



震电效应研究进展与前景展望

范小平^{1,2}, 杨从杰², 李清河², 田 韬²

(1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100008; 2. 江苏省地震局, 江苏南京 210014)

摘要:震电效应是引起地震电磁异常现象的主要因素。本文介绍了震电效应现象, 并分别就震电效应的观测、试验及理论研究进行了综述, 最后对震电效应研究及应用前景进行了讨论。

关键词:震电效应; 电磁辐射; 地震观测预报

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2006)04-0364-05

Evolution and Foreground of Seismo-electric Effect Research

FAN Xiao-ping^{1,2}, YANG Cong-jie², LI Qing-he², TIAN Tao²

(1. Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China;

2. Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China)

Abstract: Seismo-electric effect is a main factor for causing the anomalies of seismic electro-magnetic phenomena. In this paper the seismo-electric effect is introduced firstly. Then the observation, experimentation and theory study for seismo-electric effect phenomena are summarized respectively. At last the research and application foreground of seismo-electric effect in earthquake observation and prediction are discussed.

Key words: Seismo-electric effect; Electro-magnetism radiation; Earthquake observation and prediction

0 引言

许多地震观测资料表明^[1-10], 地震孕震过程中孕震区域会表现出不同程度的电磁辐射异常现象, 作为一种临震前兆已经引起了人们的关注, 并有可能成为开展可靠地震短临前兆观测研究的理想领域之一^[11]。许多国家的学者对此进行了深入的研究, 比较一致的认为震电效应是引起地震电磁辐射现象的原因之一, 也是引起视电阻率异常及视电阻率各向异性程度变化的原因之一^[12-13]。为了探讨震电效应现象及其激发机理, 地学界已经开展该项工作的观测、试验和理论研究。本文首先对地震过程中震电效应现象进行概述; 其次对震电效应的研究进展进行讨论; 最后对震电效应在地震观测预报中的

研究、应用前景进行展望, 以此加深对震电效应的理解, 为进一步认识地震电磁辐射异常产生的机理开拓新的思路。

1 震电效应现象

许多地震发生过程中, 震中或邻近区域会出现不同程度的电磁波辐射现象^[2,5-9]。这种电磁波辐射异常信号是地面电磁场、大气电磁场、地磁脉动、电离层扰动、人工电磁波等电磁波信号的叠加。许多观测及研究也同时表明地面地磁场的变化才具有真正的前兆意义, 引起地面电磁辐射异常可能原因之一便是震电效应。从严格意义上讲^[14], 震电效应

收稿日期: 2006-05-12

基金项目: 江苏省社会发展基金(BS2005068); 地震科学联合基金(606044)

作者简介: 范小平(1974-), 男(汉族), 甘肃宁县人, 在读博士, 现主要从事地震各向异性方面、震电效应、速度结构方面的研究。

包括自然界中所有的机械力与电磁力的耦合机制。这些机制包括了:(1)材料破裂和磨擦生电、发光和电磁辐射;(2)材料准静态变形生电;(3)压电及电致伸缩;(4)双电层动电现象。地震孕震过程中几乎涉及了上述四种可能激发震电效应的过程,因为根据试验研究,岩石的微破裂、主破裂、磨擦、压电效应、动电效应都具有较高的震电能量转换效率,在一定条件下,动电效应震电能量转换效率最高,可达 10^{-3} mV量级,而且在不同的孕震阶段、不同的孕震区域激发震电效应的方式有所差异。由此可见,地震孕震过程中震电效应对电磁辐射异常的产生有很大贡献。因此,基于震电耦合机制的震电效应是用来分析、解释震前、震中和震后产生电磁异常扰动原因的主要工具^[12-13],正确认识震电效应现象对进一步认识和理解地震电磁辐射异常信号具有重要的理论和实践意义。

