

文章编号: 0253-3782(2006)01-0020-09

地震孕育体源流变模型(三)

——前兆场*

宋治平¹⁾ 梅世蓉²⁾ 尹祥础²⁾

1) 中国上海 200062 上海市地震局

2) 中国北京 100036 中国地震局地震预测所

摘要 在三维流变介质体源孕震模型的粘弹性位移场与应变场理论基础上,建立了流变介质体源孕震模型的前兆场理论解,导出了流变介质中任意一点(x, y, z)的地倾斜、地下水位、电阻率的粘弹性解析解,并对地电阻率的应用作了初步分析,为地震孕育过程中前兆分析提供了一定的理论基础。

关键词 弹性包体理论 流变包体理论 粘弹性解析解 地倾斜 地下水位 地电阻率

中图分类号: P315

文献标识码: A

引言

在 Добровольский(1991)的硬包体弹性理论的基础上,作者将其发展为流变介质的包体理论,并应用流变包体模型的体应变场结果,对地震前兆的时空演化过程进行了分析(宋治平等, 2000). 宋治平等(2003, 2004)在弹性包体模型理论的基础上推导出流变包体模型的粘弹性位移场与应变场的解析式. 本文在此基础上推导出流变包体模型的前兆场(如地倾斜、地下水位、电阻率)的粘弹性解析式.

地倾斜的求解思路为(宋治平, 1996):由硬包体产生的地倾斜的弹性理论解,运用对应原理,通过拉普拉斯变换与反拉普拉斯变换,求解流变介质的包体理论产生的地倾斜的粘弹性解析式.

在地震前兆中,由于与体应变有关的前兆较多,如电阻率和地下水位与体应变存在明确的关系,因此这类前兆参数的粘弹性解析式可由体应变的弹性解析式推导而得. 本文还将对地电阻率的应用进行初步分析.

1 体源流变模型的地倾斜场

1.1 x 方向的水平地倾斜 $\gamma_x(r, t)$

在三维弹性包体理论中,点(x, y, z)在 x 方向的地倾斜 $\gamma_x(r)$ 为 z 方向的位移 $w(r)$ 在 x 方向的偏微分. Добровольский(1991)给出了点(x, y, z)在 x 方向的地倾斜弹性解 $\gamma_x(r) = \partial w / \partial x$ 为:

* 地震科学联合基金(101105)和国家自然科学基金(10232050)共同资助.
2004-06-07 收到初稿, 2005-10-24 收到修改稿并决定采用.

$$\gamma_x(r) = \frac{\alpha V \tau}{8\pi\mu(1-\nu)} y(F_7 + x^2 F_{13}) \quad (1)$$

式中, V 为包体体积, μ 和 ν 为介质弹性系数, K 为介质弹性模量, α 为包体内外介质剪切模量之比增量; 包体中心在 $(0, 0, H)$ 处, 所求点的坐标为 (x, y, z) . 其它参数见宋治平等(2003). F_7 与 F_{13} 为

$$\begin{cases} F_7 = \frac{3(H-z)}{r_1^5} + \frac{3(3-4\nu)(H-z)}{r_2^5} + \frac{30Hz(H+z)}{r_2^7} - \\ \quad \frac{4(1-2\nu)(1-\nu)(2r_2+H+z)}{r_2^3(r_2+H+z)} \\ F_{13} = -\frac{15(H-z)}{r_1^7} - \frac{15(3-4\nu)(H-z)}{r_2^7} - \frac{210Hz(H+z)}{r_2^9} + \\ \quad \frac{12(1-2\nu)(1-\nu)}{r_2^5(r_2+H+z)} + \frac{4(1-2\nu)(1-\nu)(5r_2+3H+3z)}{r_2^4(r_2+H+z)^3} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, $r_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + (H-z)^2}$, $r_2 = \sqrt{x^2 + y^2 + (H+z)^2}$. 式(1)中 $\gamma_x(r)$ 变换为

$$\gamma_x(r) = \frac{\alpha V \tau}{8\pi\mu(1-\nu)} y[P_{\gamma x1} + P_{\gamma x2}(3-4\nu) + P_{\gamma x3}(1-2\nu)(1-\nu)] \quad (3)$$

$$\begin{cases} P_{\gamma x1} = \frac{3(H-z)}{r_1^5} + \frac{30Hz(H+z)}{r_2^7} - x^2 \left[\frac{15(H-z)}{r_1^7} + \frac{210Hz(H+z)}{r_2^9} \right] \\ P_{\gamma x2} = \frac{3(H-z)}{r_2^5} - \frac{15(H-z)x^2}{r_2^7} \\ P_{\gamma x3} = -\frac{4(2r_2+H+z)}{r_2^3(r_2+H+z)^2} + \frac{12x^2}{r_2^5(r_2+H+z)} + \frac{4(5r_2+3H+3z)x^2}{r_2^4(r_2+H+z)^3} \end{cases} \quad (4)$$

