

# SM490A 與 SS400 結構用鋼異質銲接之特性研究

## The welding characteristics of SM490A and SS400 steels

洪榮德<sup>1</sup> 連聰賢<sup>1</sup> 王伯政<sup>2</sup> 施柏仰<sup>2</sup> 林新智<sup>2\*</sup> 林昆明<sup>3</sup>

Steven Hong, T.S. Lian, P.C. Wang, P.Y. Shih, H.C. Lin, K.M. Lin

<sup>1</sup>振鋒企業股份有限公司

<sup>1</sup>Yoke Industrial Corporation, Taichung, Taiwan

<sup>2</sup>台灣大學 材料科學與工程學系

<sup>2</sup>Department of materials Science and Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan

<sup>3</sup>逢甲大學 材料科學與工程學系

<sup>3</sup>Department of materials Science and Engineering, Feng Chia University, Taichung, Taiwan

### 摘要

本研究主要探討在不同入熱量下的多道次銲接對合金性質所造成的影響，包括顯微組織、機械性質及腐蝕性質，並嘗試找出最佳化參數，將製程標準化後，訂定所有的銲接參數，確保不同的銲接機具與人員皆能達成相同的銲接品質，以符合工業上之需求。實驗技術採用惰性氣體遮蔽電弧銲(Gas Shield Metal Arc Welding)進行 SM490A 與 SS400 異質銲接。熱影響區及中下層的銲道經過多道次銲接後，會受到一類似回火或正常化的熱處理過程，可消除區域上的不良組織(例如：費德曼肥粒鐵)，有效提升韌性，並降低粗晶區的硬度。由衝擊試驗結果顯示，由於晶粒細化程度的不同，較高入熱量的銲接製程會有較高的衝擊值，且其拉伸強度會隨著入熱量升高而上升。  
關鍵字：惰性氣體遮蔽電弧銲、SM490A、SS400、機械性質

### Abstract

The welding characteristics of SM490A and SS400 steels, using the Gas Shield Metal Arc Welding (GMAW) technique, have been investigated, including the microstructure, mechanical properties, and corrosion behavior. Experimental results show that after multi-pass welding, the heat affected zone and bottom welding zones have been subjected to a thermal treatment of tempering or normalizing. The unfavorable microstructures, such as Widmanstätten ferrite in these heat affected zone and welding zones, will be eliminated. Therefore, the toughness and hardness of these zones are improved. The result of the Charpy-notch impact test shows that the SM490A and SS400 steels with higher heat input during welding will exhibit higher impact toughness, due to the effect of grain refining. Meanwhile, the alloy's tensile strength will increase with increasing heat input.

Keywords: Gas Shield Metal Arc Welding (GMAW), SM490A, SS400, microstructure, mechanical property.

## 1. 前言

惰性氣體遮蔽電弧銲(Gas Shield Metal Arc Welding)，為一利用保護氣體在電弧周圍形成局部的氣體保護層，將電弧、熔池與空氣隔離，防止其產生有害的影響。GMAW 銲接係採用消耗性電極，乃直接利用金屬銲線當做電極，利用電弧之熱量產生熔滴，並以自動送線馬達將填料連續熔入銲縫中，待其凝固後，進而達到材料接合之目的，可適用於造船、石化、核電、國防及機械製造等工業製程，並且可運用於生活環境的基礎建築中。

銲接由於施工便利、接合形狀自由、氣密性佳和快速接合的特性，故在各種金屬結構中常常可以看到銲接製程的運用。在銲接的過程中，合金鋼構件經歷一急速加熱和冷卻過

程，其組織可分為銲道(weld metal)和熱影響區(heat affected zone)。銲道的性質可以藉由挑選適當的合金成分銲條來改善其機械性質；而熱影響區往往是極硬的組織，韌性相對較低，在使用上常常是造成破壞的根源，為了提升材料在使用上的安全性，銲接前材料須經一系列的熱機加工及後熱處理，以使組織及強度達到所需的規範。

在多重銲接的銲道中<sup>[1]</sup>，最初的銲道與鄰近的熱影響區，受後繼第二層銲道再加熱的影響，會使之與相鄰區域的顯微組織再度發生變化，此區域稱之為再熱區(reheated zone)，而未受影響的區域稱之為原熔區(primary fusion zone)。再熱區佔整體銲道的比例影響材料的性質甚鉅，其與銲接次數及入熱量大小有關。

