

DOI: 10.11779/CJGE202208017

高应力下大理岩循环扰动变形规律及一种破坏前兆特征

俞 缙¹, 姚 玮¹, 任文斌², 樊志忠³, 秦 伟⁴

(1. 华侨大学福建省隧道与城市地下空间工程技术研究中心, 福建 厦门 361021; 2. 中铁十二局集团第四工程有限公司, 陕西 西安 710000;

3. 厦门路桥工程投资发展有限公司, 福建 厦门 361026; 4. 太原市交通运输局, 山西 太原 030000)

摘 要: 为探究工程岩体循环扰动作用下的变形破坏特性, 开展了不同应力水平与幅值的大理岩单轴循环扰动试验。试验结果显示: ①应力水平是循环扰动下大理岩破坏的主要因素, 幅值是次要因素。应力水平刚达到扩容应力时, 即使循环幅值很大, 大理岩也不会破坏, 当应力水平远高于扩容应力且循环幅值很大时, 破坏十分迅速; ②相对于不可逆变形, 动态刚度更能体现变形曲线“疏—密—疏”的三阶段特征。可采用动态刚度衰减率的正负值作为破坏前兆特征, 在变形稳定阶段预判岩石是否会发生破坏; ③对于破坏岩样, 基于动态刚度表征的损伤变量与不可逆变形总趋势相似。“双高”模式与 I 型曲线一致, 其余模式与 II 型曲线一致。

关键词: 高应力水平; 循环扰动; 动态刚度; 破坏前兆; 损伤

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)08-1521-07

作者简介: 俞 缙(1978—), 男, 江苏苏州人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学与地下工程方面的科研工作。E-mail: bugyu0717@163.com。

Deformation laws of cyclic disturbance and a failure precursor feature of marble under high stresses

YU Jin¹, YAO Wei¹, REN Wen-bing², FAN Zhi-zhong³, QIN Wei⁴

(1. Fujian Research Center for Tunneling and Urban Underground Space Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. China Railway 12th Bureau Group Co., Ltd. 4th Branch, Xi'an 710000, China; 3. Xiamen Road & Bridge Construction Group, Xiamen

361026, China; 4. Taiyuan City Traffic Transportation, Taiyuan 030000, China)

Abstract: In order to explore its deformation and failure laws under cyclic disturbance, a series of uniaxial tests of marble with different stress levels and cyclic amplitudes are carried out. The research results show that: (1) The stress level is the decisive factor whether the marble specimens tend to failure or not, and the cyclic amplitude is a relatively minor factor. When the stress level just reaches the dilation one, the rock specimen can not fail even if it is under a much larger cyclic amplitude. When the stress level is much higher than the dilation stress and the cyclic amplitude is given a much larger value, the rock will rapidly fail. (2) Compared with the irreversible deformation, the dynamic stiffness can better reflect the transition features of sparse-dense-sparse stages. The positive and negative values of decay rate of the dynamic stiffness can be used as the features of failure precursor, and the rock failure can be predicted at the stable deformation stage. (3) For the failed marble specimens, the damage variable based on the dynamic stiffness characterization is similar to the general trend of irreversible deformation. The double-high mode is consistent with the type I curve, and the rest of the curves are consistent with the type II curve.

Key words: high stress level; cyclic disturbance; dynamic stiffness; failure precursor; damage

0 引 言

深部岩体开挖过程中, 近临空面围岩或矿柱常处在高应力水平的单向荷载条件下, 随着开挖的进展还持续承受着循环扰动荷载作用。该状态下岩体的变形破坏行为难以被有效预测和控制, 是导致岩爆、顶板垮塌等事故频发的主因, 也是研究的热点^[1]。

在单纯循环荷载下岩石变形破坏特性研究方面, 蔡燕燕等^[2]发现不同应力上限的等幅循环荷载作用

下, 大理岩应变速率与体变速率与应变在加载阶段分别呈 U 形和反 L 形关系, 在卸载阶段分别呈倒 S 形和 U 形关系。Bagd 等^[3]通过能量角度分析, 认为循环荷载引起的岩石变形是可预测的。Liu 等^[4]的研究发现岩石在同一围压下, 循环荷载频率越高, 破坏时轴向应变、循环次数及残余体积应变也越大。刘忠玉等^[5]发

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51874144, 42077254); 福建省科技计划引导性项目 (2020H0014)

