

文章编号: 0253-3782(2000)03-0305-05

对样品含水结构的电阻率 CT 研究^{*}

郝锦绮^{1,3)} 冯 锐^{2,3)} 李晓芹^{1,3)}
周建国^{1,3)} 钱书清^{1,3)} 高金田^{1,3)}

- 1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所
2) 中国北京 100045 中国地震局地震数据信息中心
3) 中国北京 100081 中国地震局构造物理开放实验室

摘要 采用高密度的电极阵列, 对具含水结构样品的视电阻率值进行了测定, 并重建了二维电阻率的图象。所得一系列 CT 图象揭示了样品内部由于裂隙和流体造成的真电阻率分布及其变化。这一方法用于岩石电性模拟实验, 使导致样品电性变化的裂隙充水过程得以清楚地揭示。

关键词 电阻率 层析成像 模拟实验 含水状态

中图分类号: P315.72⁺2

文献标识码: A

引言

实验室中对一定物理条件下模拟样品电性变化的研究, 是了解地震孕育过程中震源区物质组成、运移和演化的重要手段, 也是电法监测地震野外实验的重要补充。已有的模拟实验表明, 在受压破裂前水饱和完整岩样的视电阻率可下降一个量级(Brace, 1975), 而且在应力增大到约 50% 的破裂应力时岩样的体应变会出现急剧的增大, 此结果成为岩石扩容模式震兆机理的一个重要依据。对米级大岩样的压力实验, 还发现了样品在不同部位上的视电阻率会出现时间变化上的差异(陆阳泉等, 1998); 在有补给水的条件下对水饱和样品加压的实验中, 进一步观察到了电阻率变化的方向性差异(安金珍等, 1996)。这些实验的结果多被解释为岩样受压过程中裂隙和其中充填物(气体、液体)的改变。实验的不足之处在于, 对岩样电阻率的探测, 迄今还都在采用着一组或几组的常规四极法进行, 所得数量有限的视电阻率观测值只能用作定性的分析。这不仅难以满足实验的要求, 也不利于先进探测、分析技术的应用和推广。为了能揭示岩样视电阻率变化的微观原因和物理图象, 直观地分析引起观测量变化的裂隙和流体的分布状态, 利用高密度电极阵列进行电阻率观测, 采用 CT 技术对样品内部结构进行剖面成像或许是一种最佳的选择, 因为人们对问题的分析可以由此进入到微观的层次, 所依据的 CT 图象又是样品的真电阻率分布值。

近几年, 电阻率层析成像作为一种新技术, 已经用于对地下构造实现二维、三维成像

* 地震科学联合基金重点课题(95-07-434)和中国地震局“九五”重点课题(95-04-03-02)以及中国地震局构造物理开放实验室共同资助。中国地震局地球物理研究所著 No 00AC1015。

1999-09-02 收到初稿, 2000-02-28 收到修改稿并决定采用。

(Shima, 1992), 我国还开展了用于地震监测的野外实验(冯锐等, 1998). 初步结果认为, 孕震区裂隙和导电结构的变化是电阻率前兆的主要影响因素. 与此相应, 电阻率 CT 理论计算的进展, 已为模拟样品内部电阻率(裂隙)分布的 CT 成像创造了条件. Kumata 等(1995)首先在水槽实验的 NaCl 溶液中用棱柱状铜棒来模拟岩样中的裂隙, 他们布设了 61 个电极测试其电位场, 继而重建出二维电阻率分布图象. 但国内外对于固态样品的电阻率 CT 实验还比较少见, 这同实验技术上的种种困难有关.

应该指出, 固态样品的 CT 成像之所以引起人们的兴趣有两个重要的原因. 其一, 这种技术的发展能为实验观测技术拓宽道路. 在岩样加压、升温和充水的条件下可望给出样品内部结构变化的动态图象, 而且其结果是较精确和定量的; 其二, 便于推广到工程探测中. 人们可以经过较小改动, 把这一技术直接应用到对桥墩、桩基、立柱、涵管或古建筑物的无损探伤中. 它的探测尺度比工业 CT 机的样品(直径范围 10~400 mm)要大, 比地学 CT 的(一般 20 m~1 km)要小, 填补了空白段.

当然, 对固态样品进行电阻率层析成像的理论难度很大, 随着供电时沿物体表面和内侧出现旁侧电流, 视电阻率的正演计算变成三维问题. 作为整个研究的第一阶段结果, 本研究在理论计算上仍暂采用二维模型. 工作中我们对微小电极的埋设、供电/测量系统的转换以及覆盖测量等等技术环节做了大量的试验与摸索, 已可通过逐渐加大的极距, 实施从样品表面至深处的逐层扫描, 取得了主要反映二维横剖面构造的视电阻率值. 简言之, 本研究的目的为, 用阵列电极作电阻率观测, 来研究不同含水状态下样品的电阻率变化; 经反演计算得到样品内部真电阻率的分布图象, 从而揭示样品的微观结构分布.

