

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0256

变幅循环加卸载作用下大理岩扩容特性试验研究

俞 缙¹, 刘泽瀚¹, 林立华², 黄建国³, 任文斌³, 周 垒¹

(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. 厦门路桥工程投资发展有限公司, 福建 厦门 361026;
3. 中铁十二局集团第四工程有限公司, 陕西 西安 710000)

摘 要: 通过不同围压下变幅值循环加卸载试验, 对大理岩的损伤演化与变形特性进行了研究, 并着重分析其裂隙体积应变和扩容特性。结果表明: 随着循环加卸载次数的增加, 大理岩的弹性模量先增大后减小, 广义泊松比先稳定而后迅速增加; 综合分析第 3~6 次加载时裂隙体积应变曲线, 随着加载次数增加, 大理岩的初始裂隙体积应变增加, 弹性变形阶段的起始位置延迟, 扩容点逐渐提前, 且单次循环所造成的裂隙体积应变增量与应力幅值呈指数变化关系; 围压较大时, 变幅值循环加卸载与单调加载作用下的扩容指数相差较大。随着围压的增加, 裂隙体积应变占比逐渐增加, 且变幅值循环加卸载作用下裂隙体积应变占比大于单调加载作用下裂隙体积应变占比。大理岩的破坏模式由单调加载作用下的剪切破坏变化为变幅值循环加卸载作用下的鼓胀破坏。

关 键 词: 大理岩; 循环加卸载; 三轴试验; 裂隙体变; 扩容

中图分类号: TU 451

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2021) 11-2934-09

Characteristics of dilatancy of marble under variable amplitude cyclic loading and unloading

YU Jin¹, LIU Ze-han¹, LIN Li-hua², HUANG Jian-guo³, REN Wen-bin³, ZHOU Lei¹

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

2. Xiamen Road & Bridge Engineering Investment and Development Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361026, China;

3. China Railway 12th Bureau Group No.4 Engineering Co., Ltd, Xi'an, Shaanxi 710000, China)

Abstract: The damage evolution and deformation characteristics of marble are studied by cyclic loading and unloading tests with varying amplitude under different confining pressures, and the crack volumetric strain and dilatancy characteristics are analyzed emphatically. Some conclusions are drawn as follows. (1) With the increase of cycle number, the elastic modulus of marble first increases and then decreases, and the generalized Poisson's ratio first stabilizes and then increases rapidly. (2) Comprehensive analysis of the crack volumetric strain curves from the 3rd to 6th loading shows that as the number of loading increases, the initial crack volumetric strain of the marble increases, the initial position of elastic deformation stage is delayed, and the expansion point gradually advances. Moreover, the relationship between the increment of crack volumetric strain caused by a single cycle and stress amplitude is exponential. (3) The dilatancy index of variable amplitude cyclic loading and unloading is different from that of monotone loading at a high confining pressure. With the increase of confining pressure, the proportion of crack volumetric strain increases gradually, and the proportion of crack volumetric strain under variable amplitude cyclic loading and unloading is greater than that under monotonic loading. The failure mode of marble changes from shear failure under monotonic loading to bulging failure under variable amplitude cyclic loading and unloading.

Keywords: marble; cyclic loading and unloading; triaxial test; crack volumetric strain; dilatancy

1 引 言

传统的岩石力学行为研究大多针对单调加载条

件, 而实际岩石工程在施工和服役期间, 岩体常受到循环荷载作用^[1-2]。高边坡、矿山巷道、交通和水利隧洞的开挖过程, 以及大坝蓄水、泄洪等运营过

收稿日期: 2021-02-18

修回日期: 2021-07-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 42077254; No. 51874144); 福建省科技计划引导性项目 (No. 2020H0014)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (42077254, 51874144) and the Guiding Project of Science and Technology Plan of Fujian Province (2020H0014).

第一作者简介: 俞缙, 男, 1978 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学与工程方面的科研及教学工作。E-mail: bugyu0717@163.com

程中, 岩体均不同程度地受到循环荷载扰动影响, 其变形特性与传统的单调加载情况有何不同, 是近年来学者们研究的热点^[3-8]。众所周知, 岩石完全破坏前, 微裂隙、节理等缺陷的萌生、发育、扩展、汇聚和开裂, 最显著的表现就是岩石宏观上的扩容现象^[9-11], 故研究循环加卸载条件下岩石的损伤演化与扩容规律具有重要的意义, 也有助于更好地解释实际工程中岩石的损伤破坏机制。

前人对循环加卸载作用下的岩石力学性质研究主要分为两方面: 一是从宏观角度分析岩石变形、强度和应变能演化性质^[12]; Meng 等^[13]研究了不同围压循环加卸载条件下岩石的强度、变形和体胀特性, 发现围压对剪胀角有明显的抑制作用, 且围压越大, 岩石破裂角越小; 赵星光等^[14]利用声发射监测对花岗岩在三轴循环加卸载作用下的损伤与扩容现象进行了分析, 研究表明花岗岩的扩容行为依赖于围压的变化, 围压越高扩容速率越低; Xiao 等^[15]在循环加卸载试验中对比分析了波速法, 残余应变法, 应变能法等 6 种定义损伤的方法, 引入平均动模量的概念修正残余应变法, 使其更加适用于不同加载条件下岩石的损伤表征; Momeni 等^[16]分析了花岗岩在循环加卸载中不同最大荷载、加载幅值和加载频率对应力-应变关系, 能量密度等方面的影响, 发现了累积损伤呈现明显的三阶段过程。杨小彬等^[17]对循环加卸载作用下砂岩的能量演化特征进行分析, 发现耗能比随循环次数的增加呈 U 形曲线发展, 并建立了应力-应变关系公式。二是从细观角度研究微裂纹发展过程^[18]; Ghamgosar 等^[19]通过劈裂试验和数值仿真探讨凝灰岩在单调加载和循环荷载作用下断裂过程区内显微裂隙的发展和闭合的规律, 发现循环荷载作用使晶粒间不断摩擦并产生了较多显微裂隙, 而单调加载则产生一条光滑剪切带; Ghamgosar 等^[20]还发现循环加载会导致岩石强度减小到原来的 70%, 所形成的高密度微裂纹大多位于断裂过程区; Wang 等^[21]对循环加卸载条件下岩石进行 CT 扫描, 揭示了循环荷载对岩石裂纹尺度和密度的影响; 李兵磊等^[22]通过核磁共振研究了循环扰动下岩石内部裂隙分布, 发现微裂隙主要集中在试件边缘并在主裂纹区集中。李欣慰等^[23]通过电子显微镜扫描, 发现循环荷载作用下岩石破碎程度更大, 会产生更多的碎屑与粉状颗粒, 破坏由失稳破坏转化为失效破坏。

