

# 岩石破裂电磁辐射(EMR)现象实验研究

王立凤, 王继军, 陈小斌, 赵国泽  
(中国地震局地质研究所, 北京 100029)

**摘要** 岩石破裂电磁辐射现象是客观存在的物理现象. 随着电磁辐射观测技术在地震研究、冲击矿压预测等领域的应用, 极大地推动了岩石破裂电磁辐射的实验研究. 本文对岩石破裂电磁辐射的影响因素以及相伴生的现象, 以及有关的物理解释进行了概括介绍. 由于不同研究者使用实验设计、实验参数、实验条件的不同, 使得观测和研究结果同样难以统一认识. 不同的研究者根据各自的试验提出了不同的物理机制. 同时对已发现现象的重复性、证实性研究岩石试验缺乏. 严重匮乏利用数值模拟以及建立模型定量研究岩石破裂的电磁辐射. 此外, 岩样实验系统不同于实际的地震系统, 进行模拟震源环境的实验研究, 发展大尺度的标本和原岩现场实验的基础上, 如何建立室内室外岩石实验与地震观测事实之间的联系是问题的关键.

**关键词** 岩石破裂, 电磁辐射, 物理机制

**中图分类号** P315.317.318

**文献标识码** A

**文章编号** 1004-2903(2007)03-0715-05

## Experimental and theoretical investigations of electromagnetic radiation induced by rock fracture

WANG Li-feng, WANG Ji-jun, CHEN Xiao-bin, ZHAO Guo-ze  
(Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

**Abstract** The phenomena of electromagnetic radiation(EMR) during fracture of rocks is a fact. With the applying in earthquake forest and monitoring rock and coal burst failure the investigation of EMR is developed greatly. The paper reviews the signal characteristics and the effect factors. The mechanism of EMR in rock friction is analyzed by far. Phenomenon observed and research results are difficult because of the distinction of experimental design, parameter and condition. Therefore various mechanisms are proposed. In the future, Experiment must be done for validating the results of the previous ones. Meanwhile we must quantify electromagnetic radiation of synthesis models. In addition, specimen experiment is different from a true earthquake. So big scale specimen or field experiment is developed greatly in order to simulating the environment of earthquake. Of course the relation of rock experiment and earthquake is the key to problem.

**Keywords** rock fracture, electromagnetic radiation, physical mechanism

### 0 引 言

许多大地震前都曾观测到电磁辐射(Electromagnetic radiation, 缩写为 EMR)的异常现象<sup>[1,2]</sup>. 此外, 岩暴、煤与瓦斯突出前都观测到了电磁辐射. 总之, 岩石破裂过程中电磁辐射是一个普遍的物理现象. 电磁辐射的探测除应用于地震监测外, 在工程

安全性评价, 建筑物微破裂, 以及煤与瓦斯突出、冲击地压等煤岩动力及隧道稳定性监测等方面也具有广泛应用<sup>[3~10]</sup>. 为了探索岩石破裂、地震前电磁异常信号的物理机制, 岩石破裂过程电磁辐射的实验研究成为一项重要课题. 岩石实验研究, 主要针对大理岩、花岗岩、石英岩等坚硬岩石的电磁辐射效应、频谱特征及其产生机理<sup>[11~23]</sup>; 煤岩电磁辐射研究,

