

王军, 朱传根, 李勋, 等. 类岩石试件三轴扰动破坏特性试验研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024, 6(2): 023034.

WANG Jun, ZHU Chuangen, LI Xun, et al. Triaxial disturbance test of rock-like specimens[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(2): 023034.

## 类岩石试件三轴扰动破坏特性试验研究

王军<sup>1,2</sup>, 朱传根<sup>1</sup>, 李勋<sup>1</sup>, 王波<sup>3</sup>, 张艺腾<sup>4</sup>

(1. 山东建筑大学 土木工程学院, 山东 济南 250101; 2. 山东建筑大学 建筑结构加固改造与地下空间工程教育部重点实验室, 山东 济南 250101; 3. 华北科技学院 应急技术与管理学院, 北京 101601; 4. 应急管理部信息研究院, 北京 100029)

**摘要:** 为研究高应力围岩扰动破坏机制, 开展了不同围压下类岩石试件的三轴常规压缩和三轴循环扰动试验, 得到了试件的扰动应力-应变规律和变形破坏特征, 并对试件开展了核磁共振(Nuclear Magnetic Resonance)成像试验, 从微观角度进一步阐明了试件扰动破坏机理。研究表明: (1) 试件在不同围压下均存在一个阈值强度, 轴向荷载超过阈值强度后, 轴向变形对扰动变得敏感, 再次施加扰动会引起试件显著变形, 当轴向荷载低于阈值强度时, 变形对扰动不敏感。阈值强度与极限强度的比值可以反映试件的抗扰动能力, 随着围压增大, 该比值呈现逐步递减的规律, 说明高围压下试件抗扰动能力下降, 对扰动作用更敏感。(2) 扰动作用下类岩石试件存在弱化效应, 如常规三轴10 MPa围压下试件表现出腰鼓破坏, 而受扰动作用后, 试件呈现斜切脆性破坏, 与常规三轴5 MPa围压下破坏形态相近。(3) 岩石试件在高应力作用下进入塑性流动状态, 内部颗粒重新排列, 内部小孔隙与大孔隙的占比减少, 而中孔隙的占比显著增多, 试件内部孔隙率整体降低。

**关键词:** 类岩石试件; 三轴扰动; 阈值强度; 破坏形态; 核磁共振

中图分类号: TD315

文献标志码: A

文章编号: 2096-7187(2024)02-3034-14

### Triaxial disturbance test of rock-like specimens

WANG Jun<sup>1,2</sup>, ZHU Chuangen<sup>1</sup>, LI Xun<sup>1</sup>, WANG Bo<sup>3</sup>, ZHANG Yiteng<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. Laboratory of Building Structural Retrofitting and Underground Space Engineering, Ministry of Education, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 3. School of Emergency Technology and Management, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China; 4. Information Institute of Ministry of Emergency Management, Beijing 100029, China)

**Abstract:** In order to study the disturbance and failure mechanism of high-stress surrounding rock, triaxial conventional compression and triaxial cyclic disturbance tests of rock-like specimens under different confining pressures were carried out, and the disturbance stress-strain rule and deformation and failure characteristics of the specimens were obtained. Nuclear magnetic resonance (NMR) imaging tests were carried out on the specimens to further elucidate the disturbance and failure mechanism of the specimens from a microscopic perspective. The results show that: (1) all specimens have a threshold strength under different confining pressures. When the axial load exceeds the threshold strength, the axial deformation becomes sensitive to the disturbance, and the re-application of the disturbance will cause significant deformation of the specimen. When the axial load is lower

收稿日期: 2023-11-07

修回日期: 2023-12-28

责任编辑:

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52274121); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2022ME162); 济南市“新高校20条”资助项目(202228106);

作者简介: 王军(1985—), 男, 山东宁阳人, 副教授, 博士后, 主要从事地下工程支护与下穿接驳拓建等方面的研究工作。E-mail: wangjun@sdjzu.edu.cn

通信作者: 朱传根, E-mail: 574947149@qq.com

than the threshold strength, the deformation is not sensitive to the disturbance. The ratio of threshold strength to ultimate strength can reflect the anti-disturbance ability of the specimen. With the increase of confining pressure, the ratio shows a gradual decreasing rule, indicating that the anti-disturbance ability of the specimen decreases under high confining pressure, and it is more sensitive to the disturbance effect. (2) The rock-like specimen has a weakening effect under the action of disturbance. For example, the specimen under the conventional triaxial 10 MPa confining pressure shows waist drum failure, while the specimen under the action of disturbance shows oblique brittle failure, which is similar to the failure form under the conventional triaxial 5 MPa confining pressure. (3) Under the action of high stress, the rock specimen enters the state of plastic flow, the internal particles rearrange, the proportion of small pores and large pores decreases, while the proportion of medium pores increases significantly, and the internal porosity of the specimen decreases as a whole.

**Key words:** rock-like specimen; triaxial disturbance; threshold intensity; destruction pattern; nuclear magnetic resonance

进入深部开采后, 围岩处于“高地温、高地压、高水压、强流变、易扰动”的复杂地质环境中, 特别是深部围岩易受掘进或开采扰动的影 响, 导致围岩的大变形<sup>[1]</sup>, 使巷道支护成本急剧增加。岩石在深部复杂环境下的表现特性与浅部的有较大差别<sup>[2-3]</sup>。

高延法等<sup>[4]</sup>最早提出了岩石强度极限邻域、岩石流变扰动效应等概念, 诸多学者围绕其展开了相关研究。在扰动引起的岩石或试件变形及承载力方面, LI等<sup>[5]</sup>开展了实验室三轴压缩流变扰动试验, 通过分析扰动对流变变形和岩石力学的性能建立了流变扰动载荷下砂岩的本构模型; AHMED<sup>[6]</sup>从岩石试件裂纹发展规律角度并结合损伤理论, 探究了表面特征对岩石变形规律及本构模型的影响; YANG等<sup>[7]</sup>基于弹性损伤原理和COMSOL多物理学中的诺顿-贝利方程, 从时间、空间、能量等3个角度研究了扰动对岩石流变变形的影响。在扰动引起的破坏形态方面, ABYANEH等<sup>[8]</sup>对不同岩石的本构模型进行了数值模拟, 得出扰动变形与岩石材料的关系, 估算了相应岩石的破坏模式; LUO等<sup>[9]</sup>通过真三轴试验研究了扰动条件下岩体破坏机理、初始静应力对岩体破坏的影响以及3种动态扰动下的岩石微破碎模式; SU等<sup>[10]</sup>通过真三轴试验系统对花岗岩破坏过程进行了研究, 得到在恒定静应力作用下当动态载荷的振幅值和频率超过阈值时, Z向应变增大, 弹性应变能大于受损试样的极限储能能力时, 试样发生岩爆破坏的结论; NIU等<sup>[11]</sup>利用计算机软件模拟了岩石准静态三轴载荷、约束压力卸载和动态扰动的破坏特性; 赵光明等<sup>[12]</sup>对

大理岩岩样进行了第3主应力单面卸荷加、卸载试验研究, 得到了破坏模型的应力-应变曲线规律、破坏特征和强度特征。在岩土微观损伤演化试验研究方面; 王绳祖等<sup>[13]</sup>通过试验分析了岩石在脆性-延性转变过程中岩石力学行为、微观机制及宏观变形变化, 深入分析了塑性流动网络; REN等<sup>[14]</sup>提出了一种考虑塑性应变的岩石损伤模型; CHEN<sup>[15]</sup>发现随着非均质性的增加, 岩石样品破坏模式从“X”形变为凝结表面模式, 形成贯穿整个岩石样品; 王俊光等<sup>[16]</sup>对泥岩进行单轴压缩蠕变试验, 并利用电镜对试件破坏断口进行扫描, 研究了不同扰动幅值和频率对泥岩断口微观特征影响; LUO等<sup>[17]</sup>采用核磁共振试验, 得到岩石试件的孔隙分布, 探究了孔隙的分布特征。

目前国内外学者对各类岩石试件进行了大量的流变扰动试验, 也取得了诸多的理论成果, 但主要集中在单轴流变扰动和三轴扰动中岩石试件的宏观破坏机理上, 鲜有对试件三轴扰动中岩石宏观破坏机理的研究。为更好的揭示岩石变形特征和规律, 更好的服务地下深部支护工程实践, 笔者从试件宏观破坏与微观孔隙两个角度对三轴压缩条件下岩石扰动进行了研究。

