

·水利与土木工程·

DOI:10.12454/j.jsuese.202400167



本刊网刊

## 冻融循环前后古建筑青砖的冲击损伤研究

郝贞洪<sup>1,2,3</sup>, 高 炯<sup>1\*</sup>, 宣姣羽<sup>1</sup>, 吴日根<sup>1</sup>

(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:**针对内蒙古地区古建筑长期遭受冻融循环和风沙颗粒冲击损伤的问题,以内蒙古隆盛庄古建筑青砖砌体为研究对象,利用模拟自然环境下工程材料耐久性损伤的试验系统和自动球压冲击仪,对冻融循环前后古建筑青砖的冲击损伤行为进行研究,并利用数字图像相关技术(DIC)分析青砖压痕区应变场分布规律;通过计算动态硬度和恢复性系数来分析青砖的弹性特征;应用超景深三维显微镜和扫描电子显微镜研究其冲击损伤形貌及损伤机理。结果表明:随冲击高度的增加,青砖的冲击荷载峰值和二次冲击荷载峰值呈先平缓后快速增长的趋势,而冻融循环会导致青砖受冲击时的荷载峰值增大,二次冲击荷载峰值减小;青砖损伤区应变以冲击中心为原点向四周呈环形扩散分布,冻融循环使得青砖压痕中心区域的径向应变明显增大,同时压痕损伤面积不断扩大;动态硬度和恢复性系数随冲击高度的增加呈递减趋势,冻融循环导致青砖抵抗塑性变形能力降低,动态硬度和恢复性系数逐渐减小;冲击荷载作用下,青砖表面会形成球冠状小坑,冻融循环后青砖内部结构变得疏松软脆,导致表面损伤区压痕形貌参数不断增大。

**关键词:**古建筑青砖;冲击荷载;冻融循环;DIC;应变云图;损伤机理

**中图分类号:** TU362; TU87

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3246(2026)02-0191-12

古建筑是中国历史文化遗产的重要组成部分,是中华民族传统文化的重要代表。内蒙古地区分布约 1 500 处古建筑,且大多为砌体结构,建筑材料多采用青砖材料。内蒙古地处严寒地区,该地古建筑长期经历冻融循环作用,青砖墙体表面出现粉化、剥落以及开裂等现象。内蒙古地区分布有 4 大沙漠<sup>[1]</sup>,当遇到大风或者强风等气候条件下极易引起沙尘天气,沙尘环境下,青砖墙体易受到风沙等,硬质颗粒的冲击,表面出现裂缝甚至破损剥落,导致墙体有效截面面积减小,承载力下降,严重影响其安全性。

关于古建筑青砖材料的研究,一方面集中在青砖原构件的物理力学性能<sup>[2]</sup>、病害种类<sup>[3-4]</sup>、病害原因<sup>[5-6]</sup>、检测技术<sup>[7-8]</sup>、修复方式<sup>[9-10]</sup>的研究;另一方面,相关学者以不同区域环境为研究背景,通过室内模拟试验<sup>[11-12]</sup>,从宏观<sup>[13-14]</sup>和微观<sup>[15-18]</sup>两个角度探

究青砖材料在冻融循环、盐侵蚀、干湿循环单一或复合作用下的劣化规律和损伤机理,并对青砖材料在实际环境中的寿命进行预测。对于颗粒材料的接触、碰撞问题的研究大多集中在复合材料、金属,以及陶瓷玻璃等领域<sup>[19-22]</sup>,主要从试验研究<sup>[23-24]</sup>、理论分析<sup>[25-26]</sup>以及数值模拟角度<sup>[27-28]</sup>探究材料的抗冲击性能。数字图像相关技术与传统测量变形的的方法相比,具有非接触、全场测量、高精度等优点,同时能够给出试件在加载过程中任意区域和任意一点的全场变形的信息,目前在混凝土、岩石<sup>[29-31]</sup>等领域中有了一定的应用。然而,针对颗粒材料对古建筑青砖冲击损伤特性的研究较为缺乏,尤其是将数字图像相关方法应用于古建筑青砖材料的冲击损伤方向的研究尚未见报道。

基于此,本文以内蒙古隆盛庄古建筑青砖砌体为

收稿日期:2024-03-13 修回日期:2024-07-14 网络出版日期:2024-08-17

基金项目:国家自然科学基金面上项目(12272190);国家自然科学基金地方项目(11862022);内蒙古直属高校基本科研业务费项目(JY20220017;JY20230098);“英才兴蒙”工程人才团队项目

作者简介:郝贞洪(1977—),男,教授.研究方向:复杂环境下工程损伤机理及防护技术. E-mail:13947133205@163.com

\*通信作者:高 炯, E-mail: 20211800402@imut.edu.cn

研究对象,通过冲击球压法研究冻融循环前后古建筑青砖受冲击荷载作用下的劣化规律与损伤机理。研究结果为内蒙古地区古建筑青砖砌体的保护与修缮提供理论依据。

## 1 试验及理论分析

### 1.1 试验材料

隆盛庄位于内蒙古自治区乌兰察布市丰镇镇东北部,2014年被列为第六批中国历史文化名镇。由于隆盛庄青砖墙体在自然环境中经历百年侵蚀,青砖的物理、力学性能发生了不同程度的退化,加之现存的古青砖具有极高的历史文化价值,故依据《文物建筑维修基本材料 青砖》(WW/T0049—2014)中古建筑修复的选材原则,采用内蒙古呼和浩特鸿宇古建出售的仿古青砖,该青砖以黏土为原材料,采用传统生产工艺烧制而成,如图 1 所示。对比隆盛庄古青砖和仿古青砖的矿物成分(图 2)和基本性能(表 1)可知,二者具有相似性,故可采用该仿古青砖代替古青砖进行研究。



图 1 青砖试件

Fig. 1 Brick specimens

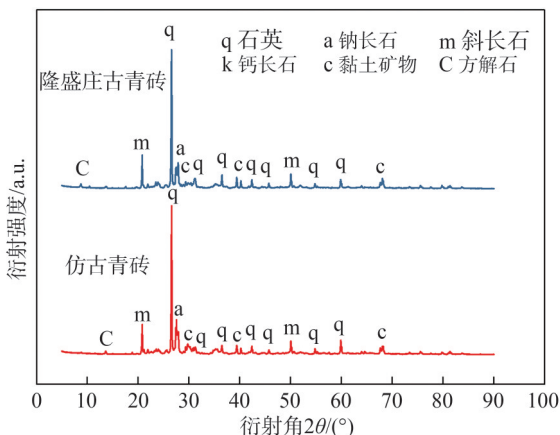


图 2 隆盛庄古砖/仿古青砖 XRD 成分分析

Fig. 2 XRD composition analysis of Longshengzhuang ancient brick/antique grey brick

表 1 隆盛庄古砖/仿古砖性能

Tab. 1 Performance of Longshengzhuang ancient brick/antique brick

类别	参数	密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	吸水率/%	表观硬度/ MPa	抗压强度/ MPa
隆盛庄古青砖	平均值	1.90	1.68	121.12	8.81
	标准差	0.24	0.09	0.17	2.35
仿古青砖	平均值	2.10	1.72	130.76	10.26
	标准差	0.35	0.12	0.34	2.17

### 1.2 试验方法及设备

依据《文物建筑维修基本材料 青砖》(WW/T 0049—2014)进行冻融循环试验,青砖试样先放入  $10\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  的水中浸泡 24 h,用湿布擦去表面水分后放入冻融箱内进行冻融循环试验,试件间隔大于  $20\text{ cm}$ ,在  $-15\sim -20\text{ }^{\circ}\text{C}$  的冻融箱冻融 3 h,然后放入  $10\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  的水中融化 2 h,此为一个冻融循环。冻融循环设置有 0、10、20、30、40、50 次,每 10 次循环后测试青砖的表观硬度、抗压强度、弹性模量和泊松比。青砖试样的尺寸为  $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 。

