

文章编号: 1671-6612 (2026) 01-011-08

# 基于光热转换相变材料的 太阳能空气集热器性能研究

王 俊 张 楠 张兆利

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

**【摘 要】** 基于相变材料的潜热储存技术可以解决太阳能供需不匹配的问题, 然而, 相变材料不能直接光热转换实现太阳能热储存。为此, 基于石蜡 (PW)、苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙烯 (SEBS)、膨胀石墨 (EG) 制备了一系列光热转换复合相变材料, 并通过差示扫描量热仪、导热系数仪、紫外-可见-近红外分光光度计等对其进行了表征。结果表明制备的 PW/SEBS/EG 复合相变材料具有良好的形状稳定性, 其光谱吸收率在 0.8~1.0 之间, 光热转换效率随 EG 含量的增加而增加。其中含 4wt%EG 的复合相变材料的潜热为 146.5J/g, 导热系数为  $0.97/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$ 。进一步将制备的复合相变材料封装制成光-热-储一体化型太阳能空气集热器。并通过实验分析了 EG 质量分数和通风风速对集热器热性能的影响。其中, 通风风速影响因素较大, 在  $800W/m^2$  下照射 5h 时间, 含有 4wt%EG 的复合相变材料的集热器相变材料的温度可以达到  $110^{\circ}C$ , 且可以使  $6m^2$  的房间升温  $2.8^{\circ}C$ , 说明了基于光热转换相变材料的太阳能空气集热器在建筑供暖领域具有潜在应用价值。

**【关键词】** 光热转换相变材料; 太阳能空气集热器; 光-热-储一体化; 建筑供暖

中图分类号 TK513 文献标志码 A

## Performance Study of Solar Air Collectors Based on Photothermal Conversion Phase Change Materials

Wang Jun Zhang Nan Zhang Zhaoli

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

**【Abstract】** Latent heat storage technology using phase change materials (PCMs) can address the mismatch between solar energy supply and demand. However, PCMs cannot directly achieve solar thermal storage through photothermal conversion. To overcome this limitation, this study developed a series of photothermal conversion composite PCMs based on paraffin wax (PW), styrene-ethylene-butylene-styrene (SEBS), and expanded graphite (EG). These composites were characterized using differential scanning calorimetry (DSC), thermal conductivity analysis, and ultraviolet-visible-near-infrared (UV-Vis-NIR) spectrophotometry. Results show that the fabricated PW/SEBS/EG composite PCMs exhibit excellent shape stability, with spectral absorptance ranging between 0.8 and 1.0. Their photothermal conversion efficiency increases with higher EG content. Specifically, the composite containing 4wt% EG demonstrated a latent heat of 146.5J/g and a thermal conductivity of  $0.97/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$ . Furthermore, the prepared composite PCM was encapsulated to create an integrated photothermal-storage solar air collector. Experimental analysis evaluated the impact of EG mass fraction and ventilation air velocity on the collector's thermal performance. Ventilation air velocity proved to be a significant influencing factor. Under irradiation of  $800W/m^2$  for 5 hours, the PCM temperature in the collector

基金项目: 国家自然科学基金 (52378111); 河北省自然科学基金 (E2024105026)

作者简介: 王 俊 (2000-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: wjswjtu2022@163.com

通讯作者: 张 楠 (1988-), 女, 博士, 副研究员, E-mail: zhangn09@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2025-07-03

containing 4wt% EG reached 110°C. This collector achieved a temperature rise of 2.8°C in a 6m<sup>2</sup> room, demonstrating the potential application value of photothermal conversion PCM-based solar air collectors in building heating.

**【Keywords】** Photothermal conversion phase change materials; Solar air collectors; Integrated photothermal-storage; Building heating

## 0 引言

随着社会的发展，人类对能源的需求不断增加。然而，传统化石能源储量有限，其使用还会造成环境污染问题<sup>[1]</sup>。因此，开发清洁的可再生能源至关重要。太阳能因其清洁、分布广和可再生特性而受到广泛关注<sup>[2]</sup>。但太阳辐射具有间歇性和不稳定性，需借助高效的储能材料方能实现按需稳定供能<sup>[3]</sup>。

