

轻型木结构外墙热工计算方法及空调负荷分析

张华玲¹, 张敏飞²

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

摘要: 针对一种典型轻型木结构外墙, 在综合分析几种常用简化热工计算方法基础上, 提出了一种改进计算方法, 并与实测值进行了对比, 说明改进后的简化方法准确性较好。然后运用能耗软件 Energyplus 对重庆某住宅卧室进行典型日的冷热负荷计算, 对比单位面积的轻型木结构、节能 50% 及节能 65% 典型砖混结构外墙得热引起的空调负荷。结果表明: 轻型木结构外墙所引起的冷热负荷最小, 日平均冷热负荷约为节能 65% 砖混结构外墙的 55%, 但夏季隔热性能比节能 65% 砖混结构外墙差, 负荷波动大, 提高轻型木结构墙体在夏季的隔热性能是改善其热工性能的关键。

关键词: 轻型木结构; 热工计算方法; 空调负荷

中图分类号: TU111.19

文献标识码: A

Analysis of Thermotechnical Calculation Method and Air-conditioning Load for Lightweight Timber Frame Envelopes

ZHANG Hualing¹, ZHANG Minfei²

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment of the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Based on the common thermotechnical calculation methods for lightweight timber frame wall, an improved method was presented with an accurate result which agreed well with the experimental data. The cooling and heating loads of a bedroom during typical days in Chongqing were calculated by building energy simulation program, EnergyPlus. Results show that the air conditioning load per unit of lightweight timber frame wall is the least in comparison with the loads of 50% and 65% energy-efficient brick-concrete walls. The daily average cooling and heating loads caused by lightweight timber frame wall are about 55% of the 65% energy-efficient brick-concrete wall. But the

lightweight timber frame is of the poorer thermal insulation property and larger fluctuation of loads than brick-concrete wall of 65% energy-saving. Improving thermal insulation in summer is the key to optimize the thermotechnical performance for lightweight timber frame wall.

Key words: lightweight timber frame; thermotechnical calculation method; air-conditioning load

木材是四大建筑材料(木材、混凝土、钢筋、塑料)中唯一可再生材料。轻型木结构建筑凭借其美观、节能、环保、舒适、抗震、亲近自然等优良性能而备受推崇,在世界各地住宅建筑领域得到广泛的应用和发展^[1-3]。法国轻型木结构建筑在居住建筑中占 5%,而且在过去的几年内呈上升趋势^[4]。日本新建住宅中木结构住宅占 47.57%,其中轻型木结构住宅占 19.53%^[5]。美国 90% 的居住建筑是轻型木结构建筑^[6]。近年来,由于国外技术的引进和开发商的参与,木结构建筑在我国也悄然兴起,许多地区特别是大城市如北京、上海等已经开始流行一股木结构住宅热。2010 年上海世博会上,属于北美典型轻型木结构建筑的加拿大温哥华案例馆更是掀起了一阵“低碳防震木结构房屋”风。我国越来越多的学者开始关注轻型木结构的节能性,但大多针对严寒和寒冷地区^[7-11]。轻型木结构住宅在重庆地区的节能性如何,与常规砖混结构住宅相比有什么优缺点,还需要进一步研究。目前建筑节能性研究大多基于建筑能耗模拟软件,轻型木结构墙体结构不同于常规墙体,由保温棉填充在等间距墙骨柱中,构成墙体中间层,在模拟时需对轻型木结构墙体中间层进行简化处理。

本文正是针对如何简化计算轻型木结构外墙热工性能,为进一步优化轻型木结构墙体,提高热工性能,减少空调峰值负荷,降低木结构建筑能耗奠定

收稿日期: 2011-03-07

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划(2006BAJ01A0521); 重庆市建委科技计划项目

