

CT技术下掺油泥改性生土的孔隙损伤研究*

张坤^{1,2}, 杨应龙¹, 兰官奇¹, 惠渊涛¹, 田安涛³, 缙鹏³

(1. 西安石油大学 管道工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 西安石油大学 基建处, 陕西 西安 710065;

3. 渭南国控精工绿建科技有限公司, 陕西 渭南 715509)

摘要: 为研究掺入水泥和油泥改性生土材料微观尺度的孔隙结构和损伤, 对轴压下的立方体试件进行CT扫描试验, 获取试件在动荷载作用下不同应力阶段的断面CT图像, 并结合灰度分析和阈值处理方法, 定量表征不同配合比材料内部孔隙率的变化规律, 建立孔隙率与材料损伤之间的内在联系, 揭示改性生土材料损伤随应力变化的演化规律、损伤破坏机理。结果表明: 不同应力状态下, YS1试件裂缝由核心受压区向边缘延伸, YS2试件呈“八字形”破坏。油泥的掺入, 可生成有较强黏结能力和可塑性的凝胶, YS2试件的变形能力得到提升。水泥掺量增加, 生成密度大的高结晶聚合物, 使YS1试件力学性能表现更优。XY、YZ扫描断面中, 各类试件在不同应力作用下, 材料内部孔隙率变化各不相同。YS1试件损伤度持续增大, YS2试件损伤度先增大后减小, 虽然YS2试件的整体损伤度小, 但力学性能弱于YS1试件, 油泥过量掺入会影响材料的力学性能, 建议油泥、水泥的质量配合比在1:2左右。

关键词: CT技术; 改性生土材料; 灰度图; 孔隙率; 损伤度

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2025.06.19.0002

中图分类号: TU411.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2026)02-0238-012

引文格式: 张坤, 杨应龙, 兰官奇, 惠渊涛, 田安涛, 缙鹏. CT技术下掺油泥改性生土的孔隙损伤研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文), 2026, 43(2): 238-249.

英文引文格式: Zhang Kun, Yang Yinglong, Lan Guanqi, Hui Yuantao, Tian Antao, Gou Peng. Pore structure deterioration in oil sludge-modified raw soil: A CT-based investigation[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2026, 43(2): 238-249.

Pore Structure Deterioration in Oil Sludge-Modified Raw Soil: A CT-Based Investigation

Zhang Kun^{1,2}, Yang Yinglong¹, Lan Guanqi¹, Hui Yuantao¹, Tian Antao³, Gou Peng³

(1. Pipeline Engineering College, Xi'an Shiyou University, Xi'an Shaanxi 710065, China; 2. Construction of Infrastructure Department, Xi'an Shiyou University, Xi'an Shaanxi 710065, China; 3. Weinan State-Owned Precision Engineering Green Building Technology Co. Ltd., Weinan Shaanxi 715509, China)

Abstract: In order to study the mesoscale pore structure and damage evolution of modified raw soil materials incorporating cement and oil sludge, CT scanning tests are conducted on cube specimens under axial pressure. Cross-sectional CT images of the specimens at different stress stages under dynamic load are obtained, and the variation law of internal porosity of materials with different ratios is quantitatively characterized by gray scale analysis and threshold processing methods. The intrinsic relationship between porosity and material damage is established, which reveals the evolution law of damage in modified raw soil materials with stress and the corresponding failure mechanisms. The results show that: under different stress conditions, the cracks of YS1 specimens extend from the core compression zone to the edge, and YS2 specimens exhibit a “figure-eight” failure mode. The addition of oil sludge promotes the formation of a gel with strong binding capacity and plasticity, which en-

* 收稿日期: 2025-06-19; 修回日期: 2026-02-05; 录用日期: 2026-02-07.

基金项目: 国家自然科学基金“纤维增强生土互锁砌块墙体抗震/保温性能一体化提升机理”(52308204); 山东省自然科学基金“混凝土构件智能化振捣与养护作用机理及装备研究”(ZR2024ME094); 西安石油大学研究生创新基金项目“CT技术下掺固废改性生土材料研究”(YCX2413146); 渭南市科技计划重点研发项目“自嵌固生土砖墙体-型钢组合结构产业化农房关键技术研发”(ZDYFJH-772); 陕西省教育厅重点科学研究计划项目“自嵌固生土墙体型钢组合结果关键技术应用研究”(25JR134).

作者简介: 张坤(1986—), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事混凝土及生土结构的研究, E-mail: 491543584@qq.com.

hances the deformability of YS2 specimens. Increasing the cement content leads to the generation of dense crystalline polymers, which results in superior mechanical performance of YS1 specimens. In the *XY* and *YZ* scanning sections, porosity variations differ significantly among specimens under different stress conditions. The damage degree of YS1 specimens increases continuously, whereas that of YS2 specimens rises initially and then declines. Although YS2 specimens exhibit lower overall damage levels, their mechanical performance remains inferior to that of YS1 specimens. Excessive oil sludge content adversely affects mechanical properties, which suggests an optimal mass ratio of oil sludge to cement of approximately 1 : 2.

Key words: CT technique; modified raw soil material; gray scale map; porosity; damage degree

0 引言

生土材料是人类应用最早的建筑材料,具有良好的保温隔热性、可降解再生性和绿色低碳性^[1-3]。但传统生土材料强度低、耐久性差、抗震能力不足,在生土材料中掺加适当比例的改性掺料,可以克服传统材料的缺陷并更好发挥材料的优点,具有巨大的研究潜力^[4-6]。油泥作为石油工业废料已广泛用于改性生土掺料中,可提高材料的力学性能,但掺量对材料的强度及离散性影响显著^[7]。将生土材料加入水泥和油泥进行研究,既实现生土材料性能改良、固体废弃物资源化利用,又兼顾生态环保与工程实用需求。近年来,改性材料的宏观及细观损伤和破坏过程研究一直是广大学者的关注热点,如借助CT技术扫描混凝土试件的CT图像,可作为研究混凝土细观结构和损伤变化过程的依据^[8-9]。

材料孔隙率对改性生土材料的性能影响显著,材料孔隙率越大,强度越低。董学勤^[10]发现改性掺料的加入有助于改善素土的微结构特征,提高其黏结强度和小孔隙数量,改变骨架颗粒的排列方式,宏观上增强了改性土的强度。吕晓明^[11]发现掺入15%稻壳灰+6%石灰,土壤微观结构出现颗粒絮凝和团聚情况,土壤试样强化性能与稳定性能显著优于普通土壤样品。宋连喜等^[12]研究不同水泥掺量下黄土材料的孔隙结构及强度特征,发现随水泥掺量的增加,材料总孔容降低,硬度和强度提升明显。Liu等^[13]采用X射线断层扫描技术探究纳米二氧化硅的改性作用,发现复掺纳米二氧化硅使混凝土抗冻寿命提升,并显著抑制冻融循环下内部孔结构劣化及界面过渡区孔隙率增长。Randeep等^[14]发现石灰石粉(LSP)通过物理填充改善稳定夯土块体(SREB)颗粒级配,而石灰石煅烧黏土水泥(LC³)通过胶凝及火山灰活性增强基质致密性与内聚性,共同提升SREB力学性能与耐久性。Bakkali等^[15]发现掺入石灰降低土-贝混合物的干密度,而孔隙率的增加降低干机械强度,提高热性能,掺入水泥显著改善力学性能,同时限制其热性能。

