

# 国产轻型木结构墙体的稳态热量传递性质

王晓欢<sup>1</sup>, 费本华<sup>1</sup>, 周海宾<sup>2</sup>, 任海青<sup>2</sup>

(1. 国家林业局 北京林业机械研究所, 北京 100029;

2. 中国林业科学研究院 木材工业研究所; 国家林业局 木材科学与技术重点实验室, 北京 100091)

**摘要:**木结构墙体稳态热量传递性质是评价其节能保温的重要指标。为了在引进国外木结构住宅先进技术基础上, 推进轻型木结构住宅国产化进程, 该研究使用国产材料制备了 13 块不同构造的轻型木结构墙体, 采用热箱—热流计法检测了稳态时墙体的有效传热系数, 并通过理论计算, 得到了各墙体的理论计算预测值。结果表明, 墙体有效传热系数在  $0.226 \sim 0.529 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  之间, 除热工级别为 II<sub>t</sub> 级的 1、2、3、6 号墙体外, 其它墙体均为 I<sub>t</sub> 级, 完全适用于中国严寒地区, 并满足中国节能 65% 的墙体传热系数限值要求。通过理论计算预测传热系数设计值与检测值基本相当, 可采用理论计算对木结构复合墙体保温性能进行设计。

**关键词:**人工林木材; 轻型木结构; 节能; 复合墙体; 有效传热系数

**中图分类号:** TU366.2    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2010)04-0076-04

## Steady-state Heat Transfer Performance of Domestic Light-frame Wood Wall

WANG Xiao-huan<sup>1</sup>, FEI ben-hua<sup>1</sup>, ZHOU hai-bin<sup>2</sup>, REN hai-qing<sup>2</sup>

(1. Beijing Forestry Machinery Research Institute of State Forestry Administration, Beijing 100029, P. R. China;

2. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry;

1Key Lab of Wood Science and Technology of State Forestry administration, Beijing 100091, P. R. China)

**Abstract:** Steady-state heat transfer performance is an important indicator for wood wall to assess its energy efficiency performance. Based on the introduction of foreign advanced technology of wood residence, 13 different wall specimens were manufactured using domestic materials in this study, and the effective heat transfer coefficient were measured by hot box-heat flow meter test method. With the results from theoretical calculation, it was found that the effective heat transfer coefficient of walls were between  $0.226 \sim 0.529 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . The thermal level was II<sub>t</sub> for specimen 1, 2, 3, and 6, and level I<sub>t</sub> was for the others, which could be appropriate for the severe cold areas and meet the requirements of 65% Energy efficiency standard in China. The calculation results were in good agreement with the measured ones.

**Key words:** plantation wood; wood light-frame; energy-efficiency; composite wall; effective heat transfer coefficient

轻型木结构墙体是以规格材为骨架材料, 采用内外覆面板, 并由保温、隔音、防潮等多层材料构成的复合结构墙体。作为建筑围护结构的重要组成部分, 墙体

的稳态热量传递性质对建筑物能源消耗影响显著。国外学者对轻型木结构外墙保温体系的研究已有多年历史<sup>[1-3]</sup>。随着木结构建筑在世界各国不同气候区的推广

收稿日期: 2009-12-25

基金项目: 国家林业局“948”引进项目(2006-4-98 和 2006-4-C04); 林业公益性行业科研专项(200704013)

