

砂岩在摩擦滑动中的 电阻率变化及其在地震预报中的应用

陆阳泉 钱家栋 刘建毅

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

用双剪法对小浪底砂岩在摩擦滑动中的电阻率变化进行了实验研究。结果表明,在摩擦滑动过程中,电阻率“趋势”变化有明显的方向性效应,在不同的测量方位上显示出较大的差异性和不同的前兆特征。平行于断层面的第Ⅰ道电阻率持续上升,大滑动前无明显异常反应;垂直横跨断层面两侧的第Ⅱ道随剪应力的增大电阻率由开始大幅度下降转为平稳变化,大滑动前出现清晰的突变异常,其幅值达50%左右;与断层面斜交成45°夹角的第Ⅲ道随剪应力的增大电阻率缓慢上升,达到某一极值后随块体的滑动转为下降。最后,本文简单地讨论了产生这些差异性现象的可能原因及其在地震预报中的应用。

一、引 言

自从六十年代布雷斯等提出了断层粘滑现象作为地震的一种可能机制以后^[1],岩石的摩擦滑动实验受到了人们的重视。1975年,王其允采用二极法测量了压紧的两块花岗岩岩石承受剪切并产生粘滑时的电阻率(以下用 ρ_s 表示)变化,但只反映了岩石的整体效应,对不同方位上的 ρ_s 差异性问题未作研究。

已有的研究表明,地壳深部的电性变化在地震前有明显的方向性效应^{[2][1]}。此外,我国大多数地电阻率台站的基底多是沉积岩层,在沉积岩的电性变化方面,目前国内外的研究主要集中在轴压或围压条件下进行,虽然其中必定包含着由于差应力引起的剪切变形,但其影响无法从实验中区分出来。文献^[3]的研究表明,含孔隙、裂隙的岩石在剪切变形时的电性变化机制可能与受压变形时不同。因此,研究沉积岩在滑移剪切过程中的电性变化特点,对于电性前兆机理的研究有着重要的意义。为此,我们对砂岩标本在剪切作用下电性变化的方向性特征进行了实验研究,得到了一些有意义的结果。

1) 陆阳泉等,自然条件下受压岩(土)层电阻率变化的实验结果及大地震前后地电阻率某些异常特征的初步分析, 1981.

二、实 验 方 法

1. 双剪加载系统

本实验采用双剪装置(图1),该装置由两台十吨压机组合成,即一台小型十吨试样压片机经改造后平放在另一台十吨液压式万能材料试验机上组成双剪加载系统²⁾。在整个实验过程中摩擦面积保持不变并能使断层面上的应力状态保持稳定,应力和位移都能准确测量。

实验用小浪底细砂岩,其基本参数如表1所示。试件用磨床精磨,使其相对面不平行度小于0.02毫米。样品系统由三块试件构成一组,中央一块为 $2 \times 3 \times 10 \text{ cm}^3$,两侧为 $2 \times 2 \times 6 \text{ cm}^3$ 。样品通过钢制垫块和钢柱测力器与压机组成双剪加载系统,样品与钢垫块之间用多层聚四氟乙烯薄膜隔开,以防止岩石与钢垫块之间的漏电和粘滑现象。4°样品的断层面上夹有海原断裂的断层泥。

