不同循环加卸载速率下盐岩能量演化与损伤规律研究*

刘冰冰[1,2,3],武志德[1,2,3],完颜祺琪[1,2,3],李康[1,2,3],
郝爱胜[1,2,3],白松[1,2,3],吴佳楠[1,2,3],陶野[1,2,3]

(1.中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;
2.国家能源地下储气库研发中心, 北京 100083;
3.中国石油天然气集团公司油气地下储库工程重点实验室, 河北 廊坊市 065007)

摘要:为探究不同加卸载速率下盐岩的能量演化规律与损伤机制,以国内某拟建盐穴压缩空气储能库的盐岩为研究对象,开展不同加卸载速率下盐岩试样的单轴循环加卸载试验,并采用力学试验、声发射监测与能量分析方法,探究其力学响应与损伤演化过程。结果表明:单轴循环加卸载条件下,盐岩呈现显著的黏塑性,加卸载速率越高,盐岩的抗压强度越低;随着加卸载循环次数增大,输入功持续递增,弹性能先升高后降低,耗散能持续增加并在后期占据主导地位;声发射活动与应力水平呈正相关关系,低加卸载速率下,盐岩内部以低能量、高频次的微破裂活动为主,高加卸载速率下,则呈现高能量、低频次的宏观裂纹扩展特征;盐岩的损伤演化可划分为初期缓慢、中期平稳和后期加速3个阶段,且加卸载速率越高,相同应力水平下盐岩的损伤程度越大。研究成果可为盐穴储能库注采速率优化、长期稳定性评估等提供参考。

关键词:盐岩;单轴循环加卸载;力学响应;能量演化;声发射监测

中图分类号:TD315;TU458 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)07-0164-09

Energy Evolution and Damage Law of Salt Rock Under Different Cyclic Loading and Unloading Rates

Liu Bingbing[1,2,3], *Wu Zhide*[1,2,3], *Wanyan Qiqi*[1,2,3], *Li Kang*[1,2,3],
Hao Aisheng[1,2,3], *Bai Song*[1,2,3], *Wu Jia'nan*[1,2,3], *Tao Ye*[1,2,3]

(1.Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China;
2.National Energy Underground Gas Storage Research and Development Center, Beijing 100083, China;
3.CNPC Key Laboratory of Oil and Gas Underground Storage Engineering, Langfang, Hebei 065007, China)

Abstract: To investigate the energy evolution law and damage mechanisms of salt rock under different loading and unloading rates, salt rock specimens obtained from a proposed salt cavern compressed air energy storage (CAES) facility in China were subjected to uniaxial cyclic loading and unloading tests at varying rates. Mechanical testing, acoustic emission (AE) monitoring and energy analysis methods were employed to explore the mechanical response and damage evolution process. The results indicate that under uniaxial cyclic loading and unloading conditions, the salt rock exhibits significant viscoelasticity, and its compressive strength decreases as the loading and unloading rate increases. With an increasing number of loading and unloading cycles, the input work continuously increases; the elastic energy first increases and then decreases, whereas the dissipated energy increases continuously and dominates in the later stages. Acoustic emission activity demonstrates a positive correlation with the stress level. Under low loading and unloading rates, the internal behavior of the salt rock is dominated by low-energy, high-frequency micro-fracturing activities. Conversely, under high loading and unloading rates, it exhibits macroscopic crack propagation characteristics characterized by high-energy and low-frequency. The damage evolution of the salt rock can be divided into three stages: an initial slow stage, a middle stable stage, and a final accelerated stage. Furthermore, a higher

* **收稿日期**:2025-08-26

基金项目:中国石油天然气集团有限公司基础性前瞻性项目(2022DJ83);中国石油集团科学技术研究院有限公司科学研究与技术开发项目(2023YCQ01);中国石油青年科技专项(2024DQ03071)

作者简介:刘冰冰(1997—),男,黑龙江佳木斯人,硕士,工程师,主要从事岩石力学实验及地下储能库稳定性评价方面的研究工作。E-mail:Liubb2022@petrochina.com.cn

通信作者:武志德(1982—),男,山西太谷人,博士,高级工程师,主要从事岩石力学实验及储气库稳定性评价方面的研究工作。E-mail:wuzhide69@petrochina.com.cn

loading and unloading rate results in a greater degree of damage in the salt rock under the same stress level. The findings provide a theoretical basis for optimizing the injection-production rates and evaluating the long-term stability of salt cavern energy storage facilities.

Key words: Salt rock, Uniaxial cyclic loading and unloading, Mechanical response, Energy evolution, Acoustic emission monitoring

0 引言

在当前碳中和战略驱动下,加快工业绿色低碳转型与清洁能源规模化应用是实现"双碳"目标的核心路径[1-3]。盐岩因其低渗透性、化学惰性及损伤自愈合特性,已成为国际公认的二氧化碳封存利用(CCUS)、压缩空气储能(CAES)及地下储氢(UHS)等低碳工程的首选地质载体[4-5]。深部盐穴储库在周期性注采过程中承受动态交变应力,围岩损伤累积可能导致密封性劣化,诱发气体渗漏或结构失稳等重大风险[6-7]。因此,盐岩在循环加卸载工况下的力学响应与损伤演化机制,是保障盐穴储能库长期安全运行的关键科学问题[8-10]。

