引用格式:杨虎城,王杨羿瑄,高运,等. 基于核磁共振的炭质板岩孔隙结构及驱水渗透特征试验分析[J]. 延安大学学报(自然科学版),2026,45(3):84-89. [YANG H C,WANG Y Y X,GAO Y,et al. NMR-based analysis of pore structure and water permeability in carbonaceous slate under water injection[J]. Journal of Yan'an University(Natural Science Edition),2026,45(3):84-89.] **DOI**:10.13876/J.cnki.ydnse.260040

基于核磁共振的炭质板岩孔隙结构及驱水渗透特征试验分析

杨虎城[1*],王杨羿瑄[1],高　运[1],苏生瑞[2],李　强[3]

(1. 延安大学 建筑工程学院,陕西 延安 716000;2. 长安大学 地质工程与测绘学院,陕西 西安 710054;
3. 陕西邦智建筑工程有限公司,陕西 西安 710021)

摘　要:为揭示地下水在炭质板岩内部孔隙渗透过程及其水岩作用对其空隙特征的影响机理,采用可实时加压驱水的岩石核磁共振试验系统对炭质板岩岩芯驱水饱过程中孔隙内水分布及其孔隙特征展开研究。结果表明,炭质板岩的孔隙结构主要由孔径小于0.63 μm的微孔隙和大于4 μm的微裂隙组成,前者体积占比多达90%,而后者占比不足10%,孔径的连续性及孔隙间连通性影响水的渗透过程。试样饱和过程水迅速进入微裂隙等孔径较大的微孔隙内,水岩物理作用使得极细的黏土矿物颗粒发生吸水膨胀而脱落,沉积于微孔隙和微裂隙尖端,部分细颗粒沿孔径较大的通道随水迁移;水填满微孔隙是较缓慢的过程且微孔隙储水量较大;外部应力和内部孔隙水压力共同作用使得孔隙结构处于动态变化过程。研究结论可为富含地下水的炭质板岩地层中地下空间开挖过程中水渗透及防治提供理论依据。

关键词:炭质板岩;驱水渗透;孔隙特征;核磁共振

中图分类号:TU43　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1004-602X(2026)03-0084-06

随着地下工程建设向着深部复杂地质岩体的发展,地下水引发结构失稳、坍塌等问题愈加突出,给工程建设带来巨大挑战。孔隙结构决定了炭质板岩吸水膨胀、遇水崩解等特性,软化作用显著。运用核磁共振从微观角度研究地下水在炭质板岩中的渗流特性是揭示水岩作用对其复杂的工程力学性质的重要途径。

炭质板岩围岩在富含地下水及高地应力环境下开挖卸荷后表现出变形量大,速度快且持续时间久等特点,变形控制难度大且支护结构极易压塌等施工难题给工程建设带来了极大的挑战[1-4]。炭质板岩随着含水率的增大而强度降低,使围岩自稳能力弱化[5]。炭质板岩遇水软化,而且随着水岩作用时间的增加,矿物颗粒发生分解、黏土矿物胶结部分溶解、溶蚀以及极细颗粒迁移等过程使得岩石微观孔隙增大,结构逐渐变得松散,板岩内部胶结物的溶解、溶蚀等作用降低了板岩内聚力和刚度,表现出变形大的特征,对其宏观力学性质影响显著[6-8]。水岩作用下节理面微细观结构损伤劣化显著,逐渐由密实状态转变为疏松多孔状态,节理面平均起伏角、平均相对起伏幅度、面积扩展率等形貌参数呈先陡后缓的劣化趋势[9]。通过一系列室内试验证实,水浸入发生物理化学反应改变了矿物微观成分和结构,表现出矿物骨架承载的累积劣化损伤[10-14]。此外,

收稿日期:2026-03-26
基金项目:延安大学博士科研启动项目(YDZKBK2025-19);校级大学生创新训练计划项目(D2025002)
作者简介:杨虎城(1986—),男,讲师,博士,主要从事工程地质及防灾减灾研究。
通信作者 E-mail:yanghc415@163.com

