

国产核磁与 CT 仪器能力提升及典型应用

马晓凡¹, 陈红², 王颖³, 梅红¹, 邹丽芳¹, 宋泽卓¹

(1.河海大学地球科学与工程学院, 江苏南京 211100; 2.河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098; 3.淮阴工学院建筑工程学院, 江苏淮安 223003)

摘要: 大型仪器设备的机制化专业管理与高效率开放运行, 可有效支撑科学研究、人才培养与社会服务相关需求。采用国产核磁共振与 CT 扫描设备, 以砂黏混合土微观结构、高分子固化剂改性土固化膜结构、黏土干湿循环劣化规律的研究为例, 结合土体在自然环境中经历降雨日晒、温度变化等过程, 为解释土体宏微观参数之间的定量关系提供了有效方法, 为揭示自然环境变化过程对各类土体的劣化机理提供了参考依据。设备相关成果效益为国产大型仪器设备综合利用提供了良好典范。

关键词: 核磁共振; CT; 大型仪器设备; 土体; 微观结构

中图分类号: (请在 <http://www.ztflh.com> 查询) **文献标识码:**

1 引言

河海大学始终高度重视大型仪器设备运行管理与开放共享工作, 不断深入推进落实, 持续提高教学科研水平、促进学科交叉融合、加强创新人才培养。自 2013 年起, 实验与分析测试中心即按照仪器设备所服务的学科方向划分出若干实体开放共享实验平台, 以推进实验室面向校内外开放, 提升大型仪器设备开放共享服务水平。2017 年, 颁布了《河海大学大型仪器设备开放共享管理办法(试行)(河海校政[2017]74 号)》, 依据文件要求对各学院大型仪器设备进行了集约化整合管理, 统筹建设了多个院级大型仪器设备开放共享平台, 明确了大型仪器设备分管领导、平台负责人和专职运维人员职责。

2019 年, 历经多轮规划论证、服务功能调整和基础设施改造, “地学分析测试中心”院级开放共享实体平台正式成立。平台以学科发展和学校需求为导向, 实行“院级专管、校级统管”的开放共享管理机制: 配置专用场地, 下设 1 个样品室和 14 个参数分析室, 整合了水文、土工、岩石、物探、地球化学等参数的分析测试能力; 设置大型仪器运维专职人员 2 人, 负责平台建设规划、大仪设备计划、开放运行使用、规章制度制定、共享绩效评价等工

基金项目: 高等教育科学研究规划课题 (22SY0212)

作者简介: 马晓凡 (1989—), 男, 实验师, 硕士, 主要从事地质工程试验技术研究。E-mail: maxiaofan_11@foxmail.com

通信作者: 陈红 (1981—), 男, 正高级实验师, 博士, 主要从事现代流体测试与河流模拟研究。E-mail: chh_hhu@hhu.edu.cn

作的持续推进；统一信息化管理运行，通过河海大学大型仪器设备开放共享网络管理平台，实现预约送样、分析测试、使用记录、报告出具、经费划转的全流程管理。

本案例所涉大口径磁共振分析与可视化系统与多尺度高分辨 X 射线三维数字岩心成像分析系统 2 台大型仪器设备，在学校实体平台建设与管理保障条件下，以科学的规划建设、专业的人员管理、良好的运行维护和高效的开放共享，在科学研究、人才培养、社会服务和区域建设中发挥了重要作用，为国产大型仪器设备综合利用提供了良好典范。

土体具有复杂的颗粒组成与多孔的微观形态，对其宏观力学性质有着很大的影响，从而决定了土体的宏观工程特性^[1]。传统的土工试验以均质材料假设为基础，对土体的宏观应力和应变进行测试^[2]，缺少对微观结构的研究。面对岩土工程领域越来越复杂的土体材料，如各类砂土、黏土及其不均匀混合土，以及掺入高分子固化剂等材料的改性土，微观结构改变产生的微观力学性质积累，最终导致土体宏观性能的复杂变化。众多学者尝试从本质上探究其微观结构和微观机理对土体当前和后续宏观力学性质的影响，研究手段主要包括核磁共振技术（NMR）、压汞试验（MIP）、计算机断层扫描技术（CT）以及扫描电镜（SEM）等^[3-5]。

在以上测试方法中，CT 扫描技术能够对岩土体整体结构进行测试，实现良好的三维重建效果^[6-9]，核磁共振技术能够直观地观察到土体微观孔隙结构的特征^[10-13]。两种方法均具有具有整体测量、快速分析、对土体结构无损等优点，正越来越多地被应用到土体微观结构的测试当中，在研究土体在经历冻融和干湿循环等自然环境变化前后的微观结构改变与损伤破坏方面具有显著优势，可为揭示土体破坏机制和失效模式的研究提供直观、多指标、量化的微观结构参数^[14-18]。结合宏观特性的测试结果，得出微观参数与强度特性之间的关系，可为复杂环境变化下工程设施的建设维护提供一定参考依据^[19-21]。

本案例采用大口径磁共振分析与可视化系统与多尺度高分辨 X 射线三维数字岩心成像分析系统，以砂黏混合土微观结构特性定量分析、高分子聚合物加固砂土固化膜结构演变、黏土干湿循环劣化机理三个具体研究为例，介绍国产核磁共振与 CT 扫描设备在土体结构研究中的应用开展情况，以及在科研服务、人才培养和共享辐射方面产生的成果效益。

2 试验设备

2.1 大口径磁共振分析与可视化系统

核磁共振（NMR, Nuclear Magnetic Resonance）是一种物理现象，是磁矩不为零的原子核，在外磁场作用下自旋能级发生塞曼分裂，在某一定频率共振吸收射频辐射的物理过程。即：对置于恒定主磁场 B_0 中的具有磁矩 $\vec{\mu}$ 的原子核（如氢质子），施加一个与恒定主磁场垂

直的交变磁场 B_1 ，使部分处于低能级的原子核吸收能量跃迁至高能级，并使全部原子核产生同向进动的过程。

试验所用设备为地学分析测试中心的 MacroMR12-150H-I 型大口径磁共振分析与可视化系统，由苏州纽迈分析仪器股份有限公司生产。如图 1 所示，全套设备由大口径 C 型永磁体、射频线圈、射频激发系统、数据采集系统、梯度磁场控制系统、高温高压驱替系统、智能低温控制系统以及真空加压饱和装置共同组成。可用于测定 T_2 谱等参数，获取样品孔隙分布特征、流体分布特征、流体迁移特征、多相流参数特征、冻土未冻水参数特征等，并可对样品进行单剖面成像与多剖面拟合三维成像，适用于地质、能源、工程等领域，可实现岩心、土壤、沥青、水泥、混凝土及其混合物等样品的无损快速分析。

