

文章编号:0254-0096(2020)04-0113-10

# 基于 ANSYS 的日光温室复合相变保温墙体的模拟研究

周莹<sup>1,2</sup>, 王双喜<sup>2</sup>, 刘中华<sup>2</sup>, 马金平<sup>2</sup>, 王婷<sup>2</sup>

(1. 菏泽学院城市建设学院, 菏泽 274000; 2. 山西农业大学工学院, 太谷 030801)

**摘要:** 复合相变保温砂浆可作为内保温砂浆与日光温室墙体组成复合相变保温墙体,为温室生产提供热能。通过对日光温室相变墙体相变传热过程的数值模拟研究,可较好地掌握其蓄放热特性,为日光温室应用复合相变材料提供理论支持。该文利用 ANSYS 有限元分析软件模拟研究日光温室复合相变保温墙体的传热过程,数值模拟结果表明:50 mm 复合相变保温砂浆与 490 mm 砖墙组成的复合相变保温墙体和 30 mm 复合相变保温砂浆与 240 mm 加气混凝土砌块墙组成的复合相变保温墙体都具有较强的蓄放热能力,两者的持续蓄热时间均为 8 h,持续放热时间分别为 16 和 13 h,这 2 种复合相变保温墙体均适合于冬季温室生产。

**关键词:** ANSYS 有限元分析; 传热过程; 数值模拟; 复合相变保温砂浆; 日光温室

**中图分类号:** S625

**文献标志码:** A

## 0 引言

日光温室墙体作为温室中吸收和储存太阳能并为温室增温的主要载体,对提高室内作物生长热环境的控制能力至关重要<sup>[1]</sup>,整个墙体的隔热保温及蓄热能力的强弱决定着室内作物能否安全越过北方寒冷的冬季<sup>[2]</sup>。随着相变蓄热技术的发展和进步,相变储能材料被逐渐应用于日光温室墙体中,相变材料通过自身状态的改变来吸收或释放热量(白天蓄热,夜晚放热),可显著提高温室墙体的蓄放热能力,该相变传热过程是一个随着时间移动的两相界面的非线性过程,可通过焓法模型进行数值模拟研究,ANSYS 有限元分析软件是一款可数值求解瞬态相变传热问题的多功能软件,其在焓法模型的基础上,通过定义材料的焓值来考虑潜热<sup>[3]</sup>(如图 1 所示),从而使模拟计算过程得以大大简化。利用 ANSYS 热分析,可对相变材料的传热过程及任意时刻的温度分布进行较好的描述。孙潇等<sup>[4]</sup>对石蜡/石膏复合相变墙体的温度变化过程利用 ANSYS 进行非线性数值模拟,仿真复合相变墙体的温度变化过程。张毅等<sup>[5]</sup>采用 ANSYS 有限元数值方法测定了相

变材料的导热系数等,研究表明焓法模型能够很好地解决固-液相变过程中界面流动的问题。郭志强等<sup>[6]</sup>采用 ANSYS 软件对相变材料的相变过程建立模型,并进行模拟分析和实验对比,研究表明,ANSYS 的模拟计算结果与试验结果基本一致。樊建新等<sup>[7]</sup>利用 ANSYS 的有限元分析法对复合相变材料模型的相变过程进行了数值模拟,研究表明数值模拟值与试验值相吻合。胡小芳等<sup>[8]</sup>应用 ANSYS 软件对石蜡/石膏复合相变材料墙体的传热过程建立了模型,研究表明,在建材中加入相变储能材料可明显改善建筑内环境温度并减小能耗。石超<sup>[9]</sup>利用 ANSYS 有限元分析软件对加入相变石蜡的相变墙体进行了传热模拟研究,结果表明模拟数据与实测数据吻合较好。胡庆康<sup>[10]</sup>利用 ANSYS 软件对相变板材的温度场进行了数值模拟,模拟结果表明相变材料的蓄热效果良好。张立明等<sup>[11]</sup>将石蜡/硬脂酸丁脂作为温室复合相变墙体材料,利用 ANSYS 分析软件模拟相变墙体的温度分布。张欣<sup>[12]</sup>利用 ANSYS 软件对日光温室相变储能墙板的蓄/放热过程进行数值模拟分析,数值计算结果和实测值吻合较好。

收稿日期: 2019-03-04

基金项目: 山东省高等学校科研发展计划(J18KB070); 菏泽学院博士基金项目(XY19BS02)

通信作者: 周莹(1984—), 女, 博士、讲师, 主要从事农业建筑结构与材料方面的研究。zhouying.yy@163.com

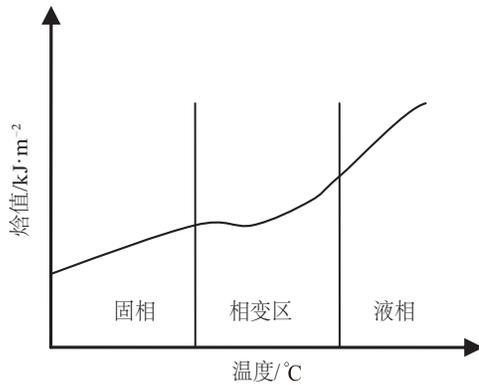


图1 相变焓与温度

Fig. 1 Phase change enthalpy and temperature

本文以复合相变储能保温砂浆与砌体墙组成的复合相变保温墙体日光温室为研究对象,利用 ANSYS 有限元分析软件建立复合相变墙体相变传热过程的简化模型,并在设定的模型初始条件和边界条件下对复合相变蓄热保温墙体的传热过程进行数值模拟分析,研究相变层厚度、室内外温度等因素对复合相变蓄热保温墙体传热性能的影响,以给出适宜于不同砌体墙日光温室合理的复合相变保温砂浆层厚度。

