

光伏组件多元复合相变材料控温特性研究与模拟

杨晨^{1,2}, 陶求华¹, 郑健雯²

- 集美大学海洋装备与机械工程学院, 福建 厦门 361021;
- 福建省能源清洁利用与发展重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 选取石蜡-十四醇掺混石墨作为多元复合相变材料, 应用 ANSYS 软件建立光伏与相变控温模块的传热模型进行模拟分析与验证。研究不同质量分数的石墨、相变层热导率、热焓值以及厚度对光伏控温效果的影响。结果表明: 上述因素都会不同程度地影响光伏组件的温度, 其中石墨用量以及相变层厚度的影响最明显。当相变层中添加 10% 石墨时, 光伏高于 50 °C 的累计时间最少; 当相变层厚度为 50 mm 时, 控温效果最佳。

[关键词] 光伏组件; 多元相变材料; 传热模型; 数值模拟; 实验验证

[中图分类号] TK 519

Research and Simulation on Temperature Control Characteristics of Multi-Component Composite Phase Change Materials for Photovoltaic Modules

YANG Chen^{1,2}, TAO Qiuhua¹, ZHENG Jianwen²

- College of Marine Equipment and Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;
- Fujian Province Key Laboratory of Energy Cleaning Utilization and Development, Xiamen 361021, China)

Abstract: In this paper, paraffin-tetradecyl mixed with 1-tetradecanol was selected as the multi-component composite phase change materials. Graphite powder was added to enhanced heat transfer. In the numerical study, The heat transfer model of photovoltaic panel and phase change temperature control module was established with ANSYS software for simulation analysis and verification. An experimental system exposed to solar radiation was used to validate the temperature control effect of phase change layer on photovoltaic panel. The temperature control characteristics of phase change layers were analysed for component ratios, thermal conductivity, thermal enthalpy and thickness. The results show that the above factors can affect the temperature of photovoltaic panel for different degrees. When graphite powder accounts for 10% in phase change materials, the cumulative time of photovoltaic panels above 50 °C is the least; when the layer thickness is 50 mm, the temperature control effect is the best.

Keywords: photovoltaic panel; phase change material; heat transfer model; numerical simulation; experimental validation

[收稿日期] 2022-10-19

[基金项目] 福建省自然科学基金项目(2020J01691)

[作者简介] 第一作者: 杨晨, 从事建筑节能研究。通信作者: 陶求华, 副教授, 从事制冷空调节能研究。

0 引言

目前,太阳能的利用主要有太阳能热利用和太阳能光伏 (photovoltaic, PV) 发电两个方面^[1]。PV 可以将太阳辐射能转化为电能供人类使用。PV 发电可以就近供电,弥补了常规电网的局限性,同时还具有维护成本低、灵活性大、清洁无污染等优点^[2,3],近年来在全球范围内被广泛应用。在 PV 发电过程中,只有 5%~18% 的太阳能被利用,超过 80% 的太阳能将转换为热能,导致 PV 组件温度升高, PV 发电量下降。当 PV 工作温度超过 25 °C 时,每升高 1 °C,发电效率将下降约 0.45%^[4],长期高温会缩短 PV 使用寿命。因此,降低 PV 组件的温度是提高 PV 组件发电效率的首要问题。

相变材料 (phase change materials, PCM) 在储能领域有着广泛的研究和应用。PCM 在相变温度区间内有很强的蓄热特性,能随着外界温度变化而由固态变为液态,或由液态变为固态,形态改变时 PCM 将吸收或释放大量的热能,具有在一定温度范围内改变自身物理特征的能力。合适的 PCM 可以用于 PV 降温^[5-9]。近年来,国内外许多学者对此进行了深入的研究。Yang 等^[10]建立了 PV-PCM 二维结构模型,研究了热导率、相变温度、热焓值对太阳能电池的影响。结果表明,在一定范围内,提高 PCM 的热导率和热焓值,太阳能电池的热控制效果会更好。但当 PCM 热导率超过 1.4 W/(m·K) 时,提高热导率对提高太阳能电池热控效果没有显著影响。He 等^[11]建立了 PV-PCM 结构的二维有限元分析模型,探究 PCM 热导率对太阳能电池控温特性的影响。结果表明,PCM 热导率的增加可以适当延长 PV-PCM 系统中太阳能电池的温度控制时间。目前国内外研究大多是在模拟下进行的,且研究过于单一,缺乏实际气象条件下 PV-PCM 的性能研究;运用 ANSYS 软件进行模拟时,很多研究缺乏对数值传热模拟的验证以及对改变材料参数所带来的分析。