**收稿日期** 2007-01-10; **修回日期** 2007-04-20.

**基金项目** 国家自然科学基金重点项目(40534023)和 863 课题; 中国地震科学卫星计划的预研与制定(2003AA134060), 地震科学联合科学基金(606019)联合资助.

**作者简介** 王立凤, 1973 年生于天津市静海县, 助理研究员, 硕士, 中国地震局地质研究所, 主要从事电磁方法研究(E-mail: wanglf309@ sina.com)

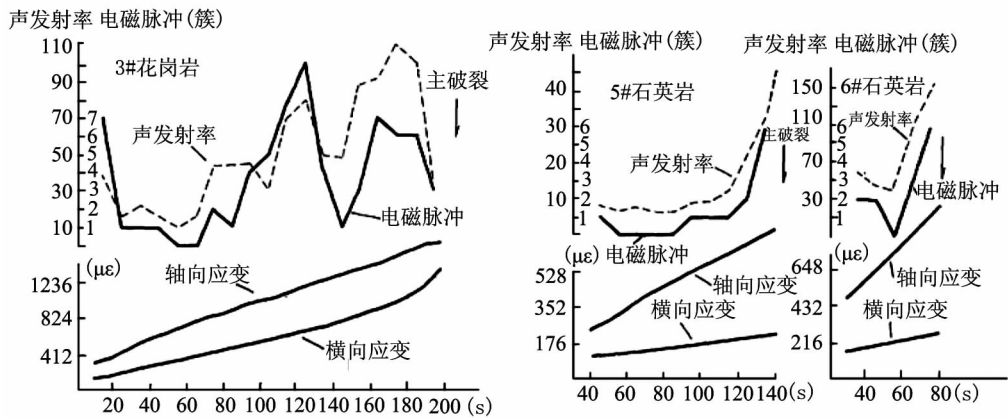


图1 电磁脉冲与声发射率、应变关系图(徐为民,1985)

Fig. 1 The relation of electromagnetic pulse, acoustic emission and strain

主要针对煤、砂岩、泥岩等强度较低岩石的电磁辐射特性及其应用<sup>[5]</sup>;监测大型工程的安全性研究,主要研究混凝土的电磁辐射特性<sup>[24]</sup>;还有学者对黄铁矿、黄铜矿等破裂时的电磁辐射特性做了研究<sup>[25]</sup>,以及玻璃陶器破裂的幅射特性<sup>[26]</sup>;此外,为了模拟地壳中岩石所处环境的复杂性,探索震源体在临震阶段及发震时产生电磁脉冲信号的可能性,国内外专家还做了室外的爆破实验<sup>[27~29]</sup>.尤其是地震电磁辐射源来自何处,是直接来自震源区还是地壳,还是大气层的电离层,对于探讨地震的物理机制,以及地震短临预报都有着特殊的意义.电磁辐射试验研究对于解决这些问题都有一定的启示作用.

## 1 电磁信号特性

许多学者在实验室内进行岩石破裂模拟实验.实验表明,不管是屏蔽条件和不屏蔽的条件下,绝大部分岩石在受压至破裂以前都发出脉冲式电磁辐射信号.在单轴和剪切加载方式下,岩石在形变至宏观破裂过程中均记录到电磁(EM)信号,电磁信号具有脉冲振幅的特点,且频带较宽.下面简单概括一下与电磁辐射信号相关的影响因素.

### 1.1 与应力(载荷)的关系

电磁信号与主破裂(应力突降)之间有明显的相关性,主破裂发生时刻电磁辐射强度最大<sup>[13,19,20,24]</sup>.如图1,5#和6#样品随着应力水平的提高,电磁脉冲频度发展的总趋势也增加,岩样主破裂时都有电磁辐射产生,而最强的信息发生在岩样的主破裂到解体的时段内.3#样品应力与电磁脉冲数量的关系就复杂得多.随着应力升高,电磁辐射信号基本上

呈增强趋势.但有时在初始加载阶段,电磁辐射强度较高,在应力峰值之后,应力越来越低,电磁辐射也呈减弱趋势<sup>[5]</sup>.

### 1.2 与声发射的关系

不同岩样破裂过程中,电磁辐射信号与声发射信号的对应关系十分复杂.既有同步性,也有非同步性<sup>[11,13]</sup>.

声发射是岩石破裂的结果.如图1所示,实验显示电磁辐射率与声发射率曲线不仅形态相似,而且它们的最大值大多同步,说明电磁辐射与岩石破裂有密切的关系<sup>[11,16]</sup>.但是,电磁辐射率图与声发射率图又有明显的区别,如图2所示,主要是前者多为连续型,而后者多为脉冲型;电磁辐射率曲线在岩石受压开始阶段一般都有个高值,而声发射率曲线则没有;此外,电磁辐射率曲线一般比声发射率曲线衰减慢.电磁辐射信号大部分与声发射信号相对应,在声发射之前出现的电磁辐射信号,表现为背景扰动增大,波形不象岩石破裂时的电磁信号那样为一组由大到小的波列,并且频谱没有明显的主峰.

