

矿井岩层受力状态与视电阻率关系的实验研究

张同俊

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

概述矿井岩层视电阻率实验的方法和内容,利用实验资料较详细地分析了岩石视电阻率的变化与其承受的应力—应变状态的关系,对于视电阻率的变化机制和方向性问题作了一定探讨。

一、引言

视电阻率法*是我国目前地震预报的主要方法之一。这个方法的出发点是,认为在孕震过程中,由于应力状态的改变,导致地层结构的某种变化,从而改变该处地层的导电性能。 ρ_s 法就是希望通过测量探测范围内地层的 ρ_s 变化来探知该处应力变化的程度,以预测可能的地震。但是应力和 ρ_s 之间的具体关系如何,人们尚不清楚。以前国内外的实验研究大多局限于实验室里。实验室里小块岩石标本的状况与天然岩层有很大差异,这给研究工作带来一定困难。

本文提供了井下天然岩层的压力—— ρ_s 实验结果,试图为 ρ_s 法预报地震提供一些实验依据。

二、实验条件、方法和内容

(一)场地及条件 实验在湖南某矿山井下200米深处的坑道内进行。岩性为矽化灰岩,夹有硫化锑矿物。在放置仪器的观测室里环境温度为 $25 \pm 1^\circ\text{C}$,探测区为 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 。观测室相对温度长期维持在85%左右,探测区则有较大变化,春夏较湿,秋冬较干。岩石样品分析表明,下矿壁岩层孔隙度均为1%,而且处于非饱和状态(见表2、3)。图1为实验场地

*本文以下凡出现“视电阻率法”一词皆用“ ρ_s ”法代替。凡出现“视电阻率”皆用“ ρ_s ”代替。

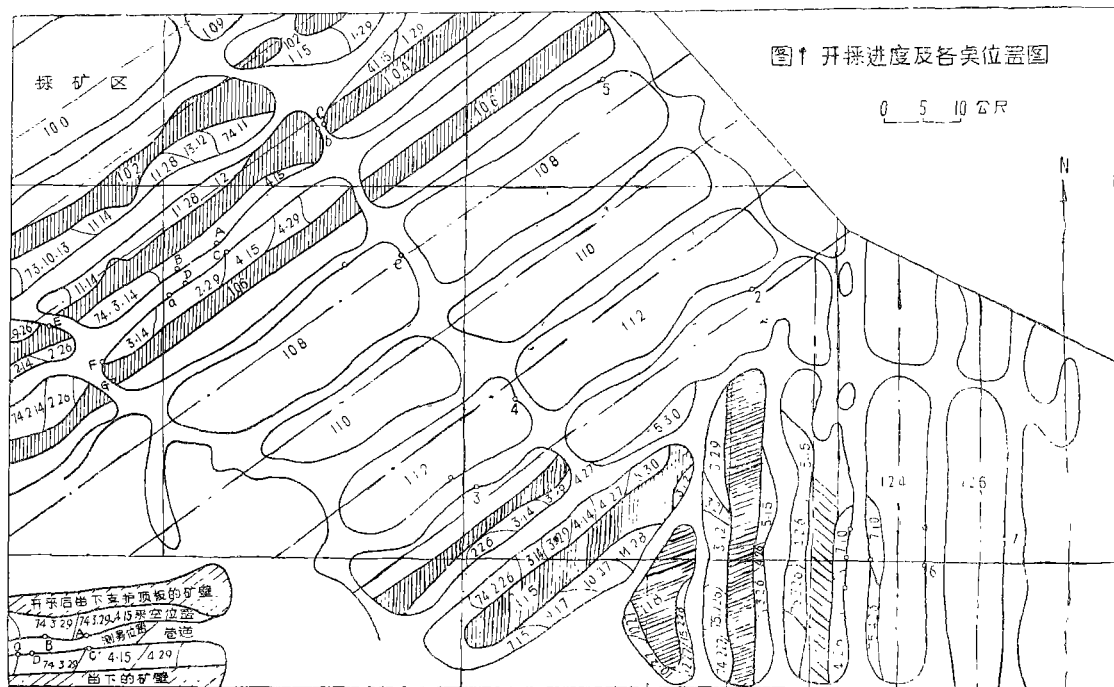


图 1

平面图，图中三位数字，如102，104……等为坑道序号。位于104₄坑道内的A，B……以及位于122*—126*坑道内的二*，六*，七*……等大写字母和一位数字为测点位置，它们分别是在1973年9月—1974年3月和1975年3月—7月进行Ps和应变观测的。a、b、c、e等小写字母表示人工加压实验观测点位置。

(二) 方法：Ps采用四极对称法，供电极距一般为1.5米左右，测量极距为0.5米左右。

电极一般用铅制成，埋深0.5米。每个测点布置水平、垂直和与水平夹角为45°的三条测线。观测中电流I_{AB}和人工电位差ΔV_{MN}同时读数，每一Ps值均取5次观测的算术平均值。由于极化效应的影响，刚接通电流后的一小段时间测数变化较大(图2)故规定在供电20秒时测量，此时Ps趋于稳定，并且极化效应的影响在每次测量中都相同在讨论ρ_s的相对变化时，它的影响自然消除。

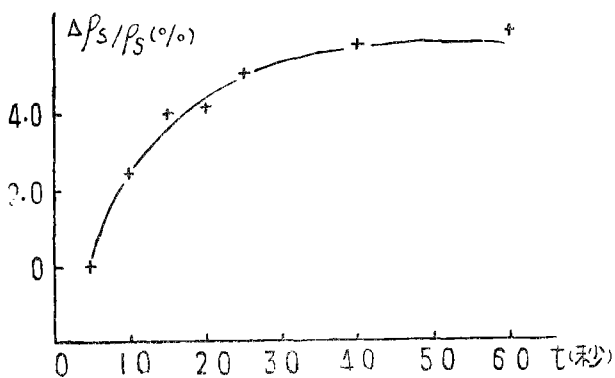


图2 ρ_s随供电时间变化(根据三次实验的平均绘制)

$$\Delta\rho_s = \rho_{s_t} - \rho_{s_s}$$

电位差ΔV_{MN}用“DDC-2A电子自动补偿仪”“Pz-5数字电压表”和改装的高输入阻抗电压表进行对比测量。电流I_{AB}用0.5级直流毫安表测量。电流为电子管稳压电源(低阻

时)和甲电池(高阻时)、

在开采应力实验*中用电阻丝应变片测量应变。並附以严格地防潮措施。其方法为:在测区选完整岩面磨平烤干,贴电阻丝应变片,用环氧树脂和石腊防潮。测量仪器为JY—5型静态应变仪。应力测量用光弹应力计。在人工加载实验中,应变测量用0级千分表(标距50cm)和应变片同时进行。加压设备为油压枕和千斤顶。加载实验装置示意绘于图3。

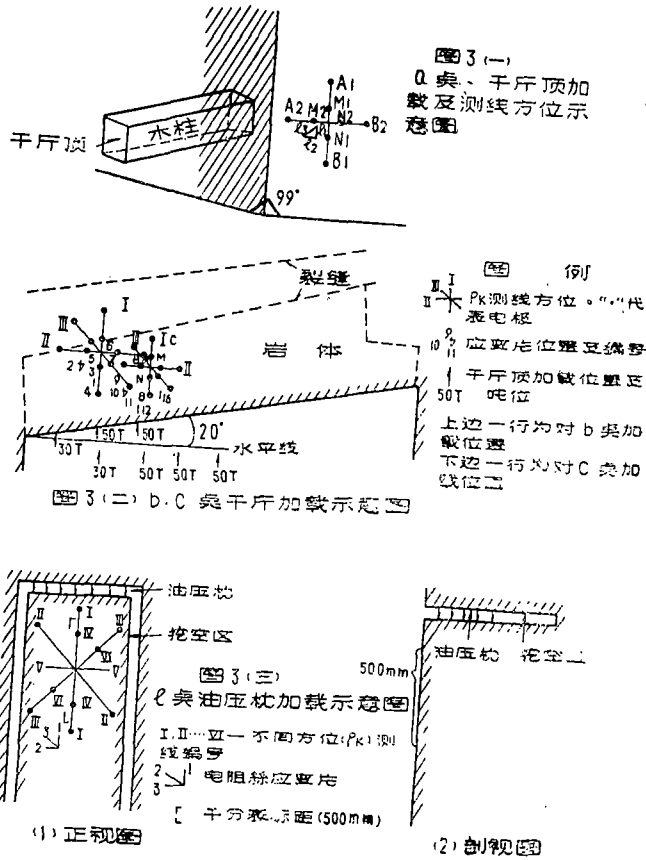


图 3

实验过程中,仪器性能稳定,线路绝缘良好(大于30MΩ)。

(三)内容 实验包括两部分:(1)观测矿山开采过程中临近采场的坑道壁上 ρ_s 变化,研究 ρ_s 与开采应力的关系;(2)在矿壁上做人工加载实验,研究加载和卸载过程中 ρ_s 的变化规律。此外,还进行了若干室内标本实验以取得岩石若干参数及与上述实验相对比。

三、资 料

全部实验共给出三批资料,现分别介绍如下:

由于开采区扩大,邻近坑道矿壁将不断加载(用应力计或应变片探可知载荷的变化),本文称这种因开采而增加的应力为“开采应力”。

(1) 开采应力实验 研究开采应力增大的情况下, 矿壁 ρ_s 的相对变化量 $\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}$ 随时间 t 的变化 (图 4—8)。

在 102° 坑道开采过程中位于 104° 坑道内的 7 个测点按 ρ_s 的变化幅度可分为 A—D 和 E、F、G、两组, 图 4 (1)、5 (1) 和 7 分别为 A、B、G 三点的 $\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}$ 周均值曲线; 为对比应变和电阻率变化结果, A、B 两点的应变曲线绘于图 4 (2) 和 5 (2)。所有曲线其横坐标皆为时间坐标, 三点的应力资料列于表 1。其余各点情形相同, 从略。图 6 给出 B 点压缩期间的日均值曲线, 以便详细研究 ρ_s 与应变的关系。

