

# 行政院國家科學委員會 八十八年度專題研究計畫進度報告

## 裂紋填充在疲勞裂紋止裂之探討 (II)

### Investigation on practical fatigue crack arrest using crack infiltration

計劃編號: NSC 89-2212-E-002-031

執行期限: 88年8月1日至89年7月31日

主持人: 單秋成

國立臺灣大學機械工程學系

計畫參與人員: 陳志宗, 蔡賜慶, 李仁志 國立臺灣大學機械工程學系

#### 一 中文摘要

本研究開發了一個連續填灌無電鍍鎳系統，可供線上修補疲勞裂縫，並證實填灌時撐開荷重愈高，裂縫減速愈明顯，隨負載應力比在修補後增加，減速效果雖略減，但仍有一定修補作用；至於動態線上修補，在負載頻率低於 5Hz 下，亦能有良好的裂縫修補效果；本研究同時成功建立了評估修補後裂縫生長行為之模式。

關鍵詞: 疲勞破壞修補，裂縫填灌法，裂縫減速，裂縫封閉預估模式，無電鍍鎳。

#### Abstract

A method of continuously infiltrating electro-less nickel plating solution into a fatigue crack has been established. It has been shown that such infiltration and nickel deposition, under static prop-opening load or dynamic cyclic loading, on crack surface can retard a fatigue crack and extend specimen fatigue life. A prediction model to estimate the crack growth behaviour following infiltration repair has also been established.

Keywords: Fatigue damage repair, crack infiltration, crack growth retardation, crack closure prediction model, electroless nickel plating.

#### 二 研究背景提要

疲勞斷裂是機械構件破壞的一個重要機制。傳統設計使用厚重的構件以傾力避免裂縫萌生，隨著科技進步，對機械結構要求其盡量輕巧而又能保障安全，在此條件下，防止裂縫萌生成為不十分實際可行，必須進而設法與裂縫共存，隨時監測裂縫的生長情形，並評估殘餘構件壽命及安全可靠度。除上述被動之監測外，如能主動對裂縫加以修補，使其減速甚至停止生長，亦不失為一個好方法。此方法對於採用『容損設計』(damage tolerant design) 之構件尤為重要，因後者體認到裂縫可藉由先天之缺陷而存在、或在使用期間不可避免地萌生；對此類構件，『容損』之概念就是祇要監測管理得當，構件仍能安全地使用，而恰當的修補一疲勞裂縫，正可延長這段安全使用的期間。

主持人過去數年發展出利用異物填灌以修補疲勞裂縫的方法[1-4]，國外也逐漸重視此一方法[5,6]，然之前的試驗，均在試片脫離試驗機以楔子協助撐開下進行，填充後尚需再靜置數天，以待填充物凝固，與實際構件在使用時線上動態受力之狀況相去頗遠。本計劃特開發不同之填灌方法，配合選用無電鍍鎳，不需在靜態施力下等待凝固，可以容許在現場進行線上之修補工作，對實務上之疲勞裂縫修補有應用價值。

### 三 實驗方法

本研究以 7075-T651 鋁合金作為試片基材，試片採 ASTM E647 緊湊試片 (Compact tension specimen)，試片寬 50 mm，厚 6mm；以 MTS 810 油壓動態測試系統進行疲勞試驗，並以人工調降負載以維持固定應力強度因子幅  $7 \text{ MPa} \sqrt{m}$ ，此外，並使用背面黏貼之應變計，加上 offset 修正法[7]以量測裂縫之封閉負載。

至於修補用之填灌方法，自試片頂部鑽洞直抵破斷面，利用瓶裝氮氣壓力將無電鍍鎳溶液不斷填灌到裂縫面上，並任其試片兩側表面流出回收，此系統見圖一。

### 四 結果與討論

#### 1. 不同應力比 R 撐開荷重 P 下靜態修補探討

填灌前  $R=0.1$ ， $\Delta K=7 \text{ MPa} \sqrt{m}$  預裂，裂縫以穩定速度成長，修補時以  $P=0.95 K_{\max}$  填灌無電鍍鎳溶液至其不再從試片兩側表面流出，結果裂縫馬上減速，再逐漸恢復原來生長速度，當 P 提高為  $1.2 K_{\max}$  時，填灌後裂縫經過一百多萬週次仍未見生長，此時把 R 提高為 0.2，裂縫始再生長，並逐漸恢復原生長速度，如 P 為  $1.5 K_{\max}$ ，則雖將 R 提高為 0.2，裂縫仍無生長跡象，R 增至 0.3 後，裂縫始開始生長；類似的現象，也可見於起始 R 為 0.3 及 0.5 的試驗。相關結果摘要於表一。

