

文章编号: 0254-0096(2020)07-0183-07

# 建筑一体化光伏相变系统性能模拟研究

朱丽, 王珍珍, 张吉强, 陈孟栋, 李庆祥, 孙勇

(天津大学建筑学院, 天津 300072)

**摘要:** 选取相变温度为42℃的相变石蜡RT-42作为相变材料,通过合理简化建立PV-PCM系统数值传热模型,运用计算流体力学模拟软件Fluent对天津地区水平放置方式的PV-PCM系统运行特性进行模拟分析与优化。结果表明:PV-PCM系统中封装材料的导热系数越大越有利于光伏降温,夏季工况下PV-PCM系统的降温和光电转换效率提升效果明显优于过渡季和冬季工况。从提高发电量的角度考虑,PV-PCM系统应选择相变温度尽量低的材料作为相变材料。夏季水平放置条件下,以最大产电特性为依据相变石蜡的适宜厚度为60 mm,此时PV-PCM系统与PV系统的最大温差能达到21.9℃,峰值温度延迟2 h,光电转换效率最大提升百分比为19.34%。

**关键词:** 光伏建筑一体化; 相变材料; 传热模型; 数值模拟

**中图分类号:** TK519

**文献标志码:** A

## 0 引言

光伏组件发电效率随工作温度的升高而降低,由于光伏组件热惰性较小会导致太阳辐射最强时组件温度最高,因温升导致光电转换效率下降严重。2006年,Huang等<sup>[1]</sup>将相变材料安置在光伏组件背面,通过相变蓄热的方式来达到控制光伏组件的工作温度的目的。Biwale等<sup>[2]</sup>对光伏相变系统(PV-PCM)内部的热传递数值模型进行了研究。文献[3]实验研究光伏-相变微胶囊(PV/MPCM)系统电热性能,结果表明PV/MPCM的相变温度以及纵横比会对系统的控温效果产生较大影响。为解决相变材料导热系数低及传热慢的问题,文献[4-5]提出在PCM中增加铝片,2种不同PCM材料组合和采用V型槽结构的方法。Browne等<sup>[6]</sup>研究认为相变用于调节晶硅电池温度的经济性优于薄膜电池。深圳大学的廖文宇等<sup>[7]</sup>进行相变储能材料对太阳能光伏墙体降温效果的实验研究。同济大学的张晏清等<sup>[8]</sup>对低温石蜡和聚乙二醇作为相变材料的相变控温光伏组件的控温特性进行实验研究。

上述研究大多是在实验室条件下进行的,缺少实际气象条件下PV-PCM系统的性能研究;运用仿真软件进行PV-PCM系统进行模拟时,很多研究缺少对数值传热模型的验证。为此,本文通过合理简化与假设,

建立PV-PCM系统数值理论传热模型,与实验数据进行对比来验证传热模型的可靠性,运用计算流体力学模拟软件Fluent对天津地区夏季运行工况下水平放置方式的PV-PCM系统运行特性进行模拟分析与优化。

## 1 数学传热模型建立

### 1.1 模型简化

依据相变材料的相变原理,以及天津地区的夏季最高温度,本文选取相变温度为42℃的相变石蜡RT-42作为PV-PCM系统的相变材料。依据实际光伏组件的构造层次,建立传热理论模型如图1所示( $q_{\text{sol}}$ 为光伏玻璃层吸收的太阳辐射, $q_{\text{conv},f}$ 和 $q_{\text{conv},b}$ 分别为光伏玻璃层与外界的对流换热和亚克力板层与外界的对流换热, $q_{\text{rad},f}$ 和 $q_{\text{rad},b}$ 分别为光伏玻璃层与外界的辐射换热和亚克力板与外界的对流换热, $P_{\text{out}}$ 为光伏组件的发电功率)。对组件各层分别进行能量衡算,通过求解能量平衡方程对PV-PCM性能进行预测。图1所示的传热理论模型中1~5为光伏组件部分,为增强数值模拟时的稳定性,考虑到晶硅电池层、晶硅电池上下的两层EVA层和TPT层的各层厚度均很小,参照文献[9]的光伏组件分层理论方法把光伏组件简化两层热质,即

收稿日期: 2018-01-22

基金项目: 国家教育部与国家外国专家局高等学校学科创新引智计划(B13011); 国家自然科学基金面上项目(51478297); 天津市应用基础与前沿技术研究计划青年项目(15JCQJJC43600)