作者简介: 王晓欢(1981-), 女, 博士, 主要从事木结构墙体材料与保温节能研究, (E-mail) wxh811118@126.com。

费本华(联系人), 男, 研究员, 主要从事木材科学与技术专业研究, (E-mail) fbh@caf.ac.cn。

使用,及其新材料的不断涌现,木结构墙体的稳态热量传递性质仍是研究重点之一<sup>[4]</sup>。

近几年中国兴建了许多现代轻型木结构住宅,基本采用国外进口材料。2005 年以来,随着中国引进新材料新技术的木结构示范项目推进,规格材、集成材、结构胶合板等国产结构材料,墙体保温、隔声、楼板振动、连接等性能方面研究已取得了一定进展<sup>[5-9]</sup>,但在国产材料墙体制备及其稳态热量传递性质研究尚处空白。利用国产的人工林杉木规格材、落叶松胶合板和保温材料等进行了复合墙体结构设计和制备,采用热箱—热流计法检测了各墙体的稳态热量传递性质,主要研究了国产制备轻型木结构墙体对不同热工分区使用的适应性,并与理论计算值进行了比较研究。不仅能对国产轻型木结构墙体的应用开发进行技术指导和质量控制,而且对木结构住宅国产化发展更具有推动作用。

## 1 国产轻型木结构复合墙体

### 1.1 墙体结构设计与材料

参考国外轻型木结构住宅墙体的设计形式<sup>[3,10]</sup>,结合中国 GB 50005—2003《木结构设计规范》<sup>[11]</sup>要求,轻型木结构复合墙体结构设计如图 1 所示。选用了截面尺寸分别为 45 mm×90 mm 和 45 mm×140 mm 的杉木规格材和厚度为 11 mm 的

结构胶合板。采用 12 mm 厚的防潮型石膏板作为内墙材料,选用岩棉、聚苯乙烯泡沫塑料板(以下简称聚苯板 EPS)和挤塑聚苯乙烯泡沫板(以下简称挤塑板 XPS)作为复合墙体的保温层。根据热箱试件框尺寸,实验墙体幅面为 920 mm×1 000 mm,木墙骨间距均为 400 mm。

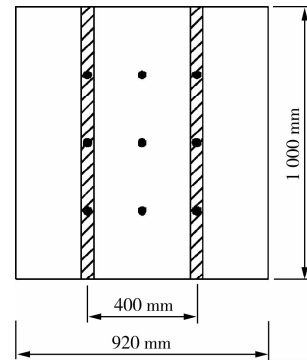


图 1 墙体框架结构形式与热电偶分布

### 1.2 墙体类型

研究中共制备了 13 块墙体,墙体构造列于表 1 中。(1)–(8)号木墙骨截面尺寸为 45 mm×90 mm,(9)–(13)号木墙骨截面尺寸为 45 mm×140 mm。(9)–(13)号墙体材料组成与各层结构分别与对应的(4)–(8)号墙体相同,区别在于木墙骨规格。各层材料基本热物理参数见表 2。

表 1 实验墙体构造和组成材料

墙体	组成材料	墙体	组成材料	墙体	组成材料	墙体	组成材料
	石膏板 岩棉 石膏板		石膏板 岩棉 结构胶合板		结构胶合板 岩棉 结构胶合板		石膏板 塑料薄膜 岩棉 挤塑板
(1)		(2)		(3)		(4)	
	石膏板 塑料薄膜 岩棉 聚苯板		石膏板 塑料薄膜 岩棉 结构胶合板		石膏板 塑料薄膜 岩棉 结构胶合板 聚苯板		石膏板 塑料薄膜 岩棉 结构胶合板 挤塑板
(5)		(6)		(7)		(8)	

表 2 墙体材料热物理性能参数

材料	厚度/ mm	导热系数/ (W·m <sup>-1</sup> ·k <sup>-1</sup> )	热阻/ (m <sup>2</sup> ·k·w <sup>-1</sup> )
石膏板	12	0.330	0.04
岩棉	90	0.045	2.00
	140	0.045	3.11
杉木规格材	90	0.140	0.64
	140	0.140	1.00
落叶松结构胶合板	11	0.160	0.07
聚苯板	40	0.039	1.03
挤塑板	40	0.028	1.43