冲击试验采用自主研发的自动冲击球压仪,通过球头上力学传感器对冲击过程中的冲击力进行实时采集并输出到相匹配的测试软件,自动冲击球压仪如图 3 所示。试件冲击高度选择 23.0、25.0、27.0、29.0、31.0、33.0、35.0、37.0、39.0 cm 共 9 个冲击高度,每个试件设置 6 个冲击点,且测试点与试样边缘距离大于 2.5 cm,各测点间距大于 3.0 cm,冲击球头选用半径为 5 mm 的碳化钨小球,其弹性模量和泊松比分别为 600 GPa、0.15。同时,利用 3D-DIC 非接触式全场形变测试系统测试青砖在冲击荷载作用下的位移场和应变场,该系统由两个 CCD 相机、两个光源以及 VIC-3D 图像分析系统组成。冲击试验后通过 VHX-7000 型超景深三维显微镜和扫描电子显微镜量测青砖表面损伤形貌。



图 3 自动冲击球压仪

Fig. 3 Automatic impact ball press

### 1.3 力学性能试验

依据《文物建筑维修基本材料 青砖》(WW/T 0049

—2014)对青砖材料进行表观硬度、抗压强度、弹性模量以及泊松比的测定,结果如表2所示。根据表2中数据,绘制各参数随冻融循环次数的分布曲线,如图4所示。由图4可知,随冻融循环次数的增加,青砖试样的表观硬度、抗压强度、弹性模量以及泊松比呈递减趋势。

表 2 冻融循环前后青砖力学性能参数

Tab. 2 Mechanical properties parameters of grey brick after freeze-thaw cycles

冻融循环次数	表观硬度/MPa	抗压强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比
0	130.760	11.68	6 435	0.155
10	116.190	10.54	6 021	0.146
20	107.290	9.93	5 630	0.135
30	98.135	9.48	4 960	0.127
40	80.380	8.73	4 197	0.134
50	59.160	7.91	3 218	0.106

理论<sup>[32]</sup>将弹性压缩阶段看成刚性球体与弹性半空间体的接触问题。假设一个质量为  $m$ 、半径为  $r$ 、弹性模量为  $E_1$ 、泊松比为  $V_1$  的刚性小球垂直冲击一个弹性模量为  $E$ 、泊松比为  $V$  的弹塑性半空间体材料表面,冲击过程中产生的冲击荷载为  $P$ ,形成的压痕深度和压痕直径分别为  $d$  和  $2a$ 。冲击球压模型如图5所示。

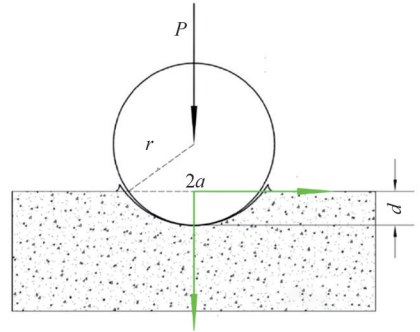


图5 冲击球压模型

Fig. 5 Impact ball pressure model

由图5可知,接触压力分布为:

$$P(r) = \frac{3P}{2\pi a^2} \left[ 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中,  $P(r)$  为接触压力。

当  $r=0$  时,接触压力达到最大:

$$P_{\max} = \frac{3P}{2\pi a^2} \quad (2)$$

法向冲击荷载值与法向压缩量的关系  $P(\delta)$  可表示为:

$$P(\delta) = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R} \delta^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

式中:  $E^*$  为接触系统的有效弹性模量,  $1/E^* = (1 - V_1^2)/E_1 + (1 - V^2)/E$ ;  $R$  为压痕半径;  $\delta$  为法向压缩量。

当压缩量  $\frac{d\delta}{dt} = 0$  时,法向压缩变形量达到最大值:

$$\delta_{\max} = \left( \frac{15mv^2}{16E^* \sqrt{R}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (4)$$

式中,  $v$  为冲击速度。

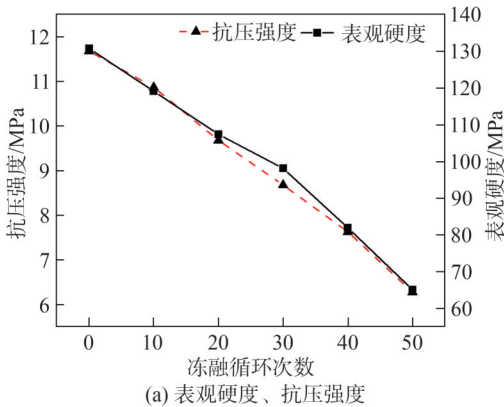
则最大法向冲击荷载值为:

$$p = \frac{4}{3} E^* R^{\frac{1}{2}} \left( \frac{15mv_{in}^2}{16E \sqrt{R}} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (5)$$

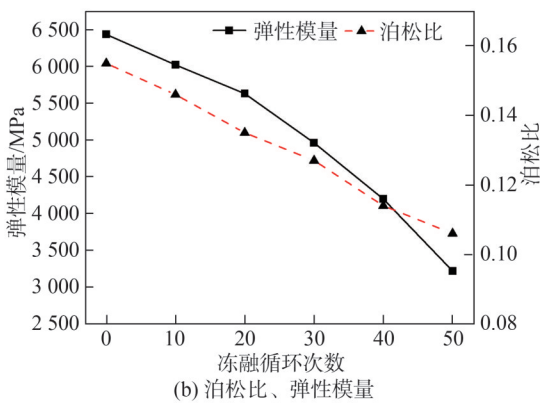
式中,  $v_{in}$  为冲击球头初始接触青砖表面时的速度。

### 1.5 理论模型与试验结果对比分析

图6为青砖受冲击时的冲击荷载随冲击高度的变化规律。由图6可知:理论值与试验值整体变化趋势相同,即随冲击高度的增加,冲击荷载呈递增的趋势,但



(a) 表观硬度、抗压强度



(b) 泊松比、弹性模量

图4 不同冻融循环作用下青砖力学参数变化

Fig. 4 Change of mechanical parameters of grey brick under different freeze-thaw cycles

### 1.4 冲击球压理论分析

青砖受沙粒冲击过程中,沙粒体积远小于青砖,可在分析中将青砖视为表面连续的半无限体,风沙粒子冲击青砖表面属于瞬时荷载,摩擦消耗的能量可以忽略不计,满足赫兹接触理论假设。则依据赫兹接触

理论值变化基本呈线性增长趋势;试验值随冲击高度的增加,表现出缓慢增大—迅速增大的变化趋势。这是因为理论模型中的接触体为均匀的线弹性体,所以冲击能量转化为接触体表面能量的占比是固定的,故理论值基本呈线性增长;而在试验过程中,由于各种试验因素的影响,冲击能量转化为试样表面的能量不固定,较低冲击高度作用下,冲击能量转化为试样表面的能量较少,而超出一定高度后冲击能量转化为试样表面的能量会增多,因此当冲击高度较大时,试验值会迅速增大。

