

日光温室瓶胆式相变墙体热性能研究

李 凯¹, 宋 丹², 王宏丽², 裴莉娟²

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 园艺学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:墙体作为日光温室中保温蓄热的集合体,对温室的热环境至关重要。现通过对瓶胆式相变墙体热工参数的计算,研究了该新型墙体的保温蓄热性能,并将其与复合砖墙、土墙的热性能进行了对比。结果表明:该瓶胆式相变墙体的保温蓄热性能和技术经济水平总体上优于复合砖墙和土墙,适合在日光温室中使用。

关键词:日光温室;瓶胆式墙体;相变储热;热性能

中图分类号:S 626.5 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-0009(2013)05-0040-03

墙体作为日光温室的重要组成部分,除承重传力外,还能够蓄积太阳辐射产生的能量,同时阻挡热量向室外散失。目前使用中的日光温室墙体主要有砖墙、土墙等类型,然而砖墙和土墙由于导热系数大,需通过加大厚度来增加墙体的热阻和蓄热能力,这降低了土地利用效率;加之粘土砖逐渐被禁用、土墙结构耐水性和耐久性差等问题,影响了日光温室的进一步发展。为此,寻求坚固、保温、经济的新型墙体成为温室研究的一个重要方向。将潜热密度大、蓄热性能好的相变材料应用于日光温室墙体,对改善温室热环境有很好的效果^[1-2]。课题组根据日光温室的特点,提出了一种新型瓶胆式相变墙体的建造方法。该墙体安装方便,施工简单,利用梁和立柱受力结构稳定性好。新墙体利用定形相变材料的相变蓄热性能和利用空气层、聚苯板导热系数低的隔热保温性能,改善了温室的热环境。该试验通过理论计算研究新型墙体和日光温室常用墙体的热工性能,用以研究该新型墙体在日光温室中应用的可行性和优越性。

1 材料与方法

1.1 瓶胆式相变墙体

如图1所示,墙体结构由内而外依次为200 mm厚蓄热板,300 mm厚空气层,200 mm厚聚苯乙烯彩钢板。日光温室桁架拱间距为1 200 mm,墙体在长度方向每隔3 600 mm设置1个立柱,立柱间的桁架由架设在立柱上

的梁支撑;梁采用规格为80 mm×120 mm×3.0 mm的矩形钢管制作而成,立柱采用规格为150 mm×150 mm×5.0 mm的矩形钢管制作而成;每段梁支撑2个桁架的荷载,梁和立柱均设置在墙体结构的空气层内。

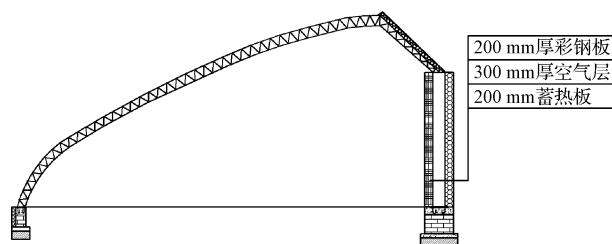


图1 日光温室及其墙体结构示意图

Fig. 1 Diagram of solar greenhouse and its wall structure

墙体结构中的蓄热板由自制的定形相变材料通过封装固定在日光温室后墙内侧。定形相变材料以粉煤灰为材料载体、以自制的适用于日光温室的 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 蓄热体系为相变材料进行制备。根据DSC测试,定形相变材料的潜热密度值为116.9 J/g,熔点为22.7℃。测试曲线见图2。

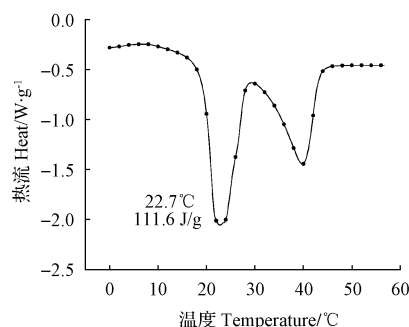


图2 DSC 测试曲线

Fig. 2 DSC testing curve

第一作者简介:李凯(1964-),男,硕士,副教授,现主要从事工程材料等方面的研究工作。E-mail:likaixn@126.com

责任作者:王宏丽(1966-),女,在读博士,副教授,现主要从事温室节能等研究工作。E-mail:daisy. h. wang@gmail.com

基金项目:国家公益性行业(农业)科研专项资助项目(201203002);陕西省科技统筹创新工程计划资助项目(2011KTDZ02)。

收稿日期:2012-11-02

1.2 试验方法

墙体除承重的作用外,还兼具热工性能。研究墙体的热工性能需要从墙体的隔热、保温、蓄热等多方面进行研究分析^[6]。

1.2.1 热阻计算 热阻是表征围护结构材料层抵抗热流波的能力,是评价材料绝热性能的指标。总热阻越大,传热量越小,越有利于墙体保温。热阻 R 的计算式为: $R = \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ (1),式中, δ_i 为材料的厚度, m; λ_i 为材料的导热系数, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$; n 为墙体组成的材料数。根据规范,日光温室墙体在满足强度要求的前提下,其热阻值应大于所要求的低限热阻。日光温室的低限热阻要求见表 1。

