

# 基于环境变迁影响的古砖孔结构及饱和系数

汤永净<sup>1</sup>, 邵振东<sup>2</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海仰韶古建筑保护科技发展有限公司, 上海 200333)

**摘要:** 通过不同水平下的淡水冻融、盐水冻融, 人工模拟山西某地区环境变迁特征, 采用蒸煮法和压汞法实验, 建立古砖不同孔径孔隙体积和饱和系数的对应关系, 评估分析环境变迁对古砖孔结构及饱和系数的影响。针对同一区域的某古建筑群不同年代的实体砖进行实验验证。研究结果表明, 环境变迁导致古砖的孔隙率和孔径分布变化; 其中, 淡水冻融导致砖孔隙率呈现规律性变化, 孔隙率缓慢增长; 盐水冻融导致砖孔隙率呈现间歇性变化; 小于  $1\ \mu\text{m}$  孔径孔隙体积占总孔隙体积百分数逐渐减少,  $1\sim 5\ \mu\text{m}$  孔径孔隙体积占总孔隙体积百分数逐渐增大; 孔径孔隙体积变化性能和饱和系数具有很好的相关性, 有利于解决文物建筑实验样品数量不足的问题, 用其替代饱和系数评定古建筑砖抗风化性能具有可行性。

**关键词:** 饱和系数; 孔结构; 淡水冻融; 盐水冻融; 抗风化性能

**中图分类号:** TU522.1

**文献标志码:** A

## Ancient Brick Pore Structure and Saturation Coefficient Based on Environmental Variation

TANG Yongjing<sup>1</sup>, SHAO Zhendong<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Yangshao Protection of Ancient Building Technology Development Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Salt solution and temperature fluctuation are predominant factors influencing the weathering performance of ancient bricks. This paper conducted laboratory test to explore weathering performance of ancient bricks in the Yellow River region. The experiment simulated brick freeze-thaw cycle in fresh water and salt water, and used mercury intrusion porosimetry and five hours boiling in water to obtain pore structure characteristics and saturation coefficient. The experiment results show that the volume fraction of pore diameter of less than  $1\ \mu\text{m}$  decreases while that of  $1\sim 5\ \mu\text{m}$  increases, and the saturation coefficient index is closely related to pore structure index. Pore structure index can

replace saturation coefficient in evaluating the weathering performance.

**Key words:** saturation coefficient; pore structure characteristics; freeze-thaw in fresh water; freeze-thaw in salt water; weathering resistance

环境变迁导致的砖的风化, 是自然界中温度、水、二氧化碳、氧长期作用的结果<sup>[1]</sup>。温度变化导致砖颗粒和孔隙的空间尺寸增大, 在压力作用下促进了砖裂缝的扩展<sup>[2]</sup>, 裂缝的扩展减小了砖的密度和抗压强度, 砖密度和抗压强度的减小削弱了砖砌体截面刚度和结构承载能力, 降低了砖砌体结构安全度<sup>[3]</sup>。风化速率是长期风化作用的时间函数。中国四川乐山大佛风化速率为每年  $0.264\sim 0.279\ \text{mm}^{[4]}$ , 山西平遥古城墙 638 d 风化厚度为  $8.03\sim 32.30\ \text{mm}^{[5]}$ 。砖的耐久性取决于砖合理的孔径分布和孔隙率<sup>[6]</sup>, 环境变迁导致砖孔结构发生变化, 小于  $5\ \mu\text{m}$  孔直径孔隙对盐析和冻融循环的变化十分敏感<sup>[7]</sup>。

温度变化导致古砖孔隙水产生循环冻融, 长期的循环冻融可改变不同孔径孔隙的原有级配; 干湿交替、热胀冷缩导致古砖产生可逆的体积变化, 这种体积变化会导致裂缝出现; 氧、二氧化碳的作用导致古砖材料产生新的化学物质, 例如大气中的二氧化碳导致砖中矿物成分方解石和白云石分解生成生石灰(氧化钙)并最终生成碳酸钙<sup>[4]</sup>。旧物质的分解和新物质的生成都会改变原孔结构状态, 主要表现为古砖的总孔隙率和孔径分布发生变化<sup>[8]</sup>。美国 ASTM-C67-14 烧结砖标准<sup>[9]</sup>和中国烧结砖标准<sup>[10]</sup>用饱和系数指标评定砖的抗风化性能, 而砖的抗风化性能是环境变迁影响的结果。砖的孔结构和饱和系数都是和水传输相关的指标, Hansen 等<sup>[11]</sup>提出用黏土砖的阈值孔隙率和总孔隙率比值作为饱和系数

的评定指标. Maage<sup>[12]</sup>提出用孔隙率与大于 3  $\mu\text{m}$  孔隙体积分数作为评定古砖抗冻性能的评定指标. Surej 等<sup>[13-14]</sup>评价了文献 Maage 方法的不足,建议用孔隙率、饱和系数、吸水率作为评定砖耐久性指标.还有不少文献<sup>[15]</sup>通过压汞实验指标评定砖耐久性能.因此,用砖的孔结构的变化指标评定砖的抗风化性能是可行的.但是,这些方法涉及的参数都来自于特定砖样品的实验结果,不适用于中国古砖的评价.

