

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2009.05.002

高围压高水压条件下大理岩卸围压变形破坏与能量特征

张雪颖^{1 2}, 阮怀宁¹

(1.河海大学岩土力学研究所,江苏 南京 210098;2.南京工程学院建筑工程系,江苏 南京 211167)

摘要 利用伺服机对大理岩进行高围压及高围压高水压岩石的卸荷力学试验。基于试验结果,研究岩样卸围压的变形破坏及其能量特征。结果表明:①大理岩峰前卸荷比峰后卸荷表现出更大的脆性;②孔隙水压力加速了岩石的脆性破裂,降低了岩石的强度;③高围压情况下卸荷比低围压情况下卸荷更容易使岩体发生破坏。

关键词 岩石;卸荷力学试验;高围压;变形破坏;能量特征

中图分类号: TU413.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2009)05-0005-04

Unloading deformation failure and energy properties of marble under high confining pressure and high water pressure//
ZHANG Xue-ying^{1 2}, RUAN Huai-ning¹(*Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Department of Architectural Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China*)

Abstract: Using the RMT-150B servo-controlling testing machine, unloading mechanical tests of marble under high confining pressure and high water pressure conditions were carried out. Based on the experimental results, the unloading deformation failure and energy properties of marble specimens were studied. The results show that marble unloaded before the peak is more brittle than marble unloaded after the peak. The pore water pressure accelerates the brittle fracture of rocks and also reduces their strength. When the marble is unloaded, it is easier to damage under high confining pressure than under low confining pressure.

Key words: rock; unloading mechanical test; high confining pressure; deformation failure; energy feature

目前,岩石力学性质的研究大多沿用一般材料力学的试验方法,即利用各种试验机对特定尺度、形状的试样逐步增加压、拉、剪等载荷,直至完全破坏,在此过程中测量各种载荷与变形的关系。这种测量岩石参数的试验过程与基础施工的加载过程类似,但与洞室开挖的卸荷过程并不相同。岩体不仅是一种材料,而且处在复杂的应力、应变环境中。地下工程、边坡工程的开挖实际上就是岩体在某一方面

的应力或应变得到释放,从而破坏了原有的力学平衡状态,使岩体产生新的变形,甚至断裂、破碎。研究岩体在应力卸载过程中的破坏,对理解地震发生也具有重大的理论意义^[1]。近年来,岩石卸荷研究得到了很大的发展^[2-12],许多研究从不同工程岩体应力变化状况出发,设计了与工程开挖相似的卸荷路径,但用于解决具体工程问题的并不多。文献[13]利用伺服机对大理岩进行了高围压及高围压高水压岩石的卸荷力学试验。笔者基于试验结果,研究了岩样卸围压的变形破坏及其能量特征。

1 高围压岩石卸荷试验方案

1.1 高围压岩石卸荷试验研究

该次试验采用将试样加载到某一应力状态 a 点后,保持大小主应力差不变的方式,即在卸去围压的同时,大主应力也等幅度降低,直至围压为零时的 b 点。其应力路径如图 1 所示。

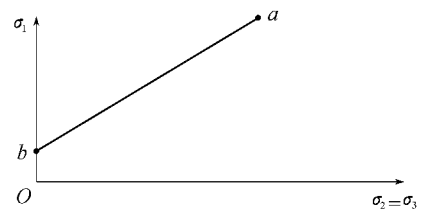


图 1 试验卸荷应力路径

对大理岩进行了在初始围压为 20 MPa、30 MPa、60 MPa 的峰前及峰后的卸围压试验,试验在 MTS815.04 电液伺服控制刚性试验机上进行。等围压三轴压缩峰前卸荷的全过程为:加载到

基金项目:国家重点工程项目(2005805715);国家自然科学基金重点基金(50539090);国家自然科学基金(50671040);南京工程学院科研基金(KXJ08121)

作者简介:张雪颖(1978—),女,江苏徐州人,讲师,博士研究生,从事岩石力学与工程教学及研究。E-mail: zhangkkl@sina.com

屈服阶段之前,降低轴向压力到一定值,使试件处于稳定状态,然后缓慢地降低围压,直到试件破坏。初始围压为 20 MPa、30 MPa、60 MPa。

等围压三轴压缩峰后卸荷的全过程为:加载到屈服阶段之后,降低轴向压力到一定值,使试件处于稳定状态,然后缓慢地降低围压,直到试件破坏。初始围压为 20 MPa、30 MPa、60 MPa。

