

文章编号: 1001-1455(2003)06-0565-04

# 地质断层对地下结构震塌影响机理的 动光弹试验研究<sup>\*</sup>

连志颖<sup>1</sup>, 陆渝生<sup>2</sup>, 叶琳<sup>1</sup>, 邹同彬<sup>2</sup>, 钱七虎<sup>2</sup>

(1. 第二炮兵工程设计研究所, 北京 100011;

2. 解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 用动态光弹性试验模拟研究了地质断层对应力波的影响及相互作用, 比较分析了冲击荷载作用下水平和 30°方向的裂缝的动态响应, 得到指定点处的条纹级数-时间关系曲线图和应力-时间关系曲线图, 研究了结构物顶部震塌的机理, 试验结论可为防护结构的改进提供参考。

关键词: 固体力学; 结构震塌; 动光弹; 断层; 应力波

中图分类号: O348.2

国标学科代码: 130·1575

文献标志码: A

## 1 引言

在岩石结构内部存在着大量的各种各样的人工或天然的孔洞、裂纹、狭缝及各种节理、裂隙、断层和夹层等, 这些孔洞或断层对常规武器作用下产生应力波传播过程产生很大影响, 弹性波在岩石结构中传播时遇到这些障碍物将发生反射、折射及绕射等现象。研究这些孔洞或断层等对应力波影响及相互作用对地下工程的结构震塌机理研究有重要意义<sup>[1]</sup>。

虽然在冲击荷载作用下的结构震塌问题是防护工程亟待解决的课题之一, 但是由于结构震塌属于高应变率条件下的破坏动力学问题范畴, 是一个十分复杂的力学问题, 因此目前尚未完全搞清。本文中根据动光弹的特点, 用动光弹进行了不同结构形状的地质断层对地下结构震塌的试验研究。

## 2 基本原理

试验模型是由 6mm 厚的聚碳酸酯板制作, 模拟在冲击荷载作用下应力波的相互作用, 其几何尺寸如图 1 所示, 其中 A 点为加载的作用位置, 图中实线表示水平裂缝, 虚线表示 30°方向的裂缝。聚碳酸酯板的动态力学参数分别为: 动弹性模量  $E_d = 3026 \text{ MPa}$ , 动态材料条纹值  $f_{od} = 9200 \text{ N/m}$ , 泊松比  $\nu = 0.35$ , 纵波波速  $c_p = 1590 \text{ m/s}$ 。

动态光弹性方法是研究应力波动态传播过程的一种有效试验手段, 它通过等差条纹图的分布形式可以把波的传播特征直观的反映出来。动态光弹性法同静态光弹性法的基本原理一样, 都利用了光弹性材料的暂时双折射性现象, 当光弹模型材料受力作用后, 模型产生双折射效应, 在图 2 所示的圆偏振光场中得到代表应力场的变化等差条纹图。根据动态条件下的应力-光学定律, 模型中条纹级数  $N$  与模型中主应力差有如下关系

$$\sigma_1 - \sigma_2 = N f_{od} / h \quad (1)$$

式中:  $f_{od}$  为该材料的动态条纹值,  $h$  为模型的厚度。因此, 连续的动态等差条纹图实质上反映了应力波的传播过程。

加载装置为 5.6mm 的小口径运动步枪, 冲击力的大小由子弹的火药量来控制。为了便于比较分析, 每次所加子弹的火药量相同, 药量为 170 粒, 每次的冲击力大小变化很小, 可以近似看作是相等的。