通信作者: 孙勇(1984—),男,博士、讲师,主要从事建筑节能和太阳能建筑一体化方面的研究。yong.sun@tju.edu.cn

将光伏玻璃单独划分为一层热质,将 2~5 层综合成另一层热质,命名为太阳能电池层。模型中各部分的参数如表 1 所示。

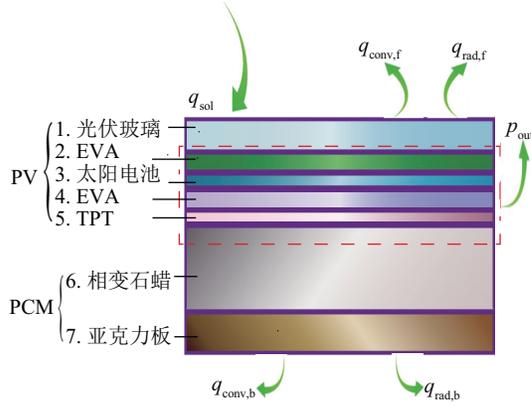


图 1 PV-PCM 系统传热理论模型

Fig. 1 Schematic diagram of heat transfer in PV-PCM system

表 1 PV-PCM 材料参数

Table 1 Properties of PV-PCM materials

材料	导热系数/ $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	密度/ $kg \cdot m^{-3}$	比热容/ $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$	厚度/ mm
光伏玻璃	1.80	3000	500	3
晶硅电池	148	2330	677	0.225
EVA	0.35	960	2090	0.5
TPT	0.20	1200	1250	0.1
RT-42	0.21	890	3220	20
亚克力板	1.80	3000	500	10

太阳能电池层平均比热容  $c_{cell}$  计算公式为:

$$c_{cell} = \frac{A(\rho_2 c_{p2} z_2 + \rho_3 c_{p3} z_3 + \rho_4 c_{p4} z_4 + \rho_5 c_{p5} z_5)}{A(\rho_2 z_2 + \rho_3 z_3 + \rho_4 z_4 + \rho_5 z_5)} \quad (1)$$

太阳能电池层平均密度  $\rho_{cell}$  计算公式为:

$$\rho_{cell} = \frac{A(\rho_2 z_2 + \rho_3 z_3 + \rho_4 z_4 + \rho_5 z_5)}{A(z_2 + z_3 + z_4 + z_5)} \quad (2)$$

太阳能电池层平均导热系数  $\lambda_{cell}$  计算公式为:

$$\lambda_{cell} = \frac{z_2 + z_3 + z_4 + z_5}{\frac{z_2}{\lambda_2} + \frac{z_3}{\lambda_3} + \frac{z_4}{\lambda_4} + \frac{z_5}{\lambda_5}} \quad (3)$$

式中,  $A$  —— 材料面积,  $m^2$ ;  $\rho$  —— 材料密度,  $kg/m^3$ ;  $c_p$  —— 比定压热容,  $J/(kg \cdot K)$ ;  $z$  —— 材料厚度,  $m$ ; 下标序号表示图 1 所示各层材料代号。

## 1.2 系统能量平衡方程

太阳能电池的温度取决于太阳辐射的多少,边界与外界环境的热交换,以及内部各部分的热传递,每层的能量平衡方程如式(4)~式(15)所示。

### 1.2.1 第 1 层(光伏玻璃层):

$$q_{sol} + q_{conv,f} + q_{rad,f} + q_{g-pv} = 0 \quad (4)$$

式中,  $q_{g-pv}$  —— 光伏玻璃层与太阳能电池层的传热,  $W$ 。

$$q_{sol} = A\alpha_{glass} I \quad (5)$$

式中,  $\alpha_{glass}$  —— 光伏玻璃吸收系数;  $I$  —— 太阳的辐照度,  $W/m^2$ 。

$$q_{rad,f} = FA\sigma(\varepsilon_{sky} T_{sky}^4 - \varepsilon_{glass} T_{glass}^4) \quad (6)$$

