

# SAE4340 熱處理與銲接製程之特性研究

黃智威\*、謝輔晉、顏煥杰、敖仲寧

Chih-Wei Huang\*、Fu-Jin Shie、Huan-chieh Yen、Jong-Ning Aoh,

國立中正大學機械工程學系

SAE4340 具有優異之硬化能及耐熱性，經淬火、回火熱處理可獲優異之高強度及韌性，可超過 SAE4130 強度 35% 以上，屬於超高強度鋼；因硬化能所致，在大尺寸厚件下機械性質也能保有均勻分布，這些優異特性使此材料廣泛應用於國防及航太工業之發動機外殼、彈頭、傳動軸、活塞桿、起落架齒輪及螺栓扣件等，甚至能使用在 -130~480°C 之環境中。但容易在熱處理後之銲接加工中產生銲裂及脆化等問題。將 4340 合金鋼熱處理達高強度鋼之機械性質後，按需求設計不同工序進行 TIG 銲接製程與銲後熱處理特性研究，以及分析不同張力之銲材銲接或補銲後熱處理特性。藉由硬度、拉伸、衝擊試驗、SEM 破斷分析等驗證多道次銲接製程與熱處理參數之影響。

關鍵字：SAE4340、機械性質、氬銲、熱處理

SAE4340 is a kind of structure steel, because it's good quench hardenability and good heat resistance, it can exceed more than 35% of 4130 strength, it belongs to ultra high strength steel; Due to hardening ability, it also can be retained mechanical properties uniform distribution in the thick pieces of large size, these excellent properties make this material widely used in the defense and aerospace industry, engine casing, warhead, drive shaft, piston rod, landing gear and bolt fasteners, etc. Even used in the -130~480°C environment, but easy to weld cracking and brittleness problems in the welding process. After doing heat treatment to let 4340 alloy steel achieve the mechanical properties of high strength steel. Design different kind of material common machining process to investigate the properties as-weld and after heat treatment, and analyze the properties after heat treatment using different welding materials with different tensile strength or after repair welding. By the hardness test, tensile test, impact test, SEM fracture surface analysis etc. to verify the effect of the multi-pass welding process and heat treatment parameters.

Keyword：SAE4340、Mechanical properties、TIG、Heat Treatment

## 一、前言

由於 SAE 4340 合金鋼優異硬化能所致<sup>(1)</sup>，在大尺寸厚件下機械性質也能保有均勻分布，這些優異特性使此材料廣泛應用於國防及航太工業之發動機外殼、彈頭、傳動軸、活塞桿、起落架齒輪及螺栓扣件等，甚至能使用在 -130~480°C 之環境中<sup>(2)</sup>。但在 300°C 回火會有脆化問題且容易在銲接加工中產生銲裂，所以此材料在熱處理與銲接製程非常具有挑戰性<sup>(3)(4)</sup>。合金鋼依不同加工方式與使用用途，可利用熱處理使材料更易於後續製作或藉由熱處理後增加材料機械性質，藉由圖 1 為 Fe-C 平衡圖<sup>(5)</sup>與圖 2 為 SAE 4340 TTT 曲線<sup>(6)</sup>的顯微組織變化與冷卻溫度，為熱處理條件參考之依據<sup>(7)</sup>。惰性氣體鎢棒電弧銲接法(Tungsten Inert Gas Arc Welding Process)，由於使用鎢棒做為電極，亦稱 TIG 銲接。然而使用保護氣體為氬氣，在業界俗稱氬銲。其銲接優點很多也適用於 SAE 4340 合金鋼<sup>(8)(9)</sup>。由於本研究透過熱處理將 SAE 4340 合金鋼進行調質使其擁有優異機械性質後以 TIG 銲接製程銲合，為配合此高強度鋼實務應用所需要，設計 6 項不同製程工序配合不同張力之銲材 TIG 銲接與後熱處理，目的在找出工業實務應用價值之製程條件，在設計與製造時都會有很大的助益。

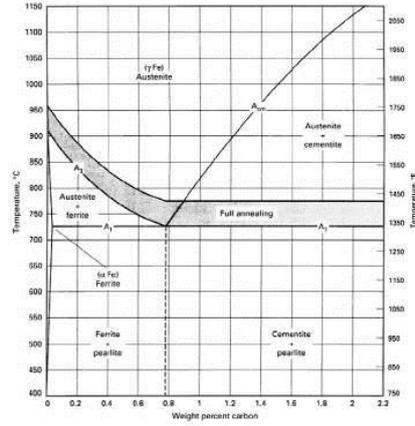


Fig. 1 Phase diagram of carbon steel after full anneal.

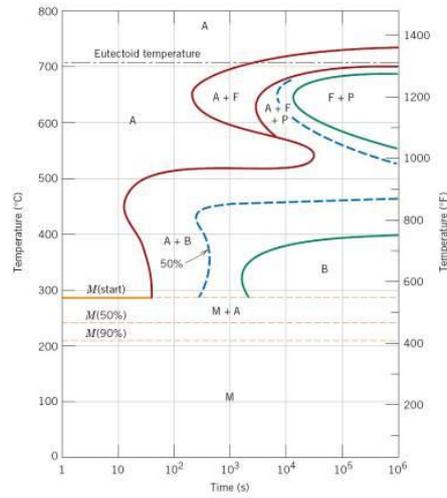


Fig. 2 SAE 4340 TTT curve.

