

Study on Deformation and Energy Characteristics of Marble during Loading and Unloading

Yaduo Song, Jie Liu, Tianyang Zhao

College of Science, Qingdao University of Technology, Qingdao Shandong
Email: 642448763@qq.com

Received: Apr. 25th, 2020; accepted: May 18th, 2020; published: May 25th, 2020

Abstract

The conventional triaxial test of the marble samples and the failure test of constant axial pressure unloading and confining pressure before and after the peak were carried out to study the mechanical properties of the rock under different stress paths and the energy evolution law during the failure process. The hoop and volume strain generated during the unloading process are large, while the axial strain is small, and the expansion phenomenon is obvious; the confining pressure suppresses the energy dissipation, thereby delaying the release of elastic strain energy. This phenomenon is found in conventional triaxial. It is particularly obvious in the test, and under the unloading path, the elastic strain energy release rate is accelerated, and the model is more violently damaged; in the conventional triaxial test, the energy value consumed in the strain softening stage is the most. The unloaded rock sample before the peak consumes the most energy value after the end of the platform period. After the peak unloading, rock sample is at the end of the platform period, the growth rate of the dissipated energy curve is significantly reduced, indicating that before this, the main shear plane is basically formed, and no more energy is needed.

Keywords

Rock Mechanics, Loading and Unloading Test, Energy

大理岩加卸载试验变形及能量转换研究

宋雅多, 刘 婕, 赵天阳

青岛理工大学理学院, 山东 青岛
Email: 642448763@qq.com

收稿日期: 2020年4月25日; 录用日期: 2020年5月18日; 发布日期: 2020年5月25日

摘要

对大理岩进行常规三轴以及峰前、峰后恒轴压卸围压破坏试验, 研究岩石在不同应力路径下的力学特性及破坏过程中的能量演化规律, 得到结论: 岩样在卸荷过程中产生的环向与体积应变很大, 而轴向应变很小, 扩容现象明显; 围压对能量耗散起抑制作用, 从而延缓弹性应变能的释放, 这种现象在常规三轴试验中尤为明显, 而在卸荷路径下, 弹性应变能释放速率加快, 模型破坏更加剧烈; 常规三轴试验中, 应变软化阶段消耗的能量值最多。峰前卸荷岩样在平台期结束后消耗能量值最多。峰后卸荷岩样在平台期结束位置, 耗散能曲线增长率明显减小, 表明在此之前, 主剪切面基本形成, 不需要再消耗大量能量。

关键词

岩石力学, 加卸载破坏试验, 能量

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

不同应力路径下, 岩体的力学特征有本质性的差别, 深入地研究不同应力路径下岩体的变形特征, 受到越来越多的学者关注。邱士利等[1]进行了大理岩三轴卸围压破坏试验, 探究卸荷速率以及卸荷初始围压对岩石扩容特征和强度变形特征的影响, 发现卸围压路径下岩石更容易出现高扩容现象; 张军伟等[2]对构造煤开展了分阶段卸围压破坏试验, 解析初始围压以及卸荷速率对岩样变形过程的影响; Yoshiyuki Kojima [3]利用相似材料进行了隧洞开挖卸荷模拟试验, 试验表明, 卸荷会导致隧洞的非线性变形加剧, 这种非线性特征随着隧洞直径以及埋深比的增加而趋于明显; 雷涛等[4]探究了岩体在卸荷过程中内摩擦角、黏聚力、弹性模量、泊松比等宏观参数的变化趋势, 发现前三个参数随着卸围压的进行不断劣化, 而泊松比呈小幅度增加趋势; 朱其志等[5]开展了粉砂岩的常规三轴试验, 系统研究其在不同围压下的岩石强度与变形规律。

岩石在外力作用下的变形过程中, 内部伴随有能量的聚集与释放, 能量的积聚与释放是岩石破坏的本质[6] [7] [8] [9]。针对卸荷路径下岩石能量转换问题, 黄达等[10]开展的大理岩卸围压试验表明, 卸荷破坏岩样在峰值点附近的能量耗散与储存值相对常三轴岩样更少, 但其在峰值前、后的应变能转换速率要远大于常规三轴岩样; 谢和平等[11]发现若试样应力应变曲线一致, 但破坏形式不同, 那么其能量释放量也完全不同, 从能量的角度出发可以更好地描述岩石变形破坏过程; 高速等[12]进行了大理岩峰前与峰后恒轴压卸围压试验, 探究大理岩的变形破坏特征与破坏过程中的能量演化规律; 陈卫忠等[13]开展花岗岩峰值前、后卸围压试验, 采用实际能量 U 与极限储存能量 U_0 之比定义了新的判别指标, 分析岩石卸荷破坏的能量演化规律; 刘天为等[14]指出岩石的变形与破坏和能量的变化密切相关, 对大理岩进行了常规三轴压缩试验, 研究了围压对加载破坏各阶段能量变化的影响。

