

文章编号:1007-9629(2014)06-1092-04

# 历史建筑中传统青砖等温吸湿性能比较研究

李永辉<sup>1,2</sup>, 谢华荣<sup>1,2</sup>, 王建国<sup>1,2</sup>, 石邢<sup>1,2</sup>

(1. 东南大学建筑学院, 江苏南京 210096; 2. 东南大学城市与建筑遗产保护教育部重点实验室, 江苏南京 210096)

**摘要:** 太原与福州两地历史建筑中青砖的劣化程度表现出较大的差异性. 为了研究青砖自身吸湿性能对这种劣化差异现象的影响, 依据 GB/T 20312—2006/ISO 12571:2000《建筑材料及制品的湿热性能吸湿性能的测定》, 在恒温条件下配制了不同种类的饱和盐溶液并控制其相对湿度, 测试了太原与福州地区历史建筑中青砖的等温吸湿曲线, 比较了两地青砖等温吸湿性能的差异性. 结果表明: 环境相对湿度为 7%~92% 时, 太原地区青砖的平衡含水率为 0.002 9~0.029 1 kg/kg, 而福州地区青砖仅为 0.001 3~0.002 4 kg/kg; 当环境湿度在较高状态下波动时, 太原地区青砖的进出水分量是福州地区青砖进出水分量的 6~12 倍. 可以说, 太原地区青砖较大的吸湿特性是加速其性能劣化的“催化剂”, 是该地区青砖劣化程度大于福州地区青砖劣化程度的重要原因之一.

**关键词:** 建筑技术; 历史建筑; 劣化; 等温吸湿曲线; 太原; 福州

中图分类号: TU111

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2014.06.027

## Comparative Study of Isothermal Sorption Properties of Traditional Blue Bricks in Historic Building

LI Yonghui<sup>1,2</sup>, XIE Huarong<sup>1,2</sup>, WANG Jianguo<sup>1,2</sup>, SHI Xing<sup>1,2</sup>

(1. School of Architecture, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Key Laboratory of Urban and Architectural Heritage Conservation of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** There is a significant difference between the degree of degradation of blue bricks in historic building of Taiyuan and that of Fuzhou. In order to study the effect of sorption properties of blue bricks on this difference, an experiment based on the national standard (GB/T 20312—2006/ISO 12571:2000) to test the isothermal sorption properties of the blue bricks in historic building of Taiyuan and Fuzhou with a view to comparing the difference between them was designed. The results indicate that, with the relative humidity ranging from 7%–92%, the equilibrium moisture contents of the blue bricks in Taiyuan are between 0.002 9–0.029 1 kg/kg, while those in Fuzhou are only between 0.001 3–0.002 4 kg/kg. When relative humidity varies in a higher region, the hygroscopic moisture content of blue bricks in Taiyuan is 6–12 times more than that of the blue bricks in Fuzhou. It suggests that the blue bricks in Taiyuan have greater hygroscopicity than those in Fuzhou, and therefore are easier to be influenced by the humidity of environment. The higher water sorption content of blue bricks in Taiyuan is liable to deteriorating, which is one of the causes that lead to higher degree of degradation of blue bricks in Taiyuan than that in Fuzhou.

**Key words:** building technology; historic building; degradation; isothermal sorption curve; Taiyuan; Fuzhou

收稿日期:2013-10-10; 修订日期:2013-11-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51108072);国家自然科学基金重点资助项目(51138002)

第一作者:李永辉(1981—),男,河南洛阳人,东南大学讲师,博士. E-mail:liyonghui@seu.edu.cn

历史建筑中的青砖在使用过程中会受到周围环境的物理、化学、生物侵蚀作用。由于砖材的孔隙尺寸较大,矿物颗粒较小,这些结构特点使砖材容易受水及水中可溶盐的侵袭而风化,在环境湿度波动下砖材内部水分波动量是影响砖材劣化的重要内因。等温吸湿曲线是在等温条件下,根据不同空气相对湿度所测得的材料平衡含水率绘制而成,是衡量材料在自然环境中自身水分变化强弱的基础特性之一,是表征材料等温吸湿性能的参数。青砖的等温吸湿曲线是对其进行性能退化机理研究的重要基础参数之一。但国外有关砖材劣化的相关研究<sup>[1-3]</sup>几乎不涉及中国传统的青砖,而国内研究<sup>[4-7]</sup>则注重历史建筑砖材的劣化成因分析,缺少对历史建筑中青砖的针对性试验研究。