相变材料 (PCM) 在相变时能吸收或释放大热量，是储存太阳能热能的理想介质<sup>[4]</sup>。石蜡 (PW) 作为一种有机相变材料，性质稳定且不易过冷<sup>[5]</sup>，被广泛应用于建筑保温<sup>[6]</sup>、电池热管理<sup>[7]</sup>和太阳能集热器<sup>[8]</sup>等领域。在太阳能热利用方面，将 PCM 集成到集热器中形成相变储能型集热器，能显著提高集热器的储热能力和太阳能利用效率<sup>[9]</sup>。然而，此类系统中热能收集（由太阳能吸收体承担）与热能储存（由 PCM 承担）功能相互分离，导致较大的热损失，限制了整体能效的提升。为克服此瓶颈，开发兼具高效光热转换与热能储存功能的一体化材料成为关键。光热转换型 PCM 能够将入射光能直接转化为热能并储存于相变潜热中，是实现“光-热-储”一体化的理想材料<sup>[10]</sup>。例如，Liu 等<sup>[11]</sup>制备了十八醇/SEBS/羟基化碳纳米管复合材料，储热容量达 183.04 J/g，太阳光吸收率高达 95.68%。Luo 等<sup>[12]</sup>开发了石蜡/膨胀石墨/炭黑材料，当炭黑含量为 10% 时，其导热系数达到 10.54/(W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>)，是纯石蜡的 31.94 倍。Yang 等<sup>[13]</sup>以聚乙二醇 (PEG) 为 PCM、泡沫碳为支撑、羟基氮化硼纳米片增强导热、氧化铜转化光热，在 PEG 含量 90% 时，光热转换存储效率达 91.8%，导热系数比纯 PEG 提高 348%。这些研究表明，使用光热转换 PCM 作为集热和储热的单一介质，有望构建“光-热-储”一体化的新型集热器。

目前，基于光热转换 PCM 的一体化集热器研究已取得一定进展。Xiao 等<sup>[14]</sup>用三水合乙酸钠/氧化石墨烯/膨胀石墨作吸热储热介质构建太阳能热

水系统，光热转换效率达 54.5%。高欢等<sup>[15]</sup>将膨胀石墨/石蜡复合 PCM 应用于集热器，并通过模拟验证了其应用潜力。然而，这些研究大多侧重于光热转换 PCM 本身性能表征，对一体化集热器整体热性能，特别是影响其性能的关键因素，研究并未深入。

本文选用石蜡 (PW) 作为相变材料，SEBS 作定形材料，膨胀石墨 (EG) 作为导热和光吸收增强剂，制备了高导热的 PW/SEBS/EG 定形相变材料，通过差示扫描量热仪、导热系数仪和分光光度计对材料进行了表征。将材料应用于集热器，构建光-热-储一体化集热器，通过实验研究了一体化集热器运行时的 PCM 温度、进出口风温及热效率，重点分析了 EG 质量分数和通风风速因素对集热器性能的影响。最后，评估了该一体化集热器用于房间供暖的效果，通过监测并分析室内平均温度及垂直方向温度分布，对比考察了其供暖性能。

## 1 实验与方法

### 1.1 材料准备

#### 1.1.1 原材料

PCM-A-42 石蜡购买于广州中佳新材料科技有限公司；苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙烯 (SEBS) 来自东莞昌宏塑料有限公司；膨胀石墨 (EG) 为 100 目，来自宿迁纳开特新材料科技有限公司。

#### 1.1.2 光热转换复合相变材料的制备

表 1 样品组成表

Table 1 The composition of the preparation samples

样品	PW/g	SEBS/g	EG/g	EG 质量分数/wt%
S1	85	15	0	0
S2	83.3	14.7	2	2
S3	81.6	14.4	4	4
S4	79.9	14.1	6	6

在本研究中制作了一系列的复合 PCMs，表 1 列出了各个样品的组成。所有样品中 PW 与 SEBS 的质量比为 85:15，而 EG 的质量分数分别为

0wt%(S1), 2wt%(S2), 4wt%(S3) 和 6wt%(S4)。PW/SEBS+EG 复合 PCM 的制备过程如图 1 所示。首先, 将一定量的 PW 与 SEBS 在 120℃ 恒温下混合 2h, 得到透明凝胶状的 PW/SEBS 混合物。然后

