

文章编号: 1000-7598 (2011) 12-3611-07

砂岩加卸载条件下能耗特征试验研究

许国安^{1,2}, 牛双建², 靖洪文^{1,2}, 杨圣奇¹, 王文龙²

(1.中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008; 2.中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:采用 MTS815 刚性伺服试验机, 对砂岩进行了单轴、三轴压缩和三轴峰后卸围压试验, 对比研究了砂岩在加卸载试验条件下的能耗特征。结果表明, 单轴压缩各能耗指标值均小于三轴压缩和三轴峰后卸围压, 三轴峰后卸围压介于单轴与三轴压缩之间。三轴压缩和三轴峰后卸围压各能耗指标均具有明显的围压效应, 随着围压的升高而线性增大。单轴压缩时砂岩表现为突发性的脆性破坏, 初期储存的弹性应变能瞬间几乎全部转化为耗散能, 成为岩样破坏时所表现出的一切现象的源动力; 三轴压缩时砂岩表现为从局部破坏到整体失稳的渐进过程, 耗散能所占吸收能量的比例越来越大, 表现为明显的能量耗散, 能量耗散发展到一定程度表现为明显的能量释放, 随即岩石整体失稳破坏。

关键词: 应力路径; 能量耗散; 能量释放; 三轴压缩; 峰后卸围压

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Experimental study of energy features of sandstone under loading and unloading

XU Guo-an^{1,2}, NIU Shuang-jian², JING Hong-wen^{1,2}, YANG Sheng-qi¹, WANG Wen-long²

(1. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China;

2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: In order to get the features of energy absorption and dissipation of sandstone under loading and unloading, the tests of uniaxial compression, triaxial compression and post-peak unloading confining pressure have been performed on sandstone with the MTS81.5 servo-controlled test machine. The results show that the dissipated energy of sandstone increases from uniaxial compression test through post-peak unloading test to triaxial compression test. The dissipated energy in triaxial compression and post-peak unloading confining pressure tests increases linearly with the confining pressure. Under uniaxial compression, the sandstone presents abrupt brittle failure and the elastic strain energy initially stored in the sandstone is instantly transformed into dissipated energy which is the power source of all phenomena of the rock failure. Under triaxial compression, the sandstone demonstrates progressive failure, i.e. the failure of sandstone is the process of from local cracking to global destruction in which the dissipated energy gradually increases with deformation. When the deformation reaches a critical level, the residual energy stored in sandstone will be rapidly released and the sandstone globally destructed.

Key words: stress paths; energy dissipation; energy release; triaxial compression; post-peak unloading confining pressure

1 引言

岩石作为一种特殊的天然材料, 因受成因和地质构造的影响, 其组织结构极为不均匀且内部存在大量随机分布的天然缺陷, 可视为一种非均质的多相复合结构^[1]。由于岩石的这种特殊结构, 导致了岩石应力-应变具有很强的非线性特点, 单纯依靠应力-应变判据建立适合岩石的强度准则是不可能

的^[2]。近些年, 采用能量耗散理论对岩石类材料的力学性能进行研究已成为岩石力学研究的一个热点, 许多岩石力学工作者对岩样破坏过程的能量变化规律进行试验研究^[3-11]。喻勇等^[4]研究了花岗岩在不同加载方式下的能耗特征。金丰年等^[5]从能量耗散角度定义了材料的损失变量, 并给出了损失变量的理论计算公式及损伤阈值的确定方法。谢和平等^[6-7]研究了岩石变形破坏过程中能量耗散、能量

收稿日期: 2010-07-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 50674083, No. 50709008); 国家十一五科技支撑计划 (No. 2008BAB36B07); 江苏省土木工程研究生科技创新基金资助。

第一作者简介: 许国安, 男, 1978 年生, 博士, 主要从事岩石力学与井巷工程方面的研究与教学工作。E-mail: xgacumt@cumt.edu.cn

释放与岩石强度和整体破坏的内在联系,建立了基于能量耗散的强度丧失准则和基于可释放应变能的整体破坏准则。杨圣奇等^[9-10]研究了单轴试验条件下尺寸对大理岩压缩变形破坏与能量特征的影响规律,并对三轴压缩变形破坏与能量特征以及围压对两者的影响规律进行了分析与探讨。