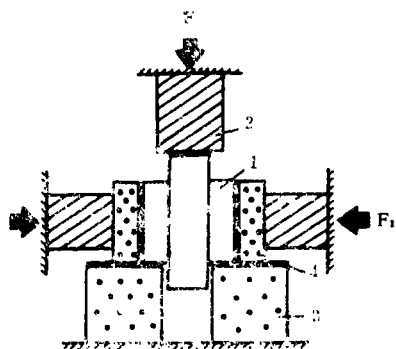


图1 实验装置图

1. 岩样 2. 钢柱测力器 3. 钢垫块 4. 聚四氟乙烯薄膜

Fig. 1 The diagram of experimental configuration

表1

岩石基本参数

密度(g/cm^3)	孔隙度(%)	强度(σ MPa)	杨氏模量E(10^8 MPa)	泊松比(ν)
2.66	3.00	150	0.71	0.14

实验前将样品抽真空650mmHg负压后用自来水浸泡72小时以上,含水率虽未经准确测定,但根据水电部岩石试验规程中对不同浸水时间岩石吸水率的试验结果分析,抽气后的砂岩浸水72小时以上其吸水率可达90%左右。实验时从水中取出试件将其表面水膜擦净晾干后置于压机上。 ρ_s 测量采用单道连测法,每测完一道大约需20~30分钟,在这样短的时间内样品系统的湿度条件基本稳定。

若试件之间的摩擦面积为S,加在样品系统上的垂直力为 F_1 ,水平力为 F_2 ,则作用在样品摩擦面上的剪应力 τ 和正应力 σ 分别由下式计算:

$$\left. \begin{aligned} \tau &= F_1 / 2S \\ \sigma &= F_2 / S \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

2. 电极的布设

2) 耿乃光等,四种岩石的摩擦滑动特征,1985.

用对称四极法分三种形式布设电极：样品中央平行于断层面的为第Ⅰ道，垂直且横跨断层面两侧的为第Ⅱ道，与断层面斜交成 45° 夹角的为第Ⅲ道，如图2所示，图中圆圈为电极孔坐标位置。电极参数列于表2。

表2 电极布设参数 单位：cm

测量道	与断层面的夹角(α°)	AB	MN	K	孔径(ϕ)	孔深(H)	备 注
I	0	6.0	2.0	12.6	0.1	0.3	充 填 琼 胶
Ⅱ	90						
Ⅲ	45						

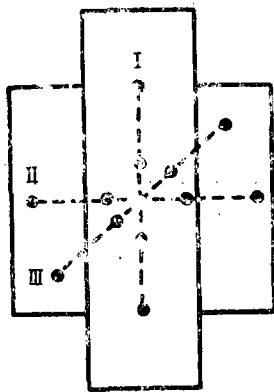


图2 电极布设示意图

Fig. 2 The schematic diagram of electrodes configuration

安装电极前在 $\phi 1 \times 3$ 的电极孔中充填琼胶后铆进铜丝，用SBVR—7/0.10mm²小型安装线焊接再以环氧树脂封孔。这样可以保持电极的稳定和接触良好。

3. 观测仪器和参数测定

用67.5伏干电池串联以数百伏直流电压向样品供电，用ZD—8 数字地电仪测量其供电后的电位差 ΔU 和供电电流 I ，按公式 $\rho_s = K \frac{\Delta V}{I}$ 计算其值。每组取5—10个观测数据的平均值作为分析的依据，仪器精度为0.02%，测量误差小于1.0%。 F_1 和 F_2 由应变式测力器测量， τ 和 σ 按(1)式计算，两试件的相对位移用FX—212位移变送器测量，由x—y函数仪同时记录，它们的测量相对误差均为1.0%。

三、主 要 结 果

图3是实验过程中的应力—位移曲线*。由图中可以看出，在正应力 $\sigma = 24\text{MPa}$ 时，当剪应力 τ 达到摩擦强度以后，所有样品都出现稳滑，4*样品的变化比较特殊，这可能是受断层泥的影响。图4说明，相对于断层面不同部位的测量道 ρ_s 的前兆特征不一样，不同样品的实验结果表现出较好的一致性。

* 2* 样品因记录原因，在图3中未绘出。

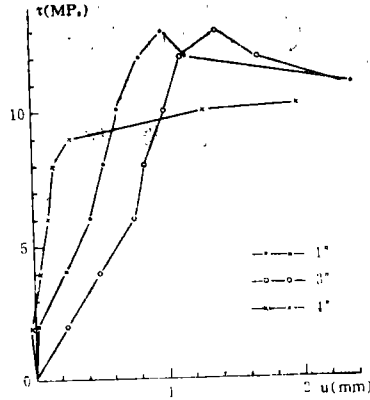


图3 砂岩的摩擦滑动曲线(4°夹有断层泥)

Fig. 3 U (displacement) — τ (shear stress) curves.

