

翅片式光伏直驱电热相变蓄热墙体传热特性研究

陈 杨¹, 李 勇^{1,2}, 王登甲^{1,2}, 刘艳峰^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学建筑设备科学与工程学院, 西安 710055; 2. 绿色建筑全国重点实验室, 西安 710055)

摘 要: 提出一种光伏直驱式电热相变蓄热墙板供暖末端, 利用光伏直流电驱动电热膜产热供暖, 同时将热量储存于相变材料中。利用多物理场耦合软件 COMSOL 建立其传热模型, 探讨在自然对流条件下添加平直翅片(翅片间距、长度及厚度)对相变蓄热墙板传热过程的影响。研究结果表明: 适当减小翅片间距能够有效缩短相变材料的完全熔化时间, 提高平均蓄热速率, 且延长放热时间, 但影响不甚明显, 当翅片间距小于 25 mm 时, 总蓄热量显著下降; 相同翅片间距下, 翅片长度占据相变材料径向长度的比例越大, 蓄热速率越高; 厚度为 1 mm, 平均蓄热速率达到最大 103.3 kJ/h, 相较于无翅片结构增幅达 27.2%。

关键词: 直驱式光伏电-热系统; 相变材料; 自然对流; 强化传热; 翅片

中图分类号: TK02

文献标志码: A

0 引 言

建筑物在建造和运营过程中的能源消耗占总能源消耗的 33%^[1], 据估算, 中国寒冷和严寒地区的采暖能耗占比高达总能耗的 75%。为了提升建筑节能水平, 必须实现既有建筑节能绿色改造, 并推动可再生能源的应用发展。在众多可再生能源中, 太阳能作为一种重要的清洁能源, 其充分利用以替代或部分替代常规传统能源, 是实现建筑节能的有效途径之一。太阳能光伏利用技术可分为独立光伏系统和并网光伏系统, 与电网的连接在一定程度上限制了其发展潜力。独立光伏系统因其体量较小、建设周期短, 在太阳能资源富集地区展现出广泛的应用前景^[2]。该系统中的光伏组件所产生的直流电可直接为建筑负载供电, 或储存于蓄电池中供后续使用^[3]。然而, 这种方式可能导致初始投资较高, 且对燃料资源过度依赖^[4]。相比来说前一种方式较为简单且成本低。近年来, 电热膜技术^[5-6]的发展为太阳能光伏技术的应用提供了新的可能。使用独立光伏系统驱动^[7]的电采暖技术有望替代传统能源。但由于太阳能的间歇性和不持续性使得在实际建筑供暖过程中面临一定挑战, 尤其在夜间光照不足时无法确保持续稳定的热源供应, 须使用高效可靠的储能技术以平衡太阳能热源的波动性。

相变材料(phase change material, PCM)因其温度相对恒定、能量密度高^[8-9]等优点已被广泛应用于太阳能蓄热与温度调节^[10-11]等领域。在建筑围护结构中应用相变材料^[12], 通过

在白天能量富足时段储存热能, 夜间需求高峰时释放, 从而有效调节室内温度波动, 减少建筑采暖的能源需求, 极大提升了建筑的能源自给自足能力与室内环境舒适性。

将相变材料应用于建筑围护结构中具有显著优势, 但将其与建筑墙体结合时, 相变材料熔化过程所产生的自然对流^[13]现象不可忽略。可通过添加翅片或肋片^[14]等高导热系数材料改善此问题, 而其中平板型翅片因其传热效率高、结构简单等^[15]特点被广泛使用。张立希等^[16]通过实验和模拟发现了添加翅片的相变石蜡热传递效率更高, 且翅片位置和长度都对石蜡熔化速率有着显著影响, 程昊天等^[17]对相变储能器进行模拟和实验研究, 结果表明增加翅片可显著提高翅片内充放热速率; 赵春容等^[18]在优化翅片参数时发现不同材料的翅片在最佳高度及其变化趋势上存在差异; 王梦媛等^[19]设计一种相变蓄热构件, 分析了不同参数肋片下其强化传热机理并优选出最佳肋片参数。

以上研究表明, 光伏驱动电加热的供暖方式能有效提升能源利用效率。然而, 目前研究主要集中于光伏将直流电转化为交流电, 以支持建筑负载的恒定热流密度, 而关于光伏直流电“即发即用、全部消纳”的相关研究较少。基于此, 提出一种光伏直驱式电热相变蓄热墙板供暖末端, 该末端通过电热膜将光伏直流电转化为热能, 以实现对建筑的供暖。本文采用模拟方法分析在周期性太阳辐射条件下, 逐时光伏发电功率作为非定常边界条件对相变蓄热墙体末端传热性能的影响。同时, 探讨翅片的添加对相变材料蓄热性能的潜在

收稿日期: 2024-12-30

基金项目: 国家重点研发计划合作单位项目(2022YFC3802705-05); 陕西省重点研发计划(2024SF-ZDCYL-05-09); 西藏自治区拉萨市科技计划(LSKJ202308)

通信作者: 刘艳峰(1971—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事建筑节能与可再生能源利用方面的研究。yangfengliu@xauat.edu.cn

