

大型花岗岩标本缓慢膨胀破裂过程中电阻率和声发射前兆特征的实验研究*

陆阳泉 钱家栋 刘建毅

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

本文重点研究了在膨胀力源作用下,大尺度花岗岩标本缓慢破裂过程中的电阻率和声发射前兆特征。实验结果表明,在岩石破裂过程中不仅观测到了电阻率的长趋势变化和短临异常,而且观测到了清晰的破裂前兆。在大破裂发生之前数小时观测到了电阻率的突变异常。实验中还记录到了声发射现象,其开始的时间较电阻率稍晚,初始破裂和主破裂时的声发射现象有其各自的特殊性。

一、前 言

近年来,大样品、长时间的岩石力学试验越来越受到人们的重视。美国布雷斯^[1]、苏联的索博列夫^[2]以及作者等^[3]均进行过大样品实验。虽然这些实验取得了一些有意义的成果,但由于力源都是来自外部,在许多方面还不能令人十分满意。为了较真实地模拟震源力学过程,1986年我们与有关单位合作,将新型静态破碎剂作为内部膨胀力源,应用于大型岩石标本破裂实验,研究大型花岗岩标本缓慢膨胀破裂过程中电阻率和声发射的前兆特征,获得了较好的效果。将这一方法用于地震岩石力学实验在国内尚属首次,在国外文献上也未见报导。本文介绍了这一实验及获得的主要结果。

二、实验概述

实验标本为西昌河西区的新鲜粗粒花岗闪长岩,岩样表面完整,无节理和原生裂纹,吸湿率较大,颗粒粗糙,粒度分布均匀。标本在野外加工成 $100.5 \times 99.6 \times 84.5 \text{cm}^3$ 的规则试体,运回后安装在具有较厚土墙平房内的水泥墩上,水泥墩的四周挖有3 m深的隔振槽,尽量避开机械振动和人为干扰的影响。

实验房为独门暗室并挂有帘布,全部测线拉出室外,尽量减少人员进出,以保证室内温湿度稳定。在10多天的正式观测中,观测室温度为 $23.5 \pm 1.2^\circ\text{C}$,日温差小于 1°C ,相对湿度

* 地震科学联合基金资助项目。

度在80%左右。

原设计在标本上方正中央打一直径为10cm, 深度为80cm的孔, 由于某种技术原因, 后来在偏离中心的某一适当位置打一直径为4.5cm, 深度为39cm的孔作为力源孔, 其中放入一定配比的EK—CASW型静态破碎剂。破碎剂经水化反应后逐渐固结膨胀, 使孔壁周围出现微裂隙。随着膨胀力的不断增大, 微裂隙逐渐扩展并经裂纹传播、加宽和贯通等不同阶段致使岩石发生缓慢破裂¹⁾。

三、电阻率观测的主要结果

为了研究花岗岩标本缓慢破裂过程中的电阻率变化特征, 我们在试件的两个相对表面的对角线上用赤道式偶极法各布设三道观测线, 如图1所示。图中试件正面为观测面(一), 与之对应的为观测面(三), 两面布极方法相同, 其参数见表1。

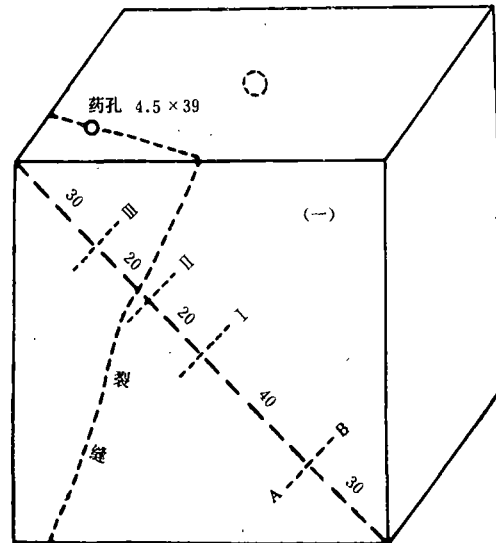


图1 电极布设图(单位cm, 图中圆孔为声发射仪探头位置)
Fig. 1 Electrodes for resistivity measurement

表1 电极布设参数(单位: cm)

观测道	电极距			装置系数 (K)	电极孔		电极		备注
	AB	MN	OO'		孔径	孔深	材料	规格	
I	15	15	40	1974	1.5	5.0	铅柱	$\phi 1.0 \times 1.0$	充填银胶
II			60	6315					
III			80	14675					

用JW—1型稳流电源供电, 用两台PZ40数字地电仪测量, 分别用PZ40数字处理器和LY—4打印机记录。每小时(或半小时)采样一次。仪器的精度为0.05%, 测量总误差小于2.0%。

1) 许宁, 新型静态破碎剂试验研究应用报告, 1983.

