



# 新型竹结构建筑传热特性

李念平, 曾德军, 王倩, 龙激波, 李靖

湖南大学土木工程学院, 长沙 410082

**摘要** 竹材具有生长周期短、产量高、强度高、环保及可再生等特点, 作为现代建筑材料已经越来越受到人们的重视。本文在自然气候条件下, 通过在墙体内各个界面预埋热电阻 Pt100, 对竹结构实验用房这种新型墙体温度进行实测, 结合竹材自身的热物性参数特点和墙体(多孔介质)传热机理, 分析其温度分布规律, 研究竹结构动态传热特性, 以期为现代竹结构建筑传热特性的研究提供一些基本数据, 为科学设计、分析竹结构建筑的传热特性提供依据。结果表明, 竹结构建筑具有良好的隔热保温性能, 对节能具有重要的意义, 利用竹材作为现代建筑材料符合可持续发展的要求。

**关键词** 竹结构; 动态传热特性; 温度分布规律; 节能

**中图分类号** TU111

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-7857(2010)20-0087-04

## Experimental Study on the Heat-transfer Characteristics of New Bamboo Structure Building

LI Nianping, ZENG Dejun, WANG Qian, LONG Jibo, LI Jing

College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

**Abstract** Bamboo has the future of short growth cycle, high yield, high intensity, environmental, renewable, etc, and as a modern building material has become increasingly attention has been paid. In this paper, under the natural climate conditions, through buries thermal resistance Pt100 in each contact surface of the wall, testing the wall temperature of bamboo structure experimental house, combined with bamboo thermal parameters characteristics and the wall (porous medium) heat transfer mechanism to analyze the temperature distribution rule and research the dynamic heat transfer characteristics of bamboo structures, for the heat transfer characteristics of modern bamboo structure architectural research to provide some basic data, as well as for future scientific design and analysis of the heat transfer characteristics of bamboo structure architectural provide the basis. The results indicate that the bamboo structure architectural has the good thermal insulation performance and has the vital significance to the energy conservation, using the bamboo as the modern building materials meet the sustainable development requirement and bamboo is an ideal building material.

**Keywords** bamboo structure; dynamic heat transfer characteristics; temperature distribution rule; energy conservation

### 0 引言

进入 21 世纪, 实施可持续发展战略、加强生态建设和环境保护已经成为中国的一项基本国策。按照《建设部建筑节能“十五”计划纲要》的目标要求, 要求全面禁止使用毁田生产的实心或空心黏土制品, 减少普通砖混结构, 积极推广应用新型轻质高强墙体材料。随着我国墙体材料改革逐渐深入, 新型墙体产品品种、生产规模、工程应用与日俱增, 这对于从根本上改变传统墙体材料大量占用耕地、消耗能源、污

染环境的状况, 形成与可持续发展相适应的新兴产业具有深远的历史意义<sup>[1]</sup>。

竹材具有生长快、产量高、强度大、弹性好、环保和可再生等特点, 利用竹材加工成竹胶合板, 在建筑等领域获得了广泛的应用, 竹材作为现代建筑材料已经越来越受到人们的重视<sup>[2-5]</sup>。现代竹结构是指以竹材为主要原料, 依据现代竹结构建筑、现代竹结构桥梁、现代竹结构构筑物等学科理论而制作的一种新型建筑结构。现代竹结构建筑的研究主要集中

收稿日期: 2010-05-12, 修回日期: 2010-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(50878078)

作者简介: 李念平(中国科协所属全国学会个人会员登记号: E121900450M), 教授, 电子信箱: linianping@126.com

在其力学性能方面。湖南大学肖岩课题组在湖南大学工程学院内建立了一栋两层楼高的竹结构别墅,并对其力学性能进行了详细分析<sup>[6-7]</sup>;东南大学吕志涛、南京林业大学张齐生设计了竹结构抗震安居房,经过分析,认为其抗震设防烈度达到 8 度<sup>[8-9]</sup>。而关于现代竹结构建筑传热特性的研究还是一片空白,本文通过建立竹结构实验用房,对围护结构各个界面的温度分布进行动态连续测试,进而分析研究竹结构建筑的传热特性,为现代竹结构建筑传热特性的研究提供一些基本数据。

## 1 竹胶合板热物性参数

### 1.1 导热系数

导热系数是表征材料导热性能优劣的参数。利用智能化导热系数测定仪,在 25℃ 气干状态下,对竹胶合板的导热系数进行测试,测得其导热系数为 0.14W/(m·K)。不同材料导热系数见表 1。

表 1 不同建筑材料的导热系数

Table 1 Thermal conductivity of different materials

材料名称	钢筋 混凝土	普通 混凝土	加气 混凝土	空心砖 砌体	竹胶 合板
导热系数 $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	1.74	1.28	0.19	0.58	0.14