在改性生土材料中,孔隙结构是一个至关重要的参数表征,深入研究改性生土材料中孔隙结构对优化材料力学性能具有重要意义,利用CT技术进行孔隙研究可以深入了解材料内部结构的细观特征,为评估材料特性和性能提供准确的数据支持。本文以改性生土材料为研究对象,对掺入水泥和油泥的改性生土材料进行CT扫描试验。利用CT扫描技术,研究材料从受力至破坏的动态发展和损伤演化规律。获取不同荷载阶段的CT断面图像,采用阈值分析法构建材料孔隙率与损伤度的关系。揭示改性生土材料损伤随应力变化的发展规律和破坏机理。

1 试验研究

1.1 试件制备

根据课题组前期成果^[16],本文采用表1所示的质量配合比制作试件,通过试验表明:这两种配方下改性生土试件的抗压强度高、延性好、离散性小,显示出优越的力学性能。将两种配合比制备的改性生土材料分别以掺料首字母命名为YS1和YS2。废弃油泥(具体参数见表2)取自吴起县某油厂,水泥选用强度等级为P·O 42.5秦岭盾实牌普通硅酸盐水泥,黄土取自西安市长安区,物理参数 $\omega_{\gamma}=18.2\%$ 、 $\rho_{\text{dmax}}=2.04 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $\omega_{\text{p}}=15\%$ 、 $\omega_{\text{L}}=26\%$ 、 $I_{\text{p}}=11$,黄土粒径主要介于0.005~0.050 mm。使用千斤顶压实法制作尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的立方体试件,制作完成后,置于温度为25~30℃、湿度为30%~40%的室内养护28 d,再进行抗压试验。

1.2 CT动载扫描试验

CT是电子计算机X射线断层扫描技术的简称,由射线发射器发出射线、穿透材料,收集射线衰减后的信息,通过信号数据成像原理,输出CT灰度图像^[17]。本文选用西安市儿童医院Philips医用螺旋CT,详细参数如表3所示。

表 1 试件质量配合比
Table 1 Mass mix proportion of specimens

试验编组	试验配合比成分/%		
	油泥	水泥	生土
YS1	0.10	0.25	0.65
YS2	0.13	0.18	0.68

表 2 油泥参数
Table 2 Sludge parameters

含油率/%	含固率/%	含水率/%	含不凝结气体率/%	其他/%
52.31	27.70	13.77	0.26	5.96

表 3 CT设备参数
Table 3 CT equipment parameters

名称	设备参数
扫描切层厚度	0.6 mm
空间分辨率	$\geq 1\ 200 \times 1\ 600$
检测层有效厚度	100 mm
X-射线管最大电压	120 kV

试验装置如图1所示,通过力学传感器观察千斤顶施加压力的大小,试件加载到预定阶段荷载后,固定玻璃盒盖板,将检测装置放入仪器,进行CT扫描,得到CT图像.阶段荷载由1.3节方法计算^[18].

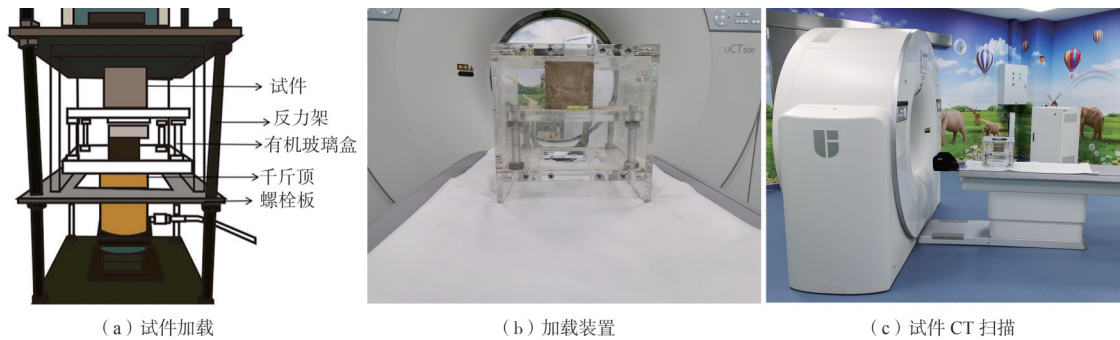


图 1 CT试验装置

Figure 1 CT test setup

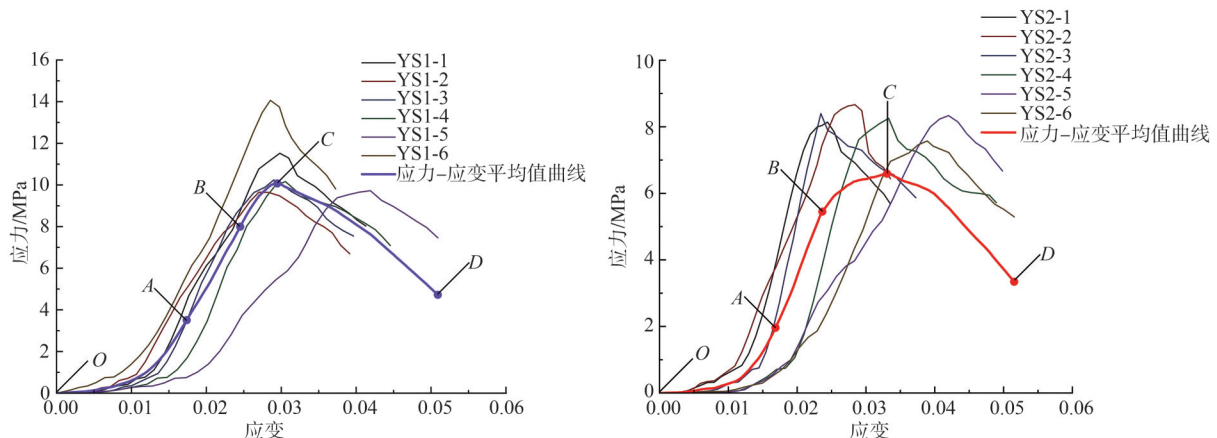


图 2 YS1和YS2试件应力-应变曲线及平均值曲线

Figure 2 Stress-strain curves and average value curves of YS1 and YS2 specimens

1.3 动态荷载的确定

利用YS1和YS2试件进行抗压试验^[16],并对试件荷载位移数据进行统计,分别绘制YS1和YS2试件应力-应变曲线,如图2所示.根据数据特点,以O、A、B、C和D为特征点.发现试件在曲线OA段被压缩,材料的密度提高,AB段斜率近似直线,属弹性变形阶段,材料内部损伤与应力呈正相关,BC段为试件弹塑性变形阶段,C点为试件的应力峰值点,CD段试件完全破坏.故选用O、A、B、C、D点的荷载进行CT扫描试验,YS1试件中,各点对应荷载分别为 $\sigma_0=0$ MPa、 $\sigma_1=3.15$ MPa、 $\sigma_2=7.99$ MPa、 $\sigma_3=10.07$ MPa、 $\sigma_4=4.72$ MPa;YS2试件中,各点对应荷载分别为 $\sigma_0=0$ MPa、 $\sigma_1=1.96$ MPa、 $\sigma_2=5.45$ MPa、 $\sigma_3=6.59$ MPa、 $\sigma_4=3.34$ MPa.

