

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.01.005



多孔烧结陶片吸水特性实验方法

潘振皓, 张磊, 孟庆林, 李琼, 任鹏

(华南理工大学 建筑学院, 广州 510641)

摘要:建筑被动蒸发降温效益以多孔材料吸水特性为基础。以广泛应用的多孔烧结陶片为例, 相关参数测试方法标准并不一致。笔者参考国际标准采用“单面浸泡法”测试了3种多孔陶片的毛细吸水系数及毛细饱和含水率, 实验结果表明, 在第1吸水阶段, 材料孔隙率与毛细吸水系数及毛细饱和含水率呈现显著正相关关系。参考中国标准, 采用“整体浸泡法”和“真空饱和法”测试了上述3种材料在水中浸泡24 h后的含水率, 并与“单面浸泡法”测试结果进行了对比研究, 结果显示, 后者实验结果分别比前两者低3.25%和21.58%。研究表明, 第1阶段吸水速率高的材料具有更高毛细饱和含水率, 此种陶片更适宜蒸发降温应用。测试方法上单面浸泡法优于整体浸泡法。采用重复性误差衡量实验精确度, 分析结果表明上述实验的重复性误差均低于2.40%。

关键词:多孔材料; 毛细吸水; 开放孔隙率; 含水率; 实验分析

中图分类号: TU111.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)01-0026-06

Experimental methods for water absorption characteristics of porous firing clay tiles

Pan Zhenhao, Zhang Lei, Meng Qinglin, Li Qiong, Renpeng

(1. School of Architecture, South China University of Technology, Guangzhou 510641, P. R. China)

Abstract: Efficiency of building passive cooling is based on the water absorption characteristics. Illustrated by the example of porous firing clay tiles, test methods are different between national and international standards. Capillary water absorption coefficients and capillary saturated water contents of three kinds of porous face tile are measured through partial immersion method referred to the international standard. The results show that both porosity/capillary absorption coefficient and porosity/capillary saturated water content have a linear positive correlation. Water contents after 24 hours absorption are measured through integral immersion method referred to the national standard, and vacuum saturation method. The results are compared to those obtained through partial immersion. It is showed that the results of partial immersion

收稿日期: 2016-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(51590912, 51308223, 51678243, 51308222); 广东省自然科学基金(2016A030313506); 亚热带建筑科学国家重点实验室自主课题(2015ZC14)

作者简介: 潘振皓(1986-), 男, 博士生, 主要从事多孔材料被动蒸发降温研究, (E-mail) pangent@foxmail.com。

张磊(通信作者), 男, 副研究员, 硕士生导师, (E-mail) 86599680@qq.cn。

Received: 2016-09-02

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51590912, 51308223, 51678243, 51308222); Guangdong Natural Science Foundation (No. 2016A030313506); State Key Laboratory of Subtropical Building Science Independent Subject (No. 2015ZC14)

Author brief: Pan Zhenhao (1986-), PhD candidate, main research interest: passive evaporation cooling of porous material, (E-mail) pangent@foxmail.com.

Zhang Lei (corresponding author), associate researcher, master supervisor, (E-mail) 86599680@qq.cn.

is less than the results of integral immersion by 3.25%, and less than the results of vacuum saturation by 21.58%. The result shows that higher capillary water absorption coefficients means higher capillary saturated water contents. The corresponding kind of tile is more suitable for passive cooling. For the test method, partial immersion is more appropriate than integral immersion. Repeatability errors of all the tests are under 2.40%, showing high precisions.

Keywords: porous material; capillary water absorption; open porosity; water content; experimental analysis

