

9Cr-1Mo-Nb-V 鋼材雷射鋸件之相變態行為與機械特性研究

Transformation Behavior and Mechanical Properties of Laser-Welded 9Cr-1Mo-Nb-V Steel

計畫編號：NSC 90-2216-E-002-041

執行期限：90 年 8 月 1 日至 91 年 7 月 31 日

主持 人：陳 鈞 台灣大學材料科學與工程研究所

參與人員：李文暉 台灣大學材料科學與工程研究所

摘要

本研究係針對 9Cr-1Mo-Nb-V 鋼板材及鋸件，進行顯微組織、衝擊、疲勞裂縫成長等實驗，並由缺口拉伸實驗探討不同回火溫度以及試驗環境下，對氫脆的抵抗能力。實驗結果顯示，板材以及雷射鋸件之脆化溫度範圍為在 $470^{\circ}\text{C}/1\text{hr} \sim 610^{\circ}\text{C}/1\text{hr}$ 之間，於回火 $540^{\circ}\text{C}/1\text{hr}$ 附近，有最低之衝擊值。脆化之成因主要為 Lath martensite boundaries 上形成之殘留沃斯田鐵，於 $540^{\circ}\text{C}/1\text{hr}$ 回火過程冷卻時，形成雙晶麻田散鐵所致。鋸道由於晶粒粗大，而使脆化現象更為嚴重。經 $750^{\circ}\text{C}/1\text{hr}$ 回火處理試片， M_{23}C_6 在 Ferrite matrix 上成長，使鋸道以及板材衝擊值回復。回火 $540^{\circ}\text{C}/1\text{hr}$ 之板材及鋸件其氫脆敏感性最高，回火 $250^{\circ}\text{C}/1\text{hr}$ 者次之，回火 $750^{\circ}\text{C}/1\text{hr}$ 之試片，有最低的氫脆敏感性。疲勞裂縫成長方面，板材 QT540 試片之裂縫成長速率最快，QT750 之裂縫成長速率最慢，QT250 則介於前述二者間。全鋸道試片 As-welded 以及回火 $540^{\circ}\text{C}/1\text{hr}$ 之試片，於 ΔK 大於 43 與 $30 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 後，裂縫呈現不穩定快速成長。

關鍵詞：9Cr-1Mo-Nb-V 鋼、雷射鋸接、

氫脆、疲勞裂縫成長

1. 前言

9Cr-1Mo-Nb-V 鋼為 1970 年代後期發展之耐熱鋼，為將原有 9Cr-1Mo 鋼成份再添加 $0.18\sim0.25\%$ V 及 $0.06\sim0.1\%$ Nb，具有良好的高溫強度及高溫抗腐蝕特性[1]，因此廣泛應用於火力電廠之過熱器，以因應抗氧化及耐高溫的環境需求[2-4]。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。就雷射鋸接方面而言，其除

可降低熱輸入量外，鋸件之熱影響區及變形量均可降低至最低程度。

本研究係利用 5KW 二氣化碳雷射，進行 9Cr-1Mo-Nb-V 鋼之鋸接，比較經不同溫度回火之板材與鋸件，對機械性質及顯微組織影響，並探討回火試片之氫脆敏感性及疲勞裂縫成長特性。

2. 實驗方法

本實驗所使用的材料為原始厚度 9.5mm 的 9Cr-1Mo-Nb-V 鋼板材，其化學成分(wt%)為 0.05C、8.83Cr、0.95Mo、0.45Si、0.35Mn、0.076Nb、0.2V、0.014P、0.003S，其餘為 Fe。實驗板材加工成厚度 5.2mm 之板狀試片，經真空中溶處理($1040^{\circ}\text{C}/30\text{min}$)後空冷，進行 250°C 、 540°C 、 750°C 回火；此種板材淬火-回火試片，在本實驗中稱之為 QT 試片。鋸件為將固溶後之板材進行 Bead-on-plate 雷射鋸接(功率 4.2KW，平台走速 700mm/min)，試片之預熱溫度控制在 250°C ，且鋸後在此溫度維持 1 小時，再進行如同板材之回火處理，此為 WT 試片。QT 與 WT 試片後之三位數字代表回火溫度。