裂隙水压力对岩石蠕变等力学行为具有影响显著[15]。

核磁共振技术是表征固体内孔隙的一种快速、非侵入性和非破坏性的方法[16-17]。通过分析弛豫时间研究孔隙特征，如孔隙类型和孔隙连通性，可计算总孔隙度和孔径分布(PSD)[18]。近年来，核磁共振技术在岩石微观孔隙结构方面研究成果丰硕，岩石内大量不同尺寸孔隙都有与其对应的反映自身特征的弛豫时间 T_2，通过核磁共振 T_2 谱图对孔内流体弛豫衰减过程的检测可表征块体材料孔隙结构[19]。核磁共振技术已被广泛应用于岩土体渗流试验，通过与压汞试验(MIP)对比，凸显了核磁共振技术在孔隙特征方面研究的优势[20-22]。

现有研究成果主要聚焦于岩石水岩作用对微观结构及力学损伤特性的研究，对炭质板岩在裂隙水渗流动态过程相关报道较少。本文基于先进的可实时驱水的岩石核磁共振试验，系统研究炭质板岩试样在驱水过程中水的渗透及试样孔隙组成、孔径大小、孔隙体积占比等的变化，从微观角度揭示其渗透过程及水岩作用下微观结构变化特征，对地下工程建设过程中炭质板岩围岩变形及地下水的渗流、涌水等的防治具有重要意义。

1　材料及试验过程

1.1　试验材料

试验所用的岩块采自甘肃省渭武高速木寨岭隧道围岩中的炭质板岩层，因矿物成分及含量不同，呈黑色、褐色与青灰色相间，结构致密，片理结构明显。选取厚度较大具有代表性的岩块，采用水钻法平行于片理面钻取半径为 25 mm，高度为 60~80 mm 的圆柱体试样，然后切割并对两端进行磨平使其垂直度及长度满足核磁共振试验夹具要求，最后放入烘箱将其烘干至恒定质量。

1.2　试验设备

试验采用 Macro MR12-150H-I 低场核磁共振实时分析与成像系统(苏州纽迈分析仪器股份有限公司)，该试验系统主要由核磁共振成像分析仪、磁体、岩芯夹持器、双缸恒压恒流驱替泵、围压泵组成。核磁共振的射频脉冲频率范围为 1~30 MHz，最大采样带宽为 2 000 kHz，磁体磁感应强度为 0.52 T；岩芯夹持器主体部分为无核磁信号的聚醚醚酮(PEEK)树脂材料，通过围压泵注入氟碳油实现加载围压；试验渗流动力源由双缸恒压恒流驱替泵提供，压力范围为 0~40 MPa，双泵连续流动，流量 0~50 mL/min，流量精度可达±0.5%(1 mL/min)。

1.3　试验方案

综合隧道埋深、地应力及裂隙水分布调研结果及炭质板岩的单轴压缩强度值，确定实验过程中驱水压力为 0.5 MPa，防止水与氟碳油混合，环向同样施加 0.5 MPa 的压应力。具体试验步骤如下：

1)测定干燥岩芯的质量、尺寸等参数，将试样上下两端放置渗流垫片，连接夹持器使其均匀接触试样。用无核磁信号聚全氟乙丙烯(FEP)热缩管包裹整体试样及部分端头并用热风枪热烘密封，装入相应的探头盒内。将探头盒管路与围压泵和双缸恒压恒流驱替泵的管路连接紧密，将氟碳油注入各管路、围压室和泵腔，通过驱替泵完全排除管路空气，保证加压的稳定性，连接探头盒信号采集端口与采集系统。

2)调试核磁共振实验采集系统，核查磁体探头并准确设置中心频率、脉冲宽度等相关参数，确保核磁信号等一切正常。驱水前采集核磁信号记为 Ini，然后施加 0.5 MPa 的围压，确保热缩管内部压强小于外侧，防止水渗入围压腔内与氟碳油混合。以 0.5 MPa 的恒压驱水，记录开始及以后每隔一定时间的核磁 T_2 谱曲线，直至相邻两次的信号量几乎不变时，视为岩芯已饱和。