根据对应原理, 将式(3)的 $\gamma_x(r)$ 进行拉普拉斯变化且化简, 给出粘弹性问题在象平面上的解

$$\begin{aligned} \bar{\gamma}_x^{(v)}(r, s) = \frac{V\tau y}{8\pi} & \left[\frac{N_{x0}}{s} + \frac{N_{x1} + N'_{x1}}{s + \frac{q_0}{q_1}} + \frac{N'_{x1}}{\left(s + \frac{q_0}{q_1}\right)^2} + \frac{N_{x2}}{s + \frac{1}{p_1}} + \right. \\ & \left. \frac{N_{x3}}{s + \frac{3K+2q_0}{3Kp_1+2q_1}} + \frac{N_{x4}}{s + \frac{6K+q_0}{6Kp_1+q_1}} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

参数 q_0, q_1, p_1 与 q'_0, q'_1, p'_1 的定义见宋治平等(2003)文章中式(2)与式(4), 具体为

$$\begin{cases} p_1 = \frac{\eta}{E_1 + E_2} & p'_1 = \frac{\eta'}{E'_1 + E'_2} \\ q_0 = \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2} & q'_0 = \frac{E'_1 \cdot E'_2}{E'_1 + E'_2} \\ q_1 = \frac{E_1 \eta}{E_1 + E_2} & q'_1 = \frac{E'_1 \eta'}{E'_1 + E'_2} \end{cases}$$

由式(5)中 $\bar{\gamma}_x^{(v)}(r, s)$ 作逆拉普拉斯变换可得 x 方向的倾斜 $\gamma_x(r, t)$ 为

$$\begin{aligned} \gamma_x(r, t) = \frac{V\tau y}{8\pi} & \left[N_{x0} H(t) + (N_{x1} + N'_{x1} + tN'_{x1}) \exp\left(-\frac{q_0}{q_1}t\right) + N_{x2} \exp\left(-\frac{1}{p_1}t\right) + \right. \\ & \left. N_{x3} \exp\left(-\frac{3K+2q_0}{3Kp_1+2q_1}t\right) + N_{x4} \exp\left(-\frac{6K+q_0}{6Kp_1+q_1}t\right) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

其中式(5)与(6)中的参数 $N_{xi} (i=0, 1, 2, 3, 4)$ 为

$$\left\{ \begin{aligned} N_{x0} &= 2 \left(\frac{q'_0}{q_0} - 1 \right) \cdot \left[\frac{S_{\gamma x}(0)}{q_0(3K + q_0)} + \frac{3P_{\gamma x3}}{6K + q_0} \right] \\ N_{x1} &= \frac{2(1 - p_1 T_1)}{q_0} \left[\frac{S_{\gamma x}(T_1)}{(3K + 2q_0) - (3Kp_1 + 2q_1)T_1} - \right. \\ &\quad \left. \frac{1 - p_1 T_1}{1 - p'_1 T_1} \cdot \frac{3(q'_0 - q'_1 T_1)P_{\gamma x3}}{(6K + q_0) - (6Kp_1 + q_1)T_1} \right] \\ N_{x2} &= -2(1 - p_1 T_2)^2 \frac{q'_0 - q'_1 T_2}{q_0 - q_1 T_2} \left[\frac{S_{\gamma x}(T_2)}{(q_0 - q_1 T_2)[(3K + 2q_0) - (3Kp_1 + 2q_1)T_2]} + \right. \\ &\quad \left. \frac{3P_{\gamma x3}}{(6K + q_0) - (6Kp_1 + q_1)T_2} \right] \\ N_{x3} &= \frac{2(1 - p_1 T_3)}{(3K + 2q_0)(q_0 - q_1 T_3)} \left(\frac{1 - p_1 T_3}{1 - p'_1 T_3} \cdot \frac{q'_0 - q'_1 T_3}{q_0 - q_1 T_3} - 1 \right) \cdot S_{\gamma x}(T_3) \\ N_{x4} &= -\frac{6(1 - p_1 T_4)}{6K + q_0} \left(\frac{1 - p_1 T_4}{1 - p'_1 T_4} \cdot \frac{q'_0 - q'_1 T_4}{q_0 - q_1 T_4} - 1 \right) \cdot P_{\gamma x3} \\ N'_{x1} &= -\frac{2(q'_0 - q'_1 T_1)(1 - p_1 T_1)^2}{q_0 q_1 (1 - p'_1 T_1)[(3K + 2q_0) - (3Kp_1 + 2q_1)T_1]} \cdot S_{\gamma x}(T_1) \\ N'_{x1} &= 2 \cdot [P_{\gamma x1} \cdot S(6K + q_0, 6Kp_1 + q_1) + P_{\gamma x2} \cdot S(6K + 7q_0, 6Kp_1 + 7q_1)] \end{aligned} \right. \quad (7)$$