\* 收稿日期: 2002-10-26; 修回日期: 2003-02-08

作者简介: 连志颖(1976—), 男, 硕士。

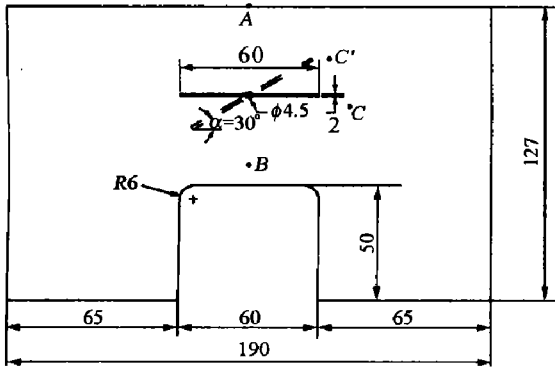


图 1 模型示意图  
Fig.1 Sketch of model

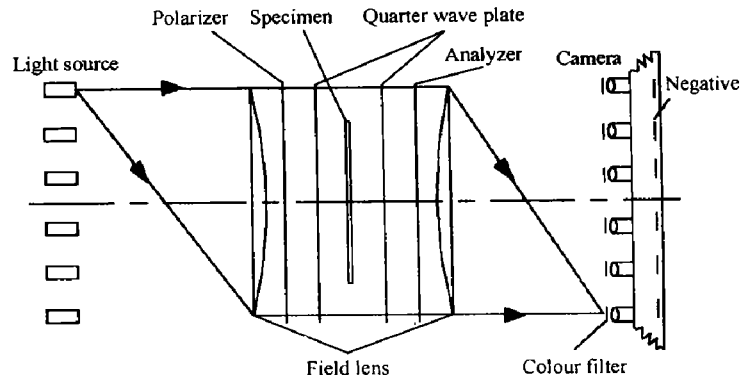


图 2 DDGS-II 型示意图  
Fig.2 Sketch of DDGS-II

记录仪器是多火花式 DDGS-II 型动态光弹仪，光路图如图 2 所示。其工作原理是：点火控制系统把冲击荷载信号传给点火系统，使贮能电容器依次放电而产生序列火花。这些高光强火花照射放在圆偏振光场中的受力模型上，就把扰动产生的应力场如实地被记录在相应的排成方阵的相机的底片上，从而得到多幅表示应力波传播过程与相互作用的序列照片<sup>[2]</sup>。

### 3 实验分析

仅讨论圆孔及水平和 30° 方向的裂缝对应力波的影响及相互作用。实验结果如图 3~5 所示。

由图 3 的等差条纹图可知，冲击产生的应力波为压缩纵波，传到孔边时被反射，反射随入射波的增强而增强；条纹图上反映为应力条纹向后凸起，未被反射的波被圆孔截为两部分分别在孔的两侧衍射；衍射后的应力波经过一段距离后又恢复原来的形状继续向前传播。在波的入射方向，由于孔边的反射波对后传的应力波有干扰，条纹图表现为应力波条纹的连续畸变。应力波传到孔边未被反射以前，孔的入射边受压，反射波出现以后，该边又受拉，拉应力的大小随反射波的增强而增大；应力波绕过圆孔时，孔的两侧由于应力波的作用而受压，波衍射到孔的底部时，底部由于应力波的作用而由零应力状态变为拉应力的作用，拉应力的大小随衍射波的增强而增大。此时，圆孔的上下两侧受拉，左右两侧受压。由于圆孔的边界上法向应力为零，其切向应力可由式(1)直接求得。

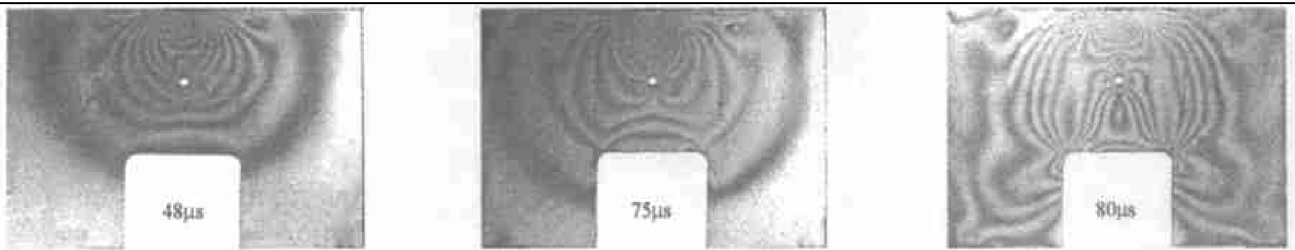


图 3 含圆孔时的动光弹典型等差条纹图  
Fig.3 Typical isochromatic fringes of the dynamic-photoelastic with a hole

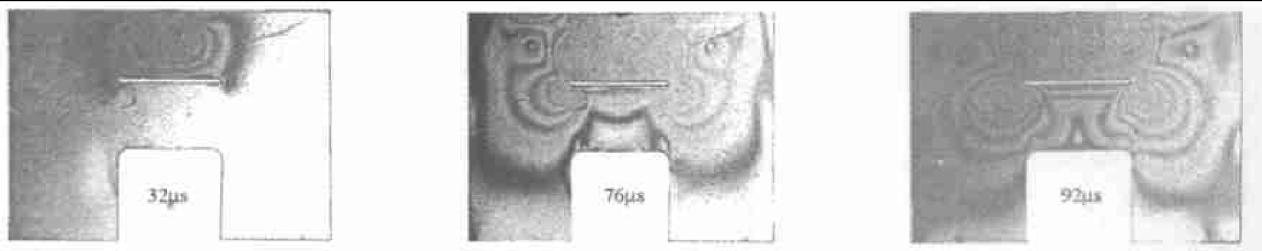


图 4 水平方向裂缝的动光弹典型等差条纹图  
Fig.4 Typical isochromatic fringes of the dynamic-photoelastic with a horizontal crack