目前,已有研究相变层几何参数与物性参数对 PV 温度分布的影响^[12-15]。Karthikeyan 等^[16]开发了 PV-PCM 传热模型,并在 MATLAB 中构建基于该模型的能量平衡方程模拟。模拟结果表明,当复合相变材料厚度为 5 cm 时,相对传统 PV 平均温度降低了 6.1 °C。但当 PCM 的厚度超过 2.5 cm 时,控温效果会略微下降,即 PCM 最佳厚度为 2.5 cm。张晏清等^[17]选用低温石蜡和聚乙二醇作为 PCM 与 PV 结合制备相变 PV 组件,实验研究了两种 PCM 的用量,以及热导率结构对组件的控温效果,结果表明,聚乙二醇作为相变控温材料的效果更好,最大冷却度达 30 °C,冷却时长可达 6 h,发电效率提高 10%;随着 PCM 厚度的增加,控温时间延长,但厚度与控温效果并不是线性关系。从以上文献中可以看出,用 PCM 控制 PV 温度的稳态研究较多,但缺少实际动态气象条件下辅助冷却方式对 PV 组件温度的非稳态换热性能研究。

本文选用石蜡、十四醇掺混石墨制备多元复合相变材料,对 PV 进行温度控制,通过 TGA/DSC 同步热分析仪,采用热重法测量相变温度与热焓值;热导率通过热导仪采用探针法测量,得到实验材料的物性参数。为了更好地了解 PCM 的控温效果,将实验材料热物性作为相变换热模拟的物性参数,采用 ANSYS 软件合理简化传热模型进行模拟,与实验数据对比验证模型的准确性。本文还将通过数值模拟建立 PV-PCM 传热模型,在单一因素基础上,研究材料热导率、热焓值及厚度对 PV 组件温度的影响,为 PV 使用寿命和光电转换效率的提高奠定了基础。

1 数值传热模型的建立

1.1 几何模型与热物性

为研究多元复合相变材料对 PV 组件温度的影响,通过 Icem 建模然后导入 Fluent 进行模拟计算,分析组件温度的变化,确定合适的 PCM。在软件中设置太阳辐射作用在 820 mm × 670 mm 的 PV 上,采用厚度为 0.2 mm 的板来模拟具有 PV 电池特性的外表面,模型参数如表 1 所示。PCM 位于 PV 背面并用铝壳封装,封装壁面厚度 2 mm。PCM 选用石蜡-十四醇-石墨复合相变材料。插入 UDF 文件模拟 8:00—17:30 时段 PV 与 PV-PCM 板的温度变化。

表 1 组件的几何参数与热物性

Tab.1 Geometric parameters and thermophysical properties of components

材料	长 × 宽/(mm × mm)	厚度/mm	热导率/(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	密度/(kg · m ³)	比热容/(J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)
PV	820 × 670	0.2	148.0	2330	677
铝壳	820 × 670	2.0	202.4	2719	871

1.2 控制方程

PV-PCM 传热模型的连续性方程、动量守恒方程和能量方程分别为： $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$ ； $\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T) + \rho \vec{g}$ ； $\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u h) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v h) = \frac{\partial}{\partial x}(k \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k \frac{\partial T}{\partial y}) + S_h$ 。其中： u 和 v 分别是 x 和 y 方向的流体速度； p 是流体压力； T 是流体温度； ρ 是密度； k 是热导率； S_h 代表源项； h 是比焓。

1.3 边界条件与求解器设置

PCM 的流动过程采用 Laminar 模型求解，融化与凝固过程采用 Solidification/Melting 模型求解。将实验测得的辐照度和环境温度编制为 UDF，作为边界条件。PCM 的相关数据由实验测得。对流传热系数为 8 W/(m² · K)，其余面设置为耦合热边界条件。初始化温度与实验空气温度一致。收敛标准的残差设置为 10⁻⁶，求解过程监测 PV 表面的平均温度。此外，运行计算选用 Fixed 类型，迭代步数为 7000 步，迭代步长为 5 s，进行数值求解。