然而SM490A與SS400經過銲接後的機械性質常受到銲條合金成份、入熱量和遮蔽氣體的影響<sup>[2-3]</sup>，此次研究主要目的是針對鋼板吊掛夾頭構件之銲接技術與製程參數做一詳實且系統性的研究與探討，其品質的好壞，則是依賴銲接實務上的經驗作為設計的依據，為符合在銲接現場之銲接製程設計以及減少不必要的變數，本研究選用之鋼板為9 mm，透過文獻蒐集整理與材料實驗分析等工作，藉以精進鋼板吊掛夾頭構件之銲接技術應用於吊鈎具之各種性能。

## 2. 實驗方法

本研究主要探討不同的銲接製程參數下，進行三道次的異質銲接，並觀察其顯微組織變化，配合機械性質和腐蝕性質測試，以瞭解不同製程參數對微結構和材料性質的影響。

### 2.1 母材

SM490A 為工業界常用之銲接結構用軋延鋼，添加少量鈮(Niobium)合金元素，透過控制軋延的技術而得到的均勻細晶，且具有析出強化特性，為銲接結構用鋼中的重要鋼種。SS400 是一種具有優良綜合力學性能的新一代鋼鐵材料，研究其銲接組織結構變化對工程上具有重要的意義。SS400 是日本鋼板牌號的一種表示方法，主要限制磷、硫含量在 0.05wt% 以下。整體表示抗拉強度為 400Mpa 以上的普通結構鋼。大部分在交貨狀態下被使用於建築、橋樑、船舶、車輛等結構件，部分再進一步加工、熱處理後使用於機械結構。其合金成份如第 1 表所示。

Table 1 The composition of SM490A and SS400 alloys

(%)	C	Mn	P	S	Si	Al	Nb
SM490	0.12	1.06	0.02	0.006	0.01	0.032	0.023
SM400	0.16	0.76	0.012	0.007	0.01	0.041	-

### 2.2 銲接參數設定

本實驗所使用之銲接製程參數有三種，入熱量也有所不同，其使用之依據為參考規範之建議及使用者經驗設計，如第 2 表所示。為方便計算，我們把變動的電流及電壓取中間值代入方程式(1)計算其入熱量的大小並編號。銲接試片的編號由入熱量的上升，分別標上 DA、DB、DC，如第 2 表所示：

$$Q = \frac{I * V}{S} \quad (1)$$

(Q：熱輸入量，I：電流，V：電壓，S：走速)

Table 2 The welding parameters and heat input used in this study.

No.	Welding layer	Welding Parameter				Total heat input (KJ/mm)
		Current	Voltage	Speed	Heat input	
		(A)	(V)	(mm/s)	(KJ/mm)	
DA	Root	125	18.5	1.5	1.542	5.699
	Second layer	145	20.5	1.5	1.982	
	Surface	145	22.5	1.5	2.175	
DB	Root	135	19.5	1.67	1.576	5.753
	Second layer	155	21.5	1.67	1.996	
	Surface	155	23.5	1.67	2.181	
DC	Root	155	21.5	2	1.666	5.953
	Second layer	175	23.5	2	2.056	
	Surface	175	23.5	2	2.231	

### 2.3 顯微組織觀察

將不同製程條件的試片切取下來，鑲埋於電木粉中以 SiC 砂紙由#240、#400、#600、#800、#1000、#1500、#2000 依序研磨，再利用氧化鋁粉拋光至 0.05μm，以酒精洗淨後，將之置入丙酮中藉由超音波振盪機洗淨殘留氧化鋁粉顆粒，試片取出後以 5%Nital 腐蝕液腐蝕(5%HNO<sub>3</sub>+ 98%無水酒精)，清洗吹乾後觀察。本實驗利用光學顯微鏡 OM 觀察其金相組織，藉以了解不同的製程其顯微組織的差異。

將銲道及熱影響區粗晶區分別標示出來，利用精密切割儀器切取直徑 3mm、長 10mm 的圓棒，並使用慢速切割機切取約 200μm 的薄片，用砂紙研磨至 70μm 左右，利用 twin-jet 電解拋光機進行電解拋光(jet polish)，其電解拋光溶液採用 5%過氯酸(HClO<sub>3</sub>) + 20%甘油 + 75%酒精，而拋光溫度在 -15°C ~ -10°C 之間。本研究使用 JEOL JEM 100CXII 穿透式電子顯微鏡，操作電壓為 100KV，利用此穿透式電子顯微鏡協助我們觀察各種不同的顯微組織。

