

熱處理溫度對低碳鋼銲件應力消除與微觀組織之研究

Studies of heat treatment of different temperature on residual stress relief and microstructure of low carbon steel weldment

周佑融, 王家祥, 吳威德*

Yu-Jung Chou, Jia-Siang Wang and Weite Wu

中興大學材料科學與工程學系

f1470891079@gmail.com

摘要

本研究設計對自動鎢極氬銲後工件進行 50°C、100°C、200°C、400°C、600°C、800°C 持溫各 2 小時熱處理，探討不同熱處理溫度對殘留應力消除與其顯微結構之影響，並結合 X-ray 量測應力值、金相觀察與硬度值，以獲得量化應力消除熱處理的歷程與組織形貌特徵。結果顯示殘留應力在 200°C 低溫回復階段才開始明顯消除約 17.4%；而 400°C 高溫回復階段明顯消除 36.8%；600°C 為再結晶階段，應力和硬度在此溫度皆快速下降，殘留應力已消除 85.1%；而 800°C 熱處理後，殘留應力已幾乎完全消除。**關鍵字：**殘留應力、銲接、熱處理、低碳鋼

Abstract

Steel are often used as the main materials of architectures and welded to joint two parts, but residual stress(RS) is formed. Avoiding to harms of residual stress, we design different heat treatment condition to eliminate weld residual stress, and combine microstructure and hardness data to understand the process of residual stress relief. Residual stress start to relief about 17.1% in 200 °C and decrease about 36.8% in 400 °C; Residual stress and hardness decrease rapidly in 600 °C recrystallization process; Residual stress is almost eliminated in 800 °C grain growth process. **Keywords:** Residual stress, Weld, Heat treatment, Low carbon steel.

1.前言

低碳鋼在工業銲接上應用廣泛，因其一般情況下不會產生嚴重硬化、淬火組織，擁有良好之銲接性。但由於焊接過程中材料局部性熔融加熱，產生溫度梯度極大，冷卻不均勻地收縮而產生殘留應力。殘留應力使材料晶格扭曲，僅需些許外力即可越過降伏點

產生塑性變形，影響其機械性質表現、疲勞壽命，甚至有應力腐蝕的問題，輕則產生龜裂，重則使銲件破壞，故控制降低銲件的殘留應力是極為重要的關鍵。

降低殘留應力的方法有熱處理、震動法等，而其中熱處理是普遍應用的方法之一，但因熱處理成本較高，如能了解不同熱處理條件的殘留應力消除效果，則能有效地控制成本，避免浪費。故本實驗欲藉由不同之熱處理溫度來分析殘留應力的消除效果，結合顯微結構與硬度值分析觀察其變化，以期許獲得殘留應力消除的歷程特徵與最佳的熱處理條件。

2.實驗方法與步驟

實驗使用試片為 AISI 1020 碳鋼，長 100mm、寬 60mm、高 23mm，使用全自動化氣體保護鎢極電弧銲(GTAW)進行銲接以製造殘留應力，起弧電流 200A、電壓 15V、行走速度 150mm/min，銲道長度 80mm。每個試片分別經過第一次殘留應力測量後進行銲後熱處理，熱處理升溫速率控制為 200 °C /hr，分別升溫達 50 °C、100 °C、200 °C、400 °C、600 °C、800 °C 持溫 2 小時後，爐冷至室溫，接著第二次量測殘留應力觀察其變化量。

殘留應力量測運用 XRD-cos α 法殘留應力量測技術(Cr 靶 XRD)，使用儀器為 μ -X360TM，電腦中輸入參數量測 α 肥粒鐵(211)面之繞射峰訊號，工作距離調整至 39mm，試片傾斜角度 35 度。量測得訊號代入式[4]：

$$\sigma = - \left[\frac{E}{1+\nu} \right] \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin 2\psi_0} \left(\frac{\partial a}{\partial \cos \alpha} \right)$$

