

# 岩石受压过程中“应力反复”对电阻率的影响

陈大元 陈峰

(北京大学地球物理系)

贺国玉

(国家地震局分析预报中心)

## 摘 要

在岩石电阻率随压力变化的不同阶段,部份地减低轴向压力后再加压(毎回总压降约为破坏应力的10%)。研究这种特殊的加载方式下,即所谓“应力反复”对电阻率的影响。结果如下:

(1) 对高水饱和度岩石,随压力不断增加电阻率变化的总趋势为上升—平稳—下降的变化形态(包括饱和度为100—70%)。对低饱和度岩石(实验中饱和度为70%和50%),电阻率变化的总趋势已改变。(2) 对高饱和度岩石共作了十一次“应力反复”实验。除了水饱和度为71%的岩石在压力为30MPa处,“应力反复”时电阻率无明显变化外,其余均呈现电阻率的负异常(下降幅度约2%左右),我国地电台在震前观测到的地电阻率变化以负异常为主。实验结果为解释这种负异常提供一种新的可能机制。(3) 在电阻率随压力变化的下降段,特别是接近岩石破坏时,“应力反复”所引起的电阻率负异常与一般情况下出现的负异常相比,有以下三个特征:a) 负异常的幅度要大一个数量级(约-20%);b) 不仅应力下降时电阻率下降,而且应力恢复时电阻率仍然下降;c) 各个方向电阻率变化的差别很大(约10%)。以上这三个特征可作为岩石临近破坏的标志。而一般的电阻率负异常可能只与“应力反复”有关,并不意味着岩石处于临近破裂的危险状态。(4) 低饱和度岩石,“应力反复”可能引起电阻率的“正异常”。

作者还用“应力反复”过程中,水进出裂隙(包括张性和压性裂隙),简单解释了所得结果,并提出:引起最大主应力降低的短期因素,并不一定是个安全因素,它可能增加地震发生的危险性。

## 一、前 言

多数人认为地震是由于岩层中应力逐渐积累,在某处超过岩石强度时,产生滑移所导致的岩层的突然错动;并且认为地震前后,地球物理场的变化也直接或间接地与这种作用有关。随着地震预报研究的广泛开展,在实验室中对岩石的应力-应变关系和其它物理性

质的研究,成为研究地震前兆的一种手段。在这些研究中,不断增加岩石样品的荷载直至岩石破坏,这样一种单调的、最简单的加载方式被普遍采用。在岩石电阻率的有关实验中也是这样。

地震孕育过程中应力的变化并不像上述简单加载过程那样单调变化,而是要复杂得多。震源区(例如断层的闭锁段)应力单调上升的可能性也许要比外围地区大得多,但应力的调整或反复也完全可能发生(地壳中除了应力增加过程外,有人还列举了不少应力减小的过程<sup>[1]</sup>);至于震源外围地区,在应力上升的总趋势下,局部应力反复可能更具有代表性。此外像天体和气象等因素也会使岩层中的应力发生附加的变化。

我们考虑到实际孕震过程的这种复杂性,又考虑到岩石并非完全弹性体,它的性质不仅由应力或应变决定,而且与其经历(或者说是加载过程)有关,故设计了一种特殊的加载方式:在荷载不断增加的总趋势中,在电阻率变化的不同阶段,部份地减低载荷后再加载。(以下简称这种加载方式为“应力反复”)。这种加载方式的岩石电阻率变化实验,还未见过报道。所得到的一些新的结果,对地震预报可能有参考价值。

## 二、实验方法简介

### 1. 标本及其处理

所用标本均为  $4 \times 4 \times 8\text{cm}^3$  的四川白虎涧花岗岩,其平均抗压强度为  $1.0 \times 10^3 \text{MPa}$ 。长轴两端面经磨床加工,不平行度误差小于  $0.02\text{mm}$ 。标本经清洁处理和烘干后,在标本一侧面布置了三个方向的四极对称装置,以测量电阻率,另一侧面粘贴电阻丝应变片,然后抽真空浸水,具体处理请参看文献[2]。所得水饱和的岩石标本,在空气中蒸发掉部份水份可得到非饱和岩石标本。其水饱和度  $S$ ,可由饱和时的含水量  $W_0$  和非饱和时的含水量  $W_1$  得到  $S = W_1/W_0$ 。水饱和度  $S$  的测量误差最大不超过  $5\%$ 。加载过程中不再补给水份。

