

①7 96-103

岩盐流变特性的研究*

Research on the Rheology Behaviour of Rock Salt

邱贤德

Qiou Xiande

(重庆大学, 重庆, 630044)

庄乾城

Zhung Qiancheng

(重庆钢铁设计研究院)

p588.247
TD313

A 摘要 用自行设计的杠杆式流变仪,对长山、乔后岩盐的蠕变、松弛、弹性后效流变力学特性进行了试验研究。研究表明,长山岩盐的变形受位错及晶间界面的控制,在长期蠕变中以位错滑移为主,该岩盐主要呈现脆性破坏。乔后岩盐是一种复杂的粘弹塑性体,屈服应力很低。根据试验结果,建立了单向应力状态下的最大应变破坏准则,当 $\epsilon \geq \epsilon_0$ 时,岩盐试件将发生破坏。

关键词 岩盐流变特性; 弹性后效; 蠕变; 松弛; 模型

中国图书资料分类法分类号 TD331, TS353

ABSTRACT Using lever rheology instrument designed by ourself the experimental research about rheology behaviours of creep, relaxation and residual elasticity of Changshan's, Qiaohou's rocksalt have been carried out in this paper. It makes clear from research that the delormation of Changshan's rocksalt is controlled by dislocation and grain boundary, in the course of the long-term creep, the dislocation is the main strain. The main failure of this rocksalt is brittle. Qiaohou's rocksalt is a kind of matter which possesses complicated visco-elasticity plasticity. The yield stress is very low. According to the experimental result, a maximum strain failure criterion under unidirectional stress condition has been set up. When $\epsilon \geq \epsilon_0$ the rocksalt sample will be failure.

KEYWORDS rheology behaviour of rock salt; residual elasticity; creep; relaxation; model

0 引 言

岩盐作为一种特殊的岩石类材料,对其力学特性的研究在国际上受到广泛的重视。流变既是岩石类材料的共性,又是软岩的特性。流变特性包括蠕变、松弛、弹性后效^[1]。岩盐、泥岩等软岩类对流变非常敏感。流变破坏也是这类岩石的主要破坏形式。而岩盐流变的实验及理论研究在国内尚不多见。

1 岩盐流变的试验

* 收文日期 1994-04-05

1.1 松弛试验装置

松弛试验使用的仪器为经改装的岩石膨胀测定仪,其原理见图1。图中:1—BLR-1型拉压传感器;2—试件;3—球铰支座;4—SY-III型数字式应变仪。

1.2 试验结果与分析

1.2.1 岩盐的松弛试验

试验的样品取自长山盐矿和乔后盐矿,其基本情况见表1。由于岩盐遇水溶解,在空气中潮解等特点,试件采用干加工。试验时试件外套一层较柔软的塑料薄膜,以避免受空气湿度的影响。

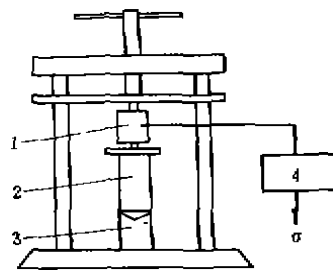


图1 松弛试验装置原理图

表1 松弛试验试件一览表

序号	试件编号	试件尺度/mm 长×宽×高	主要晶粒 尺寸(mm)	试件外观	取样点	试验时间
1	R1-1	37.5×38×61.4	~4-11	白色透明	长山	9月30日~10月6日
2	R1-2	37×38.2×61	~4-11	明显可见	长山	10月7日~10月29日
3	R1-3	34.3×34.9×54.5	~4-11	晶粒直接	长山	10月8日~10月23日
4	R1-4	35×35×54	~4-11	胶结	长山	10月24日~10月29日
5	R1-5	φ52.2×98.5	~4-11		长山	11月5日~12月3日
6	R2-1	36.2×39.2×78.5	<1	灰黑色泥	乔后	12月3日
7	R2-2	38.6×43.1×74.1	<1	质胶结	乔后	12月5日~12月18日
8	R2-3	48×48×103.2	<1		乔后	12月18日~25日
9	R2-4	44.7×40.8×81.4	<1		乔后	12月25日~1月6日
10	R2-5	49.4×48×93.9	<1		乔后	93年1月6日~15日