图 8 (1) 是 2° 、 6° 、 7° 测点 (分别位于 122° 、 124° 、 126° 坑道) 的 ρ_s 相对变化曲线, 图 8 (2) 是 2° 点的应变曲线 (6° 、 7° 点因应变片受潮变质, 故未给出应变资料)。应力资料见表 1 (续), 这组实验是为了研究当 120° 坑道开采过程中, 处于不同力源距的三个测点 ρ_s 变化的差异性。

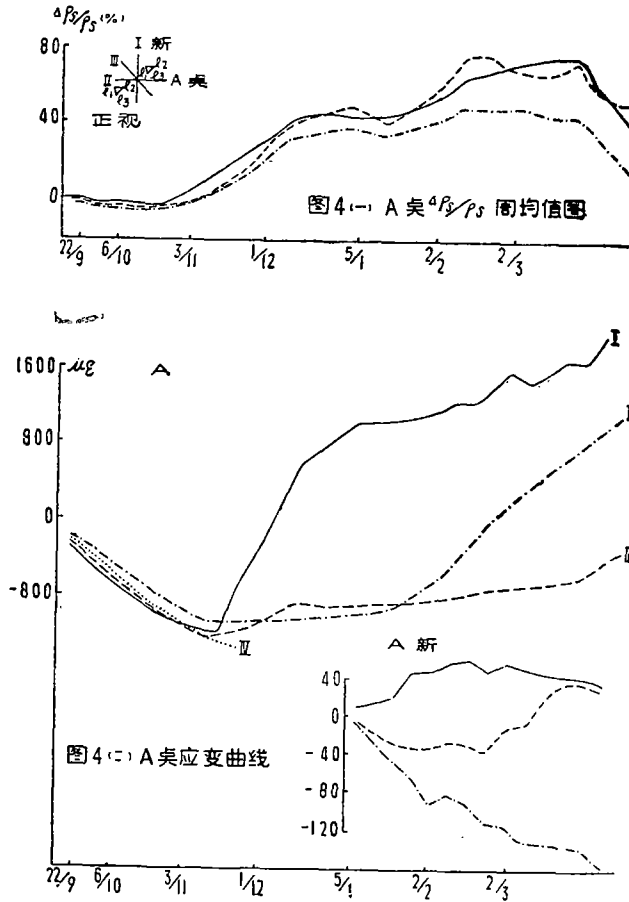


图 4

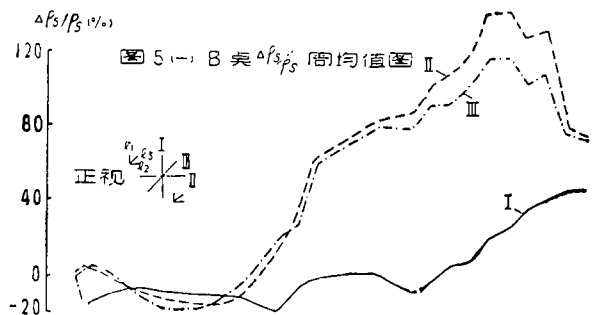
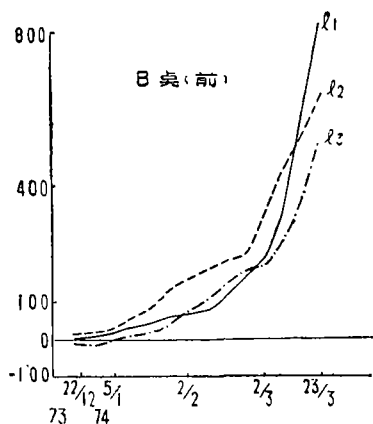


图 5 (一)

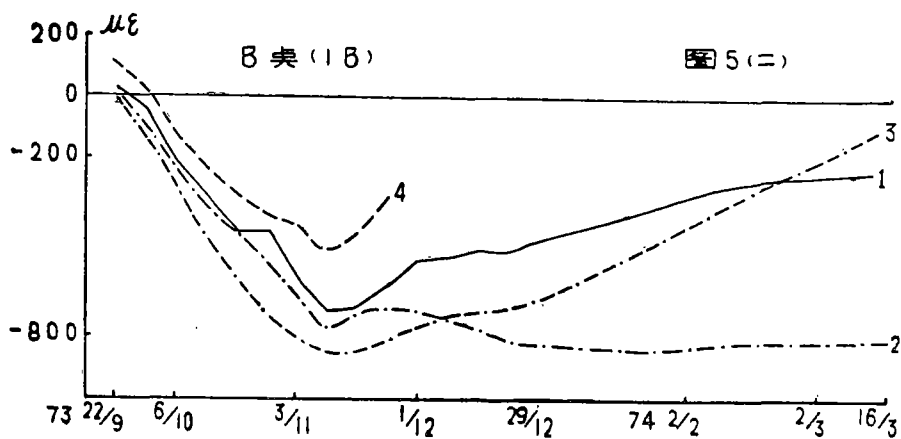


图 5 (二)

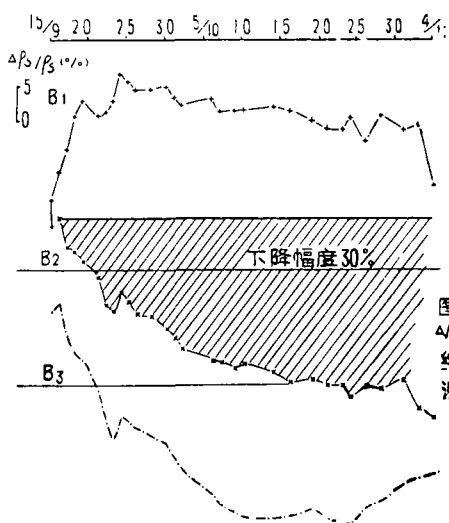


图 6(1) B类 $\Delta f_3/\beta_s$ 日值曲线压缩, β_s 减小

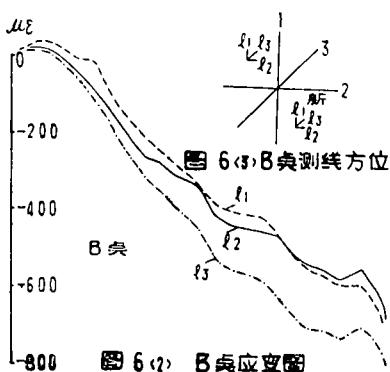


图 6(2) B类测线方位

图 6(2) B类应变图

图 6

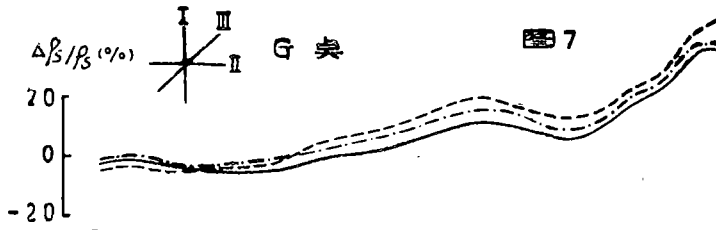


图 7

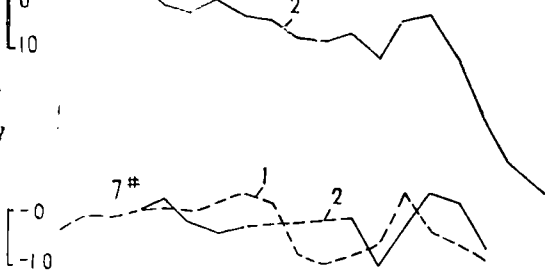
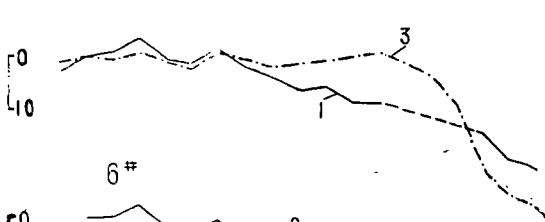
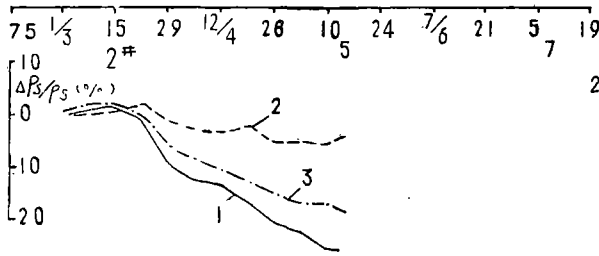


图 8(I) 2# 6# 7# 测桌 / 周均值图

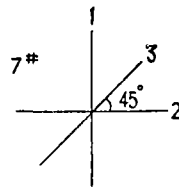
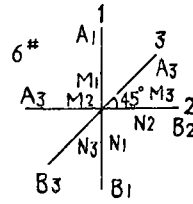
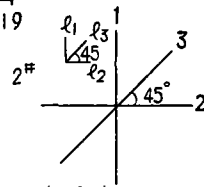


图 8(II) 2# 6# 7# 测
线方位

1—沿垂向
2—水平向

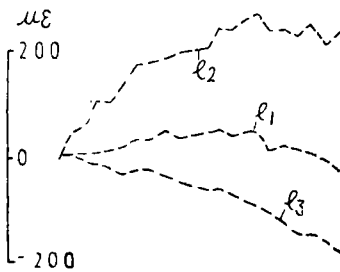


图 8(III) 2# 应变曲线

应 力、资 料* 表 1

测 点	A			B			G		
	K	Q(°)	P: q	K	Q(°)	P: q	K	Q(°)	P: q
1973.10.3.				2/3					
10.9.				1/3		4:3	2/3		
10.22.	$\frac{2}{3}$			1		2:1	1		
10.30.	$\frac{2}{3}$						2	-15°	2:1
11.5.	1			$1\frac{2}{3}$	0°	2:1	2	-15°	4:1
11.16.	$1\frac{1}{3}$			$1\frac{2}{3}$	0°	2:1	$1\frac{2}{3}$	15°	4:1
12.1.	$1\frac{2}{3}$		2:1	$1\frac{2}{3}$	5°	4:1	$1\frac{1}{3}$	-15°	4:1
12.22.				$1\frac{2}{3}$	10°	2:1			
1974.1.10.	$1\frac{1}{3}$	30°	2:1	$1\frac{1}{3}$	15°	4:1	1	-10°	4:1
1.16.	$1\frac{2}{3}$	20°	2:1	$1\frac{1}{3}$	20°	4:1	$1\frac{1}{3}$	-10°	4:1
1.30.	$2\frac{1}{3}$	20°	2:1	$1\frac{2}{3}$	20°	4:1	$1\frac{1}{3}$	-10°	4:1
2.9	$2\frac{1}{3}$	20.	2:1	$1\frac{1}{3}$	20°	4:1	$1\frac{1}{3}$	-10°	4:1
2.22.				2	20°	4:1	$1\frac{1}{3}$	-15°	4:1
3.2.0	2	20°	2:1						