## 二、實驗方法

### 2.1 材料準備

4340 合金鋼大型棒材(直徑約 12 吋)進行切片加工成 255mm×80mm×10mm 之板材。母材金相如圖 3 所示，基材化學成份如表 1 所示。將 4340 板材對接完後進行試片拉伸試片製備。先對母材進行測試，母材之機械性質:抗拉強度 761 MPa、降伏強度 425 MPa、延伸率 22%、衝擊值 19.5 J。TIG 銲接使用之銲材為 ER80S-G 與 ER120S-G，其成分如表 1，由於 ER80S-G 是台灣銲材廠生產適合銲接 SAE4340 高強度低合金鋼之最高張力之銲材，考量成本與後續熱處理問題因此選用此銲材找出製程中能降低成本的方法。此外 ER120S-G 銲材是由德國銲材廠進口之銲材，此銲材抗拉強度會比調質的 4340 母材抗拉強度低，但已是市售適用於 SAE4340 之最高張力銲材。為應付不同工序之需要所以先將母材進行不同熱處理<sup>(10)(11)</sup>。如圖 4 所示，(a)為母材 50X 金相與(b)以 880°C 持溫 2 HR 後爐冷進行退火，兩組織比較可發現退火後可使材料更均勻。(c)為淬火之針狀組織與(d)淬火後以 540°C 回火 2 HR 組織比較發現回火後針狀組織較不明顯。

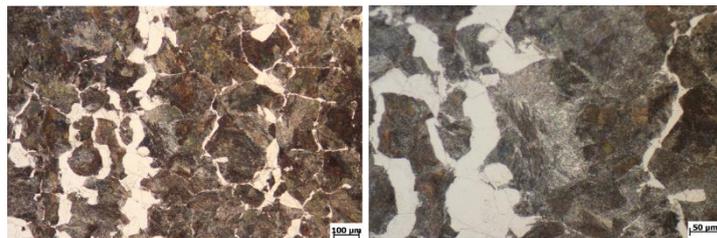


Fig. 3 Metallography of base metal.

Table. 1 Chemical composition of base metal and welding materials

材料	化學成份(wt%)						
	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo
SAE 4340	0.39	0.22	0.67	0.23	1.7	0.64	0.18
ER80S-G	0.06	0.50	0.99	---	---	1.22	0.54
ER120S-G	0.08	0.79	1.90	---	---	0.32	0.50

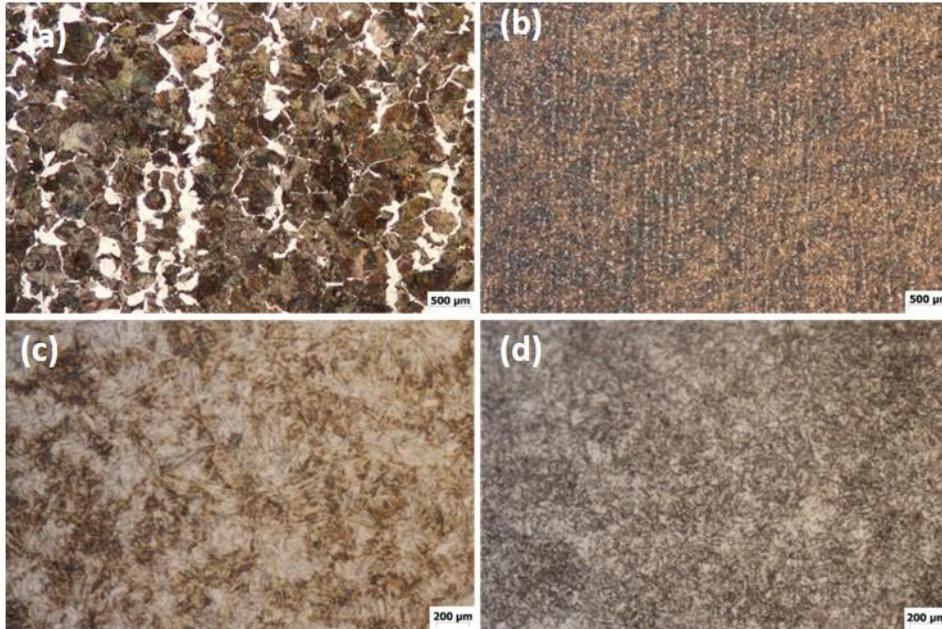


Fig. 4 Optical micrographs of micro structure (a)Base metal. (b)Annealing(845° C).

(c)Quenching(880° C). (d)Quenching and Tempering(540° C) metallography diagram.

## 2.2 不同工序之 TIG 銲接與後熱處理

為了因應實際使用需求設計 6 種不同熱處理與銲接工序，如表 2 所示；工序 I：銲接時的熱影響區可能導致銲道機械性質下降，所以進行調質處理，回復機械性質，確保銲道與調質後母材仍在高強度鋼之範圍。工序 II：母材成形加工時可能會造成應力殘留或組織不均勻，為了消除上述情況所以我們採用完全退火使應力消除，再進行銲接與後熱處理。工序 III：如果母材在銲接前機械性質不符合需求，需將胚件先進行調質熱處理，使其達到高強度要求，再進行銲接。工序 IV 與 V：經過調質後的板材硬度會明顯提高，因此在銲接後工件會有應力殘留，所以進行回火，但又必須控制回火後之機械性質，為取得較佳機械性質，對不同回火的溫度進行比較探討，分別以高溫 540 °C、低溫 350 °C 進行不同溫度之回火探討。工序 VI：將母材先進行調質熱處理，達到高強度使用 ER120S-G 銲材進行銲接，滿銲後將銲道表面銑削剷除 3mm 之銲道深度後以 ER80S-G 銲材進行補銲後熱處理。

