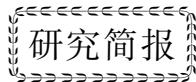


文章编号: 0253-3782(2001)03-0322-06



1999 年 9 月 21 日台湾集集 $M_s 7.4$ 地震前 ULF 电磁信号及其与模拟实验结果的比较^{*}

钱书清¹⁾ 郝锦绮¹⁾ 周建国¹⁾
高金田¹⁾ 王玲玲²⁾ 梁 静¹⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所, 中国地震局构造物理开放实验室

2) 中国福州 350003 福建省地震局

关键词 集集地震 岩石受压破裂实验 ULF 电磁前兆 产生和传播机理

中图分类号: P319 文献标识码: A

大地震前观测到异常的电磁信号已有很多报道, 1995 年 1 月 17 日日本阪神 7.2 级地震 (Hayakawa *et al.*, 1996) 和 1989 年 10 月 19 日美国洛马普列塔 7.1 级地震 (Fraser-Smith *et al.*, 1990) 之前的电磁异常信号尤其引人注目。但所报道的仅为一、两个台的资料。为确认这一现象, 笔者研究了距集集地震震中 256~858 km 内我国大陆沿海地区 9 个台用同一种仪器 (ULF、VLF 电磁波观测系统) 的观测结果, 总结地震前 3 个月到发震时刻的资料, 得到地震前电磁异常信号的区域分布、时域特征和频域特征。

为认识地震前异常电磁信号的特征和传播途径, 已有许多学者进行了实验研究。以往的岩石破裂实验观测到的是 VLF、LF 和 HF 频段的电磁信号 (Bredy, Glen, 1986; Yamada *et al.*, 1989; 郭自强, 1994; 钱书清等, 1996, 1998), 对于岩石破裂的 ULF 频段的电磁信号尚未见报道。郝锦绮等 (1993) 在进行岩石剩余磁化强度与压力关系的实验时, 发现磁场记录中有多次 ULF 频段的突变信号, 它们产生于岩石即将破裂时, 与微裂隙的生成相关。本研究中实验重点即为观测岩样在主破裂发生前是否有 ULF 的电磁信号产生, 并与集集地震前的 ULF 电磁异常信号特征进行比较。

1 地震概况

1999 年 9 月 21 日 01 时 47 分 (北京时) 我国台湾省南投县集集镇发生 $M_s 7.4$ 地震, 震源深度为 11 km。在主震震中的西侧有延伸达 80 km 长的南北向地表破裂带。台湾全岛震感十分强烈, 并波及福建、广东、浙江和江西省的部分地区, 其中福州、泉州、厦门、宁德等城市震感明显。

2 震前 ULF 异常电磁信号

我国东南沿海地区建有 23 个电磁波观测台 (其中浙江省 9 个、福建省 10 个、广东省 3 个、上海市 1

* 地震科学联合基金 (95-07-434) 和中国地震局构造物理开放实验室资助课题。中国地震局地球物理研究所论著 01AC1002。

2000-07-17 收到初稿, 2001-02-27 收到修改稿, 2001-04-02 决定采用。

个), 这些台的观测仪器除广东省外均为江苏省地震局研制的ULF和VLF电磁波观测系统. 台站建在背景电磁干扰小的场地, 平时的记录曲线为带有小波动的准直线. 根据笔者搜集的资料, 这次地震前3个月到发震时间段内有9个台先后观测到ULF和VLF异常电磁信号(表1).

表1 集集地震前中国东南沿海地区电磁波台的电磁异常信号

观测台站	震中距/km	震中方向	观测频率/Hz	电磁异常出现时间	电磁异常信号特征
上海崇明	858	N	0.1~20	9月3~6日	南北向信号, 出现许多小脉冲
浙江嘉善	780	N	0.1~20	7月26日~8月18日 9月6~17日	异常时间达18.9 h 异常时间达16.7 h
福建福州	285	NWW	0.1~10	7月中旬~9月中旬	幅度达4.2 nT
福建闽清	348	NW	5 000	9月	共0.8 h异常
福建莆田	260	NW	75 000	8~9月	共120 h异常
福建南安	256	NW	5 000	7~9月	共61 h异常
福建尤溪	366	NW	5 000	9月1~5日, 11~15日, 18日	其中13, 15和18日信号幅度最大
广东汕头	432	W	0.1~15	8月下旬~9月18日 每日均出现	呈现一组组脉冲波, 其中9月13, 19两日最多
广东佛山	786	SWW	0.1~20	8月25~31日 9月1~10日	东西向信号比南北向先出现, 且频次也高

