

DOI: 10.11779/CJGE202210018

多次动态扰动下红砂岩时效变形特性研究

刘闽龙¹, 陈士海^{*1}, 石伟民¹, 崔广强¹, 沈 峰¹, 李海波²

(1. 华侨大学土木工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 为探究深部工程岩体受扰动作用下的时效变形特性, 利用扰动伺服三轴加载系统对红砂岩开展了动态扰动三轴加载试验。试验结果表明: 动态扰动作用下, 岩石的轴向应变-时间曲线呈振荡式上升; 扰动荷载的施加会引起岩石应变产生突增的现象, 该应变的突增值随着扰动作用的次数呈指数式衰减; 岩石破坏前累计扰动施加次数随着围压的增大而增大, 随轴向应力加载水平的提升而减少; 动态扰动在高静载应力水平下将引起岩石的快速破坏, 在较低静载应力水平下岩石则表现为类似于疲劳破坏的时效破坏。

关键词: 动态扰动; 时效变形; 围压; 轴向应力加载水平

中图分类号: TU451 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)10-1917-08

作者简介: 刘闽龙(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩石力学方面的研究工作。E-mail: 458652447@qq.com。

Time-dependent deformation characteristics of red sandstone under multiple dynamic disturbances

LIU Min-long¹, CHEN Shi-hai¹, SHI Wei-min¹, CUI Guang-qiang¹, SHEN Feng¹, LI Hai-bo²

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: In order to explore the time-dependent deformation characteristics of deep engineering rock mass under disturbed action, the dynamic disturbance triaxial loading tests on red sandstone are carried out by using the disturbed servo triaxial loading system. The time-dependent deformation characteristics and failure modes of red sandstone damaged by disturbance under different confining pressures and axial pressures are analyzed. The test results show that under the action of dynamic disturbance, the axial strain-time curve of rock rises in an oscillating manner. The disturbance loads will cause the phenomenon of sudden increase of strain in rock, and the sudden increase of strain decreases exponentially with the number of disturbance. The application times of cumulative disturbance before rock failure increases with the increase of confining pressure, and decreases with the increase of axial stress loading level. The dynamic disturbance loads will lead to rapid failure of rock at higher static stress level, but it will lead to aging failure similar to the fatigue failure at lower static stress level.

Key words: dynamic disturbance; time-dependent deformation; confining pressure; axial loading stress level

0 引言

在深部地下工程掘进过程中, 岩体受高地应力和采掘动力的耦合作用, 这些动力荷载如爆破荷载、机械振动等, 具有传播范围远、扰动能量高的特点^[1]。由于地下采掘作业是一个不断循环的过程, 意味着每次循环作业引起的扰动都将作用在深部巷道的围岩上, 而随着扰动作用次数的增加很有可能会触发围岩的高应力围压变形破坏, 发生如岩爆、冲击地压等大能级、大体量的工程灾害。这些工程灾害目前还难以预测和有效控制^[2-3]。

近年来, 针对岩石的动力学性质, 国内外众多学者在理论和试验方面做了大量的研究, 通过研制和改进SHPB试验装置, 研究了岩石一维、二维静载与

循环冲击共同作用下岩石的动力学特征, 在岩石受冲击作用下的应力应变力学特性、破坏形态及能量耗散规律等方面取得了一定的成就^[4-6]。另外, 在深部地下工程中, 岩石处于长期流变状态, 根据工程实践表明, 深部岩体在开采扰动作用后岩石的破坏呈现明显的时间滞后现象, 为此, 一些学者开始通过自主研制的岩石扰动流变装置^[7-8], 展开对岩石流变状态下的扰动破坏研究, 根据试验结果提出了“扰动载荷”“扰动流变”^[9]以及“岩石强度极限领域”“岩石流变扰动效应”^[10]等岩石力学新概念。在此基础上, 王波等^[11-12]

基金项目: 国家自然科学基金项目(51974136)

收稿日期: 2021-08-11

*通信作者(E-mail: cshblast@163.com)

研究了岩石处于强度极限邻域内和强度极限邻域外的流变扰动效应规律，并基于试验结果建立起了不同的岩石流变扰动本构方程。黄万朋等^[13]对冲击载荷作用下深地岩体工程的长期大变形机制以及稳定性控制进行了系统研究。宫凤强等^[14]开展常规静载和动力扰动下不同预静载水平岩石断裂韧度测试试验，获得硬岩受动力扰动的断裂特性变化规律。王青元等^[15]通过岩石流变冲击试验机，从能量角度阐述了蠕变岩石在冲击扰动作用下的破坏规律。邓树新等^[16]模拟了冲击扰动下岩块从开始滑移至发生岩爆全过程，并探讨了滑移型岩爆机理。李帅等^[17]利用自主研发的岩石松弛-扰动试验装置，开展了岩石加载、松弛、动态扰动和扰动后各个阶段的轴向应力、轴向应变和声发射响应的研究。