在另一些试验中,结果表明:强声发射并不伴随有强的电磁辐射,一些电磁辐射信号往往与弱的声发射相关;在岩石主破裂时虽然观测到很强的声发射信号,但并未同时记录到强的电磁辐射信号<sup>[40]</sup>.

### 1.3 与岩性的关系

岩样的电磁辐射特性与岩样的矿物成分相关.含压电矿物成分多的岩石,破裂过程中记录到的EMR数量高于含压电矿物少的岩石,如石英花岗岩的EMR事件数量大于斜长石花岗岩和细晶岩.含石英晶体岩石在破裂过程中的电磁信号,其振幅具

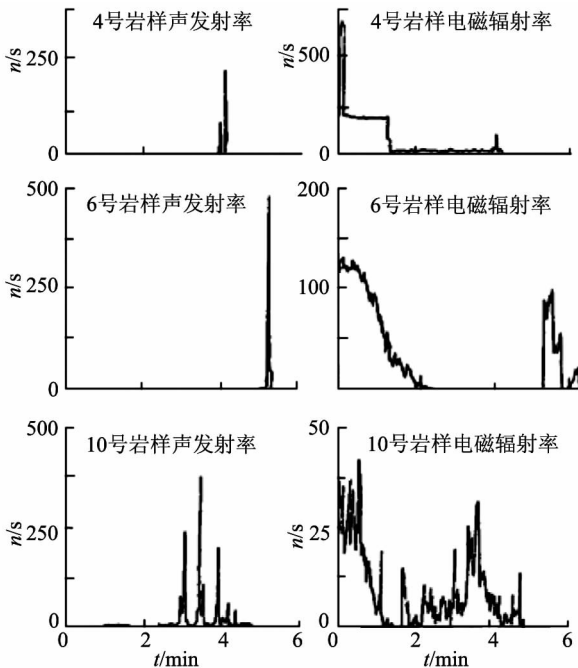


图2 岩石破裂过程中的声发射率和电磁辐射率的记录曲线(曹惠馨,1999)

Fig2 The curves of electromagnetic pulse, acoustic emission during rock fracture

有脉冲形态,信号的频率较高<sup>[11,40]</sup>.石英成分的存在,更有利于岩样产生高频(1~5 MHz)和低频(100 Hz~100 kHz)电磁辐射信号,但对中频信号(100 kHz~1MHz)的产生影响不明显<sup>[25]</sup>.岩样的石英含量与信号频率之间的关系不明显.另外,岩样电磁辐射特性也与岩样矿物的结晶程度有关,如粗粒大理岩和钾质花岗岩所产生的电磁信号数量大于辉长岩的数量.实验表明,岩石的矿物成分和微观结构都对EM信号事件的性质具有重要影响<sup>[40]</sup>.

此外,岩石的力学性质对岩石电磁辐射也有影响.最大电磁辐射强度与岩石试块强度间呈较好的正相关性,基本上是岩石试块强度越大,最大电磁辐射强度越高<sup>[5,16]</sup>;与同一类岩样比较,未出现电磁辐射信号的,都是破裂抗压强度最低的<sup>[19]</sup>.

#### 1.4 时空关系

大多数实验中,在岩石主破裂前普遍观测到电磁信号.主破裂时的电磁信号幅度比微破裂时大;而且,不是每个实验,岩石主破裂时都有电磁辐射信号出现;主破裂辐射电磁信号具有方向性,不同观测方位接收到的信号强度不同,对着主破裂方位接收到的信号最强;有的实验中,不同方位的天线,有些接收不到信号<sup>[19,20]</sup>.

