

相变控温光伏电池组件

张晏清, 张 雄, 金诚瀛

(同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 分别以低温石蜡和聚乙二醇作为相变控温材料与光伏电池结合制备相变控温光伏组件(PV/PCM). 实验研究了两种相变材料、聚乙二醇用量以及相变导热结构对组件的控温效果; 实验室与现场测试了 PV/PCM 组件的温度-光辐射-功率曲线. 研究表明, 聚乙二醇作为相变控温材料效果更佳; 增加相变材料用量, 控温时间延长, 但两者间并非线性关系; 采用钢丝束能有效加强传热效果. 聚乙二醇 PV/PCM 组件的最大冷却度达 30 °C, 冷却时间可达 6 h, 组件的开路电压提高 6%, 功率提高 10%.

关键词: 相变材料; 控温; 光伏电池; 光电转化效率

中图分类号: TB34

文献标志码: A

Photovoltaics/Phase Change Materials Component with Temperature Controlling Property

ZHANG Yanqing, ZHANG Xiong, JIN Chengying

(Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Photovoltaics and phase change material(PV/PCM) component system was produced through a combination of low melting point paraffin and polyethylene glycol. The experiments studied the temperature control effect of PCM on PV/PCM with different composition and thermal structures. The temperature-radiation-power curve of PV/PCM system was tested with both laboratorial and field study. The study reveals that temperature controlling period can be lengthened with the increasing PCM content, however no explicit linear relationship is confirmed. The polyethylene glycol is a better temperature controlling PCM and steel wire enhances the heat conduction significantly. The PV/PCM system composed of polyethylene glycol reaches a maximum cooling degree to 30 °C, cooling period to 6 hours. The open circuit voltage of the system increases by 6%, and the power increases by 10%.

Key words: phase change materials (PCM); temperature controlling; photovoltaics (PV); photoelectric conversion

efficiency

随着化石能源的减少与环境污染的加重, 可再生能源的利用已经成为世界范围内的重要研究课题. 太阳能作为可再生能源, 清洁无污染, 并能持续利用, 将成为未来重要能源, 具有广阔的市场开拓空间^[1]. 然而太阳能光伏电池的光电转换效率较低, 提高电池组件效率具有重要意义. 影响电池组件效率的因素包括: 电池组件工作温度、太阳辐照量、组件光学损失及太阳光谱变化^[2]. 单晶硅电池的效率与温度近似成线性关系, 其温度系数约为 $-0.4\% \sim -0.6\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 即对晶体硅太阳能电池而言, 温度每提高 1 °C, 输出功率减少 $0.4\% \sim 0.6\%$ ^[3].

相变材料(PCM)利用物质发生相变时会吸收或放出热量的性质来贮存或放出热能, 进而调整、控制工作元件或材料周围环境温度^[4]. PCM 作为控温材料已经在很多领域得到应用^[5]. Tan^[6]开展了 PCM 应用于电子组件的降温研究; 在手机、笔记本电脑等便携式电子器件中嵌入 PCM 模块可降低其工作温度^[6-7]. 理论上, 采用相变材料可以降低光伏电池温度, 从而提高电池光电效率. Huang^[8]针对石蜡与光伏电池制成的 PV/PCM 系统进行了研究. 在应用相变材料控制光伏电池温度方面的研究国内尚未见报道.

本研究采用石蜡和聚乙二醇(PEG)作为相变材料与硅晶体光伏电池制备得到相变控温光伏电池组件, 研究了系统组件的温度、光辐射度与光电输出参数; 实验室与室外现场测定了相变控温组件的光-电-热关系.

1 实验

1.1 实验材料与仪器设备

实验材料: 46 号石蜡、液体石蜡、聚乙二醇 1000 (均为分析级, 国药集团供应)、环氧树脂、导热硅脂、

铝合金板材、PVC 板材、钢纤维束. 单晶硅太阳能光伏电池 PV(标准电压 18 V, 工作电压 15 V, 光电转化效率 18%, 尚德公司产).

仪器设备: 1000 W 大功率白炽灯、TM-902C-K 型热电偶、VC890C+ 数字万能表、TES-1333 太阳辐照度计、DK-S22 水浴锅、申玻熔点测定仪.

1.2 PV/PCM 系统的制备

相变材料采用低温石蜡与聚乙二醇 1000. 两者分别为长链烷烃和多元醇聚合物, 是两种常用固-液相变材料. 低温石蜡自行制备: 将 46 号固体石蜡与液体石蜡以 1:2 的质量比混合, 水浴加热至 50 ℃, 搅拌至无分层无气泡即可. 测得的相变比焓与熔点见表 1.

