

# 流变扰动条件下红砂岩敏感邻域范围试验

王 波<sup>1</sup>, 田志银<sup>1</sup>, 马世纪<sup>1</sup>, 任永政<sup>1</sup>, 高翔宇<sup>1</sup>, 孙宏旭<sup>1</sup>, 黄万朋<sup>2</sup>, 王 军<sup>3</sup>

(1. 华北科技学院 应急管理与技术学院, 河北 三河 101601; 2. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590;  
3. 山东建筑大学 土木工程学院, 山东 济南 250101)

**摘 要:**在扰动载荷作用下, 处于“敏感邻域”内的流变岩体容易发生变形破坏, 为深入研究围压对扰动“敏感邻域”范围的影响规律, 以红砂岩为研究对象, 使用 RRTS-IV 型岩石流变扰动效应试验系统, 对不同围压和轴压作用下的流变岩体进行扰动冲击试验, 观察轴向扰动应变随轴压的变化规律, 并分析不同围压条件下“敏感邻域”的变化情况, 利用核磁共振分析系统, 对比分析流变岩体在不同围压条件下, 处于敏感区和非敏感区的流变岩体在扰动前后的孔隙率、 $T_2$  谱曲线、谱峰面积和孔径分布的变化规律。试验结果表明:当围压保持恒定, 轴向扰动应变值随轴压的增大呈现出先降后升的非线性趋势, 且当作用于流变岩体上的轴压越接近于该围压条件下的长期强度时, 动态扰动所产生的轴向扰动应变值越大。处于不同围压条件下流变岩体, 会存在一个敏感过渡点( $\sigma_m$ ), 它决定了流变岩体对动态扰动的敏感程度。当 $\sigma_1 < \sigma_m$ 时, 流变岩体的敏感程度随轴压的增大而减小, 当 $\sigma_1 \geq \sigma_m$ 时, 流变岩体的敏感程度随轴压的增大而增大, 并根据流变岩体的敏感程度不同划分出 3 个敏感区域:  $R_1$  非敏感区、 $R_2$  敏感区和  $R_3$  蠕变破坏区。确定了敏感邻域的范围( $\Delta\sigma$ )应介于长期强度( $\sigma_p$ )与敏感过渡点强度( $\sigma_m$ )两者之间, 并通过计算不同围压条件下“敏域比”的变化情况, 发现围压对岩体内部裂纹扩展的抑制作用和损伤阈值的提高并非线性增加的, 而是呈现出一种减速增长的趋势。当流变岩体处于敏感区时, 外部扰动冲击会导致岩体内部产生新的微小孔隙, 且在扰动冲击的作用下岩体内部的微小孔隙会逐渐贯通、扩展为新的大孔隙孔隙, 使得岩体内部的孔隙数量增大, 同时外部扰动冲击对岩体内部孔隙发育的影响也会随着围压的增大而逐渐降低。当流变岩体处于非敏感区时, 外部扰动冲击会使得岩体内部的大孔隙发生闭合, 致使岩体内部的总孔隙数量减少, 同时, 岩体内部新生微小孔隙的形成速率和大孔隙的闭合速率都会随着围压的增大而逐渐降低。研究成果对于丰富三轴岩石流变扰动效应相关理论具有重要的现实意义。

**关键词:** 三轴流变扰动试验; 扰动应变; 敏感邻域; 扰动损伤; 孔隙发育

**中图分类号:** TD315 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)02-0917-13

## Sensitive neighborhood range of red sandstone under rheological disturbance condition

WANG Bo<sup>1</sup>, TIAN Zhiyin<sup>1</sup>, MA Shiji<sup>1</sup>, REN Yongzheng<sup>1</sup>, GAO Xiangyu<sup>1</sup>, SUN Hongxu<sup>1</sup>,  
HUANG Wanpeng<sup>2</sup>, WANG Jun<sup>3</sup>

(1. School of Emergency Management and Technology, North China Institute of Science and Technology, Sanhe 101601, China; 2. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 3. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

收稿日期: 2024-01-24 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 刘雅清 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1609

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (52274121); 河北省自然科学基金资助项目 (E2022508023); 中央引导地方科技发展基金资助项目 (226Z4101G)

作者简介: 王 波 (1981—), 男, 山东阳谷人, 教授, 博士。E-mail: wangbo.94@163.com

通讯作者: 田志银 (1998—), 男, 四川达州人, 硕士。E-mail: 1454728575@qq.com

引用格式: 王波, 田志银, 马世纪, 等. 流变扰动条件下红砂岩敏感邻域范围试验[J]. 煤炭学报, 2025, 50(2): 917-929.

WANG Bo, TIAN Zhiyin, MA Shiji, et al. Sensitive neighborhood range of red sandstone under rheological disturbance condition[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(2): 917-929.



移动阅读

versity, Jinan 250101, China)

**Abstract:** Under the action of disturbance load, the rheological rock mass in the “sensitive neighborhood” is prone to deformation and failure. In order to study the influence of confining pressure on the range of disturbance “sensitive neighborhood”, the red sandstone is taken as the research object, and the RRTS-IV rock rheological disturbance effect test system is used to carry out the disturbance impact test on the rheological rock mass under different confining pressures and axial pressures. The change rule of axial disturbance strain with axial pressure is observed, and the change of “sensitive neighborhood” under different confining pressure conditions is analyzed. The nuclear magnetic resonance analysis system is used to compare and analyze the rheological rock mass under different confining pressure conditions. The variation of porosity,  $T_2$  spectrum curve, spectral peak area and pore size distribution of rheological rock mass in sensitive and non-sensitive areas before and after disturbance. The results show that: When the confining pressure remains constant, the axial disturbance strain value shows a nonlinear trend of decreasing first and then increasing with the increase of axial pressure, and when the axial pressure applied to the rheological rock mass is closer to the long-term strength under the confining pressure condition, the axial disturbance strain value generated by the dynamic disturbance is larger. There is a sensitive transition point ( $\sigma_m$ ) in rheological rock mass under different confining pressure conditions, which determines the sensitivity of rheological rock mass to dynamic disturbance. When  $\sigma_1 < \sigma_m$ , the sensitivity of rheological rock mass decreases with the increase of axial pressure. When  $\sigma_1 \geq \sigma_m$ , the sensitivity of rheological rock mass increases with the increase of axial pressure. According to the sensitivity of rheological rock mass, three sensitive areas are divided:  $R_1$  non-sensitive area,  $R_2$  sensitive area and  $R_3$  creep failure area. It is determined that the range of sensitive neighborhood ( $\Delta\sigma$ ) should be between long-term strength ( $\sigma_p$ ) and sensitive transition point strength ( $\sigma_m$ ). By calculating the change of “sensitive domain ratio” under different confining pressure conditions, it is found that the inhibition of confining pressure on crack propagation in rock mass and the increase of damage threshold do not increase nonlinearly, but show a trend of deceleration growth. When the rheological rock mass is in the sensitive area, the external disturbance impact will lead to the generation of new micro-pores inside the rock mass, and under the action of disturbance impact, the micro-pores inside the rock mass will gradually penetrate and expand into new large-aperture pores, which makes the number of pores inside the rock mass increase. At the same time, the influence of external disturbance impact on the development of pores inside the rock mass will gradually decrease with the increase of confining pressure. When the rheological rock mass is in the non-sensitive area, the external disturbance impact will make the large pores in the rock mass close, resulting in a decrease in the total number of pores in the rock mass. At the same time, the formation rate of new micro pores and the closure rate of large pores in the rock mass will gradually decrease with the increase of confining pressure. The research results have important practical significance for enriching the theory of rheological disturbance effect of triaxial rock.

