

黄河流域砖石古建筑风化性能评价*

汤永净¹ 邵振东²

(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 通过压汞实验和X射线荧光光谱实验, 证明了小于 $5\mu\text{m}$ 孔径孔隙体积的变化是中国古砖的风化敏感区域。其中, 随年代的久远, 小于 $1\mu\text{m}$ 孔径孔隙体积占总孔隙体积比例数逐渐减少, $1\sim 5\mu\text{m}$ 孔径孔隙体积占总孔隙体积比例逐渐增大。利用古砖风化性能在孔径分布敏感区域的变化特征, 可以对砖石古建筑风化性能进行评价, 有利于砖石古建筑的保护

关键词 孔隙体积 孔径 风化 压汞

1 引 言

风化是环境变迁对古砖的主要影响形式, 是自然界中温度、水、二氧化碳、氧对古砖的长期作用。干湿交替、热胀冷缩、冻融循环导致古砖材料产生可逆的体积变化, 在材料内部产生新裂缝, 从而改变了古砖材料原有孔结构; 水、二氧化碳、氧等因素的长期作用导致古砖材料结构胶结物长期流失并可能生成新的物质, 胶结物流失或生成物质都改变了古砖原有孔结构。中国四川乐山大佛风化侵蚀厚度为 $0.264\sim 0.279\text{mm/a}$ ^[1], 山西平遥古城墙638 d风化侵蚀厚度为 $8.03\sim 32.30\text{mm}$ ^[2], 按照此风化侵蚀速度推算, 如果不进行有效的保护, 二百年后, 一些以砖石材料为主的建筑遗产不是面貌全非就是已经坍塌。见图1、图2。

通过MIP试验得出孔结构数值对砖的风化性能进行评价适用文物建筑。Maage等通过MIP试验得出的孔隙率和大于 $3\mu\text{m}$ 孔直径的孔隙体积占总孔隙体积的百分数评判黏土砖的耐久性, 建议用DIP数值作为评定砖耐久性指标, $\text{DIP} = \frac{3.2}{D} + 2.4P_3$ 。其中, P_3 为大于 $3\mu\text{m}$ 孔直径的孔隙体积分数, DIP数值小于55时判定砖耐久性不合格, 大于70时为合格^[3]。Robertson等建议用MIP试验中的进汞压力与体积滞回能评判石灰石砌体的材料耐



图1 山西蒲州古城墙门楼

* 国家自然科学基金(51278359)资助项目。



图2 河南洛阳五花塔

久性。结合电镜扫描试验和结晶试验说明该方法的可行性和可操作性，并且具有缩短检测时间的优点^[4]，Hansen等对比加拿大和美国规范得出的黏土砖饱和系数试验值和MIP孔结构试验结果，得出用阈值孔径对应的孔隙率与总孔隙率比值作为新的饱和系数建立与规范饱和系数之间的关系，用以缩短检测时间和提高检测效率^[5]，Koroth等提出考虑表面孔径分布的参数对Maage公式进行修正，以调整用Maage公式计算的低DIP值具有较好耐久性的情况。其表面孔径分布参数参照加拿大和美国规范执行。作者认为表面孔径分布参数也可以用MIP试验完成，在取样时去除砖表面的粉尘，在其外表面钻孔取样进行试验^[6]，Elert等用MIP试验获得不同烧结温度下的黏土砖孔隙率和孔径分布，科学选用历史建筑维修时需要配置的砖^[7]，Benavente等指出砖中孔直径小于2~5 μm 的孔隙对盐结晶最敏感。针对不同烧结温度的砖用背散射电子图像和MIP法测试孔径与盐结晶程度的关系。强调MIP试验结果中的孔径分布与盐结晶风化程度的关系^[8]，Wardeh等分析了烧结黏土材料冻胀力产生的孔隙体积变化和孔径分布。由此说明，孔径分布可以用来评价烧结黏土材料的抗冻耐久性^[9]，Sagin等通过散射电镜分析古砖的微观结构，表明小于5 μm 直径的孔径孔隙对盐结晶和冻融循环较敏感^[10]。这些研究反映了用MIP和孔结构（含孔隙率、孔径分布）反映砖抗风化性能的可行性，但是，这些方法中涉及的参数都是来自于特定的砖样品实验结果，不适用于中国古砖的评价。

2 实验样品与方法

2.1 实验样品信息

实验样品来自中国黄河流域6个方圆5km同一区域砖石古建筑实体外墙。这6个古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、19世纪。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℃。外墙砖尺寸为29cm×14cm×7cm。压汞实验样品形状为1cm×1cm×2cm长方体，样品部位取自同一块外墙砖裸露外侧面；用X荧光分析外墙砖化学成分，随机在砖裸露外侧面取样，研磨至粉末状，每样品数量20g。压汞、荧光实验样品见图3。

2.2 压汞实验

实验采用美国麦克仪器公司生产的AutoPoreIV9500型压汞仪，见图4。首先把样品干燥至恒质，然后样品置于膨胀计头部，密封、称重并计算膨胀计重量。将膨胀计送入低压站分析（绝对压