2 震电效应研究进展

2.1 震电效应的观测

最早提出声电效应现象的是 Debye^[15],于1933年发现了声波可以引起电解液中带电悬浮物与阴离子分离而产生电场;Thompson^[16]于1936年发现了第一类震电效应(I效应),即电阻效应,弹性形变可以引起介质电阻率的变化,并认为地震波和电场耦合的方法可用于资源勘探;1939年 Ivannov^[17]通过爆破试验观测到了由爆破引发的电场,发现由弹性波引发的电场与弹性波场方向相反,并提出了第二类震电效应(E效应),即流动电势效应。在过去几十年里,虽然人们对震电效应的耦合机制并不甚了解,但对震电效应研究仍没有间断。国外学者对震电效应在地震观测预报方面的研究进行了大量的主动性和被动性观测,研究领域涵盖了:(1)震前、震中及余震过程中的电磁场变化观测研究^[18];(2)地表激发—接收震电响应实验观测^[19];(3)井中震电效应观测研究^[20]。研究发现震电效应是可以以任何时间段为周期而发生的一种自然现象^[21];自然电位(SP)在时间和空间尺度范围内的变化与地热场^[22-23]和火山活动^[24-28]具有紧密的联系;而电位的变化与地形、储层放电、地下塌方和地壳应力的变化等因素有关。在世界上许多国家^[29-31]建立了专用的观测站来测量研究震前、震中和震后产生的电磁异常变化,电磁波的频谱覆盖了从甚低频(VLF)到甚高频(VHF)频带内的所有能量范围。在产生震电效应的诸多因素中,通常认为动电效应(流动电

势效应)是导致SP变化的主要因素^[32-35]。Muir Wood 和 King^[36]发现震后数月内河水的放电现象有较大增加并认为流动的水(液体)充满了整个上覆地壳,并且在震后弛豫过程中释放到了地表。Scholz^[37]还发现了震前存在流体向膨胀区扩散的现象。这些研究结果一方面证实了地震过程中电磁辐射现象的普遍性,另一方面也认为震电效应是引起或造成震前电磁辐射异常的原因之一。

地震过程中的震电效应现象很早就引起我国学者的注意。早在1966年邢台地震和1976年唐山地震期间,我国地震工作者就观测到了地震过程中电磁波辐射异常现象,从此便开始了为地震观测预报服务的电磁现象的观测与研究活动。时至今日我国地震工作者就地震中的电磁异常现象、地震电磁异常的前兆意义、地震电磁异常幅度同地震强度的关系以及产生或诱发地震电磁异常的可能的物理机制进行了详细的论述,取得了许多宝贵的经验和结论。普遍认为:(1)地震电磁辐射具有明显的时间特征,电磁辐射的强度与持续时间的长短均与孕震震级、震中距有一定的关系^[38];(2)地震电磁辐射具有明显的空间特征,不同的观测距离、观测区域、观测方向、不同的传播介质结构及区域构造观测到的电磁辐射特征有所差异,且震中位于大陆和海洋的电磁辐射信号也有差异;(3)地震电磁辐射频率非常丰富,范围从超低频到超高频,但不同的频率成分与地震对应关系有所差异,多数超低频电磁辐射异常映震能力比较好,电磁辐射异常信号的幅度与频率有关;(4)地震与电磁辐射异常有相当高的相关性^[39],与地震震级有一定的关系,特别是5级以上地震相关性最高,可达100%。对于中小地震,地震过程中电磁辐射则有一定的随机性,有时出现电磁异常却没有地震,有时有地震部分区域台站却观测不到电磁辐射异常信号。这些观测与研究进一步让人们认识到地震过程中电磁辐射的客观性,也对加强地震电磁辐射现象的深入研究提出了要求。

2.2 震电效应的试验研究

对震电效应的试验研究主要集中在地球物理勘探领域和地震观测预报领域,而以地球勘探领域的研究独树一帜。最初的震电效应研究特别是试验研究就是以勘探为目的,但随着人们认识水平的提高,与震电效应相关的观测、试验结果逐渐推广应用到地震观测预报领域。

