

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

材料高應變率與動態破裂韌度之非接觸量測技術研究

A Research of High Strain Rate Test and Non-contact Dynamic Fracture Toughness Method

計畫編號：NSC 89-2212-E-002-129

執行期限：89年08月01日至90年10月31日

主持人：吳恩柏 國立台灣大學應用力學研究所

一、中文摘要

本報告以壓克力為試驗材料，探討其在動態加載時之斷裂韌度(dynamic fracture toughness, K_{I_d})量測，報告中提出一種新的方法來進行動態斷裂韌度量測，並與以往的實驗結果做一比較。

關鍵詞：壓克力、動態斷裂韌度

Abstract

This article provides a new method to obtain the dynamic fracture toughness of brittle material (PMMA). The final result shows a consistency with other experiment data presented before.

Keywords: PMMA, dynamic fracture toughness

二、緣由與目的

在實際工程問題中裂縫處於動態加載下的情形是較為常見且普遍的，許多實驗證明裂縫在動態加載下的行為與靜態加載時不同，因此裂縫在動態加載下的行為更為人所關心，本報告中將探討材料在受撞擊加載下其動態斷裂韌度之變化。

對於動態斷裂韌度的量測方法，常見的有：焦散法(caustics method)[1]、動態光彈法(dynamic photo-elasticity method)[2]、動態應變場量測法[3]、載荷法(force method)[4, 5]、位移法(load-point displacement method)[6]

焦散法在動態斷裂力學的研究上為一強而有力的量測法，但受限於取像頻率及價格的因素，因此在研究脆性材料的動態斷裂問題時仍有許多學者採取載荷法，載荷法在實驗設備上較焦散法更為簡便。在本報告中將以載荷法進行試驗，與以往不同的是我們將以撞擊桿直接撞擊試片，利用暫態雷射都普勒測速系統(TLDA)量測撞擊桿之應力波傳質點速度歷程，並進一步反算撞擊端之外力與位移，此即作用於試片之動態加載，並利用此外力計算試片之動態斷裂韌度。為了與以往的哈普金生桿法做一區別，我們將此法稱為直接撞擊法(direct impact method, DIM)，利用直接撞擊法可以大大提

升加載速率，對於進行在高加載速率下之動態斷裂韌度量測無疑是一大突破。本章中將同時以哈普金生桿法(Hopkinson pressure bar, HPB)量測試片之動態斷裂韌度，以比較此兩種方法在動態斷裂韌度量測上之差異。

三.實驗原理及方法

在以往許多學者的研究中認為，試片動態斷裂韌度值的決定只須記錄動態加載時作用於試片上之外力，將外力歷程代入靜態應力強度因子，其最大值便是試片的動態斷裂韌度，這一點後來經由Kalthoff [7]以實驗證明是不正確的，完整的動態分析，慣性效應必須予以考慮。

實驗原理

為了免除邊界的不確定性，在本報告中我們將以哈普金生桿法及直接撞擊法進行一點彎矩實驗，並利用 I. V. Orynyak [8]在 1998 年所提出的新模型作為往後計算動態應力強度因子的依據，如下：

$$K_I(t) = \frac{\epsilon K_S z_1}{P_0(t)} \int_0^t P_0(\tau) \sin \epsilon(t - \tau) d\tau \quad (1)$$

其中 $z_1 = L/2S$ ，L 為全長，S 為靜態試驗三點彎矩之跨距(span)； K_S 為準靜態斷裂韌度； $P_0(t)$ 為作用於撞擊端的力； ν 為波生比。