表1表明, 在该地震前东南沿海地区确实出现了明显的电磁前兆异常. 观测到的电磁信号分布范围广, 从异常信号出现到结束长达3个月. 可归纳出以下特点:

1) 从空间分布看, 我国东南沿海地区的电磁波观测台有23个, 其中已发现有异常的有9个台. 它们从上海崇明到广东佛山, 沿东南沿海形成一个约1 400 km长的弧线带, 与集集地震震中距离为256~858 km. 这9个台出现异常信号的时间有先有后, 未发现异常出现时间的先后与震中距之间的关系.

2) 每个台站从开始出现异常到发生主震的这一时期内异常信号的时域特征为: 初期信号小, 出现的频次低; 在临震前10天多数台出现大幅度、高频次的异常信号. 但主震发生时刻无信号(图1).

3) 异常波形的频率以ULF为主, 即0.1~20 Hz异常波形呈一组组脉冲. 图2给出震前8天广东汕头台用数采仪实时记录的脉冲波形. 信号的持续时间和间断时间各台不一.

主震发生后, 各台的观测信号恢复平静. 后来在强余震发生前, 各台又出现类似于主震前的异常信号, 但异常幅度比主震前小、频次比主震前低. 综上所述, 集集地震前后出现于大陆东南沿海地带的电磁异常, 看来与该地震震源区的孕震活动有关.

3 实验研究

为探索大地震前出现的ULF电磁信号的机理, 本研究进行了相关的岩石破裂实验, 以观测在应力下岩样主破裂前是否有ULF频段的信号出现, 比较这类信号的特征与大震前观测到的ULF信号的相似性.

实验样品有花岗岩(7块)、闪长岩(4块)、大理岩(6块)和石英砂岩(1块), 共4类18块. 岩样尺寸有3种: 120 mm×200 mm×360 mm, 140 mm×140 mm×280 mm, 179 mm×73 mm×298 mm. 加压系统采用长江500型压机, 对岩样进行单轴均匀速率加载, 直至岩样破坏. 加载速率有3种: 4, 10和20 t/min. 各种频段的磁探头离岩石样品表面约3~5 cm, 铜片作为电极用铜胶贴于岩样表面. 一对应变片贴于样品的直立面的中部, 记录样品体应变的变化. 两只声探头耦合于压机的底板, 拾取岩样的声发射并得到声发射率. 为了降低外界电磁干扰, 压机、岩石样品和各类探头都置于电磁屏蔽罩内, 屏蔽罩接于实验室的地线. 岩石实验前的干扰背景检测表明, 电磁各道记录的干扰值均小于10 mV, 比实验中观测到的前兆信号小几个数量级.