国内外学者针对盐岩加卸载工况下的力学特性开展了系列试验研究。Phueakphum 等[11]通过室内循环加载测试,发现盐岩抗压强度随加载循环次数的增加而降低,二者呈幂函数关系,弹性模量略有下降后趋于恒定。Sartkaew 等[12]发现在高温条件、不同加载速率下,盐岩的剪应力-应变曲线呈非线性关系,同时,基于平均应变能密度计算了盐岩扩容时的畸变应变能。高红波等[13]通过模拟储气库运行围岩受载情况,开展应力水平不断提高的反复加卸载试验,发现加卸载曲线几乎重合,盐岩的杨氏模量基本不变,滞回环和强度降幅很小。刘建锋等[14]基于三点弯曲试验方法开展了盐岩拉伸加卸载及声发射试验,测试得到纯盐岩断裂韧度 $K_{IC}=6.36$ MPa·$mm^{0.5}$,三点弯曲加卸载下盐岩破坏由切槽尖端逐渐向荷载点扩散。王伟超等[15]分析了盐岩分级加卸载、多级加载变形和声发射特征,发现低应力水平下盐岩有较明显的声发射 Kaiser 效应,70%峰值应力卸载再加载后表现出 Felicity 效应。李浩然等[16]采用岩石声波、声发射一体化监测装置研究了三轴多级循环荷载作用下盐岩波速与声发射变化特征,认为超声波波速和声发射活动与应力状态一致,并与围压应力密切相关,裂隙密度和 Felicity 比变化与岩体承载破坏特征较为吻合。许宏发等[17]开展了盐岩三轴循环载荷试验,分析了应力比强度、应力比振幅、上限应力水平、荷载频率、循环次数等对体积应变的影响。尤业超等[18]基于能量耗散原理研究了盐岩动态力学性能及破坏特征,认为随着入射能增加,盐岩硬化效应明显,随着吸收能增加,峰值应力因围压不同而发生变化。

目前,盐岩加卸载条件下的力学特性研究已取得了大量成果,但现有试验多局限于单一加载速率,对不同应力水平下的损伤量化表征尚不明确,盐岩在不同循环加卸载速率下的能量演化机制与累积损伤规律仍需进一步研究。对此,本文以国内某拟建盐穴压缩空气储能库地区的盐岩为研究对象,开展不同速率单轴多级循环加卸载试验,结合围岩变形和声发射特征,揭示不同速率和应力水平下盐岩循环的能量演化机制与损伤评价。研究结果可为盐穴地下储能库工程长期安全运行提供理论支撑。

1 试验材料与方法

1.1 试验样品

试验样品取自国内某拟建盐穴压缩空气储能库地区野外露头灰白色盐岩,采用金刚石纱线机床加工成直径为 50 mm、长度为 100 mm 的标准圆柱形试样,直径允许偏差小于 0.2 mm,两端面的不平整度允许偏差小于 0.05 mm,端面与轴线的垂直偏差不超过±0.25°。

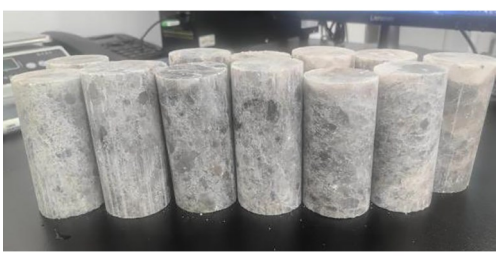


图 1 试验样品

Fig.1 Test samples

1.2 试验设备

试验设备采用国家能源地下储气库研发中心的 MTS 815 岩石力学试验机。该试验机最大轴向载荷为 4 600 kN,围压加载 0~140 MPa,最大温度为

200 ℃,具备单轴/三轴压缩试验、间接拉伸试验、循环加卸载试验及渗透率测试等多种岩石力学特性测试功能。通过闭环伺服控制系统,配合 LVDT 轴向引伸计和环向引伸计,能够同步采集岩石轴向、径向应变。

搭配美国声学物理公司 PAC-Ⅱ超声波-声发射(AE)一体化监测系统。该系统集成高灵敏度宽带传感器(频率范围为 20～1.2 MHz)、18 位高速数据采集卡及多通道前置放大器,支持 8 通道同步信号采集,传感器中心频率为 150 kHz,最高采样率为 10 MHz。

1.3 试验方案

对盐岩试样开展单轴压缩试验,得到试样平均单轴抗压强度,并开展不同速率下的单轴循环加卸载试验。设定每组试验循环加卸载次数为 8 次,每级循环加卸载采用相同的载荷速率,加载峰值分别为 10%UCS、20%UCS、30%UCS、40%UCS、50%UCS、60%UCS、70%UCS、80%UCS,每次卸载至 1 kN。每组 8 次循环加卸载完成后,采用轴向位移控制继续加载,直至样品发生破坏。试验加载方案如图 2 所示。设定 3 组试验循环加卸载速率分别为 0.125 MPa/s、0.25 MPa/s、0.5 MPa/s。试验全过程采用声发射系统实时同步监测采集声发射信号。