#### 1.5 频率特征

各种实验中,由于使用接收设备的频带范围不同,无法统一了解电磁信号的频带特性.很多实验,在超低频段普遍观测到电磁辐射.此外在岩石破裂的同时也观测到可见光<sup>[11,12]</sup>.一般认为,岩石破裂电磁辐射具有宽广的频带范围.

#### 1.6 数量和强度特征

电磁辐射事件数量与加载方式、岩样尺寸等因素密切相关.在相同加载方式下,大尺寸岩样出现电磁辐射事件的比例明显大于小尺寸岩样.这可能与岩样加载破裂的能量有关.它表明,岩石破裂过程中的电磁辐射与破裂体的体积相关,这个因素的影响要大于岩性因素,但岩性因素的影响依然存在<sup>[40]</sup>.实验的电磁辐射特性也与实验参数的设置相关.

## 2 岩石破裂电磁辐射的物理机制

对于岩石破裂过程中电磁辐射的物理机制,国内外许多学者做了大量研究. Niston(1977)和 Warwick(1982)根据自己的实验结果,提出了压电效应理论.压电效应引起裂隙表面贮电,随着压力增大,电荷增加,裂隙附近区域静电场也增强,当电场高达一定值时,或者介质击穿,电荷释放,或者由于破裂摩擦产生了电荷扰动,随着压电场的突降,形成发光<sup>[11]</sup>.前苏联学者 Gokhberg 认为,在力学的电现象,包括压电效应、斯捷潘诺夫效应、摩擦起电过程、双导电层的破裂等均是岩石在应力作用下,由分离电荷张弛而产生的电磁效应.佩利尔曼认为,岩石中的微裂隙、亚微裂隙产生的波动电荷,相对于固体介质的运动形成电流体系而产生电磁辐射,它与裂隙缝壁起电和裂隙缝壁运动的特性有关.前苏联地震学家萨多夫斯基等认为电磁脉冲与电介质脆性破裂的裂缝壁起电和裂缝壁运动特征有关<sup>[30]</sup>.岩石破裂中有电子发射<sup>[14]</sup>,岩石受到压缩时,在局部区域的应力可能比所加应力高几个量级,因此一些原子的外壳层电子有可能获得高的动能逃逸出来,当岩石呈爆炸方式破裂时,在压缩过程中贮存在岩石中的能量以猝发方式释放出来,伴随着这种能量释放和固体键的断裂,原先已逃逸出的自由电子将从岩石中挣脱出来,这些电子的大多数具有较低能量,它和周围介质分子碰撞产生光和电磁辐射.朱元清等(1991)根据郭自强等提出的破裂岩石的电子发射与压缩原子模型理论,以及一系列实验和观测结果,提出岩石破裂时产生的电磁辐射是裂纹尖端电荷随着裂纹加速扩展所产生的假说,并以电偶极子模型计算了单裂纹沿一个方向扩展时产生的近场电磁场强