山西长治市气候温差大,年最低气温在 $-30\sim-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .高原的湿陷性黄土含有较多的水溶盐,最大水溶盐质量分数为 4%<sup>[16]</sup>,呈固态或半固态分布在各种颗粒的表面;湿陷性黄土颗粒主要为粉土颗粒,基本上无大于 0.25 mm 的中砂颗粒.

古建筑土壤中的水溶盐因砖毛细孔吸附力进入古建筑砖体,气候变化导致古砖冻融.盐结晶和冻融循环导致孔隙率和孔径分布的变化<sup>[4]</sup>,砖裂纹扩展.一般情况下,由于气候影响,山西古建筑的砖基础部位大多受淡水冻融和水溶盐共同作用(盐水冻融),而古建筑中部和上部的砖主要受淡水冻融作用,气候温差和水溶盐对古砖的影响随着时间的推移呈现加剧状态.

本文探讨了山西古砖在环境变迁影响下孔结构与饱和系数的关系.由于孔结构实验所需样品体积小、数量少,现场取样满足了尽可能少干扰文物建筑之目的,对砖石文物建筑抗风化能力的评定具有很好的适用性.

## 1 实验样品与方法

### 1.1 实验样品

实验样品来自中国山西某山村 19 世纪古民居

外墙砖(图 1).古民居和本文第 4 节中的 5 个古建筑聚集在方圆 5  $\text{km}^2$  的同一区域.该区域属于温带大陆性季风气候,干燥少雨,年平均降水 562 mm,冬季历史最低温度 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ .该古民居不属于文物建筑,拟拆迁重建.外墙砖尺寸为 29 cm $\times$ 14 cm $\times$ 7 cm.饱和系数样品为每组 5 块整砖<sup>[17]</sup>,饱和系数实验共用外墙砖 40 块;压汞实验样品为 1 cm $\times$ 1 cm $\times$ 2 cm 的长方体,样品取自同一块裸露外墙砖的外侧面,压汞样品共 24 个;用 X 射线荧光光谱分析仪判断外墙砖化学成分,样品来自裸露外墙砖的外侧面,取样后研磨至粉末状,每个样品的质量为 20 g.



图 1 19 世纪古民居

Fig.1 Ancient residence of 19th century

从 19 世纪直到实验阶段,环境变迁对该古民居砖的影响主要表现为淡水冻融和盐水冻融,因此实验采用人工模拟其环境变迁条件,同时用不同冻融次数模拟不同时间.人工模拟各样品实验代码见表 1.

### 1.2 实验前样品处置

所有样品在 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 干燥箱中干燥 24 h,测量并记录各样品外观尺寸.把 DX0,DX15,DX30,DX50,DG15,DG30,DG50 样品置放在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 淡水中浸泡 24 h,把 YDX0,YDX15,YDX30,YDX50,YDG15,

表 1 人工模拟各样品实验代码

Tab.1 Specimen code for simulation of freeze-thaw condition

测试项目	样品代码							
饱和系数	DX0	DX15	DX30	DX50	YDX0	YDX15	YDX30	YDX50
孔隙结构	DG0	DG15	DG30	DG50	YDG0	YDG15	YDG30	YDG50

注:表中 X 为饱和系数样品代码;G 为压汞样品代码;D 为冻融样品代码;Y 为 4%(质量分数)NaCl 水溶液;数字 0,15,30,50 为冻融循环次数.

YDG30,YDG50 置放在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 4%NaCl 水溶液中浸泡 24 h.

### 1.3 冻融实验

根据墙砖试验方法标准<sup>[17]</sup>,把 DX15,DX30,DX50,DG15,DG30,DG50 样品置放在冻融设备的

淡水溶液冻融盒中,YDX30,YDX50,YDX15,YDG15,YDG30,YDG50 置放在 4%NaCl 盐水溶液冻融盒中,水面均高于样品 2 cm,样品处于饱水状态.试件中心冻融温度为 $-20\sim+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,降温时间 3 h,升温时间 2 h,冻融循环次数分别为 15,30,50 次.

实验采用 HDY-15 型自动循环冻融箱。

#### 1.4 饱和系数实验

根据墙砖试验方法标准<sup>[17]</sup>, 饱和系数实验时, 把所有饱和系数样品置于 105 ℃ 鼓风干燥箱中烘至恒质, 称其干质量( $m_0$ ), 然后将试样浸泡于 20 ℃ 淡水中 24 h, 称其湿质量( $m_{24}$ ), 再放入蒸煮箱中淡水煮沸 5 h, 称量其湿质量( $m_5$ ), 按照公式 (1) 计算其饱和系数  $K$ 。

$$K = (m_{24} - m_0) / (m_5 - m_0) \quad (1)$$

#### 1.5 压汞实验

实验采用美国麦克仪器公司生产的 AutoPoreIV9500 型压汞仪。为了减少制作方法对古砖压汞样品微观结构的影响, 形状为 1 cm×1 cm×2 cm 长方体的压汞样品采用微型切割机切割后研磨而成。把样品在 105 ℃ 干燥箱中干燥 24 h 去除样品中的游离水。再把所有干燥至恒质的压汞样品置于膨胀计头部, 密封、称重并计算膨胀计质量。将密封