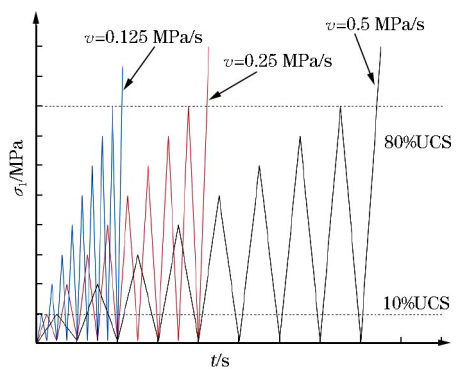


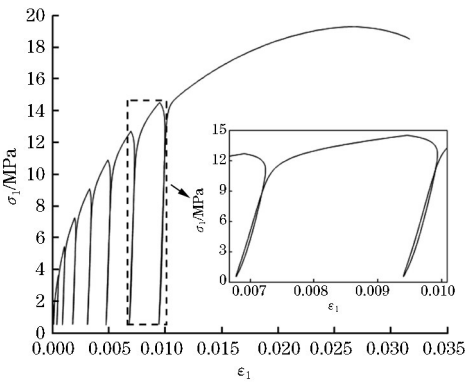
图 2 单轴循环加卸载试验应力加载方案

Fig.2 Stress loading scheme of uniaxial cyclic loading and unloading test

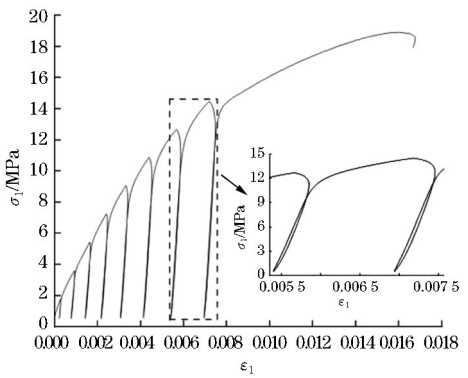
2 盐岩变形特征与能量演化分析

2.1 盐岩变形特征分析

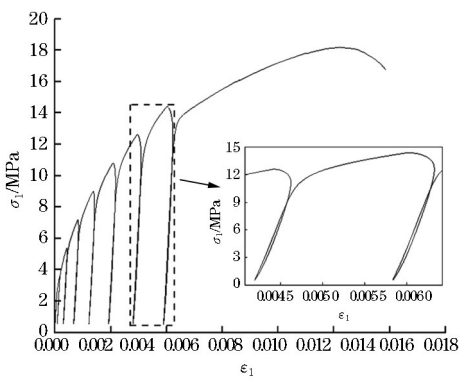
通过盐岩单轴压缩试验测得盐岩单轴强度为 18.52 MPa。基于该强度值,确定了循环加卸载试验各级加载应力水平。图 3 为盐岩在不同加卸载速率下的单轴循环应力-应变曲线。



(a) 加卸载速率 v=0.125 MPa/s



(b) 加卸载速率 v=0.25 MPa/s



(c) 加卸载速率 v=0.5 MPa/s

图 3 单轴循环加卸载应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves of uniaxial cyclic loading and unloading

由图 3 可知,在加载阶段,应力随应变的增加而上升,盐岩同时发生弹性与塑性变形;在卸载阶段,盐岩仅发生弹性变形恢复,塑性变形保留,形成残余应变。每级卸载后应变未恢复至原点,残余应变随循环次数的增加而持续累积,表明盐岩在循环荷载作用下发生晶格错动或微裂纹扩展,导致塑性应变逐渐累积。加载与卸载曲线交叉形成滞回环,揭示了盐岩在循环荷载作用下存在不可恢复的能量耗散。滞回环宽度随循环次数的增加而增大,每一次

循环均会引入新的不可逆变形，体现出盐岩在循环荷载下存在显著的塑性累积特性。每一级滞回环顶部应力随循环次数的增加而逐渐升高，盐岩在循环加卸载作用下，承载能力并未因塑性变形累积而发生弱化，反而在后续加载中承受更高应力，这与应变硬化效应或晶体滑移有关。

对比每次加卸载过程，发现弹性模量变化程度不大，表明其弹性性质相对稳定，循环加卸载中滞回环与损伤演化主要由塑性变形主导。与典型硬岩（如花岗岩、泥岩）相比，盐岩表现出更强的滞回效应和塑性变形能力。循环加卸载过程中，盐岩未呈现明显的脆性断裂峰，破坏模式以渐进式损伤为主，而非突发脆性破坏。

盐岩在不同单轴循环加卸载速率下的试验结果见表 1。

表 1　盐岩在不同单轴循环加卸载速率下的试验结果

Table 1　Experimental results of uniaxial cyclic loading and unloading rates of salt rock

岩芯编号	加载方式	加卸载速率/(MPa/s)	抗压强度/MPa
Y-1	单轴压缩	0.250	18.52
Y-2	单轴循环加卸载	0.125	19.32
Y-3		0.250	18.92
Y-4		0.500	18.19

对比不同加卸载速率下盐岩抗压强度变化规律可知，盐岩单轴抗压强度为 18.52 MPa，循环加卸载速率分别为 0.125 MPa/s、0.25 MPa/s 和 0.5 MPa/s 时，对应的抗压强度分别为 19.32 MPa、18.92 MPa 和 18.19 MPa，即加卸载阶段速率越高，盐岩抗压强度越低。这是由于盐岩是一种典型的黏塑性材料，其变形行为具有显著的时间依赖性。当加卸载速率分别为 0.125 MPa/s、0.25 MPa/s 和 0.5 MPa/s 时，盐岩循环结束后的应变依次为 0.94%、0.69% 和 0.58%。可见，加卸载速率较慢时，盐岩晶粒有足够时间通过晶界滑动或位错运动等方式调整内部结构，从而逐渐释放局部应力集中。这种塑性变形过程可以耗散能量，延缓宏观破裂的发生，表现为较高的抗压强度。而当加卸载速率较快时，依赖时间的塑性变形机制来不及发挥作用，导致应力无法释放，局部应力迅速累积，最终更易破坏，抗压强度随之降低。

2.2　盐岩加卸载能量演化分析

根据热力学第一定律，外部载荷对试样输入的总功将转化为弹性能与耗散能[19-21]。其中，输入功 U 为外界对盐岩试样所做的总机械功，其值等于加载应力-应变曲线与 x 轴包围的面积；弹性能 U_e 是盐岩在弹性变形阶段储存的可恢复能量，卸载时完全释放，等于卸载曲线下与 x 轴包围面积的绝对值；耗散能 U_d 为加载期间由于盐岩塑性变形、微裂纹扩展、摩擦生热等因素导致的不可逆能量损失，其值等于应力-应变曲线和卸载曲线与 x 轴包围的面积差。单轴加卸载能量特征参数计算示意如图 4 所示，计算公式见式(1)至式(3)。

