

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

雷射表面退火處理阻擋疲勞裂縫成長

Retardation of Fatigue Crack Growth by Laser Surface Annealing

計劃編號: NSC 89-2216-E-019-011

執行期限: 89/08/01~90/07/31

主持人: 蔡履文 國立台灣海洋大學材料所

計畫參與人員: 林素嫻 林旭宏 國立台灣海洋大學材料所

一、中文摘要

本研究為探討大氣及氣態氫環境中，殘留應力對疲勞裂縫成長之影響，304 不銹鋼板材進行雷射銲接及雷射熱處理，利用輸入熱能方式產生殘留應力。

304 不銹鋼平板經雷射熱處理其殘留應力量測結果顯示：熱處理中心區為殘留張應力區，而兩旁為殘留壓應力區，並且隨著距離的增加壓應力逐漸減小。量測缺口前端殘留應力場，缺口尖端距離熱處理中心線距離減小，缺口前端之殘留壓應力則增加，而熱處理中心區為張應力區。

疲勞試驗結果顯示經雷射熱處理之 compact tension (CT) 試片，熱處理區前方區域因殘留壓應力之影響，使疲勞裂縫成長速率具有減緩效果，改變 CT 試片缺口位置相對雷射熱處理中心線位置，試片缺口尖端愈接近熱處理中心線，原始高阻擋裂縫成長現象消失。裂縫成長在熱處理區以及疲勞裂縫成長通過熱處理區後，均顯示相當於母材之裂縫成長特性。雷射銲件疲勞裂縫成長實驗，結果大致與雷射熱處理試件相同。而在氣態氫環境中，經雷射熱處理試件，其疲勞裂縫成長起始區與大氣環境中相同均有減速的現象，即在脆化環境於低 ΔK 值範圍下，殘留應力仍具有阻擋疲勞裂縫成長的效應。

關鍵詞：疲勞裂縫成長、殘留應力、304 不銹鋼、有限元素分析法

Abstract

The fatigue crack growth behavior of the 304 austenitic stainless steel annealed by a CO₂ laser is investigated in this work. Metallographic observations indicate that distinct locations of a laser-treated specimen

reveal the similar microstructures and microhardness, as a result of no substantial phase transformation occurs in the laser-heated region. The results of fatigue crack growth test demonstrate that the as-treated specimen has a higher resistance to fatigue crack growth in the region preceding the laser track. However, marked retardation of crack growth in the low ΔK range disappears for the specimen stress-relieved at 850°C for one hour. Similar result has been observed in the specimen with shorter notch tip to centerline of laser track distance.

Residual stress measurements of the laser surface-annealed specimen indicate that there is a peak in stress distribution in the laser track and it changes from tensile into compressive stresses with increasing the distance away from the laser track. Also, it reveals that the width of the tensile stress field is far wider than that of laser track itself. The stress field ahead of laser track will be changed from tensile into compressive residual stresses after introducing a sharp notch. The presence of residual compressive stresses ahead of notch tip results in the reduced fatigue crack growth rate in the compact tension specimen.

Keywords: Fatigue crack growth, Residual stresses, 304 stainless steels, Finite element analysis

二、前言

當金屬受到低於其抗拉強度之反覆循環應力作用下，引起破斷或損壞現象，稱為金屬疲勞。而在這種動態負荷下所產生的破壞，稱為疲勞破壞。由裂縫成長速率 (da/dN) 對應力強度因子變動範圍 (ΔK) 作對數圖，得到疲勞裂縫成長曲線圖，依據 Ritchie[1] 所提出的裂縫成長機構，裂縫

成長過程分為三個階段。第一階段為裂縫生成期， ΔK_{th} 代表裂縫成長之應力強度因子臨界值，應力強度因子值若小於 ΔK_{th} ，將不會有裂縫生成，或者因為裂縫成長速率太小無法量測。第二階段為裂縫成長期，裂縫在此階段穩定成長，對數圖呈現線性關係。

銲接因局部急速加熱與冷卻的作用，在熔填金屬與銲接母材附近產生，而有不均勻的收縮和膨脹熱應變，再由熱應變產生熱應力。Shi[2]研究指出幾種應力分佈對裂縫成長之影響機構。其中提出當裂縫成長橫越銲道時，殘留應力作用對裂縫成長的影響情形，於裂縫成長初期，縱向殘留壓應力與裂縫尖端產生交互作用，隨裂縫成長，殘留壓應力分佈範圍變短但其值卻加大，因此影響將隨裂縫成長接近銲道而變得更加明顯，而使疲勞裂縫成長速率減緩，此一情況在低外加應力或低應力強度因子變動範圍時，將變的更加明顯。當裂縫成長進入銲道區域時，雖然裂縫尖端處為殘留張應力區，但由於破裂面再次受到應力作用而有閉合現象，因而裂縫成長亦可能呈現較緩慢現象。

