

第二章 文獻探討

2.1 銲接電弧之簡介

電弧的產生是一種低電壓高電流的放電作用，而電弧的持續則是由於陰極受熱而釋放的熱電子活動的結果。

母材連接到接地端(或稱為電弧端)，藉由電極的瞬時碰觸母材而造成短路，引起極大的電流，此時熱量增高使電極與母材觸碰處達到足夠的高溫度，而釋放出離子化熱電子。電極與母材間產生電位差而導致電流中斷，產生電弧。

圖 2-1 為電弧銲接方法之構成原理，圖 2-1(a)為熔極方式，即電極會熔解當作銲條使用。通常以金屬電極(銲條)及母材間所發生電弧(稱為金屬電弧)之熱，來熔解電極及母材。採用此方式銲接法有遮蔽金屬電弧銲、潛弧銲、氣體金屬電弧銲、包藥電弧銲等等。

圖 2-1(b)為非熔極方式，以碳化鎢或碳棒作電極，與母材間產生電弧熱量將母材或加入之銲條熔解，採用此種方式之銲接法有碳及電弧銲、氣體鎢極電弧銲與電漿電弧銲。

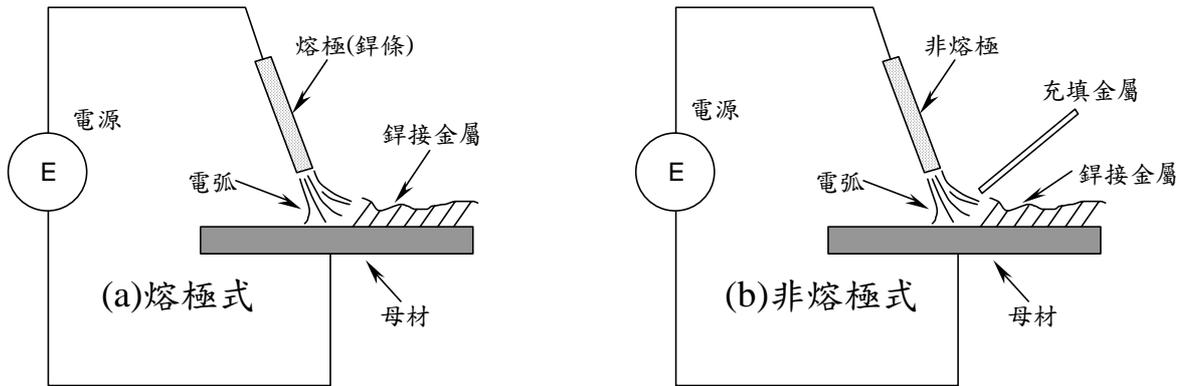


圖 2-1 電弧銲接基本原理[1]

2.1.1 銲接電弧之性質

電弧柱的發生，可以從電子原理較能充分的說明。如圖 2-2 所示，電子質量很小 ($9.1 \times 10^{-28} \text{g}$)，電子極容易由負極的金屬分離，此小質量的負電荷由陰極向正極加速前進，經由電弧柱中間通過而形成電弧柱。

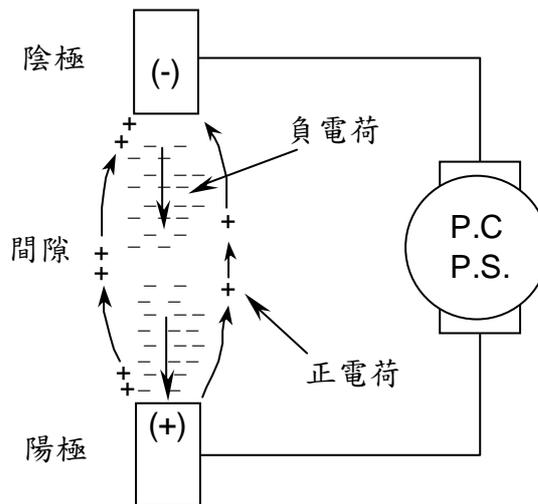


圖 2-2 電弧柱電子理論[2]

電弧柱的熱分佈可分為三區：陰極區、電離區(Plasma Area)和陽極區，此三區中陽極區溫度最高，可達 10,000~11,000⁰F，主要的原因為陽極區被電子攜帶電流能量沖向陽極板的衝擊作用釋放出熱量的結果。電離區的熱量是由少數電子和許多離子經過離子化氣體柱時，與原子相互衝擊(Collision)的結果。陰極區(或負極區)熱量，主要是離子衝擊陰極所產生中等的熱量。電弧是最有效的生熱法，是有用的現代技術。

2.1.2 電壓－電流之靜特性

當電極或銲條材料種類、保護氣體型式及電弧長度大小等皆維持定值，且亦保持銲接電弧穩定性的情況下，電弧電壓與銲接電流變化的關係即稱為電壓-電流靜特性（static volt-ampere characteristic）。

如圖 2-3 所示為電壓-電流的靜特性曲線。由圖中可明顯得知電壓-電流之靜特性曲線呈一 U 形分佈，茲將其重要特性簡述如下：

1. 下降特性曲線（ab 線段）

在較低的銲接電流區間內，當銲接電流增加時其電弧電壓將隨之降低。

2. 水平特性曲線(bc 線段)

在較高的銲接電流區間內，無論銲接電流增加或減小其電弧電壓近乎保持一定位。

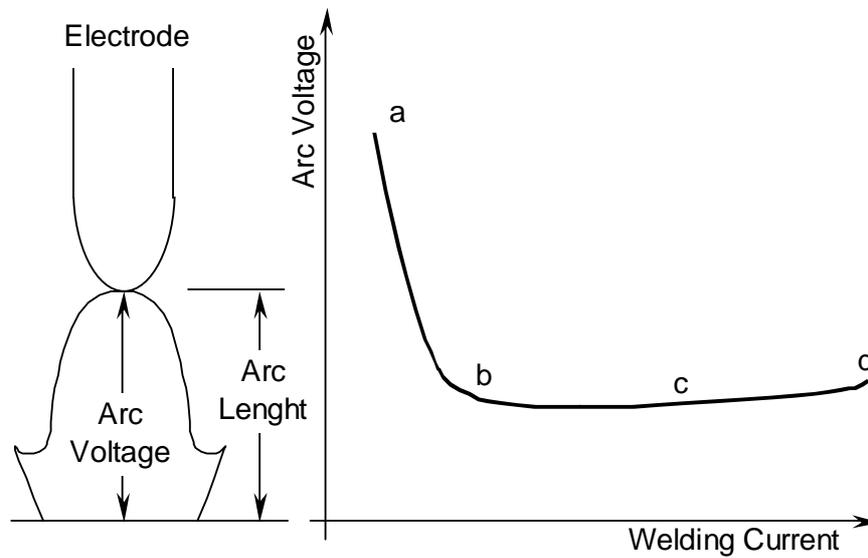


圖 2-3 電壓-電流的靜特性曲線[3,4]

3. 上升特性曲線(cd 線段)

在極高的銲接電流區間內，當銲接電流增加時其電弧電壓將隨之提高。至於影響電壓-電流靜特性之主要因素則有下列兩方面：

(1) 電弧長度之影響

當電弧長度增加時，由於電弧電壓值將會提高，因此電壓-電流的靜特性曲線住呈也會隨之提升。

(2) 保護氣體之影響

主要係取決於保護氣體的热傳導性。舉例而言， CO_2 比 Ar 氣體會產生較高的電弧電壓值，亦即會提升電壓-電流的靜特性曲線位置。由於 CO_2 氣體的高溫熱傳導性優於 Ar 氣體，因而會造成 CO_2 氣體有較高的熱

量損失率，進而使得單位電弧長度上要有較高的 IE 值與其保持平衡。因此當銲接電流在維定值的情況下，其電弧電壓勢必要提高。

2.1.3 電弧銲接之熱源特性

在銲接處由外部所供給的熱量之銲接進入熱量，而其銲件吸入熱量之百分比謂之熱效率。以 AWSE-6010 之塗料銲條試驗熱量進入銲件之大約數值，電弧產生熱能的 15%約為熔化所需，45~65%為銲件之加熱之輻射、對流等所需，熔池中金屬僅為 20~40%，若加大銲接電流及銲速，更能有效使用熱量，電弧過長，由於輻射及對流變大致使熱效率降低。



2.2 惰氣金屬極電弧銲(GMAW)

2.2.1 惰氣金屬極電弧銲原理及簡介

惰氣金屬極電弧銲(gas metal arc welding，簡稱 GMAW)，係使用裸金屬絲銲線作為電極，與工作物間產生電弧，引為銲接能源。電弧係由電流經過離子化之氣體層所發生。氣體之分子或原子被電力擊散，發生游離；即失去電子，留下正電荷。帶正電荷氣體之離子，由正極流向負極，而電子則由自負極流向正極。總熱量 95%係由電子傳送，其餘部份由正離子傳送，如圖 2-4 所示。

