

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

## 高功率雷射去除薄金屬構件中缺陷之研究(2/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2216-E-002-004-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立臺灣大學材料科學與工程學研究所

計畫主持人：陳鈞

計畫參與人員：楊子青

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 5 月 10 日

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫進度報告

## 高功率雷射去除薄金屬構件中缺陷之研究 ( 2/3 )

計畫編號：NSC 92-2216-E-002-004

執行期限：92 年 7 月 1 日至 93 年 8 月 31 日

計畫主持人：陳 鈞 國立台灣大學材料科學與工程學系

計畫參與人員：楊子青 國立台灣大學材料科學與工程學系

### 一. 中文摘要

前期研究使用高功率二氧化碳雷射銲接技術，探討去除薄金屬構件缺陷可行性，且已有相當的成果。一般而言，金屬構件缺陷之成因，主要為材料製造或使用過程中所產生的缺陷。本計畫之實驗材料分為兩大類，包括人工預製缺陷試片與使用已知含有缺陷的不銹鋼試片。材料缺陷的去除，可經由金相組織觀察、X 光檢驗與機械性質測試等評估，做為雷射銲接去除缺陷之有效性指標。實驗結果顯示，應用雷射栓孔 ( Keyhole ) 銲接方式，可大幅減少試片內夾雜物含量、消除試片內之氧化膜及完成試片裂縫或孔洞之密封。此外，試片缺陷經雷射去除後的機械性質不論是衝擊、缺口拉伸或是疲勞特性，皆與原材相近，故使用雷射銲接去除薄金屬構件缺陷確可達到再生目的，未來可考慮用於受損薄金屬構件之再生製程。

關鍵詞：雷射銲接、雷射銲補、機械性能、材料缺陷、再生製程。

### 二. 緣由與目的

雷射銲接為雷射材料加工製程上

的一項重要應用，利用其能量密度高、作用時間短、熱輸入量低等特性，可減少銲件熱影響區與降低工件之變形量至最低程度。目前雷射銲接為一成熟的銲接技術，在銲接品質上與電子束銲件相當，尤其在薄板銲接方面，更具競爭優勢。

一般材料缺陷如夾雜物、裂縫 ( 內含氧化膜 )、氣孔等形成，大都與其生產製程及使用環境相關。以銲接為例，在銲接過程中，即有相當大的機會在銲道或熱影響區生成缺陷，而使銲件品質下降或不堪使用。事實上，金屬構件缺陷之存在會造成機械性質的劣化，嚴重影響其使用壽命，甚至導致工安事故的發生。材料缺陷的形狀、大小、分佈等，均為影響機械性質的主要因素。許多銲接件之破壞係因疲勞所引發，且疲勞裂縫容易於應力集中區 ( 銲道與熱影響區 ) 生成，而這些區域均為銲接缺陷最易產生的位置。另一方面，由於材料在製程中所生成的缺陷，如氣孔、裂縫、雜質等，會使工件的疲勞強度及其疲勞限降低。裂縫中氧化物的去除，以往已有許多研究來探討其可行性及相關製程<sup>(1-3)</sup>，且大多屬於化學清淨方式，但仍有許多鈦、鋁等金屬氧化物，無法有

效去除。

前期研究主要目的在於探討應用雷射銲接技術，進行去除薄金屬構件內部不同類型缺陷及氧化物等，證實其可行性並有確切的成效。本期計畫重點係延續探討缺陷去除後或氧化物還原後之相關機械性質。

### 三. 實驗方法

本實驗材料係以 AISI 410 不銹鋼之板材（厚度約 3.5mm）為主，422 不銹鋼棒材（直徑 16 公分，切片為厚度 3.5mm 之圓盤）為輔。410 與 422 不銹鋼分別經 980 與 1038 三十分鐘之真空固溶處理，注入氮氣冷卻後再施以 700 及 750 兩小時之回火處理。經熱處理後的不銹鋼材料，再進行下述含氧化膜或內部缺陷試片製作。

銲補試片則採用單面開 V 型槽的方式製作，其規格如圖 1 所示。當完成人工製作之含有氣孔試片，即 410-P 試片，再以 Keyhole 銲接方式去除氣孔，所得之試片簡稱為 410-PW 試片。表 1 係雷射銲接與銲補所使用之製程參數。在雷射銲補方面，為了銲補較寬的區域，故雷射束焦點位置採用在試片表面上方 30mm 處。由於焦點位置的上昇，雷射功率密度下降，因此雷射銲補相較於銲接需要有較高的功率及較低的移動速度。所有 410 與 422 不銹鋼銲補或銲接試片，銲後需分別經 650 與 700 回火兩小時。銲後所有試片均需以 X 光做檢測，可評估材料缺陷經雷射銲接後的改變。

