

日光温室墙体传热特性的研究

佟国红, 王铁良, 白义奎, 刘文合

(沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110161)

摘 要: 为提高日光温室的节能效果, 探索能有效提高温室热环境的墙体材料及组成, 对结构相同、墙体材料不同的温室温度环境进行了测试, 用频率响应法对不同材料组成的 600 mm 厚墙体的传热特性分别进行了理论分析。测试结果表明: 在同一温室内, 复合异质墙体夜间内表面温度比纯砖墙内表面温度平均提高 3.7 °C; 在相同室外温度环境条件下, 复合异质墙体温室内夜间空气温度比夯实土墙温室的室内温度平均提高 3.0 °C。理论分析结果显示: 复合异质墙体对室外温度扰量的衰减倍数是聚苯乙烯泡沫塑料板(以下简称聚苯板)墙体的 12.3 倍, 是纯砖墙的 9.5 倍; 单位面积复合异质墙体全天向室外传热量是纯砖墙的 1/17。理论分析及试验都证明聚苯板作为墙体的隔热材料, 砖作为墙体的蓄热材料是合理的。该文给出了最佳墙体的组成。

关键词: 日光温室; 墙体; 传热特性

中图分类号: S625

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2003)03-0186-04

1 引言

大型连栋温室生产时, 因能耗过高, 使得绝大多数连栋温室都在亏损运行, 而日光温室以其特殊的围护结构及保温措施, 不加温或少加温就可越冬生产, 因此日光温室在我国发展非常迅速。墙体作为温室的围护结构之一, 对温室内的热环境有直接的影响, 我国的专家学者曾对几种温室墙体的温度分布进行了测试^[1,2], 但目前对温室墙体的传热特性还缺乏理论研究。国外学者对温室墙体的传热及能耗进行了理论分析及实验测试^[3~6], 但由于其所研究的温室结构与我国的日光温室结构不同, 我们还不能直接照搬国外的研究模式。为有效地提高日光温室节能效果, 有必要对墙体的传热特性进行分析研究, 以期对温室的建造起指导作用。

2 试验设计

测试温室均为具有不同墙体结构的辽沈 I 型日光温室。各处理墙体如表 1 所示。

表 1 试验处理

Table 1 Experimental treatments

处理	墙厚 /mm	组 成
处理 1	450	450 mm 厚纯砖墙
处理 2	450	240 mm 厚红砖—90 mm 厚聚苯板—120 mm 厚红砖
处理 3		上宽 900 mm, 下宽 1 200 mm 厚的夯实土墙
处理 4	600	240 mm 厚红砖—120 mm 厚聚苯板—240 mm 厚红砖
		240 mm 厚红砖—50 mm 厚空气层—50 mm 厚聚苯板
处理 5	680	—120 mm 厚红砖—50 mm 聚苯板—50 mm 空气层— 120 mm 厚红砖

收稿日期: 2002-11-18

基金项目: “十五”国家科技攻关计划: “工厂化农业关键技术与示范”——日光温室节能关键技术与产业化(2001BA 503B); 辽宁省“十五”科技攻关项目: 工厂化高效农业关键技术与示范(2001215001)

作者简介: 佟国红(1966-), 女, 蒙古族, 副教授, 沈阳市 沈阳农业大学水利学院, 110161。Email: TGHLB@online.ln.cn

处理 1、处理 2 是同一温室的两种墙体, 温室位于辽宁省沈阳市郊; 处理 3 和处理 4 位于辽宁省法库县; 处理 5 位于辽宁省辽中县。处理 1、处理 2 及处理 5 为辽沈 I 型 7.5 m 日光温室, 跨度 7.5 m, 长 92 m, 脊高 3.5 m, 后墙高 2.2 m, 后坡仰角 31.7 °; 后坡水平投影 1.5 m。处理 3 和处理 4 为辽沈 I 型 7.0 m 日光温室, 跨度 7.0 m, 长 46.6 m, 脊高 3.3 m, 后墙高 2.05 m, 后坡仰角 32.3 °; 后坡水平投影 1.4 m。采用 WJK-III 型温室温度环境监测仪测试室内外空气温度, 测点距室内外地坪 1.0 m, 测温探头都经防辐射处理, 数据为计算机自动采集, 采集间隔为 10 min。采用热敏电阻测试处理 1、处理 2 墙体的内部温度分布, 测点距室内地坪 1.2 m, 将测温探头按设定的距离砌入北墙中, 处理 1、处理 2 墙体内测点 1~ 测点 6 布置位置一致, 分别距室内墙体表面 0.01, 0.12, 0.23, 0.285, 0.34, 0.44 m, 每小时采集一次数据。