#### 2. 負載歷史對靜態修補之影響

此部份主要在模擬裂縫在一較低 R(0.1) 成長，經修補後，R 增加，欲探討其修補效果之變化。圖二比較當  $P=0.95 K_{\max}$ ，修補後維持  $R=0.1$  及使用  $R=0.2$  之差異，後者使減速效應減少幾乎一個級距；當 P 為  $1.2 K_{\max}$ ，如上所述：修補後原 0.1 應力比在一百萬週次內裂縫仍無生長，此時將 R 增至 0.2 則裂縫生長開始，但如修補後馬上使用  $R=0.2$ ，則裂縫仍無法生長，必須增至 0.3 裂縫始開始生長，而比較此二負載歷史所造成之修補後生長行為，卻極為類似(圖三)；圖四為

$P=1.5 K_{\max}$  時，負載歷史對修補後生長行為之影響。

#### 3. 動態線上修補

圖四為施行 1、5 及 10 Hz 循環負載中，動態進行無電鍍鎳溶液填灌下裂縫生長行為，在 1 Hz 之低負載頻率下，裂縫有愈長愈慢，趨向停止之態勢；在 5 Hz 下，裂縫生長漸次減慢一個多級距，並趨向一定值；負載頻率 10Hz 下，裂縫生長行為類似在 5 Hz 者，不過速度減慢所至之定值與無填灌之差異較少，僅約為無填灌生長速度之一半。

#### 4. 修補後生長行為之預估

裂縫經修補後生長行為之預估，可分兩層面進行：一為從實驗量測之裂縫封閉負載，利用 Elber[8]所提出之有效應力強度因子 ( $\Delta K_{\text{eff}}$ ) 修正之 Paris' law，其結果見圖二至圖四中之 diamond symbols。一般而言， $\Delta K_{\text{eff}}$  均低估裂縫的生長速度，其原因可能是鎳鍍層未能充份深入裂縫尖端範圍，以致裂縫封閉儀器感應到後方的裂縫面接觸訊號，而裂縫尖端仍處於張開狀態，仍看到較高之生長動力。

以上之評估須經實驗量測的過程，無法在修補前預作評估，此舉對瞭解修補之機轉有一定幫助，但較無實務價值。後者最理想的狀況是能事前預知修補結果，以便決定是否利用此法進行修補，因此本研究的另一個層面之預估，試圖從較基礎之破壞力學出發，計算填充物所造成之生長動力減低，從而推算其生長速度，此模型之示意圖見圖五，分析流程見表二，目前已就此模式發表了一篇期刊論文[9]。

### 五 結論

1. 本期計畫完成一個線上進行無電鍍鎳填灌系統，試片在受循環負載下仍能進行填灌。
2. 在各撐開荷重下，無電鍍鎳填灌均能使裂縫減速，其中以撐開荷重大於最大循環負載填灌者，可使裂縫停止生長。
3. 當裂縫在上述狀況下停止後，可於其 R 提高

0.1 至 0.2 下，繼續生長。

4. 當裂縫在靜態修補後停止生長，如馬上施以較高之應力比，修補效果雖然較差，但裂縫仍能維持一定之減速效果。
5. 以 5 Hz 以下循環負載下進行動態修補，對裂縫減速有顯著效果，10 Hz 負載下進行動態修補則修補效果較不明顯。
6. 發展出預估模式，可成功地在修補前即可預測裂縫生長行為。