機械特性評估方面，衝擊試片係根據 ASTM E23 (Subsize, 5mm thick) 製作，探討經不同溫度回火之板材及鋸件其衝擊值變化，以確定回火脆性之範圍。一般拉伸試驗試片係根據 ASTM E8 製作，係使用 Smooth tensile specimens，在常溫下以 0.762mm/min 之夾頭移動速率進行試驗，量測板材經不同溫度回火處理後之抗拉強度，以做為計算 Notch strength ratio (NSR) 的基準。缺口拉伸試驗係使用 $20 \times 56 \times 3$ 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，鋸件為採缺口開在鋸道中心且平行鋸道之方式製作；於 0.0072 mm/min 速率, 10atm 壓力之空氣環境及氫氣環境下，進行板材及雷射鋸件之慢速率拉伸試驗以求得缺口拉伸強度 (Notched tensile strength, NTS)。在疲勞裂縫成長試驗方面，實驗試片係依據 ASTM E647-88 標準規格製作，試片分為板材與雷射鋸件兩部份進行。鋸件之裂縫成長方向係與雙道鋸道平行，疲勞裂縫完全於鋸道內所延伸。疲勞裂縫成長試驗分兩階段進行，第一階段進行預裂，以 K 遞減方式進行，預裂長度設定為 2mm，隨即進入第二階段裂縫成長試驗，採定負荷方式進行，疲勞裂縫成長試驗的試驗參數：頻率為 20Hz、應力比 (Load ratio) R 值為 0.1。

3. 結果與討論

3-1. 一般機械性質與顯微組織

9Cr-1Mo-Nb-V 鋼板材及鋸件經不同溫度回火處理後，其衝擊值與微硬度變化如圖 1 與圖 2 所示。衝擊試驗結果顯示，板材在 540°C/1hr 附近有明顯脆化現象，其衝擊值僅有 10J。雷射鋸件同樣於 540°C/1hr 有一最低之衝擊值 (4.2J)，脆化溫度範圍為 470°C/1hr ~ 610°C/1hr，且在此溫度有二次硬化現象產生。回火溫度低於 540°C 時，衝擊值雖有提升，但仍具有相當脆性；而當回火溫度高於 680°C 時，開始有衝擊值上升之現象，而在 750°C 時可得一良好之衝擊性質。

圖 3 為雷射鋸件 WT250、WT540 以及 WT750 試片鋸道區域之顯微組織。WT250 試片於部分板條狀麻田散鐵內有大量的差排分佈，且在 Martensite lath boundaries 上明顯有殘留沃斯田鐵存在。由於 9Cr-1Mo-Nb-V 鋼之 M_f 溫度約為 250°C [5]，因此在鋸道之冷卻過程中，沃斯田鐵應可完全轉變成麻田散鐵，但可能由於麻田散鐵在變態過程中體積膨脹，造成部份殘留沃斯田鐵受到兩側應力作用而殘留在鋸道內。回火 540°C/1hr 之 WT540 試片中，原先應力作用會由於回火效應而逐漸消除，殘留沃斯田鐵在冷卻過程中形成雙晶麻田散鐵，造成

鋸道衝擊值降低，使材料嚴重脆化。由於 9Cr-1Mo-Nb-V 鋼之 M_s 溫度高達 390°C [5]，因此在冷卻過程當中，會對先前所生成之麻田散鐵產生回火作用，形成自動回火麻田散鐵，並產生桿狀之碳化物。而在 WT750 試片內，發現有大量粗化之球狀碳化物 ($M_{23}C_6$) 伴隨 Ferrite 生成，因而使衝擊值回復。

3-2. 缺口拉伸試驗

不同回火溫度 QT 試片於 10 atm 空氣及氫氣環境下之缺口拉伸強度值，如圖 4 所示。NTS Loss 為缺口拉伸強度於氫氣中較空氣中之減少量比值：

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

NTS Loss 值愈大，表示氫脆敏感性越高。板材方面，QT540 試片之 NTS Loss 值為 40%，氫脆敏感性最高；QT250 次之，NTS Loss 值為 7.8%；而高溫回火之 QT750 試片高壓氫環境對其幾乎完全沒有任何影響，其 NTS Loss 值趨近於 0。

