

• 水利与土木工程 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202400169



本刊网刊

盐渍环境下古建筑青砖腐蚀机理研究及剩余寿命预测

吴安利^{1,2,3}, 郭增平^{1*}, 郝负洪^{1,2,3}, 吴日根¹, 宣姣羽¹

(1. 内蒙古工业大学 土木工程学院, 内蒙古自治区 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古自治区建筑检测鉴定与安全评估工程技术研究中心, 内蒙古自治区 呼和浩特 010051; 3. 内蒙古自治区土木工程结构与力学重点实验室, 内蒙古自治区 呼和浩特 010051)

摘要:针对内蒙古中西部地区盐渍环境下古建筑青砖的常见病害及服役寿命短,模拟古建筑墙体青砖在可溶盐侵蚀下形成的损伤破坏,配制 3 种盐溶液对青砖进行 5、10、15、20、25、30、35 和 40 次干湿循环腐蚀加速试验,一次干湿循环试验浸泡与 60 °C 烘干(时间均为 12 h),测试其宏观性能、微观形貌和物相的变化,并采用 Wiener 过程理论模型预测青砖寿命,以达到失效阈值的时间,通过腐蚀损伤速度与量化关系对内蒙古中西部盐渍环境下古建筑青砖的剩余寿命进行预测。结果表明:随着盐-干湿循环次数的增加,青砖的宏观耐久性性能呈差异性的退化趋势,退化程度大小关系为 5%Na₂SO₄溶液>2.5%Na₂SO₄+2.5%NaCl 复合盐溶液>5%NaCl 溶液,青砖内部孔隙中盐结晶压力破坏、矿物质溶蚀水解、泥化和离子间置换反应等致其腐蚀劣化,在盐-干湿循环下青砖表现形貌与微观结构同时存在着不同程度的损伤破坏,微观结构的损伤使其宏观性能不断降低。在 5%Na₂SO₄溶液、5%NaCl 溶液和 2.5%Na₂SO₄+2.5%NaCl 复合盐溶液中,在盐-干湿循环腐蚀加速试验下,青砖的寿命预测分别为 1 097、1 646 和 1 153 h;在内蒙古中西部盐渍环境下古建筑青砖的剩余寿命预测分别为 120、139 和 124 a,因此在该地区盐渍环境下,古建筑青砖剩余寿命保守估计至少为 120 a。试验研究结果为古建筑青砖的耐久性评估及保护修缮等提供了指导性意见。

关键词:盐-干湿循环;古建筑青砖;盐结晶压力;微观形貌;物相变化;剩余寿命预测

中图分类号:TU522.1

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2026)02-0267-11

古建筑是中国传统文化重要组成部分,近些年党和国家作出重要指示:“促进文化事业和文化产业繁荣发展,推动中华优秀传统文化的保护传承”。对古建筑的保护已成为当前迫切需要研究解决的问题。内蒙古中西部地区有大量的古建筑^[1],同时该地区分布着大面积的盐渍土,土壤中可溶盐种类齐全且含量较高^[2]。通过对古建筑墙体青砖取样检测与仪器设备分析发现^[3-5],土壤中可溶盐伴随雨水及地表水上升到墙体最大 3 m 高度,造成青砖损伤破坏^[3],严重影响古建筑的安全性与耐久性。

国内学者对古建筑青砖的物理力学性能^[6]、病害原因^[7]、病害类型^[8]、无损检测技术^[5]及加固修复^[9]等方面进行研究,范永丽等^[10]通过分析得出可溶盐是造成古建筑墙体青砖损伤破坏的重要因素;袁玉卿等^[11]通过试验

研究了碳酸盐侵蚀作用下对古建筑青砖的损伤破坏。目前,古建筑青砖的腐蚀机理研究多集中于宏观层面的耐久性性能退化分析,将微观结构形貌的变化与宏观耐久性演变相结合以揭示青砖腐蚀机理的研究相对较少,对于盐渍环境下古建筑青砖的剩余寿命预测更是鲜有报道。因此,对盐渍环境下古建筑青砖腐蚀机理研究以及剩余寿命预测已成为当前重要的研究内容。

综上,针对内蒙古中西部地区盐渍环境特征,模拟实际盐渍环境对古建筑青砖损伤进行盐-干湿循环腐蚀加速试验,研究其宏观耐久性性能损伤退化,通过计算表征内部孔隙结构中盐结晶压力、微观形貌和矿物质成分变化来揭示古建筑青砖腐蚀机理。以 Wiener 过程理论模型,对青砖进行寿命预测,结合古建筑服役年限、始建青砖的抗压强度等,在盐-干湿循环腐蚀加速试验下,青

收稿日期:2024-03-13 修回日期:2024-05-31 网络出版日期:2024-07-05

基金项目:国家自然科学基金面上项目(1227190);国家自然科学基金地区项目(11862022);内蒙古直属高校基本科研业务费项目(JY20220017;JY20230098)

作者简介:吴安利(1966—),男,副教授。研究方向:建筑工程诊治;评估与改造。E-mail:13848113028@163.com

* 通信作者:郭增平, E-mail:g913017@163.com

砖达到失效阈值,根据损伤速度与盐渍环境下青砖损伤程度量化关系,对内蒙古中西部地区盐渍环境下古建筑青砖剩余寿命进行预测。研究结果可为古建筑青砖的耐久性评估以及保护修缮提供理论指导。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

古建筑青砖具有极高的历史价值,材料珍贵且难以获取,试验使用仿古青砖代替古青砖,通过对比内蒙古隆盛庄古建筑青砖与仿古青砖表观形貌,如图 1 所示,可知两者材质间具有较高的相似性。

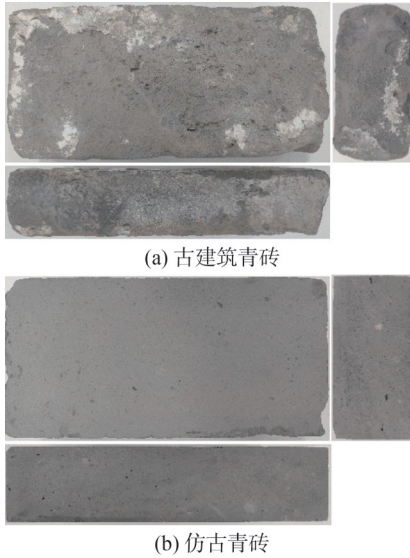


图 1 青砖表观形貌

Fig. 1 Appearance morphology of green bricks

表 1 为青砖物理性能对比。由表 1 可知,古青砖与仿古青砖在密度与吸水率方面具有一定相似性,由于古青砖长期经历自然环境因素影响,具有较高的孔隙率。

表 1 青砖物理性能对比

Tab. 1 Comparison of physical properties of green bricks

青砖类型	密度/(g·cm ⁻³)	吸水率/%	孔隙率/%	数据来源
隆盛庄	1.62	18.94	9.51	取样
山西晋北	1.50	17.32	26.42	文献[12]
山西北部	1.58~1.83	9.49~19.14	—	文献[13]
仿古青砖	1.74	17.42	6.24	

表 3 青砖 XRF 成分对比

Tab. 3 XRF composition comparison analysis of blue bricks

青砖来源	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅	MnO	其他
山西弘福寺青砖 ^[4]	60.92	11.18	13.32	6.14	4.95	—	1.56	0.76	0.53	0.21	0.11	—
山西平遥古城青砖 ^[3]	61.78	12.17	7.76	4.19	2.22	2.65	2.66	0.58	—	0.14	0.07	0.54
内蒙古隆盛庄	57.97	16.54	10.54	5.37	3.58	2.33	1.88	0.73	0.35	0.19	0.09	0.43
仿古青砖	60.41	16.38	8.62	5.16	3.85	2.53	1.84	0.71	0.07	0.20	0.08	0.15