## 2 实验方法与检测设备

采用热箱—热流计法检测墙体的传热系数。测试布点如图 1 所示。

实验热箱如图 2 所示。实验用热箱由冷箱、热箱和试件框组成。冷箱部分主要靠制冷压缩机组工作来控制制冷温度;热箱部分靠电加热器产生热量,对箱体内部空气进行加热,2 个箱体内部均设置有风扇和均热导流板,使内部环境温度分布尽量均匀。通过冷热箱的温度控制,提供一个稳定的温差环境。

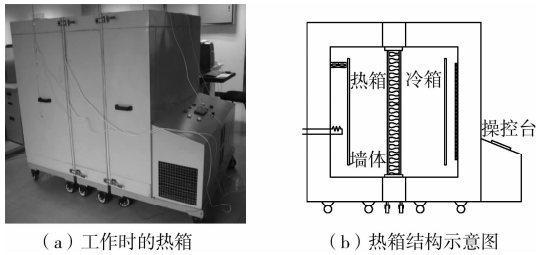


图 2 标定热箱

当热流通过墙体结构时,由于其热阻的存在,在厚度方向的温度梯度为衰减过程,使该结构内、外表面具有温差。在墙体受热表面的木墙骨上和墙骨立柱之间位置分别贴上平板状热流计片,在热流计周围的内外表面布置 T 型热电偶,并在冷面相应处布置热电偶,将测试信号输入热流与温度巡回检测仪中,读出温度和电动势值,并储存记录。通过测得的电动势可计算出流过的热流量。

根据木墙骨处冷热表面温差  $\Delta T_f$  和木墙骨之间填充保温处冷热表面温差  $\Delta T_i$ ,以及相应的热流量  $q_f$  和  $q_i$ ,按照以下公式(1)和公式(2)分别计算出复合墙体的木墙骨框架处和保温材料填充处的热阻  $R_f$  和  $R_i$ ,然后按照面积加权,通过公式(3)计算得到墙体的总传热系数,即为有效传热系数  $U$  [2],描述的是木墙骨和保温材料等材料组成的复合结构墙体的综合传热性质。

$$R_f = \frac{\Delta T_f}{q_f} \quad (1)$$

$$R_i = \frac{\Delta T_i}{q_i} \quad (2)$$

$$U = \frac{F_f}{100} \times \frac{1}{R_f + 0.11 + 0.05} + \frac{F_i}{100} \times \frac{1}{R_i + 0.11 + 0.05} \quad (3)$$

式中,  $F_f$  为木墙骨占墙体面积值,取 9.78;  $F_i$  为非框架部分占墙体面积值,取 90.22; 0.11 和 0.05 分别为木结构复合墙体内、外表面换热阻。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 国产材料制备轻型木结构复合墙体保温性能及其热工级别

表 3 列出了木骨架组合墙体热工级别和适应地区 [12]。不同构造轻型木结构墙体的有效传热系数检测值见表 4,表中  $K_f$  指木墙骨处复合墙体传热系数;  $K_i$  指保温材料填充处复合墙体传热系数。由于木材与保温材料自身导热性能存在较大差异,所以在整个框架墙体的复合结构中,木墙骨位置的传热能力不同于保温材料填充的位置。实验中杉木的导热系数约大于岩棉 3 倍,因此无论是理论计算还是实际

检测,  $K_f$  总是高于  $K_i$ 。计算值中,岩棉材料填充位置的保温性能比木墙骨位置平均高 50%;检测值中,岩棉材料填充位置的保温性能比木墙骨位置平均高 42%。

实验结果表明,1、2、3、6 号实验墙体传热系数为 0.489~0.529 W/(m<sup>2</sup>·K),属于热工级别 II<sub>i</sub> 级,可以用于严寒和寒冷地区。4、5、7、8、10、11 号实验墙体的传热系数为 0.335~0.380 W/(m<sup>2</sup>·K),属于 I<sub>i</sub> 级,可用于严寒地区。9、12、13 号实验墙体的传热系数小于 0.3 W/(m<sup>2</sup>·K),用于严寒地区保温性能则更优异。以北京地区为例,按照节能 65% 的标准 [13],4 层以上的外墙传热系数的限值为不大于 0.60 W/(m<sup>2</sup>·K),3 层以下的不大于 0.45 W/(m<sup>2</sup>·K);哈尔滨地区分别为 0.52 W/(m<sup>2</sup>·K) 和 0.40 W/(m<sup>2</sup>·K)。目前中国木结构建筑一般为 3 层以下,外墙有效传热系数检测结果表明,除了 1、2、3、6 号墙体外,其它实验墙体均满足节能 65% 标准要求。