### 五、參考資料

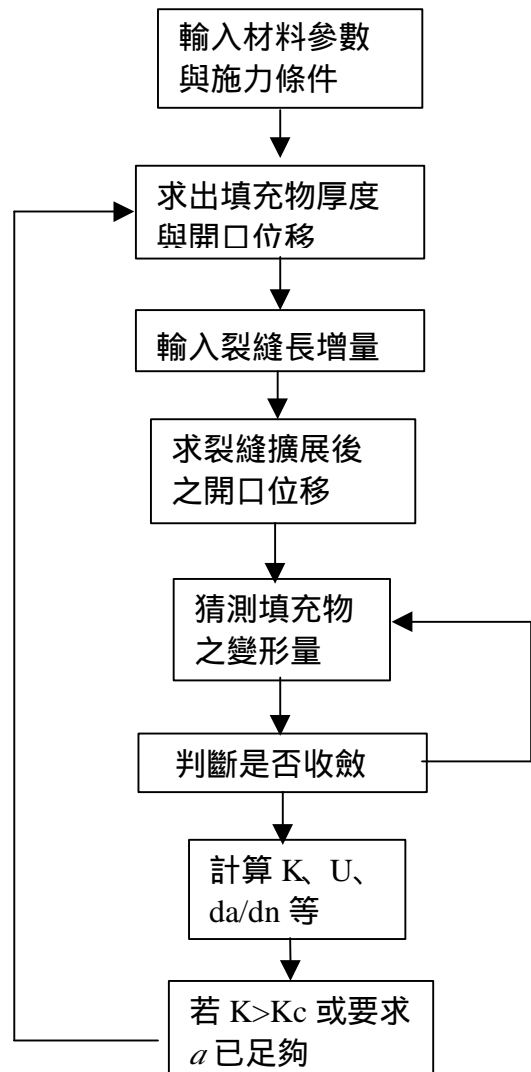
1. C. S. Shin, C. M. Wang and P. S. Song (1996) "Fatigue damage repair --- A comparison of some possible methods", International Journal of Fatigue, **18**, No.8. pp.535-546.
2. C. S. Shin and S. H. Hsu (1992) "Fatigue life extension by an artificially induced retardation mechanism", Engineering Fracture Mechanics, **43**, No.4, pp.677-684.
3. P. S. Song, S. Huang and C. S. Shin (1996) "Enhancement in fatigue life through electroplated Nickel-induced crack closure", Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineering, **17**, No.6, pp.601-607.
4. C. S. Shin, K. C. Huang and R. Z. Li, (1998) "Artificial retardation of fatigue crack growth by the infiltration of cracks by foreign materials", Fat. Fract. Engng. Mater. and Struct. Vol.21, pp.835-846.
5. A. UR-Rehman and P. F. Thomason (1993) "The effect of artificial fatigue crack closure on fatigue crack growth", Fat. Fract. Engng. Mater. and Struct., **16**, No.10, pp.1081-1090.
6. P. K. Sharp, J. Q. Clayton and G. Clark (1997) "Retardation and repair of fatigue cracks by adhesive infiltration," Fat. Fract. Engng. Mater. and Struct., **20**, No.4, pp.605-614.
7. M. Kikukawa, M. Jono and K. Tanaka (1976) "Fatigue crack closure behaviour at low stress intensity level," Pro. ICM2, Boston, pp. 254-277.
8. Elber, W. (1971) "The significance of fatigue crack growth." ASTM STP486, Philadelphia,

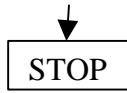
pp.230-241.

C. S. Shin and C. Q. Cai (2000) "A model for evaluating the effect of fatigue crack repair by the infiltration method," in press, Fat. Fract. Engng. Mater. and Struct., Vol.23.

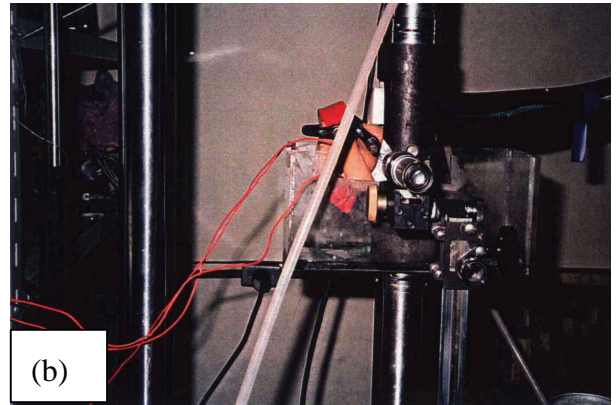
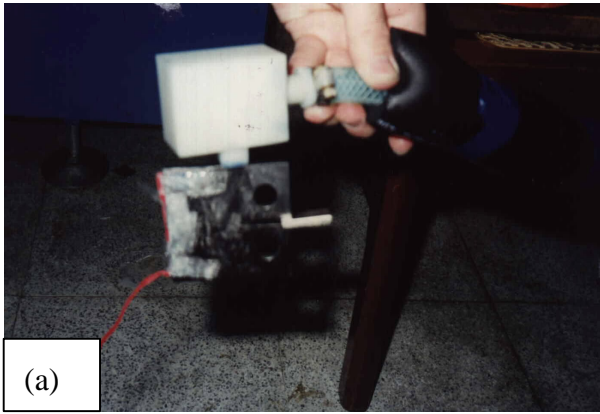
撐開荷重	循環負載應力比	修補後	重新生長應力比
1.2 $K_{max}$	0.1	停止生長	R=0.2
	0.3	停止生長	R=0.4
	0.5	停止生長	R=0.6
1.5 $K_{max}$	0.1	停止生長	R=0.3
	0.3	停止生長	R=0.4
	0.5	停止生長	R=0.6

