

水压致裂试验过程中的地电效应研究

陈宝华 史磷华 骆永妙

(福建省地震局地震研究所)

摘要

本文总结了在水压致裂试验现场多台电法仪器测量和记录到的加压过程中的地电效应，并得到一些能反映岩石破裂情况的有意义的结果：(1)随着压力增加，电阻率明显上升。当压力超过岩石临界应力的一半以后，电阻率即很快地下降，卸压后又逐步回升，其变化椭圆的长轴方向与岩石破裂面的延伸方向是一致的；(2)以压力孔为中心的自然电位及 ZK_2 ， ZK_{14} 孔的井下电位都伴随着加压过程而变化，强烈反映了过滤电场与孔隙水压力的相关性。

关键词 水压致裂；地电效应；电阻率；变化椭圆；自然电位

一、前言

二十多年来，国内外许多地震研究单位观测到了一些地震前地电阻率发生变化的现象。为了探索其变化的原因，从而进一步指导对较大地震预测的研究，不少学者在实验室进行了岩石标本破裂前电阻率变化的实验研究^[1,2,3]。为了弥补样本尺度小及与实际勘探区的岩(土)层自然条件相差悬殊之不足，我国地震研究人员从 1969 年起还先后在邢台、兰州及一些矿区进行自然状态(常温、低围压)下土层及岩层受力时电阻率变化的实验^[4]。这些实验研究的结果在一定程度上对地震前地电阻率的变化作了解释。为了进一步获得地表较深处高围压天然状态下地电阻率随压力变化情况，我们于 1985 年 11 月至 12 月，参加了国家地震局组织的一些单位，在福建南靖县汤坑温泉点进行的水压致裂试验，在现场布设多台电法仪器进行了地电试验项目的测量和记录。我们观测到加压过程的地电效应，并获得一些能反映岩石破裂情况的有意义的结果。无疑，这些结果对于地震的地电前兆的机理研究具有一定的价值。

二、场地条件及试验情况

汤坑温泉点井孔分布如图 1 所示。 ZK_{10} 孔为本试验的压力孔。该区地势平坦，地质条件简单。钻探揭露和地表出露的岩性为石英砂岩与花岗闪长岩。与温泉构造有关的是花岗闪长岩。第四纪覆盖层厚约 10—15m，形成电法异常的因素是岩性破碎程度和含水

