

冲击载荷下扩展裂纹尖端动态 能量释放率分布的焦散线分析*

姚学锋 方 竞

(北京大学力学系 北京 100871)

摘要 借助高速摄影捕捉裂纹瞬态扩展过程,利用动态焦散线研究了含有裂纹的三点弯曲梁在冲击载荷作用下扩展裂纹尖端的动态能量释放率分布规律;综合分析了裂纹扩展时间、长度、速度,以及扩展裂纹尖端动态应力强度因子与它的变化关系,表明了动态能量释放率在裂纹扩展过程中的驱动作用。

关键词 动态焦散线 动态能量释放率 扩展裂纹

中图法分类号 O346.1

1 引言

动态能量释放率与动态应力强度因子一样,是控制扩展裂纹尖端的应力场、应变场的参量,它是裂纹扩展过程中系统的弹性能量释放,反映了动态裂纹扩展的驱动力。Freund^[1]、Craggs^[2]等利用 Irwin 关系研究了扩展裂纹尖端瞬态能量释放率与动态应力强度因子的变化规律;Cotterell^[3]利用动态能量释放率描述了 PMMA 的断裂过程;Bergkvist^[4]考虑了动态能量释放率与扩展速度之间的关系;Erdogan and Sih^[5]则提出了动态能量释放率准则,在动态断裂力学中得到广泛应用。由于实验条件和所研究问题的复杂性,冲击载荷下扩展裂纹尖端能量释放率的实验研究则相对薄弱,有关定量分析的研究工作的文献更为稀少。

焦散线法为动态断裂力学研究提供了一种有效的实验方法。它不仅具有较高的测量精度,设备简单,更重要的是只要测量一个几何长度——焦散斑直径,就可以确定裂纹尖端的应力强度信息,因此常被用来确定扩展裂纹尖端动态应力强度因子随载荷的变化规律。Kalthoff^[6]、Theocaris^[7]等在这方面进行了大量的试验研究,得到了满意的效果;刘承、苏先基等^[8]研究了裂纹扩展速度对焦散斑图的影响;方竞^[9]等将动焦散与动光弹结合在一起,研究了应力波作用下裂纹尖端应力强度因子的动态响应。

我们以冲击载荷作用下含有裂纹的三点弯曲梁为研究对象,充分发挥高速摄影的优势,利用动态焦散线法对扩展裂纹尖端的动态能量释放率分布进行了系统的实验研究,并确定了动态能量释放率与动态应力强度因子、动态裂纹扩展时间、长度、速度的变化关系,对裂纹扩展机理进行了探讨。

* 国家教委及国家自然科学基金项目。

1994年11月14日收到原稿,1995年3月13日收到修改稿。

2 基本原理

I 型裂纹是工程结构中最常见和最重要的裂纹形式,裂纹扩展沿原来初始裂纹的方向进行。Freund^[1]将 I 型扩展裂纹尖端的动态能量释放率与动态应力强度因子之间的关系表示为

$$G_{\text{Id}} = \frac{1}{E'} A_1(v) K_{\text{Id}}^2 \quad (1)$$

式中:

$$E' = \begin{cases} E & \text{平面应力} \\ E/(1 - \nu^2); & \text{平面应变} \end{cases}$$

E 为材料的弹性模量; ν 为材料的泊松比; K_{Id} 为 I 型裂纹尖端的动态应力强度因子; G_{Id} 为 I 型扩展裂纹尖端的动态能量释放率; $A_1(v)$ 为 I 型裂纹瞬时扩展速度的函数,它依赖于材料性质和裂纹瞬时扩展速度。当 $v=0$ 时, $A_1(v)=1$; 一般情况下, $A_1(v)=v^2 \alpha_d [(1-\nu) \times c_s^2 D]^{-1}$; $D=4\alpha_d \alpha_s - (1+\alpha_s)^2$; $\alpha_d = [1 - (v/c_d)^2]^{1/2}$; $\alpha_s = [1 - (v/c_s)^2]^{1/2}$; c_d 为弹性体中膨胀波波速; c_s 为弹性体中剪切波波速; v 为裂纹扩展的瞬时速度。

另一方面, Theocaris^[7] 利用动态焦散线方法将 I 型扩展裂纹尖端的动态应力强度因子表示为

$$K_{\text{Id}} = \frac{2\sqrt{2\pi}F(v)}{3f^{5/2}z_0cd_{\text{eff}}} D_{\text{max}}^{5/2} \quad (2)$$

