

DOI: 10.11779/CJGE201504003

损伤盐岩短期自恢复特性试验研究

姜德义¹, 王雷¹, 陈结^{1, 2}, 任松¹, 杨春和^{1, 2}

(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, 湖北 武汉 430071)

摘要: 为了解盐岩在产生损伤以后的力学性质以及在恒温环境下的短期自恢复特性, 设计了盐岩剪切损伤后的自恢复试验, 研究了损伤盐岩相关力学参数随恢复时间的变化规律。试验结果表明, 自恢复对盐岩内摩擦角的恢复作用明显, 而对黏聚力的恢复不明显; 在恢复的初期, 损伤盐岩抗剪强度随之降低, 继续恢复则会出现相对增强, 最终会进入长期恢复阶段, 趋于稳定; 经一定时间的恢复以后, 损伤盐岩的抗变形能力有所增强的同时, 其变形能力也有所增强; 对盐岩损伤自恢复的研究可以分为长期和短期, 试验中两者的分界点为 7 d 左右。通过对盐岩损伤自愈合的理论进行讨论分析, 可以知道盐岩的自恢复并不是简单的力学性质的增强, 更体现在综合性质的改善, 同时伴随部分力学性质的劣化; 通过对损伤变量的拟合, 可以看出试件的损伤值在自愈合过程中的发展变化规律。

关键词: 盐岩; 自恢复; 短期; 剪切损伤; 再结晶

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)04-0594-07

作者简介: 姜德义(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土力学、采矿工程及安全工程方面的教学与研究工作。E-mail: deyij@cqu.edu.cn。

Experimental research on properties of short-term self recovery of damaged salt rock

JIANG De-yi¹, WANG Lei¹, CHEN Jie^{1, 2}, REN Song¹, YANG Chun-he^{1, 2}

(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 430071, China)

Abstract: In order to understand the mechanical properties and short-term self recovery features of salt rock with damage under constant temperature, the self recovery tests on the salt rock with shear damage are designed, and the variation laws of related mechanical parameters with the time for recovery are studied. The test results show that the recovery of internal friction angle is obvious, and that of cohesive force is not obvious. In the early recovery stage, the shear strength decreases and then relatively increases with the recovery, and eventually enters into the long-term recovery phase. After recovery, with the increasing ability of resistance to deformation, the deformation ability of damaged salt rock also increases. The researches on the self recovery of salt rock with damage should be divided into long-term and short-term ones, and the dividing point is about 7 d. Through the discussion and analysis of the self-healing theory, it is known that the recovery is the strengthening of mechanical properties and improvement of comprehensive quality, sometimes along with degradation of some mechanical properties. By fitting the damage variables, the variation of damage values of damaged specimens in the process of self healing is released.

Key words: salt rock; self recovery; short term; shear damage; recrystallization

0 引言

盐岩体具有孔隙率低, 渗透性小等优点, 而且盐岩具有在一定条件下的自恢复特性, 被国际上公认为是石油、天然气储备和高放射性废物处置的理想场所^[1]。目前, 针对盐岩损伤特性, 包括扩容损伤、蠕变损伤、疲劳损伤以及简单应力状态下的损伤, 进行了细致的研究; 但是对于盐岩损伤自恢复性质的研究才刚刚起步。盐岩在损伤之后的自愈合特性对储气库运行过程

中的安全性和稳定性具有重要作用。

目前, 国内外针对环境条件对盐岩静动力力学特征已经进行了较多的研究, 主要包括温度、卤水浸泡、杂质、围压、加载方式等因素对盐岩力学性质的影响^[2-6]。陈剑文^[7]、高小平等^[8-9]研究发现温度对盐岩的物理力

基金项目: 国家自然科学基金项目(51304256); 中国博士后基金项目(2013M540620); 中央高校基金项目(CDJZR13240022)

收稿日期: 2014-07-23

学特性影响较大, 随着温度的升高, 盐岩的力学性能劣化明显; 陈结等^[10]研究了卤水浸泡后盐岩声发射特征, 认为盐穴建造期盐岩受一定温度的卤水作用后盐岩的强度将出现一定弱化, 但卤水也会促进损伤盐岩体的重结晶恢复。

