

# 拱形试件动态断裂的动光弹分析

沈家瑶 冯英先 刘新华 宋 刚 吴树森

(华东工学院)

**提要** 本文采用动光弹方法,分析了带边裂纹的拱形三点弯曲试件在枪击加载条件下的瞬态反应。从多火花动光弹仪记录下来的16幅断裂过程的照片和微机输出的电火花光信号图上,得到了各时刻的等差线图形和裂纹长度。使用运动裂纹尖端附近的应力场解,去计算动应力强度因子。对环氧树脂材料,测定了动态应力强度因子与裂纹扩展速度之间的关系,并给出了当裂纹扩展速度达到410m/s时,为裂纹产生分叉的条件。

**关键词:** 断裂, 动态光弹性。

随着世界科学技术的高速发展,在宇航、交通、能源和军事工程上的断裂动力学也出现了越来越迅速的进展。

早在五十年代 Wells 和 Post<sup>[1]</sup> 就用动光弹方法研究了动态裂纹扩展规律,七十年代以来, Kobayashi<sup>[2][3]</sup>, Dally<sup>[4]</sup> 等人在用动光弹研究断裂动力学方面做了大量工作。他们用直三点弯曲试件和单边缺口等试件,分别在落锤加载和用楔形块加载情况下,研究了张开型动应力强度因子  $K$  与裂纹扩展速度  $\dot{a}$  等关系。

对于火炮身管,地下管道等这些中厚壁管的断裂动力学问题,采用拱形试件则更符合其实际结构形式。因此,本文用动光弹法,对带边裂纹拱形三点弯曲试件(图1),在枪击短时冲击加载条件下,对环氧树脂材料,测定了动态应力强度因子与裂纹扩展速度之间的关系,并给出了当裂纹扩展速度达到410m/s时,为裂纹产生分叉的条件。

## 1 实验技术和方法

### 1.1 试件及加载方式

试验采用拱形三点弯曲试件,其几何尺寸如图1所示。试件由环氧树脂板机加工制成,初裂纹在电火花线切割机上由0.12mm 铜丝加工而成的钝裂纹。

由小口径运动步枪子弹,打击加载接头而实现对试件短时冲击加载(图2)。

试件厚度、子弹重量和子弹初速列于表1,子弹初速由天幕靶测速装置测得。

1986年11月15日收到。

表 1

	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
试件厚度(mm)	6.5	6.5	7.6	7.6
子弹重量(g)	(2.7 部分装药)	2.7 (全装药)	3.5 (部分装药)	3.5 (全装药)
子弹初速 (m/s)	90	177	200	310

