

# 盐湖岩盐变形破坏的试验研究 与数学模拟\*

王 绳 祖

(国家地震局地质研究所, 北京)

## 提 要

本文利用盐湖岩盐矿物成分单一、结构简单、盐晶透明以及正交偏光下具有应力双折射特性等便利条件,通过单轴压缩试验和微观观测,研究了盐晶和盐湖岩盐的变形破坏机理及弱面的影响。并且,由此探讨了岩石非线性本构关系的一种离散化方法,其中包括强调岩石的弱面效应,建立由实体元和弱面元组成的多晶随机弱面体的有限元模型,反演弱面的力学性状,以及模拟盐湖岩盐变形破坏的全过程。

## 一、引 言

1975年以来,结合青藏铁路建设,对柴达木盆地察尔汉盐湖岩盐的力学性质进行了研究<sup>[1,2]</sup>,在为盐湖地区铁路的安全通行提供依据的同时,也为岩盐变形破坏机理的研究积累了资料。

盐湖岩盐是第四纪盐湖以NaCl为主的化学沉积。由于盐晶相互固结程度的不同,盐湖岩盐的强度变化悬殊:呈散粒堆集状时,强度为零;而强固结的干硬岩盐,单轴抗压强度可超过100kg/cm<sup>2</sup>。但总的来说,盐湖岩盐是一种强度和刚度都很低的特殊的岩盐。盐湖岩盐矿物成分单一,所含晶粒粗大(一般粒度为5~15mm),盐晶透明,晶型简单(等轴晶系),在正交偏光下具有应力双折射效应<sup>[6~9]</sup>。盐湖岩盐的这些特点,为研究变形破坏机理提供了便利条件。

本文的主要目的在于利用这种便利条件,采取宏观与“微观”结合、试验与数学模拟结合的方法,探讨岩盐的变形破坏机理及本构关系。试验所用岩盐取自察尔汉盐湖。岩盐单晶是柴达木盆地西部大风山地区的天然晶体,其力学性状与察尔汉盐晶类似。

## 二、盐湖岩盐的变形破坏机理

### (一)盐湖岩盐的弱面

盐湖岩盐宏观力学性状的试验研究<sup>[1]</sup>已初步表明了变形破坏过程中弱面的重要性。岩石

\*本文基本内容是笔者在中国科学院青海盐湖研究所工作期间完成的

中的弱面系是由所有具不同强度、刚度的削弱面组成。而组成盐湖岩盐弱面系的是晶间弱面和晶内弱面。

晶内弱面，如晶内滑移面、解理面<sup>[3,7]</sup>，保持一定程度的离子键力，可称为键联弱面。盐湖岩盐和盐晶的试验表明，在单轴压缩过程中，起主要作用的是沿{001}面的破裂和沿{011}面的滑移，少数破裂沿{011}面发生。另外，在上述晶内弱面的影响下，晶内还可能形成扭折带、无理双晶面等复合弱面。

盐湖岩盐晶粒之间的接触面，构成晶间弱面。此处，原有意义上的离子键力已不存在。这种弱面属于岩相学一级的组构弱面。它们明显地受所含饱和溶液的影响。溶液蒸发、析盐时，由于析出盐晶的连接作用，弱面强度相应增高。如果晶间弱面的强度与刚度高于晶内弱面，则岩盐向强固结体过渡。

岩盐多晶体中，晶内弱面在晶粒范围内具有明显的定向性，但由于晶粒分布方向杂乱无章，使晶内弱面在总体分布上具有随机性。岩盐内杂乱分布的晶间弱面（连同孔隙）构成网面曲折、交叉穿切的弱面网络。随着外力作用方式和取向的改变，晶间弱面网络的任一网面都有可能成为凹凸不平的破裂面。因此，无论从单个晶间弱面的大小和取向分布，或弱面网络内破裂网面的任意性来说，晶间弱面都是随机分布的。所以，不同于受构造弱面控制的定向弱面体，盐湖岩盐是一种多晶随机弱面体。

### (二)盐晶的变形与破坏

采用天然的NaCl单晶进行单轴压缩试验，可得如图1所示的应力-应变曲线，图2所示的相应的试件形态变化，以及图3所示的分阶段取样观测的应力双折射效应的形迹。试验表明，盐晶的峰前变形破坏过程可分为以下四个阶段：

I·弹性变形阶段——没有不可逆变形，但有明显的弹性后效现象。试件中部电阻应变片测得弹性模量平均为 $E = 2.78 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ ，泊桑比 $\mu = 0.22$ （与文献[10,11]试验数据相近）。

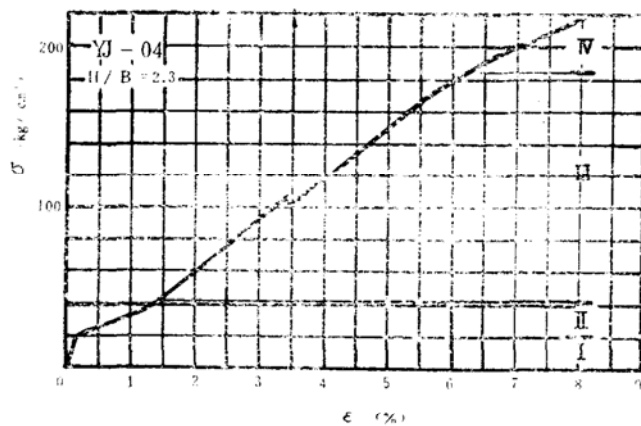


图1 岩盐单晶单轴压缩应力-应变曲线

试件号——YJ-04；试件尺寸——3.46×3.45×7.96cm；H/B——高宽比；I~IV——变形破坏的四个阶段

II·塑性变形阶段——由本阶段起，出现不可逆变形。沿{011}弱面发生滑移，弱面角（即弱面与加荷轴线的正交平面之间的夹角）起初为45°，后为45~44°，无明显变化。除局部有交叉滑移的双折射条纹外，基本上属于易滑移，条纹稀疏，光程差较小。变形模量平均为 $E_{II} = 1380 \text{ kg/cm}^2$ 。