其中, $P_{\gamma xi} (i=1, 2, 3)$ 见式(4), $S_{\gamma x}(T)$ 为

$$S_{\gamma x}(T) = P_{\gamma x1} \cdot [6K + q_0 - (6Kp_1 + q_1)T] + P_{\gamma x2} \cdot [6K + 7q_0 - (6Kp_1 + 7q_1)T] \quad (8)$$

通用函数 $S(n, m)$ 为(宋治平等, 2003)

$$S(m, n) = [AA(3K + 2q_0, 3Kp_1 + 2q_1) + BB(3K + 2q_0, 3Kp_1 + 2q_1)] \cdot (m - nT_1) + CC(3K + 2q_0, 3Kp_1 + 2q_1) \cdot n \quad (9)$$

其子函数为

$$\left\{ \begin{aligned} AA(m, n) &= -\frac{(1 - p_1 T_1)[q'_1(1 - p_1 T_1) - 2p_1(q'_0 - q'_1 T_1)]}{q_0 q_1 (1 - p'_1 T_1)} \cdot \frac{1}{m - nT_1} \\ BB(m, n) &= -\frac{(1 - p_1 T_1)^2(q'_0 - q'_1 T_1)}{q_0(1 - p'_1 T_1)} \cdot \frac{DD(m, n)}{m - nT_1} \\ CC(m, n) &= -\frac{(1 - p_1 T_1)^2(q'_0 - q'_1 T_1)}{q_0 q_1 (1 - p'_1 T_1)} \cdot \frac{1}{m - nT_1} \\ DD(m, n) &= \frac{1}{q_0} - \frac{p'_1}{q_1(1 - p'_1 T_1)} - \frac{n}{q_1(m - nT_1)} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

当 $t=0$ 时, x 方向的倾斜 $\gamma_x(r, t)$ 为

$$\gamma_x(r, 0) = \frac{V\tau y}{8\pi} (N_{x0} + N_{x1} + N'_{x1} + N_{x2} + N_{x3} + N_{x4}) \quad (11)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时, x 方向的倾斜 $\gamma_x(r, t)$ 为

$$\gamma_x(r, \infty) = \frac{V\tau y}{8\pi} N_{x0} \quad (12)$$

1.2 y 方向的水平地倾斜 $\gamma_y(r, t)$

在三维弹性包体理论中, 点 (x, y, z) 在 y 方向的地倾斜 $\gamma_y(r)$ 为 z 方向的位移 $w(r)$ 在 y 方向的偏微分. Добровольский (1991) 给出了点 (x, y, z) 在 y 方向的地倾斜弹性解

$\gamma_y(r) = \partial w / \partial y$ 为

$$\gamma_y(r) = \frac{\alpha V \tau}{8\pi\mu(1-\nu)} x(F_7 + y^2 F_{13}) \quad (13)$$

其中, F_7 与 F_{13} 见式(2). 式(13)中 $\gamma_y(r)$ 变换为

$$\gamma_y(r) = \frac{\alpha V \tau}{8\pi\mu(1-\nu)} x[P_{\gamma y1} + P_{\gamma y2}(3-4\nu) + P_{\gamma y3}(1-2\nu)(1-\nu)] \quad (14)$$