2 数值传热模型的实验验证

为验证传热模型模拟的准确性，选用单一 PV 和 PV-PCM 组件同时进行室外对比实验，使用导热系数仪和热重分析仪分别采用探针法和热重法测得 PCM 的热物性参数，利用实验数据对模拟进行验证，实验系统结构如图 1 所示。



a) 导热系数仪



b) 热重分析仪



c) PV-PCM 装置实物图

图 1 实验系统结构图

Tab.1 Structure diagram of experimental system

单一 PV 和 PV-PCM 组件采用的 PV 型号、尺寸相同，均为 100 W 单晶硅 PV，PCM 采用厚度为

20 mm 的石蜡-十四醇-5% 石墨。PCM 的物性参数为：密度 868 kg/m^3 ；比热容 $2434 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ；热导率 $0.3162 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ；热焓值 170 J/g ；熔化温度 $44 \text{ }^\circ\text{C}$ ；凝固温度 $42 \text{ }^\circ\text{C}$ 。辐照度和空气温度如图 2 所示。采用温度巡检仪和辐照仪分别测量 PV 的温度和辐照度，将 PV 接收的太阳辐射编制为用户自定义函数 (UDF) 并加载到 Fluent 模型中，作为边界条件。基于以上模型的简化和边界条件的假设，分别对 PV 和 PV-PCM 板的表面温度进行模拟，模拟结果如图 3 所示。

在初始温度为 $31 \text{ }^\circ\text{C}$ ，PCM 厚度为 20 mm 时，将辐照度编写为 UDF 文件，作为边界条件，开展多元复合相变材料对 PV-PCM 温度特性的研究分析，通过分析单一 PV 温度及 PV-PCM 板的温度变化，来确定模型的准确性。实验与模拟温度分布如图 3 所示。

由图 3 可以看出，在测试期间 (8:00—17:30)，PV 的模拟和实验的最高值分别为 60.6 和 $61.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ，平均值都为 $49.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。PV-PCM 板的模拟和实验的最高值分别为 59.1 和 $59.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ，平均值分别为 47.6 和 $48.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 。无论是 PV 还是 PV-PCM 板的模拟和实验误差均在 7.6% 以内，具有较好的吻合性。经持续太阳辐射，PV 和 PV-PCM 板的温度开始稳定上升，PV 的升温速率明显大于 PV-PCM 板的升温速率，两者温差越来越大，最大差值为 $8.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 。这是由于铝壳内的 PCM 吸收热量达到相变温度，发生相变，使得 PV 的温度上升缓慢。可见，使用 PCM 对于 PV 有较好的控温效果。此外，数值模拟可以用于预测 PCM 的热导率、热焓值以及厚度等相关参数改变后 PV 的温度变化，分析 PCM 物性参数改变对 PV 控温效果的影响。