1.2 实验记录系统

本试验由国产 WZDD—I 型多火花动光弹仪拍摄瞬态动等差条纹图，裂纹尖端处贴有断裂丝作为起裂信号，起裂信号经放大电路向动光弹仪输入一个脉冲信号。

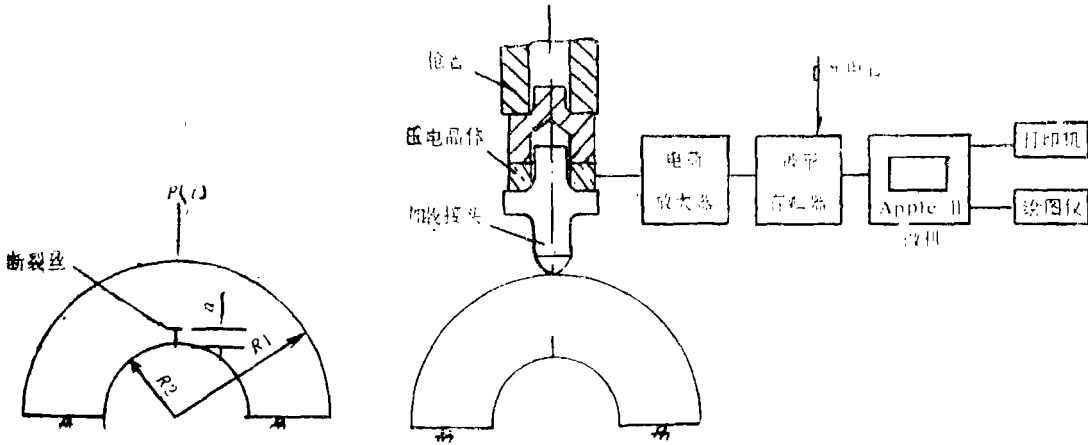


图 1 试件的尺寸

图 2 加载方式和记录系统

多火花动光弹仪的电火花信号，由图 2 测试系统测得。利用光电转换器转为电信号，输入 BC—V 瞬态波形存贮器，经高速 A/D 转换器、接口器，将输入信号转换为二进制码，送入 Apple—II 微处理机，瞬态波形由绘图仪绘出，准确记下十六个电火花的间隔时间，整个过程由 Basic 语言程序控制。测得的火花光信号如图 3 所示。

枪击冲击力的测定装置如图 2 所示。在枪管与试件间安装上 L15 型压电晶体传感器，

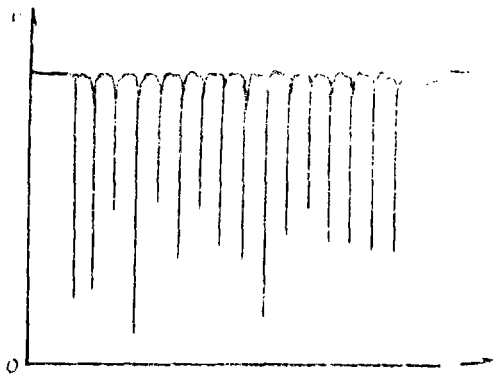


图 3 火花光信号

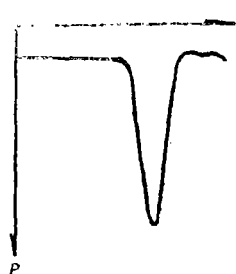


图 4 载荷—时间曲线

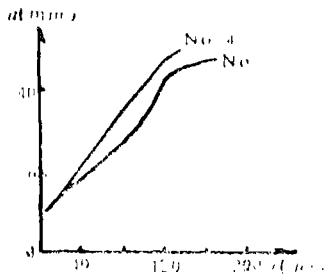


图 6 裂纹长度与时间关系曲线

子弹撞击时的压电信号输入微处理机,实现了数据采集和处理自动化,测得载荷—时间曲线,如图4所示。通过标定其加载速率为  $19.6 \times 10^6 \text{ N/s}$ , 载荷峰值为  $1.02 \text{ kN}$ , 载荷经历时间为  $50 \mu\text{s}$ 。载荷强度通过使用长弹、短弹及火药量来控制。

## 2 $K-\dot{a}$ 关系

图5是多火花动光弹仪所记录的 No.2 试件的十六幅等差线照片。根据图3记录的十六个曝光时刻,就可以从照片得到裂纹长度  $a$  与时间  $t$  的关系曲线,如图6所示。根据图6的曲线即可确定每个时刻的裂纹扩展速度  $\dot{a}$ 。