将混合物转入 165℃ 的油浴中, 将 EG 缓慢加入到 PW/SEBS 混合物中, 以 140rpm 的转速搅拌 1h。最后倒入模具中, 冷却至室温。

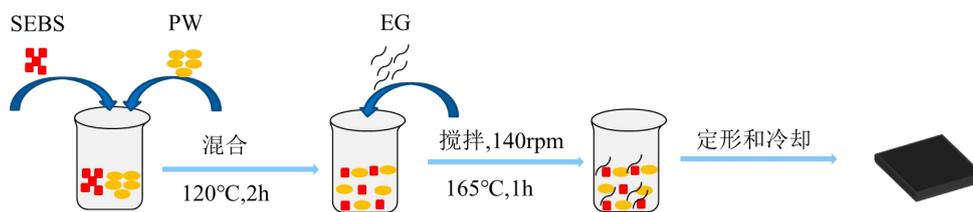


图 1 制备流程图

Fig.1 Preparation process diagram of the PW/SEBS/EG CPCM

1.1.3 性能测试与表征方法

采用差示扫描量热计 (DSC, TA Q20) 研究了所有样品的相变温度和潜热。测试在氮气环境下进行。加热和冷却速率设置为 5℃/min, 测试温度范围为 0~70℃。通过 TC3100 导热系数仪测试了样品的导热系数。测试在恒定室温下进行。为确保温度探头与样品表面良好且均匀的热接触, 测试前将样品压制成两块 20mm×20mm×3mm 的长方体薄片。每个样品的 DSC 和导热系数重复测试三次, 取三次测试的平均值作为样品的热性能。

采用紫外-可见-近红外 (UV-vis-NIR) 分光光度计 (UV3600) 测定材料的吸收率, 测试光谱范围为 200~2000nm。

1.2 实验系统的搭建

参考 Zhang 等<sup>[16]</sup>的实验设计, 搭建了集热器系统, 其具体结构及实验布置如图 2 所示。该集热器结构设计的关键在于采用光热转换相变材料 (PCM) 同时承担集热与蓄热功能。本次实验采用先蓄热后放热的运行模式, 先在 800W/m<sup>2</sup> 辐照强度下光照 5h 之后打开风机通风换热。

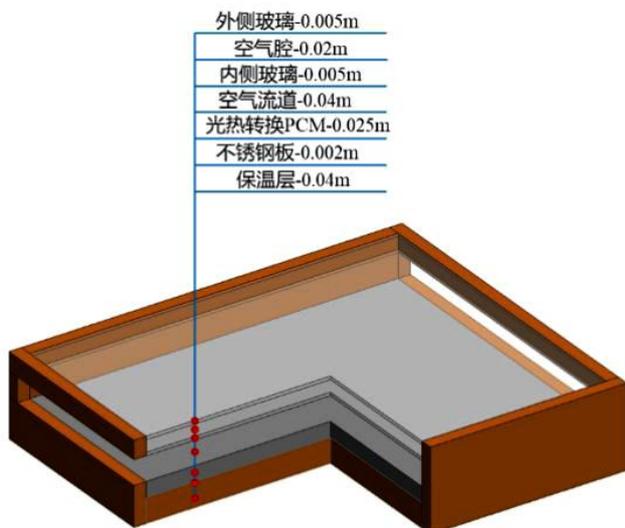


图 2 集热器结构和实验布置图

Fig.2 Structure of the collector and experimental layout diagram

初步选择的供暖房间为东西朝向, 房间面积为 24m<sup>2</sup>, 其中长 6m, 宽 4m, 高 3.8m。为了使集热器的集热面积与供暖房间面积相匹配, 将三个完全相同的集热器串联使用, 同时使用保温板 (图中虚

线) 隔离房间面积的 1/4 使用, 在高度为 2.0m 处使用保温板封闭, 同时在其中布置热电偶, 沿着高度方向热电偶布置在 0.1m、0.5m、1.1m、1.5m、1.7m 和 2.0m, 具体布置如图 3 所示。

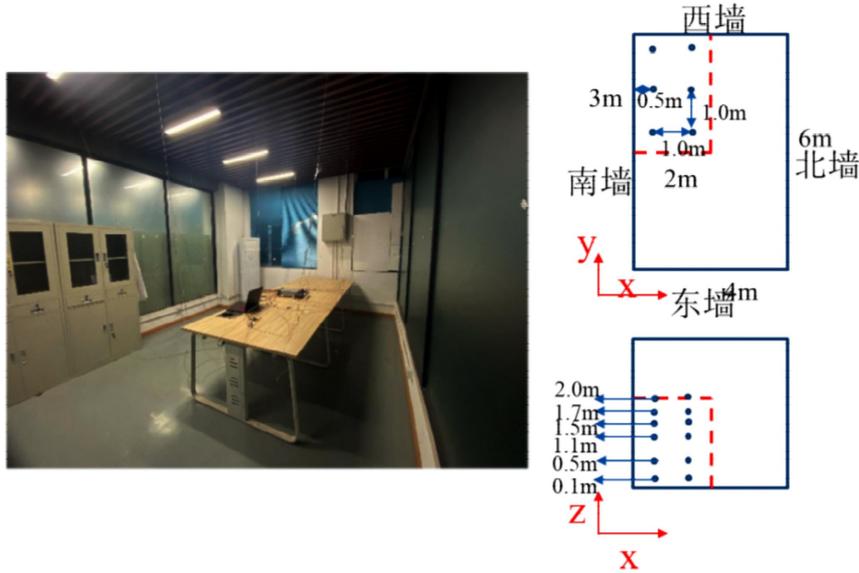


图3 供暖房间和温度测点示意图

Fig.3 Heating room and temperature measuring point schematic diagram

无热源工况：对供暖房间先进行无热源实验，即在供暖房间内不添加任何热源，关闭所有热源。为避免从窗户透过的光照对实验的干扰，确保实验数据的准确性，将能透过太阳光的西窗进行遮盖。