### 2. 测量装置(如图 1 所示)

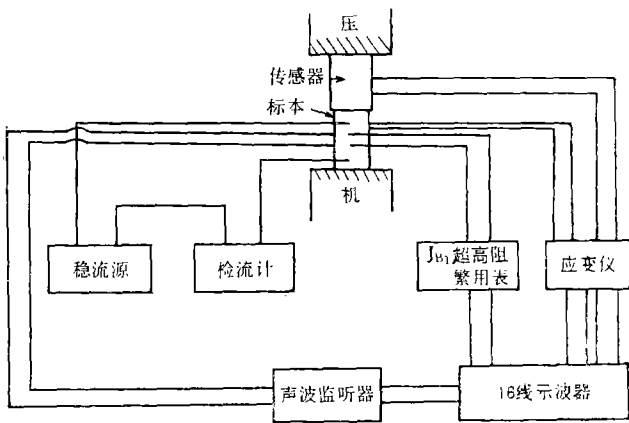


图 1 装置及测量系统方框图。

Fig. 1 Block diagram of apparatus and measurement system.

3. 加载方式

以标本  $G_{21}$  的实验为例[参阅图 2(a)], 图中横轴为时间轴, 图下方纵坐标为压强  $P$ 。当压力不断增加的过程中, 在不同的压强上作了“应力反复”, 第一回在  $P = 30\text{MPa}$ , 第二回在  $P = 60\text{MPa}$ , 图中用斜线标出的两个三角形即是这两回“应力反复”。每回压强降低总量为  $10\text{MPa}$ , 分两次完成, 一次为  $5\text{MPa}$ 。升压也分两次, 每次也是  $5\text{MPa}$ , 以使压力恢复到“应力反复”的起始值。因此“应力反复”一回, 前后共测量 5 次数据。在非“应力反复”段, 压强每改变  $10\text{MPa}$  测量一次。其余标本的加载过程, 都以同样的方式示于相应各个图的下方。与平均抗压强度相比, 一次“应力反复”过程中, 总的减压约为标本破坏应力的  $10\%$  左右。

三、实验结果

图 [2(a), 3(a), 4(a), 4(b), 5(a) 和 5(b)] 的下方是不同时间的压强, 图的上方给出的是三个方向视电阻率相对变化与时间的关系曲线。曲线标号 1、2 和 3 分别表示平行于压力方向、垂直于压力方向和与压力方向斜交  $45^\circ$  布极所测得的视电阻率, 相对于压强为零时的视电阻率变化的相对值即  $\Delta\rho/\rho = (\rho - \rho_0)/\rho_0$ 。

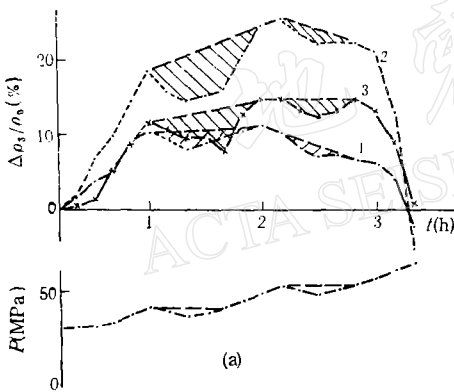


图 2(a) 标本  $G_{21}$  的  $\Delta\rho/\rho_0$  及  $P$  与时间  $t$  的关系。

Fig. 2 (a) Relative resistivity changes and pressure with time for the sample  $G_{21}$ .