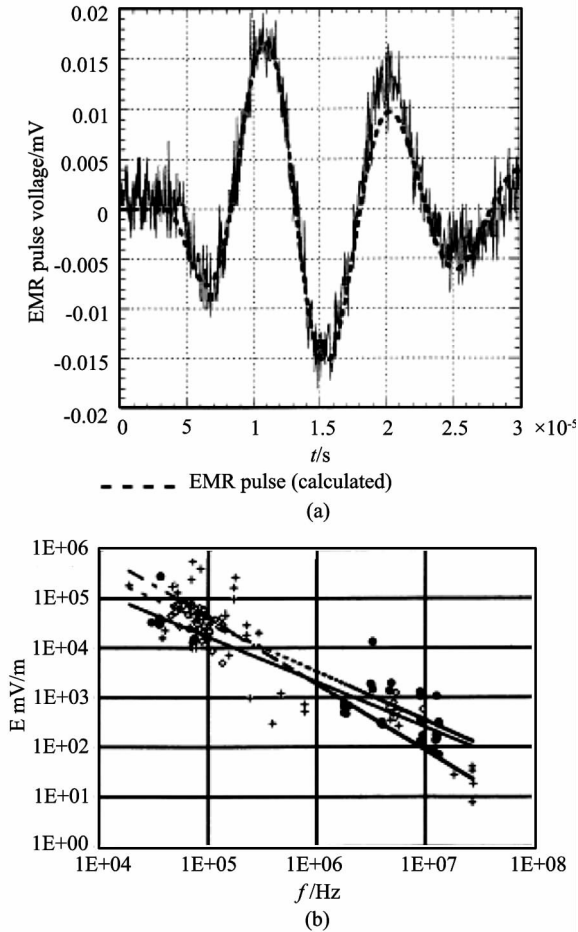


图3 A) 试验电磁辐射脉冲与数字拟合 B) 压缩白垩、花岗岩和玻璃陶器, 电磁辐射脉冲的振幅与频率的关系 (\* 白垩; ◇ 花岗岩; + 玻璃陶器; — 白垩趋势线; - - 花岗岩趋势线; - · - 玻璃陶器趋势线)

Fig3 A) An experimental EMR pulse and its numerical fit; B) Amplitude-frequency relation of EMR pulses associated with chalk, granite and glass-ceramic compression (\* chalk; ◇ granite; + glass-ceramic; — chalk trendline; - - granite trendline; - · - glass-ceramic trendline). (V Frid, 2000)

度<sup>[32]</sup>. 岩石标本本身具有大量的微裂纹, 并随着压力的增大而增加. 在力场的作用下, 由于应力集中, 这些微裂纹在裂纹尖端会发射低能电子, 同时产生声发射, 由于岩石标本表面裂纹尖端电子的逃逸和裂纹分布的随机性, 会在标本表面形成微电流, 并随着压力的增加而增大, 当到达临界应力时, 裂纹大量增加并沿着轴力方向重新分布, 形成主破裂带, 主破裂带是由密集的微裂纹组成. 当主破裂带上的某处由于高应力集中而超出岩石的破裂极限时, 岩石开始破裂. 在破裂过程中由于内外部裂纹的导通, 使得内外部破裂尖端发射的大量电子直接飞入空间而被

记录到. 由于大量电子的逃逸, 使得裂纹尖端聚集相当数量的电荷, 并产生很高的电场, 随着裂纹的加速扩展, 正是这些裂纹尖端的运动电荷产生电磁辐射. 郭自强<sup>[17]</sup>提出岩石破裂产生的低频电磁辐射起因与微破裂引起的电子发射. 郭子祺<sup>[33]</sup>提出了多裂纹同步扩展辐射模型.

无论从何种角度出发, 电磁脉冲的规律性必定与岩石破裂过程的形式有关. 很多研究者研究了岩石破裂过程中电磁脉冲规律, 陈忠辉<sup>[37]</sup>建立了电磁脉冲时间序列的理论模型, 他所建立的模型主要分析了电磁脉冲信号与位移速率的关系. 而 Rabinovitch 等所建立的模型<sup>[34, 35, 36]</sup>, 主要侧重与电磁脉冲信号的时间分布特征. 如图 3, Rabinovitch 根据试验结果, 单个电磁脉冲可以用下式表示:

$$A = \begin{cases} A_0 \sin(\omega(t - t_0)) & t < T \\ (1 - \exp(-(t - t_0)/\tau)) & t < T \\ A_0 \sin(\omega(t - t_0)) \exp(-(t - T)/\tau) & t \geq T \\ \times (1 - \exp(-(T - t_0)/\tau)) & t \geq T \end{cases}$$

其中  $t$  为时间,  $t_0$  为从起始时间到脉冲开始的时间,  $T$  为从起始时间到脉冲包络最大值的时间. 因此  $T' = T - t_0$  是达到脉冲最大值的间隔时间;  $\tau$  上升和下降时间, 其结果是相同的;  $A_0$  是脉冲的幅度,  $\omega$  是频率. 除了  $t$  以外所有这些参数都是根据试验结果用最小二乘法拟合计算出来的. 如此以来, 研究了电磁脉冲的变化规律, 就可以通过电磁脉冲时间序列特征, 进一步认识岩石破裂的过程, 对于探讨岩石发射失稳主要破裂前的规律有着重要的意义, 无疑为预测、预报地震和滑坡提供可靠的依据.