1936年地球物理学家 R. R. Thomposn^[16]通过爆破试验发现了震电信号的存在,并认为爆炸后引

起电极接地电阻发生变化的原因是地震波的传播引起地温或固体颗粒间的接触电阻变化造成的;1936年 L. Blau 和 L. Statham^[14]对震电效应在资源勘探中的前景进行了研究,认为接地电阻的变化是引起震电效应现象的原因之一;1941年 Ivanov^[17]将震电效应原理应用到石英脉和韦晶岩勘探中;日本小川俊雄和尾池和夫用锤子敲打花岗岩,弯曲岩石致使破裂,观测到了不同频率和断续脉冲信号^[40];美国 G. Lymm 和 O. Gress 观测到了 900 Hz 和 5 Hz 的低频信号^[40];Soeblev, Keptic 等运用爆炸源观测到了不同强度的电磁场^[14];1993年 A. H. Thompson 等对震电效应在资源勘探中的应用研究,特别是油气储层的勘探取得了可喜的成果^[14];1996年波达波夫^[41]给出了直流电场对孔隙饱和介质中声波的影响的试验结果,发现直流电场对孔隙饱和介质中弹性场参量的影响有一定的阈值,而且具有方向性。

我国学者对震电效应的试验研究也取得了许多可喜的成绩。1993年刘洪从理论上研究了含流体多孔介质中震电效应的机制及量级估量,提出了浓差极化放大机制及偏置作用对震电信号的影响;接着又开展了震电转换波观测的预研性实验,并于1996年开始开展多次外部施加电场的地震信号采集和震电效应野外实验研究^[42];1996年裘慰庭综述了震电效应在油气勘探中的应用前景^[43];戴世坤提出了第三类震电效应^[44];孙卫斌分析了在油气层上振动激励效应的观测结果^[45];2001年石昆法发现在砂土上的震电信号比粘土上的大,含石油岩芯标本上的震电效应信号比含水岩芯标本上的强,而且通过室外实验也已经测量到可信的震电效应信号^[46]。为了研究地震孕震过程临震阶段的电磁辐射现象,1983年钱书清等人观测到了 500 t TNT 爆破花岗岩过程中的电磁辐射现象^[47];1986年钱书清等人两次记录到地下 300 m 岩石破裂所产生的电磁辐射信号^[48];1989年钱书清等人在试验室通过对岩石施加双轴压力,模拟地震孕震区构造断裂带的活动,从试验角度解释了地震电磁辐射前兆不同步现象的物理机制^[49];1996年钱书清等人在试验室观测到岩石破裂时中、高频电磁辐射的方位性^[50];1999年郭自强发现岩石在单轴压力下裂缝发射电子和发光现象^[51]。综上所述,无论是基于含流体裂隙介质的动电效应试验还是基于岩石破裂的压电效应试验,都说明了震电效应的客观性,普遍性。震电效应有着巨大的、潜在的科学价值及运用价值,特别是对于油

气的开发和地震电磁异常信号的提取等。

2.3 震电效应的理论研究

震电效应虽然属于交叉学科研究范畴,涉及了物理化学、流体力学、电学、胶体化学、岩石物理及震源物理等方面,而且仍然处于认识与探索阶段,但对理论的探索从发现震电效应这种现象就开始了。J. Frenkel^[52]在1944年首先建立一套震电方程。方程描述了机械力驱动流动电流,但并未考虑到电磁波的辐射问题。1989年 Neev^[53]等人提出了震电效应的孔隙介质理论,完善了 Biot^[54]孔隙介质方程,但对震电机理考虑不全,且未结合电磁波方程,也得不到电磁场。1994年 S. R. Pride^[55]建立了一套较完整的孔隙介质中由流势引起的震电效应的方程组,虽结合了电磁波方程,但仍对震电机理考虑不全。前苏联学者波达波夫^[41]等人提出了基于第一、第二类震电效应的震电耦合控制方程。目前学者引用比较多的就是波达波夫和 S. R. Pride 的弹性—电磁耦合波动方程。

