

文章编号: 1001-1455(2004)04-0352-04

界面对应力波作用的动光弹试验研究^{*}

陆渝生, 张宏梅, 连志颖

(解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 用动光弹法分析研究了在冲击载荷作用下界面上应力波的传播过程, 利用应力波理论分析了界面上应力波的作用机理, 证实了界面上存在着能量累积和阻滞能量传递的作用, 并结合弹性波动理论和应力-光学定律导出了波动方程与条纹级数之间的关系式。

关键词: 爆炸力学; 能量累积; 动态光弹性; 应力波

中图分类号: O348.1 国标学科代码: 130°3520 文献标志码: A

1 引言

在地面与地下防护工程之间总是存在各种界面, 如不同地质构造、地质裂缝、断裂带、节理等形成的构造面; 围岩与地下工程间的人工界面等。当地下防护工程受到冲击或爆炸作用时, 动荷载所引起的应力波在传播过程中, 必将受到这些界面的影响。应力波如何在界面上发生反射和透射? 界面对能量传递有何影响? 对地下防护工程的防护能力是利是弊? 这些问题已经引起重视, 在爆破工程中, 已经注意到这些问题并在爆破作业中加以利用。如预裂爆破法就是利用预裂纹界面对应力波的反射作用增强爆破的破碎程度; 隔震沟则是利用界面阻隔应力波以减弱爆破对沟外的影响。但是对界面与应力波的作用机理仍研究不够。

由于动态光弹性法(简称动光弹)具有全场性、可视性、直观性、非接触性、无损伤及对动态问题能作实时、连续的全过程记录等特点, 所以特别适合用来分析冲击或爆炸时应力波的产生、传播与相互作用的过程。本文中用目前我国最先进的 DDGS-2 型多火花高速摄影系统记录了在冲击载荷作用下应力波在界面上传播的等差条纹图, 并用应力波理论分析了界面上应力波的作用机理, 证实了界面上存在着能量累积和界面具有阻滞能量传递的作用, 并结合弹性波动理论和应力-光学定律导出了波动方程与条纹级数之间的关系式。

2 试验方法及基本原理

2.1 动态光弹性法试验

动态光弹性法的基本原理见文献[1], 这里不再赘述。根据应力-光学定律, 模型中等差条纹级数 N 与模型中主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ 存在下列关系^[1]

$$\sigma_1 - \sigma_2 = Nf/h \quad (1)$$

式中: f 是该材料的动态条纹值, h 为模型的厚度。

试验模型由两块聚碳酸酯板制成, 分别称为上模板和下模板。两模板的上下边界平整光滑, 模板厚度 6mm。两块模板上下叠放, 紧密接触, 以模拟界面上应力波的传播和相互作用, 其几何尺寸如图 1 所示, 其

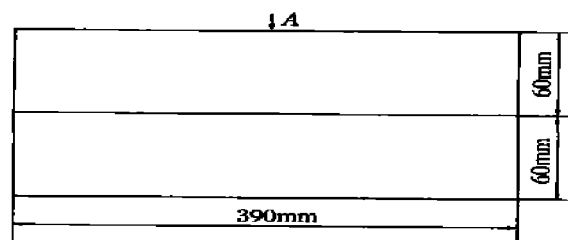


图 1 模型简图

Fig. 1 Diagram of model

* 收稿日期: 2003-08-19; 修回日期: 2004-02-16

作者简介: 陆渝生(1945—), 男, 教授。

中中点 A 为冲击荷载的作用位置,下模板两端铰支,形成三点弯曲梁。

聚碳酸酯的有关动态力学参数^[2]:动态条纹值 $f=9200\text{N}/(\text{m}\cdot\text{fringe})$,泊松比 $\nu_d=0.35$,弹性模量 $E_d=2.6\text{GPa}$ 。

试验的荷载源为 5.6mm 的小口径运动步枪,弹丸装药量为 400 粒。

动态光弹性法是研究冲击或爆炸作用的一种非常有效的实验手段,它能以微秒级的时间量级来记录由爆炸或冲击产生的应力波的传播过程,从而得到具有规律性的认识。

2.2 弹性应力波与动态等差条纹的基本关系式

在动光弹实验中,虽然都把动态等差条纹的传播过程看作是应力波的传播过程,但动态等差条纹和应力波之间到底是怎样的函数关系,却一直没有明确。本文中针对动态光弹性法是平面应力问题,结合弹性应力波理论和应力-光学定律,导出了平面应力问题的弹性应力波与动态等差条纹的基本关系式。

对于平面应力问题,其本构方程为^[3]

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2} \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right] \quad (2)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2} \left[\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right] \quad (3)$$

$$\sigma_{xy} = G \left[\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right] \quad (4)$$