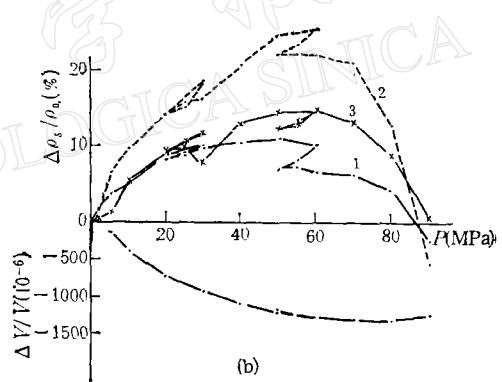


图 2(b) 标本  $G_{21}$  的  $\Delta\rho/\rho_0$  与  $\Delta V/V$  与  $P$  的关系

Fig. 2(b) Relative resistivity changes and volumetric strain of the sample  $G_{21}$  under different pressure.

为了示出“应力反复”对电阻率的影响, 在电阻率相对变化的曲线上, 用斜线标明“应力反复”引起的电阻率相对变化。我们共进行了十四次“应力反复”都用类似的方法分别画在各个图上。所测得的各次“应力反复”中的数据, 全部列于表 1。其中标本  $G_{21}$  和  $G_{19}$  分别在压强  $P$  为  $95.2\text{MPa}$  和稍大于  $100\text{MPa}$  时被压碎, 标本  $G_{20}$  和  $G_{17}$  没有压碎而多次使用, 以便得到不同饱和度下电阻率变化特征。

除了上述电阻率与时间 ( $t$ ) 图外, 还在图 2(b) 和图 3(b) 中给出了电阻率随压强的变化图和体应变  $\Delta V/V = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_2$  随压力的变化。

下面对实验结果作一初步综合。

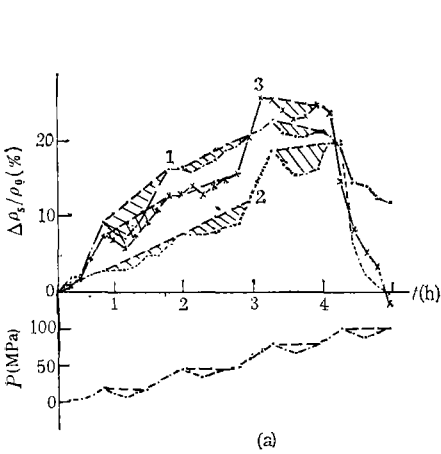


图 3(a) 标本  $G_{19}$  的  $(\Delta\rho/\rho_0)-t$  和  $p-t$  图。  
Fig. 3(a) Relative resistivity changes and pressure with time for the sample  $G_{19}$ .

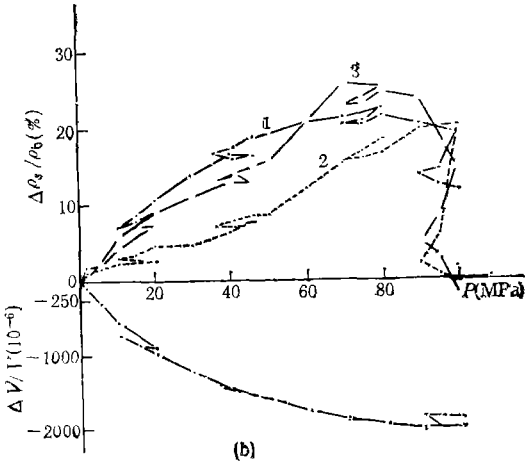


图 3(b) 标本  $G_{19}$  的  $(\Delta\rho/\rho_0)-p$  和  $(\Delta V/V)-p$  图  
Fig. 3(b) Relative changes of resistivity and volume of the sample  $G_{19}$  under different pressure

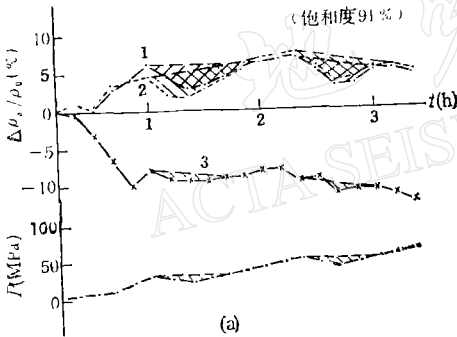


图 4(a) 标本  $G_{20}$  在饱和度为 91% 时  $(\Delta\rho/\rho_0)-t$  和  $p-t$  图  
Fig. 4(a) Relative resistivity changes and pressure with time for the sample  $G_{20}$  in saturation 91%.