## 1 复合相变保温砂浆的制备

利用相变石蜡与膨胀珍珠岩制备得到复合定形相变材料,将定形相变材料与建筑脱硫石膏、外加剂等按比例复配得到石膏基石蜡/膨胀珍珠岩复合相变保温砂浆<sup>[13]</sup>,通过 DSC 差示扫描量热仪分析测试得到如图 2 所示的 DSC 曲线,复合相变保温砂浆的相变温度为 25.6 °C,相变潜热为 89.8 kJ/kg,具有合适的相变温度和较高的相变潜热,符合王宏丽<sup>[14]</sup>提出的用于温室生产的相变储能材料所需满足的要求。

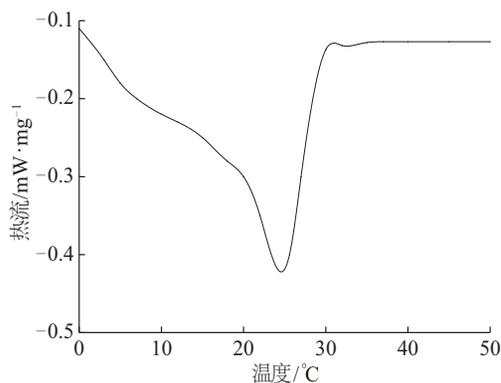


图2 复合相变保温砂浆 DSC 曲线

Fig. 2 DSC curve of composite phase change thermal insulation mortar

## 2 相变传热模型建立

### 2.1 基本假设

复合相变储能保温砂浆作为内保温砂浆与砌块墙共同组成日光温室复合相变蓄热保温墙体,相变墙体的传热过程随时间、温度的变化而变化,是一个复杂的非线性瞬态传热过程。一般情况下,砌块墙日光温室中后墙的长度和宽度远大于其厚度,沿高度方向的热传导对室内热环境的影响很小,故可将温室墙体传热模型作为一维热传导进行研究,即相变传热只沿着墙体厚度方向进行,为进一步简化复合相变墙体的模型作以下假设:1)传热只沿墙体厚度方向进行,为一维传热;2)相变砂浆及砌块墙体材料均匀分布,且热物性各向同性;3)相变保温砂浆发生固-液相变时只存在热传导;4)室内空气分布均匀;5)忽略温室内湿度、太阳辐射、土壤和作物的影响;6)忽略温室覆盖材料与室外空气之间的对流换热;7)无内热源。

### 2.2 相变传热模型

将复合相变保温墙体的传热简化为一维传热,使模型的计算大大简化,复合相变墙体的简化物理模型如图 3 所示。图 3 中,将相变复合墙体的内表面作为坐标原点,  $[0, L_1]$  为复合相变保温砂浆厚度,  $m$ ;  $[L_1, L_2]$  为砌块墙厚度,  $m$ 。

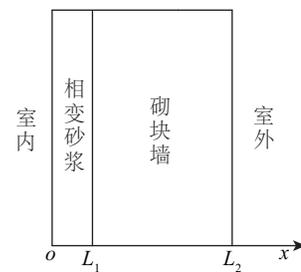


图3 相变墙体物理模型

Fig. 3 Physical model of phase change wall

采用直角坐标系,瞬态焓法模型的控制方程可表示为:

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中,  $\rho$  ——材料密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\lambda$  ——导热系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;  $t$  ——时间,  $\text{s}$ ;  $T$  —— $t$  时刻的墙体温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $x$  ——墙体厚度,  $\text{m}$ ;  $H$  ——焓值,  $\text{J}/\text{m}^3$ 。

$$H = \int_0^{T_0} c_s(T) dT + \int_{T_0}^{T_1} c_m(T) dT + \int_{T_1}^T c_l(T) dT \quad (2)$$

式中,  $c_s$  ——固相比热容,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;  $c_l$  ——液相比热容,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;  $c_m$  ——相变比热容,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;  $T_0$  ——焓

值为 0 时的温度, °C;  $T_s$  ——固相温度, °C;  $T_l$  ——液相温度, °C。

$$H = \begin{cases} c_s(T - T_s), & T < T_s \\ \left( \frac{c_s + c_l}{2} + \frac{\Delta H_m}{T - T_s} \right) (T - T_s), & T_s < T < T_l \\ \frac{c_s + c_l}{2} (T - T_s) + \Delta H_m + c_l(T - T_l), & T_l < T \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\Delta H_m$  ——相变材料的相变潜热, kJ/kg。

相变砂浆和砌体墙的导热方程分别为:

$$\rho_m \frac{\partial H_m}{\partial t} = \lambda_m \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad 0 < x < L_1 \quad (4)$$

式中,  $\lambda_m$  ——复合相变砂浆的导热系数, W/(m·K);  $\rho_m$  ——复合相变砂浆的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $H_m$  ——复合相变砂浆的焓值, J/m<sup>3</sup>。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_w \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad L_1 < x < L_2 \quad (5)$$

表 1 材料热物性及参考价格

Table 1 Thermophysical properties and reference price of materials

材料	尺寸/mm	密度/kg·m <sup>-3</sup>	比热容/J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	导热系数/W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
复合相变保温砂浆	—	363	1.35×10 <sup>3</sup>	0.076
蒸压灰砂砖	240×115×53	1800	1.06×10 <sup>3</sup>	0.900
加气混凝土砌块	600×240×200	700	1.15×10 <sup>3</sup>	0.240

表 2 复合相变保温砂浆焓值

Table 2 Enthalpy of composite phase change thermal insulation mortar

温度/°C	15	25	30	40
导热系数/ W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	0.076	0.076	0.115	0.184
焓值/J·m <sup>-3</sup>	0	3.15×10 <sup>7</sup>	5.46×10 <sup>7</sup>	1.27×10 <sup>8</sup>

### 2.3.2 墙体厚度

徐刚毅等<sup>[15]</sup>指出传统砖墙日光温室的后墙厚度约为 0.5~0.7 m, 其做法大多为在 2 层砖墙之间填充松散保温隔热材料或聚苯板等, 保温效果受环境因素的影响较大。目前常用日光温室砌体墙做法是在墙体外侧张贴聚苯乙烯泡沫板, 保温隔热效果良好, 蓄放热效果主要由砌体墙材料和厚度决定。本文根据前人研究和经验选取 490 mm 砖墙和 240 mm 加气混凝土砌块墙作为研究对象, 在其内侧涂抹不同厚度的复合相变保温砂浆, 通过数值模拟研究复合相变保温墙体的传热过程, 分析其保温、蓄放热性能。

