

研究与开发

# 落叶松胶合板复合墙体设计 及其保温隔热性能计算

王 戈<sup>1</sup>, 费本华<sup>2</sup>, 徐兰英<sup>3</sup>, 林利民<sup>3</sup>, 王子奕<sup>4</sup>

(1. 国际竹藤网络中心,北京 100102; 2. 北京林业机械研究所,北京 100013;  
3. 黑龙江省林产工业研究所,哈尔滨 150081; 4. 黑龙江省林业科学院,哈尔滨 150081)

**摘要:** 介绍了落叶松胶合板复合墙体的结构设计、保温隔热计算方法。对适于北京地区复合墙体保温隔热的计算结果表明:由水泥砂浆、落叶松胶合板覆板、保温材料以及石膏板等国产材料组成的木结构复合墙体,当保温层材料(聚苯乙烯泡沫塑料)厚度大于 24 mm 时,该墙体能够满足我国建筑规范中的保温隔热要求。

**关键词:** 落叶松胶合板; 复合墙体; 聚苯乙烯泡沫塑料; 保温隔热

中图分类号: S791. 22; TS6 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654(2007)06-0001-03

## Structural Design and Calculation of Heat Preservation/insulation of a Composite Wall Made with Larch Plywood

WANG Ge<sup>1</sup>, FEI Ben-hua<sup>2</sup>, XU Lan-ying<sup>3</sup>, LIN Li-min<sup>3</sup>, WANG Zi-yi<sup>4</sup>

(1. International Center for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China; 2. Beijing Forestry Machine Institute, Beijing 100013, China; 3. Forest Products and Industry Institute of Heilongjian Province, Harbin 150081, China; 4. Forestry Academy of Heilongjian Province, Harbin 150081, China)

**Abstracts:** The structural design and theoretical calculations for heat preservation / insulation for a composite wall were described in this paper. The results showed that the properties of the wall, which was composed of larch plywood sheathing, cement, heat preservation / insulation material and plasterboard, can meet the Chinese standards for 24 mm or thicker polystyrene foam insulation.

**Key words:** larch plywood; composite wall; polystyrene foaming material; heating preservation/insulation

利用木材建造的房屋,在保温、节能、环保等方面都具有很显著的优越性,近些年,我国出现了越来越多木结构房屋,但大多采用国外进口的木质板材建造。利用我国人工林资源,建造国产化木结构房屋,已引起人们的高度重视。其中木结构房屋的墙体保温隔热性能是设计和建造的重要内容,需要通过设计和计算来确定最佳结构形式。

本文以北京地区为例,采用国产落叶松结构胶合

板等材料,进行轻型木结构房屋复合墙体结构设计及热工性能理论计算,旨在为我国落叶松胶合板在木结构房屋建造中的应用,提供技术参考。

### 1 材料的选择及复合墙体结构设计

#### 1.1 材料选择

我国 GB 50005-2003《木结构设计规范》中,对木基结构板材的具体规定为:当墙骨间距为 600 mm 时,满足强度要求的板材最小厚度应为 11 mm。考虑成本因素,笔者选用 11 mm 落叶松结构胶合板作为墙体覆板;另考虑木结构房屋的防火要求,在复合墙体设计和计算中,采用了 12 mm 厚的普通石膏板作为内墙材料;通过对常用保温隔热材料的导热系

收稿日期:2007-03-19; 修改稿:2007-04-28

基金项目:林业科学技术推广项目“建筑用落叶松胶合板结构材应用技术推广”(2005176);引进国际先进农业科技技术(948)项目“人工林木材的 NIR(近红外)材性预测及增值利用技术”(2003-4-27)。

作者简介:王戈(1965—),男,国际竹藤网络中心副研究员,博士。

数、使用效果和应用情况进行比较,选用聚苯乙烯泡沫塑料(简称苯烯板)作为复合墙体的保温材料,厚度根据理论计算后确定;外墙装饰采用水泥砂浆,厚度为 20 mm,以保证木结构房屋的耐久性。