E 為彈性模數， ν 為蒲松比， η 為布拉格角 θ 的餘角， ψ_0 為試片表面與 2D 偵測屏幕之夾角， α 定義為繞射環上訊號之角度，a 定義為式：

$$a_1 = \frac{1}{2} [(\epsilon_{\alpha 1} - \epsilon_{\pi+\alpha 1}) + (\epsilon_{-\alpha 1} - \epsilon_{\pi-\alpha 1})]$$

整體示意圖如 Fig.1。量測位置為垂直銲道方向，從銲道中心向外量測到基材。

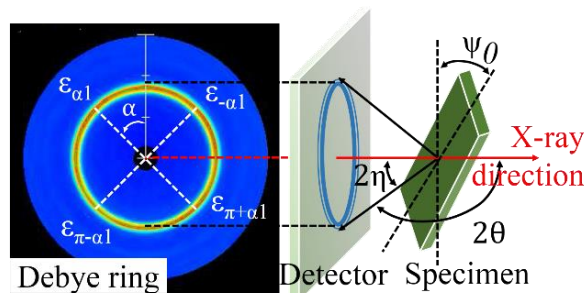


Fig.1 Cos α -XRD residual stress measurement

為了定量化殘留應力消除效果以鬆弛率(Relaxation rate)表示之，公式如式[1]：

$$\text{Rel}(\%) = \frac{|\sigma_0| - |\sigma_{HT}|}{|\sigma_0|} \times 100\%$$

Rel(%)為鬆弛率(Relaxation rate)，相當於殘留應力的消除百分比。 σ_0 為加工後殘留應力(MPa)； σ_{HT} 為熱處理後殘留應力(MPa)。

3.結果與討論

3.1 成分鑑定

試片化學成分以 X 射線螢光分析儀分析，如 Table.1。原始試片與銲接後試片的相分析如 Fig.2 所示，繞射峰上標示代表為 α -Fe 相，其為體心立方結構(Body-Centered Cubic, BCC)。銲接前後都僅有 α -Fe 繞射訊號，可知主要為 α -Fe 相。但從平衡相圖得知平衡狀態會有 Fe_3C 相存在，但無繞射訊號，推測其原因為相分率太小，儀器在一定百分比以下即無法偵測其訊號。

Table.1 Specimen chemical component

Element	Fe	C	Mn	P	S
Contentswt(%)	Balance	0.184	0.604	0.017	0.1.8012
Required	Balance	0.18-0.23	0.30-0.60	0.04(max)	0.05(max)

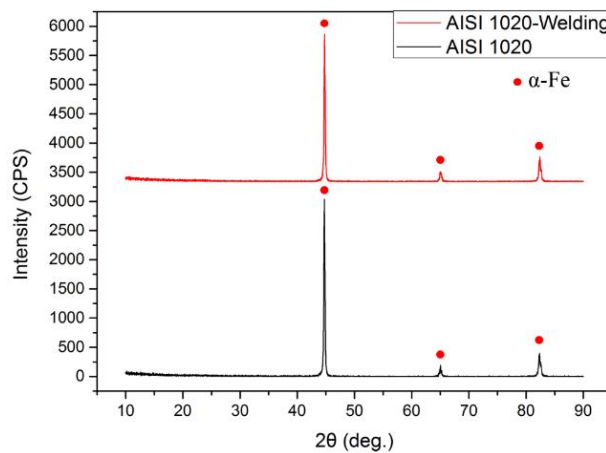


Fig.2 X-ray Diffraction phase analysis

3.2 殘留應力分析

本實驗利用 Cr 靶-cosa 法 XRD 進行殘留應力分析。試片銲接後分別經過 50°C、100°C、200°C、400°C、600°C、800°C 持溫 2 小時熱處理消除殘留應力後。其殘留應力變化結果如 Fig.3 所示。