从表 1 可知,与现有常用墙体材料相比,竹胶合板的导热系数远小于现有墙体材料的导热系数,其导热系数为普通混凝土的 8.0%、钢筋混凝土的 10.9%,与新型保温墙体材料——加气混凝土和空心砖砌体相比,竹胶合板的导热系数也要小,约为加气混凝土的 73.7%、空心砖砌体的 24.1%。因此,将竹胶合板作为建筑墙体材料,可以达到良好的保温隔热效果及节能目的。

### 1.2 其他热物性参数

处于自然气候条件下的建筑物,必然会受到大气层各种气象因素的影响,这样通过围护结构的热流量及围护结构内部的温度分布也就随着时间的变化而变化,这就是非稳态传热过程。表征非稳态传热过程稳定性的参数主要有比热容、蓄热系数和热扩散率等。根据周芳存<sup>[10]</sup>测得竹胶合板在气干状态下的比热为 1.722kJ/(kg·K),热扩散率为  $1.64 \times 10^{-7} m^2/s$ ,并由

$$S = \frac{A_q}{A_\theta} = \sqrt{\frac{2\pi\lambda cv}{Z}}$$

可以得出其 24h 蓄热系数 S 为 3.3W/(m<sup>2</sup>·K)。

## 2 实验房概况和测试方法

### 2.1 实验房概况

实验房建在湖南大学暖通实验楼顶层,尺寸 2m×2m×2m,方位为正南北向,四周为空旷地区。其墙体结构见图 1,墙体

材料及其热物性参数详见表 2,其他材料的物性参数来源于文献[11]。在建造实验房时,和传统的砌法有点不尽相同,从最里层开始,先把竹胶合板建起来,在竹胶合板的内外表面贴上传感器(温度传感器用的是热电阻 Pt100),再在竹胶合板的外面砌上加气混凝土块,由于传感器夹在两者之间,砌的时候非常小心,传感器并没有受到损坏,加气混凝土砌好后,同样在其外表面贴上传感器,贴的位置和竹胶合板表面贴的位置相对应,最后在加气混凝土外面摸一层水泥砂浆。

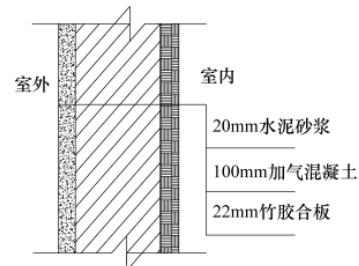


图 1 墙体结构示意图

Fig. 1 Wall structure

表 2 墙体各层材料的热物性参数

Table 2 Physical properties for the materials in the wall

结构	厚度 /mm	导热系数 $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	干密度 $/(kg \cdot m^{-3})$	比热容 $/(kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	24h 蓄热 系数 $/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$
水泥砂浆	20	0.93	1800	1.05	11.37
加气混凝土	100	0.19	500	1.05	2.81
竹胶合板	22	0.14	639	1.72	3.31

### 2.2 测试方法和内容

通过对竹结构墙体各个界面的温度进行实测,根据其温度分布规律分析竹结构墙体传热特性。为了保证所测量的数据能准确真实的反映墙体的传热,墙体内温度传感器的测点位置为墙体几何中心。同时在砌筑墙体时,为了避免损坏部分传感器而导致无法准确测定数据,在墙体内埋装传感器的时候,同一界面每种传感器埋装了 3 个,每一界面的温度取 3 个传感器测得的平均值,安装平面图如图 2 所示。安装完成

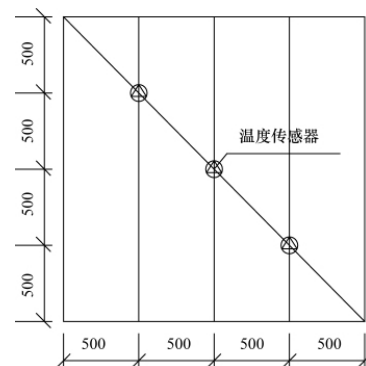


图 2 竹结构墙体内温度传感器安装平面图(单位:mm)

Fig. 2 Plan of sensor installation in bamboo structures wall (unit: mm)

后对每个传感器进行标号,并连接到数据记录仪上,数据采集仪器是 48 通道无纸记录仪。

### 3 实验结果和分析

#### 3.1 东墙和南墙温度分布

为了研究竹结构墙体传热特性,选取了夏天晴天时某一天的温度分布,对墙体不同方位的各个界面温度进行分析,室外大气温度如图 3 所示。图 4 和图 5 分别反映了同一天东墙和南墙的温度分布情况。可以看出,南墙和东墙温度分布的大致趋势是一致的,但是由于太阳高度角的影响,白天南墙和东墙的温度分布趋势存在延缓,东墙温度达到波峰的时间比南墙早,但峰值比南墙低。