从图5每幅照片裂纹尖端的等差条纹环,可以计算相应时刻的动应力强度因子  $K$ 。计算方法简述如下。

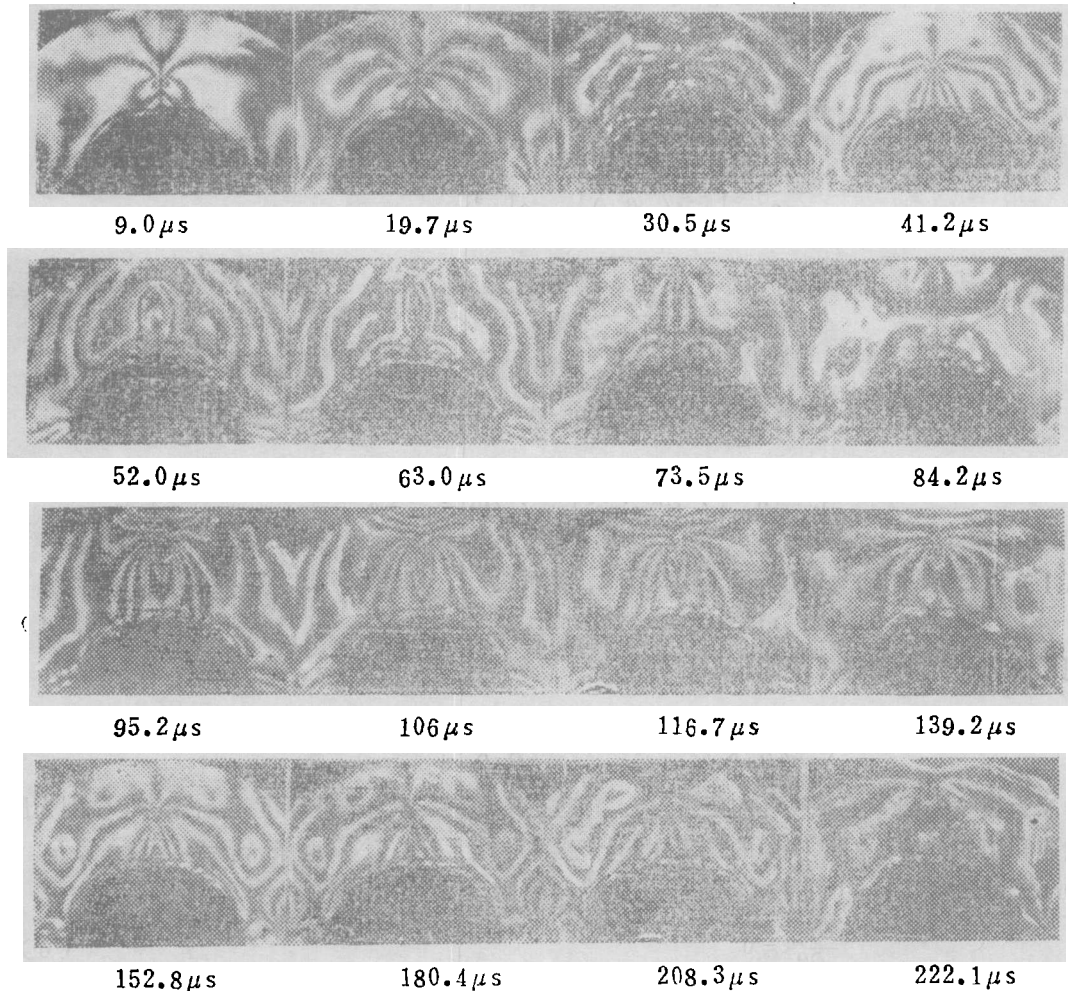


图5 No. 2 试件等差线照片

根据 Rice<sup>[6]</sup> 给出的常速裂纹扩展时, 裂纹尖端附近的奇异应力场的理论解为

$$\sigma_s = B_1 \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \left[ B_2 + (s_1^2 - s_2^2) f(\theta) \cos \frac{\theta_1}{2} \right] + \sigma_{ox} \quad (1)$$

$$\sigma_r = B_1 \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \left[ -B_2 + (s_1^2 - s_2^2) f(\theta) \cos \frac{\theta_1}{2} \right] \quad (2)$$

$$\tau_{rz} = B_1 \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} B_3 \quad (3)$$

其中

$$s_1^2 = 1 - \left( \frac{\dot{a}}{c_1} \right)^2$$

$$s_2^2 = 1 - \left( \frac{\dot{a}}{c_2} \right)^2$$

$$\operatorname{tg} \theta_1 = s_1 \operatorname{tg} \theta$$

$$\operatorname{tg} \theta_2 = s_2 \operatorname{tg} \theta$$

$$f_1(\theta) = \left[ 1 - \left( \frac{\dot{a}}{c_1} \right)^2 \sin^2 \theta \right]^{-\frac{1}{4}}$$

$$f_2(\theta) = \left[ 1 - \left( \frac{\dot{a}}{c_2} \right)^2 \sin^2 \theta \right]^{-\frac{1}{4}}$$

$$B_1 = \frac{1 + s_2^2}{4s_1 s_2 - (1 + s_2^2)^2}$$

$$B_2 = (1 + s_1^2) f_1(\theta) \cos \frac{\theta_1}{2} - \frac{4s_1 s_2}{1 + s_1^2} f_2(\theta) \cos \frac{\theta_2}{2}$$

$$B_3 = 2s_1 \left[ f_1(\theta) \sin \frac{\theta_1}{2} - f_2(\theta) \sin \frac{\theta_2}{2} \right]$$

