

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

锦屏大理岩单轴压缩过程中的微结构演化

封陈晨,李 傲,王志亮,王浩然

A study of mineral compositions and micro-structure characteristics for the Jinping marble

FENG Chenchen, LI Ao, WANG Zhiliang, and WANG Haoran

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202204023

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

动态载荷下大理岩断口形貌特征试验研究

An experimental study of the fracture morphology of marble under dynamic loading 王伟祥, 王志亮, 贾帅龙, 卢志堂 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 118-124

基于核磁共振与氮吸附技术的黄土含盐量对结合水膜厚度的影响研究

An experimental study of the influence of loess salinity on combined water film thickness based on NMR and nitrogen adsorption technique

何攀, 许强, 刘佳良, 蒲川豪, 陈达, 赵宽耀 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 142-149

冻融循环作用下花岗岩损伤的宏微观尺度研究

A study of granite damage in the macro and microscopic scales under freezing-thawing cycles 戚利荣, 王家鼎, 张登飞, 张永双, 李贞孝, 孙嘉兴, 马剑飞 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 65-73

3种因素影响下固化废弃淤泥的微观特性研究

Research on the micro-characteristics of solidified waste sludge under the effect of three factors 杨浩,朱剑锋,陶燕丽 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 91-99

基于离散元法的砂石混合体直剪试验结果分析

An analysis of direct shear test results of sand – gravel mixture based on the discrete element method 苏永华, 王栋 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 97–104

单轴压缩下红色砒砂岩水泥土的能量演化机制研究

Energy evolution mechanism of red Pisha-sandstone cement soil under uniaxial compression 耿凯强, 李晓丽 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 134-141



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202204023

封陈晨,李傲,王志亮,等. 锦屏大理岩单轴压缩过程中的微结构演化 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 90-96. FENG Chenchen, LI Ao, WANG Zhiliang, *et al.* A study of mineral compositions and micro-structure characteristics for the Jinping marble[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 90-96.

锦屏大理岩单轴压缩过程中的微结构演化

封陈晨,李 傲,王志亮,王浩然 (合肥工业大学土木与水利工程学院,安徽合肥 230009)

摘要:为了研究锦屏大理岩受载过程中内部孔隙结构的演化规律,文章先对其进行矿物成分测定和单轴压缩试验;随后对 施加不同轴压后的试样开展了核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)测试,并分析相应试验结果;最后,根据 NMR 孔隙 度参数,建立起试样损伤度、有效应力比系数与轴压比之间函数关系。结果表明:大理岩内部孔隙分布具有多尺度特性;加 载过程中核磁共振 T₂谱分布曲线整体向右移动,小尺寸孔隙占比减少而中等尺寸孔隙占比增加;岩样内部孔隙具有多重 分形结构,小孔占比影响孔隙的分形维数和连通性。当小孔占比小时,孔隙结构相对简单,分形维数较低;当小孔占比大 时,孔隙结构则较复杂,分形维数增大。大理岩孔隙度和损伤度均随荷载增加呈指数增大,且损伤和未损状态下有效应力 比也增大。此项研究对揭示岩石损伤与破坏机理具有重要指导意义,同时在岩石损伤检测方面也具有一定参考价值。 关键词:大理岩;核磁共振;孔隙度;分形维数;损伤度 中图分类号: TU455 文献标志码:A 文章编号: 1000-3665(2022)06-0090-07

A study of mineral compositions and micro-structure characteristics for the Jinping marble

FENG Chenchen, LI Ao, WANG Zhiliang, WANG Haoran (School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract: To study the evolution law of internal pore structure of Jinping marble under loading, the mineral composition and uniaxial compression test were first conducted. Then, the nuclear magnetic resonance (NMR) tests were carried out on the samples subjected to different axial pressures, and the corresponding test results were further analyzed. Finally, the functional relationships of the damage degree and effective stress ratio with the axial compression ratio were established according to the NMR porosity parameters. It is found that the pore distribution in the marble has multi-scale characteristics. During the loading process, the T_2 spectrum distribution curve of NMR shifts to the right as a whole, and the proportion of small-sized pores decreases while the proportion of medium-sized pores increases. There exist multi-fractal structures of pores inside the rock samples, and the fractal dimension and connectivity of pores are affected by the small pore proportion. When the small pore proportion is low, the pore structure is relatively simpler and the fractal dimension increases. Both the porosity and damage degree of the marble increase exponentially with the increase of load, and the effective stress ratio of