由图4a可见,随着剪应力的增大,平行于断层面的第I道 ρ_s 持续上升,失稳滑动前无明显异常反应。而垂直且横跨断层面两侧的第II道则不同,随剪应力的增加 ρ_s 开始大幅度下降,然后转平变缓,稍有波动,当断层失稳滑动前 ρ_s 出现明显的突变异常(突升或突降),跳动幅度达5.0%左右(图4b)。与断层面斜交成45°夹角的第III道当剪应力增加时, ρ_s 缓慢上升,达到某一极值后伴随块体的大滑动 ρ_s 转为下降(图4c)。

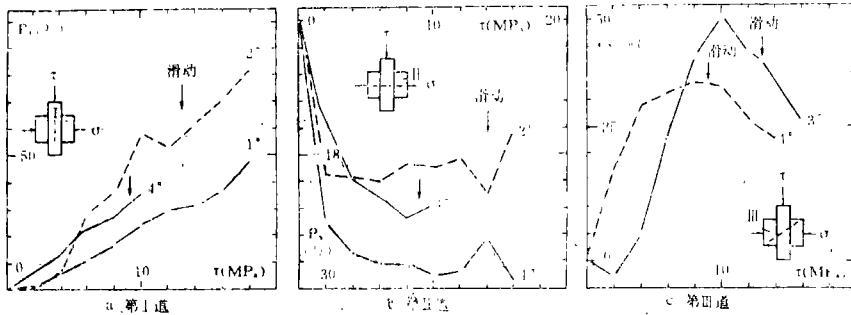


图4 第I—III道 ρ_s — τ 图

Fig. 4 ρ_s — τ curve

表3列出了三块标本的摩擦强度和位移量。由表可见,1°和3°标本的摩擦强度相同,位移量也很接近,说明这两块样品的力学性质基本一致。由于4°样品中夹有断层泥,所以它的摩擦强度降低了,位移量也稍小。

表3

样 品	摩 擦 强 度(τ MPa)	位 移 量(mm)
1°	13	2.35
3°	13	2.29
4°	9	1.96

上述实验结果还表明,样品在摩擦滑动过程中显示出 ρ_s 异常的方向性和差异性:平行于断层面的第Ⅰ道和与断层面斜交的第Ⅱ道 ρ_s 总变化幅度都较大,但在大滑动前第Ⅱ道 ρ_s 有转折性前兆变化,而第Ⅰ道无明显异常反应;垂直横跨断层面两侧的第Ⅲ道虽然 ρ_s 总变化幅度较其他两道稍小,但在大滑动前有清晰的突变异常,其幅值可达5.0%左右。

四、讨 论

砂岩在正应力 $\sigma = 24\text{MPa}$ 的条件下,当剪应力达到摩擦强度以后开始稳滑,摩擦强度也随位移的增大而减小。4°样品夹有断层泥,摩擦强度有所降低并出现强化现象。

从实验可知,由于岩石的破裂方式不同,其 ρ_s 前兆也不一样。在稳滑过程中, ρ_s 变化比较均匀平稳,大滑动前后无明显异常区别;而在蠕变或粘滑过程中 ρ_s 变化幅度小,波动大,但破裂前兆明显。有关这方面的详细资料拟将另文讨论。下面着重讨论 ρ_s 的方向性效应。