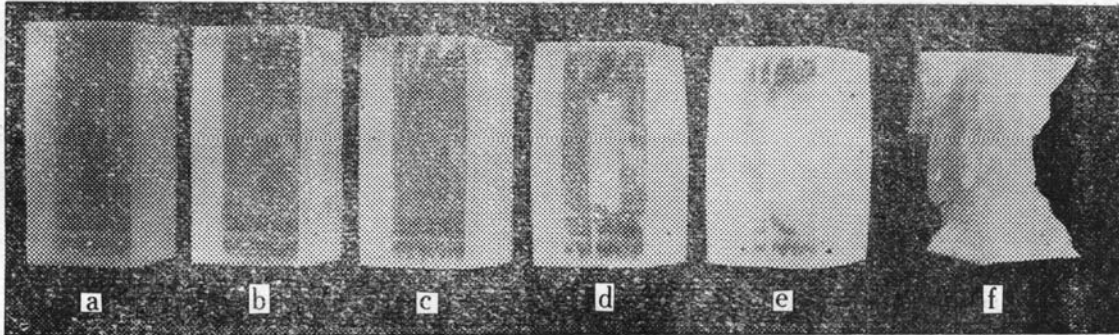


图2 盐晶单轴压缩各阶段的变形破坏形态

试件号——YJ—31,高7.05cm,高宽比1.99。(a)原状;(b)阶段Ⅱ末,两侧稍弯;(c)阶段Ⅲ初,端部张裂;(d)阶段Ⅲ后期,中部张裂;(e)阶段Ⅳ,两端有双锥痕迹;(f)破坏后的双锥状内核部

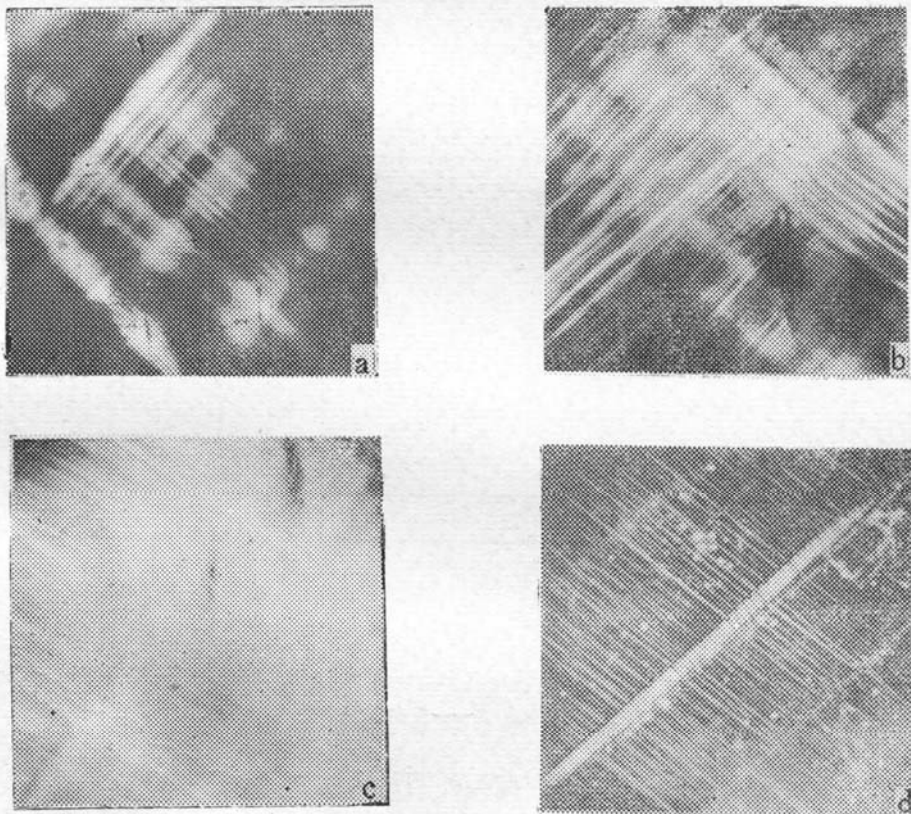


图3 岩盐单晶单轴压缩各阶段的应力双折射形迹

(a)阶段Ⅰ,交叉条痕(8×,厚19.5mm);(b)阶段Ⅱ交叉条痕,纵向张裂(8×,厚21.5mm);(c)阶段Ⅲ,交叉条痕,扭折带,纵向张裂(8×,厚21.6mm);(d)阶段Ⅳ,条痕,扭折带(20×,厚0.3mm)

