

DOI : 10.16285/j.rsm.2016.01.012

围压作用下盐岩应变与损伤恢复试验研究

陈 结^{1,2}, 刘剑兴¹, 姜德义¹, 范金洋¹, 任 松¹

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 为了研究盐岩在特定环境下的损伤自恢复效应, 通过改变盐岩初期损伤度、围压大小与保压时间 3 个变量分别开展了损伤盐岩保压恢复试验。基于材料破坏的应变控制理论, 主要分析了盐岩初期损伤度、围压大小与保压时间 3 个因素在压力恢复作用下对盐岩应变恢复和损伤愈合进程的影响。试验结果表明: 围压可以改变盐岩自恢复能力; 盐岩应变恢复可以分为应变快速恢复、减速恢复与缓慢恢复 3 个阶段, 这 3 个阶段与围压大小、裂隙发育度、时间之间存在密切关系, 该恢复趋势呈现出类似负指数型降低趋势; 保压时间和围压的增加在一定范围内都可以加强损伤试件的应变恢复效果与损伤愈合能力; 盐岩保压期间围压的增加都相对地加快了整体的恢复速率, 延长了减速恢复阶段的时间; 较大初始损伤的试样虽在保压期恢复速率较高, 但并未改变恢复后损伤大小的排序; 较大的围压可以促使应变恢复和损伤愈合, 但过大的围压容易造成应变假恢复和损伤增加的现象。

关 键 词: 盐岩; 初始损伤; 保压时间; 裂隙发育度; 损伤愈合

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016)01 - 0105 - 08

An experimental study of strain and damage recovery of salt rock under confining pressures

CHEN Jie^{1,2}, LIU Jian-xing¹, JIANG De-yi¹, FAN Jin-yang¹, REN Song¹

(1. State Key Laboratory for the Coal Mine Disaster Dynamics and Controls, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: The aim of this study is to investigate the damage recovery effect of salt rock under confining pressure conditions. Thus the damage recovery experiments have been performed on the salt rock specimens with different initial damage degrees under different confining pressures and holding time. Based the controlling theory of strain, the effects of the above three factors on the strain and damage recovery are analyzed under compression. The results indicate that the self-recovery ability of salt rock can be changed by confining pressure. The strain recovery process can be divided into three phases: fast recovery, retard recovery and slow recovery which are depending on the confining pressure, degree of growing cracks and holding time. Firstly, it is shown that the strain recovery process can be approximately fitted by a negative exponential function. Secondly, the increases of both holding time and confining pressure are beneficial to the effects of strain and damage recovery to a certain degree. Especially, the increase of confining pressure within the holding time can not only raises the whole recovery rate, but also prolongs the retard recovery stage. Finally, the ranking of damage magnitudes of salt rock specimens remains unchanged, even though the specimen with a higher damage degree has a high recovery rate in the pressure holding time. The high confining pressure can promote the strain and damage recovery of salt rock, but a higher confining pressure may cause the phenomenon of false recovery.

Keywords: salt rock; initial damage degree; holding time of pressure; fracture development; damage recovery

1 引 言

损伤是指在外载荷作用下被作用对象的内部结构缺陷孕育、扩展、贯通的过程, 该过程严重地

影响着材料的力学性质。在地下工程领域, 在地质运动引起的地下动态环境的影响下, 岩体一直受到动态损伤破坏作用, 若不加以控制, 岩体可能发生连续性损伤并造成工程岩体的力学与结构失稳, 极

收稿日期: 2014-06-09

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (No. 51304256, No. 51574048); 中国博士后科学基金 (No. 2013M540620, No. 2015T80857)

This work was supported by the Young Foundation of the National Natural Science of China (51304256, 51574048) and the China Postdoctoral Science Foundation (2013M540620, 2015T80857).

第一作者简介: 陈结, 男, 1983 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩石基础力学及采矿工程方面的教学与研究工作。E-mail: chenjie_cqu@163.com

大地缩短工程项目的使用期。盐岩,由于其具有良好的力学性质、低渗透率,特别是还具有良好的自恢复能力,而被广泛地用作储气库等工程使用对象。但由于地下储气库在运作过程中处于动态的影响状态,盐岩的自恢复能力也将发生变化。因此,对盐岩自恢复能力的研究尤显必要,同时,该研究也能对预测与控制岩腔稳定性提供依据。