多孔烧结陶片铺贴于建筑外墙外表面,吸水后经被动蒸发可实现对围护结构降温效果^[1-2],其吸水特性是决定蒸发量的关键参数。中国南方地区夏季高温多雨,利用被动蒸发降低建筑能耗具有优势^[3]。多孔陶片的孔隙率、毛细吸水系数、含水量等物性,是吸水蒸发研究的基础参数^[4-7]。单面浸泡吸水实验方法(简称“单面浸泡法”)、整体浸泡吸水实验方法(简称“整体浸泡法”),以及真空饱和吸水实验方法(简称“真空饱和法”)是测定上述参数的常用实验方法^[8]。细、微观尺度研究采用伽马射线、中子吸收及核磁共振等方法实验成本高,操作复杂且不适合大量实验,因此并未使用^[9]。单面浸泡法可使材料处于近似一维吸水过程,吸水通量 Δm_t (单位: kg/m^2) 与时间二次方根($t^{0.5}$)成线性关系^[10]。材料一维吸水呈现显著两阶段特性:第 1 阶段,水分由吸水面穿过材料孔隙向多孔陶片另一面渗透,即毛细吸水阶段。此阶段 $\Delta m_t - t^{1/2}$ 线性拟合斜率即为毛细吸水系数(A_w)。材料接近毛细饱和和含水量(ω_{cap})时吸水速率显著降低,向第 2 阶段过度。该阶段吸水速率缓慢且稳定^[11]。吸水性研究可参考文献多为吸水性相对较低材料如天然石材或混凝土等^[12-13]。单面浸泡实验方法载于国际标准 ISO 15148: 2002(E) 和欧洲标准 EN 1925 (CEN 1999a)^[9,14]。整体浸泡法系将材料整体浸入液体中,并对吸水后材料湿重进行称量并计算相关参数的方法。整体浸泡使吸水面积提高,吸水速率高于单面浸泡法。为试件检测常用方法,操作简单。可获取试件吸水 24 h 含水率($W_{24\text{GB}}$)、沸腾饱和含水率等参数。整体浸泡实验方法载于中国国家标准 GB/T 2542—2012 和 GB 13545—2003^[15]。真空饱和法可获取材料开放孔隙率及表观密度。真空饱和和含水率参数可对比单面浸泡法和整体浸泡法,显示其 24 h 吸水含水率水平。实验方法载于欧洲标准 EN 1936 (CEN 1999b) 和美国标准 ASTM C 1699—09^[16-17]。

一方面,目前,中国缺乏针对建材吸水特性的数据库;另一方面,针对建筑材料吸水特性的实验标准多为整体浸泡法,而更接近外贴面砖实际吸水

过程的单面浸泡法则只能参考国际标准。因此,需要准确、简便的实验方法,以进一步对广泛的建材进行测定。本文将对比单面浸泡与整体浸泡两种实验方法,并辅以真空饱和法,探讨多孔陶片吸水特性实验方法,对 3 种常用多孔陶片吸水特性进行测定。

1 研究方法

1.1 研究对象

选用 3 种常见粘土多孔陶片: N1 (孔隙率: 34.07%, 图 1)、N2 (孔隙率: 35.39%, 图 2) 及 A1 (孔隙率: 24.09%, 图 3)。通过电子显微镜观察,材料孔隙直径均在 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 以上,属于大孔材料。其它主要仪器有: 电子天平 (SHIMADZU UX4200H 型), 最大量程 4.2 kg, 分度值: 0.01 g; 旋片真空泵 (广东佛泵真空设备有限公司 2X-8 型), 抽速 8 L/s; 以及自制吸水装置等。