第一作者: 张华玲(1967—),女,副教授,主要研究方向为建筑节能理论与技术。E-mail: hlzhang@cqu.edu.cn

通讯作者: 张敏飞(1987—),男,工学硕士,主要研究方向为轻型木结构节能性。E-mail: zmf_211@126.com

基础。

1 轻型木结构墙体构造

轻型木结构住宅外墙由内覆面板、墙骨柱、保温层、外覆面板、防潮层以及外饰面构成。一般用石膏板作为内覆面板,主要用于防火。墙骨柱的主要形式有 $40\text{ mm} \times 90\text{ mm} (2 \times 4)$ 和 $40\text{ mm} \times 140\text{ mm} (2 \times 6)$, 通常,承重墙的墙骨柱为 $40\text{ mm} \times 140\text{ mm}$, 而非承重墙的墙骨柱 $40\text{ mm} \times 90\text{ mm}$ 。墙骨柱的间距有 300、400、500、600 mm 四种形式,但工程中主要根据建筑承重的要求选用 400 mm 和 600 mm,当承重要求较高时选用 400 mm。填充在内外覆面板中间的保温材料可以是硬质保温材料如保温板,也可以是松散的保温材料如玻璃棉等。用水泥板、胶合板、定向刨花板(OSB板)作为外覆面板,钉固在墙骨柱上。为阻止雨水进入墙体,在外覆面板上还需要覆盖一层防水透气膜如聚丙烯产品,在防止外界水进入的同时又可以让墙体中所积聚的水汽排到外界。外饰面主要有以下 4 种:① 在覆面板上钉挂金属网再抹灰粉饰或水泥抹灰后加饰面砖;② 在外覆面板外直接装饰外挂板如 PVC 挂板、实木挂板等;③ 在覆面板上钉上竖向钉板条,再将外装饰挂板钉在钉板条上;④ 在覆面板上钉上竖向钉板条,将水泥压力板钉在顶板条上,然后重复①过程。

本文选取 2×6 这种典型轻型木结构外墙形式,如图 1 所示。墙体由内向外依次为:12.7 mm 石膏板、140 mm 木龙骨填充保温玻璃棉(墙骨柱间距为 600 mm)、12.7 mm 胶合板、0.4 mm 防潮层、12.7 mm 实木挂板。

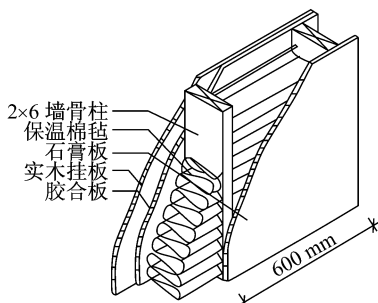


图1 轻型木结构墙体

Fig.1 Lightweight timber frame wall

2 轻型木结构外墙热工计算

2.1 简化热工计算方法

简化计算假设条件:① 热流都是平行的;② 防

潮层很薄因而忽略其热阻;③ 墙骨柱和保温棉的面积比近似为 600 mm 间距内墙骨柱和保温棉的所占面积比。

墙体热阻计算公式为

$$R = R_i + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_e \quad (1)$$

式中: R 为外墙的总热阻; R_i 为内表面换热热阻,取 $0.11\text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$; R_e 为外表面换热热阻,取 $0.04\text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$; R_1 为石膏板的热阻; R_2 为中间层(墙骨柱+保温棉)的热阻; R_3 为胶合板的热阻; R_4 为实木挂板的热阻。

方法一:忽略墙骨柱的存在,将中间层(墙骨柱+保温棉)全部当作保温材料,即 $R_2 = \lambda/\delta$, 其中, λ 为保温棉的导热系数, δ 为中间层厚度,将 R_2 代入式(1)算出墙体热阻 R 。该方法忽略了墙骨柱和热桥对整个墙体热阻的影响,显然这种方法误差很大。

方法二^[12]:先假设中间层(墙骨柱+保温棉)全是保温材料算出墙体中间层平均传热系数 k_1 ,再假设中间层全部为墙骨柱,算出墙体中间层平均传热系数 k_2 ,然后分别对应乘以保温材料和墙骨柱的面积权重系数,得到中间层的平均传热系数 k 如下:

$$k = ak_1 + bk_2 = \frac{a\delta}{\lambda} + \frac{b\delta}{\lambda'} \quad (2)$$