主要技术参数包括：①磁场强度 $0.3\pm0.05T$ 。②磁体均匀度优于 50ppm，最大有限检测区域 $\phi150mm\times L100mm$ 。③检测精度可实现最小 5 μm 孔隙的识别分析。④磁体温度 $32.00\pm0.01^{\circ}C$ ，磁场稳定性优于 300Hz/Hour。⑤频率脉冲频率范围 1~30MHz，频率控制精度 0.1Hz，脉冲精度 100ns，射频发射峰值输出功率 300W，最大采样带宽 2000kHz。⑥X、Y、Z 方向梯度功放峰值强度 4.5Gauss/cm。⑦采样速率 50MHz，相位控制精度优于 0.1 度，时序分辨率 20ns，频率分辨率 0.0000007Hz。⑧高温高压驱替可实现 0-80 $^{\circ}C$ 变温、0-40MPa 围压、低于 40MPa 跟踪压力，流量 0.01-15ml/min，流量精度 $\pm0.1\%$ 。⑨在线低温冻融可实现-25-25 $^{\circ}C$ 变温，控温精度 $\pm0.1^{\circ}C$ 。



图 1 MacroMR12-150H-I 型大口径磁共振分析与可视化系统

2.2 多尺度高分辨 X 射线三维数字岩心成像分析系统

X 射线断层扫描成像 (X-ray computed tomography, X-CT) 技术是一种无损检测技术, 具有扰动低、精度高、多方位、非破坏性等技术优势, 已经被广泛应用于水泥基材、混凝土、岩土体等多孔材料的细观或微观物质结构特征检测、损伤演化及破坏机理研究。

试验所用设备为河海大学地学分析测试中心的 NanoVoxel 4561 型多尺度高分辨 X 射线三维数字岩心成像分析系统, 由天津三英精密仪器股份有限公司生产。如图 2 所示, 全套设备由防辐射屏蔽箱体、样品仓、开放式微聚焦 X 射线源、大视野平板探测器、高精度样品转台、岩心成像采集系统、数据三维重建及数字化岩心可视分析系统、射线源高压控制与真空维持设备以及配电系统共同组成。能够以微米级分辨率对较大尺寸的岩石及土壤样品内部结构进行三维无损扫描成像, 构建样品内部微结构的三维模型并进行定性和定量分析, 通过二维及三维视角表征样品的孔隙、裂隙、骨架、基质、流体场、位移场等信息。

主要技术参数包括: ①系统总体技术指标。最高空间分辨率 $3\ \mu\text{m}$, 可测最大样品尺寸 $200\ \text{mm}$; 具备超分辨成像能力, 可实现亚像素成像功能。②开放式微聚焦 X 射线源。光源最高电压 $300\ \text{kV}$, 光源最低电压 $50\ \text{kV}$; 最大发射功率 $350\ \text{W}$; 可自由调节电流; 配备多组 X 射线滤波片; z 轴行程 $0\text{--}600\ \text{mm}$ 。③大视野平板探测器。具抖动防伪影机械功能; 像素矩阵 2560×2048 像素; 成像面积 $253.6\ \text{mm}\times 317.4\ \text{mm}$; 动态范围 $16\ \text{bit}$; 具备本底校正、增益校正功能; z 轴行程 $0\text{--}600\ \text{mm}$ 。④高精度样品转台。最大承载 $100\ \text{kg}$; 旋转范围 $0\text{--}360^\circ$ 的任意整数倍旋转; x 轴行程 $0\text{--}1000\ \text{mm}$, y 轴行程 $0\text{--}250\ \text{mm}$ 。⑤数据三维重建及数字化岩心可视分析系统。可对扫描软件获得的数据进行图像三维重构, 获得三维体数据; 具有三维数据导入与导出、三维可视化及分割、定量分析及测量、二维与三维图像滤波、去噪、平滑等功能; 可实现三维数据体渲染、数据孔隙网络模型建模, 孔隙、喉道、裂隙等详细数据分析统计等功能。

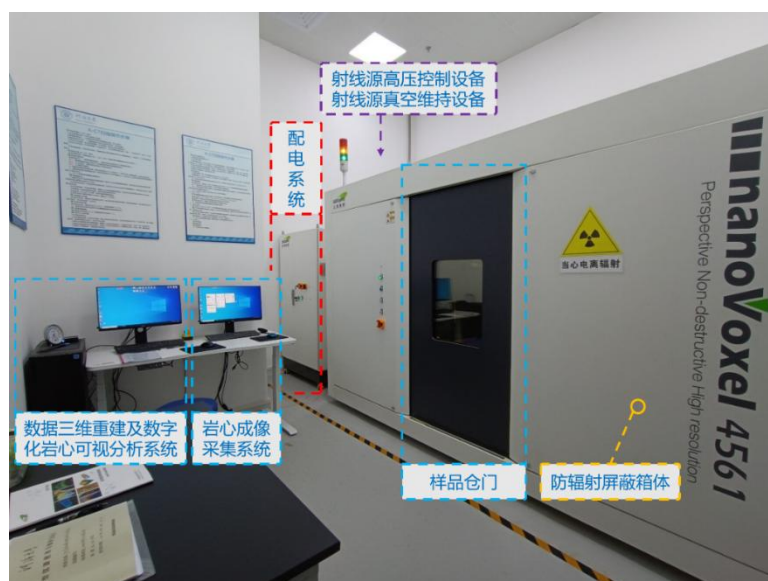


图2 NanoVoxel 4561 型多尺度高分辨 X 射线三维数字岩心成像分析系统

3 设备提供的技术支撑

3.1 砂黏混合土微观结构特性定量研究

在实际工程中遇到的土体并非都是性质相似的某一种土层,尤其是在吹填造陆等工程中,常会遇到砂土和黏土分布极不均匀的混合土。两种性质差异较大的土体以不同比例混合后将会表现出复杂的宏微观特性。土体的外在宏观力学特征受其内部微观结构的显著影响,因此对不同砂黏比例混合土的微观结构特性与宏观力学特性进行定量研究能够揭示其宏微观参数之间的关系,对实际工程应用具有重要意义。