### 2.4 機械性質測試

拉伸試驗系對試件施加拉力以量測試件的機械性質，主要在比較不同製程其抗拉強度的差異，並找出材料的斷裂位置在母材或是銲道，以做為銲接結構的設計及分析。衝擊試

驗之目的為比較材料之韌性，試片上有一凹槽，以擺錘從一定之高度擺下將試片擊斷，以量取試片破斷時所吸收之能量來表示韌性的大小，以比較不同製程之鐸道及熱影響區其韌性的差異。將鋼板切成 10mm x 7.5mm x 55mm 之衝擊試片，在鐸道及熱影響區分別取 2mm 的開口，進行實驗分析。

彎曲試片測試，需將鐸冠及鐸根均須加工磨平，將鋼板切成 40mm x 9mm x 150mm 試件之尺寸，彎曲試驗是為了確保金屬在受到彎曲時有足夠的韌性使材料不至於破裂，主要是用來評定鐸接接頭的塑性和緻密性。彎曲試驗分為橫向正面彎曲和背面彎曲，正面彎曲測試為鐸冠朝下，壓頭從上方壓下，使得鐸冠受到最大的彎曲；背面彎曲測試則是鐸根朝下，試片彎曲半徑(壓頭半徑)均依規定進行。

維氏硬度試驗，量測時所採用的荷重為 200g，以鐸道中心點起，每隔 0.5mm 量測一個微硬度值，待進入熱影響區後，改為每隔 0.25mm 量測一個硬度值，直至進入母材。間距主要取決於減少同性質區域的重覆量測並避開上一量測點的塑性區以保有準確性。

### 3. 結果與討論

第 1 圖與第 2 圖分別為為 SM490A 與 SS400 鋼材的顯微組織，第 1 圖中顯示 SM490A 之晶粒沿滾軋方向會有黑色帶狀組織，另外 SM490A 的晶粒較為細小，根據文獻<sup>[4]</sup>指出，合金鋼添加微量鈮(Nb)元素，可藉由它所形成的碳、氮析出物，有效的阻止晶界的移動，達到晶粒細化的效果，並阻止軋延後鋼材的再結晶，使得沃斯田鐵晶粒被軋成扁平狀，具固溶強化及析出強化的效果。而又有文獻指出，鈮的析出物在超過 1200°C 下，將會固溶於沃斯田鐵中，使得硬度有所提升；而 SS400 無方向性明顯看出其方向性，SS400 母材其主要組織為等軸狀  $\alpha$ -ferrite 和 pearlite 的混合組織；而 SM490A 母材為經過一熱滾軋(hot-rolled)的製程，從其顯微組織可看出為  $\alpha$ -ferrite 和扁平狀 pearlite 混合成帶狀組織，此帶狀組織平行於壓軋方向，形成的因素和材料內雜質原子的偏析有絕對關係，鋼板內的合金元素在熱壓軋的過程中往往會有偏析的情形產生，而造成  $A_{c3}$  溫度的改變，當溫度冷卻下來時，含合金元素多的區域因其變態點較低而產生波來鐵，造成鋼板強度和韌性的異向性(anisotropy)，對於強度及機械性質會有不良的影響。

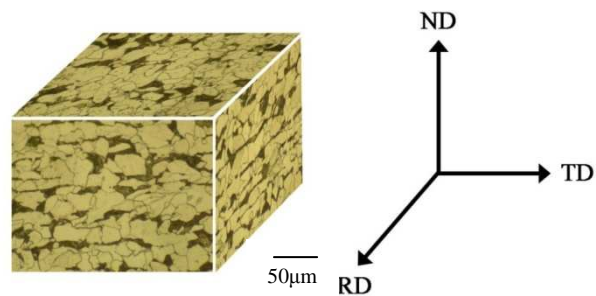


Figure 1 The microstructure of SM490A alloys.

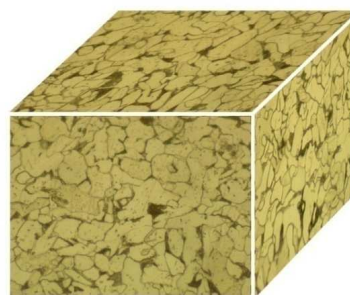


Figure 2 The microstructure of SS400 alloy.