實驗方法

以載荷法進行動態斷裂韌度實驗，必須量測出作用於試片上之作用力，本報告中我們將以 HPB 及 DIM 兩種方法進行動態斷裂韌度量測實驗，簡述其實驗方法：

(1)哈普金生壓力桿法

HPB 之實驗架設如圖 1，以撞擊桿(striker bar)撞擊入射桿(incident bar)輸入一入射波(incident wave)，並撞擊試片進行一點彎矩實驗，入射波傳遞至試片時一部份傳入試片(傳輸波, transmitted wave)，另一部份反射進入入射桿中(反射波, reflection

wave)，利用黏貼在入射桿上之應變規量測入射波及反射波所造成的應變訊號，將應變訊號經應力波頻散校正法並疊加兩波可求得撞擊試片端之作用力：

$$P(t) = EA(v_i(t) + v_r(t)) \quad (2)$$

將反算出之作用力代入(1)式可求得試片在受撞擊時之動態應力強度因子。

(2)直接撞擊法

DIM 之實驗架設如圖 2，實驗時以長 200mm 及 500mm 的半圓頭撞擊桿直接撞擊試片進行一點彎矩試驗，利用 TLDA 量測撞擊桿上之應力波傳質點速度歷程，速度歷程經由一維 Love 波傳理論進行應力波頻散校正可反算撞擊端之作用力，同樣將反算出之作用力代入(1)式求得試片在受撞擊時之動態應力強度因子。

由於我們所使用的材料為脆性材料，可以線彈性斷裂力學討論之，因此當裂縫開始傳播時(起裂)之動態應力強度因子即為其動態斷裂韌度。在本報告中將以應變規量測裂紋尖端附近之應變場變化來決定起裂點，應變規中心黏貼位置在距裂縫尖端 1.5mm 處($r = 1.5\text{mm}$, $\theta = 90^\circ$)，對於脆性材料而言當起裂發生後，裂紋迅速擴展傳播，如此將造成應變規量測處之應變場瞬間下降，因此由應變規陡降處即可判定為起裂點，必須注意的是雖然應變規黏貼的非常靠近裂紋尖端，但終究不可能黏貼於裂縫處，因此實際上的起裂點並非應變規陡降處，不過我們可以應力波傳的觀點予以修正。

四.實驗結果與討論

(1)哈普金生壓力桿法

如圖 3，圖中實線部份代表撞擊力歷程，虛線部份代表裂紋尖端之應變訊號，原形點則代表由(1)式所計算出來試片之動態應力強度因子，由圖中可明顯看出應變訊號在接近 90 μ s 時出現陡降情形，以此點當作起裂點，同時可讀出 K_{Id} 及 \dot{K}_{Id} 。從圖 3 中可發現當撞擊力結束後應變訊號微降又繼續上升持續到 90 μ s 時陡降，若以陡降處當作起裂點則表示，在撞擊過程中試片並未起裂而是在撞擊力結束後才起裂，這是由於撞擊結束後試片中之動能分布不均勻，撞擊區域之動能大於兩旁，因此在撞擊結束後試片仍然持續變形，直到 90 μ s 才發生斷裂。這種情形，在 DIM 實驗中以低速撞擊試片時也會發生，因此若希望由撞擊力歷程而判斷起裂點(例如：以力量峰值當作起裂點[6])在低速撞擊中是不可行的。

(2)直接撞擊法

如圖 4，圖中實線部份代表撞擊力歷程，虛線部份代表裂紋尖端之應變訊號，原形點則代表由(1)式所計算出來試片之動態應力強度因子，以應變訊號陡降處當作起裂點，同時可讀出 K_{Id} 及 \dot{K}_{Id} 。

觀察應變訊號與撞擊力訊號，就整體上來說隨著撞擊初速的提升應變訊號陡降處(起裂點)會不斷提前，在極低速撞擊時起裂點發生在撞擊結束後，隨著撞擊初速的提升起裂點將漸漸與力量峰質同時發生，並且這個情形在越高速越明顯，因此在高速撞擊時應以力量峰質當作起裂點。

