

干湿循环及循环加卸载作用下白云岩力学特性及能量演化规律研究

侯国庆¹, 王运敏^{2,3}, 李小双^{1,4,5*}, 张锋¹, 鲁俊¹

1. 绍兴文理学院, 浙江 绍兴 312000;
2. 金属矿山安全与健康国家重点实验室, 安徽 马鞍山 243000;
3. 中钢集团马鞍山矿山研究总院股份有限公司, 安徽 马鞍山 243000;
4. 常州大学, 江苏 常州 213164;
5. 齐鲁理工学院, 山东 济南 250200



摘要:利用 MTS 815.04 试验系统对经过不同次数干湿循环的白云岩开展了不同围压的循环加卸载试验, 从应力—应变曲线、峰值强度、动态弹性模量、能量演化和耗能比等方面, 探讨了白云岩力学特性和能量演化规律。结果表明: (1) 应力—应变曲线随干湿循环次数的增加表现出内凹的非线性特征; (2) 循环荷载提高了白云岩的承载能力, 循环荷载下的峰值强度超过了相同围压条件下常规压缩的峰值强度; (3) 动态弹性模量在 $0.3\sigma_c$ 、 $0.5\sigma_c$ 和 $0.8\sigma_c$ 应力水平下的变化可划分为强化阶段和弱化阶段, 且随围压的增加而增大, 随干湿循环次数的增加而减小; (4) 总能量和弹性能在循环加卸载中表现出典型的阶梯式上升; (5) 白云岩在首次干湿循环过程中表现出显著的压密效应, 其耗能比高于同一应力水平下的其余循环加卸载过程, 耗能比均值随围压和干湿循环次数的增加以及应力水平的提高而增大。该研究成果为复杂环境的岩石力学特性提供了理论依据, 对矿山边坡的灾害防控具有重要的参考意义。

关键词: 岩石力学; 白云岩; 干湿循环; 循环加卸载; 动态弹性模量; 能量演化

中图分类号: TU45 文献标志码: A 文章编号: 1005-2518(2025)04-0865-12 DOI: 10.11872/j.issn.1005-2518.2025.04.364
引用格式: 侯国庆, 王运敏, 李小双, 等. 干湿循环及循环加卸载作用下白云岩力学特性及能量演化规律研究[J]. 黄金科学技术, 2025, 33(4): 865-876. HOU Guoqing, WANG Yunmin, LI Xiaoshuang, et al. Study on Mechanical Properties and Energy Evolution of Dolomite Under Dry-Wet Cycle and Cyclic Loading and Unloading Effects[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(4): 865-876.

在矿山开采过程中, 边坡岩体会受到频繁爆破的扰动作用, 使得岩体长期处于应力加载与卸载的循环状态, 这种反复的应力作用导致岩体的力学特

性和破坏形式发生显著变化, 并伴随能量转换。同时, 我国南方地区属雨热同期气候, 夏季高温多雨, 频繁受到降雨和暴晒等气候条件的交替影响, 经历

收稿日期: 2024-11-18; 修订日期: 2025-04-25

基金项目: 云南省中央引导地方科技发展项目“重要生态敏感区磷矿山固废充填保水绿色开采技术应用研究”(编号: 202407AC110019)、国家自然科学基金项目“干湿—冷热—循环载荷耦合下高陡岩质边坡裂隙岩体的疲劳失稳机理研究”(编号: 42477142)、“干湿交替—爆破振动耦合下含空区高陡岩体力学响应特征及其失稳机理研究”(编号: 42277154)、贵州省科技计划项目“复杂环境应力下难采胶磷矿露天转地下开采岩体响应特征研究”(编号: 黔科合支撑[2022]一般229)、山东省高等学校青创人才引育计划“边坡安全管控与灾害预防技术创新团队”(编号: 鲁教科函[2021]51号)、山东省自然科学基金项目“露井复合采动下岩体响应的演化特征及其破坏机制研究”(编号: ZR2022ME188)、济南市“新高校20条”科研带头人工作室项目“干湿交替—爆破振动耦合作用下含高陡岩质边坡力学响应特征及其致灾机制研究”(编号: 20228108)和常州大学高层次人才引进项目“降雨入渗与露井复合采动耦合作用下高陡岩质边坡岩体响应的演化特征及其致灾机制研究”(编号: ZMF24020037)联合资助

作者简介: 侯国庆(2000—), 男, 安徽无为, 硕士研究生, 从事矿山岩体力学研究工作。E-mail: onebutcher1001@163.com

***通信作者:** 李小双(1983—), 男, 湖北随州, 教授, 硕士生导师, 从事矿山岩体力学研究工作。E-mail: xsli2011@cczu.edu.cn

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

着干湿循环的交替变化,而干湿循环作为一种累积性发展过程,对岩体的影响不容忽视。因此,通过开展干湿循环及循环加卸载试验,研究白云岩在不同围压条件下的力学特性和能量演化规律,可为干湿循环及循环加卸载领域的理论和应用研究提供重要参考。

为探究干湿循环和循环加卸载作用下岩石的力学特性,国内外学者开展了诸多试验,取得了若干研究进展。早在20世纪50年代,研究人员通过开展室内试验,认为气质崩解和胶体物质消散是岩石遇水崩解的两大机理。目前对于干湿循环条件下岩石力学特性的研究仍以室内试验方法为主,部分学者通过开展干湿循环后红砂岩的常规三轴试验(姚华彦等,2010;张培森等,2021;Chen et al, 2023),系统研究了红砂岩的弹性模量、黏聚力和内摩擦角等力学参数的变化规律。干湿循环作用的影响因素众多,一些学者研究了不同干湿循环次数对岩石强度的影响(刘鹏程等,2020),结果表明:岩石强度随着干湿循环次数的增加而降低,且在第一次干湿循环后降幅最大。Tang et al(2018)认为当干湿循环次数超过某一特性值时,岩石强度并不会一直下降,而是最终趋近于一个稳定值。还有学者研究了水-岩的物理作用、化学作用和力学作用对岩石的影响,包括以砂岩作为研究对象的干湿循环水-岩作用试验(邓华锋等,2012;傅晏等,2017),结合干湿循环和声发射特性,分析砂岩的力学参数和声发射特征(Meng et al, 2020),并研究不同含水状态下岩石的力学特性(Hale et al, 2003;周宇等, 2024),结果表明:干湿循环作用会促进岩石的损伤发展,劣化岩石的力学性能,是岩石内部微裂隙生长和扩展的重要原因。在循环荷载方面,相关研究表明循环荷载是随时间变化且重复的信号,其影响因素包括加载波形、循环次数、应力振幅、应力上下限和频率等(王者超等,2012;王瑞红等,2023)。近年来,为研究循环加卸载条件下岩石力学特性,研究人员开展了循环试验,但研究对象多为单轴循环荷载下的脆性岩石,并未考虑围压的影响(徐速超等,2009;赵博等,2021;Liu et al, 2023)。然而,实际工程中岩体往往处于三向受力状态(Ma et al, 2013),因此部分学者设计了三轴循环试验,开展了不同围压的三轴循环加卸载试验(黄正均等,2018;

