

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.06.016



多孔烧结陶片在盐溶液中的吸水特性

潘振皓, 孟庆林, 李琼

(华南理工大学 建筑学院; 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510641)

摘要: 外墙多孔饰面层在含盐环境下的吸水特性变化, 将影响利用被动蒸发技术之低能耗建筑的效能。为探寻盐浓度对陶片吸水特性影响的规律, 以一种常用陶片分别在纯水、3.5% 及 26.3% 质量分数 NaCl 溶液中, 采用部分浸泡法进行吸水实验。结果显示: 毛细吸水系数在 3.5% 溶液中比纯水高 17.57%, 在 26.3% 溶液中比纯水低 12.17%。陶片吸收纯水质量随溶液浓度提高呈线性下降趋势。达到毛细饱和时, 陶片含水量在 3.5% 溶液中比纯水低 2.50%, 在 26.3% 溶液中比纯水低 16.18%; 继续连续吸水 24 h 后, 陶片含水量在 3.5% 溶液中比纯水低 3.18%, 在 26.3% 溶液中比纯水低 20.51%。综合而言, 盐分将削弱陶片吸收纯水的能力, 削弱水平随盐分浓度提高而增强, 陶片在滨海含盐环境中吸水情况将明显区别于内陆地区。

关键词: 多孔陶片; 吸水系数; 含水量; 盐溶液

中图分类号: TU111.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)06-0117-06

Water absorbing characteristics of porous firing clay tiles in saline solutions

Pan Zhenhao, Meng Qinglin, Li Qiong

(School of Architecture; State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510641, P. R. China)

Abstract: Water absorption of porous materials were influenced by sea salt. It would lead to changes of the efficiency of the low-energy buildings using passive evaporation cooling technology. To find the relations between the concentration and the water absorption characters, we conducted water absorption tests through partial immersion method with common porous fire-clay tiles and NaCl solution with different concentrations. Compared to the pure water case, tiles' capillary absorption coefficient was higher by 17.57% in solutions with the concentration of 3.5% by weight (same below), and lower by 12.17% in 26.3% solution. Pure water absorption reduced while concentration increased. Capillary saturated water content was lower in 3.5% solution than in pure water by 2.50%, and lower in 26.3% solution than in pure water by 16.18%. Continuous absorption for 24 hours, the pure water content was lower in 3.5% solution than in pure water by 3.18%, and lower in 26.3% solution than in pure water by 20.51%. In

收稿日期: 2017-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(51590912)

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.

李琼(通信作者), 女, 博士, 副研究员, 博士生导师(E-mail) arliqiong@scut.edu.cn.

Received: 2017-04-11

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 51590912)

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

Li Qiong (corresponding author), PhD, associate researcher, doctoral supervisor, (E-mail) arliqiong@scut.edu.cn.

summary, salts would weaken the water absorption ability of the tiles. The higher the concentration of the solution was, the absorption would be weaker. As a result, water absorption of the tiles in the coastal saline environments would be different from the inland situation.

Keywords: porous tile; absorption coefficient; water content; saline solution

中国夏热冬暖地区滨海地带跨纬度大、岸线长、岛屿多。多具有日照强烈、高温多雨、风力强劲等特点,特别适合建筑被动蒸发降温技术应用。贴附于建筑外墙外表面的多孔烧结陶片层可依靠吸收的雨水、淋水等水源,通过被动蒸发降低围护结构温度。而环境中普遍存在的盐分,使多孔陶片在吸收液态水时实际面临的是不同浓度的盐溶液。盐液在多孔材料毛细吸水作用下进入材料内部孔隙网络,可能引起材料热湿物性甚至结构耐久性的改变。