(1) 砂黏混合土孔隙率与孔径分布分析

对于未加入砂土的红黏土试样其孔隙率最大,随着砂土含量的增加,混合土的孔隙率逐渐减小(图2)。其中砂土含量从0%增加到15%,总孔隙率减小了12.05%,砂土含量从15%增加到45%过程中总孔隙率变化较小,分别减小了0.7%和3.3%,而当砂土含量从45%增加到60%,混合土的总孔隙率减小了8.20%。这是由于红黏土是由更加细小且紧密粘结的细小颗粒组成,红黏土的比重相对较大,因而在相同干密度条件下,黏土颗粒所占据的体积较小,孔隙体积相对较大,最终导致其孔隙率相对较大。随着砂土含量的增加(达到40-50%),砂土颗粒所占据的体积增加,砂土颗粒在混合土中形成了骨架结构,且砂土颗粒间的孔隙能够被黏土颗粒填充,从而混合土的孔隙率逐渐减小。

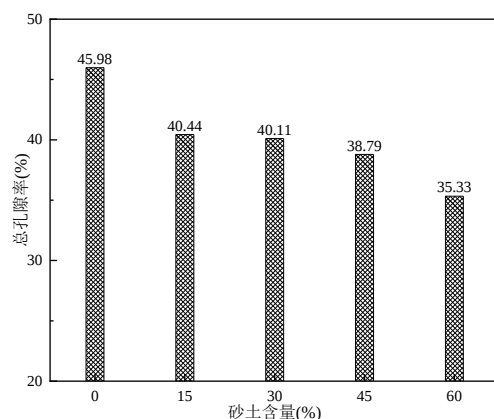


图3 不同砂土含量混合土孔隙率变化

不同砂土含量混合土的 T_2 谱（图 4）大致可分为三个峰值，其中最左边的峰值最高，而右边两峰值相对较低。表明砂黏土中相对较小的孔隙所占的比例最多，而大中孔隙相对较少。随着砂土含量的增加，最左边的峰值信号逐渐减小，相对应地，右边两个峰值信号则是逐渐增加。随着砂土含量的增加，砂黏混合土中大孔隙逐渐增多而微孔隙则逐渐减小。其中，最左侧峰值主要分布在 0.1-3ms 之间，顶点对应的弛豫时间在 0.69-1 ms 之间。右侧两个峰值则分别分布在 10-100ms 以及 100-1000 ms 之间。砂黏混合土中微孔孔径主要分布在 0.002-0.07 μm 之间，中孔主要分布在 0.15-1.5 μm 之间，而大孔则是大于 1.5 μm 。

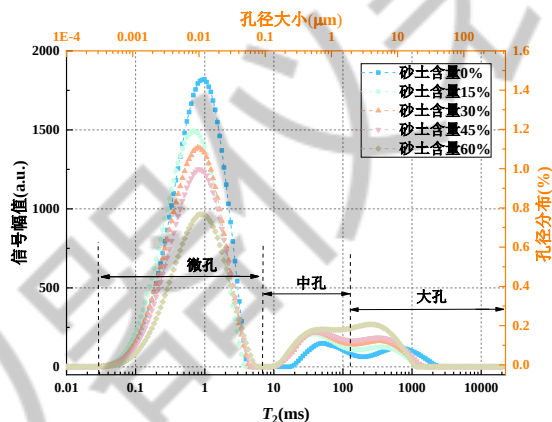


图4 不同砂黏比例混合土孔隙率与孔径分布

通过计算 T_2 谱中各个峰的面积可以得到对应孔隙类型所占的比例。砂黏混合土中不同孔隙类型随砂土含量的变化如图 5 所示。从图 5 中可以看出，其中微孔所占比例分布在 70-90% 之间，且随着砂土含量的增加，微孔比例逐渐减小，平均砂土含量每增加 1%，微孔比例减小 0.32%。而随着砂土含量的增加，中孔和大孔所占的比例逐渐增加，平均砂土含量增加 1%，中孔和大孔比例分别增加 0.11% 和 0.21%。

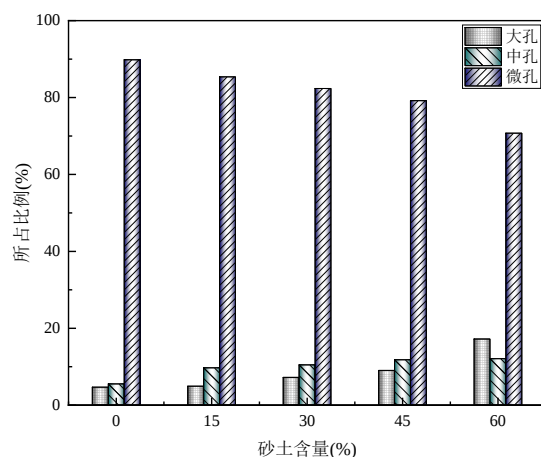


图 5 砂黏混合土不同孔隙类型所占比例

(2) 砂黏混合土宏微观参数之间的定量关系

对不同砂黏比例的混合土进行三轴剪切试验，得到混合土的粘聚力和内摩擦角，并建立了抗剪强度参数与砂黏混合土孔隙率之间的定量关系，如图 6 所示。从图 6 中能够看出，混合土的粘聚力和内摩擦角均与孔隙率之间保持良好的线性关系，其中，混合土的内摩擦角与孔隙率保持的是正线性相关的关系，平均孔隙率每增加 1%，内摩擦角增加 5.2°；而粘聚力则是与孔隙率保持线性减小的关系，孔隙率增加 1%粘聚力平均减小 0.8 kPa。

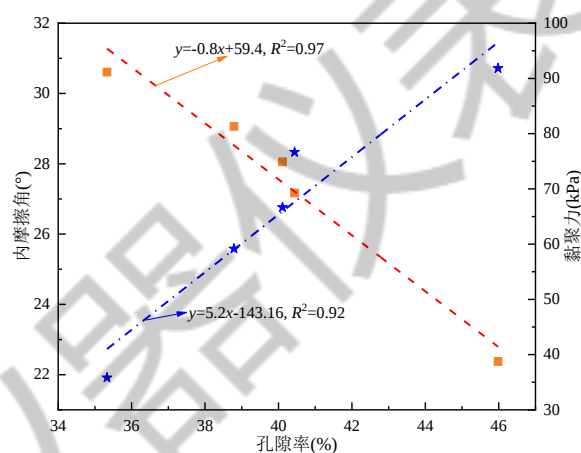


图 6 不同砂土含量混合黏聚力和内摩擦角与孔隙率之间的关系

3.2 高分子聚合物加固砂土固化膜结构演变研究

高分子聚合物作为土体改良的一种新材料，具有生态环保、价格低廉、加固效果好等优点，在实际工程应用中取得良好的应用效果。然而，对高分子聚合物加固后土体的内部微观结构以及在硬化过程中固化膜的结构变化却缺乏定量化的研究。核磁共振测试技术具有的对结构无损、快速、定量化的测量效果，能够填补高分子聚合物加固土体在微观结构研究上的空白，并能够实现在时间尺度上对固化膜结构的演变进行动态测量。

