

## 第二章 文獻探討

### 第一節 鋁合金材料之分類與特性

#### 壹、鋁合金簡介

鋁比重  $2.7\text{g/cm}^3$ ，熔點  $660^\circ\text{C}$ ，為面心立方結構 (FCC)，常溫常壓下極易和氧反應形成緻密的氧化膜 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )，此種氧化膜即使被刮除很快又形成一層薄膜，具有防蝕作用，可阻止內部材料進一步被氧化。鋁重量輕、質軟易加工、延展性佳、抗腐蝕性佳且無毒性，故在工業上應用極為廣泛。在鋁中加入 Mg、Si、Zn、Cu 等元素成為鋁合金後，再利用鋁對合金元素在高、低溫有不同溶解度的特點，施以適當熱處理，便能有效的提高其機械性質。鋁合金富延展性，加工成型性良好，重量輕，對電、熱有良好的傳導性，使其成為航空、車輛工業上的重要材料<sup>[1][4]</sup>。

鋁材之特性包括：(1)質輕(2)富延展性(3)甚高之導電性(4)抗蝕性強(5)優良之強還原劑。故可用於製造電線、電纜各種建築構件及化工工業設備等，供多種特殊用途及一般用途。純鋁中加入不同之合金元素如 Mg、Sn、Ni、Fe 等以提高鋁之強度、硬度及耐蝕性，以提供在不同場合的應用。

依其用途之不同可分為鍛造用鋁合金及鑄造用鋁合金二種。依其是否可熱處理改變其機械性質，而分為可熱處理型與非熱處理型二類。其中熱處理型鋁合金又可分為人工時效硬化及自然時效硬化二種<sup>[5]</sup>。

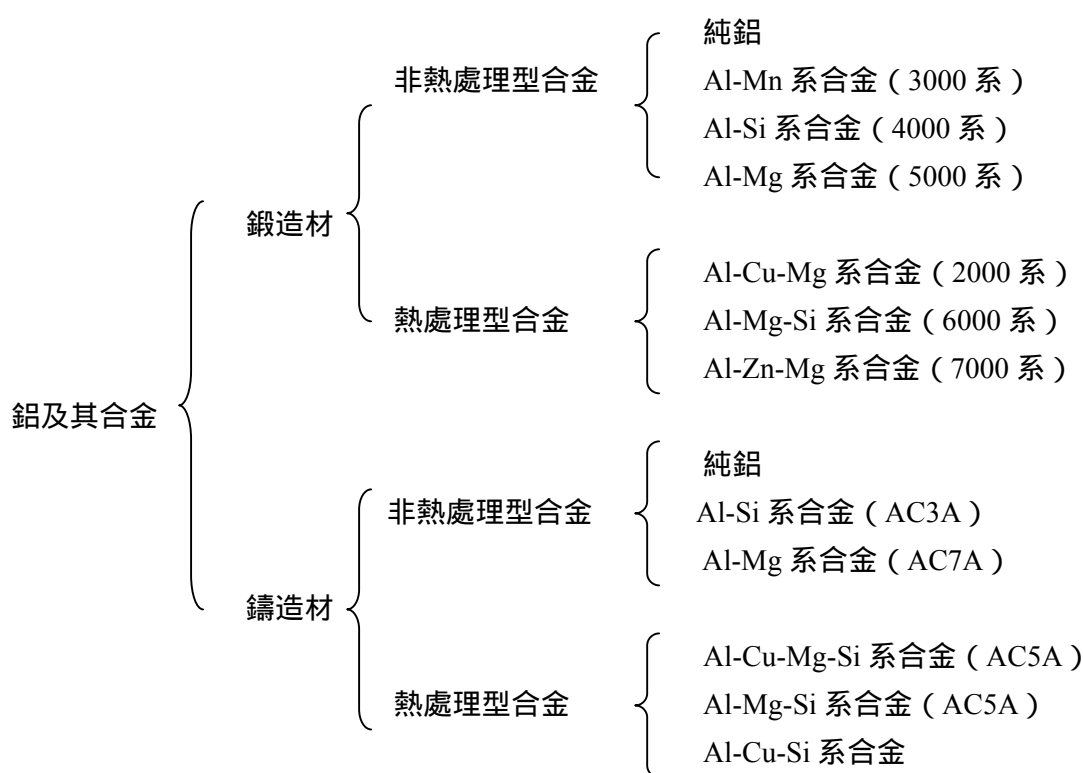
目前鍛造用鋁合金之常用代號共有四位數字，其後再加上其加工代號。4 個數字中第一位數字用以區別合金系統，後二位數字指示加入合金成分或鋁之純度。第二位數字代表原型合金 (Original Alloys) 與改良合金 (Modification of The Original Alloys)，或不純度之上限 (Impurity Limit)

<sup>[3][5][6]</sup>。

## 貳、鋁合金分類

一般鋁合金依製造及成型方法的不同，可分為鑄造用鋁合金及鍛造用鋁合金兩大類，如表 2-1<sup>[7]</sup>。鑄造用鋁合金係以各種鑄造法製成鋁合金鑄件後加以應用，如砂模法、壓鑄法、精密鑄造法等。而鍛造用鋁合金為經必要的加工成形後再加以應用，如被、棒、條、線、箔、管及擠型等<sup>[1]</sup>。

表 2-1 鋁及其合金之分類<sup>[7]</sup>



依據美國鋁業學會 (American aluminum association) 制定命名法則，鍛造用鋁合金可分為九大類，並以四位數字編號來表示如表 2-2，並在末位數字後面加上加工或熱處理條件之代號<sup>[6][8][9]</sup>。如表 2-3<sup>[1]</sup>所示，編號的第一位數字代表添加的主要合金元素；第二位數字代表該合金改良次數；第三、四位數字用以區分合金成份或純鋁之純度。其中 1XXX、3XXX、4XXX、5XXX 及 8XXX 系列為非熱處理型鋁合金，主要靠固溶處理及應

變硬化來獲得強化；而 2XXX、6XXX 及 7XXX 系列為熱處理型合金，可藉析出硬化達到強化的目的。

表 2-2 鍛鍊用鋁合金之編號<sup>[8]</sup>

編號	主要添加合金元素	熱處理	實例
1XXX	無（99.0%以上之純鋁）	無法時效硬化	1050
2XXX	銅	可以時效硬化	2219
3XXX	錳	無法時效硬化	3003
4XXX	矽	無法時效硬化	4032
5XXX	鎂	無法時效硬化	5083
6XXX	鎂加矽	可以時效硬化	6061
7XXX	鋅加鎂	可以時效硬化	7075
8XXX	其他元素（如：鋰）		
9XXX	備用合金		

表 2-3 鋁合金加工與熱處理條件記號表<sup>[1]</sup>

記 號	意 義
-F	表示製造狀態，未行熱處理或冷加工者。
-O	表示完全退火狀態（僅用於鍛造品）。
-H	表示加工硬化狀態。
-H1n	表示僅受應變硬化（Strain-Hardened）。
-H2n	表示加工應變硬化後部分退火者。
-H3n	表示應變加工硬化後再行安定化者。
	n=2 為 20%（1/4 硬質）。
	n=4 為 40%常溫加工（1/2 硬質）。
	n=6 為 60%常溫加工（3/4 硬質）。
	n=8 為 80%常溫加工（硬質）。
	n=9 為 90%常溫加工（特別硬質）。
-T	表示以熱處理使之安定化者。
-2	表示完全退火（僅用於鑄造品）。
-3	表示固溶熱處理後常溫加工以增加強度。
-4	表示固溶熱處理後常溫時效至安定狀態。
-5	表示僅施人工時效者（其前不施固溶熱處理）。
-6	表示固溶熱處理後人工時效。
-7	表示固溶熱處理後安定化者。
-8	表示固溶熱處理後常溫加工，之後人工時效。
-9	表示固溶熱處理後人工時效，之後常溫加工。
-10	表示人工時效後常溫加工。
-W	表示溶體化處理淬火（Solution Treat）後正在進行時效硬化者，後面常註記時間，如 W30 表淬火後 30 天。

### 參、2219 鋁合金簡介

Al-Cu 合金擁有高的強度，除 2219 鋁合金外，其餘的 Al-Cu 合金，其銲接性不佳為其最大的使用限制。2219 鋁合金通常用於飛機及運輸結構材料，故於國防工業極為重要。2219 鋁合金含 6.3%Cu，乃取代 2025，除其有 2025 的優點外，2219 更擁有較 2025 高的強度，較佳的高溫強度、抗蝕性，尤其是其優良的銲接性及銲接強度。2219 鋁合金應用於高溫（320 以下）的使用構件、銲接構件，如太空梭的外圍燃料櫃<sup>[10][11]</sup>。

2219 鋁合金在 1954 年首次開發，與 2024、2025 同屬 2000 系列可熱處理型鋁合金，其成分如表 2-4 所示。與 2024、2025 之最大不同在於銅含量，2219 之銅含量約 5.8 ~ 6.8 Wt%，超過銅在鋁中的最大固溶限，而 2024、2025 之銅含量低於銅在鋁中的最大溶限<sup>[3]</sup>。

