

# 贵州地扞侗寨传统民居围护结构改造对室内热湿环境影响

李峥嵘<sup>1</sup>, 曾诗琴<sup>1</sup>, 赵 群<sup>2</sup>, 邢浩威<sup>1</sup>

(1. 同济大学暖通空调研究所, 上海 201800; 2. 同济大学建筑城市规划学院, 上海 201800)

**摘要:** 随着经济、资源的变化及火灾的危害, 贵州地扞侗寨居民逐渐用砖结构改造原有的木结构建筑, 以改善其气密性与保温性能, 但砖结构同时带来了室内结露与夏季夜间过热的问题. 本研究结合现场实测, 分析改造前后围护结构热工性能的变化, 阐述其对室内热湿环境的影响. 结果显示, 改造后的砖墙结构能更好地稳定室内温湿度, 但其内表面在夜间和雨后更容易结露. 本文分别讨论了结露和夜间过热现象的解决方案.

**关键词:** 侗寨; 传统民居; 围护结构; 自然通风; 结露;

**中图分类号:** TU119

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2016)06-0908-04

## The impact of envelope materials on indoor thermal and moist environment in Dimen Dong Nationality in Guizhou

LI Zhengrong<sup>1</sup>, ZENG Shiqin<sup>1</sup>, ZHAO Qun<sup>2</sup>, XING Haowei<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201800, China;

2. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** with the change of economy and resource and the damage of fire, the brick construction is mainly adopted when the residents rebuild their traditional wooden house in Dimen Dong nationality village, by this way, the air tightness and the thermal insulation of the building have been obviously improved, but there will be moisture condensation inside the room and the summer night is excessively hot. This paper will analyze the difference between the thermal performance index of envelope before and after the transformation and will describe its influence on the indoor thermal and humidity environment. The result shows that the brick wall structure after transformation can better stabilize indoor temperature and humidity, however, the moisture condensation is easier to exist at the internal surface in the night and sunny day after shower. This paper discusses the solution including moisture condensation and overheating at night.

**Key words:** Dong nationality village; traditional dwelling; envelope; natural ventilation; moisture condensation

传统民居是居民在当地气候与资源、经济条件下形成的地域性建筑, 在社会与建筑发展历史中具有重要意义. 由于气候、经济与社会的发展, 传统民居面临保护与改造的双重压力. 如何在提高室内舒适度基础上保持当地建筑风格, 是国内外多个专业的研究热点, 目前的研究主要集中于两个方面: 一方面是从建筑学角度研究传统建筑空间营造与历史演变, 基于当地的经济、人文、物质基础上对当地建筑进行材料、空间布局等方面的改造, 主要利用现代技术对现有传统建筑材料进行修理及维护<sup>[1-2]</sup>, 以及借鉴传统建筑的空间格局, 构建可持续性建筑<sup>[3-4]</sup>; 另一方面从室内热湿环境营造角度研究其对当地环境的适应性<sup>[5-8]</sup>, 如建筑材料的热惰性对室内热环境影响及节能的可行性<sup>[5]</sup>、传统民居的热舒适研究<sup>[6-7]</sup>及围护结构热传递过程<sup>[8]</sup>等. 研究表明围护结构性能对室内热环境影响很大, 目前围护结构变化对室内湿环境影响的研究比较少, 而在高湿

地区, 传统民居围护结构内表面受潮情况与室内湿环境联系密切<sup>[9]</sup>, 因此传统民居在改造中需要相关技术指导.

## 1 贵州地扞侗寨民居现状与室内热湿环境监测方案

### 1.1 地扞村传统民居现状及改造趋势

地扞传统侗寨建筑属于干栏式, 且均用当地的杉木建造, 屋顶铺设单层青瓦, 如下图 1(b). 虽然建造用木料可以就地取材, 但是因炊事与供暖引发的火灾频发, 因此当地居民目前倾向采用混凝土与粘土砖改建, 部分在建筑立面铺装木质结构、或者建筑二层保留木结构, 以达到建筑风貌保护目的, 如下图 1(a), 围护结构相关热工特性见表 1.

贵州地扞侗寨春夏季室外处于高湿状态, 在贵州地扞侗寨风环境的实测及其分析中指出<sup>[10]</sup>: 地扞侗寨夏季室外最高温不高, 整体湿度较大. 在当地

走访调查中, 当地居民反映砖房在白天比较凉快, 但是比较潮湿, 特别在梅雨季节, 墙体表面发霉现象比较严重, 在调查中发现, 居民并没有开窗习惯.



