

中文引用格式:张遵国,袁新立,陈毅,等. 不同应力循环路径下砂岩的能量演化特征[J]. 中国安全科学学报,2024,34(2):144-152.

英文引用格式:ZHANG Zunguo, YUAN Xinli, CHEN Yi, et al. Energy evolution characteristics of sandstone under different stress cycle paths [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(2): 144-152.

不同应力循环路径下砂岩的能量演化特征*

张遵国^{1,2}副教授,袁新立¹,陈毅¹,唐朝¹,马凯欣¹,陈永强¹

(1 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院,辽宁 葫芦岛 125105;

2 辽宁工程技术大学 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室,辽宁 葫芦岛 125105)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.02.0797

基金项目:辽宁省教育厅高等学校基本科研项目资助(LJKZ0345)。

【摘要】 为从能量角度探究砂岩在循环应力作用下的力学响应,开展10 MPa初始峰值应力逐级递增、80 MPa初始峰值应力逐级递增及恒定100 MPa峰值应力3种循环路径下的加卸载试验,结合应力应变曲线和能量计算结果,分析砂岩各项能量随循环次数和峰值应力的演化特征。结果表明:随循环次数和峰值应力增加,初始峰值应力80和100 MPa时滞回环仅在第2次循环时向应变增大方向明显迁移。不同应力循环路径下单位体积耗散能表现出不同的阶段性演化特征,分级循环加卸载时,砂岩各项能量值随峰值应力增加由二次函数向线性函数增长特征转变,而峰值应力恒定为100 MPa等幅度循环加卸载时,随循环次数增加,砂岩单位体积能和单位体积弹性能呈开口向下的二次函数趋势下降,单位体积耗散能呈指数趋势下降。不同应力区间内循环路径对砂岩的能量影响有较大差异,分级循环加卸载与单次加卸载相比,峰值应力为80 MPa时各项能量相差均小于10%,峰值应力为100 MPa时各项能量相差达到22.74%~62.58%。

【关键词】 循环路径; 砂岩; 峰值应力; 滞回环; 能量演化; 耗散能

Energy evolution characteristics of sandstone under different stress cycle paths

ZHANG Zunguo^{1,2}, YUAN Xinli¹, CHEN Yi¹, TANG Chao¹, MA Kaixin¹, CHEN Yongqiang¹

(1 College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Huludao

Liaoning 125105, China; 2 Key Laboratory of Mine Thermo-motive Disaster &

Prevention, Ministry of Education, Huludao Liaoning 125105, China)

Abstract: In order to investigate the mechanical response of sandstone under cyclic stress from the energy perspective, the loading and unloading tests conducted along three cyclic paths which included an incremental step-by-step increase in initial peak stress at 10 MPa, an incremental step-by-step increase in initial peak stress at 80 MPa, and a constant peak stress maintained at 100 MPa. Subsequently, we analyzed the evolution characteristics of each energy component of sandstone based on the stress-strain curve and energy calculation results, taking into account the number of cycles and peak stress. The results show that as the number of cycles and peak stress increase, the hysteresis loop migrated to the direction of strain increase obviously only in the second cycle at the initial peak stress of 80 and 100 MPa. Different

stress cycle paths make the unit volume dissipated energy shows different stage evolution characteristics. The energy values of sandstone change from a quadratic to a linear growth law as the peak stress increases in the hierarchical cyclic loading and unloading way, while in the constant amplitude cyclic loading and unloading way with the peak stress constant at 100 MPa, the unit volume energy and unit volume elastic energy of sandstone show an open downward quadratic decrease trend and the unit volume dissipative energy shows an exponential decrease trend. The effect of cyclic paths on the energy of sandstone in different stress ranges is quite different. In a comparison of the single and the hierarchical cyclic loading and unloading way, the energy difference is less than 10% when the peak stress is 80 MPa, while the energy difference is 22.74%–62.58% when the peak stress is 100 MPa.

Keywords: cycle path; sandstone; peak stress; hysteresis loop; energy evolution; dissipation energy

0 引言

矿井进入深部开采后,巷道所处的地质环境愈发复杂,在开采的扰动下,岩体极易受到高应力和周期载荷作用而发生失稳^[1],一旦失稳,容易造成结构自身和人员生命财产的重大损失,还可能造成难以估量的次生灾害^[2]。岩石破坏是能量耗散和能量释放共同作用导致的结果,能量的演化贯彻岩石变形破坏的全过程^[3]。因此,研究岩石在不同应力循环路径下的能量演化特征,对探究矿井动力灾害发生机制及其防治具有重要意义。