1.2 高围压高压岩石的卸荷试验研究

与峰前卸荷试验相同,只是在卸围压前,在试样轴向两端面施加均匀分布的水压力至 10 MPa。试验的加载如图 2 所示。

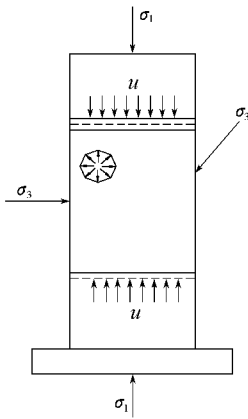
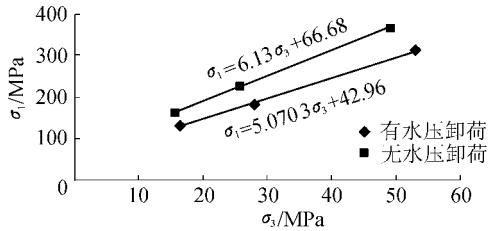


图 2 试验原理示意图

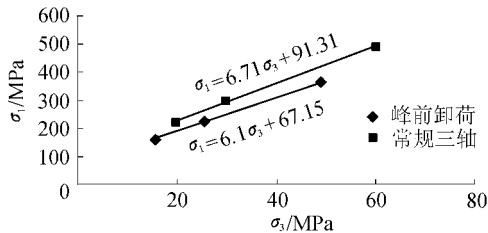
2 岩石卸围压的强度特性

图 3 为 σ_1 与 σ_3 的关系曲线。由图 3(a)可知,峰前有水压和无水压卸荷试验中 $\sigma_1 \sim \sigma_3$ 关系曲线可近似用直线 $\sigma_1 = K\sigma_3 + Q$ 进行拟合,其中 K, Q 是由岩石性质确定的试验常数(K 可以用来评价围压对岩石强度的影响),但峰前有水压卸荷试验中的 K, Q 值比峰前无水压卸荷试验中的值小。所以,峰前有水压卸荷试验中 $\sigma_1 \sim \sigma_3$ 关系曲线总是位于峰前无水压卸荷试验中 $\sigma_1 \sim \sigma_3$ 关系曲线之下。可见,峰前有水压卸荷试验在破坏时围压 σ_3 比峰前无水压卸荷试验大,即峰前有水压卸荷在较大围压下就发生了破坏,由此可见水压削弱了岩石的卸荷强度。由图 3(b)(c)可知,无论峰前无水压卸荷试验、峰后无水压卸荷试验还是常规三轴试验, $\sigma_1 \sim \sigma_3$ 关系曲线均可近似用直线 $\sigma_1 = K\sigma_3 + Q$ 进行拟合,常规三轴试验下的 K, Q 值比峰前无水压卸荷试验和峰后无水压卸荷试验下的 K, Q 值大,故常规三轴试验下的 $\sigma_1 \sim \sigma_3$ 关系曲线总是在峰前无水压卸荷试验和峰后无水压卸荷试验下的 $\sigma_1 \sim \sigma_3$ 关系曲线之上。峰前或峰后无水压卸荷试验在卸荷(围压 σ_3)前,与常规三轴试验围压相同,卸荷后围压均有不同程度的降低,其趋势为卸荷后峰后无水压卸荷试验比峰前无水压卸荷试验的围压更低,初始围压越大,则卸

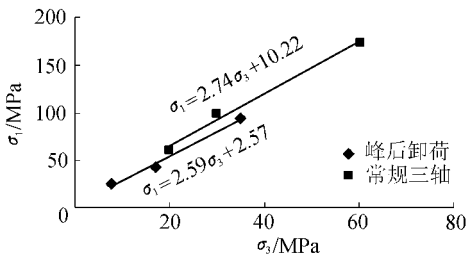
荷后围压降低越多,亦即峰前无水压卸荷试验中岩石试样在更高的围压下就发生破坏,可见峰前卸荷对岩石强度的影响比峰后卸荷要大。



