

基于纳米压痕仪测定将军冢墓葬砖的力学特性研究

任克彬^{1,2}, 李新明³, 王志留³, 常宏杰¹

(1. 河南省文物考古研究院, 河南 郑州 450000; 2. 河南省文物建筑保护研究院, 河南 郑州 450002;
3. 中原工学院 建筑工程学院, 河南 郑州 450007)

摘要: 墓葬遗址的耐久性与其砌块材料的力学特性密不可分, 而墓葬砖又具有文物属性, 无法大量取样进行常规测试。本文采用纳米压痕仪测定方法对墓碑的表面和内部力学特性进行测试分析, 通过XRD和SEM方法测试与分析墓碑表面和内部的矿物组成及微观结构。结果表明: 墓碑表面和内部试样中矿物类型一致, 主要包括石英、长石和云母等, 矿物组成的均匀性反映了汉代在建筑材料制作上的技术成就, 以及对质量控制的重视; 墓碑内部的最大压入荷载、平均弹性模量、硬度和断裂韧性均高于表面, 其分别为378.31 mN、50.9 GPa、4.14 GPa和4.53 MPa·m^{1/2}, 而表面则为406.42 mN、37.5 GPa、2.41 GPa和2.02 MPa·m^{1/2}。说明受地下水、盐等侵蚀作用, 表面孔隙率高于其内部结构孔隙率, 墓葬砖表面力学性能有所劣化。

关键词: 纳米压痕; 将军冢; 墓葬砖; 力学特性; 微观结构

中图分类号: TU501

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)04-0094-07

Study on the Mechanical Properties of General's Tomb Burial Bricks Based on Nanoindentation Instrument

REN Kebin^{1,2}, LI Xinming³, WANG Zhiliu³, CHANG Hongjie¹

(1. Henan Provincial Institute of Cultural Heritage and Archaeology, Zhengzhou, Henan 450000, China;
2. Henan Province Institute of Cultural Relics and Monuments Protection, Zhengzhou, Henan 450002, China;
3. School of Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450007, China)

Abstract: The durability of these burial sites is closely linked to the mechanical properties of their masonry materials. However, due to their status as cultural relics, tomb bricks cannot be sampled in large quantities for routine testing. This work employs nanoindentation techniques to investigate the mechanical properties of both surface and interior sections of tomb bricks. X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) are utilized to analyze the mineral composition and microstructure of these samples. The results indicate that both surface and interior samples share identical mineral types, predominantly consisting of quartz, feldspar, and mica. This uniformity in mineral composition reflects the technological advancements achieved during the Han Dynasty in producing building materials while emphasizing quality control. It was observed that due to groundwater infiltration and salt erosion, porosity levels on the surface are higher than those found within the brick interiors. Consequently, there has been a deterioration in the mechanical properties at the surface level compared to those within; specifically, maximum indentation load, average elastic modulus, hardness, and fracture toughness values for interior bricks surpass those measured at their surfaces. The recorded values for interior bricks are 378.31 mN (maximum indentation load), 50.9 GPa (average elastic modulus), 4.14 GPa (hardness), and 4.53 MPa·m^{1/2} (fracture toughness). In contrast, corresponding values for surface bricks are 406.42 mN (maximum indentation load), 37.5 GPa (average elastic modulus), 2.41 GPa (hardness), and 2.02 MPa·m^{1/2} (fracture toughness).

Keywords: nanoindentation; Jiangjun mound; tomb bricks; mechanical activation behavior; microstructure

收稿日期: 2025-02-25

修稿日期: 2025-03-19

基金项目: 河南省科技攻关项目“微纳尺度下 MICP 技术修复石质文物性能评价及其均质化技术研究”(242102320294); 河南省文物建筑保护研究院基本科研业务费项目