表 2 为青砖抗压强度对比。仿古青砖平均抗压强度为 10.10 MPa,标准值为 7.88 MPa,符合烧结普通砖 MU10 强度等级要求^[14];古青砖与仿古青砖的抗压强度差值在 1.33 MPa 范围之内。综合分析,古青砖与仿古青砖物理力学性能接近。

表 2 青砖抗压强度对比

Tab. 2 Compressive strength of green bricks

青砖来源	抗压强度/MPa	数据来源
山西大同市	11.43	文献[13]
山西平遥县	10.35	文献[13]
内蒙古隆盛庄	9.02	取样
仿古青砖	10.10	

通过 X 射线荧光光谱分析(XRF)测试古青砖与仿古青砖的氧化物成分,可知其主要成分组成包括 SiO₂、Al₂O₃、CaO、Fe₂O₃、MgO、K₂O 和 Na₂O 等;通过 X 射线衍射(XRD)测试古青砖与仿古青砖矿物质组成,可知其主要成分包括石英(quartz)、钠长石(calcite)、钙长石(anorthite)、方解石(calcite)、微斜长石(microcline)及黏土矿物(clay mineral),青砖 XRD 衍射图谱分析如图 2 所示,两者物质成分接近。青砖 XRF 成分对比如表 3 所示。该仿古青砖是由黏土为原料按古青砖的传统烧制工艺生产制作而成,以保证古建筑青砖在原材料和工艺上具有相似性。综上试验得出,可以用仿古青砖代替古青砖。

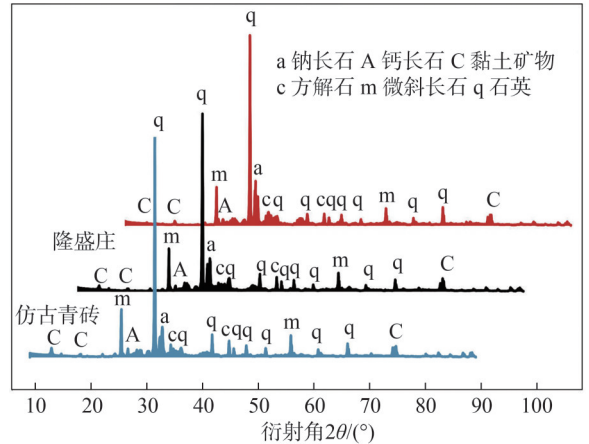


图 2 青砖 XRD 衍射图谱分析

Fig. 2 X-ray diffraction pattern analysis of green bricks

1.2 试验方法

对内蒙古中西部地区分布的盐渍土取样检测,土壤中易溶盐含量如表4所示,该地区盐渍土中可溶盐含量多以 Na^+ 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 为主。参考溶液浓度设计^[15],以可溶盐浓度10~20倍配制5% Na_2SO_4 溶液、5% NaCl 溶液和2.5% Na_2SO_4 +2.5% NaCl 复合盐溶液,以蒸馏水溶液作

为对比研究,模拟盐渍环境下墙体青砖损伤。对其进行盐-干湿循环腐蚀加速试验,试验分别设置5、10、15、20、25、30、35和40次干湿循环,一次干湿循环青砖试件浸泡与烘干(温度60℃)时间均为12h;开展青砖的质量、抗压强度和动弹性模量测试^[16];利用X射线衍射仪(XRD)和扫描电子显微镜(SEM)测试物相及微观形貌。

表4 内蒙古中西部地区土壤易溶盐含量

Tab. 4 Soil soluble salt contents in the central and western regions of Inner Mongolia

来源	采样点	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}	NO_3^-	HCO_3^-
巴彦淖尔市五原县	1	18.75	0.05	4.37	0	6.71	12.88	0.50	0.22	2.82
	2	27.47	0.16	4.70	5.40	25.28	33.04	0.50	0.22	6.04
呼和浩特市托克托县	1	4.27	0.04	0.13	0.10	0.52	0.59	0.48	0.26	2.37
	2	4.84	0.04	0.14	0.11	0.72	0.48	0.54	0.06	2.15
鄂尔多斯市达拉特旗	1	14.63	0.87	0.82	0.98	3.52	13.76	2.04	0.14	2.93
	2	26.20	0.09	0.70	0	23.14	38.16	1.24	0.02	3.87

2 试验结果分析

2.1 表观形貌变化

干湿循环前后青砖表观形貌变化如图3所示。由图3可知:在 Na_2SO_4 溶液中干湿循环下,青砖表面逐渐变得粗糙疏松,出现盐结晶明显析出现象,依次有薄层片状或鳞片状剥落,并伴随有颗粒酥碱粉化脱落,溶蚀使青砖内部与外部连通的孔洞数增加;随着干湿循环次数增加,青砖试件棱角处损伤缺失程度逐渐加剧,并有裂缝的形成与延伸(图3

(c))。在 NaCl 溶液中干湿循环下,青砖表面有呈簇团状和雪花状的盐结晶,并逐渐形成白色盐结晶壳,伴随表面粉化颗粒脱落;随着干湿循环次数增加,青砖试件棱角处疏松粗糙程度增加,小裂纹逐渐扩展形成贯通裂缝(图3(d))。在复合盐溶液中干湿循环后,青砖表面呈酥粉状颗粒脱落,随着干湿循环次数增加,损伤程度逐渐加剧,青砖边缘与棱角处逐渐变得疏松粗糙,损伤缺失现象逐渐加重,其损伤形式与 Na_2SO_4 溶液类似,但损伤程度比后者更低一些(图3(e))。

