

压剪应力场中组合裂纹扩展的 动态光弹性研究^{*}

卿新林^{**} 宋锦良

(清华大学) (天津大学)

冯德益 蒋淳

(天津市地震局)

摘 要

本文用动态光弹性方法对震源物理中几种典型组合裂纹的动态扩展过程进行了研究。首次成功地记录了这些组合裂纹在单轴压缩情况下动态扩展过程中的等差线条纹图,并得到了裂纹的扩展路径。根据实验结果,本文确认在远场压剪应力场中扩展张裂纹尖端的 $K_{Ia}=0$,并求出了 K_{Ia} ,得出了在压剪应力场中该等裂纹属稳定扩展的结论。

关键词: 动态光弹性 动态应力强度因子 等差线 组合裂纹 稳定扩展

一、引言

研究地震孕育过程与震源应力场是探索地震预报的一个核心问题,鉴于孕震条件的复杂性,依靠单纯的实地观测和相应的理论研究存在很多困难,必须配合以实验研究^{(1),(2)}。用动态光弹性方法可以同时得到裂纹的运动情况和应力场的变化过程,因而它是目前用实验方法研究上述问题的有效手段之一。

最早用动态光弹性方法研究裂纹扩展的是 Post 和 Wells⁽³⁾,后来 Kobayashi⁽⁴⁾等人也从事过这方面的研究,但他们的研究内容主要限于远场拉张应力场。在地壳运动所产生的压力和地层压力的作用下,含有断层的岩石所处的应力场是压剪应力场。一些学者对在压剪应力场中有关裂纹问题曾进行过静态光弹性研究^{(5),(6)},但未涉及裂纹扩展过程。本文是作

* 地震科学联合基金资助项目。

** 在天津大学取得硕士学位,现在清华大学力学系攻读博士学位。

1) 王建华,压剪应力场中裂纹的光弹性研究,1987。

者对文献〔2〕提出的典型化了的X型、Y型、T型组合裂纹，在压剪应力场中动态扩展过程所作的光弹性实验研究的一部分。

二、实验技术

1. 试件和加载

根据地壳内的实际情况，我们将所要研究的问题看作平面问题。在本实验中，用 Homalite100 平板代替岩石，这是一种具有与岩石相似的破裂特征且有双折射效应的脆性材料⁽⁶⁾。在平板中预制穿透型裂纹以模拟断层。试件的外形尺寸均为 $100 \times 70 \times 7 \text{mm}^3$ 。裂纹长度为 20mm 和 7mm，宽 1.5mm (图 1)。用自行设计的电动油压加载装置来实现试件所受单向均布压缩载荷²⁾。

2. 记录装置

实验使用 WZDD-1 型多火花动态光测弹性仪 (简称沙丁机)。PHILIPS 记忆示波器及电阻应变仪等。沙丁机的光源为 16 个火花隙排成 4×4 阵列，经圆偏振光光路，到达一个由 16 个镜头组成的成像装置，这 16 个镜头与 16 个火花隙位置一一对应。如图 2 所示。

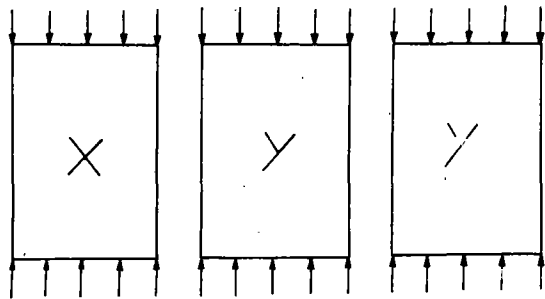


图 1 模型简图

Fig. 1 Sketch of model in the experiment

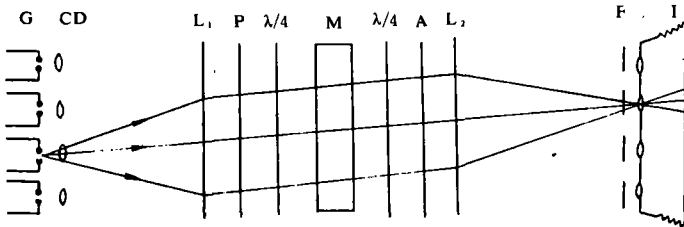


图 2 沙丁机原理简图

G. 火花隙 CD. 凸透镜 L₁. 准直镜 P. 起偏镜 A. 检偏镜
 $\frac{\lambda}{4}$. $\frac{1}{4}$ 波片 L₂. 场镜 F. 滤波片 I. 照相机

Fig. 2 Principle of record system in the experiment

3. 同步触发系统

为了拍摄裂纹扩展过程中的等差线照片，需要在裂纹开始扩展的同时发出触发脉冲，使沙丁机工作，因此就得使用同步触发系统。该系统由启裂信号源和触发电路组成。经反复比较，TS3-10mA 裂纹扩展片在断裂时要求位移张开量为 0.01mm 左右，断裂滞后约为

