

张斌, 朱涛, 周建国. 2017. 岩石电阻率图像及各向异性变化的实验研究. 地震学报, 39(4): 478-494. doi:10.11939/jass.2017.04.004.

Zhang B, Zhu T, Zhou J G. 2017. Experimental studies on the changes of rock resistivity image and anisotropy. *Acta Seismologica Sinica*, 39(4): 478-494. doi:10.11939/jass.2017.04.004.

岩石电阻率图像及各向异性变化的实验研究^{*}

张斌¹⁾ 朱涛^{1,2),*} 周建国^{1,2)}

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国北京 100081 中国地震局地震观测与地球物理成像重点实验室

摘要 在两组人工样品自由表面以中心点为基准对称布设3条辐射状测线, 对样品实施单轴应力加载和卸载后, 利用电阻率层析成像方法构建了相应的视电阻率相对变化图像, 并计算和绘制了表征裂隙产生和发展速率的视电阻率各向异性系数 λ^* 以及表征裂隙产生和发展方位的各向异性主轴方位角 α 随应力和深度的变化曲线。结果表明: 所有测线所对应的RRC图像均随着应力的变化呈现出相同的变化趋势, 即在加载阶段, 随着应力的增加, 视电阻率相对变化图像中电阻率降低区域逐渐收缩, 而电阻率升高区域逐渐扩张, 在卸载阶段, 随着应力的减小, 电阻率降低区域继续收缩, 电阻率升高区域继续扩张; 样品中的高阻体对其所在部位及附近区域的电阻率增幅有较大影响, 而对横越高阻体测线的视电阻率相对变化图像的趋势性变化无影响; 对于原始电性为各向异性的样品, 随着应力的增加, 其各向异性程度降低; 裂隙主要在岩样的浅部产生和发展, 而在较深部位的裂隙产生和发展的速率相对较低。上述结果有助于解释和理解地震、火山活动和大型地质构造运动引起的视电阻率及其各向异性的变化特征, 电阻率层析成像方法可能成为目前地震电阻率观测方法的有益补充。

关键词 岩石电阻率 视电阻率相对变化 电阻率层析成像 视电阻率各向异性

doi:10.11939/jass.2017.04.004 中图分类号: P315.72⁺2 文献标志码: A

Experimental studies on the changes of rock resistivity image and anisotropy

Zhang Bin¹⁾ Zhu Tao^{1,2),*} Zhou Jianguo^{1,2)}

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) Key Laboratory of Seismic Observation and Geophysical Imaging, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

Abstract: Apparent resistivity data was acquired during the uniaxial compression on two sets of man-made samples. Then we constructed the relative resistivity change (RRC) images corresponding to three radial measuring lines inter-

* 基金项目 国家自然科学基金(41574083)和中央级公益性科研院所基本科研业务专项(DQJB13B05)共同资助。

收稿日期 2016-11-30 收到初稿, 2017-02-08 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: zxl_tao@126.com



secting with the center of a sample surface using electrical resistivity tomography, and plotted the curves of apparent resistivity anisotropy factor λ^* and azimuthal angle of anisotropy axis α versus stress and depth. λ^* and α represent the rate and direction of crack generation and development respectively. Our results indicate that all RRC images show the same change trend with the change of stress. With the increase of stress, the resistivity-decreased region (RDR) in the RRC images would shrink gradually, while the resistivity-increased region (RIR) would expand gradually. During the process of unloading, with the decrease of stress, the RIR continues to expand, and RDR continues to shrink. The high-resistivity block embedded in a sample has a great influence on the resistivity-increased amplitude at its location and surroundings, but little effect on the trending change of resistivity image. For the samples with originally electrical anisotropy, λ^* decreases with the increase of stress; Cracks appeared and developed mainly in the shallower part of a rock sample, while in the deeper part, the rate of crack generation and development is much lower, which can help to explain and understand the changes in resistivity and its anisotropy caused by earthquakes, volcanic activities and large-scale tectonic movements. This method could be a useful complement to the current seismic resistivity observation methods.

Key words: rock resistivity; relative apparent resistivity change; resistivity tomography; apparent resistivity anisotropy

引言

许多地震、矿震、火山活动和大型地质构造运动前均可观测到显著的电阻率异常变化 (Rikitake, Yamazaki, 1969; Stopinski, Teisseyre, 1982; Jackson *et al*, 1985; Kayal, Banerjee, 1988; 毛桐恩等, 1999; 杜学彬等, 2000, 2001, 2006, 2015; 冯锐等, 2001; Utada, 2003; 安金珍等, 2008; 钱家栋等, 2013). 为了研究电阻率异常变化的规律和机理并探索其作为地震预报参量的可行性, 研究人员在室内和野外进行了大量的电阻率随应力变化的试验, 并取得了丰硕的成果 (Parkhomenko, Bondarenko, 1960; Brace *et al*, 1965; Yamazaki, 1965; Brace, Orange, 1966, 1968a, b; 陈大元等, 1983; 金耀等, 1983; 张金铸, 陆阳泉, 1983; 张天中等, 1985; 安金珍等, 1996; 陈峰等, 2000, 2002, 2003a, b, 2013), 对理解地震前、后电阻率的异常变化, 探索其形成机理及分析地震监测预报台站记录到的地电阻率数据等起到了重要作用. 目前在地震地电阻率观测中, 主要使用与室内实验研究装置相同的具有 4 个固定电极的对称四极测量系统, 该系统只能获得地下某个深度到地表的整个深度层的视电阻率值. 研究人员主要根据该视电阻率值的大小和变化规律来判断其是否存在异常, 进而判断该异常变化是否与地震有关. 由于地下电性结构存在非均匀性, 可能导致测量系统即使安装在距离震中很近的台站, 在某些测向上也难以观测到强震前显著的视电阻率异常变化, 例如 2008 年汶川 $M_{\text{S}}8.0$ 地震前, 成都台在 NW 向就未发现明显的地电阻率异常变化 (张学民等, 2009). 另外, 观测到的地电阻率变化中往往会包含由非震因素导致的异常变化, 例如年变化和季节性变化, 而在实际的电阻率数据处理中, 很难将其从观测到的视电阻率变化中完全剔除, 因为在剔除这些异常的同时, 又会人

为地引入新的异常变化,这就使得仅仅依靠测量系统观测到的地电阻率异常变化来判定其与地震活动的相关性的准确度降低、难度增大(朱涛, 2013)。因此,探索新的地震电阻率观测方式,不仅可以为目前的地震电阻率观测系统提供有益的补充,也对我国的防震减灾具有一定的实际意义。为此一些研究人员进行了新的尝试,例如井下观测(苏鸾声等, 1982; 康云生等, 2013)和多极距观测(赵和云, 钱家栋, 1987; 钱家栋, 赵和云, 1988; 薛顺章等, 1994; 汪雪泉等, 2002; 王兰炜等, 2011),目前这些观测系统的效果仍未确定,因此有必要探索其它的地震电阻率监测方法。冯锐等(2001)利用电阻率层析成像技术于1998年4月14日唐山 $M_{L4.4}$ 和 $M_{L5.0}$ 地震前,在河北省昌黎台均观测到了明显的电阻率图像的趋势性变化:震前约5个月的电阻率图像相对于震前9个月的电阻率图像,电阻率出现了区域性降低,而后随着地震的临近,电阻率降低的区域逐渐扩张,大约震后两个月,电阻率图像几乎恢复至震前9个月时的状态。这表明利用电阻率层析成像技术观测地电阻率图像的趋势性变化可以作为目前地震地电阻率观测方法的有益补充。

对于电阻率图像变化特征的实验研究目前还很少。郝锦绮等(2002)开展了对磁铁矿石英岩样品进行应力反复加载和卸载的单轴压缩实验,研究了电阻率图像的变化特征,并探讨了其变化机理。周启友等(2009)使用电阻率层析成像方法研究了X, Y, XY及-XY这4个方向上饱水和排水过程中岩石电阻率变化空间分布模式的各向异性特征。这些研究体现了岩石样品在二维和三维结构上的电阻率各向异性变化特征,为利用电阻率层析成像方法进行岩石视电阻率图像随应力变化特征的研究创造了条件。因此,本文拟从以下3个方面进行研究:①在实验室验证冯锐等(2001)在地震前观测到的电阻率图像的趋势性变化是否可以重现;②进一步认识和理解视电阻率图像及视电阻率各向异性随应力的变化特征;③探讨实验结果在地震、火山喷发以及大型地质构造运动中的意义。

1 实验方法

本文实验使用两组人工样品,分别为样品Ⅰ和样品Ⅱ各两块,尺寸均为30 cm×30 cm×30 cm。样品制作过程如下:首先,将编号均为42.5R的普通硅酸盐水泥、白水泥、河砂、食盐按照11:2.2:11:1的重量比混合并充分搅拌均匀后浇灌到模具中;然后,在样品尚未固结时在任意一个表面以中心点为基准对称布设3条辐射状测线(图1a),其中测线 L_1

