



地壳介质弹性和电性各向异性研究的新进展

李清河^{1,2}, 阮爱国^{2,3}, 范小平^{1,2}, 金淑梅¹

(1. 江苏省地震局, 江苏 南京 210014; 2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000 3. 国家海洋局第二研究所, 浙江 杭州 310012)

摘要 :分析了地壳介质各向异性研究的现状,指出了弹性和电性各向异性研究中存在的问题,提出了联合利用弹性和电性各向异性研究地球介质特征及提取物性参数的正反演方法. 理论研究和地震过程的实际资料表明,将弹性和电性结合起来研究地壳介质各向异性具有清晰明确的物理意义,是各向异性研究的一个非常有发展前景的新领域.

关键词 :各向异性; 地震波; 电阻率; 地震; 联合正反演; EDA 模型

中图分类号 :P313.3 文献标识码 :A 文章编号 :1000-0844(2004)01-0010-08

0 前言

地球介质各向异性研究在近 30 年来发展很快,它在资源探查、地震预报、地球内部结构等研究中越来越显示其重要性. 20 世纪 70 年代以来, Crampin 等研究了横波通过各向异性介质时所发生的分裂现象,提出了 EDA(Extensive Dilatancy Anisotropy, 广泛膨胀各向异性)模型,从而使通过地震波研究各向异性逐步走向实用化^[1~20]. 近年来,英国、法国、美国、俄国、日本和中国等国科学家在用横波分裂研究介质各向异性方面有了长足的进展,涉及领域包括构造、石油、天然气、地热能、地震等. 在电性各向异性研究方面,开展了层状对称各向异性的大地电磁反演,利用四极对称电法观测研究电阻率的各向异性随时间变化等^[21~30].

但是,各向异性研究仍存在许多问题,除了横波分裂与电性各向异性各自待深入研究的问题之外,尚存在以下重要难点^[10]:

(1) 地下介质各向异性有多种类型,仅靠一种方法尚难以判定;

(2) 地震波横波分裂的横向分辨率较高,但垂向分辨率较低,电磁测深和电法勘探判定的电性各向异性的横向分辨率低,垂向分辨率相对较好,可初步确定层位. 单靠一种方法难以确定介质各向异性位置,而位置的准确与否对资源探查很重要.

(3) 对于 EDA 模型,需较为准确地确定裂纹和孔隙密度、排列方向、孔隙中的物质等,现在的研究程度不够^[31,32],单靠一种方法难以做到.

(4) 求取应力状态在资源勘察、地震预报中意义很大,但目前的单一方法精度都不够.

近年来,通过对大量的地震波和电性的各向异性研究,我们发现联合利用地震波和电性研究地壳介质各向异性是解决以上难点问题的较为合适的办法.

1 弹性和电性各向异性联合研究的原理

地壳介质各向异性有如下类型:(1) 本征各向异性. 一是结晶岩石中含有各向异性晶体;二是各向同性的固体在某一方向上受到相当大的应力作用时,便呈现各向异性;三为在沉积过程中个别颗粒受到

重力造成的拉伸或拉平可造成各向异性。本征各向异性多在下地壳和地幔中显现。(2) 裂隙造成的各向异性。地壳中有大量裂缝或孔隙,其中充有流体,其优势取向可影响各向异性。(3) 长波各向异性。长波通过薄各向同性层时,因各层组分和厚度不同而总体上显示为各向异性。

物质的弹性本构关系的非对称性在地震波各向异性中可显现出来,表现为横波偏振分裂。当横波通过各向异性介质时,会发生分裂现象,通过在地震图上记录到的快、慢波极化图样及走时差,可判定介质各向异性的特征,因而是研究各向异性有效的方法。但因为地震波从震源到地震仪,射线路径通过的任一各向异性均会对横波分裂产生影响,记录到的横波分裂是地震波射线路径的综合效应,难以确定射线路径上哪一处呈现各向异性。

建立在趋肤效应物理基础上的大地电磁测深法通过资料反演可分辨出不同深度的电性各向异性。电性各向异性的基础是物质内部电性结构的非对称性、结晶物的杂质等,因其电导率不同而显现出电性各向异性来。倘若地壳中存在微裂隙并有流体存在,将显示出与岩石骨架很大的电导率反差,其微裂隙的某种定向分布可能造成比较明显的电导率各向异性。

