

APE 理论与地电阻率前兆

阮爱国, 李清河, 赵和云

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃兰州 730000)

摘要: 介绍了含裂隙介质的 APE 理论(anisotropic poro-elasticity). 根据 APE 理论, 对裂隙膨胀提出了新的看法, 认为当岩石不产生大量破裂时, 裂隙的扩张和闭合是互为依存、彼此平衡的. 用笔者建立的裂隙方向性集中体积模型的各向异性电导率张量表达式, 研究了应力场导致裂隙纵横比变化与地壳岩石电阻率变化的关系. 结果表明, 即使地壳岩石的平均体应变很小或不产生新的裂隙, 也可以出现电阻率大的突变. 电阻率的正负变化及其量值都与裂隙纵横比及分布的方向有关. 这一结果适用于对离震源区较远的场兆的解释, 但不涉及震源附近产生大量新生裂隙所激发的近场问题.

关键词: 地电阻率; APE 理论; 异常机理; 裂隙纵横比

中图分类号: P315.72; P319.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2000)03-0209-08

0 引言

近年来地球介质的各向异性研究越来越受到人们的重视, 其应用亦日益广泛和深入. 在地质学领域内各向异性研究主要是通过对 S 波分裂的研究来进行的, 其物理基础是 Crampin 提出的 EDA 裂隙模型^[1,2]. 但是用 S 波分裂参数来分析应力场变化时所得到的体应变变化量级太大, 在 10^{-4} 以上, 这与实际的形变测量是不符的^[3].

APE 理论是近年来发展起来的关于裂隙受力演化的一种动态定量理论^[4~9]. 该理论在流体守恒条件下将孔隙压力、差应力及其方向和裂隙面取向有机地结合在一起, 在此基础上来研究裂隙的扩张、闭合演化规律及其对地震波各向异性的影响, 计算体应变量级时不会出现上述问题.

电性各向异性现象虽然发现得很早, 但是用于地震电性前兆分析还很少. 其中一个亟待解决的问题是需要建立一个物理模型, 从微观上将地电阻率各向异性与岩石裂隙参数相联系, 对此, 笔者已进行了研究^[10,11]. 人们已经发现强震前地电阻率有明显的变化, 但是对异常机理研究得还不够, 尤其是场兆问题. 如果不考虑阿契定律($\rho = \rho_f \varphi^{-m}$)^[12] 中结构指数 m 的变化, 就无法解释在体应变很小的情况下产生的大幅度地电阻率变化, 所以已有的认识是将地电阻率的异常变化归结为孔隙结构指数 m 的变化及大量新生裂隙的发育. 但是这里有几个问题不甚清楚, 一是结构指数如何变化? 变化有多大? 特别是当台站距震中甚远, 达上百公里甚至几百公里, 如何设想台站下方介质会受孕震过程影响而出现裂隙贯通、取直的结构指数变化?

收稿日期: 1999-12-20

基金项目: 地震科学联合基金资助项目(198115). 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2000034

作者简介: 阮爱国(1963-), 男(汉族), 浙江温岭人, 副研究员, 现主要从事弹性、电性各向异性理论及对地震过程的联合解释.

二是用新生裂隙渗水很难解释地电阻率大幅度的临震突跳, 因为无法想像在几十小时内有如此大量的水渗透到裂隙中而后再马上被挤出来. 三是实际观测到的地电阻率变化虽然以下降变化为主, 但也常常出现上升变化, 而且其变化具有方向性, 不同方向测道的变化量值不同. 而根据目前流行的标量形式的阿契定律只能得到下降变化且无方向性的解释.

笔者认为可以将 APE 理论引入电性方面的研究, 以解决地电阻率前兆机理和电导率各向异性等问题. 本文简要介绍了 APE 的基本理论和主要公式, 根据裂隙闭合、扩张理论, 用笔者建立的电性各向异性微观模型(体积模型)^[10-11] 对岩石电阻率异常变化机理进行半定量化的研究, 以期从理论上对上述一些问题作初步的探讨.