在自愈合研究方面, 国内外已取得了部分成果。Houben 等^[11]通过试验研究发现, 储库扰动区的微裂纹愈合机理可以分为 3 种: 由外力导致的物理愈合、由表面能激发的扩散愈合、岩盐再结晶愈合, 并且推导出岩盐损伤愈合方程; Kuenkajorn 等^[12]试验研究了不同应力状态、不同裂纹类型和不同时间等条件下岩盐裂纹的愈合效应, 得出了影响岩盐裂纹愈合的主要因素有裂纹的起点和密集程度以及愈合过程中压力的大小与作用时间; 梁卫国等^[13]研究发现高温再结晶之后损伤岩盐试件仍具有完好试件的基本变形特征, 且高温再结晶可以恢复岩盐的内摩擦角, 但是对于黏聚力的恢复表现不明显; 余丽珍等^[14]研究发现石油通过盐岩的微裂缝渗透进盐岩体, 盐岩的再结晶和可塑性变形将渗透进盐岩体的石油封闭起来; 陈结^[15]分析损伤纯盐岩在一定温度、湿度环境下的损伤恢复特征发现通过一定的围压作用压合裂隙, 对损伤恢复有帮助; 在有水份补给的条件下, 温度的升高会促进晶体内的晶粒再结晶作用。

以上研究对于全面开展盐岩损伤自恢复研究起了很好的引领作用。盐岩损伤自恢复研究, 尤其对于建腔期和盐腔运行过程中的稳定性, 是非常有必要的。本文利用纯度较高的巴基斯坦盐岩, 设计了损伤盐岩在温度条件下的短期恢复试验, 研究了损伤盐岩的力学性质和恢复特性随恢复时间的变化规律。研究成果为盐岩腔体建造和与运行过程中盐腔的稳定性研究提供了理论参考。

1 试验方法

1.1 试验设备

本次试验是在重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室自行研制的三轴试验机上配合可变角剪切夹具进行角模压剪试验, 如图 1。试验机采用计算机自动控制的电液伺服自动加载系统, 最大轴向力为 400 kN, 最大加载速率调控范围 0.1~500 mm/min。变角剪切夹具可对边长不大于 50 cm 的立方体试件做不同倾角的角模压剪试验。

1.2 试样制备

试验的岩样采用巴基斯坦天然盐岩, 其组成成分和质量百分含量见表 1, 其中可溶物含量达到了 99.4%。盐岩试样尺寸为 50 mm×50 mm×50 mm, 相

邻面间相互垂直, 偏差不超过 0.25°, 相对两个面不平行度均控制在 0.0005 mm 以内, 符合岩石力学试验规范的要求。加工方式为机器切割后手工打磨, 并对其表面进行磨光处理, 加工好的盐岩试件如图 2 所示。

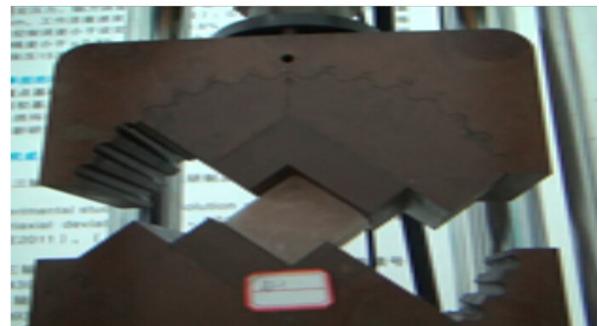


图 1 角模压剪装置

Fig. 1 Test device for variable angle shear strength



图 2 试验试件

Fig. 2 Test specimens

表 1 盐岩试样的成分

Table 1 Components of salt rock specimens

可溶物	不溶物
NaCl	K ₂ SO ₃
99.4%	0.4%

1.3 试验方案

根据研究目的需要, 设计如下试验方案, 共分 3 个步骤:

- (1) 将加工成型的完好试件加载至峰值, 使其产生损伤。
- (2) 将已经产生损伤的试件, 放入 50℃恒温水浴箱, 恢复时间分别为 0, 1, 2, 4, 7, 18, 30 d。
- (3) 将已经保温过一段时间的试件取出, 放到试验机上再次进行加载至峰值。

每组试件分 3 个角度进行加载, 3 个放置角度分别为 35°, 45°, 55°; 为保证每个试件都可以被加载至峰值, 每次剪切均超过峰值, 以荷载开始下降为标准, 下降约 1 kN 左右停止; 每组试件第一次加载之后, 将试件包裹严密之后, 放入 50℃恒温水浴箱进行保温。

2 自愈合机理讨论及模型分析

关于自愈合现象，国内外学者通过超声波^[16]、显微观察^[11]、宏观参数分析^[3]等多种手段，均观察到明显的盐岩晶粒的生长现象。尤其是 Houben 等通过显微镜观察到晶界面的生长，说明盐岩自愈合现象是实际存在的。