表 1 低温石蜡与聚乙二醇的相变比焓潜热与熔点

Tab.1 The phase transition enthalpy and melting point of paraffin and PEG

相变材料	熔点范围/℃	相变比焓/(J·g ⁻¹)	热导率/(W·m·K ⁻¹)
低温石蜡	35~39	105.40	0.150
PEG1000	35~40	137.31	0.187

使用铝合金制成空心矩形管材, 管材侧面制作一玻璃窗口, 以观察 PCM 物相变化. 管材中分别均匀嵌入钢纤维、铝导热翅片作为导热介质. 将上述 PCM 加热到熔点以上 30 ℃ 后分别填充到腔体中. 使用环氧树脂进行封装, 固化 24 h. 固化过程中, 始终保持环氧树脂与 PCM 的充分接触, 防止空气夹入其间. 采用导热硅胶将相变控温板粘结于 PV 板背面制得 PV/PCM, 系统如图 1 所示.

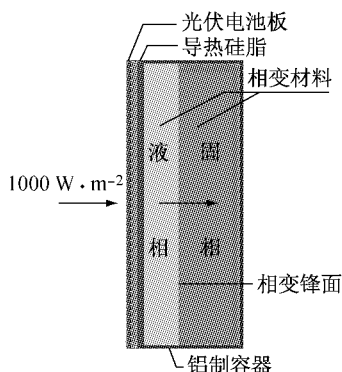


图 1 PV/PCM 系统剖面图

Fig.1 PV/PCM system profile

1.3 PV/PCM 系统的性能检测

使用大功率白炽灯模拟太阳光的光谱和辐照度, 在室内环境温度 25 ℃ 的条件下, 以 1 000 W·m⁻² 的辐照强度对 PV/PCM 系统进行照射, 实验示意图如图 2 所示. 记录 PV 板前后表面温度、相变材

料温度、开路电压对时间的变化曲线, 以及对空白 PV 板相应指标的差值曲线.

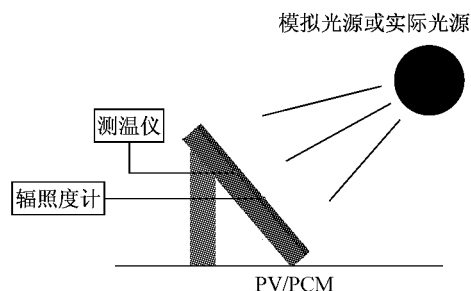


图 2 PV/PCM 系统实验示意图

Fig.2 PV/PCM system simulation plan

2 实验结果与分析

2.1 不同相变材料对控温性能的影响

分别测试低温石蜡和聚乙二醇 PV/PCM 组件的光辐射时间与温度关系, 结果见图 3.

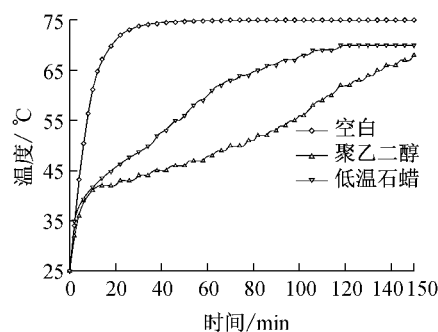


图 3 PV/PCM 与对比 PV 板的辐射时间-温度关系

Fig.3 The relationship of radiation time and temperature between PCM/PV and the control PV

聚乙二醇和低温石蜡系统在辐射受热后, 均产生相变-吸热作用, 两系统组件的升温速率均低于空白参比样本的玻璃基 PV 板; 辐射温度曲线均呈台阶状缓慢上升. 这是由于在相变-传热过程中, 最贴近电池面的 PCM 率先熔化, 在液固界面产生相变锋面, 其温度即为 PCM 熔点; 之后相变锋面逐渐向相变材料纵深发展, 在比热容、散热、相变比焓共同作用下产生的降温效果使温度上升速率降低. 加热一定时间后, 由于相变吸热效应消失, 系统净热增加, 温度升高并最终达到平衡, 如图 4 所示. 与低温石蜡相比, 由于聚乙二醇的相变比焓为 137 kJ·kg⁻¹, 大于前者的 105 kJ·kg⁻¹, 因此聚乙二醇 PV/PCM 系统的升温速率更为缓慢, 表现为辐射温度台阶状曲线更为平缓.