有塑性硬化现象, 主要是由滑移面临界剪应力逐渐增大所引起。本阶段的下限和上限应力水平(即屈服限)分别为 $\sigma_I = 12.5$ 和 $\sigma_{II} = 29.1 \text{ kg/cm}^2$ , 相应的临界剪应力 $\tau_I = 6.3 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\tau_{II} = 14.6 \text{ kg/cm}^2$ 。应该指出的是, 当 $H/B \leq 1$ 时, 由于端面压板的限制, 滑移面不能贯穿试件截面, 故本阶段消失, 第I阶段直接过渡到第III阶段,  $\sigma_I = 29.1 \text{ kg/cm}^2$ 。

III. 纵向张裂阶段——纵向张裂沿 $\{100\}$ 面逐步扩展。滑移条痕加密, 光程差增大, 并出现扭折带、无理双晶等晶格重新取向的现象。由于滑移面变缓(弱面角为 $43 \sim 40^\circ$ ), 临界剪应力的继续增大, 以及复滑移的出现, 塑性硬化更加明显。变形模量平均为 $E_{III} = 2710 \text{ kg/cm}^2$ 。

IV. 假塑性变形阶段——破裂沿 $\{100\}$ 、 $\{011\}$ 解理面迅速扩展, 接近峰值应力时, 破裂急剧发展。

### (三) 盐湖岩盐的变形破坏过程

盐湖岩盐的变形破坏过程具有比较明显的阶段性<sup>[1]</sup>。如图4所示, 可以根据试验应力-应变曲线的转折和横向变形系数 $\mu$ (相当于泊桑比)值的阶梯式的增大, 将盐湖岩盐的峰前变形曲线划分为若干段。进入第III段,  $\mu \approx 0.5$ , 说明变形已超出弹性阶段, 虽然,  $\sigma - \epsilon_x$ 曲线仍保持线性。

盐湖岩盐弹性模量的数量级大致为 $10^2 \sim 10^8 \text{ kg/cm}^2$ , 仅为一般岩石弹性模量的 $1/1000 \sim 1/100$ , 因此, 使用一般的材料试验机, 即可获得如图5所示的全过程应力-应变曲线。其中包括峰前的正坡线段和峰后的负坡线段。

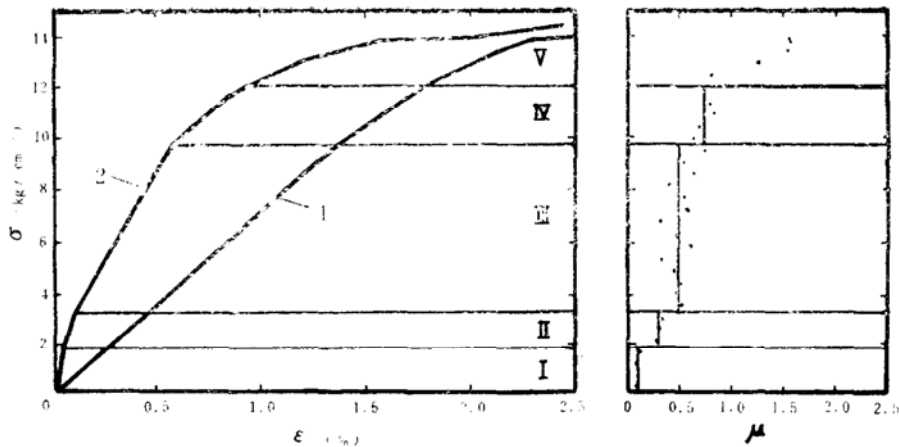


图4 盐湖岩盐变形破坏的阶段性

试件号——Ch11-1; 试件尺寸—— $12.29 \times 12.38 \times 23.66 \text{ cm}$ , 高宽比为1.91;  $F$ ——横截面积;  $H$ ——高度;  
 $\sigma$ ——轴向应力; 1, 2——轴向和横向应变即 $\epsilon_y, \epsilon_x$ ;  $\mu$ ——横向变形系数;  $\mu = \Delta \epsilon_x / \Delta \epsilon_y$

试件破坏后的观察表明: ①试件分离为外围与内核部, 外围部破裂、脱落, 内核部残留物呈锥形(图6)。②除强固结体以外, 试件的破裂面主要地沿晶间弱面穿切。如固结型岩盐, 无沿 $\{111\}$ 破裂者; 沿 $\{011\}$ 破裂者极为个别; 沿 $\{100\}$ 破裂者也只占少数。③正交偏光下对盐晶进行观察, 结果如表1所示。表内B类盐晶包括受试件制备等因素的影响, 而且滑移面远未贯穿盐晶; 只有C类盐晶明显地呈现塑性变形状态, 而其比例仅占 $5.6 \sim 8.2\%$ 。多数晶粒仍处于或近似于弹性状态。