## 1 岩石流变扰动试验系统

试验采用TAW-1000D岩石流变扰动试验仪, 是国内较为先进的试验仪器, 主要由加载装置、扰动装置、数据采集装置等组成。

### 1.1 试验仪加载装置

TAW-1000D岩石流变扰动试验系统采用刚度

大于10 GN/m的加载主机, 主机采用整体铸造的门式加载框架, 油缸下置, 扰动油缸上置, 可提供的最大轴向力为1 000 kN, 加载过程中可分别对荷载和位移进行控制, 加载精度值在99%以上。围压加载装置由压力室、加压缸、充液油源、小车、导轨、控制器和传感器等组成, 围压最大可加载至70 MPa, 测量精度同样在99%以上。压力室内含有由自平衡活塞组件构成的自平衡结构, 在施加围压时对轴向传感器不会产生影响。加载过程中, 仪器通过加压缸的活塞运动, 实现自动补压, 可以使轴压、围压值长时间维持恒定状态。

## 1.2 扰动荷载加载装置

TAW-1000D扰动荷载装置在轴向加载框架的上方, 由液压系统推动扰动装置活塞施加扰动荷载, Electronic Data Capture(EDC)控制箱根据计算机指令以及测定液压压力值的传感器进行伺服调整。TAW-1000D扰动荷载装置特点是可以施加连续荷载, 测力分辨率为2 N, 可实现位移扰动控制和荷载扰动控制。试验仪能够提供多种扰动荷载波形, 如简谐荷载、恒定间隔荷载、矩形荷载、三角形荷载、锯齿荷载、脉冲荷载等, 其频率 $\leq 5$  Hz。



图1 岩石流变扰动效应试验仪

Fig. 1 Rock rheological disturbance effect tester

## 1.3 数据收集装置

岩石流变扰动试验仪的数据采集装置主要由引伸计、传感器、EDC控制箱、计算机TEST软件等组成, 该装置可自动采集并记录轴向荷载值、轴向位移值、围压值、围位移值、扰动荷载值、扰动位移值、扰动频率值、时间值等。轴向引伸计与径向引伸计内部含有特殊应变片, 可自动记录轴向应变、径向应变, 其精度在99%以上。试验时计算机TEST软件对EDC控制箱施加命令, 控制加压缸进行加压或者卸压, 同时引伸计将所获得的数据传输给传感器, 并经过EDC控制箱反馈给计算机TEST软件, 软件界面如图2所示。

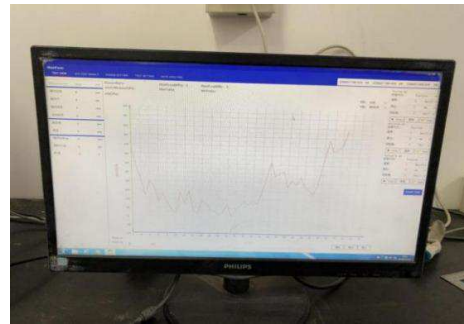


图2 TEST 软件界面

Fig. 2 TEST software interface

## 2 类岩石试件三轴压缩试验

### 2.1 试件的制作

试件材料取自华丰煤矿<sup>[18]</sup>深部1 100 m处巷道围岩的砂质泥岩, 对其进行密封处理, 转移至实验室, 进行切割, 取芯, 打磨, 剔除具有明显裂隙、层理等肉眼可见的缺陷, 最后使用HS-YS4A型岩石声波参数测试仪进行波速测试, 剔除波速异常的

岩石试件。采用X射线物相分析法确定砂质泥岩的组分, 使用DX-2700型X射线衍射仪对砂质泥岩进行扫描, 记录每秒脉冲数衍射强度, 与衍射强度数据库进行比对, 分析其岩样组分。根据衍射结果(表1)得到砂质泥岩样品主要成分为高岭石, 有中等含量的伊利石或伊蒙混层等矿物。

考虑到岩石的取芯率很低, 又极易发生断裂, 且离散性较大。根据相似模拟理论: 凡具有同一特性的现象, 当单值条件(边界条件、应力条件、应变条件、密度条件等)彼此相似, 则由这些相似单

值条件组成的现象也必定相似。对取得的岩石进行物理参数分析, 根据获取的基本参数(表2), 制作具有相似性质的类岩石试件(图3)。采用河砂(粒径为0.60~4.75 mm), 铁铝酸水泥, 水按照质量比为1.9:1:0.5进行拌和, 制作的类岩石试件与岩石试件的物理参数比值为1:1。

表1 X-射线衍射分析报告

Table 1 X-ray diffraction analysis report

黏土矿物相对含量/%					混层比/%S	
S	I/S	I	K	F	I/S	F/S
8	31	9	52	—	25	—

注: S—蒙脱石; I—伊利石; K—高岭石; F—长石; I/S—伊蒙混层; F/S—长蒙混层。

表2 岩石与类岩石试件基本力学参数<sup>[18]</sup>

Table 2 Basic mechanical parameters of rock and rock

类型	弹性模量/GPa	单轴抗压极限强度/MPa	平均密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	屈服应力/MPa
岩石	15.56	32.68	2.58	27.65
类岩石试件	14.13	28.65	2.35	24.95

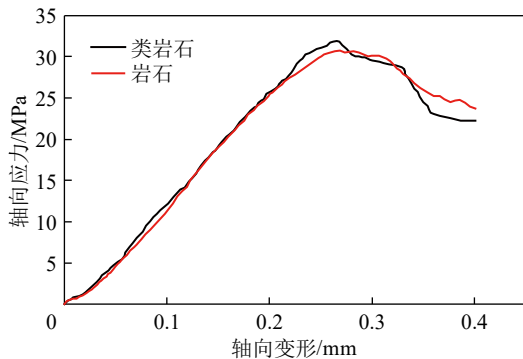


图3 类岩石试件与岩石应力-应变曲线

Fig. 3 Comparison of total stress-strain curves between class rocks and rocks

试件尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 经过28 d养护后, 将其放在打磨机上打磨, 使上下端面的不平整度 $\leq 0.02 \text{ mm}$ , 然后再用岩石声波参数测试仪进行纵波波速测试, 剔除波速异常的类岩石试件, 部分类岩石试件如图4所示。

## 2.2 类岩石试件常规三轴压缩试验

根据先前学者对岩石流变及其扰动效应试验研究<sup>[19-21]</sup>, 首先对已选取的类岩石试件进行不同围压下的三轴压缩试验, 设定的围压分别为0, 1, 3, 5, 10, 15, 20 MPa。为更好的模拟深部岩石的复杂应



(a) 岩石声波测速仪



(b) 部分类岩石试件

图4 仪器及试件

Fig. 4 Instrument and specimen

力状态, 通过施加围压, 试验可更为真实地模拟地下环境的力学行为。若先施加轴压, 表明试件开始单轴压缩, 致使试件内部出现裂纹, 可能会影响常规三轴试验的准确性和可信性。先施加围压可以有效增加试样的侧向压力, 使试样在轴压加载时更加稳定, 这有助于减小试件的侧向变形, 确保试验结果的准确性, 同时可有效地增加试件的强度, 并提供一定的保护作用。为此试验选择先施加围压, 待围压达到目标值后再施加轴压, 轴压加载速率为 $0.2 \text{ MPa/s}$ <sup>[22]</sup>, 考虑试验的时间尺度, 较慢的加载速率可提供更好的试验控制, 更好地模拟实际深部应力的加载过程, 更准确地观察试样的变形和破坏过程, 使试验结果更接近工程实际。由于较快的加载速率可能导致试验结果的不准确或试样意外破坏, 常规压缩试验中轴压采用连续加载方式, 直至试件被破坏停止, 得到不同围压下类岩石试件的轴向应力-应变关系, 如图5所示。

由图5可知, 试件极限强度与所受围压大小有关, 试件所受围压越大, 极限强度越大, 与无围压时的极限强度 $24.9 \text{ MPa}$ 相比, 试件在 $20 \text{ MPa}$ 围压下的极限承载能力达到 $93.3 \text{ MPa}$ , 增加2.7倍。试件的极限应变也由无围压下的 $0.245\%$ 增加到 $20 \text{ MPa}$ 下的 $2.058\%$ , 增大了8倍左右。同时在 $10 \text{ MPa}$ 以上的

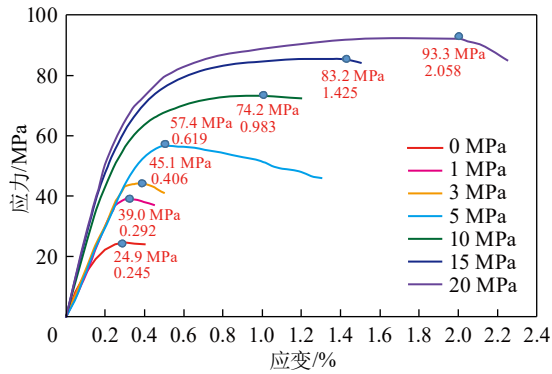


图5 常规压缩条件下不同围压的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of different confining pressures under conventional compression conditions

