

doi:10.3969/j.issn.1001-0505.2014.02.038

# 苏州吴江近现代青砖等温吸湿性能实验研究

李永辉 谢华荣 王建国 李新建 吴锦绣

(东南大学城市与建筑遗产保护教育部重点实验室,南京 210096)

**摘要:** 根据恒温条件下饱和盐水溶液控制的恒定相对湿度,测试了苏州吴江地区近现代2种青砖的等温吸湿曲线.比较了不同样砖、不同年代青砖等温吸湿曲线的差异性,给出了平衡含湿量随相对湿度变化的拟合公式.结果表明:在7%~92%的相对湿度环境中,苏州清末青砖的平衡含湿量在2.84~27.65 g/kg之间,20世纪80年代青砖的平衡含湿量在1.45~10.14 g/kg之间,苏州清末青砖的吸湿量是苏州20世纪80年代青砖的3倍以上.得到的公式及数据可应用于历史建筑砖墙“酥碱”程度的量化确定,并为研究中国传统建筑性能劣化机理及砖构建筑热湿耦合分析提供了基础数据支撑.

**关键词:** 建筑物理;青砖;平衡含水率;等温吸湿曲线

**中图分类号:** TU111 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0505(2014)02-0441-04

## Experimental research on isothermal sorption properties of early modern and modern gray bricks in Wujiang, Suzhou, China

Li Yonghui Xie Huarong Wang Jianguo Li Xinjian Wu Jinxiu

(Key Laboratory of Urban and Architectural Heritage Conservation of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Based on constant relative humidity from the saturated salt-water solution under isothermal conditions, the isothermal sorption curves of early modern and modern bricks in Wujiang (Suzhou, China) are measured. The sorption property differences of various samples at different ages are compared, and their fitting formulae of the equilibrium moisture content of grey bricks changing with relative humidity are presented. The results indicate that, with the relative humidity ranging from 7% to 92%, the equilibrium moisture contents of the late Qing grey bricks are between 2.84 and 27.65 g/kg and those of the 1980s grey bricks are between 1.45 and 10.14 g/kg. The equilibrium moisture content of the late Qing grey bricks is about three times that of the 1980s grey bricks. The experimental data and formula can be applied to the quantitative analysis of the efflorescence of the historical brick wall, and provide basic data for the further study on the performance degradation mechanism of Chinese traditional architecture and the dynamical moisture characteristics of the building envelopes.

**Key words:** building physics; gray brick; equilibrium moisture content; isothermal sorption curve

青砖是中国历史建筑的重要组成部分.自然环境下青砖砌体中水分的变化状况可直接或间接地加速砖砌体的物理、化学和生物破坏作用,密切影响着砖砌体性能退化的发展.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湿量绘制而成,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.材料的等温吸湿特性不仅是量化研究砖砌体劣化机理的基础,也是研究并获得中国传统青砖历史建筑围护结构材料传热过程中有关特性参数、传递系数的基础.

目前国内学者对一些建筑材料进行过类似的实验研究.在国外, Moropoulou 等<sup>[1-2]</sup>研究了砖、石

**收稿日期:** 2013-08-29. **作者简介:** 李永辉(1981—),男,博士,讲师,liyonghui@seu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金重点资助项目(51138002)、国家自然科学基金资助项目(51108072,51208089)、教育部博士点新教师基金资助项目(20110092120003).

**引用本文:** 李永辉,谢华荣,王建国,等.苏州吴江近现代青砖等温吸湿性能实验研究[J].东南大学学报:自然科学版,2014,44(2):441-444.  
[doi:10.3969/j.issn.1001-0505.2014.02.038]