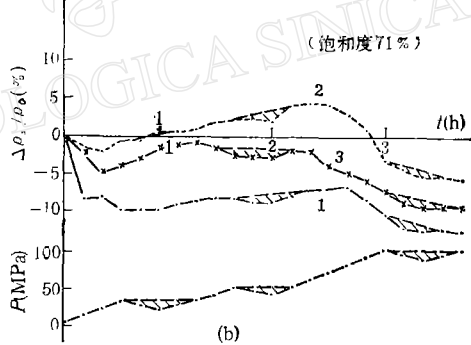


图 4(b) 标本  $G_{20}$  在饱和度为 71% 时的  $\Delta\rho/\rho_0-t$  和  $p-t$  图  
Fig. 4(b) Relative resistivity changes and pressure with time for the sample  $G_{20}$  in saturation 71%.

1. 电阻率变化的总趋势

图 2(b) 和图 3(b) 给出了水饱和花岗岩标本  $G_{21}$  和  $G_{19}$  的结果。从中可以看出电阻率随压力变化的总趋势和我们以前的实验结果是一致的<sup>[2]</sup>, 即饱和花岗岩电阻率随压力增大, 呈上升—平稳—下降的变化形态。本文所得的电阻率与时间 ( $t$ ) 曲线与电阻率随压力变化的总趋势(或说是曲线的总体形态)是类似的。图 4(a) 是水饱和度为 91% 的花岗岩标本  $G_{20}$  的电阻率与时间曲线, 其总形态没有变。图 4(b) 为水饱和度为 71% 的结果, 除了开始加压时有些下降外, 基本上还是上升—平稳—下降的形态。而图 5 所示的是花岗岩标本  $G_{17}$  在水饱和度 70% 及 50% 时的实验结果, 电阻率曲线的形态已经改变。关于电阻率变化与水饱和度的关系, 这里不准备详述, 以后将另文讨论。

表 1 “应力反复”时的电阻率相对值  
Table 1 Relative resistivity changes under “stress reversal”

标 号	饱和度(%)	P (MPa)	$\Delta\rho/\rho_0(\%)$		
			1	2	3
G <sub>21</sub>	100	30.0	10.1	18.5	11.5
		20.0	8.1	14.6	9.3
		30.0	9.7	16.4	7.7
		60.0	10.1	25.4	14.7
		50.0	7.0	22.0	12.3
		60.0	6.6	22.2	14.5
G <sub>19</sub>	100	20.0	9.1	2.6	7.4
		10.0	7.0	3.0	6.1
		20.0	10.6	4.8	9.0
		46.2	16.4	7.6	12.7
		36.2	16.6	7.0	12.9
		46.2	18.7	8.5	14.9
		80.0	22.6	18.5	25.4
		70.0	20.5	15.5	22.8
		80.0	21.6	16.6	24.6
		100.0	19.2	20.0	14.9
90.0	13.8	2.2	5.0		
100.0	11.9	-0.2	-1.8		
G <sub>20</sub>	91	30.0	6.0	4.3	-8.0
		20.0	2.8	1.7	-9.4
		30.0	4.4	4.0	-9.0
		50.0	6.7	7.4	-9.6
		40.0	2.8	3.7	-11.3
		50.0	4.9	5.2	-10.9
	71	30.0	-9.9	-0.7	-4.0
		20.0	-9.9	0.4	-1.6
		30.0	-8.7	0.7	-1.0
		50.0	-8.3	2.0	-2.6
		40.0	-8.8	1.8	-3.0
		50.0	-7.8	4.0	-1.8
		100.0	-10.1	-3.1	-7.3
		90.0	-12.5	-5.3	-9.4
	100.0	-12.6	-5.6	-9.4	
	G <sub>17</sub>	70	30.0	-4.5	-3.3
20.0			-5.5	-3.3	-2.1
30.0			-5.4	-3.5	-1.9
60.0			-7.0	-5.4	-2.6
50.0			-8.2	-6.1	-3.4
50		60.0	-7.6	-6.2	-2.7
		30.0	-4.8	-9.0	-5.8
		20.0	-4.4	-8.1	-5.1
		30.0	-4.6	-8.1	-5.6