赵军等,2020),认为岩石的侧向膨胀在疲劳损伤演化中起主导作用,且岩石的弹性模量和泊松比随着围压的变化呈现先增大后减小的趋势。对于岩石在循环加卸载条件下的力学行为,还可以从能量的角度进行探讨,如通过三轴循环加卸载试验研究了页岩的强度特性和能量演化特征(Li et al, 2022),结果表明耗能比-应变曲线呈“勺形”演化特征。

综上所述,前人研究多集中于干湿循环或循环加卸载的独立研究,推动了对水-岩损伤机制的认识,为循环加卸载下岩石力学特性研究提供了理论基础,但目前相关理论研究还不成熟,且缺少综合考虑干湿循环和循环荷载的系统研究。因此,本文选择经历不同次数干湿循环的白云岩作为研究对象,开展考虑围压因素的循环加卸载试验,旨在研究白云岩的力学特性和能量演化特征。该研究成果为岩体在复杂环境下的力学特性提供了理论依据,并对我国南方相同或类似条件的矿山边坡安全与灾害防控具有重要指导。

1 试验方案

1.1 试样制备

为研究干湿循环及循环加卸载作用下白云岩的力学特性和能量演化规律,在不同围压条件下,对经历不同次数干湿循环的白云岩开展循环加卸载试验。试样岩芯取自云南省云磷集团尖山磷矿,按照国际岩石力学学会建议方法(Fairhurst et al, 2000),将现场取回的白云岩岩芯在实验室内切割打磨成 $\Phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的标准试样(图1),筛除肉眼可见的含节理软弱面的试样,并对加工完成后的标准试样进行波速测试,测得白云岩的平均波速为 $4\ 917\text{ m/s}$,剔除声波波速差异较大的试样,以减小试验过程与结果因受到试样不均质性影响而产生过大差异。

1.2 试验设备

循环加卸载试验采用的仪器是美国MTS公司生产的MTS 815.04试验系统,如图2所示。该仪器由控制系统、油源、加载框架、围压系统和水力系统等部分以及各种传感器组成,其轴向最大荷载可达 $4\ 600\text{ kN}$,最大围压可达 140 MPa ,围压通过液压油泵进行施加。在进行循环加卸载试验之前,为防

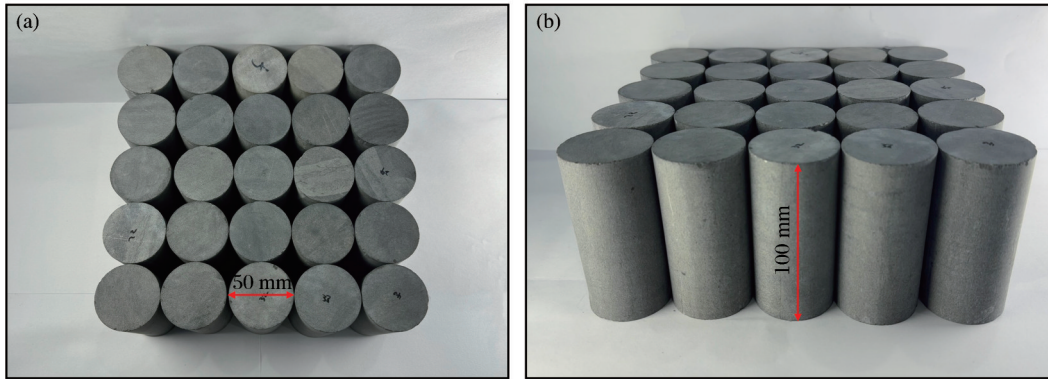


图1 白云岩标准试样

Fig. 1 Dolomite standard specimens

止试样被试验用油侵蚀渗透,先用热缩管裹住试样,再加热热缩管使其与试样紧密贴合,当确认热缩管无破损和无褶皱后,用胶带密封加固热缩管两端。然后,安装轴向引伸计和环向引伸计实时记录试样在试验中的轴向位移、轴力和径向位移等数据,用于测量岩石的变形。最后,将试样固定在三轴室中,通过MTS操作平台控制液压油泵和岩石力学试验机进行循环加卸载试验。

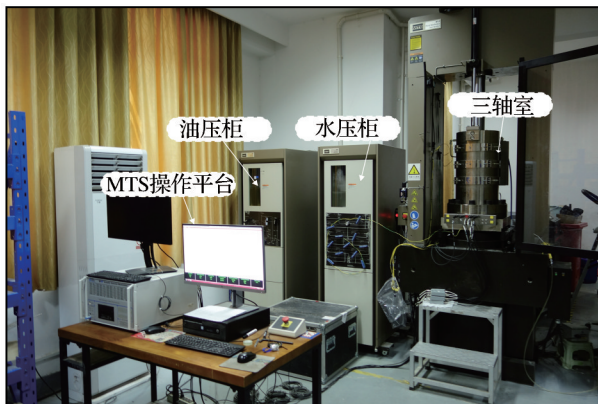


图2 MTS 815.04 试验系统

Fig. 2 MTS 815.04 test system

1.3 试验方案

(1) 干湿循环试验

将筛选后的白云岩标准试件进行标记和编号,分批次放入智能型真空干燥箱中烘干,温度设定为 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$,烘干时间为 24 h ,烘干完成后等待试样冷却至常温,再将试样浸水进行自由吸水 48 h ,上述“干燥—浸水”过程为一次干湿循环,重复该步骤直至达到预设的干湿循环次数。干湿循环次数分别设

置为 0 次、 10 次和 30 次,完成相应干湿循环试验的试样,用保鲜膜包裹保存。

(2) 循环加卸载试验

循环荷载大多属于弹性波,而复杂的弹性波由简单的正弦波组合而成,本研究将爆破过程中频繁的振动作用简化为正弦波形式的三级循环加卸载作用。围压分别设置为 $0, 3, 5\text{ MPa}$,模拟岩石在边坡不同位置的受力状态,对于 0 次干湿交替循环下的试样,测得其在 3 种围压条件下的常规压缩峰值强度 σ_c (表1),以此设计循环加卸载试验的应力振幅上限。选取不同干湿循环次数下波速相近的试样进行循环加卸载试验,每组准备 2 个试样。试验方案如表2所示,图3所示为轴向应力加载过程示意图,加载步骤如下:

表1 常规压缩试验结果

Table 1 Results of conventional compression test

编号	干湿循环 次数/次	围压/MPa	峰值强度 /MPa	峰值应变 /%
A-0-0	0	0	187.17	0.92
A-0-3	0	3	195.96	1.27
A-0-5	0	5	199.95	1.28

①以速率为 0.05 MPa/s 对岩样施加轴压至 1 MPa ,再以同样的速率将围压升至指定围压(围压为 0 MPa 时为单轴试验)。

②稳定围压,以 0.05 MPa/s 的速率加载轴压至应力振幅中间值,以 $0.3\sigma_c, 0.5\sigma_c$ 和 $0.8\sigma_c$ 作为三级应力振幅上限进行循环加卸载试验, 1 MPa 作为应力振幅下限,频率为 0.8 Hz ,每级循环 30 次。

