

文章编号:0254-0096(2019)02-0496-09

# 日光温室相变蓄热墙体最佳组合厚度的模拟研究

时盼盼<sup>1</sup>, 吕建<sup>1</sup>, 孙于萍<sup>1</sup>, 李宪莉<sup>1</sup>, 王博<sup>2</sup>, 王雷波<sup>1</sup>

(1. 天津城建大学能源与安全工程学院, 天津 300384; 2. 天津津能滨海新能源有限公司, 天津 300384)

**摘要:** 为合理确定日光温室复合相变墙体蓄热层与保温层的最佳厚度, 该文从日光温室墙体动态传热特性角度出发, 通过EnergyPlus模拟, 研究复合相变墙体蓄热层与保温层厚度不同对温室热性能的影响。结果表明: 墙体蓄热保温性能的增大随蓄热层与保温层厚度的增加是有限的, 对于天津地区, 推荐使用的日光温室三重结构墙体的最佳组合厚度为40 mm相变材料(phase change materials, PCM)+300 mm加气混凝土+50 mm聚苯乙烯泡沫板EPS(expanded polystyrene board, EPS), 其中40 mm PCM和50 mm EPS可作为墙体蓄热性和保温性的“转折点”; 优化后的复合相变墙体与同热阻的土墙、砖墙相比最高温度分别降低1.65、2.59 °C, 最低温度分别提高2.04、2.90 °C, 可明显减小温室全天温度波幅, 有效改善温室热环境的整体水平; 土地占用面积比同热阻的土墙、砖墙分别减少81%、60%, 可提高土地利用率。

**关键词:** 日光温室; 墙体; 蓄热层; 保温层; EnergyPlus

**中图分类号:** S625.1

**文献标识码:** A

## 0 引言

日光温室墙体承载着集热、蓄热、承重和保温等多重功能, 是温室冬季和夜间重要的供热源。墙体蓄热保温能力的好坏, 直接影响到温室作物能否安全生长, 进而影响作物产量。因此, 依据蓄热保温材料热工性能和温室种植区域的气候条件, 确定温室墙体蓄热层、保温层的最佳厚度, 是提高温室墙体蓄热保温性能和降低温室墙体建造成本的重要前提。

目前, 为提高墙体的蓄热保温性能, 国内外的专家学者对日光温室墙体的研究主要集中在墙体材料及结构等方面, 取得很多研究成果。李建设等<sup>[1]</sup>对夯实黏土墙体日光温室的蓄热保温性进行研究分析; 杨建军等<sup>[2]</sup>对日光温室土质墙体的厚度进行相关研究; Berroug等<sup>[3]</sup>研究不同墙体组合与材料的保温性能; 张勇等<sup>[4]</sup>对主动蓄热后墙日光温室的室内温度和通风蓄热风道蓄热特性进行理论分析和试验验证; 李明等<sup>[5]</sup>对日光温室墙体蓄热层厚度的确定进行研究; Gosselin<sup>[6]</sup>对不同结构日光温室保

温性进行研究。

虽然对日光温室墙体的结构以及材料研究较多, 但目前在日光温室墙体的传热特性分析中针对日光温室复合相变墙体蓄热层与保温层的优化研究较少, 至今尚未制定出适用于不同地区墙体蓄热层及保温层厚度的标准。因此, 本文的研究基于日光温室墙体的动态传热特性, 提出一种优化日光温室复合相变墙体蓄热层与保温层的方法, 即结合天津地区日光温室种植区域的气象条件, 利用EnergyPlus软件模拟日光温室墙体蓄热层与保温层厚度不同对温室热性能的影响, 确定适用于该地区日光温室复合相变墙体的最佳组合厚度。

## 1 物理模型

以位于天津郊区某蔬菜种植基地温室大棚为参考建立物理模型(见图1), 该温室为被动式太阳能采暖温室。温室大棚坐北朝南, 东西延长, 围护结构由北墙、东西墙、南向塑料薄膜和地面土壤等组成。温室长60 m, 跨度9 m, 脊高4.7 m, 北墙高3.4 m, 前屋面角28.9°, 后屋面角43.2°。屋面使用

收稿日期: 2016-10-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51678385); 天津市教委社会科学重大项目(2016JWZD33)

通信作者: 时盼盼(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事建筑节能与可再生能源方面的研究。2215767322@qq.com。

聚氯乙烯耐老化无滴日光塑料薄膜,夜间覆盖保温被。保温被每天上午 09:00 开启,下午 16:00 关闭。若 11:00~14:00 温度过高则采取通风措施。温室内种植低矮类作物,且间隙较大,对透过塑料薄膜照到地面土壤上的阳光遮挡较小,可忽略不计。为保证温室作物正常生长,室内温度不宜低于 8 ℃。

基于日光温室墙体构筑原理及方法,及文献[7]