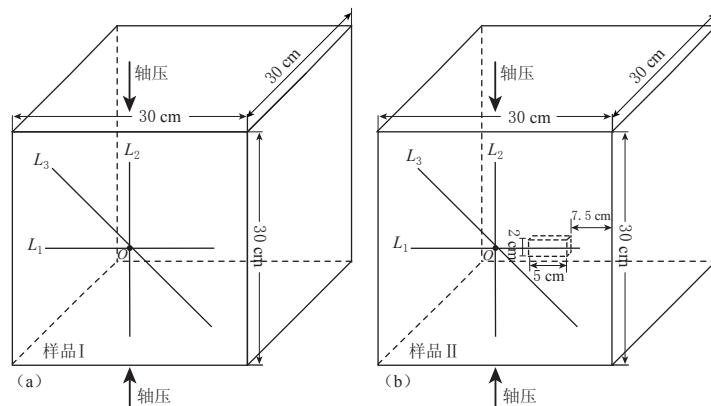


图1 样品Ⅰ(a)和样品Ⅱ(b)的测线布设和加压方向示意图

Fig. 1 Arrangement of measuring lines and directions of loading for sample I (a) and sample II (b)

垂直于加压方向, 测线 L_2 平行于加压方向, 测线 L_3 与加压方向夹角为 45° 。测线 L_1 和 L_2 的电极数目均为 43 个, 隔离系数(深度因子)(Diaferia *et al.*, 2006)均为 14, 测线 L_3 的电极数目为 57 个, 隔离系数为 18。所有测线的电极间距均为 5 mm。为了研究高阻体对岩石电阻率图像趋势性变化的影响, 在样品 II 中嵌入了一块高阻水泥长方体, 尺寸为 $5 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$, 放置于测线 L_1 中心点右侧正下方 2.5 cm 深度处(高阻体上表面距测线 L_1 表面 2.5 cm)(图 1b); 最后, 将样品放置于空气中至少一个月, 以充分固结。经测试, 高阻体的电阻率为 $32 \Omega \cdot \text{mm}$, 样品的抗压强度均约为 44.4 MPa, 相对密度均约为 1.96 g/cm^3 。

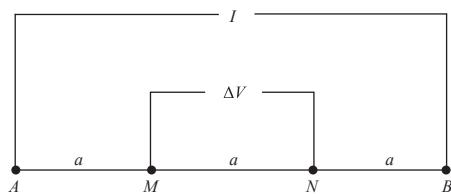


图 3 温纳- α 装置示意图

A, B 为供电电极; M, N 为测量电极; I 为供电电流; ΔV 为测量电极间的电位差; a 为电极间距

Fig. 3 Sketch diagram of Wenner- α array
 I indicates the intensity of current between two current electrodes A and B . ΔV indicates the potential difference between two potential electrodes M and N , a indicates electrode spacing

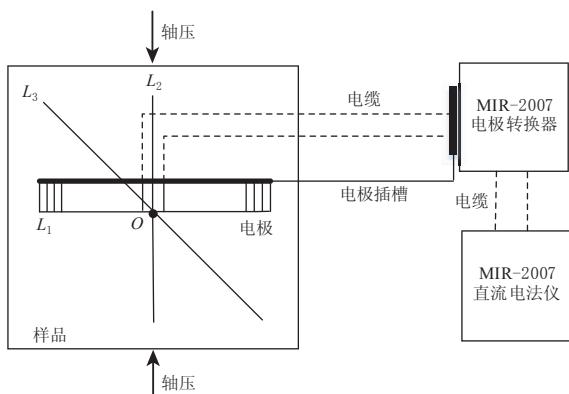


图 2 实验系统示意图

Fig. 2 Sketch diagram of experimental system

实验系统由加压系统和测量系统两部分组成(图 2)。加压系统为济南时代试金集团制造的 YAW-5000F 单轴压力机。视电阻率数据采集采用专门为室内岩石电阻率实验设计的 MIR-2007 直流电法仪, 其技术指标如表 1 所示。数据采集过程中, 使用了温纳- α 观测装置(图 3)。

实验开始前需要测试仪器在连续工作状态下的稳定性。当 MIR-2007 直流电法仪处于无压力(0 MPa)状态下连续工作约 72 小时的过程中, 取一块样品 I 重复测量 36 次。结果表明,

表 1 MIR-2007 直流电法仪的主要技术指标

Table 1 Main technical indicators of MIR-2007 DC resistivity meter

输入阻抗 /MΩ	电压测量范围/V	电流测量范围/A	供电电压 /V	工频抑制 /dB	自电补偿方式 及范围
4 104	[−4, 4] 精度优于 $\pm 0.5\%$; 分辨率为 $1 \mu\text{V}$	[−4, 4]	≤ 700	≥ 80	全量程跟踪式 自动补偿

任意两次电阻率重复测量的误差均小于 5%(图 4), 图中同一颜色的菱形块代表该次测量结果相对于第一次测量结果的相对变化。为了简便, 共给出 3 次测量结果的相对变化, 相距第一次测量的时间间隔分别约为 12 小时(黑色)、48 小时(蓝色)和 64 小时(红色), 测量数据的相对变化基本分布在 $-5\% \sim 5\%$ (两条绿色线)之间。说明在连续工作 72 小时的情况下, 电阻率仪仍是稳定的, 测量的数据是可靠的, 亦即, 当所获得的测量数据的相对变化的绝对值小于 5% 时, 可以认为测量数据是可靠的。

实验过程中, 对两组样品实施单轴应力加载、卸载。样品Ⅰ的应力加、卸载曲线如图5a所示, 应力从0 MPa开始以 2.0×10^{-2} MPa/s的速率均匀地、逐级地加载至11.11, 22.22, 27.77和33.33 MPa, 然后以 -2.0×10^{-2} MPa/s的速率逐级地卸载至0 MPa。样品Ⅱ的应力加、卸载曲线如图5b所示, 应力以 2.0×10^{-2} MPa/s的速率从0 MPa开始逐级加载至11.11, 22.22, 33.33和40 MPa, 然后以 -2.0×10^{-2} MPa/s的速率逐级地卸载至0 MPa。在加载和卸载至不同应力时实施应力保持, 直到3条测线的视电阻率数据均采集完毕, 同时要求每块样品总的测量时间不超过20小时。

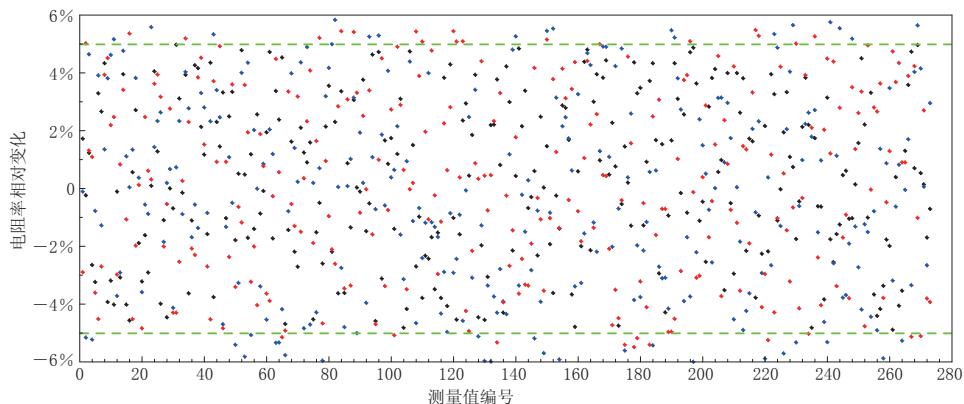


图4 样品在无压力状态下电阻率重复测量结果相对第一次测量结果的变化图

Fig. 4 The relative resistivity change by comparing repeated measurement with the first measurement before loading

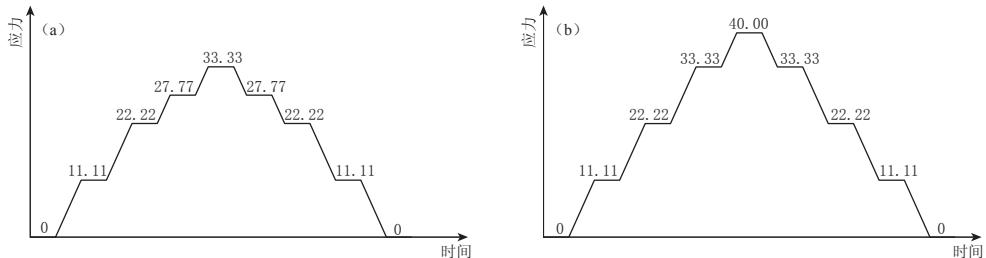


图5 样品Ⅰ(a)和样品Ⅱ(b)的应力(单位为 MPa)加载和卸载曲线

Fig. 5 The stress (in MPa) loading and unloading curves of sample I (a) and sample II (b)