③若循环加卸载试验结束后试样没有破坏,则

表2 三轴循环加卸载试验方案

Table 2 Triaxial cyclic loading and unloading test programme

编号	干湿循环次数/次	围压/MPa	三级应力上限/MPa			荷载控制加载时间/min			应力下限/MPa
			$0.3\sigma_c$	$0.5\sigma_c$	$0.8\sigma_c$	I	II	III	
B-0-0	0	0	56.15	93.59	149.74	8.86	15.10	24.46	1
B-0-3	0	3	58.79	97.98	156.77	9.30	15.83	25.63	1
B-0-5	0	5	59.99	99.98	159.96	9.50	16.16	26.16	1
B-10-0	10	0	56.15	93.59	149.74	8.86	15.10	24.46	1
B-10-3	10	3	58.79	97.98	156.77	9.30	15.83	25.63	1
B-10-5	10	5	59.99	99.98	159.96	9.50	16.16	26.16	1
B-30-0	30	0	56.15	93.59	149.74	8.86	15.10	24.46	1
B-30-3	30	3	58.79	97.98	156.77	9.30	15.83	25.63	1
B-30-5	30	5	59.99	99.98	159.96	9.50	16.16	26.16	1

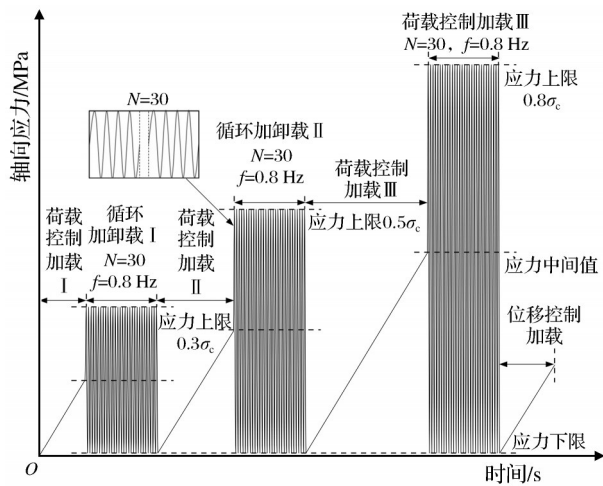


图3 轴向应力加载过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of axial stress loading process

在第三级循环结束后,将轴向荷载卸载至0,再以0.001 mm/s的位移速率控制加载轴压直至岩样破坏。

2 试验结果分析

2.1 应力—应变曲线特征分析

图4~图6所示为不同围压及不同干湿循环次数条件下循环加卸载试验的应力—应变曲线。由图4~图6可知,在0次干湿循环条件下,白云岩的应力—应变曲线呈现出较为线性的弹性特征,弹性模量较高,随着干湿循环次数的增加,应力—应变曲线表现出内凹的非线性特征。由于白云岩本身含有裂隙和节理等缺陷,在循环加卸载过程中,再加载的曲线与卸载曲线不会完全重合,而是与卸载

曲线相交,形成滞回环,随着循环次数的增加,滞回环向应变增加方向偏移。图7所示为试样B-0-0每一级应力水平的第一个滞回环,滞回环的面积随着应力水平的提高而显著增大。形状呈“弯月”形,表明应力幅值越高,岩石内部的损伤越大。随着循环加卸载的进行,岩石内部累积损伤逐步加剧,由此引发的不可逆变形量持续增大,进而导致消耗的能量也增多。

2.2 峰值强度特征分析

表3所示为不同条件下的循环加卸载试验结果,在0次干湿循环条件下,白云岩的峰值强度由围压为0 MPa时的209.05 MPa上升至围压为5 MPa时的234.81 MPa,峰值强度与围压呈正相关关系。与常规压缩试验结果(表1)进行对比,发现循环加卸载试验下白云岩的峰值强度超过相同围压条件下常规压缩的峰值强度。这表明在循环加载过程中,含有天然微裂纹和孔隙的白云岩在轴向荷载作用下,其矿物颗粒局部接触应力往往高于名义应力,在内部会出现局部破坏,卸载过程中原本压密的结构得到“释放”,产生的碎屑容易脱落并填充至附近的孔隙中,从而改善矿物颗粒之间的接触状态,提高了白云岩的极限承载能力(邓华锋等,2015),宏观上表现为微裂纹和孔隙逐渐减小甚至闭合,以及峰值强度升高。在围压为0 MPa、3 MPa和5 MPa条件下,白云岩在循环加卸载试验中的强化幅度分别为11.69%、12.81%和17.43%,强化幅度随着围压的增加而增大,在此过程中,围压通过对白云岩施加侧向约束作用,有效延缓了其破坏过程,因

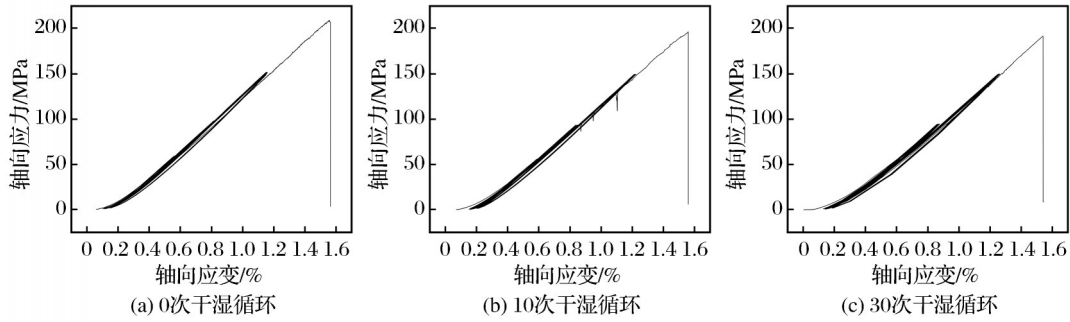


图4 围压为0 MPa时应力—应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves for 0 MPa confining pressure

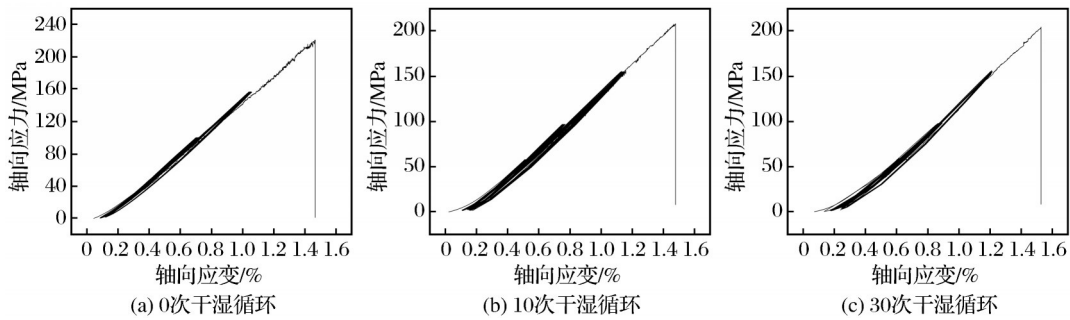


图5 围压为3 MPa时应力—应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves for 3 MPa confining pressure

