

文章编号:1009-3087(2014)02-0046-06

深埋大理岩卸荷力学特性的试验研究

王璐,刘建锋*,杨昊天,任浩楠,聂明
(四川大学水利水电学院,四川成都610065)

摘要:为探讨深埋大理岩在不同应力路径下力学性质的差异,揭示卸荷应力路径对岩石力学性质的影响,对取自锦屏二级深埋引水隧洞的浅灰色大理岩进行了常规三轴和2种应力路径的卸荷三轴试验研究,得到了卸荷应力状态下,大理岩破坏时的纵横应变小于常规三轴压缩应力状态得到的结果,且其变形具有由延性变形向脆性变形转化的特征。不同应力路径下大理岩的变形模量和泊松比与围压均有良好的线性关系,但卸荷应力状态下的变形模量较常规三轴压缩应力状态下的小,泊松比则相反。卸荷状态下大理岩的破坏面更为粗糙,其内聚力较三轴压缩状态下的内聚力下降了36.4%,而内摩擦角增加了35.4%;在45 MPa正应力范围内,卸荷应力状态下的抗剪强度低于常规三轴压缩状态下的抗剪强度,卸荷应力状态下更易导致岩石发生破坏。

关键词:深埋大理岩;卸荷三轴试验;强度特征;变形特征

中图分类号:TU45

文献标志码:A

Experimental Research on Mechanical Properties of Deeply Buried Marble Under Unloading Conditions

WANG Lu, LIU Jianfeng*, YANG Haotian, REN Haonan, NIE Ming

(College of Hydraulic and Hydroelectric Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

Abstract: To discuss the difference of mechanical behavior of marble buried deeply in high stress caused by different stress paths and reveal the influence of unloading on rocks' mechanical properties, a series of triaxial tests under loading and unloading conditions were carried out on the marble samples from the tunnel of Jinping Secondary Hydropower Project. The results showed that when marble is broken, the vertical and horizontal strain under unloading condition are smaller than that under triaxial compression tests, and the brittle features of rocks are more conspicuous under unloading condition. The secant modulus and Poisson ratio have good linear relationship with confining pressure in different stress paths. The secant modulus under unloading condition is smaller than that under triaxial compression test, but Poisson ratio is on the contrary. The failure face of marble is more rough under unloading condition, and the cohesion c decreases 36.4% while the internal friction angle φ increases 35.4% relatively with the loading tests. The shear strength in unloading condition is lower than that in loading condition when normal stress is below 45 MPa, and damage occurs more. These results showed that the influence of unloading should be considered fully during the excavation of deep underground engineering.

Key words: deeply buried marble; unloading triaxial test; strength property; deformation property

地下工程开挖导致径向应力降低和切向应力增加,其变化过程是应力不断调整的径向卸荷过程。虽然正常的加载过程及卸荷过程均会导致岩石破坏,但岩石在这两种条件下的力学性质有显著差异,而地下工程开挖使侧向应力降低和轴向应力增加更

易导致围岩发生破坏。随大型地下工程建设的日益增多,开挖卸荷对应的岩体力学行为越来越受到重视,特别是随工程埋深增加,开挖卸荷导致的应力调整对围岩破坏的影响则更为显著。

近些年,针对岩石在加载和卸荷应力路径下力学性质的研究也取得了较大进展。针对大理岩,多个研究者通过卸荷试验研究,获得了大理岩在加载和卸载条件下的力学行为的差异^[1-3],及在定轴压卸围压条件下大理岩的变形特性^[4]。李宏哲等^[5]针对锦屏深埋大理岩开展了卸围压破坏试验及卸围压多级破坏试验,得到了卸荷条件下的抗剪强度参数 c 较加载条件下的低,而 φ 较高;汪斌等^[6]进行了

收稿日期:2013-07-12

基金项目:国家“973”重点基础研究发展计划资助项目(2011CB201201;2010CB226802);国家自然科学基金资助项目(51120145001;51104101)