1 APE 理论简介

EDA 模型(extensive-dilatancy-anisotropy)^[1-2] 即广泛扩容各向异性模型. 其主要含义是: 地壳上部广泛存在含流体的微裂隙或孔隙, 在应力作用下这些裂隙或孔隙沿一定方向呈优势排列, 裂隙面与最小主压应力方向垂直. 由于近地表的最小主压应力通常是水平向的, 所以裂隙在地壳中是竖直排列的, 而走向与最大水平主压应力方向一致, 因此从本构关系上讲, 定向裂隙的存在使地壳介质呈方位各向异性, 导致 S 波在传播过程中分裂成快 S 波与慢 S 波, 其中快 S 波的偏振方向与最大水平主压应力方向大致一致. 研究 S 波分裂现象最常采用的本构关系是 Hudson 理论^[13-15], 其中存在的问题是对饱水裂隙弹性模量的修正量只与裂隙密度有关, 因此无法从动态上来研究应力场变化对弹性模量本身的影响.

APE 模型(anisotropic poro-elasticity)^[4-9] 即各向异性孔隙弹性模型, 可用于动态、定量地研究在变化条件下流体饱和和微裂隙岩石特性变化规律. 该模型对 Hudson 公式进行了改进, 引入了纵横比参量. APE 理论的主要含义是: 在低渗透、低孔隙度假定下, 介质中原先均匀分布随机排列的含水裂隙, 由于取向的不同受区域应力作用效果不一样, 在邻近裂隙之间产生孔隙压力梯度, 使得流体沿压力梯度在邻近裂隙之间产生迁移, 从而造成裂隙定向排列. 这种裂隙被称为 EDA 裂隙. 它们对应力变化是较灵敏的, 极易产生各向异性现象. 在小应变条件下, 裂隙纵横比的变化是地震波各向异性的主要原因. 下面简要介绍该理论基本公式和主要结论:

假定裂隙纵横比很小, 则不含流体的裂隙体积形变为

$$\frac{V}{V_0} = \frac{V_0 + \Delta V}{V_0} = 1 + e_{ii} \approx \frac{g}{g_0} \quad (1)$$

其中: g 是纵横比, 即裂隙长轴与厚度之比; e_{ii} 是裂隙体应变, 下标 0 表示初值. 根据 Christensen^[16] 的研究, 对于不含流体的裂隙, 有

$$\frac{g}{g_0} = 1 + \left[\frac{2(1-\gamma)}{\pi g_0 \mu} \right] \sigma_n \quad (2)$$

其中: μ 、 γ 分别为岩石剪切模量和泊松比, σ_n 是裂隙面法向应力. 设坐标系与 3 个主应力方向重合, 则

$$\sigma_n = \sigma_n(\Psi, \theta) = \sigma_{ij} n_i n_j = \sigma_1 \sin^2 \Psi \cos^2 \theta + \sigma_2 \sin^2 \Psi \sin^2 \theta + \sigma_3 \cos^2 \Psi \quad (3)$$

其中: Ψ 表示裂隙面法向与竖向轴 x_3 的交角, θ 是裂隙面在水平面上与 x_1 轴的交角. 式(1)和式(2)表明, $V(\sigma_n)$ 与 σ_n 呈线性关系. 假定初应力为零, 则有

$$V = V_0 \left[1 + \frac{1}{V_0} \left[\frac{\partial V}{\partial \sigma_n} \right] \sigma_n \right] = V_0 (1 + C_r \sigma_n) \quad (4)$$

定义裂隙压缩率

$$C_r = \frac{1}{V_0} \left(\frac{\partial V}{\partial \sigma_n} \right) \tag{5}$$

其倒数 σ_c 称为临界应力. 当裂隙面法向应力绝对值超过临界应力时, 裂隙开始闭合. 式(4)的无量纲形式为

$$\frac{V}{V_0} = 1 + \frac{\sigma_n}{\sigma_c} \tag{6}$$

当考虑含流体的裂隙时, 式(4)改写成

$$\frac{V}{V_0} = 1 + (\sigma_n + P_f) C_r = 1 + \frac{(\sigma_n + P_f)}{\sigma_c} = \nu(\sigma_{ij}, P_f, \Psi, \theta) \tag{7}$$

其中: P_f 是裂隙流体压力. 这是 APE 理论的一个基本公式, ν 函数(又称归一化纵横比)大于零说明裂隙是张开的, 反之则是闭合的.