式中: u 、 v 为 x 、 y 方向上的位移分量, E 为弹性模量, μ 为泊松比, $G=E/2(1+\mu)$ 。

在平板中,不计体力时,弹性应力波的波动方程为

$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{c_p^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (5)$$

$$\nabla^2 \psi = \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (6)$$

式中: ϕ 、 ψ 分别为纵波(P波)、横波(S波)的拉梅势函数。 c_p 、 c_s 分别为纵波和横波的速度。

则位移可表达式为

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad (7)$$

$$v = \frac{\partial \phi}{\partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (8)$$

由分离变量法,以加载点为坐标原点,方程(5)、(6)的解可分别取为下列形式^[4]

$$\phi = H_1(t) T_1(r) \quad (9)$$

$$\psi = H_2(t) T_2(r) \quad (10)$$

式中: $H_1(t) = \exp(-i\omega_p t)$, $T_1(r) = A \exp(ik_p r)$, $H_2(t) = \exp(-i\omega_s t)$, $T_2(r) = B \exp(ik_s r)$, $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$,其中 ω_p 、 ω_s 分别为 P 波和 S 波的时间频率, k_p 、 k_s 分别为 P 波和 S 波的空间频率。

因此位移 u 、 v 可表示为

$$u = \frac{\partial T_1}{\partial x} H_1 + \frac{\partial T_2}{\partial y} H_2$$

$$v = \frac{\partial T_1}{\partial y} H_1 - \frac{\partial T_2}{\partial x} H_2$$

将其代入(2)~(4)式,并引入(1)式和莫尔圆表达式^[5],简化后可得

$$\begin{aligned} \sigma_1 - \sigma_2 &= [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\sigma_{xy}^2]^{1/2} \\ &= \frac{E}{1-\mu^2} \{ [(\Delta_1 T_1)^2 + 4(\Delta_2 T_1)^2] H_1^2 + [(\Delta_1 T_2)^2 + 4(\Delta_2 T_2)^2] H_2^2 + \\ &\quad 4H_1 H_2 (\Delta_2 T_2 \Delta_1 T_1 - \Delta_2 T_1 \Delta_1 T_2) \}^{1/2} = Nf/h \end{aligned} \quad (11)$$

若仅考虑 P 波, 则 $\psi=0$, (11)式可简化为

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2} [(\Delta_1 T_1)^2 + 4(\Delta_2 T_1)^2]^{1/2} \exp(-i \omega t) = Nf/h \quad (12)$$

式中: Δ_1 、 Δ_2 为微分算子

$$\Delta_1 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \quad \Delta_2 = \frac{\partial^2}{\partial x \partial y}$$

(11)式和(12)式从本质上反映了在动态条件下平面应力问题的弹性应力波与动光弹等差条纹级之间的内在联系, 证明了可以通过分析动态等差条纹来说明模型内应力波的传播和能量的变化。这样, 对界面上应力波的作用机理问题, 在进行理论计算有困难时, 用动态光弹性法分析研究, 不失为一种简便而有效的实验研究方法。

3 试验结果分析

试验记录到的模型的部分瞬态等差条纹分布图如图 2 所示。图中给出了一组在枪击作用下不同时刻的典型等差条纹图照片, 照片下的时间是以弹体对模型作用瞬时作为零时刻 ($t=0$)。由于在聚碳酸酯中膨胀波 (P 波) 的波速约为剪切波 (S 波) 波速的二倍^[3], 因此首先记录到的是膨胀波。照片中最外边的一组近似同心圆的条纹即为膨胀波的等差条纹, 这些条纹表示了应力波传播的过程。由图 2 可见, 弹丸作用后, 枪击产生的应力波在没有遇到其它边界前, 在模型中是以球面波的形式向外传播的。