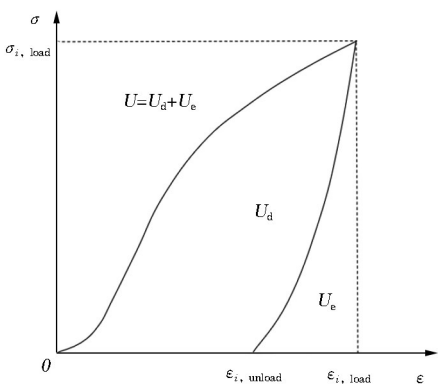


图 4　单轴加卸载能量特征参数计算示意

Fig.4　Schematic of calculation of energy characteristic parameters for uniaxial loading and unloading

$$U_i = \int_0^{\varepsilon_{i,\mathrm{load}}} \sigma \,\mathrm{d}\varepsilon \tag{1}$$

式中：U_i 为第 i 次循环加卸载的输入总功，MJ/m³；$\varepsilon_{i,\mathrm{load}}$ 为第 i 次加载试样应变；σ 为应力；ε 为应变。

$$U_{i,\mathrm{e}} = \left| \int_{\varepsilon_{i,\mathrm{unload}}}^{\varepsilon_{i,\mathrm{load}}} \sigma \,\mathrm{d}\varepsilon \right| \tag{2}$$

式中：$U_{i,\mathrm{e}}$ 为第 i 次循环加卸载弹性能，MJ/m³；$\varepsilon_{i,\mathrm{unload}}$ 为第 i 次卸载试样应变。

$$U_{i,\mathrm{d}} = U_i - U_{i,\mathrm{e}} = \int_0^{\varepsilon_{i,\mathrm{load}}} \sigma \,\mathrm{d}\varepsilon - \left| \int_{\varepsilon_{i,\mathrm{unload}}}^{\varepsilon_{i,\mathrm{load}}} \sigma \,\mathrm{d}\varepsilon \right| \tag{3}$$

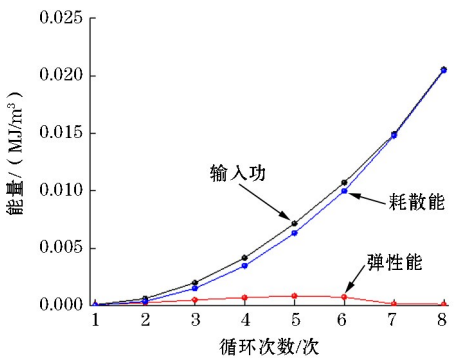
式中，$U_{i,\mathrm{d}}$ 为第 i 次循环加卸载弹性能，MJ/m³。

盐岩不同速率单轴循环加卸载下各级能量变化曲线如图 5 所示。盐岩单轴循环加卸载过程输入功、弹性能和耗散能演化规律如下。

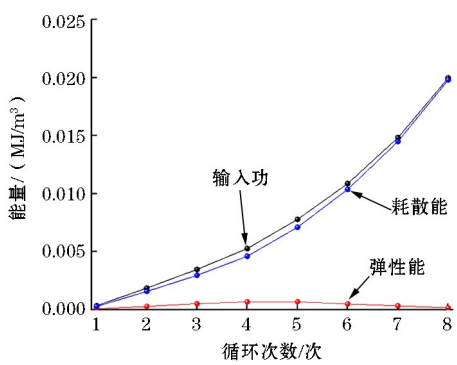
(1) 输入功：随加卸载循环次数增加，输入功不断上升。加载过程中，盐岩变形所需能量不断累积，且每级加载应力幅度逐渐增大，从而需要更多能量输入驱动压缩。

(2) 弹性能：弹性能总体占比小，其随着循环次数的增加呈先上升后下降的变化趋势。前 5 次循环中，弹性能随循环次数的增加而上升，加卸载速率分

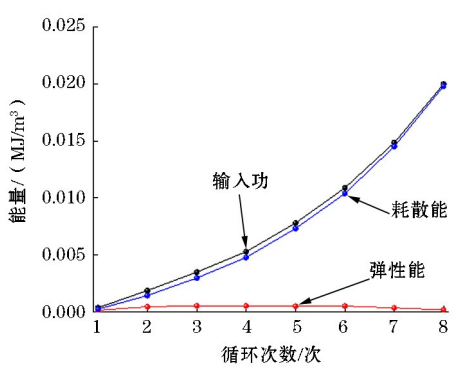
别为 0.125 MPa/s、0.25 MPa/s 和 0.5 MPa/s 时，最大弹性能依次为 8.35×10^{-4} MJ/m^3、5.14×10^{-4} MJ/m^3 和 4.97×10^{-4} MJ/m^3。这表明 50% UCS 低应力水平下，盐岩内部结构相对完整，能够储存一定弹性势能，且弹性变形在总变形中占比逐级提高。5 次循环后，随着循环次数继续增加，微裂纹网络扩展与裂隙贯通等损伤累积导致试样刚度下降，弹性恢复能力减弱，弹性能由峰值转为递减。同时，每级卸载后残余塑性应变逐渐累积，压缩了弹性恢复的应变范围，进一步削弱了试样弹性能的储存。



