

# 40Cr 材料动态起裂韧性 $K_{I_d}(\dot{\sigma})$ 的实验测试<sup>\*</sup>

李玉龙 郭伟国 贾德新 刘元镛

(西北工业大学强度所 西安 710072)

罗景润 杜君 陈裕泽

(中国工程物理研究院结构力学研究所 成都 521信箱 610003)

**摘要** 描述了利用 Hopkinson 压杆技术加载三点弯曲试样测试 40Cr 材料动态起裂韧性  $K_{I_d}(\dot{\sigma})$  的试验方法。试样上的动态载荷历程由 Hopkinson 杆直接测得,并分别代入动态有限元程序及近似公式求得动态应力强度因子历史;由贴在试样裂尖附近的应变片确定起裂时间,最终确定起裂时的动态应力强度因子值,即动态起裂韧性  $K_{I_d}(\dot{\sigma})$ 。试验结果表明:利用 Hopkinson 压杆技术加载三点弯曲试样测试材料动态起裂韧性的方法是可行的;起裂时,动态有限元的位移法、应力法及近似公式法求得的动态应力强度因子值比较吻合;在本文的载荷速率下,40Cr 材料动态起裂韧性  $K_{I_d}(\dot{\sigma})$  与准静态起裂韧性  $K_{I_c}(\dot{\sigma})$  相比,降低了约 28%。

**关键词** 动态起裂韧性 Hopkinson 压杆 动态应力强度因子

**中图分类号** O347.3

## 1 引言

众所周知,材料在冲击载荷作用下的行为不同于在准静态载荷作用下的行为。一般来说,在冲击载荷作用下,材料的屈服极限升高,韧性下降。对于含裂纹或缺陷的结构来说,用准静态断裂韧性作为参数设计的结构在冲击载荷作用下偏于危险,或可能发生破坏。因而,要以动态起裂韧性作为在冲击载荷作用下结构的设计参数。因此,结构材料动态起裂韧性的测试对于承受冲击载荷作用的结构设计具有重要的意义。

材料动态起裂韧性的实验测试属于动态断裂力学的研究范畴,动态起裂韧性的测试目前还存在着许多困难:①动态载荷的施加及测试;②动态应力强度因子的实时测试;③起裂时间的测试。对于光学透明材料,可利用焦散线法或光弹性方法与高速摄影机相配合,测试材料的动态起裂韧性,对于工程上常用的金属材料反射式焦散线法等光学方法与高速摄影机配合也可以确定材料的动态起裂韧性,但由于图象的清晰度受到限制,测试精度较低,费用昂贵。在较低载荷速率范围内,也就是  $10^2 \text{MPa} \sqrt{\text{m}}/\text{s} \leq \dot{K}_{I_d}(\dot{\sigma}) \leq 10^5 \text{MPa} \sqrt{\text{m}}/\text{s}$  时,可利用落锤或摆锤试验机,或动态液压试验进行材料动态起裂韧性的试验测试<sup>[1,2]</sup>,其中利用摆锤冲击示波试验机加载三点弯曲试样或 Charpy 试样测试材料动态起裂韧性  $K_{I_d}(\dot{\sigma})$  的技术应用得最为广泛,它的优点是:试样较小,费用便宜以及加载设备相对简单。但由于对其惯性力及应力波机制的理解尚未取得较大进展,实验数据的说明遇到

\* 本课题由中物院院外基金及航空基金资助。

1994年7月21日收到原稿,1995年5月29日收到修改稿。

了一些困难。另外,这种试验技术其载荷速率只能达到  $K_{Ia}(\dot{\sigma}) = 10^6 \text{MPa} \sqrt{\text{m}}/\text{s}$  量级。鉴于此,许多学者建议利用 Hopkinson 压杆装置测定载荷速率为  $10^6 \text{MPa} \sqrt{\text{m}}/\text{s}$  时的动态起裂韧性,并取得了进展<sup>[3,4]</sup>。应该指出:有些研究者在计算动态应力强度因子时采用了未考虑惯性影响的准静态公式,这为动态起裂韧性的确定带来较大的偏差。在文献[5,6]中作者对此进行过讨论。为了克服这一缺点,Yokoyana 等人<sup>[7]</sup>利用动态有限元方法确定动态应力强度因子,取得了较满意的结果。