0.5mm，其拾取裂纹扩展信号的能力较强，基本上能满足实验要求。在裂纹扩展片中剪出含有一根断裂丝的小条，如图 3 所示，用 502 胶将它贴在裂纹端部附近，并使断裂丝与原始裂纹约成 25° 角，然后用引线引入触发电路。该断裂丝可以作为启裂信号源，裂纹一旦开裂扩展，断裂丝断开，就给触发电路输入一信号，触发电路则输出一个足以使沙丁机触发的电压脉冲。

2) 卿新林，压剪应力场中裂纹扩展的动态光弹性研究，1990.

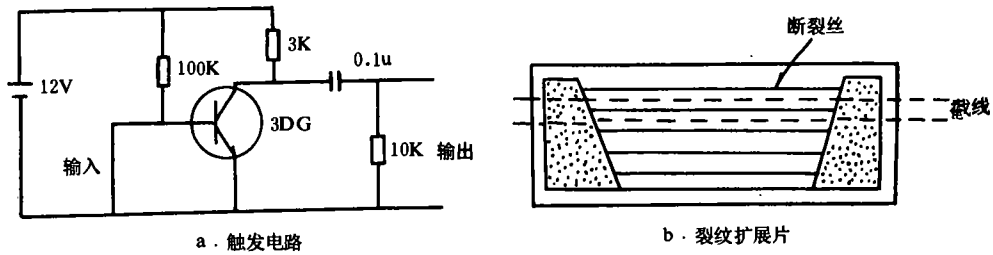


图3 触发系统

Fig. 3 Trigger system in the experiment

三、实验资料及分析

1. 裂纹扩展路径

图4是三种组合裂纹典型的扩展图形。实验表明，复合型组合裂纹的扩展路径与单裂纹相比存在着一定差异，其组合形态影响着裂纹扩展路径。

(1) X型组合裂纹：从裂纹端部附近开始扩展，初始开裂方向与原始裂纹近于成90°角，然后几乎是沿直线扩展，当扩展裂纹尖端到达与两条原始裂纹尖端的距离相等的位置时，扩展裂纹很快转向最大压应力方向，并继续向前扩展。在这个过程中，由于受载荷大小的限制，裂纹可以在任意时刻终止扩展。当扩展裂纹接近加载端部时，其扩展方向突然改变，最后导致整个试件破坏。

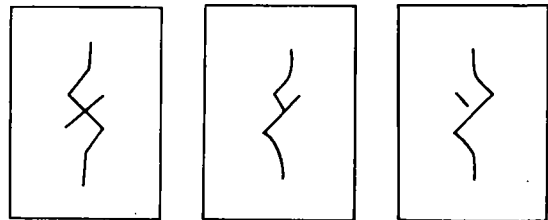


图4 三种组合裂纹扩展图形

Fig. 4 Extension of three kinds of combination crack

(2) Y型组合裂纹：在较接近的两条裂纹尖端出现的扩展裂纹与X型裂纹相似。在主裂纹的另一端部出现的扩展裂纹与单裂纹相似，即从裂纹端部附近开始扩展后，裂纹逐渐弯向最大压应力方向。

(3) T型组合裂纹：T型组合裂纹的扩展裂纹出现在主裂纹上，其扩展路径仍与单裂纹相似。在短裂纹与主裂纹之间未出现贯通现象。

2. 裂纹扩展速度

利用光电转换装置将沙丁机的火花信号转变为电信号，记入记忆示波器，记下有关曝光时刻，再从照片上利用投影放大仪量出有关时刻的裂纹长度，就可以得到裂纹长度与时间的关系曲线，计算这些曲线在各点的斜率就可以得到裂纹的扩展速度。在本实验给定的载荷作用下，三种组合裂纹的扩展速度都随扩展时间的增加而减小，如图5所示。

3. 应力场分布情况

图 6 是用沙丁机拍摄下来的几幅典型等差线照片。通过分析可知：X 型组合裂纹附近的应力场明显地分为两个压缩区和两个拉伸区，且压缩区的剪应力要比拉伸区的剪应力大得多。对于 Y 型组合裂纹和 T 型组合裂纹，应力场有类似的象限型分布，同样是压缩区的剪应力比拉伸区的大(图 7)。

