

原地电阻率变化的实验*

赵玉林 钱复业

(国家地震局地球物理研究所)

杨体成

(河北省地震局)

刘建毅**

(国家地震局兰州地震研究所)

摘要

在野外原地对某些自然状态非饱和的土层及含裂隙砂化灰岩电阻率随应变的变化进行了实验。主要结果有：1) 低应力下，随体积的压缩电阻率下降；体积膨胀时电阻率上升；2) 所测岩、土层电阻率相对变化($\Delta\rho/\rho$)对微小应变(ϵ)的变化响应甚为敏感，裂隙岩层比土层更甚。放大系数 $\frac{\Delta\rho}{\rho}/\epsilon$ 与应变量有关，对 10^{-4} 应变通常有一、二百倍，对 10^{-5} 应变可达数百乃至上千倍；3) 电阻率相对变化幅度随力源强度和尺度的增加而增加，随力源距离的增加而衰减。电阻率变化起始时间随距离的增加显示出滞后现象；4) 水平各向同性土层，在应力作用下，不同方向电阻率变化不同，呈现出方向性。通常垂直最大压缩方向的电阻率 ρ_{\perp} 下降较多，平行方向的 ρ_{\parallel} 下降较小或略有上升，与压力呈 45° 的 $\rho_{45^{\circ}}$ 下降幅度介于中等。含裂隙砂化灰岩则不同，不同方向电阻率的变化不仅与压缩方向有关，而且还与裂隙方向有关。通常是 ρ_{\parallel} 下降较多。当压应力平行裂隙时， ρ_{\perp} 也下降，但当压应力垂直裂隙时， ρ_{\perp} 则明显上升。

前言

地震前地电阻率发生变化的现象，国内外已有报道^[1-4]。用岩石标本破裂前电阻率变化的实验结果^[5]，以及有切割面的岩石标本摩擦滑动时电阻率变化的实验结果^[6]，可对地震前震源区电阻率的变化进行一些解释。然而，这些实验是在室内尺度很小的岩石标本上进行的，标本的含水量，含节理、裂隙以及受力等条件与自然状态的岩(土)层一般相差悬殊。尤其是对我国地电阻率观测而言，由于测量深度较浅(地下数百米内)，岩、土层基本处于常温、小围压状态。含水情况一般是非饱和的。一些台测量体积内主要还是未成岩的地层。强震前往往在震中及其附近较广的区域(可达一、二百公里)内观测到地电阻率异常变化，这意味着电阻率变化可能只与震中周围微小的附加应变变化有关。由于缺少针对这些实际情况的实验结果，有碍于进一步理解震前所观测到的地电阻率异常的某

* 1981年7月7日收到初稿，1982年11月22日收到修改稿。

** 傅征祥、芦胜强、张同俊、张庆元等同志曾先后参加实验工作。

些规律性^[7]。因而,根据我国地电阻率观测的实际情况,结合震前所观测到的某些规律开展实验,便成为理解这种前兆机制的桥梁。为此,作者提出并设计了一组原地测量电阻率变化的实验。从1969年起先后在河北省邢台地震区、甘肃省兰州地区及我国某矿区,进行了自然状态下土层及岩层受力时电阻率变化的实验,所用力源是千斤顶或矿山开采时的应力变化。实验共进行了数十次,主要定性结果基本一致。可用来对我国地震前所观测到的电阻率异常变化进行某些解释。

一、实验技术

1. 实验场地及实验方式

1) 利用千斤顶加压实验 用千斤顶先后进行了压缩土层、土层(弯曲)伸长及压缩岩层的实验。

为压缩土层,在地表土层中挖一槽,沿槽的两壁放两块 1×1 米²的厚木板,两只10—20吨的油压式或螺旋式千斤顶通过钢板、木板,对槽附近土层施加水平压力(图1(a))。