式中,  $F$  —— 辐射角系数;  $\sigma$  —— 斯蒂芬-玻尔兹曼常数,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ ;  $\varepsilon_{sky}$  —— 天空发射率;  $T_{sky}$  —— 天空温度,  $K$ ;  $\varepsilon_{glass}$  —— 光伏玻璃发射率;  $T_{glass}$  —— 光伏玻璃温度,  $K$ 。

$$q_{conv,f} = Ah(T_{air} - T_{glass}) \quad (7)$$

$$h = 8.55 + 2.56 v_{wind} \quad (8)$$

式中,  $h$  —— 光伏组件表面与室外空气的对流传热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $T_{air}$  —— 室外空气温度,  $K$ ;  $v_{wind}$  —— 风速,  $m/s$ 。

### 1.2.2 第 2 层(太阳能电池层):

$$q_{pv,s} + q_{pv-g} + q_{pv-pcm} = 0 \quad (9)$$

式中,  $q_{pv,s}$  —— 太阳能电池层吸收的太阳辐射,  $W$ ;  $q_{pv-g}$  —— 太阳能电池层与光伏玻璃层的传热,  $W$ ;  $q_{pv-pcm}$  —— 太阳能电池层与相变石蜡层的传热,  $W$ 。

### 1.2.3 第 3 层(相变石蜡层):

$$q_{pcm,s} + q_{pcm-pv} + q_{pcm-ac} = 0 \quad (10)$$

式中,  $q_{pcm,s}$  —— 相变石蜡层吸收或释放的热量,  $W$ ;  $q_{pcm-pv}$  —— 相变石蜡层与太阳能电池层的传热,  $W$ ;  $q_{pcm-ac}$  —— 相变石蜡层与亚克力板层的传热,  $W$ 。

相变石蜡层由于其随温度而发生相态变化,其能量平衡方程为:

$$q_{pcm,s} = mc_{p,pcm} \frac{dT_{pcm}}{dt} + H \cdot \Delta X \quad (11)$$

式中,  $m$  —— 相变石蜡质量,  $kg$ ;  $c_{p,pcm}$  —— 相变石蜡的比热容,  $J \cdot (kg \cdot K)$ ;  $t$  —— 时间;  $H$  —— 相变潜热,  $J$ ;  $\Delta X$  —— 液相率。

### 1.2.4 第 4 层(亚克力板层):

$$q_{ac,s} + q_{conv,b} + q_{rad,b} + q_{ac-pcm} = 0 \quad (12)$$

式中,  $q_{ac,s}$  —— 亚克力板层吸收的热量,  $W$ ;  $q_{ac-pcm}$  —— 亚克力板层与相变材料层的传热,  $W$ 。

亚克力板与外界的辐射换热为:

$$q_{rad,b} = FA\sigma(\varepsilon_{ground} T_{ground}^4 - \varepsilon_{ac} T_{ac}^4) \quad (13)$$

式中,  $\varepsilon_{ground}$  —— 地面发射率;  $T_{ground}$  —— 地面温度,  $K$ ;

$\varepsilon_{ac}$ ——亚克力板发射率;  $T_{ac}$ ——亚克力板温度, K。

$$q_{conv,b} = Ah(T_{air} - T_{ac}) \quad (14)$$

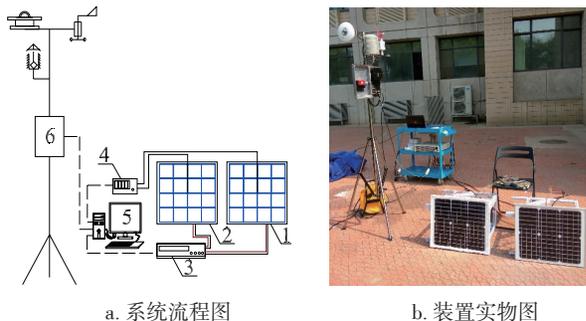
光伏组件的发电功率  $P_{out}$  :

