

# 盐岩应变硬化自弱化现象研究

陈 结<sup>1,2</sup>, 范金洋<sup>1</sup>, 姜德义<sup>1</sup>, 吴建勋<sup>1</sup>, 刘剑兴<sup>1</sup>

(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:** 为探究盐岩的应变硬化自弱化现象及机制, 拟通过单轴压缩卸载、静置、二次加载试验来研究盐岩自弱化后强度指标和变形指标的变化规律。并基于位错理论, 对自弱化的微观机制进行阐述。研究表明: (1) 盐岩自弱化后的强度和弹性模量随静置时间(弱化时间)的变长而呈现弱化趋势; 且 4 h 之前弱化趋势明显, 之后趋势特征不明显。(2) 盐岩弱化后的泊松比和等容变形率在 4 h 前后有台阶特征。泊松比的前台阶值小于后台阶值, 等容变形率的前台阶值大于后台阶值。(3) 盐岩自弱化现象是应变硬化后位错在内部残余应力(摩擦力和位错弹性力)的作用下逐渐远离集中区, 均匀化的结果。

**关键词:** 岩石力学; 盐岩; 应变硬化; 自弱化; 位错; 等容变形率

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2015)08 - 1612 - 07

## STUDY ON PHENOMENON OF SELF-WEAKENING OF STRAIN HARDENING OF SALT ROCK

CHEN Jie<sup>1,2</sup>, FAN Jinyang<sup>1</sup>, JIANG Deyi<sup>1</sup>, WU Jianxun<sup>1</sup>, LIU Jianxing<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for 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:** In order to explore the mechanisms that govern the self-weakening of strain hardening of salt rock, the tests under uniaxial compression unloading, standing still and second time loading were performed with the variation of indices of strength and strain obtained in this study. The micro-mechanism of the phenomenon of self-weakening of strain hardening was explained with the dislocation theory. After self-weakening, the peak strength and elastic modulus of rock salt in the second loading period exhibited a weakening trend with the interval time between two times loading tests. When the interval time was less than 4 h, the strength indices decreased sharply. While for the case of more than 4 h, no evident decrease was observed. When the interval time was approximately 4 h, Poisson's ratio and isometric deformation rate of salt rock jumped upward and downward. The self-weakening effect was resulted from the behavior of crystal dislocations that was removed away from original dislocation accumulation zone due to the drive of residual stress(mainly friction and unevenly elastic dislocation force).

**Key words:** rock mechanics; salt rock; strain hardening; self-weakening; dislocation; isochoric deformation rate

## 1 引 言

盐岩具有一定的损伤自愈合能力, 能够使储气

库围岩在承受微裂纹型损伤后<sup>[1-3]</sup>, 通过晶界的移动和新晶界面的形成, 一定程度地恢复原始的力学特性。自愈合能力能够较好地保证储气库的安全可靠运行, 并延长储气库的物理寿命。伴随着自愈合过

**收稿日期:** 2014 - 10 - 13; **修回日期:** 2015 - 02 - 10

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

**作者简介:** 陈 结(1984 -), 男, 博士, 2008 年毕业于重庆大学工程力学专业, 现任副教授, 主要从事岩石损伤力学方面的教学与研究工作。E-mail: chenjie\_cqu@163.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2014.1356

程, 盐岩内部晶粒结构和位势不断调整, 致密区域原子通过逐渐向稀疏部转移, 以恢复其自然平衡状态。这个过程使得之前积累的应变硬化特征逐渐弱化(暂且称为应变硬化自弱化现象)。这种弱化现象对于储气库的影响, 由于缺乏关注和研究, 目前并不可知。本文研究的目的是揭示盐岩发生应变硬化自弱化现象的规律, 并讨论其发生机制, 为盐岩的损伤研究和储气库安全运营提供参考。