不论从变形角度, 还是从能量角度, 对岩体加卸载破坏的研究已经取得较多的成果。此外, 恒轴压卸围压条件下, 不考虑轴压的变化对试验结果造成的差异, 能更好地分析卸围压对岩样的影响规律。本文开展了大理岩的常规三轴试验, 在此基础上操作了恒轴压卸围压试验, 进行了变形破坏分析, 并从能

量角度对加卸荷破坏试验过程中耗散能与弹性应变能的变化规律进行了探究。

2. 试验方案

2.1. 加荷试验方案

首先开展室内常规三轴加荷破坏试验,为后面的恒轴压、卸围压试验提供数据支撑。试验在中国矿业大学 MTS815 电液伺服试验机上进行,岩样取自同批大理岩岩块,加工成直径为 50 mm 高为 100 mm 的圆柱试样。岩样精度满足试验要求:

(1) 采用应力控制施加围压,当围压达到初始设定值时停止;(2) 保持围压恒定不变,通过位移控制以 0.003 mm/s 的速率继续给岩样施加轴向压力,直至岩样最终破坏时停止。

2.2. 卸荷试验方案

在不同围压下,使大理岩在峰值前、峰值后 80%处保持轴压恒定不变,以不同速率卸围压直至破坏,分为三个阶段:

(1) 通过应力控制施加围压,加载围压至目标值时停止;(2) 保持围压不变,通过位移控制继续施加轴向压力至定值(峰值前、峰值后应力 80%处);(3) 保持轴力恒定,在峰值前、峰值后按不同的卸荷速率卸围压直至岩样完全破坏。

3. 加卸荷破坏试验分析

3.1. 加荷试验应力 - 应变曲线

图 1 为围压从 10 MPa 提高至 40 MPa 范围内,大理岩常规三轴压缩破坏试验应力 - 应变曲线。曲线共分为五个阶段。

压密阶段(OP 段): 岩石内部天然微裂缝在加载初期被压密。

弹性阶段(PA 段): 该阶段后期,岩样内部会产生少量裂纹。

屈服阶段(AB 段): 岩石内部微裂隙萌生并快速扩展,岩样很快便达到强度极限。

应变软化阶段(BC 段): 在此阶段,微裂纹继续扩展,同时相互连接形成宏观裂纹,岩样强度不断下降。

残余阶段(CD 段): 几乎不再产生新裂纹,处于宏观裂纹滑移阶段,岩样完全失去承载能力。

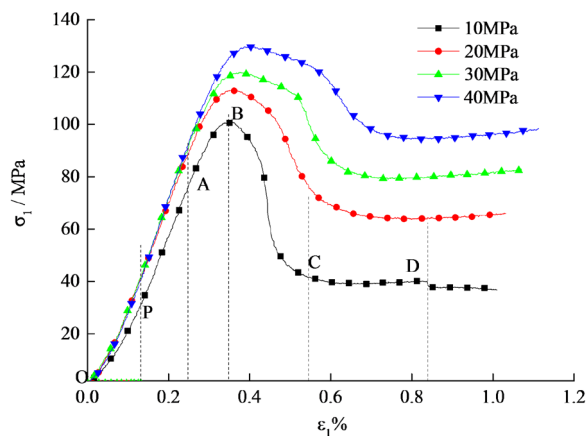


Figure 1. Stress-strain curve of conventional triaxial compression test

图 1. 常规三轴压缩试验应力 - 应变曲线

大理岩在低围压条件下(10 MPa), 峰后曲线下降较快。随着围压的增大, 岩样的峰值强度明显提高, 延性变形特征逐渐明显, 达到峰值强度后并不立即进入应变软化阶段, 而是经过相当大的塑性变形后曲线才开始下降, 残余强度也越来越接近峰值强度。