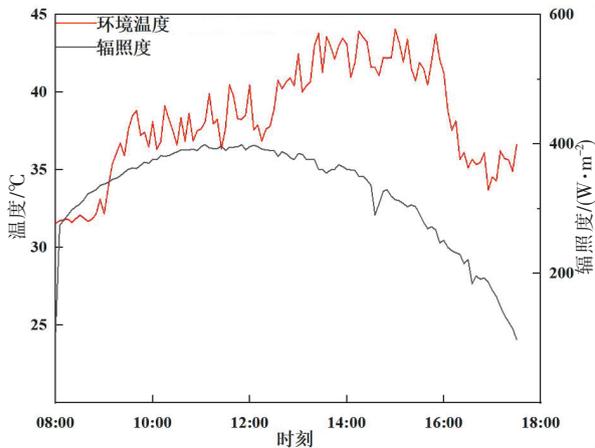


图 2 实验期间气象条件

Fig.2 Meteorological conditions during the experiment

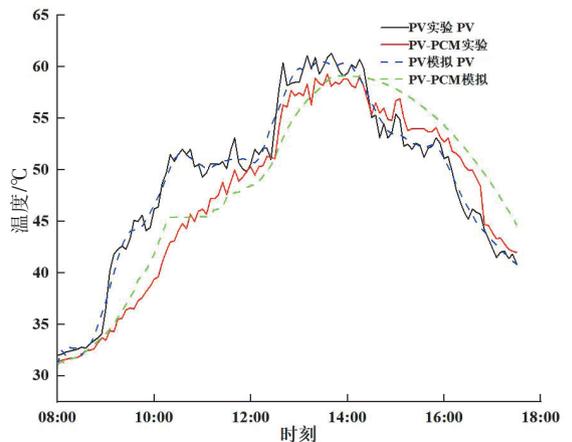


图 3 PV 组件温度实验值与模拟值对比

Fig.3 Comparisons of temperature of PV module from experiments and simulations

3 PV-PCM 系统性能优化模拟

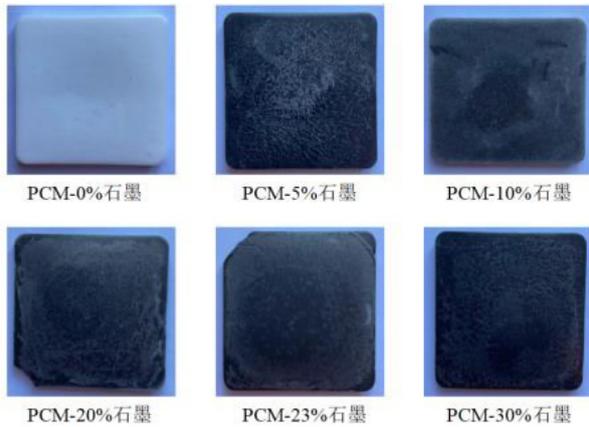
为研究 PCM 物性参数对 PV 控温效果的影响，在初始温度不变的情况下，分别设置 PCM 不同的热导率、热焓值、厚度、封装外壳以及石墨掺混比例，模拟 (8:00—17:30) PV 的温度变化。

3.1 不同质量分数的石墨对 PV 组件的影响

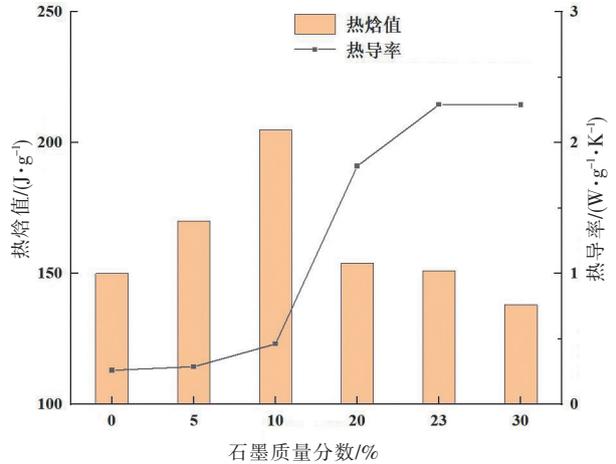
在初始温度为 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ，PCM 厚度为 20 mm 时。将质量分数分别为 5%、10%、20%、23% 和 30% 的石墨作为导热强化助剂添加于石蜡-十四醇相变材料中，探究不同质量分数石墨对 PV 的控温影响。PCM 材料属性如图 4 所示。

由图 4 可知，在 PCM 中添加不同质量分数的石墨会引起热导率和热焓值的变化，热焓值会呈现先增大后减小的趋势，而热导率会持续增加到 $2.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，随后石墨的增加对于热导率的影响不太明显。随着石墨质量分数的改变，PV-PCM 的控温效果会得到不同程度的强化。在石墨质量分数为 10% ~ 20% 区间，热焓值增幅较为明显，出现这一现象的原因是 PCM 的质量分数下降，导致材料蓄

热能力下降, 热焓值降低。因此可以看出, 对于 PCM-石墨复合相变材料, 在保证其导热和储热能力的前提下, 石墨添加量以不超过 10% 为宜。由于 PCM 的热导率和热焓值的综合影响, 复合 PCM 材料对 PV 的控温效果并不总是随着石墨质量分数的增加而上升。相比无石墨的工况, 质量分数更高的工况下 PV 高于 50 °C 的累计时间占比减少, 如图 5 所示。由图 5 可知, 测试期间 (8:00—17:30), 当石墨质量分数为 5% 时, PV-PCM 组件最高温度和平均温度分别为 59.1 和 48.4 °C, 相比单一 PV 温度降低了 1.5 和 0.8 °C。当石墨质量分数为 10% 时, PV-PCM 组件温度下降最为明显, 最高温度和平均温度分别为 55.6 和 43.1 °C, 相比 PV 组件温度降低了 5.0 和 6.1 °C。模拟结果表明, 添加不同质量分数的石墨粉能强化相变 PV 组件的散热特性。当石墨质量分数为 10% 时, PV 处于 50 °C 时刻比例因子最小, PV 组件的控温效果最好。