盐岩材料的很多性质已经得到姜德义等<sup>[4-8]</sup>的深入研究, 从其应力-应变曲线可以判断盐岩也存在应变硬化现象。应变硬化现象表现为材料在拉伸压缩试验中, 经过屈服阶段后, 抵抗变形的能力得到增强的特征<sup>[9-10]</sup>。针对应变硬化现象的研究, 已开展了很多, 并取得了丰硕的成果。殷德顺等<sup>[9]</sup>根据描绘金属塑性拉伸变形的指数方程(经验公式), 提出了岩土应变硬化指数理论, 发现岩土的应变硬化指数能够反映岩土的硬化能力。蔡向荣等<sup>[10]</sup>研究了高韧性水泥基复合材料基本力学性能和应变硬化过程, 表明在拉伸荷载作用下其具有假应变硬化和多缝开裂特性。方 健等<sup>[11]</sup>基于 Hollomon 公式, 提出了求解金属材料均匀变形阶段  $n$  值的新测试手段, 得到了具有高准确度和可靠性的  $n$  值。代启锋等<sup>[12]</sup>利用电子万能试验机和分离式 Hopkinson 拉杆装置对冷轧双相钢分别进行了不同应变速率的拉伸试验, 结果表明: 在准静态和动态拉伸下, 存在两阶段应变硬化特性。宋玉泉等<sup>[13]</sup>通过精确试验测量结果表明, 应变硬化指数随应变的变化规律是不同的, 并从拉伸变形的状态方程出发, 揭示了其力学机制。这些研究的对象主要涉及金属材料 and 少数岩土材料, 对盐岩的相关研究尚不多见。它们很好地解释了应变硬化的一般性规律和相关机制, 可以为研究盐岩应变硬化自弱化现象提供参考与借鉴。

关于盐岩的应变硬化的机制不需要再过多解释, 但自弱化现象作为一种独特现象, 机制尚不清晰。本文拟将应变硬化后的盐岩试件密封静置, 使其在残余内应力作用下弱化, 并通过不同的静止时间研究静置时间对弱化规律的影响。并基于试验结果, 讨论盐岩内部残余应力因素对自弱化过程的影响, 揭示自弱化的机制。

## 2 试验条件及方法

### 2.1 试验条件

试验所需加载设备为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盐岩高温三轴试

验机。试验对象是取自巴基斯坦某盐矿高纯度盐岩, 主要成分 NaCl 含量 96%以上, 另含有少量  $K_2SO_3$ 、泥岩和不溶杂质成分, 试件外观颜色呈白色或浅红色、且具有一定的透光性。试件加工成标准的  $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  圆柱试件。

为了保证试件岩性的稳定可靠, 降低其离散性, 选择颜色尽量一致、含杂质成分相近, 裂纹长度、数量差异较小的盐岩试件进行加工。加工完成的试件的端面平整度尽量保证在  $\pm 0.02 \text{ mm}$  以内, 以减小端部效应。加工完成的试件见图 1。

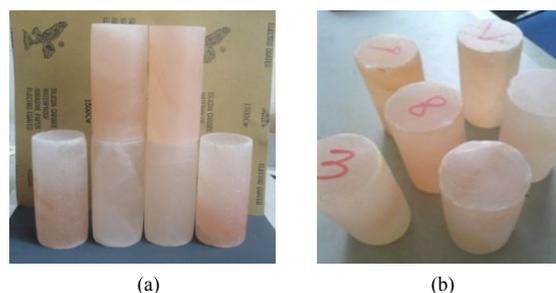


图 1 盐岩试件

Fig.1 Salt rock specimens

### 2.2 试验方案设计

试验方案设计分为 3 步, 即先通过单轴压缩试验使试件产生应变硬化, 然后密封静置于恒温环境, 最后通过标准单轴加载(二次加载), 测试其自弱化效果。

(1) 产生应变硬化阶段: 试件先加载至设定载荷值点  $M1(27.5 \text{ MPa})$ , 加载速率  $2 \text{ kN/s}$ , 然后迅速卸载至  $0 \text{ MPa}$ , 卸载速率为  $5 \text{ kN/s}$ 。

(2) 密封静置后第二次加载阶段: 卸载后将试件立即用保鲜膜包裹, 保存至密闭的整理箱内, 且箱内温度基本不变。静置时间完成后, 将试件加载至破坏, 定义第二次加载时的弹性极值点为  $M2$ , 加载速率采用  $2 \text{ mm/min}$ 。

(3) 静置时间分别取  $0, 0.5 \text{ h}, 1 \text{ h}, 2 \text{ h}, 4 \text{ h}, 8 \text{ h}, 4 \text{ d}$ 。由于试验所用盐岩试件材质均匀, 试验数据离散性很小, 每个试验做 2 个重复试验, 分别用 a 和 b 表示。试件编号规则: NS - 间隔时间(如  $0.5 \text{ h}$  或  $4 \text{ d}$ )。

