

青海地区农村土坯墙体保温改造热工性能研究

桑鹏飞^{1,2}, 谢静超¹, 刘加平¹, 刘德慧³, 王建平⁴

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124; 2. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100037;
3. 青海民族大学建筑工程学院, 西宁 810007; 4. 海军工程设计研究局, 北京 100070)

摘 要: 针对青海地区气候条件和当地农村土坯建筑特点,采用傅氏级数表达室外综合温度函数作为墙体外侧热工分析的边界条件,基于墙体热工系统理论利用 MATLAB 编程计算分析土坯墙保温改造前后的延迟时间和衰减倍数,并通过谐波反应法计算改造前后墙体的净失热流和内表面波动温度。结果表明,节能改造后的墙体失热流有很大程度的减小。总体来说,改造后的土坯墙体节能率高达 74%以上,且内表面温度有 3.4~4.7℃的提高,不仅可提高室内辐射场温度,而且使得室内辐射场更加趋于均匀,可增加室内人员的热舒适性。同时这些研究和分析可为新型民居的设计提供量化依据与科学认识。

关键词: 保温改造; 室外综合温度; 延迟; 衰减; 农村土坯建筑

中图分类号: TU111.19

文献标识码: A

0 引 言

传统乡土建筑具有与地域气候相适应的室内热环境品质和低能耗低碳属性,但其室内空间功能难以满足现代生活方式的需求。然而,现代乡村建筑虽满足现代生活方式的功能需求,但其简单构造致使建筑热工性能较差,失去了与地域气候相适应的特点,随之而来的是能耗的增长和环境的恶化。

长期以来,诸多学者^[1-3]对传统土坯房屋的抗震性能进行了详细研究。刘艳峰等^[4]通过理论分析表明此类民居具有很好的热稳定性。赵西平等^[5]分析研究秦茂村传统民居围护结构热工性能,得出秦茂村的建筑物理环境需解决的首要问题是冬季保温问题。同时,还有诸多学者^[6,7]对城市居住建筑和公共建筑保温改造做了大量科学研究。然而对地域气候相适应的土坯房保温改造的研究文章则少见报道。

青海地区在中国建筑气候分区中属严寒地区^[8],随着青海地区的发展,新农村建设迫在眉睫,为使生土民居再度焕发生机,更加宜居和健康地发展,应建造出适宜当地特点的绿色低能耗建筑。本文旨在继承传统土坯墙优良的地域气候相适应的特

点下,且能满足地方标准^[9]节能要求,对比土坯墙改造前后的围护结构净失热流和内表面波动温度。同时,这些研究和分析为以后对新型民居的设计提供了量化依据与科学认识。

1 被测对象

被测建筑位于青海省海东市民和县下的一个村镇,该村镇居民近年来在政策的支持下建了新房,也都保留了老房,分别建于 2015 年和 20 世纪 80 年代前后。为对比传统民居和新建民居热环境状况,对该地区民居进行为期 1 a 的现场测试。本次测试选取 2 个测试房间,分别为新建民居的客厅和传统民居的客厅,编号为 1 号和 2 号。测试房 1 号(新建民居)平面布局如图 1a 所示。内外墙均采用实心黏土砖,外墙厚 370 mm,内墙厚 240 mm,墙体内外侧水泥砂浆抹灰,屋面为平屋面,南墙有 2 扇塑钢窗,窗户尺寸为 2.2 m×2.2 m,南向有阳光房,阳光房有屋顶;测试房 2 号(传统民居)平面布局见图 1b,采用传统的建造技术,外墙采用 370 mm 厚土坯砖,内墙为 240 mm 厚土坯砖,墙体内外侧水泥砂浆抹灰,屋面也是平屋面,南墙有 2 扇木框窗,窗户尺寸大小为 1.65 m×1.2 m,南向有挑檐。

收稿日期: 2016-11-23

基金项目: 国家自然科学基金(51590912); 国家自然科学基金面上项目(51578013)

通信作者: 谢静超(1976—), 女, 博士、副教授, 主要从事建筑节能方面的研究。xiejc@bjut.edu.cn

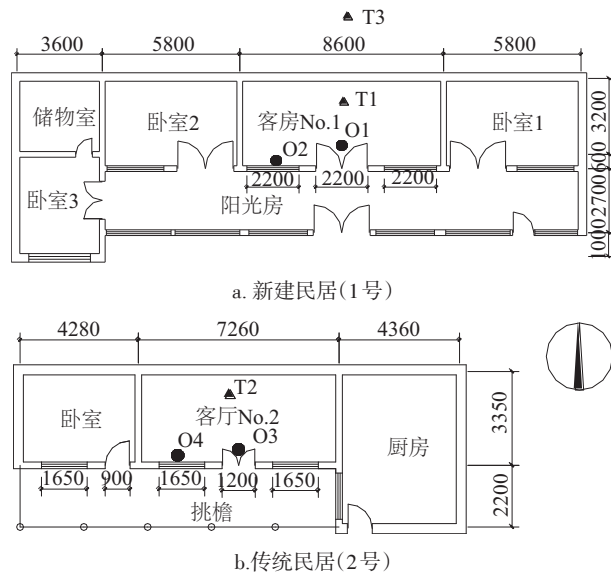


图1 新建民居1号和传统民居2号测点平面图(mm)