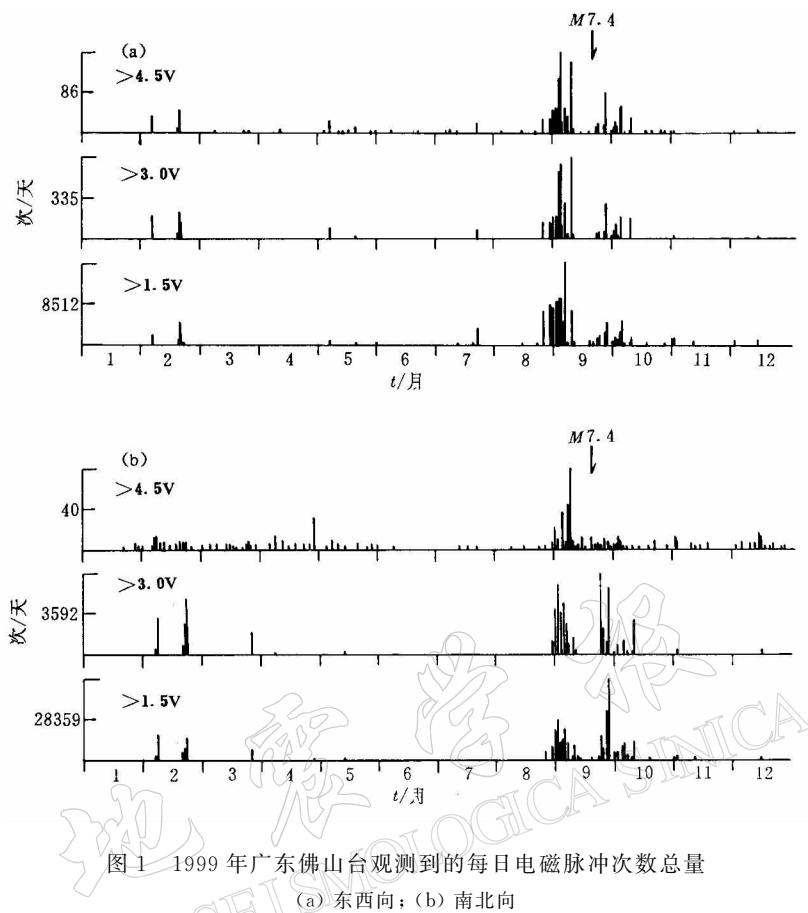


图 1 1999 年广东佛山台观测到的每日电磁脉冲次数总量

(a) 东西向; (b) 南北向

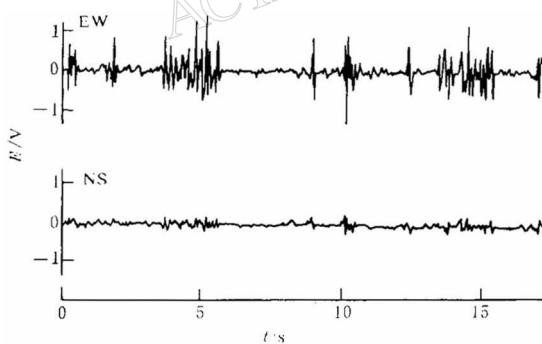


图 2 1999 年 9 月 13 日 13:09:43 广东汕头台采用数字式采集仪实时记录的地震前异常脉冲波形. 观测频段为 0.1~15 Hz, 采样频率为 30 Hz

号次数为最多, 其余岩样出现这类现象较少.

采用快速磁带记录仪(3~19 cm/s)记录电信号、各种频段(0~100 Hz, 3~176 kHz)的磁信号、声发射等的高频变化, 并用慢速纸记录仪(2 cm/min)记录磁场、体应变、应力和声发射率的慢变化过程.

从慢速记录发现岩样在单轴加压下, 进入体膨胀阶段出现了突发的 ULF 磁信号(频率范围从直流到 5 Hz), 它与体应变曲线的起伏有一一对应关系. 如图 3 显示花岗岩的体应变和磁场随单轴压力的变化. 在压力加至 57 MPa 时, 岩样的体积发生了突然膨胀(细线), 此时磁场也出现了突变(粗线). 岩样主破裂前这种 ULF 频段的磁场和应变信号共出现了 3 次. 从表 2 看出, 18 块岩样中以花岗岩(7 块)和闪长岩(4 块)在体膨胀阶段出现 ULF 突变型磁信

