

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.12.018

等向压缩及偏压加载下锦屏大理岩变形特性研究

彭 帅¹, 张希巍¹, 冯夏庭¹, 蔡 明^{1,2}

(1. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 劳伦森大学 工程学院, 安大略省 萨德伯里 P3E 2C6)

摘 要: 以中国锦屏地下实验室工程 T_{2b} 大理岩为研究对象, 开展了等向压缩($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) 试验及不同围压下的三轴偏压($\sigma_1 - \sigma_3$) 加载试验, 分析讨论了大理岩等向压缩体积变形特点、围压对峰后变形行为及峰前渐进性变形破坏过程的影响。试验结果表明: 大理岩的等向压缩体积变形在不同围压范围内经历了一个线性-非线性-线性的变化过程。等向压缩体变曲线上存在一个拐点(敏感应力), 该点的围压能在一定程度上反映其应力历史。偏压加载时峰后变形表现为脆性-半脆性-延性转化特征, 峰值强度随围压变化与等向压缩体变曲线斜率发生变化的转换围压是一致的。围压对渐进性破坏过程各个阶段均会产生一定影响, 除偏差闭合应力阈值外, 其余各特征偏应力阈值均随围压近似呈线性增加关系。在等向压缩和偏压加载时出现了 2 次裂隙闭合过程。试验成果对进一步研究硬岩的变形破坏机制、防治深部地下工程灾害具有一定参考价值。

关 键 词: 锦屏; 大理岩; 变形特征; 等向压缩; 渐进性破坏; 脆-延性转换

中图分类号: TU 454

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017) 12-3532-09

Deformation behavior of Jinping marble under isotropic compression and deviatoric stress loading conditions

PENG Shuai¹, ZHANG Xi-wei¹, FENG Xia-ting¹, CAI Ming^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China;

2. Bharti School of Engineering, Laurentian University, Sudbury, Ontario P3E 2C6, Canada)

Abstract: Isotropic compression and conventional triaxial compression experiments are performed on the T_{2b} marble samples taken from Jinping underground laboratory, China, and some issues related to the isotropic compression deformation characteristics, the effect of confining pressure on the post-peak behavior and the pre-peak progressive failure process have been analyzed and discussed. The test results show that the volumetric strain under isotropic compression presents a linear-nonlinear-linear change when subjected to a confining pressure increase. An apparent volume change inflection point (sensitive stress) is observed, which can be related to stress history. There is a brittle-semi brittle-ductile transition trend with increasing confining pressure in the results of the conventional triaxial tests, and the change of the strength is consistent with the change of the isotropic compression curves which is in isotropic pressure vs. volumetric strain plot. Furthermore, the increased confining pressure has an effect on each stage of the progressive failure process, and other stress thresholds of the marble increase approximately linearly with the confining pressure except the crack closure deviatoric stress threshold. The initial crack closure process of the marble occurs twice, one under isotropic compression and the other under the deviatoric stress loading condition. The above results of Jinping T_{2b} marble is valuable for achieving a better understanding the rock failure mechanism and preventing disasters in deep underground engineering.

Keywords: Jinping; marble; deformation behaviour; isotropic compression; progressive failure; brittle-ductile transition

1 引 言

脆性硬岩破坏具有渐进性和突变特征, 包括峰前渐进损伤过程^[1-3]和峰后应力快速跌落过程^[4-5]。

近年来, 随着地下采矿、大埋深水利水电硐室等工程相继进入深部岩体工程范畴^[6-7], 复杂应力路径下的脆性破坏现象(如岩爆)频繁发生, 对地下工程的稳定性和人员施工安全带来严重威胁。鉴于此,

收稿日期: 2017-03-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.11572083); 高等学校学科创新引智计划资助(No.B17009)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (11572083) and the Programme of Introducing Talents of Discipline to Universities (B17009).

第一作者简介: 彭帅, 男, 1993 年生, 硕士, 主要从事岩石流变特性方面的研究工作。E-mail: pengshuai_neu@163.com

通讯作者: 张希巍, 男, 1976 年生, 博士, 副教授, 主要从事硬岩在真三轴条件下破裂机制方面的研究工作。E-mail: zhangxiwei@mail.neu.edu.cn

高应力条件下硬岩的脆性破坏过程及其变形特性研究对揭示灾害机制具有重要科学意义。

脆性岩石的变形破坏与其内部微裂隙的萌生和扩展直接相关^[1,3]，国内外学者对此开展了大量研究。Brace^[8] 和 Bieniawski^[9]等将岩石单轴峰前应力-应变曲线划分为 4 个明显的变形阶段：裂隙闭合阶段、近弹性阶段、裂隙稳定扩展阶段和裂隙加速扩展阶段，分界点处对应 4 个重要的特征应力阈值。尽管各特征应力阈值的定义已得到普遍认同，但其识别方法尚不统一。Martin 等^[1]提出的裂隙体变识别法，为理解岩石破裂过程提供了一种有效途径，其中弹性模量 E 和泊松比 ν 的确定最为关键。Eberhardt 等^[2]基于单轴条件下的数据，提出移动点回归法优化弹性参数的选取，但此方法中步长的选取较为主观，从而影响特征应力阈值的取值。Zhao 等^[10]采用声发射并结合应变测量方法，提出了一种确定单轴条件下脆性岩石起裂应力阈值的客观方法。王洪亮^[11]、黄达^[12]、张晓平^[13]等基于不同岩石在单轴压缩下的试验数据，研究了应变率、加载速率、加载方向对峰前变形破坏过程的影响。