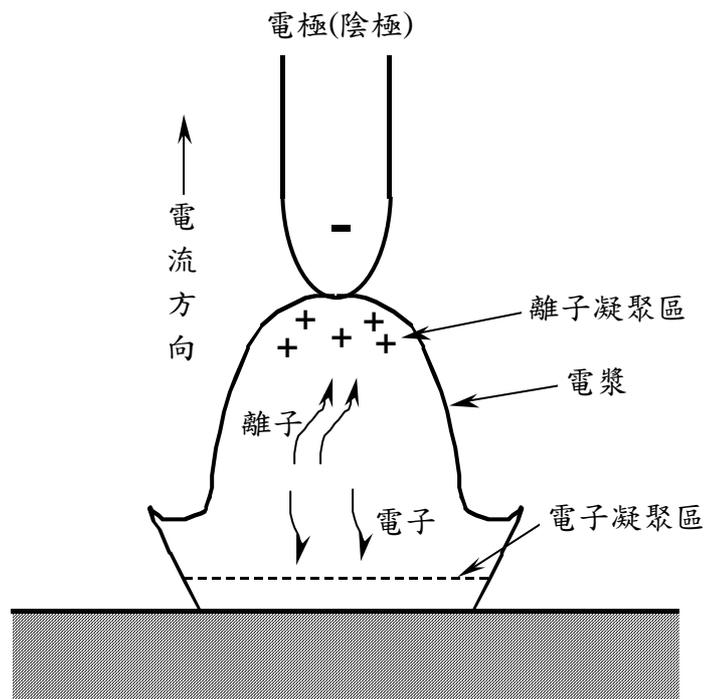


圖 2-4 直流正極性電弧示意圖[5]

銲線由銲槍送出，並有氣體蔽護；故端部熔化後之金屬滴點，穿越電弧落入銲池中，此銲接法所產生之熱能更集中。如圖 2-5 所示。

銲線與工作物接觸，並迅速提起即可起弧；電弧發生時，送線同時開始。通常電弧使工作物上產生銲池之後，將銲槍不論手動或機械自動，沿銲縫緩緩前進，可將銲縫相鄰兩邊連結；亦即熔化之銲接金屬，在電極之後跟隨凝固，於是漸次完成銲接。

MIG 銲接極性使用直流反極性 DCRP(direct-current reverse polarity)，而 AC 及 DCSR(直流正極性)則較不適用。使用 DCRP 可以穩定電弧，穿透力較強，且具有清潔銲道及周圍作用。

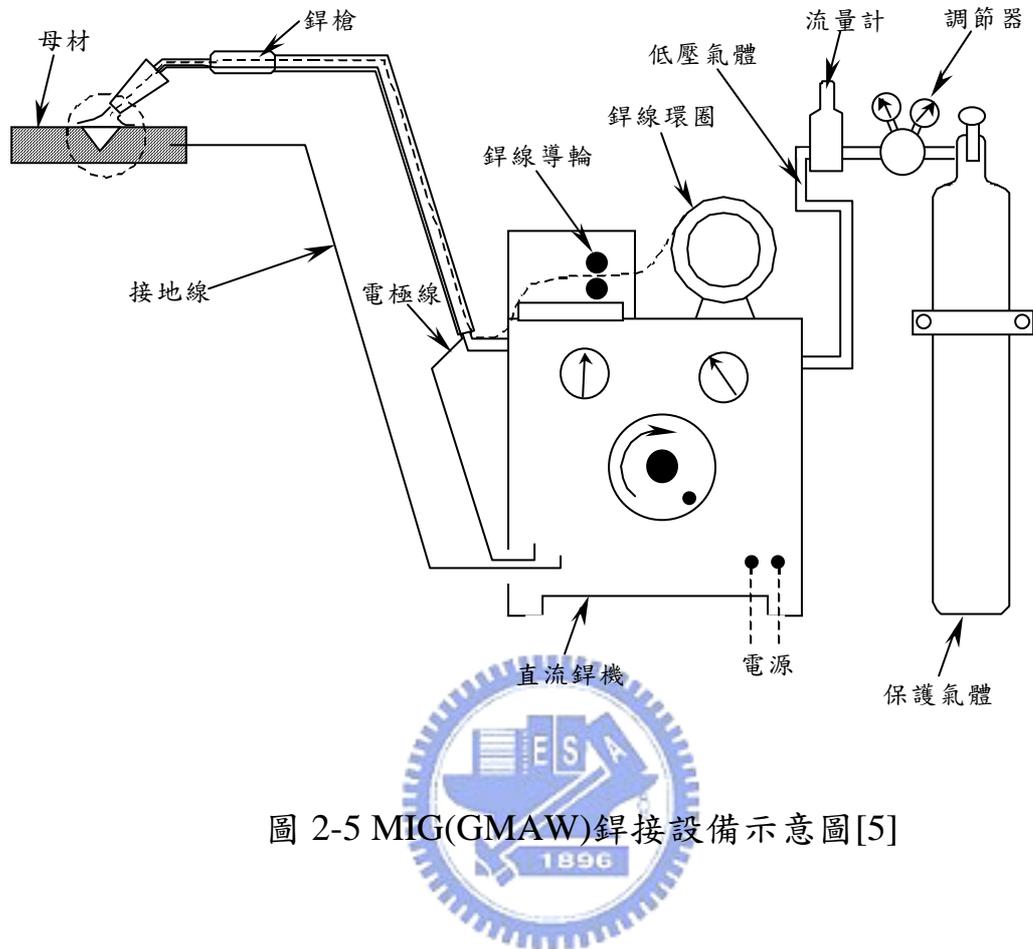


圖 2-5 MIG(GMAW)鋁接設備示意圖[5]

2.2.2 鋁接參數

1. 鋁接電流(welding current)

鋁接電流是將鋁線變成熔滴傳送到母材完成鋁接之原動力，鋁接電流又是形成電弧滲透深淺之最大決定因素。其中 CO_2 遮護氣體金屬電弧鋁，大部分採用定電壓特性之電源機，鋁線經由鋁槍的鋁線嘴送出熔融，因此電弧的維持必須依賴控制鋁線之送給速度的變化來微量控制鋁接電流。

電壓是電源機，使用 1.6mm 銲線，維持一定銲線嘴至母材距離，在一定電流，銲接速度與熔入深度成反比。

2. 銲接電壓(電弧長度)(Welding voltage or Arc length)

電弧電壓是以電弧長度顯示之，也是決定銲道外觀形狀的最大因素，如圖 2-6 所示[6]，電弧電壓與銲道表面形狀及熔入深度知關係。

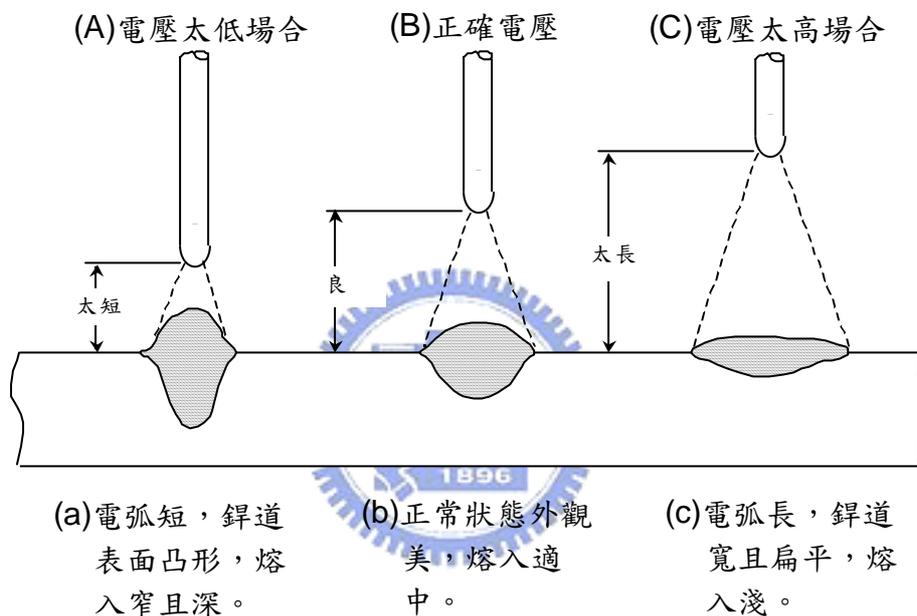


圖 2-6 同一電流值下電弧電壓與銲道表面形狀銲熔深的關係[6]

3. 移動速度(travel speed)

(1) 移動速度增加，滲透亦增加；但達到某一程度後，移動速度之增加或減少，都將減少滲透量。

(2) 移動速度減少之影響：

- 每單位長度內銲線之熔填率增加。

- 因單位長度熔填金屬增加，故產生大而淺之鐳池。滲透度因此而減少。
- 鐳接電弧前進時，熔化金屬有微向弧前流動之趨勢，如此，使電弧僅能在大而淺之鐳池中作用，卻不能與母材發生直接接觸，故產生寬大鐳珠。
- 增加鐳珠高度。

