

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)^{*}

陆阳泉¹⁾ 赵家骝²⁾ 钱家栋²⁾ 王玉祥¹⁾ 刘建毅¹⁾

1) 中国兰州 730000 国家地震局兰州地震研究所

2) 中国北京 100036 国家地震局分析预报中心

摘要 用采自现场的 500 mm×500 mm×1 000 mm 的天然灰岩, 在注水条件下模拟扩容-扩散(D-D)孕震模式, 并以多种监测手段追踪受载岩石样品从变形、微裂到大破裂全过程有关的物理场的时空演化特征。分析视电阻率结果表明: ① 受载岩石从微裂到大破裂全过程与电阻率前兆的时空演化进程基本吻合; ② 电阻率前兆的时间进程具有“阶段性”, 空间分布具有“差异性”; ③ 岩石大破裂前观测到明显的“趋势”异常和“短期”前兆, 并发现部分似可被确认为“临震”异常的电阻率前兆。电阻率的变化和分布特征似乎显示了与岩石样品受载过程的膨胀现象有某种内在联系, 但未找到岩石膨胀的直接证据。最后, 从理论上探讨了受载岩石样品电阻率变化的机理。

主题词 岩石破裂试验 视电阻率 D-D 孕震模式 差异性 阶段性

引言

为了探索地震孕育理论及其前兆机理, 1972 年美国学者努尔以土力学和岩石力学扩容概念为基础, 首先提出了地震孕育的膨胀-扩散(D-D)模式(Nur, 1972)。之后, 肖尔茨等又进一步把这种模式用于解释多种地震前兆现象(Scholz *et al.*, 1973)。但是迄今为止, 这个模式及其所预言的前兆现象还没有在实验室得到验证。为此, 我们同俄罗斯科学院合作, 开展了一次大样本岩石破裂实验, 其目的是考察注水条件下岩石的破裂发展过程及其相应的前兆机理。直接用实验方法检验地震孕育模式, 在国内外还是第一次。众所周知, D-D 孕震模式特别强调水在孕震过程中的重要作用, 而岩石电阻率变化与岩石含水率的变化密切相关。因此, 本文首先对视电阻率测试结果作较深入地分析。限于篇幅, 其它观测资料将另文讨论。

1 实验概述

实验样品为采自野外现场的新鲜灰岩, 加工成 500 mm×500 mm×1 000 mm 的规则试件。为了能保证在样品中心产生内破裂和膨胀区, 在样品中部与轴压约 45°方向预制有 7

* 国家地震局“八五”攻关项目(85-04-04)。

1997-01-22 收到初稿, 1997-07-21 收到修改稿并决定采用。

个钻通的孔, 孔的直径为 18 mm。在岩石顶面中心开有孔径为 10 mm、孔深 300 mm 的进水孔, 以提供岩石受载膨胀后维持孔隙压力所需的水源。在实验前 20 小时和整个实验过程中, 以常压自动向孔中连续注水, 然后用 5 万吨压力机纵向分段线性加载—停载—再加载循环进行, 直到岩石破坏为止, 持续时间约 9 个小时。主要观测方法有: 18 通道直流电法; 多路径超声波透视; 8 通道声发射波形采集; 双通道声发射波形采集和 6 通道声发射模拟记录; 36 通道交流电法; 应力、总变形和多点局部应变(应变花)测量(图 1)。