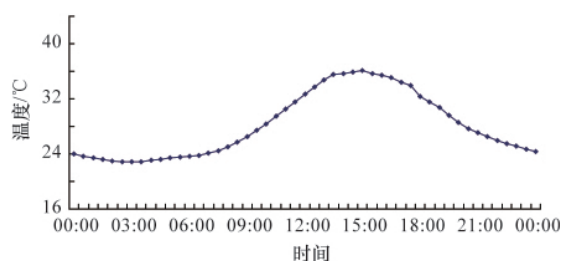


图 3 室外温度

Fig. 3 Outdoor temperature

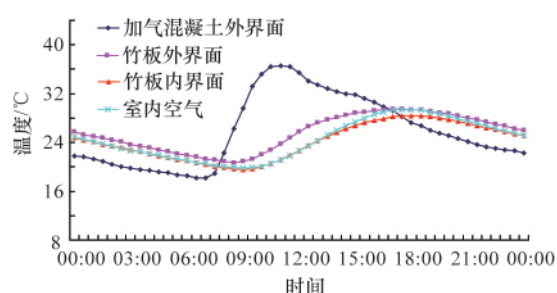


图 4 东墙传热温度分布

Fig. 4 Heat transfer temperature distribution of east wall

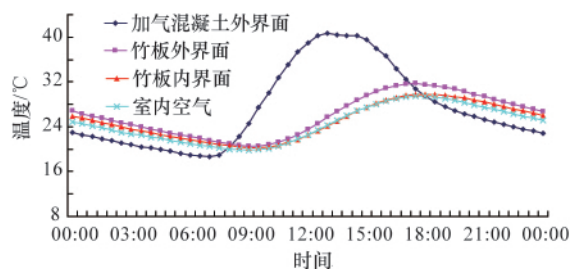


图 5 南墙传热温度分布

Fig. 5 Heat transfer temperature distribution of south wall

#### 3.2 不同界面温度分布

图 4 和图 5 还显示了墙体内部各个界面的温度在一天内的变化情况。可以看出,由于受到太阳辐射和室外空气温度的影响,墙体处于明显的非稳定传热状态,温度随时间一直

变化。在上午,随着热扰动影响时间的增加,墙体内部被影响的节点不断向墙体内部延伸,直至墙体的内表面即竹胶合板的内表面,且被影响节点的温度不断升高。从墙体内部温度的分布可以看出,受扰动节点的温度变化率随着墙体节点的深入不断降低;水泥砂浆的温度变化梯度最大,加气混凝土其次,竹胶合板最小,说明透过每个节点的热流密度不断减少,这是由于在热量向墙体内部传递的过程中不断被墙体本身吸收所导致的。

#### 3.3 衰减延迟分析

各个界面温度的最大值并没有出现在同一时刻,而是相应滞后数小时,这是由于墙体本身的蓄热作用而造成的。以南墙为例,从图 6 可知,加气混凝土外侧温度的最大值出现在 13:50,最大值达到 41°C,比室外大气温度还要高,这是由于室外综合温度造成的;而竹胶合板板外界面的最高温度出现在 17:50,且最大值只有 32°C,比加气混凝土外表面温度的最大值要低 9°C,这是加气混凝土本身具有蓄热作用而造成的结果;竹胶合板内界面的最高温度出现在 18:20,最大值为 29.4°C,只比竹胶合板外表面温度的最大值低 2.6°C,这是由于竹胶合板的厚度比加气混凝土要薄的缘故;室内空气温度与竹胶合板内界面温度基本一致,时间延迟也不明显,这是因为竹胶合板内界面与室内空气直接接触,以对流传热为主。

受外界温度变化的影响,加气混凝土外表面的温度在一天内的波动非常大,波动幅度达到 22°C,这是由于最外层的水泥砂浆层抵抗外界综合温度干扰能力不够造成的,这样会在墙体内部会产生强烈的热应力,不能有效地保护墙体主体结构免受热应力的危害,破坏建筑的质量,从而影响建筑的使用寿命,是一种很不好的现象。而竹胶合板外界面和内界面的温度波动要小得多,这是因为竹胶合板的导热系数小、热容和蓄热系数大等因素造成的,使得这一部分的温度变化小,可以有效的保持室内温度的热稳定性,提高了室内的热舒适性,也可以保护墙体结构免受热应力的危害。

#### 3.4 周期性传热分析

图 6 给出了南墙连续 3 天的温度分布情况,这 3 天的室外气象条件基本一致,由图可知,墙体内部各处温度以 24h 为周期发生波动,每天的温度波动趋势基本一致。由于热惰性的影响,墙体从外到内,最高温度出现时间延迟,温度波动振幅逐渐减小,竹胶合板两侧温度梯度变化最小。