(3)移動速度過慢：

熔池金屬在鐳池中堆集愈高，鐳道角隅過度堆疊。產生大型熱影響區(HAZ)。

(4)移動速度增高：

- 熱量傳導至母材者減少，即熔填率減少，或滲透力減少。
- 鐳珠之寬度與高度亦減少。
- 可使鐳珠邊緣產生鐳蝕。因熔化金屬不夠充分，以填補被電弧熔化之槽縫所導致。



4.鐳線伸出長度(electrode extension)

鐳線伸出長度或穿出長度，指鐳線重鐳槍內導電火嘴起至鐳線之最前端為止，期間之距離。如圖 2-7 所示[7]。但為了更符合實用起見，常自導火嘴起至工作物表面止，量測得到的長度，作為鐳線伸出長度之衡量標準。但需保持鐳接電壓為常數，或電弧長一定者。

- (1)增加鉚線伸出長度，及增加鉚線受到電阻作用之預熱量；故只需少量之鉚接電流，即可在所設定之餵線速度下將鉚線熔化，因此熔填率增加。
- (2)增加鉚線伸出長度，減少鉚道之滲透量。
- (3)增加鉚線伸出長度過大，產生熔填金屬量多但熱度不高，充填槽縫之中。結果形成不良外形之鉚珠與滲透極淺之鉚道。

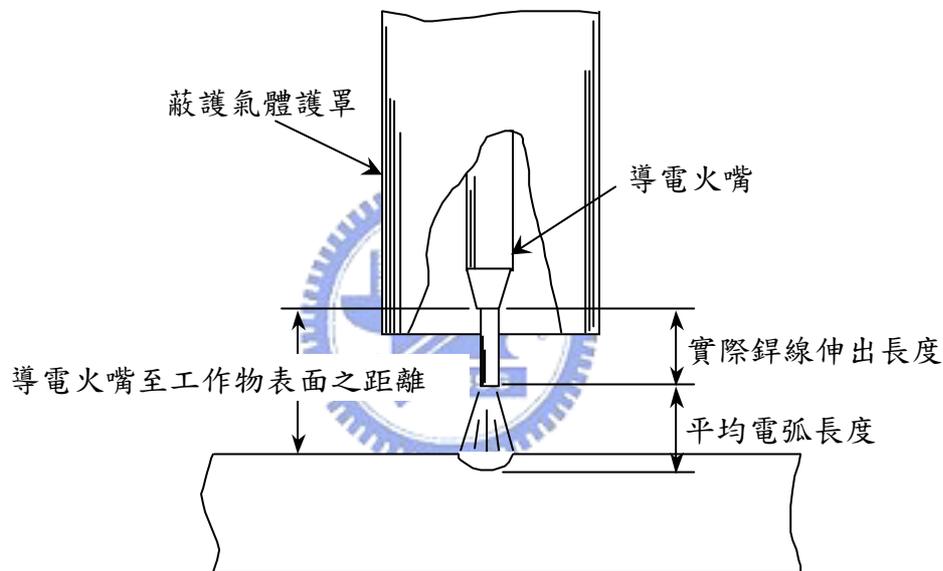


圖 2-7 鉚線伸出長度或穿出長度[7]

- (4)增加鉚線伸出長度，電弧不穩定，鉚渣增加。
- (5)增加鉚線伸出長度，減低氣體不護作用。正確長度應為 1/4~1/2 吋，視金屬轉移模式之不同而定。

(6)調整鐸線伸出長度，以因應根隙過大或過小。遇根隙太大時，可增加鐸線伸出長度，以減少滲透，增加金屬熔填量。反之，根隙太小時，則需減少鐸線伸出長度，以使增加滲透力。

5.鐸線尺寸 (electrode size)

(1)每種鐸線如果其化學變化成分一定，直徑大小一定，則鐸接電流可允許使用範圍亦屬一定，但若鐸線直徑較大者：

- 可供電流較大時使用。此種情況下可以產生較高的熔填率與較深之滲透量。
- 如電流保持不變，則電流密集度因直徑較大而減低，但鐸線熔化速度，與電流密集度成比例，故比較低。
- 如電流保持不變，因滲透量之大小與電流密集度成比例，因而較小。
- 如電流保持不變，鐸珠之外形較為寬大。

(2)直徑較小者：

- 如電流保持不變，有較高之鐸線熔化速度，亦即有較大之熔填率。
- 如電流保持不變，有較深之滲透度。

(3)不同直徑之鐸線產生之各種熔填率，故鐸線之選擇除了考慮材質之外，其決定使用直徑大小應依據：

- 母材金屬厚度。
- 需要之滲透度。

- 希望之熔填率。
- 銲珠外形。
- 銲接位置。
- 考慮價格。

2.2.3 銲滴傳遞方式

MIG 銲接其銲線末端在電弧下熔液，傳送到母材上計有 5 種方式：

(1) 短路傳送式(Short-circuiting transfer)

短路電弧法，幾乎都用於銲線直徑 1.2mm 以下，且通常以低銲接電流、電壓來進行。所得到的銲道熔池細小，熔入淺，凝固快速，因此這種操作法特別是用在薄板全能銲接位置上以及厚板材料立銲和仰銲，甚至於大工銲的填補。

在短路電弧操作法中，電壓斜率和電感保持正確平衡，才能達到最佳情況的熔滴移行，並且可以減少大量火花飛濺物。

(2) 熔球傳送式(Globular transfer)

當電流及電壓升高到超過短路傳送所應有的最大範圍時，熔金傳送就變成一種不同的景象；有大而不規則形狀的熔滴通過電弧的間隙，這些熔滴的直徑，比銲線直徑為大，當其成長到相當程度時，由於本身的

重量受到短路，使其脫離銲線末端而掉落，當球滴從銲線分離時，通過電弧的間隙形成任意的傳送。

熔球傳送方式，大部分是使用 CO_2 為遮護氣體，以 CO_2 為遮護氣體時，銲線受電弧高熱傳導通過熔滴而熔化；但當使用氫氣為主遮護氣體時，銲線的末端並未受到電弧電漿包圍，因此熔滴大小也隨著改變，甚至有可能大到足以與銲件產生短路。此時會引起瞬間的熄弧。由於在熔金傳送過程的不規則，火花飛濺物自然就會增高，而火花飛濺物是從銲線和銲道熔池兩方面而來。

(3)噴灑傳送式(Spray transfer)

此種電弧乃指當二次電流量增加超過球傳送的範圍，通過金屬線電極時，其末端產生高熱，並將金屬末端經電弧熔化成為數百粒微細之熔球像噴灑式的衝向母材熔池，電弧穿透深且銲速極快，銲道光滑美麗，廣用於平銲、橫銲及厚板之銲接，唯火花飛濺增多為其缺點。

(4)脈動噴灑傳送(Pulsed-spray transfer)

帶有脈動的噴灑熔滴傳送銲法，是由噴灑傳送銲法演進而來，控制於一般短路傳送銲接的電流大小範圍內，獲得可予以控制的熔滴傳送。因此要使用一種特殊的銲接電源機，使其產生一種脈動波電流，具有一個低的基本電流以維持電弧，以及一個高量超過轉變電流，以供特殊銲條使用。這兩種電流量合併而產生一穩定噴灑電弧，每當電流超過轉變

點時，即成熔滴傳送，如圖 2-8 所示[6]，通常此項傳送，是以輸入電源線路頻率若干倍數值來進行。其較低的平均電流，使之能夠採用只有其他銲接法所能適用之較大銲線，以噴灑傳送的形式來銲接較薄的材料。

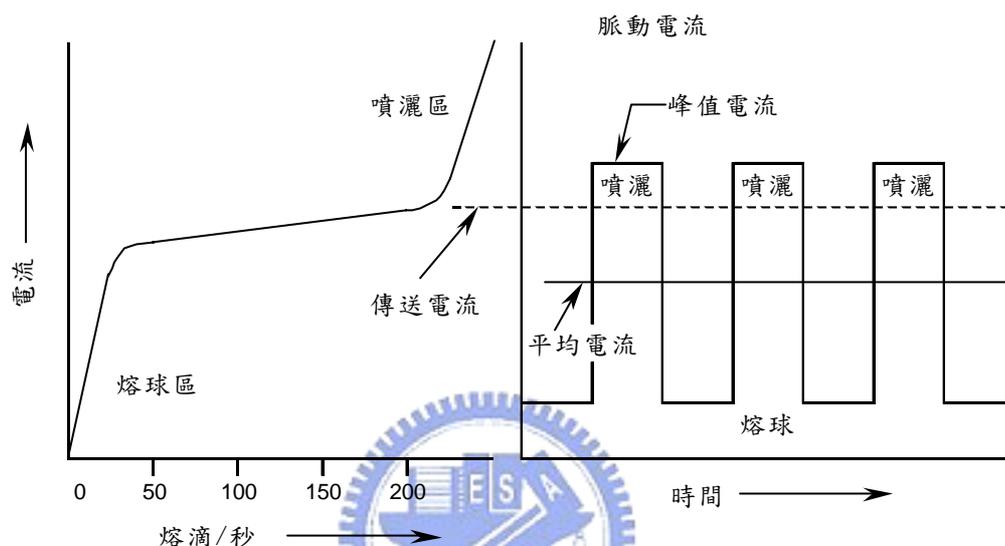


圖 2-8 脈動噴灑電弧與電流之關係[6]

