

# 用 电 阻 率 测 量 法 检 测 在 加 载 条 件 下 介 质 的 动 力 过 程

W. Stopinski

(波兰华沙 01-452 波兰科学院地球物理研究所)

## 摘 要

本文给出了实验样品在单向轴向自动加载条件下, 电阻率变化测量的结果. 所用的方法是四电极法. 微电极全部固定在样品中. 一种预先给定的预切口准裂纹决定了未来的断裂带. 为了保证既能监测到断裂带内电阻率的变化, 又能监测到断裂带外电阻率的变化, 将微电极安装在样品中各个部位. 虽然这种前兆现象在断裂带内非常明显, 但将断裂带内和带外的测量结果进行比较, 可以看出: 电阻率方法在带内及带外可以用来进行断裂预报. 在断裂带内所得的这种典型变化过程和在煤矿中所得的电阻率变化很相似. 缩短测量的重复时间可提高结果的质量. 在电阻率变化期间可发现新的前兆现象.

**关键词** 电阻率前兆; 标本破裂; 矿山岩爆; 地震

## 一、引 言

煤矿和地震活动区的现场测量及实验室研究构成了三种实验途径, 可用来探索介质内部发生毁坏性变化时电阻率的前兆. 最初的电阻率变化是在岩石中观察的, 它是随着应力增加而增大. 这是在日本做的(Yamazaki, 1965). 随后在苏联、中国和日本的实验室测量中也得到同样的关系. 在苏联的地震活动区第一次观测到电阻率有较大的变化(高达 50%. Barsukov, 1972). 在加尔姆实验场(Ostashevski and Sidorin, 1985)和伏龙芝实验场(Trapeznikov *et al.*, 1986)专门对电阻率进行探测研究.

在日本, 经验性研究的目的在于: (1)找出未来地震震级和电阻率有变化的测点到震中距离之间的关系; (2)找出地震震级和电阻率前兆持续时间的关系(Rikitake and Yamazaki 1976; Rikitake, 1979; Rikitake, 1988).

在中国唐山  $M = 7.8$  地震前, 在有规律的地电阻率下降的背景上, 观测到短期电阻率变化(Qian *et al.*, 1982; Zhao and Qian, 1985). 这种快变的电阻率变化和固体潮力有关.

在地震前现场测量的同时, 实验室关于电阻率变化是在样品加载条件下进行的(Brace, 1975; Brace and Orange, 1968). 他们给出了含渗透性岩石膨胀变化和电阻率变化之间的关系.

在波兰, 电阻率实验的目的在于寻找矿山崩落前的前兆现象. 观测到这种变化最大

1989 年 5 月 8 日收到本文初稿, 1990 年 12 月 1 日决定采用.

可达3个数量级(Stopiński, 1986; Stopiński and Dmowska, 1984).发展了震源过程的膨胀渗流模型,并给出了描绘电阻率变化典型过程的经验曲线DP(Stopiński, 1986; Stopiński, 1985).试图根据渗透理论对电阻率的变化进行定量描述(Stopiński and Teisseyre, 1982).

本文是波兰铜矿和煤矿实验的继续.它给出了样品在加载条件下,电阻率测量的结果.实验用的仪器是MSK-01型测量装置(Stopiński and Teisseyre, 1982).以前矿山所进行的实验,为设计这种新仪器,提供了许多信息.

本文所给的结果,是在Bork实验室(苏联)实验获得的.与煤矿和地震活动区的现场测量相比,实验室实验提供了在断裂带内记录到物理前兆变化的可能性.由于知道了加载条件,可对介质的动力过程进行分段研究.

## 二、样品的结构和实验技术

本文只涉及到“预裂缝型”的标本在实验中所获得的结果.在这种样品内部固定了应力场集中区,并在应力场集中区内安放了穿孔纸带(图1).这种纸带预示了未来的断裂面,并与“障碍体”型标本相比,只需

1/3的加载力就足以引起断裂(“障碍体”型标本在应力场集中区内则没有穿孔纸带).这种样品是由混凝土做成的长方体,尺寸为 $150 \times 75 \times 35\text{mm}^3$ .为这次实验准备了20块“预裂缝”型标本.