集热器供暖工况：太阳能空气集热器入口与保温通风软管相连，通过风机主动抽取外界环境的新风通过保温通风软管送入太阳能空气集热器进行加热，然后通过保温通风软管输送加热的空气进入供暖房间，为室内提供热空气从而提高室内空气温度。太阳能空气集热器为此工况的单一热源。此工况不考虑从窗户透过的光照，故将能透过太阳光的西窗进行遮盖。简称集热器供暖工况。

## 2 结果和讨论

### 2.1 热物理性能

通过 DSC 测量样品的相变温度和潜热。图 4 显示了 PW 和各个样品的熔化和凝固 DSC 曲线，向上是吸热过程，向下是放热过程。可以看出，PW 有一对吸热/放热峰，各个样品的熔化与凝固趋势与 PW 相似。

表 2 给出了 PW 和样品在熔化和凝固过程中的潜热和相变温度。熔化和凝固的相变温度分别用字母  $T_m$  和  $T_f$  表示。熔化潜热和凝固潜热分别用符号  $\Delta H_m$  和  $\Delta H_f$  表示。由表 2 可以看出纯 PW 的熔化温度为  $38.93^\circ\text{C}$ ，凝固温度为  $41.41^\circ\text{C}$ 。与纯 PW 相比，S1 的熔化和凝固温度分别降低了  $1.06^\circ\text{C}$  和  $0.59^\circ\text{C}$ 。

而加入 EG 后，样品 S2~S4 的熔化和凝固温度比 PW 平均降低  $1.71^\circ\text{C}$  和  $1.11^\circ\text{C}$ 。这可能是由于 PW 和 SEBS+EG 之间的物理交联，它在不同程度上降低了样品的熔化和凝固温度。而各样品的潜热随着 EG 质量含量的增加而减小。由表可知当 EG 质量浓度在 0~6% 范围内变化时，熔化过程的复合潜热从  $157.8\text{J/g}$  减小到  $142.3\text{J/g}$ 。一般情况下，复合 PCM 的潜热与所含 PCM 的含量成正比，其理论关系可表示为：

$$\Delta H = k\Delta H_{PW} \quad (1)$$

式中： $\Delta H$ 、 $k$  和  $\Delta H_{PW}$  分别为复合 PCM 的潜热、复合 PCM 中 PW 的质量分数和纯 PW 的潜热。计算得到的潜热值与测量值基本相同但比测量值略高。其原因可能是 SEBS+EG 结构的三维网络限制了 PW 的晶体排列和取向，影响了相变潜热。

在太阳能集热器方面，PCM 的导热性能是集热器及时储存和释放热量的关键。测量了纯 PW 和各个样品的导热系数，结果如表 2 所示。由表可得，由于 PW 和 SEBS 的导热系数较低，样品 S1 的导热系数仅为  $0.23/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$ 。而在添加了 EG 后，由于 EG 的高导热性和其在 PW 中形成了连续的导热网络，样品 S2~S4 的导热系数随着 EG 质量分数的增加几乎呈线性增加。S2、S3 和 S4 的导热系数分别是 S2 的 1.87、4.22 和 6.17 倍。结果表明，EG 的加入大大提高了复合 PCM 的导热性能。