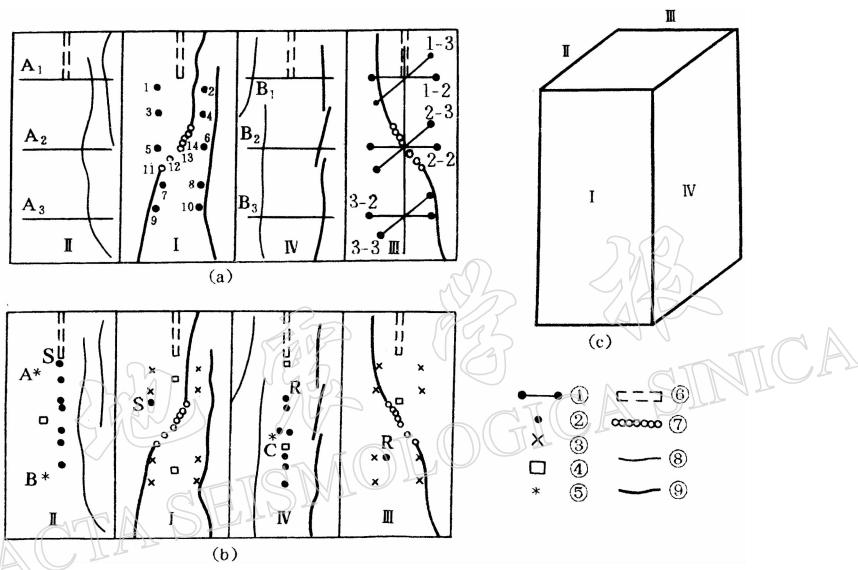


图 1 各测试方法传感器分布图。(a) 电法测量电极分布(图中 A_1 , A_2 , A_3 , B_1 , B_2 , B_3 为交流供电电极; 1~14 为交流测量电极); (b) 超声波、声发射探头分布图; (c) 各观测面位置立体示意图

- ① 直流电阻率测线;
- ② 超声波(S: 声发射源; R: 接收传感器);
- ③ 8 通道声发射接收传感器;
- ④ 6 通道声发射接收传感器;
- ⑤ A, B, C 双通道声发射波形采集声发射源;
- ⑥ 注水孔;
- ⑦ 中心排孔;
- ⑧ 原生裂纹;
- ⑨ 破裂后的裂纹

2 主要结果

2.1 应力-应变测试结果

图 2 是轴向应力-应变关系曲线。应力由加载系统的压力表读数换算得出; 总变形由置于压机上下顶板之间的 3 个千分表直接量测, 分别读取第 I, II, III 面的纵向变形值。表 1 给出了轴向压力和变形值。

2.2 视电阻率观测结果

在岩石样品第 III 面的上、中、下 3 个部位分别布置了 3 个测点的直流电法, 测线方向分别与压力方向平行、垂直和 45° 斜交(图 3)。图 4 是上、中、下 3 个测点所有测线上观测

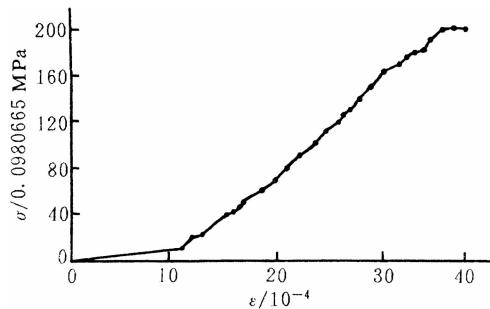


图 2 轴向应力-应变曲线

表 1 灰岩样品轴向压力和轴向位移数据

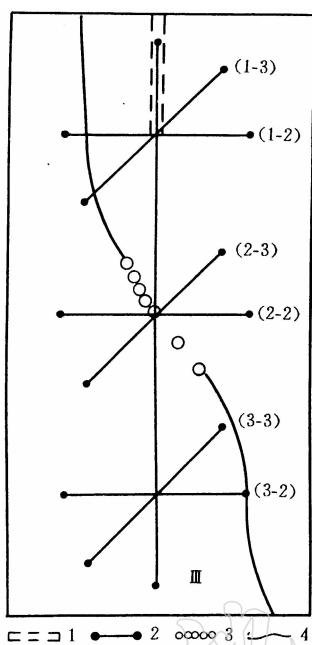


图 3 对应图 1a 第Ⅲ面直

流电法测线布置图

1. 注水孔; 2. 测线编号; 3. 中心排孔号; 4. 样品破裂后的裂逢

到的电阻率变化结果。纵坐标是电阻率实测值 ($\Omega \cdot m$)，横坐标为相对时间，时间的推移与加载进程相一致。图 5 是将上、中、下 3 个测点与压力方向垂直和斜交两个测道的电阻率归一后的相对变化结果。横坐标为相对时间，纵坐标为电阻率相对变化百分比，箭头指示岩石大破裂发生的时间。视电阻率观测结果显示出下述特点：① 从图 5 可以看出，电阻率变化大致可分为两部分：19 时以前的平缓变化和 19 时后的急剧变化；② 在平缓变化部分，总的来说显示了缓慢下降的趋势，但不同部位的测点其下降幅度各异：最大的下降在中部测点上，达 15%；上下两个测点分别为 5% 和 10%；③ 在急剧变化部分显示了相对于平缓变化部分大得多的变化幅度，并且各部位测点的情况无论是幅度还是形态都差异甚大：上中两个部位的电阻率由 19 时前的下降趋势转为上升；而下部测点的电阻率则继续下降，其幅度比 19 时前的平缓部分还要大；④ 在样品临近大破裂前，中部测点上的电阻率由大幅度上升再次转为下降。