作者简介: 任克彬(1986—), 男, 副研究馆员, 主要从事岩土质文物保护研究工作。E-mail: renkebin1986@163.com

纳米压痕测试方法可以快速获取测试材料的弹性模量、硬度等力学性能参数,具有测试样品少,测试范围小,测试精度高的优势,可以文物散落碎片为样品完成力学性能测试与分析。目前,纳米压痕测试技术已在金属材料^[1-2]、薄膜^[3-4]、水泥基材料^[5-6]、岩石^[7-8]、烧结黏土砖^[9-10]等材料测试中广泛应用,测试效果较好。如,Zakira 等^[10]通过纳米压痕对硫铝酸钙水泥(CSA)微观力学性能进行了研究,测定出无高岭石和含高岭石样品的铝灰石弹性模量,测试结论与大量宏观样品测试结果较为相近。Wang 等^[11]通过纳米压痕试验详细阐述了硅酸钙水合物(C-S-H)微观力学性能,并说明了 C-S-H 的力学性能影响因素。Deng 等^[12]采用纳米压痕技术对页岩进行了研究,发现页岩复合材料在微尺度上的模量各向异性主要由粘土颗粒的取向决定,嵌入黄铁矿的页岩复合材料表现出较强的软化特性。Buchner 等^[13]采用纳米压痕测试方法对烧制黏土砖的微观结构特征与力学特性进行了研究,实现了样品亏缺条件下的力学性能定量评价。

综上所述,纳米压痕测试及理论方法具有信息获取全面、人为因素影响小、被摄体干扰最小等优点,能够在较低幅度干预和扰动墓葬古遗址本体的前提下,提供有效构件进行微观物理力学性能表征参数。所以本文选取郑州将军冢墓葬砖为研究对象,通过 X 射线衍射(XRD)试验,分析墓砖表面和内部的矿物组成成分及含量,在微纳尺度下,采用纳米压痕技术对墓砖表面和内部结构进行力学性能测试并进行微观结构分析,提取墓葬砖的力学表征信息。研究可为古遗址墓葬类砖质文物的保护和修复工作提供参考。

1 将军冢概况

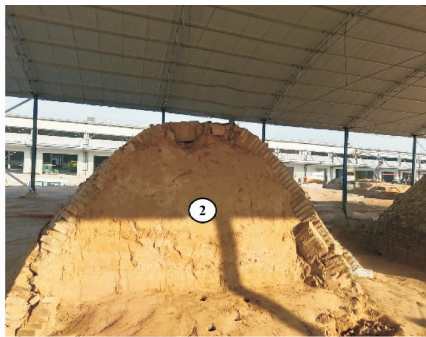
将军冢墓遗址位于河南省郑州航空港区,西距新郑市 22 km,东距尉氏县 19.7 km,北邻淮海路,东部为小黑河,南邻 343 国道,西靠周家村和胡陈村。于 2023 年 6 月由河南省文物考古研究院对其发掘。将军冢墓地基于墓葬形制、随葬品特点、地层关系等多方面因素被推断为东汉中期,墓葬本体以及墓前建筑基址在全国同等级墓葬材料中较为少见,对于了解东汉晚期高等级贵族墓的陵园设施、祭祀活动和墓葬制度具有重要学术价值^[14]。将军冢墓葬的墓室砖结构砌法基本相同,仅在墓顶和墓壁用砖层数略有不同;铺地砖均为横向人字形,沿着南北平铺而成,墓壁为侧砖丁砌而成,墓顶为四面结顶式穹窿顶^[15]。

2 试验材料与方法

由于建造年代、环境变化,历史变迁等因素影响,墓顶和墓壁表面已产生溶解、碱风化、脆粉、裂纹和损失等病害,影响遗址的安全保存和全面展示。有必要结合其砌砖的力学特征信息对其进行复原和修复。而对于此类墓葬类古遗址砌筑材料力学信息的提取,常规力学性能测试取样过程会对文物本体造成损坏,无法大量取样且取样困难^[16]。为解决这一问题,需进一步探寻一种测试其原始物理力学特征的有效方法。

2.1 测试材料及样品制备

本研究测试材料取于将军冢 2 号墓室砖。选取 2 号墓室旁散落墓砖块进行表面和内部微、纳观力学性能测试,以评价墓砖力学性能的均质性。取样及测试位置如图 1 所示。