(a) 加卸载速率 v=0.125 MPa/s



(b) 加卸载速率 v=0.25 MPa/s



(c) 加卸载速率 v=0.5 MPa/s

图 5 单轴循环加卸载能量变化曲线

Fig.5 Energy change curves of uniaxial cyclic loading and unloading

(3) 耗散能：耗散能占比随着循环次数的持续增加而升高。耗散能对应塑性变形、微裂隙扩展及晶体间摩擦等不可逆能量耗散。每次循环加载均会引发新的塑性变形或损伤，且损伤具有累积性，使材料内部结构的不可逆损伤愈发显著。第 5 次循环后，微裂纹趋于网络化，局部应力集中加剧，更多耗散能被用于形成贯通式裂纹，致使耗散能增速提高，表明盐岩在高应力水平循环荷载下损伤发展较快。

图 6 为不同单轴循环加卸载速率下各阶段耗散能与弹性能占总功的比值。从图 6 可以看出，弹性能占比随着循环加卸载次数增加而不断降低；耗散能占比随着循环加卸载次数增加而不断升高。在较高加卸载速率(v=0.5 MPa/s)下，第 1 次循环阶段的弹性能占比达 86%，高加载速率导致盐岩没有充足的时间通过塑性变形等非弹性行为耗散能量，更多的能量被储存为弹性能；第 2～6 次循环阶段，弹性能随加载应力水平增大而迅速降低，但始终高于较低加载速率条件，这是因为高加载速率下，盐岩内部颗粒来不及充分调整与位移，变形以晶格弹性变形为主导；第 7～8 次循环阶段，能量构成以耗散能为主，耗散能占比达 99%以上，高应力水平导致的裂纹扩展与贯通使耗散能量较高，其占比略高于较低加载速率条件。

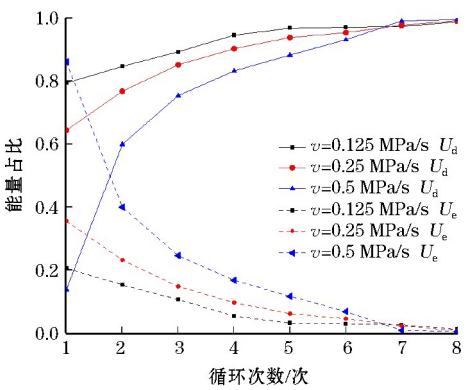


图 6 不同加卸载速率各阶段能量占比

Fig.6 Energy proportions at each stage under different loading and unloading rates

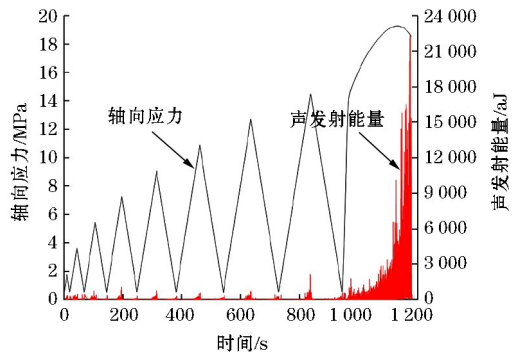
3 基于声发射特征的损伤规律分析

声发射是研究岩石加载中内部损伤演化的重要手段。加卸载过程中，盐岩内部微裂纹萌生、扩展及塑性变形等变化会打破原有应力平衡，引发晶体发生相对位移，并以弹性波形式向四周释放能量。这些弹性波经盐岩介质传播至试样表面，被声发射传感器捕捉并转化为声发射信号。通过对声发射信号

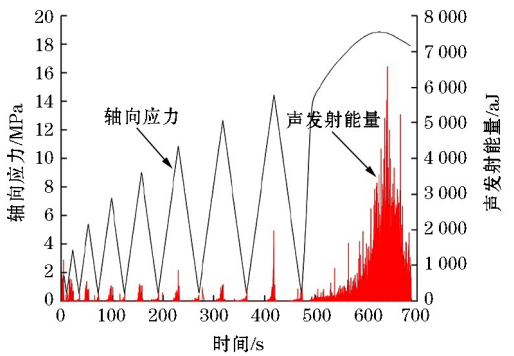
的特征参数(如事件数、振铃计数、能量等)进行统计分析，能够实时监测盐岩在加载过程中的内部损伤状态。

3.1　盐岩声发射能量变化规律

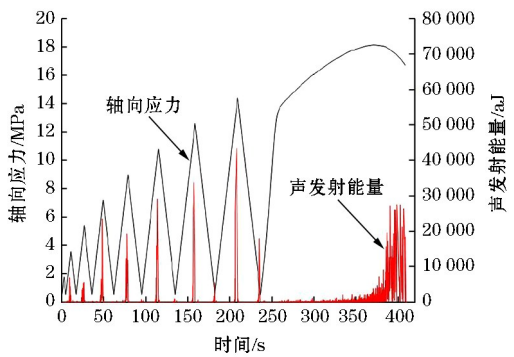
图 7 为盐岩不同单轴循环加卸载速率下声发射能量和应力随时间的变化曲线。通过图 7 分析盐岩单轴循环加卸载不同阶段的声发射活动规律，并划分为以下 3 个阶段。



(a) 加卸载速率 v=0.125 MPa/s



(b) 加卸载速率 v=0.25 MPa/s



(c) 加卸载速率 v=0.5 MPa/s

图 7　盐岩不同单轴循环加卸载速率下声发射能量和应力随时间变化曲线

Fig.7　Change curves of acoustic emission energy and stress with time during uniaxial cyclic loading and unloading of salt rock

(1) 第 1～3 次循环阶段：应力水平较低，声发射活动较弱，能量释放较少。此阶段盐岩处于弹性变形或微裂纹闭合阶段，内部结构未发生显著损伤，声发射能量信号主要由孔隙压密或原有微裂纹的摩擦滑动引起。