表 1 (续)

	122-2*			124-6*			126-7*		
	K	Q(°)	P: q	K	Q(°)	P: q	K	Q(°)	P: q
1975.3.14.	$1\frac{1}{3}$	-20°	2:1	$1\frac{1}{3}$	-40	2:1	$1\frac{1}{3}$	10	
4.6.	$2\frac{1}{3}$	-20	2:1	2	-30	2:1	$1\frac{2}{3}$	0	2:1
5.1.4.	$3\frac{2}{3}$	-10	2:1	$2\frac{2}{3}$	-30	4:1	2	10	2:1
7.9.				4	-15	2:1	$2\frac{2}{3}$	0	2:1

*1.K—最高条纹级数；2.Q—最大压力方向与铅垂方向的头角，列时针为正；3.P: q—最大主应力（指压应力）与最小主应力之比；4.条纹级数未作室内率定，数据仅作定性参数。

(2) 人工加载实验 (图 9 - 14)

图 9 是 a、b、c、三点千斤顶加载实验中 $\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s} - P$ (压力) 资料。因未装压力表，故

压力无定量数据, 定性地有 $P_{i+1} > P_i$ 。

图10是e点油压枕加载实验的 $\frac{\Delta \rho_s}{\rho_s} - P$ 资料。图11、12是e点 $\frac{\Delta L}{L} - P$ 和 $\frac{\Delta \rho_s}{\rho_s} - \frac{\Delta L}{L}$ 资料。图13绘出a、b、c、e四点实验中 $\frac{\Delta \rho_s}{\rho_s}$ 和 $\frac{\Delta L}{L}$ 随时间的变化曲线, 从这个图可考查 ρ_s 的变化和形变相对于压力变化的滞后现象。图14是e点 $\frac{\Delta \rho_s}{\rho_s} / \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta L}{L}$ 曲线, 图中 $\frac{\Delta L}{L}$ 是取了两次实验中分别用应变仪和千分表测得的数据。

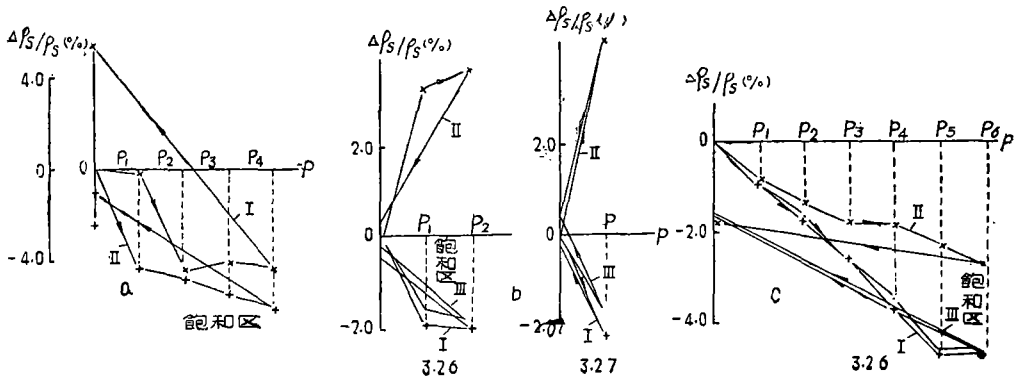


图9 $\Delta \rho_s / \rho_s - P$ 图

$P < P_2$, ρ_s 大幅度减小, $P > P_2$, ρ_s 变化趋向饱和。卸载后, ρ_s 恢复。

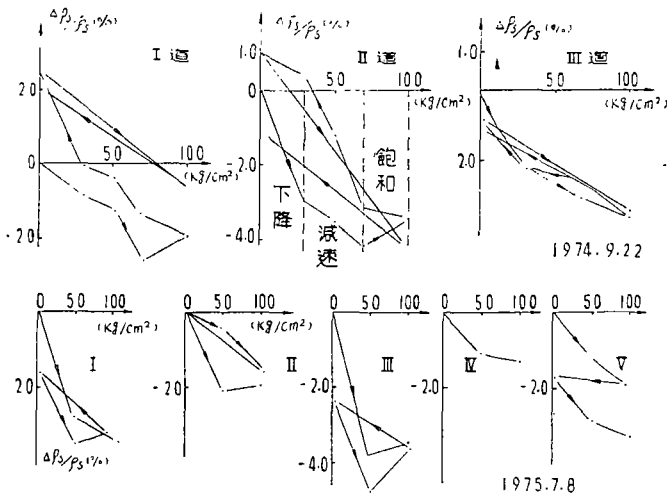


图10 e点 $\frac{\Delta \rho_s}{\rho_s} - P$ 图

加载时 ρ_s 减小, 卸载时 ρ_s 恢复, 但一般不恢复到原值。图中还表明压力 P 小时 ρ_s 变化速度快(曲线较陡), P 大时 ρ_s 变化速度慢(曲线较平)。 $P > 50 \text{ Kg/cm}^2$, ρ_s 趋向饱和或反向变化(增大)。

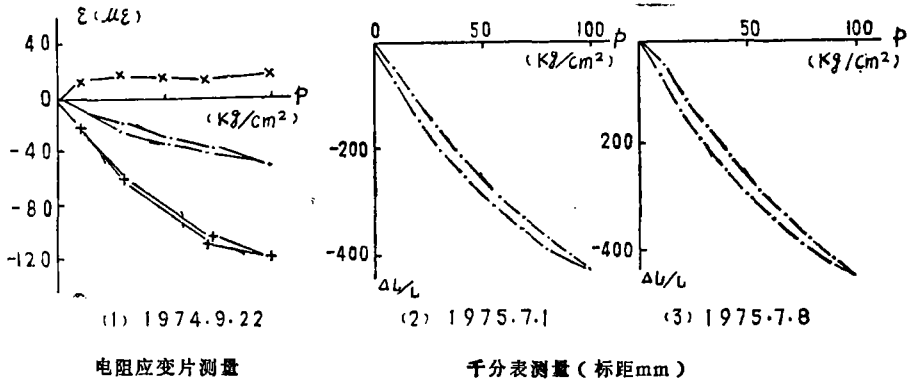


图11 e点 $\frac{\Delta L}{L} - P$ 关系曲线图

图(1)表明岩体形变近于单向压缩(负号表示压缩,正号表示引张)。又外力撤去后,残余形变极微,表明形变基本在弹性范围内。

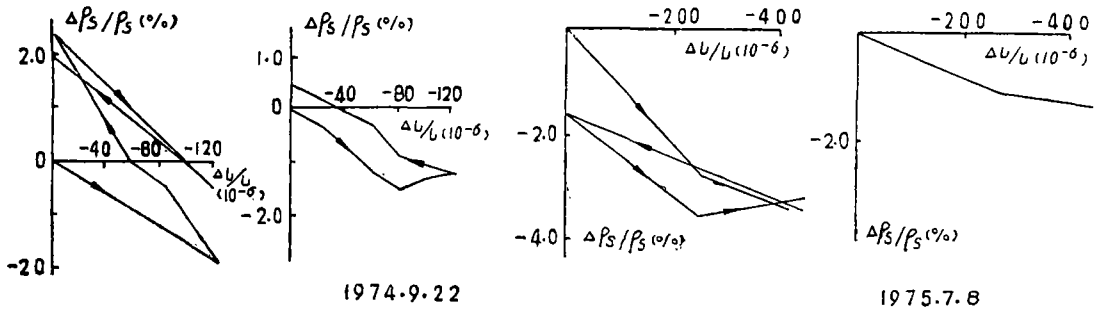


图12 e点 $\frac{\Delta \rho_s}{\rho_s} - \frac{\Delta L}{L}$ 图(沿压缩方向)

压缩时 ρ_s 减小,形变恢复时 ρ_s 亦恢复。 $|\Delta L/L| > 100 \times 10^{-6}$ 时 ρ_s 变化趋向饱和。

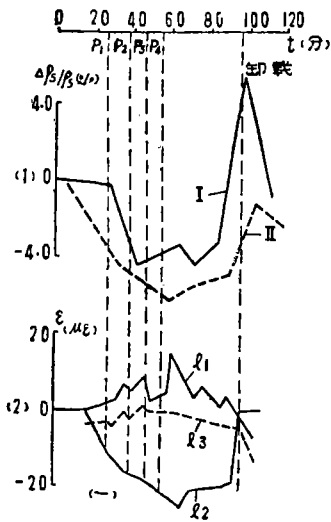


图13(一) a点(1) $\Delta \rho_s / \rho_s - P(t)$ 图
(2) $\epsilon - p(t)$ 图

横坐标是时间轴。加、卸载时刻标于图中。 $P_{i+1} > P_i$ ($i=1, 2, 3, \dots$) 加载时 ρ_s 减小,卸载后 ρ_s 恢复。刚卸载瞬间 ρ_s 回跳到一个较高值,随后略有减小