表一：不同應力比及撐開荷重下靜態修補行為





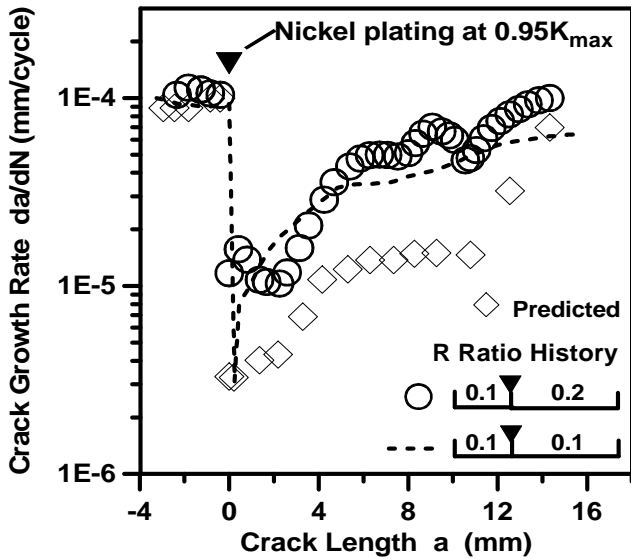
表二：裂縫修補後生長行為預估模型之流程



圖一：裂縫連續填灌系統：(a) 試片端之構造；(b) 線上填灌情形。

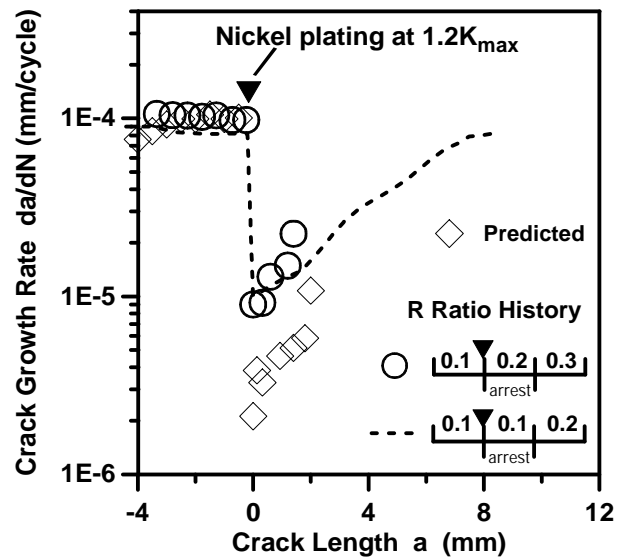
Twors095

Twors12

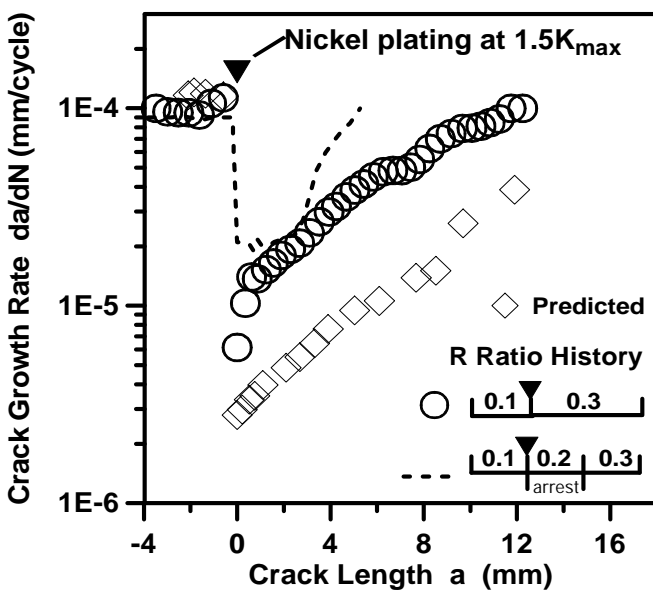


圖二：撐開荷重  $0.95K_{max}$  填灌後之生長行為。

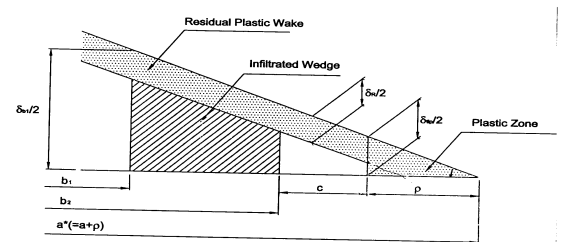
Twors15



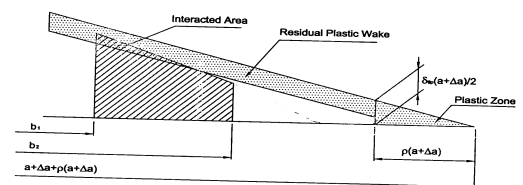
圖三：撐開荷重  $1.2K_{max}$  填灌後裂縫停止生長，將 R 提高至 0.2 後裂縫繼續生長。



圖四：撐開荷重  $1.5K_{max}$  填灌後裂縫停止生長，將 R 提高至 0.3 後裂縫始繼續生長。



(a) 填充物剛填充時



圖五：裂縫修補後生長行為預估模型。