为研究不同高分子聚合物含量加固后砂土的微观特性以及其在硬化过程中固化膜的结

构演变,采用核磁共振仪器对养护不同天数后的固化砂土进行测试,得到了试样的 T_2 谱图。对核磁共振在聚合物硬化过程中动态监测的有效性进行验证,并通过反演分析获得聚合物填充的孔隙率、孔径大小以及孔喉分布。根据 T_2 谱数据对聚合物填充的孔隙进行定量化分析,将其孔隙类型进行分类,并计算出试样内部的分形维数。所得测试结果很好对聚合物加固砂土的微观结构进行了定量分析,为进一步解释高分子聚合物的加固机理提供了有效方法,并结合宏观力学参数,能够建立加固砂土宏微观参数之间的定量关系。

1) 核磁共振在聚合物硬化过程中动态监测的有效性验证

在试样养护过程中,试样的重量被连续记录,不同聚合物加固的干砂质量始终保持一致,因此,根据试样的质量,还可以获得不同养护时间后聚合物重量。图 7 (a) 显示了在养护过程中核磁共振总信号强度与聚合物之间的关系。从图中可以观察到,核磁共振总信号量与聚合物质量之间保持高度的线性关系,这表明 NMR 弛豫测量结果可以有效描述聚合物填充的孔隙情况。此外,在相同的养护时间下,聚合物含量较高的加固砂土的总信号强度大于聚合物含量较少的加固砂土的总信号强度。

以上关系也可以显示在不同聚合物加固砂土的聚合物填充的孔隙率与养护时间之间的关系。本研究中聚合物填充的孔隙率可以称为试样中聚合物所占体积的比例。如图 3 (b) 所示,聚合物填充的孔隙率随着固化时间的增加呈指数下降。

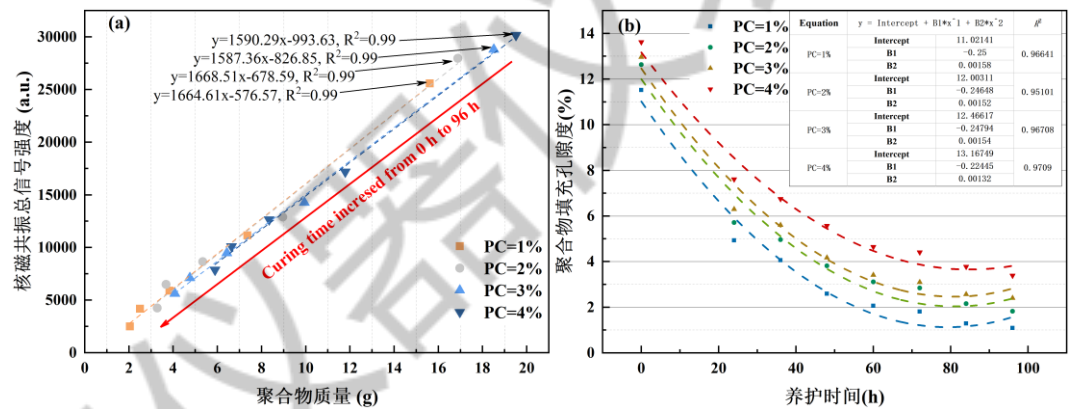


图7 (a) 核磁共振总信号强度与砂土试样中聚合物质量之间的线性关系;
(b) 不同聚合物含量加固砂土中聚合物填充的孔隙率与养护时间之间的关系

2) 加固砂土的孔径分布

为了定量动态监测聚合物在硬化过程中聚合物填充的孔隙变化,将聚合物加固后砂土的 T_2 信号谱图转换为聚合物填充的孔径大小分布曲线。图 8 展示了不同养护时间后试样的 T_2 信号谱图和聚合物填充的孔径分布曲线。结果显示,在硬化过程中,曲线总体上都逐渐向左移动,这意味着聚合物填充的孔的总体尺寸逐渐减小。并根据 T_2 信号谱图中的不同峰值,