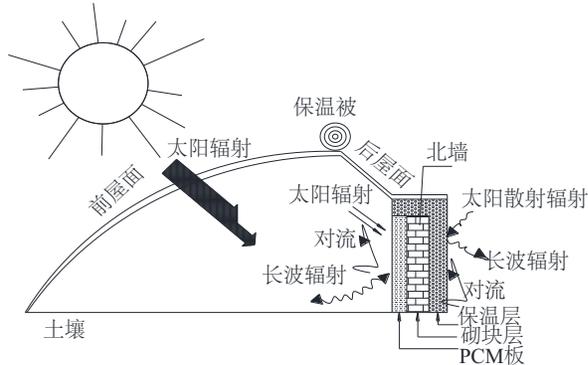


图1 温室大棚的物理模型

Fig. 1 Physical model of greenhouse

所建立的三重结构墙体模型,选定该温室大棚的外墙为三重结构,由内到外依次为蓄热层,砌块层和保温层,其中蓄热层选用以玻化微珠颗粒为主要成分的相变材料,砌块层选用加气混凝土且厚度选定为 300 mm,保温层选用聚苯板。本文研究所选用的相变材料比热随温度的变化情况如图 2 所示,其余各围护结构材料参数如表 1 所示。

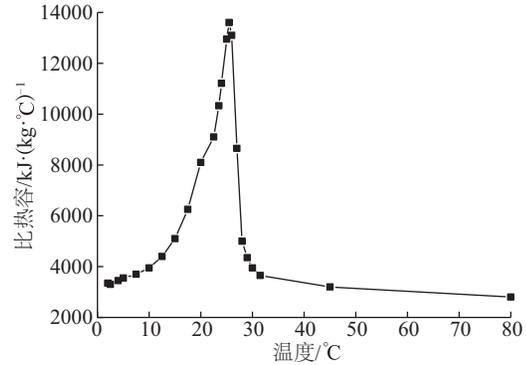


图2 相变材料(PCM)比热随温度变化

Fig. 2 Specific heat-temperature curve of PCM

表1 围护结构材料参数

Table 1 Material parameters of building envelopes

材料名称	密度/kg·m <sup>-1</sup>	导热系数/ W·(m·℃) <sup>-1</sup>	热吸收率	比热容/ kJ·(kg·℃) <sup>-1</sup>	厚度/mm	透过率	应用位置
加气混凝土	680	0.24	0.90	1.07	300.00	0.00	东、西、北墙
水泥板	1700	0.90	0.70	0.75	200.00	0.00	后屋面
保温层	25	0.05	0.60	1.80	变化	0.00	北墙内表面
PCM层	511	0.56	0.75	变化	变化	0.00	各墙外表面
保温被	200	0.11	0.60	0.20	40.00	0.00	前屋面
土壤层	500	1.00	0.90	1.00	无限大	0.00	地面
大棚薄膜	75	0.11	—	—	0.12	0.80	前屋面

## 2 数学模型

### 2.1 假设条件

根据三重结构墙体构造特点,墙体传热模型以非稳态传热为理论基础。为简化传热模型作以下假设: 1)忽略沿墙体高度方向热量传导,按一维导热处理; 2)各层墙体均为匀质且各向同性材料; 3)墙体内部的传热只有导热,忽略对流作用; 4)忽略相变材料在融化状态时的自然对流和凝固时的过冷效应; 5)忽略各层材料间的接触热阻; 6)墙体内部不存在内热源。

### 2.2 控制方程

日光温室墙体内部温度分布的导热微分方程式为:

$$\rho c \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} - \rho r \frac{\partial f}{\partial \tau} \quad (1)$$

傅立叶定律解析式为:

$$q(x, \tau) = -\lambda \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \quad (2)$$

式中,  $\tau$  ——温室大棚塑料薄膜透过率;  $c$  ——墙体材料的比热容, kJ/(kg·℃);  $\rho$  ——墙体材料的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\lambda$  ——墙体材料的导热系数, W/(m·℃);

$r$ ——相变潜热,  $\text{kJ/kg}$ ;  $q$ ——沿  $x$  方向传递的热流密度,  $\text{W/m}^2$ ;  $x$ ——导热面的坐标,  $\text{m}$ ;  $T_m$ ——相变材料的相变熔化温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x}$ ——墙体沿  $x$  方向的温度梯度;  $f$ ——相变时, 液体所占比重, 满足:

$$\begin{cases} f=1, & T > T_m \\ f=0, & T < T_m \\ 0 < f < 1, & T = T_m \end{cases}$$

### 2.3 边界条件

日光温室外墙(包括北墙、东西墙)应满足以下 2 个热平衡方程:

