第5卷 第1期 地震学报 Vol. 5, No. 1
1983年2月 ACTA SEISMOLOGICA SINICA Feb., 1983

单轴压缩下多裂隙含水岩样电阻率变化与体积应变*

金 耀 张天中 华正兴 徐明发 黄平章
(国家地震局地球物理研究所)

摘 要

在单轴压缩下，对经过高温焙烧的含水辉长岩进行了轴向和径向电阻率变化以及体积应变的同时连续测量．结果表明，在完全饱和前的非弹性压缩阶段，电阻率随压应力增高而降低；在完全饱和的弹性压缩阶段，电阻率升高；在非弹性的体积膨胀阶段，电阻率继续上升．从Archie公式出发，通过近似分析，导出了电阻率变化和体积应变的关系式．实验结果和近似分析定性上相附．本文的主要结果是发现含水岩样在膨胀阶段电阻率的升高，初步认为这是由于热开裂的张开，降低了饱和度的结果．

一、引 言

文献[1]和国内其它有关资料表明，在我国某些地震震前观测到地电阻率升高的现象，国外也有类似的震例[2]．对此，现有的地震前兆模式[3]难以做出适当的解释．本文试图在某些合理条件下，从简单的单轴试验入手，探索这一现象的可能原因．

可以设想，震前岩体电阻率升高在下列三种情况下可能都会发生：1）震源区的岩体是干燥的，在构造应力作用下产生大量干裂隙；2）震前岩体中所含孔液因受挤压通过新老裂隙从震源区外流，导致岩体含水量的降低；3）震源是一个内外隔离的“封闭”区，震前含水的或为水所浸湿的裂隙重新张开，引起岩体水饱和度的下降．

根据地壳电性测量和地表钻探结果，目前大多数地球物理学家认为，地壳上部岩石处于水饱和或接近水饱和状态，难以设想存在无水的“干燥”地带．所以，上述第一种情况似乎不大可能存在．上述第二种情况涉及孔液在岩石裂隙中的渗透性．根据Zoback和Byerlee[4]对花岗岩膨胀裂隙的研究，孔液在这些裂隙中的渗透能力是很低的，不可能在短期内达到震源内外较大范围的迁移．所以，第二种情况存在的可能性似乎也不大．上述第三种情况主要取决于岩体中是否存在大量含水的或为水所浸湿的老裂隙．在某些地区，特别是地震活动频繁的老震区，由于漫长的地质历史上构造应力的长期反复作用，设想那里有大量含水老裂隙存在，看来不是不合理的．在构造应力作用下，这些老裂隙先是趋于闭合，然后到达体积膨胀阶段又重新张开．它们的张开显然比新裂隙的产生容易，就

* 1980年6月11日收到初稿，1981年1月28日收到修改稿．

http://www.dizhenxb.org.cn

是说在一定的应力水平下，大多数老裂隙仅仅是张开，只有其中的少数可能由于局部介质强度较低或者局部应力较高，既张开又在端部扩展产生新裂隙。假设震源区是封闭的，即无孔液从外部流入。在这种情况下，倘若大量老裂隙张开，使岩体水饱和度降低引起电阻率上升，如果这种作用比少数新裂隙产生使电阻率减小的作用来得大，则总的影响应该是使电阻率增大。这仅仅是一种设想。为了寻找一些实验根据，我们进行了简单的单轴压缩实验。没有围压想必不会根本改变这一实验的性质。希望单轴实验可能会给出一些定性的讯息，即我们试图弄清楚在这些条件下，岩石电阻率变化的形态，以便为震前电阻率上升现象提供一个可能的物理解释。

二、实 验

1. 方法 本实验采用的岩石是质地非常致密的济南辉长岩，加工成直径 5 厘米、高10 厘米的圆柱体。其密度为 3.06 克/立方厘米，孔隙度为万分之几，自然风干的岩样电阻率约为 10^{12} 欧姆·厘米。实验前先将岩样放入高温炉焙烧，产生大量热开裂。焙烧后孔隙度增大约 10 倍。可以认为，烧过的岩样其孔隙主要是纵横比很小的热开裂。然后放入真空容器中抽气，再注入自来水，进行长达 48 小时的近饱和渗透。取出后马上涂复环氧树脂，以求密封。浸水后岩样电阻率为 10^5—10^6 欧姆·厘米。