收稿日期: 2022-04-12; 修订日期: 2022-06-23 投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目:国家自然科学基金雅砻江联合基金资助项目(U1965101);国家自然科学基金项目(12272119)

第一作者:封陈晨(1997-),女,硕士研究生,从事岩石损伤破坏特性研究。E-mail: fengcc_1014@163.com

通讯作者: 王志亮(1969-), 男, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为岩石动力学特性与损伤破坏机理。E-mail: cvewzL@hfut.edu.cn

岩石是一种非均质多孔材料,具有大量随机分布 的天然缺陷(如微孔洞、微裂隙)。在外部载荷作用 下,岩石中的缺陷不断发育,形成宏观裂纹,引起岩石 材料力学性质的劣化,并最终导致岩石失稳破坏。因 此,为了对工程问题进行准确的理论分析与数值计 算,探究岩石在荷载作用下内部损伤的演化规律及破 坏机理,具有重要意义。

在岩石受荷破坏机制方面,国内外学者开展了诸 多扎实的基础工作。张治亮等门通过对砂岩进行不同 围压下常规三轴压缩试验,采用密度描述损伤方法分 析岩石的变形和损伤演化规律,发现在加载初期岩石 会出现虚拟损伤,获得一定程度的"修复",当偏应力 提高时岩石才出现真实损伤,其损伤量与等效应变呈 良好的线性关系。Liu 等[2] 对煤岩开展了压缩条件下 的实时 CT 试验, 指出煤岩在压缩荷载作用下的损伤 演化具有非均匀性和局部化现象。Yang 等³³利用 CT 扫描技术分别对锦屏大理岩开展了常规三轴压缩 和常规三轴分级加载试验,研究得出试样的 CT 数具 有一定的统计分布规律,且基于 CT 数定义的损伤变 量随围压的增加而降低,围压在一定程度上削弱了岩 石的损伤程度。Li等种利用岩石双轴流变仪研究煤 岩在单轴压缩条件下的声发射特性,发现声发射信号 能够反映煤岩内部的损伤,且煤岩声发射累积计数与 其变形和损伤演化程度有关。此外,尚有一些学者从 细观尺度上数值分析岩石受荷时的损伤演化规律,为 揭示岩石损伤机理提供了有益的参考[5-7]。

核磁共振技术(NMR)具有检测无损、效率高以及 检测样品可重复等优势,已逐渐成为主要的岩石物理 试验分析手段。许多学者将 NMR 应用于岩石的损伤 破坏特性研究。李杰林等^[8-9]、许玉娟等^[10]基于 NMR 对寒区花岗岩进行多次冻融循环试验,发现随着冻融 次数的增加,岩样的孔隙度增速加快,且 T₂谱分布的 每个谱峰均随之增大,孔隙结构改变且渗透性增强。 张元中等^[11]、周科平等^[12]对不同岩石在单轴和三轴作 用后的 NMR 特性进行了试验研究,指出 T₂谱面积可 反映岩石内部孔隙结构变化,并建立了孔隙度与损伤 度间的函数关系。

综上所述,目前有关岩石在单轴和三轴压缩条件 下的损伤破坏方面,国内外学者已开展了大量试验研 究,对岩石的受荷损伤现象已有诸多描述,但在揭示 岩石内部损伤度与轴压比关系以及将损伤度与分形 理论相结合的研究成果鲜少。鉴于此,本文拟对大理 岩试样开展单轴压缩和 NMR 测试,结合连续介质损 伤力学和分形理论,探究不同外荷载下岩石内部孔隙 结构的变化规律,并通过核磁共振 T₂谱曲线阐释轴 向荷载作用下岩石内部损伤演化机理。此外,还拟依 据孔隙度参数构建考虑损伤修正的损伤度与轴压比 间函数关系,力求得出有参考价值的结论。