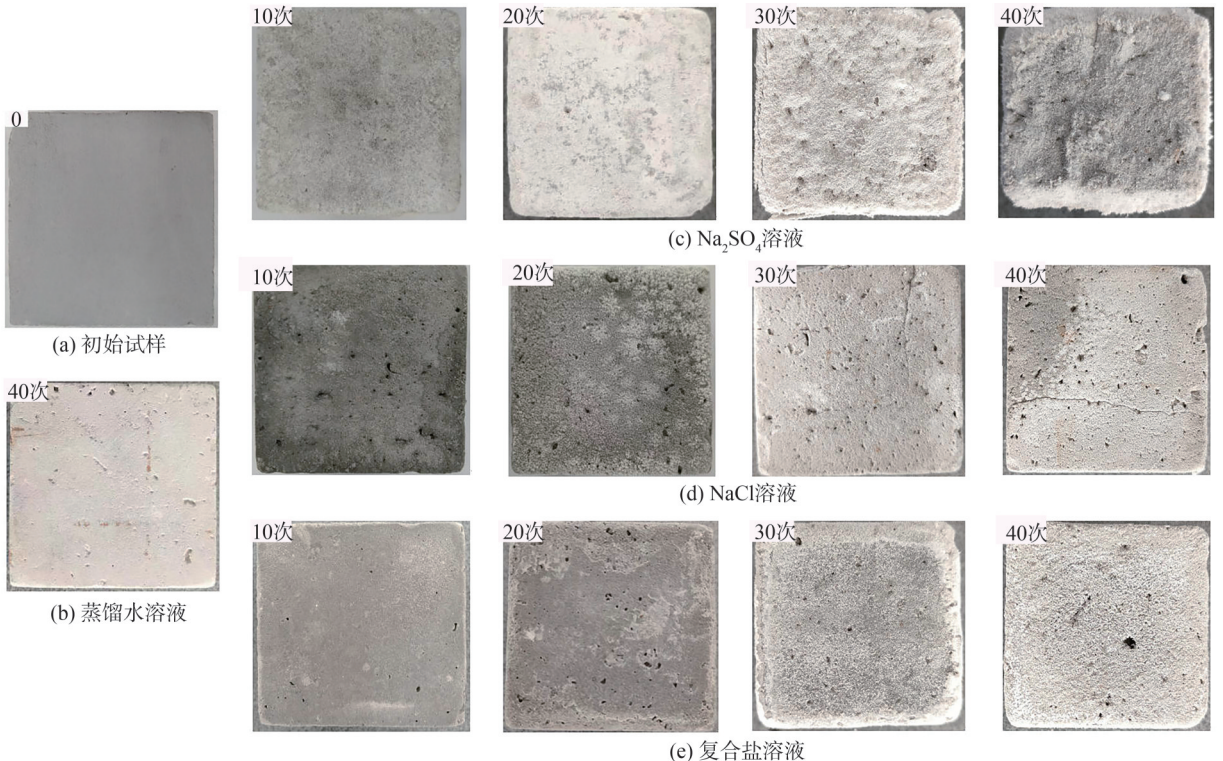


图3 青砖表观形貌变化

Fig. 3 Apparent morphology change of green bricks

2.2 质量变化

干湿循环下,不同溶液中青砖质量损失率如图 4 所示。由图 4 可知:在蒸馏水溶液中干湿循环后,青砖质量不发生变化;在盐溶液中干湿循环后,青砖的质量损失率呈先减小后增加的趋势,干湿循环 10 次后开始出现质量损失,Na₂SO₄ 溶液、NaCl 溶液和复合盐溶液干湿循环 40 次后青砖质量损失分别为 7.85%、4.16% 和 6.28%。Na₂SO₄ 溶液比复合盐溶液中青砖的质量损失多 9.2 g,复合盐比 NaCl 溶液损失多 10.2 g。干湿循环下,由于可溶盐进入青砖孔隙内部,积累溶液中溶质的质量大于青砖本体的质量损失,青砖质量增加,随着干湿循环增加,青砖本体的质量损失超过孔隙中溶质的积累量,青砖的质量损失率增加。

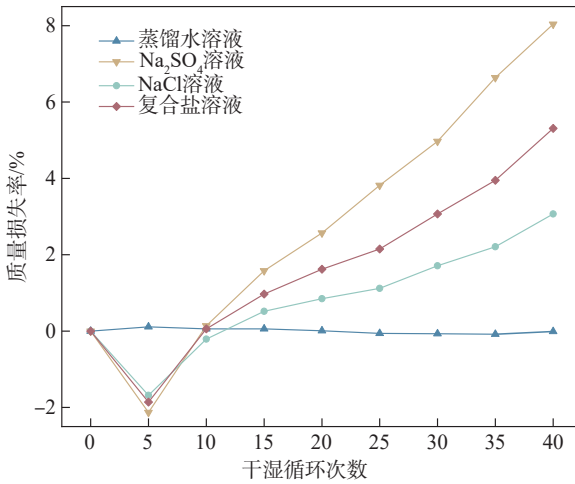


图 4 青砖质量损失率

Fig. 4 Green bricks mass loss rates

2.3 抗压强度变化

干湿循环下,不同溶液中青砖抗压强度变化如图 5 所示。由图 5 可知:蒸馏水溶液中,干湿循环后青砖的抗压强度相对稳定;盐溶液中,干湿循环后青砖的抗压强度略微增加后逐渐降低,Na₂SO₄ 溶液、NaCl 溶液

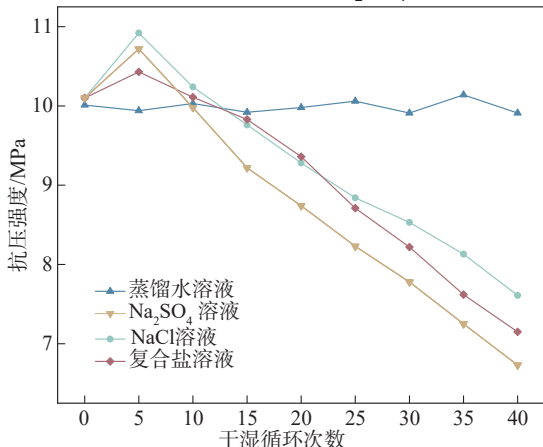


图 5 青砖抗压强度变化

Fig. 5 Change of compressive strength of green bricks

和复合盐溶液干湿循环 40 次后青砖抗压强度分别下降 3.37、2.49 和 2.95 MPa;Na₂SO₄ 溶液比复合盐溶液青砖的抗压强度多损失 4.16%,复合盐比 NaCl 溶液多损失 4.56%。干湿循环下,盐分在青砖孔隙结构中积累填充,抗压强度增加;随着干湿循环次数增加,内部孔隙结构被破坏,棱角缺失,承载面积减小,抗压强度逐渐降低。

2.4 相对动弹性模量变化

干湿循环下青砖相对动弹性模量损失如图 6 所示。由图 6 可知:在蒸馏水溶液中,干湿循环后青砖相对动弹性模量没有变化趋势;在盐溶液中,干湿循环作用下青砖相对动弹性模量损失呈先减小然后斜直线逐渐增加的趋势,干湿循环 10 次左右开始出现损失;Na₂SO₄ 溶液、复合盐溶液和 NaCl 溶液中,干湿循环 40 次青砖相对动弹性模量损失分别为 14.16%、10.82% 和 7.95%;Na₂SO₄ 溶液比复合盐溶液多损失 1.6 MPa,复合盐溶液比 NaCl 溶液多损失 1.3 MPa。干湿循环初期,盐分与矿物质不充分反应,并对孔隙结构填充致密,相对动弹性模量增加;随着干湿循环次数增加,矿物质反应破坏内部孔隙结构,相对动弹性模量损失逐渐增加。

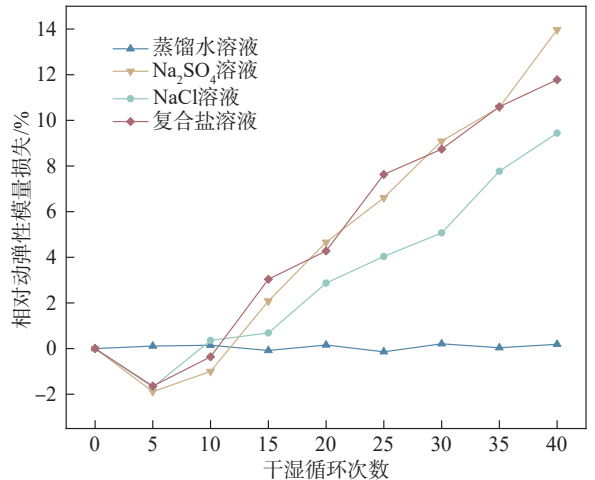


图 6 青砖相对动弹性模量损失

Fig. 6 Relative dynamic elastic modulus loss of green bricks

3 腐蚀机理分析

3.1 盐结晶压力分析

盐溶液中,干湿循环下盐分进入青砖孔隙,并在内部聚集形成盐晶体,溶液中的溶质不断析出并附着在已有盐晶体上,同时盐晶体不断溶解到盐溶液中,盐晶体体积变化,表面能也随之发生改变,晶体表面能的存在增加了晶体的溶解度,与曲率共同制约晶体累计膨胀;晶体的周围溶液浓度过饱和情况下,溶液中的溶质会向有利于结晶变化的方向不断生长,而其生长的物质基础是盐晶体表面和孔隙壁之间一层厚度为 δ 的过饱和溶液膜(δ 约为 1~2 nm)。视晶体为