其中, $P_{\gamma yi} (i=1, 2, 3)$ 分别为

$$\begin{cases} P_{\gamma y1} = \frac{3(H-z)}{r_1^5} + \frac{30Hz(H+z)}{r_2^7} - y^2 \left[\frac{15(H-z)}{r_1^7} + \frac{210Hz(H+z)}{r_2^9} \right] \\ P_{\gamma y2} = \frac{3(H-z)}{r_2^5} - \frac{15(H-z)y^2}{r_2^7} \\ P_{\gamma y3} = -\frac{4(2r_2+H+z)}{r_2^3(r_2+H+z)^2} + \frac{12y^2}{r_2^5(r_2+H+z)} + \frac{4(5r_2+3H+3z)y^2}{r_2^4(r_2+H+z)^3} \end{cases} \quad (15)$$

根据对应原理, 对式(14)进行拉普拉斯变化, 化简后再进行逆拉普拉斯变换, 可得在 y 方向的倾斜:

$$\gamma_y(r, t) = \frac{V \tau x}{8\pi} \left[N_{y0} H(t) + (N_{y1} + N'_{y1} + tN'_{y1}) \exp\left(-\frac{q_0}{q_1}t\right) + N_{y2} \exp\left(-\frac{1}{p_1}t\right) + N_{y3} \exp\left(-\frac{3K+2q_0}{3Kp_1+2q_1}t\right) + N_{y4} \exp\left(-\frac{6K+q_0}{6Kp_1+q_1}t\right) \right] \quad (16)$$

其中, 式(16)中的参数 $N_{yi} (i=0, 1, 2, 3, 4)$ 分别为式(7)与(8) N_{xi} 表达式中的 $P_{\gamma xi}$ 替换为 $P_{\gamma yi}$ 即可.

当 $t=0$ 时, y 方向的倾斜为

$$\gamma_y(r, 0) = \frac{V \tau x}{8\pi} (N_{y0} + N_{y1} + N'_{y1} + N_{y2} + N_{y3} + N_{y4}) \quad (17)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时, y 方向的倾斜为

$$\gamma_y(r, \infty) = \frac{V \tau x}{8\pi} N_{y0} \quad (18)$$

2 体源流变模型的地下水位粘弹性解

井水位的升降变化是含水层系统发生体应变的间接效应(Rhoabs, Robinson, 1979; 侯茂生, 1984). 地下水位变化 Δh 与体应变 θ 、介质的孔隙度、水体密度等因素有关, 具有如下关系(侯茂生, 1984):

$$\Delta h = \frac{\theta}{S_s} \quad (19)$$

其中, $S_s = \rho g[(1-\varphi)/k_r + \varphi/k_w]$ 为单位储存系数, ρ 为水体密度, g 为重力加速度, φ 为孔隙度, k_r 为含水层的体积压缩模量, k_w 为水体的压缩模量. 不同地区的单位储存系数 S_s 不同. 例如, Rhoabs and Robinson(1979)对美国一些井孔的计算显示, S_s 为 10^{-8} 量级; 侯茂生(1984)研究中国江苏 10 井水位显示, S_s 为 $5.0 \times 10^{-9}/\text{cm}$. 为了研究体应变的变化对地下水位的影响, 因此根据宋治平等(2004)中式(34)给出的流变包体模型的体应变表达式, 结合式(19), 可得到点 (x, y, z) 处的水位变化的粘弹性解 $\Delta h(r, t)$:

$$\Delta h(r, t) = \frac{3V \tau x y}{4\pi S_s} \left[M_{\theta 0} H(t) + M_{\theta 1} \exp\left(-\frac{q_0}{q_1}t\right) + M_{\theta 2} \exp\left(-\frac{1}{p_1}t\right) + \right.$$

$$M_{\theta 3} \exp\left(-\frac{3K+2q_0}{3Kp_1+2q_1}t\right) + M_{\theta 4} \exp\left(-\frac{6K+q_0}{6Kp_1+q_1}t\right) \quad (20)$$