三种组合裂纹的扩展裂纹都出现在拉伸区内，扩展裂纹的存在改变了其附近的应力场分布，扩展裂纹内侧的剪应力明显减小。相对来说，扩展裂纹外侧的应力场变化要小一些。距扩展裂纹较远的区域应力场受应力波的影响略有变化，但变化不大。

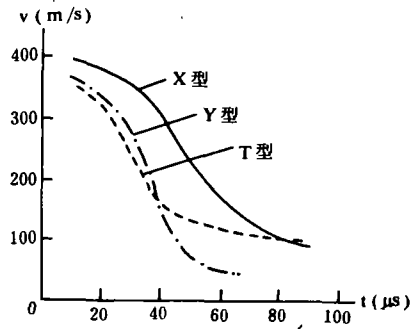


图 5 三种组合裂纹扩展速度曲线

Fig. 5 Curves of extension velocity of three kinds of combination crack



60 μ s

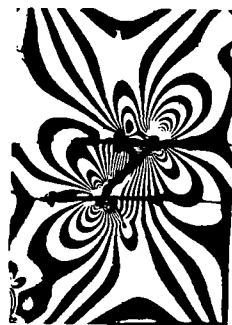


100 μ s

(a) X 型裂纹



40 μ s



60 μ s

(b) Y 型裂纹

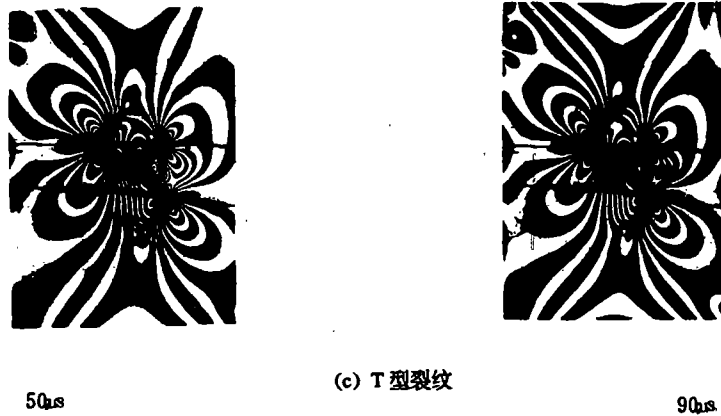


图6 三种组合裂纹扩展条纹图

Fig. 6 Extension streak of three kinds of combination crack

4. 应力强度因子的确定

文献〔7〕在处理远场压剪应力场中裂纹扩展问题时，认为在新扩展的裂纹面上裂纹必然闭合，且有 $K_{Ia}=0$ 。本文的实验证实，在远场压剪应力场中，扩展裂纹尖端的 $K_{Ia}=0$ ，扩展裂纹可以按纯 I 型处理。

从图 6 的等差线照片可以看出，扩展裂纹尖端的等差线条纹形状类似于标准纯 I 型裂纹，具有极明显的对称特征。此外，由等倾线观测也可以证实，裂纹一旦开裂即按纯 I 型扩展。

作者利用 409-Ⅱ 光弹仪对与压缩方向呈 45° 角的单裂纹在压剪应力场中的扩展进行了研究。通过控制外加压缩载荷大小，可以使扩展裂纹停止在各个阶段，然后在一定的压缩载荷下，对每个状态的扩展裂纹尖端附近的等倾线进行观察，发现扩展裂面上等倾线参数与裂纹在该处切线的倾角相等，即该处扩展裂纹所在平面为主平面。为了确定裂纹继续扩展的方向，可根据已知的裂纹扩展路径在试件上标出裂纹即将扩展的方向，然后观察这个方向上等倾线情况，发现在裂纹即将扩展的方向上的等倾线参数跟该方向的倾角相同，这就说明扩展沿与最大张应力垂直的方向进行。对此也可以这样理解，尽管裂纹处在远场压剪应力场中，但由于裂纹本身的存在改变了裂纹尖端附近的局部应力场，在裂纹尖端附近交替存在着拉伸区和压缩区。扩展裂纹总是出现在拉伸区，在这个局部区域内，扩展裂纹尖端的应力场可以不断调整，始终保持 $K_{Ia}=0$ 。这与文献〔8〕的研究结果相一致。