将聚合物所填充的孔隙分为了三种类型，微孔、中孔以及小孔。

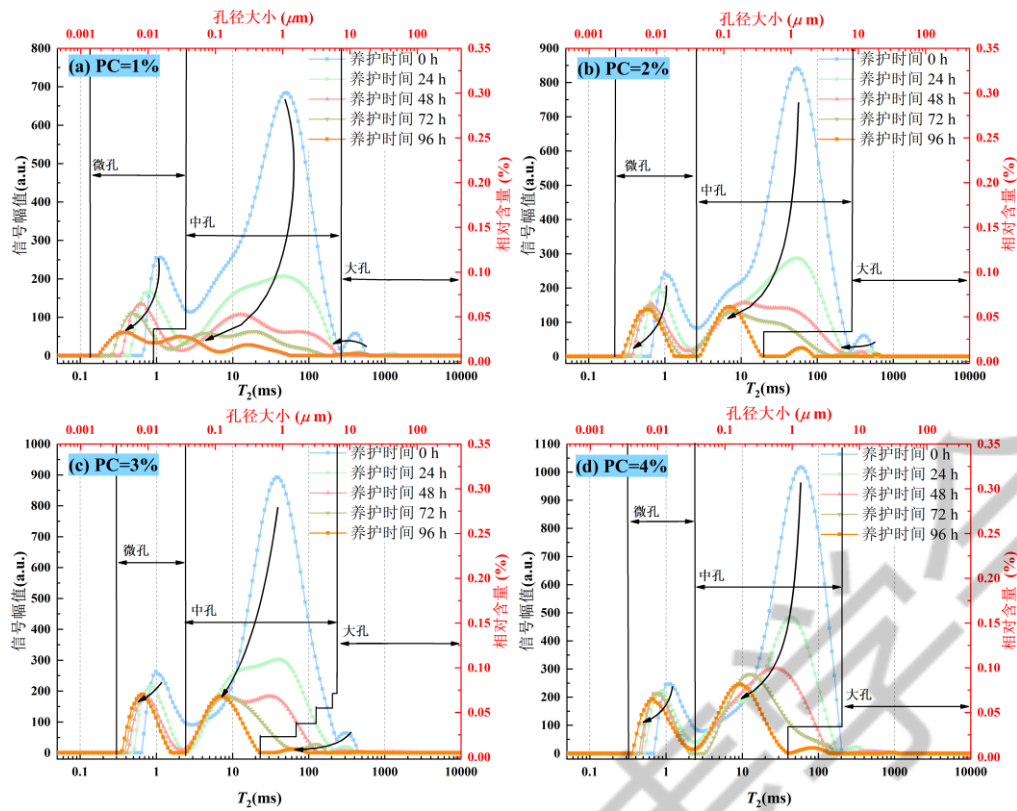


图 8 不同养护时间下不同聚合物含量的加固砂土 T_2 谱和聚合物填充的孔径分布

3) 基于 T_2 谱的聚合物填充孔隙的分形维数分析

在分形理论中，可以利用分形维数对岩土体孔隙结构复杂性和不规则程度进行评价。根据所得的 T_2 数据，能够对聚合物所填充的孔隙进行分形特征分析。从测试结果中可以看出，聚合物填充的孔隙具有良好的分形特征，相对较大的分形维数在整体上与养护时间保持良好的正相关关系（图 9）。根据所得的分形维数数据，能够建立加固砂土的强度计算模型、渗透系数计算模型。

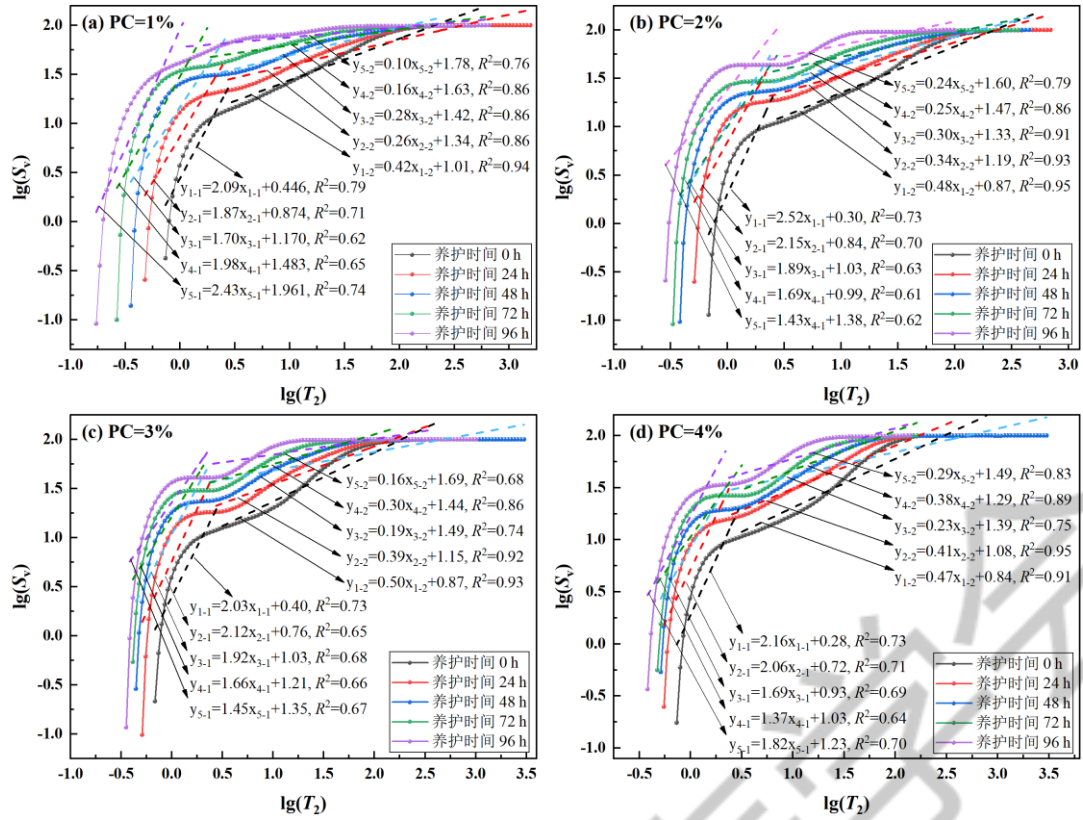


图9 不同聚合物加固砂土养护不同时间后的分形特征曲线

4) 宏微观参数定量关系确定

为了直观地说明聚合物加固砂土的力学性能和微观参数之间的关系，图 10 显示了加固砂土的抗压强度随聚合物填充孔隙体积的变化。随着聚合物占据孔隙率的增加，抗压强度呈指数下降。根据宏微观试验结果，分别建立了两个指数函数，以定量描述聚合物含量为 1% 和 3% 的试样的抗压强度和聚合物占据孔隙度之间的关系，结合聚合物占据的孔隙度降低与养护时间之间的二次函数关系，无侧限抗压强度与养护时间之间的关系可以表示为：

$$\sigma_c \quad (p_c=1\%)=602\exp((7.5c_t-0.0474c_t^2-330.6)10^{(-2)})+22.8, \quad R^2=0.96$$

(1)

$$\sigma_c \quad (p_c=3\%)=943\exp((7c_t-0.04371c_t^2-354)10^{(-2)})+133.3, \quad R^2=0.96$$

(2)

其中 σ_c 为无侧限抗压强度， c_t 为养护时间。从上述公式可以看出，聚合物加固砂土的无侧限抗压强度与养护时间保持良好的线性关系。

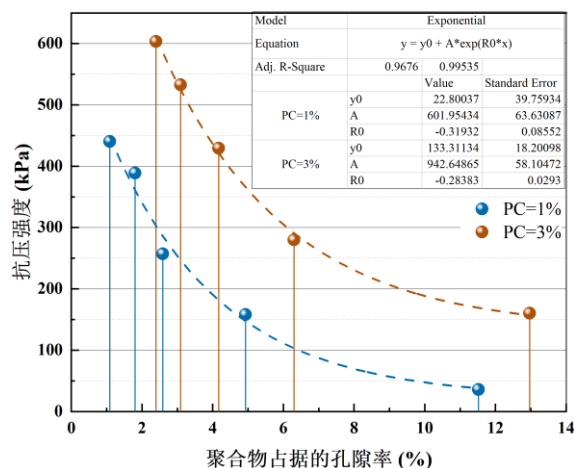


图 10 聚合物占据的孔隙率与抗压强度之间的关系

3.3 黏土干湿循环劣化机理研究

干湿循环作用将会对岩土体的工程特性和微观结构产生重要的影响。为研究干湿循环对黏土的力学特性和微观结构的影响，通过一系列无侧限抗压强度试验和 CT 扫描测试，从宏观和微观两个尺度，对经历不同干湿循环次数后黏土的力学特性和微观结构参数进行研究，旨在揭示干湿循环后黏土的宏观表现与内在结构之间的关联，以期能为复杂环境变化下工程设施的建设维护提供依据。