1986 年 8 月 9 日收到本文初稿，1988 年 9 月 27 日决定采用。

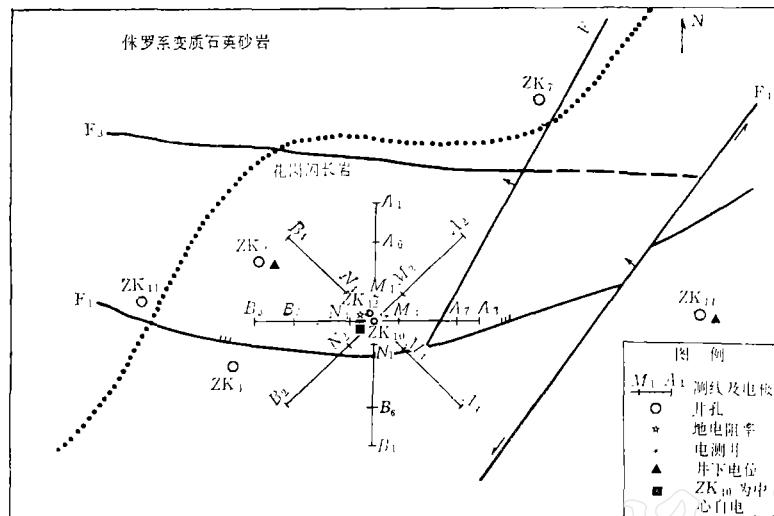


图 1 实验场井孔及电法仪器分布

表 1 ZK₂ 孔柱状结构情况

地质时代	底层深度 (m)	地 质 简 述
第四系	4.80	表层 0.3m 耕植土, 上部 1.0m 灰色粘土, 下部黄色粘土, 不透水。
	12.90	砂砾卵石: 成份砂岩、熔岩, 粒径一般 0.1—5cm, 最大 10cm, 透水性良好, 含水丰富。
	24.0	风化花岗闪长岩: 18m 以上全风化成粘砂土, 不含水; 18m 以下半风化, 弱含水。
	34.5	碎裂花岗闪长岩: 经强烈挤压, 裂隙杂乱, 有较多沸石充填于裂隙间, 富含裂隙水, 为强含水段。
燕山期	41.7	花岗闪长岩: 中细粒花岗结构, 钾长石、斜长石、石英及角闪石、黑云母等组成, 节理发育, 并有沸石充填, 为中等含水段。
	49.5	压碎花岗闪长岩: 岩性同 24.0—34.5m, 强烈绿泥石化、黄铁矿化, 可见 50° 及 70° 倾角裂隙, 有擦痕及沸石充填, 为强含水段。
	75.0	花岗闪长石: 中细粒花岗结构, 岩石成份同 41.7m, 其中 49.5—54.5m 岩石破碎, 轻微绿泥石化, 为弱含水段; 54.5—58.5m 强烈绿泥石化及高岭土化, 岩石极破碎, 节理、裂隙很发育, 并充填沸石, 为含水段; 58.5—75.0m 绿泥石化, 岩石较破碎, 节理较发育, 局部有硅质充填, 沿节理面斜长石高岭土化, 该段不含水。
	84.9	轻微绿泥石化, 岩石较完整, 75—81.9m 钾长石含量增多, 76.6, 82.0 及 83.5m 沿垂直裂隙面斜长石高岭土化, 并有铁锰质充填, 不含水。
二期	86.5	钾长石含量增多, 黄铁矿化, 有绿帘石条带, 岩石破碎, 含水性较好。
	94.0	岩石较完整, 坚硬, 垂直闭合节理面上有碳酸盐充填, 93.1 及 95.5m 节理间有铁锰质充填, 不含水。
二幕	100.5	岩石绿泥石化及轻微黄铁矿化, 裂隙发育, 岩石破碎, 尤以 94—98m 极破碎, 100m 处节理面斜长石高岭土化, 为中等含水段。