式中: D_{max} 为扩展裂纹尖端焦散斑的最大直径; f 为焦散线的数值因子; d_{eff} 为材料的有效厚度; c 为材料的焦散光学常数; z_0 为物体到参考平面的距离; $F(v)$ 为裂纹扩展速度调节因子。当裂纹未起裂时, $v=0$, $F(v)=1$; 当裂纹具有实际意义的扩展速度时, $F(v)$ 恒小于 1, 但在数据处理过程中常取为 1。将式(2)代入式(1), 得到

$$G_{\text{Id}} = \frac{A_1(v)}{E'} \left[\frac{2\sqrt{2\pi}F(v)}{3f^{5/2}z_0cd_{\text{eff}}} D_{\text{max}}^{5/2} \right]^2 \quad (3)$$

对于给定的实验条件, f 、 E' 、 c 、 z_0 、 d_{eff} 都是常数, $A_1(v)$ 、 $F(v)$ 可根据有关表达式确定。这样只要利用动态焦散线方法测量扩展裂纹尖端的焦散斑最大直径 D_{max} , 就可以根据式(3)确定扩展纹尖端的动态能量释放率。

3 试件及其有关参数

冲击载荷(落锤)作用下的有机玻璃试件, 如图 1 所示, 在简单支承情况下, 梁的长度与高度之比为 4.9, 厚度为 3 mm。在梁的下边界中间有一裂纹垂直于边界, 其裂纹的长度为 6 mm, 宽度为 0.6 mm。这样在冲击弯曲应力作用下, 裂纹可视为张开型。实验中有有关试件的力学常数及参数见表 1。

本实验利用自由落锤对试件施加冲击载

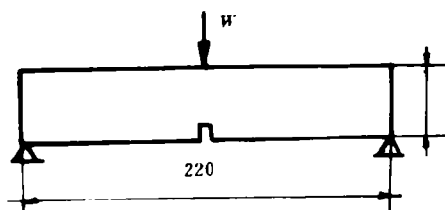


图 1 有机玻璃试件——三点弯曲简支梁

Fig. 1 Specimen of three-point-bend beam with initial crack under impact load

荷,落锤速度为 2.3 m/s。同时借助多火花式高速摄影捕捉扩展裂纹尖端的动态焦散斑图。

表 1 材料的力学常数及实验参数

Table 1 Mechanical constants of Material and experimental parameters

材 料	E/Pa	ν	$c/(\text{mm}^2/\text{N})$	$z_0/(\text{mm})$	f	$c_s/(\text{m/s})$	$c_d/(\text{m/s})$
有机玻璃	2.72×10^9	0.33	-0.88×10^{-4}	400	3.17	924	1840