实验时轴向和径向电阻率以及轴向径向应变同时进行测量。图 1 为样品上电极和应变片布置示意图。

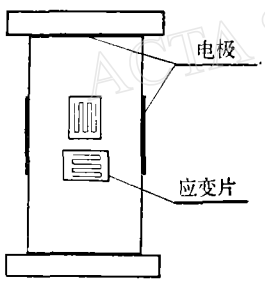

图 1

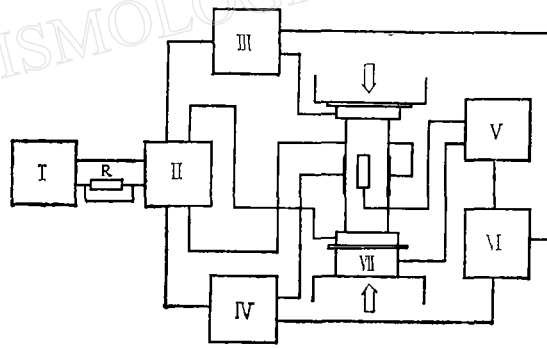

图 2

图 2 为实验系统方框图。电阻测量采用每秒 10 周的交流电压，幅度为 50 伏（峰—峰），由低频振荡器(I)供给。转换器 (II) 以 15 秒的时间间隔轮流将电压讯号通过电流放大器(III)或(IV)接至样品的轴向或径向电极。电流放大器的输入阻抗小于 1 千欧。电流放大器的交流讯号输出和应变仪(V) 的输出都记录在紫外线示波器 (VI) 上，样品的电阻值的变化由接入的标准电阻来标定。

正式进行实验前先将样品在 250 巴的压应力以内反复多次加卸载，以求进一步减小裂隙表面导电变化的影响。

为了便于揭示体积膨胀的影响，分三次加载：第一次加载到 1.25 千巴（体积膨胀之前）；第二次加载到 1.75 千巴（体积膨胀开始之后）；第三次加载直到破坏。

http://www.dizhenxb.org.cn

2. 结果　图 3、4、5 分别为第一、二、三次加卸载过程中的体积应变曲线和轴向径向电阻率的相对变化曲线.

图 3 为第一次加载的应变曲线(0—1.25 千巴)，在大约 0.3 千巴的压应力以内变化较快，0.3 千巴以上呈线性变化，卸载曲线几乎同加载曲线重合，说明压应力在弹性范围以内. $\rho/\rho_0(/\!/)$曲线大致也在 0.3 千巴附近发生显著变化. 在 0.3 千巴处减小到 0.73，0.3 千巴以后曲线趋于不变. $\rho/\rho_0(\perp)$变化幅度较小，仅有 6%，而且达到最低点的应力值(0.25 千巴)也较低，0.25 千巴以后曲线开始回升. 卸载时的电阻率曲线基本上和加载曲线重合，略有滞后，卸载后的电阻率大体上恢复到初始值.

图 4 的第二次加载曲线(0—1.75 千巴)和图 3 的第一次加载曲线有三点不同. 第一，体积应变曲线在 1.4 千巴附近偏离线弹性变化，说明从该点起开始微裂隙体积膨胀. 大概由于产生了微裂隙膨胀的缘故. 卸载体积应变曲线出现明显的滞后现象，卸载后的永久形变量约为 120×10^{-6}. 第二，$\rho/\rho_0(/\!/)$ 曲线在 1.0 千巴附近开始回升，到膨胀点附近