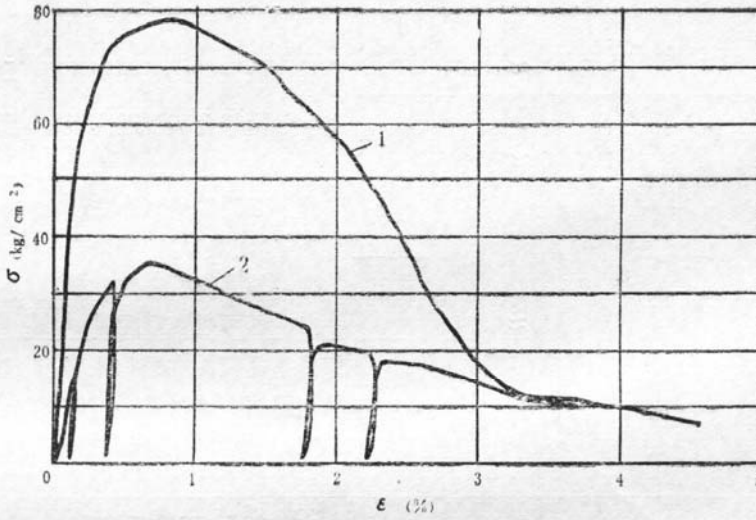


图5 盐湖岩盐全过程应力-应变曲线

1——试件C14-07, 试件尺寸:4.56×4.49×9.98cm, 高宽比2.2;  
 2——试件C05-04, 试件尺寸:4.97×4.99×10.98cm, 高宽比2.2



图6 盐湖岩盐单轴压缩破坏后的锥形内核部(原圆柱状试件直径约13cm)

表1 固结型岩盐破坏后盐晶变形状况

试件编号	高宽比 H/B	$\sigma_p$ (kg/cm <sup>2</sup> )	晶粒观察 方 法	观察的晶粒 或切面数目	不同滑移条痕的盐晶百分比(%)		
					A.无条痕	B.不明 显,局部	C.成组或交叉, 明显,贯穿
C05-04	1.84	35.5	劈分薄片 后观察	269	49.4	45.0	5.6
C08-05	2.23	42.6	整粒观察	499	62.1	29.7	8.2

根据宏观性状和“微观”观测(其 $\mu$ 值和应力水平系据20次试验结果统计),可将盐湖岩盐的变形破坏过程综合划分为表2所示的若干阶段。图7所示的变形破坏特征的综合示图,表示了变形曲线的峰前段的情况。

盐湖岩盐的变形破坏过程,一般包括弹性、假弹性、峰前假塑性和峰后假塑性等变形

表2 盐湖岩盐单轴压缩变形破坏过程

阶段号	变形阶段	分段	变形破坏特征				
			曲线形式	应力水平上限	$\mu$	主要变形方式	破裂现象
1	弹性变形	I	非线性	$\frac{\sigma_A}{\sigma_p} \approx 0.16$	0.09	盐晶弹性变形；晶间弱面压密，包含部分不可逆变形	I、II段之间有轻微声响
		II	线性	连续极限 $\frac{\sigma_B}{\sigma_p} \approx 0.29$	0.33		
2	假弹性变形	III	线性	比例极限 $\frac{\sigma_C}{\sigma_p} \approx 0.77$	0.55	盐晶以弹性变形为主；纵向(陡斜)晶间弱面张裂，外围部纵弯曲、鼓出，不可逆变形明显	侧面纵向张裂，并掉碴，
		IV	线性		1.06		
3	峰前假塑性变形	V	非线性	强度极限 $\sigma_p$	$> 1.06$	部分盐晶塑性变形和张裂；晶间弱面剪裂；锥形内核部形成，外围部纵横张裂发展	侧面裂缝纵横，掉碴加剧， $\sigma_p$ 较高时，发出较强裂声
		VI					
		VII					
4	峰后假塑性变形		负坡非线性			内核部上、下锥顶挤碎，外围部崩裂；部分盐晶塑性变形和断裂	逐渐坍塌

阶段。假塑性变形，是颗粒之间或岩块之间相互错动、相对转动和相互挤碎的总体表现，是一种包含细部破坏的广义的不可逆“变形”。它不同于沿键联弱面发生滑移的真正的塑性变形。后者保持着连续性。假弹性变形，指的是模量等于或相近于弹性模量的不可逆线性“变形”，引起变形不可逆的原因，主要是弱面的张裂及晶间弱面的压密。变形的起始段（I段），除盐晶的弹性变形外，还包含晶间弱面的压密以及试件端面的压密，具有不可逆的因素。部分弱面的压密有可能延续到第II段，致使整个弹性变形阶段不同程度地含有不可逆变形的组成部分。I段的变形模量 $E_1$ 平均为弹性模量 $E$ 的97%。

### 三、盐湖岩盐变形破坏过程的数学模拟

岩石的力学性质受到不同尺度等级的弱面的影响。人们基于对节理、断层以至深部大断裂等构造弱面和大地构造弱面的认识，已经将岩体、地壳看成为不同的实体单元和弱面单元的集合，从而将表现的单一力学性状还原为不同的单元力学性状的组合。盐湖岩盐的研究，则从一个侧面表明：为了掌握岩石的变形破坏机理，应该考虑更小尺度等级的弱面，即随机分布的组构弱面和键联弱面的影响，并将表现的、以逼近宏观变形曲线为依据的本构关系，离散化为不同的单元本构关系的组合。可发挥有限元法固有的“离散化”的特点，通过岩石的“力学性状离散化”以建立能够揭示岩石本质的力学模型和本构关系。下面仅以固结岩盐为对象，作一初步的探讨。