图 1(a) 改造建筑外貌 (后文标记为 1#)  
Fig.1(a) renovation building's appearance (marked 1#)



图 1(b) 传统建筑外貌 (后文标记为 2#)  
Fig. 1(b) traditional building's appearance (marked 2#)

改建后 1 号砖木房围护结构传统木房 2 号房围护结构一层外墙: 红砖, 厚度约 180 mm, 一层外墙: 木板, 厚度约 20 mm, 内外表面均有 20 mm 抹灰; 二层外墙: 木板, 厚度约 20 mm 二层外墙: 木板, 厚度约 20 mm.

表 1 墙体材料及其热工性能<sup>[11]</sup>

Tab.1 Materials and thermal performance of the wall<sup>[11]</sup>

材料	厚度 $\delta/\text{mm}$	蓄热系数 $S/W(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	材料热阻 $R/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$	导热系数 $\lambda/\text{W}(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	热惰性 指标 D	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	比热容 $c/(\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$
杉木	20	0.29	0.04	5.55	0.01	500	2.51
石灰砂浆	20	8.9	0.02	0.93	0.18	1 600	0.84
砖墙	180	9.66	0.22	0.81	2.13	1 800	0.88

注: 多层围护结构热惰性指标  $D = D_1 + D_2 + \dots + D_n = R_1S_1 + R_2S_2 + \dots + R_nS_n$ , 故砖墙的热惰性指标  $D = 2.13 + 0.18 + 0.18 = 2.49$

1.2 室内环境监测方案

选取当地比较典型的两栋相邻建筑(见图 1)作为监测对象, 两栋建筑均是南北朝向, 室内一层及二层布局及功能特点也类似. 1 号房是改建后建筑, 一层采用砖结构, 外墙表面再贴以木板装饰, 二层和三层采用木结构. 2 号房是传统的全木结构, 属于典型的传统民居. 作者在 2014 年 7 月 17-19 日连续三天典型夏季工况(17、18 日有阵雨, 19 日全晴天)下对室内常用空间的温湿度和壁面温度进行采样, 布点方案见下图 2, 采用的仪器见表 1.

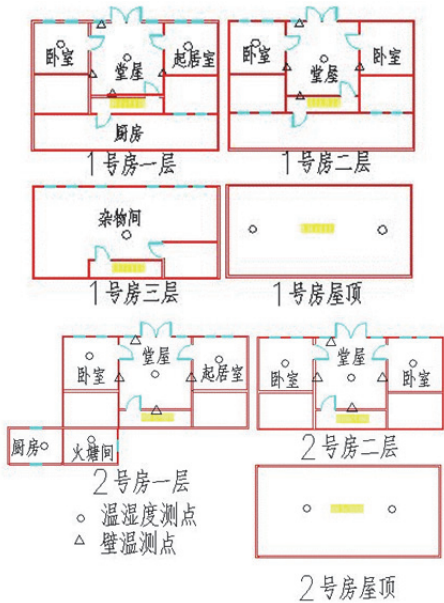


图 2 室内参数采样点布置示意图  
Fig.2 The location of indoor monitoring points

考虑到两类建筑不同层高及厨房的改造对室内热环境的影响, 同时对改造后建筑三层杂物间及两类建筑厨房、楼梯间、屋顶进行温湿度测量, 测量结果表示改造后建筑三层的室内温湿度与屋顶内温湿度相差不大, 且两类建筑相邻, 两类屋顶内温湿度差异不大; 改造后建筑厨房处于半开放状态, 基本处于外界环境之下, 可以认为两类建筑一层及二层大堂及卧室处于相同的边界条件下, 研究不同围护结构对室内热湿环境的影响. 数据检测的相关仪器精度如表 2.