以上研究大多集中于岩石在单轴条件下的特征应力阈值研究，而常规三轴条件下的特征应力阈值研究还比较少。刘宁等^[14]将锦屏大理岩室内三轴试验得到的特征应力阈值与现场监测手段相结合，并将其用于分析现场围岩的损伤程度。周辉等^[15]采用裂隙体变识别法研究了不同围压下大理岩和花岗岩的特征应力阈值，并对其产生机制进行分析，但其研究的围压范围较为有限。深部高地应力下岩石的变形破坏模式可能发生改变^[16]，原岩由浅部的脆性破坏逐渐向延性破坏过渡，开挖后又由潜在的延性破坏向脆性破坏转变，因而高围压下发生脆-延性转化的岩石渐进变形破坏过程也值得关注。以往针对硬岩三轴试验研究大多以不同的静水压力状态为起点，而偏压加载前静水压力阶段的变形、体积压缩、孔隙结构改变等往往被忽略，这部分数据在文献中鲜有报道。事实上，等向压缩阶段体变能的蓄积会对偏压加载时岩石的脆性破坏过程产生一定影响，其体积变形规律对研究岩石内部微裂隙的演化非常有价值^[17]。

本文以锦屏地下实验室工程 T_{2b} 大理岩为研究对象，对其进行了高围压下的等向压缩试验和不同围压下的三轴偏压加载试验。基于等向压缩加、卸载体变数据分析讨论了大理岩等向压缩过程中的体变特点、裂隙闭合规律及敏感应力。通过偏压加载过程中的全应力-应变数据，分析了大理岩的峰后变

形特征和脆性演化规律；采用基于变形的裂隙体变识别法，提取出各特征应力阈值，并分析围压对大理岩峰前渐进变形破坏过程的影响。最后，从变形机制上对等向压缩和偏压加载阶段微裂隙出现两次不同的闭合过程展开讨论。

2 试验方案

2.1 试样描述

试验所用岩样为锦屏地下实验室工程 T_{2b} 大理岩，按照 ISRM 的建议方法加工成直径为 50 mm，高为 100 mm 的标准岩样。将岩样置于自然状态下风干后，进行密度和超声波波速测试，波速测试系统来自瑞士 Proceq 公司，选用的超声波传感器探头为 54 kHz，所测平均 p 波波速为 3 695 m/s，密度为 2.84 g/cm³。所有岩样均来自同一大块岩石并以相同方向加工，减小了试样离散性对试验结果的影响。

2.2 试验仪器

主要进行了等向压缩加、卸载试验和不同围压下的常规三轴压缩试验（包括单轴），所有试验均在东北大学深部金属矿山安全开采教育部重点实验室 ROCKMAN 207^[18]硬岩三轴试验系统上进行。该试验系统可施加的最大轴向荷载为 2 000 kN，最大围压为 100 MPa，通过轴向或环向变形控制，可获得硬岩的全应力-应变曲线。

为克服热缩套对岩样等向压缩体变的影响，等向压缩试验中以贴应变片方式测量体变，具体方法为：在试样中部间隔 90° 粘贴 2 对应变花，用导线将应变片线脚引出，再用热缩套密封试样，导线穿出处的密封需特别注意。使用 KYOWA 公司提供的 UCAM-60A 高速静态采集仪记录应变数据。

常规三轴试验中体变测量采用耐高温、高压的超小型 LVDT 传感器，该体变测量系统由 2 个轴向和 1 个径向 LVDT 构成，其中轴向 LVDT 量程为 5 mm，径向 LVDT 量程为 3 mm，体变传感器的精度为 0.1%。单轴压缩试验采用同时安装 LVDT 和贴应变片测量岩样体变，应变片数据采集与等向压缩试验结果相同。常规三轴试验岩样端部采用减摩剂处理，摩擦系数从 0.1 降低到 0.02^[19]。

2.3 试验过程

(1) 等向压缩试验

为了探究大理岩等向压缩过程中的变形特点及其内部微孔隙的闭合规律，在单独一个岩石试样上进行了最大围压为 100 MPa 的等向压缩试验，包括加、卸载两个阶段。加载采用压力控制方式，加载速率为 2 MPa/min，后以相同速率卸载至 0.5 MPa

左右。图1示意了等向压缩下试样可能出现的体积变形特点,其可作为识别敏感应力和分析内部孔隙特征变化的依据。

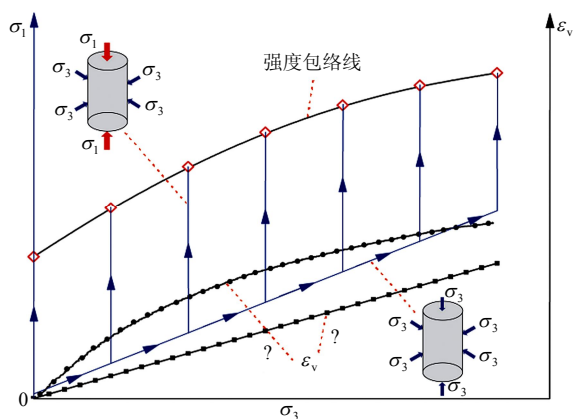


图1 等向压缩和偏压加载应力路径示意图

Fig.1 Illustration of stress paths under isotropic compression and deviatoric stress loading conditions