(5) 旋轉噴灑傳送(Rotating spray transfer)

假如電流、電壓與銲線伸出長度均超過一般噴灑熔滴傳送操作法所使用的範圍時，則在銲條的前端，就會有相當長度的熔化，並且沿著電弧四周磁場影響，成螺旋形的旋轉。當電弧呈旋轉時，受控制的熔滴流，從銲條的末端傳送到熔池，要經過相當廣的區域。電弧的能量也因此散開，造成滲透的樣式呈寬廣型；因此以噴灑傳送式法所形成手指狀凸起的滲透得以消除。

2.2.4 鐳接氣體

1. 蔽護氣體對鐳接之影響：

- (1) 滲透力。
- (2) 鐳珠外形。
- (3) 熔填率或鐳接速度。
- (4) 發生之煙霧與氣體。
- (5) 噴渣量。
- (6) 金屬轉移模式。
- (7) 鐳道獲得之機械性質。



2. 使用 CO₂ 氣體蔽護(鐳接鋼鐵)：

- (1) 如鐳接電流一定，則鐳線之熔填率、滲透度、鐳珠寬度及鐳珠凸起高度等均為最大。
- (2) 價格最廉。
- (3) 發生之煙霧及噴渣最多。
- (4) 輸入鐳道中之熱量最高，需用較快的移動速度，才可平衡。

3. 使用氬-氧混合氣或氬氣(鐳接鋼鐵)：

- (1) 與 CO₂ 氣體蔽護情形相反，如鐳接電流一定，鐳線之熔填率、滲透度、鐳珠寬度、高度等均較小。

(2)發生煙霧及鉚渣不多。

4. 使用氩- CO₂ 混合氣(鉚接鋼鐵)：

其表現之特性在 CO₂ 氣體與氩氣混合氣之間。

5. 鉚接非鐵金屬時，使用之蔽護氣體為：

(1)氩氣—產生之滲透量較少，鉚線之熔填率低，鉚珠之外形較窄，高度較低，發生噴渣最少，比較之下較氦氣或氩氦混合氣便宜。

(2)氦氣—產生之滲透量最深，鉚線之熔填率較高，鉚珠之外形較寬、較高，在一定之電弧長度下，產生較高之電壓。價格最貴，使用流量率較氩高。

(3)氩-氦混合氣—其性質在氩與氦氣之間。

如圖 2-9 所示[7]，氣體蔽護及鉚珠外形、滲透特性。

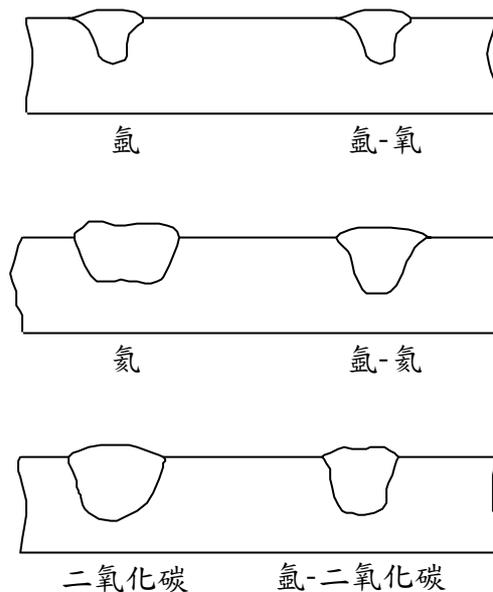


圖 2-9 在不同氣體蔽護下，鉚珠之外形及其滲透特性[7]

2.3 碳鋼

2.3.1 碳鋼之簡介[8]

所謂碳鋼是鐵和碳的合金，根據 Fe-C 平衡狀態圖，它的含碳量在 0.02%~2% 範圍。現在工業上所使用材料以碳鋼為最多，用途也很廣。

碳鋼的各種機械性質大致由含碳量和顯微鏡組織來決定，如圖 2-10[9]表示碳鋼的含碳量和組織率的關係。

由圖 2-10 可知，亞共析鋼各種機械性質和含碳量有密切的關係，如抗拉強度、降伏點和硬度等等都是隨含碳量增加而增加，但伸長率、斷面縮率隨含碳量增加而減少；過共析鋼，除了硬度和降伏點隨含碳量的增加而增加外，其他機械性質大致不變。

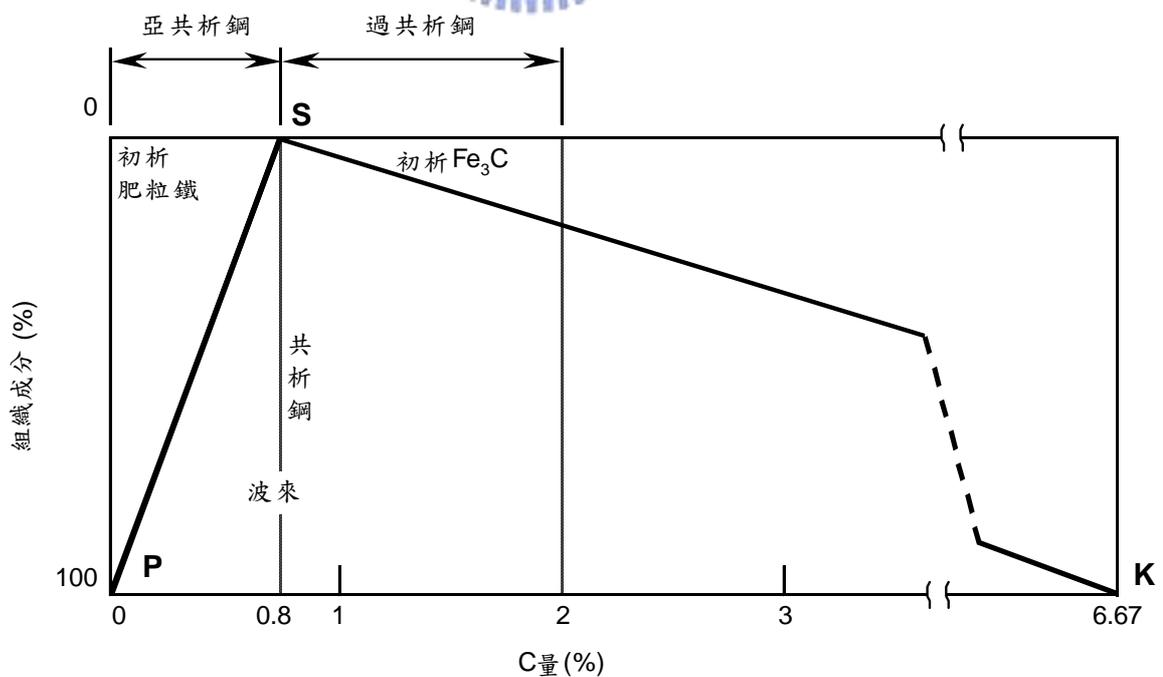


圖 2-10 碳鋼的含碳量和組織率(肥粒鐵、波來鐵、Fe₃C)的關係[9]

2.3.2 碳鋼之分類

碳鋼之分類法很多，有依精煉方法分類，依金相組織分類與依用途分類，其他之分類如下：

1. 碳鋼的成份及用途：

如表 2-1 所示，為各種鋼材之含碳量、抗拉強度與用途之分類。

表 2-1 各種鋼材之性質[8]

名稱	含碳量(%)	抗拉強度 (Kg/mm ²)	用途
極軟鋼	<0.12	<38	鉚釘、鋼絲、薄鋼片、電線、窗框
軟鋼	0.13~0.20	38~44	鉚釘、鋼骨、鍋爐、鋼筋、造船、車輛
半軟鋼	0.21~0.35	44~50	鋼骨、鋼筋、造船、鍋爐
半硬鋼	0.36~0.5	50~60	軸心、鋼軌、螺釘、鋼板、樁
硬鋼	0.51~0.80	60~70	軸心、鋼軌、鋼輪箍、螺栓、工具線材
極硬鋼	0.81~1.70	>70	工具

2. 碳鋼的分類：

碳鋼加工至可利用的型態，即稱之鋼材。鋼材大可分為條鋼、鋼板、鋼輪箍。此外，可大分類為普通構造用碳鋼：使用在建築、橋樑、船舶、火車極車輛和其他一般構造物，其含碳量在 0.12%~0.20% 左右。