时:分	载荷 $\sigma/0.0980665 \text{ MPa}$	形变 $\Delta L/\text{mm}$			备注
		I	II	III	
11:15	0	0	0	0	S
11:42	5	0.02	1.09	1.05	
11:45	10	1.05	1.15	1.18	
11:52	20	1.19	1.23		E
12:22	22	1.30	1.30		S
12:40	40	1.57	1.52		E
13:10	41	1.61	1.55		S
13:22	50	1.72	1.66		
13:35	60	1.87	1.79	1.83	E
14:05	60	1.90	1.82	1.87	S
14:20	70	2.01	1.92	1.98	
14:31	80	2.10	2.01	2.09	E
14:45	80	2.13	2.03	2.11	
14:58					S
15:13	90	2.25	2.15	2.23	
15:30	100	2.37	2.26	2.34	E
15:45	99	2.38	2.27		
16:01					S
16:19	110	2.49	2.38	2.46	
16:37	120	2.61	2.48	2.59	E
16:52	122	2.65	2.52	2.60	
17:06	122				S
17:21	130	2.72	2.59	2.69	
17:36	140	2.82	2.69	2.78	E
17:51	141	2.85	2.72	2.80	
18:07					S
18:17	150	2.94	2.80	2.88	
18:30	160	3.04	2.90	2.99	E
18:45	160.5	3.09	2.93	3.02	
19:06					S
19:18	170	3.22	3.06	3.21	
19:25	178	3.28	3.12	3.28	
19:30	180	3.34	3.18	3.34	E
19:45	182	3.39	3.22	3.40	
20:00	182	3.42	3.26	3.42	S
20:12	190	3.48	3.32	3.49	
20:24	200	3.61	3.44	3.62	E
20:34	201.5	3.68	3.51	3.70	
20:50	201	3.81	3.62	3.82	
20:56					S
21:04	204				失稳破坏