3)分别对试样加工时的残余料和试验后岩块加工成含有片理面的小块体，进行电镜扫描，观察新鲜片理面在不同倍数下表观特征，采集合适区域的微观结构图像。

2　炭质板岩微观结构特征分析

2.1　微观结构分析

炭质板岩主要由石英、云母、有机碳及多种黏土矿物组成，是一种遇水软化，易崩解碎裂的特殊岩石[23]。炭质板岩在驱水饱和过程中发生水岩相互作用，进而改变微观结构，通过对驱水试验前后的试样进行电镜扫描(SEM)，得到片理面表观形态变化见图 1。在不通放大倍数下观测到不同大小的片状和粒状颗粒，其形态和大小不均匀，表明炭质板岩由多种不同种类的矿物组成。片理面上有明显的微裂隙、微裂纹等缺陷，这些缺陷部分沿着岩石弱胶结层理面方向延伸和分布，还有部分与层理面相交的裂隙分布无规律。饱和试验前(图 1A 和 B)岩样片理面微裂隙边缘及片状颗粒碎屑棱角分明，而驱水饱和后(图 1C 和 D)的微裂隙边界及颗粒边缘

变的更加圆润,粒间细小微孔隙及裂隙尖端被极细颗粒填充,颗粒融为一体,无明显粒间孔隙。由此可见炭质板岩驱水饱和过程中发生了压力溶解、迁移及沉积等物理作用。

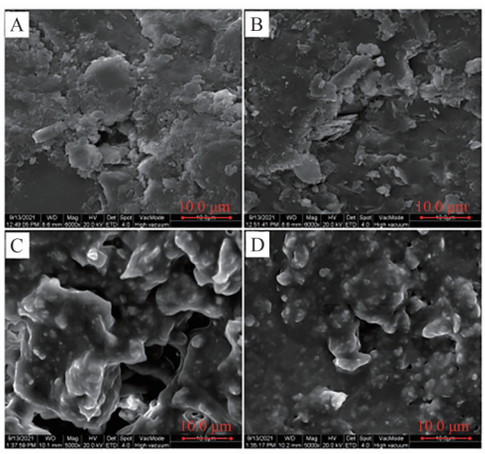


图1 试验前后炭质板岩片理面微观结构对比图

注:A和B分别表示蠕变前裂隙和颗粒形态分布;C和D分别表示蠕变后裂隙和颗粒形态分布

2.2 炭质板岩孔隙内水入渗过程

核磁信号变化由水入渗岩芯中量的变化引起的,通过采集核磁共振信号T_2谱来表征试样中水入渗量及分布位置等渗透过程,进而研究干燥试样在驱水进入其内部不同孔隙的分布及迁移过程,直至驱水达到饱和状态。岩体孔隙水的弛豫时间主要取决于表面弛豫,从而使得T_2分布能够直接反映岩石的孔隙结构,表面弛豫表达式见式(1)。

$$\frac{1}{T_2}=\rho_2\left(\frac{S}{V}\right)=\rho_2\frac{F_S}{r_C}, \tag{1}$$

其中,ρ_2为水的密度(g/μm³);S/V是孔隙比表面(1/μm),F_S为孔隙形状因子,r_C为岩石的孔喉半径(μm)。

由于岩石通常包含大量不同尺寸的孔隙,各尺寸的孔隙有带其自身特征的弛豫时间T_2,因此,核磁共振谱图可以反映流体多种弛豫衰减过程。弛豫时间T_2可以表征岩石的孔隙大小分布,曲线峰值和面积则代表岩石孔隙体积,曲线峰的连续性反映了孔径的连续性特征。由式(1)可知,横向弛豫时间T_2分布规律与岩石中水含量和分布位置及所测的孔隙大小分布规律是一致的。在驱水饱和过程中不同时间对应的T_2谱数据见图2,图中Ini为无环向约束力的初始状态。

由图2可知,初始状态和驱水饱和后T_2谱曲线呈双峰型,而施加环向压力及驱水入渗过程中的T_2谱曲线为三峰型,从左到右依次称为P1峰、P2峰和P3峰,分别对应为微孔、中间孔隙和微裂隙。施加环向应力后,P1峰发生右移,且峰面积减小,P2和P3峰的弛豫时间范围扩大,峰面积增大,说明应力作用下颗粒被压缩,颗粒间的部分微孔水分发生转移。驱水前期,三个峰信号幅值都发生了显著的增大,第一峰的增加过程更显著,说明岩芯在驱水时水迅速填充在微裂隙和中间孔内,而水入渗到微孔隙的过程较缓慢。在驱水压力下,微孔隙中被"挤出"的少量可动水和驱水管中注入的水快速进入了中间孔隙和微裂隙,该孔隙中的水以注入水为主。驱水过程中P1的峰值及面积在缓慢增大,而其他两峰几乎不变,认为中间孔隙和微裂隙很快被水填满,而在驱水压力下水进入微孔隙较缓慢,孔隙间的连通性较差。直到驱水后的第565和679 min,相邻两次采集的信号几乎一致,可视为岩石饱和时,水的体积和孔隙体积相等,而岩芯孔隙被水填充饱和后T_2谱又恢复到双峰状态。综合微观分析结果,炭质板岩岩芯内部孔隙的孔径分布呈非连续状态,外部应力作用使薄片颗粒发生弹性弯曲,从而使孔径的连续性和孔隙间的连通性得以改善,提高了岩样的渗透性。