1.2 复合墙体的热工参数测定

参照 JGJ 51-2002《轻骨料混凝土技术规程》和 GB 50176-93《民用建筑热工设计规范》测试方法,对组成墙体的各种材料进行热工性能参数的测定,结果见表 1。从表 1 可见,落叶松胶合板具有良好的隔热性能,适于建造木结构房屋。

表 1 几种复合墙体材料的热物理性能参数

Tab 1 Parameters of heat property on composite wall materials

材料名称	厚度 / mm	导热系数 W/(m·K)	蓄热系数 S W/(m <sup>2</sup> ·K)
纸面石膏板	12	1 = 0.33	S <sub>1</sub> = 5.28
苯烯板	待定	2 = 0.042	S <sub>2</sub> = 0.36
落叶松胶合板	11	3 = 0.16	S <sub>3</sub> = 3.69
水泥砂浆	20	4 = 0.93	S <sub>4</sub> = 11.37

1.3 复合墙体的结构设计

参考国外的木结构房屋墙体设计形式,结合我国《木结构设计规范》要求,落叶松胶合板复合墙体结构设计为:石膏板(12 mm) + 保温材料(厚度待定) + 落叶松胶合板(11 mm) + (覆面膜及金属网) + 水泥砂浆(20 mm),如图 1 所示。

根据所处的地理位置和气候的变化类型,北京地区被划为寒冷地区。按 GB 50176-93 规定,建筑应满足冬季保温要求,部分地区还应兼顾夏季防热。因此,本研究在热工计算时,主要考虑墙体的保温和隔热性能。对于覆面膜及金属网,因其厚度较薄,对导热影响较小,在计算中可忽略不计。

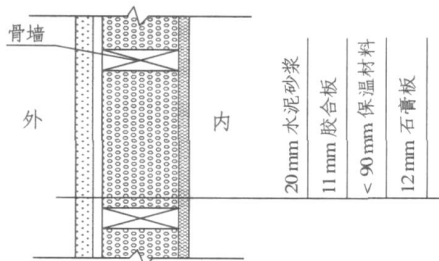


图 1 落叶松胶合板复合墙体构造示意图  
Fig 1 The structural pattern of the wall composed of larch plywood

2 复合墙体保温性能设计计算

2.1 保温设计计算原理

传热速度的快慢和传热量与房屋建筑墙体的热

工特性有密切关系<sup>[1-2]</sup>。建筑的保温主要是通过加大复合墙体的传热阻、减少室内向室外的传热来实现。但是,加大传热阻,必然会导致建筑造价及其维护费用的增加。

《民用建筑热工设计规范》中,规定了既能满足保温要求,又能使相应建筑及费用最低的墙体结构传热阻设计值,其最小传热阻  $R_{0,min}$  按下式计算确定:

$$R_{0,min} = (t_i - t_e) n n R_i / t \quad (1)$$

式中:  $t_i$  —冬季室内计算温度;

$t_e$  —冬季室外计算温度;

$n$  —温差修正系数;

$n$  —外墙最小传热阻的附加修正系数;

$R_i$  —墙体内表面换热阻;

$t$  —室内空气与墙体内表面之间的允许温差。

从保温角度要求的最低热阻考虑,复合墙体的实际传热阻  $R_0$  必须大于  $R_{0,min}$ 。

2.2 复合墙体保温性能的计算

根据强度及成本等设计要求,复合墙体在保持其他各层材料厚度不变的情况下,可以根据其最小传热阻,来计算和确定保温层苯烯板的最小厚度。

1) 墙体最小传热阻计算参数 对于北京地区,根据《民用建筑热工设计规范》提供的数值:  $n = 1.00$ ;  $n = 1.35$ ;  $t = 6.0$ ; 冬季  $t_i = 18$ ; 复合墙体内、外表面换热阻分别为  $R_i = 0.11 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ,  $R_e = 0.04 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ 。

按规范要求,  $t_e$  需根据复合墙体的热惰性指标  $D$  值来确定。由于保温层的厚度待定,热惰性指标  $D$  暂无法确定,因此,先假设北京地区采用 Ⅱ型复合墙体,则  $t_e = -12$ 。按式(1)计算可得,复合墙体的最小传热阻  $R_{0,min} = 0.74 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ 。