膏和石头等建筑材料的等温吸湿性能. Pavlík 等<sup>[3]</sup>对加气混凝土、轻质陶瓷砖和传统陶瓷砖、某新型相变材料及自主研发的石灰石膏的等温吸湿性能进行了研究. Lo'pez-Doncel 等<sup>[4]</sup>对墨西哥中部城市瓜纳华托劣化严重的历史建筑的典型材料进行了吸湿性能的实验研究. 欧洲的黏土砖在组成成分及烧结工艺上与中国传统青砖有较大差异,其数据无法代表中国传统建筑所用的青砖. 国内,裴清清等<sup>[5]</sup>、闫增峰等<sup>[6]</sup>及李魁山等<sup>[7]</sup>对水泥砂浆、石膏板、混凝土、夯土墙、黏土砖、生土砖及 EPS 保温材料等材料的等温吸湿特性进行了实验研究,对比了其等温吸湿曲线的区别. 但国内文献中没有对实验样砖的产地、年代及具体的种类进行详细说明,无法为传统历史建筑砖砌体劣化机理研究提供必要的的数据支持.

城市优秀近现代建筑一般是指从 19 世纪中期至 20 世纪 50 年代建设的,能够反映城市发展历史、具有较高历史文化价值的建筑物和构筑物. 目前,我国大量遗存的传统历史建筑多属于优秀的近现代建筑,其建筑中的青砖也以近现代的青砖为主. 本文将针对苏州吴江地区历史建筑,以清末民居的青砖(近代青砖)及 20 世纪 80 年代的青砖(现代青砖)为代表,主要研究苏州吴江地区近现代青砖的等温吸湿特性,对同批次不同时期、不同样品的吸湿特性差异性进行比较研究,为中国传统建筑热湿耦合分析与建筑遗产保护提供基本数据支持.

## 1 实验方法

### 1.1 实验原理

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,定义式如下:

$$\mu = \frac{m - m_0}{m_0} \quad (1)$$

式中, $\mu$  为材料的平衡含水率,kg/kg; $m$  为吸湿后的材料质量,kg; $m_0$  为干燥后的材料质量,kg.

在等温条件下利用不同的饱和盐溶液来创造不同的湿度环境,使青砖在不同环境中达到平衡状态,并测量出青砖在该湿度状态下的平衡含水率. 然后,根据美国 FSEC (Florida Solar Energy Centre) 建立的常用建筑材料平衡含湿量曲线数据库采用的表达式<sup>[8]</sup>对实验结果进行拟合,得出等温吸湿曲线. 该表达式如下:

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

式中, $a, b, c, d$  为实验常数; $\psi$  为相对湿度.

### 1.2 实验装置

基本实验装置为真空干燥皿(见图 1)、光电式精密天平(型号为 MSE324S-000-DU,精度为 0.1 mg)及温湿度记录仪(型号为 RTR 53A). 在干燥皿中利用不同的饱和盐溶液获得不同相对湿度的环境,并用温湿度记录仪对干燥皿中的温度、湿度进行

监控. 干燥皿内有一带孔的隔层,将被测试样置于隔层之上,隔层上下空间通过小孔连通. 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湿量的影响,将干燥皿置于温度为  $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$  的环境空间中,环境温度通过自动控温空调机实现.



图 1 实验用真空干燥皿及温湿度记录仪

### 1.3 实验过程

依照《建筑材料及制品的湿热性能:吸湿性能的测定》(GB/T 20312—2006),测出 2 种青砖在不同相对湿度环境下的样品的平衡含湿量. 为增强青砖试样的代表性,在苏州吴江有历史记载的 2 处历史建筑的不同位置上随机各取 6 块清末青砖和 20 世纪 80 年代青砖(砖的外观见图 2). 为消除同块砖两端在环境影响下老化所带来的等温吸湿性能差异,通过切割机在每块样砖的中心部位取出尺寸约为  $2\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 、质量约为  $3 \sim 5\text{ g}$  的 3 块小试块作为该块青砖的测试试样(合计质量约  $9 \sim 15\text{ g}$ ). 实验中代表清末青砖的试样有 6 组,分别编号为清末 1~6 号;代表 20 世纪 80 年代青砖的试样也有 6 组,分别编号为 80 年代 1~6 号. 将试样先放在  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$  的烘箱中烘干至完全干燥(前后 2 次测量质量差小于 0.1%,则认为达到完全干燥),用光电式精密天平称量质量后依次置于具有一定相对湿度的干燥皿中. 试块在干燥皿内进行湿交换,直到达到吸湿平衡状态(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. 5 个干燥皿中用一合水氯化锂、氯化镁、硝酸镁、氯化钠和硝酸钾配置饱和盐溶液,创造出相对湿度为  $(7 \pm 1)\%$ 、 $(32 \pm 1)\%$ 、 $(52 \pm 1)\%$ 、 $(72 \pm 1)\%$  和  $(92 \pm 1)\%$  的 5 个环境,具体实测相对湿度数据如