由此可见,地震波各向异性和电性各向异性从不同侧面反映物质内部结构的本构关系。若结晶物同时具有较大的导电性能差异和弹性参数差异,则可同时观测到地震波各向异性和电性各向异性。中、上地壳,尤其是上地壳,含有大量裂隙和孔隙,若其中充有水等流体,则电性各向异性和地震波各向异性都很明显。当然,物质内部结构的本构关系的差异也不一定同时能在电性和地震波各向异性中反映出来。若结晶矿物电性差异不明显,则电性各向异性难以反映;若弹性参数差异不明显,则地震波各向异性难以反映。当孔隙介质为气时,虽然电性差异不大,但地震波却可以反映各向异性,我们可以分别利用其差异判定各向异性类型。这就是利用地震波各向异性和电性各向异性的联合解释和联合反演以获得介质各向异性参数的物理基础。

在上地壳中存在大量的裂隙,且含有水等流体,这时呈现大范围扩容各向异性,可以同时观察到地震波和电性各向异性。影响二者的主要因素具有共同的物理特性,即孔隙几何和物理含量,这便为进行联合反演提供了较为可靠的物理依据,尽管二者本构关系构成方式不一样。上地壳又是油、气资源的储层和浅源地震的孕震层,故研究上地壳各向异性具有重要的理论意义和应用价值。然而,上地壳构造复杂,研究难度较地球深部要大得多。

2 研究方法

2.1 建立适合 EDA 模型的弹性与电性本构关系

地壳中,尤其上地壳中含有较多的微裂隙或孔隙,其排列受应力控制,通常走向垂直于最小压应力,平行于最大水平应力。在地震波通过时会发生极化,对电导张量亦有影响。故这种由含排列整齐裂隙的固体或间断层(PTL)构成的固体的复合介质的性质变化可用各向异性弹性张量和电导张量来描述,是联系地震波与电性各向异性的纽带,是同时反演的物理基础之一。这种各向异性在较大范围内存在并与孔隙(裂隙)的体膨胀有关,而这种体膨胀又与应力状态有关,故此种介质又称为 EDA 介质^[7],可以写出其本构关系并建立方程。上地壳中含有固体骨架和孔隙流体,称为两相介质。因孔隙间多为连通,故呈现各向异性。可借助 Biot 理论分别研究含水、气、油的两相介质的内部结构,给出弹性张量和电导张量,写出各自的传导方程。

2.2 弹性和电性各向异性模型的正演模拟

在 EDA 各向异性模型下根据本构关系和方程建立模型,正演模拟横波分裂和大地电磁响应函数,按照给定模型计算横波分裂的时差,快、慢波极化及衰减等,利用伪谱法对非均匀各向异性介质弹性波场进行正演,对大地电磁测深资料进行 PTL 深度电阻率数值模拟,计算大地电磁响应函数。

2.3 介质各向异性参数的正演模拟

2.3.1 确定不同深度各向异性分布

- (1) 根据大地电磁测深反演的不同层位视电阻率各向异性层,建立模型;
- (2) 选择合适的地震波记录和浅层地震勘探资料分析各向异性的特征;
- (3) 选择合适的地电场资料分析浅部电性各向异性的特征;
- (4) 综合电性资料和地震波资料确定不同深度层位的介质各向异性。

2.3.2 在确定不同深度层位的基础上分析各向异性参数的类型

各向异性参数主要包括裂隙、孔隙、孔隙排列、孔隙密度、孔隙介质等,应研究对介质各向异性影响最明显的参数,如裂隙纵横比、孔隙密度及孔隙所含流体。要研究同时使用地震波与电性资料正演的的方法。

2.4 地震波与电性联合反演介质各向异性

在上地壳中因存在充有流体的微裂隙,电导张量的优势方向与剪切波快波极化的优势方向是一致的,这是联合反演的物理基础。对于层状各向异性介质,若是属于上述这种机理,则应有一致的层界面和各向异性优势方向。

可用于反演的横波分裂主要参数为快、慢波时差和快、慢波极化方向;电性反演的主要参数为常规视电阻率-阻抗相位、阻抗实部视电阻率-阻抗虚部视电阻率。进行联合反演时模型参数为:各向异性介质层厚、速度及方向分布,电阻率及其方向分布。进一步推测对介质各向异性影响最明显的参数,即裂隙纵横比、孔隙密度及孔隙所含流体等。

(1) 首先要计算各向同性介质中地震波的波形、主要物理参数、电阻率曲线;

(2) 合成层状各向异性介质地震图和电阻率曲线;

(3) 简化反演模型参数。与均匀各向同性介质不同,各向异性介质反演所得走时速度和电阻率除有标量值外,还有反映方向的物理量;