其中, $M_{\theta 0}, M_{\theta 1}, M_{\theta 2}, M_{\theta 3}, M_{\theta 4}$ 为

$$\begin{cases} M_{\theta 0} = 6 \left(\frac{q'_0}{q_0} - 1 \right) \cdot \frac{S_{\theta}(0)}{3K+2q_0} \\ M_{\theta 1} = -6 \cdot \frac{q'_0 - q'_1 T_1}{q_0} \cdot \frac{(1-p_1 T_1)^2}{1-p_1 T_1} \cdot \frac{S_{\theta}(T_1)}{(3K+2q_0) - (3Kp_1+2q_1)T_1} \\ M_{\theta 2} = -6 \cdot \frac{q'_0 - q'_1 T_2}{q_0 - q_1 T_2} \cdot \frac{(1-p_1 T_2)^2}{(3K+2q_0) - (3Kp_1+2q_1)T_2} \cdot S_{\theta}(T_2) \\ M_{\theta 3} = -6 \cdot \frac{1-p_1 T_3}{3K+2q_0} \left(\frac{1-p_1 T_3}{1-p_1 T_3} \cdot \frac{q'_0 - q'_1 T_3}{q_0 - q_1 T_3} - 1 \right) \cdot S_{\theta}(T_3) \\ M_{\theta 4} = -6 \cdot \frac{1-p_1 T_4}{6K+q_0} \cdot \frac{(6K+7q_0) - (6Kp_1+7q_1)T_4}{(3K+2q_0) - (3Kp_1+2q_1)T_4} \cdot \\ \left(\frac{1-p_1 T_4}{1-p_1 T_4} \cdot \frac{q'_0 - q'_1 T_4}{q_0 - q_1 T_4} - 1 \right) \cdot P_{\theta 2} \end{cases} \quad (21)$$

其中, 体应变通用函数 $S_{\theta}(T)$ 为

$$S_{\theta}(T) = P_{\theta 1} + P_{\theta 2} \cdot \frac{(6K+7q_0) - (6Kp_1+7q_1)T}{(6K+q_0) - (6Kp_1+q_1)T} \quad (22)$$

其中, 与坐标有关的函数 $P_{\theta 1}$ 与 $P_{\theta 2}$ 为

$$\begin{cases} P_{\theta 1} = \frac{1}{r_1^5} - \frac{10H(H+Z)}{r_2^7} \\ P_{\theta 2} = \frac{1}{r_2^5} \end{cases} \quad (23)$$

当 $t=0$ 时, 其水位变化为

$$\Delta h(r, 0) = \frac{3V_{\tau xy}}{4\pi S_s} (M_{\theta 0} + M_{\theta 1} + M_{\theta 2} + M_{\theta 3} + M_{\theta 4}) \quad (24)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时, 其水位变化为

$$\Delta h(r, \infty) = \frac{3V_{\tau xy}}{4\pi S_s} M_{\theta 0} \quad (25)$$

3 体源流变模型的电阻率粘弹性解

阿契定律已成为地电阻率的重要理论支柱之一, 是地电前兆微观机理研究的主要理论工具(钱家栋, 1985; 梅世蓉等, 1993). 研究表明, 地电阻率的变化与变形、流体以及岩石的干湿程度等因素有关, 其中潮湿岩石的电阻率遵从阿契定律

$$\rho = \alpha \rho_0 \varphi^m S^{-n} \quad (26)$$

其中, α 为常数, ρ_0 为孔液电阻率, φ 为孔隙度, $S = V_{\text{液}}/V$ 是孔液饱和率; m, n 为结构指数, 通常 $m = 1.3 \sim 1.95$, $n = 2$. 周勃然等(1994)给出砂岩的孔隙度一般为 $0.45\% \sim 2.21\%$. 在应力作用下, 孔隙度 φ 与孔液饱和率 S 将发生变化, 所引起的电阻率的变化 $\Delta\rho/\rho$ 为:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \left(\frac{n-m}{\varphi} + m \right) \cdot \frac{\Delta V}{V} \quad (27)$$

其中, $\Delta V/V$ 为体应变 θ . 为了研究体应变的变化对电阻率的影响, 根据宋治平等(2004)文

章中式(34)给出的流变包体模型的体应变表达式,结合式(27),可得到点 (x, y, z) 处电阻率的粘弹性解 $\Delta\rho(r, t)/\rho$ 为

$$\frac{\Delta\rho}{\rho}(r, t) = \frac{3V\tau xy}{4\pi} \left(\frac{n-m}{\varphi} + m \right) \cdot \left[M_{\theta 0} H(t) + M_{\theta 1} \exp\left(-\frac{q_0}{q_1}t\right) + M_{\theta 2} \exp\left(-\frac{1}{p_1}t\right) + M_{\theta 3} \exp\left(-\frac{3K+2q_0}{3Kp_1+2q_1}t\right) + M_{\theta 4} \exp\left(-\frac{6K+q_0}{6Kp_1+q_1}t\right) \right] \quad (28)$$