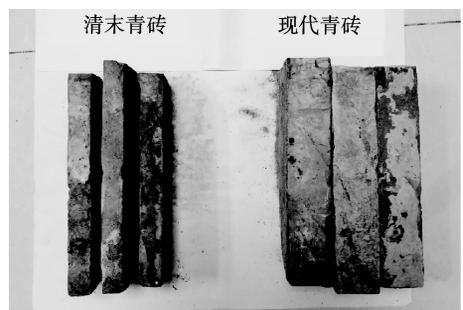


图 2 苏州吴江青砖实验试样

表 1 所示. 在配制盐溶液时溶剂使用蒸馏水,且干燥皿盖子密封处涂抹凡士林增强其密封性,确保干燥皿中相对湿度的准确性和稳定性.

表 1 在(23±1)℃环境下不同饱和盐溶液所对应的相对湿度

盐名称	分子式	实测相对湿度/%
一合水氯化锂	LiCl · H <sub>2</sub> O	7 ± 1
氯化镁	MgCl <sub>2</sub>	32 ± 1
硝酸镁	Mg (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	52 ± 1
氯化钠	NaCl	72 ± 1
硝酸钾	KNO <sub>3</sub>	92 ± 1

### 2 实验结果与讨论

图 3 为苏州吴江 20 世纪 80 年代 1~6 号青砖的等温吸湿曲线图. 由图 3 可看出,在相对湿度为 7%~92% 的范围内,1~6 号青砖的吸湿量变化区间分别为:0.97~4.95 g/kg,0.61~1.33 g/kg,2.19~18.65 g/kg,0.87~2.50 g/kg,1.37~6.39 g/kg,2.70~27.01 g/kg. 图 4 为苏州吴江清末 1~6 号青砖的等温吸湿曲线图. 由图 4 可看出,在相对湿度为 7%~92% 的范围内,1~6 号青砖的吸湿量变化区间分别为:7.68~55.27 g/kg,1.54~8.60 g/kg,0.94~8.36 g/kg,1.17~7.97 g/kg,3.46~63.50 g/kg,2.25~22.22 g/kg. 2 种青砖的吸湿量随着环境相对湿度的增加呈幂指数增长趋势.

