

动态断裂的加载和测试技术*

郑 坚 王泽平 段祝平

中国科学院力学研究所非线性连续介质力学开放研究实验室, 北京 (邮政编码100080)

提要 本文对动态断裂实验的加载和测试技术作了扼要综述。简单介绍了各种实验技术的基本原理和应用范围, 评述了各自所具有的特点和不足, 并对动态断裂实验技术的发展提出了一些建议和设想。

关键词 动态断裂; 动态加载; 测试技术; 应变率效应

1 引言

动态断裂是在快速施加的载荷, 如撞击和炸药爆炸作用下发生的。动态断裂的加载率要高于准静态加载的传统拉伸实验或断裂实验的加载率。在本文介绍的各种实验方法中, 断裂产生的加载率一般要高于 $10 \text{ MPam}^{1/2}/\text{s}$, 更一般的情况是要高于 $10^4 \text{ MPam}^{1/2}/\text{s}$ 。在 ASTM E 399 标准的断裂韧性实验中, 金属材料平面应变断裂韧性实验的加载率近似为 $2.75 \text{ MPam}^{1/2}/\text{s}$ 。

Krafft^[1] 和 Radon^[2] 的早期实验工作表明: 在钢的断裂过程中, 加载率每提高一个量级将导致断裂韧性降低10%, 即: 由于率效应的影响, 断裂韧性将随加载率的提高而下降。这种行为是在通常的中等加载率的落重式和摆锤式实验中观察到的, 但这并不能说明在更高的加载率下也会表现出同样的行为。已有一些实验结果表明, 随实验中加载率的不断提高断裂韧性又随之增加^[3]。Kalthoff^[3] 认为断裂韧性随加载率的变化存在3种可能性(图1)。(a) 随加载率的增加, 冲击断裂韧性连续下降; (b) 冲击断裂韧性达到一定的最小值, 并在更高的加载率下保持这个水平; (c) 冲击断裂韧性达到一最小值, 在加载率超过某一极限值后将增加。对于第一种情况由于连续变化后断裂韧性将变为零, 因此是不可能的。但对于后两种情况, 现在还没有足够的实验结果能证明哪一种情况是正确的。

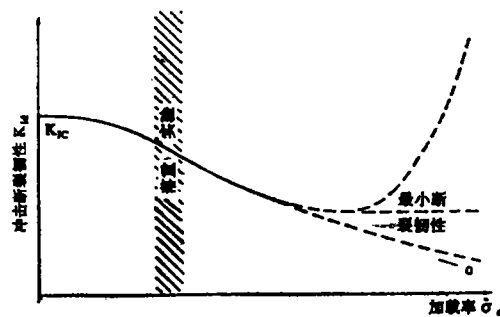


图1 冲击断裂韧性随加载率变化的可能情况

如果研究中只限于线弹性断裂力学, 则加载率参数 \dot{K}_I , 即裂纹尖端区的加载速率, 可

* 本文工作等到国家自然科学基金部分资助。

按下式定义为

$$\dot{K}_I = K_{Ic}/t_f$$

式中 K_{Ic} 为材料的断裂韧性, t_f 为加载开始至裂纹开始扩展的时间间隔。很显然, 随加载时间 t_f 的变化, 加载率 \dot{K}_I 可以在相当大的范围内变化。按实验中各种实验技术可达到的加载率范围, 加载率参数可划分为如下 3 部分^[4]:

- ① 准静态断裂 $10^{-3} \text{ MPam}^{1/2}/\text{s} \leq \dot{K}_I \leq 10^3 \text{ MPam}^{1/2}/\text{s}$
动静态试验机 液压伺服试验机
- ② 动态断裂 $10^3 \text{ MPam}^{1/2}/\text{s} \leq \dot{K}_I \leq 10^5 \text{ MPam}^{1/2}/\text{s}$
摆锤或落重式冲击试验机
- ③ 高速载荷作用下的断裂 $10^3 \text{ MPam}^{1/2}/\text{s} \leq \dot{K}_I \leq 10^3 \text{ MPam}^{1/2}/\text{s}$
应力波加载技术

由上面可看出, \dot{K}_I 的值可在十几个量级中变化, 需要多种实验技术才能实现。在70年代中期以前, 动态断裂实验使用的实验设备基本上都是摆锤和落重式冲击试验机, 测试手段大多采用了电阻应变片。后来又出现了所谓的应力波加载技术, 使实验中可获得的加载率进一步提高。在测试技术上, 动光弹和焦散线技术的出现为动态断裂的研究创造出了更加光辉的前景。本文旨在扼要介绍已有的各种动态断裂实验技术, 以便了解这方面的研究和发展。

2 使用液压伺服实验系统的断裂实验

2.1 快速加载平面应变断裂韧性实验

ASTM推荐的测定快速加载平面应变断裂韧性 K_{Ic} 的实验方法是对 ASTM E 399^[5] 准静态实验方法的改进, 它允许在超过传统的静态实验加载率的情况下测量材料断裂韧性, 如在加载率超过 $2.75 \text{ MPam}^{1/2}/\text{s}$ 的情况下。快速加载断裂实验可在液压伺服式试验机上进行¹⁾。对这种实验所提出的要求既不适用于撞击实验也不适合于准静态实验。因此, ASTM快速加载断裂韧性实验中的加载率覆盖了准静态实验的应变率范围和后面介绍的撞击弯曲实验中的中等应变率范围。这种实验方法只适用于实验时间大于 1ms 的情况。

快速加载实验中的载荷配置, 试样几何尺寸和试样的制备同标准的准静态断裂韧性实验一样。实验数据的处理基本上也是一样的, 快速加载断裂韧性和断裂载荷之间的关系使用了静态应力强度因子表达式。两者之间的主要差别是在快速加载实验中施加于试样的载荷比准静态实验中更快一些。加载率受实验中使用的液压伺服试验机能力的限制, 更重要的是受实验系统的惯性效应和瞬时扰动的影响, 因为这使利用静态分析方法处理实验结果受到了限制。因此, 为避免实验装置的瞬时扰动 ASTM E 399 附录 7 对实验装置明确提出了必须满足的性能要求, 并确定了可允许的惯性效应极限。为了测得快速加载断裂韧性, 实验中必须记录载荷随时间以及裂纹张开位移随时间的变化, 进而, 得到载荷-位移关系。大多数载荷传感器都有足够的频响可以用于快速加载实验。然而, 断裂实验中通常使用的悬臂梁夹式位移计可能会出现一些问题。如果夹式位移计刚性太低, 在实验中两个叶片会产生振动。这些振动会导致载荷-位移记录的非线性, ASTM E 399 附录 7 中介绍的夹式位移计适用于加载

1) 液压伺服实验装置可使实验中的加载率或应变率在较大的范围内变化。对准静态断裂实验, 要求实验中的加载率小于 $2.75 \text{ MPam}^{1/2}/\text{s}$, 当加载率超过这个值时即为快速加载断裂, 这时实验仍可在液压伺服式试验机上进行, 但对断裂实验中的测量和数据处理提出了更多的要求。

时间大于 1ms 的实验。当这些夹式位移计固定在试样上时，其共振频率约为 3300 Hz，自由臂的共振频率约为 750Hz。因此，共振频率超过这些值的任何夹式位移计都可用于快速加载实验。快速加载实验中用于放大传感器信号的仪器频响至少应为 $(20/t)$ kHz， t 为以毫秒为单位的实验时间。因此，在这类实验中使用频响为 25 kHz 的放大仪器是足够的。

尽管对实验施加了很多要求，但经验表明载荷-位移记录仍有非线性出现^[6]。这种非线性可以由试样夹具和实验机共同产生，也可以由确定断裂载荷的不可靠性产生。为了确定可允许的非线性范围，专门引入了一个数据处理方法，以确定可允许的非线性范围^[7]。