3 结果与分析

处理 1 和处理 2 位于同一温室内, 处理 1 内表面与处理 2 内表面(测点 1)温度夜间均高于室内气温, 且在 0:00~ 7:00 及 20:00~ 23:00 时间段二者温差为 3.4~ 4.2 °C, 平均达到 3.7 °C, 可见处理 2 白天蓄热多, 夜间与处理 1 相比, 向室内放出更多的热量; 处理 1 夜间只有内表面温度(测点 1)高于室内气温, 而处理 2 的测点 1、测点 2、测点 3 夜间温度均高于室内气温, 说明聚苯板的隔热效果好, 减少了热量的损失, 使聚苯板以内的墙体夜间成为热源。

处理 3 和处理 4 在同一天测试, 虽然处理 3 平均厚度为 1 050 mm, 处理 4 厚度为 600 mm, 但是复合异质墙体温室的室内空气温度与夯实土墙温室的室内空气温度相比, 0:00~ 7:00 提高 2.9 ~ 4.6 °C, 20:00~ 23:00 提高 1.3 ~ 1.6 °C, 平均提高 3.0 度。可见, 复合异质墙体的日光温室热稳定性较好, 与室内空气的对流换热少, 室温升温少, 夜间从表面向室内传出的热量比较大, 从而室温降低的幅度比较小, 温室的热惰性大。处