(4) 互为约束反演。介质层厚和各向异性主方向相同,可以使地震波与电磁反演互为约束,实现联合反演;

(5) 非线性问题的线性化,可以参考目前比较成熟的方法处理。

2.5 布设试验观测系统,验证理论方法并确定各向异性参数

选择合适的地区布置较密的大动态宽频带数字化地震台网以记录地震资料和电磁综合观测台记录电磁资料,并进行大地电磁测深观测。对获得实际观测资料进行解释并验证上述理论,确定各向异性参数。利用人工地震和天然地震资料对网内外台站进行研究区地壳三维速度结构反演,取得该区速度结构。对研究区进行浅层地震层析成像研究,获得浅层速度结构,结合大地电场的浅层资料进行物性分析。

2.6 研究地震过程中弹性波和电性各向异性的特征

通过对地震区较大地震孕震过程记录的地震波和电性各向异性的特征研究,寻找用于地震预报的地震波和电性各向异性的指标。

3 研究进展

3.1 对弹性各向异性和电性各向异性本构关系的理论分析和公式推导

(1) 岩石呈现各向异性是因为微观结构本构关系矩阵中元素排列的非对称性。不同岩石的对称形式不同,我们推导了一个应变能公式,可以给出各种对称体系下的弹性本构形式,统一了不同坐标系给出的弹性本构形式差异。重点研究了 EDA 模式下的弹性各向异性本构关系^[33]。

(2) 从 EDA 模型出发,建立了等效的电性各向异性微观模型并给出了数学推导,即电性各向异性裂隙方向性集中体积模型(简称体积模型)。该模型不仅可表达 EDA 裂隙的电性特征,还可以用于更一般的情况。模型的主要原理是将电导率各向异性与岩石的裂隙孔隙度联系在一起,同时将三个主方向的电导率推导出来,这对从动态的角度研究应力作用下地震电性前兆场是十分有益的,为开展弹性、电性各向异性对地震过程的联合解释打下了基础。该模型应用于 EDA 裂隙定向排列时,其中的一个水平向主轴与裂隙排列方向一致,或者说与水平最大主压应力方向一致,与快 S 波偏振方向大体上是一致的。

(3) 从直流电法和大地电磁测深法讨论了薄层各向异性和 EDA 各向异性的特征。就薄层各向异性而言,当岩层为水平时,直流电法和 MT 法都无法测出其各向异性效应,但当岩层倾斜时,直流电法可以测出各向异性,MT 法中的 H 极化也可以测出,但 E 极化仍不能反映各向异性效应。就 EDA 裂隙各向异性而言,由于水平方向存在两个电性主轴,所以直流电法和 MT 法都可以测出其各向异性效应。此外电性各向异性中直流电法视电阻率存在反常现象,即地表视电阻率大的方向与地下真电阻率小的方向一致,反之亦然。这一点过去虽然也有提及,但在实际应用中很少得到关注^[34]。

(4) 就地震孕育的动态过程来看,与地震机制解中 P 轴垂直的测道上直流电法视电阻率在震前的变化较大。我们可以从任意两个观测方向求得第三个方向的视电阻率,当该方向视电阻率变化最大时可视为与 P 轴垂直,从而有助于判断未来的发震断层。对于大地电磁测深来讲,其中的一个电性主轴应平行 P 轴。

3.2 纯理论模型下的弹性波场序列和电场分布的数值模拟

全面推导了用特征值法处理伪谱法中各种边界条件的表达式^[35],推导了 EDA 型层状各向异性介质大地电磁深测正演计算公式。对多种模型从不同的频率、测量方向模拟了地表视电阻率曲线。结果表明地表视电阻率值不仅与测量频率有关,而且与测量方向相对电性主轴的角度有关。

3.3 联合应用 S 波分裂法和大地电磁测深法研究地震前兆各向异性现象和发震应力场随时间演化的关系^[36]