引入无量纲的附加孔隙流体压力 $P = \frac{(P_f - P_{f0})}{\sigma_c}$ 和无量纲的附加应力 $S_{ij} = -\frac{(\sigma_{ij} - \sigma_0 \hat{q}_j)}{\sigma_c}$,

其中 P_{f0} 和 σ_0 分别是初始孔隙压和围压, 且有 $P_{f0} = -\sigma_0$, 对压应力取负值. 这样可将式(7)写成

$$\nu = 1 + P - S_n = 1 + P - S_{ij} n_i n_j \tag{8}$$

另一方面, 根据流体守恒定律, 可以推得

$$\int_{\nu \geq 0} \nu \, d\Omega = \exp \left[- \int_0^P C_r dP_f \right] \tag{9}$$

其中: C_r 是流体压缩率. 一般来说有 $C_r \ll C_r$, 所以式(9)可以简化成

$$\int_{\nu \geq 0} \nu \, d\Omega \approx 1 - PC_r \sigma_c \approx 1 \tag{10}$$

这里积分因子 $d\Omega = \frac{1}{4\pi} \sin \Psi \, d\Psi \, d\theta$. 式(10)可视为式(8)的控制方程, 它将孔隙压与应力联系在一起了. 相应的张开裂隙有效密度可表示成

$$\epsilon(\sigma_{ij}, P_f) = \epsilon_0 \int_{\nu \geq 0} d\Omega \tag{11}$$

定义竖向差应力: $S_V = S_3 - S_1$, 水平最大差应力: $S_H = S_2 - S_1$, 水平最小差应力: $S_h = S_1$. 令 $\nu = 0$, 由式(8)得裂隙闭合方程

$$\nu = 1 + P - S_h - S_H \sin^2 \Psi \sin^2 \theta - S_V \cos^2 \Psi = 0 \tag{12}$$

为了分析方便, 令 $\cos^2 \Psi_0 = (1 + P - S_h) / S_V$, $\zeta = S_H / S_V$, 闭合方程(12)可改写成

$$\cos^2 \Psi(\theta) = (\cos^2 \Psi_0 - \zeta \sin^2 \theta) (1 - \zeta \sin^2 \theta)^{-1} \tag{13}$$

同时, 未闭合裂隙归一化纵横比式(8)可改写成

$$\nu = S_V (1 - \zeta \sin^2 \theta) (\cos^2 \Psi(\theta) - \cos^2 \Psi) \tag{14}$$

推得控制方程为

$$\int_0^{\theta_0} (1 - \zeta \sin^2 \theta) \left[\frac{\cos^2 \Psi_0 - \zeta \sin^2 \theta}{1 - \zeta \sin^2 \theta} \right]^{\frac{3}{2}} d\theta = \frac{3\pi}{4} S_V^{-1} \tag{15}$$

这时的 θ_0 定义了竖直裂隙 ($\Psi = \frac{\pi}{2}$) 张开与闭合的界线, 由式(13)得

$$\begin{cases} \sin^2 \theta_0 = \zeta^{-1} \cos^2 \Psi_0 & \text{当 } \cos^2 \Psi_0 < \zeta \\ \theta_0 = \frac{\pi}{2} & \text{当 } \cos^2 \Psi_0 \geq \zeta \end{cases} \quad (16)$$

积分式(15)是无法求解的,这是因为积分上限 θ_0 是 Ψ_0 的函数,而 Ψ_0 是应力状态的函数,是未知的,所以只能采用数值解法来讨论应力场作用下裂隙闭合、扩张的演化规律,这方面的分析结果可参见文献[7]和[8],这里不再赘述。

总之, APE 模型考虑了在差应力作用下流体在邻近裂隙间的短距离迁移,克服了以前一些模式中只考虑单纯膨胀而引起的问题.综合分析上述有关方程可以得到如下认识:

(1) 裂隙的闭合与扩张不仅与附加差应力有关,而且受制于流体守恒定律.当某一优势方向的裂隙产生扩张时,其它方向的裂隙则闭合.因此在平均体应变很小的情况下,仍可以产生大的、具有方向性的波速变化及电性变化。