$$P_{out} = A\eta I\tau_{glass} \quad (15)$$

式中,  $\eta$ ——光伏组件光电转换效率;  $\tau_{glass}$ ——光伏玻璃透过率。

## 2 数学传热模型验证

为验证传热模型可靠性,进行空白光伏组件以及耦合相变材料的 PV-PCM 系统的室外对比实验,利用实测数据对模拟结果进行了验证,实验系统结构组成如图 2 所示。



a. 系统流程图  
1. 空白光伏组件 2. PV-PCM 系统 3. 电子负载  
4. 温度记录仪 5. 计算机 6. 便携式气象站  
图2 实验系统

Fig. 2 Performance testing system

空白光伏组件和 PV-PCM 系统所采用的光伏组件型号相同,均为北京天柱阳光单晶硅光伏组件(型号:CSW-SM-30W;尺寸为 550 mm×450 mm×30 mm;最大输出功率为 30 W;峰值功率点电流为 1.67 A;峰值功率点电压为 18 V);光伏组件电流-电压特性曲线由南京美尔诺电子有限公司生产的电子负载测量(型号:M9710);光伏组件背板工作温度由 K 型热电偶测量,数据采用温度记录仪(型号:衡欣 AZ88598)实时记录。测试期间气象数据由锦州阳光 PC-4 型便携式自动气象站记录。2017 年 6 月 27 日对空白光伏组件和 PV-PCM 系统进行室外测试,测试期间光伏组件垂直放置,室外气象条件如图 3 所示。

基于以上对模型的简化及边界条件的假设,分别对空白光伏组件及 PV-PCM 系统进行模拟。模拟中各层边界条件设定方法:1)光伏玻璃盖板、亚克力板与外界相邻的边界设定为 mixed,其中对流换热系数采用式(8)计算;2)光伏组件与相变石蜡区域不直接与外界环境相邻,其内部相邻边界均设为 coupled 耦合

边界;3)光伏玻璃层和太阳能电池层接收的太阳辐射热转化为内热源,将内热源编制为用户自定义函数(UDF)并加载到 Fluent 模型中。模拟结果如图 4 所示。

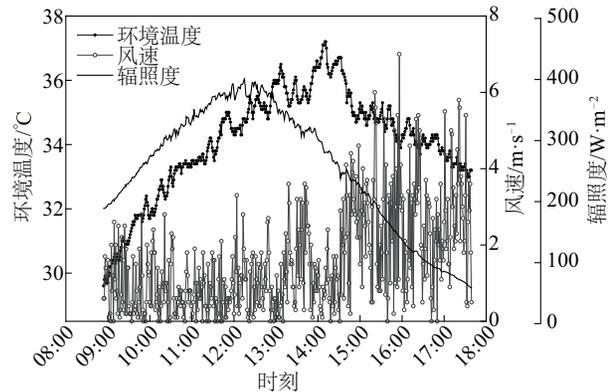


图3 实验期间气象条件

Fig. 3 Weather data during experimental test

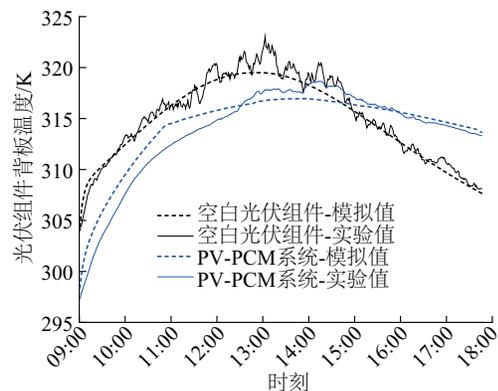


图4 光伏组件背板工作温度实验值与模拟值对比

Fig. 4 Working temperatures of PV module back surface

由图 4 可知,无论是空白光伏组件还是 PV-PCM 系统,组件背板温度的模拟值与实验值均有较好的一致性;光伏组件的实验值比模拟值最大温度差别为 2.7 °C,误差为 5.8%,PV-PCM 系统实验值与模拟值温差最大为 1.9 °C,误差为 4.1%。说明建立的数值传热模型能够较好地与实验结果吻合。

## 3 PV-PCM 系统性能模拟优化

### 3.1 封装方式对 PV-PCM 系统性能的影响

目前研究中对相变石蜡常用的封装方式为亚克力板与铝盒,为探究 2 种封装方式对 PV-PCM 系统性能的影响,建立厚度为 2 mm 的铝盒封装方式 PV-PCM 系统,进行不同封装方式的模拟。选取天津地区典型气

象年<sup>[10]</sup>,夏至日前后天气晴朗、辐照度比较稳定的6月24日的气象条件作为模拟的边界条件,风速取该天平均值2.5 m/s。采用亚克力板与铝盒封装的PV-PCM系统性能模拟结果如图5所示。在00:00~13:00的光伏背板温度升高阶段,铝盒封装的PV-PCM系统光伏组件背板温度相对于亚克力板封装光伏组件背板温度低0.0~1.7℃。在13:00~24:00的光伏组件背板温度降低阶段,铝盒封装的PV-PCM系统光伏背板温度相对于亚克力板封装光伏组件背板温度低1.3~2.8℃。出现这种现象的原因可能是导热系数更大的铝盒能更快地与外界环境进行换热,带走系统更多的热量。