表 2 检测所需仪表及其精度范围

Tab.2 The scope and precision of the detectors

检测项目	仪器 仪表	最小分度 值或精度	采样	
			方式	间隔/min
室内温湿度	HOBO 自动记录仪	$\pm 0.2^\circ\text{C}/\pm 1.8\%$ RH+0.7%测量值	自动	5
壁面温度	天建华仪	$\pm 0.5^\circ\text{C}$	自动	5

2 实测分析

2.1 传统民居及改造后民居室内温湿度对比

经数据筛选, 两栋建筑室内温湿度差异性主要体现在一层房间, 选取一层大堂及卧室进行对比分析, 由图 3 得, 改建后一层大堂室内日间气温低于传统民居室内气温, 夜间温度基本重合, 均高于室外温度  $2^\circ\text{C}$  左右, 而室内湿度高于传统民居一层大堂室内湿度, 日间更为明显; 一层卧室对比中也能发现类似规律, 但改造后建筑室内湿度全天较传统民居室内湿度高 10% 左右. 阵雨期间的温度对比中

可以看出,砖房室内温度波动较小,雨后温升较小。

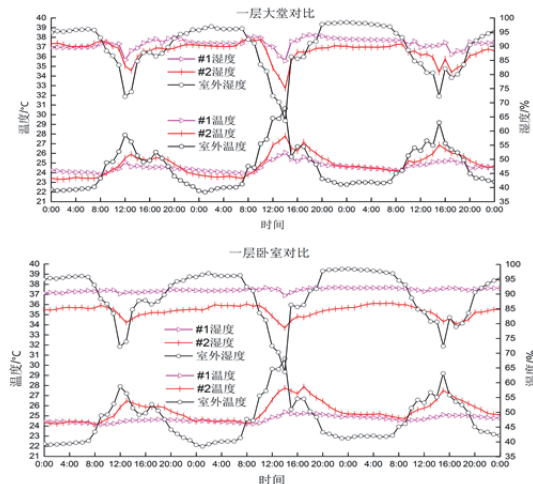


图3 改造建筑与传统建筑室内温湿度对比

Fig.3 temperature and humidity contrast between renovation and traditional building

经走访调查,居民白天一般上山务农,处于室内时间一般为夜间,经问卷统计,夜间时间段,居民没有开窗习惯.选取时间段 19:00-7:00 对两类建筑一层大堂室内外温湿度进行数理统计,计算结果如图 4、5 所示。

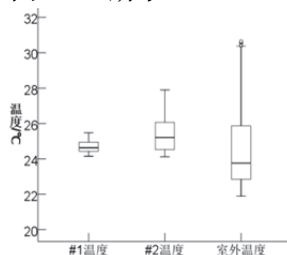


图4 温度箱图对比

Fig.4 boxplots comparison of the temperature

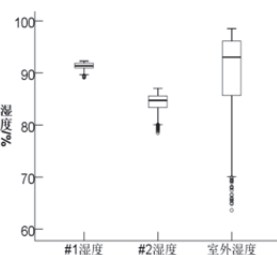


图5 湿度箱图对比

Fig.5 boxplots comparison of the humidity

由温度箱图显示,改造建筑及传统建筑夜间平均温度均高于室外平均温度,比较两者的离散程度可知,改造后砖墙结构室内温度波动较小,这是由两类材料的热工特性所决定的;同时对比湿度箱图,两类建筑室内湿度均低于室外湿度,而改造后建筑室内湿度大于传统民居室内湿度,通过估算室内通风换气次数<sup>[12]</sup>,在相同开门窗情况下砖墙结构室内换气次数明显低于木墙结构室内换气次数,实测表明砖墙能很好改善建筑的气密性能,然而在地扞洞寨高湿环境下,反而会影响室内自然通风,引起湿量集聚。

## 2.2 改造建筑与传统建筑墙体内部结露风险

通过实测研究,改造后建筑室内温度波动较小,但室内湿度过高,砖墙结构的房间在夜间室内高热高湿的条件之下,当墙体内壁面温度低于室内露点温度时,容易结露。在测量室内空气温湿度的情况下,可计算得出室内空气露点温度<sup>[13]</sup>

$$t_d = b / [a / \log_{10}(e / 6.11) - 1]$$

其中:  $e = f \times E_s$ ,  $E_s = E_0 \times 10(a \times t) / (b + t)$ ,  $t_d$  为露点温度(°C),  $e$  为空气的水蒸汽压(hpa),  $a, b$  对于水面( $t \geq 0$  °C)分别取值 7.5、237.3,  $f$  为空气相对湿度(%),  $E_s$  为空气饱和水蒸汽压(hpa),  $E_0$  为空气温度为 0°C 时的饱和水蒸汽压,取值为 6.11 hpa,  $t$  为空气温度(°C)。结合实测数据对两类建筑一层大堂进行结露风险分析。