#### （一）多晶随机弱面体的有限元模型

有限元模型的建立，考虑到以下几方面：①鉴于晶内弱面贯穿滑移的情况只占少数以及盐

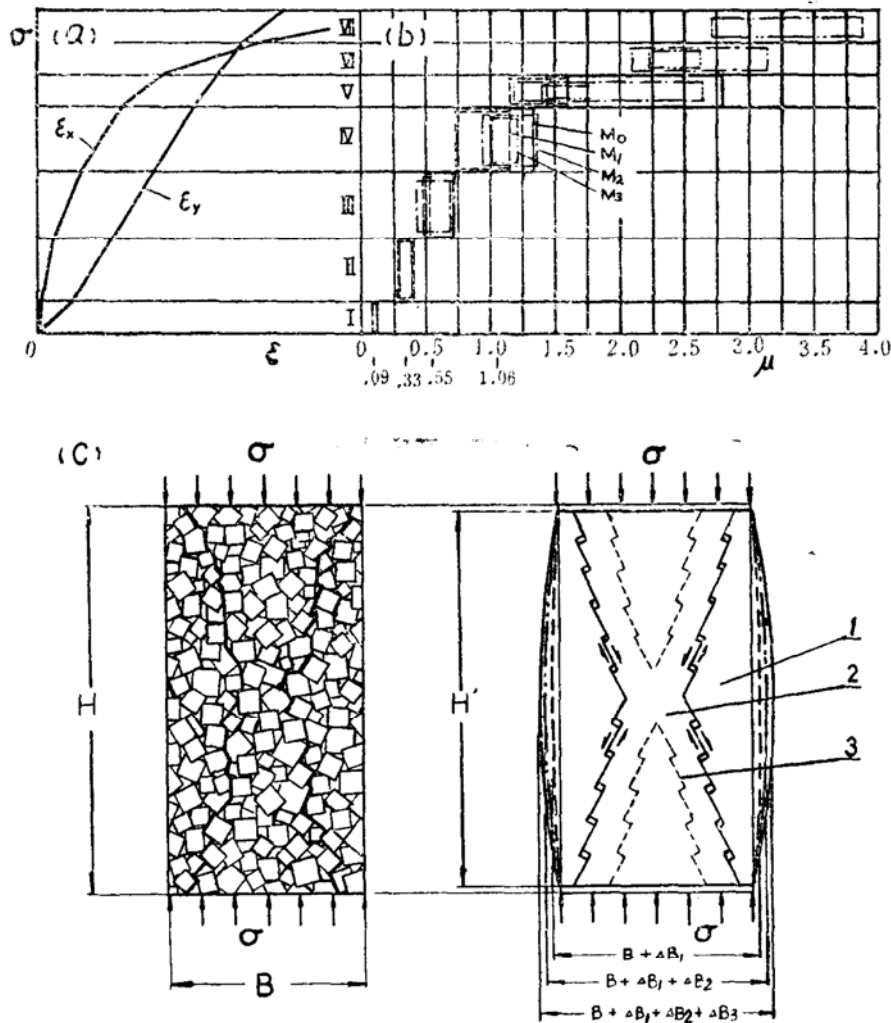


图 7 盐湖岩盐的变形特征

(a) 应力-应变曲线示意图:  $\epsilon_y$ ——纵向应变,  $\epsilon_x$ ——横向应变; (b) 泊桑比  $\mu$  的变化: 各种线框表示  $\mu$  值分布范围, 0.09, 0.33, ……表示平均值; (c) 变形破坏模型: 1——外围部; 2——内核部; 3——缩小的内核部界线,  $\Delta B_1, \Delta B_2, \Delta B_3$ ——依次为泊桑效应、剪胀、纵弯曲引起的宽度增加量

和晶间弱面位态分布的随机性, 模型中忽略盐晶晶内的各向异性, 而晶间弱面只按一种单一性状考虑; ②为了简便起见, 近似地采用平面应变有限元模型, 其中包括三角形实体元(线性位移函数)和四节点弱面元(Goodman非连续面元<sup>[12]</sup>)。这一近似, 使模拟只具有半定量的性质; ③参考多晶金属微观断裂力学研究中所用的概率论模型和确定论模型<sup>[13,14]</sup>, 建立岩盐试件的概率论或准概率论模型; ④鉴于试件形状和受力状况的对称性, 模型只取其1/4部分。

基于以上的考虑, 建立如图 8 所示的具有规格化结构的概率论模型, 并且满足下列要求: ①各晶粒的基本形状与尺寸相同, 晶粒尺寸与岩盐晶粒的实际粒度数量级大致相同; ②晶间弱面沿垂直、水平和左、右45°分布, 各方向的弱面元数量无悬殊差别; ③晶粒互相镶嵌。

(二) 盐晶与晶间弱面的力学性状

1. 盐晶的力学性状

考虑到盐晶分布的随机性，根据试验，并参考有关文献 [10, 11]，采用盐晶的基本力学参数如下：

弹性模量  $E = 2.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ ，泊桑比  $\mu = 0.22$ ；塑性变形时（第Ⅲ阶段），变形模量  $E_r = 2700 \text{ kg/cm}^2$ ，泊桑比  $\mu_{II} \approx 0.5$ ，塑性滑移的临界剪应力  $\tau_s = 14.6 \text{ kg/cm}^2$ 。开始塑性滑移的判据为

$$\tau_{\max} \geq \tau_s \left( \frac{1}{\cos \lambda \sin \delta} \right) \quad (1)$$