1 试验概况

1.1 试验原理

NMR 分析以岩石孔隙液体中氢核为探针,当氢核 受到电磁作用被极化后,施加1个特定角度的振荡射 频脉冲后,可以检测到1个衰减信号,信号大小与氢 核(质子)的数量成正比,其中横向的衰减时间即为 *T*2时间^[6]。*T*2弛豫时间受流体性质与孔隙比表面积的 影响,对于岩石孔隙中的流体,有3种同时存在的弛 豫机制^[10]:①表面流体弛豫机制;②分子自扩散弛豫 机制;③自由流体弛豫机制。这3种机制下的弛豫时 间满足下列关系:

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2\text{fl}}} + \frac{1}{T_{2\text{km}}} + \frac{1}{T_{2\text{l}}}$$
(1)

式中: T_{2 自由} — 孔隙流体在足够大容器中的 T₂ 弛豫时 间:

*T*_{2表面}——表面弛豫引起的流体弛豫时间;

*T*_{2 扩散} — 梯度磁场下扩散引起的孔隙流体弛豫 时间;

T2——孔隙中流体的弛豫时间。

当孔隙中只有1种流体且流体本身的弛豫要比表面弛豫小很多时, T_{2 自由}可忽略不计; 当磁场较为均匀(磁场梯度较小), T_{2扩散}也可忽略。故式(1)可化简为:

$$\frac{1}{T_2} = \rho_2 \left(\frac{S}{V}\right)_{\text{ABR}} \tag{2}$$

式中:ρ2---表面弛豫强度;

V——流体体积。

对于内部孔隙可以简化成柱状、球状的材料, T₂ 弛豫时间与孔隙直径的关系为^[9]:

$$\frac{1}{T_2} = \frac{\rho_2}{r} F_s \tag{3}$$

式中:r--孔径;

 F_{s} ——几何形状因子(柱状孔隙 $F_{s}=2$,球状孔隙 $F_{s}=3$)。

对于多孔介质岩石类材料的取 $F_s=2$ 、 $\rho_2=1$ μ m/ms^[13],则式(3)可简化如下:

$$r = 2T_2 \tag{4}$$

1.2 试样制备与仪器设备

试验大理岩取自锦屏二级水电站深埋引水隧洞, 试样密度为2.81 g/cm³,尺寸为Φ10.0 cm×5.0 cm(图1), 为了降低断面偏心受压而引起的误差,两端面打磨后 的不平行度小于0.05 mm^[14]。随后,测量试样的尺寸、 质量等,并根据波速大小排除离散性较大的试样。相 关测试仪器有岩石力学试验机、真空饱水机、NMR测 试系统(图2)。其中,真空饱水机在设置抽气时间和 压力后,自动运行,压力值读数为0.1 MPa。NMR测试 系统采用上海纽迈电子科技有限公司生产的 MiniMR-60 NMR 成像分析系统,该设备的主磁场为0.51 T, H质子共振频率为21.7 MHz,射频脉冲频率为1.0~ 49.9 MHz,磁体控温 25~35 °C,射频功率300 W, NMR 成像的最大分辨率为100 μm。



图 1 锦屏大理岩试样 Fig. 1 samples of the Jinping marble



1.3 试验步骤

(1)试验开始前,对岩样进行矿物成分测定和单轴

压缩试验,获得其单轴抗压强度的平均值,约135 MPa。

(2)对余下试样进行洗油洗盐处理,并将试样放 在真空饱水机内,饱水 24h后,再使用 NMR 系统测量 试样的细观结构。

(3)对经烘干处理后的大理岩试样进行常规的单 轴压缩,将试样沿轴向分别加载到100 MPa、125 MPa 后卸载,之后取出试样,再作真空饱水处理。

(4)对不同荷载后的试样进行 NMR 测试, 根据实 测数据, 得到试样的 T₂ 谱分布曲线。

2 试验结果分析

2.1 大理岩矿物成分测定

将 X 射线衍射测试数据绘制成曲线,可得到如 图 3 所示的 X 射线衍射图谱。



图 3 大理岩试样 X 射线衍射图谱 Fig. 3 X-ray diffraction spectrum of the marble samples

采用绝热法对大理岩物相进行半定量分析,矿物成分的质量分数 X;可由绝热法公式^[15]得到:

$$X_{i} = \left[\frac{I_{i}}{K_{i}} \middle| \left(\sum \frac{I_{i}}{K_{i}} \middle| 95\%\right)\right] \times 100\%$$
(5)

式中: Ii —— 试样的各物相最大衍射强度;

*K*_i——试样的各物相参比值(RIR 值)。

由图 3 可知, 各矿物成分最大衍射强度为: 白云石 2 213 CPS、方解石 785 CPS、石英 209 CPS。同时, 参考 MDI-jade 软件中相应的 PDF 卡片, 得出各矿物成分 最强衍射峰的 RIR 值为: 白云石 2.57, 方解石 3.12, 石英 3.09。计算得到大理岩各矿物成分质量分数分别 为: 白云石 69.34%, 方解石 20.25%, 石英 5.44%, 其他 5.00%。

2.2 NMR 与孔隙分形特征分析

孔隙度是指孔隙体积占材料总体积之比,用来定 量表征材料孔隙的基本情况。对于含水的多孔介质 材料, NMR 的信号主要来源于水中的氢原子, 故可将 试验所得的核磁信号强度通过换算得到材料的孔隙 度。T₂ 谱曲线分布面积反映了材料内部流体的数量, 也可将 T₂ 谱曲线面积视为岩石的孔隙度, 故从 T₂ 谱 曲线可直观地观察材料内部不同尺寸裂纹的发育情 况^[8-10]。

表1给出不同轴压下大理岩试样核磁共振 T₂ 谱 分布面积。当加载至100 MPa 时, T₂ 谱面积较0 MPa 上升了12.64%; 加载至125 MPa 时较0 MPa 时增加了 54.64%。这表明在外部荷载作用下, 岩石孔隙体积会 发生显著变化; 随着荷载的增加, 孔隙体积持续增加 直至岩石破裂为止。

表 1 大理岩试样核磁共振谱面积 Table 1 NMR spectrum area of the marble samples

轴向荷载/MPa	0	100	125
T2谱面积	1 555.89	1 752.63	2 406.01

根据式(4)获得大理岩试样孔隙尺寸的分布情况如 图 4 所示。试样内部孔隙孔径分布跨度较大,最小约 为 2 μm,加载到 125 MPa 时最大可达 5 000 μm 以上, 表明了大理岩内部孔径分布的多尺度特性。随外荷 载的增加,大理岩的孔隙尺寸分布比例也随之发生变 化,试样内部小孔隙逐渐发育贯通,尺寸相对小的孔 隙占比逐渐减少,尺寸在 50~200 μm 的孔隙占比逐渐 增加,当加载到 125 MPa 时孔径为 0~20 μm 的孔隙基 本不存在,加载过程中试样内部孔隙充分发育,内部 损伤加剧,最终造成岩样的宏观破坏。

本文依照文献 [16] 及试验所得大理岩孔隙尺寸 分布情况,将大理岩内部孔径划分为3类:小孔(小于 100 µm)、中孔(100~1000 µm)、大孔(大于1000 µm),



Fig. 4 Distributing proportion of sample pores

大理岩内部孔径划分结果见表 2 所列。由表 2 可知未 加载时,小尺寸孔隙占比较大,大孔次之,中孔最少, 荷载增加到 125 MPa 时中孔占比最高,小孔及大孔占 比减少。岩样孔径变化整体上表现为孔隙尺寸随荷 载增加而增大,同时中孔数量逐渐增加,从 20% 增至 49%,增幅达 145%,岩样的孔隙结构变化主要表现为 小孔发育成中孔,大孔数量有所下降,但孔径最大尺 寸由 2 244 µm 上升至 5 472 µm。