(2) 常规三轴压缩试验

进行了0~100 MPa围压下的常规三轴压缩试验,研究围压对岩石破坏过程的影响,其应力加载路径见图1。试验过程分为3步进行:①围压加载速率与等向压缩试验保持一致,仍以2 MPa/min加载至目标围压,使岩样处于静水压力之中;②峰前偏压加载采用载荷控制方式,速率为0.5 MPa/s;③岩样屈服后,转为LVDT测量的环向变形控制,速率为0.025 mm/min。

3 峰前渐进性变形阈值识别方法

3.1 特征应力阈值识别过程演示

由于裂隙体变识别法物理意义明确,可较为准确地识别岩石的特征应力阈值^[15,20],特别是对裂隙闭合应力阈值进行识别。因此,本文也采用此方法确定三轴条件下的特征应力阈值并外延至更高围压条件下。在实际计算中确定弹性段对应的裂隙体积应变-轴向应变曲线的边界比较困难,因此,在确定偏差闭合应力和偏差起裂应力阈值时,引入了一个绝对误差限,避免特征应力阈值取值的主观性。下面具体介绍各特征应力阈值的取值方法和物理意义。

常规三轴应力状态下,试样加载时产生的总体积应变 ε_v 包括弹性体积应变 $\varepsilon_{v\text{elastic}}$ 和裂隙体积应变 $\varepsilon_{v\text{crack}}$,其计算公式为

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 \quad (1)$$

$$\varepsilon_{v\text{elastic}} = \frac{1-2\nu}{E}(\sigma_1 + 2\sigma_3) \quad (2)$$

$$\varepsilon_{v\text{crack}} = \varepsilon_v - \varepsilon_{v\text{elastic}} = \varepsilon_v - \frac{1-2\nu}{E}(\sigma_1 + 2\sigma_3) \quad (3)$$

式中: ε_1 为轴向应变; ε_3 为横向应变; σ_1 、 σ_3 分别为最大、最小主应力; E 为弹性模量; ν 为泊松比。

图2以围压为5 MPa的大理岩常规三轴试验数据为例,演示硬岩峰前渐进性变形破坏过程,并说明各特征应力阈值的确定方法和物理意义。步骤如下:①在轴向应力-应变曲线(见图2(a))上选择近似弹性段,确定 E 和 ν ;②在裂隙体变-轴向应变曲线(见图2(b))中可见一个清晰的平台段,将其边界投射到轴向应力-应变曲线上,即可确定偏差闭合应力阈值 σ_{cc} 和偏差起裂应力阈值 σ_{ci} ,两值范围内为近似弹性阶段。本文中对裂隙体积应变引入一个0.001%的绝对误差(即 $|\varepsilon_{v\text{crack}} - \varepsilon_{v\text{crackmax}}| \leq 0.001\%$,式中: $\varepsilon_{v\text{crackmax}}$ 为裂隙体积应变的最大值)作为边界依据来确定 σ_{cc} 和 σ_{ci} 。 σ_{cc} 表示岩石初始裂隙闭合,裂隙体积快速减小,可简单表征岩石试样已有的损伤程度;偏差起裂应力阈值 σ_{ci} ,Martin等^[1]认为,此时诱导损伤裂隙开始萌生。③在体变曲线上存在一个扩容点,将其投射到轴向应力-应变曲线上,即可确定偏差损伤应力阈值 σ_{cd} ,此应力阈值可衡量岩石的长期强度。④继续增加荷载,当试样内裂隙扩展、贯通到一定阶段时,试样发生破坏,达到偏应力强度 σ_s 。

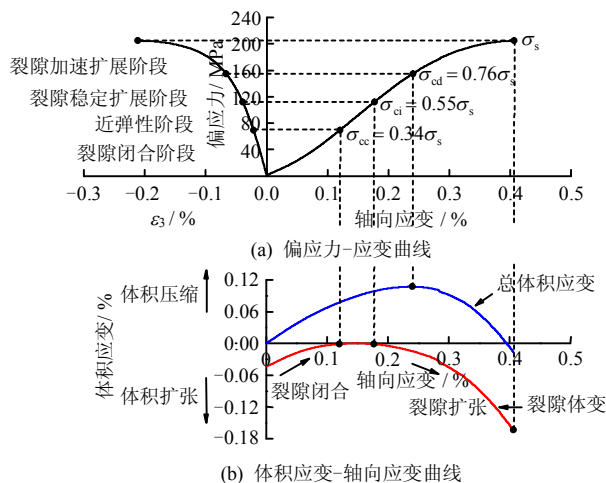


图2 5 MPa围压下大理岩渐进性破坏过程演示

Fig.2 Illustration of progressive failure process of marble under a confining pressure of 5 MPa

