

# Energy Analysis of Red Sandstone Loading and Unloading at Different Stress Levels

Ruichuan Tian<sup>1</sup> Renfeng Wan<sup>1</sup> Xiaolong Wang<sup>1</sup> Fei Gan<sup>2\*</sup>

1. Chongqing Shutong Geotechnical Engineering Co., Ltd., Chongqing, 401120, China

2. College of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou, 550025, China

## Abstract

In order to explore the energy evolution of red sandstone under uniaxial compression, a stress-strain controlled triaxial shear tester was used to carry out uniaxial loading and unloading tests. The stress-strain curves of uniaxial experiments with different loading strengths (yield strengths of 10, 30, 50, 70) were analyzed from the energy point of view. The energy variation of red sandstone under different loading intensities was analyzed by the input energy density, elastic energy density and dissipated energy density of uniaxial compression. The results show that with the increase of loading intensity, the input energy density of red sandstone increases nonlinearly, and the proportion of dissipated energy and elastic energy changes.

## Keywords

red sandstone; uniaxial compression; energy evolution; loading intensity

# 不同应力水平下红砂岩加卸载能量分析

田瑞川<sup>1</sup> 万仁锋<sup>1</sup> 王小龙<sup>1</sup> 干飞<sup>2\*</sup>

1. 重庆蜀通岩土工程有限公司, 中国·重庆 401120

2. 贵州大学土木工程学院, 中国·贵州 贵阳 550025

## 摘要

为了探究单轴压缩下红砂岩的能量演化规律, 采用应力-应变控制式三轴剪切试验机进行单轴加卸载试验。从能量的角度对不同加载强度(10、30、50、70的屈服强度)单轴实验的应力-应变曲线进行了分析。通过单轴压缩的输入能密度、弹性能密度、耗散能密度分析了不同加载强度下红砂岩的能量变化规律。研究表明: 随着加载强度增加, 红砂岩的输入能密度呈非线性增加, 耗散能与弹性能的占比发生变化, 加载强度较低时, 耗散能占比较大, 当加载达到一定强度后, 耗散能的占比随着强度增加而增加。

## 关键词

红砂岩; 单轴压缩; 能量演化; 加载强度

## 1 引言

在隧道开挖过程中, 必然会对围岩造成扰动, 造成围岩变形。岩石变形过程存在能量转化, 从热力学角度看, 岩石变形与破坏是能量扰动下的失稳<sup>[1]</sup>, 因此研究岩石变形过程中的能量变化是非常有必要的。在隧道施工中, 岩石处于复杂应力状态, 存在加载与卸荷过程。因此研究不同应力阶段下岩石的能量演化规律对岩体受荷变形的能量演化机制有重要意义。

【基金项目】国家自然科学基金(项目编号: 52164001)。

【作者简介】田瑞川(1986-), 男, 中国河南漯河人, 硕士, 副高级工程师, 从事岩土工程研究。

【通讯作者】干飞(1987-), 男, 中国贵州贵阳人, 博士, 副教授, 从事岩土力学方面的教学与研究。

众多学者对岩石的能量演化阶段进行了广泛深入研究。谢和平<sup>[2,3]</sup>等学者基于能量耗散原理研究了岩石的整体准则; 马秋峰<sup>[4]</sup>等基于能量耗散原理建立了能够更好表征岩石强度的损伤本构模型; 刘之喜<sup>[5]</sup>等基于能量守恒定律, 通过单轴压缩实验提出了岩石单轴压缩实验的能量演化规律; 张志镇<sup>[6]</sup>等对红砂岩通过单轴循环加卸载实验定义了能量密度和储能极限; 徐颖<sup>[7]</sup>等对泥岩通过逐渐提高荷载的单轴循环加卸载实验定义了损伤变量。从能量转换的角度来看岩石的破坏, 可以加深对岩石在不同应力条件下可能发生的破裂和断裂的认识<sup>[8]</sup>。