### 3 存在问题及发展趋势

在室内实验方面, 由于岩样破裂过程中产生电磁辐射信号微弱, 频带范围很宽, 迫切要求采用高增益、低噪声, 以及宽频带的实验技术. 此外, 目前的实验大多采用单轴压缩, 剪切破裂实验做得较少; 岩石单轴压缩、拉伸破坏的实验较多, 但对岩石摩擦的实验较少; 我国目前也还没有开展三轴条件的实验研究.

室内实验有其局限性, 岩石样品的尺度与震源尺度相差巨大, 实验的应力等模拟条件与天然地震相差甚远, 这类实验结果能否推广应用于地质实体也是需要深入研究的课题. 因此, 探索震源体在临震及发震时产生电磁脉冲信号的可能性, 模拟地壳中岩石所处环境的复杂性, 进行大尺度的标本和原岩现场实验, 如何建立室内室外岩石实验与地震观测

事实之间的联系,如何利用数值模拟进行电磁辐射物理机制的研究等,已经成为当今岩石力学和地震前兆实验研究的发展方向。

### 参 考 文 献 (References):

- [1] 毛桐恩,钱书清,刘小伟.震前电磁波观测与实验研究文集[C].北京:地震出版社,1989.
- [2] 陈智勇,杜晓泉,陶如谦,等.电磁辐射与地震[C].北京:地震出版社,1998.
- [3] Frid V. Calculation of electromagnetic radiation criterion for rockburst hazard forecast in coal mines[J]. Pure and Applied Geophysics, 2001, 158: 931~944.
- [4] Frid V, Vozoff K. Electromagnetic radiation induced by mining rock failure [J]. International Journal of Coal Geology, 2005, 64(1): 57~65.
- [5] 王恩元,等. 受载岩石电磁辐射特性及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1473~1477.
- [6] 王恩元,何学秋,窦林,周世宁,聂百胜,刘贞堂. 煤矿采掘过程中煤岩体电磁辐射特征及应用. 地球物理学报, 2005, 48(1): 216~221.
- [7] 窦林名,何学秋. 冲击矿压危险预测的电磁辐射原理[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(2): 427~431.
- [8] 撒占友,何学秋,王恩元,于广明. 煤岩变形破坏电磁辐射记忆效应实验研究. 地球物理学报, 2005, 48(2): 379~385.
- [9] 撒占友,何学秋,王恩元. 煤岩变形破坏电磁辐射记忆效应的力电耦合规律. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1517~1522.
- [10] 刘建辉,李化敏. 电磁辐射法在岩爆监测中的应用[J]. 矿业研究与开发, 2006, 26(1): 69~73.
- [11] 徐为民,童莞生,吴培稚. 岩石破裂过程中电磁辐射的实验研究[J]. 地球物理学报, 1985, 28(2): 181~190.
- [12] 孙正江,王丽华,高宏. 岩石标本破裂时的电磁辐射和光发射[J]. 地球物理学报, 1986, 29(5): 491~494.
- [13] 孙正江. 岩石破裂过程中的低频电磁辐射. 地震, 1986, 4: 1~4.
- [14] 郭自强,周大庄,施行觉,等. 岩石破裂中的电子发射[J]. 地球物理学报, 1988, 31(5): 566~571.
- [15] 吴小平,施行觉,郭自强. 花岗岩压缩带电的实验研究[J]. 地球物理学报, 1990, 33(2): 208~211.
- [16] 曹惠馨,钱书清,吕智. 岩石破裂过程中超长波段的电、磁信号和声发射的实验研究[J]. 地震学报, 1994, 16(2): 235~241.
- [17] 郭自强,刘斌. 岩石破裂电磁辐射的频率特性[J]. 地球物理学报, 1995, 38(2): 221~226.
- [18] 钱书清,吕智,任克新. 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, 1998, 20(5): 535~540.
- [19] 钱书清,任克新,吕智. 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, 1996, 18(3): 346~351.
- [20] 钱书清,郝锦琦,周建国,等. 岩石受压破裂的 ULF 和 LF 电磁前兆信号[J]. 中国地震, 2003, 19(2): 109~116.
- [21] 郝锦琦,钱书清,高金田,等. 岩石破裂过程中的超低频电磁异常[J]. 地震学报, 2003, 25(1): 102~111.