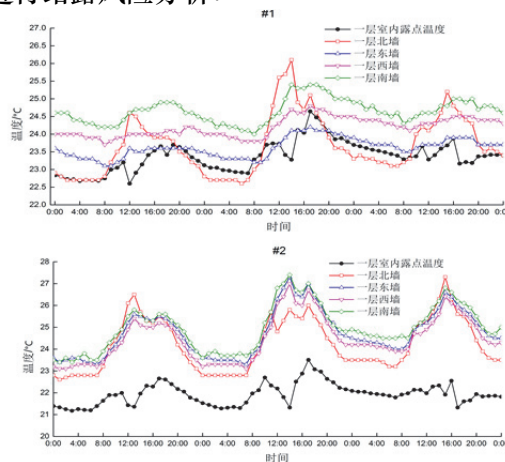


图6 一层大堂墙体内部壁面温度及室内露点温度

Fig.6 temperature of internal surface and the dew point temperature of indoor air in the first central room

结合图 6 可以得出,改造建筑(1#)一层堂屋北墙及东墙内壁面均有结露风险,但出现时间段不同,北外墙结露时间段在夜间,这是由于北外墙受室外影响较大,内表面温度最低,而东内墙结露时间段在日间暴雨期过后,当室外温度急剧降低再上升,砖墙的热惰性使内墙表面对温度响应时间较长,内壁面温度相比室内温度升高速率而言较慢,砖墙的气密性使室内湿度过高,空气露点温度也随之升高,导致东墙内壁面温度低于室内露点温度,有结露风险;经计算结合图 6 可知,传统民居(2#)一层堂屋墙体各壁面温度均高于室内空气露点温度,没有结露风险。

## 2.3 通风对于内壁面结露及夜间过热问题改善

在已经空气温湿度及当地大气压的情况下,可求解出空气的含湿量<sup>[14]</sup>

$$d = \phi p_{q,b} / p_{a-\phi p_{q,b}}$$

其中:  $\phi$  为空气相对湿度,  $p_{q,b}$  为此温度下的饱和水蒸汽压力,  $p_a$  为当地大气压力. 对改造后建筑一层大堂室内外空气含湿量及温度作对比分析:

由图 7 可知,夜间室外温度及含湿量均小于室内空气,将室外空气与室内空气直接进行混合,将实现图 8 中 1 号过程线的空气变化,室内空气状态 A 与室内空气状态 B 混合,此时低温含湿量低的室外空气能将室内空气降温除湿到状态 C,并降低露点温度(由  $t_d$  降到  $t_c$ ),在改善室内热环境的同时,



也缓解了内壁面结露的风险。

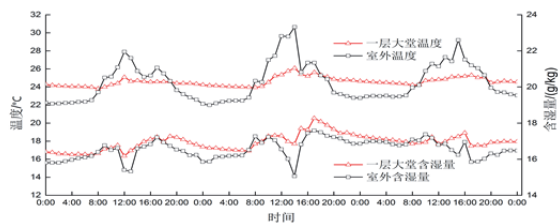


图7 一层大堂室内空气及室外空气温度、含湿量对比  
Fig.7 comparison of moisture content between indoor air and outdoor air in the first central room

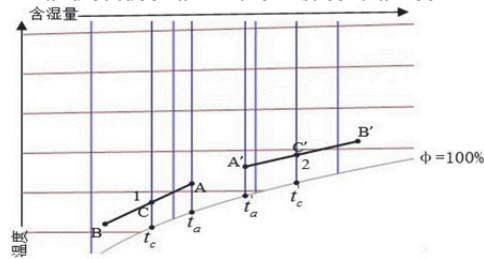


图8 室内外空气混合过程焓湿图

Fig.8 Enthalpy-humidity chart of mixing between outdoor air and indoor air

在雨后晴天, 室外空气湿度增加同时温度增加, 此时与室内温度较低含湿量较小的室内空气混合, 将实现2号过程线的空气变化, 室内空气状态A'与室外状态B'混合, 此时室内空气C'温度升高, 同时露点温度升高(由 $t'_{da}$ 升到 $t'_{dc}$ ), 而砖墙内表面温升较慢, 使得内壁面温度易低于室内空气露点温度, 这时候利用自然通风, 不仅加剧了室内空气品质的恶化, 同时会加剧墙体内部表面结露。