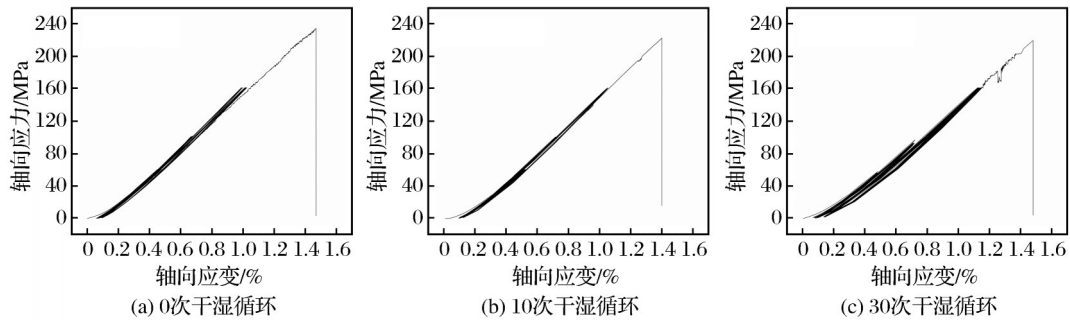


图6 围压为5 MPa时应力—应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves for 5 MPa confining pressure

此白云岩能够承受更高的轴向荷载而不发生破坏。

以未经过干湿循环的试验结果作为标准值,通过计算劣化度来衡量干湿循环作用对岩石强度的劣化程度,计算公式为

$$D_a = \frac{\sigma_0 - \sigma_1}{\sigma_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$D_s = D_a - D_{a-1} \quad (2)$$

式中: D_a 为相同围压条件下不同干湿循环次数相比于未经过干湿循环的白云岩峰值强度的总劣化度; D_s 为该阶段的劣化度。

图8所示为不同围压及不同干湿循环次数条件下白云岩峰值强度的劣化度及拟合曲线。由图8可知,当围压为0 MPa时,白云岩的总劣化度高于围压为3 MPa和5 MPa的情况,在30次干湿循环时,总劣化度由5 MPa围压下的8.24%降至0 MPa围压下的6.41%,说明围压减缓了白云岩的劣化。白云岩峰值强度的总劣化度与干湿循环次数的拟合曲线呈指数关系,曲线的斜率随干湿循环次数的增加而减小,总劣化度增幅减缓,而阶段劣化度呈现出先增大后减小的变化趋势。由图8可以看出,

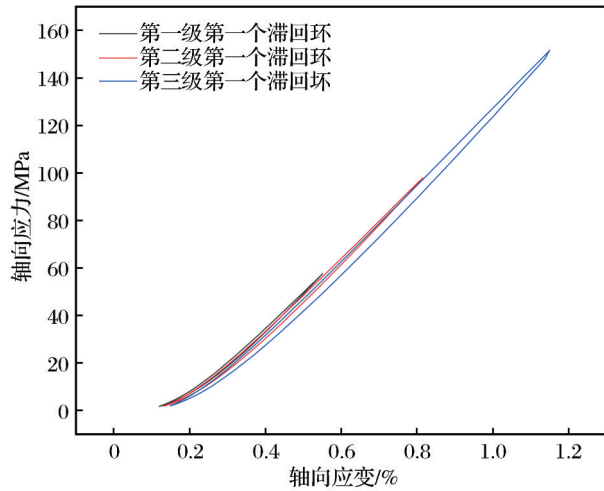


图7 试样B-0-0的滞回环

Fig. 7 Hysteresis loop of specimen B-0-0

表3 循环加卸载试验结果

编号	干湿循环次数/次	围压/MPa	峰值强度 /MPa	峰值应变 /%
B-0-0	0	0	209.05	1.56
B-10-0	10	0	196.56	1.56
B-30-0	30	0	191.82	1.54
B-0-3	0	3	221.07	1.47
B-10-3	10	3	208.19	1.48
B-30-3	30	3	204.58	1.53
B-0-5	0	5	234.81	1.46
B-10-5	10	5	222.60	1.40
B-30-5	30	5	219.76	1.47

白云岩在10次干湿循环阶段的劣化度高于30次干湿循环阶段,总劣化度在经历30次干湿循环后达到最大值,表明劣化作用随着干湿循环次数的增加而逐渐减弱。

2.3 动态弹性模量特征分析

动态弹性模量能够反映岩石抵抗变形的能力,是描述岩石在循环加卸载过程中弹性恢复能力的重要物理参数。图9所示为循环加卸载的滞回环示意图。

其中,A点表示应力振幅的最高点,即加载的终点和卸载的起点;B点表示应力振幅的最低点,即再加载的起点;C点表示卸载曲线和再加载曲线的交点,直线BC的斜率就是滞回环的动态弹性模量。 ε_b 和 σ_b 分别表示B点对应的轴向应变和轴

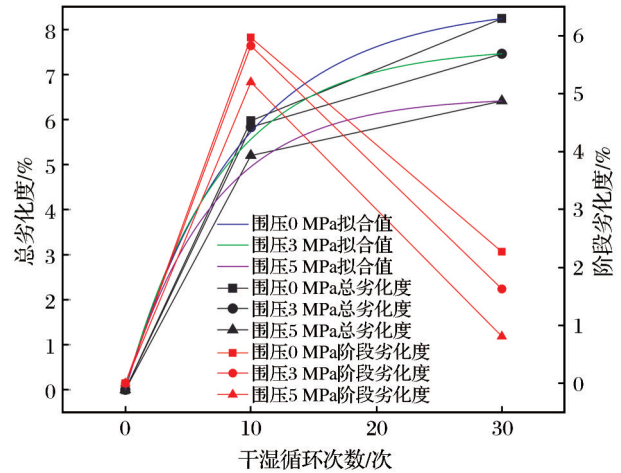


图8 白云岩峰值强度劣化度

Fig. 8 Deterioration degree of peak strength of dolomite

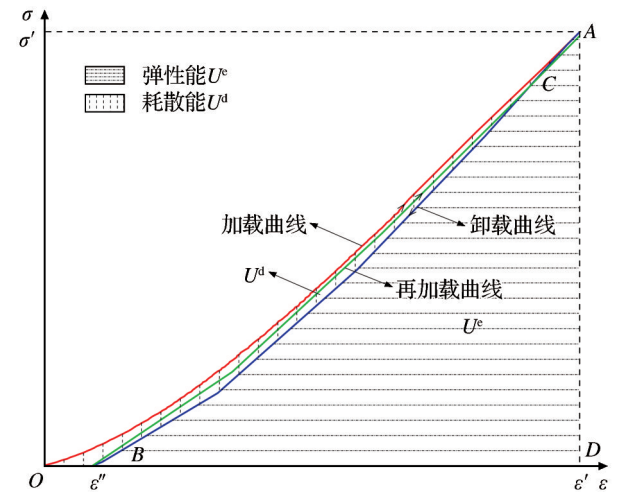


图9 循环加卸载的滞回环示意图

Fig. 9 Schematic diagram of hysteresis loop for cyclic loading and unloading

向应力, ε_c 和 σ_c 分别表示C点对应的轴向应变和轴向应力,因此,滞回环的动态弹性模量计算公式为

$$E_d = \frac{\sigma_c - \sigma_b}{\varepsilon_c - \varepsilon_b} \quad (3)$$

选取每个应力水平下第1、5、9、13、17、21、25、30次循环的数据,绘制白云岩在不同围压及不同干湿循环次数条件下动态弹性模量随循环周数的变化曲线,如图10所示。通过对比不同围压条件下白云岩的动态弹性模量发现,动态弹性模量随着围压的增加而增大,这是由于轴向施加的荷载在白云岩的极限承载能力范围之内,围压会限制试样发生