式中: a 是保温棉面积权重系数,即保温棉在墙体中占的面积比; b 为墙骨柱面积权重系数,即墙骨柱在墙体中占的面积比; k_1 为中间层均为保温材料时的平均传热系数; k_2 为中间层均为墙骨柱时的平均传热系数; λ' 为墙骨柱的导热系数。

将 $R_2 = 1/k$ 代入式(1)算出墙体热阻 R 。这种方法虽然考虑了墙骨柱,但却忽略了保温材料和墙骨柱导热系数的不同而产生的热桥对墙体热阻的影响。

方法三:文献[13]给出了由两种以上材料组成、两向非均质的围护结构平均热阻的计算公式。但该复合墙体中间层并未与空气直接接触,故笔者认为应将原公式改成式(3)的形式更为准确。

$$R_2 = \left[\frac{F_0}{\frac{F_1}{R_5} + \frac{F_2}{R_6}} \right] \beta = \left(\frac{F_0}{F_1 k_1 + F_2 k_2} \right) \beta \quad (3)$$

式中: F_1, F_2 分别是按平行于热流方向划分的墙骨柱和保温棉的传热面, m^2 ; F_0 是与热流方向垂直的总传热面, m^2 ; $R_5 = \lambda/\delta$, 是中间全部为保温棉时的热阻; $R_6 = \lambda'/\delta$, 是中间层全部为墙骨柱时的热阻; β 是修正系数,根据墙骨柱和保温棉的导热系数比值查文献[13]确定。该方法考虑了墙骨柱和热桥对墙体热阻的影响。如果将方法二算出的中间层热阻用修

正系数 β 加以修正,两种简化方法的计算结果一致。实际上,方法三是在方法二上做了修正。

方法四^[12]:先假设中间层(墙骨柱+保温棉)全是保温材料,算出整个墙体的传热系数 k_3 ,再假设中间层全部为墙骨柱,算出整个墙体传热系数 k_4 ,然后分别对应地乘以保温材料和墙骨柱的面积权重系数,得到墙体平均传热系数 k' ,见式(6),进而计算出墙体的平均热阻 $R=1/k'$ 。这种方法虽然考虑了墙骨柱,但却忽略了保温材料和墙骨柱导热系数的不同而产生的热桥对热阻的影响。该方法也没有考虑热桥对墙体热阻的影响。

$$k_3 = \frac{1}{R_i + R_1 + R_5 + R_3 + R_4 + R_e} \quad (4)$$

$$k_4 = \frac{1}{R_i + R_1 + R_6 + R_3 + R_4 + R_e} \quad (5)$$

$$k' = ak_3 + bk_4 \quad (6)$$

式中: k_3 为中间层均为保温材料时墙体的传热系数; k_4 为中间层均为墙骨柱时墙体的传热系数。

改进方法(方法五):作者针对方法四存在的问题,提出了一种修正方法。即:根据墙骨柱和保温棉的导热系数比查取修正系数 β ,对中间层的平均热阻值 R_2' 进行修正(R_2' 为按方法四计算的墙体总热阻减去内外覆面板、外饰面层及内外表面热阻),将式(7)中的 R_2 代入式(1)后得出墙体热阻值 R 。该方法考虑了墙骨柱和热桥对墙体热阻的影响。

$$R_2 = R_2\beta =$$

$$\left(\frac{1}{k} - (R_i + R_1 + R_3 + R_4 + R_e)\right)\beta \quad (7)$$

2.2 计算结果对比分析

应用表1数据,分别用以上5种简化方法对轻

表1 墙体材料的热物性参数^[14-15]