上述研究主要针对一维、二维条件下的岩石冲击试验，但在实际深部工程中，岩体是受三维高静应力作用处于平衡状态，关于三维动静组合加载下的岩石力学特性，李夕兵等^[18]、Li 等^[19]通过改进 SHPB 装置研制了三维下的动静组合加载岩石力学试验系统，在该试验系统上的研究表明三维动静组合加载下岩石的破坏模式为“单锥”压剪破坏^[20-21]。目前国内外研究受制于试验装置，还主要集中于一维和二维的岩石冲击破坏试验，而三维动静载荷组合作用下的岩石变形规律的试验研究还较少，且由于冲击扰动的作用时间很短，大多数学者主要研究冲击前后的变形结果，针对扰动作用过程中的岩石时效变形响应情况的研究还较少。

基于此，本文以红砂岩为试验对象，利用 TFD-2000/D 型动态扰动伺服三轴试验系统，对围压和轴压作用下的岩石试样施加轴向的正弦波扰动荷载，模拟深部地下岩体开挖后在低围压状态下受动态扰动荷载作用而发生破坏的过程，分析岩石在多次动态扰动作用下的时效变形特性和破坏形式，为防治深部工程岩体在多次开采扰动作用下诱发失稳破坏提供理论基础。

1 试验设备与方案

1.1 岩石试样制备

试验所用岩样取自云南矿山一块质地均匀、表面无贯通裂纹的红砂岩荒料，经石材加工厂处理后加工成大小合适的长方体岩块，再通过岩石取芯机、打磨机等设备进行取芯、切割、打磨工序处理，制成直径 50 mm，高 100 mm 的试样，从中挑选出表面平整、无裂缝、层理和缺角的岩石试样，并对制好的试样进行尺寸测量和称重。最后为保证各个试样的岩性较为

接近，对所制备的试样进行声波检测筛选，剔除波速差异较大的试样。

1.2 动态扰动伺服三轴试验系统

试验设备采用 TFD-2000/D 型动态扰动伺服三轴加载装置，如图 1 所示。该试验系统主要分为 4 个部分：轴向加载系统、围压加载系统、扰动施加控制系统和数据采集控制系统。轴向加载系统加载行程可达 100 mm，最大可施加 2000 kN 的试验力，加载速度范围为 0.01~20 kN/s，从而保证在试验中能稳定地施加轴向荷载。围压加载系统可对试样施加最大围压 100 MPa，加载速度为 0.001~1 MPa/s。扰动控制系统由扰动油缸、位移传感器、扰动杆等组成，试验中对试样施加扰动力是通过放置于三轴试验机主体上部的扰动油缸推动扰动杆上下移动来实现，并采用德国 Doli 公司生产的 EDC580 型桌面式伺服控制器设定扰动加载波形，如图 1 (b) 所示。该扰动系统可施加的最大扰动力为 300 kN，最高扰动频率 70 Hz，扰动力波形形式有正弦波、三角波和方波等，所施加的扰动力振幅可以分为位移和荷载两种。

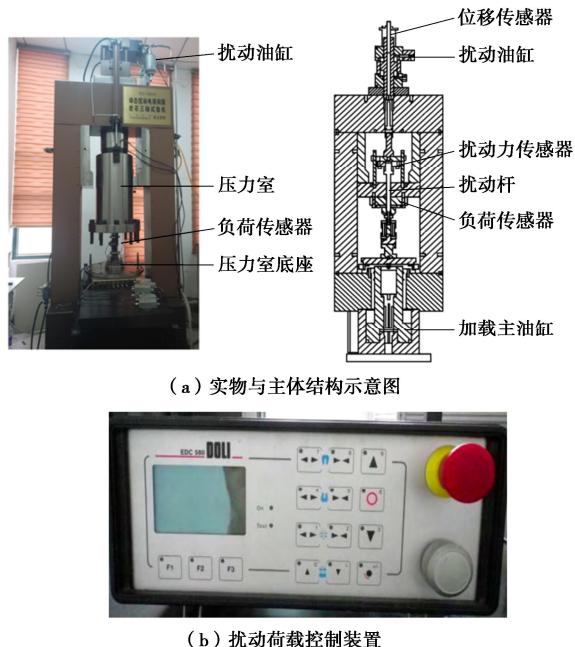


图 1 TFD-2000/D 型动态扰动伺服三轴加载装置

Fig. 1 TFD-2000 / D dynamic disturbance servo triaxial loading devices

1.3 试验方案及加载步骤

在试验中，为研究多次动态扰动作用下不同围压以及轴压应力水平下对岩石时效变形特性的影响，考虑到岩体的破坏主要发生在洞壁上，而在深部岩体开挖后，会引起洞周围一定范围内岩体的应力重分布，岩体从三向应力状态变为平面受力状态，所以为更好地模拟洞壁附近的岩石开挖后在低围压状态下受到多

次扰动作用而破坏的过程, 故围压的取值设置较小, 将其设为 3 个级别, 分别为 0, 5, 10 MPa。由于不同围压作用下岩石的力学特征会有所变化, 因此为确定动态扰动加载试验中预加载轴压的具体大小, 在试验前先通过基本试验测得红砂岩在不同围压下的基本力学参数。根据试验结果不同围压下岩石基本力学参数如表 1 所示。为研究深部岩体受爆破地震波的作用而发生失稳破坏的现象, 考虑爆破地震波是一种具有幅值和频率的非平稳随机弹性波, 但通常为便于研究一般可以将其简化为正弦波或余弦波, 地下开挖和震动产生的扰动频率范围为 2~15 Hz^[22-23], 故设定一组动态扰动正弦波组合, 其频率为 3 Hz。由于地下岩爆常常发生在距离扰动源较远的距离上, 如滑移型岩爆, 此处动力扰动的幅值一般衰减到较小的量, 因此扰动波的幅值不宜设置太大, 以在该扰动波应力区间内岩样仍处于弹性阶段且未发生扩容现象为条件, 取无围压条件下岩石峰值抗压强度的 20% 左右来设定扰动幅值, 最终确定扰动幅值 ΔF 为 10 MPa。后文中用“3 Hz, 10 MPa”来表示扰动频率为 3 Hz, 幅值为 10 MPa 的扰动正弦波。