3.2 弹性模量和泊松比的确定

对于弹性段的选取,实际上并无统一方法。王洪亮^[11]、黄达^[12]等约定峰值强度的40%~60%作为

弹性段。Yang 等^[21]在研究砂岩的变形特性时则选取峰值强度的 30%~70%范围内的应力-应变数据计算弹性模量和泊松比。下面简单介绍本文中弹性参数的确定方法。

弹性模量 E ：选取峰值强度的 30%~60% 范围内的应力-应变数据，采用最小二乘法线性拟合，得到的斜率即为弹性模量 E 。

泊松比 ν ：仍选取峰值强度的 30%~60% 的数据作为线弹性段，以轴向应力-应变曲线斜率与横向应力-应变曲线斜率之比的相反数确定泊松比 ν 。

按照上述方法，基于常规三轴应力-应变数据，将大理岩在不同围压下的 E 和 ν 分别提取出来，并对不同围压下的 E 采用幂函数进行拟合（见图 3）。由图可见，随围压增加，弹性模量有轻微增大的趋势，而围压对泊松比未产生明显影响。

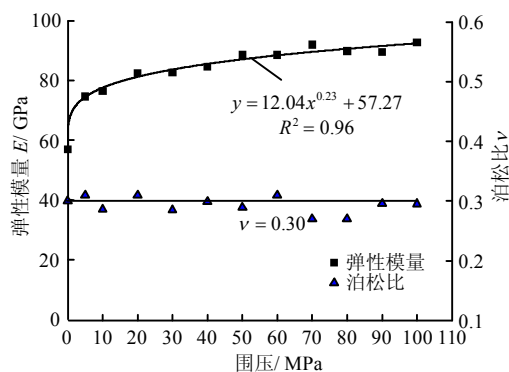


图 3 围压对大理岩弹性模量和泊松比的影响

Fig.3 Influence of confining pressure on elastic modulus and Poisson's ratio of marble

4 试验结果分析

4.1 等向压缩过程变形特点分析

图 4 给出了 0~97~0.5 MPa 等向压缩加、卸载试验结果，以体积应变对应平均应力 $p=(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)/3$ （其中 $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$ ）来表示。从图可知，加载时，试样产生了一定的压缩变形，围压达到 97 MPa 时，试样体积应变约为 0.33%。在整个围压范围内，其体积应变经历了一个线性-非线性-线性的变化过程。在初始低围压段（0~10 MPa），试样的体变曲线基本呈线性；随着围压升高，体变曲线的斜率逐渐变缓，但其体积变形仍以较快的速度非线性增加，这与试样内部随机分布的微孔隙、裂隙闭合有关；当围压继续升高超过 50 MPa 时，其体变变形随围压升高缓慢地线性增加。Wang^[22]、Asef^[23]等通过静水加载试验得到的不同岩石中弹性波速率随围压的变化规律与本文大理岩的等向压缩

体变规律类似，但其研究的超高压主要关联构造地质背景。参照偏压加载时切线模量的计算方法，大理岩等向压缩时体积压缩模量随围压的变化趋于增加，这与偏压加载时弹性模量随围压的变化相关联，即体积压缩模量越大，弹性模量也越大（见图 3）。当卸载至较低围压时，卸载曲线与加载曲线分离，表明等向压缩时试样产生了一定量的塑性变形，这与初始微裂隙的损伤和破坏有关。在低围压阶段，裂隙未完全闭合，高围压下裂隙得以充分闭合，偏压加载过程中应力-应变曲线中初始压密段的逐渐缩短也与此过程有关。此外，岩石在等向压缩阶段将蓄积一定量的弹性体变能，而卸载过程中大理岩的能量耗散极小（见图 4），尤其是在高围压阶段，初始地应力场中的这部分能量可能会对偏压加载时的脆性破坏过程产生一定影响。

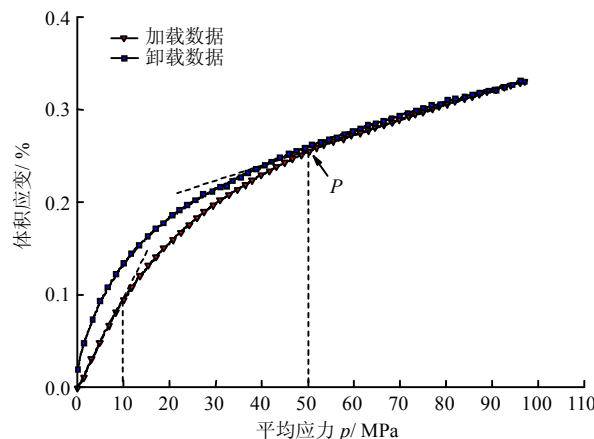


图 4 大理岩等向压缩加、卸载体变曲线

Fig.4 Volumetric strain curves of marble under isotropic compressive loading and unloading conditions

同一工程区域深部和浅部的大理岩矿物成分非常接近，但其经历的应力历史并不相同，本文中大理岩在不同围压下的等向压缩体变规律差异可能也与之相关。图 4 中非线性体变曲线上存在一个拐点，此拐点的意义可能与土力学中的先期固结压力相似，其对应的平均应力与应力历史、最大沉积应力和最大构造应力有关，但在岩石力学中并没有统一的定义。Zhang 等^[17]在研究 4 种硬岩等向压缩变形特性时以敏感应力 P 来定义此拐点，并认为以敏感应力估计现场平均地应力较为可行。本文中以高围压下线性段起点处的平均应力作为敏感应力（见图 4），该敏感应力约为 50 MPa。陈秀铜等^[24]通过回归分析计算得到锦屏地区的初始平均地应力约为 46 MPa，而现场实测平均地应力为 54 MPa，均与本文中向压缩试验确定的敏感应力接近。可见通