2 结果与讨论

2.1 XY断面CT图像分析

参照现有CT扫描断面的确定方法^[19],分别以受力的平行面和垂直面为研究对象,在CT扫描结束后,经图像剪切预处理,采用大津法对CT断面图像进行阈值分割,得到对比度显著的目标图像,取试件在不同应力状态下的XY扫描断面,如图3所示.

XY-1断面的细部情况如图3(a)所示,YS1和YS2试件的破坏模式不同.在低应力状态下($\sigma_1\sim\sigma_2$),YS1和YS2试件材料表面仅出现少量裂纹,主要集中在边缘区域.随着受荷应力增加,YS1试件的裂纹数量显著增加,裂纹呈放射状和分支状,表明裂纹扩展路径受材料微观结构影响.裂纹密集且扩展迅速,遍布整个材料表面,材料内部结构逐渐受到破坏,因长时间受力导致在高应力状态下表现出典型的断裂破坏.相比YS1试件,YS2试件破坏迹象并不明显,应力集中区域(如边缘)导致裂纹萌生、扩展,裂纹形态较简单,主要为受力下沿边缘方向的线性扩展.材料边缘向内部扩展速率较慢,掺入油泥使材料有一定的塑性变形能力,裂纹主要集中在边缘区域,表现出明显的疲劳破坏.

XY-2、XY-4断面的细部情况如图3(b)、图3(d)所示,两断面的破坏模式同XY-3断面相似,YS1和YS2试件表现出不同的破坏模式.YS1试件内部均出现明显的“八字形”裂缝并相互贯通,裂缝由核心受压区向试件边缘延伸,且伴随部分土块脱落.相比XY-3断面,XY-2断面的核心受压区相对完整,土块脱落较少,说明材料颗粒之间密实性高,试件受力后“环箍效应”表现明显.而XY-4断面核心受压区下部破坏显著,且试件右侧土块脱落较多.YS2试件在上述断面中的破坏失效处仅出现在试件一侧,说明试件抵御荷载能力弱,表现出明显的断裂破坏.

XY-3断面的细部情况如图3(c)所示,YS1和YS2试件表现出不同的破坏模式.YS1试件内部出现明显的“八字形”裂缝并相互贯通,裂缝由核心受压区向试件边缘延伸,裂缝宽度增加显著.YS1试件破坏形态与标准立方体试件抗压试验的破坏形态相同,因材料颗粒间密实性高,试件受力后“环箍效应”表现明显.YS2试件内部仅出现4条主裂缝(呈“八字形”相互贯通),破坏失效处仅出现在试件一侧.油泥和生土在YS2试件内形成的颗粒粒径为10~20 mm,颗粒间有效黏结面积小,这些高聚合物间黏聚力差,试件内部的细小裂缝逐渐扩展,导致试件失去整体性并破坏.

XY-5断面的细部情况如图3(e)所示,YS1和YS2试件的破坏模式不同.YS1试件在低应力状态下破坏较轻,主要在边缘部位;随受荷应力提升,试件破坏程度显著增加,大量裂纹覆盖整个表面,裂纹从边缘迅速扩展到内部区域,破坏明显,这些裂隙相互连通,表明在高应力作用下材料边缘承受较大应力,导致裂隙沿边缘区域广泛萌生和扩展.通过对比其他断面的CT图像可知,XY-5断面中YS1试件掺料分布不均匀,形成的缺陷导致应力集中,引发裂纹产生和试件破坏.YS2试件主要在边缘区域表现出破坏迹象,随受荷应力提升,破坏程度逐步增加,虽然材料整体性保持较好,但也出现较为明显的断裂迹象,试件掺料间形成的较大颗粒会增加脆性断裂破坏的风险.

2.2 YZ断面CT图像分析

YZ断面与试件受力方向平行,如图4所示.低应力状态下,YS1试件表现出较高的耐裂性,裂纹扩展较慢,伴随材料内部局部塑性变形.YS2试件裂纹扩展缓慢,形态简单且分布稀疏.随受荷应力提升,YS1试件裂纹扩展迅速且密集,裂纹形态复杂,呈明显的线性扩展,边缘处有多个裂纹分支.YS2试件裂纹扩展迅速,裂纹清晰且为直线形,贯穿整个试件表面,材料的疲劳强度和韧性显著降低,试件破坏明显.