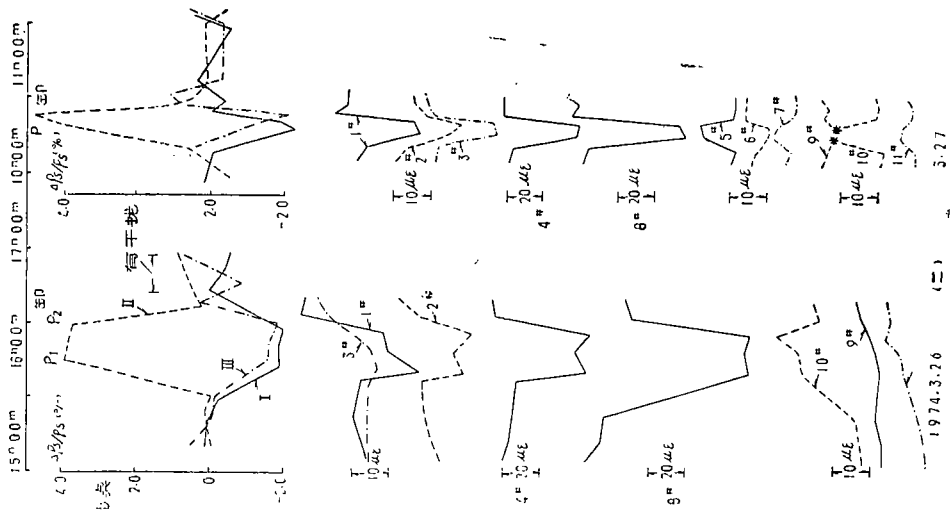


图13 (二) b点 $\frac{\Delta \rho_s}{\rho_s} - P(t)$ 和 $\epsilon - P(t)$ 图

横轴是时间轴，加、卸载时刻标于图中。ε为电阻应变片测量结果。

应变图表明，岩体主要应变是沿外力方向的压缩，但由于围岩的影响，测区应变形态较为复杂，不是单纯的单向压缩（5°片的引张和2°、6°片的压缩）

加载前 ρ_s ，各次测量对平均值的偏离甚微（0.5%），它表明实验中 ρ_s 测量的精度。加载时垂直于外力方向 ρ_s 增加，这是b点的一个特殊现象。

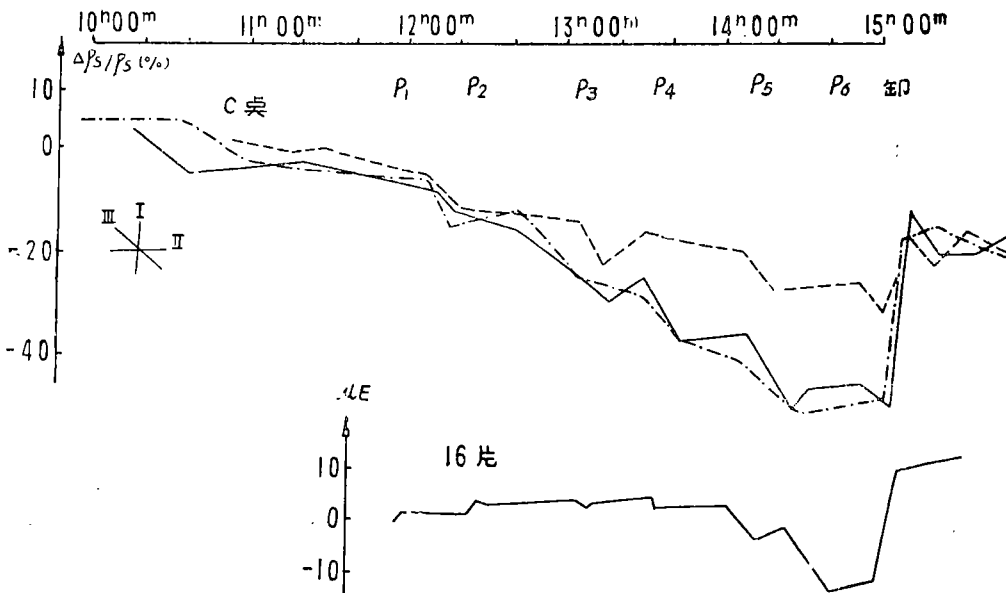


图13(三) C点 $\frac{\Delta \rho_s}{\rho_s} - P(t)$ 和 $\epsilon - P(t)$ 图

压缩时 ρ_s 下降，卸载时 ρ_s 恢复。8°片的引张表明形变形态较复杂

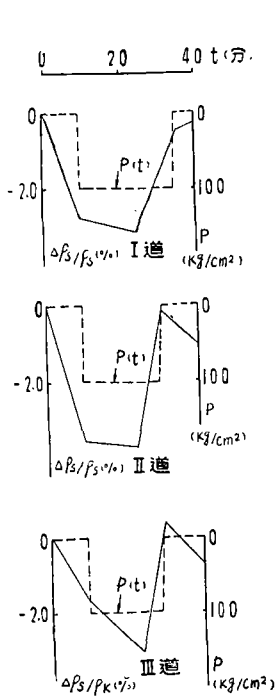


图13(四) e点 $\Delta\rho_s/\rho_s - P(t)$

加载区 ρ 变化滞后于压力。卸载瞬间 ρ_s 回跳到一个较高值，随后略有减小

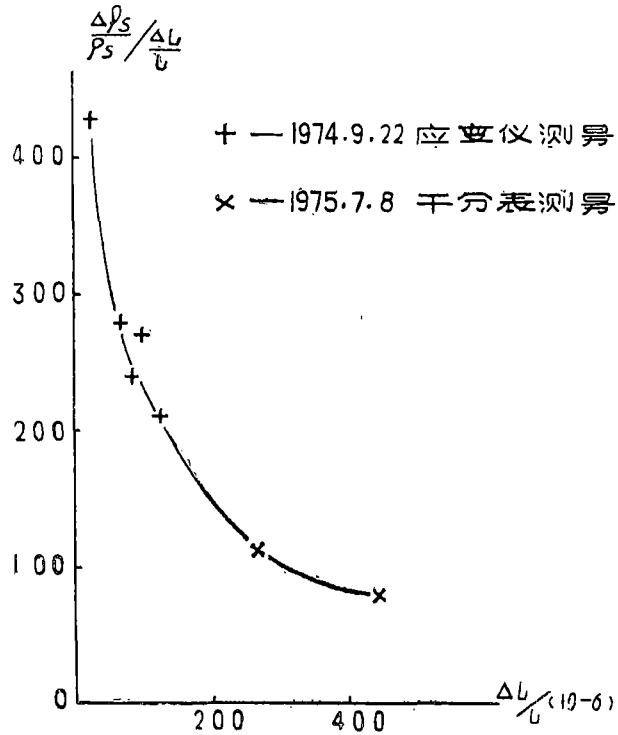


图14 e点 $\frac{\Delta\rho_s/\rho_s}{\Delta L/L} - \Delta L/L$

同一测点，形变小， $\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s} / \frac{\Delta L}{L}$ 比值大。形变增大，比值减小

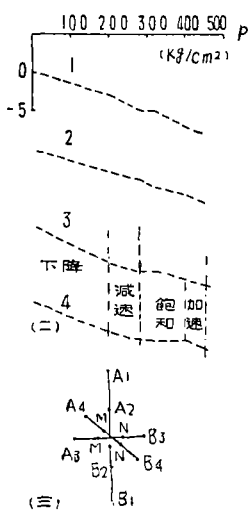
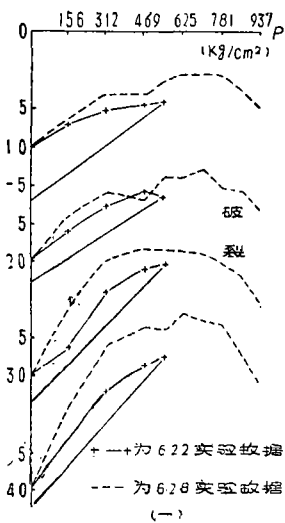


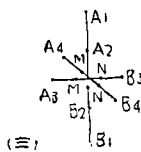
图15(一) 3° 标本 $\Delta\rho_s/\rho_s - P$ 图

标本水饱和，故压缩时 ρ_s 增大。当 $P \leq 312$ ， ρ_s 变化快； $P > 312$ 时 ρ_s 变化速度减小。 $P > 625$ ， ρ_s 开始反向变化，应是标本开始微破裂，有新的导电通路形成。

图15(二) 2° 标本 $\Delta\rho_s/\rho_s - P$ 图

随着压力的增加， ρ_s 变化分为下降、减速下降、饱和、加速（下降）几个阶段。标本含水量较高，但不饱和。

图15(三) 2°、3° 标本测线方位(外力沿着第1道方向)



