

DOI: 10.11779/CJGE201406016

三轴卸荷条件下大理岩扩容与能量特征分析

陈学章^{1, 2}, 何江达^{1, 2}, 肖明砾^{1, 2}, 谢红强^{1, 2*}, 刘建锋^{1, 2}

(1. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 2. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要: 扩容现象是岩石变形破坏过程中的重要特征。基于 MTS815 Flex Test GT 岩石力学试验平台, 采用室内三轴卸荷试验和塑性力学理论分析, 揭示了大理岩在卸荷条件下的扩容特征及能量变化特征。结果表明, 随着围压的增大, 岩样的各特征应力随之增大, 其扩容特征随之减弱; 岩样的扩容参数——扩容指标以及剪胀角均具有围压效应, 即扩容指标与围压呈良好的指型分布, 剪胀角与应力比呈线性分布; 岩样的卸荷破坏过程中能量特征为初始时以可释放应变能为主到破坏时的耗散能为主, 其间的转折点为初始损伤扩容点, 同时卸荷条件下的特征能量值与围压具有良好的指型关系; 在峰值点与残余点处, 岩样的能量损伤值与剪胀角以及能量特征值与扩容指标均存在着较好的指型关系。

关键词: 岩石力学; 大理岩; 三轴卸荷; 扩容; 能量特征; 相关性分析

中图分类号: TU456 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2014)06-1106-07

作者简介: 陈学章 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为岩石力学与工程。E-mail: chenxuezhang90@163.com。

Dilatancy and energy properties of marble under triaxial unloading condition

CHEN Xue-zhang^{1, 2}, HE Jiang-da^{1, 2}, XIAO Ming-li^{1, 2}, XIE Hong-qiang^{1, 2}, LIU Jian-feng^{1, 2}

(1. State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. College of Water

Resources & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Dilatancy is an important feature of rock during deformation and failure processes. By means of the MTS815 servo-controlled test machine, laboratory triaxial unloading experiments and plasticity theory analysis are made to obtain the characteristics of dilatancy and energy change of marble under unloading condition. The results show that the characteristic stress of rock samples increase and the dilatancy characteristics decrease with the increase of the confining pressure. The dilatancy parameters of rock samples, dilatancy index and dilatancy angle, have obvious effects of confining pressure. The dilatancy index and confining pressure have good exponential distribution, and the relationship between dilatancy angle and stress ratio is linearly distributed. The energy characteristics of rock samples under unloading destruction process are that the main energy is releasable strain energy at the initial stage and dissipation energy at the failure stage, and the turning point between these two stages is the initial damage dilatancy point. Meanwhile the characteristic energy value and confining pressure under unloading condition have a good exponential relationship. Both at the peak point and the residual point, the relationship both between the energy damage amount and the dilatancy angle and between the energy eigenvalues and the dilatancy index has a good exponential distribution.

Key words: rock mechanics; marble; triaxial unloading; dilatancy; energy property; correlation analysis

0 引言

随着国内大型水电工程陆续在西部高山峡谷地区建设的展开, 高地应力下的岩体开挖及稳定性已成为水电工程建设中面临的重大问题, 如三峡船闸高边坡开挖, 雅砻江锦屏 I 级高边坡、锦屏 II 级引水隧洞开挖工程等。从本质上讲, 岩体开挖过程实际上是天然岩体沿某一方向或多个方向的卸荷以及应力重分布, 其与在加载条件下的岩体力学特性有本质区别。因此有必要深入研究岩体在高卸荷条件下的力学特性^[1-6]。

岩体扩容膨胀变形是岩石破坏时所表现显著特征之一, 是岩石由于内部微观裂纹的发展而引起的体积非弹性增加现象。目前, 国内外许多学者就此进行了研究, Matsushima^[7]观测到花岗岩的扩容效应, 并指出其扩容效应随围压的增加而降低; Yuan 等^[8]用双直线简化了岩石轴向变形与体积变形的关系, 并提出了

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51079092)

收稿日期: 2013-11-29

*通讯作者

扩容指标的概念; Alejano 等^[9]对岩石扩容过程中剪胀角的计算进行了探讨, 并对硐室围压变形进行了合理预测; Mahmutoglu 等^[10]研究了低围压下大理岩峰后强度变化与非弹性体积变形的关系; 陈宗基等^[11-13]研究了与时间有关的扩容特性, 并提出了非弹性体积变形的增加对岩石稳定性的作用。