好的膨胀计送入低压站分析, 抽真空到 50 μm 汞柱以下; 低压分析结束后取出膨胀计, 再次称重(试样、膨胀计与低压压入汞的总质量)后送入高压站中继续分析。充汞至 3.45 kPa (0.5 Psia), 接着由仪器自动分步控制加压至 413.70 MPa (60 000 Psia), 每步平衡时间(equilibrium time)为 10 s。公式 (2) 为进汞压力与相应孔径的关系。

$$p = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (2)$$

式中:  $p$  为压力, Pa;  $\sigma$  为汞的表面张力 (4.15 Pa·cm<sup>-2</sup>);  $r$  为毛细管半径, nm;  $\theta$  为试样与汞液的接触角, 130°。

## 2 实验结果

### 2.1 饱和系数计算结果

根据公式 (1) 计算饱和系数, 结果见表 2。

表 2 饱和系数实验结果

Tab.2 Results of saturation coefficient

样品代码	$m_0/g$	$m_{24}/g$	$m_5/g$	$(m_{24}-m_0)/g$	$(m_5-m_0)/g$	饱和系数
DX0	1 892.6	2 248.0	2 318.2	355.4	425.6	0.835
DX15	1 778.1	2 068.3	2 124.4	290.2	346.3	0.837
DX30	1 664.2	2 056.9	2 132.1	392.7	467.9	0.840
DX50	1 484.8	1 776.3	1 804.4	291.5	319.6	0.912
YDX0	1 804.6	2 186.8	2 244.1	382.2	439.5	0.870
YDX15	1 756.2	2 061.5	2 096.2	305.3	340.0	0.898
YDX30	1 610.9	1 861.7	1 882.4	250.8	271.5	0.924
YDX50	1 749.5	2 107.1	2 133.4	357.9	383.9	0.932

### 2.2 压汞实验结果

压汞实验所得淡水及盐水冻融后的孔隙率及孔隙结构结果见表 3。

表 3 压汞实验结果

Tab.3 Results of MIP

样品代码	孔隙率/%	$P_1/\%$	$P_{1-5}/\%$
DG0	35.921 1	43.76	53.81
DG15	36.227 1	41.51	55.13
DG30	37.443 1	37.90	59.28
DG50	36.857 2	33.19	63.81
YDG0	35.748 2	40.53	55.67
YDG15	39.044 1	35.01	60.44
YDG30	37.137 7	34.67	63.94
YDG50	36.830 4	29.93	64.79

注:  $P_1$  为孔直径小于 1 μm 的孔隙占总孔隙体积的百分数;  $P_{1-5}$  为孔直径为 1~5 μm 之间的孔隙占总孔隙体积的百分数。

## 3 实验结果分析

### 3.1 饱和系数

饱和系数  $S \leq 0.850$  为砖的抗风化性能合格数值<sup>[10]</sup>, 饱和系数数值越小反映砖的抗风化性能越好。由图 2 可以看出, 基准对比样品 DX0 饱和系数值最小 (0.835), 具有一定的抵抗风化能力; DX15, DX30 饱和系数值 (0.837, 0.840)  $\leq 0.850$ , 说明在短期单一淡水冻融风化条件下, 古砖抗风化能力已经开始削弱但是仍属于合格数值; YDX0 样品虽然冻融次数为 0, 但由于被 4% NaCl 水溶液浸泡, 其抗风化系数  $\geq$  DX15, DX30; YX30 饱和系数 0.870  $\geq 0.850$ , YDX30 受水溶盐作用, 其饱和系数值 (0.924) 大于没有水溶盐作用的 DX50 (0.912), YDX50 饱和系数 (0.932) 盐冻次数最多, 饱和系数值最大。

饱和系数反映砖连通孔隙和不连通孔隙的相对含量, 饱和系数越大, 反映砖连通孔隙相对数量越多<sup>[18]</sup>。水、二氧化碳、氧及其各种衍生物质首先进入砖的连通孔隙对孔壁进行风化作用, 温度的变化导致砖裂缝的产生, 风化介质通过裂缝持续进入不连通孔隙进行风化作用。实验验证砖在自由状态下的

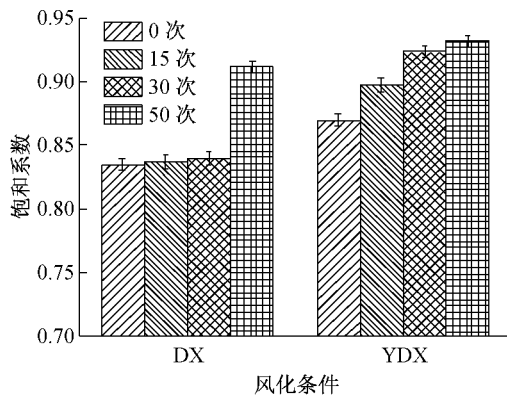


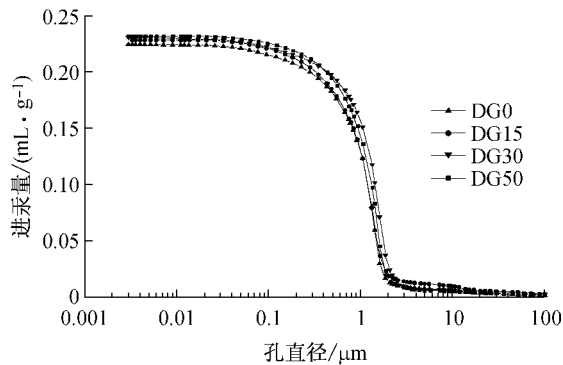
图 2 古砖不同工况的饱和系数

Fig.2 Saturation coefficients of ancient bricks in different weathering conditions