理想形态下表面能相同的球状晶体,平衡状态下,溶液浓度与晶体几何参数之间满足式(1)^[17]:

$$\gamma_{CL}\kappa_{CL} = \frac{R_g T}{V_C} \ln \frac{C}{C_0} \quad (1)$$

式中: γ_{CL} 为晶/液界面的表面能; κ_{CL} 为晶体表面曲率,对于理想球状晶体而言,其大小等于 $2/r$, r 为球状盐晶体的半径; R_g 为理想气体常数,取值为 $8.314 \text{ MPa}/(\text{m}^3 \cdot \text{mol})$; T 为绝对温度,K; V_C 为理想晶体的摩尔体积, L/mol ; C/C_0 为溶液的过饱和度, mol/L 。

干湿循环下,温湿度变化使溶液蒸发导致溶质浓度升高形成过饱和溶液,盐分在孔隙中析出并形成盐结晶体,当生长至与孔壁接触时,晶体膨胀与孔隙壁接触产生的相互排斥力作用于孔壁上,盐结晶压力在宏观上表现为拉力作用,晶/液界面的表面能与曲率共同制约晶体生长的力由孔壁承担,作用于孔壁的盐结晶压力大小为^[18]:

$$P_N = R_g T \ln(\sigma_N/V_C) \quad (2)$$

式中: P_N 为盐结晶压力,MPa; σ_N 为第 N 次干湿循环后青砖孔隙中溶液过饱和度。

盐-干湿循环过程中,青砖孔隙中形成的盐结晶压力如图7所示。干湿循环过程青砖孔隙中溶液蒸发,溶质不断积累形成过饱和溶液。计算出盐结晶压力理论值最小值为 7.42 MPa ,超过青砖的抗折强度 4.08 MPa 。计算出的盐结晶压力并不完全等于盐结晶形成过程产生的破坏应力,因为盐结晶形成应力不能在青砖孔隙间进行有效传递,内部形成盐结晶压力不足以导致青砖孔隙形成大的破坏,但会导致内部孔隙变大以及微裂纹的形成,在长时间情况下发生多次反复结晶可能导致累积损伤。

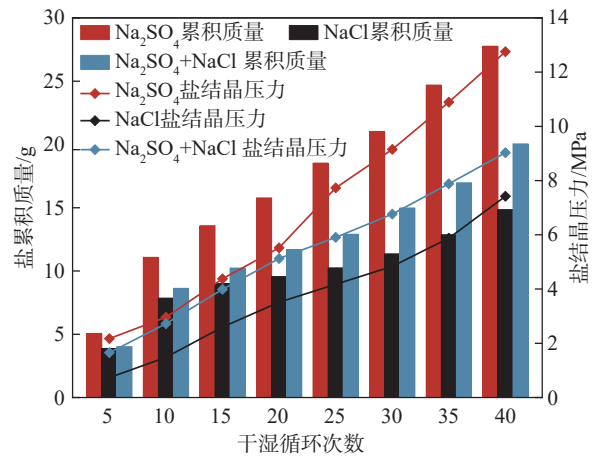


图7 青砖孔隙中的盐结晶压力

Fig. 7 Pressure of salt crystals in the pores of the blue bricks

3.2 微观形貌变化

盐溶液干湿循环前后青砖的微观形貌如图8所示。由图8可知:青砖初始形貌颗粒连接程度相同,结构致密均匀无明显的裂纹。经过盐溶液干湿循环40次后,青砖内部孔隙结构变得疏松不密实,颗粒间连接程度降低,大的矿物颗粒形成碎屑,与粉化脱落散布在试件表面,胶结物和黏土矿物等溶解、泥化流失使颗粒间孔隙变大并形成微裂纹,部分孔洞与微裂缝相连形成蜂窝状的孔隙结构(图8(b)~(d))。Na₂SO₄溶液中,经干湿循环,青砖内部结构中可见明显的块状盐结晶体,颗粒之间形成密集的微裂缝(图8(e));NaCl溶液中,经干湿循环,盐晶体在孔隙中聚集结晶,撑破矿物颗粒之间的连接,形成一条贯通的裂纹(图8(f));复合盐溶液中,经干湿循环,青砖完整的矿物颗粒层片状崩解碎裂,内部孔隙结构变大,孔洞间扩展形成微裂纹(图8(g))。

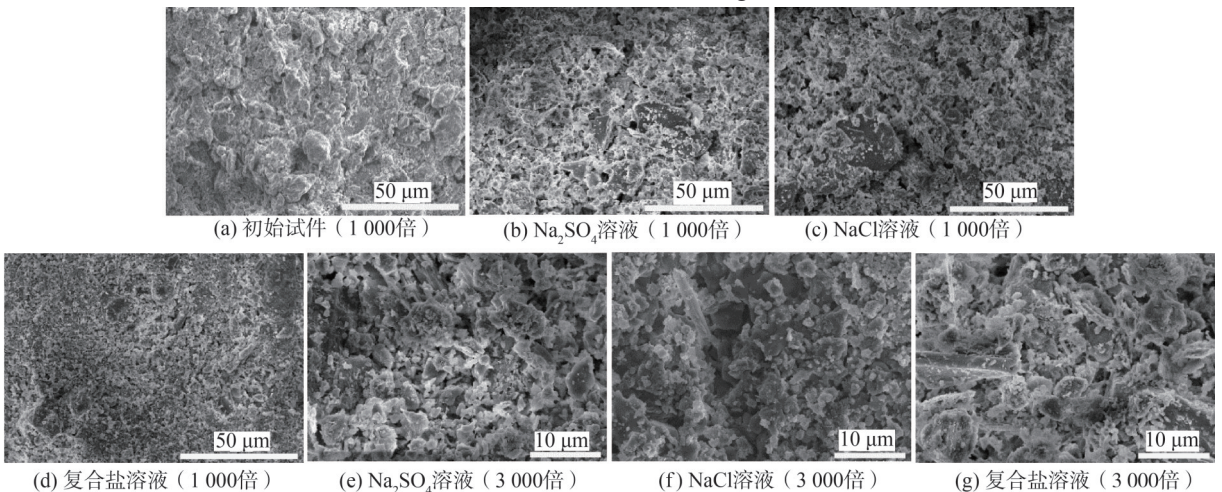


图8 盐溶液干湿循环前后青砖的微观形貌

Fig. 8 Microscopic morphology of salt solution before and after dry-wet cycle

3.3 物相变化

青砖矿物相及相对初始含量变化如图9所示。干

湿循环40次前后青砖XRD衍射图谱如图9(a)所示,蒸馏水在干湿循环下不与青砖矿物质反应;盐溶液在

干湿循环后生成新的矿物相高岭石(kaolinite),根据矿物质含量分析可知,石英和黏土矿物的含量增加,长石类矿物质总体含量减少(图9(b))。

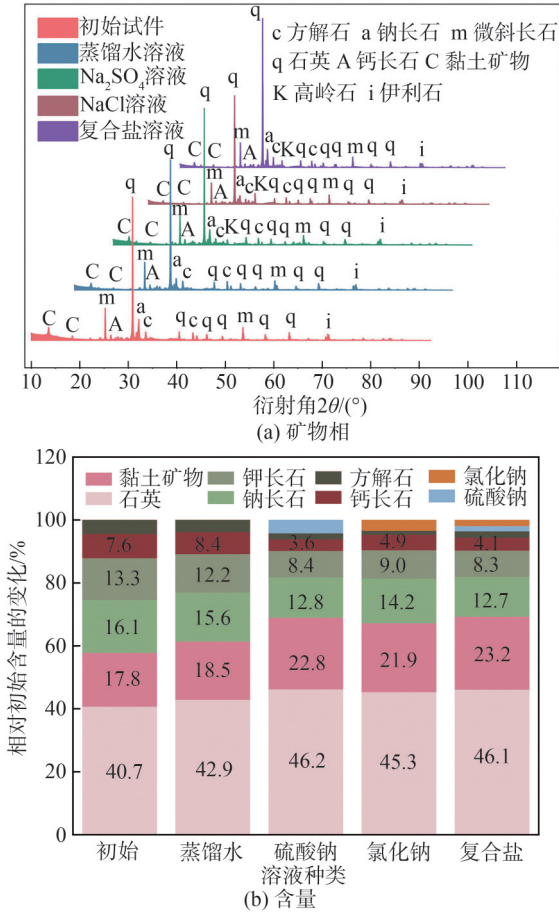
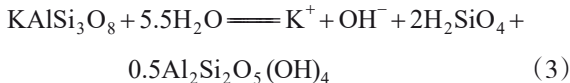