第 3-5 圖分別為 DA、DB、DC 試片經異質鐸接多重鐸道之顯微組織，鐸道左邊為 SS400、右邊為 SM490A。我們在熱影響區的部分，靠近上層鐸道部分的熱影響區會產生許多束狀組織，但從 OM 金相發現其他鐸道之熱影響區皆因多次鐸接的熱循環而無此束狀組織。我們發現鐸冠部分的晶粒與第二層鐸道、底部鐸道的晶粒形狀有所不同，此乃因再熱區之影響，在鐸冠的部分是呈雜亂成長的柱狀枝晶為主，而中層及底層鐸道則為等軸晶肥粒鐵，在鐸道彼此相鄰的部分會產生較粗大的等軸晶粒，其餘再熱區幾乎皆為細晶區。

鐸道原熔區內的組織相當複雜，包括晶界肥粒鐵(grain boundary ferrite)、費德曼肥粒鐵(Widmanstatten ferrite)、針狀肥粒鐵(acicular ferrite)、夾雜物(inclusion)和微觀相(Micro-phase)...等等，在晶粒內部觀察到許多交錯的典型針狀肥粒鐵平板，第 6 圖為在 TEM 電子顯微鏡下鐸道重熔區所觀察到的費德曼肥粒鐵，其長度約為 30µm、長寬比約為 20 : 1。

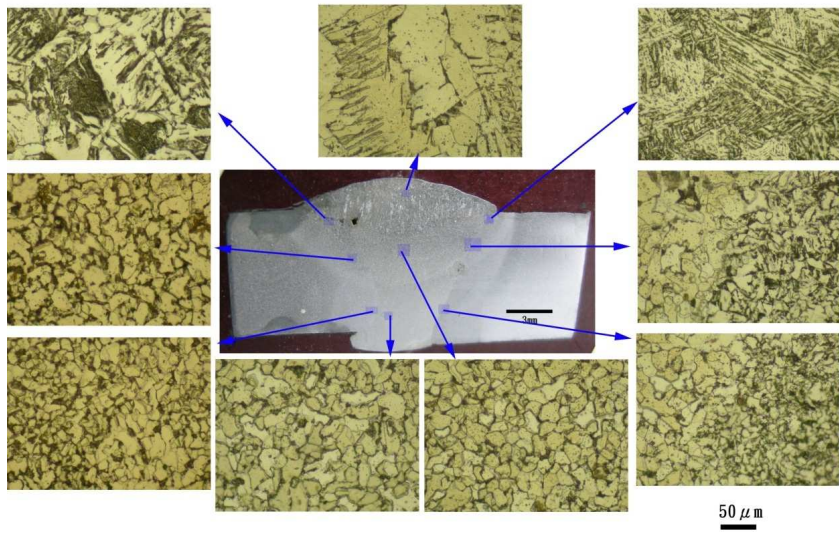


Figure 3 OM microstructure of DA specimens.

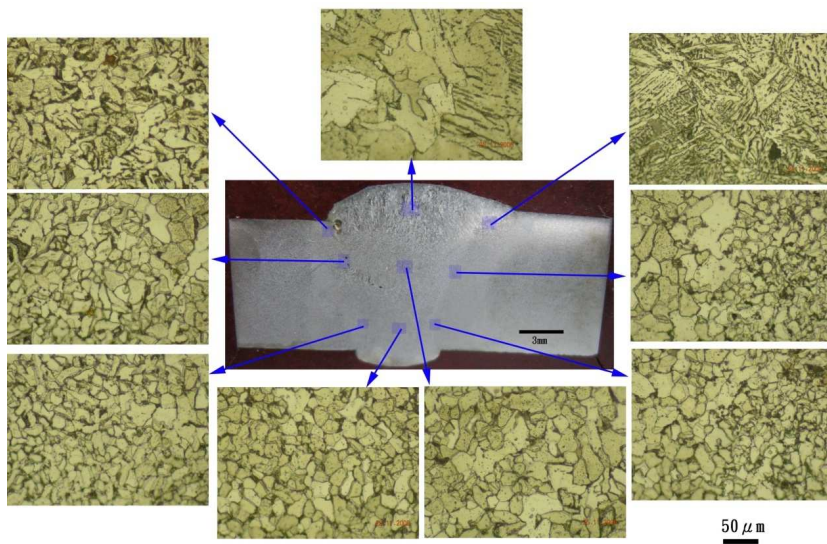


Figure 4 OM microstructure of DB specimens.