作者简介:王璐(1988—),女,博士生.研究方向:岩石力学与工程. E-mail:homewanglu@163.com

*通信联系人 E-mail:ljfscu@163.com;liujf@scu.edu.cn

常规三轴压缩及高应力条件下的峰前、峰后卸围压试验,得到大理岩峰前卸围压强度对围压变化最敏感,且峰前和峰后卸围压黏聚力均降低,内摩擦角均增大,峰后卸围压岩石的塑性变形较峰前卸围压的大;黄润秋^[7]、邱士利^[8-9]等均研究了卸荷速率对大理岩力学性质的影响规律,并且后者在此基础上,扩展研究了不同初始损伤程度和卸荷路径下深埋大理岩的力学特性,提出初始损伤程度和卸荷路径对深埋大理岩卸荷变形破坏过程具有强烈的控制作用。此外,还有研究者通过试验对锦屏二级大理岩常规三轴压缩和峰前、峰后卸围压3种应力路径下的大理岩力学参数进行研究,并对比分析了其强度和变形特征及破裂机制^[10-11],及对不同岩石的卸荷力学特性开展了大量试验测试^[12-18]。王璐等^[11]也通过单轴压缩、常规三轴压缩和卸围压升轴压试验对大理岩的强度及变形参数进行了初步探讨,并对加载和卸载条件下的力学特征进行了对比分析。

总结之前的岩石加卸载试验成果发现,卸荷试验中基本是在 $\sigma_1 > \sigma_3$ 条件下开始卸围压,而对于深埋岩石,初始地应力可能接近于静水压力,即 $\sigma_1 = \sigma_3$ 。因此,为探讨深埋高应力条件下,不同应力路径对大理岩力学行为的影响,作者结合锦屏深埋大理岩的应力特征,通过加载和卸荷的不同应力路径试验,对深埋大理岩在卸荷应力状态的力学行为进行探讨,并为工程围岩稳定性分析提供相应物理力学参数。

1 试验设备及方案

1.1 试验设备及试件制备

试验测试全部在MTS815 Flex Test GT岩石力学试验系统上进行。测试岩石取自锦屏二级深埋引水隧洞,埋深约为2 500 m,其岩性为浅灰色大理岩。参考《工程岩体试验方法标准》及相关规程^[19-20]中的规定进行试件加工和试验测试,加工好的标准试件尺寸为 $\varphi 50 \text{ mm} \times H 100 \text{ mm}$ 。试验得到测试试件风干状态下的平均单轴抗压强度为106.9 MPa。

1.2 试验方案

作者试验测试的3种应力路径分别是常规三轴压缩试验(方案I)、三轴应力下的轴向荷载等于单轴抗压强度($\sigma_1 > \sigma_3$)时开始卸载的卸荷试验(方案II)、三轴静水压力($\sigma_1 = \sigma_3$)下开始卸载的卸荷试验(方案III)(见图1)。

图1中OA段和AC段分别为静水压力阶段和方案I,这2个阶段均按规范规定的加载速率进行加

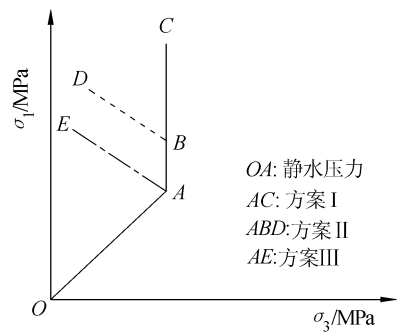


图1 试验方案应力路径示意图

载。ABD段(即AB段和BD段)为方案II,该方案中设定BD段围压卸荷速率为0.05 MPa/s,轴向加载速率为侧向卸荷速率的3倍,B点对应轴向应力约为测试岩石的单轴抗压强度。方案I和方案II测试试件均为5个,单个试件只施加一个围压压力,根据取样工程埋深设定初始目标围压压力分别为10、20、40、60、80 MPa。

图1中AE段对应方案III,该阶段的围压卸荷速率及轴向加载速率与方案II中BD段相同。为了尽可能减小岩石非均匀性对试验结果的影响,方案III采用一个试件按5级加载和卸荷的方法进行测试,围压压力仍分别为10、20、40、60、80 MPa。在第1级围压下($\sigma_3 = 10 \text{ MPa}$),以方案II的BD段卸围压和增轴压的速率,使轴向应力增加至 $\sigma_1 - \sigma_3 = 20 \text{ MPa}$ (此时岩石仍处于弹性阶段,且应力差的增量不超过下级围压,循环加卸载不影响其变形特性)时,停止卸围压,维持当前围压压力不变,同时把轴向荷载卸载至接近零时开始施加第2级围压($\sigma_3 = 20 \text{ MPa}$),并重复第1级围压下的卸载过程。第2级围压下的卸荷过程完成后,分别按第2级围压压力下的卸荷方法进行第3级至第5级围压压力下的卸荷试验,并当第5级围压下的轴向应力增加至 $\sigma_1 - \sigma_3 = 20 \text{ MPa}$ 时不再停止卸围压,而是按方案II BD段的卸载速率继续卸载至破坏。