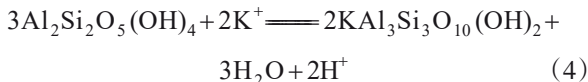
图9 青砖矿物相及相对初始含量变化

Fig. 9 Change of mineral phase and content of green bricks

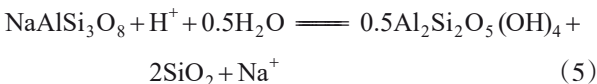
青砖中长石和黏土属于硅酸盐类矿物质,与水发生复分解反应生成酸或者碱,强酸弱碱盐或弱酸强碱盐经水解后形成不同带电荷的离子,在水中与 OH^- 或者 H^+ 结合生成新的矿物质;构成青砖的长石矿物,成分上属于强碱弱酸盐类矿物质,经过溶蚀水解后可以看到青砖表面盐分析出泛白现象,生成 SiO_2 和 KOH 以胶状或液态随水分的迁移流出,反应过程如式(3)^[19-20]所示:



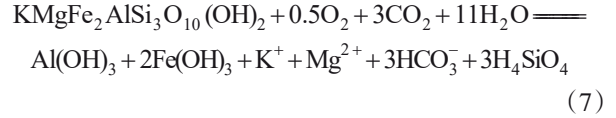
微斜长石溶蚀水解形成高岭石($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)后,再次反应生成伊利石($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$),如式(4)所示:



同时反应水解出 H^+ 离子会进一步促进长石矿物质的溶蚀反应,反应过程如下:



青砖中的少量黏土矿物质黑云母在盐溶液下与空气中的氧气和二氧化碳接触发生溶蚀反应:



黑云母是一种含铁量较高的云母,矿物质不稳定、易受各种因素影响,所以在青砖中很少以沉积物形式存在。空气中的 CO_2 溶于水与碳酸盐反应生成易溶盐,如生成碳酸氢钠 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 在水溶液中以离子形态流失。干湿循环过程中 Na_2SO_4 结合水分子形成 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 会使体积膨胀416%,产生水合盐结晶压力也会使孔隙结构破坏。方解石碳酸类矿物质溶解出 Ca^{2+} 与 SO_4^{2-} 结合形成一种难溶性 CaSO_4 ,结合水分子形成 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,会使体积增大至少1倍^[21],聚集积累对孔隙结构产生破坏。 NaCl 溶液为弱酸性溶液,能加快对碳酸盐类如方解石溶蚀反应。长石类矿物质溶蚀、溶解水解以及离子之间置换反应后,剩余残存黏土矿物,也会随水体发生泥化脱落。伴随着温湿度变化反复地溶解-结晶,颗粒间黏结程度降低,青砖的抗压强度等宏观性能退化。

通过盐结晶压力、微观形貌和物相变化分析,盐溶液干湿循环过程中涉及盐结晶、溶蚀水解、泥化、溶解和离子间的物理化学反应。青砖孔隙中盐分聚集结晶形成膨胀力不断使颗粒粉化以及剥落程度增加,孔隙结构形成微裂纹随着循环次数增加逐渐扩展形成宏观损伤破坏。青砖由石英、长石、方解石以及黏土矿物质等构成了强度骨架,盐结晶破坏形成碎屑与颗粒脱离本体,加速矿物质发生溶蚀水解、离子间置换和黏土泥化脱落,随溶液流动迁移与水分蒸发将物理化学反应颗粒携带出表面。青砖内部孔隙结构变大,与外部连通的孔洞和微裂缝不断扩展发育,结构间连接程度降低,颗粒骨架变得松散使材质疏松,生成的黏土矿物高岭石更加泥化土状化,材质脆弱硬度小,微观形貌的损伤变化滞后于表现形貌变化。青砖的损伤形式为表面与内部都同时存在一定损伤破坏,微观结构的损伤使青砖的宏观性能不断降低。

4 基于Wiener过程青砖剩余寿命预测

4.1 青砖的寿命预测

Wiener过程也称为布朗运动过程,适用于表征具有大量微小损伤累计导致材料耐久性性能发生变化的非单调退化过程^[22]。盐渍环境下,古建筑青砖长期遭

受土壤中可溶盐的侵蚀,盐分的物理结晶和化学反应有着明显的加速作用,因此,使用 Wiener 过程对青砖进行寿命预测。考虑到青砖的耐久性能具有偏离原点的趋势,选用具有漂移性质的 Wiener 过程建立模型,漂移性质 Wiener 过程 $(X_k(t); t > 0)$ 可以表示为:

$$X_k(t) = \alpha t + \beta B(t) \quad (9)$$

式中: $X_k(t)$ 在 t 时刻青砖的退化量, $k=1$ 时为青砖的质量退化量, $k=2$ 时为青砖的抗压强度退化量; α 为漂移系数; β 为退化过程中的扩散系数; $B(t)$ 为标准的 Wiener 过程。

标准的 Wiener 过程 $\{B(t); t > 0\}$ 具有如下性质:

1) $X_k(0) = 0$; 2) $(X_k(t); t > 0)$ 具有相互独立的增量,增量 $X_k(t + \Delta t) - X_k(t) \sim N(\alpha \Delta t, \beta^2 \Delta t)$; 3) $X_k(t)$ 服从均值为 αt 、方差为 $\beta^2 t$ 的正态分布。

假设 P 为青砖的失效阈值, T 为青砖达到失效阈值的时间,则:

$$T = \inf \{t \mid X_k(t) > P, t \geq 0\} \quad (10)$$

在 t 时刻 $X_k(t)$ 的概率密度函数为 $f(x_k, t)$, 青砖在 t 时间段内不失效的概率为:

$$P\{T > t\} = P\{X_k(t) < P\} = \int_{-\infty}^P f(x_k, t) dx \quad (11)$$

依据 Fokker-Planck 方程得到概率密度函数为:

$$f(x, t) = \frac{1}{\beta \sqrt{2\pi t}} \left\{ \exp\left[-\frac{(x - \alpha t)^2}{2\beta^2 t}\right] - \exp\left[\frac{2\alpha P}{\beta^2}\right] \times \exp\left[-\frac{(x - 2P - \alpha t)^2}{2\beta^2 t}\right] \right\} \quad (12)$$

将式(12)代入(11)中进行推导,得到 T 分布的可靠度函数和概率密度函数分别如式(13)和(14)所示:

$$R_k(t) = \Phi\left(\frac{\alpha t - P}{\beta \sqrt{t}}\right) + \exp\left(\frac{2\alpha P}{\beta^2}\right) \Phi\left(\frac{-P - \alpha t}{\beta \sqrt{t}}\right) \quad (13)$$