拉伸試驗結果顯示，QT250、QT540 以及 QT750 之抗拉強度分別為 1263 MPa、1305 MPa 以及 743 MPa，與一般拉伸試驗相較，缺口拉伸強度較一般抗拉強度為高，此為由於缺口拉伸試片之三軸向應力狀態，將導致延性金屬的缺口強化。QT250、QT540 以及 QT750 試片於 10 atm 空氣環境中，其缺口拉伸強度與抗拉強度比值（即 NSR 值）分別為 1.19、1.21 與 1.22。有缺口強化效果，但強化效應並不顯著。

不同溫度回火的 WT 試片，於 10 atm 空氣及氫氣環境下之缺口拉伸強度值如圖 5 所示。在相同回火條件下，鋸道較板材試片有更高之氫脆敏感性，WT250 及 WT540 試片之 NTS Loss 分別達 36.4% 與 61.8%，皆較 QT 試片高，且 WT540 具有最高之氫脆敏感性。WT540 試片於氫環境下之缺口拉伸破斷面主要特徵為準劈裂破壞，而 WT250 試片則主要為準劈裂和少許 Dimple 破壞。高溫回火 WT750 試片之氫脆敏感性不明顯，其 NTS Loss 只有 1%。

3-3. 疲勞裂縫成長試驗

圖 6 為板材 QT 試片於不同回火溫度時，裂縫成長速率 (da/dN) 與應力強度因子 (ΔK) 之特性曲線。由特性曲線圖觀察得知，QT540 試片其 da/dN 值最高，裂縫成長速率最快，QT250 試片次之，QT750 試片之裂縫成長速率最慢；QT 試片之疲勞裂縫成長破斷面為以穿晶破壞為主，QT250 及 QT750 試片全為由穿晶破壞所構成，QT540 試片於低 ΔK 時為穿晶破壞模式，當 ΔK 達 $48 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 時，疲勞裂縫開始不穩定快速成長，破斷面由穿晶轉為準劈裂破壞。

圖 7 為件 WT 試片於不同回火溫度之裂縫成長速率特性曲線。WT250 及 WT540 試片其疲勞裂縫成長特性曲線斜率，較相同回火條件之 QT250 及 QT540 試片陡峭，而 WT750 試片此現象較不明顯。WT250 及 WT540 試片分別在 ΔK 小於 43 及 $30 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 時，其破斷面為由穿晶破壞所構成，大於此值後，裂縫成長速率快速增加，呈現不穩定之快速成長，破斷面則轉變為由準劈裂所構成，如圖 8 所示。

4. 結論

1. 9Cr-1Mo-Nb-V 鋼板材及鋸件之脆化溫度範圍為 $470^\circ\text{C}/1\text{hr} \sim 610^\circ\text{C}/1\text{hr}$ 之間，於回火 $540^\circ\text{C}/1\text{hr}$ 時，有最低之衝擊值。
2. 回火溫度之不同將導致顯微組織的改變，9Cr-1Mo-Nb-V 鋼回火脆化之原因，為殘留於 Martensite lath boundaries 之沃斯田鐵，經回火 $540^\circ\text{C}/1\text{hr}$ 後，冷卻時形成雙晶麻田散鐵所致。
3. 在 $540^\circ\text{C}/1\text{hr}$ 回火之板材及鋸道均有最高之氫脆敏感性， $250^\circ\text{C}/1\text{hr}$ 回火之板材及鋸道的氫脆敏感性次之， $750^\circ\text{C}/1\text{hr}$ 回火之板材及鋸道之氫脆敏感性最低。且在相同回火條件下，鋸道較板材試片有更高之氫脆敏感性。
4. 疲勞裂縫成長實驗中，板材 QT540 試片有最快之裂縫成長速率，QT250 試片次之，QT750 試片之裂縫成長速率最慢。
5. WT250 及 WT540 試片，其裂縫成長曲