(a) 取样位置



(b) 表面及内部试样

图 1 取样位置及样品

为综合评价墓砖整体力学性能的均质性,分别对墓砖表面和内部进行纳米压痕试验试样制备。根据测试要求,将墓砖砖体表面厚度 2 cm 内和墓砖几何中心轴 2 cm 内范围定义为墓砖表面和内部试样。首先,将两种试样分割成 1 cm×1 cm×0.5 cm 的试样;使用清水玻璃胶将试样在硅胶模具内进行浇筑;为保证测试样品具有足够的光滑性和平整度,防止表面粗糙突变影响测试的准确性,使用 600、1000、1500、2000 目数的碳化硅砂纸和抛光机对浇筑试样进行打磨,每道砂纸的打磨时间不少于 20

min;分别采用尺寸为3.0 μm、1.0 μm和0.3 μm的金刚石悬浮液颗粒对试样进行抛光,呈现镜面效果;将打磨完成后的试样进行清洗,以确保表面无杂质。

XRD 试样制备过程中将墓砖表面和内部样品研磨成均匀粉末,与石蜡粘合剂混合,然后涂布在样品支架上。颗粒尺寸约为10 μm~50 μm,表面平整致密。扫描电镜(SEM)试样制备过程中,采用冷冻-真空升华干燥法对墓砖试样进行干燥,防止干燥过程中试样内部微观结构改变。采用锋利刀片逐层切取墓砖表面,保留尺寸约为10 mm×15 mm×10 mm的样品,使用双面刀片将其周围切除1 mm,获取SEM样品。

2.2 试验仪器及方法

测试所选用纳米压痕仪为美国安捷伦 G200,采用压头为三棱锥玻氏(Berkovich)金刚石压头。载荷分辨率为50 nN,最大荷载为500 mN,z方向位移分辨率小于0.01 nm,最大压入深度大于500 μm,x、y方向位移分辨率为1 μm,行程范围100 mm×100 mm^[17]。试验过程中设置压头以10 nm/s的速度接近试样表面,设置CSM模式的频率为45 Hz,位移幅值为2 nm,应变率为0.05 s⁻¹,最大压痕深度为2 000 nm~2 200 nm,达到最大荷载后,保载10 s,各测点之间的间距大于20 μm^[18]。扫描电镜(SEM)测试采用日立高科技扫描电镜SU8100系列测试设备。X射线衍射(XRD)图谱分析采用德国Bruker D8 Advance型X射线衍射仪,在0.002°~90°的恒定步长下,扫描速度在0.002°/min~100°/min之间,2θ角的测量范围是5°~80°。

3 试验结果与分析

3.1 墓葬砖矿物组成

表1为墓砖试样矿物含量比例。可以看出,墓砖组成矿物主要包括石英、长石和云母等。其中,石英含量最高,表面试样和内部试样含量分别为68%、74%;长石含量次之,表面与内部试样长石含量分别为24%、15%;云母含量最少,表面与内部试样中云母含量分别为6%和8%。图2为墓砖表面和内部试样的XRD衍射图谱,由图2可知,墓砖表面和内部试样中矿物类型一致,主要矿物含量相近,表明汉代砖块在制作过程中使用的原料具有较高的一致性,制砖工艺较为成熟和稳定。说明汉代墓砖原料在拌合过程中得到了均匀混合,烧制过程中温度和时间控制得当,从而确保了砖块的整体质量和性能。这种均匀性也反映了汉代在建筑材料制作上