我们主要利用 Hopkinson 压杆系统加载预裂的三点弯曲试样测定 40Cr 材料的动态起裂韧性,施加于试样的载荷历程由 Hopkinson 杆直接测得,并代入动态有限元分析程序及近似公式求得动态应力强度因子的变化历史,起裂时间由贴在试样裂纹尖端附近的应变片测得。最终,将动态起裂韧性与准静态起裂韧性进行了比较,研究了加载速率对于材料断裂韧性的影响。

## 2 材料及试样

试样的材料为 40Cr,取自  $\phi 60\text{mm}$  的棒材,锻造成毛坯后再经粗加工、热处理、磨削、线切割等工艺。热处理条件为  $840^\circ\text{C}$  淬油, $200^\circ\text{C}$  回火。洛氏硬度约为 52,线切割裂纹深度为 15mm。测试材料基本性能参数的拉伸试样符合国标《金属拉力试验法》(GB228-76)的要求,与三点弯曲试样取自于同一根棒材,且为同炉热处理。拉伸试验是在 MTS Test Star  $\pm 100\text{kN}$  试验机上完成的,四个试样的平均结果为  $\sigma_{0.2} = 1604\text{MPa}$ , $\sigma_b = 2153\text{MPa}$ 。

三点弯曲试样的几何形状如图 1 所示,试样的厚度为  $B = 20\text{mm}$ ,宽度  $W = 40\text{mm}$ ,长度  $L = 170\text{mm}$ ,在 15mm 长的线切割裂纹的基础上,在高频疲劳试验机上预制 5mm 的疲劳裂纹,使得总裂纹长度  $a$  与试样宽度  $W$  之比  $a/W$  为 0.5。符合国标《金属材料平面应变断裂韧性  $K_{Ic}$  标准试验方法》(GB4161-1984)中规定的尺寸要求。在试验过程中,支座跨距 160mm。

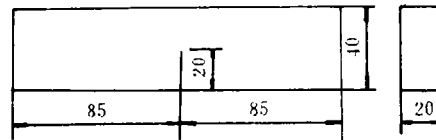


图 1 试样的几何形状和尺寸

Fig. 1 Configuration and dimension of the specimen

## 3 准静态断裂韧性的测试

准静态断裂韧性试验按国标 GB4161-84 的要求分别在 MTS Test Star  $\pm 100\text{kN}$  试验机及 Instron 静力试验机上进行,载荷速率为  $0.5\text{kN/s}$  ( $K_{Ic} = 1.3\text{MPa} \sqrt{\text{m}}/\text{s}$ )。由于载荷-裂纹张开位移曲线为典型的脆性断裂曲线,可令  $P_Q = P_{\max}$ ,代入国标中推荐的断裂韧性计算公式:

$$K_{Ic} = \frac{P_Q S}{B W^{3/2}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (1)$$

式中:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2}\left[1.99 - \left(\frac{a}{W}\right)\left(1 - \frac{a}{W}\right)\left(2.15 - 3.93\left(\frac{a}{W}\right) + 2.7\left(\frac{a}{W}\right)^2\right)\right]}{2\left(1 + \frac{2a}{W}\right)\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}}$$

由于  $K_{I0}$  满足条件:

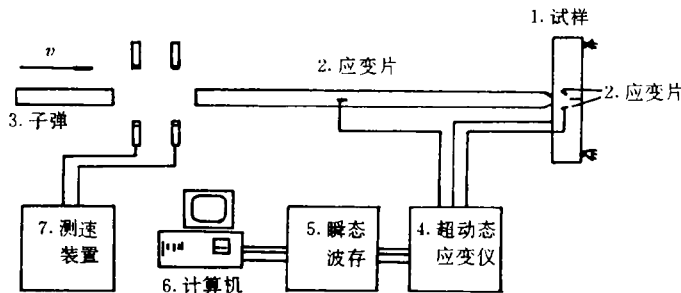
$$B, a \geq 2.5\left(\frac{K_{I0}}{\sigma_{ys}}\right)^2 \quad (2)$$