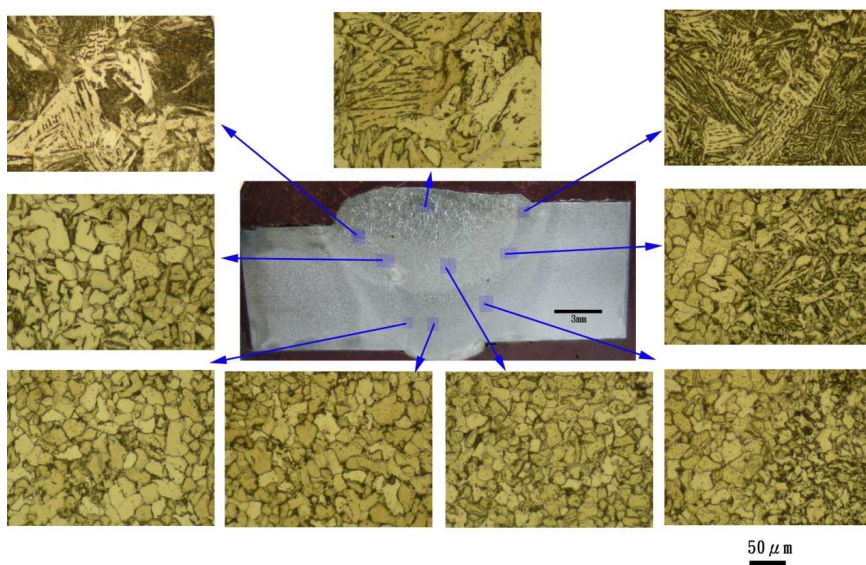


Figure 5 OM microstructure of DC specimens.

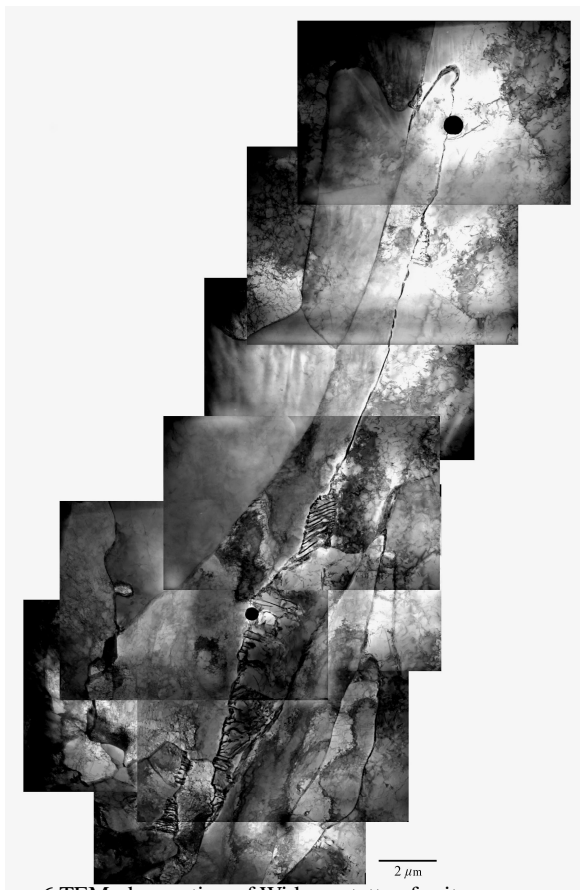


Figure 6 TEM observation of Widmanstatten ferrite.

第 7 圖之鐳道 TEM 觀察中呈現，黑色的小圓球為鐳道凝固時形成的夾雜物(inclusion)，根據 EDX 分析，如第 3 表所示，可發現夾雜物(inclusion)之氧含量明顯上升，其乃因鐳接製程中採用惰性氣體覆蓋方式來保護融熔區金屬，以免除環境因子的侵害，但這樣的保護並非全面有效，因此其和鍛造鋼兩相比較，會因鐳接而導入較多的 inclusion 代表其為鐳接凝固時容易產生的氧化物，可做為肥粒鐵成核之位置，當鐳道 inclusion 含量太多會使成核位置增加，此外，我們可以清楚看到晶粒內肥粒鐵的結構中有含有許多差排存在。

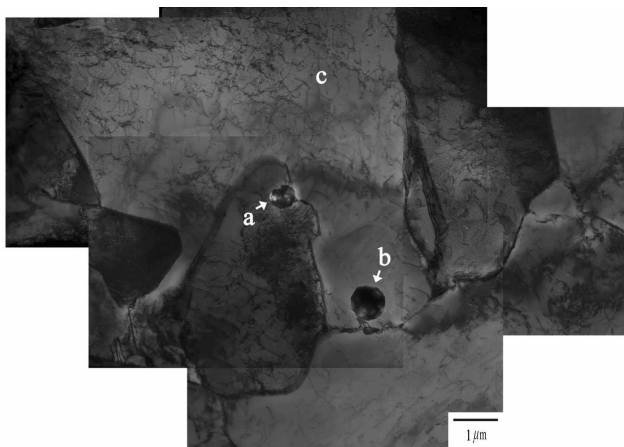


Figure 7 TEM observation of high density dislocation and inclusion.