Fig. 1 Floor plan of new building No.1 and traditional room No.2 measuring point(mm)

在每个民居布置3个温湿度测点 T1~T3 和4个门窗开关测点 O1~O4, T1 测量新建民居客厅室内温湿度, T2 测量传统民居客厅室内温湿度, T3 放在土坯房和新建房屋中间的菜园子里测量室外温湿度, O1 测量新建民居客厅门开关状态, O2 测量新建民居客厅窗开关状态, O3 测量传统民居客厅门开关状态, O4 测量传统民居客厅窗开关状态, 如图1所示, 测试周期为2016-06~2017-05。考虑到已有数据并能反映出夏季新老民居的室内热环境状况, 选取2016-07-15的新老民居客厅室内外温湿度和门窗开关数据进行比较, 如图2~图5所示。

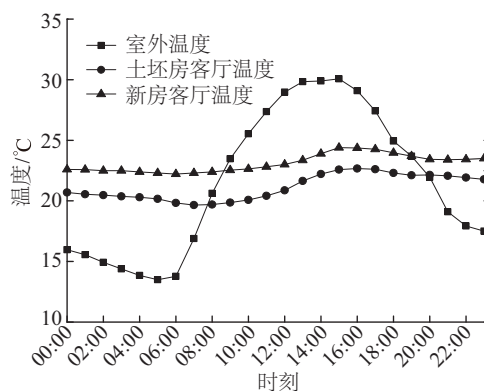


图2 新老民居室内外温度对比

Fig. 2 Comparison of new and traditional residential indoor and outdoor temperature

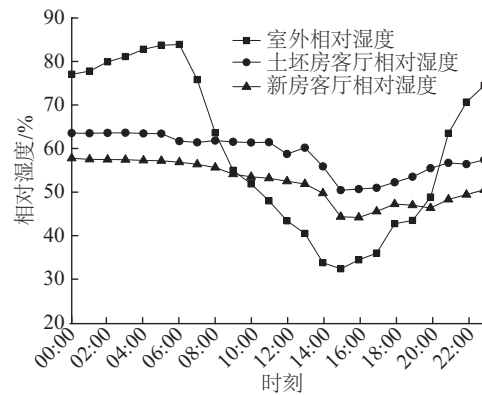


图3 新老民居室内外相对湿度对比

Fig. 3 Comparison of new and traditional residential indoor and outdoor relative humidity

由图2、图3可知, 新建民居 T1 室内空气温度平均值为 23.1 °C, 相对湿度平均值为 52.1%, 温湿度最高值分别为 24.4 °C、57.8%, 最低值为 22.2 °C、44.2%, 传统民居 T2 室内空气温度平均值为 21.1 °C, 相对湿度平均值为 58.7%, 温湿度最高值为 22.7 °C、63.6%, 最低值为 19.7 °C、50.4%。

由图4、图5可知, 传统民居客厅门在 00:00~06:22 处于关闭状态, 06:22~24:00 处于打开状态, 客厅窗一直处于关闭状态, 新建民居客厅门在 00:00~05:31、22:24~24:00 处于关闭状态, 05:31~22:24 处于打开状态, 新建民居窗在 00:00~05:58、22:25~24:00 处于关闭状态, 05:58~22:25 处于打开状态。综上可以看出, 土坯房客厅平均温度比新建房客厅温度低 2 °C, 同时, 室外空气温度最高值出现在约 15:00, 新建民居室内空气温度在开窗开门的情况下最高值出现在约 15:00, 而传统民居在开门的情况下室内空气温度最高值出现在约 16:00, 这说明土坯