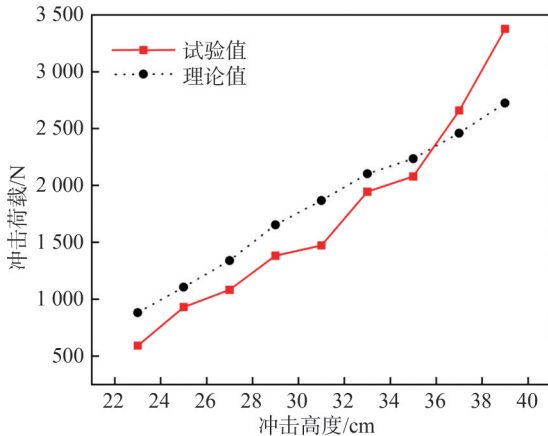


图6 冲击荷载作用下青砖的冲击荷载–高度曲线

Fig. 6 Impact load–impact height curves of green brick under impact load

## 2 试验结果与分析

### 2.1 青砖的接触损伤分析

#### 2.1.1 冲击荷载–时程曲线分析

图7为不同冲击高度下青砖的冲击荷载–时程曲线。每组试件的冲击过程是独立的,因此,对每组荷载的横坐标按照冲击高度的增加进行错位调整,避免9组荷载值堆叠在一起。

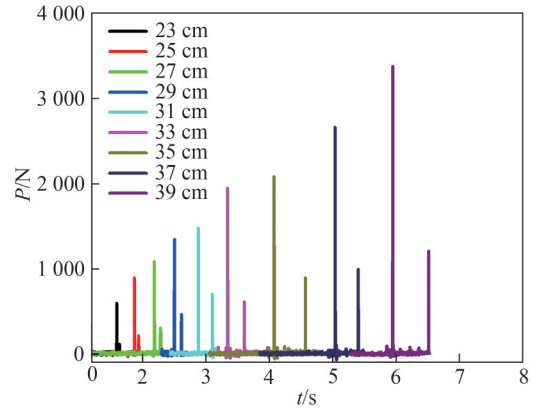


图7 不同冲击高度下青砖的荷载–时程曲线

Fig. 7 Load–time curves of blue bricks under different impact heights

由图7可知,青砖受冲击的过程可分为两个阶段:第I阶段,在球头冲击作用下青砖表面被压缩,此时冲击荷载迅速上升,当冲击速度为0时,冲击荷载达到峰值;第II阶段,青砖发生弹性变形后会给球头1个冲量,表现为冲击荷载–时间曲线的二次增长。青砖冲击荷载峰值和二次回弹力值随冲击高度的增加表现为先缓慢后快速增长的趋势,同时二次回弹的时间间隔延长。由于青砖表面具有一定的弹性变形能力,冲击能量一部分转化为青砖表面的弹性势能,因此,当冲击高度较低时,荷载峰值增长较缓慢;随冲击高度的增加,冲击球头的重力势能和弹簧的弹性势能提供的冲击动能会增大,因此青砖冲击荷载峰值和二次回弹力值较之前增长明显,同时由于球头二次回弹的时间间隔与二次冲击的荷载有关,故二次冲击的时间间隔随冲击高度的增加而延长。

#### 2.1.2 冲击应变场分布规律

图8不同冲击高度下青砖压痕区域径向应变云图,展示在不同冲击高度(23、27、31、35、39 cm)下青砖压痕区域径向应变的变化分布, $h$ 为冲击高度。

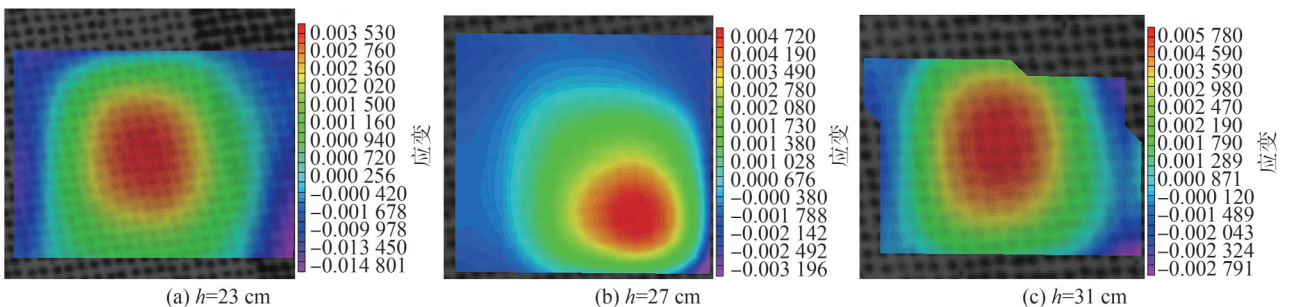


图8 不同冲击高度下青砖压痕区域径向应变云图

Fig. 8 Radial strain cloud diagram of grey brick indentation area under different impact heights

由图8可知,在冲击荷载作用下,青砖压痕的径向应变以冲击中心为原点向四周呈环状扩展分布,且损伤区域的应变随距冲击中心距离的增大而减小。为了更好地描述压痕区域径向应变的分布情况,

从冲击中心区域开始,沿径向取点于压痕边缘,不同冲击高度下试样冲击压痕径向应变分布如图9所示。由图9可知,当冲击高度为23、27、31、35、39 cm时,压痕径向应变最大值分别为3 531、4 972、5 780、

7 861、9 231。由此可见,青砖试样压痕中心区的径向应变随冲击高度的增加呈递增的趋势,且压痕损伤区域的面积也逐渐增大。这是因为在冲击荷载作用下,压痕中心区是青砖表面破坏的危险区域,当冲击高度增大时,冲击中心区域在拉、压、切等复杂应力作用下形变量会逐渐增大,同时压痕边缘所受的挤压力也会增大,因此压痕中心处应变与压痕面积逐渐增大。

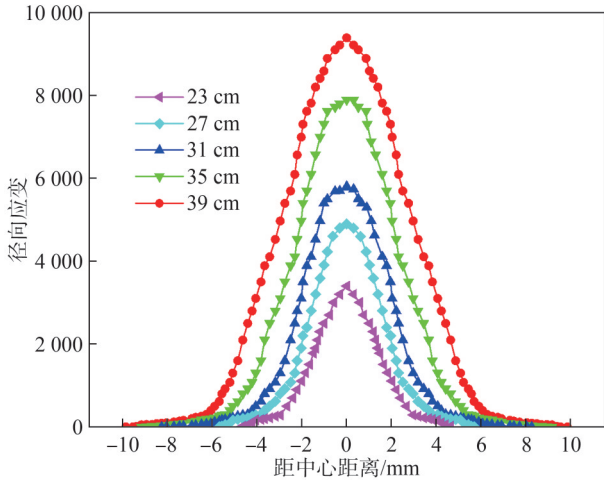


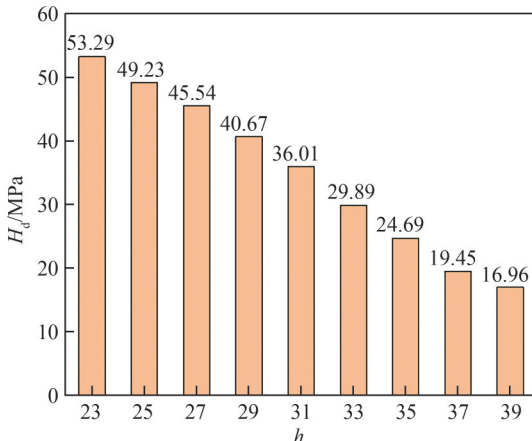
图 9 不同冲击高度下青砖压痕区域径向应变分布

Fig. 9 Radial strain distribution of grey brick indentation area under different impact heights

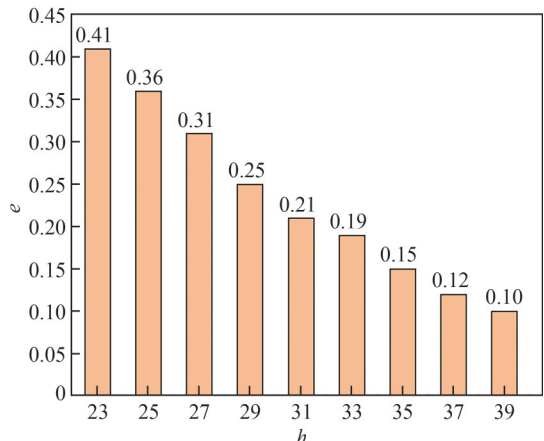
2.1.3 冲击表面弹塑性特征

在冲击荷载作用下青砖会发生弹塑性变形,因此采用能量转化法对冲击过程进行分析。动态硬度和恢复性系数是评价冲击过程中材料抗冲击变形和弹性恢复能力的参数,其中,动态硬度反映材料在冲击荷载作用下抗塑性变形能力的强弱,恢复性系数反映材料在冲击荷载作用下弹性恢复能力的高低。

根据 Tabor<sup>[33]</sup>理论,材料的动态硬度  $H_d$  表示为:



(a) 动态硬度



(b) 恢复性系数

图 10 不同冲击高度下青砖的动态硬度和恢复性系数

Fig. 10 Dynamic hardness and resilience coefficients of grey bricks under different impact heights

$$H_d = \frac{U - U_E}{V_c} \tag{6}$$

$$U = \frac{1}{2} m v_{in}^2 \tag{7}$$

$$U_E = \int_0^a \frac{3P^2}{2a^6 E^*} \delta^4 = \frac{3P^2}{10aE^*} \tag{8}$$

式(6)~(8)中,  $U$ 、 $U_E$  及  $V_c$  分别为总动能、弹性变形能及粒子冲击材料形成的损伤体积。

式(6)可表示为:

$$H_d = \frac{U - U_E}{V_c} = \frac{\frac{mv_{in}^2}{2} - \frac{3P^2}{10aE^*}}{V_c} = \frac{5mv_{in}^2 aE^* - 3P^2}{10V_c aE^*} \tag{9}$$

岳汉威<sup>[19]</sup>基于牛顿定理提出用恢复性系数来描述材料弹性恢复能力。球头回弹的能量  $U_R$  来源于材料的弹性变形能,则恢复性系数  $e$  可表示为:

$$e = \sqrt{\frac{U_R}{U}} = \sqrt{\frac{U_E}{U}} = \sqrt{\frac{3P}{5aE^* m v_{in}^2}} \tag{10}$$

图 10 为不同冲击高度下青砖的动态硬度和恢复性系数。由图 10 可知:青砖的动态硬度和恢复性系数随着冲击高度的增大呈递减的趋势,当冲击高度在 23 cm 时,青砖的动态硬度和恢复性系数分别为 53.29 MPa、0.41;当冲击高度达到 39 cm 时,青砖的动态硬度和恢复性系数分别减小至原来的 31.65% 和 24.39%。这是因为青砖属于弹塑性材料,具有一定的弹性变形能力,因此当冲击高度较低时,动态硬度的数值较大;随着冲击高度的增加,材料很快进入塑性变形阶段,且青砖塑性变形量不断加大,青砖的动态硬度值逐渐降低。恢复性系数反映了材料受冲击作用时的弹性恢复能力和能量转换的能力,且与动态硬度值有对应关系。因此,随着冲击高度的增加,表面损伤程度变大,青砖的恢复性系数逐渐减小。

## 2.2 冻融循环作用后青砖的接触损伤分析

### 2.2.1 冻融试样损伤劣化分析

图 11 为不同冻融循环次数作用后青砖表观劣化图。由图 11(a)和(b)可知:当冻融循环次数较少时,青砖试样表面无明显变化;冻融循环 20 次时,青砖边缘

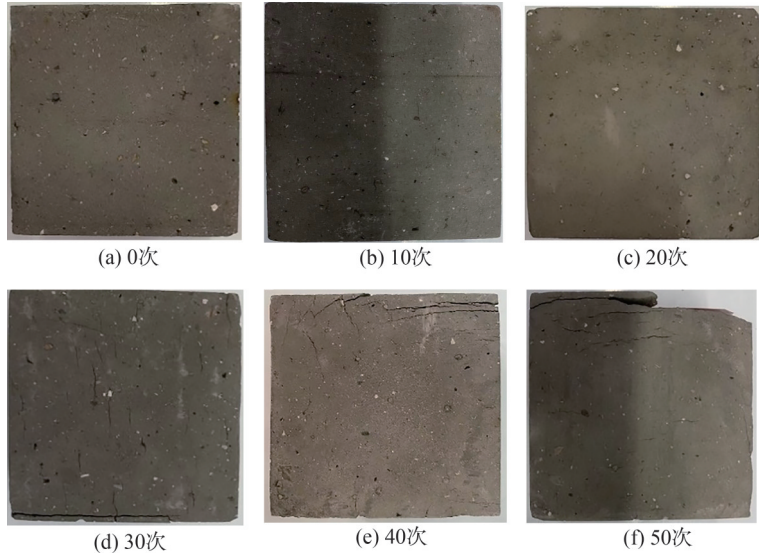


图 11 不同冻融循环次数后青砖表观劣化图

Fig. 11 Apparent deterioration diagram of grey bricks after different freeze-thaw cycles

图 12 为不同冻融循环次数作用后青砖的微观形貌。由图 12 可知,未冻融的青砖试件内部颗粒排列较为紧密,孔隙较少且无明显裂纹,整体结构致密性较好,随冻融循环次数的增加,青砖内部的胶凝材料会

开始出现粉化、轻微脱落现象,进而导致试样的四周棱角变得圆润(图 11(c));冻融循环 30 次时,青砖边缘开始出现层剥现象,并随冻融次数的增加,青砖表面裂缝不断延伸扩展(图 11(d));当冻融循环 50 次时,试样表面出现块状脱落现象。

不断分解、流失,内部出现腐蚀凹坑和颗粒状物质,并且在反复的冻胀和溶解作用下,青砖内部孔隙结构逐渐扩张,出现较多大而圆的孔隙,如图 12(a)~(d)所示。

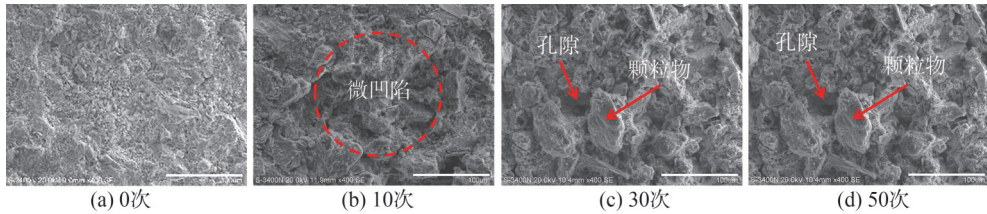


图 12 不同冻融循环次数下青砖的微观形貌

Fig. 12 Microscopic morphology of grey bricks under different freeze-thaw cycles

### 2.2.2 冲击荷载-时程曲线分析

图 13 为青砖在不同冻融循环次数下的冲击荷载-时程曲线,冲击高度选择 31 cm。

由图 13 可知,随冻融循环次数的增加,冲击的峰值荷载呈递增趋势,二次回弹力值和二次冲击的时间间隔逐渐减小。未冻融时,青砖表面的峰值荷载和二次回弹峰值荷载分别为 1 240.1、380.4 N;当冻融循环 10 次时,青砖的冲击荷载峰值增加约 22.3%,二次回弹峰值下降约 26.4%,同时二次冲击的时间间隔会缩短,冻融循环 20 次以后变化显著;当冻融循环 50 次时,青砖表面的冲击荷载峰值增加约 92.2%,二次冲击的荷载峰值下降约 63.9%,二次冲击的时间间隔下降更明显。这是由于在冻融循环初期,青砖内部密实程度变化不大,当冻融循环 20 次以后,青砖表面结构破坏较为严重,内部空

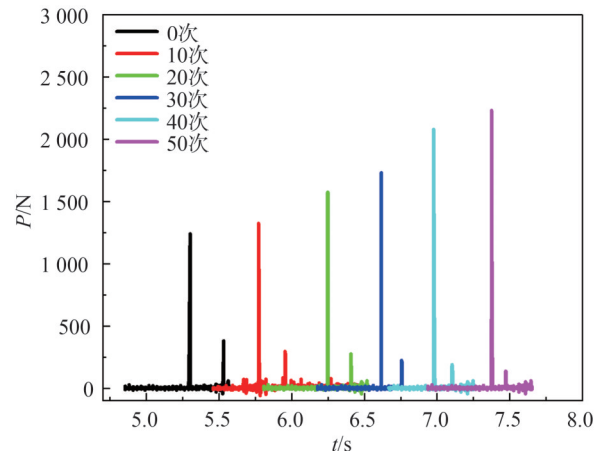


图 13 不同冻融循环次数作用下青砖材料荷载-时程曲线  
Fig. 13 Load-time history curves of grey brick material under different freeze-thaw cycles