上述研究试图从不同层面揭示循环加卸载作用下岩石的损伤演化和体积变化规律, 获得了颇具价

值的成果。本文拟通过变幅值循环加卸载三轴试验, 利用经典的裂隙体积变形计算和变形阶段划分方法, 从朴素的分析视角出发, 研究不同加载方式下大理岩变形参数变化的差异性。着重对变幅值循环加卸载变形曲线中各加载段的总体积应变与裂隙体积应变进行对比分析, 并对循环加载幅值变化对裂隙体积应变的影响进行了较为详尽的规律总结。最后结合大理岩的破坏模式, 运用归一化思路剖析围压和加载方式对大理岩总体积应变和裂隙体积应变之间比例关系的影响规律。

2 试验条件及方法

2.1 试验设备及试样

试验使用 TFD2000 型电伺服岩石三轴仪。该仪器围压上限为 100 MPa, 轴压加载最高可达 2 000 kN, 应力传感器精度为 0.01 kN。利用轴向引伸计和环向链式引伸计进行变形测量, 轴向变形测量范围为 $-5 \sim 5$ mm, 环向变形测量范围为 $-1.5 \sim 1.5$ mm, 分辨率均为 10^{-4} mm。通过 EDC 专业数字控制器及配套系统, 可实现多种控制方式, 如环向应力与变形控制、轴向应力与变形控制等。岩石试样选用白色粗晶大理岩, 材质匀称、无裂隙、杂质少、完整度好, 且所有试样均取自同一批次大理岩试样。依照国际岩石力学协会提议, 大理岩被加工成直径为 50 mm、高为 100 mm 的圆柱体试件, 直径误差控制在 0.3 mm 内, 对试样两端进行面磨平处理使其端面平整度控制在 0.02 mm 内。

2.2 试验方案

设置 6 组不同围压下的单调加载和变幅循环加卸载试验, 围压分别为 0、5、10、15、20、30 MPa, 每组试验各设置 3 组平行试验。首先进行单调加载试验, 以 0.03 mm/min 加载速率的轴向变形控制方式加载, 应力-应变全过程曲线见图 1。

根据单调加载的峰值应力试验结果设定循环加卸载目标应力, 分别为相同围压下单调加载峰值应力的 20%、40%、60%、80%、90%, 达到每级目标应力后卸载至 0 MPa, 再进行下一级加载直至试样破坏, 即总共加载 6 次, 卸载 5 次。因岩样存在一定差异性, 试验中可能出现第 5 次加载未达到目标应力时试样已接近破坏, 此时卸载不再适合进行应变控制, 故循环加卸载试验中卸载段一律采用应力控制, 卸载速率设置为 0.1 MPa/s。此外, 当第 5 次加载无法达到设定应力水平时, 则在变形曲线趋于水平时进行卸载, 再作第 6 次加载直至试样破坏。

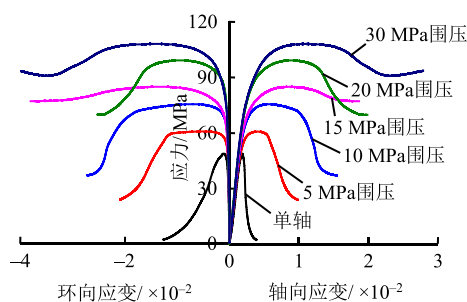


图1 单调加载应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves of monotonic loading

3 变形特征

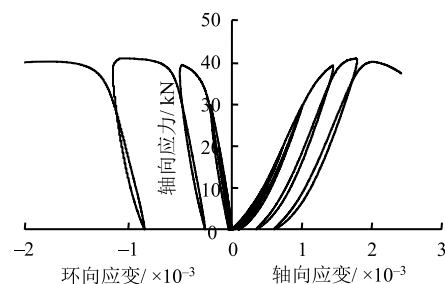
3.1 应力-应变关系

图1 单调加载下的大理岩轴向和环向应力-应变曲线显示, 峰值应力随围压的增大而提升, 在峰后均呈现软化特性。单轴条件下峰后应力迅速下落, 岩样表现出脆性特性, 随着围压的增大峰值应力对应的应变值不断增加, 延性变形特征随之加强。图2 为不同围压下变幅循环加卸载全应力-应变曲线。篇幅所限, 仅列出单轴、10、30 MPa 围压的试验曲线。如图2所示, 变幅循环加卸载和单调加载下大理岩的峰值应力较为接近。变幅循环加卸载的残余变形随每一级应力的增加而增大, 曲线滞回环更加明显, 面积逐渐增大。当围压较低时滞回环为“柳叶形”, 围压较高时滞回环变为“梭子形” [24]。