式中,  $\alpha_w$  ——砌体墙的热扩散系数,  $\alpha_w = \frac{\lambda_w}{\rho_w c_w}$ ;  $\lambda_w$  ——

砌体材料的导热系数, W/(m·K);  $\rho_w$  ——砌体材料的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $c_w$  ——砌体材料的比热容, J/(kg·K)。

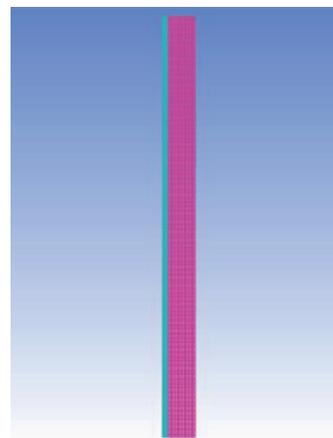
## 2.3 参数确定

### 2.3.1 墙体材料

蒸压灰砂砖和加气混凝土砌块是作为替代烧结粘土砖的新型建筑材料, 因其良好的结构性能和热学性能在中国被大力推行使用。本文选取常用的蒸压灰砂砖和混凝土砌块作为日光温室的砌块墙体材料与复合相变砂浆共同组成温室复合后墙进行研究, 灰砂砖、加气混凝土砌块、复合相变保温砂浆的热物性见表 1, 复合相变保温砂浆的焓值见表 2。

## 2.4 网格划分

日光温室后墙取不同厚度的不同砌体材料, 墙高取 3.5 m, 复合相变内保温砂浆层取不同厚度, 利用 ANSYS 建立长方形模块的二维模型并进行平面网格划分, 基本网格划分如图 4 所示。



注: 左侧为复合相变砂浆(薄), 右侧为砌体墙(厚)。

图 4 网格划分

Fig. 4 Mesh partition

### 3 复合相变保温墙体保温效果的模拟研究

#### 3.1 物理模型

砖墙厚取 490 mm,加气混凝土砌块墙取 240 mm,墙高 3.5 m,相变保温砂浆厚度分别为 0、10、20、30、40、50、60 mm,分别建立物理模型。

#### 3.2 初始条件及加施荷载

温室内和复合相变保温墙体内表面初始温度设定为 20 °C,室内温度恒定,室内空气对流换热系数取  $h_{in}=5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  [16];温室外温度设定为 -10 °C,室外空气对流换热系数取  $h_{out}=15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。加施温度荷载后,求解 12 h 内温室复合相变墙体的传热过程,并得到 12 h 后复合相变保温墙体内表面的温度场,相当于模拟日光温室保温被遮蔽 12 h 后复合相变墙体的保温效果(假设相变砂浆白天无蓄热、夜晚无放热),求解步长设定为 60 s,求解总时间为 43200 s,对模拟数据进行分析。

#### 3.3 数值模拟结果及分析

##### 3.3.1 砖墙复合相变保温墙体

经数值求解后处理,得到如图 5 所示的砖墙和不同厚度相变保温砂浆复合相变墙体加荷 12 h 后的传热模拟图,图 6 所示为加荷 12 h 内砖墙复合相变保温墙体内侧温度变化曲线图。由图 5 和图 6 可知,加荷 12 h 后不同保温墙体的温度场变化不明显,490 mm 砖墙、490 mm 砖墙+10 mm 相变砂浆、490 mm 砖墙+20mm 相变砂浆、490 mm 砖墙+30 mm 相变砂浆、490 mm 砖墙+40 mm 相变砂浆、490 mm 砖墙+50 mm 相变砂浆、490 mm 砖墙+60 mm 相变砂浆复合相变保温墙体内侧所对应

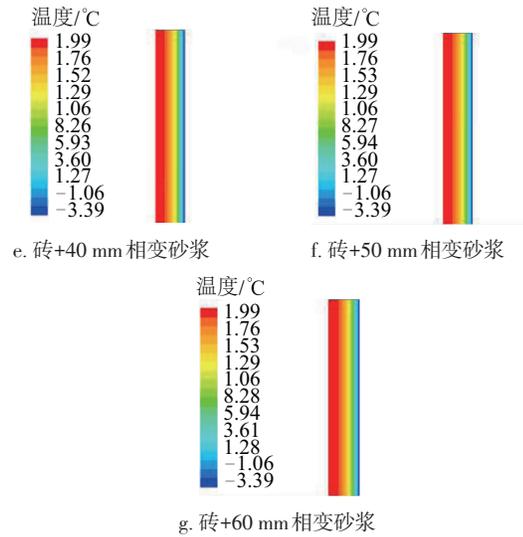


图 5 不同相变砂浆厚度+砖墙复合相变保温墙体加荷 12 h 后温度场

Fig. 5 Temperature field of composite phase change thermal insulation wall with different phase change mortar thickness and brick after loading 12 hours

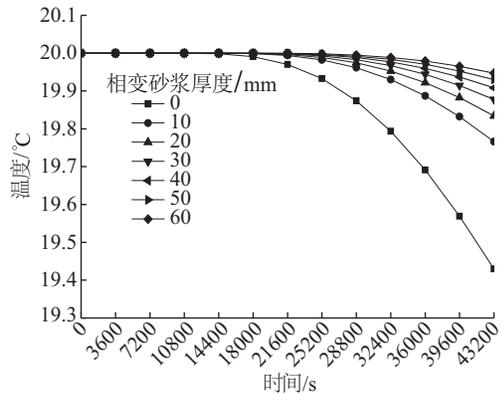
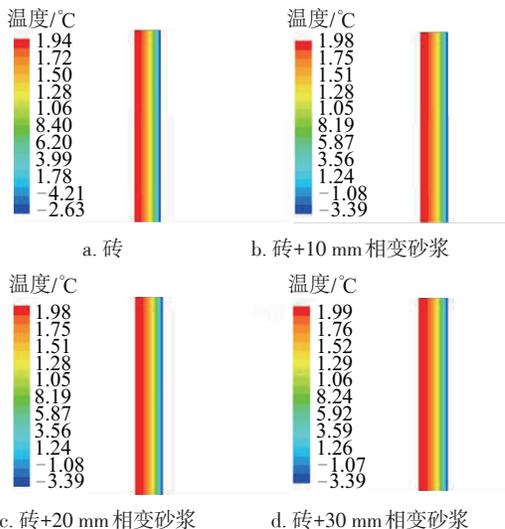