微电极是按在波兰鲁宾铜矿测量中所采用的技术制做的(Stopiński et al., 1979).这种电极是一种混合物,它是由石墨和石蜡粘固成的一种电缆——岩石连合体.不管是供电电极AB还是测量电极MN都固定在标本中.在标本中的不同部位分布了几组测点(见图2).在14个“预裂缝”型标本中,既安装了永久性电极,又安装了定期性电极.

标本所处的单轴加载条件是由INOVA型自动加压机提供的.INOVA型压机配有伺服操作装置.

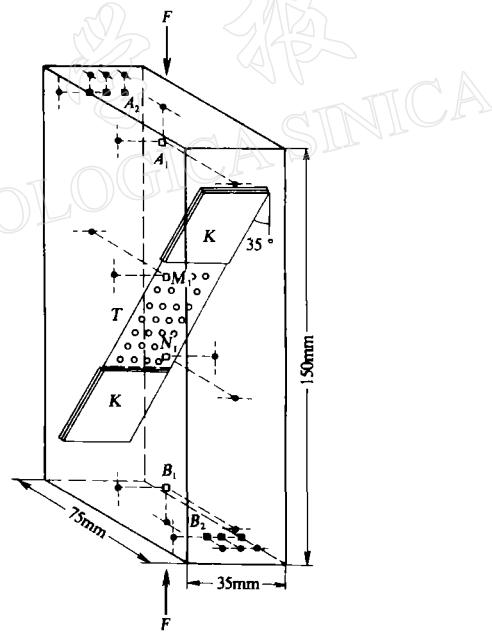


图1 在“预裂缝”型标本中应力集中区、供电电极、测量电极及穿孔纸带的分布. K为应力场集中区, T为穿孔纸带并表示主断裂,  $A_1, B_1$ 为供电电极,  $M_1, N_1$ 为固定在样品轴上的测量电极,  $A_2, B_2$ 为分支供电电极, F为在标本上的轴向加载

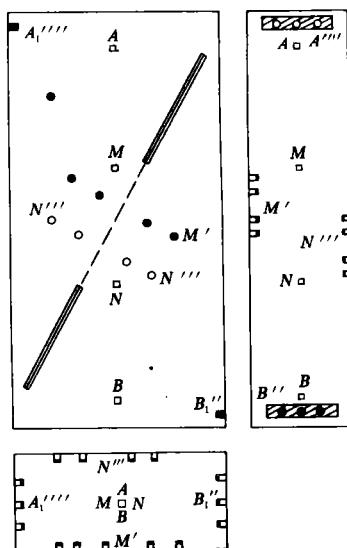


图2 在“预裂缝”型标本中供电测量系统的实例.方形表示永久固定测量系统,圆形表示定期固定测量系统,其它符号同图1

压机的下活塞是可移动的,上活塞是固定的.在每个加载实验中都用了一种软材料,它的畸变速度是 $2 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ .

这些实验所得的结果是非常有趣的,主要是由于使用了波兰科学院研制的新测量仪器 MSK-01.它具有令人满意的技术参数.MSK-01装置的优点之一,即它的测量重复时间——16s是最显著的特征.在一些实验中测量分了七组,这样总的测量持续了112s.

MSK-01装置的技术参数如下:固定输出电流  $I$  (mA),频率为2Hz,并且误差小于0.1%; $\Delta U$ 的测量误差不超过0.5%;测量动态范围大于110分贝;模拟输出;用BCD码数字化输出到数据传输系统;电网能保证连续工作;电池能保证独立工作.