先以 10mm 厚度之中碳鋼板材試銲參數是否能成功銲合，過程中量測銲接層間溫度。首先將中碳鋼板材開槽銲道角度 60°，保留預彎量後以電流 125A 進行第一層之接合，此電流參數較小是因為主要目的在固定試片後進行第二道次之熔填料，使用基本電流 100A、尖峰電流 250A 與脈衝頻率 2 HZ，待 8 道次滿銲後記錄參數，以金相確認銲道無缺陷，後以此電流與進給速度做為基礎參數，如表 3 所示，融填道次如圖 5 所示。以實務經驗將預熱溫度控制在 300~320°C 之間，層間溫度控制在 320°C，後熱以 350°C 後熱五分鐘後爐冷至室溫。在熱處理部分為達到 4340 高強度合金鋼的優良機械性質與此機械性質下的氬銲製程，所以在胚料部份需先進行熱處理調質，使板料的抗拉強度不低於 1172 MPa、降伏強度不低於 1076 MPa 與延伸率 9% 的高機械性質條件，必須先找到適合胚料的熱處理條件與參數將板材進行調質後進行 TIG 銲接製程。熱處理調質條件以 860°C 持溫 40 分鐘後將爐溫降至 845°C 後油淬至室溫，接著以 540°C 進行回火兩小時後水淬至室溫，目標機械性質為：抗拉強度 1176 MPa、降伏強度 1068 MPa、延伸率 9%，需達高機械性質之需求，機械性質檢測方式以 ASTM E8M 與 E23 之標準進行測試，如圖 6、圖 7 所示。

Table. 2 Different process.

NO.	工序內容
I	母材+鐸接+淬火+回火
II	母材+退火+鐸接+淬火+回火
III	母材+淬火+回火+鐸接
IV	母材+淬火+回火+鐸接+高溫回火(540° C)
V	母材+淬火+回火+鐸接+低溫回火(350° C)
VI	母材+淬火+回火+鐸接+銑削+補鐸

Table. 3 Parameter of weld.

鐸接參數	
預熱溫度 (°C)	300~320
層間溫度 (°C)	320
尖峰電流 (A)	250
基本電流 (A)	100
脈衝頻率 (HZ)	2
進給速度 (mm/s)	2.5
送線速度 (mm/s)	1.1

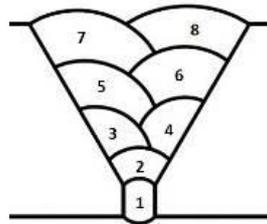


Fig. 5 Schematic of the weld pass.

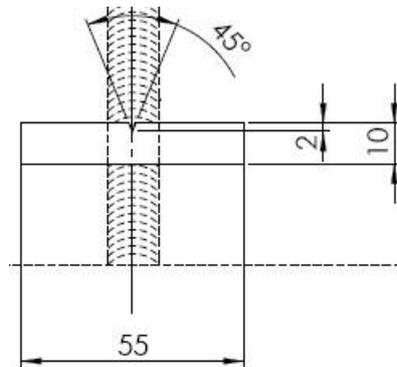


Fig. 6 Schematic of the impact test specimen.

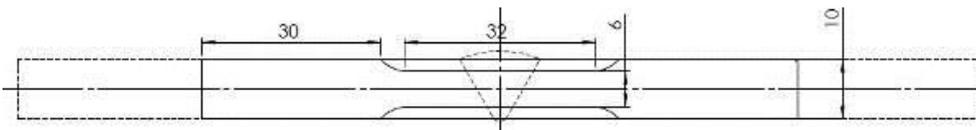


Fig. 7 Schematic of the tensile test specimen.

### 三、結果與討論

#### 3.1 SAE4340熱處理機械性質分析

為達高強度機械性質:抗拉強度不低於 1172 MPa、降伏強度不低於 1076 MPa 與延伸率 9%之高機械性質條件進行熱處理。母材機械性質為抗拉強度 761MPa、降伏強度 425 MPa 與延伸率 22%，而目前調質可達抗拉強度 1426 MPa、降伏強度 1311 MPa 與延伸率 10.1%之機械性質，但衝擊值較低為 22.7 J，由表 4 所示。

Table.4 Mechanical properties of base metal and base metal after post-weld heat treatment.

Process	Weld metal	Tensile strength MPa	Yield Strength MPa	Elongation %	Impact J
Base Matel	NA	761	425	22.0	19.5
Base Matel QT BM + Heat Treatment	NA	1426	1331	10.1	22.7

#### 3.2 鐳道橫截面金相觀察

在進行 TIG 鐳銲製程時，鐳道表面宏觀可以從鐳道表面第一時間得知鐳道是否成功鐳合。若無法成功鐳合，會先在鐳道表面產生裂紋或是缺陷，通常以實務經驗來說鐳接過程中有足夠溫度的預熱、控制層間溫度與後熱處理，且在鐳接填料過程中順暢沒有問題通常鐳道是屬成功鐳道，這才有價值進行後續金相與硬度分析，目測沒問題後進行鐳後熱處理與金相試片製作與機械性質測試分析，如圖 8 所示。



Fig. 8 Macroscopic surface of TIG welding.