岩石的每个应力-应变阶段都对应一个特定的能量状态。能量驱动的状态不稳定是导致岩石的破坏的最终原因, 因此研究岩石变形过程中的能量变化有助于提高对岩石损伤规律的认识。

## 2 实验方案

### 2.1 试件准备及试验设备

为了保证试件具有相似的内部结构与矿物成分，降低试件离散性，论文实验采用的红砂岩均来自同一产地山东省沂南县。试件尺寸为  $50\text{mm} \times 100\text{mm}$  的圆柱形试件，断面平整度误差为  $\pm 0.1\text{mm}$ ，垂直度误差为  $\pm 0.25^\circ$ 。在进行单轴实验之前，使用 WSD-4 型数字声波仪测试试件波速，选取波速相近试样以降低离散性。论文单轴实验在 DSZ-1000 应力 - 应变控制式三轴剪切试验机上进行，该三轴力学试验机最大轴向力和围压分别为  $1000\text{kN}$  和  $60\text{MPa}$ ，最大加载行程为  $50\text{mm}$ ；主油缸位移加载速率  $0.1\sim 100\text{mm/min}$ ，加载速率  $0.1\sim 60\text{MPa/min}$ 。

### 2.2 单轴抗压实验

为分析不同应力状态下红砂岩的能量变化规律，开展以下实验：

①通过三轴剪切试验仪的单轴抗压实验测试红砂岩的屈服强度；

②依次加载 10、30、50、70 的屈服强度的应力后卸载，以模拟红砂岩的不同应力状态。加载速率设定为  $2\text{kN/s}$  加载至预设荷载，卸载速率同样设定为  $2\text{kN/s}$ 。

## 3 实验结果

红砂岩的单轴抗压实验如图 1 所示。红砂岩在  $107\text{MPa}$  左右出现拐点，说明此时红砂岩达到屈服。从图 1 中可知，在单轴加载过程中红砂岩存在 3 个阶段，即压密阶段、弹性阶段以及塑性阶段。a 为压密阶段与弹性阶段的分界点，b 为弹性阶段和塑性阶段的分界点。

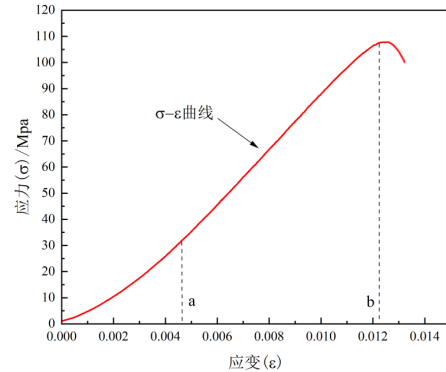


图 1 单轴压缩应力 - 应变曲线图

不同应力状态下的应力 - 应变曲线如图 2 所示，应力 - 应变曲线反映了红砂岩在不同应力状态下的不同受力阶段的变形特征。在加载和卸载过程中，应力 - 应变曲线并不重合。说明在加载过程中，红砂岩的内部结构已经改变，红砂岩的弹性模量也随之发生改变。