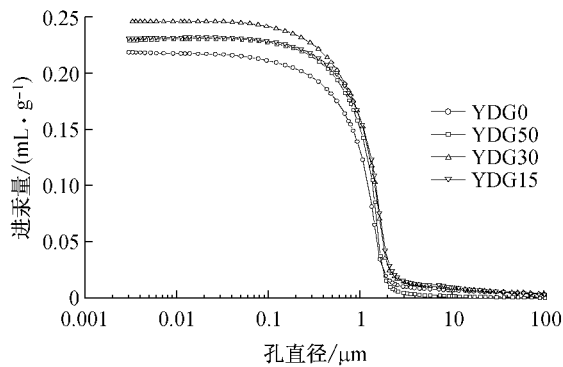
吸水性能和时间的平方根成正比<sup>[11]</sup>. 压汞实验中的阈值孔径可作为区分连通孔隙和不连通孔隙的临界值. 连通孔隙数量越多, 砖的初始风化速率越大.

### 3.2 孔径分布

图 3 中的进汞累计曲线和图 4 中的孔隙入口孔径分布曲线由压汞实验数据(表 3)得出. 图 3 的进汞累计曲线表明所有试样总进汞量均在  $0.20 \sim 0.25 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$  之间; 图 4 的孔隙入口孔径分布曲线主要分布在  $0.02 \sim 4.00 \mu\text{m}$  之间, 最大分布孔径在  $0.50 \sim 2.00 \mu\text{m}$  之间.



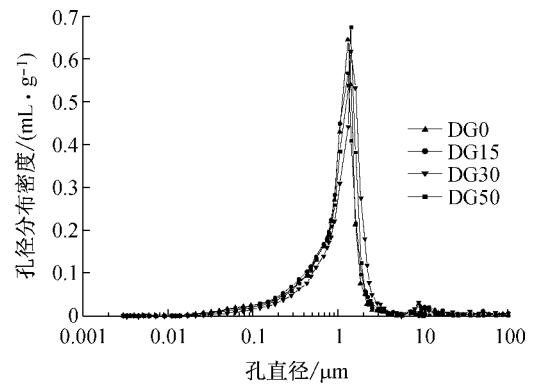
a 淡水冻融



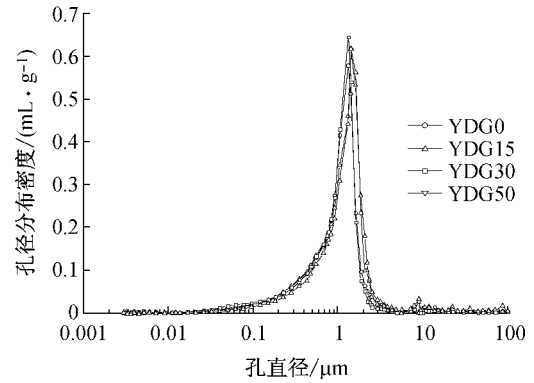
b 淡水冻融

图 3 进汞累计曲线

Fig.3 Cumulation of mercury intrusion



a 淡水冻融



b 淡水冻融

图 4 孔隙入口孔径分布曲线

Fig.4 Distribution range of entrance pore diameter

### 3.3 孔隙率

图 5 由压汞实验数据(表 3)得出, 反映了不同风化形式导致古砖孔隙率的变化. 其中 DG30 的孔隙率(37.4431)和 DG50 的孔隙率(36.8572)均大于 DG15 的孔隙率(36.2271)和 DG0 的孔隙率(35.9211), 反映冻融产生的物理风化中, 砖孔隙率随时间呈现缓慢增长趋势. 300 年时间里, 物理风化导致古砖孔隙率增大 1%<sup>[8]</sup>. 图 5 中 YDG50, YDG30, YDG15 样品孔隙率均大于 YDG0, 同样反

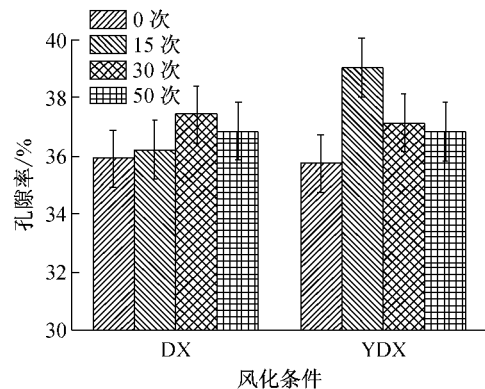


图 5 古砖不同工况的孔隙率

Fig.5 Porosity of ancient bricks in difference weathering conditions

映冻融对孔隙率的作用.但是,水溶盐产生的化学风化中砖孔隙率变化是复杂的,例如 YDG15 的孔隙率大于 YDG50.