2219 中所含之微量合金元素計有 Si、Fe、Mn、Zr、Ti 等，其中 Fe 可形成  $Al_7Cu_2Fe$ ，Mn 可形成  $Al_6(Mn, Fe)$ ，Zr 可形成  $Al_3Zr$ ，Si 與 Mg 可形成  $Mg_2Si$ ，以上皆為細小之金屬間化合物，它們的存在可以升高 2219 之再結晶溫度及達到晶粒細化之目的，藉此可提高 2219 之高溫強度。2219 不易發生應力腐蝕裂縫（Stress Corrosion Cracking），在高溫（180 - 200）時具有 2000 系鋁合金最佳的強度值，亦具有良好的銲接性<sup>[3][11]</sup>。

表 2-4 ASM 規定之 2219-T31 鋁合金化學成分表（%）<sup>[9]</sup>

成分 規格	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zr	Zi	Ti
2219-T31	0.20	0.30	5.8-6.8	0.20-0.40	0.02	0.18	0.10	0.02-0.10

## 肆、5083 鋁合金簡介

5083 為非熱處理型合金，鎂含量 2.5-5.0%，詳細成分如表 2-5 所示，共晶溫度 450 ，最大固溶量 14.9%的鋁-鎂合金，最小抗拉強度為 36kg/mm<sup>2</sup>，銲接性佳，適用於銲接結構用材料。鎂含量增加可增加變形的抵抗性，但當鎂含量超過 5%以上，容易產生應力腐蝕現象<sup>[12]</sup>。

5083 合金強度是藉冷加工過程中所產生之差排（Dislocation）及次晶（Sub-grain）組織而獲得，然而銲接過程中，熱輸入在熱影響區產生退火效應，再結晶及晶粒成長出現，使此區內之差排及次晶消失，藉由組織及安定化處理，防止常溫之時效軟化；耐海水腐蝕，適用於需耐蝕之結構。添加錳（Mn）及鈷（Co），適於建築、車輛、步道橋樑、船舶及低溫氣體設備<sup>[13][14]</sup>。

表 2-5 ASM 規定之 5083-O 鋁合金化學成分表（%）<sup>[9]</sup>

成分 規格	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zi	Ti
<b>5083-O</b>	<b>0.40</b>	<b>0.40</b>	<b>0.10</b>	<b>0.40-1.0</b>	<b>4.0-4.9</b>	<b>0.05-0.25</b>	<b>0.25</b>	<b>0.15</b>

## 第二節 鋁合金材料的冷加工與熱處理

### 壹、冷加工簡介

金屬於再結晶溫度下做滾軋、擠製、抽拉等操作，此種加工通常在室溫下進行，且在加工過程中金屬溫度會上升，此種加工為冷加工。冷加工會改變材料的各項性質：抗拉強度、降伏強度及硬度會增加，延展性會降低。冷加工因應變使金屬硬化及加強作用產生應變硬化( Strain-hardened )。應變硬化主要有三個因素：( 1 ) 結晶內原子排列有所變異，即差排 ( Dislocation ) 的產生；( 2 ) 結晶內部的破散 ( Fragmentation )；( 3 ) 晶粒變形。

當金屬經過冷加工後，內部會產生嚴重的殘留應力 ( residual stress )。在不影響金屬物理性質及不改變晶粒結構之下，欲消除此種應力，可將金屬加熱至再結晶溫度範圍以下如回火處理或珠擊法 ( shot peening ) 以增加其疲勞強度<sup>[1][15]</sup>。

金屬材料之硬度及強度會隨冷加工程度而提高，延性卻降低，對已加工硬化 ( work hardening ) 到達某程度，再繼續加工便會有破裂的危險，需將其加熱至再結晶溫度以上處理 ( 退火處理 )，使硬度和延性恢復後才能繼續加工<sup>[1][15]</sup>。

加工硬化後材料之退火軟化過程分三階段<sup>[15]</sup>：( 1 ) 回復期：在  $T_1$   $T_2$  的溫度範圍內，材料內部的硬度為漸次減少，物理性質漸漸恢復加工前狀態，但機械性質變化甚少，顯微組織幾乎不變；( 2 ) 再結晶 ( Recrystallization ) 期：經過回復期到  $T_2$   $T_3$  溫度範圍時，內應力漸漸消除，產生新的結晶核重新結晶；( 3 ) 晶粒成長 ( Grain growth ) 期：通過再結晶期後，晶粒漸漸擴大，材料完全恢復加工前狀態。如圖 2-1 所示。

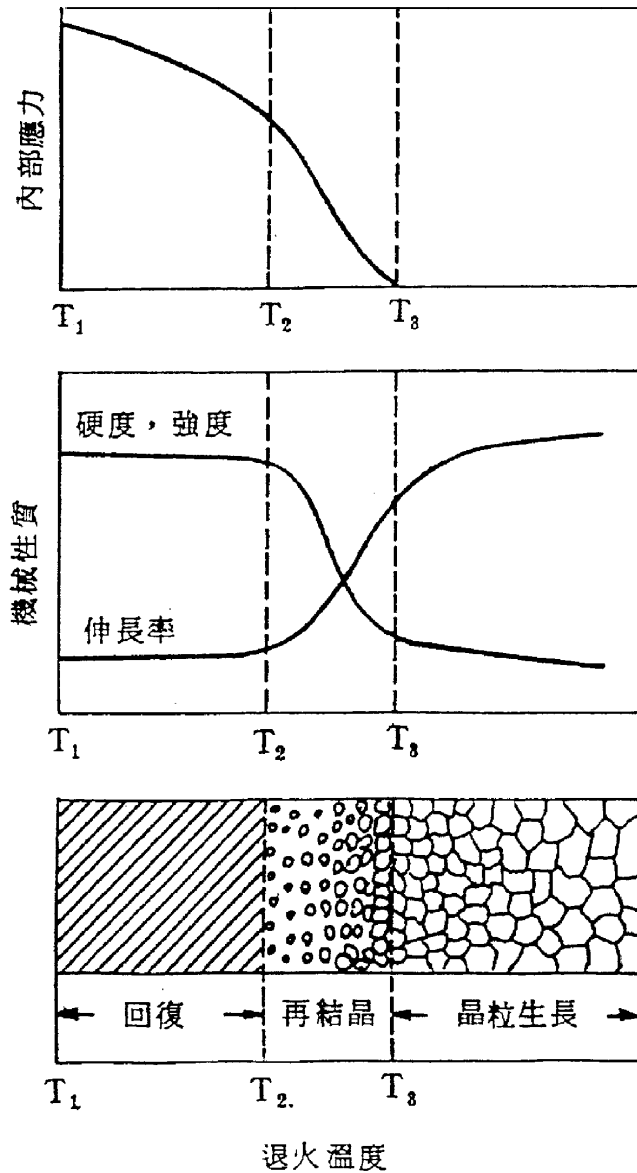


圖 2-1 回復-再結晶-晶粒成長圖<sup>[1]</sup>

## 貳、鋁合金熱處理簡介

熱處理 (heat treatment) 是指對材料施以適當的加熱或冷卻，而利用加熱或冷卻的配合來得到所需的特性為目的，對鋁合金而言，只有析出硬化型鋁合金 (2XXX、6XXX、7XXX) 可以藉由一些熱處理的操作處理來改善其機械性質，減少銲接缺陷，增加強度<sup>[13][16]</sup>。



## 一、退火處理

主要的目的在消除加工或鑄造時所產生之內應力，或使之軟化以利於加工或成形。經過冷壓、鍛造、壓成之鍛件經退火處理後可恢復所失之延展性。

弛力退火 ( stress-relief annealing ) 其目的乃在除去加工硬化，亦即消除加工時所產生之內應力。通常只需將鋁合金加熱至  $340\pm 10$  之溫度，保溫 1 小時後再爐冷或空冷即可。為避免過度的氧化及晶粒成長 ( grain growth )，最高的弛力退火溫度以不超過 410 為宜<sup>[4]</sup>。

完全退火 ( full annealing ) 目的在於完全軟化，亦即消除析出硬化效果或消除高溫加工後速冷之影響。通常將鋁合金加熱至 415~440 的溫度，保溫 2 小時，然後爐冷 ( 最大冷速以不超過 28 /h 為宜 ) 至 260 <sup>[4]</sup>。

## 二、安定處理 ( stabilization )

5XXX 系列的鋁合金經過冷加工後，再進行 120-180 低溫熱處理稱為安定處理，在處理過程中允許一可控制的回復現象 ( recovery ) 的發生。在安定處理後強度會下降但延展性會上升。因為內部結構能量的釋放，材料到達一個低能量狀態，對於更進一步回復的驅動力降低，在低溫環下使用其結構不再發生變化。未做安定處理者其強度隨時間增加而逐漸降低，做過安定處理者強度則不隨時間改變<sup>[13][16]</sup>。