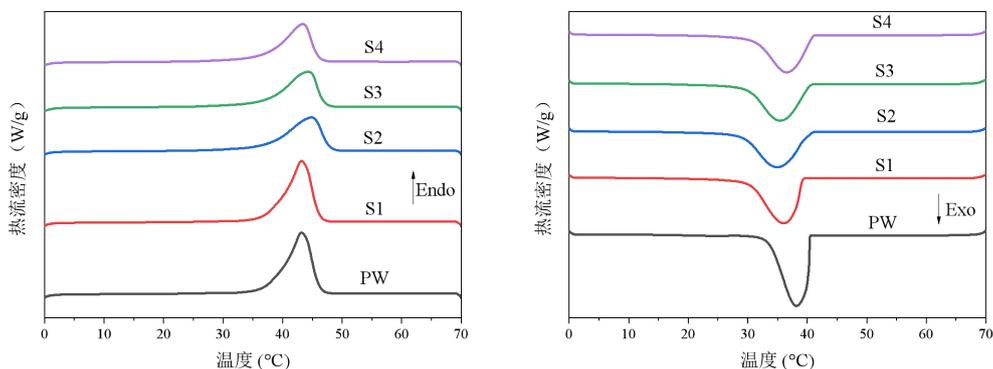


图 4 PW, S1~S4 的 DSC 曲线

Fig.4 DSC curves of PW, S1~S4

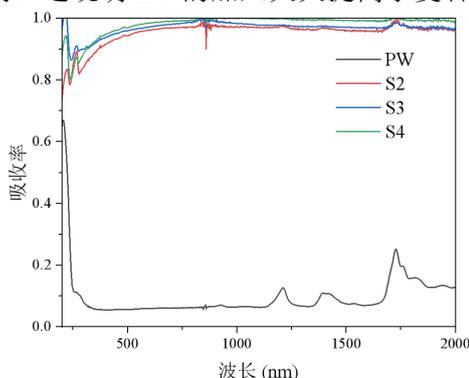
表 2 PW, S1~S4 的热物理性能

Table 2 Thermal properties of PW, S1~S4

样品	$T_m/^\circ\text{C}$	$\Delta H_m/(\text{J/g})$	$T_f/^\circ\text{C}$	$\Delta H_f/(\text{J/g})$	$\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
PW	38.93	186.0	41.41	185.8	0.22
S1	37.87	157.8	40.82	155.9	0.23
S2	37.21	149.9	40.12	147.4	0.43
S3	37.25	146.5	40.45	143.4	0.97
S4	37.19	142.3	40.34	140.1	1.42

2.2 光吸收性能

紫外-可见-近红外光谱如图 5 (a) 所示。由图可知, 纯 PW 在整个太阳波段都展示出较低的吸收率, 且在太阳辐射能量占比较大的可见光区域几乎不吸收, 吸收率仅为 0.1。而复合 PCM 在太阳波段的任意区域都有很高的吸收率, 其吸收率在 0.8~1.0 之间。这说明 EG 的加入大大提高了复合



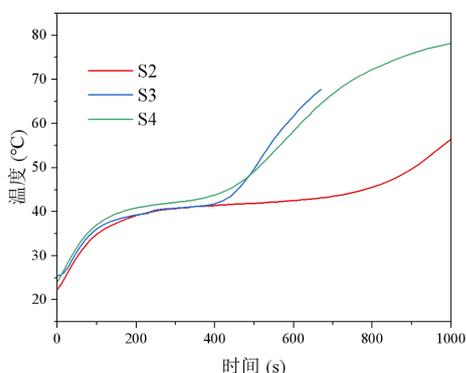
(a) 紫外-可见-近红外吸收光谱

PCM 的光吸收性能。

将样品放置在  $100\text{mW}/\text{cm}^2$  氙灯下, 记录样品随时间的温度分布, 结果如图 5 (b) 所示。在加入 EG 后, EG 的黑色表面可以有效吸收近红外线和可见光, S2~S4 在吸收光能迅速达到  $37^\circ\text{C}$  左右, 完成显热蓄热, 之后各个样品都能完成相变。参考 Sun 等<sup>[17]</sup>对复合 PCM 光热转换效率的描述, 相变过程中 PCM 的潜热与吸收的太阳能辐射能的比值可由式 (2) 计算。

$$\eta = \frac{m\Delta H}{IAt} \tag{2}$$

式中:  $m$  为样品质量;  $\Delta H$  为样品的熔化潜热;  $I$  为模拟光源的光强;  $A$  为样品的吸光面积;  $t$  为样品的相变持续时间。通过计算, S2、S3 和 S4 的光热转换效率分别为 62.21%、68.18% 和 69.23%。样品具有较高的光热转换效率。



(b) 样品温升曲线

图 5 样品的吸收光谱和温升曲线

Fig.5 The UV-vis-NIR absorption spectrum and time-temperature curves of samples

2.3 集热器蓄放热性能

2.3.1 EG 质量分数

为了研究 EG 质量分数对集热器性能的影响,

保证 PCM 厚度为  $2.5\text{cm}$ , 光照时间为 5h, 辐射照度为  $800/(\text{W}/\text{m}^2)$ , 控制 EG 质量分数从 0wt% 到 6wt%, 实验得到的 PCM 上下层温度以及计算得到

的蓄热效率对比如图 6 所示。从上下层的温度对比可以看出，在  $800\text{W}/\text{m}^2$ ，5h 光照下，添加 EG 的相变层上下层的温差随着 EG 含量的增加而减小。而不添加 EG 的由于缺少 EG 对于 PCM 流动的限制，熔化前上下层有明显的温度分层，而熔化后由于产生了对流上下层温度差异迅速减小。