其中, $M_{\theta 0}, M_{\theta 1}, M_{\theta 2}, M_{\theta 3}, M_{\theta 4}$ 见本文式(21~23)。

当 $t=0$ 时,电阻率变化的粘弹性解为

$$\frac{\Delta\rho}{\rho}(r, 0) = \frac{3V\tau xy}{4\pi} \left(\frac{n-m}{\varphi} + m \right) \cdot (M_{\theta 0} + M_{\theta 1} + M_{\theta 2} + M_{\theta 3} + M_{\theta 4}) \quad (29)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时,电阻率变化的粘弹性解为

$$\frac{\Delta\rho}{\rho}(r, \infty) = \frac{3V\tau xy}{4\pi} \left(\frac{n-m}{\varphi} + m \right) \cdot M_{\theta 0} \quad (30)$$

4 地电阻率的初步分析与应用

宋治平等(2000)分析了球形包体在地表面产生的体应变,计算了 t 时刻的体应变与 $t=0$ 时刻的体应变之差,一是为了检验推导结果和程序的正确性,二是通过计算结果对硬、软包体进行定量对比分析。对硬、软包体产生的体应变的象限性,体应变随时间的变化形态特征,硬包体体应变的三阶段特征及其对地震前兆现象进行了应用(宋治平等, 2000, 2001, 2003, 2004; 薛艳等, 2003)。为了对地电阻率理论表达式进行检验,本文在计算体应变的基础上(宋治平等, 2000),根据式(28),计算球形包体在地表面 t 时刻的地电阻率 $\Delta\rho(r, t)/\rho$ 与 $t=0$ 时刻的地电阻率 $\Delta\rho(r, 0)/\rho$ 之差,即地电阻率的相对变化量。

有关球形包体参数与介质参数可见宋治平等(2000)。对于地电阻率参数取 $m=1.3, n=2$, 孔隙度 φ 取 0.71% , 则 $(n-m)/\varphi + m$ 约为 100。硬包体在不同观测点产生的地电阻率的变化曲线如图 1 所示, 其中图 1a 为不同孕震半径尺度内的观测点在地表 2 个象限的空间位置, 图 1b 为硬包体在地表不同地点产生的地电阻率变化量随时间的变化形态。有关初步分析如下:

1) 形态特征的差异性。不同观测点处的地电阻率具有明显的三阶段特征, 其表现形式因地区不同而异, 相邻地区的形态也不同。例如在 1 倍孕震体半径尺度范围内的观测点处, 其形态特征表现形式有两种, 即“增高→极大值→降低→趋于稳定值”(图 1b 中 B_1 点)与“降低→极小值→升高→趋于稳定值”(图 1b 中的 A_1)。在 2 倍孕震体半径尺度附近的观测点处, 其总体特征表现为“N”型。但其变化过程也有两种, 如图 1b 中 A_2 点的地电阻率为“逐渐升高→转折, 逐渐下降→趋于稳定值”, 而 B_2 点(图 1b)却为“逐渐下降→转折, 逐渐上升→趋于稳定值”。

2) 形态特征随震中距的不同而不同。例如在一个象限内, 1 倍孕震半径(R)内的 A_1 点的形态特征为“凹”型; 位于 $2R$ 附近的 A_2 点(图 1b)为“N”型; 位于 $3R$ 附近的 A_3 点(图 1b)的形态为“凸”型, 远离震中的点 A_4 (图 1b)的变化不大。但在另一个象限内, B_1, B_2 和 B_3 点(图 1b)的形态特征却分别为“凸、N、凹”型。