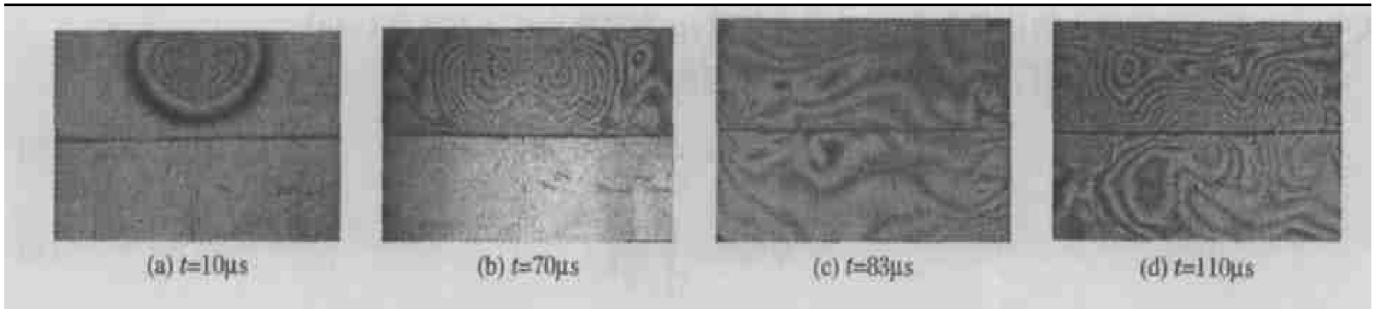


图 2 枪击作用下典型条纹图

Fig. 2 Typical fringes under gunlighting

下面分析一下应力波到达上下模板界面后的情况。根据弹性平面波在两个介质界面上的传播规律, 随着应力波继续向外传播, 膨胀 P 波遇到界面时将发生反射与折射, 产生反射纵波 (PP 波) 和反射横波 (PS 波)。但由拍摄到的动态等差条纹图可知, 虽然 P 波在 $15\mu\text{s}$ 前就已到达界面, 但仅仅产生反射, 而未同时发生折射, 即应力波没有透过界面向下一块模板传播, 而是随着冲击载的递增, 上模板内的条纹不断增密, 根据 (10) 式, 可知上模板内存在着应变能的累积过程, 模板内的比应变能在逐渐提高 (见图 2(a)、(b))。

当应变能积聚到一定程度, 在约 $80\mu\text{s}$ 时, 上模板突然高速冲击下模板而发生应力波的折射, 在瞬间将应变能传递到下模板内, 此时上、下模板内反射纵波 (PP 波)、横波 (PS 波) 和折射纵波 (SP 波)、横波 (SS 波) 都存在, 见 (图 2(c))。由于各种应力波相互作用和零级条纹难以确定, 使得照片上条纹级数不易判别。但是, 分析图 2(c)、(d), 可以看到以下几个特点:

(1) 加载点附近条纹呈水平状。这说明由于惯性力的作用, 此时上模板已与加载头脱开而无冲击载作用。

(2) 上、下模板界面上的条纹是连续的。这说明了此时上、下模板是紧密接触的。在上模板变形时, 上模板依靠惯性力推动下模板一起成整体同时向下弯曲。

(3) 上、下模板的条纹均为稀疏条纹。由式 (11) 知, 这是由于原来储存在上模板中的部分能量分配到了下模板中, 从而使整体的应力值减小; 同时也说明了此时应力梯度较小, 应力分布比较均匀。随着模板进一步变形, 上下模板的运动速度降低, 当下模板弹性变形产生的回弹力超过作用其上的惯性力

时,下模板产生回弹而与上模板发生撞击,使两模板内的应力重新分配,在界面附近因应力梯度增大而出现密集条纹(见图2(d))。随着变形的继续和能量的损耗,应力波幅值将不断衰减,直至变形停止,应力波完全消失。

4 结 论

由以上分析,可以得出以下结论:

(1)动态光弹性试验是研究界面对应力波作用的简便而有效的方法。它可以清晰地看到应力波在界面上的传播及相互作用过程,便于分析研究。

(2)根据弹性波动理论和应力-光学定律导出的波动方程与等差条纹级数之间的关系式(11)、(12),从本质上说明了应力波与等差条纹之间的内在联系,是本文中分析动光弹实验结果的理论基础。

(3)应力波在到达界面时将立即发生反射,但不会立即发生折射,而是进行能量的累积。在累积到达一定程度时,才突然发生界面上的能量传递过程,并且此后界面两侧的比应变能远低于应力波发生折射前的比应变能。这样,用实验证实了界面具有对冲击应变能的累积和阻滞作用。这一作用对于防护工程是非常有利的。例如,地下工程与地表间的横向界面可以大大减弱冲击应力波对地下工程的打击作用;在设计地下工程时,可以人为地设置一些界面,以提高地下工程的抗冲击能力。

(4)本文中仅对相同介质的界面作了实验研究。对不同介质之间的界面对应力波的作用,以及接合程度不同的界面对应力波的作用等令人感兴趣的问题,有待于进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 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: 123.
- [2] 赵清澄. 光测力学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996: 281.
- [3] 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: 1—24.
- [4] 梁昆淼. 数学物理方法[M]. 北京: 人民教育出版社, 1979: 253—282.
- [5] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1980: 214—220.

Experimental study on interaction of stress wave and interface using dynamic photoelasticity

LU Yu-sheng^{*}, ZHANG Hong-mei, LIAN Zhi-ying

(*Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology,
Nanjing 210007, Jiangsu, China*)

Abstract: Complicated changes of stress and strain state are produced on the interface, when subjected to impact load. The transmission of stress wave on the interface is simulated using dynamic photoelastic method. The effect mechanism about stress wave is analyzed by stress wave theory. The interface block effect about energy accumulation and transfusion is confirmed. The relation of stress wave and fringe series is derived using elastic wave motion and stress-optical law.

Key words: mechanics of explosion; energy cumulation; dynamic photoelasticity; stress wave

* Corresponding author: LU Yu-sheng

E-mail address: luy882003@yahoo.com.cn

Telephone: 025-80821679