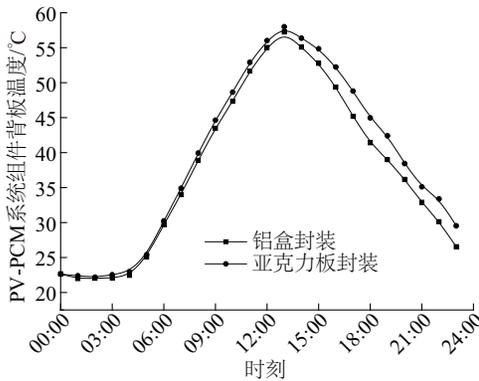


图5 不同封装方式光伏组件背板温度

Fig. 5 Temperatures at back surface of PV-PCM panel with different encapsulation

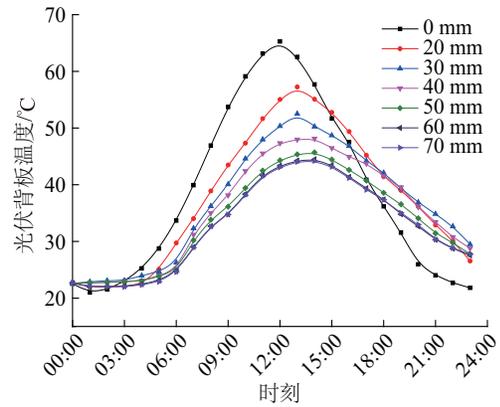
### 3.2 厚度对PV-PCM系统性能的影响

对天津地区铝盒封装的PV-PCM系统水平放置方式下的厚度进行优化,气象条件选取同3.1节。模拟方案分为7组,对应相变石蜡厚度分别为0、20、30、40、50、60和70 mm。

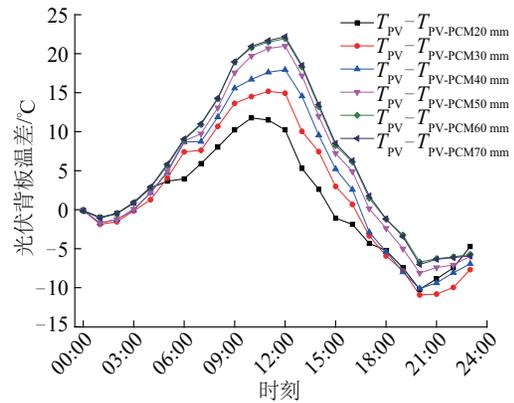
#### 3.2.1 热特性

不同相变石蜡厚度下光伏组件热特性图6所示。随着辐照度的增大与环境温度的升高,PV系统与PV-PCM背板温度均呈现上升趋势,而随着辐照度的减小与环境温度的降低呈现下降趋势,PV-PCM系统温度出现一定的相位延迟,12:00时无相变石蜡的光伏背板温度达到最大值65.2℃,随相变石蜡厚度的增加出现峰值温度的时间延迟越大,PV系统与PV-PCM背板温度差值越大。但是,相变石蜡厚度较小时,厚度变化对光伏温度的控制效果较为显著,当相变石蜡厚度继续增大时,控温效果随厚度的变化不明显。由于相变石蜡热容的作用PV-PCM系统的温度变化趋势较PV温度较缓,

因此当环境温度降低与辐照度减小时会出现PV-PCM系统温度高于PV系统温度的情况。



a. 背板温度



b. 背板温差

图6 不同相变石蜡厚度下PV-PCM系统光伏组件背板温度和背板温差

Fig. 6 Back surface temperatures and temperature difference of PV module with different PCM thickness

#### 3.2.2 电特性

图7所示为不同厚度相变石蜡的光伏光电转换效率随时间的变化趋势。早晨与傍晚由于辐照度较小,虽然系统温度较低,但光电转换效率并无较大的提升,有时反而呈现降低趋势,从而体现了太阳电池的弱光特性。PV系统的光电转换效率在12:00时达到最小值12.31%;带有20、30、40、50、60和70 mm厚相变石蜡的PV-PCM系统,当处于各自温度最高点时,光电转换效率分别为13.10%、13.62%、13.96%、14.22%、14.35%和14.38%。与空白光伏组件相比,光电转换效率的提升随相变石蜡厚度的增加而呈现增加趋势,提升最大值分别为1.28%、1.65%、1.95%、2.28%、2.38%和2.41%。