以往对岩样破坏过程中能耗特征的研究大多集中于单轴和三轴压缩试验即加载条件下进行的,对卸载条件下岩样破坏过程中能耗特征的研究较少,特别是对同一种岩石在加、卸载条件下能耗特征对比研究的更少。为此,本文利用 MTS81.5 伺服试验机对砂岩分别进行了单轴压缩、三轴压缩和三轴峰后卸围压试验,对比研究了砂岩加、卸载条件下变形破坏过程中的能耗特征。

2 岩样破坏过程能量分析

考虑一个单位体积的岩体单元在外力作用下产生变形,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 , 根据热力学第一定律可得^[6]

$$U = U^d + U^e \quad (1)$$

式中: U^d 为岩体单元耗散能,用于形成岩体单元内部损伤和塑性变形,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; U^e 为岩体单元中储存的可释放应变能,该部分能量形成于岩体单元发生弹性应变阶段,当外力卸除后,这部分能量能够使岩体变形得到一定的恢复。

单位岩体中 U^d 和 U^e 的量值关系见图 1 所示。

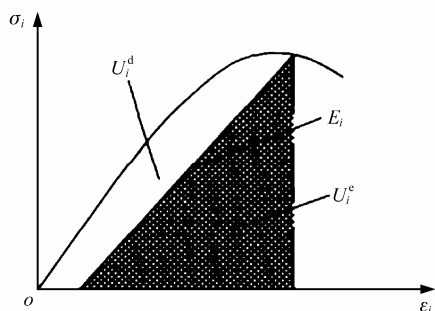


图 1 岩体单元中能量耗散和可释放应变能的量值关系^[6]

Fig.1 Relationship between elastic strain energy and dissipative energy in rock unit^[6]

可认为式(1)是复杂应力状态下岩体单元能量满足的关系式,在主应力空间中单位体积的岩体单元各部分能量可表示为^[12]

$$U = \int \sigma_1 d\epsilon_1 + \int \sigma_2 d\epsilon_2 + \int \sigma_3 d\epsilon_3 \quad (2)$$

$$U^e = \frac{1}{2} \sigma_1 \epsilon_1^e + \frac{1}{2} \sigma_2 \epsilon_2^e + \frac{1}{2} \sigma_3 \epsilon_3^e \quad (3)$$

$$\epsilon_i^e = \frac{1}{E_i} [\sigma_i - \nu_i (\sigma_j + \sigma_k)] \quad (4)$$

式中: σ_i 、 σ_j 、 σ_k ($i, j, k=1, 2, 3$) 为主应力; ϵ_i 和 ϵ_i^e 分别为主应力方向上的应变和弹性应变; ν_i 为泊松比; E_i 为卸载弹性模量; U 、 U^d 、 U^e 单位均为 MJ/m^3 , 与应力的单位 MPa 实际是相同的。

在利用试验机对岩样进行加、卸载试验时,假设岩样在加、卸载变形这一物理过程中与外界没有热交换,即为一封闭系统,对于单位体积岩样来说,其在加、卸载变形过程中各部分能量可以按照文献[6]中对单位体积岩体单元变形过程中能量分析计算的方法进行计算。在此物理过程中,外力功所产生的总输入岩样的能量 U 可认为单位体积岩样实际吸收的能量 U_0 , U^e 为单位体积岩样所储存的可释放弹性应变能,二者之差 U^d 则可理解为单位体积岩样在加卸载变形过程中耗散掉的能量,即耗散能。

单轴压缩试验条件下,对于单位体积岩样单元来说,应力状态为单轴受压,只有轴向的应力和变形量不为 0,将其代入式(2)~(4)可得

$$U_0 = \int \sigma_1 d\epsilon_1 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\sigma_{li} + \sigma_{li-1}) (\epsilon_{li} - \epsilon_{li-1}) \quad (5)$$

$$U^e = \frac{\sigma_1^2}{2E} \quad (6)$$

式中: σ_{li} 、 ϵ_{li} 为轴向应力-轴向应变曲线上每一点的应力、应变值,且初始应力和初始应变均为 0; E 为弹性模量。

单轴条件下岩样所吸收的能量 U_0 为试验机加载过程中岩样应力-应变曲线下方所包含的面积,对轴向应力-轴向应变曲线求积分可得,即式(5);对于单位岩样可释放应变能 U^e 的计算,假设岩样在全应力-应变曲线上卸载曲线和再加载曲线基本一致,卸载弹性模量 E_i 可采用峰值前弹性段的弹性模量 E 代替(其计算方法为峰前弹性段应力与应变的比值),在进行岩样单轴加载试验过程中计算曲线上任意一点的可释放弹性应变能时,均可根据该点的应力值和峰值前弹模确定,即式(6)。