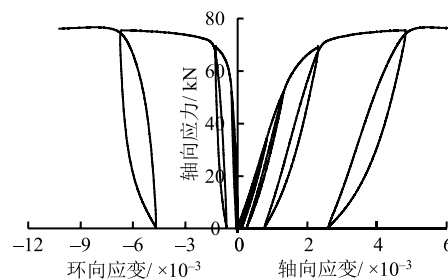
图3(a)和图3(b)分别为不同围压下载载段弹性模量和广义泊松比随加载次数变化的关系曲线。由于第1次加载未进入弹性阶段, 故主要分析第2~6次加载段。如图3(a)所示, 围压越高, 弹性模量越大, 而相同围压下载弹性模量先增后减。这是因为第2和第3次加载阶段大理岩初始裂隙不断闭合, 试样整体趋向密实, 使试验结果大致在第4次加载段时弹性模量最高。第4次加载目标应力为强度的80%, 此时试样开始产生新生裂纹, 弹性模量开始下落。图3(b)显示, 相同围压下, 广义泊松比先稳定, 在第4次加载时显著增大, 其原因与弹性模量类似。需说明的是, 广义泊松比增幅较大, 由0.2左右增大至0.5甚至0.6 [24]。这是因为第4次加载后岩样裂隙大幅度增大整体性被破坏, 内部结构逐渐松散所致 [25-26], 该现象在文献 [27-28] 中也有类似报道。

3.2 裂隙体积应变变化规律

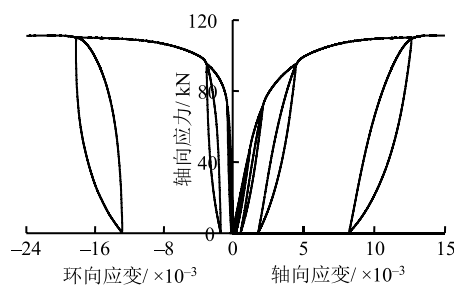
岩石力学性质发生改变的关键在于其内部裂隙的变化, 裂隙体积应变是其重要表征手段。Martin 等 [29-30] 认为, 岩石的裂隙体积应变可以由测量得到



(a) 单轴



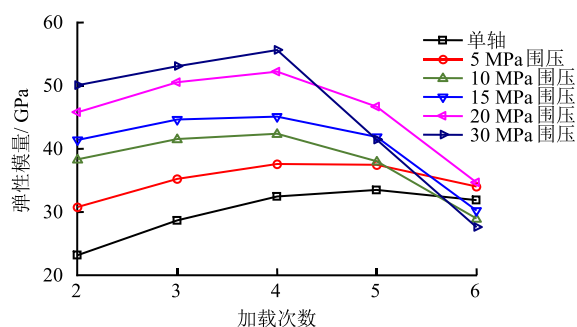
(b) 10 MPa 围压



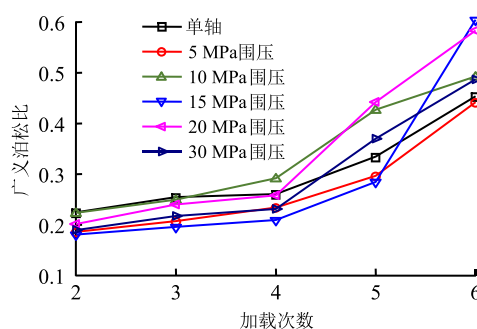
(c) 30 MPa 围压

图2 变幅循环加卸载应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves of variable amplitude cyclic loading



(a) 弹性模量-加载次数关系



(b) 广义泊松比-加载次数关系

图3 变形参数与加载次数关系

Fig.3 Relationship between deformation parameter and loading number

的总体积应变减去弹性体积应变得到, 即

$$\varepsilon_{vc} = \varepsilon_v - \varepsilon_{ve} \quad (1)$$

式中: ε_{vc} 为裂隙体积应变; ε_v 为总体积应变; ε_{ve} 为弹性体积应变。常规三轴试验中总体积应变 ε_v 可下式进行计算:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 \quad (2)$$

式中: ε_1 为轴向应变; ε_3 为环向应变。弹性体积应变 ε_{ve} 可由下式计算^[30]:

$$\varepsilon_{ve} = \frac{1-2\mu_e}{E}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (3)$$

式中: μ_e 为弹性阶段的泊松比; E 为弹性模量; σ_1 为最大主应力; σ_2 为中间主应力; σ_3 为最小主应力。对于常规三轴试验, $\sigma_2 = \sigma_3$, 因此, 式 (3) 可改写为

$$\varepsilon_{ve} = \frac{1-2\mu_e}{E}(\sigma_1 + 2\sigma_3) \quad (4)$$

图 4 为单轴时两种加载作用下的应力-应变曲线, 以及裂隙体积应变、总体积应变与轴向应变关系曲线。

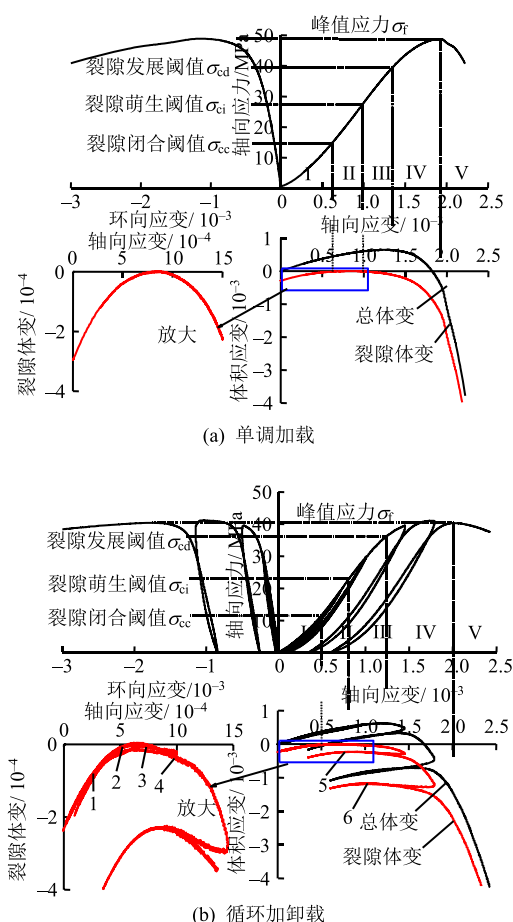


图 4 单轴单调加载和循环加卸载变形曲线与阶段划分
Fig.4 Deformation curves and stage division of monotonic and cyclic loading-unloading under uniaxial condition