4 试验结果及其分析

图 2 展示了冲击作用下含裂纹三点弯曲梁中扩展裂纹尖端的动态焦散斑——系列分

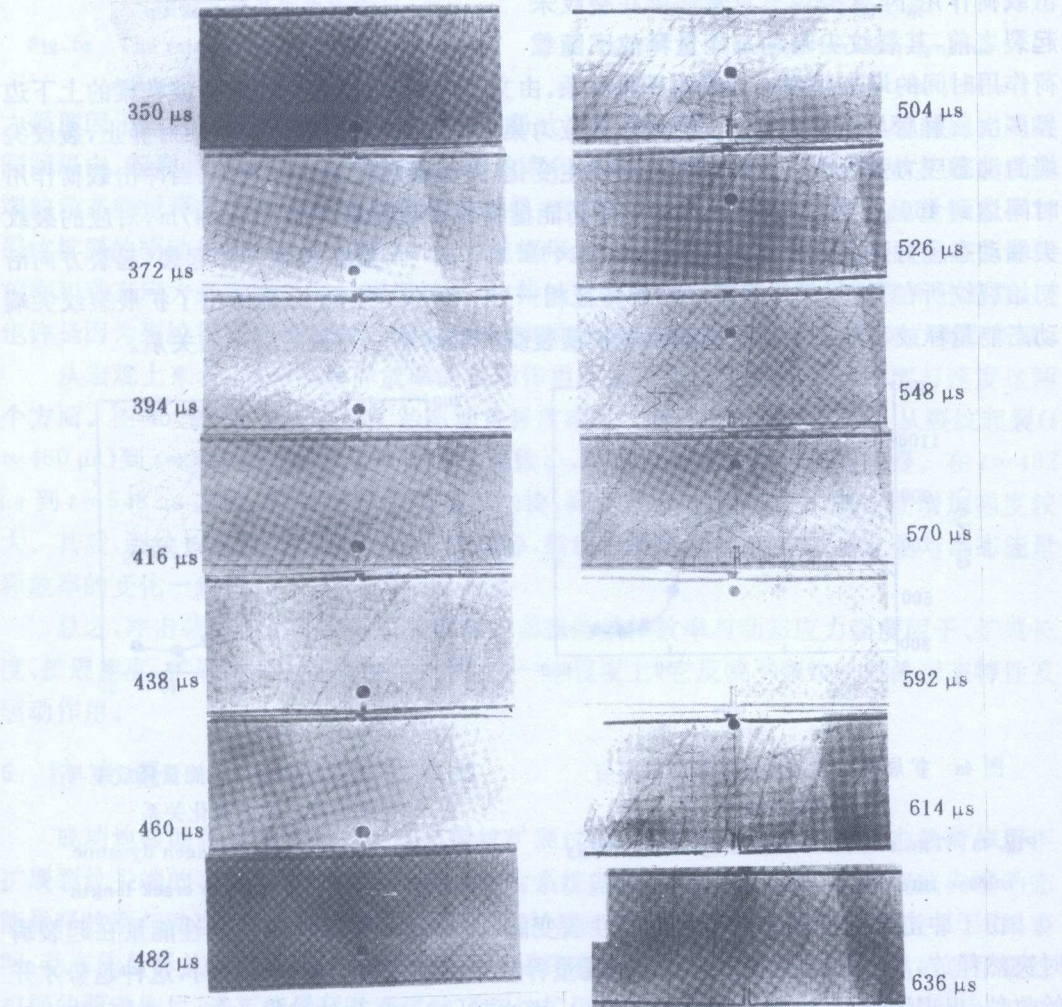


图 2 扩展裂纹尖端的动态焦散斑——系列分布图

Fig. 2 Dynamic caustic patterns of running crack tip

布图。根据动态焦散线的测试原理,可以描绘扩展裂纹尖端焦散斑直径随时间的变化规律(见图 3)。由于裂纹尖端焦散斑图的大小反映了裂尖应力集中程度,扩展裂纹尖端焦散斑直径的变化表明了不同瞬时裂纹尖端的动力响应。

根据式(2)、式(3)可以确定不同瞬时裂纹尖端的动态能量释放率和动态应力强度因子,图 4a、图 4b 分别表明了冲击载荷作用下扩展裂纹尖端动态能量释放率与裂纹扩展时间、裂纹扩展长度之间的变化关系。显然,冲击载荷作用下,含裂纹三点弯曲梁在裂纹未起裂之前,其裂纹尖端动态能量释放率随载

荷作用时间的增加呈现出递增的变化关系。由文献[10]知:这是弯曲应力波在梁的上下边界多次反射后与裂纹尖端相互作用引起应力集中的结果。此时裂纹保持相对静止,裂纹尖端的动态应力强度因子也随时间逐渐发生变化,并且继续呈现递增趋势。当冲击载荷作用时间达到 $460\ \mu\text{s}$ 左右时,裂纹尖端的动态能量释放率达到最大值 $1162\ \text{N/m}$,对应的裂纹尖端动态应力强度因子也达最大值 $1.76 \times 10^6\ \text{N} \cdot \text{m}^{-3/2}$,裂纹尖端开始起裂,起裂方向沿初始裂纹所在平面,与 I 型裂纹扩展特征相一致。图 5a、图 5b 分别给出了扩展裂纹尖端动态能量释放率与裂纹扩展速度以及扩展裂纹尖端动态应力强度因子的关系。