方案II和方案III的卸荷过程中,大理岩发生破坏后,则停止卸围压,并以轴向应变控制施加轴向荷载,以获得其卸荷破坏后的残余强度。

2 试验结果及分析

2.1 变形特征分析

图2中方案I、方案II和方案III应力-应变曲线上的数字均为试件破坏时对应的实时围压。由于方案III仅在初始围压80 MPa的状态下加载至破坏,故方案III给出的仅是初始围压为80 MPa条件下的

卸荷应力-应变曲线。

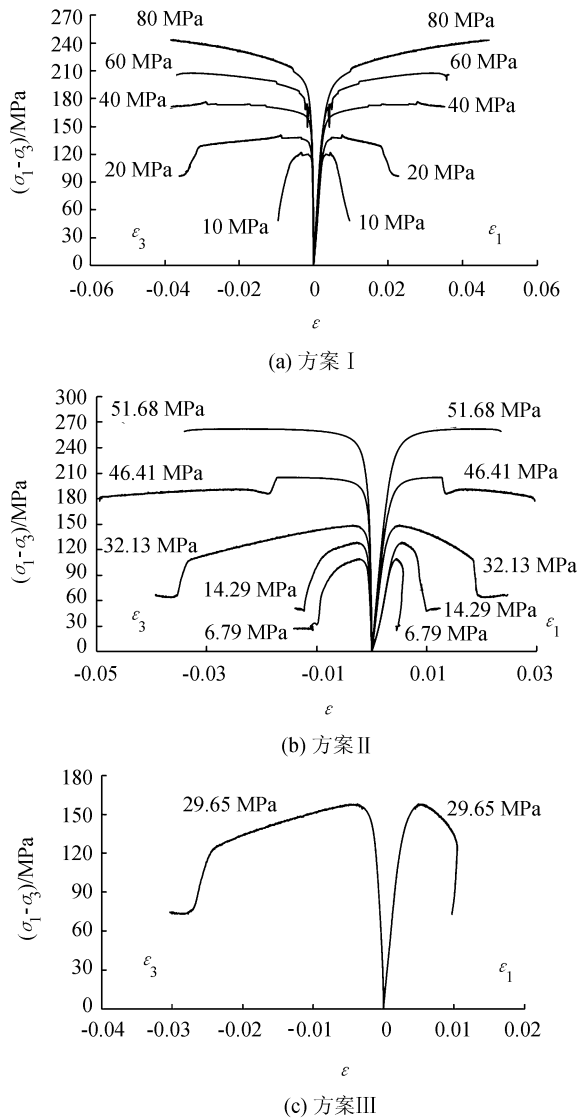


图2 在不同围压下的典型应力-应变全过程曲线

Fig. 2 Typical complete stress-strain curves under different confining pressures

由方案 I 常规三轴压缩得到大理岩在不同围压压力下的变形特征不同(见图 2(a))。虽然其破坏对应的变形量随围压增加而增大,但低围压下($\sigma_3 \leq 40$ MPa),测试大理岩在峰值阶段出现了较大塑性变形后才发生缓慢破坏,围压越低,其在峰值阶段的塑性变形越小。当围压达到 40 MPa 后,大理岩表现出明显的应变硬化特征;当围压为 80 MPa 时,大理岩的轴向压缩量达到了轴向引伸计的量程(为 5%)而未发生破坏,故未继续进行压缩和测量。

在方案 II 和方案 III 卸荷应力路径下,虽然随初始围压压力增加,峰值阶段的塑性变形增加,但均未出现明显应变硬化特征(见图 2(b)和(c))。在方案 III 卸荷应力路径下,虽然其初始围压为 80 MPa,

但其脆性变形特征较方案 I 的围压 20 MPa 时更为显著。

各测试方案下峰值应力对应的轴向应变和横向应变表明(见图 3,图中的横向应变为绝对值):常规三轴加载应力条件下(即方案 I)的纵向和横向应变,均高于其在相同围压时卸荷应力条件下(即方案 II 和方案 III)的纵向和横向应变。随着围压压力增加,方案 I 对应的应变远大于方案 II 和方案 III 得到的结果,卸荷应力路径对变形的影响也更为显著,这表明工程开挖的卸荷应力路径更易使大理岩在较小的变形条件下发生破坏,特别是随工程埋深的增加,卸荷条件下大理岩变形特征的变化需更加重视。