式中, Φ 为标准正态分布函数。

$$f(t) = \frac{P}{\sqrt{2\pi\beta^2 t^3}} \exp\left(-\frac{(P - \alpha t)^2}{2\beta^2 t}\right) \quad (14)$$

由于可靠度函数为连续型函数,采用极大似然估计对 Wiener 过程参数 α 和 β^2 进行估计,漂移性质 Wiener 过程退化模型的似然函数为:

$$L(\alpha, \beta^2) = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m \frac{1}{\sqrt{2\beta^2 \pi \Delta t_{ij}}} \exp\left[-\frac{(\Delta X_{ij} - \alpha \Delta t_{ij})^2}{2\beta^2 \Delta t_{ij}}\right] \quad (15)$$

直接求解上述似然函数方程得到的 α 和 β^2 参数如式(16)和(17)所示:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^m X_{in}}{\sum_{i=1}^m t_{in}} \quad (16)$$

$$\beta^2 = \frac{1}{\sum_{j=1}^m n} \left[\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \frac{\Delta X_{ij}^2}{\Delta t_{ij}} - \frac{\left(\sum_{i=1}^m X_{in}\right)^2}{\sum_{i=1}^m t_{in}} \right] \quad (17)$$

式(15)~(17)中: X_{in} 为第 n 个试件在 $1 \sim i$ 次测试性能; X_{ij} 为第 j 个试件在 $1 \sim i$ 次测试性能; Δt_{ij} 为第 j 试件在第 i 次测试性能需要的时间; $\Delta X_{ij} = X_{ij} - X_{i(j-1)}$; n 为青砖试件数量; t_{in} 为第 n 个试件在 i 次测试的时间。

青砖在盐溶液干湿循环下的退化量计算 Wiener 过程参数,并以青砖质量损失率 5% 和抗压强度损失率 25% 为达到耐久性能失效状态,将计算参数代入可靠度函数式(13)中,分别得到在不同盐溶液中干湿循环下青砖的寿命预测曲线,如图 10 所示。

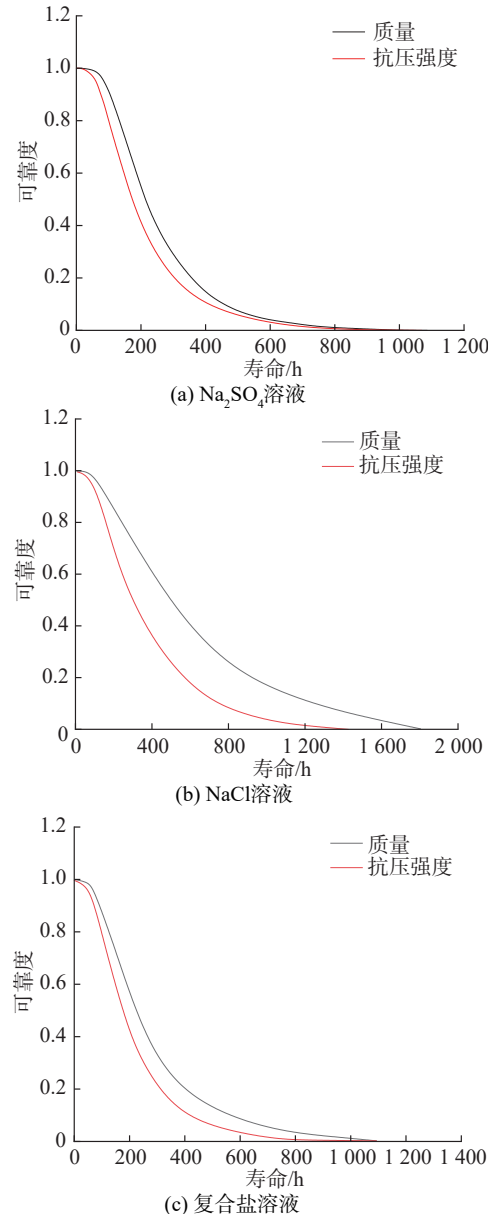


图 10 青砖寿命预测曲线

Fig. 10 Life prediction curves of green bricks

从图 10 中得出,在 Na_2SO_4 溶液、 NaCl 溶液和复合盐溶液干湿循环腐蚀加速试验下,以青砖的质量计算得到的寿命预测分别为 1 086、1 802 和 1 111 h,以抗压强度计算得的寿命预测分别 1 109、1 490 和 1 196 h,平均寿命预测分别为 1 097、1 646 和 1 153 h。

4.2 内蒙古中西部盐渍环境下古建筑青砖的剩余寿命预测

以腐蚀程度为基准进行寿命预测,是在建筑结构使用 T_0 年后依据耐久性损伤速度预测其剩余寿命。以古建筑砖墙有效截面损失 25% 时为建筑结构达到失效状态, T_r 为剩余使用寿命^[23]:

$$T_r = \left(\frac{aA_0}{A_0 - A_r} - 1 \right) T_0 \quad (18)$$

式中: T_0 为结构已使用年限; T_r 为剩余使用寿命; A_0 为砖墙的有效截面积; A_r 为当前砖墙的剩余有效截面积; a 为结构耐久性系数,砖墙取 0.25。

参考以砖墙腐蚀程度对古建筑墙体青砖剩余寿命进行预测。统计内蒙古中西部现役古建筑有 300 a 历史^[1],通过对内蒙古历史气候环境调查,取最大年平均干湿循环次数^[24],考虑青砖的强度受多种因素影响,预测初始青砖抗压强度为 15 MPa,对现役古建筑青砖取样开展抗压强度及回弹测试,与仿古青砖的平均抗压强度 10.1 MPa 接近。通过盐-干湿循环腐蚀加速试验下,仿古青砖损伤退化速度与服役年限内古建筑青砖损伤量化关系,对古建筑青砖进行剩余寿命预测,青砖损伤度计算 V 为^[25]:

$$V = \frac{D_2 - D_1}{h} \quad (19)$$

式中, D_1 为青砖初始抗压强度, h 为干湿循环次数, D_2 为盐-干湿循环后青砖抗压强度。

计算服役年限内盐渍环境下青砖损伤度 V_1 与腐蚀加速试验下青砖损伤度 V_2 。腐蚀加速试验下, Na_2SO_4 溶液、 NaCl 溶液和复合溶液在分别经过 30、45 和 35 次干湿循环后,青砖达到失效阈值;在实际盐渍环境下经过 T_a 年(1.64、2.01 和 1.84 a)达到失效阈值,腐蚀加速试验下与盐渍环境下损伤对比,计算青砖的剩余寿命为:

$$T_r = T_0 - T_a \frac{V_2}{V_1} \quad (20)$$

内蒙古中西部地区的 Na_2SO_4 溶液、 NaCl 溶液和复合盐溶液在盐渍环境下,青砖剩余寿命分别为 120、139 和 124 a,在该地区盐渍环境下古建筑青砖剩余寿命至少为 120 a。

青砖剩余寿命与所在古建筑剩余寿命年限相同,古建筑剩余寿命预测经验评估为:

$$L_r = \frac{1 - 1.4D}{\eta_i r} \quad (21)$$

式中, D 为结构损伤系数, η_i 为建筑的重要性系数, r 为房屋使用年限的折旧率。

对于一般损坏且还未达到严重损坏的古建筑,损伤系数取值为 0.4,计算古建筑剩余寿命为 108 a;青砖剩余寿命预测与所处古建筑达到与之相对应甚至更长剩余寿命,通过对古建筑剩余寿命评估可知,古建筑青砖剩余寿命预测在可靠范围之内。通过对比环境损伤因子可知,冻融循环作用下的青砖剩余寿命要小于盐-干湿循环下剩余寿命^[26]。综上所述,对青砖剩余寿命预测具有一定的合理性,为今后古建筑青砖的耐久性评估和保护修缮提供一定参考与借鉴。