表 1 红砂岩的基本物理力学参数

Table 1 Basic physical and mechanical parameters of red sandstone

| 围压级别 /MPa | 峰值抗压强度 /MPa | 弹性模量 /GPa |
|-----------|-------------|-----------|
| 0 | 62.01 | 6.60 |
| 5 | 98.19 | 9.50 |
| 10 | 120.82 | 11.07 |

由于影响岩石流变结果的因素主要包括试验时的围压大小、加载的轴向应力水平以及施加的扰动荷载类型, 为明确各因素对试样结果的具体影响, 分两组试验进行, 如表 2 所示。

表 2 试验加载方案

Table 2 Schemes of test loading

| 组别 | 围压 /MPa | 轴向应力水平 /% | 扰动频率 /Hz | 扰动幅值 /MPa |
|------|----------|------------|----------|-----------|
| 试验组一 | 0, 5, 10 | 85 | 3 | 10 |
| 试验组二 | 5 | 70, 80, 90 | 3 | 10 |

试验组一, 在扰动荷载“3 Hz, 10 MPa”和轴向应力水平为峰值抗压强度 85% 的条件下, 进行不同围压(0, 5, 10 MPa)下的多次扰动加载试验, 研究围压对试验结果的影响; 试验组二, 围压 5 MPa 和扰动荷载“3 Hz 10 MPa”条件下, 进行不同轴向加载应力水平(70%, 80%, 90% 峰值抗压强度)的多次扰动加载试验, 研究轴向加载应力水平对试验结果的影响。

加载步骤为先对岩样进行围压 P_w 的加载, 围压通过荷载控制, 加载速率为 0.5 MPa/s, 然后开始施加轴向荷载, 轴向加载的控制方式采用变形控制, 加载

速率为 0.05 mm/min, 控制试样的轴向负荷加载至设定的应力水平 P_{as} , 待试样变形趋于平稳后开始施加动态扰动。根据试样的加载结果, 应变在开始后 30 min 内就较快趋于平稳, 因此在扰动加载试验中选择 30 min 时长作为一个时间段, 记为 T 。待试样静加载 30 min 后, 通过控制扰动加载系统设定所施加的扰动载荷的大小、频率、波形, 对试样施加扰动载荷 P_d , 扰动荷载的作用时间 t_d 设为 30 s, 30 s 后停止施加扰动载荷, 并保持之前的围压和轴压, 静加载 30 min 后再对试样施加与上一步相同波形和持续时间的扰动载荷, 重复上述过程, 直至试样破坏。图 2 为试验的加载力学模型及扰动荷载的加载路径示意图。

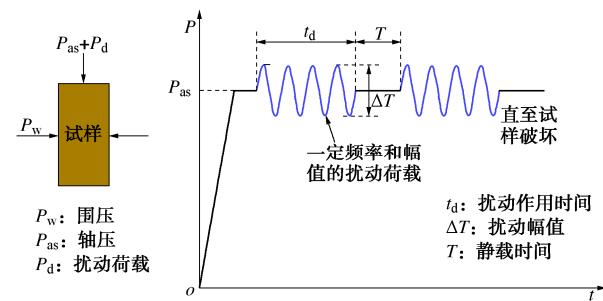


图 2 试验加载路径及加载模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of loading path and model for tests

2 试验结果分析

2.1 动态扰动加载试验结果

图 3 为试样分别在扰动荷载(“3 Hz, 10 MPa”)作用和无扰动作用下的岩石轴向应变 - 时间曲线, 其它加载条件均为 10 MPa 围压和 85% 峰值抗压强度的轴向加载应力水平。图 4 所示为频率 3 Hz, 振幅 10 MPa 的扰动荷载与时间的实际加载图, 由图 4 可知, 加载过程中扰动的波形均匀, 幅值也较一致, 误差较小, 表明该试验系统施加的扰动载荷具有良好的稳定性。图 5 为对应的图 3 在扰动荷载作用下的岩石应力 - 应变曲线, 在正弦波扰动荷载作用下岩石的应力 - 应变曲线形成一个个滞回环, 其与岩石的循环加载试验曲线相类似, 但由于扰动荷载频率较大且相邻两次扰动施加的间隔时间较短, 导致岩石的应力 - 应变曲线在扰动施加段变得相对紊乱。

由图 3 可知, 在无扰动作用下岩石试样在加载后不久, 轴向应变曲线接近平行于时间轴, 轴向应变的增长放缓。但在扰动作用下, 试样的应变会产生突变, 并且随着扰动作用次数的不断增加, 应变整体呈阶梯式上升, 但相邻两次扰动之间的应变曲线则与无扰动作用下的应变曲线相似。从动态扰动作用区间, 即图 3 的局部放大图中可知, 在扰动结束后最终会形成一

