

# 应用霍普金森压杆技术 进行材料动态断裂韧性研究

中国科学院力学研究所 田兰桥·段祝平

**【摘要】**本文应用霍普金森压杆(SHPB)技术对特种钛合金在高加载率下的动态断裂韧性进行了试验研究,并与静态试验结果进行了比较。结果证明,该合金的动态断裂韧性随着加载率的增高而下降。同时表明应用SHPB技术进行材料动态断裂韧性研究是一种切实可行的方法。

**关键词** 动态断裂韧性 加载率 SHPB技术 特种钛合金

## 1 前言

材料在高加载速率下断裂韧性不同于缓慢加载的情况, Radon、Turner和Krafft早在六十年代就论述了加载率在韧的断裂中的重要作用。

一般说来,在断裂韧性的研究中,加载率也就是应力强度因子 $K_I$ (一般取平面应变条件下的I-型K因子)随时间的变化率 $\dot{K}_I$ 大致可以分为以下几种情况:

(1)  $1\text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s} \leq \dot{K}_I \leq 10^3\text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$  称为准静态加载,可在静态试验机上进行;

(2)  $10^4\text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s} \leq \dot{K}_I \leq 10^5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$  利用摆锤冲击机加载;

(3)  $10^6\text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s} \leq \dot{K}_I \leq 10^9\text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$  应用应力波加载方法。

在七十年代以前,对于断裂力学的研究主要集中在低加载率条件下,然而兵器构件或工程构件材料多是受到冲击或动态载荷的作用。在这种情况下仍沿用缓慢加载条件下的数据及结果显然是不合适的,因为在不同加载率下控制断裂的机制不同。不少研究证明,随着加载率的增高材料的动态断裂韧性 $K_{Ia}$ 也是变化的,图1描绘出三种情况:

(a) 动态断裂韧性随着加载率的增加而降低;(b) 动态断裂韧性随加载率的增加,最终达到某一最低水平,而当加载率更高时不再变化;(c) 动态断裂韧性达到某一最小值后,然后随加载率的增加 $K_{Ia}$ 值又开始上升。但是究竟材料的动态断裂韧性属于那种

1991年6月26日收到稿件

1990年兵器材料动态力学专业委员会成立大会暨学术研讨会论文

还要通过实验来确定<sup>[1]</sup>。因此随着动态断裂力学的发展，人们也在不断的探索一种可靠、有效的方法，以实现加载率 $K_I > 10^6$  MPa $\sqrt{m/s}$ ，用来研究材料在高加载率下的动态断裂韧性。

本文介绍了应用 SHPB 技术进行材料动态断裂韧性研究的方法及理论依据<sup>[2]</sup>，并给出了利用本方法对特种钛合金动态断裂韧性实验研究的结果。

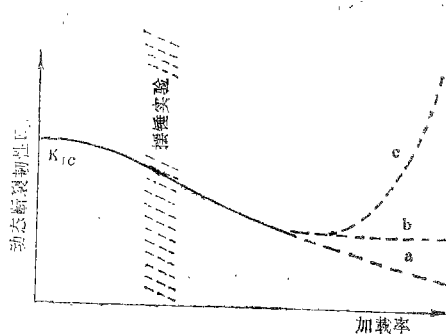


图1  $K_{I,d}$  随加载率变化情况

## 2 实验技术及试样

### 2.1 设备简介

图2是SHPB设备简图。整个设备由气枪、测速装置、试验部分、测量系统、数据采集及处理几个部分组成。有关设备的详细介绍可参见文献<sup>[3]</sup>。与进行SHPB压缩实验不同的是改变了输入导杆与试件的接触端的形状和试件的形状，即将输入导杆一端加工成楔形冲头，以压紧楔形缺口的试件，如图3。

整套设备稳定性好，测量精度高，数据采集及处理系统全部由微机控制。

### 2.2 试件的制备

利用SHPB技术进行动态断裂试验所用试件为紧凑拉伸 WL-CT 试件，如图4。在 ASTM 标准的基础上对试件进行了一些改进，即去掉其拉伸孔轴线以外的部份，并用线