### 3.4 不同孔径孔隙体积的变化

根据表3试验数据绘制各不同工况时小于  $1\ \mu\text{m}$  孔径孔隙体积占孔隙总体积百分数的变化规律,如图6所示;绘制各不同工况时  $1\sim 5\ \mu\text{m}$  孔径孔隙体积占孔隙总体积百分数的变化规律,如图7所示.

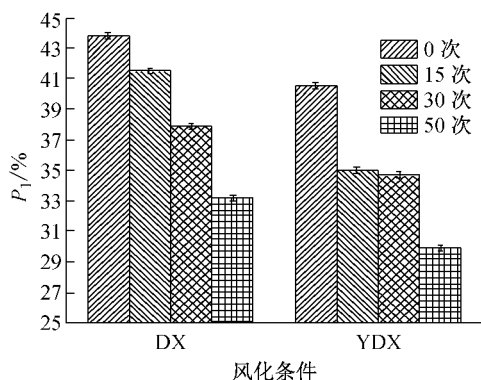


图6 小于  $1\ \mu\text{m}$  孔径孔隙体积占孔隙总体积百分数

Fig.6 Volume fraction of pore diameter of less than  $1\ \mu\text{m}$  in different weathering conditions

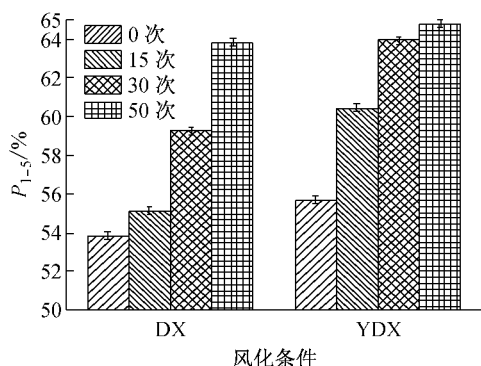


图7  $1\sim 5\ \mu\text{m}$  孔径孔隙体积占孔隙总体积百分数

Fig.7 Volume fraction of pore diameters of  $1\sim 5\ \mu\text{m}$

图6中,随冻融循环次数的增加,小于  $1\ \mu\text{m}$  孔径孔隙体积逐渐减小,其中 DG30 的孔隙体积比 DG15 减少了 3.61%,而对应的 YDG30 的孔隙体积比 YDG15 的减少了 0.34%;DG50 的孔隙体积比 DG30 的减少了 4.73%,而对应的 YDG50 的孔隙体积比 YDG30 的减少 4.74%.

图7中,随冻融循环次数的增加, $1\sim 5\ \mu\text{m}$  孔径孔隙体积逐渐增加,其中 DG30 的孔隙体积比 DG15 的增加了 4.15%,对应的 YDG30 的孔隙体积比 YDG15 的增加了 3.50%;DG50 的孔隙体积比 DG30 的增加了 4.73%,而对应的 YDG50 的孔隙体积比 YDG30 的减少了 0.85%.

盐结晶和冻结性导致孔隙率和孔径分布发生变化<sup>[6]</sup>.淡水冻融导致砖孔隙率随时间呈现缓慢增长趋势(图5);砖小于  $1\ \mu\text{m}$  孔径孔隙体积逐渐减小,从 D15 到 D50 共减少了 8.34%(图6); $1\sim 5\ \mu\text{m}$  孔径孔隙体积逐渐增加,从 D15 到 D50 平均增加 8.88%(图7).盐水冻融导致砖孔隙率呈现减少趋势(图5);砖小于  $1\ \mu\text{m}$  孔径孔隙体积逐渐减小,YDG15 到 YDG50 共减少 5.08%(图6); $1\sim 5\ \mu\text{m}$  孔径孔隙体积逐渐增加,YDG15 到 YDG50 共增加 4.35%(图7).但是,盐水冻融也常常中断了这种规律性变化,例如图6中的 YDG15 到 YDG30 以及图7中的 YDG30 到 YDG50,其孔径分布变化几乎停止.由此看出,淡水冻融导致砖孔隙率和孔径分布呈现规律性变化,盐水冻融导致砖孔隙率和孔径分布呈现间歇性变化.

盐水冻融包含了化学风化和物理风化.化学风化对孔隙率和孔径分布的影响是复杂的.无论是氯离子扩散过程中形成的液膜,还是硫酸根离子生成的含有结晶水的“白色絮状物”硫酸铝都会充填砖的孔隙<sup>[19]</sup>,同时硫酸铝硬化后的膨胀更改变了砖的孔隙.化学风化的复杂性导致砖孔隙率和孔径分布的变化呈现间歇性.古砖小于  $5\ \mu\text{m}$  孔径孔隙对盐和冻融循环的变化十分敏感<sup>[7]</sup>.

砖的性能是材料性质和微观环境的时间函数<sup>[11]</sup>.19世纪的古砖在人工模拟风化条件下,孔径分布随冻融次数发生了变化:小于  $1\ \mu\text{m}$  孔径孔隙体积逐渐减少, $1\sim 5\ \mu\text{m}$  孔径孔隙体积逐渐增加,测试结果和文献[7,11]中反映的砖风化特性基本吻合.人工模拟风化条件中,冻融循环次数表示时间,盐水和淡水表示不同风化形式.孔隙率和孔径分布的变化与风化条件(含风化形式和风化时间)具有很好的相关性.