另一類為機械構造用碳鋼：這些鋼是用電爐或平爐精煉的全靜鋼塊所製造成，並且實施熱處理後才供使用。

2.3.3 微量元素對碳鋼之影響

微量元素在鐵原子當中是以兩種不同的方式存在，如原子直徑較小的非金屬元素(C、H、N、O、B 等等)，會佔在鐵原子之空間處，稱為插入式固溶體。其他之金屬元素會將鐵原子置換出來，稱為置換式固溶體。一般會影響碳鋼之微量元素有下列幾項：碳、矽、錳、磷、硫、氮、氧、氫、銅、鎳、鉻、鋅、砷等等，僅針對前面幾項提出說明：

1. 碳的影響：鐵碳合金中是以含碳量來區分鐵與鋼。通常在含碳高於 0.02%時會由於成份不同及溫度不同，有不同的組織也改變物理性質。在於鋼體中，碳式插入型固溶體，鋼體中之碳以化合碳與石墨碳兩種方式存在。依碳的含量，分為高碳、中碳、低碳鋼，也可以從硬度區分為軟鋼及硬鋼。
2. 矽的影響：矽為煉鋼中之脫氧劑，含碳量約 0.05%~0.30%之間。矽可以全部溶解於肥粒鐵中，含量在 0.3%以下時可增加鋼之抗拉強度、降伏強度、伸長率及斷面縮率，同時衝擊值也會隨矽之上升而增大。另外，鐵中加入矽會增加電阻比，可以減少磁帶損失。

3. 錳的影響：錳在普通鋼中含量約為 0.3~0.8%，部份效應適用於煉鋼時還原及除硫，錳大部份留於鋼中，少部份形成 MnS ，錳在 0.6% 以上時較能顯出錳存在之效應。
4. 磷的影響：磷在鋼中易起偏析，且不易用熱處理方式去除。在一般的鋼材中，P 的含量被限度在 0.05% 以下，一部份與鐵化合 Fe_3P ，剩餘則熔於肥粒鐵中。磷含量過高時易使晶粒粗大，降伏延韌性，且與氧之親和力有害於鋼材銲接性及鍛造性，但可促進鋼的切削性。
5. 硫的影響：硫化物有 $1050^{\circ}C$ 及 $875^{\circ}C$ 兩個脆點，與鋼之含硫及錳成份含量有關，其脆性隨錳含量之增高而降低。如錳含量低，且氧含量增加時，危害更大。此現象起因於 FeS 在晶粒界析出，而 FeS 之熔點為 $1195^{\circ}C$ ，但若與 Fe 形成共晶物時，則熔點降至 $985^{\circ}C$ 。
6. 鋁的影響：鋁為價格最低之強脫氧劑，甚容易與鋼中之氧結合，產生脫氧生成物。鋁添加入鋼液後，一部份生成 Al_2O_3 介在物殘留於鋼中，有損於鋼之韌性或造成凝固後缺陷，部份與鋼中氮生成 AlN 析出。
7. 氧氣的影響：氧氣在固態鐵中的熔解度很小，通常都以氧化物存在於鋼中，造成鋼品質劣化。氧氣存在於鋼中容易導致赤熱脆性，這是因為氧氣所引起之氧化皮膜在一次結晶粒所引起。

8. 氫氣的影響：氫氣在煉鋼鋼錠澆鑄過程中熔解於鋼中，在軋延材料及鍛造製品中發生白點之外，也很容易隨著酸洗、皮膜處理或銲接等過程而入侵，造成韌性降低，延遲破壞(氫脆性)。

2.3.4 碳鋼之銲接性

碳鋼之銲道金屬的結晶最先開始於熔池及母材的邊界上，作為結晶核心的是邊界上處於半熔化狀態的晶粒，然後以柱狀或樹枝型式成長，直到相互接處為止。在晶粒成長的過程中，有些經歷成長比較順利，有些晶粒則彼此間受到相互的阻礙。

銲接時，由於熔池的體積小，部分母材又隨同一起熔化，因此銲道金屬易形成過熱組織，其晶粒是粗大化，這種粗大的晶粒，對金屬的機械性質有很不良的影響。

偏析現象是銲道金屬結晶過程中極易產生的一種缺陷。產生晶內偏析主要原因為當銲道結晶時，最先結晶的晶粒中心，往往是最純而熔點最高的元素，而最後結晶的柱狀晶粒的末端及晶層中間，就會聚集一些低熔點的雜質和元素。

在電弧銲接的情況下，銲道的冷卻速度很快，容易產生晶內偏析的缺陷。一般對低碳鋼，因其晶粒開始和終了溫度區間很小，各種元素結晶先後與快慢差別不大，故低碳鋼銲接時，晶內偏析的情況並不嚴

重。而在高碳鋼、合金鋼銲接時，晶內偏析現象就很嚴重了，常常會因此而引起熱裂紋等缺陷。所以高碳鋼、合金鋼等，於銲接後常需藉熱處理來改善。

銲接時，銲道和熱影響區的金屬在銲接熱源的作用下，都會發生金相組織的改變，或稱之為“相變”。銲接時的這種相變和鋼材在進行熱處理時發生的相變是相同的。相變後的金相組織，與金屬被加熱的溫度及在此溫度下停留的時間，冷卻速度等因素有關。銲接時熱影響區各段的溫度分佈如圖 2-11[6]所示。

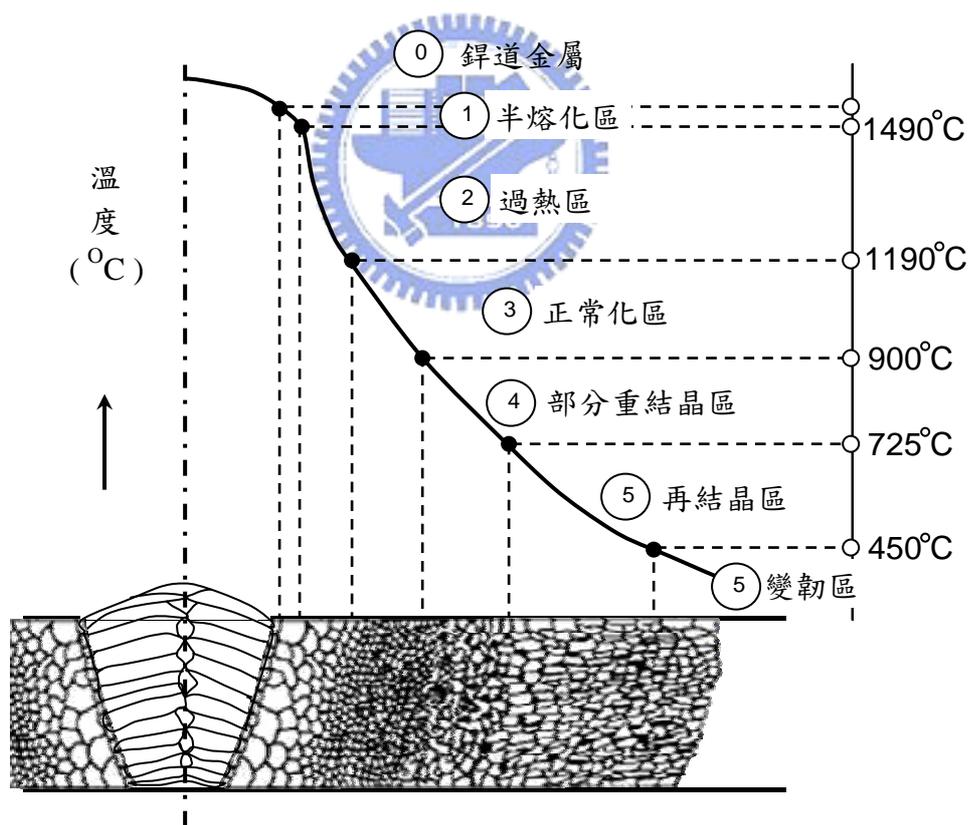


圖 2-11 銲接縫溫度與組織關係示意圖[6]

現以低碳鋼單道(One pass)銲縫為例，將其熱影響區的六個區段特點說明如下：

1. 半熔化區

它是靠近銲道但又局部熔化了了的母材區段。在此區內，沃斯田鐵晶粒是過熱的粗大組織，因而該區雖然很狹窄，但對銲接縫德塑性及衝擊韌性卻帶來極為不利的影響。

2. 過熱區

它是被加熱至 $1100\sim 1490^{\circ}\text{C}$ 範圍內的母材區域。在這樣的高溫下，沃斯田鐵的晶粒急速成長，形成粗大的沃斯田鐵過熱組織。過熱區之特徵乃是使銲接縫的塑性、衝擊韌性大大地降低。通常會使衝擊值下降約 25~30% 左右。尤其對於易淬火的合金鋼，這一過熱區的影響更壞。當鋼中碳含量和合金元素含量增高時，這一過熱區的機械性能會顯著的變壞，有的合金甚至再用熱處理的方法也不易恢復。