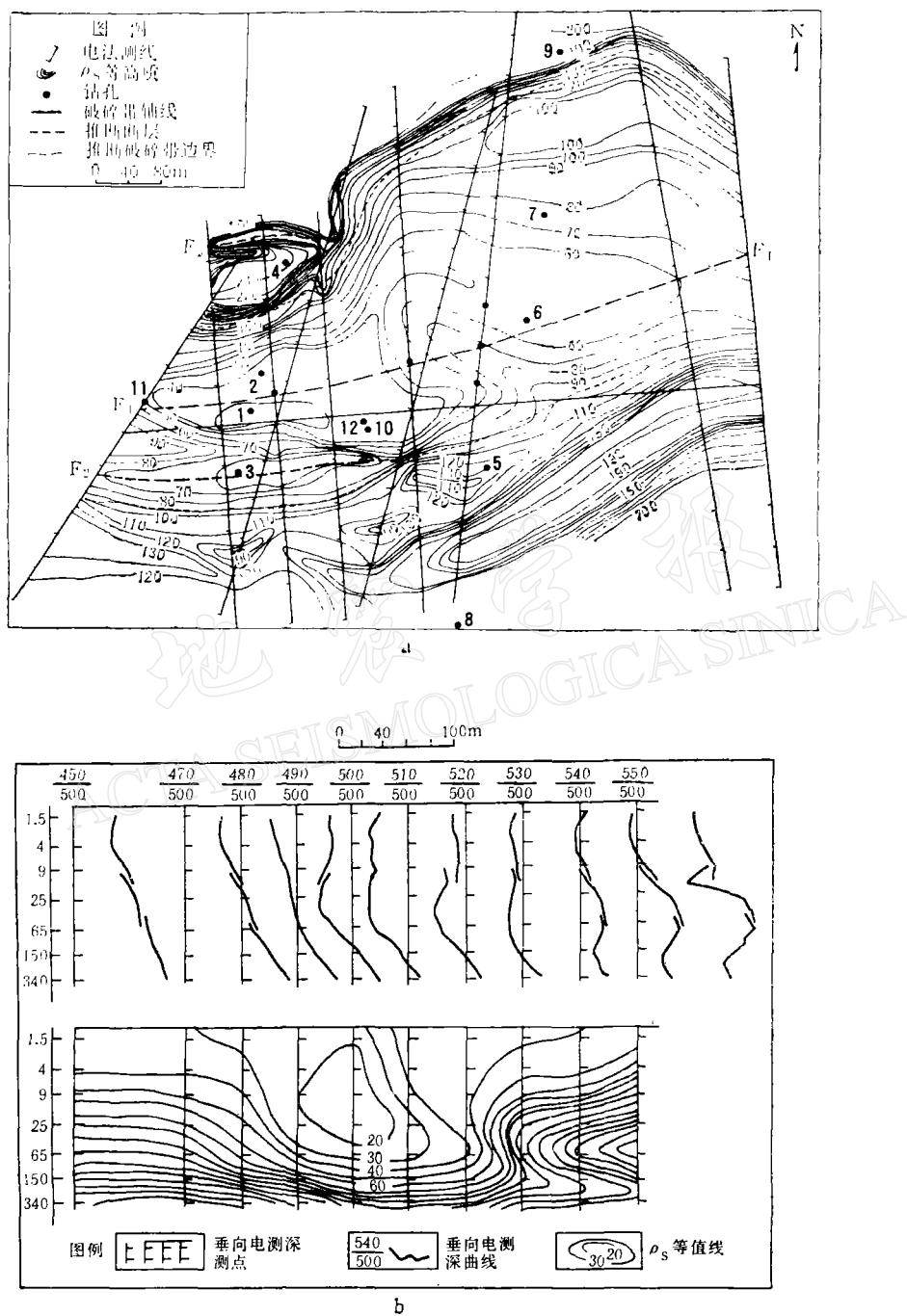


图2 实验场等 ρ_s 平面图(a)及 ZK₁₆ 孔附近垂向电测深断面图(b)
(据陈颜杰)

量及含水性质——矿化水或淡水。本区内多点水样电性分析结果表明, 电阻率在 $6\Omega \cdot m$ — $380\Omega \cdot m$ 之间变化, 说明其电性差异显著。图 2a 是等 ρ_s 平面图。从图中可见, 所选压

力孔及井下电位测量孔 ZK₂ 均在低电阻率的富含高温矿化水范围内。水压致裂实验选 ZK₁₀ 孔的 60—95m 段进行。表 1 列出该孔的柱状结构情况,三次加压段分别选在深 91.0 m, 75.2m 和 62.2m 处(系封隔器顶部位置)。由图 2b 垂向电测深断面图可见,欲反映此深度孔周介质的电性变化,最佳极距为 200—300m。我们选 300m 左右供电极距,并在 EW, NS 测线上增设 200m 左右极距,目的是探测 60m 深度加压过程的电性变化。为了解加压试验前后井壁岩性状况,我们分别在试验前后进行了电测井工作。测量装置与电极构造见图 3, A, B 为供电电极, M, N 为测量电极, $AM = MN = 0.5m$ 。图 4 a 是加压前的电测井曲线。由柱状结构情况表及电测井曲线可见,90.5—94.5m 深处岩石较完整,岩石电阻率高达 $3 \times 10^3 \Omega \cdot m$; 71.5—75.5m 深处次之,岩石电阻率为 $750 \Omega \cdot m$ 左右; 最上面一段岩石较破碎,节理较发育,岩石电阻率也较低,其值为 $200 \Omega \cdot m$ 左右。第一、二次试验(即 91.0m 和 75.2m 深处)为封闭型加压,每半小时左右增压 $35 kg/cm^2$,至岩壁破裂为止(临界压力为 $154 kg/cm^2$)。第三次为开放型加压。但由于该段岩石不太完整,压水流失严重,所以

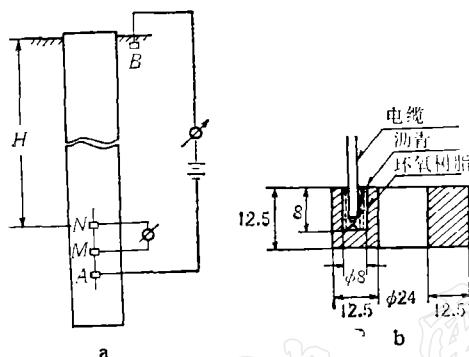


图 3 电测井测量装置及电极规格图

后来改用封隔器加压,最大加压达 $133 kg/cm^2$ 。卸压后用每分钟 8 加仑速率进行大排量压水。图 4b 是三次加压试验结束后进行的电测井曲线,可见三个加压段岩石电阻率均降低,尤以深 90.5—94.5m 最为明显,由加压前的 $3 \times 10^3 \Omega \cdot m$ 降到 $218 \Omega \cdot m$ 以下,说明岩石压裂是成功的。