过岩石等向压缩体变数据能够在一定程度上与地应力建立联系,但能否推广使用,还需要更多的试验数据来验证。

4.2 脆-延性转化特征分析

图5所示为不同围压下大理岩三轴压缩全应力-应变曲线。由图可以观察到,围压较低时,大理岩轴向应力-应变曲线初始压密段呈现显著的非线性特征,随着围压的升高,初始压密特征不明显。

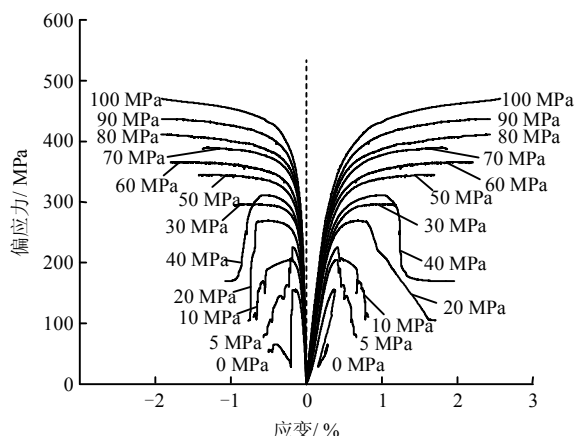


图5 大理岩三轴压缩试验的全应力-应变曲线

Fig.5 Complete stress-strain curves of marble from triaxial compression experiments

图5还表明,围压会对大理岩的应力-应变曲线形态产生显著影响,随着围压的升高呈现出典型的脆性-半脆性-延性转化特征。在0~10 MPa低围压条件下,屈服后的轴向应力-应变曲线达到峰值强度后会迅速跌落,表现为显著的脆性破坏特征。当围压达到20 MPa后,岩样达到峰值强度会出现一段平台后再跌落,且平台的长度随围压的增加而增加,岩石呈现出半脆性。当围压继续增加至更高围压(>50 MPa)时,岩石发生塑性流动,应力-应变曲线的峰值强度不明显,峰后变形由脆性-半脆性向延性转化。本文研究发现,锦屏T_{2b}大理岩脆-延性转化的临界围压为50 MPa,这与张春生等^[25]在研究锦屏白山组大理岩力学特性时得到的结果接近。

值得注意的是,偏压加载峰后脆性发生变化的围压分界点与等向压缩体变曲线斜率发生变化的转换围压是相对应的(见图6),将等向压缩变形数据与大理岩的峰值强度也绘于此图中。由图可见,岩样发生脆性-半脆性-延性转化时,峰值强度随围压的变化规律存在明显差异,即在脆性-半脆性域内呈非线性增加趋势,转为延性变形时,峰值强度基本呈线性增加,这与等向压缩体积模量和弹性模量的变化规律较为一致。结合等向压缩阶段的体变数据来解释上述现象,较低围压下,由于初始裂隙并未

充分闭合,峰值强度受裂隙和围压的共同影响,呈现非线性增加趋势;而高围压下,岩样内部裂隙充分闭合,岩石变形由脆性转化为延性,裂隙引起的强度差异有所减小,峰值强度主要受围压的影响。换言之,低围压下初始裂隙主要影响岩石强度的提高,高围压下,围压对岩石强度的提高起到控制作用。

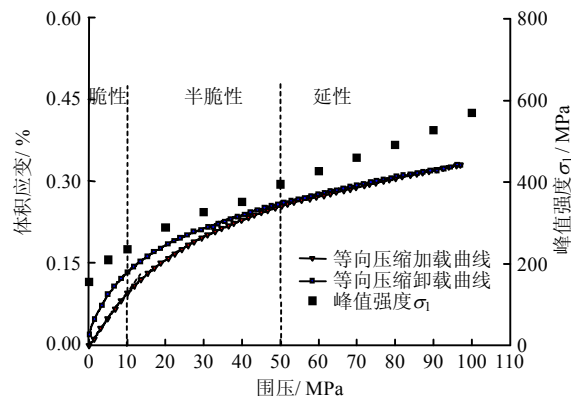


图6 大理岩峰值强度与等向压缩体变的关系

Fig.6 Relations between peak strength and isotropic volumetric strain of marble under isotropic compression

峰后应力-应变曲线的斜率可以描述岩石脆性行为的变化。Tarasov等^[5]基于峰后能量平衡原理提出了新的岩石脆性评价准则,认为当峰后曲线的变形模量与峰前弹性模量接近时,岩石的脆性最大。图7提取了部分三轴试验结果,给出了围压对大理岩峰后曲线的影响,可以观察到大理岩峰后曲线的斜率也随围压的变化而发生改变,由单轴条件下的II型曲线^[4]向有围压条件下的I型曲线转变,单轴条件下岩石脆性最大,随围压的增加,岩石的脆性逐渐减弱,延性增强。