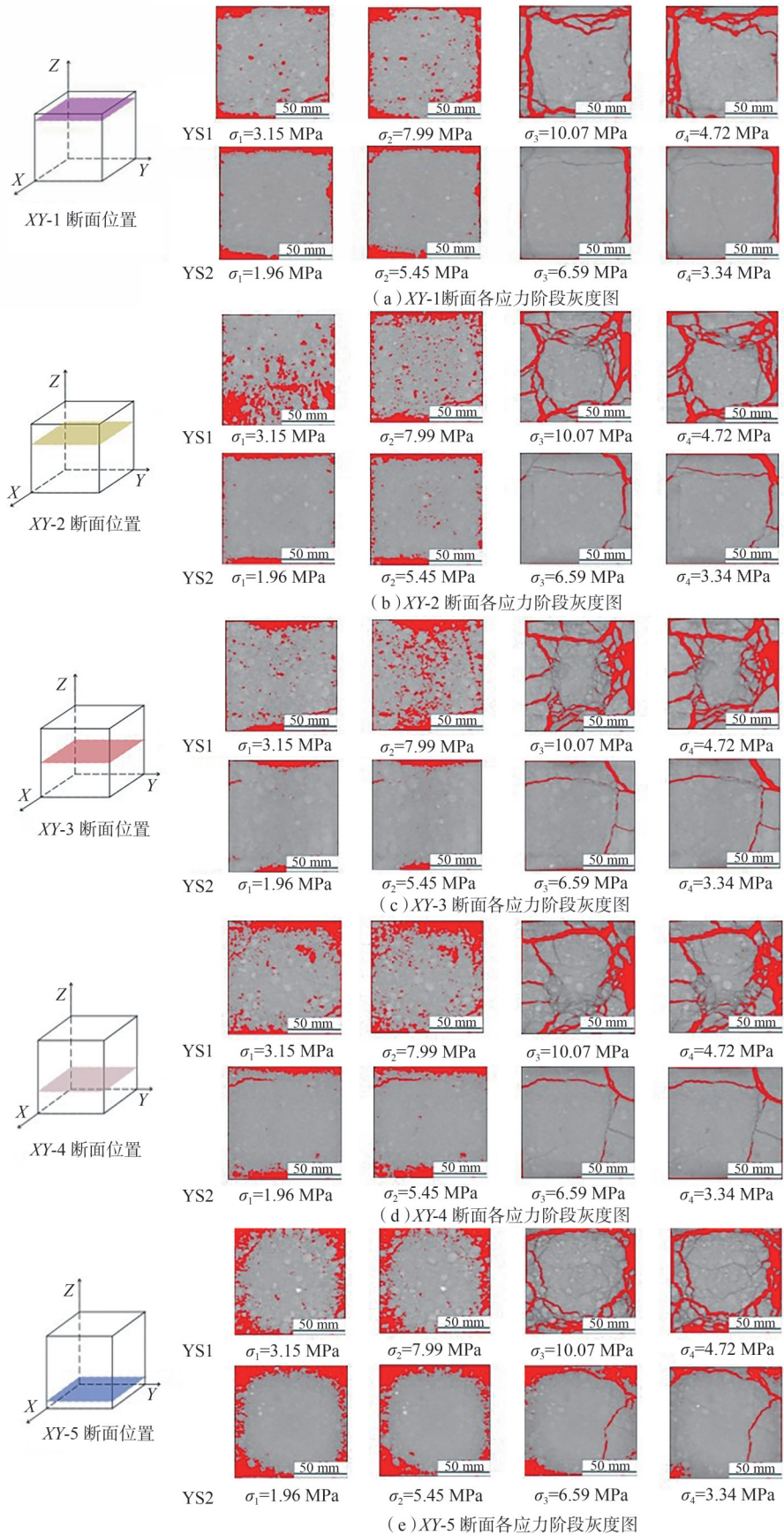


图 3 XY断面各阶段灰度图

Figure 3 Grayscale images of XY section at different stages

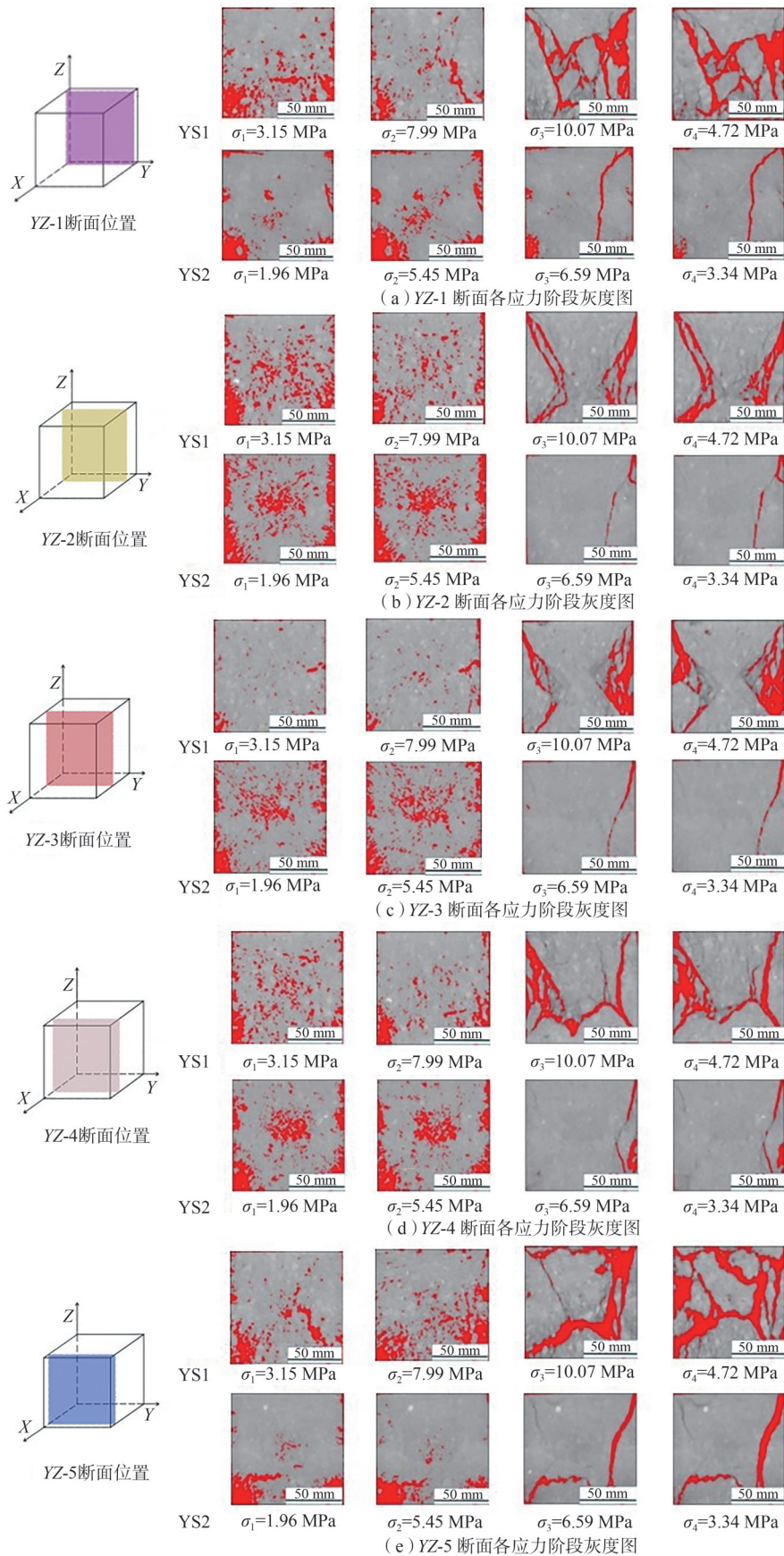


图 4 YZ断面各阶段灰度图

Figure 4 Grayscale images of YZ section at different stages

YZ-1、YZ-5断面的细部情况如图4(a)、图4(e)所示,YS1和YS2试件在两断面具有相似的破坏面裂缝,裂缝出现在断面的边沿处、位置对称,但破坏形态不同。YZ-1断面中,YS2试件右侧出现的主裂隙贯穿较大区域,表明材料内部存在一个主要的应力集中路径或薄弱面,导致裂隙沿该方向优先扩展。YZ-5断面中,YS2试件右侧和底部边沿处发生断裂破坏。与YS2试件不同,两断面中YS1试件均在底部边缘处出现明显的“八字形”裂缝,由核心受压区向边缘延伸,导致试件发生破坏。低应力状态下,YS1试件微裂隙较为分散,材料在低应力初期尚未达到裂隙大规模扩展和连通的程度,只在局部薄弱点或应力集中区域萌生微小的裂纹。YS2试件无论是边缘还是中心位置,裂纹形态简单明了,裂纹数量少,扩展速度慢,材料具有较高的韧性。随受荷应力提升,YS1试件在边缘和中心位置产生的裂缝呈不规则网状分布,表明材料内部应力分布不均匀,导致在不同方向产生裂纹扩展。YS2试件裂纹数量增多,裂纹长度增加,覆盖整个中心区域,裂纹迅速扩展。