另一方面, 岩石变形破坏表观上表现为岩石扩容膨胀破碎, 其实质是能量的耗散与释放过程, 国内外诸多学者亦对此进行了深入探讨, 谢和平等^[14-15]基于岩石的能量耗散与释放分析了岩石的变形破坏过程, 提出了其整体破坏准则; Tsouthrelis 等^[16]、苏承东等^[17]基于室内单轴、三轴压缩试验, 研究了岩石破坏时的峰前能量特征; Hua 等^[18]基于动力学原理研究岩石峰前储存的弹性应变能与岩爆发生的相关性。

上述研究成果大多基于加载条件下的研究, 而对于岩石在高围压和卸荷条件下的扩容特性、能量特征以及其相关性研究较少。文中基于四川大学 MTS815 Flex Test GT 岩石力学试验系统, 开展大理岩三轴卸荷试验, 并采用塑性力学理论分析, 研究大理岩卸荷条件下的扩容特征以及能量特征, 揭示扩容特征参数、能量特征与围压的关系以及其相关性, 阐述能量耗散与释放和扩容碎胀变形破坏的内在联系。

1 试验方案

1.1 试验设备与制样

试验采用四川大学 MTS815 Flex Test GT 岩石力学试验系统。试验机可进行三轴压缩全过程测试, 最大围压可达到 140 MPa, 轴向、横向变形采用引伸计测量, 其量程分别为-2.5~5.0, -2.5~8.0 mm。



图 1 试验设备及试样图

Fig. 1 Test instruments and manufactured marble samples

大理岩试样取自锦屏 II 级水电站引水隧洞的 A 线辅助洞, 均是浅灰白色的大理岩。岩石按相关规范、规程制备成 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的标准试件, 岩样含水状态为天然风干状态。

1.2 试验方法

岩体初始应力一般为三向状态, 其开挖为典型卸载过程, 即径向应力降低和切向应力升高。室内试验

中为准确模拟该过程, 采用降围压 σ_3 , 缓慢升轴压 σ_1 的方式, 围压卸荷采用应力控制, 轴压采用位移控制。

三轴卸荷试验先以 0.05 MPa/s 加载速率施加围压至预定值 (10, 20, 40, 60, 80 MPa 共 5 级围压), 然后以 0.5 MPa/s 速率加载至三轴压缩峰值强度的 70%左右; 随后以 0.05 MPa/s 速率降围压, 同时以 0.15 MPa/s 速率升轴压, 试件破坏后停止降围压, 并以适当轴向应变速率控制继续施加轴向应力, 直至轴向应力不随应变的增加而降低, 此时结束试验。

2 大理岩卸荷扩容特征分析

2.1 应力 - 应变关系的特征点应力表述

卸荷条件下大理岩的应力 - 应变关系曲线见图 2, 从图 2 中可看出: 卸荷条件下大理岩应力 - 应变全过程曲线可分为 5 个阶段 (对应可用 5 个特征应力表示, 即裂纹闭合应力 σ_{cc} 、起裂应力 σ_{ci} (微裂隙张开时的应力)、损伤扩容点应力 σ_{cd} 、峰值应力 σ_f 以及残余应力 σ_r); 对应 5 个分区, 即裂纹闭合区、线弹性区、塑性扩容区、屈服区以及峰后特征区。从宏观变形来看, 损伤扩容点对应岩样宏观状态从压缩变形为主转变为扩容 (膨胀) 变形; 微观状态则表现为初始裂纹产生向裂纹持续发展转变, 即表征岩样开始屈服破坏的特征点; 从能量观点来看, 损伤扩容点对应岩样由初始可释放应变能为主逐渐转变为以耗散能为主, 耗散能自此后的变化速率急剧增加, 岩石损伤逐步累积扩散。对于裂纹闭合应力的确定是卸荷条件下轴向应变 - 体积应变关系曲线中曲线由压缩变化向膨胀变化的转折点 (对应的是微观状态); 起裂应力的确定是岩石应力应变曲线中的直线段向曲线段变化的转折点。

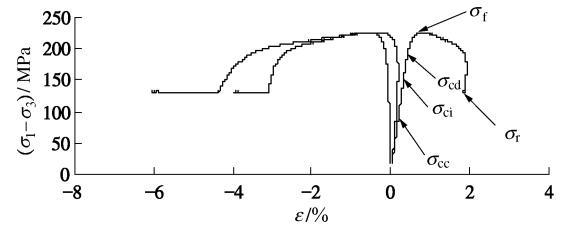


图 2 卸荷条件下特征点应力表征图

Fig. 2 Characterization of characteristic stress

不同围压条件下的卸荷应力 - 应变曲线见图 3 (应变以压缩为正, 膨胀为负), 其扩容特征曲线见图 4。

随着围压的增大, 大理岩试样脆性特征逐渐减弱, 延性特征逐渐增强, 其破坏特征逐渐由脆性破坏向延性破坏转变, 各特征点应力也随之增大。卸荷条件下大理岩扩容特征也较为明显, 但随着围压的增大, 扩