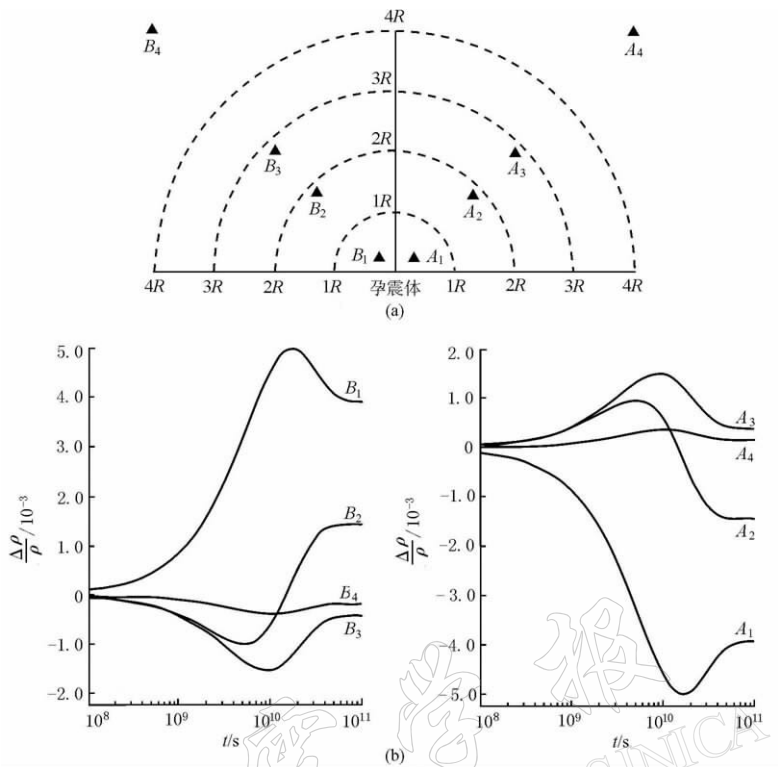


图 1 硬包体产生的地电阻率随时间的变化形态

(a) 不同孕震半径尺度内的观测点在地表两个象限的空间位置. 图中的 $A_1 \sim A_4$ 与 $B_1 \sim B_4$ 均表示观测点的位置, 虚线表示数倍包体半径尺度, R 为孕震包体的半径, 原点为孕震包体中心在地表的投影; (b) 硬包体在地表不同地点产生的地电阻率变化量随时间的变化形态, 图中的 $A_1 \sim A_4$ 和 $B_1 \sim B_4$ 与图 1a 中相对应

3) 变化幅度随震中距的增大而减少. 如果不考虑地电阻率相对变化的正与负, 只考虑相对变化的绝对值, 由图 1b 可见, 地电阻率相对变化量随震中距的增大而减小, 即对于依次远离震中的点而言, 其相应变化幅度也依次减小, 如震中距逐渐变大的 $A_1 \sim A_4$ 点与 $B_1 \sim B_4$ 点的变化幅度均为逐渐变小.

4) 形态特征的象限性. 由于体应变在空间存在象限性(宋治平等, 2000), 而体应变与地电阻率只存在与观测点处介质有关的常数, 因此地电阻率变化曲线的形态特征也存在象限性. 图 1a 中相同震中距的“ A ”系列点与“ B ”系列点的形态特征相反, 如 A_1 点对应 B_1 点, A_2 点对应 B_2 点, A_3 点对应 B_3 点, A_4 点对应 B_4 点. 这些对应点的地电阻率的变化形态特征相反. 研究表明, 对称象限内的等距离观测点的地电阻率的变化形态相同, 而相邻象限内等距离观测点的地电阻率的变化形态相反, 也就是说, 地电阻率的变化形态具有象限性分布特点. 在实际观测分析中, 地震前地电阻率异常确实存在象限性与形态特征差异性特征. 例如唐山地震前, 地电阻率异常存在明显的象限性分布(孙其政等, 1998). 宋治平等(2001)研究表明, 张北地震前, 电阻率趋势变化也具有一定的象限性分布现象. 冯志生等(2004)研究了华东地区地电阻率各向异性度的长周期的趋势变化, 表明在中强地震前, 不同观测点的地电阻率各向异性度的变化曲线形态并不一致, 其解释为长周期的脉冲型应变波或应力波由震中向外传播所致.

按照以上地电阻率的理论计算结果,由于孕震体的存在,在不同观测点产生的地电阻率存在形态差异性与象限性特征,并随震中距的不同而不同;变化幅度随震中距的增大而减少.基于这一理论结果,不难理解地震前地电阻率的象限性与形态特征的差异性.

5 讨论与结论

以上在三维流变包体模型的粘弹性位移场与应变场解析式基础上(宋治平等, 2003, 2004),推导出流变包体模型的地倾斜 $\gamma_x(r, t)$ 与 $\gamma_y(r, t)$ 、地下水位变化 $\Delta h(r, t)$ 、电阻率变化 $\Delta\rho(r, t)/\rho$ 的粘弹性解析式,从而为地震孕育过程中前兆分析提供了一定的理论基础.