应变增量 $\Delta\epsilon$, 且试样的轴向应变也会随着扰动载荷作用而振荡上升, 表明岩石的动态变形过程中伴随着弹性变形, 由于应变振荡的幅度要明显大于最终造成的应变增量, 这也导致了试样破坏基本都发生在动态扰动的加载过程中。

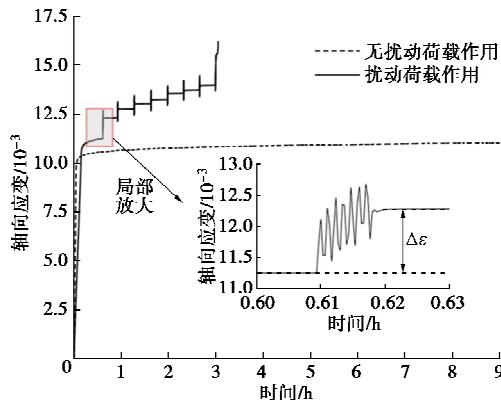


图 3 岩石应变 - 时间曲线

Fig. 3 Strain-time curves of rock

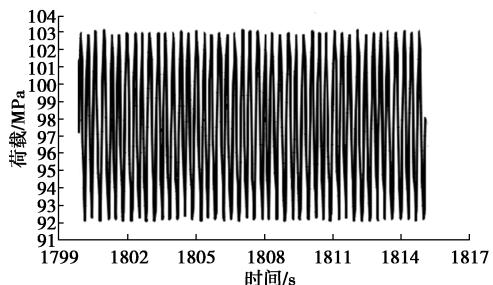


图 4 扰动荷载 - 时间曲线

Fig. 4 Relationship between disturbance load and time

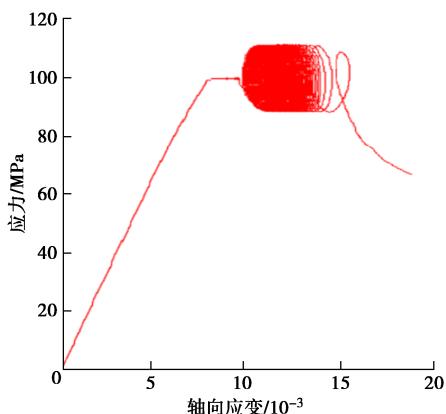


图 5 应力 - 应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves

另外由图 3 可知, 试样在施加 8 次扰动后破坏, 破坏时所对应的轴向应变为 14.66×10^{-3} , 该应变主要由两部分组成, 分别是加载过程中静载引起的随着试验时间而增加的蠕变以及动态扰动所引起的应变增量。在试验开始加载到第 1 次扰动施加前, 对应实际的加载时间为 0.55 h, 岩石轴向应变在围压和轴压的作用下从 0 快速上升至 11.20×10^{-3} , 并进入稳定蠕变

阶段, 该应变值达到了轴向总应变的 76.4%。在岩石试样进入稳定蠕变后, 岩石的变形则以扰动荷载引起的变形为主, 8 次扰动引起的应变增量分别为 1.26×10^{-3} , 0.46×10^{-3} , 0.40×10^{-3} , 0.35×10^{-3} , 0.38×10^{-3} , 0.22×10^{-3} , 0.18×10^{-3} , 0.11×10^{-3} , 将上述值相加得到扰动引起的总应变增量为 3.36×10^{-3} , 该应变值为轴向总应变的 22.9%, 并且可知, 岩石试样在开始施加扰动直到岩石破坏, 围压和轴压作用所引起的静载蠕变仅为 0.1×10^{-3} , 占轴向总应变的 0.7%, 且随着扰动次数增多, 静载蠕变也未发生明显变化, 应变曲线基本呈平直状态。综上, 可以得出扰动会加剧岩石内部单元的损伤, 对岩石的破坏起到了关键性作用。

在深部地下工程中, 动力扰动诱发岩体变形突变的现象是导致岩块由稳定状态转变失稳破坏的重要原因。持续的扰动会增加变形的累积, 如累积变形过大, 岩块自然会脱离系统发生系统的垮塌。而由于岩体经过长期的地质构造运动中, 岩石内部积聚了大量的地质构造变形能, 当扰动荷载开始对蕴含能量的岩体进行频繁作用时, 扰动能量大部分都积聚在岩体内, 体现为岩体位移的累积。扰动引起的位移累积最终可能导致岩体原有的平衡状态被打破, 引起岩体中长期储存的地质构造变形能的释放, 造成岩爆等动力灾害。因此在实际工程中也可通过确定岩块的临界累积位移或应变来预测岩爆^[24]。

2.2 围压和轴向应力水平对岩石轴向应变的影响

图 6 为试验组一和试验组二所记录下的试验结果。其中图 6 (a) 为试样在 85% 峰值抗压强度的轴向加载应力水平 “3 Hz, 10 MPa” 扰动荷载下, 不同围压情况所得到岩石轴向应变 - 时间全过程曲线; 图 6 (b) 为 5 MPa 围压, “3 Hz, 10 MPa” 扰动荷载作用下, 不同轴向加载应力水平的岩石轴向应变 - 时间全过程曲线。