2 实验结果及分析

2.1 视电阻率相对变化图像

前人的研究大多采用两个或者几个电极(Parkhomenko, Bondarenko, 1960; Brace *et al.*, 1965; Yamazaki, 1965; Brace, Orange, 1966, 1968a, b; 陈大元等, 1983; 金耀等, 1983; 张金铸, 陆阳泉, 1983; 张天中等, 1985; 安金珍等, 1996; 陈峰等, 2000, 2002, 2003a, b, 2013), 因此只能建立一点或同一深度上几点的视电阻率随应力变化的关系曲线, 而无足够数据来构建视电阻率随应力变化的动态图像。在本研究的实验中, 布设了两条均包含43个电极的测线 L_1 和 L_2 , 隔离系数均为14, 还有一条包含57个电极的测线 L_3 , 隔离系

数为 18. 一个隔离系数代表一个深度层, 因此测线 L_1 和 L_2 的视电阻率测量数目为 287 个, 测线 L_3 的视电阻率测量数目为 513 个, 足以构建每条测线在不同应力下的视电阻率图像. 为了更好地研究视电阻率图像随应力的变化特征, 利用式(1)计算不同应力下的视电阻率相对于加压前(无应力)视电阻率的变化量 $\Delta\rho_{\text{NR}}$, 即

$$\Delta\rho_{\text{NR}} = \frac{\rho_N - \rho_0}{\rho_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中 ρ_N 和 ρ_0 分别为 N MPa 和 0 MPa(加压前)下的视电阻率测量值. 利用计算得到的 $\Delta\rho_{\text{NR}}$ 构建视电阻率相对变化(relative resistivity change, 简写为 RRC)图像.

实验中分别测试了两块样品 I 和两块样品 II. 由于每种样品中的两块样品的 RRC 图像随应力变化的规律非常相似, 文中仅给出每种样品中一块样品的实验结果. 图 6 给出了加压前样品 I 和样品 II 各测线对应的视电阻率图像. 可以看出, 样品的电性结构基本上表现为分层均匀各向同性. 在 90 mm 以浅的区域, 样品 I 的视电阻率约为 $4\text{--}54\ \Omega\cdot\text{mm}$, 样品 II 的视电阻率约为 $4\text{--}70\ \Omega\cdot\text{mm}$. 样品 I 和样品 II 的视电阻率均随深度增加而增大. 另外, 样品 II 中的高阻体似乎对其周围的视电阻率影响很小(虚线框标示范围), 可能是由于试验中设置的电极间距为 5 mm, 远远小于高阻体 5 cm 的长边长, 且测线 L_1 横越高阻体且平行于高阻体的长边所致.

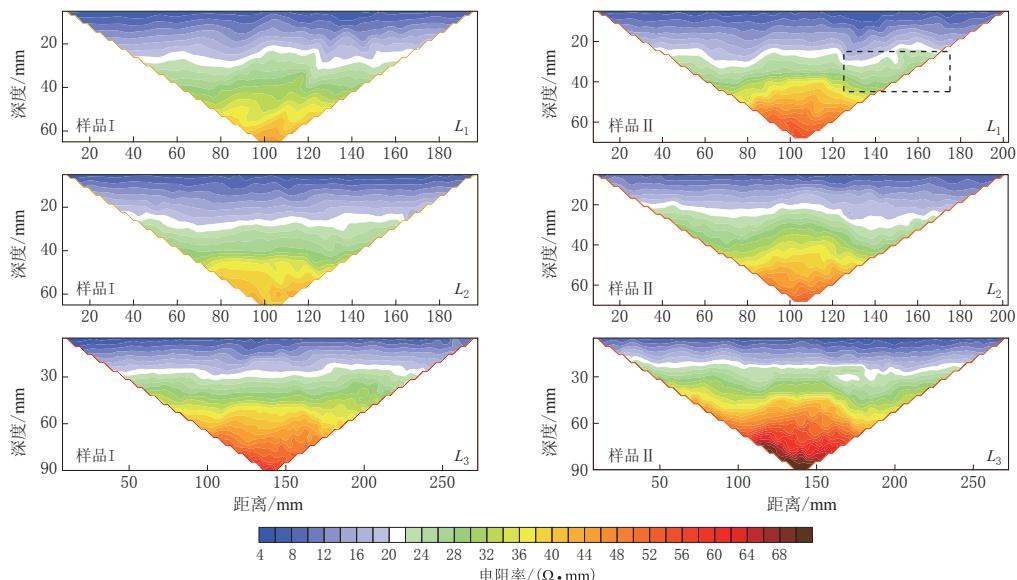


图 6 加压前样品 I 和样品 II 中布设的测线 L_1 , L_2 和 L_3 观测到的视电阻率图像

Fig. 6 The apparent resistivity images observed by measuring lines L_1 , L_2 , L_3 laid in sample I and sample II before loading

图 7 给出了样品 I 在不同应力下各测线所对应的 RRC 图像. 可以看出, 对于垂直于加压方向的测线 L_1 (图 7a), 当应力不超过 33.33 MPa(约为破裂应力的 75%)时, 电阻率降低区域(resistivity-decreased region, 简写为 RDR)(蓝色至白色)只占图像的极小部分, 且随着应力的增加, 区域逐渐收缩; 电阻率升高区域(resistivity-increased region, 简写为 RIR)(白色至红色)则占图像的绝大部分, 且伴随着 RDR 收缩的同时, RIR 逐渐扩张, 这

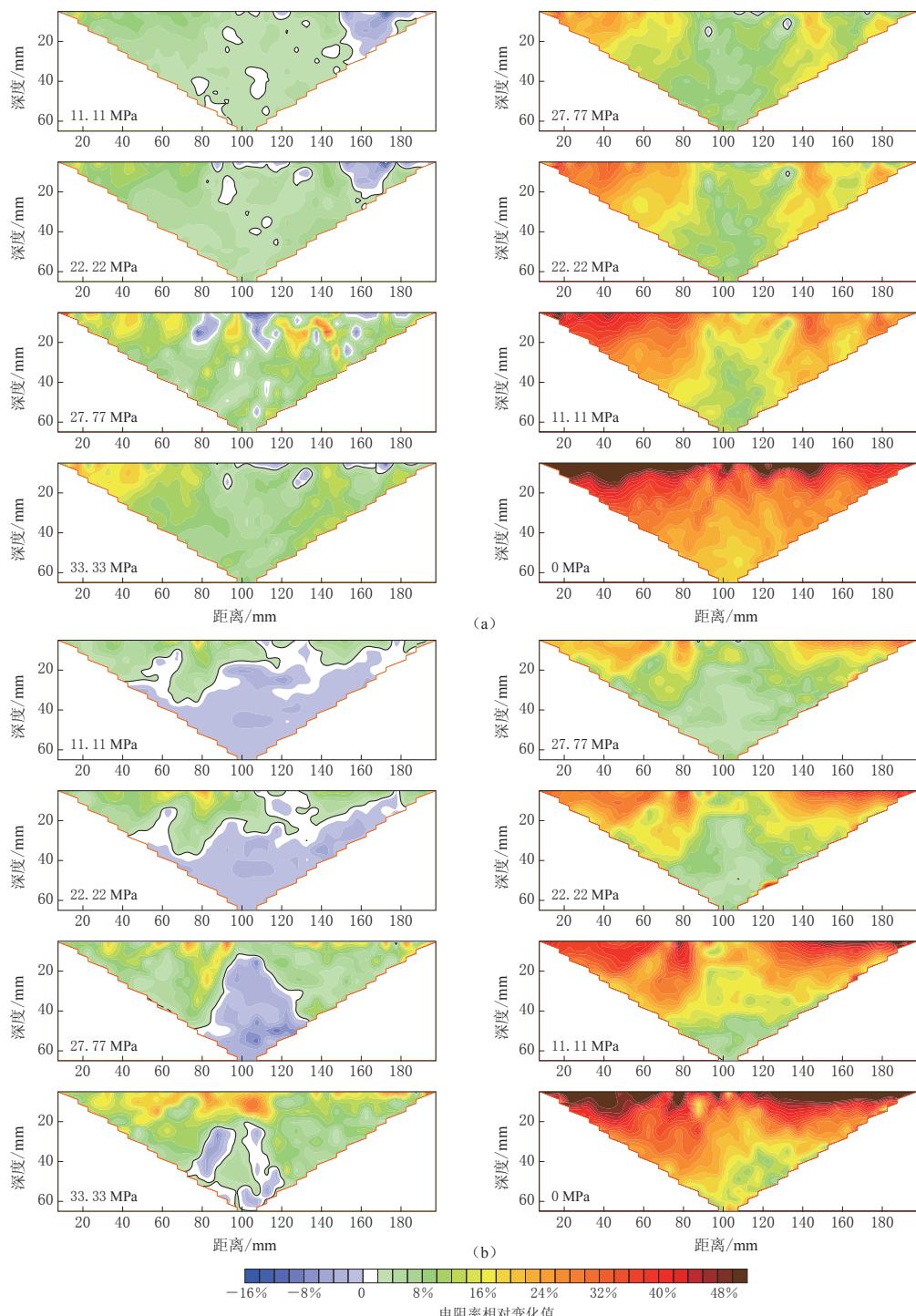


图 7 加压(左), 卸压(右)过程中不同应力下样品中布设的测线 L_1 (a), L_2 (b), L_3 (c) 观测到的视电阻率相对变化图像

Fig. 7 Relative resistivity change images observed by measuring lines L_1 (a), L_2 (b), L_3 (c) laid in sample I. Left column represents loading process, and right column represents unloading process