2.2 极限 J 值和 J 阻力曲线的确定

对于高韧低强材料，就不能用线弹性断裂韧性 K_{Ic} 来表示其抵抗裂纹扩展的能力，而必须使用裂纹尖端弹性应力应变场的 J 积分来表示，确定 J 积分 (J_{Ic}) 的方法已被列入 ASTM 标准^[8]。文献[9]推荐了确定 J 阻力曲线(表示材料对慢速稳态扩展裂纹的阻力)的方法，但只考虑了准静态载荷作用的情况。为了计及加载率对材料断裂韧性的影响，Logsdon 等^[10]使用紧凑拉伸试样和液压伺服实验机对 A533 钢进行动态 J_{Id} 和 J 阻力曲线的测量。除为了增加夹式位移计的刚度而使用了弹簧载荷外，测试系统同测定静态 K_{Ic} 和 J_{Ic} 值的实验完全一样。当实验温度足够低时，裂纹出现后并不发生稳定的增长，所以可以直接进行动态 J_{Id} 的测量。裂纹的出现在载荷-时间曲线上表现为曲线的突然间断。因此，很容易在载荷-位移曲线上确定裂纹起始点。动态 J_{Id} 值按准静态下确定 J_{Ic} 的方法确定，由载荷-位移曲线下的面积计算得到。

然而当出现稳定裂纹增长时，Logsdon 等^[10]使用了多试样方法建立 J 阻力曲线。对若干具有同样裂纹长度的紧凑拉伸试样施加动载至载荷-位移曲线的不同位置，得到不同的裂纹扩展长度。Joyce^[11]和 Ernst^[12]提出了单试样方法来得到完整的动态 J 阻力曲线。

目前，尚无标准的方法可用于测量准静态 J 阻力曲线和动态 J 阻力曲线。尽管已可以进行弹塑性范围内的动态断裂实验，但同线弹性断裂力学实验相比更加复杂。因此，在建立可靠的动态断裂实验方法和在其标准化以前，还需开展大量的工作。

3 Charpy 撞击实验

Charpy 撞击实验在材料的动态断裂研究中得到了最为广泛的应用，已被列入美国的 ASTM E23 标准^[13]。实验配置如图 2 所示。Charpy 撞击实验以试件断裂时所吸收的能量来衡量材料的断裂性能。所以，实验一般是在摆锤式撞击实验机上进行的，由锤头在撞击试样前

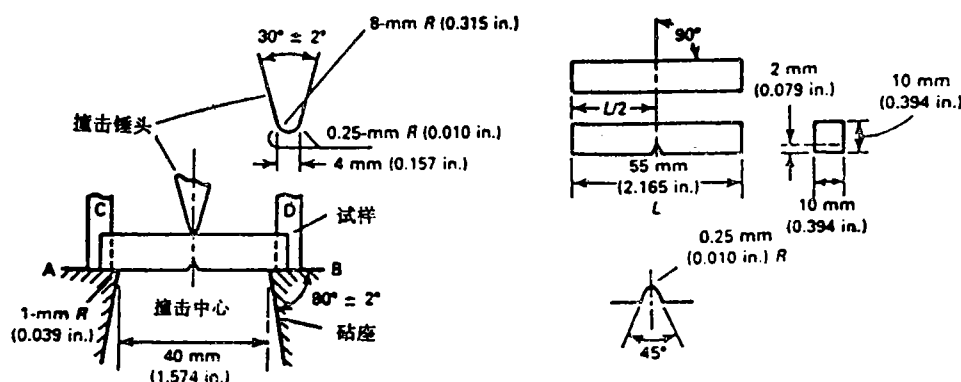


图2 A型 Charpy 试样和实验配置。

后总势能的变化得到试样的断裂能量。此外还经常进行断口形貌和延性变形程度的测量等。

ASTM E 23 对试样、支座和摆锤结构等都提出了要求。实验机必须有足够的能量使试样完全断裂，断裂能量不能超过总势能的80%。机器必须牢固固定在地面上，并保持其水平。必须测量和计及风的阻力和摩擦损失。精确测量摆锤的重量，并由测得的摆锤高度降计算得到机器总的势能。摆锤的释放过程应一致和平稳。试样应自由离开实验机，不能挤住或反弹到摆锤上。对于高、低温实验，试件必须在冷、热介质中取出后5秒钟内准确地放在试样支座上。还应定期对实验机进行检查以保证性能的可靠性。为了能在标准的 Charpy 撞击实验机上获得更多的信息，还可以使用其他测试仪器，这时实验仍然保持有低消费，小试样以及操作简单等优点。最常用的方法是在锤头上使用应变片以测定载荷-时间变化。

Ireland(1976)^[14,15] 曾就在实验装置和试样上粘贴应变片的位置进行了详尽的研究，以期得到试样中真实的极限断裂载荷(图3)。贴片位置共分为三组：①支座和锤头上的应变片 I, J；②裂纹附近位置上的应变片 A, B, C；③试样特殊位置上的应变片 D, E, F, G。由于锤头上的应变片是作为实验装置的一个组成部分，免去了每次实验贴片的麻烦，而且实验结果表明由此得到的结果也能较好地反映出裂纹附近的载荷变化情况，因此认为实验中在锤头上贴片是最为理想的。

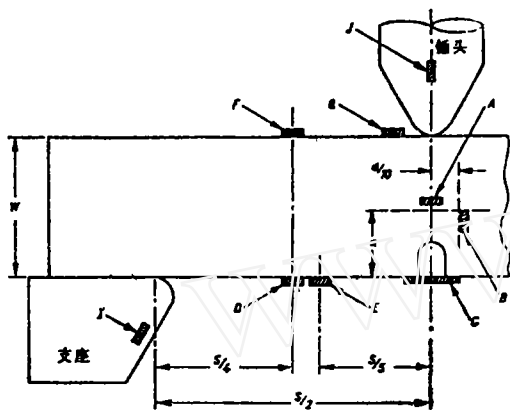


图3 实验装置和试样上的贴片位置草图

但这种方法也有其固有的缺点和不足。首先，测得的载荷稳定性很差，在确定载荷时经常会引起较大的误差。其次，材料的动态强度值是从静态值分析计算得到的，有时并不能准确反映出材料的真实行为。因此，

这种传统的测试技术仅仅是在试样中载荷达到准静态条件足够长时间后，得到的结果才是有意义的。对更短的加载时间，动态效应对试样应力状态有极大的影响。如果不考虑载荷测量中的这些动态效应，就会导致错误的结果，得到过高的材料断裂韧性。因此，只有当裂纹开始扩展时间大于受冲击试样振动周期 τ 的3倍时，准静态分析方法才可使用，即

$$t_f > 3\tau$$

试样振动周期 τ 值可由下面的近似经验公式给出：

$$\tau = 3.36(W/c_0)(EBC_0)^{1/2}$$

式中 W 为试样宽度， B 为试样厚度， E 为弹性模量， C_0 为试样的声抗， c_0 为试样中的波速。

大量实验结果表明，在撞击开始的 2τ 时间内测得的载荷振动非常剧烈，测试结果极不可靠。而当载荷作用时间超过 3τ 时，振动效应已有所减小，因此认为在摆锤和落重式冲击实验中，当 $t_f > 3\tau$ 时得到的动态断裂韧性 K_{I_d} 能较好地反映出材料的真实特性，这已得到普遍承认。

Bohme^[16] 和 Kalthöf(1985)^[17] 对三点弯曲实验中的动态效应进行了详尽的研究。使用的试样材料分别为环氧树脂和高强钢。通过比较动态应力强度因子 K_I^d 和等效静态应力强度因子 K_I^s 来估计动态效应的影响。静态值由测得的锤头载荷 P_{II} ，使用 ASTM E399 中传统

的静态应力强度因子公式来确定，而动态应力强度因子则由焦散线的光学阴影法直接测得。

图4中给出了两种材料的定量结果，并绘出了以时间为函数的动态应力强度因子 K_I^d （实验点）和相应的静态应力强度因子 K_I^s 曲线。 K_I^s 值表现出很强的振荡特性，而真实的动态应力强度因子 K_I^d 则表现出很好的稳定性。在 $t < \tau$ 的短时间内，这种差别特别明显。虽然随时间的增加这种差别在逐渐减小，但在时间 $t > 3\tau$ 后动态效应的影响还未明显消失， K_I^s 和 K_I^d 仍有很大差别。由于试样和支座间的接触刚度不同，环氧树脂试样受到的影响明显大于高强钢试样。