收稿日期: 2021-07-01

现在分级循环作用下,煤岩的弹性模量呈现出先增加后下降的趋势。夏才初等^[6]提出在循环应力与温度共同作用下,岩石割线模量的衰减速率为“快—慢—快”,且应力上限可显著降低峰值割线模量。祝艳波等^[7]发现石膏质岩在循环荷载作用下的塑性效应明显,且具有显著的滞后特征。章清叙等^[8]指出,岩石疲劳破坏时的应变值与全曲线峰后应变值相当。在破裂前兆研究方面,张晖辉等^[9]根据岩石在循环加载过程中的声发射信号特征,提出了两种岩石破坏前兆。Pei 等^[10]根据声发射 b 值评估了岩石在循环加载中破坏的可能。Li 等^[11]综合声发射振铃数、分形维数等得到了岩石循环加载破坏前兆信息。Sheinin 等^[12]根据岩石在循环加载过程中红外辐射特征对岩石破坏进行了预判。Cao 等^[13]根据平均红外辐射温度与温度率在循环加卸载中突变的特征,将其作为岩石破坏前兆。

上述研究主要关注单纯循环荷载作用下岩石的变形特性及声发射、红外辐射等破裂前兆特征。事实上,与单纯循环荷载条件不同,深开挖条件下岩石是处在高静应力和循环扰动共同作用的特殊的“动静组合荷载”条件下^[14]。李夕兵等^[15]研究了岩石应变能密度临界值与外界作用的关系,提出采用应变能密度构建岩石在动静组合作用下破坏准则的方法。左宇军等^[16]指出当动载频率和幅值达到一定程度时,会使动静组合作用下的岩石系统振幅突变,据此采用突变理论对动静组合作用下岩石稳定性进行分析。唐礼忠等^[17]发现,当应力上限较低时,循环扰动会对岩石起强化作用,当平均应力提高后,每个周期内变形增量与循环破坏次数均呈指数关系减小。

目前,对高应力条件和循环扰动这种动静组合受力状态下的岩石变形规律,特别是对变形参数反映的破坏前兆特征研究尚不充分。鉴此,本文通过不同应力水平及幅值的单轴循环扰动试验,研究不同条件下大理岩在循环扰动过程中,不可逆变形、动态刚度、动态刚度衰减率和损伤变量等参量的响应规律,根据稳定阶段动态刚度衰减率的特征给出了岩石在循环扰动下的破坏前兆。所得结论为深部地下工程开挖过程中基于变形特性对岩体稳定性预判提供参考。

1 试验条件及方法

1.1 试验设备与试样

试验在华侨大学与长春市科意试验仪器有限公司联合研制的 TFD—2000/D 型电液伺服三轴动态扰动试验机上完成,该试验系统经改造后可进行外部异源扰动作用(如图 1 所示)。扰动系统施加主要靠扰动油缸推动扰动杆进行循环往复运动,扰动杆可独立工作,

具有独立的配套控制系统。设备可提供最大围压为 200 MPa,最大轴压为 2000 kN,负荷传感器测量精度 0.01 kN,循环作用最大可达 300 kN,最高频率 70 Hz,活塞杆行程 ± 50 mm。岩样变形采用轴向引伸计(最大量程为 10 mm)和径向链式外挂引伸计(最大量程为 3 mm),测量分辨率为 0.0001 mm。控制系统采用德国 DOLI 公司的 EDC 全数字伺服控制器,可实现轴向力控制、轴向变形控制、轴向位移控制、径向变形控制和径向应力控制等多种控制方式。

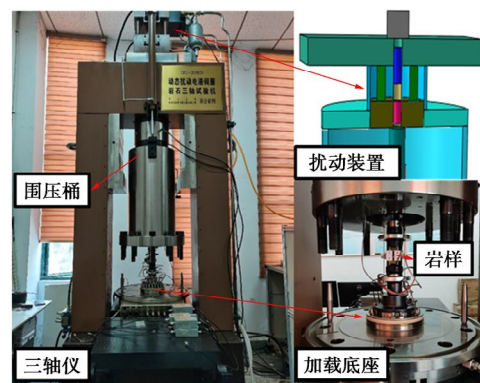


图 1 TFD-2000/D 型电液伺服三轴动态扰动试验机

Fig. 1 TFD-2000/D servo-controlled triaxial rock mechanics testing system

岩样为白色粗晶粒大理岩,质地均匀,无杂质,少裂隙,完整性和均匀性较好,平均密度为 2.70 g/cm^3 。按国际岩石力学学会(ISRM)试验规程建议方法,将岩样加工为 $\phi 50 \text{ mm} \times h 100 \text{ mm}$ 的标准圆柱试样,端面平整度控制在 0.02 mm 内,直径误差控制在 0.3 mm 内,见图 2。试验前对所有试样进行超声波纵波波速测试,并剔除波速异常试样,以此进一步保证岩石试样均一性,岩样平均纵波波速为 3392.67 m/s 。图 3 为单轴加载条件大理岩的轴向、径向全应力—应变关系曲线,峰值应力为 50 MPa,弹性模量为 23.2 GPa,泊松比为 0.224,扩容点在峰值应力 70%处,据此为后续循环扰动试验参数确定提供依据。