Tab.1 The physical properties of wall materials

材料名称	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)	比热 J/(kg·K)	蓄热系数 W/(m ² ·K)
石膏板	0.16	800	1 088	3.21
玻璃棉毡	0.05	85	963	0.53
2×6 墙骨柱	0.14	577	1 634	3.17
胶合板	0.12	545	1 214	2.37
实木挂板	0.07	545	1 256	1.91
水泥砂浆	0.93	1 800	1 050	11.37
聚苯颗粒 保温浆料	0.06	200	1 015	1.17
加气混凝土 砌块(250厚)	0.54	800	1 350	10.58
挤塑聚 苯板 XPS	0.03	30	1 380	0.28
JN 厚壁型烧结 页岩空心砌块	0.30	800	1 050	4.53

型木结构外墙进行热工性能计算,并与用热箱法实测的轻型木结构外墙热阻进行对比,见表2。可以看出,已有的4种简化计算方法,只有方法三考虑了热桥对热阻的影响,误差最小,而方法一误差最大,本文在方法四基础上提出的改进计算方法,即方法五的误差最小。

3 木结构外墙对负荷的影响

3.1 墙体选择及热工性能计算

针对轻型木结构墙体构造的特殊性,模拟时需对轻型木结构墙体中间层进行简化。选择2×6轻型木结构外墙和重庆地区目前常用的节能50%和节能65%砖混结构外墙,分析其节能效果和负荷特征。

节能50%典型外墙结构:水泥砂浆(5 mm)+聚苯颗粒保温浆料(25 mm)+加气混凝土砌块(250厚)(200 mm)+水泥砂浆(20 mm)。

节能65%典型外墙结构:水泥砂浆(20 mm)+挤塑聚苯板(30 mm)+水泥砂浆(20 mm)+JN厚壁型烧结页岩空心砌块砌体(200 mm)+水泥砂浆(20 mm)。

为便于对模拟结果进行分析,运用文献[13]中给出的热工计算公式,按表2数据对以上3种墙体的热工性能进行计算,其中轻型木结构墙体热阻按方法五进行简化计算,计算结果见表3。

表2 木结构墙体热阻计算结果

Tab.2 The thermal resistance results of lightweight timber frame wall

简化计算方法	计算热阻/ (m ² ·K·W ⁻¹)	实测热阻/ (m ² ·K·W ⁻¹)	相对 误差/%
方法一	3.56	3.08	15.66
方法二	3.20	3.08	3.92
方法三	3.01	3.08	2.18
方法四	3.27	3.08	6.29
方法五	3.08	3.08	0.02

表3 墙体热工性能计算结果

Tab.3 Thermotechnical performance results of wall

墙体	热阻/ (m ² ·K·W ⁻¹)	热惰性	衰减 倍数	延迟 时间/h
节能50%	0.79	3.82	35.45	7.64
节能65%	1.69	4.05	94.43	9.51
木结构	3.08	2.64	29.85	4.47

3.2 模型建立

模拟对象为重庆市某住宅楼标准层一间卧室(6 mm×3 mm×3 mm),房间只有一面西外墙,其他墙体均为内墙,模拟时只考虑西外墙(6 mm×3 mm)得

热引起的冷热负荷,不考虑内墙和楼板的户间传热,忽略室内人员、灯光和设备所引起的负荷.分别对冬季典型采暖日(1月28日)和夏季典型空调日(8月1日)进行负荷计算.采暖空调室内温度分别为18℃和26℃.以节能50%和节能65%砖混结构及轻型木结构作为建筑模型,计算典型日逐时冷热空调负荷.

3.3 模拟结果与分析

用Energyplus软件模拟重庆市3种不同墙体在典型构造的采暖空调负荷,得到不同西外墙单位面积所引起的冷热负荷,见图2~图3和表4.