图 5 30°方向裂缝的动光弹典型等差条纹图

Fig.5 Typical isochromatic fringes of the dynamic-photoelastic with a tilted crack

分析裂缝的实验结果(见图 4~5),冲击作用产生的应力波波头在未到达裂缝之前,应力波的传播与无限平板中应力波的传播一样,其传播是以柱面波的形式向外辐射,应力条纹图上表现为一组围绕作用点的一组同心圆,这是与弹性理论的解析解是一致的<sup>[3]</sup>。

当应力波传到裂缝时,一部分沿裂缝两侧继续向前传播,而中间部分则在裂缝处向上反射,并在端角处引起应力集中。被反射的应力波在应力条纹图上表现为应力条纹反向凸起,反射波出现后,将与后面的波发生相互干涉作用,使应力条纹连续变形。然后应力波被裂缝分为两部分从两侧发生衍射,由于裂缝两端突变的缘故,在裂缝两端形成动态应力集中现象,应力集中随着衍射波的增强而增大。水平裂缝右端 C 点附近和 30°斜方向上端 C'附近的应力条纹级次曲线如图 6 所示。图中左侧纵轴表示水平裂缝右端 C 点附近的应力条纹级次,右侧纵轴表示 30°斜方向上端 C'点附近的应力条纹级次。衍射后的应力波继续向下传播,最后到达结构顶部。由于应力波与裂缝的相互作用,应力波的传播时间延长,应力波衰减,峰值降低,表现在等差条纹上条纹级数降低(见图 6),这说明此时结构顶部的动应力降低,因而减轻了结构顶部的震塌程度。

初始的冲击纵波为压缩波,因而在未反射前,介质受压应力;到达裂缝上侧面后,由于反射波是拉伸波,所以在往回传播的过程中,将不断地与入射纵波波尾叠加,从而使其携带能量不断损耗而波阵面渐趋平缓,并将在裂缝上边缘形成拉应力;当应力波在衍射到裂缝的下边时,裂缝两端的衍射波逐渐汇拢,使下侧受拉应力作用,随着衍射波的增强和叠加,拉应力逐渐增大。衍射后的应力波继续向下传播,到达结构顶部,见图 7。图中左纵轴表示水平裂缝时 B 点的径向应力,右纵轴表示 30°方向裂缝时 B 点的径向应力。根据式(1),得到水平裂缝时,最大应力  $\sigma_{r, \max} = 3.06\text{MPa}$ , 30°方向时,最大应力为  $\sigma_{r, \max} = 4.59\text{MPa}$ 。比较这两个实验结果可以看出,随着裂缝倾斜角度增大,在裂缝处反射波将减小,绕射到结构顶部的应力波将增大,这对工程的防护是极为不利的。

