

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

422 不鏽鋼雷射鉚件之缺口拉伸強度與疲勞裂縫成長特性探討

Notched tensile strength and fatigue crack growth behavior
of laser-welded 422 stainless steel

計畫編號：NSC 89-2216-E-002-052

執行期限：89年8月1日至90年7月31日

主持人：陳鈞 台灣大學材料科學與工程研究所

計畫參與人員：楊子青 台灣大學材料科學與工程研究所

摘要

422不鏽鋼為碳含量(wt %)0.2至0.25之12%Cr麻田散鐵系不鏽鋼，並添加了一些鉻、釩及鎢等合金元素。這些元素極易與碳形成碳化物，以增強材料之高溫強度，並兼具高韌性之特性。由於422不鏽鋼裂縫敏感度高因此鉚接性較差，故在鉚接製程上，通常藉由控制預熱溫度、在製程中避免氫氣的介入以及鉚後熱處理來確保鉚接品質。應用雷射鉚接，除了降低熱輸入量外也能減少鉚道溶質偏析。高溫回火之422不鏽鋼母材及鉚道有良好之抗氫脆性；而在低溫回火的情況下對於氫較為敏感，且隨著壓力的增加，缺口拉伸強度亦大幅下降。此外，低溫回火之鉚件也因回火不足而延緩疲勞裂縫成長速率。但475°C/2hrs回火之試片因回火脆性，使得在高ΔK時，裂縫加速進入快速破裂區。

關鍵詞：422不鏽鋼、雷射鉚接、缺口拉伸強度、疲勞裂縫成長速率

一、前言

422為麻田散鐵系不鏽鋼，經由熱處理可使其強化，一般使用溫度可達到650°C。由於422不鏽鋼同時兼具了高強度及高韌性的優點，因此廣泛應用汽渦輪機高壓葉片等重要零組件上^[1]。422不鏽鋼鉚接性雖差，但可藉由控制預熱、鉚後熱處理及避免鉚接時氫的介入，仍可獲得良好的鉚接品質。在一般的拉伸試片量測，未能充分反應顯微組織或測

試環境的不同，致使強度或延性改變的關係。若使用缺口拉伸試片，在不同環境或壓力下進行慢速率拉伸，由其抗拉強度或破壞模式的改變，可顯現經不同回火溫度之試片差異性。此外，疲勞裂縫成長速率之量測，亦可呈現鉚件不同區域成長速率之差別，做為工程應用上之重要參考依據。

近年來，由於高功率密度二氧化碳雷射發展已趨成熟，在工業上有廣泛的應用。雷射鉚接除可降低熱輸入量外，亦能減少鉚道金屬偏析以及鉚件形變量。本研究利用5KW二氧化碳雷射進行422麻田散鐵系不鏽鋼之鉚接，同時比較母材與鉚道之機械性質，並探討其氫脆敏感性以及鉚件不同區域之疲勞裂縫成長特性。

二、實驗方法

本實驗係使用15至20公分直徑之422不鏽鋼棒材（成份wt%：0.24% C；11.98% Cr；0.76% Ni；1.07% Mo；0.99% W and 0.26% V等），切割成厚度約4mm之盤狀試片，經真空固溶及回火處理(1038°C /30min + A. C. + 750°C /2hrs)後再進行Bead-on-plate雷射鉚接(3.15kW, 1000mm/min)。試片之預熱溫度控制在250°C左右且鉚後在此預熱溫度維持1小時，再進行250、475及700°C之回火處理。一般拉伸試驗係使用Smooth tensile specimens，進行母材經不同回

火處理之機械性能，做為計算 Notch strength ratio (NSR) 的基準。另外，以 ASTM E23 (subsize, 2.5 mm thick) 規格，進行上述試片的衝擊試驗。缺口拉伸試驗係使用 20x 56x 3 mm 試片，在長度方向中點之兩側以線切割垂直切入各達 7 mm 之缺口深度，並以 1.2×10^{-4} mm/sec 速率於不同壓力 (1、5 及 20 大氣壓) 及環境 (空氣及氫氣) 下進行母材及雷射鋸件之慢速率拉伸試驗。在疲勞裂縫成長試驗方面，分為母材與雷射鋸件兩部份來進行。實驗依據 ASTM E647-88a 標準規格，裂縫成長方向與鋸道垂直且缺口距鋸道邊緣 8mm，以比較鋸道不同區域之裂縫成長速率差異。