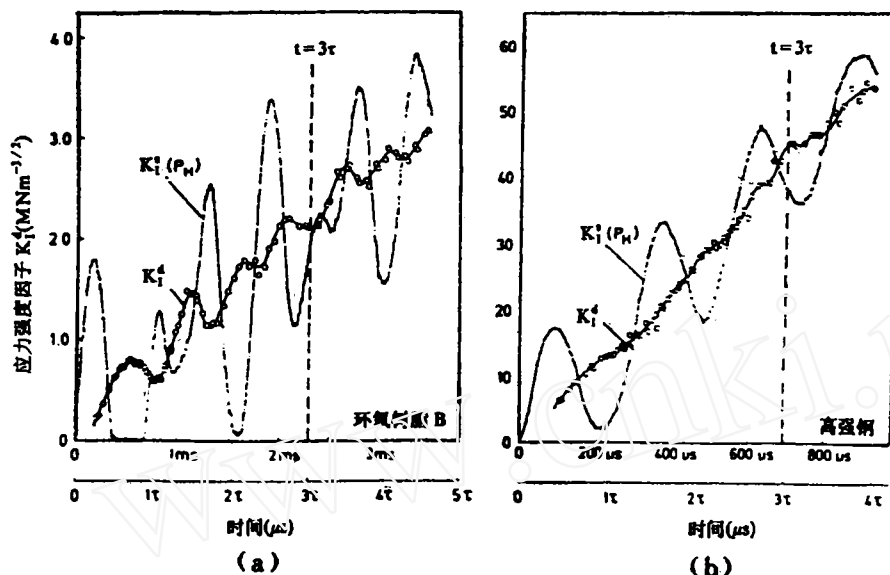


图4 落重载荷下的裂纹应力强度因子：(a) 环氧树脂试样，(b) 高强钢试样

Kalthoff^[17]还通过测量支座对试样的作用力进一步研究了冲击载荷作用下的试样行为。图5中比较了环氧树脂试样在1m/s冲击速度下的：(a)锤头上测得的载荷；(b)裂纹尖部测得的应力强度因子；(c)支座上测得的载荷；(d)在试样端部支座位置上测得的载荷。研究中使用试样的 τ 值大约为700 μ s。四种信号的比较表明，大约在600 μ s时才记录到了支座上的载荷。这个时间约大于最慢的波即横波从撞击点传播到支座所需要时间的3倍。图5(d)解释了这种意想不到的行为。结果发现实验中试样端部和支座间脱离了接触。这种情况大约从200 μ s开始，这个时间与波传播到支座时所用的时间相一致。在接下来的400 μ s内试样完全自由，仅仅是在这个时间之后，即总时间大约为600 μ s时，试样才与支座恢复接触，与这个观察结果相一致，支座上记录到了载荷。随实验条件不同，可能还会出现第二次脱离接触，同时在锤头和试样间也会出现脱离接触现象。图6简要说明了这个过程。由于在撞击开始，支座显然不起任何作用，因此又对无支撑试样进行了补充实验。实验结果由图5中的虚线和空心点表示，可以看出试样的初始响应对有无支撑是完全一样的。

大量实验结果表明，动态效应对冲击载荷作用下的裂纹力学行为有很大影响。按ASTM标准，当时间 t_f 大于 3τ 时， K_I^s 值能很好地近似表示实际的动态应力强度因子 K_I^d 。然而，对裂纹开动时间 $t_f < 3\tau$ 时的情况，上述的静态分析并不能很好地描述材料行为，导致较大

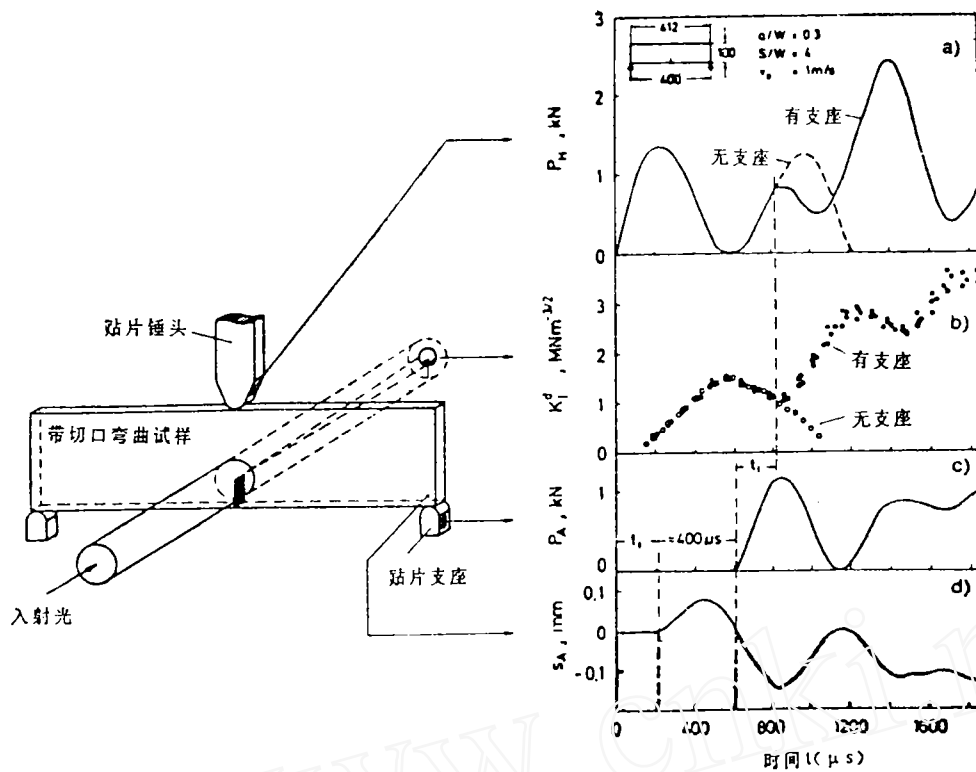


图5 落重实验中预制切口弯曲试样的力学响应

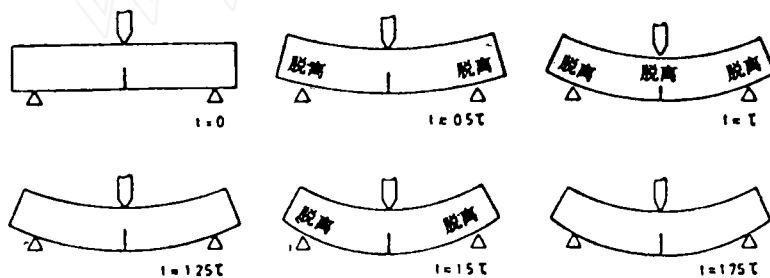


图6 三点弯曲实验中观察到的脱离接触现象

的误差。高温实验和小的冲击速度正好可得到较长的断裂时间 t_f 。另一方面，试样尺寸越小， τ 值越小。但由于在高温实验中一般要求试样尺寸较大，而且小的冲击速度 v 会导致实验中加载率 \dot{K}_I 下降，因此， v 、 t_f 和 τ 是不能独立变化的。为了克服这些存在的困难，减少对实验参数选择的限制，进而提高实验中的加载率，得到可靠的实验结果，许多学者开始了大量的工作。对 Charpy 试样的尺寸效应也进行了一些有意义的研究^[18,19]。

4 冲击响应曲线概念

由于在实验的最初阶段，对预制裂纹 Charpy 试样撞击实验得到的载荷-时间记录的处理有一定困难，而且在确定动态断裂韧性 $K_{I,d}$ 中使用的是准静态方法，因此限制了实验可以适用的范围。为了得到足够大的断裂时间，就必须限制撞击速度。可允许的最大速度取决于实验材料的韧性。使用测量冲击断裂韧性 $K_{I,d}$ 的冲击响应曲线概念^[20-22]可以克服上述困难和