## 2. “应力反复”所引起的电阻率变化

对高饱和度岩石(电阻率变化曲线为上升—平稳—下降型)电阻率的影响。

对水饱和岩石以及饱和度为 91% 及 71% 的岩石,共作了十一次“应力反复”。除了水饱和度 71% 的标本,在  $P = 30\text{MPa}$  时所作的一次“应力反复”,电阻率看不出明显的变化外,其余十次,都是压强达到一定值后,减压时三个方向的电阻率均下降,压强恢复时电阻率上升。与“应力反复”前后的电阻率相比,从电阻率随时间的变化曲线上的斜线部份[请参看图 2(a), 3(a), 4(a) 和 4(b)]可看出曲线呈凹兜形状(简称电阻率“负异常”)。

值得注意的是,上述负异常出现在电阻率变化的不同阶段,即不仅出现在电阻率的上升段,也出现在电阻率随压力变化的平稳段,甚至也出现在下降段。

a) 在电阻率的上升段,电阻率随压力的增加而增加。所以压力下降电阻率下降,压力恢复电阻率也恢复,“应力反复”引起负异常是很自然的。从图 2(b) 和 3(b) 的体应变曲线看,“应力反复”后,岩石体应变恢复到原值。

b) 在电阻率变化的平稳段,电阻率随压力增加基本不变。可是当压力减小时,电阻率有明显的降低,如标本  $G_{21}$  (请参看图 3) 在  $P = 60\text{MPa}$  时的“应力反复”中,二个方向电阻率下降最大达 3.4%,此后再加压,电阻率又能重新上升。对于这种高水饱和度岩石在电阻率变化的平稳段所具有的上述特性是前人没有报道过的。考虑到岩石在此阶段已有体膨胀即已有相当多的新裂隙,并且这些新裂隙对岩石溶液导电通道的改善已能抵消原有裂隙闭合所引起的电阻率的增加<sup>[2]</sup>。这些裂隙自然不会只是平行于压力方向的张裂隙,也应有不少压性裂隙。这是因为新裂隙取向是由矿物晶体结构因素决定,并非完全由压力方向决定(这可由文献[3]中的破裂显微照片中看到)。在此阶段,压力减小时电阻率的降低自然是岩石导电通道的改善,而压力减小只会使平行于压力方向的张性裂隙闭合一些,这只能使电阻率增加,只有压性裂隙当压力减小时可能进去一些水溶液。因此我们可以推论,在此阶段压力减小引起压性裂隙进水的作用超过了张性裂隙闭合的作用,才使得电阻率下降,因而重新加压时电阻率又能有所上升恢复。

此外从体应变曲线看,当“应力反复”结束压力恢复原值时,体应变也恢复原值。这就说明虽然此时压性裂隙已进了一些水,但岩石结构骨架仍然是稳定的,此阶段压性裂隙进水对岩石强度和体膨胀影响很小。

c) 在电阻率的下降段,电阻率随压力的增加是下降的。当压力减小时电阻率不但不恢复上升,反而继续下降,当压力恢复时电阻率仍进一步下降。特别是在接近岩石破裂强度时,例如标本  $G_{19}$  在  $P = 100\text{MPa}$  时的“应力反复”中(图 3)电阻率下降最大达到 -17.8%,比电阻率上升段和平稳段下降幅度约大一个数量级,而且当压力恢复时电阻率进一步下降,下降的总幅度超过 -20%。其次,各方向电阻率变化之间的差别可扩大到 10% 以上。

此外从体应变曲线看,压力减小时体积是膨胀的;但压力恢复原值时,体应变已不能恢复原值,负体应变的绝对值减小相应于体积增大。这就是说新裂隙进水已使岩石发生可观察到的体膨胀,而且已经降低了岩石的弹性模量,同样也会降低岩石的强度。因此从发生地震的危险性看,最大主应力降低并不一定安全,它可导致水的进入而降低岩石强