**Key words:** triaxial rheological disturbance test; disturbance strain; sensitive neighbourhood; disturbance injury; pore developed

## 0 引 言

随着煤矿开采深度的不断增加,深部地下工程开挖时,岩体会受到人为或自然的扰动冲击影响,如爆破、机械开挖、地震和冲击地压等,这些扰动冲击会改变岩体的应力、应变状态<sup>[1-3]</sup>。而地下采掘作业是一个循环的过程,每次循环都会影响深部巷道围岩的状态,随着动态扰动次数的增多,部分深部岩体会在扰动冲击的作用下发生失稳破坏、滑移或塌陷等不稳定现象,进而诱发深部岩爆、冲击地压、顶板大面积来压等工程灾害,降低岩体的稳定性和安全性,增加地下工程的风险和难度。因此,研究流变岩体在不同围压

条件下,受到外部扰动冲击后,岩体内部孔隙数量和孔径分布的变化规律,对于理解深部复杂应力状态下的岩体动力学特性以及防范矿井动力灾害具有重要的指导意义<sup>[4-7]</sup>。

近年来,诸多学者针对岩体流变和微观损伤演化特征做了大量研究,高延法等<sup>[8]</sup>提出“强度极限邻域”这个岩石力学新概念。所谓“强度极限邻域”,是一种接近岩石强度极限的应力状态范围,当流变岩石处于这个应力状态范围内时,外部扰动冲击会对岩体内部结构造成极大地影响。王波等<sup>[9]</sup>应用自主研发的RRTS-III型岩石流变扰动应三轴试验系统,配合先进的监控监测手段,针对“强度极限邻域”内、外的冲击

扰动变形规律,进行了单、三轴压缩流变扰动效应试验研究。王瑞红等<sup>[10]</sup>通过开展节理砂岩不同上限应力比循环加卸载试验,探究了不同上限应力对节理砂岩的孔隙变化情况以及疲劳损伤后岩体内部结构的损伤演化特征。崔希海<sup>[11]</sup>针对强度峰值后去软化岩石进行了“低围压条件下的压缩变形扰动效应”,建立了低围压条件下岩石蠕变扰动效应的本构方程,探究了主应力、围压、冲击扰动载荷与应变软化岩石扰动变形的力学关系。荣腾龙等<sup>[12]</sup>基于 Drucker-Prager 破坏准则的损伤本构关系建立指数型和立方型 2 种考虑煤体损伤破裂的渗透率演化模型,探究了常规三轴加载和开采扰动加卸载下煤体渗透率的分区段变化特征和有效围压恒定条件下煤体渗透率随气体压力升高的变化规律。刘之喜等<sup>[13]</sup>分析了真三轴压缩过程中主应力加、卸载对岩体内部结构造成的影响,提出了真三轴压缩的能量分析方法,探究了砂岩的储能极限与最大主应力的关系。温宏平等<sup>[14]</sup>对花岗岩开展了动态循环加载试验,分析了不同扰动因素动态加载后的花岗岩孔隙率和渗透率的影响规律,并建立了动态循环加载后花岗岩 Biot's 系数。刘忠玉等<sup>[15]</sup>对不同应力上限的单轴分级循环加卸载试验进行了研究,分析了循环加载过程中残余变形、弹性模量和损伤变量的变化规律。王春等<sup>[16]</sup>通过高轴压和围压共同作用下频繁冲击扰动试验,对比了含铜蛇纹岩能承受的扰动冲击次数与围压的关系,并分析了反射能和入射能的比值随围压的变化趋势。刘闽龙等<sup>[17]</sup>使用扰动伺服三轴加载系统对红砂岩开展动态扰动三轴加载试验,阐述了岩石失稳破坏前围压与扰动冲击次数的关系,探究了静载压力水平对岩石破坏速率的影响。赵光明等<sup>[18]</sup>使用真三轴扰动卸荷岩石测试系统进行 3 个主应力循环加卸载试验,分析了不同方向应力大小与岩体损伤之间的关系。沈荣喜等<sup>[19]</sup>等通过真三轴霍普金森压杆试验系统,研究了三向静载预应力状态下的煤样断裂与预应力的关系,并对单轴冲击时的破坏程度进行了对比。张培森等<sup>[20]</sup>通过对砂岩开展不同围压条件下的峰后循环载荷试验探究了不同地应力环境下峰后循环载荷作用对岩石渗透率的影响。冯帆等<sup>[21]</sup>探讨不同含水状态红砂岩试样在动静组合状态下的失稳破裂特征,对比了自然状态砂岩试与饱水状态砂岩破坏模式的不同以及与动力扰动频率的关系。李晓照等<sup>[22]</sup>提出一种应力波动力扰动下脆性岩石蠕变断裂特性的宏观力学模型,研究了不同应力波幅值及周期影响下的脆性岩石应变-时间关系曲线和动力损伤与岩石蠕变失效破坏之间的关系。唐礼忠等<sup>[23]</sup>使用 SHPB 动静组合加载系统,对围压卸载

中高储能岩体进行频繁动力扰动试验,探究了围压与轴压对卸载中高储能岩体内部微裂隙发育的影响。陈文昭等<sup>[24]</sup>通过对花岗岩进行室内动静组合加载下的单轴压缩试验,分析了扰动应力幅值与岩石的碎屑分布的变化规律。通过上述分析可知:目前,三轴岩石流变扰动效应试验研究与岩石微观损伤演化特征研究方面已经取得了一定进展。然而,研究流变岩体在不同围压条件下,受到外部扰动冲击后,岩体内部孔隙数量和孔径分布的变化规律,尚未进行相关研究。

针对上述不足,笔者使用自主研发的 RRTS-IV 型岩石流变扰动效应试验机,以红砂岩为研究对象,通过三轴流变扰动试验,分析动态扰动冲击对流变岩体轴向扰动应变的影响规律,并根据流变岩体敏感性的不同,将流变岩体划分为 3 个区域,并分析了围压对流变岩体敏感区域范围的影响。最后,利用 ZYB-II 型真空加压饱和装置、核磁共振分析系统等设备,研究流变岩体在不同围压条件下,受到外部扰动冲击后,岩体内部孔隙数量和孔径分布的变化规律,进而丰富三轴岩石流变扰动效应相关理论。

## 1 试验设备及方案

### 1.1 岩样制备

岩石试件选取具有良好变形能力、粒径分布均匀,质地坚硬且试样表明无明显节理的红砂岩作为研究对象,并使用取样机将现场采集的新鲜岩块加工制作成高度约 50 mm、直径约 25 mm 的圆柱形标准试件,如图 1 所示,并用非金属超声波检测分析仪测定其超声波纵波传播速度和传播时间,保留离散性较小的红砂岩试件进行试验研究。

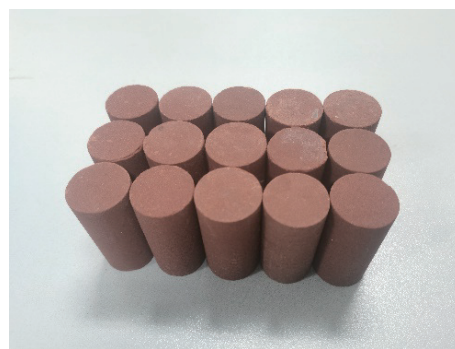


图 1 红砂岩试件

Fig.1 Red sandstone specimens

### 1.2 试验设备

试验设备如图 2、图 3 所示,分别为 RRTS-IV 型岩石流变扰动效应试验系统、ZYB-II 型真空加压饱和装置和核磁共振分析系统。





图2 RRTS-IV 型岩石流变扰动效应试验系统

Fig.2 RRTS-IV rock rheological disturbance effect test system



图3 ZYB-II 型真空加压饱和装置与核磁共振分析系统

Fig.3 ZYB-II vacuum pressure saturation device and nuclear magnetic resonance analysis system

RRTS-IV 型岩石流变扰动效应试验系统由围压控制系统、轴向加压系统、动态冲击装置和数据采集装置等组成,该试验系统可在施加轴向静载压力和围压条件下开展动态扰动冲击试验,并实时监测岩石试件在试验过程中轴向静载压力变化、轴向变形数据和横向变形数据,该系统可进行的试验有常规三轴压缩试验、三轴逐级加载试验和三轴流变扰动试验。

ZYB-II 型饱和装置由岩心腔、加压泵、岩心脱气系统等组成,可以通过提高真空度和加高压力,使岩样达到充分饱和的状态,以便更真实地反映岩样的孔隙分布变化。核磁共振分析系统可对三轴流变扰动作用下的岩石内部结构变化进行无损检测,该分析系统可以利用共振信号直接反映岩石孔隙流体的分布情况,间接反映岩石孔隙结构的变化情况。通过测量流变岩体在受到动态扰动冲击前后的  $T_2$  谱曲线、孔隙率、谱峰面积和孔径分布等参数,可用于评价动态扰动对岩体内部结构的影响程度和损伤规律。

### 1.3 试验方案

1) 选取制备好的圆柱形红砂岩试件进行洗油、洗盐等预处理,测量并记录红砂岩试件的直径、长度,随后将试验试件放入恒温烘箱进行烘干处理,直到岩石试件达到恒重为止。将岩石样品放入抽真空加压饱和装置中,并用硅油进行浸泡。加压饱和前,先将岩

