

裂纹动态扩展速度特性的实验研究

刘再兴

(华侨大学)

提要 本文介绍一种测量裂纹快速扩展速度的薄膜电位法, 该方法具有精度高、记录直观、不受干扰等优点, 特别适用裂纹长距离快速扩展的瞬时速度测试。采用此法研究了有机玻璃 SEN 试件的裂纹快速扩展过程, 对实验结果作了分析讨论, 得到断裂速度-名义断裂应力的经验关系式。

关键词 动态断裂; 裂纹扩展; 薄膜电位。

一、引言

近几十年来, 动态断裂问题日益引起人们的重视, 不少学者已做过大量的理论分析和实验研究工作, 其中, 裂纹快速扩展速度的实验测试是颇为重要的一个方面, 对于深入了解失稳断裂机理和将理论结果应用到工程实践中都是不可缺少的。

裂纹扩展速度的理论分析, 最早有 Mott 的工作^[1], 他导出无穷大板 I 型裂纹的速度表达式, 并提出极限速度的概念。其后, Roberts 和 Wells^[2]计算得到理论极限断裂速度:

$$v_m = 0.38 v_s = 0.38 (E/\rho)^{1/2} \quad (1)$$

式中 E 为材料弹性模量, ρ 是材料密度。

1960年, Berry^[3]指出 Mott 分析中的错误, 推导出另一修正的裂纹扩展速度方程:

$$v^2 = (0.38 v_s)^2 \left(1 - \frac{a_0}{a} \right) \left(1 - (n-1) \frac{a_0}{a} \right) \quad (2)$$

a_0, a ——裂纹的初始长度, 瞬时长; $n = 2(\sigma_c/\sigma_I)^2$ σ_c ——临界应力; σ_I ——名义断裂应力。

已发表的一些文献^[4-6]表明, 实验测试结果基本上在式(2)指示的范围内, 证明式(2)较准确地描述了弹性材料裂纹快速扩展速度的规律。但对式中 v 与 σ_I 的关系, 则未见有详细讨论。此外, 实验发现不同材料测得的 v_m 在 $0.2 \sim 0.38 v_s$ 间变化, 且同一材料各个试件的最大断裂速度亦非一定值^[5,7], 这说明是否存在一如(1)式所示的理论极限断裂速度, 亦有待进一步研究。

裂纹扩展速度的测量, 目前较广泛使用的是高速摄影和导电栅法(速度计)^[8]。但前者分辨率低, 操作困难, 设备昂贵, 后者同样有精度低, 记录不直观等缺点。特别是, 此两种方法所测的结果仅是某一时间间隔裂纹扩展速度的平均值, 不利于研究动态断裂的瞬时特性。此外, 超声表面波和高频阻抗等技术, 由于易受外界干扰, 不易成功应用而未能推广使用。

为了能连续地测定裂纹长距离快速扩展的瞬时速度, 本文介绍了一种简便有效的薄膜电位法。该方法不仅具有精度高, 记录直观, 不受干扰等优点, 且操作简单, 能同步记录与速

度相关的某些参数(如载荷、应变等),特别是该方法可较容易地推广使用在工程结构中的裂纹速度测试,这对于动态断裂和止裂理论的实际应用具有重要的意义。用有机玻璃试样做的实验结果证明,薄膜电位法确是一种可靠而实用的方法,对实验结果作了分析讨论,得到断裂速度与名义断裂应力的经验关系式。

二、实验装置与测量原理

(一) 实验装置

实验装置如图1所示。在室温中,试件由普通拉伸机缓慢加载直至断裂,断裂过程的裂纹扩展长度-时间($a-t$),载荷-时间($P-t$)关系由示波器同步记录,照相复制。

试件采用单边缺口(SEN)中心加载形式,为保证获得均匀拉应力,试件长宽比取为4。裂纹的预制用锯子锯成钝缺口或再用薄刀片割制成尖裂纹。试件材料为有机玻璃,其基本参数列于表1。

表1 国产有机玻璃的物理参数

E	μ	ρ	$\sigma_{0.1}$	σ_b	K_{IC}	v_m	v_c
$G N/m^2$		g/cm^3	MN/m^2	MN/m^2	$MN/m^{3/2}$	m/s	m/s
2.33	0.35	1.15	25.0	45.5	1.18	547	1439