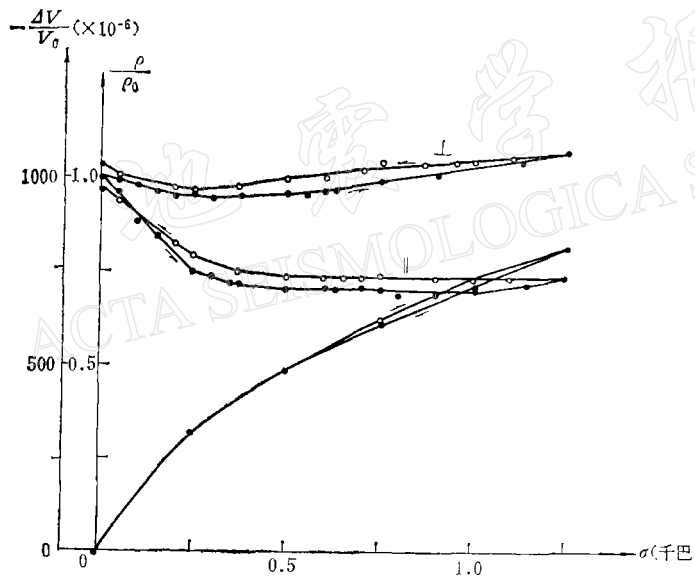

图　3

$\rho/\rho_0(/\!/)$ 以及 $\rho/\rho_0(\perp)$ 回升速度都加大. 第三，卸载时，电阻率曲线明显滞后，卸载后不回到初始值，反而变大. 滞后量在 0.3 千巴以上基本不变，0.3 千巴以下开始减小. 电阻率变化的滞后可用微裂膨胀定性说明.

图 5 为第三次加载曲线(0—2.2 千巴)，基本上是图 4 加载曲线的重演和向高应力区的延伸. 这里膨胀阶段电阻率升高变得更加明显，并且 $\rho/\rho_0(/\!/)$ 以及 $\rho/\rho_0(\perp)$ 的变化受微裂膨胀的影响有不同的表现，越接近破裂强度，$\Delta\rho/\rho(\perp)$ 比 $\Delta\rho/\rho(/\!/)$ 越大. 其次，大概由于受第二次加载产生的永久微裂隙影响的缘故，$\rho/\rho_0(/\!/)$ 曲线在低应力区的电阻开始回升的应力值向后推了几百巴. 在水饱和弹性形变区内，$\rho/\rho_0(/\!/)$ 的上升现象变得更加显著.