三轴等围压压缩条件下,对于单位体积岩样单元来说,应力状态为双轴受压,同时存在轴向 σ_1 、环向 $\sigma_2 = \sigma_3$,将其代入式(2)可得岩样实际吸收的能量 U_0 为

$$U_0 = \int \sigma_1 d\epsilon_1 + 2 \int \sigma_3 d\epsilon_3 \quad (7)$$

式(7)可以解释为,三轴受压试验条件下外力

做功所产生的总输入岩样的能量 U_0 , 包括轴向力对岩样做正功和环向力 (围压) 对岩样做负功两部分, 此时, 岩样的环向应变以压缩为正, 即实际测得的环向应变为负值。另外, 考虑岩样压缩过程中环向变形沿岩样分布是不均匀的, 特别是岩样破坏后, 这种效应表现得更明显, 因此, 按式 (7) 计算时, 假设岩样的平均环向变形为所测岩样中部环向变形值的 1/2。

对于可释放应变能 U^e 来说, 假设岩样为各向同性体, 由式 (3) 可知, 也包括轴向和环向两部分, 据相关文献^[13]研究表明, 环向可释放弹性应变能相对轴向来说很小, 可忽略不计, 因此, 这里计算可释放弹性应变能仍按式 (6) 计算。

3 砂岩加载破坏的能耗特征

3.1 单轴压缩

单轴压缩试验共进行了 5 块岩样, 编号为 U1~U5, 采用位移控制加载, 以 0.06 mm/min 的变形速率, 在单轴压缩条件下使岩样破坏。

根据试验过程中采集得到的相关试验数据, 采用式 (5)、(6) 计算可得单轴压缩条件下砂岩岩样变形破坏过程中各能量特性变化曲线。其中, 试样 U2、U3 结果如图 2 所示。