表 2 大理岩试样内部孔隙孔径划分 Table 2 Pore size partition of pores inside marble samples

轴向荷载/MPa	小孔占比	中孔占比	大孔占比
0	0.47	0.20	0.33
100	0.40	0.32	0.28
125	0.34	0.49	0.17

大理岩的 T₂ 谱分布如图 5 所示,由图 5(a)可知, 试样的弛豫时间主要集中在 5~200 ms 之间,曲线中 峰值处对应的弛豫时间均增大,T₂ 谱分布逐渐右移, 说明在荷载作用下孔隙孔径增大,岩样的损伤程度加 剧。图 5(b)(c)显示,随着荷载的增加,小孔与大孔的 数量(T₂ 谱曲线与时间轴所围面积)均逐渐减小,这 与表 2 中结果相一致。

已有研究表明岩石内部孔隙具有分形特征,本文 采用 T, 谱分布计算分形维数, 结果见表 3 所示。其 中, D₁、 D₂ 和 D₃ 分别为小孔、中孔和大孔对应的分形 维数, D_{NMR} 为整体内部孔隙的分形维数。表 3 中小孔 分形维数 D1 出现负值的原因是小孔段中岩样内部孔 径较小,在孔隙表面吸附力的作用下,流体自由流动 和流体分子自由扩散受到约束,此时 T2表面和 T2扩散对 弛豫时间的影响不可忽略,故不具有实际意义。随荷 载的增加, D2从 2.81 减至 2.63, 平均值为 2.75; D3从 2.89 减至 2.61, 平均值 2.71。结合表 2 可知, 小孔占比 少时,分形维数较低,孔隙结构相对简单,甚至部分中 孔、大孔相互交汇,连通性变好;小孔占比高时,分形 维数较大,孔隙结构较复杂,主要原因是小孔的孔径 和体积更小,岩样被分隔成更多微小的块体,孔隙结 构的复杂程度增加而孔隙间连通性降低,导致了分形 维数增大[17-18]。

3 大理岩单轴压缩损伤机制分析

3.1 损伤度

在连续损伤力学中,材料的损伤可以看作是材料 连续性的降低。文献 [12]用连续度 ψ 来表征材料劣化 程度,并认为在未损条件下 ψ=1, ψ=0 表示材料完全破



marble NMR

表 3 分形维数计算结果

荷载/MPa	D_1	D_2	D_3	$D_{\rm NMR}$
0	-0.20	2.81	2.89	2.39
100	-0.51	2.82	2.64	2.24
125	-0.87	2.63	2.61	2.11

坏。依据连续度概念引入损伤度 D_s:

$$D_{\rm S} = 1 - \psi \tag{6}$$

式中: Ds=0代表未损状态, Ds=1代表完全损伤。

本文将孔隙度引入损伤度 D_{s} 中,并考虑实际材料 破坏后仍具有残余强度,无法达到完全损伤状态,故 引入修正系数 β 。假设受荷岩石内部微元体应力服从 Weibull 分布,修正系数 β 一般取 0.95^[19]。因此,在荷 载 F下岩石的损伤度和有效应力为:

$$D_{\rm s} = 1 - \frac{V'}{V} = \frac{n' - n}{1 - n} \tag{7}$$

$$\sigma' = \frac{F}{A'} = \frac{F}{V'} = \frac{\sigma}{1 - \beta D_{\rm s}} \tag{8}$$

式中:n、n'---材料未损和损伤状态下的孔隙度;

σ、σ'——材料受荷时总应力和有效应力。

单轴压缩条件下,大理岩在受到轴压后,基于 NMR 孔隙度的试样内部应力状态为:

$$\sigma'_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{1 - \beta D_{\rm s}} = \frac{\sigma_{ij}(1 - n)}{1 - n - \beta n' + \beta n} \tag{9}$$