总的看来，根据这三幅观测图(图 3、4、5)，在我们这样一个封闭多裂隙含水试件里，

http://www.dizhenxb.org.cn

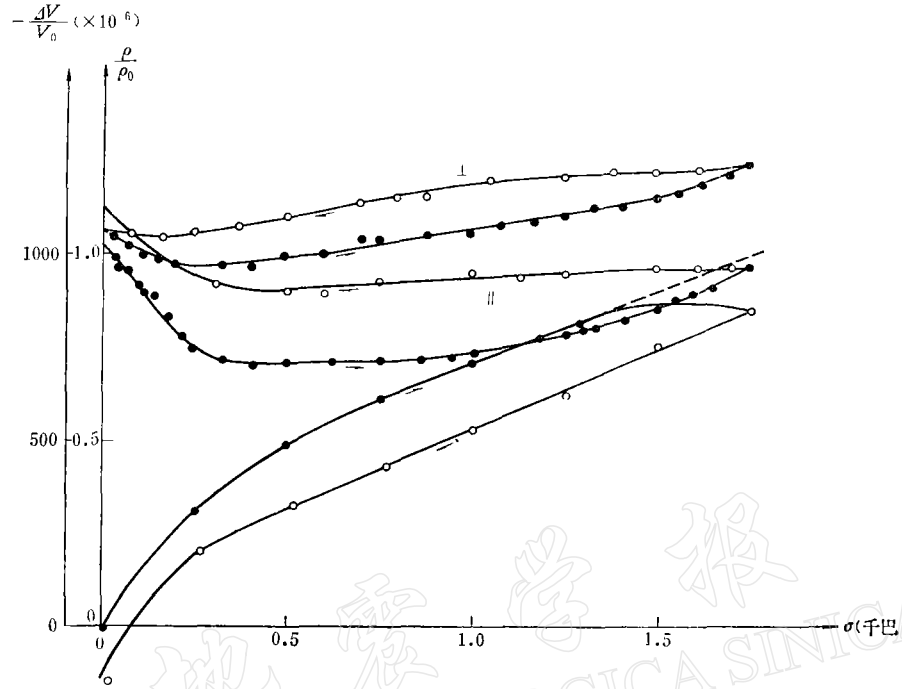

图 4

电阻率变化具有这样的特点：即加载时，在低应力区孔隙水没有饱和以前，电阻率减小。进入完全饱和的弹性形变区后，电阻率增大；到了微破裂膨胀阶段，上升的速度更快。这三个阶段电阻率的变化和体积应变有明显的相关性。

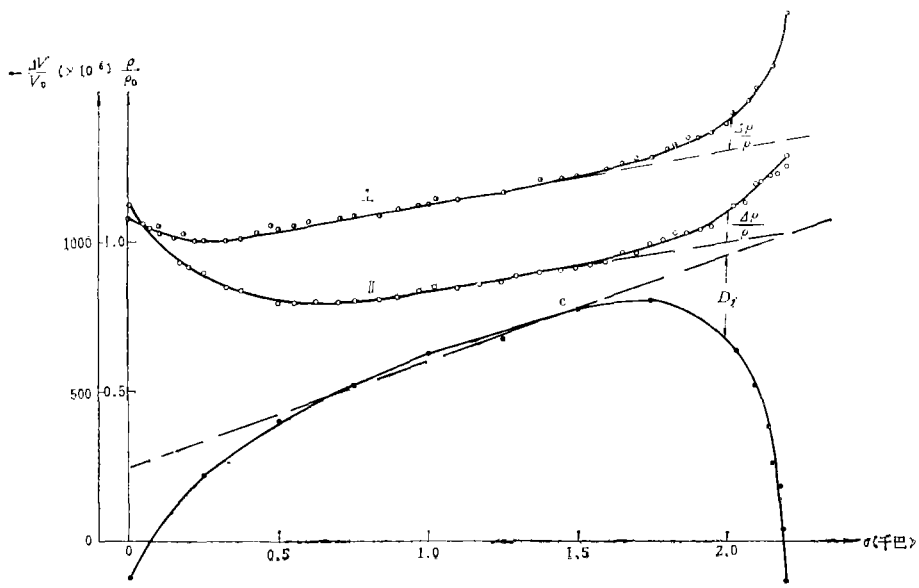

图 5

http://www.dizhenxb.org.cn

三、近似分析与讨论

可以证明，上述电阻率变化特征和一个基于 Archie 定律的近似分析定性上一致。Archie 定律的形式是

$$\rho = \rho_w \eta^{-m} S^{-h} \tag{1}$$

式中 ρ 是岩石的电阻率，ρ_w 是孔隙水的电阻率，η 是岩石的孔隙度，S 是岩石的水饱和度，m、n 是两个与岩石结构有关的常数．因为饱和度 $S = \frac{1}{\eta}\frac{V_w}{V_T}$（$V_T$ 为岩样的体积，V_w 为孔隙水的体积），(1)式的增量形式为：

$$\Delta\rho/\rho = (n - m)\Delta\eta/\eta + n\frac{\Delta V_T}{V_T} - n\frac{\Delta V_w}{V_w} \tag{2}$$

对于封闭的岩样，各形变阶段孔隙度的相对变化 $\Delta\eta/\eta$ 和相应的体积应变 $\Delta V_T/V_T$ 之间的近似关系由孔隙度 η 的定义及图 6 体积应变示意曲线通过简单分析分别求得初始阶段(OA)，

$$\Delta\eta/\eta \cong \frac{1}{\eta}\frac{\beta_1 - \beta_2}{\beta_1}\frac{\Delta V_T}{V_T} \tag{3}$$