理5的内外温度变化可进一步证明具有复合异质墙体的

日光温室热稳定性较好。

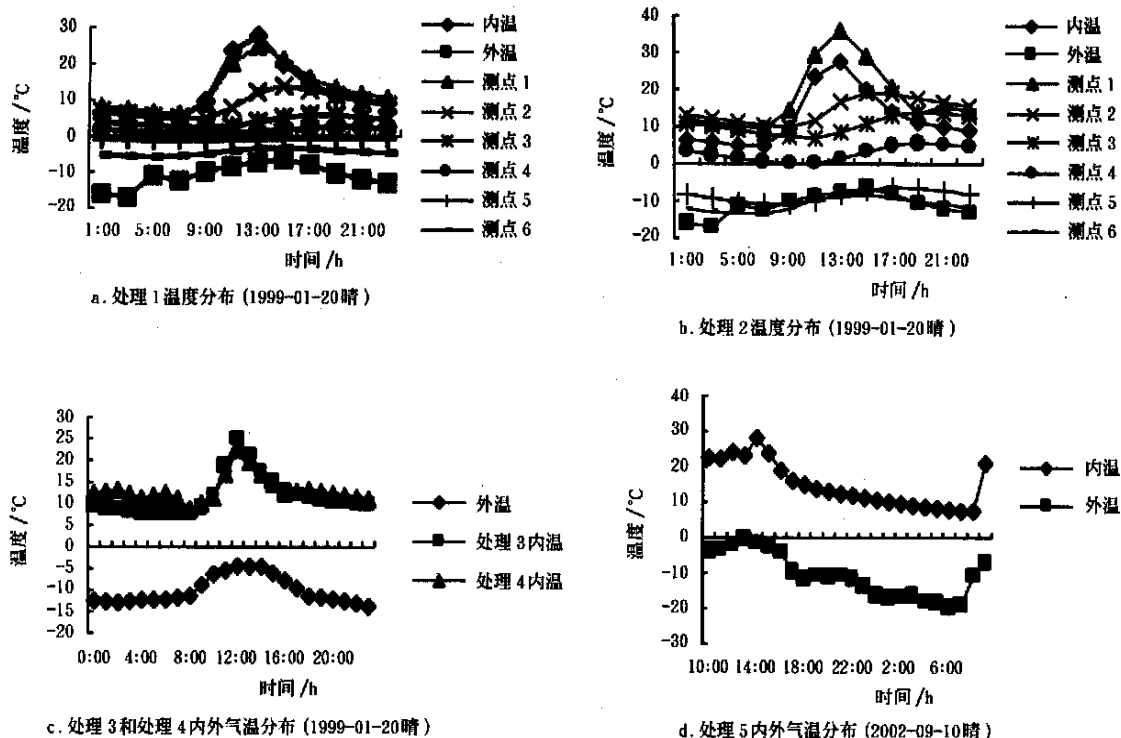


图1 日光温室内空气温度日变化

Fig 1 Daily changes of air temperature in solar greenhouses

4 墙体传热量计算模型

4.1 墙体导热单值性条件

4.1.1 几何条件

根据砖的规格,砖墙的厚度取为600、480、360、240 mm及120 mm。为便于理论分析,使墙体总厚度统一达到600 mm,聚苯板厚度相应取为600、480、360、240 mm及120 mm。

4.1.2 物理条件

假定室内无热源,砖墙导热系数为 $0.81 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$,比热为 $1.05 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$,容重为 $1800 \text{ kg}/\text{m}^3$,聚苯板导热系数为 $0.0327 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$,比热为 $1.34 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$,容重为 $8 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

4.1.3 边界条件

假设各种墙体所处边界条件相同,给定第3类边界条件:墙体内外表面换热系数分别为 8.7 、 $23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;将2002年1月27日外扰实测值作为理论分析用外扰值,如图2所示;对于相同的外扰值变化,各种墙体对应的温室室内气温实际变化不同,为便于对各种墙体的传热特性进行对比分析,室内气温统一取 15°C 。

4.2 边界条件分解

将图2所示外扰 $T_o(\tau)$ 按付氏级数展开,分解成一组以 $\pi/12$ 弧度为基频的简谐波函数,取3阶谐波进行墙体的非稳态传热量计算^[7]

$$T_o(\tau) = -11.6 + 7.64\sin(\pi\tau/12 + 4.397) + 4.129\sin(\pi\tau/6 + 1.238) +$$

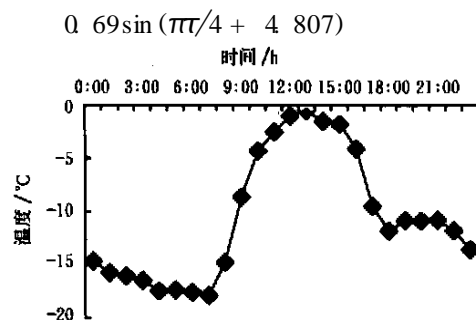


图2 室外空气温度日变化

Fig 2 Daily change of air temperature outside greenhouse

4.3 墙体总传递矩阵^[7]

$$[G] = [G_0][G_1]\dots[G_i]\dots[G_n]$$

$$[G_i] = \begin{bmatrix} A_i(s) & -B_i(s) \\ -C_i(s) & D_i(s) \end{bmatrix},$$

$$A_i(s) = D_i(s) = \frac{ch(\sqrt{s/a}L_i)}{\sqrt{s/a}i},$$

$$C_i(s) = \lambda_i \sqrt{s/a_i} \frac{sh(\sqrt{s/a}L_i)}{\sqrt{s/a}i},$$

$$B_i(s) = \frac{sh(\sqrt{s/a}L_i)}{\lambda_i \sqrt{s/a_i}}$$

式中 s ——Laplace 变元; a_i ——第 i 层导热系数, m^2/s ; λ_i ——第 i 层导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; L_i ——第 i 层材料厚度, m 。

4.4 频率响应

由 s-传递函数的性质, 即系统输出的原函数= 传递函数 * 输入的原函数, 不必求逆即可求出系统的频率响应。以厚度为 600 mm 的不同组成墙体为例, 各处理如表 2 所示。计算对基频为 $\pi/12$ 的内外扰量的频率响应。