三、結果與討論

3-1.一般機械性質與顯微組織

422 不鏽鋼母材經 250(B-250 試片)、475 (B-475 試片) 及 700°C (B-700 試片) 回火後之機械性質如表一所示。由表可知 B-475 之試片，硬度最高。而 B-700 試片強度最低，但有較高之伸長率及斷面縮率。然而，B-250 或回火於二次硬化區內之 B-475 試片，雖有較高之強度，但由衝擊值與延性偏低。故 422 不鏽鋼必需經 700 °C 以上之回火，方可得到較佳的延性。上述試片之顯微組織如圖 1 所示，可知 B-250 及 B-475 試片其 M_3C 之合金碳化物在 Lath martensite 析出。當回火溫度達 700°C (如 B-700 試片) 時， $M_{23}C_6$ 合金碳化物也開始析出於 Lath martensite boundary 上。

3-2.缺口拉伸試驗

圖 2 為 B-700 試片於不同壓力之空氣與氫環境下，試片之缺口拉伸強度值。由圖可知在空氣中，壓力對試片缺口拉伸強度(NTS)沒有影響。在氫氣中，Loss in NTS 可定義為：

$$L = \frac{NTS_{(air)} - NTS_{(H_2)}}{NTS_{(air)}} \times 100\%$$

B-700 試片之 L 值趨近於 0，可知 B-700 試片於一大氣壓 (15Psi) 下對氫氣幾乎

沒有任何影響，對氫脆敏感度較低。當壓力提升至 5 (75Psi) 及 20 (300Psi) 大氣壓時，其 L 值分別為 8% 和 26%。顯示 B-700 試片隨著壓力的增加，缺口拉伸強度因而降低。就破斷面來觀察發現，空氣環境下不論壓力多寡，完全為酒渦狀延性破裂 (如圖 3)。而在氫氣環境下，缺口邊緣受到氫影響產生明顯的沿晶及 Tearing topography surface (TTS) 之脆性破斷 (如圖 4)。但隨著氫氣的壓力增加，使得 B-700 試片在二十大壓氫氣的作用下，有擴大脆性範圍的趨勢。

圖 5 為 W-700 (W 代表雷射鋸件，其後三位數字係回火攝氏溫度) 試片於不同壓力之空氣與氫氣環境下缺口拉伸強度值。於空氣環境下不受壓力的影響。其缺口拉伸強度平均為 1128MPa。由圖可知，經雷射鋸接後回火 700°C/2hr 的試片同樣擁有較佳的抗氫脆性。但與 B-700 試片之 L 值相較，得知 W-700 試片在氫環境下較低。由於分析雷射鋸件含硫量為 0.003%，而母材則是 0.007% 可知硫含量有下降趨勢。所以這可能是由於雷射鋸接將材料純化之效應所造成的^[2]。W-700 試片隨著壓力增加，氫脆範圍也因而擴大。受到氫氣影響較大之缺口邊緣區域其破斷面為 TTS 破壞。而部份脆性區則是酒渦狀破斷夾雜著階梯狀之準劈裂型態。

B-700 試片之缺口拉伸強度在空氣中不受壓力之影響而改變，而 B-475 與 B-250 之試片亦同。與一般拉伸試片相比較，可知缺口拉伸強度較一般抗拉強度為高。這是因為缺口拉伸試片三軸向應力狀態導致延性金屬的缺口強化；而在傾向脆性破裂的材料中，其塑性限制使其能夠超越材料經一般塑性降伏之前的破裂臨界值，因此使其增加缺口拉伸應力。於一大氣壓空氣環境中，B-250 及 B-475 試片之缺口拉伸強度與抗拉強度之比值 (即 NSR 值) 分別為 0.92 與 0.70。由此可知在二次硬化範圍內具回火脆性，因此對此回火溫度之母材及雷射鋸件之缺口 (或裂縫) 敏感性較高。而且由於低溫回火之母材及鋸道試

片，其回火麻田散鐵^[3]上存在高密度之晶格缺陷及微細碳化物，使得捕捉氫的位置較多而產生脆化^[4]。圖 6 顯示不同溫度回火之母材與雷射鉚件在不同氣壓氫環境下之缺口拉伸強度比較。由圖可知 B-250、B-475、W-250 與 W-475 於氫環境之 L 值分別為 6%、52%、9% 及 28%，且隨著壓力增加至二十大氣壓，上述試片之 L 值分別升高至 70%、71%、57% 和 61%。因此不論是母材或是鉚道試片，當回火於 475°C/2hr 之條件，其抗氫脆的能力最差，但與 250°C/2hr 回火試片相差不多。另外，422 不鏽鋼雷射鉚件因缺口形狀效應造成塑性變形，使得試片破裂於鉚道及母材界面上，故缺口拉伸強度較相同回火條件之板材為高。就破斷面分析而言，低溫回火之試片受氫氣之影響，離缺口邊緣處之脆性破裂模式以 TTS 及準劈裂為主；鉚道試片因其雷射純化效應，故灰雜物較母材試片為少（如圖 7），以及含硫量的降低，而造成鉚道試片於氫氣環境下缺口拉伸強度較母材試片為大。