容点对应轴向变形逐渐增大,而体积应变明显降低,扩容点的出现时间也越晚,表明围压能有效抑制扩容变形。

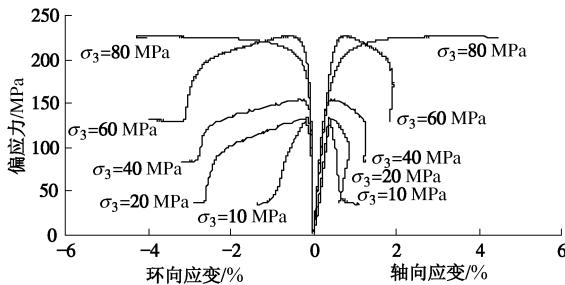


图3 卸荷条件下偏应力-应变关系

Fig. 3 Deviatoric stress-strain curves under unloading

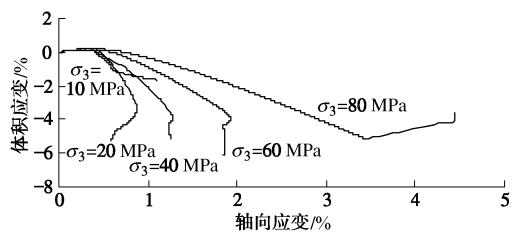


图4 卸荷条件下轴向应变-体积应变关系

Fig. 4 Axial strain-volumetric strain curves

2.2 特征点应力与围压的关系

不同围压下各特征点应力如表1所示;同时,图5给出了应力特征值与围压的相关性。

表1 特征点应力值

Table 1 Characteristic stress values (MPa)

围压	σ_{cc}	σ_{ci}	σ_{cd}	σ_f	σ_r
10	50.89	111.63	122.87	139.13	37.68
20	60.63	114.47	125.55	145.68	43.31
40	102.84	142.10	170.38	187.53	99.38
60	152.13	203.18	219.90	266.56	156.66
80	181.62	230.53	250.91	290.51	159.08

注:对于80 MPa围压下的残余强度是由人工采集的,在应力应变曲线中并未表出。

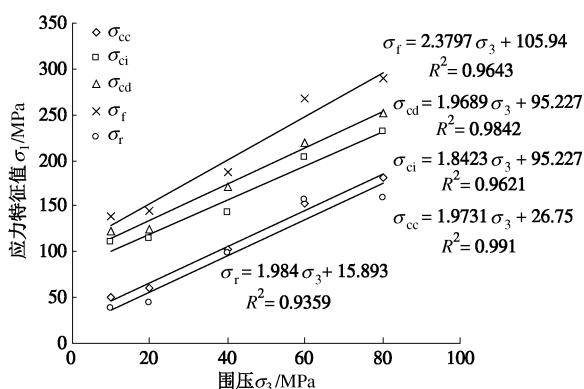


图5 特征应力与围压的关系

Fig. 5 Relationship between characteristic stress and confining pressures

从表1和图5中可看出:特征点应力与围压具有良好的线性相关性,拟合系数均达到0.93以上,表明特征点应力随围压的增大而增大,尤其对损伤扩容点应力 σ_{cd} ,即高围压情况下,达到损伤扩容(膨胀)破坏的应力也较高。从损伤力学角度,随着围压的增大,岩样内部裂纹所受正应力增加,促进岩石内部微裂纹的压密闭合,有效抑制微裂纹的产生与扩展,从而抑制其内部损伤的能量耗散,使岩石扩容破坏得以延迟。同样,随着围压的增大,峰值应力 σ_f 及残余特征应力 σ_r 随之增大,使得岩样在初始扩容屈服后的后继屈服面进一步增大,从而提高岩样的承载能力。

2.3 扩容参数与围压的关系

文献[8]提出了扩容指标 I_d 的概念,以量化表征岩石的扩容特性,扩容指标 I_d 可表示为

$$I_d = \frac{\theta_p}{\theta_0} = \frac{\arctan(\Delta\epsilon_{vp}/\Delta\epsilon_{lp})_p}{\arctan(\Delta\epsilon_{vp}/\Delta\epsilon_{lp})_0} \quad (1)$$