根据 Houben 等的分析，盐岩裂隙的愈合存在 3 种机理：①压力闭合，采用外加压力的手段，使得盐岩内部存在的裂隙闭合，如图 3 (a)；②扩散效应，在表面能的作用下，裂隙张角两侧的 NaCl 会被迁移、堆积到顶角处，最终使得界面之间的接触面积增加，如图 3 (b)；③再结晶作用，再结晶作用是在固态条件下发生的一种晶体生长作用。晶体的生长使得裂隙两边晶界面的点接触部分重新生长在一起，如图 3 (c)。

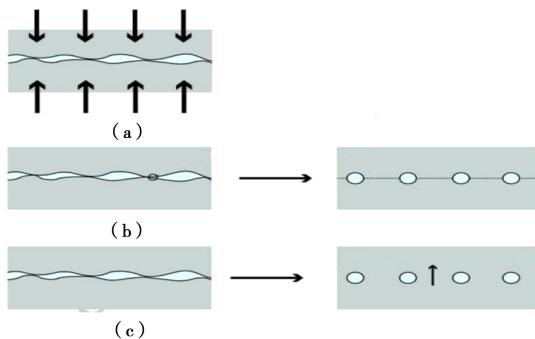


图 3 自愈合机理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of self-healing mechanism

图 3 (a) 所示机制属于一般性压密，对于盐岩内部结构的影响不大。

图 3 (b) 所示机制属于物质的方向性聚集。该机制可以分为 3 个步骤：条件传递、物质传输和结构形成。条件传递是指整个反应体系中温度、压力等量的变化；物质传输是指分子的定向移动；结构形成包括物质堆积和新生成结构体。

物质传输在整个反应进程中至关重要，物质传输的速度越快，自愈合过程也就会越快。而这种物质传输在很大程度上受晶体内部各种缺陷的分布和性质的影响。固体化学家们把空位引起的原子扩散作为一种主要的物质传输机制处于邻近空位结点上的原子，当其做热振动时，于某一频率下超过了势能垒而跳入空位中。这样失去原子的原来结点就成了空位，结果形成与空位移动方向相反的原子移动，空位浓度越大越有利于原子扩散。如果受到应力作用，这种由空位引起的原子扩散将会受到剪切应力的影响。假如多晶质集合体中的一个四方形颗粒受外加应力的作用，将会引起如图 4 所示的空位流动^[18]。

图 3 (c) 机制属于再结晶作用，属于结晶学范畴。

在外界热能的激发下，通过晶粒表面上的质点在固态下的扩散作用，使它们转移到相邻同种晶粒的晶格位置上去，导致晶粒间界面相应发生移动，从而使部分晶粒成长变粗，另部分晶粒则被消耗而最终消失。

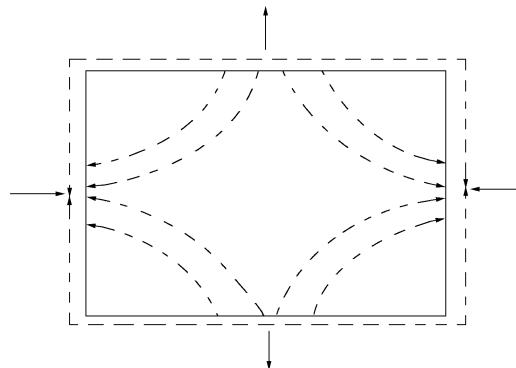


图 4 晶体在外应力作用下的空位流动^[17]

Fig. 4 Crystal space flows under outer stress

在多晶集合体中，晶粒之间存在着界面，且界面两侧的同种晶粒，一般都不会正好以相同的面网相邻接触，因而界面附近的质点都受到一定的相互作用力而偏离晶格中的平衡位置，具有或多或少的应变能。与粗晶粒相比，细晶粒具有大得多的比表面积（每单位体积所占的表面积），因而细晶粒所具有的应变能也要比粗晶粒大得多。为了尽可能降低体系的总自由能，以便使晶体更加稳定，细晶粒就有合并为粗晶粒的倾向。当受到外界热能的激发时，界面附近的质点即可发生扩散移动而引起再结晶作用，同时并伴随有应变能的释放。

此外，再结晶作用还有助于消除晶格中的缺陷，因为在那里的质点也具有较高的应变能，易于发生质点的扩散转移^[19]。

根据上述分析，对于一个已经产生损伤，含有明显裂纹的盐岩试件，在经历 3 种自愈合机制以后，其结构完整性得到了恢复，但并不是所有的力学性质都能够恢复。因为在没有压密作用的前提下，假定试件体积一定，那么物质的质量是一定的，整个试件的孔隙度没有发生变化。从这个角度来看，恢复的过程会有部分力学性质得到改善，但是也伴随部分力学性质的劣化。对于试件的整体性而言，对力学参数进行综合分析才能正确评价盐岩的损伤和自恢复效果。