图 4a 是加压前的电测井曲线。由柱状结构情况表及电测井曲线可见,90.5—94.5m 深处岩石较完整,岩石电阻率高达 $3 \times 10^3 \Omega \cdot m$; 71.5—75.5m 深处次之,岩石电阻率为 $750 \Omega \cdot m$ 左右; 最上面一段岩石较破碎,节理较发育,岩石电阻率也较低,其值为 $200 \Omega \cdot m$ 左右。第一、二次试验(即 91.0m 和 75.2m 深处)为封闭型加压,每半小时左右增压 $35 kg/cm^2$,至岩壁破裂为止(临界压力为 $154 kg/cm^2$)。第三次为开放型加压。但由于该段岩石不太完整,压水流失严重,所以

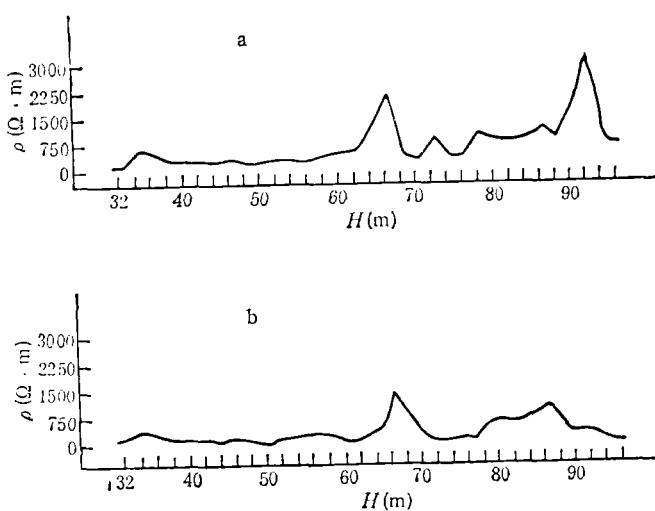


图 4 ZK₁₀孔三次加压前后电测井曲线

三、加压过程中各物理量的变化

1. 地电阻率的变化

我们以 ZK₁₀ 孔为中心相隔 45° 布设四道测线, 供电极距为 300m 左右, 测量极距在 60—100m 之间。仪器使用 DDC-2A 型电子自动补偿仪, 精度为 1.5%, 测前经 UJ-25 电位差计标定符合地电台站观测技术规范要求。由于选用了大功率的稳流电源, 工作电流在 2—3A, 使人工电位差信号足够强 (100—250mV), 仪器能在高测程工作, 因而保证了比野外电法测量精度提高 3 倍以上。为探测最上层加压段地电阻率的压力效应, 在 1, 3 道测线上布设了两组较短电极距装置。由于该井段井壁岩石较破碎, 致开放型加压未达到预期的效果, 因而这两组布极装置所测得的电阻率变化不是很显著的。