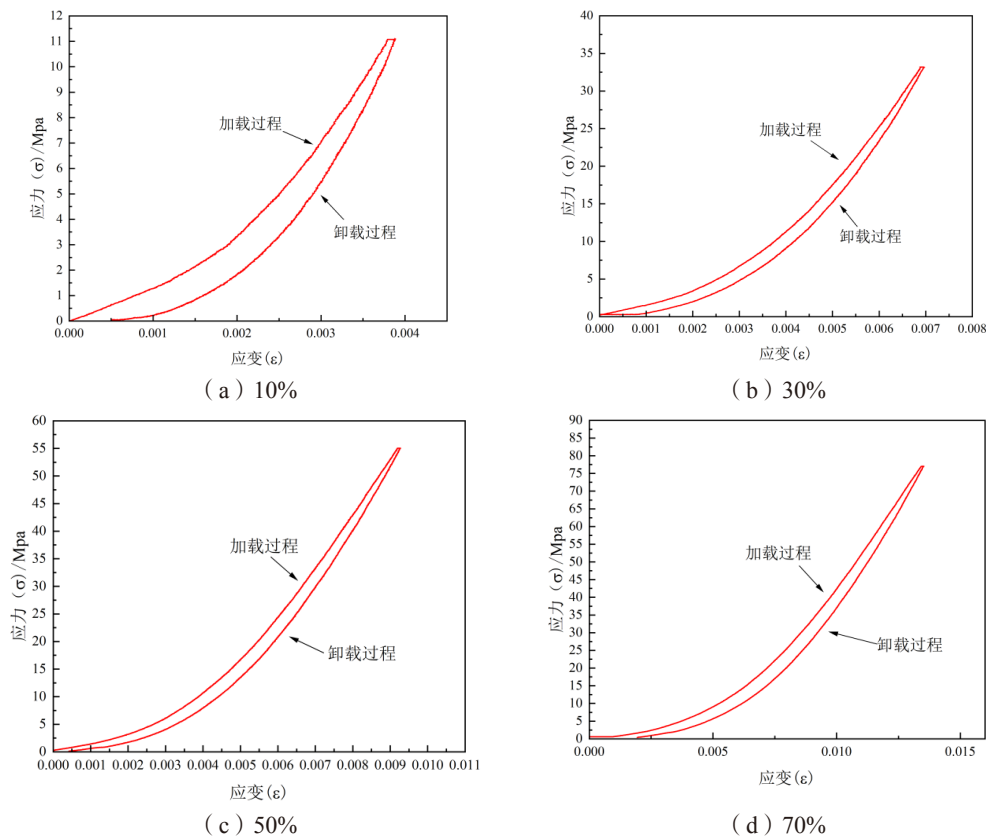


图 2 红砂岩不同应力状态下的应力 - 应变图

## 4 能量分析

能量守恒定律指出, 能量既不能被创造, 也不能被破坏; 它可以从一种形式转化为另一种形式, 或者从一个物体转移到另一个物体。岩石破坏是一种由能量驱动的岩石不稳定现象<sup>[9]</sup>。假设在整个压缩过程中不存在热损失, 基于能量守恒定律:

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

其中,  $u$  为实验过程中的输入能密度;  $u^d$  为耗散能密度;  $u^e$  为可逆弹性应变能密度。在实验过程中, 输入能为仪器外力对红砂岩做的功, 输入能一部分作为可逆的弹性能储存在红砂岩中, 另外一部分转化为不可逆的耗散能。

在试验过程中, 只有试验机对试件做功, 试件的输入能密度  $u$  按下式计算<sup>[10]</sup>:

$$u = \int \sigma d\varepsilon = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\sigma_i + \sigma_{i-1}) (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}) \quad (2)$$

其中,  $\sigma_i$  为试验机采集的第  $i$  个应力数据;  $\varepsilon_i$  为当应力为  $\sigma_i$  时对应的应变;  $n$  为试验机的数据采集个数。

试件的弹性能通过卸载过程释放, 所以红砂岩释放的弹性能密度可通过卸载过程中应力—应变曲线计算得到:

$$u^e = \int \sigma^e d\varepsilon^e = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\sigma_i^e + \sigma_{i-1}^e) (\varepsilon_i^e - \varepsilon_{i-1}^e) \quad (3)$$

