

# 含相变材料层玻璃屋顶光热传输特性分析

刘昌宇, 吴洋洋, 李 栋, 郑雨蒙, 周英明, 刘晓燕

(东北石油大学土木建筑工程学院, 大庆 163318)

**摘 要:** 模拟研究含半透明相变材料层玻璃屋顶的动态传热特性, 分析相变材料半透明特性和天顶角对含相变材料层玻璃屋顶动态传热特性的影响。结果表明, 相变材料半透明特性和天顶角对玻璃屋顶的温度延迟、内表面温度、热流、透射太阳能等影响显著; 双层玻璃厚度为 18 mm, 相变材料层厚度为 20 mm 的玻璃屋顶结构适合中国北方严寒地区。

**关键词:** 相变材料; 屋顶; 传热; 半透明特性

**中图分类号:** TK124

**文献标识码:** A

## 0 引 言

能源和环境是人类发展的两大关键要素。建筑是能源利用大户, 目前建筑能耗约占社会总能耗的 40%, 并随人们生活方式和居住条件的改善而逐渐增加。目前, 发展兼具建筑节能和室内热舒适性的新技术已成为建筑行业面临的主要问题之一<sup>[1]</sup>。屋顶是建筑围护结构中热损失的主要来源, 约占直接太阳辐射引起总能耗的 70%<sup>[2]</sup>, 特别是采用玻璃屋顶的大型场馆等建筑。由于玻璃具有半透明特性, 导致其能耗增加, 因而增加玻璃的蓄热能力是改善玻璃屋顶传热性能的有效方法之一。添加相变材料增加玻璃结构的储能密度和隔热性能, 是近年来发展的一项新技术<sup>[3,4]</sup>。文献[4]数值模拟研究了中国东北部地区含相变材料传统屋顶的传热性能, 并分析其传热影响因素。

为研究相变材料在建筑中的应用, 国内外研究人员建立了一维传热模型<sup>[5-8]</sup>、二维传热模型<sup>[9]</sup>和三维传热模型<sup>[10]</sup>等计算模型, 但这些模型仅适用于混凝土结构和聚氯乙烯结构等不透明屋顶。很多学者利用实验和数值模拟方法研究相变材料对窗、幕墙等其他围护结构传热的影响<sup>[11-13]</sup>, 考虑其半透明性质。但由于屋顶在建筑中的位置特殊, 其热损失和太阳得热系数也不同于其他围护结构, 所得结论无法应用于玻璃屋顶。本文针对中国东北地区含

半透明相变材料层玻璃屋顶的动态传热研究需求, 考虑半透明相变材料导热、辐射和相变耦合传热过程, 建立其动态传热分析模型, 并分析材料半透明特性和天顶角对其动态传热的影响。

## 1 数理模型

图 1 为大庆市(属于中国东北地区)某采用含相变材料层玻璃坡屋顶建筑屋顶结构模型。如图 1 所示, 到达玻璃屋顶表面的太阳辐射经玻璃和相变材料透射、反射和吸收, 通过导热、对流和辐射等传热方式与室内外环境进行光热交换后进入室内。考虑屋顶内外表面与环境之间的辐射、对流耦合传热过程。

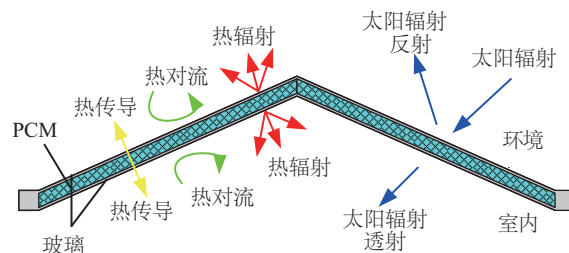


图1 含相变材料层玻璃屋顶结构传热模型

Fig. 1 Heat transfer model of double glazing roof filled with PCM

### 1.1 控制方程和边界条件

模型假设: 1) 将玻璃屋顶动态传热过程简化为

收稿日期: 2016-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(51306031)

通信作者: 李 栋(1979—), 男, 博士、副教授, 主要从事太阳能利用方面的研究。lidonglvyan@126.com

一维瞬态传热;2)不考虑相变材料自然对流;3)相变材料仅能透过短波辐射;4)玻璃和相变材料均视为各项同性介质,且材料的热物性参数与温度无关;5)不考虑相变材料的散射影响。