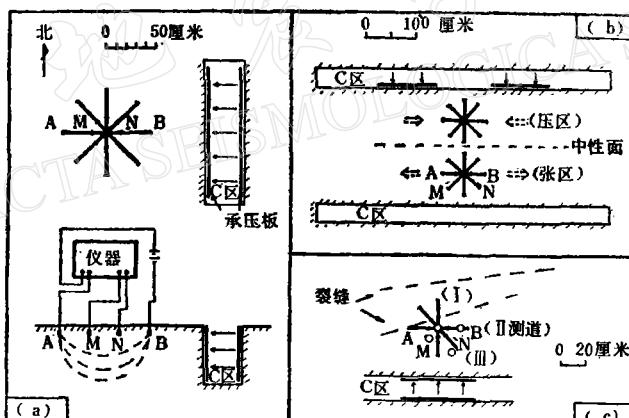


图1 千斤顶加压电阻率实验装置图(箭头示力源方向;
c区——挖空区; AMNB——电极系)

- (a)——土层加压装置和电极布设俯视(上)及剖面(下)图
- (b)——土层弯曲实验点位布设俯视平面图
- (c)——巷道侧壁裂隙岩层千斤顶加压实验点布设侧视图(圆圈示应变片位置)

为研究土层(弯曲)伸长时的电阻率变化,在地表土层中挖两个平行长槽,对两槽之间的土体施加弯矩(图1(b))。土体水平弯曲,在其中部形成纯弯曲区,在中性面张区的一侧布设测点,便可研究土层伸长时电阻率的变化。所研究的土层多属第四纪亚砂土、固结疏松、处于非饱和状态。其电阻率在数十至一、二百欧姆·米之间。

为研究岩层压缩时的电阻率变化,千斤顶压缩场地选在地下一、二百米深的矿山巷道中,对某一固定体积内的矽化灰岩岩层施加竖直或水平向压应力,受压岩层的侧向与围岩自然接触,约有数十巴的围压。电极布设在巷道的侧壁上。有的测点布设在有明显裂

隙的地段(图1(c)). 实验岩层的连通孔隙度约为1—5%，平均水饱和率为30%，处于非饱和状态。实验中使用最大压强不超过100公斤/厘米²，最大压应变小于 4×10^{-4} ，卸载后应变恢复至零。

2) 利用矿山开采时应力变化观测电阻率变化的实验 为研究自然状态下岩层受力时电阻率变化的规律性，在地下一、二百米深现场开采的旁侧巷道中，布设了实验测点，以研究开采面从测点旁经过时电阻率的变化。为研究电阻率幅度的空间分布，还在距采场不同距离上布设了测点(图2)。

实验岩体一般只有一个自由面，电极系即布在其上，其它方向与岩层自然接触。实验岩层为厚层矽化灰岩，倾角20—25°，结构差异明显，常含裂隙，电阻率各向异性系数平均为1.60。

2. 电阻率及应变的测量

(1) 电阻率的测量 电阻率采用对称小四极法测量(参见图1(a))。用小铅棒作电极，在岩层中埋设时一般用石墨填实。供电电极距的选择以测量体积内变形均匀为准，一般为0.90米或1.50米。每个测点均有3至4个测道，分别与压力方向平行、垂直或呈45°斜交。土层实验有时沿加压板中心线不同距离处布设多个测点，有时测点还选在与加压板呈45°的方向上。为研究矿山开采应力变化对巷道壁表层和深层影响之差异，个别点还布设了从1.5至12.0米的各种电极距。测点附近除布极的平面外，岩土层通常再无其它边界，基本消除了边界影响。

供直流电入地，同时测量电流强度及电位差，计算出电阻率的绝对值。电位差或用自动补偿直流毫伏计或用高输入阻抗数字电压表测量。供电电流强度用0.5级电流表测量。仪器每1—2月标定一次，保持性能长期稳定。井下观测室的温度为25°±2°C，湿度80—85%。联接导线或电缆绝缘程度良好。每次改变压力均待电阻率变化稳定后读数，每个数据均是5—10次读数的平均值，其标准偏差小于0.5%。

由于岩层中激发极化效应较明显，故采用定时(供电后20秒、断电后40秒)读数。为总的评价长期观测精度，在巷道拐角处布设了测量体积相同的两个测点，经2个月观测，两测点实测电阻率之差均小于2%。井下长期观测受通风影响，夏季和冬季岩体表层的湿度不同，电阻率有明显季节性变化，一般夏季呈极小值，冬季呈极大值。其幅度随电极距的加大而减小。对1.5米电极距季节变幅(双振幅)一般可达40%。在分析长期资料时，已注意区分和消除这种似周期性的干扰。