3. 正常化區

正常化區(normalizing zone)金屬被加熱到稍微超過相變態點(Ac_3)，在 $900\sim 1100^{\circ}\text{C}$ 之間，此時沃斯田鐵晶粒比較細小，當銲接縫在空氣中冷卻時，可能形成晶粒細小正常化組織，所以正常化區有良好的機械性質，是較理想的區段。

4. 部分重結晶區

該區金屬被加熱至 $725\sim 900^{\circ}\text{C}$ 之間，低於相變態點(A_{c3})。此區相變態不完全，所以晶粒大小不一。該區能降低銲接縫之機械強度，希望此區越窄越好。

5.再結晶區

此區溫度在 $450\sim 700^{\circ}\text{C}$ 之間。只有經過冷壓加工過的金屬，才能發生再結晶過程。該區硬度稍有降低，但對其他機械性質影響不大。

6.變韌區

當加熱至 $200\sim 500^{\circ}\text{C}$ 時，金屬變韌，稱為變韌區。

以上六個區段都是理論上的分析，實際上在銲接低碳鋼($C<0.25\%$)時只能看到三個區段，即過熱區、正常化區、部分重結晶區。如銲接熱影響區的大小，係受銲接方法、銲接規範、銲接材料等多種因素的影響，一般情況下，皆希望熱影響區越小越好，但熱影響區太小時，銲接縫產生的內應力愈大，因此易於形成銲接裂縫。相反地，熱影響區太大時，雖然可以減小內應力，銲件卻容易產生變形和撓曲的缺陷。

2.4 助銲劑

2.4.1 助銲劑之功用

助錒劑(塗料)是構成錒條的要素，它在錒接過程中因為電弧熱源之作用，會產生複雜的化學變化形成氣體及溶渣，及其它冶金之效果，以提高錒接件之品質。茲將助錒劑之主用功用分述如下[5]：

(1)保護熔池防止外圍氣體侵入。

錒條於錒接過程中受電弧熱源之作用使助錒劑燃燒，會產生 CO、CO₂、H₂、H₂O 等氣體，這些氣體將錒接區周圍的空氣排擠掉，避免熔池之高溫金屬與氧接觸而氧化，達到保護熔化金屬的目的。

助錒劑在燃燒時除了產生氣體外，亦會形成大量溶渣，溶渣在通過電弧空間向熔池傳播時包覆著熔滴，防止氣體之侵入，錒接完成後溶渣覆蓋在熔池之上，使熔融金屬與大氣隔絕，避免被氧化及氮化，並使錒接的冷卻速率減緩以改善錒道的性質。

(2)脫氧作用。

保護氣體與溶渣若含有氧化性物質，或錒條受潮、錒件處理不淨、沾油、銹及其它氧化物等，都會使錒接金屬產生氧化的現象；可在塗料中添加 Al、Ti、Si、Mn、C 等脫氧劑以克服錒接金屬被氧化。

(3)助錒劑內加入合金元素以調整錒接金屬的成份。

為調整錒接金屬之合金成份，可在助錒劑中加入所要之合金粉末，錒接過程中合金燃燒損失小，可達到添加合金成份於錒道金屬之目的。

(4)穩定電弧作用。

常用之穩弧劑為鹼金屬和鹼土金屬的化合物，如 CaCO_2 、 K_2CO_3 、 Na_2CO_3 、 KNO_3 、長石、花崗石、水玻璃等，穩弧劑中所含之 K、Na、Ca 等元素，其電離電位很低，助銲劑內含有這些低電離電位的物質，可以改善電弧空間氣體的電離條件，使銲接電流易於通過電弧空間，因此可以增加電弧的穩定性。

2.4.2 助銲劑之種類

不同系統之助銲劑其成份、特性、功用亦不同，以下僅就不同系統助銲劑之銲條作簡要之介紹[5]：

1. 高纖維素系(E6011、TC-11)

此類銲條於助銲劑中含約 30% 的有機物，這些有機物藉銲接燃燒的作用產生大量的氣體以保護熔填金屬，同時電弧周圍氣體屬於還原性，故可得優異之機械性能，且被覆薄，產生之銲渣量極少，且銲接時大量氣體之爆裂使之深具穿透性，故適於全位置及底道銲接。

2. 高氧化鈦系(E6013、TR-13、R-13)

此系銲條助銲劑含約 35% 之氧化鈦，銲接時電弧安定，火花量較低，熔渣易清除，銲道光滑波紋細緻，作業性極優秀，且穿透深度較淺，故多適用於薄板銲接。

3. 鹽基鈦礦系(D4303、F-03、TAC-03)

此型鐸條之助鐸劑約含 30% 以上之氧化鈦及約 20% 之鹽基性氧化物，電弧安定，穿透度適中，鐸渣呈網狀質脆易除，且熔填金屬機械性優異，是優秀之軟鋼鐸條之一。

4. 鈦鐵礦系(D4301、E-10、EL-10)

此種鐸條之助鐸劑含有 30% 以上之鈦礦石，並和鐵砂混合屬於中厚度被覆，因其成分介於高氧化鈦與酸性鈦鐵礦系兩者之間，熔鋼流動性良好，鐸接保護固密，且電弧極為安定，穿透雖屬中等，但絕少氣孔及夾渣，最適於厚板之深溝對接。

5. 低氫系(E7016、D4316)

此類鐸條之助鐸劑以碳酸石灰及氟化鈣為主要成分，因盡量隔絕氧氣之生成，故熔渣之鹽基度極高。這種鐸條於鐸接時，碳酸石灰分解生成 CO_2 ，氣體以保護電弧，同時由於水性氣體之反應而將氫氣氧化，另外，因稀釋作用(dilution)使得保護氣體中之氫氣分壓降低，故溶解於熔填金屬內部之氫氣量極少。

這類鐸條之特長乃熔化時氫含量較其他種類低，且富強力脫氧作用，使熔填金屬富韌性，機械性能異常優越。但此類鐸條電弧較不安定，且於鐸道開端及接頭處極易生氣孔，故今日此類鐸條皆於先端塗抹一層氣孔防止劑以防氣孔之生成，另外，鐸道稍凸且鐸條易受水份之影響，故於施工技術及使用前之烘乾乃必要注意之事項。

6.鐵粉低氫系(E7018、E7028)

此系鐸條與低氫系之助鐸劑成分相同，唯加入 25~40%鐵粉，使之熔填速率得以提高，其他性質與低氫系並無太大的差異。

7.鐵粉氧化鈦系(E7024、T-24)

此型鐸條係將高氧化鈦系之被覆劑中加入大量的鐵粉，屬厚被覆鐸條，被覆重約為鐸條重量之 50%，鐸接時電弧穩定且形成深的保護筒使得操作容易，鐸道非常美觀且熔填效率可達 170~200%，最適於薄板之緣角鐸或不太需要強度的 T 形鐸口。

8.鐵粉氧化鐵系(E-6027、T-27、T-27L)

此類鐸條係將高氧化鐵系加入酌量之鐵粉所作成。與鐵粉氧化鈦系具有同樣之目的，唯鐸接時熔滴成噴濺狀傳送，穿透性中等，鐸濺損耗極微，且鐸渣可以自動剝落，作業性、機械性俱佳，適於平鐸及水平角鐸。

2.4.3 助鐸劑中之成份對鐸接金屬之影響

助鐸劑中的化學性質決定了助鐸劑的冶金性能，助鐸劑鹼度及活性是常用來表示助鐸劑化學性質的指標。根據國際鐸接學會 (International Institute of Welding, IIW)將助鐸劑鹼度以鹼性指數 (Basicity Index B.I.)作為說明，B.I.計算公式為：[10,11]

$$B.I. = \frac{CaO + MgO + BaO + Na_2O + K_2O + CaF_2 + \frac{1}{2}(MnO + FeO)}{SiO_2 + \frac{1}{2}(Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)}$$

式中所列為銲劑中的重量百分比。根據計算結果作如下的分類：

1. 酸性銲劑 (B.I. < 1.0) :

通常酸性銲劑具有良好的銲接性、銲道成形美觀，但是銲道金屬含氧量高，耐衝擊韌性較低。

2. 中性銲劑 (B.I. = 1.0 ~ 1.5) :

熔融金屬的化學成份與銲絲的化學性質相近，銲道金屬含氧量有所降低。

3. 鹼性銲劑 (B.I. > 1.5) :

通常鹼性銲劑之熔接金屬的含氧量較低，可以獲得較高的衝擊強度，但是銲接性較差。



銲劑中的 B.I. 值愈大，則熔接金屬之 Mn 分佈較均勻，同時 P 及 S 的含量較少。氧含量隨著 B.I. 值的增加而減少。B.I. 值愈小，銲渣愈偏酸性渣系。此時銲劑的耐火性愈高。熔融速度可提高，銲道比較寬及平整。

此外，相對化學活性係數 (Af) 可以把各種成份的助銲劑分為高活性助銲劑 (Af ≥ 0.6)，活性助銲劑 (Af = 0.3 ~ 0.6)，低活性助銲劑 (Af = 0.1 ~ 0.3) 和惰性助銲劑 (Af ≤ 0.1)。