3.3.1 1995 年 7 月 22 日甘肃省永登 5.8 级地震。

我们使用了 1990 年 4 月到 1995 年 9 月间中国 CDSN 兰州台、中法合作朗索台的三分量 29 个地震的数字地震资料,中法合作松山台的电磁连续观测资料,将地震剪切波分裂方法和大地电磁测深(MT)资料处理方法共同应用于此地震过程及其各向异性特征的研究(图 1 图 2 图 3)。从图 1 可见,永登地震前快 S 波偏振方向由北偏东逐渐转为北偏西,发震后又转回北偏东,快慢波的时间延迟在震前也是急剧上升的。图 2 表示 MT 电性主轴变化。计算表明各频点的电性主轴方向基本一致,与断层近于垂直的电性主轴(ρ_{xy})从时间上看震前为北偏东 17°左右,逐渐转为北偏西 15°并发震,震后恢复到北偏东。永登地震的震源机制解表明其发震应力场的 P 轴是北偏西 15°。不同方法得到的三个方向总体上是一致的,时间演化规律也是协调的,其机理就是应力所致的 EDA 裂隙定向排列的结果。图 3 显示了永登地震前后变化最大的 160 s 和 226 s 周期电性主轴视电阻率变化曲线,横坐标为 1995 年 1 月 1 日起计算的天数。两周期

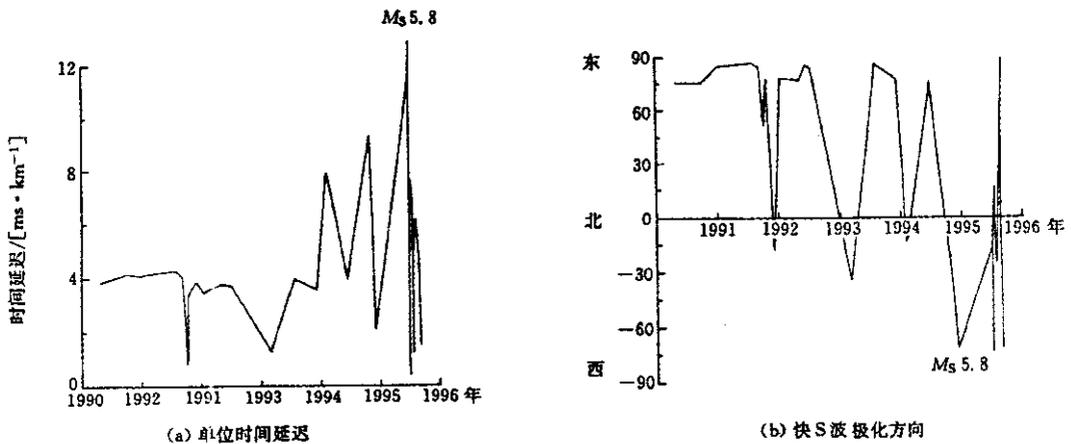


图 1 永登地震过程 S 波分裂时间进程

Fig. 1 The variation of shear wave splitting via time during Yongdeng earthquake.

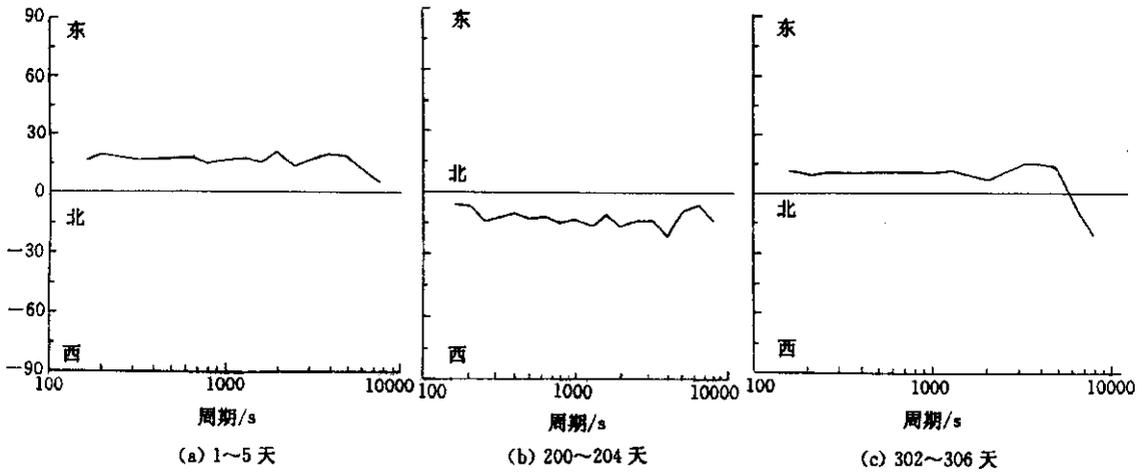


图 2 永登地震前后不同时段电性主轴随周期的变化

Fig. 2 The variation of electric principal axis via period in different stages during Yongdeng earthquake.