把 (1) (2) (3) 式代入最大剪应力  $\tau_m$  关系式

$$(2\tau_m)^2 = (\sigma_x - \sigma_r)^2 + (2\tau_{rz})^2 \quad (4)$$

并利用应力—光学定律，经简化后可得到

$$\left( \frac{Nf_o \sqrt{2\pi r}}{2\dot{h}B_1 K} \right)^2 - \left( B_2 + \frac{\sigma_{ox} \sqrt{2\pi r}}{2B_1 K} \right)^2 - B_3^2 = 0 \quad (5)$$

式中  $N$  为裂纹尖端等差条纹环的级数， $f_o$  为动态条纹值， $\dot{h}$  为试件厚度， $c_1$  和  $c_2$  分别为膨胀波速和剪切波速。对本实验的环氧树脂板测得的  $f_o = 166.7 \text{ N/cm 条}$ ， $c_1 = 2250 \text{ m/s}$ ， $c_2 = 1230 \text{ m/s}$ 。再利用 Irwin 法<sup>[6]</sup>，当  $r = r_m$ ， $\theta = \theta_m$  时

$$\frac{\partial \tau_m}{\partial \theta} = 0 \quad (6)$$

则由式 (5) 和 (6) 可得

$$K = \left( \frac{Nf_o}{\dot{h}} \right) \sqrt{2\pi r} H(\theta_m, \dot{a}) \quad (7)$$

$r_m$  是等差线条纹环的最大径向距离， $\theta_m$  是与  $r_m$  相应的倾角，函数  $H(\theta_m, \dot{a})$  可由下式计算

$$H(\theta_m, \dot{a}) = \frac{\left[1 + \left(\frac{\partial B_1}{\partial \theta} / \frac{\partial B_2}{\partial \theta}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}}}{2B_1 B_2} \quad (8)$$

文献[4]对于不同的  $\dot{a}/c_2$  与  $\theta_m$  给出了一些数字结果。根据(7)式即可由等差线图算出与  $\dot{a}$  相应的动应力强度因子  $K$ 。本文得到的环氧树脂材料的  $K-\dot{a}$  关系如图7所示

### 3. 分析和讨论

本文实验是用枪击加载，各种载荷强度是通过选用长弹、短弹及火药量来实现的。用这样的方法测定了  $\dot{a}$  从小到大的全部可能情况。

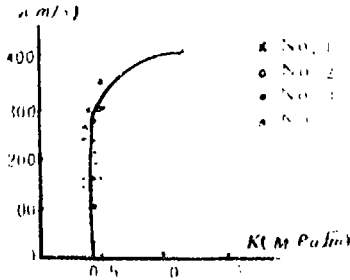


图 7.  $K-\dot{a}$  曲线

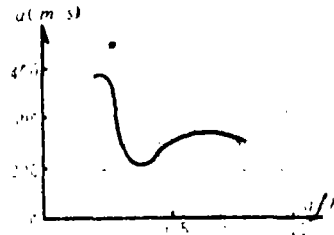


图 8.  $\dot{a}-\frac{a}{b}$  曲线

由图4看出，整个枪击加载所经历的时间约为  $50\mu s$  左右，因此裂纹扩展直至试件断裂的整个过程是应力波反射、叠加作用的过程，也是能量消耗减少的过程。在短时间内冲击能量输入试件后，经历了  $\dot{a}$  短期加速，然后很快减速，随着裂纹向深度方向扩展， $\dot{a}$  有所起伏，这是因为应力波反射、叠加在裂纹尖端处所引起该处应力场的变化，产生对  $\dot{a}$  的影响，如图8所示。当输入较高冲击能量时，裂纹扩展开始后， $\dot{a}$  加速直至裂纹弯曲，图9是 No. 4 试件的其中二张照片，明显可看出裂纹高速扩展及裂纹弯曲。若在裂纹尖端积聚更高