### 3 结论

(1) 就热工特性而言, 由表1得出改造后建筑180 mm厚砖墙结构热惰性指标为2.49, 而20 mm木墙热惰性指标为0.01, 改造后砖墙结构对室外热量扰动的抵抗能力较强, 而较高的材料密度, 增加了建筑气密性, 使室内通风条件变差, 室内湿量集聚不能通过自然风带走, 因此改造后建筑呈现室内日间温度较木房低, 全天湿度较木房要高特点。

(2) 居民处于室内时间段一般为夜间, 改造后建筑并没有改善传统木房夜间过热问题, 反而室内平均湿度比木房要大, 恶化了室内夜间空气品质。

(3) 在典型夏季情况下, 砖房内壁面有结露风险, 传统木房则没有。砖房外墙内壁面在夜间容易产生结露现象, 可以利用室外通风进行缓解, 并解决室内过热问题; 雨后晴天内墙内壁面容易产生结露, 此时通风并不能改善结露现象, 需要通过其他手段进行调节。

### 参考文献 References

[1] AL-ARABI Sabri Emara, MAHMOUD Sayed Korany. An analytical study of building materials and deteriora-

tion factors of farasan heritage houses, and the recommendations of conservation and rehabilitation (german house case study)[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences 2016,216: 561-569.

- [2] MERAL Halifeoğlu, GÖKC E Gökc, A. Restoration and refuction problems of Diyarbakır traditional houses[J]. Journal of Cultural Heritage 2013,145:534-537
- [3] BERRAK Kirbas, NESLINUR Hizh. Learning from vernacular architecture: Ecological solutions in traditional erzurum houses[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences 2016, 216: 788-799.
- [4] 潘曦. 纳西族乡土建筑建造范式研究[D]. 北京: 清华大学.2014
- PAN Xi. Research on the Building paradigm of Naxi Vernacular architecture[D].Beijing: Tsinghua University, 2014
- [5] JOSÉ A. Orosa, ARMANDO C. Oliveira. A field study on building inertia and its effects on indoor thermal environment[J]. Renewable Energy, 2012,37: 89-96.
- [6] IGNACIO Requena Ruizn. Thermal comfort in twentieth-century architectural heritage: Two houses of le corbusier and andré wogenscky[J]. Building and Environment, 2008,43: 2154-2162.
- [7] 林波荣. 皖南民居夏季热环境实测分析.[J]清华大学学报(自然科学版),2002,42(8):1071-1074.
- LIN Borong. Field study of thermal environment in Wannan traditional residential buildings in the summer. [J].Tsinghua University (Sci & Tech),2002,42(8):1071-1074.
- [8] 张继良. 传统民居建筑热过程研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学,2006.
- ZHANG Jiliang. Study on thermal process of traditional dwellings[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2006.
- [9] FRANCK Lucas, LAETITIA Adelard, FRANC,ois Garde, et al. Study of moisture in buildings for hot humid climates[J]. Energy and Buildings 2002,34: 345-355.
- [10] 李峥嵘, 吴少丹, 赵群. 贵州地扞侗寨室外风环境实测研究及评价[J]. 建筑热能通风空调,2015,34(4):27-30.
- LI Zhengrong, WU Shaodan, ZHAO Qun. Field measurement and analysis of outdoor wind environment in Dimen Dong Nationality in Guizhou[J]. Building Energy & Environment, 2015,34(4):27-30.
- [11] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 第三版. 北京: 高等教育出版社,1998.
- YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer science[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 1998.
- [12] 齐美薇, 李晓峰, 黄河. 示踪气体法利用人体作为 CO<sub>2</sub> 释放源测量宿舍换气次数的方法探究[J]. 建筑科学.2013,29(6): 52-57.
- QI Meiwei, LI Xiaofeng, HUANG He. Discussion on Measuring Ventilation Rates of Dorms through Tracer Gas Method with Human Body as CO<sub>2</sub> Release Source[J]. Building Science,2013,29(6): 52-57.
- [13] ASHRAE. Fundamentals handbook[M]. Atlanta: Tullie Circle, Ashrae Inc., GA 30329, 1991.
- [14] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 第二版. 北京: 中国建筑工业出版社.2007.
- LU Yaoqing. Practical heating air conditioning design manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Building Industry Press.2007.

(编辑 吴海西)