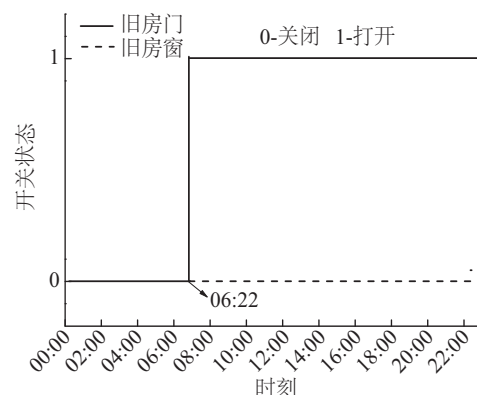


图4 传统民居门窗开关状态

Fig. 4 Switch state of traditional residential doors and windows

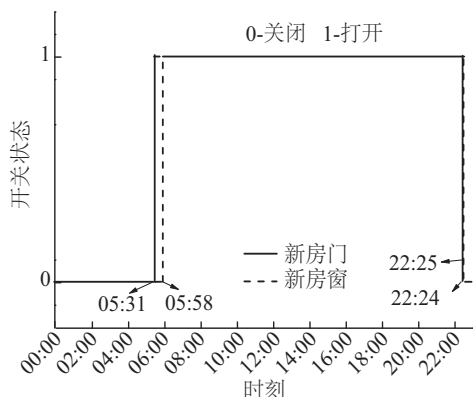


图5 新建民居门窗开关状态

Fig. 5 Switch state of new residential doors and windows

墙有较好的蓄热性以及温度延迟性。可见,传统民居室内热环境明显优于新建民居。所以为了保留传统民居的这些优点,又能使其满足节能标准规范的要求,进行了以下的理论计算。

2 采暖期室内外计算温度的确定

2.1 室内设计计算温度

低层住宅的主要房间包括卧室和起居室等,低层居住建筑室内采暖平均设计计算温度作为进行全年采暖能耗计算时的基准温度。大量农村调查结果表明,由于农民起居及生活习惯与城市有较大区别,使得对冬季采暖温度的要求也不相同,许多农户认为舒适的采暖温度为 14~15℃。标准规定低层居住建筑室内采暖平均设计计算温度应为 16℃^[9]。

2.2 室外计算温度

青海省太阳辐射资源丰富,是仅次于西藏地区的第 2 个高值区,日照时数为 2323~3575 h,年接收到的太阳能量折合 1623 亿 t 标准煤,太阳辐照总的分布趋势为西高东低,西部超过 7200 MJ/m²^[10]。同时该地区空气稀薄,尘埃和水汽含量小,使得太阳辐射和有效长波辐射对围护结构的热状况影响较内陆一般地区显著。所以采用不同朝向室外综合温度作为外扰,能够更准确反映当地的气候特点,有利于正确的分析围护结构的合理性。故采用室外综合温度较室外空气温度能更准确描述不同朝向围护结构所受到的室外热作用。由于太阳辐射受太阳方位角和太阳高度角的影响,所以围护结构的室外综合温度与朝向密切相关。室外综合温度

包含室外空气温度和太阳直射辐射、天空散射辐射、地面反射辐射对围护结构的加热作用,也包含了围护结构外表面有效长波辐射的散热作用。

根据文献[11],计算不同朝向围护结构室外综合温度:

$$t_{sa} = t_e + \frac{q_s + q_r}{\alpha_e} - \frac{q_e}{\alpha_e} \quad (1)$$

式中, t_{sa} 、 t_e ——室外综合温度和室外空气温度,℃; q_r 、 q_s ——围护结构外表面所吸收的地面反射辐射热量和太阳辐射热量, W/m²; q_e ——有效辐射或夜间辐射, W/m²; α_e ——外壁面总换热系数,取 23.0 W/(m²·K); 围护结构外表面对阳光的吸收率取 0.7^[11]。

以大柴旦市为例,该地区采暖期天数为 196 d^[9],根据典型气象年数据^[12],计算该地区冬至日 12 月 22 日不同朝向围护结构室外综合温度。12 月 22 日的太阳高度角虽然是全年最低,有利于得热,但高度角的降低同时也会导致阳光穿过大气层的距离增长,大气透明度修正部分增大,使得太阳辐射照度略有降低。另外,12 月 22 日是全年太阳日照时间最短的 1 天,该日的建筑物太阳辐射得热分析具有典型性^[13]。12 月 22 日,大柴旦市各朝向外墙室外综合温度计算表 1 所示。表明,由于辐射作用的影响,不同朝向围护结构室外综合温度差别较大,其中南向最高,其最大值约为 21.6℃,北向最低,其最高值只有 -3.8℃,东西室外综合温度介于南北向之间,其最大值分别为 3.57 和 12.73℃,可见南墙太阳辐射得热量最大而北墙最小。室外综合温度昼夜温差也随朝向不同而差别明显,其中南向温差最大,可达 40℃以上。

2.3 室外综合温度的傅氏级数表达

在室温一定的情况下,建筑围护结构的不稳定传热决定于 2 个因素,一是外扰的变化情况,另一个是围护结构对外扰变化的响应。作用于建筑围护结构的外扰,如室外空气温度、太阳辐射强度等,大体是以 24 h 为周期的。气象条件虽然大体上呈周期变化,但变化是随机的、不规则的。因此,利用傅氏级数展开式将复杂的扰量曲线表达为简单的周期函数:

$$t_i(\tau) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega\tau + \varphi_n) \quad (2)$$