早在1951年,傅承义^[56]先生就对震电效应现象的应用进行了研究。韩其玉^[57]从孔隙介质波动力学观点出发,研究了孔隙介质中几种震电效应转换机制,给出了相应的震电耦合方程。胡恒山^[58]等人对波达波夫和 Pride 的震电耦合方程进行了对比分析,用 Biot 介质参数说明了波达波夫震电方程组中弹性动力学参数的含义,在忽略第一类震电效应条件下将该方程组与 Pride 方程组进行比较,说明了二者在描述第二类震电效应方面的异同点,同时指出波达波夫方程组忽略了流体与固体的耦合质量;方程中的黏性耗散项丢掉了—个孔隙度因子,依据该方程组计算出的弹性波和转换电场的幅度将偏大;且边界条件之一存在错误,会影响对波在界面上的反射透射规律的描述。戴世坤^[44]提出了“第三类震电效应”的概念,建立了双相介质震电波控制方程,分析了震电波场动力学和运动学特征。朱涛^[59]计算了具有对称压力源分布的水平层状半空间介质模型和各向异性裂隙模型的地表冲流电位异常,估计了不同介质模型下地表冲流电位异常的最大幅值。刘洪^[60]对天然电磁场高分辨探测油气的可能性进行的论述,分析了电磁波对震电参数的分辨率,并与电磁波对电导率参数的分辨率进行了对比。实际上,完整的震电耦合方程非常复杂,不仅要考虑到各种情况下的震电耦合机制,而且还要考虑介质微观因素对震电效应的影响。

3 前景展望

震电效应是一种自然现象,是客观存在的事实。从激发机理上讲,震电效应是机械力与电磁力的耦合;从宏观现象上讲,震电效应是引起地震电磁辐射异常、电阻率异常及电阻率各向异性程度变化的原因之一;从微观角度讲,震电效应是带电离子、带电晶体分离的结果。正确认识和了解震电效应产生的机理及传播特征对资源的开发利用、对深入分析地震电磁异常信号,利用电磁波信息实现地震预测都具有重要的意义。目前对震电效应在以下几方面的研究前景较为广阔。

(1) 震电效应机制的理论探索。震电效应对震电耦合机制的一种泛称。实际上自然界中存在着许多微观的、宏观的震电耦合机制,我们所观测到的震电效应现象是多种场叠加的结果,是大气中入射的电磁波对导电介质的反射、对导电极化介质的极化、外界的震动、应力作用等激发电磁波辐射的叠加等。目前的研究则大多侧重于对单一震电耦合机制的研究。而对地震观测预报而言,特别是电磁辐射异常信号的短临预报,则更应该考虑多源场、多种耦合机制的综合激发及其时空变化特征,这样也许能对震前电磁辐射信号异常频次及强度进行解释。

(2) 震电效应观测研究。震电效应是在任何时间尺度内,任何空间范围内都可发生的一种自然现象,因此对如何设置观测台站、观测物理量的确定、观测精度的设定、特别是对观测频率的要求,都具有较高的要求。其次,应加强震电信号的采集、震电信号提取方法、数据后续处理及最终解释方法的研究。因为如何从记录中滤除干扰,提取有效震电信号是研究和认识震电信号的前提和基础,数据处理方法和解释方法的研究是实现震电信号运用的基础。

(3) 震电效应的试验研究。实验是认识震电效应现象、探索其辐射机制的必要手段,也是实现利用震电效应的关键环节之一。考虑到震电效应激发机制的复杂性、多样性,震电效应的实验研究应加强对含流体裂隙介质中的震电耦合机制的研究,因为含流体裂隙介质中震电转换机制比岩石破裂震电转换机制大,而且震电信号对油、气、水反映敏感。基于压电效应的实验研究,对进一步认识电磁辐射频率、强度与岩石破裂过程的时空特征具有重要的意义,研究结果有助于理解和认识地震孕震过程中的电磁辐射异常。同时,试验对电磁辐射信号的提取方法研究具有积极意义。