(2) 应变的测量 为测量土体的应变，在测点(对称四极装置的中点)下22.5厘米深处，埋一内贴电阻应变片的橡皮探头。岩层的应变是在电阻率测点旁选岩石表面完整之

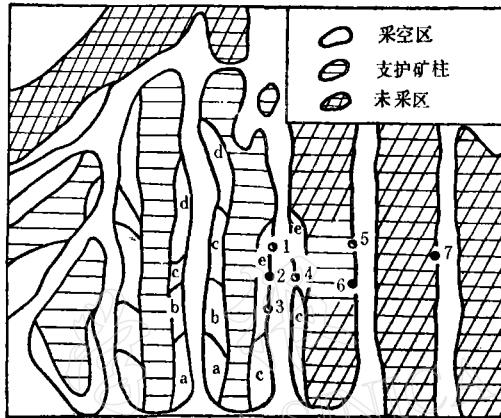


图2 矿山开采进度及距采场不同距离电阻

率测点布置示意图

(编号1—7为测点；测点2、6、7至采场b-d的距离分别为： $\Delta_2 = 10$ 米、 $\Delta_6 = 20$ 米、 $\Delta_7 = 30$ 米；a区1974年12月27日采空；b区1975年3月26日采空；c区4月26日采空；d区5月15日采空；e区7月10日采空)

处,按规定贴电阻应变片来测量的。仪器为YJ-5型静态应变仪,或YJD-1型动静态应变仪。

对井下长期观测,电阻应变片的防潮问题未能很好解决,加上岩石表面变形复杂等因素的影响,单只应变片的数据不一定能反映电阻率测量体积内的应变。本文用多只应变片的平均变化来代表测量体积内的应变变化。

为估计压强及测点处的应力、应变变化的量级,有的测点还进行了压力表、光弹、水准、千分表等辅助测量。

二、实验结果

1. 所研究的非饱和岩、土层受压时,电阻率一般下降

按图1(a)和图1(c)装置,对某些非饱和的岩、土层加压时,实验结果如图3所示。图中左半部((a)-(d))是不同地区(邢台和兰州)土层受压时,电阻率呈现下降变化的情况。图中右半部((e)-(f))是不同地段矽化灰岩岩层受压时,电阻率呈现下降变化的情况。图(c)-(e)用千斤顶加压,而图(f)是矿山开采应力变化使岩体压缩时的情况。为了对比,图3中(d)-(f)还给出相应的应变测量结果,可以看出它们与电阻率变化基本上是同步的。

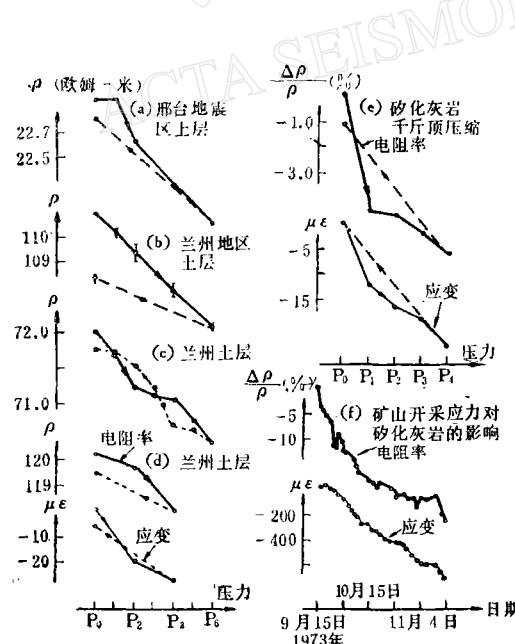


图3 非饱和岩、土层受压时电阻率下降(粗线)、卸载回升(虚线)与应变(细线)对比的实验结果
(图3(b)中短竖线为每次观测的标准误差 (a)-(d) 为土层受压结果; (e) 是矽化灰岩岩层受压结果; (f) 为矿山开采应力压缩岩层的结果)