至今为止,国内外很多作者对岩石的损伤进行了研究。宣以琼等^[1]分析了隐伏煤田基岩风化带的分布特点、岩石风化损伤的变异特征以及工程地质特性与缩小防护煤柱机制。夏红春等^[2]在假定微元强度或微元破坏服从双参数 Weibull 分布的基础上,建立了土-结构接触面统计损伤软化本构模型,该模型较好地反映了土-结构接触面变形破坏的全过程。姜德义等^[3]进行了试验分析,结果表明:盐岩应力损伤是由盐岩晶粒相互错动促使微裂纹增多所致,侧向波速确定的损伤变量与应力具有相关性。邓绪彪等^[4]基于损伤弱化与摩擦强化的思想,利用弹簧、胶结杆、滑片组成细观子链 D ,并引入剪切带宽度,建立了摩擦局部化损伤本构关系。刘泉声等^[5]概述了裂隙岩体的冻融损伤关键问题与研究状况,提出了必须以水冰相变为切入点,立足细观尺度,充分考虑冻胀融缩作用与裂隙扩展的相互影响来揭示冻岩损伤机制的观点。任松等^[6]进行了周期荷载作用下盐岩声发射特征试验研究,发现加载速率的提高会加速盐岩的疲劳损伤,声发射振铃数累计曲线和应变累计曲线在盐岩疲劳损伤具有一致性,变幅荷载造成的盐岩损伤比恒幅荷载损伤严重的现象。任松等^[7]又进行了不同温度下的盐岩疲劳特性影响的试验研究,对盐岩的疲劳损伤进行了分析,发现盐岩损伤发展模式与体积应变发展模式较为接近,提出采用体积应变来描述盐岩的疲劳损伤的合理性。Chen 等^[8]对盐岩单轴压缩破坏条件下的损伤自恢复特性进行了研究,分析了温度和湿度环境对损伤愈合的影响。孙中秋等^[9]提出了采用逾渗表述岩石内部破裂过程和损伤情况,为研究岩石破坏失效及裂缝衍生发展提供新的思路。吴斐等^[10]在非牛顿流体黏滞阻尼元件的基础上建立了岩盐分数阶的蠕变本构模型,并在试验数据上得到了验证。在损伤自恢复研究方面,国内外也取得了相当的成果。Houben 等^[11]通过试验研究发现,储库扰动区的微裂纹愈合机制可以分为由外力导致的力学愈合、由表面能激发的扩散愈合、盐岩再结晶愈合 3 种愈合方式。Chan 等^[12]研究盐岩入编损伤的微裂纹,发现这些裂纹可以在足够高的压力和温度下因晶体的再结晶作用得到恢复和愈合。马光等^[13]对维西雪龙山

变质岩带的变质岩进行了分析,研究了当地原岩恢复宏观情况。

以上研究在岩石损伤模型、损伤机制、裂隙发育等方面都取得了极大的进展,为进一步研究盐岩损伤奠定了基础;上述文献也对盐岩损伤自愈和恢复机制进行了研究,对原岩体的恢复能力进行了宏观总结与分析。由于研究最终都是为了理论联系实际,落脚于工程实践,保证工程岩体的稳定性控制与预测预报。对于盐岩的稳定性维护,若对其缺陷采取人为主动的方式,迫使盐岩自恢复能力加强势必会对盐岩损伤程度有所影响,保证岩腔储气库稳定性和使用寿命。目前为止,国内对这方面的研究并不多。根据前人研究,盐岩的损伤恢复有 3 种机制:扩散作用、再结晶作用和压力恢复作用。本文主要从压力恢复作用角度,研究了围压作用对盐岩的应变恢复和损伤愈合的影响,对不同的损伤程度下的盐岩试样进行了不同围压、不同时间参数的围压保压试验,初步研究了这 3 个参数对盐岩自恢复能力的影响,分析了不同情况下盐岩应变恢复规律与损伤愈合规律。

2 试验条件与方法

2.1 试验设备及条件

本次试验使用重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室自行设计的 WSD-400 微机控制电液伺服三轴试验机,如图 1 所示。本系统由液压站、计算机测控系统、主机等部分组成。工作过程中,由液压站提供系统动力,计算机测控系统用于控制电液伺服阀通过电液伺服缸加载,主机上安放试样并在计算机控制下进行加载试验,试验按规定的加载过程自动完成。以下是该试验机设计的主要技术参数:

(1) 最大试验力(轴向力)为 400 kN,轴向力范围为 5 ~ 400 kN,示值精度优于示值的 $\pm 0.8\%$ 。

(2) 活塞工作最大行程为 60 mm,速率范围(无级)为 0.1 ~ 80 mm/min,速率控制精度小于设定速率的 $\pm 0.8\%$ 。

(3) 位移示值分辨率为 0.04 mm,精度优于示值的 $\pm 0.8\%$ 。

(4) 最大围压为 30 MPa,试验范围为 0.6 ~ 30 MPa,示值精度优于示值的 $\pm 0.8\%$ 。

2.2 试验试件选取与加工

本试验岩样取自埋深较大、NaCl 含量高达 96% 以上的巴基斯坦某盐矿天然盐岩,该地区盐岩具有离散性小且在一定筛选条件下力学性质稳定的特点。

为了进一步减小因尺寸、杂质、结构弱面等对

试验结果引起的离散性误差，选取颜色基本一致，无可视结构面与杂质的试件进行打磨，最终加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱形试件，加工试件平整度控制在 $\pm 0.02 \text{ mm}$ 以内，加工完成的试件与试验后试件如图 2 所示。

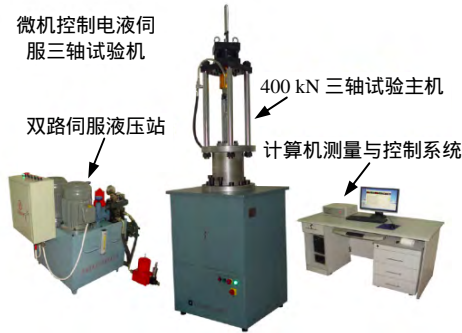
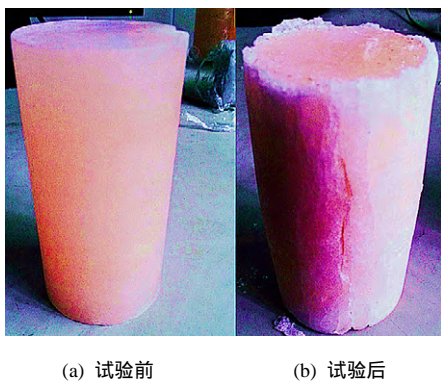