图 4(a)对单调加载变形曲线进行常规的裂隙发展 5 阶段划分^[31], 分别为裂隙闭合阶段 I、弹性阶段 II、裂隙稳定扩展阶段 III、裂隙非稳定扩展阶段 IV 和峰后变形阶段 V。同样, 图 4(b)对变幅循环加卸载变形曲线的外包络线也可进行类似的裂隙发展阶段划分。对比两图可见: ①变幅循环加卸载的第 1~3 个加载段应力水平基本在裂隙发展阈值前, 应力-应变曲线、总体积应变、裂隙体积应变与轴向应变关系曲线均大致在各自同一路径上, 其趋势与数值和单调加载时类似; ②在第 4 次加载后, 应力水平超越了裂隙发展阈值, 进入裂隙非稳定扩展阶段, 卸载后残余变形明显, 各曲线与前 3 次加载段显著分离; ③变幅循环加卸载各曲线的峰后下落趋势相对于单调加载有所缓和。

图 5 为不同围压时变幅循环加卸载作用下的裂隙体积应变、总体积应变和轴向应变的关系曲线,

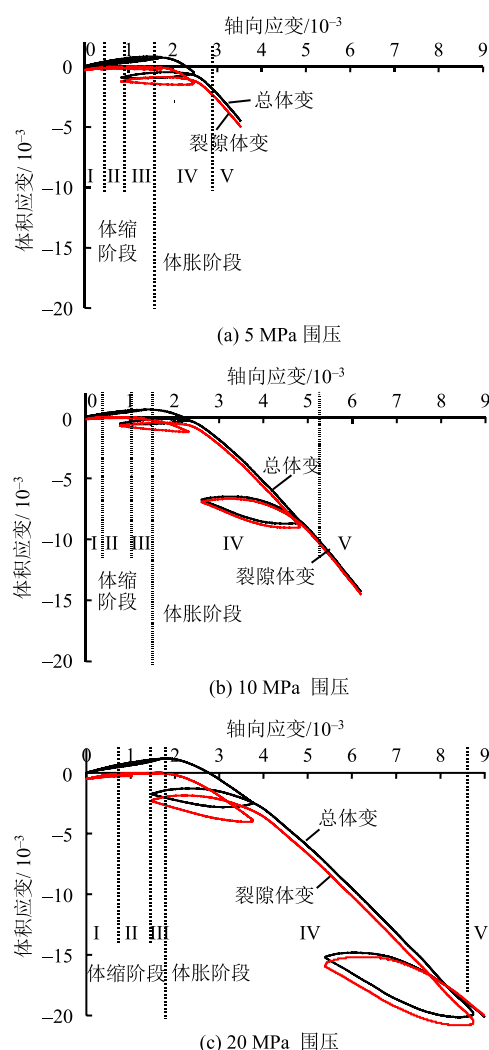


图 5 不同围压下循环加载裂隙体积应变、总体积应变与轴向应变的关系曲线

Fig.5 Relation curves of crack volumetric strain-axial strain and total volumetric strain-axial strain subjected to cyclic loading under confining pressures

两种体积应变的外包络线亦可效仿图 4, 分为 5 个阶段。I、II、III 阶段岩样总体被收缩, 裂隙体积轻微减小, 且围压对两种体积应变曲线无明显影响。IV、V 阶段总体积扩容, 裂隙体积也随之增大, 且围压越大, 总体积应变和裂隙体积应变增大幅度也越大, 而曲线斜率趋于缓和。

图 4 和图 5 用外包络线对变幅循环加卸载作用下裂隙体积应变和总体积应变划分阶段, 虽然相对简便直观, 但不能分析每一次加卸载过程之间的细微差异。为此, 从裂隙体积应变和总体积应变曲线中提取第 3~6 次加卸载变形数据, 并清除残余变形使每次加卸载的裂隙体积应变和总体积应变均由 0 点起始, 便于对两种体积应变的差异作对比分析, 见图 6。图中, *c*、*d*、*e*、*f* 与 3、4、5、6 分别为第 3~6 次加载的裂隙体积应变和总体积应变的变化曲线。由图可见: ①由累积损伤作用, 初始裂隙体积应变(裂隙体积应变曲线与纵坐标相交处的数值)随着循环加载次数增加而增大。裂隙压密阶段的终点随着循环加载次数的增加, 逐渐向横坐标轴正方向运动; ②当初始裂隙闭合后, 裂隙体积应变为 0, 曲线开始与横坐标重叠, 岩石进入弹性变形阶段。至该阶段终点时开始与横坐标偏离。将由弹性阶段开始到结束的轴向应变增量定义为“弹性变形长度”, 该长度随着循环加卸载次数的增加而缩短。说明累积损伤作用使岩样裂隙数量增加, 裂隙压密过程延长, 裂隙完全闭合后因含有更多的裂隙, 难以长时间维持在弹性变形阶段, 故更快地进入裂隙稳定扩展阶段。随围压增加, “弹性变形长度”越来越短, 甚至难以分辨出曲线与横坐标的重叠段长度; ③传统认识认为, 弹性变形阶段、裂隙稳定扩展阶段(起点为弹性变形阶段终点)与非稳定扩展阶段(起点为扩容点)的先后界限分明。而仔细观察图中较高围压下第 6 次加载裂隙体积应变和总体积应变曲线可见, 3 个阶段发生时刻趋于一致, 岩石由裂隙压密阶段直接进入裂隙非稳定扩展阶段。这可能是由于在高围压下累计损伤导致岩石内部裂隙大量增加, 最后一次加载时岩样已接近破坏状态, 裂隙压密阶段完成后新生裂隙立刻快速产生, 导致弹性变形阶段和稳定扩展阶段几乎消失; ④总体积应变最大值(即体缩量)随加载次数的增加而逐渐变小, 且裂隙体积应变曲线和总体积应变曲线的曲率随着围压增大而逐渐减小, 从裂隙发展速度的角度体现了围压越高岩石延性越强。

