

Analysis of Energy Characteristics of White Sandstone at Different Stress Levels Based on GRA Method

Xiaolong Wang¹ Renfeng Wan¹ Ruichuan Tian¹ Fei Gan^{2*}

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

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

Abstract

The uniaxial compressive strength of sandstone is a crucial parameter that characterizes its mechanical properties. To investigate the energy characteristics and mechanical property variations of white sandstone under different stress levels, a series of tests were conducted using the GRA method. The test samples were incrementally loaded to 10%, 30%, 50%, 70%, and 100% of the uniaxial failure strength (i.e., stress levels $i=0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1$). Subsequently, the static elastic modulus and energy changes in white sandstone specimens were analyzed. The results indicate that as the stress level increases, normal fractured specimens exhibit minimal creep characteristics, maximum elastic modulus, increased total energy required for uniaxial compression, gradual decrease in sandstone absorption ratio, and irregular increase in dissipation energy. Among various factors, the total energy of uniaxial compression shows the strongest correlation with elastic strain energy and the weakest correlation with elastic modulus.

Keywords

stress-strain; elastic modulus; elastic strain energy; dissipated energy; grey correlation

基于 GRA 法下不同应力水平白砂岩能量特征分析

王小龙¹ 万仁锋¹ 田瑞川¹ 干飞^{2*}

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

砂岩单轴抗压强度是其重要的特征参数之一。为了获取不同应力水平下白砂岩的能量特征及力学性质变化, 基于GRA法, 依次测试试样加载到单轴破坏强度的10%、30%、50%、70%、100% (即应力水平 $i=0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1$), 对白砂岩试件进行静弹性模量和能量变化等方面的分析。研究表明, 随着应力水平的增加, 正常压裂的试件蠕变特性最小、弹性模量最大, 单轴压缩所需总能量增加, 砂岩吸收比逐渐减小, 耗散能呈现不规则增大。在众多因素中, 试件单轴压缩总能量与弹性应变能相关性最大, 与弹性模量相关性最小。

关键词

应力应变; 弹性模量; 弹性应变能; 耗散能; 灰色关联

1 引言

岩体抗压强度评估和破坏规律涉及工程安全领域问题, 研究其破坏过程及破坏模式有重要的工程意义^[1]。岩石破坏并不是在一瞬间形成, 而是损伤累积的结果, 其初始内部微裂纹及孔隙在外界环境作用下扩展、贯通, 最终导致其丧失承载能力^[2]。

岩石能量研究主要通过岩石单轴破坏试验和三轴压缩试验推导。李树忱、李术才^[3]等研究了耗散弹性损伤的设

计模型及其在工程中的应用, 建立了弹性损伤的能量模型; 姚吉康^[4]等对岩石进行了单轴和常规三轴压缩试验, 发现岩石破坏与围压时能量吸收、能量耗散和能量存储极限之间存在良好的线性关系; 谢凯楠、姜德义^[5]等通过拉伸作用下岩石中能量分布的分析为断裂机理提供了理论基础。以上岩石能量的研究主要集中于压剪试验过程中弹性应变能、塑性应变能、热能以及滞回环方面^[6-8], 对于单轴加载下白砂岩内部能量的演化规律还有待补充。白砂岩在压缩过程中难以获取实时能量, 一些学者借助应力应变曲线中压密、弹性阶段来近似代替白砂岩破坏过程, 这显然不够准确, 因此很有必要研究白砂岩内部能量变化趋势^[9-11]。

论文通过控制从低到高的应力水平, 研究了砂岩破坏过程中的能量演变规律^[9,12], 通过白砂岩单轴加载卸载过程反映了层状岩石机械损伤过程中的能量演化规律和力学性能

【作者简介】王小龙 (1988-), 男, 中国河南许昌人, 硕士, 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, 从事岩土力学教学与研究。

变化，为后续的研究和工程提供参考。

2 样品制备及加载方式

根据国际岩土学会规程将白砂岩试样加工成高 100mm、直径 50mm 的圆柱体。论文运用三轴仪来做单轴加载卸载试验，采用位移控制加载，加载速率为 0.05mm/min，依次将试样加载到单轴破坏强度的 10%、30%、50%、70%、100%。

3 试验结果分析

3.1 能量计算

假定岩石处于封闭系统中，与外界环境无热量交换。当受到试验机加载产生变形破坏时，输入能 U 等于外力对岩石所做的总功，即等于岩石弹性能 U_e 与耗散能 U_d 之和^[8,9,13]，可得：

$$U=U_e+U_d \quad (1)$$

图 1 中 σ_1 为轴向应力， ε_1 为轴向应变。根据广义胡克定律得到：

$$U_e = \frac{1}{2E_i} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] \quad (2)$$