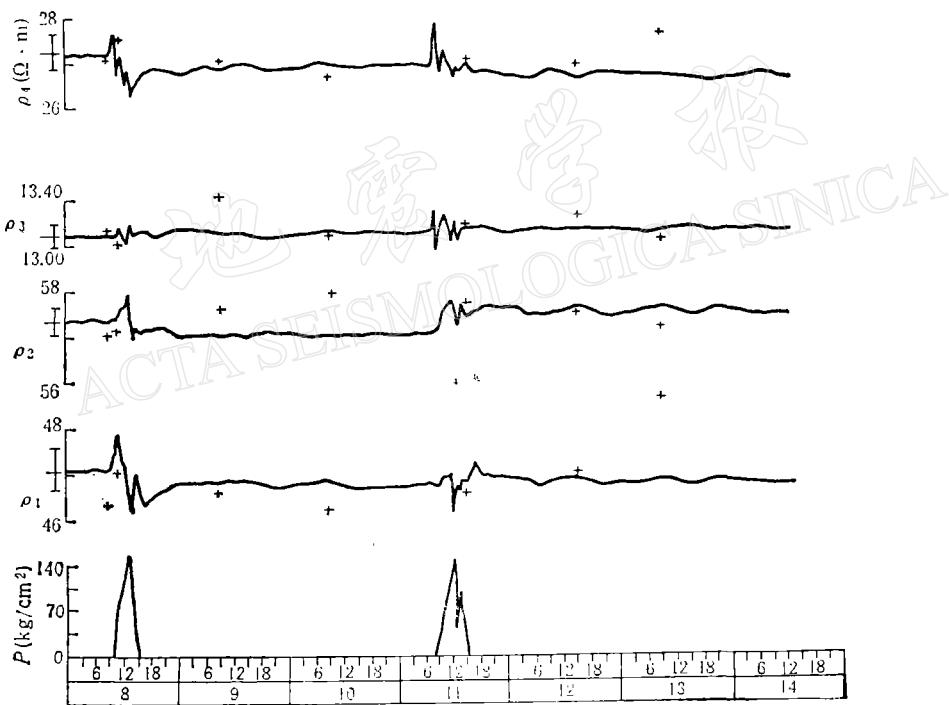


图 5 水压致裂实验中的电阻率变化曲线

图 5 是第一、第二次加压前后四测线地电阻率的变化曲线图, 各测线的左方标有背景值(长横线)及二倍标准偏差限(竖线段), 其值分别为: $\rho_1 = 47.08, \sigma_1 = 0.52$; $\rho_2 = 57.32, \sigma_2 = 0.34$; $\rho_3 = 13.08, \sigma_3 = 0.12$; $\rho_4 = 27.20, \sigma_4 = 0.40$ (单位均是 $\Omega \cdot m$), 图下端为压力曲线(图上标有“+”为有邻近直流电场影响时的测值, 统计时按“干扰”处理, 予以剔除。实验时在其后 10—20 分钟内无干扰时补测)。由图可见, 在加压和卸压的过程中, 地电阻率的变化是显著的。随着压力增加, 电阻率明显上升, 超过临界应力的一半以后电阻率即很快地下降。当压力增加到临界应力以后一、二小时, 电阻率下降到最低值, 卸压后逐步回升, 经过数小时就稳定在一个水平上(其中 ρ_3 变化较小些, 第一次加压过程在 $2\sigma_3$

范围内波动, 但相对加压之前的变化还是明显的). 可以看出, 一般卸压后电阻率的稳定值比加压前稍有降低. 但也有加压前后基值不变(如第三测线)及卸压后基值抬高(如第二测线在第二次加压前后的变化). 这些变化与布雷斯等所做的在高围压和孔隙水压下结晶岩石电阻率随压缩应力变化的实验^[1]结果很一致. 后者指出, 电阻率减小是与压缩应力作用下发生的孔隙率增加或扩容密切相关的.

我们取第 i 条测线上在某次加压过程中地电阻率变化幅度为 $A_i = \rho_{i\max} - \rho_{i\min}$, 而该次加压前电阻率平均值为 $\bar{\rho}_i$, 则其相对变化 B_i :

$$B_i = A_i / \bar{\rho}_i \times 100\% \quad i = 1, 2, 3, 4$$

因为每个时刻封隔器向井壁加压是均匀的, 因此在同一测线上, 井壁两侧地电阻率相对变化一样. 这样, 以布极中心点为原点 o , NS, EW 为 y 轴, x 轴. 将各个 B_i 值标在图上, 然后根据最小二乘法原理, 可得出拟合椭圆(图 6), 也就是该次加压前后地电阻率的变化椭圆(此过程是在 LASER-310 机上实现的). 从变化椭圆上可由公式 $\varepsilon = \sqrt{1 - \left(\frac{A}{B}\right)^2}$, (A, B 为椭圆的长、短轴), 求出其离心率 ε .