助銲劑在銲接過程中，是以液態熔渣形式覆蓋在銲接金屬表面以保護銲接熔池(weld pool)不受大氣的污染，並可改善銲接金屬的化學成份、機械性質及微觀組織等，因此茲將助銲劑中成份之功用分述如下：[12-17]

1. 銲劑中屬於鹼性銲劑的成份有：CaO、MgO、FeO 及 MnO。而屬於酸性的則有 SiO₂，P₂O₅，TiO₂，及 Al₂O₃。鹼性銲劑具有去硫及磷的能力，因此衝擊韌性及延性較佳。酸性銲渣則是在銲接過程中容易控制及去除銲渣容易。但銲接金屬中含有較多的介在物(inclusion)，因此韌性較低。

2. Al₂O₃ 及 Cr₂O₃ 會降低電弧穩定性。

3. CaO 可改善電弧穩定性，並使銲渣(slag)之粘度下降。

4. 銲劑中的 SiO₂ 增加，可調整粘度並增加電流能量(耐高電流)。SiO₂，並可使銲渣中的 MnO₂ 及 FeO 含量增加，銲接金屬中的 Si 及 O 含量也會增加。

5. 增加 MnO 可增加電弧滲透性能(Penetration)以及減少對銹的敏感性。

MnO 增加同時可增加銲接金屬中的 Mn 及 O 含量。

6. 銲藥中加入 CaF₂ 的作用，是希望形成 HF 的氣體以降低熔填金屬中的擴散氫含量。此外，銲接時 CaF₂ 大量的蒸發，產生的氣體有利於降低氫的分壓，促使氫在液態金屬中的溶解度降低而達到脫氧的作用。

CaF₂ 另外還有二個重要的作用，其一，為提高熔渣的透氣性，有利於

熔池中氫的逸出；其二，為銲劑中的 CaF_2 可促進 CaO 的熔化，降低鹼性渣的粘度。

7. Al_2O_3 在鹼性渣中可降低粘度，在酸性渣中則可增加粘度，但是無法提升銲道的熔透深度。

8. 銲劑中的 CaCO_3 、 MgCO_3 與 BaCO_3 經銲接後起分解作用形成 CO_2 ，分解的 CO_2 氣體可與氫原子直接作用生成 OH ，達到脫氧的作用。

9. TiO_2 、 Fe_2O_3 、 AlF_3 與 SiO_2 可增加銲道的熔透深度。

2.5 助銲劑對 1020 低碳鋼影響

在銲接 SAE1020 低碳鋼的過程當中，添加助銲劑的影響程度可以從幾個觀點來探討：



1. 對外觀及銲道型態。
2. 對銲道熔融面積及銲道深寬比。
3. 對銲道深度及銲道微硬度。

2.5.1 對銲道外觀及銲道型態之影響[18]

1. 銲道外觀之影響：

混合後之助鐸劑中若含有 MoO_3 、 MnO_2 等成份時，其含量越高越容易產生過熔(undercut)之現象；換言之，在助鐸劑之成份中含有 MoO_3 時，可以有效的增加鐸道之熔透深度，但也伴隨著少許的過熔現象。

當 MoO_3 達到 80%之重量百分比時會有氣孔產生，且外觀亦較差。 MoO_3 助鐸劑之配比不宜加到 80%之重量百分比。此外，若助鐸劑成份中含有 MgCO_3 （鐸藥含量達 80%）時，可得較平整之外觀，推測其原因可能是 MgCO_3 改善了電弧空間氣體的電離條件，使鐸接電流易於通過電弧空間，因此可以增加電弧的穩定性。

2. 鐸道型態之影響：

由圖 2-12 中可明顯看出，在所有添加混合型助鐸劑中，以 $\text{MoO}_3(60\%)+\text{Fe}_2\text{O}_3(40\%)$ 助鐸劑、 $\text{MoO}_3(60\%)+\text{SiO}_2(40\%)$ 助鐸劑、 $\text{MoO}_3(80\%)+\text{MgCO}_3(20\%)$ 助鐸劑和 $\text{Fe}_2\text{O}_3(40\%)+\text{SiO}_2(60\%)$ 助鐸劑成效最佳，對低碳鋼鐸道成形的作用效果最為顯著，可達到完全熔透的最佳鐸道穿深效果。

成份A	A(80%)+B(20%)	A(60%)+B(40%)	A(40%)+B(60%)	A(20%)+B(80%)	成份B
Fe ₂ O ₃					SiO ₂
Fe ₂ O ₃					MnO ₂
Fe ₂ O ₃					MgCO ₃
SiO ₂					MnO ₂
SiO ₂					MgCO ₃
MnO ₃					MgCO ₃
MoO ₃					Fe ₂ O ₃
MoO ₃					MgCO ₃
MoO ₃					MnO ₂
MoO ₃					SiO ₂

MoO ₃	SiO ₂	MnO ₂	MgCO ₃	Fe ₂ O ₃	No flux

圖 2-12 混合型助銲劑添加對銲道截面型態之影響[18]

2.5.2 對鐸道熔融面積及鐸道深寬比之影響

1. 鐸道熔融面積之影響：

圖 2-13 為五種單獨助鐸劑及無助鐸劑對鐸道熔融面積長條圖。圖中所示 MoO_3 對鐸道熔融面積之影響最大，可達 31.5mm^2 ，No flux 對鐸道熔融面積為 13.5mm^2 為面積最小者。

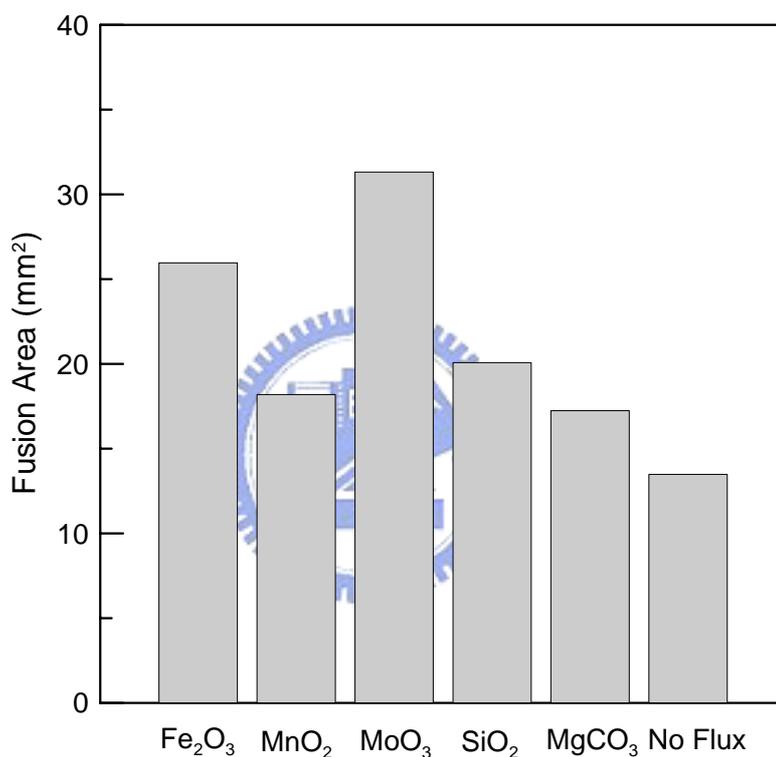


圖 2-13 單一助鐸劑及 No flux 對鐸道熔融面積之影響長條圖

經由各種助鐸劑按比例兩兩相互混合實驗結果，發現以 $\text{Fe}_2\text{O}_3 40\% + \text{SiO}_2 60\%$ 之混合型助鐸劑對鐸道熔融面積影響最大可達 35.5mm^2 。其次為 $\text{MoO}_3 60\% + \text{Fe}_2\text{O}_3 40\%$ 混合型助鐸劑，鐸道熔融面積為 34.5mm^2 。

2. 鐸道深寬比之影響：

銲道熔深/熔寬比值來作為銲道穿深能力之評估指標。因此，銲接後銲道寬度越窄越好，深度越深越佳。圖 2-14 係各種單一助銲劑及 No flux 對銲道深寬比之影響，圖中顯示，對深寬比影響最大之單一銲藥為 MoO_3 ，其比值可達到 0.72。 No flux 之深寬比為 0.27，為最小者。

經由各種助銲劑按比例兩兩相互混合實驗結果發現以 $\text{MoO}_3(60\%)$ 與 $\text{SiO}_2(40\%)$ 之混合助銲劑之深寬比 0.85 為最大另 $\text{Fe}_2\text{O}_3(40\%)$ 與 $\text{SiO}_2(60\%)$ 混合之活性助銲劑之深寬比 0.75 為次之。 $\text{MoO}_3(80\%)$ 與 $\text{MgCO}_3(20\%)$ 之混合助銲劑深寬比為 0.67， $\text{MoO}_3(60\%)$ 與 $\text{Fe}_2\text{O}_3(40\%)$ 之混合助銲劑深寬比為 0.61 效果亦不錯。

