

应力波载荷作用下线弹性断裂过程的动态分析方法研究

沙桂英, 刘殿魁, 刘瑞堂, 姜风春

(哈尔滨工程大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 利用 Hopkinson 单压杆实验装置, 对材料的线弹性动态断裂特性进行了研究, 建立了应力波载荷作用下动态裂纹起裂及扩展过程的动态分析方法, 采用该方法可同时测得材料的动态裂纹起裂时间、断裂韧性和裂纹扩展速度。40Cr 钢三点弯曲试样的实验结果表明: 该钢的动态裂纹扩展过程主要是减速过程, 在 $2.25\text{TPa} \sqrt{\text{m/s}}$ 的加载速率下, 起裂时间为 $28.00\mu\text{s}$, 最大裂纹扩展速度为 478.91m/s , 动态断裂韧性为 $63.12\text{MPa} \sqrt{\text{m}}$ 。

关键词: 应力波载荷; 线弹性断裂; 动态断裂韧性; 裂纹扩展速度; 动态分析

* 中图分类号: O346.2 文献标识码: A

1 引 言

在研究惯性效应和载荷速率时, 动态断裂力学不能忽略, 它有着广泛的工程应用背景。研究材料的动态断裂特性, 有利于在工程结构设计中有效地实施起裂控制和止裂控制。然而, 动态载荷作用下, 材料的变形和断裂机理十分复杂。至今, 关于材料动态断裂的问题, 无论是理论分析工作还是实验研究工作都是很不够的。因此, 这些问题的研究已成为当前固体力学和材料科学研究中的前沿课题。

目前, 对工程上广泛使用的结构材料在高加载速率下的起裂问题已开展了一些研究^[1-3], 但对裂纹动态扩展速度特性的研究还较少^[4-5]。特别是在应力波加载条件下, 表征和测量材料线弹性断裂及扩展速度特性的动态分析理论与实验研究尚未见报道。

我们采用 Hopkinson 单压杆加载装置, 对 40Cr 钢三点弯曲试样进行了动态冲击实验。通过粘贴在冲击杆上的应变片记录的应变波形, 计算出施加在试样上的动载荷及加载点位移随时间的变化关系, 进而得到试样瞬时裂纹长度和冲击响应曲线。建立了线弹性断裂条件下测试材料动态裂纹起裂及扩展过程力学参数的动态分析方法, 应用该方法得到了 40Cr 钢的动态断裂韧性和裂纹扩展速度特性。

2 实验装置及原理

2.1 实验装置

Hopkinson 单压杆实验装置如图 1 所示。采用三点弯曲试样, 将贴有应变片的冲击杆(输入杆)对准试样的中心, 当滑膛枪发射出的圆柱形子弹撞击输入杆时, 在压杆内将产生一应力波, 在该应力波作用下, 试样中的裂纹产生动态扩展。子弹飞行速度由光控继电器和振荡测速仪测试, 施加在试样上的动载荷及加载点位移随时间的变化关系通过粘贴在冲击杆上的应变片记录的应变波形计算。

2.2 实验原理及方法

2.2.1 三点弯曲试样瞬时裂纹长度 $a(t)$ 及裂纹扩展速度 $v(t)$ 的测定

三点弯曲试样的裂纹尺寸、载荷、加载点位移之间的关系可由关键曲线函数表示为^[6]

* 收稿日期: 2000-09-25; 修回日期: 2001-06-10

作者简介: 沙桂英(1963—), 女, 副教授

$$\frac{W \cdot P(t)}{b_0^2} = K \left(\frac{D(t)}{W} \right)^m \quad (1)$$

式中： W 为试样密度； b_0 为试样的原始韧带尺寸， $b_0 = W - a$ ， a 为瞬时裂纹长度； m, K 为实验常数。

试样所受的动态载荷 $P(t)$ 和加载点位移 $D(t)$ 可根据一维应力波理论计算^[7]

$$P(t) = EA[\epsilon_i(t) + \epsilon_r(t)] \quad (2)$$

$$D(t) = c_0 \int_0^t [\epsilon_i(\tau) - \epsilon_r(\tau)] d\tau \quad (3)$$

式中： $\epsilon_i(t)$ ， $\epsilon_r(t)$ 分别是冲击杆上应变片记录到的入射波和反射波； E, A 分别是冲击杆的弹性模量和横截面积； c_0 为弹性波速，取值为 5189.00m/s。