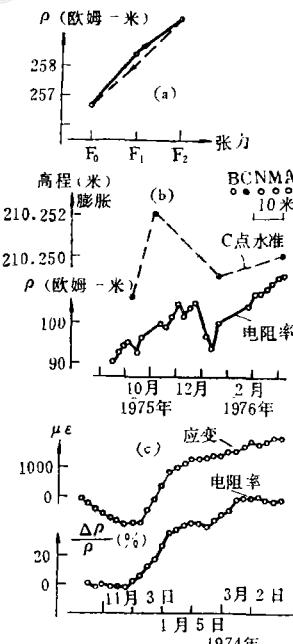


图4 非饱和岩、土层伸长时
电阻率上升的实验结果
(a)——土层(弯曲)伸长结果
(b)——巷道顶板下沉弯曲矽化灰岩伸
长的实测结果(锡矿山矿务局资料)
(c)——开采应力引起岩层膨胀的结果

综合图3给出的结果可得出: 所研究的非饱和岩、土层在低应力时, 随着体积的压缩, 电阻率一般呈现下降变化(图中粗线). 卸载时电阻率回升(图中虚线). 对土层, 卸载时应变未完全恢复至零, 电阻率也不回升到初始值(图3(d)); 对岩层, 卸载时应变虽基本恢复至零, 而电阻率一般仍不回升到初始值(图3(e)).

2. 所研究的非饱和岩、土层伸长时电阻率一般上升

图3给出的卸载时电阻率回升现象, 可做为岩、土层伸长时的一个结果. 但为了直接研究附加拉应力引起的电阻率变化, 按图1(b)所示装置, 做了土层(弯曲)伸长实验, 结果如图4(a)所示. 可以看出, 土层伸长时电阻率上升(粗线), 应力释放时电阻率恢复原值(虚线). 为了对比, 图4(b)引用了锡矿山矿务局的资料. 该图给出巷道顶板下沉弯曲时, 非饱和矽化灰岩层膨胀引起的电阻率上升变化和反映岩层弯曲的水准测量结果. 从图可见, 两者变化基本一致. 图4(c)是开采应力使巷道壁表层膨胀时, 电阻率上升及应变伸长的测量结果. 从图也可看出, 电阻率与应变的变化是同步的.

综合图4各结果得出: 在低应力下, 所研究的非饱和岩、土层膨胀时, 电阻率一般呈上升变化.

3. 原地岩、土层电阻率对微小应变的灵敏响应

比较原地实测岩、土层电阻率和线应变变化, 发现这些介质电阻率相对变化 $\Delta\rho/\rho$ 对微小应变 ϵ 的响应甚为敏感. 图5给出所测岩、土层受压时, 电阻率放大系数 $K = \frac{\Delta\rho}{\rho} / \epsilon$ 的实验曲线. 从图可见, 当应变为 10^{-5} — 10^{-4} 时, K 值可达数百乃至上千倍, 且应变愈

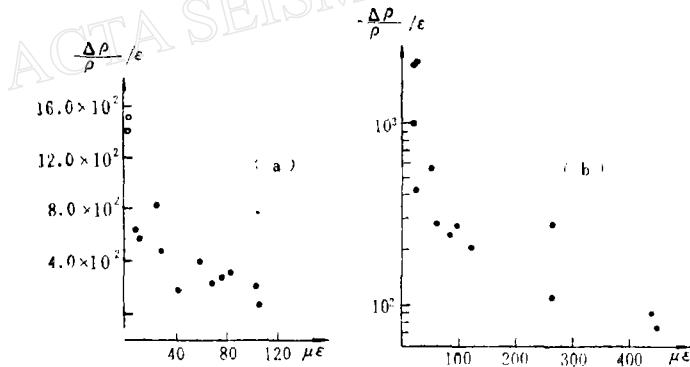


图5 土层(a)、岩层(b)压缩时, 电阻率放大系数
(电阻率相对变化与应变之比)的实验曲线

小 K 值愈高. 例如对土层(图5(a)), 应变平均为 0.9×10^{-4} 时, K 为 2.2×10^2 ; 而应变为 1.8×10^{-5} 时, K 值达 6.2×10^2 . 对岩层(图5(b)), 应变平均为 2.2×10^{-4} 时, K 为 1.9×10^2 ; 而应变为 3.0×10^{-5} 时, K 值竟达 1.5×10^3 . 对比岩层和土层电阻率对小应变(10^{-5} 或更小)的放大系数得出, 岩层的放大系数较高. 也就是含裂隙矽化灰岩对微小应变的响应更为灵敏.