1)  $x=0$ , 墙体内表面(PCM 层)热平衡方程:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \rho_r \tau I_z + \alpha_r (t_r - t_{in}) + q_r \quad (3)$$

$$q_r = \sum_i^n \sigma_b \varepsilon_r x_i (T_r^4 - T_i^4) \quad (4)$$

式中,  $\rho_r$ ——墙体内表面对太阳光照的吸收率;  $I_z$ ——各时刻不同朝向的太阳总辐照度,  $\text{W/m}^2$ ;  $\alpha_r$ ——墙体内表面对流换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $t_r$ ——墙体内表面温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{in}$ ——室内空气温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $q_r$ ——墙体内表面与其他壁面的辐射换热量,  $\text{W/m}^2$ ;  $\sigma_b$ ——黑体辐射常数, 取值  $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  $x_i$ ——墙体内表面与其他壁面之间的角系数;  $\varepsilon_r$ ——系统黑度, 取值 0.75;  $T_r$ ——墙体内表面的热力学温度,  $\text{K}$ ;  $T_i$ ——其他围护结构各壁面的热力学温度,  $\text{K}$ ;  $i$ ——其他壁面和其他围护结构;  $n$ ——墙体的层数。

2)  $x=L$  ( $L$  为沿  $x$  方向墙体在  $L$  处的位置, 即墙体的厚度为  $L$  处。  $L$  为墙体外表面, 即保温层), 墙体外表面(保温层)热平衡方程为:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \rho_a I_z + \alpha_a (t_{out} - t_a) - q_{lw} \quad (5)$$

$$q_{lw} = \sigma \varepsilon_w \left[ (x_{sky} + x_g \varepsilon_g) T_a^4 - x_{sky} T_{sky}^4 - x_g \varepsilon_g T_g^4 \right] \quad (6)$$

式中,  $\rho_a$ ——墙体外表面对太阳光照的吸收率;  $\alpha_a$ ——墙体外表面对流换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $t_{out}$ ——室外空气温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_a$ ——墙体外表面温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $q_{lw}$ ——墙体外表面对天空、地面的长波辐射热量,  $\text{W/m}^2$ ;  $\sigma$ ——辐射系数;  $\varepsilon_w$ ——墙体外表面对长波辐射的系统黑度, 取值 0.6;  $\varepsilon_g$ ——地面的黑度, 其取值为 0.9;  $x_{sky}$ ——墙体外表面对天空的角系数;  $x_g$ ——墙体外表面对地面的角系数;  $T_{sky}$ ——

有效天空温度,  $\text{K}$ ;  $T_g$ ——地表温度,  $\text{K}$ ;  $T_a$ ——墙体外表面温度,  $\text{K}$ 。

### 2.4 求解方法

复合相变墙体的热平衡方程以及传热模型在形式上与普通墙体完全相同, 区别在于要考虑复合墙体相变材料在相变传热过程中的特殊性, 则相变传热问题的求解成为墙体热平衡方程求解的难点。相变材料在传热过程中会出现 3 种状态, 因此在求解过程中应针对固态、液态以及固液熔融态分别建立传热模型:

$$\frac{\partial T_s}{\partial \tau} = \alpha_s \nabla^2 T_s, \text{ 固相区} \quad (7)$$

$$\frac{\partial T_l}{\partial \tau} = \alpha_l \nabla^2 T_l, \text{ 液相区} \quad (8)$$

$$k_s \left( \frac{\partial T_s}{\partial x} \right)_{\xi} - k_l \left( \frac{\partial T_l}{\partial x} \right)_{\xi} = r \rho v_{\xi}, \text{ 固液熔融态区} \quad (9)$$

式中,  $v_{\xi}$ ——物态界面移动的速度,  $\text{m/s}$ ,  $v_{\xi} = d\xi/dt$ ,  $\xi$ 、 $t$  分别为反应进度和时间; 下标  $s$  和  $l$  分别表示固相和液相。

在相变问题求解时, 利用有限差分法对相变过程建立一个“焓法模型”。焓法模型的主要思路是将热焓和温度一起作为待求函数, 在整个区域(包括液相、固相和两相界面)建立统一的能量方程, 利用数值方法求出热焓分布, 然后确定两相界面。数学上已证明, 焓法模型的基本方程和描述相变问题的常用方程是等价的。

焓法的基本方程是积分形式:

$$\frac{d}{d\tau} \int_V \rho dV + \int_V \rho dA = \int_V k dA + \int_V q dV \quad (10)$$

当固、液两相的比热容分别为常数时, 温度与焓的关系式  $H = HTF(T_i)$  可表示为:

$$T = \begin{cases} H/c_{p,s}, & H < H_s \\ \frac{H + (T_m - \varepsilon)r/(2\varepsilon)}{c_{p,s} + r/(2\varepsilon)}, & H_s \leq H \leq H_l \\ T_m + \varepsilon + \frac{H - H_l}{c_{p,l}}, & H > H_l \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $\varepsilon$ ——相变半径;  $H_s$ 、 $H_l$ ——相变材料固态、液态的焓,  $\text{kJ/kg}$ 。

在不考虑对流及热源的情况下, 将式(11)代入式(7)~式(9), 并假定固、液相比热容为常数, 则可得:

$$\rho \frac{\partial H}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (12)$$

