断层的亚临界扩展和地震的孕育过程

郑天愉　　尹祥础

（中国科学院地球物理研究所，北京）（国家地震局地球物理研究所，北京）

断层的亚临界扩展，在浅源构造地震的孕育过程中，起着重要的作用．本文用流变介质中的II型受压闭合裂纹作为断层的力学模型，研究了在不同受力情况下的断层亚临界扩展过程，进而分析了断层活动规律与地震的关系．

如文献[1]中所述，对于断层扩展问题，可选用平板边缘受均匀剪应力 τ_0 作用的 II 型裂纹作为理论模型．裂纹坐标为 $y=0$，$|x|\leqslant a$．ξ 为以裂纹端点为原点，指向-x 方向的活动坐标．

地壳介质由于其固有的性质，所处环境以及历史上构造活动的影响，表现出强烈的非弹性性质．从连续介质力学的角度，可将其概括为介质的流变性质．采用标准线性固体作为介质的流变模型，其本构关系为

$$J(t)=J_0+(J_\infty-J_0)[1-\exp(-t/T)]. \tag{1}$$

在围压作用下，地壳中的断层处于受压闭合状态，两断层面之间存在相互作用．当断层面相对滑动时，这种阻止滑动的剪应力 τ_s 为滑动量 ΔU 的函数．它在断层端部取极大值 τ_p，随着 ΔU 的增加而逐渐下降，到 $\Delta U\geqslant U^*$ 时，$\tau_s=\tau_k$．端部附近断层面上 $\Delta U\leqslant U^*$ 的区域为弱化区，其坐标为 $y=0$，$0\leqslant\xi\leqslant\alpha$．$\alpha$ 与整个断层带的尺度相比，满足 $\alpha\ll a$．在此尺度很小的弱化区内，x 方向的位移 $u=u(\xi/\alpha)$，近似取

$$\tau_s=\begin{cases}(\tau_p-\tau_k)(1-\xi/\alpha)+\tau_k=\tau_m(1-\xi/\alpha)+\tau_k, & 0\leqslant\xi\leqslant\alpha,\\ \tau_k, & \alpha<\xi\leqslant a.\end{cases} \tag{2}$$

根据叠加原理，可以把上述模型转化成板边受 $\tau_c=\tau_0-\tau_k$ 作用，裂纹面上受 $\tau_f=\tau_s-\tau_k$ 作用的等效模型．

在此模型中，τ_f 必须满足

$$K=\sqrt{2/\pi}\int_0^\alpha \tau_f(\xi)\xi^{-1/2}d\xi, \tag{3}$$

裂纹端部的应力才是有限的．K 为 II 型裂纹的应力强度因子．由 (3) 式可得

$$a\tau_c^2/\alpha\tau_m^2=32/9\pi^2=L. \tag{4}$$

当构造力随时间变化时，只要满足

$$|[\tau_c(t+t_a)-\tau_c(t)]/\tau_c(t)|\ll 1.$$

文献 [1] 中的 (16) 式依然成立，其中 t_a 为裂纹扩展 α 间隔所需时间．裂纹端部附近 ($\xi\ll a$) 裂纹面上任一点的位移为

本文 1983 年 4 月 27 日收到．

$$u = [A(v)/2\pi]\int_{t_i}^{t} J(t-t')\frac{\partial}{\partial t'}\left\{\int_0^a \tau_f(\xi')[2(\xi/\xi')^{1/2} - \ln|(\sqrt{\xi}+\sqrt{\xi'})/(\sqrt{\xi}-\sqrt{\xi'})|]\,d\xi'\right\}dt'. \tag{5}$$

将(1)式和(2)式代入(5)式以及裂纹扩展时的能量守恒关系式

$$\Gamma = W = \int_0^{\frac{1}{2}U^*} \tau_f(\xi)du = \int_0^d \tau_f(\xi)(\partial u/\partial\xi)d\xi. \tag{6}$$

经数学上的近似处理后导出

$$W = \pi A(v)L\tau_m^2\alpha F(\alpha/v), \tag{7}$$

其中

$$F(\alpha/v) = \left(\frac{1}{8}-\frac{9}{64c}\right)J_0 + \frac{9}{64c}J_\infty - \frac{9}{64c}(J_\infty - J_0)\exp(-4c\alpha/15Tv), \tag{8}$$

Γ为断裂能，W为周围介质向弱化区微元做的功，$v = \frac{da}{dt}$为裂纹扩展速度，c是由数值计算确定的参数.

当
$$\Gamma = \pi A(v)L\tau_m^2\alpha F(\alpha/v), \tag{9}$$
也即
$$\Gamma = A(v)K^2F(\alpha/v) \tag{10}$$
时，裂纹扩展. 由(8)式知，当$v\to\infty$和$v=0$时，F分别取其极小值F_{min}和极大值F_{max}. 因此，能满足裂纹扩展条件(10)的K值范围为

$$K_{min} \leqslant K \leqslant K_{max}, \tag{11}$$

$$\left.\begin{aligned} K_{min} &= [\Gamma/A(v)F_{max}]^{1/2},\\ K_{max} &= [\Gamma/A(v)F_{min}]^{1/2},\end{aligned}\right\} \tag{12}$$

在此范围内，裂纹以有限速度扩展，处于亚临界扩展状态. $K < K_{min}$，裂纹停止扩展；$K = K_{max}$，裂纹失稳扩展.