将双层玻璃屋顶的传热过程分3个区域进行计算(如图2所示),分别为外玻璃层、内玻璃层和中间的相变材料层。图中 $A$ 为吸收比; $r$ 为反射率; $I_{\text{sol}}$ 为太阳辐照度, $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 分别为室外侧玻璃厚度、石蜡层厚度、室内侧玻璃厚度, $\text{m}$ ;  $x$ 为距离, $\text{m}$ 。

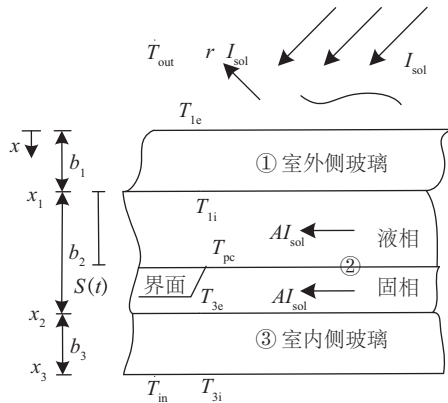


图2 含相变材料双层玻璃屋顶结构计算示意图

Fig. 2 Calculated layout of double glazing roof filled with PCM

玻璃区域一维非稳态能量方程为:

$$\rho_g c_{p,g} \frac{\partial T}{\partial \tau} = k_g \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \phi \quad (1)$$

式中,  $\rho_g$ ——玻璃的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c_{p,g}$ ——玻璃的定压比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $T$ ——温度,  $\text{K}$ ;  $\tau$ ——时间,  $\text{s}$ ;  $k_g$ ——导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $\phi$ ——辐射源项,  $\text{W}/\text{m}^3$ 。

相变区一维非稳态能量方程为:

$$\rho_p \frac{\partial h}{\partial \tau} = k_p \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \phi \quad (2)$$

式中,  $\rho_p$ ——相变材料的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $h$ ——相变材料的比焓,  $\text{J}/\text{kg}$ ;  $k_p$ ——相变材料的导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

式(2)中相变材料的比焓由式(3)计算:

$$h = \int_{T_{\text{ref}}}^T c_{p,p} dT + \beta Q_L \quad (3)$$

$$\begin{cases} \text{其中, } 0, T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_1 - T_s}, T_s \leq T \leq T_l \\ 1, T > T_l \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $c_{p,p}$ ——相变材料的定压比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $Q_L$ ——相变材料相变过程中的潜热,  $\text{J}/\text{kg}$ ;  $\beta$ ——计算区的液体分数;  $T_s$ ——相变材料的熔点,  $\text{K}$ ;  $T_l$ ——相变材料的液态温度,  $\text{K}$ 。

当计算节点在图2中不同层内时,每层的辐射源项计算方法如式(5)所示。

$$\phi = \begin{cases} \frac{A_{g1} I_{\text{sol}}}{L_{g1}}, & \text{在室外侧玻璃层内时} \\ \frac{T_{g1} A_{p1} I_{\text{sol}}}{L_{p1}}, & \text{在液相石蜡层内时} \\ \frac{T_{g1} T_{p1} A_{p2} I_{\text{sol}}}{L_{p2}}, & \text{在液相石蜡层内时} \\ \frac{T_{g1} T_{p1} T_{p2} A_{p2} I_{\text{sol}}}{L_{g2}}, & \text{在室内侧玻璃层内} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $T_{g1}$ 、 $T_{p1}$ 、 $T_{p2}$ 、 $T_{g2}$ ——玻璃层1、相变层1、相变层2、玻璃层2的透射比;  $A_{g1}$ 、 $A_{p1}$ 、 $A_{p2}$ 、 $A_{g2}$ ——玻璃层1、相变层1、相变层2、玻璃层2的吸收比;  $L_{g1}$ 、 $L_{p1}$ 、 $L_{p2}$ 、 $L_{g2}$ ——玻璃层1、相变层1、相变层2、玻璃层2的厚度,  $\text{m}$ 。