本文通过对中国太原古城和福州三坊七巷历史建筑的现场调研,发现太原地区历史建筑中的下部青砖存在较为严重的风化及粉化、盐析和剥落等现象(见图1),而福州地区三坊七巷的历史青砖基本上保持了原有的形态,性能退化现象不明显(见图2)。为了研究青砖自身吸湿性能对这种劣化差异现象的影响,本文对太原与福州两地历史建筑中青砖的等温吸湿曲线进行了测试,对比分析了其差异性和影响,以便为中国青砖构造历史建筑的热湿耦合分析及其性能退化机理研究提供基本数据支持。



图1 太原古城民居图

Fig. 1 Traditional residence in Taiyuan



图2 福州三坊七巷民居

Fig. 2 Traditional residence in Fuzhou

## 1 试验方案及试验过程

### 1.1 试验原理

青砖平衡含水率是指青砖在一定空气状态(温度、相对湿度)下最后达到的吸湿率或稳定含水率:

$$\mu = (m - m_0) / m_0 \quad (1)$$

式中: $\mu$ 为青砖的平衡含水率,kg/kg; $m, m_0$ 分别为吸湿后及干燥时的青砖质量,kg。

在等温条件下,使青砖在不同的湿度环境中达到平衡状态,然后测量出青砖在该湿度状态下的平衡含水率。此后,根据美国 Florida Solar Energy Centre(FSEC)建立的常用建筑材料平衡含水率曲线数据库采用的表达式<sup>[8]</sup>[式(2)]对试验结果进行拟合,得出等温吸湿曲线。

$$\mu = a\psi^b + c\psi^d \quad (2)$$

式中: $a, b, c, d$ 均为试验常数; $\psi$ 为环境相对湿度,%。

### 1.2 试验装置和材料

基本试验装置为真空干燥皿;MSE324S-000-DU光电式精密天平,精度0.1mg;RTR 53A温湿度记录仪,精度0.1℃/0.1%。在干燥皿中利用一合水氯化锂、氯化镁、硝酸镁、氯化钠和硝酸钾配置饱和盐溶液,分别营造出相对湿度为(7±1)%,(32±1)%,(52±1)%,(72±1)%,(92±1)%共5个环境[环境温度为(23±1)℃],具体实测数据见表1。

表1 不同饱和盐溶液及其对应的相对湿度

Table 1 Saturated salt solutions and corresponding relative humidity under (23±1)℃

LiCl·H <sub>2</sub> O	MgCl <sub>2</sub>	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	NaCl	KNO <sub>3</sub>	%
7±1	32±1	52±1	72±1	92±1	

所测青砖分别取自太原古城和福州三坊七巷的明清民居,两地青砖各取6块样砖。通过切割机在每块样砖上切出若干尺寸约为2cm×1cm×1cm的重约3~5g的小试块,再取其中3块小试块作为该样砖的测试样(总重约9~15g)。

### 1.3 试验过程

具体测试方法依照GB/T 20312—2006/ISO 12571:2000《建筑材料及制品的湿热性能吸湿性能的测定》,将试块先放在(105±5)℃的烘箱中烘至完全干燥(前后2次测量质量差小于0.1%,即认为达到完全干燥),用光电式精密天平称量其质量后置于干燥皿中的隔层之上,隔层上下空间通过小孔连通。试块在干燥皿内进行湿交换,直至达到吸湿平衡状态(前后2次测量质量差小于0.1%),然后用光电

天平称量其平衡质量. 由于温度、湿度都是水分迁移的驱动力, 为减小温度对平衡含水率的影响, 将干燥皿置于(23±1)℃的环境空间中, 环境温度通过自动控温空调机实现. 试验过程用温湿度记录仪对干燥皿和环境空间中的温、湿度进行监控.