(2) 裂隙的闭合与扩张决定于裂隙面法向与最大差应力之间的夹角.没有水平差应力时,水平向裂隙在竖向压力作用下最早开始闭合,临界点 $S_V \geq 1.5 \sigma_c$; 在水平差应力作用下,裂隙面法向与最大差应力垂直的裂隙最容易闭合,临界点 $S_H \geq 2 \sigma_c$. 如果差应力继续增大,未闭合的竖向裂隙将膨胀、贯通,并沿最大水平应力方向排列,裂隙面垂直最小水平应力,即所谓的 EDA 裂隙。

(3) 竖向差应力对于 EDA 裂隙的演化起控制作用.当最大水平差应力超过竖向差应力时,EDA 裂隙的走向将发生 90° 转向.这是前兆出现反向变化的根本原因,预示着区域应力已经很大了,而不是以往认为的应力恢复.反过来由于介质性质的方向性改变,局部应力场方向可能有所调整.这种临震前应力场方向性的改变在实际观测中已被人们所认识^[17, 18]。

2 岩石电阻率各向异性及变化机理

2.1 电导率各向异性的表示

根据裂隙方向性集中电性各向异性体积模型^[10-11],有

$$\begin{aligned} \sigma_x &= (\varphi_x + \varphi_z) \sigma_f + (1 + \varphi_y) \sigma_s \\ \sigma_y &= (\varphi_y + \varphi_z) \sigma_f + (1 + \varphi_x) \sigma_s \\ \sigma_z &= (\varphi_x + \varphi_y) \sigma_f + (1 + \varphi_z) \sigma_s \end{aligned} \quad (17)$$

裂隙方向性定义及有关参数说明请参阅文献[10]和[11]。

2.2 地电阻率前兆机理

根据 APE 理论,在应力作用下裂隙的厚度或纵横比将发生变化,既有扩张也有闭合,这取决于裂隙面法向与差应力的方向.显然裂隙的这种扩张、闭合与地电阻率变化是有关的。

2.2.1 应力作用下裂隙纵横比变化各向异性

根据体积模型,设裂隙只有 3 个取向且各方向的纵横比各不相同,应用式(8),有

$$\frac{g_i}{g_{0i}} = \nu_i = 1 + P_i - S_i \quad (18)$$

增量形式为

$$\Delta \nu_i = \frac{\partial P_i}{\partial S_j} \Delta S_j - \Delta S_i \quad (19)$$

需要说明的是,这里的裂隙是单个的,而在体积模型中裂隙是成族的,但在机理上单个裂隙可以代表一族裂隙,因为这里考虑的只是裂隙的方向性.另外下标 i 既代表应力方向也代表裂隙

面法向, 而不是裂隙排列走向. 假设裂隙是随机地沿 3 个主应力方向取向, 竖向应力增加, 其余 2 个方向的应力不变, 即 $\Delta S_3 > 0, \Delta S_1 = \Delta S_2 = 0$, 在初始阶段对随机取向的裂隙有 $P = \frac{1}{3}(S_1 + S_2 + S_3)$, 由式(19)推得

$$\begin{aligned} \Delta \nu_3 &= \frac{1}{3} \Delta S_3 - \Delta S_3 = -\frac{2}{3} \Delta S_3 \\ \Delta \nu_1 &= \Delta \nu_2 = \frac{1}{3} \Delta S_3 \end{aligned} \tag{20}$$

这就表明水平向裂隙(法向是竖向的)的纵横比减小将导致竖向裂隙(法向是水平向的)纵横比扩张, 也就是彼此之间平衡. 如果水平向裂隙完全闭合后, 只有竖向裂隙受水平向应力的作用, 设 $\Delta S_2 > 0, \Delta S_1 = 0$, 初始阶段竖向裂隙有 $P = \frac{1}{2}(S_1 + S_2)$, 同理可以推得

$$\begin{aligned} \Delta \nu_2 &= \frac{1}{2} \Delta S_2 - \Delta S_2 = -\frac{1}{2} \Delta S_2 \\ \Delta \nu_1 &= \frac{1}{2} \Delta S_2 \end{aligned} \tag{21}$$

这也说明裂隙的纵横比变化与裂隙面法向有关, 当与最大压应力垂直的裂隙纵横比减小而趋于闭合时, 与最小应力垂直的裂隙产生扩张, 彼此平衡的机理在于流体的迁移. 进一步演化, 最终未闭合的裂隙就是所谓的 EDA 裂隙. 需要说明的是, 这里引用的孔隙压 P 表达式是最简单的初始状态表达式, 实际上, APE 理论表明裂隙演化过程中孔隙压与应力之间的关系是非线性的且无法给出解析解, 并且裂隙取向不只是 3 个方向, 但从机理上和定性方面考虑, 上述简单的讨论是能说明问题的.