观察底层温度可知，EG 不同质量含量的 PCM 都可以完全熔化，且只有不加 EG 的 PCM 温度明显较低，而其他 EG 不同含量的 PCM 温度都很接近，其中 4%wtEG 的 PCM 温度最高。这是因为 EG 的添加会提高 PCM 的吸光性能和导热性能。吸光性能的提高对 PCM 温度的提高起正向作用。然而导热性能的提高有两面性。一方面导热性能的提高会促使热量在 PCM 内部的传递，另一方面也会提

高集热器的热损失。因此综合来看，在 EG 质量分数较低时，EG 的添加可以提高 PCM 的温度。而当 EG 质量分数较高（6%wt）时，EG 对集热器热损失的提高起主导作用，PCM 温度反而开始下降。

平均蓄热效率为 PCM 从初始状态至完全熔化后的温度（取  $50^\circ\text{C}$ ，未能完全熔化的取到相变点的温度），PCM 获得的内能与入射太阳辐射能的比值。观察蓄热效率图可知，蓄热效率随着 EG 质量分数的提高先增加后降低，如 EG 质量分数由 2% 提高到 4% 时，平均集热效率从 51.08% 提高到 53.35%；而 EG 质量分数由 4% 提高到 6% 时，平均集热效率从 53.35% 降低至 49.78%。因此 4wt% 的 EG 是一个合适的质量含量。

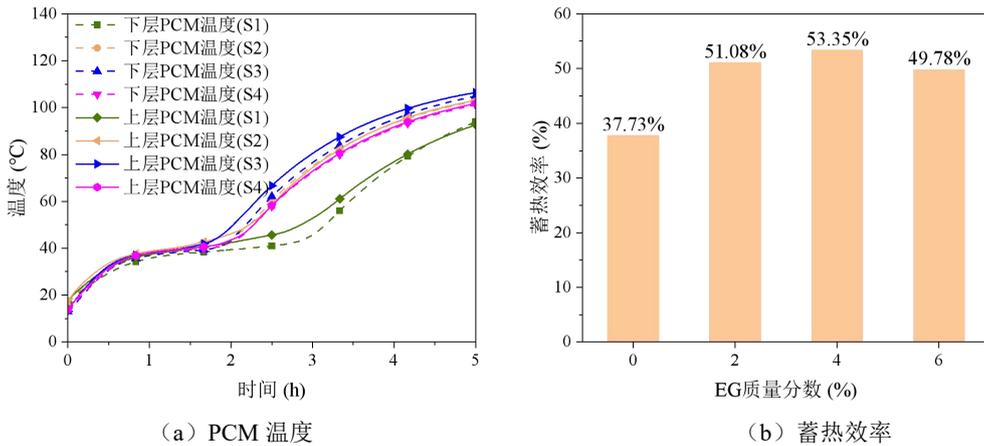


图 6 不同 EG 质量分数下 PCM 温度和蓄热效率图

Fig.6 Temperature of PCM and heat storage efficiency diagrams under different mass fractions of EG

### 2.3.2 通风风速

为了研究通风风速对集热器放热性能的影响，保证 PCM 厚度为 2.5cm，光照时间为 5h，辐射照度为  $800\text{W}/\text{m}^2$ ，EG 质量分数为 4wt%，改变风速从 0.1m/s 到 0.3m/s，实验得到的进出口处的 PCM 温度如图 7 所示。由图 7 可知，不同风速下进出口处的 PCM 的温度趋势大致相同。在通风后，进口处的 PCM 由于与进风的温度差距最大，对流换热强度最高，热量迅速传递给进风，温度下降得最快。而出口处 PCM 与风的温差最小，因此温度下降得最慢。而随着风速的增加，进出口 PCM 的综合温度都在不断下降。

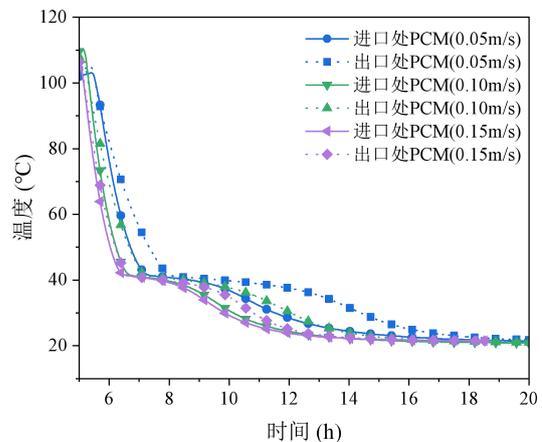
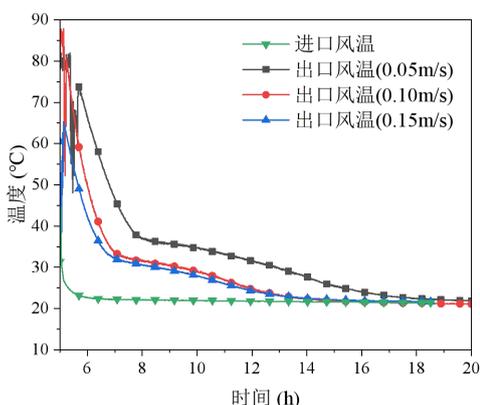