不同围压下由于循环应力幅值的变化而造成的裂隙体积应变的变化如图 7 所示, 单次循环所造成

的裂隙体积应变增量可以用下式计算:

$$\varepsilon_{vc}^{si} = \varepsilon_{vc}^n - \varepsilon_{vc}^{n-1} \quad (5)$$

式中: ε_{vc}^{si} 为单次循环所造成的裂隙体积应变增量; ε_{vc}^n 为第 n 次循环对应的裂隙体积应变。

从图 7 不难看出, 当循环加卸载应力幅值小于裂隙发展阈值时, 此时处于裂隙稳定扩展阶段之前, 循环加卸载的幅值变化对单次循环所造成的裂隙体积应变的影响不大。当循环加卸载应力幅值大于裂隙发展阈值, 即处于裂隙非稳定扩展阶段时, 幅值的变化对单次循环所造成的裂隙体积应变的影响效

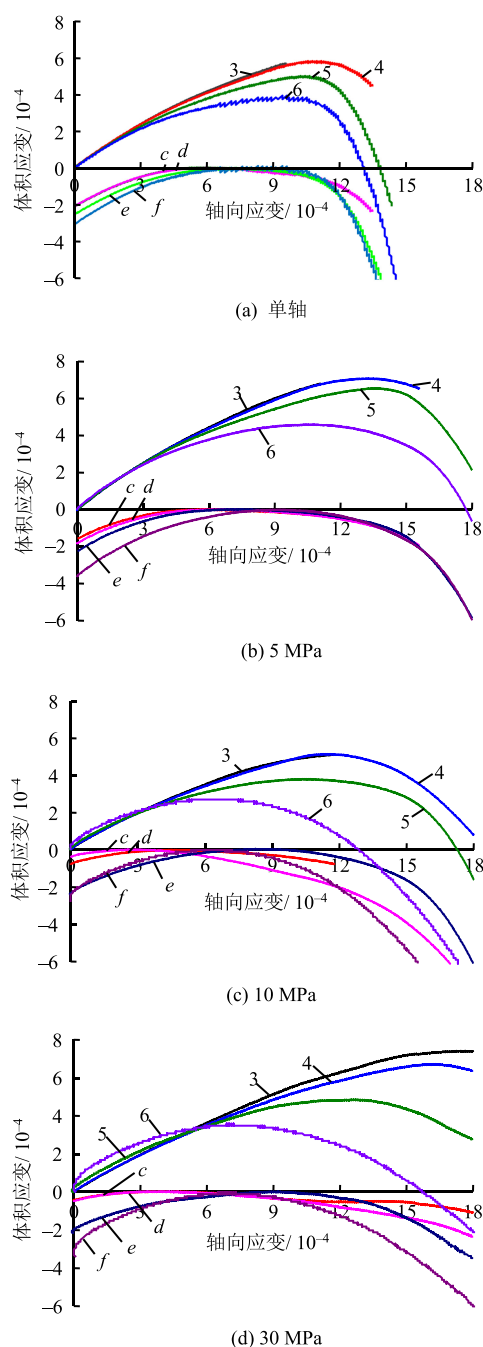


图 6 每次加载时初始裂隙体积应变和总体积应变曲线
Fig.6 Curves of initial crack volumetric strain and total volume strain during each loading

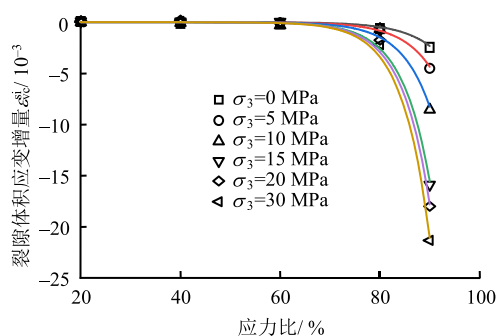


图 7 循环加卸载幅值与裂隙体积应变变化关系

Fig.7 Relationship between cyclic loading and unloading amplitude and crack volumetric strain

果显著，即循环加卸载幅值越大，造成的裂隙体积应变越大。且裂隙体积应变与循环加卸载幅值的变化符合指数关系，可用下式表示：

$$\varepsilon_{vc}^{si} = \alpha \times \beta^{Str} \quad (6)$$

式中： α 为材料常数； β 为加载条件参数； Str 为循环幅值应力比。对于大理岩材料， α 取 -1.564×10^{-9} ，不同围压下的加载条件参数 β 与相关系数 R^2 如表 1 所示。

表 1 加载条件参数与相关系数
Table 1 Loading condition parameters and correlation coefficients

围压 / MPa	加载条件参数 β	相关系数 R^2
0	$7.228\ 80 \times 10^6$	0.990 26
5	$1.451\ 34 \times 10^7$	0.990 34
10	$2.960\ 97 \times 10^7$	0.983 17
15	$5.963\ 93 \times 10^7$	0.981 94
20	$6.936\ 77 \times 10^7$	0.993 95
30	$8.381\ 29 \times 10^7$	0.995 41

由表 1 可知，不同围压条件下相关系数均为 0.98 以上，拟合效果较好，围压与加载条件参数的关系如图 8 所示。

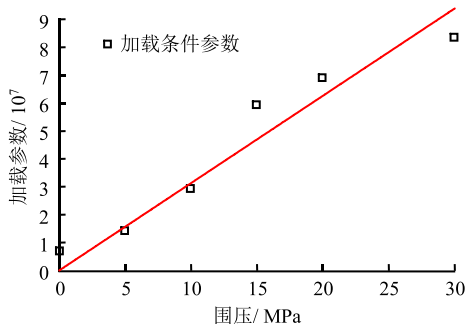


图 8 加载条件参数与围压变化关系

Fig.8 Relationship between loading condition parameter and confining pressure

由图 8 可见，随着围压的增加，加载条件参数与围压呈现线性增长的关系，可用下式拟合：

$$\beta = k \sigma_3 \quad (7)$$

式中： k 为拟合参数。在不同围压下的变幅值循环加卸载作用下的 k 为 $3.130\ 3 \times 10^6$ ，相关系数为 0.977 92，拟合效果较好。