改善,以期光伏发电在建筑供暖中的设计提供参考。

1 模型建立

1.1 物理模型

本文提出的一种光伏直驱式电热相变蓄热墙板结构如图 1 所示。该结构利用光伏直流电驱动电热膜将电能转化为热能。电热膜产生的热能通过热传导方式有效传递给相变墙体,从而实现热量的存储,达到全天候为建筑供暖的目的。该墙体结构从左至右依次为保温层、电热膜、相变层和装饰层。其中相变材料以宏观封装的形式安装在内墙以增强其热储存能力。此外,采用平直翅片结构来提高电热相变蓄热墙板的蓄热性能。墙体室内侧表面受到室内空气对流换热和表面长波辐射的综合影响。

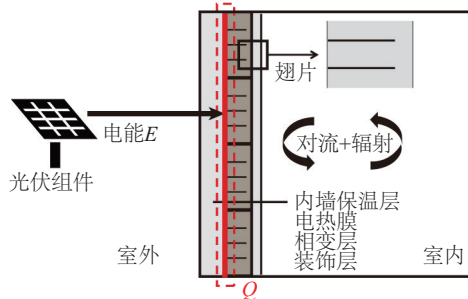


图 1 光伏直驱电热相变蓄热墙体运行原理

Fig. 1 Operating principle of photovoltaic direct drive electric heating phase change heat storage wall

相变材料的选择对采暖系统的性能影响也是至关重要的,一般辐射供暖墙体的表面温度通常保持在 18~24 °C,且相变温度应接近此范围^[20]。文献[21-23]在对相变材料应用于采暖领域的性能进行研究时,其相变温度均在 18~27.5 °C 之间。同时由于石蜡类相变材料应用广泛、易于取得且和建筑的兼容性较好等特点,本文选用的相变材料为 22 °C 的石蜡,其物性参数如表 1 所示。

表 1 相变石蜡及翅片物性参数

Table 1 Physical properties of phase change paraffin

参数	数值(相变石蜡)	数值(翅片)
密度/(kg/m ³)	870	2719
导热系数/[W/(m·K)]	0.21	202.00
比热容/[J/(m·K)]	2200	871
熔化温度/K	295.15	
相变温度间隔/(ΔT/K)	1	
相变潜热/(kJ/kg)	210	
热膨胀系数/K ⁻¹	0.001	
动力黏度/[kg/(m·s)]	0.004	

1.2 数学模型

本文通过建立熔-多孔介质法模型来模拟石蜡相变过程,考虑相变材料熔化过程中的自然对流,为了计算方便,对模型进行合理简化:

- 1) 各层墙体材料分布均匀,且热物性各向同性;
- 2) 相变材料的导热系数、恒压热容等物性参数在固、液态时不随温度变化;
- 3) 相变材料液相状态下为牛顿不可压缩流体,忽略黏性耗散,且密度满足 Boussinesq 近似假定;
- 4) 封装外壳采用纯铝材质,导热系数高且厚度较小,计算过程中忽略其厚度。

基于上述假定,相变石蜡熔化过程为:

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ ——石蜡的密度, kg/m³; u 、 v —— x 、 y 方向上的速度, m/s²。

动量方程:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_x \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho g \alpha (T - T_m) + S_y \quad (3)$$

$$S_x = -C \frac{(1 - \theta)^2}{\theta^3 + q} u, \quad S_y = -C \frac{(1 - \theta)^2}{\theta^3 + q} v \quad (4)$$

式中: μ ——相变材料的动力黏度, Pa·s; θ ——液相分数。

能量方程:

$$\rho \left(\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} \right) = \frac{k}{c_p} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) + \frac{\rho}{c_p} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5)$$

式中: h ——相变比焓, J/kg。

液相分数 θ 通过式(6)定义:

$$\theta = \begin{cases} 0, & T \leq T_l \\ \frac{T - T_l}{T_s - T_l}, & T_l \leq T \leq T_s \\ 1, & T \geq T_s \end{cases} \quad (6)$$

$$T_m = (T_s + T_l)/2 \quad (7)$$

通过液相分数来定义相变材料其他的物性参数:

$$k = (1 - \theta)k_s + \theta k_l \quad (8)$$

$$\rho = (1 - \theta)\rho_s + \theta\rho_l \quad (9)$$

$$c_p = (1 - \theta)c_{ps} + \theta c_{pl} + L \frac{\partial a_m}{\partial T} \quad (10)$$

$$a_m = \frac{\theta\rho_l - (1 - \theta)\rho_s}{2\rho} \quad (11)$$

式中: T_s 、 T_l ——相变材料熔化开始、中止温度, K; c_p ——定压

比热容, $J/(kg \cdot K)$; c_{ps} 、 c_{pl} ——相变材料固相、液相的比热容, $J/(kg \cdot K)$; k_s 、 k_l ——相变材料固相、液相的导热系数, $W/(m \cdot K)$; ρ_s 、 ρ_l ——相变材料固相、液相的密度, kg/m^3 ; a_m ——质量分数。