### 三、动力过程的快速变化特性

图3给出了重复时间为16s和112s的测量对比结果.图3a是对2个标本P-1和P-2同时加载所记录到的电阻率变化的趋势.每间隔112s测量一次.两条曲线展示了电阻率有规律的上升.虽然电阻率的上升在实验的最后阶段有一个加速过程,但没有发现短期电阻率变化.图3b是在相同的加载条件下,对一个标本P-2加载记录的,测量间隔为16s.由于观测重复间隔的减少,可以在同样上升的电阻率背景上观测到有海湾形的脉动.靠近断层的点表明:脉动的持续时间减少了,但它们相应的振幅增大了.因此笔者认为:在加载条件下,介质的动力过程有一个快变特性.因此,为了获得更真实的结果,缩短测量物理参数的重复间隔是必要的.

中国唐山地震前现场测量也发现有上述结果的电阻率变化(Zhao and Qian, 1985).长期变和短期变揭示了电阻率变化的复杂性,但从几个方面得到这种变化结果是可能的.

### 四、在加载标本中膨胀引起的动力过程

最初的实验系列是用“零”号标本做的实验,目的在于检测测量技术及方法.通过这些实验找到了固定电极最合适的深度及电极的尺度和形状,还有介质与电极及电缆的连接方式.

图4给出了含水的“零”号标本的电阻率变化过程及加载过程.曲线斜率的增加表明长期预报的开始.根据DD模型,弹性应变阶段后紧跟的就是不可逆阶段(Scholz *et al.*, 1973; Mjachkin *et al.*, 1975).长期预报的开始意味着标本达到了不可逆过程阶段.在

实验的最后阶段,电阻率有明显的上升和下降. 它们和加载的上升和下降是同步的(见图4). 监测电阻率上升和下降可决定短期预报的时间段.

根据在波兰的铜矿和煤矿所发展的膨胀模型,研究主要是用干标本进行的(Stopiński, 1986; Stopiński, 1985).