3.3 扩容特征

扩容指数 I_d 是量化反映岩石加载过程中扩容现象的常用参量^[28]， I_d 越大表示扩容效应越明显，岩石内部裂隙体积越大，其表达式如下：

$$I_d = \frac{\theta_p}{\theta_0} = \frac{\arctan(\Delta \varepsilon_{vc} / \Delta \varepsilon_{lp})_p}{\arctan(\Delta \varepsilon_{vc} / \Delta \varepsilon_{lp})_0} \quad (8)$$

式中： θ 为表观扩容角； θ_p 为当前围压下的表观扩容角； θ_0 为 0 MPa 围压下的表观扩容角； $\Delta \varepsilon_{vc}$ 为裂隙体积应变增量； $\Delta \varepsilon_{lp}$ 为轴向塑性应变增量。轴向塑性应变 ε_{lp} 可以由 $\varepsilon_{lp} = \varepsilon_l - \varepsilon_{lc}$ 得到。由 $\varepsilon_{lc} = \sigma_l / E$ 可以得到弹性轴向应变。表 2 为单调加载和变幅循环加卸载下岩石在应力峰值时刻对应的 θ 和 I_d 。

表 2 表观扩容角与扩容指数

Table 2 Apparent dilatancy angle and the dilatancy index

围压 / MPa	单调加载		循环加卸载	
	表观扩容角 θ / (°)	扩容指数 I_d	表观扩容角 θ / (°)	扩容指数 I_d
0	85.70	1.000 00	85.79	1.000 0
5	78.96	0.921 40	78.86	0.919 2
10	75.55	0.881 60	75.63	0.881 6
15	75.72	0.882 60	75.98	0.885 6
20	66.27	0.773 30	71.47	0.833 0
30	64.87	0.756 16	73.11	0.852 1

文献[28]指出， I_d 和围压主要呈负指数关系，可由下式表示：

$$I_d = e^{-m_d \sigma_3} \quad (9)$$

式中： m_d 为拟合参数。

根据表 1 和式(9)分别对两类试验结果作拟合。结果显示，单调加载作用下的 m_d 为 0.010 46，相关系数为 0.905 2，拟合效果较好。变幅循环加卸载作用下的 m_d 为 0.007 45，但相关系数仅仅为 0.557 17，拟合效果非常差，见图 9。在两种加载条件下，大理岩的 I_d 随围压的增加而降低。当围压较低时，两种加载方式的 I_d 差值很小，但当围压较大时差值较大，说明加载方式对大理岩的扩容行为影响显著，负指数关系无法很好得反映围压对 I_d 的影响。图 10 为围压 30 MPa 时岩样破坏模式，以及裂隙体积应变和总体积应变曲线。图 10(a)显示单调加载作用下

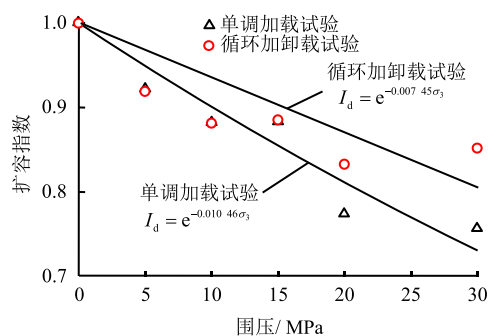


图9 单调加载和循环加卸载下扩容指数与围压的关系
Fig.9 Relationship between dilatancy index and confining pressure under monotonic loading and cyclic loading

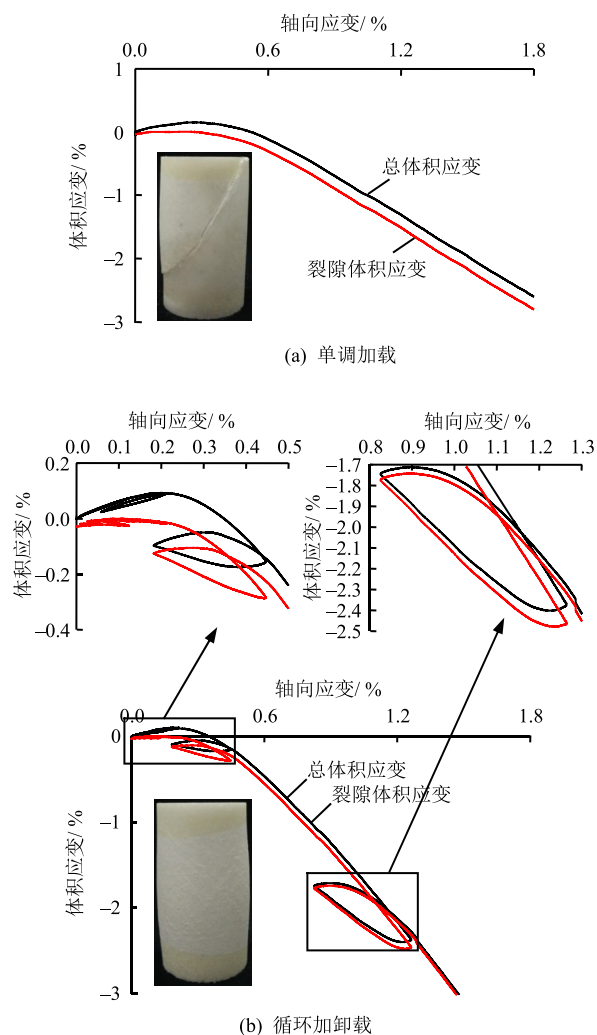


图10 围压为30 MPa时不同加载条件下裂隙体积应变、总体积应变曲线及其破坏模式
Fig.10 Curves of crack volumetric strain and total volume strain and their failure modes under different loading conditions when the confining pressure is 30 MPa

大理岩表现为具有单一剪切面的剪切破坏形式, 总体积应变与裂隙体积应变的差值(即弹性体积应变)随轴向应变增长先增大, 达到扩容点后基本稳定。图10(b)显示变幅循环加卸载作用下大理岩表现为