Table 3 EDS analysis of a, b, and c.

	a		b		c	
	wt%	at%	wt%	at%	wt%	at%
C	32.45	57.72	33.87	61.8	11.5	37.34
O	16.97	22.66	12.3	16.83	0.32	0.77
Si	1.18	0.9	0.39	0.3	0.34	0.47
P	0.22	0.15	0.01	0.01	0.28	0.35
S	1.26	0.84	0.29	0.19	0.16	0.2
Mn	2.60	0.39	0.43	0.17	10.6	0.75
Fe	45.32	17.34	52.7	20.69	76.8	60.12
Total	100	100	100	100	100	100

因為鐳接試片為一強度不均勻的試片，在進行拉伸試驗時，塑性應變將集中在強度最低的部分發生，在這種情況下，局部的應變將導致比正常標距低的伸長率，所以此鐳接試片的拉伸試驗可作為抗拉強度的評定，但不能用來評定降伏強度。就異質鐳接三種不同製程條件的拉伸結果來看，我們可以得知採用入熱量較高的 DC 製程時，抗拉強度最高，且延性也最好；隨製程參數電流、電壓向下減少，抗拉強度下降。我們可以推測 SS400 在鐳接時經過一系列熱循環過程後，會使原材料的抗拉強度性質略為下降，其中又以製程 DA 的 SS400 熱影響區有較差的抗拉強度，而造成此趨勢變化之結果，推測因為入熱量較低，使得再熱區中機械性質較佳的細晶區比例較少而使得強度略為下降，拉伸實驗結果逐列於第 4 表。

Table 4 The comparison of mechanical properties

	Tensile strength(MPa)	Elongation (%)
SA490A	460	30.3
SS400	537	17.3
DA	426	18.5
DB	436	20.7
DC	449	21.3

熱影響區的硬度值是鐳接可鐳度(weldability)之評估準則，硬度的增加總是會伴隨著金屬脆性的增加與塑性變形之降低，也是我們是否進行鐳接預熱及鐳後熱處理的標準<sup>[4]</sup>。過去研究發現，未經後置熱處理之鐳道熱影響區硬度值會受母材化學成份、鐳道層數及冷卻速率影響，而藉由硬度試驗

將協助我們分辨材料中顯微組織的差異。

將各種製程之試片分為鐳冠、中間鐳道及鐳根以適當間距取點做微硬度測試(Hv)，因不同鐳接參數，而有不同的入熱量及熱循環過程，其殘留應力、相的比例及固溶元素皆有所差異，故所測到的微硬度值亦有所不同。結果分別顯示於第 8 圖、第 9 圖與第 10 圖。

觀察異質鐳接件在 SM490A 熱影響區的硬度可以發現，接近鐳道的硬度值會有明顯上升的現象，可能的原因有二：一是因其冷卻速率較慢，其主要的顯微組織均為費德曼肥粒鐵與針狀肥粒鐵，推擠原有的母材，使得殘留應力大增，造成此區的硬度值上升比母材更高，而事實上費德曼肥粒鐵平板間存在著 Microphases，這些 Microphases 的相會影響我們所量測到的硬度值，所以即使在同一條件下測得的費德曼肥粒鐵的硬度值亦有所差異；在 SM490A 粗晶區中，由於尖峰溫度較高且停留時間較長，Nb 的析出物將固溶於沃斯田鐵中，而固溶的 Nb 會降低  $\gamma \rightarrow \alpha$  的變態溫度( $A_{r3}$ )以致增加此一區域的硬度。隨著遠離鐳道，殘留應力影響愈小，我們可以發現硬度會有逐漸下降的趨勢，而硬度持續下降至回火區後，此時殘留應力對材料影響不大，且回火晶粒較粗大，所以在此區硬度會達到一最低值，而後漸漸回升到母材硬度。