4. 岩、土层电阻率相对变化幅度随力源规模的增加而增加、随距离增加而衰减及电阻率变化起始时间随距离增加而滞后的现象

用类似于图1(a)的装置, 沿加压板中心线不同距离(l_i)处, 布设多个与压力方向垂

直的测道，并用几种边长(b_i)的加压板加压，结果表明，土层受压时电阻率相对变化幅度($\Delta\rho/\rho$)随离源距与加压板边长之比(l/b)的增加而衰减。例如对兰州土层经验关系为：

$$\log \frac{\Delta\rho}{\rho} = 0.68 - 0.26 \frac{l}{b}$$

(图6(a)中直线)，相关系数 $r = -0.90$ 。当边长 b 保持不变时，电阻率变化则随距离 l 的增加而衰减。例如当 $b = 1$ 米，加压板上压强约为10公斤/厘米²时，沿加压板中心线距板2—3米处，电阻率变化就衰减至1%左右，当增加边长 b 时，同一距离处之电阻率变化幅度也增大。

图6(b)给出某矿山开采时，距采场不同距离之测点(点位见图2)电阻率变化幅度的衰减实况。图中曲线分别是距采场10米、20米、30米处之2、6、7号点电阻率7日值实测曲线。从图可见，随着采矿的掘进(采掘顺序为图2中a、b、c、d、e)，电阻率值逐渐下降，并且距采场最近的 ρ_2^* 曲线下降幅度最大，距采场较远的 ρ_6^* 、 ρ_7^* 变化幅度依次变小。如4月份(5月中旬2#测点已采空)， ρ_2^* 下降幅度达28%(同期实测光弹应力条纹增加 $2\frac{1}{3}$ 级)， ρ_6^* 下降10%(光弹应力条纹增加 $1\frac{1}{3}$ 级)，而 ρ_7^* 变化则不明显(应力条纹仅增加 $2/3$ 级)。因此，当把采场看作力源时，可得出与土层实验相同的定性结果，即随力源距离的增加，电阻率变化幅度衰减。与土层实验对比，矿山开采的力源规模(尺度和源强度)较大，影响范围及电阻率变化幅度也大。

从图6(b)还可看出，电阻率变化的起始时间随离采场距离的增加而显示出滞后的现

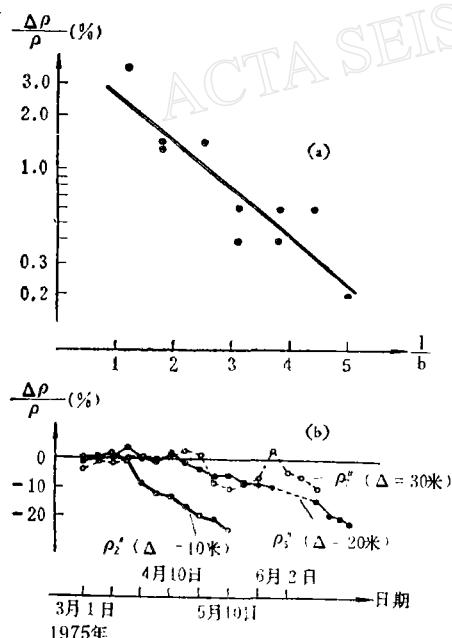


图6 电阻率变化幅度($\Delta\rho/\rho$)随力源距离加大而衰减的实验结果 (a)——土层结果 (b)——矿山开采时矽化灰岩的结果 (Δ 为测点至采场的距离)

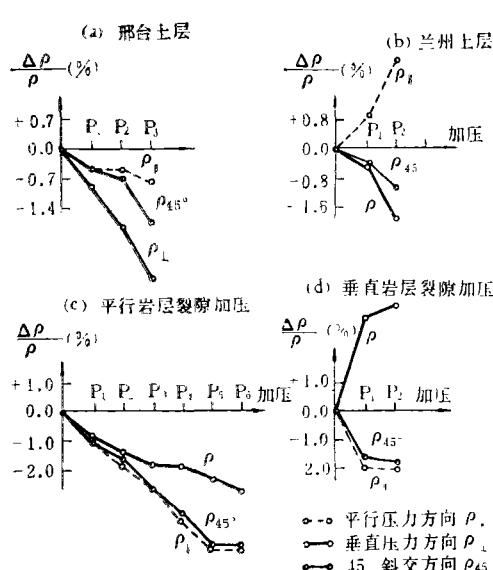


图7 岩、土层受力后不同方向电阻率变化的实验结果
(a), (b) 为土层结果；(c), (d) 为裂隙矽化灰岩结果

象。例如距采场较近的 2 号点电阻率约从 3 月下旬开始下降；距离居中的 6 号点， ρ_6 * 约从 4 月中旬开始；而距采场较远的 7 号点，变化则从 4 月底开始。电阻率变化所显示出的从采场向外传播的现象，是很引人注意的。