图1 WSD-400 微机控制电液伺服三轴试验机
Fig.1 WSD-400 computer controled electro-hydraulic servo triaxial testing machine



(a) 试验前 (b) 试验后
图2 试验前后试件对比图
Fig.2 Images of specimen comparison before and after tests

2.3 试验方案设计

为得到不同因素影响下盐岩的自恢复能力，试验将试件分为 4 部分，每部分分成几组试验。同时，为了消除试验结果的离散性差异，每组试验重复做 3 个试件。由于试验具有较好的可重复性，每组试验随机抽取一个试件的试验数据进行分析，并编号：做盐岩的单轴压缩试验的 D1、D2，进行不同围压保压的 H1、H2、H3，进行了不同保压时间试验的 H1、H4、H5，进行了不同初始损伤的 H1、H6、H7。方案如表 1 所示。通过对试件 D2 的单轴压缩试验，得到此批盐岩的平均单轴抗压强度为 43 MPa。所有围压加卸载速率均为 0.2 MPa/s。试验环境均保持为室内常温。

2.3.1 单轴试验

(1) 对试件 D1 进行单轴压缩试验，以 0.2 kN/s 的加载速率加载至轴压 26 MPa 后，以相同速率降

至 2.5 MPa。最后以 0.5 mm/s 的加载速率加载至试件破坏。

表 1 盐岩恢复试验方案

试验分组	前期损伤轴压/MPa	保压围压/MPa	保压时间/h
D1	26		0
D2	最大		
H1	26	10	6
H2	26	15	6
H3	26	20	6
H4	26	10	9
H5	26	10	12
H6	32	10	6
H7	38	10	6

(2) 以 0.5 mm/s 的加载速率将试件 D2 直接加载至破坏。

2.3.2 不同围压保压试验

先以 0.2 kN/s 的轴压加载速率加载至 26 MPa；再以相同速率降至 2.5 MPa，此后进行 6 h 的保压试验，围压大小分别选取为 10、15、20 MPa，保压完成后，用 0.5 mm/s 的加载速率将试件单轴压缩至破坏。

2.3.3 不同的轴压破坏试验

试件以 0.2 kN/s 的轴压加载速率加载至 26、32、38 MPa（分别取单轴抗压强度的 60%、75%、90%）进行损伤破坏；然后以相同的速率降至 2.5 MPa；最后用 10 MPa 的围压进行 6 h 的保压试验，待保压完成，用 0.5 mm/s 的加载速率将试件进行单轴压缩破坏。

2.3.4 不同保压时间试验

先以 0.2 kN/s 的轴压加载速率加载至 26 MPa 后，再以相同速率降至 2.5 MPa，此后分别进行 10 MPa 下 6、9、12 h 的保压试验，待保压完成，以 0.5 mm/s 的加载速率将试件进行单轴压缩破坏。

3 盐岩应变恢复分析

3.1 单轴损伤试验与保压恢复试验的对比分析

根据前人的研究成果^[6-7]，盐岩无论是单轴加载还是循环、变级加载都受全应力-应变曲线的控制，即应变控制理论。因此，研究盐岩的恢复特性时，对应变恢复程度的考量将至关重要。盐岩在压应力作用下的破坏形式多为剪胀破坏，除了环向应变情况外，本文选取体积应变作为分析对象，其中体积应变通过下式^[14]计算得到：

$$\varepsilon = \frac{\Delta V}{V_0} = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_2 \quad (1)$$

式中： ΔV 为试件体积增量（膨胀为正，压缩为负）； V_0 为试件原始体积； ε_1 为轴向应变（拉伸为正，压缩为负）； ε_2 为环向应变（膨胀为正，缩小为负）。

图 3、4 分别是试件 D1 和 H1 的轴向应力与轴向应变、轴向应力与环向应变曲线。从图中可以发现：轴压由 26 MPa 降至 2.5 MPa，在加载至破坏的过程中，D1 由于未经历保压，二次加载前轴向应变与环向应变的起点，与卸载段的末点相比，没有发生明显的变化。而进行了围压保压的 H1 轴向应变与环向应变均发生了不同程度的恢复。这是由于在初次加压过程中，盐岩在外载荷作用下使得内部晶体结构出现损伤并发育，盐岩裂隙增多。在保压过程中，围压的横向压缩作用使盐岩发育的裂隙逐渐闭合，裂隙空间逐渐减小，在宏观上表现为其体积的变化，也就是体积应变和环向应变的相应变化。但观察盐岩的应力峰值可以发现，二次加载后的峰值并未有较大差异。这是由于应变硬化效应的影响：H1 初次加载后经过围压保压作用，轴向的裂纹与损伤产生自恢复作用使试样的强度增强；D1 经过初次加载使盐岩轴向方向内部结构变得更加致密，产生应变硬化效应，使二次加载的峰值强度呈现伪增强。加上不可避免的试验差异性，故而两者强度表面上相近。