对(1)式取对数得

$$\log \frac{W \cdot P(t)}{b_0^2} = m \log \frac{D(t)}{W} + \log K \quad (4)$$

利用钝缺口深裂纹试样测得应力波载荷作用下的载荷-位移曲线，在屈服载荷 P_y 与最大载荷 P_{max} 之间取若干点按(4)式进行拟合，即可得到动态加载条件下的实验常数 m, K 。

对于预裂纹试样，瞬时裂纹长度 $a(t)$ 可由(1)式导出

$$a(t) = W - \left[\frac{P(t) \cdot W^{m+1}}{K \cdot D(t)^m} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

可以看出，(5)式中动态载荷和加载点位移的确定考虑了压杆与试样界面间的反射应力波，而且实验常数 m, K 也是在相同的应力波加载条件下测得的，即该式中的变量都是动态参数。因此，由该式确定的瞬时裂纹长度 $a(t)$ 是动态力学量。

求得试样瞬时裂纹长度 $a(t)$ 之后，可绘出裂纹长度随时间的变化曲线 $a(t)-t$ ，对其进行数据处理，拟合出裂纹长度随时间的关系式，然后对该式微分便可得到裂纹扩展速度随时间的变化关系 $v(t)-t$ ，即

$$v(t) = \dot{a}(t) \quad (6)$$

需要指出的是，上述计算过程中用到的加载点位移 $D(t)$ 应是试样的塑性位移 $D_p(t)$ ，而由实验系统记录的应力波计算得到的却是名义位移，其中包含有弹性位移 $D_e(t)$ 。因此，应对名义位移进行修正。但由于在应力波载荷作用下，特别是在线弹性断裂的情况下，裂纹起裂时试样的位移较小，可以不考虑弹性位移 $D_e(t)$ 的影响^[8]，本文中直接采用名义位移计算。

2.2.2 冲击响应曲线 $K_I(t)-t$ 的确定

利用三点弯曲试样的动态应力强度因子 $K_I(t)$ 与加载点位移 $D(t)$ 之间的关系^[9]，可以得到冲击响应曲线关系式

$$K_I(t) = \frac{3S \sqrt{a(t)}}{2BW^2} \cdot Y \left[\frac{a(t)}{W} \right] \cdot K(t) \cdot D(t) \quad (7)$$

式中： B 为试样厚度； W 为试样宽度； S 为试样支点间距； $Y(a(t)/W)$ 为试样的几何因子； $K(t)$ 为试样刚度。对于三点弯曲试样，当 $S/W=4$ 时， $Y(a(t)/W)$ 可表示为^[10]

$$Y(a(t)/W) = \frac{1.99 - (a(t)/W)(1 - a(t)/W)[2.15 - 3.93a(t)/W] + 2.7(a(t)/W)^2}{(1 + 2a(t)/W)(1 - a(t)/W)^{3/2}} \quad (8)$$

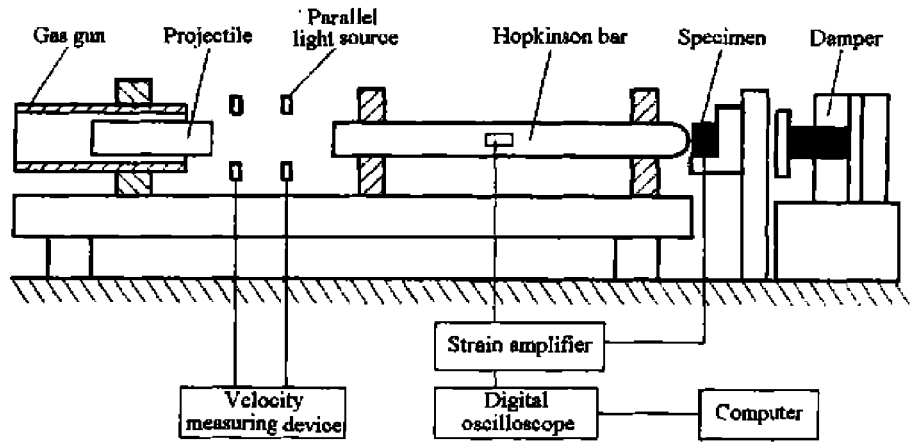


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Experimental apparatus of Hopkinson single pressure bar

考虑试样的转动惯性和剪切变形的影响,试样的刚度可表示为^[11]

$$K(t) = \frac{4EB}{(S/W)^3} \left[1 + \frac{6}{(S/W)} V \left[\frac{a(t)}{W} \right] + \frac{12+11\nu}{5(S/W)^2} \right] \quad (9)$$