的技术成就,以及对质量控制的重视。

表 1 墓砖矿物组成及比例

样品	石英/%	长石/%	云母/%	其他/%
表面	68	24	6	2
内部	74	15	8	3

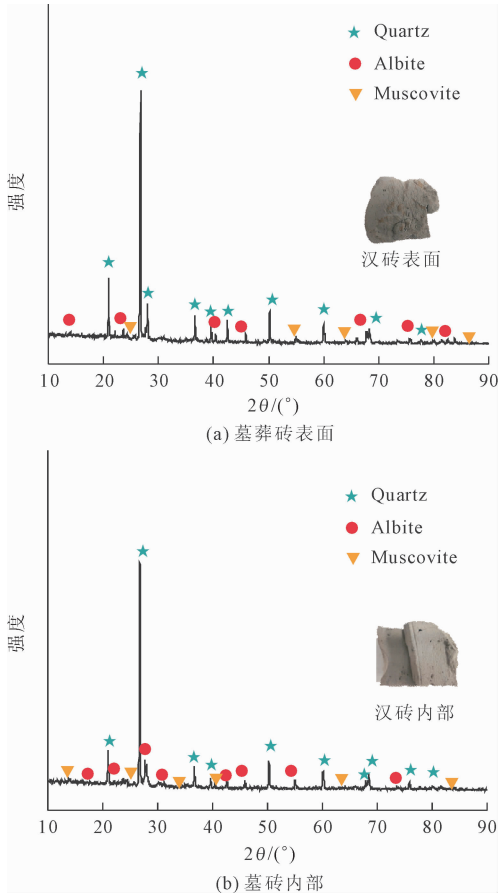


图 2 墓葬砖 XRD 衍射图谱

3.2 墓葬砖表面及内部微观结构特征

对墓砖表面和内部试样进行扫描电镜测试(SEM),得到500倍数墓砖表面及内部试样的SEM图,如图3所示。将图3进行二值化处理(图3(c),图3(d)),可以看出,墓砖表面(图3(a))的结构成片状分布,较为粗糙,棱角分明,有明显的大孔隙,密实度较低;而(图3(b))中墓葬砖内部表面较为平整,颗粒致密,孔隙相对较小。表面和内部的孔隙在各个方向都有分布,能明显看出墓葬砖表面的孔隙数量多于墓砖内部的。这是由于汉代古墓群长期掩埋于地下,会受到地下水、微生物等影响,表面和内部的可溶性矿物成分和胶结物在地下水等因素的作用下发生溶解,产生一系列的孔隙,而最先受到影响的是墓砖的表面。随着时间推移,墓葬砖表层逐渐形成大孔隙,水溶液开始沿表层孔隙结构入渗,逐渐

向墓砖的内部入渗,入渗路径增长,水溶液和墓砖的接触面积减小,反应速率降低。墓葬砖内部的微小

孔隙也可能由此造成或是在制造墓砖冷却时,其内部产生原始微小孔隙。

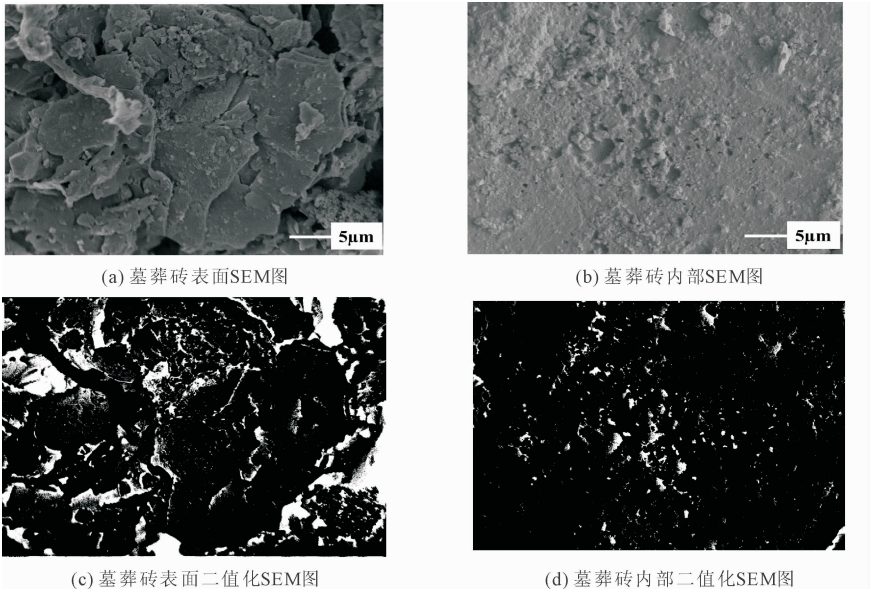


图 3 墓葬砖试样微细观结构 SEM 图及孔隙分布图

3.3 墓葬砖力学特性及表征参数

纳米压痕测试过程中,可分为加载、保载、卸载三个阶段,如图 4 所示。加载时,荷载-位移曲线的曲率会在弹性和弹塑性阶段迅速增长。即纳米压头试样表面接触时,先发生弹性变形,当荷载达到屈服强度时,开始发生弹塑性变形并开始出现压头处的裂纹,直至试样破坏发生塑性变形,形成永久裂缝。

压入荷载 406.42 mN。在保载阶段,墓砖表面的蠕变量比内部的稍大,塑性较强。在卸载之后,墓砖表面及内部试样回弹量超过总体变形的 2/3,说明汉代砖块具有较好弹性性能。