心腔抽真空至 1 MPa 左右,并保持 2 h 以上。然后对容器内的岩石试件加压至 10 MPa 左右,并保持 24 h,使岩石样品充分饱和,饱和后取出岩样,放入 RRTS-IV 型试验系统进行后续试验。

2) 首先开展三轴压缩试验:确定不同围压下的强度极限,为后续三轴逐级加载试验的逐级加载强度设置提供依据。其次进行三轴逐级加载试验:确定不同围压下蠕变岩体的长期强度,为后续三轴流变扰动试验设置不同的轴向静载压力提供依据。最后进行三轴流变扰动试验:对不同围压和轴压作用下的流变岩体施加一定次数的动态扰动冲击试验,通过绘制流变岩体在动态扰动冲击下的轴向扰动应变曲线,分析处于不同敏感区域的流变岩体对于动态扰动的敏感程度。

3) 为确定处于敏感邻域内的流变岩体受到动态扰动冲击后岩体内部结构的造成的影响,分别选取不同围压条件下处于不同敏感区的流变岩体样本,进行动态扰动冲击试验,并使用核磁共振分析系统监测流变岩体在动态扰动冲击前后的孔隙率、 $T_2$  谱曲线、谱峰面积和孔径分布等参数的变化规律,揭示动态扰动对流变岩体内部孔隙结构的影响机制。

## 2 试验过程

### 2.1 常规三轴压缩试验

首先使用 RRTS-IV 型岩石流变扰动效应试验系统对 5 组红砂岩试件进行了三轴压缩试验,每组试件的围压分别设置为 4、6、8、10、12 MPa,轴向静载压力以 0.1 MPa/s 的速率进行加载,当红砂岩试件在压缩过程中出现变形破坏时停止试验。同时记录各组试件的破坏载荷、强度极限 ( $\sigma_c$ )、轴向极限应变,试验结果见表 1。其中因后续需开展流变扰动试验,试验

表 1 红砂岩常规三轴压缩试验数据

Table 1 Conventional triaxial compression test data of red sandstone

围压/ MPa	试件 编号	高度/ mm	直径/ mm	强度极 限/MPa	平均强度 极限/MPa	轴向极限 应变/ $10^{-6}$
4	A-1	50.12	25.03	51.92	52.03	8 348.31
	A-2	50.09	24.96	52.14		8 205.23
6	A-3	50.12	25.05	55.58	55.42	8 729.66
	A-4	50.11	25.03	55.26		8 655.78
8	A-5	50.05	25.04	59.19	59.04	9 131.21
	A-6	50.14	25.03	58.89		9 269.34
10	A-7	50.02	24.97	62.88	62.96	9 749.83
	A-8	50.14	25.08	63.04		9 946.50
12	A-9	50.08	25.11	67.74	67.51	10 733.45
	A-10	50.13	25.04	67.28		10 521.78

过程中动态扰动冲击使得横向应变数值变化波动较大,致使横向应变试验值与实际值偏差较大,因此后续试验过程以轴向应变的变化作为研究依据。

## 2.2 三轴逐级加载试验

为确定红砂岩试件在不同围压条件下的长期强度,根据三轴压缩试验结果,进行三轴逐级加载试验。分别在围压为 4、6、8、10、12 MPa 的条件下,对红砂岩试件施加不同的蠕变应力水平,每一级蠕变应力作用 2 h 后,记录岩石轴向应变变化情况,并观察试件是否发生失稳破坏,如未发生失稳破坏则进行下一级蠕

变应力加载试验,当试件发生失稳破坏时即停止试验,根据试验数据绘制图 4 红砂岩三轴逐级加载试验全程流变曲线。

图 4a 展示了围压为 4 MPa 时,轴向应变随着蠕变压力增加的变化情况,当蠕变压力由 35.91 MPa 逐级加压至 40.16 MPa 的过程中,流变岩体的轴向应变速率均呈现出先减速增长的趋势,且最终稳定在一个恒定值,这表明流变岩体此时已处于稳定蠕变阶段,即在持续的应力作用下,其不会发生变形破坏。当蠕变压力增加至 42.22 MPa 时,流变岩体的轴向应变速

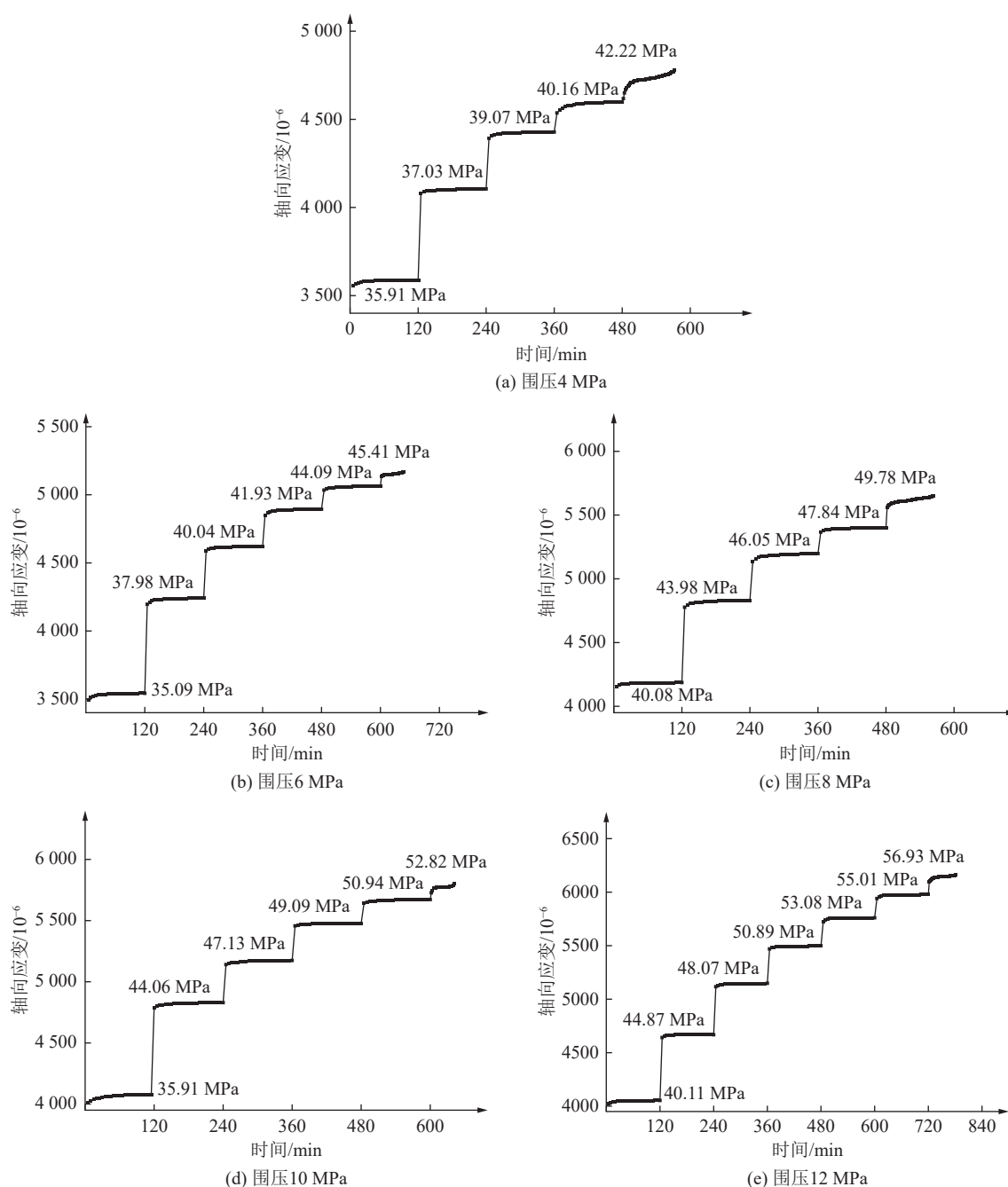


图 4 红砂岩三轴逐级加载试验全程流变曲线

Fig.4 Whole rheological curves of red sandstone in triaxial step-by-step loading test