图 2 大理岩试样

Fig. 2 Marble specimens

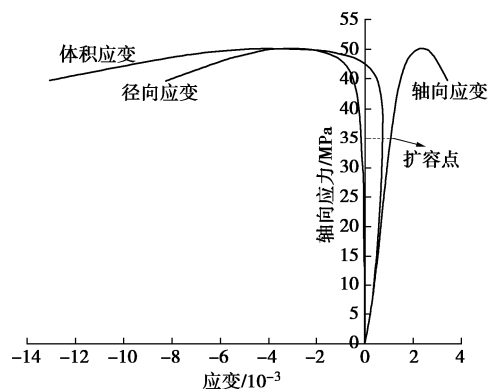


图 3 单轴压缩应力 - 应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of uniaxial compression

1.2 试验方案

为探究岩石工程中临空面附近岩石以及矿柱对于循环扰动的变形响应特征,对大理岩试样进行“单轴加载+循环扰动”试验。具体步骤如下:先将轴向应力加载至预设应力水平(按对峰值应力的比值设定,此应力水平即循环扰动应力上限,应力下限即为应力上限与幅值的差值),在此应力水平下静置 5 min,使岩样内部应力重分布稳定,由于时间很短,忽略流变效应。而后对岩样施加频率 5 Hz 下不同循环幅值作用。若循环 5500 圈后变形依然稳定,则停止试验。参数设置见表 1,全过程加载路径如图 4 所示,认为应力比 70%, 80%和 90%分别为高、中 high 和超高应力水平。

表 1 单轴下应力上限与循环幅值的预设目标值)

Table 1 Preset target values of upper limit of uniaxial stress and disturbance amplitude (MPa)				
循环幅值	峰值应力	应力比 70%	应力比 80%	应力比 90%
5, 10, 15	50.00	35.00	40.00	45.00