3.2. 加荷试验破坏形式分析

图 2 为大理岩常规三轴压缩破坏形式, 岩样的破坏角(剪切破裂面与岩样底面方向的夹角)在图中用黑线标出。单轴加载的岩样, 主要表现出劈裂破坏的特征。随着围压的提高, 岩样破坏形式呈现为主剪切破坏。其中, 单轴压缩岩样的破坏角为 64° , 常规三轴试验中, 围压从 10 MPa 提高至 30 MPa 范围内, 各岩样的破坏角均在 $58^\circ\sim 61^\circ$ 范围内变化。表现为随着围压的升高, 岩样破坏角减小, 使得破裂面间能够承载更大的应力[15]。

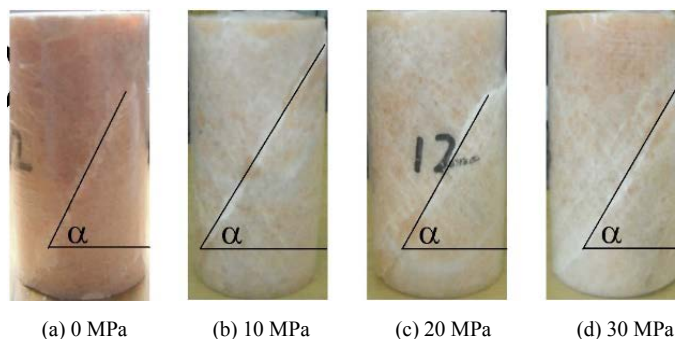


Figure 2. Picture of failure of marble samples in conventional triaxial test

图 2. 大理岩常规三轴试验岩样破坏图片

3.3. 卸荷试验变形分析

以围压 20 MPa 下, 卸荷速率为 0.2 MPa/s 的大理岩试样为例进行分析, Y01 号试样的全过程应力-应变曲线如图 3 所示。加载初期岩样处于弹性变形阶段, 体积变形与轴向变形均沿正向增长, 环向变形沿负向增长。此时岩样处于体积压缩, 环向膨胀状态, 沿轴向的变形量最大, 体积变形量次之, 而环向应变呈小幅度增长。随着轴力的提升, 岩样内部出现损伤, 体积应变曲线偏离直线。环向应变沿负向持续增加, 到达卸荷点后, 增速明显变大。体积应变曲线也在卸荷点处出现拐点, 开始沿负方向增长。整个卸荷过程中, 产生的轴向变形远远小于环向与体积变形, 岩样表现出强烈的体积扩容现象。

如图 4 为大理岩在峰后 80%处保持轴压不变, 以 0.2 MPa/s 的速率卸围压, 所得到的全应力-应变曲线(围压 20 MPa)。

加载初期岩样的体积应变以及轴向应变同时沿正向增长, 岩样处于体积压缩状态。轴向应力-应变曲线快速向右发展, 轴向应变增速较快, 而环向应变增量较小, 增长趋势较弱, 在加载前期可以忽略不计。

到达峰值应力附近时, 环向应变开始大幅度增长, 体积应变开始沿反方向增加, 表明岩样开始扩容。

当加载至峰值应力后 80%处时, 使轴力保持不变, 同时开始卸围压。卸荷开始后, 环向应变与体积应变值在平台期内成倍增长, 期间岩样环向应变增长 27.0%, 体积应变增长 46.9%, 而此时轴向应变增值较小, 仅为 2.3%。说明峰后卸荷时, 岩样同样出现了较为明显的扩容现象。平台期过后, 轴向应力-应变曲线下降, 宏观破坏面已基本形成, 但岩样还未完全失去承载能力。最后, 当轴向应变值增长至 0.005 时, 岩样完全破坏。