注：S 为开始加载，E 为结束(暂停)加载。

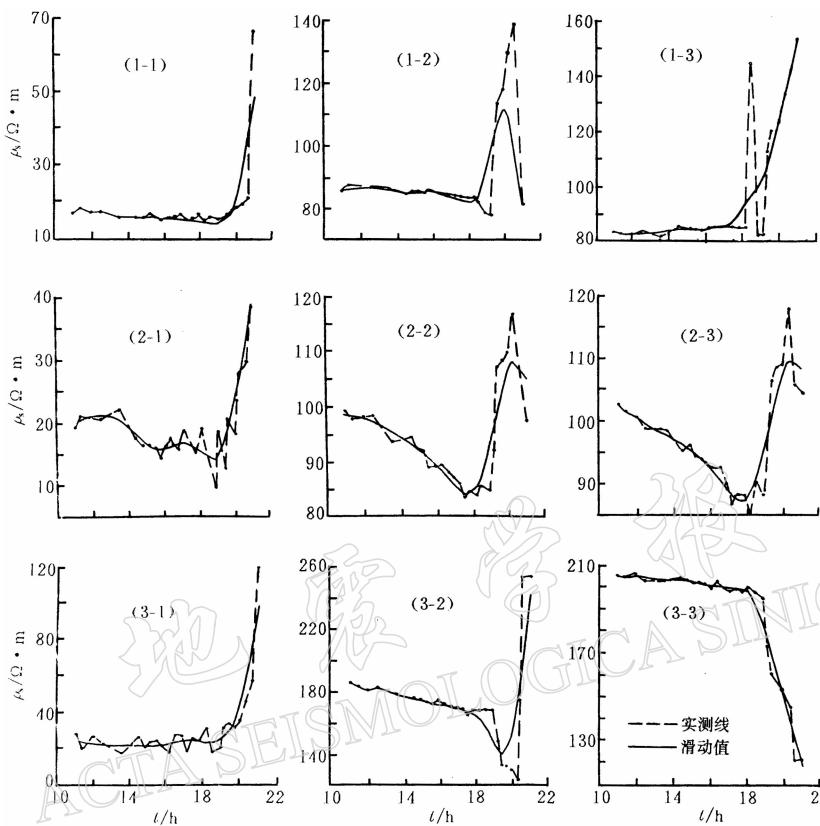


图4 各测点视电阻率值(图中曲线编号与图3测线号相对应)

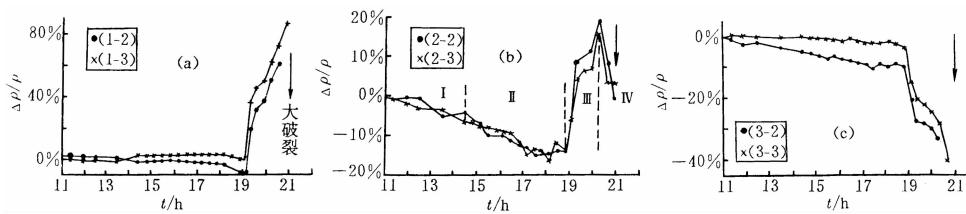


图5 直流电阻率随加载时间的变化(图中箭头表示样品大破裂时间, 曲线编号与图3测线号相对应). (a) 上部; (b) 中部; (c) 下部

由表1可见, 在19时前后应力水平正好达到破坏应力的80%左右。注意到这一点, 则实验结果中电阻率变化的全过程表现是很有意思的。为此, 我们将在下面着重进行分析。

3 初步分析

3.1 电阻率变化的时空分布特征

3.1.1 电阻率变化的基本形态

与加载过程相关联的视电阻率变化的基本形态表现为, 达到破坏应力80%之前的较长

时间的平稳下降，以及在接近破坏条件(高应力状态)下的剧烈变化。19时是电阻率随时间变化的一个非常重要的转折点，这一时刻似乎反映了受载岩石样品内部结构也开始发生了重大变化。

3.1.2 电阻率随时间变化的阶段性

在整个加载直到破坏的全过程中，电阻率变化可以划分为19时前与19时后的两个部分。但实际上，从中部测点19时前的平稳下降中，还可以依据下降速率的区别细分出两个不同的小阶段：15时前6%的下降和15时后12%的下降。由表1可见，在15时左右受载岩石的应力水平正好是破坏应力的一半。如同布雷斯等所指出的那样，受载岩石应力水平达到破坏应力的一半到 $2/3$ 时，往往在岩石内部因新裂隙的增生而产生扩容现象(Brace, Qrange, 1968)。在15时左右开始出现的电阻率更大幅度的下降，或许正是与这个部分的扩容过程相关联。遗憾的是，本次实验中事先没有安排体积变形测量，有关体积扩容的证据无法提供。

如果从电阻率变化所给出的设想成立，那么电阻率下降速率的改变这一事实，可能意味着在15时扩容开始时新裂隙形成的速率比从样品上部水流进的速率要小。或者说，新的裂隙虽然在扩容开始逐渐形成，但岩石孔隙中原来的水很容易进入到新裂隙的表面而形成一层导电的水膜(因为这时新裂隙形成的速率很小)。正是这层水膜增加了岩石中导电通道的截面，表面导电性起了重要作用。

在样品内部结构产生大变化的19时，中部测点的电阻率变化也显示了两个小阶段：从19时到20时47分电阻率上升，其后转为下降直到岩石解体为止。它似乎同样可以用岩石微裂隙发育的速率与水流入这部分的速率的比较来予以说明。