YZ-2、YZ-4断面的细部情况如图4(b)、图4(d)所示,YS1试件在两断面的裂缝出现在靠近底部三分之一处,整体呈“八字形”的破坏形态,与在YZ-1和YZ-5断面出现的位置不同。YS2试件在右侧边缘处出现裂缝,发生破坏。低应力状态下,YS1试件出现较多的微裂隙,但这些微裂隙没有进一步扩展、连通。YS2试件裂纹形态简单,未形成大规模连通。随受荷应力提升,YS1试件裂纹数量和复杂性均增加,裂纹扩展速度加快,存在两条较为突出的主裂缝,从试件边缘向中心延伸,呈类似“V形”分布。YS2试件不能很好抵御应力提升,出现一条从试件一侧边缘延伸至另一侧的主裂缝,呈线性分布。

YZ-3断面的细部情况如图4(c)所示,YS1试件破坏面的裂缝界限出现在中间位置,不同于其他断面,此断面中试件破坏严重,材料四周出现大量裂缝,使内部形成“沙漏形”土块,并未出现“八字形”的整体裂缝。而YS2试件破坏形态与其他断面相似,均出现在试件右侧边缘处,发生断裂破坏。低应力状态下,YS1试件内部开始出现一些微小的裂纹,但这些裂纹尚未形成连贯的裂隙。微裂隙数量较少,且主要集中在材料的局部区域。YS2试件微裂隙分布广泛,多呈点状和短小的线状。随受荷应力提升,YS1试件存在两条较为显著的主裂隙,从两侧边缘向中心延伸,呈类似“X形”分布。这种主裂隙的形成,表明在高应力作用下材料内部沿特定方向产生强烈的应力集中,导致裂隙沿这些方向快速扩展,失去结构完整性。YS2试件裂纹长度增加,从一侧边缘延伸至另一侧,说明在高应力作用下,材料内部已形成一条主要的裂隙通道。

3 材料孔隙率及损伤分析

3.1 孔隙率与强度的关系分析

孔隙率是指材料中孔隙体积与自然状态下总体积的比值。由图5可知,在相同试件的不同断面中,随受荷应力提升,试件内部孔隙结构变化显著。两类试件在 σ_1 应力状态下,YS1和YS2试件均是XY-3断面孔隙率最小,为11.68%和6.59%,而XY-5断面孔隙率最大,为24.12%和23.22%;XY-1断面孔隙率变化小,XY-5断面孔隙率变化大。两类试件在 σ_2 应力状态下,YS1试件XY-1断面孔隙率最小,为15.35%,比 σ_1 应力状态增加26.34%;YS2试件XY-3断面孔隙率最小,为6.76%。两类试件在 σ_3 应力状态下,YS1和YS2试件各断面孔隙率均减小,材料受荷时内部孔隙被压缩,部分孔隙、孔洞、裂隙体积减小,并伴随部分孔的闭合现象,孔隙率表现出下降趋势。两类试件在 σ_4 应力状态下,YS1和YS2试件各断面孔隙率均出现增大趋势,此过程试件完全破坏,失去承载力;材料刚度退化,内部裂隙得到显现和延伸,试件内部损伤明显,孔隙、孔洞、裂隙等各类形态增多。

由图5试件孔隙率整体变化可知,YS1试件的孔隙率整体呈逐渐增加趋势,由于受荷后出现明显的塑性变形,生成的裂缝和孔洞增加,试件孔隙率升高。与YS1试件不同,YS2试件的孔隙率整体呈降低趋势,这是因为应力增加导致试件被压缩,促使材料内部微孔和微裂纹闭合,孔隙率减小。但当应力从 σ_1 增大到 σ_2 时,YS2试件的XY各断面孔隙率逐渐增加,说明试件内部发生破坏、产生裂缝,而裂缝生成会增加孔隙数量,导致试件孔隙率升高。峰值应力后,XY各断面孔隙率呈降低趋势,可能是应力提升使YS2试件内部的密实度增加,孔隙率减小。由图5试件孔隙率对比可知,YS1和YS2试件孔隙率呈不同变化趋势,表明在不同配合比下,试件在应力作用下内部损伤的发展存在较大差异。

化学性能方面,水泥经水化反应生成水化硅酸钙凝胶和氢氧化钙晶体,填充孔隙并胶结土颗粒,提升强度和稳定性;油泥中有机成分与水泥水化反应后生成的物质发生反应,形成的凝胶逐渐结晶硬化,有较强的黏结能力,使骨料结合牢固。物理力学性能方面,水泥颗粒填充土体孔隙,降低孔隙率,增加密实度,并通过水化产

物增强抗压和抗拉强度;油泥通过油性物质润滑土体,改善和易性,同时填充孔隙并黏结土颗粒,提升整体性和抗裂性.掺入不同含量油泥和水泥的试件,在力学性能和孔隙率上表现出不同的特性.油泥和水泥配合比为1:1.38时,试件的整体孔隙率更低,是因为水泥和油泥共同填补反应后产生的孔隙,降低整体孔隙率.油泥和水泥配合比为1:2.5时,试件的力学性能更好,是因为水泥含量高,水化反应后产生更多的产物使抗压强度提高.分析不同XY断面下两类试件的孔隙率,如图5(f)所示,应力在 σ_1 至 σ_2 时,两类试件的孔隙率呈增加趋势,荷载增加促进材料内部孔隙、裂缝的发展,孔隙率升高.应力在 σ_2 至 σ_3 时,两类试件的孔隙率呈下降趋势,材料内部孔隙、裂缝受荷压缩显著,部分孔隙、裂缝闭合,孔隙率降低.应力在 σ_3 至 σ_4 时,两类试件的孔隙率整体呈上升趋势,材料内部孔隙、裂缝显著发展,试件发生破坏,孔隙率上升明显.