## 三、時效硬化處理

析出硬化的基本原理是利用過飽和基體微細析出物的析出，來達成強化基體阻止差排移動的作用。鋁合金析出硬化的三個步驟：1. 固溶處理 ( solution treatment )；2. 淬火 ( quenching )；3. 時效處理 ( aging

treatment) 析出硬化的每一個步驟對析出硬化的效果影響很大，例如固溶處理選取不當，淬火速率不夠快，時效時間及溫度不當，都可能造成材料性質上的損失，而無法符合設計上的要求，故欲發揮析出硬化效果，需對每一步驟的影響因素有充分瞭解。茲就各步驟之要點及其注意事項分述如下：

#### (1) 固溶處理

此過程主要將鋁材加熱至 單相區，維持一段時間使溶質全部溶入基體而成為 相固溶體。惟溫度不可超過共晶溶解溫度，否則沿晶界將有熔解現象，會造成淬火後材料變脆。在固溶溫度內，溫度選擇愈高，則其原子的擴散速率愈快，析出硬化效果也就愈加顯著。

一般固溶處理時間 (soaking time) 應足以讓溶質原子全部溶入基體，因此有其最佳時間。若時間太長則易造成過度晶粒成長且浪費能源。此外材料厚度和加熱所用之介質的不同，都會影響所需的加熱時間和受熱的均勻程度<sup>[13][16]</sup>。

#### (2) 淬火

鋁合金的淬火係從固溶溫度快速冷卻到室溫，其目的為使可硬化的合金元素存留在固溶體內，抑制其析出，最常用的淬火液有水及油。對於不同的鋁合金及其形狀，可藉由不同的淬火液溫度控制其冷卻速度，淬火後的組織為過飽和固溶體<sup>[13][16]</sup>。為避免冷卻過程的析出，在操作上，要遵循下列兩個原則：1. 熱處理件由爐中取出至淬火介質這段時間稱淬火延遲時間 (quench delay time) 要短到足以使表面溫度高於析出物產生的溫度。2. 淬火介質的體積、熱吸收量與流動速率必須足夠以避免析出。任何淬火過程的中斷都可能引起零件溫度的回升而達到其敏感溫度範圍 (260-400 )。淬火介質必須使所有零件均快速通過此範圍，即需較快的淬火速率，否則將導致降伏強度、韌性及抗腐蝕性降低。

### (3) 析出

將淬火後所得之過飽和固溶體，置於常溫或加熱至一定溫度（150-190℃），維持一最佳時間，則固溶體的金屬會以化合物的形態析出，而形成強化機構。置於常溫下進行之析出稱為自然時效（natural aging），通常需較長的時間；而置於高溫下的析出稱為人工時效（artificial aging），其析出作用因高溫而加速，故所須的時間較短，通常以鹽浴爐或空氣爐來保持溫度。以鋁合金而言 7000 系列適合使用自然時效，而 2000、6000 系適合使用人工時效。

對於某些 6XXX 系與 7XXX 系合金，自然時效為不穩定狀態，這些合金可在數年內不斷改變機械性質，故有時需配合人工時效處理。溫度愈高可減少處理的時間，但若溫度過高則會降低獲得所要求機械性質之可能性。此外，人工時效有時採多段進行，其目的是為了在低溫產生更多細小的凝核析出，而在高溫短時間使凝核長至適當大小，達到機械性質所要求的階段。時效時間過長或時效溫度過高都容易形成過時效（over aging），導致強度大幅降低。最後在熱處理設備上，為了避免因溫度不均而導致時效後機械性質有所差異，故須嚴格注意溫控與爐內溫度之均勻度<sup>[13][16]</sup>。

### 第三節 鋁合金之銲接特性

鋁及鋁合金之銲接特性與其他金屬不同，影響銲接性者主要包括表層之氧化膜、熱傳導性、膨脹係數、熔點及銲接軟化等。茲將這些銲接特性分述如下<sup>[1][17][18][19]</sup>：

#### 一、氧化層

鋁及鋁合金置於大氣中，在表面上會迅速地形成一層氧化層(  $\text{Al}_2\text{O}_3$  )，厚度約  $0.1 \mu\text{m}$ 。使鋁材具有優良的耐蝕性及穩定性。但氧化膜的形成，卻造成銲接上的莫大困擾。一般而言，純鋁的熔點為  $660^\circ\text{C}$ ，而覆蓋於鋁材表面之氧化層熔點卻可高達  $2040^\circ\text{C}$ ，相差有三倍之多。在銲接過程中，氧化層阻隔了熔填金屬與母材之熔合，因氧化層無法在銲接過程中熔融，所以在銲接之前必須先清除氧化層，才能達到較佳的銲接品質<sup>[1]</sup>。一般氧化層的清除方法，有溶劑、銲劑、機械式研磨及銲接電弧作用來清除<sup>[2]</sup>。銲接進行中，若氧化鋁的粒子滲入銲道將影響銲道品質，造成延性降低、熔透不佳或銲接龜裂等現象。

#### 二、熱傳導性

鋁合金之特性之一乃是具有高導熱性，其導熱速度約為碳鋼的三倍以上，散熱速度相當快。因此鋁合金雖具有較低之熔點，但同一厚度的鋁材及鋼材銲接時，鋁材所需的輸入熱量較高，即需要相當集中的熱輸入量才能順利銲接<sup>[1]</sup>。

#### 三、膨脹係數

鋁材的熱膨脹係數極大，由熔融至凝固其體積變化約縮小  $6\%$ ，大約為鋼鐵的兩倍。這種冷卻所產生的收縮，在銲接加工時，必須有正確的銲接程序及預留裕度，否則會造成很大的變形，形成因拘束而產生之龜裂<sup>[1]</sup>。

由於體積收縮較大，銲接某些鋁合金時，往往由於過大的內應力而在脆性溫度區間內產生熱裂紋；尤其是高強鋁合金銲接時，常常是嚴重的銲

接缺陷之一<sup>[18][19]</sup>。

#### 四、熔點色澤

純鋁的熔點約 660 ，而一般鋁合金之熔點大約 570 ，遠低於鐵之熔點 1536 及銅之熔點 1080 <sup>[7]</sup>。尤其鋁與其他金屬不同的是：鋁在加熱過程中，甚至到達熔點時，其色澤變化甚微。因此，經常造成初學者，在銲接時無法辨別顏色的改變來調整銲接位置或移動，以致造成過熱而將工件銲穿。所以，鋁合金在施銲時，施銲者必須特別注意液態或濕潤現象的研判，以便於了解鋁合金材料熔融之變化<sup>[1]</sup>。

#### 五、銲接軟化

純鋁的結晶格子結構為面心立方 ( face-centered cubic )，共有 2 個可能的滑動面。故鋁本身具有較佳的延展性及加工性，即使在零下溫度也能維持其延展性。鋁合金銲件因銲接時，銲道部份會產生高溫軟化現象，銲道附近亦因溫度太高，使得機械性質也變差。因此，銲接時銲道的設計、銲接方法的選擇及施工的程序皆須詳加考慮規劃<sup>[1]</sup>。

#### 六、氣孔

氣孔是鋁合金銲接時易產生的缺陷之一。氫是產生銲接氣孔的主要原因。鋁及鋁合金的液體熔池很容易吸收氣體，高溫下溶入的大量氣體，在銲後冷卻凝固過程中來不及析出，而聚集在銲縫中形成氣孔。

#### 七、銲接熱影響區

在銲接過程中，大量的熱輸入大部份用在熔化填料及母材金屬，而少部分的熱量則向銲道兩旁的母材金屬傳遞，因此銲道兩側的母材將受到一梯度式之溫度影響，此部份屬於急速的升溫；另一方面，母材的體積、面積一般遠大於銲道，亦即熱傳導的速度不小，此部份屬於急速的降溫，此種急速升溫、降溫的過程稱之為熱循環過程 ( Thermal Cycle Process )，此時母材如同經歷一次短時間的熱處理，微觀組織因此受到改變，而其變化情形與母材原始加工狀態有關，母材的機械性質因而起了巨大變化<sup>[20]</sup>。

由於高溫熱作用，鐸道本身係屬於鑄造組織，強度接近母材之退火狀態，由於材料本身熱導作用，母材靠近鐸道之處必然會受到熱量的影響，愈近鐸道所承受的熱量愈高，母材在經歷熱循環作用後，如實施一熱處理程序，將使鐸道附近母材組織改變，如圖 2-2 所示。一般組織之改變大都是基體改變、析出物之析出、晶粒再結晶、晶粒成長等，上述母材內部組織的改變均會影響其機械性質，故稱為熱影響區( Heat Affected Zone, HAZ )<sup>[13]</sup>。

熱影響區中組織之改變可能是相變態、晶粒成長、析出物回熔 ( Precipitation Reverse ) 等。一般而言，通常會造成鋁合金母材強度的降低。本研究所探討之 2219 鋁合金屬於熱處理型鋁合金，5083 屬於非熱處理型鋁合金。以下，就熱處理型鋁合金與非熱處理型鋁合金經鐸接的熱循環過程後，母材熱影響區 ( HAZ ) 中可能產生的微觀組織作一介紹<sup>[3][21]</sup>：