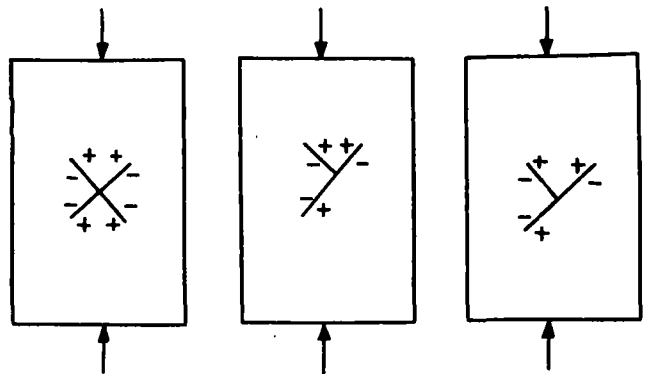


图7 应力场的象限型分布

Fig. 7 Quadrant distribution of stress field

扩展中的裂纹尖端附近的应力场可以写为⁽⁹⁾

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{11} &= \frac{K(t)}{\sqrt{2\pi r}} A[A_1 + A_2] + \sigma_{01} ; \\ \sigma_{12} &= \frac{K(t)}{\sqrt{2\pi r}} AA_3 ; \\ \sigma_{22} &= \frac{K(t)}{\sqrt{2\pi r}} A[-A_1 + A_2] . \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中

$$A = (1 + a_s^2) / [4a_s a_i - (1 + a_s^2)^2] ;$$

$$A_1 = (1 + a_i^2) f_1(\theta) \cos \frac{\theta_i}{2} - \frac{4a_i a_s}{1 + a_s^2} f_2(\theta) \cos \frac{\theta_s}{2} ;$$

$$A_2 = (a_i^2 - a_s^2) f_1(\theta) \cos(\theta_i/2) ;$$

$$A_3 = 2a_i [f_1(\theta) \sin \frac{\theta_i}{2} - f_2(\theta) \sin \frac{\theta_s}{2}] ;$$

$$a_s = (1 - \frac{v^2}{c_s^2})^{1/2} ; \quad a_i = (1 - \frac{v^2}{c_i^2})^{1/2} ;$$

$$\operatorname{tg} \theta_i = a_i \operatorname{tg} \theta ; \quad \operatorname{tg} \theta_s = a_s \operatorname{tg} \theta ;$$

$$f_1(\theta) = (1 - \frac{v^2}{c_i^2} \sin^2 \theta)^{-1/2} ; \quad f_2(\theta) = (1 - \frac{v^2}{c_s^2} \sin^2 \theta)^{-1/2} .$$

根据光弹性原理有

$$\frac{Nf_\sigma}{h} = \sqrt{\left(\frac{2KAA_1}{\sqrt{2\pi r}} + \sigma_{01}\right)^2 + \frac{4K^2 A^2 A_3^2}{2\pi r}} . \quad (2)$$

其中 N 是条纹级次, f_σ 是材料条纹值, h 是试件厚度, c_i 和 c_s 分别为纵波和横波波速, K 为应力强度因子。

由文献〔10〕, 将(2)式右边展为 \sqrt{r} 的幂级数, 取其前二项, 得

$$\frac{Nf_\sigma}{h} = \frac{2A(A_1^2 + A_3^2)^{1/2}}{\sqrt{2\pi r}} K + \frac{A_1 \sigma_{01}}{\sqrt{A_1^2 + A_3^2}} . \quad (3)$$

取裂纹尖端附近两个点的数据 (r_1, θ_1, N_1) 和 (r_2, θ_2, N_2) 分别代入(3)式, 得到确定 K 和 σ_{01} 的联立方程, 再消去 σ_{01} , 便可以解出 K 。若两个点取在同一条射线上, $\theta_1 = \theta_2$, 则有

$$K = \frac{f_\sigma \sqrt{2\pi} (N_1 - N_2)}{2hA \left(\frac{1}{\sqrt{r_1}} - \frac{1}{\sqrt{r_2}} \right) \sqrt{A_1^2 + A_3^2}} .$$

应力强度因子与载荷大小有关, 图 8 给出了三种组合裂纹在本实验载荷下扩展裂纹尖端的应力强度因子变化曲线。从图可以看出, 在载荷不变的情况下, 三种组合裂纹的应力强度因子都随扩展速度的增加而减小。