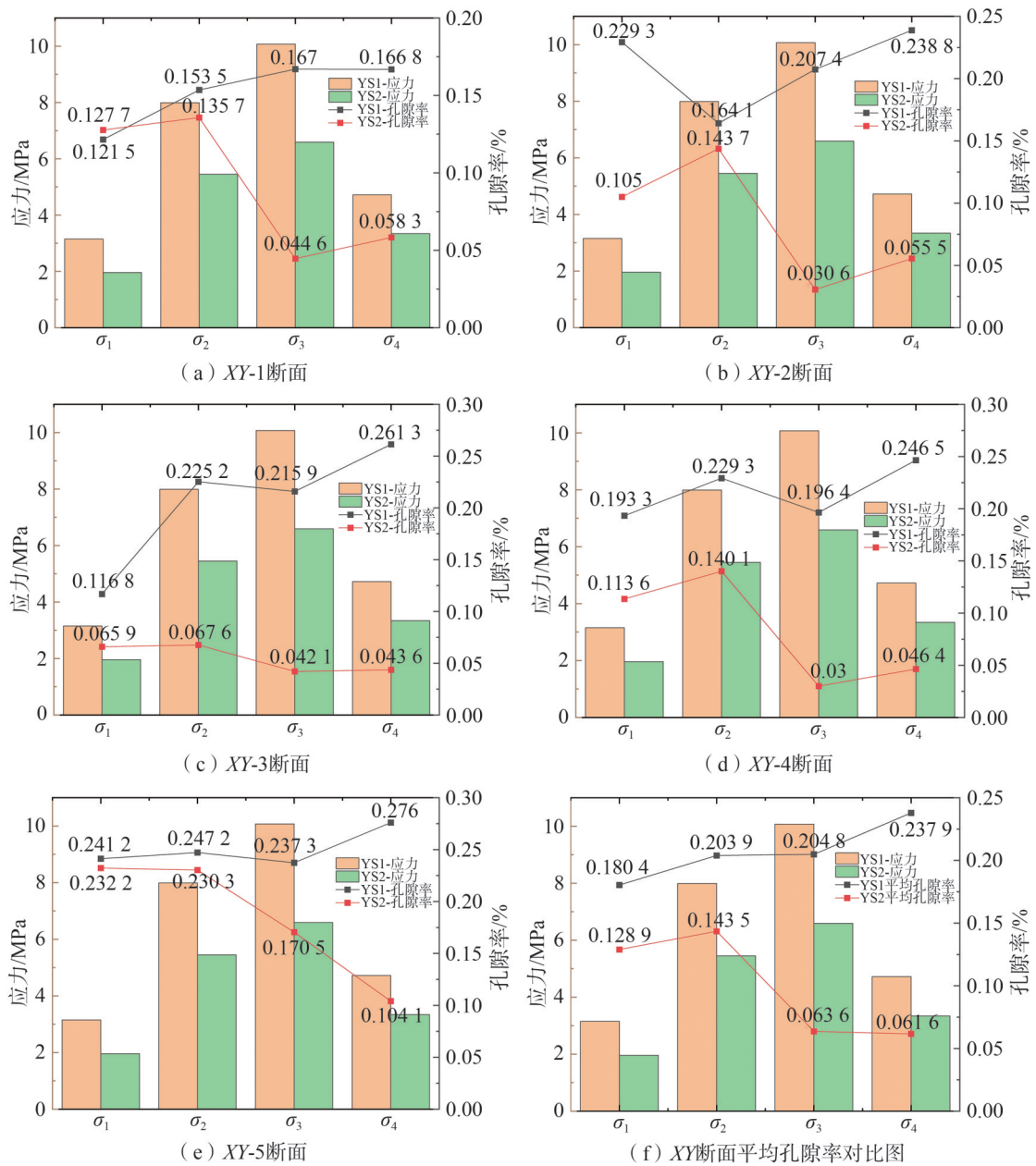


图5 XY各断面中YS1与YS2试件孔隙率对比

Figure 5 Comparison of the porosity of YS1 and YS2 specimens in each section of XY

YZ-1、YZ-5断面分析如图6(a)、图6(e)所示.在YZ-1断面中,两类试件在 σ_2 应力状态下,YS1试件孔隙率突然减小,材料在加载初期内部孔隙压实、微裂纹闭合.随应力持续提升,材料内部结构微裂纹扩展,孔隙率出现平稳上升趋势.YS2试件孔隙率在 σ_1 至 σ_3 应力状态下先增大再减小,初期材料内部微裂纹和孔隙扩展,孔

隙率增大;随应力增加,材料颗粒间结构趋于致密,微裂纹闭合,孔隙率减小. 在YZ-5断面中,YS1试件的孔隙率持续升高,材料随应力增加内部发生破坏,裂纹扩展.

YZ-2、YZ-4断面分析如图6(b)、图6(d)所示. 在YZ-2断面中,两类试件孔隙率均呈先减小后增大趋势. 加载初期,材料内部孔隙受外部压力被压实,水泥和油泥等成分可能发生少量的塑性变形,颗粒重新排列,从而填充和压紧孔隙,导致孔隙率降低. 加载后期,材料颗粒间黏结效力失效,部分裂隙转变成裂缝继续发展,材料内部结构破坏特征明显,颗粒间的滑移程度增大,排列组合为新的裂缝、孔洞,材料孔隙率升高. 在YZ-4断面中,YS1试件变化趋势与YZ-2断面相同;YS2试件孔隙率呈减小趋势,是因为材料密度高,初始孔隙小,随应力提升,孔隙被进一步压实,孔隙率降低.

YZ-3断面分析如图6(c)所示. YS1试件整体孔隙率呈逐渐增加趋势,随外部应力持续作用,YS1试件内部的应力集中在某些薄弱区域,并伴随微裂纹出现,微裂纹在应力作用下逐渐扩展、相互连接,形成新的裂隙. YS2试件整体孔隙率呈先增加后减小再增加的变化趋势,初始应力导致微裂纹扩展和孔隙率升高,材料内部微观结构在应力作用下重新排列,适量油泥的加入充当骨料作用,被其他颗粒附着后,部分孔隙闭合,材料密实度增大,孔隙率下降,随外部应力持续作用,累积损伤导致新孔隙形成和原有孔隙扩展,油泥和水泥的黏结作用减弱,孔隙率升高.