氫環境脆化是材料在含氫環境所造成機械性質劣化，在常溫及低應變速率下脆化情形最為嚴重。氫對材料之機械性質的影響，最主要的是延性下降，其下降的程度與材料內部的氫含量及材料的微觀組織有關。當材料內部產生裂縫時，氫原子容易在三軸的應力區集中，導致裂縫尖端脆化而加速裂縫成長。氫脆易發生在室溫低應變速率，因在低應變速率下氫氣有足夠的時間擴散至裂縫尖端，使裂縫尖端容易達到氫脆所需的臨界濃度。而在低溫時由於氫擴散所需之動能不足，在高溫時氫容易擴散而不被束縛，故不會在裂縫尖端聚集。所以考量應變速率及溫度的結果，在低應變速率及室溫的情況下氫脆現象相當明顯。Gangloff 和 Wei[3,4]指出：氫脆能使材料裂縫成長速率增加。

三、實驗方法

雷射熱處理採用 CO_2 雷射加工機。實驗試片條件為板厚 4.6mm 304 不銹鋼鋼板，功率為 2000W，處理速度為 1500mm/min，

進行試片雙面對稱之雷射退火，雷射銲接參數為：雷射功率 3.5KW，銲接速度 1000mm/min。

疲勞裂縫成長試驗採用 CT 試片，其尺寸(圖 1)是依 ASTM 標準規範製作，疲勞試片包括母材及裂縫成長橫越雷射作用區，其中當裂縫成長橫越銲道或熱處理區，實驗規劃不同缺口位置至雷射加工中心線位置。此試驗之設備採用 10 噸 MTS 810 油壓伺服控制動態試驗機，試驗系統與電腦連線以控制試驗參數並存取試驗數據，試驗係在室溫中進行，以頻率 20Hz、採用固定負荷方式，進行裂縫成長試驗。而在氫環境疲勞試驗中採用原有之疲勞試驗機，再加上一密閉容器，以相同尺寸之 CT 試片通入 1.5 大氣壓之氫氣，來模擬材料於氣態氫中之疲勞裂縫成長特性。

本實驗殘留應力量測方式採用 ASTM E837 規範之應變規鑽孔法，來量測殘留應力，經由多次鑽孔來去除物件的某一部分，並以應變規來量測機械加工前後的應變改變量，進而推算出物件的原有殘留應力。

四、結果與討論

因母材為一均質材料，所以其疲勞裂縫成長特性呈現一個線性的趨勢。母材疲勞破斷面，在起始區中為明顯的穿晶破斷面，且除穿晶破壞之外還有一些平坦的區域，其形成的平坦區域的原因可能負載導致材料破裂，於破裂面表面形成拉長之塑性痕 (plastic wake)，而材料於破裂負載釋放過程，破裂面相互擠壓而產生閉合效應所致。圖 2 為母材及經雷射銲接試件，改變試驗 CT 試片缺口位置相對銲道中心線位置之疲勞裂縫成長曲線圖，在銲道與裂縫尖端相距 10 mm(weld-10) 試片中，裂縫在母材及熱影響區成長約為 7.25 mm 即進入銲道區域，裂縫成長橫越 1.5 mm 寬之銲道區後，將再次通過狹小之熱影響區而進入母材區域。結果顯示裂縫成長通過銲道再次進入母材區域範圍，銲件呈現出之裂縫成長速率與母材一致，顯現出原始母材的特性。當裂縫成長在銲道區域實驗結果顯示並未產生裂縫成長加速現象，可視為近乎母材性質。而在銲道前方之區域，

尤其是在裂縫成長起始區域，裂縫成長速率遠低於母材，由於此一區域並未因加熱而有明顯組織變化，此一裂縫成長遲緩現象，可能是由鐸接所引發殘留應力，降低此區域之裂縫成長速率。降低原始缺口位置至鐸道中心線位置之距離，結果得知於低 ΔK 值範圍，原始高阻擋裂縫成長特性消失，可能是當缺口逐漸接近鐸道時，殘留應力逐漸減小，而導致不同 CT 試片缺口位置，有不同疲勞裂縫成長特性。