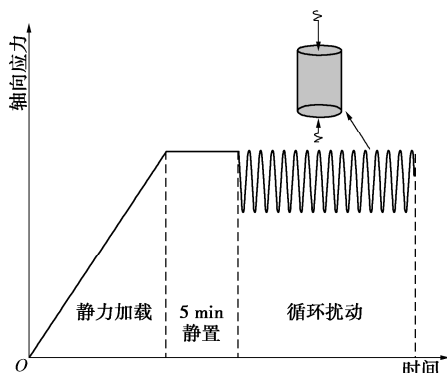


图 4 全过程加载路径

Fig. 4 Load paths throughout process

2 试验结果与分析

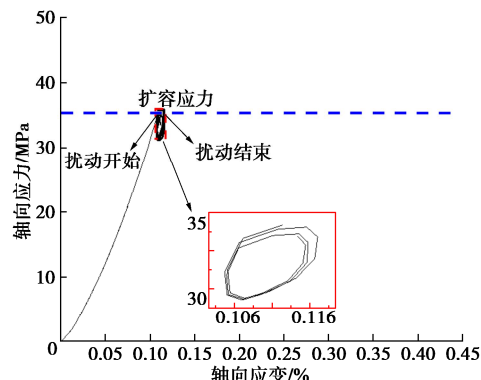
2.1 应力 - 应变关系

表2为大理岩在不同应力上限和循环幅值下发生

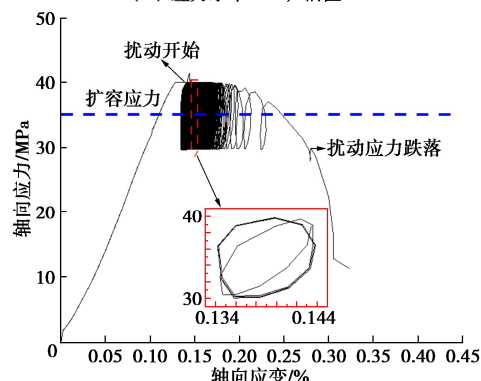
破坏所需的循环次数,图5为典型轴向应力 - 轴向应变关系曲线。

表 2 岩样破坏情况及循环次数

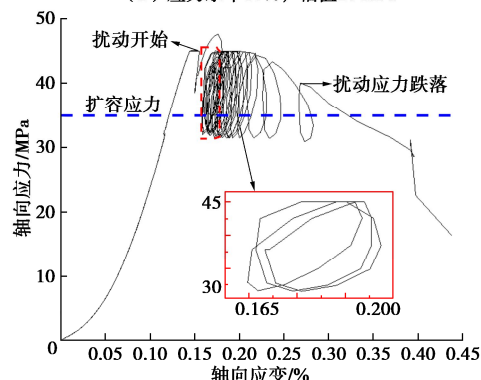
Table 2 Failure situations of marble specimens and cycle times			
应力比/%	幅值/MPa		
	5	10	15
70	未破坏	未破坏	未破坏
80	5500 圈	550 圈	285 圈
90	5450 圈	430 圈	24 圈



(a) 应力水平70%, 幅值5 MPa



(b) 应力水平80%, 幅值10 MPa



(c) 应力水平90%, 幅值15 MPa

图 5 大理岩循环扰动应力 - 应变曲线

Fig. 5 Disturbed stress-strain curves of marble under cyclic disturbance

由表2和图5可知:当应力水平一定时,随着循环幅值增大,岩石破坏更迅速。以90%应力水平为例,循环幅值从5 MPa增加到10, 15 MPa,破坏所需循环

次数分别减少了92.1%和99.6%；当循环幅值一定时，应力水平越高破坏所需循环次数越少。以幅值15 MPa为例，当应力水平为70%时岩样未破坏，当应力水平从80%增加到90%后，破坏所需循环次数减少了91.6%。故循环幅值增大或应力水平提高均会加速岩石破坏，只有当循环幅值和应力水平均达到一定程度后，岩石才会破坏，二者共同决定岩石的破坏。

对比图3、5可知，破坏前最大轴向应变值（即图中应力跌落点：破坏前一次循环中加载至应力上限时的应变值）与常规单轴压缩下峰值应力下的轴向应变值（其中，单轴峰值应变0.24%，应力水平为80%，幅值为10 MPa时，破坏前最大应变0.28%，应力水平为90%，幅值为15 MPa时，破坏前最大应变0.27%）接近。进一步分析发现，当应力水平与扩容应力接近时，大理岩在循环作用下较难迅速破坏，当应力水平大幅超过扩容应力时，在循环扰动前岩石已积累大量塑性变形，此时再施加大幅值循环扰动使岩石迅速破坏。姑且将这种高应力水平和大幅值循环扰动的情况称为“双高”模式循环扰动。当幅值较大时，累积损伤增长较快，试样破坏迅速。另一方面，当应力水平未达到一定程度时，即使循环幅值较大，岩石也难以迅速破坏，这与以往类似研究结果一致^[18]。

2.2 应变-时间关系

典型应变时程曲线如图6所示，忽略循环周次内变形变化，提取总变形发展进程的趋势（如图7所示），可以发现，对于未破坏（III型）与破坏岩样（I、II型）的应变时程曲线，可按增长趋势进行阶段划分，未破坏岩样的两阶段分为初始阶段与稳定阶段，破坏岩样分为初始阶段、稳定阶段与破坏3个阶段。其中，破坏最迅速的“双高”模式与I型曲线对应。