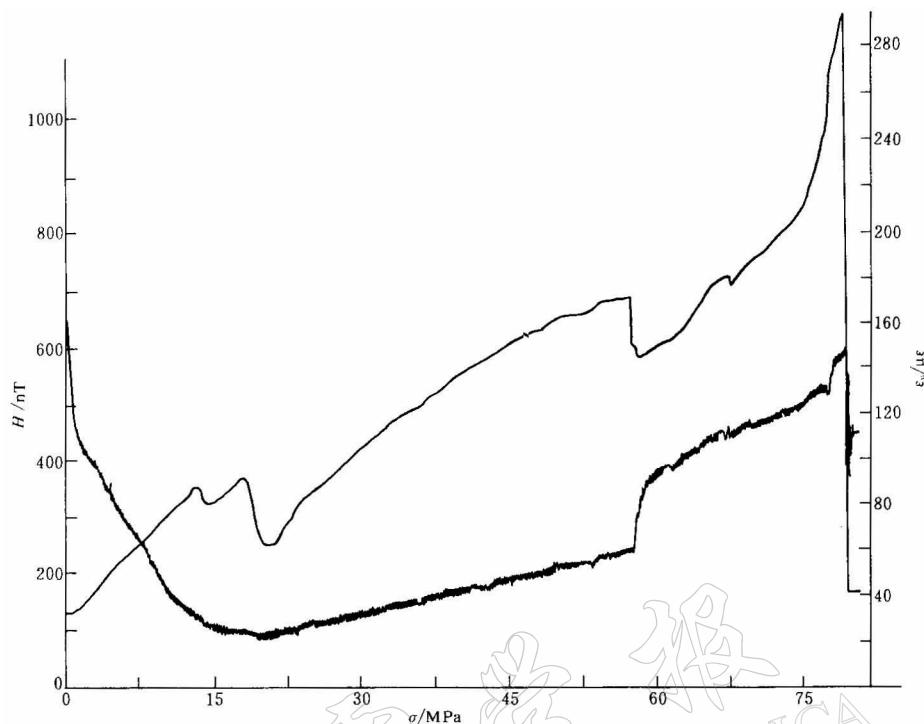
图3 花岗岩(LHL3)磁场 H (粗线)和体应变 ϵ (细线)随应力 σ 的变化曲线

表2 岩样主破裂前的磁脉冲数据统计

样品名称	岩石种类	破裂应力值 /MPa	膨胀段应力值 /MPa	快速记录中 的脉冲数	慢速记录中 的脉冲数
LHL4	大理岩	110	19~74	0	0
LHL5	大理岩	120	23~90	0	0
LHL6	大理岩	113	41~81	0	0
LHL2	花岗岩	76	20~56	1	2
LHL3	花岗岩	77	21~62	0	3
LHL7	花岗岩	115	38~105	0	1
LHL8	花岗岩	92	18~71	0	4
982I	粗粒闪长岩	109	59~95	2	5
984I	粗粒石英砂岩	45	10~40	0	0
985I	粗粒闪长岩	80	33~50	2	1
986I	大理岩	35	10~25	0	0
987I	黑云母花岗岩	95	40~75	2	4
9306H	闪长岩	101	85~98	15	1
9306V	闪长岩	33	12~29	0	6
9311H	大理岩	151	44~109	0	5
9311V	大理岩	41	7~34	0	3
9302H	细粒花岗岩	45	26~35	1	5
9302V	细粒花岗岩	90	41~67	5	4