玻璃层的透射比和吸收比可由式(6)、式(7)计算<sup>[14]</sup>:

$$T_i = \frac{(1 - r_{i1})(1 - r_{i2}) \exp(-\alpha_i L_i)}{1 - r_{i1} r_{i2} \exp(-2\alpha_i L_i)} \quad (6)$$

$$A_i = 1 - r_{i1} - \frac{(1 - r_{i1}) r_{i2} \exp(-2\alpha_i L_i)}{1 - r_{i1} r_{i2} \exp(-2\alpha_i L_i)} - T_i \quad (7)$$

介质 $i$ 和 $j$ 的界面反射率 $r$ 可根据Fresnel关系式计算<sup>[15]</sup>:

$$r_{i-j} = \frac{(n_i - n_j)^2}{(n_i + n_j)^2} \quad (8)$$

式中,  $n_i$ 、 $n_j$ ——介质 $i$ 、 $j$ 的折射率。

屋顶内外表面的边界条件:

外层玻璃外表面直接接收太阳辐射,在 $x=0$ 处边界条件为:

$$-k_g \frac{\partial T}{\partial x} = q_{\text{rad}} + e_{h,\text{out}} (T_{\text{out}} - T_{a,\text{out}}) \quad (9)$$

式中,  $q_{\text{rad}}$ ——外层玻璃外表面与大气的辐射换热,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $e_{h,\text{out}}$ ——外层玻璃外表面的对流换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $T_{\text{out}}$ ——外层玻璃外表面的温度,  $\text{K}$ ;  $T_{a,\text{out}}$ ——环境温度,  $\text{K}$ 。

与室外环境的辐射换热 $q_{\text{rad}}$ 由式(10)计算,其中 $q_{\text{rad,sky}}$ 和 $q_{\text{rad,air}}$ 计算方法如式(11)、式(12)<sup>[16]</sup>。

$$q_{\text{rad}} = q_{\text{rad,air}} + q_{\text{rad,sky}} \quad (10)$$

$$q_{\text{rad,sky}} = \varepsilon \sigma F_{\text{sky}} B (T_{\text{out}}^4 - T_{\text{sky}}^4) \quad (11)$$

$$q_{\text{rad,air}} = \varepsilon \sigma F_{\text{sky}} (1 - B) (T_{\text{out}}^4 - T_{\text{a,out}}^4) \quad (12)$$

式中,  $q_{\text{rad,air}}$ 、 $q_{\text{rad,sky}}$  ——与空气、天空的辐射换热,  $\text{W/m}^2$ ;  
 $\varepsilon$  ——玻璃表面发射率;  $\sigma$  ——玻尔兹曼常数;  
 $F_{\text{sky}}$  ——玻璃和天空的角系数;  $B$  ——天空与空气  
 辐射之间的衰减因子;  $T_{\text{sky}}$  ——天空温度,  $\text{K}$ 。

$$F_{\text{sky}} = \frac{1 + \cos \theta}{2} \quad (13)$$

$$B = \sqrt{\frac{1 + \cos \theta}{2}} \quad (14)$$

$$T_{\text{sky}} = 0.0552 T_{\text{a,out}}^{1.5} \quad (15)$$

式中,  $\theta$  ——玻璃屋顶和天空的夹角,  $\theta = 0^\circ$  时代表  
 水平玻璃屋顶。

靠近室内环境的内层玻璃的内表面处, 在  $x = x_3$   
 处边界条件为<sup>[14]</sup>:

$$-k_g \frac{\partial T}{\partial x} = e_{\text{h,in}} (T_{\text{in}} - T_{\text{a,in}}) + \varepsilon \sigma (T_{\text{in}}^4 - T_{\text{a,in}}^4) \quad (16)$$

式中,  $e_{\text{h,in}}$  ——内层玻璃内表面换热系数,  
 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $T_{\text{in}}$  ——内层玻璃内表面温度,  $\text{K}$ ;  
 $T_{\text{a,in}}$  ——室内温度,  $\text{K}$ 。