近年来,众多学者从能量角度研究岩石在循环应力作用下的力学响应,赵忠虎等^[4]从宏观和微观角度分析了在不同变形阶段中岩石能量的耗散与释放问题,发现能量耗散导致岩石强度降低,而能量释放是造成岩石灾变破坏的真正原因。HU Huarui等^[5]针对预制角度砂岩试样,开展了循环加卸载试验,发现岩石裂隙角度越大,其储能能力越强,耗能能力越弱。卢俊平等^[6]通过研究热处理后花岗岩能量耗散特征,发现温度越高,用于试样破坏的能量越少,耗散能、能耗密度下降幅度越大。汪泓等^[7]对砂岩的干燥与饱和试件开展单轴循环加卸载试验,发现水分使砂岩的单位体积弹性能和单位体积耗散能降低。周俊等^[8]对不同高径比花岗岩开展动态压缩试验,发现单位体积岩石破碎耗能随高径比增大而减小,且单位体积岩石破碎耗能大小与分形维数呈正相关。由爽等^[9]开展了花岗岩的三轴加卸荷试验,得出高围压下岩石峰值破坏前内部储存的能量更多,在发生破坏时内部释放的变形能对岩石结构的冲击力度更强。刘冬桥等^[10]对不同岩性的脆性岩石开展单轴压缩试验,在其能量演化特征基础上发现脆性岩石损伤演化过程整体呈S型发

展趋势。王军祥等^[11]通过分级循环加卸载试验,发现试件的总吸收能、耗散能和弹性能都呈上升趋势,总吸收能增长缓慢,增长速度随着循环次数增加逐渐变缓,耗散能在进入破坏阶段后迅速上升,弹性应变能变化趋势不明显,中等倾角的耗散能较多。综上所述,现有研究主要从裂隙角度、温度、水分、加载速率、岩性和循环次数等方面探究了岩石能量耗散特征,但不同应力循环路径对岩石能量演化的影响鲜有报道。

鉴于此,笔者拟以具有强冲击倾向性的砂岩为研究对象,开展3种应力路径下的循环加卸载试验,分析在不同应力加卸载路径下岩石的应力-应变曲线、单位体积能、单位体积弹性能和单位体积耗散能的演化特征,以期对深部开采矿井动力灾害防治提供理论指导。

1 应力循环路径下的加卸载试验

1.1 试样制备

试验岩样取自黑龙江某煤矿17号煤层顶板(埋深约642.5 m),为质地均匀、完整性较好的粉砂岩,具有强冲击倾向性。

根据国际岩石力学学会标准,采用取心机在实验室取心后,使用切割机切割、双端面磨平机打磨(端面平行度 ± 0.02 mm),制得 $\Phi 50$ mm \times 100 mm的标准试件(图1)。严格筛选加工成型后的试件,剔除表面有可见裂纹的试件。

为排除水分对岩石物理力学性质的影响,将加工好的岩样放入烘干箱中,在105℃下烘干24 h以上,直至1 h内试件质量变化小于0.005 g,然后,放入密封袋(排出多余空气)密封保存。

1.2 试验设备

加载设备采用液压万能材料试验机(图2),该



图 1 砂岩试件

Fig. 1 Sandstone specimen

试验机最大轴向荷载为 600 kN, 由计算机控制, 自动采集试验数据。

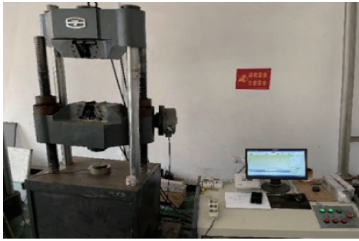


图 2 试验设备

Fig. 2 Test equipment

1.3 试验步骤

试验测得干燥状态下砂岩平均抗压强度为 138.82 MPa, 从单轴抗压强度测试中应力应变曲线 (图 3) 可以看出, 3 个试件在 0~100 MPa 区间内应力应变曲线基本重合, 具有较好的一致性, 故确定最大循环峰值应力为 100 MPa。

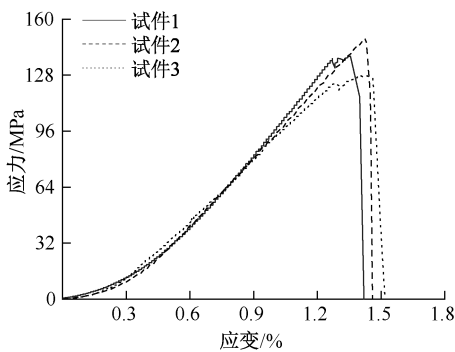


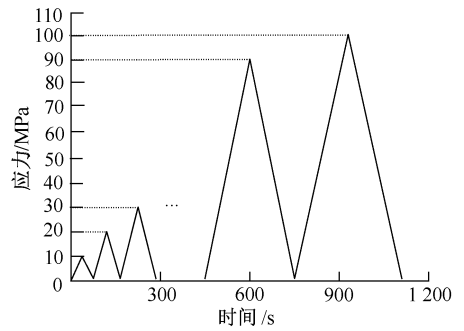
图 3 单轴加载下岩样的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of rock samples under uniaxial loading

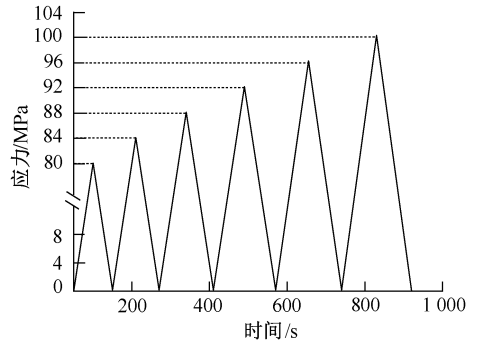
试验包括试件安装和循环加卸载 2 个阶段, 具体步骤如下:

1) 试件安装。为消除端部效应, 在每次试件安装前需要把试件两端均匀涂抹适量润滑脂, 将涂抹好润滑脂的试件放置在试验机承压板中心, 启动试验机使上承压板与试件上端面充分接触。

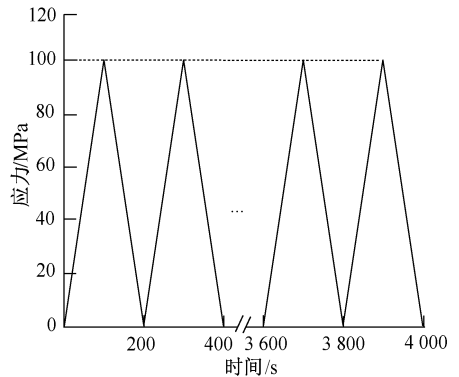
2) 循环加卸载试验。不同循环路径的加卸载路径如图 4 所示。



(a) 路径1



(b) 路径2



(c) 路径3

图 4 不同循环路径的加卸载路径

Fig. 4 Schematic diagram of the loading and unloading paths for different cycle paths

图 4 为循环路径 1 采用分级循环加卸载。试验机以 0.5 MPa/s 的速率加载到 10 MPa 时, 再以相同的速率卸载至 0.05 MPa (为保证试件与压力机充分接触, 设置最低荷载为 0.05 MPa) 处。以此方式对同一岩样进行加载卸载循环, 每一次加载的最大值比上一次高 10 MPa, 当循环峰值应力达到 100 MPa 时结束试验。

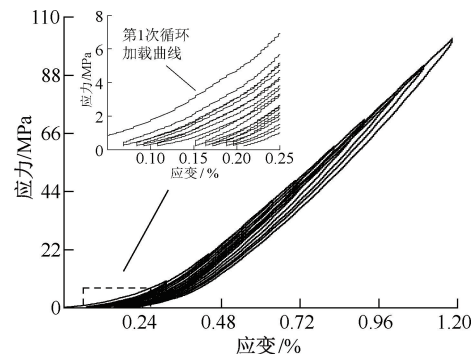
循环路径 2 同样采用分级循环加卸载。试验机以 0.5 MPa/s 的速率加载到 80 MPa 时, 以相同速率卸载至 0.05 MPa 处。以此方式对同一岩样进行加载卸载循环, 每一次加载的最大值应比上一次高

4 MPa, 当循环峰值应力达到 100 MPa 时结束试验。

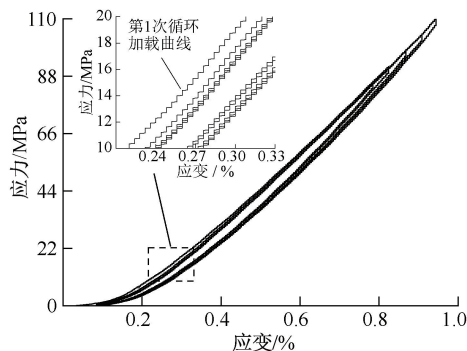
循环路径 3 采用等幅度循环加卸载。试验机以 0.5 MPa/s 的速率加载到 100 MPa 时,再以相同速率卸载至 0.05 MPa 处,加卸载循环 20 次后结束试验。

2 不同循环路径下应力-应变曲线

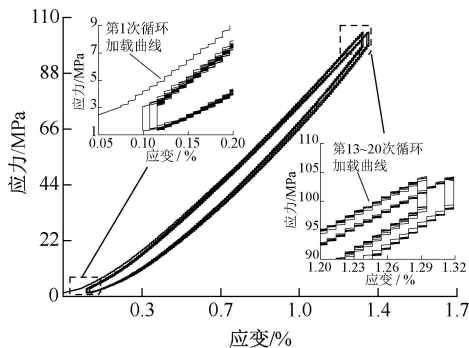
不同循环路径下岩样的应力-应变曲线如图 5 所示。



(a) 应力循环路径1



(b) 应力循环路径2



(c) 应力循环路径3

图5 不同应力循环加-卸载路径下岩样的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of rock samples under different stress cyclic loading and unloading paths

从图 5 可以看出,在应力循环加-卸载路径下,各岩样卸载曲线与加载曲线并不重合,从而形成一封闭的滞回环(由于应力卸载至 0.05 MPa,故第 1

次循环的滞回环不封闭),但各循环路径下滞回环的变化特征存在显著差异。

对于应力循环路径 1(图 5a),由于初始峰值应力(10 MPa)较低,在初次加载过程中岩样内只有少量孔隙、裂隙压实。随着循环次数和峰值应力的不断增加,岩样内部的孔隙、裂隙大量闭合,每次循环加卸载均产生一定的塑性变形,该部分变形不可恢复,使加载曲线和卸载曲线所围成的滞回环随循环次数增加不断向应变增大的方向迁移^[12]。

