

Inconel 718 超合金雷射表面改質技術研究

Laser Surface Modification of IN718 Superalloy

計劃編號：NSC 90-2216-E-019-008

執行期限：90/08/01~91/07/31

主持人：蔡履文 國立海洋大學材料所

計劃參與人員：林旭宏 林素嫻 國立海洋大學材料所

一、中文摘要

本研究為探討 Inconel 718(IN718) 板材在大氣、氣態氫、及硫化氫水溶液充氫不同時段後，疲勞裂縫成長特性之比較，此外雷射熱處理對板材疲勞裂縫成長之影響亦被探討。

時效試件經雷射處理由於強化析出物重新固溶入基地中，導致試件表面硬度下降，增加雷射處理速率時，其退火深度相對減少。殘留應力量測結果顯示：經雷射熱處理之中心位置顯示殘留張應力，而在裂縫尖端前 1mm 處為殘留壓應力區。疲勞裂縫成長試驗結果顯示雖然 IN718 合金在固溶及時效狀態，存在明顯強度及延性的差異，但兩者之疲勞裂縫成長特性卻大體相同。經雷射熱處理之 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減慢甚至無法生長，而在氣態氫環境或經硫化氫水溶液充氫後，因氫原子在 IN718 材料內部擴散速率極慢或 IN718 氫脆性低，故氫脆導致疲勞裂縫成長加速現象並未產生。

Abstract

The object of this work is to study the fatigue crack growth behavior of heat-treated In718 alloy tested in various conditions, including laboratory air, gaseous hydrogen and pre-charging in saturated H₂S solution for different periods of time. Although the difference in tensile properties between solution-annealed and aged specimens is quite large, experimental results indicate

that both specimens have nearly the similar fatigue properties in air and gaseous hydrogen. For laser-treated specimens, the initial high resistance to crack growth is noticed, as compared with that of the aged base material. The retardation of crack growth ahead of laser track has been attributed to the presence of residual compressive stresses ahead of crack tip.

Keywords: IN 718, fatigue crack growth, laser-annealed treatment.

二、前言

IN718 是屬於析出硬化型的鎳基超合金，使用溫度範圍在 -250°C (-423°F)~700°C (1292°F) 之間，大部分在鍛造狀態下使用，少量用於鑄造狀態，是最常被廣泛使用的超合金[1]。以往應用蒸氣渦輪機上，具備優良高溫和潛變強度[1]。後來研究發現此材料之抗氧離子腐蝕性能良好，所以也應用在石油探勘或海上構件[2]，近期更廣泛的應用在航空上或其它嚴苛腐蝕環境。

高功率雷射可藉由調整光束的能量密度，以達成切割、銲接、表面熱處理等功能。雷射熱處理製程相較於傳統製程，更易經由光學系統聚焦精確控制處理的位置、尺寸、面積大小，使得熱影響變形降到最小程度，取代部分傳統熱處理製程。一般高強度材料表面狀態呈現較高破裂敏感性，材

料表面缺陷易引發脆性破壞，以往雷射表面處理，於工件表面形成軟化組織，可提高此材料之抗氫脆性，改善其延性。另一方面經雷射熱處理後所引發之複雜應力分佈，亦有助於抵抗疲勞裂縫成長[4]。本研究針對 IN718 板材在固溶、時效及雷射熱處理三種狀態，於大氣、氣態氫環境及浸泡於硫化氫水溶液不同時段等三種條件下，在大氣環境進行疲勞裂縫成長試驗，評估在不同測試環境及顯微組織，對疲勞裂縫成長特性之影響，並由破斷面觀察來瞭解三種環境及不同之應力強度因子變動範圍(Stress intensity factor range, ΔK)，所呈現出不同的破斷模式。雷射熱處理所伴隨的殘留應力對疲勞裂縫成長和破斷面的影響亦予以探討。

三、實驗方法

本實驗用 IN718 板材厚度為 6.8mm，其化學成分(wt%)為 16.61Fe、4.64Nb、16.84Cr、3.11Mo、0.97Ti、0.52Al、0.05C、0.12Si、0.02V、0.02Co，其餘為 Ni。板材在固溶處理狀態(1040°C/1hr)為 S 試片，而固溶處理後經兩段式時效處理(720°C/8 hr + 620°C/8 hr)為 A 試片。雷射熱處理系統為 Rofin-Sinar RS850 CO₂ 雷射加工機，配有三軸向之 CNC 工作台，固定雷射熱處理功率 2000W，處理面積為 6mm×25mm，將先前經時效處理試片(A 試片)進行試片雙面對稱之雷射處理為 L 試片。