表2 试验初始条件及初始状态

试件编号	MPa									
	R1-1	R1-2	R1-3	R1-4	R1-5	R2-2	R2-3	R2-4	R2-5	
ϵ_0 (%)	1.60	3.67	0.76	0.80	2.00	0.44	0.78	0.82	0.51	
σ_0	5.44	12.2	2.28	2.71	7.29	3.56	6.10	6.85	4.07	
$10^{-2} \times B(\sigma_0/\epsilon_0)$	3.40	3.40	3.00	3.39	3.65	7.95	7.82	7.74	7.98	
$10^{-2} B(\sigma_0/\epsilon_0)$	3.37					7.87				

1.2.2 试验结果与分析

试验目的在于确立合理的松弛本构关系。由于现场主要以压应力为主,故试验以压缩松弛为主。试验初始条件见表2。其试验结果见图2、图3。

从图2、图3中可以看出,应力松弛速率随时间的增长而降低并趋于零。

通过对试验数据的回归分析,得到自贡长山盐矿岩盐的应力与时间的关系为:

$$\sigma = A - B \ln t \quad (1)$$

式中 σ ——应力,MPa

t ——时间,h.

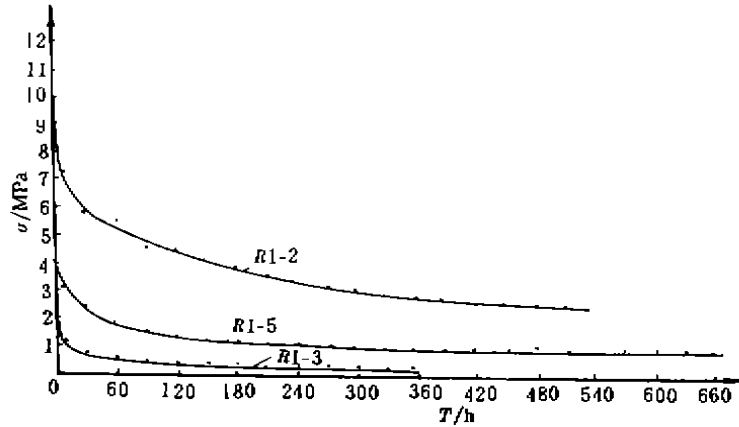


图2 长山盐矿松弛实验曲线

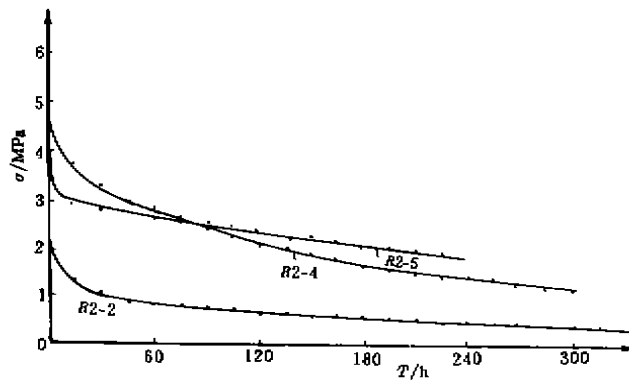


图3 乔后盐矿松弛实验曲线

此模型说明应力与时间的自然对数之间有良好的线性关系。如 R_{1-2} 试件松弛试验回归方程为

$$\sigma = 8.39522 - 0.87644 \ln t \quad (2)$$

其相关系数 $r = 0.99046$ 。从实验回归过程中还发现 A, B 参数与初始应力 σ_0 也有很好的线性关系。

$$A = -0.312678 + 0.692898 \sigma_0, \quad r = 0.99292 \quad (3)$$

$$B = -2.56592 \times 10^{-2} + 7.53212 \times 10^{-2} \sigma_0, \quad r = 0.9915 \quad (4)$$

从云南乔后盐矿岩盐的试验结果来看,模型

$$\sigma = E \cdot \exp(-Ft) \quad (5)$$

的拟合效果相当好。另外

$$\sigma = A - B \ln(-Ft) \quad (6)$$

的拟合效果也不错。

式中 F ——为因岩性而异的试验常数。但模型的回归参数 A, B 对初始应力 σ_0 的依赖性较差。试件 R_{2-2} 的模型回归方程为:

$$\sigma = 1.89854 \exp[-6.99951 \times 10^{-3} t], \quad r = 0.93444 \quad (7)$$