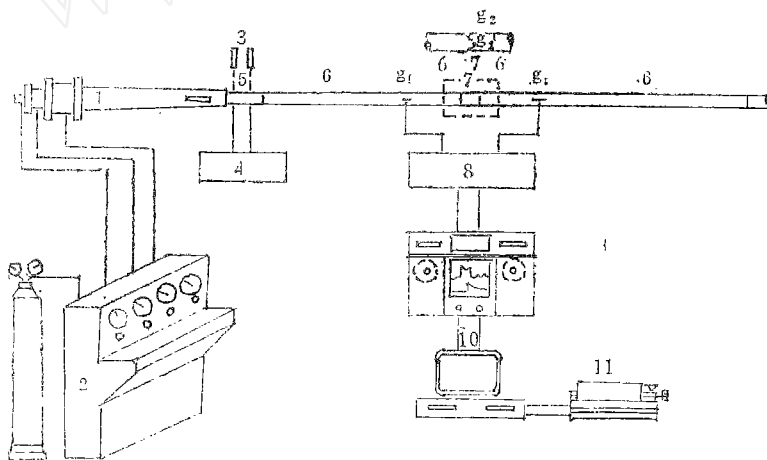


图2 设备简图

- |       |        |                           |
|-------|--------|---------------------------|
| 1—气枪  | 2—主控台  | 3—He-Ne 激光测速装置            |
| 4—计数器 | 5—子弹   | 6—导杆                      |
| 7—试件  | 8—放大器  | 9—Nicolet 示波器             |
| 10—微机 | 11—打印机 | $g_1, g_2, g_3, g_4$ —应变片 |

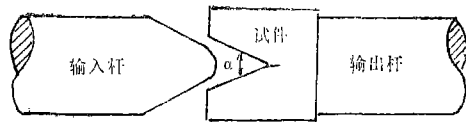


图3 楔型导杆与试件简图

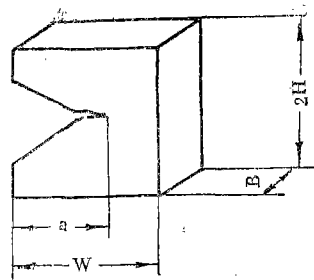


图4 试件简图

切割加工出一个选定角度的楔形缺口，以和导杆上的楔形冲头相配合，为保证试验中导杆与试件为线接触，除应保证楔形面的加工精度外，冲头楔角要略大于试件的楔角。试件尺寸的设计根据ASTM标准保证满足平面应变的条件，试件宽度B要满足

$$B \geq 2.5 (K_{IC} / \sigma_y)^2 \quad (1)$$

其中 $K_{IC}$ 和 $\sigma_y$ 分别是试件材料的静压断裂韧性和屈服强度。

B确定后，根据试件各部份尺寸关系再确定H、W值，本试验试件尺寸将在下面给出。

Shoemaker和Rolfe（1971年）在大量实验的基础上观察到在较高加载率 $K_c$ 下试件尺寸可大大减小，这无疑给动态试验创造了有利条件。

### 2.3 预制疲劳裂纹

由于试件尺寸较小、且去掉了拉伸孔，因此用常规的方法预制疲劳裂纹有一定困难，为此改进了预制疲劳裂纹的夹、卡具，用一个楔形压头和特制的连接件与疲劳机相配合，将试件底部放于一个光洁度和刚度足够的金属垫块上，将试件楔形缺口与楔形压头极好的对称接触。为保证裂纹生长的方向可先在楔形缺口尖端用电火花方法切割一个长 $1 \sim 0.5\text{mm}$ 的槽口，电火花切割所用钼丝的直径为 $0.12\text{mm}$ ，而把缺口抛光以便观察裂纹的生长。根据不同材料，依据GB4161-84预制疲劳裂纹。其最大载荷应使应力强度因子的最大值不超过 $K_{IC}$ 估计值的80%，疲劳载荷之比在 $-1 \sim 0.1$ 之间，在裂纹扩展最后阶段应使疲劳载荷循环应力强度因子最大值 $K_{max} < 0.6K_c$ ，加载过程中密切注视裂纹扩展情况，一经发现开裂立即卸载。为保证裂纹的尖锐程度，对某些材料要靠二次卸载来处理。

## 3 动态断裂韧性 $K_{Id}$ 计算

由于改进后的WL-CT试件和紧凑拉伸试件基本相同，Knott（1973年）的工作证明，对两种试件的应力强度因子可以采用相同的表达方式，相应地在临界状态下 $K_{Id}$ 的表达式即根据可下面公式求得

$$K_{Id} = \frac{P_c(t)}{B\sqrt{W}} f(a/W) \quad (2)$$

其中， $P_c(t)$ 为垂直于裂纹面作用的外载荷，柔度系数 $f(a/W)$ 设为一次近似

$$f(a/W) = 29.6(a/W)^{1/2} - 185.5(a/W)^{3/2} + 655.7(a/W)^{5/2} - 1017(a/W)^{7/2} + 638.9(a/W)^{9/2} \quad (3)$$