所以  $K_{Ic} = K_{I0}$ 。五个试样的平均值  $K_{Ic} = 51.8 \pm 1.0 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ 。

## 4 动态起裂韧性的测试

### 4.1 加载及测试原理

三点弯曲试样的冲击加载是自行研制的分段式 Hopkinson 压杆系统上完成的, 它的基本原理如图 2 所示。由压缩空气炮发射长约 250mm, 直径为 23mm 的圆柱形子弹, 同轴撞击与子弹相同直径的输入杆, 在输入杆上产生压缩应力波, 当压缩应力波传播至输入杆与试样的接触面时, 一部分返回输入杆, 另一部分传给试样, 并对试样施加冲击载荷, 使得试样断裂。



1. Specimen; 2. Strain gauges; 3. Projectile; 4. Amplifier;  
5. Digital recorders; 6. Micro-computer; 7. Velocity measurement

图 2 加载及测试装置

Fig. 2 Arrangement of loading and measuring

贴在输入杆上的应变片, 可以测得入射杆上由于应力波作用而产生的入射应变脉冲  $\varepsilon_i$  及反射应变脉冲  $\varepsilon_r$ , 经超动态应变仪放大后输入给波形存贮器, 进行存贮记录, 再输入给计算机进行数据文件存档及处理。所使用的超动态应变仪为中科大生产的 K54 超动态应变仪, 波形存贮器为中科院成都分院科学仪器厂生产的 BC845A 型四通道瞬态波形存贮器, 采样速率为 5 字/微秒, 存贮量每通道 4K 字。

### 4.2 载荷计算

在测得了入射应变波及反射应变波后, 可根据一维应力波理论求得输入杆与试样接触面处的载荷及位移。即:

$$P(t) = EA(\varepsilon_i + \varepsilon_r); \quad (3)$$

$$u(t) = C \int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_r) d\tau \quad (4)$$

其中:  $E$ 、 $A$  分别为输入杆的弹性模量及横截面积,  $C$  为输入杆的一维弹性波速,  $C = 5189 \text{ m/s}$ 。在进行载荷及位移计算时, 应特别注意入射波与反射波沿时间轴平移后时间零点的重合。

### 4.3 起裂时间的测定

起裂时间对于动态起裂韧性的准确确定是至关重要的。在八十年代初, 曾有很多研究者认为, 试样在冲击载荷作用下, 在最大载荷值处起裂, 这种思想后被许多的实验结果及有限元计算结果所否定。其原因是由于惯性效应的影响, 动态应力强度因子的变化不仅要滞后于载荷的变化, 而且可能与载荷的变化趋势也完全不同, 也就是说, 载荷的最大值与动态应力强度因子的最大值并不重合。因此, 起裂时间必须另行确定。目前, 起裂时间的确定方法也很多, 如电磁法、电位法、断裂丝栅法及电阻应变片法等。这些方法各有优缺点。本实验采用电阻应变片法, 其基本原理是在裂纹尖端沿与裂纹延长线成  $\pm 60^\circ$  的径向分别贴两片 (BE 120-1AA) 的电阻应变片, 距裂尖距离为  $5 \text{ mm}$ , 如图 3 所示。当试样承受载荷作用时, 应变片上所测得的应变随载荷的增大而增大, 当裂纹起裂时, 产生卸载波, 使得应变剧烈减小。因此, 应变片上所测应变的最大值对应的时间减去应力波从裂尖传播至应变片所需时间就是起裂时间。此方法已被 Dally<sup>[8]</sup> 等人应用于测定材料的动态起裂韧性及动态裂纹的扩展韧性, 并取得了成功。在本实验中, 为进一步验证此方法, 在试样的反面也按相同方法贴有应变片。