(a) 大理岩无水压和有水压峰前卸荷峰值 σ_1 与围压 σ_3 的关系



(b) 大理岩峰前卸荷与常规三轴峰值 σ_1 与围压 σ_3 的关系



(c) 大理岩峰后卸荷与常规三轴峰值 σ_1 与围压 σ_3 的关系

图 3 $\sigma_1 \sim \sigma_3$ 的关系曲线

3 岩石卸荷过程的变形特性

由图 4 可见,峰前卸荷试验应变 ϵ_1 均随着 σ_3 的增大而增大。而峰后卸荷试验稍有不同,当 σ_3 从约 10 MPa 增大到约 20 MPa 时, ϵ_1 稍有减小;然后当 σ_3 从约 20 MPa 增大到约 35 MPa 时, ϵ_1 急剧增大。在峰前卸荷试验中,随着 σ_3 的增大 ϵ_1 增大很小,而在峰后卸荷试验中, σ_3 增大时 ϵ_1 的增大比较明显。这是由于峰后岩石的破碎程度比峰前大,所以峰后卸围压过程中轴向应变的变化量比峰前大。峰前卸围压试验中在进行卸轴压时的弹性恢复大,试件的完整性较好,而且初始围压越小,弹性恢复越大。这表明,峰前卸围压时,岩石试件未形成较明显的宏观裂纹。最终的破坏程度,峰前卸围压较峰后卸围压

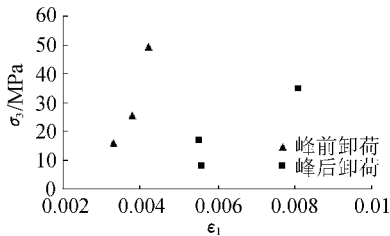


图 4 应变对比

剧烈得多,这也说明峰前卸围压主要产生脆性崩裂,峰后卸围压,由于试样内部已经产生较明显的破坏面,可以产生较大的变形,而不崩裂。

4 岩石卸荷变形破坏过程中的能量分析

由热力学定律可知,能量转化是物质物理过程的本质特征,物质破坏是能量驱动下的一种状态失稳现象。因此,研究并建立岩石破坏过程中的能量变化规律及其与强度和整体破坏间的联系,将更有利于反映外载作用下岩石强度变化与整体破坏的本质属性。从能量角度出发,岩石变形破坏是能量耗散与能量释放的综合结果^[14-17]。能量耗散主要诱发岩石损伤,导致材料性质劣化和强度损失,能量释放则导致岩石的突然破坏。当岩石在外力作用下产生变形时,假设该物理过程与外界没有热交换,即封闭系统,外力功所产生的总输入能量为 U ,根据能量守恒定律,可得

$$U = U^d + U^e \tag{1}$$

式中: U^d 为岩石耗散能; U^e 为岩石可释放弹性应变能。

耗散能导致岩石内部的损伤和塑性变形,其变化满足热力学第二定律,即内部状态改变符合熵增加的趋势。图5为岩石能量耗散能与可释放应变能的关系。图5中面积 U^d 表示岩石发生损伤和塑性变形时所消耗的能量,阴影面积 U^e 表示岩石储存的可释放应变能,该部分能量为岩体单元卸载后释放的弹性应变能。从热力学观点来看,能量耗散是单向和不可逆的,而能量释放则是双向的,只要满足一定条件是可逆的。

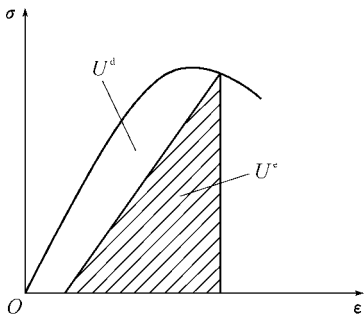


图5 岩石能量耗散能与可释放应变能的关系

4.1 峰前卸围压能量特征

图6为常规三轴和峰前卸荷试验的应力应变曲线。从图6可以看出,岩石在卸载前的变形过程大致可以分为3个阶段,这3个阶段对应着不同的能量转化形式。①压密阶段。在该阶段,岩石内部的微缺陷逐步闭合,试件刚度提高。在此过程中,试验机通过做功的方式对岩石输入能量,转变为岩石的弹性势能储存在内部,如果卸载这部分能量将会释放出来。②弹性阶段。此阶段岩石发生线弹性变形,