快速磁带仪回放资料中发现, 岩样在体积膨胀到主破裂前出现了ULF磁脉冲信号(频率范围从直流

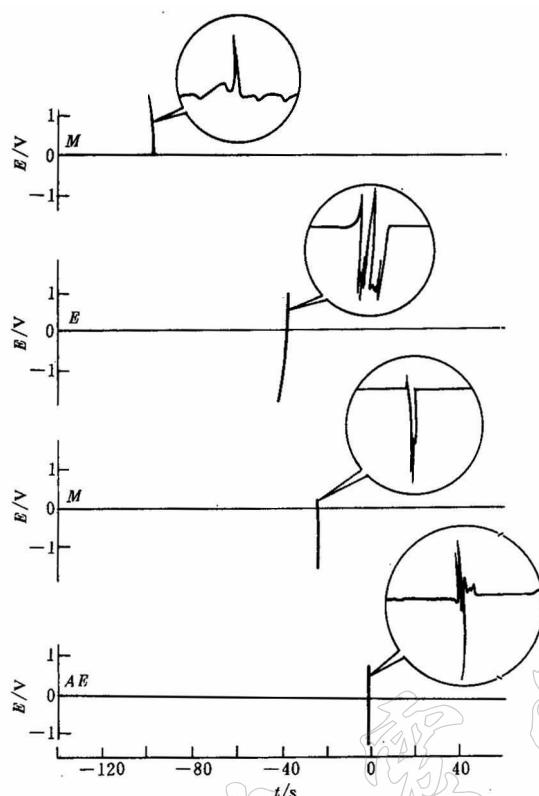


图 4 闪长岩(9306H)小破裂前的电磁前兆信号.

M、*E* 和 *AE* 分别表示磁场、自电位和声发射. 将时间轴放大 100 倍得到右上方圆圈内的脉冲衰减波形

到 100 Hz). 与声发射所表明的微破裂出现相比较, ULF 磁脉冲有的在微破裂前出现, 有的与微破裂同时出现. 图 4 展示了闪长岩在主破裂前出现的一组电磁前兆信号. 横坐标上的 0 点为岩样小破裂发生的时刻, 在此之前 90 s 内出现了一组电和磁的前兆脉冲. 各类岩石在主破裂前出现的 ULF 磁脉冲数详见表 2. 从表 2 看到, 快速记录中 6 块大理岩都未出现 ULF 磁脉冲, 而闪长岩出现的脉冲数最多.

至于岩样在主破裂阶段的表现, 出现的强信号主要在 VLF 频段(3~176 kHz), 它们的幅度大, 持续时间也长; 而此阶段 ULF 则表现为弱信号, 有的岩样在主破裂时段无 ULF 信号出现. 对主破裂阶段电磁信号的特征, 我们将另文讨论.

4 实验结果与集集地震前的 ULF 信号的比较

将位于我国东南沿海台站观测到的集集地震前 ULF 磁信号, 与模拟实验中岩样在主破裂前出现的 ULF 磁信号, 从时间域、频率域和波形特征等方面进行比较, 两类信号很相似, 其特征归纳于表 3. 因震前观测的 VLF 频段是信号的包络线, 而实验记录的是信号波形, 无法进行直接对比.

表 3 实验结果与集集地震前 ULF 信号的比较

时段	接收频率	开始出现的时间段	强信号出现的时间段	波形特征	信号的时域特征	主震时刻
集集地震前	0.1~20 Hz	主震发生前 3 个月~前几天	临震前 8~1 天	脉冲状 突跳信号	多次出现	无信号
岩样主破裂前	DC~100 Hz	岩样受压开始体膨胀	接近主破裂约为破裂压力的 90%	脉冲状 突跳信号	多次出现	有弱信号, 占样品个数 1/2

5 讨论

本研究对花岗岩在内的大量样品进行实验, 利用快、慢两种记录仪记录到岩样在主破裂前的 ULF 和 VLF 电磁信号. 由表 3 可见, 这类信号与集集地震前观测的 ULF 异常信号在形态、频域和时域等方面都很相似. 由此推测, 该地震前的 ULF 电磁信号可能是由于震源区岩石发生小破裂而产生的. 震前的这类信号是如何传播的, 是我们进一步要研究的问题.

集集地震的震源深度为 11 km. 这次地震的震源位于上地壳的中间部位. 该处上地壳厚 25 km, 与大陆东南部的岩石圈连为一体, 均由花岗岩组成(国家地震局《中国岩石圈动力学地图集》编委会, 1989). 人们通常将地震的前兆显示区用 $R = e^M$ (km) 估算(Scholz *et al.*, 1973). 式中 M 为地震震级, 一个 7.4 级地