率显著提高,且呈现出加速增长的趋势,这一现象表明流变岩体已经进入不稳定蠕变阶段,且在该蠕变压力作用下 1.6 h 之后,流变岩体出现失稳破坏,破坏时的轴向应变为  $4\,779 \times 10^{-6}$ 。

根据蠕变长期强度的定义可知,当岩石从稳定蠕变过渡到不稳定蠕变的过程中,所能承受的最小主应力就是其长期强度,因此,在 4 MPa 的围压作用下,流变岩体的长期强度应介于 40.16~42.22 MPa。为了便于计算和分析后文中敏域比的变化情况,这里采用这 2 个值的平均值,即 41.19 MPa 作为长期强度的参考值。同理,当围压分别为 6、8、10、12 MPa 时,流变岩体的长期强度参考值依次确定为 44.75、48.81、51.88、55.97 MPa。

### 2.3 三轴流变扰动试验

为确定不同围压条件下的红砂岩试件在动态扰动冲击下的变形特性。选取 5 组红砂岩试件,分别在围压为 4、6、8、10、12 MPa 条件下进行轴向加压试验,并根据三轴逐级加载试验确定的长期强度,分别选取合适的轴压预定值,进行三轴流变扰动试验。轴压预定值的选取遵循以下原则:一是轴压预定值应小于相应围压下的长期强度,以避免岩石试件在扰动冲击前因加速蠕变而发生变形破坏。二是轴压预定值应尽可能接近长期强度,以方便探究处于极限应力状态下的流变岩体对于外部扰动冲击的动态响应特征。轴向静载压力以 0.1 MPa/s 的速率进行加载,当轴压增加到预定值时停止加载,保持压力恒定静载加压 1 d。

为模拟深部岩体在开挖、爆炸和地震等因素的影响下的扰动冲击情形,本试验对蠕变 1 d 的红砂岩试件施加周期性的动态扰动冲击试验,扰动载荷由 5 kg 的冲击环提供,每次冲击高度为 15 cm,每隔 1 min 重复 1 次,共进行 5 次冲击,记录流变岩体在 5 次扰动冲击试验后,其轴向扰动应变值的变化情况,并将测得的数据绘制成图 5 不同围压条件下轴向扰动应变变化。

由图 5 可知,在不同围压和轴压作用下的流变岩体,经过 5 次动态扰动后其轴向扰动应变变化规律如下:

1) 在围压保持不变的条件下,轴向扰动应变值并非随轴压的增大而单调减少,而是呈现出先降后升的非线性趋势。这说明流变岩体对动态扰动的敏感性与轴压有关。特别地,当轴压越接近于该围压条件下的长期强度 ( $\sigma_p$ ) 时,动态扰动冲击对流变岩体产生的轴向扰动应变值也越大。

2) 在不同围压条件下,存在一个敏感过渡点 ( $\sigma_m$ ),它决定了流变岩体对动态扰动的敏感程度。当

$\sigma_1 < \sigma_m$  时,轴向扰动应变值随轴压的增大而逐渐降低。当  $\sigma_1 \geq \sigma_m$  时,轴向扰动应变值随轴压增大的而急剧增大。

敏感过渡点 ( $\sigma_m$ ) 的存在表明,周期性的扰动冲击对处于不同轴压作用下的流变岩体内部结构造成的影响是不同的,当  $\sigma_1 < \sigma_m$  时,随着轴压的增大,岩体内部的孔隙和微裂隙被压密,岩石密度和抗扰动能力提高,同时,流变岩体的弹塑性变形能力也逐渐增强,使得岩体在受到扰动冲击后的恢复能力加强,使得轴向扰动应变随轴压增大而减小。

当  $\sigma_1 \geq \sigma_m$  时,岩体的弹性变形能力出现降低,而塑性变形能力持续增强,使得流变岩体在外部动态扰动的冲击下,其轴向扰动应变快速增大。这说明,当  $\sigma_1 \geq \sigma_m$  时,流变岩体进入一个对外部扰动非常敏感的区域,即“敏感邻域”。当流变岩体处于“敏感邻域”内时,外部动态扰动会给岩体内部孔隙造成极大的损伤,当扰动冲击带来的损伤累积超过一定阈值时,岩体就会发生失稳破坏。

### 2.4 敏感区域的划分

考虑到流变岩体对外部扰动冲击的敏感性会随着围压和轴压的不同而发生改变,可根据式 (1) 的划分标准,划分为出 3 个区域:即  $R_1$  非敏感区、 $R_2$  敏感区和  $R_3$  蠕变破坏区。并依据常规三轴压缩试验、三轴逐级加载试验和三轴流变扰动试验分别确定围压为 4、6、8、10、12 MPa 时的强度极限 ( $\sigma_c$ )、长期强度 ( $\sigma_p$ ) 和敏感过渡点 ( $\sigma_m$ )。

$$\begin{cases} R_1: 0 < \sigma_{(x,y)} \leq \sigma_{(m,y)} \\ R_2: \sigma_{(m,y)} < \sigma_{(x,y)} \leq \sigma_{(p,y)} \\ R_3: \sigma_{(p,y)} < \sigma_{(x,y)} \leq \sigma_{(c,y)} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $x$ 、 $y$  分别为流变岩体表面承载的轴压和围压, MPa;  $\sigma_{(m,y)}$ 、 $\sigma_{(p,y)}$  和  $\sigma_{(c,y)}$  分别为流变岩体在围压  $y$  条件下确定的敏感过渡点、长期强度和强度极限, MPa。

依据式 (1) 将不同围压和轴压作用下的流变岩体进行了敏感区域的划分,结果如图 6 所示。

当流变岩体处于蠕变破坏区时,因岩体受到超过其长期强度的轴向静载荷,经过较短的时间,岩体将进入加速蠕变阶段即不稳定蠕变阶段,在这个该阶段,岩体的塑性变形速率急剧增加,塑性应变也随之累积,一旦塑性应变达到某个临界值,岩石的强度和刚度都会随之降低,这时,如对其施加扰动冲击会加剧岩体的损伤程度,同时加速其损伤和破坏过程。