通过对比图 3 和图 4 可看出:对于青砖的等温

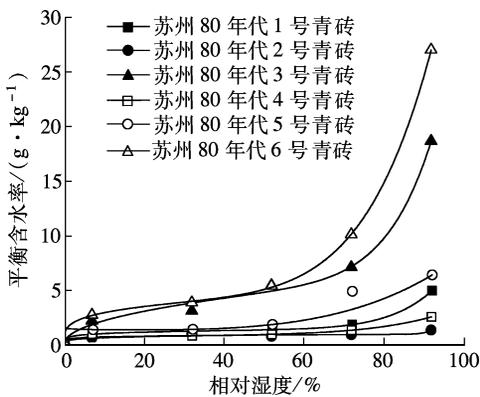


图 3 苏州吴江 20 世纪 80 年代青砖等温吸湿曲线

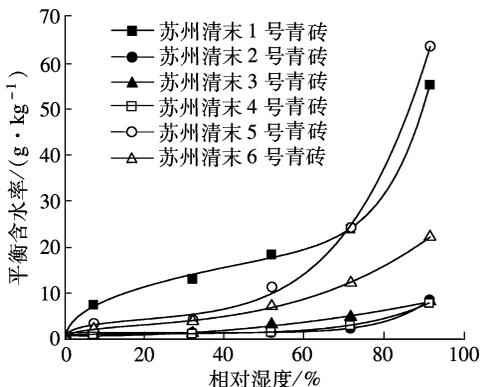


图 4 苏州吴江清末时期青砖等温吸湿曲线

吸湿量而言,20 世纪 80 年代 1 号、2 号、4 号与 5 号青砖之间差异性较小,3 号和 6 号青砖的吸湿量明显大于其他砖,其中 6 号青砖的吸湿量最大,在 92% 时的吸湿量达到吸湿量最小的 2 号青砖的 20.37 倍;清末时期的 2 号、3 号与 4 号青砖之间差异性较小,1 号、5 号与 6 号青砖的吸湿量大于其他号砖,其中 5 号青砖的吸湿量最大,在 92% 时的吸湿量是吸湿量最小的 4 号青砖的 7.97 倍. 从实验结果可看出,由于青砖烧结过程所产生的内部孔隙结构的不同,同地区同批次的青砖在等温吸湿特性上表现出了较大的差异性. 砖墙体因水分波动而产生性能劣化时,砖块个体之间的等温吸湿特性差异性将影响着砖墙体中同区域砖材劣化发生的起始位置和劣化程度.

图 5 为苏州 20 世纪 80 年代与清末时期青砖试样的等温吸湿曲线的平均值对比图. 在不同相对湿度下,清末青砖的平衡含湿量在 2.84~27.65 g/kg 之间,20 世纪 80 年代青砖的平衡含湿量在 1.45~10.14 g/kg 之间. 从图 5 可看出,在高的相对湿度环境下,清末时期青砖的平衡含湿量约为 20 世纪 80 年代青砖平衡含湿量的 3 倍以上,同地区不同时期的青砖等温吸湿特性存在明显的差异. 其原因可能是砖材在使用过程中受冻融循环、结晶膨胀及风化等劣化因素的影响<sup>[9-12]</sup>,在时间的作用下除了引起其自身力学强度的衰减外,对砖材自身的等温吸湿特性也造成了明显影响,年代久远的砖材具有更强的吸湿性.

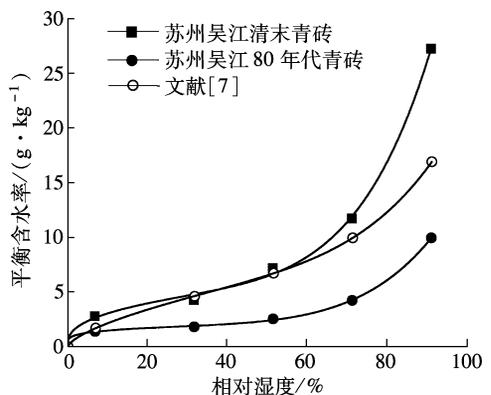


图 5 苏州吴江 20 世纪 80 年代青砖及清末青砖等温吸湿曲线平均值与文献[7]测试结果的比较

图 5 还对比了本次苏州吴江青砖实验数据和文献[7]中黏土砖的等温吸湿特性实验数据. 从图中可看出,文献[7]中黏土砖的数据与本实验中的苏州吴江清末青砖的等温吸湿曲线接近,但与本实验中 20 世纪 80 年代青砖有明显的差异,其数据约是 20 世纪 80 年代青砖平衡含湿量的 2 倍以上. 其原因是,砖质材料是用土制成土坯后经过人工高温烧制而得,烧制过程中因黏土原料、焙烧温度、制造工艺等因素的不同,将造成不同地区不同样砖之间

的等温吸湿特性的差异.因此,从我国传统建筑劣化机理研究及历史建筑节能改造利用上来看,建议今后的砖材等温吸湿实验应明确砖材的具体种类、产地及年代等信息来增强砖材实验数据的代表性和应用意义.

另外,本文基于苏州吴江地区历史建筑中随机抽取的20世纪80年代与清末时期的每组6个试样的实验数据平均值,给出了苏州20世纪80年代与清末时期的青砖等温吸湿曲线的拟合公式和相关系数,如表2所示.