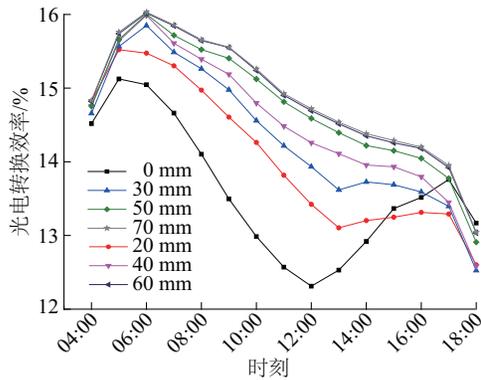


图7 不同厚度相变石蜡下PV-PCM系统光电转换效率

Fig. 7 Efficiency of PV-PCM system with different PCM thickness

图8给出了不同厚度相变石蜡下光电转换效率提升百分比。可看出光电转换效率提升百分比最大分别为9.92%、13.17%、15.81%、18.49%、19.34%和19.56%；光伏光电转换效率提升出现负值时,此时辐照度已经较低,对发电量的影响被降低到一个很小的程度。

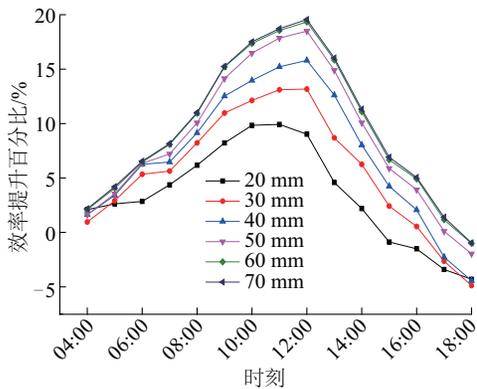


图8 不同厚度相变石蜡下光伏光电转换效率提升百分比

Fig. 8 Relative percentage increase in PV efficiency

不同厚度相变石蜡对应的光伏组件最大功率如图9所示,光伏最大功率随相变石蜡厚度的增加呈现增加趋势,0、20、30、40、50、60和70 mm厚度下PV-PCM系统一天内的光伏最大功率趋势与辐照度变化一致,最大值分别为22.99、25.26、25.99、26.48、27.09、27.24和27.28 W。通过逐时最大功率积分得到光伏系统一天内的最大发电量,其随相变石蜡厚度的变化关系如图10所示。可看出随着相变石蜡厚度的增加,光伏系统发电量呈上升趋势,运用相变石蜡与不运用相变石蜡的光伏系统相比,发电量增加较大,之后继续增加相变石蜡用量,发电量增长趋势变缓。相变石蜡厚度为70 mm时相对相变石蜡厚度为60 mm时发电量基本不变,说明

在辐照度及环境温度一定的情况下继续增加相变石蜡厚度已不能带来发电量的增加,即60 mm为该气象条件下的最适宜厚度,根据图6和图7可知,此时PV-PCM系统与PV系统的最大温差能达到21.9℃,峰值温度延迟2 h,光电转换效率最大提升百分比为19.34%。