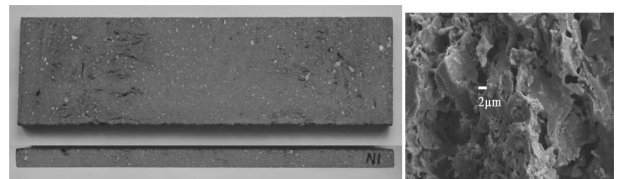


图 1 N1 试件及电镜照片

Fig. 1 Sample N1 and electron-microscope photo

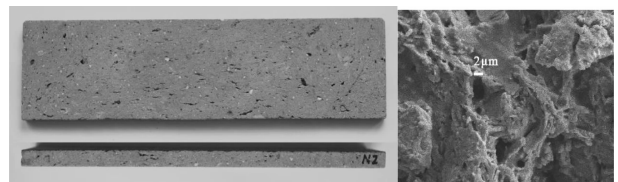


图 2 N2 试件及电镜照片

Fig. 2 Sample N2 and electron-microscope photo



图 3 A1 试件及电镜照片

Fig. 3 Sample A1 and electron-microscope photo

1.2 单面浸泡法

参考国际标准 ISO 15148:2002(E), 测试环境控制在: 气温 $24\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 $33\% \pm 2\%$ 。试件经鼓风干燥箱烘干至恒重 ($110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$), 移入测试环境中降温稳定至恒重。采用不透气、不透水且不吸水透明材料对试件上表面及四侧边进行封贴。侧边封贴至距底面 $3\sim 5\text{ mm}$, 上表面封贴膜留孔径 $< 1\text{ mm}$ 排气细孔, 孔距 $\leq 1\text{ cm}$ 。试件以点支形式安装, 底部浸入液面深度 $1\sim 2\text{ mm}$ 。试件吸水达到设定时长后取出称重。实验第 1 吸水阶段吸水时长 5 s (由材料吸水情况决定), 第 2 阶段初期 $10\sim 60\text{ s}$, 后期累计时间 30 min 、 1 h 、 8 h 、 12 h 各称重一次, 达到 24 h 称重结束实验。试件取出称重时保持水平姿态 (倾斜可能影响一维吸水), 先以饱和吸水海绵去除试件底面明水, 称重后迅速将试件水平返回吸水。第 1 阶段线性部分拟合得斜率即为毛细吸水系数 A_w , $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})$ [9]: $A_w = \frac{\Delta m'_t - \Delta m'_0}{\sqrt{t_t}}$; 其中: $\Delta m_t = (m_t - m_i)/A$ 。式中: $\Delta m'_t$ 为 t_t (s) 时 Δm_t 值, kg/m^2 ; $\Delta m'_0$ 为 $t_t = 0$ 时 Δm_t 值, kg/m^2 ; m_t 为 t 时质量, kg ; m_i 为初始质量, kg ; A 为吸水面积, m^2 。线性拟合第 2 阶段与第 1 阶段拟合直线交点 Δm_t 与试件厚度比值为毛细饱和含水量, kg/m^3 。宜将其换算为毛细饱和含水率 (ω_{cap} , %)。结束实验烘干试件进行重复实验, 每组实验重复 3 次。

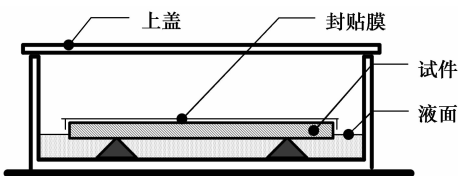


图 4 单面浸泡法实验装置

Fig. 4 Partial immersion experimental facility

1.3 整体浸泡法

参考国家标准 GB/T 2542—2012, 测试室内气温恒定 $24\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对湿度恒定 $33\% \pm 2\%$ 。试件经鼓风干燥箱 $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重后称取干重 m_0 , kg , 在电子干燥箱内冷却至室温。实验装置由电子天平、承台、钢丝挂扣、玻璃水箱以及电子计算机组成。电子天平置于承台上, 天平底部称重挂钩吊挂试件, 试件悬于纯水中, 顶部距液面 50 mm 。电子天平连接至计算机连续记录天平读数, 采样间隔为 10 s 。24 h 后实验结束, 将试件取出, 拭去表面明水后称取湿重 m_{24} , kg , 得 24 h 试件吸水率

$$W_{24}, \%^{[15]}: W_{24} = \frac{m_{24} - m_0}{m_0} \times 100\%$$

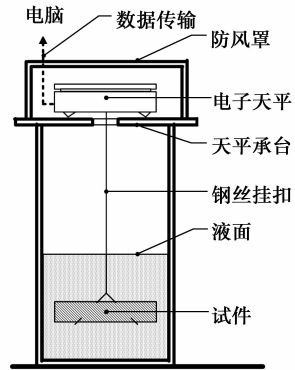


图 5 整体浸泡实验装置

Fig. 5 Integral immersion experimental facility

1.4 真空饱和方法

参考美国标准 ASTM C 1699—09, 进行真空饱和实验 [17]。试件于鼓风干燥箱内 $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重后, 记录试件干重 m_{dry} , kg , 立于容器中支架上, 放入真空舱 (见图 6) 中。降低真空舱中气压, 稳定于 20 mbar 以下 4 h , 使材料内部孔隙中空气逸出。保持真空舱内气压, 向水槽中缓慢注入纯水 (水温 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$), 液面上升速度控制在 50 mm/h 左右, 直至液面浸没试件顶端 50 mm 。试件于水下浸泡 24 h 后, 称取试件悬于水中质量 m_{under} , kg , 将试件取出, 去除表面明水, 称取湿重 m_{wet} , kg 可得真空饱和含水率 ω_{vac} , %: $\omega_{\text{vac}} = \frac{m_{\text{wet}} - m_{\text{dry}}}{m_{\text{dry}}}$; 孔隙率 ϕ , %: $\phi = \frac{\omega_{\text{vac}}}{\rho_l}$; 表观密度 ρ , kg/m^3 : $\rho = \frac{m_{\text{dry}} \cdot \rho_l \cdot g}{m_{\text{under}}}$ 。式中: ρ_l 为 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下纯水密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, 取 9.8 m/s^2 。