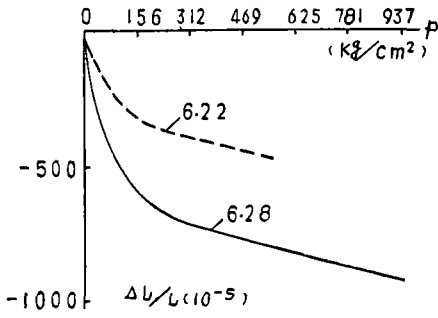


图16 标本 $\Delta L/L-P$ 图

千分表测量。

0—156Kg/cm²压力区间, 包含标本与压头间绝缘的形变在内。

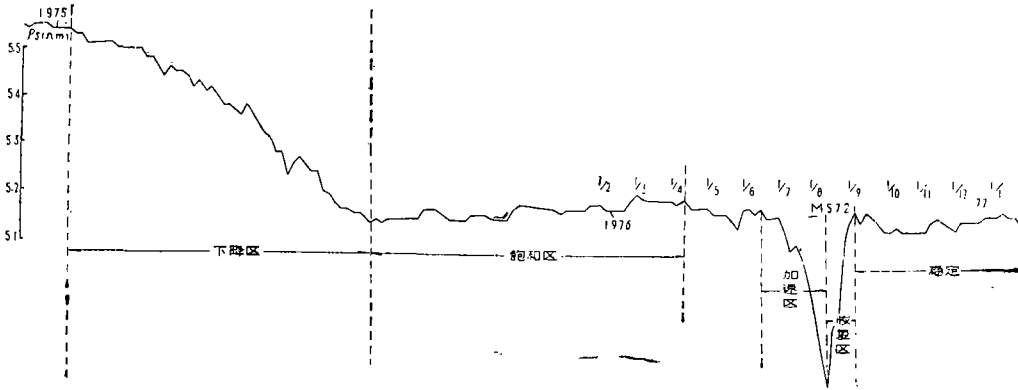


图 17

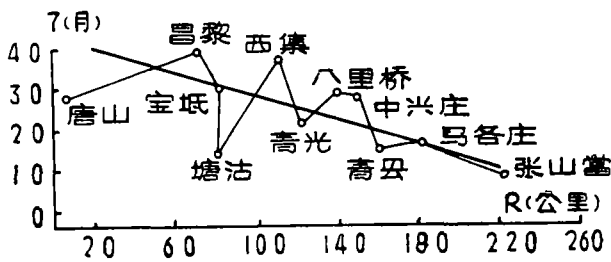


图18 唐山地震前 p_s 异常持续时间 T 与震中距 R 的关系

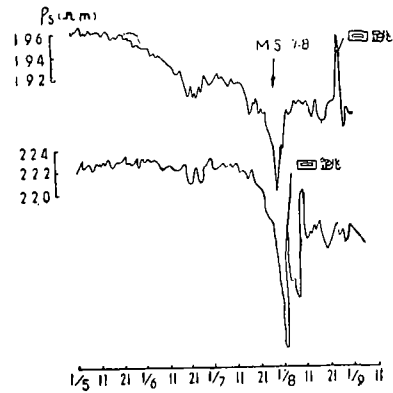


图19 唐山地震前昌黎台 p_s 加速下降异常及震后回跳

(3) 井下标本在实验室内压力实验

图15、16是在实验场地取的岩石标本拿到实验室测量的资料。3°标本用自来水饱和, 2°标本接近于饱和。需要指出的是压头和标本之间垫有之母片和塑料薄膜, 形变是用千分表测

量压头之间的位移得到的，故其中包含了云母片的压缩在内。

四、实验结果综述和分析讨论

1. 分析图 6 並参考表中 1 中 B 点的应力资料 可以发现，随着开采应力的增长，矿壁受到压缩， ρ_s 逐渐减小。对照图 8 和表 1（续），可得到同样的结论。

2. 图 4、5、7、表明，随着开采应力的增长， ρ_s 先减小，然后大幅度增高。我们注意到，在 ρ_s 增高的同时，应变曲线也是上升（表明扩容）的。在这期间 102° 坑道采掘已逐渐接近並通过与测区相应的部位，导致测区矿壁承受过大应力而不断产生“脱壳”现象。由此得到结论：非饱和岩层破裂过程中， ρ_s 增高。这个结论与水饱和的情况刚好相反，水饱和岩石标本破裂时， ρ_s 急剧减小〔1〕（图 15、16）。

实验场地岩石孔隙度 K 1975年1月 表2

样品号	106-1	106-2	112-1	112-2	112-3	112-4	112-5	112-6
K (%)	4.83	4.42	1.19	0.90	1.23	0.95	0.90	0.90

“106-1” 和 106-2” 为有裂缝的标本，故 K 大。

岩石的含水量 (1) 1974年8月27日 表3

样品号	4-1	4-2	5-1	5-2	6-1	6-2	12-1	12-2	37-1	37-2	104-1
n_w (%)	0.22	0.26	0.41	0.56	0.35	0.32	0.41	0.31	0.37	0.37	0.44
n_c (%)	0.57	0.67	1.12	1.45	0.91	0.83	1.12	0.81	0.96	0.96	1.14

(2) 1974年12月19日 表3

样品号	106-1	106-2	106-3	110-1	112-1	112-2	112-3	112-4
n_w (%)	0.22	0.21	0.11	0.11	0.12	0.3	0.11	0.26
n_c (%)	0.57	0.55	0.29	0.29	0.31	0.8	0.29	0.68

(3) 表3

样品号	106-底	106-顶	110-1	110-2	112-1	112-2	112-3	112-4
n_w (%)	0.48	0.22	0.14	0.24	0.16	0.1	0.37	0.10
n_c (%)	1.25	0.57	0.36	0.62	0.42	0.3	0.96	0.26

n_w —标本含水重量与标本总量之比

n_c —标本所含水分的体积与标本总体积之比

3. 分析图 8 和表 1 可知，随着测点距力源距离的增加，测区应力、应变随之衰减， ρ_s 的变化幅度亦减小。值得注意的是，当采掘在 120° 坑道进行时，（图 8 中 1975.3.14.—5.14 资料），位于 122° 坑道的 2° 测点紧靠 120° 采场，距力源最近，位于 124° 坑道 6° 测点次之，位于 126° 坑道的 7° 测点最远（图 1），其 ρ_s 的变化量依次减少。而当采场位于 122° 坑道时（图 8 中 1975 年 5 月中旬—7 月中旬资料），上述现象在 6° 和 7° 点重演。为醒目计，兹将 2°、6°、7° 测点的有关数据列于表 4（ ΔP 、 $\Delta \rho_s / \rho_s$ 分别从表 1 和图 8 得到，距离 R 从现场量出）这一很有意义的结果说明 ρ_s 变化与应力之间有着密切的联系。

$\Delta\rho_s/\rho_s$ 随力源距的变化 表4

测点号	2°	6°	7°	6°	7°
R(力源距·米)	15	30	45	15	30
ΔP (应力条纹级数)	$2\frac{1}{3}$	$1\frac{1}{3}$	$\frac{1}{8}$	$1\frac{1}{3}$	
$\Delta\rho_s/\rho_s$ (%)	28	10	不明显	30	10
时间	1975.3.14-5.14.采掘120°坑道		5月中旬-7月中旬采掘122°坑道		

$\Delta\rho_s/\rho_s$ 幅度的差别应是由含水量不同所致。这从图12可以看出,处于坑道内(含水不饱和)的e点, $\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s} / \frac{\Delta L}{L} \sim 10^2$, 而在实验室中水饱和的3°标本的 $\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s} / \frac{\Delta L}{L}$ 却是30~40, 这一结果和其他实验资料是吻合的, 例如山崎良雄给出的(火山砾凝灰岩)数据[2]为:

含水量(%)	2	18	25
$\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s} / \frac{\Delta L}{L}$	400	250	25

5. 围压对比值 $\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s} / \frac{\Delta L}{L}$ 的影响: 表5是a、b、c三点在千斤顶加载下, 沿压力方向 $\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}$ 与 $\frac{\Delta L}{L}$ 的数据, $\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s} / \frac{\Delta L}{L}$ 的量级为 10^3 此三点有围压*, 由图12得e点 $\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s} / \frac{\Delta L}{L} \sim 10^2$, e点无围压。由此可知, 解除了围压的岩块比值 $\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s} / \frac{\Delta L}{L}$ 较小, 而未解除围压的天然岩层, 其比值较大。

$\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}$ 与 $\frac{\Delta L}{L}$ 的比值 表5

测点	实验日期	总压力W(T)	$\frac{\Delta L}{L}$ (10^{-6})	$\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}$ (10^{-2})	$\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s} / \frac{\Delta L}{L}$
a	1974.2.17.	50	-28	-6.1	2×10^3
b	3.26.	150	-21	-2.1	1×10^3
c	3.26.	150	-22	-4.7	2×10^3

段 ρ_s 不再减小或稍有增加(图10、12)。从图14可找到两者之间的经验关系:

$$\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s} = X e^{ax^2+bx+c} \quad (1)$$

式中 $X = \left| \frac{\Delta L}{L} \right|$ 变化范围: $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 、a、b、c为与岩层性质有关的常数, 此处 $a = 9.51 \times 10^6$, $b = -8.57 \times 10^3$, $c = 6.26$ 。

7. 实验发现, ρ_s 变幅随测线(相对于压力方向的)取向而变: 平行于压力方向 ρ_s 减小

4. 岩层含水量对 ρ_s 变化幅度

的影响: 含水量增大, $\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s} / \frac{\Delta L}{L}$ 的比值减小。比较A、B两点与G点的资料可看出, 前一组点的 $\Delta\rho_s / \rho_s$ 比后一组点明显地大。这两组点位于同一坑道, 岩性基本一致, 但后一组点地势较低, 较潮湿。

6. 同一测点 ρ_s 变幅与探测区形变量有关。如前所述, 压缩时 ρ_s 减小, 压缩形变量增大, ρ_s 变幅也增大。但两者不是线性关系, 随着形变量的增大, ρ_s 变化速度逐渐减, 小到一定阶段

*本文所指围压系指岩层的天然约束。当我们对岩层的局部施压时, 该区域必然受到邻近区域的约束, 使之不能自由地向垂直于压力的方向引张。这个约束力就是本文所指的围压。

量最大，垂直于压力方向 ρ_s 减小量最小。为了考查开采应力实验中 ρ_s 变化的方向性规律。在D点共布设了五道不同方向测线，用公式

$$\left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right) = A + BCOS2(X - X_0) \quad (2)$$

用其中1,2,3条测线的数据求出A、B、 α 等参数，再计算出第4,5道测线方向的 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 值，并与实测值相对比，大体相符合*。由此可认为在布三道线的情况下，可以推算任一方向 $\Delta\rho_s/\rho_s$ ，并进而推算 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 极值方向。下面将看到， $\left|\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right|_{max}$ 方向与探测区最大主压应力方向一致。