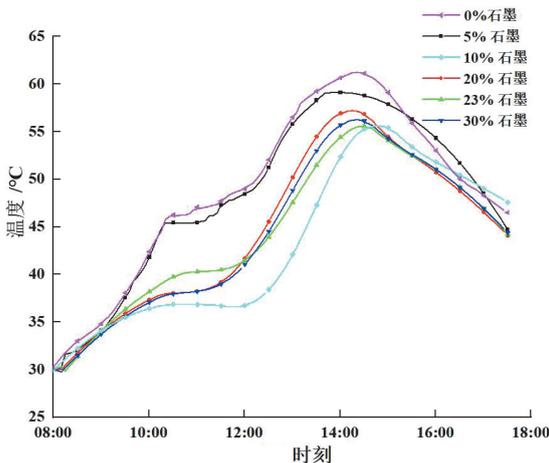
a) PCM 实物图



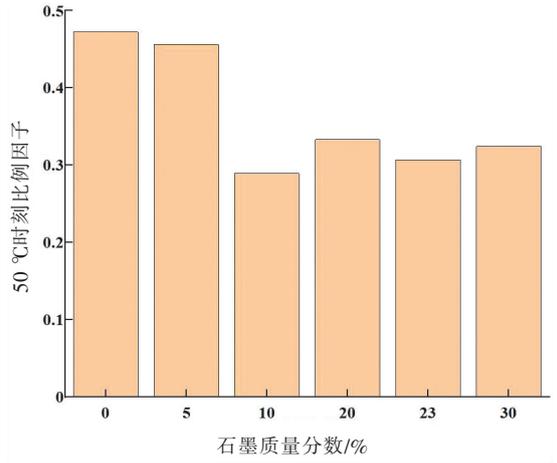
b) PCM 热导率和热焓值

图 4 不同石墨占比的相变材料参数

Fig.4 Parameters of phase change materials with different graphite proportions



a) 组件温度



b) 控温性能

图 5 不同石墨质量分数的 PV-PCM 组件温度和控温性能

Fig.5 Temperature and temperature control performance of PV-PCM modules with different graphite mass fractions

3.2 PCM 不同物理特征对 PV 组件温度的影响

在初始温度为 30 °C, 选用石蜡-十四醇掺混石墨作为相变材料, 可以通过正交实验实现不同的材料参数变化。通过 Fluent 模拟分别设置 PCM 的热导率、热焓值以及厚度。探究不同热导率、热焓值

以及厚度对于 PV-PCM 组件温度的影响。不同热导率、热焓值以及厚度下的 PV-PCM 组件温度变化如图 6~8 所示,性能对比如表 2~4 所示。

由图 6 所示,对比无 PCM 的 PV,当 PCM 热导率在 0.2 ~ 1.8 W/(m·K) 一定范围内时,随着 PCM 热导率的增加,PV 控温的效果得到了相应提升。然而,当热导率超过 1.8 W/(m·K) 后,热导率的增加对 PV 组件热控效果的改善作用并不显著,且 PCM 热导率对太阳能电池的热控效果受到太阳辐照度的影响。从表 2 中可以进一步看出,测试期间(8:00—17:30),随着热导率的提高,PCM 的融化会加快,PV 组件的整体峰值温度会下降,同时组件表面温度升温更慢,背板通过自然对流散热的温差增加,对流换热量增大,因此峰值温度会下降,PV 的控温效果得到提升。

由图 7 和表 3 分析可知,不同的 PCM 热焓值对于太阳能电池温度的控制有着显著影响。在测试期间(8:00—17:30)的变化数据,随着 PCM 板热焓值的不断增加,PV 的升温速率越来越慢,PV 的组件温度也越低。适当地增加热焓值可以有效地降低 PV 组件温度的峰值,以及延迟峰值的时间,使得 PV 的控温效果变得更好。