疲勞裂縫成長試驗採用 Compact Tension (CT) 試片，其尺寸是依 ASTM 標準規範製作，實驗試片尺寸如圖 1 所示。疲勞試片包括裂縫成長方向垂直雷射熱處理區(NL 試片，圖 1(a))，及裂縫成長沿雷射熱處理區中心線(PL 試片，圖 1(b))。此試驗之設備採

究[3]指出：時效狀態之 IN718 合金經用 10 噸 MTS 810 油壓伺服控制動態試驗機，試驗係在室溫中進行，試驗分成兩階段進行，第一階段為疲勞預裂，預裂長度為 2mm。預裂完成後，立即以頻率 20Hz、定振幅負荷方式，進行第二階段之疲勞裂縫成長試驗。氣態氫環境疲勞試驗為先將試驗試片置入密閉容器中，並通入 2 大氣壓之氫氣，評估材料於氣態氫中之疲勞裂縫成長特性。預充氫對時效試件之影響，為先將時效試件(A 試片)浸泡於飽和硫化氫水溶液中 5, 7 或 14 天，而後在大氣環境中進行疲勞裂縫成長試驗。本實驗殘留應力量測方式為採用 ASTM E837 規範之鑽孔法，來量測經雷射熱處理試件之殘留應力，經由多次鑽孔去除物件的某一部分，配合應變規來量測機械加工前後的應變改變量，而推算出物件的原有殘留應力值。

四、結果與討論

圖 2 所示為 IN718 時效板材，以不同速率雷射處理後(雷射功率為 2000W)，從試件表面到基材內部的微硬度變化情況。時效試件經雷射處理，由於析出物重新固溶入基地中，導致試件表面硬度下降，增加雷射處理速率時，相對其退火深度減少，處理速率為 1200mm/min 以上，雷射退火試片之退火深度低於 0.5mm。經拉伸試驗證實：IN718 板材經時效處理，其最大抗拉強度及降伏強度遠較固溶試件為高，但延伸率則以後者較優越。實驗亦顯示，當雷射退火厚度低於 0.5mm，雷射熱處理試片拉伸性質與時效試片相似。為了避免雷射熱處理降低時效試片的強度，雷射熱處理製程參數選擇雷射功率 2000W 和處理速率 1200mm/min。

欲瞭解疲勞裂縫成長過程，裂縫

前端殘留應力狀態對裂縫成長速率之影響，實驗先選用疲勞裂縫成長方向垂直雷射熱處理區(NL 試片)，實驗以線切割製程製作人造裂縫，模擬真實裂縫成長至 3 或 4.5mm 後，於熱處理中心位置及裂縫尖端前 1mm 處之殘留應力。實驗結果得知該試片在雷射熱處理中心線位置顯示大約 270MPa 之殘留張應力，而在人造裂縫長度各為 3mm 或 4.5mm 時，其裂縫前端處均呈現壓應力狀態，其值大小分別為 165MPa、73MPa。殘留應力量測結果顯示：在 NL 試片疲勞裂縫成長初始生長區域，裂縫前端存在著殘留壓應力場，預期將會影響實驗疲勞裂縫的成長速率，而在雷射熱處理中心線位置則呈現殘留張應力區。

固溶(S 試片)及時效(A 試片)試片於大氣與氣態氫環境中之 da/dN 對 ΔK 之關係如圖 3 所示，一般而言，大部份的工程材料在氣態氫環境中會呈現裂縫成長加速，但在本實驗發現，在氣態氫環境中並未產生裂縫加速成長，與大氣中之疲勞特性相似，此意謂著 IN718 疲勞裂縫在成長期間有較高抗氫脆性。