圖 3 所示分別為 HAZ-10、HAZ-7.5 以及 HAZ-5(不同雷射熱處理中心線位置相對缺口位置)三種不同試片，相對於母材之疲勞裂縫成長特性關係曲線，因其缺口尖端相對熱處理位置不同，在疲勞裂縫起始區之殘留應力大小即分佈狀態也不一，由曲線圖中可觀察出在低 ΔK 值區時，裂縫成長的速率分別為 HAZ-10 低於 HAZ-7.5 低於 HAZ-5 試片，圖中 HAZ-10 及 HAZ-7.5 裂縫成長速率在起始區相對於母材有較慢的趨勢，不過 HAZ-5 的起始區則與母材接近。

長、寬、厚分別為 $200 \times 120 \times 4.6$ mm 的 304 不銹鋼平板經過雙面雷射熱處理之後，分別在熱處理中心及距離熱處理中心線 8、12、25 及 30 mm 處，利用盲孔鑽孔法量測其殘留應力，結果如圖 4 所示為各不同位置殘留應力大小與相對熱處理位置之關係圖，我們可以明顯由圖中觀察出，熱處理中心及其附近的區域皆為殘留張應力，其張應力大小隨著距離熱處理區中心線位置越遠而變小，甚至轉變成為殘留壓應力。由此可知經過雷射熱處理之平板試片，其熱處理區域附近皆為殘留張應力而在距離熱處理區的一定距離外，其應力場轉變成壓應力，以平衡平板上張應力區。

雷射熱處理中心線與預置缺口相距 10 mm 之 CT 試片，在經預裂 2 mm 之後，模擬真實裂縫成長過程中，裂縫前端殘留應力之重新分佈情形，該試片在雷射熱處理中心線位置，所量測出為 153MPa 之殘留張應力，而在預裂之裂縫尖端前 1 mm 處量所測出的值為殘留壓應力，其值大小為 88MPa。實驗結果明顯顯示在疲勞裂縫成長的起始區存在殘留壓應力場，而在雷射熱處理中心線附近則為殘留張應力，由此可預知在疲勞裂縫成長起始區，因殘留壓

應力的影響會出現一個明顯裂縫成長緩慢的區域，當裂縫成長至熱處理區，所量測之殘留應力雖為張應力，但由於裂縫逐漸成長接近熱處理區中心線時殘留張應力亦逐漸釋放，故殘留應力效應降低，疲勞裂縫成長特性回到與母材相似之特性。

母材在充氬環境下進行疲勞裂縫成長試驗，其結果如圖 5，與大氣中之母材疲勞裂縫成長特性比較，可以明顯比較出在氬環境中之疲勞裂縫成長特性有加速的現象，兩者在實驗 ΔK 範圍內呈現大體一致之差異，其結果顯示 304 不銹鋼母材在氬環境中會受到氬脆影響而產生裂縫成長加速的現象。而圖 6 為經過雷射熱處理試片 (HAZ-10)，在大氣與氬環境中之疲勞裂縫成長特性比較圖，304 不銹鋼經雷射熱處理之疲勞裂縫成長在氬環境中的起始區與大氣中相同的有明顯減速的現象，此一現象說明即使在脆化環境中，因殘留應力效應作用，於低 ΔK 值範圍內，利用熱應力仍可提高材料阻擋裂縫成長能力。氬環境母材以及雷射熱處理疲勞試片破斷面，除了部分沿晶破壞區域外，主要觀察到 quasi-cleavage 脆性破壞。

五、結論

1. 304 不銹鋼鐸件疲勞裂縫成長實驗結果顯示，於鐸道區域具有與母材一致之裂縫成長特性，在鐸道前方之區域，因殘留應力之影響則有裂縫成長遲緩現象。
2. 304 不銹鋼平板經雷射熱處理後量測殘留應力分佈狀態，熱處理中心區為殘留張應力區，而兩旁為殘留壓應力區。量測缺口前端殘留應力場，依缺口距離熱處理中心線距離減小，缺口前端之殘留壓應力則增加，而熱處理中心區為張應力區。
3. 經雷射熱處理試片其疲勞裂縫成長試驗顯示，熱處理區前方區域因殘留壓應力之影響，使疲勞裂縫成長具有減緩效果。改變實驗試片缺口相對雷射熱處理中心線距離，造成不同程度之殘留應力釋放，低起始裂縫成長速率現象消失。裂縫成長在熱處理區以及疲勞裂縫成長通過熱處理區後，均大體顯示母材之裂縫成長特性。
4. 氣態氬環境中，經雷射熱處理試件，其疲勞裂縫成長起始區與大氣環境中相同