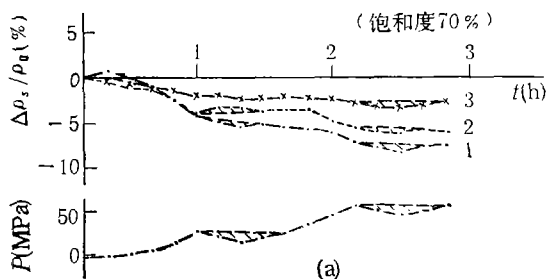


图 5(a) 标本  $G_{17}$  在水饱和度为 70% 时的  $\Delta\rho/\rho_0$  和  $P$  与时间  $t$  的关系

Fig. 5 (a) Relative resistivity changes and pressure with time for the sample  $G_{17}$  in saturation 70%.

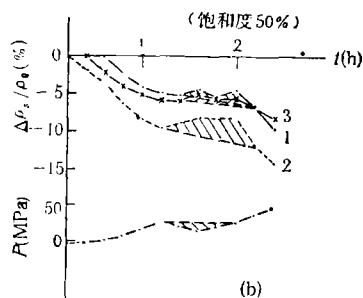


图 5(b) 标本  $G_{17}$  在水饱和度为 50% 时的  $\Delta\rho/\rho_0$  和  $P$  与时间  $t$  的关系

Fig. 5(b) Relative resistivity changes and pressure with time for the sample  $G_{17}$  in saturation 50%.

度。某地区岩石强度的降低,特别是在高应力集中区,一旦应力恢复,则发生地震的危险性进一步增加了。

### 3. “应力反复”对低饱和度岩石电阻率影响。

对饱和度为 70% 的标本  $G_{17}$  作了二次“应力反复”。在压强为 60MPa 时“应力反复”使得三个方向上的电阻率仍为负异常[参看图 5(a)]。而在压强  $P = 30\text{MPa}$  时,有一个方向上的电阻率出现了“正异常”。

而在水饱和度为 50% 时所作的“应力反复”( $P = 30\text{MPa}$ ),三个方向上的电阻率均出现“正异常”,这是与高水饱和度岩石不同的。

## 四、实验结果在地震预报中意义的探讨

1. 我国自 1966 年邢台地震,把电法勘探中的对称四极装置引进地震预报研究以来,在近廿年的时间里建立了相当多的地电台,获得了不少震前地电阻率变化的资料。其中地电阻率以下降变化为主,负异常占多数,也有一些地方电阻率是上升的或呈复杂变化<sup>[4]</sup>。此外唐山地震期间还记录到远离震中达 600km 区域内的电阻率异常<sup>[5]</sup>。但是直到现在,对地电阻率下降变化的解释仍不统一。一般认为在震源区,饱和岩(土)在破裂阶段,其阻率由于应力增加而下降。用这种看法来解释震源外围地区的地电阻率下降有一定困难。因此也有人认为电阻率的负异常与非饱和岩(土)的压密有关。这是根据非饱和岩(土)的压力实验的结果,即低应力下随压力增加电阻率下降<sup>[5]</sup>。这种解释与水文地质学的一般看法相矛盾。水文地质学认为长年潜水面以下的岩(土)是水饱和的<sup>[6,7]</sup>。根据我们上述的实验结果,对引起地电阻率下降异常的原因,提出第三种可能机制:高饱和岩(土)由“应力反复”引起电阻率的负异常。这种机制把地下介质看成是高饱和度的,这是和水文地质学的一般看法相一致的。特别是在震源外围区域,由这种机制引起电阻率负异常的可能性更大一些。这是因为震源外围地区,在孕震过程中发生局部应力反复是更具有代表性的应力积累过程(正如前言中已经叙述过的)。