2) 墙体保温层最小厚度计算及验算 计算复合墙体的传热阻  $R$  时,必须确定组成墙体材料的厚度及导热系数。由于保温层厚度待定,所以根据保温设计计算原理,由复合墙体的最小传热阻推算出保温层厚度后,再进行验算,最后确定墙体结构和厚度。

根据材料热阻公式  $R_n = \delta / \lambda$ , 按表 1 所列数值,计算出:石膏板的热阻  $R_1 = 0.036 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ; 落叶松胶合板的热阻  $R_3 = 0.069 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ; 水泥砂浆的热阻  $R_4 = 0.022 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ 。

根据表 2 的推算结果,因为  $D = 0.86$ ,  $< 1.5 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ , 属于 Ⅱ型复合墙体。查表可知:  $t_e = -16$ , 重新将其带入式(1),经验算,最终确定保温层的最小厚度  $R_2$ , 计算结果见表 3。

表 2 复合墙体保温设计的推算结果

Tab 2 Calculation results on heat preservation design of composite wall

墙体传热阻	$R_0 = R_i + R_1 + R_3 + R_4 + R_e = 0.277 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$
保温层热阻	$R_2 = R_{0,\min} - R_0 = 0.463 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$
保温层厚度	$\delta_2 = R_2 \cdot \lambda_2 = 19.45 \text{ mm}$
热惰性指标值	$D = R_1 S_1 + R_2 S_2 + R_3 S_3 + R_4 S_4 = 0.86 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$

表 3 复合墙体保温设计的验算结果

Tab 3 Checking results on heat preservation design of composite wall

墙体最小传热阻	$R_{0,\min} = (t_i - t_e) / \alpha = 0.842 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$
实际保温层热阻	$R_2 = R_{0,\min} - R_0 = 0.565 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$
实际保温层最小厚度	$\delta_2 = R_2 \cdot \lambda_2 = 23.7 \text{ mm}$
热惰性指标验算值	$D = R_1 S_1 + R_2 S_2 + R_3 S_3 + R_4 S_4 = 0.90 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$

从表 3 的验算结果可知,  $D = 0.90$ ,  $< 1.5 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 属于 II 型, 说明第 2 次取值满足计算要求, 保温层的设计厚度可以采用。

通过以上计算结果可以得出, 当复合墙体保温层(苯烯板)厚度  $> 23.7 \text{ mm}$  时, 其复合墙体的传热阻可以满足大于最小传热阻的要求, 表明该结构的外墙设计符合建筑热工要求。

由此得出, 在北京地区制作轻型木结构房屋, 设计墙体时, 当其他各层材料条件不变的情况下, 该结构的苯烯板厚度只要  $> 24 \text{ mm}$ , 就能满足规范中的保温设计要求。

### 3 复合墙体隔热性能的设计计算

#### 3.1 复合墙体隔热设计计算的原理

按照我国《民用建筑热工设计规范》规定, 在房间自然通风的情况下, 建筑物的屋顶和东、西外墙的内表面最高温度  $t_{i,\max}$  不能大于夏季室外计算温度最高值  $t_{e,\max}$ 。为此, 需先根据满足保温设计要求时复合墙体的结构以及当地的气候条件, 计算出复合墙体内部表面的最高温度, 然后再与当地夏季的最高计算温度进行比较, 决定是否需要采取某些特殊的隔热措施, 以满足  $t_{i,\max} \leq t_{e,\max}$  的条件。

由于在《民用建筑热工设计规范》中,  $t_{i,\max}$  的计算非常复杂, 实际设计中常采用一种简易的计算方法:

先求出复合墙体内部表面的平均温度  $t_i$ , 再求内表面温度相对平均值的振幅  $A_{if}$ , 两者之和即为内表面的最高温度, 即:  $t_{i,\max} = t_i + A_{if}$ 。

