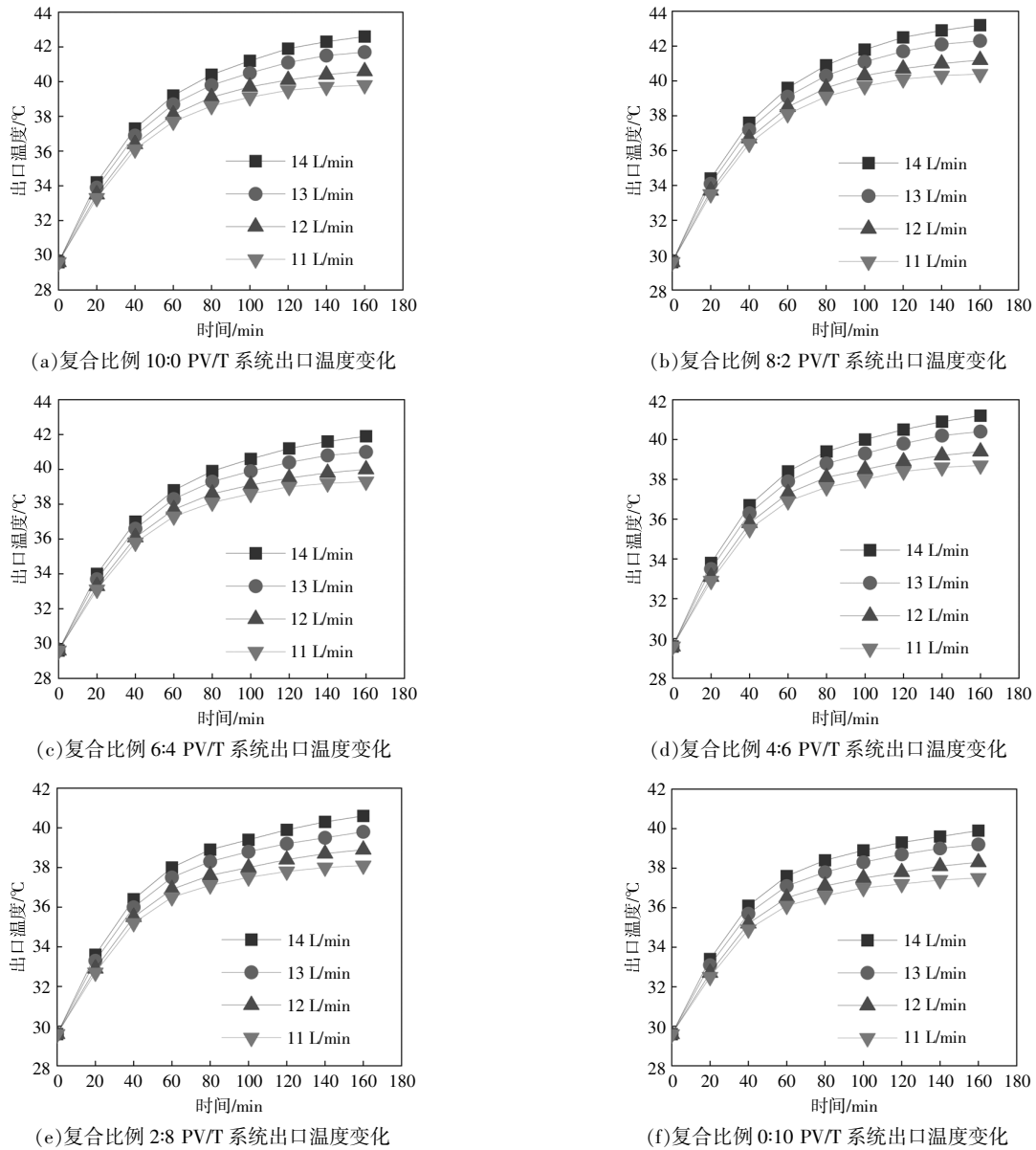


图 11 不同流速下不同复合比例的纳米流体的 PV/T 系统出口温度

Fig.11 PV/T system outlet temperature of nanofluids with different compound proportions at different flow rates

由图 11 可知,PV/T 系统的出口温度变化速率会随着流速上升而增加。流速为 14 L/min 时,温度变化速率最快,实验后温度最高;流速为 11 L/min 时,温度变化速率最慢,实验后温度最低。流速越快,PV/T 系统的出口温度上升速率越快。

因此流速是复合纳米流体在 PV/T 集热器应用中较为重要的影响因素。

3.2.4 不同复合比例下 PV/T 系统的效率

本文选取的 6 种复合比例的纳米流体于 PV/T 系统应用的效率如图 12 所示。

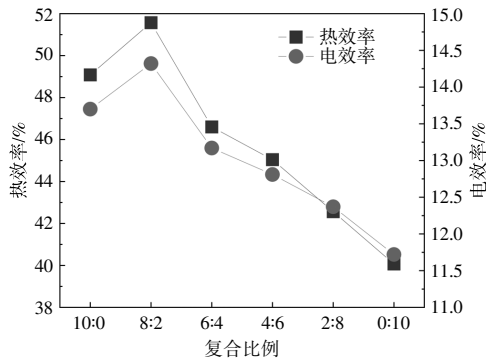


图 12 不同复合比例下 PV/T 系统的效率
Fig.12 Efficiency of PV/T system under different compound ratios