(4) 震电效应的应用。震电效应有着广泛的应用前景,特别是地震观测预报领域的潜在贡献逐渐被人们所认识和接受。震电信号辐射强度、频率时空特征的研究,震电信号辐射强度、频率时空特征与地震孕震过程之间关系的研究,多源震电信号辐射强度的计算,信号的提取方法的研究等都是地震观测预报过程中需要解决的问题。

[参考文献]

- [1] Russel R D, K E Butler, A W Kepic, et al. Seismoelectric exploration[J]. *Leading Edge*, 1997, (16): 1611—1615
- [2] Darcy Karakelian, Gregory C Beroza, Simon L. Analysis of ultra-low frequency electromagnetic field measurements associated with the 1999 M 7.1 Hector Mine earthquake sequence [J]. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2002, (92): 1513—1524.
- [3] Beamish D. Characteristics of near surface electrokinetic coupling[J]. *Geophys. J. Int.*, 1999, (137): 231—242.
- [4] Haartsen M W, S R Pride. Electro seismic waves from point sources in layered media[J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, (102): 24745—24769.
- [5] 马玉虎. 电磁辐射与孕震过程初探[J]. *高原地震*, 2001, 13 (3): 24—30.
- [6] 赫建国, 张元福. 震前极低频电磁异常及其频谱特征[J]. *地震学报*, 1992, 17(1): 81—88.
- [7] 祁贵仲. “膨胀”磁效应[J]. *地球物理学报*, 1978, 21: 18—33.
- [8] 赵玉林, 卢军, 李正南, 等. 唐山地震应变—电阻率前兆及虚错动模式[J]. *地震学报*, 1996. 18(1): 78—82.
- [9] Hayajawam M ed. Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with earthquakes[M]. Tokyo: Terra Sci. Publications Co., 1999.
- [10] Hayakawa M, Molchanov, O A eds. Seismo Electromagnetic, Lithospheric-Atmosphere-Ionosphere Coupling[M]. Tokyo: Terra Sci. Publications Co., 2002.
- [11] 赫建国, 潘怀文, 毛国敏, 等. 准静电场异常与地震[J]. *地震地磁观测与研究*, 2000, 24(4): 3—6.
- [12] Ishido T, H Mizutani. Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics[J]. *J. Geophys. Res.*, 1981, 86: 1763—1775.
- [13] Park S K, M J Johnston, T R Madden. Electromagnetic precursors to earthquakes in the ULF band; A review of observations and mechanisms[J]. *Rev. Geophys.*, 1993, 31: 117—132.
- [14] 刘洪, 李幼铭. 对利用震电效应勘探油气水的几点看法[J]. *石油物探*, 1994, 33(2): 94—101.
- [15] Debye P. A method for the determination of the mass of electrolyte ions[J]. *J. Chem. Phys.*, 1933, 1(13): 13—16.
- [16] Thompson R R. The seismoelectric effect[J]. *Geophysics*, 1936, 1: 327.
- [17] Ivannov A G. Effect of electricization of earth layers by elastic