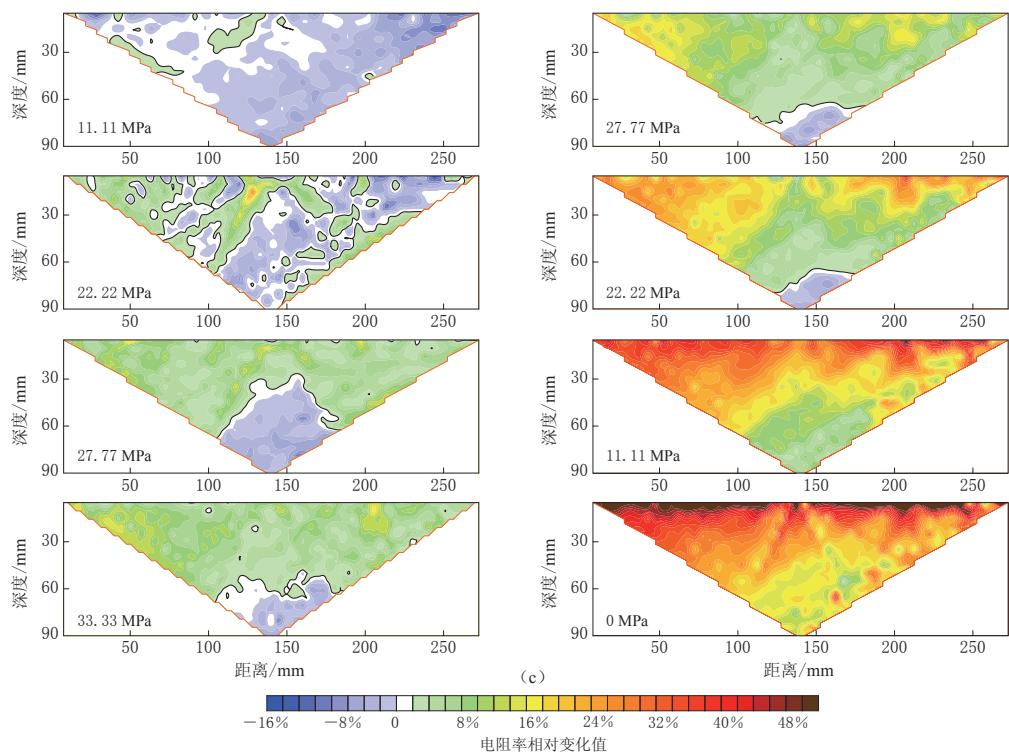


图 7 加压(左), 卸压(右)过程中不同应力下样品 I 中布设的测线 L_1 (a), L_2 (b), L_3 (c) 观测到的视电阻率相对变化图像

Fig. 7 Relative resistivity change images observed by measuring lines L_1 (a), L_2 (b), L_3 (c) laid in sample I. Left column represents loading process, and right column represents unloading process

与冯锐等(2001)在两次唐山地震前观测到的电阻率图像的变化趋势非常相似。在应力逐级卸载至 0 MPa 的过程中, RRC 图像中的 RIR 仍然占据着绝大部分, 且继续扩张。对于平行于压力轴的测线 L_2 (图 7b)和与压力轴成 45°角的测线 L_3 (图 7c), 当应力小于 22.22 MPa(约为破裂应力的 50%)时, RDR 的分布范围比 RIR 大很多, 但是随着应力增加至 33.33 MPa 时, RDR 迅速收缩而 RIR 则迅速扩张。在应力逐级卸载至 0 MPa 的过程中, RDR 继续收缩, 直至消失, 而 RIR 则占据了 RRC 图像的绝大部分, 且区域内平均电阻率继续增大。图 8 给出了样品 II 在不同应力下各测线所对应的 RRC 图像。从图中可以看出, RDR 和 RIR 随应力的变化(加载和卸载过程)呈现出与样品 I 相同的变化趋势。但是, 当应力较小(如 11.11 MPa)时, 高阻体对其所在部位及其附近区域电阻率的影响很小, RRC 图像随应力的变化趋势与图 7 中的结果是一致的。当应力超过 22.22 MPa 时, 横越高阻体且垂直于压力轴的测线 L_1 所对应的 RRC 图像(图 8a)表明, 高阻体所在部位及其附近区域的电阻率增幅相对较大, 说明在应力较高时高阻体的存在可能使得 RRC 图像随应力的变化变得更为突出。

2.2 视电阻率各向异性

计算岩石视电阻率各向异性系数需要测量相交于一点的不同方向测线上的电阻率值。电阻率的测量方法有多种, 例如 Brace 和 Orange(1966)在室内利用二极法测量垂直相交的两条测线的视电阻率, 计算了横向和纵向电阻率变化的比值, 研究了其随应力变化的特征;

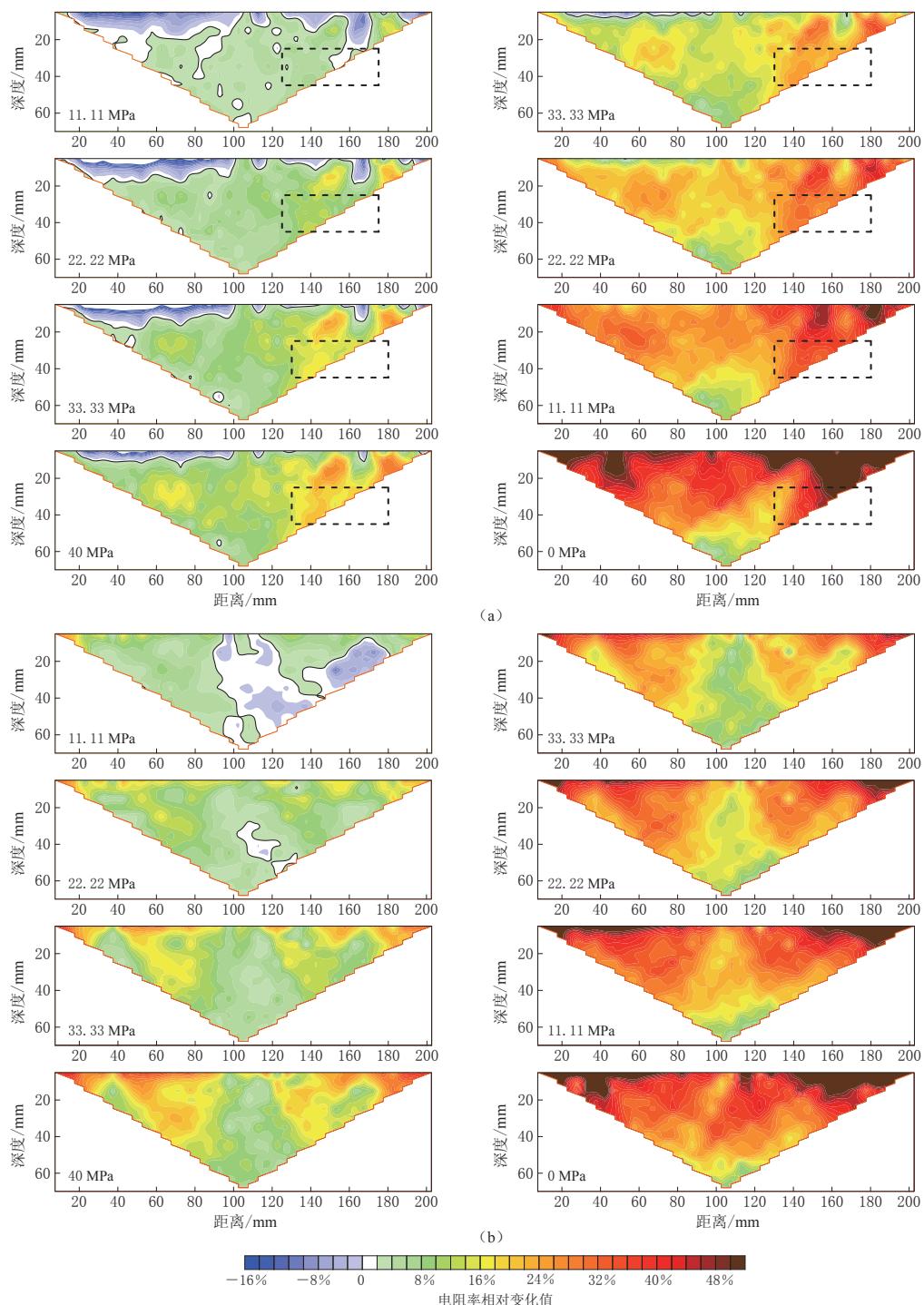


图 8 加压(左), 卸压(右)过程中不同应力下样品 II 中布设的测线 L_1 (a), L_2 (b), L_3 (c) 观测到的视电阻率相对变化图像

Fig. 8 Relative resistivity change images observed by measuring lines L_1 (a), L_2 (b), L_3 (c) laid in sample II. Left column represents loading process, and right column represents unloading process