銲道熔融邊界在離中心 5mm 處，熱影響區由顯微結構判斷離銲道中心在 5~9mm 內。殘留應力在銲道與熱影響區有最大拉應力，在越過熱影響區後拉應力急遽下降。另發現部分試片銲道中心位置的殘留應力有下降的現象，與銲接理論不符。參閱其他文獻也有如此的現象[5][6][7]，但沒有明確解釋其原因。此現象可能與塑性變形有關，試片銲道中心拉伸應力極大，大於材料降伏點而發生塑性變形，變行使拉伸應力受到釋放，應力值下降。其結果就是材料發生彎曲，或是銲道表面的隆起與凹陷。

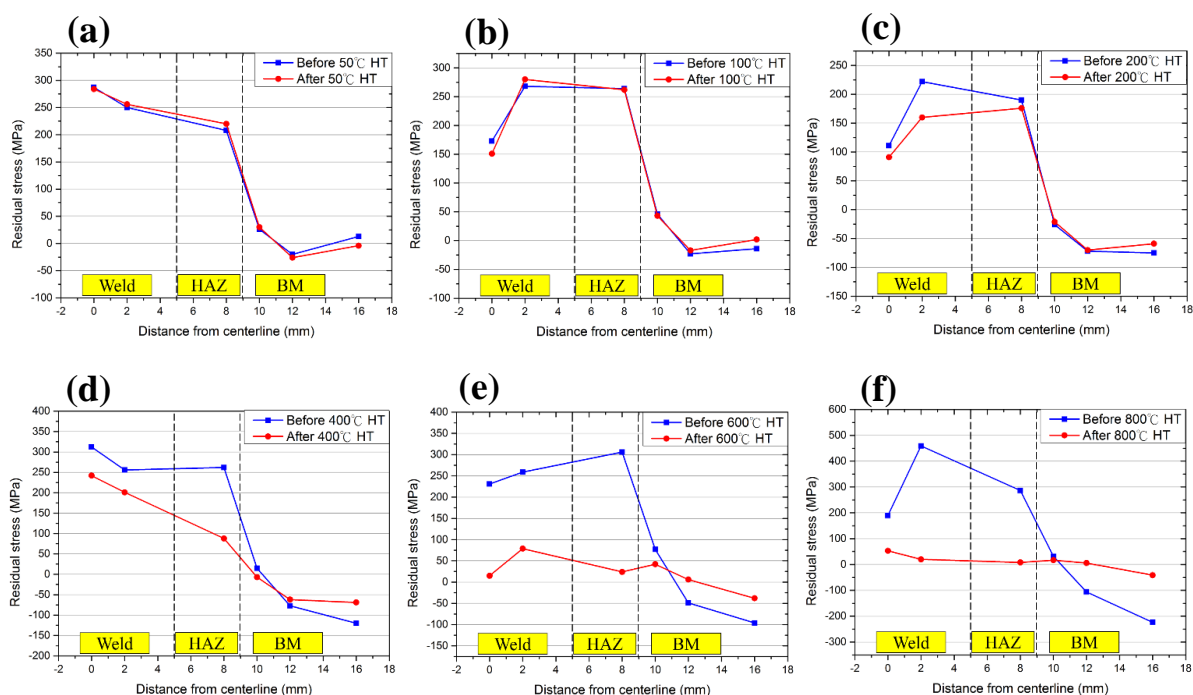


Fig.3 Residual stress of weld in (a)50 °C HT(b)100 °C HT(c)200 °C HT(d)400 °C HT(e)600 °C HT(f)800 °C HT

Table.2 Average tension residual stress relaxation rate

Temperature	Rel(%)
50 °C	-2.4
100 °C	3
200 °C	17.8
400 °C	36.8
600 °C	85.1
800 °C	88.3

僅取銲道和熱影響區域的應力值數據，因殘留應力導致的破壞都是由拉應力所造成，把拉應力位置的鬆弛率取平均後得 Table.2。50 °C、100 °C 熱處理對消除殘留應力沒有效果；200 °C 則開始觀察到變化，拉伸殘留應力鬆弛率平均為 17.8%；400 °C 的殘留應力鬆弛率平均為 36.8%；600 °C 熱處理後應力有大幅的改變，殘留應力鬆弛率平均為 85.1%；800 °C 熱處理後殘留應力鬆弛率平均為 88.3%。