图 7 不同风速下 PCM 温度图

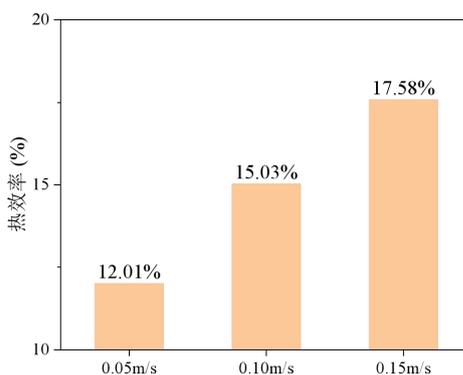
Fig.7 Temperature diagram of the PCM under different wind speeds

实验得到的进出口风温如图 8 (a) 所示。由图 8 (a) 可知, 风速的增加可以提高了装置的放热速率, 单位时间内取出的热量增加, 因此集热器能够在短时间内维持更高的能量输出。但当风速提高到一定水平后, 集热器内 PCM 与空气的对流换热强度已经很高, 此时 PCM 内部的传热等因素开始限制 PCM 与风之间的换热。因此随着风速的增加, 出口风温降低的幅度在不断降低。



(a) 进出口风温

热效率为空气获得的内能与入射的太阳能辐射能的比值。计算得到的不同风速下的热效率如图 8 (b) 所示。由图 8 (b) 可知, 与出口风温变化的趋势相反, 随着风速的增加, 热效率在不断增加。这是因为风速的增加会提高风与 PCM 之间的对流换热强度。因此 PCM 所储存的热量迅速传递给风, 有用能增加, 因此热效率增加。而由于集热器热损失的存在, 因此热效率提高的幅度也在降低。



(b) 热效率

图 8 不同风速下进出口风温和热效率图

Fig.8 Diagrams of the inlet and outlet air temperatures and thermal efficiency under different wind speeds

2.4 集热器供暖性能

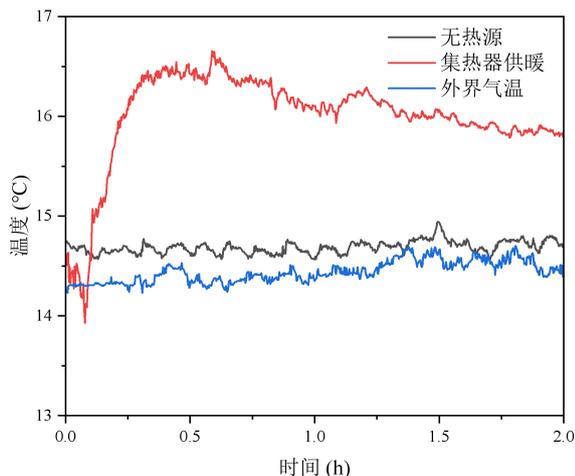


图 9 不同工况房间平均温度图

Fig.9 Average temperature diagram of rooms under different working conditions

无热源和集热器供暖房间的温升曲线如图 9 所示, 测试在夜间进行以防止太阳辐射的干扰, 室内空气温度选取房间水平与垂直测点空气温度取平均值计算得出。由图 9 可知, 由于整体实验在室内进行, 无热源和外界气温的温度波段较为平缓且较为接近, 无热源房间空气温度的变化范围为