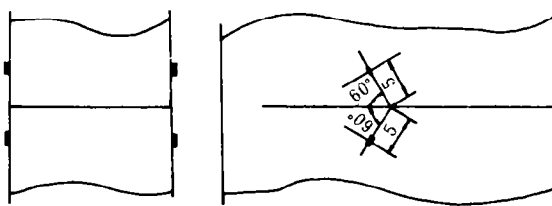


图 3 应变片在试样上的位置

Fig. 3 Location of strain gauges on specimen

### 4.4 动态应力强度因子的计算

众所周知, 动态应力强度因子的实时测量存在着很大的困难, 特别是对于金属材料。鉴于这种情况, 很多研究者建立了一种所谓实验-数值方法, Yokoyama<sup>[7]</sup> 等人也利用这种方法测试了铝合金及钛合金材料的动态起裂韧性。本实验也采用此方法。其基本步骤是利用 Hopkinson 杆系统测出施加于试样的载荷, 以此载荷为输入, 利用动态有限元法求得试样内动态应力强度因子随时间的变化历史, 对应于起裂时间的动态应力强度因子即为材料的动态起裂韧性。

#### 4.4.1 动态有限元法

由于试样的对称性, 对一半试样, 共划分为 28 个八节点等参元, 共计 107 个节点。为了

反映裂尖应力、应变的奇异性,在裂尖取 2 个八节点畸变奇异等参元。如图 4 所示。

依据拉格朗日方程及变分原理,可得动态有限元的基本方程为:

$$[M]\{\ddot{u}\}[K]\{u\} = \{f\} \quad (5)$$

其中:[ $M$ ]为总体质量阵,[ $K$ ]为总体刚度阵, $\{\ddot{u}\}$ 和 $\{u\}$ 分别为节点加速度矢量和节点位移矢量, $\{f\}$ 为节点力矢量,以上方程为二阶常微分方程组,采用 Newmark- $\beta$  方法求解。这样,通过差分法可将方程重新整理为:

$$[\hat{K}]\{u\}_{n+1} = \{\hat{f}\}_{n+1} \quad (6)$$

式中:

$$[\hat{K}] = [K] + C_4[M],$$

$$[\hat{f}]_{n+1} = \{f\}_n + \{f\}_{n+1} + [M](C_4\{u\}_n + C_5\{\dot{u}\}_n + C_6\{\ddot{u}\}_n) - [K]\{u\}_n - [M]\{\ddot{u}\}_n,$$

$$\{\ddot{u}\}_{n+1} = C_4(\{u\}_{n+1} - \{u\}_n) - C_5\{\dot{u}\}_n - C_6\{\ddot{u}\}_n,$$

$$\{\dot{u}\}_{n+1} = C_1(\{u\}_{n+1} - \{u\}_n) - C_2\{\dot{u}\}_n - C_3\{\ddot{u}\}_n,$$

$$C_1 = \frac{\alpha}{\beta\Delta t}, \quad C_2 = \frac{\alpha}{\beta} - 1, \quad C_3 = \frac{\Delta t}{2}(\frac{\alpha}{\beta} - 2),$$

$$C_4 = \frac{1}{\beta\Delta t^2}, \quad C_5 = \frac{1}{\beta\Delta t}, \quad C_6 = \frac{1}{2\beta} - 1$$

对于给定的积分步长  $\Delta t$ ,如果已知  $t_n$  时刻的位移矢量 $\{u\}_n$ 和加速度矢量 $\{\ddot{u}\}_n$ ,那么,就可以求得  $t_{n+1}$ 时刻的位移矢量 $\{u\}_{n+1}$ ,速度矢量 $\{\dot{u}\}_{n+1}$ 及加速度矢量 $\{\ddot{u}\}_{n+1}$ 。在积分过程中, $\alpha$ 取 0.5, $\beta$ 取 0.25,积分步长  $\Delta t$ 取 0.2 $\mu$ s。

在求得了节点位移后,将裂纹面上各点垂直于裂纹面方向的位移代入裂尖附近的位移表达式:

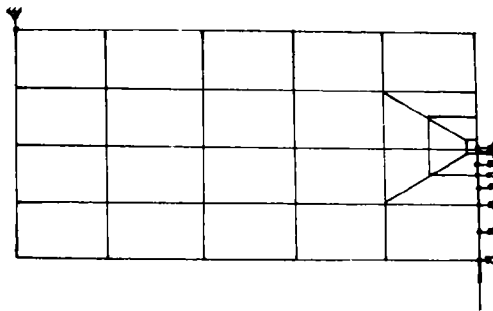


图 4 有限元网格划分

Fig. 4 Mesh of the finite element method

$$u_r = \frac{K_I(t)(1 + \gamma)}{E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} (k - \cos \theta) \quad (7)$$