在鐳道的部分，因為成分不均勻以及相的差異，硬度跳動的範圍較大，以鐳冠來說，SA 硬度值相對較高，其原因推測有二：第一點是其有 SA 有最小入熱量，冷卻速率最快，Gowrisankar<sup>[5]</sup>認為冷卻速率的不同，其冷卻時的收縮量就有所不同，故冷卻速率快其收縮量較大，容易出現殘留應力，當殘留應力高於降伏強度時，便出現應變硬化的現象，於是會出現較高的硬度值；第二點是由於不同合金含量會對硬度造成影響，其中錳含量的影響較大，並指出在較高的入熱量下，其鐳道中錳含量會減少，並造成其硬度的下降。而中層鐳道及鐳根的部分，我們可以發現其硬度值較最上層鐳冠為低，乃因其受到上層鐳道熱循環的影響，產生一類似退火作用，使得鐳道內殘留應力大為降低，然而其不同製程之硬度已無明顯的差異。

彎曲試驗是測試材料抵抗外力的能力，同時也可以檢測鐳道的優良程度，若是因錯誤的製程參數設計，則容易使鐳道產生鐳孔，通常這些鐳孔會是破裂紋的成核位置，而在鐳接材料的試驗中，我們分為正面彎曲和背面彎曲來做測試。

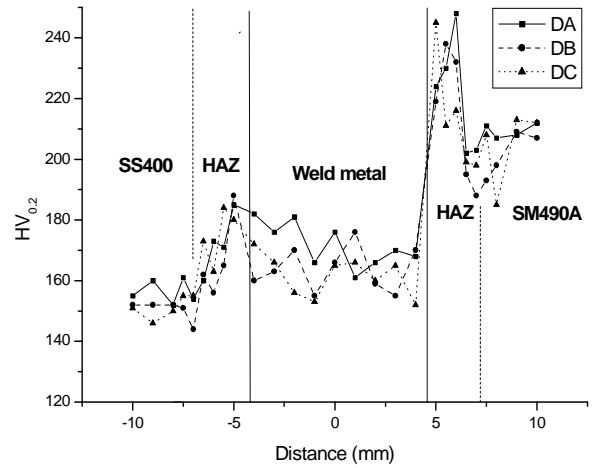


Figure 8 Heat affected zone of welding front.

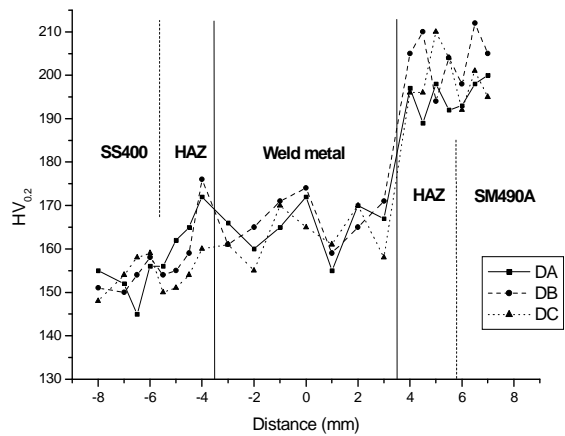


Figure 9 Heat affected zone of welding center.

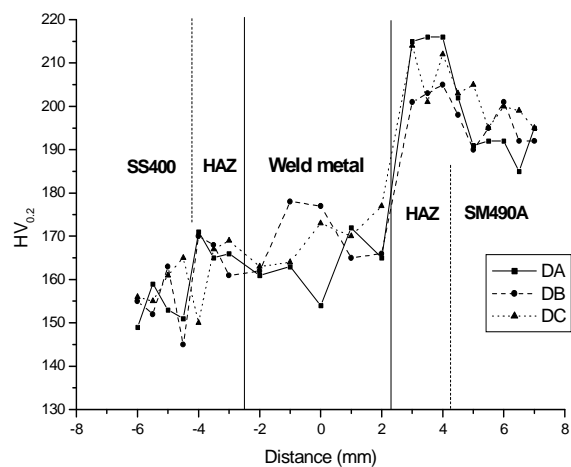


Figure 10 Heat affected zone of welding root.

圖 11(a-f)異質銲接的正面彎曲試驗較易出現裂紋的情況，其中不合格的為 DA 製程試片，我們可以合理的推斷出 DA 製程因為入熱量較小，冷卻速率較其他製程為快，造成較大的殘留應力，抵抗變形的韌性較差，故銲道表層在彎曲試驗中會出現較大的裂紋；在反面彎曲試驗的部分，銲根乃屬於再熱區的部分，受第二、第三層入熱量影響，使晶粒更細微，大小更均勻，且消除了原有之殘留應力，使其有較佳抵抗變形的韌性，故在彎曲試驗中皆無裂縫的產生。