### 3.5 不同孔径孔隙体积对应的饱和系数

人工模拟风化条件下,19世纪古民居砖不同孔径孔隙体积和对应饱和系数的关系见图8,9.

图8,9分别表明,随着饱和系数的提高,小于  $1\ \mu\text{m}$  孔径孔隙体积减少, $1\sim 5\ \mu\text{m}$  孔径孔隙体积增加.图9中直线和二次曲线的数学表达式的相关系数分别为 0.963 0 和 0.955 2,反映  $1\sim 5\ \mu\text{m}$  孔径孔隙体积的变化和饱和系数具有很好的相关性.

饱和系数实验至少需要 5 块古砖样品<sup>[17]</sup>,这对于文物建筑是很难实现的.孔结构实验只需要少量古砖碎块样品,用孔结构指标评定文物建筑抗风化性能具有可行性.

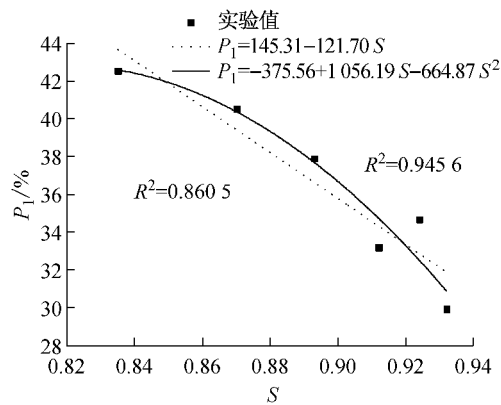


图 8 小于 1 μm 孔径孔隙体积占比与饱和系数的关系

Fig.8 Volume fraction of pore diameter of less than 1 μm versus saturation coefficient

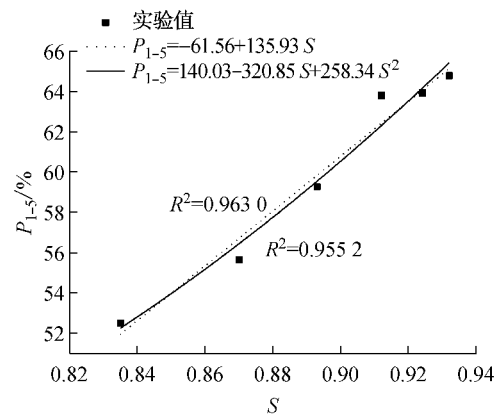


图 9 1~5 μm 孔径孔隙体积占比与饱和系数的关系

Fig.9 Volume fraction of pore diameter of 1 to 5 μm and saturation coefficient

## 4 工程实例验证

采用自然风化条件下文物建筑实体古砖样品对图 6,7 的人工模拟实验结果进行验证. 验证实验采用压汞法, 样品分别来自 5 个不同建造年代的文物

建筑外墙砖中裸露的外侧面, 取样部位为室外地面以上 1 m, 见图 10. 压汞样品为 1 cm×1 cm×2 cm 的长方体. 5 个文物建筑的建造年代分别为 10 世纪, 11 世纪, 12 世纪, 14 世纪, 16 世纪. 5 个文物建筑的地理位置和 19 世纪古民居坐落于方圆 5 km<sup>2</sup> 的相同区域范围. 压汞实验结果见表 4.

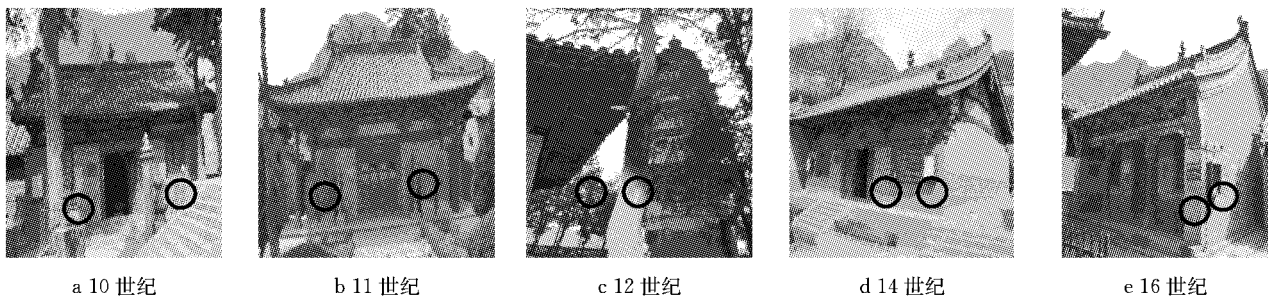


图 10 文物建筑压汞样品取样位置图

Fig.10 Position of brick samples in ancient buildings

表 4 不同年代样品压汞实验结果

Tab.4 Porosity from mercury intrusion test

建造年代	孔隙率/%	$P_1$ /%	$P_{1-5}$ /%
10 世纪	32.618 3	22.861	68.984
11 世纪	29.874 1	30.270	66.716
12 世纪	33.054 0	35.794	56.667
14 世纪	33.839 1	69.584	25.346
16 世纪	37.516 1	79.306	14.956
19 世纪	36.084 6	81.073	14.107

图 11 根据压汞实验结果表 4 数据绘制, 表示自然风化条件下古砖孔结构的变化. 由图 11 可以看出, 人工模拟风化条件和自然风化条件古砖样品的孔径分布变化特征基本相同: 随着年代的增长, 小于 1 μm 孔径孔隙体积逐渐减少, 1~5 μm 孔径孔隙体积逐渐增大.