式(17)为双层玻璃屋顶内表面温度波峰的差  
 值, 即温度延迟, 是分析玻璃屋顶等双层玻璃结构  
 传热性能的重要参数。式(18)和式(19)为计算的  
 平均相对值和最大相对值, 用于评价玻璃屋顶的热  
 性能<sup>[17]</sup>。

$$\varphi_g = \tau_{g,\text{max}} - \tau_{a,\text{max}} \quad (17)$$

$$\varphi_{\text{ave}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i^2 - \alpha_i^1}{\alpha_i^1} \quad (18)$$

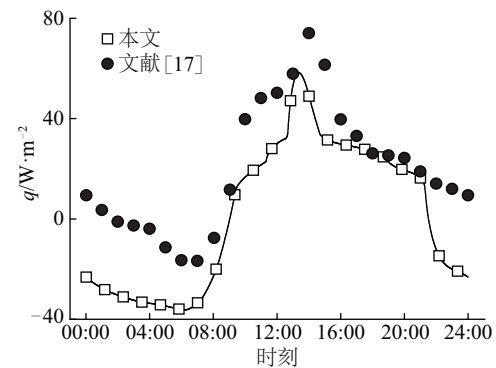
$$\varphi_{\text{max}} = \text{Max}_{1 \leq i \leq k} \left\{ \frac{\alpha_i^2 - \alpha_i^1}{\alpha_i^1} \right\} \quad (19)$$

式中,  $\varphi_g$  ——双层玻璃结构与室外空气的温度延  
 迟;  $\tau_{g,\text{max}}$  ——双层玻璃结构内表面温度达到峰值的  
 时间;  $\tau_{a,\text{max}}$  ——室外温度达到峰值的时间;  $\varphi_{\text{ave}}$ 、  
 $\varphi_{\text{max}}$  ——平均相对值和最大相对值;  $\alpha_i^1$ 、 $\alpha_i^2$  ——对  
 照参数值和标准值;  $i$  ——节点数量;  $k$  ——网格总  
 数量。

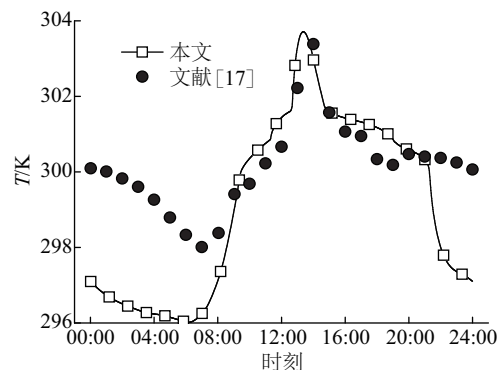
## 1.2 求解方法及程序验证

利用文献[15]所用的有限差分法来离散方程

及边界条件, 采用 TDMA 算法求解方程。相变材  
 料和玻璃幕墙内的网格间距皆为  $1 \text{ mm}$ 。采用文  
 献[17]的实验参数对程序进行验证。室外空气温  
 度、太阳辐照度取自文献[17]的图 6。材料的热物  
 性参数取自文献[17]中的表 2。玻璃的吸收系数和折  
 射率分别为  $19 \text{ m}^{-1}$  和  $1.5$ <sup>[18]</sup>。玻璃发射率为  $0.88$ <sup>[19]</sup>。  
 相变材料折射率为  $1.3$ , 固态和液态吸收系数分别  
 为  $50 \text{ m}^{-1}$  和  $40 \text{ m}^{-1}$ <sup>[18]</sup>。初始温度为  $23^\circ\text{C}$ 。模拟运  
 行 2 d 至周期性变化。文献[17]和本文数值模拟的  
 热流和含相变材料双层玻璃内表面温度对比结果  
 见图 3。如图 3 所示, 本文的热流和温度模拟结果  
 与文献[17]的实验结果趋势基本一致, 局部存在  
 一些差异。本文计算的热流和温度与实验结果的  
 平均相对值分别为  $34\%$  和  $2.7\%$ , 原因为: 1) 实验过  
 程中初始温度会对结果有较大影响; 2) 文献[17]并  
 未明确给出所采用相变材料的光学参数; 3) 实验研  
 究本身存在约  $20\%$  的误差。上述分析表明, 本文的  
 数学模型和求解程序可求解含相变材料双层玻璃  
 结构内的相变和辐射耦合传热问题。