从以上数据处理中可以发现,回归参数与初始应力之间存在着一定的关系。从某种意

义上讲,回归参数是时间、温度、试件尺寸及微观结构等因素的函数。

在试验中还发现应力存在波动现象,不同于岩石力学中的微震现象,它有长短不同的周期。据分析这是岩盐微观变形机制所致,它是由位错的运动和孪生起着控制作用^[3]。根据位错攀移和多边形化建立流变模型。

1.3 岩盐的蠕变

1.3.1 岩盐蠕变试验装置

蠕变试验装置为自行设计加工的杠杆式流变仪,采用二级加载,放大系数为55倍,最大施载能力为65 kN。所用试件最大高度为140 mm,可以进行恒载和卸载试验,使用百分表、千分表测量变形。

1.3.2 试验结果与分析

蠕变是一种长期行为,由于时间和条件所限制,笔者仅对单轴压缩状态下的中期蠕变进行了试验,对长山岩盐和乔后岩盐分别进行了7件圆柱体标准试件和4件长方体标准试件的试验。试验结果见图4、图5。

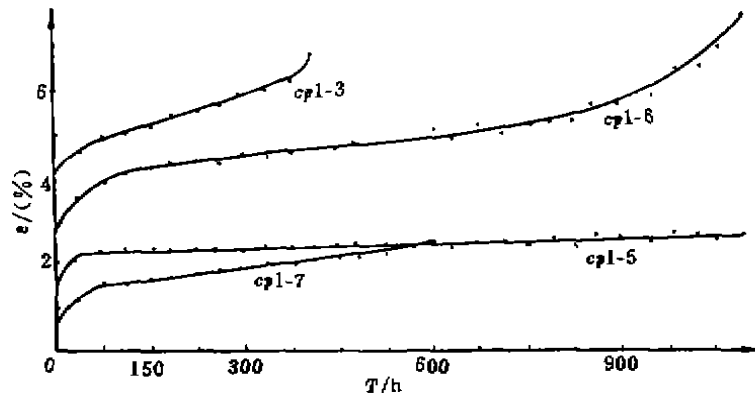


图4 长山岩盐蠕变试验曲线

从图4、图5中可以看出,两种岩盐的蠕变虽然有很大差异,但蠕变发展均有三个阶段,在各阶段上,对相同应力水平,乔后岩盐蠕变第一阶段很短,且初始应变很小,而蠕变第二阶段短不明显;第三阶段长而应变大,此阶段持续时间占了整个流变时间的50%左右,而应变占了总应变的70%左右。图5中乔后岩盐蠕变曲线型式是应力较高所致,对低应力下的蠕变曲线未获得。长山岩盐的蠕变第一、第三阶段较短,第二阶段较长,且初始应变比较大,因此长山岩盐应变硬化现象比较明显。乔后岩盐的应变的软化现象比较明显。