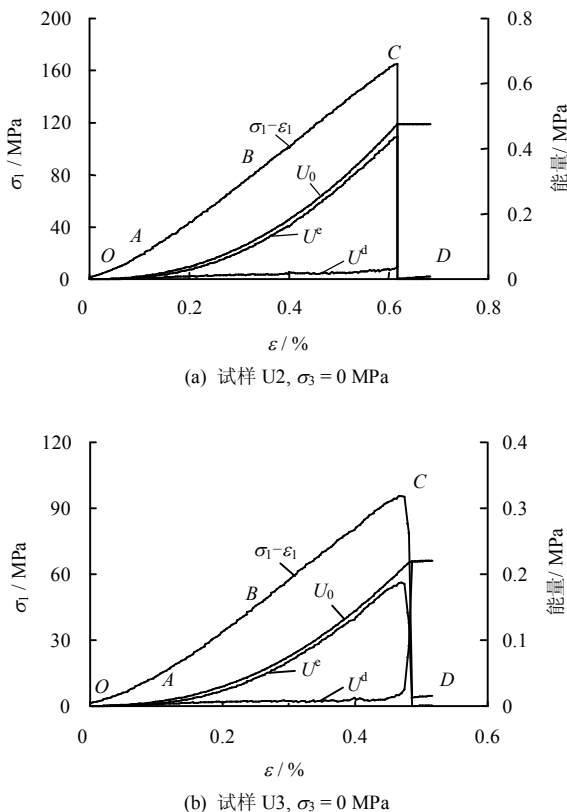


图 2 单轴压缩试验岩样破坏过程能量变化

Fig.2 Energy curves in uniaxial compression tests

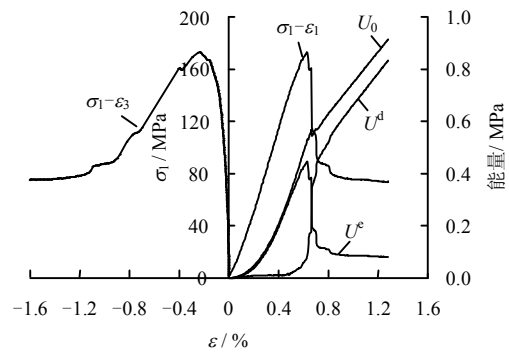
由图 2 可知, 砂岩单轴压缩时, 变形各阶段能量有不同的转化形式。初始压密阶段 (OA) 与弹性变形阶段 (AB), 岩样吸收的能量转化为可恢复的弹性应变能储存在岩石内部; 峰前非线性变形阶段 (BC), 岩样吸收的能量大部分还是以弹性应变能形式储存下了, 有部分能量耗散于岩石内部微裂纹的扩展、发育中, 此阶段储存在岩样中的弹性应变能值达到最大, 对于试样 U2、U3 分别为 0.435 9、0.187 6 MPa; 应力脆性跌落阶段 (CD), 岩石内部微裂纹的发展发生质变, 出现主控破裂面, 随即岩石发生整体破坏, 前期储存在岩样内的可释放弹性应变能瞬间释放, 转化为岩样的耗散能 (对于试样 U2、U3 此时弹性应变能分别为 0.000 01、0.000 36 MPa, 而岩样耗散能分别为 0.474 93、0.219 2 MPa, 占此刻岩样吸收总能量的百分比分别为 99.99%、99.81%), 亦即试验机对岩样做的塑性功, 是岩石产生声光热、塑性变形等能量来源。

3.2 三轴压缩

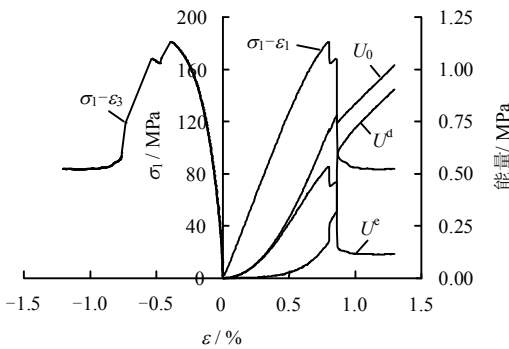
三轴压缩分别进行了围压为 10、20、30、40 MPa 下的试验, 共计 13 块岩样, 岩样编号为 T1~T13。加载模式同传统三轴压缩试验。采用式 (6)、(7) 计算得出三轴压缩条件下砂岩变形破坏过程中能量特性变化曲线。试样 T1、T6、T8、T11 变形破坏过程中各能量特性曲线见图 3。

从图 3 可以看出, 不同围压下砂岩三轴压缩试验岩样破坏过程中各能量特征曲线存在相似的特征。岩样储存的可恢复弹性应变能在峰前非线性屈服阶段前均是随着轴向应力的增大其值所占岩样吸收能量的比例在逐渐增大。在岩样进入峰前非线性屈服阶段后, 岩样吸收的一部分能量耗散于岩样产生塑性变形与内部微裂纹形成与扩展中, 此阶段, 可恢复的弹性应变能比例降低, 但其值还在增加, 耗散能所占比例与值均增加。在岩样强度达到峰值点前的某一瞬间, 储存的可恢复弹性应变能达到最大值。达到峰值点时, 由于围压的存在, 储存在岩样内的可恢复应变能并不像单轴压缩时瞬间几乎全部转化为耗散能, 而是逐渐耗散于岩样微宏观裂纹的扩展中, 直到岩样发生整体破坏。这说明三轴压缩时岩样的失稳破坏是能量逐渐释放的结果, 是能量耗散到一定程度下的突变。

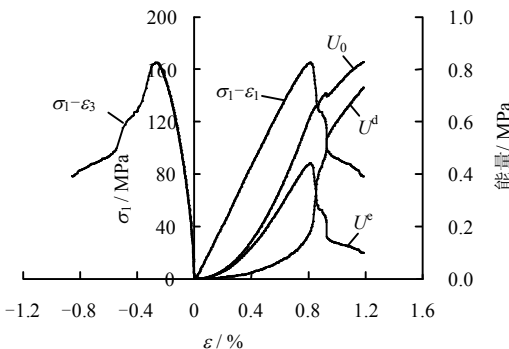
另外, 与单轴压缩不同, 三轴压缩时岩样吸收能量变化曲线在达到峰值点后存在降低的情况, 这主要是因为岩样在达到峰值点出现破裂, 造成环向应变陡增, 造成式 (7) 中第 2 项值陡增, 即岩样膨胀对液压油做的负功在试验机对岩样做功中占主导