洞数量明显增多,进而导致青砖表面弹性变形能力降低,因此青砖的冲击荷载峰值增长迅速,二次回弹的力值逐渐减小,二次冲击的时间间隔不断缩短。

### 2.2.3 冲击应变分布规律分析

图 14、15 为冻融循环 0、10、20、30、40、50 次后青砖冲击压痕应变云图和应变分布,冲击高度为 31 cm。

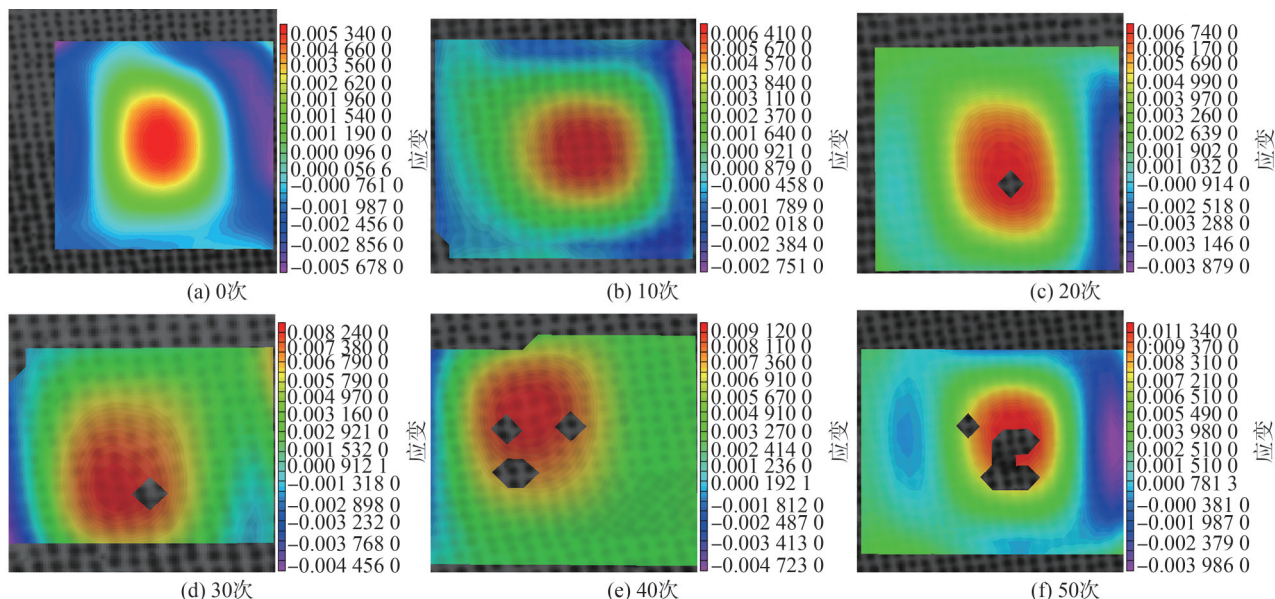


图 14 不同冻融循环次数下青砖冲击压痕应变云图

Fig. 14 Strain cloud diagram of grey brick impact indentation under different freeze-thaw cycles

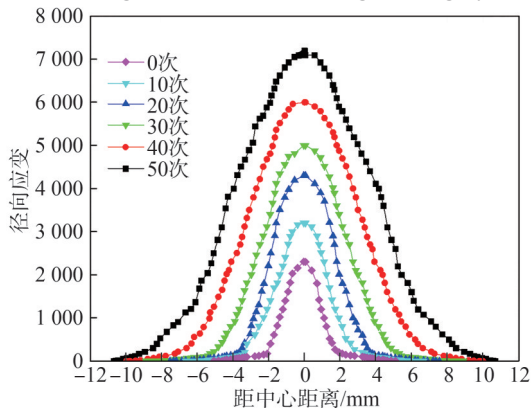


图 15 不同冻融循环次数下青砖冲击压痕应变分布

Fig. 15 Impact indentation strain distribution of grey bricks under different freeze-thaw cycles

综合分析图 14、15 可知:在相同冲击荷载作用下,青砖压痕中心区域的径向应变增加了 729~5 490;冻融循环 20 次之前,青砖压痕边缘应变增量较小,20 次以后,压痕边缘应变较之前增长明显。这是因为在冻融循环初期,青砖表面弹性变形能力较大,在冲击荷载作用下,材料会吸收相对较多的冲击动能,而随着冻融循环次数的增加,青砖内部结构变得疏松脆弱,在冲击荷载作用下,青砖表面裂纹扩展路径较多,冲击能量更多地转化为试样表面损伤的能量,进而导致青砖压痕区域应变变量增大。

### 2.2.4 冲击表面弹塑性特征分析

图 16 为不同冻融循环次数作用下青砖的动态硬度和弹性恢复性系数。

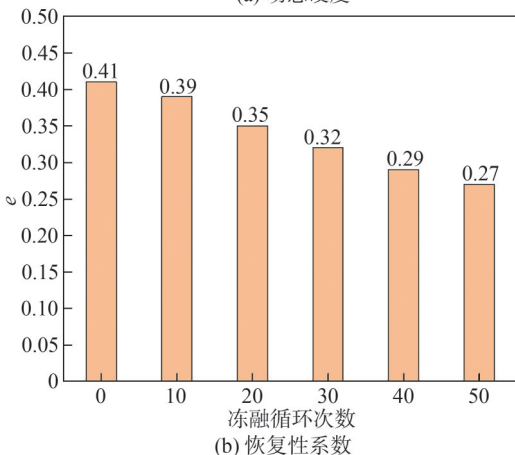
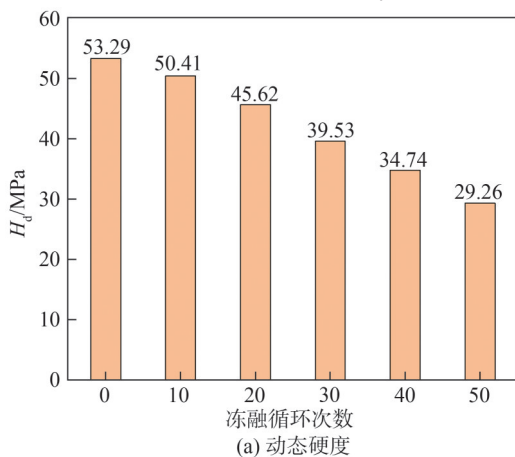


图 16 不同冻融循环次数作用下青砖的动态硬度和弹性恢复性系数

Fig. 16 Dynamic hardness and elastic recovery coefficient of grey brick under different freeze-thaw cycles

由图 16 可知:未冻融时,青砖表面塑性变形量较小,此时的动态硬度值为 53.29 MPa;冻融循环作用后,青砖表面会出现起皮、粉化以及剥落等现象,在冲击荷载作用下,青砖表面损伤区域较大,因此,动态硬度值随冻融循环次数的增加而逐渐减小,当冻融循环 50 次时,青砖的动态硬度降低为原来的 54.91%。冻融循环会使青砖表面密实程度降低,进而导致青砖表面抗塑性变形能力降低,因此恢复性系数呈相同的递变规律。

### 2.3 冲击球压表面损伤形貌与损伤机理分析

#### 2.3.1 冲击荷载作用下青砖表面压痕特征分析

利用 VHX6000 型超景深三维显微镜对青砖表面的压痕进行量化采集,通过 VHX6000 型超景深三维显微镜对压痕形貌的二维、三维形貌进行分析以及对压痕几何参数进行量测。图 17 分别为青砖在 31 cm 冲击高度下的 2D 轮廓、3D 剖面图。图 17(a) 图片尺寸为  $5\,344.65\ \mu\text{m} \times 5\,544.10\ \mu\text{m}$ 。由图 17 可知,青砖在冲击荷载作用下会形成球冠状小坑,且相同半径的轴向同心圆其压痕离面位移沿径向呈环形分布。图 17(b) 为压痕 3D 剖面,通过对压痕 3D 轮廓进行剖切可精确得到压痕的深度、直径、表面积以及体积分别为  $247.15\ \mu\text{m}$ 、 $3\,912.74\ \mu\text{m}$ 、 $11.13\ \text{mm}^2$  及  $1.21\ \text{mm}^3$ 。