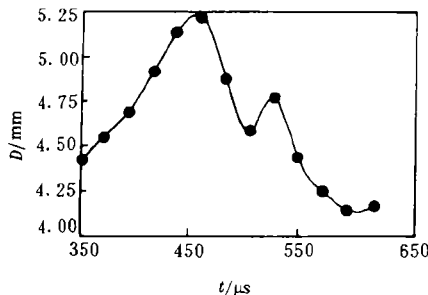


图 3 扩展裂纹尖端焦散斑直径随时间的变化规律

Fig. 3 The maximum diameters of caustics at the running crack tip

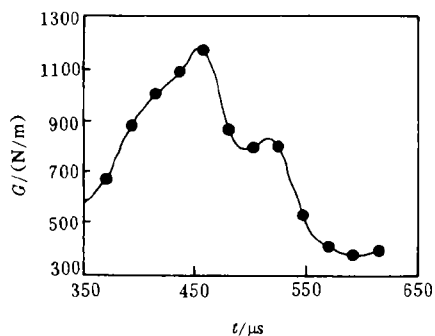


图 4a 扩展裂纹尖端动态能量释放率与时间的变化关系

Fig. 4a The relation between dynamic energy release rate and the time of crack running

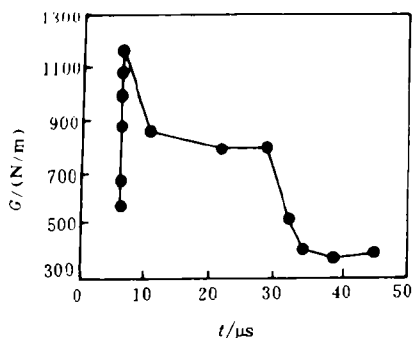


图 4b 扩展裂纹尖端动态能量释放率与裂纹长度之间的变化关系

Fig. 4b The relation between dynamic energy release rate and the crack length

由于冲击载荷所做的功转化为弹性应变能,而储存于裂纹尖端的弹性能量在起裂瞬时突然释放,导致扩展裂纹尖端的动态能量释放率突然下降。 $t=482\ \mu\text{s}$ 时,这种趋势才开始收敛,出现波动变化,并持续大约 $60\ \mu\text{s}$ 。由文献[10]知:裂纹扩展前期,一方面,应力波携带能量衰减不太严重,另一方面,裂纹扩展速度较小,裂纹扩展长度与梁高之比相对较小,因而弯曲应力波在梁中的分布形式变化不大。在这段时间内,扩展裂纹尖端的动态应

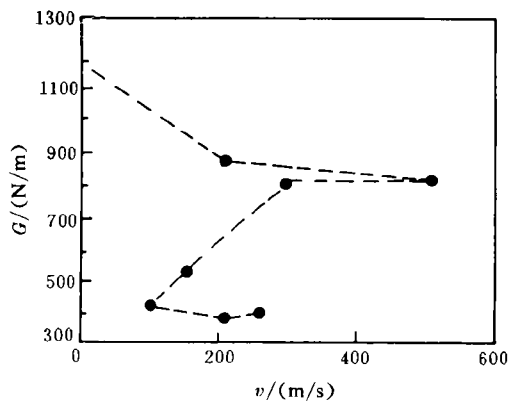


图 5a 扩展裂纹尖端动态能量释放率与
裂纹扩展速度的关系

Fig. 5a The relation between dynamic energy
release rate and crack velocity

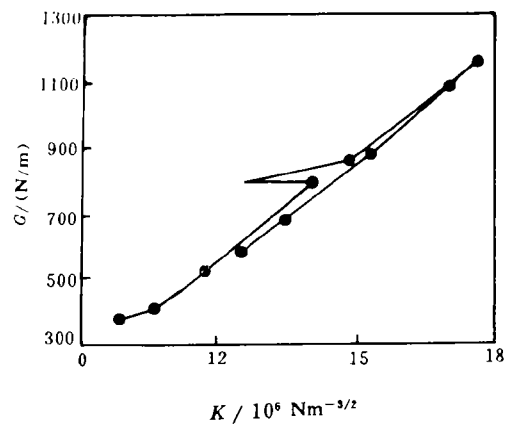


图 5b 扩展裂纹尖端动态能量释放率与
动态应力强度因子的关系

Fig. 5b The relation between dynamic
energy release rate and stress intensity factors

力强度因子随时间的变化规律同动态能量释放率保持一致,只是在裂纹起裂前后相同时间间隔内,起裂后的裂纹尖端动态能量释放率和动态应力强度因子比起裂前扩展裂纹尖端的动态能量释放率和动态应力强度因子低,它们之间的差值体现了动态能量释放率对裂纹扩展的驱动作用。当 $t=526 \mu\text{s}$,应力波携带的能量衰减,扩展裂纹尖端的动态能量释放率和动态应力强度因子又呈现递减关系,持续达 $80 \mu\text{s}$,并在最后稍微出现回升趋势,这也许是因为裂纹扩展到最后时,加载端头对扩展裂纹尖端所产生局部高度应力集中所致。