由图 12 可知,复合比例为 8:2 时,PV/T 系统的热效率、电效率和综合效率均为最高,复合比例为 0:10 时,效率最低。复合比例为 8:2 的水基石墨烯/还原氧化石墨烯复合纳米流体相较于 Alous S^[6] 配制的水基石墨烯纳米流体,其热效率提高了 14.26%,电效率提高了 11.73%。结合图 9 和图 12 可知,纳米流体的传热性能越优异,PV/T 系统的热效率越高。这种纳米流体更有效地收集利用 PV/T 集热器中的热量,降低 PV/T 集热器的板面温度,使得 PV/T 系统的电效率有所提高,进而使 PV/T 的综合效率增加。

4 结论

本文配制了一种新型的水基石墨烯/还原氧化石墨烯复合纳米流体,并搭建了一个 PV/T 集热系统,于夏季测试了该复合纳米流体在 PV/T 集热系统中的传热性能。在特定的测试条件下,测试、对比了辐射强度、流速与复合比例变化对 PV/T 集热系统的影响,结果如下。

①当氙灯功率为 500~2 000 W 时,辐射强度越高,PV/T 系统的出口温度上升速率越高。氙灯功率即太阳辐射强度为水基石墨烯/还原氧化石墨烯复合纳米流体在 PV/T 集热器应用中的重要影响因素。

②当流速为 11~14 L/min 时,流速越快,PV/T 系统的出口温度上升速率越高。流速是水基石墨烯/还原氧化石墨烯复合纳米流体在 PV/T 集热器应用中的影响因素,但流速变化导致的温度变化幅度没有氙灯辐射强度导致的温度变化幅度高,因此相较于氙灯强度,流速的影响较小。

③当石墨烯/还原氧化石墨烯复合比例为

0:10~10:0 时,石墨烯含量比例越高,PV/T 系统的出口温度上升速率越高,但复合比例 8:2 除外。复合比例为 8:2 时,PV/T 系统的出口温度上升速率最高,超过石墨烯纳米流体。因此复合比例为 8:2 时为复合纳米流体的最佳复合比例。

④复合纳米流体的传热能力越强,PV/T 系统的综合效率越高。综合效率最高为复合比例 8:2 时的 43.67%。

参考文献:

- [1] Maxwell J C.A treatise on electricity and magnetism[M]. London:Clarendon press, 1998.
- [2] Choi S U S, Eastman J A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles [J].ASME – Publications–Fed,1995,231:99–106.
- [3] Rao C N R,Matte H S S,Subrahmanyam K S,et al. Characterization and selected properties of graphene[J]. Graphene:Synthesis,Properties and Phenomena,2012, 32(6):1–47.
- [4] Askari S,Lotfi R,Seifkordi A,et al.A novel approach for energy and water conservation in wet cooling towers by using MWNTs and nanoporous graphene nanofluids [J].Energy Conversion and Management,2016,109 (10):98–105.
- [5] Ghozatloo A, Rashidi A, Shariaty–Niassar M, et al. Convective heat transfer enhancement of graphene nanofluids in shell and tube heat exchanger [J]. Experimental Thermal and Fluid Science,2014,53(3): 136–141.
- [6] Alous S, Kayfeci M, Uysal A, et al. Experimental investigations of using MWCNTs and graphene nanoplatelets water –based nanofluids as coolants in PVT systems [J].Applied Thermal Engineering,2019, 162(9):153–161.
- [7] Novoselov K S,Geim A K,Morozov S V,et al.Electric field effect in atomically thin carbon films[J].Science, 2004,42(2):666–677.
- [8] 王嘉尧. 碳系纳米流体制备及光热转换性能研究[D]. 青岛:青岛科技大学,2022.
- [9] 舒磊.稳定分散石墨烯纳米流体的制备及其光热转换性能研究[D].上海:上海交通大学,2019.
- [10] 张星晨,吕建,霍雨霞,等.积尘对光伏光热系统性能影响的实验研究[J].可再生能源,2020,38(9):117–119.
- [11] 安丽芳,景金龙.PV/T 光伏光热系统关键参数影响特性研究[J].热能动力工程,2021,36(11):148–152.

Research on the application of carbon composite nanofluids in photovoltaic photothermal collectors

Gou Yujun, Zhao Haichuan, An Yue, Fu Yongqi

(College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063200, China)

Abstract: Carbon-based nanofluid has a higher heat transfer coefficient than other nanofluids and is relatively cheap. Graphene nanofluid has a high heat transfer coefficient, and reduced graphene oxide nanofluid has good stability. So, this article developed a new type of carbon-based composite nanofluid (water-based graphene/reduced graphene oxide composite nanofluid) as the heat transfer medium in PV/T collectors by two-step method. The radiation intensity, flow rate, and composite nanofluid were analyzed. The effect of proportion on the water temperature at the outlet of the collector was studied, and the proportion of water-based graphene/reduced graphene oxide with better heat transfer performance was obtained in different compound proportion ranges of the experiment. Experimental results show: the higher the radiation intensity, the faster the flow rate, the higher the water temperature at the outlet of the PV/T collector, the better the heat transfer effect of the nanofluid; when the composite ratio is 8:2, the heat transfer effect of the nanofluid is the best, the thermal efficiency and electrical efficiency of the PV/T system are 23.49% and 20.18% respectively. Compared with water-based graphene and reduced graphene oxide, nanofluid has better heat transfer effect. The research of this article provides reference for the practical development of carbon nanofluids in heat transfer media.

Keywords: photovoltaic/thermal; nanofluids; compound ratio; liquid cooling type