其中較為特別的就是 200 °C 與 400 °C 在銲道的殘留應力消除效果相似，但在熱影響區的殘留應力鬆弛率卻突然提高。其可能原因在於熱影響區原為再結晶區域，再結晶的過程伴隨著殘留應力的下降，故供給試片足夠的熱能(如 400 °C 的試片)，使再結晶得以繼續進行，原受熱膨脹收縮之應力就得以消除。

3.4 顯微結構分析

本實驗針對銲道分析顯微結構在不同溫度熱處理後的變化，結果如 Fig.4 所示。銲道主要由 α 肥粒鐵相所構成，不同位置之形貌與密集程度會有差異。Fig.5(a)(b)(c)(d)(e) 分別為無熱處理、50 °C、100 °C、200 °C、400 °C 持溫 2 小時熱處理後之顯微結構，主要結構仍為板狀與針狀肥粒鐵，難以明顯看出其中的變化；Fig.5(f) 600 °C 熱處理後發現有再結晶之晶粒生成，原結構破壞；Fig.5(g) 800 °C 熱處理後晶體結構形貌完全改變，可看到白色等軸狀的肥粒鐵與圍繞在肥粒鐵週邊的黑色波來鐵。造成顯微結構在 800 °C 熱處理後完全改變的原因有兩點，第一點為結構經過完全再結晶化且為晶粒成長階段；第二點為相變化，由 Fe-Fe₃C 平衡相圖可見 800 °C 已經超過 A₁ 線(727 °C)，部分 α -Fe 與 Fe₃C 轉變成 γ -Fe。之後溫度下降後， γ -Fe 在 α -Fe 晶粒周邊共析出波來鐵。

總結起來，由顯微結構判斷 400 °C 以下為回復階段，600 °C 為再結晶的階段，800 °C 為晶粒成長之階段。

3.5 維氏硬度分析

Fig.5(a)為試片表面垂直鐸道方向在不同溫度熱處理後之硬度值，可看到鐸道中心為硬度最高點，熱處理前之鐸道最大硬度為 293HV。在 50 °C ~400 °C 熱處理後硬度值沒有顯著的變化；600 °C 熱處理後最大硬度值降低至 223HV；800 °C 熱處理後，最大硬度值降低至 150HV。Fig.5(b)為鐸道橫截面不同深度在不同溫度熱處理後的硬度值。從圖可看見硬度也呈現一個山峰的形狀，但硬度最高點在距離表面 2~3mm 左右。熱處理前最大硬度為 314HV。50 °C ~400 °C 熱處理後硬度值沒有顯著的變化；600 °C 熱處理後最大硬度值降低至 239HV；800 °C 熱處理後，最大硬度值降低至 144HV。

鐸道橫截面在離表面 2~3mm 處有最大硬度值的原因，從 Fig.6 可以發現此處有較大的原 γ -Fe 晶粒，在晶粒內析出針狀的費德曼肥粒鐵。由文獻當中可以發現費德曼組織可使結構硬度上升[2][3]，而其中針狀又比在晶界析出的板狀費德曼組織硬度更高。結合硬度與顯微結構可即可解釋為何此區間擁有鐸道橫截面中的最大硬度了。