应变,从而提高了白云岩抵抗变形的能力,且围压越大,围压对白云岩的保护作用就越强。在相同围压条件下,经历更多干湿循环次数的白云岩,其动态弹性模量越小。这表明水分子进入白云岩后,内部的裂隙因充水膨胀增大了裂隙的宽度;在干燥处理时,岩石内部出现失水收缩现象,弱胶结物和松散颗粒随着水分子的蒸发而逐渐流失,在干湿循环的劣化作用下,白云岩的内部结构变得松散,削弱了矿物颗粒之间的胶结能力(刘新荣等,2016),宏观上表现为动态弹性模量随着干湿循环次数的增加而降低。

总体而言,白云岩的动态弹性模量变化趋势在

不同条件下呈现出较强的一致性。在 $0.3\sigma_c$ 应力水平时,循环荷载通过压密岩石内部的裂纹以及碎屑的填充,提高了白云岩的承载能力,使其动态弹性模量上升;当轴向荷载提高至 $0.5\sigma_c$ 和 $0.8\sigma_c$ 应力水平时,白云岩的动态弹性模量随着循环次数的增加而逐渐下降,这是由于施加的循环荷载逐渐接近其极限承载能力,更高的应力水平会对岩石造成损伤,在循环加卸载过程中,岩石内部的损伤不断累积,出现局部接触变形和裂纹扩展,导致白云岩抵抗变形的能力降低。因此,将动态弹性模量随应力水平的变化划分为2个阶段:在 $0.3\sigma_c$ 应力水平时,为强化阶段;在 $0.5\sigma_c$ 和 $0.8\sigma_c$ 应力水平时,为弱化阶段。

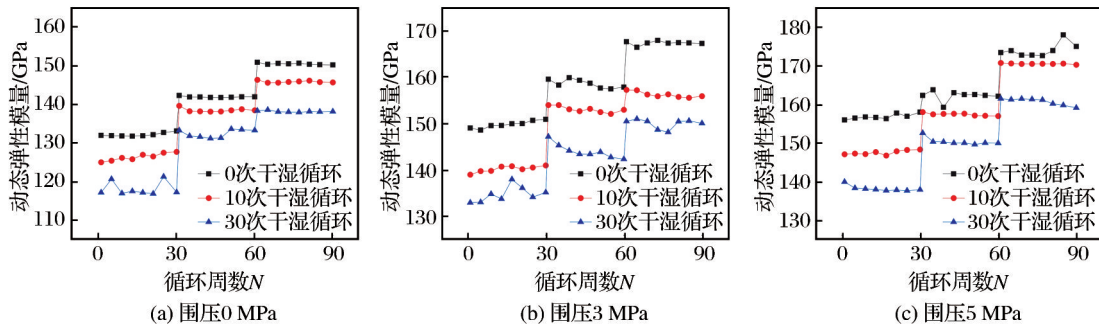


图10 动态弹性模量与循环周数的关系曲线

Fig. 10 Relationship curves between dynamic elastic modulus and cycle numbers

3 循环加卸载作用下能量演化规律研究

3.1 能量计算方法

岩石是由天然地质材料组成的,其内部充满了各种缺陷,包括预先存在的微裂纹(Zhang et al, 2024)。在外加应力作用下,这些微裂纹逐渐扩展为局部裂缝,最终合并、贯通,导致周围岩体产生失稳现象。岩石的破坏机制与能量转换密切联系,岩石在荷载作用下的变形与破坏过程,实际上是能量相互转化的过程。假设试验是在一个孤立的系统中进行的,荷载作用过程中不存在与外界的热交换,根据能量守恒定律,岩石中的总能量在整个过程中保持恒定。对于岩石而言,外界所输入的总能量 U 转化为可恢复的弹性能 U^e 和不可恢复的耗散能 U^d (王梦想等,2024),总能量 U 计算公式为

$$U = U^e + U^d \quad (4)$$

在循环加卸载过程中,岩石在受荷载作用时吸

收的总能量可通过应力—应变曲线下的面积来计算,如图9所示。总能量 U 的计算公式为

$$U = \int_0^{\varepsilon_1'} \sigma_1 d\varepsilon_1 + \int_0^{\varepsilon_2'} \sigma_2 d\varepsilon_2 + \int_0^{\varepsilon_3'} \sigma_3 d\varepsilon_3 \quad (5)$$

式中: σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别为第一、第二和第三主应力; ε_1 、 ε_2 和 ε_3 分别为在第一、第二和第三主应力方向上形成的应变。在三轴压缩荷载作用下,第二和第三主应力相等,即 $\sigma_2 = \sigma_3$,此时总能量 U 的计算公式可简化为

$$U = \int_0^{\varepsilon_1'} \sigma_1 d\varepsilon_1 + 2 \int_0^{\varepsilon_3'} \sigma_3 d\varepsilon_3 \quad (6)$$

受荷载作用时储存的弹性能是可恢复的,通过计算应力—应变曲线中滞回线下的面积大小,以此来表示弹性能的大小(肖福坤等,2014),弹性能 U^e 可表示为

$$U^e = \int_{\varepsilon_1''}^{\varepsilon_1'} \sigma_1 d\varepsilon_1 + \int_{\varepsilon_3''}^{\varepsilon_3'} \sigma_3 d\varepsilon_3 \quad (7)$$

耗散能 U^d 为总能量 U 与弹性能 U^e 的差值,结合

式(6)和式(7)可得到耗散能,表示为

$$U^d = \int_0^{\varepsilon_1^i} \sigma_1 d\varepsilon_1 + 2 \int_0^{\varepsilon_3^i} \sigma_3 d\varepsilon_3 - \int_{\varepsilon_1^r}^{\varepsilon_1^i} \sigma_1 d\varepsilon_1 - 2 \int_{\varepsilon_3^r}^{\varepsilon_3^i} \sigma_3 d\varepsilon_3 \quad (8)$$

3.2 能量演化特征研究

图 11~图 13 所示为白云岩在不同围压条件下循环加卸载过程中的能量演化曲线。由图 11~图 13 可以看出,白云岩的总能量和弹性能是相近的,在分级加载过程中表现为典型的阶梯式上升,反映出白云岩在分级加载过程中能量的持续累积,且大部分能量是以弹性能的形式储存起来。通过观察总能量和耗散能的放大图可以发现,每一级应力水平下首次循环的总能量和耗散能均出现显著跃升,随着循环加卸载的进行,总能量和耗散能迅速下降,并围绕某个数值上下波动,而弹性能的变化则较为稳定。这是由于首次加载时白云岩内部裂隙和孔隙压缩变化最大,造成不可恢复的变形。在后续的循环荷载作用下,白云岩内部结构经过多

次调整,使得初始状态下较为松散的颗粒结构逐渐被压密,不可逆变形逐渐接近当前应力水平下的极限状态,其内部结构趋于稳定,后续循环加卸载虽有应变的产生,但增量小于首次循环。