a. 热流密度



b. 温度

图3 数值解与实验结果对比

Fig. 3 Compared results in this work and the literature

## 2 结果与讨论

本文中玻璃和相变材料的网格大小均为 1 mm。测得的大庆市 6 月 22 日大气温度、太阳辐照度和天顶角变化情况如图 4 所示。 $e_{h,out}$  和  $e_{h,in}$  分别为 19 和 8.7 W/(m<sup>2</sup>·K)<sup>[16]</sup>。室内空气温度  $T$  为 26 ℃。材料的热物性见表 1。玻璃的吸收系数和折射率分别为 19 m<sup>-1</sup> 和 1.5<sup>[18]</sup>。玻璃的发射率为 0.88<sup>[19]</sup>。初始温度为 23 ℃。模拟 2 d 后屋顶内部传热不受初始温度的影响。

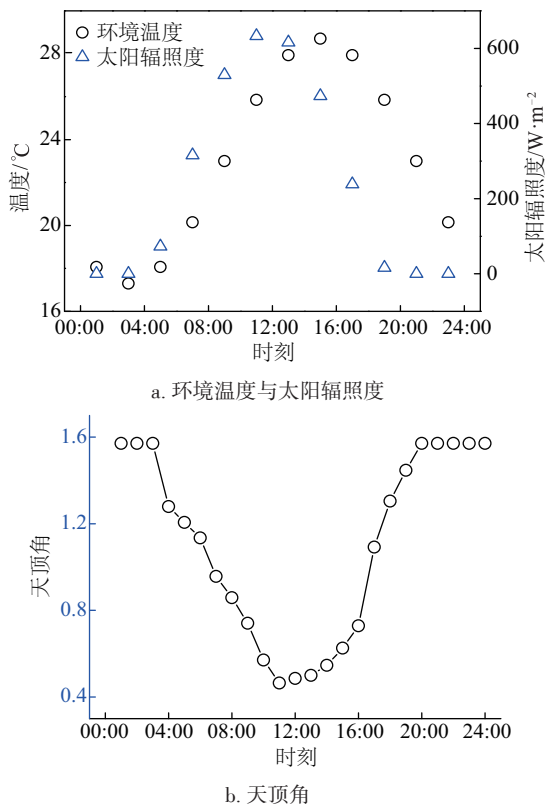


图4 环境温度、太阳辐照度和天顶角每小时的变化情况  
Fig. 4 Mean hourly variation of ambient temperature, solar irradiance and zenith angle

表1 材料热物性<sup>[9]</sup>

Table 1 Thermophysical properties of materials<sup>[9]</sup>

热物性	玻璃	相变材料
熔点/℃	—	27~29
密度/kg·m <sup>-3</sup>	2500	850
导热系数/W·(m·K) <sup>-1</sup>	0.96	0.21
定压比热容/J·(kg·K) <sup>-1</sup>	840	2230
潜热/J·kg <sup>-1</sup>	—	205000

### 2.1 半透明特性的影响

为分析相变材料半透明特性对含相变材料玻璃屋顶传热特性的影响,研究不透明屋顶和半透明屋顶 2 种情况。玻璃和相变材料厚度分别取 18 和 20 mm,天顶角始终为 0°。液态和固态相变材料的折射率分别为 1.3 和 1.4。固态和液态相变材料的吸收系数分别为 30 m<sup>-1</sup> 和 5 m<sup>-1</sup>。图 5 为不透明模型和半透明模型内部表面传热过程的对比图。可看出,二者温度曲线趋势大体相同。