14.5°C~14.8°C, 无明显温升。而集热器供暖下室内空气温度变化范围为 13.9°C~16.7°C, 温升 2.8°C。

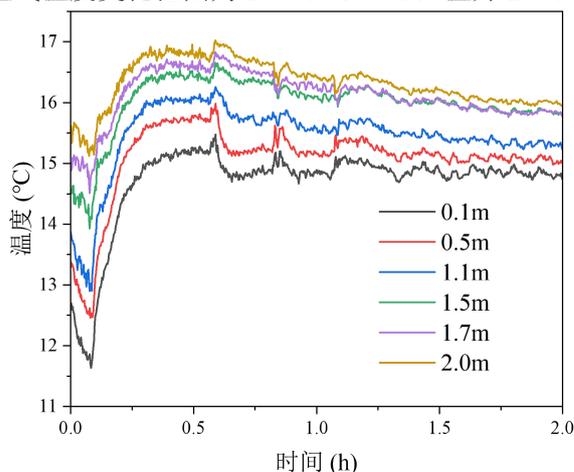


图 10 集热器单独供暖房间垂直温度图

Fig.10 Collector independent heating room vertical temperature diagram

室内垂直温度对比如图 10 所示。由图 10 可知, 随着高度的增加, 室内空气温度也在上升, 同一高度温度的变化趋势为先上升稳定后再下降。室内空气温度的变化范围在 14.5°C 左右。在前 1h 内不进行通风, 各个高度温度变化较为平缓。除了离地

0.1m 处的测点外, 其他高度方向的测点温度差距较小, 在 1℃ 以内。在 1h 时集热器对房间进行供暖通风, 供暖房间内各个高度的温度测点开始升温, 并在 0.5h 内房间温度达到最大值, 最大值分别是 14.5℃、14.9℃、15.1℃、15.5℃、15.6℃、16.4℃。而由于集热器对房间的通风口位置较高, 因此最低处温度测点 0.1m 的温度与无热源的温度相近, 也就是说采取集热器对人体站立时脚踝处的区域无供暖效果。而随着高度的增加, 房间各个高度的温度都有不同程度的增高。

### 3 结论

本文采用熔融共混的方法制备了具有优越光热转换和储热能力的 PW/SEBS/EG 相变材料, 并基于光热转换 PCM 构建了光-热-储一体化型集热器。通过材料的表征和对集热器的蓄放热实验研究了集热器的性能, 主要结论如下:

(1) EG 的添加会大大提高 PCM 的导热系数, 但也会降低 PCM 的焓值; 复合相变材料在太阳波段的吸收率在 0.8~1.0 之间, 其光热转换效率在 62.21%~69.23% 之间。

(2) EG 的添加会增强 PCM 的吸光性能和导热性能, 但也会提高集热器的热损失。因此 4wt% 的 EG 是一个合适的含量。而随着风速的增加集热器的热效率在不断增加, 但增加的幅度在不断减小。

(3) 相比于无热源工况下房间无明显温升, 集热器供暖下房间的温升为 2.8℃。而室内不同高度下, 除了离地 0.1m 处的测点外, 其他高度方向的测点温度差距较小, 在 1℃ 以内。

#### 参考文献:

- [1] Zhang X, Zhang R, Feng C, et al. Decomposition analysis of renewable energy demand and coupling effect between renewable energy and energy demand: Evidence from China [J]. *Renewable Energy*, 2024, 237(PC):121839-121839.
- [2] Li G, Li M, Taylor R, et al. Solar energy utilisation: Current status and roll-out potential[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 209: 118285.
- [3] Sofian A B A D A, Lim R H, Munawaroh H S H, et al. Machine learning and the renewable energy revolution: Exploring solar and wind energy solutions for a sustainable future including innovations in energy storage[J]. *Sustainable Development*, 2024,32(4):3953-3978.
- [4] Swami M B P, Ramalingam S. Recent developments in nano-enhanced phase change materials for solar thermal storage[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2022,238.
- [5] Yu X K, Tao Y B. Preparation and characterization of paraffin/expanded graphite composite phase change materials with high thermal conductivity[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 198: 123433.
- [6] Sun Y, Li X, Cai W, et al. Effect of sunshade thermal insulation curtain position and ventilation mode on performance of building with phase change material Trombe wall[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025,263:125403-125403.
- [7] Mohankumar S, Tuan A H, Kalidasan B, et al. A technical review on composite phase change material based secondary assisted battery thermal management system for electric vehicles[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,322.
- [8] Mourad A, Aissa A, Said Z, et al. Recent advances on the applications of phase change materials for solar collectors, practical limitations, and challenges: A critical review[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022,49: 104186.
- [9] 艾雄杰,袁俊,吕伟中,等.基于相变储热的集成式太阳能集热器研究进展[J].*储能科学与技术*,2024,13(12): 4409-4420.
- [10] Albdour S A, Haddad Z, Sharaf O Z, et al. Micro/nano-encapsulated phase-change materials (ePCMs) for solar photothermal absorption and storage: Fundamentals, recent advances, and future directions[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2022, 93: 101037.
- [11] Xingru L, Hua S, Zhongliang H, et al. Biomass-based phase change material gels demonstrating solar-thermal conversion and thermal energy storage for thermoelectric power generation and personal thermal management[J]. *Solar Energy*, 2022,239:307-318. (下转第 46 页)