表 2 600 mm 厚墙体各处理

Table 2 Treatments of 600 mm thick wall

处理	厚度/mm	组 成
处理 1	600	600 mm 厚聚苯板
处理 2	600	600 mm 厚砖墙
处理 3	600	240 mm 厚砖墙—120 mm 厚聚苯板—240 mm 厚砖墙
处理 4	600	360 mm 厚砖墙—120 mm 厚聚苯板—120 mm 厚砖墙
处理 5	600	120 mm 厚砖墙—120 mm 厚聚苯板—360 mm 厚砖墙
处理 6	600	120 mm 厚砖墙—480 mm 厚聚苯板
处理 7	600	240 mm 厚砖墙—360 mm 厚聚苯板
处理 8	600	360 mm 厚砖墙—240 mm 厚聚苯板
处理 9	600	480 mm 厚砖墙—120 mm 厚聚苯板

4.4.1 传热频率响应

各处理对频率为 $\pi/12$ 室外温度扰量的衰减倍数如图 3 所示, 延迟时间图(略)。

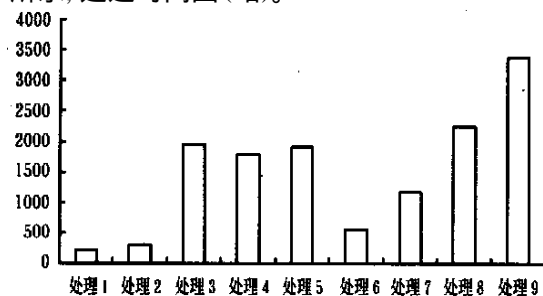


图 3 传热频率响应(衰减倍数)

Fig 3 Frequency response of heat transfer (Dim inishing multiple)

4.4.2 吸热频率响应

各处理对频率为 $\pi/12$ 室内温度扰量的衰减倍数如图 4 所示, 延迟时间图(略)。

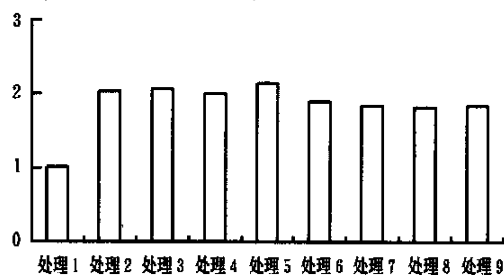


图 4 吸热频率响应(衰减倍数)

Fig 4 Frequency response of heat absorption (Dim inishing multiple)

3.5 墙体传热量计算^[7]

通过墙体单位面积的逐时传热量

$$HG = K[(t_{oa} - t_r) + (a_r/k) \sum_{n=1}^{N/2} (A_{an}/U_n) * \sin(\omega_n \tau + \varphi_{an} - \psi_{yn})]$$

式中 K ——墙体的传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; t_{oa} ——外扰平均温度, $^\circ C$; t_r ——室内设计温度, $^\circ C$; a_r ——墙体内部表面换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; N ——一个周期内测点值的数目; A_{an} —— n 阶谐波振幅, $^\circ C$; U_n ——传热频率响应的衰减倍数; ω_n —— n 阶谐波外扰的频率, rad ; φ_{an} —— n 阶谐波初相位角, rad ; ψ_{yn} ——传热频率响应的延迟时间, rad 。单位面积墙体传热量如图 5 所示。

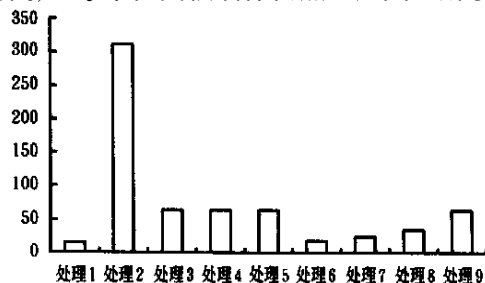


图 5 墙体传热量(W/m^2)

Fig 5 Quantity of heat flux toward outside (W/m^2)