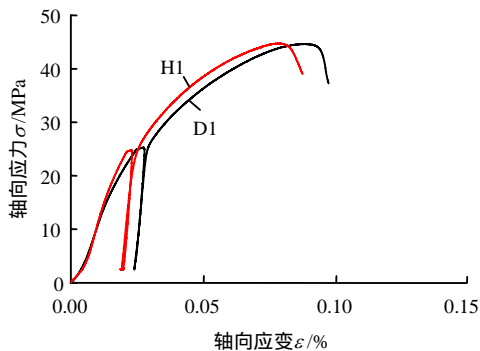


图 3 D1 与 H1 轴向应力与应变曲线
Fig.3 Axial stress and strain curves of D1 and H1

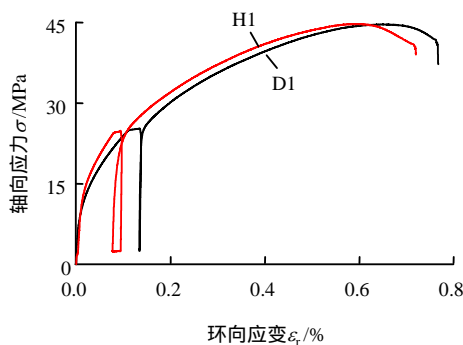


图 4 D1 与 H1 轴向应力与环向应变曲线
Fig.4 Axial stress and hoop strain curves of D1 and H1

3.2 保压恢复试验的阶段特征分析

图 5、6 分别是 H1 在围压保压情况下，保压期间的体积与环向应变随时间变化曲线。在围压保压过程中，试件体积应变和环向应变均随着时间的推移大致呈现类负指数减小趋势。针对此现象进行了不同情况下的对比试验，以确定不同情况下盐岩恢复能力，探求应力影响盐岩自恢复的规律。

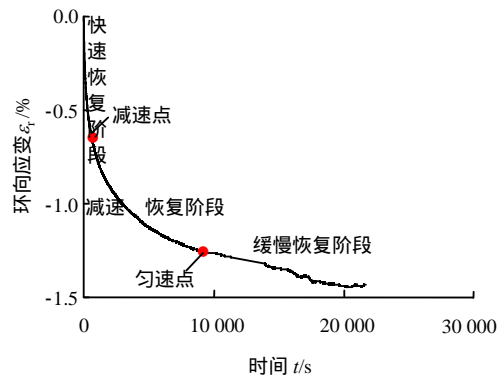


图 5 H1 环向应变与时间关系曲线
Fig.5 Relationship between hoop strain and time of H1

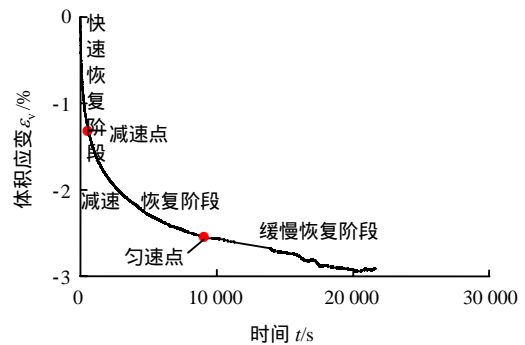


图 6 H1 体积应变与时间关系曲线
Fig.6 Relationship between volumetric strain and time of H1

在图 5、6 中，对图像恢复初期的曲线进行线性拟合，当拟合直线与实际恢复曲线某一个点的切线斜率之差超过了拟合曲线斜率的 10% 时，则把这个点叫做“减速点”。同理，对恢复后期的曲线进行线性拟合，可得到“匀速点”。这 2 个点将曲线分成的前、中、后三段，分别叫做：快速恢复阶段、减速恢复阶段与缓慢恢复阶段。

由图 5、6 相关论文资料^[15-17]推理可知：在快速恢复阶段，盐岩各向应变都快速的降低，基本呈现线性降低的趋势。由于盐岩经历初次加载，内部裂隙发育与部分晶体结构产生破坏，形成了大量的内部孔隙。保压期间，由于受到侧向的围压压迫作用，在初始阶段，试样的体积呈现出快速压缩变形，即快速恢复阶段。当内部孔隙被压缩到一定程度过

后, 孔隙壁的接触面积势必会增加, 此时孔隙的继续压缩由于受到抵抗, 应变恢复趋势会呈现出减速的趋势, 即减速点过后的减速恢复阶段。当盐岩试样内部孔隙处于被高度压密状态, 其变形恢复能力也快速放缓, 恢复速率十分缓慢, 即缓慢恢复阶段。Houhen 论述了 3 种恢复机制的成因条件, 对应于试验中曲线中 3 个恢复阶段, 可以看出: 初始快速恢复阶段, 试样由于受到围压的快速压缩作用使内部孔隙被快速压密, 因此, 此阶段恢复的主要机制为压力恢复机制; 在减速恢复阶段, 由于孔隙壁的接触阻碍了孔隙被进一步压密, 同时, 接触面的增大促进了扩散作用范围的扩大, 因此, 此阶段恢复的主要机制为扩散恢复机制和压力恢复机制; 最后的缓慢恢复阶段中, 扩散范围非常大, 内部孔隙已被完全压密, 应力恢复作用已不明显。此阶段恢复的主要机制为扩散恢复机制; 在常温条件下, 再结晶作用是一种缓慢的长期作用, 因此, 在各个阶段都存在再结晶恢复作用, 但并不是主要机制。