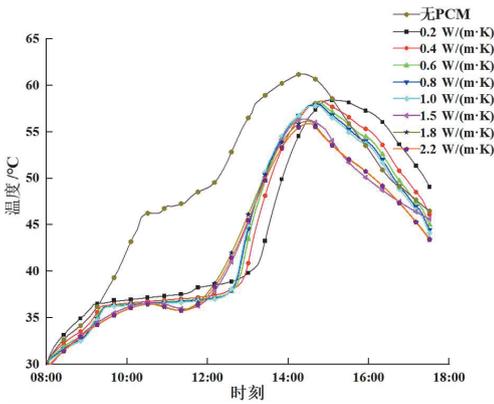


图 6 不同热导率下 PV-PCM 组件温度

Fig.6 PV-PCM module temperatures under different thermal conductivities

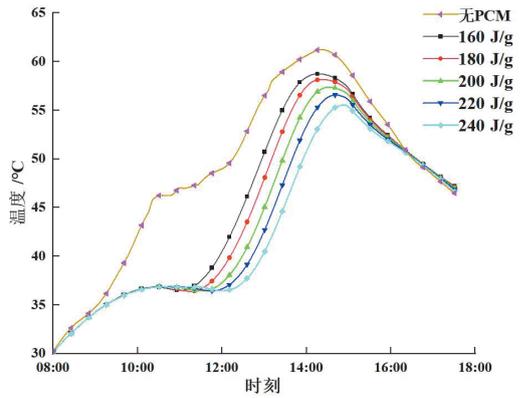


图 7 不同热焓值下 PV-PCM 组件温度

Fig.7 PV-PCM module temperatures under different enthalpy values

表 2 不同热导率下 PV-PCM 性能对比

Tab.2 Performance comparison of PV-PCM under different thermal conductivities

热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	峰值温度/°C	与 PV 最大温差/°C	平均温度/°C	与 PV 平均温差/°C
无 PCM	61.3	0.0	49.2	0.0
0.2	58.4	2.9	44.5	4.7
0.4	58.3	3.0	44.0	5.2
0.6	58.1	3.2	43.9	5.3
0.8	57.9	3.4	43.8	5.4
1.0	57.8	3.5	43.7	5.5
1.5	56.1	5.2	43.1	6.1
1.8	56.0	5.3	43.1	6.1
2.2	55.9	5.4	42.9	6.2

表3 不同热焓值下 PV-PCM 性能对比

Tab.3 Performance comparison of PV-PCM under different enthalpy values

热焓值/(J·g ⁻¹)	峰值温度/℃	与 PV 最大温差/℃	平均温度/℃	与 PV 平均温差/℃
无 PCM	61.3		49.2	
160	58.7	2.6	45.2	4.0
180	58.1	3.2	44.6	4.6
200	57.3	4.0	43.9	5.3
220	56.4	4.9	43.3	5.9
240	55.5	5.8	42.7	6.5

从图8和表4可以看出,随着PCM厚度的增加,控温效果先增加后减小,但整体呈现递增趋势。随着PCM厚度的增加出现峰值温度的时间延迟越大,PV与PV-PCM板的温度差值越大。但是,PCM厚度较小时,厚度变化对PV的控温效果较为明显,当厚度逐渐增大时,递增趋势随着厚度的增加而减小。由于峰值温度会出现滞后性,当周围温度和辐照度降低时,PCM会逐渐放热,此时PV-PCM的温度会高于PV的温度。结果表明,随着PCM厚度的不断增大,PV的升温速率越来越慢,PV的组件温度也越低,所以适当增加复合PCM材料的用量可以有效地延长控温时间,并降低PV的平均温度。

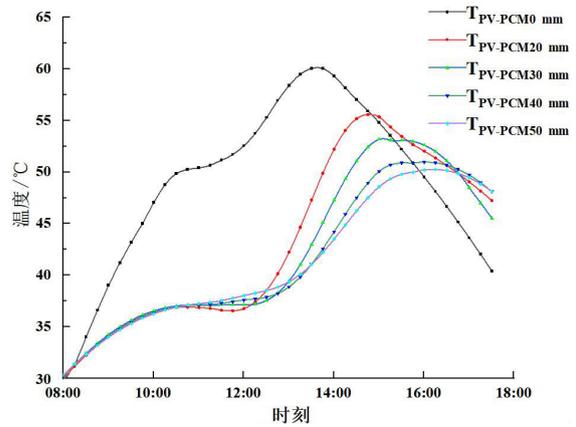


图8 不同厚度下 PV-PCM 组件温度

Fig.8 Temperature of PV-PCM components at different thicknesses

表4 不同厚度下 PV-PCM 性能对比

Tab.4 Performance comparison of PV-PCM under different thickness

厚度/mm	峰值温度/℃	与 PV 最大温差/℃	平均温度/℃	与 PV 平均温差/℃
0	61.3		49.2	
20	55.5	5.8	43.1	6.1
30	53.1	8.2	42.1	7.1
40	50.9	10.4	41.4	7.8
50	50.2	11.1	41.2	8.0

