双轴压缩下组合裂纹的动态扩张实验研究*

卿新林　　宋锦良　　冯德益　　蒋淳

（天津大学，天津 300072）（天津市地震局，天津 300201）

摘要　本文运用动态光弹性技术，实验研究了几种与地震孕育构造背景相近的组合裂纹在双轴压缩下的扩展规律，对裂纹扩展路径、稳定性作了分析，并与单轴压缩情况进行了对比，同时还研究了摩擦力对裂纹扩展的影响。通过上述研究，得出了压剪应力场中裂纹稳定扩展等结论。

关键词：　**动态光弹性实验；　双轴压缩；　摩擦力；　裂纹扩展**

1　引言

文献〔1〕比较全面地研究了单向压缩情况下几种典型组合裂纹的扩展规律，但在地壳的形变过程中，岩石所处的应力状态比此要复杂得多，因此有必要探讨更接近于实际的双轴压缩条件下裂纹的扩展规律，以期得出更为普遍的结论，为解释地震现象及预报地震提供一些具有参考价值的意见。本文仍用与岩石具有相似破裂特征的 Homalite 100 光弹性材料模拟岩石，研究其在双轴压缩下的破裂特征。另外，地壳中的断层、破裂面呈自由裂纹形式的可能性很小，断层间含有各种填充物，在地应力场的作用下，各裂纹面间存在着很大的摩擦力，据此本文还研究了裂纹面间的摩擦力对裂纹扩展的影响。

2　实验步骤及结果

2.1　加载装置与记录系统

本实验使用一套自行设计的电动油压加载系统，如图 1 所示。该加载系统由电动油压机、测力系统和双向加载装置三部分组成。电动油压机包括油缸、油泵、控制阀等部分，通过调节控制阀可以调整加载大小、方向及速率；测力系统由荷载传感器和 YJ-16 电阻应变仪组成；双向加载装置如图 1(b)所示，上、下两边油压加载，侧边采用弹性支承，弹性支承采用 10 个大小尺寸完全相同的环氧树脂小圆盘，其优点是既可当弹性支承，又可根据圆盘上的等色线计算侧向力。实验中采用国产 WZDD-1 型多火花动态光弹性仪作记录装置，其原理及触发电路在文献〔1〕中有详细叙述。

2.2　模型

模型外形尺寸如图 2 所示，模型材料为 Homalite 100。Homalite 100 是一种优质的脆性光弹性材料，在模型上分别预制了 X 型、Y 型组合裂纹，裂纹尺寸如图 2(b)所示。

2.3　实验结果

使用 WZDD-1 型动态光弹仪拍摄记录裂纹扩展过程中的等色线条纹图，图 3 是两种裂纹的等

* 地震科学联合基金资助项目

色线条纹图。

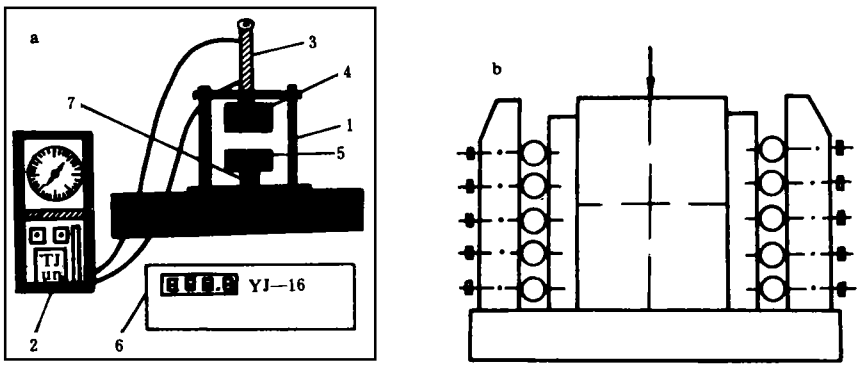

图1 加载设备示意图

1. 框架；2. 油压及控制系统；3. 油缸；4. 加力压头；
5. 球形支座；6. 电阻应变化仪；7. 测力传感器

Fig. 1 Sketch of loading device

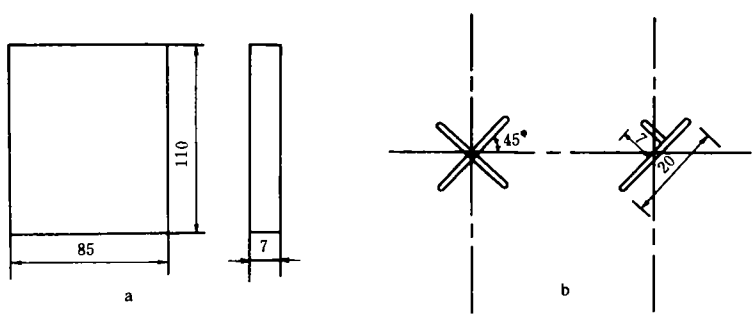

图2 模型简图(单位:mm)