表中: μ ——泊松比, K_{IC} ——断裂韧度。

(二) 薄膜电位法的测量原理

测量原理可参见图2。

在试件表面裂纹将通过的路径上粘贴一条状金属薄膜,作为传感元件,当裂纹扩展时,薄膜将被同时撕裂(实验中曾观察到,在裂纹未充分分岔的地方,金属膜断开的尖端正好与裂纹尖端重合,

证明实际情况确是如此),引起 $m-m$ 两点间电阻值的变化,故金属膜可相当一

可变电阻。设薄膜具有均匀厚度 δ , 膜宽 $2B$, 则当裂纹扩展了长度 Δa 时,电阻值的增量为

为 $\Delta R = \frac{2 \alpha \Delta a}{B \delta}$ (α 为金属膜材料的导电率),稳流电源输出的电流强度 I_0 由电流表监测,由于测量过程中 I_0 保持恒值,相应的输出电压变化为:

$$\Delta U = \Delta R I_0 = \frac{2 \alpha I_0}{B \delta} \Delta a = k \Delta a \quad (3)$$

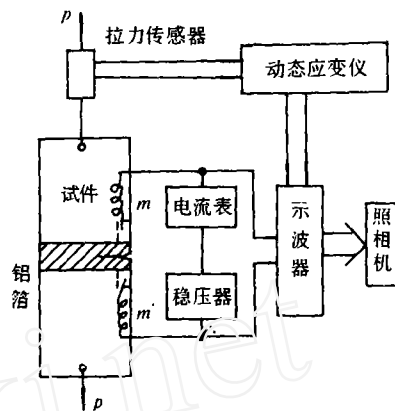


图1 实验装置示意图

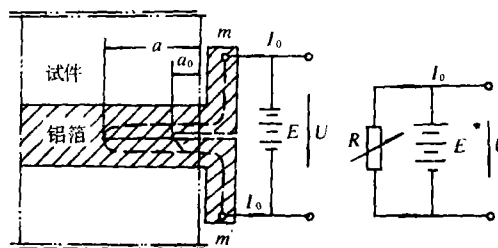


图2 测量原理简图

E ——稳流电压, I_0 ——电流路径, U ——输出电压。

式中 $k = 2\alpha I_0 / B\delta$ 称为灵敏系数, 当选定电流强度 I_0 , 金属膜材料和几何尺寸后, k 即为一常数.

式(3)说明 ΔU 是 Δa 的连续线性函数. 因此, 只要测出电压-时间 ($U-t$) 变化规律即可方便地换算成裂纹扩展长度-时间 ($a-t$) 关系, 从而求出每一瞬时的裂纹扩展速度.

(三) 标定

实验前必须检验(3)式的正确性并确定灵敏系数 k . 考虑到薄膜电位法是一简单直流电路, 不受频率响应的限制, 故可采用静态标定.

用锋利的刀片逐段划开金属膜, 模拟裂纹扩展, 同时记录相应的电压变化. 由测量原理可知, 薄膜电位法的精度很大程度上依赖于 k 值的精度.

为此标定时采用高精度的数字电压表显示电压变化, 而薄膜的割痕长度用30倍读数显微镜观测, 因此提高了 k 值的精度.

实验和标定中均采用0.0075mm厚的金属铝箔. 由于铝箔很薄且脆, 不致于使试件附加刚度而影响实验结果^[9]. 对取自不同位置的10片铝箔标定的结果表明, 铝箔的厚度确是均匀的, (3)式能很好得到满足, 且10个标定的 k 值基本相同, 最大偏差率为2.5%. 图3给出两种不同长度铝箔的标定曲线. 图中可见, 在实际测量范围内 $\Delta U - \Delta a$ 的关系线性度极好.