这就是简化的基于焓法模型的相变热传导方程,其核心是在整个区域(固相、液相和两相界面)建立统一的能量方程,来求解相变传热问题。其优点是无需跟踪界面,便于数值计算,物理意义较为明确。

### 3 数值模拟

#### 3.1 软件介绍

EnergyPlus 是一款常用于建筑能耗与建筑热环境模拟分析的软件<sup>[8]</sup>。该软件可按研究需要构建建筑的数学模型,通过输入墙体材料的热物性参数、几何参数以及温室作息时间等参数进行能耗模拟分析。该软件提供了可用于相变材料(phase change material, PCM)模拟分析的 PCM 模块,该模块采用一维导热有限差分求解算法(CondFD)<sup>[9]</sup>。CondFD 算法通过了诸多国际测试机构的验证<sup>[10]</sup>。在 CondFD 算法中,离散时间步长可由用户自行设置,建议 1 h 不应少于 4 次。在该模拟计算中,设置时间步长为 1 min。此外,PCM 模块采用 PCM 的焓值-温度函数耦合的方法解决 PCM 相变问题。

#### 3.2 日光温室动态模型的建立与参数设置

在模拟计算中,日光温室除了墙体蓄热层、保温层厚度变化外,其余各结构参数以及作息时间均与物理模型建立时所述一致。其中,墙体蓄热层厚度在 0~9 cm 范围内变化,保温层厚度在 2~8 cm 范围内变化。运用 Sketchup 软件建立日光温室三维模型,然后将其导入 EnergyPlus 软件中进行计算。在该模型中输入 PCM 板参数时,它的焓值-温度关系是依据图 2 所示的比热计算出对应温度下的焓值,然后将涵盖整个相变区间对应温度下的焓值输入到 PCM 模块中,之后再导入天津地区室外气象参数,对建立的温室模型进行模拟,从而求得日光温室各壁面不同时刻的温度、传热量以及室内空气温度等参数。计算时间为天津地区的典型供暖天,即 2015-12-25 至 2015-12-29,共 5 d, 120 h。

## 4 结果与分析

### 4.1 PCM厚度的确定

#### 4.1.1 PCM厚度对北墙内表面温度的影响

由图 3 可知,墙体内表面温度受室外气温和太阳辐射的影响,表现出以 24 h 为周期昼升夜降的特点,符合简谐波动的规律。由于墙体相变蓄热层具有较高的热容性,导致墙体内表面温度的变化滞后于室外气温的变化。

在砌块层厚度和保温层厚度一定时(300 mm 砌块层+50 mm 保温层),随着 PCM 厚度由 0 cm 增至 9 cm,墙体内表面温度变化趋势一致,但最高气温逐渐降低,最低气温逐渐升高,日气温变化幅度越来越小。墙体内表面温度不是随着 PCM 厚度的增加呈等比例变化,当 PCM 厚度为 0 cm 时,北墙内表面日气温变化幅度最大;当 PCM 厚度为 9 cm 时,北墙内表面日气温变化幅度最小;但当 PCM 厚度大于 4 cm 后,PCM 厚度对北墙内表面温度的影响较小,最低温度的提升小于 0.5 °C,最高气温基本无变化,日气温变化幅度也基本无变化。原因是相变材料的导热能力有限,太阳辐射热只能传递到一定厚度的蓄热层,若蓄热层较厚,内侧的相变材料则无法有效地蓄热与放热。墙体内表面最低温一般出现在早晨约 08:00 时,说明此时相变材料放热基本结束。当 PCM 厚度为 4 cm 时,棚内最低温度可保

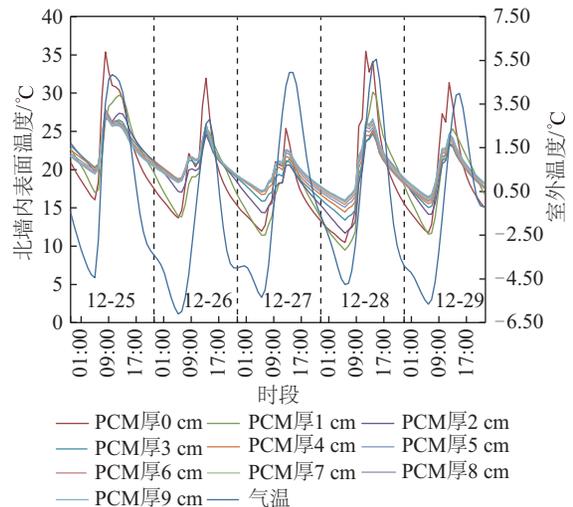


图3 PCM厚度对北墙内表面温度的影响

Fig. 3 Influence of PCM thickness on temperature of inner surface in north wall

证在约 10 ℃,满足温室作物正常生长所需的要求,同时,对于严寒天气和连阴天气也具有一定的保障。因此,PCM 厚度为 4 cm 时可满足温室墙体对蓄热性的要求。

#### 4.1.2 PCM 厚度对北墙内表面传热量的影响

由图 4 可知,晴天 09:00(打开保温被)后,墙体内表面温度随太阳辐射强度的增强而升高,热量逐渐以对流或辐射作用蓄存在墙体蓄热层中,从室内传至墙体,数值为正。在约 13:00 时,太阳辐射强度达