5 结 论

1) 试验研究表明,在蒸馏水溶液干湿循环下,青砖耐久性不发生退化趋势,在 Na_2SO_4 溶液、 NaCl 溶液和复合盐溶液中干湿循环下耐久性退化程度先减小后增加且随着干湿循环次数增加,呈差异性退化趋势,退化程度为 Na_2SO_4 溶液 > 复合盐溶液 > NaCl 溶液。

2) 通过对青砖的微观形貌与物相变化进行分析,发现盐结晶破坏使颗粒粉化与剥落程度增加,孔隙结构破坏形成微裂纹逐渐发展成宏观裂缝,加速水盐进入内部与矿物质发生溶蚀水解、泥化和离子间置换等化学反应,材质变得疏松、硬度小,内部孔隙结构变大,结构间连接程度降低,与外部连通的孔洞和微裂缝不断扩展发育,即微观结构的损伤使青砖的宏观性能不断降低。

3) 用 Wiener 过程建立寿命预测模型, Na_2SO_4 溶液、 NaCl 溶液以及复合盐溶液中干湿循环下,青砖的寿命预测分别为 1 097、1 646 和 1 153 h;在内蒙古中西部盐渍环境下,青砖的剩余寿命分别为 120、139、124 a,故在该地区盐渍环境下古建筑青砖剩余寿命至少为 120 a。

参考文献:

- [1] 张鹏举. 内蒙古古建筑[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [2] Hao Yunhong, Jiang Nan, Fan Jincheng, et al. Corrosion resistance of concrete in saline soil environment[J]. Concrete, 2016(8): 8-10. [郝负洪, 江南, 樊金承, 等. 盐渍土环境下混凝土的抗腐蚀性能研究[J]. 混凝土, 2016(8): 8-10.]
- [3] Han Weicheng, Pei Sumin, Liu Fang. Material characterization of the brick in the Ming Dynasty heritage wall of Pianguan County: A case study[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 16: e00940.
- [4] Fan Yongli, Song Shaolei, Huang Jizhong, et al. Study on weathering mechanism of masonry bricks of ancient temples in Shanxi Province using Dingxiang Hongfu

- temple masonry brick[J]. *Construction and Building Materials*,2019,222:500–510.
- [5] Wang Yansong, Wu Xiaomin, Wu Guanglong, et al. Factors influencing the surface quality of ancient blue bricks based on instrument analysis[J]. *Journal of Building Materials*,2021,24(4):851–857.[王炎松,伍小敏,吴光龙,等.基于仪器分析的古青砖表面品质影响因素[J]. *建筑材料学报*,2021,24(4):851–857.]
- [6] Gao Heng, Sun Sheng, Jin Pujun. Composition, structure and properties of the Ming dynasty bricks engraved with “Qianwei” used in Xi’an circumvallation[J]. *Journal of Building Materials*,2020,23(1):122–127.[高衡,孙升,金普军.西安城墙明代“前卫”字砖材料成分、结构与性能研究[J]. *建筑材料学报*,2020,23(1):122–127.]
- [7] Yue Jianwei, Lin Jian, Wang Yongfeng, et al. Study on the improvement of soil water in Kaifeng imitation site[J]. *Advanced Engineering Sciences*,2020,52(1):46–55.[岳建伟,林健,王永锋,等.开封仿遗址土水理性质的改良研究[J]. *工程科学与技术*,2020,52(1):46–55.]
- [8] Zhang Yue, Jin Pujun, Wang Su, et al. Studies on the mechanisms of the surface weathering disease and erosion of the bricks of the Xi’an City wall[J]. *Relics and Museology*,2019(4):106–112.[张悦,金普军,王肃,等.西安城墙古砖表面风化病害及腐蚀机理研究[J]. *文博*,2019(4):106–112.]
- [9] Lu Junlong, Xing Weiwei, Wang Zhenshan, et al. Analysis of hysteresis properties of seismic damaged masonry pagoda restraint by rigid hoops[J]. *Advanced Engineering Sciences*,2021,53(6):81–92.[卢俊龙,邢威威,王振山,等.震损砌体古塔围箍加固后的滞回特性分析[J]. *工程科学与技术*,2021,53(6):81–92.]
- [10] Fan Yongli, Song Shaolei, Lu Yi, et al. Research on the weathering and erosion of wall bricks(carvings) using thermodynamics[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*,2020,32(1):1–9.[范永丽,宋绍雷,路易,等.结合热力学对古建筑墙体砖(雕)风化侵蚀机理探究[J]. *文物保护与考古科学*,2020,32(1):1–9.]
- [11] Yuan Yuqing, Zhang Zhen, Wang Xiawei, et al. Salt erosion influence on compressive strength of Kaifeng City wall imitative bricks[J]. *Journal of Henan University(Natural Science)*,2022,52(1):95–101.[袁玉卿,张震,王夏伟,等.盐蚀对开封城墙仿制砖抗压强度影响[J]. *河南大学学报(自然科学版)*,2022,52(1):95–101.]
- [12] Li Bin. Study on the performance of the original components of ancient bricks and tiles in the Ming and Qing dynasties in Shanxi Province[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology,2020.[李斌.山西明清时期古砖瓦原构件性能研究[D].太原:太原理工大学,2020.]
- [13] Jiang Xiaoxi, Yang Xiaofang, Qiao Zhen, et al. Study on properties of Ming Dynasty great wall black bricks in Northern Shanxi Province[J]. *Fly Ash Comprehensive Utilization*,2022,36(3):79–85.[姜效玺,杨晓芳,乔榛,等.山西西北部明长城青砖性能研究[J]. *粉煤灰综合利用*,2022,36(3):79–85.]
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 烧结普通砖:GB/T 5101—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [15] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土试验规程:SL/T 352—2020[S].北京:中国水利水电出版社,2020.
- [16] 中华人民共和国国家文物局. 文物建筑维修基本材料+青砖:WW/T0049—2014[S].北京:文物出版社,2014.
- [17] Correns C W. Growth and dissolution of crystals under linear pressure[J]. *Discussions of the Faraday Society*,1949,5:267–271.
- [18] Jiao Dading. Experimental study on the effect of the sulfate on the weathering of glutenite in Maijishan[D]. Lanzhou: Lanzhou University,2020.[焦大丁.硫酸盐对麦积山砂砾岩风化影响的试验研究[D].兰州:兰州大学,2020.]
- [19] Li Tianzhen, Fan Yongli, Wang Kaiyi, et al. Methyl-modified silica hybrid fluorinated Paraloid B-72 as hydrophobic coatings for the conservation of ancient bricks[J]. *Construction and Building Materials*,2021,299:123906.
- [20] Li Zhen, Zhang Jingke, Liu Dun, et al. Experimental study on indoor simulated deterioration of sandstone of Xiaofowan statues at Dazu Rock Carvings[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*,2019,41(8):1513–1521.[李震,张景科,刘盾,等.大足石刻小佛湾造像砂岩室内模拟劣化试验研究[J]. *岩土工程学报*,2019,41(8):1513–1521.]
- [21] Ren Kefa, Xie Zhenbin, Wang Ling, et al. Salt weathering mechanism and climate response in Niujiaozhai Grottoes, Renshou, Sichuan[J]. *Geological Review*,2023,69(4):1368–1386.[任科法,谢振斌,汪灵,等.四川仁寿牛角寨石窟盐风化作用机理与气候响应[J]. *地质论评*,2023,69(4):1368–1386.]
- [22] Zhang Xuepeng, Zhang Rongling, Wang Xiaoping, et al. Damage evolution and life prediction of concrete in saline soil based on Wiener process theory[J]. *Journal of Building Materials*,2023,26(11):1192–1199.[张学鹏,张戎令,王小平,等.基于 Wiener 过程理论的盐渍土中混凝土损伤演化及寿命预测[J]. *建筑材料学报*,2023,26(11):1192–1199.]
- [23] Zhang Xiuliang. Structural analysis and residual service life prediction of ancient gardens in Lingnan in Qing Dynasty[D]. Guangzhou: South China University of Technology,2016.[张秀亮.岭南清代园林古建筑结构分析与剩余使用寿命预测研究[D].广州:华南理工大学,2016.]
- [24] Zhao Shuixia, Zhou Quancheng, Wang Wenjun, et al. Dry-wet climate characteristics of Inner Mongolia based on standardized precipitation index[J]. *Journal of China Insti-*