2.2.2 纵横比变化与电导率各向异性变化

在裂隙理论中一般设单个裂隙呈薄椭球体或钱币状, 裂隙孔隙度可以表示为 $\varphi = \frac{N}{V} \frac{4\pi}{3} a^2 c$, 而裂隙密度定义为 $\epsilon = \frac{Na^3}{V}$, 所以有 $\varphi = \frac{4\pi}{3} \epsilon g$. 这里的 a 和 c 是裂隙的长半轴和短半轴, N 是体积 V 中裂隙的数目, $g = c/a$, 称为纵横比, ϵ 是平均裂隙密度. 这样就将孔隙度分解成裂隙密度和纵横比. 实际地壳岩石中的裂隙和孔隙的形状要复杂得多, 孔隙度还受围压、地温、深度、地质构造因素或其它不确定因素的影响, 但根据 Brace^[19, 20] 实验结果, 对于地壳浅部岩石, 可以认为这些参数与应力场变化关系不大, 所以为简单起见, 有 $\varphi = K \epsilon g$. 体积模型裂隙是成族的, 和一般的单个裂隙不一样, 但是裂隙孔隙度与纵横比的线性关系本身就是对大量裂隙而言的, 所以上述简化仍是成立的. 假设裂隙孔隙度变化由纵横比变化引起, 有

$$\frac{\Delta \varphi}{\varphi} = \frac{\Delta g}{g} = \frac{\Delta \nu}{\nu} \tag{22}$$

引入体积模型电导率各向异性表达式(17), 忽略 σ_s 项, 将式(22)代入得

$$\begin{cases} \frac{\Delta \sigma_x}{\sigma_x} = -\frac{\Delta \rho_x}{\rho_x} = \frac{\Delta g_x + \Delta g_z}{g_x + g_z} \\ \frac{\Delta \sigma_y}{\sigma_y} = -\frac{\Delta \rho_y}{\rho_y} = \frac{\Delta g_y + \Delta g_z}{g_y + g_z} \\ \frac{\Delta \sigma_z}{\sigma_z} = -\frac{\Delta \rho_z}{\rho_z} = \frac{\Delta g_x + \Delta g_y}{g_x + g_y} \end{cases} \tag{23}$$

式中: 纵横比 g 的下标 x, y 表示竖向裂隙的排列走向, 下标 z 表示水平裂隙的法向. 对电导率

而言, 这里的下标表示坐标轴方向. 式(23) 与(19) 联立就构成了真电导率或真电阻率在应力作用下的变化机理. 但由于孔隙压与应力之间的关系是一个复杂积分, 所以用应力变化来推导电性变化是很复杂的数值问题, 为简明起见, 直接由式(23) 来讨论纵横比变化对电性变化的影响. 设只有竖向裂隙存在, 即 $g_z = 0, \Delta g_z = 0$, 竖向应力和最小水平应力不变, 最大水平应力(y 方向) 增大, 根据前节的讨论可以设沿 x 方向排列的裂隙(法向为 y 方向) 纵横比减小, 而沿 y 方向排列的裂隙纵横比扩张. APE 裂隙扩张与闭合的平衡理论,

$$\Delta g_x = -\Delta g_y = -\Delta g \tag{24}$$

$$g_x = \frac{1}{400}, \quad g_y = \frac{1}{200}, \quad \Delta g = \frac{1}{400}$$

代入式(23) :

$$\frac{\Delta \rho_x}{\rho_x} = 100\%, \quad \frac{\Delta \rho_y}{\rho_y} = -50\%, \quad \frac{\Delta \rho_z}{\rho_z} = 0.$$

EDA 裂隙扩容, $\Delta g_x = \Delta g_z = 0$:

$$\frac{\Delta \rho_x}{\rho_x} = 0, \quad \frac{\Delta \rho_y}{\rho_y} = -50\%, \quad \frac{\Delta \rho_z}{\rho_z} = -50\%$$