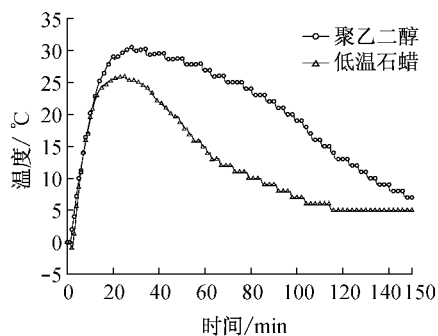


图 4 相对冷却效果对比

Fig. 4 The contrast of relative cooling effect

显然具有高比焓值的聚乙二醇作为 PCM 具有更长的控温时间. 以下对其展开进一步研究.

2.2 相变材料用量对控温性能的影响

当聚乙二醇用量分别为 0, 40, 80, 120, 160 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 时 PV/PCM 温度与温差变化见图 5, 6. 实验表明, 随着 PCM 用量不断加大, 光伏电池的板面温度曲线坡度逐渐平缓, 控温时间延长, 但两者间并非比例关系. 因此增大 PCM 用量, 可以控制光伏电池升温趋势. 根据热力学原理, 光伏电池与 PCM 间的热

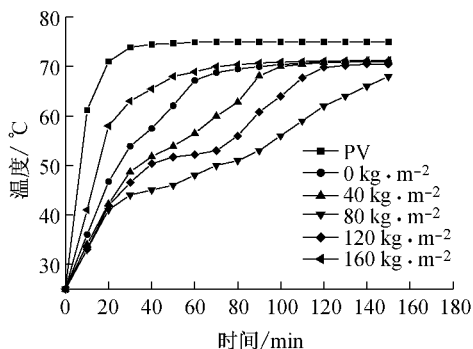


图 5 不同 PCM 用量的 PV 温度

Fig. 5 The temperature of PV with different dosages of PCM

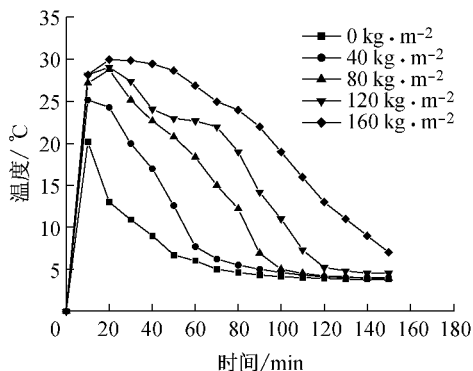


图 6 不同 PCM 用量的相对冷却效果

Fig. 6 The relative cooling effect with different dosages of PCM

传递必须通过相变锋面的不断推进才能维持相变持续进行, 这就使 PV 和锋面间产生温差, 致使相变材料尽管在不断溶解-吸热, 但是温度仍然将逐渐升高, 当锋面推进到一定深度, 在开放环境系统将达到热平衡. 此时的固相 PCM 将不产生相变. 可见, PCM 用量存在一个极限值, 这个极限只与材料本身的性质和所处的热环境有关, 与 PCM 用量无关.

2.3 相变导热结构的性能实验

实验将石蜡相变材料放置在铝制容器装置中, 并对铝制容器分别设置导热翅片和钢纤维强化传热, 导热翅片为铝制, 间距 2 cm, 厚度 1 mm, 贯通相变材料整体并沿热流方向布置; 钢纤维均匀填充于容器腔体中, 在相变材料中形成金属网格.

结果如图 7 所示, 图中 B 表示空白 PV 板, C 表示空白铝制容器与 PV 复合板, D 表示填充石蜡 PV/PCM, E 表示嵌入导热翅片的填充石蜡 PV/PCM, F 表示加入钢纤维的填充石蜡 PV/PCM.

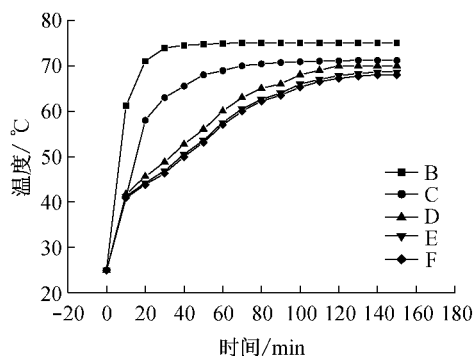


图 7 不同导热结构的 PV 温度

Fig. 7 The temperature of PV with different thermal structures of PCM

图 7 中 B, C 曲线表明, 附加铝合金容器将会强化光伏板的散热能力. 在使用相同的铝合金容器、加入相同用量石蜡的条件下, 改变相变材料内部导热结构, 得到 D, E, F 曲线. 实验表明, 在 PCM 内加入金属导热材料, 可提高冷却效果 15%~20%, 平均温度可降低 15%~20%, 冷却时间可延长 20%~25%.