式中  $\tau_{\max}$  —— 最大剪应力；

$\left( \frac{1}{\cos \lambda \sin \delta} \right)$  —— 取向因子<sup>[5, 6]</sup>；

$\lambda, \delta$  —— 载荷方向、滑移方向与滑移面的夹角，对于 {011}， $\lambda = \delta$ 。

盐晶随机分布，取平均值  $\delta = 22.5$ ，则由式 (1) 可得  $\tau_{\max} \geq \sqrt{2} \cdot \tau_s = 20.6 \text{ kg/cm}^2$ 。峰值强度判据按照莫尔-库仑准则和最大张应力准则：内摩擦角  $\phi = 35^\circ$ ，内聚力  $c = 100 \text{ kg/cm}^2$ <sup>[11]</sup>，平均抗张强度  $\sigma_t \approx 10 \text{ kg/cm}^2$ （根据劈裂法测定结果计算）。

2. 晶间弱面的力学性状

考虑以下特点，并参考有关文献 [12, 15]，采用如图 9, 10, 11 所示的弱面变形曲线和强度曲线：①同岩盐内晶间弱面网面的凹凸不平相比，单个晶间弱面的粗糙度微不足道，后者的剪胀效应可忽略不计；②着眼的是弱面网络的整体平均特性，因此可以不拘泥于弱面力学性状的细节，以直线段代替曲线段，以简化本构关系；③试件自重同所受外荷相比，可以忽略，故不必考虑初始应力。

晶间弱面的力学性状可由下列参数确定：

$K_n$  —— 晶间弱面的法向刚度系数；

$v, v_{\max}, v_{fr}$  —— 依次为晶间弱面的法向引张量、法向极限压密度（负值）和张裂引张量；

$\sigma_{t-Rm}$  —— 晶间弱面的法向抗张强度；

$K_s$  —— 晶间弱面的切向刚度系数；

$u_p$  —— 晶间弱面剪裂时的剪切位移量；

$\tau_p, \tau_r$  —— 峰值和残余抗剪强度，

$$\tau_p = c_{Rm} + \sigma \text{tg} \phi_p, \quad (2)$$

$$\tau_r = \sigma \text{tg} \phi_r, \quad (3)$$

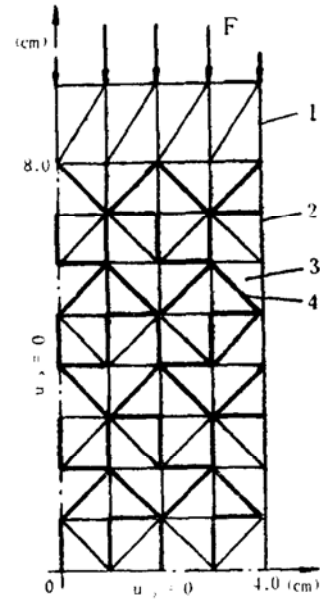


图 8 盐湖岩盐随机弱面体的概率论模型

1——压板；2——岩盐试件(1/4部)  
3——实体元；4——弱面元；  
F——外荷； $U_x, U_y$ ——边界节点位移 (节点数目115，实体元数72，弱面元数46)



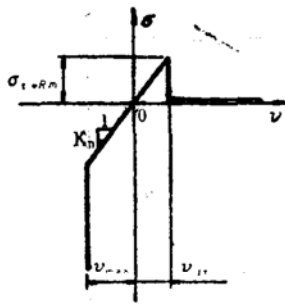


图9 晶间弱面法向变形曲线

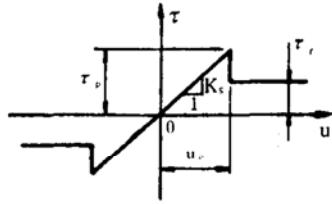


图10 晶间弱面剪切变形曲线

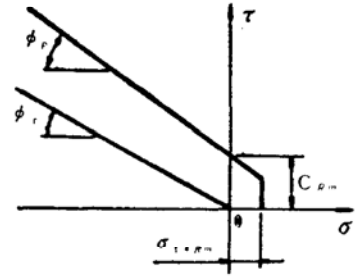


图11 晶间弱面强度曲线

$C_{Rm}$ ——晶间弱面的切向内聚力;

$\phi_p, \phi_r$ ——晶间弱面峰值强度时和剪裂后的摩擦角,  $\phi_p \approx \phi_r \approx 24^\circ$

### (三)晶间弱面力学性状的反演

晶间弱面的力学性状参数可由岩盐宏观力学性状反演。除 $K_s$ 、 $K_n$ 以外,其余参数可在变形破坏过程的模拟计算中依次地加以确定:

$v_{max}$ ,根据 I 段上限的最大绝对值适当选定; $\sigma_{t,Rm}, v_{tr}$ ,相当于 II 段上限的最大值; $u_p, C_{Rm}$ ,相当于比例极限条件下的最大绝对值。

关于 $K_s, K_n$ 的反演,实质上是个最优化问题。计算表明,对此问题,牛顿法具有简单易行,运算量少,收敛速度快等优点。

有限元数学模型为 $[K]\{u\} = \{F\}$ ,  $\{u\}$ 中含已知位移分量 $u_i^*, i = 1, \dots, m$ 。设目标函数为

$$f_i(x) = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = u_i - u_i^*, i = 1, \dots, m \quad (4)$$

式中  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ——待求的变形常量,如 $K_s, K_n, \dots$ ;