表1 大柴旦地区冬至日逐时室外空气温度和室外综合温度
Table 1 Hourly outdoor sol-air temperature and air temperature in winter solstice in Da Qaidam area

时刻	室外综合温度/℃				室外空气 温度/℃	时刻	室外综合温度/℃				室外空气 温度/℃
	东向	南向	西向	北向			东向	南向	西向	北向	
00:00	-16.0	-16.0	-16.0	-16.0	-14.2	12:00	-5.6	19.0	-8.7	-8.7	-6.9
01:00	-16.6	-16.6	-16.6	-16.6	-14.8	13:00	-6.0	21.6	-1.5	-6.0	-4.2
02:00	-17.5	-17.5	-17.5	-17.5	-15.7	14:00	-3.8	21.4	7.5	-3.8	-2.0
03:00	-18.5	-18.5	-18.5	-18.5	-16.7	15:00	-4.2	16.8	11.9	-4.2	-2.4
04:00	-19.4	-19.4	-19.4	-19.4	-17.6	16:00	-5.4	10.3	12.7	-5.4	-3.6
05:00	-20.1	-20.1	-20.1	-20.1	-18.3	17:00	-7.0	-1.9	1.4	-7.0	-5.2
06:00	-20.4	-20.4	-20.4	-20.4	-18.6	18:00	-8.9	-8.9	-8.9	-8.9	-7.1
07:00	-18.6	-18.6	-18.6	-18.6	-16.8	19:00	-10.7	-10.7	-10.7	-10.7	-8.9
08:00	-1.7	-6.9	-16.3	-16.3	-14.5	20:00	-12.3	-12.3	-12.3	-12.3	-10.5
09:00	3.6	2.3	-14.4	-14.4	-12.6	21:00	-13.7	-13.7	-13.7	-13.7	-11.9
10:00	2.7	9.2	-12.7	-12.7	-10.9	22:00	-14.9	-14.9	-14.9	-14.9	-13.1
11:00	-0.7	14.9	-10.9	-10.9	-9.1	23:00	-15.9	-15.9	-15.9	-15.9	-14.1

式中， $t_s(\tau)$ ——在 τ 时刻的室外综合温度，℃，其中 τ 为时刻，h； A_0 ——零阶外扰，即计算周期内室外空气综合温度的平均值，℃； A_n ——第 n 阶正弦波外扰的振幅，℃； φ_n ——第 n 阶正弦波外扰的初相位，rad； ω ——角速，rad； $\omega=2\pi/T$ ， T 为函数的周期，h。

由于在实际居住建筑中围护结构遇到的外扰函数很复杂，常用一系列等间隔的离散数据来表达该函数的变化。因此，就需要利用这些等间隔的离散数据近似求得有限项傅氏级数，进行该函数变化的谐波分析。将基本周期区间 $[0, T]$ 分为 N 等分，在该区间内只有 N 个离散点数值，本文 N 取24，采样时间间隔 $\Delta\tau=1\text{ h}$ 。因为建筑围护结构对高频扰量具有剧烈衰减作用，所以在建筑热传递过程计算中，室外扰量的采样时间间隔取1 h已足够精确。 j 为采样值的序号； n 为谐波的阶数，文献[11]指出6阶谐波近似正确解并考虑到计算的复杂性，本文 n 取6。

得到谐波有限项傅氏级数表达式：

$$t_s(j\Delta\tau)=A_0+\sum_{n=1}^6A_n\sin(n\omega j\Delta\tau+\varphi_n)\tag{3}$$

根据式(1)求得的不同朝向的室外综合温度并结合傅氏级数的近似计算理论式(2)、式(3)，通过

计算求得有限项傅氏级数，进行该函数变化的谐波分析，其结果如图6所示。由图6可以看出6阶室外综合温度傅氏函数曲线与逐时室外综合温度基本吻合，因此本文的后续分析采用室外综合温度傅氏函数曲线表示围护结构的周期外扰函数。

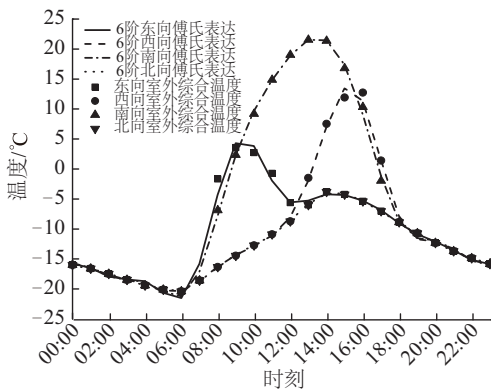


图6 不同朝向室外综合温度傅氏函数曲线
Fig. 6 Outdoor sol-air temperature Fourier series curves of different direction