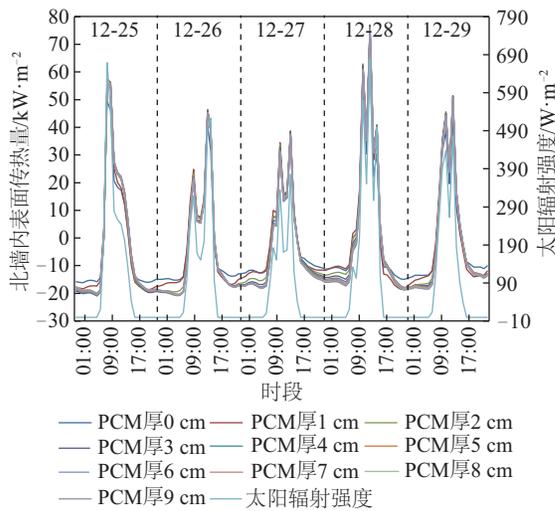


图 4 PCM 厚度对北墙传热量的影响

Fig. 4 Influence of PCM thickness on heat transfer of north wall

到峰值,同时,室内温度以及相应的蓄热量随之达到最大值,之后蓄热量逐渐减小,直至 16:00(盖上保温被)前,墙体内表面一直处于蓄热状态。16:00~次日 09:00,墙体内表面温度高于室内空气温度,热量由墙体内表面流向室内空气,墙体内表面处于放热状态,数值为负。

表 2 列出了 PCM 厚度不同的墙体 5 d 的累计蓄放热量。由表 2 可知,随着 PCM 厚度的增加,墙体累计蓄热量与累计放热量都在逐渐增加,但变化幅度越来越小。当 PCM 厚度达到 9 cm 时,相对于未作蓄热层的墙体,累计蓄热量与累计放热量分别增加 198.51、284.10 kW/m<sup>2</sup>,蓄放热性能较好。由此可见,在其他条件确定的情况下,PCM 厚度是决定墙体蓄放热性能的重要参数,随着 PCM 厚度的增加,墙体蓄热量与放热量逐渐增加。同时由图 5 可看出,墙体放热量始终大于蓄热量,并且二者差值随着 PCM 厚度增加逐渐增大,对于夜间作物生长十分有利,但当 PCM 厚度大于 4 cm 时,蓄热量与放热量变化速率逐渐趋于平缓,且蓄热量与放热量的差值也基本无变化。由此可知蓄热量的增加随 PCM 厚度的增加是有限的,若再盲目增加 PCM 厚度会造成投资成本增加,节能收益将会相对减小。

表 2 不同厚度 PCM 墙体的蓄放热比较

Table 2 Comparison for heat storage of PCM walls with different thickness

参数	PCM 厚度/cm										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
累计放热量/kW·m <sup>-2</sup>	984.5	1108.6	1193.4	1225.5	1240.3	1249.4	1257.2	1261.6	1264.8	1268.6	
累计放热增量/kW·m <sup>-2</sup>	—	124.1	208.9	241.0	255.8	264.9	272.7	277.1	280.3	284.1	
百分率/%	—	12.61	21.22	24.48	26.00	26.91	27.70	28.15	28.47	28.86	
累计蓄热量/kW·m <sup>-2</sup>	793.10	925.20	943.90	961.90	972.92	979.25	984.53	987.67	989.90	991.61	
累计蓄热增量/kW·m <sup>-2</sup>	—	132.10	150.80	168.80	179.82	186.15	191.43	194.57	196.80	198.51	
百分率/%	—	16.66	19.01	21.28	22.67	23.47	24.14	24.53	24.81	25.03	

#### 4.1.3 PCM 厚度对温室大棚负荷的影响

由图 6 可知,在砌块层厚度和保温层厚度一定时(300 mm 砌块层+50 mm 保温层),随着 PCM 厚度由 0 cm 增至 9 cm,温室负荷明显下降,相对于未作蓄热层的墙体可降低 6.67%、11.59%、15.05%、17.37%、18.82%、19.83%、20.68%、21.45%、22.10%;

相对于前一个厚度工况而言,温室负荷分别降低 18.63%、13.76%、9.65%、6.48%、4.05%、2.82%、2.38%、2.15%、1.81 MJ/m<sup>2</sup>,降低幅度为 7.14%、5.57%、4.07%、2.81%、1.79%、1.26%、1.07%、0.98%、0.83%。由此可知,随着 PCM 厚度增大,温室负荷呈现一个减小的趋势,但并不是等比例的,当 PCM 厚度大于 4 cm 后,热负