1) CT 扫描测试三维重构图像分析

对不同干湿循环次数黏土的 CT 扫描纵剖面图进行比较，并对横剖面图进行二值化处理，提取试样内部的裂隙分布情况，得到如图 11 和图 12 所示的裂隙发育过程图。由图 11 可知，当试样经历 1 次干湿循环后，内部裂隙从试样的四周开始发育，而此时发育的裂隙较为分散，且宽度较小。当干湿循环次数增加到 4 次时，裂隙进一步发育，并逐渐向试样内部扩展，部分离散的裂隙逐渐相互连接。随着干湿循环次数的进一步增加，试样内部裂隙逐渐扩展，长度和宽度均有进一步的增加，裂隙的连续性也有所提高，且主要分布在试样四周。当干湿循环次数达到 4 次后，试样中裂隙的总体分布形态基本达到稳定，随着干湿循环劣化作用的持续，仅长度和宽度得到进一步扩展。除此之外，随着干湿循环次数的增加，试样内部的微裂隙也持续发育，当循环次数从 8 次增加到 12 次的过程中，干湿循环的劣化作用开始减轻。如图 12 所示，随着干湿循环次数的增加，裂隙首先在不同层的交界处开始发育，试样经历 1 次干湿循环后，从底部开始出现裂隙。当循环次数达到 4 次时，试样的中间层开始发育竖向裂隙，且随着干湿循环次数的增加，试样内部裂隙的长度和宽度均有所增加。

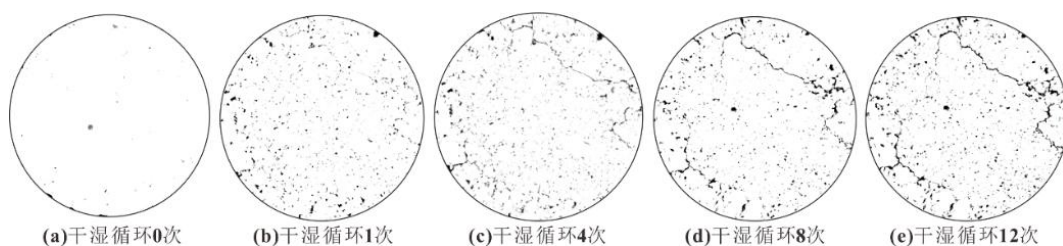


图 11 不同干湿循环次数下黏土裂隙分布平面图

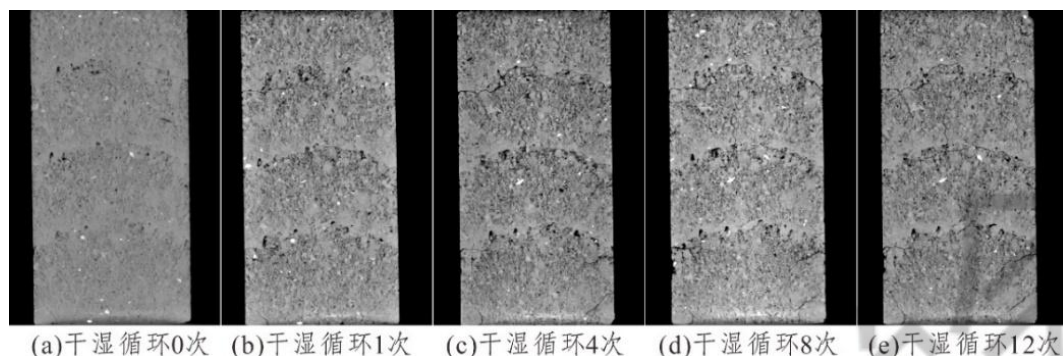


图 12 不同次数干湿循环作用下黏土的纵剖面 CT 扫描图像

2) CT 扫描测试图像数据分析

采用 Avizo 软件对 CT 扫描数据进行处理, 使用交互式 Top-hat 分割方法对每一层扫描图像进行处理, 计算得出每一层的面孔隙率(图 13)。由于试样制备采用的是分层击实方法, 因此在对试样的面孔隙率进行统计时发现, 在每一层的交界面, 面孔隙率显著大于层间的孔隙率。随着干湿循环次数的增加, 试样的面孔隙率均出现了明显的增加, 交界面孔隙率的增加更加显著, 这也表明, 在干湿循环劣化作用下, 层间的裂隙最先发育。通过对分割后的图像进行三维建模, 能够得到不同干湿循环次数下试样的三维孔隙结构, 如图 16 所示。在孔隙结构的三维建模图像中能够观察到, 当试样经历 1 次干湿循环作用后, 试样中孔隙明显增多, 不同层交界处出现了连续的裂隙, 且层间也发育了竖向裂隙, 随着干湿循环次数的增加, 孔隙数量进一步增加, 层间裂隙和试样表面的竖向裂隙也逐渐扩展。