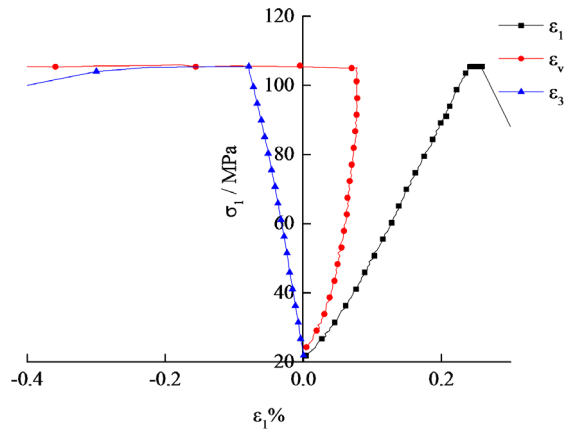


Figure 3. Total stress-strain curve of rock sample Y01
图 3. Y01 号岩样全应力 - 应变曲线

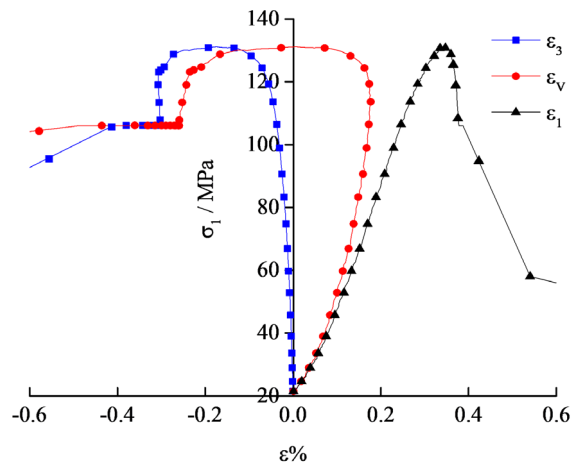
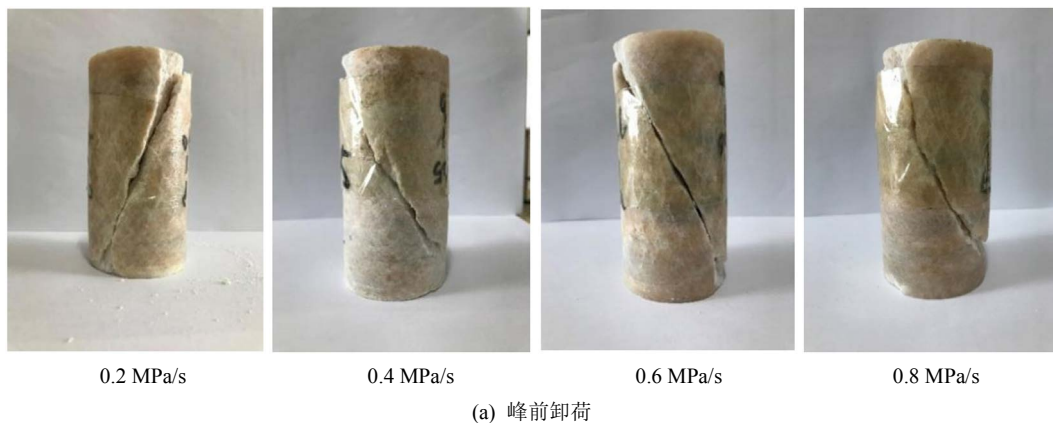


Figure 4. Y05 rock sample full stress-strain curve
图 4. Y05 号岩样全应力 - 应变曲线

3.4. 卸荷试验破坏形式分析

图 5 为大理岩在恒轴压卸围压路径下，峰值前与峰值后不同卸荷速率下的破坏形态。主剪切破坏面与岩样底面呈一定角度，并贯穿整个试样。峰前卸荷与峰后卸荷岩样的破坏角均在 $62^{\circ}\sim 68^{\circ}$ 范围内变化。



(a) 峰前卸荷

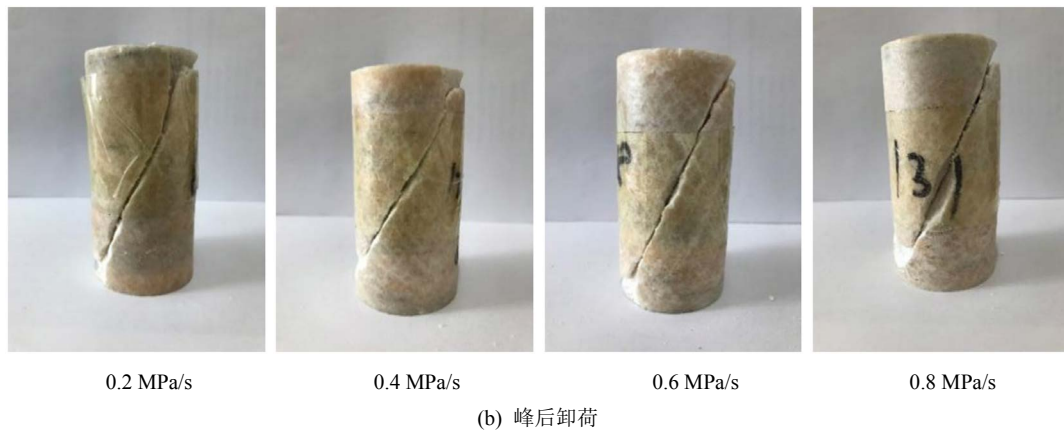


Figure 5. Macroscopic failure modes of marble at different unloading rates
图 5. 大理岩不同卸荷速率下的宏观破坏形态