在人工加载实验中b、c、e三处 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 的极值方向与最大主压应力方向之间的夹角 α 列于表6。数据表明， $\Delta\rho_s/\rho_s$ 的极值方向与最大主压应力方向一致，其差值在实验误差范围以内。顺便指出一点， $\Delta\rho_s/\rho_s$ 的一个极值方向与最大主压应力方向平行，另一个极值方向自然与最大主压应力方向垂直，实验发现与最大主压应力方向平行的是 $\left|\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right|_{max}$ ，因 $\Delta\rho_s < 0$ ，故亦可记为

b、c、e点 α 角表 表6

测点	b	c	e
$\alpha(^\circ)$	0 ± 5	0 ± 11	5 ± 1

$\left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right)_{min}$ 。

8. 压缩过程中， ρ_s 的变化滞后于形变（图13(四)），而形变和压力的变化则几乎是同的，但卸载时 ρ_s 和形变的恢复都有滞后现象（图13和表7）

卸载后形变的恢复过程 表7

Δt (minute)		0	5	10	15	20	27	32	43	49
P (Kg/cm ²)	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta L/L$ (10 ⁻⁶)	437	13	7.4	6.0	5.0	3.0	2.0	1.0	0.2	0

从图13(一)还可以发现，刚卸载的瞬间， ρ_s 回跳到较高值(甚至高于加压前的 ρ_s 值)，然后经一段时间的波动逐渐变到比加压前的 ρ_s 低的某个值稳定下来。这对分析大震后的 ρ_s 资料有一定参考价值。

五、初步理论解释

作为初步解释，借用一个简化的模型，以便使计算简率。设岩层是由一些微小的球形岩石颗粒和球形孔隙组成，其视电导率公式为〔3〕

$$\sigma_s = \sigma_A \frac{3 - 2K(1 - \sigma_A/\sigma_g)}{3\sigma_A/\sigma_g + K(1 - \sigma_A/\sigma_g)} \quad (3)$$

式中：K—孔隙度， σ_A —孔隙电导率， σ_g —固体岩石颗粒电导率。

以下分几种情况讨论：

1. 水饱和：孔隙中充满导电水溶液，故有 $\sigma_A \gg \sigma_g$ ，(3)式化简为 $\sigma_s = \sigma_A \frac{2K}{3 - K}$ 改写成视

*：参见附录

电阻率公式:

$$\rho_s = \rho_A \frac{3-K}{2K} = \frac{1}{2} \rho_A \left(\frac{3V}{V_p} - 1 \right) \quad (4)$$

式中: V_p ——孔隙体积,

V ——测区岩层总体积。故孔隙度 $K = V_p/V$ 。

压缩的直接效果是改变了压区岩层的体积,对(4)式求导:

$$\frac{d\rho_s}{\rho_s} = \frac{3}{3-K} \frac{1}{V} (dV - \frac{1}{K} dV_p)$$

考虑到液体的压缩系数远大于固体的压缩系数,故有

$$dv = dv_p, \Rightarrow \frac{d\rho_s}{\rho_s} = \frac{3}{3-K} \frac{K-1}{K} \frac{dV}{V} \quad (5)$$

取 $K = 0.01$ (见表2), 有:

$$\frac{d\rho_s}{\rho_s} = -100 \frac{dV}{V} \quad (5')$$

即按此模型算得,在水饱和的情况下, $\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s} / \frac{\Delta L}{L}$ 比值约为100, 压缩时 $dV < 0$,

故 $\frac{d\rho_s}{\rho_s} > 0$ 即压缩时 ρ_s 增大, 与实验结果大体吻合。

$$2. \text{对非水饱和状态有: } \rho_{s,q} = \rho_s K_q^m \quad (6)$$

式中: $K_q = \frac{V_q}{V_p}$, V_p ——孔隙体积, V_q ——孔隙中水溶液所占的体积。考虑到气体压缩系数远大于液体压缩系数 $\Rightarrow dV_q = 0$, $dV_p = dV$ 于是有:

$$\frac{d\rho_{s,q}}{\rho_{s,q}} = \frac{d\rho_s}{\rho_s} + \frac{m}{K} \frac{dV}{V} \quad (7)$$

$K = 0.01$, 通常取 $m = 2.15$ *

$$\frac{d\rho_{s,q}}{\rho_{s,q}} = (-100 + 215) \frac{dV}{V} = 115 \frac{dV}{V} \quad (7')$$

压缩时 $dV < 0$, 故 $\frac{d\rho_{s,q}}{\rho_{s,q}} < 0$, 即非水饱和岩石压缩时 ρ_s 减小, 定性解释了实验结果。

3. 考虑到实验中所测应变都是线应变, 它和体应变之间的关系为:

$$\text{有围压时: } \frac{dV}{V} = 3 \frac{dL}{L}, \text{ 代入(5')}: \frac{d\rho}{\rho} = 450 \frac{dL}{L} \quad (7'')$$

$$\text{无围压时: } \frac{dV}{V} = (1-2\sigma) \frac{dL}{L}, \text{ 取 } \sigma = 0.25 \text{ 代入(5')}$$

$$\frac{d\rho}{\rho} = 75 \frac{dL}{L} \quad (7''')$$

[注]参看一般石油勘探书籍

这便是实验中a、b、c点的 $\frac{\Delta \rho_s}{\rho_s} / \frac{\Delta L}{L}$ ($\sim 10^3$) 比e点的 $\frac{\Delta \rho_s}{\rho_s} / \frac{\Delta L}{L}$ ($\sim 10^2$) 大许多的合理解释。(前三点有围压, e点解除了围压(图3))。

这个模型没有考虑岩层中有裂隙这一客观事实, 这是与实际的最大偏离。故它不能解释 $\left| \frac{\Delta \rho_s}{\rho_s} / \frac{\Delta L}{L} \right|$ 随 $\left| \frac{\Delta L}{L} \right|$ 增大而减小。若考虑有裂隙存在, 在非水饱和状态, 孔隙中有少量水溶液, 导电性能较差。较小压力下裂隙合拢, 由于表面张力作用, 水溶液在其间形成水膜, 构成良好导电通路, ρ_s 大幅度减小, 故有很大的 $\frac{\Delta \rho_s}{\rho_s} / \frac{\Delta L}{L}$ 比值(相当于图10、14、中所标“下降”区)、压力增大, 水膜通路变化不大, 此时圆形孔隙变形, 使 ρ_s 继续减小, 此即前面模型的计算和分析(相当于图10、14、中“减速”)。压力继续增加, 部分裂隙闭死, 水膜通路切断, 使 ρ_s 略有增加(相当于图10、14、中的“饱和”区)。压力进一步增大, 孔隙继续压缩, 而裂隙则全部闭死, 孔隙中的气体排不出去, 因而孔隙压力不断增大, 导致产生微破裂, 含水量较高的岩层, 水溶液将渗进这些微裂缝, 构成新的导电通路, 使 ρ_s 再次大幅度减小(图14、中“加速”区)。

六、震 例 分 析

利用实验结果, 概略分析一下近年来我国境内几个大震前的 ρ_s 异常。

1. 1976年7月28日唐山7.8级和1976年8月16日松潘7.2级等各次大震前, 震中周围许多台站的 ρ_s 测量都观测到明显的“台阶式下降”异常。图17是距松潘地震震中100公里的武都台的 ρ_s 五日均值图。 ρ_s 异常从1975年2月开始, 2月——11月减小7.6% (平均每月减小0.8%)、这是震前能量积累的第一阶段, 相当于图10、14中的“下降区”。75年11月——76年4月, ρ_s 曲线变平, 这是震前能量集中的第2阶段, 相当于图10、14、中的饱和区”。76年4月——6月 ρ_s 曲线在新有下降的趋势, 7月初至8月中(发震) ρ_s 急剧减小7.2% (平均每月减小4.9%), 这是震前能量积累的最后阶段, 岩层体积膨胀, 新的导电通路构成, ρ_s 大幅度下降。

唐山地震前 ρ_s 变化幅度 表 8

台 站	R (Km)	$\left(\frac{\Delta \rho_s}{\rho_s} \right)_{max}$ (%)
荷 泽	520	SN. -3.1
		EW. -2.6
大 圩 河	320	SN. -3.6
		EW. -4.3
青 县	160	EW. =10.0
小 汤 山	160	SN. +3.7
徐 庄 子	130	EW. 20.0
塘 沽	80	SN. -2.9
		EW -3.7
昌 黎	80	SN. -4.3
		EW -6.3
马 家 沟	5	SN. -23.5
		EW. -11.4

炉震地震前 ρ_s 前变化幅度

台 站	R (Km)	幅度 (%)
甘 孜	45	12
康 定	220	6
腾 冲	725	1
兰 州	663	0.5
嘉峪关	970	0

有这种“台阶式下降”异常。显然有的曲线迭加了年变化在内, 不象图17那样典型, 但都能看到“下降—饱和—和加速下降”这几个变化阶段来, 这里不一一列举。震前各台 ρ_s 变化形态如此相似, 並和实验结果基本一致, 应不是偶然现象, 而是反映了受力时岩层导电性能的变化规律。震前 ρ_s 变化的这一特点, 可作为预报发震时间的重要参考。

唐山地震前, 震中距150公里以内的唐山、宝坻、青光、中兴庄等台, 炉震地震前甘孜台(震中距45公里)的 ρ_s 资料都

2. 实验中得到的随力源距的增加, ρ_s 变化幅度和变化持续时间的衰减, 在各次大震中都有明显体现。表 8 是唐山、炉霍地震前 ρ_s 变化幅度与震中距的数据〔4〕。图 18 是唐山周围各台 ρ_s 异常持续时间随震中距增加而衰减的情况〔4〕。 ρ_s 变化的这一规律为预报震中提供了依据、当然由于各台台址条件的不同, 幅度、持续时间的衰减都不是绝对的。但如有足够数量的观测点构成观测网, 还是可以鉴别的, 如表 8 和图 8 所示, 虽有起伏, 但趋势是清楚的。

3. 图 19 是唐山地震后昌黎台 ρ_s 的回跳现象〔4〕, 和图 13(一) 中卸载后 ρ_s 的回跳相似。

几次大震后, 周围台站的 ρ_s 都恢复不到异常开始前的数值、这并不意味着异常没有结束, 从实验中来看卸载后 ρ_s 也不完全恢复原值。只要震后 ρ_s 恢复到某个值后完全稳定下来, 就可认为异常已经结束。