1.3 模拟设置

基于上述方程和边界条件,采用 COMSOL 软件,空间选择二维,物理场选择层流、固体和流体传热。为提高计算收敛性,在左上侧施加压强约束点。

该模型的初始条件和边界条件为:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{t=0} = T_{init} \quad (12)$$

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0, y=0.02} = 0 \quad (13)$$

右边界室内侧散热表面为第三类边界条件:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = a(T - T_{in}) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_{in}^4) \quad (14)$$

式中: T_{in} ——室内温度, 设为 $16^\circ C$; a ——对流换热系数取 $8.7 W/(m^2 \cdot K)$; ε ——辐射换热系数, 取 0.93。

左侧为第三类边界条件:

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{x=0} = Q(\tau) \quad (15)$$

$$Q(\tau) = I^2 R \eta \quad (16)$$

$$E = IV \quad (17)$$

式中: $Q(\tau)$ ——电热膜在以光伏直流电为电源驱动下所产生的随时间变化的热量, J ; E ——光伏组件的发电量, W ; I ——光伏组件实际工作状态下输出电流, A ; V ——光伏组件实际工作状态下输出电压, V ; R ——电热膜特征电阻, Ω ; η ——电热膜的能量转换效率。

其中光伏直驱电热膜采暖系统的构建可参考文献[24], 通过 TRNSYS 软件模拟拉萨地区典型气象年 1 月 23 日光伏直驱发电系统光伏组件逐时发电功率(光伏组件运行时间为 09:00—19:00), 并利用计算机模块构建出电热膜产热模型, 作为相变蓄热墙体的入口边界, 如图 2 所示。

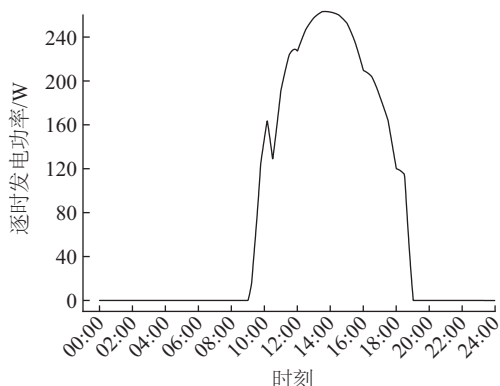


图2 电热膜逐时发电功率随时间变化曲线

Fig. 2 Hourly power generation curve of electric heating film over time

2 网格独立性检验与模型验证

2.1 网格独立性检验

为了计算方便,选取实验模型的 1/5 进行模拟仿真。在数值模拟中,为了计算精确且节省资源,需对划分出的网格进行无关性检验,以未添加翅片的相变蓄热模块进行分析,网格数量分别为 14953、31658 和 55175。3 种网格数量下 PCM 液化率随时间的变化如图 3 所示,可发现 3 种网格数量下液化率模拟结果差异不大,认为此时计算结果与网格数量无关,选择网格数量为 31658 进行计算。

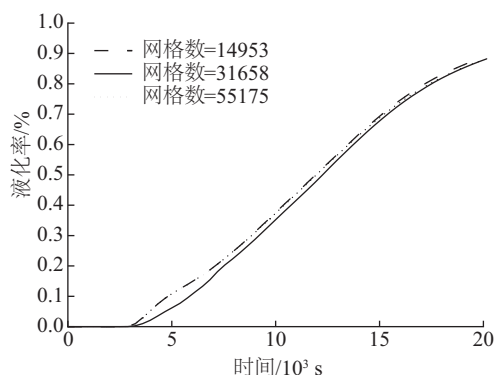


图3 网格无关性检验

Fig. 3 Grid independence test

2.2 模型验证

2.2.1 表面温度验证

为验证模型的准确性,搭建电加热相变蓄热实验测试平台,相变材料选取海南科依诺公司生产的宏观封装好的石蜡,相变材料物性参数如表 2 所示。电加热相变蓄热模块(图 4)从左至右依次为聚苯板保温层(60 mm)、铝箔纸反射层、电热膜、相变材料层(15 mm)及水泥砂浆装饰层(10 mm)。将其用木质框架(1 m×1 m)固定后贴附与实验房间内墙测,如图 5 所示。

表2 翅片模拟参数设置

Table 2 Fin parameter settings

	间距	长度	厚度
间距/mm	100, 50, 40, 25, 20	12	1
长度/mm	50	3, 6, 9, 12	1
厚度/mm	50	12	0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0

分别在相变材料层表面和水泥砂浆装饰层表面均匀布置 5 个温度测点,如图 4 所示。为了测量结果的准确性,测量结果取其平均值。室内初始温度为 $16^\circ C$ 。使用加热功率为 $200 W/m^2$ 的电热膜进行实验测试;使用 K 型热电偶测量各层表面温度及室内温度,精确度为 $\pm 1\%$;使用安捷伦数据采集仪收集测量数据,精确度为 0.004。