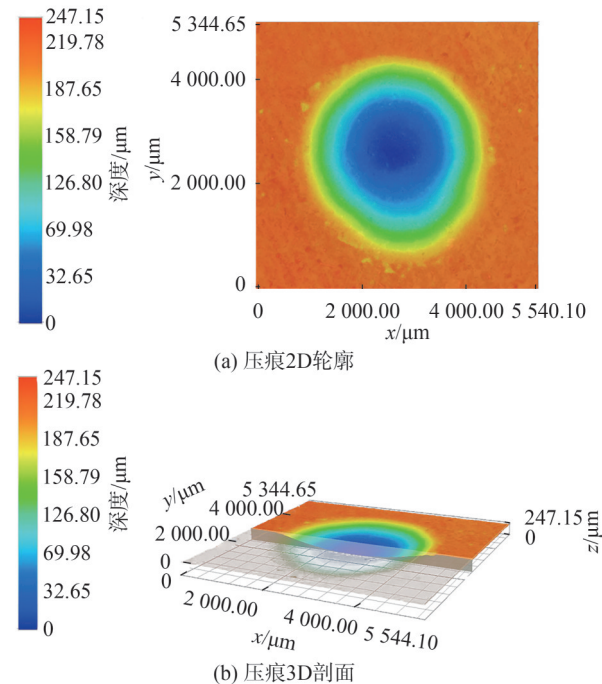


图 17 青砖二维、三维压痕形貌图

Fig. 17 Two-dimensional and three-dimensional indentation topography images of grey bricks

表 3 为不同冻融循环作用后青砖表面压痕损伤区域的三维参数。由表 3 可知:在相同冲击荷载作用下,未冻融的青砖的压痕损伤区深度、面积和体积最

小,表面抗塑性变形能力最强;而冻融循环作用后,青砖表面出现粉化、剥落以及开裂等现象,当冻融循环 50 次时,青砖的压痕深度、直径较未冻融时分别增加了 51.26%、15.66%。因此,青砖表面的劣化会加剧压痕 3 维参数的增长,且随冻融循环次数的增加表面损伤程度逐渐变大。

表 3 青砖表面压痕三维参数

Tab. 3 Three-dimensional morphology parameters of grey bricks surface indentation

冻融循环次数	压痕深度/ $\mu\text{m}$	压痕直径/ $\mu\text{m}$	压痕表面积/ $\text{mm}^2$	压痕体积/ $\text{mm}^3$
0	247.15	3 912.74	11.13	1.21
10	291.83	4 039.25	11.97	1.45
20	331.65	4 197.19	12.47	1.86
30	342.71	4 326.14	13.02	1.99
40	354.65	4 486.11	13.66	2.01
50	373.79	4 509.94	13.86	2.29

#### 2.3.2 青砖损伤机理分析

图 18 不同冻融循环次数下青砖表面三维压痕形貌图,冲击高度选择 31 cm。

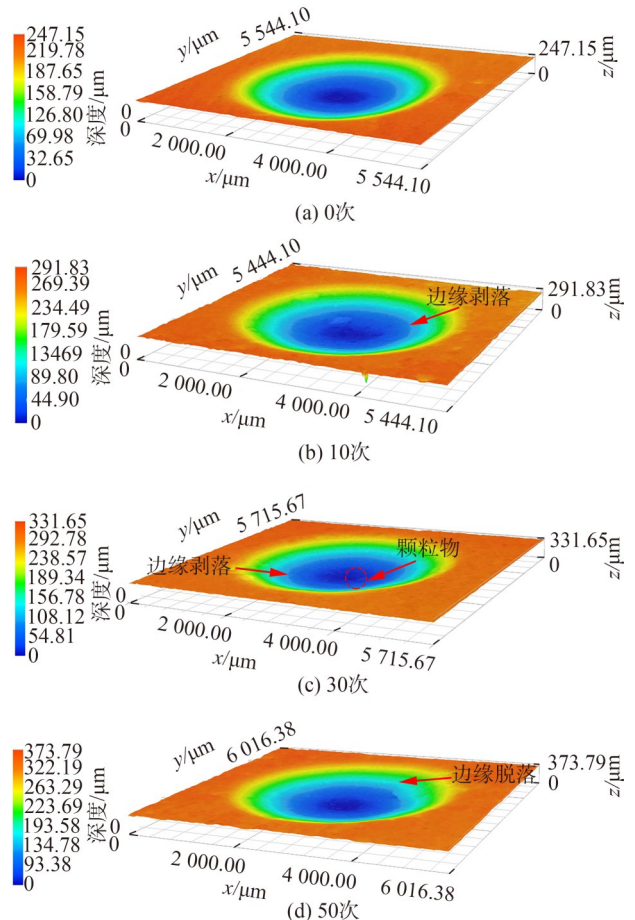


图 18 不同冻融循环次数下青砖表面三维压痕形貌

Fig. 18 Three-dimensional indentation morphology of grey brick surface under different freeze-thaw cycles

由图17可知,在冲击荷载作用下,青砖表面出现明显的塑性变形特征,冲击区域会产生球冠状压痕,且压痕直径随冻融循环次数的增加呈递增的趋势。未冻融的青砖在冲击荷载作用下形成的损伤区域较完整,损伤区形状为圆球形凹痕;当冻融循环10次时,青砖受冲击后其表面的压痕区域变得粗糙,这是冻融循环作用使得青砖内部矿物成分与胶结材料的连接性降低,进而导致压痕周围在冲击拉压力作用下挤出较多的颗粒物,压痕边缘出现剥落现象(图18(b));冻融循环30次以后,压痕边缘出现剥落现象,且青砖损伤区压痕尺寸明显增大(图18(c)~(d))。这是由于材料表面和内部结构的不同,在相同冲击荷载作用下损伤的情况也不相同,对于未冻融时青砖内部结构密实无明显缺陷,在冲击荷载作用下,青砖表面抗塑性变形能力较强,产生的塑性变形最小,因此形成的冲击坑较浅;冻融循环会导致青砖内部孔隙和微裂缝数量增多,在冲击荷载作用下,裂缝扩展的路径增多,冲击能量更多地转化为试样表面损伤的能量,因此在冲击坑内部会出现颗粒脱落现象,且压痕深度和半径增大。

### 3 结论

1)随着冲击高度的增加,青砖受冲击时的荷载峰值和二次回弹力值表现为先平缓后快速增长的趋势,二次冲击的时间间隔延长;当冲击高度相同时,冻融循环导致青砖受冲击时荷载峰值增大,二次回弹的时间和荷载峰值不断减小,当冻融循环50次时,冲击荷载峰值增加了92.2%,二次冲击的荷载峰值下降了63.9%。

2)利用数字图像相关方法对青砖冲击后的应变场进行分析可得:青砖损伤区应变以冲击中心为原点对四周呈环形扩散分布,且径向应变随距离冲击中心距离的增大而减小;在相同冲击高度下,随冻融循环次数的增加,青砖压痕中心区域的径向应变增加了729~5 490,同时压痕损伤面积不断扩大。

3)通过对青砖材料动态硬度、恢复性系数定量分析可知:青砖的动态硬度、恢复性系数随冲击高度的增加呈递减的趋势;在相同冲击高度下,随冻融循环次数的增加,青砖抗塑性变形能力降低,动态硬度、恢复性系数也表现出相同的递变规律。

4)利用超景深三维显微镜和扫描电子显微镜对青砖表面及压痕形貌进行分析可得:在冲击荷载作用下,青砖表面会形成球冠状压痕,压痕周围出现颗粒剥落现象;冻融循环会使青砖内部结构变得疏松脆弱,进而导致其表面抗塑性变形能力降低,在冲击荷载作用下青砖压痕三维参数不断增大,且冲击坑内部