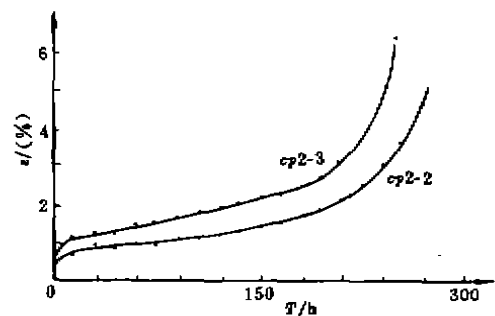


图5 乔后岩盐蠕变试验曲线

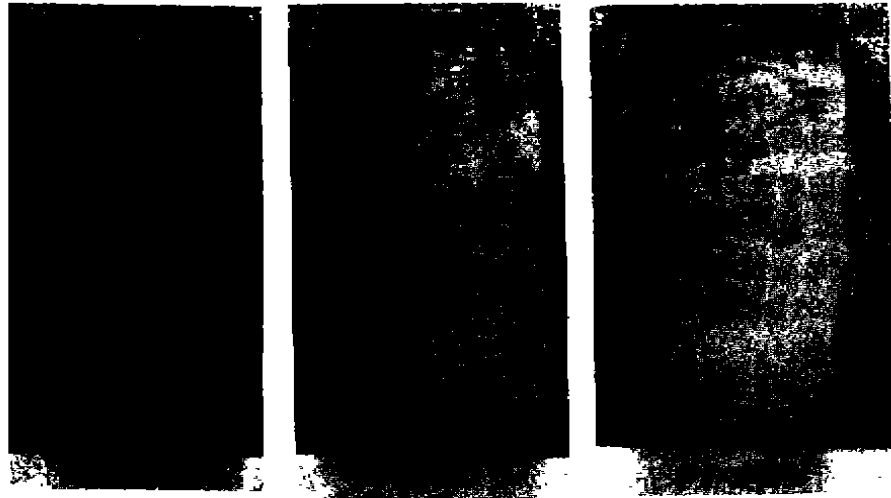


图 6 长山盐矿岩盐蠕变裂隙的发展

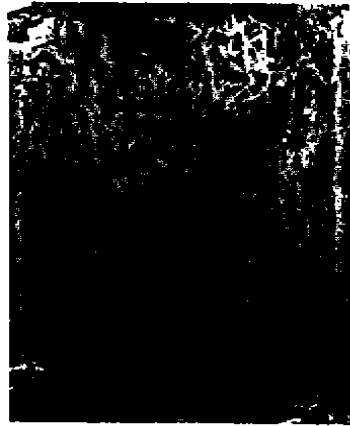


图 7 长山盐矿岩盐裂隙网络



图 8 乔后盐矿岩盐流变破坏

表 3 实验初始条件、初始应变及破坏时间

试件编号	cp1-1	cp1-2	cp1-3	cp1-4	cp1-5	cp1-6
σ_0/MPa	18.36	18.3	14.72	14.14	9.93	14.41
$\epsilon_0/(\%)$	1.080	0.930	3.676	2.597	1.574	2.520
T_b/h	77		406		> 1500	1046.6
$\epsilon_b/(\%)$	6.062		6.999			6.10
试件编号	cp1-7	cp2-1	cp2-2	cp2-3	cp3-4	
σ_0/MPa	9.80	7.92	7.77	11.30	4.17	
$\epsilon_0/(\%)$	0.68	1.24	0.479	0.61	6.34	
T_b/h		0.133	275.500	251.250	3.500	
$\epsilon_b/(\%)$		6.02	6.991	6.32		

注: T_b ——破坏时间

在破坏上,长山岩盐一般在流变的初期就形成宏观裂隙,至蠕变第二阶段时裂隙基本达到稳定。当裂隙加速发展时,蠕变进入第三阶段,最终由于裂隙的连通而导致破坏。乔后岩盐

蠕变初期一般不出现宏观裂隙,一旦出现蠕变明显加速,就造成蠕变破坏。两种宏观裂隙均沿应力轴向分布,如图 6 所示。长山岩盐的裂隙密度要大得多,大的裂隙沿轴向扩展,小的裂隙逐渐发展成网格结构,如图 7。乔后岩盐 X 裂隙常定向发展,形成宏观剪切带,如图 8 所示。两种岩盐的破坏形式基本相同,以张性破坏为主,符合最大拉应变准则。试件初始条件见表 3。用基本模型回归分析的结果如下。

对长山岩盐 CP_{1-6} 试件:

$$\text{第一阶段} \quad \sigma = 2.52 + 0.3012t^{0.3502}, \quad \text{相关系数 } r = 0.99602 \quad (8)$$

$$\text{第二阶段} \quad \sigma = 3.941 + 1.871 \times 10^{-4}t, \quad \text{相关系数 } r = 0.99422 \quad (9)$$

$$\text{第三阶段} \quad \sigma = 3.941 + 1.739 \times 10^{-8}t^{2.722}, \quad \text{相关系数 } r = 0.96991 \quad (10)$$

对乔后岩盐 CP_{2-2} 试件:

$$\text{第一阶段} \quad \sigma = 0.519 + 6.96 \times 10^{-2}t^{0.4494}, \quad \text{相关系数 } r = 0.99988 \quad (11)$$

$$\text{第二阶段} \quad \sigma = 0.634 + 5.43 \times 10^{-8}t, \quad \text{相关系数 } r = 0.99800 \quad (12)$$

$$\text{第三阶段} \quad \sigma = 0.634 + 9.1 \times 10^{-9}t^{2.5413}, \quad \text{相关系数 } r = 0.98768 \quad (13)$$