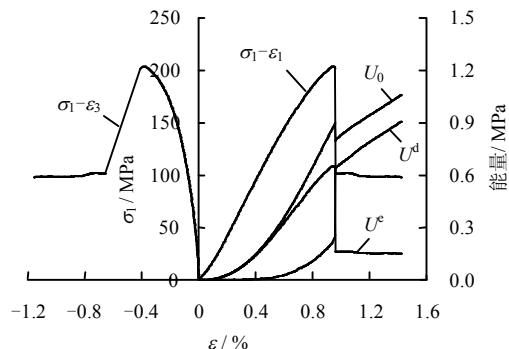
(a) 试样 T1, $\sigma_3 = 10$ MPa



(b) 试样 T6, $\sigma_3 = 20$ MPa



(c) 试样 T8, $\sigma_3 = 30$ MPa



(d) 试样 T11, $\sigma_3 = 40$ MPa

图 3 三轴压缩试验岩样破坏过程能量变化
Fig.3 Energy curves in triaxial compression tests

作用。另一方面，由于围压的限制作用，在残余变形阶段，岩样内依然储存有一定量的能量，但与耗散能相比已微不足道。此阶段，岩样吸收的能量大部分转化为耗散能，耗散于岩样剪切滑移中。

通过对单轴和各围压三轴压缩条件下试样破坏前岩样实际吸收能量值（亦即要造成岩样的破坏岩样需要吸收的能量值）和岩样破坏后耗散能数据进行统计计算（见表 1），由计算结果可知，与单轴压缩条件下岩样能耗特征相比，三轴压缩条件下两者均大于单轴时，且大致随着围压的增大而增大。围压 10、20、30、40 MPa 条件下，试样破坏前平均吸收能量值分别为单轴时的 1.82 倍、2.13 倍、2.94 倍、3.61 倍；岩样破坏后耗散能均值分别为单轴时的 1.44 倍、1.76 倍、2.36 倍、2.93 倍。主要原因是三轴压缩时，由于围压对岩样变形的约束作用，增大了微破裂面上颗粒的咬合力，若对岩样造成与单轴压缩时同样程度的损伤，岩样就需要吸收和耗散比单轴压缩更多的能量。

表 1 三轴压缩能量分析
Table 1 Energy analysis of triaxial compression tests

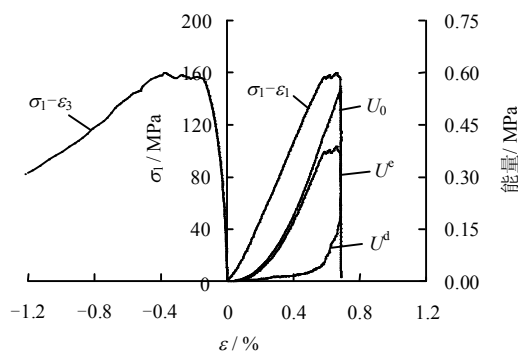
岩样 /MPa	σ_3 /MPa	U_0 /MPa	U^d /MPa	均值/MPa		方差	
				U_0	U^d	U_0	U^d
U1	0	0.222 00	0.220 40				
U2	0	0.474 94	0.474 93	0.305 5	0.304 8	0.014 3	0.014 40
U3	0	0.219 60	0.219 20				
T1	10	0.567 50	0.434 50				
T2	10	0.562 40	0.438 00	0.555 6	0.437 9	0.000 2	0.000 01
T3	10	0.536 80	0.441 10				
T4	20	0.510 20	0.430 60				
T5	20	0.642 60	0.510 30	0.649 6	0.537 2	0.013 6	0.009 90
T6	20	0.795 90	0.670 70				
T7	30	0.826 70	0.691 30				
T8	30	0.810 00	0.698 00	0.899 5	0.720 3	0.013 2	0.001 30
T9	30	1.061 90	0.771 50				
T11	40	1.058 10	0.906 60				
T12	40	1.276 60	0.946 20	1.101 3	0.892 1	0.016 6	0.002 60
T13	40	0.969 10	0.823 40				

4 砂岩卸载破坏的能耗特征

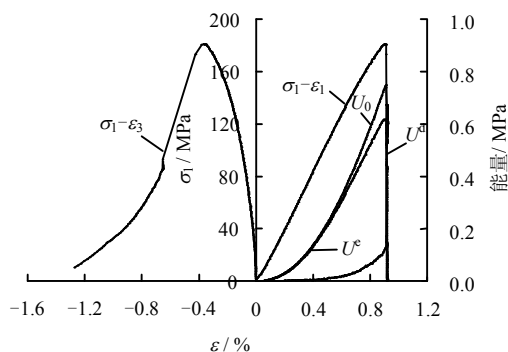
对于卸载条件下砂岩岩样破坏过程能耗特征的研究，采用三轴峰后卸载试验。试验应力路径为：先进行轴向接触，保持 1~2 MPa 的接触力，然后环向加载到设定荷载，后在环向应力（围压）保持不变的情况下，采用轴向位移控制模式，将轴向应力加载至略高于相应围压下三轴抗压强度；当达到预设强度值后，在维持轴向变形恒定的情况下缓慢卸除围压直至岩样破坏。