式中: E 为材料的弹性模量,可取 $E=210\text{GPa}$; ν 为泊松比,可取 $\nu=0.3$; $V(a(t)/W)$ 为形状因子,可由下式计算

$$V \left[\frac{a(t)}{W} \right] = \left[\frac{a(t)/W}{1-a(t)/W} \right]^2 \left[5.58 - 19.57 \left[\frac{a(t)}{W} \right] + 36.82 \left[\frac{a(t)}{W} \right]^2 - 34.94 \left[\frac{a(t)}{W} \right]^3 + 12.77 \left[\frac{a(t)}{W} \right]^4 \right] \quad (10)$$

需要说明的是:在(7)式冲击响应曲线 $K_1(t)-t$ 的计算中,由于材料的瞬态裂纹长度 $a(t)$ 、瞬态加载点位移 $D(t)$ 及瞬态刚度 $K(t)$ 等都是瞬态力学参量,因此是一种动态的分析方法,由此得到的动态断裂参数能更好地反映材料的真实特性,而且可同时分析材料的起裂和扩展全过程。

2.2.3 动态断裂韧性 K_{Id} 的测定

先由(7)式确定冲击响应曲线 $K_1(t)-t$,然后测得动态裂纹的起裂时间 t_f ,就可以确定对应的动态断裂韧性 K_{Id} 。本文中分别采用应变片法和动态分析法测定起裂时间 t_f 。应变片法是在试样侧面垂直于裂尖方向并和裂尖相距3mm处粘贴一电阻应变片,以应变片所测得的应变最大值对应的时间减去应力波从裂尖传播到应变片所需时间作为起裂时间^[12];动态分析法是由测得的瞬态裂纹长度随时间的变化关系 $a(t)-t$ 和原始裂纹长度 a_0 确定起裂时间。

2.2.4 平均加载速率 K_I 的确定

根据得到的动态断裂韧性 K_{Id} 和起裂时间 t_f ,可由下式计算平均加载速率

$$K_I = K_{Id}/t_f \quad (11)$$

3 实验材料与试样

实验材料为40Cr结构钢,取自 $\Phi 39\text{mm}$ 的棒材,经锻造、机械加工、热处理、线切割等工艺加工完成。热处理工艺为 $850\text{ }^\circ\text{C}$ 油淬, $200\text{ }^\circ\text{C}$ 回火。材料性能参数为: $\sigma_s=1240.00\text{MPa}$, $\sigma_b=1488.00\text{MPa}$ 。三点弯曲试样的几何形状及尺寸见图2。先采用线切割(钼丝直径为 0.13mm)开缺口,然后预制疲劳裂纹至预定长度($a/W \approx 0.5$),疲劳裂纹预制和原始裂纹长度的测量均按照GB/T 2358-94进行。所用的设备和仪器分别是红山高频疲劳试验机和FDIC Jx6型工具显微镜。

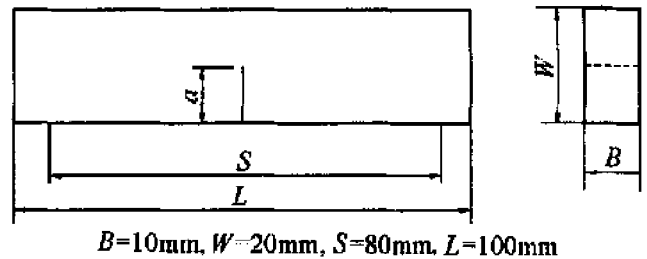


图2 试样形状及尺寸
Fig.2 Geometry of the specimen

4 实验结果与分析

4.1 40Cr 钢动态裂纹扩展速度的测试结果

采用钝缺口和预裂纹($a/W \approx 0.5$)三点弯曲试样分别进行动态冲击实验,通过对所测得的载荷和加载点位移数据的计算处理,得到了40Cr钢瞬时裂纹长度 $a(t)$ 和裂纹扩展速度 $v(t)$ 随时间的变化曲线,如图3、4所示。

由图3可知,当裂纹为原始长度($a_0=9.98\text{mm}$)时,对应的时间 $t=28.00\mu\text{s}$,此即采用本文中的动态分析法确定的起裂时间 t_f' ;而应变片法实测的起裂时间 $t_f=26.00\mu\text{s}$ 。可见二种方法的结果是比较吻合的,二者相差7.69%,这说明采用动态分析法确定起裂时间是可行的,而且省去了粘贴应变片的环节,简化了实验过程,且可用于低温环境下的断裂实验。此外,由图3还可以看出:当 $t \approx 65\mu\text{s}$ 时,试样趋于完全断开, $a \approx 20\text{mm}$ 。