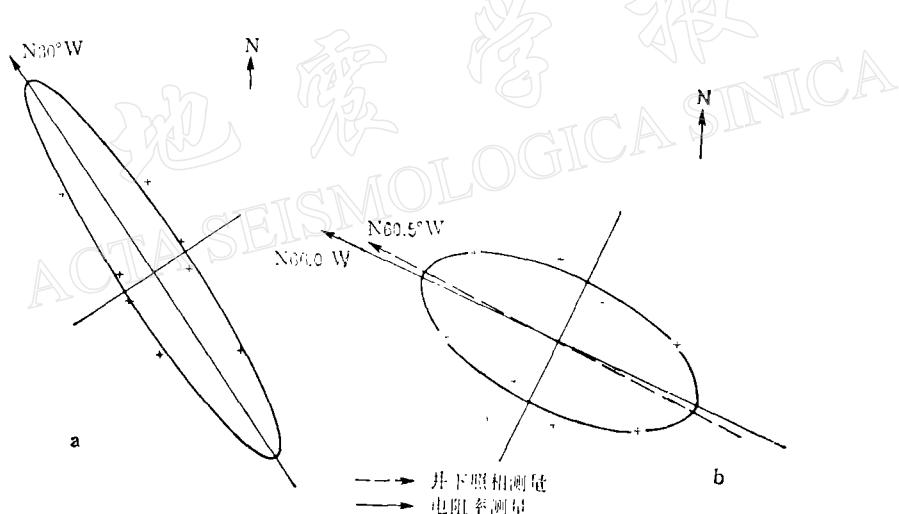


图 6 电阻率变化椭圆

第一、二两次试验变化椭圆的离心率分别为: $\varepsilon_1 = 0.99$, $\varepsilon_2 = 0.89$, 这意味着该区岩石电学性质各向异性很显著. 有趣的是, 椭圆的长轴方向与该区的应力场方向——南东东^[2]很相近. 第二次加压试验采用了井下照相方法测量出这次岩石破裂的方向是 N60.5°W, 而岩石电阻率变化椭圆的长轴方向为 N66.0°W, 二者的结果比较吻合, 从而也表明了第二次试验岩石破裂面的延伸方向与初始破裂是基本一致的. 第一次试验电阻率变化椭圆的长轴方向为 N30°W.

2. 以加压孔为中心的自然电位

测量电极布置标在图 1 上. 井旁中心电极是厚为 1cm, 长为 3cm 的铅环, 其余测量电极采用 20cm × 30cm 的铅板, 并以带屏蔽线的双芯电缆作电极引线, 电极接头处选用

环氧树脂严格密封。中心电极接 DDC-2A 电子自动补偿仪的 *M* 端。第一、二两次加压试验过程中各个方向的自然电位变化情况见图 7。

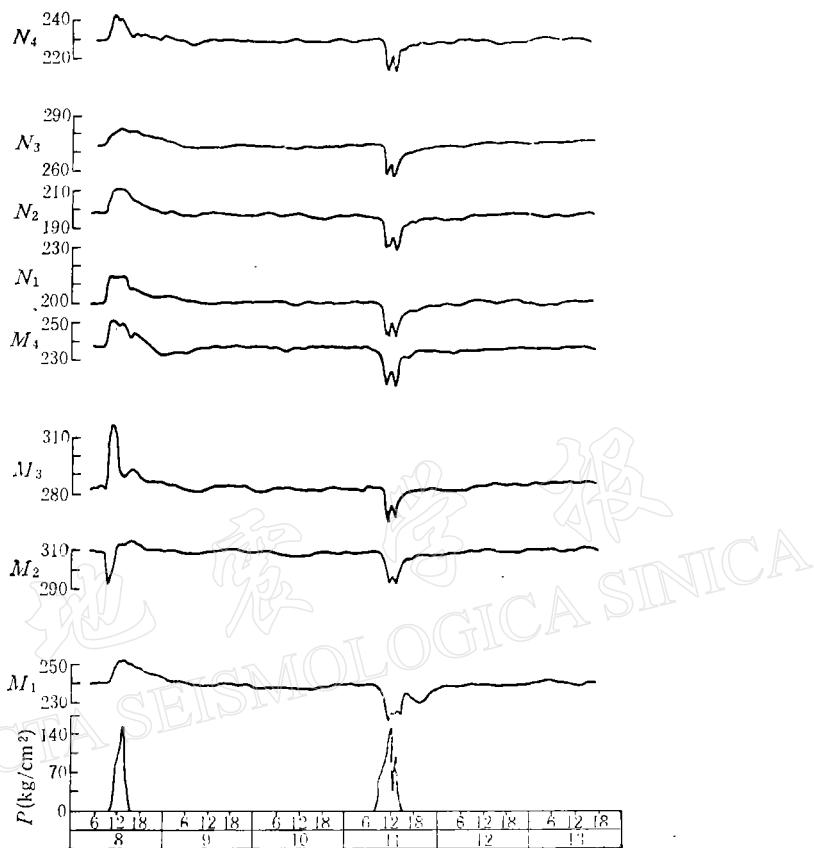


图 7 加压前后自然电位变化曲线(单位: mV)

第一次加压过程中, 随压力的增加, 八个测道中有七组数值是上升的。当压力增至岩石破裂的临界应力一半时, 自然电位达到最大值, 然后逐步下降, 卸压后十小时左右稳定。其中以第三道(M_3)变化幅度最大。只有第二测道(M_2)自然电位的变化与上述情况是相反的, 但卸压后恢复期的变化是一致的。

第二次加压过程中, 自然电位的变化形式与前次不同。当压力增到临界应力一半时, 自然电位亦降到最小值, 而后逐步上升。从此以后加压过程有个波动, 即压力达最大值下降 20 分钟后又增压到 70kg/cm^2 , 而自然电位亦相应反相变化, 但位相延迟了 30 分钟。