取  $\theta = \pi, k = 3 - 4\gamma$  (平面应变情况),在  $r$  较小时有:

$$K_{II}^*(n\Delta t) = \frac{E}{4(1 - \nu)^2} \sqrt{\frac{2\pi}{r_1}} u_r(r, \pi, n, \Delta t)$$

式中: $K_{II}^*(n\Delta t)$ 是  $n\Delta t$  时刻距裂尖为  $r_1$  点上对应于裂纹面上  $y$  方向的位移  $u_r$ ,所求得动态应力强度因子的近似值。在  $K_{II}^*(n\Delta t) \sim r_1$  坐标系中将这此点拟合为一条直线,外推于  $r = 0$  处就可求得动态应力强度因子的计算值。这就是所谓动态有限元位移法。

在求得了节点位移后,还可以求得裂尖前沿裂纹线上各点垂直于裂纹面的应力,并把代入裂尖应力场公式:

$$\sigma_y = \frac{K_I(t)}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \quad (8)$$

取  $\theta=0$  时有:

$$K_{Im}^*(n\Delta t) = \sqrt{2\pi r_n} \sigma_{Im}^*(r_n, 0, n\Delta t) \quad (9)$$

$K_{Im}^*(n\Delta t)$  就为距裂尖  $r_n$  处, 对应于裂尖应力  $\sigma_{Im}^*$  时动态应力强度因子的近似值, 在  $K_{Im}^*(n\Delta t) \sim r_n$  坐标系中拟合直线并反推于  $r=0$  处, 就可得动态应力强度因子的计算值, 这就是所谓动态有限元应力法。

动态有限元程序全部采用标准的 FORTRAN 语言编写, 可在个人微机上进行全部运算, 计算方法、应力强度因子的计算值以及程序的有效性已在文献[9]中给予验证。

#### 4.4.2 近似法

动态有限元程序可以成功的求解三点弯曲试样的动态应力强度因子, 但其缺点是需编制较多的程序, 花费较多的机时, 使得实验数据的实时处理受到一定的限制, 有些量的物理意义也不清楚。动态应力强度因子的解析表达式还未求得, 因此, 许多人就致力于发展三点弯曲试样动态应力强度因子的近似公式法。作者曾在 Williams 弹簧质量模型的基础上, 提出了一种修正公式<sup>[10]</sup>, 其表达式为:

$$K_I = \frac{K_{Is}\omega_1}{P(t)} \int_0^t P(\tau) \sin \omega_1(t - \tau) d\tau \quad (10)$$

其中:  $K_{Is}$  为对应于载荷  $P(t)$  的准静态应力强度因子,  $\omega_1$  为含裂纹试样的一阶振动频率, 其确定方法可见文献[10]。当载荷历史已知时, 只要对上式进行积分或采用数值积分法就可确定任一时刻的动态应力强度因子, 与动态有限元结果比较, 结果令人满意。

#### 4.5 动态起裂韧性的测试结果

在冲击载荷作用下, 共完成了八个试样的实验, 图5表示了001号试样加载时入射应变波和反射应变波沿时间轴平移、时间零点重合后的波形图。图6表示了用一维应力波理论处理后施加于试样的载荷及加载点的位移随时间的变化曲线。图7表示了试样正、反面应变片上所测的应变信号及起裂时间的确定。应该注意的是, 从试样正反两面所贴的应变片上测得的起裂时间并非重合, 主要由于试样的厚度影响以及裂纹也并非对称起裂及扩展所致, 但在确定起裂韧性时, 只选取最小的起裂韧性即可。