图 6 不同相变砂浆厚度+砖墙复合相变保温墙体加荷 12 h 内墙体内层的温度变化

Fig. 6 Temperature variation of inner side of composite phase change thermal insulation wall with different phase change mortar thickness and brick in loading 12 hours



的温度分别为: 19.43、19.77、19.83、19.88、19.91、19.93、19.95 °C,随着复合相变保温砂浆厚度的增加,复合相变保温墙体内表面温度呈上升趋势,说明复合相变保温砂浆层的厚度越大复合相变保温墙体的温度场越高,复合相变保温墙体的保温性越好。但从图中也可看出,复合相变保温墙体内侧温度随着相变层厚度的增加上升幅度较小,特别是当相变砂浆厚度超过 30 mm 后,复合相变保温墙体内侧温度增幅不超过 5%,说明保温砂浆层厚度超过 30 mm 后对复合相变保温墙体的保温性影响不

大。初步选定复合相变保温砂浆层厚 30 mm 与 490 mm 砖墙组成日光温室复合相变保温后墙。日光温室外围护结构应满足《JB/T 10286—2001 日光温室结构》<sup>[17]</sup>中的相关规定:日光温室外围护结构后墙的热阻要求大于设计低限热阻  $R_{\min}$ 。不同地区不同室外设计温度下的低限热阻  $R_{\min}$  见表 3。

表 3 日光温室外围护结构后墙的低限热阻

Table 3 Low limit thermal resistance of exterior wall of solar greenhouse

室外设计温度/°C	低限热阻/ $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$	室外设计温度/°C	低限热阻/ $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$
-4	1.1	-26	2.1
-12	1.4	-32	2.8
-21	2.1	—	—

同种建筑材料热阻的计算公式为:

$$R = \frac{\delta}{\lambda} \quad (6)$$

式中,  $R$  —— 热阻, ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )/W;  $\delta$  —— 材料厚度, m;  $\lambda$  —— 材料导热系数, W/(m·K)。

复合墙体热阻值的计算公式为:

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} \quad (7)$$

以山东某地区的室外设计温度  $-8^\circ\text{C}$  为例, 经计算对应低限热阻  $R_{\min} \approx 1.25 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ 。490 mm 砖墙+30 mm 复合相变保温砂浆组成的复合相变墙体的热阻按照式 (7) 计算, 即  $R = \frac{\delta_{\text{brick}}}{\lambda_{\text{brick}}} + \frac{\delta_{\text{pcm}}}{\lambda_{\text{pcm}}} = \frac{0.049}{0.9} + \frac{0.03}{0.076} = 0.94 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W} < R_{\min}$ , 不满足结构要求。需通过增加复合相变保温砂浆的厚度来提高热阻, 但在实际生产过程中保温砂浆的厚度越大施工工艺越复杂, 也越不安全, 当复合相变保温砂浆的厚度增加到 50 mm 时,  $R = \frac{\delta_{\text{brick}}}{\lambda_{\text{brick}}} + \frac{\delta_{\text{pcm}}}{\lambda_{\text{pcm}}} = \frac{0.049}{0.9} + \frac{0.05}{0.076} = 1.21 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ , 基本满足结构要求。综合考虑结构性能、施工性能、经济性能和保温性能, 最终确定复合相变保温砂浆层的厚度为 50 mm, 对 490 mm 砖墙进行内保温砂浆处理, 可得到较好的经济效果和保温效果。

### 3.3.2 加气混凝土砌块墙复合相变保温墙体

图 7 所示为混凝土砌块墙和不同厚度相变保温砂浆复合相变墙体加荷 12 h 后的传热模拟图, 图 8 所示为 12 h 内 2 种不同类型墙体内部温度变化曲线图。

由图 7、图 8 可看出, 经模拟加荷 12 h 后不同复

合相变砂浆层厚度下复合相变墙体内部温度场变化区别较大, 240 mm 砌块墙、240 mm 砌块墙+10 mm 相变砂浆、240 mm 砌块墙+20 mm 相变砂浆、240 mm 砌块墙+30 mm 相变砂浆、240 mm 砌块墙+40 mm 相变砂浆、240 mm 砌块墙+50 mm 相变砂浆和 240 mm 砌块墙+60 mm 相变砂浆复合相变保温墙体的墙体内部 12 h 后所对应的温度分别为: 17.36、17.94、18.35、18.66、18.9、19.09、19.25  $^\circ\text{C}$ , 其与室内环境界面的温度差分别为: 2.64、2.06、1.65、1.34、1.1、0.91、0.75  $^\circ\text{C}$ , 随着复合相变保温砂浆厚度的增加, 复合相变保温墙体内部表面温度呈上升趋势, 其与室内环境界面的温度波动幅度逐渐变小,