围压应力-应变曲线有一段几乎呈水平趋势, 此时试件的应力基本不变, 应变显著增大, 说明此时试件已进入塑性状态, 并且围压越大, 试件的塑性区发展越充分, 因此在较高围压下, 试件发生的主要是延性破坏; 类岩石试件峰前受载阶段, 试件内部张开界面和微裂隙开始闭合, 径向膨胀减小, 岩石压密。随着荷载增大, 试件内部萌生、稳定性扩展的微裂纹, 表现为体积扩容现象, 但低围压下并不明显。此时, 出现弹性或弹塑性转化为塑性的屈服点。当微裂纹从量变到质变时, 裂纹非稳态发展, 直至试件破坏。

相比10 MPa以上的围压应力-应变曲线, 在围压为零或较低的情况下轴向应变速率迅速增大, 应力-应变曲线在峰后内部结构遭到破坏, 裂隙交互贯通形成宏观断裂面, 破坏形式趋于局部化主要表现为沿宏观断裂面的块体滑移, 承载力会迅速下降, 岩石破坏以脆性破坏为主, 随着围压增大逐渐表现出一定的延性态势。同时也表明从围压5 MPa到10 MPa的过程中, 类岩石试件从脆性状态逐渐过度到延性屈服状态。根据类岩石试件三轴常规压缩试验, 得到其三轴常规压缩试验数据, 见表3。

### 3 类岩石试件三轴扰动试验

类岩石试件三轴扰动试验采用逐级加载方式, 根据满柯等<sup>[23-25]</sup>的长期强度确定方法并结合常规应力-应变试验曲线, 初步确定不同围压下的长期强度  $\sigma_{sx}$  ( $x$ 表示围压级数, 共有7组: 0, 1, 3, 5, 10, 15, 20 MPa) 分别为18, 27, 34, 41, 45, 50, 57 MPa, 取其80%作为扰动试验的首次轴向预静载应力, 之后每次静载增加10%  $\sigma_{sx}$ , 每级轴向预静载持续时间

表3 三轴常规压缩试验数据

Table 3 Data of triaxial conventional compression test

围压/MPa	极限强度/MPa	极限应变/%	极限变形/mm
0	24.9	0.245	0.242
1	39	0.292	0.286
3	45.1	0.406	0.401
5	57.4	0.619	0.606
10	74.2	0.983	0.973
15	85	1.425	1.397
20	93.3	2.058	2.017

注: 极限应变及极限变形, 指代极限强度对应的应变及变形。

不低于2 h, 且轴向变形15 min内不超过0.001 mm后, 对试件施加扰动荷载(图6)。扰动荷载波型为正弦波, 频率为1 Hz, 荷载幅值设定为1 kN, 对试验的岩样( $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ), 相当于施加的最大扰动应力约为0.5 MPa。试件在每级静载下至少被扰动8次, 一次扰动包含30个周期, 每次扰动时间间隔15 min, 经过8次扰动且变形稳定后, 对试件施加下一级轴向荷载。考虑到工程实际中岩石处于三向受力状态, 在常规三轴压缩试验中  $\sigma_2 = \sigma_3$ , 当围压为0即单轴扰动流变试验, 属于深部开采后, 破碎区围岩丧失第二主应力和第三主应力, 单轴蠕变下岩石特性的研究重点, 为此本节只重点研究实际工程状况下三轴扰动在围压下的破坏特性。

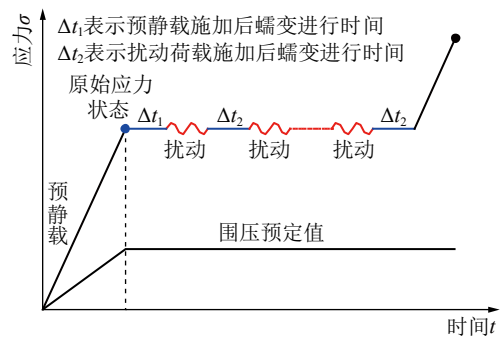


图6 应力加载路径

Fig. 6 Stress loading path diagram

#### 3.1 扰动试验分析

图7描述了不同围压下轴向变形随时间的变化趋势。

由图7(a)可知, 围压越大, 试件在扰动作用下的极限变形就越大。由图7(b)可知, 1 MPa围压下, 轴向变形与时间的曲线呈现“先缓后陡”的趋势。施加第1,2级轴向荷载时, 变形增加量仅为0.009 mm, 曲线近似为一条水平线, 试件受到扰动

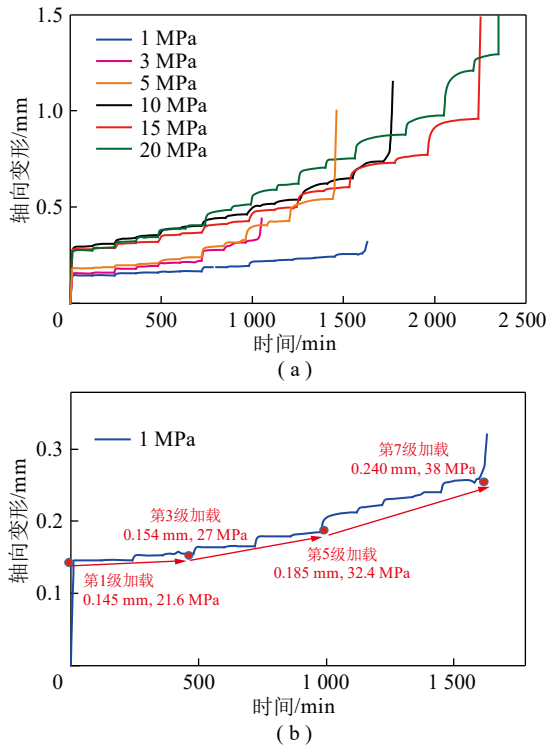


图7 扰动条件下不同围压轴向变形随时间的变化曲线  
Fig. 7 Axial deformation-time of different confining pressures under disturbed conditions

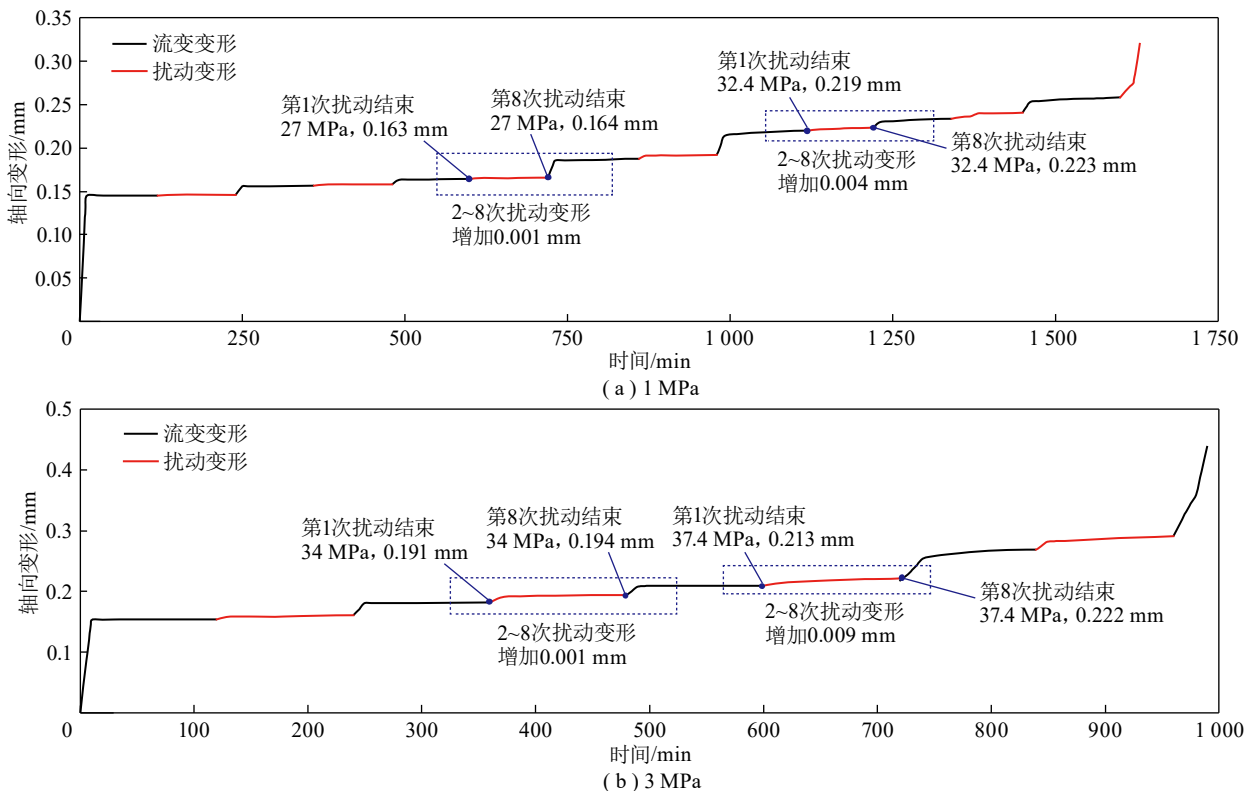
后轴向变形不大;随着轴向荷载增加,曲线逐渐“倾斜”,施加第3,4级轴向荷载后,变形增加量为0.031 mm,为第1,2级荷载作用下变形量的3.5倍;施加第5,6级轴向荷载后,变形增加量继续扩大,增