圖 4 為時效試片浸泡於飽和硫化氫水溶液 5, 7 或 14 天，經不同時段充氫後於大氣環境中進行疲勞裂縫成長測試，各試片之 da/dN 對 ΔK 之關係圖。由結果顯示經預充氫後內部氫原子的影響很少，只有在裂縫成長起始階段有略微較明顯的影響，產生較高的疲勞裂縫成長速率，其可能之原因為氫在 IN718 中之擴散速率很低[5]，氫原子不易滲入此材料中，另一可能原因為 IN718 具面心立方結構，對氫原子有相當大固溶量而不會引發氫脆。

圖 5 為 IN718 合金經雷射熱處理

在大氣中之 da/dN 對 ΔK 之關係圖，如結果所示，經過雷射熱處理試片，相對於時效板材來說，在起始區皆有較高阻擋裂縫成長的性質。由先前應力量測結果得知：裂縫尖端前方之壓應力場，應是導致 NL 試片在低 ΔK 範圍內，有較高阻擋裂縫成長能力的主因，先前研究成果亦指出：17-4PH (AISI630) 不銹鋼經雷射處理後亦呈現相同趨勢[4]。裂縫成長沿雷射熱處理區行進時(PL 試片)亦顯示和 NL 試片類似現象。IN718 板材在固溶或時效狀態，兩者間有著相當大之硬度、強度、延性及衝擊韌性差異，但在大氣及氣態氫中之疲勞裂縫成長特性，兩者間卻差異甚微，因此顯微組織應不致導致疲勞特性產生巨大變化，PL 試片有高阻擋裂縫成長能力，亦應歸究於殘留應力所致，IN718 鉸件亦顯示相同趨勢[6]。

IN718 時效試片與 T-250 麻時效鋼過時效試片在大氣中和氣態氫環境中之 da/dN 對 ΔK 之關係圖，如圖 6 所示，兩者在大氣中有相當之最大抗拉強度 (IN718:1240MPa, T-250:1280MPa)，而伸長率則 IN718 優於 T-250 麻時效鋼 (IN718:34%, T-250:18%)，無論於大氣或氣態氫環境中，T-250 麻時效鋼疲勞裂縫成長速率皆比 IN718 時效條件明顯地快了許多。尤其是 T-250 麻時效鋼有十分顯著之氫致疲勞裂縫加速成長現象。過時效麻時效鋼其顯微組織為在 BCC 結構之基地中，析出回復沃斯田鐵 (Reversion austenite) 及 Ni_3Ti-Ni_3Al 等微小析出物[7]。而在時效狀態之 IN718 合金，其顯微組織為在 FCC 基地，主要析出 Ni_3Nb 及較少量之 $Ni_3(Ti, Al)$ [8]，且兩者之氫擴散速率及氫視固溶量有相當大差異。由以往實驗的知 IN718 在氣態氫環境中，氣

體壓力低於 20 大氣壓，慢速率拉伸試驗均顯示低氫脆性。同樣在飽和硫化氫水溶液中，T-250 麻時效鋼有遠較 IN718 合金為高之氫脆敏感性，氫在鎳基合金中極高視固溶量及低擴散速率，應是導致 IN718 能免於氫致疲勞裂縫成長之重要因素。

Components (306)2000, P.277

感謝國科會研究經費支持(NSC 90-2216-E-019-008),特此致謝。

五、結論

1. 時效試件經雷射處理，由於析出物重新固溶入基地中，導致試件表面硬度下降，增加雷射處理速率時，相對其退火深度減少，處理速率為 1200mm/min 以上，雷射退火試片之退火深度低於 0.5mm，經拉伸試驗證實：在此種雷射熱處理條件下，雷射熱處理試片拉伸性質與時效板材試片相似。
2. IN718 板材在固溶或時效狀態，兩者間有著相當大之硬度、強度、延性差異，但在大氣及氣態氫中之疲勞裂縫成長，兩者間 da/dN 對 ΔK 之關係特性卻差異甚微。
3. IN718 合金經雷射熱處理試片，相對於時效板材來說，在起始區皆有較高阻擋裂縫成長的性質。由應力量測結果得知：裂縫尖端前方之壓應力場，應是導致 NL 試片在低 ΔK 範圍內，有較高阻擋裂縫成長能力的主因。