表2 实验样砖的等温吸湿曲线拟合

青砖	拟合关系式	相关系数 $R^2$
20世纪80年代	$\mu = 0.0025\psi^{0.2038} + 0.0120\psi^{5.3323}$	0.9992
清末	$\mu = 0.0074\psi^{0.3836} + 0.0319\psi^{5.3144}$	0.9967

### 3 结语

砖材在环境中平衡含水量的多少将影响砖材的冻融循环强度、风化速度、“酥碱”程度以及微生物繁殖速度等砖材劣化主因,即砖材的等温吸湿特性影响着砖砌体劣化的速度与强度.本文比较了苏州吴江地区以清末及20世纪80年代青砖为代表的近现代青砖的等温吸湿性能,提出了苏州吴江地区20世纪80年代青砖及清末青砖的等温吸湿曲线拟合公式.实验结果表明,同时期不同样砖之间等温吸湿性能存在明显差异,不同时期的样砖之间也存在明显的差异,在同等环境湿度下苏州清末青砖的吸湿量是苏州20世纪80年代青砖的3倍以上,青砖在时间作用下将具有更大的吸湿量.

本文通过实验研究得出的量化数据和曲线,可应用到历史建筑砖墙酥碱程度的量化确定,以便在实际的保护维修过程中,更准确地确定砖砌体的酥碱程度.另外,本文总结的公式及数据为研究中国传统建筑性能劣化机理及砖构建筑热湿耦合分析提供了基础数据支撑.

### 参考文献 (References)

- [1] Karoglou M, Moropoulou A, Maroulis Z B, et al. Water sorption isotherms of some building materials[J]. *Drying Technology*, 2005, **23**(1/2): 289-303.
- [2] Moropoulou A, Karoglou M, Giakoumaki A, et al. Drying kinetics of some building materials[J]. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2005, **22**(2): 203-208.
- [3] Pavlík Z, Žumár J, Medved I, et al. Water vapor adsorption in porous building materials: experimental measurement and theoretical analysis[J]. *Transp Porous Med*, 2012, **91**(3): 939-954.
- [4] Lo'pez-Doncel R, Wedekind W, Dohrmann R, et al. Moisture expansion associated to secondary porosity: an example of the Loseros Tuff of Guanajuato, Mexico

- [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, **69**(4): 1189-1201.
- [5] 裴清清,陈在康.几种常用建材的等温吸放湿曲线试验研究[J].*湖南大学学报:自然科学版*,1999,26(4): 96-99.  
Pei Qingqing, Chen Zaikang. An experimental study on isothermal moisture absorption and desorption processes of some common-used building materials[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences Edition*, 1999, **26**(4): 96-99. (in Chinese)
- [6] 闫增峰,刘加平,王润山.生土围护结构的等温吸湿性能的实验研究[J].*西安建筑科技大学学报:自然科学版*,2003,35(4):347-350.  
Yan Zengfeng, Liu Jiaping, Wang Runshan. Experimental study of moisture absorption isotherms of adobe building materials[J]. *Journal of Xi'an University of Architect and Technology: Natural Science Edition*, 2003, **35**(4): 347-350. (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, PA, USA: America Society for Testing and Materials Publication, 1994: 35-53.
- [9] 韩兵康,张丽卿,李春祥.砖木结构类保护性建筑的灾害分析与防治对策[J].*自然灾害学报*,2004,13(6): 105-111.  
Han Bingkang, Zhang Liqing, Li Chunxiang. Disaster analysis and control countermeasures of brick-wood structure type protective buildings[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2004, **13**(6): 105-111. (in Chinese)
- [10] Larbi J A. Microscopy applied to the diagnosis of the deterioration of brick masonry[J]. *Construction and Building Materials*, 2004, **18**(5): 299-307.
- [11] 和玲,甄刚,周伟强.大雁塔和法门寺砖材保护研究[J].*文物保护和考古科学*,2004,16(3):33-39.  
He Ling, Zhen Gang, Zhou Weiqiang. The deterioration and consolidation of Dayan Pagoda and Famen Temple[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2004, **16**(3): 33-39. (in Chinese)
- [12] 杨昌鸣,成帅.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)