## 3 试验结果分析

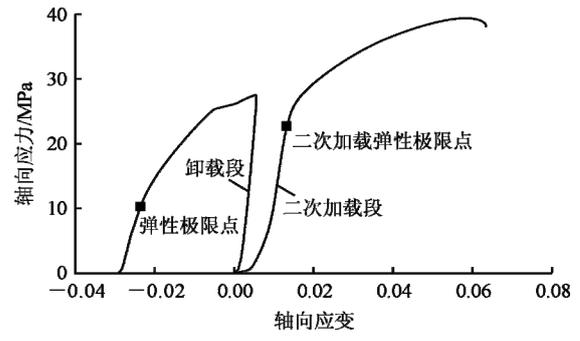
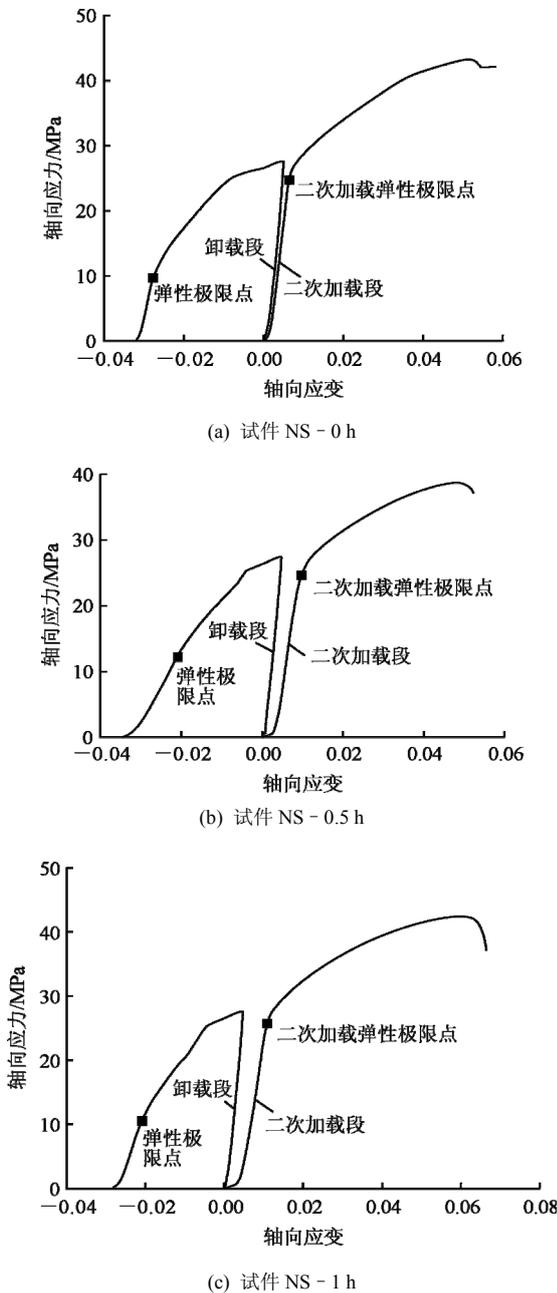
### 3.1 弱化后强度指标的变化规律

盐岩的应变硬化是盐岩原子在外部应力作用下相互挤压密实, 并达到弹性承载极限后, 内部位错

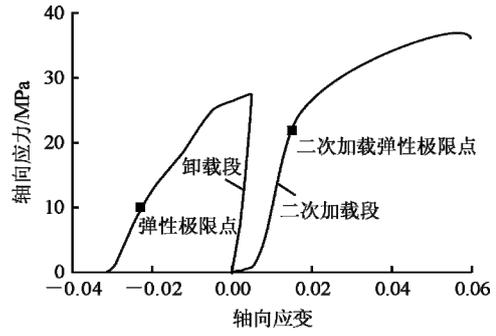
互相堆积增强内部抵抗应力的过程<sup>[14]</sup>。试验中，经过自弱化后可以发现：盐岩的峰值强度和弹性模量呈现出了较为明显的降低趋势。