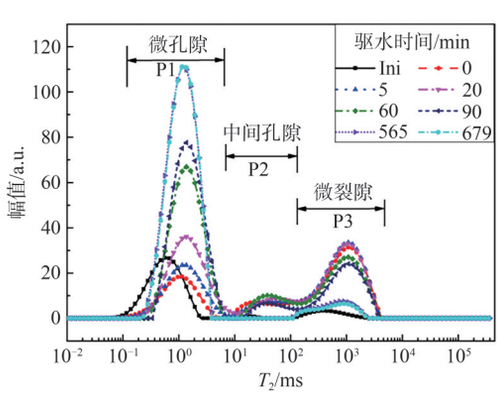


图2 试样驱水全过程T_2谱变化曲线图

2.3 驱水饱和过程T_2谱各峰面积

T_2峰面积表示岩石内部孔隙数量的多少及孔隙度的大小,与相应孔径的孔隙度和孔隙的数量成正相关。因此,根据T_2谱曲线计算各谱峰的峰面积,可确定各孔径孔隙的数量及相对占比,如图3所示。

图3中驱水过程各峰总面积呈逐步增大最后趋于稳定,说明试样驱水过程中孔隙内含水量逐渐增加,最终达到最大值。三个峰的面积趋势表现各不同,P1峰面积和所有峰的总面积几乎同步逐渐增大,说明微孔隙在驱水过程中不断吸水,而P3峰面

积逐渐减小，P2的变化范围内发生先增大后减小至初始状态，表明驱水初期水迅速填满较大的孔隙，随后微裂隙中的水逐渐减少。P1峰面积占比从29.66%增加到93.06%，驱水入渗过程中微孔隙内的水量增加了63.4%；而P3峰面积占比从60.69%降低到24.86%，微裂隙内充满了水，片状颗粒弹性变形恢复过程中微裂隙的量减少了35.83%，最后达到饱和时与P2峰融为一体。P2峰面积占比在驱水过程中在11.31%和6.14%之间波动。在驱水过程中，水很快进入微裂隙，而微孔数量多且连通性差，需要较长时间才能充满，随着驱水量的增加，总峰值面积逐渐增大并最终趋于稳定。随着孔隙中填充水的增多，水分担部分颗粒的应力逐步增大，内部孔隙水压力和外部约束压力达到平衡，片状颗粒发生了可恢复的弹性变形，中间孔隙闭合，微裂隙数量也在降低，饱和岩芯的孔径分布恢复到了初始的双峰状态。

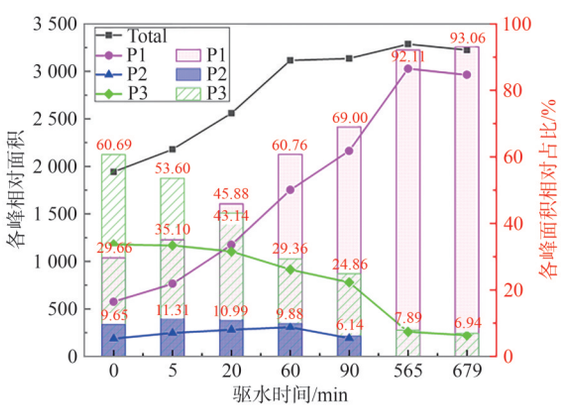


图3　驱水过程各峰面积变化曲线

2.4　驱水饱和过程孔隙度

孔隙度测定需先测量饱和岩样T_2谱，利用标准刻度样品进行定标，拟合出含水量和核磁共振信号值的关系，再将饱和岩样的T_2谱核磁共振信号值代入关系式中求出试样含水量，根据不同孔径内的含水量求出试样孔隙度。本次试验定标样品选择体积为35 mL，孔隙率分别为1%、5%、10%和20%四种标准样品来校准试样的T_2谱数据，得出信号振幅与孔隙率之间的关系，见式(2)。