式中 θ 为表观膨胀角; $\Delta\epsilon_{vp}$ 为塑性体积应变增量; $\Delta\epsilon_{lp}$ 为轴向塑性应变增量,对于三轴卸荷试验 $\Delta\epsilon_{vp} = \Delta\epsilon_{lp} + 2\Delta\epsilon_{3p}$; $\epsilon_p = \epsilon - \epsilon_e$, ϵ_e 为弹性应变, $\epsilon_e = \sigma/E$, E 为卸载弹性模量,可近似取全应力应变关系曲线中弹性变形区模量;下标p表示三轴试验状态,0表示单轴试验状态。

三轴卸荷条件下,大理岩扩容指标 I_d 见表2;扩容指标与围压的关系见图6。

表2 扩容指标统计表

Table 2 Statistics of dilatancy indices

围压 / MPa	表观膨胀角 $\theta/(\text{°})$	扩容指标 I_d	围压 / MPa	表观膨胀角 $\theta/(\text{°})$	扩容指标 I_d
0	82.55	1.00	40	73.76	0.89
10	80.72	0.98	60	68.87	0.83
20	79.91	0.97	80	65.20	0.79

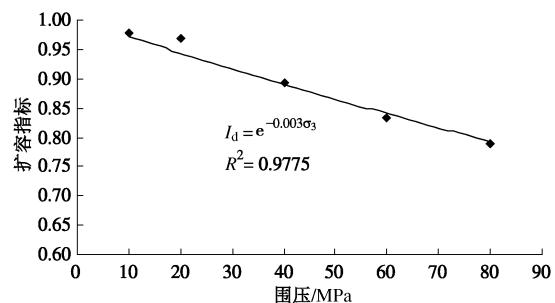


图6 扩容指标与围压的关系

Fig. 6 Relationship between dilatancy index and confining pressures

从表2,图6中可以看出:扩容指标 I_d 与围压 σ_3 呈指数型分布;随着围压的增大,扩容指标逐渐减小,岩样的扩容膨胀特征逐渐减弱。

为进一步验证大理岩的扩容特性,文中采用剪胀

角 ψ 对其进行量化, 其表达式为

$$\psi = \arcsin \left(\frac{\Delta \varepsilon_{vp}}{\Delta \varepsilon_{vp} - 2\Delta \varepsilon_{ip}} \right) , \quad (2)$$

式中参数物理量意义同式(1)。

图7为剪胀角与塑性体积应变的关系图, 从图7中可以看出: 在岩样卸载过程中, 随着变形的增大, 岩样剪胀角随之急剧增大; 在岩样由压缩状态转为膨胀状态后, 即对应峰值应力后的残余卸荷过程, 剪胀角的增大速率随之减小; 同时, 随着围压的增大, 非弹性体积应变由压缩转为膨胀点处的剪胀角随之减小, 可见围压增加对岩样扩容特征有显著抑制作用。

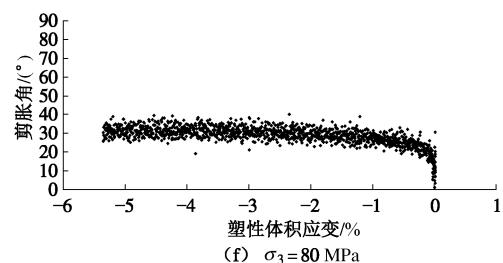
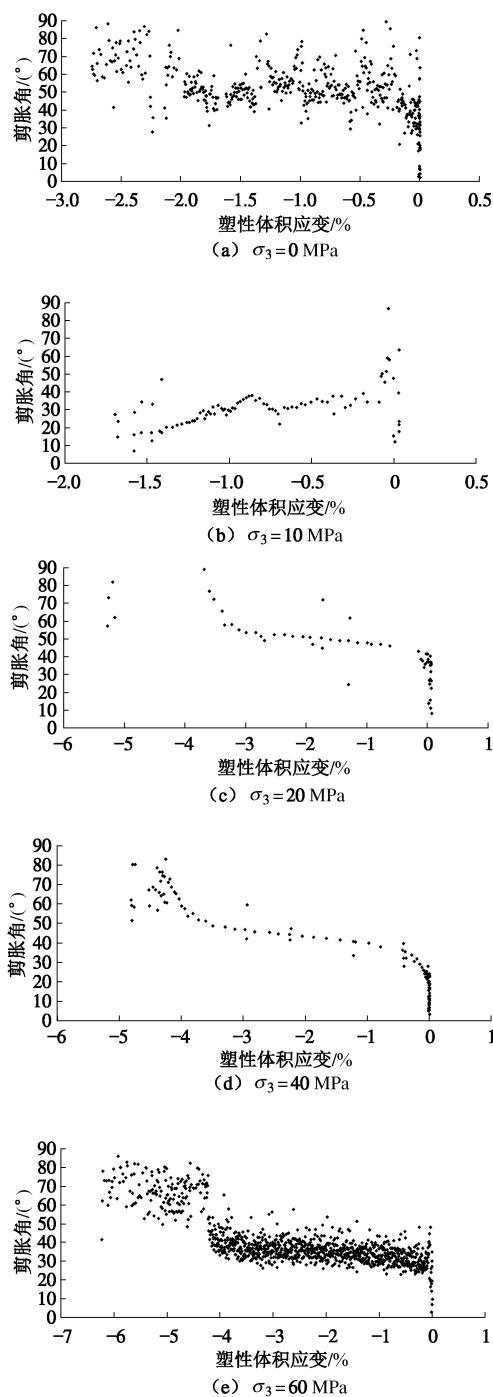