当流变岩体处于非敏感区时,周期性地施加 5 次以内的动态扰动冲击不会使得岩体发生失稳破坏,且随着围压的不断增大,非敏感区所占面积会快速增大。



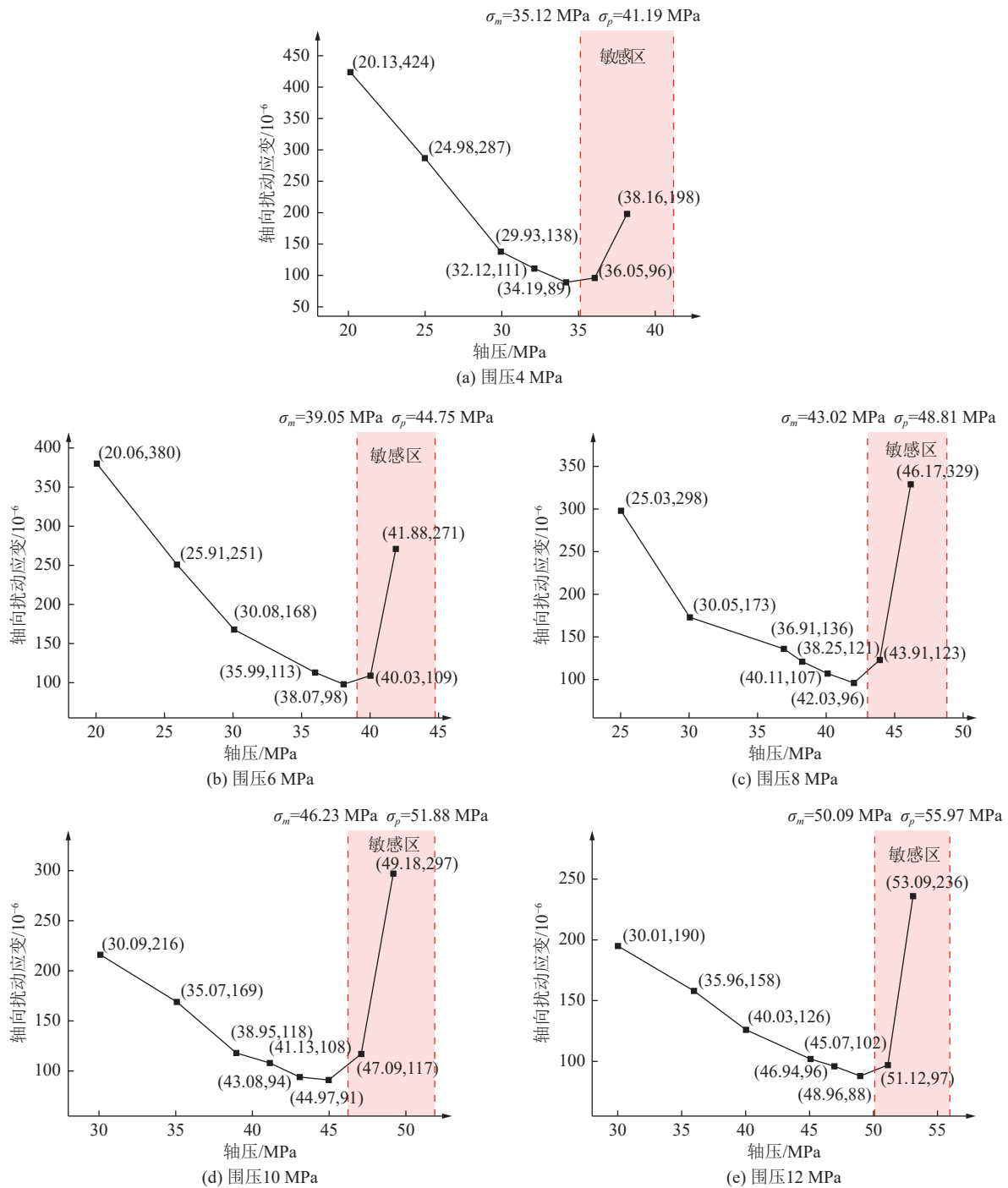


图5 不同围压条件下轴向扰动应变变化

Fig.5 Variation of longitudinal disturbance strain under different confining pressure conditions

该现象表明, 围压能够抑制岩体内部裂纹的扩展, 增加岩体的密度和强度, 提高岩体的抗扰动能力, 致使岩体进入扰动敏感区所需的轴向应力水平随着围压的增大而升高。换言之, 围压越大, 岩体的抗扰动能力越强, 岩体进入扰动敏感区所需的轴向应力水平也就越大。

当流变岩体处于敏感区时, 由于施加于流变岩体的轴向静载压力大于敏感过渡点强度, 使得岩体处于一种对外部扰动十分敏感的状态, 每次外部扰动冲击

都会加速岩体内部微小孔隙的损伤发展, 同时使得岩体的强度逐渐降低, 且随着扰动冲击次数的增多, 岩体内部的损伤积累也会越多, 当损伤积累达到一定的阈值时, 岩体就将发生失稳破坏。

为深入研究围压对扰动敏感区域的影响, 即“敏感邻域”的变化情况, 试通过式 (2) 计算不同围压条件下流变岩体“敏感邻域”范围与强度极限的比值, 其中“敏感邻域”范围 ( $\Delta\sigma$ ) 取长期强度 ( $\sigma_p$ ) 与敏感过渡点强度 ( $\sigma_m$ ) 两者之差。

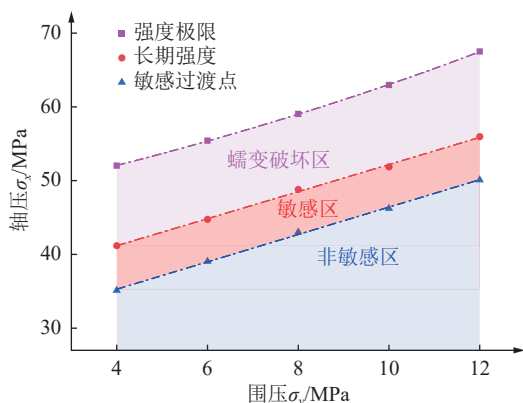


图6 敏感区域划分

Fig.6 Sensitive area division map

$$K = \frac{\Delta\sigma}{\sigma_c} \times 100\% = \frac{\sigma_p - \sigma_m}{\sigma_c} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $K$  为敏感邻域范围与强度极限的比值, 简记为“敏域比”;  $\Delta\sigma$  为流变岩体的敏感邻域范围, MPa;  $\sigma_c$  为常规三轴压缩确定的强度极限, MPa;  $\sigma_p$  为三轴逐级加载试验获取的长期强度, MPa;  $\sigma_m$  为三轴流变扰动试验确定的敏感过渡点强度, MPa。

根据式 (2) 计算不同围压条件下敏域比的变化情况, 并将所得数据进行曲线拟合, 得图 7 敏域比拟合曲线。

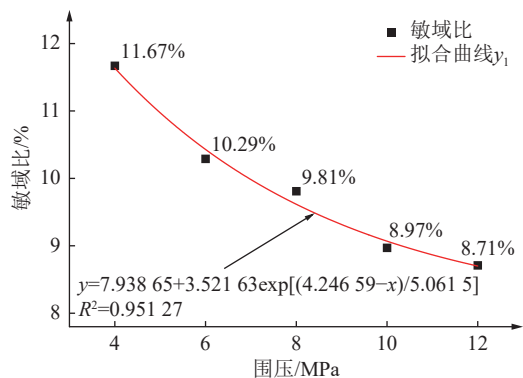


图7 敏域比拟合曲线

Fig.7 Sensitive domain matching curve

则不同围压条件下的流变岩体敏域比 ( $K$ ) 与围压 ( $\sigma_y$ ) 的拟合函数关系式为

$$K = 7.938\ 65 + 3.521\ 63 \exp\left(\frac{4.246\ 59 - \sigma_y}{5.061\ 5}\right) \quad (3)$$

观察拟合曲线  $y_1$  可知, 随着围压的增加, 敏域比逐渐降低。当围压从 4 MPa 增至 12 MPa 时, 敏域比从 11.67% 降至 8.71%, 降低了 25.36%。敏域比的下降表明: 增大围压能有效抑制岩体内部裂纹的扩展, 减小岩体的变形量和破碎吸能, 提高累计损伤阈值, 延缓失稳破坏的发生, 从而提高流变岩体的抗扰动能

力, 使得流变岩体的敏域比随围压的增大逐渐减低。同时, 观察拟合曲线  $y_1$  的变化趋势可知, 随着围压增大, 敏域比的下降速度逐渐减慢, 该现象表明: 围压的对岩体内部裂纹扩展的抑制作用和损伤阈值的提高并非线性增加的, 而是呈现出一种减速增长的趋势。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 孔隙率变化分析

为研究外部扰动冲击对不同围压条件下流变岩体内部孔隙的影响, 根据图 6 的敏感区域划分结果, 分别在 4、8、12 MPa 的围压水平下开展流变扰动冲击试验。试验中, 先将轴压增大至指定压力, 再静载加压 1 d, 然后对敏感区和非敏感区的流变岩体分别进行 5 次扰动冲击。

试验后, 用核磁共振仪测量流变岩体的孔隙率、孔径分布、 $T_2$  谱曲线、谱峰面积变化情况, 分析动态扰动冲击对流变岩体内部结构的影响, 以及动态扰动对敏感邻域内岩体的损伤演化规律。

通过观察表 2 中不同围压条件下各敏感区孔隙率的变化可知, 当围压分别为 4、8、12 MPa 时, 处于敏感区的流变岩体在经历 5 次扰动冲击后, 其平均孔隙率相较未受扰动冲击的岩体分别增加了 2.44%、1.79% 和 1.27%。说明当流变岩体处于敏感区时, 外部扰动会促进岩体内部原有微小孔隙的损伤发育, 使之扩展、贯通为新的大孔径孔隙, 但这种损伤发育效果会随着围压的增大而逐渐减弱。而处于敏感区的流变岩体在经历 5 次扰动冲击后, 其平均末孔隙率与未受扰动冲击的流变岩体相比分别减少 1.09%、0.84% 和 0.64%, 表明当流变岩体处于非敏感区时, 动态扰动会使得岩体内部原有的孔隙发生闭合。同时, 在动态扰动的作用下, 岩体逐渐会进入压密状态, 致使岩石孔隙结构更加致密和坚硬, 进而抑制新孔隙的形成, 而围压的增大会加强这种抑制效果, 使得岩体内部的孔隙闭合数量随着围压的增大而逐渐减少。