在围压和轴向加载水平不同的情况下, 岩石试样在破坏前所能承受的扰动荷载作用的次数也存在着明显不同。由图 6 (a) 可知, 无围压情况下试样经 4 次动态扰动加载破坏, 5 MPa 围压下为 6 次, 10 MPa 围压下上升到 8 次, 即试样破坏前累计的扰动作用次数随围压的增大而增大。其原因主要是由于围压在一定程度上起到横向压密岩石试件的作用, 限制了岩石内部微裂纹的横向萌发、扩展、贯通, 从而提高了岩石的抗扰动能力。另外, 围压的不同也导致试样破坏时所对应的轴向应变不同, 在围压 0 MPa 情况下, 试样破坏时所对应的轴向应变为 8.70×10^{-3} , 该值在 5 MPa 围压下为 11.22×10^{-3} , 在 10 MPa 围压下可达到 14.66×10^{-3} , 即围压越大, 试样破坏时所对应的轴向应变也越大。当作用不同应力水平时, 即图 6 (b),

由于不同的加载应力水平决定了岩石是否处于强度极限领域范围内, 岩石对扰动会表现出不同的敏感程度, 高应力水平下, 岩石对扰动效应的响应将更加明显, 图 6(b)中也体现为累计扰动作用次数随应力水平的提升而减少。特别的, 在高轴向应力水平(90%峰值抗压强度)下, 扰动引起的变形增量明显增大, 在 $t=0.52$ h 施加第1次扰动开始时, 静载引起的轴向应变为 9.38×10^{-3} , 经3次扰动加载, 岩石试样在 $t=1.21$ h 时破坏, 破坏时对应的轴向应变为 12.10×10^{-3} 。3次扰动加载所引起的应变增量分别为 1.20×10^{-3} , 0.56×10^{-3} , 0.34×10^{-3} , 扰动引起岩石应变突增的现象明显。但当在较低的应力水平(70%峰值抗压强度)下时, 试样经过22次扰动加载才破坏, 同时扰动荷载只在前6次作用中引起较为明显的应变增量, 随后的扰动加载对最终的应变结果的影响较小, 但是应变振荡幅度并没有出现明显的变化。

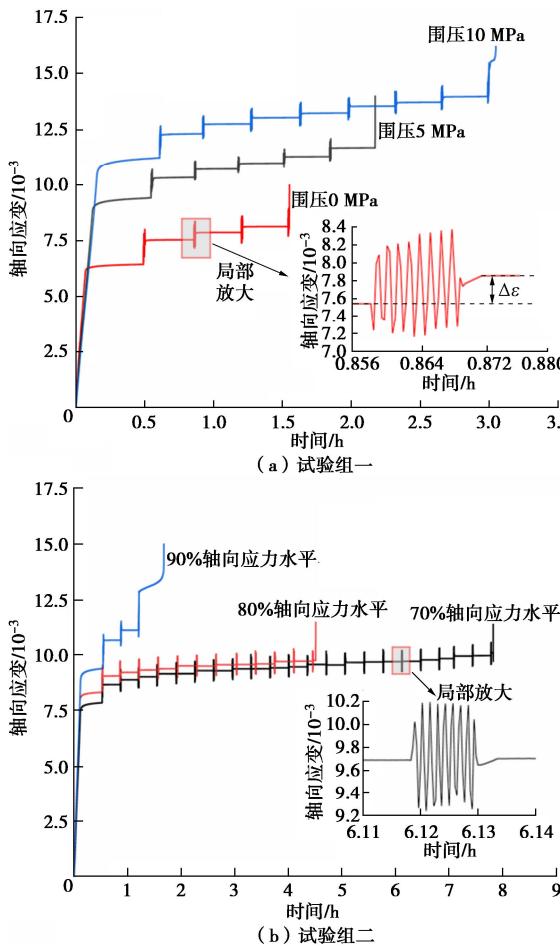


图6 多次动态扰动作用下岩石应变-时间全过程曲线

Fig. 6 Complete stress-strain curves of rock under multiple dynamic disturbances

2.3 扰动应变增量

从上述试验结果可知, 岩石在每次扰动结束后会产生一个不可完全恢复的变形, 即单次扰动应变增量 $\Delta\epsilon$ 。由试验结果绘制的扰动应变增量与扰动次数之间

的关系图如图7所示。由图7可知, 扰动应变增量随着扰动次数迅速减少, 且无论在何种围压或应力加载水平下, 第一次扰动引起的应变增量较后续加载要大得多, 并经过2到3次动态加载后, 单次扰动应变增量值快速趋于恒定。当岩石轴压较低时如试验组二中施加70%峰值抗压强度和80%峰值抗压强度的轴向应力水平, 后续的扰动不足以对岩石试样变形产生明显影响。