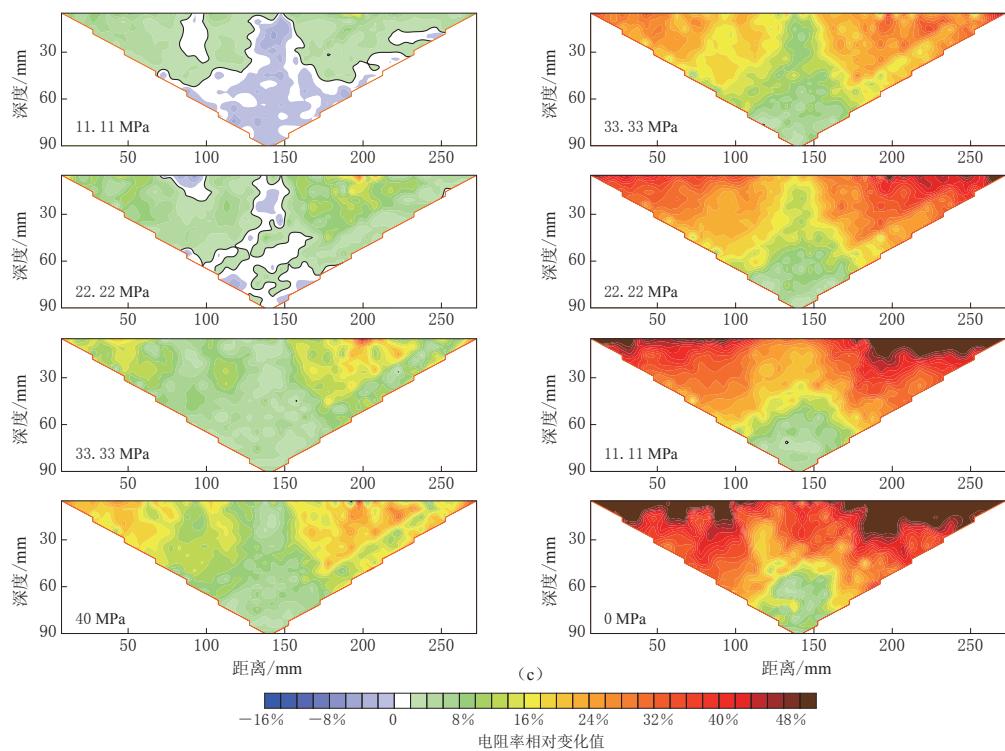


图 8 加压(左), 卸压(右)过程中不同应力下样品 II 中布设的测线 L_1 (a), L_2 (b), L_3 (c) 观测到的视电阻率相对变化图像

Fig. 8 Relative resistivity change images observed by measuring lines L_1 (a), L_2 (b), L_3 (c) laid in sample II. Left column represents loading process, and right column represents unloading process

Kurite(1986)利用不同方向的4条测线的电阻率值, 分析了单轴压力下电阻率各向异性与地震波速之间的关系; 毛桐恩等(1995)利用地电阻率观测台站在EW和NS两个测向上的电阻率值探讨了地震孕育期的地电阻率各向异性变化特征; 安金珍等(1996)和陈峰等(2000, 2002, 2003a, b)设计了与Kurite(1986)相同的共中心点的4条辐射状测线, 讨论了不同加压条件下视电阻率各向性的变化特征。在上述实验中, 每条测线仅布设了4个或8个电极, 只研究了一个或两个深度层的电阻率各向异性随应力的变化特征。Zhu等(2012)增加了每条测线的电极数目, 研究了多个深度层的视电阻率各向异性随应力和深度的变化特征, 但是由于对岩样所加应力相对于破裂应力来说较小, 因此并未观测到视电阻率各向异性系数随深度和应力的明显变化。在本实验研究中, 参照Zhu等(2012)的方法, 在样品的自由表面布设了共中心点的3条测线(图1), 利用温纳- α 观测装置获得了人工岩石样品在单轴压缩至破裂以及卸载的过程中每条测线的视电阻率值, 并以此来研究视电阻率各向异性随深度和应力的变化特征。根据温纳- α 观测装置的特点, 选取了隔离系数为偶数时的视电阻率数据对(图9)。每块样品可提取出6组视电阻率数据对(每个视电阻率数据对由分别来自测线 L_1 , L_2 和 L_3 的3个视电阻率值组成), 分别对应于6个有效深度(图10)。

视电阻率各向异性系数 λ^* 和裂隙优势方向与加压轴方向之间的夹角(各向异性主轴方位角) α 采用陈峰等(2000)的公式进行计算, 即

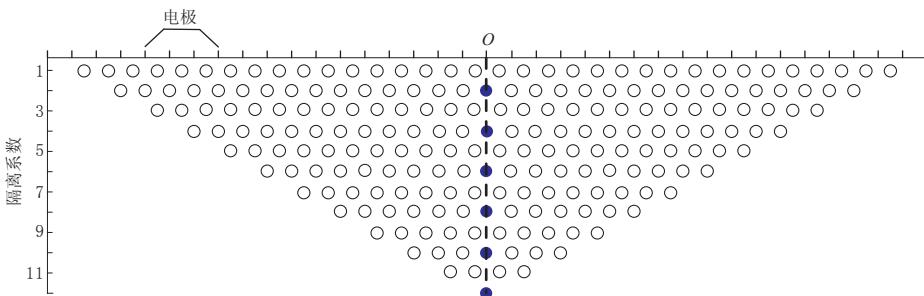
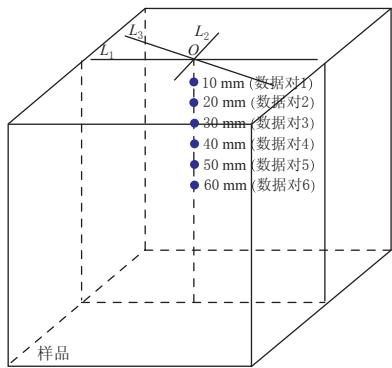
图 9 温纳- α 阵列视电阻率数据对选取示意图Fig. 9 Sketch diagram of apparent resistivity set extraction for Wenner- α array

图 10 视电阻率数据对对应的有效深度图

Fig. 10 Effective depths corresponding to apparent resistivity sets

过程中对材料进行了充分的搅拌,但是样品仍然存在原始电性各向异性,且其基本上随深度的加深而减小;②一般情况下,样品的视电阻率各向异性系数随着应力的增加而减小,即对于原始电性各向异性的样品,随着应力的增加,各向异性程度降低(图 12a),原始电性各向异性岩石在单轴压缩、剪切、有围压的三轴压缩的过程中也观测到了相同的结果(陈峰等, 2003a);③在应力加载过程中,在有效深度为 10 mm 和 20 mm 处,样品 I 在不同应力下的最大与最小 λ^* 之差分别为 1.26 和 1.35,而其它有效深度处的最大与最小 λ^* 之差均小于 0.55,表明随着应力的增加,裂隙主要在岩样的浅部(20 mm 以浅的区域)产生和发展,而在较深的部位(20 mm 以深的区域)裂隙产生和发展的速率相对较低.这种现象相应地出现在了卸载阶段,最大和最小 λ^* 之差同样出现在岩样的浅部(有效深度为 10 mm 和 20 mm),表明样品在加载阶段末期的破裂主要发生在浅部;④随着应力的增加,视电阻率各向异性主轴方位角 α 无明显的趋势性变化,但随着深度的加深, α 的最大值与最小值之差明显增大(图 12b),表明样品浅部裂隙的产生和发展存在明显的方向性(陈峰等, 2000, 2002, 2003a, b);⑤对于加载和卸载阶段,同一深度处、不同应力下的最大与最小 λ^* 差值无固定趋势,但是卸载阶段的最大与最小 α 的差值几乎在所有有效深度上均明显大于加载阶段的,表明应力对各向异性的控制可能主要体现在视电阻率各向异性主轴方位角 α 上.

$$\lambda^{*2} = \frac{2 \sqrt{M^2 + Q^2}}{L - \sqrt{M^2 + Q^2}}, \quad (2)$$

其中,

$$L = \rho_{s_1}^{-2} + \rho_{s_2}^{-2}, \quad (3)$$

$$M = \rho_{s_1}^{-2} - \rho_{s_2}^{-2}, \quad (4)$$

$$Q = 2\rho_{s_3}^{-2} - L, \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \left[\arctan \left(\frac{Q}{M} \right) + k\pi \right], \quad k = 0, 1, 2, 3, \quad (6)$$

式中, ρ_{s_1} , ρ_{s_2} , ρ_{s_3} 分别为沿测线 L_1 , L_2 和 L_3 测得的视电阻率值.