- waves passing through them (in Russian) [J]. Doklady Akademii Nauk, SSSR, 1939, **24**, 41—43.
- [18] D Karakelian, S L Klemperer, A C Fraser-Smith, et al. Ultra-low frequency electromagnetic measurements associated with the 1998 M_w 5.1 San Juan Bautista, California earthquake and implications for mechanisms of electromagnetic earthquake precursors[J]. Tectonophysics, 2002, **359**(1—2), 65—79.
- [19] Haines S, Pride S, Klemperer S. Development of experimental methods in electroseismic research, with application to aquifer characterization[J]. Eos. Trans. AGU, 2001, **82**, 47 Abstract GP22A-0268.
- [20] Zhenya Zhu, Matthijs W Haartsen, M Nafi Toksöz. Experimental studies of electrokinetic conversions in fluid-saturated borehole models[J]. Geophysics, 1999, **64**, 1349—1356.
- [21] Corwin R F. The self-potential method for environmental and engineering applications[A]. in: S H Ward, ed. Geotechnical and Environmental Geophysics (Vol. 1) [C]. Tulsa: Society of Exploration Geophysics, 1990. 127—145.
- [22] Corwin R F, D B Hoover. The self-potential method in geothermal exploration[J]. Geophysics, 1979, **44**, 226—245.
- [23] Zohdy A A R, L A Anderson, L J P Muffler. Resistivity, self-potential, and induced-polarization surveys of a vapor-dominated geothermal system[J]. Geophysics, 1973, **38**, 1130—1144.
- [24] Corwin R F. The Self-potential method for environment and engineering application[J]. Geotechnical and Environmental Geophysics, 1990, **1**, 127—145.
- [25] Massenet F, V N Pham. Mapping and surveillance of active fissure zones on a volcano by the self-potential method[J]. J. Volcanol. Geotherm. Res., 1985, **24**, 315—338.
- [26] Fujinawa Y, Takahashi K, Matsumoto T, et al. Experiments to locate sources of earthquake-related VLF electromagnetic signals[J]. Proceedings of the Japan Academy (Ser. B), 1997, **73** (3): 33—38.
- [27] J Zlotnicki, J L Le Mouél. Volcanomagnetic effects on Piton de la Fournaise Volcano (Réunion Island) [J]. J. Geophys. Res., 1988, **93**(B8): 9157—9171.
- [28] J Zlotnicki, J L Le Mouél. Possible electrokinetic origin of large magnetic variations at la Fournaise volcano [J]. Nature, 1990, **343**, 633—636.
- [29] Park S K, M J S Johnston, T R Madden, et al. Electromagnetic precursors to earthquakes in the ULF band: A review of observations and mechanisms [J]. Reviews of Geophysics, 1993, **31**, 117—132.
- [30] Johnston M J S. Review of electric and magnetic fields accompanying seismic and volcanic activity [J]. Surveys in Geophysics, 1997, **18**, 441—475.
- [31] Utada H. On the physical background of the VAN earthquake prediction method [J]. Tectonophysics, 1993, **224**, 153—160.
- [32] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid, I. Low-frequency range, II. Higher frequency range [J]. J. Acoust. Soc. Amer., 1956, **28**, 168—191.
- [33] Broding R A, S D Buchanan, D P Hearn. Field experiments on the electroseismic effect [J]. Geophysics, 1963, **58**, 898—903.
- [34] Butler K E, R D Russel, A W Kopic. Measurements of the seismoelectric response from a shallow boundary [J]. Geophysics, 1996, **61**, 1769—1778.
- [35] Eaton D W, R R Stewart, M P Harrison. The Fresnel zone for P-SV waves [J]. Geophysics, 1991, **56**, 360—364.
- [36] Muir-Wood R, King G C P. Hydrological Signatures of Earthquake Strain [J]. Journal of Geophysical Research, 1993, **98** (B12): 22035—22068.
- [37] Scholz C H, L R Sykes, Y P Aggarwal. Earthquake prediction: A physical basis [J]. Science, 1973, **181**, 803—810.
- [38] 王继军, 赵国泽, 詹艳, 等. 中国地震电磁现象的观测与研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2005, **25**(2): 11—21.
- [39] 关华平, 陈智勇, 余素荣. 首都圈及其邻近地区电磁辐射效应研究 [J]. 地震, 2000, **20**(1): 65—70.
- [40] 董玉芬, 王来贵. 地震前电磁异常现象与试验进展 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 1999, **18**(5): 542—544.
- [41] 波达波夫, 等著. 裘慰庭, 李乐天, 译. 震电勘探原理 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- [42] 刘洪. 利用天然电磁场高分辨探测地下油气水的可能性 [J]. 地球物理学报, 1994, **37**(6): 828—835.
- [43] 裘慰庭. 震电效应在油气勘探中的应用前景 [A]. 见: 牛毓基编. 石油物探新技术系列调研成果 [C]. 北京: 石油工业出版社, 1996. 640—651.
- [44] 戴世坤. 双相介质中震电效应和震电波场传播特性 [J]. 勘探地球物理进展, 2003, **26**(4): 287—300.
- [45] 孙卫斌. 振动激励场效应及实测技术研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 1999.
- [46] 石昆法. 震电效应原理和初步实验结果 [J]. 地球物理学报, 2001, **44**(5): 720—726.
- [47] 钱书清, 张以勤, 曹惠馨. 花岗岩洞爆破时伴随岩石破裂的电磁辐射 [J]. 地球物理学报, 1983, **26** (增刊): 1—7.
- [48] 钱书清, 张以勤, 曹惠馨, 等. 岩石破裂时产生的电磁脉冲的观测与研究 [J]. 地震学报, 1986, **8**(3): 301—308.
- [49] 钱书清. 地震电磁辐射前兆不同步现象物理机制的试验研究 [J]. 地震学报, 1998, **20**(5): 535—540.
- [50] 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, 1996b, **18** (3): 346—351.
- [51] 郭自强, 郭子祺, 钱书清, 等. 岩石破裂中的声电效应 [J]. 地球物理学报, 1999, **42**(1): 74—83.
- [52] J Frenkel. On the theory of seismic seismoelectric phenomena in a moist soil [J]. Journal of physics, 1994, **8**: 130—241.