5、文獻回顧

1. Inconel 718, Aerospace structural Metals Handbook, USA, 1995.
2. J.A.Harris and T.F.Lemke, Mat. Perf.(22)(1)1983, P.11.
3. A.Hirose et. al., Mat. Sci. Eng., (A219)1996, P.71.
4. L.W. Tsay, T.Y. Yang & M.C. Young, Mat. Sci. Eng., (A311)2001,P.64.
5. J.Xu et. al., Met. Trans., (25A)1994, P.539.
6. L.A. James and W.J. Mills, J. Eng. Mat. Tech., (107)1985, P.34.
7. L.W. Tsay et. al., Corr. Sci., (44)2002, P.1311.
8. C.Slama and M.Abdellaoui, J. Alloys

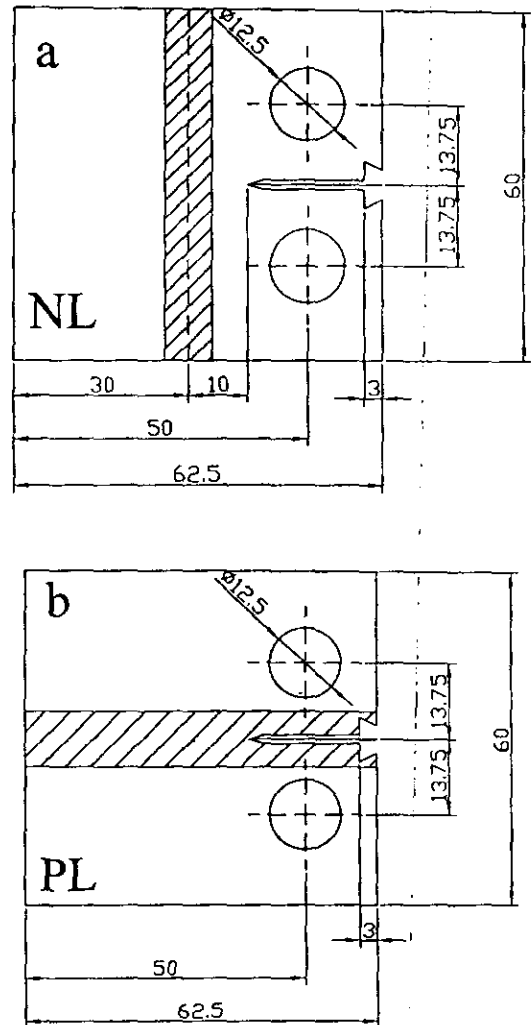


圖 1. 疲勞裂縫成長試驗試片尺寸圖

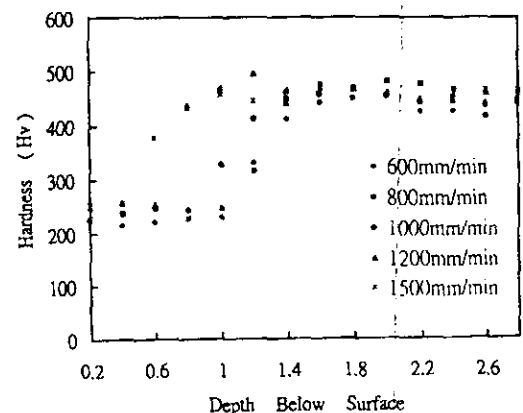


圖 2. 時效試片經雷射熱處理後，硬度-深度分佈圖(單位:mm)