APE 理论可以很好地解释体应变较小的情况下临震时地电阻率较大的突跳,

2.2.3

[10, 11] :

$$V_0(x, y) = \frac{I\rho}{2\pi \sqrt{m^2 x^2 + y^2}} \tag{25}$$

$\rho = \sqrt{\rho_x \rho_z}; m = \sqrt{\frac{\rho_x}{\rho_y}}$, $\rho_x = \rho_y$ 或 $m = 1$ 时, ;

() , $\varphi_x \propto g_x =$

$\frac{1}{400}, \varphi_y \propto g_y = \frac{1}{200}$, $(\Delta g_z = 0, \Delta \rho_z = 0)$, , (17)

2 个方向电阻率比值: $\frac{\rho_x}{\rho_y} = 2, \frac{\rho_x}{\rho_z} = 3.$ $x = r \cos \varphi, y = r \sin \varphi,$ (25)

$$\rho_s = \frac{\sqrt{\rho_x \rho_z}}{\sqrt{1 + (m^2 - 1)\cos^2 \varphi}} \tag{26}$$

$$\rho_{sx} = \sqrt{\rho_y \rho_z} \quad (\varphi = 0), \quad \rho_{sy} = \sqrt{\rho_x \rho_z} \quad (\varphi = \frac{\pi}{2})$$

, 2 个主方向的视电阻率变化为:

$$\frac{\Delta \rho_{sx}}{\rho_{sx}} = \frac{\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\rho_z}{\rho_y}} \Delta \rho_y}{\sqrt{\rho_y \rho_z}} = \frac{1}{2} \frac{\Delta \rho_y}{\rho_y} = -25\%, \quad \frac{\Delta \rho_{sy}}{\rho_{sy}} = \frac{\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\rho_z}{\rho_x}} \Delta \rho_x}{\sqrt{\rho_x \rho_z}} = \frac{1}{2} \frac{\Delta \rho_x}{\rho_x} = 50\%$$

EDA 裂隙扩容,

$$\frac{\Delta \rho_{sx}}{\rho_{sx}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta \rho_y}{\rho_y} + \frac{\Delta \rho_z}{\rho_z} \right) = -50\%, \quad \frac{\Delta \rho_{sy}}{\rho_{sy}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta \rho_x}{\rho_x} + \frac{\Delta \rho_z}{\rho_z} \right) = -25\%$$

APE 关于裂

隙的扩张和闭合理论相结合,

3

- (1) ,
- (2) APE 理论引入电性研究方面作了二方面工作,

3 个主元素的具体表达式,

- (3) , APE 理论和 EDA 裂隙模型可能是建立地震前兆场综合物理模式的基础,

. APE 理论还可以用于其它前兆机理的研究.

[21, 22]

VAN 法观测中^[23],

VAN 的电信号不可能传播数百公里,

APE 理论可以认为这样的电信号是一种原位激发的电性号,

[]

[1] Crampin S, Evans R, Atkinson B K. Earthquake prediction: a new physical basis[J]. Geophys J R Astr Soc, 1984a, 76: 147—156.
 [2] Crampin S, Chesnokov E M, Hipkin R G. Seismic anisotropy the state of art II[J]. Geophys J R Astr Soc, 1984b, 76: 1—16.