線斜率，較相同回火條件之 QT250 及 QT540 試片陡峭，WT750 則無此現象。

5. 參考文獻

1. Y. Tsuchida, K. Tokuno, K. Hashimoto, NIPPON STEEL TECHNIQUE RE-PORT, No 58, Jul.1993, pp.27-35
2. L. J. Berchman, S. Muralidhatan, N. S. Rengaswamy, S. Natarajan, V. Sivan, and S. V. Iyer, British Corrosion Journal, vol.31, no.3, 1996, pp.223-226
3. T. Cool and H. K. D. H. Bhadeshia, Science and Technology of Welding and Joining, vol.2, no.1 , 1997, pp.36-42
4. 陳廣中, X91 鉻鉬合金鋼鋸接探討, 鋸接與切割, 第五卷第四期, pp.12-20
5. T.Sasaki, etc, Kawasaki Steel Technical Report, no25, 1991, p.78

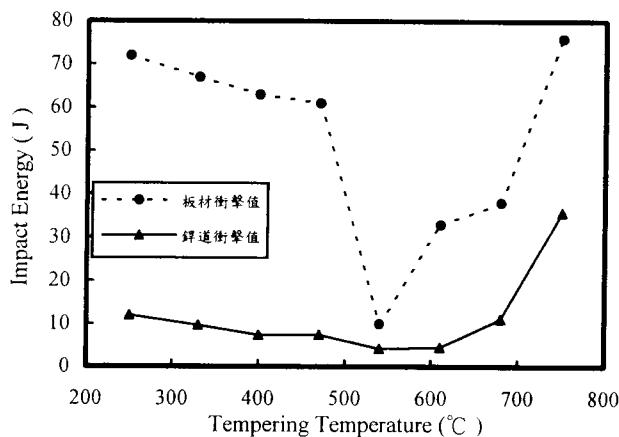


圖 1 不同回火溫度 QT 與 WT 試片之衝擊值比較

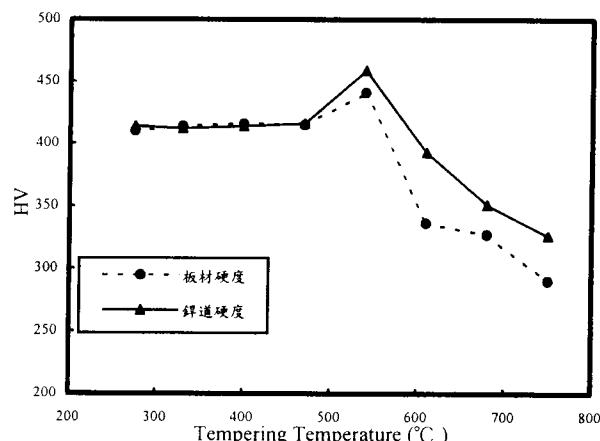


圖 2 不同回火溫度 QT 與 WT 試片之微硬度值比較

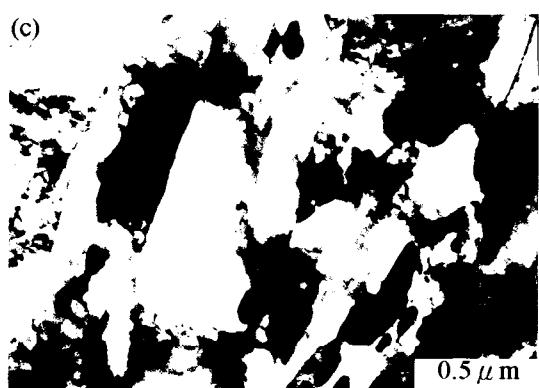
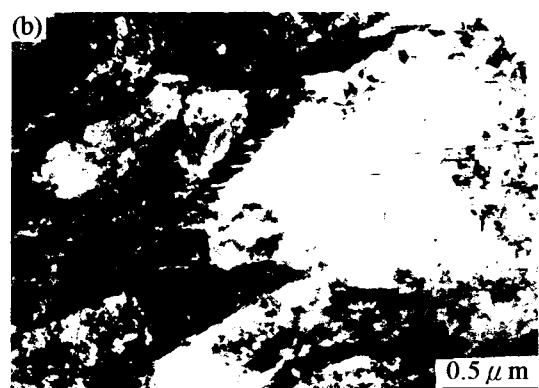