结 论

从上述实验资料和分析讨论中我们可以看到, 局部岩层的视电阻率 ρ_s 与该区域的应力一应变状态是密切相关的, 当区域应力状态改变时, ρ_s 相应地变化, 两者之间有着规律性的联系。从而从实验上证明了 ρ_s 法预报地震的物理基础是可靠的。本文初步探讨了其中的部分规律, 它与近年来我国境内几次大震前的 ρ_s 变化情况是吻合的〔5〕。诚然, 影响 ρ_s 变化的因素是复杂的, 象本文中所分析过的季节因素、含水量因素等等。岩层 ρ_s 变化规律也是复杂的, 欲更清楚地认识这些规律, 还应作大量的实验和理论研究。

附录一、关于 ρ_s 变化的方向性规律

1. 公式推导

由《地电原理》一书, 对均匀各向异性介质, 视电阻率公式可表为:

$$\rho_s = \sqrt{\frac{\rho_1 \rho_2 \rho_3}{\rho_1 \cos^2 \alpha + \rho_2 \sin^2 \alpha}} \quad (10)$$

式中: ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 分别为真电阻率张量 $\vec{\rho}$ 的三个主值。 α 为测线与 ρ_1 方向的夹角。再假定 $\rho_1 \rho_2$ 平行于地表, ρ_3 与地表垂直, 于是在地表布线测量就可用 (10) 式。微分之:

$$d\rho_s = \frac{\partial \rho_s}{\partial \rho_1} d\rho_1 + \frac{\partial \rho_s}{\partial \rho_2} d\rho_2 + \frac{\partial \rho_s}{\partial \rho_3} d\rho_3 + \frac{\partial \rho_s}{\partial \alpha} d\alpha$$

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial \rho_1} = \frac{1}{2} \rho_s \frac{\frac{\rho_2}{\rho_1} \sin^2 \alpha}{\rho_1 \cos^2 \alpha + \rho_2 \sin^2 \alpha} \quad \frac{\partial \rho_s}{\partial \rho_2} = \frac{1}{2} \rho_s \frac{\frac{\rho_1}{\rho_2} \cos^2 \alpha}{\rho_1 \cos^2 \alpha + \rho_2 \sin^2 \alpha}$$

设 $d\alpha = 0$, 即设压力不改变主值的方向。

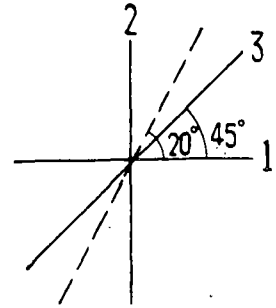
$$\Rightarrow \frac{d\rho_s}{\rho_s} = \frac{1}{2} \left(\frac{\frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{d\rho_1}{\rho_1} \sin^2 \alpha + \frac{d\rho_2}{\rho_2} \cos^2 \alpha}{\frac{\rho_2}{\rho_1} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \right) + \frac{d\rho_3}{\rho_3}$$

若按右图所示布三道测线，设第一道测线与 ρ_1 成 α_0 角，由(11)式：

$$X_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{\frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{d\rho_1}{\rho_1} \sin^2 \alpha_0 + \frac{d\rho_2}{\rho_2} \cos^2 \alpha_0}{\frac{\rho_2 \sin^2 \alpha_0 + \cos^2 \alpha_0}{\rho_1}} + \frac{d\rho_3}{\rho_3} \right)$$

$$X_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{d\rho_1}{\rho_1} \cos^2 \alpha_0 + \frac{d\rho_2}{\rho_2} \sin^2 \alpha_0}{\frac{\rho_2 \sin^2 \alpha_0 + \cos^2 \alpha_0}{\rho_1}} + \frac{d\rho_3}{\rho_3} \right)$$

$$X_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{\frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{d\rho_1}{\rho_1} (1 + \sin^2 \alpha_0) + \frac{d\rho_2}{\rho_2} (1 - \sin 2\alpha_0)}{\frac{\rho_2 (1 + \sin^2 \alpha_0) + (1 - \sin 2\alpha_0)}{\rho_1}} + \frac{d\rho_3}{\rho_3} \right)$$



式中： $X_i = \left(\frac{d\rho}{\rho_s} \right)_i \quad i = 1, 2, 3$

假定 $\rho_1 = \rho_2$ ，但 $d\rho_1 \neq d\rho_2$ 。即假定压缩前介质在水平方向性质相同，因水平方向受压而产生所谓“各向异性”， ρ 变化的极值方向，即为压缩后电阻率张量的主值方向。于是上列各式化简为：

$$\left\{ \begin{aligned} X_1 &= \frac{1}{2} \left(\frac{d\rho_1}{\rho_1} \sin^2 \alpha_0 + \frac{d\rho_1}{\rho_1} \cos^2 \alpha_0 + \frac{d\rho_3}{\rho_3} \right) & (12) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} X_2 &= \frac{1}{2} \left(\frac{d\rho_1}{\rho_1} \cos^2 \alpha_0 + \frac{d\rho_2}{\rho_2} \sin^2 \alpha_0 + \frac{d\rho_3}{\rho_3} \right) & (13) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} X_3 &= \frac{1}{4} \left[\frac{d\rho_1}{\rho_1} (1 - \sin 2\alpha_0) \right] + \frac{d\rho_2}{\rho_2} (1 + \sin 2\alpha_0) + \frac{d\rho_3}{\rho_3} & (14) \end{aligned} \right.$$

解上列联立方程可得：

$$\operatorname{tg} 2X_0 = \frac{X_1 + X_2 - 2X_3}{X_2 - X_1} \quad (15)$$

由实验测得 X_1 、 X_2 、 X_3 ，即可由(15)式算出 $d\rho_1$ 的方向。 $d\rho_1$ 的方向就是 ρ_s 的极值方向。

欲求与第1道测线成任意角 α 方向（即与 ρ_1 成 $\alpha - \alpha_0$ 方向的 ρ_s 变化率，将(12)式中的 α_0 换成 $(\alpha - \alpha_0)$ 即可：

$$\begin{aligned} \left(\frac{d\rho_s}{\rho_s} \right)_\alpha &= \frac{1}{2} \left[\frac{d\rho_1}{\rho_1} \sin^2 (\alpha - \alpha_0) + \frac{d\rho_2}{\rho_2} \cos^2 (\alpha - \alpha_0) + \frac{d\rho_3}{\rho_3} \right] \\ &= A + B \cos 2(\alpha - \alpha_0) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\text{其中：} A = \frac{1}{4} \left(\frac{d\rho_1}{\rho_1} + \frac{d\rho_2}{\rho_2} + 2 \frac{d\rho_3}{\rho_3} \right) = \frac{1}{2} (X_1 + X_2) \quad (17)$$

$$B = \frac{1}{4} \left(\frac{d\rho_2}{\rho_2} - \frac{d\rho_1}{\rho_1} \right)$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2}(X_1 - X_2)^2 + (X_1 - X_3)^2 - (X_1 - X_2)(X_1 - X_3)} = \sqrt{\frac{1}{2}P^2 + q^2 - Pq}$$

(18)

$$P = X_1 - X_2 \quad q = X_1 X_3$$

在解联立方程(12)–(14)时可得到A、B的表区式(17)、(18)。

由实验测得 X_1 、 X_2 、 X_3 、并用(15)式算得 α_0 ，即可由(16)式算得与第1道测线成任意角 α 方向的 $\frac{d\rho_s}{\rho_s}$ 值。

2. 图20是D点第4、5道观测值与由(15)式计算的理论值的比较。从图中可看到两者的趋势是一样的、再由5道测线的相对位置及其 $\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}$ 资料(图21)，能得出结论，按此理论分析 ρ_s 的方向性是可取的。

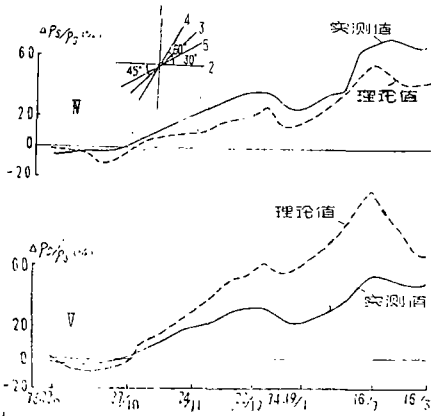


图20 D点($\Delta\rho_s/\rho_s$)理论值和测值的比较

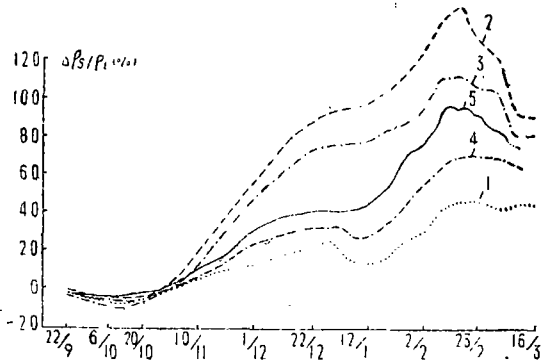


图 21

3. 对b、c、e三处实验资料按(15)式计算 $\left| \frac{\Delta\rho_s}{\rho_s} \right|_{\alpha, x}$ 方向角 α 列于表9、10。计算结果

表明 $\left| \frac{\Delta\rho_s}{\rho_s} \right|_{\alpha, x}$ 方向与压缩方向是一致的(b、c点 $\alpha \approx 20^\circ$ 似乎有较大差异，但注意到现场的几何特征(参见图3)，压缩方向实际上与表观压力方向有约 20° 的角度—正文中表6的数据是考虑了这一影响后的修正值)。

表中 α 角的误差按如下估计：

(1) 测量误差按 $\pm 0.5\%$ 计。

函数 $f = \frac{X_1 + X_2 - 2X_3}{X_1 - X_2} = \text{tg}2\alpha$ 取标准误差：

* 参看图13(二) b点加载前 ρ_s 资料

$$\Delta f_{\sigma} = \frac{2 |\Delta \times|}{(X_2 - X_1)^2} \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (X_2 - X_3)^2 + (X_3 - X_1)^2}$$