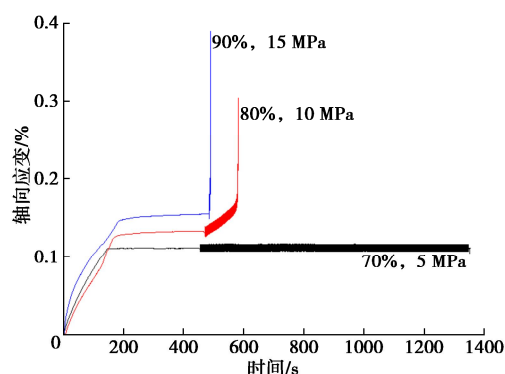


图6 大理岩应变-时间曲线

Fig. 6 Strain-time curves of marble

3 循环扰动过程中变形及损伤演化特征

3.1 不可逆变形发展

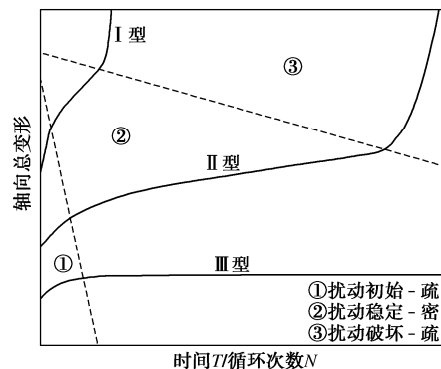


图7 循环扰动下岩石总变形趋势

Fig. 7 Total deformation trend of marble under cyclic disturbance

在循环扰动过程中，不可逆应变比滞回圈能更直观地体现轴向应变发展情况。图8为不可逆应变与相对循环次数（某次循环对应的圈数 n 与最终循环圈数 N 的比值）的关系曲线。

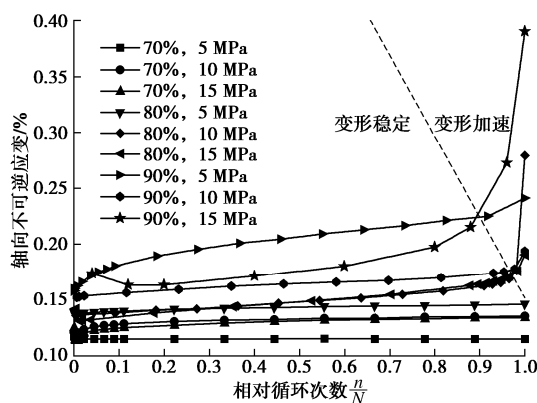


图8 不可逆应变-相对循环次数关系

Fig. 8 Relationship between irreversible strain and relative cycle times

由图8可知，不可逆应变在破坏前发展缓慢，对于未破坏岩石，变形逐渐稳定几乎不再增加。并且，变形从初始到稳定的过渡特征不明显。对于破坏岩样，在变形稳定阶段，不可逆应变增加虽然缓慢，但相比于未破坏岩样，增加依然明显。在破坏前，不可逆应变迅速增加，并且，不同条件下岩石从变形稳定到变形加速的分界点几乎在一条直线上。其中，“双高”模式的转折角，相对其他条件更加缓和，这是由于此种模式下，在很少的循环周次内，不可逆应变已经增加到较大程度并接近破坏，这体现了“双高”模式会大大加速岩石破坏的特性。

3.2 动态刚度变化与破坏前兆

在循环扰动中，塑性变形的累积会加速总变形的发展，从而使得其动态刚度随着循环扰动的进行而逐渐减小。根据图9所示方法计算动态刚度^[4]。

动态刚度与相对循环次数的关系如图10所示，为了便于分析，图10中给出了两条水平参照线，分别对

应于 70% 和 80%, 90% 应力水平, 并将稳定阶段中, 动态刚度曲线相对于水平参照线的夹角命名为 α 和 β , 分别对应 80%, 90% 和 70% 应力水平的转角, 在此规定转角顺时针为正, 逆时针为负。

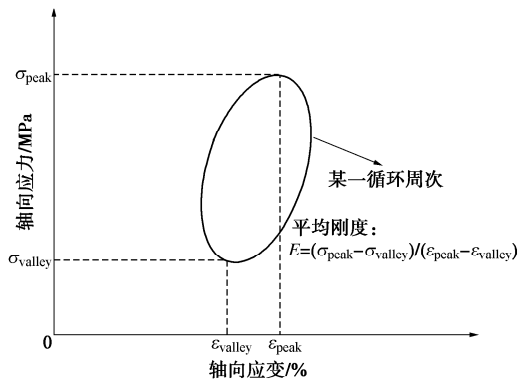


图 9 动态刚度示意图

Fig. 9 Schematic diagram of average stiffness

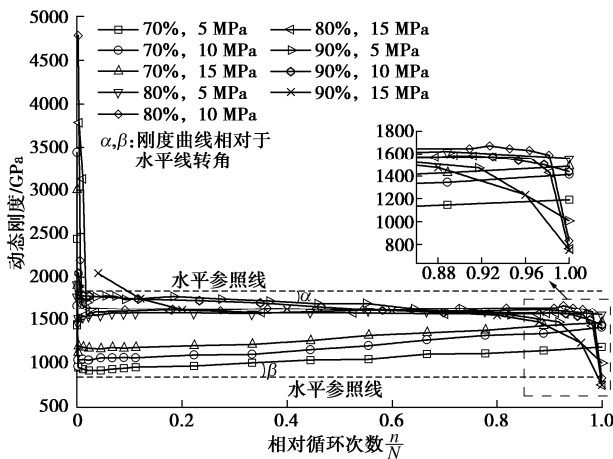


图 10 动态刚度 - 相对循环次数关系

Fig. 10 Relationship between average dynamic axial stiffness and relative number of cycles