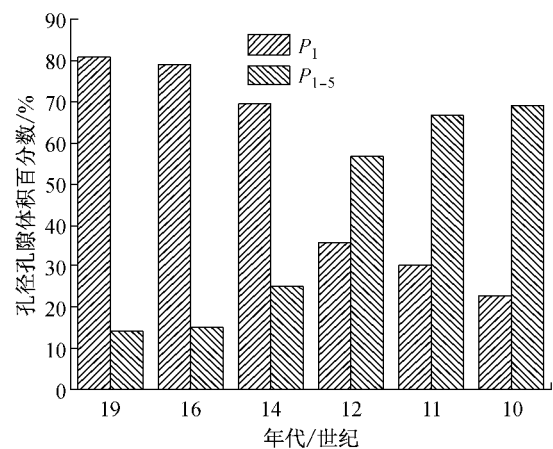


图 11 不同年代古建筑砖不同孔径孔隙体积百分数

Fig.11 Volume fraction of pore diameter of ancient bricks from ancient buildings in different centuries

表 5 为各种砖样品的 X 射线荧光光谱实验结果。样品来自各古砖裸露的外侧面,重复实验取平均值。

砖的矿物组成和制造工艺(烧结温度)是导致孔隙率和孔径分布变化的主要因素<sup>[9,11]</sup>。表 5 中各样品不仅主量成分含量相近,微量成分含量也十分相

近,如  $\text{Ti}_2\text{O}$  的质量分数均在在 0.59%~0.70% 范围内;中国从公元前 1 世纪到公元 16 世纪使用同一传统制砖工艺——“埏泥”和“还原气氛”<sup>[20-21]</sup>;表 4 中自然状态下的 6 个古砖孔径分布变化规律相近,由此可以得出,19 世纪古民居砖和 5 个古建筑砖具有一定的可比性。

表 5 化学成分组成  
Tab.5 Chemical composition

试样年代	质量分数/%									烧失量/%
	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{MgO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{SO}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{CaO}$	$\text{Ti}_2\text{O}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	
10 世纪	1.88	2.16	11.80	57.30	0.003	2.31	10.48	0.67	4.01	7.71
11 世纪	1.87	1.96	9.35	56.80	0.13	2.26	10.50	0.64	3.64	8.49
12 世纪	1.92	2.63	8.02	56.80	0.17	2.05	11.00	0.59	4.13	8.70
14 世纪	1.84	2.51	10.50	59.20	0.12	2.70	11.80	0.73	4.86	4.56
16 世纪	1.89	2.34	9.33	57.00	0.04	2.72	11.80	0.66	4.23	6.23
19 世纪	1.76	2.18	11.10	57.60	0.08	2.43	10.62	0.70	4.66	6.70

## 5 结论

(1) 淡水冻融导致山西古砖孔隙率和孔径分布呈现规律性变化:孔隙率缓慢增长,小于  $1\ \mu\text{m}$  孔径孔隙体积占孔隙总体积百分数逐渐减少,  $1\sim 5\ \mu\text{m}$  孔径孔隙体积占孔隙总体积百分数逐渐增大;盐水冻融导致砖孔隙率和孔径分布呈现间歇性变化。

(2) 环境变迁条件下,山西古砖小于  $1\ \mu\text{m}$  孔径孔隙体积和饱和系数具有很好的相关性,利用该性质评定砖石文物建筑风化性能具有可行性。