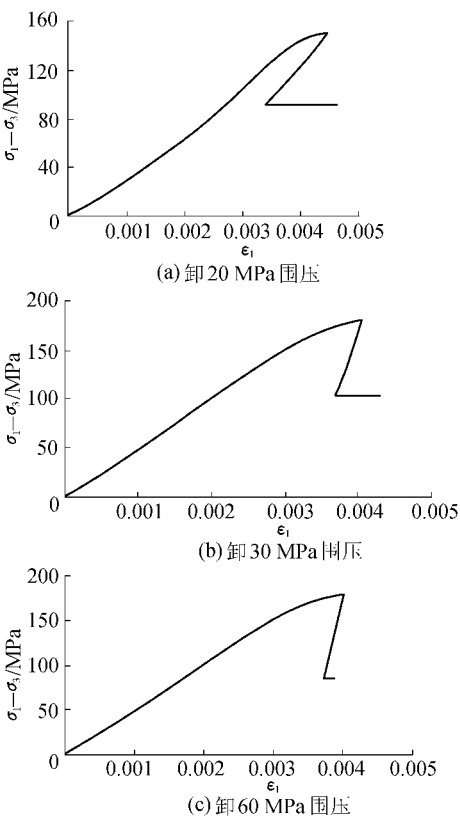


图6 大理岩峰前卸荷应力~应变曲线

试验机对岩石做的功全部转化为岩石的弹性势能。此阶段仍然是可逆过程,在此时卸载,能量仍然会释放出来,而不会造成对岩石的破坏。③塑性变形阶段。超过岩石的弹性极限后,岩石进入塑性变形阶段,内部的微裂纹逐步发育扩展。此阶段试验机输入能量一部分将继续转化为弹性势能,而另一部分转变为塑性势能及表面能等耗散掉,但岩石的弹性能仍然占主要地位。能量耗散主要诱发岩石损伤,导致材料性质劣化和强度损失,而围压限制着岩石内部裂纹的扩展及发育,对能量耗散起抑制作用。根据式(1),围压越大,岩石储存弹性势能能力越强,岩石的屈服强度及峰值强度越高。岩石在卸围压阶段储存的弹性应变能释放出来,当释放出的弹性势能等于某一状态岩石破坏需要的耗散能时岩石发生破坏。围压越大,前面储存的可释放应变能也越大,可以提供较大围压破坏所需要的耗散能。因此,初始围压越大,岩石破坏时的围压也越大。另一方面,由于卸围压时岩石内部产生的损伤破裂面较少,一旦卸载,可释放应变能只能沿少数破裂面释放,试件也就只产生少数宏观破裂面,试件破裂也就更强烈。

峰前有水压卸荷试验的能量释放特征与峰前无水压卸荷试验类似,不过水压的存在相当于降低了围压的作用,对岩石内部裂纹的扩展及发育起促进作用,使能量耗散加速,而能量耗散主要诱发岩石损伤导致材料性质劣化和强度损失。因此,有水压卸荷比

无水压卸荷岩石强度更低,导致有水压卸荷在较高的围压下即发生破坏。另外由于在卸载过程中水压力对能量释放的促进作用,使得岩石破坏更强烈。

4.2 峰后卸围压能量特征

图7为常规三轴和峰后卸荷试验应力~应变曲线。从图7中可以看出,在峰值强度对应的应变之前,可释放应变能占主导地位,过了峰值点后,岩石内部产生大量新的微裂纹,并且逐步演化,汇合形成宏观主裂纹。在此阶段,前期存储的弹性势能释放出来,转化为为了形成微裂纹和宏观主裂纹的表面能等耗散能。此时卸载,由于可释放弹性应变能较小,只能提供较小围压破坏需要的耗散能。因此,与峰前卸荷试验相比,破坏时的围压较小。而由于此时岩石中已经产生较多裂隙,塑性变形较大,裂隙开展比较充分,一旦卸载,释放出的能量有多个出口,试件破坏不会太强烈。