为了较真实地反映整个实验过程中电阻率的变化特征，我们对所测到的原始数据未作任何处理。各道电阻率的变化情况见表 2，图 2 和图 3 分别为电阻率时值图和日均值图。

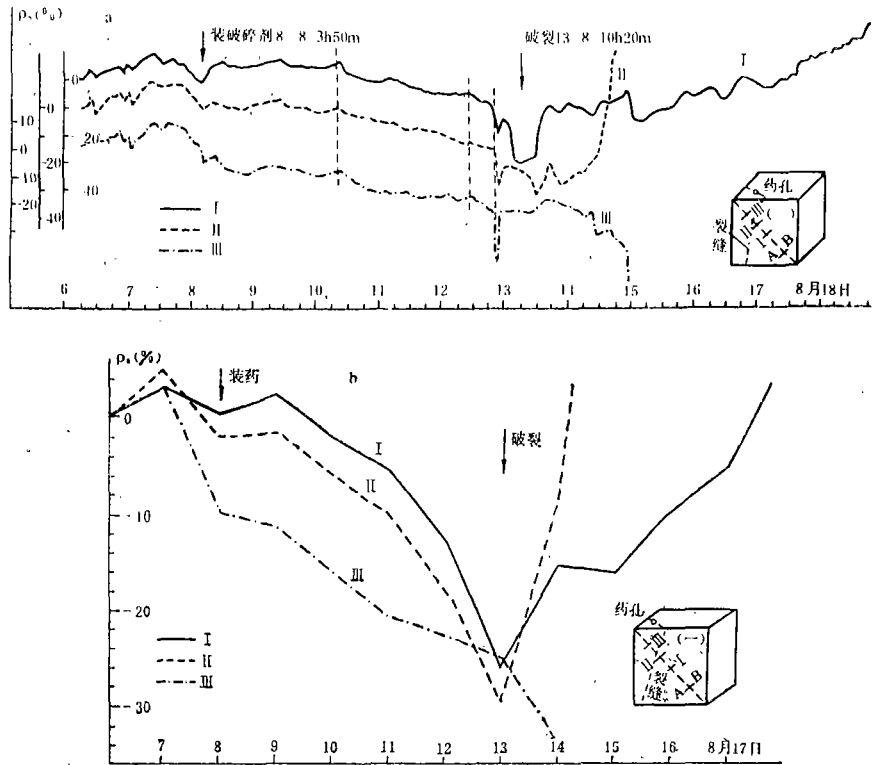


图 2 花岗岩试件破裂前后观测面 (一) 电阻率变化曲线
a. 时值图 b. 日均值图

Fig. 2 ρ_v -curves in side (一) of the granite specimen before and after the occurrence of main rupture

表 2 装药至破裂前各阶段电阻率的变化比较

观测面	测量道	总变幅 (%)	正常变化			缓慢下降			加速下降			突变		
			时间 (小时)	幅度 (%)	速率	时间 (小时)	幅度 (%)	速率	时间 (小时)	幅度 (%)	速率	持续时间 (小时)	幅度 (%)	速率
(一)	I	-25.8	53	3.2	0.06	50	-11.2	-0.22	10	-13.0	-1.30	8	-19.6	-6.5
	II	-29.3		1.5	0.03		-13.2	-0.26		-16.0	-1.60		-30.0	-10.0
	III	-25.1		-2.6	-0.05		-8.4	-0.17		-24.6	-2.46		-42.4	-14.1
(三)	I	-9.1	53	-3.8	-0.07	50	-2.9	-0.06	10	-3.8	-0.40	6	-12.0	-2.0
	II	-11.3		-2.7	-0.05		-2.0	-0.04		-13.7	-1.40		-13.6	-2.3
	III	-14.4		-4.0	-0.08		-3.2	-0.06		-7.5	-0.8		-15.7	-2.6