长至0.055 mm,为第1,2级荷载作用下变形量的6倍,反映出试件的轴向变形不再稳定,其他围压下的变形-时间曲线也表现出相同的规律。

结合高延法等<sup>[4]</sup>提出的“岩石强度极限邻域”的概念,在轴向应力逐级加载过程中,存在某一轴向应力值,岩石在其左右两侧表现出不同的性质,称这一临界值为“岩石阈值强度”。轴向荷载值低于“岩石阈值强度”时,施加扰动后试件轴向变形量基本为零,此时试件对扰动不敏感;当轴向荷载大于“岩石阈值强度”时,每施加一次扰动均会增加一定量的轴向变形,试件对扰动影响比较敏感<sup>[26-27]</sup>。参照高延法等<sup>[4]</sup>的研究成果,为便于定量分析三轴扰动规律,笔者对每一级加载引起的试件轴向变形量进行比较,定义为本加载阶段引起轴向变形量为前一阶段变形量2倍以上为“岩石阈值强度邻域”,根据其可以进一步估算出岩石阈值强度。同时通过扰动试验结果可知,试件承受一定时间静载后,首次扰动会引起试件轴向变形突变,对定量分析扰动条件下试件轴向变形规律产生了一定干扰,因此选择轴向变形渐变的“2~8次扰动”作为研究对象。

(1)不同围压下试件“阈值强度”分析

图8描述了类岩石试件在围压分别为1, 3, 5, 10, 15, 20 MPa时的轴向变形随时间的发展趋势。



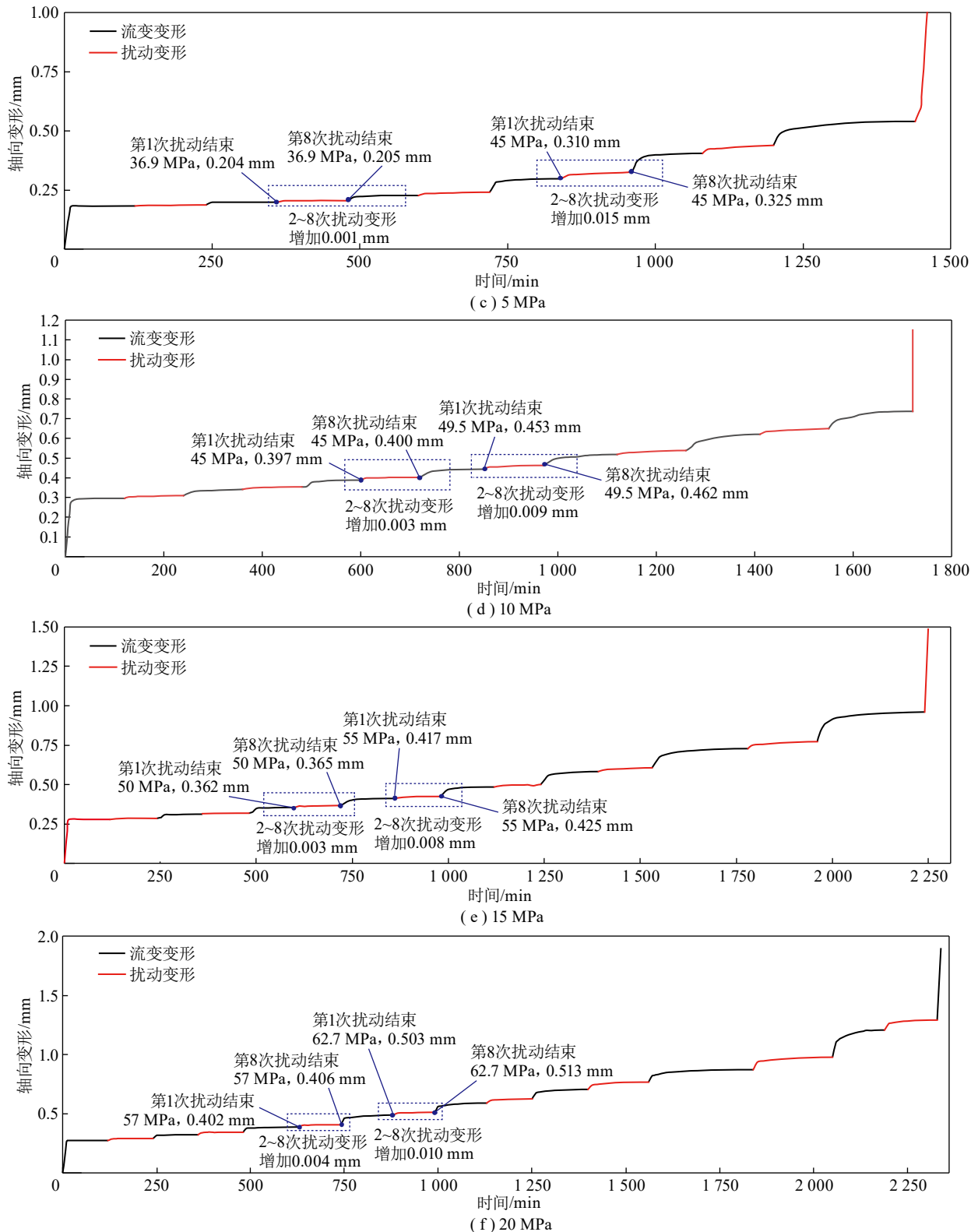


图8 不同围压下应变随时间的变化曲线

Fig. 8 Deformation time curves under different confining pressures

为探究类岩石试件“阈值强度”，将轴向变形分为流变变形和扰动变形两阶段。以围压10 MPa为例，由图8(d)可知，当轴向荷载小于45 MPa时，曲线近似水平，变形微小，类岩石试件对扰动不敏

感，此时轴向荷载小于阈值强度；轴向荷载增加到45 MPa时，施加前几次扰动引起部分扰动变形，但是随着扰动次数增加，扰动变形趋于稳定不再增加，施加第2~8次扰动时，轴向变形增加了

0.003 mm; 轴向荷载增加至49.5 MPa时, 曲线为一条倾斜直线, 每施加一次扰动, 均会引起一定的变形, 此时2~8次扰动所引起的增加量为0.009 mm, 是45 MPa下2~8次扰动增加量的3倍, 说明49.5 MPa下试件对扰动影响比较敏感, 此时轴向荷载大于阈值强度, 故围压10 MPa下类岩石试件的阈值强度在45.0~49.5 MPa, 取平均值47.25 MPa作为其阈值强度。

同理根据其他围压下轴向变形随时间的变化曲线可得出相应围压下类岩石试件的阈值强度, 在围压1, 3, 5, 15, 20 MPa下, 其值分别为29.7, 35.7, 43.2, 52.5, 59.8 MPa, 如图9所示, 可知随着围压增大, 阈值强度也在增大。其本质原因是围压与轴力的相互约束关系: 围压通过限制裂纹扩展降低变形损伤累积速率, 围压越高, 对试件内部裂纹扩展约束效果就越好, 所需削弱围压限制作用的轴力就越高, 即阈值强度越高。