切取鐳道橫截面，在研磨、拋光後用 3% nital 腐蝕，並用光學顯微鏡觀察微組織。圖 9 為母材調質後鐳接之鐳道，可以明顯觀察到鐳道熔填凝固區域與固液轉換區，在固液轉換區外側就是母材或熱影響區，也可以觀察出熔填 8 道次後即滿鐳。

多道次鐳接過程中由於加熱與冷卻曲線的劇烈波動，在鐳道凝固過程中會導致偏析與組織的不均勻，因此鐳後的顯微組織是錯綜複雜的，圖 9 為母材鐳接後織金相可以發現靠近母材的熱影響區，原來為肥粒鐵與波來鐵的組織，在受到鐳接所輸入的熱量後有晶粒細化的現象，在靠近鐳道的熱影響區與鐳道上層，因在鐳接過程中無法迅速冷卻形成麻田散鐵，以致部分相轉變為變韌鐵，鐳道下層則因為受到後續道次所輸入的熱量，有類似回火的效果，故組織較為均勻。

圖 10 為工序 I (母材+鐳接+淬火+回火)金相是在鐳後進行淬火與回火熱處理，目的是希望在鐳接過程後能夠有效的提昇鐳後的機械性質，避免熱影響區過度軟化的現象，可以明顯觀察到鐳道熔填凝固區域與固液轉換區之交界並不明顯，只能觀察出鐳道金屬與母材兩個區域，兩者組織大多為回火麻田散鐵，惟上層鐳道因為有晶粒粗大化的現象，即使經過固熔處理仍然無法消除，此鐳道在熱處理後也無再熱裂縫產生，實屬合格鐳合鐳道。

圖 11 為工序 III (母材+淬火+回火+鐳接)為調質後進行鐳接的工序，可以明顯觀察到鐳道熔填凝固區域與固液轉換區，在固液轉換區外側就是母材與熱影響區，其中母材為回火麻田散鐵相，在靠近鐳道的熱影響區，是晶粒粗大化的回火麻田散鐵與變韌鐵，於鐳道上方融熔區也可以發現有費德曼肥狀粒鐵組織。

圖 12 為工序 II (母材+退火+鐳接+淬火+回火)先將母材退火(880°C)進行鐳接後經熱處理調質(Q:845°C T:540°C)後回復硬度避免過度軟化。也只能觀察出鐳道金屬與母材兩個區域，熱處理後也無再熱裂縫產生，此鐳道經熱處理後仍屬合格鐳合鐳道。

圖 13 為工序 VI (母材+淬火+回火+鐳接+高溫回火)由母材調質後鐳接並且以 540°C 高溫回火

2 hr 後鐸道組織較為均勻。

圖 14 為工序IV(母材+淬火+回火+鐸接+銑削+補鐸)以 ER120-G 之鐸後鐸道將表面剷除 3 mm 後補鐸 6 道 ER80-G 之鐸道，可以明顯觀察到鐸道熔填凝固區域與固液轉換區，在固液轉換區外側就是母材或熱影響區，也可觀察出上層與下層之鐸道金屬明顯的差別與板材經過 16 道次鐸接受拉應力造成彎曲的現象。圖 15 為補鐸後經熱處理調質後可以觀察出鐸道金屬與母材兩個區域與兩種鐸道金屬之分佈區域，熱處理後在鐸道中間靠母材區域有再熱裂縫產生，約為 500  $\mu\text{m}$ 。機械性質測試之破斷面均不經過此處，仍屬合格鐸合鐸道。

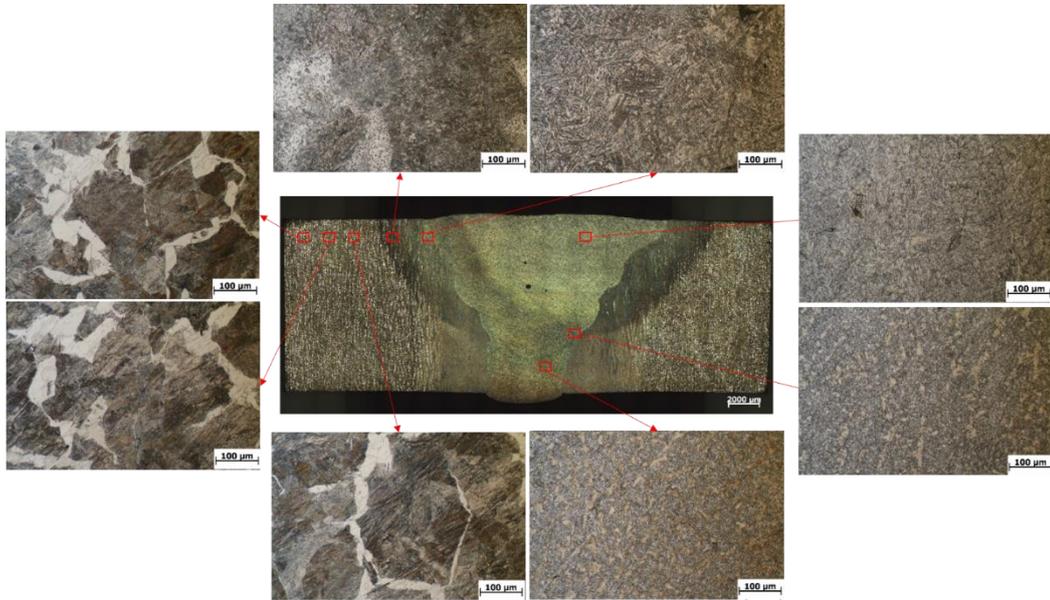


Fig. 9 Micro structure of base metal after welding.