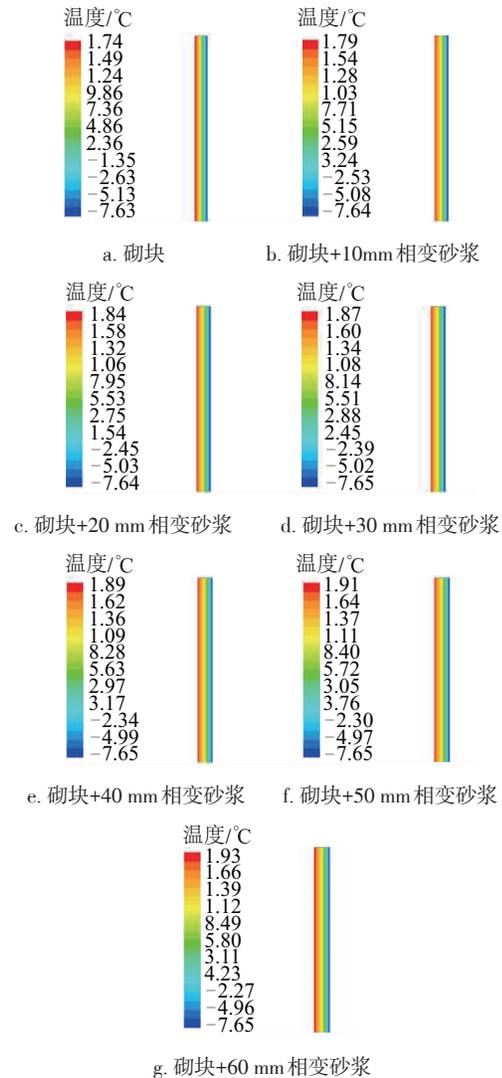


图 7 不同相变砂浆厚度+混凝土砌块墙复合相变保温墙体加荷 12 h 后温度场

Fig. 7 Temperature field of composite phase change thermal insulation wall with different phase change mortar thickness and concrete block after loading 12 hours

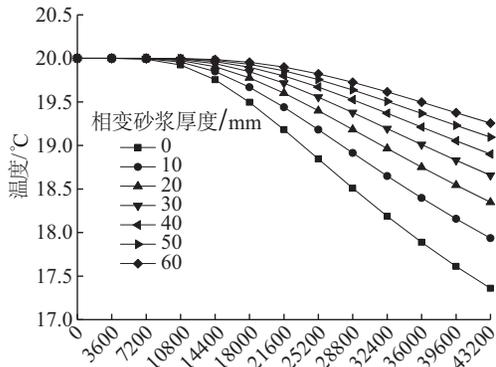


图8 不同相变砂浆厚度+混凝土砌块墙复合相变保温墙体加荷 12 h 内墙体内部的温度变化

Fig. 8 Temperature variation of inner side of composite phase change thermal insulation wall with different phase change mortar thickness and concrete block in loading 12 hours

说明相变砂浆层越厚,复合相变保温墙体的温度场越高,保温性能也越好,对温室内温度的缓冲作用就越大。同时从图 8 中可看出,当复合相变保温砂浆的厚度大于 30 mm 时,相变墙体的升温趋势变缓,说明保温砂浆层厚度超过 30 mm 后对相变墙体保温性能的影响变小。同上文,对 240 mm 砌块墙+30 mm 相变砂浆的复合相变墙体进行热阻计算,得到  $R=0.24/0.24+0.03/0.076=1.39(\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}>R_{\text{min}}=1.25(\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}$ ,满足结构设计要求。综合考虑结构性能、施工性能、经济性能和保温性能,最终确定复合相变保温砂浆层的厚度为 30 mm,对 240 mm 加气混凝土砌块墙进行内保温砂浆处理,较经济且保温效果较好。

## 4 复合相变保温墙体相变传热的模拟研究

### 4.1 物理模型

根据上文,砖墙和加气混凝土砌块墙分别取 490 和 240 mm,复合相变保温砂浆层厚度分别取 50 和 30 mm,墙高取 3.5 m,建立物理模型。

### 4.2 初始条件及施加荷载

在实际生产过程中,温室室内、外温度会随着时间的变化而变化,伴随温度的变化复合相变保温墙体呈现出不同的保温、蓄放热性能。以某一天(08:00~次日 08:00)温室内、外的实际温度为因变量,室内外温度变化见图 9,08:00 开启保温被,17:00 遮闭保温被,以 08:00 室内空气温度 12 °C 作为复合相变墙体的初始温度,模拟复合相变墙体一天中的传热过程,其中室内空气对流换热系数取  $h_{\text{in}}=5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,室外空气对流换

热系数取  $h_{\text{out}}=15 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。求解步长设定为 60 s,求解总时间为 86400 s,对模拟数据进行分析。

如图 9 所示,一天内温室内温度和温室外温度都有较大变化,且变化趋势基本一致。室内最高气温和最低气温分别为 35.7、12.7 °C,最大温差 23 °C,室内温度的变化适宜于复合相变砂浆的蓄热、放热。

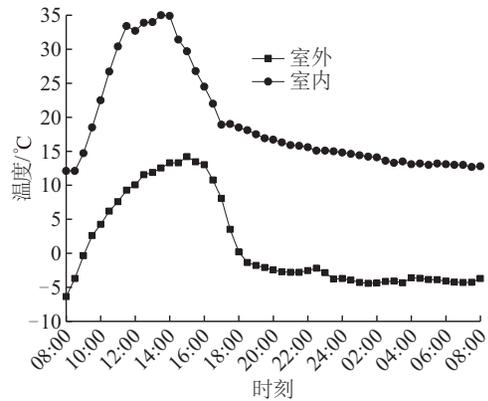


图9 室内、外温度

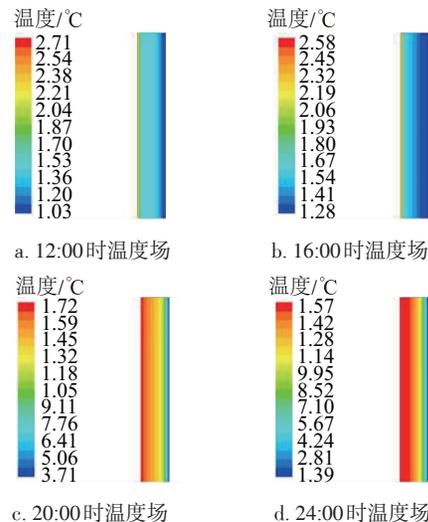
Fig. 9 Temperatures of indoor and outdoor