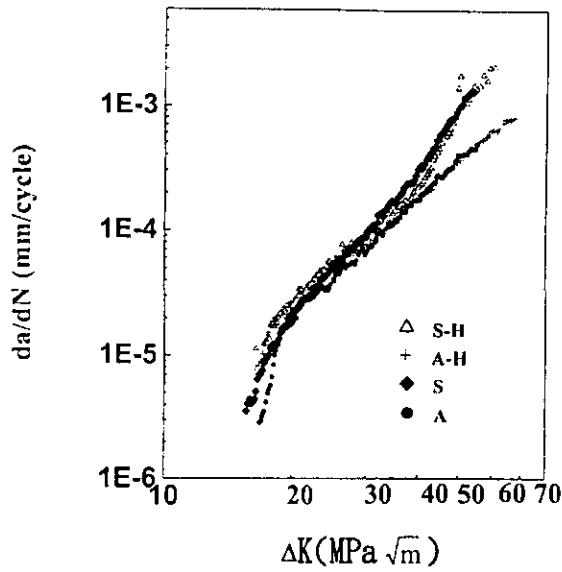


圖 3. 板材在固溶(S)或時效(A)狀態在大氣與氣態氫環境中(S-H, A-H)其 da/dN 對 ΔK 之關係曲線

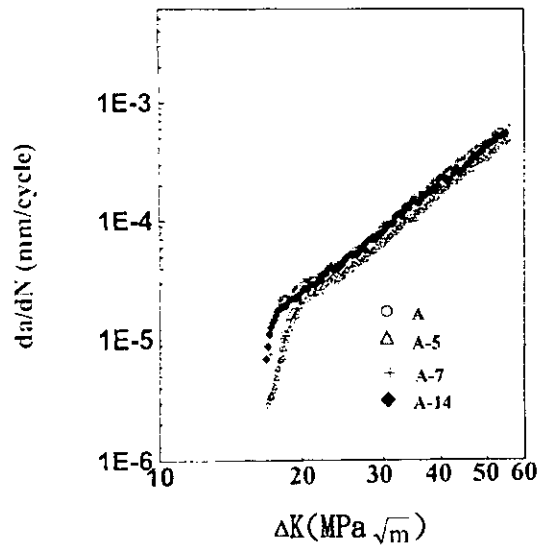


圖 4. 時效試片浸泡於飽和硫化氫溶液 5 天(A-5), 7 天(A-7)和 14 天(A-14)後在大氣環境中之 da/dN 對 ΔK 之關係圖

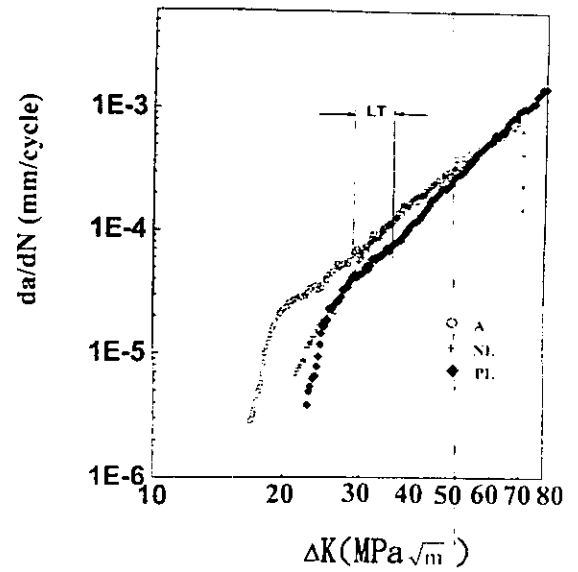


圖 5. 時效試片經雷射熱處理，疲勞裂縫成長方向垂直雷射熱處理區(NL)及疲勞裂縫成長方向沿雷射熱處理區(PL)，在大氣中之 da/dN 對 ΔK 之關係圖

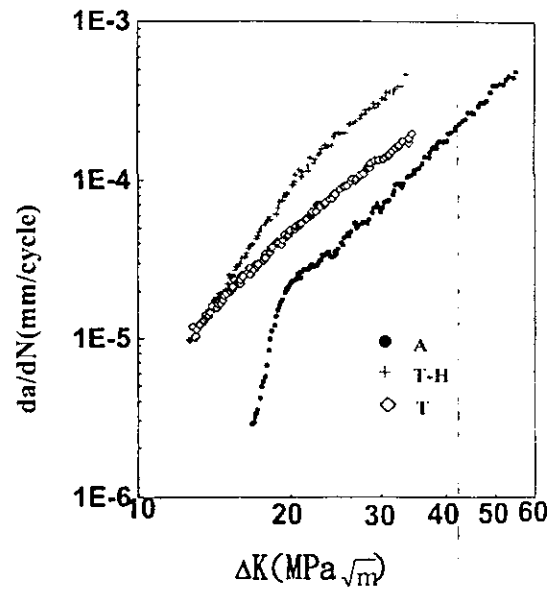


圖 6. 時效試片和過時效 T-250 麻時效鋼 T-250 在大氣中(T)與氣態氫環境中(T-H)之 da/dN 對 ΔK 之關係圖