式中: *σ_i*, *σ'_{ij}* 未损和损伤状态下的有效应力张量。 **3.2** 基于孔隙度参数的单轴压缩损伤分析

岩石在外部荷载作用下的损伤和破坏实质是岩石 内部裂隙萌生、扩展和贯通的过程,孔隙度可以直观 地表征岩石的损伤^[9-10,13-14]。依据核磁共振试验结 果,对不同轴压下的孔隙度进行指数拟合(图 6),其拟 合结果为:

$$n' = 0.592\ 07 + 0.398\ 53\exp\left(\frac{k}{272.087\ 04}\right)$$
$$(0 \le k \le 100, R^2 = 0.999\ 8) \tag{10}$$

式中:k——压缩过程中轴压与峰值强度比值/%。





试样在未损状态下的孔隙度为 0.990 6%, 联立式 (7)(9)(10), 可获得大理岩损伤度、损伤和未损状态 下的有效应力比系数和轴压比之间的关系, 分别如 图 7、图 8 所示。



Fig. 7 Plot of damage degree with axail compression ratio of the sample



图 6 显示了试样内部的孔隙度与轴压比呈指数函 数关系,且图 7 表明大理岩损伤度与轴压比正相关, 可见当施加的轴压越大,大理岩试样的孔隙度增大, 其损伤度也越大。由图 8 可知,损伤与未损状态下的 有效应力比系数随轴压比增大而增大,这表明当轴压 增加时,大理岩在未损状态下的有效应力不变而在损 伤状态下的有效应力则增大。

4 结论

(1)大理岩试样内部孔隙分布具有多尺度特性。 当外荷载增加时,试样孔隙尺寸分布比例也随之发生 变化,试样内部小孔隙逐渐发育贯通,小尺寸孔隙占 比逐渐减少,中等尺寸孔隙占比逐渐增加,核磁共振 T₂谱分布曲线整体向右移动。

(2)试样内部孔隙具有多重分形结构,小孔径孔 隙占比直接影响内部结构分形维数和孔隙连通性。 当小孔占比低时,分形维数较低,此时孔隙结构相对 简单;当小孔占比高时,试样内部孔隙结构的复杂程 度增加且孔隙之间的连通性降低,分形维数较大,孔 隙结构趋于复杂。

(3)随着外荷载的增加,大理岩试样的孔隙度呈 指数增大,经修正后的损伤度与轴压比表现出良好的 正相关;未损和损伤状态下的有效应力比系数与轴压 比关系呈现出指数函数的变化趋势;试样损伤度和有 效应力均随轴向压力的增加而增大。

参考文献(References):

- 【1】 张治亮,徐卫亚,王伟,等. 韧性岩石常规三轴压缩试验及变形与损伤演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(增刊2):3857-3862. [ZHANG Zhiliang, XU Weiya, WANG Wei, et al. Investigation on conventional triaxial compression tests of ductile rock and law of deformation and damage evolution[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Sup 2): 3857 3862.(in Chinese with English abstract)]
- [2] LIU B X, SHU Z L, HAN J J, et al. Real-time CT experimental research on creep microscopic damage evolution of coal rock under compression[J]. Disaster Advances, 2012, 5(4): 667 – 674.
- [3] YANG Y S, LI K Y, ZHOU H, et al. Investigation on the relationship between CT numbers and marble failure under different confining pressures[J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2021, 60(1): 846 – 852.
- [4] LI X M, ZHANG D M, YU G, et al. Research on damage and acoustic emission properties of rock under uniaxial compression[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2021, 39(5): 3549 – 3562.
- [5] 付腾飞,徐涛,朱万成,等.基于多晶离散元法的砂岩 三轴压缩损伤特性[J].东北大学学报(自然科学版),
 2020,41(7):968-974. [FU Tengfei, XU Tao, ZHU Wancheng, et al. Damage compression based on polycrystalline discrete element method[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2020, 41(7): 968-974. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 张国凯,李海波,王明洋,等.岩石单轴压缩下损伤表 征及演化规律对比研究[J].岩土工程学报,2019, 41(6):1074 - 1082. [ZHANG Guokai, LI Haibo, WANG Mingyang, et al. Comparative study on damage characterization and damage evolution of rock under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(6): 1074 - 1082. (in Chinese with