3-3. 痞勞裂縫成長試驗

圖 8 為 B 試片在不同回火溫度時，裂縫成長速率 (da/dN) 與應力強度因子 (ΔK) 特性曲線。由特性曲線圖觀察得知其符合 Paris law 經驗公式， $da/dN = C(\Delta K)^m$ ，其中的指數 m 在 2.661~3.42 之間。B-700 試片之韌性高於 B-250 及 B-475 兩試片，因此呈現較低的 da/dN 值。一般而言，母材試片的破壞模式以穿晶破裂為主，但 B-475 因回火脆性於 $\Delta K > 30 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 時，其裂縫成長速率增快，呈現較為嚴重的沿晶破裂型態（如圖 9）。

圖 10 為 422 不鏽鋼雷射鉚接後經回火後之 W-250、W-475 和 W-700 試片與板材 (750°C) 之疲勞裂縫成長曲線比較。由於低溫回火之鉚件由於殘留應力的效應^[5, 6, 7]，使得在裂縫開始成長時，可觀察到明顯的延遲效應。而隨著裂縫長度的增加，延遲效應逐漸減小。當裂縫從熱影響區穿過裂縫成長速率較母材試片稍低。但

在進入另一端熱影響區時，卻迅速降低其裂縫成長速率，爾後回復與母材相近。為將殘留應力消除，故將雷射鉚件回火 700 °C/2hr。由圖 10 可知 W-700 試片之殘留應力仍未能完全消除，使得初始應力仍較母材試片為高，但其裂縫成長特性仍接近於母材。所有試片當裂縫通過鉚道位置時，其破斷面型態皆為穿晶破裂。

四、結論

1. 回火溫度之不同導致顯微組織的改變，在 700°C 回火的情況下，422 不鏽鋼母材及其鉚道均有良好之抗氫脆性；而在二次硬化溫度範圍內之 475°C 回火試片，其抗氫脆性最差。此外，氫脆敏感性與雷射鉚接過程中之純化效應亦有相當關連。
2. 422 不鏽鋼雷射鉚件由於斷裂位置在鉚道與母材界面上，故缺口拉伸強度較相同回火條件之母材為低。
3. 抗氫脆性較高之母材及雷射鉚件 (B-700 與 W-700) 試片，其缺口拉伸強度亦會隨壓力增加而下降。
4. 由於 475°C/2hrs 回火之試片具有回火脆性，在 $\Delta K > 30 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 時，疲勞裂縫成長加速而進入快速破裂區。
5. 422 不鏽鋼雷射鉚件若回火溫度不足，(W-250 及 W-475 試片)，鉚接的殘留應力會使初始的裂縫成長速率延緩。若回火溫度升高至 700°C，其疲勞裂縫成長特性因殘留應力之消除而回復與母材相近。

五、參考文獻

1. J.R. Kattus, Aerospace Structural Metal Handbook, Code 1403, (1973), p.3.
2. E.M. Breinar and C.M. Banas, Second International Symposium of the Japan Welding Society, (1975), pp.25-29.
3. C. R. Brook, F. Bogni, Materials Characterization, Vol.38, No.2, (1997), pp.103-117.

4. D. M. SYMONS, Metallurgical and Materials Trans. A., Vol.29A, (1998), pp.1265-1277.
5. C. C. Huang and T. H. Chuang, Materials and Manufacturing Processes, Vol.12, No.5, (1997), pp.779-797.
6. Y. Kitsunai, M. Tanaka and E. Yoshihisa, Metallurgical and Materials Transactions A, Vol.29A, (1998), pp.1289-1298.
7. J. D. Almer, J. B. Cohen etc., Metallurgical and Materials Transactions A, Vol.29A, (1998), pp.2127-2136.