表 1 日光温室墙体的低限热阻

Table 1 The threshold of heat resistance of solar greenhouse walls

室外设计温度/℃	低限热阻/ $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	
	后墙	后屋坡
-4	1.1	1.4
-12	1.4	2.5
-21	1.8	3.0
-26	2.1	4.0

1.2.2 热流密度计算 热流密度是墙体隔热性能的重要指标,热流通过围护结构以导热方式从高温空气一侧转移至低温空气一侧。热流密度越小,说明热量通过墙体的传递越少,墙体保温效果越好。由于热量辐射影响较小,热流密度计算时考虑自然对流的作用,其计算式为: $q = K(t_i - t_o)$ (2),式中, K 为复合墙体的综合传热系数, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$; q 为墙体的热流密度, W/m^2 ; t_o 为室外空气温度平均计算值,℃; t_i 为室内空气温度平均计算值,℃。其中,复合墙体的综合传热系数计算按公式:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_w} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_n}} \quad (3), \text{式中, } \alpha_w \text{ 为墙体外表面与空}$$

气的对流换热系数, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$; α_n 为墙体内表面与空气的对流换热系数, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$; λ_i 为墙体材料的导热系数, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$; δ_i 为墙体材料的厚度, m。

1.2.3 蓄热系数计算 蓄热性能用蓄热系数 S 来表示,表征材料层抵抗温度波的能力。蓄热系数的计算式为: $S = \frac{A_g}{A_\theta} = \sqrt{\frac{2\pi\lambda\alpha}{T}}$ (4),式中, S 为材料的蓄热系数,

$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$; λ 为材料的导热系数, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$; c 为材料的比热容, $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$; ρ 为材料的容重, kg/m^3 ; T 为热流波的作用周期, h, 一般为 24 h。研究表明,当墙体的热阻相同、组成材料不同时,其内表面对空气温度波的传热衰减倍数相差会很大。材料的蓄热系数越大,衰减倍数就越大,抵抗周围环境温度波动的能力也就越大。

1.2.4 热惰性指标计算 热惰性指标是表征围护结构抵抗热流波和温度波在材料层中传播的参数。对处于不稳定传热状况下的建筑围护结构来说,热惰性指标 D

计算式为: $D = \sum_{i=1}^n R_i \cdot S_i$ (5),式中, R_i 为墙体材料的热阻, $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$; S_i 为墙体材料的蓄热系数, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$; n 为墙体组成的材料数。热惰性指标值越大,外来的热流波穿透围护结构需要的时间越长,波动幅度被减弱的程度也越大,板壁材料的热惰性及其稳定性越大,室内温度波动越小。

1.2.5 墙体热性能综合评价 在墙体结构稳定的前提下,热性能与造价是评价墙体方案优劣的 2 个重要因素。现引入 T 函数作为墙体热性能和经济性能综合评价指标,即墙体的导热系数乘以该墙体的单位面积价格,显然,乘积越小,墙体的技术经济效果越好^[7]。 $T = P \cdot \lambda_k$ (6),式中, T 为墙体的技术经济特征量, $元 \cdot W \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$; P 为墙体的单位面积价格, $元/m^2$; λ_k 为墙体的等效导热系数, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ 。其中,多层材料的等效导热系数计

$$\text{算公式}^{[8]} \text{为: } \lambda_k = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{\sum_{i=1}^n \delta_i / \lambda_i} \quad (7), \text{式中, } \delta_i \text{ 为墙体各层材}$$

料的厚度, m; λ_i 为墙体各层材料的导热系数, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$; n 为墙体组成的材料数。

2 结果与分析

目前日光温室中常见的墙体结构主要有红砖墙、夯实土墙等;由于砖墙厚度小、热阻低,生产中一般在砖墙外加聚苯乙烯彩钢板以提高墙体热阻。基于此,该研究将 600 mm 厚红砖墙+100 mm 厚聚苯乙烯彩钢板构成的复合砖墙和 2 300 mm 厚夯实土墙作为传统墙体代表,与新型瓶胆式相变墙体进行对比研究。

由于聚苯乙烯彩钢板的芯材为聚苯板,外侧为极薄的钢板,而钢板导热系数大、厚度极小,因而其热阻可忽略不计,可将其简化为聚苯板。墙体各组成材料的热工性能参数见表 2。

表 2 墙体材料的热工性能参数

Table 2 Wall materials thermal property parameters of building envelope

参数	材料类别				
	红砖墙	相变蓄热板	空气层	聚苯板	夯实土墙
密度/ $kg \cdot m^{-3}$	1 800	1 033	1.205	20	2 000
导热系数/ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0.780	0.478	0.023	0.047	0.800
比热/ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	1.050	14.580	1.005	1.380	0.840