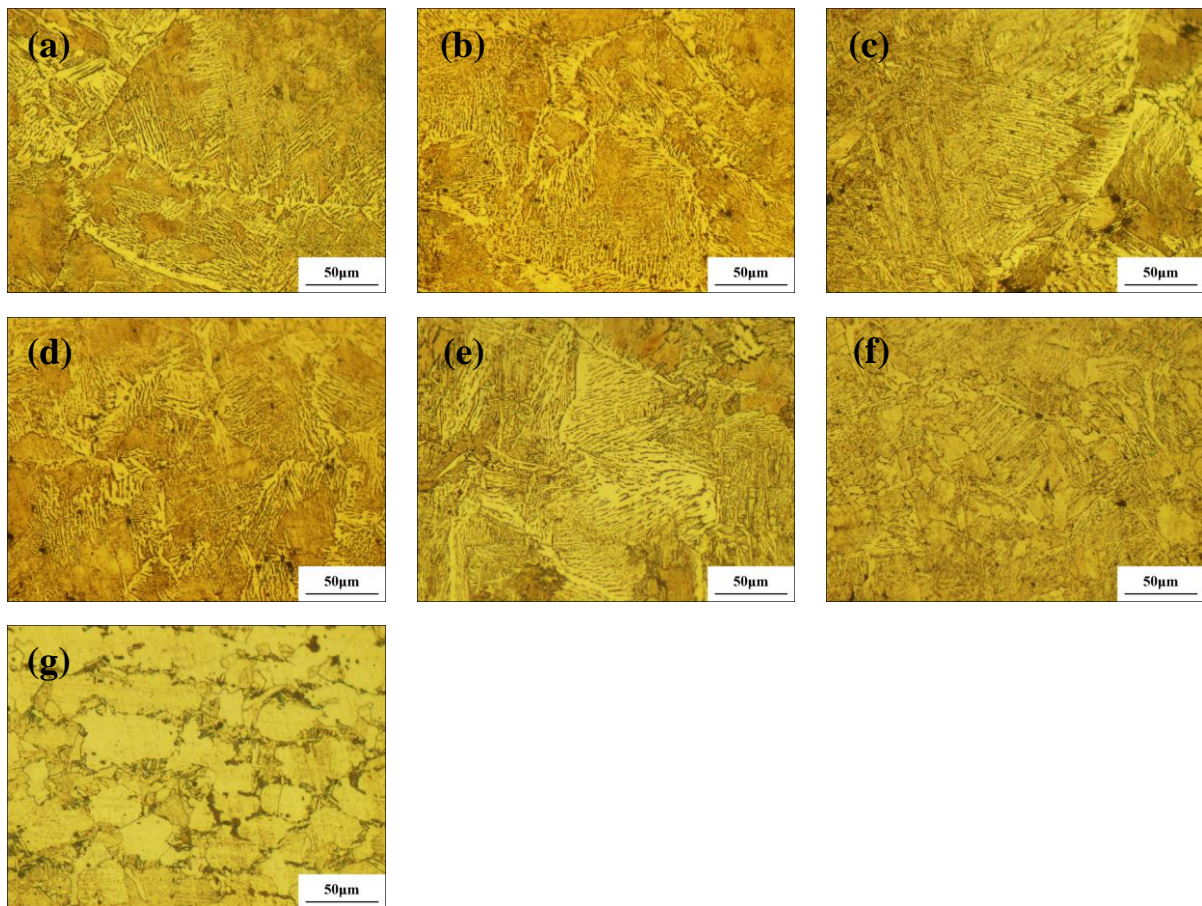


Fig.4 Microstructure of weld (a)Without HT (b) After 50 °C HT (c) After 100 °C HT (d) After 200 °C HT (e) After 400 °C HT (f) After 600 °C HT (g) After 800 °C HT