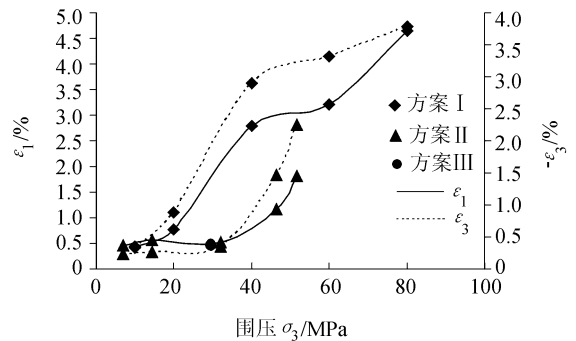


图3 变形与试验方案的关系

Fig. 3 Relationship between deformation and experiment scheme

为深入探讨卸荷应力路径对大理岩变形特征的影响,按下式计算各方案下大理岩的峰值应力 50% 对应的变形模量 E 和泊松比 μ :

$$E = \frac{\sigma_1 - 2\mu\sigma_3}{\varepsilon_1} \quad (1)$$

$$B = \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} \quad (2)$$

$$\mu = \frac{B\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_3(2B - 1) - \sigma_1} \quad (3)$$

由于方案 III 为同一个试件分级加围压和卸载,在 10、20、40、60 MPa 等 4 级围压下的轴向加载量均相等($\sigma_1 - \sigma_3 = 20$ MPa),该应力值低于其在 80 MPa 围压压力下卸荷破坏对应的强度值 187.73 MPa,故在前 4 级围压均取轴向荷载 $\sigma_1 - \sigma_3 = 20$ MPa 时的应力点计算其对应的 E 和 μ 值。

3 种测试方案下的变形模量和泊松比均随围压压力增加而增大(见图 4),各试验方案下的变形模量和泊松比与围压的关系均可表示为线性函数,并具有较高的相关系数(见表 1)。图 4 表明,方案 I 对应各级围压下变形模量均为最大,其泊松比均为

最小,但随围压增加,方案 I 变形模量增长率较 2 个卸荷方案低,而泊松比的增率较 2 个卸荷方案高;方案 III 对应的变形模量介于方案 I 和方案 II 之间,方案 II 对应的泊松比介于方案 I 和方案 III 之间,方案 I 的变形模量为方案 III 的 1~1.5 倍,但对应泊松比仅为方案 III 的 0.6~0.8 倍。该结果表明,相同横向应变时,大理岩在卸荷应力条件下对应的轴向压缩应变相对较小。

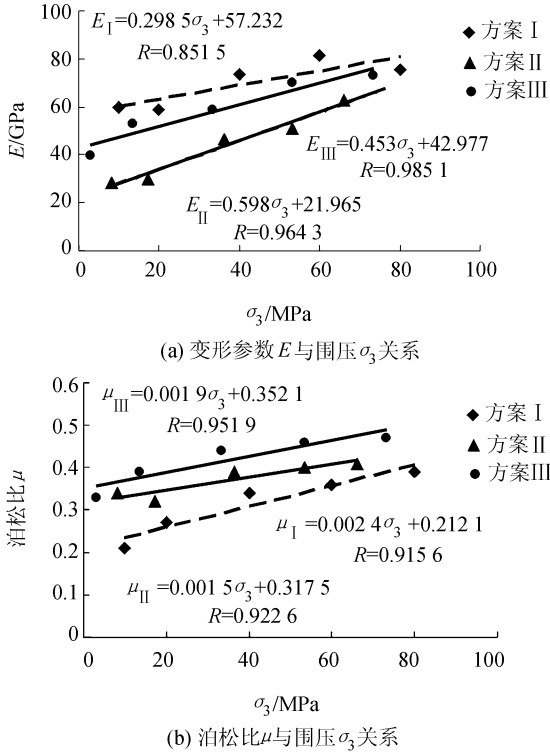


图 4 加载和卸载 E, μ 与破坏围压 σ_3 关系曲线

Fig. 4 Relationship curves of E, μ and confining pressure under loading and unloading conditions