(2) 第 4～5 次循环阶段：中等应力水平下，声发射活动信号增强，能量释放增大。随着应力水平提高，盐岩内部微裂纹开始稳定扩展，局部塑性变形加剧，新生裂纹形成并伴随能量释放。

(3) 第 5～8 次循环阶段：高应力水平下，声发射活动急剧增强，伴随较高的能量释放，表明主裂纹加速扩展并贯通形成宏观破裂面，能量快速释放。

加卸载过程中，盐岩的 Kaiser 效应显著，即在未超过上一次加载达到的最大应力水平时，声发射活动较弱；一旦应力超过历史峰值后，声发射活动便开始增强。卸载阶段声发射活动明显减少，仅存在因裂纹闭合或摩擦滑移产生的少量低能量信号。

此外，在较低加卸载速率(v=0.125 MPa/s 和 v=0.25 MPa/s)条件下，各级声发射能量信号较弱，盐岩有更充足的时间通过晶界滑移、位错运动等塑性机制调整内部应力，微裂纹扩展更缓慢且分散，声发射活动较频繁但能量较低。在高加卸载速率(v=0.5 MPa/s)下，各级声发射能量信号较强，高速加载时，外部应力迅速施加，盐岩内部微裂纹缺乏充足时间通过塑性变形或局部调整来适应，导致裂纹扩展伴随剧烈能量释放，主裂纹扩展迅速，声发射活动频率低而释放能量高。

3.2　基于声发射能量的损伤分析

岩石的微缺陷演化过程可以看成是非平衡统计过程，微元的强度分布服从 Weibull 分布[22]，其分布密度函数为：

$$\varphi(F)=\frac{m}{F_0}\left(\frac{F}{F_0}\right)^{m-1}\cdot \mathrm{e}^{-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m} \tag{4}$$

式中：F 为微元的 Weibull 分布的随机分布变量；m 为反映岩石脆性的参数；F_0 为岩石的宏观平均强度；$\varphi(F)$ 为试样在加载过程中微元损伤率的度量。

损伤因子 D 与微元破坏概率密度之间的关系为：

$$\mathrm{d}D/\mathrm{d}F=\varphi(F) \tag{5}$$

则有：

$$D=\int_0^F \varphi(F)\mathrm{d}F=1-\mathrm{e}^{-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m} \tag{6}$$

根据等效应变假设：

$$\sigma = E_0 \varepsilon (1 - D) \tag{7}$$

式中，E_0 为无损材料的弹性模量，MPa。

岩石声发射活动规律与其内部缺陷的统计分布规律具有一致性，假设整个截面全破坏时的声发射累积能量为 Ω_m，则加载过程中声发射的累积能量 Ω 可表示为：

$$\Omega = \Omega_m \int_0^F \varphi(x)\mathrm{d}x = \Omega_m \left[1 - \mathrm{e}^{-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m}\right] \tag{8}$$

因此，声发射能量定义的损伤因子可用下式表示：

$$D = \Omega / \Omega_m \tag{9}$$

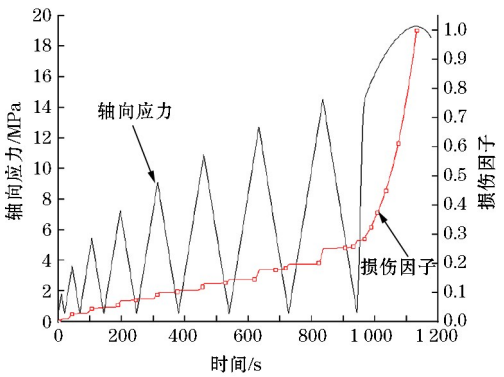
图 8 为不同单轴循环加卸载速率下盐岩损伤因子、应力随时间的变化曲线。结合曲线特征，可将盐岩在单轴循环加卸载过程中的损伤变化划分为以下 3 个阶段。

(1) 第 1～3 次循环阶段：在加卸载初期阶段，损伤因子增长较为缓慢。该阶段载荷水平较低，盐岩内部原生微小裂隙逐渐闭合，岩石内部结构未发生大规模的破坏。声发射监测到的能量释放很少，说明盐岩内部微裂纹萌生和扩展活动处于较低水平，岩石整体处于相对稳定状态，损伤累积效应不明显。

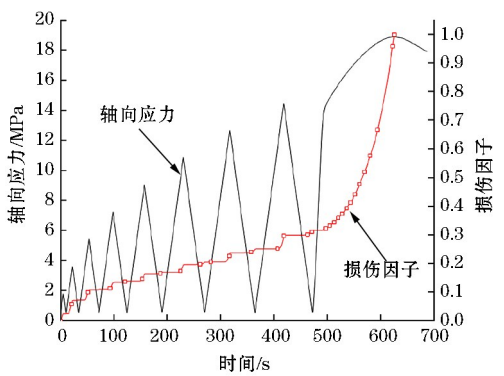
(2) 第 4～5 次循环阶段：随着加载应力水平提高，损伤因子开始平稳上升。此时盐岩所受应力逐渐增大，岩体内部开始有新的微裂纹萌生，原始微小裂纹也开始缓慢扩展，损伤因子随着时间和应力的增加而逐步累积。盐岩内部结构开始发生一定程度的变化，但仍具有一定的承载能力，损伤发展相对较为缓和。

(3) 第 5～8 次循环阶段：高应力水平加卸载阶段，损伤因子显著上升。盐岩内部微裂纹大量产生并快速扩展，微裂纹彼此连通、汇聚。声发射活动频繁发生且强度显著提升，能量大量释放，损伤快速累积，盐岩损伤程度持续加剧，内部结构完整性逐渐降低。