对于应力循环路径 2(图 5b),岩样的滞回环仅在第 2 次循环时向应变增大的方向发生明显迁移,之后随循环次数的增加滞回环均无明显迁移现象。这是由于循环路径 2 下初始峰值应力(80 MPa)较高,在初次循环加卸载过程中岩样内部的原生孔隙、裂隙大量闭合,压实作用较为明显,使第 2 次的循环加卸载中滞回环向应变增大的方向产生明显迁移。而岩样在初次循环加卸载中经过压实作用后,轴向应力对岩石的内部孔隙、裂隙的影响降低,使滞回环的迁移现象减弱。

对于应力循环路径 3(图 5c),在初始 100 MPa 峰值应力的作用下,初次循环加卸载过程中岩样内部的原生孔隙、裂隙大量闭合,压实作用较为明显,岩样产生较大塑性变形,使岩样的滞回环在第 2 次循环时向应变增大的方向发生明显迁移。由于每次循环加卸载的峰值应力恒定不变,在岩样中的孔隙、裂隙基本压实后,岩样变形能力随着循环次数的增加逐渐减弱^[13],导致第 2~12 次循环时滞回环基本重叠。但需要注意的是,高应力条件下多次进行循环加卸载会使岩石更容易产生损伤^[14],导致岩石力学强度的损失,提高岩石的压缩性,促使第 13 次循环时岩样在峰值应力处的应变量突然减小,随后,第 14~20 次循环与第 13 次循环的滞回环又表现出基本重叠现象。

3 不同循环路径下各项能量演化特征

3.1 能量计算方法

单轴周期应力作用下,试件的循环加卸载是一个能量不断输入和耗散的过程。岩石吸收的能量,一部分形成弹性应变能,一部分以热能、辐射能等形式消耗掉,被称为耗散能。根据能量计算分析模型(图 6),并采用图形积分的方法计算应力-应变曲线每个循环下的单位体积能 U 、单位体积弹性能 U_e 及单位体积耗散能 U_p ^[15],得到各项能量。

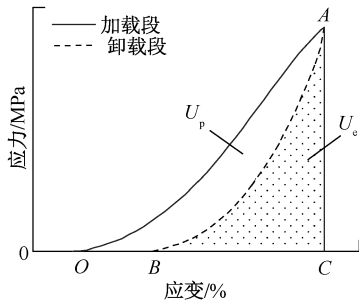


图6 能量计算分析模型

Fig. 6 Energy calculation analysis model

计算公式如下^[15]：

$$\begin{cases} U = \int_0^C \sigma d\varepsilon \\ U_e = \int_B^C \sigma d\varepsilon \\ U_p = U - U_e \end{cases} \quad (1)$$

式中： U 为单位体积能，是加载曲线 OAC 与应变坐标轴围成的面积； U_e 为单位体积弹性能，是卸载曲线 ABC 与应变坐标轴围成的面积； U_p 为单位体积耗散能，由单位体积能减去试样的单位体积弹性能即为单位体积耗散能，也就是加卸载曲线 OAB 之间的面积。

3.2 能量演化特征

根据式(1)计算得到岩样不同应力循环路径下 U 、 U_e 和 U_p 与循环次数关系，如图7所示。

从图7中可以看出，岩石在不同循环加载方式下各项能量演化特征不尽相同。

在应力循环路径1中(图7a—图7c)，岩样的单位体积能、单位体积弹性能和单位体积耗散能均随循环次数的增加而增大，各项能量与循环次数均符合开口向上的二次函数关系，但在循环后期，各项能