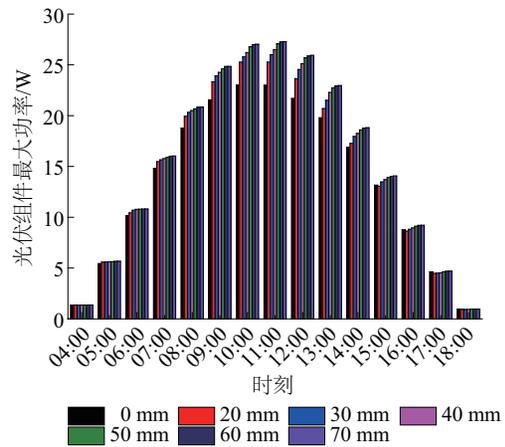


图9 不同厚度相变石蜡对应的光伏组件最大功率

Fig. 9 Photovoltaic maximum power with different PCM thickness

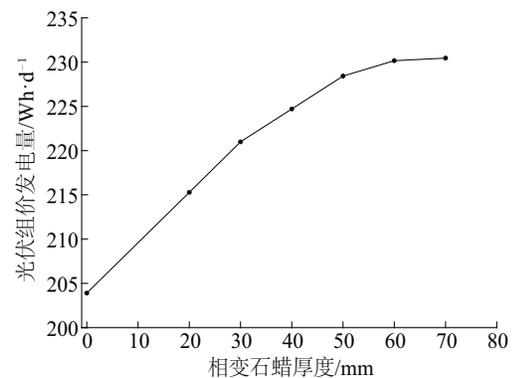


图10 发电量随相变石蜡厚度变化关系

Fig. 10 Photovoltaic power generation with different PCM thickness

### 3.3 不同季节工况PV-PCM系统性能对比分析

分别选取春分日和冬至日作为过渡季和冬季的气象代表日;春分日当天环境温度为5.0~12.6℃,水平总辐照度为0.00~839.12 W/m<sup>2</sup>;冬至日当天环境温度为-7.5~2.9℃,水平总辐照度为0.00~476.48 W/m<sup>2</sup>。对适宜相变石蜡厚度60 mm条件下天津地区水平放置方式的PV-PCM系统在过渡季与冬季工况下的运行性能进行模拟分析。不同季节下的性能对比如表2所示。

表 2 不同季节工况下 PV-PCM 系统性能对比

Table 2 Performance comparison of PV-PCM system under different seasonal conditions

工况	光伏组件	与 PV 系	光电转换效率
	峰值温度/°C	最大温差/°C	最大提升百分比/%
夏季	44.4	21.9	19.34
过渡季	42.5	5.8	4.31
冬季	18.5	0.0	0.00

夏季工况下 PV-PCM 系统中光伏组件背板峰值温度为 44.4 °C, 与 PV 系统的最大温差达到 21.9 °C, 光电转换效率最大提升 19.34%; 过渡季的光伏组件背板峰值温度为 42.5 °C, 与 PV 系统最大温差仅为 5.8 °C, 光电转换效率仅提升 4.31%; 而冬季工况下由于环境温度较低, 光伏组件的峰值工作温度仅为 18.5 °C, 尚未超过相变材料相变温度, 未发生相变, 未对光伏组件起到降温 and 效率提升的效果。这说明相变材料的相变温度与光伏组件峰值温度差别越大, 相变材料相变过程越充分, 越有利于光伏组件降低温度、提高光电转换效率。因此从提高发电量的角度考虑, PV-PCM 系统应选择相变温度尽量低的材料作为相变材料。

### 3.4 PV-PCM 系统建筑一体化集成应用策略

PV-PCM 系统与建筑集成时, 可以从集成位置、设计要素和建筑类型三方面考虑。

1) 集成位置: 与传统光伏建筑一体化集成方式类似, PV-PCM 系统可以与建筑的屋面(平屋面、坡屋面)、墙体、幕墙、构件(阳台、遮阳板)等位置集成; 而且相对于普通光伏组件, PV-PCM 系统的相变模块具有良好的承重与热工性能, 因此可以考虑作为建筑的围护结构直接应用。

2) 设计要素: PV-PCM 系统集成时需要根据建筑的用能需求进行能量匹配设计; 同时, 还需依据建筑美学原则, 从色彩与质感、对称与平衡、尺度与比例这 3 个角度研究相变材料、光伏材料和建筑表皮设计表达。尤其是现在装配式建筑的迅速发展, 可以根据光伏尺寸将光伏相变系统进行模块化处理。

3) 建筑类型: PV-PCM 系统在建筑一体化集成时, 对室内热环境造成一定影响, 在炎热地区使用时需要在夜间设置主动除热装置, 或者应用于主要在白天使用的建筑比如办公建筑或学校; 而在严寒地区使用时则可以利用其热特性减少夜间采暖能耗。

## 4 结 论

选取相变温度为 42 °C 的相变石蜡 RT-42 作为相变

材料, 通过计算平均比热容等对光伏组件几何模型和传热过程进行了合理简化, 建立 PV-PCM 的数值传热模型。运用 Fluent 对传热模型进行模拟验证, 对天津地区夏季运行工况下水平放置方式的 PV-PCM 系统运行特性进行模拟分析与优化, 结果表明:

1) PV 系统和 PV-PCM 系统实验值与模拟值的温差和误差分别不超过 2.7 和 1.9 °C 和 5.8% 和 4.1%, 说明建立的传热模型可用于 PV-PCM 系统性能模拟研究。