无论是导热翅片还是钢纤维, 导热材料均加强了热流在液相中的传递, 增加了热流密度, 使同一时刻有更多的 PCM 参与相变, 更多的热量转化为潜热被储存, 从而达到降低温度梯度, 减缓系统的升温速度效果.

由于钢纤维将 PCM 分隔成形状不规则的小单元体, 所以比表面积更大, 传热率更高. 因此, 使用钢纤维产生的导热效果更好, 而且成本更低.

2.4 系统组件光电性能分析

在环境温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、辐照强度为 $1\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的条件下,实验测定了相变控温电池组件的光辐射度-温度-光电效率曲线,实验结果见图 8。图中 A, B 分别代表空白 PV 电池和聚乙二醇 PV/PCM 组件的光伏电池温度,聚乙二醇用量为 $160\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。A1, B1 分别代表相应电池的开路电压。实验表明,光照的最初 10 min 内光电效应占主导地位,在此阶段电子-空穴对的生成速率大于复合速率,载流子密度小,有利于电荷的快速迁移和大量堆积,加之这一阶段光伏板面温度不高,升温对光电性能的负面影响被光电效应抵消,开路电压呈上升趋势,两板差别不大。随着辐射时间延长,对比电池板面温度升高,升温的负面影响开始显现,材料热运动的增加使电子更轻易地突破能垒,电池反向饱和电流增加,导致开路电压较低,电压波动较大。而聚乙二醇 PV/PCM 组件的开路电压较高且较为稳定。相变材料的控温冷却作用使组件的开路电压提高 6%,绝对值提高 1 V。

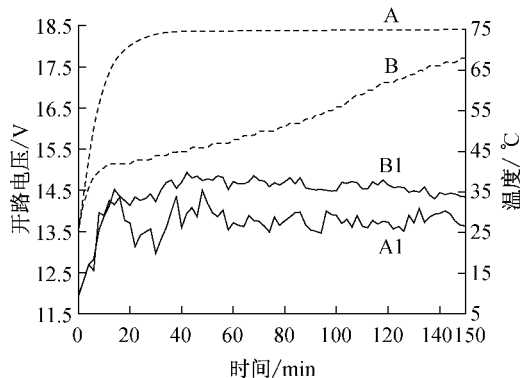


图 8 PV 板的开路电压与板面温度关系

Fig. 8 The relationship of open circuit voltages and PV temperatures

2012 年 7 月 10 日 8:00—18:00, 风力微弱,最高气温 $36\text{ }^{\circ}\text{C}$,日照辐射度在 $200\sim 1\,300\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间,室外实际太阳辐射实验结果见图 9, 10, 11。实验表明,PCM 从 9:00 开始产生控温效果,12:00 控温效果达到最大,在 13:00 日照辐射达到最大之前,最大降温值达到 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。图 10 表明,在 10:00—14:00 时段,功率提高约 10%,效率绝对值提高了 1% 以上。之后,随着相变材料潜热的消耗, PV/PCM 趋近于热平衡,温度接近空白 PV, 逐渐失去控温效果。14:00 后,日照辐射开始下降,空白 PV 由于热容量小,降温很快。而 PCM 的存在使系统的热容量增大;同时, PCM 在降温过程中会反向放出潜热,导致降

温出现滞后,温度高于空白 PV。但由于此时段的日照已相对减少,尤其是 15:00 后,辐照度快速下降,输出功率已相当有限,图 11 表明此时段 PCM 的温度对光伏电池功率的影响基本可以忽略。综合分析表明, PV 的全日照平均输出功率和光电转化效率均