1 实验模型和观测系统

由电阻率较低的固态人造材料制成的圆柱形样品直径为 200 mm, 高 120~580 mm, 在其内部构造了与样品轴相平行的圆柱形或长方形孔隙的异常结构, 用以模拟岩体内部的裂隙、包裹体和岩脉. 共完成了对于内含单个、两个或 3 个异常体的 10 种模型实验, 异常体的最小尺度从 15 mm 逐渐缩小到 3 mm. 在较低电阻率($4 \times 10^6 \Omega \cdot \text{m}$)的模型材料背景上, 通过使异常体内部处于高电阻率的中空状态、填充有机玻璃(电阻率为 $1 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{m}$)以及在空隙中注入低电阻率($0.2 \Omega \cdot \text{m}$)的盐溶液, 来实现异常体的电性反差变化. 测试结果表明, 样品材料经水饱和后电阻率为 $585 \Omega \cdot \text{m}$, 经饱和盐溶液浸透后电阻率则为 $18 \Omega \cdot \text{m}$. 作为一个例子, 将 B_{10} 模型的结构在图 1 中给出.

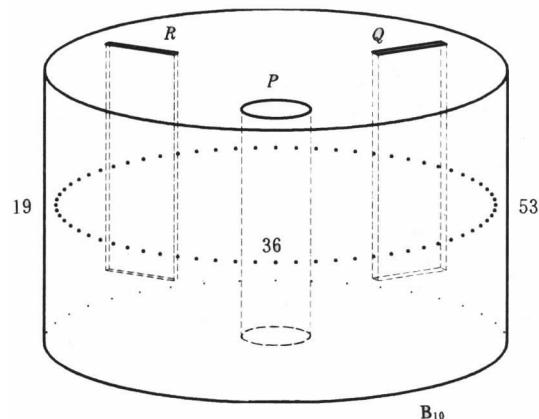


图 1 含有 3 个异常体结构的 B_{10} 模型横断面(按模型比例画出). 图中 P 和 Q 为中空/充盐水状态, R 为充满高电阻率的有机玻璃; 外圈处的黑点为电极, 数字为电极编号

在圆柱样品中部的圆形横截面四周均匀布设阵列电极共 108 个。利用 MIR 直流电测仪和 MIS 电极转换器在 108 个电极间进行扫描, 做温纳或单极-单极测量。为在电阻率较高的样品上实现高密度快速电性测量, 曾对仪器做了一系列改进: 利用 1 Hz 正负方波做交变供电, 以减小电极的极化影响; 将输入阻抗提高到 $80 \text{ M}\Omega$, 改善了电位及电流的测量精度; 利用微机控制多路电极转换器实现各电极间供电和测量功能的自动转换; 在仪器控制软件上亦做了多项改进以适应电阻率 CT 的单极-单极、温纳等不同方法的测量要求。经以上改进和在试验模型上的多次测试, 已可实现在固态样品上 108 个电极之间按要求进行各种组合的扫描性测量。

2 数据处理

目前暂引用二维电阻率图象重建方法对视电阻率实测值进行反演。在预处理中用统计平滑方法消除观测数据中个别偏差过大的点。用 Zohdy 方法 (Zohdy, 1989; Lock, Barker, 1995) 构制出似断面图; 采用有限单元法进行正演计算。然后采用 RBPT(电阻率反投影技术)或 Zohdy 的比例法进行反演迭代, 得到各单元的真电阻率值, 从而构成圆柱体中部横断面上的 CT 图象。有关对圆柱体电阻率成像的计算问题将另文讨论。

3 结果与分析

在干燥的状态下对 10 个模型进行了测试。现以 B_{10} 模型为例(图 1), P 和 Q 为中空状态, R 内则嵌入高电阻的有机玻璃, 沿圆环的电极数为 69 个, 在一周电极的头、尾部都外延有重复的观测电极以便于计算, 总观测电极数为 108 个。电极间距为 9 mm, 埋深 5 mm。在图 2 中已经标明了人工异常体 P 、 Q 和 R 的位置。其中图 2a 是人造材料未完全固结、样品潮湿时的成像结果, 在低阻分布的背景下, 围绕着异常体出现了高阻区, 在模型四周含水量大的区域出现了更低阻区。图 2b 是人工样品固结后的成像结果。在两个为模拟裂隙和岩脉的长条形异常体 Q 、 R 处出现了高阻区, 比背景均值 ($30 \Omega \cdot \text{m}$) 高出 1~3 倍, 尤以几何尺寸较大的异常体 Q 最为突出。我们注意到, 对异常体 R 的成像位置比真实的稍偏深。