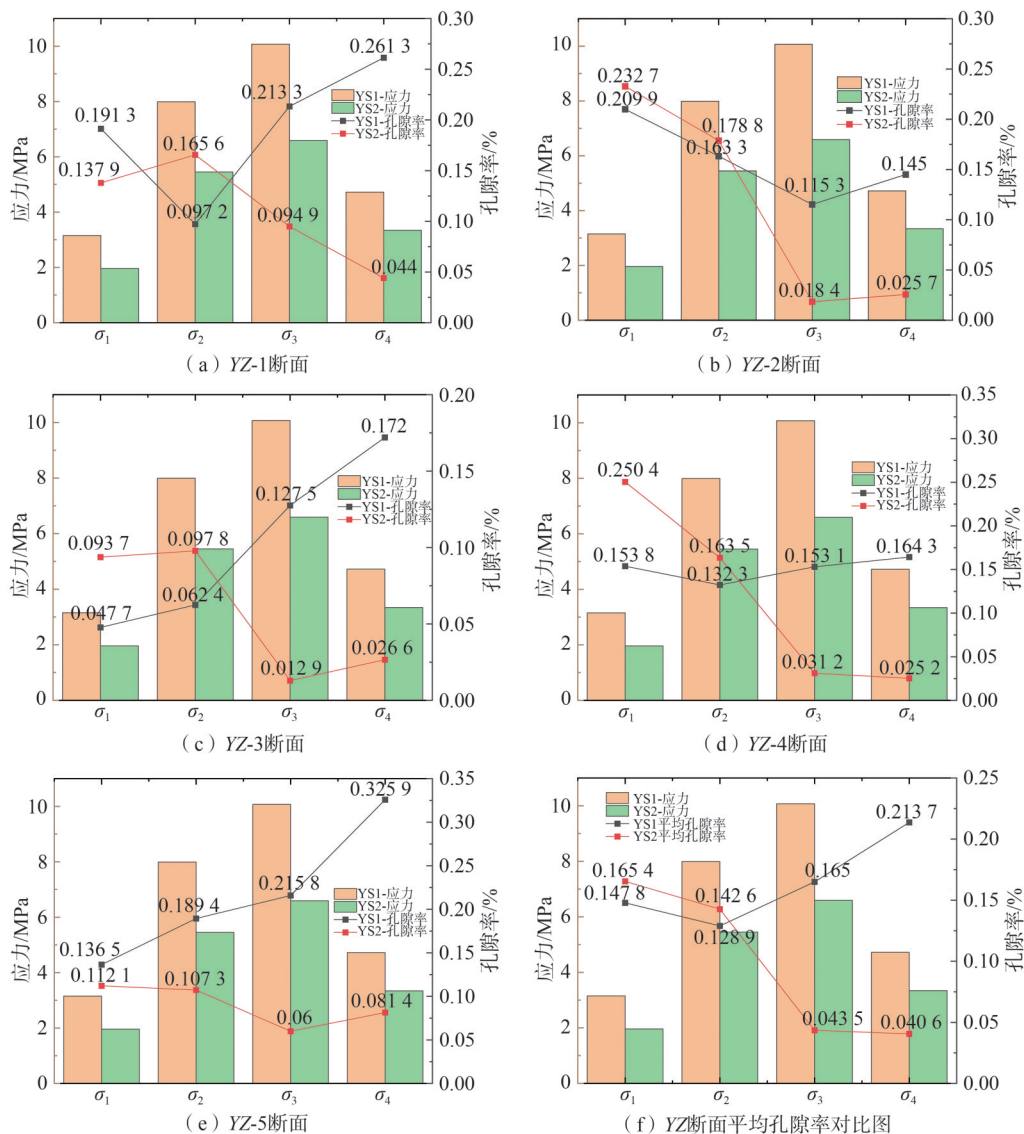


图6 YZ各断面中YS1与YS2试件孔隙率对比

Figure 6 Comparison of the porosity of YS1 and YS2 specimens in each section of YZ

3.2 生土材料损伤因子计算

材料破坏是持续演变且复杂的物理变化过程,损伤的积累导致材料出现孔隙、裂缝,当损伤积累至极限时,材料的承载能力亦至极限,材料完全破坏. 根据2.1节改性生土试件从受压起始至破坏的全过程,将其分为试件压缩阶段及弹塑性阶段,这两个阶段内,先是初始损伤减小,随后损伤萌生并稳定发展直至急剧增大.

为进一步研究改性生土试件在受荷情况下孔隙率的变化对材料细观破损的影响,引入损伤度指标^[8],即动态荷载作用下发生损伤试件的孔隙率相对于无荷载条件下改性生土试件孔隙率的变化,构建损伤评价公式:

$$D_{F-T} = \frac{P(n)}{P_0} - 1, \quad (1)$$

式中: D_{F-T} 为损伤度; P_0 为无荷载条件下的孔隙率; $P(n)$ 为不同荷载下的孔隙率, n 为荷载级数.

YS1试件XY扫描断面平均孔隙率和损伤度的变化如表4所示.

表4 YS1试件XY扫描断面平均孔隙率和损伤度的变化

Table 4 The change of mean porosity and damage degree of XY scanning cross-section of YS1 specimens

应力/MPa	孔隙率/%	变化率/%	损伤度
0	9.33	-	-
3.15	18.04	+93.35	0.934
7.99	20.39	+13.03	1.185
10.07	20.48	+0.44	1.195
4.72	23.79	+16.16	1.550

由表4可知,试件损伤度持续上升,部分试件损伤度大于1,可能是因为进行孔隙分析时,选取的阈值范围较大,孔隙率选取更精确,通过计算后损伤度整体值偏大,故定义损伤度超过1.195后试件损坏. 当应力 $\sigma=3.15$ MPa时,试件损伤度为0.934. 当应力增加到10.07 MPa时,试件损伤度为1.195,增加27.94%. 当应力 $\sigma=4.72$ MPa时,损伤度为1.550. 损伤度变化趋势与孔隙率一致.

YS2试件XY扫描断面平均孔隙率和损伤度的变化如表5所示.

表5 YS2试件XY扫描断面平均孔隙率和损伤度的变化

Table 5 The change of mean porosity and damage degree of XY scanning cross-section of YS2 specimens

应力/MPa	孔隙率/%	变化率/%	损伤度
0	4.64	-	-
1.96	12.89	+177.80	1.778
5.45	14.35	+11.33	2.093
6.59	6.36	-55.68	0.371
3.34	6.16	-3.14	0.328

由表5可知,试件损伤度呈先上升后下降趋势. 当应力 $\sigma=3.34$ MPa时,损伤度为0.328. 当应力 $\sigma=5.45$ MPa时,损伤度从1.778增加至2.093,增加了17.72%. 当掺入更多油泥时,试件的损伤度更小,YS2试件的质量状态较好,同灰度图表现一致,仅出现“八字形”主裂缝,破坏全过程规律,整体孔隙率比YS1试件更低,但力学性能表现弱于YS1试件,说明掺入过多油泥不利于材料的性能发展. 参看文献[20]并结合本文研究,认为油泥和水泥的最佳配合比应在1:2左右.

4 结论

1)不同应力状态下,两种试件表现出不同的破坏形式. 在XY扫描断面的CT图像中,YS1试件的裂缝由核心受压区向边缘延伸,“环箍效应”表现明显;YS2试件呈“八字形”破坏. 在YZ扫描断面的CT图像中,YS1试件呈“沙漏形”破坏;YS2试件则是在右侧出现明显的贯通裂缝,发生断裂破坏.