限制。对固定的实验条件，如试样几何、裂纹长度和撞击速度，可以建立起裂尖的动态应力强度因子 $K_I^d(t)$ 随时间的变化曲线。这个 $K_I^d(t)$ 曲线在数量上把试样的响应同冲击特性联系起来，因此被称为冲击响应曲线。冲击响应曲线只取决于实验系统的弹性特性，因此，对所考虑系统是唯一的。在相同的撞击条件下，冲击响应曲线概念可以适用于所有钢试样。对不同韧性的钢试样只要弹性性能相同，即弹性模量和泊松比相同，并满足线弹性断裂力学或小范围屈服条件，由预先建立的冲击响应曲线和测得的断裂时间 t_f ，可以得到动态断裂韧性 K_{Id} (图 7) 为

$$K_{Id} = K_I^d(t = t_f)$$

冲击响应曲线可以通过测量和计算得到。纯粹的计算需要同时考虑试样和撞击锤头。如果在计算中使用实验数据，如测得的载荷和位移关系，作为输入数据可以使计算大大的简化。冲击响应曲线可以使用光学方法，如动光弹、焦散线测得，也可以利用位于裂纹尖端附近经过标定的应变片信号得到。不同撞击速度下的冲击响应曲线是相类似的。应力强度因子 K_I^d 与撞击速度 v_0 有线性关系，并在试样断裂所需要能量与总冲击能量相比较小时，与锤头质量 m_0 无关。在实际应用中，可以使用下面的表达式：

$$K_I^d = R \cdot v_0 \cdot t''$$

式中 $t'' = f(t')$ 可以由 [20] 表 3 中的值给出，

$$t' = g(t) = t[1 - 0.62(a/W - 0.5) + 4.8(a/W - 0.5)^2]$$

$R = 301 \text{ GN/m}^{5/2}$ ， v_0 为撞击速度， a 为裂纹长度， W 为试样宽度， t'' 和 t' 为特殊定义的时间， t 为测得的时间。函数 f 和 g 分别用于动态修正和计及裂纹长度的变化。这个近似公式具有较高的精度。

受冲击载荷作用的预制裂纹 Charpy 试样的断裂时间可以由两个未经标定的应变片得到，一个位于锤头上而另一个位于试样裂尖附近。应变信号的快速下降标志着裂纹的失稳。另一个测量方法则是基于电磁原理的方法。实验前将试样磁化，在裂纹开始快速传播时由于裂纹尖端的加速将产生一个磁信号。由位于裂纹尖端接近试样表面（不与试样接触）的一个磁线圈来采集产生的磁信号。得到的信号可清楚地表示出裂纹失稳瞬间的时间。

冲击响应曲线概念是一种完全动态的测量方法，使传统的准静态方法可以在更短的断裂时间内使用。它对在冲击后短时间内裂纹失稳的实验是一种有效的方法，即这种方法尤其适合于高速载荷作用下脆性材料的实验，并不受到 t_f 要大于 3τ 的限制。但这种方法要受到小范围屈服的限制，这是由于在出现大的塑性变形时冲击响应曲线会失去其唯一性。然而在大塑性变形条件下，断裂时间 t_f 已足够长可成功地使用准静态分析方法。两种方法各有其适用的范围，并可互相补充。

5 单点弯曲实验

对撞击三点弯曲试样动态行为的研究表明，在试样刚刚受到撞击时试样的两端同支座失

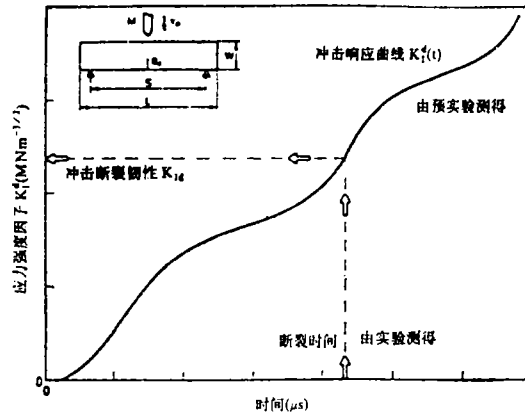


图 7 测量冲击断裂韧性 K_{Id} 的冲击响应曲线概念

去了接触^[17]。因此，前面所讨论的冲击响应曲线的初始部分完全是由惯性载荷作用的结果，支座未起到任何作用。所以，如果撞击速度较高、裂纹起裂时间很短，则在撞击过程中就没有必要给试样支撑，这时可进行所谓的单点弯曲实验^[23,24]。

单点弯曲试样为单边裂纹试样。去掉了试样两端的支座，实验配置同传统的三点弯曲实验配置完全相同。实验方法如图8所示。当锤头撞击试样时，试样的中部被加速离开锤头，而试样的端部由于惯性则相对落后。这使得试样弯曲，对裂纹尖部加载。由这样的惯性力所产生的典型的应力强度曲线如图9所示，曲线近似为正弦波形。曲线单调增至最大值，然后单调下降，整个曲线相当光滑，并不出现三点弯曲实验中曲线的剧烈振动。为了比较，锤头载荷也示于图9中。单点弯曲实验中得到的应力强度曲线只取决于撞击速度，试样几何尺寸和材料的弹性性能，与实验材料的断裂性能无关。因此，在小范围屈服条件下，冲击响应曲线概念也可用于单点弯曲实验。

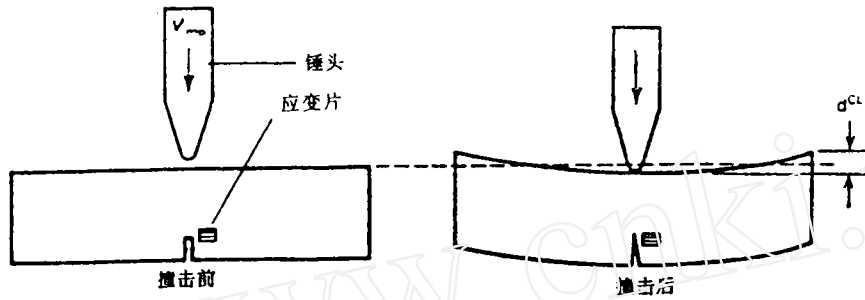


图8 单点弯曲实验配置简图

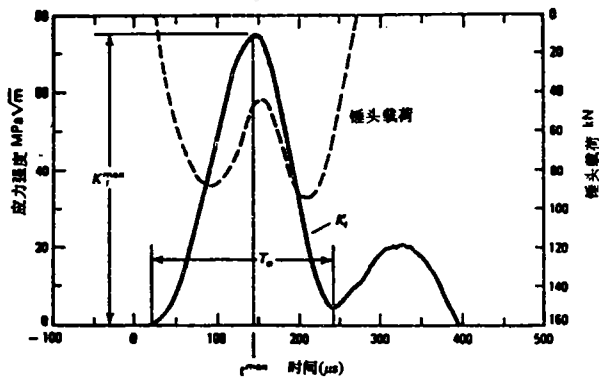


图9 单点弯曲实验中典型的应力强度和载荷曲线

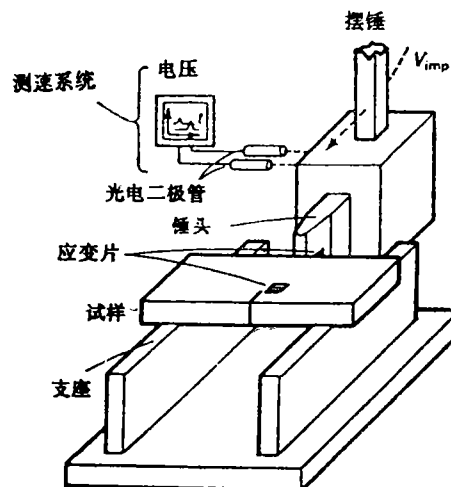


图10 摆锤实验机上的单点弯曲实验

单点弯曲实验最大的优点是测得的应力强度关系包含了所有的动态效应。因此，对实验中的撞击速度和断裂时间无任何限制。同时使用单点弯曲实验和冲击响应曲线的概念可得到变化平稳的响应曲线。实验的载荷可由气炮加速弹丸来得到，也可在摆锤实验机上进行(图10)。Seidl^[25]也进行了类似的单点弯曲实验。由于在摆锤和落重实验机可获得的撞击速度较低，所以对铝和钛等这样的轻合金需在试样两端附加镇重板才能得到较高的应力强度^[26]。