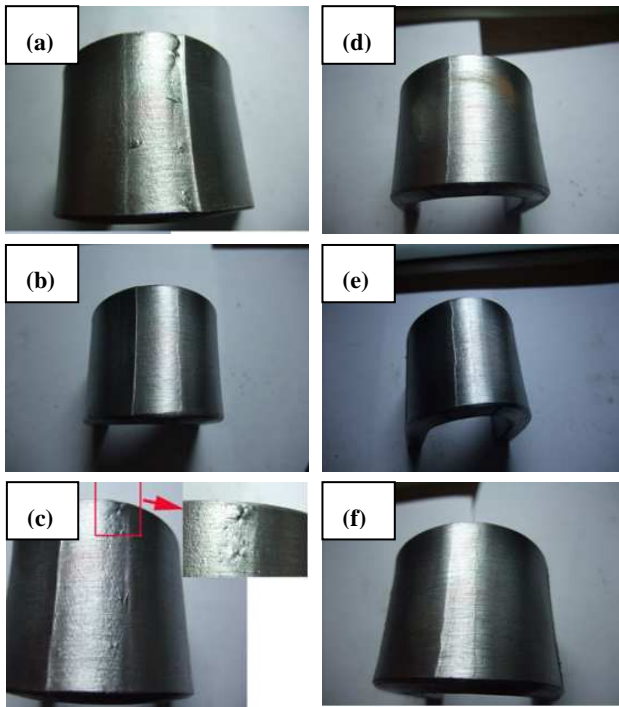


Figure 11 Positive bending of (a)DA, (b)DB, (c)DC and opposite bending of (d)DA, (e) DB, (f)DC.

從第 5 表衝擊實驗結果可以得知，熱影響區其抗衝擊皆較差，此晶粒尺寸是影響鋼材塑性的一個重要參數，裂縫核的形成會在晶界差排堆疊的地方發生，此時堆疊在此處的剪切應力為  $n \cdot \tau$  ( $n$ ：差排數量、 $\tau$ ：滑動方向的剪切應力)，較小的晶粒尺在到達晶界滑動帶之差排堆疊數量較少，所以在晶界上的局部應力集中也會相對的降低，不論差排結合、差排堆疊或雙晶交互作用機構時，產生裂縫成核的情形均會降低；換句話說，裂紋的前進沿著此等軸晶界前進，其裂紋前進的方向一直在改變，也就是說，其緩和了裂紋的前進，使裂紋前進的阻力增加，故其有較佳之衝擊值。

Table 5 the value of impact test.

	Impact values (kg-m/cm <sup>2</sup> )
SM490	12.5
SS400	21.2
HAZ-DA	9.9
HAZ-DB	9.5
HAZ-DC	14.5

#### 4. 結論

1. 氣體遮護電弧銲則表面起伏較大，又以入熱量較小的 DA 製程有起伏較大的銲道表面。
2. 銲道原熔區主要皆為晶界肥粒鐵、費德曼肥粒鐵、針狀肥粒鐵、inclusion 跟 micorphase，而在再熱區皆為較細的等軸晶肥粒鐵，其中愈接近上層銲道的部分晶粒會較粗大。
3. 在拉伸試驗與衝擊試驗中，異質銲接之試片其破斷位置在 SS400 的熱影響區，鄰介於回火區附近，強度隨著入熱量上升而上升，其衝擊值也有上升之趨勢。
4. 硬度試驗中，靠近銲道的熱影響區會因殘留應力的影響，而有最高的硬度值，而後在回火區有一最低的硬度；多道次銲接造成的熱循環影響可有效的減少粗晶區的硬度，而入熱量較小的製程會使得銲道的硬度較大。
5. 彎曲試驗中，背彎的試片因其銲道之晶粒細化，有較佳抵抗變形之能力，皆未出現裂紋；而面彎的異質銲接試片則在入熱量較小時，發現有長度大於 3mm 裂紋，乃因其有最大殘留應力所致。

#### 參考文獻

1. S.Lee, B.C. Kimand, D.Kwon, Metallurgical Transaction 23 (1991) 2803.
2. J. Kim, H.Y. Jeong, International Journal of Fatigue, 32 (2010) 1159.
3. Y. Shi, D. Chen, Y. Lei, X. Li, Computational Materials Science, 31 (2004) 379.
4. M.D. Chapetti, H.Miyata, T.Tagawa, T. Miyata, M. Fujioka, Material Science and Engineering A, 381 (2004) 331.
5. I. Gowrisankar, A.K. Bhaduri, V. Seetharaman, D.D.N. Verma, D.R.G Achar, Welding Journal, 6 (1987) 147.