由于地震前兆观测主要在地表,也就是观测点 (x, y, z) 中 z 为 0. 在式(6)、(16)、(20)及(28)中取 $r=r_1=r_2=\sqrt{x^2+y^2+H^2}$ 即可.当然,也可以在三维弹性包体理论中进行简化后,再通过对应原理求解地表面的前兆表达式.这两种渠道均可求得地表面的前兆表达式.

为了对前兆理论表达式的推导进行检验与分析,本文以地电阻率为例,计算了球形包体在地表面产生的地电阻率的相对变化量,分析了地电阻率的形态差异性与象限性以及形态与变化幅度随震中距变化的关系等问题.这些理论结果对地震前地电阻率的象限性、形态特征差异性以及地电阻率的异常判断等方面均具有一定的指导意义.

对于与应变存在关系的其它前兆参数,也可以在本文基础上建立相应的理论关系.为了更好地指导地震前兆的分析,应该对三维流变体源孕震模型的前兆理论解给出详细的计算结果以及结合观测资料进行分析.另外,外界触发因素的响应、前兆场理论解的分析与应用等等问题都值得进一步深入研究.

参 考 文 献

- 冯志生,杨建军,梅卫萍,等. 2004. 华东地区地电阻率各向异性度的地震前兆异常特征初步研究[J]. 地震学报, **26**(2): 223~227
- 侯茂生. 1984. 苏 10 井水位与应力应变的关系[J]. 地震学报, **6**(1): 90~97
- 梅世蓉,冯德益,张国民,等. 1993. 中国地震预报概论[M]. 北京:地震出版社, 144~150
- 钱家栋. 1985. 地电阻率在地震预报中的应用[M]. 北京:地震出版社, 1~58
- 宋治平. 1996. 加卸载响应比与其它地震前兆时空演化研究及其应用[D]: [学位论文]. 北京:国家地震局地球物理研究所, 15~110
- 宋治平,尹祥础,梅世蓉. 2000. 包体流变模型体应变时空演变的理论分析[J]. 地震学报, **22**(5): 491~500
- 宋治平,徐平,张洪魁,等. 2001. 地震前兆的象限性特征及其理论分析[J]. 地震学报, **23**(1): 54~60
- 宋治平,尹祥础,梅世蓉. 2003. 地震孕育体源流变模型(一)——位移场[J]. 地震学报, **25**(6): 574~582
- 宋治平,尹祥础,梅世蓉. 2004. 地震孕育体源流变模型(二)——应变场及其应用[J]. 地震学报, **26**(2): 121~131
- 孙其政,张国民,李宣璐,等编. 1998. 电磁学分析预报方法[M]. 北京:地震出版社, 190~191
- 薛艳,宋治平,宋先月,等. 2003. 地震孕育过程中形变趋势变化形态的理论分析[J]. 中国地震, **19**(3): 306~314
- 周勃然,田中原,赵碧华. 1994. 用 CT 技术确定砂岩的孔隙度[J]. 测井技术, **18**(3): 178~184
- Rhoads G H, Robinson E S. 1979. Determination of aquifer parameters from well tides[J]. *J Geophys Res*, **84**(11): 6071~6082
- Добровольский И П. 1991. Теория Подготовки Тектонического Землетрясения[M]. Москва: ИФЗ АН СССР, 1~218

THREE-DIMENSIONAL RHEOLOGIC EARTHQUAKE PREPARATION (3): PRECURSOR FIELD

Song Zhiping¹⁾ Mei Shirong²⁾ Yin Xiangchu²⁾

1) *Earthquake Administration of Shanghai Municipality, Shanghai 200062, China*

2) *Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China*

Abstract: On the basis of the theory of viscoelastic displacement and strain field for the three-dimensional rheologic model of earthquake preparation, this paper mainly studies the theoretical solution of precursor field for the three-dimensional rheologic model of earthquake preparation. We derive the viscoelastic analytical expressions of the ground tilt, underground water level, earth resistivity at an arbitrary point (x, y, z) in the rheologic medium, and analyze the application of earth resistivity preliminarily, providing a certain theoretical basis for the precursor analysis of seismogenic process.

Key words: elastic inclusion theory; rheologic inclusion theory; viscoelastic analytical expression; ground tilt; underground water level; earth resistivity

地震学报
ACTA SEISMOLOGICA SINICA