tute of Water Resources and Hydropower Research, 2022, 20(1):10–19. [赵水霞, 周泉成, 王文君, 等. 基于 SPI 指数的内蒙古地区干湿气候特征[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2022, 20(1):10–19.]

[25] Liu Weidong, Liu Tianyu. Experimental study on durability of brick masonry of protected historical building in service [J]. Journal of Building Structures, 2018(S2): 279–283. [刘

卫东, 刘天宇. 现役历史保护建筑砌体用砖的耐久性测试研究[J]. 建筑结构学报, 2018(S2): 279–283.]

[26] Zhao Peng. Damage and deterioration law and mechanism of blue brick and its masonry structure under load and environment [D]. Nanjing: Southeast University, 2016. [赵鹏. 荷载与环境作用下青砖及其砌体结构的损伤劣化规律与机理[D]. 南京: 东南大学, 2016.]

Study on Corrosion Mechanism and Prediction of Remaining Life of Ancient Architectural Bricks Under Salty Environment

WU Anli^{1,2,3}, GUO Zengping^{1*}, HAO Yunhong^{1,2,3}, WU Rigen¹, XUAN Jiaoyu¹

(1.School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2.Inner Mongolia Autonomous Region Engineering Research Center of Structure Inspection, Appraisal and Safety Assessment, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 3.Key Laboratory of Civil Engineering, Structure and Mechanics of Inner Mongolia, Hohhot 010051, China)

Abstract:

Objective This study addresses the deterioration behavior and service life of ancient architectural blue bricks in saline environments in central and western Inner Mongolia. It simulates damage development in ancient wall bricks subjected to soluble salt corrosion, analyzes corrosion mechanisms and remaining service life prediction for blue bricks under saline conditions, and provides theoretical guidance for preserving ancient blue bricks and predicting their remaining service life in saline environments of central and western Inner Mongolia.

Methods Based on the characteristics of saline-alkali soil environments in central and western Inner Mongolia, the primary types and concentrations of soluble salts in the soil were identified, and three groups of solutions were prepared at 10 to 20 times the soluble salt concentration, including a 5% Na₂SO₄ solution, a 5% NaCl solution, and a composite salt solution consisting of 2.5% Na₂SO₄ + 2.5% NaCl. A distilled water solution was used as the control group for comparative analysis. Blue bricks were subjected to accelerated corrosion tests for 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, and 40 cycles under alternating wet and dry conditions. Each corrosion cycle consisted of 12 h of immersion followed by 12 h of drying at 60 °C. Macroscopic changes in brick mass, compressive strength, and relative dynamic modulus were measured. Scanning electron microscopy (SEM) was utilized to examine changes in internal micropore structures before and after testing, while X-ray diffraction (XRD) was employed to analyze phase transformations. The service life of the bricks was predicted using the Wiener process theoretical model. Considering the service life requirements of ancient structures and the initial compressive strength of the bricks, the failure time threshold was determined. The remaining service life of ancient bricks in the saline environments of central and western Inner Mongolia was predicted by quantifying the relationship between damage rate and damage severity under saline conditions.

Results and Discussions As the number of salt wet and dry corrosion cycles applied to the blue bricks gradually increased, changes in visual morphology indicated that the bricks exhibited no significant damage after wet and dry cycling in the distilled water solution. Under Na₂SO₄ solution cycles, damage and material loss at the edges and corners of the specimens progressively intensified, accompanied by crack initiation and propagation. After NaCl solution cycles, the edges and corners of the specimens became increasingly loose and rough, and small cracks gradually developed into penetrating cracks. Under composite salt solution wet and dry cycling, the edges and corners of the blue bricks gradually became loose and rough, with damage and material loss continuously worsening. Overall, as the number of accelerated salt wet and dry corrosion cycles increased, the degree of damage to the blue bricks consistently intensified. Analysis of macroscopic performance indicated that the mass, compressive strength, and relative dynamic modulus of the blue bricks exhibited differentiated degradation trends. The severity of degradation followed the order of 5% Na₂SO₄ solution > 2.5% Na₂SO₄ + 2.5% NaCl composite salt solution > 5% NaCl solution. Microscopic morphology analysis using SEM and XRD demonstrated that corrosion degradation of the blue bricks resulted primarily from salt crystallization pressure within internal pores, mineral dissolution and hydrolysis, mudding, and interionic replacement reactions. Under salt wet and dry cycling, both the macroscopic appearance and microscopic structure of the blue bricks exhibited varying degrees of damage, and deterioration of the microscopic structure led to a continuous decline in macroscopic mechanical properties.

Conclusions Under accelerated salt wet–dry cycle corrosion testing, the predicted service life of green bricks based on mass loss was calculated as 1 086, 1 802, and 1 111 hours in 5% Na₂SO₄ solution, 5% NaCl solution, and 2.5% Na₂SO₄ + 2.5% NaCl composite salt solution, respectively. The predicted service life based on compressive strength was calculated as 1 109, 1 490, and 1 196 hours, respectively. The average predicted service lives were 1 097, 1 646, and 1 153 hours. Failure thresholds were reached after 30, 45, and 35 wet–dry cycles, respectively, corresponding to

1.64, 2.01, and 1.84 years under actual saline environmental conditions. The remaining service life of blue bricks in Na_2SO_4 , NaCl , and composite salt solutions in central western Inner Mongolia was determined to be 120, 139, and 124 years, respectively by combining the service life of ancient buildings in Inner Mongolia with the compressive strength of original green bricks, and through quantitative analysis of the relationship between salt wet-dry cycle damage rates and green brick damage severity in saline environments. Under the regional saline conditions, the remaining service life of blue bricks in ancient structures is at least 120 years. The predicted remaining service life of blue bricks is consistent with, or even exceeds, that of the ancient structures in which they are used. Through evaluation of the remaining service life of ancient buildings, the predicted lifespan of their blue bricks falls within a reliable range. These experimental findings provide guiding principles for evaluating the durability of ancient architectural blue bricks and for their conservation and restoration.

Key words: salt-dry-wet cycle; Ancient building green brick; salt crystallization pressure; microstructure; phase transition; residual life prediction

(编辑 张 琼)

引用格式: Wu Anli, Guo Zengping, Hao Yunhong, et al. Study on corrosion mechanism and prediction of remaining life of ancient architectural bricks under salty environment[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2026, 58(2): 267-277. [吴安利, 郭增平, 郝负洪, 等. 盐渍环境下古建筑青砖腐蚀机理研究及剩余寿命预测[J]. *工程科学与技术*, 2026, 58(2): 267-277.]