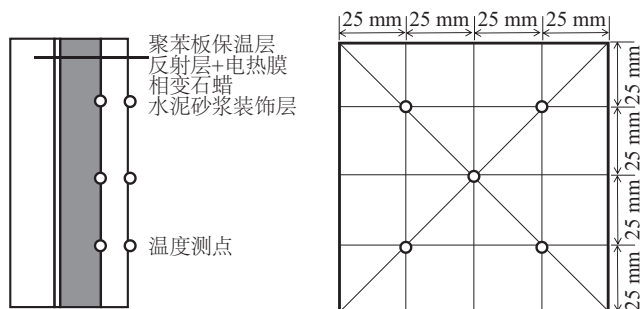


图4 实验平台结构及表面测点布置

Fig. 4 Experimental platform structure and surface measurement point layout

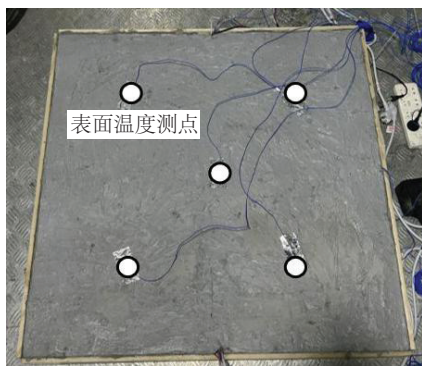


图5 实验现场测试图

Fig. 5 Experimental field diagram

如图6所示,建立实验系统物理模型,并将相应边界条件作为模拟的边界条件,开展数值模拟计算。对比实验结果与模拟结果可发现,实验值与模拟值相差不大。表面温度实验数据与模拟数据整体偏差不超过10%,说明模型计算的准确性。

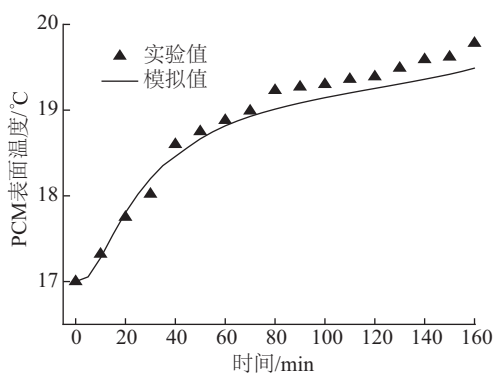


图6 相变层表面温度测试值与模拟结果对比

Fig. 6 Comparison between temperature test results and simulation results of phase change layer surface

2.2.2 熔化凝固模型验证

为验证相变材料熔化凝固模型,将当前模型与文献[16]中的相变石蜡熔化实验进行对比,实验值和本文模拟值的对比如图7所示,可看出其吻合较好,虽在部分时间点上的温度演化有些许误差,但大体相似,由此可说明本文的模型可

靠,可进行相关模拟研究。

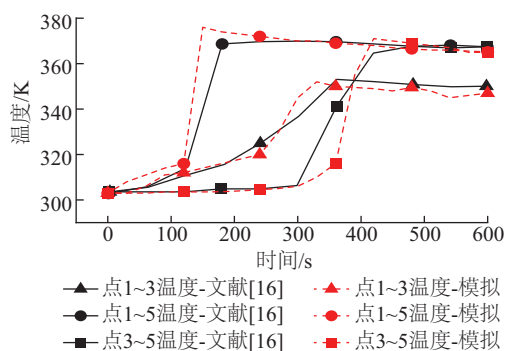


图7 表面温度模拟值与文献值对比

Fig. 7 Comparison between simulated surface temperature values and literature values

3 结果与讨论

3.1 添加翅片及间距对传热性能的影响

有未添加翅片的相变蓄热模块在不同时刻的相变云图如图8所示,将系统开始运行时间(即09:00)设置为起始时间0 h。可观察到,在相变石蜡熔化的初始阶段,靠近左侧加热面的区域率先开始熔化,此时,熔化前沿始终保持一致,平行于左右两侧并垂直向前推进,随着加热时间的延长,液相体积也随之增加,当加热时间达到4 h时,自然对流作用显著增强,此时传热机制转变为导热和对流,从而引起内部密度差,进而产生浮力效应,使得高温液相逐渐上升至顶部,而低温固相则下沉,形成稳定的温度梯度,熔化前沿开始向右下部分推进,整个熔化过程呈现从上至下的规律。但在放热过程中,传热主要以导热方式进行,可发现,自然对流对放热的影响较小。

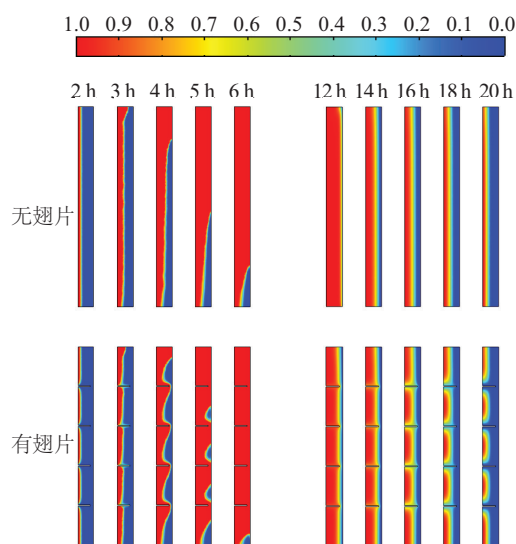


图8 传热过程相变云图变化

Fig. 8 Phase change cloud map and temperature cloud map of thermal storage process