随后在空腔 P 和 Q 中注入饱和盐溶液, 试图改变它们的电性状况并与高阻值的有机玻璃异常体 R 进行对比。图 2c 是刚注入盐溶液后的成像结果, 异常体 P 和 Q 处的电阻率均比注盐溶液之前大幅度下降, P 区的电阻率由 $30 \Omega \cdot \text{m}$ 降至 $10 \Omega \cdot \text{m}$; Q 区的由 $90 \Omega \cdot \text{m}$ 降至 $30 \Omega \cdot \text{m}$; 而有机玻璃 R 处的电阻率值未变。随后, 继续在不同时刻进行了阵列电极的扫描性测量。从重建出的一系列电阻率 CT 图象可看到, 在盐水向围岩介质中扩散的同时, 样品材料的固化程度也变得更高, 呈现出一幅幅动态变化的图样。图 2d 是在注入盐溶液 5 h 之后的 CT 图象, 此时异常体 P 的低阻区和异常体 R 的高阻区更为明显, 介质内部电阻率的非均匀性亦变得突出起来。将重建出的图象与真实模型相对比, 正负异常区的水平(横向)位置均是正确的, 说明本研究中由高密度阵列电极构成的观测系统和反演方法能够揭示出样品内部的异常体, 技术途径是可行的。显然目前已经达到的对模拟破碎带宽度的最高分辨率约为电极间距的 $\frac{1}{3}$ (水平方向)。但从对异常体成像的深度来看, 低阻体的位置偏浅, 高阻体的偏深, 其偏差量同电阻率异常体的大小和数值有关。如何改进成像的精度还有待今后的深入工作。