圖 3 錐道 TEM 顯微組織 (a) WT250, (b) WT540, 與 (c) WT750

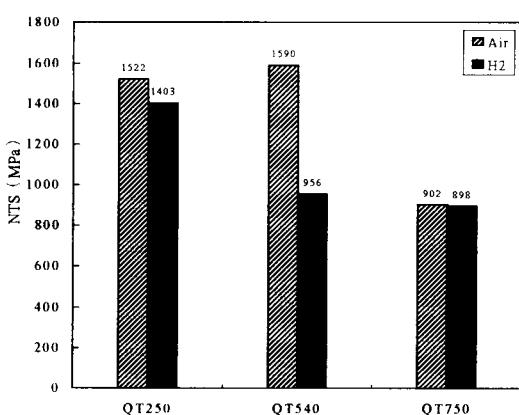


圖 4 不同回火溫度 QT 試片於 10 atm 空氣與氫氣環境下之缺口拉伸強度值

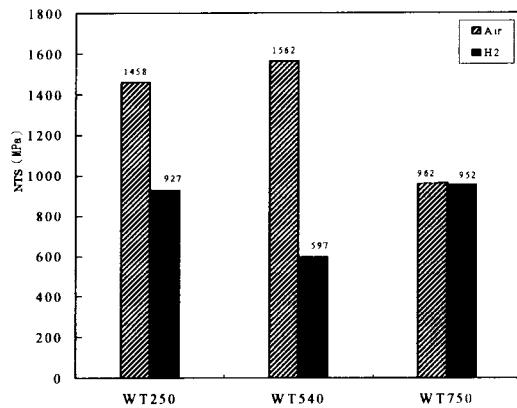


圖 5 不同回火溫度 WT 試片於 10 atm 空氣與氫氣環境下之缺口拉伸強度值

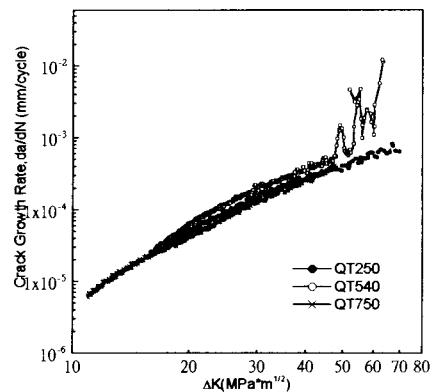


圖 6 不同回火溫度 QT 試片之疲勞裂縫成長特性曲線

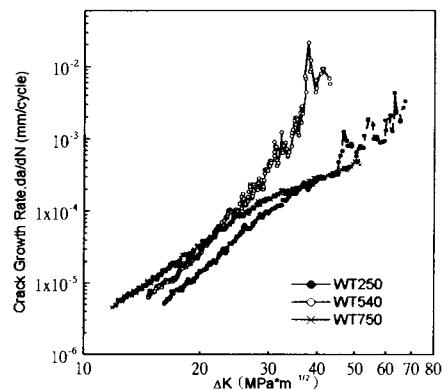


圖 7 不同回火溫度 WT 試片之疲勞裂縫成長特性曲線

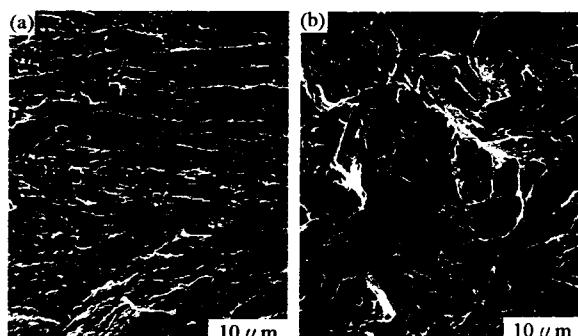


圖 8 WT540 試片於(a) $\Delta K < 30$ 與(b) $\Delta K > 3\Delta M Pa \sqrt{m}$ 之疲勞裂縫成長破斷面