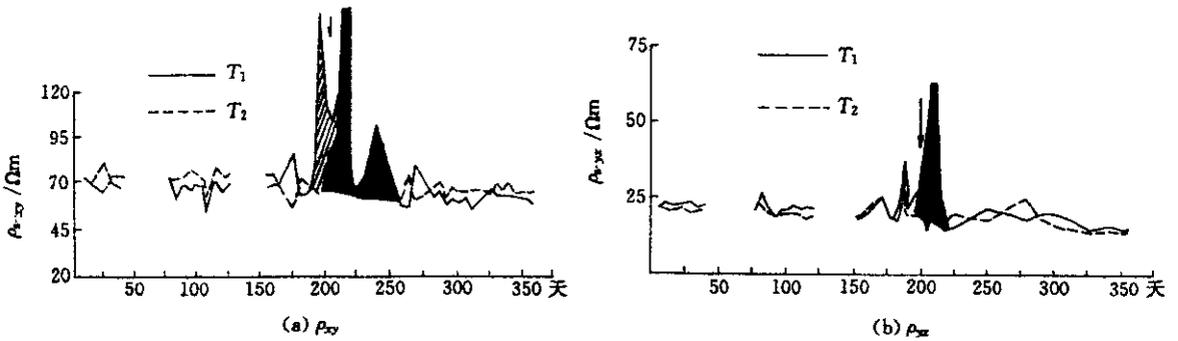


图 3 永登地震前后不同周期电性主轴视电阻率变化曲线($T_1 = 160\text{ s}; T_2 = 226\text{ s}$)

Fig. 3 The variation of apparent electric resistivity via time for different period during Yongdeng earthquake($T_1 = 160\text{ s}; T_2 = 226\text{ s}$).

对应的深度与该次地震的震源深度相当。视电阻率量值的变化也存在各向异性并有自己的特点:视电阻率静态的各向异性特征由台站所处构造条件决定,但动态各向异性变化受地震应力场作用。与 P 轴一致的电性主轴其 MT 视电阻率 ρ_{xy} 变化最大。震前不同频率视电阻率变化的差异表明其变化强度还取决于介质分层性质。

3.3.2 1996 年 6 月 1 日甘肃省天祝 - 古浪 5.4 级地震

用同样方法对地震过程各向异性现象作了联合解释。所得到的结果再次证明快 S 波偏振方向、电性主轴方向的动态变化确实反映了应力场的变化,发震时它们与 P 轴在总体上是一致的(参见文献 [37] 之图 2 和图 4)。这反映出基于 EDA 裂隙动态变化的弹性、电性各向异性理论是正确的。与永登地震相比,天祝 - 古浪地震由于松山电磁台正处在发震断层上(永登地震时观测台与震源之间没有断层上的联系),其各向异性特征还有自己的特点:一是断层的控制作用突出,各频段的视电阻率都有明显变化,不象永登地震时局限于某个频段;二是与 P 轴方向一致的电性主轴视电阻率 ρ_{xy} 量值上的变化不如另一个电性主轴 ρ_{yx} 大,后者平行断层,反映出构造的控制作用强于应力场方向性的影响。

3.3.3 地震前兆意义

从两次地震的方向性看,似乎电性主轴与 P 轴的吻合程度比快 S 偏振方向的吻合程度要高些,可能是快慢 S 波偏振方向的相互垂直性不如两个电性主轴之间的互相垂直性好。电性方法的另一个优点是具