表1给出了8个试样的测试结果, 对于每个试样, 以载荷历程为输入, 采用三种不同的方法确定应力强度因子历史, 再由起裂时间确定动态起裂韧性。从表中可以看出, 采用有限元位移法八个试样的平均结果为  $K_{Ia}(\dot{\sigma}) = 37.10 \text{MPa} \sqrt{\text{m}}$ 。采用有限元应力法的结果为  $K_{Ia}(\dot{\sigma}) = 37.83 \text{MPa} \sqrt{\text{m}}$ 。采用近似公式的结果为  $K_{Ia}(\dot{\sigma}) = 34.10 \text{MPa} \sqrt{\text{m}}$ 。所有试样的平均载荷速率约为  $\dot{K}_{Ia}(\dot{\sigma}) = 1.0 \times 10^6 \text{MPa} \sqrt{\text{m}}/\text{s}$ , 子弹速度的平均值为  $15.5 \text{m/s}$ , 试样承受的最大载荷的平均值为  $176.3 \text{kN}$ 。

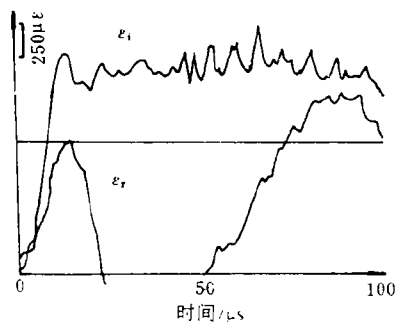


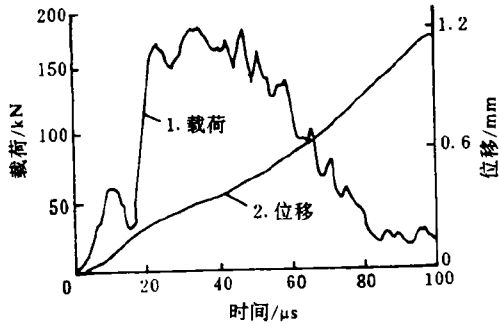
图 5 入射波  $\epsilon_i$  及反射波示意图

Fig. 5 Input wave and reflection wave

表 1 40Cr 材料动态起裂韧性测试数据

Table 1 Testing results of dynamic fracture initiation toughness for 40Cr material

试样号	001	002	003	004	005	006	007	008	平均值
裂纹长度 / (mm)	20.77	20.70	20.32	20.38	20.83	20.43	20.89	20.32	20.58
子弹速度 / (m/s)	15.6	15.2	15.2	15.4	15.2	15.1	15.5	16.0	15.4
最大载荷 $P_m$ / (kN)	178.2	171.9	173.5	181.4	179.8	170.3	173.5	181.4	176.3
达到 $P_m$ 时间 $t_m$ / ( $\mu s$ )	33.0	22.2	31.8	30.8	31.6	31.0	31.2	30.8	30.3
起裂时间 / ( $\mu s$ )	35.6	37.6	35.4	34.8	38.0	31.4	34.6	33.2	35.1
断裂载荷 $P_f$ / (kN)	167.1	151.2	164.4	167.1	156.0	170.3	165.5	170.3	163.99
载荷速率 / ( $kN/s \times 10^6$ )	4.46	4.02	4.64	4.80	4.10	5.42	4.84	5.13	4.70
$K_{Ia}(\dot{\sigma}) / (MPa \sqrt{m})$ 位移法	37.43	48.05	38.08	37.02	46.94	24.85	32.42	31.38	37.10
$\dot{K}_{Ia}(\dot{\sigma}) / 10^6 \times$ ( $MPa \sqrt{m} / s$ )	1.05	1.28	1.08	1.06	1.24	0.79	0.94	0.95	1.06
$K_{Ia}(\dot{\sigma}) / (MPa \sqrt{m})$ 应力法	38.91	48.54	37.17	37.78	47.67	26.48	33.57	32.54	37.83
$K_{Ia}(\dot{\sigma}) / (MPa \sqrt{m})$ 近似公式法	34.15	41.41	33.14	33.19	42.19	25.14	33.39	30.17	34.10