表 3 墙体热工级别及适应地区

热工级别	传热系数	地区
I <sub>i</sub>	≤0.4	严寒
II <sub>i</sub>	≤0.5	严寒、寒冷
III <sub>i</sub>	≤0.6	寒冷、夏热冬冷
IV <sub>i</sub>	≤1.0	夏热冬冷、夏热冬暖
V <sub>i</sub>	≤1.2	夏热冬暖

#### 3.2 实验检测与理论计算预测传热系数比较

根据 ASHRAE Handbook of Fundamentals (ASHRAE 2009) [14] 和民用建筑热工设计规范 [15] 计算方法,按照多层结构非均质围护结构形式的平均热阻计算公式,将各层材料的热阻进行累加,得到每一块墙体热阻,并且根据内外表面换热,再计算出各墙体的有效传热系数。计算值相对检测值的相对误差列于表 4 中,通过比较发现,多数墙体的计算值与检测值的误差在允许范围内。所以,在已知材料准确的导热系数时,即可通过计算,得到木结构复合墙体有效传热系数或有效热阻的理论值。

### 4 结论

利用国产材料完成了 13 块不同构造木结构复合墙体的制备和保温性能检测。1、2、3、6 号墙体传热系数为 0.489~0.529 W/(m<sup>2</sup>·K),热工级别属于 II<sub>i</sub> 级,可用于严寒和寒冷地区;4、5、7、8、10、11 号墙体的传热系数为 0.335~0.380 W/(m<sup>2</sup>·K),热工级别属于 I<sub>i</sub> 级,可用于严寒地区;9、12、13 号墙体的传热系数小于 0.3 W/(m<sup>2</sup>·K),用于严寒地区保温性能更优。除 1、2、3、6 号墙体外,其它实验墙体均满足节能 65% 的标准要求。

表4 有效传热系数检测值与计算值

编号	墙体构造材料	检测值/(W·(m <sup>2</sup> ·K) <sup>-1</sup> )			计算值/(W·(m <sup>2</sup> ·K) <sup>-1</sup> )			相对误差/ %
		K <sub>f</sub>	K <sub>i</sub>	U	K <sub>f</sub>	K <sub>i</sub>	U <sub>p</sub>	
1	石膏板+岩棉(杉木)+石膏板	0.817	0.497	0.529	1.155	0.450	0.519	1.9
2	石膏板+岩棉(杉木)+胶合板	0.871	0.453	0.494	1.114	0.443	0.509	-3.1
3	结构胶合板+岩棉(杉木)+胶合板	0.764	0.460	0.489	1.075	0.437	0.500	-2.1
4	石膏板+塑料薄膜+岩棉(杉木)+挤塑板	0.604	0.323	0.350	0.443	0.277	0.293	16.4
5	石膏板+塑料薄膜+岩棉(杉木)+聚苯板	0.558	0.348	0.368	0.539	0.311	0.334	9.4
6	石膏板+塑料薄膜+岩棉(杉木)+胶合板	0.733	0.466	0.492	1.114	0.443	0.509	-3.5
7	石膏板+塑料薄膜+岩棉(杉木)+胶合板+聚苯板	0.493	0.329	0.345	0.520	0.305	0.326	5.5
8	石膏板+塑料薄膜+岩棉(杉木)+胶合板+挤塑板	0.541	0.313	0.335	0.430	0.271	0.287	14.4
9	石膏板+塑料薄膜+岩棉(杉木)+挤塑板	0.413	0.222	0.241	0.382	0.212	0.228	5.3
10	石膏板+塑料薄膜+岩棉(杉木)+聚苯板	0.592	0.318	0.345	0.452	0.231	0.253	26.6
11	石膏板+塑料薄膜+岩棉(杉木)+胶合板	0.588	0.358	0.380	0.797	0.297	0.346	9.0
12	石膏板+塑料薄膜+岩棉(杉木)+胶合板+聚苯板	0.519	0.270	0.294	0.438	0.228	0.248	15.6
13	石膏板+塑料薄膜+岩棉(杉木)+胶合板+挤塑板	0.406	0.207	0.226	0.373	0.209	0.225	0.8