震的前兆显示区约为2 000 km。上述东南沿海的观测台(表1)都在该地震的前兆显示区内。

临震前孕震区花岗岩介质在强应力的作用下, 其微裂缝发展产生的快速应力变化, 可通过压电和压磁效应产生ULF电磁信号; 或者由强应力引起活动断层发生蠕动或粘滑, 使断层带的边缘发生微破裂, 也可能产生ULF电磁信号。这类信号通过地下断层与地表的连接处构成的狭缝天线向大气层辐射, 形成地波, 可能被地面上的天线接收(Yoshino, 1991)。从震源处发出的ULF信号, 也可在花岗岩地壳中直接传播至上述台站。电磁波在介质中传播的波幅是随指数函数衰减的。其穿透深度 Z_s (单位: m)为

$$Z_s = 500 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$$

式中, ρ 为介质的电阻率, f 为信号的频率。由此式可知高频信号在介质中很快被吸收, 只有ULF信号可能穿透上地壳。若信号的频率为100 Hz, 介质是花岗岩, 其电阻率 ρ 取为 $3 \times 10^8 \Omega \cdot \text{m}$, 则穿透深度 Z_s 的估算值为866 km。上述东南沿海观测台到集集地震的震中距离在256~858 km, 因此, 该地震震前3个月到临震前几天观测到的ULF电磁信号有可能直接来自于地震的孕育区。

该实验是中国地震局构造物理开放实验室完成的。汪江田、杨钢宇、姜永权、廖华康、黄茂提、陈宝华分别为笔者提供了东南沿海各台站资料; 邓明德、李世愚、耿乃光、刘晓红在模拟实验中给予帮助。在此一并致谢。

参 考 文 献

- 郭自强. 1994. 地震低频电磁辐射研究[J]. 地球物理学报, 37(增刊): 261~268
- 郝锦绮, 黄平章, 周建国. 1993. 微破裂对岩石剩磁的影响——对地震预报的意义[J]. 地球物理学报, 36(2): 203~211
- 马杏垣主编. 1989. 中国岩石圈动力学地图集[C]. 北京: 中国地图出版社, 65
- 钱书清, 任克新, 吕智. 1996. 伴随岩石破裂的VLF、MF、HF和VHF电磁辐射特性的实验研究[J]. 地震学报, 18(3): 346~351
- 钱书清, 吕智, 任克新. 1998. 地震电磁辐射前兆不同步现象物理机制的实验研究[J]. 地震学报, 20(5): 535~540
- Bredy B T, Glen A R. 1986. Laboratory investigation of the electrodynamics of rock fracture[J]. Nature, 321(29): 488~492
- Fraser-Smith A C, Bernardi A, McGill P A, et al. 1990. Low-frequency magnetic field measurements near epicenter of the Ms7.1 Loma Prieta earthquake[J]. Geophys Res Lett, 17: 1 465~1 468
- Hayakawa M, Molchanov O A, Ondoh T, et al. 1996. Anomalies in the sub-ionosphere VLF signals for the 1995 Hyogo-Ken Nanbu earthquake[J]. J Phys Earth, 44: 413~418
- Scholz C H, Sykes L R, Aggarwal Y P. 1973. Earthquake prediction: a physical basis[J]. Science, 181(4 102): 803~810
- Yoshino T. 1991. Low-frequency seismogenic electromagnetic emissions as precursors to earthquakes and volcanic eruptions in Japan[J]. J Scientific Exploration, 5(1): 121~144
- Yamada I, Masuda K, Mizutani H. 1989. Electromagnetic and acoustic emission associated with rock fracture[J]. Phys Earth Planet Inter, 57: 157~168

ULF ELECTROMAGNETIC PRECURSORS BEFORE 1999 Jiji, TAIWAN EARTHQUAKE AND THE COMPARISON WITH RESULTS OF SIMULATING EXPERIMENTS

钱书清¹⁾ 胡金琦¹⁾ 周江国¹⁾
高建天¹⁾ 王美玲²⁾ 廖江平¹⁾

1) Laboratory of Tectonophysics & Institute of Geophysics, China Seismological Bureau, Beijing 100081, China
2) Seismological Bureau of Fujian Province, Fuzhou 350003, China

Key words: Jiji earthquake; experiment of rock fracture under compression; ULF electromagnetic precursors; mechanism of production and propagation