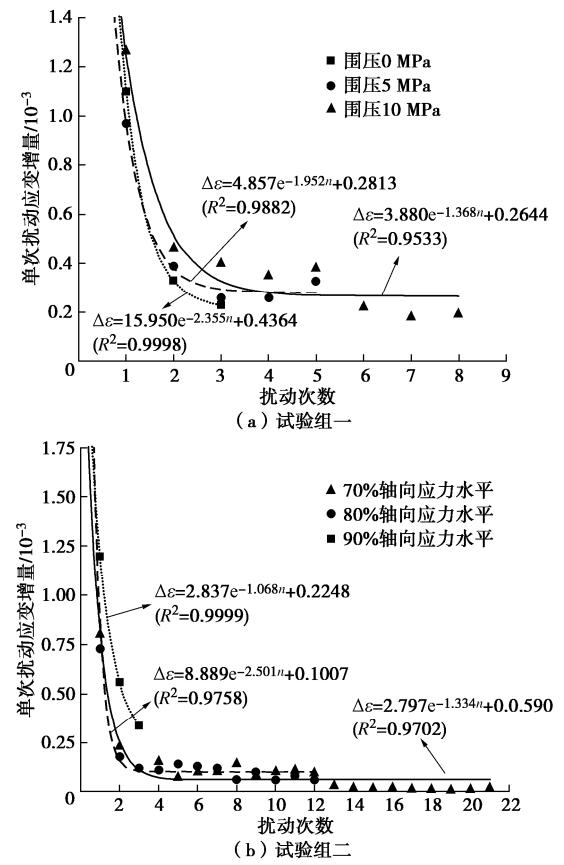


图7 单次扰动应变增量与扰动次数间关系

Fig. 7 Relationship between strain increment of single disturbance and disturbance times

观察图中单次扰动应变增量 $\Delta\epsilon$ 随扰动次数 n 呈指数衰减规律, 可以采用下述关系式表示为

$$\Delta\epsilon = Ae^{-Bn} + C, \quad (1)$$

式中, n 为扰动次数, A , B , C 为与围压、扰动荷载以及轴向加载应力水平相关的系数。

表3, 4为拟合得到的各系数计算结果, 扰动应变增量与扰动次数的具体表达式如图7所示, 拟合相关系数均在0.95以上, 拟合效果良好。

将不同围压下多次扰动引起的应变增量相加得到扰动引起的总应变增量。 0 MPa 围压下扰动引起的轴向总应变增量为 1.66×10^{-3} , 5 MPa 围压下该值为 2.21×10^{-3} , 10 MPa 围压下为 3.36×10^{-3} , 分别占各围压下岩石破坏时所对应的总轴向应变的 19.1%, 19.7%

和 22.9%，所占比例随着围压的增大而增大，这是由于一方面围压限制了径向变形和裂纹的发育，另一方面由于在加载过程中围压和径向应变做负功，导致输入红砂岩内部的总能量减少，从而提高了红砂岩的变形和抗扰动的能力。同理，考察不同轴压下扰动引起的总应变增量与岩石破坏时总应变值的关系，分别得到 70%，80% 和 90% 轴向应力水平下扰动引起的轴向总应变增量占各轴压下岩石破坏时所对应的总轴向应变的 20.0%，19.3% 和 19.0%，该值随着轴压的增大而减小，这是由于轴压升高导致输入岩石内部的总能量升高，同时进入岩石的强度极限领域范围内，岩石对扰动表现出较高的敏感程度，只需经过几次扰动加载岩石即发生破坏，导致所形成的总扰动应变增量占比较小。

表 3 不同围压下曲线拟合系数

Table 3 Curve-fitting coefficients under different confining pressures

| 围压/MPa | A | B | C |
|--------|-------|-------|--------|
| 0 | 6.814 | 2.041 | 0.2151 |
| 5 | 4.857 | 1.952 | 0.2813 |
| 10 | 3.880 | 1.368 | 0.2644 |

表 4 不同轴压应力水平下曲线拟合系数

Table 4 Curve-fitting coefficients under different axial compressive stress levels

| 轴压应力水平/% | A | B | C |
|----------|-------|-------|--------|
| 70 | 2.797 | 1.334 | 0.0590 |
| 80 | 8.889 | 2.501 | 0.1007 |
| 90 | 2.837 | 1.068 | 0.2248 |

2.4 动态扰动下岩石的破坏模式

从上述试验结果可以对动态扰动下试件的破坏模式进行分析，试验曲线表明了岩样在动态扰动直至破坏的过程是一个累积损伤的过程，岩样的变形由静载引起的随着试验时间而增加的蠕变变形以及动态扰动引起的变形两部分组成，其中在试样进入稳态蠕变后，岩石的变形以扰动荷载引起的变形为主，其对岩石的破坏起到了决定性作用，在其作用下，试样的应变也会随着扰动载荷作用而振荡上升，引起试样的振动破坏。单次扰动应变增量的发展趋势可以反映出损伤累积速度的发展趋势，当损伤累积到一定程度时试样发生破坏。由图 7 可知，扰动效应是在随着作用次数而减小，岩石出现了应变硬化的现象，但是有所不同的是，当岩石静载水平较低时如试验组二中施加 70% 和 80% 轴向应力水平，此时由于处于较低的应力状态，导致后续的扰动不足以对岩石试样产生明显影响。在岩石的应变 - 时间曲线上体现为在曲线的后半段，扰动除了引起明显的弹性变形外，实际产生的不可逆变形很小，曲线整体呈现等速蠕变平直状态，但通过继续施加扰动次数，岩石依然发生了破坏，这是