## 2 试验结果

图 3(a)为太原地区 1~6 号青砖的等温吸湿曲线图. 由图 3(a)可以看出, 在相对湿度为 7%~92%时, 1~6 号青砖的吸湿量变化区间分别为 0.003 23~

0.015 90 kg/kg, 0.001 97~0.016 80 kg/kg, 0.004 65~0.061 67 kg/kg, 0.003 34~0.012 50 kg/kg, 0.002 25~0.033 10 kg/kg, 0.001 95~0.034 90 kg/kg. 图 3(b)为福州地区 1~6 号青砖的等温吸湿曲线图. 由图 3(b)可以看出, 在相对湿度为 7%~92%时, 1~6 号青砖的吸湿量变化区间分别为 0.001 72~0.003 55 kg/kg, 0.001 52~0.001 94 kg/kg, 0.001 24~0.001 98 kg/kg, 0.000 91~0.002 15 kg/kg, 0.001 22~0.002 77 kg/kg, 0.000 92~0.001 99 kg/kg. 两地青砖吸湿量随着环境相对湿度的增加呈指数增长趋势.

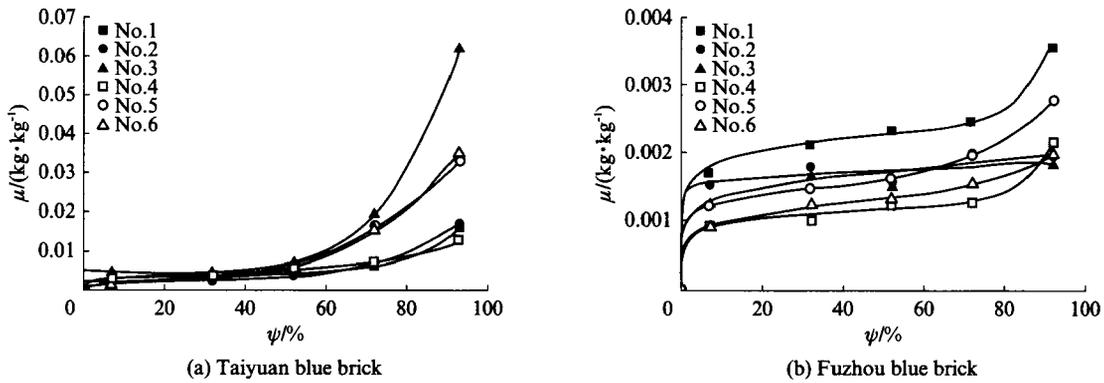


图 3 青砖等温吸湿曲线  
Fig. 3 Isothermal absorption curves of blue brick

基于青砖烧结过程所产生的内部孔隙结构不同, 同一地区的青砖在等温吸湿特性上表现出了较大的差异性. 太原地区各青砖试样的等温吸湿量差异性较大, 其中 1 号、2 号青砖与 4 号青砖相似, 5 号青砖与 6 号青砖相似, 而 3 号青砖的等温吸湿量在相对湿度为 92%时达到 4 号青砖的 4.94 倍以上, 1 号和 2 号青砖的 3.67 倍以上. 福州地区各青砖试样的差异性较小, 等温吸湿量最大的 1 号青砖在相对湿度为 92%时的等温吸湿量大约是等温吸湿量最小的 3 号青砖的 1.89 倍.

图 4 为太原地区与福州地区青砖试样等温吸湿曲线平均值的对比图. 从图 4 可以看出, 两地青砖的等温吸湿特性具有明显的差异性, 太原地区传统青砖在环境相对湿度变动时, 其平衡含水率的波动远大于福州地区传统青砖. 在相对湿度为 7%~92%的条件下, 太原地区青砖的平衡含水率平均值的变化范围为 0.002 9~0.029 1 kg/kg, 福州地区青砖的平衡含水率平均值的变化范围为 0.001 3~0.002 4 kg/kg. 当环境相对湿度在较高状态下波动时, 太原地区青砖的进出水分量是福州地区青砖进出水分量的 6~12 倍. 基于太原和福州地区历史建筑中随机抽取的 6 个试样试验数据的平均值, 本文给出了能代表太原地区与福州地区青砖等温吸湿曲线的拟合公式和相关系数.