其中, 为卸载过程中试验机采集的第  $i$  个应力数据, 为卸载过程中当应力为  $\sigma_i$  时对应的应变。

从公式看出输入能密度对应应力—应变曲线加载阶段的曲线的积分, 弹性能密度对应卸载阶段的曲线的积分, 对应的耗散能密度为两个阶段曲线对应面积之差。从图 2 可看出耗散能的增量随着应变的增加而减少。在应力刚开始增加的压密阶段, 耗散能占比较大, 这可能是因为在压密阶段, 岩石内部颗粒之间的裂缝的闭合以及岩石颗粒之间的摩擦滑移等压密行为消耗了较多能量<sup>[11]</sup>。虽然压密阶段处于弹性阶段中, 但是应力导致了岩样产生了一定的塑性变形, 产生了一定的能量耗散。

$$u^d = u - u^e \quad (4)$$

不同应力状态下红砂岩的输入能密度、弹性能密度和耗散能密度的计算结果如表 1 所示。

表 1 能量计算表

应力状态	能量 (mJ/mm <sup>3</sup> )			占比
	$u$	$u^e$	$u^d$	
10%	0.01494	0.01155	0.00339	1 : 0.77 : 0.23
30%	0.07783	0.06915	0.00868	1 : 0.89 : 0.11
50%	0.17942	0.15388	0.02554	1 : 0.86 : 0.14
70%	0.34325	0.28379	0.05946	1 : 0.83 : 0.17

不同应力状态下, 耗散能与弹性能占输入能的比例有所差异。在应力加载水平为 10 时, 弹性能占比最低, 损耗能占比最高。这是由于在施加 10 的应力时, 处于压密阶段,

裂缝的闭合以及红砂岩颗粒之间的摩擦消耗了能量, 导致了损耗能占比增加。在应力水平在 30% 以后, 弹性能占比逐渐下降, 损耗能占比逐渐增加。造成这种现象的原因是, 随着荷载的增加, 试件的裂缝被压闭合之后, 随着能量不断在红砂岩的内部薄弱区积累, 能量聚集到达极限后会产生新裂缝。随着荷载的增加, 裂缝逐渐产生和劣化出现塑性变形并释放能量, 与此同时耗散能占比不断增加。

## 5 结论

论文通过设置不同应力状态下红砂岩的单轴压缩实验, 研究其在加载过程中的能量变化, 具有一定的工程意义, 获得以下结论:

①红砂岩的输入能密度与加载强度之间存在明显的正相关关系。随着加载强度的增加, 红砂岩的输入能密度呈几何式增加。

②在加载强度较低时, 此时岩石颗粒间摩擦和孔隙的闭合消耗了能量, 所以耗散能反而占比较大。在加载强度提高到屈服强度 30% 后, 随着最终加载强度的增加, 红砂岩的最终耗散能随之增加。

③在加载的过程中, 弹性能和损耗能都随着应变的增加而增加, 呈非线性正相关关系, 但两者的占比会随着加载强度的增加而发生改变

## 参考文献

- [1] 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): 2603-2608.
- [2] 孙友杰, 戚承志, 朱华挺, 等. 岩石动态断裂过程的能量分析[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(1): 43-49.
- [3] 谢和平, 鞠杨, 黎立云, 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.
- [4] 马秋峰, 刘志河, 秦跃平, 等. 基于能量耗散理论的岩石塑性-损伤本构模型[J]. 岩土力学, 2021, 42(5): 1210-1220.
- [5] 刘之喜, 王伟, 罗吉安, 等. 岩石单轴压缩试验中能量演化分析方法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(9): 3131-3139.
- [6] 张志镇, 高峰. 单轴压缩下红砂岩能量演化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 953-962.
- [7] 徐颖, 李成杰, 郑强强, 等. 循环加卸载下泥岩能量演化与损伤特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 2084-2091.
- [8] 许江, 严召松, 彭守建, 等. 岩石渐进性破坏过程中变形和能量分析[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(8): 47-53.
- [9] Taymaz I. An experimental study of energy balance in low heat rejection diesel engine[J]. Energy, 2006(2/3): 31.
- [10] CHEN Z Q, HE C, MA G Y, et al. Energy damage evolution mechanism of rock and its application to brittleness evaluation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019(52): 1265-1274.
- [11] 刘之喜, 孟祥瑞, 赵光明, 等. 真三轴压缩下砂岩的能量和损伤分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(2): 327-341.