3.3 不同围压对盐岩应变恢复能力的影响分析

该组试验分别选取了 H1、H2、H3 作为研究分析对象。试验中, 同样初始损伤的 H1、H2、H3 分别用 10、15、20 MPa 围压经历相同时间, 即 6 h 的保压恢复, 得到了图 7、8 为两组环向与体积应变随时间变化的对比图。

图 7、8 中, H2、H3 显示出与 H1 同样的保压恢复状态下的应变恢复的阶段特征, 同时还反映出: 在保压过程中, 相同的保压时间内, 较大的围压引起的力学愈合^[18] (即应变恢复) 响应更大。这主要是因为压力恢复机制在围压增大时得到了增强。减速恢复速率相对变大, 减速点、匀速点均向后漂移, 前两个阶段的恢复时间相对延长; 缓慢恢复阶段的线性恢复速率有微量增加。在围压增加梯度 (5 MPa→10 MPa→15 MPa) 相同的情况下, H1 - H2 - H3 应变恢复的增加梯度却逐渐减小, 即应变恢复总量随围压的增大呈现减速增加的趋势。

通过上述试验现象, 发现围压影响应变恢复的规律: 较大的围压使应力恢复机制在盐岩的恢复过程中作用更加明显, 增强了快速恢复阶段的速率。

3 种恢复机制相互影响^[19-20], 应力作用增加了孔隙间的贴合度, 增强了扩散作用, 造成了应变减速恢复段和缓慢恢复段的增强。虽然在较大的围压作用下, 应变恢复量在增大, 但过大的围压在压密轴向裂隙的同时引起另外一个方向 (径向) 裂纹的发育, 引发了额外损伤。这一点会在后文损伤愈合分析中得到体现。

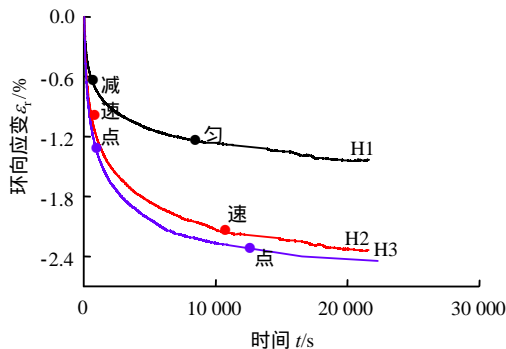


图 7 H1、H2、H3 环向应变与时间曲线

Fig.7 Hoop strain vs time curves of of H1, H2, H3

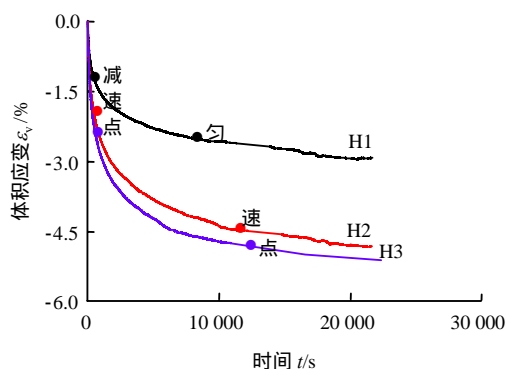


图 8 H1、H2、H3 体积应变与时间曲线

Fig.8 Volumetric strain vs time curves of H1, H2, H3

3.4 保压时间对盐岩应变恢复的影响分析

第 2 组对比试验分别选取了 H1、H4、H5 作为试验对象。三者在同等级度初始损伤过后分别进行了 10 MPa 下 6、9、12 h 的围压保压, 得出图 9、10 两组环向与体积应变随时间变化曲线。

图 9、10 中, 盐岩应变同样表现出负指数变化并呈现 3 个阶段的恢复趋势, 3 条基本重合的曲线中, 随着时间推移, 应变恢复仍然在逐渐增加, 最终趋于水平。对比可以发现, 随着时间的增加, 应变恢复呈现的特征是: 试样的差异性, 只能存在于理想状态, 在本质上是不可避免。相同试验条件下, 试样的减速点和匀速点基本相同, H1、H4、H5 前两个阶段的应变恢复量几乎也是相同的。不同保压时间造成了第 3 个阶段 (缓慢恢复段) 随保压时间的变长而变长。

3.5 初始损伤对盐岩应变恢复能力的影响分析

第 3 组对比试验分别选取了 H1、H6、H7 作为试验对象。三者分别在经过 26、32、38 MPa 的初始轴压损伤过后, 随即将轴压降至 2.5 MPa 并保持不变, 开始加载 10 MPa 围压并保压 6 h。得出图 11、12 两组环向与体积应变随时间变化而变化的曲线。