1.4 岩盐的弹性后效

表 4 弹性后效实验参数

试件编号	σ_0/MPa	$\varepsilon_0/(\%)$	t_0/h	$\varepsilon_1/(\%)$	$\varepsilon_2/(\%)$	ε_2	ε'
Th11	9.80	0.680	603.667	2.5610	0.4330	2.065	0.496
Th12	9.930	0.530	4.500	0.7490	0.4700	0.245	0.504
Th21	7.356	0.369	92.506	1.1811	0.3310	0.754	0.427
Th22	7.356	0.565	4.000	0.6908	0.2850	0.370	0.321
Th23	3.678	0.139	139.000	0.3995	0.0755	8.5×10^{-2}	0.391

注: ε_1 ——瞬时回弹, ε' ——回复应变

弹性后效是流变力学的一个重要内容,它不是独立的,在蠕变、松弛中都包含弹性后效成份。因此应选取蠕变过程中的卸载变形规律,以检验和完善已得到的模型。弹性后效试验参数,见表 4。利用回归分析得到:

长山岩盐:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + 6.866 \times 10^{-2} - 5.901 \times 10^{-8} \ln[800(t - t_0) + 1], r = 0.99169 \quad (14)$$

乔后岩盐:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + 1.391 \times 10^{-2} - 1.67 \times 10^{-8} \ln(t - t_0), r = 0.91098 \quad (15)$$

式中 ε_1 ——最终应变,它随卸载时间 t_0 的增长而增大。

根据回归结果,认为卸载曲线仍可用对数关系表示,卸载模型为:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - F'' \ln[\gamma''(t - t_0) + 1] \quad (16)$$

式中 ε_1 ——卸载应变;

F'' 、 γ'' ——为因岩性而异的试验常数。

这里值得指出的是初始应变不是完全弹性的,应分为弹、塑性两部分。而塑性应变又包括两部分,即初始裂隙形成部分 ε'_p 及与时间有关的塑性应变部分 ε''_p 。故

$$\varepsilon = \varepsilon'_p + \varepsilon''_p \quad (17)$$

这里还要指出对与时间有关的蠕变量 $F' \ln(\gamma' t + 1)$ 同与时间有关的应变回复 $F'' \ln[\gamma''(t$

- t_0) + 1] 比较可得:蠕应变为粘弹塑性变形。这里 F' 、 γ' 亦因岩性而异的试验常数。其中粘性、塑性变形均为在蠕变过程中由于裂隙的发展形成了不可恢复的变形,都为时间的函数。这时应变模型为:

$$\varepsilon = \varepsilon_0' + \varepsilon_p' + \varepsilon_s' + F'^m \ln[\gamma'^n(t - t_0) + 1] + f(t, \sigma) \quad (18)$$

- 式中 ε_0' —— 初始弹性应变;
- ε_p' —— 初始裂隙形成应变;
- ε_s' —— 塑性应变;
- $F'^m \ln[\gamma'^n(t - t_0) + 1]$ —— 不可恢复的粘弹性流动应变;
- $f(t, \sigma)$ —— 裂隙发展应变。

2 岩盐流变模型

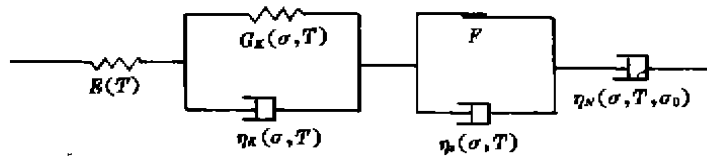


图 9 岩盐流变力学结构模型

2.1 流变模型的确定

通过对岩盐应力——应变场的研究,建议采用如图 9 所示的岩盐流变力学结构模型^[2]。此与前述试验结果相吻合。该模型是由马克斯威尔(Maxwell)、凯尔文(Kelvin)、宾汉姆(Bingham)组成。即

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta \sigma}{E(T)} + \left[\frac{\sigma_D}{2G_K} - \varepsilon_s \right] \left[1 - \exp\left(-G_K \frac{\Delta t}{\eta_K}\right) \right] + \left(\frac{1}{\eta_B} \right) (F) \left(\frac{F}{\sigma} \right) \Delta t + \left(\frac{\sigma_D}{2\eta_N} \right) \Delta t \quad (19)$$

- 式中 η_K, η_B, η_N —— 为相应力学元件的流变常数;
- E —— 弹簧的弹性模量;
- G_K —— 弹簧的剪切模量;
- F —— 滑动器的滑动系数。