3.1.3 电阻率变化空间分布的差异性

在岩石样品上、中、下3个不同部位显示了电阻率不同的变化，可能反映了一种与岩石内部结构变化的空间差异性有关的过程。这个过程或许同时伴随有水在全部加载期间不均匀流动或分布的影响。从图5上看出，19时前中部测点上电阻率下降的幅度大于上下两个测点，可以作为一个明显的例证。因中部测点可探测的区域恰是事先安排的“应力集中区”，由于上部注水孔的存在，这里在应力集中作用下的微裂隙发育将有利于引导水向该区流动。即便是在19时之后各测点电阻率都显示了大幅度的变化，但它们彼此间在幅度大小和形态上也有明显的差异：上、中两个测点的电阻率变化似乎同样显示了微裂隙的发育速度比水流进新裂隙的速度要快。19时后下部测点电阻率继续下降的物理机制目前尚不清楚，还有待其它资料予以佐证。

无论如何，与小标本相比，大样本实验中的电阻率变化以及其它观测结果都显示了空间上的差异性，反映了大样本岩石内部结构和物理过程的不均匀性，更接近于野外观测的实际。这是大样本实验所表现出的重要优点之一，也是大样本岩石力学实验能够作为模拟地震孕育过程的优势所在。

3.1.4 岩石大破裂之前电阻率异常的“临震”前兆显示

实验从11时15分开始加载，21时04分载荷相当不稳而不能继续再加，这表明岩石已经失稳，21时07分和21时09分连续发出两声“巨响”而崩裂，全部实验长达9个小时。从图5可以清楚地看到，上、中、下3个测点的电阻率变化尽管幅度大小不同，形态也各有差异，但从19时24分开始各测点电阻率变化发生转折的时间却相当一致，此时离岩石大

破坏的时间已不到 2 小时, 这种转折现象不能不与样品大破裂的“短期”前兆相联系。再从图 5b 中部测点上的电阻率变化看, 两条测线的电阻率从 20 时 47 分以前的上升, 突然同时发生转折而再次大幅度下降, 这时离样品的整体破裂仅有 20 分钟。这一现象预示了岩石即将解体, 破坏就要发生, 这似乎可以被认为是岩石大破裂的“临震”标志。

3.2 受载岩石样品电阻率变化的理论分析

按照上面的分析, 受载岩石样品的变形发展过程似乎包含 4 个阶段: ① 压密阶段。原始裂隙受压闭合, 孔隙度减小; ② 扩容初期阶段。新裂隙形成, 水开始进入新的扩容裂隙; ③ 急剧扩容阶段。微裂隙增生和传播速度大于水流人的速度; ④ 大破裂前的“临震”阶段。大量水流人扩容裂隙。相应各阶段的电阻率变化在图 5b 中用罗马数字表示, 箭头指示岩石大破裂发生的时间。在这些阶段上的电阻率变化行为可以用阿契定律进行定量描述, 作为其可能的机理解释。

阿契定律的经验表达式阐明了多孔岩石电阻率与岩石内部结构及含水状况的关系(钱家栋等, 1985)

$$\rho = \rho_w \Phi^{-m} S^{-n} \quad (1)$$

其微分形式有

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = - \left(m \frac{\Delta \varphi}{\varphi} + n \frac{\Delta S}{S} \right) - (\Delta m \ln \varphi + \Delta n \ln S) \quad (2)$$

式中, ρ 和 ρ_w 分别是岩石电阻率和岩石中孔隙溶液电阻率; $\Phi = V_p/V$ 是岩石孔隙度(V_p 是岩石中孔隙的体积, V 是岩石的总体积); $S = V_w/V_p$ 是水饱和度(V_w 是孔隙溶液的体积); m 是称为结构系数的常数, 它与岩石导电通道截面的大小有关; n 是与水含量有关的另一个常数。

在第 1 阶段, 假定标本中孔隙和裂隙的体积由于受压而减小, 这时水不可能进入孔隙, 且假定 $m \approx 1$, $n = 2$, $\varphi = 0.01$ 。于是从式(2)有

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{(n-m)}{\varphi} \cdot \frac{\Delta V}{V} \approx \frac{3(n-m)}{\varphi} \cdot \frac{\Delta L}{L} \quad (3)$$

式中, $\Delta L/L$ 是线应变, 根据对这一阶段的实测 $\Delta L/L \approx -10^{-4}$ 。所以, 这与中部测点在这个阶段上电阻率的观测结果相一致。

在第 2 阶段, 扩容开始, 假定有水进入新生裂隙, 从式(2)有

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{(n-m)}{\varphi} \cdot \frac{\Delta V}{V} - n \frac{\Delta V_w}{V_w} \approx -n \frac{\Delta V_w}{V_w} \quad (4)$$