結果與討論

圖 5 為以 HPB 及 DIM(200mm 及 500mm)兩種不同的實驗方法同樣套用 Orynyak 之動態應力強度因子模型所求解出之動態斷裂韌度(K_{Id})對動態斷裂韌度變化率(\dot{K}_{Id})關係圖。其中十字形點為以材料試驗機進行不同加載速率實驗並套用靜態斷裂韌度公式所得出之結果。由圖中可說明：(1)以不同質量(不同長度、材質)之撞擊桿進行 DIM 實驗所求解出之 K_{Id} 一致；(2)以 HPB 及 DIM 兩種不同的實驗方法所求解出之 K_{Id} 一致。

進一步與以往的文獻比較，如圖 6，圖中三角形點為 Wada 等人所發表之結果[5]，而十字形點則為我們之實驗結果，兩者有差不多的趨勢。由此我們可證明以 DIM 配合 TLDA 進行動態斷裂韌度量測是一可行且嶄新的方法，並且其加載速率將可較以往大為提高。對於強度較高的材料(如：金屬)，由於需要高的加載速率使產生斷裂，因此無法以 HPB 進行，必須以落錘或 Charpy 試驗機進行實驗，但以落錘或 Charpy 試驗機所量測出之撞擊力歷程其準確性低，經過濾波平滑後的撞擊力及位移歷程可信度較低，再者其加載速率無法提高。因此對於高強度材料無法以落錘、Charpy 試驗機或 HPB 進行高加載速度之動態斷裂韌度實驗時，DIM 為一可行的辦法。

對於壓克力材料的動態斷裂韌度量測我們發現當 $\dot{K}_{Id} = 1 \times 10^4 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ 時其動態斷裂韌度 K_{Id} 具有一最小值，在 $\dot{K}_{Id} < 1 \times 10^4 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ 時其 K_{Id} 與 K_{Ic} 相差不多，而當 $\dot{K}_{Id} > 1 \times 10^4 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ 時其 K_{Id} 有明顯上升的趨勢，並且隨著 \dot{K}_{Id} 的增加而提升。

五.計畫成果自評

在本報告中我們分別以 HPB 及 DIM 配合 TLDA 及應力波頻散校正量測壓克力試片之動態斷裂韌度，發現其與以往之動態斷裂韌度實驗有一致的結果，證明在材料的動態斷裂韌度量測上，DIM 為一嶄新且可行的方法，並且其加載速度將較以往大為提高，對於高強度材料的斷裂行為相信 DIM 更能展現其優點。

六、參考文獻

[1] Kalthoff, J. F., "On the Measurement of Dynamic

Fracture Toughness-A Review of Recent Work”, *Int. Journ. of Fracture*, vol.27, pp.277-298, 1985.

- [2] Shukla, A., R. K. Agarwal and H. Nigam, “Dynamic Fracture Studies on 7075-T6 Aluminum and 4340 Steel Using Strain Gages and Photoelastic Coatings”, *Engineering Fracture Mechanics*, vol.31(3), pp.501-515, 1988.
- [3] Sun, Y. B., K. H. Lee and T. E. Tay, “Dynamic Fractures Study on CrNiMoV Alloy Steel under Different Heat Treatments and Impact Rates”, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, vol.17(8), pp.883-889, 1994.
- [4] Kobayashi, T., “Measurement of Dynamic Fracture Toughness Jid by Instrumented Charpy Test”, *Int. Journ. of Fracture*, vol.23, pp.R105-R109, 1983.
- [5] Wada, H., M., Seika, C. A., Calder and T. C., Kennedy, “Measurement of Impact Fracture Toughness for PMMA with Single-Point Bending Test Using an Air Gun”, *Engineering Fracture Mechanics*, vol.46(4), pp.715-719, 1993.
- [6] Bacon, C., J., Farm and J. L., Lataillade, “Dynamic Fracture Toughness Determined from Load-Point Displacement”, *Experimental Mechanics*, pp.217-223, September, 1994.
- [7] Kalthoff, J. F., S. Winkler and J. Beinert, “The Influence of Dynamic Effect in Impact Testing”, *Int. Journ. of Fracture*, vol.13, pp.528-531, 1977.
- [8] Orynyak, I. V. and A. J., Krasowsky, “The Modelling og Elastic Response of A Three-Point Bending Specimen Under Impact Loading”, *Engineering Fracture Mechanics*, vol.60(5-6), pp.563-575, 1998.