从图 2、3 及表 2 中可以看出电阻率变化具有以下几个特点：

1. 从装破碎剂开始到主破裂之前，随着水化反应的进行，在花岗岩标本经历缓慢的应力一应变过程中，电阻率的变化可分为 4 个阶段（图 2 a）；

(1) 正常变化。装破碎剂之前三道电阻率曲线有比较一致的日变形态，装入破碎剂后日变形态逐渐消失并略有下降。此后在长达50多个小时之内，电阻率变化的幅度和速率都不大，基本上属于正常变化阶段。

(2) 缓慢下降。在上述变化的基础上各道电阻率日变形态完全消失并出现有规律的趋势性下降变化，下降的幅度和速率都比前一阶段要大，持续时间约50个小时。

(3) 加速下降。破碎剂经过100余小时的反应后，电阻率出现急剧的加速下降变化，在短暂的10小时之内，其下降的幅值和速率均较前提高20%至数倍或数十倍，显示出岩石即将破裂的短期前兆信息。

(4) 突变异常。临破裂之前电阻率的突变异常十分显著，其特点是：各道电阻率突变时间基本同步，观测面(一)的各道突变开始时间是8月12日21点，观测面(三)各道突变开始时间是21点30分；突变幅度大，且按 I < II < III 的顺序排列；持续时间长，观测面(一)的各道电阻率变化持续约3个小时，观测面(三)内各道电阻率变化持续约6个小时。

2. 标本大破裂后，观测面(一)直接遭受破坏，裂缝又从第II、III道测线之间通过，所以当破裂发生后只有远离裂缝的第I道电阻率基本能恢复到正常状态，而第II、III道电阻率出现不可控制的大幅度上升和下降变化(图2b)。由于观测面(三)未直接受到破坏，所以其内电阻率变化量级和各阶段特征都不如观测面(一)明显(图3a)，破裂发生后电阻率也能恢复到正常值(图3b)。

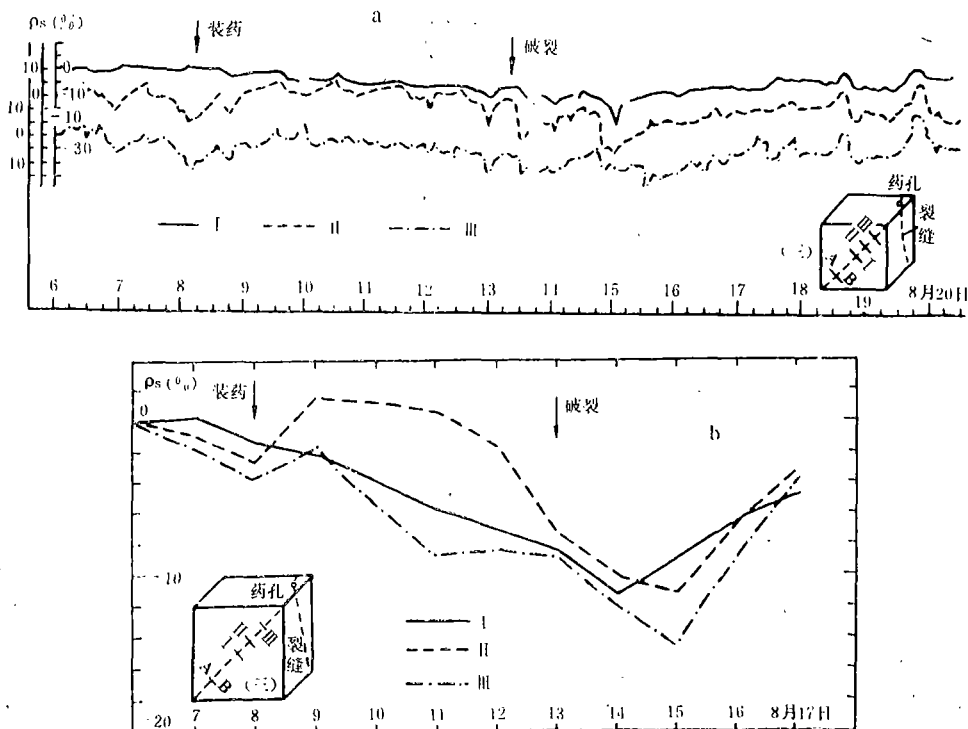


图3 花岗岩试件破裂前后观测面(三)电阻率变化曲线
a. 时值图 b. 日均值图

Fig. 3 ρ_s -curves in side (三) of the granite specimen
before and after the occurrence of main rupture