#### 3.2 孔径分布变化分析

完成岩石三轴流变扰动试验结束后, 为避免试样因静载加压和扰动冲击使得水分流失, 进而影响后续的孔隙分布测定, 采用渐进饱和的方式对试样进行了真空加压饱和, 即缓慢增加饱和液的压力, 避免快速变化导致的内部应力增大, 以达到减少对试样内部结构损伤的效果。随后使用核磁共振仪测定了 4、8 和 12 MPa 围压条件下岩样内部孔隙数量的分布情况, 图 8 显示了动态扰动作用下各组流变岩体内部孔隙数量分布变化情况 (图中各孔径孔隙分布占比均为表 2 中 2 组检测结果的均值)。



表2 不同围压条件各敏感区孔隙率变化

Table 2 Porosity changes of each sensitive area under different confining pressure conditions

围压/MPa	扰动区域	试件编号	轴压/MPa	扰动次数	末孔隙率/%	平均末孔隙率/%
4	敏感区	S-1	38.16	5	7.64	7.76
		S-2	38.03		7.88	
		S-3	37.89	0	5.39	5.32
		S-4	38.21		5.25	
	非敏感区	S-5	29.93	5	4.34	4.40
		S-6	30.08		4.46	
		S-7	30.14	0	5.41	5.49
		S-8	30.02		5.57	
8	敏感区	P-1	46.17	5	6.96	6.92
		P-2	46.03		6.88	
		P-3	46.06	0	5.09	5.13
		P-4	45.89		5.17	
	非敏感区	P-5	38.15	5	4.51	4.46
		P-6	38.11		4.41	
		P-7	37.97	0	5.38	5.30
		P-8	38.04		5.22	
12	敏感区	Q-1	53.09	5	6.29	6.21
		Q-2	53.14		6.13	
		Q-3	53.13	0	4.99	4.94
		Q-4	53.06		4.89	
	非敏感区	Q-5	45.11	5	4.48	4.54
		Q-6	45.14		4.60	
		Q-7	45.06	0	5.11	5.18
		Q-8	44.98		5.25	

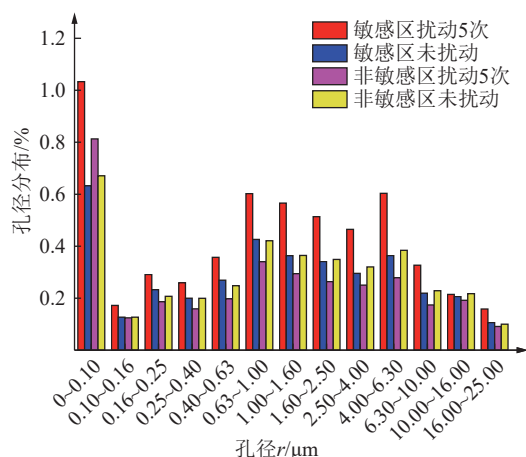
由图 8a 可知,当流变岩体处于非敏感区时,外部动态扰动使得总孔隙数量减少,其中孔径尺寸为  $0\sim 0.16\ \mu\text{m}$  的微小孔隙在动态扰动作用下孔径分布占比快速增加,孔径尺寸为  $0.4\sim 6.3\ \mu\text{m}$  的大孔隙在扰动的作用下孔径分布占比快速降低,同时随着围压的逐渐增大,扰动冲击所形成的新生微小孔隙的占比会逐渐减少。这表明动态扰动冲击对流变岩体内部微小孔隙的贯通发展起到促进作用,对小孔径孔隙扩展为大孔径孔隙是起抑制作用的,而围压的增大会使得微小孔隙的贯通与扩展受到横向挤压的限制,且这种限制作用随着围压的增大会逐渐增强,致使微小孔隙增长数量随围压的增大而逐渐减少。

当对处于敏感区的流变岩体施加动态扰动冲击后,各个不同尺寸的孔隙数量均出现了不同程度的增长,但随着围压由 4 MPa 增大至 12 MPa,扰动冲击产生的新生微小孔隙和大孔隙数量均出现了不同程度的降低,这表明动态扰动能加速流变岩体内部孔隙

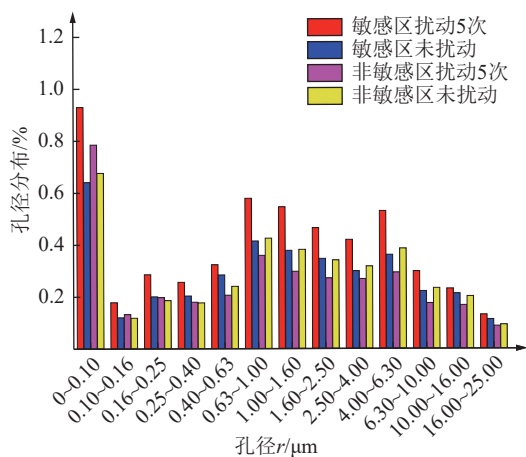
的损伤发育程度,使得岩体内部孔隙单元的在扰动冲击的作用下快速扩展、发育为更大孔径的新孔隙,但随着围压的逐渐增大,岩体的这种损伤发育速度会逐渐降低,这说明围压的增大会使得岩体内部原有孔隙的(裂隙、裂纹等缺陷)闭合程度在扰动冲击的作用下进一步加深,从而一定程度上提升岩体的密度和抗扰动能力,使得岩体内部的损伤阈值得到一定提高,致使孔隙率的变化幅度随围压的增大而减小。

### 3.3 $T_2$ 谱曲线变化分析

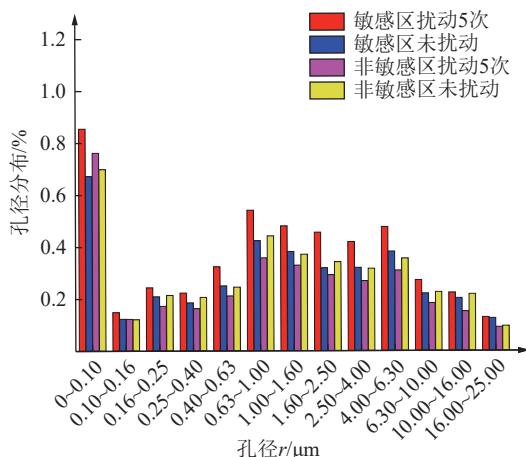
使用核磁共振仪对扰动冲击后的流变岩体试件进行  $T_2$  谱检测,该检测方法基于核磁共振原理,能够测量岩体中氢核的横向弛豫时间分布,进而反演出岩体内部的孔隙半径分布情况。 $T_2$  谱曲线的横轴表示氢核的横向弛豫时间,与孔隙尺寸呈正相关关系,纵轴表示信号幅度,与孔隙数量呈正比关系。如图 9 所示(图中  $T_2$  谱曲线为表 2 中 2 组检测结果的均值拟合而成)流变岩体的  $T_2$  谱曲线有 2 个谱峰,由左向右



(a) 围压 4 MPa



(b) 围压 8 MPa

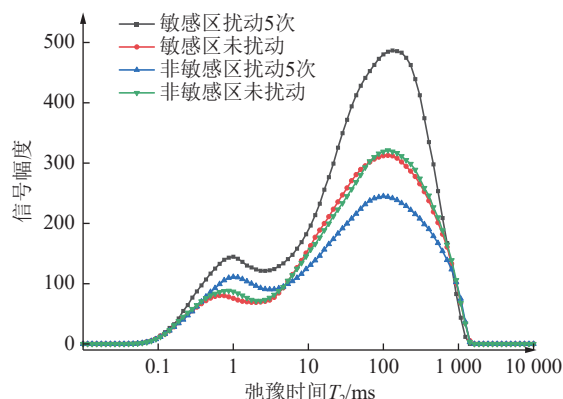


(c) 围压 12 MPa

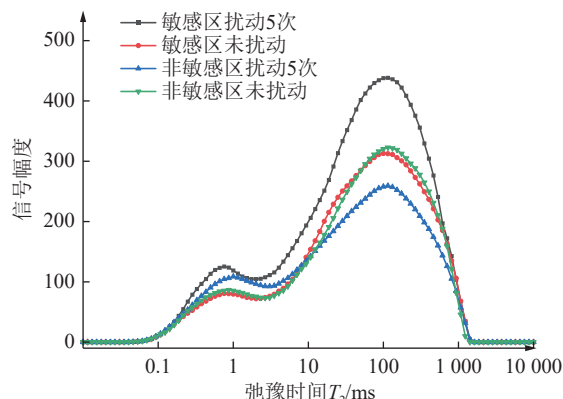
图 8 不同围压条件下各敏感区孔隙数量分布变化

Fig.8 Variation of pore number distribution in sensitive areas under different confining pressures