荷降低速率逐渐趋于平缓。

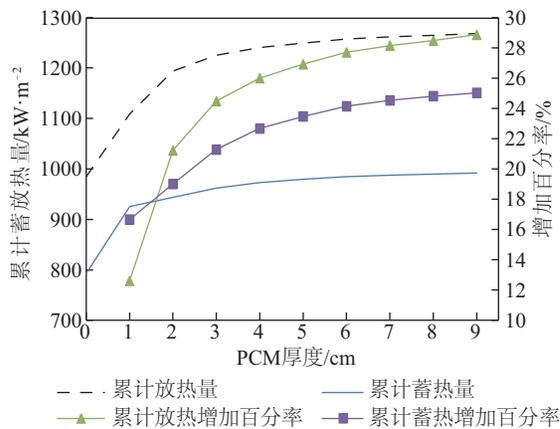


图5 PCM厚度对墙体蓄放热的影响

Fig. 5 Influence of PCM thickness on heat storage of the PCM walls

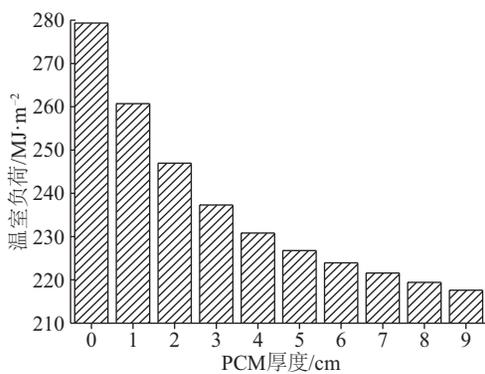


图6 PCM厚度对温室大棚负荷的影响

Fig. 6 Influence of PCM thickness on heat load of greenhouse

综上所述,在砌块层厚度和保温层厚度一定时(300 mm 砌块层+50 mm 保温层),PCM厚度为4 cm时可满足温室墙体对蓄热性的要求,则考虑4 cm作为墙体蓄热层最佳厚度是可行的。

## 4.2 保温层厚度的确定

### 4.2.1 保温层厚度对北墙外表面热流量的影响

由图7可知,在蓄热层厚度和砌块层厚度一定时(40 mm 蓄热层+300 mm 砌块层),随着保温层厚度由2 cm增至8 cm,北墙外表面热流量均随室外温度呈周期性变化。17:00~次日09:00,墙体外表面均处于散热状态,较好的保温性可保证墙体白天蓄存的热量更多地释放到温室内部,相对于保温层厚度为2 cm的墙体,北墙外表面累计热流量分别减小20.68、36.35、48.6、58.42、66.47、

73.19 MJ/m<sup>2</sup>,减小幅度为4.68%、8.23%、11%、13.22%、15.04%、16.56%。可见,在其他条件确定时,保温层厚度是决定墙体保温性能的重要参数,随着保温层厚度的增加,墙体外表面热流量逐渐减小,但并不是呈等比例变化,当保温层厚度小于5 cm前,传热量的减少随保温层厚度的增加变化明显;当保温层厚度大于5 cm后,传热量随保温层厚度的增加基本无变化若再盲目增加保温层厚度会造成投资成本增加,同时增加自重使保温层脱落,降低墙体寿命。

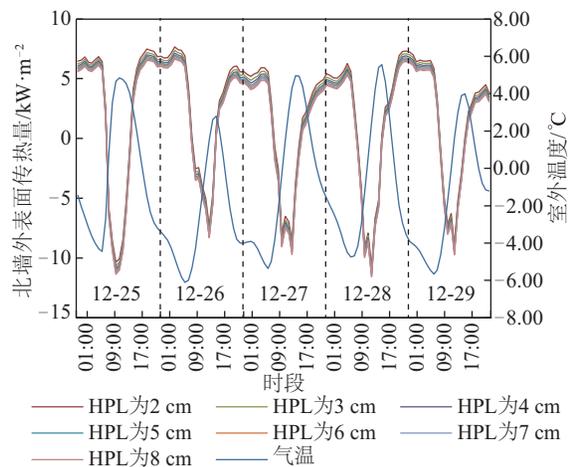


图7 保温层厚度对北墙外表面热流量的影响

Fig. 7 Influence of insulating layer thickness on heat transfer of outside surface in north wall

### 4.2.2 保温层厚度对温室大棚负荷的影响

由图8可知,在蓄热层与保温层厚度一定时(40 mm 相变蓄热+300 mm 砌块层),随保温层厚度由2 cm增至8 cm,温室负荷明显下降,相对于保温层厚度为2 cm的墙体,其负荷分别降低3.16%、5.41%、7.09%、8.40%、9.45%、10.30%。由此可知,随保温层厚度增大,温室负荷呈现一个减小的趋势,但并不是呈等比例变化的,当保温层厚度小于5 cm时,热负荷降低的较快,当保温层厚度大于5 cm后,热负荷降低速率逐渐趋于平缓,当保温层厚度为5 cm时,可保证温室作物安全越冬。因此,从节能效果和初投资方面考虑,选择5 cm作为墙体保温层最佳厚度是可行的。