从图 11、12 中可以看出, H6 与 H7 应变恢复曲线与 H1 一样, 整体上仍然保持着负指数变化趋

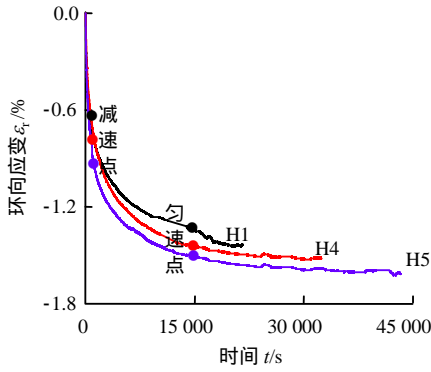


图9 H1、H4、H5 环向应变与时间曲线
Fig.9 Hoop strain vs time curves of H1, H4, H5

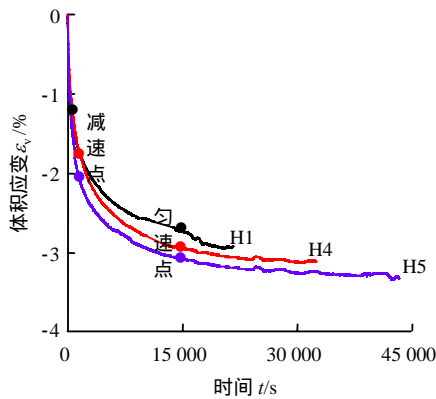


图10 H1、H4、H5 体积应变与时间曲线
Fig.10 Volumetric strain vs time curves of H1, H4, H5

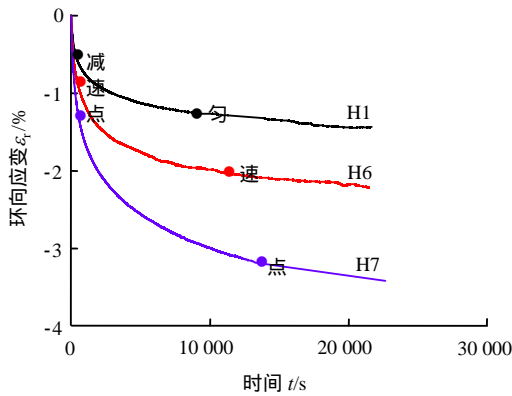


图11 H1、H6、H7 环向应变与时间曲线对比图
Fig.11 Hoop strain vs time curves of H1, H6, H7

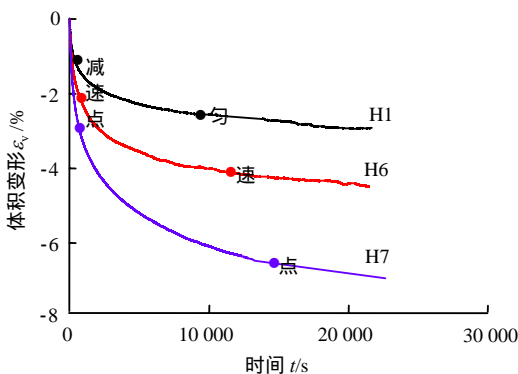


图12 H1、H6、H7 体积应变与时间曲线对比图
Fig.12 Volumetric strain vs time curves of H1, H6, H7

势。但对比分析可以发现，初始损伤对应变恢复的影响是：较大的初始损伤造成了更多的裂隙发育，所以其在各个阶段，应变恢复就会随着初始损伤的增加而增加，表现为快速恢复段的恢复量和速率增加、减速恢复段的恢复量和速率增加、缓慢恢复段速率的增加以及减速点和匀速点的向后漂移。较大的初始损伤虽然可以在相同的围压和时间下产生更大的恢复量，但较大的损伤的试样恢复后，相对于其他恢复后的试样，仍然是损伤较大的（即损伤程度排序未发生变化）这一点在后文损伤愈合分析中得到体现。

4 盐岩损伤愈合能力分析

损伤愈合表现为经过损伤愈合的盐岩试样，其承载能力相对于有损伤的盐岩，能够有效增强。通过对弹性模量（或变形模量）的考察，分析了盐岩在围压作用下损伤愈合能力的变化。根据Lemaitre^[21]创立的应变等效性假设，应力作用与受损材料所引起的变形等效于受损材料的实际有效承载面积，对于一维问题可用公式表示为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{\sigma'}{\tilde{E}} \quad (2)$$

式中： ε 、 E 、 \tilde{E} 分别为无损材料的应变值、盐岩初始与受损材料的弹性模量， $\sigma = F/A$ 为横截面上的名义应力， $\sigma' = F/\tilde{A}$ 为净截面或有效截面上的应力，即有效应力^[22-23]。

谢和平等^[24]给出了一维条件下不可逆塑性变形影响的弹塑性材料的损伤定义公式，与一维问题中基于应变等效性假设的受损材料本构方程作为“弹性模量法”定义和度量损伤的基本依据：

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E} \quad (3)$$

$$D = 1 - \frac{\varepsilon - \varepsilon'}{\varepsilon} \frac{E'}{E} \quad (4)$$

式中： D 为损伤； E' 为弹塑性损伤材料的卸载刚度； ε' 为卸载后的残余塑性变形。

通过式（3）、（4）可以推导出经过损伤过后的弹塑性盐岩的弹性模量为

$$\tilde{E} = E' \frac{\varepsilon - \varepsilon'}{\varepsilon} \quad (5)$$

定义保压过程中盐岩损伤恢复率 $K=1$ 与保压前的弹性模量 \tilde{E} 与保压后的弹性模量 E_1 的比值之差，即

$$K = 1 - \rho \frac{\tilde{E}}{E_1} = 1 - \rho \frac{E' \varepsilon - \varepsilon'}{E_1 \varepsilon} \quad (6)$$