$$y = 117.78x - 51.716, \tag{2}$$

其中，y为T_2谱单位体积信号幅度，x为对应的孔隙率。在达到饱和阶段之前，孔隙不断充满水，测量信号量的变化代表了孔隙含水量的变化。

驱水过程中炭质板岩孔隙中含水率的变化曲线见图4。初始状态下岩心单位体积含水率为0.58%，前60 min内含水率显著增加到1.12%，驱水至565 min和679 min时，单位体积含水率分别为1.15%和1.14%。可见，驱水前60 min内水在孔隙内渗流较快，是由于外部应力增大了微裂隙的数量和孔径，而且产生了一定量的孔径较大的中间孔隙，孔径的连续性和连通性得到显著的改善，为水的快速渗透提供了通道条件。60 min之后单位体积含水率增长缓慢，一方面是水进入微孔隙较缓慢，另一方面是孔隙内外压力平衡过程中间孔隙和大孔隙被挤压使其数量和孔径减小，与微孔隙出现此消彼长的现象。

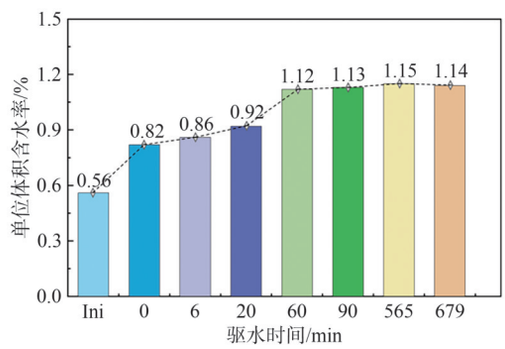


图4　驱水过程单位体积含水率变化曲线

2.5　驱水饱和过程孔径及孔喉分布

通过式(1)将核磁共振T_2谱换算为反映岩石孔隙结构特征的孔径分布。由YANG等[6]的研究成果得表面弛豫系数为175，将所观测到的所有孔隙的T_2分布转化为岩芯孔隙的孔径和孔喉分布，驱水过程中含有不同大小孔隙的岩石样本的体积含水量分布见图5。在施加约束压力时，孔隙结构变化显著，出现了中间孔隙，连通性明显改善，微孔的最大孔径从0.5 μm增加到1 μm，而微裂隙的最大孔径则从300 μm增加到600 μm。在孔隙水压力和约束压力的相互作用下，孔径先增大后缩小，微裂隙的孔径在初始状态和饱和状态下几乎没有变化(介于10~300 μm)，而微孔的直径则略有增大。微孔含水量的峰值从0.041%降至0.018%，然后随着注入时间的延长而增加。相反，微裂隙含水量的峰值从0.008%上升到0.04%，然后下降到0.01%。

孔喉是不同大小的孔隙之间连接通道，是表征孔隙之间联通性重要指标。根据孔隙率分量与孔径关系得到了孔喉分布情况，将连续的孔径分布划分为多个区段，形成孔喉与之对应的含水量分布关系见图6。微孔隙的孔喉分布范围为0~0.63 μm，在驱水过程中，微孔的体积含水分量随驱水时间的延长而显著增大，从0.05%增加至0.26%。微裂隙的

孔喉分布范围为4.00~25.00 μm,微裂隙的体积含水量变化在0.05%以下,驱水饱和过程中间空隙被压缩逐渐消失。炭质板岩孔径分布主要以小于0.63 μm的微孔为主,占比约为90%,而大于6.30 μm的微裂隙占比不足10%。由此可知,在驱水饱和过程中孔隙分布处于动态变化过程,初始孔喉分布呈连续状态,渗透性能较好,随着孔隙水压力平衡外部应力,片状颗粒恢复弹性变形的过程中孔喉分布出现间断,饱和状态下颗粒恢复平衡,缺少中间孔隙。孔隙大小及连通性影响了水在炭质板岩内的渗透特性。