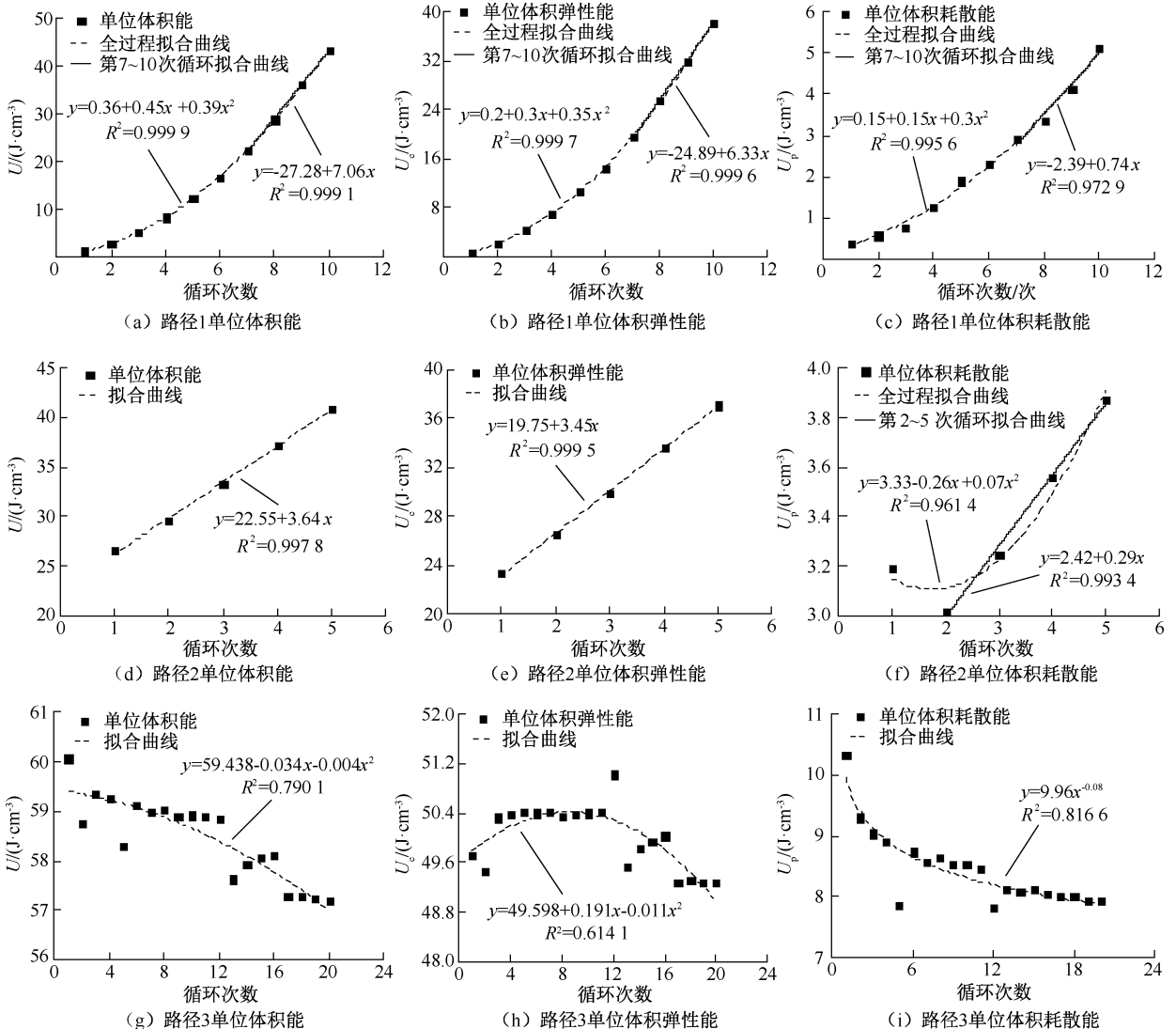


图7 不同应力循环路径下各项能量演化特征

Fig. 7 Energy evolution characteristics under different cycling modes

量与循环次数同样也有较好的线性相关性。

在应力循环路径2中(图7d—图7f),岩样的单位体积能和单位体积弹性能随着循环次数的增加不断增大,二者呈线性函数关系。单位体积耗散能与循环次数呈开口向上的二次函数关系,其单位体积耗散能随循环次数增加先减少后趋于线性增长。

在应力循环路径3中(图7g—图7i),岩样的单位体积能和单位体积弹性变形能与循环次数均符合开口向下的二次函数关系。单位体积耗散能与循环次数呈幂函数关系,随循环次数的增加单位体积耗散能不断下降,在循环初始时变化量较大,但随着循环次数的增加,变化量逐渐减小。

3.3 岩样能量耗散阶段性特征

岩石内部微缺陷不断闭合、新生裂隙发展演化表现为能量的耗散^[16]。试验结果表明:砂岩在不同循环路径下耗散能表现出不同的阶段性特征。

1) 应力循环路径1。从图7c可以看出,应力循环路径1条件下岩样单位体积耗散能拟合曲线可分为加速增长和线性增长2个阶段。

在加速增长阶段,岩样在受到轴向应力的作用时,内部原生的微孔隙和裂隙被逐渐压密闭合,由于该循环路径下的初始峰值应力较小,循环一定次数后内部的孔隙和裂隙才基本被压密。因此,在压密阶段中,单位体积耗散能随循环次数的增加加速增长。

在线性增长阶段,当循环一定次数后,岩样内部孔隙、裂隙已经紧密压实,继续循环加卸载,轴向应力对岩样内部孔隙和裂隙的发育影响减小,在弹性阶段内单位体积耗散能变化较为稳定,趋于线性增长。

2) 应力循环路径2。从图7f可以看出,应力循环路径2下岩样的单位体积耗散能随循环次数的增加存在下降阶段和线性增长阶段,全过程拟合曲线呈V型。

在下降阶段,由于该循环路径下的初始峰值应力(80 MPa)较大,岩样受到的压密效应显著,使岩样在第1次加卸载循环时的单位体积耗散能相对于第2次明显较大,岩样单位体积耗散表现出下降趋势。

在线性增长阶段,从第2次加卸载循环后,随着循环次数和峰值应力增加,岩样的单位体积耗散能开始线性增长。这是由于初始应力较大,对砂岩的压密作用较强,在第1、2次循环加载时岩样已经充分压密,形成了较为稳定的孔隙结构,导致砂岩耗散