图3 压汞样品以及X荧光实验样品及处置

力0~30 ppsi^①)；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重量)后送入高压站中继续分析(绝对压力30~33000 ppsi)。在给定的外界压力下将汞强制压入砖样中，采用分步加压法，式(1)为进汞压力与相应孔径的关系。

$$P = \frac{2\sigma\cos\theta}{r} \quad (1)$$

其中， P 为压力(ppsi)； σ 为汞的表面张力(485 dyn^②/cm)； r 为毛细管半径(nm)； θ 为试样与汞液的接触角(130°)。

2.3 X射线荧光光谱实验

X射线荧光光谱实验采用德国布鲁克公司生产，型号SRS3400，见图5。样品来自各古砖裸露的外侧面，样品形状为20g粉末状。重复实验取平均值。



图4 AutoPoreIV9500型压汞仪



图5 SRS3400X射线荧光光谱实验仪

① 1ppsi=6.89476 × 10³pa。

② 1dyn=10⁻⁵N。

3 实验结果

3.1 压汞实验结果

表1 压汞实验结果

建造年代	孔隙率/%	压力/ppsi	
		小于1 μ m	1~5 μ m
10世纪	32.6183	22.861	68.984
11世纪	29.8741	30.270	66.716
12世纪	33.0540	35.794	56.667
14世纪	33.8391	69.584	25.346
16世纪	37.5161	79.306	14.956
19世纪	36.0846	81.073	14.107

3.2 X射线荧光光谱实验结果

表2 化学成分组成

(单位: %)

建造年代	质量分数									
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	Ti ₂ O	Fe ₂ O ₃	烧失量
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

4 实验结果分析

表1实验结果得出图6。随年代的久远,小于1 μ m孔径孔隙体积占总孔隙体积分数逐渐减少,1~5微米孔径孔隙体积占总孔隙体积分数逐渐增大。在环境变迁的影响下,中国古砖小于5 μ m孔径范围是孔径分布变化的敏感区域。这个实验结果和Sagin的实验结果是吻合的。Sagin等通过散射电镜分析古砖的微观结构,表明小于5 μ m直径的孔径孔隙对盐结晶和冻融循环较敏感^[10]。

实验样品来源的6个古建筑位于山西黄土高原相同区域。由表2看出,6个样品不仅主量成分含量相近,其微量成分含量也相近。山西黄土高原气候温差大,年最低气温在零下20~30 $^{\circ}$ C,常见冰雹、沙暴、飓风。高原的湿陷性黄土含有较多的水溶盐,最大水溶盐含量为4%(重量),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0.25mm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,气候变化导致古砖因气候变化而产生冻融现象。古建筑的基础部位为冻融和水溶盐两种风化形式共同作用(盐水冻融风化),古建筑中部和上部的砖因无水溶盐影响其风化形式主要是冻融风化(淡水冻融风化)。由此看出,本实验样品和Sagin研究^[10]中的实验样品环境基本相似,山西黄土高原砖石古砖样品风化形式也是盐结晶和冻融循环的作用,二者实验结果是相互吻合印证的。由于中国砖石古建筑大部分坐落于黄河流域,实验结果也反映了中国砖石古建筑的风化性能。

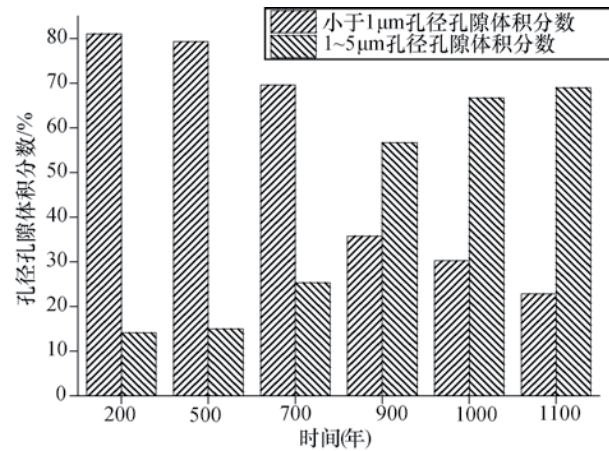


图6 不同年代古建筑砖不同孔径孔隙体积分数

5 结 论

- (1) 古砖中小于 $5\mu\text{m}$ 孔径孔隙体积的变化范围是黄河流域砖石古建筑风化的敏感区域。
- (2) 由于压汞实验样品体积小,利用古砖孔径分布的敏感性评价古砖的风化性能是可行的,有利于砖石古建筑的保护。
- (3) 建议相关部门重视和加强砖石古建筑风化性能的研究。

参 考 文 献

- [1] 秦中,张婕,彭学艺,等.四川乐山大佛风化的初步探讨.地理研究,2005,24(6):928-934.
- [2] 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.岩土工程学报,2010,32(10):1628-1632.
- [3] Maage M. Frost resistance and pore size distribution in bricks. Materials and structures, 17(101):345-350.
- [4] Robertson W D. The evaluation of the durability of limestone masonry in historic buildings studies in Conservation, 1982, supplement 1: 51-55.
- [5] Hansen W, Kung J H. Pore structure and frost durability of clay bricks. Materials and Structures, 1988, 21:443-447.
- [6] Koroth S R, Feldman D, Fazio P. Development of new durability index for clay bricks. Journal of Architectural Engineering, 1998, 4:87-93.
- [7] Elert K, Cultrone G, Navarro C R, et al. Durability of bricks used in the conservation of historic buildings-influence of composition and microstructure. Journal of cultural heritage, 2003, 4:91-99.
- [8] Benavente D, Linares-Fernandez L, Cultrone G, et al. Influence of microstructure on the resistance to salt crystallization damage in brick. Materials and Structures, 2006, 39:105-113.
- [9] Wardeh G, Perrin B. Freezing-thawing phenomena in fired clay materials and consequences on their durability. Construction and Building Materials, 2008, 22:820-828.
- [10] Sagin E U, Boke H. Characteristics of bricks used in the domes of some historic bath buildings. Journal of Cultural Heritage, 2013, 145:e73-e76.