3. 电阻率变化的大小与力源孔或裂缝的距离有关。观测面(三)上的测线离裂缝远, 电极未受新生裂隙的影响, 而观测面(一)距力源和裂缝较近, 所以其内各道电阻率异常出现的时间比观测面(三)早, 且幅度大, 阶段性明显。由于裂缝从观测面(一)的测线Ⅱ旁通过, 所以该道的电阻率异常幅度最大(29.3%)。

4. 电阻率变化与探测深度有关。探测深度按Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ道的顺序由小到大, 电阻率变化幅度也按此顺序由小到大(参见表2)。

四、声发射观测结果

声发射观测使用S₃₂₀₇单通道声发射综合参数测试仪, 探头频率为120kHz, 仪器增益为40dB。实验中测量了声发射总计数和能量脉冲两个参数。岩石初始破裂和主破裂时的记录图象示于图4和图5中。据声发射资料所确定的岩石破裂过程列于表3中。

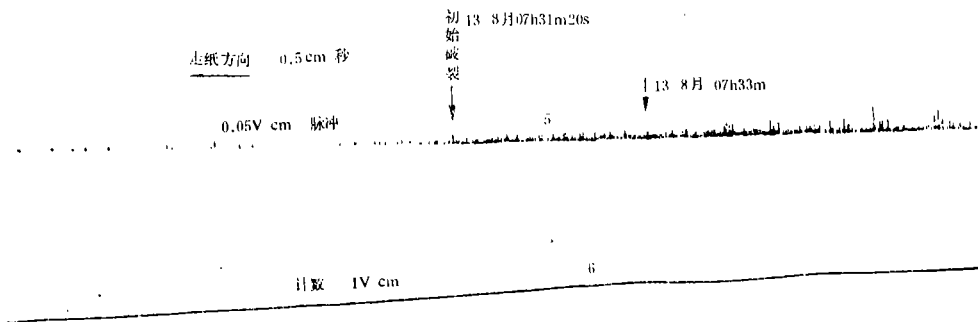


图4 花岗岩试件初始破裂时的声发射记录图

Fig. 4 The recordings of acoustic emission at the beginning of the rupturing process for the granite specimen

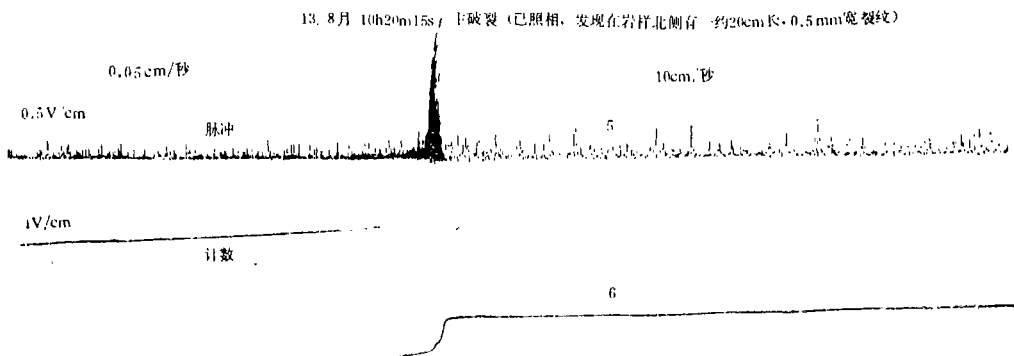


图5 花岗岩试件主破裂发生时声发射强脉冲记录图

Fig. 5 The recordings of the strong pulse in the acoustic emission when the main rupture of the granite specimen occurred

表 3

根据声发射记录确定的岩石破裂过程

破裂过程	时 间	声 发 射 特 征	备 注
装破碎剂	8/8 3h50m	无	
微裂隙形成	13/8 3h16m	有少量声发射	
初始破裂	7h31m20s	声发射骤然密集, 振幅增大	见图4
裂纹扩展	持续2小时50分	声发射继续进行	
主破裂	10h20m15s	出现强脉冲信号, 记录出格	见图5, 力源孔一侧可见长20cm、宽0.5mm裂纹
破裂传播	持续18小时20分	总计数和能量脉冲继续增大	
第二次大破裂	14/8 4h40m	总计数急增, 无强脉冲信号	岩石表面和力源孔另一侧出现裂纹