值得说明的是, 在资料处理时, 已根据加压前背景场的测量对观测成果作了线性校正, 消去了电极极化电位差的影响(呈线性下降)。因此, 图 7 所显示的自然电位变化主要反应了加压过程引起的效应。显然, 第二次加压过程, 自然电位随压力的增大而下降, 这可以解释为: 岩石颗粒在通常情况吸附水溶液中的负离子, 而正离子在孔隙压的作用下流动, 因而导致自然电位的下降^[6]。而第一次加压过程自然电位大部分成上升情况, 目前尚不好理解, 这有待于进一步研究。

3. 井下电位

井下电位测量布设在 ZK_2 孔与 ZK_{14} 孔(见图 1). 测量装置由两个铅环电极组成(电极规格见图 3), 引线采用双屏蔽电缆线, 接头灌以环氧树脂、松香及沥青等绝缘材料, 一个电极放在井下, 另一个电极埋在井边. ZK_2 孔安放的记录仪是 XWX-2042 携带式电子自动电位差计, 测量量程为 5mV — 10V , 精度为 0.5% , 井下电极离地面深度是 37m . ZK_{14} 孔用的是 XWZK-153 快速自动平衡记录仪, 量程是 0 — 10mV , 精度为 0.5% , 井下电极安放在离地面 50m 深度上.

除 ZK_2 孔第二次试验仪器出水机构故障无记录及第三次试验该孔记录反应不明显外, 其余记录还是明显地展示了加压过程的井下电位的变化.

(1) 第一次试验 ZK_2 井: 当压力加到最大值 $154\text{kg}/\text{cm}^2$ 前 15 分钟, 即超过临界应力 80% 时, 井下电位开始上升, 一小时后增加到最大值, 幅度为 7.5mV , 卸压后一小时恢复正常(图 8a).

ZK_{14} 井: 在加压到最大值时井下电位开始上升, 近 2 小时后到达最大值, 幅度为 0.8mV , 卸压后不回复原值.

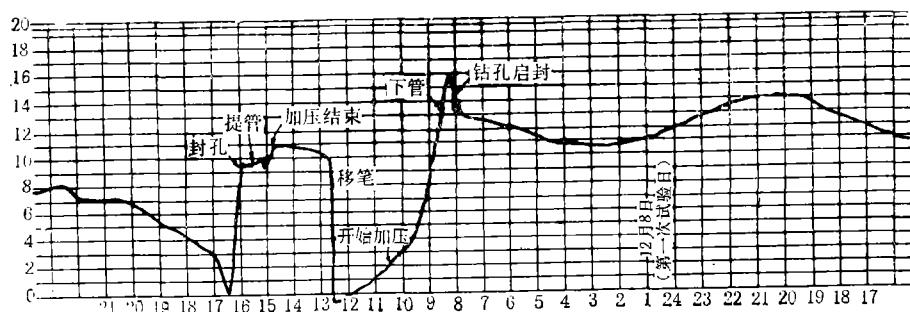
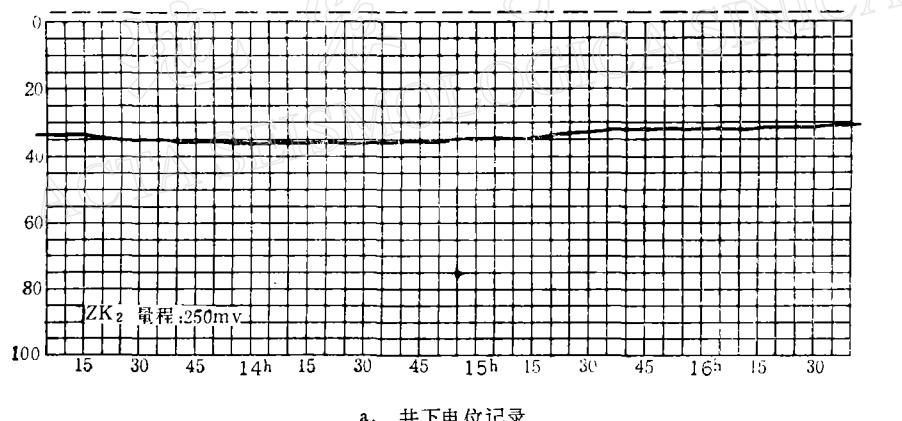


图 8 第一次加压过程 ZK_2 孔井下电位及井水位记录

(2) 第二次试验 当压力升至最大值(154kg/cm^2)以后8分钟, ZK_{14} 孔井下电位下降 0.3mV , 22分钟后才上升, 50分钟后升至最大值, 幅度为 0.6mV , 以后一直稳定在此范围, 亦即: 卸压后半小时井下电位升到最大值, 并且不回复原值.