试验进行了围压为 30、40、20 MPa 共 3 组试验，每组 3 块，共 9 块，试样编号为 TT7~TT15。

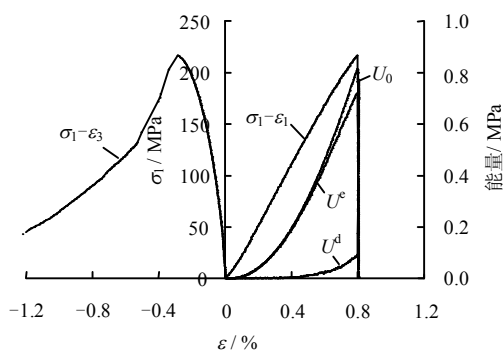
同样, 采用式 (6)、(7), 计算可得砂岩三轴峰后卸载试验条件下各能量特性变化曲线。其中, 岩样 TT13、TT7、TT10 能量特性曲线见图 4。



(a) 试样 TT13, $\sigma_3 = 20$ MPa



(b) 试样 TT7, $\sigma_3 = 30$ MPa



(c) 试样 TT10, $\sigma_3 = 40$ MPa

图 4 峰后卸围压试验岩样破坏过程能量变化

Fig.4 Energy curves in the tests of post-peak unloading confining pressure

从图 4 可以看出, 卸围压前各特征曲线变化趋势与三轴压缩时一致。从卸围压点开始, 与三轴压缩时存在明显的不同, 岩样实际吸收的能量随着围压的卸除逐渐降低, 主要原因是在保持轴向变形恒定的情况下卸除围压, 该过程试验机不再对岩样做功, 而岩样环向膨胀对液压油不断做负功, 即式 (7) 中第 2 项值在不断的增大, 因此, 岩样实际吸收的

能量在逐渐减低。另外, 储存在岩样内的弹性应变能随着围压的卸除, 逐渐耗散, 是造成岩样发生不可恢复塑性变形及剪切滑移和发生破坏时表现出的一切现象的原动力。

单轴压缩和不同围压三轴峰后卸围压条件下试样破坏前吸收的能量和破坏后耗散能量见表 2。从表中可知, 三轴峰后卸围压试验的能耗值介于单轴与三轴压缩试验之间, 且随初始围压值的增大而增大。围压 20、30、40 MPa 条件下, 试样破坏后平均吸收能量值分别为单轴时的 1.68 倍、2.53 倍、3.12 倍, 分别为同围压条件下三轴压缩的 79.2%、85.78%、86.56%; 岩样破坏后耗散能均值分别为单轴时的 1.46 倍、2.23 倍、2.78 倍, 分别为同围压条件下三轴压缩的 82.97%、94.25%、94.9%。

表 2 单位岩样破坏前后能量变化

Table 2 Energy analysis of rock specimen before and after its failure

岩样	σ_3 / MPa	U_0 / MPa	U^d / MPa	均值 / MPa		方差	
				U_0	U^d	U_0	U^d
U1	0	0.222 00	0.220 40				
U2	0	0.474 94	0.474 93	0.305 5	0.304 8	0.014 3	0.014 4
U3	0	0.219 60	0.219 20				
TT13	20	0.460 60	0.364 80				
TT14	20	0.506 20	0.468 60	0.514 5	0.445 7	0.002 2	0.003 4
TT15	20	0.576 80	0.503 70				
TT7	30	0.672 40	0.508 50				
TT8	30	0.871 90	0.824 60	0.771 6	0.678 9	0.006 6	0.016 9
TT9	30	0.770 60	0.703 50				
TT10	40	0.734 00	0.611 40				
TT11	40	1.156 80	1.038 60	0.953 3	0.846 6	0.029 9	0.031 3
TT12	40	0.969 20	0.889 90				

5 围压对能耗的影响

5.1 三轴压缩

表 1 给出了不同围压三轴压缩试验条件下岩样发生破坏前 (即发生破坏需要吸收的能量) 岩样实际吸收的能量与岩样破坏后耗散能值, 表中能量值均为单位岩样的能量值。

图 5、6 分别给出了岩样发生破坏需要吸收的能量值和发生整 3 体破坏后 (根据试验结果一般环向应变值达到峰值环向应变值 3 倍左右岩样即发生整体破坏) 耗散能与围压的关系图。