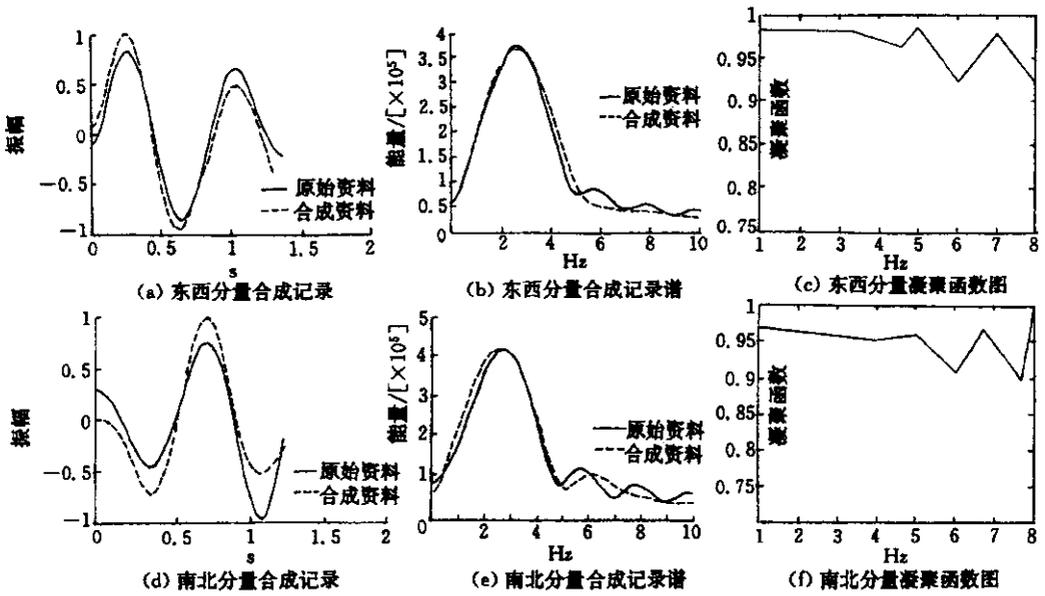


图 4 波形分析结果

Fig. 4 Results of waveform analysis.

频率特征,可以反映深度的变化。两次地震的分析表明应力场导致的 EDA 裂隙动态变化在地壳一定深度范围都是存在的,证明了 EDA 在地壳一定范围的广泛性。从电性变化上证明这一点有特殊的意义和广泛的应用前景。

根据 EDA 模型、APE 理论和电性模型,从各向异性的角度来讨论用直流感电阻率方法进行地震监测预报的机理,着重点落在离震源较远的场兆问题上。根据新的电性模型可解释震前小应变下大的视电阻率变化,可解释不同方向观测值不同的原因,可解释震前视电阻率既可以是下降变化也可以出现上升变化的现象,排除了临震视电阻率突跳对大量进水或大量出水的严重依赖性,这些问题是以往标量理论所不能及的。

3.4 波形拟合

研究裂隙介质各向异性参数是一项非常有意义的工作,此前有不少人从不同角度进行了尝试。我们通过合成地震图方法波形拟合了各向异性介质的主要物性参数孔隙度和裂隙长短轴纵横比,这一工作对资源勘查的岩性勘探很有意义。我们用此方法计算了永登地震前后中、小地震的孔隙率和纵横比,见图 4。图中(a)、(d)为时间域波形,(b)、(e)为对应的频谱,(c)、(f)为检验两条记录吻合程度的频率域凝聚函数。以此求取出裂隙孔隙度和裂隙纵横比。我们又研究了孕震过程孔隙率和纵横比的变化,发现了有意义的变化特征,见图 5。

4 主要结论

(1) 理论研究和实际资料表明,将弹性和电性结合起来研究地壳介质各向异性具有清晰明确的物理意义,是各向异性研究的一个非常有发展前景的新领域。

(2) 上地壳中含有较多的微裂隙或孔隙,其有序的排列受应力控制。地震波通过时会发生极化,对电导张量亦有影响,故这种含有排列整齐裂隙或间断层的固体的地壳介质广泛存在各向异性。上地壳有大量孔隙和 EDA 模型对资源勘查、地震预报等研究很有意义。