在本文试验方案提供的恢复条件下，试件在荷载卸去以后，会出现一定程度的弹性恢复，这个过程对试件内部裂纹的闭合有一定的效果；扩散效应是由表面能激发引起的，温度可以提高晶体的表面能，同时也会加速 NaCl 分子的转移速度；同时温度提供的热能，可以激发晶粒的生长，由微小晶粒生长成为粗大晶粒。此外为防止水分的流失，恢复过程中试件被密封包裹；50℃的温度也不会造成盐岩结晶水的流失。

因此, 在设计的试验中, 盐岩进行自愈合的客观条件是充分的, 后期试验恢复的效果也比较明显。

3 试验结果分析

每组试件共有 9 个, 分别进行 3 个角度的压剪试验, 每个角度有 3 个试件。所用盐岩试样圆柱形标准试件的单轴抗压强度为 43 MPa, 密度为 $2.12 \times 10^3 \sim 2.15 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。试验的最终结果取各角度试件的平均值。抗剪强度与法向应力近似一条直线, 根据试验数据可以通过最小二乘法得到盐岩的黏聚力和内摩擦角值。表 2 为黏聚力和内摩擦角随恢复时间的不同而得到的不同结果。

表 2 内摩擦角和黏聚力

Table 2 Internal friction angles and cohesions

保温时间/d	原盐		恢复后	
	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa
0	20.35	15.20	19.51	14.87
1	17.70	15.85	19.74	12.81
2	17.60	16.12	21.12	12.58
4	16.34	17.61	20.27	13.76
7	16.30	16.90	22.82	10.94
18	15.07	16.08	22.07	10.21
30	17.42	15.11	23.53	9.91

图 5 为同一试件两次加载的应力应变曲线对比图, 该试件为第一次加载之后恢复 2 d 的试件。从图中可以看出两次加载的应力应变曲线存在明显差异, 第二次加载曲线更为明显的反映出硬化效果的存在; 且二次加载曲线应力峰值点非常不明显, 这一现象也存在于在其他条件的试件应力曲线上。

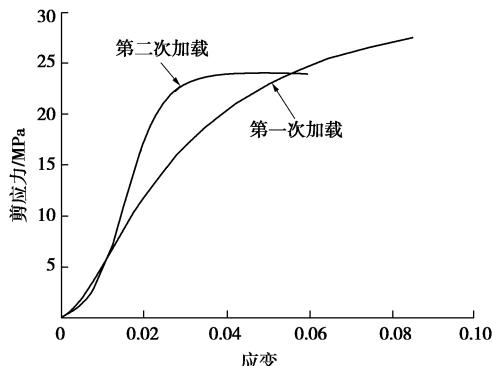


图 5 两次加载的应力 - 应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves under two loadings

为使试验结果尽可能不受到试件离散性和试件初始损伤的影响, 下文分析的时候均以保温后试件的对应参数值与原盐试件的对应参数值的相对比值作为分析对象。

3.1 内摩擦角和黏聚力分析

图 6 中分别为内摩擦角和黏聚力相对值随恢复时间的不同的变化曲线。由图 6 可以看出, 内摩擦角随着恢复时间的增加是逐渐增大的, 并在 7 d 左右达到

最大, 再进行长时间保温效果就不再明显; 黏聚力随着恢复时间的增加是逐渐减小的, 也是在 7 d 左右达到最小, 继续进行保温, 减小的趋势也不再明显。由此可以看出, 盐岩在温度条件下的自恢复作用, 对盐岩的内摩擦角恢复效果是较好的, 但是对黏聚力是有弱化作用的; 而且从时间效应来看, 盐岩的短期恢复, 最初的 7 d 是关键。