式中， ε_1 、 ε_2 、 ε_3 分别为最大主应力 σ_1 、中间主应力 σ_2 、最小主应力 σ_3 对应的应变； E_i 为岩石弹性模量，可取弹性段峰值强度时轴向应变的 0.5%~2% 的弹性模量； ν_i 为泊松比。单轴压缩加载时，即 $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ ，式 (2) 可简化为：

$$U_e = \frac{\sigma_1^2}{2E_i} \quad (3)$$

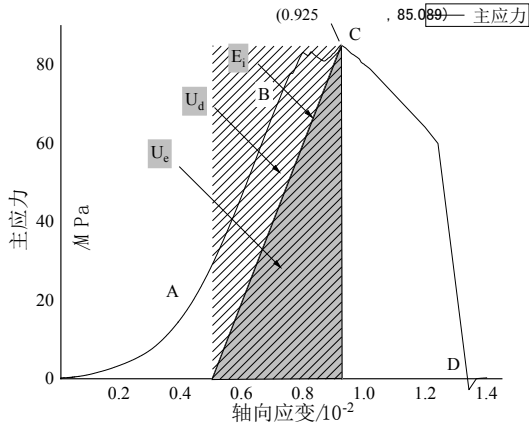


图 1 单轴压缩过程能量变化示意图

岩石单轴压缩过程中，轴向应力 σ_1 对围岩做正功的应变能可根据应力—应变曲线积分得到：

$$U = \int_0^{\varepsilon_{max}} \sigma_1 d\varepsilon \quad (4)$$

根据式 (1) 与式 (4) 得到耗散能 U_d ：

$$U_d = U - U_e \quad (5)$$

3.2 单轴压缩破坏试验结果

由图 2 可知，应力水平越大，轴向变形越大，弹性模量呈现不规则变化，几个应力水平中，当试件正常压裂时弹

性模量最大，达到了 19.83GPa，应力水平为 0.1 时弹性模量最小，有 5.42GPa，弹性模量跨度较大，说明砂岩样品差异性较大，均质性不强，脆性很高；从图 2 我们也可以知道，随着压应力的增加，轴向应变逐渐增大，其中应力水平为 0.7 时应变最大。

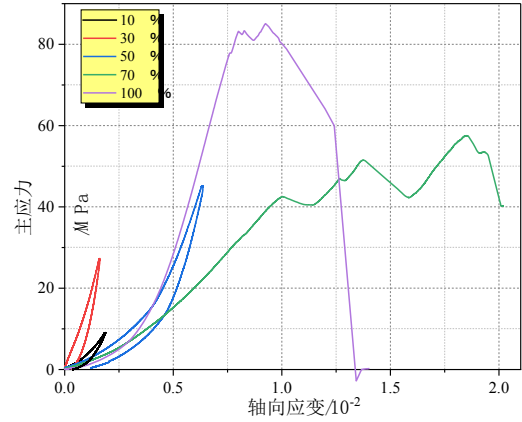


图 2 不同应力水平下白砂岩应力应变

根据式 (1)~式 (4) 对试验数据进行处理，得到试样单轴压缩过程的能量特征如表 1 所示。

表 1 不同应力水平下白砂岩能量变化

应力水平	峰值能量 (MJ)	总能量 U (MJ)	U_e (MJ/m ³)	U_d (MJ/m ³)
0.1	0.836	1.156	0.758	0.119
0.3	2.643	3.247	2.124	0.525
0.5	9.085	15.723	8.346	0.739
0.7	57.238	65.791	30.945	26.293
1	31.179	57.332	18.258	12.921

从表 1 可知，除应力水平为 0.7 的试件由于韧性较大需要较大能量外，不同应力水平下的砂岩试件峰值前 U_e 及 U_d 随应力水平增加而增大， U 也随之增大。应力水平每增加 0.2，相应的 U_e 和 U_d 呈几何倍增加，其中应力水平为 0.1、0.3、0.5、0.7、1 时， U_d/U_e 整体呈现逐渐上升的趋势， U_e 与 U 的比值为吸收比整体呈现逐渐下降的趋势； U_d/U 在应力水平为 0.7 时最大。结果表明白砂岩在未达到其抗压峰值强度前，只有少部分能量用于试样内部微裂隙闭合摩擦，微裂纹扩展以及破裂面相互贯通等，主要是以吸收弹性能为主，耗散比逐渐增大，且在应力水平为 0.7 时最大，这与张志镇^[13]等人得到在岩石强度 80% 左右处 U_e 和 U_d 比值达到最大的结论相符。

下面将从试样 (应力水平为 1) 受压的四个阶段来具体砂岩破坏时能量变化规律：

①压密阶段 (0A)：轴向应力占抗压峰值强度的 30% 以内，此阶段所产生的能量较少，各能量间的转化效率偏低， U_e 和 U_d 差距不大。

②弹性阶段 (AB)：即试样变形完全是可恢复的，

图1中近似直线段,该阶段轴向应力占峰值强度的30%~80%。此阶段试样从外界吸收能量并以 U_e 形式储存于试样内。

③塑性阶段(BC):轴向应力超过峰值强度的80%。此时试样吸收的 U_e 基本转化为微裂纹扩展的 U_d , U_e 和 U_d 随着载荷的增加而增加。

④破化阶段(CD):即应力峰值后加速破坏阶段。由于微裂纹的加速扩张和贯通,试样的 U_e 大部分转化为 U_d ,其余以摩擦能和动能的形式流失。

3.3 各因素之间的灰色关联度分析

“灰色因子分析”是一种统计方法,用于分析系统发展的质量和次要因素,它是系统动态发展的一种定量比较分析方法。为进一步研究试件压缩时的能量变化,采用灰色关联度法(GRA)来探究试件的 U 与 U_e 、 U_d 、弹性模量以及应力水平之间的关系,根据已有公式来计算灰色关联度 R_i ^[14,15],如表2所示。