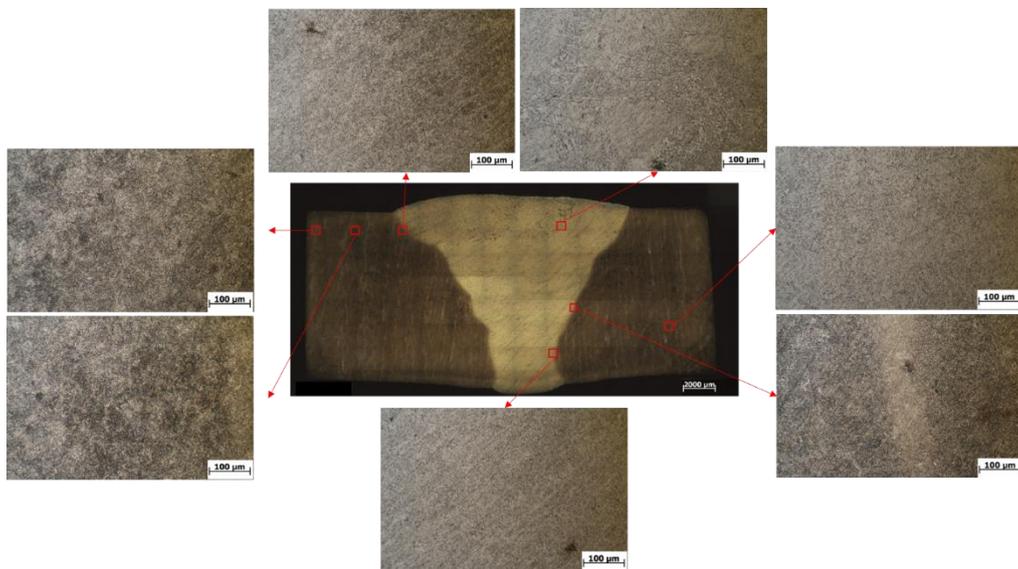


Fig. 10 Micro structure of Process I (Base metal+ Welding+ Quenching+ Tempering).

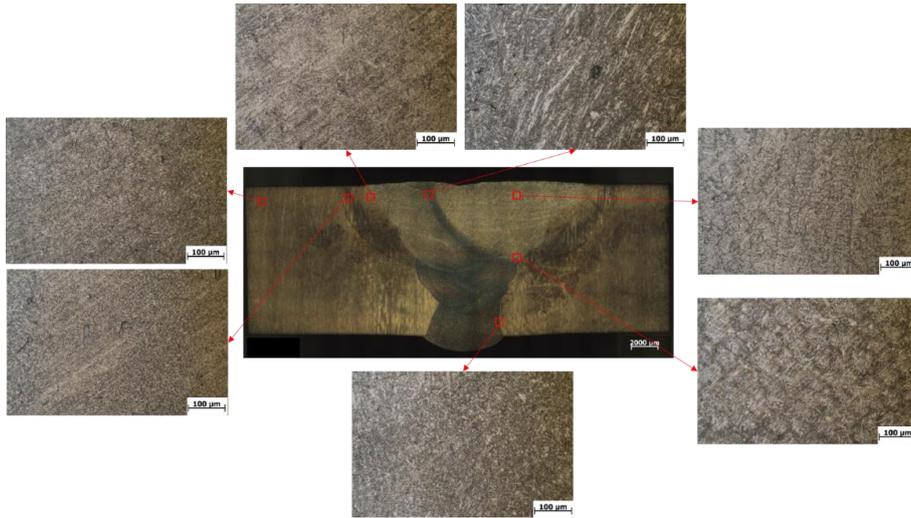


Fig. 11 Micro structure of Process III (Base metal, Quenching, Tempering, Welding, Tempering(540°C)).



Fig. 12 Micro structure of Process II (Base metal, Annealing, Quenching, Tempering, Welding, Tempering(540°C)).

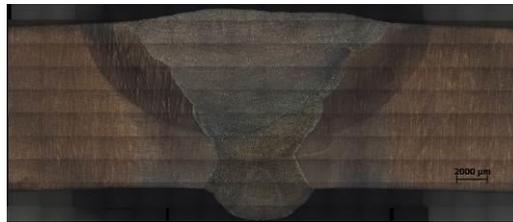


Fig.13 Micro structure of ProcessIV(Base metal, Quenching, Tempering, Welding, Repair welding).



Fig.14 Micro structure of repair weld.

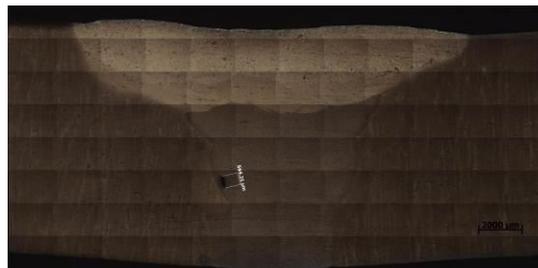


Fig.15 Micro structure of post-weld heat treatment after repair weld.