图7 剪胀角与非弹性体积应变的关系

Fig. 7 Relationship between dilatancy angle and inelastic volumetric strain

不同围压条件下大理岩剪胀角见表3。由于剪胀角与岩石破坏存在本质联系, 且峰值处破坏特征与峰值强度 σ_f 和围压 σ_3 有关, 残余强度时亦与应力台阶 $\sigma_f - \sigma_r$ 和围压 σ_3 有关, 故运用量纲分析, 引入峰值应力比 σ_f / σ_3 和应力台阶比 $(\sigma_f - \sigma_r) / \sigma_3$ 表征。

表3 特征剪胀角统计表

Table 3 Statistics of characteristic dilation angles

围压/MPa	峰值剪胀角 ψ_f /(°)	残余剪胀角 ψ_r /(°)
10	49.10	23.44
20	43.19	63.55
40	30.40	51.48
60	28.37	41.43
80	27.41	30.37

注: 由于在围压为10 MPa处, 脆性特征较为明显, 故其剪胀角计算可能并不准确, 故舍去围压为10 MPa的残余剪胀角。

峰值应力比、应力台阶比与剪胀角的关系见图8, 9。从图8, 9中可看出: 大理岩在卸荷条件下的剪胀角与应力比之间存在良好的线性关系; 随着围压的增大, 其峰值剪胀角与残余剪胀角均会出现一定程度减小。

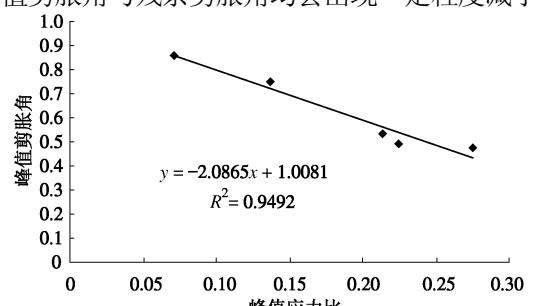


图8 峰值剪胀角与峰值应力比的关系

Fig. 8 Relationship between dilation angle and stress ratio at peak strength

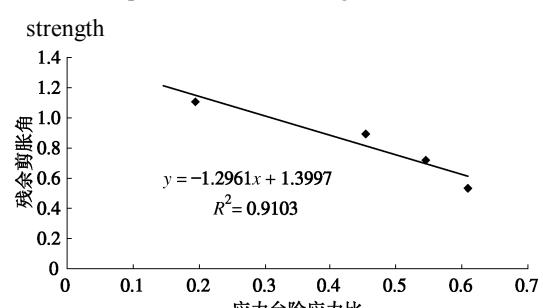


图9 残余剪胀角与应力台阶比的关系

Fig. 9 Relationship between dilation angle and stress ratio at residual strength

3 大理岩卸荷能量特征分析

对于大理岩卸荷三轴试验,可认为是一个热力学封闭系统,忽略加卸载过程中温度变化,由功能关系可知,在试验过程外界对岩样所做功 W 等于岩样内部能量的变化 U_0 。由文献[14]可知,总吸收能由两部分组成,即单位体积所储存的可释放应变能 U_e 和用于形成岩样内部损伤以及塑性变形的耗散能 U_d 。其中,