可以看出: (1) 相比于不可逆应变, 动态刚度更能够体现出岩石在疏 (①初始) — 密 (②稳定) — 疏 (③破坏) 完整 3 个不同阶段的变形响应特征。(2) 当应力水平为 70% 时, β 为负, 既此时动态刚度随循环扰动进行而增大, 岩石被强化且不会破坏。对于 80% 应力水平且幅值为 5 MPa 的结果, 由于应力水平与扩容应力较接近且幅值很小, 故劣化作用十分有限, 此时动态刚度几乎稳定不变, 非常接近临界状态 (在稳定阶段, 动态刚度既不增大也不减小的状态)。当应力水平和循环幅值更大时, α 为正, 即稳定后, 动态刚度持续减小, 进入破坏阶段后, 刚度急剧减小并最终破坏。综上可知, 对于在循环扰动中岩样能否破坏, 稳定阶段的动态刚度的相对水平线转角为关键判断依据, 并且, 在稳定阶段, 动态刚度近似呈线性变化, 故可通过先期一定次数循环的数据来估算转角的正负和大小, 进而判断岩样是否会破坏。

为进一步定量分析稳定阶段动态刚度的演化特征, 取稳定阶段的第一圈和最后一圈的动态刚度, 计算其对循环次数的斜率, 并将其定义为动态刚度衰减率, 用以定量描述该阶段动态刚度的变化情况, 如图 11 所示。

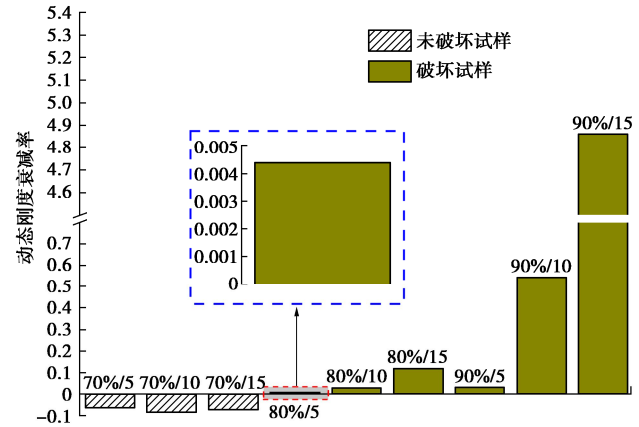


图 11 稳定阶段动态刚度衰减率

Fig. 11 Decay rate of average dynamic axial stiffness at cyclic stability stage

从图 11 中可以看出, 在未破坏的岩样中, 当应力水平为 70% 时, 5, 10, 15 MPa 的循环幅值分别对应的衰减率为 -0.062, -0.085, -0.071, 这说明在循环扰动过程中动态刚度均有一定程度提高, 且循环幅值 5 MPa 时对应的衰减率绝对值最小, 故可认为, 循环幅值增大会一定程度上提升循环扰动对动态刚度的提高作用。当应力水平为 80% 且幅值为 5 MPa 时, 岩样理论上可以破坏, 但由于试验时间过长试验机会过热的问题, 5500 次循环扰动后便停止。当应力水平和循环幅值继续增大, 岩样均破坏, 尤其在“双高”模式下, 动态刚度的衰减率增加近百倍, 且衰减程度严重, 由此推测, 随应力水平和幅值增大, 初始—稳定—破坏的分界特征将越来越模糊, 动态刚度会迅速衰减到岩样破坏。综上, 稳定阶段的动态刚度衰减率的正负状态可作为岩石循环扰动破坏前兆。

3.3 基于动态刚度的损伤演化规律

由于动态刚度在循环扰动过程中的响应特征具有显著的阶段性并在稳定阶段能够预示岩样破坏, 据此, 损伤变量表达式为^[19]

$$D = \frac{A_{sd,max} - A_{sd}}{A_{sd,max} - A_{sd,min}}, \quad (1)$$

式中, $A_{sd,max}$ 为循环扰动过程中的最大动态刚度, A_{sd} 为某一循环周次内的动态刚度, $A_{sd,min}$ 为循环扰动过程中最小动态刚度。