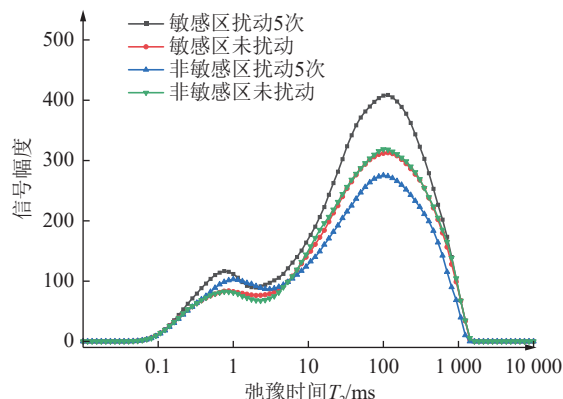
分别为第一谱峰和第二谱峰。选取 8 MPa 围压条件下处于非敏感区且未受到扰动的流变岩体作为参考样本,将其  $T_2$  谱波谷位置对应的弛豫时间作为第一谱峰与第二谱峰的分界线,即第一谱峰对应弛豫时间  $T_2 \leq 2.656$  1 ms 的小孔隙,第二谱峰对应弛豫时间  $T_2 > 2.656$  1 ms 的大孔隙。



(a) 围压 4 MPa



(b) 围压 8 MPa



(c) 围压 12 MPa

图 9 不同围压条件下各敏感区  $T_2$  谱变化Fig.9  $T_2$  spectrum changes of each sensitive area under different confining pressure conditions

当流变岩体处于敏感区时,外部动态扰动冲击会使得第一谱峰峰值和第二谱峰峰值显著提高,但是这种提高随着围压的增大而逐渐减弱,其中第二谱峰峰值下降幅度更为显著。这表明,动态扰动会使得岩体内部形成更多新的微小裂隙,原有微小孔隙在扰动作用下将逐步扩展发育为大孔隙,但随着围压的增大,微小孔隙发育、扩展为大孔隙的速率会逐渐降低,致使围压越大,大孔隙的增长幅度也越小。更进一步分析可知,流变岩体处于高应力环境时,即使较小的扰

动也可能引起显著的应力重分布,同时岩体中原有的不连续面(如裂缝、节理、断层等)也可能导致应力集中,致使扰动冲击对这些应力集中区域造成更进一步破坏,从而导致岩石失稳破坏的发生。

当流变岩体处于非敏感区域时,外部扰动冲击会使得第一谱峰峰值增大,第二谱峰峰值降低,同时这种变化随着围压的增大而逐渐减小,这表明,动态扰动使得岩体内部形成了更多的微小裂隙,从而使得第一谱峰值增幅逐渐增大,同时也使得岩体内部的大孔隙发生闭合,致使第二谱峰的峰值降低。伴随着围压的不断增大,岩体内部的形成新生微小孔隙的速率与

大孔隙的闭合速率均逐渐减慢,因此围压越大,岩体内微小孔隙的增长幅度和大孔隙的减小幅度都会越小。

### 3.4 谱峰面积变化分析

孔隙率的大小和孔隙数量均与  $T_2$  谱峰面积大小成正比相关<sup>[25]</sup>,因此根据  $T_2$  谱的双峰值特征,可通过对比第一谱峰面积和第二谱峰面积在动态扰动后的变化情况,分析动态扰动对流变岩体内部微小孔隙和大孔隙的影响,同时研究不同围压条件下小孔隙和大孔隙的变化规律。表 3 为不同围压条件下各敏感区谱峰面积变化。

表 3 不同围压条件下各敏感区谱峰面积变化

Table 3 Changes of spectral peak area of each sensitive area under different confining pressure conditions

围压/MPa	敏感区域	岩样编号	扰动次数	第一谱峰面积	第一谱峰面积均值	第二谱峰面积	第二谱峰面积均值	总谱峰面积均值
4	敏感区	S-1	5	2 399.21	2 289.93	13 124.83	13 065.90	15 355.83
		S-2		2 180.65		13 006.97		
		S-3	0	1 362.44	1 408.89	9 295.80	9 208.19	10 617.08
		S-4		1 455.34		9 120.56		
	非敏感区	S-5	5	1 727.42	1 749.32	7 521.97	7 506.88	9 256.20
		S-6		1 771.22		7 491.79		
		S-7	0	1 473.87	1 509.12	9 280.95	9 227.60	10 736.72
		S-8		1 544.37		9 274.25		
8	敏感区	P-1	5	2 075.77	2 064.73	12 327.83	12 283.18	14 347.91
		P-2		2 053.69		12 238.53		
		P-3	0	1 435.40	1 423.22	9 189.58	9 143.71	10 566.93
		P-4		1 411.04		9 097.84		
	非敏感区	P-5	5	1 956.37	1 841.46	7 735.73	7 711.53	9 552.99
		P-6		1 726.55		7 687.33		
		P-7	0	1 537.34	1 507.89	9 042.81	9 013.97	10 521.86
		P-8		1 478.44		8 985.13		
12	敏感区	Q-1	5	1 826.56	1 910.58	11 502.72	11 215.86	13 126.44
		Q-2		1 994.60		11 644.04		
		Q-3	0	1 524.18	1 507.24	9 241.31	9 213.72	10 738.96
		Q-4		1 490.30		9 186.13		
	非敏感区	Q-5	5	1 717.57	1 697.78	7 857.53	7 796.58	9 494.36
		Q-6		1 677.99		7 735.63		
		Q-7	0	1 465.42	1 464.19	8 973.69	8 906.63	10 370.82
		Q-8		1 462.96		8 839.57		

观察表 4 中各围压条件下第一谱峰面积和第二谱峰面积变化可知,当流变岩体处于敏感区且经历 5 次动态扰动冲击后,其总谱峰面积的平均值相较于未受扰动冲击的流变岩体,都出现了不同程度的增加。当围压由 4 MPa 增加至 8 MPa 和 12 MPa 时,总谱峰

面积均值的增加值依次为 4 738.75、3 780.98、2 387.48。试验结果表明:当流变岩体处于敏感区时,扰动冲击会使得岩体内部的总孔隙数量增加,说明扰动冲击对岩体内部孔隙的扩展和贯通是起着促进作用的,但随着围压的增大,这种促进作用会逐渐减弱。



当流变岩体处于非敏感区且经历 5 次动态扰动冲击后,其总谱峰面积均值相较于未受扰动冲击的流变岩体,出现下降。当围压由 4 MPa 增加至 8 MPa 和 12 MPa 时,总谱峰面积均值的减少值分别为 1 480.52、968.87、876.46。试验结果表明:当流变岩体处于非敏感区时,扰动冲击会使得岩体内部的总孔隙数量减少,但随着围压的逐渐增大,孔隙数量的减少量会逐渐降低,说明围压的增大,使得岩体内部的原生裂隙受扰动冲击的影响而发生闭合,裂隙开度逐渐减小,进而使得岩体内部的总孔隙数量减少。

## 4 结 论

1) 通过分析不同围压条件下的流变岩体受到 5 次外部扰动冲击作用后,其轴向扰动应变变化规律知:当围压保持恒定,轴向扰动应变值随轴压的增大呈现出先降后升的非线性趋势,且当作用于流变岩体上的轴压越接近于该围压条件下的长期强度时,动态扰动所产生的轴向扰动应变值越大。

2) 处于不同围压条件下流变岩体,存在一个敏感过渡点 ( $\sigma_m$ ) 它决定了流变岩体对动态扰动的敏感程度。当  $\sigma_1 \leq \sigma_m$  时,流变岩体的敏感程度随轴压的增大而减小,当  $\sigma_1 > \sigma_m$  时,流变岩体的敏感程度随轴压的增大而增大,并根据不同围压条件下流变岩体的敏感性不同,划分出 3 个敏感区域:  $R_1$  非敏感区、 $R_2$  敏感区和  $R_3$  蠕变破坏区。

3) 确定敏感邻域的范围 ( $\Delta\sigma$ ) 应介于长期强度 ( $\sigma_p$ ) 与敏感过渡点强度 ( $\sigma_m$ ) 两者之间,并通过计算不同围压条件下“敏域比”的变化情况,发现随着围压的增大,敏域比会逐渐减小,该现象表明:围压的对岩体内部裂纹扩展的抑制作用和损伤阈值的提高并非线性增加的,而是呈现出一种减速增长的趋势。

4) 当流变岩体处于敏感区时,外部扰动冲击会导致岩体内部产生新的微小孔隙,且在扰动冲击的作用下岩体内部的微小孔隙会逐渐贯通、扩展为新的大孔隙,使得岩体内部的孔隙数量增大,同时外部扰动冲击对岩体内部孔隙发育的影响也会随着围压的增大而逐渐降低。

5) 当流变岩体处于非敏感区时,外部扰动冲击会使得岩体内部孔隙数量减少,主要原因为扰动冲击的作用下,岩体内部的大孔隙发生闭合所致,但随着围压的不断增大,岩体内部形成新生微小孔隙的速率与大孔隙的闭合速率均会逐渐减慢。

## 参考文献(References):

[1] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019,

44(5): 1283–1305.

XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1283–1305.

[2] 潘俊峰, 齐庆新, 刘少虹, 等. 我国煤炭深部开采冲击地压特征、类型及分源防控技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 111–121.

PAN Junfeng, QI Qingxin, LIU Shaohong, et al. Characteristics, types and prevention and control technology of rock burst in deep coal mining in China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 111–121.

[3] 朱斯陶, 姜福兴, 朱海洲, 等. 高应力区掘进工作面冲击地压事故发生机制研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(S2): 337–343.

ZHU Sitao, JIANG Fuxing, ZHU Haizhou, et al. Study on mechanism of rockburst accident in heading face in high stress area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S2): 337–343.

[4] 潘一山. 煤矿冲击地压扰动响应失稳理论及应用[J]. 煤炭学报, 2018, 43(8): 2091–2098.

PAN Yishan. Disturbance response instability theory of rockburst in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8): 2091–2098.

[5] 刘少虹, 李凤明, 蓝航, 等. 动静加载下煤的破坏特性及机制的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 3749–3759.

LIU Shaohong, LI Fengming, LAN Hang, et al. Experimental study of failure characteristics and mechanism of coal under static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3749–3759.

[6] 李明, 茅献彪. 冲击载荷作用下砂岩破坏及能量耗变率效应的数值模拟研究[J]. 爆破, 2014, 31(2): 78–83.

LI Ming, MAO Xianbiao. Numerical simulation studies on strain rate effect of sandstone's energy dissipation and destruction under impulse loading[J]. Blasting, 2014, 31(2): 78–83.

[7] 唐礼忠, 舒计步, 武建力, 等. 高静应力和频繁动力扰动共同作用下砂卡岩动力学特性[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(8): 993–999.

TANG Lizhong, SHU Jibu, WU Jianli, et al. Dynamic characteristics of skarn under the combined action of high static stress and frequent dynamic disturbance[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(8): 993–999.

[8] 高廷法, 肖华强, 王波, 等. 岩石流变扰动效应试验及其本构关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S1): 3180–3185.

GAO Yanfa, XIAO Huaqiang, WANG Bo, et al. A rheological test of sandstone with perturbation effect its constitutive relationship study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 3180–3185.

[9] 王波, 刘重阳, 陈学习, 等. RRTS-IV 型岩石流变扰动效应试验系统[J]. 煤炭学报, 2019, 44(S2): 484–491.

WANG Bo, LIU Chongyang, CHEN Xuexi, et al. Experimental system of rheological disturbance effect of RRTS-IV rock[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(S2): 484–491.

[10] 王瑞红, 危灿, 刘杰, 等. 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, 2023, 42(4): 810–820.

WANG Ruihong, WEI Can, LIU Jie, et al. Macro and micro characteristics of jointed sandstone under cyclic loading and unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(4): 810–820.

- [11] 崔希海. 岩石流变扰动效应及试验系统研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2007.  
CUI Xihai. The study on rheological properties of rocks undergoing disturbance and experimental system[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2007.
- [12] 荣腾龙, 周宏伟, 王路军, 等. 开采扰动下考虑损伤破裂的深部煤体渗透率模型研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(11): 3983–3992.  
RONG Tenglong, ZHOU Hongwei, WANG Lujun, et al. A damage-based permeability models of deep coal under mining disturbance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(11): 3983–3992.
- [13] 刘之喜, 孟祥瑞, 赵光明, 等. 真三轴压缩下砂岩的能量和损伤分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(2): 327–341.  
LIU Zhixi, MENG Xiangrui, ZHAO Guangming, et al. Energy and damage analysis of sandstone under true triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(2): 327–341.
- [14] 温宏平, 李炜光, 王旭昊, 等. 动态循环加载下花岗岩孔渗参数演化规律[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(5): 119–128.  
WEN Hongping, LI Weiguang, WANG Xuhao, et al. Evolution law of granite porosity-permeability parameters under dynamic cyclic loading[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(5): 119–128.
- [15] 刘忠玉, 董旭, 张旭阳. 分级循环荷载下层理煤岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(S1): 2593–2602.  
LIU Zhongyu, DONG Xu, ZHANG Xuyang. Experimental study on mechanical properties of bedding coal and rock under graded cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(S1): 2593–2602.
- [16] 王春, 程露萍, 唐礼忠, 等. 高轴压和围压共同作用下受频繁冲击时含铜蛇纹岩能量演化规律[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(5): 55–68.  
WANG Chun, CHENG Luping, TANG Lizhong, et al. Energy evolution law of copper-bearing serpentine received frequent impact under common action of high axial compression and confining pressure[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(5): 55–68.
- [17] 刘闽龙, 陈士海, 石伟民, 等. 多次动态扰动下红砂岩时效变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(10): 1917–1924.  
LIU Minlong, CHEN Shihai, SHI Weimin, et al. Time-dependent deformation characteristics of red sandstone under multiple dynamic disturbances[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(10): 1917–1924.
- [18] 赵光明, 刘之喜, 孟祥瑞, 等. 真三轴循环主应力作用下砂岩能量演化规律[J]. 岩土力学, 2023, 44(7): 1875–1890.  
ZHAO Guangming, LIU Zhixi, MENG Xiangrui, et al. Energy evolution of sandstone under true triaxial cyclic principal stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(7): 1875–1890.
- [19] 沈荣喜, 顾周杰, 王恩元, 等. 真三轴条件下煤样冲击动力学及破坏特征实验研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 2168–2178.  
SHEN Rongxi, GU Zhoujie, WANG Enyuan, et al. Experimental study on impact dynamics and failure characteristics of coal specimen under true triaxial conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 2168–2178.
- [20] 张培森, 许大强, 颜伟, 等. 不同围压下峰后循环载荷对砂岩力学及渗流特性的影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 94–105.  
ZHANG Peisen, XU Daqiang, YAN Wei, et al. Effect of post-peak cyclic load on mechanics and seepage characteristics of sandstone under different confining pressures[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 94–105.
- [21] 冯帆, 陈绍杰, 王琦, 等. 真三轴卸载-动力扰动下自然与饱水砂岩破坏特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(11): 2240–2253.  
FENG Fan, CHEN Shaojie, WANG Qi, et al. Experimental study on failure characteristics of natural and saturated sandstone under true triaxial unloading and dynamic disturbance condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(11): 2240–2253.
- [22] 李晓照, 张骥烁, 柴博聪, 等. 动力损伤后的脆性岩石静力蠕变断裂模型研究[J]. 力学学报, 2023, 55(4): 903–914.  
LI Xiaozhao, ZHANG Qishuo, CHAI Bocong, et al. A static creep fracture model after dynamic damage in brittle rocks[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2023, 55(4): 903–914.
- [23] 唐礼忠, 刘昌, 王春, 等. 频繁动力扰动对围压卸载中高储能岩体的动力学影响[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(6): 144–154.  
TANG Lizhong, LIU Chang, WANG Chun, et al. Dynamic influence of frequent dynamic disturbance on high-energy rock mass during confining pressure unloading[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(6): 144–154.
- [24] 陈文昭, 蒋一凡, 刘夕奇. 循环扰动荷载作用下花岗岩损伤及破裂特性研究[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2022, 36(3): 47–53, 88.  
CHEN Wenzhao, JIANG Yifan, LIU Xiqi. Damage and fracture characteristics of granite under cyclic disturbance loading[J]. Journal of University of South China (Science and Technology), 2022, 36(3): 47–53, 88.
- [25] 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, 755.  
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, 755.