地震学报 ACTA SEISMOLOGICA SINICA

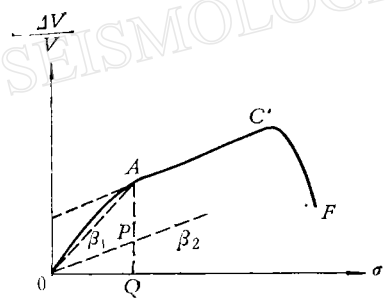

图　6

弹性饱和阶段(AC)，

$$\Delta\eta/\eta \cong \frac{\beta_w - \beta_m}{\beta_2}\frac{\Delta V_T}{V_T} \tag{4}$$

这里，β_1、β_2 分别为 OA 及 AC 阶段样品的压缩系数，β_w、β_m 分别为孔隙水和矿物颗粒的压缩系数．在体积膨胀阶段（CF），$\Delta\eta/\eta$ 的式子，用膨胀应变 D_f 和 CF 段的斜率 β_3 分别置换(3)式中的 $\Delta V_T/V_T$ 和 β_1 即得。

对于非封闭的水饱和岩样，因为水是不可压缩的，样品体积的总变化等于流出的水的体积，故有

$$\Delta\eta/\eta = \frac{1}{\eta}\frac{\Delta V_T}{V_T} \tag{5}$$

http://www.dizhenxb.org.cn

将(3)、(4)、(5)式代入(2)式，并考虑到封闭和非封闭样品的初始阶段 $\frac{\Delta V_w}{V_w}=0$，以及封闭样品弹性阶段 $\frac{\Delta V_w}{V_w}=\frac{\beta_w}{\beta_2}\frac{\Delta V_T}{V_T}$，即可得到封闭及非封闭样品各形变阶段电阻率相对变化的近似式，列于下表：

$\Delta\rho/\rho$	封 闭 样 品	非封闭水饱和样品
初 始 阶 段	$(n-m)\frac{\beta_1-\beta_2}{\beta_1}\frac{1}{\eta}\frac{\Delta V_T}{V_T}$	$\frac{-m}{\eta}\frac{\Delta V_T}{V_T}$
弹 性 阶 段	$m\left(1-\frac{\beta_w}{\beta_2}\right)\frac{\Delta V_T}{V_T}$	
膨 胀 阶 段	$(n-m)\frac{\beta_3-\beta_2}{\beta_3}\frac{1}{\eta}D_f$	$-\frac{m}{\eta}D_f$

根据这些式子，图 7 给出两条示意曲线，分别代表压缩作用下封闭和非封闭饱和岩样电阻率的相对变化，为便于同试验结果对比，图中的横坐标用压应力．看来，这里的定性分析与实验结果定性上是相符合的．

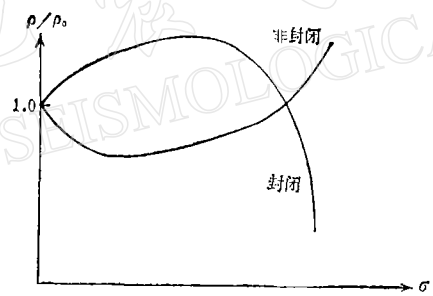

图 7

我们的实验结果，在低应力区即初始非弹性压缩阶段，电阻率随压应力增大而下降，这一点和 Parkhomenko 等[5]以及藤井和滨野[6]的结果是一致的．电阻率下降的原因都是由于样品受压，裂隙体积减小，水饱和度提高，更多的含水裂隙沟通的结果．在水饱和的弹性压缩阶段，我们的结果(电阻率上升)和 Brace[7,8] 非封闭系统水饱和岩样的结果相同．其原因都可以解释为压力作用下有效孔隙度减小的结果．本文和前人的主要差别在于膨胀阶段． Brace[9] 利用水饱和的封闭岩样在围压下进行实验，发现膨胀阶段电阻率下降，他认为下降的原因是水沿新生微裂面扩散，由于表导电沟通更多导电通道的结果．如前述，我们的岩样是经过高温焙烧含有大量热开裂的样品．如果认为形变膨胀阶段岩样体积的非线性增大主要是由于这些热开裂的重新张开，那么这里观测到膨胀阶段电阻率增大便可以得到合理的解释，即这些无水的老开裂的张开没有引起裂隙表面导电的变化，相反却导致样品水饱和度的降低，从而使样品电阻率上升．我们从图 3、4 上看到，在循环加载过程中不存在象藤井等的实验里所测量到的那种显著的不可逆变化，这一点也是上述解释的一个佐证．