4. 加卸荷破坏试验能量分析

4.1. 加荷试验过程能量分析

图 6 为 20 MPa 围压下, 大理岩的应力 - 能量 - 应变演化曲线。在压密段(对应图中 AB 段), 吸收的总能量主要以弹性应变能的形式储存, 两者曲线几乎重合。由于岩石自身缺陷(内部微裂隙与节理的存在), 还需要消耗部分能量用于岩石内部裂隙滑移、压密、闭合等。但此阶段耗散能量值较小, 三种能量增长速率普遍较小, 该阶段吸收总能量达到 0.03 MJ/m^3 。

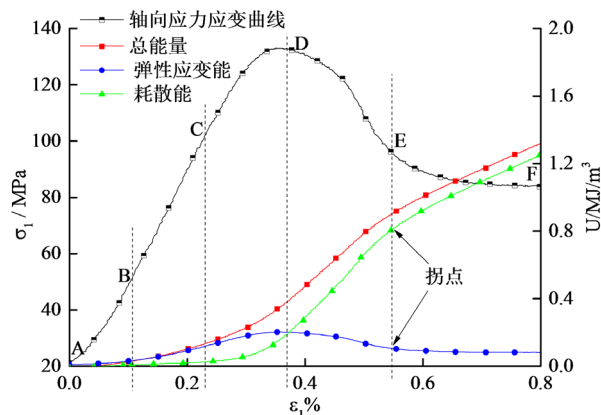


Figure 6. Energy evolution curve of conventional triaxial compression failure test of marble

图 6. 大理岩常规三轴压缩破坏试验能量演化曲线

当应力应变曲线进入线弹性阶段(对应图中 BC 段), 耗散应变能仍在缓慢变化。该阶段后期有少量微裂纹产生, 并不是完全意义上的弹性阶段, 但消耗能量仍然较少。达到屈服点时, 耗散能的值仅为 0.02 MJ/m^3 , 而此时总能量已经增长至 0.13 MJ/m^3 ; 屈服弱化阶段(对应图中 CD 段), 岩样内部裂纹大量扩展。随着轴向应力的不断提高, 岩样内部开始出现应力集中, 于是微裂纹追踪着应力集中区域萌生、扩展, 需要消耗大量能量, 耗散能呈现出迅速增长趋势。该阶段轴向应力增长较慢, 而轴向应变快速增长, 表明吸收的应变能转化为耗散能的比例增大, 弹性应变能增速放缓, 在接近峰值应力处也达到峰值 0.20 MJ/m^3 , 该阶段随之结束。

应力应变曲线达到峰值应力后, 进入应变软化阶段(对应图中 DE 段), 岩石内部新旧裂纹相互作用, 聚集形成主破裂面, 必然导致岩样内部积聚的弹性应变能转换成耗散应变能的形式释放。峰值处(D 点)总能量曲线与耗散能曲线以较大速率持续增长, 此阶段内消耗的能量值最多, 占耗散总能量值的 50%。表明岩样在宏观破裂面形成之前需要消耗更多的能量。而弹性应变能在前一阶段达到峰值后开始释放, 由于围压的抑制作用, 弹性应变能呈现出缓慢下降趋势。

进入岩体破坏阶段(对应图中 EF 段), 此阶段宏观破裂面已经形成, 应力 - 应变曲线不再继续下降, 3 种能量曲线在 E 点都出现较为明显的拐点, 岩样破坏面基本处于宏观滑移状态。

4.2. 峰前卸荷试验过程能量分析

图 7 为围压 20 MPa 下, 岩样在峰值应力前 80%处保持轴压恒定, 以 0.2 MPa/s 的速率卸围压时的应力 - 能量 - 应变演化曲线。这里将轴力保持不变的曲线段定义为平台期。