因为有水进入的条件下 $\Delta V_w > 0$, 而 V_w 是一个数值很小的量, 所以 $\frac{\Delta V_w}{V_w}$ 是一个比 $\frac{(n-m)}{\varphi} \cdot \frac{\Delta V}{V}$ 大得多的项。由上式可见, 电阻率的下降应当正比于孔隙水含量的变化, 这时孔隙水变化对电阻率的贡献要大于体积变化的贡献。因此, 岩石电阻率比第一阶段有了更大的变化。

在第 3 阶段, 扩容剧烈发生, 新裂隙增长的速率大于水流人的速率。从式(4)有

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{(n-m)}{\varphi} \cdot \frac{\Delta V}{V} - n \frac{\Delta V_w}{V_w} \approx \frac{(n-m)}{\varphi} \cdot \frac{\Delta V}{V} \quad (5)$$

这意味着当 $\Delta V/V > 0$ (扩容)时, $\Delta \rho/\rho$ 与 $\Delta V/V$ 成正比(符号亦相同), 在该阶段上电阻率将大幅度上升, 与实验结果相符合。

在最后一个阶段，即岩石处于临界失稳破裂状态，一方面由于扩容引起孔隙压的降低导致水流入的速度大大增加；另一方面由于裂隙定向排列，两者均使岩石中导电通道大为改善，以致我们必须考虑结构系数的改变($\Delta m < 0$)。从式(2)有

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{(n-m)}{\varphi} \cdot \frac{\Delta V}{V} - n \frac{\Delta V_w}{V_w} - \Delta m \ln \varphi \approx -n \frac{\Delta V_w}{V_w} - \Delta m \ln \varphi \quad (6)$$

式中， $\varphi < 1$ ， $\Delta m < 0$ ， $\Delta V_w > 0$ ，所以电阻率再一次减小，特别是在样品中部测点上直接观测到了临破裂前电阻率再次下降（由于此时上下两个测点因岩石表面已经破碎脱落影响，电极无法测量而没有观测到这一现象）。

将式(5)、(6)与式(3)、(4)相比较很容易看出：电阻率在阶段3或阶段4上的变化比在阶段1和2上大得多是完全可能的。

4 讨论

(1) 阿契定律的微分形式本来只适用于小应变状态，这里用到了较大变形条件下的分析应当不是完全合适的，但用它作为以电阻率观测来认识岩石从受载到破裂全过程的内部变形机理的一种工具和方法，并在一定假设条件下，以电阻率变化的量级评估给出定性结果，上述公式的运用还是有意义的。

(2) 公式(2)中 $\Delta n \ln S$ 在上述分析时未作讨论，是因为这一项的量级比其它项要小得多，这可归因于饱和度 S 在我们的实验中几乎接近于1。因此，在一般情况下 $\Delta n \ln S$ 忽略不计而并不影响上述分析结果。

(3) 本次实验是以验证膨胀-扩散(D-D)模式为主要目的，但一个重要的参量——横向变形未能在实验中安排测量。图2中虽然给出了应力-应变本构关系，但因巨大的压力只能测出轴向应变呈不断的压缩势态，无法从中找到描述岩石膨胀过程的直接证据，这不能不说如此庞大实验设计中的一项重大缺陷和失误。

本文得到梅世蓉教授的关心、支持，并在撰写文稿中给予了指导，在此表示衷心地感谢。对张肇诚教授在组织这次国际合作实验中提供的帮助深表谢意。

参 考 文 献

- 钱家栋, 陈有发, 金安忠, 1985. 地电阻率法在地震预报中的应用. 北京: 地震出版社. 118~125
- Brace W F, Qurangle A S, 1968. Electrical resistivity changes in saturated rocks during fracture and frictional sliding. *J Geophys Res*, **73**(4): 1433~1445
- Nur A, 1972. Dilatancy pore fluids and premonitory variations of t_s/t_p travel times. *Bull Seism Soc Amer*, **62**(5): 1847~1861
- Scholz C H, Sykes L R, Aggarwal Y P, 1973. Earthquake prediction: A physical basis. *Science*, **181**(4102): 803~809