2) 铝盒封装的 PV-PCM 系统光伏背板温度相对于亚克力板封装光伏组件背板温度低 1.3~2.8 °C, 说明采用导热系数更大的封装材料能更快地与外界环境进行换热, 更有利于光伏降温。

3) 夏季工况下 PV-PCM 系统的降温和光电转换效率提升效果明显优于过渡季和冬季工况, 从提高发电量的角度考虑, PV-PCM 系统应选择相变温度尽量低的材料作为相变材料。

4) 夏季水平放置条件下, 以最大产电特性为依据, 相变石蜡的适宜厚度为 60 mm, 此时 PV-PCM 系统与 PV 系统的最大温差能达到 21.9 °C, 峰值温度延迟 2 h, 光电转换效率最大提升可达 19.34%。

### [参考文献]

- [1] HUANG M J, EAMES P C, NORTON B. Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics [J]. *Solar energy*, 2006, 80 (9): 1121-1130.
- [2] BIWOLE P H, PIERRE E, KUZNIK F. Phase-change materials to improve solar panel's performance [J]. *Energy & buildings*, 2013, 62: 59-67.
- [3] HO C J, TANUWIJAVA A O, LAI C M. Thermal and electrical performance of a BIPV integrated with a microencapsulated phase change material layer [J]. *Energy & buildings*, 2012, 50(7): 331-338.
- [4] HUANG M J. The effect of using two PCMs on the thermal regulation performance of BIPV systems [J]. *Solar energy materials & solar cells*, 2011, 95(3): 957-963.
- [5] MAITI S, BANERJEE S, VYAS K, et al. Self regulation of photovoltaic module temperature in V-trough using a metal & ndash; wax composite phase change matrix [J]. *Solar energy*, 2011, 85 (9): 1805-1816.
- [6] BROWNE M C, NORTON B, MC CORMACK S J. Phase change materials for photovoltaic thermal management [J]. *Renewable and sustainable energy*

- reviews, 2015, 47: 762-782.
- [7] 廖文宇, 叶永敏, 石宪, 等. 相变储能材料对太阳能光伏墙体降温效果实验研究[J]. 建筑节能, 2014(8): 47-51.  
LIAO W Y, YE Y M, SHI X, et al. Experimental study on influence of phase change material on the temperature of wall with photovoltaic[J]. Building energy efficiency, 2014(8): 47-51.
- [8] 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.  
ZHANG Y Q, ZHANG X, JIN C Y. Photovoltaics/phase change materials component with temperature controlling property[J]. Journal of Tongji University (natural science edition), 2014, 42(2): 320-324.
- [9] SMITH C J, FORSTER P M, CROOK R. Global analysis of photovoltaic energy output enhanced by phase change material cooling[J]. Applied energy, 2014, 126: 21-28.
- [10] 中国气象局气象信息中心气象资料室. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京: 建筑工业出版社, 2005.  
Meteorological Data Office of Meteorological Information Center, China Meteorological Administration. Special meteorological data for analysis of thermal environment in China[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2005.

## SIMULATION STUDY ON PERFORMANCE OF BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAIC COUPLED WITH PHASE CHANGE MATERIAL (PV-PCM)

Zhu Li, Wang Zhenzhen, Zhang Jiqiang, Chen Mengdong, Li Qingxiang, Sun Yong  
(School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The paraffin RT42 with phase transition temperature of 42 °C was selected as phase change material, and numerical models of the PV-PCM system was established through reasonable simplification of PV geometric model. Performance simulation and optimization of PV-PCM system mounted horizontally under the summer operating condition in Tianjin was studied using computational fluid dynamics software FLUENT. The results show that packaging material with greater thermal conductivity is beneficial to reduce PV temperature. PV-PCM system working under summer conditions has better temperature reduction and conversion efficiency increasing than transition season and winter, and to achieve more electricity generation PCM lower phase-transition temperature is preferred. For PV-PCM system positioned horizontally under summer condition, in order to obtain maximum power generation the optimum PCM thickness is 60 mm, the corresponding maximum temperature difference and peak temperature delay between PV and PV-PCM is 21.9 °C, and 2 hours respectively, and the solar cell conversion efficiency can be increased by 19.34%.

**Keywords:** building integrated photovoltaics; phase change materials; heat transfer models; numerical simulation