$u_i$ ——与已知位移点相应的位移分量。

解的条件为 $f_i(x) = 0, i = 1, \dots, m$ 。根据牛顿法<sup>[16]</sup>,可得

$$f_i(x) = f_i(x^0) + \sum_{j=1}^n \frac{\partial f_i(x^0)}{\partial x_j} (x_j - x_j^0), i = 1, \dots, m \quad (5)$$

式中  $x^0$ —— $x$ 的初值。

当 $m = n$ 时,有唯一解。以差商代替偏导数,经迭代计算,求得近似解。

设岩盐单轴抗压强度 $\sigma_p = 20 \text{ kg/cm}^2$ ,根据已给出的关系式和数据,可算出试件(模型 RM01)的已知位移量(cm)如图12: $u_1^* = \Delta l_l = -0.01652, u_2^* = \Delta b_l = 0.00076$ 。反演所得刚度系数为: $K_s \approx 320 \text{ kg/cm}^8, K_n \approx 350 \text{ kg/cm}^8$ 。

### (四)变形破坏过程的数学模拟

按照模型RM01( $\sigma_p = 20$ ),采用迭代法,逐步提高应力水平,进行模拟计算。其中包括反演弱面参数(见三、(三)节)以及根据式(1)和图9,10调节盐晶模量<sup>[2]</sup>和弱面刚度。计算结果如图13,14所示。反演所得的弱面参数为: $v_{max} = -0.00191 \text{ cm}, \sigma_{t,Rm} = 0.82 \text{ kg/cm}^2, c_{Rm} = 2.59 \text{ kg/cm}^2$ 。

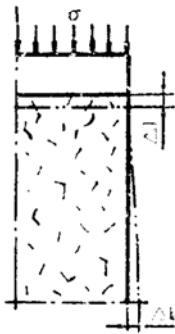


图12 试件(1/4部)的变形量

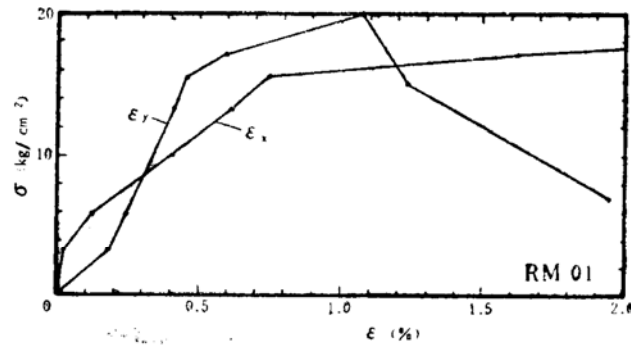


图13 盐湖岩盐单轴压缩下的模拟应力-应变曲线  
模型RM01, 高宽比为2, 盐晶模量为 $2.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ ,  
 $\epsilon_x, \epsilon_y$ ——轴向和横向应变

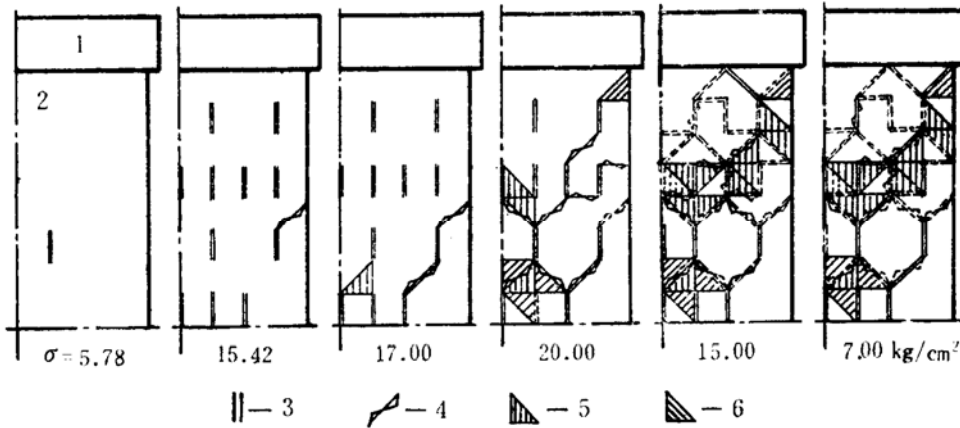


图14 盐湖岩盐单轴压缩下试件的破裂与塑性滑移发展过程

1——压板; 2——试件(1/4); 3——晶间弱面张裂; 4——晶间弱面剪裂(上、下凸形表示错动了方向); 5——盐晶张裂; 6——盐晶塑性变形, 虚线表示曾经张裂或剪裂;  $\sigma$ ——轴向应力(连续限 $\sigma_B=5.78$ , 比例限 $c=15.42$ , 峰值强度 $\sigma_P=20.00$ )

图13所示的盐湖岩盐的模拟变形曲线同试验的变形曲线(图4, 5)相比较, 具有相似的变化趋势。

图14所示的破裂和塑性滑移发展过程也同试实际基本相符。当应力 $\sigma$ 达到 $20 \text{ kg/cm}^2$ 时, 剪裂和张裂的晶间弱面沿大致倾斜方向几乎已将试件分割为锥形内核部和外围部(同图6, 7比较)。右上角有一实体单元发生塑性滑移。模拟计算时, 如继续增大轴向载荷, 则试件变形加剧并失稳。只有再降低载荷, 才能达到平衡。这时, 曲线的负坡段随之而形成。