(3) 第三次试验 ZK_{10} 井一开始加压, ZK_{14} 孔井下电位就开始上升, 加压30分钟后上升的速率加大, 达 0.32mV/h , 大排量压水停泵后75分钟上升速率开始变缓. 最大值幅度为 2.5mV , 以后下降了 0.7mV , 但回复不到原值.

四、讨 论

1. 加压过程, 地电阻率变化反映了岩石孔隙率变化, 即扩容的过程. 破裂面产生后, 由于低阻矿化水的浸入引起岩石电阻率的下降. 由电阻率变化椭圆可确定破裂面的延伸方向. 这一结果给地电阻率预报地震方法提示了很有意义的内容, 即如果在某一孕震区附近布设多测向的地电阻率测量系统, 那么我们就可以根据电阻率变化椭圆的长轴方向推测孕震区的震源应力场的方向.

2. 以 ZK_{10} 孔为中心的自然电位及 ZK_2 , ZK_{14} 孔的井下电位, 都伴随着 ZK_{10} 孔加压过程变化. ZK_2 孔的水位记录显示该井的水位亦随 ZK_{10} 孔压力的增减而灵敏地升降(图8 b)¹⁾, 表明该热水矿区含水层具有良好的孔隙流通性. 根据公式, 过滤电位 $u = (\epsilon_0 \epsilon \rho \Delta u / \eta) \cdot p^{[7]}$, (式中, p 为孔隙水的压力, ϵ , η , ρ 分别是流体的介电常数、粘滞系数和电阻率, Δu 是电偶极层的电位跃变值), 当 ZK_{10} 孔压力增大时, 孔隙压亦增大, 导致含水层热矿水的流动, 从而使过滤电场的强度发生变化.

矿化度不同的热矿水在压力的作用下渗流到其他井孔, 从而使 ZK_2 , ZK_{14} 孔的井下电位亦发生改变. 因此, 试验结果表明, 井下电位及加压孔周自然电位, 对地下含水层在应力作用下水动态的效应是明显的.

本实验研究工作得到福建省地震局余兆康、蔡诗凤同志的帮助, 福州地震台马永章参加了本实验的观测工作, 在此谨表谢意.

参 考 文 献

- [1] Brace, W.F. and Orang, A.S., 1968. Electrical resistivity changes in saturated rocks during fracture and frictional sliding. *J. Geophys. Res.*, **73**, 1433—1445.
- [2] Лархоменко, Э.И., 1965. Электрические Свойства Горных Пород.. *Наука*, No. 3, 104—107.
- [3] 张天中、华正兴、徐明发, 1985. 1.2千巴围压下岩样破裂和摩擦滑动过程中电阻率变化. 地震学报, **7**, 428—432.
- [4] 赵玉林、钱复业、杨体成、刘建毅, 1983. 原地电阻率变化的实验. 地震学报, **5**, 217—224.
- [5] 林纪曾、梁国昭、赵毅、谢明富, 1980. 东南沿海地区的震源机制与构造应力场. 地震学报, **2**, 245—257.
- [6] 中南矿冶学院物探教研室, 1980. 金属矿电法勘探, 182—191. 冶金工业出版社.
- [7] 孙正江、王华俊, 1984. 地电概论, 23—32. 地震出版社.

1) 福建省地震局, 1986. 福建省南靖县汤坑村水压致裂水文地球化学效应实验观测数据汇编(附图部分).

A STUDY OF THE GEOELECTRIC EFFECT ON THE PROCESS OF HYDRAULIC FRACTURING EXPERIMENTS

Chen Baohua, Shi Linhua and Luo Yongmiao

(Institute of Earthquake Research, Seismological Bureau of Fujian Province)

Abstract

In the paper, the geoelectric effects associated with the pressurization measured and recorded by electric instruments in sites of hydraulic fracturing experiments are summarized, and some significant results corresponding to rock failure are also obtained as follows:

(1) With the increase of pressure, the resistivity rises distinctly. After the pressure has exceeded a half of rock critical stress, the resistivity drops rapidly; and during the release stress, the resistivity gradually rises again.

(2) The self-potential centered on the pressure hole and the electric potential in the wells ZK₂ and ZK₁₄ change with the pressurization, all reflect strongly the correlation between the percolated electric field and the pore pressure gradient.