其中,  $a$  是初始裂纹长度,  $W$  为试件纵向长度。

根据一维弹性波理论, 通过粘贴于导杆上的应变片, 可以得到入射、反射及透射瞬态应变波形, 分别用  $\varepsilon_I(t)$ 、 $\varepsilon_R(t)$  和  $\varepsilon_T(t)$  表示, 应力波通过试件所用的时间  $t_s$  为

$$t_s = L_s / C_s \quad (4)$$

其中,  $L_s$  是试件长度,  $C_s$  是试件的声速。当试件长度较小时 (一般  $L_s$  为 10mm~25mm),  $t_s \ll t$ , 即远远小于应力脉冲持续的时间  $t$ 。研究表明, 当  $t_T \gg 3t_s$  时, 可以满足试件应力均匀化条件, 实验是可靠的。式中  $t_T$  是透射应力脉冲持续的时间。在本实验中,  $t_s \approx 3\mu s$ ,  $t_T > 18\mu s$ , 满足以上条件。因此在很短的时间内试件就会处于平衡状态, 即界面 I、II 的应力相等。根据如下公式即可得到试件纵向作用力  $P_s(t)$

$$\sigma(t) = E\varepsilon(t) \quad (5)$$

$$\sigma(t) = \frac{1}{2}\rho_0^* C_0^* V_0^* \quad (6)$$

$$E = \rho_0^* C_0^{*2} \quad (7)$$

$$V_0^* = 2C_0^* \varepsilon(t) \quad (8)$$

式中,  $\rho_0^*$ 、 $C_0^*$ 、 $V_0^*$  分别为导杆的密度, 弹性声速和撞击杆的速度。由此不难得到界面 I、II 的速度  $V_I(t)$ 、 $V_{II}(t)$  及应力  $\sigma_I(t)$ 、 $\sigma_{II}(t)$

$$V_I(t) = C_0^* [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t)] \quad (9)$$

$$V_{II}(t) = C_0^* \varepsilon_T(t) \quad (10)$$

$$\sigma_I(t) = \rho_0^* C_0^{*2} \{\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t)\} \quad (11)$$

$$\sigma_{II}(t) = \rho_0^* C_0^{*2} \varepsilon_T(t) \quad (12)$$

其中,  $\varepsilon_I(t)$ 、 $\varepsilon_R(t)$  和  $\varepsilon_T(t)$  分别表示入射、反射和透射应变。

试件上的平均应力  $\sigma_{SR}(t)$  为

$$\sigma_{SR}(t) = \frac{1}{2} \{\sigma_I(t) + \sigma_{II}(t)\} \quad (13)$$

力  $P_s(t)$  为

$$P_s(t) = \sigma_{SR}(t) \cdot F_s \quad (14)$$

其中,  $F_s$  为试件横截面积, 因为不计试件中的惯性效应, 两界面应力可设相等, 因此可以用界面 II 上的透射应力  $\sigma_{II}(t)$  代替  $\sigma_{SR}(t)$ , 于是

$$P_s(t) = \sigma_{II}(t) \cdot F_s \quad (15)$$

$P_s(t)$  确定后, 依据对试件上力的分析, 可以得到试件所受拉力  $P_T(t)$  为

$$P_T(t) = \frac{P_s(t)}{2 \operatorname{tg}(\alpha/2 + \operatorname{tg}^{-1} \mu)} \quad (16)$$

式中,  $\alpha$  为楔型缺口的角度,  $\mu$  为材料的摩擦系数。将上式代入 (2) 式, 于是得到  $K_{Id}$  的表达式

$$K_{Id} = \frac{P_s(t) f(a/W)}{2B\sqrt{W} \operatorname{tg}(\alpha/2 + \operatorname{tg}^{-1} \mu)} \quad (17)$$