6 基于分段式 Hopkinson 杆原理的动态断裂实验

分段式 Hopkinson 杆技术^[27]作为在高应变率条件下测试材料力学性能的一种有效方法得到了广泛的应用。许多学者为了在动态断裂实验中获得更高的加载率和可靠的实验结果，对 Hopkinson 杆技术进行了改进。

这方面的工作最早是由 Costin 等(1977)^[28]进行的，之后又得到了进一步发展^[29,30]，

实验中使用的实验装置如图 11 所示。试样为带有表面疲劳预制裂纹的固体圆杆。实验时，试样一端固定，另一端有一圆盘，圆盘上配置有炸药作为动力源，由点燃炸药产生的拉伸脉冲使试样断裂。对整个装置进行了标定，以保证在脉冲上升阶段就足以使试样断裂。使用这种加载技术，在拉伸脉冲到达预制裂纹断面的 20—25 μs 内就可使试样断裂。在裂纹两侧分别粘贴有入射和透射应变片，用于进行应变测量。Kolsky^[26]在他的压杆实验中表明，透射脉冲提供了对试样裂纹区平均应力的测量，透射脉冲的幅值正比于裂纹区平均净截面上的应力。当脉冲的长度与裂纹宽度相比要大时，为了分析问题的方便，可将作用在裂纹区的载荷作为准静态载荷来处理，因此无论分析是弹性的还是塑性的，表面切口圆杆试样的应力分析结果都可采用。

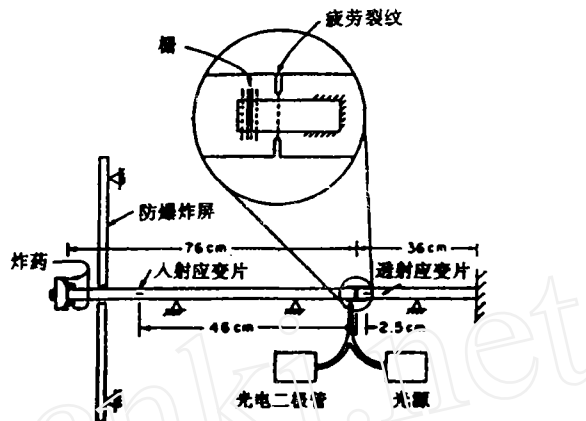


图 11 动态断裂装置简图

裂纹张开位移测量使用了基于 More 云纹原理的光学装置。基准栅为透明的玻璃板，试样栅则直接刻在试样表面上，位于试样的入射端，基准栅固定在试样透射端并跨过试样的裂纹区。当试样受到拉伸作用时，基准栅和试样栅产生相对移动，形成云纹。用光电二极管和示波器来记录光强的合成振荡。这种测量技术具有以下两个优点：①装置的响应时间远小于载荷脉冲的上升时间，在载荷作用的 20 μs 内可准确地测得产生的位移；②一旦光栅刻在了试样上，就不需再进行装置的标定，这是因为云纹和位移之间的关系一经建立（对所使用栅的种类和实验配置）是固定不变的。DormevoI (1981)^[31]和 Ohlson^[32]使用同样的试样进行了实验，但在加载及测试技术上作了一些改动。由橡皮带驱动的弹丸在两个平行导轨间运动。使用光电引伸计技术来测量裂纹张开位移。

上述实验技术具有较高的频响，可以获得较好的动态实验结果，加载率 \dot{K}_I 可达 10^8 量级以上。但 Costin 等使用的技术与 Dormevol 使用的相比要复杂些，首先光栅的刻制要求较高 ($W = 1200 \mu \text{in}/\text{线}$)，其次是使用了炸药作为能源。实验中使用的试样尺寸都较大，材料浪费较多，费用相对要高一些。

Klepaczko (1979)^[4,33]使用了与分段式 Hopkinson 压杆完全相同的实验装置，仅仅对试样作了变化，实验装置如图 12(a) 所示。实验使用的试样类似于紧凑拉伸试样，位于两段分离的压杆（即入射杆和透射杆）之间。尖劈与入射杆相连并插入试样的切口。入射杆的长度至少是尖劈和试样长度的 10 倍，因此，入射波通过尖劈对试样的加载过程可以认为是准静态的。Couque 等^[34]设计了蓄能式压杆装置（图 12(b)）。实验中，首先将所需的能量储存在与脆性切口试样相连的弹性压杆中。脆性切口试样，实际上是“触发”试样。当其断裂时，

会突然释放出储存在压杆中的能量，同时对两个试样加载。裂纹张开位移的测量使用了涡流位移传感器。裂纹传播的测量使用了裂纹扩展计，共有 5 线。该装置实验中的加载率可达 $3.5 \times 10^8 \text{ MPam}^{1/2}/\text{s}$ 。

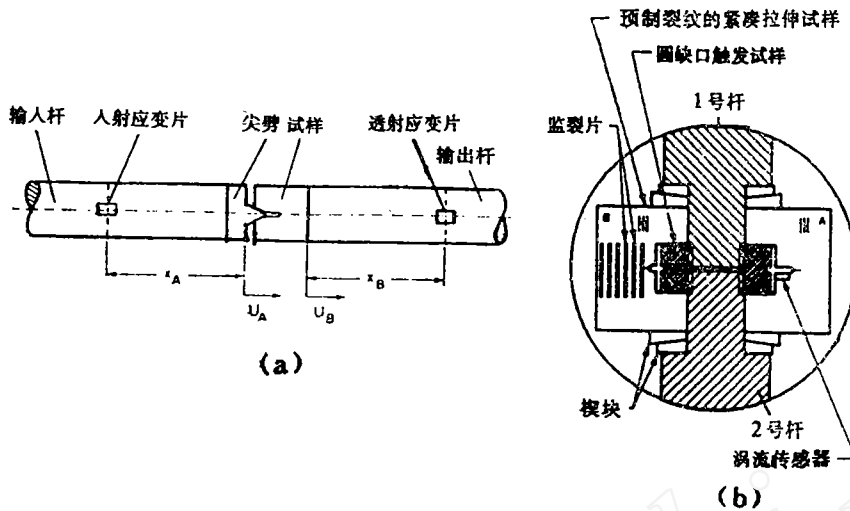


图 12 (a) 用于动态断裂研究的分段式 Hopkinson 压杆装置；
(b) 动态断裂试验的蓄能式压杆装置

以上两种实验方法与 Costin 等的方法相比，具有试样小，费用低的优点，并可通过控制撞击杆速度在较大加载率范围内进行实验。但实验前必须对装置进行标定。

Kishida 等 (1984)^[36] 完全采用了 Lindholm 和 Yeakley (1968)^[36] 用于高应变率下材料拉伸实验的 Hopkinson 杆技术，实验装置如图 13 所示。试样同样为帽子形试样，仅仅是在试样上加工了狭缝，预制了疲劳裂纹。这种实验技术的缺点是试样加工困难，应力强度因子计算也复杂，而且实验的可靠性也应作进一步探讨。

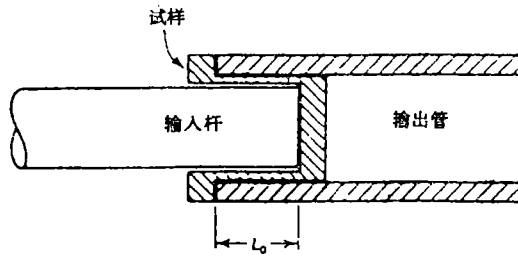


图 13

Yokoyama 等 (1989)^[37] 利用 Hopkinson 技术进行了动态三点弯曲实验 (图 14)。装置中使用了三根弹性压杆，一个输入杆，两个输出杆。完全使用了应变片测试技术。