鼓胀破坏形式, 未出现明显剪切面。总体积应变与裂隙体积应变的差值随轴向应变增长先增大, 至扩容点处差值最大, 然后开始减小, 接近破坏时差值趋近于0。这是因为每次循环加卸载都会引起岩石内力重分布, 并形成一批在空间上随机分布的新生裂隙。多次循环后产生了大量次生裂隙, 从而难以形成聚集在剪切面上的贯穿裂隙。同时因裂隙数量巨大, 完整岩石的弹性体缩量可以忽略不计, 总体积应变以裂隙体积变形为主, 这与 Ghamgosar 等^[19]的认识一致。

为更直观地反映不同围压和加载方式下裂隙体积应变和总体积应变之间差异的变化规律, 定义峰值应力时裂隙体积应变 ε_{vc} 和总体积应变 ε_v 间的比值为裂隙体积应变比, 比值越接近1代表裂隙体积应变占比越大, 弹性体积应变占比越小, 计算结果见图11。由图可知, 裂隙体积应变比在两种加载条件下均随围压的升高而变大。在单调加载中, 单轴压缩时裂隙体积应变占比仅为0.317, 弹性体积应变仍占据主要部分, 但是随着围压的增高裂隙体积应变占比升高至0.8以上, 这是由于围压越高, 岩石的塑性变形特征越强, 塑性变形量增大, 越来越偏向于延性破坏, 从而使得岩石内部产生更多微裂隙, 故在三轴状态下裂隙体积应变占据主要地位。而在循环加卸载中, 单轴压缩时裂隙体积应变占比升高至0.69, 这说明了循环加卸载的累计损伤作用生成了更多的微裂隙, 随着围压的升高, 弹性体积应变占比极小, 与单调加载相比裂隙体积应变比更接近1。

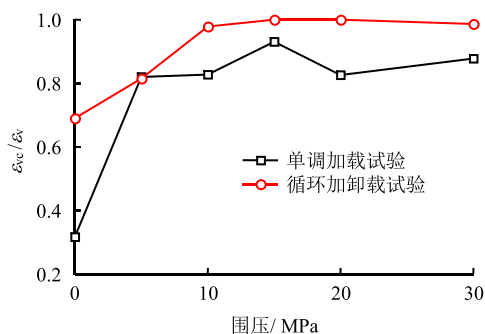


图11 单调和循环加卸载峰值应力时的裂隙体积应变比-围压关系

Fig.11 Relationship between crack volumetric strain ratio and confining pressure under monotonic and cyclic loading-unloading peak stresses

4 结 论

(1) 变幅循环加卸载三轴试验显示, 随着加卸载次数的增加, 大理岩的弹性模量会先上升后下降,

泊松比会先稳定而后加速增大。

(2) 单独选取第 3~6 次加载曲线对比发现, 随着加载次数增大, 大理岩的初始裂隙体积应变不断变大, 弹性变形阶段的起始位置延迟, “弹性变形长度”减小, 扩容点逐渐提前, 直至最后出现弹性变形阶段、裂隙稳定扩展阶段与非稳定扩展阶段重合在一点的现象。单次循环所造成的裂隙体积应变增量与应力幅值呈现指数变化关系, 加载条件参数与围压呈现线性增长的关系。

(3) 在围压较小时, 单调加载和变幅循环加卸载作用的扩容指数基本一致; 围压较大时, 变幅循环加卸载作用的扩容指数大于单调加载扩容指数。随着围压的增大, 弹性体积应变占比逐渐减小, 裂隙体积应变占比逐渐增大, 且循环加卸载较单调加载作用的裂隙体积应变占比更大, 说明在循环加卸载的累积损伤作用使大理岩萌生更多的次生裂隙。此时大理岩的破坏模式由单调加载作用下的剪切破坏, 变化为循环加卸载作用下的鼓胀破坏。

本研究主要针对粗晶粒大理岩展开, 相关结论对于其他类型岩石的适用性尚待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] TAHERI A, ROYLE A, YANG Z, et al. Study on variations of peak strength of a sandstone during cyclic loading[J]. **Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources**, 2016, 2: 1-10.
- [2] MA L, LIU X, WANG M, et al. Experimental investigation of the mechanical properties of rock salt under triaxial cyclic loading[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2013, 62: 34-41.
- [3] 肖福坤, 刘刚, 申志亮, 等. 循环载荷作用下煤样能量转化规律和声发射变化特征[J]. **岩石力学与工程学报**, 2016, 35(10): 1954-1964.
XIAO Fu-kun, LIU Gang, SEHN Zhi-liang, et al. Energy conversion and acoustic emission(AE) characteristics of coal samples under cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(10): 1954-1964.
- [4] 尹士兵, 李夕兵, 叶洲元, 等. 温-压耦合及动力扰动下岩石破碎的能量耗散[J]. **岩石力学与工程学报**, 2013, 32(6): 1197-1202.
YIN Tu-bing, LI Xi-bing, YE Zhou-yuan, et al. Energy dissipation of rock fracture under thermo-mechanical coupling and dynamic disturbances[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(6): 1197-1202.
- [5] 金解放, 李夕兵, 殷志强, 等. 轴压和围压对循环冲击下砂岩能量耗散的影响[J]. **岩土力学**, 2013, 34(11): 3096-3102.
JIN Jie-fang, LI Xi-bing, YIN Zhi-qiang, et al. Effects of axial compression and confining pressure on energy dissipation of sandstone under cyclic impact loads[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(11): 3096-3102.
- [6] 苏承东, 张振华. 大理岩三轴压缩的塑性变形与能量特征分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2008, 27(2): 273-280.
SU Cheng-dong, ZHANG Zhen-hua. Analysis of plastic deformation and energy property of marble under pseudo-triaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(2): 273-280.
- [7] BAGDE M N, PETROŠ V. Fatigue properties of intact sandstone samples subjected to dynamic uniaxial cyclical loading[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2005, 42(2): 237-250.
- [8] 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.
- [9] ERARSLAN N. Microstructural investigation of subcritical crack propagation and fracture process zone (FPZ) by the reduction of rock fracture toughness under cyclic loading[J]. **Engineering Geology**, 2016, 208: 181-190.
- [10] ERARSLAN N. A Study on the Evaluation of the fracture process zone in CCNBD rock samples[J]. **Experimental Mechanics**, 2013, 53(8): 1475-1489.
- [11] NAZIFE ERARSLAN. Microstructural investigation of subcritical crack propagation and fracture process zone (FPZ) by the reduction of rock fracture toughness under cyclic loading[J]. **Engineering Geology**, 2016, 208: 181-190.
- [12] LIU X S, NING J G, TAN Y L, et al. Damage constitutive model based on energy dissipation for intact rock subjected to cyclic loading[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2016, 85: 27-32.
- [13] MENG Q B, LIU J F, LI R, et al. Experimental study on rock strength and deformation characteristics under triaxial cyclic loading and unloading conditions[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2021, 54: 777-797.
- [14] 赵星光, 李鹏飞, 马利科, 等. 循环加、卸载条件下北山深部花岗岩损伤与扩容特性[J]. **岩石力学与工程学报**, 2014, 33(9): 1740-1748.
ZHAO Xing-guang, LI Peng-fei, MA Li-ke, et al. Damage and dilation characteristics of deep granite at