四、结论

在压剪应力场中,

1. 组合裂纹的扩展路径与组合形态有关, 组合裂纹间的相互作用可以改变裂纹扩展路径。

2. 扩展的张裂纹表现为纯 I 型, 即扩展裂纹尖端的 $k_{Ia}=0$ 。

3. 当载荷恒定时, 扩展裂纹尖端的应力强度因子随扩展的增加而减小, X、Y 及 T 型三种组合裂纹的应力强度因子的变化趋势相似。

4. 在裂纹端部附近, 拉伸区与压缩区交替存在, 压缩区的剪应力大于拉伸区的剪应力。

上述结果可用于地震震源孕育过程及地震前兆时空分布特性分析与地震预报密切相关的研究中, 为震源物理的理论研究及地震前兆机理研究提供了一定的实验依据。例如, 压缩区与拉伸区的交替存在对应着前兆现象近似呈“象限型”分布, 拉伸区内应力较小导致区内前兆反映不如压缩区明显等。

(本文 1991 年 8 月 7 日收到)

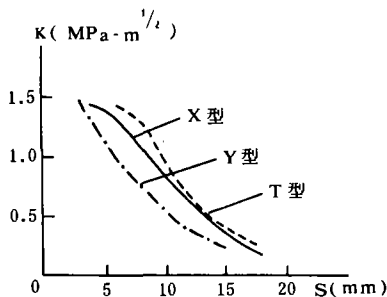


图 8 三种组合裂纹扩展裂纹尖端的应力强度因子与扩展长度的关系曲线

Fig. 8 Relationship between stress intensity factor of extension crack top and extension length of three kinds of combination crack

参考文献

- [1] 郭增建、秦保燕, 立交模式和其在地震预报中的应用, 西北地震学报, Vol. 7, No. 1, 1985.
- [2] 耿大玉, 关于发震断层与静止断层文遇的讨论, 西北地震学报, Vol. 8, No. 1, 1986.
- [3] Wells, A. and Post, D., The dynamic stress distribution surrounding a running crack — a photoelastic analysis, Proc. of SESA, Vol. 16, No. 1, 1958.
- [4] Kobayashi, A. S. and Chan, C. F., A dynamic photoelasticity of dynamic-tear-test specimen, Exp. Mech., Vol. 16, No. 5, 1976.
- [5] Bombolakis, Photoelastic study of initial stages of brittle fracture in compression, Tectonophysics—Elsevier Publishing Company, Amsterdam Printed in the Netherlands, Vol. 6, No. 6, 1968.
- [6] Kobayashi, A. S. and Mall, S., Dynamic fracture toughness of Homalite 100, Exp. Mech., Vol. 18, No. 1, 1978.
- [8] H. P. Rossmanith, Topics in photomechanics crack, waves and contacts, Photoelasticity, 1986.
- [9] Rice, J. R., Mathematical analysis in the mechanics of fracture, Vol. II, Edited by H. Libowitz, Academic Press, New York, 1968.
- [7] 王新华等, 用断裂力学的方法研究地震断裂的扩展方式, 地球物理学报, Vol. 27, No. 3, 1984.
- [10] 杜家吉、贾有权, 光弹性确定应力强度因子的全场级数法, 力学学报, No. 2, 1983.

(下转41页)

A RESEARCH FOR TILT VECTOR STABILITY AND PRECURSOR CHARACTERS IN ACCORDANCE WITH THE MAX—MODULUS

Niu Anfu, Wu Yilin

(*Institute of Seismology, SSB, Wuhan, China*)

Abstract

In this paper, the problems about direct identification of precursor with the tilt vector are discussed, and the method is also put forward. On the basis of tilt modulus, the max—modulus of vector is researched. The stability of tilt vector and relationship between vector characters (for example: pause, knot, radical change) are studied. The relationships between the stability of vector characters and precursors of Gonghe, Qinghai and Jingtai, Gansu and Datong, Shanxi earthquakes are discussed. The results show that the knots and pauses may be steady, therefore they are uncertainly precursor marks; however, the radical change of vector is possible precursor. The research for stability is more meaningful and effective for precursor analysis than direct method.

(上接19页)

DYNAMIC PHOTOELASTIC ANALYSIS OF COMBINED CRACK PROPAGATION IN A COMPRESSION—SHEAR STRESS FIELD

Qing Xinlin, Song Jinliang

(*Tsinghua University*) (*Tianjin University*)

Feng Deyi, Jiang Chun

(*Seismological Bureau of Tianjin City, China*)

Abstract

In this paper, dynamic propagations of some typical combined cracks in the physics of earthquake focus are studied by means of dynamic photoelasticity. Dynamic isochromatic fringes of these crack propagations under uniaxial compression are first successfully recorded, and the crack paths are also obtained. Experimental results show that $K_{I_d} = 0$ at a running crack tip even in a compression—shear stress field. Mode I dynamic stress intensity factors of running crack tips are determined, and a conclusion of crack stable propagation in a compression—shear stress field is obtained.