由于前面加载过程在岩石体内形成了初始裂纹。这些初始裂纹在多次应力周期连续拉扯下逐渐成长，并使材料承载面积缩减，降低材料的承载能力。当裂纹成长到临界长度时，材料净承载面积下的应力已超过材料的极限强度，此时的材料发生了强制破坏，且破坏时并无明显的宏观塑性变形等其它明显的预兆，具有一定的突然性，表现出了疲劳破坏的特点。在试验中也发现，如果继续降低静载水平，岩石经过几十次的扰动加载，岩石也并未破坏。因此，在三维静载水平较高条件下，扰动能明显促进岩石的损伤发育，引起岩石破坏；在较低的三维静载水平下，持续施加扰动将引起岩石疲劳破坏。

图 8 为加载结束后两组试样的破坏模式。在试验组一中，当无围压作用时，由于径向变形不受限制，在扰动力的作用下岩石试样的破坏模式主要以竖向的劈裂破坏为主，有一个沿近似对角贯穿整个试样的主剪切破坏面，除此之外，还存在少量的局部剪切破坏面和拉张破坏面，破坏后岩样的完整性差，破碎成大块、小块以及粉末状。随着围压的增大，剪切面的数量有减少的趋势，破坏后完整性更好，块度也更大，沿试样表面主裂纹剖开试样，试样内部发生共轭剪切破坏。在试验组二中，岩石的破坏同样以共轭剪切破坏面为主，在 70% 轴向应力水平下，其破坏断口较为粗糙，主要由于经过较多的扰动加载次数作用后，对岩石造成了持续性的损伤即累积一定的疲劳损伤之后，试样在应力集中的部位萌生裂纹，当扰动作用时会导致岩石内部晶粒之间产生相应的错动，加速裂隙的发育，导致岩石试样内部结构的进一步劣化，引起破裂面附近的矿物颗粒之间的黏结力、摩擦力下降，随着裂纹的增加，试样突然断裂，伴随着响声，试样发生疲劳破坏。80% 和 90% 轴向应力水平下的破坏模式差别不大，都形成了一条从顶端贯穿至岩石试样底部的宏观主控破裂面，但岩石的破碎程度有随着轴向应力水平的上升而下降的趋势。在 90% 轴向应力水平下，岩石处于很高的应力状态，岩石破坏后所形成的块度较大，由于在岩石内部形成裂缝到发生破坏的时间很短，宏观主控破裂面内部晶粒之间发生的错动不明显，导致破坏后形成的岩石粉末也相对较少。





图 8 岩石破坏模式

Fig. 8 Failure modes of rock

3 结 论

(1) 扰动会引起岩石的应变突增, 加剧岩石内部单元的损伤, 对岩石的破坏起到了关键性作用。受正弦波扰动荷载作用, 岩石的轴向应变呈振荡式上升, 振荡的幅度要大于扰动施加结束后最终所形成的应变增量。

(2) 动态扰动所能引起的应变增量随扰动次数呈指数衰减规律。岩石所能承受的扰动次数随着围压的增大而增多, 随轴压的增大而减少。

(3) 动态扰动在不同的静载应力水平下对岩石的破坏影响存在明显区别。当静载应力水平较高(90%峰值抗压强度的轴压)时, 动态扰动导致岩石快速破坏; 当静载应力水平较低(70%和80%峰值抗压强度的轴压)时, 岩石表现为类似疲劳破坏的时效破坏。

参考文献:

- [1] 谢和平. “深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(2): 1–16. (XIE He-ping. Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(2): 1–16. (in Chinese))
- [2] 潘俊锋, 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 Jun-feng, QI Qing-xin, LIU Shao-hong, 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. (in Chinese))
- [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(增刊2): 337–343. (ZHU Si-tao, JIANG Fu-xing, ZHU Hai-zhou, et al. Study of mechanism of rockburst accident in heading face in high stress area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S2): 337–343. (in Chinese))
- [4] 唐礼忠, 王春, 程露萍, 等. 一维静载及循环冲击共同作用下砂卡岩力学特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科
学版), 2015, 46(10): 3898–3906. (TANG Li-zhong, WANG Chun, CHENG Lu-ping, et al. Experimental study of mechanical characteristics of skarn under one-dimensional coupled static and cyclic impact loads[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(10): 3898–3906. (in Chinese))
- [5] 王春, 唐礼忠, 程露萍, 等. 高轴压和围压共同作用下砂卡岩受频繁动态扰动时的动力学特性[J]. 岩土力学, 2018, 39(12): 4537–4546. (WANG Chun, TANG Li-zhong, CHENG Lu-ping, et al. Dynamic characteristics of skarn subjected to frequent dynamic disturbance under combined action of high axial compression and confining pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(12): 4537–4546. (in Chinese))
- [6] 刘洋, 刘长武. 冲击荷载下轴压对峰后破裂砂岩力学特性的影响[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1281–1288. (LIU Yang, LIU Chang-wu. Effect of axial static stress on mechanical properties of post-peak cracked sandstone under impact loading[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1281–1288. (in Chinese))
- [7] 王波, 高昌炎, 陈学习, 等. 岩石流变扰动效应三轴试验系统[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 433–440. (WANG Bo, GAO Chang-yan, CHEN Xue-xi, et al. Triaxial test system for rock rheological perturbation effect[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 433–440. (in Chinese))
- [8] 崔希海, 高延法, 李进兰. 岩石扰动蠕变试验系统的研发[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2006, 25(3): 36–38. (CUI Xi-hai, GAO Yan-fa, LI Jin-lan. Research and development of rock creep experimental system under the disturbing load[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2006, 25(3): 36–38. (in Chinese))
- [9] 崔希海, 李进兰, 牛学良, 等. 岩石扰动流变规律和本构关系的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1875–1881. (CUI Xi-hai, LI Jin-lan, NIU Xue-liang, et al. Experimental study on rheological regularity and constitutive relationship of rock under disturbing loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1875–1881. (in Chinese))
- [10] 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(增刊1): 3180–3185. (GAO Yan-fa, XIAO Hua-qiang, 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.