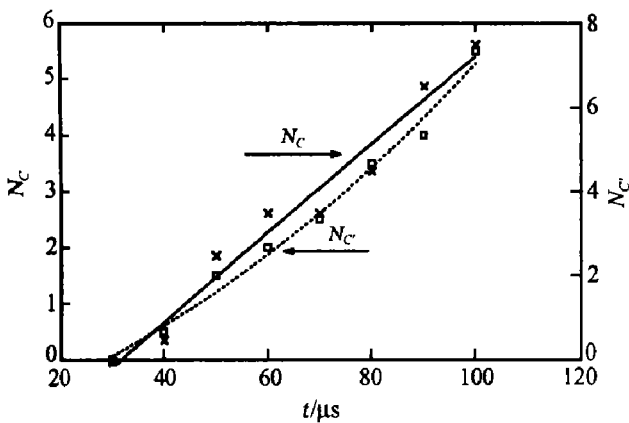


图 6 条纹级数曲线

Fig.6 Fringe order curves

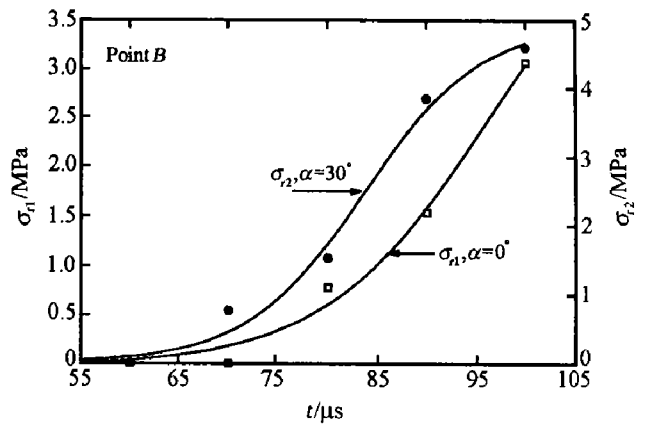


图 7 径向应力曲线

Fig.7 Stress curves

极端地讲,如果裂缝的方向平行于应力波的传播方向,则应力波在传播过程中不会产生明显的反射作用,这样就失去了裂缝的延时和阻隔作用,对工程的防护不会产生有利的影响;相反,如果一条足够长

的水平裂缝,由于裂缝是中空的,应力波遇到裂缝时不会发生折射和透射现象,只有反射作用,对于原来结构顶部的抗震塌起到了良好的作用。但在实际岩石介质中,裂缝内不会是中空的而是有填充物质的,其力学性质与岩体不同。因此,在工程防护结构中,可以构筑带有孔隙的成层式结构,能够使孔隙上方的介质在压缩波作用下充分变形和破坏,尽可能的消耗压缩波的能量,这对提高工程防护能力是非常有利的。

#### 4 试验结论

作为机理研究,利用动态光弹性试验来模拟研究岩石结构内部的圆孔、水平裂缝和  $30^\circ$  方向的裂缝对冲击荷载作用下产生的应力波的影响及相互作用。

(1)从动态光弹性照片来看,在裂缝附近将出现动态应力集中现象。应力集中随着衍射波的增强而增大。

(2)裂缝的长度和偏斜方向都影响应力波的传播,对结构震塌的影响明显。对于水平或偏斜角度不大的裂缝来说,从动光弹照片来看可以延迟应力波衰减的时间,降低峰值压力,使结构顶部的应力降低。从理论上讲,由于裂缝的存在,应力波不能发生透射,而只能反射和在裂缝两端发生衍射,从而延长了应力波衰减的时间。在实际岩石结构中,断层内一般会有填充物质,其力学性质与原有岩体不同,应力波将会在断层处发生折射和二次反射,使波的衰减增加,降低了结构顶部的动应力,这对结构也是有利的。断层的方向对应力波的传播影响将随着裂缝的偏转角的增大而减弱衰减作用,因此,应充分利用水平或小斜角裂缝的有利影响。

(3)如果在成层式结构人为地预留一定高度的空隙。从应力波传播机制来看,是比较有效的一种防震塌措施,上面的结构可有充分变形空间,消耗压缩波的能量。虽然目前这种结构构造较复杂,施工较困难,目前采用很少,但仍是值得研究和推广应用的课题。

#### 参考文献:

- [1] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 47—50.
- [2] 苏先基, 励争. 固体力学动态测试技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997: 122—123; 128—130.
- [3] 徐芝纶. 弹性力学·上[M]. 北京: 高等教育出版社, 1988: 100—102.

### Dynamic photoelastic investigations of the effect of geology faultage on underground structural spallation

LIAN Zhi-ying<sup>1\*</sup>, LU Yu-sheng<sup>2</sup>, YE Lin<sup>1</sup>, ZOU Tong-bin<sup>2</sup>, QIAN Qi-hu<sup>2</sup>

(1. *Engineering Design and Institute of Second Artillery, Beijing 100011, China;*  
2. *Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, Jiangsu, China*)

**Abstract:** The experiments to simulate the stress wave effect and interaction of geology faultage have been down by using dynamic photoelasticity. The dynamic response of horizontal and 30 degree crack are compared under shock load. The stress-time curves and stress-time curves at appointed point are obtained. The spallation mechanism of the structure is studied. Experimental results could be a reference for improvement on protective construction.

**Key words:** solid mechanics; structure spallation; dynamic photoelasticity; faultage; stress wave

\* Corresponding author: LIAN Zhi-ying

Telephone: 010-66339636