4 结论

1) PV及PV-PCM实验值与模拟值的表面温差和平均绝对误差均在7.6%以内,说明建立的传热模型可用于PV-PCM换热性能模拟研究。石蜡-十四醇掺混5%石墨粉的PV-PCM系统相对于PV温度最多降低了8.6℃,达到了良好的控温效果。

2) 当石墨质量分数为10%,PV-PCM组件温度下降最为明显,平均温度相比PV分别降低了12.3%。选用石蜡-十四醇掺混石墨作为多元复合相变材料进行模拟,在一定范围内,随着热导率和热焓值的增加,可以显著提高PV-PCM的温度控制效果。

3) 随着PCM用量的增加,PV的控温效果越好。当PCM厚度为0~30mm时,控温效果逐渐上

升;当 PCM 厚度为 30 ~ 50 mm 时,控温效果略微下降;当 PCM 厚度为 50 mm 时,峰值温度和平均温度相比 PV 组件温度降低了 18.1% 和 16.2%。因此采用 PCM 的最佳厚度为 50 mm。

[参 考 文 献]

- [1] 左然,施明恒,王希麟,等. 可再生能源概论[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [2] 王金焕. 太阳能光伏发电应用技术[M]. 北京:电子工业出版社,2017.
- [3] 何道清,何涛,丁宏林. 太阳能光伏发电系统原理与应用技术[M]. 北京:化学工业出版社,2018
- [4] 韩林岑,朱群志. 基于相变材料的太阳能电池板温度控制实验研究[J]. 上海电力学院学报,2019,35(4):391-394,403.
- [5] KARTHICK A, PICHANDI R, GHOSH A, et al. Performance enhancement of copper indium diselenide photovoltaic module using inorganic phase change material[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2020, 15(5):2480.
- [6] MOUSAVI BAYGI S R, SADRAMELI S M. Thermal management of photovoltaic solar cells using polyethylene glycol 1000 (PEG1000) as a phase change material[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2018, 5:405-411.
- [7] PASCAL H B, PIERRE E, FREDERIC K, et al. Phase-change materials to improve solar panel's performance[J]. Energy & Buildings, 2013, 62:59-67.
- [8] HASAN A, HUANG M J, EAMES P C, et al. Evaluation of phase change materials for thermal regulation enhancement of building integrated photovoltaics[J]. Solar Energy, 2010, 84(9):1601-1612.
- [9] LI W, GUAN Y, ZHANG X, et al. Experimental and numerical study on performance enhancement of photovoltaic panel by controlling temperature with phase change material[J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(11):16062-16077.
- [10] YANG Y H, HE Y T, XIAO L X. Research on applications of phase change materials in solar cell thermal control[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 354117:012047.
- [11] HE Y T, XIAO L X, YANG Y H, et al. PCM thermal conductivity effect on mechanism of PV/PCM thermal control characteristics[J]. International Journal of Green Energy, 2020, 17(12):783-792.
- [12] PARK J, KIM T, LEIGH S B. Application of a phase-change material to improve the electrical performance of vertical-building-added photovoltaics considering the annual weather conditions[J]. Solar Energy, 2014, 105:561-574.
- [13] 兰康,白建波,张超,等. 光伏组件相变材料控温性能的实验研究[J]. 节能技术, 2020, 38(2):173-177.
- [14] INDARTONO Y S, PRAKOSO S D, SUWONO A, et al. Simulation and experimental study on effect of phase change material thickness to reduce temperature of photovoltaic panel[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2015, 88(1):012049.
- [15] 王云浩. 相变控温式光伏的数值模拟研究[J]. 河南科技, 2021, 40(6):123-125.
- [16] KARTHIKEYAN V, SIRISAMPHANWONG C, SUKCHAI S, et al. Reducing PV module temperature with radiation based PV module incorporating composite phase change material[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 29:101346.
- [17] 张晏清,张雄,金诚瀛. 相变控温光伏电池组件[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(2):320-324.

(责任编辑 马建华 英文审校 郑青榕)