式中： ρ 为不同加载方式下的相关性转换系数。

根据各个试验数据求得盐岩损伤恢复率得到统计表 2。

为了表述清晰和便于理解,将 $\rho/(1-K)$ 看作损伤恢复率。由表中数据可以看出,在其他变量相同情况下有 3 个特点:

(1) 盐岩随着保压围压的增加, $(1-K)/\rho$ 值在减小,即损伤的恢复率在增加,但增加呈现出减速增加的趋势,这是由于围压的增加在侧向提供了更大的压力,迫使内部孔隙闭合的同时,造成了另外方向的裂隙发展和损伤发育的结果。

(2) 随着保压时间的延长,盐岩的损伤恢复率逐渐增加。这可以解释为盐岩作为一种弹塑性材料,3 种恢复机制和流变性综合作用现象。

(3) 盐岩的损伤恢复率会随着初始损伤的增加而增加。这是由于初始损伤过程使盐岩内部结构发生破坏,盐岩展现出更强的塑性能力,但不论损伤愈合量多大,所造成的损伤始终是不可能完全恢复的,所引起的裂隙发育度也在不断增加,所以利用轴压的初始损伤量来提高岩腔稳定性与安全性管理时应当合理考虑,谨慎使用。

表 2 盐岩试件弹性模量变化与恢复值统计表

Table 2 Statistics of elastic modulus and its recovery values of salt rock specimen

变量	编号	围压/MPa	时间/h	轴压/MPa	ε /%	ε' /%	E' /MPa	E_1 /MPa	$(1-K)/\rho$
围压	H1	10			2.563	2.251	131.97	92.72	0.173 3
	H2	15			2.465	2.165	126.58	90.26	0.170 7
	H3	20			2.652	2.338	130.54	91.65	0.168 6
时间	H1		6		2.563	2.251	131.97	92.72	0.173 3
	H4		9		2.438	2.117	130.65	101.90	0.168 8
	H5		12		2.577	2.263	130.55	106.89	0.148 8
轴压	H1			26	2.563	2.251	131.97	92.72	0.173 3
	H6			32	3.284	2.895	127.89	107.45	0.141 0
	H7			38	4.724	4.281	124.89	102.52	0.114 2

5 结 论

(1) 盐岩非完全损伤过后,通过合适的围压保压可以在一定程度上人为地加强其应变恢复和损伤的愈合能力。这一现象对盐腔工程运营期保持合适压力、达到腔体结构稳定性与安全性要求,具有参考意义。

(2) 围压保压状态下盐岩环向和体积应变恢复状况大致可以分为 3 个阶段:应变快速恢复阶段、应变减速恢复阶段与应变缓慢恢复阶段。3 个阶段表现出的规律和保压期间围压大小、裂隙发育度、保压时间长短相关。但在每个阶段内 3 种恢复机制发挥的主次作用不同,且应变恢复的阶段特征随不同因素会发生不同程度的变化;初始损伤度和围压的增加会使减速点和匀速点向后漂移;恢复时间越长,最后缓慢恢复段越长。

(3) 初始损伤度的增加、保压期间围压的增大和时间的延长可以加强盐岩应变与损伤恢复能力。盐岩在整体恢复过程中呈现出类负指数降低的现象,但等梯度下的围压与初始损伤的增加并不能呈现恢复能力的线性增强,而是呈现出增强减弱的趋势。

(4) 较大初始损伤的试样虽在保压期恢复速率较高,但并未改变恢复后损伤大小的排序;较大的

围压可以促使应变恢复和损伤愈合,但过大的围压容易造成应变假恢复和损伤增加的现象。选择合适的手段增强恢复效果,是需要慎重考虑的。

参 考 文 献

- [1] 宣以琼,武强,杨本水,等. 岩石的风化损伤特征与缩小防护煤柱机制[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(6): 678 - 682.
XUAN Yi-qiong, WU Qiang, YANG Ben-shui, et al. Weathered damage attributes of rock and law of reducing protection coal column[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2004, 33(6): 678 - 682.
- [2] 夏红春,周国庆,商翔宇. 基于 Weibull 分布的土-结构接触面统计损伤软化本构模型[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(6): 734 - 737, 747.
XIA Hong-chun, ZHOU Guo-qing, SHANG Xiang-yu. Statistical damage softening constitutive model of soil-structure interface based on Weibull random distribution[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2007, 36(6): 734 - 737, 747.
- [3] 姜德义,陈结,刘建平. 应力损伤盐岩的声波、溶解试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3569 - 3573, 3594.
JIANG De-yi, CHEN Jie, LIU Jian-ping. Experimental research on acoustic and dissolved properties of stress damaged salt rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009,