(3) 弹性和电性联合正反演是获取介质各向异性参数的有效途径,其参数的变化对地震预报可能是有意义的。

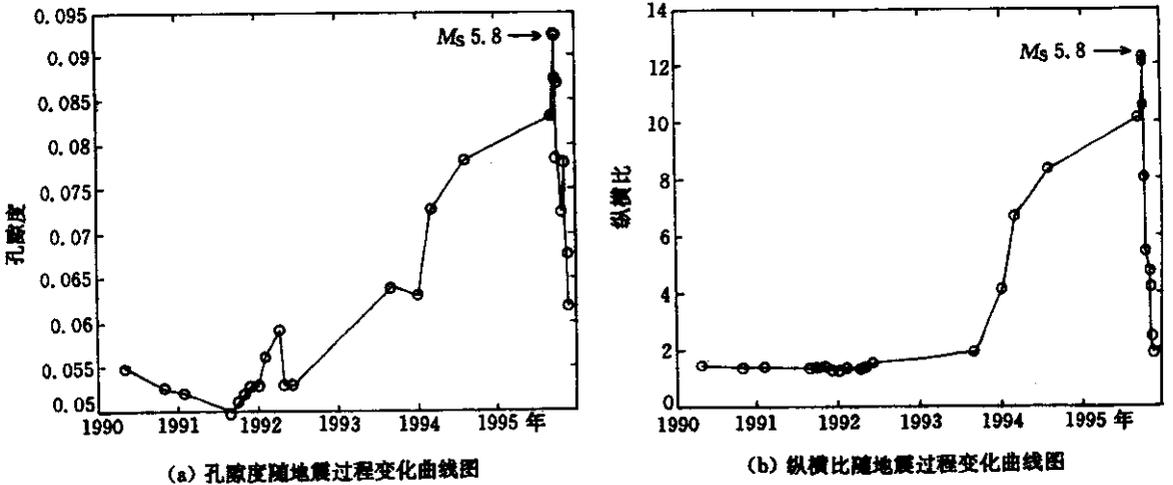


图5 永登地震过程介质参数变化曲线

Fig.5 The variation of media parameters via time during Yongdeng earthquake.

[参考文献]

- [1] Crampin S, John H Lovell. A Decade of Shear-wave Splitting in the Earth's Crust :What does It Mean ? What Use We Make of It ? And What Should We Do Next ?[J]. Geophys. J. Int. ,1991 ,107 387 -417.
- [2] Babukska V ,Cara M. Seismic Anisotropy in the Earth[M]. Dordrecht :Kluwer Academic Publishers ,1991.
- [3] Aster R C ,Shearer P M ,Berger J. Quantitative Measurements of Shear Wave Polarization at the Anza Seismic Network ,Southern California : Implications for Shear-Wave Splitting and Earthquake Prediction[J]. J. Geophys. Res. ,1990 ,95 :12449 -12473.
- [4] Crampin S ,Evans R ,Ucer B , et al. . Observations of Dilatancy— Induced Polarization Anomalies and Earthquake Prediction[J]. Nature ,1980 ,286 874 -877.
- [5] Douma J. The Effect of the Aspect Ratio on Crack - Induced Anisotropy[J]. Geophysical Prospecting ,1988 ,36 614 -632.
- [6] Crampin S. Effective Anisotropic Elastic Constants for Wave Propagation Through Cracked Solid[J]. Geophys. J. R. astr. Soc. ,1984 ,76 :135 -145.
- [7] Yardley G ,Crampin S. Extensive—Dilatancy Anisotropy :Relative Information in VSPs and Reflection Surveys[J]. Geophys. Prosp. ,1991 ,39 :337 -355.
- [8] Takashi M ,Kiyoshi Y ,Hisao I. Spatial distribution of shear wave anisotropy in the crust of the southern Hyogo region by borehole observations [J]. Geophy. Jour. Inter. ,2001 ,147(3) 528 -542.
- [9] 李清河,刘希强,张范民,等.剪切波分裂的某些理论问题及天祝-景泰6.2级地震地震剪切波分裂特征研究[J].中国地震,1994,10(增刊):9-21.
- [10] 阮爱国,李清河.地壳介质各向异性研究状况、存在问题及进一步研究思路[J].地震地磁观测与研究,1999,20(3):1-12.
- [11] 高原,郑斯华.唐山地区剪切波分裂研究(II)——相关函数分析法[J].中国地震,1994,10(增刊):22-32.
- [12] 滕吉文,张中杰,王爱武,等.弹性介质各向异性研究沿革、现状与问题[J].地球物理学进展,1992,7(4):14-29.
- [13] 徐中信,张中杰.2D非均匀各向异性介质中地震波运动学问题正演模拟[J].石油物探,1989,28(2):37-49.
- [14] 姚陈,王培德,陈运泰.卢龙地区S波偏振与上地壳裂隙各向异性[J].地球物理学报,1992,35(2):305-315.
- [15] 张中杰,何樵登. N个薄层介质组合引起的视各向异性[J].长春地质学院学报,1990,20(2):223-226.
- [16] 何樵登,等.用遗传算法反演裂隙各向异性介质[J].石油物探,1995,34(3):46-50.
- [17] 周辉,等.非线性各向异性波形反演[J],石油物探,1995,34(6):725-735.
- [18] 刘坤,张中杰,胡家富,等.中国陆区S波分裂的频带相关性及其意义[J].中国科学D,2001,31(2):155-161.
- [19] 杨顶辉.双相各向异性介质中弹性波方程的有限元解法及波场模拟[J].地球物理学报,2002,45(4):575-583.
- [20] 杨晓玲,金振民,马瑾,等.青藏高原北部异常SKS分裂成因的初步探讨—被熔体强化的岩石圈各向异性[J].地球物理学报,2002,45(6):821-831.