表4 西外墙冷负荷对比

Tab.4 Comparison of the coiling load for west wall	热负荷/(W·m ⁻²)			冷负荷/(W·m ⁻²)		
	节能50%	节能65%	木结构	节能50%	节能65%	木结构
日平均	9.66	5.13	2.76	10.49	5.40	2.95
6:00pm~8:00am 平均	9.23	5.02	2.53	11.56	5.68	3.50
最大	10.81	5.39	3.77	12.90	6.05	5.54
最小	8.44	4.79	1.43	7.83	4.73	0.63

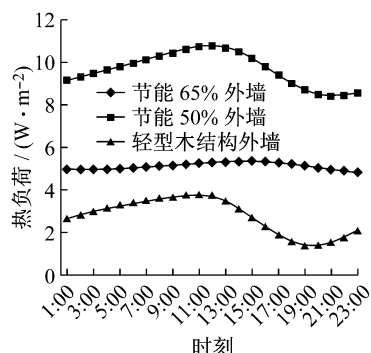


图2 外墙单位面积所引起的热负荷

Fig.2 Heating load caused by exterior wall per unit area

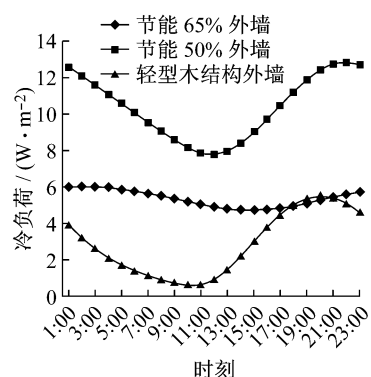


图3 外墙单位面积所引起的冷负荷

Fig.3 Coiling load caused by exterior wall per unit area

从表4可以看出:在采暖典型日,轻型木结构西外墙单位面积所引起的日平均热负荷为2.76 W·m⁻²,约占节能65%墙体的54%,如果只考虑夜间人员在室的时间段6:00pm~8:00am的平均热负荷,则只有2.53 W·m⁻²,只有节能65%砖混结构墙体的一半.在夏季典型日,轻型木结构西外墙单位面积所引起的日平均冷负荷为2.95 W·m⁻²,占节能65%墙体的55%,如果只考虑夜间人员在室的时间段6:00pm~8:00am的平均冷负荷为3.50 W·m⁻²,约为节能65%砖混结构墙体的62%.因此,采用轻型木结构墙体所需的采暖空调能耗大大减少.

从图2和图3看出:由于轻型木结构外墙保温性好,夜间人员在室时间采暖负荷小,有利于缓解用电高峰压力,但轻型木结构外墙的热惰性小,单位面积外墙所造成的负荷波动性大.轻型木结构房间冷负荷最大值出现的时间在8:00pm,而节能50%和节能65%砖混结构房间冷负荷最大值出现的时间分别在10:00pm和2:00am,最大负荷出现的时间更为提前.这对于重庆地区住宅是不利的,该时段正是家庭人员在室时间,室外温度较高不宜开窗通风降温,且又是用电高峰时期,空调电耗需求反而更大.

4 结论

通过对轻型木结构外墙简化热工计算方法进行的探讨和负荷计算分析,获得的研究成果将为改进重庆地区轻型木结构外墙的热工性能指明了方向.主要结论为:

(1) 本文提出的改进热工计算简化方法(方法五)准确性较好,在无法实测轻型木结构墙体热阻时,推荐采用方法五,不建议采用忽略中间层墙骨柱的方法一.

(2) 轻型木结构外墙保温性能优于节能50%和65%典型砖混结构外墙.在采暖典型日,重庆市轻型木结构西外墙单位面积所引起的日平均热负荷为2.76 W·m⁻²,仅为节能50%的29%,占节能65%墙体的54%;在夏季典型日,轻型木结构西外墙单位面积所引起的日平均冷负荷为2.95 W·m⁻²,仅为节能50%墙体的28%,占节能65%墙体的55%.可见住宅采用轻型木结构可大大减少采暖空调能耗.