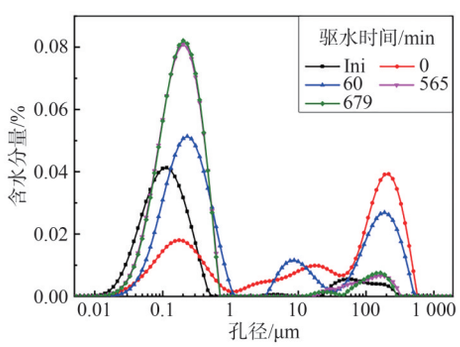


图5 试样孔径与孔隙内含水分量图

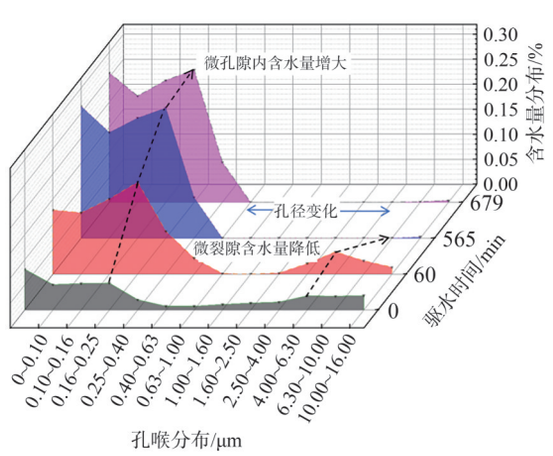


图6 驱水过程中试样孔喉分布及含水变化图

3 结论

1)炭质板岩结构较致密且具片理特性岩石,片状颗粒定向排列形成的粒间鱼鳞状微孔隙占据孔隙体积90%以上,微裂隙不足10%。炭质板岩微孔隙和微裂隙间缺少中间孔隙,连通性弱导致岩体的渗透性差。

2)应力作用使片状颗粒发生变形,导致其微孔隙及微裂隙的扩张或融合,改变了内部孔径的连续性和孔间的连通性,进而影响渗透性。水沿片理面附近的微孔隙及微裂隙进入到岩石内部,水压力平衡外部应力使得孔隙结构处于动态变化过程。片理面附近的黏土矿物颗粒吸水后黏结弱化,部分极细颗粒剥落溶解并沉积于微孔或裂隙尖端,部分则沿通道随水迁移,从而改变孔隙分布和渗透特性。

3)压力促使水能快速填充于炭质板岩较大孔隙内,如微裂隙,而渗入微孔隙速度较缓慢。驱水饱和主要为微孔隙内缓慢填充水的过程,因其体积占比大而持续久。孔隙水压力增减会改变板岩骨架有效应力,而扰动后的孔隙压力需较长时间重新平衡,从而表现出炭质板岩蠕变量大且持续时间久的特点。

参考文献:

[1]尹建勋. 软弱炭质板岩隧道大变形特征及应对措施研究[J]. 铁道建筑技术,2019(7):110-113.

[2]陶志刚,罗森林,康宏伟,等. 公路隧道炭质板岩变形规律及蠕变特性研究[J]. 中国矿业大学学报,2020,49(5):898-906.

[3]马腾飞. 深部裂隙岩体峰后变形机理与稳定性分析方法研究[D]. 济南:山东大学,2019.

[4]WANG F N, GUO Z B, QIAO X B, et al. Large deformation mechanism of thin-layered carbonaceous slate and energy coupling support technology of NPR anchor cable in Minxian Tunnel: A case study [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 117: 104151.

[5]胡涛涛,葛峻恺,刘可萌. 含水率对高地应力炭质板岩隧道围岩稳定性的影响研究[J]. 水资源与水工程学报,2022,33(5):169-175+182.

[6]YANG H C, SU S R, LI P, et al. Investigation of the Microstructure Characteristics and Deformation Mechanisms of the Carbonaceous Slate under Hydromechanical Coupling [J]. Geofluids, 2023, 5490136.

[7]王翔. 水岩相互作用下炭质板岩劣化特性研究[D]. 兰州:兰州大学,2025.

[8]曹廷,何刘,王维,等. 水岩循环对变质砂岩微观结构损伤与宏观力学劣化影响机理研究[J]. 工程地质学报,2024,32(1):96-107.

[9]黄叶宁,邓华锋,李建林,等. 水-岩作用下节理岩体剪切力学特性及本构模型[J]. 岩石力学与工程学报,2023,42(3):545-557.