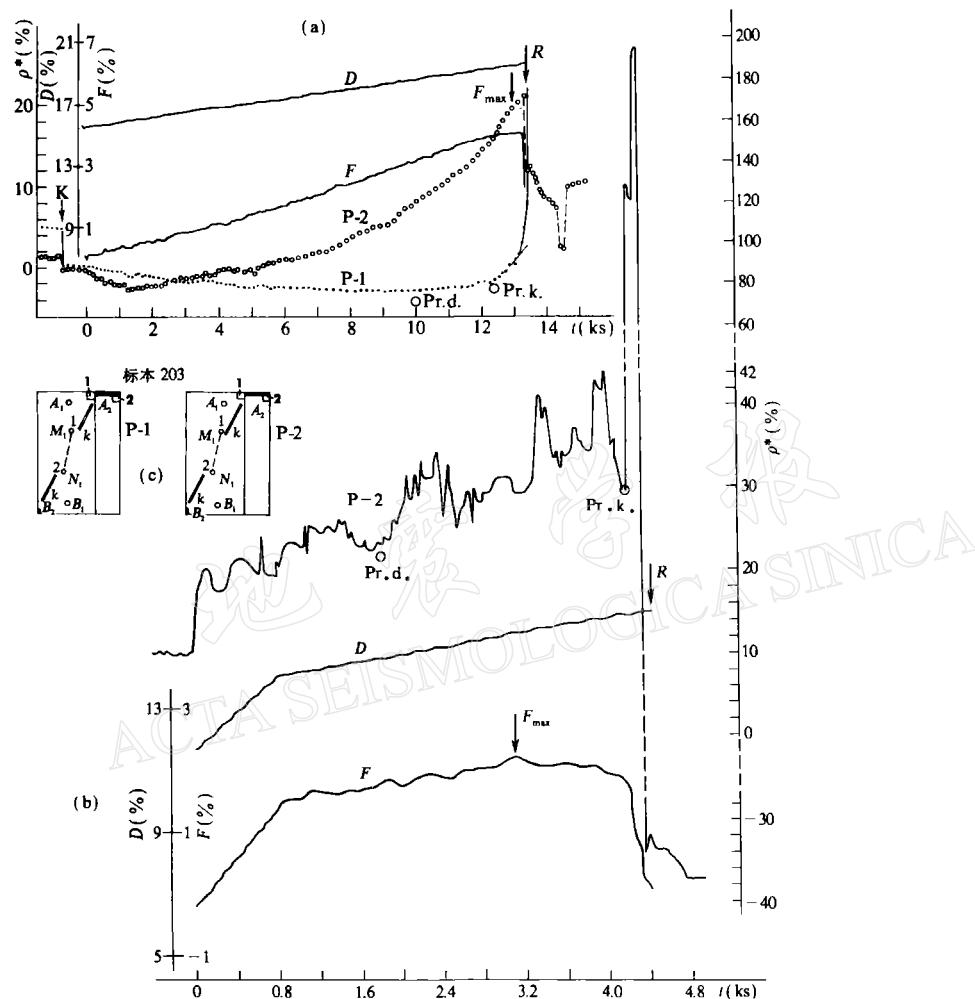


图 3 重复间隔为112s (a) 和 16s (b) 电阻率  $\rho^*$  的变化对比图, 同时对加载  $F$  的过程和两个加载阶段的形变  $D$  进行比较, 所用标本为 203 号“预裂缝”型标本 P-1 和 P-2. (c) 图是应力场集中区和微电极在标本 P-1 和 P-2 中的分布.  $F_{\max}$  为应力最大点; Pr.d. 和 Pr.k. 为长期和短期前兆;  $R$  为在应力作用下的主要动力破裂, 其它符号同图 1

实验室研究表明: 活动应变分离带的形成明显地先于宏观主破裂的形成(Sobolev, 1983; Shamina *et al.*, 1986). 在煤矿同样观测到类似的现象(Stopiński, 1986)因此, 我们实验室研究的目的是: 在宏观主破裂形成以前区分动力过程的不同阶段. 通常, 我们假设这个破裂是由破裂带内所集中的加强应力场所引起的, 破裂的形状由穿孔纸带决定. 这样, 当在这个带上测量电阻率变化时, 可获得较好的结果. 在破裂带上电阻率变化的典型过程

如图 5 所示. 根据电阻率变化曲线的分析, 电阻率变化的过程可分为以下几个阶段:

**1. 压缩阶段** 在这个阶段, 由于预先存在裂纹的关闭和电性通道数的增加, 引起电阻率下降. 在实验室研究中, 花岗岩标本对这种压缩效应表现得很明显 (Zoback and Byerlee, 1975).

**2. 相对平衡阶段** 这个阶段是由压缩引起电阻率下降和微裂纹扩展引起电阻率上升

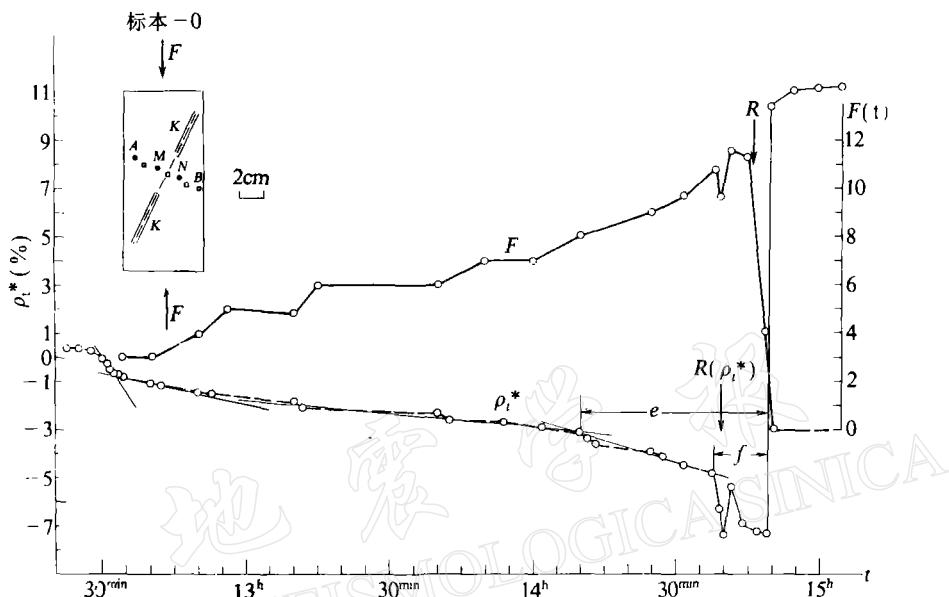


图 4 在“零”号标本中电阻率  $\rho^*$  和加载  $F$  的最初实验室研究结果.  $AMNB$  为供电测量系统;  $e$  为  
主破裂的长期预报;  $f$  为主破裂临震前的短期预报;  $R$  为最后破裂过程, 表明应力场减弱  
升这两种相反现象的一种平衡. 事实上, 在这时间段内, 电阻率值较为平缓(见图 5).

**3. 弹性应变阶段** 在这阶段, 微裂纹扩展有一个加速趋势. 在这个阶段, 裂纹扩展对电阻率的影响超过在压缩阶段对电阻率的影响, 并且电阻率逐渐开始上升.

**4. 不可逆过程阶段** 在这个阶段, 由于大量微裂纹的产生, 使电阻率加速上升. 微裂纹合并并移到未来断裂的脆弱区.

如上述实验, 不可逆过程(长期预报的起始时间段)发生在负载达到最大值  $F_{\max}$  之前的 1.5ks.

紧跟着不可逆过程后就是最后的破裂阶段. 在这个阶段内产生破裂.

与图 5 不同, 图 6 给出了在断裂带外电阻率变化的过程. 在应力集中区的标本(应力集中区与可移动压力活塞连接), 可观测到电阻率上升的趋势. 相反, 在应力集中区外的标本(应力集中区与一个不可移动压力活塞连接), 可观测到电阻率下降的趋势. 然而, 在这两种情况下, 电阻率曲线斜率的变化发生在最大应力处. 这样, 电阻率方法既可用在震源带内, 也可用在震源带外预报断裂. 当然, 这种前兆现象在断裂带内更为明显.

上面的结果和在煤矿得到的电阻率变化结果是非常一致的. 图 7 给出了经验曲线  $DP$  (膨胀渗透模型. Stopiński, 1986). 曲线描绘了煤矿崩落前观测电阻率的典型变化. 这

条曲线非常像图 5 所示的曲线, 这是可以理解的, 因为可以认为, 在煤矿的测量和在未来煤矿震动的震源区获得的数据是一样的。除了最初的压缩阶段, 这篇文章描述的所有过程都可在曲线  $DP$  上找出(见图 7)。