(3) 轻型木结构外墙的热惰性小,所造成的负荷波动性大.重庆市轻型木结构住宅西外墙得热引起的最大冷负荷在8:00pm,出现时间比节能50%和节能65%典型砖混结构更为提前.该时段正是室外

温度较高,不宜开窗通风降温时段,且又是用电高峰时期,空调耗电需求大,这显然不利于削减电网峰值负荷。

(4) 轻型木结构外墙虽然保温性能较优,但隔热性能较差。根据重庆地区的气候特点,该地区建筑围护结构的热工性能应首先满足夏季防热要求,同时兼顾冬季保温,因此,如何加强轻型木结构墙体在夏季的隔热性能,是改善重庆地区轻型木结构外墙热工性能的关键。

参考文献:

- [1] Gajda J, VanGeem M. Energy use in residential housing: a comparison of insulating concrete form and wood frame walls [M]. Portland: Portland Cement Association Research & Development, 2000.
- [2] Van de Lindt J W, Carraro J A H, Heyliger P R, et al. Application and feasibility of coal fly ash and scrap tire fiber as wood wall insulation supplements in residential buildings[J]. Conservation and Recycling, 2008, 52:1235.
- [3] 刘爱霞,周静海. 持续发展的芬兰木结构建筑[J]. 沈阳建筑大学学报:社会科学版, 2006(4): 321.
LIU Aixia, ZHOU Jinghai. The ever-developing wooden buildings in Finland [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Social Science, 2006(4): 321.
- [4] Fraisse G, Boichot R, Kouyoumji J L, et al. Night cooling with a ventilated internal double wall[J]. Energy and Buildings, 2010, 42(3):393.
- [5] 谢力生. 日本木结构的发展历程与现状[J]. 木材木业, 2009, 23(3):20.
XIE Lisheng. The history and conditions of wood structures in Japan[J]. China Wood Industry, 2009, 23(3):20.
- [6] Li Yue, Ellingwood B R. Reliability of woodframe residential construction subjected to earthquakes[J]. Structural Safety, 2007(29): 294.
- [7] 于伸. 现代木结构房屋的设计探讨[D]. 哈尔滨:东北林业大学材料科学与工程学院, 2004.
YU Shen. Discuss on the modern design of wood house[D]. Harbin: Northeast Forestry University. College of Material Science and Engineering, 2004.
- [8] 赵勇. 现代木结构住宅墙体热物理性能研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2007.
ZHAO Yong. Research on the thermal characteristics of modern wood framed construction wall [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2007.
- [9] 张斌,王伟. 轻型木结构住宅与别墅能耗对比分析[J]. 低温建筑技术, 2010, 32(9):104.
ZHANG Bin, WANG Wei. Energy consumption comparison between woodframe residential construction and villa [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2010, 32(9):104.
- [10] 国际工程项目管理研究院,建筑环境与设备研究所. 中国木结构建筑与其他结构建筑能耗和环境影响比较[R]. 北京:清华大学建筑环境与设备研究所, 2006.
Institute of International Engineering Project Management. Institute of Built Environment. Analysis on the operative energy consumption and environment impact for timberwork and other structure buildings in China[R]. Beijing: Tsinghua University. Department of Building Environment, 2006.
- [11] 王晓欢. 轻型木结构住宅节能与墙体传热[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2009.
WANG Xiaohuan. Research on energy-efficiency in light-frame wood residence and the wall heat transfer[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2009.
- [12] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE handbook fundamentals[M]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc, 2009.
- [13] 中华人民共和国建设部. GB50176—93 民用建筑热工设计规范[S]. 北京:中国计划出版社, 1993.
Ministry of Construction of the Peoples Republic of China. GB50176—93 Thermal design code of civil building [S]. Beijing: China Planning Press, 1993.
- [14] 重庆市城乡建设委员会. DBJ50—071—2010 居住建筑节能65%设计标准[S]. 重庆:重庆市建筑节能中心, 2010.
Chongqing Urban Construction Committee. DBJ50—071—2010 Design standard for energy efficiency 65% of residential building[S]. Chongqing: Chongqing Building Energy Saving Center, 2010.
- [15] Enermodal Engineering Limited. Modeling two-and three-dimensional heat transfer through composite wall and roof assemblies in hourly energy simulation programs (1145-TRP) [R]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers Inc, 2001.