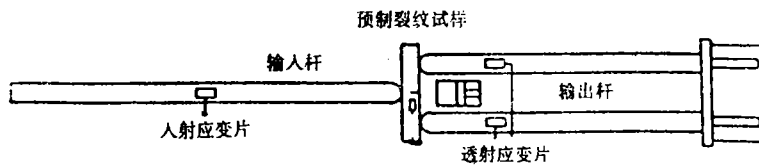


图 14 动态三点弯曲实验示意图

基于分段式 Hopkinson 杆原理的各种动态断裂实验技术, 由于具有结构简单, 操作方便以及测试结果可靠等优点, 而得到了广泛的应用。这类实验中, 由于脉冲长度远大于试样尺寸 (裂纹尺寸), 因此, 在相对脉冲长度较短的时间内在试样中就可建立起应力平衡, 所以完全可以使用准静态方法进行分析 and 处理。

7 短脉冲断裂力学实验

短脉冲断裂力学是对经典静态断裂力学概念的改进, 它可以应用于快速施加、短延时载荷作用下的断裂。当一个裂纹受到短延时的应力脉冲作用时, 静态断裂力学理论不足以描述裂纹的失效。如果作用的载荷脉冲时间很短, 近似等于应力波传播经过裂纹长度所需的时间, 则应力强度与静态时所考虑的情况大不相同。如果载荷脉冲只有几个微秒, 则失稳准则中必须包含时间效应, 即裂尖的应力强度就不能用一个简单的参数来表示, 而应是一个时间的函数 $K_I^d(t)$, 因此, 必须对失稳准则进行改进, 建立新的失稳准则, 使其反映出短脉冲载荷的作用和影响, 在许多动载情况下, 失稳准则中并不需要考虑载荷的延续时间。然而, 在包括撞击, 炸药爆炸和激光辐射等情况下, 就会表现出短延时效应, 失稳准则中必须计及时间效应。

按照静态力学概念, 随裂纹长度的增加, 失稳极限应力连续下降, 即

$$\sigma_{crit} \propto K_{Ic} \sqrt{\pi a}$$

然而, 当裂纹受到短脉冲载荷作用时, 失效应力将高于由静态方程预测的结果。由平板撞击和弹丸撞击技术^[38,39] 进行的可控应力脉冲实验表明, 对超过一定长度的裂纹 (相应于脉冲时间和波速的积), 失稳应力为常值, 与裂纹长度无关。

这些观察结果可以理解为裂纹尖端的应力强度由于受到了阶梯形载荷 (载荷随时间突然增加, 然后保持为一常值) 的作用而发生了变化 (图 15)^[40,41]。应力强度随时间的平方逐渐增加, 超过静态应力强度值, 经过几个阻尼振荡后达到常静态值。对有限时间阶梯函数载荷, 由图 15 中的叠加得到了裂纹的应力强度。图 16 说明了受延续时间为 T_0 的方波作用时, 应力强度随裂纹长度增加的变化。为了方便, 裂纹长度由 $C_L T_0$ 给出, C_L 为纵波速度。

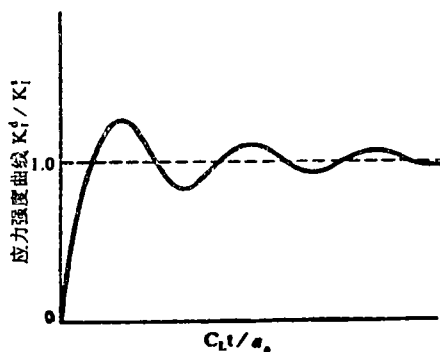


图 15 动态和静态裂尖应力强度因子 (K_I^d / K_I^s) 随时间的变化

对短裂纹 ($a_0 < 1/24 C_L T_0$), 动态应力强度

曲线近似为一长方形 (图 16), 平均应力强度等于等效的静态应力强度。随裂纹长度的增加, 动态应力强度也增加, 逐渐接近于三角形, 但平均动态应力强度因子小于等效静态裂纹的应力强度因子值。对更大的裂纹长度 ($a_0 > 1/3 C_L T_0$), 动态应力强度值并不是连续增加, 而是保持同一个值, 尽管裂纹长度增加相应的静态应力因子也增加。

短脉冲断裂实验不是常规实验, 需要特殊的仪器、设备才能进行。平板撞击实验由于可以准确的控制加载脉冲幅值, 因此得到了广泛的应用。但平板撞击实验技术在大多数情况下还是被用于细观力学研究, 考察微裂纹和微孔洞的损伤演化特征。最近, Ravichandran 等^[42] 和 Prokash 等^[43] 利用平板撞击实验技术进行了宏观断裂力学研究, 实验配置如图 17(a) 所

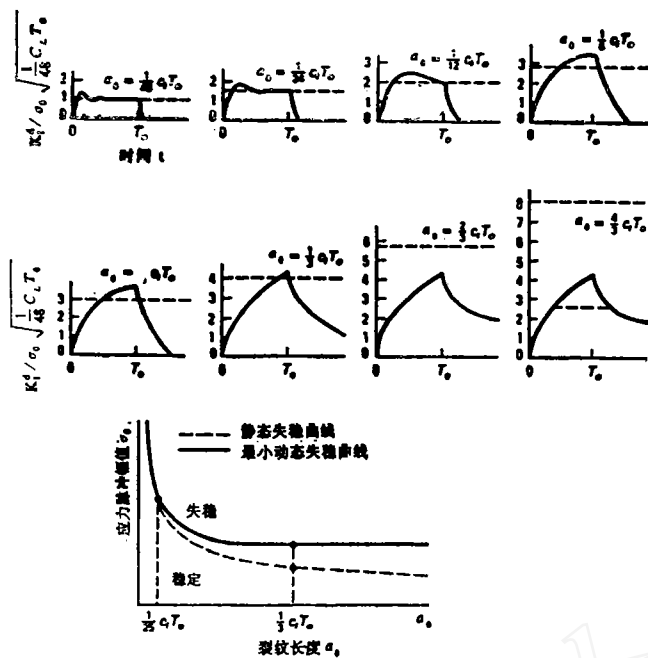


图 16 裂纹长度增加时的动态应力强度因子变化情况

示。实验中使用激光干涉技术来测量裂纹的张开位移，载荷脉冲宽度为 $1\mu\text{s}$ 。激光干涉技术测得的位移精度取决于所使用激光的波长。因此，激光干涉技术不但有相当高的响应，而且还有极高的测量精度，因此得到了广泛的重视。平板撞击实验中的加载率可达 10^9 量级。Shockey^[39] 也设计了一种短脉冲实验装置(图 17(b))。

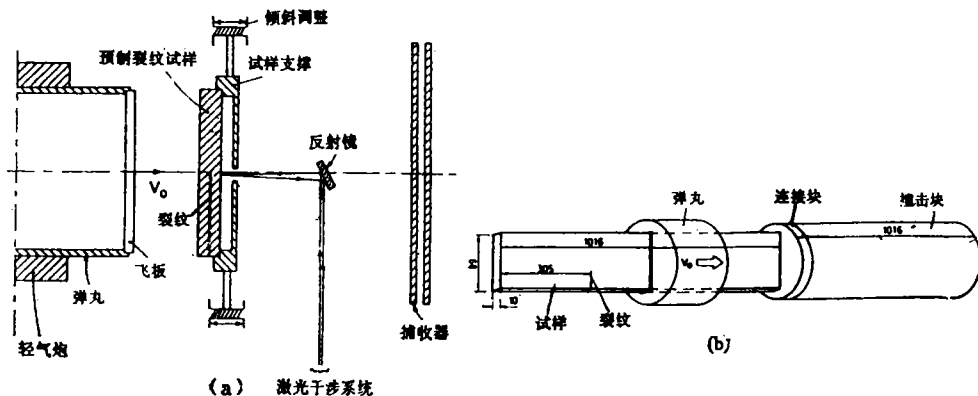


图 17 短脉冲断裂实验加载和测试技术

此外,还有一些其他类型的实验技术也得到了不同程度的应用。Ravi-Chandar 等^[44,45] 提出了动态断裂的电磁加载实验技术。使用的试样类似于紧凑拉伸试样。当高压电容器对插入试样切口的线圈放电时所产生的作用力使裂纹开裂。Kalthoff^[3] 实验中使用了单边裂纹试样。由气炮发射的弹丸直接撞击与裂纹面平行的试样边缘。当撞击产生的压缩波在试样的另一边缘反射为拉伸波返回试样时对裂纹加载,并使用焦散线法进行测试。实验中得到的裂