会出现颗粒脱落现象,当冻融循环50次时,青砖的压痕深度、直径较未冻融时分别增加了51.26%、15.66%。

#### 参考文献:

- [1] Cheng Leilei, Que Xiaoe, Yang Liu, et al. China desert eco-system: Function improvement and service efficiency enhancement[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(6): 690–698. [程磊磊, 却晓娥, 杨柳, 等. 中国荒漠生态系统: 功能提升、服务增效[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(6): 690–698.]
- [2] Li Bin, Du Hongxiu, Liu Xiaoxian, et al. Physical properties and composition analysis of ancient bricks in Ming and Qing dynasties in Shanxi Province[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(9): 2944–2949. [李斌, 杜红秀, 刘晓仙, 等. 山西明清古砖物理性能及成分分析[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(9): 2944–2949.]
- [3] Zhu Caihui, Li Ning, Guo Bingxuan, et al. Detection and analysis of the disease of brick-soil structure base in an ancient building[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(1): 169–176. [朱才辉, 李宁, 郭炳煊, 等. 某古建筑砖土结构基座病害探测分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(1): 169–176.]
- [4] Yang Xiaohong, Zheng Liang, Chen Yile, et al. Recognition of damage types of Chinese gray-brick ancient buildings based on machine learning—Taking the Macau World Heritage buffer zone as an example[J]. Atmosphere, 2023; 14(2): 346.
- [5] Liu Jianbin, Zhang Zhongjian. Characteristics and weathering mechanisms of the traditional Chinese blue brick from the ancient city of Ping Yao[J]. Royal Society Open Science, 2020, 7(8): 200058.
- [6] Wang Niannian, Zhao Xuefeng, Zhao Peng, et al. Automatic damage detection of historic masonry buildings based on mobile deep learning[J]. Automation in Construction, 2019, 103: 53–66.
- [7] Wang Haoyu, Peng Lin, Zhang Houjiang, et al. Detection of material missing of hidden column in ancient building wall based on infrared thermal imaging[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(3): 132–144. [王皓宇, 彭林, 张厚江, 等. 基于红外热成像的古建筑墙内暗柱材料缺失检测[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(3): 132–144.]
- [8] Cao Feng, Wu Yuqing, Wang Julin. Determination of capillary water absorption of blue bricks in Beijing Ming Great Wall and its influencing factors[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(22): 286–292. [曹峰, 吴玉清, 王菊琳. 北京明长城青砖毛细吸水性测定及其影响因素[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(22): 286–292.]
- [9] Li Sai, Wang Xinya, Zhang Zhongjian, et al. Application of building information model in the renovation construction

- of an ancient temple: Taking Jingyong Temple as example [J]. *Building Structure*, 2023, 53(S1): 2391–2395. [李赛, 王新亚, 张中俭, 等. BIM 技术在古建筑修复中的应用——以旌勇祠享殿为例[J]. *建筑结构*, 2023, 53(增刊 1): 2391–2395.]
- [10] Zhang Jianwei, Huang Xiaoshan, Bian Hanliang, et al. Repair and reinforcement of ancient buildings based on skim milk powder combined with induced calcium carbonate precipitation technology[J]. *China Science and Technology Paper*, 2021, 16(10): 1035–1039. [张建伟, 黄小山, 边汉亮, 等. 基于脱脂奶粉联合诱导碳酸钙沉淀技术的古建筑修复加固[J]. *中国科技论文*, 2021, 16(10): 1035–1039.]
- [11] Tang Yongjing, Shao Zhendong, Xu Tianlong. Uniaxial compressive tests on ancient brick masonry from heritage buildings under unsaturated freeze–thaw conditions[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 183: 706–715.
- [12] Zhang Daoming, Wang Li, Guo Guoliang, et al. The effect of freeze–thaw action on the deterioration of macroscopic properties and microstructure of ancient grey bricks[J]. *Protection of Cultural Relics and Archaeological Science*, 2021, 33(4): 9–15. [张道明, 王丽, 郭国梁, 等. 冻融作用对古青砖宏观性能及微观结构劣化的影响[J]. *文物保护与考古科学*, 2021, 33(4): 9–15.]
- [13] Bie Zhiming. The evolution law of structural damage of grey brick masonry under a freeze–thaw cycle[J]. *Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science Edition)*, 2020, 51(4): 668–672. [别治明. 冻融循环下青砖砌体结构性损伤的演化规律[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2020, 51(4): 668–672.]
- [14] Yue Jianwei, Ma Can, Zhao Limin, et al. Study on deterioration of gray brick with different moisture contents under freeze–Thaw environment[J]. *Materials*, 2022, 15(5): 1819.
- [15] Zhao Peng. Damage degradation law and mechanism of grey 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.]
- [16] Tang Yongjing, Zhao Hong, Ye Zhenhua, et al. Weathering performance analysis and weathering degree evaluation of ancient brick masonry[J]. *Civil Building and Environmental Engineering*, 2017, 39(3): 67–74. [汤永净, 赵红, 叶真华, 等. 古代砖砌体风化性能分析及风化程度评定[J]. *土木建筑与环境工程*, 2017, 39(3): 67–74.]
- [17] Li Yonghui, Xie Huarong, Wang Jianguo, et al. Comparative study on isothermal moisture absorption performance of traditional grey bricks in historical buildings[J]. *Journal of Building Materials*, 2014, 17(6): 1092–1095. [李永辉, 谢华荣, 王建国, 等. 历史建筑中传统青砖等温吸湿性能比较研究[J]. *建筑材料学报*, 2014, 17(6): 1092–1095.]
- [18] Liu Xiao. Research on the deterioration law and mechanism of the facade of brick buildings in Lanzhou[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021. [刘笑. 兰州市砖砌建筑外立面劣化规律与机理研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.]
- [19] Yue Hanwei. Research on contact damage of concrete by sphere impact method[D]. Beijing: China General Research Institute of Building Materials Science, 2010. [岳汉威. 岩石、混凝土材料的接触损伤及冲击球压法评价研究[D]. 北京: 中国建筑材料科学研究院, 2010.]
- [20] Zhang Zongheng, Zhang Hong, Yao Xiaohu, et al. Experimental study of failure modes of PVB laminated glass under low-velocity impact[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(S1): 113–119. [张宗恒, 张红, 姚小虎, 等. 低速冲击下 PVB 夹层玻璃的破坏模式试验研究[J]. *兵工学报*, 2017, 38(增刊 1): 113–119.]
- [21] Wang Depan, Liang Sen, Zhou Yuesong, et al. Study on mechanical properties and impact resistance of chopped carbon fiber reinforced alumina composite ceramics[J]. *Composite Materials Science and Engineering*, 2023, (6): 12–16. [王得盼, 梁森, 周越松, 等. 短切碳纤维增强氧化铝复相陶瓷力学性能及抗冲击性能研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2023, (6): 12–16.]
- [22] Hao Yunhong, Wang Ting, Xuan Jiaoyu, et al. Analysis of impact damage characteristics and elastoplastic characteristics of steel structure coating[J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(9): 931–937. [郝云洪, 王亭, 宣姣羽, 等. 钢结构涂层冲击损伤特性及弹塑性特征分析[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(9): 931–937.]
- [23] Hao Yunhong, Tian Xule, Han Yan, et al. Contact damage of steel structure coatings under impact loading[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(3): 707–712. [郝云洪, 田旭乐, 韩燕, 等. 冲击荷载作用下钢结构表面涂层的接触损伤[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(3): 707–712.]
- [24] Chen Zhicheng. Study on contact damage of concrete materials and non-destructive evaluation by ball compression method[D]. Beijing: China Academy of Building Materials Science, 2002. [陈志城. 混凝土材料的接触损伤及球压法无损评价研究[D]. 北京: 中国建筑材料科学研究院, 2002.]
- [25] Thornton C. Coefficient of restitution for collinear collisions of elastic–perfectly plastic spheres[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1997, 64(2): 383–386.
- [26] Thornton C, Ning Zemin. A theoretical model for the stick/bounce behaviour of adhesive, elastic–plastic spheres[J]. *Powder Technology*, 1998, 99(2): 154–162.
- [27] Zou Jun, Liu Jiabin, Wang Jizhen, et al. High-energy low-velocity impact response and damage characteristics of the blunt-body of composite laminates[J]. *Journal of Com-*