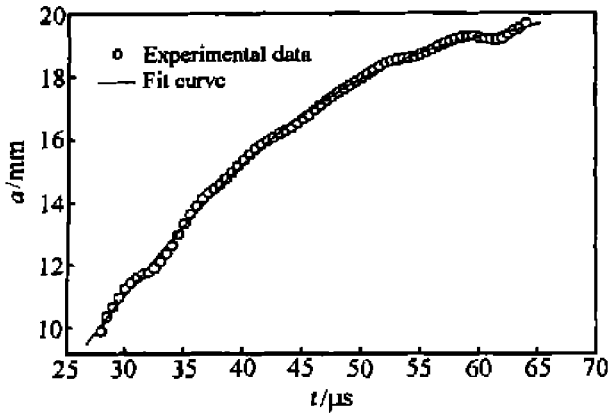


图 3 40Cr 钢 $a(t)-t$ 曲线

Fig.3 The relation curve of $a(t)-t$ for 40Cr steel

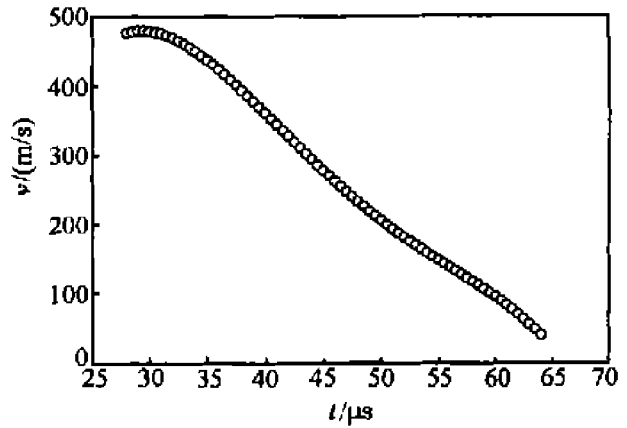


图 4 40Cr 钢 $v(t)-t$ 曲线

Fig.4 The relation curve of $v(t)-t$ for 40Cr steel

由图 4 可见,在应力波载荷作用下,40Cr 钢的动态裂纹扩展过程主要是减速过程,当 $t_f = 28.00\mu\text{s}$ 时,动态裂纹扩展速度为 $v_f = 475.77\text{m/s}$; 当 $t_f = 29.50\mu\text{s}$ 时,动态裂纹扩展速度达最大值 $v_{\text{max}} = 478.91\text{m/s}$ 。

4.2 冲击响应曲线 $K_I(t)-t$ 的测定

利用上面得到的瞬时裂纹长度 $a(t)$ 和瞬态位移 $D(t)$ 数据,由 (7) ~ (10) 式计算得到 40Cr 钢的冲击响应曲线 $K_I(t)-t$ 如图 5 所示。

可见,40Cr 钢三点弯曲试样的动态应力强度因子的基本变化规律是随时间延长而增大的。当 $t = 46.50\mu\text{s}$ 时,达到最大值 ($K_I = 87.69\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$),而在试样完全断开 ($t \approx 65\mu\text{s}$) 之前, $K_I(t)$ 有降低趋势,直至试样完全断开。

4.3 40Cr 钢动态断裂韧性 K_{Id} 的确定

由测得的起裂时间和图 5 所示的 $K_I(t)-t$ 曲线及 (11) 式,可得 40Cr 钢的动态断裂韧性 K_{Id} 和相应的加载速率 K_I : 当 $t_f = 26.00\mu\text{s}$ 时, $K_{Id} = 57.96\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, $K_I = 2.23\text{TPa}\sqrt{\text{m/s}}$; 当 $t_f = 28.00\mu\text{s}$ 时, $K_{Id} = 63.12\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, $K_I = 2.25\text{TPa}\sqrt{\text{m/s}}$ 。可见,二种方法得到的动态断裂参数相差不大 (K_{Id} 仅相差 8.90%)。

4.4 40Cr 钢动态断裂韧性 K_{Id} 的有效性分析

采用 ASTM 准则对动态分析法测定的动态断裂韧性 K_{Id} 的有效性进行分析 (但将其中的参数采用动态条件下的相应值),有

$$B, a \geq 2.5 [K_{Id} / \sigma_{yd}]^2 \tag{12}$$

由于本文中并没有测试 40Cr 钢的动态屈服强度 σ_{yd} , 故采用文献 [13] 提供的数据, $\sigma_{yd} = 1472.00\text{MPa}$, 进而计算得到 $2.5 [K_{Id} / \sigma_{yd}]^2 = 4.60\text{mm}$ 。