### 4.3 数值模拟结果及分析

#### 4.3.1 砖墙复合相变保温墙体

图 10 为不同时刻砖墙复合相变保温墙体的传热模拟图,图 11 为 24 h 内砖墙复合相变保温墙体内部温度变化曲线图。

由图 10、图 11 可看出,08:00~12:00 期间,随着室内温度的上升,复合相变保温墙体的温度也随之升高,但要比室内温度延迟,升温速率也小于室内温度,当室内温度超过 26 °C 高于复合相变砂浆的相变温度时,复合相变保温砂浆层内侧的升温趋势变缓;12:00~14:30 期间,室内温度持续快速上升,最高温度达 35.7 °C,但复

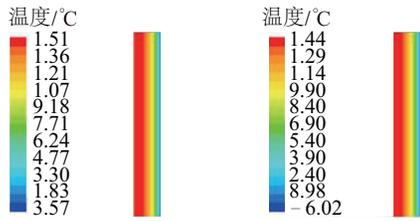


a. 12:00 时温度场

b. 16:00 时温度场

c. 20:00 时温度场

d. 24:00 时温度场



e. 次日 04:00 时温度场 f. 次日 08:00 时温度场

图 10 砖墙复合相变保温墙体不同时刻的温度场

Fig. 10 Temperature fields of the brick composite phase change thermal insulation motor wall at different time

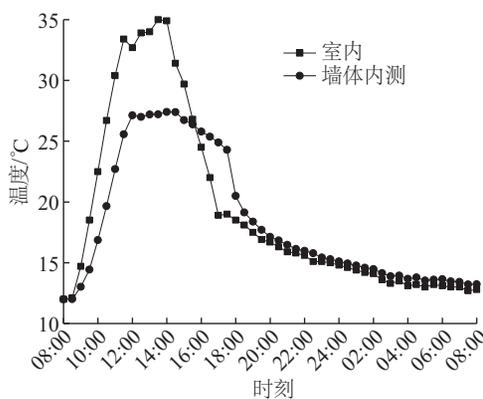


图 11 砖墙复合相变保温墙体内测温度变化

Fig. 11 Temperature variation of the inner surface of brick composite phase change thermal insulation wall

合相变保温砂浆层的温度上升至 27.1 °C 后变化趋势较平稳, 12:00、13:00、14:00 时复合相变保温墙体内测的温度分别为 27.1、27.2、27.4 °C, 明显低于室内温度, 说明此时复合相变砂浆处于持续吸热、蓄热阶段; 14:30~16:00 期间, 室内温度明显下降, 但温度仍高于复合相变砂浆的相变温度, 复合相变保温砂浆层的温度仍处于吸热、蓄热阶段, 复合相变保温墙体内测的温度在 15:00、16:00 时分别为 26.7、25.8 °C, 其温度下降速率低于室内温度; 16:00~17:00 期间, 复合相变保温砂浆层内测界面温度与室内温度基本一致; 当室内温度下降至 25 °C 以下后, 复合相变保温砂浆层随着室内温度的降低逐渐呈现出放热状态, 在 17:00~次日 08:00 期间, 复合相变保温砂浆层内测界面温度始终高于室内温度, 说明复合相变墙体在整个夜间均处于放热状态。

放热阶段复合相变墙体内测温度见表 4, 复合相变保温砂浆层内测界面温度与室内温度相比较, 两者最大温差为 2 °C, 即使在持续放热 16 h 后至次日 08:00, 复合相变保温砂浆层内测界面温度也比室内温度高 0.4 °C, 复合相变保温砂浆的蓄热、放热能力突

显。490 mm 砖+50 mm 复合相变保温砂浆组成的复合相变墙体具有良好的保温、蓄热、放热能力。

表 4 放热阶段砖墙复合相变保温墙体内测温度变化

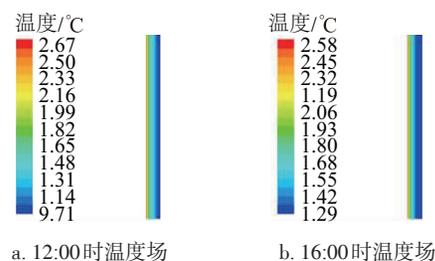
Table 4 Temperature variation of inner surface of brick composite phase change thermal insulation wall in heat release phase

时刻	室内温度/°C	复合相变墙体内测温度/°C
18:00	18.5	20.5
19:00	17.5	18.4
20:00	16.7	17.1
21:00	15.9	16.5
22:00	15.6	16.0
23:00	15.1	15.4
00:00	14.8	15.1
01:00	14.4	14.8
02:00	14.1	14.5
03:00	13.3	13.9
04:00	13.1	13.7
05:00	13.0	13.5
06:00	13.3	13.7
07:00	13.0	13.4
08:00	12.8	13.2

将 50 mm 复合相变储能保温砂浆作为内保温砂浆对砖墙日光温室的后墙进行涂抹改造处理, 通过对比试验研究得到: 涂抹复合相变保温砂浆的日光温室的日最低温度比无相变砂浆的对照温室的日最低温度平均高出 1.5 °C, 复合相变储能保温砂浆的保温效果明显; 复合相变储能保温砂浆使温室昼夜温差平均降低了 3.3 °C, 复合相变保温砂浆温室的蓄、放热效果较好, 有效缩小了温室内的昼夜温差<sup>[13]</sup>。

#### 4.3.2 加气混凝土砌块墙复合相变保温墙体

图 12 为不同时刻加气混凝土砌块墙复合相变保温墙体的传热模拟图, 图 13 为 24 h 内加气混凝土砌块墙复合相变保温墙体内测温度变化曲线图。



a. 12:00 时温度场

b. 16:00 时温度场

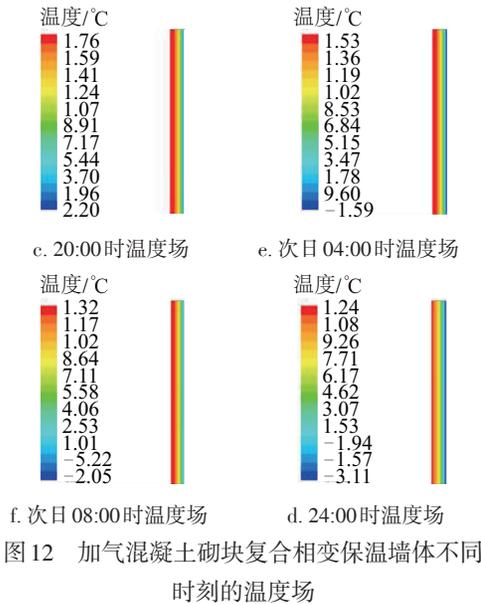


Fig. 12 Temperature fields of concrete block composite phase change thermal insulation wall at different time