与煤矿观测不同, 把本文的实验结果与在地震活动区地震前观测到的结果相比较是困难的, 因为地震前的测量通常离震中是有一定距离的。个别的非地震因子对这些结果有

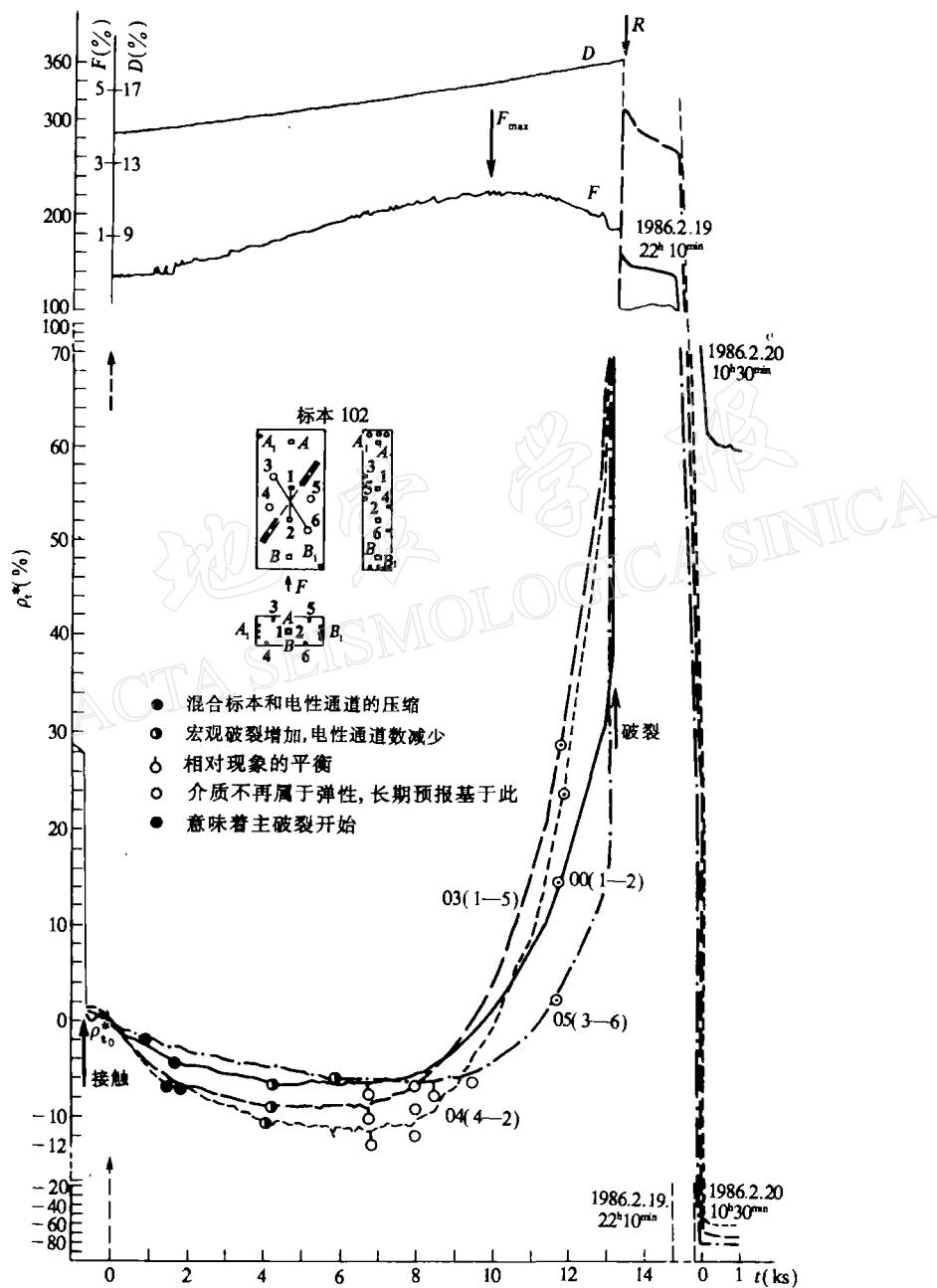


图 5 在 102 号“预裂缝”型标本最大应力带内力学过程所引起的电阻变化、负载  $F$  和形变  $D$  的变化曲线。 $\rho_{t_0}^*$  为电阻率基准线,  $\rho_t^*$  为在时间  $t$  测量的电阻率,  $R$  为记录到主破裂

很大影响.这个动力过程的进展比在煤矿和在实验室条件下要慢.然而,在大多数情况下,在主震之前可以看出:电阻率变化曲线的斜率上升.作为一个例子,中国松潘地震前电阻率变化过程(Zhang and Fu, 1981)非常像图4和图6所给的变化过程.