(1) 峰值强度和峰值应变

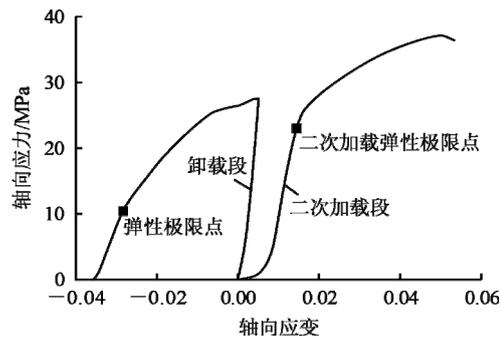
为使各曲线能尽可能清晰地展示，将第二次加载的起始应变定义为 0。如图 2 所示，为试件全过程(去除静置时间)的应力 - 应变曲线。观察对比曲线可以发现有以下规律：① 压密段的特征：试件试件 NS - 0 h 的应力 - 应变曲线的卸载段和加载段十分接近，第二次加载的压密段非常短暂。经过静置时间后，其余组第二次加载压密段曲线长度(卸载段和加载段间距)，随静置时间总体上变宽，具有非常明显的压密段特征，且压密段的应变幅值和应力幅



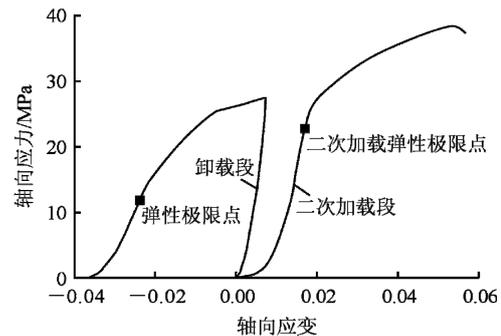
(d) 试件 NS - 2 h



(e) 试件 NS - 4 h



(f) 试件 NS - 8 h



(g) 试件 NS - 4 d

图 2 盐岩试件全应力 - 应变曲线

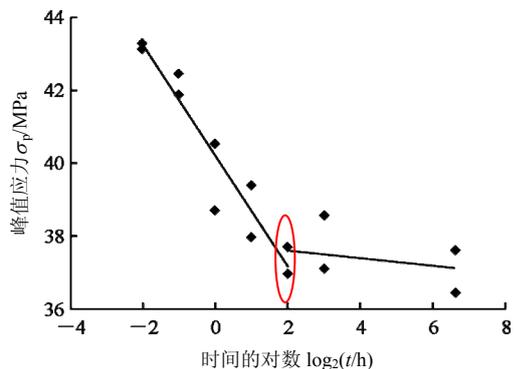
Fig.2 Completed stress-strain curves of salt specimens

值随静置时间增大而总体上增大。② 第二次加载时，峰值应力呈现降低趋势：第二次加载时，相比初次加载，盐岩的弹性极限由 10 MPa 左右升高至 25 MPa 左右。将试件第二次加载的峰值应力及其对应的应变的结果统计如表 1 中所示。为使试验数据能够较好地展示，将时间取对数后的数值设为 X 轴。考虑

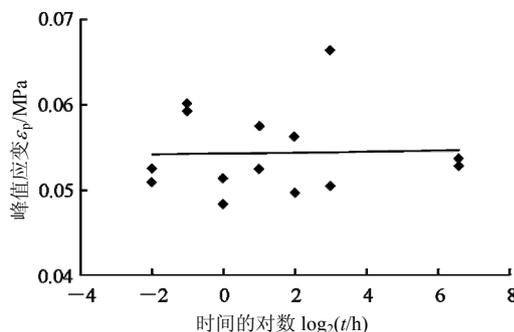
表 1 试件第二次加载峰值强度点应力、应变及弹性模量  
Table 1 Stress, peak strain and elastic modulus values of peak strength point in second time loading

试件 编号	a 组试验			b 组试验		
	峰值应力 $\sigma_p$ /MPa	峰值应变 $\epsilon_p$ /%	弹性模量 $E$ /GPa	峰值应力 $\sigma_p$ /MPa	峰值应变 $\epsilon_p$ /%	弹性模量 $E$ /GPa
NS - 0 h	43.11	0.052 5	5.383	43.27	0.050 9	5.576
NS - 0.5 h	42.46	0.059 2	4.202	41.87	0.060 1	3.756
NS - 1 h	40.54	0.051 4	4.245	38.68	0.048 3	4.286
NS - 2 h	39.38	0.057 5	3.441	37.97	0.052 4	3.912
NS - 4 h	36.97	0.056 2	2.563	37.69	0.049 7	3.096
NS - 8 h	38.58	0.066 4	2.196	37.11	0.050 4	3.531
NS - 4 d	36.46	0.052 7	3.009	37.62	0.053 7	3.400