http://www.dizhenxb.org.cn

四、初步结论

本文的主要结果是发现经过高温焙烧因而存在大量热开裂的封闭含水岩样，单轴压缩下其电阻率的变化和体积变化之间存在着明显的相关性，以及膨胀阶段电阻率上升．近似计算定性上和观测结果相符．我们初步认为，热开裂在膨胀阶段的张开，引起水饱和度的降低是电阻率升高的原因．这一结果作为震前电阻率上升现象一个可能的物理解释之前，尚须进一步在围压下进行验证．

参　考　文　献

[1] 钱复业、赵玉林，地震前地电阻变化十例，地震学报，**2**，2，1980.

[2] A. Mazzella and Morrison, Electrical resistivity variations associated with earthquakes on the San Andreas fault, *Science*, **185**, 855—857, 1974.

[3] V. I. Mjachkin, et al., Two models for earthquake forerunners, *Pure Appl. Geophy.*, **113**, 169—181, 1975.

[4] M. D. Zoback and J. D. Byerlee. The effect of micro-crack dilatancy on the permeability of westerly granite, *J. Geophys. Res.*, **80**, 752—755, 1975.

[5] E. I. Parkhomenko and A. J. Bondarenko, Effect of uniaxial pressure on electrical resistivity of rocks, *Bull. Acad. S., VSSR, Geophysics*, Ser, 2, 326, 1960.

[6] N. Fujii and Y. Hamano, Anisotropic changes in resistivity and velocity during rock deformation, High-pressure research applications in geophysics, Edited by Murlih. Manghnani and Syuniti Akimote, Academic press, New York, 53—63, 1977.

[7] W. F. Brance, A. S. Orange, and T. M. Madden, The effect of pressure on the electrical resistivity of water-saturated crystalline rocks, *J. Geophys. Res.*, **70**(22), 5669—5678, 1965.

[8] W. F. Brace and A. S. orange, Further studies of the effects of pressure on electrical resistivity of rocks, *J. Geophys. Res.*, **73**(16), 5407—5420, 1968.

[9] W. F. Brance, Dilatancy-related electrical resistivity changes in rocks, Pure *Appl. Geophys.*, **113**, 207—217, 1975.

http://www.dizhenxb.org.cn

THE ELECTRICAL RESISTIVITY CHANGES AND VOLUMETRIC STRAIN OF WATER-BEARING CRACKED ROCK SAMPLES UNDER UNIAXIAL COMPRESSION

JIN YAO ZHANG TIANZHONG HUA ZHENGXING
XU MINGFA HUANG PINGZHANG
(*Institute of Geophysics, State Seismological Bureau*)

Abstract

The axial and transversal electrical resistivity changes in water-bearing, and high temperature baked gabbro rock samples together with their volumetric strain have been measured simultaneously and continuously under uniaxial compression. The measurement shows that the value of resistivity decreases at first before complete water saturation in the stage of non-elastic compression, then it begins to increase in the stage of complete water saturation and elastic compression. Finally the resistivity increases again during the last non-elastic dilatancy stage. According to Archie's law, an approximate relationship between the resistivity change and volumetric strain has been obtained through mathematical analysis. Qualitatively, our experimental results are in agreement with it, but not quantitatively. The main result obtained is that the electrical resistivity of water-saturated rock samples increases during the dilatancy stage under uniaxial compression. It may be explained by decrease of water saturation as caused by reopening of the heated cracks.

http://www.dizhenxb.org.cn