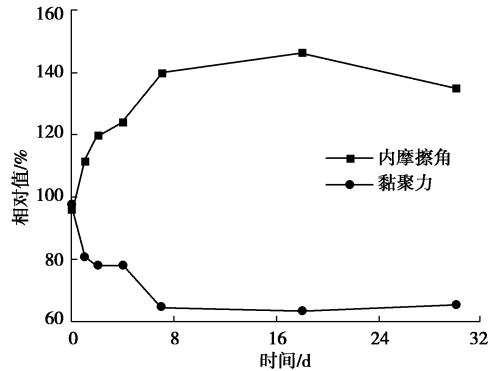


图 6 黏聚力和内摩擦角变化图

Fig. 6 Variation of internal friction angle and cohesion

压剪试验中, 试件会出现剪胀现象, 且进入塑性阶段后盐岩出现扩容现象。根据自愈合理论, 损伤盐岩出现自恢复现象以后, 其孔隙度并不会发生变化, 如果考虑剪胀和扩容作用, 相比原盐, 恢复过后的试件实际上空隙度是增加的。黏聚力即为同种物质内部相邻各部分之间的相互吸引力, 孔隙度增加意味着内部相邻各部分的平均距离增加, 黏聚力减小也是必然的; 盐岩试件在第一次加载以后, 内部出现的破碎部分, 自恢复过程中出现的再结晶作用, 使得试件内部细碎晶粒长大变粗, 这种情况既增加颗粒表面的摩擦力又增加了颗粒间的嵌入和联锁作用产生的咬合力, 所以试件的内摩擦角随着保温时间的增加逐渐增大。

3.2 盐岩剪切强度的分析

温度对盐岩剪切强度的影响较大。一般认为在低温条件下, 随着温度的增加盐岩的抗剪强度不断降低^[5]。一方面是温度升高加剧了盐岩内部分子的热运动, 削弱了它们之间的凝聚力, 使晶粒间更容易产生滑移。另一方面是因为盐岩试件内部含有多种矿物成分, 各种矿物颗粒的热膨胀系数不同, 在试件内部就形成了不均匀的热应力; 往往在矿物颗粒的边界处会形成应力集中现象, 当此处的应力达到或超过岩石的强度极限, 矿物颗粒之间的联结就会断裂, 产生微裂纹^[20]。这样随着温度的升高盐岩试件内聚力不断降低、微裂纹不断增多, 最终会使得盐岩的抗剪强度不断劣化。

图 7 为试件两次加载的抗剪强度之比与恢复时间之间的关系, 恢复时间对剪切强度的影响相对复杂。总的来看, 温度确实使试件的抗剪强度降低了, 但是降低的过程中存在增长的阶段。从时间效应上来看,

盐岩的抗剪强度随着恢复时间先减小,然后增大,最终趋于稳定或者说进入长期恢复阶段。根据3种角度的试验结果,共同的规律是试件的抗剪强度在恢复4 d以后其抗剪强度最接近天然试件,7 d为盐岩短期自恢复和长期自恢复的分界点,之后的恢复效果属于长期效果,短期内看不出明显的规律。

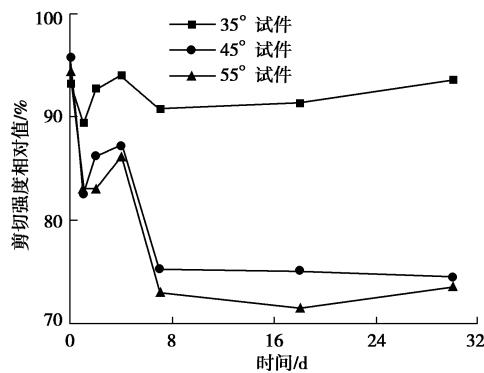


图 7 剪切强度相对值变化图

Fig. 7 Relative values of shear strength

一般来说,随着温度的增加,岩石的延性加大,屈服点降低,强度也降低。在没有恢复和恢复最开始的1~2 d,盐岩的强度明显降低,说明自愈合的作用还不明显,温度的弱化起着主要作用;然后随着保温时间的增加,自恢复作用越来越明显,抗剪强度也有所回升,在第四天达到最大,之后继续降低直至稳定。

3.3 变形能力和抗变形能力

变形能力以试件在达到峰值应力时产生的应变作为衡量指标,抗变形能力以变形模量作为衡量指标。一般情况下两个参数的变化规律应该是相反的。

如果试件两次加载之间,不做任何处理,则第二次加载时,试件会表现出明显硬化现象。如图8为保温时间为0 d的试件剪切模量相对值。硬化现象是试件内部结构从有序到无序的一种表现,自恢复作用可以一定程度上恢复试件内部结构的有序性,这就造成恢复过的试件比没恢复过的试件抗变形能力小的现象。