纹尖端加载率高达 10^7 量级，并发现断裂韧性同准静态情况相比有显著增加。Dally 等^[46]使用了单边裂纹的平面楔子式试样。试样两端四个孔内装有火药作为实验中的动力源。实验中的测试使用了动光弹技术以及应变片技术，并将两种方法进行了比较。结果表明，任何一种方法得到的结果都是可靠的。Dally 等^[47]的研究表明对张开型裂纹仅用一个应变片就可确定动态应力强度因子 K_I^d 。该实验的缺点是实验中应力波到达裂纹的同时性和对称性难以保证。Kida 等^[48]进行了脆性材料的无裂纹悬臂梁冲击实验，也得到了一些有价值的结果。

目前，在动态断裂的实验研究中，较低加载率下的液压伺服和Charpy撞击实验已有一定的标准可循，实验已较规范，实验结果也比较可靠。但在更高加载率下的应力波加载实验技术，还无一定的标准可循。目前得到较多应用并起主导作用的是分段式Hopkinson杆应力波加载技术和平板撞击实验技术，实验结果也有较高的可信度。

8 动态断裂测试技术

上面在介绍加载技术的同时，也介绍了相应的测试技术。由于应变片测试具有简单，适用，经济等优点，因而得到了广泛的应用，但也有其局限性，它只能对裂纹开始扩展瞬间以前的行为进行测试，而对裂纹开始传播后行为的测试是无能为力的，后者的测试只能求助于基于应力分析的光学方法和高速摄影记录技术。由于裂纹传播行为受到裂纹尖端很高的局部奇异应力的影响，裂纹传播路径经常是无法预测的，因此实验研究要考虑全场并采用高分辨率的光学方法。光弹和焦散线测试技术用于材料断裂行为的研究最为合适，它们不仅能用来测试裂纹的传播行为，而且还可用来测试裂纹开始传播前的行为同样能得到满意的结果，因而得到了最为广泛的应用。

将光学方法用于动态断裂研究，最难解决的问题是如何记录表示瞬间应力状态的条纹图。现在已有多种记录方法，其中包括高速摄影机^[49,50]，Cranz-Schardin摄影机^[51,52]，激光记录系统和频闪观测系统等^[53,54]。由于Cranz-Schardin多火花高速记录系统具有经济，适用，能同时记录多幅照片的特点，所以应用最广泛。该系统的基本组成如图18所示^[55,56]。使用时首先将放电器充以直流高压(15000 v)，当受到信号触发时，放电器以可控的时间方式依次放电，产生一系列高强度、短延时的光脉冲。典型光脉冲的上升时间大约为100 ns，接着按指数衰减。在1/3最大光强时测得的总脉冲时间(等于曝光时间)为400 ns到500 ns。脆性聚合物中裂纹传播速度大约为每秒400 m，因此在曝光时间内裂纹扩展大约为0.2mm。Cranz-Schardin记录系统的幅频可在 2×10^4 到 80×10^4 幅每秒之间变化。当系统被用于传播裂纹的止裂研究时，使用幅频 2×10^4 幅每秒，观测时间达1.2 ms。而对裂纹分叉的研究，通常使用的幅频为 10^5 至 2×10^5 幅每秒。更高的幅频则被用于波速远高于裂纹传播

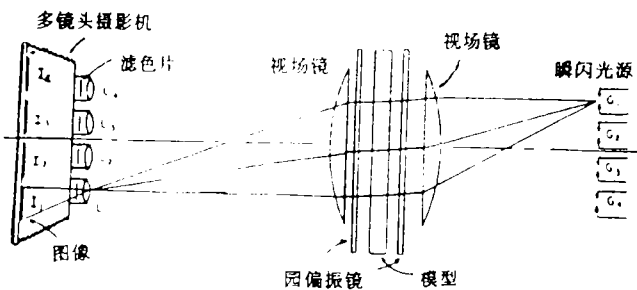


图18 典型的多火花高速光弹记录系统

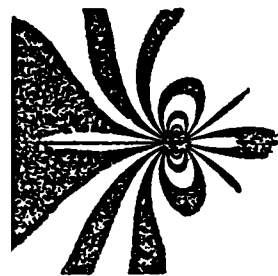


图19 高速裂纹尖部的等差线图

速度的应力波传播效应的研究。在裂纹传播过程的研究中，使用最早的Cranz-Schardin记录系统为6火花单位，后来又出现了16火花单位和24火花单位等。我国普遍使用的是16火花单位的国产WZDD-1型多火花动态光弹仪。

8.1 动光弹技术

用于动光弹实验的Cranz-Schardin记录系统如图18所示。使用了一对视场(物)镜来控制实验中的光路，以适当的方式将光脉冲透过模型传到底片上。脆性聚合物有机玻璃100的裂纹高速传播的等差线条纹图如图19所示。裂纹尖端区的等差线条纹图为得到以时间为函数的瞬态应力强度因子 K_I^d 和裂纹尖端的传播速度 v 提供了必要的依据。

Irwin^[57]的研究表明由一条等差线条纹周线上进行的单点测量就可确定张开型的裂纹应力强度因子 K_I 。但Irwin的方程只在条纹倾角 θ_m 为73度和139度之间时才是正确的，而且Kobayashi^[58]发现 K_I 对测量 θ_m 的微小误差是很敏感的。为了避免这些错误，Kobayashi改进了Irwin的方法以差分方程形式来表示 K_I ，使用的数据则是由两条等差线条纹周线上的随机点 r_1 和 r_2 得到的。Smith^[59]考虑了张开型应力强度因子 K_I 和剪切型应力强度因子 K_{II} 同时存在的混合型情况，表明比值 K_{II}/K_I 与等差线的倾角 θ_m 有关，并可用二次方程表示。Sanford等^[60]进一步发展了Smith的工作，除 K_I 和 K_{II} 外，还包含了远场应力 σ_{∞} 。分析方法也从选择点的方法变为多点方法以改进确定未知量 K_I 、 K_{II} 和 σ_{∞} 的精度。

8.2 焦散线技术

焦散技术是Manogg^[61]在1964年提出的，许多研究者^[62,63]又在此基础上进行了改进。焦散线光学阴影法的基本原理如图20所示。这种方法用平行光束照明载荷作用下的预裂纹试样。当试样受到载荷作用时，由于应力集中，裂纹尖端附近区域的物理条件将发生变化。对透明试样，试样厚度和材料折射率都会减小，因此包围裂纹尖端的区域将起到一个发散透镜的作用，光线被向外折射。结果，在试样后部距离为 Z_0 的屏幕(像平面)上，可以观察到被一条亮曲线包围的阴影区，这条曲线被称为焦散线。图20中还示出了不透明钢试样的情况。对于此种情况，由于试样表面的变形，入射到裂纹附近区域的光线将被反射到中心线上。在试样后部距离为 Z_0 的虚像平面上，反射光的延长线形成了与在透射情况下得到的相似的图形。因此得到了相似的焦散线。Manogg由围绕裂纹尖端的线弹性应力场计算了I型裂纹的阴影图。对光学各向同性材料将得到一条焦散线，而对各向异性材料将分开为两条焦散线(图21)。