3 墙体衰减延迟作用分析

3.1 板壁热力系统总传递矩阵

以室外为输入端，多层板壁围护结构总传递矩阵为^[11]：

$$\begin{bmatrix} A(s) & -B(s) \\ -C(s) & D(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{a_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_n(s) & -B_n(s) \\ -C_n(s) & D_n(s) \end{bmatrix} \times \cdots \times \begin{bmatrix} A_i(s) & -B_i(s) \\ -C_i(s) & D_i(s) \end{bmatrix} \times \cdots \times \begin{bmatrix} A_1(s) & -B_1(s) \\ -C_1(s) & D_1(s) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{a_e} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $A_i(s) = D_i(s) = \text{ch}\left(l_i \sqrt{\frac{s}{a_i}}\right)$

$$B_i(s) = \left(\lambda_i \sqrt{\frac{s}{a_i}}\right)^{-1} \cdot \text{sh}\left(l_i \sqrt{\frac{s}{a_i}}\right)$$

$$C_i(s) = \left(\lambda_i \sqrt{\frac{s}{a_i}}\right) \cdot \text{sh}\left(l_i \sqrt{\frac{s}{a_i}}\right)$$

式中, α_i 、 α_e ——内、外表面的换热系数;
 λ_i 、 l_i 、 a_i ——墙体第 i 层的导热系数、导温系数、厚度;
 s ——温度扰量的基频,对应前文的 6 阶谐波,本文温度扰量的基频取 $\pi/12$ 、 $\pi/6$ 、 $\pi/4$ 、 $\pi/3$ 、 $5\pi/12$ 、 $\pi/2$ 。

3.2 板壁热力系统对室外温度的延迟和衰减

板壁围护结构的传热频率响应是当室温保持为 0℃时,板壁内表面对室外侧不同频率正弦波温度波幅的衰减倍数 v_{yn} 和时间延迟相位 ψ_{yn} (rad)。如果室外侧温度是频率为 ω_n 、振幅为 A_{an} 、初相位为 φ_n 的正弦形温度波,则以下指数函数虚部就是所要输入的温度波,即:

$$\begin{aligned} i(\tau) &= A_{an} [\cos(\omega_n \tau + \varphi_n) + i \sin(\omega_n \tau + \varphi_n)] \\ &= A_{an} e^{i(\omega_n \tau + \varphi_n)} \end{aligned} \quad (5)$$

表 2 保温改造前后土坯墙体构造及其热工参数

Table 2 Configuration and thermal parameters of adobe wall before and after insulation renovation

构造类型	材料层	干密度 ρ / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	蓄热系数 S / $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$	比热容 c / $\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	导热系数 λ / $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	热阻 R / $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$	传热系数 K / $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$
土坯墙体	20 mm 水泥砂浆	1800.0	11.37	1.05	0.930	0.02	1.92
	370 mm 夯实黏土	2000.0	12.99	1.01	1.160	0.32	
	20 mm 水泥砂浆	1800.0	11.37	1.05	0.930	0.02	
改造后 土坯墙体	50 mm 聚氨酯 硬质泡沫塑料	30.0	0.36	1.38	0.033	1.52	0.50
	370 mm 夯实黏土	2000.0	12.99	1.01	1.160	0.32	
	20 mm 水泥砂浆	1800.0	11.37	1.05	0.930	0.02	

注:墙体的热工参数根据文献[14]确定。

建筑室内温度环境由室内空气温度场和辐射温度场构成。对室内温度环境的评价包括平均温度和温度波动 2 个层面。传统民居少有人工温度

因此板壁内表面对室外温度扰量的延迟时间相位(rad)和衰减倍数为:

$$\psi_{yn} = A_{rg}[B(i\omega_n)] = \arctan \frac{B(i\omega_n)_{\text{Im}}}{B(i\omega_n)_{\text{Res}}} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} v_{yn} &= \frac{A_{an}}{\Delta t_{in}} = \alpha_i |B(i\omega_n)| \\ &= \alpha_i \sqrt{[B(i\omega_n)_{\text{Res}}]^2 + [B(i\omega_n)_{\text{Im}}]^2} \end{aligned} \quad (7)$$