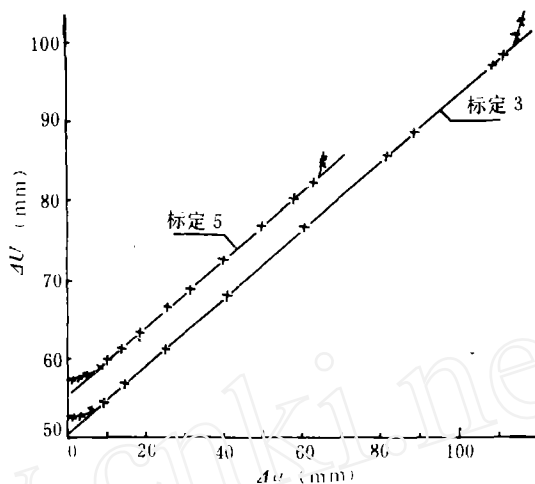


图3 $\Delta U - \Delta a$ 关系标定曲线

标定条件: 电流 $I = 0.5 \text{ A}$, 铝箔尺寸
(mm) 对标定 3 为 $116 \times 20 \times 0.0075$,
对标定 5 为 $65 \times 20 \times 0.0075$

三、实验结果与分析讨论

(一) 裂纹扩展规律:

典型的裂纹扩展长度-时间, 载荷-时间同步记录结果见图4. 图中 $P-t$ 曲线清楚表明, 在

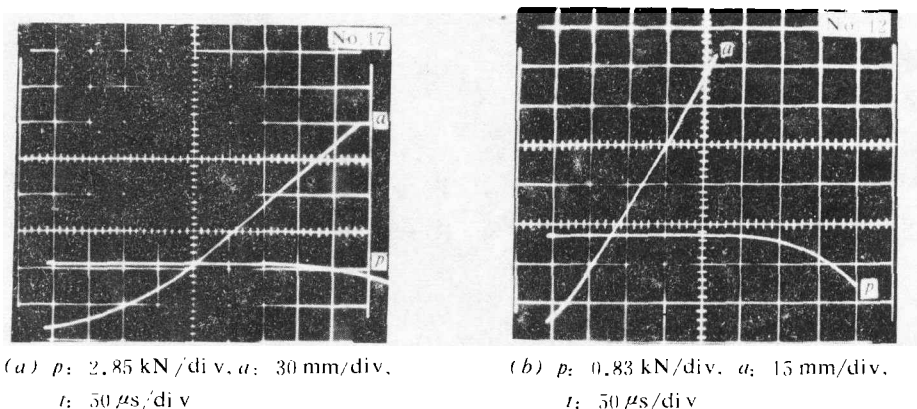


图4 裂纹扩展长度和载荷随时间变化的记录

断裂的整个过程中, 载荷基本上保持一定值, 故可认为本实验属于恒载荷条件。

根据图 1 中 $a-t$ 曲线计算的无量纲裂纹扩展速度-裂纹长度变化规律示于图 5, 为便于比较同时给出了式 (2) 的两条极限理论曲线。从图中可见, 在 $a/a_0 = 4 \sim 5$ 时, 实验结果基本上在 Berry 理论指示的范围内, 但在裂纹扩展初始阶段, 实测值明显低于理论值。这是因为: 有机玻璃是种粘弹性材料, 在裂纹扩展的低速阶段, 粘性阻尼的作用使裂纹加速过程变缓, 而式 (2) 的推导中并未考虑这一因素, 所以产生上述偏差。由于裂纹在高速扩展时往往呈现脆性^[10], 故这一阶段理论值与实验结果较一致, 该现象文献[11]早有报道, 并作过详细讨论。

(二) $v_f-\sigma_f$ 关系

实验测试结果发现, 只要裂纹扩展量足够大, 裂纹都经由加速过程逐渐趋近一常速阶段。测得的常速阶段断裂速度 v_f 在 $0.51 v_m \sim v_m$ (即 $0.2 v_s \sim 0.38 v_s$) 间变化, 且呈现随名义断裂应力 σ_f 的增加而增大的规律。此现象在不同条件的实验中, 亦曾被观察到^[17-12], 但未见有进一步的讨论。为研究 $v_f-\sigma_f$ 关系, 我们采用最小二乘法处理了实验数据, 得到下述经验公式, 并将结果示于图 6:

$$\text{尖裂纹} \quad v_f/v_m = 1.113 - \frac{0.247}{\sigma_f} \quad r = 0.981 \quad (4a)$$

$$\text{钝裂纹} \quad v_f/v_m = 0.986 - \frac{0.226}{\sigma_f} \quad r = 0.961 \quad (4b)$$