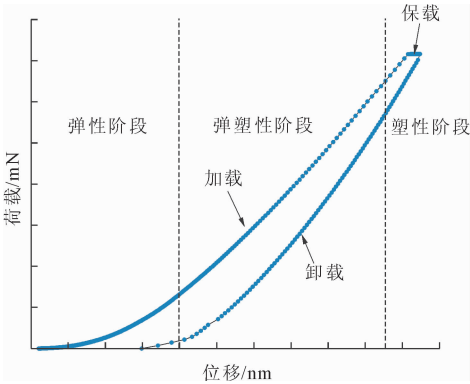


图 4 荷载-位移曲线模型

每个试样进行纳米压痕测试试验后,删除表面粗糙及孔隙处的点,可得到荷载-位移曲线如图 5 所示。可以看出墓砖表面(图 5(a))和内部(图 5(b))荷载-位移曲线形态相似。相比于墓砖内部,墓砖表面的高强度矿物分布较少,低强度矿物分布较多,最大压入荷载为 378.31 mN;墓砖内部的高强度矿物分布较多,低强度矿物分布较少,内部的最大

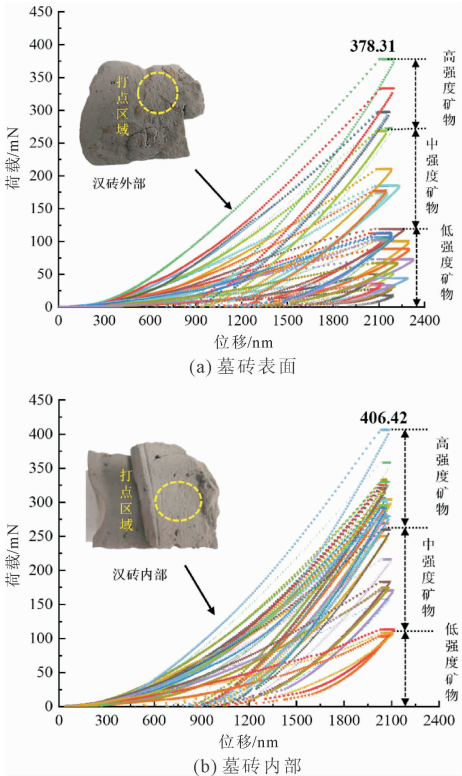


图 5 墓砖荷载-位移曲线

整理试样的荷载-位移曲线,可得到图 6 墓碑微观弹性模量-位移关系和图 7 墓碑微观硬度-位移曲线图。由图 6、图 7 可以看出,微观弹性模量和硬度的变化趋势大致相同,两者总体都是随着深度的增加而缓慢减小,说明墓碑微观弹性模量和硬度自身有着密切的相关性。其次,墓碑外部弹性模量和硬度的最大值均小于其内部弹性模量和硬度的最大值,这表明墓碑外部的变形和强度性质都要弱于墓碑内部。这由于墓碑长时间埋于地下,首先造成外部表面腐蚀,导致硬度等力学性能下降。同时可以发现纳米压痕试验在试样表面 100 nm 左右时,数据出现很大的波动,这可能由于试样表面粗糙以及材料本身的性质造成的。由于墓碑使用纳米压痕试验,连续刚度测试方法获得的弹性模量和硬度在 1 000 nm 左右的深度数据开始比较平稳,因此建议

选取 1 000 nm 之后的数据进行计算弹性模量和硬度。而随着压痕深度的增加,在加载过程中会出现裂纹导致弹性模量和硬度的减小。因此,压痕深度越大,对应的弹性模量和硬度与真实的墓碑的弹性模量和硬度的数值相差越大。所以本文选取 1 000 nm 到 1 200 nm 的数据进行研究。

由墓碑弹性模量-位移曲线(图 6)及硬度-位移曲线(图 7)分析结果可知,1 000 nm~1 200 nm 压痕深度范围内数据较为稳定,采用均值法对数据进行处理并整理。由于纳米压痕试验数据较多,通常采用均值法或解卷积法对力学参数进行处理。解卷积法需要明确区分墓碑的物相组成且可能存在多种结果^[19],因此本文采用均值法对数据进行分析,图 8 为计算范围内的平均弹性模量、平均硬度和平均断裂韧性的测试结果。