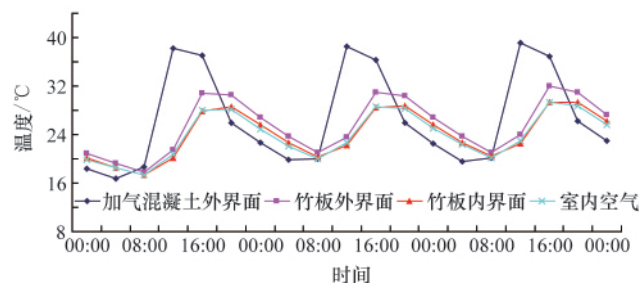


图 6 南墙周期性温度分布

Fig. 6 Periodic temperature distribution of south wall

#### 4 结论

分析实验测得的数据,发现在周期性室外综合温度作用的影响下,竹结构墙体各处温度随时间也发生周期性变化。墙体外壁温度随时间变化最剧烈,越往内,温度波动越小,墙内表面即竹胶合板内表面的温度波动最小。墙体外的温度分布具有延迟特性,从室外向室内,温度最高点的出现时间逐渐向后推移,温度波动振幅逐渐减弱。加之竹胶合板的导热系数小和其他热物性参数等特点,综合以上结论,竹结构具有良好的隔热保温性能,是一种理想的建筑材料。

#### 参考文献 (References)

- [1] 孙林, 刘巍. 建筑材料的未来发展趋势 [J]. 山西建筑, 2005, 31 (12): 129-130.  
Sun Lin, Liu Wei. *Shanxi Architecture*, 2005, 31(12): 129-130.
- [2] 李世东, 许传德. 中国竹业发展经历与 21 世纪发展战略 [J]. 竹子研究汇刊, 1998, 17(1): 1-5.  
Li Shidong, Xu Chuangde. *Journal of Bamboo Research*, 1998, 17(1): 1-5.
- [3] van der Lugt P, van den Dobbelsteen A A J F, Janssen J J A. An environmental, economic and practical assessment of bamboo as a building material for supporting structures [J]. *Construction and Building Materials*, 2006, 20(10): 648-656.
- [4] Khsrow G. Bamboo as reinforcement in structural concrete elements [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2005, 27(3): 637-649.
- [5] 叶明, 钱城, 郝赤彪. 新型绿色建材——竹材人造板探讨 [J]. 青岛理工

- 大学学报, 2007, 28(5): 41-44.  
Ye Ming, Qian Cheng, Hao Chibiao. *Journal of Qingdao Technological University*, 2007, 28(5): 41-44.
- [6] 肖岩, 余立永, 单波, 等. 现代竹结构在汶川地震灾后重建中的应用 [J]. 自然灾害学报, 2009, 18(3): 14-18.  
Xian Yan, She Liyong, Shan Bo, et al. *Journal of Nature Disasters*, 2009, 18(3): 14-18.
  - [7] Xiao Y, Shan B, Chen G, et al. Development of a new type of glulam [C]// Proceedings of the International Conference on Modern Bamboo Structures. Changsha: ICBS-2007, 2007.
  - [8] 吕清芳, 魏洋, 张齐生, 等. 新型竹质工程材料抗震房屋基本构件力学性能试验研究 [J]. 建筑技术与应用, 2008, 11: 1-5.  
Lu Qingfang, Wei Yang, Zhang Qisheng, et al. *Research & Application of Building Materials*, 2008, 11: 1-5.
  - [9] 吕清芳, 魏洋, 张齐生, 等. 新型抗震竹质工程材料安居示范房及关键技术 [J]. 特种结构, 2008, 25(4): 6-10.  
Lu Qingfang, Wei Yang, Zhang Qisheng, et al. *Special Structure*, 2008, 25(4): 6-10.
  - [10] 孙照斌, 田芸, 安胜足. 竹材干燥技术研究现状 [J]. 世界林业研究, 2006, 19(6): 41-44.  
Sun Zhaobin, Tian Yun, An Shengzu. *World Forestry Research*, 2006, 19(6): 41-44.
  - [11] Kumaran M K. Final report, IEA-Annex 24, task3: Aterials properties [M]. KU-Leuven, Laboratorium Bouwfysica, 1996.

(责任编辑 王芷)

## 2010年全国声学学术会议

时间: 2010年12月  
地点: 黑龙江·哈尔滨

主办单位: 中国声学学会

电 话: 010-62554285  
传 真: 010-62561833  
电子信箱: asc@mail.ioa.ac.cn  
通信地址: 北京市海淀区北四环西路21号 (100190)  
网 址: www.aschina.org