实验结果表明,相对于断层面不同部位所测得的 ρ_s 前兆信息不一样,显示出明显的方向性效应, ρ_s 在各个测量方位上也有较大的差异。平行于断层面的第Ⅰ道由于所有电极都处于运动块体同一侧的整体部位上,主要受到挤压力的作用,所以当断层发生滑动时 ρ_s 反应不明显。因岩石基本处于饱和状态,当受到挤压时有可能使某些导电通路闭合,裂隙水被排出,而 ρ_s 呈上升变化。垂直横跨断层面两侧的第Ⅲ道则不同,它们的供电电极和测量极都分布在断层面的两边,这时电极实际上成了断层活动信息的接收器,断层面的微小变化都有可能通过它反映出来。在初始应力条件下,整个样品都处于压缩状态,被挤出的部分裂隙水富集于断层带上,使 ρ_s 在开始阶段出现大幅度下降;随着剪应力的逐渐增大,岩块进入缓慢摩擦滑动阶段,断面上的应力不断集中并随之产生一些新的微小裂缝,这些微裂缝随着剪应力的增减而会多次发生“张开”或“闭合”,这就会使 ρ_s 在一个相对平稳的背景下出现微小的波动;当断层面处于失稳状态即将大滑动之前,由于微裂缝的迅速传播和裂隙水的重新分布,有可能导致 ρ_s 的突然跳动。第Ⅱ道虽然也跨越断层,但与断层面成45°夹角,这样就有可能降低它接收信号的“灵敏度”,虽然它也能感受到断面上传来的信息,但不如第Ⅲ道敏感。由于它的供电电极处于滑动面的前缘,这里是应力高度集中的部位,大滑动前可能出现许多张裂缝,使集中在断层带的水重新流入裂缝中,所以使 ρ_s 达到某一极值后在块体大滑动前出现下降变化。

在本次实验中,断层泥的加入除降低了摩擦强度和使 ρ_s 变化幅度稍小而外,其他无明显影响(参见图4)。这方面的实验研究还有待进一步深入。

在地震预报实践中,常常发现 ρ_s 的前兆异常与震中方位或地质构造有关,我们的实验也证实了这一点。地壳被许多断裂切割成大小不同的块体,一般认为,地震的发生与块体运动——断层活动有关,正如实验所表明的那样,当观测台站建于块体的不同部位或相对于断裂带的不同方位,对同一地震可能会有不同的异常反应。这就启发我们,要捕捉地震前兆,观测台站位置的选择和测量方位的布置是很重要的。就地电观测而言,为了抓住地震信息,在有条件的地方,横跨断裂带或在断裂带的端部布设观测道是有意义的。

本研究是地震学联合基金资助的课题。参加实验的有国家地震局地球物理研究所耿乃光、刘晓红、柳林以及兰州地震研究所的陆启明同志。王玉祥、淮淑琴、余存顺、赵家骥、

王燕琼等同志参加了标本和仪器的准备工作。

(本文1987年5月20日收到)

参 考 文 献

- [1] Brace, W.F., Byerlee, J.D., Stick-slip as a mechanism for earthquakes, *Science*, Vol. 153, 1966.
[2] 国家地震局地质研究所、兰州地震研究所大地电磁测深组, 大地电磁测深, 地震出版社, 1981.
[3] J. Qian, Regional study of the anomalous change in apparent resistivity before the Tangshan earthquake ($M=7.8$, 1976) in China, *Pageoph*, Vol. 122, 1984/85.

RESISTIVITY CHANGES IN THE FRICTIONAL SLIDING EXPERIMENTS OF SANDSTONE SAMPLES AND THEIR APPLICATION IN THE STUDY OF EARTHQUAKE PREDICTION

Lu Yangquan, Qian Jiadong and Liu Jianyi
(*The Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSR*)

Abstract

The results of experimental study on resistivity changes of the Xiaolangdi sandstone samples with the bilateral shear method are presented in this paper.

The main feature of the results is that the trends of resistivity changes in different directions with respect to the loading direction are different during the loading process up to sliding. The resistivity increases steadily in the direction parallel to the loading direction but no change in the trend prior to the main sliding; the resistivity in the direction perpendicular to the loading direction firstly decreases with big magnitude, then with small magnitude as loading stress increases and clearly shows the behavior of a sudden anomalous change right before the main sliding with the magnitude of 5.0%; the resistivity in the direction which is 45° with respect to the loading direction shows a trend of slow increases and after the trend reaches a maximum value it decreases. Furthermore, this paper also deals with possible causes of these results and their application in the study of earthquake prediction.