$$U_0 = \int \sigma_1 d\varepsilon_1 + 2 \int \sigma_3 d\varepsilon_3, \quad (3)$$

$$U_e = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)]. \quad (4)$$

对于可释放应变能 U_e ,可忽略环向变形产生的应变能,即

$$U_e = \frac{\sigma_1^2}{2E}, \quad (5)$$

式中, E 为弹性模量。

3.1 能量特征与体积变形的关系

大理岩卸荷条件下能量特征与体积变形之间的关系曲线见图 10, 11。

从可释放应变能曲线可知,在前期体积压缩阶段,可释放应变能快速增长,前期由于岩样微裂纹的闭合,可释放应变能相对较缓,在初始扩容点处,变化速率达到最大;随后由于岩样裂纹的扩展,可释放应变能增长速率逐渐减缓,在峰值强度处可释放应变能达到最大;在残余强度时,岩样仍然具有一定的可释放应变能,即岩样卸荷破坏后,仍然具有一定的承载能力。

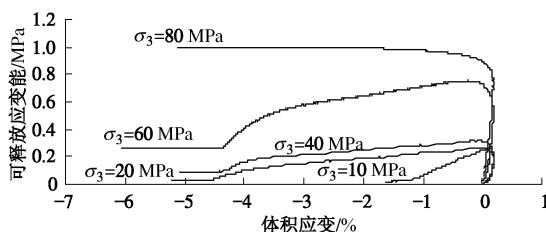


图 10 体积应变 - 可释放应变能关系曲线

Fig. 10 Relationship between volumetric strain and released energy

从耗散能曲线可知,在初始扩容点之前,耗散能数值较小,同时增长速率较慢;初始扩容点之后,岩样的耗散能急剧增加,表明在初始的裂纹闭合阶段和线弹性阶段,岩样从外界吸收的总能量几乎全都用于初始裂纹的闭合,岩样总体呈线弹性变形,其塑性变形与内部损伤几乎没有;初始扩容点以后,岩样中裂纹开始扩展,塑性变形开始出现,内部损伤开始累积,直至试样破坏。从不同围压下耗散能的增长速率来看,围压越大耗散能增长越快,且无论是峰值强度还是残余强度,可释放应变能 U_e 和耗散能 U_d 都具有一定的

围压效应,即随围压的增加而增大。

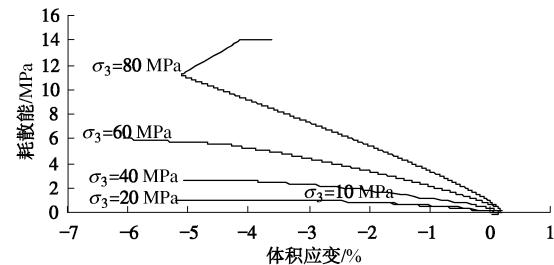


图 11 体积应变 - 耗散能关系曲线

Fig. 11 Relationship between volumetric strain and dissipation energy

3.2 特征点能量与围压的关系

表 4 列出了大理岩卸荷条件下的峰值点与残余点处的能量特征值,拟合关系见图 12。从表 4 和图 12 中可知:随着围压的增大,岩样在峰值强度时的能量损伤值 U_d/U_e 有所提高,可见在高围压下岩样可承担更大的损伤度以及裂纹的扩展,这也解释了高围压对强度提高的内在原因;同时,随着围压的增大,岩样在卸荷条件下各特征能量均有所增加,且存在良好的指数型关系。

表 4 能量特征统计表

Table 4 Statistics of energy eigenvalues

围压 / MPa	峰值 U_e /MPa	峰值 U_d /MPa	残余 U_e /MPa	残余 U_d /MPa
10	0.263	0.028	0.020	0.779
20	0.259	0.162	0.023	1.013
40	0.317	0.390	0.080	2.683
60	0.755	1.075	0.270	5.999
80	0.965	2.745	1.001	7.415

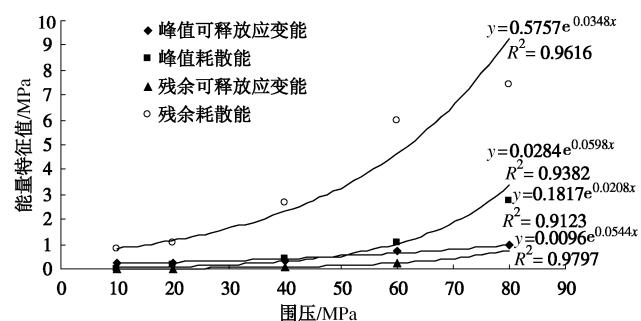


图 12 围压 - 能量特征值关系曲线

Fig. 12 Relationship between confining pressure and energy eigenvalue

4 大理岩卸荷能量特征与扩容特性关系

为了更好地分析大理岩卸荷条件下的能量特征与扩容特征之间的关系引入能量损伤值 U_d/U_e 及残余强度时的能量差值损伤量 $\Delta U_d/\Delta U_e$,即残余与峰值时