综上所述,对于天津地区,推荐使用的日光温室复合墙体最佳组合厚度约为40 mm 相变蓄热层+300 mm 加气混凝土砌块层+50 mm 聚苯板保温层。

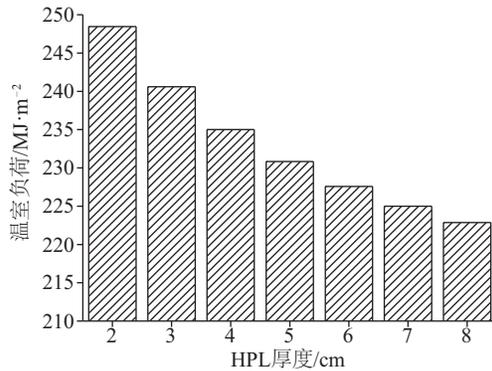


图8 保温层厚度对温室大棚负荷的影响

Fig. 8 Influence of insulating layer thickness on heat load of greenhouse

### 5 3种墙体对比分析

目前使用较多的温室墙体仍是砖墙和土墙,为了更全面地评价优化后的墙体相比砖墙和土墙的性能,首先,以优化后的墙体热阻计算相同保温性能对应的砖墙和土墙厚度。墙体热阻 $R$ 表征热量通过墙体时所受阻大小,反映材料层对热流波的阻挡能力。由多层材料共同组成的围护结构的总热阻可用式(13)计算:

$$R_0 = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} \quad (13)$$

式中, $R_0$ ——总热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ;  $\delta_j/\lambda_j$ ——第 $j$ 层的热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ;  $\delta_i$ 为第 $j$ 层的厚度(m), $\lambda_j$ 为第 $i$ 层材料的导热系数( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )。

由模拟的相关参数可知优化后的复合墙体热

阻为  $2.32 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ,查得天津地区砖墙和土坯墙的导热系数分别为  $0.43$ 、 $0.91 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,算得砖墙厚度为  $0.997 \text{ m}$ ,土坯墙厚度为  $2.112 \text{ m}$ 。在外界条件相同时,对具有相同热阻的3种墙体进行数值模拟,如图9所示,由此可知,与同热阻的土墙、砖墙相比,优化后的复合墙体的热性能最优,砖墙最差。由表3可知,与同热阻的土墙、砖墙相比,优化后的复合墙体的最高温度分别降低  $1.65$ 、 $2.59 \text{ }^\circ\text{C}$ ,最低温度分别提高  $0.86$ 、 $1.96 \text{ }^\circ\text{C}$ ,夜间平均气温分别提高  $1.22$ 、 $1.76 \text{ }^\circ\text{C}$ ;优化后的复合墙体土地占用面积比砖墙减少  $60\%$ ,比土墙减少  $81\%$ 。因此,与传统墙体相比,复合相变墙体对于夜间气温的提升、室内热稳定性的提高以及土地利用率的提高具有重要意义。

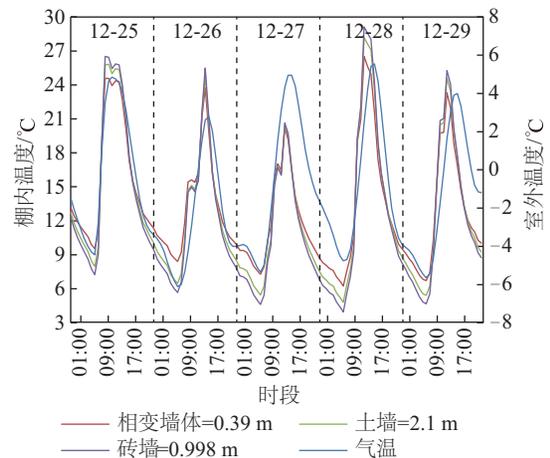


图9 3种墙体棚内温度变化

Fig. 9 Temperature change of greenhouse with three kinds of walls

表3 3种墙体室内温度对比(°C)

Table 3 Contrast of temperature of greenhouse with three kinds of walls(°C)

气温情况	室外气温	室内气温		
		三重结构复合相变墙体	土墙	砖墙
最高气温	5.55	26.53	28.18	29.12
最低气温	-6.10	4.81	3.95	2.85
夜间平均气温	-2.33	11.05	9.83	9.29

### 6 结论

1)三重结构复合相变墙体的蓄热性和保温性不是随蓄热层与保温层厚度的增加呈线性变化,而是在某一厚度之后变化逐渐趋于平缓,其中  $40 \text{ mm}$

PCM 和  $50 \text{ mm}$  EPS 分别作为墙体蓄热性和保温性的“转折点”。

2)对于天津地区,推荐使用的日光温室三重结构墙体最佳组合厚度由内到外依次约为  $40 \text{ mm}$  相变蓄热层+ $300 \text{ mm}$  加气混凝土砌块层+ $50 \text{ mm}$  聚苯