取$t=0$时断层的半长度为a_0，构造力为$\tau_c(0)$，则$K(0)=\sqrt{\pi a_0}\tau_c(0)$. 对参量做无量纲化处理，取$\bar{a}=a/a_0$，$\bar{t}=t/T$，$\bar{v}=v/(a_0/T)$，$\bar{\tau}_c=\tau_c/\tau_c(0)$，$\bar{K}=K/K_{min}$，$\bar{J}_\infty=J_\infty/J_0$. 将(12)式代入(10)式后得

$$\bar{v} = d\bar{a}/d\bar{t} = -\tau_c(0)^2\bar{\tau}_c(\bar{t})^2\bar{a}/B\ln\{A - A/\bar{K}(0)^2\bar{\tau}_c(\bar{t})^2\bar{a}\}, \tag{13}$$

其中
$$A = [8c/9(\bar{J}_\infty - 1)] + 1, \quad B = \frac{4c}{15}L\tau_m^2.$$

由(13)式可知，断层的扩展速度$v(t)$直接决定于$\tau_c(t)$. 当构造力随时间变化而情况不同时，断层的扩展方式也各不相同. 实际观测结果也表明，断层扩展表现出多种状态. 如1965年日本松代町地震的地区，从1894年起测到了比较均匀的地壳沉降和上升，并逐渐发展成临震时的迅速变化(图1(a))[2]. 这些地表形变显然反映了断层的亚临界扩展情况. 此外，也记录到许多无震蠕动和间歇蠕动现象. 例如，1971年7月19日，沿美国 Hayward 断层设置的蠕变仪，依次从不同时刻起记录到断层位移[3]，图1(b)为依据此记录粗略绘出的断层蠕动曲线. 图1(c)为1967年 San Andreas 断层扩展的一次记录图[4]，这是一次间歇蠕动.

为了研究这些复杂的断层活动规律，我们选用下面几种典型的构造力变化条件：

1. 构造力保持不变，即$\bar{\tau}_c(\bar{t})=1$.

2. 构造力随时间线性增加或减少，即

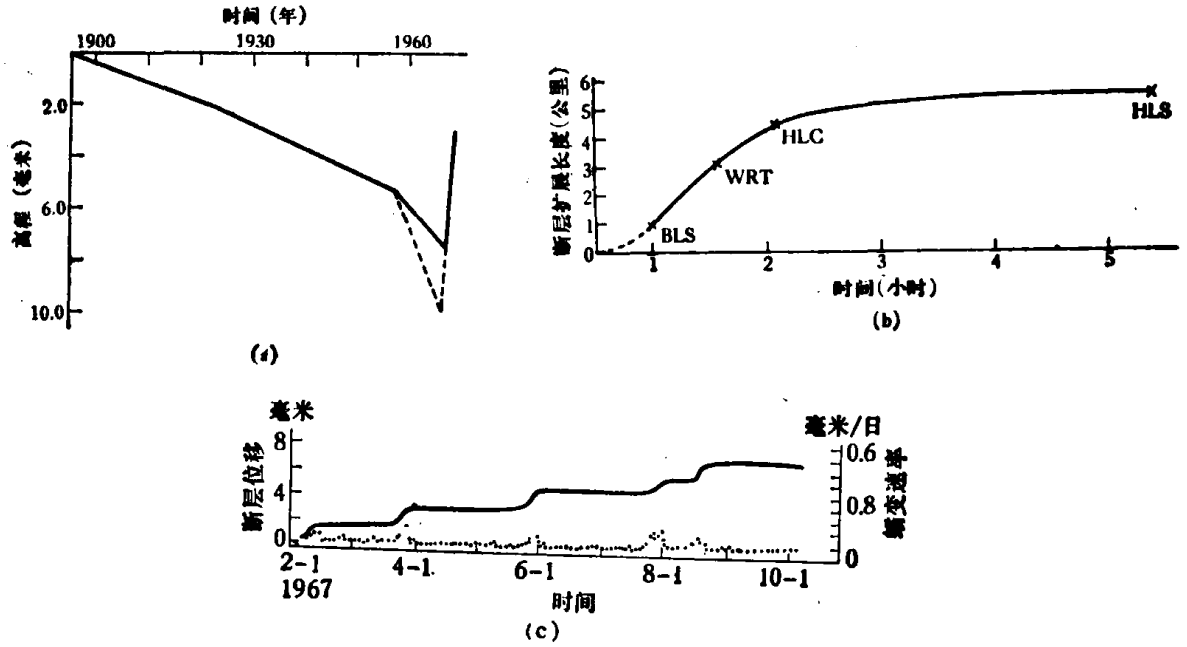

图 1　观测断层扩展示意图

(a) 日本松代町地区水准测量记录；　(b) Hayward 断层蠕动曲线(图中标注的字母为台站名)；
(c) San Andreas 断层蠕变 (1967) 记录，实线为断层位移，虚线为蠕变速率

$$\bar{\tau}_c(\bar{t}) = \begin{cases} 1, & 0 \leqslant \bar{t} \leqslant \bar{t}_c, \\ 1 + \eta(\bar{t} - \bar{t}_c), & \bar{t} > \bar{t}_c. \end{cases}$$