的能量差值之比, 由量纲分析原理, 建立能量损伤值与扩容剪胀角之间的关系, 其拟合图见图 13。从图 13 中可知: 岩样的能量损伤值与剪胀角存在着较好的指数类型关系。随着围压的增大岩样剪胀角随之减小, 能量损伤值随之增大。

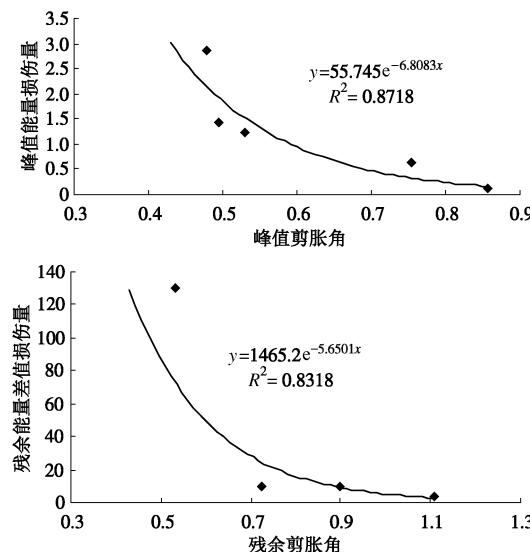


图 13 剪胀角 - 能量损伤值关系曲线

Fig. 13 Relationship between dilation angle and energy damage

岩样扩容指标 I_d 与围压存在着指数型关系, 而能量与围压有着较好的线性关系, 考虑扩容指标与能量特征值之间的关系见图 14。从图 14 中可知: 岩样的能量特征值与扩容指标存在着较好的指数类型关系; 随着围压的增大岩样扩容指标随之减小, 能量特征值随之增大。

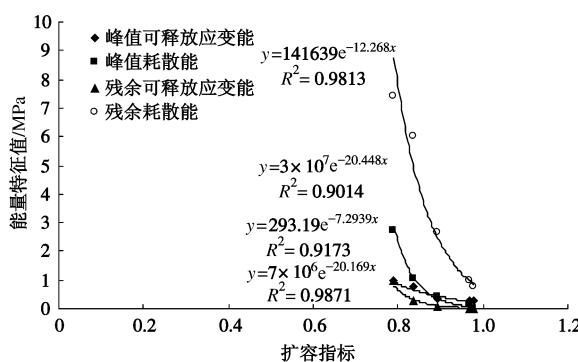


图 14 扩容指标 - 能量特征值关系曲线

Fig. 14 Relationship between dilatancy index and energy eigenvalue

5 结 论

(1) 三轴卸荷条件下, 大理岩特征点应力随围压 σ_3 的增大而增大, 且呈良好线性分布, 尤其对初始损伤扩容点应力 σ_{ed} , 表明增大围压有助于岩体初始微

裂纹的闭合以及抑制微裂纹的发展。在地下工程开挖支护中, 只需施加一定的支护力 σ_3 , 将有效地抑制围岩的膨胀变形。

(2) 随着围压的增大, 大理岩卸荷条件下的扩容特征逐渐减弱; 由压缩状态转变为膨胀状态时的剪胀角也随之减小; 扩容指标与围压呈良好的指数型分布, 但敏感性较弱, 而剪胀角与应力比呈良好的线性分布。

(3) 大理岩卸荷下的破坏过程可由能量分析来解释, 即初始时岩样中以可释放应变能为主, 岩样为可承受状态, 到破坏时岩样以耗散能为主, 其之间的转折点为初始损伤扩容点。对应的岩样的峰值点与残余点处的能量特征值均与围压呈良好的指数型分布。

(4) 随着围压的增大, 岩样在峰值强度时的能量损伤值 U_d/U_e 有所提高, 可见在高围压下岩样可承担更大的损伤度及更多的裂纹开展情况, 这是高围压将提高岩石强度的内在原因。

(5) 无论是峰值点还是残余点处, 大理岩在卸荷条件下能量损伤值与剪胀角以及能量特征值与扩容指标均存在着较好的指数类型关系。且随着围压的增大岩样剪胀角、扩容指标随之减小, 能量特征值及能量损伤值随之增大。