3.3 土坯墙和节能改造墙体衰减倍数和延迟时间

根据课题组实地调研得知,在青海乡村地区还存在着大量的土坯房建筑,根据现场得知的土坯墙的厚度以及青海地区常用建筑材料热物理性能计算参数^[14],可得知其房屋的传热系数约为 2 W/(m²·K)。这与文献[15]通过问卷得出在西北地区农村住宅建筑中,生土建筑所占比例约为 28.5%,围护结构传热系数约为 1.98 W/(m²·K)相符。由此可知建筑外墙的耗热量较大,约占建筑总耗热量 51%^[15],住宅建筑节能策略以提高外围护结构保温性能为主。根据青海省工程建设地方标准^[2]的规定,本标准通过改善低层居住建筑围护结构热工性能,控制冬季采暖能耗,达到节能 50%的目标要求,严寒 B 区的节能居住建筑外墙传热系数不大于 0.5 W/(m²·K),因此对传统土坯房屋外墙加保温使其满足标准规范的传热系数限值,2 种墙体的构造组成以及热工参数见表 2。

调节系统,室内温度主要由围护结构热工特性决定。该特性不但体现在以其热阻降低室内、外传热量,还在于对室外温度波动向室内传热过程的衰减

和延迟作用上。后者是防止传统民居室内过热或过冷,保持室内温度稳定的关键。对于室外空气温度而言,其波动曲线与正弦曲线接近,因此适于采用谐波法进行分析。根据式(4)~式(7)用 Matlab 编程计算表 2 中土坯墙体改造前后对不同阶数外扰的延迟时间和衰减倍数,计算结果见表 3。由表 3 可看出墙体对不同频率的谐波有不同的衰减倍数,频率越高衰减倍数越激烈,对土坯墙体加保温改造后其衰减倍数有很大的增加,其一阶衰减倍数与土坯墙体三阶相当。因此与土坯墙相比,外扰曲线所具有的低频成分,通过围护结构时就会很大程度上被消除了,使内表面温度波动更加稳定。土坯墙体改造前后延迟时间变化不是很大。

表 3 改造前后墙体的延迟时间和衰减倍数

Table 3 Temperature time lag and decrement factor of wall before and after insulation renovation

阶数	谐波/ rad	衰减倍数		延迟时间/h	
		改造前	改造后	改造前	改造后
1	$\pi/12$	30.7	369.1	12.39	13.70
2	$\pi/6$	121.2	1664.2	9.02	9.53
3	$\pi/4$	355.4	5154.6	7.43	7.71
4	$\pi/3$	886.3	13204.0	0.46	0.64
5	$5\pi/12$	1986.8	30021.0	0.99	1.12
6	$\pi/2$	4125.4	62788.0	1.29	1.39

4 墙体失热量和内表面温度波动分析

在周期性外扰作用下,通过墙体室内的失热量可认为包括 2 部分:1)由于室外空气平均综合温度与室内空气温度(对于设计计算,室温为给定的常数)之差所造成的失热量;2)由于外扰波动致使围护结构内表面也具有波动而产生的附加产热量。采用谐波反应法^[11],利用当量温差进行计算可求得围护结构的净失热热流。

在稳定传热条件下,通过平壁的热流量与通过平壁各部分的热流量都相等,通过当量温差可推导出内表面波动温度 θ_i :

$$\theta_i = t_i - \frac{K}{\alpha_i} \left[t_i - \bar{t}_{sa} - \frac{\alpha_i}{K} \sum_{n=1}^{\frac{N}{2}} \frac{A_{an}}{v_{yn}} \cdot \sin(\omega_n \tau + \varphi_n - \psi_{yn}) \right] \quad (8)$$

式中, K ——板壁围护结构的传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; t_i ——室内供暖设计温度, $^\circ C$; φ_n ——第 n 阶正弦波

外扰的初相位, rad。

采用谐波法计算土坯墙体和节能保温改造后土坯墙不同朝向净失热热流和内表面波动温度如图 7 和图 8 所示。从图 7 可知,由于不同朝向受到太阳辐照影响不同,土坯墙各朝向平均失热热流为南向 $40.09 W/m^2$,东、西向 50.89 、 $51.11 W/m^2$,北向最大 $55.8 W/m^2$ 。土坯墙保温改造后各朝向平均失热热流为南向 $10.36 W/m^2$,东、西向 13.15 、 $13.21 W/m^2$,北向 $14.42 W/m^2$ 。保温改造后的土坯墙东、西、南、北净失热热流比土坯墙减少了 37.74 、 37.91 、 29.73 、 $41.38 W/m^2$,保温改造后的土坯墙体的净失热热流有很大的减小,改造墙体墙体总体上比着土坯墙体节能率达到 74%。同时,计算结果表明在冬季设计工况下,由于不同朝向太阳辐照的得热,无论是土坯墙还是改造墙体,南外墙的逐时失热量较北外墙降低约 28%,东西外墙的逐时失热量较北外墙降低分别约 8.8%、8.4%。