到数据展示的完整性，将试验间隔时间为 0 的数据展示于试验间隔时间为 0.5 h 组的前一整数刻度(即 -2)，后文的 X 时间轴均采用此法处理。观察图 3(a) 可以发现试件峰值应力呈在 4 h 之前，呈降低趋势，且降低率明显，4 h 之后第二次加载的峰值应力下降趋势微弱。③ 峰值应力点应变：峰值应变具有比较大的离散性，几乎呈现随机分布，未呈现出明显的规律特征。



(a) 试件峰值应力随时间变化图



(b) 试件峰值应变随时间变化图

图 3 峰值应力、应变与时间关系曲线

Fig.3 Relationship curves of peak stress, peak strain with time

(2) 弹性模量

弹性模量是衡量物体抵抗弹性变形能力大小的

尺度。卸载时盐岩的压缩变形仅少量回弹，存在一定的残余变形。经过静置时间后，盐岩内部颗粒间产生了一定程度的自调整，其内部的致密程度发生了变化，导致其弹性模量发生变化，如图 4 所示，详细数据如表 1 所示。弹性模量的变化呈现出与试件的第二次加载峰值强度类似的规律，即在 0~4 h 范围内降低趋势明显，4 h 之后随着时间的增长，数值在一个稳定值附近上下波动，且有略微的上升趋势。

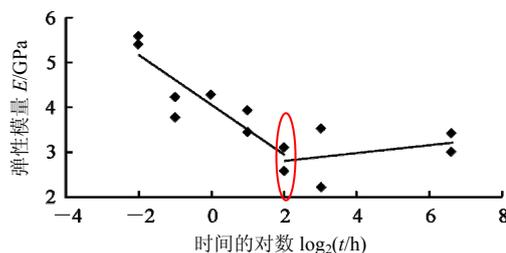


图 4 弹性模量随时间变化曲线

Fig.4 Relationship curve of elastic modulus with time

3.2 弱化后变形指标的变化规律

为进一步发现弱化规律，观察各种变形间的相互关系。在应变硬化的研究中，学者经常会采用应变硬化指数  $n$  来描述岩土等材料的应变硬化程度。但通过拟合试验数据发现 Hollomon 公式并不能很好适用于盐岩。本文从泊松比和等容变形 2 个角度，分析盐岩的变形能力的变化。

(1) 泊松比变化规律

盐岩轴向受压缩时，径向由于泊松比现象产生膨胀作用。如果这种膨胀作用越明显，说明盐岩的流动特性越强，抗变形能力越弱。如图 5 所示，详细数据如表 2 所示。泊松比随静置时间存在增长趋势。这个现象说明盐岩在自弱化过程中，轴向挤压密集的盐岩原子，部分由于扩散作用逐渐向径向转

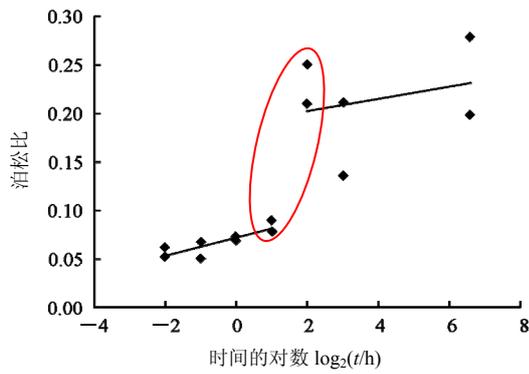


图5 试件泊松比随时间变化曲线

Fig.5 Relationship curve of Poisson's ratio with time

表2 试样第二次加载的泊松比和等容变形

Table 2 Poisson's ratio and isometric deformation rate in second loading

试样编号	a 组试验		b 组试验	
	泊松比 $\mu$	等容变形率 $\nu$	泊松比 $\mu$	等容变形率 $\nu$
NS - 0	0.052 8	-1.118 0	0.061 0	-1.390 1
NS - 0.5 h	0.066 9	1.154 4	0.050 0	-1.111 2
NS - 1 h	0.068 0	-1.025 0	0.072 6	-1.126 2
NS - 2 h	0.089 2	-1.217 2	0.078 1	-1.185 0
NS - 4 h	0.250 6	-2.004 8	0.210 2	-1.725 3
NS - 8 h	0.135 4	-1.371 4	0.211 2	-1.725 3
NS - 4 d	0.278 9	-2.261 4	0.198 2	-1.656 5