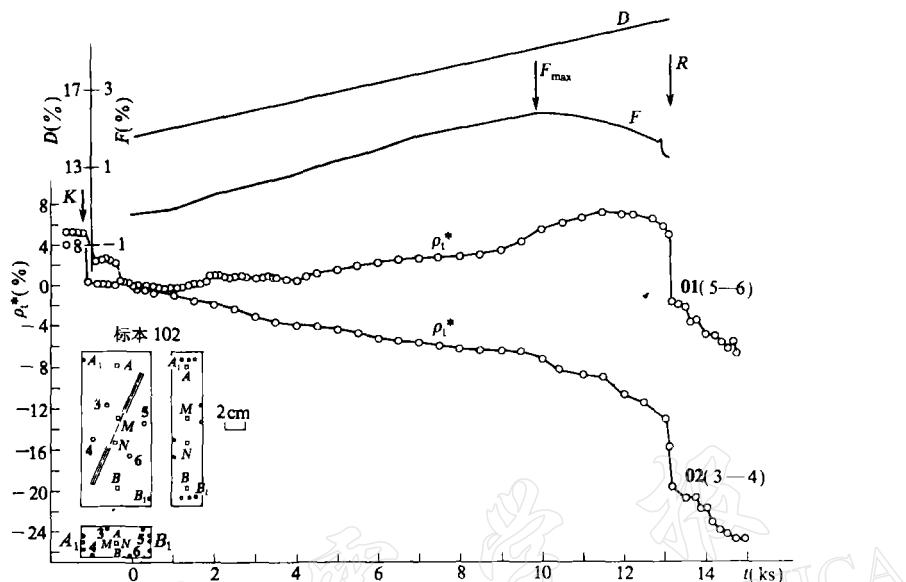


图6 在102号“预裂缝”型标本主断裂带(最大主应力)两边区域所得电阻率 $\rho^*$ 变化、负载 $F$ 和形变 $D$ 的变化(解释见图5)

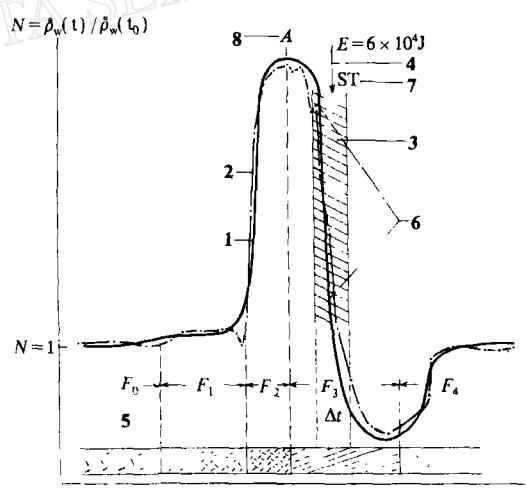


图7 临界膨胀阈模型的电阻率变化(1)和现场测量结果(2)曲线.  
3—期望的主破裂开始的时间段, 4—主破裂, 5—膨胀过程  
阶段( $F_0, \dots, F_4$ ), 6—接近破裂点的曲线段, 7—用技术爆破  
(ST)引起的震动, 8—电阻率增加的最大峰值点A

## 五、结 论

在断裂带内动力过程可分为以下几个阶段:

1. 压缩阶段; 2. 相对平衡阶段; 3. 弹性应变阶段; 4. 不可逆过程阶段; 5. 最后破裂阶段.

上面提到的阶段和膨胀渗透模型(DP)模型一致. 该模型描述在煤矿崩落震源区的破裂过程. 实验室所得结果和在煤矿、地震活动带所测结果是一致的, 这表明四电极电阻率方法在研究断裂前兆方面是有用的. 本文只是初步研究, 详细描写实验室实验和在地震活动带电阻率的测量将在以后进行. 尤其是随着测量重复间隔的缩短, 电阻率变化的测量似乎是很重要的.

在这次实验中, 检验了新测量仪器 MSK-01的高技术参数. 实验数据表明了 MSK-01装置具有高分辨率. 有了这种仪器, 使加载样品的几个测量点同时对不同区域进行测量成为可能, 这就扩大了我们对应力场增强时有关现象的认识.