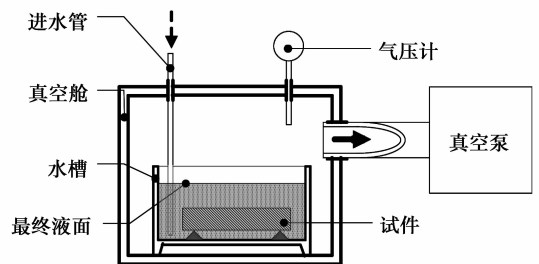


图 6 真空饱和实验装置

Fig. 6 Vacuum saturation experimental facility

1.5 误差分析方法

各组实验均在相同实验室、恒定温湿度环境下, 采用同一组仪器由同一人员进行操作, 符合重复性

条件^[18]。因此,可采用平均相对标准差计算重复性误差(e_r , Repeatability Errors),以衡量实验精确度,其中 x 为测试值; i 为某试样, $i \in [1, p]$; j 为某次测试^[8], $j \in [1, q]$ 。

$$e_r = rs_r = \overline{rs_{x_{i,j}}(j, i)} =$$

$$\frac{1}{q} \sum_{j=1}^q \left[\sum_{j=1}^q \left(\sqrt{\frac{x_{i,j}^2 - \overline{x_{i,j}}^2}{q-1}} \right) \cdot \frac{1}{\overline{x_{i,j}}} \times 100\% \right]$$

2 实验结果与讨论

1) 单面浸泡实验实验显示, 3 试件的毛细吸水阶段均在 1 min 左右完成, 并逐渐向第 2 阶段过度。毛细吸水阶段内, 材料保持较高吸水速率。试件 N1 和 N2 孔隙率均在 35% 左右, 两者具有较接近的毛细吸水系数。而孔隙率仅有 24.09% 的 A1 试件吸水系数较前两者有显著降低(图 7)。同时, N1 和 N2 的毛细饱和含水率接近, 而 A1 显著偏低, 显示出孔隙率越大, 毛细饱和含水率越高的趋势(图 8)。经线性回归分析, 孔隙率与毛细吸水系数、毛细饱和含水率呈线性正相关关系(图 9)。实验水温 23.5 °C。重复性试验间隔 24 h。N1、N2 及 A1 试件单面浸泡实验重复性误差依次为 1.40%、2.40% 及 1.85%, 实验重复性好, 精确度高^[8]。