#### (一) 非熱處理型鋁合金 ( 加工硬化型鋁合金 )

對加工硬化非熱處理型鋁合金而言，其熱影響區 ( HAZ ) 大致可分為三個區域：1. 晶粒成長區。2. 再結晶區。3. 晶粒粗大區。對此非熱處理鋁合金而言，受到鐸接熱循環的作用下，HAZ 會因晶粒成長及再結晶的冶金反應而損失部分的機械強度<sup>[22]</sup>。

#### (二) 熱處理型合金

對熱處理型鋁合金而言，經鐸接後母材熱影響區依其受不同溫度熱循環作用，大致可分為下列五個區域：

##### 1. 部份熔化區 ( Partial Melted Zone )

此部份緊靠鐸道，其中合金所含之共晶組成 ( Eutectic Constituents ) 可能因高溫而部份熔化和再凝固 ( Resolidified )，此區將因過熱導致析出物集中，晶粒粗大強度甚低。此區域可能產生的問題有：熱裂、韌性降低、氫裂等現象。

## 2. 固熔區 ( Solid Solution Zone )

此區所經歷的熱循環溫度較高，母材原本所含之析出物，在此區將被重熔回去，銲後可加以適度的自然時效或人工時效，強度會較部份熔化區為高。

## 3. 部分固熔區 ( Partial Solid Solution Zone )

因熱循環溫度較低，部份析出物無法熔回基地，尚未固熔之析出物有可能聚集而粗化，導致機械性質變差。

## 4. 過時效區 ( Over-aged Zone )

析出物往晶粒中心聚集合併 ( Coalescence ) 成粗大顆粒，材質成了過時效狀態，機械性質最差，而成為 HAZ 或銲件強度最弱的區域。需施予銲後熱處理 ( Post-Weld Heat Treatment ) 才能改善。

## 5. 未受影響區 ( Unaffected Zone )

此區域與銲道有一段距離，感受到的溫度低，不足以引起組織的變化，性質與未銲前相同。

由以上可知，對熱處理型鋁合金而言，HAZ 冶金上的反應遠比非熱處理型鋁合金來得複雜，而影響 HAZ 性質的主要因素有<sup>[22]</sup>：(a) 合金成分 (b) 合金銲前加工狀態 (c) 銲接熱輸入量 (d) 銲後熱處理。

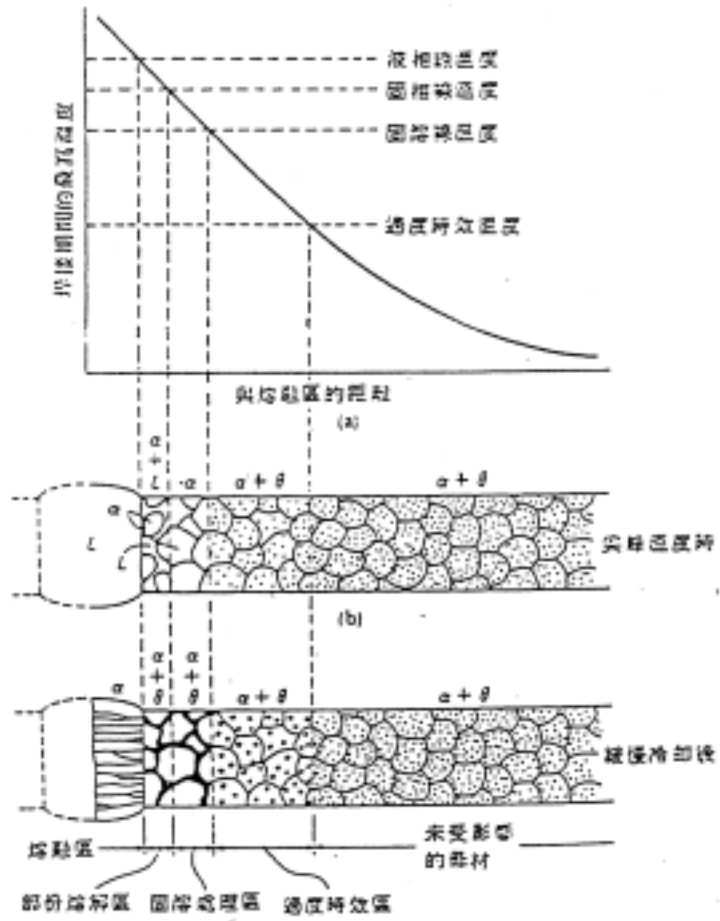


圖 2-2 銲道熱影響區組織變化圖<sup>[3]</sup>



## 第四節 銲接熱裂縫

### 壹、銲接熱裂縫的分類

裂縫是銲接中常遇到的問題，也是銲接中嚴重的缺陷。1960 年 Kammerer 將銲件裂縫區分為熱裂縫（Hot Cracking）與冷裂縫（Cold Cracking），裂縫在接近固相線溫度（Solidus Temperature）形成的稱為熱裂縫。Hemsworth 將熱裂縫分成兩類，一是偏析熱裂縫（Segregation Cracking），包括有：凝固熱裂縫（Solidification Cracking）和液化熱裂縫（Liquation Cracking）；二是延性降低裂縫（Ductility-dip Cracking）<sup>[3][24][25]</sup>。

凝固熱裂縫發生於銲道金屬，這種熱裂縫幾乎都發生與傳播於固相線溫度以上。當銲道金屬從熔融狀態凝固下來時，在熔融區域凝固之最後階段，由於溶質的再分佈造成合金元素和雜質偏析，形成一些低熔點之析出物，加上凝固時的收縮壓力，此時就形成了裂縫。由此看出這種型式之裂縫與凝固組織有關<sup>[25]</sup>。

液化熱裂縫發生於單道銲的母材金屬熱影響區，或是多重熱循環的銲道金屬熱影響區（多重銲道或修補銲）。這種裂縫在接近固相線溫度時發生以及延伸。液化熱裂縫比凝固熱裂縫，在尺寸上小很多，且以沿晶方式延伸或接近熔融線<sup>[25]</sup>。

延性降低熱裂縫，發生於單道銲的銲道金屬，或是單道銲，多重銲及修補銲的熱影響區。此種裂縫發生於固相線溫度下，且這種裂縫是以沿晶方式破裂，而無前述偏析熱裂所擁有的晶界液態薄層。

再熱裂縫（reheat cracking），發生在多道次銲接或補銲時於前次銲道的熱影響區上。

銲接熱裂之特徵，如下表 2-4 所示：

表 2-4 銲接熱裂之特徵<sup>[23]</sup>

發生溫度	315 以上。
發生時間	銲接進行中。
破裂形式	沿晶式破壞。
形成區域	A. 銲接金屬熔融區（凝固裂縫）。 B. 銲接金屬或母材熱影響區（液化裂縫）。
裂縫特徵	A. 裂縫主要形成於高溫下。 B. 裂縫主要發生於銲接的加熱過程（凝固裂縫）或冷卻過程（液化裂縫）中。 C. 裂縫形成時金屬液薄膜會存在於晶界。 D. 裂縫必定會沿著晶界而形成。

## 貳、銲接熱裂縫的理論

通常在銲道金屬和母材熱影響區，都可以發現銲接熱裂縫的存在。茲分別討論如下：

### 一、銲道金屬熱裂理論

銲道金屬熱裂較早受到注意，關於此方面重要的理論有收縮脆化理論（Shrinkage-Brittleness Theory）以及 Pellini 與 Apblett 提出的應變理論（Strain Theory）。而最合理也較為多數人接受的是由 Borland 在 1960 年提出綜合理論（Generalized Theory），基本上是修正與擴充以上兩個理論<sup>[3][25][27][28][29][30]</sup>。綜合理論將凝固過程分為四個階段，如圖 2-3、2-4。

a、第一階段：a - d - c 所圍成的面積。

樹枝狀結構形成，並自由地分佈在熔融金屬液中，無裂縫產生<sup>[26]</sup>。

b、第二階段：a - c - e 所圍成的面積。

樹枝狀的結構連結，晶界也開始生成，金屬液仍然可以流動，若此時產生裂縫，則金屬液可加以填充而使其癒合（Healed）。

c、第三階段：a - e 線以下。

為臨界凝固範圍 ( Critical Solidification Range )，在此時晶界已近乎完全長成，因而限制了金屬液的流動，裂縫於此時發生後，不會再癒合。Borland 特別指出第三階段為臨界凝固範圍，乃因若此範圍越寬，則銲接金屬越容易產生裂縫。存在一串連續之液態膜，膜間被狹窄且已凝固之固體連橋 ( Solid Bridges ) 所分隔，這些液體膜無承受應力的能力，而這些連橋必須承受冷卻收縮之應力，因此容易被破壞，相反的固體連橋愈多，即表示液態金屬薄膜愈不連續，愈不易被破壞及產生熱裂縫。因而此階段亦被稱為臨界凝固範圍 ( Critical Solidification Range ) [26]。