参考文献:

- [1] 钱七虎. 深部地下工程空间开发中的关键科学问题[M]// 钱七虎院士论文选集. 北京: 科学出版社, 2007: 549 - 568. (QIAN Qi-hu. The key problems of deep underground space development[M]// Selections from Academician QIAN Qihu's Theses. Beijing: Science Press, 2007: 549 - 568. (in Chinese))
- [2] 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, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803 - 2813. (in Chinese))
- [3] 黄润秋, 黄 达. 卸荷条件下岩石变形特性及本构模型研究[J]. 地球科学进展, 2008, 23(5): 441 - 447. (HUANG Run-qiu, HUANG Da. Study on deformation characteristics and constitutive model of rock on the condition of unloading[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(5): 441 - 447. (in Chinese))
- [4] 王贤能, 黄润秋. 岩石卸荷破坏特征与岩爆效应[J]. 山地研究, 1998, 16(4): 281 - 285. (WANG Xian-neng, HUANG Run-qiu. Analysis of deformation and fracture features of

rock under unloading condition and their effect on rock burst[J]. Mountain Research, 1998, **16**(4): 281 – 285. (in Chinese))

[5] 高春玉, 徐进, 何鹏. 大理岩加卸载力学特性的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(3): 456 – 460. (GAO Yu-chun, XU Jin, HE Peng. Study on mechanical properties of marble under loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(3): 456 – 460. (in Chinese))

[6] 陈卫忠, 刘豆豆, 杨建平. 大理岩卸围压幂函数型 Mohr 强度特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(11): 2214 – 2220. (CHEN Wei-zhong, LIU Dou-dou, YANG Jian-ping. Power function based Mohr strength criterion for marble with unloading confining pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(11): 2214 – 2220. (in Chinese))

[7] MATSUSHIMA S. On the flow and fracture of igneous rocks and on the deformation and fracture of granite under high confining pressure[M]. Kyoto: Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 1960: 20 – 26.

[8] YUAN Shih-che, HARRISON J P. A empirical dilatancy index for the dilatant deformation of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, **41**: 679 – 686.

[9] ALEJANO L R, ALONSO E. Considerations of the dilatancy angle in rocks and rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2005, **32**: 481 – 507.

[10] MAHMUTOGLU Y, VARDAR M. Effects of inelastic volume increase on fractured rock behaviour[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2003, **62**: 117 – 121.

[11] 陈宗基, 康文法. 在岩石破坏和地震之前与时间有关的扩容[J]. 岩石力学与工程学报, 1983, **2**(1): 11 – 21. (TAN Tjiong-kie, KANG Wen-fa. Time dependent dilatancy prior to rock failure and earthquakes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1983, **2**(1): 11 – 21. (in Chinese))

[12] 陈宗基, 石泽全, 于智海, 等. 用 8000 kN 多功能三轴仪测量脆性岩石的扩容、蠕变及松弛[J]. 岩石力学与工程学报, 1989, **8**(2): 97 – 118. (TAN Tjiong-kie, SHI Zhe-quan, YU Zhi-hai, et al. Dilatancy, creep and relaxation of brittle rocks measured with the 8000 kN multipurpose triaxial apparatus[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1989, **8**(2): 97 – 118. (in Chinese))

[13] 陈宗基, 康文法. 岩石的封闭应力、蠕变和扩容及本构方程[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, **10**(4): 200 – 312. (TAN Tjiong-kie, KANG Wen-fa. On the locked in stress, creep and dilatation of rocks, and the constitutive equations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1991, **10**(4): 200 – 312. (in Chinese))

[14] 谢和平, 鞠杨, 魏立云, 等. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(17): 3003 – 3010. (XIE He-ping, JU Yang, et al. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(17): 3003 – 3010. (in Chinese))

[15] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨, 等. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(21): 3565 – 3570. (XIE He-ping, PENG Rui-dong, JU Yang, et al. Energy dissipation of rock deformation and fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(21): 3565 – 3570. (in Chinese))

[16] TSOUTHRELIS C E, EXADAKTYLOS G E. Effect of rock discontinuities on certain rock strength and fracture energy parameters under uniaxial compression[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1993, **11**(2): 81 – 105.

[17] 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. (in Chinese))

[18] HUA A Z, YOU M Q. Rock failure due to energy release during unloading and application to underground rock burst control[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001, **16**(3): 241 – 246.