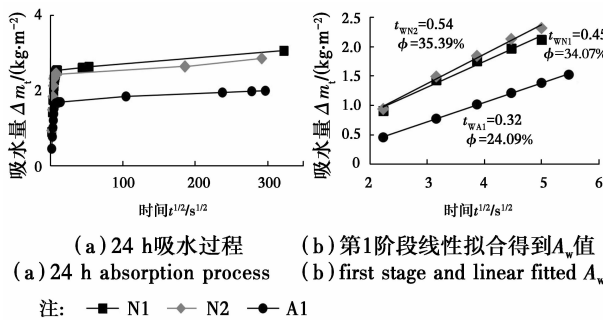


图 7 毛细吸水系数

Fig. 7 Capillary absorption coefficient

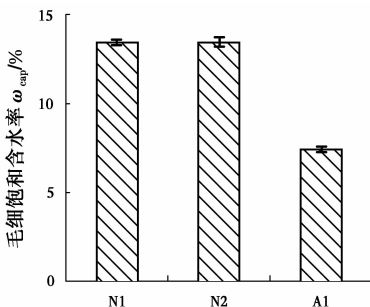


图 8 毛细饱和含水率

Fig. 8 Capillary saturated water content

2) 整体浸泡实验 整体浸泡下试件吸水速率远

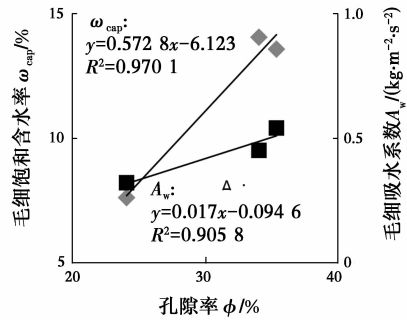


图 9 毛细吸水系数及饱和含水率随孔隙率变化情况

Fig. 9 Relations of $\phi-A_w$ and $\phi-\omega_{cap}$

大于单面浸泡。该方法下毛细吸水阶段在 20 s 左右结束。另一方面, 受材料内部液态水扩散速率影响, 不同材料在不同时刻吸水饱和度不同。在毛细吸水阶段吸水量较其他材料大的试件, 在第 2 吸水阶段系数可能低于其他材料。例如 N1 试件在毛细吸水阶段结束时的含水率大于 N2 试件, 但过度到第 2 阶段后, N2 试件吸水含水率超过了 N1 试件(图 10)。吸水 24 h 后, 单面浸泡试件含水率低于整体浸泡, 总体平均差距($d/\%$)为 3.25%(表格 1), 差距与孔隙率无显著相关关系。实验水温 23.6 °C。N1、N2 及 A1 试件每组重复实验间隔 24 h, 实验重复性误差分别为 0.68%、0.35% 及 0.06%, 精确度较好。

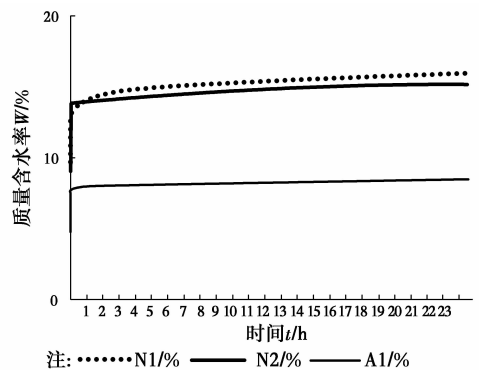


图 10 含水率曲线

Fig. 10 24 h water content curve

表 1 吸水 24 h 含水率

Table 1 24 h water absorption content

试件	整体浸泡 $W_{24GB}/\%$	单面浸泡 $W_{24ISO}/\%$	差距 $d/\%$
N1	16.77	16.20	3.44
N2	16.08	15.63	2.82
A1	8.89	8.59	3.48

3)真空饱和实验 真空饱和含水率是材料所能达到的最大含水率水平。单面浸泡法测得的 24 h 吸水含水率低于真空饱和含水率,平均差距 $d\%$,分别为:N1:14.42%,N2:22.43%,A1:27.88% ($d = \frac{\omega_{vac} - \omega_{cap}}{\omega_{vac}} \times 100\%$)。实验水温 24 °C,重复性实验间隔 24 h。N1、N2 及 A1 重复性误差分别为 0.05%、0.93%和 1.73%,精确度高。对比可知,小孔隙率、高密度材料吸水过程受孔隙内气体含量影响显著(表 2)。

表 2 真空饱和实验

Table 2 Vacuum saturated experiment

试件	真空饱和含水率 $\omega_{vac}/\%$	单面吸水 24 h 含水率 $W_{24ISO}/\%$	差距 $d/\%$	孔隙率 $\varphi/\%$	密度 $\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
N1	18.93	16.20	14.42	34.07	1 796.64
N2	20.15	15.63	22.43	35.39	1 753.03
A1	11.91	8.59	27.88	24.09	2 019.14

3 结论

针对 3 种高吸水性多孔陶片分别实施 3 种常用材料吸水特性实验,对比不同方法间差异,探索综合评价此类材料吸水特性的方法。其中,毛细吸水系数和毛细饱和含水率指标采用单面浸泡法测定。对不同材料而言,在第 1 吸水阶段,孔隙率毛细吸水系数和毛细饱和含水率呈线性正相关关系。在第 2 吸水阶段,材料吸水速率与孔隙率无显著相关关系。说明第 1 阶段吸水更快的材料,能在该阶段吸收更多液态水;而材料长期浸泡情形下的吸水量取决于其内部复杂的孔隙特性。采用单面浸泡法或整体浸泡法对比测定的吸水 24 h 含水率结果显示,前者比后者得到含水率低,平均差距为 3.25%,差距与孔隙率无显著相关关系。而由于单面浸泡更接近陶片贴附于围护结构外表面的情形,可以认为整体浸泡测值比实际偏大,该指标更宜采用单面浸泡测定。此外,单面浸泡 24 h 材料含水率比真空饱和含水率低,平均差距 21.58%,说明孔隙内部气体显著阻塞水分迁移。上述所有实验满足重复性条件,重复性误差低于 2.40%,实验重复性好,精确度高。未来在材料不同含水量下吸水系数变化、多孔外墙贴面