表 1 不同试验方案的 E, μ 与围压的关系表达式

Tab. 1 Relational expression of E, μ and confining pressure under different experiment schemes

方案	表达式	相关系数 R
I	$E = 0.2985\sigma_3 + 57.232$	0.8515
	$\mu = 0.0024\sigma_3 + 0.2121$	0.9156
II	$E = 0.598\sigma_3 + 21.965$	0.9643
	$\mu = 0.0015\sigma_3 + 0.3175$	0.9226
III	$E = 0.453\sigma_3 + 42.977$	0.9851
	$\mu = 0.0019\sigma_3 + 0.3521$	0.9519

由图 2~4 分析可知,加载条件和应力路径对测试大理岩的变形特征具有非常显著的影响。常规三轴加载条件下,大理岩会出现较大的塑性变形,其对应的变形模量高于卸荷应力状态下的结果,泊松比

则相反;卸荷条件下,大理岩在常规三轴压缩应力状态下呈现的较大塑性变形则会向相对脆性变形特征转化,并且在高压围压压力下发生破坏时对应的轴向应变相对较低。因此,在深部地下工程开挖过程中,为获得更为真实的围压变形特征,应尽可能采用卸荷试验得到的力学参数对围岩稳定性进行评价。

2.2 强度特性分析

考虑方案 III 仅在 80 MPa 的初始围压下得到了其卸荷条件下的三轴抗压强度,故以下分析中仅以方案 II 为例与方案 I 进行对比分析。为探讨大理岩在不同试验方案下的抗压强度与围压压力的关系,图 5 中强度与破坏围压关系曲线中,把单轴抗压强度作为方案 I 下的零围压,并将其单轴抗压强度统计入方案 I 的相关关系拟合中。

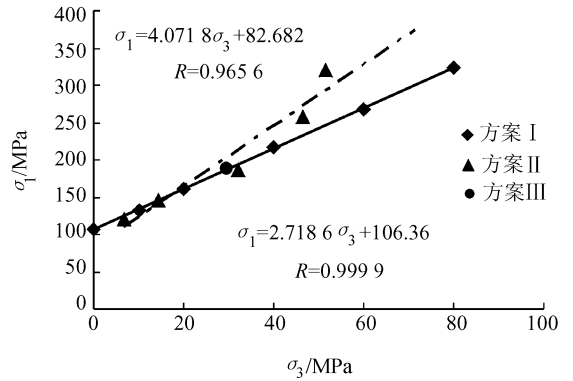


图 5 不同方案下抗压强度与破坏围压关系曲线

Fig. 5 Relationship curves of strength and failure confining pressure under testing conditions

图 5 中拟合得到方案 I 的相关系数达到了 0.9999,表明大理岩在方案 I 零围压下的强度与其在非零围压的强度具有很高的相关性。由图 5 中方案 I 和方案 II 的拟合结果可知,当围压压力低于 17.5 MPa 时,大理岩在卸荷应力状态下的三轴抗压强度低于其在常规三轴压缩下的抗压强度,即方案 I 对应的抗压强度大于方案 II 对应结果,但当围压压力高于 17.5 MPa 时,其结果则相反。图 5 中方案 I、方案 II 拟合表达式斜率的大小,表明大理岩在卸荷条件下,其破坏面将更为粗糙,因而其内摩擦角将会高于常规三轴加载(即方案 I)得到的结果,但其内聚力则相反。

根据图 5 中方案 I、方案 II 拟合表达式,按规范^[20]中建议计算方法得到的抗剪强度参数见表 2。其中, w 为方案 I 中 c, φ 值相对方案 II 中 c, φ 值的百分比增加量。由表 2 可知,卸荷应力状态下的 c 值较常规加载应力状态下降低了 36.47%,但内摩擦角 φ 却增加了 35.42%。鉴于库仑定律表述的岩石抗

剪强度表达式中,抗剪强度 τ 的大小是由内聚力 c 和内摩擦角 φ 这2个参数共同决定的。因此,为探讨卸荷应力条件对大理岩抗剪强度的影响,并考虑工程围岩开挖后的正应力通常不会超出40 MPa,故图6仅给出了正应力45 MPa以内的正应力与抗剪强度关系。

表2 强度参数列表

Tab. 2 Results of intensity parameter

试验方案	c/MPa	$w_c/\%$	$\varphi/(\text{°})$	$w_\varphi/\%$
方案 I	32.25	36.47	27.53	-35.42
方案 II	20.49	36.47	37.28	-35.42