- (in Chinese))
- [11] 王 波, 高昌炎, 陈学习, 等. 岩石流变扰动特性单轴压缩试验研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(6): 1443 – 1450. (WANG Bo, GAO Chang-yan, CHEN Xue-xi, et al. Axial load test study on the perturbation properties of rock rheology[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(6): 1443 – 1450. (in Chinese))
- [12] 王 波, 刘重阳, 高昌炎, 等. 强度极限邻域内岩石单轴蠕变扰动试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(7): 81 – 86. (WANG Bo, LIU Chong-yang, GAO Chang-yan, et al. Experimental study on uniaxial creep disturbance of rock in the neighborhood of strength limit[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(7): 81 – 86. (in Chinese))
- [13] 黄万朋, 孙远翔, 陈绍杰. 岩石蠕变扰动效应理论及其在深地动压工程支护中的应用[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(9): 1621 – 1630. (HUANG Wan-peng, SUN Yuan-xiang, CHEN Shao-jie. Theory of creep disturbance effect of rock and its application in support of deep dynamic engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(9): 1621 – 1630. (in Chinese))
- [14] 宫凤强, 张 乐, 李夕兵, 等. 不同预静载硬岩在动力扰动下断裂特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(8): 1841 – 1854. (GONG Feng-qiang, ZHANG Le, LI Xi-bing, et al. Experimental study on fracture behaviors of hard rock under dynamic disturbance with different pre-static loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(8): 1841 – 1854. (in Chinese))
- [15] 王青元, 刘 杰, 王培涛, 等. 冲击扰动诱发蠕变岩石加速失稳破坏试验[J]. 岩土力学, 2020, 41(3): 781 – 788, 798. (WANG Qing-yuan, LIU Jie, WANG Pei-tao, et al. Experimental investigation of accelerated failure of creep rock induced by impact disturbance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(3): 781 – 788, 798. (in Chinese))
- [16] 邓树新, 王明洋, 李 杰, 等. 冲击扰动下滑移型岩爆的模拟试验及机理探讨[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(12): 2215 – 2221. (DENG Shu-xin, WANG Ming-yang, LI Jie, et al. Mechanism and simulation experiment of slip-type rock bursts triggered by impact disturbances[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(12): 2215 – 2221. (in Chinese))
- [17] 李 帅, 朱万成, 牛雷雷, 等. 动态扰动对应力松弛岩石变形行为影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 2795 – 2804. (LI Shuai, ZHU Wan-cheng, NIU Lei-lei, et al. Experimental study on influence of dynamic disturbance on deformation behavior of rock under stress relaxation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(8): 2795 – 2804. (in Chinese))
- [18] 李夕兵, 古德生. 深井坚硬矿岩开采中高应力的灾害控制与破碎诱变[C]// 香山第 175 次科学会议. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. (LI Xi-bing, GU De-sheng. The hazard control and cataclastic mutagenesis induced by high stress in hard rock mining at depth[C]// Proceedings of the 175th Xiangshan Science Congress. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. (in Chinese))
- [19] LI X B, ZHOU Z L, LOK T S, et al. Innovative testing technique of rock subjected to coupled static and dynamic loads[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(5): 739 – 748.
- [20] 周宗红, 章雅琦, 杨安国, 等. 白云岩三维动静组合加载力学特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(5): 1030 – 1036. (ZHOU Zong-hong, ZHANG Ya-qi, YANG An-guo, et al. Experimental study on mechanical characteristics of dolomite under three-dimensional coupled static-dynamic loading[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(5): 1030 – 1036. (in Chinese))
- [21] 宫凤强, 李夕兵, 刘希灵. 三维动静组合加载下岩石力学特性试验初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1179 – 1190. (GONG Feng-qiang, LI Xi-bing, LIU Xi-ling. Preliminary experimental study of characteristics of rock subjected to 3D coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1179 – 1190. (in Chinese))
- [22] LUO D N, SU G S, ZHANG G L. 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.
- [23] 窦林名, 何 江, 曹安业, 等. 煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1469 – 1476. (DOU Lin-ming, HE Jiang, CAO An-ye, et al. Rock burst prevention methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1469 – 1476. (in Chinese))
- [24] 李 杰, 王明洋, 李新平, 等. 微扰动诱发断裂滑移型岩爆的力学机制与条件[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(增刊 1): 3205 – 3214. (LI Jie, WANG Ming-yang, LI Xin-ping, et al. The mechanics mechanism and occurrence conditions of sliding type rockbursts triggered by weak disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S1): 3205 – 3214. (in Chinese))