### 3.3 SAE4340不同工序熱處理機械性質分析

將維氏微硬度試驗量測銲道橫面及縱面硬度，量測荷重為 1000g/15s，每 0.5mm 量測一個硬度值對銲道、熱影響區及母材做連續量測，從銲後微硬度分析是由銲道表面下方 1 mm 進行測試。根據文獻<sup>(12)</sup>，儘管經過熱處理，銲道硬度最小值依然在熱影響區，圖 16 為不同工序之銲道微硬度分佈，可以發現熱影響區約 8~10 mm，銲後調質之微硬度分佈顯示銲道中心之左右兩側約 10mm 寬度之硬度低於 HV300，此區間無法透過銲後調質回復硬度。若以調質後母材配合 TIG 銲後之製程微硬度分佈可以發現銲後回火可以回復銲後所降低之硬度，將硬度回復至 HV400 左右，目前將母材調質銲接後回火之(工序IV、V)微硬度分佈為最佳。銲道金屬透過銲後調質之硬度也比母材低，所以推測進行拉伸測試時，此工序之斷裂位置會在銲道內。

由圖 17 可發現母材銲後調質(工序 I)的抗拉強度約為 1200MPa，為母材調質的 80%，但延伸率卻明顯下降，原因是銲後調質使熱影響區的機械性質強於銲道，導致拉伸破斷位置在銲道，而母材退火後銲接再調質處理的(工序 II)抗拉強度與銲後調質(工序 I)的機械性質相似，但延伸率略高；調質後銲接(工序 III)與調質後銲接回火(工序 IV、V)的抗拉強度差異不大，因為受到銲接時的熱影響，與調質鋼相比下降約 30%，約 1000MPa，其破斷位置皆為熱影響區，延伸率比母材調質後略低一些，如圖 18 所示。

圖 19 可以發現銲後的衝擊值明顯比調質鋼高，工序 I 與工序 II 相比可以觀察到因為銲前有母材退火能使銲後衝擊值較高；母材調質後銲接後回火(工序 IV、V)衝擊值比調質後未回火(工序 III)較高，且為四個工序中衝擊值最高。

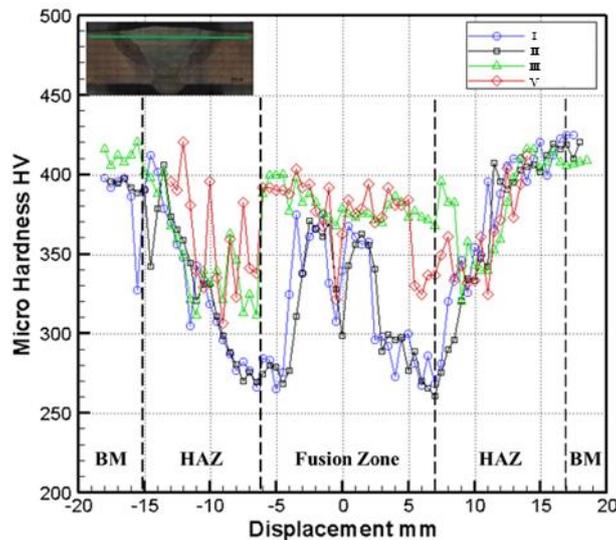


Fig. 16 Micro-hardness analysis of different process.

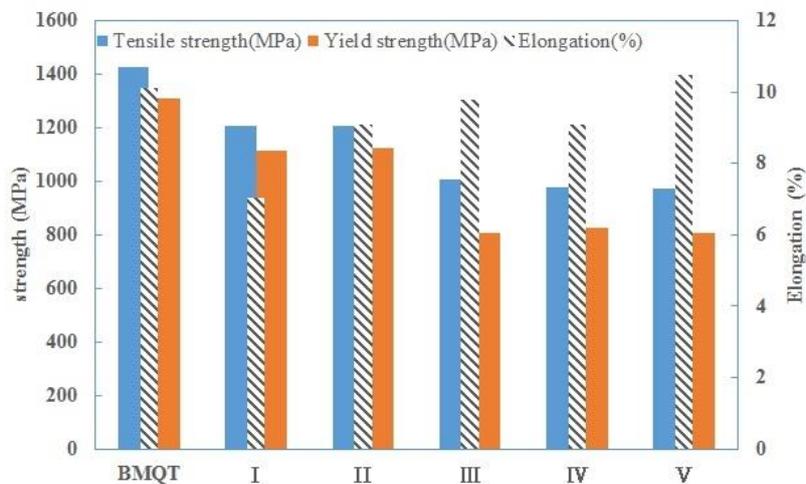


Fig. 17 Mechanical properties of different process.

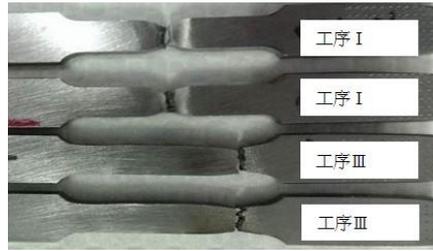


Fig. 18 Macroscopic fracture surface of tensile test.

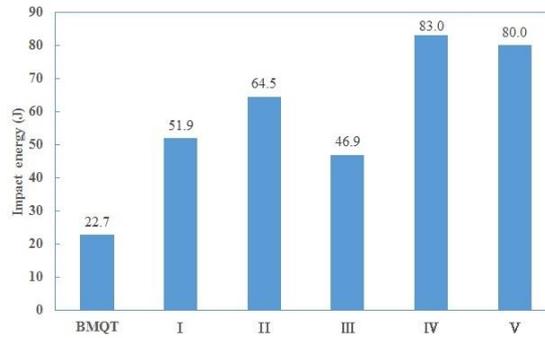


Fig. 19 Impact value of different process.