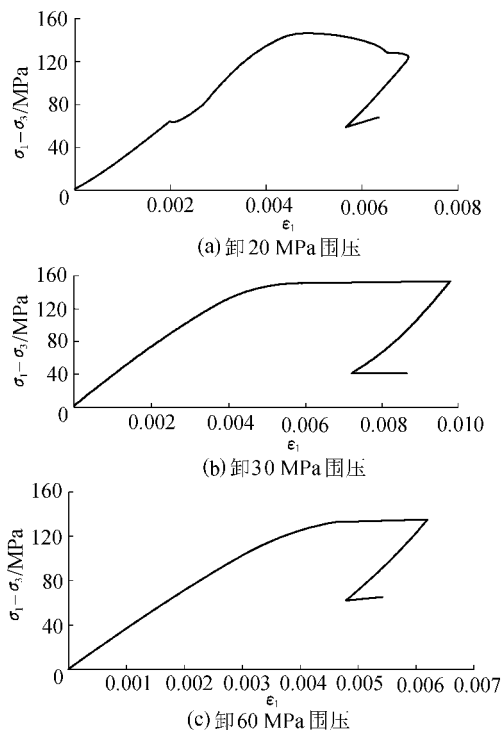


图7 大理岩峰后卸荷应力~应变曲线

5 结论

笔者结合锦屏二级水电站大理岩的高围压及高围压高水压卸荷试验结果,研究了不同围压条件下峰前卸荷及峰后卸荷的岩石变形破坏及能量特征以及高围压高水压下峰前卸荷的岩石变形破坏及能量特征,主要结论如下:

a. 岩石破坏应变能随着围压的增大而增大。初始围压越大,卸荷过程中岩石越容易破坏,并且破坏更剧烈。

b. 峰前或峰后无水压卸荷试验在卸围压 σ_3

前,与常规三轴试验围压相同,卸荷后围压均有不同程度的降低,其趋势为卸荷后峰后无水压卸荷试验比峰前无水压试验的围压更低,初始围压越大,卸荷后围压降低越多。亦即峰前无水压试验中岩石试样在更高的围压下就发生破坏,且破坏更剧烈。

c. 峰前有水压卸荷试验在破坏时围压 σ_3 比峰前无水压卸荷试验大,即峰前有水压卸荷在较大围压下就发生了破坏,由此可见水压削弱了岩石的卸荷强度。

参考文献:

- [1] 尤明庆. 岩石试样的强度及变形破坏过程[M]. 北京: 地质出版社, 2000.
- [2] 李建林. 卸荷岩体力学理论与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [3] 徐林生. 卸荷状态下岩爆岩石力学试验[J]. 重庆交通大学学报, 2003, 22(1): 1-4.
- [4] 周小平. 裂隙岩体卸荷本构理论研究及其应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2000.
- [5] 黄达. 大型地下洞室开挖围岩卸荷变形机理及稳定性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2007.
- [6] 任建喜, 罗英, 刘文刚, 等. CT检测技术在岩石加卸载破坏机理研究中的应用[J]. 冰川冻土, 2002, 24(5): 672-675.
- [7] 陈忠辉, 林忠明, 谢和平, 等. 三维应力状态下岩石损伤破坏的卸荷效应[J]. 煤炭学报, 2004, 29(1): 31-35.
- [8] 周小平, 哈秋聆, 张永兴, 等. 峰前围压卸荷条件下岩石的应力-应变全过程分析和变形局部化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3236-3245.
- [9] 邓钦, 李建林, 张志刚. 卸荷岩体力学的研究与发展[J]. 黑龙江水专学报, 2006, 33(2): 27-29.
- [10] 张黎明, 王在泉, 贺俊征. 岩石卸荷破坏与岩爆效应[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2007, 39(1): 110-114.
- [11] 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.
- [12] 李建林, 王乐华. 节理岩体卸荷非线性力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 1968-1975.
- [13] 阮怀宁, 刘汉龙. 锦屏二级水电站深埋长隧洞岩体力学特性与围岩稳定性分析研究[R]. 南京: 河海大学, 2006.
- [14] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 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.
- [15] 杨圣奇, 徐为亚, 苏承东. 大理岩三轴压所变形破坏与能量特征研究[J]. 工程力学, 2007, 24(1): 136-142.
- [16] 赵忠虎, 谢和平. 岩石变形破坏过程中的能量传递和耗散研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2008, 40(2): 26-31.
- [17] 祝启虎, 卢文波, 孙金山. 基于能量原理的岩爆机理及应力状态分析[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2007, 40(2): 84-87.

(收稿日期: 2008-12-08 编辑: 方宇彤)