d、第四階段：b - d 線以下。

殘餘的金屬液完全的凝固。

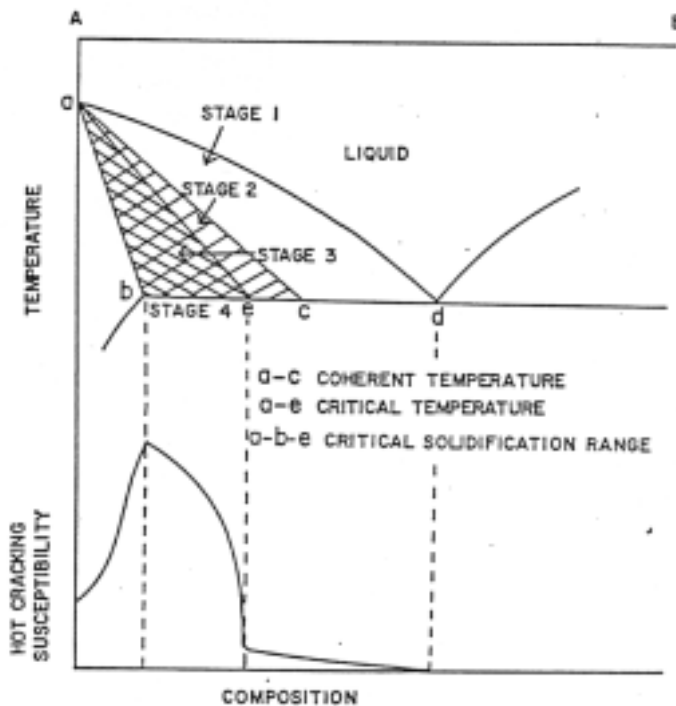


圖 2-3 銲接金屬熱裂之綜合理論示意圖<sup>[3]</sup>

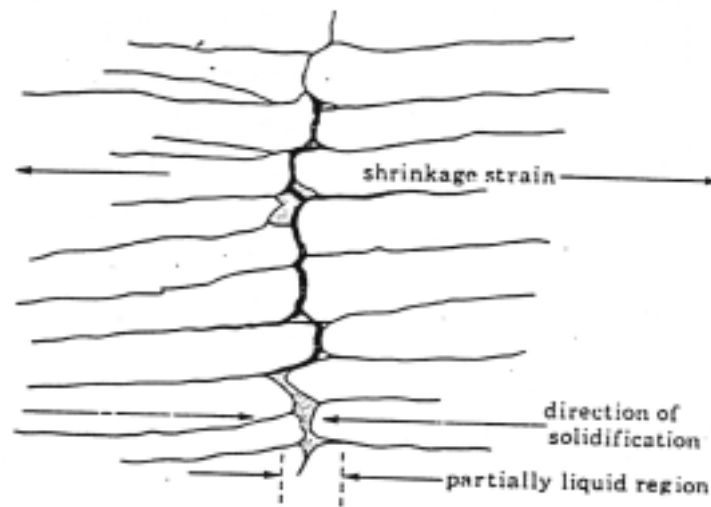


圖 2-4 凝固裂縫示意圖<sup>[3]</sup>

## 二、母材熱影響區裂縫理論

母材熱影響區可細分為二大部份，一是部份熔化區，另一則是母材熱影響區。這二個區域的熱裂縫，前者可以液化理論 (Liquation Theory)，後者可以析出物理論解釋<sup>[27][31][32][33]</sup>。

液化理論，對於部份固溶區所在位置，在銲接時，其所經歷的熱循環最高溫度將超過共晶溫度 (Eutectic Temperature)，此時晶界處所含的共晶相 (Eutectic Phase) 將會形成液態膜，而在此同時晶粒受到熱循環之作用，熱裂於是產生。液化理論基本上係熱影響區受到銲接輸出熱量影響，於晶粒間產生液態薄層，其來源主要為低熔點之偏析物如 Si、P、S 的偏析<sup>[3][20]</sup>。

析出物理論，可以圖 2-5 說明。在某一溫度下，晶粒周圍的析出物往晶界聚集，晶粒周緣處形成一窄而強度低的析出物缺乏區 (Precipitation Depleted Zone)，由於無法承受因溫度下降所產生之收縮應力，因而產生裂縫。

減低析出物，以避免產生裂縫，有以下幾種方法<sup>[27]</sup>：

1. 以低輸入熱量施鐸，減少母材停留在高溫之時間，避免析出物過度析出。
2. 鋁材本身添加少量 Cr，增加晶粒穩定。
3. 添加 Ti、Co、V 等晶粒細化元素，減緩析出物過量析出。

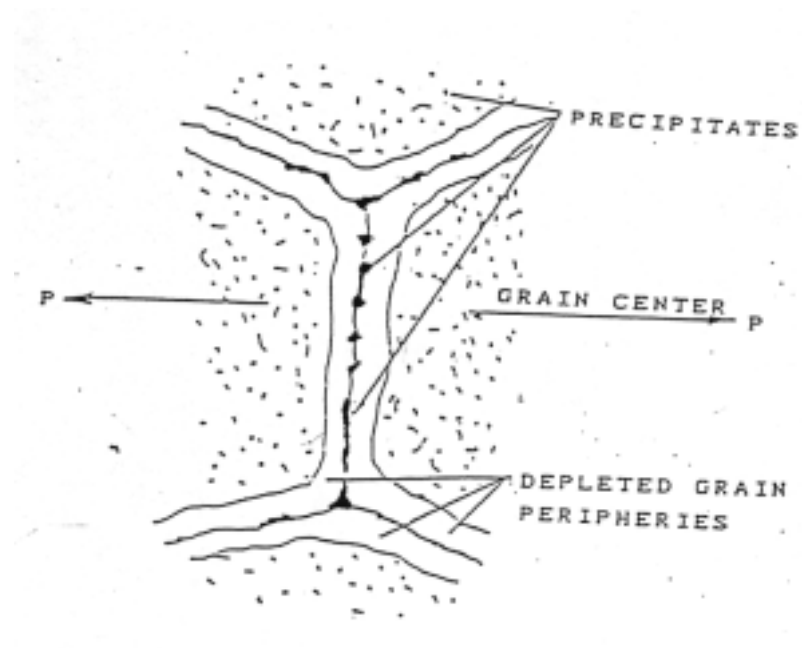


圖 2-5 析出物缺乏區熱裂示意圖<sup>[3]</sup>

## 參、鐸接熱裂縫的防止

### (一) 降低鐸道金屬熱裂縫之方法<sup>[20][34]</sup>

除了凝固過程外，外力的存在才能造成裂縫的形成，外力的主要來源有：

- (1) 機械因素：與裂縫形成關係最密切包括接頭設計、鐸珠大小及形狀、夾持等。
- (2) 熱影響：包括冷卻速率與尖峰溫度 (Peak Temperature) 及板的

厚度，愈厚者，愈易有裂縫產生。

(3) 冶金上的變數：包括晶粒的大小、形狀、偏析等。

所以欲減少銲道金屬熱裂縫可由其來源著手，如(1)提高銲接速率。(2)改變接頭設計，夾持方法，例如銲接時施予一壓縮力。(3)選用適當的填料金屬，以達到晶粒細化及降低熱裂敏感度，在晶粒細化方面可加入 Ti、Zr、V 等細化元素。而降低熱裂敏感度方面以鋁系合金為例，Al-Cu 合金系中，當 Cu 的 wt% 達 3%wt 最易形成裂縫，Al-Mg-Si 合金系中， $Mg_2Si$  量於 1-2%wt 時最易生成裂縫，所以多量的 Cu、Si 加入可以降低裂縫的生成，元素對熱裂縫敏感度的關係，如圖 2-6 所示<sup>[32][33]</sup>。