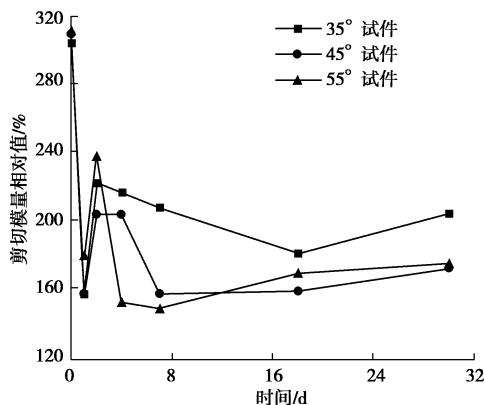


图 8 剪切模量相对值变化图

Fig. 8 Relative values of shear modulus

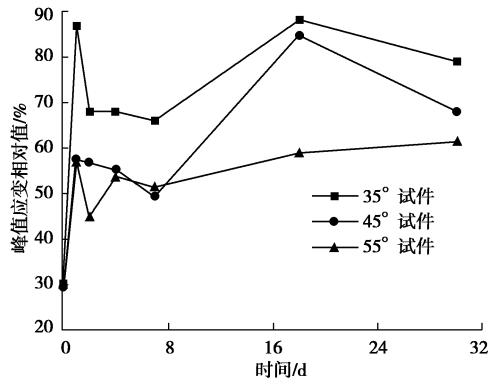


图 9 峰值应变相对值变化图

Fig. 9 Relative values of peak strain

由前文可知,温度的作用会降低岩石的刚度,增强延性。自恢复的初期盐岩的变形模量在温度作用下开始降低,此时自恢复已经开始起作用;在经过2~4 d的恢复以后,变形模量有所增强,在7 d以后基本趋于稳定。

在恢复的最初阶段,试件的峰值应变因为硬化作用低于原盐峰值时对应的应变,但是随着恢复时间的增长,变形能力逐渐增加。如图9所示,在最初的7 d里,恢复一天的试件变形能力恢复的最明显,随着时间的增加,逐渐稳定。但是55°试件的变形能力恢复不如其他角度的试件明显,55°试件主要为剪切破坏,这反映了损伤类型对自愈合作用的影响。

抗变形能力和变形能力是两种相反的作用,适度的抗变形能力和变形能力对盐岩腔体的稳定性是有好处的。通过盐岩自恢复的作用,盐岩的变形能力可以恢复到80%以上,而同时抗变形能力可以保持在原盐的150%,腔体围岩的这种特性对维护盐岩腔体的稳定是非常有利的。这也证明了盐岩本身的自恢复作用对与腔体的安全性和稳定性是很重要的。

3.4 损伤与自愈合分析

假设以原盐试件为无损时的状态,则其剪切强度为 τ_0 ,以第二次加载前(保温一定时间之后)的试件为含有损伤的状态,其剪切强度为 τ_1 ,损伤变量为 D ,则3者之间的关系为

$$\tau_1 = (1 - D)\tau_0 \quad (1)$$

由式(1)可以求得损伤试件恢复之后的损伤值,见表3。

表 3 损伤变量

Table 3 Damage variables

恢复时间	损伤值		
	35° 试件	45° 试件	55° 试件
0 d	0.067	0.042	0.056
1 d	0.105	0.174	0.169
2 d	0.073	0.138	0.169
4 d	0.059	0.128	0.138
7 d	0.092	0.247	0.270
18 d	0.086	0.249	0.285
30 d	0.138	0.255	0.264

由前文可知, 恢复后的盐岩试件在一定恢复时间内规律是比较明显的, 超过临界时间点以后规律就不再明显。所以, 以恢复 7d 之内的试件损伤值作为分析对象, 得到如图 10 所示的对比图。

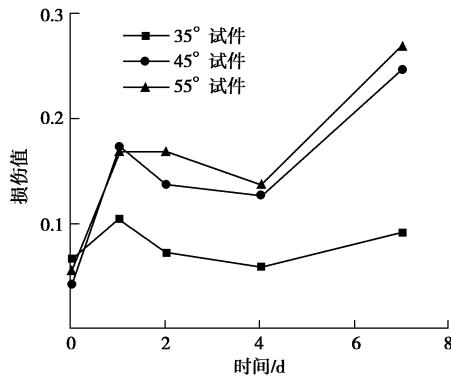


图 10 短期损伤变量变化图

Fig. 10 Variation of short-term damage variables

从图 10 可以看出, 自恢复的效果与恢复时间有很大关系。在恢复的第一天内, 愈合的效果不明显, 在温度的作用下盐岩的损伤值反而继续增大; 继续进行恢复, 恢复的效果开始明显, 损伤值逐渐减小, 并在恢复 4 d 左右时损伤值降到最小, 之后损伤恢复逐渐进入长期阶段, 规律不再明显。