图 11 给出了样品 I 在不同深度处的 λ^* 和 α 随应力的变化图,可以看出:①虽然在岩样制作

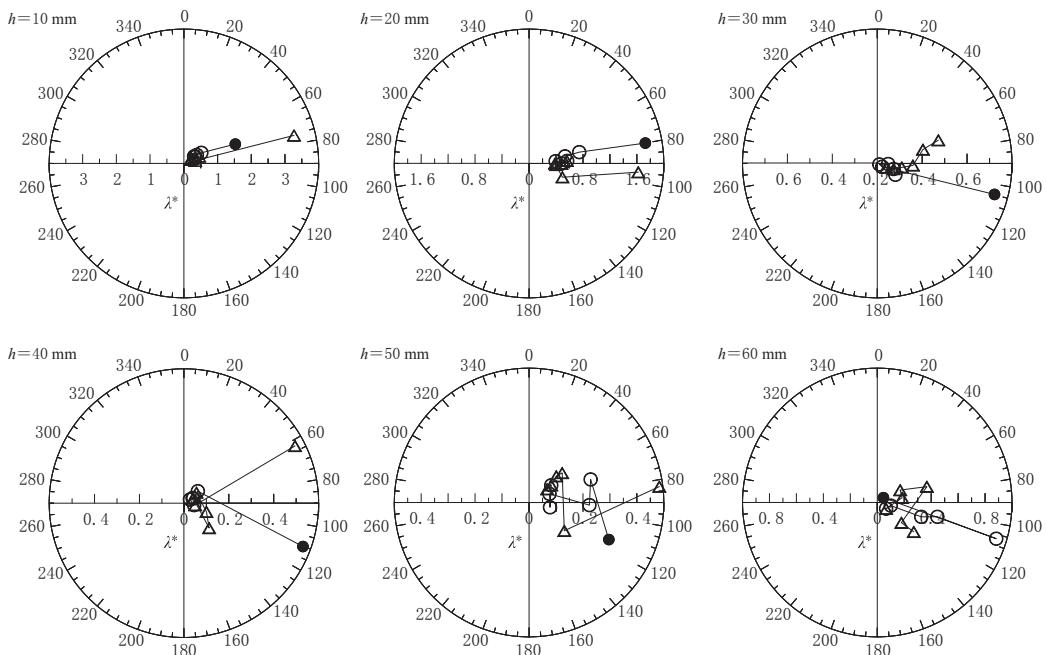


图 11 样品 I 在不同有效深度 h 处的各向异性系数 λ^* 和各向异性主轴方位角 α 随应力的变化图
空心圆、三角形和实心圆分别表示应力加、卸载过程及加压前(0 MPa)不同应力对应的 λ^* 和 α 值, 下同

Fig. 11 The changes of λ^* and α with stress for sample I at different effective depths h
Open circles, triangles and dots represent values of λ^* and α corresponding to different
stresses under loading, unloading and before loading, the same below

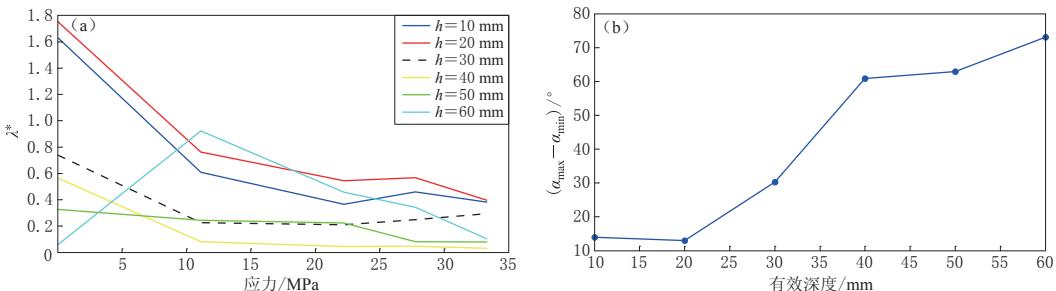


图 12 样品 I 在不同深度 h 处的视电阻率各向异性系数 λ^* 随应力的变化(a)和视电阻率
各向异性主轴方位角 α 的最大值与最小值之差随深度的变化(b)

Fig. 12 Variations of λ^* with stress curves at different depths of sample I (a),
variations of $\alpha_{\max} - \alpha_{\min}$ with depth curve of sample I (b)

图 13 给出了不同深度下样品 II 的 λ^* 和 α 随应力的变化图。可以看出, 样品 II 的视电
阻率各向异性与样品 I 存在某些相似的变化特征: 例如, 随着应力的增加, 样品 II 的视电
阻率各向异性系数 λ^* 总体减小; 在加载过程中, 不同应力下的最大与最小 λ^* 之差的最大
值出现在浅部; 卸载阶段的最大与最小 α 的差值几乎在所有有效深度上明显大于加载阶段的。
但是, 也存在与样品 I 不同的变化特征, 例如: 随深度的加深, 最大与最小 α 之差失去
了明显的趋势性特征; 卸载阶段的最大与最小 λ^* 的差值几乎在所有有效深度(除 10 mm 深

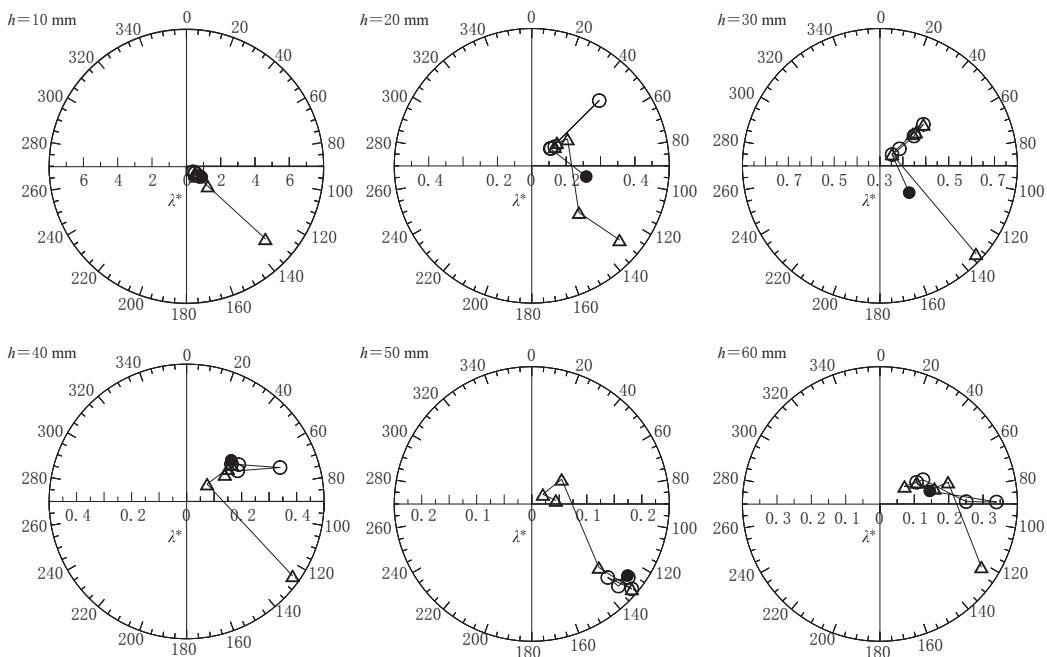


图 13 样品 II 在不同有效深度 h 处的各向异性系数 λ^* 和各向异性主轴方位角 α 随应力的变化

Fig. 13 The changes of λ^* and α with stress for sample II at different effective depths h

度外)上稍大于加载阶段的. 这可能是受样品 II 中高阻体的影响所致.

3 讨论与结论

前人对电阻率随应力变化的实验研究主要采用 4 个固定电极的对称四极测量系统, 所获得的电阻率值仅能反映岩样电性结构的纵向(一维)变化(Parkhomenko, Bondarenko, 1960; Brace *et al*, 1965; Yamazaki, 1965; Brace, Orange, 1966, 1968a, b; 陈大元等, 1983; 金耀等, 1983; 张金铸, 陆阳泉, 1983; 张天中等, 1985; 安金珍等, 1996; 陈峰等, 2000, 2002, 2003a, b, 2013). 本次实验中, 在每条测线上布设了至少 43 个电极, 隔离系数至少为 14, 在同一应力下可以获得至少几百个视电阻率值, 足以构建反映岩样横向和纵向电性结构的视电阻率图像. 由此可知, 研究重点应集中于视电阻率图像中应力所引起的视电阻率的区域性变化, 这亦是前人的实验研究工作中所欠缺的.

本实验使用人工样品的主要原因为: ① 干燥的天然岩石通常具有很高的电阻率值, 例如花岗岩、辉绿岩及石英和长石的电阻率分别约为 10^{10} , 10^8 和 $10^{12} \Omega \cdot \text{m}$ (Parkhomenko, Bondarenko, 1960), 导致直流电阻率仪重复测量的精度很差, 难以获得可靠的测量数据; ② 在天然岩石上布设电极非常困难, 容易导致电极因接触电阻太大而无法获得有效、可靠的视电阻率测量数据; ③ 本研究中虽然使用的是人工样品, 但随着应力的增加, 其表现出了与天然磁铁矿样品相似的视电阻率图像变化特征(Zhu *et al*, 2012), 表明人工样品的结果具有较好的外延性, 即本文的结果同样适用于天然岩石样品.