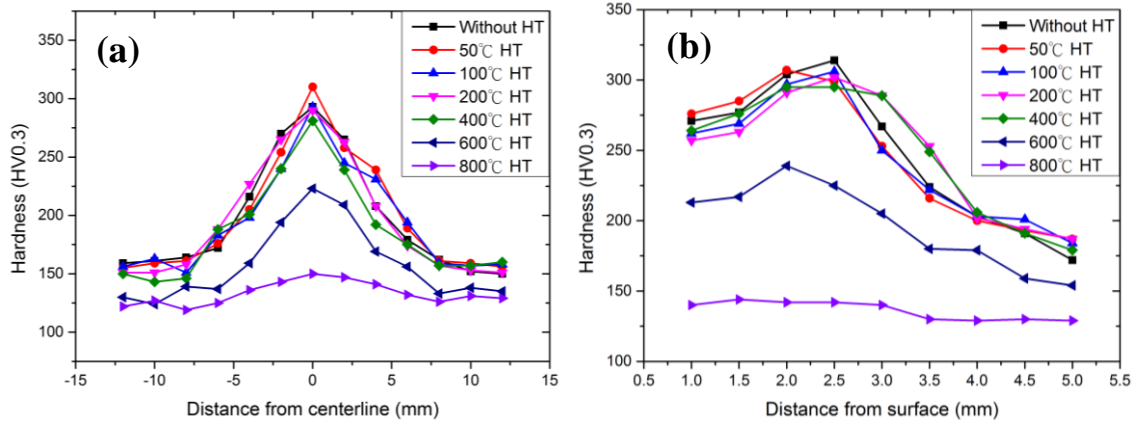


Fig.5 Hardness of weld. (a) perpendicular to weld direction(b) cross section of weld