以往研究多考虑纯水的吸水蒸发,而工程实际中陶片吸收的大多并非纯水,沿海地区又以盐溶液为特点。曾有学者以 3%^[1]、3.5%^[2-3] 以及 15%^[4] 等质量分数的 NaCl 溶液模拟海水对多孔材料中盐分迁移特性进行研究。其中 3.5% 质量分数盐溶液因其较接近海水中 NaCl 浓度,被最多采用,高浓度盐溶液环境也可能出现。伴随着多孔材料反复吸水干燥,其表面附近可能积累可观的结晶盐^[5],再次吸水可能导致结晶溶解升高液体浓度。若采用海水进行淋水降温,蒸发失水也可能导致液体浓度上升。不同材料吸水特性受盐分影响效果并不清晰。多孔材料毛细吸水系数(A_w ,或简称吸水系数)代表材料在毛细吸水过程第一阶段中的吸水速率。该阶段指纯水及溶液从陶片的一面以一维方向迁移至另一面的过程,表现为材料迅速增重。达到毛细饱和状态后增重速率显著减慢。曾有学者采用石材(孔隙率约 3.02%,吸水系数约 $0.003 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$) 在 5% 质量分数盐溶液(溶质为 97% NaCl 和 3% CaSO_4) 中对比纯水中进行吸水实验,并认为石材在两者中吸水系数相同^[6]。可见对于致密材料,盐分对吸水系数影响并不大。而多孔烧结陶片孔隙率高(约 24.90%),吸水速度快(吸水系数约 $0.33 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$),盐分是否影响吸水特性需要得到证明。究其原因,有学者认为是材料吸水特性受孔隙分布以及液体性质的影响。根据 Lucas-Washburn 公式,容易推导得到一维毛细吸水中吸水系数^[7-9]:

$$A_w \propto \sqrt{\frac{\gamma \cdot \cos \theta}{\mu}}$$

其中: γ 为液体表面张力, N/m; μ 为液体动力粘度, Pa·s; θ 为接触角, °。在 NaCl 水溶液中,温度一定情况下,表面张力、接触角及粘度

均随浓度增加而上升^[10-11]。而孔道壁接触角随液体浓度变化较难测定。尽管如此,仍认为吸水性(或吸水系数)均发生降低并与 $(\gamma/\mu)^{1/2}$ 呈线性关系^[12]。此外,毛细管中水蒸气分压力亦有一定影响^[9]。然而,上述关系仍缺乏广泛材料验证。

笔者将采用多孔烧结陶片在 3.5%、26.3% 质量分数 NaCl 溶液以及纯水中进行吸水特性实验。主要考察材料的毛细吸水系数、毛细饱和含水量以及吸水 24 h 含水率等吸水特性,并浅析液体表面张力与粘度变化对毛细吸水系数影响效果。以此探讨含盐环境下多孔陶片吸水特性的变化。

1 研究对象及方法

1.1 材料及设备

实验试样为粘土烧结制成的多孔陶片,试样共 3 件,材料相同。陶片外观呈红褐色,表面粗糙。试样参数如表 1 所示,外观及细观肌理如图 1。电镜显示孔隙直径多在 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 以上,属大孔材料;平均孔隙率约为 24.90%。采用电子天平(SHIMADZU UX4200H 型)进行称重,量程 4.2 kg,分度值 0.01 g。采用平板玻璃自制水槽,便于实验中观察。吸水过程中试样采用不锈钢支架点支法支承。实验在恒温恒湿房间内进行。

表 1 试件基本参数

Table 1 Parameters of the samples

试件编号	干质量/kg	吸水面积/ m^2	试件厚度/m	孔隙率/%
A1	0.270 45	0.012 324	0.011	24.79
A2	0.271 30	0.012 402	0.011	25.39
A3	0.281 71	0.012 469	0.011	24.52



图 1 试件及电子显微镜照片

Fig. 1 Picture and electron-microscope photo of the sample

1.2 实验方法

1.2.1 纯水吸水实验 参考国际标准 ISO 15148:

2002(E)采用部分浸泡法进行实验^[13-14]。测试环境保持气温 $24\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $33\%\pm 2\%$ 。试件经鼓风干燥箱 $110\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干后移入测试环境中降温稳定至恒重。采用不透水且不吸水塑料薄膜封贴试件上表面及四侧边。上表面封贴膜开排气细孔,孔径不大于 1 mm ,孔距不大于 1 cm ,四侧边封贴膜下边距试件底边 $3\sim 5\text{ mm}$,如图 2 所示。