近年来不少研究者通过数值计算认为, 用准静态计算方法和考虑惯性效应的动态计算方法得到的结果有一定的差别。为此我们在 (2) 式中增加一个惯性修正因子  $\eta$ , 则

$$K_{I_d} = \eta \frac{P_c(t)}{B\sqrt{W}} f(a/W) \quad (18)$$

式中，惯性修正因子 $\eta$ 依据试件的材料而变化。

#### 4 临界启裂点 $T_c$ 的确定

确定临界启裂时间 $T_c$ 对于得到准确的 $K_{I_d}$ 是十分重要的。图5是由透射杆应变片测得的典型波形。通过前面分析可以知道透射波可以反应试件中的应力状态，因此从该波形可以观察到，当载荷作用于试件时的变形使得裂纹尖端形成应力集中，并导致环绕裂纹尖端的塑性区形成。该塑性区在破坏发生之前吸收能量，当载荷达到最大值 $P_{max}$ 时，裂纹开始启裂，扩展，至试件断裂，能量释放，于是应变信号在裂纹开始扩展的一瞬间迅速下降，之后波形信号不再上升。对于高强低韧脆性材料可以认为，由应变波上升时刻 $T_0$ 到波形信号下降点 $T_1$ 的时间间隔为 $T_c$ 。见图6。

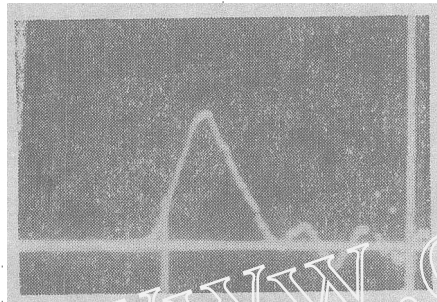


图5 透射波形

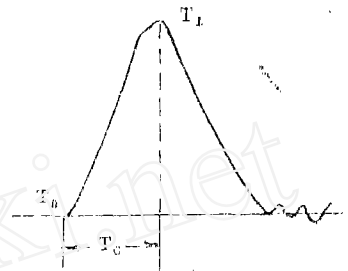


图6  $T_c$ 的确定

为了精确的确定 $T_c$ 值，在试件裂纹尖端适当的位置和试件侧面中心部位分别贴粘二组标距为 $0.5 \times 0.5\text{mm}$ 的微型应变片。根据上面试件的受力分析，可以得到相应的波形。测得 $T_c$ 后，根据下式

$$\dot{K}_{I_d} = \frac{K_{I_d}}{T_c} \quad (18)$$

即可得相应的加载率 $\dot{K}_{I_d}$ ，即平均应力强度因子率。

应当指出的是，由于SHPB技术进行材料动态断裂韧性实验时所用的试件和导杆为楔形接触，为保证实验的同心度，要求试件及导杆的加工精度较高，否则将直接影响试验的精度及试验波形。

#### 5 特种钛合金动态断裂韧性试验结果

在本实验中，选用三种钛合金材料，分别为Ti(I)、Ti(II)、Ti(III)，根据公式(1)求得试件尺寸为： $B=7\text{mm}$ ， $W=17.5\text{mm}$ ， $2H=16.8\text{mm}$ ， $a=7.5\text{mm}$ 加载脉冲持续时间为 $120\mu\text{s}$ ，冲击速度为 $7\sim 26\text{m/s}$ 。

实验后对试件进行有效性检验，剔除不合格试件。得到如下实验结果。

(1) 当加载率 $K_{I,d} > 10^6 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ 时, 三种合金的动态断裂韧性都比低加载率时有明显的降低。

(2) 将Ti(I)高加载率得到的实验结果与低加载率相比较, 其呈现出随加载率 $K_{I,d}$ 的增加 $K_{I,d}$ 下降的趋势, 见图7。

(3) 图8为试验得到的入射、反射和透射波形。图9为试件上检裂片所得到的波形, 上线为试件侧面的波形, 下线为裂纹尖端波形。不难看出, 当加载波作用于试件时, 试件吸收能量, 变形, 直到断裂, 整个过程相对应由波形变化可以观察到, 入射脉冲持续时间为 $120\mu\text{s}$ , 透射波持续时间大于3倍 $T_s$ , 一般为 $20\mu\text{s}$ 左右, 可以认为试件满足应力均匀条件。两个检裂片对应很好, 说明用该方法确定启裂时间 $T_c$ 是可行的。