(a) 裂纹高速扩展



(b) 裂纹弯曲

图 9. 裂纹高速扩展和弯曲

的冲击能量时,则裂纹发生分叉(见图10照片)。

在试件断开的裂纹面上还可明显看出,裂纹以低速扩展时,断裂面是光滑的,裂纹以高速扩展时,断裂面是极其粗糙的,如图11照片所示。本实验测得,粗糙面 $\dot{a}$ 的范围为 $347\text{m/s} < \dot{a} < 410\text{m/s}$ 。

图7是环氧树脂材料制成的拱形试件的 $K-\dot{a}$ 关系曲线。由图可知,存在一个 $K$ 的最小值,低于此 $K$ 值,裂纹不可能扩展,最小值为 $K_{1,m} = 0.41\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ,它代表了环氧树脂的止裂韧度, $\dot{a} < 250\text{m/s}$ 低速情况, $K-a$ 曲线几乎是条垂直线。当达到 $\dot{a} = 410\text{m/s}$ 这一极限速度时,裂纹发生分叉,相应分叉 $K_{1,c} = 1.2\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。图中实验数据较为分散,特别在动态情况下,运动裂纹尖端位置的确定,对 $K$ 和 $\dot{a}$ 的计算有很大影响。

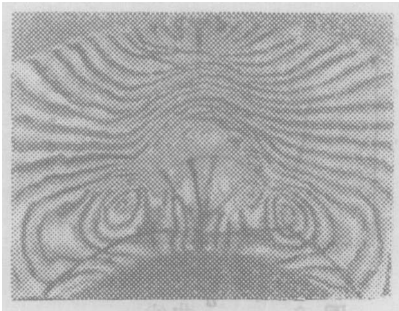


图 10. 裂纹分叉

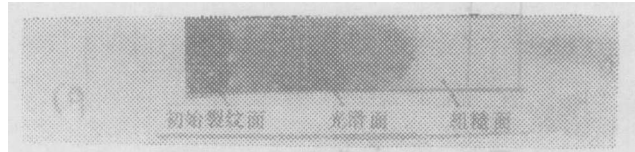


图 11. 试件断裂面

#### 4. 结论

1. 尽管加载方式和试件几何形状不同,对于脆性的环氧树脂材料,本文实验所得的 $K-\dot{a}$ 关系与Homalite-100<sup>[1]</sup>等材料的 $K-\dot{a}$ 关系是相似的。因此, $K-\dot{a}$ 曲线代表了材料的动态特性。

2. 本文所得的最大的 $\frac{\dot{a}}{c_2} = \frac{410}{1230} = 0.33$ ,这说明由于分支的出现,能量分散,使得裂纹速度受到限止。

3. 有关裂纹弯曲的控制条件还需进一步研究。本文所得的裂纹弯曲时的应力强度因子 $K = 1.2\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ,  $\dot{a} = 410\text{m/s}$ 。

#### 参 考 文 献

- [1] Wells, A. A. and Post, D., *Proc. of SESA*, 16, 1(1958), 69—92.
- [2] Kobayashi, A. S. and Chen C. F., *Exp. Mech.* 16, (1976), 5 176—181.
- [3] Kobayashi, A. S. and Mall, S., *Exp. Mech.* 18(1978), 11—18.
- [4] Dally, J. W., *Expe. Mech.* 19(1979)10 349—361.
- [5] Rice, J. R., *Fracture*, Vol. II, edited by H. Libowitz, Academic Press, New York, (1968), 191.
- [6] Irwin, G. R., *Proc. of SESA*, 16(1958), No. 1, 93—96,

# Photoelastic Analysis of Dynamic Fracture in Arch Specimen

Shen Jiayao    Feng Yingxian    Liu Xinhua  
Song Gang    Wu Shusen

*(East China Institute of Technology)*

## Abstract

In this paper, the transient response of three-points bending arch specimens with crack under impact is analyzed by means of dynamic photoelasticity. From 16 photographs of fracture process recorded by multiplespark camera, the isochromatic pattern and crack length of each moment are obtained. The stress field near a crack tip obtained therefrom is used to calculate dynamic stress intensity factor and the relation between this factor and crack propagating velocity of epoxy resin can then be determined.

**Key words:** photoelasticity, dynamic fracture.