5. 岩、土层受力时电阻率变化出现了方向性 按图 1(a) 装置对岩、土层加压时，在同一压力条件下，同一测点不同方向测道电阻率升、降形态及变化幅度往往是不一样的，我们把这种现象称为电阻率变化的方向性。

对于电性水平各向同性的土层，在同一应力作用下，垂直压力测道的电阻率 ρ_{\perp} 下降幅度较大(图 7(a), (b) 中粗线)，而与压力平行的电阻率 ρ_{\parallel} 下降幅度较小(图 7(a)) 或上升(或 7(b) 中虚线)；与压力呈 45° 的电阻率下降幅度居中(图中细线)。

对于含裂隙的岩层加压时，不同方向电阻率的变化不仅与加压方向有关，而且还与裂隙方向有关。图 7(c) 给出平行裂隙方向加压的结果。受压砂化灰岩岩体虽无肉眼可见裂缝，但电阻率存在各向异性，平行压力方向电阻率绝对值较小为 166 欧姆一米；垂直压力方向电阻率值较大为 205 欧姆米。加压后三个测道电阻率均下降，其相对幅度下降较大的是电阻率绝对值较小的、与压力平行的测道 (ρ_{\parallel})；相对幅度下降较小的是电阻率绝对值较大的、与压力垂直的测道 (ρ_{\perp})，而 $\rho_{45^{\circ}}$ 变化居中。

图 7(d) 是垂直岩层裂隙方向加压的结果。受力的砂化灰岩岩体存在着肉眼可见裂缝(见图 1(c))，加压前垂直裂隙方向电阻率绝对值较大为 261 欧姆·米；沿裂隙方向较小为 232 欧姆·米。加压后，平行压力方向电阻率 ρ_{\parallel} (与裂隙方向垂直) 下降幅度较大， $\rho_{45^{\circ}}$ 下降较小，而沿裂隙方向、与压力垂直测道 ρ_{\perp} ，却明显上升(图 7(d) 中粗线)。

综合图 7 各结果，可看出以下二点，第一，岩土层受力后各测道电阻率变化形态和幅度不同，呈现方向性。第二，均匀土层电阻率变化的方向性主要与加力方向有关。通常 ρ_{\perp} 与 $\rho_{45^{\circ}}$ 均下降，且 ρ_{\perp} 下降较大；而 ρ_{\parallel} 有时下降(此时 ρ_{\parallel} 下降最小)，有时上升。裂隙岩层电阻率变化的方向性与土层的情况很不相同，既与加力方向有关，又与裂隙方向有关。当平行裂隙加压时，各道电阻率均下降， ρ_{\parallel} 下降最多。当垂直裂隙加压时，沿裂隙方向电阻率明显上升，另两道下降且 ρ_{\parallel} 下降较大。

三、讨 论

对非饱和的多孔沉积岩，根据 Archie 经验公式，当假设结构指数为常量时，可求得因孔隙中高电阻气体体积变化所引起的电阻率变化是与体应变成正比的。其比例系数为定值(与初始孔隙度的倒数和结构指数有关)。这虽可定性说明，压缩时电阻率下降，在低应力下电阻率相对变化对应变响应较灵敏等现象，然而定量上放大系数却比实验结果至少低一个量级。而应变愈小，放大系数愈高的实验结果，证明电阻率变化与应变之比并不是一个常量，从而表明结构指数在应力作用下也将发生变化。

在此情况下，非饱和岩石电阻率的经验公式可写成^[8]：

$$\rho = \alpha \rho_0 \omega^{-n}$$

式中 α 是一个常系数， ρ_0 是孔液电阻率。体积湿度 $\omega = V_w/V$ ，而 V 和 V_w 分别是岩石总体积和孔液所占体积。 n 为结构指数，它反映着孔隙中导电溶液的分布状况。如果在

低应力作用下,导电液体连通性发生变化(如含水量适当时,孔隙中孤立的水珠受压后相互连通等)使 n 变化,将灵敏地影响电阻率(随 n 呈指数变化).因此认为电阻率对应变的灵敏响应也许不是个别岩石中的一种特殊现象,至少,在小应变下对某些原地非饱和岩、土层可能具有一定的普遍性.当然,随岩性、饱和程度等条件的变化,其灵敏程度会有所不同,甚至成为不灵敏.为具体确定灵敏程度,应在现场对岩、土层进行原地实验.