表2 总能量与各因素之间的灰色关联度

总能量 (MJ)	应力 水平	弹性模量 (GPa)	U_e (MJ/m ³)	U_d (MJ/m ³)
关联度 R_i	0.763	0.634	0.912	0.850

从表2可知,在以上几个因素中,单轴压缩砂岩试样时,弹性应变能与总能量的关联度最大,其次是耗散能,弹性模量与单轴总能量关联度最小,但大于0.6。各因素之间的因子权重分别为0.241、0.201、0.289、0.269,这说明总能量与各因素之间均有较强的联系关系。

4 结论

在不同应力水平下对白砂岩进行单轴加卸载试验,分析了其弹性模量和能量变化,得出以下结论:

①不同应力水平下,白砂岩试件弹性模量大小变化不规律,在正常压裂时弹性模量最大;随着应力水平增大,轴向应变逐渐增大,正常压裂的试件蠕变特性最小,应力水平为0.3时试件蠕变特性最大。

②不同应力水平下,单轴压缩时不同阶段能量变化和转化特征各异。抗压未达到峰值强度会出现这种现象:砂岩试件的能量吸收比逐渐降低,耗散比逐渐增加,弹性能与耗散能比值逐渐增加,说明试件内部主要以吸收弹性能为主。

③在几种因素中,单轴加卸载时,白砂岩总能量主要

与弹性应变能有关, R_i 为0.912,因子权重为0.289。其中弹性模量与白砂岩总能量关联最小,因子权重仅有0.201。

参考文献

- [1] 程虹铭,杨小彬,杨东辉,等.单轴压缩下裂隙砂岩的能量转化特征及倾角效应[J].煤炭工程,2023,55(10):143-148.
- [2] 管华栋,潘熙,黄雅兰.基于超声波测试的片岩单轴抗压强度预测模型[J].声学技术,2023,42(4):489-494.
- [3] 李树忱,李木才,朱维申,等.能量耗散弹性损伤本构方程及其在围岩稳定分析中的应用[J].岩石力学与工程学报,2005(15):2646-2653.
- [4] 姚吉康,王志亮.华山花岗岩力学特性及能量演化规律研究[J].水利水电工程学报,2018(3):78-85.
- [5] 谢凯楠,姜德义,蒋翔,等.页岩巴西劈裂试验的能量分布与临界特征分析[J].煤炭学报,2017,42(3):613-620.
- [6] 刘腾龙,毕靖,王超林,等.三轴循环加卸载条件下砂岩能量和孔隙演化[J/OL].水利水电技术(中英文),1-14[2024-03-11].http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1746.TV.20230710.1759.004.html.
- [7] 李利峰,张晓虎,邓慧琳,等.不同加载速率下砂岩的单轴压缩试验力学特性及能量演化规律[J].采矿与岩层控制工程学报,2020,2(4):83-89.
- [8] 徐鹏飞,邓华锋,张恒宾,等.不同应力水平下砂岩时滞性单轴压缩破坏特性研究[J].岩土力学,2021,42(11):3041-3050+3078.
- [9] 谢成龙,吴秋红,翁磊,等.不同应力条件下含充填物砂岩的能量演化规律[J].矿业工程研究,2022,37(4):8-15.
- [10] 寇子龙,闻磊,刘彦峰,等.单轴压缩过程砂岩破坏特性研究[J].有色金属(矿山部分),2022,74(1):89-96.
- [11] 蔡国军,卫俊仁,许强,等.单轴恒载作用下砂岩蠕变破坏预测试验研究[J/OL].成都理工大学学报(自然科学版),1-13[2024-03-11].http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1634.N.20230922.1459.010.html.
- [12] 程锦山,管华栋,王观石,等.单轴压缩下不同饱和度红砂岩横波特征研究[J/OL].有色金属科学与工程,1-10[2024-03-11].http://kns.cnki.net/kcms/detail/36.1311.TF.20230414.1440.002.html.
- [13] 张志镇,高峰.单轴压缩下岩石能量演化的非线性特性研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(6):1198-1207.
- [14] 罗毅超,刘德儿,马大喜.基于GRA-BA-RBFNN模型的露天矿台阶爆破岩石位移预测[J].矿业研究与开发,2019,39(11):47-52.
- [15] 曾鹏,赵奎,邓晓平,等.岩石化学元素对其抗压强度影响灰色关联度分析[J].有色金属科学与工程,2013,4(1):79-82+100.