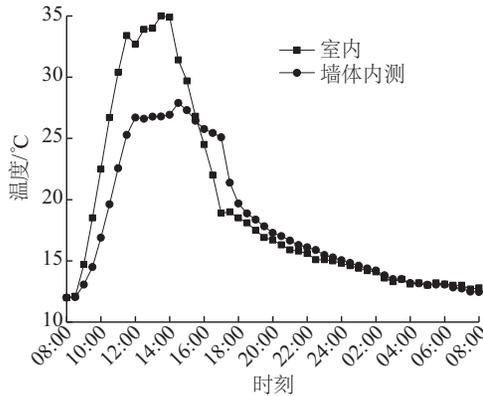


Fig. 13 Temperature variation of the inner surface of concrete block composite phase change thermal insulation wall

由图 12 和图 13 可看出,08:00~12:00 期间,随着室内温度的上升,复合相变保温墙体的温度随之升高,但比室内温度延迟,升温速率小于室内温度;12:00~14:00 期间,室内温度持续快速上升,但复合相变保温砂浆层的温度变化趋势较平稳,温度变化在 26.7~26.9 °C 之间,明显低于室内温度,说明由于室内温度高于复合相变保温砂浆的相变温度,复合相变砂浆发生相变处于吸热、蓄热阶段,使热量蓄积入相变层;14:00~17:00 期间,室内温度明显下降,复合相变保温砂浆层的温度变化较平缓,说明其可延缓温度环境发生较大变化,16:00 后,室内温度下降至 25 °C 以下,复合相变保温砂浆层的温度高于室内温度,复合相变保温砂浆的蓄热能力明显,复

合相变保温砂浆层随着室内温度的降低逐渐呈现出放热状态;受室内环境的影响 17:00 后复合相变保温砂浆层内侧温度出现了快速下降的情况,持续至 18:00 左右,此后随着室内气温的变化趋于平缓,复合相变保温砂浆层内侧温度的变化也随之趋于平缓,且在 17:00~次日 05:00 期间,复合相变保温砂浆层内测界面温度高于室内温度,说明此时间段复合相变保温砂浆一直处于放热状态。

复合相变墙体内部温度变化见表 5,复合相变保温砂浆层内测界面温度与室内温度相比较,两者最大温差为 1.4 °C,相变放热持续 13 h 后的最小温差为 0.1 °C,复合相变保温砂浆的放热效果明显;次日 05:00~次日 8:00 期间,虽然复合相变保温砂浆层内测温度低于室内温度,但温差基本维持在 0.3 °C 以内,此阶段相变砂浆层的保温效果较明显。240 mm 混凝土砌块+30 mm 复合相变保温砂浆组成的复合相变墙体具有良好的保温、蓄放热能力。

表 5 放热阶段混凝土砌块复合相变保温墙体内部温度变化

时刻	室内温度/°C	复合相变墙体内部温度/°C
18:00	18.5	19.7
19:00	17.5	18.4
20:00	16.7	17.3
21:00	15.9	16.7
22:00	15.6	16.1
23:00	15.1	15.5
00:00	14.8	15.1
01:00	14.4	14.6
02:00	14.1	14.2
03:00	13.3	13.5
04:00	13.1	13.2
05:00	13.0	13.1

## 5 结 论

1)对砖墙复合相变保温墙体日光温室和加气混凝土砌块墙复合相变保温墙体日光温室的保温效果进行模型模拟研究,研究表明 50 mm 厚复合相变保温砂浆层为 490 mm 砖墙理想的内保温砂浆层,30 mm 厚复合相变保温砂浆层为 240 mm 加气混凝土砌块墙理想的内保温砂浆层;

2)对 490 mm 砖墙+50 mm 复合相变保温砂浆的复合相变保温墙体和 240 mm 加气混凝土砌块墙+30 mm 复合相变保温砂浆的复合相变保温墙体进行相变传热模型模拟研究,研究表明 2 种复合相变保温墙体持续蓄热时间均为 8 h,前者的持续放热时间为 16 h,后者的持续放热时间为 13 h,说明两者均具有较好的保温蓄放热能力,综合考虑两者都适合于冬季生产,可根据不同地区的不同环境条件进行合理调整复合相变砂浆层厚度或砌体墙厚度;

3)复合相变保温砂浆作为砌体墙日光温室的内保温砂浆,可在建造温室时直接使用,也可用于对原有砌体墙日光温室的改造,提高砌体墙的保温、蓄放热能力,从而提高温室供植物生长的热环境,提高温室生产效率,已在部分生产实践中加以应用,取得了较好的效果;

4)本文中应用 ANSYS 有限元分析软件对复合相变保温墙体进行相变传热分析时,假设忽略了很多影响条件,而在实际生产过程中室内外环境、作物生长等对温室内环境都有一定的影响,将进一步考虑多因素下复合相变保温墙体的传热模型研究。