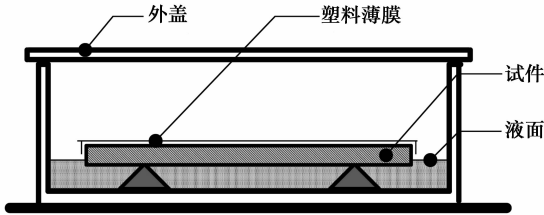


图 2 部分浸泡吸水实验装置

Fig. 2 Partial immersion experimental facility

试件底面接触液体开始吸水,液面距试件底面 $1\sim 2\text{ mm}$,底部由不锈钢支架点支支撑。每达到吸水时间间隔后平稳取出,以相同浓度溶液浸湿海绵擦去底面明水,以电子天平称量,后迅速移回,继续吸水。一次称重耗时约 2 s 。因试件达到毛细饱和状态速度快,吸水时间间隔在第一吸水阶段为 5 s ;吸水速率显著下降后,延长至 $10\sim 30\text{ s}$;其后 30 min 、 1 、 8 、 12 、 24 h 称量试件,一次测试结束。材料从干燥状态开始,前 24 h 的吸水过程最具代表意义^[15],且能代表大多数持续的降雨和淋水时间,因此,一次完整吸水实验时长设为 24 h 。

数据处理方法如下,对第 1 阶段线性拟合得到毛细吸水系数($A_w, \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})$)^[13]。

$$A_w = \frac{\Delta m'_{it} - \Delta m'_0}{\sqrt{t_i}} \quad (1)$$

式中: Δm_t 为 t 时刻试件单位面积增加的质量, $\Delta m_t = (m_t - m_i)/A$; $\Delta m'_{it}$ 为第 1 吸水阶段拟合直线上 t_i 时的 Δm_t 值, kg/m^2 ; $\Delta m'_0$ 为第 1 吸水阶段拟合直线交纵轴值, kg/m^2 ; m_t 为 t 时间试件质量, kg ; m_i 为试件初始质量, kg ; A 为吸水面积, m^2 。

将第 2 阶段进行线性拟合,拟合直线与第 1 阶段拟合直线交点纵轴值与试件厚度比,则为毛细饱和含水量($\omega_{\text{cap}}, \text{kg}/\text{m}^3$)^[16]。

$$\omega_{\text{cap}} = \frac{\Delta m'_{it}}{h \cdot A} \quad (2)$$

试件吸水 24 h 后含水率^[17]为

$$W_{24} = \frac{m_{24} - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: h 为试件厚度, m ; m_0 为试样干质量, kg ; m_{24} 为

试样浸水 24 h 湿质量, kg 。

1.2.2 盐溶液吸水实验 为说明陶片在海水侵袭环境下吸水特性,选择最接近海水中 NaCl 浓度的 3.5% 质量分数 NaCl 溶液模拟海水吸水环境。另一方面,考虑到反复吸盐、干燥陶片表面会累积较多盐分结晶,这部分盐分再次吸水溶解时将提高溶液浓度。为最大可能说明陶片在高浓度溶液中吸水特性,节省测试次数提高经济型,选择了接近饱和的 26.3% 质量分数 NaCl 溶液模拟高浓度吸水实验环境。实验方法同纯水吸水实验,温湿度数值保持恒定。盐溶液均采用干燥的实验用 NaCl 分析纯粉剂及蒸馏水配置溶液。配置工作均在吸水实验标准环境中进行。为避免混淆,“吸水系数”均指对纯水及盐溶液中纯水部分的吸收系数,“吸收系数”则概指对溶液总体的吸收系数。经烘干后验算陶片吸收溶液浓度与配置的浸泡溶液一致。

1.2.3 误差分析 实验采用 3 块相同材质多孔砖,在相同环境下进行实验。材料误差(e_m)以相对标准差(rs)衡量^[18-19]。材料误差计算方法为

$$e_m = rs_m = \sqrt{[rsx_{i,j}^1(i,j)]^2 - (rs_r)^2} \quad (4)$$

$$rsx_{i,j}^1 = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^q \sum_{i=1}^p (x_{i,j}^1 - \bar{x}_{i,j}^1)^2}{p \cdot q - 1}} \cdot \frac{1}{\bar{x}_{i,j}^1(i,j)} \times 100\% \quad (5)$$