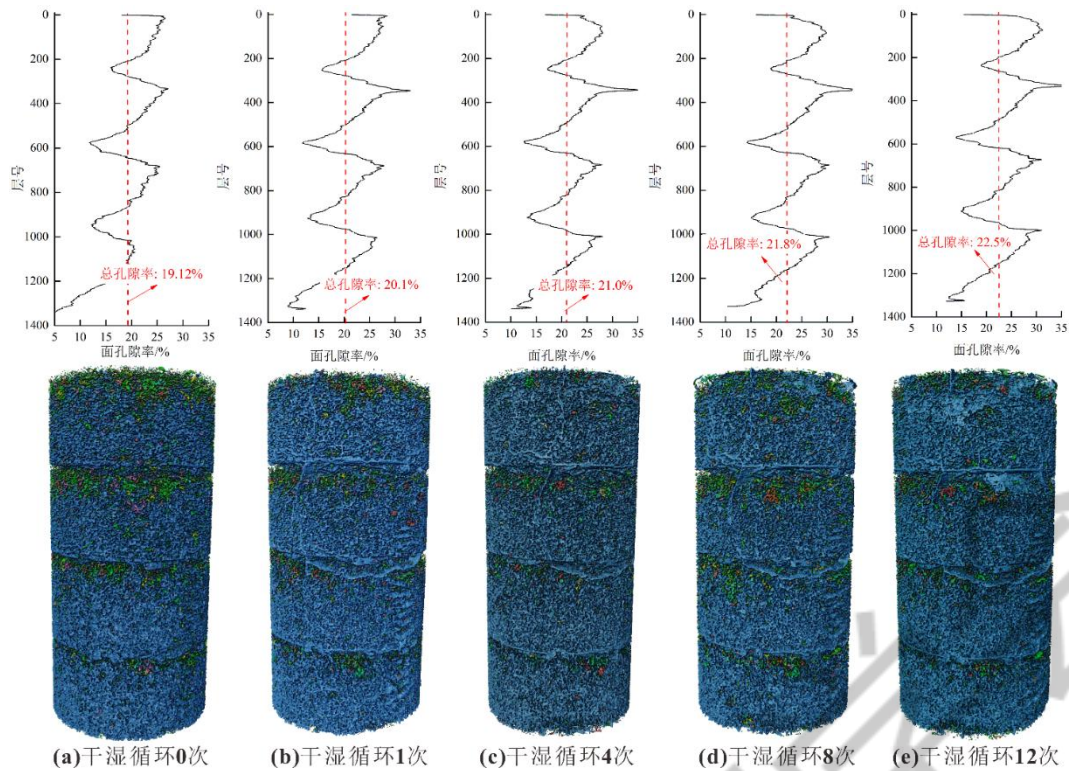


图 13 不同干湿循环次数试样的面孔隙率

孔隙的连通性对其破坏特征和渗流特性均具有重要影响,为进一步评估干湿循环作用对黏土孔隙结构的影响,对部分试样的孔隙连通性进行研究。考虑到计算机的图像处理能力和孔隙结构的代表性,选取的单元体大小为 $30\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ 。为减小制样的不均匀性对试样孔隙连通性的影响,选取的单元体位置位于试样的 928~1228 层,为制样过程中试样的最下层。孔隙的连通性研究中,沿着 z 轴方向对代表性单元体的连通性进行分析,判断依据为单元体在 z 轴方向孔隙的连通情况,其中从 z 轴顶面存在连续到底面的孔隙通道称为连通孔隙,其间出现断续的孔隙称之为孤立孔隙。

图 14 中红色部分代表连通孔隙,绿色部分代表孤立孔隙。由图 14 可知,黏土中的连通孔隙占主要部分,且随着干湿循环次数的增加,连通孔隙所占的比例逐渐增加,而孤立孔隙的比例逐渐减小,且孤立孔隙的分布变得更加分散。不同干湿循环次数黏土中连通孔隙和孤立孔隙所占的比例如图 15 所示。在经历不同次数干湿循环后,黏土中连通孔隙所占的比例均超过 90%,且当干湿循环次数达到 8 次后,连通孔隙和孤立孔隙所占的比例基本达到稳定。

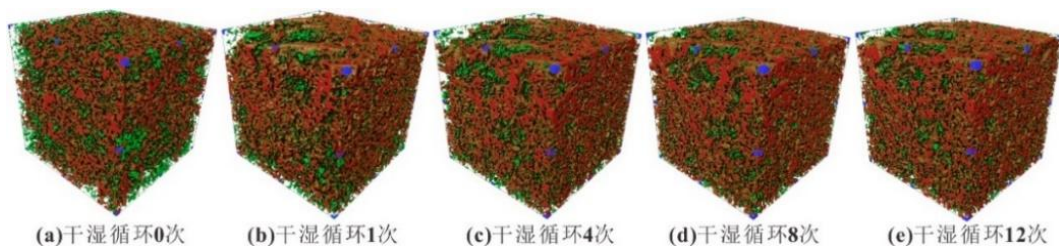


图 14 不同干湿循环次数下黏土中连续孔隙和闭合孔隙分布情况

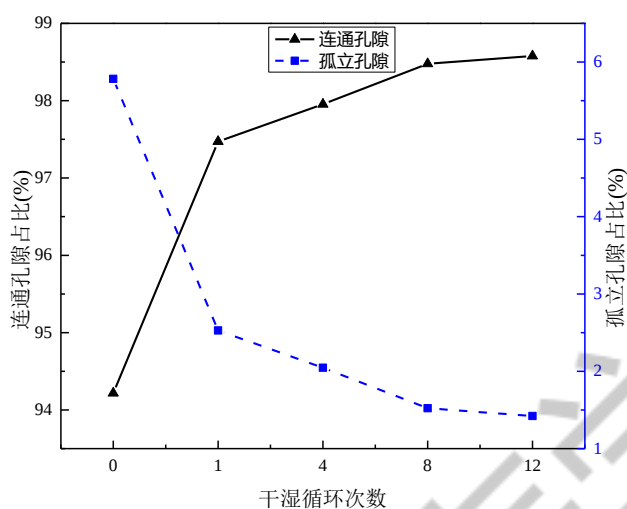


图 15 不同干湿循环次数下黏土中连续孔隙和闭合孔隙所占比例

3) 干湿循环劣化作用下黏土宏微观参数之间的联系

岩土体外在宏观表现受其内在微观结构特性的影响,为定量研究不同干湿循环次数下黏土的微观参数对强度特性的影响,建立了孔隙率与抗压强度之间的关系,如图 16 所示。由图 16 可知,抗压强度与孔隙率之间保持负指数关系,随着试样孔隙率的增加,试样的抗压强度出现了先快速下降后趋于稳定的趋势。孔隙率从 19%增加到 21%的过程中抗压强度下降了 40%左右,当孔隙率从 21%增加到 22.5%时,抗压强度仅变化了 4%左右。从孔隙率与抗压强度之间的关系能够得出,在干湿循环过程中,当干湿循环达到一定次数后,孔隙率增加对抗压强度的减小作用开始减缓。

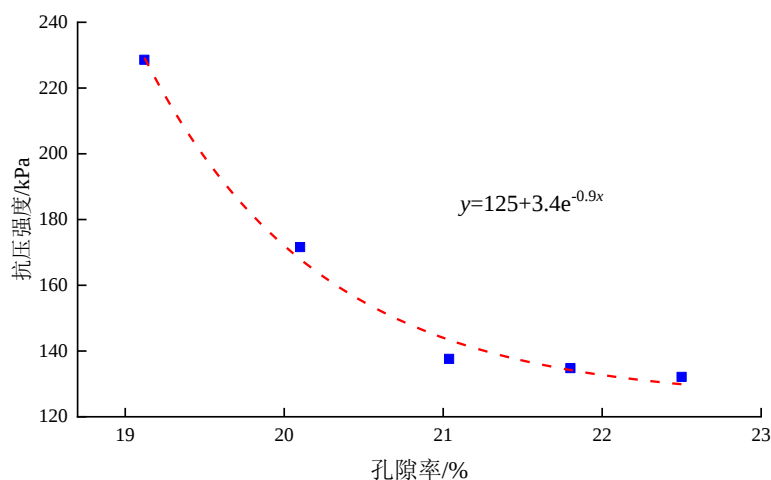


图 16 不同干湿循环次数黏土的孔隙率与抗压强度之间的关系

4 设备产出的成果效益

4.1 科研服务

依托大口径磁共振分析与可视化系统与多尺度高分辨 X 射线三维数字岩心成像分析系统，开展了不同类型岩土体在干湿循环、冻融循环、结构改性、自发渗吸、溶质运移等多个方向的分析研究，服务国家重点研发计划项目 2 项、国家自然科学基金项目 12 项、省部级项目 14 项，解决了重大水利水电建设、长距离引调水、地质灾害防治等多个工程的关键技术问题，经济和社会效益显著，为区域工程建设提供了“河海智慧”。