#### [参考文献]

- [1] 韩云全,陈超,管勇,等.复合相变蓄热墙体材料对日光温室热环境及番茄生长发育的影响[J].中国蔬菜,2012(18):99-105.  
HAN Y Q, CHEN C, GUAN Y, et al. Effect of composite phase change thermal storage wall materials on solar greenhouse thermal environment and tomato growth[J]. China vegetables, 2012(18): 99-105.
- [2] 马承伟,苗香雯.农业生物环境工程[M].北京:中国农业出版社,2005.  
MA C W, MIAO X W. Agricultural bio-environment engineering [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- [3] 张朝晖,范群波,贵大勇,等.ANSYS 8.0热分析教程与实例解析[M].北京:中国铁道出版社,2005.  
ZHANG Z H, FAN Q B, GUI D Y, et al. ANSYS 8.0 thermal analysis tutorial and case analysis [M]. Beijing: China Railway Press, 2005.
- [4] 孙潇,邹钺.相变墙体温度变化的计算机模拟[J].建筑节能,2010,38(9):58-60,65.  
SUN X, ZOU Y. Simulation of temperature changing process of phase change wall material with computer[J]. Building energy conservation, 2010, 38(9): 58-60, 65.
- [5] 张毅,张菁燕,黄斌,等.脂肪酸相变材料导热系数测试及相变传热过程的数值模拟[J].功能材料,2012,43(14):1950-1954,1959.  
ZHANG Y, ZHANG J Y, HUANG B, et al. Experiment test of thermal conductivity coefficient and heat transfer simulation analysis of fatty acids phase change materials [J]. Journal of functional materials, 2012, 43 (14): 1950-1954, 1959.
- [6] 郭志强,吴文健,满亚辉,等.基于ANSYS有限元方法对相变材料相变过程的分析[J].新技术新工艺,2007(11):87-89.  
GUO Z Q, WU W J, MAN Y H, et al. Phase change analysis of PCM by ANSYS finite element method [J]. New technology & new process, 2007(11): 87-89.
- [7] 樊建新.相变墙体传热过程有限元模拟分析研究[J].山西建筑,2008,34(26):231-233.  
FAN J X. Finite-element simulation analysis of the heat delivering process of phase change wall [J]. Shanxi architecture, 2008, 34(26): 231-233.
- [8] 胡小芳,肖迪.基于ANSYS的相变储能建筑材料温度响应特性的研究[J].材料导报,2009,23(22):83-86.  
HU X F, XIAO D. Research on the properties of the phase change power storage building material temperature response through ANSYS [J]. Materials review, 2009, 23(22): 83-86.
- [9] 石超.相变储能材料RT28在建筑墙体中的应用研究[D].合肥:安徽建筑大学,2015.  
SHI C. Research on the application of phase change material RT28 in the building wall [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2015.
- [10] 胡庆康.相变材料在建筑节能中的应用及其模拟实验[D].淮南:安徽理工大学,2016.  
HU Q K. Application of phase change materials in building energy conservation and simulation experiment [D]. Huainan: Anhui University of Science And Technology, 2016.
- [11] 张立明,邹志荣,陆国东,等.温室墙体复合相变材料的制备与有限元分析[J].农机化研究,2008,30(4):158-170.  
ZHANG L M, ZOU Z R, LU G D, et al. The preparation of compound phase change material of greenhouse wall and analyzed by ANSYS [J]. Journal of agricultural mechanization research, 2008, 30(4): 158-170.
- [12] 张欣.日光温室相变材料墙板蓄/放热过程数值模拟研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2016.  
ZHANG X. CFD based simulation of heat charging/discharging process of phase change wallboard in

- Chinese solar greenhouse [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.
- [13] 周莹, 王双喜. 复合相变储能保温砂浆在日光温室中的应用效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33(20): 190-196.
- ZHOU Y, WANG S X. Application effect of composite phase change energy storage thermal insulation mortar in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(20): 190-196.
- [14] 王宏丽, 邹志荣, 陈红武, 等. 温室中应用相变储热技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 304-307.
- WANG L H, ZOU Z R, CHEN H W, et al. Research advances in technologies of phase-change heat storage and its application in greenhouses [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(6): 304-307.
- [15] 徐刚毅, 周长吉. 不同保温墙体日光温室的性能测试与分析[J]. 华中农业大学学报, 2004(z2): 62-66.
- XU G Y, ZHOU C J. Performance testing and analysis on different insulation walls of sunlight greenhouse [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2004 (z2): 62-66.
- [16] 张建荣, 刘照球, 刘文燕. 混凝土表面自然对流换热系数的实验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2007, 33(5): 143-146.
- ZHANG J R, LIU Z Q, LIU W Y. Experimental research on natural convective coefficient of concrete surface [J]. Sichuan building science, 2007, 33(5): 143-146.
- [17] JB/T 10286—2001 日光温室结构[S]. 北京: 机械科学研究院, 2001.
- JB/T 10286—2001 Solar greenhouse structure [S]. Beijing: Academy of Machinery Science & Technology, 2001.

## SIMULATION STUDY ON COMPOSITE PHASE CHANGE THERMAL INSULATION WALLS IN SOLAR GREENHOUSE BASED ON ANSYS

Zhou Ying<sup>1,2</sup>, Wang Shuangxi<sup>2</sup>, Liu Zhonghua<sup>2</sup>, Ma Jinping<sup>2</sup>, Wang Ting<sup>2</sup>

(1. College of Urban Construction, Heze University, Heze 274000, China;

2. College of Engineering, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

**Abstract:** Composite phase change insulation mortar can be used as internal insulation and energy storage layer, together with the walls of solar greenhouse, to constitute the composite phase-change thermal insulation wall, which can provides heat energy but also insulation for greenhouse production. The heat charge and discharge characteristics of solar greenhouse phase change wall are numerically simulated based on finite element analysis software ANSYS in this paper, which providing theoretical support for the application of composite phase-change materials in solar greenhouse. This study numerically examines the heat transfer process of composite phase change thermal insulation wall. The results show that this walls, which consists of composite phase change insulation mortar with 50 mm and 30 mm thick, respectively, and brick wall with 490 mm thick and aerated concrete block wall with 240 mm thick, respectively, has a strong ability of heat store and release. Both of them have 8 hours heat storage duration of time, while the duration time of heat release is 16 and 13 hours, respectively. Overall, two kinds of the walls are suitable for greenhouse production in winter.

**Keywords:** ANSYS finite element analysis; heat transfer; numerical simulation; composite phase change insulation mortar; solar greenhouse