图 12 为破坏试样损伤变量 D 和相对循环次数的关系, 与总变形趋势和动态刚度类似, 具备显著三阶段特征。

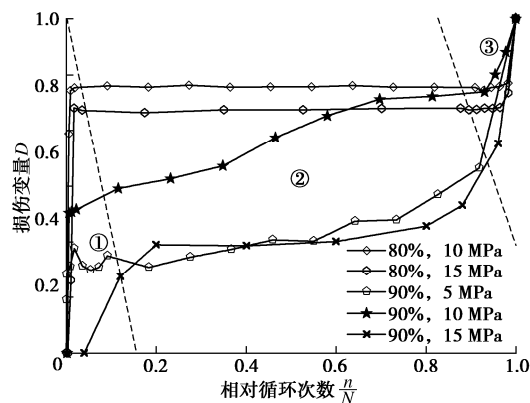


图12 损伤变量与相对循环次数关系

Fig. 12 Relationship between damage variable and relative cycle number

可以看出,该方法可表征岩石在循环扰动过程中的损伤演化进程,并能够体现出循环扰动过程滞回圈疏(①初始)一密(②稳定)一疏(③破坏)的变化。进一步分析可以看出,损伤变量演化曲线与前文所述的总变形趋势曲线具有相似的形态,且可发现,“双高”模式的损伤演化过程,虽然也有三阶段特征,但相比于其他情况,由于损伤累积非常迅速,故各阶段过渡特征不明显,尤其表现为初始阶段持续时间很短并迅速进入稳定阶段,之后又迅速进入破坏阶段。然而对于其他条件,其在初始阶段的损伤变量表现为短时间内快速增长后迅速稳定,并保持较长时间稳定后,损伤变量才会再次迅速增长并进入破坏阶段。进一步对比发现,当为超高应力水平(90%)时,即使在稳定阶段,损伤变量增长依然较快,而应力水平相对较低时(80%),损伤变量在稳定阶段可以保持长时间极缓慢增长,这与前文所述的初始塑性变形累积程度(即加载至预设应力水平且尚未扰动时的塑性变形累积程度)有关。并可看出,在“双高”组合下,由于岩石损伤演化进程被大大缩短,破坏迅速且反应时间短,故在工程中需极力避免。

4 结 论

(1)应力水平是循环扰动下大理岩破坏的主要因素,幅值是次要因素。主要表现为:当应力水平等于扩容应力时,大幅值循环扰动也难使岩石破坏;应力水平超过扩容应力时,较大幅值循环扰动可使岩样破坏;应力水平远高于扩容应力时,低幅值循环扰动也可使岩样破坏。

(2)动态刚度比不可逆变形更能体现循环扰动的初始、稳定和破坏三阶段的不同特征。在稳定阶段,动态刚度衰减率为负时,循环扰动会对岩石起强化作用,岩石不破坏;动态刚度衰减率为正时,循环扰动

对岩石起劣化作用,岩石最终破坏;动态刚度衰减率的正负为岩石循环扰动破坏前兆。

(3)基于动态刚度表征的损伤变量与相对循环次数的关系与轴向变形总趋势具有相似性,其中,“双高”模式与其他模式分别与I、II型总变形趋势曲线对应。在初始阶段,损伤变量值急剧增加,当进入稳定阶段后,损伤变量迅速平稳,当进入破坏阶段后,损伤变量再次急剧增加至1,岩石破坏。

参考文献:

- [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 He-ping. 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. (in Chinese))
- [2] 蔡燕燕, 唐 欣, 林立华, 等. 疲劳荷载下大理岩累积损伤过程的应变速率响应[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(5): 827 - 836. (CAI Yan-yan, TANG Xin, LIN Li-hua, et al. Strain rate response of damage accumulation of marble under fatigue loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(5): 827 - 836. (in Chinese))
- [3] BAGDE M N, PETROŠ V. Fatigue and dynamic energy behaviour of rock subjected to cyclical loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(1): 200 - 209.
- [4] LIU E L, HUANG R Q, HE S M. Effects of frequency on the dynamic properties of intact rock samples subjected to cyclic loading under confining pressure conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(1): 89 - 102.
- [5] 刘忠玉, 董 旭, 张旭阳. 分级循环荷载下煤层岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(增刊 1): 2593 - 2602. (LIU Zhong-yu, DONG Xu, ZHANG Xu-yang. 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. (in Chinese))
- [6] 夏才初, 周舒威, 胡永生, 等. 循环单轴应力和循环温度作用下玄武岩力学性质初探[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6): 1016 - 1024. (XIA Cai-chu, ZHOU Shu-wei, HU Yong-sheng, et al. Preliminary study on mechanical property of basalt subjected to cyclic uniaxial stress and cyclic temperature[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6): 1016 - 1024. (in Chinese))
- [7] 祝艳波, 黄 兴, 郭 杰, 等. 循环荷载作用下石膏质岩的