### 3.4 SAE4340不同張力鋁材熱處理機械性質分析

使用鋁材 ER80S-G 之鋁道微硬度分布，顯示鋁後鋁道之硬度為 HV350-400 之間，鋁後調質硬度有限，是由於鋁材是屬於軟鋼鋁材，硬化能有限。也可以從微硬度分布中觀察出熱影響區約為 9 mm，其中以調質完鋁道中心約 3.5 mm 寬為硬度最低處，其餘位置硬度皆高於 HV400 以上。可以明顯發現鋁後鋁道之左右兩側有受熱影響之區域，此區域之硬度值較低，推測在進行鋁後鋁道試片拉伸試驗時會斷在熱影響區內，如圖 20 所示。

由表 5 可知使用 ER80S-G 鋁材鋁後道次抗拉強度約為 850 MPa 為母材調質之 60%，經鋁後調質之機械性質為 1128 MPa，為母材調質試片之 80% 已達高強度鋼標準，但衝擊值會略為下降。使用 ER120S-G 鋁材之鋁後鋁道抗拉強度為 1006 MPa，為母材調質之 70%，經鋁後調質試片之機械性質可達 1200 MPa 以上，為母材調質強度 84%，衝擊值可略為改善。兩種鋁材隨著鋁後回火溫度的提升，抗拉強度並沒有明顯的影響，針對鋁後鋁道進行殘留應力消除則使用較低的回火溫度即可。

ER120S-G 與 ER80S-G 混合之鋁後鋁道與鋁後調質機械性質顯示其機械性質皆介於兩種機械性質之間，可以提升 ER80S-G 鋁後調質之抗拉強度較低之劣勢並且維持高衝擊值之特性與大幅提升 ER120S-G 鋁後鋁道衝擊值之特點。

三種不同鋁道金屬之鋁後鋁道透過回火都可提升衝擊值，尤其使用 ER120S-G 之鋁道最為明顯，但越高溫之回火會使抗拉強度與延伸率下降。

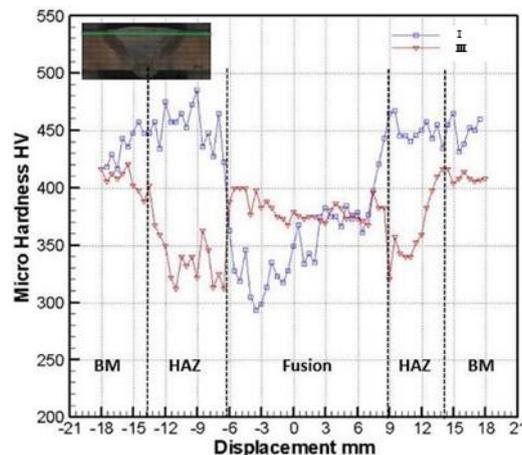


Fig. 20 Hardness analysis of weld with ER80S-G.

Table. 5 Mechanical properties of different welding material after heat treatment.

Process	Weld metal	Tensile strength MPa	Yield Strength MPa	Elongation %	Impact J
I Weld + Heat Treatment	ER80	1128	1048	12.1	119
	ER120	1208	1126	9.1	65
	ER120+ER80	1188	1076	8.5	62
III Heat Treatment + weld	ER80	848	733	7.3	135
	ER120	1006	806	9.8	47
	ER120+ER80	955	812	9.5	102
IV Heat Treatment + Weld + Temper(540°C)	ER80	793	766	6.5	113
	ER120	979	824	9.1	83
	ER120+ER80	955	813	9.5	118
V Heat Treatment + Weld + Temper(350°C)	ER80	868	743	11.9	138
	ER120	974	804	10.5	80
	ER120+ER80	882	727	13.7	112
Base Matel	NA	761	425	22.0	19.5
Base Matel QT BM + Heat Treatment	NA	1426	1331	12.6	17.3

### 3.5 衝擊與拉伸破斷面SEM微觀分析

圖 21 分別是母材、母材調質與調質銲後銲道的宏觀與微觀觀察，母材的衝擊破斷面呈現明顯的脆性破面。銲後調質的剪唇區比母材調質後的區域大，表示調質銲道吸收衝擊的能力較佳，此破斷面與衝擊值有相同的趨勢；在掃描式電子顯微鏡觀察下，母材呈現劈裂面，母材熱處理後在斷面顯示韌窩組織遍佈與衝擊值相符。

圖 22(a)為銲後銲道之破斷橫截面觀察，此破斷位置在熱影響區的位置，可以發現破斷面沒有很明顯韌窩組織，但卻有出現較多劈裂面，此破斷面之試片延伸率為 9.8%，推測是由於母材調質之延伸率為 10.1%所致。圖 22(b)為銲後調質之破斷橫截面觀察，此破斷位置在銲道金屬的位置，破斷面有較多韌窩組織，代表此銲道組織接合良好，此破斷面之試片延伸率並不佳(7%)，是由於銲後調質後已將銲道金屬抗拉強度回復至強度上限而失去延伸率所致。