可见,本实验采用的试样满足 (12) 式,即满足平面应变、小范围屈服条件。

5 结 论

(1) 对于应力波载荷作用下的线弹性断裂,采用本文建立的动态分析方法是可行的,可同时测得材料的动态的裂纹起裂时间、断裂韧性和裂纹扩展速度。

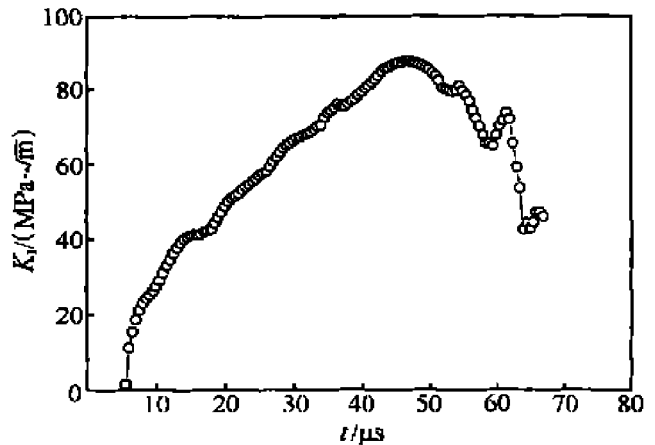


图 5 40Cr 钢冲击响应曲线 $K_I(t)-t$

Fig.5 The curve of $K_I(t)-t$ for 40Cr steel

(2)40Cr 钢的动态裂纹扩展过程主要是减速过程,当 $t_f=29.50\mu\text{s}$ 时,动态裂纹扩展速度最大,为 478.91m/s。

(3)在 2.25TPa $\sqrt{\text{m/s}}$ 的加载速率下,40Cr 钢的动态断裂韧性 $K_{Id}=63.12\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。

参考文献:

- [1] Bui H D, Maigre H, Rittel D. A New Approach to the Experimental Determination of the Dynamic Stress Intensity Factor [J]. Solids Structures, 1992, 29(23): 2881-2895.
- [2] Kobayashi T. Analysis of Impact Properties of A533 Steel for Nuclear Reactor Pressure Vessel by Instrumented Charpy Test [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1984, 19(1): 49-65.
- [3] 姜风春, 刘瑞堂, 刘殿魁. 动态断裂韧性测试方法的比较研究[J]. 实验力学, 1999, 14(2): 267-272.
- [4] Zehnder A T, Rosakis A J. Dynamic Fracture Initiation and Propagation in 4340 Steel under Impact Loading [J]. International Journal of Fracture, 1990, 43(4): 271-285.
- [5] 沙桂英, 刘瑞堂, 姜风春. SHPB 杆加载动态裂纹扩展速度测试方法研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2000, 21(5): 32-38.
- [6] Kobayashi T, Yamamoto I, Niinomi M. Evaluation of Dynamic Fracture Toughness Parameters by Instrumented Charpy Impact Test [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1986, 24(5): 773-782.
- [7] 乔纳斯 A 朱卡斯. 碰撞动力学[M]. 张志云, 丁世用, 魏传忠, 译. 北京: 兵器工业出版社, 1987: 336-339.
- [8] 陈箴, 蔡其巩. 工程断裂力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1977: 272-276.
- [9] Bacon C, Fam J, Lataillade J L. Dynamic Fracture Toughness Determined from Load-point Displacement [J]. Experimental Mechanics, 1994, 34(3): 217-223.
- [10] Srawley J E. Wide Range Stress Intensity Factor Expression for ASTM E399 Standard Toughness Specimen [J]. International Journal of Fracture, 1976, 12(3): 475-486.
- [11] 姜风春. 金属动态断裂的理论及实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2000: 34-44.
- [12] Dalley J W, Sanford R J. Strain Gauge Methods for Measuring the Opening Mode Stress Intensity Factor [J]. Experimental Mechanics, 1998, 27(4): 381-388.
- [13] 张晓欣. 金属材料动态断裂韧性测试技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2000: 36.

Dynamic Analyses Method of Linear-elastic Fracture under Stress Wave Loading

SHA Gui-ying, LIU Dian-kui, LIU Rui-tang, JIANG Feng-chun
(*Haerbin Engineering University, Haerbin 150001, Heilongjiang, China*)

Abstract: Based on the investigation of dynamic linear-elastic fracture, dynamic analyses method of crack initiation and propagation under stress wave loading was suggested. This method is used to measure crack initiation time, dynamic fracture toughness and crack propagation velocity for linear-elastic materials.

Key words: stress wave loading; linear-elastic fracture; dynamic fracture toughness; crack propagation velocity; dynamic analyses method