1. Load, 2. Displacement

图 6 试样加载点的载荷与位移

Fig. 6 Load and displacement at loading point

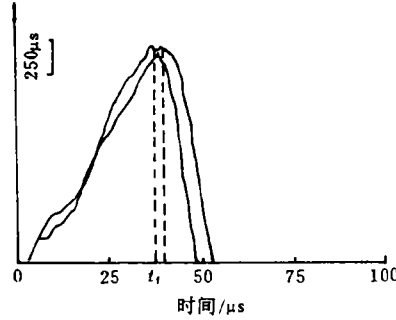


图 7 起裂时间的确定示意图

Fig. 7 Determination of fracture time  $t_f$

### 5 结果的分析与讨论

利用本文所描述的方法,比较成功的测定了 40Cr 材料的动态起裂韧性。与摆锤冲击加载预裂的 Charpy 试样或三点弯曲试样测试材料动态起裂韧性的方法相比,本文的方法具有如下优点:首先,施加于试样的载荷持续时间较长,并依赖于子弹的长度,它可由贴在入射杆上的应变片较准确的测定。依据一维应力波理论从入射应变脉冲与反射脉冲直接计算。其次,由于施加于试样的载荷的持续时间超过了试样的起裂时间,所以不会出现象 Kalthoff<sup>[11]</sup>等人发现的在摆锤试验机上加载三点弯曲试样时出现的试样与支座“失去接触”的现象,这为随后动态应力强度因子的计算提供了方便。最后,本文的方法可使动态起裂韧性的平均变化率,也就是加载速率提高一个量级。另外,本文的方法避开了直接测试动态应力强度因子带来的困难和麻烦。

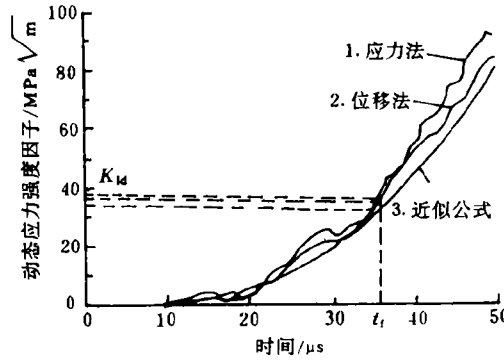
我们给出了三种不同的动态应力强度因子的确定法,即有限元位移法,应力法及近似公式法。从表 1 可以看出,位移法和应力法的结果比较接近,而近似公式法的结果小于位移法和应力法的结果。就方法本身而言,有限元法的精度高于近似公式法。这主要是由于在推导近似公式时,等效质量及试样的一阶振型等的选取存在着误差。有限元法的精度虽然较高,但需要编制较多的程序,计算工作量较大,实验数据的实时处理有一些困难。而近似公式法的精度虽然较差,但计算工作量较小,实时处理容易发现。所以,可以根据不同的需要选取不同方法。

起裂时间对于动态起裂韧性的影响很大,如果起裂时间有 2~3μs 的差异(即 10%左右),动态起裂韧性的差异可能大于 20%以上。而用试样正反面裂尖附近所贴的应变片测得的起裂时间之间的差异也可能大于 3μs,这主要是由于裂纹的起裂沿厚度一点开始,这一点的位置沿厚度也是随机的,不确定的,要减小误差,最好是在试样两面同时贴应变片,尔后,取最小的起裂时间为准。Dally 等人在文献[7]中用光弹法对于此种方法进行过验证,误差在 10%左右,但这是对薄板而言。对厚试样,这种方法的误差由于起裂时间不能准确测定而很难估计。当然,厚度越小,误差越小。当裂纹沿厚度一点起裂时,将对于裂尖的应力场产生影响,至于影响有多大,还有待于进一步的研究。尽管如此,就目前的实验



条件及现有的测试方法,应变片法还是一种较好的方法。

图 8 给出了将载荷历史代入准静态公式计算的动态应力强度因子历史与动态有限元结果的比较,从图中可以看出:试样的起裂并非发生在载荷的最大值点处,可能会依据材料本身性能的不同在提前或滞后于载荷的最大值处起裂。把动态载荷代入准静态应力强度因子的计算公式所确定的动态应力强度因子与试样内的真实动态应力强度因子差别很大,而且变化趋势也完全不同,从图中可以看出:如果把起裂时的载荷值代入准静态公式所确定的起裂韧性为  $433\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。而此时



1. Stress method; 2. Displacement method; 3. By approximate formula

图 8 动态起裂韧性的确定示意图

Fig. 8 Determination of dynamic fracture toughness

时试样内的真实应力强度因子值,即真实的动态起裂韧性为  $37.34\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。因此,要计算试样内真实的动态应力强度因子,就必须对试样进行完全的动态分析。