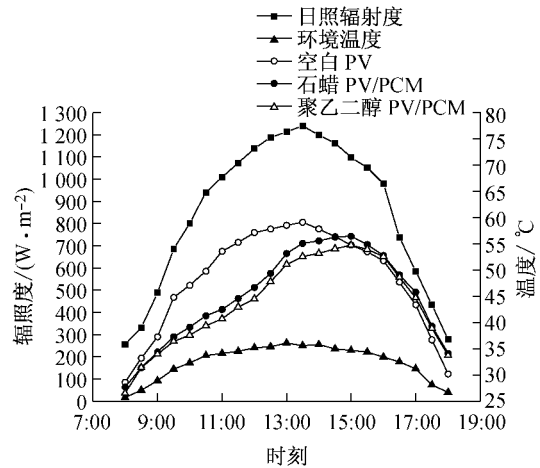


图 9 PV/PCM 组件的辐照度-温度曲线

Fig. 9 The radiation-temperature power curves of PV/PCM components

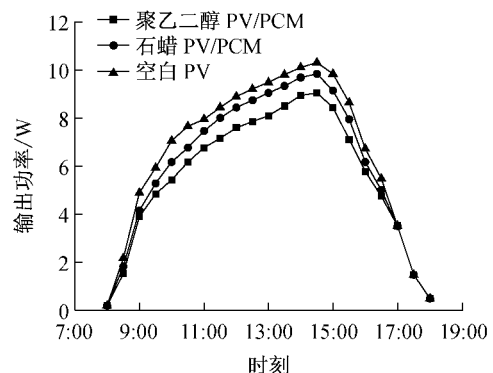


图 10 PV/PCM 组件的温度-功率曲线

Fig. 10 The temperature-power curves of PV/PCM components

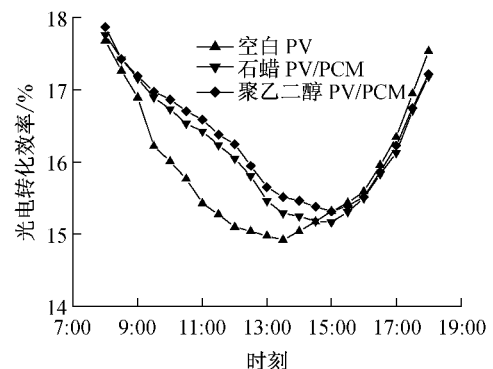


图 11 不同 PCM 的光电转化效率变化曲线

Fig. 11 The curves of photoelectric conversion efficiency with different PCMs

得到有效提高. 18:00 后,日照辐射消失,系统进入放热恢复阶段,夜间时段 PCM 相变材料凝固,可以循环使用发挥作用.

现场实验表明,聚乙二醇的控温效果优于石蜡.

对于相同光电材料,当使用大功率 PV 或串联布置时将可获得更大的开路电压;电压增量绝对值按比例放大.

3 结论

(1) 分别使用低温石蜡与聚乙二醇 1000 作为相变控温材料与光伏电池结合制备了相变控温光伏组件(PV/PCM). 在光辐照下,PV/PCM 组件的电池板温度曲线上上升趋势较普通光伏电池明显减缓.

(2) 在 PV/PCM 系统中使用低温高潜热的 PCM 与强化传热结构有利于光伏电池的控温;增加相变材料用量,控温时间延长,但两者间并非线性关系;聚乙二醇作为相变控温材料效果更佳;采用钢丝束能有效加强传热效果.

(3) 相变控温技术可以提高硅晶体光伏电池的输出功率和光电转化效率.

(4) 聚乙二醇 PV/PCM 组件的最大冷却温度达 30 °C,冷却时间可达 6 h,组件的开路电压提高 6%,输出功率提高 10%.

参考文献:

- [1] 孙振路. 利用太阳能电池板的效率问题探讨[J]. 中国科技信息, 2009(9):44.
- [2] SUN Zhenlu. Discussion of the efficiency of the solar panels[J]. China Science and Technology Information, 2009(9):44.
- [3] 秦红, 沈辉, 张仁元, 等. 温度对太阳能电池效率的影响及改善方法分析[R]. 广州: 中科院广州能源研究所, 2004.
- [4] QIN Hong, SHEN Hui, ZHANG Renyuan, et al. The impact of temperature on the efficiency of solar cells and analysis of methods to improve the efficiency[R]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Energy of Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [5] 陈爱英, 汪学英, 曹学增. 相变储能材料的研究进展与应用[J]. 材料导报, 2003, 17(5):42.
- [6] CHEN Aiyang, WANG Xueying, CAO Xuezheng. Research progress and application of phase change energy storage materials[J]. Materials Review, 2003, 17(5):42.
- [7] Brinkworth B J, Sandberg M. Design procedure for cooling ducts to minimize efficiency loss due to temperature rise in PV arrays[J]. Solar Energy, 2006(80):89.
- [8] Lu T J. Thermal management of high power electronics with phase change cooling[J]. Heat and Mass Transfer, 2000(43): 2245.
- [9] Tan F L, Fok S C. Thermal management of mobile phones using phase change materials[C]// IEEE 9th Electronics Packaging Technology Conference. Singapore: IEEE, 2007: 836-842.
- [10] Pasupathy A, Athanasius L, Velraj R, et al. Experimental investigation and numerical simulation analysis on the thermal performance of a building roof incorporating phase change material for thermal management [J]. Applied Thermal Engineering, 2008(28):556.
- [11] Hasan A. McCormack J S, Huang J M, et al. Evaluation of phase change materials for thermal regulation enhancement of building integrated photovoltaics[J]. Solar Energy, 2010(84): 1601.