- [3] Crampin S, Booth D C, Evans R, Peacock S, Fletcher J B. Changes in shear wave splitting at Anza near the time of the North Palm Springs earthquake[J]. *J Geophys Res*, 1990, 95(B7): 11197—11212.
- [4] Zatsepin S V, Crampin S. The metastable poro-rective and interactive rockmass; anisotropic poro-elasticity[A]. *Expanded Abstracts[Z]*. 65th Ann Int SEG Meeting, Houston, 1995. 918—921.
- [5] Crampin S, Zatsepin S V. Production seismology, the use of shear waves to monitor and model production in a poro-reactive and interactive reservoir[A]. *Expanded Abstracts[Z]*. 65th Ann Int SEG Meeting, Houston, 1995. 199—202.
- [6] Zatsepin S V, Crampin S. Stress-induced coupling between anisotropic permeability and shear-wave splitting[A]. *Extended Abstracts[Z]*. 58th Conf EAGE, Amsterdam, 1996. C030.
- [7] Zatsepin S V, Crampin S. Modelling the compliance of crustal rock—— I: response of shear-wave splitting to differential stress[J]. *R A S G J L*, 1997, 129: 477—494.
- [8] Crampin S, Zatsepin S V. Modelling the compliance of crustal rock—— II: response to temporal changes before earthquakes [J]. *Geophys J Int* 1997, 129: 495—506.
- [9] Stuart Crampin. Keynote lecture: Going APE—monitoring and modelling rock deformation with shear-wave splitting[Z]. 1998(personal communication).
- [10] , , [C]. : [Z], 2000. 53—65.
- [11] , . [J]. , 1999, 19(3): 35—42.
- [12] Archie G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. *Trans A I M E*, 1942, 146: 54—62.
- [13] Hudson J A. Overall properties of a cracked solid[J]. *Math Proc Camb Phil Soc*, 1980, 88: 371—384.
- [14] Hudson J A. Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks[J]. *Geophys J R Astr Soc*, 1981, 64: 133—150.
- [15] Hudson J A. A higher order approximation to the wave propagation constants for a cracked solid[J]. *Geophys J R Astr Soc*, 1986, 87: 265—274.
- [16] Christensen R M. *Mechanics of composite materials[M]*. John Wiley and Sons New York, NY, 1990.
- [17] , , . 1995 年永登 5.8 级地震多种前兆异常特征[J]. , 1997, 19(4): 19—24.
- [18] , , , . [A]. : [C]. : , 1998. 64—69.
- [19] Brace W F, et al. Electrical resistivity changes in saturated rocks during fracture and frictional sliding[J]. *J Geophys Res*, 1968, 73: 1433—1445.
- [20] Brace W F. Dilatancy-related electrical resistivity changes in rocks[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1975, 113: 207—217.
- [21] , . 1976 年唐山 7.8 级地震地电阻率和地下水前兆综合物理机制研究[J]. , 1998, 18(): 1—9.
- [22] , , . [J]. , 2000, 20(1): 39—44.
- [23] . VAN 法的报告[A]. : [C]. : , 1998. 138—150.

(下转 223 页)

- [17] Singh S J. Static deformation of a multi-layered half-space by internal sources[J]. *J Geophys Res*, 1970, 75: 3257—3263.
- [18] Smylie D E and Mansinha L. The elasticity theory of dislocations in real earth models and changes in the rotation of the earth [J]. *Geophys J R Astr Soc*, 1971, 23: 329—354.

STRESS FIELD BY SHEAR FAULT IN A SEMI-INFINITE MEDIUM ——Part II: Dip-slip fault

YAO Lan-yu, NIE Yong-an, ZHAO Gen-mo

(*Seismological Bureau of Tianjin Municipality, CSB, Tianjin 300201, China*)

Abstract: A complete suit of closely analytical expressions of stress field is presented for the dip-slip shear fault with an arbitrary dip angle in a semi-infinite medium. Checking and reviewing the analytical expressions of stress field by other researchers, closely mathematical reasoning for the expressions is done again, thus this suit of expressions has become more perfect and reliable.

Key words: Dislocation; Dip-slip fault; Stress field; Analytical expression

(上接 216 页)

ANISOTROPIC PORO-ELASTICITY MODEL AND EARTH RESISTIVITY PRECURSOR

RUAN Ai-guo, LI Qing-he, ZHAO He-yun

(*Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: The latest development of APE theory for anisotropy study is introduced and applied in electric problems. In the view of APE cracks modeling, it is believed that when there is no newly developed cracks, the dilatancy and closing of cracks balance each other. Using a new electric conductivity anisotropic model (named cubic model), put forward by present authors, for the cracked rocks containing fluid, the mechanism of earth resistivity precursor of earthquake is discussed according to the APE theory, considering the variation of aspect ratio to be the main source of the precursor due to stress change. It is concluded that the increasing or decreasing variation of earth resistivity with large amplitude before strong earthquakes could be explained easily by the new electric anisotropic model, even if the total porosity or strain do not change or there are no new cracks developed. Moreover, it is found that resistivity variation characteristics are related to the aspect ratio and distribution of cracks. But the conclusions from the discussion in this paper are effective only for seismic field precursor, not for source precursor related to new developed cracks.

Key words: Ground resistivity; APE model; Anomaly mechanism; Crack aspect ratio