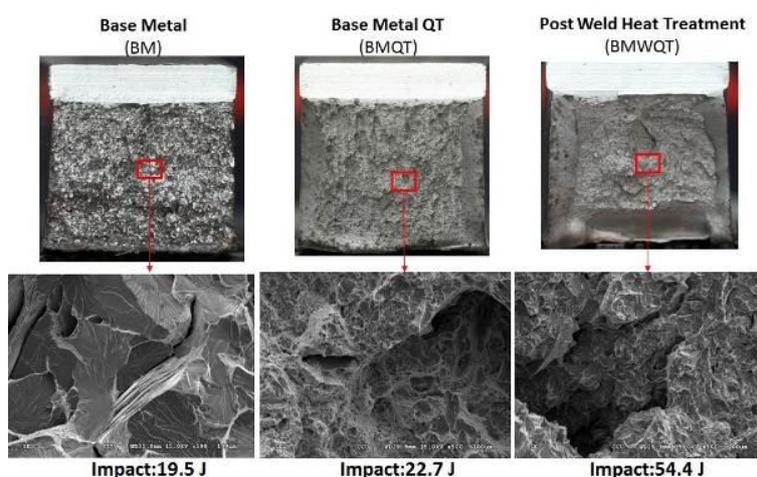


Fig. 21 Impact fracture surface in different parameters of heat treatment.

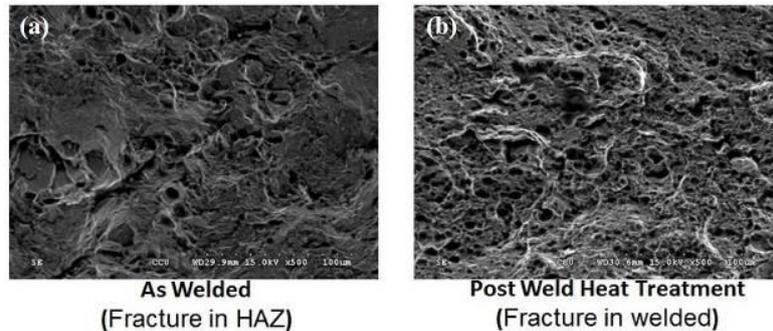


Fig. 22 Fracture surface in different positions.

#### 四、結論

1. 利用 4340 高強度合金鋼板材，經過熱處理調質後可達母材硬度 HRC:40~44、抗拉強度 1426 MPa、降伏強度 1331 MPa、延伸率 10.1%。
2. 以 TIG 銲配合預熱溫度 300°C、層間溫度 300-320°C、後熱 350°C，不同工序皆可成功銲合 4340 高強度合金鋼板材。
3. 硬度分佈結果發現熱影響區約 8~10 mm，此區間硬度低於 300 HV，經調質處理無法有效提升硬度。
4. 銲後銲道受銲接時熱影響軟化影響所以拉伸斷裂位置皆在熱影響區，破斷微觀顯示熱影響區有較多的劈裂面，而銲後調質拉伸斷裂位置在銲道，是由於銲道金屬經調質後強度低於調質母材所致，破斷面之韌窩組織較多則表示銲合情況良好。
5. 調質後銲接與調質銲接後回火兩種工序的抗拉強度相近，但經銲後回火衝擊值可提升 50%，其中不同回火溫度對於機械性質沒有顯著影響，若進行銲後殘留應力消除與提昇銲道衝擊值則使用較低的回火溫度即可。
6. 不同工序之銲道衝擊值均高於母材調質，衝擊破斷面有明顯剪唇區，顯示吸收衝擊能力較佳。
7. 三種不同銲道金屬之銲後銲道經回火都可提升衝擊值，尤其使用 ER120S-G 銲材之銲道最為明顯。

#### 五、誌謝

感謝柏夫企業有限公司全力協助研究所需之設備與人力，以及科技部計畫(科技部計畫編號 NSC100-2221-E-194-016-MY3)與中山科學研究院經費支持使本研究得以順利進行。

#### 六、參考文獻

- (1) 劉國雄, 林樹均, 李勝隆, 鄭晃忠: 工程材料科學, 全華科技圖書公司, 台北, 2006, pp.614-669.
- (2) 王仰舒, 鋼鐵材料, 全華科技圖書公司, 台北, 1997。
- (3) Y. Ohmori, H. Ohtani, T. Kunitake, "Tempering of the bainite and the bainite/martensite duplex structure in a low-carbon low-alloy steel", Metal Science, 1974, pp. 357-366.
- (4) 曾春風, 郭央謙, "構造用鎳鉻鉬合金鋼 JIS-SNCM 439 熱處理之研究", Journal of Technology, 2010, pp. 121-130.
- (5) B.L. Bramfitt: Heat Treating of Steel, Annealing of Steel, ASM International, 1990, p.45.
- (6) Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams, American Society for Metals, 1977, p.118.
- (7) K. Easterling, Introduction to the physical metallurgy of welding, Butterworth-Heinemann, 1992.
- (8) 周長彬, 郭央謙, 蔡丕椿: 銲接學, 全華科技圖書股份有限公司, 台北, 1997, pp.48-50.
- (9) K. Ferjutz, J.R. Davis, ASM Handbook: Welding, Brazing, and Soldering, Gas-Tungsten Arc

Welding, Vol.6, ASM Inter -national, 1993, pp.590-591.

- (10) 金重勳: 熱處理, 復文書局, 台南, 1998, pp.322~340。
- (11) 蔡馬陵: 鋼鐵材料手冊, 中國材料科學學會, pp.185~195, 1982
- (12) I K Lee, C L Chung, Y T Lee, Y T Chien,"Effect of Thermal Refining on Mechanical Properties of Annealed SAE 4130 by Multilayer GTAW" , JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH, INTERNATIONAL, 2012, 19(7): 71-78.