- posites,2024,41(6):3271–3278[邹君,刘佳鑫,王计真,等. 复合材料层合板钝头体高能量低速冲击响应与损伤特性[J]. 复合材料学报,2024,41(6):3271–3278.]
- [28] Zhao Yiqiao, Yu Tao, Guo Yichun, et al. Low-velocity impact performance of plant fiber metal laminates[J]. Journal of Building Materials,2022,25(8):830–835.[赵艺桥,于涛,郭逸纯,等. 植物纤维金属层合板的抗低速冲击性能[J]. 建筑材料学报,2022,25(8):830–835.]
- [29] Sun Yanan, Jin Zuquan, Peng Bo, et al. Pulling-out process and interfacial bonding performance of BFRP bar in concrete based on DIC[J]. Journal of Building Materials,2023,26(1):45–52.[孙亚楠,金祖权,逢博,等. 基于DIC的混凝土嵌入式BFRP筋拔出行为及黏结性能研究[J]. 建筑材料学报,2023,26(1):45–52.]
- [30] Chen Xudong, Shi Zhenxiang, Guo Yuzhu, et al. Flexural performance of granite–concrete beams based on DIC technology[J]. Journal of Building Materials,2022,25(10):1040–1046.[陈徐东,石振祥,郭玉柱,等. 基于DIC的花岗岩–混凝土梁抗弯性能研究[J]. 建筑材料学报,2022,25(10):1040–1046.]
- [31] Dai Shuhong, Xu Tao, Huang Huasen, et al. Study on mode I crack damage propagation of rock based on DIC–FEM[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science Edition),2023,42(4):385–390.[代树红,徐涛,黄华森,等. 基于DIC–FEM的岩石I型裂纹损伤扩展研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2023,42(4):385–390.]
- [32] Johnson K L. 接触力学[M]. 徐秉业,罗学富,刘信声,等译. 北京:高等教育出版社,1992.
- [33] Tabor D. The hardness of metals[M]. Oxford: Oxford University Press,2000.

## Study on Impact Damage of Ancient Building Grey Bricks Before and After Freeze–thaw Cycles

HAO Yunhong<sup>1,2,3</sup>, GAO Jiong<sup>1\*</sup>, XUAN Jiaoyu<sup>1</sup>, WU Rigen<sup>1</sup>

(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, Hohhot 010051, China;

3. The Inner Mongolia Key Laboratory of Civil Engineering Structure and Mechanics, Hohhot 010051, China)

### Abstract:

**Objective** This study selects grey brick masonry from ancient structures in Longshengzhuang, Inner Mongolia, as the research object to address the issues associated with long-term freeze–thaw cycles and impact-induced damage to sand particles in ancient buildings in Inner Mongolia. Ball pressure impact tests conducted on grey bricks before and after freeze–thaw cycles are utilized to investigate the impact damage behavior of grey bricks in ancient buildings.

**Methods** An engineering material durability damage testing system simulating natural environmental conditions and an automatic ball drop impact apparatus were utilized to conduct ball pressure impact tests on ancient building grey bricks before and after freeze–thaw cycling. The digital image correlation (DIC) technique was applied to analyze strain field distributions within the indentation zones of the bricks. Dynamic hardness and coefficients of restitution were calculated to evaluate elastic–plastic behavior. In addition, ultra-depth three-dimensional microscopy and scanning electron microscopy were employed to observe damage morphology and to investigate underlying damage mechanisms.

**Results and Discussions** As the number of freeze–thaw cycles increased, the apparent hardness, compressive strength, elastic modulus, and Poisson's ratio of the grey brick samples showed a declining trend. The impact process of ancient building grey bricks was divided into two stages. In the first stage, the brick surface was compressed under ball impact, and the impact load rapidly increased to its peak value. In the second stage, elastic deformation of the brick generated an impulse force acting on the ball, which appeared as a secondary rise in the impact load time curve. With increasing impact height, both the peak load and secondary rebound force initially increased gradually and then increased rapidly, while the time interval associated with secondary impact was extended. Under identical impact heights, freeze–thaw cycling caused an increase in peak impact load, whereas the secondary rebound time and secondary impact peak load continuously decreased. Without freeze–thaw cycling, the peak load and secondary rebound peak load were 1 240.1 N and 380.4 N, respectively. After 10 freeze–thaw cycles, the peak impact load increased by approximately 22.3%, while the secondary rebound peak load decreased by approximately 26.4%. These effects became more pronounced after 20 cycles. Following 50 freeze–thaw cycles, the surface impact peak load increased by approximately 92.2%, and the secondary impact peak load decreased by approximately 63.9%, accompanied by a significant reduction in the secondary impact time interval. After impact loading, strain within the damaged zone exhibited a ring-shaped diffusion pattern centered on the impact location, and radial strain decreased with increasing distance from the impact center. At impact heights of 23, 27, 31, 35, and 39 cm, the maximum radial strains were 3 531, 4 972, 5 780, 7 861, and 9 231, respectively. At identical impact heights, increasing numbers of freeze–thaw cycles caused the radial strain in the central indentation region to increase by 729 to 5 490. Before 20 freeze–thaw cycles, strain increases at the indentation edges were minimal, whereas after 20 cycles, edge strain increased significantly relative to earlier stages. The dynamic hardness and coefficient of restitution of ancient building grey bricks decreased as impact height increased. At an impact height of 23 cm, these values were 53.29 MPa and 0.41, respectively, while at 39 cm, they de-

creased to 31.65% and 24.39% of their initial values, respectively. Under identical impact heights, increasing freeze–thaw cycles reduced the bricks' resistance to plastic deformation, and both dynamic hardness and coefficient of restitution progressively declined. Without freeze–thaw cycling, dynamic hardness and coefficient of restitution were 53.29 MPa and 0.41, respectively. After 50 freeze–thaw cycles, these values decreased to 54.91% and 34.15% of their original values. Under impact loading, the surface of the ancient building's grey bricks formed spherical crown-shaped indentations, with particle shedding observed around the indentation. Freeze–thaw cycling caused surface pulverization, spalling, and cracking, while internal pore structures gradually expanded and became larger and more rounded, reducing resistance to plastic deformation. After impact loading, indentation depth, diameter, surface area, and volume increased progressively; the indentation surfaces became rougher, and particle shedding occurred within the impact pits. Unfrozen bricks exhibited the smallest indentation damage zones in terms of depth, area, and volume, indicating the highest resistance to plastic deformation. After 50 freeze–thaw cycles, indentation depth and diameter increased by 51.26% and 15.66%, respectively, compared to the unfrozen condition. The experimental results provided valuable guidance for durability assessment, protection strategies, and restoration practices for ancient buildings in Inner Mongolia.

**Conclusions** Freeze–thaw cycles significantly deteriorate the mechanical properties and impact resistance of grey bricks used in ancient buildings, leading to reduced dynamic hardness, decreased coefficient of restitution, and increased surface damage under impact loading. The experimental results provide valuable insights for durability assessment and for the development of protection and repair strategies for ancient buildings in Inner Mongolia.

**Key words:** ancient building grey brick; impact load; freeze–thaw cycle; digital image correlation(DIC); strain cloud diagram; damage mechanism

(编辑 张 琼)

引用格式: Hao Yunhong, Gao Jiong, Xuan Jiaoyu, et al. Study on impact damage of ancient building grey bricks before and after freeze–thaw cycles[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2026, 58(2): 191–202. [郝贻洪, 高炯, 宣姣羽, 等. 冻融循环前后古建筑青砖的冲击损伤研究[J]. *工程科学与技术*, 2026, 58(2): 191–202.]