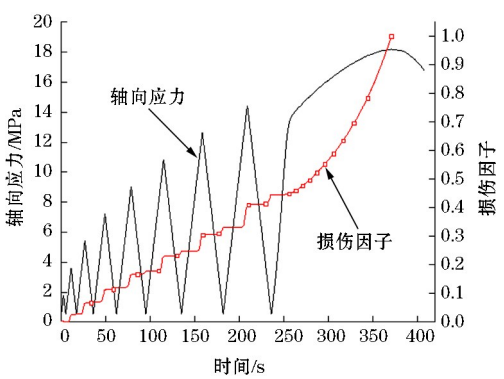
进一步对比不同加卸载速率下岩石损伤规律，发现加卸载速率越高，相同应力水平下盐岩损伤程度越大。在第 8 次循环加卸载结束后，在加卸载速率分别为 0.125 MPa/s、0.25 MPa/s、0.5 MPa/s 时，对应损伤因子依次为 0.27，0.32，0.44。加卸载速率较低时，盐岩内部微裂纹的产生和扩展相对缓慢，微裂纹有时间逐步发育、相互作用，损伤逐步累积。加卸载速率较高时，在相同时间内施加的应力变化更大，微裂纹快速萌生和扩展，损伤累积速率远高于低加卸载速率工况。因此，在相同应力水平下，高加卸载速率会加剧盐岩损伤。



(a) 加卸载速率 v=0.125 MPa/s



(b) 加卸载速率 v=0.25 MPa/s



(c) 加卸载速率 v=0.5 MPa/s

图 8 不同单轴循环加卸载速率下盐岩损伤因子、应力变化曲线

Fig.8 Change curves of damage factor and stress of salt rock under different uniaxial cyclic loading and unloading rates

4 结论

(1) 盐岩在循环加卸载条件下存在显著的塑性累积特性，滞回环宽度与残余应变随循环次数的增

加而增大;弹性模量相对稳定,破坏模式以渐进式损伤为主;盐岩抗压强度随着加卸载速率的增加而降低。

(2) 盐岩变形所需输入功随循环次数的增加而持续上升;弹性能随着加卸载循环次数的增加先上升后下降,第 5 次循环后因损伤累积效应而逐步降低;耗散能持续增加,在第 5 次循环后高应力阶段增速加快。此外,随着循环加卸载次数的增加,弹性能占比逐渐降低,耗散能占比逐渐升高。

(3) 声发射活动与应力水平呈正相关关系,低应力水平阶段声发射活动较弱,高应力水平下,声发射活动急剧增强;各级加卸载过程中,盐岩的 Kaiser 效应显著,卸载阶段声发射活动明显减弱;在较低速加卸载速率($v=0.125$ MPa/s 和 $v=0.25$ MPa/s)条件下,各级声发射能量信号较弱,声发射活动较频繁;在高速加卸载速率($v=0.5$ MPa/s)下,各级声发射能量信号较强,声发射活动频率低。

(4) 盐岩损伤随着加卸载循环次数的增加而逐渐增大,演化呈初期缓慢、中期平稳、后期快速增长的特征。第 8 次循环加卸载结束后,加卸载速率分别为 0.125 MPa/s、0.25 MPa/s、0.5 MPa/s 时,对应的盐岩损伤因子依次为 0.27,0.32,0.44。加卸载速率越高,相同应力下盐岩的损伤程度越大。

参考文献(References):

[1] 邹才能,李士祥,熊波,等.新质生产力下"能源绿色转型"革命及意义:兼论"能源三角"理论认识[J].石油勘探与开发,2024,51(6):1395-1408.
Zou Caineng, Li Shixiang, Xiong Bo, et al. Revolution and significance of "Green Energy Transition" in the context of new quality productive forces: a discussion on theoretical understanding of "Energy Triangle"[J]. Petroleum Exploration and Development,2024,51(6):1395-1408.

[2] 丁国生,丁一宸,李洋,等.碳中和战略下的中国地下储气库发展前景[J].油气储运,2022,41(1):1-9.
Ding Guosheng, Ding Yichen, Li Yang, et al. Prospects of underground gas storage in China under the strategy of carbon neutrality[J]. Oil & Gas Storage and Transportation,2022,41(1):1-9.

[3] 侯正猛,罗佳顺,曹成,等.中国碳中和目标下的天然气产业发展与贡献[J].工程科学与技术,2023,55(1):243-252.
Hou Zhengmeng, Luo Jiashun, Cao Cheng, et al. Development and contribution of natural gas industry under the goal of carbon neutrality in China[J]. Engineering Science and Technology,2023,55(1):243-252.

[4] 完颜祺琪,李国欣,朱华银,等.中国天然气地下储气库重大理论、关键技术进展与展望[J].天然气工业,2025,45(1):153-163.
Wanyan Qiqi, Li Guoxin, Zhu Huayin, et al. Major theories and key technologies of underground natural gas storage facilities in China: progress and prospects[J]. Natural Gas Industry,2025,45(1):153-163.

[5] 完颜祺琪,丁国生,赵岩,等.盐穴型地下储气库建库评价关键技术及其应用[J].天然气工业,2018,38(5):111-117.
Wanyan Qiqi, Ding Guosheng, Zhao Yan, et al. Key technologies for salt-cavern underground gas storage construction and evaluation and their application[J]. Natural Gas Industry,2018,38(5):111-117.