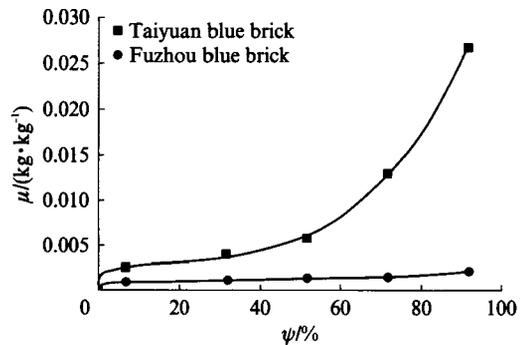


图 4 太原地区青砖与福州地区青砖等温吸湿曲线平均值比较  
Fig. 4 Comparison of average value for isothermal sorption curves between Taiyuan and Fuzhou blue bricks

太原地区:

$$\mu = 1.9572 \times 10^{-4} \psi^{0.0259} + 2.0757 \times 10^{-4} \psi^{0.0771}, \quad R^2 = 0.9999 \quad (3)$$

福州地区:

$$\mu = 0.0017 \psi^{0.1138} + 9.5763 \times 10^{-4} \psi^{4.7674}, \quad R^2 = 0.9979 \quad (4)$$

## 3 分析与讨论

砖构历史建筑的性能退化除了人为因素和结构因素以外, 主要受自然环境的影响. 在自然环境的影响下, 其性能退化现象有脱落、空鼓、泛霜风化(盐

析、粉化、风化)、变形、裂缝、微生物繁殖及局部力学性能衰减等。造成这些现象的原因是内因(自身特性)和外因(外界环境因素)共同作用的结果,其中内因包括孔隙结构及矿物组成造成的传热性能和吸湿特性等;外因主要有空气污染造成的酸雨、冻融循环以及雨水、地下水作用和微生物作用等。内外因共同作用下的历史建筑自身的水热运移波动是影响建筑遗产自身性能退化的核心要素。平衡含水率是指材料在一定空气状态(温度、相对湿度)下最后达到的稳定含水率,等温吸湿曲线的物理意义就是衡量了自然环境温湿度变化下青砖本体能进出水分量的多少。可以说,等温吸湿特性影响着砖构建筑遗产的冻融循环强度、风化强度与速度、可溶盐类泛霜以及微生物繁殖速度,直接关系到砖构建筑遗产性能退化的速度与强度。

造成太原地区青砖劣化现象比福州地区青砖严重的原因受多方面因素影响。太原地区与福州地区位于不同的气候区域,太原属于寒冷地区,福州属于夏热冬暖地区。太原年平均气温 $9.5^{\circ}\text{C}$ ,最冷月1,2月份,平均气温 $-6.6^{\circ}\text{C}$ ;最热月7,8月份,平均气温 $23.5^{\circ}\text{C}$ ;年平均相对湿度为 $53\%\sim 60\%$ 。福州年平均气温 $16\sim 20^{\circ}\text{C}$ ,最冷月1,2月份,平均气温达 $6\sim 10^{\circ}\text{C}$ ;最热月7,8月份,平均气温 $24\sim 29^{\circ}\text{C}$ ;年平均相对湿度约 $77\%$ 。从气候特征来看,太原地区存在明显的冻融循环现象,而福州地区则基本不出现冻融循环现象,这是太原地区青砖劣化严重的重要原因之一。从冻融循环的破坏强度上看,由两地区等温吸湿曲线的差异可以看出,在一定的温湿度环境下,太原青砖的稳定含水率是福州青砖的多倍以上,即意味着太原青砖因冻融循环所带来的膨胀破坏力也是福州青砖的多倍以上。另一方面,通过图4可以看出,当自然环境温湿度波动时,太原青砖的进出水分量是福州青砖进出水分量的 $6\sim 12$ 倍,即意味着当自然环境温湿度波动时,与水分运移相关的劣化现象(泛霜风化、膨胀裂缝、微生物污染等)对于太原青砖而言,其发展速度和强度将是福州青砖的多倍以上。太原地区青砖较大的吸湿特性是加速其性能劣化的“催化剂”。