金相試片經 Vilella's 溶液腐蝕後，利用光學顯微鏡觀察其組織及材料缺陷的類別，並進行微硬度分佈量測。拉伸試驗依 ASTM E8-90a<sup>(4)</sup>規範製作

試片，在  $5 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$  應變速率下，於室溫進行拉伸試驗。此外，為了評估衝擊韌性以及觀察雜質分佈的情形，使用 Olsen 萬能衝擊試驗機於室溫下，進行銲道之衝擊試驗，試片規格需符合 ASTM E23-91<sup>(4)</sup>的規範，採用 2.5mm 厚之 subsize 規格。

缺口拉伸試驗可作為缺陷有效去除之一項重要評估。由於麻田散鐵系不銹鋼在氫氣環境下具缺口敏感性，故實驗於一大氣壓氫氣中進行。使用之缺口拉伸試片規格如圖 2 所示，並以  $1.2 \times 10^{-4} \text{mm/sec}$  定夾頭速率進行慢速拉伸試驗。疲勞裂縫成長試驗方面，主要包含對接面銹蝕之 410 不銹鋼試片與人工缺陷試片，經雷射銲接後之疲勞裂縫成長速率（da/dN）改變狀況。疲勞裂縫成長試片為使用 Compact-tension (CT) 試片。實驗流程依 ASTM E647-91 規範<sup>(5)</sup>，使用 MTS 10 噸的動態試驗，在頻率為 20Hz 與 R（Load ratio）為 0.1 條件下進行測試。此試片之製作方式係使用單面開槽試片（圖 1）進行銲補後，再進行反面開槽與銲補，故其銲道區為 Double-V 開槽型態。在銲補時，故意選擇較低之雷射功率，造成銲補區之缺陷生成，並經 X-ray 檢測，確定缺陷位置後，可進行 CT 試片的缺口的定位。此類 CT 試片的疲勞裂縫成長實驗，可做為含缺陷試片之特性指標。

### 四. 結果與討論

#### 4.1 一般機械測試

當氧化銹蝕試片經雷射銲接與 650 /2hrs 回火後（410-OW 試片），其銲道、熱影響區與母材三個區域之微硬度分佈相當均勻。比較 410-OW（不銹鋼對接面銹蝕後經雷射銲接）與 410-BW

(Bead-on-plate) 試片，鐳後經 650 /2h 回火後之機械性質如表 2 所示。由於兩試片鐳道強度均較母材為高，所以斷裂位置均在母材，且延伸率與斷面縮率皆相近。實驗印證氧化試片經雷射鐳接後（即 410-OW 試片），其機械強度接近於 410-BW 之試片。

在進行含有氧化物雷射鐳補實驗時，使用的填料為 410 SS 與氧化物(包含  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZrO}_2$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等)粉末，依不同比例混合成兩種不同濃度的混合粉末。一為含有 18.5wt% 氧化物填料，經雷射鐳補後(410-MR(L)試片)其衝擊值約為 12J，與母材相近。若氧化物的添加量增加至 22wt% 時(410-MR(H)試片)，氧化物雖經過雷射的去除與還原分解，但是此試片之衝擊值降低為 4.4J。鐳補之界面出現嚴重的脆性破壞(圖 3)，這可由鐳補過程中鐳道對流的現象來解釋。加的氧化物經雷射熔融後，雜質偏析於靠近鐳道區的鐳補界面晶界上。由金相組織(圖 4)觀察得知高濃度氧化物之不銹鋼粉末經雷射鐳補後，由於氧化物含量較高而不易去除，因此於界面晶界上仍有氧化物以及富鉻碳化物的聚集。因此於鐳道與影響區間的界面，在靠近鐳道區域產生劈裂的脆性破壞。故應用雷射去除材料內部之氧化物有其上限，但一般材料中氧化物以及雜質含量遠低於本實驗，應可有效去除。

#### 4-2 缺口拉伸試驗

另一方面，雜質的存在與材料氫脆敏感性有關<sup>(6)</sup>，故針對缺口拉伸試片在氫環境下進行測試。由實驗數據(表 3)和破斷面結果顯示，氧化試片經雷射鐳接後於一大氣壓氫環境下試驗並無氫

脆效應。由於氧化物已完全去除，因而 410-OW 試片之缺口拉伸強度 (NTS) 與 410-BW 試片相近。此外，針對含高與低濃度之氧化物合金粉末，經雷射鐳補去除或分解氧化物後，其缺口拉伸強度隨著氧化物的濃度增加而傾向脆性破壞。但強度的變化並不大，是因為缺口破壞開始的位置在鐳道中心。缺口拉伸試片受氫氣影響較嚴重的區域是在缺口的初始位置。鐳道中心位置的氧化物皆可完全去除以及分解，致使材料缺口拉伸於氫環境下所損失之強度差異性並不大。