由于式中  $A_{if}$  的计算较为繁琐, 考虑到  $t_{i,\max}$  给出的仅是一个比较范围, 因此可简化处理。根据经验, 可取  $1.5 \sim 2.0$  之间的较大值来确定。

#### 3.2 复合墙体隔热性能的计算

1) 计算复合墙体的传热阻  $R_0$  当复合墙体结构由石膏板(12 mm)、苯板(24 mm)、落叶松胶合板(11 mm)和水泥砂浆刷面(20 mm)组成时, 复合墙体的传热阻  $R_0 = R_i + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_e = 0.848 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$ , 其中保温层苯烯板热阻  $R_2 = 0.571 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$ 。其他数值见 2.2 节中的墙体保温计算。

2) 计算复合墙体内部表面最高温度  $t_{i,\max}$  在《民用建筑热工设计规范》和《采暖通风与空气调节设计规范》<sup>[3]</sup> 中, 可查得北京地区夏季室外计算基本参数分别为:

太阳辐射吸收系数  $\alpha = 0.7$ ; 太阳辐射照度平均值  $I = 174 \text{ W} / \text{m}^2$ ; 室外计算温度平均值  $t_e = 30.2$ ; 室内计算温度平均值  $t_i = t_e + 1.5 = 31.7$ ; 复合墙体内部、外表面换热系数  $\alpha_i = 8.7 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$ ,  $\alpha_e = 23.0 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$ ; 内表面温度相对平均值振幅  $A_{if} = 2.0$ ; 夏季室外计算温度最高值  $t_{e,\max} = 36.3$ 。为求出  $t_{i,\max}$ , 需先计算出室内综合温度平均值  $t_{sa}$  和  $t_i$ , 计算过程及其结果见表 4。

表 4 复合墙体材料隔热的计算及结果

Tab 4 The calculating process and results for heat insulation design of composite wall materials

室外综合温度平均值	$t_{sa} = t_e + I / \alpha_e = 35.50$
内表面平均温度	$t_i = t_i + (t_{sa} - t_i) R_0 = 32.21$
墙体内部表面最高温度	$t_{i,\max} = t_i + A_{if} = 34.2$

从表 4 可知, 复合墙体内部表面最高温度  $t_{i,\max} = 34.2$ , 夏季室外计算温度最高值为  $t_{e,\max} = 36.3$ 。根据计算结果, 在其他层材料和厚度不变的情况下, 取苯烯板厚度为 24 mm 时, 内表面最高温度可低于夏季室外计算温度最高值 2.1, 能够满足北京地区的隔热设计要求。

### 4 结论

1) 从建筑节能考虑, 建筑墙体材料应尽可能选择导热系数小的建筑材料 ( $< 0.25$  的建筑材料为保温材料)。建筑材料导热系数越小, 热阻越大, 越有利于建筑物的保温和隔热。落叶松胶合板的导热系数为 0.16, 是良好的建筑保温材料。在强度满足要求

(下转第 6 页)

表3 各因素对力学性能的影响分析

Tab 3 Effects of various factors on the mechanical properties of the plywood

项目	MOR/MPa			MOE/GPa			保留强度/MPa			冲击强度/(kJ·m <sup>-2</sup> )		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
*	231.9	245.3	224.3	21.05	20.74	19.77	143.3	153.1	146.4	155.5	159.6	160.7
*	171.1	152.4	166.1	17.71	14.42	15.34	92.6	89.4	95.6	-	-	-
*	269.4	228.2	249.3	22.07	22.73	23.47	178.7	164.3	147.4	172.8	161.5	171.5
*	186.3	159.2	177.7	15.93	16.80	17.21	118.0	115.1	92.3	-	-	-
*	229.0	256.8	256.7	22.22	23.07	22.10	142.7	147.3	170.9	175.1	182.3	171.2
*	151.8	197.6	165.4	16.92	19.34	18.01	89.6	95.7	112.3	-	-	-
极差 R	40.40	28.60	32.40	1.17	2.33	3.70	36.0	17.00	24.50	-	-	-
极差 R	34.50	45.20	12.30	1.78	4.92	2.67	28.4	25.70	20.00	-	-	-
R(平均)	37.45	36.90	22.35	1.47	3.63	3.19	32.2	21.35	22.25	19.6	10.8	22.7