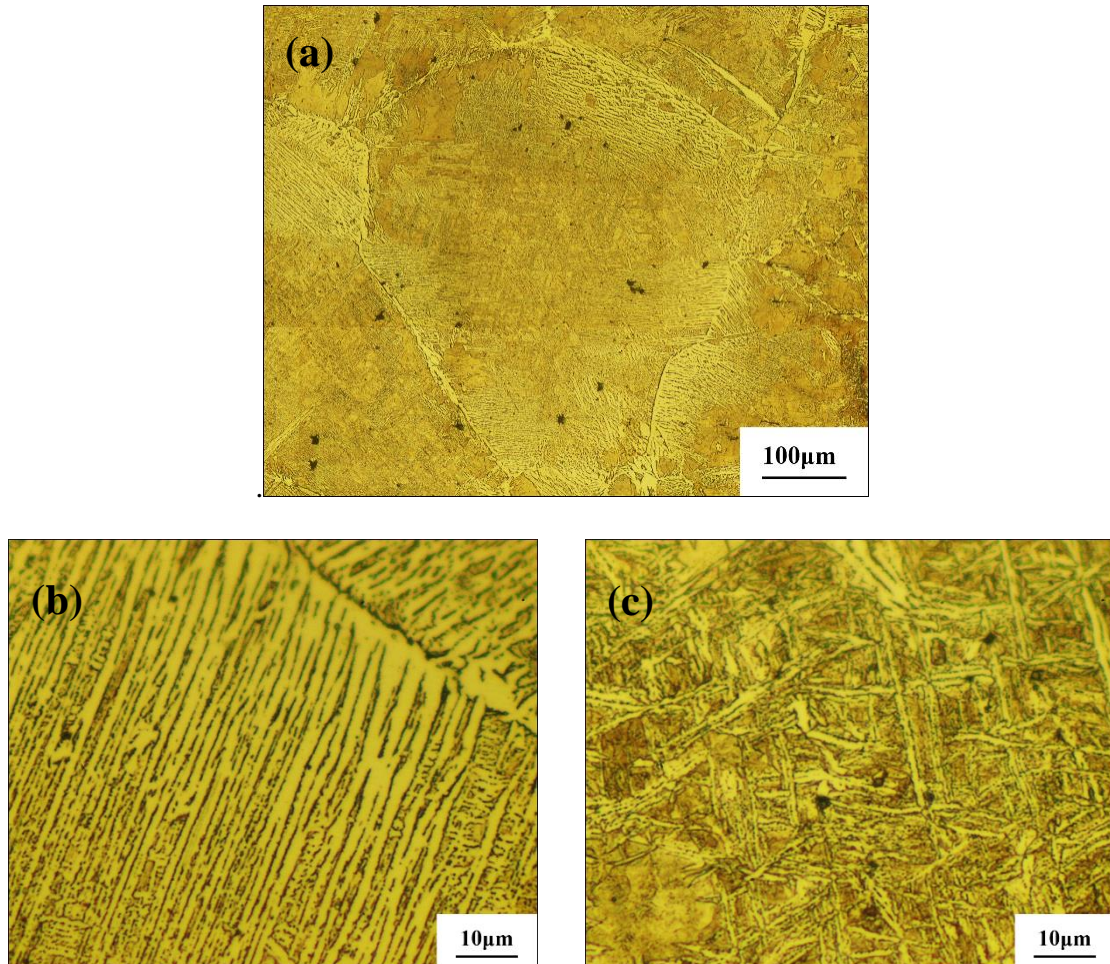


Fig.6 Microstructure of the hardest position (a) Original grain shape of γ -Fe(b) Plate Widmanstatten ferrite(c) Acicular Widmanstatten ferrite

3.6 應力與硬度比較

結合殘留應力和硬度在不同溫度熱處理後之數據，如 Fig.7。殘留應力數據為鋁道拉伸應力平均消除百分比，硬度數據選取鋁道橫截面硬度分布中的硬度最大值。

殘留應力消除在 200 °C 熱處理持溫 2 小時才有明顯的消除率，到 400 °C 熱處理更進一步有 36.8% 的消除率，到 600 °C 再結晶階段後應力大幅消除 85.1%。硬度則是 50 °C ~400 °C 熱處理沒顯著變化，到 600 °C 開始再結晶後才開始下降。

在回復的過程，因為點缺陷和差排數量減少，並且差排經過重排，晶粒內部應力場的數量與大小下降，所以在 200 °C 熱處理後即可見到殘留應力的下降。600 °C 熱處理為再結晶階段，驅動力為冷加工貯存之能量，次晶界相互結合，且在高角度之晶界生成晶核，以形成出無缺陷無應變之晶粒。此時殘留應力下降量由 36.8% 提升到 85.1%，是下降幅度最大的區間，已可消除極大部分的殘留應力。而 800 °C 熱處理後，再結晶已經完成，進入晶粒成長階段，在此階段有最大的殘留應力消除率，因其材料內部缺陷最少。

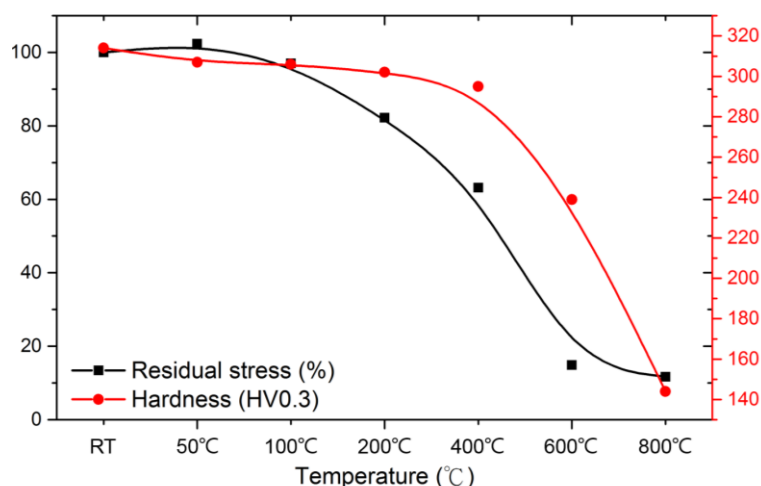


Fig.7 Residual stress and hardness after heat treatment of different temperature

XRD 殘留應力量測是微觀的測量方法，但硬度值是較為巨觀的量測數據，所以在 400 °C 以下的回復階段時，晶粒內部的點缺陷與差排數量減少程度還不足以使硬度值產生明顯變化。600 °C 熱處理後材料再結晶晶粒生成，硬度值則大幅度下降，其原因為新生成之晶粒缺陷少，難以阻擋受力變形時差排的滑移，結果就是材料變軟，硬度值下降。在 800 °C 晶粒成長階段有最低的硬度值，因其有較粗大之晶粒，難以阻止其變形。