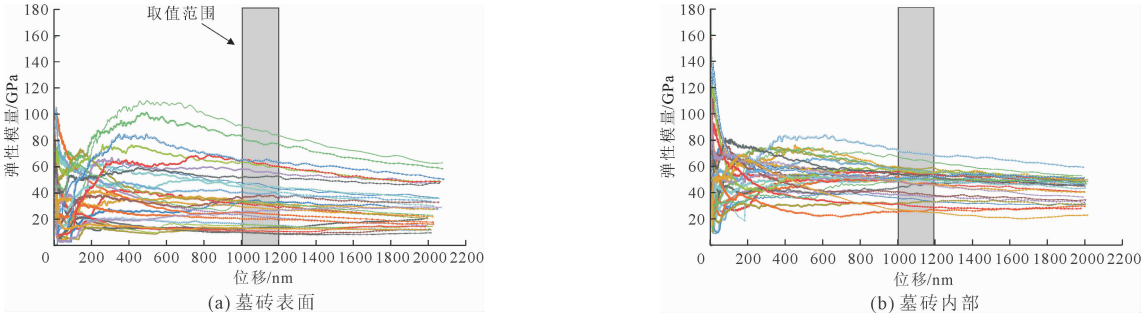


图 6 墓碑弹性模量-位移曲线

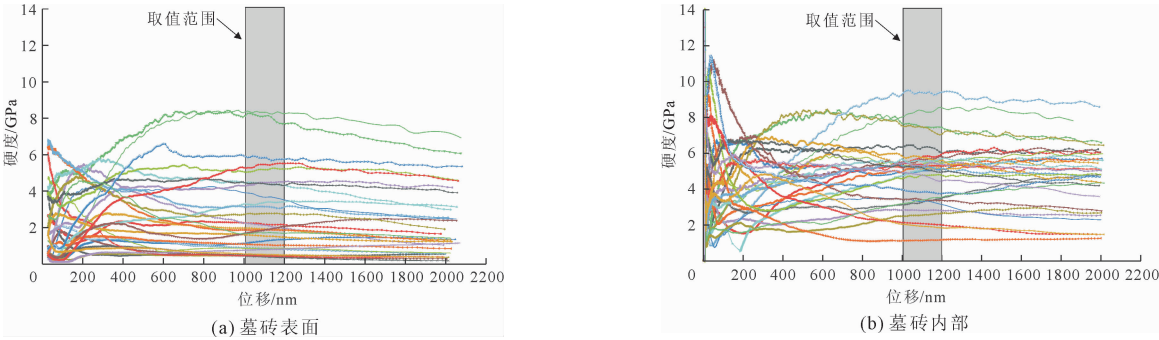


图 7 墓碑硬度-位移曲线

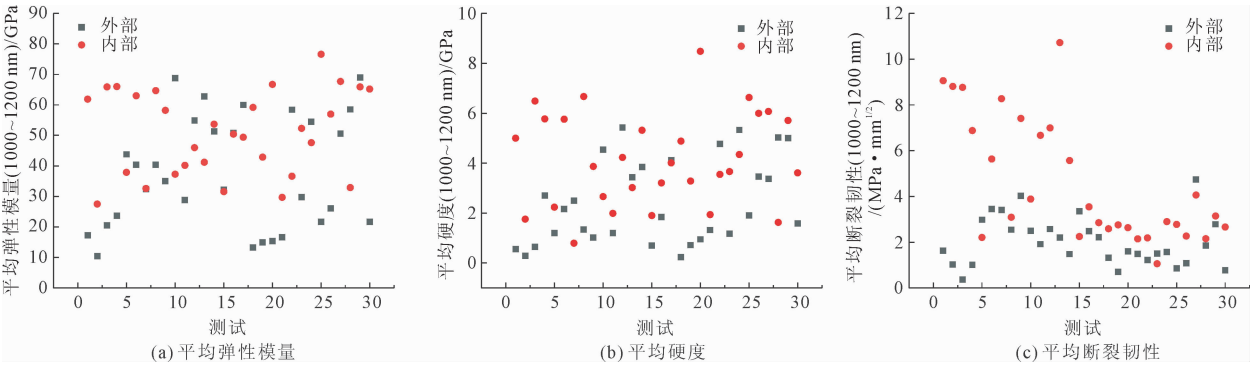


图 8 各个点平均力学测试结果

由图 8 可以看出,墓砖内部的数据点大部分都位于墓砖外部数据点的上方,说明墓砖内部的力学性能是要高于其外部。且数据点分布都比较离散。整理得到微纳尺度下墓砖试样弹性模量、硬度及断裂韧性等力学性能表征参数。如表 2—表 4 所示。