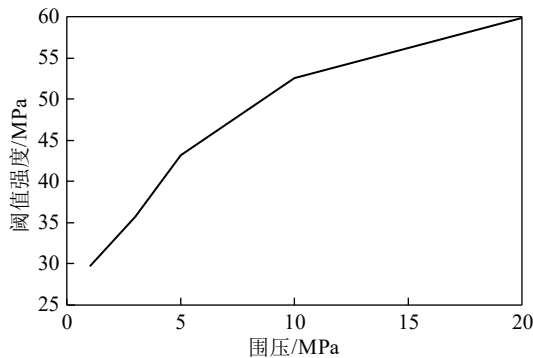


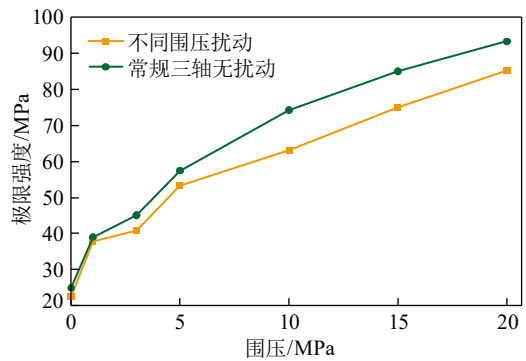
图9 阈值强度与围压的关系

Fig. 9 Relation between threshold strength and confining pressure

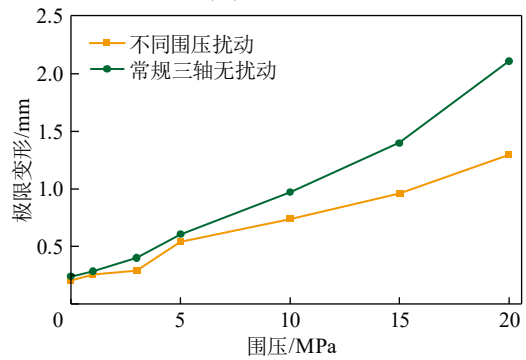
(2)不同围压下扰动变形分析

以围压1 MPa为例, 由图8(a)可知, 共对类岩石试件加载了7级轴向静载, 第7级静载持续2 h后施加扰动荷载, 试件轴向变形突然显著增加且变形速度越来越大, 说明试件已被破坏, 取第7级轴向静载值作为类岩石试件在围压1 MPa下的扰动极限强度, 相应变形为扰动极限变形。得到不同围压下类岩石试件的三轴扰动试验数据, 如图10, 表4所示。由图10, 表4可知, 相同围压下扰动试验的极限强度和阈值强度均比常规条件下小。为便于描述分析, 将阈值强度与常规极限强度的比值称为阈值比, 由图10, 表4可知, 随着围压的升高, 这一比值整体呈现下降趋势, 试件在无围压时比值为

0.843, 围压5 MPa时为0.714, 围压20 MPa时为0.640。阈值强度与常规极限强度的比值反映出试件的抗扰动能力, 比值越大说明阈值强度越接近极限强度, 扰动对试件的影响就越小, 因此深部巷道围岩处于高应力状态下, 相较于浅部的更易受扰动影响。



(a) 极限强度对比



(b) 极限变形对比

图10 常规三轴与应力扰动试验对比

Fig. 10 Comparison of conventional triaxial and stress disturbance tests

表4 扰动条件下试件极限承载能力与极限变形  
Table 4 Ultimate bearing capacity and ultimate deformation of specimens under disturbed conditions

围压/MPa	扰动条件			常规条件		阈值比
	极限强度/MPa	扰动极限变形/mm	阈值强度/MPa	极限强度/MPa	常规极限变形/mm	
0	22.4	0.205	21.0	24.9	0.242	0.843
1	37.8	0.258	29.7	39.0	0.286	0.762
3	40.8	0.291	35.7	45.1	0.401	0.792
5	53.3	0.541	43.2	57.4	0.606	0.714
10	63.0	0.738	47.2	74.2	0.973	0.636
15	75.0	0.961	52.5	85.0	1.397	0.617
20	85.2	1.293	59.8	93.3	2.017	0.640

根据图8和图11所示, 初期扰动阶段: 应力扰动加载前恒压阶段、应力扰动阶段和应力扰动后恒压阶段的轴向增量很小, 轴向变形曲线趋于平

缓, 应力扰动过程中岩石内部以弹性变形为主, 岩

石内部损伤较小。

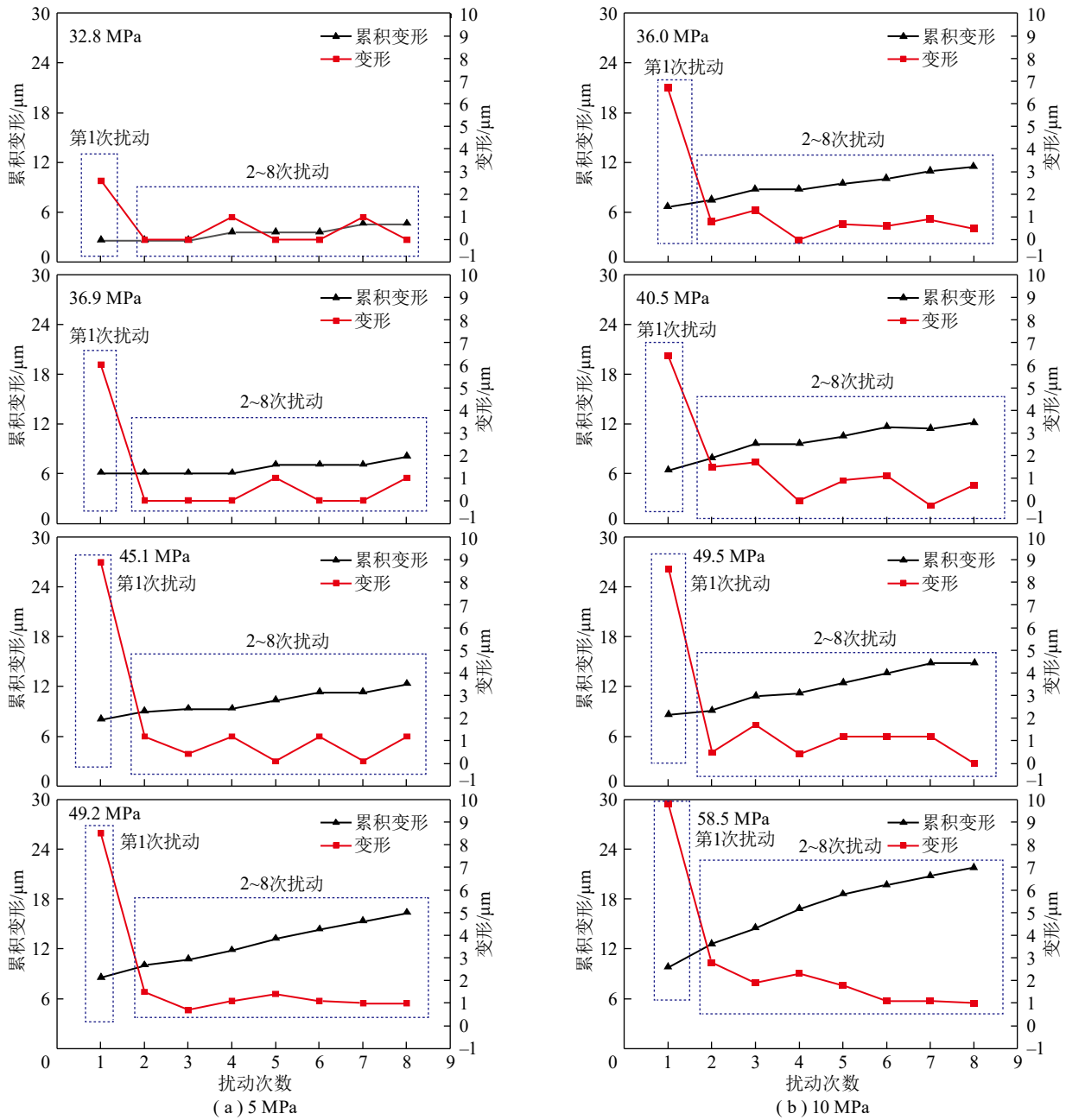


图 11 扰动次数分析

Fig. 11 Disturbance frequency analysis diagram

中期扰动阶段: 随着轴压水平的提高, 每级加载的各阶段轴向变形开始缓慢增加, 应力扰动过程中岩石内部以塑性应变为主, 岩石内部损伤逐渐累积。

后期扰动阶段: 静载轴压削弱围压的约束作用, 轴向变形呈直线上升, 恒压阶段的轴向呈微倾斜直线, 该阶段岩石蠕变特性明显。

由图8可知, 每级轴向静载作用2 h后的首次扰动荷载引起的变形量较大, 2~8次单次扰动引起的

试件变形量相对较小, 围压5 MPa下扰动次数与变形关系如图11(a)所示。第1级轴向静载为32.8 MPa, 静载持续2 h后施加扰动, 总共扰动8次, 每次间隔15 min, 由图11(a)可知, 第1次扰动变形量增加0.002 6 mm, 2~8次扰动变形增加量为0.002 mm, 相对于2~8次扰动, 首次扰动所引起的变形量较大, 围压5 MPa下其他几级荷载作用以及在其他围压作用时也表现出同样的规律。围压10 MPa(图11(b))为例, 随着静载增加, 首次扰动变形增加量分别为