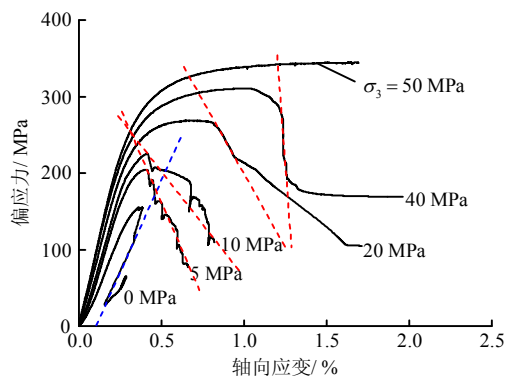


图7 围压对大理岩峰后变形行为的影响

Fig.7 Influence of confining pressure on deformation behavior of marble in the post-peak region

4.3 三轴加载峰前渐进性破坏过程分析

参照上述第3节特征应力阈值识别过程演示的

方法，将不同围压条件下的各特征偏应力阈值提取出来列入表 1。

表 1 大理岩在不同围压下各特征偏应力阈值汇总
Table 1 Summary of characteristic deviatoric stress thresholds of marble under various confining pressures

试样 编号	σ_3 /MPa	σ_{cc} /MPa	σ_{ci} /MPa	σ_{cd} /MPa	σ_s /MPa	σ_{cc}/σ_s	σ_{ci}/σ_s	σ_{cd}/σ_s
JP-9	0	51	93	129	156	0.33	0.60	0.83
JP-2	5	69	112	155	205	0.34	0.55	0.76
JP-4	10	86	121	180	225	0.38	0.54	0.80
JP-15	20	79	166	202	269	0.29	0.62	0.75
JP-16	30	62	191	246	296	0.21	0.64	0.83
JP-13	40	76	201	256	311	0.24	0.65	0.82
JP-8	50	71	231	270	345	0.21	0.67	0.78
JP-10	60	87	243	290	366	0.24	0.66	0.79
JP-1	70	45	255	319	390	0.12	0.65	0.82
JP-7	80	69	291	315	411	0.17	0.71	0.77
JP-12	90	75	303	339	437	0.17	0.69	0.78
JP-6	100	76	316	352	470	0.16	0.67	0.75

图 8 为不同围压下大理岩的各特征偏应力阈值。从图可知，随着围压的升高，大理岩的偏差闭合应力阈值 σ_{cc} 基本保持不变（图中 σ_{cc} 的拟合线为各围压下偏差闭合应力阈值的平均值），即使在高围压下，仍能得到较高的偏差闭合应力阈值，表明偏压加载前静水压力加载时初始裂隙并未完全闭合。而偏差起裂应力阈值 σ_{ci} 、偏差损伤应力阈值 σ_{cd} 和偏应力强度 σ_s 均随围压呈现不同程度的增加趋势，由线性拟合结果可以发现，偏差强度对围压的敏感性最高，偏差损伤应力阈值对围压的敏感性略低于偏差起裂应力阈值。以上结果表明，围压使弹性段范围明显扩大，裂隙稳定扩展段受到一定程度的抑制，而裂隙加速扩展阶段轻微增加。

图 9 中将不同围压下大理岩的特征偏应力阈值用偏应力强度 σ_s 进行标准化处理，并对其进行线性拟合。由图可知，裂隙闭合阶段所占比例近似单调减小，由单轴状态下的 $0.33\sigma_s$ 下降到 $0.16\sigma_s$ （围压 100 MPa），弹性段所占比例明显扩大，由单轴状态下的 $0.27\sigma_s$ 增加至 $0.51\sigma_s$ （围压 100 MPa），而裂隙稳定扩展段所占比例略微下降，由单轴状态下的 $0.23\sigma_s$ 下降到 $0.08\sigma_s$ ，而裂隙加速扩展阶段所占比例基本稳定在 $0.20\sigma_s$ 。总体而言，大理岩的 σ_{cc}/σ_s 、 σ_{ci}/σ_s 、 σ_{cd}/σ_s 变化区间分别为 $0.12\sim 0.38$ 、 $0.54\sim 0.71$ 、 $0.75\sim 0.83$ 。Yang 等^[21]基于砂岩常规三轴试验数据得到的 σ_{ci}/σ_s 、 σ_{cd}/σ_s 范围分别为 $0.10\sim 0.14$ 、 $0.37\sim 0.51$ ，与本文的研究结果对比后发现，岩石类型对标准化处理后的特征应力阈值影响非常明显。周辉等^[15]对锦屏二级水电站大理岩进行常规

三轴试验确定的 σ_{cc}/σ_s 、 σ_{ci}/σ_s 、 σ_{cd}/σ_s 分别为 $0.10\sim 0.25$ 、 $0.47\sim 0.64$ 、 $0.82\sim 0.92$ ，与本文的研究结果也存在一定差异，这可能与岩石的赋存条件、取样损伤等因素有关。