· 96 ·

English abstract)

- [7] 张国凯,李海波,夏祥,等.岩石单轴压缩下能量与损伤演化规律研究[J].岩土力学,2015,36(增刊1):94-100.[ZHANG Guokai, LI Haibo, XIA Xiang, et al. Research on energy and damage evolution of rock under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(Sup 1):94-100. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 李杰林,周科平,张亚民,等.基于核磁共振技术的岩石孔隙结构冻融损伤试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(6):1208-1214.
 [LI Jielin, ZHOU Keping, ZHANG Yamin, et al. Experimental study of rock porous structure damage characteristics under condition of freezing-thawing cycles based on nuclear magnetic resonance technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1208 1214. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 李杰林, 刘汉文, 周科平, 等. 冻融作用下岩石细观结构损伤的低场核磁共振研究[J]. 西安科技大学学报, 2018, 38(2): 266 272. [LI Jielin, LIU Hanwen, ZHOU Keping, et al. An LF-NMR study of the micro-structural deterioration of rocks under the effect of freeze-thaw cycles[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018, 38(2): 266 272. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 许玉娟,周科平,李杰林,等. 冻融岩石核磁共振检测及冻融损伤机制分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 3001-3005. [XU Yujuan, ZHOU Keping, LI Jielin, et al. Study of rock NMR experiment and damage mechanism analysis under freeze-thaw condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 3001 3005. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 张元中,肖立志. 单轴载荷下岩石核磁共振特征的实验研究[J]. 核电子学与探测技术, 2006, 26(6): 731 734. [ZHANG Yuanzhong, XIAO Lizhi. Experimental study of the NMR characteristics in rock under uniaxial load[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2006, 26(6): 731 734. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 周科平,胡振襄,高峰,等.基于核磁共振技术的大理 岩三轴压缩损伤规律研究[J].岩土力学,2014,

35(11); 3117 - 3122. [ZHOU Keping, HU Zhenxiang, GAO Feng, et al. Study of marble damage laws under triaxial compression condition based on nuclear magnetic resonance technique[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(11); 3117 - 3122. (in Chinese with English abstract)]

- [13] ANOVITZ L M, COLE D R. Characterization and analysis of porosity and pore structures[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2015, 80(1): 61 – 164.
- [14] WANG Z L, SHI G Y. Effect of heat treatment on dynamic tensile strength and damage behavior of mediumfine-grained Huashan granite[J]. Experimental Techniques, 2017, 41(4): 365 – 375.
- [15] 郭常霖.多晶材料X射线衍射无标样定量方法[J].无机材料学报,1996,11(1):1-8. [GUO Changlin. X-ray standardless quantitative analysis method for polycrystalline materials[J]. Journal of Inorganic Materials, 1996,11(1):1-8. (in Chinese with English abstract)]
- [16] ONDRÁŠIK M, KOPECKÝ M. Rock pore structure as main reason of rock deterioration[J]. Studia Geotechnica et Mechanica, 2014, 36(1): 79 – 88.
- [17] 胡鑫, 王超勇, 孙强, 等. 核磁共振技术对热解煤孔隙 结构分形特征研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41
 (11): 67-75. [HU Xin, WANG Chaoyong, SUN Qiang, et al. Study on fractal characteristics of pore structure of pyrolysis coal by nuclear magnetic resonance technology[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(11): 67-75. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 王伟祥,王志亮,贾帅龙,等.动态载荷下大理岩断口 形貌特征试验研究[J].水文地质工程地质,2022, 49(3):118-124. [WANG Weixiang, WANG Zhiliang, JIA Shuailong, et al. An experimental study of the fracture morphology of marble under dynamic loading[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(3):118-124. (in Chinese with English abstract)]
- [19] ZHAO G J, CHEN C, YAN H. A thermal damage constitutive model for oil shale based on Weibull statistical theory[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019. https://doi.org/10.1155/2019/4932586

编辑:张明霞