0.006 7, 0.006 4, 0.007 2, 0.008 6, 0.009 3, 0.009 6 mm, 在轴压较低时, 试件此时处于弹性状态, 首次扰动引起的变形增量相对较小, 轴压较高时, 试件已进入塑性状态, 首次扰动引起的变形量较大, 根据王绳祖<sup>[13]</sup>对岩石的脆性-延性转变及塑性流动网络塑性状态的描述, 认为岩石塑性流动是其中包括由位错运动、扩散、超塑性等机制所引起的固体流动以及所含液体直接或间接作用。因此试件在轴压较高条件下已经进入塑性状态, 在2 h静载过程中, 由于存在塑性流动现象, 试件内部构造在动态中寻求一个新的平衡, 塑性流动过程中产生部分孔隙, 施加扰动荷载后, 试件内部构造原有平衡被打破, 孔隙被压实或者贯通, 试件宏观表现为变形增大或试件突然发生破坏。

王波等<sup>[28]</sup>在研究流变扰动效应引起围岩应力场演化规律时认为多次扰动后累计变形量的本构方程为

$$\sum \Delta \varepsilon = \sum_{i=1}^n k \frac{\Delta W_i}{E} f(\sigma, \sigma_0)$$

式中,  $k$ 为扰动系数;  $E$ 为岩石的弹性模量;  $\Delta W_i$ 为第  $i$ 次的扰动荷载能量;  $f(\sigma, \sigma_0)$ 系数为与岩石应力状态有关的函数。

因此可以认为试件破坏是轴向静载与扰动荷载耦合作用的结果<sup>[29-30]</sup>, 对比三轴常规压缩和三轴扰动极限强度和极限变形, 可知在相同围压下,

扰动试验得到的极限变形、极限强度均小于常规试验, 所以试件在受到扰动后, 会提前发生破坏。

### 3.2 类岩石试件破坏形态分析

图12反映了常规三轴压缩条件下类岩石试件在不同围压时的破坏形态, 在无围压时试件表面裂纹沿纵向发展, 表面片状剥落, 随着轴压增大, 试件在产生轴向变形的同时会产生径向变形, 试件表面受到的拉应力超出其抗拉力, 其表面片状剥落、发生劈裂破坏; 在围压5 MPa时, 试件出现一条贯通内部的斜裂缝, 与单轴压缩相比试件此时处于三向受压状态, 表面抗拉能力增强, 随着轴压的增大, 试件内剪应力逐渐超过抗剪力, 试件发生斜切破坏; 在围压10 MPa时, 试件中间径向变形大, 上、下端径向变形小, 呈现出“腰鼓”变形, 同时试件表面伴随着斜裂纹, 此时类岩石试件破坏形态为“斜切-腰鼓过渡型”; 在围压15, 20 MPa时也发生“腰鼓”变形, 呈现中间变形大, 两端变形小的特征, 结合类岩石试件在围压15, 20 MPa时的应力-应变曲线, 达到极限承载能力时试件塑性发展较为充分, 可将腰鼓变形归为延性破坏。综上所述, 随着围压增大, 试件的破坏形态呈现劈裂破坏、剪切破坏及腰鼓变形, 劈裂与剪切属于脆性破坏, 腰鼓变形为延性破坏, 类岩石试件在两种破坏的围压分界点约为10 MPa。

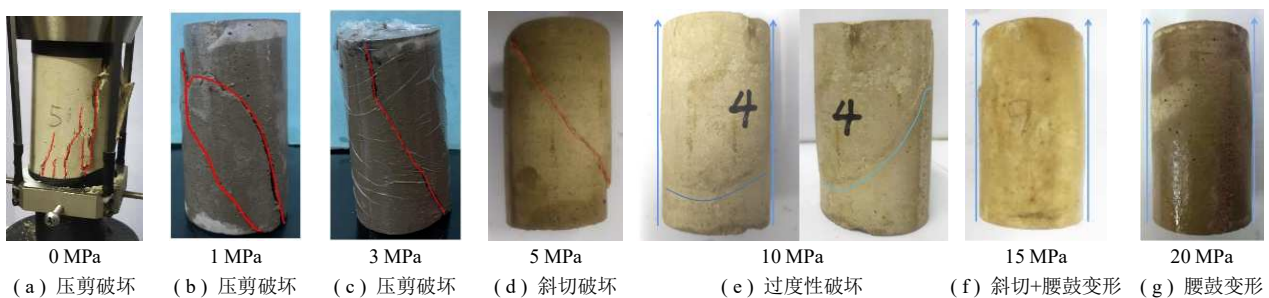


图12 常规条件下不同围压类岩石试件破坏形态

Fig. 12 Failure patterns of rocks under different confining pressures under conventional conditions

图13为扰动条件下不同围压类岩石试件的破坏形态。由图13可知, 在围压0, 5, 10 MPa时, 类岩石试件表面出现一条贯通裂缝, 单轴压缩条件下, 裂缝与水平面夹角比较大, 受围压约束后, 裂缝与水平面夹角变小; 在围压15 MPa时, 试件表面出现两道交叉裂缝, 呈现出“X型共轭破坏”特征, 该破坏是由剪应力超过试件的抗剪强度引起的脆性

破坏, 同时试件中间径向变形略大于两端径向变形, 试件中部略有腰鼓; 在围压20 MPa时, 试件表明有一道明显的斜裂缝, 试件本身沿着裂缝上下错位, 致使试件呈中间略腰鼓并伴随斜裂缝的破坏形态。综上所述, 试件受扰动后, 其破坏特征主要是以脆性破坏为主, 围压较高时, 如15, 20 MPa, 虽然略有腰鼓变形, 但最终发生了脆性斜切破坏。

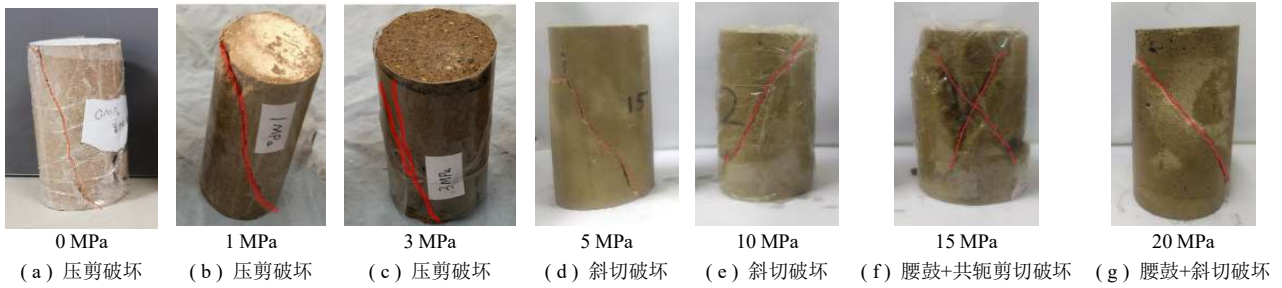


图 13 扰动条件下不同围压类岩石试件破坏形态

Fig. 13 Failure patterns of rocks under different confining pressures under disturbed conditions