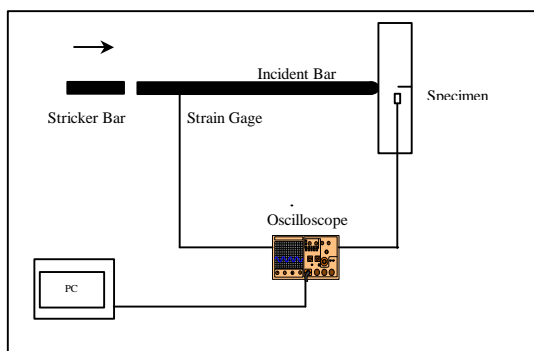


圖 1 HPB 之實驗架設圖

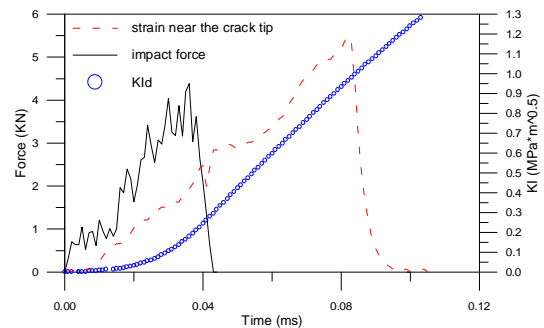


圖 3 典型 HPB 之撞擊力歷程及動態應力強度因子歷

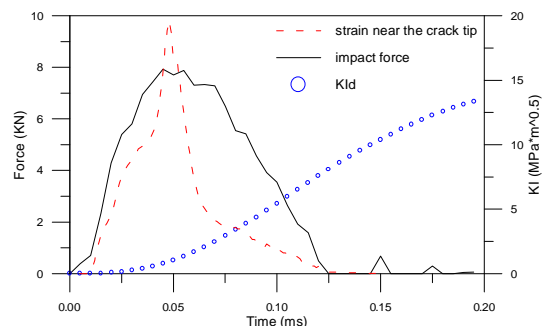


圖 4 典型 DIM(500mm Al bar)之撞擊力歷程及動態

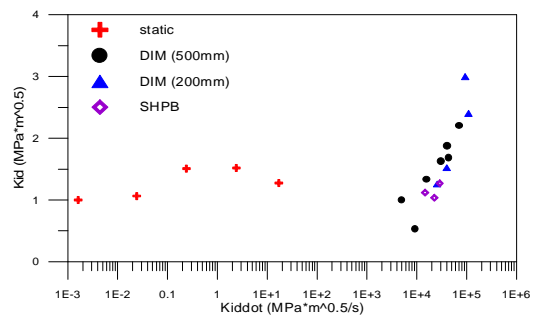


圖 5 壓克力試片之斷裂韌度與斷裂韌度變化率之關

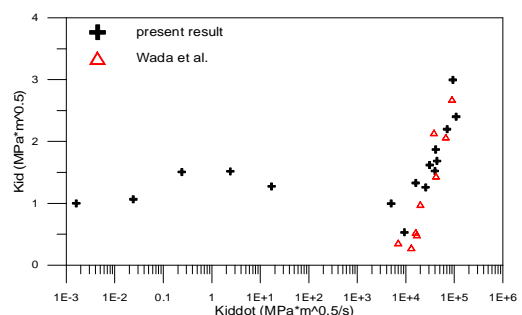


圖 6 壓克力試片之斷裂韌度與斷裂韌度變化率之關