移。第二次加载时，轴向原子密度不如弱化前密度大，而径向方向的原子密度比之前大，因此出现弹性模量减小，泊松比增大的现象<sup>[14]</sup>。同样地，静置时间为 4 h 时，数据发生了突变，呈跳跃式上升，规律连续性受到影响，但是整体趋势没有改变。

(2) 等容变形特征

扩容在一定程度上能够直观地反应损伤<sup>[15]</sup>。如果材料发生较大变形的同时，伴随着较小的体积膨胀，说明其具有较好的抵抗损伤的能力，即等容变形能力较强。它是韧性特征的表现，可以反映裂纹或损伤在材料内的扩展能力。由于试验中盐岩试件的轴向方向作为主受力方向(即第一主应力方向)，本文选取轴向应变和体积应变的比值(轴向变形以压缩为正，扩容变形以膨胀为正)作为研究等容变形的指标。结果如图 6 所示，详细数据如表 2 所示。经过第二次加载，可以发现盐岩的等容变形率分为 2 个阶段：4 h 之前，等容变形率基本处于一个较高水平，呈水平波动，有微弱的下降趋势；4 h 之后，等容变形率进入一个较低水平，但仍然是水平波动，也有微弱下降趋势。

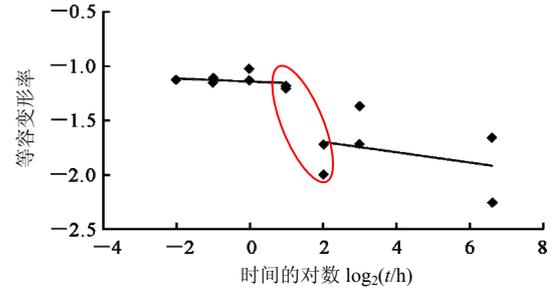


图6 试件等容变形率随时间变化图

Fig.6 Diagram of isometric deformation rate with different times

两阶段间有比较大的下降趋势，说明在短期内等容变形能力处于较高的水平，经过长期作用等容变形能力降低，处于较低的水平。原因是：扩散作用是存在于自然界的普遍现象。经过研究发现，盐岩中也存在扩散现象<sup>[16]</sup>。浓度差是扩散作用最主要的动力之一<sup>[17]</sup>。首次加载后，盐岩在轴向压缩作用下，轴向浓度提高，原子也处于不稳定状态；而径向方向由于膨胀，原子浓度较低。在浓度差作用下，盐岩原子逐渐向径向转移，径向原子浓度的提高势必导致更容易产生膨胀作用，从而引发扩容<sup>[18]</sup>。但是由于扩散作用是一种缓慢运动，仅经过长期作用才能生效，引发盐岩力学参数的变化。因此，呈现出短期内效果不明显，而长期效果明显的试验现象。

### 4 自弱化微观机制讨论

钱才富等<sup>[19-20]</sup>认为，晶体材料的应变硬化现象源于晶体内部位错的大量增殖及其在障碍处的堆积。位错堆积导致应力集中产生微裂纹，微裂纹的发育使位错被消化。盐岩的塑性行为就是位错不断滑移堆积和被消化的结果。位错群于障碍处堆积，堆积数量与盐岩内部的应力集中程度有关。若障碍阻力较大，则位错堆积数量越多，内部应力越大，产生的硬化现象越显著。盐岩加载过程中，内部晶粒产生抵抗应力与逐渐增大的外力达到平衡。在这个过程中盐岩内部的抵抗应力来源于：(1) 晶体的弹性应变力(弹性极限内)：它为内力系统增加了抵抗力；(2) 位错集中应力：堆积位错数随着外力增大持续增加，使位错群的应力集中程度增大，也增加了系统抵抗外力的能力；(3) 摩擦力：盐岩塑性行为中产生的新裂纹和旧裂纹的裂纹壁间摩擦作用由于法向应力的增大，同样造成了抵抗应力的增大。

产生塑性变形后，由于结构的复杂性，外力撤

去后, 晶体内部的抵抗应力并不会马上完全消失, 仍然存在残余应力<sup>[21]</sup>。这些残余应力随时间的增长在晶粒自调整中逐渐降低, 乃至消失。卸载过程中残余应力发生了变化:

(1) 弹性力消失: 盐岩试样 NS - 0 h 曲线初次加载的卸载段和第二次加载段, 十分接近可以说明: 盐岩卸载过程中一定程度的回弹是弹性变形的回弹。在外应力逐渐撤去时, 内部弹性应力随弹性变形消失而逐渐降低至 0。