式中: x 为测试值; i 为某试样, $i \in [1, p]$; j 为某次测试, $j \in [1, q]$ 。

2 结果与讨论

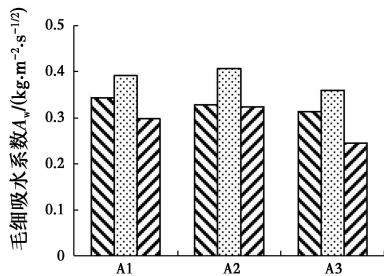
2.1 毛细吸水系数

实验结果显示, 3.5% 质量分数溶液比较纯水,提高了毛细吸水系数(A_w),而 26.3% 质量分数溶液较纯水降低了 A_w 值。陶片在纯水中吸水系数平均为 $0.33\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$,在 3.5% 质量分数中吸收系数平均为 $0.40\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$,在 26.3% 溶液中平均为 $0.39\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$ 。此外,实际吸收的纯水及两种浓度溶液体积对比,发现 3.5% 质量分数中吸收体积最大,而 26.3% 质量分数溶液却比纯水略低。由此可见,当吸收液体中含有溶解态 NaCl ,陶片吸水增重速率上升,浓度越高上升越大。但将所吸收 NaCl 溶液按质量浓度算出其中所含纯水,则陶片在低浓度溶液中吸水系数大于纯水,而高浓度溶液中吸水系数低于纯水,如表 2 所示。实验后烘干含盐水陶片验证所吸收溶液浓度与浸泡液相同。

为考查差异水平,通过 $\Delta A_w = \frac{A_{wH_2O} - A_{w3.5}}{A_{wH_2O}} \times 100\%$ 对 3.5% 溶液、26.3% 溶液与纯水中吸水系数进行比较,显示陶片吸水系数在 3.5% NaCl 溶液相比纯水平均高 17.57%;在 26.3% 溶液中相比纯水平均低 12.17%,在图 3 也可直观看出。若从整个吸水过程看,如图 4,经过 24 h 材料在 3 种液体中增重值接近,而实际吸收纯水质量随 NaCl 浓度降低。因此,可以推测,多孔陶片在第 1 阶段吸收不同浓度 NaCl 溶液(或纯水)速率受 NaCl 溶液浓度影响,低浓度有利于提高吸收速率,近饱和溶液减慢吸收速率;吸收量受陶片孔隙网络影响,和液体质量有关,实际吸收水分随溶液浓度升高而降低。

表 2 毛细吸水系数
Table 2 Capillary water absorption coefficient

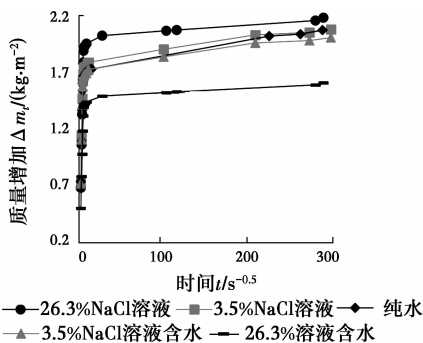
试件编号	纯水	3.5% NaCl 溶液	26.3% NaCl 溶液
A1	0.34	0.39	0.30
A2	0.33	0.41	0.32
A3	0.31	0.36	0.24
平均值	0.33	0.39	0.29
材料误差/%	4.64	6.19	13.98



注: ▣ 纯水 ▤ 3.5%NaCl溶液中纯水 ▥ 26.3%NaCl溶液中纯水

图 3 毛细吸水系数

Fig. 3 Capillary water absorption coefficient



注: ● 26.3%NaCl溶液 ■ 3.5%NaCl溶液 ◊ 3.5%NaCl溶液含水 ▲ 26.3%溶液含水

图 4 A01 试件吸水过程

Fig. 4 Water absorption process of A01

2.2 细饱和含水量

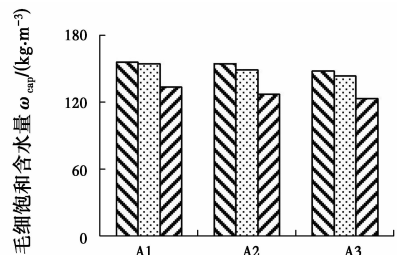
达到毛细饱和时,材料吸收液体质量依溶液浓

度升高而升高,液体体积依次减小,实际吸收纯水质量依次减小。毛细饱和含水量(ω_{cap})代表多孔砖在毛细吸水阶段结束时吸水量大小。实验结果显示,在达到毛细饱和时,受液体密度影响,溶液盐分浓度越高,陶片增重越大。而考查实际吸收纯水部分,陶片的毛细饱和含水量在 3.5% 盐溶液中比纯水平均低 2.50% ($\Delta\omega_{cap} = \frac{\omega_{capH_2O} - \omega_{cap3.5}}{\omega_{capH_2O}} \times 100\%$),在 26.3% 溶液中平均低 16.18%,呈线性下降趋势,如图 5 所示。可见控制毛细饱和状态的机理较为复杂,而陶片在盐溶液中毛细饱和含水量通过实验确定较为可行。