为研究墙体的保温蓄热性能,现以陕西关中地区为例,取室内空气温度平均设计值为 15℃、室外空气温度平均设计值为 -15℃,对墙体热工参数进行计算。由于温室内的长波辐射环境及墙内外表面的气流速度等,主要影

响墙体表面与环境间的辐射及对流换热,计算中通过表面换热系数考虑这一影响。因此为统一评价条件,使评价结果具有可比性,取外表面换热系数为 $23 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$,内表面换热系数为 $8.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ [9]。

由表3可知,新型墙体在热阻、热流密度、蓄热系数等重要指标上均好于复合砖墙和土墙;虽然新型墙体在热惰性指标和单位面积造价上略逊于土墙,但是新型墙体

的技术经济效果远好于土墙,而且土墙厚度为2 300 mm,新型墙体厚度仅有700 mm,与土墙相比,能够减小土地面积,增加土地利用。此外,新型墙体热阻值远高于日光温室的低限热阻,使日光温室的保温效果更好;由于蓄热板内相变材料的作用,新型墙体的蓄热能力也最优。综上,新型墙体较传统墙体在保温蓄热性能方面有了较大提高,同时技术经济效果更好。

表3

不同墙体的计算指标

Table 3

Calculation indexes of different walls

墙体类型	组成材料及厚度/mm	热阻 R $/\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$	热流密度 q $/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	蓄热系数 S $/\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	热惰性指标 D	造价 $/\text{元} \cdot \text{m}^{-2}$	技术经济 T $/\text{元} \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
新型墙体	聚苯板 200+空气层 300+蓄热板 200	17.72	1.68	$0.23+0.09+43.40$	20.24	235	9.40
复合砖墙	红砖 600+聚苯板 100	14.89	1.98	$19.64+0.23$	15.60	245	11.52
夯实土墙	夯实土 2 300	2.74	10.35	18.75	51.35	89	71.20

3 结论

该新型瓶胆式相变墙体作为一种复合墙体结构,能够利用梁和立柱的承重作用,保持墙体的稳定性;利用定形相变材料的相变蓄热性能提高墙体的蓄热能力;利用空气层和聚苯板导热系数低的特性增加墙体热阻,减少热量的散失;墙体结构的复合形成了优势的叠加。

理论计算的结果显示,该新型墙体的保温蓄热性能优于传统墙体,技术经济效果也更好;同时该墙体安装方便、施工简单、耐久性好,适合在日光温室建设中推广使用。

该试验仅是通过理论计算对新型墙体的保温蓄热性能进行了研究,为更深入地了解新型墙体的保温蓄热性能,还需进一步的试验验证。

参考文献

- [1] 管勇,陈超,李琢,等.相变蓄热墙体对日光温室热环境的改善[J].农业工程学报,2012,28(10):194-201.
- [2] 薛亚宁,陈超,李清清,等.复合相变蓄热墙体材料应用于日光温室的效果研究[J].北方园艺,2010(15):6-11.
- [3] 孟少春.单坡温室设计与建造[M].沈阳:辽宁科学技术出版社,2003.
- [4] GB 50017-2003.钢结构设计规范[S].
- [5] 范钦珊,施雯琴,孙汝劼.工程力学[M].北京:高等教育出版社,1989.
- [6] 彦启森,赵庆珠.建筑热过程[M].北京:中国建筑工业出版社,1986:60-80.
- [7] 王教方,岳贤军,宋淑珍,等.多层复合材料导热系数测定方法的研究[J].山东建材学院学报,2000,14(3):258-260.
- [8] 孙诗兵,李俊领,田英良.墙体节能改造性价比优化研究[J].墙材革新与建筑节能,2008(4):40-44.
- [9] 马承伟,卜云龙,籍秀红,等.日光温室墙体夜间放热量计算与保温蓄热性评价方法的研究[J].上海交通大学学报(农业科学版),2008,26(5):411-415.

Thermal Performance Analysis of the Cavity Wall with PCM of Solar Greenhouse

LI Kai¹, SONG Dan², WANG Hong-li², QIU Li-juan²

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100;

2. College of Horticulture, Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: As a collection of solar greenhouse in heat preservation, wall is critical to the thermal environment of the greenhouse. Through studying the thermal parameters of the cavity wall with PCM, the performance of thermal performance of the new type wall were studied, and compared it with brick wall and cob wall. The results showed that the new type wall was superior to brick wall and cob wall with the thermal performance and the level of technical and economic. The cavity wall with PCM was suitable for solar greenhouses.

Key words: solar greenhouse; cavity wall; PCM storage; thermal performance