(a)模型外形尺寸； (b)裂纹尺寸(宽度均为1.5mm)

Fig. 2 Sketch of model used in the experiment

2.3.1 裂纹扩展路径

X型裂纹:扩展从裂纹端部开始,初始开裂方向与原始裂纹成略大于90°的角,其扩展路径几乎是一条直线,当扩展裂纹尖端到达距两个原始裂纹尖端距离相等的位置时,扩展裂纹尖端稍向里转向第二个原始裂纹,此时裂纹即停止扩展。若继续加大载荷,扩展裂纹突然急剧转弯向最大压应力方向扩展,其扩展路径亦近似于直线,在这一阶段,裂纹的扩展随载荷的增加而一步一步地阶跃式地向前扩张。在此之前,没有发现宏观剪切裂纹形成。

Y型裂纹:扩展裂纹出现在主裂纹端部,且在靠近短裂纹的一端,裂纹扩展路径与短裂纹基本平行,其后的扩展情况与X型裂纹相同。

从图3可以看出,扩展裂纹后缘靠近原始裂纹的区域应力明显减小,而扩展裂纹对远处应力场

b. 10μs　　b. 20μs

纹示意图　图3　等色线条

Y型裂纹　　a. X型裂纹；b

ipes of isocolor Fig. 3　Sketch of str

2.3.2 应力强度因子

[illegible]

[illegible]

纹。利用公式[2,3]

$$K=\frac{f\sigma\sqrt{2\pi}}{2dB}\cdot\frac{N_1\sqrt{A_1^2(\theta_1')+A_3^2(\theta_1')}A_1(\theta_2')-N_2\sqrt{A_1^2(\theta_2')+A_3^2(\theta_2')}A_1(\theta_1')}{A_1(\theta_2')\left[\frac{A_1^2(\theta_1')+A_3^2(\theta_1')}{\sqrt{r_1'}}\right]-A_1(\theta_1')\left[\frac{A_1^2(\theta_2')+A_3^2(\theta_2')}{\sqrt{r_2'}}\right]} \tag{1}$$

就可以求出扩展裂纹尖端的动态应力强度因子。

在裂纹尖端附近取数时，取数区范围不能超出裂纹尖端等色线条纹对称区。若在扩展裂纹尖端附近处有两条等色线可利用，在用公式(1)求解时，可以把两点取在同一射线上，$\theta_1'=\theta_2'$，则(1)式写为

$$K=\frac{f\sigma\sqrt{2\pi}}{2dB}\frac{N_1-N_2}{\left[\frac{1}{\sqrt{r_1'}}-\frac{1}{\sqrt{r_2'}}\right]\sqrt{A_1^2+A_3^2}} \tag{2}$$

图4是X型、Y型组合裂纹在双轴压缩时扩展裂尖的应力强度因子随扩展长度变化的关系曲线。

3 分析与讨论

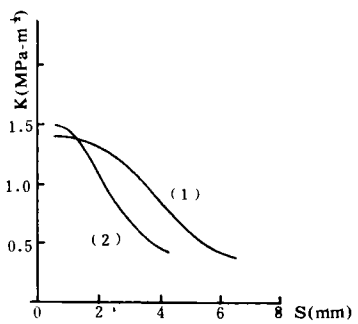

图4 应力强度因子变化曲线

(1)X型裂纹； (2)Y型裂纹

Fig. 4 Curve of stress intensity factor change

3.1 初始闭合裂纹与初始不闭合裂纹的比较

在上述研究中，所有裂纹都是用狭窄的缝隙来摸拟，缝隙的两边是自由的。而在地球深处的自然条件下，破裂面呈自由裂纹形式存在的可能性很小，在地层的强大压力作用下，它们之间相互挤压，破裂面之间存在着摩擦力作用。因此有必要比较初始闭合裂纹与不闭合裂纹的异同。在远方拉伸应力场中，两者之间无本质差别；在远方压剪应力场中，我们绘制了45°单斜裂纹在单向均布压力作用下闭合与不闭合时的等色线图。由观察可知，在两种情况下，剪应力的集中区都是在裂纹的延伸处，特别是在裂纹尖端附近。但由于闭合程度不一样，等色线图有明显差别，造成这种差别的主要原因是由于闭合裂纹的两表面之间相互挤压，使得初始闭合裂纹能起到准连续介质的作用，非奇异场对裂纹尖端应力场的影响比较小。