[10]柴少波,宋浪,周炜,等. 水岩作用对充填节理岩石劣化的影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2023,53(5):1510-1520.

[11]李二强,冯吉利,张龙飞,等. 水-岩及风化作用下层状炭质板岩巴西劈裂试验研究[J]. 岩土工程学报,2021,43(2):329-337.

[12]陈光波,李谭,杨磊,等. 水岩作用下煤岩组合体力学特

性与损伤特征[J]. 煤炭科学技术,2023,51(4):37-46.
[13]汪丽,李同录,张建杰. 地下水对板岩微观结构变化的影响研究[J]. 水力发电,2019,45(4):45-48.
[14]赵鹏飞. 深埋隧道炭质板岩水理-力学特性研究[D]. 沈阳:东北大学,2023.
[15]张峰瑞,姜谙男,杨秀荣. 孔隙水压力对锯齿状结构面剪切蠕变特性的影响[J]. 岩土力学,2020,41(9):2901-2912.
[16]ZHENG S, YAO Y, LIU D, et al. Nuclear magnetic resonance surface relaxivity of coals [J]. International Journal of Coal Geology,2019,205:1-13
[17]吴志军,卢槐,翁磊,等. 基于核磁共振实时成像技术的裂隙砂岩渗流特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(2):263-275.
[18]GUO J, XIE R, XIAO L. Pore-fluid characterizations and microscopic mechanisms of sedimentary rocks with three-dimensional NMR: Tight sandstone as an example [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering,2020,80:103392.
[19]SAIDIAN M, PRASAD M. Effect of mineralogy on nuclear magnetic resonance surface relaxivity: a case study of Middle Bakken and Three Forks formations [J], Fuel, 2015,161(12):197-206.
[20]周洁,周华德,石振明. 基于低温三轴渗流核磁共振成像的人工冻结软土水分迁移及压融演化特征分析[J]. 岩土工程学报,2025,47:107-111.
[21]WANG Y, YUAN Q, DENG D, et al. Measuring the pore structure of cement asphalt mortar by nuclear magnetic resonance [J]. Construction and Building Materials, 2017, 137:450-458.
[22]WASHBURN KE, SANDOR M, CHENG Y. Evaluation of sandstone surface relaxivity using laser-induced breakdown spectroscopy [J]. Journal of Magnetic Resonance, 2017, 275:80-89.
[23]邵羽,米德才,叶琼瑶,等. 广西地区炭质岩基本物质组成及其对崩解特性的影响[J]. 工程地质学报,2023,31(5):1588-1596.

[责任编辑　张　香]

NMR-based analysis of pore structure and water permeability in carbonaceous slate under water injection

YANG Hucheng[1*], WANG Yangyixuan[1], GAO Yun[1], SU Shengrui[2], LI Qiang[3]

(1. School of Architecture and Engineering, Yan'an University, Yan'an 716000; 2. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054; 3. Shaanxi Bangzhi Construction Engineering Co., Ltd., Xi'an 710021, China)

Abstract: To reveal the pore permeation process of groundwater in the carbonaceous schist and the influence mechanism of water-rock interaction on its pore characteristics, this paper uses a rock nuclear magnetic resonance test system that can perform real-time pressure water displacement to study the water distribution in the pores and the pore characteristics during the water displacement saturation process of the carbonaceous schist core. The results show that the pore structure of the carbonaceous schist is mainly composed of micro-pores with diameters less than 0.63 μm and micro-cracks with diameters greater than 4 μm. The former accounts for as much as 90% of the volume, while the latter accounts for less than 10%. The continuity of pore diameters and the connectivity between pores affect the water permeation process. During the saturation process of the sample, water quickly enters the larger-sized pores such as micro-cracks, and the water-rock physical interaction causes the extremely fine clay mineral particles to absorb water and expand and fall off, depositing at the tips of the micro-pores and micro-cracks. Some fine particles migrate along the channels with larger diameters with the water; the filling of micro-pores by water is a relatively slow process and the water storage capacity of the micro-pores is large. The combined action of external stress and internal pore water pressure causes the pore structure to be in a dynamic change process. The research conclusions can provide a theoretical basis for water permeation and prevention in the underground space excavation process of carbonaceous schist strata with abundant groundwater.

Key words: carbonaceous schist; water displacement permeability; pore characteristics; nuclear magnetic resonance