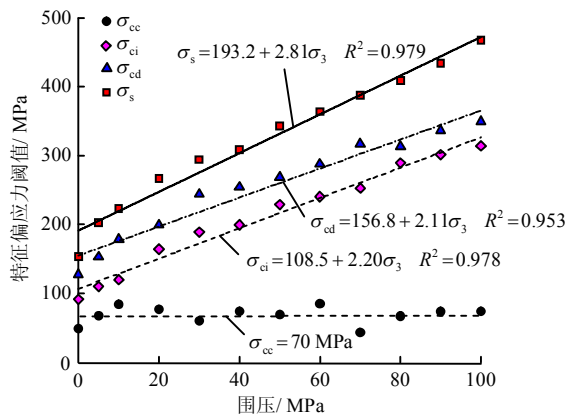


图 8 不同围压下大理岩各特征偏应力阈值
Fig.8 Characteristic deviatoric stress thresholds of marble under various confining pressures

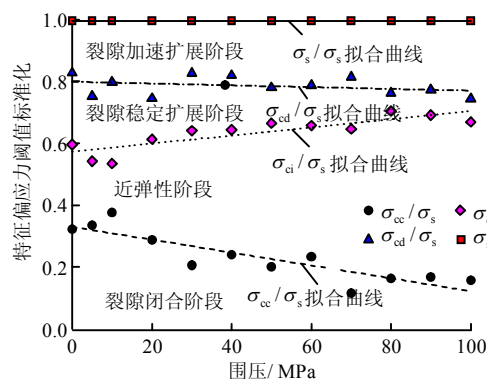


图 9 不同围压下大理岩各特征偏应力阈值标准化
Fig.9 Normalized characteristic deviatoric stress thresholds of marble under various confining pressures

5 讨论

岩石渐裂破坏过程已开展了几十年的研究，各特征应力阈值的定义和意义也得到了普遍认同，但以往针对裂隙起裂应力阈值和损伤应力阈值的研究较多，而裂隙闭合过程并未引起足够关注，尤其是偏压加载前静水压力加载时初始裂隙的闭合规律往往被忽视。钻孔取样过程中由于岩石应力状态发生改变而对岩样造成一定程度的损伤，且其损伤程度与取样深度有关，而裂隙闭合规律的研究能在一定程度上反映取样损伤的大小^[26-27]，因此，有必要对其开展深入讨论。

从图 4 和图 8 可以发现：等向压缩时岩石内部的微裂隙已经出现了一次闭合过程，在偏压加载初期，即使是在高围压下仍可以识别到较高的偏差闭

合应力阈值,表明围压加载阶段裂隙并未完全闭合,因而在偏压加载时又经历了第2次裂隙闭合过程。通过图10等向压缩和偏压加载裂隙闭合过程示意图来解释这一现象。岩石作为一种非均质性材料,其内部有许多原生微裂隙及取样卸荷过程造成的随机分布的微裂隙(见图10(a))。等向压缩阶段,由于岩样在各个方向受力均等,随机分布的微裂隙在各方向只能以几何相似的方式被压缩(见图10(b)),并不能完全闭合,尤其是围压低于敏感应力 P 时更加明显,此时微裂隙出现第1次闭合。施加偏应力时,垂直于最大主应力方向且与最大主应力成较小夹角的微裂隙继续被压缩,当偏应力加载至偏差裂隙闭合合应力阈值时,表明岩石内部微裂隙全部闭合(见图10(c)),这是微裂隙第2次发生闭合。由此可见,岩石所处的不同应力状态可能会对其内部微裂隙的闭合规律产生重要影响。

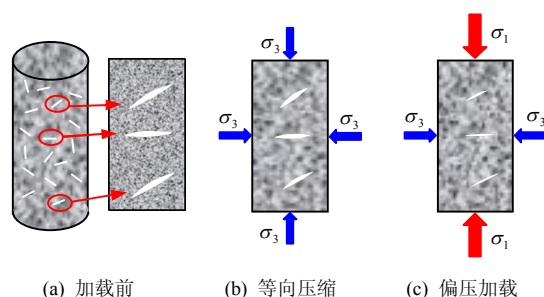


图10 岩石等向加载和偏压加载微裂隙闭合过程示意图
Fig.10 Illustration of crack closure of rock under isotropic compression and deviatoric stress loading conditions

6 结 论

(1) 等向压缩体积变形随围压升高经历了一个线性-非线性-线性的变化过程。在0~10 MPa低围压下,表现为线性;在较高围压范围内,其体积变形表现为快速地非线性增加;围压超过50 MPa时,以较缓慢的速度线性增加。

(2) 等向压缩体变上的敏感应力能在一定程度上反映其应力历史,卸载时体积应变能耗散较少,可能会影响偏压加载时的脆性破坏过程。

(3) 偏应力加载时,大理岩的峰后变形表现为脆性-半脆性-延性转化特征,围压低于10 MPa时脆性特征明显,围压超过50 MPa时发生塑性流动,与等向压缩体积变形随围压的变化规律是相关联的。

(4) 大理岩的偏差起裂应力阈值、偏差损伤应力阈值和偏应力强度均随围压增加呈正线性关系,标准化处理后的 σ_{cc}/σ_s 、 σ_{ci}/σ_s 、 σ_{cd}/σ_s 分别为