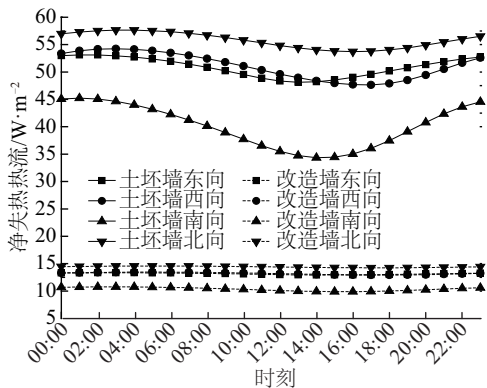


图 7 土坯墙保温改造前后失热热流对比

Fig. 7 Comparison of heat loss before and after insulation renovation of adobe wall

从图 8 可知,保温改造土坯墙体内表面温度有明显提高,其中东、西、南、北向墙体平均内表面温度分别为 14.49 、 14.48 、 14.81 、 $14.34 ^\circ C$,而土坯墙东、西、南、北向墙体平均内表面温度分别为 10.15 、 10.12 、 11.39 、 $9.59 ^\circ C$,保温改造后的土坯墙东、西、南、北内表面平均温度比土坯墙分别提高了 4.34 、 4.36 、 3.42 、 $4.76 ^\circ C$,提高了墙体内壁面辐射温度,增加了室内的舒适度。以北向墙体内表面平均温度为基准,保温改造墙体东、西、南内表面平均温度与北向之差分别为 0.16 、 0.14 、 $0.47 ^\circ C$,土坯墙的分别为 0.71 、 0.54 、 $1.81 ^\circ C$,即采用保温改造后的土坯墙体内辐射温度场越趋于均匀。

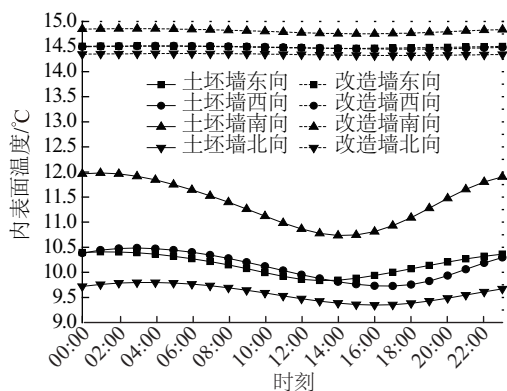


图8 土坯墙保温改造前后内表面波动温度对比

Fig. 8 Comparison of internal surface fluctuation temperature before and after insulation renovation of adobe wall

5 结 论

本文通过分析土坯墙保温改造前后的热工性能得到以下结论:

1)太阳能资源丰富的青海地区农村土坯建筑,以室外综合温度作为围护结构热工分析的边界条件,能够反映出不同朝向围护结构太阳作用的差异,采用6阶谐波的有限傅氏级数能准确表达出室外综合温度函数变化。

2)保温改造后土坯墙体其衰减倍数有很大的增加,其对室外综合温度一阶外扰衰减倍数369.1与土坯墙体3阶衰减倍数355.4相当,因此与土坯墙相比,内表面温度波动更加稳定,土坯墙体改造前后延迟时间变化不是很大。

3)保温改造后的土坯墙体的净失热热流有很大程度的减小约26.73~41.38 W/m²,改造后墙体节能率总体上达到74%。且太阳能资源富集地区,无论是土坯墙还是改造墙体,由于不同朝向受到太阳辐照影响不同,南外墙的逐时热负荷较北外墙降低约28%,东西外墙的逐时热负荷较北外墙降低分别约8.8%、8.4%,因此要充分利用当地太阳能资源得热。

4)保温改造后的土坯墙体不仅能提高墙体内部壁面辐射温度约3.42~4.76℃,且室内辐射温度场趋于均匀,增加了室内环境的舒适度。

【参考文献】

[1] 赵西平. 西部传统夯土民居建筑抗震性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.

[1] Zhao Xiping. Study on seismic behavior of China's

western traditional rammed earth resident buildings [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.