[6] 孟涛,梁卫国,代进州.盐岩水平溶腔储库可用性的数值模拟研究[J].矿业研究与开发,2013,33(4):10-15.
Meng Tao, Liang Weiguo, Dai Jinzhou. Numerical simulation of usability of horizontal salt cavern used as gas storage[J]. Mining Research and Development, 2013, 33(4):10-15.

[7] 喻超,黄小兰,马洪岭.夹层力学特性对盐岩储库稳定性影响的模拟分析[J].矿业研究与开发,2012,32(5):85-90.
Yu Chao, Huang Xiaolan, Ma Hongling. Simulation and analysis on the effect of interlayer's mechanical properties to stability of salt-rock storage cavern[J]. Mining Research and Development,2012,32(5):85-90.

[8] 冀辉杰,徐素国,邵震.压力溶浸作用下钙芒硝盐岩力学特性基础研究[J].矿业研究与开发,2020,40(7):43-48.
Ji Huijie, Xu Suguo, Shao Zhen. Basic research on mechanical properties of glauberite salt rock under pressure leaching[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(7):43-48.

[9] 杨镇宇,陈结,范金洋,等.盐岩变速率循环试验中的疲劳特性与声发射特征研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(4):951-963.
Yang Zhenyu, Chen Jie, Fan Jinyang, et al. Experimental study on fatigue properties and acoustic emission characteristics of salt rock under variable cyclic rate effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024,43(4):951-963.

[10] 郭印同,蔡振华.潜江超深盐矿盐岩力学特性的试验研究[J].矿业研究与开发,2010,30(2):23-27.
Guo Yintong, Cai Zhenhua. Expermental studies on mechanical properties of salt rock of Qianjiang salt mine[J]. Mining Research and Development,2010,30(2):23-27.

[11] Phueakphum D, Fuenkajorn K. Effects of cyclic loading on mechanical properties of salt[C]//International Society for Rock Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering, The University of Hong Kong. Proceedings of the 2009 International Symposium on Rock Mechanics: "Rock Characterisation, Modelling and Engineering Design Methods". Lisbon: ISRM,2009:105.

[12] Sartkaew S, Fuenkajorn K. Effects of loading rate on strength and deformability of rock salt under 273 - 373 kelvin[J]. International Society of Offshore and Polar Engineers,2014:133885135.

[13] 高红波,梁卫国,徐素国,等.循环载荷作用下盐岩力学特性响应研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(增刊1):2617-2623.
Gao Hongbo, Liang Weiguo, Xu Suguo, et al. Study of mechanical behavior response of salt rock under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(Suppl.1):2617-2623.

[14] 刘建锋,丁国生,张强星,等.弯曲加卸载下杂质盐岩断裂力学行为特征研究[J].工程科学与技术,2020,52(3):107-114.
Liu Jianfeng, Ding Guosheng, Zhang Qiangxing, et al. Investigation on fracture mechanical behavior of salt rock with impurities under bending loading-unloading conditions[J]. Engineering Science and Technology,2020,52(3):107-114.

[15] 王伟超,刘希亮,张五交,等.不同应力路径下盐岩破坏声发射时序特征研究[J].实验力学,2015,30(3):348-354.
Wang Weichao, Liu Xiliang, Zhang Wujiao, et al. Study of acoustic emission timing features of salt rock subjected to different stress path loadings[J]. Journal of Experimental Mechanics,2015,30(3):348-354.

[16] 李浩然,杨春和,李佰林,等.三轴多级荷载下盐岩声波声发射特征与损伤演化规律研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(4):682-691.
Li Haoran, Yang Chunhe, Li Bailin, et al. Damage evolution and characteristics of ultrasonic velocity and acoustic emission for salt rock under triaxial multilevel loading test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(4):682-691.

[17] 许宏发,王晨,马林建,等.三轴低频循环荷载下盐岩体积应变特性研究[J].岩土工程学报,2015,37(4):741-746.
Xu Hongfa, Wang Chen, Ma Linjian, et al. Volumetric strain of rock salt under triaxial low-frequency cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015,37(4):741-746.

[18] 尤业超,李二兵,谭跃虎,等.基于能量耗散原理的盐岩动力特性及破坏特征分析[J].岩石力学与工程学报,2017,36(4):843-851.
You Yechao, Li Erbing, Tan Yuehu, et al. Analysis on dynamic properties and failure characteristics of salt rock based on energy dissipation principle[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2017,36(4):843-851.

[19] 吝曼卿,陈烨,金胜利,等.单轴循环加卸载下磷块岩能量演化特征试验研究[J].化工矿物与加工,2024,53(3):1-7.
Lin Manqing, Chen Ye, Jin Shengli, et al. Experimental study on evolution characteristics of energy in phosphate block rock under uniaxial cyclic loading and unloading[J]. Industrial Minerals & Processing,2024,53(3):1-7.

[20] 邓朝福,刘建锋,徐慧宁,等.单轴加卸载条件下岩盐变形过程能量和声发射特征研究[J].工程科学与技术,2017,49(增刊2):150-156.
Deng Chaofu, Liu Jianfeng, Xu Huining, et al. Study on the energy and acoustic emission characteristics of rock salt under uniaxial loading and unloading conditions[J]. Advanced Engineering Sciences,2017,49(Suppl.2):150-156.

[21] 黎立云,谢和平,鞠杨,等.岩石可释放应变能及耗散能的实验研究[J].工程力学,2011,28(3):35-40.
Li Liyun, Xie Heping, Ju Yang, et al. Experimental investigation of releasable energy and dissipated energy within rock[J]. Engineering Mechanics,2011,28(3):35-40.

[22] 侯公羽.岩石力学高级教程[M].北京:科学出版社,2018.
Hou Gongyu. Advanced course of rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2018.