与未添加翅片结构的相变云图相比,添加翅片后的相变材料呈现出明显不同的熔化演化规律。由于翅片具有较高的导热系数,靠近翅片区域的相变材料熔化程度更高,并在相邻翅片之间形成类似波峰状的凹陷分布。尤其在蓄热后期,翅片结构能够有效强化下部区域相变材料的传热与熔化过程,促进温度场均匀发展,从而提高整体换热速率和蓄热效率。

图 9a 展示了添加不同翅片间距下相变材料液化率的变化曲线,蓄热过程开始时间即为系统开始运行时间。显示熔化前期 6 条液化率曲线基本相似,但当蓄热进行到后期时,可发现添加翅片的相变材料熔化速率明显快于无翅片结构。总体来看,翅片的加入有效缩短了相变材料熔化时长。图 9b 表明,在凝固过程初期,翅片的添加对液化率的影响较为明显,然而,在后期阶段,翅片间距对其液化率的影响差异则较小,总体来看,适量减小翅片间距可缩短相变材料凝固时间,但效果并不显著。

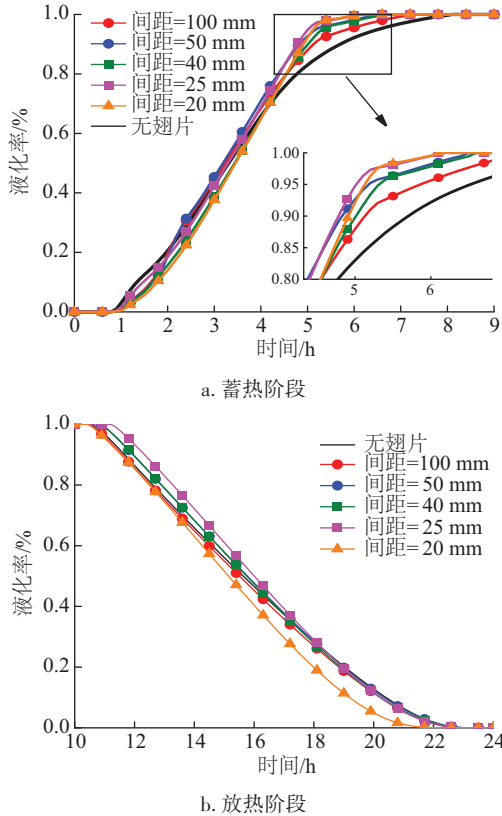


图 9 不同翅片间距下液化率变化

Fig. 9 Changes in liquefaction rate under different spacing of fins

由于仅减少翅片间距可能会使得相变材料体积减少,所以不能仅以相变时间来衡量,还需考虑整体的蓄热量及蓄热速率。图 10 给出了添加不同翅片间距(100、50、40、25 及 20 mm)对相变材料蓄热过程的影响,包括相变材料完全熔化时间、蓄热量以及平均蓄热速率的变化。当翅片间距从 100 mm 减至 20 mm 时,相变材料的完全熔化时间相较于无翅片分别

缩短 12.2%、20.7%、19.5%、24.4% 和 25.6%。总体而言,添加翅片有效缩短了相变材料的熔化时间,其主要原因在于翅片的高导热性,从而增强了相变材料内部的热交换效率,促使熔化速率加快。此外,随着翅片间距的减小,这导致翅片之间的相变材料所产生的自然对流作用逐渐减弱。

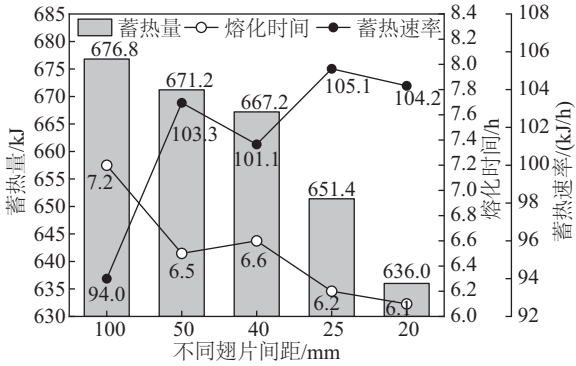


图 10 不同翅片间距下蓄热量、熔化时间和蓄热速率对比

Fig. 10 Comparison of heat storage, melting time, and heat storage rate under different spacing of fins

当翅片间距从 100 mm 减至 40 mm 时,蓄热量显著降低,但蓄热速率从 94.0 kJ/h 提升到 103.3 kJ/h,增幅为 10%。然而,当翅片间距从 50 mm 进一步降低至 40 mm 时,蓄热量及平均蓄热速率变化幅度明显减小,这表明翅片间距减小至某一临界值后,对熔化过程的增强效果不再显著。在翅片间距减至 20 mm 时,相变材料的完全熔化时间降至最低,仅为 6.1 h,但蓄热量却大幅降低,因为翅片间距的减小导致相变材料的总体积逐渐减少,从而影响了其蓄热能力。