当围压从 0 MPa 增加至 5 MPa 时,总能量、弹性能和耗散能均有所上升,表明围压不仅提高了白云岩的承载能力,还提高了其吸收能量的能力。由于围压对白云岩的侧向保护作用,使得裂纹扩展发育时需要消耗更多的能量,从而导致耗散能增加。在相同围压条件下,随着干湿循环次数的增加,干湿循环的累积劣化作用使得白云岩在加载过程中产生更多的不可逆变形,其内部的裂纹数量不断增加,孔隙体积增大,且循环荷载的应力水平越高,消耗的能量越多,在 $0.8\sigma_c$ 应力水平时达到最大值。这是因为应力水平越接近白云岩的极限承载能力时,循环荷载对岩石造成的损伤越大,因此耗散能随着干湿循环次数的增加和应力水平的提高而不断增大。

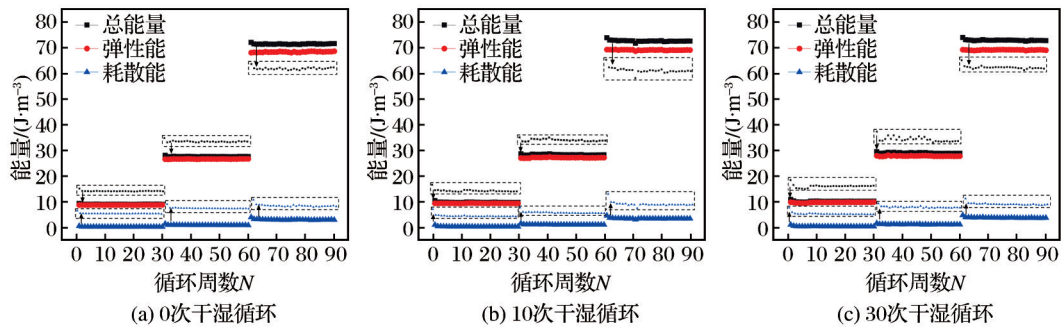


图 11 围压为 0 MPa 时能量演化曲线

Fig. 11 Energy evolution curves for 0 MPa confining pressure

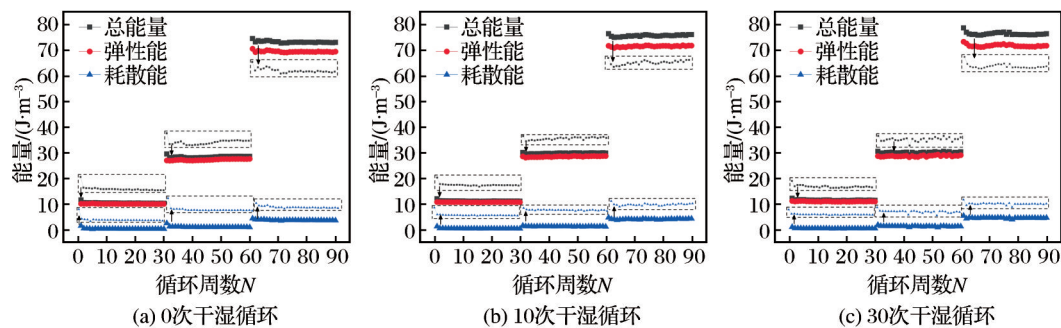


图 12 围压为 3 MPa 时能量演化曲线

Fig. 12 Energy evolution curves for 3 MPa confining pressure

3.3 耗能比特征研究

为进一步研究白云岩在不同干湿循环次数及

不同围压条件下循环加卸载过程中的损伤,引入耗能比 η , 其计算公式为

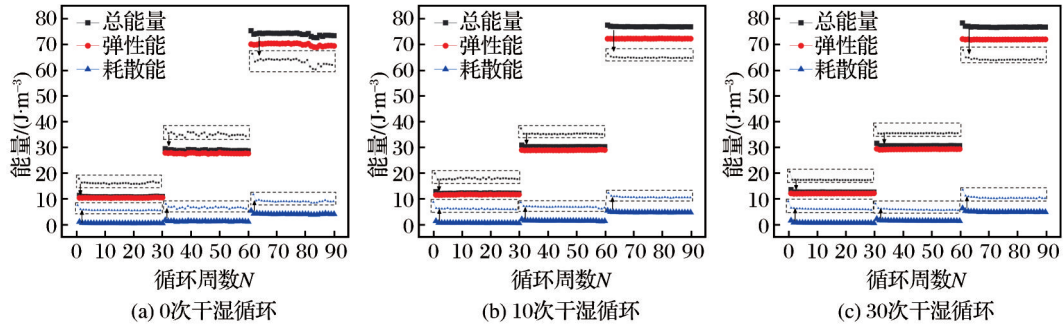


图13 围压为5 MPa时能量演化曲线

Fig. 13 Energy evolution curves for 5 MPa confining pressure

$$\eta = \frac{U_i^d}{U_i} \times 100\% \quad (9)$$

式中: U_i^d 为第 i 次循环加卸载的耗散能; U_i 为第 i 次循环加卸载的总能量。

选取每个应力水平下第 1、5、9、13、17、21、25、30 次循环的数据, 利用式(9)计算得到白云岩在不同条件下的耗能比, 并根据计算结果绘制耗能比与循环周数的关系曲线(图 14)。由图 14 可以看出, 在不同应力水平条件下, 每一级应力水平下首次循环加卸载的耗能比为这一应力水平中的最大值, 表明首次加载时产生的不可逆变形较大, 更多的耗散能用于裂纹的压密与扩展。随着循环加卸载的进行, 耗能比迅速下降, 并趋于稳定, 意味着在后续试验过程中, 白云岩的内部结构得到调整, 产生的不可逆变形逐渐减小, 耗散能量较少, 大部分能量仍以弹性能的形式储存。这种现象在应力水平为 $0.3\sigma_c$ 时最为显著, 首次循环加卸载的耗能比高于这一应力水平下其余循环加卸载。这是由于白云岩本身是一种含有裂隙、孔隙和节理等缺陷的非理想性材料, 在循环加卸载之前并不是处于压密状

态, 首次循环加载时, 裂纹闭合明显, 且在卸载时裂纹不能完全“舒张”, 总体上处于压密状态, 而在 $0.5\sigma_c$ 和 $0.8\sigma_c$ 应力水平时, 首次循环加载时岩石的压密作用不如 $0.3\sigma_c$ 应力水平条件下。因此, 首次循环加卸载的耗能比高于这一应力水平下其余循环加卸载, 且 $0.3\sigma_c$ 应力水平时首次循环加卸载的耗能比远高于 $0.5\sigma_c$ 和 $0.8\sigma_c$ 应力水平。当应力水平为 $0.3\sigma_c$ 时, 白云岩在围压为 0 MPa、3 MPa 和 5 MPa 以及 0 次干湿循环条件下的耗能比均值分别为 3.46%、4.23% 和 4.38%, 在 30 次干湿循环条件下的耗能比均值分别为 4.41%、4.83% 和 5.06%, 耗能比均值随着围压的增加而增大, 可见围压的存在使得白云岩在压密裂纹与裂纹面之间的摩擦及滑移所消耗的能量增加。当循环荷载提高后, 耗能比均值也随之提高, 表明循环荷载加剧了白云岩的损伤, 导致以不可逆形式消耗的能量增加。通过对比不同干湿循环次数条件下的耗能比均值发现, 干湿循环次数越多, 耗能比均值越高。这是由于干湿循环的累积劣化作用造成白云岩内部结构中的松散颗粒增多, 矿物颗粒之间的胶结能力不断减弱, 随着