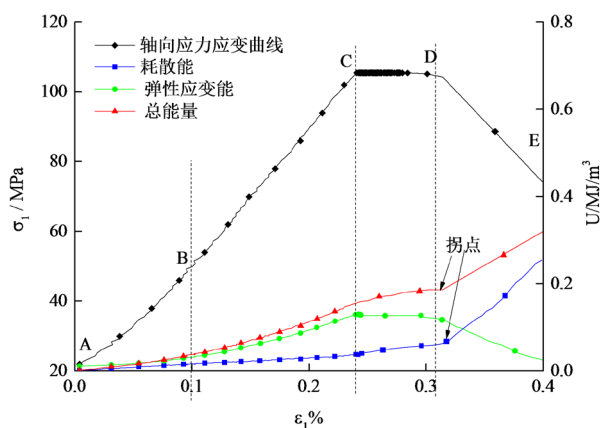


Figure 7. Energy evolution curve of constant axial pressure and confining pressure failure test before peak

图 7. 峰前恒轴压、卸围压破坏试验能量演化曲线

对应轴向应力 - 应变曲线压密阶段 AB, 能量曲线与常规三轴试验相应阶段的能量曲线一致。耗散能量值较低, 总能量与弹性应变能曲线相接近, 压密段总能量最大值达到 0.037 MJ/m^3 。

线弹性 BC 段, 总能量与弹性应变能曲线均以较大速率增长, 两者的差异逐渐显现。总能量曲线增速最快, 弹性应变能次之, 而耗散能曲线缓慢增长。总能量增长至 0.15 MJ/m^3 后, 随即达到卸荷点。

在峰值应力前 80%处开始保持轴压恒定, 进入恒轴压卸围压阶段(CD 段), 试验机对岩样做功较常规三轴试验变少, 总能量缓慢增加。而卸围压导致岩样内部裂纹加速扩展, 耗散能增速变大。平台期内弹性应变能的值趋于平稳, 直至 D 点达到储能极限, 随即释放。该阶段耗散能最大值达到 0.06 MJ/m^3 , 总能量最大值为 0.19 MJ/m^3 。

平台期结束后, 达到 D 点处, 轴向应力 - 应变曲线大幅度下降。此阶段裂纹仍在发育扩展。总能量与耗散应变能曲线同步出现拐点(如图), 增长速率明显提高, 此后消耗能量占耗散能总值的 68%。表明卸荷岩样在平台期结束后(D 点), 在完全丧失承载力之前(E 点), 需要消耗更多能量。此时围压抑制作用不再强烈, 弹性应变能达到储能极限后快速沿破裂面释放, 岩样完全破坏, 试验结束。

4.3. 峰后卸荷试验过程能量分析

图 8 为 20 MPa 围压时, 岩样在峰值应力后 80%处保持轴压恒定, 以 0.2 MPa/s 卸围压时的应力 - 能

量 - 应变曲线。

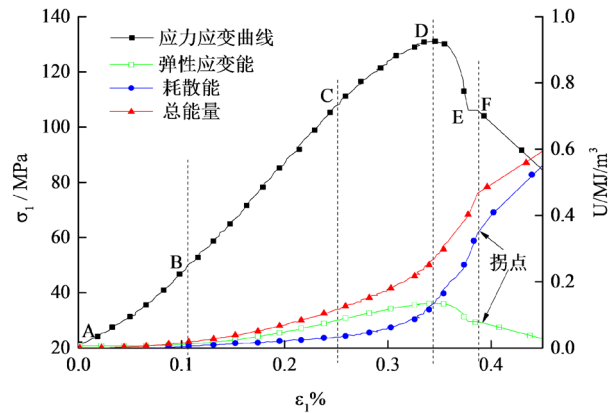


Figure 8. Energy evolution curve of constant axial pressure and confining pressure failure test after peak

图 8. 峰后恒轴压、卸围压破坏试验能量演化曲线

在达到卸荷点之前，能量演化规律与相同围压下的常规三轴类似，各阶段结束时对应的能量值也与常规三轴中十分接近。

达到峰值应力后 80%处(E 点)，卸荷开始，应力 - 应变曲线进入平台期，弹性应变能保持不变。平台期结束后，三种能量同时出现拐点(如图)。弹性应变能释放，不断增大的耗散能主导岩样的破坏行为，当耗散能不再继续增加时，岩样完全破坏。