0.12~0.38、0.54~0.71、0.75~0.83。

(5) 围压对大理岩峰前变形破坏各阶段会产生一定影响。围压使裂隙闭合段减小,线弹性段范围明显扩大,裂隙稳定扩展段则受到一定程度的限制,裂隙加速扩展段轻微增加。

参 考 文 献

- [1] MARTIN C D, CHANDLER N A. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, 1994, 31(6): 643—659.
- [2] EBERHARDT E, STEAD D, STIMPSON B, et al. Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, 35(2): 222—233.
- [3] CAI M, KAISER P K, TASAKA Y, et al. Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(5): 833—847.
- [4] WAWERSIK W R, FAIRHURST C. A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, 1970, 7(5): 561—575.
- [5] TARASOV B, POTVIN Y. Universal criteria for rock brittleness estimation under triaxial compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 59(4): 57—69.
- [6] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(16): 2803—2813.
HE Man-chao, XIE He-ping, PENG Su-ping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2803—2813.
- [7] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究探索[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(11): 2161—2178.
XIE He-ping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(11): 2161—2178.
- [8] BRACE W F, PAULDING B W, SCHOLZ C. Dilatancy in the fracture of crystalline rocks[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1966, 71(16): 3939—3953.
- [9] BIENIAWSKI Z T. Mechanism of brittle fracture of rock: Part I—theory of the fracture process[J]. *International*

- Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1967, 4(4): 395—406.
- [10] ZHAO X G, CAI M, WANG J, et al. Objective determination of crack initiation stress of brittle rocks under compression using AE measurement[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2015, 48(6): 2473—2484.
- [11] 王洪亮, 范鹏贤, 王明洋, 等. 应变率对红砂岩渐进破坏过程和特征应力的影响[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1340—1346.
- WANG Hong-liang, FAN Peng-xian, WANG Ming-yang, et al. Influence of strain rate on progressive failure process and characteristic stresses of red sandstone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(5): 1340—1346.
- [12] 黄达, 黄润秋, 张永兴. 粗晶大理岩单轴压缩力学特性的静态加载速率效应及能量机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 245—255.
- HUANG Da, HUANG Run-qiu, ZHANG Yong-xing. Experimental investigations on static loading rate effects on mechanical properties and energy mechanism of coarse crystal grain marble under uniaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(2): 245—255.
- [13] 张晓平, 王思敬, 韩庚友, 等. 岩石单轴压缩条件下裂纹扩展试验研究——以片状岩石为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9): 1772—1781.
- ZHANG Xiao-ping, WANG Si-jing, HAN Geng-you, et al. Crack propagation study of rock based on uniaxial compressive test—A case study of schistose rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(9): 1772—1781.
- [14] 刘宁, 张春生, 褚卫江. 锦屏深埋大理岩破裂特征与损伤演化规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1606—1613.
- LIU Ning, ZHANG Chun-sheng, CHU Wei-jiang. Fracture characteristics and damage evolution law of Jinping deep marble[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(8): 1606—1613.
- [15] 周辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 硬岩应力-应变阈值特点及产生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(8): 1513—1521.
- ZHOU Hui, MENG Fan-zhen, ZHANG Chuan-qing, et al. Characteristics and mechanism of occurrence of stress thresholds and corresponding strain for hard rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(8): 1513—1521.
- [16] WONG T F, BAUD P. The brittle-ductile transition in porous rock: A review[J]. **Journal of Structural Geology**, 2012, 44: 25—53.
- [17] ZHANG X W, KONG R, LI Y H, et al. Experimental study on isotropic compression deformation of rocks at room temperature[C]//13th ISRM International Congress of Rock Mechanics-Int'l Symposium on Rock Mechanics. Montreal: [s. n.], 2015.
- [18] 张希巍, 杨成祥, 张柬, 等. 红透山铜矿深部片麻岩力学行为试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 2): 3228—3237.
- ZHANG Xi-wei, YANG Cheng-xiang, ZHANG Jian, et al. Experimental study of mechanical behaviour of deep gneiss in Hongtoushan copper mine[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(Supp.2): 3228—3237.
- [19] FENG X T, ZHANG X W, YANG C X, et al. Evaluation and reduction of the end friction effect in true triaxial tests on hard rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2017, 97: 144—148.
- [20] 周辉, 孟凡震, 卢景景, 等. 硬岩裂纹起裂强度和损伤强度取值方法探讨[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 913—918.
- ZHOU Hui, MENG Fan-zhen, LU Jing-jing, et al. Discussion on methods for calculating crack initiation strength and crack damage strength for hard rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(4): 913—918.
- [21] YANG S Q, JING H W, WANG S Y. Experimental investigation on the strength, deformability, failure behavior and acoustic emission locations of red sandstone under triaxial compression[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2012, 45(4): 583—606.
- [22] WANG Q, JI S C, SALISBURY M H, et al. Pressure dependence and anisotropy of P-wave velocities in ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogenic belt (China): Implications for seismic properties of subducted slabs and origin of mantle reflections[J]. **Tectonophysics**, 2005, 398(1): 67—99.
- [23] ASEF M R, NAJIBI A R. The effect of confining pressure on elastic wave velocities and dynamic to static Young's modulus ratio[J]. **Geophysics**, 2013, 78(3): 135—142.
- [24] 陈秀铜, 李璐. 锦屏二级水电站引水隧洞区域三维初始地应力场反演回归分析[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(6): 55—58.
- CHEN Xiu-tong, LI Lu. Inverse analysis of initial field stress for Jinping II Hydropower Station tunnel area[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2007, 34(6): 55—58.