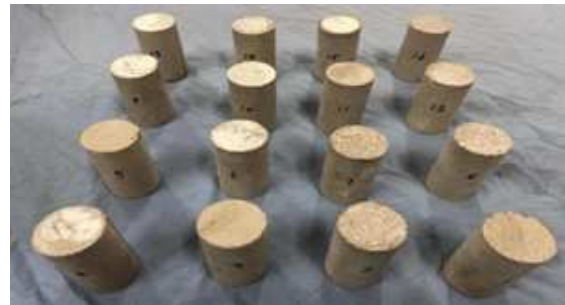
对比图10, 12, 13可知, 常规压缩条件下, 随着围压升高类岩石试件先后经历脆性劈裂、脆性斜切、斜切-腰鼓、腰鼓变形等破坏形态; 扰动作用下为脆性劈裂、脆性斜切、略有腰鼓的脆性斜切等。试件受扰动影响破坏形态会提前, 如常规压缩条件下试件在10, 15, 20 MPa围压下均表现为腰鼓延性破坏, 受扰动作用后, 试件呈现出斜切脆性破坏、略有腰鼓的斜切脆性破坏。对比常规三轴和三轴扰动试验结果可知, 扰动对类岩石材料存在一定的弱化效应。其主要原因<sup>[31-33]</sup>为: ①试件的破坏过程伴随着裂纹的压密、萌生、扩展和贯通。试件加载初期, 由于围压限制裂纹扩展降低了试件损伤累积率, 岩石内部裂隙发育只在既有缺陷区域的重复压密、损伤破坏和相邻区少数裂隙的扩展。但在分级应力扰动后期, 随着轴力的升高会使得围压限制作用减弱造成裂纹快速扩展, 试件损伤程度增大, 过早出现试件损伤薄弱区。②试件本身在高围压状态下储存了一定的弹性应变能, 由于在弹性应变能向塑性变形的缓慢转化过程中, 扰动荷载的额外能量输入使得试件的应变能瞬时发生小幅突增, 导致储能瞬时加快, 造成裂纹迅速非稳态扩展和贯通, 表现为裂纹损伤扩大和试件整体扩容, 加速试件在损伤薄弱区的破坏, 延性破坏转变为脆性破坏。高轴力是岩石强度弱化的前提和主导因素, 而动力扰动诱发岩石破坏并影响强度弱化程度。

### 3.3 类岩石试件内部结构分析

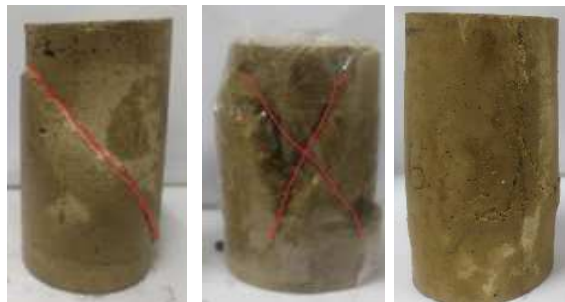
为进一步探究类岩石试件在扰动作用下的破坏机理, 通过核磁共振成像分析仪(NMR imaging analyzer), 如图14所示, 对整体性较好的3个腰鼓变形试件和3个未加载试件进行内部孔隙结构分析, 如图15所示。经过24 h饱水、24 h烘干后,核磁共振检测得出未加载试件与加载后腰鼓试件核磁共振成像图, 如图16所示。



图 14 NMI20-025 V-I 核磁共振成像分析仪  
Fig.14 NMI20-025 V-I NMR imaging analyzer



(a) 3个随机未加载试件



(b) 腰鼓破坏试件

图 15 核磁共振所用试件

Fig. 15 Specimen used in NMR

由图16(a)可以发现, 未加载的试件成像图中出现几处明亮的光斑, 说明试件内部存在一些较大的孔隙。由图16(b)可以发现, 试件发生腰鼓变形后, 原有的明亮光斑消失, 图像上呈现一些细小且分散的光点, 说明试件内部较大孔隙被压缩, 产生了一些新的较小孔隙。

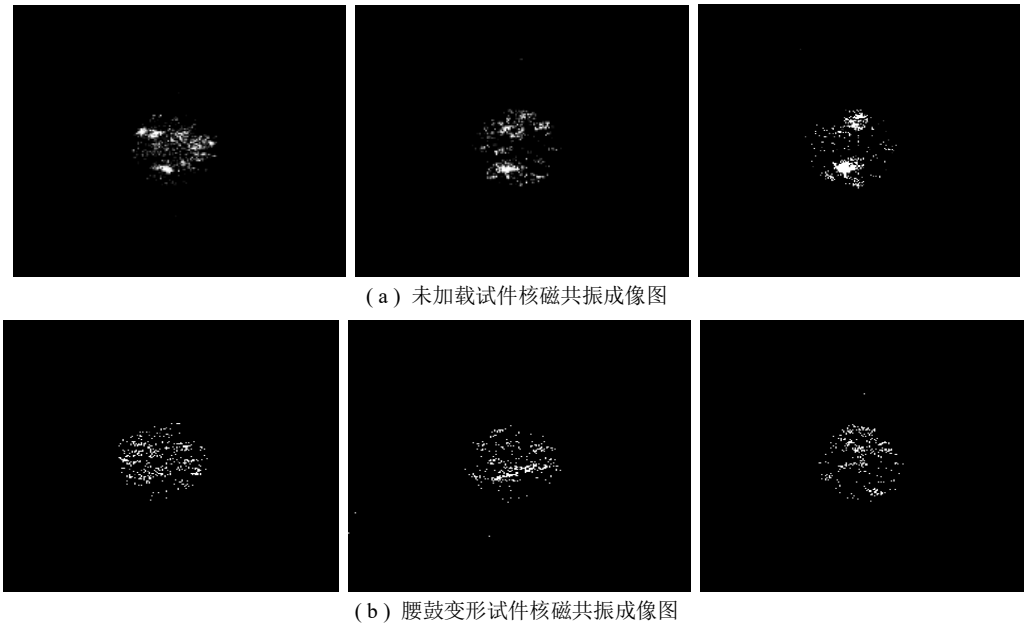


图 16 核磁共振成像图

Fig. 16 Nuclear magnetic resonance imaging contrast

对试件内部孔隙数据作平均处理, 绘制成试件内部孔隙分布图, 如图17所示。为便于分析, 定义孔(0, 100 nm],(100, 1000 nm],[1000, 10000 nm]的孔隙分别为小、中、大等3种孔隙。小孔隙(粒间孔隙)主要是骨架颗粒组成的格架间的空间; 中孔隙(粒组孔隙)主要是颗粒组的胶结孔隙, 占比一般低于5%; 大孔隙是混凝土振捣不密实或砂子粒径过大引起的内部缺陷<sup>[34-35]</sup>。

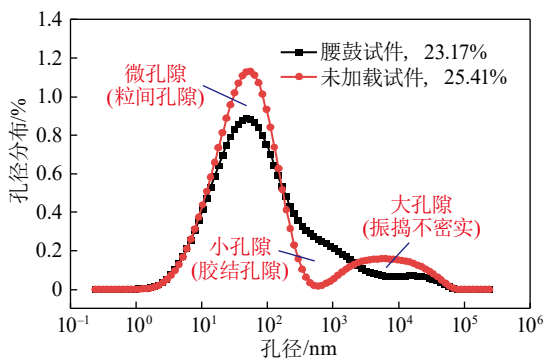


图 17 类岩石试件内部孔隙分布

Fig. 17 Internal pore distribution of rocks

由图17可知, 腰鼓型变形试件整体孔隙率较未加载试件减少, 其中小孔隙与大孔隙占比均减少, 而中孔隙占比显著增多。原因在于腰鼓型试件变形过程中发生了塑性流动, 内部颗粒发生位错运动, 使小颗粒进入大孔隙, 同时由于颗粒间的相互错动, 部分原生孔隙粒径加大, 产生了新的中孔隙

(粒组孔隙)。因此在轴向荷载和围压的共同作用下, 试件中因初始缺陷造成的大孔隙被压实, 试件内部颗粒结构重新排列, 试件内部应力重新达到平衡。

#### 4 结论与展望

(1)受扰动作用影响, 类岩石试件在不同围压下均存在一个阈值强度, 轴向荷载小于阈值强度时, 轴向变形对扰动不敏感; 轴向荷载大于阈值强度时, 轴向变形随着扰动次数增加而增大。随着围压增大, 阈值强度与极限强度的比值呈现逐步递减的规律, 试件对扰动作用表现更加敏感, 抗扰动能力下降。

(2)常规压缩条件下, 随着围压升高, 类岩石试件先后表现出脆性劈裂、脆性斜切、斜切-腰鼓、延性腰鼓等破坏形态, 扰动作用下为脆性劈裂、脆性斜切、略有腰鼓的脆性斜切破坏等。表明扰动效应对岩石强度存在一定的弱化作用, 虽然围压具有限制岩石内部微裂纹扩展贯通效果, 但扰动后期, 轴力的升高削弱了围压的限制作用, 造成裂纹快速扩展, 弹性应变能提前释放, 加速了岩石破坏。高轴力是岩石强度弱化的前提和主导因素, 而动力扰动诱发岩石破坏并影响强度弱化程度。