(4) 图10是试件断口扫描电镜照片, 断口呈现出明显的河流花样和台阶, 因此, 该种材料断裂属脆性断裂。

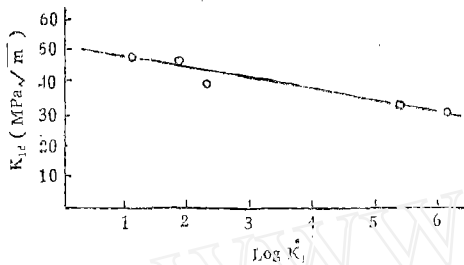


图7 特种钛合金断裂韧性与加载率的关系



图8 试验波形

上一入射波、反射波, 下一透射波

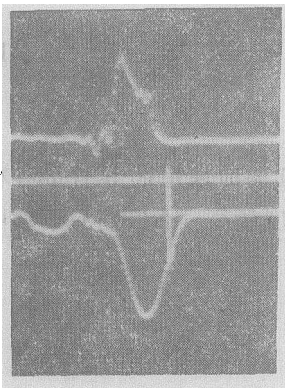


图9 检裂片波形

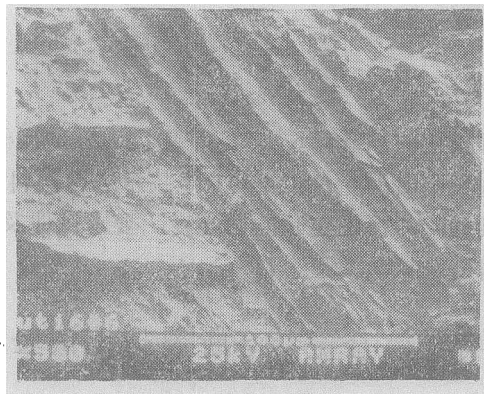


图10 试件断口形貌

## 6 结论

1. 应用SHPB设备, 采用应力波加载方式研究脆性材料动态断裂韧性, 不仅 $K_{I,c}$ 可

高达  $10^6 \text{MPa}\sqrt{\text{m/s}}$  以上, 而且与摆锤冲击机相比, 减少了惯性效应的影响, 试验重复性好, 数据可靠, 试件制备简单, 因此是研究材料动态断裂韧性的一种切实可行的方法。

2. 通过三种特种钛合金动态断裂韧性的研究可知, 随加载率  $K_1$  的增高, 材料的动态断裂韧性下降, 断口呈脆性断裂特征。

3. 考虑惯性效应对  $K_{II}$  的影响, 建议在应用准静态公式进行计算时, 应根据试验材料的不同对公式进行修正。

### 参 考 文 献

- [1] J. F. Kalthoff, Engineering Fracture Mechanics, 1986, vol.23, No 1, P289~298
- [2] J. R. Klepaczko, Proceeding of the Second Conference on the Mechanical Properties of Materials at High Rates of Strain, Held in Oxford, 1979, 28~30, March, P201~214
- [3] 段祝平等, 力学进展, 1980, 1, P1~15
- [4] J. M. Krafft, Applied Material Research, 1964, No 3, P88~101

---

## 含金属间化合物的金属基复合材料的生产

据英国德温特出版公司出版的《化学专利文摘》1991年第3期报道, 欧洲共同体专利部门批准了一种金属基复合材料生产新工艺获得专利权。专利号为 EP-408-257-A。1991年1月16日公布。

金属基复合材料的制备工艺包括: 先用60~80(体积)%的细铝屑、1~10(体积)%的细镍屑和/或细铜屑、1~10(体积)%的细钛屑混合, 然后制成有孔隙的预制件, 这些金属细屑占预制件总体积的62~95%(其余38~5%的体积为孔隙——译注)。然后, 将预制件浸入Al、Al合金、Mg、Mg合金等熔融的基体金属中, 使熔融的金属浸渍到预制件的孔隙内, 实际上不必在熔体上施加压力。预制件也可以包含弥散的增强材料, 最好是Ni、Cu或两者的细屑; Ni屑最少占50(体积)%, 最好是占80%以上的体积。

细Ni屑、Cu屑或它们的混合屑中至少含50(体积)%的Cu [最好含大于80(体积)%的Cu]。细钛屑至少含50(体积)%的Ti [最好是含大于80(体积)%的Ti]。

这种生产工艺的优点是最终能制备出没有微孔的复合材料(微孔被熔融的金属浸渍后完全填充了——译注), 在材料内形成的金属间化合物使材料得到加强。采用的熔化金属的熔点比较低, 而且浸渍接触的时间短, 从而降低了成本, 与早先生产这种材料的工艺相比, 提高了生产效率。

(刘先曙)