对比 3 个角度的试件可以发现, 35° 试件的损伤值最小, 恢复效果也最不明显; 而 45° 试件和 55° 试件则相对效果比较明显。这反映了损伤类型对自愈合效果的影响。35° 试件受到较多的压应力, 压剪作用对压缩损伤的影响较小, 试件的初始损伤较小, 恢复的效果相对不明显; 而 45° 试件和 55° 试件, 损伤主要为剪切损伤, 损伤程度比较严重, 自愈合的效果相对明显。

以 55° 试件为例, 对损伤值和恢复时间进行拟合, 可以得到短期内, 恢复时间与损伤变量之间的关系式

$$D = 0.0049t^3 - 0.05t^2 + 0.14t + 0.06 \quad (R^2 = 0.98) \quad (2)$$

4 结 论

自愈合过程是一个损伤演化的过程, 但是与一般损伤过程的演化方向不同。研究损伤演化的方式有两种: 一种是直接测得试件的损伤值, 这种方法一般以无损手段进行测量, 可避免试验本身对试件损伤的影响; 一种是通过间接手段, 通过试件的状态参数来反映试件的损伤状态, 但这种方法一般在实施过程中对试件本身的损伤产生影响。本文采用的是第二种方法, 加载过程会对试件产生损伤, 但是所取参数并非是某一点的状态参数, 都是可以反映试件综合特征的参数, 所以研究的是过程参数, 通过过程中得到的参数来反

映试件本身的状态。这样做, 有利处在于尽量避免了试验方法产生的损伤对研究目标产生的影响, 而且更符合工程实际。通过这种试验方法得到如下结论:

(1) 通过对盐岩损伤自愈合的机理进行分析, 恢复的过程主要是结构完整性的恢复, 而不是简单的强度增加, 需要多个力学参数来反映其效果。

(2) 在短期内, 损伤盐岩黏聚力随恢复时间的增长逐渐减小, 内摩擦角随保温时间的增长逐渐增大; 损伤盐岩的剪切强度随恢复时间的增长先减小后增大; 损伤盐岩剪切模量随恢复时间的增长逐渐减小, 中间有波动; 峰值应变随恢复时间的增长呈逐渐增大的趋势。

(3) 盐岩力学参数与恢复时间的关系短期内有明显规律; 盐岩短期恢复和长期恢复的分界点是 7 d, 恢复作用的初始 7 d 效果是十分明显的, 7 d 以后进入到长期恢复阶段, 恢复的效果需要长时间观察才能研究

(4) 自愈合作用会受到试件本身性质的影响。不同角度的试件的恢复效果有明显差别。35° 剪切损伤的试件恢复效果并不十分明显, 损伤值变化较小, 而 45° 试件和 55° 试件的损伤值在自愈合作用下变化比较明显。

参考文献:

- [1] 杨春和, 梁卫国, 魏东吼, 等. 中国盐岩能源地下储存可行性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4409 - 4417. (YANG Chun-he, LIANG Wei-guo, WEI Dong-hou, et al. Investigation on possibility of energy storage in salt rock in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(24):4409 - 4417. (in Chinese))
- [2] 纪文栋, 杨春和, 姚院峰, 等. 应变加载速率对盐岩力学性能的影响[J]. 岩石力学与工程学, 2011, 30(12): 2507 - 2513. (JI Wen-dong, YANG Chun-he, YAO Yuan-feng, et al. Effects of loading strain rate on mechanical performances of salt Rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12): 2507 - 2513. (in Chinese))
- [3] 翟松韬, 吴刚, 张渊, 等. 单轴压缩下高温盐岩的力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 105 - 111. (ZHAO Song-tao, WU Gang, ZHANG Yuan, et al. Mechanical characteristics of salt rock subjected to uniaxial compression and high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 105 - 111. (in Chinese))
- [4] 方秦, 阮征, 翟超辰, 等. 围压与温度共同作用下盐岩的 SHPB 实验及数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1756 - 1765. (FANG Qin, RUAN Zheng, ZHAI Chao-chen, et al. Split hopkinson pressure bar test and numerical analysis of salt rock under confining pressure and