2)当油泥和水泥配合比为1:1.38时,YS2试件灰度图的完整性更好,试件整体孔隙率更低,表明较多油泥的掺入,生成较强黏结能力的凝胶填充孔隙,此类凝胶可塑性强,材料变形能力提高,虽然孔隙率减小,但材料

开裂荷载和峰值荷载降低,力学性能弱于YS1试件。当油泥和水泥配合比为1:2.5时,试件破坏显著,虽然整体孔隙率增大,但水泥掺量增加使材料生成大量的高结晶聚合物,此类高聚合物密度大,材料开裂荷载和峰值荷载同步升高,力学性能优越。

3)在XY扫描断面中,YS1试件随应力提升整体孔隙率持续增大,试件发生塑性变形,产生孔洞和裂缝。但YS2试件整体孔隙率先增大后减小,低应力下试件内部发生破坏,微裂纹和孔隙增多,孔隙率增大;随应力提升,部分孔隙被压实,裂缝闭合,孔隙率减小。在YZ扫描断面中,YS1试件整体孔隙率先减小后增大,但YS2试件整体孔隙率持续减小,两类试件在不同应力作用下,材料内部孔隙率变化趋势不同。

4)YS1试件损伤度表现出持续增大趋势,随应力变化,试件内部孔隙和裂缝不断扩展,试件完整性丧失,发生破坏。YS2试件损伤度先增大后减小,随应力提升,试件内部出现微裂纹或变形,损伤度逐渐增大;但加载至峰值荷载时,部分细微损伤区域趋于稳定,损伤度降低,最大损伤度出现在开裂荷载处。虽然YS2试件的整体损伤度小,但抵御材料损伤的能力差,力学性能表现弱于YS1试件,过多油泥的掺入影响材料性能,建议最优油泥、水泥的质量配合比在1:2左右。

参考文献:

- [1] 崔陇鹏. 生土建筑的发展与未来[J]. 建筑与文化,2017(12):11.
Cui L P. The development and future of earth construction[J]. Architecture & Culture, 2017(12):11. (in Chinese)
- [2] 陈冬尔,李维,杨洋,等. 生土绿色建筑材料研究现状简述[J]. 四川建筑,2023,43(1):208-210.
Chen D E, Li W, Yang Y, et al. A brief description of the research status of green building materials in raw soil[J]. Sichuan Architecture, 2023, 43(1):208-210. (in Chinese)
- [3] 王雪浪,肖怡. 国内生土建筑研究与展望[J]. 城市建筑,2022,19(24):96-99.
Wang X L, Xiao Y. Research and prospect of domestic raw soil architecture[J]. Urbanism and Architecture, 2022, 19(24):96-99. (in Chinese)
- [4] 张福鹏,石磊,柳思勉,等. 国内生土建筑材料改性进展研究[J]. 铁道科学与工程学报,2022,19(10):2919-2929.
Zhang F P, Shi L, Liu S M, et al. Research on the progress of modification of raw soil building material in China[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(10):2919-2929. (in Chinese)
- [5] Larissa D. Strengthening earthen building materials with cellulose fibres[J]. CE/Papers, 2025, 8(1):34-44.
- [6] Piñas J M, Lira L, Horn M, et al. Influence of *Stipa ichu* on the thermal and mechanical properties of adobe as a biocomposite material[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1433:012003.
- [7] 吴家强,马宏瑞,许光文,等. 循环流化床热解油田采油污泥的实验研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2011,26(6):88-92.
Wu J Q, Ma H R, Xu G W, et al. Experimental study on the pyrolysis of oily sludge in circulating fluidized bed[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2011, 26(6):88-92. (in Chinese)
- [8] 田威,韩女,张鹏坤. 基于CT技术的混凝土孔隙结构冻融损伤试验[J]. 中南大学学报(自然科学版),2017,48(11):3069-3075.
Tian W, Han N, Zhang P K. Experiments on the freeze-thaw damage of concrete porous structure based on CT technique[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2017, 48(11):3069-3075. (in Chinese)
- [9] González D C, Rahman M, Mínguez J, et al. Influence of fibers and curing conditions on the pore morphology in plain and fiber-reinforced high-performance concrete through the use of computed tomography scan technology[J]. Applied Sciences, 2020, 10(12):4286.
- [10] 董学勤. 改性土物理力学特性及其在生土建筑中的应用[D]. 西安:西安理工大学,2021.
Dong X Q. Physical and mechanical properties of modified soil and its application in raw soil construction[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [11] 吕晓明. 不同改性材料对路基填料性能影响分析[J]. 黑龙江交通科技,2024(12):40-46.
Lyu X M. Influence analysis of different modified materials on the subgrade filling performance[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2024(12):40-46. (in Chinese)
- [12] 宋连喜,王忠伟,李鹏飞,等. 黄土水泥复合材料的孔隙结构演化与强度特征研究[J]. 粉煤灰综合利用,2024,38(4):

47-52.

Song L X, Wang Z W, Li P F, et al. Pore structure evolution and strength characteristics of loess cement composites with different content[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2024, 38(4): 47-52. (in Chinese)

- [13] Liu F, Tang R, Ma W W, et al. Analysis on frost resistance and pore structure of phase change concrete modified by Nano-SiO₂ under freeze-thaw cycles[J]. Measurement, 2024, 230: 114524.
- [14] Randeep, Srivastava S, Soamidas V. Performance evaluation and microstructural characterisation of stabilised rammed earth blocks using limestone dust powder and LC³ [EB/OL]. (2025-08-07) [2025-12-30]. https://link.springer.com/article/10.1007/s40996-025-01991-3?utm_source=cnki&utm_medium=affiliate&utm_content=meta&utm_campaign=DDCN_1_GL01_metadata.
- [15] Bakkali Z, Bahlaoui A, Bouferra R, et al. Optimizing energy efficiency in buildings: Effect of mussel shells, lime, and cement in improving earth block performances[J]. Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration, 2025, 10: 3253-3265.
- [16] 张坤, 芦白茹, 兰官奇, 等. 一种利用油泥及水泥矿的改性生土材料的配方: CN202310147721.4[P]. 2023-07-04.
Zhang K, Lu B R, Lan G Q, et al. Formulation of modified raw soil material using oil sludge and cement mine: CN202310147721.4[P]. 2023-07-04. (in Chinese)
- [17] 王聪. 基于CT技术的沥青混合料力学行为及三维重构研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
Wang C. Study on mechanical behavior and three-dimensional reconstruction of asphalt mixture using X-ray computed tomography[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2012. (in Chinese)
- [18] 魏佳妮. 铁尾矿砂、水泥改性生土材料抗压性能及CT细观损伤试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.
Wei J N. Experimental study on compressive properties and CT meso-damage of raw soil material modified by iron tailing and cement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2022. (in Chinese)
- [19] 张坤, 卫杨杨, 邵鑫辉, 等. CT技术下掺煤矸石和电石渣的生土材料损伤演化及孔隙研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(28): 12182-12192.
Zhang K, Wei Y Y, Shao X H, et al. Damage evolution and pore space of raw soil materials mixed with coal gangue and calcium carbide slag under CT technique[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(28): 12182-12192. (in Chinese)
- [20] 张坤, 付智勇, 张凌寒, 等. 三种固废改性生土材料配方设计及力学性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(2): 603-616+636.
Zhang K, Fu Z Y, Zhang L H, et al. Formula design and mechanical properties of three kinds of modified raw soil materials mixed with solid waste[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2024, 43(2): 603-616+636. (in Chinese)

责任编辑: 张自强