- Beishan under cyclic loading-unloading conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(9): 1740-1748.
- [15] XIAO J Q, DING D X, JIANG F L, et al. Fatigue damage variable and evolution of rock subjected to cyclic loading[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2009, 47(3): 461-468.
- [16] MOMENI A, KARAKUS M, KHANLARI G R, et al. Effects of cyclic loading on the mechanical properties of a granite[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2015, 77: 89-96.
- [17] 杨小彬, 程虹铭, 吕嘉琦, 等. 三轴循环荷载下砂岩损伤耗能比演化特征研究[J]. **岩土力学**, 2019, 40(10): 3751-3757, 3766.
- YANG Xiao-bin, CHENG Hong-ming, LÜ Jia-qi, et al. Energy consumption ratio evolution law of sandstones under triaxial cyclic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(10): 3751-3757, 3766.
- [18] KITTITEP F, DECHO P. Physical model simulation of shallow openings in jointed rock mass under static and cyclic loadings[J]. **Engineering Geology**, 2010, 113(1-4): 81-89.
- [19] GHAMGOSAR M, ERARSLAN N. Experimental and Numerical studies on development of fracture process zone (FPZ) in rocks under cyclic and static loadings[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2016, 49(3): 893-908.
- [20] GHAMGOSAR M, ERARSLAN N, WILLIAMS D J. Experimental investigation of fracture process zone in rocks damaged under cyclic loadings[J]. **Experimental Mechanics**, 2017, 57(1): 97-113.
- [21] WANG Y, FENG W K, HU R L, et al. Fracture evolution and energy characteristics during marble failure under triaxial fatigue cyclic and confining pressure unloading (FC-CPU) conditions[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2021, 54: 799-818.
- [22] 李兵磊, 王武功, 曹洋兵. 循环加载下大理岩的力学响应及裂隙扩展规律[J]. **福州大学学报(自然科学版)**, 2021, 49(1): 108-114.
- LI Bing-lei, WANG Wu-gong, CAO Yang-bing. Mechanical response and fracture propagation law of marble under cyclic dynamic load[J]. **Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)**, 2021, 49(1): 108-114.
- [23] 李欣慰, 姚直书, 黄献文, 等. 循环加卸载下砂岩变形破坏特征与能量演化研究[J]. **岩土力学**, 2021, 42(6): 1693-1704.
- LI Xin-wei, YAO Zhi-shu, HUANG Xian-wen, et al. Investigation of deformation and failure characteristics and energy evolution of sandstone under cyclic loading and unloading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(6): 1693-1704.
- [24] 周垒. 循环加卸载作用下大理岩变形特征及损伤度表征[D]. 泉州: 华侨大学, 2018.
- Experiment research on the deformation characteristics and damage variable expression of marble under cyclic load[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2018.
- [25] 岳喜伟, 戴俊生, 王珂. 岩石力学参数对裂缝发育程度的影响[J]. **地质力学学报**, 2014(4): 372-378.
- YUE Xi-wei, DAI Jun-sheng, WANG Ke. Influence of rock mechanics parameters on development of fracture[J]. **Journal of Geomechanical**, 2014(4): 372-378.
- [26] 张年学, 盛祝平, 李晓, 等. 岩石泊松比与内摩擦角的关系研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2011(增刊1): 2599-2609.
- ZHANG Nian-xue, SHENG Zhu-ping, LI Xiao, et al. Study of relationship between Poisson's ratio and angle of internal friction for rocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011(Suppl.1): 2599-2609.
- [27] 黄润秋, 黄达. 高地应力条件下卸荷速率对锦屏大理岩力学特性影响规律试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2010, 29(1): 21-33.
- HUANG Run-qiu, HUANG Da. Experimental research on affection laws of unloading rates on mechanical properties of Jinping marble under high geostress[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(1): 21-33.
- [28] 黄润秋, 黄达. 卸荷条件下花岗岩力学特性试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2008, 27(11): 2205-2213.
- HUANG Run-qiu, HUANG Da. Experimental research on mechanical properties of granites under unloading condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(11): 2205-2213.
- [29] MARTIN C D. The strength of massive Lac du Bonnet granite around underground openings[D]. Winnipeg: University of Manitoba, 1993.
- [30] MARTIN C D, CHANDLER N A. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1994, 31(6): 643-659.
- [31] 段艳燕, 宋宏伟. 岩石峰后剪胀效应研究综述[J]. **地下空间与工程学报**, 2007, 3(6): 1027-1030.
- DUAN Yan-yan, SONG Hong-wei. Review of dilatancy nature of the rock post-failure behaviour[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2007, 3(6): 1027-1030.