原地电阻率实验密切结合我国当前地电阻率的实际观测条件,其结果有助于对某些地震前异常现象的理解,如震前既有下降异常,又有上升变化;同一测点不同方向电阻率变化显示出方向性;以及异常从震中向外传播等^[7].利用电阻率变化对微小应变的响应甚灵敏及力源规模愈大影响范围愈大的实验结果,尚可解释强震前震源区及其附近,较大范围内电阻率均发生变化的现象.

参 考 文 献

- [1] О. М. Барсуков, О связи электрического сопротивления горных пород с тектоническими процессами, *Изв. АН СССР Физика Земли*, 1, 1970.
- [2] T. Rikitake and Y. Yamazaki, Strain steps as observed by a resistivity variometer, *Tectonophysics*, 9, 197—203, 1970.
- [3] A. Mazzella and H. P. Morrison, Electrical resistivity variations associated with earthquakes on the San Andreas fault, *Science*, 185, 855—857, 1974.
- [4] 赵玉林,钱复业,唐山 7.8 级强震前震中周围形变电阻率的下降异常,地球物理学报, 21, 3, 1978.
- [5] W. F. Brace, Dilatancy-related electrical resistivity changes in rocks, *Pageoph.*, 113, 1/2, 1975.
- [6] Ch.-Y. Wang, et al., Electrical resistivity changes in rocks during frictional sliding and fracture, *Pageoph.*, 116, 4/5, 1978.
- [7] 钱复业等,地震前地电阻率的异常变化,中国科学 (B 辑), 9, 831—839, 1982; *Scientia Sinica (Series B)* 26 (1983), 3: 326—336.
- [8] В. Н. Дахнов, Л. П. Долина, Геофизические методы изучения нефтегазоносных коллектиров, *Госгоптехиздат*, 1959.

EXPERIMENTS IN SITU OF ELECTRICAL RESISTIVITY CHANGES

ZHAO YULIN QIAN FUYE

(Institute of Geophysics, State Seismological Bureau)

YANG TICHENG

(Seismological Bureau of Hebei Province)

LIU JIANYI

(Seismological Institute of Lanzhou, State Seismological Bureau)

Abstract

Under natural conditions in the field some experiments have been done for electrical resistivity changes with strain in partially saturated soil layers and siliceous limestone layers containing cracks. The major results are as follows:

(1) At very low stresses, the resistivity drops (or rises) when rock (or soil) layers are compressed (or extended).

(2) The relative change in resistivity of the rock or soil layers, $\Delta\rho/\rho$, is sensitive to strain changes (ϵ); this is particularly true for the rock containing cracks. Amplification factor, $(\Delta\rho/\rho)/\epsilon$, changes with strain, and generally ranges from 100—200 at a strain of 10^{-4} up to about 10^3 at a strain of 10^{-5} .

(3) With increasing intensity and dimension of the force, the resistivity change increases. When the distance between the point of measurement and the force is increased, the resistivity change decreases and shows a delay.

(4) For horizontally isotropic soil layers, resistivity changes due to stress variation exhibit directivity, that is, the changes measured along different profiles are not identical. ρ_{\perp} , measured along the profile perpendicular to the pressure, usually has a larger drop. As for ρ_{\parallel} , parallel with the pressure, a much smaller drop, or sometimes a little rise, occurs. For ρ_{45° , the drops are moderate. In contrast, the resistivity change of the siliceous limestone layer containing cracks is not only related to the directions of the pressure but also to that of the cracks. The drop of ρ_{\parallel} usually is larger. ρ_{\perp} has a smaller drop when the pressure is parallel to the cracks, and rises distinctly when the pressure is perpendicular to them.