从宏观上来看,动态能量释放率的驱动作用还体现裂纹尖端的扩展长度与速度这两个方面。图 4b、图 5a 分别表明了动态能量释放率与二者之间的变化关系。从裂纹起裂($t=460 \mu\text{s}$)到 $t=482 \mu\text{s}$ 之间,裂纹扩展速度较小,裂纹扩展长度增长幅度较慢。在 $t=482 \mu\text{s}$ 到 $t=548 \mu\text{s}$ 之间,裂纹扩展速度明显加快,高达 505 m/s ,裂纹扩展长度增加幅度较大。其后,裂纹长度、扩展速度呈现下降趋势,裂纹扩展幅度较小,这些变化是与动态能量释放率的变化一致的。

总之,冲击载荷作用下扩展裂纹尖端的动态能量释放率与动态应力强度因子、扩展长度、扩展速度、扩展时间之间有密切关系,在一定程度上,它反映了裂纹扩展的瞬态特性及驱动作用。

5 结束语

成功地借助高速摄影捕捉了动态裂纹扩展过程,利用动态焦散线对冲击载荷作用下扩展裂纹尖端的动态能量释放率进行了较为系统的试验分析,研究了扩展裂纹尖端动态能量释放率与动态应力强度因子、扩展长度、扩展速度、扩展时间之间的变化关系。结果表明:动态能量释放率与动态应力强度因子一样具有相同的动态断裂力学意义,表明了裂纹扩展的驱动作用;动态能量释放率反映了裂纹扩展的瞬态特性及其裂纹尖端的动力响应,可以用于描述裂纹扩展的动态模式。

参 考 文 献

- 1 Freund L B. Dynamic Fracture Mechanics. Edinburgh: Cambridge University Press, 1990
- 2 Craggs J W. On the Propagation of a Crack in an Elastic Brittle Material. *J Mech & Phys Solid*, 1960, 8(1): 66~75
- 3 Cotterell B. On Brittle Fracture Path. *Int J Fract Mech*. 1965, 1(1): 96~103
- 4 Bergkvist H. The Motion of a Brittle Crack. *J Mech Phys Solids*, 1973, 21(4): 229~239
- 5 Erdogan F, Sih G C. On the Crack Extension in Plates under Plane Loading and Transverse Shear. *J Basic Engng*, 1963, 85(4): 519~525
- 6 Kalthoff J F. On Some Current Problems in Experimental Fracture Dynamic. In: Knauss W G, eds. Workshop on Dynamic Fracture, Pasadena California; California Institute of Technology, 1983, 11~35
- 7 Theocaris P S. Elastic Stress Intensity Factors Evaluated by Caustics. In: G C Sih ed. *Mechanics of Fracture: Experimental Evaluation of Stress Concentration and Intensity Factors*, Hingham, Mass: Martinus Nijhoff Publishers, 1981, 280~330
- 8 刘承, 苏先基. 裂纹扩展速度对焦散线的影响和动态焦散常数的测定. *实验力学*, 1988, 3(1): 109~118
- 9 Fang J, Qi J, Jiang Z D, et al. An Experimental Methods to Investigate the Interaction Between Stress and Crack in Polycarbonate, In: Silva Gones, eds. *Recent Advance in Experimental Mechanics*, Balke-ma, Rotterdam, 1994, 593~598
- 10 Betser A A, Frocht M M. A Photoelastic Study of Maximum Tensile Stresses in Simply Supported Short Beams Under Central Transverse Impact. *J Appl Mech*, 1957, 24(4): 509~514

ANALYSIS OF CAUSTICS ON DYNAMIC ENERGY RELEASE RATE OF RUNNING CRACK TIP UNDER IMPACT LOAD

Yao Xuefeng, Fang Jing

(*Department of Mechanics, Peking University, Beijing, 100871*)

ABSTRACT In this paper, a high-speed framing camera is used to seize the transient process of crack propagation. Under impact load, dynamic energy release rates of the running crack tip of a three-point-bend beam with initial crack are studied by means of dynamic caustics. The synthetical relationship of the crack propagating time and velocity, dynamic stress intensity factors with dynamic energy release rates are analyzed. At the end, the driving effect of dynamic energy release rate is presented.

KEY WORDS dynamic caustics, dynamic energy release rate, running crack