表 2 微观弹性模量(1 000 nm~1 200 nm)				
样品位置	最大值/GPa	最小值/GPa	平均值/GPa	标准差
表面	69.0	10.4	37.5	18.2
内部	76.6	27.5	50.9	13.9

表 3 微观硬度(1 000 nm~1 200 nm)				
样品位置	最大值/GPa	最小值/GPa	平均值/GPa	标准差
表面	5.43	0.24	2.41	1.69
内部	8.48	0.79	4.14	1.87

表 4 微观断裂韧性(1 000 nm~1 200 nm)				
样品位置	最大值/(MPa·m ^{1/2})	最小值/(MPa·m ^{1/2})	平均值/(MPa·m ^{1/2})	标准差
表面	4.74	0.37	2.02	1.05
内部	10.72	1.06	4.53	2.66

墓砖表面的平均弹性模量为 37.5 GPa(标准差为 18.2)、平均硬度为 2.41 GPa(标准差为 1.69)及平均断裂韧性为 2.02 MPa·m^{1/2}(标准差为 1.05);内部的平均弹性模量为 50.9 GPa(标准差为 13.9)、平均硬度 4.14 GPa(标准差为 1.87)、平均断裂韧性为 4.53 MPa·m^{1/2}(标准差为 2.66)。微纳尺度下墓砖内部的弹性模量和硬度要高于墓砖表面。各力学性能表征参数计算值标准差较大,说明数据之间的离散程度较大,进一步反映出墓砖的矿物组成相对复杂,孔隙特征明显,非均匀性较强。

4 结 论

(1) 将军冢墓葬砖主要由石英、长石和云母等组成,其中,石英含量最高,长石含量次之,云母含量最少。表面和内部矿物类型及含量基本一致,反映了汉代在建筑材料制作上的技术成就,以及对质量控制的重视。

(2) 由于长期掩埋于地下,受到地下水、微生物等影响,导致墓葬砖表面可溶性矿物成分和胶结物溶解,随时间推移其表面结构粗糙、孔隙多且溶蚀性更为明显,而内部受影响较小,则相对平整致密、孔隙较小。

(3) 墓砖表面最大压入荷载为 378.31 mN,内部最大压入荷载 406.42 mN,表面蠕变量较大,塑性较强。墓砖内部微观力学性能优于表面,内部平均弹性模量在 40 GPa~60 GPa 区间,平均硬度在 4 GPa~5 GPa 区间,表面平均弹性模量在 30 GPa~40 GPa 区间,平均硬度在 1 GPa~2 GPa 区间;墓砖内部和表面的微观平均弹性模量分别为 50.9 GPa、37.5 GPa;微观平均硬度分别为 4.14 GPa、2.41 GPa;微观平均断裂韧性分别为 4.53 MPa·m^{1/2}、2.02 MPa·m^{1/2}。反应墓砖内部的力学性能更强,更能抵抗外力作用,而表面由于长期受环境侵蚀,力学性能出现劣化。

(4) 纳米压痕技术在研究郑州将军冢墓葬砖力学性能方面展现出显著优势,仅需少量样品即可获取精准的力学表征参数。为文物砖块的保护和修复提供了理论依据和技术支持。

参考文献:

[1] 王方圆,张玉龙,王章维,等. 纳米压痕下 VCoNi 中熵合金的塑性变形行为 [J/OL]. 金属学报,1-14[2024-10-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1139.TG.20240306.1715.010.html>.

[2] 刘佳伟,郎风超,王时雨,等. 基于纳米压痕技术研究 2024-T4 铝合金力学性能 [J]. 轻金属,2023(8):47-52.

[3] Constantinides G, Ulm F J, Vliet K V. On the use of nanoindentation for cementitious materials[J]. Materials & Structures, 2003,36(257):191-196.

[4] Luo Zhiyu, Li Wengui, Wang Kejin, et al. Research progress in advanced nanomechanical characterization of cement-based materials[J]. Cement and Concrete Composites, 2018,94:277-295.

[5] 康俊涛,袁佳乐,余泽川. 过硫磷石膏矿渣水泥净浆微观力学性能表征 [J]. 武汉理工大学学报,2023,45(9):22-29.

[6] Ma Zhaoyang, Pathegama Gamage R, Zhang Chengpeng. Application of nanoindentation technology in rocks: a review[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2020,6:60.