表 3 毛细饱和含水量

Table 3 Capillary saturated water content $kg \cdot m^{-3}$

试件编号	纯水	3.5% NaCl 溶液	26.3% NaCl 溶液
A1	157.30	156.17	135.04
A2	156.14	150.54	128.55
A3	149.65	144.86	124.64
平均值	154.36	150.52	129.41
材料误差/%	2.67	3.76	4.06



注: ▣ 纯水 ▤ 3.5%NaCl溶液中纯水 ▥ 26.3%NaCl溶液中纯水

图 5 毛细饱和含水量

Fig. 5 Capillary saturated water content

2.3 吸水 24 h 含水率

陶片连续吸水 24 h 后,吸收纯水量随溶液浓度升高而降低。吸水 24 h 含水率(W_{24})代表多孔砖在 24 h 连续单面吸水条件下含水量质量分数。多孔砖在实际工作中面临自然降雨或人工淋水,但持续时间均难以超过 24 h。而多孔砖在进入第 2 吸水阶段后将长期保持持续缓慢吸水,因此,参考砖材测试国家标准,引入该指标说明材料实际可能最大吸水量。结果显示:陶片 W_{24} 在 3.5% 溶液中比纯水平均低

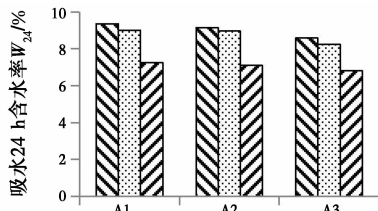
3.18% ($\Delta W_{24} = \frac{W_{24H_2O} - W_{24,3.5}}{W_{24H_2O}} \times 100\%$);在

26.3% 溶液中比纯水平均低 20.51%,见图 6。 W_{24} 与溶液浓度呈线性负相关关系。

表 4 吸水 24 h 含水率

Table 4 Water content after 24 hours %

试件编号	纯水	3.5% NaCl 溶液	26.3% NaCl 溶液
A1	9.36	9.00	7.26
A2	9.15	8.97	7.10
A3	8.58	8.26	6.82
平均值	9.03	8.74	7.06
材料误差/%	4.47	4.79	3.15



注: □ 纯水 ▨ 3.5%NaCl溶液中纯水 ▩ 26.3%NaCl溶液中纯水

图 6 吸水 24 h 含水率

Fig. 6 Water content after 24 h

2.4 盐影响水分迁移机理浅析

毛细吸水系数受液体性质影响。根据推导得到的关系,材料在不同液体中的吸水系数为: $\left(\frac{\gamma}{\mu}\right)^{\frac{1}{2}} = 11.368A_w + 4.6026 (R^2 = 0.6182)$ 趋势。因而,液体性质确实对吸水系数存在影响。而吸水系数在稀盐溶液中较大,造成了上述线性回归式决定系数降低。究其原因,推测是受孔隙壁、孔隙网络自身性质及接触角等因素的影响。此外,陶片在 3 种液体中所吸收液体总质量显示出接近的趋势,说明孔隙网络所能容纳的液体可能受质量限制。而液体浓度不同造成了陶片实际吸收的水分质量存在差异。

3 结论

多孔烧结陶片吸水特性作为建筑被动蒸发降温技术的重要组成部分,需要针对滨海环境解决陶片对盐溶液吸收特性不清晰的问题。针对陶片在工程实际中可能面临的情况,采用部分浸泡法,通过一维毛细吸水实验,采集了陶片在纯水、NaCl 稀溶液(质量分数 3.5%)、接近饱和溶液(质量分数 26.3%)中的相关吸水数据,针对毛细吸水系数、毛细饱和含水量、吸水 24 h 含水率等指标进行考查,并浅析了差异的成因。结果显示:随液体中 NaCl 浓度上升,受溶液密度影响,多孔砖吸收液体质量略微上升,但同时实际吸收纯水量显著降低。在第 1 吸水阶段中,低浓度有利于提高吸收速率,近饱和溶液减慢吸收速率。考查陶片对盐溶液中纯水部分的毛细吸水系