能随循环次数近似线性变化。

需要注意的是,若循环初始时峰值应力较高,则在首次循环加卸载过程中轴向应力对岩样的压密效应较为明显,表现为第1次循环的单位体积耗散能较大(此现象在循环路径3中也有体现)。

3) 应力循环路径3。从图7i可以看出,应力循环路径3条件下岩样的单位体积耗散能在前5次循环中随着循环次数的增加快速下降,从第6次循环开始单位体积耗散能缓慢下降,该循环路径下岩样单位体积耗散能拟合曲线呈L型,大致可以分为2个阶段。

在快速降低阶段,由于高轴向应力对岩样的压密效应,导致岩样第1次加卸载循环的单位体积耗散能较大。但在循环峰值应力不变的条件下,由3.2节分析可知,继续增加循环次数,岩样孔隙、裂隙的压密效应显著降低,表现为第2~5次循环中,岩样的单位体积耗散能迅速降低,但降低速率逐渐减小。

在缓慢降低阶段,当岩样内部的孔隙、裂隙在加速降低阶段被基本压密后,岩样的单位体积耗散能开始缓慢下降。虽然岩样经过压密且峰值应力不变,但是在高应力循环应力下,循环次数的增加使岩样内部形成一些新的孔隙、裂隙,在第5和第12次循环时岩样内部发生一定损伤,导致单位体积耗散能出现波动,波动后的单位体积耗散能随即恢复到拟合曲线附近处,表明在轴向应力较高时岩石能量特征的不稳定性^[17]。计算可知:第1次和2次波动的幅值(与波动点前的单位体积耗散能相比)分别为11.50%和7.63%,且在波动后的稳定循环次数(稳定循环次数取2个波动点之间循环次数)分别为6和8次。可见:在缓慢降低阶段,随着循环次数增加单位体积耗散能波动的幅值减小,且波动后的稳定循环次数增加,在较高的峰值应力下,岩样内部孔隙和裂隙具有不稳定性,而随着循环次数的增加,岩样逐渐趋于稳定。

3.4 循环路径对岩样各项能量的影响

为探究不同峰值应力范围内循环路径对岩样各项能量的影响,对比分析应力为80和100 MPa时3种循环路径下岩样的各项能量大小关系(图8)。

从图8a可以看出,峰值应力为80 MPa时,岩样在循环路径1下的单位体积能、单位体积弹性和单位体积耗散能分别为28.89、25.535和3.355 J/cm³,在循环路径2下的各项能量分别为26.525、

23.333 和 3.192 J/cm³。岩样在循环路径 2 下的各项能量较循环路径 1 分别低 8.19%、8.62% 和 4.86%。可见:当峰值应力为 80 MPa,即循环应力在 10~80 MPa 范围时,轴向应力对岩样的破坏和能量演化影响较小,2 种循环路径下岩样各项能量相差不大。

从图 8b 可以看出,在循环峰值应力为 100 MPa 时,岩样在循环路径 1 下的单位体积能、单位体积弹性能和单位体积耗散能分别为 43.542、38.421 和 5.121 J/cm³;在循环路径 2 下的各项能量分别为 40.904、37.034 和 3.87 J/cm³;在循环路径 3 下的各项能量分别为 60.072、49.73 和 10.342 J/cm³。不同应力循环路径下岩样的各项能量大小关系均为:循环路径 3>循环路径 1>循环路径 2。循环路径 1 较循环路径 3 的各项能量分别小 27.52%、22.74% 和 50.48%,循环路径 2 较循环路径 3 的各项能量分别低 31.91%、25.53% 和 62.58%。可见:循环峰值应力在 80~100 MPa 阶段时,轴向应力对岩样的单位体积耗散能影响较大,且循环次数越多,岩样在峰值应力为 100 MPa 时的单位体积耗散能越小。

分析可知:在循环峰值应力为 80 MPa 时,分级循环加卸载至 80 MPa 与单次加卸载至 80 MPa 相比,循环路径对岩样的各项能量值影响较小,路径 2 较路径 1 的各项能量值相差均小于 10%。而在循环峰值应力为 100 MPa 时,分级循环加卸载至 100 MPa 与单次加卸载至 100 MPa 相比,循环路径对岩样的单位体积耗散能影响较大,对单位体积能和单位体积弹性能影响也有明显提升,路径 1 与路径 2 较路径 3 的单位体积耗散能均相差大于 50%、单位体积能和单位体积弹性能相差均大于 20%。相关研究表明:在单轴循环加卸载试验中,当循环峰值应力远低于试件的屈服强度时,即使循环次数达到上万次,岩石也不会被破坏^[18];在三轴循环加卸载试验中,当试样未进入塑性区时,试样损伤较小,微裂纹在试样内随机产生,应力和微裂纹数目的变化并未受循环加卸载太大影响^[19];在煤的吸附/解吸试验中,当试验应力条件远低于煤样屈服强度时,对煤样本身的损伤可忽略不计^[20]。岩石的能量耗散变化一定程度上反映了其内部的损伤程度^[21]。因此,当环境应力远小于岩样本身的屈服强度时,不论是对于单轴、三轴还是吸附/解吸试验,循环加/卸载对岩样的力学性能影响均较小。