本文的实验结果表明: 无论是样品 I, 还是样品 II, 所有测线对应的 RRC 图像随着应力变化均呈现出了相同的变化趋势, 即随着应力的增加, RRC 图像中的 RDR 逐渐收缩,

而 RIR 逐渐扩张; 另外, 高阻体对其所在部位和附近区域的电阻率值增幅有较大影响, 对视电阻率图像的趋势性变化没有影响。Zhu 等(2012)曾获得了磁铁矿的视电阻率图像随着应力的增加, RDR 逐渐扩张, 而 RIR 逐渐收缩的结果。本文的结果看似与 Zhu 等(2012)的结果存在差异, 但实际上二者是一致的, 即视电阻率图像随着应力均出现了明显的趋势性变化。另外, 本文实验结果与冯锐等(2001)于 1998 年唐山 $M_L 4.4$ 和 $M_L 5.0$ 地震前在河北省昌黎台所观测到的特征非常相似, 这表明冯锐等(2001)在地震前观测到的电阻率图像的趋势性变化可以在实验室内重现, 进而表明电阻率图像的趋势性变化可以与地震、火山活动和大型地质构造运动相关联。

在本次实验中, 利用所获得的 6 个有效深度上的视电阻率数据对, 计算并绘制了不同深度下视电阻率各向异性系数 λ^* 和各向异性主轴方位角 α 随应力的变化图, 结果与陈峰等(2003b)一致, 即一般情况下, 对于原始电性各向异性的样品, 随着应力的增加, 各向异性程度降低(图 12a, b)。同时也获得了新的结果和认识: 随着单轴应力的增加, 裂隙主要在岩样的浅部产生和发展, 而在较深的部位裂隙产生和发展的速率相对较低; 在应力加载过程, 不同应力下的最大与最小 λ^* 之差最大值出现在浅部; 卸载阶段的最大与最小 α 的差值几乎在所有有效深度上明显大于加载阶段的差值。一些实例研究结果表明, 在唐山 $M_S 7.8$ 地震前后, 震中 140 km 范围内的地电阻率各向异性变化非常明显(毛桐恩等, 1995)。2002 年四川雅安陇西河峡谷的坡口滑坡发生前后测得的视电阻率各向异性系数 λ^* 和各向异性主轴方位角 α 均发生了显著的变化(安金珍等, 2008)。这表明, 本文的结果有助于解释和理解地震和大型地质构造运动引起的视电阻率及其各向性的变化特征, 且该方法可能成为目前地震电阻率观测方法的有益补充。

需要提及的是, 本文的研究结果是非常初步的。这是因为在研究中, 仅采用了固定速率的单轴加压方式而未考虑更加贴近地震孕育过程的加载方式, 例如非固定速率和应力反复加载, 而且加压间隔过大(约为破裂应力的 25%), 这导致了难以据此更加深入地研究和认识电阻率图像的细微特征, 这将在下一步工作中进行改善。

参 考 文 献

- 安金珍, 修济刚, 陈峰, 陈大元. 1996. 单轴压力下有补给水岩石电阻率变化各向异性研究[J]. 中国地震, 12(3): 300-306.
- An J Z, Xiu J G, Chen F, Chen D Y. 1996. Anisotropy studies of rock resistivity changes under uniaxial pressure and water replenishment[J]. *Earthquake Research in China*, 12(3): 300-306 (in Chinese).
- 安金珍, 周平根, 马麦宁, 陈峰, 董颖, 钟沛林. 2008. 用地电阻率探测和监测滑坡体实验[J]. 地震学报, 30(3): 254-261.
- An J Z, Zhou P G, Ma M N, Chen F, Dong Y, Zhong P L. 2008. Experiments on exploring and monitoring landslipmass using geoelectric resistivity observations[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 30(3): 254-261 (in Chinese).
- 陈大元, 陈峰, 王丽华. 1983. 单轴压力下岩石电阻率的研究: 电阻率的各向异性[J]. 地球物理学报, 26(增刊): 784-792.
- Chen D Y, Chen F, Wang L H. 1983. Studies on electrical resistivity of rocks: Its anisotropy[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 26(S): 784-792 (in Chinese).
- 陈峰, 修济刚, 安金珍, 廖椿庭, 陈大元. 2000. 岩石电阻率变化各向异性与微裂隙扩展方位的实验研究[J]. 地震学报, 22(3): 310-318.
- Chen F, Xiu J G, An J Z, Liao C T, Chen D Y. 2000. Research on dependence of resistivity changing anisotropy on

- microcracks extending in rock with experiment[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **22**(3): 310–318 (in Chinese).
- 陈峰, 安金珍, 廖椿庭. 2002. 弹性约束承载岩石电阻率变化形态研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, **38**(3): 427–430.
- Chen F, An J Z, Liao C T. 2002. Research on dependence of resistivity changing feature on axial load under elastic constraint with experiment[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, **38**(3): 427–430 (in Chinese).
- 陈峰, 安金珍, 廖椿庭. 2003a. 原始电阻率各向异性岩石电阻率变化的方向性[J]. 地球物理学报, **46**(2): 271–280.
- Chen F, An J Z, Liao C T. 2003a. Directional characteristic of resistivity changes in rock of original resistivity anisotropy [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **46**(2): 271–280 (in Chinese).
- 陈峰, 廖椿庭, 安金珍. 2003b. 剪切和摩擦滑动大模型的视电阻率变化幅度和各向异性[J]. 地球物理学报, **46**(5): 667–675.
- Chen F, Liao C T, An J Z. 2003b. Amplitude and anisotropy of apparent resistivity change in big models during shear and frictional slipping[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **46**(5): 667–675 (in Chinese).
- 陈峰, 马麦宁, 安金珍. 2013. 承压介质电阻率变化的方向性与主应力的关系[J]. 地震学报, **35**(1): 84–93.
- Chen F, Ma M N, An J Z. 2013. Relation between directional characteristics of resistivity changes and principal stress [J]. *Acta Seismologica Sinica*, **35**(1): 84–93 (in Chinese).
- 杜学彬, 薛顺章, 郝臻, 张世中. 2000. 地电阻率中短期异常与地震的关系[J]. 地震学报, **22**(4): 368–376.
- Du X B, Xue S Z, Hao Z, Zhang S Z. 2000. On the relation of moderate-short term anomaly of earth resistivity to earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **22**(4): 368–376 (in Chinese).
- 杜学彬, 阮爱国, 范世宏, 郝臻. 2001. 强震近震中区地电阻率变化速率的各向异性[J]. 地震学报, **23**(3): 289–297.
- Du X B, Ruan A G, Fan S H, Hao Z. 2001. Anisotropy of the variation rate of apparent resistivity near the epicentral region of strong earthquakes[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **23**(3): 289–297 (in Chinese).
- 杜学彬, 马占虎, 叶青, 谭大诚, 陈军营. 2006. 与强地震有关的视电阻率各向异性变化[J]. 地球物理学进展, **21**(1): 93–100.
- Du X B, Ma Z H, Ye Q, Tan D C, Chen J Y. 2006. Anisotropic changes in apparent resistivity associated with strong earthquakes[J]. *Progress in Geophysics*, **21**(1): 93–100 (in Chinese).
- 杜学彬, 刘君, 崔腾发, 范莹莹, 安张辉, 闫睿, 王丽. 2015. 两次近距离大震前成都台视电阻率重现性、相似性和各向异性变化[J]. 地球物理学报, **58**(2): 576–588.
- Du X B, Liu J, Cui T F, Fan Y Y, An Z H, Yan R, Wang L. 2015. Repeatability, similarity and anisotropy changes in apparent resistivity recorded by station Chengdu at near distances before two great earthquakes[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **58**(2): 576–588 (in Chinese).
- 冯锐, 郝锦绮, 周建国. 2001. 地震监测中的电阻率层析技术[J]. 地球物理学报, **44**(6): 833–842.
- Feng R, Hao J Q, Zhou J G. 2001. Resistivity tomography in earthquake monitoring[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **44**(6): 833–842 (in Chinese).
- 郝锦绮, 冯锐, 周建国, 钱书清, 高金田. 2002. 岩石破裂过程中电阻率变化机理的探讨[J]. 地球物理学报, **45**(3): 426–434.
- Hao J Q, Feng R, Zhou J G, Qian S Q, Gao J T. 2002. Study on the mechanism of resistivity changes during rock cracking[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **45**(3): 426–434 (in Chinese).
- 金耀, 张天中, 华正兴, 徐明发, 黄平章. 1983. 单轴压缩下多裂隙含水岩样电阻率变化与体积应变[J]. 地震学报, **5**(1): 99–106.
- Jin Y, Zhang T Z, Hua Z X, Xu M F, Huang P Z. 1983. The electrical resistivity changes and volumetric strain of water-bearing cracked rock samples under uniaxial compression[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **5**(1): 99–106 (in Chinese).
- 康云生, 安海静, 马可兴, 谭大诚. 2013. 天水地电阻率地表与井下多种观测方式的试验分析[J]. 地震工程学报, **35**(1): 190–195.
- Kang Y S, An H J, Ma K X, Tan D C. 2013. Test analysis on geoelectrical resistivity observation combining the surface and deep-well methods at Tianshui seismic station in Gansu Province[J]. *China Earthquake Engineering Journal*,