砖周期吸水-被动蒸发研究中,将对现有研究进行拓展延伸。

参考文献:

- [1] 孟庆林,胡文斌,张磊,等. 建筑蒸发降温基础 [M]. 北京:科学出版社,2006:1-20.
MENG Q L, HU W B, ZHANG L, et al. Building evaporation cooling foundation [M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [2] 张磊,刘习康,孟庆林,等. 多孔饰面砖墙体蒸发降温效果试验研究[J]. 建筑材料学报,2014(6):1036-1042,1048.
ZHANG L, LIU X K, MENG Q L, et al. Experimental study of evaporative cooling capacities of wall with porous face brick [J]. Journal of Building Materials, 2014(6):1036-1042,1048. (in Chinese)
- [3] BRANDE T V D, BLOCKEN B, ROELS S. Rain water runoff from porous building facades: implementation and application of a first-order runoff model coupled to a HAM model [J]. Building and Environment, 2013, 64:177-186.
- [4] MUKHOPADHYAYA P, KUMARAN K, NORMANDIN N, et al. Effect of surface temperature on water absorption coefficient of building materials [J]. Journal of Building Physics, 2002, 26(2):179-195.
- [5] CARMELIET J, HENS H, ROELS S, et al. Determination of the liquid water diffusivity from transient moisture transfer experiments [J]. Journal of Thermal Envelope and Building Science, 2004, 27(4):277-305.
- [6] NIZOVITSEV M I, STANKUS S V, STERLYAGOV A N, et al. Determination of moisture diffusivity in porous materials using gamma-method [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(17):4161-4167.
- [7] HANŽIČL, KOSEC L, ANŽEL I. Capillary absorption in concrete and the lucas-washburn equation [J]. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(1):84-91.
- [8] FENG C, JANSSEN H, FENG Y, et al. Hygric properties of porous building materials: Analysis of measurement repeatability and reproducibility [J]. Building and Environment, 2015, 85:160-172.
- [9] Hygrothermal performance of building materials and products-determination of water absorption coefficient

- by partial immersion: EN ISO 15148[S]. 2002 .
- [10] ZHU Y G, KOU S C, POON C S, et al. Influence of silane-based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 35(1): 32-38.
- [11] CNUUDE V, DE BOEVER W, DEWANCKELE J, et al. Multi-disciplinary characterization and monitoring of sandstone (kandla grey) under different external conditions [J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2013, 46(1): 95-106.
- [12] GRILO J, FARIA P, VEIGA R, et al. New natural hydraulic lime mortars-physical and microstructural properties in different curing conditions [J]. Construction and Building Materials, 2014, 54: 378-384.
- [13] WALKER R, PAVÍA S. Moisture transfer and thermal properties of hemp-lime concretes [J]. Construction and Building Materials, 2014, 64: 270-276.
- [14] Natural stone test methods- determination of water absorption by capillarity: EN 1925 [S]. 1999.
- [15] 砌墙砖试验方法: GB/T 2542—2012[S]. 北京:中国标准出版社,2013.
Test methods for wall bricks: GB/T 2542-2012 [S]. Beijing: Standerd Press of China, 2013. (in Chinese)
- [16] Natural strone test methods-Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity: EN 1936 [S]. 2006.
- [17] Standard Test Method for Moisture Retention Curves of Porous Building Materials Using Pressure Plates: ASTM C 1699-09 [S].
- [18] Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results-Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method: ISO 5725-2 [S]. 2002.

(编辑 王秀玲)

更正启事

《土木建筑与环境工程》2016 年第 4 期第 39 页页脚“基金项目”中“国家自然科学基金(2010100106)”应改为“国家自然科学基金(51508444)”。

特此更正。

《土木建筑与环境工程》编辑部