表 3 显示,添加翅片对放热时长及平均放热速率的影响较小。翅片间距从 100 mm 减至 20 mm 时,放热时长相较于无翅片增加 6.7%、14%、13.3%、15 % 和 11.3%,平均放热速率增加 15.6%、7.5%、7.5%、4% 和 5.6%,这与图 9 中的分析一致,翅片的间距对放热过程所产生的影响有限,为兼顾其整体蓄热量与平均蓄热速率,选择间距为 50 mm 结构为最佳方案。

表 3 不同翅片间距下放热时长、放热量及放热速率对比

Table 3 Comparison of heat release duration, heat release, and heat release rate under different spacing of fins

翅片间距/mm	放热时长/h	放热量/kJ	放热速率/(kJ/h)
0	15.0	666.2	35.8
100	16.0	663.7	41.4
50	17.1	657.8	38.5
40	17.0	654.5	38.5
25	17.3	643.5	37.2
20	16.7	631.2	37.8

3.2 翅片长度对传热性能的影响

针对上述结论,由于翅片对放热过程影响较小,故下述只对其蓄热过程进行考虑分析。对翅片间距为 50 mm、厚度为 1 mm 的相变蓄热模块进行模拟分析,研究翅片长度分别占据其内部总长度 20%(3 mm)、40%(6 mm)、60%(9 mm)和 80%(12 mm)位置对其性能的影响,图 11 展示了在不同翅片长度下蓄热量、熔化时间及平均蓄热速率的变化趋势,结果表明,翅片长度对相变材料的传热具有显著影响。当翅片长度从 3 mm 逐渐增至 12 mm 时,完全熔化时间相较于无翅片分别缩短 6.1%、14.6%、15.8% 和 20.7%。与此同时,蓄热速率也有明显的提升,相较于无翅片的增幅为 8.3%、19.3%、21.1% 和 27.2%,结果表明,随着翅片长度的增加,相变材料的完全熔化时间逐渐减少,而平均蓄热速率则逐渐增加。

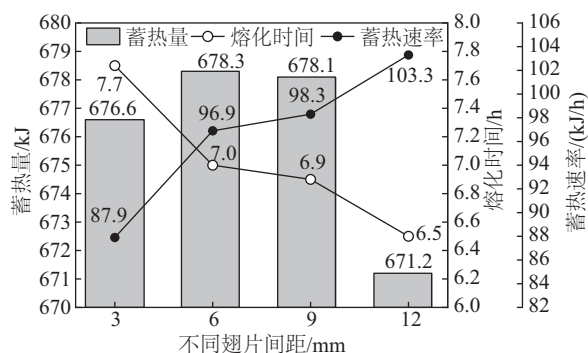


图 11 不同翅片长度下蓄热量、熔化时间和蓄热速率对比
Fig. 11 Comparison of heat storage, melting time, and heat storage rate under different fin lengths

在翅片长度达到 12 mm 时,熔化时间达到最短,同时平均蓄热速率也达到最高值,这一现象归因于较长的翅片长度能有效增加翅片和相变材料之间的接触面积,从而提高了换热效率,促使相变材料的熔化过程并提高整体传热速率。

3.3 翅片厚度对传热性能的影响

对翅片间距为 50 mm、长度为 12 mm 的相变蓄热构件在不同翅片厚度下进行模拟分析,相变材料完全熔化时间、蓄热量和蓄热速率的影响结果如图 12 所示。当翅片厚度分别为 0.2、0.5、1.0、2.0 和 4.0 mm 时,相变材料的完全熔化时间分别为 6.9、6.8、6.5、6.7 和 6.6 h,变化幅度相较于无翅片分别减少 15.9%、17.1%、20.1%、18.3% 和 19.5%。蓄热速率相较于无翅片的增幅为 20.4%、22.4%、27.2%、22.0% 和 20.1%。总体来看,翅片厚度的增加能有效缩短相变材料完全熔化时间,但总蓄热量却减少。

当翅片厚度为 0.2 mm 时,由于翅片所占体积较小,相变材料整体体积也达到最大,因此总蓄热量最高,然而当翅片厚度从 1 mm 增至 2 mm 时,完全熔化时间反而增加 0.2 h,蓄热量下降 7.2 kJ,同时蓄热速率也降低 4.2 kJ/h,这一现象表明,简单地增大或减少翅片厚度并不一定会缩短相变材料熔

化时间。过厚或过薄的翅片均可能会影响其性能优化,进而延长其蓄热时间,降低蓄热速率。

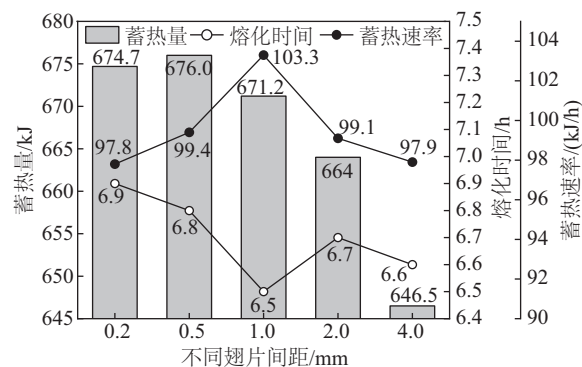


图 12 不同翅片厚度下蓄热量、熔化时间和蓄热速率对比
Fig. 12 Comparison of heat storage, melting time, and heat storage rate under different fin thicknesses