由式 (4a) 可知, 当 $\sigma_f \rightarrow \sigma_{0.1}$ 时, v_f 趋近于极限速度 v_m 。但一般情况下含尖裂纹的试件总是在低于 $\sigma_{0.1}$ 的应力下就断裂, 这意味着有机玻璃确实存在一如式 (1) 所示的理论极限断裂速度, 且 v_m 仅当 $\sigma_f \rightarrow \sigma_{0.1}$ 时才能达到。

对钝裂纹情况则不同, 断裂总是在较大的甚至远大于 $\sigma_{0.1}$ 的应力下才发生。事实上, 钝裂纹根部并不存在应力奇异性, 试件的断裂似乎应认为是强度破坏的问题, 而不应作为断裂力学意义上的破坏来处理。因此当 $\sigma_f = \sigma_{0.1}$ 时, 裂纹速度并不能达到极限值。但在强度破坏的极限情况下即 $\sigma_f = \sigma_b$ 时, 由 (4b) 算

得 $v_f = 0.937 v_m$, 与 v_m 相差 6.3%。由于实验和曲线拟合中的误差, 仍可认为钝裂纹同样以 v_m

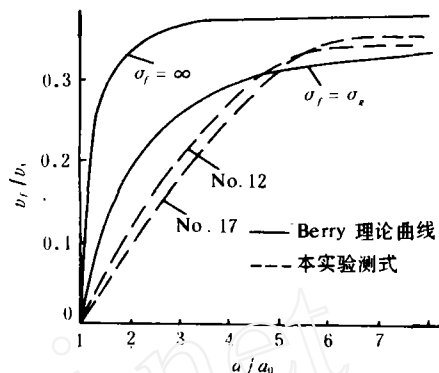


图 5 裂纹扩展速度-裂纹长度关系

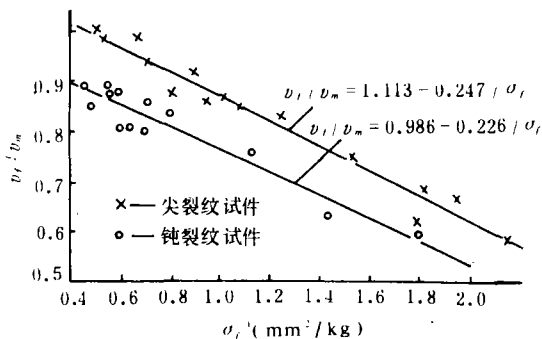


图 6 断裂速度-名义断裂应力关系

为理论极限速度。至于钝裂纹经验关系式的相关性((4)式中 r 为相关系数)较差的原因,可能是预制的钝缺口半径并不一致造成的。

从图(6)和式(4)可见,在同样的断裂应力下钝裂纹的速度总比尖裂纹的为低。这可能有两个原因:*a*,钝裂纹试件在断裂前虽贮存了较多的能量,但因裂纹前缘应力集中程度较弱,存在较大范围的塑性变形,消耗了大量的能量,使动能大大减少。*b*,由文献[13]列出的表中可知钝缺口有较大的表面能,从试件断口亦观察到钝裂纹试件的断裂表面比尖裂纹的为粗糙,较大的表面能消耗了较多的能量,造成裂纹速度的降低,产生上述现象。当然,此问题的真实原因仍有待进一步研究。

(三) $v-k_{Ia}$ 关系

采用文献[14]给出的(4)(5)(8)三式,计算了动态应力强度因子 k_{Ia} ,得到的 $v-k_{Ia}$ 关系示于图(7)。图中可见, $v-k_{Ia}$ 关系曲线近似为一倒L形。在裂纹扩展的初始阶段, k 的微小增加将引起裂纹速度急剧增大,这一阶段的 $v-k_{Ia}$ 关系近似为线性。在 k_{Ia} 达到初始 k_{I0} 值的大约1.6倍时,开始出现一很小的过渡区,最后当 $k_{Ia}/k_{I0} \approx 1.8$ 时,裂纹进入恒速阶段而 k_{Ia} 则迅速增加。相似的结果和讨论可参考文献[15, 16]。关于 $v-k_{Ia}$ 关系,还有不少文献作过讨论,但因动态应力强度因子的含义和计算方法各文献说法不一,分析讨论的结果亦不完全相同。