如果以精度较高的有限元位移法为基准,40Cr 材料的动态起裂韧性在本文所试验的载荷速率下约为  $K_{Ia}(\dot{\sigma}) = 37.10\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ,对应的载荷速率是  $\dot{K}_{Ia}(\dot{\sigma}) = 1.06 \times 10^6\text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ 。与准静态断裂韧性  $K_{Ic} = 51.75\text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$  相比,降低了约 28.3%,即  $K_{Ic}/K_{Ia}(\dot{\sigma}) = 1.4$ 。这与美国研究者对于钢轨材料所做出的试验结果相同。在高载荷速率情况下动态起裂韧性降低的原因还有待于进一步的研究。

参 考 资 料

- 1 Mall S, Kobayashi A S, Urabe Y. Dynamic Photoelastic and Dynamic Finite Element Analysis of Dynamic-tear-test Specimen. *Experimental Mechanics*, 1978, 18(2): 447~456
- 2 Kobayashi A S, Ramulu M, Mall S. Impacted Notch Bend Specimen. *J Press Ves Tech Trans. ASME. Ser. J.* 1982, 104: 25~30
- 3 Klepaczko, J R. Application of the Split-Hopkinson Pressure Bar to Fracture Dynamics. *Proc 2nd Conf Mech Prop. High Rates of Strain* (ed. J. Harding), Oxford, The Inst Pyhs. 1979. 45: 201~204
- 4 Dutton A G, Mines R A W. Analysis of Hopkinson Pressure Bar Loaded Instrumented Charpy Test Using an Inertial Modelling Technique. *Int J Fracture*, 1991, 51: 187~206
- 5 李玉龙. 利用三点弯曲试样测试材料动态起裂韧性的技术与展望. *稀有金属材料与工程*, 1993, 22(5): 12~18
- 6 李玉龙, 刘元镛. 三点弯曲试样动态冲击特性的有限元分析. *计算结构力学及其应用*, 1995, 12(1): 110~115
- 7 Yokoyama T, Kishida K. A Novel Impact Three-Point Bend Test Method for Determining Dynamic Fracture-Initiation Toughness. *Experimental Mechanics*, 1989, (6): 188~194
- 8 Dally J W, Sanford R J. Strain Gauge Methods for Measuring the Opening Mode Stress Intensity Factor  $K_I$ . *Experimental Mechanics*, 1988, 27: 381~388
- 9 李玉龙, 刘元镛. 带裂纹板在冲击载荷作用下动态应力强度因子的数值计算. *航空学报*, 1989, 10

- (5):227~233
- 10 李玉龙,刘元镛.用弹簧-质量模型求解三点弯曲试样的动态应力强度因子.固体力学报,1994,15(1):75~79
- 11 Kalthoff J F. On the Measurement of Dynamic Fracture Toughness—A Review of Recent Work. Int J Fracture, 1985, 27: 227~298

## EXPERIMENTAL MEASUREMENT OF DYNAMIC FRACTURE INITIATION TOUGHNESS OF 40Cr STEEL

Li Yulong, Guo Weiguo, Jia Dexin, Liu Yuanyong

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072)

Luo Jingrun, Du Jun, Chen Yuze

(Southwest Institute of Structural Mechanics, Chengdu, P. O. Box 521, 610003)

**ABSTRACT** In this paper, a testing method for measuring the dynamic fracture toughness of 40Cr material using three point bend specimen loaded with Hopkinson pressure bar is described. The loading applied to the specimen is determined from the pulse on the Hopkinson pressure bar. The dynamic stress intensity factor is calculated by means of finite element method and approximate formula respectively. The fracture time is measured using strain gauges mounted on the vicinity of the crack tip and the dynamic fracture initiation toughness is obtained based on the stress intensity factor history and the fracture time. The results show that the testing procedure described in this paper is acceptable for measuring dynamic fracture initiation toughness under high loading rates. Over the loading rate range of this paper, the dynamic fracture toughness reduces about 28% of the quasi-static fracture toughness.

**KEY WORDS** dynamic fracture initiation toughness, Hopkinson pressure bar, dynamic stress intensity factor