4 结 论

本文提出一种光伏直驱式电热相变蓄热墙板,并在非定常边界条件下研究翅片参数对其蓄热性能的影响,得到以下主要结论:

1)翅片的添加加快相变材料的熔化过程,并提高其蓄热速率,在直翅片结构下且翅片间距分别为 100、50、40、25 和 20 mm 的相变蓄热构件中,相变材料完全熔化时间相较于无翅片缩短的范围为 12.2% 到 25.6%。蓄热速率增幅的范围为 15.7% 到 29.4%,在翅片长度为 12 mm、厚度为 1 mm 条件下,翅片间距为 25 mm 时蓄热速率达到最大值 105.1 kJ/h,但当翅片间距进一步减小,总蓄热量却出现明显下降。

2)翅片长度对相变材料蓄热过程具有显著影响,随着翅片长度的增加,相变材料完全熔化时间逐渐缩短且蓄热速率显著提高。在翅片间距为 50 mm 时,翅片长度分别为 3、6、9 和 12 mm 时,相变材料完全熔化时间相较于无翅片缩短的范围为 6.1%~20.7%,平均蓄热速率增幅的范围为 8.3%~27.2%,且翅片长度为 12 mm 时蓄热速率最高。

3)翅片厚度为 0.2、0.5、1.0、2.0 和 4.0 mm 时,相变材料完全熔化时间相较于无翅片缩短的范围为 15.9%~20.1%,蓄热速率也相应提高,相较于无翅片增幅范围为 20.1%~27.2%;过厚或过薄的翅片厚度均可能影响其蓄热速率,在翅片间距为 50 mm、长度为 12 mm、翅片厚度为 1 mm 时蓄热速率达到最大。

[参考文献]

- [1] NEJAT P, JOMEHZADEH F, TAHERI M M, et al. A global review of energy consumption, CO₂ emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO₂ emitting countries) [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2015, 43(C): 843-862.

- [2] 尹淦. 太阳能光伏发电主要技术与进展[J]. 电力技术, 2009, 18(10): 2-6, 14.
YIN S. Main technology and progress of solar photovoltaic power generation[J]. Electric power technology, 2009, 18(10): 2-6, 14.
- [3] 王永利, 张吉林, 逢博, 等. “双碳”目标下的分布式光伏发展前景[J]. 科技与创新, 2023(15): 59-61.
WANG Y L, ZHANG J L, PANG B, et al. Development prospect of distributed photovoltaic under the goal of “double carbon” [J]. Science and technology & innovation, 2023(15): 59-61.
- [4] LI J Z, LIU P, LI Z. Optimal design and techno-economic analysis of a solar-wind-biomass off-grid hybrid power system for remote rural electrification: a case study of West China[J]. Energy, 2020, 208: 118387.
- [5] JEONG Y G, AN J E. UV-cured epoxy/graphene nanocomposite films: preparation, structure and electric heating performance [J]. Polymer international, 2014, 63(11): 1895-1901.
- [6] LU P B, CHENG F, OU Y H, et al. A flexible and transparent thin film heater based on a carbon fiber/heat-resistant cellulose composite [J]. Composites science and technology, 2017, 153: 1-6.
- [7] 雷小苗, 何继江, 杨守斌, 等. 能源转型视域下“零碳乡村”的可行性和环保性: 以陕西关中 C 县 F 村为例 [J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2020, 22(5): 32-41.
LEI X M, HE J J, YANG S B, et al. Feasibility and environmental protection of “zero carbon rural” from the perspective of energy transition: take F village in middle area of Shaanxi Province as an example [J]. Journal of Beijing Institute of Technology (social sciences edition), 2020, 22(5): 32-41.
- [8] 徐龙, 王海, 高艳娜, 等. 复合相变材料对轻质围护结构建筑室内热环境调节性能研究[J]. 建筑科学, 2013, 29(12): 45-49, 107.
XU L, WANG H, GAO Y N, et al. Study on performance of composite PCM (phase-change material) 's adjusting indoor thermal environment of light weight enclosure buildings [J]. Building science, 2013, 29(12): 45-49, 107.
- [9] PRABAKARAN R, DHAMODHARAN P, SATHISHKUMAR A, et al. An overview of the state of the art and challenges in the use of gelling and thickening agents to create stable thermal energy storage materials [J]. Energies, 2023, 16(8): 3306.
- [10] FARAJ K, KHALED M, FARAJ J, et al. A review on phase change materials for thermal energy storage in buildings: heating and hybrid applications [J]. Journal of energy storage, 2021, 33: 101913.
- [11] 王鑫, 方建华, 刘坪, 等. 相变材料的研究进展[J]. 功能材料, 2019, 50(2): 70-75.
WANG X, FANG J H, LIU P, et al. Research progress of phase change materials [J]. Journal of functional materials, 2019, 50(2): 70-75.
- [12] 陈佳慧, 康鑫. 冬季太阳能相变蓄热通风墙热工性能的数值模拟[J]. 太阳能学报, 2023, 44(4): 522-530.
CHEN J H, KANG X. Numerical simulations on thermal performances of passive solar ventilated walls with latent heat storage in winter [J]. Acta energiae solaris sinica, 2023, 44(4): 522-530.
- [13] SOARES N, GASPAR A R, SANTOS P, et al. Experimental evaluation of the heat transfer through small PCM-based thermal energy storage units for building applications [J]. Energy and buildings, 2016, 116: 18-34.
- [14] GOVINDARAJ K, PANCHABIKESAN K, DENKENBERGER D, et al. Effect of fin orientations in a spherically encapsulated PCM for effective heat transfer enhancement [J]. Chemical engineering transactions, 2017, 277-282.
- [15] 刘景成, 张树有, 周智勇. 板翅换热器流道结构改进与流体流动性能分析[J]. 机械工程学报, 2014, 50(18): 167-176.
LIU J C, ZHANG S Y, ZHOU Z Y. Analysis of channel structure improvement and its influence on fluid flow in plate-fin heat exchanger [J]. Journal of mechanical engineering, 2014, 50(18): 167-176.
- [16] ZHANG L X, ZHANG Z Y, YIN H. Comprehensive study on melting process of phase change material by using paraffin coupled finned heating plate for heat transfer enhancement [J]. Sustainability, 2022, 14(5): 3097.
- [17] 程昊天, 贺明飞, 原郭丰, 等. 矩形翅片管糖醇相变储热器传热性能分析[J]. 太阳能学报, 2024, 45(2): 244-250.
CHENG H T, HE M F, YUAN G F, et al. Heat transfer performance analysis of rectangular finned tube sugar alcohol phase change heat reservoir [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(2): 244-250.
- [18] ZHAO C R, WANG J Y, SUN Y B, et al. Fin design optimization to enhance PCM melting rate inside a rectangular enclosure [J]. Applied energy, 2022, 321: 119368.
- [19] 王梦媛, 刘衍, 杨柳, 等. 相变蓄热构件传热强化及其对轻质墙体蓄热性能提升研究[J]. 建筑科学, 2019, 35(4): 28-35, 59.
WANG M Y, LIU Y, YANG L, et al. Heat transfer enhancement of building component with phase change material (PCM) and thermal storage performance of lightweight composite wall [J]. Building science, 2019, 35(4): 28-35, 59.