#### 4.3 疲勞裂縫成長試驗

本試驗首要探討之項目為含裂縫、氣孔等缺陷試片對疲勞特性的影響。在實驗上除了使用含人工缺陷試片外，並進行銹蝕之 410 不銹鋼，經雷射鐳接去除後之疲勞裂縫成長實驗。

若兩端的熱影響區與鐳道的界面接合不良時，則有裂縫與氣孔之缺陷存在且探討缺陷對疲勞裂縫成長之特性。由圖 5 為含兩側缺陷之 410 不銹鋼試片與不含缺陷試片之疲勞裂縫成長速率比較得知。當裂縫由左至右通過缺陷時，因為缺陷的存在，在初期有缺口鈍化的效應，故能抑制裂縫成長速率，但隨之有快速成長的趨勢。當裂縫成長至另一端缺陷(孔洞)時，則重複 da/dN 減速後再加速的情況發生。若鐳補區沒有缺陷的存在，裂縫成長至鐳道時，其 da/dN 略低於母材 (410-BM)。隨後當裂縫通過鐳補區域後，裂縫成長速率則會逐漸回復與 410 不銹鋼母材相同。一般而言，氣孔之存在，在裂縫成長初期有延遲成長的效應，隨後快速成長。但在界面裂縫方面則需視其方向而定，當

界面裂縫平行於疲勞裂縫成長方向時，會有加速效果，與上述結果會有很大不同。故裂縫之存在，對於疲勞裂縫成長速率的影響，視兩者間的夾角而定，角度越大，延遲效果越顯著；反之則有加速裂縫成長效應。

圖 6 為 410-OW、410-BW 與 410-BM 試片之疲勞裂縫成長速率比較。在裂縫開始成長時，可觀察到 410-OW 與 410-BW 試片裂縫成長初期有明顯  $da/dN$  值的延遲效應，這是因為鐸件殘留應力尚未完全消除。而伴隨著裂縫長度或  $\Delta K$  值的增加，延遲效應逐漸減少。當裂縫由熱影響區穿過鐸道時，裂縫成長速率較 410-BM 母材試片稍低，最後隨應力強度因子 ( $\Delta K$ ) 的增加而逐漸回復到母材之特性。410-OW 試片其疲勞裂縫成長速率的趨勢與 410-BW 試片相近，兩者在各個不同區域的疲勞破斷面皆為穿晶破裂。因此，氧化膜經雷射鐸接後可完全去除，且對於疲勞裂縫成長特性沒有影響。

## 五. 結語

- (1) 氧化銹蝕之 410 不銹鋼，經雷射鐸接與回火處理後，其硬度以及成份分佈相當均勻，且機械性質與母材經雷射鐸接後回火者相近。並且在氫環境下之缺口強度與母材相同
- (2) 由於 410-OW 與 410-BW 兩試片之殘留應力未能完全消除，故在裂縫成長初期有明顯  $da/dN$  值的延緩效應。因 410-OW 試片雜質的消除，使得疲勞裂縫成長速率與 410-BW 試片相近。
- (3) 利用雷射鐸補製程去除氧化物之方法可行，但是所添加的氧化物濃度卻有其限制。當氧化物添加量低於 18.5wt% 時，氧化物可以完全去除，

使得其衝擊韌性與母材相近。對於缺口強度而言，因為不受氫氣的影響而沒有太大的改變。但是高濃度(22wt%)之氧化物卻不易去除，故在鐸道與熱影響區界面上會有一些雜質聚集，以致於材料界面傾向於嚴重的脆性破壞。對此可再利用雷射 keyhole 鐸接來加以克服。

- (4) 對於接合不良或含氣孔缺陷之試片，初期會因缺口鈍化效應，致使裂縫成長速率下降，隨後即有快速成長趨勢。應用雷射鐸接去除缺陷後，會增加試片之殘留應力，故其初始裂縫成長速率較未去除缺陷前為低，爾後由於缺陷的去除使得裂縫成長速率逐漸恢復至原有特性。

## 六. 參考文獻

1. D.L. Keller and W.R. Young, "Cost Effective Repair Techniques for Turbine Airfoils-Volume ", AFML Wright Patterson AFB, December, 1980.
2. E. Geniey's, "Brazing in Reducing Fluoride-Containing Atmospheres", First International Brazing and Soldering Conference, London, Nov., 1972.
3. F.J. Hermanek and M.J. Stern, "Turbine Component Restoration by Activated Diffusion Brazing", Alloy Metal, Inc.
4. Standard test method for impact testing of metallic materials, E23-91, Annual book of ASTM standards, vol. 03.01, ASTM, Pennsylvania, 1991, 197.
5. Standard test method for impact testing of metallic materials, E647-91, Annual book of ASTM standards, vol. 03.01, ASTM, Pennsylvania, 1991, 654.
6. W.C. Luu and J.K. Wu, Corrsion Science, 38, 2, 1996.