表一、422 不鏽鋼經不同溫度回火之機械性質

| 試片種類 機械性質 | B-250 | B-475 | B-700 |
|--------------------------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| U.T.S. MPa (kgf/mm ²) | 1609 (164.2) | 1720 (175.5) | 968 (98.8) |
| Y.S. MPa (kgf/mm ²) | 1273 (130.0) | 1343 (137.0) | 637 (65.0) |
| Elongation (%) | 3 | 3 | 9 |
| Reduction of Area (%) | 5 | 3 | 11.5 |
| Impact energy (J) | 3.0 | 1.1 | 10.8 |
| Hardness (HRc) | 48.4 | 50.5 | 30.7 |

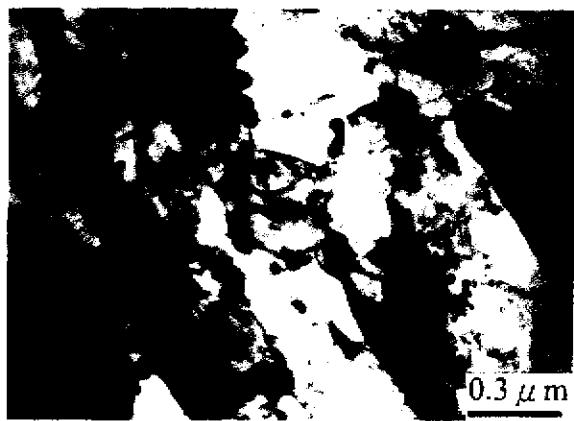
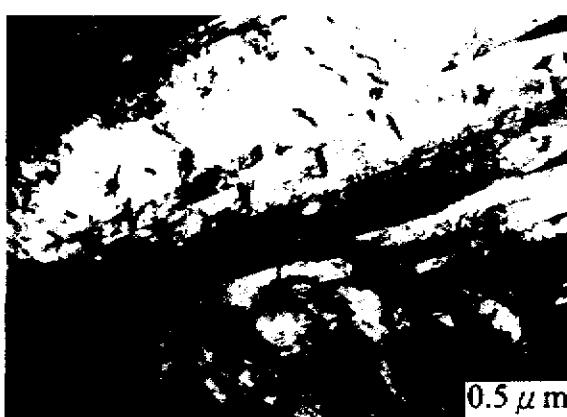
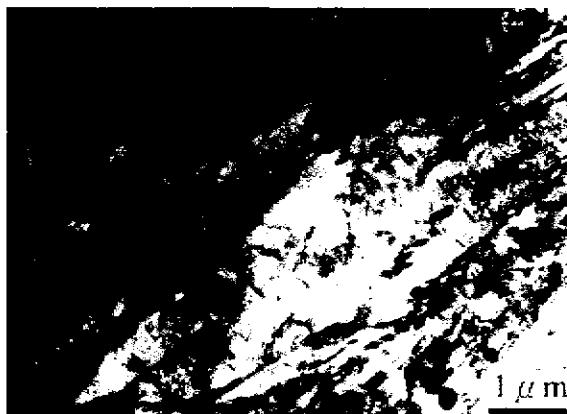


圖 1、422 不鏽鋼母材經不同溫度回火之顯微組織

(a) B-250 ; (b) B-475 與 (c) B-700

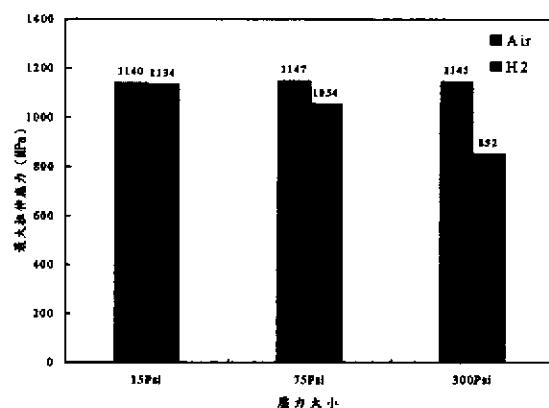


圖 2、B-700 試片於不同測試條件下之 NTS 值

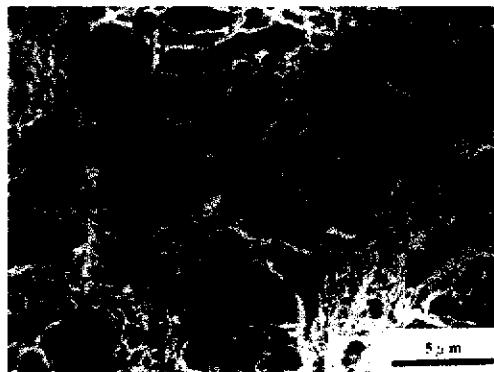


圖 3、B-700 試片於空氣環境下之延性破斷



圖 4、B-700 試片於氫環境(20atm)下之脆性破斷