- 30(12): 3569 - 3573, 3594.
- [4] 邓绪彪, 魏思民, 宋晓焱. 岩石类材料摩擦局部化损伤本构关系研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(3): 471 - 476.
DENG Xu-biao, WEI Si-min, SONG Xiao-yan. Research on the friction localization of rocklike materials on damage of constitutive relationship[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2013, 42(3): 471 - 476.
- [5] 刘泉声, 康永水, 黄兴, 等. 裂隙岩体冻融损伤关键问题及研究状况[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 971 - 978.
LIU Quan-sheng, KANG Yong-shui, HUANG Xing, et al. Critical problems of freeze-thaw damage in fractured rock and their research status[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(4): 971 - 978.
- [6] 任松, 白月明, 姜德义. 周期荷载作用下盐岩声发射特征试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1613 - 1639.
REN Song, BAI Yue-ming, JIANG De-yi. Experimental research on acoustic emission property of salt rock under cyclic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(6): 1613 - 1639.
- [7] 任松, 白月明, 姜德义. 温度对盐岩疲劳特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1839 - 1845.
REN Song, BAI Yue-ming, JIANG De-yi. The research of temperature effect on salt rock fatigue property[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(9): 1839 - 1845.
- [8] CHEN J, REN S, YANG C H, et al. Self-healing characteristics of damaged rock salt under different healing conditions[J]. **Materials**, 2013, 8(6): 3438 - 3450.
- [9] 孙中秋, 谢凌志, 刘建锋, 等. 基于逾渗模型的盐岩损伤与破坏研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 441 - 448.
SUN Zhong-qiu, XIE Ling-zhi, LIU Jian-feng, et al. Study of salt rock damage and failure based on percolation model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(2): 441 - 448.
- [10] 吴斐, 刘建锋, 武志德, 等. 盐岩的分数阶非线性蠕变本构模型[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 2): 162 - 167.
WU Fei, LIU Jian-feng, WU Zhi-de, et al. Fractional nonlinear creep constitutive model of salt rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(Supp.2): 162 - 167.
- [11] HOUBEN M E, TEN HOVE A, PEACH C J, et al. Crack healing in rock salt via diffusion in adsorbed aqueous films: Microphysical modelling versus experiments[J]. **Physical and Chemistry of the Earth**, 2013, 64: 95 - 104.
- [12] CHAN K S, BODNER S R, MUNSON D E, et al. Recovery and healing of damage in WIPP salt[J]. **International Journal of Damage Mechanics**, 1998, 7(2): 143 - 166.
- [13] 马光, 刘继顺, 苏之良, 等. 维西雪山山变质岩带岩石类型及原岩恢复[J]. 云南地质, 2004, 23(3): 304 - 309.
MA Guang, LIU Ji-shun, SU Zhi-liang, et al. The main rock types and protolith restoration of Xuelongshan belt in Weixi[J]. **Yunnan Geology**, 2004, 23(3): 304 - 309.
- [14] 姜德义, 范金洋, 陈结. 盐岩在围压卸荷作用下的扩容特征研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 1881 - 1886.
JIANG De-yi, FAN Jin-yang, CHEN Jie. Study of dilatancy characteristics of salt rock under unloading action of confining pressure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(7): 1881 - 1886.
- [15] 李廷春, 吕海波. 三轴压缩载荷作用下单裂隙扩展的 CT 实时扫描试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 289 - 296.
LI Ting-chun, LÜ Hai-bo. The real-time CT scanning test of fissure extension under triaxial compression loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(2): 289 - 296.
- [16] 李佳. 单轴和双轴压缩下裂隙性岩石力学特性试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
LI Jia. Experimental study of mechanical properties of fractured rock under uniaxial and biaxial compressions[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [17] 赵东宁, 黄志全, 于怀昌, 等. 灰质泥岩压密段变形分析与能量传递研究[J]. 铁道建筑, 2013, (12): 87 - 90.
ZHAO Dong-ning, HUANG Zhi-quan, YU Huai-chang, et al. Calcareous mudstone compaction deformation analysis and energy transfer research[J]. **Railway Engineering**, 2013, (12): 87 - 90.
- [18] CHEN D L, WEISS B, STICKLER R. A model for crack closure[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 1996, 53(4): 493 - 509.
- [19] BRANTLEY S L, EVANS B, HICKMAN S H, et al. Healing of microcracks in quartz: Implications for fluid flow[J]. **Geology**, 1990, 18(2): 136 - 139.
- [20] TER HEEGE J H, DE BRESSER J H P, SPIERS C J. Dynamic recrystallization of wet synthetic polycrystalline halite: Dependence of grain size distribution on flow stress, temperature and strain[J]. **Tectonophysics**, 2005, 396(1 - 2): 35 - 57.
- [21] LEMAITRE J. Continuous damage mechanics model for ductile fracture[J]. **Journal of Engineering Materials and Technology, ASME**, 1985, 107(1): 83 - 89.
- [22] KACHANOV L M. Time of rupture process under creep condition[J]. **IZV. Akad. Nauk. SSR. Otd. Tech. Nauk**, 1958, 8(1): 26 - 31.
- [23] RABOTNOV Y N. Creep rupture[C]//Proceedings of 12th International Congress of Applied Mechanics. Berlin: Springer Group, 1968: 342 - 349.
- [24] 谢和平, 鞠扬, 董毓利. 经典损伤定义中的“弹性模量法”探讨[J]. 力学与实践, 1997, 19(2): 1 - 5.
XIE He-ping, JU Yang, DONG Yu-li. Discussion about ‘elastic modulus method’ in the classic definition of damage[J]. **Mechanics and Practice**, 1997, 19(2): 1 - 5.