\* 分别为 1、2、3 水平对应的试板长度和宽度方向的强度值之和。

应的试板 MOE 最大。较优方案为: A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, 即: 热压温度 150、单位压力 2.6 MPa、热压时间 70 s/mm。

对保留强度的影响。温度的影响最大, 3 个因素依次为 A > C > B。在各水平中, A<sub>2</sub>、B<sub>2</sub>、C<sub>3</sub> 对应的试板长度方向的保留强度最大; A<sub>2</sub>、B<sub>2</sub>、C<sub>3</sub> 对应的试板宽度方向的保留强度最大。较优方案为: A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>3</sub>, 即: 热压温度 140、单位压力 2.4 MPa、热压时间 80 s/mm。

对冲击强度的影响。热压时间的影响最大, 3 个因素依次为: C > A > B。在各水平中, A<sub>3</sub>、B<sub>3</sub>、C<sub>2</sub> 对应的试板冲击强度最大。较优方案为: A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, 即: 热压温度 150、单位压力 2.6 MPa、热压时间 70 s/mm。

3) 最优方案的确定 竹帘胶合板主要用作混凝土模板, 因此, 对其耐水性、耐老化性、MOE 等性能要求较高。根据上述分析, 综合考虑生产成本和效率等因素, 选择最优的工艺条件为 A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, 即: 热压温度 140、单位压力 2.6 MPa、热压时间 70 s/mm。

### 2.3 验证试验

按此工艺条件进行了验证试验。结果表明, 在本研究范围内, 此工艺条件为最优方案。试板的性能指标为: MOR 为 92.5 MPa、MOE 为 7.8 GPa、保留强

度 52.5 MPa、冲击强度 58.8 kJ/m<sup>2</sup>, 均达到 JG/T 165-2004 中优等品的要求。

### 3 结论

1) 自行研制的多元共聚型改性 MF 树脂的使用性能优良, 可用于制造竹帘胶合板。对现有使用 PF 树脂为胶黏剂的竹胶合板生产企业, 不需对现有设备和工艺进行改造, 即可直接用于生产, 具有良好的推广应用前景。

2) 按“冷-热-冷”一次覆塑成型工艺压制的竹帘胶合板, 较优的热压工艺参数为: 温度为 140、单位压力 2.6 MPa、时间为 70 s/mm。

### 参考文献:

- [1] 叶喜. 改性三聚氰胺-甲醛树脂工艺研究[J]. 西南林学院学报, 1997, 17(4): 43-47.
- [2] 苏行义. 低摩尔三聚氰胺树脂稳定性的研究[J]. 建筑人造板, 1994(1): 6-7.
- [3] Maylor R. New melamine modified binders for moisture resistant MDF[J]. Wood Adhesive, 1995(5): 115-121.
- [4] Pizzi A. High performance MUF resins of low melamine content by a number of novel techniques[J]. Wood Adhesive, 2000(3): 219-239.

(责任编辑 姜征、赖威)

(上接第 3 页)

的前提下, 可以用其制造木结构复合墙体。

2) 通过结构设计和理论计算, 对国产材料组成的落叶松木质复合墙体(水泥砂浆层厚 20 mm、落叶松胶合板覆板厚 11 mm、保温材料以及石膏板厚 12 mm), 当保温层材料(苯烯板)的厚度 > 24 mm 时, 该复合墙体可以适应北京地区的气候条件, 墙体的保温和隔热性能, 均可达到我国《民用建筑热工设计

规范》的要求。

### 参考文献:

- [1] 周晓燕, 华毓坤, 胡勤龙. 定向结构板居室室内热环境的研究[J]. 木材工业, 2000, 15(1): 12-15.
- [2] 廖耀发. 建筑物理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- [3] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 采暖通风与空气调节设计规范[S]. GB 50019-2003. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.

(责任编辑 姜征)