## 参 考 文 献

- Barsukov, O. M., 1972. Variation of electric resistivity in mountain rocks connected with tectonic causes. *Tectonophysics*, **14**, 273.
- Brace, W. F. and Orange, A. S., 1968. Electrical resistivity changes in saturated rocks during fracture and frictional sliding. *Jour. Geophys. Res.*, **73**, 1435.
- Brace, W. F., 1975. Dilatancy related electrical resistivity changes in rocks. *PAGEOPH.*, **113**, 207.
- Mjachkin, V. I., Brace, W. F., Sobolev, G. A. and Dieterich, J. H., 1975. Two models for earthquake forerunners. *PAGEOPH.*, **113**, 169.
- Ostashevski, M. G. and Sidorin, A. J., 1985. Electric methods and the results of its application in the seismic region (in Russian). *Doklady AN SSSR*, **282**, 2.
- Qian, F. Y., Zhao, Y. L., Yu, M. M., Wang, Z. X., Liu, X. W. and Chang, S. M., 1982. Geoelectric resistivity anomalies before earthquakes. *Scientific Sinica*, **26**, 326.
- Rikitake, T. and Yamazaki, Y., 1976. Resistivity changes as a precursor of earthquakes. *Jour. Geomagn. Geoelectr.*, **28**, 497.
- Rikitake, T., 1979. Classification of earthquake precursors. *Tectonophysics*, **54**, 293.
- Rikitake, T., 1988. Earthquake prediction: an empirical approach. *Tectonophysics*, **148**, 195.
- Scholz, C. H., Sykes, L. R. and Aggarwal, Y. P., 1973. Earthquake prediction—a physical basis. *Science*, **181**, 805.
- Shamina, O. G., Fedorova, T. S., Palenov, A. M., Ponyatovskaya, V. I., Staknovsky, I. R., Terentyev, V. A. and Volynets, L. N., 1986. Seismic and strain fields in the vicinity of shear rupture. *Acta Geophys. Pol.*, **34**, 233.
- Sobolev, G. A., 1983. Precursors of seismic events (in Russian). *Prognos Ziernietniasienij*, **4**, 120.
- Stopiński, W., Jesionek, A., Samborski, R. and Bober, A., 1979. Preliminary results of rock resistivity investigations in Lubin copper mine and their relation to the increase in stresses in the rock mass (in Polish). *Publ. Inst. Geophys. Pol. Ac. Sci.*, **M-2**(123), 189.
- Stopiński, W. and Teisseire, R., 1982. Precursory rock resistivity variations related to mining tremors. *Acta Geophys. Pol.*, **30**, 293.
- Stopiński, W., Mucha, L. and Konopacki, J., 1982. Geoelectric instrument MSK-01 (in Polish). *Publ. Inst. Geophys. Pol. Ac. Sci.*, **M-3**(155), 191.
- Stopiński, W. and Dmowska, R., 1984. Rock resistivity in Lubin (Poland) copper mine and its relation to variations of strain field and occurrence of rockburst. *Proc. 1st. Int. Congress on Rockburst, a. Seismicity in Mines*.

- Johannesburg, 1982. ed. N. C. Gay, E. H. Walwright, 297.
- Stopiński, W., 1985. Dilatational-threshold model of resistivity changes in partly saturated rocks (in Polish). *Publ. Inst. Geophys. Pol. Ac. Sci.*, **M-6** (176), 199.
- Stopiński, W., 1986. Changes in electric resistivity of a rock body associated with mining (in Polish). *Publ. Inst. Geophys. Pol. Ac. Sci.*, **M-7** (186), 3.
- Trapeznikov, Yu. A., Volknin, A. N., Shchelochkov, G. G., Tesalin, M. N. and Kolosov, A. M., 1986. On the results of electric structural investigations in the Frunze proof ground. *Prognos ziemniacki*, **7**, 103.
- Yamazaki, Y., 1965. Electrical conductivity of strained rocks. Laboratory experiments of sedimentary rocks. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **44**, 783.
- Zhang, G. M. and Fu, Zh. X., 1981. Some features of medium- and short-term anomalies before great earthquakes. *Earthquake Prediction—International Review*. In: Simpson, D. W. and Richards, P. G. (eds.). American Geophysical Union, Washington D. C., 497.
- Zhao, Y. L. and Qian, F. Y., 1985. Short-duration resistivity variations before and after the  $M=7.8$  Tangshan Earthquake. *Geophys. Res.*, **1**, 255.
- Zoback, D. and Byerlee, J. D., 1975. The effect of microcrack dilatancy on the permeability of Westerly Granite. *J. Geophys. Res.*, **80**, 752.