4 结 论

1) 随着循环次数增加,在初始峰值应力较低(10 MPa)时,应力-应变曲线的滞回环向应变增大的方向不断迁移,而初始峰值应力较高(80 MPa)时,滞回环仅在第 2 次循环时向应变增大方向产生明显迁移,后续循环中迁移现象减弱。

2) 不同应力循环路径下砂岩的能量演化特征存在显著差异。分级循环加卸载时,随峰值应力的提高,砂岩的各项能量值随循环次数增加由二次函数增长特征向线性增长特征转变;峰值应力恒定 100 MPa 进行等幅度循环加卸载时,随循环次数的增加,砂岩的单位体积能和单位体积弹性能呈开口向下的二次函数趋势下降,单位体积耗散能呈指数趋势下降。

3) 不同循环路径下,砂岩的单位体积耗散能具有不同的阶段性演化特征。初始峰值应力为 10 MPa 的分级循环加卸载条件下单位体积耗散能存在加速增长阶段和线性增长阶段,初始峰值应力 80 MPa 的分级循环加卸载条件下单位体积耗散能存在下降阶段和线性上升阶段,峰值应力为 100 MPa 的等幅度循环加卸载条件下单位体积耗散能存在加

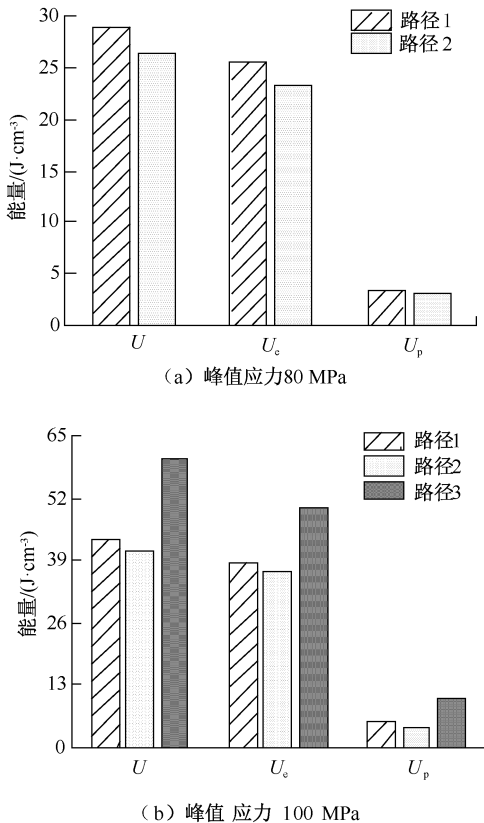


图 8 不同峰值应力下能量对比

Fig. 8 Energy comparison under different peak loads

速降低阶段和缓慢降低阶段。

4) 不同应力区间内循环路径对砂岩的能量影响有较大差异。分级循环加卸载与单次加卸载相比,在10~80 MPa区间内,循环路径对岩样的各项能量值影响较小,峰值应力为80 MPa时,2种循环

方式下各项能量相差均小于10%;而在80~100 MPa区间内,循环路径对岩样的各项能量影响明显提升,峰值应力为100 MPa时,2种循环方式下单位体积耗散能相差大于50%、单位体积能和单位体积弹性相差均大于20%。

参 考 文 献

- [1] 刘玉冰,王恩元,张东明,等. 真三轴应力条件下破断煤体力学响应及渗流特性试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(6): 105-113.
LIU Yubing, WANG Enyuan, ZHANG Dongming, et al. Experimental study on mechanical response and seepage characteristics of broken coal under true triaxial stress conditions [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(6): 105-113.
- [2] 李翔,魏恒,王靖童. 深部隧道支护结构区间非概率可靠度分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(12): 1-10.
LI Xiang, WEI Heng, WANG Jingtong. Interval non-probabilistic reliability analysis of support structures for deep tunnel[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(12): 1-10.
- [3] 刘基程,马林建,张宁,等. 岩石变形破坏过程的能量演化研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(3): 975-986.
LIU Jicheng, MA Linjian, ZHANG Ning, et al. Research progress on energy evolution in the process of rock deformation and failure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(3): 975-986.
- [4] 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.
ZHAO Zhonghu, XIE Heping. Energy transfer and energy dissipation in rock deformation and fracture[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2008, 40(2): 26-31.
- [5] HU Huarui, XIA Binwei, LUO Yafei, et al. Energy characteristics of sandstones with different crack angles under true triaxial cyclic loading and unloading [J]. Energy Science & Engineering. 2022, 10(4): 1 418-1 430.
- [6] 卢俊平,王远,刘磊,等. 热处理后花岗岩动态拉伸特性及能量耗散研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(3): 54-63.
LU Junping, WANG Yuan, LIU Lei, et al. Study on dynamic tensile properties and energy dissipation of granite after thermal treatment[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2023, 5(3): 54-63.
- [7] 汪泓,杨天鸿,刘洪磊,等. 循环荷载下干燥与饱和砂岩力学特性及能量演化[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1 600-1 608.
WANG Hong, YANG Tianhong, LIU Honglei, et al. Mechanical properties and energy evolution of dry and saturated sandstones under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(6): 1 600-1 608.
- [8] 周俊,赵光明,孟祥瑞,等. 高径比差异条件下花岗岩动态冲击能量耗散及破碎特征[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(2): 379-386.
ZHOU Jun, ZHAO Guangming, MENG Xiangrui, et al. Dynamic impact energy dissipation characteristics of granite with different height-diameter ratios[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(2): 379-386.
- [9] 由爽,李虎振,侯晓旭,等. 采动应力路径下花岗岩变形破坏特性及能量演化机制[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2023, 44(8): 1 177-1 187.
YOU Shuang, LI Huzhen, HOU Xiaoxu, et al. Deformation damage characteristics and energy evolution mechanism of granite under mining stress path. [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2023, 44(8): 1 177-1 187.
- [10] 刘冬桥,郭允朋,李杰宇,等. 单轴压缩下脆性岩石损伤破坏能量演化规律试验研究[J]. 工程地质学报, 31(3): 843-853.
LIU Dongqiao, GUO Yunpeng, LI Jieyu, et al. Experimental study on damage and failure energy evolution of brittle rocks under uniaxial compression[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(3): 843-853.
- [11] 王军祥,赵会敏,郭连军,等. 分级循环荷载下裂隙岩石疲劳破坏特性与能量演化机制[J/OL]. 土木与环境工程学报:中英文: 1-14. [2022-04-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.tu.20220422.1124.002.html>.
WANG Junxiang, ZHAO Huimin, GUO Lianjun, et al. Fatigue failure characteristics and energy evolution mechanism of fractured rock under graded cyclic loading[J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering: 1-14. [2022-04-