[7] 时 贤,蒋 恕,卢双舫,等. 利用纳米压痕实验研究层理性页岩岩石力学性质——以渝东南酉阳地区下志留统龙马溪组为例[J]. 石油勘探与开发,2019,46(1):155-164.

[8] 陈显辉,程 毅,谢欣玥,等. 基于纳米压痕试验的大理岩宏微观力学参数关联性研究 [J]. 岩土力学, 2023,44(12):3551-3564.

[9] Kiefer T, Füssl J, Kariem H, et al. A multi-scale mate-

rial model for the estimation of the transversely isotropic thermal conductivity tensor of fired clay bricks[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2020, 40 (15): 6200-6217.

[10] Zakira U, Bajpayee A, Pharr M, et al. Grid nanoindentation on calcium sulfoaluminate (CSA)-Kaolinite pastes [J]. Construction and Building Materials, 2022, 335: 127523.

[11] Wang Jiawei, Gao Chang, Tang Jiahui, et al. The multi-scale mechanical properties of calcium-silicate-hydrate [J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 140:105097.

[12] Deng Lei, Xie Lingzhi, He Bo, et al. Anisotropic microscale failure mechanism of shale[J]. Acta Geotechnica, 2024, 19:7451-7471.

[13] Buchner T, Kiefer T, Königsberger M, et al. Continuum micromechanics model for fired clay bricks: Upscaling of experimentally identified microstructural features to macroscopic elastic stiffness and thermal conductivity [J]. Materials & Design, 2021, 212:110212.

[14] 张体义. 2023 年度河南省十大考古新发现揭晓[J]. 河南日报, 2024-03-02(3).

[15] 河南新闻广播. 郑州航空港区发现东汉晚期列侯“将军冢”[EB/OL]. [2024-02-29]. <https://share.hntv.tv/news/0/1763146030251261953>.

[16] 柴鹏飞, 丁淑君, 刘 洲, 等. 用纳米压痕等测试方法对莫高窟第 335 窟地面水泥基材料进行初步分析[J]. 石窟与土遗址保护研究, 2023, 2(1):16-24.

[17] Cong Richao, Yang Ruiyue, Li Gensheng, et al. Geomechanical properties of thinly interbedded rocks based on micro-and macro-scale measurements[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56 (8): 5657-5675.

[18] Oliver W C, Pharr G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments[J]. Journal of Materials Research, 1992, 7(6):1564-1583.

[19] 时 贤, 蒋 恕, 卢双舫, 等. 利用纳米压痕实验研究层理性页岩岩石力学性质——以渝东南酉阳地区下志留统龙马溪组为例[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46 (1): 155-164.



(上接第 35 页)

[16] 韩桦磊. 装配式框架结构环形钢筋节点设计与力学性能有限元分析[J]. 砖瓦, 2024(11):82-84.

[17] 邵家辉. U 型环扣钢筋连接装配式盖板涵力学性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2024.

[18] 钱稼茹, 杨新科, 秦 珩, 等. 竖向钢筋采用不同连接方法的预制钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6):51-59.

[19] 高华超. 装配式剪力墙上下墙板钢筋 U 型搭接连接性能研究[D]. 天津:天津大学, 2018.

[20] 张微敬, 钱稼茹, 陈 康, 等. 竖向分布钢筋单排连接的预制剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构, 2011, 41 (2): 12-16.

[21] 钱稼茹, 彭媛媛, 张景明, 等. 竖向钢筋套筒浆锚连接的预制剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构, 2011, 41 (2): 1-6.

[22] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.

[23] 庄 茁. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2009.

[24] Mirzazadeh M M, Noël M, Green M F. Effects of low temperature on the static behaviour of reinforced concrete beams with temperature differentials [J]. Construction and Building Materials, 2016, 112:191-201.

[25] 白明鑫, 陈江涛, 陈圣刚, 等. 热力耦合作用下非对称约束钢筋混凝土构件力学性能研究[J/OL]. 工程科学与技术, 1-12.

[26] 王玉镯, 傅传国. ABAQUS 结构工程分析及实例详解[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.

[27] 陆新征, 叶列平, 缪志伟. 建筑抗震弹塑性分析[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009.

[28] 徐 琪, 彭林立, 蔡 洁, 等. 装配式钢筋桁架筒支梁力学性能有限元分析[J]. 湖北工业大学学报, 2024, 39(2):104-110.

[29] 王玉镯, 傅传国. ABAQUS 结构工程分析及实例详解[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.