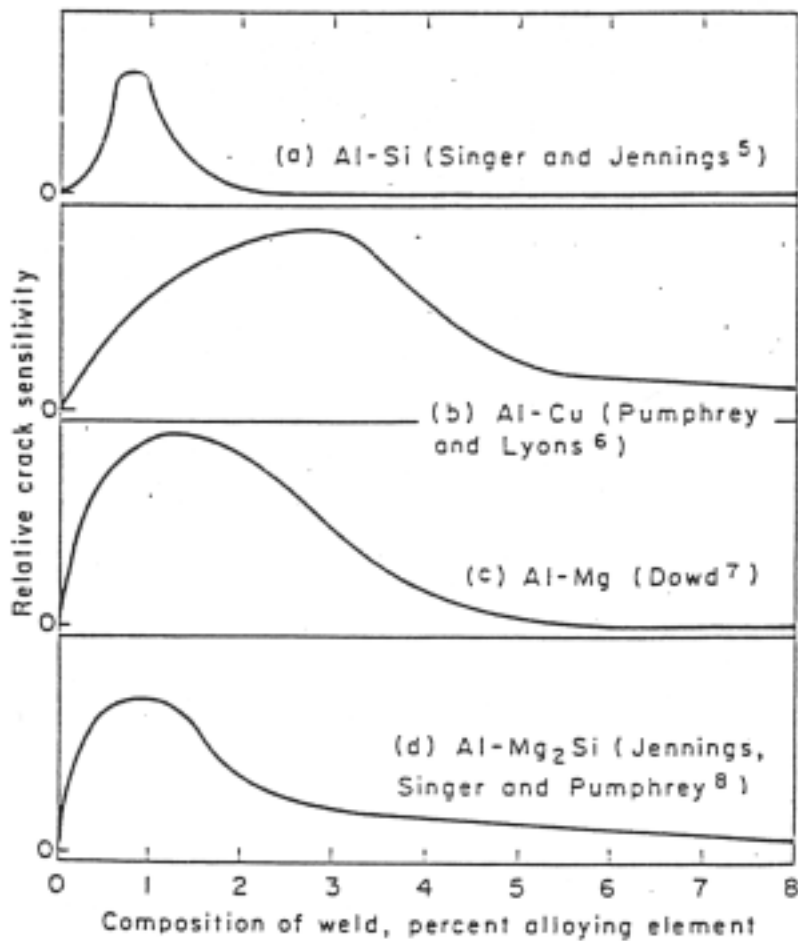


圖 2-6 金屬元素對熱裂縫敏感度的關係<sup>[20]</sup>

## (二) 降低母材熱影響區熱裂之方法

(1) 減小熱輸入 (Heat Input), 部分熔融區大小和晶界融化量隨熱能的加入而增加, 也就是熱輸入量多, 部分熔融區和晶界融化量擴大, 例如使用電子束鐸 (EB weld) 雷射鐸接等等, 這些方法可以達到減小部份固溶區的區域大小, 亦可以使晶粒停留在高溫的時間降低, 避免析出物過度於晶界析出。(2) 減少約束力 (Restraint), 因為熱裂的產生一定得藉由外力的輔助, 減少約束方可降低熱裂的發生。因此在部分熔融區的熱裂敏感性可以藉由降低應力而減少。(3) 由母材著手。母材成分、晶粒大小和溶解物或雜質的偏析, 可以很明顯的影響部分熔融區的熱裂敏感性。故純金屬無所謂熱裂問題, 因為無低融點雜質偏析到晶界。低融點偏析物在晶界量一定時, 則被覆面積受晶粒大小所控制。晶粒越粗大, 其晶界所能提供的面積較小, 故有較高熱裂敏感性; 較小的晶粒增加晶界的面積, 使共晶相 (Eutectic Phase) 集中的機會降低, 形成液態膜的機會降低, 熱裂自不易形成, 所以添加晶粒細化元素, 如 Co、Ti、Zr 等。(4) 添加其他金屬。部分熔融區的熱裂不能由加入金屬改變成分控制。但適當的選擇添加金屬, 可以藉由改變凝固順序而避開熱裂的形成。(5) 母材的滾軋方向也會影響熱裂的敏感性。鐸接方向如垂直滾軋方向, 此平行方向更容易熱裂, 其原因是滾軋後晶粒具有方向性。鐸接平行軋延方向熱裂裂縫較難傳播。(6) 避免多重熱循環。<sup>[20][35]</sup>

## (三) 其他減少鐸接熱裂縫的方法

(1) 局部快冷減少鐸接熱裂<sup>[36][37]</sup>。鐸接熱裂紋的產生是由於晶粒間變形超過該處晶粒間變形能力所致。Prokhorov 認為隨變形速度增加金屬熱塑性降低, 降低冷卻速度可以降低變形速度和鐸接熱裂紋的傾向, 並把預熱和緩冷作為減少鐸熱熱裂紋形成的措施。研究結果表明, 鐸縫局部快冷可以減少脆性溫度區內的變形量, 另外提高變形速度可以提高脆性溫度

區下半部金屬的熱塑性，從而增加允許變形速率和減少銲接熱裂紋。

(2) 銲縫兩側隨銲同步碾壓法<sup>[38]</sup>。針對高強鋁合金，從銲接熱裂紋產生的力學角度出發，有別於以往從冶金途徑出發。對於熱裂敏感性較高的材料，從冶金途徑解決銲接熱裂紋的效果是比較有限的。根據銲接熱紋理論，銲接熱裂紋的產生是在凝固過程中，脆性溫度區間銲縫或熱影響區 (HAZ) 金屬承受的拉伸應變大於它們的臨界應變速率；本法即利用適當的力學措施使在銲接冷卻過程中對於脆性溫度區的銲縫或熱影響區 (HAZ) 金屬同時承受一外加壓縮應變，以抵銷熱拉應變而有效達成防止銲接裂紋的產生。<sup>[57]</sup>

#### 肆、鋁合金銲接熱裂縫

鋁合金具有高膨脹係數及高收縮率，故亦有較高之熱裂傾向。通常具有較寬之凝固溫度範圍，具有較大之區域發生固化熱裂。合金中加入較多之合金元素或具有較多之雜質則具有較寬之凝固範圍。例如鋁合金中加入較多之 Cu、Zn、Mg 元素。純鋁並不會產生固化熱裂，因為它在晶界並沒有低熔點之共晶相產生來造成固化熱裂<sup>[26][39]</sup>。

高合金含量之鋁合金，具有非常多之共晶液態相有時能回填初始之裂縫使之具有較低之熱裂敏感性。而組成介於純鋁與高合金含量兩者之間，共晶液態相大到足以形成晶界薄膜，則容易產生固化熱裂<sup>[3][43]</sup>。

鋁合金銲接裂縫大都出現在銲道或緊鄰銲道的熱影響區上。鋁合金銲道裂縫與母材及銲材的合金成份、銲道設計、銲接方法、銲接程序及銲接參數等有關，其中又以母材及銲材合金成份的影響最大<sup>[3][41][42]</sup>。

鋁合金的成份很複雜，又容易形成共晶相，由圖 2-7 可看出鋁合金合金成份對其共晶溫度的影響很大。合金成份越多會導致凝固溫度範圍變大，而對銲接性有不利的影響。圖 2-8 為鋁合金中合金成份對裂縫敏感性



的影響，由圖中很明顯可看出僅是高 Cu 含量或僅是高 Mg 含量的鋁合金，  
 銲接性甚佳，如 2219 及 5083。而含 Cu 量及含 Mg 量兩者均高的 7075、  
 2091、8090、2024 銲接性則不佳。鋁合金含有少量的 Mg 元素可提供強化  
 相析出物之形成且不會降低其銲接性，如 2519，具有高強度及好的銲接  
 性。圖 2-8 可用來預估鋁合金銲接性，以及提供如何選用銲條來調整銲道  
 合金成份以提高銲接性<sup>[44]</sup>。

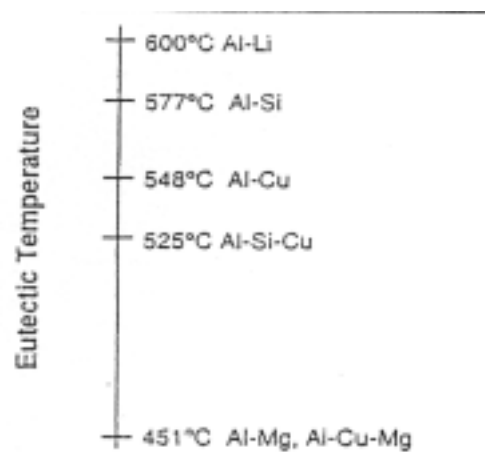


圖 2-7 鋁合金合金成份對其共晶溫度的影響<sup>[22][58]</sup>

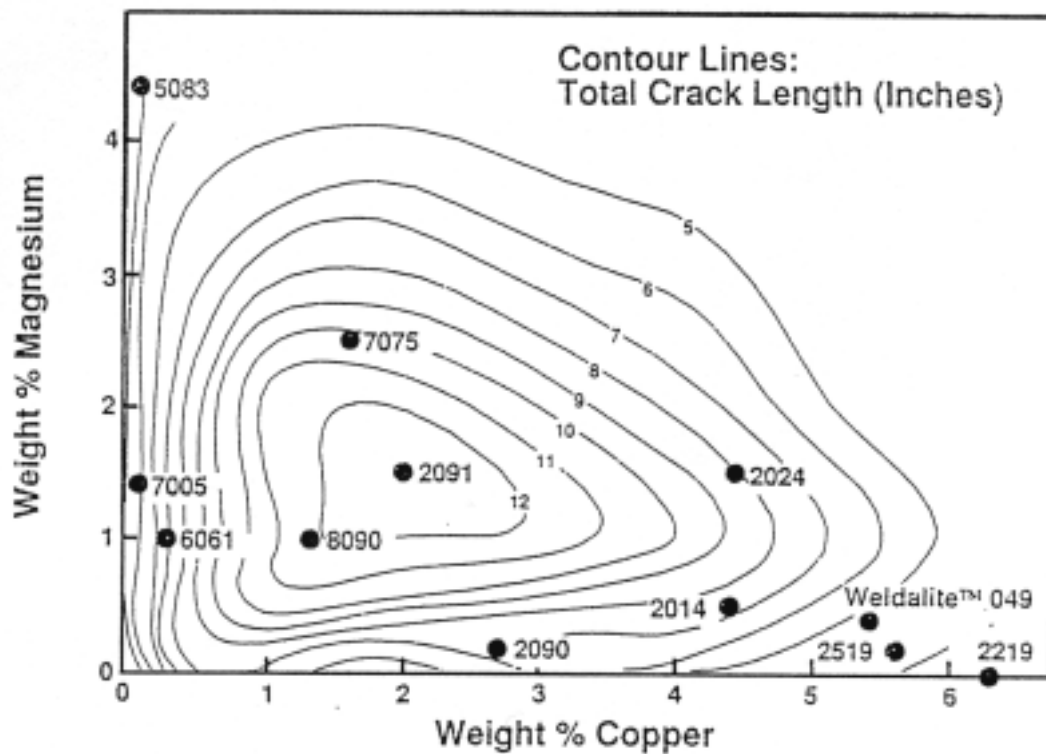


圖 2-8 鋁合金中合金成份對裂縫敏感性之影響<sup>[22]</sup>

## 伍、鐸接熱裂縫的評估方法

熱裂的發生屬於鐸接缺陷中較為嚴重的缺陷，且熱裂一直是鐸接冶金領域中投入最多但卻獲得最少的研究主題<sup>[46]</sup>。評估熱裂有許多種方法。由於裂縫不容易觀察，通常進行試驗時使材料產生塑性變形，使裂縫或微裂縫張開以便觀察。而由於鐸接條件之不同，材質之差異、晶粒大小、不純物等因素之影響使得熱裂難以做定性之評估<sup>[3]</sup>。至目前為止，最常用來評估鐸接熱裂之方法有下列幾種：