(2) 摩擦力逐渐降低: NS - 0 h 试验第二次加载应力 - 应变曲线压密段不明显。而其余组静置后 (0.5 h) 试验的第二次加载曲线对比可以发现, 裂隙压密段逐渐变长, 说明裂纹不是在外力撤离时随之马上张开(裂纹壁间仍然接触), 而是随静置时间的变长逐步张开。裂纹方向和位错滑移方向在空间各方向相互平行或交叉, 导致裂隙周边位错在弹性回弹时产生不协调变形, 引发摩擦力作用。

(3) 位错集中力逐渐降低: 位错集中力受堆积位错群的规模(即数量与长度)和堆积位错群的位错密度影响。在晶体中位错运动又受有效应力和温度的影响, 分别如下<sup>[20]</sup>所示:

$$v = B(\sigma^*)^m \quad (1)$$

$$v = v_c \exp\left(\frac{-\Delta F^\ddagger}{kT}\right) \quad (2)$$

式中:  $B$  为温感系数;  $v$  为位错的滑移速度;  $\sigma^*$  为有效应力;  $m^*$  为应力敏感系数;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为绝对温度;  $\Delta F^\ddagger$  为标准激活能, 表示使位错充分激活所需要的能量;  $v_c$  为标准激活能为 0 时的位错速度, 即声速。试验时温度近似不变, 可以认为  $v$  仅和有效应力有关, 也就是和静置时间相关。随着搁置时间的变长, 堆积位错逐渐远离, 堆积位错间的集中应力作用也逐渐减小。

第二次加载时弹性模量是内部应力(晶体的弹性应变力、位错集中力、裂隙壁间摩擦力)的综合表现, 此时由于弹性应变力和摩擦力基本无变化, 弹性模量随静置时间呈降低的趋势, 体现了位错集中力的降低。原因是: 静置时间内堆积位错在综合残余应力作用下逐渐远离集中区域, 时间越久运动距离越远, 造成第二次加载时, 盐岩晶体内部的位错重新运动回集中区的距离越远。由于距离越远, 位错按原路返回的机制就越小, 能够重新到达集中区的位错就越少, 位错的集中程度就越低, 因此, 造

成位错集中力的降低, 导致了第二次加载弹性模量呈现降低趋势, 即弱化现象。

## 5 结 论

本文试验研究了静置时间对盐岩应变硬化自弱化现象的影响。从盐岩的峰值强度、峰值应变、弹性模量、泊松比和等容变形角度, 分析了试验现象。主要得到以下结论:

(1) 经自弱化后盐岩的峰值强度和弹性模量随静置时间的变长而呈现弱化趋势。静置时间 4 h 之前, 减弱趋势明显, 4 h 之后峰值强度轻微上升, 弹性模量轻微下降。

(2) 盐岩第二次加载的泊松比呈升高趋势在静置时间 4 h 前后有一突跳上升。等容变形率呈下降趋势, 在静置时间 4 h 前后有一突跳下降。

(3) 盐岩经历初次加载时产生位错集中堆积, 导致应变硬化。撤去外力后, 位错在盐岩内部残余应力(摩擦力和位错集中力)作用下, 逐渐分散, 远离原始位错集中区, 第二次加载时位错集中程度降低是导致自弱化的微观原因。

## 参考文献(References):

- [1] CHAN K S, BONDER S R, MUNSON D E. Recovery and healing of damage in WIPP salt[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 1998, 7(2): 143 - 166.
- [2] 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.
- [3] DRURY M R, URAI J L. Deformation-related recrystallization processes[J]. *Tectonophysics*, 1990, 172(3/4): 235 - 253.
- [4] 姜德义, 范金洋, 陈 结, 等. 应力因素下的岩盐卸荷扩容试验研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(增 1): 41 - 46.(JIANG Deyi, FAN Jinyang, CHEN Jie, et al. Test study of unloading capacity expansion characteristics of salt rock under stress factors[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(Supp.1): 41 - 46.(in Chinese))
- [5] HAKAN A. Percolation model for dilatancy-induced permeability of the excavation damaged zone in rock salt[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 46(4): 716 - 724.
- [6] 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]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(12): 2 507 - 2 513.(JI Wendong, YANG Chunhe, YAO Yuanfeng, et al. Effects of loading