- 疲劳特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(4): 940 - 952. (ZHU Yan-bo, HUANG Xing, GUO Jie, et al. Experimental study of fatigue characteristics of gypsum rock under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(4): 940 - 952. (in Chinese))
- [8] 章清叙, 葛修润, 黄 铭, 等. 周期荷载作用下红砂岩三轴疲劳变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(3): 473 - 478. (ZHANG Qing-xu, GE Xiu-run, HUANG Ming, et al. Testing study on fatigue deformation law of red-sandstone under triaxial compression with cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(3): 473 - 478. (in Chinese))
- [9] 张晖辉, 颜玉定, 余怀忠, 等. 循环荷载下大试件岩石破坏声发射实验: 岩石破坏前兆的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(21): 3621 - 3628. (ZHANG Hui-hui, YAN Yu-ding, YU Huai-zhong, et al. Acoustic emission experimental research on large-scaled rock failure under cycling load—fracture precursor of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(21): 3621 - 3628. (in Chinese))
- [10] PEI F, JI H G, ZHAO J W, et al. Energy evolution and AE failure precursory characteristics of rocks with different rockburst proneness[J]. Advances in Civil Engineering, 2020: 8877901.
- [11] LI D X, WANG E Y, KONG X G, et al. Damage precursor of construction rocks under uniaxial cyclic loading tests analyzed by acoustic emission[J]. Construction and Building Materials, 2019, **206**: 169 - 178.
- [12] SHEININ V I, BLOKHIN D I, MAKSIMOVICH I B, et al. Experimental research into thermomechanical effects at linear and nonlinear deformation stages in rock salt specimens under cyclic loading[J]. Journal of Mining Science, 2016, **52**(6): 1039 - 1046.
- [13] CAO K W, MA L Q, WU Y, et al. Cyclic fatigue characteristics of rock failure using infrared radiation as precursor to violent failure: experimental insights from loading and unloading response[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2021, **44**(2): 584 - 594.
- [14] 李夕兵, 宫凤强. 基于动静组合加载力学试验的深部开采岩石力学研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2021, **46**(3): 846 - 866. (LI Xi-bing, GONG Feng-qiang. Research progress and prospect of deep mining rock mechanics based on coupled static-dynamic loading testing[J]. Journal of China Coal Society, 2021, **46**(3): 846 - 866. (in Chinese))
- [15] 李夕兵, 左宇军, 马春德. 动静组合加载下岩石破坏的应变能密度准则及突变理论分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(16): 2814 - 2824. (LI Xi-bing, ZUO Yu-jun, MA Chun-de. Failure criterion of strain energy density and catastrophe theory analysis of rock subjected to static-dynamic coupling loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(16): 2814 - 2824. (in Chinese))
- [16] 左宇军, 李夕兵, 马春德, 等. 动静组合载荷作用下岩石失稳破坏的突变理论模型与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(5): 741 - 746. (ZUO Yu-jun, LI Xi-bing, MA Chun-de, et al. Catastrophic model and testing study on failure of static loading rock system under dynamic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(5): 741 - 746. (in Chinese))
- [17] 唐礼忠, 武建力, 刘 涛, 等. 大理岩在高应力状态下受小幅循环动力扰动的力学试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, **45**(12): 4300 - 4307. (TANG Li-zhong, WU Jian-li, LIU Tao, et al. Mechanical experiments of marble under high stress and cyclic dynamic disturbance of small amplitude[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, **45**(12): 4300 - 4307. (in Chinese))
- [18] 刘 涛, 杨 鹏, 吕文生, 等. 岩石在不同应力幅值下受低频循环扰动的力学特性试验[J]. 煤炭学报, 2017, **42**(9): 2280 - 2286. (LIU Tao, YANG Peng, LÜ Wen-sheng et al. Rock mechanical properties experiments with low-frequency circulation disturbance under different stress amplitudes[J]. Journal of China Coal Society, 2017, **42**(9): 2280 - 2286. (in Chinese))
- [19] LIU E L, HE S M. Effects of cyclic dynamic loading on the mechanical properties of intact rock samples under confining pressure conditions[J]. Engineering Geology, 2012, **125**: 81 - 91.