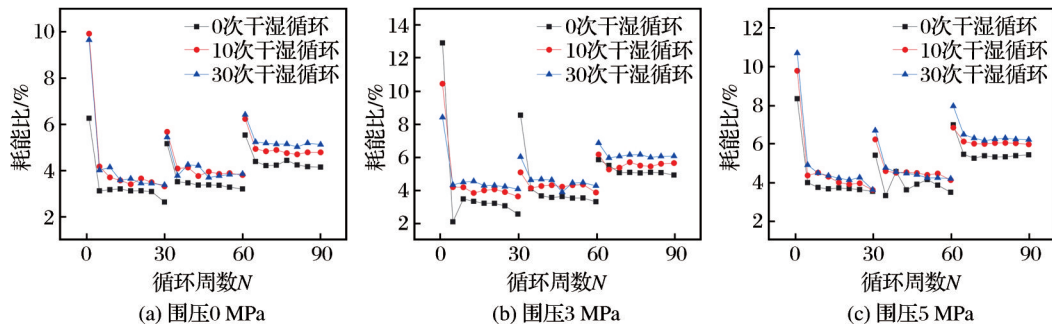


图14 耗能比与循环周数的关系曲线

Fig. 14 Relationship curves between energy consumption ratio and cycle numbers

干湿循环次数的增加,岩样内部损伤劣化程度加剧,进而在循环加卸载过程中消耗更多的能量,促使新生裂纹的产生以及既有裂纹的起裂与扩展。

4 结论

利用 MTS 815.04 试验系统对经历过干湿循环的白云岩进行不同围压条件下的循环加卸载试验,探究了白云岩在循环加卸载过程中的力学特性和能量演化规律,得出以下结论:

(1) 应力—应变曲线随着干湿循环表现出内凹的非线性特征,滞回环呈“弯月”形,其面积随着应力水平的提高而显著增大。

(2) 在循环加卸载作用下,白云岩的峰值强度超过相同围压条件下常规压缩的峰值强度,在 0 MPa、3 MPa 和 5 MPa 条件下强化幅度分别为 11.69%、12.81% 和 17.43%,峰值强度随着围压的增加而增大,随着干湿循环次数的增加而减小,总劣化度随着干湿循环次数的增加而增大,但增加幅度减小,阶段劣化度呈现出先增大后减小的变化趋势,干湿循环的劣化作用逐渐减弱。

(3) 动态弹性模量在应力水平不同时变化不一致,按照不同应力水平可划分为 2 个阶段,即在 $0.3\sigma_c$ 应力水平时为强化阶段,在 $0.5\sigma_c$ 和 $0.8\sigma_c$ 应力水平时为弱化阶段。

(4) 总能量和弹性能在循环加卸载过程中表现为典型的阶梯式上升,能量主要以弹性能的形式储存,白云岩在首次循环的压密作用明显,用于裂纹压密的能量增加,耗能比高于同一应力水平下其余循环加卸载,耗能比均值随着围压和干湿循环次数的增加以及应力水平的提高而增大。

(5) 在后续研究中,可以考虑循环次数、频率和应力级数等因素在循环加卸载试验中对岩石力学特性和能量演化规律的影响。

参考文献 (References):

Chen C, Zhao B Y, Zhang L Y, et al, 2023. Mechanism of strength deterioration of red sandstone on reservoir bank slopes under the action of dry-wet cycles[J]. Scientific Reports, 13:20027.

Fairhurst C E, Hudson J A, 2000. Draft ISRM recommended

method for the determination of full stress-strain curves in intact rocks by uniaxial compression tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, (6):802-808.

Hale P A, Shakoor A, 2003. A laboratory investigation of the effects of cyclic heating and cooling, wetting and drying, and freezing and thawing on the compressive strength of selected sandstones[J]. Environmental and Engineering Geoscience, 9(2): 117-130.

Li Z Y, Xie S, Song Q H, et al, 2022. Energy dissipation and damage evolution characteristics of shale under triaxial cyclic loading and unloading[J]. Advances in Materials Science and Engineering, (1): 1212584.

Liu Z X, Liu X D, 2023. Evolution of residual strain and strain energy in rocks under various types of uniaxial cyclic loading-unloading[J]. Frontiers in Earth Science, 11: 1243909.

Ma L J, Liu X Y, Wang M Y, et al, 2013. Experimental investigation of the mechanical properties of rock salt under triaxial cyclic loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 62: 34-41.

Meng Y Y, Jing H W, Yin Q, et al, 2020. Investigation on mechanical and AE characteristics of yellow sandstone undergoing wetting-drying cycles[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 24(11): 3267-3278.

Tang S B, Yu C Y, Heap M J, et al, 2018. The influence of water saturation on the short- and long-term mechanical behavior of red sandstone[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 51(9): 2669-2687.

Zhang J R, Luo Y, Gong H L, et al, 2024. Characteristics of energy evolution and failure mechanisms in sandstone subject to triaxial cyclic loading and unloading conditions[J]. Applied Sciences, 14(19): 8693.

邓华锋, 李建林, 王孔伟, 等, 2012. 饱和—风干循环过程中砂岩次生孔隙率变化规律研究[J]. 岩土力学, 33(2): 483-488. Deng Huafeng, Li Jianlin, Wang Kongwei, et al, 2012. Research on secondary porosity changing law of sandstone under saturation-air dry cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 33(2): 483-488.

邓华锋, 肖志勇, 李建林, 等, 2015. 水岩作用下损伤砂岩强度劣化规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 34(增刊 1): 2690-2698. Deng Huafeng, Xiao Zhiyong, Li Jianlin, et al, 2015. Experimental study on strength deterioration law of damaged sandstone under water-rock action[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 34 (Suppl.1): 2690-2698.