4.2 人才培养

充分发挥大型仪器的人才培养支撑作用，依托大口径磁共振分析与可视化系统与多尺度高分辨 X 射线三维数字岩心成像分析系统，支持 17 位博士、21 位硕士和 1 位留学生的论文研究，支持江苏省研究生科研创新计划项目 1 项，自 2020 年起已有 17 篇高水平学术论文发表于“Construction and Building Materials”、“Journal of Hydrology”等期刊。支持学生参加创新创业实践，中国国际“互联网+”大学生创新创业大赛全国银奖 1 项、江苏省金奖 1 项、江苏省三等奖 1 项，“挑战杯”中国大学生创业计划竞赛全国铜奖 1 项、江苏省金奖 1 项、江苏省一等奖 1 项，全国大学生地质技能竞赛一等奖 1 项，全国大学生工程地质创新实践大赛优胜奖 1 项，国家级创训 2 项。

4.3 共享辐射

依托大口径磁共振分析与可视化系统与多尺度高分辨 X 射线三维数字岩心成像分析系统，在服务教学、科研的基础上，全面拓展对外服务渠道，提升服务能力。积极加入“江苏省科技创新券服务机构”等区域性科研服务平台，在“江苏省第十三届分析测试管理及技术论

坛第三轮会议”、“第十八届全国水利量测技术综合学术研讨会”等会议作大口径磁共振分析与可视化系统与多尺度高分辨 X 射线三维数字岩心成像分析系统技术报告。为南京大学、东南大学、同济大学、南京工业大学等高校，自然资源部国土（耕地）生态监测与修复工程技术创新中心、中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司等单位，江苏省科技厅、自然资源厅等部门提供技术支持。服务科研院所、兄弟高校、访问学者、中小學生大型仪器设备科普参观讲解活动 40 余次。有效推进了大型仪器设备开放共享工作，促进平台大仪综合利用率水平整体不断向好发展。

参考文献:

- [1]张豫川, 高旭龙, 刘东发, 等. 基于 SEM 的土体微观结构三维分析与分维计算方法[J/OL]. 长江科学院院报, 2023-02-13.
- [2]程展林, 左永振, 丁红顺. CT 技术在岩土试验中的应用研究[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(3): 33-38.
- [3]蒋明镜, 吕雷, 石安宁, 等. 适用于显微 CT 扫描的微型动三轴仪研制与试验验证[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增刊 1): 214-218.
- [4]申志福, 孙天佑, 白宇帆, 等. 基于电镜成像原理的黏土微结构参数提取方法[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5): 933-939.
- [5]李佳明, 唐世斌, 毕鹏雁, 等. 土体微观结构定量分析方法探讨[J]. 实验室研究与探索, 2022, 41(3): 34-41.
- [6]MENG Qingshan, WU Kai, ZHOU Haoran, et al. Mesoscopic damage evolution of coral reef limestone based on real-time CT scanning[J]. Engineering Geology, 2022, 307: 106781.
- [7]郑佳, 庄建琦, 孔嘉旭, 等. 基于 CT 扫描的黄土孔隙结构特征研究[J]. 地质科技通报, 2022, 41(6): 211-222.
- [8]蔡正银, 朱洵, 黄英豪, 等. 冻融过程对膨胀土裂隙演化特征的影响[J]. 岩土力学, 2019, 40(12): 4555-4563.
- [9]谭皓, 宋勇军, 郭玺玺, 等. 冻融裂隙砂岩细观损伤与应变局部化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(12): 2485-2496.
- [10]Wang, X., Tao, J. Polymer-modified microbially induced carbonate precipitation for one-shot targeted and localized soil improvement. Acta Geotech. 2019, 14, 657–671.
- [11]Wang, HM., Ni, WK., Yuan, KZ, et al. Microstructure evolution of loess under multiple

collapsibility based on nuclear magnetic resonance and scanning electron microscopy. *J. Mt. Sci.* 2021, 18, 2612–2625.

[12] Luiz F. Piresa, André C. Aulerb, Waldir L, et al. X-ray microtomography analysis of soil pore structure dynamics under wetting and drying cycles. *Geoderma*. 362 (2020): 114103.

[13] 周科平, 李杰林, 许玉娟, 等. 基于核磁共振技术的岩石孔隙结构特征测定[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(12): 4796-4800.

[14] 魏俊, 廖华林, 王华健, 等. 真三轴条件下砾岩力学特性试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(5): 81-89.

[15] 杨俊, 童磊, 张国栋, 等. 干湿循环机制下风化砂改良膨胀土的收缩特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(2): 150-155.

[16] 刘慧, 杨更社, 申艳军, 等. 冻融-受荷协同作用下砂岩细观损伤演化 CT 可视化定量表征[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(5): 1136-1149.

[17] 王萍, 屈展. 基于核磁共振的脆硬性泥页岩水化损伤演化研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 687–693.

[18] 刘勇健, 李彰明, 郭凌峰, 等. 基于核磁共振技术的软土三轴剪切微观孔隙特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(8): 1924-1932.

[19] 马晓凡, 陈红, 刘瑾, 等. CT 扫描视域下黏土干湿循环劣化机理[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(5): 111-118.

[20] 王颖, 刘瑾, 马晓凡, 等. 基于核磁共振的聚氨酯固化砂土浸水作用分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(12): 2342-2349. (WANG Ying, Liu Jin, Ma Xiaofan, et al. 2020. Immersion effect of polyurethane-reinforced sand based on NMR[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. 2020, 42(12): 2342-2349.)

[21] Ying Wang, Yi Lu, Jin Liu, et al. Monitoring and characterization of the polymer-filled pores in sand using nuclear magnetic resonance during air-drying[J]. *Construction and Building Materials*, 337 (2022): 127568.