- [53] 刘建华,刘福田,孙若昧,等. 秦岭—大别山带及其南北缘地震层析成像[J]. 地球物理学报, 1995, 38(1): 46—54.
- [54] 徐佩芬,刘福田,王清晨,等. 大别—苏鲁碰撞造山带地震层析成像研究——岩石圈三维速度结构[J]. 地球物理学报, 2000, 43(3): 377—385.
- [55] 彭艳菊,苏伟,郑月军,等. 中国大陆及海域 Love 波层析成像[J]. 地球物理学报, 2002, 45(6): 792—801.
- [56] 郑月军,黄忠贤,刘福田,等. 中国东部海域地壳—上地幔瑞利波速度结构研究[J]. 地球物理学报, 2000, 43(3): 480—487.
- [57] 朱介寿,曹家敏,蔡学林,等. 东亚及西太平洋边缘海高分辨面波层析成像[J]. 地球物理学报, 2002, 45(5): 647—663.
- [58] 徐果明,李光品,王善恩,等. 用瑞利面波资料反演中国大陆东部地壳上地幔横波速度的三维结构[J]. 地球物理学报, 2000, 43(3): 366—376.
- [59] 朱良保,许庆,陈晓非. 中国大陆及邻近海域的 Rayleigh 波群速度分布[J]. 地球物理学报, 2002, 45(4): 475—482.
- [60] 李红谊,刘福田,孙若昧,等. 大陆东部及海域地壳—上地幔结构研究[J]. 地震学报, 2001, 23(5): 472—479.

(上接 368 页)

- [53] J Neev, F R Yeatts. Electrokinetic effects in fluid-saturated poroelastic media[J]. Physical Review B, 1989, 40: 9135—9141.
- [54] M A Biot. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid, I Low frequency range[J]. J. Acoust Soc. Am., 1956, 28: 168—178.
- [55] S R Pride. Governing equation for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media[J]. Physical Review(B), 1994, 50: 15678—15696.
- [56] 傅承义. 地表的本质对地震勘测的几种影响[J]. 中国科学. 1951, 2(3): 271—281.
- [57] 韩其玉,刘仲一,王永刚. 孔隙介质震电方程[J]. 石油物探, 1997, 36(增刊): 14—19.
- [58] 胡恒山,刘家琪,王洪滨,等. 对波达波夫和 Pride 震电波方程组的对比分析[J]. 地球物理学报, 2003, 46(1): 107—112.
- [59] 朱涛,赵和云. 孕震过程中冲流点位地电异常的理论研究[J]. 地震学报, 2000, 23(4): 398—406.
- [60] 刘洪. 震电效应研究在资源勘探中的应用前景[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(2): 211—217.