- [22] Frid V, Rabinovitch A, Bahat D. Electromagnetic radiation associated with induced triaxial fracture in granite[J]. Philosophical magazine letters, 1999, 79(2): 79~86.
- [23] Brady B T, Rowell G A. Laboratory investigation of the electro-dynamics of rock fracture[J]. Nature, 1986, 321: 488~492.
- [24] 钱书清,郝锦琦,邓明德,等. 混凝土样品受压破裂过程中的电磁信号[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 797~800.
- [25] 刘煜洲,刘因,王寅生,等. 岩石破裂时电磁辐射的影响因素和机理[J]. 地震学报, 1997, 19(4): 418~425.
- [26] Frid V, Rabinovitch A, Bahat D. Fracture induced electromagnetic radiation[J]. Appl. Phys. 2003, 36: 1620~1628.
- [27] 钱书清,张以勤,曹惠馨,等. 岩石破裂时产生电磁脉冲的观测与研究[J]. 地震学报, 1986, 8(3): 301~307.
- [28] Tomizawa M, Hayakawa T, Yoshino K, Ohta, T, Okada, H, Sakai. Observation of ELF/VLF Electromagnetic variations associated with a seismic experimental explosion[C]. In: M. Hayakawa and Y. Fujinawa. Electromagnetic Phenomena related to Earthquake Prediction[C]. Terra Scientific Publishing Company, 1994: 337~347.
- [29] 金安中,赵强,姜枚,等. 小尺度岩石爆破引起电磁辐射野外实验观测结果[J]. 地震学报, 1997, 19(1): 45~50.
- [30] 萨多夫斯基,等. 地震的电磁前兆[M]. 北京:地震出版社, 1986. 34~45.
- [31] 郭自强,尤峻汉,李高,等. 破裂岩石的电子发射与压缩原子模型[J]. 地球物理学报, 1989, 32(2): 173~177.
- [32] 朱元清,罗祥麟,郭自强,等. 岩石破裂时电磁辐射的机理研究[J]. 地球物理学报, 1991, 34(5): 594~601.
- [33] 郭子祺,郭自强. 岩石破裂中多裂纹辐射模型[J]. 地球物理学报, 1999, 42(增刊.): 172~177.
- [34] Rabinovitch A. Parametrization of electromagnetic radiation pulses obtained by triaxial fracture of granite samples[J]. Philosophical Magazine Letters, 1998, 77: 289~293.
- [35] Frid V, Rabinovitch A, Bahat D. Fracture induced electromagnetic radiation[J]. Phys. D: Appl. Phys. 2003 (36): 1620~1628.
- [36] Frid V, Bahat D, Goldbaum J, Rabinovitch A. Experimental and theoretical investigation of Electromagnetic radiation induced by rock fracture[J]. Israel Journal of Earth Sciences, 2000, 49: 9~19.
- [37] 陈忠辉,蔡永生,于光明. 岩石破裂过程中电磁脉冲规律的研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版) 1998, 17(3): 244~24.
- [38] 董玉芬,王来贵. 地震前电磁异常现象与实验进展. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 1999, 18(5): 524~544.
- [39] 钱书清,郝锦琦,周建国,等. 1999年9月21日台湾集集 Ms7.4 地震前 ULF 电磁信号及其与模拟试验结果的比较[J]. 地震学报, 2001, 23(3): 322~327.
- [40] 郭自强,郭子祺,钱书清,等. 岩石破裂中的电声效应[J]. 地球物理学报, 1999, 42(1): 74~83.
- [41] 郭自强. 地震低频电磁辐射研究[J]. 地球物理学报, 1994, 37(1): 261~268.