- [2] 苏何先, 潘文, 柏文峰, 等. 新型土坯墙体房屋抗震性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(6): 54—61.
- [2] Su Hexian, Pan Wen, Bai Wenfeng, et al. Seismic behavior of new adobe walls structure [J]. Civil Engineering and Environmental Engineering, 2015, 37(6): 54—61.
- [3] 王毅红, 卜永红, 刘挺. 生土结构房屋的承重土坯墙体抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(Sup1): 526—530.
- [3] Wang Yihong, Bu Yonghong, Liu Ting. Study on the aseismic behavior of adobe walls of raw-soil structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(Sup1): 526—530.
- [4] 刘艳峰, 刘加平, 张继良. 传统夯土民居冬季热稳定性研究[J]. 四川建筑科学研究, 2008, 34(6): 204—206.
- [4] Liu Yanfeng, Liu Jiaping, Zhang Jiliang. Thermal stability of traditional tamped-soil dwelling in winter [J]. Building Science Research of Sichuan, 2008, 34(6): 204—206.
- [5] 赵西平, 刘元, 刘加平. 秦岭山地传统民居冬季热工性能分析[J]. 太原理工大学学报, 2006, 37(5): 565—567, 571.
- [5] Zhao Xiping, Liu Yuan, Liu Jiaping. The thermal property of traditional residential architecture in Qinling mountain [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2006, 37(5): 565—567, 571.
- [6] 贾瑞英. 旧有建筑外墙保温改造的经济效益分析[J]. 低温建筑技术, 2005, (4): 87—88.
- [6] Jia Ruiying. Economical effectation analyze of reforming old-building walls to save heat energy [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2005, (4): 87—88.
- [7] 耿幼明. 既有办公建筑围护结构节能改造研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [7] Geng Youming. Study on existing office building envelop energy efficiency retrofit [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [8] GB 50176—93, 民用建筑热工设计规范[S].
- [8] GB 50176—93, Code for thermal design of civil buildings[S].
- [9] DB 63/877—2010, 低层居住建筑节能设计标准[S].

- [9] DB 63/877—2010, Design standard for energy efficiency of low-rise residential buildings[S].
- [10] 庾汉成, 白宗科. 太阳能与青海民居建设[J]. 建筑节能, 2009, 38(4): 42—47.
- [10] Yu Hancheng, Bai Zongke. Solar energy and the construction of housing in Qinghai province[J]. Construction Conserves Energy, 2009, 38(4): 42—47.
- [11] 彦启森, 赵庆珠. 建筑热过程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.
- [11] Yan Qisen, Zhao Qingzhu. Thermal process of building [M]. Beijing: Chinese Building Industrial Press, 1986.
- [12] 中国气象局气象信息中心气象资料室, 清华大学建筑科学系. 中国建筑热环境分析专用气象数据集 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [12] Meteorological Information Center, Meteorological Bureau of China Meteorological Administration, Department of Building Science, Tsinghua University. Special weather data set for China's building thermal environment analysis [M]. Beijing: Chinese Building Industrial Press, 2005.
- [13] 杨 昭, 郁文红, 张甫仁. 建筑物冬季太阳辐射得热分析[J]. 太阳能学报, 2005, 26(1): 104—109.
- [13] Yang Zhao, Yu Wenhong, Zhang Furen. Analysis on the utilization of solar energy in south rooms of building in winter [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2005, 26 (1): 104—10.
- [14] DB 63/948—2011, 青海省被动式太阳能采暖工程技术规程[S].
- [14] DB 63/948—2011, Technical specification for passive solar heating engineering in Qinghai province[S].
- [15] 马 超, 刘艳峰, 王登甲, 等. 西北农村住宅建筑热工性能及节能策略分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2015, 47(3): 427—432.
- [15] Ma Chao, Liu Yanfeng, Wang Dengjia, et al. Analysis of thermal performance and energy saving strategy of rural residence building in northwest china [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2015, 47(3): 427—432.

STUDY ON THERMAL PERFORMANCE OF INSULATION RENOVATION FOR ADOBE WALL IN QINGHAI REGION OF CHINA

Sang Pengfei¹, Xie Jingchao¹, Liu Jiaping¹, Liu Dehui³, Wang Jianping³

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Limited, Beijing 100037, China;

3. College of Architecture and Civil Engineering, Qinghai Nationalities University, Xining 810007, China;

4. Naval Institute of Engineering Design and Research, PLA, Beijing 100070, China)

Abstract: With the climate conditions in northwest Qinghai and the characteristics of local rural adobe buildings, the harmonic Fourier series to express the outdoor sol-air temperature function is adopted as outside boundary conditions for wall thermal analysis. Based on the theory of wall thermal system, time lag and decrement factor of the adobe wall before and after the thermal insulation renovation are calculated with Matlab. The net heat loss of the wall and the inner surface fluctuation temperature are calculated by the harmonic reaction method. The results show that the heat loss of the wall is reduced to a greatly extent after the insulation renovation, and the energy saving rate of the wall reaches up to 74% and the inner surface temperature has an increase from 3.4-4.7 °C, which not only improves the indoor radiation field temperature, but also makes the indoor radiation field be more uniform, thus increasing the thermal comfort of the interior personnel. At the same time, the research and analysis for our new residential design provides a quantitative basis and scientific understanding.

Keywords: thermal insulation; sol-temperature; time lag; decrement factor; rural adobe buildings