1) 因为我们尚未找到此结论的依据,故正在做有关的实验,来验证此结论。

2. 高饱和度岩石在电阻率变化的不同阶段(相应于不同的应力水平),“应力反复”可引起电阻率的负异常。因此用电阻率的负异常来判断地下介质所处的状态就有了困难。特别是在电阻率的上升段和平稳段,“应力反复”所引起的电阻率的负异常很难区分。只有在电阻率的下降段,特别是在接近岩石破坏强度时,“应力反复”所引起的电阻率负异常有以下三个特征与一般情况下的负异常不同:下降幅度比一般情况下大一个数量级;压力下降电阻率下降,压力恢复电阻率仍然下降;电阻率变化在各方向间的差别很大。以上这三个特征有可能作为,在地电台测区范围内岩层临近破裂时的标志。特别是如能和其他地球物理测量手段配合,与应力变化相对比,使第二个特征得到确认,这种判断的把握可能更大。而一般的电阻率负异常可能只与“应力反复”有关,并不意味着岩层处于临近破裂的危险状态。

3. 在岩石接近破坏强度时,“应力反复”使水进入裂隙,电阻率急剧下降,岩石强度也降低。因此最大主应力这种下降又回升的“应力反复”增加了地震发生的危险性。因此,是否可以认为引起应力下降的某些短期因素,并不一定是个安全因素。甚至可能成为地震的触发因素。

由于实验条件和自然条件不尽相同,如上所述,对实验结果在地震预报中的意义,只能是一种有关物理上的可能机制的探讨,是否适用于野外,最终尚需实践来检验。

#### 附注:实验条件与自然条件差别影响的讨论。

1. 实验是在无围压条件下进行的,我国地电台的“勘探深度”一般为数百米,围压可达 10MPa。围压对实验结果定会有影响,首先可想到的是轴应力复原时电阻率的恢复特性会更好些。

2. 实验时岩石标本无补给水源,仅靠岩石所含水份的内部调整。地下水的存在,有利于水的补给,可能使电阻率的下降幅度更大一些。

3. 因为实验中是用有裂隙的完整花岗岩块中的变化来类比地下岩层中的变化,所以实验结果所提供的物理上的可能机制在野外是否成立,还需野外的观察和研究来检验。

### 参 考 文 献

- [1] 耿乃光,应力减小引起地震,地震学报,7,445—451,1985.
- [2] 陈大元、陈 峰、王丽华、贺国玉、戴经安,单轴压力下岩石电阻率的研究——电阻率的各向异性,地球物理学报,26,784—792,1983.
- [3] 北京大学地球物理教研室、中国科学院地质所三室,岩石的结构、成份与它在单向压力下电阻率变化的初步研究,地震战线,1973,4: 9—15.
- [4] 钱复业、赵玉林,地震前地电阻率变化十例,地震学报,2, 186—197,1980.
- [5] 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, 181—182,1978.
- [6] Ф. И. 萨瓦连斯基,工程地质手册,135,地质出版社翻译 1959 第一版.



## INFLUNCES OF “STRESS REVERSAL” ON ROCK RESISTIVITY DURING LOADING PROCEDURE

CHEN DAYUAN AND CHEN FENG

*(Department of Geophysics, Peking University)*

HE GUOYU

*(Analysis and Prediction Center, State Seismological Bureau)*

### Abstract

The properties of rock resistivity were studied under pressure, particularly with “stress reversal” procedure, in which the applied pressure was increased, decreased, and increased again.

It was observed that, 1) with pressure increasing, the main feature of the resistivity changes was increase—steady—decrease for high saturation rock samples (saturation 71—100%). But the main feature for low saturation samples was different (resistivity increased). 2) In 10 out of 11 cases for high saturation samples the resistivities dropped remarkably (about 2%). These drops could explain the negative anomalies commonly observed in geoelectricity surveys, before earthquakes in China. 3) It was also observed shortly before rock failure that, a) The resistivity drops much more dramatically in the “stress reversal” period, about 20% more than ordinary drops. b) These drops occurred not only during stress decrease but also during stress increase. c) The anisotropic property of resistivity change is enhanced. 4) Resistivity increase was observed during the “stress reversal” period for low saturation rock samples.

The results mentioned above were explained with the effect of water flowing in and out of the cracks of rocks. Temporary factors, which bring about a reduction of the main stress, may enhance the possibility of earthquake occurrence.