傅晏, 王子娟, 刘新荣, 等, 2017. 干湿循环作用下砂岩微观

- 损伤演化及宏观劣化研究[J]. 岩土工程学报, 39(9): 1653-1661. Fu Yan, Wang Zijuan, Liu Xinrong, et al, 2017. Meso damage evolution characteristics and macro degradation of sandstone under wetting-drying cycles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 39(9): 1653-1661.
- 黄正均, 赵星光, 张磊, 2018. 不同围压下花岗岩三轴压缩疲劳特性试验[J]. 实验室研究与探索, 37(8): 15-19. Huang Zhengjun, Zhao Xingguang, Zhang Lei, 2018. Experiment on the fatigue characteristics of granite under different confining pressures [J]. Research and Exploration in Laboratory, 37(8): 15-19.
- 刘鹏程, 黄武峰, 包太, 等, 2020. 泥质白云岩干湿循环力学特性试验研究及其本构模型[J]. 长江科学院院报, 37(8): 101-105, 112. Liu Pengcheng, Huang Wufeng, Bao Tai, et al, 2020. Experimental study on mechanical properties of argillaceous dolomite under dry-wet cycles and its constitutive model [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 37(8): 101-105, 112.
- 刘新荣, 李栋梁, 张梁, 等, 2016. 干湿循环对泥质砂岩力学特性及其微观结构影响研究[J]. 岩土工程学报, 38(7): 1291-1300. Liu Xinrong, Li Dongliang, Zhang Liang, et al, 2016. Influence of wetting-drying cycles on mechanical properties and microstructure of shaly sandstone [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 38(7): 1291-1300.
- 王梦想, 王浩, 马守龙, 等, 2024. 三轴分级循环加卸载下爆破损伤顶板砂岩能量耗散试验研究[J]. 振动与冲击, 43(16): 227-237. Wang Mengxiang, Wang Hao, Ma Shoulong, et al, 2024. Blast damage to sandstone of top slab under triaxial graded cyclic loading and an unloading experimental study on energy dissipation [J]. Journal of Vibration and Shock, 43(16): 227-237.
- 王瑞红, 危灿, 刘杰, 等, 2023. 循环加卸载下节理砂岩宏观损伤破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 42(4): 810-820. Wang Ruihong, Wei Can, Liu Jie, et al, 2023. Macro and micro characteristics of jointed sandstone under cyclic loading and unloading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 42(4): 810-820.
- 王者超, 赵建纲, 李术才, 等, 2012. 循环荷载作用下花岗岩疲劳力学性质及其本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 31(9): 1888-1900. Wang Zhechao, Zhao Jianguang, Li Shucai, et al, 2012. Fatigue mechanical behavior of granite subjected to cyclic load and its constitutive model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 31(9): 1888-1900.
- 肖福坤, 申志亮, 刘刚, 等, 2014. 循环加卸载中滞回环与弹塑性应变能关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 33(9): 1791-1797. Xiao Fukun, Shen Zhiliang, Liu Gang, et al, 2014. Relationship between hysteresis loop and elastoplastic strain energy during cyclic loading and unloading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 33(9): 1791-1797.
- 徐速超, 冯夏庭, 陈炳瑞, 2009. 矽卡岩单轴循环加卸载试验及声发射特性研究[J]. 岩土力学, 30(10): 2929-2934. Xu Suchao, Feng Xiating, Chen Bingrui, 2009. Experimental study of skarn under uniaxial cyclic loading and unloading test and acoustic emission characteristics [J]. Rock and Soil Mechanics, 30(10): 2929-2934.
- 姚华彦, 张振华, 朱朝辉, 等, 2010. 干湿交替对砂岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 31(12): 3704-3708, 3714. Yao Huayan, Zhang Zhenhua, Zhu Chaohui, et al, 2010. Experimental study of mechanical properties of sandstone under cyclic drying and wetting [J]. Rock and Soil Mechanics, 31(12): 3704-3708, 3714.
- 张培森, 赵成业, 李腾辉, 等, 2021. 红砂岩三轴加载过程中波速变化及能量演化规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 40(7): 1369-1382. Zhang Peisen, Zhao Chengye, Li Tenghui, et al, 2021. Experimental study on wave velocity variation and energy evolution of red sandstone during triaxial loading process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 40(7): 1369-1382.
- 赵博, 徐涛, 杨圣奇, 等, 2021. 循环载荷作用下高应力岩石疲劳损伤破坏数值模拟与试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 52(8): 2725-2735. Zhao Bo, Xu Tao, Yang Shengqi, et al, 2021. Experimental and numerical study of fatigue damage of highly stressed rocks under cyclic loading [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 52(8): 2725-2735.
- 赵军, 郭广涛, 徐鼎平, 等, 2020. 三轴及循环加卸载应力路径下深埋硬岩变形破坏特征试验研究[J]. 岩土力学, 41(5): 1521-1530. Zhao Jun, Guo Guangtao, Xu Dingping, et al, 2020. Experimental study of deformation and failure characteristics of deeply-buried hard rock under triaxial and cyclic loading and unloading stress paths [J]. Rock and Soil Mechanics, 41(5): 1521-1530.
- 周宇, 李旭, 张鹏姣, 等, 2024. 水化作用下矽卡岩动态力学响应及能量耗散特征[J]. 黄金科学技术, 32(4): 610-619. Zhou Yu, Li Xu, Zhang Pengjiao, et al, 2024. Dynamic mechanical response and energy dissipation characteristics of skarn under hydration [J]. Gold Science and Technology, 32(4): 610-619.

Study on Mechanical Properties and Energy Evolution of Dolomite Under Dry-Wet Cycle and Cyclic Loading and Unloading Effects

HOU Guoqing¹, WANG Yunmin^{2,3}, LI Xiaoshuang^{1,4,5}, ZHANG Feng¹, LU Jun¹

1. Shaoxing University, Shaoxing 312000, Zhejiang, China;

2. State Key Laboratory of Safety and Health for Metal Mine, Ma'anshan 243000, Anhui, China;

3. Sinosteel Ma'anshan Institute of Mining Research Co., Ltd., Ma'anshan 243000, Anhui, China;

4. Changzhou University, Changzhou 213164, Jiangsu, China;

5. Qilu Institute of Technology, Jinan 250200, Shandong, China

Abstract: To examine the mechanical properties and energy evolution of dolomite subjected to dry-wet cycles and cyclic loading and unloading, a series of conventional compression tests were conducted using the MTS 815.04 test system. These tests were performed under varying confining pressures, specifically utilizing $0.3\sigma_c$, $0.5\sigma_c$, and $0.8\sigma_c$ as the upper limits of the tertiary stress for hierarchical cyclic loading and unloading. The lower limit of the stress amplitude was set at 1 MPa, and the cyclic loading and unloading frequency was maintained at 0.8 Hz, with 30 cycles executed at each stress level. Triaxial cyclic loading and unloading tests were conducted on dolomite samples that had undergone different numbers of dry-wet cycles to analyze and discuss the stress-strain curves, peak strength, dynamic modulus of elasticity, energy evolution, and energy consumption ratio characteristics. The findings indicate that the stress-strain curves of dolomite subjected to dry-wet cycles exhibit a concave and non-linear nature, with hysteresis loops resembling a “curved moon” shape. Under cyclic loading and unloading, the peak strength surpasses that observed in conventional compression at identical confining pressures, with enhancements of 11.69%, 12.81%, and 17.43%, respectively. The peak strength increases with rising confining pressure but decreases as the number of dry-wet cycles increases. Although total deterioration intensifies with more dry-wet cycles, the rate of increase diminishes, indicating a gradual weakening of the deterioration effect. The dynamic modulus of elasticity exhibits variable changes across different stress levels, showing a strengthening phase at a $0.3\sigma_c$ stress level and a weakening phase at $0.5\sigma_c$ and $0.8\sigma_c$ stress levels. Both total and elastic energies demonstrate a characteristic stepwise increase with escalating stress levels, with the highest energy dissipation ratio occurring during the first cycle at any given stress level. The mean energy dissipation ratio rises with increasing confining pressure, the number of dry-wet cycles, and stress levels. The findings of this study offer a theoretical foundation for understanding the mechanical properties of rocks in complex environments, and has great reference significance for the disaster prevention and control of mine slopes.

Key words: rock mechanics; dolomite; dry-wet cycle; cyclic loading and unloading; dynamic modulus of elasticity; energy evolution