- temprature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(9): 1756 – 1765. (in Chinese))
- [5] 郭印同, 杨春和, 付建军. 盐岩三轴卸荷力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(3): 725 – 730, 738. (GUO Yin-tong, YANG Chun-he, FU Jian-jun. Experimental research on mechanical characteristics of salt rock under triaxial unloading test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(3): 725 – 730, 738. (in Chinese))
- [6] 郑雅丽, 张华宾, 王芝银, 等. 含杂质盐岩力学特性对比试验研究[J]. 煤炭学, 2012, **37**(1): 17 – 20. (ZHENG Ya-li, ZHANG Hua-bin, WANG Zhi-yin, et al. Experimental study on mechanical property of rock salt with impurity[J]. Journal of China Coal Society, 2012, **37**(1): 17 – 20. (in Chinese))
- [7] 陈剑文. 盐岩的温度效应及细观机理研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2008. (CHEN Jian-wen. Studies on temperature effect of mechanical properties and micro mechanism of rock salt[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Rock & Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, 2008. (in Chinese))
- [8] 高小平, 杨春和, 吴文, 等. 温度效应对盐岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(11): 1775 – 1778. (GAO Xiao-ping, YANG Chun-he, WU Wen, et al. Experimental studies on temperature effect of mechanical properties of rock salt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(11): 1775 – 1778. (in Chines))
- [9] 高小平, 杨春和, 吴文, 等. 盐岩蠕变特性温度效应的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(12): 2054 – 2059. (GAO Xiao-ping, YANG Chun-he, WU wen, et al. Experimental studies on temperature dependent properties of rock salt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(12): 2054 – 2059. (in Chinese))
- [10] 陈结, 姜德义, 邱华富, 等. 卤水浸泡后盐岩声发射特征试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(7): 1337 – 1942. (CHEN Jie, JIANG De-yi, QIU Hua-fu, et al. Study of acoustic emission character of salt rock soaked in brine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(7): 1337 – 1942. (in Chinese))
- [11] Houben M E, Ten Hove A, Peach C J, et al. Crack healing in rocksalt via diffusion in adsorbed aqueous films: Microphysical modelling versus experiments[J]. Physical and Chemistry of the Earth, 2013, **64**: 95 – 104.
- [12] Fuenkajorn K, Phueakphum D, Jandakae M. Healing of rock salt fractures[C]// Proceeding of the 38th Engineering Geology & Geotechnical Engineering Symposium. Nevada Reno: Elfass Noms and Watters University of Nevada Reno, 2003: 393 – 408.
- [13] 梁卫国, 徐素国, 赵阳升. 损伤岩盐高温再结晶剪切特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(20): 3413 – 3417. (LIANG Wei-guo, XU Su-guo, ZHAO Yang-sheng. Experimental study on heating recrystallization effect on shear characteristics of damaged rock salt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(20): 3413 – 3417. (in Chinese))
- [14] 余丽珍. 岩盐封闭性评价技术在含油气系统中的应用[J]. 资源环境与工程, 2008, **22**(3): 348 – 353. (YU Li-zhen. Application of the sealing evaluation technology for rock salt in the petroleum system[J]. Resources Environment & Engineering, 2008, **22**(3): 348 – 353. (in Chinese))
- [15] 陈结. 含夹层盐穴建腔期围岩损伤灾变诱发机理及减灾原理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012. (CHEN Jie. Catastrophic mechanism induced by damaged surrounding rock and mitigation principle during bedded salt cavern construction period[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese))
- [16] Jiang D Y, Li Q X, Chen J, et al. Self-recovery ability of stress damaged salt rock experiment[J]. Journal of Coal Science & Engineering, 2012, **19**(1): 63 – 68.
- [17] Wenke R H. 变形岩石和金属的优选方位-现代结构分析概念[M]. 金振民, 译. 北京: 中国地质大学出版社, 1991: 141 – 150. (WENKE R H. The deformation of rock and metal optimization bearing-modern structural analysis concept[M]. JIN Zhen-min, tran. Beijing: China University of Geosciences Press, 1991: 141 – 150. (in Chinese))
- [18] 刘亮明, 吴延之. 剪切应力作用下晶质矿物的化学行为及其地质意义[J]. 地质与勘探, 1996, **32**(4): 26 – 31. (LIU Liang-ming, WU Yan-zi. Chemical behavior of shear-stressed crystalline minerals and discussion of geological implication[J]. Geology and Prospecting, 1996, **32**(4): 26 – 31. (in Chinese))
- [19] 罗谷风. 结晶学导论[M]. 北京: 地质出版社, 1985: 17. (LUO Gu-feng. Crystallography introduction[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985: 17. (in Chinese))
- [20] 康健, 赵明鹏, 赵阳升. 随机非均质热弹性力学模型与岩石热破裂门槛值的数值试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(14): 2331 – 2335. (KANG Jian, ZHAO Ming-peng, ZHAO Yang-sheng. Random non-homogeneous thermal elastic mechanics model and numerical tests on thermal cracking threshold of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(14): 2331 – 2335. (in Chinese))