## 参考文献:

- [1] Wells T, Hancock G, Fryer J. Weathering rates of sand stone in a semi-arid environment[J]. *Environment Geology*, 2008, 54(5): 1047.
- [2] Hall C, Hoff W D. Water transport in brick, stone and concrete [M]. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [3] 邱洪兴,蒋永生,曹双寅. 古塔结构损伤系统识别 II: 应用[J]. 东南大学学报, 2001, 31(2): 86.  
QIU Hongxing, JIANG Yongsheng, CAO Shuangyan. System identification for structural damage of ancient tower II: application[J]. *Journal of Southeast University*, 2001, 31(2): 86.
- [4] 秦中,张婕,彭学艺,等. 四川乐山大佛风化的初步探讨[J]. 地理研究, 2005, 24(6): 928.  
QIN Zhong, ZHANG Jie, PENG Xueyi, et al. A study on weathering processes of Leshan Grand Buddha, Sichuan, China [J]. *Geographical Research*, 2005, 24(6): 928.
- [5] 张中俭,杨志法,卞丙磊,等. 平遥古城墙基外侧砂岩的风化速度研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1628.  
ZHANG Zhongjian, YANG Zhifa, BIAN Binglei, et al. Weathering rates of sandstone in lower walls of Ancient City of Pingyao [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(10): 1628.
- [6] Kerstin E, Cultrone G, Navarro C R, et al. Durability of bricks used in the conservation of historic buildings-influence of composition and microstructure [J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2003, 4(2): 91.
- [7] Elif U S, Hasan B. Characteristics of bricks used in the domes of some historic bath buildings [J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2013, 14(S): e73.
- [8] 汤永净,邵振东. 气候对中国古代塔砖材料性能劣化影响的研究[J]. 文物保护与考古科学, 2012, 24(3): 33.  
TANG Yongjing, SHAO Zhendong. Ancient tower of brick material properties degradation by climate [J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2012, 24(3): 33.
- [9] American Society for Testing and Materials. ASTM-C67-14 Standard test methods for sampling and testing brick and structural clay tile[S]. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2014.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 5101—2003 烧结普通砖[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 5101—2003 Fired common bricks [S]. Beijing: China Standards Press, 2003.
- [11] Hansen W, Kung J H. Pore structure and frost durability of clay bricks[J]. *Materials and Structures*, 1988, 21: 443.
- [12] Maage M. Frost resistance and pore size distribution in bricks [J]. *Materiaux et Cnstructions*, 1984, 17(101): 345.
- [13] Surej R K, Fazio P, Feldman D. Comparative study of durability indices for clay bricks[J]. *Archit Eng*, 1998, 4: 26.
- [14] Surej R K, Feldman D, Fazio P. Development of new durability index for clay bricks[J]. *Archit Eng*, 1998, 4: 87.
- [15] Reddy M S. Application of mercury intrusion porosimetry on clay bricks to assess freeze-thaw durability—a bibliography with abstracts[J]. *Construction and building materials*, 1996, 10(6): 461.
- [16] 罗宇生,汪国烈. 湿陷性黄土研究与工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.

- LUO Yusheng, WANG Guolie. Collapsible loess research and engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 2542—2012 砌墙砖试验方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2012.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 2542—2012 Test methods for wall bricks[S]. Beijing: China Standards Press, 2012.
- [18] 李庆繁. “饱和系数”在烧结砖中的应用及其机理探讨[J]. 新型墙材, 2013, 3: 26.
- LI Qingfan. The application and mechanism of “saturation coefficient” in sintering brick[J]. New Wall Material, 2013, 3: 26.
- [19] 何尔章. 水化硫铝酸钙(钙矾石)的形成条件与性质[J]. 硅酸盐建筑制品, 1983(3): 38.
- HE Erzhang. Hydrated calcium sulfoaluminate (ettringite) formation conditions and properties [J]. Silicate Building Products, 1983(3): 38.
- [20] 李国豪. 建苑拾英——中国古代土木建筑科技史料选编[M]. 上海: 同济大学出版社, 1990.
- LI Guohao. Jian Yuan Shi Ying—ancient chinese historical selected civil construction technolog [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1990.
- [21] 李家治. “秦砖汉瓦”的历史作用[J]. 建筑材料学报, 1998, 1(3): 26.
- LI Jiazhi. The historical role of Qin Han watt brick[J]. Journal of Building Materials, 1998, 1(3): 26.



#### (上接第 1661 页)

- CHEN Changbing. Research on distribution of lateral bulk-solid pressures on silos' walls [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006.
- [6] Holst J, Ooi J, Rotter J, *et al.* Numerical modeling of silo filling. I: continuum analyses [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1999, 125(1): 94.
- [7] Holst J, Ooi J, Rotter J, *et al.* Numerical modeling of silo filling. II: discrete element analyses [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1999, 125(1): 104.
- [8] WAN Xuewen, YANG Zhaojian, SHU Xuefeng, *et al.* The static contact statuses between granular materials and flat-bottomed steel silos [J]. Powder Technology, 2013, 235: 1053.
- [9] Guaital M, Couto A, Ayuga F. Numerical simulation of wall pressure during discharge of granular material from cylindrical silos with eccentric hoppers [J]. Biosystems Engineering, 2003, 85(1): 101.
- [10] Herle I, Gudehus G. Determinations of parameters of a hypoplastic constitutive model from properties of grain assemblies [J]. Mechanics of Cohesive Materials, 1999, 4: 461.
- [11] Von Wolffersdorff. A hypoplastic relation for granular materials with a predefined limit state surface [J]. Mechanics of Cohesive Materials, 1996, 1(3): 251.
- [12] Niemunis A, Herle I. Hypoplastic model for cohesive soils with elastic strain range [J]. Mechanics of Cohesive Materials, 1997, 2(4): 279.
- [13] 杨鸿, 杨代恒, 赵阳. 钢筒仓散料静态压力的三维有限元模拟[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2011, 45(8): 1423.
- YANG Hong, YANG Daiheng, ZHAO Yang. Three-dimensional finite element simulation of static granular material pressure for steel silos [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2011, 45(8): 1423.
- [14] Juan A, Moran J M, Guerra M I, *et al.* Establishing stress state of cylindrical metal silos using finite element method: comparison with ENV 1993 [J]. Thin Walled Structures, 2006, 44(11): 1192.
- [15] 杨代恒. 钢筒仓设计研究及散料压力的数值模拟 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- YANG Daiheng. Design research of steel silos and numerical simulation of bulk materials pressure [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.