峰值应力后 80%处卸荷时，岩样内部储存的弹性应变能已经部分释放，仅剩一部分弹性应变能可沿破裂面释放，此时岩样破坏过程不如峰前卸荷时强烈。

对比上述常规三轴试验与峰值前、峰值后恒轴压、卸围压破坏试验可知：在围压 20 MPa 下，当岩样达到储能极限，常规三轴试验中对应的弹性应变能为 0.20 MJ/m^3 ，占此时岩样总能量的 50%；峰值前、峰值后 80%处恒轴压、卸围压路径下对应的弹性应变能分别为 0.13 MJ/m^3 与 0.19 MJ/m^3 ，占总能量比值分别为 36%与 53%。说明常规三轴与峰值后恒轴压、卸围压试验的弹性应变能峰值相接近，均大于峰值前恒轴压、卸围压路径。前两种试验路径下，吸收总能量可更多转化为弹性应变能。

常规三轴试验中，耗散能最大值达到 0.70 MJ/m^3 ，峰值前、峰值后恒轴压、卸围压试验中耗散能最大值分别为 0.57 MJ/m^3 与 0.6 MJ/m^3 。相同围压下，常规三轴试样需要消耗更多能量才能破坏，卸荷路径比加荷路径下岩样更容易发生破坏。

5. 结论

(1) 卸荷刚开始岩样就出现了明显的扩容现象，在卸荷过程中，岩样产生的环向与体积应变明显大于轴向应变。

(2) 围压对能量耗散起抑制作用，从而延缓弹性应变能的释放，这种现象在常规三轴试验中尤为明显。卸荷路径下，弹性能释放速率加快，模型破坏更加剧烈。

(3) 常规三轴试验中，岩样的总能量与耗散能曲线在应变软化阶段增长率达到最大，在此阶段内消耗的能量值最多，占耗散总能量值的 50%；而峰前恒轴压、卸围压路径下，总能量与耗散能在应力 - 应变曲线峰后段增长率达到最大，期间消耗能量占耗散能总值的 68%，表明峰前卸荷岩样在应力 - 应变曲线峰后段消耗能量值最多。峰后卸荷岩样在平台期结束位置，耗散能曲线增长率明显减小，表明在此之前，

主剪切面基本形成, 不再需要大量能量消耗。相同围压下, 常规三轴试样需要消耗更多能量才能产生破坏, 表明卸荷路径更加危险。

参考文献

- [1] 邱士利, 冯夏庭, 张传庆, 周辉, 孙峰. 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.
- [2] 张军伟, 姜德义, 赵云峰, 陈结, 李林. 分阶段卸荷过程中构造煤的力学特征及能量演化分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(12): 2820-2828.
- [3] Kojima, Y. and Yashiro, K. (2005) Deformation Behavior of Tunnel Lining due to Ground Surface Loading and Unloading above the Tunnel. *Quarterly Report of RTRI*, **46**, 143-146. <https://doi.org/10.2219/rtriqr.46.143>
- [4] 雷涛, 周科平, 胡建华, 高峰. 卸荷岩体力学参数劣化规律的细观损伤分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(1): 275-281.
- [5] 朱其志, 闵中泽, 王岩岩, 王伟. 粉砂岩三轴压缩试验中的试样尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S2): 3296-3303.
- [6] 郭延辉, 侯克鹏, 孙华芬, 谢富英. 地下金属矿山深部开采引起地表移动变形规律研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2011, 63(5): 36-40+45.
- [7] 李夕兵, 姚金蕊, 宫凤强. 硬岩金属矿山深部开采中的动力学问题[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(10): 2551-2563.
- [8] 陈子全, 李天斌, 陈国庆, 马春驰. 不同应力路径下砂岩能耗变化规律试验研究[J]. 工程力学, 2016, 33(6): 120-128.
- [9] 李天斌, 陈子全, 陈国庆, 马春驰, 唐欧玲, 王敏杰. 不同含水率作用下砂岩的能量机制研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(S2): 229-236.
- [10] 黄达, 谭清, 黄润秋. 高围压卸荷条件下大理岩破碎块度分形特征及其与能量相关性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1379-1389.
- [11] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨. 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(21): 3565-3570.
- [12] 高速, 张黎明, 王在泉, 丛宇. 大理岩卸荷破坏变形及能量特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 2808-2813.
- [13] 陈卫忠, 吕森鹏, 郭小红, 乔春江. 基于能量原理的卸围压试验与岩爆判据研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1530-1540.
- [14] 刘天为, 何江达, 徐文杰. 大理岩三轴压缩破坏的能量特征分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2): 395-400.
- [15] 梁运培, 李清淼, 顾义磊, 邹全乐, 李全贵. 不同围压下页岩残余强度及破裂面特征的试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(6): 1179-1185.