板保温层。

3)与同热阻的土墙、砖墙相比,优化后的复合相变墙体具有更好的削峰填谷作用,对温室全天温度波幅的减小,室内热稳定性的提高以及温室热环境整体水平的改善具有重要意义;同时,可有效提高土地利用效率。

#### [参考文献]

- [1] 李建设,白青,张亚红.日光温室墙体与地面吸放热量测定分析[J].农业工程学报,2010,26(4):231—236.
- [1] Li Jianshe, Bai Qing, Zhang Yahong. Analysis on measurement of heat absorption and release of wall and ground in solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(4): 231—236.
- [2] 杨建军,邹志荣,张智,等.西北地区日光温室土墙厚度及其保温性的优化[J].农业工程学报,2009,25(8):180—185.
- [2] Yang Jianjun, Zhou Zhirong, Zhang Zhi, et al. Optimization of earth wall thickness and thermal insulation property of solar greenhouse in Northwest China [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8): 180—185.
- [3] Berroug F, Lakhel E K, El-Omari M, et al. Thermal performance of a greenhouse with a phase change material north wall [J]. Energy and Buildings, 2011, 43(11): 3027—3035.
- [4] 张勇,高文波,邹志荣.主动蓄热后墙日光温室传热CFD模拟及性能试验[J].农业工程学报,2015,31(5):203—211.
- [4] Zhang Yong, Gao Wenbo, Zou Zhirong. Performance experiment and CFD simulation of heat exchange in solar greenhouse with active thermal storage back-wall [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(5): 203—211.
- [5] 李明,周长吉,魏晓明.日光温室墙体蓄热层厚度确定方法[J].农业工程学报,2015,31(2):177—183.
- [5] Li Ming, Zhou Changji, Wei Xiaoming. Thickness determination of heat storage layer of wall in solar greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(2): 177—183.
- [6] Gosselin L. Thermal shielding of multilayer walls with phase change materials under different transient boundary conditions[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48(9): 1707—1717.
- [7] 管勇,陈超,马彩雯,等.日光温室墙体保温层最佳厚度的确定[J].新疆农业科学,2015,52(3):542—550.
- [7] Guan Yong, Chen Chao, Ma Caiwen, et al. Determination of optimum insulation thickness for solar greenhouse wall [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2015, 52(3): 542—550.
- [8] Crawley D, Lawrie L, Pedersen C, et al. Energy Plus: Energy simulation program [J]. ASHRAE Journal Online, 2000, 42(4): 49—56.
- [9] Tabares-Velasco P C, Christensen C, Bianchi M. Verification and validation of Energy Plus phase change material model for opaque wall assemblies [J]. Building and Environment, 2012, 54: 186—196.
- [10] Zhu Dandan, Hong Tianzhen, Yan Da, et al. A detailed loads comparison of three building energy modeling programs: EnergyPlus, DeST and DOE-2.1E [J]. Building Simulation, 2013, 6(3): 323—335.

## SIMULATION STUDY ON OPTIMUM COMPOSITE THICKNESS OF PHASE CHANGE HEAT STORAGE WALL

Shi Panpan<sup>1</sup>, Lyu Jian<sup>1</sup>, Sun Yuping<sup>1</sup>, Li Xianli<sup>1</sup>, Wang Bo<sup>2</sup>, Wang Leibo<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Safety Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;

2. Tianjin Jinneng Binhai New Energy Co., Ltd., Tianjin 300384, China)

**Abstract:** In order to reasonably determine the optimum thickness of heat storage layer and insulation layer of the composite wall in solar greenhouse, this paper studies the effect of different thickness of heat storage layer and insulation layer of the greenhouse by means of numerical simulation of EnergyPlus based on the dynamic heat transfer characteristics in Tianjin region. The results show that the heat preservation and storage capability of the wall is limited with the increase of the thickness of the heat storage layer and the insulation layer; the optimum combination thickness of composite phase change wall is 40 mm PCM+300 mm +50 mm EPS, and the 40 mm PCM, 50 mm EPS are the "turning points" of wall thermal storage and heat preservation under typical meteorological conditions in Tianjin region. Compared with cob wall and brick wall with the same thermal resistance, the maximum temperature of the optimized composite phase change wall is reduced by 1.65 and 2.59 °C, the minimum temperature is increased by 2.04 and 2.90 °C, and the land occupation area of the optimized composite phase change wall is reduced by 81% and 60% respectively. As a result, the optimized composite phase change wall can significantly reduce the temperature fluctuation of greenhouse throughout the day and effectively improve the overall level of greenhouse thermal environment, and improve the utilization rate of land.

**Keywords:** greenhouse; wall; heat storage layer; insulation layer; EnergyPlus