注: $w = (w_{\text{方案 I}} - w_{\text{方案 II}}) / w_{\text{方案 I}} \times 100$ 。

在本文研究的最大初始围压80 MPa以内,随正应力增加,测试大理岩在常规三轴压缩和卸荷三轴压缩下的抗剪强度均增加(见图6)。虽然卸荷条件下,当围压压力高于17.5 MPa时,卸荷三轴抗压强度高于常规三轴压缩强度,但在卸荷应力条件下的抗剪强度却低于常规三轴压缩的抗剪强度,大理岩在卸荷应力状态下更易发生破坏,这表明地下工程开挖卸荷过程对围岩力学行为有不利影响,将更易使围岩的力学性质降低。因此,在对地下工程开挖过程中的围岩稳定性进行分析和评价时,应充分考虑开挖卸荷的影响。

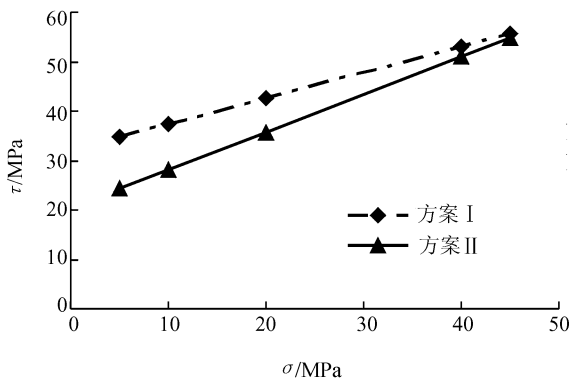


图6 抗剪强度与正应力关系曲线

Fig. 6 Relationship of shear strength and normal stress

3 结论

通过试验研究,获得了锦屏二级水电站地下洞室围岩大理岩在加载及2种卸荷应力路径下的力学特性的差异,为工程应用提供了基本物理力学参数。得到的结论如下:

1)通过常规三轴压缩和2种应力路径的卸荷三轴压缩试验,得到了大理岩在卸荷应力状态下的力学行为与常规三轴加载下的力学行为显著不同。深埋地下工程开挖过程中,应更加重视卸荷应力状态对围岩力学行为的影响。

2)大理岩在常规三轴压缩应力状态下,随围压增加,其破坏时的纵横向变形相对较大,并具有显著应变硬化特征,而在卸荷应力状态下,其破坏时的纵横向应变相对较小,并具有向脆性变形转化的特征;对于深埋岩石,在静水压力条件下卸荷破坏时的脆性特征最显著。卸荷应力状态下,大理岩的变形模量低于常规三轴压缩得到的结果,但其泊松比则反之;静水压力条件下卸荷(方案 III)得到的大理岩变形模量介于常规加载(方案 I)和 $\sigma_1 > \sigma_3$ 条件下卸荷(方案 II)之间,而泊松比最大。

3)卸荷应力状态下的内聚力较常规三轴压缩应力状态下的内聚力下降了36.47%,而其内摩擦角则相反,较常规三轴应力状态下提高了35.42%,表明卸荷应力状态更易使大理岩破坏面呈现出更为粗糙的特征。大理岩在卸荷应力状态下的抗剪强度低于常规三轴压缩,卸荷应力状态下更易发生破坏。

参考文献:

- [1] Gao Chunyu, Xu Jin, He Peng, et al. Study on mechanical properties of marble under loading and unloading conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 456-460. [高春玉,徐进,何鹏,等.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.]
- [2] Xie Hongqiang, He Jianga, Xu Jin. Deformation characteristics of rock under loading and unloading conditions and experimental study of mechanical parameters [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(3): 336-338. [谢红强,何江达,徐进.岩石加卸载变形特性及力学参数试验研究[J].岩土工程学报,2003,25(3):336-338.]
- [3] Pei Jianliang, Liu Jianfeng, Xu Jin. Experimental study of mechanical properties of layered marble under unloading condition [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2496-2502. [裴建良,刘建锋,徐进.层状大理岩卸荷力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(12):2496-2502.]
- [4] Qin Yuchun, Zhu Zhende, Wang Zhanpeng. Unloading strain characteristic experiments on marble of diversion tunnel of Jinping hydropower station [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(S2): 1084-1088. [秦玉春,朱珍德,王战鹏.锦屏水电站引水隧洞大理岩卸荷变形特性试验[J].岩土力学,2006,27(增2):1084-1088.]
- [5] Li Hongzhe, Xia Caichu, Yan Zijian, et al. Study on marble unloading mechanical properties of Jinping hydropower station under high geostress conditions [J]. Chinese Journal of

- Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2104 - 2109. [李宏哲, 夏才初, 闫子舰, 等. 锦屏水电站大理岩在高应力条件下的卸荷力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2104 - 2109.]
- [6] Wang Bin, Zhu Jiebing, Wu Aiqing, et al. Experimental study of mechanical properties of Jinping marble under loading and unloading stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2138 - 2145. [汪斌, 朱杰兵, 邬爱清, 等. 锦屏大理岩加、卸载应力路径下力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2138 - 2145.]
- [7] Huang Runqiu, 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. [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.]
- [8] Qiu Shili, Feng Xiating, Zhang Chuanqing, et al. Experimental research on mechanical properties of deep-buried marble under different unloading rates of confining pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9): 1807 - 1817. [邱士利, 冯夏庭, 张传庆, 等. 不同卸围压速率下深埋大理岩卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(9): 1807 - 1817.]
- [9] Qiu Shili, Feng Xiating, Zhang Chuanqing, et al. Experimental research on mechanical properties of deep marble under different initial damage levels and unloading paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1686 - 1697. [邱士利, 冯夏庭, 张传庆, 等. 不同初始损伤和卸荷路径下深埋大理岩卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1686 - 1697.]
- [10] Li Xinping, Xiao Taoli, Wang Bin, et al. Experimental study of Jinping II hydropower station marble under loading and unloading stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 882 - 889. [李新平, 肖桃李, 汪斌, 等. 锦屏二级水电站大理岩不同应力路径下加卸载试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 882 - 889.]
- [11] Wang Lu, Xu Jin, Liu Jianfeng, et al. Experimental research on mechanical properties of marble from Jinping II hydropower project under loading and unloading conditions[J]. Sichuan Water Power, 2011, 30(6): 106 - 110. [王璐, 徐进, 刘建锋, 等. 锦屏二级水电站大理岩加卸载力学特性试验研究[J]. 四川水力发电, 2011, 30(6): 106 - 110.]
- [12] Li Tianbin, Wang Lansheng. The laboratory study on deformation and destruction characteristics on basalt under stress relief condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, 12(4): 321 - 327. [李天斌, 王兰生. 卸荷应力状态下玄武岩变形破坏特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(4): 321 - 327.]
- [13] Tao Lubin, Xia Caichu, Lu Yiming. Experimental studies on complete course behavior of unloading of granite on Three Gorges project of the Yangtze River[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1998, 26(3): 330 - 334. [陶履彬, 夏才初, 陆益鸣. 三峡工程花岗岩卸荷全过程特性的试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1998, 26(3): 330 - 334.]
- [14] Zhang Liming, Wang Zaiquan, Song Quanfeng, et al. Experimental study on the total failure course of siltsand under unloading condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S1): 5043 - 5047. [张黎明, 王在泉, 宋全峰, 等. 粉砂卸荷破坏全过程的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增1): 5043 - 5047.]
- [15] Huang Runqiu, 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. [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.]
- [16] You Mingqing, Hua Anzeng. Triaxial confining pressure unloading test of rock specimen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(1): 24 - 29. [尤明庆, 华安增. 岩石试样的三轴卸围压试验[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(1): 24 - 29.]
- [17] Shen Junhui, Wang Lansheng, Wang Qinghai, et al. Deformation and fracture features of unloaded rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(12): 2028 - 2031. [沈军辉, 王兰生, 王青海, 等. 卸荷岩体的变形破裂特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(12): 2028 - 2031.]
- [18] Zhang Hongbo, Song Guangxiu, Huang Maosong, et al. Research on failure features of rocks under different stress unloading path[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2007, 37(6): 83 - 86. [张宏博, 宋广修, 黄茂松, 等. 不同卸荷应力路径下岩体破坏特征试验研究[J]. 山东大学学报: 工学版, 2007, 37(6): 83 - 86.]
- [19] 中华人民共和国行业标准编写组. SL264—2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 水利水电出版社, 2001.
- [20] 中华人民共和国行业标准编写组. DL/T 5368—2007 水电水利工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.