- [21] Negi J G ,Sataf P D. Anisotropy in Geoelectromagnetism[M]. Amsterdam Elsevier ,1989.
- [22] 林长佑,等. 各向异性介质的地大电磁反演及其有关地震前兆场的讨论[J]. 地震学报 ,1996 ,**18**(3) 326 - 332.
- [23] Brace W F. Dilatancy - Related Electrical Resistivity Changes in Rocks[J]. Pure and Applied Geophysics ,1975 ,**113** 207 - 217.
- [24] Douglas P Obrien , Morrison H F. Electromagnetic Fields in an N-Layer Anisotropic Half-space[J]. Geophysics. 1967 ,**32** :668 - 677.
- [25] Kurita K. How Can We Identify Location of A Fracture Plane ? Anisotropy of Electrical Conductivity and Seismic Velocity in Dilatancy[J]. Earthquake Prediction Research ,1986 **4** 39 - 45.
- [26] Rankin D ,Reddy I K. A Magnetotelluric Study of Resistivity Anisotropy[J]. Geophysics. 1969 ,**34** #38 - 449.
- [27] 林长佑,武玉霞,杨长福,等. 水平层状对称各向异性介质的地大电磁资料反演[J]. 地球物理学报,1996 **39**(增刊) :342 - 348.
- [28] 钱复业,等. 地电阻率的各向异性地震前兆及其在探索震中区域应力场分布中的应用[A]. 见:石特临主编. 地震地电学发展与展望[C]. 兰州:兰州大学出版社,1998. 64 - 69.
- [29] Everett M E ,Steven C. Electric dipole fields over an anisotropic seafloor :theory and application to the structure of 40 Ma Pacific Ocean lithosphere[J]. Geophys. Jour. Inter. ,1999 ,**136**(1) :41 - 56.
- [30] Markus E ,Volker H. Macro - anisotropy of the electrical conductivity of the crust : a magnetotelluric study of the German Continental Deep Drilling site (KTB [J]. Geophys. Jour. Inter. 1999 ,**136**(1) :109 - 122.
- [31] Vera Schutle - Pelkum , Donna K Blackman. A Synthesis of Seismic P and S anisotropy[J]. Geophys. Jour. Inter. ,2003 ,**154**(1) :166 - 178.
- [32] Takashi M ,Nishizawa O ,Kanagawa K et al. . Laboratory measurements of elastic anisotropy parameters for the ? exposed crustal rocks from the Hidaka Metamorphic Belt , Central Hokkaido , Japar[J]. Geophys. Jour. Inter. 2001 ,**145**(1) 33 - 47.
- [33] 阮爱国,李清河. 地壳介质各向异性本构关系讨论[J]. 华南地震 ,1999 ,**19**(3) 35 - 42.
- [34] 阮爱国,李清河. EDA 各向异性层状介质 MT 正演模拟[J]. 华南地震 ,1999 ,**19**(4) 8 - 13.
- [35] 阮爱国,李清河. 非均匀各向异性弹性波场正演[J]. 西北地震学报,2001 **23**(4) :318 - 329.
- [36] 阮爱国,李清河. 永登地震剪切波分裂及电阻率各向异性的变化特征[J]. 中国地震 2000 ,**16**(4) 316 - 326.
- [37] Ruan Aiguo ,Li Qinghe. Temporal Evolution of the Shear-wave Splitting and the Geo-electrical Anisotropy in Tianzhou - Gulang earthquake [J]. 西北地震学报 2003 **25**(4) 374 - 379.

PROGRESS IN STUDY ON ELASTIC AND ELECTRIC ANISOTROPY IN CRUST MEDIA

LI Qing-he^{1,2} , RUAN Ai-guo^{2,3} , FAN Xiao-ping^{1,2} , JIN Shu-mei¹

(1. *Seismological Bureau of Jiangsu Province , Nanjing 210014 ,China ;*

2. *Lanzhou Institute of Seismology , CSB , Lanzhou 730000 ,China ;*

3. *Second Institute of State Ocean Bureau , Hangzhou 310012 ,China)*

Abstract : The present research situation on anisotropy in crust is analysed , and the difficulties in identifying the crust anisotropy by using seismic waves and electricity each respectively are indicated. The forward and inverse methods of studing the features of crust media and extracting crust parameters by combined using elastic and electric anisotropy are intruducted. The results of theoretical and practical data show that the combined study on seismic waves and electricity for anisotropy in crust gives clear physical meaning , it will be a new development fields to research anisotropy.

Key words : Anisotropy ; Seismic waves ; Electric resistivity ; Earthquake ; Combined forward and inverse methods ; EDA model