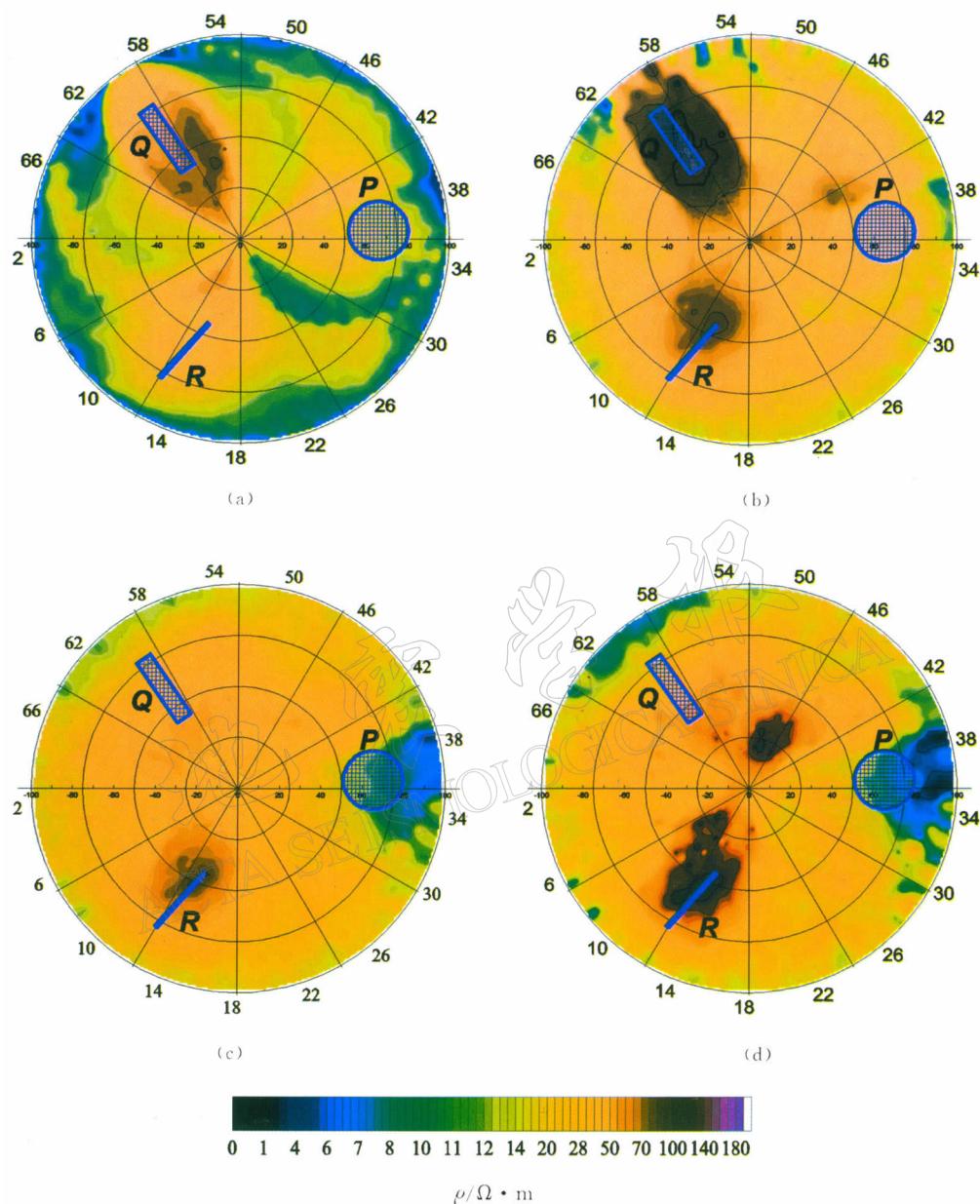


图 2 B_{10} 模型在实验不同阶段的电阻率 CT 图象
 (a) 人造材料尚未完全固化, 模型潮湿时; (b) 模型已固结;
 (c) 在 P 、 Q 两空腔注入盐溶液后; (d) 在(c)状态之后 5 h, 盐溶液逐渐扩散的结果

4 讨论与结论

本研究通过所设计的一系列观测和层析成像的技术方法, 达到了预期的目的, 对具有较大电性反差的含水结构固态样品重建出了真电阻率分布的图象。

实验结果表明, 目前所采用的数据处理和反演方法, 所得的电阻率 CT 图象, 对于样品中的裂隙、裂隙中的流体及其它有着高电性反差的介质具有一定的分辨力, 技术途径被证明是可行的。当然, 在图象重建的过程中我们也注意到, 正负异常区的水平位置尽管在 CT 图象中有良好的显示, 但深度上还存在一定量的偏差, 且反演得到的真电阻率的数值还不能与真实模型的参数达到良好的吻合。这有待于今后理论研究工作的重视。我们期望通过这一技术和理论方法的进一步改进, 对于震源及其邻近区域裂隙闭合或生成、流体的进入或流出等震源物理过程引起的电性前兆现象, 深化认识。

参 考 文 献

- 安金珍, 修济刚, 陈峰, 等. 1996. 单轴应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
 冯锐, 李晓芹, 郝锦琦, 等. 1998. 地震监测中的电阻率层析技术[A]. 见: 陈运泰主编. 中国地震学会第七次学术大会
 论文摘要集[C]. 北京: 地震出版社, 122
 陆阳泉, 赵家骝, 钱家栋, 等. 1998. 利用大样本岩石破裂实验模拟扩容-扩散孕震模式的某些结果(一). 地震学报, **20**
 (2): 194~200
 Brace W F. 1975. Dilatancy-related electrical resistivity changes in rocks[J]. *Pure Appl Geophys*, **113**: 207~217
 Kumata M, Ii H, Chiba A. 1995. Physical model simulation test for resistivity tomography[A], *Proceedings of 3rd
 SEGJ / SEG International Symposium*[C]. Tokyo, Japan. 343~350
 Lock M H, Barker R D. 1995. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections[J]. *Geophysics*, **60**
 (6): 1 682~1 690
 Shima H. 1992. 2-D and 3-D resistivity image reconstruction using crosshole data[J]. *Geophysics*, **57**(10): 1 270~1 281
 Zohdy A A R. 1989. A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding Curves[J].
Geophysics, **54**, (2): 245~253

RESISTIVITY TOMOGRAPHY STUDY ON SAMPLES WITH WATER-BEARING STRUCTURE

Hao Jinqi^{1, 3)} Feng Rui^{2, 3)} Li Xiaoqin^{1, 3)}
 Zhou Jianguo^{1, 3)} Qian Shuqing^{1, 3)} Gao Jintian^{1, 3)}

- 1) Institute of Geophysics, China Seismological Bureau, Beijing 100081, China
 2) National Center for Seismic Data and Information, China Seismological Bureau, Beijing 100045, China
 3) Laboratory of Tectonophysics, China Seismological Bureau, Beijing 100081, China

Abstract The apparent resistivity of the samples with water-bearing configuration was measured and 2-D resistivity images of these samples were reconstructed then. The obtained series of tomograms reveal the distribution and its variation of true resistivity within the samples caused by the changes of crack and liquid distribution. Applying this method to the simulation experiment on the electrical properties of rocks, the fracturing and water filling process, which produces the electrical changes, can be brought to light clearly.

Key words resistivity tomography simulation experiment water-bearing state