5 析因设计

研究红砖与聚苯板两种因素不同水平搭配对室内热环境的影响。砖(因素 A)厚度取为 600 mm (a1)、480 mm (a2)、360 mm (a3)、240 mm (a4) 及 120 mm (a5); 聚苯板(因素 B)厚度取为 600 mm (b1)、480 mm (b2)、360 mm (b3)、240 mm (b4)、180 mm (b5)、120 mm (b6)、90 mm (b7) 及 60 mm (b8)。经过二元图分析, 砖与聚苯板对热环境的影响无交互作用。析因设计组合方式表(略)。析因设计方差分析结果为 $F_A = 5.03$, $F_{0.001}(4, 28) = 6.25$, $F_A < F_{0.001}(4, 28)$; $F_B = 426.9$, $F_{0.001}(7, 28) = 4.93$, $F_B > F_{0.001}(7, 28)$ 。聚苯板对热环境的影响高度显著。

6 结 论

1) 对于复合异质墙体, 砖墙厚度一定时, 随着聚苯板厚度的增加, 室内温度上升; 同理, 聚苯板厚度一定时, 随着砖墙厚度的增加, 室内温度也上升。但方差分析结果表明, 聚苯板对热环境的影响高度显著。

2) 理想的日光温室墙体不但要求其向外放热量小, 还要求其热稳定性好。因此, 从频率响应、传热量计算及实测结果看, 单独用聚苯板或砖作为墙体材料都不合适。复合异质墙体对室外温度扰量的衰减倍数是聚苯板墙体的 12.3 倍, 是纯砖墙的 9.5 倍; 复合异质墙体单位面积全天向室外传热量是聚苯板墙体的 1.2 倍, 是纯砖墙的 1/17。因此聚苯板只能作为墙体的隔热材料, 砖只能作为墙体的蓄热材料。对于厚度为 600 mm 的不同组成墙体, 图 3~5 表明处理 8 (360 mm 厚砖墙—240 mm 厚聚苯板) 较为理想, 当然建筑时聚苯板外还应有一保护层。

[参 考 文 献]

- [1] 陈端生, 郑海山, 刘步洲. 日光温室气象环境综合研究——墙体、覆盖物热效应研究初报[J]. 农业工程学报, 1990, 6(2): 77~ 81.
- [2] 亢树华, 戴雅东, 房思强等. 日光温室优型结构的研究[J]. 农业工程学报, 1996(增), 30~ 35.
- [3] Fuller R J, Meyer C P, Sale P J M. Validation of a dynamic model for predicting energy use in greenhouse[J]. J agric Engng Res, 1987, 38, 1~ 14.
- [4] Nijsskens J, Deltour J, Coutisse s, et al. Heat transfer through covering materials of greenhouses[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1984, 33, 193~ 214.
- [5] Garzoli K A. Simple greenhouse climate model[J]. Acta Horticulturae, 1989, 174, 393~ 401.
- [6] Joliet O. Horticern: An improved static model for predicting the energy consumption of a greenhouse[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1991, 55, 265~ 294.
- [7] 彦启森, 赵庆珠. 建筑热过程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994: 49, 56, 68.

Heat transfer property of wall in solar greenhouse

Tong Guohong, Wang Tieliang, Bai Yikui, Liu Wenhe

(College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

Abstract: In order to improve the energy saving effect and find out the proper wall materials and its composition of solar greenhouse, the temperature environment inside several greenhouses with the same structure and different wall materials was tested. The heat transfer properties of 600 mm thick wall composed of different materials were studied with the method of frequency response. The results show that the average temperature on the inside surface of the complex wall is 3.7 °C higher than that of brick wall in one solar greenhouse and that the average temperature inside the greenhouse with complex wall is 3.0 °C higher than that with tamper earth wall under the same temperature outside. The results of theoretical analysis indicate that diminishing multiple toward the outside temperature fluctuation of the complex wall is 12.3 times of that of polystyrene foam plastic plate and 9.5 times of that of brick wall, and that the quantity of heat flux toward outside of the complex wall is 1/17 of that of brick wall. Polystyrene foam plastic is better to be thermal insulation material and brick is proper to be thermal storage material. The optimum wall composition was given in this paper.

Key words: solar greenhouse; wall; heat transfer property