由图 5、6 可知, 三轴压缩试验条件下岩样破坏后吸收能量以及耗散能随着围压的增大, 两者值都增大, 且均与围压间存在有良好的线性关系, 可用 $Y = A\sigma_3 + B$ 表示, 式中, Y 代表岩样破坏后吸收能量 U_0 与耗散能 U^d , B 可近似认为是该岩石在单轴

压缩试验条件下岩样破坏后吸收能量与耗散能, A 表示三轴试验条件下围压对 U_0 和 U^d 的影响系数。

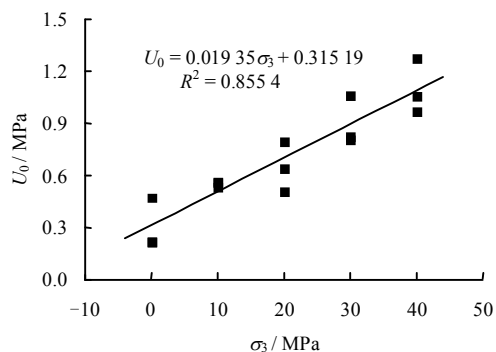


图 5 三轴压缩岩样破坏后吸收能量与围压的关系
Fig.5 Relationship between eventually absorbed energy and confining pressure in triaxial compression tests

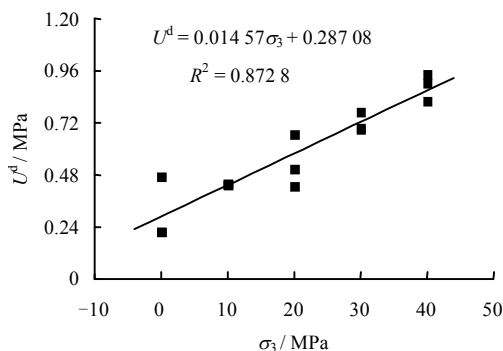


图 6 三轴压缩岩样破坏后耗散能与围压的关系
Fig.6 Relationship between dissipated energy and confining pressure in triaxial compression tests

5.2 峰后卸围压

不同初始围压三轴峰后卸围压试验条件下岩样破坏后岩样吸收能量与耗散能见表 2。三轴峰后卸围压试验条件下岩样破坏后吸收能量、耗散能与围压的关系图见图 7、8。

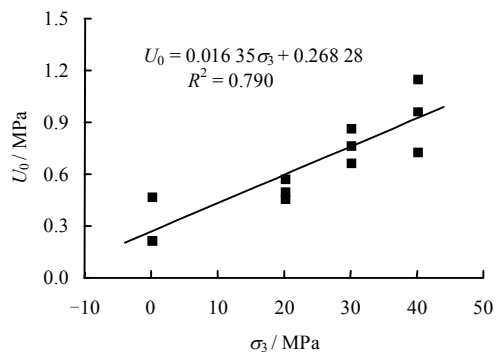


图 7 峰后卸围压岩样破坏后吸收能量与围压关系
Fig.7 Relationship between eventually absorbed energy and confining pressure in the tests of post-peak unloading confining pressure

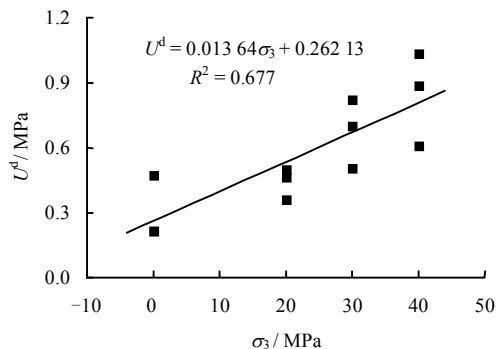


图 8 峰后卸围压岩样破坏后耗散能与围压关系
Fig.8 Relationship between dissipated energy and confining pressure in the tests of post-peak unloading confining pressure

由图 7、8 可知, 三轴峰后卸围压试验条件下岩样破坏后吸收能量以及耗散能也是随着围压的增大, 两者值都增大, 且也均与围压间存在有良好的线性关系, 同样可用 $Y = A\sigma_3 + B$ 表示, 式中各符号意义类似于三轴压缩试验条件下。