(3): $\Delta \alpha = \frac{1}{1+f^2} \Delta f_{\sigma}$

b、c点 $\left(\frac{\Delta \rho_s}{\rho_s}\right)_{max}$ 方向角 α 表

表 9

P	X ₁ (%)	X ₂ (%)	X ₃ (%)	$tg2\alpha = \frac{X_1 \cdot X_2 - 2X_3}{X_2 - X_1}$	$\alpha (^{\circ})$
C点 1974.3.29 (温度20℃ 相对湿度100%)					
0	0	0	0		
P ₁	-1.0±0.5	-0.8±0.5	-1.0±0.5	1.0±7.0	41--40
P ₂	-1.8±0.5	-1.3±0.5	-1.6±0.5	0.2±2.5	35--33
P ₃	-2.6	-1.8	-2.6	1.0±1.8	35--20
P ₄	-3.7	-1.8	-3.5	0.8±0.7	19±12
P ₅	-4.7	-2.6	-4.6	0.9±0.7	21±11
P ₆	-4.7	-2.7	-4.6	0.9±0.7	21±11
0	-1.6	-1.7	-1.6	1±14	43--34

b点 1974.3.26 (温度20℃ 相对湿度100%)

0	0	0	0		
p ₁	-1.9±0.5	3.3±0.5	-1.6±0.5	0.9±0.3	21±5
p ₂	-2.0	3.7	-1.9	1.0±0.2	22±3
0	-0.4	0.3	-0.2	0.4±1.8	33--27

b点 1974.3.27. (温度19℃ 相对湿度100%)

0	0	0	0		
P	-2.2±0.5	4.4±0.5	-1.7±0.5	0.8±0.2	19±4
0	-0.1	0.4	0.4	-1±3	31--38

e点 $\left(\frac{\Delta \rho_s}{\rho_s}\right)_{max}$ 方向角表

表10

P (Kg/cm ₂)	X ₁ (%)	X ₂ (%)	X ₃ (%)	$tg2Q = \frac{2X_1 - X_2 X_3}{X_3 - X_2}$	$\alpha = Q + 45_{\circ}$
0	$\rho_{s,1} = 1368 \Omega m$	$\rho_{s,2} = 1208 \Omega m$	$\rho_{s,3} = 2088 \Omega m$		
50	-7.7	-5.0	-6.0	4.4±0.4	-6±1
100	-3.2	-2.0	-2.0	0.0	0
0	-0.1	-0.5	-1.2		
100	-4.8	-3.1	-2.4	-5.7±1.0	5±1

说明: 1. $X_i = \left(\frac{\Delta \rho_s}{\rho_s}\right)_i$ $i=1, 2, 3$

2. $\Delta \rho_s = (\rho_s)_{\bar{p}} - (\rho_s)_{\bar{p}=0}$

3. 压力很小时, $\therefore \frac{\Delta \rho_s}{\rho_s}$ 很小, 故 Δf_{σ} 大, 当 $\Delta f_{\sigma} > f$ 时

按 $tg2\alpha_1 = f + \Delta f_{\sigma}$ $tg2\alpha_2 = f - \Delta f_{\sigma}$ α 在 $\alpha_1 - \alpha_2$ 之间

若 $\Delta f_{\sigma} < f$, 则记为 $\alpha \pm \Delta \alpha$ $\Delta \alpha = \frac{1}{2} \frac{1}{1+f^2} \Delta f_{\sigma}$

附录二、关于资料的准确度

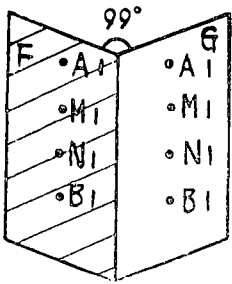


图22 F、G 相对位置及第一道布极示意图

1. ρ_s 的标准误差 K_a : 人工加载实验、 $K_a \leq 0.5\%$ 开采应力实验 $K_a \leq 1.5\%$ 。

6. 为检验资料的可信度, 在图22所示的 F、G 两处布置测线测量同一勘探体积内的 ρ_s , 图23是40天的测量结果, 两处测值线, 基本一致, 差别 $< 2\%$, 大体在测量误差范围内。这说明所测数据符合电法勘探理论。

3. 分别在三个测点作了在不同电流下测量 ρ_s 的实验, 图24是实验结果, 供电电流从20mA变到300mA, ρ_s 变化不到 2% 。而在做压力实验时, 电流变化一般不超过几 mA, 供电电压基本恒定(定不变), 由此排除了电源的微小变化对 ρ_s 的影响。

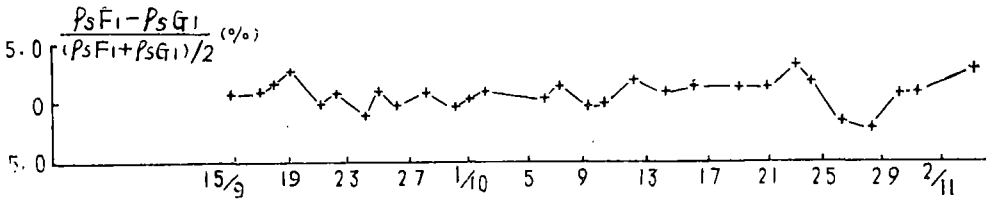


图23 F和G点 ρ_s (垂直方向) 数据比较图

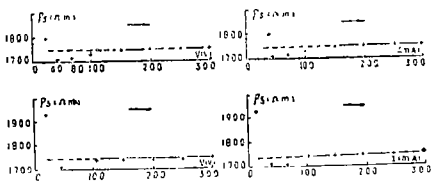


图24 (一)

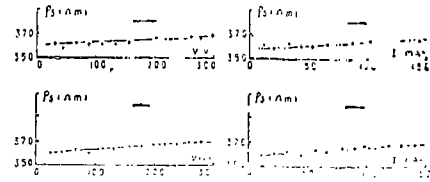


图24 (二)

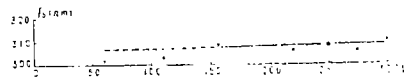


图24 (三)

图24 2号点、4号点和 E 点实验图

4. 仪器性能稳定。在开采应力实验中, 因观测时间长(一般为几个月), 为防止仪器变化, 采取了如下措施; (1)用数字电压表和DDC-2A仪对比观测 ΔV_{MN} 。(2)平均每一月左右校对一次仪器。(3)各测点共用同一套仪器(A-G七个点还共用同一根电缆), 但在相同时期内各测点的 ρ_s 变化差别甚明显, 说明不是仪器的影响, 而是 ρ_s 本身的变化。

5. 温、湿度等环境因素的影响: 人工加载实验每次在8小时之内完成、温、湿度基本恒定。开采应力实验则受一些影响(附录三有专题讨论)。

综上所述,全部实验资料都是可靠的

附录三关于年变化的讨论

井下长期观测也存在年变化。4、5月份 ρ_s 取极大值,9月份 ρ_s 取极小值, ρ_s 年变幅度的20—30%。影响年变的因素估计主要是水份,温度影响较小,一年之间温差约2~3度,而湿度变化则较大、春夏之间、矿壁电缆上皆有水珠凝结,表明空气中湿度过饱和,而秋冬则无珠凝结。实验中 ρ_s 探测深度一般约0.5米(AB极距约1.5米),致受表层湿度影响较大。但年变不影响文中各结论,例如年变是在9月中、下旬 ρ_s 开始增大,而B点的 ρ_s 到11月上旬才由减小转为增大,同时期A点的 ρ_s 则在10月中旬就开始增大。又如2°、6°、7°的 ρ_s 资料依离力源远近不同而在时间和幅度上的变化,都显然和年变毫不相干。

原兰州地震大队刘建毅、陈德万、吕广庭、王玉祥、张庆渊、贾有学、齐玉芳等同志,北京大学地球物理系数教师朱仁益、陈大元、张德华等同志先后参加过实验工作。赵玉霖、钱家栋、陈有发等同志对实验提出过许多宝贵建议。锡矿山矿务局党委、长沙矿山研究院等单位曾给予大力协助。本文初稿承钱家栋同志审阅,提出了许多宝贵意见,在此一并致以衷心感谢。

(1980年6月20日收到)

参 考 文 献

- [1] The Effect of Pressure on the Electrical Resistivity of Water-Saturated Crystalline Rocks W.F. Brace.
—《Journal of Geophysical Research》
November 15, 1965.
Electrical Resistivity Changes in Saturated Rocks during Fracture and Fractional Sliding
W.F. Brace A.S. Orange
—《Journal of Geophysical Research》VOL. 73, NO. 4.
- [2] Electrical Conductivity of Strained Rocks
—The Second Paper Yoshio Yamagaki
《东京大学地震研究所汇报》第44号 第4册
- [3] Electrical Conductivity of Strained Rocks
The first paper, laboratory experiment on sedimentary rocks Yoshio Yamazaki
《东京大学地震研究所汇报》第43号 第4册
- [4] 唐山地震地电异常发展过程与地震“三要素”的预报 唐山地震工作队《唐山地震短临前兆资料》地震出版社1977年
- [5] Observations on Apparent Resistivity in Shallow Crust before and after Several Great Shallow Earthquakes. Qian Jiadong, et al.
《The Proceedings of the International Symposium on Earthquake Prediction》(to be published by UNESCO, Paris, 1981)

EXPERIMENTAL STUDY ON THE VARIATIONS
IN APPARENT RESISTIVITY ASSOCIATED
WITH THE STRESS-STRAIN STATE OF
THE ROCK-WALLS IN THE UNDERGROUND
MINE TUNNELS

Zhang Tong-jun

Abstract

Experiments on the variations in apparent resistivity in the rock-walls of the underground mine tunnels had been made for more than two years, meanwhile the stress-strain state of the walls was changing with adjoining tunnels being dug

This paper presents and analyses the obtained data in detail, which include those of stress, strain, apparent resistivity, and so on. The mechanism on variations of apparent resistivity and the problem about the directions of extreme values of the variations are discussed briefly.