- 35(1): 190–195 (in Chinese).
- 毛桐恩, 王铁城, 姚家榴, 卢军, 张洪魁. 1995. 唐山地震地电阻率各向异性变化特征研究[J]. 地震学报, 17(4): 505–510.
- Mao T E, Wang T C, Yao J L, Lu J, Zhang H K. 1995. The characteristics of anisotropy changes in earth resistivity of Tangshan $M_{S7.8}$ [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 17(4): 505–510 (in Chinese).
- 毛桐恩, 胥广银, 范思源, 赵明, 孙景芳. 1999. 地电阻率各向异性度的动态演化图象与地震孕育过程[J]. 地震学报, 21(2): 180–186.
- Mao T E, Xu G Y, Fan S Y, Zhao M, Sun J F. 1999. Heterogeneity of dynamic evolution pattern of geoelectric resistivity and the seismogenic process[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 21(2): 180–186 (in Chinese).
- 钱家栋, 赵和云. 1988. 地电阻率的数值模拟和多极距观测系统[J]. 地震学报, 10(1): 77–88.
- Qian J D, Zhao H Y. 1988. Earth resistivity modelling and observational system with multi-separation of electrodes[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 10(1): 77–88 (in Chinese).
- 钱家栋, 马钦忠, 李劭稼. 2013. 汶川 $M_{S8.0}$ 地震前成都台 NE 测线地电阻率异常的进一步研究[J]. 地震学报, 35(1): 4–17.
- Qian J D, Ma Q Z, Li S N. 2013. Further study on the anomalies in apparent resistivity in the NE configuration at Chengdu station associated with Wenchuan $M_{S8.0}$ earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 35(1): 4–17 (in Chinese).
- 苏鸾声, 王邦本, 夏良苗, 李验轩. 1982. 井下电极观测地电阻率排除地面干扰的实验[J]. 地震学报, 4(3): 274–276.
- Su L S, Wang B B, Xia L M, Li Y X. 1982. Elimination of surface disturbances in earth-resistivity measurement by lowering the electrodes in shallow wells[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 4(3): 274–276 (in Chinese).
- 汪雪泉, 郑兆蕊, 薛维龙. 2002. 安徽嘉山台的多极距电阻率观测[J]. 地震学刊, 22(1): 1–4.
- Wang X Q, Zheng Z B, Xue W L. 2002. Multiple polar distance resistivity observation at Jiashan, Anhui seismic station [J]. *Journal of Seismology*, 22(1): 1–4 (in Chinese).
- 王兰炜, 朱旭, 朱涛, 张世中, 刘大鹏, 胡哲, 张宇. 2011. 地电阻率多极距观测系统及试验研究[J]. 地震, 31(1): 20–31.
- Wang L W, Zhu X, Zhu T, Zhang S Z, Liu D P, Hu Z, Zhang Y. 2011. Multi-separation array geo-electrical resistivity observation system and its experimental observation[J]. *Earthquake*, 31(1): 20–31 (in Chinese).
- 薛顺章, 温新民, 董永德, 梁子彬, 张庆渊, 赵和云. 1994. 地电阻率预报地震新方法的研究[J]. 地震学报, 16(2): 227–234.
- Xue S Z, Wen X M, Dong Y D, Liang Z B, Zhang Q Y, Zhao H Y. 1994. Study on a new method of earthquake prediction using geoelectric resistivity[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 16(2): 227–234 (in Chinese).
- 张金铸, 陆阳泉. 1983. 不同三轴应力条件下岩石电阻率变化的试验研究[J]. 地震学报, 5(4): 440–445.
- Zhang J Z, Lu Y Q. 1983. An experimental study on the variation of rock resistivity under triaxially different stresses [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 5(4): 440–445 (in Chinese).
- 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[J]. 地震学报, 7(4): 428–433.
- Zhang T Z, Hua Z X, Xu M F. 1985. Electrical resistivity changes in rock samples during fracture and frictional sliding at 1.2 Kb confine pressure[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 7(4): 428–433 (in Chinese).
- 张学民, 李美, 关华平. 2009. 汶川 8.0 级地震前的地电阻率异常分析[J]. 地震, 29(1): 108–115.
- Zhang X M, Li M, Guan H P. 2009. Anomaly analysis of earth resistivity observations before the Wenchuan earthquake [J]. *Earthquake*, 29(1): 108–115 (in Chinese).
- 赵和云, 钱家栋. 1987. 郫县台多极距观测资料的反演和分析[J]. 中国地震, 3(增刊): 73–78.
- Zhao H Y, Qian J D. 1987. Inversion and analysis of data of temporal change in apparent resistivity with multi-separations in Pixian stations, Sichuan Province[J]. *Earthquake Research in China*, 3(S): 73–78 (in Chinese).
- 周启友, 杭悦宇, 刘汉乐, 戴水汉, 徐建平. 2009. 饱水和排水过程中岩石电阻率各向异性特征的电阻率成像法研究 [J]. 地球物理学报, 52(1): 281–288.

- Zhou Q Y, Hang Y Y, Liu H L, Dai S H, Xu J P. 2009. The anisotropic properties of rock resistivity during saturation and desaturation processes revealed by electrical resistivity tomography[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(1): 281–288 (in Chinese).
- 朱涛. 2013. 汶川 $M_{\text{S}}8.0$ 地震前区域性地电阻率异常初步研究[J]. *地震学报*, **35**(1): 18–25.
- Zhu T. 2013. Preliminary study on regional geo-resistivity anomaly before the Wenchuan $M_{\text{S}}8.0$ earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **35**(1): 18–25 (in Chinese).
- Brace W F, Orange A S, Madden T R. 1965. The effect of pressure on the electrical resistivity of water-saturated crystalline rocks[J]. *J Geophys Res*, **70**(22): 5669–5678.
- Brace W F, Orange A S. 1966. Electrical resistivity changes in saturated rock under stress[J]. *Science*, **153**(3743): 1525–1526.
- Brace W F, Orange A S. 1968a. Electrical resistivity changes in saturated rocks during fracture and frictional sliding[J]. *J Geophys Res*, **73**(4): 1433–1444.
- Brace W F, Orange A S. 1968b. Further studies of the effects of pressure on electrical resistivity of rocks[J]. *J Geophys Res*, **73**(16): 5407–5420.
- Diaferia I, Barchi M, Loddo M, Schiavone D, Siniscalchi A. 2006. Detailed imaging of tectonic structures by multiscale earth resistivity tomographies: The Colfiorito normal faults (central Italy)[J]. *Geophys Res Lett*, **33**(9): L09305. doi:10.1029/2006GL025828.
- Jackson D B, Kauahikaua J, Zablocki C J. 1985. Resistivity monitoring of an active volcano using the controlled-source electromagnetic technique: Kilauea, Hawaii[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **90**(B14): 12545–12555.
- Kayal J R, Banerjee B. 1988. Anomalous behaviour of precursor resistivity in Shillong area, NE India[J]. *Geophys J Int*, **94**(1): 97–103.
- Kurite K. 1986. How can we identify location of a fracture plane? Anisotropy of electrical conductivity and seismic velocity in dilatancy[J]. *Earthq Predict Res*, **4**(1/2): 39–45.
- Parkhomenko E I, Bondarenko A T. 1960. Effect of uniaxial pressure on electrical resistivity of rock[J]. *Bull Acad Sci USSR, Geophys Ser*, **2**: 326.
- Rikitake T, Yamazaki Y. 1969. Electrical conductivity of strained rocks, the 5th paper, residual strains associated with large earthquakes as observed by a resistivity variometer[J]. *Bull Earthq Res Inst*, **47**(1): 99–105.
- Stopinski W, Teissseyre R. 1982. Precursory rock resistivity variations related to mining tremors[J]. *Acta Geophys Pol*, **30**(4): 293–320.
- Utada H. 2003. Interpretation of time changes in the apparent resistivity observed prior to the 1986 eruption of Izu-Oshima volcano, Japan[J]. *J Volcanol Geoth Res*, **126**(1/2): 97–107.
- Yamazaki Y. 1965. Electrical conductivity of strained rocks, the first paper, laboratory experiments on sedimentary rocks [J]. *Bull Earthq Res Inst*, **43**(4): 783–802.
- Zhu T, Zhou J G, Hao J Q. 2012. Experimental studies on the changes in resistivity and its anisotropy using electrical resistivity tomography[J]. *Int J Geophys*, **2012**: 142069. doi:10.1155/2012/142069.