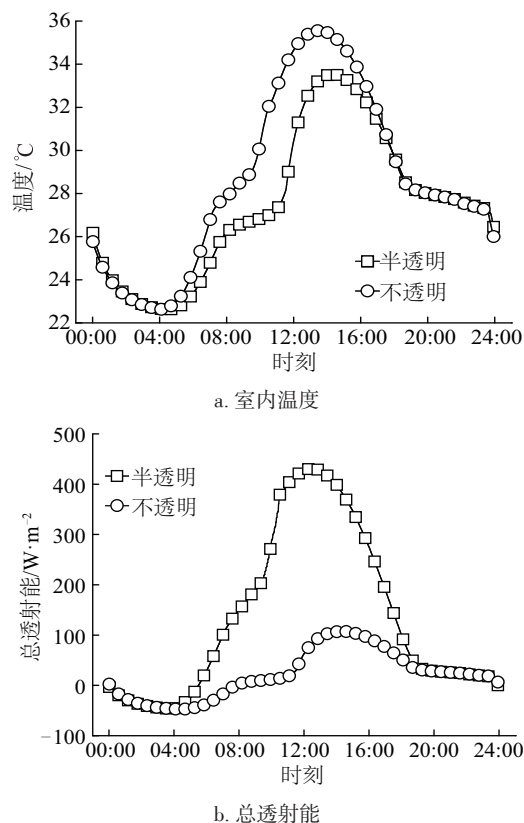


图5 不同半透明特性下玻璃屋顶内表面模拟结果  
Fig. 5 Simulation results of the interior surface on double glazing roof with different semi-transparent property of PCM

如图 5a,不透明模型和半透明模型的温度延迟分别为 140 和 90 min,这表明半透明特性对屋顶内表面温度延迟有显著影响。与半透明模型的结果相比,不透明模型结果的平均相对值和最大相对值分别为 3.8%和 17.5%,表明半透明特性对温度的影响较弱,特别是 05:00 前和 18:00 后。而在 05:00~18:00 之间,不透明模型的温度值大于半透明模型。主要原因是采用不透明模型时,太阳辐射全部被屋顶外表面吸收,导致总传热热阻增加。从

图 5b 可看出,不透明模型热流密度小于半透明模型,与半透明模型的结果相比,不透明模型结果的平均相对值和最大相对值分别为 88.3% 和 25%,说明考虑半透明特性对屋顶热流密度有很大影响。

## 2.2 天顶角的影响

分析太阳天顶角对含相变材料玻璃屋顶传热性能的影响。2 种情况下天顶角分别取  $\theta_s=0$  和  $\theta_s=f(\tau)$ 。天顶角随时间变化情况如图 4b。玻璃和相变材料厚度分别为 18 mm 和 20 mm。液态和固态相变材料折射率分别为 1.3 和 1.4。固态和液态相变材料吸收系数分别为  $30 \text{ m}^{-1}$  和  $5 \text{ m}^{-1}$ 。

图 6 为 2 种情况下双层玻璃内表面传热情况。除图 6d 外,其余图中 2 条曲线趋势均一致。原因是不考虑天顶角变化时,太阳光持续垂直入射,仅仅在相变材料发生相变过程的 09:00~10:00 和 16:00~18:00 这 2 个时间段内太阳光透过率呈线性变化,其余时间都呈水平分布。相比而言,当考虑天顶角变化时,由于计算过程中将其细化,太阳光透过率的整个曲线变化趋势自然。从图 6a 可看出,考虑天顶角变化和不考虑时的温度延迟分别为 100 min 和 140 min,表明考虑天顶角变化对温度延迟的影响显著。与考虑天顶角变化时的结果相比,不考虑天顶角时计算结果的平均相对值和最大相对值分别为 3.3% 和 11.1%,表明是否考虑天顶角对屋顶内表面温度的影响很小。但不考虑天顶角变化时的温度值大于考虑其影响时的温度值。主要原因是考虑角度时,太阳光垂直入射,到达玻璃屋顶外表面的有效太阳辐射量较大,而且界面的反射率较小,导致玻璃屋顶内吸收的太阳能增加。如图 6b 和图 6c 所示,考虑天顶角随时间变化时,透过玻璃屋顶的总热流和太阳能较小。与考虑天顶角变化时相比,不考虑角度变化时的平均相对值和最大相对值分别为 10.34% 和 6.74%, 12.6% 和 10.53%,说明是否考虑天顶角的变化对热流密度的影响大于其对温度的影响。如图 6d 所示,结果与热流密度基本一致。2 种模型得到的值在大多时间内大于 0.2 (特别在 07:30~19:00 之间),表明该条件下玻璃屋顶可有效利用相变材料的潜热,既能提高其热惰性,又不影响其室内采光。