- 24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.tu.20220422.1124.002.html>.
- [12] 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.
XU Ying, LI Chengjie, ZHENG Qiangqiang, et al. Analysis of energy evolution and damage characteristics of mudstone under cyclic loading and unloading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(10): 2084-2091.
- [13] 杨永杰, 段会强, 邢鲁义. 周期荷载作用下煤的疲劳变形及能量演化特征[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(1): 154-167.
YANG Yongjie, DUAN Huiqiang, XING Luyi. Fatigue deformation and energy evolution of coal under uniaxial cyclic loading[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(1): 154-167.
- [14] 陈崇枫. 应力循环加卸载作用下砂岩时效变形特征研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
CHEN Chongfeng. Time-dependent deformation of sandstone under cyclic unloading and loading stress[D]. Shenyang: Northeastern University, 2019.
- [15] 杨磊, 高富强, 王晓卿, 等. 煤岩组合体的能量演化规律与破坏机制[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3894-3902.
YANG Lei, GAO Fuqiang, WANG Xiaoqing, et al. Energy evolution law and failure mechanism of coalrock combined specimen[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12): 3894-3902.
- [16] 尹晓萌, 张爱明, 王鲁男. 干燥和含水状态下片岩的特征强度与能量演化的各向异性规律及机制[J]. 工程地质学报, 2023, 31(5): 1573-1587.
YIN Xiaomeng, ZHANG Aiming, WANG Lunan. Anisotropic behavior and mechanism of dry and water-bearing schist in terms of characteristic strength and energy evolution [J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(5): 1573-1587.
- [17] 赵闯. 循环荷载作用下花岗岩损伤变形与能量特征分析[D]. 济南: 山东大学, 2014.
ZHAO Chuang. Damage Deformation and energy characteristics of granite subjected to cyclic loading [D]. Ji'nan: Shandong University, 2014.
- [18] 郭印同, 赵克烈, 孙冠华, 等. 周期荷载下盐岩的疲劳变形及损伤特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1353-1359.
GUO Yintong, ZHAO Kelie, SUN Guanhua, et al. Experimental study of fatigue deformation and damage characteristics of salt rock under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1353-1359.
- [19] 田文岭, 杨圣奇, 方刚. 煤样三轴循环加卸载力学特征颗粒流模拟[J]. 煤炭学报, 2016, 41(3): 603-610.
TIAN Wenling, YANG Shengqi, FANG Gang. Particle flow simulation on mechanical behavior of coal specimen under triaxial cyclic loading and unloading[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 603-610.
- [20] 张磊, 李菁华, 郭鲁成, 等. 含瓦斯烟煤 CO₂ 置换吸附行为与形变特性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(5): 901-913.
ZHANG Lei, LI Jinghua, GUO Lucheng, et al. Experimental study of both the displacement behaviour by CO₂ and the characteristic of volumetric strain on methane saturated bituminous coal[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(5): 901-913.
- [21] 郭红军, 季明, 孙中光, 等. 循环荷载作用下红砂岩能量演化特征研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3(4): 15-23.
GUO Hongjun, JI Ming, SUN Zhongguang, et al. Energy evolution characteristics of red sandstone under cyclic load[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(4): 15-23.



作者简介: 张遵国 (1986—), 男, 重庆人, 博士, 副教授, 主要从事矿井灾害防治及 CO₂ 地质封存方面的研究。E-mail: zhang_zung@163.com。