比較殘留應力值與硬度值後，可發現殘留應力在 400 °C 的回復階段即有大約近 40% 的消除率，而硬度值要到 600 °C 再結晶階段才降低，如此即可知要消除殘留應力、又要維持機械強度的話，400 °C 熱處理是最佳條件。

4.結論

本實驗利用 XRD-cos α 法量測 AISI 1020 碳鋼經過銲接製程的殘留應力值，接著再經過 50°C、100°C、200°C、400°C、600°C、800°C 持溫 2 小時熱處理應力消除條件後，量測其應力值，並探討在銲接後碳鋼試片中，熱處理前後之殘留應力變化值、維式硬度值與顯微結構變化的相互關係，從結果歸納以下結論：

- (1) 經銲接後，試片的銲道和 HAZ(Heat-affected zone)有最大之拉應力值，經熱處理應力消除後，200°C 開始有 17.8%的應力消除率；400°C 有約 36.8%的應力消除率；而 600°C 開始再結晶，應力消除率大幅提高為 85.1%；800°C 熱處理後應力小於 50Mpa，接近完全消除。
- (2) 材料大部分結構為 α -Fe，在銲道為長條狀之板狀費德曼肥粒鐵與細長的針狀肥粒鐵。在 50~400°C 熱處理顯微結構無明顯變化，600°C 熱處理後發現再結晶之晶粒，800°C 熱處理後再結晶完成，為粗大的晶粒。
- (3) 硬度值在銲件表面分布，在銲道中心最高 293HV，往母材遞減；銲道橫截面的硬度分布在距離表面 2~3mm 深度處有最大硬度值 314HV。在 50~400 °C 熱處理後硬度值無明顯變化，600 °C 熱處理後為 239HV，800 °C 熱處理後為 144HV。

5.參考文獻

- [1] J. T. Maximova, G. V. Dunchevab, and I. N. Mitev, “Modelling of residual stress relaxation around cold expanded holes in carbon steel,”*Journal of Constructional Steel Research*, Vol.65, 2008, pp.909-917.
- [2] Bo-Ming Huang, Hung-Wei Yen, David Ho, Henry Ho and Jer-Ren Yang, “The influence of Widmanstatten ferrite on yielding behavior of Nb-containing reinforcing steel bars”, *Scripta Materialia*, Vol. 67, 2012, pp. 431–434.

- [3] Constance W. Ziemian, Mala M. Sharma, Donald E. Whaley, "Effects of flashing and upset sequences on microstructure, hardness, and tensile properties of welded structural steel joints," *Materials and Design*, Vol. 33, 2012, pp. 175-184.
- [4] K. Hiratsuka, T. Sasaki, K. Seki, and Y. Hirose, "Development of measuring system for stress by means of image plate for laboratory X-ray experiment," *International Centre for Diffraction Data, Advances in X-ray Analysis*, Vol. 46, 2003, pp. 61-67.
- [5] Yashar Javadi, Mehdi Ahmadi Najafabadi, "Comparison between contact and immersion ultrasonic method to evaluate welding residual stresses of dissimilar joints," *Materials and Design*, Vol. 47, 2013, pp. 473–482.
- [6] Seyedali Sadeghi, Mehdi Ahmadi Najafabadi, Yashar Javadi, Mohammadjavad Mohammadisefat, "Using ultrasonic waves and finite element method to evaluate through-thickness residual stresses distribution in the friction stir welding of aluminum plates," *Materials and Design*, Vol 52, 2013, pp. 870–880.
- [7] Yashar Javadi, Seyedali Sadeghi, Mehdi Ahmadi Najafabadi, "Taguchi optimization and ultrasonic measurement of residual stresses in the friction stir welding," *Materials and Design* Vol. 55, 2014, pp. 27–34.