6 结 论

(1) 砂岩加、卸载试验条件下各能量特征曲线表明, 岩石的破坏过程是一个能量耗散与释放的过程, 岩石发生破坏前吸收的能量主要以可恢复的弹性应变能储存在岩石内部, 少量的能量耗散于岩石内部微裂纹的形成与扩展中; 岩石发生破坏时, 储存的可恢复弹性应变能在瞬间转化为耗散能, 成为岩样破坏时所表现出的一切现象的源动力。

(2) 由于围压对岩石变形的限制作用, 单轴压缩各能量指标值均小于三轴压缩和三轴峰后卸围压; 三轴峰后卸围压各能量指标值介于单轴压缩与同围压条件下的三轴压缩之间。

(3) 三轴压缩和三轴峰后卸围压试验, 各能量指标均存在明显的围压效应, 二者均是随着围压的增大而增大, 且具有良好的线性关系, 可以采用 $Y = A\sigma_3 + B$ 表示; 三轴压缩试验各能量指标与围压间较三轴峰后卸围压时具有更准确的线性关系。

(4) 单轴试验砂岩表现为突发性的整体失稳破坏, 初期储存在岩石内部的弹性应变能瞬间几乎全部转化为耗散能, 耗散于岩石破坏时产生的一切现象中; 三轴压缩砂岩的破坏表现为一个从局部破坏到整体失稳的过程, 耗散能占岩样吸收能量的比例越来越大, 可释放弹性应变能越来越少, 表现为明显的能量耗散过程, 当能量耗散发展到一定程度转化为能量的突然释放, 随即岩石整体破坏。

参 考 文 献

- [1] 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, 23(21): 3565—3570.
XIE He-ping, PENG Rui-dong, JU Yang. Energy dissipation of rock deformation and fracture[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(21): 3565—3570.
- [2] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨, 等. 基于断裂力学与损伤力学的岩石强度理论研究进展[J]. 自然科学进展, 2004, 14(10): 1086—1092.
- [3] 尤明庆, 华安增. 岩石试样破坏过程的能量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 778—781.
YOU Ming-qing, HUA An-zeng. Energy analysis of failure process of rock specimens[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(6): 778—781.
- [4] 喻勇, 尹健民. 三峡花岗岩在不同加载方式下的能耗特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 205—208.
YU Yong, YIN Jian-min. Energy dissipation properties of the Three Gorges granite under different loading modes[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(2): 205—208.
- [5] 金丰年, 蒋美蓉, 高小玲. 基于能量耗散定义损伤变量的方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 1976—1980.
JIN Feng-nian, JIANG Mei-rong, GAO Xiao-ling. Defining damage variable based on energy dissipation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(12): 1976—1980.
- [6] 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.
XIE He-ping, JU Yang, LI Li-yun. 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.
- [7] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨, 等. 岩石破坏的能量分析初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2604—2608.
XIE He-ping, PENG Rui-dong, JU Yang, et al. On energy analysis of rock failure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(15): 2604—2608.
- [8] 彭瑞东, 谢和平, 鞠杨, 等. 试验机弹性储能能对岩石力学性能测试的影响[J]. 力学与实践, 2005, 27(3): 51—55.
PENG Rui-dong, XIE He-ping, JU Yang, et al. Effect of elastic accumulation energy of testing machine on mechanical measurement of rocks[J]. **Mechanics in Engineering**, 2005, 27(3): 51—55.
- [9] 杨圣奇, 徐卫亚, 苏承东. 岩样单轴压缩变形破坏与能量特征研究[J]. 固体力学学报, 2006, 27(2): 213—216.
YANG Sheng-qi, XU Wei-ya, SU Cheng-dong. Study of deformation failure and energy properties of rock specimen in uniaxial compression[J]. **Acta Mechanica Sinica**, 2006, 27(2): 213—216.
- [10] 杨圣奇, 徐卫亚, 苏承东. 大理岩三轴压缩变形破坏与能量特征研究[J]. 工程力学, 2007, 24(1): 136—141.
YANG Sheng-qi, XU Wei-ya, SU Cheng-dong. Study of deformation failure and energy properties of marble specimen under triaxial compression[J]. **Engineering Mechanics**, 2007, 24(1): 136—141.
- [11] 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.
- [12] SOLECKI R, CONANT R J. Advanced mechanics of materials[M]. London: Oxford University Press, 2003.
- [13] 韩立军. 岩石破坏后的结构效应及锚注加固特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2004.