历史建筑中青砖等温吸湿特性的强弱与砖材的矿物组成、微观结构、烧结温度及制造工艺等内因有关。另外,在传统青砖的服役时间里,持续的冻融循环将增多砖材内部微裂缝,砖材本身吸湿特性的“催化剂”作用也增强了砖材内部因化学反应所产生的空隙,以及因砖材表面内外温差所导致的内部裂缝。因此,从外因上看,历史建筑中太原青砖具有高的吸

湿特性的原因之一是太原青砖在当地气候环境下长期服役所造就的。在后续研究中,将结合青砖的矿物组成、微观结构以及服役环境等方面的数据,探明青砖吸湿特性差异性的深层原因,以获得对青砖更为全面的认识,为分析历史建筑的耐久性和劣化机制、热学性能提供更充分的依据。

## 4 结论

太原地区传统青砖的吸湿特性远大于福州地区传统青砖,当环境相对湿度在较高状态下波动时,太原青砖的进出水分量是福州青砖进出水分量的 $6\sim 12$ 倍。研究结果可以作为历史建筑青砖围护结构热湿传递的基础数据,将为历史建筑的保护分析及性能退化机理研究提供基本支持。

## 参考文献:

- [1] LARSEN E S, NIELSEN C B. Decay of bricks due to salt[J]. *Materials and Structures*, 1990, 23(1): 16-25.
- [2] KAROGLU M, MOROPOULOU A, MAROULIS Z B, et al. Water sorption isotherms of some building materials[J]. *Drying Technology*, 2005, 23(1/2): 289-303.
- [3] PAVLIK Z, ŽUMÁR J, MEDVED I, et al. Water vapor adsorption in porous building materials: Experimental measurement and theoretical analysis[J]. *Transport in Porous Media*, 2012, 91(3): 939-954.
- [4] 杨昌鸣, 成师. 近代历史建筑砖石外墙劣化成因与修复技术探索[J]. *建筑学报*, 2011(S1): 76-79.  
YANG Changming, CHENG Shuai. Exploration on deterioration causes and restoration technology about masonry exterior walls of modern historic buildings[J]. *Architectural Journal*, 2011(S1): 76-79. (in Chinese)
- [5] 冯楠. 潮湿环境下砖石类文物风化机理与保护方法研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2011.  
FENG Nan. Study on deterioration mechanism and the conservation of typical brick and stone cultural heritage in moisture circumstances[D]. Jilin: Jilin University, 2011. (in Chinese)
- [6] 谢振斌, 韦荃, 龙涛. 温湿度对水井坊遗址的影响[J]. *文物保护与考古科学*, 2005, 17(3): 46-49.  
XIE Zhenbin, WEI Quan, LONG Tao. The influence of environment temperature and humidity on the Shuijingfang site[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2005, 17(3): 46-49. (in Chinese)
- [7] 李魁山, 张旭, 韩星, 等. 建筑材料等温吸放湿曲线性能实验研究[J]. *建筑材料学报*, 2009, 12(1): 81-84.  
LI kuishan, ZHANG Xu, HAN Xing, et al. Experimental research of isothermal sorption curve of building materials[J]. *Journal of Building Materials*, 2009, 12(1): 81-84. (in Chinese)
- [8] TYE R P. Relevant moisture properties of building construction materials, manual on moisture control in buildings[M]. Philadelphia: America Society for Testing and Materials Publication, 1994: 35-53.

# 历史建筑中传统青砖等温吸湿性能比较研究



作者: [李永辉](#), [谢华荣](#), [王建国](#), [石邢](#), [LI Yonghui](#), [XIE Huarong](#), [WANG Jianguo](#), [SHI Xing](#)  
作者单位: [东南大学建筑学院, 江苏南京210096](#); [东南大学城市与建筑遗产保护教育部重点实验室, 江苏南京210096](#)  
刊名: [建筑材料学报](#)   
英文刊名: [Journal of Building Materials](#)  
年, 卷(期): 2014, 17(6)

引用本文格式: [李永辉](#). [谢华荣](#). [王建国](#). [石邢](#). [LI Yonghui](#). [XIE Huarong](#). [WANG Jianguo](#). [SHI Xing](#) [历史建筑中传统青砖等温吸湿性能比较研究](#)[期刊论文]-[建筑材料学报](#) 2014(6)