均有減速的現象，表示在脆化環境，於低 ΔK 值範圍下，殘留應力仍具有阻擋疲勞裂縫成長的能力。

六、參考文獻

1. R.O. Ritchie, "Near-Threshold Fatigue-Crack Propagation in steels", International Metals Reviews, Vol.24, No.5&6, 1979, P.205.
2. Y. W. Shi, B. Y. Chen and J. X. Zhang, "Effect of Welding Residual Stresses On Fatigue Crack Growth Behaviour In Butt Welds of A Pipeline Steel", eng. Fract. Mech., Vol.36, No.6, 1990, P.893.
3. R. P. Gangloff and R. P. Wei, "Gases Hydrogen Embrittlement of High Strength steels", Metal. Trans., Vol.8A, 1977, P.1043.
4. R. P. Gangloff and R. P. Wei, "Gases Hydrogen Assisted Crack Groth in 18 Nickel Steels", Scripta Metallurgica, Vol.8, 1974, P.661.

誌謝

本研究承蒙國科會經費支助(NSC 89-2216-E-019-011) 雷射表面退火處理阻擋疲勞裂縫成長(III)。

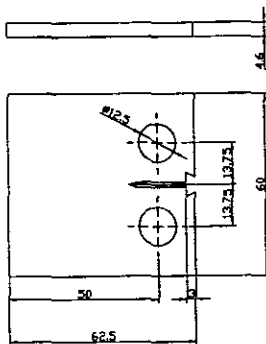


圖 1 疲勞裂縫成長試驗試片尺寸圖。

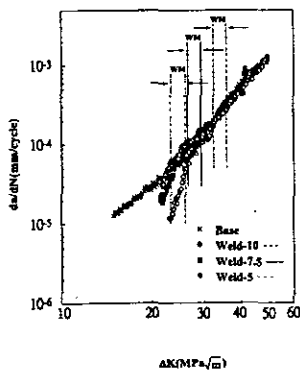


圖 2 母材及不同銲接位置之疲勞裂縫成長特性曲線圖。

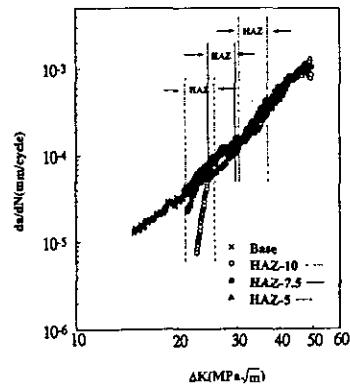


圖 3 母材及不同雷射熱處理位置之疲勞裂縫成長特性曲線圖。

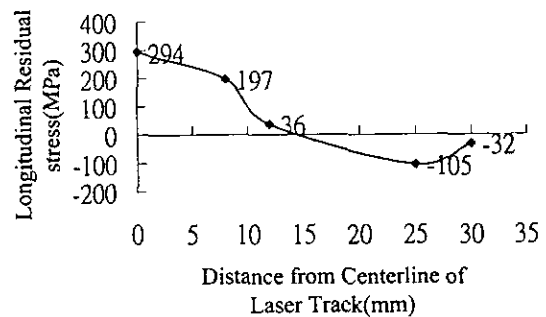


圖 4 304 不銹鋼平板雷射熱處理中心線距離與殘留應力之關係圖。

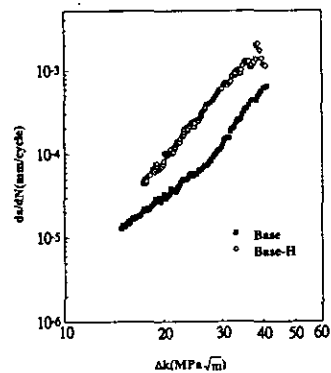


圖 5 304 不銹鋼母材於大氣及氫氣環境中之疲勞裂縫成長曲線圖。

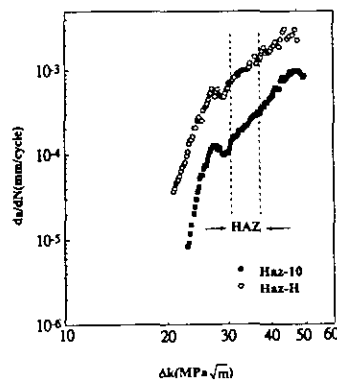


圖 6 雷射熱處理於大氣及氫氣環境中之疲勞裂縫成長曲線圖。