由图14还可知, 发生张裂和塑性滑移的实体元(盐晶)分别占实体元总数的14%和5.6%。这同第二、(三)节所述的试验结果相一致。

#### 四、结 论

1. 岩石是不同尺度等级的弱面单元与实体单元的集合。盐湖岩盐的弱面系包括晶间弱面和晶内弱面, 多数情况下, 对于力学性状起控制作用的是晶间弱面。弱面效应是建立岩盐宏

观与微观力学性状之间联系、掌握变形破坏机理的关键之一。

2. 盐湖岩盐的变形破坏过程包括弹性、假弹性、峰前假塑性和峰后假塑性等变形阶段, 以及连续极限、比例极限、强度极限等临界应力状态。假弹性变形含有晶间弱面的张裂(近似平行于轴向)。假塑性变形则是晶间弱面张裂与剪裂以及盐晶张裂与塑性滑移等多种变形破裂现象的宏观表现。

3. 对于岩石的本构关系, 迄今所用的逼近宏观(表观)变形曲线的方法, 是一种唯象学的模拟方法。基于弱面效应的观点, 本文认为, 可以发挥有限元法原有的“离散化”的特点, 通过岩石的“力学性状离散化”即“本构关系离散化”将表观的单一性状离散化为实际存在的弱面性状与实体性状的集合。从而建立能够揭示岩石变形破坏机理的力学模型和本构关系。

4. 本文关于盐湖岩盐变形破坏过程的数学模拟是初步的、半定量的。在探求更合理的概率论模型, 进行三维模拟, 考虑时间效应和几何非线性以及合理确定盐晶与弱面本构关系等方面, 均有待作进一步的研究。

白鹿堤、张宗淳、冷如勤、马万孝等同志参加了试验; 在盐晶摄影方面, 得到高章鸿、魏祥泰同志的协助, 特此表示感谢

### 参 考 文 献

- [1] 王绳祖, 察尔汉盐湖岩盐物理力学性质的研究, 青藏铁路察尔汉盐湖地区路基基底稳定性预测的研究(文集), 中国科学院青海盐湖研究所, 科学技术文献出版社, 1979, 第51~74页。
- [2] 王绳祖、孙家乐, 多层介质变形模量的计算方法, 北京工业大学学报, 1981年第3期, 第11~20页。
- [3] Baar, C.A., Applied Salt-rock Mechanics, I. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New York, 1977.
- [4] Winkler, H.G.F., 晶体构造和晶体性质, 科学出版社, 1960。
- [5] Cottrell, A.H., 晶体中的位错和范性流变, 科学出版社, 1960。
- [6] Schmid, E. and Boas, W., 晶体范性学, 科学出版社, 1958。
- [7] Nicolas, A., Poirier, J.P., Crystalline Plasticity and Solid State Flow in Metamorphic Rocks, John Wiley and Sons, London-New York-Sydney-Toronto, 1976.
- [8] Классен-Неклюдова, М.В., Механическое двойникование Кристаллов, Издательство АН СССР, 1960.
- [9] Masamitsu Fukushima and Ryuichi Shintani, Stress-Birefringence Effect in NaCl Type Single Crystals, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.19, No.3, 1980, pp. 565~566.
- [10] Dreyer, W., The Science of Rock Mechanics. Part 1, The Strength Properties of Rocks. Trans Tech Publication, 1972.
- [11] Проскуряков, Н.М. и др., Физико-механические свойства соляных пород, Издательство Недра, 1973.
- [12] Goodman, R.E., Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks, West Publishing Company, U.S.A., 1976.
- [13] 宫本博, 有限要素法と破壊力学, 培風館, 東京, 1970。
- [14] 大南正英, 塩沢和章, 多結晶体の強度と破壊, 培風館, 東京, 1976。
- [15] Laughagen, K., Analysis of Underground Openings with a Distinct Shear Zone, Rock Mechanics, Vol. 9, No. 1, 1977, pp. 1~8.
- [16] Forsythe, G.E., Moler, C.B., 线性代数方程组的计算机解法, 科学出版社, 1979,

## Experimental Investigation and Mathematical Simulation of Deformation and Failure of Salt-lake Rocksalt

*Wang Sheng-zu*

(Institute of Geology, National Bureau of Seismology, Beijing)

### Abstract

An experimental study on the mechanisms of deformation and failure of NaCl single crystals and salt-lake rocksalt was carried out by means of uniaxial compression tests and optical microscopic observations. There is a convenient condition for this study since the salt-lake rocksalt is of simple characters such as the low strength and low stiffness, the simple structure and texture, the large grain-scale and the transparent crystals of NaCl in which the stress-induced birefringence streaks appears under the crossed polarized light, etc. It is shown in the experiments that the weakness plane effect plays an important part in the processes of deformation and failure of salt-lake rocksalt.

Based on the experiments, a discretization method of nonlinear constitutive relationship of rocks was presented in this paper in stead of the phenomenological methods which approximate constitutive equations to the apparent stress-strain curves. The main points of this method include: (1) developing a probabilistic finite element model which consists of solid elements and weakness plane elements; (2) inversion of the mechanical behaviors of weakness plane by Newton's method; (3) mathematical simulation of complete process of deformation and failure of salt-lake rocksalt by the finite element method.