通过比较得出传热系数检测值与理论计算值基本相当,因此可以利用材料基本热物理参数数据对木结构复合墙体有效传热系数进行理论预测和设计。

#### 参考文献:

- [1] TEESDALE L V. Thermal insulation made of wood-base materials—Its application and use in houses[R]. Forest Service U. S. Department of Agriculture, Forest Products Laboratory, 1958.
- [2] SHERWOOD GERALD E, HANS GUNARD E. Energy efficiency in light-frame wood construction[M]. Madison W I; U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1979.
- [3] ZARR R R, BURCH D M, FANNEY A H. Heat and moisture transfer in wood-based wall construction: measured versus predicted [R]. DIANE Publishing, NIST building science series 173, 1995.
- [4] SKUJANS J, VULANS A, ILJINS U, et al. Measurements of heat transfer of multi-layered wall construction with foam gypsum[J]. Applied Thermal Engineering, 2007,27:1219-1224.
- [5] 王戈,费本华,徐兰英,等. 落叶松胶合板复合墙体设计及其保温隔热性能的计算[J]. 木材工业, 2007, 21(6):1-6.  
WANG GE, FEI BEN-HUA, XU LAN-YING, et al. Structural design and calculation of heat preservation/insulation of a composite wall made with larch plywood [J]. China Wood Industry, 2007, 21(6):1-6.
- [6] 周海宾. 木结构墙体隔声和楼板减振设计方法研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2006.
- [7] 龙超,吕建雄,任海青,等. 杉木人工林规格材的足尺弯曲、压缩分级测试[J]. 林业科学, 2008,(8):95-99.  
LONG CHAO, LV JIAN-XIONG, REN HAI-QING, et al. Full size bending and compression in-grade tests on dimension lumber of Cunninghamia lanceolata plantation[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008,(8):95-99.
- [8] 陈恩灵,费本华. 木结构金属连接件连接性能的研究现状[J]. 木材工业, 2008, 22(3):9-12.  
CHEN EN-LING, FEI BEN-HUA. Review on performance of metal connectors in wood frame structures[J]. China Wood Industry, 2008, 22(3):9-12.
- [9] 郭伟,费本华,赵荣军,等. 木桁架齿板连接性能及影响因素研究现状[J]. 木材工业, 2008, 22(6):24-27.  
GUO WEI, FEI BEN-HUA, ZHAO RONG-JUN, et al. Review of tests and impact factors of metal-plate connection[J]. China Wood Industry, 2008, 22(6):24-27.
- [10] DALGLIESH A, CORNICK S, MAREF W, et al. Hygrothermal performance of building envelopes for 2D and 1D simulation [C]//10th Conference on Building Science and Technology Proceedings, Ottawa, Ont., 2005.
- [11] GB 50005—2003 木结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2005.
- [12] GB/T 50361—2005 木骨架组合墙体技术规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2005.
- [13] DBJ 11—602—2006 居住建筑节能设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2006.
- [14] American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning. 2009 ASHRAE Handbook - Fundamentals (I-P Edition) [M]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2009.
- [15] GB 50176—93 民用建筑热工设计规范[S]. 北京:中国计划出版社, 1993.

(编辑 胡 玲)