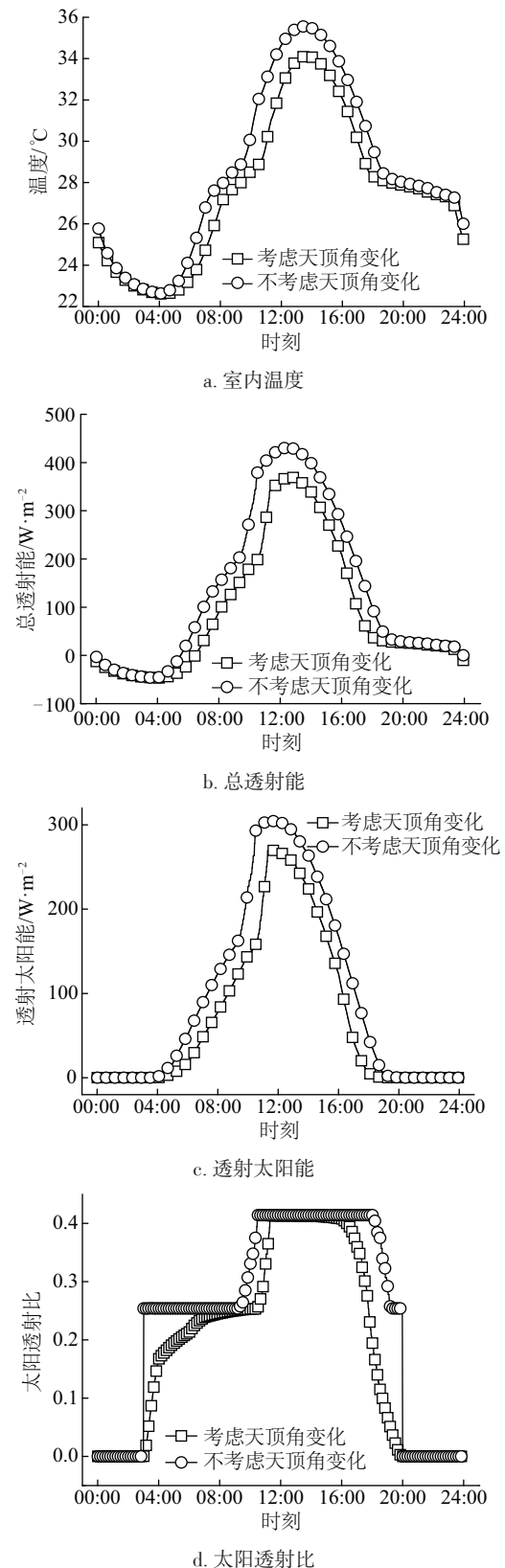


图 6 不同天顶角时玻璃屋顶内表面传热模拟结果  
Fig. 6 Simulation results of the interior surface on double glazing roof with different zenith angle of sun

### 3 结 论

本文数值研究了不同半透明特性和天顶角对含相变材料双层玻璃屋顶内表面传热特性的影响,得出以下主要结论:

1)是否考虑屋顶的半透明性对含相变材料层玻璃屋顶内传热性能的影响较大。不考虑其半透明性不仅会使其内表面的温度值增加、热流值减小,还会严重影响一天内的温度延迟值。

2)在太阳辐照下玻璃屋顶结构内的传热计算过程中,应考虑天顶角随时间的变化,否则会对内表面温度、热流、太阳能透过率等结果影响较大。相比而言,不考虑天顶角的变化对屋顶热流的影响比对其内部温度场的影响更大。