在前人研究的基础上,结合本次试验研究,得出了岩盐松弛模型:

$$\sigma = A + B \ln(t) \quad (\text{长山岩盐}) \quad (20)$$

$$\sigma = E \exp(-Ft) \quad (\text{乔后岩盐}) \quad (21)$$

蠕变模型:

$$\varepsilon = A' + B' t^m \quad (\text{高初应力}) \quad (22)$$

$$\varepsilon = E' + F' \ln(t) \quad (\text{低初应力}) \quad (23)$$

考虑到初始条件,式(24)可变为

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + F' \ln(\gamma' t + 1) \quad (24)$$

蠕变过程有三个阶段,只要把各阶段之间的区分点确定后,就可确定相应的模型。

2.2 流变变形机理

对长山岩盐而言,从位错滑移理论中可知,岩盐不是单晶体,是由许多裂隙、界面组合而

成的多晶体,变形能力增强。因此,只要发生了少量的位错攀移,以滑移为主,造成在应力水平相差不大的情况下,应变率大,破坏时间短。所以长山岩盐变形受晶体内部位错及晶间弱面的控制。在松弛中初始时刻加一恒定应变 ϵ_0 ,使内部存在一个应变场,此时晶内以应变软化为主。通过局部区域的塑性化,使应力逐渐得到释放。

对乔后岩盐而言,该岩盐为粘弹塑性体,屈服应力较低。在低应力下就能表现出粘塑性流动。因此,岩盐是一种复杂的粘弹塑性材料。材料内部存在着胶结、裂隙度等特征。

2.3 岩盐流变破坏

长山、乔后盐矿两种岩盐的流变破坏都是由于裂隙的发展、连通,导致整个试件的破坏。在试验中发现,循环加载可以加速试件破坏。这是由于循环加载增加了产生裂隙的机会,加速裂隙连通的缘故。

长山岩盐蠕变初期加载时常发出清脆的响声,有时伴有宏观裂隙的产生。这些现象表明该岩盐是一种脆性材料。在蠕变初期局部已发生脆性破坏,在第二阶段由于位错、晶界等对变形的控制,表现出一定的粘塑性,第三阶段发出的声音不断出现,最后导致以脆性为主的完全破坏。乔后岩盐有类似情况,除在破坏时发出沉闷的响声外,在第三阶段都不发出用耳听得到的声音,这种岩盐的破坏是以塑性为主。

从试验结果可以得到,由于试件的差异,破坏时间的不同,但最终应变保持一常数,且基本相同,约为 6.25%。由此建立上述两种岩盐的破坏准则:当

$$\epsilon \geq \epsilon_0 \approx 6.25\% \quad (25)$$

时,将发生单向应力状态下的蠕变破坏。

3 几点认识

1) 岩盐是一种特殊的软岩。岩盐的变形能力强,既有较强的脆性,又有明显的塑性。岩盐是一种粘弹塑性材料。由于两种岩盐内部结构的差异,因此,蠕变曲线亦有很大的差别。

2) 岩盐的变形受位错及晶内界面控制。由实验得出的岩盐蠕变规律,不论在高应力下,还是在低应力下,都与按位错理论得到的蠕变规律基本吻合。

3) 岩盐是一种复杂的粘弹塑性体,除具有粘、弹、塑性外,还具有裂隙闭合性质。

4) 两种岩盐有着相同形式的松弛规律: $\sigma = C_1[\sigma_0 - \beta \ln(st + 1) + C_2(\alpha^{-D}) + ca(E_s^{-n})]$; 乔后岩盐的蠕变经验公式为: $\epsilon = C_1(A' + B' t^m) + C_2 G' t^n$ 。

5) 两种岩盐蠕变的发展可以用裂隙的发展来表征。根据所确定的关系,就可以通过测裂隙的发展来预测蠕变破坏。

6) 两种岩盐都符合最大拉应变破坏准则。它们破坏时的应变基本保持一常数。当 $\epsilon \geq \epsilon_0 \approx 6.25\%$ 时,即产生破坏。松弛中也存在着破坏现象。

参 考 文 献

- 1 李通林. 矿山岩体力学. 重庆:重庆大学出版社,1991. 30
- 2 Senseny P E, Hansen F D. Mechanical Behaviour of Rock Salt, Int. J. Rock Mech. Mining Sci. & Geomech. Abstr. 1992, 29(4): 363~378
- 3 J. 费里埃德[法]著. 位错. 王煜译. 北京:科学出版社,1984. 210~211