将以上结果与电阻率观测结果相比较可以看出, 声发射和电阻率一样, 都可以记录到岩石的破裂前兆, 它们都可以作为预报地震的前兆观测方法之一。但是, 由于它们各自反映的物理量不同, 而对于岩石破裂过程的前兆反应也会有差异。同声发射相比较, 电阻率变化从趋势异常到短临异常整个形态比较完整, 异常出现时间早、幅度大; 且在主破裂前12小时记录到了电阻率突变异常。声发射开始的时间比电阻率异常的开始时间迟5个小时, 但其图象清楚地反映了岩石破裂活动的全部过程和发展趋势。由于声发射强脉冲和岩石主破裂同时发生, 因此将其用于寻找“主震”前兆指标可能会有一定困难。

五、初步结论

我们用静态破碎剂作为岩体内部的膨胀力源进行大尺度岩石缓慢破裂实验取得了较好的效果。从某种意义上说, 这一类实验较室内小标本实验显示了较多的优越性。其主要优点是: 力源来自试体内部, 作用时间长, 岩石破裂的力学过程完整, 有利于开展多手段综合对比观测, 为模拟地震过程和进行前兆异常研究提供了新的实验方法和途径。

实验表明, 在内部力源作用下, 大型花岗岩标本缓慢破裂过程中电阻率的阶段性变化与标本缓慢的应力—应变过程和破裂活动密切相关, 不仅有明显的趋势异常, 而且有清晰的破裂前兆。特别是在大破裂发生之前数小时有先于声发射的电阻率突变异常, 可以认为这是与主破裂有关的“前兆”现象。这一实验结果与我国某些大地震前的实际观测结果相符合^[4], 从而为地震前地电前兆异常的理论解释提供了实验证据。

岩石声发射现象是受力岩石破裂过程的客观反映, 它不仅与应力状态有关, 更与岩石的破裂过程有关。因此, 声发射图象有效地“跟踪”和揭示了岩石破裂发展的规律, 为分析岩石的破裂过程和各種观测数据提供了资料。

在实验和资料整理过程中, 王玉祥、谭建文参加了部分工作, 赵家骥、王燕琼检修了测试仪器, 薛顺章给予了支持, 特此致谢。

(本文1988年2月3日收到)

参 考 文 献

- [1] Brace, W.F., The effect size on mechanical properties of rocks, *Geophysical Research Letters*, Vol. 8, No. 7, 651—652, 1981.
- [2] 索博列夫, 大标本破裂前兆的研究, 大陆地震活动性和地震预报国际学术讨论会论文集, 地震出版社, 1984.
- [3] 陆阳泉等, 三向压缩下大型混凝土标本的电性特征, *西北地震学报*, Vol. 2, No. 4, 1980.
- [4] Qian Jiadong, Gui Xitai, Ma Huaizhong, Ma Xikang, Guan Huaping and Zhao Qingming, Observations of Apparent Resistivity in the Shallow Crust before and after Several Great Shallow Earthquakes, *Proceedings of the International Symposium on Earthquake Prediction*, 145—146, UNESCO, Paris, 1984.

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE PRECURSORY FEATURES OF
APPARENT RESISTIVITY AND ACOUSTIC EMISSION OF LARGE SCALE
OF GRANITE SPECIMEN DURING THE PROCESS OF SLOWLY
DILATANCY RUPTURING

Lu Yangquan, Qian Jiadong, Liu Jjianyi

(*Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Gansu, China*)

Abstract

This paper deals mainly with the precursory features of apparent resistivity and acoustic emission of the large scale granite specimen during the process of slowly rupturing due to a dilatancy source. The results show that not only the long tendency of anomaly and short-term anomaly in resistivity were observed before the main rupture occurrence, but the precursors associated with rupture were observed clearly as well, i.e. a sudden change in apparent resistivity several hours prior to the main rupture occurrence. The precursor in acoustic emission was also recorded in the experiment, the starting time, however, is later than that in apparent resistivity. And there are respective distinctions in the acoustic emission during the initial micro-rupture and the final main rupture,