(3)高应力岩石试件进入塑性后, 其内部会有塑性流动状态, 使得试件内颗粒重新排列, 原有的大孔隙被细小颗粒填充, 大孔隙占比减少, 同时因颗

粒位错运动产生了一些中孔隙, 中孔隙占比增多, 岩石试件整体孔隙率降低, 试件被压缩。

(4)笔者主要在扰动荷载保持不变的情况下, 对不同围压下类岩石试件的进行的研究, 下一步将重点研究扰动荷载变化的情况下试件的扰动破坏机制, 另外受限于当前试验技术手段, 不能对破坏后不完整的试件进行核磁共振试验, 无法探究其内部孔隙演化规律。

#### 参考文献(References):

- [1] 朱磊, 古文哲, 柴敬, 等. 采动覆岩全场变形演化过程分布式光纤监测研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(1): 013014.  
ZHU Lei, GU Wenzhe, CHAI Jing, et al. Evolution of mining-induced overburden deformation using distributed optical fiber[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(1): 013014.
- [2] 王杰, 袁国涛. 不同加载速率下深部砂岩的声发射与破裂响应特征[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(4): 043024.  
WANG Jie, YUAN Guotao. Acoustic emission and fracture characteristics of deep sandstone under different loading rates[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2023, 5(4): 043024.
- [3] WAGNER H. Deep mining: A rock engineering challenge[J]. Rock Mech Rock Eng, 2019, 52: 1417–1446.
- [4] 高延法, 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 and its constitutive relationship study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 3180–3185.
- [5] LI X, YIN Z. Study of creep mechanical properties and a rheological model of sandstone under disturbance loads[J]. Processes, 2021, 9(8): 1291.
- [6] AHMED Z, WANG S, HASHMI M Z, et al. Causes, characterization, damage models, and constitutive modes for rock damage analysis: A review[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(16): 1–14.
- [7] YANG Z, ZHU W, GUAN K, et al. Influence of dynamic disturbance on rock creep from time, space and energy aspects[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2022, 13(1): 1065–1086.
- [8] JAFARIAN ABYANEH M, TOUFIGH V. Softening behavior and volumetric deformation of rocks[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(8): 04018084.
- [9] LUO D, SU G, ZHANG G. True-triaxial experimental study on mechanical behaviours and acoustic emission characteristics of dynamically induced rock failure[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(3): 1205–1223.
- [10] SU G, FENG X, WANG J, et al. Experimental study of remotely triggered rockburst induced by a tunnel axial dynamic disturbance under true-triaxial conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(8): 2207–2226.
- [11] NIU L, ZHU W, CHENG Z, et al. Numerical simulation on excavation-induced damage of rock under quasi-static unloading and dynamic disturbance[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(17): 1–14.
- [12] 许文松, 赵光明, 孟祥瑞, 等. 大理岩真三轴单面卸荷条件下加卸载试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(3): 526–534.  
XU Wensong, ZHAO Guangming, MENG Xiangrui, et al. Test study on true-triaxial loading and unloading for marble with unloaded single face[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(3): 526–534.
- [13] 王绳祖. 岩石的脆性-延性转变及塑性流动网络[J]. 地球物理学进展, 1993, 8(4): 25–37.  
WANG Shengzu. Brittle-ductile transition and plastic-flow networks in rocks[J]. Progress in Geophysics, 1993, 8(4): 25–37.
- [14] REN C, YU J, CAI Y, et al. A novel constitutive model with plastic internal and damage variables for brittle rocks[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 248: 107731.
- [15] CHEN H, FANG R, LI Y J, et al. Three-dimensional DEM numerical simulation of rock failure progress with different microscopic heterogeneities[A]. Applied Mechanics and Materials[C]. Trans Tech Publications Ltd, 2014, 580: 767–773.
- [16] 王俊光, 杨鹏锦, 金峤. 动静加载条件下泥岩蠕变及细观破裂机制分析[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(6): 1223–1229.  
WANG Junguang, YANG Pengjin, JIN Qiao. Mudstone creep experiment and mesomechanical analysis of failure mechanism under cyclic disturbance load and static load[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2019, 48(6): 1223–1229.
- [17] ZHANG X, DONG Q, ZHANG X, et al. Rheological properties of argillaceous intercalation under the combination of static and intermittent dynamic shear loads[J]. Shock and Vibration, 2021, 2021: 5533086.
- [18] 张慎河, 徐学国, 王军, 等. 类岩石蠕变性能试验及长期强度确定方法研究[J]. 山东建筑大学学报, 2020, 35(1): 24–29.

- ZHANG Shenhe, XU Xueguo, WANG Jun, et al., Study on creep property test of similar rocks and long-term strength determination method[J]. *Journal of Shandong Jianzhu University*, 2020, 35(1): 24–29.
- [19] ZHA ES, ZHANG ZT, ZHANG R, et al. Long-term mechanical and acoustic emission characteristics of creep in deeply buried jinping marble considering excavation disturbance[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 139: 104603.
- [20] SHAN RL, BAI Y, JU Y, et al. Study on the triaxial unloading creep mechanical properties and damage constitutive model of red sandstone containing a single ice-filled flaw[J]. *Rock Mech Rock Eng*, 2021, 54: 833–855.
- [21] YANG SQ, HUANG YH, TANG JZ. Mechanical, acoustic, and fracture behaviors of yellow sandstone specimens under triaxial monotonic and cyclic loading[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 130: 104268
- [22] GB/T 50081—2019, 混凝土物理力学性能试验方法[S]. 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2019.  
GB/T 50081—2019, Test method for Physical and Mechanical properties of concrete[S]. Ministry of Housing and Urban-Rural Development, PRC, 2019.
- [23] 满轲, 刘晓丽, 宋志飞. 深部岩体半正弦应力波扰动下的层裂试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(3): 428–434.  
MAN Ke, LIU Xiaoli, SONG Zhifei. Experimental study on spalling of deep rock under half sine stress wave disturbance[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(3): 428–434.
- [24] LU J, YIN G, GAO H, et al. True triaxial experimental study of disturbed compound dynamic disaster in deep underground coal mine[J]. *Rock Mech Rock Eng*, 2020, 53: 2347–2364.
- [25] 李志浩, 熊自明, 岳松林, 等. 深部围岩地冲击扰动作用的模拟试验技术[J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(2): 024101.  
LI Zhihao, XIONG Ziming, YUE Songlin, et al. Simulation test technique for impact disturbance of deep surrounding rock[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(2): 024101.
- [26] DU H, SONG D, CHEN Z, et al. Experimental study of the influence of structural planes on the mechanical properties of sandstone specimens under cyclic dynamic disturbance[J]. *Energy Science & Engineering*, 2020, 8(11): 4043–4063.
- [27] ZHU W, YAN B, LIU X, et al. Rock creep deformation triggered by dynamic disturbance: numerical simulation[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2022, 22(7): 04022101.
- [28] 王波, 高昌炎, 陈学习, 等. 岩石流变扰动效应三轴压缩试验研究[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(S2): 403–411.  
WANG Bo, GAO Changyan, CHEN Xuexi, et al. Triaxial test system for rock rheological perturbation effect[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(2): 403–411.
- [29] WANG C, ZHAN S, XIE M, et al. Damage characteristics and constitutive model of deep rock under frequent impact disturbances in the process of unloading high static stress[J]. *Complexity*, 2020, 2020: 2706091.
- [30] LI Y L, MA Z Y. A damaged constitutive model for rock under dynamic and high stress state[J]. *Shock and Vibration*, 2017, 2017: 8329545.
- [31] WU Wuxing, GONG Fengqiang, JIANG Quan, Strength weakening effect of high static pre-stressed granite subjected to low-frequency dynamic disturbance under uniaxial compression[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2022, 32(7): 2353–2369.
- [32] LUO Song, GONG Fengqiang, LI Liuliu, et al. Linear energy storage and dissipation laws and damage evolution characteristics of rock under triaxial cyclic compression with different confining pressures, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2023, 33(7): 2168–2182.
- [33] 杨圣奇, 杨景, 孙博文, 等. 基于围压因素的分级应力扰动下砂岩损伤破裂特性试验研究[J/OL]. *岩石力学与工程学报*, <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2023.0274>. [2023–12–22].  
YANG Shengqi, YANG Jing, SUN Bowen, et al., Experimental study on damage and fracture characteristics of sandstone under graded stress disturbance based on confining pressure factor[J/OL]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2023.0274>. [2023–12–22].
- [34] KARIM EMK, PIERRE GJBC, THIERRY JM. Modeling stress-induced permeability alterations in sandstones using CT scan-based representations of the pore space morphology[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2022, 150: 104998
- [35] CHU ZF, WU ZJ, LIU QS, et al. Evaluating the microstructure evolution behaviors of saturated sandstone using NMR testing under uniaxial short-term and creep compression[J]. *Rock Mech Rock Eng*, 2021, 54: 4905–4927.