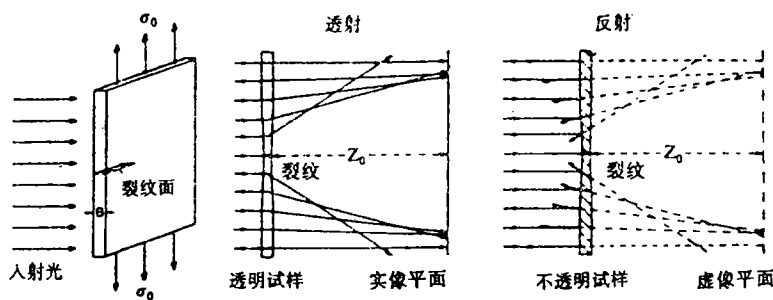


图20 焦散线法基本原理

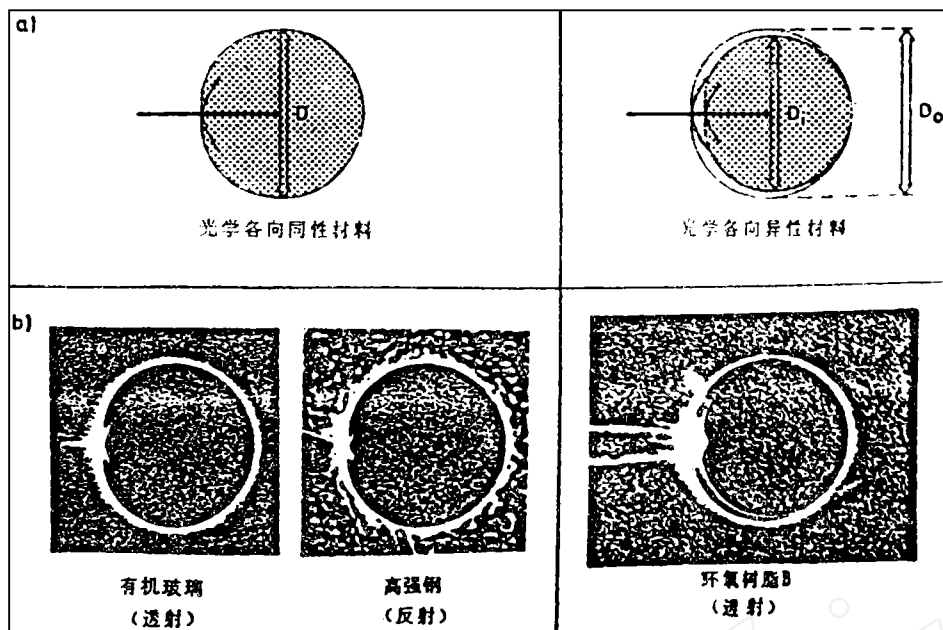


图 21 I 型焦散线 (a) 计算得到 (b) 测量得到

焦散线所包围阴影部分尺寸的大小与裂纹尖端的应力强度有关。焦散线直径 D 和应力强度因子 K_I 的关系可由定量表达式给出^[63]。一般有 $K_I \propto D^{5/2}$ 。裂纹尖端焦散线从形式上看比动光弹的等差线要简单，处理起来也容易，因此焦散线技术很适用于对复杂现象的研究，如动态断裂等。目前又出现了双焦散线方法^[64]，但应用还很少。动态云纹法作为一种有效的测试手段也在动态断裂研究中得到了一定的应用^[65]。

9 结 语

纵观所述的各种动态断裂加载和测试技术，每一种方法都有其缺点和不足。就目前的发展情况看，摆锤和落重式冲击实验中的三点弯曲实验仍占主要地位，但由于得到的加载率有限，一般只能在 10^3 到 $10^5 \text{ MPam}^{1/2}/\text{s}$ 量级内变化，许多学者作了大量工作发展新的实验技术，以提高实验中的加载率，为此基于分段式 Hopkinson 杆原理的应力波加载技术得到了发展，并愈来愈受到重视。

目前，动态断裂实验技术是百花齐放，种类繁多，而且各有其优缺点，因此有必要进行各种实验技术之间的对比实验，以考察每种方法的可靠性和适用范围，得到较为理想的动态断裂实验技术，并在此基础上作进一步的发展。以后还需要开展大量实验研究以考察材料断裂韧性随加载率的变化情况。关于运动裂纹的动态断裂韧性测试技术本文没有涉及，今后将专门论述。对于高加载率下断裂行为的研究在我国开展的还很缓慢，有待于广大力学工作者去努力探索。

本工作得到国家自然科学基金部份资助，在此表示感谢。

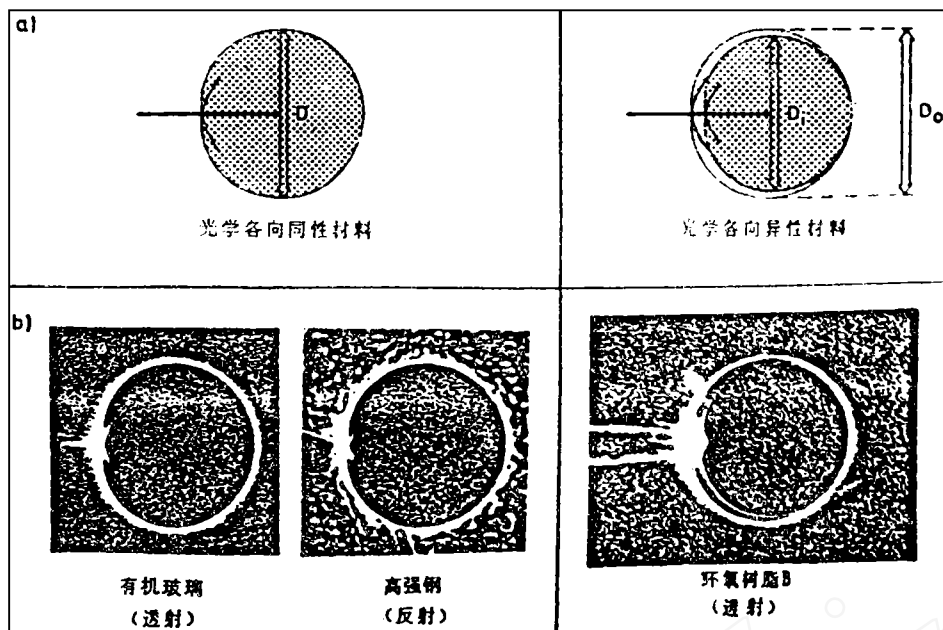


图 21 I 型焦散线 (a) 计算得到 (b) 测量得到

焦散线所包围阴影部分尺寸的大小与裂纹尖端的应力强度有关。焦散线直径 D 和应力强度因子 K_I 的关系可由定量表达式给出^[63]，一般有 $K_I \propto D^{5/2}$ 。裂纹尖端焦散线从形式上看比动光弹的等差线要简单，处理起来也容易，因此焦散线技术很适用于对复杂现象的研究，如动态断裂等。目前又出现了双焦散线方法^[64]，但应用还很少。动态云纹法作为一种有效的测试手段也在动态断裂研究中得到了一定的应用^[65]。

9 结 语

纵观所述的各种动态断裂加载和测试技术，每一种方法都有其缺点和不足。就目前的发展情况看，摆锤和落重式冲击实验中的三点弯曲实验仍占主要地位，但由于得到的加载率有限，一般只能在 10^3 到 $10^5 \text{ MPam}^{1/2}/\text{s}$ 量级内变化，许多学者作了大量工作发展新的实验技术，以提高实验中的加载率，为此基于分段式 Hopkinson 杆原理的应力波加载技术得到了发展，并愈来愈受到重视。

目前，动态断裂实验技术是百花齐放，种类繁多，而且各有其优缺点，因此有必要进行各种实验技术之间的对比实验，以考察每种方法的可靠性和适用范围，得到较为理想的动态断裂实验技术，并在此基础上作进一步的发展。以后还需要开展大量实验研究以考察材料断裂韧性随加载率的变化情况。关于运动裂纹的动态断裂韧性测试技术本文没有涉及，今后将专门论述。对于高加载率下断裂行为的研究在我国开展的还很缓慢，有待于广大力学工作者去努力探索。

本工作得到国家自然科学基金部份资助，在此表示感谢。