諸如：可調應變試驗( Varestraint Test ) 微裂縫彎曲試驗( Fissure Bend Test ) Circular-Patch Test Houldcroft Test 熱延性試驗( Hot Ductility Test ) 壓板對接鐸接裂紋試驗 ( FISCO ) Strain-Induced Crack Opening Test、T 型接點試驗、十字搭接試驗法、魚骨狀裂紋試驗法等<sup>[3][18][45][46]</sup>。本研究為利用改良式可調應變試驗來作為評估的方法，其原理與使用方法，詳述於後。

### 第五節 可調應變試驗

在 1965 年由 Savage 和 Ludin 發展出可調應變試驗，此試驗的特點在於可獨立鐸接參數和應變量 ( Augmented Strain )，以分別研究冶金因素與機械因素對熱裂之影響。此測試最初發展之設計，如圖 2-9 所示；試片被裝置成一懸臂樑，鐸鎗由左而右移動，當電弧通電過如圖所示之 A 點時，一氣動之加壓軋將試片向下彎曲，以吻合可調式模塊 B 上表面之曲率半徑，同時電弧繼續穩定向前行進，最後在 C 停弧。從幾何觀點上來看，在試片上表面受一加大之縱向應變<sup>[42][47]</sup>：

$$= ( t / 2 ) / R$$

t：試片厚度 ( thickness of specimen )

R：模塊曲率半徑 ( radius of die block )

觀察熔池四周熱裂縫的數量、長度與應變的關係可評估銲接熱裂敏感性，表示裂紋的方法有：(1)引起裂紋的最小外力。(2)裂紋總長度。(3)最大裂紋長度。其中(1)和(2)為提供比較熱裂紋敏感性的兩個指標，而(3)為提供熱裂紋發生的相對溫度範圍<sup>[48][49]</sup>。

在 Varestraint Test 發表後，陸續有一些修改的模式提出。此種試驗又可細分為縱向可調應變試驗、橫向可調應變試驗、點可調應變試驗 ( Spot Varstraint Test )，如圖 2-10 所示。上述試驗方法之差異性在於銲接方向與施加應變之方向為平行或垂直來區分。而點可調應變試驗僅施行單點之銲接。

本研究所使用的機型為改良式萬用型的 Varestraint 試驗機，由國立交通大學周長彬博士所領導之銲接實驗室加以設計組裝，電弧可採用固定式或移動式，視實驗的需要。將試片至於模塊上方 ( 曲率可加以更改 )，銲接完畢迅速利用兩側之油壓臂向下壓，以達成所需之變形量。而銲接參數有 ( 1 ) 應變量 ( 2 ) 電極種類與大小 ( 3 ) 電流與電壓 ( 4 ) 銲接走速 ( 5 ) 保護氣體流量與種類等<sup>[3][50]</sup>。

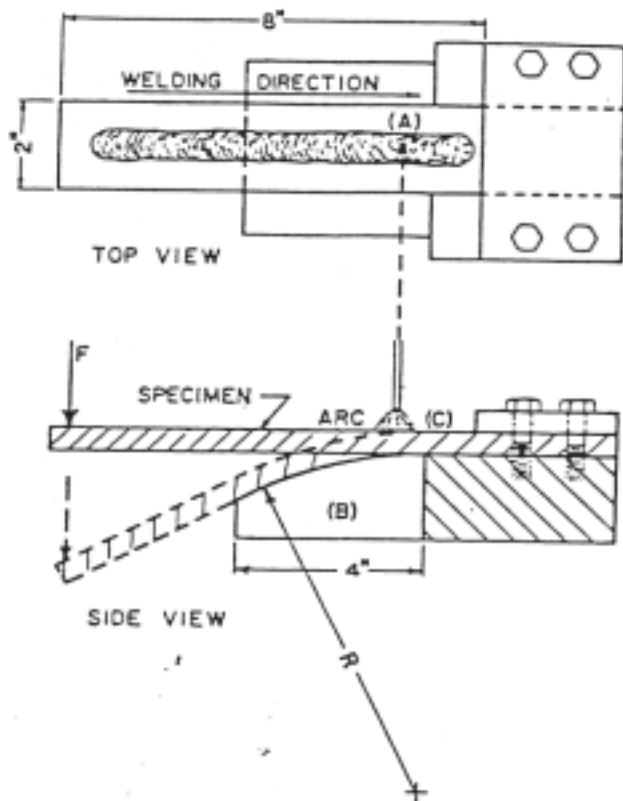


圖 2-9 可調應變試驗機示意圖<sup>[3]</sup>

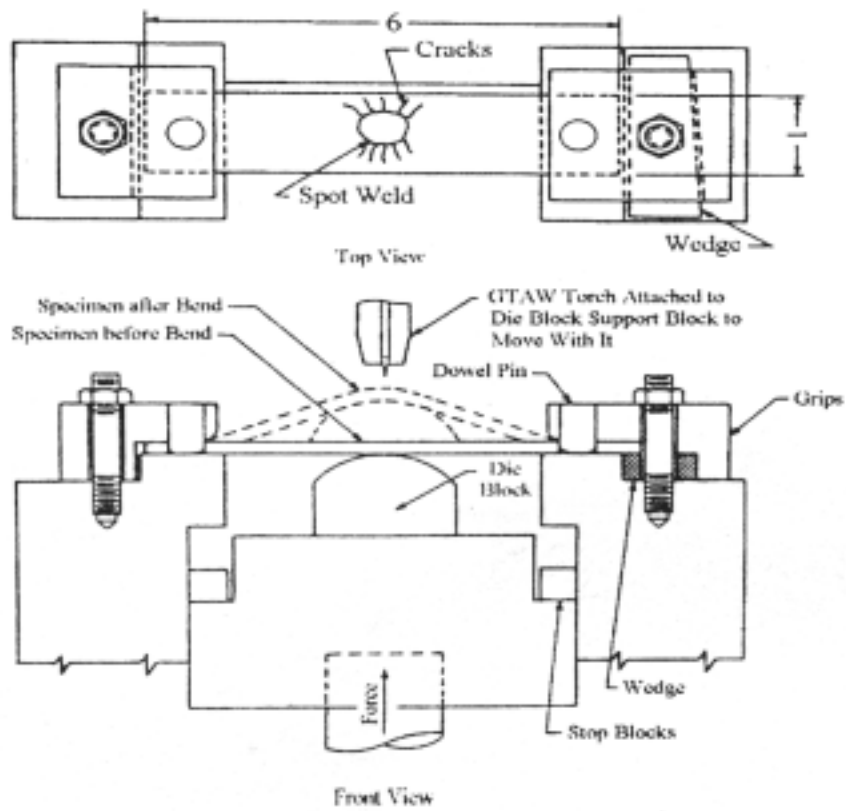


圖 2-10 改良型可調應變試驗機示意圖<sup>[23]</sup>

## 第六節 TIG 銲接原理及設備

### 壹、TIG 原理

氣體鎢極電弧銲 ( Gas Tungsten Arc Welding, GTAW ), 又稱惰氣鎢極電弧銲 ( Tungsten Inert Gas Welding, TIG ), 國內習稱「氬銲」; 氬銲如圖 2-12 所示, 是一種利用非消耗鎢極與工件間所產生的電弧加熱工間接合部位, 使達成冶金式結合之電弧銲接方法; 施銲時由氣體噴嘴所噴出的惰性氣體或惰性混合氣體, 可以保護熔融金屬以避免氧化<sup>[1]</sup>。

以純氬氣或氬氣與氦氣之混合氣體作為保護氣體, 使用交流電源, 可增進電弧效應, 同時對熔池亦有清淨作用, 其基本原理如圖 2-11 所示。在銲接過程中, 非消耗性鎢電極與母材間產生電弧, 惰性氣體同時經由銲槍送入銲口區域, 包圍電極與熔池, 以防止大氣中氧與氮造成之熔接污染, 如此送入填料即可將母材接合。此外由於鎢電極具有很高的熔點, 若在其電流負載容量限度內使用, 幾乎完全不會消耗。此法最大特點在減少銲接時金屬的變質<sup>[47][51][55]</sup>。