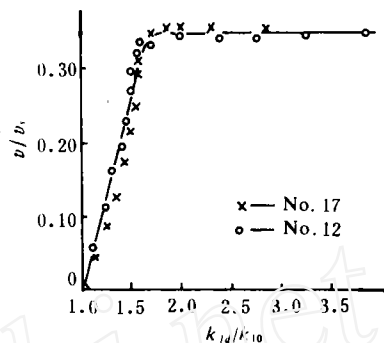


图7 无量纲的 $v-k_{Ia}$ 关系曲线

四、结 论

实验证明,薄膜电位法确具有精度高,操作简便,不受干扰等优点,是一种适于测试裂纹长距离扩展速度的实用方法。

失稳裂纹扩展有一常速阶段,此常速值随名义断裂应力的增加而增大。实验结果得到有机玻璃的 $v/v_m - \sigma_f^{-1}$ 线性经验关系式。

有机玻璃存在一理论极限断裂速度 $v_m = 0.38 \cdot (E/\rho)^{1/2}$ 。

致谢:本文的工作得到华中工学院力学系付教授刘再华同志的指导和大力帮助,谨此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Mott, N. F., *Engineering*, **165** (1948), 16.
- [2] Roberts, D. K. and Wells, A. A., *Engineering*, **178** (1954), 820.
- [3] Berry, J. P., *J. Mech. Phys. Solids*, **8** (1960) 194.
- [4] Anthony, S. R., Chabb, J. P. and Congleton, J. *Phil. Mag.*, **22** (1970) 1201.
- [5] Kerkhof, F., *Proc. Inter. Conf. on Dynamic Crack Propagation*, Ed. G. C. Sih, (1973), 3.
- [6] Congleton, J. and Petch, N. J., *Phil. Mag.*, **16** (1967) 749.
- [7] Paxsson, T. L. and Lucas, R. A., *Proc. Inter. Conf. on Dynamic Crack Propagation*, Ed. G. C. Sih (1973), 415.

- [8] Erdogan, F. , *Fracture*, I Ed. Liebowitz, H. . (1968), 497.
- [9] Crosley, P. B. and Ripling, E. J. , Fast Fracture and Crack Arrest, ASTM STP 627 (1977), 203.
- [10] Stroh, A. N. *J. Mech. Phy. Solids*, 8 (1960), 119.
- [11] Qalaney, E. N. and Brace, W. F. *J. Appl. Phys.* 31 (1960), 2233 .
- [12] Schardin, H. , *Fracture*, Ed. B. L. Arebach et al. (1959), 297.
- [13] Berry, J. P. *Fracture*, V. Ed. Liebowitz, H. . (1968), 38.
- [14] Rose, L. R. F. , *Inter. J. F.* 12 (1976), 779.
- [15] Kobayashi, T. and Dally, J. w. , Fast Fracture and Crack Arrest, ASTM STP 627 (1977), 257.
- [16] Green, A. K. and Pratt, P. L. , *Eng. F. Mech* 6 (1974), 71 .

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE VELOCITY CHARACTERISTICS OF DYNAMIC CRACK PROPAGATION

Liu Zaixing

(Hua Qiao University)

ABSTRACT A method which is named metallic-foil electric-potential method for measuring the velocity of fast crack propagation was introduced. It possesses the advantages of high accuracy, record intuition, free from disturbance, etc. and is especially applicable to measure the instantaneous velocity of a crack fast propagating for long distance. Using this method, an experiment with PMMA SEN specimen has been performed to investigate the fast crack propagation. The experimental results have been discussed and the fracture velocity-nominal fracture stress empirical relation obtained.

KEY WORDS fracture, crack propagation, metallic-foil electric-potential.