为了进一步研究初始闭合裂纹与不闭合裂纹对其扩展规律的影响，我们对X型组合裂纹的一条裂纹填充石英砂，另一条让其表面自由，石英砂是与环氧树脂胶混合搅拌后填充在裂纹间的。填充前，在裂纹表面涂上一层薄薄的石蜡，这样可保证裂纹面间有摩擦力作用，又不致使环氧树脂胶与裂纹表面粘接在一起。然后对含有这种组合裂纹的*Homalite* 100平板在单轴均布压力下进行动光弹实验。结果表明，扩展裂纹是从不闭合裂纹端部开始的，裂纹扩展路径与45°单斜裂纹在相同条件下的扩展路径相似，它们之间的差别与两条裂纹表面都自由时的组合裂纹相比明显减小，但它们在扩展过程中所表现出的性态基本相同。

文献[4]中曾研究过压剪应力场中闭合裂纹表面摩擦力分布变化情况，结果表明，随着外加载荷的增加，摩擦区逐渐向裂纹中间集中，而靠近裂纹尖端部分的摩擦力逐渐减小，以至可以略去。这样在足以使裂纹扩展的较大载荷作用下，裂纹端部的上、下表面由于剪切变形影响就会相互分离，成为自由表面。

宏观剪切裂纹。

[illegible]

支 是发生在这两个扩展分

[illegible]

裂问题。

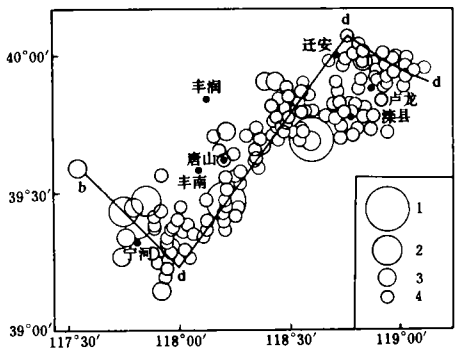

图7 唐山地震后 $M_L>5.0$ 的余震震中分布图

1. $M_S\geqslant7.0$; 2. $6.5\leqslant M_L<7.5$;

3. $6.0<M_L<6.5$; 4. $5.0<M_L<6.0$

Fig. 7 Distribution of aftershocks of $M_L>5.0$ after the Tangshan earthquake

4 结论

从以上的实验结果及分析可得出以下结论：

(1)组合裂纹的扩展路径与组合形态及受力状态有关。

(2)在压剪应力场中，不管初始裂纹的闭合与否，它们的扩展都不是沿初始裂纹方向进行的，不闭合裂纹的初始开裂角接近90°，闭合裂纹的开裂角要略小，约70°—80°。

(3)初始裂纹面间的摩擦力会减弱裂纹尖端应力场的强度，同时也削弱了裂纹间的相互影响。

(4)压剪应力场中，扩展的张裂纹表现为纯I型；扩展裂纹尖端的应力强度因子随扩展的增加而减小，裂纹属稳定扩展。

(本文1992年6月29日收到)

参考文献

1 卿新林，宋锦良，冯德益，蒋淳. 压剪应力场中裂纹扩展的动态光弹性研究. 西北地震学报，1992，14(2).

2 Rice J R. Mathematical analysis in the mechanics of fracture. Fracture(Vol. Ⅱ), New York: H. Libowitz, Academic Press, 1968. 191.

3 杜家吉. 动态张开型裂纹扩展的动光弹分析. 天津大学学报，1985，4.

4 王建华，宋锦良. 受压剪应力作用闭合裂纹的光弹性研究. 地震学报，1990，12(1).

5 郭增建. 震源物理. 北京：地震出版社，1979.

6 耿大玉. 关于发震断层与静止断层交遇的讨论. 西北地震学报，1986，8(1).

7 谷继成. 强余震的时间分布特征及其理论解释. 地球物理学报，1979，22(1).

DYNAMIC PROPAGATIONS OF COMBINED CRACKS UNDER BIAXIAL COMPRESSION

Qing Xinlin and Song Jinliang

(*Tianjin University*)

Feng Deyi and Jiang chun

(*Seismological Bureau of Tianjin City*)

Abstract

In this paper, the propagations and rupture characteristics of some typical combined cracks in the physics of earthquake focus, under biaxial compression, are studied by means of dynamic photoelasticity. The crack paths and propagation stability are analysed, comparing with the uniaxial compression. In the meanwhile, the effect of opposite crack face friction on crack propagation is studied. Some conclusions, such as crack stable propagation in a compression-shear stress field, are obtained.

Key Words: Dynamic photoelasticity; Biaxial compression; Friction; Crack propagation