数,在 3.5% 溶液中比纯水平均高 17.57%,在 26.3% 溶液中比纯水平均低 12.17%;考查毛细饱和含水量,在 3.5% 溶液中比纯水平均低 2.50%,在 26.3% 溶液中比纯水平均低 16.18%,呈线性降低趋势;考查吸水 24 h 含水量,在 3.5% 溶液中比纯水中平均低 3.18%,在 26.3% 溶液中比纯水平均低 20.51%,呈线性下降趋势。所有实测结果误差在 10% 以内,较为精确。结果显示,陶片吸水受溶液表面张力和粘度影响。经连续吸水 1 d,受多孔陶片孔隙网络运移能力影响,陶片吸收 3 种液体质量趋近,但受溶液浓度影响,所吸收液体中实际含水量依次降低。

由于多孔烧结陶片在含盐环境中的吸水特性差异,将导致陶片在降雨、淋水等过程中实际含水量发生变化,进而将影响到吸水结束后蒸发率水平。在未来的研究中,针对多盐类环境吸水,多次吸水干燥以及含盐湿空气环境中吸湿等更为细致的实际问题,将展开相应的研究,以期完备对含盐环境中多孔烧结陶片吸水特性的认识。

参考文献:

- [1] SADAFI M H, JAHN I, STILGOE A B, et al. A theoretical model with experimental verification for heat and mass transfer of saline water droplets [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2015, 81: 1-9.
- [2] 范汇吉. 环境因素对铝空气海水电池阴阳极性能的影响[D]. 山东 青岛:中国科学院研究生院海洋研究所, 2012: 10.
FAN H J. Effects of environmental factors on the anode and cathode performance of Al/air seawater batteries [D]. Qingdao, Shangdong: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, 2012: 10. (in Chinese)
- [3] 张冕. 纳滤和膜蒸馏处理海水淡化浓盐水的研究[D]. 上海:华东理工大学, 2014: 6.
ZHANG M. Study on the treatment of the concentrated brine solution of seawater desalination by nanofiltration and vacuum membrane distillation [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014: 6. (in Chinese)
- [4] PEI L, HUININK H, KOPINGA K. Salt transport and crystallization in porous building materials [J]. Magnetic Resonance Imaging, 2003, 21 (3/4): 317-320.
- [5] ZHANG H, WITTMANN H F, ZHAO T. Relation

- between the silicon resin profiles in water repellent treated concrete and the effectiveness as a chloride barrier [J]. *Restoration of Buildings & Monuments*, 2005, 11(1): 35-46.
- [6] 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.
- [7] WASHBURN E W. The dynamics of capillary flow [J]. *Physical Review*, 1921, 17(3): 273.
- [8] HANŽIČ L, KOSEC L, ANŽEL I. Capillary absorption in concrete and the Lucas-Washburn equation [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2010, 32(1): 84-91.
- [9] SONGOK J, SALMINEN P, TOIVAKKA M. Temperature effects on dynamic water absorption into paper [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2014, 418(5): 373-377.
- [10] SGHAIER N, PRAT M, NASRALLAH S B. On the influence of sodium chloride concentration on equilibrium contact angle [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2006, 122(1): 47-53.
- [11] HALL C, HOFF W D. Rising damp: capillary rise dynamics in walls [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2007, 463(2084): 1871-1884.
- [12] BRITO V, GONÇALVES T D. Drying kinetics of porous stones in the presence of NaCl and NaNO₃: Experimental assessment of the factors affecting liquid and vapour transport [J]. *Transport in Porous Media*, 2013, 100(2): 193-210.
- [13] Hygrothermal performance of building materials and products-determination of water absorption coefficient by partial immersion; EN ISO 15148: 2002 [S]. 2002.
- [14] 潘振皓, 张磊, 孟庆林, 等. 多孔烧结陶片吸水特性实验方法 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2017, 39(1): 26-31.
- PAN Z H, ZHANG L, MENG Q L, et al. Experimental methods for water absorption characteristics of porous firing clay tiles [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2017, 39(1): 26-31. (in Chinese)
- [15] OZCELIK Y, OZGUVEN A. Water absorption and drying features of different natural building stones [J]. *Construction & Building Materials*, 2014, 63(2): 257-270.
- [16] 冯驰. 多孔建筑材料湿物理性质的测试方法研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- FENG C. Study on the test methods for the hygric properties of porous building materials [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [17] 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 brick: GB/T 2542-2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2013. (in Chinese)
- [18] 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.
- [19] 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 胡英奎)