3.构造力作周期性变化，即

$$\bar{\tau}_c(\bar{t}) = 0.80 + 0.30 \sin[(\bar{t} - 21.7) \times 0.03].$$

(1) 当构造力恒定不变时 (图 2a)，断层扩展开始后即不断加速，直至失稳，即发生地震. (2) 当构造力随时间线性增加 ($\eta > 0$) 时，扩展速度增加的速率加快，孕震期缩短. 当构造力逐渐减小 ($\eta < 0$)，但 $\eta > \eta^*$ (某一临界值) 时，断层扩展依然加速，但增加的速率变慢，孕震期加长，最后仍发展为失稳扩展. 当 $\eta < \eta^*$ 时，断层扩展到 t_c 时刻后不再加速，而是减

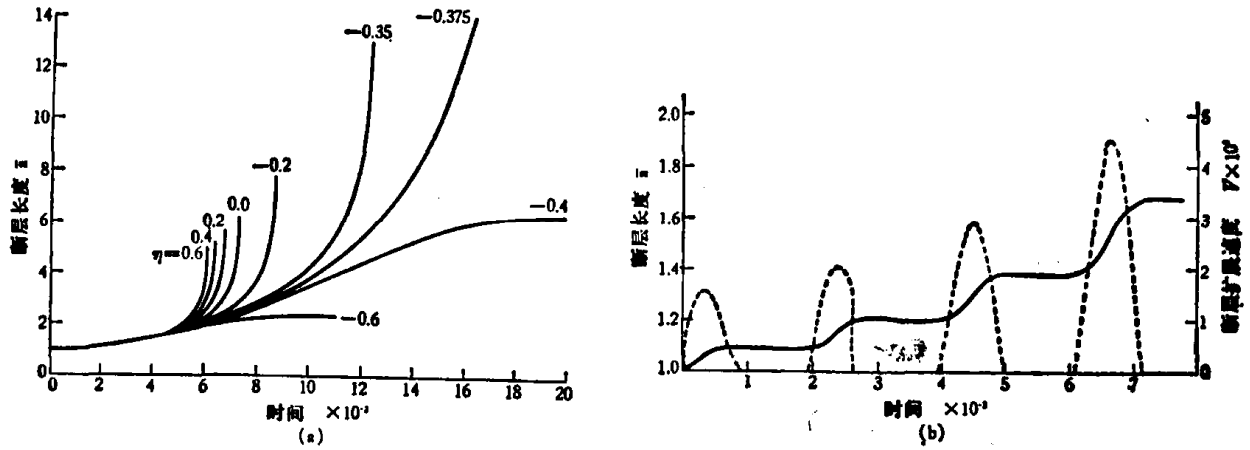

图 2　理论断层扩展曲线

实线为断层长度，虚线为断层扩展速度. (a) 作用力恒定不变，及作用力线性增加或减少的情况；
(b) 作用力随时间作周期性变化的情况

速，并最终停止扩展，与实际观测到的无震蠕动现象一致(图 2a)。(3) 当我们取构造力随时间作周期性变化时，理论计算的 $\bar{a}-\bar{t}$，$\bar{v}-\bar{t}$ 曲线(图 2b)，其特征与观测到的间歇蠕动一致。

本文的工作表明，由于介质流变性质的影响，当构造力使断层的应力强度因子达某阈值后，断层即开始亚临界扩展；即使构造力保持不变，扩展也将不断加速，并最终导致失稳扩展(地震)。由于构造力变化情况不同，断层扩展表现为实际观测到的多种形态：扩展速度的变化速率不同，孕震期长短随之而异；断层扩展还可能逐渐停止，只产生无震蠕动；也可呈现间歇的断层蠕动。总之，断层的蠕动并不一定导致地震，二者之间有密切而又相当复杂的关系。而蠕动速度的持续迅速增加，则是值得密切关注的前兆信息。

致谢：对傅承义教授的指导，表示感谢。

参 考 文 献

[1] 尹祥础、郑天愉，中国科学，B辑，1982，10：922—930.
[2] Mescherikov, J. A., *Tectonophys.*, 6(1968), 29—39.
[3] King, C. Y., Nason, R. D. & Tocher, D., *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.*, 274(1973), 355—360.
[4] Smith, S. W. & Wyss, M., *Bull. Seism. Soc. Am.*, 58(1968), 1955—1973.