- strain rate on mechanical performances of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12): 2 507 - 2 513.(in Chinese))
- [7] 姜德义, 范金洋, 陈 结, 等. 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): 1 881 - 1 886.(JIANG Deyi, FAN Jinyang, CHEN Jie, et al. Study on the characteristics of the salt's capacity expansion under the action of confining pressure unloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 1 881 - 1 886.(in Chinese))
- [8] 刘建锋, 徐 进, 杨春和, 等. 盐岩拉伸破坏力学特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 580 - 586.(LIU Jianfeng, XU Jin, YANG Chunhe, et al. Mechanical characteristics of tensile failure of salt rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(4): 580 - 586.(in Chinese))
- [9] 殷德顺, 和成亮, 陈 文. 岩土应变硬化指数理论及其分数阶微积分理论基础[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 762 - 766.(YIN Deshun, HE Chengliang, CHEN Wen. Theory of geotechnical strain hardening index and its rationale from fractional order calculus[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(5): 762 - 766. (in Chinese))
- [10] 蔡向荣. 超高韧性水泥基复合材料基本力学性能和应变硬化过程理论分析[博士学位论文][D]. 大连: 大连理工大学, 2010.(CAI Xiangrong. The basic mechanical performance and strain hardening process theoretical analysis of ultra high toughness cementitious composites[Ph. D. Thesis][D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.(in Chinese))
- [11] 方 健, 魏毅静, 王承忠. 拉伸应变硬化指数的解析测定及力学分析[J]. 塑性工程学报. 2003, 10(3): 12 - 17.(FANG Jian, WEI Yijing, WANG Chengzhong. Analytical measurement and mechanical analysis of tensile strain hardening exponent[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2003, 10(3): 12 - 17.(in Chinese))
- [12] 代启峰, 宋仁伯, 范午言, 等. DP1180双相钢在高应变速率变形条件下应变硬化行为及机制[J]. 金属学报, 2012, 48(10): 1 650 - 1 655. (DAI Qifeng, SONG Renbo, FAN Wuyan, et al. Behaviour and mechanism of strain hardening for dual phase steel DP1180 under high strain rate deformation[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48(10): 1 650 - 1 655.(in Chinese))
- [13] 宋玉泉, 海锦涛, 管志平. 拉伸变形应变硬化指数的力学解析[J]. 中国科学(E 辑), 2001, 31(2): 103 - 108.(SONG Yuquan, HAI Jintao, GUAN Zhiping. Tensile deformation strain hardening exponent analytical mechanics[J]. Science in China, 2001, 31(2): 103 - 108.(in Chinese))
- [14] HOUBEN M E, HOVE A T, 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, 2012. [http://d.scholar.cnki.net/detail/SJES\\_U/SJES13011300472126](http://d.scholar.cnki.net/detail/SJES_U/SJES13011300472126).
- [15] 姜德义, 范金洋, 陈 结, 等. 围压卸载速率对盐岩扩容损伤影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增 2): 3 154 - 3 159. (JIANG Deyi, FAN Jinyang, CHEN Jie, et al. Research on capacity expansion damage of the salt under the different rates of confining pressure unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Supp.2): 3 154 - 3 159.(in Chinese))
- [16] WATANABE T, PEACH C J. Electrical impedance measurement of plastically deforming halite rocks at 125 °C and 50 MPa[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 107(B1): ECV2 - 1.
- [17] HOUBEN M E, HOVE A T, 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, 2012. [http://d.scholar.cnki.net/detail/SJES\\_U/SJES13011300472126](http://d.scholar.cnki.net/detail/SJES_U/SJES13011300472126)
- [18] MAS D, CHEMENDA A I. Dilatancy factor constrained from the experimental data for rocks and rock-type material[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 67: 136 - 144.
- [19] 钱才富. 位错和位错偶沿单一滑移系从裂纹尖端的发射[J]. 金属学报, 1999, (5): 546 - 550.(QIAN Caifu. Dislocation and dislocation along a single slip system from crack tip emission[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1999, (5): 546 - 550.(in Chinese))
- [20] 赵敬世. 位错理论基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989: 126 - 130.(ZHAO Jingshi. Base of dislocation theory[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1989: 126 - 130.(in Chinese))
- [21] 王仲仁, 苑世剑, 胡连喜. 弹性与塑性力学基础[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1997: 139 - 141.(WANG Zhongren, YUAN Shijian, HU Lianxi. Elastic-plastic mechanism base[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1997: 139 - 141.(in Chinese))