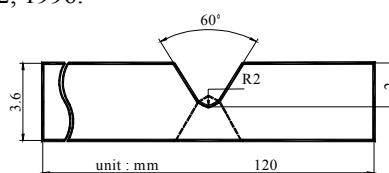


圖 1. 開 V 型槽試片示意圖

表 1. 雷射銲接與雷射銲補參數

Parameters	Laser welding	Repair welding
Laser power	3.1 KW	3.3 KW
Scan rate	800 mm/min	350 mm/min
Focal length	200mm, Cu mirror	200mm, Cu mirror
Focal point	0.5mm under the surface	30mm above the surface
Shielding gas	Ar, 15 l/min flow rate	Ar, 15 l/min flow rate

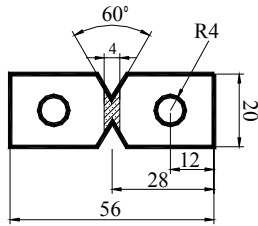


圖 2. 缺口拉伸試片示意圖

表 2. 410-BW 與 410-OW 試片之機械性質比較

Specimens	Mechanical properties	
	410-BW*	410-OW*
YS, MPa	597	603
UTS, MPa	700	707
Elongation (%)	14	14
Reduction of Area (%)	64	67
Fracture location	BM	BM

\* 650 /2h tempered

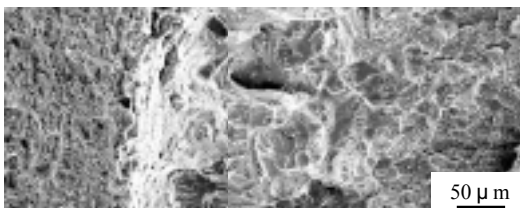


圖 3. 410-MR (H)試片之衝擊破斷面

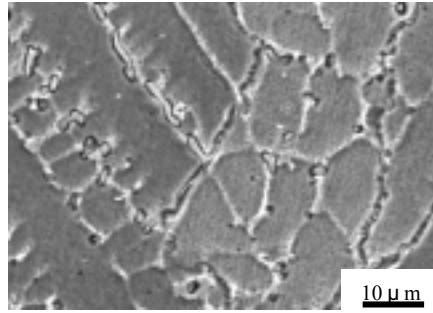


圖 4. 410-MR (H)界面金相組織

表 3. 410-BW、410-OW、410-MR (L) 與 410-MROX(H)之缺口拉伸強度比較

Specimens	NTS (in 1 atm H <sub>2</sub> )
410-BW	952 MPa
410-OW	944 MPa
410-MR (L)	940 MPa
410-MR (H)	914 MPa

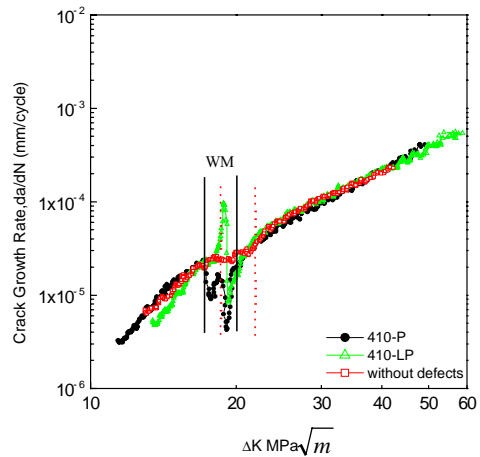


圖 5. 含缺陷與缺陷去除之疲勞裂縫成長曲線

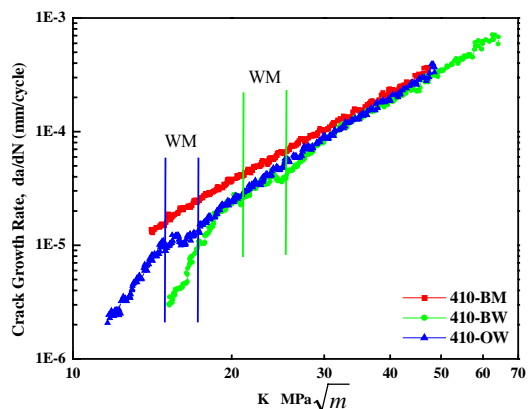


圖 6. 410-OW、410-BW 與 410-BM 試片之疲勞裂縫成長曲線