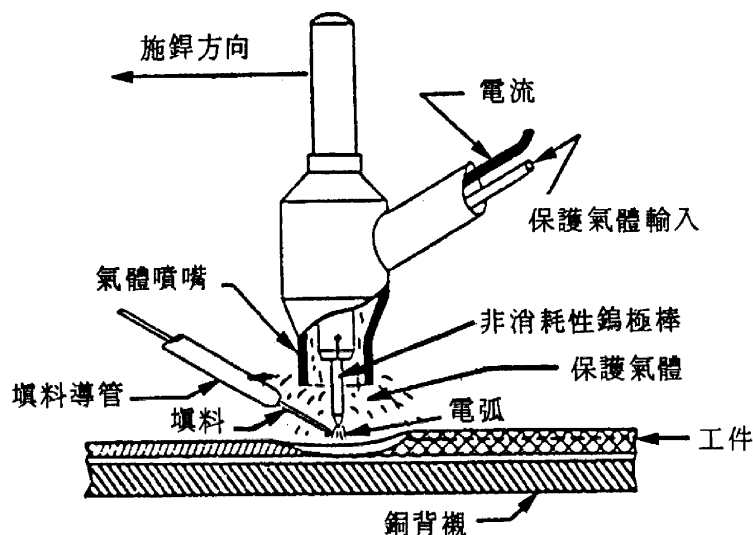


圖 2-11 TIG 示意圖<sup>[1]</sup>

## 貳、銲接設備

TIG 的設備計有 (1) 銲炬 (Torch) 或電極把手 (Electrode holder) (2) 鎢極棒 (3) 惰性氣體 (4) 氣體調節器及流量錶 (5) 氬銲機 (6) 水冷卻系統 (7) 氣體導管和水導管以及電纜線，茲分別說明如圖 2-12 所示。

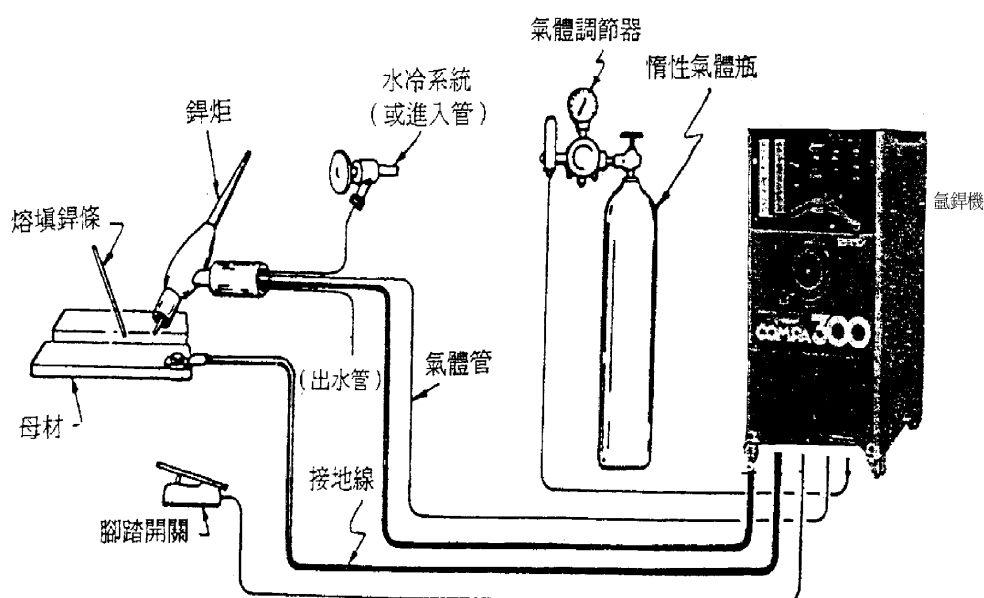


圖 2-12 TIG 銲接設備<sup>[5]</sup>

## 參、銲接電流型式

TIG 電源機所使用之電流形式主要分為：直流正極性 (DCEP)、直流反極性 (DCEN)、交流極性 (AC) 等三種<sup>[52]</sup>，各有不同之特性及使用場合，如圖 2-13 所示，茲將此三種極性分述如下：

CURRENT TYPE	DCEN	DCEP	AC (BALANCED)
ELECTRODE POLARITY	NEGATIVE	POSITIVE	
ELECTRON AND ION FLOW			
PENETRATION CHARACTERISTICS			
OXIDE CLEANING ACTION	NO	YES	YES-ONCE EVERY HALF CYCLE
HEAT BALANCE IN THE ARC (APPROX.)	70% AT WORK END 30% AT ELECTRODE END	30% AT WORK END 70% AT ELECTRODE END	50% AT WORK END 50% AT ELECTRODE END
PENETRATION	DEEP; NARROW	SHALLOW; WIDE	MEDIUM
ELECTRODE CAPACITY	EXCELLENT e.g., 1/8 in. (3.2 mm) 400 A	POOR e.g., 1/4 in. (6.4 mm) 120 A	GOOD e.g., 1/8 in. (3.2 mm) 225 A

圖 2-13 TIG 電源機電流極性比較圖<sup>[45]</sup>

#### a. 直流電極正 (DCEP)

鎢極接正極，母材接負極，在銲接時電子由母材流向鎢棒，而保護氣體離子則流向母材。故有 70% 熱量集中於鎢棒，30% 熱量集中於母材，銲道形狀淺而寬，適合較薄的鋁板銲接，由於保護氣體離子流向母材，而加強銲道及周圍熱影響區表面的清淨作用。此外鎢棒因受 70% 熱量，故必須選用較粗尺寸來防止過熱產生熔融而污染銲道<sup>[1][19]</sup>。

#### b. 直流電極負 (DCEN)

鎢極接負極，母材接正極，在銲接時電子由鎢棒衝擊母材表面，而保護氣體離子則流向鎢棒。由於電子速率高於保護氣體離子之速率，故 70% 熱量會集中於母材，30% 熱量集中於鎢棒，銲道形狀深且窄，可適合較厚鋁板的銲接。此外由於鎢棒熱量較少，故可選用較細之尺寸，亦可容許較大的電流而不損壞<sup>[1][19]</sup>。

#### c. 交流極性 (AC)

氬銲電弧的交流極性，正極與負極瞬間交互變化，為鋁及鋁合金氬銲

應用最廣的一種方法。交流電在銲接時若接於 60Hz 之電源為 DCEN 及 DCEP 銲接法每秒互換 60 次，故熱容量分佈在電極與銲件各佔 50%，所形成銲道之熔深介於 DCEN 與 DCEP 之間。在直流反極的半波，銲道及周圍熱影響區的表面產生清淨作用，因此其清淨作用較直流正極者為佳，而較直流電極負者為差，交流氬銲產生極優良的鋁及鋁合金銲接品質<sup>[1]</sup>。

銲接時由於電流每 1/120 秒即歸零一次，電弧可能不穩定，甚至較難引弧，因此都裝有高週波變壓器，使高壓電（3000—8000V）高週波（0.5—30Hz）均與電弧同時存在，而能增加電弧穩定性，並使擊碎氧化膜效果更佳。

#### 肆、保護氣體

保護氣體在 TIG 銲接法中主要的任務有二：（一）保護熔融金屬及熔池避免與空氣接觸，造成銲縫的劣化，而導致銲接失敗；（二）銲接機將電能轉換成熱能，這能量經由氣體傳遞到待銲件的表面，使熱能傳遞完成銲接的動作<sup>[53]</sup>。

鋁及鋁合金銲接所用的保護氣體，主要為氬氣（Ar）、氦氣（He）、氬氦混合氣等。

#### 伍、TIG 銲接主要優點如下：

1. 沒有銲渣及飛濺物，減少銲後清理時間。
2. 不需使用銲劑，於是無銲劑之流動，可清楚的看到熔池，且銲後不需清潔處理，氧化與氮化甚少，抗銹性與延性特佳，優於其它銲法。
3. 熔填金屬控制單純，銲道的寬窄與高低均可由銲線之填入量及鎗頭操作速率加以控制，以達最經濟之銲線消耗量，節省銲接成本。
4. 使難施銲之金屬易於銲接，尤其對鋁與鋁合金。



5. 銲件品質優良、銲道美觀。
6. 熱輸入控制容易，且可不添加填料，對薄材料之銲接特別方便。

#### **陸、TIG 銲接主要缺點如下：**

1. 由於鎢電極所能承載之電流有限，故熔融與穿透能力較低。
2. 銲接速率與堆積率慢，厚斷面之銲接費時且昂貴。
3. 較適用於銲接板厚在 6mm 以下的母材。
4. 電極容易沾上熔池金屬，更換費時。
5. 一般材料用直接 (DCEN)；鋁鎂用反接 (DCEP)。一般來說，鋁合金薄版用交流極性(AC)效果最佳。