3)双层玻璃、相变材料层厚度分别为 18 mm、20 mm 的玻璃屋顶结构适合中国北方严寒地区,既能保证相变潜热的利用率,也不影响室内采光。

#### [参考文献]

- [1] 吴彦廷,周国兵,杨勇平. 太阳能相变蓄热集热墙二维非稳态模型及分析[J]. 太阳能学报, 2012, 33(6): 948—952.
- [1] Wu Yanting, Zhou Guobing, Yang Yongping. Two-dimension unsteady model and performance analysis for Trombe wall system with phase change materials [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2012, 33(6): 948—952.
- [2] 黄德中,沈吉宝. 建筑节能技术综述[J]. 太阳能学报, 2007, 28(6): 682—688.
- [2] Huang Dezhong, Shen Jibao. The energy saving of buildings[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2007, 28(6): 682—688.
- [3] Al-Obaidi K M, Ismail M, Rahman A M A. Design and performance of a novel innovative roofing system for tropical landed houses[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 85: 488—504.
- [4] Li Dong, Zheng Yumeng, Liu Changyu, et al. Numerical analysis on thermal performance of roof contained PCM of a single residential building[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 100: 147—156.
- [5] Lu Shilei, Chen Yafei, Liu Shangbao, et al. Experimental research on a novel energy efficiency roof coupled with PCM and cool materials[J]. Energy & Buildings, 2016, 127: 159—169.
- [6] Barrios G, Huelsz G, Rojas J, et al. Envelope wall/roof thermal performance parameters for non air-conditioned buildings[J]. Energy & Buildings, 2012, 50: 120—127.
- [7] Kousksou T, Arid A, Jamil A, et al. Thermal behavior of building material containing microencapsulated PCM [J]. Thermochimica Acta, 2012, 550: 42—47.
- [8] Evola G, Marletta L, Sicurella F. A methodology for investigating the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings[J]. Building and Environment, 2013, 59: 517—527.
- [9] Guichard S, Miranville F, Bigot D, et al. A thermal model for phase change materials in a building roof for a tropical and humid climate: Model description and elements of validation[J]. Energy and Buildings, 2014, 70: 71—80.
- [10] Gowreesunker B L, Tassou S A. Effectiveness of CFD simulation for the performance prediction of phase change building boards in the thermal environment control of indoor spaces[J]. Building and Environment, 2013, 59: 612—625.
- [11] Alqallaf H J, Alawadhi E M. Concrete roof with cylindrical holes containing PCM to reduce the heat gain [J]. Energy & Buildings, 2013, 61: 73—80.
- [12] de Gracia A, Navarro L, Castell A, et al. Experimental study of a ventilated façade with PCM during winter period[J]. Energy & Buildings, 2013, 58: 324—332.
- [13] Silva T, Vicente R, Rodrigues F, et al. Performance of a window shutter with phase change material under summer Mediterranean climate conditions[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 84: 246—256.
- [14] Goia F, Perino M, Serra V, et al. Experimental analysis of the energy performance of a full-scale PCM glazing prototype[J]. Solar Energy, 2014, 100: 217—233.
- [15] Li Dong, Qi Hanbin, Wu Guozhong. Determined optical constants of liquid hydrocarbon fuel by a novel transmittance method [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2015, 126(7-8): 834—837.
- [16] Wang Fuqiang, Tan Jianyu, Ma Lanxin, et al. Thermal performance analysis of porous medium solar receiver with quartz window to minimize heat flux gradient[J]. Solar Energy, 2014, 108: 348—359.
- [17] Zhong Kecheng, Li Shuhong, Sun Gaofeng, et al. Simulation study on dynamic heat transfer performance of PCM-filled glass window with different thermophysical parameters of phase change material[J].

- Energy and Buildings, 2015, 106: 87—95.
- [18] Li Shuhong, Zhong Kecheng, Zhou Yingying, et al. Comparative study on the dynamic heat transfer characteristics of PCM-filled glass window and hollow glass window[J]. Energy & Buildings, 2014, 85: 483—492.
- [19] Gowreesunker B L, Stankovic S B, Tassou S A, et al. Experimental and numerical investigations of the optical and thermal aspects of a PCM-glazed unit[J]. Energy & Buildings, 2013, 61: 239—249.

## ANALYSIS OF LIGHT AND HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF GLASS ROOF WITH PHASE CHANGE MATERIAL

Liu Changyu, Wu Yangyang, Li Dong, Zheng Yumeng, Zhou Yingming, Liu Xiaoyan

(School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

**Abstract:** The simulation study of dynamic heat transfer characteristics of glass roof containing translucent phase change material layers is conducted to analyze the effect of translucency performance of phase change materials and zenith angle on the dynamic heat transfer characteristics of glass roof with phase change material layers. The results show that the effect of translucency performance of phase change materials and zenith angle on temperature delay, internal surface temperature, heat flow and transmitted solar energy is significant; the glass roof structure with 18 mm thickness of double glass and 20 mm thickness of phase change material layer is suitable for the severe cold regions in northern China.

**Keywords:** phase change material; roof; heat transfer; semi-transparent characteristic