- [20] 张仁元. 相变材料与相变储能技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
ZHANG R Y. Phase change materials and phase change energy storage technology [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [21] SHEIKHOLESLAMI M, AL-HUSSEIN H R A. Analyzing efficiency of solar heat storage unit within a building including Trombe wall equipped with phase change material in existence of fins [J]. Journal of building engineering, 2023, 71: 106406.
- [22] MI X, CHEN C, FU H Q, et al. Experimental study on heat storage/release performances of composite phase change thermal storage heating wallboards based on photovoltaic electric-thermal systems[J]. Energies, 2023, 16(6): 2595.
- [23] ROYON L, KARIM L, BONTEMPS A. Thermal energy storage and release of a new component with PCM for integration in floors for thermal management of buildings [J]. Energy and buildings, 2013, 63: 29-35.
- [24] LIANG Y X, WANG D J, LI Y, et al. Novel approach to remote rural heating: Direct coupled photovoltaic electric heater underfloor heating system with phase change materials [J]. Applied thermal engineering, 2024, 250: 123525.

RESEARCH ON HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF FINNED PHOTOVOLTAIC DIRECT-DRIVE ELECTRIC HEATING PHASE CHANGE HEAT STORAGE WALL

Chen Yang¹, Li Yong^{1,2}, Wang Dengjia^{1,2}, Liu Yanfeng^{1,2}

(1. School of Building Equipment Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. National Key Laboratory of Green Building, Xi'an 710055, China)

Abstract: A panel heating terminal with photovoltaic direct drive electric heating phase change heat storage wall panel heating terminal is proposed, which uses photovoltaic DC to drive the electric heating film to produce heat and store the heat in the phase change material at the same time. The heat transfer model is established by using the multi physical field coupling software COMSOL, and the effect of adding flat fins (fin spacing, length and thickness) on the heat transfer process of phase change heat storage wall panel under natural convection conditions is discussed. The results show that properly reducing the fin spacing can effectively shorten the complete melting time of PCM, improve the average heat storage rate, and extend the heat release time, but the effect is not obvious. When the fin spacing is less than 25 mm, the total heat storage decreases significantly; Under the same fin spacing, the greater the proportion of fin length to the radial length of PCM, the higher the heat storage rate; When the thickness is 1 mm, the average heat storage rate reaches the maximum of 103.3 kJ/h, which increases by 27.2% compared with the structure without fins.

Keywords: direct-drive photovoltaic electric-heating system; phase change materials; natural convection; heat transfer enhancement; fins