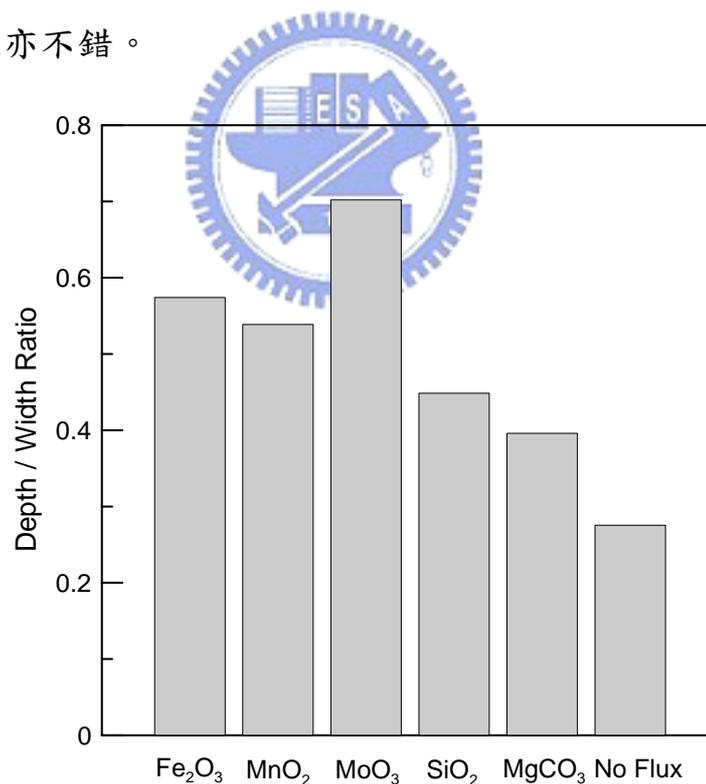


圖 2-14 單一助銲劑及 No flux 對銲道深寬比之影響長條圖

2.5.3 對銲道深度及銲道微硬度之影響

1. 鐸道深度之影響：

圖 2-15 所示為各單一助鐸劑及 No flux 對鐸道熔透深度之影響，由圖中得知，以 MoO_3 之單一助鐸劑效果為最佳，鐸道深度為 5.75mm。 No flux 為最差，鐸道深度為 0.23mm。

在進行傳統鐸接工作時，鐸道熔深不足一直是鐸接界致力克服的問題。經由各種助鐸劑按比例兩兩相互混合實驗結果發現添加混合型 $\text{MoO}_3(60\%)+\text{Fe}_2\text{O}_3(40\%)$ 助鐸劑、 $\text{MoO}_3(60\%)+\text{SiO}_2(40\%)$ 助鐸劑、 $\text{MoO}_3(80\%)+\text{MgCO}_3$ 助鐸劑和 $\text{Fe}_2\text{O}_3(40\%)+\text{SiO}_2(60\%)$ 助鐸劑之製程，可有效改善傳統氬鐸鐸道熔深不足之缺失，可以節省開槽或背面補鐸之成本，可提升鐸接效率，縮短工時。

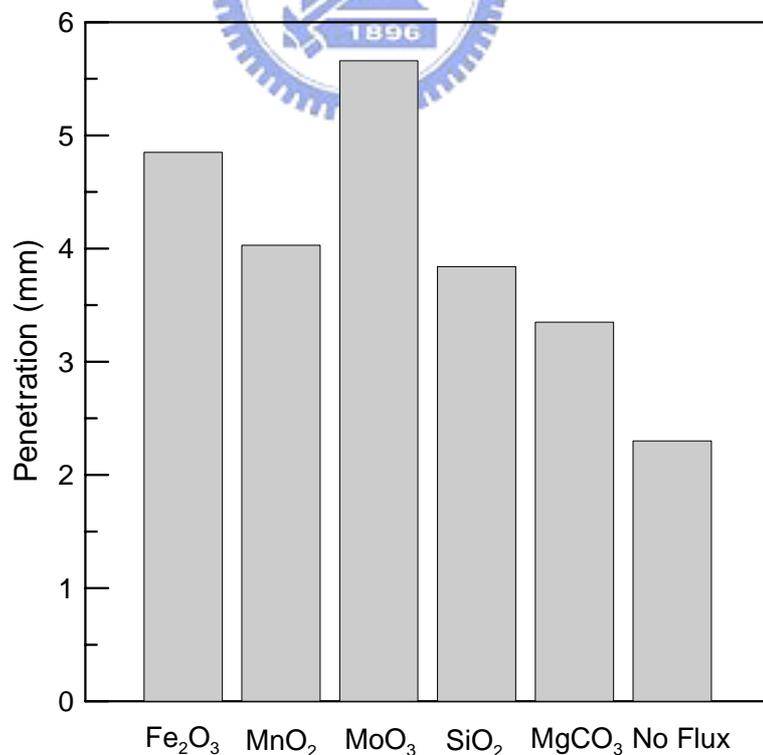


圖 2-15 單一助鐸劑及 No flux 對鐸道熔透深度影響長條圖

2. 鐸道微硬度之影響：

在施鐸的過程中，母材因電能轉換成熱能而熔化，在凝固的過程中，速度的快慢為影響母材鐸接處晶粒之大小的原因之一，溫度越高處，凝固較慢，晶粒亦較粗大，同樣的硬度亦較軟，反之亦然。

圖 2-16 為五種單一助鐸劑及 No flux 對鐸道微硬度之影響，從圖中可知以 Fe_2O_3 對微硬度值之影響最高約 147 Hv，另外 MoO_3 為 146 Hv，No flux 最低為 137 Hv。

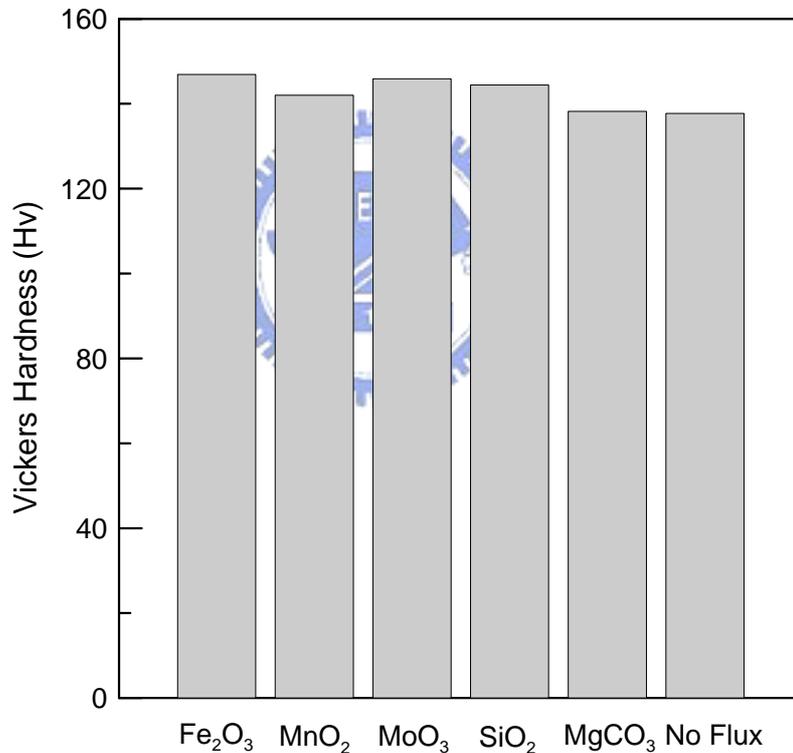


圖 2-16 單一助鐸劑及 No flux 對鐸道微硬度之影響長條圖

經由各種助鐸劑按比例兩兩相互混合實驗結果發現添加混合型助鐸劑對於微硬度之影響，並不會因為原助鐸劑之效果良好而有相加或相乘之效果。

2.6 包藥銲線

2.6.1 包藥銲線之簡介

利用包藥銲線作為銲接填料，早於 1920 年即被人引用於銲接製程。由於包藥銲線有甚多的優點。如(1)高熔填率。(2)非濺率很低。(3)煙塵量很少。及(4)優良的銲道外觀及形狀等。因此包藥銲線的使用逐年增加，並且取代了部份手工電弧銲接及 MIG/MAG 銲接[19]。

包藥銲線(Flux core wire)一般分為兩大類：

1. 外加遮護氣體銲線(Gas shielded flux core wire)如圖 2-17 所示[6]。
2. 自發遮護氣體銲線(Self-shielded flux core wire)如圖 2-18 所示[6]。

使用自發遮護包藥銲線施銲即不必再用 CO_2 氣體遮護，因其內部銲藥經電弧燃燒後產生 CO_2 遮護氣體在野外風速較大處施銲。

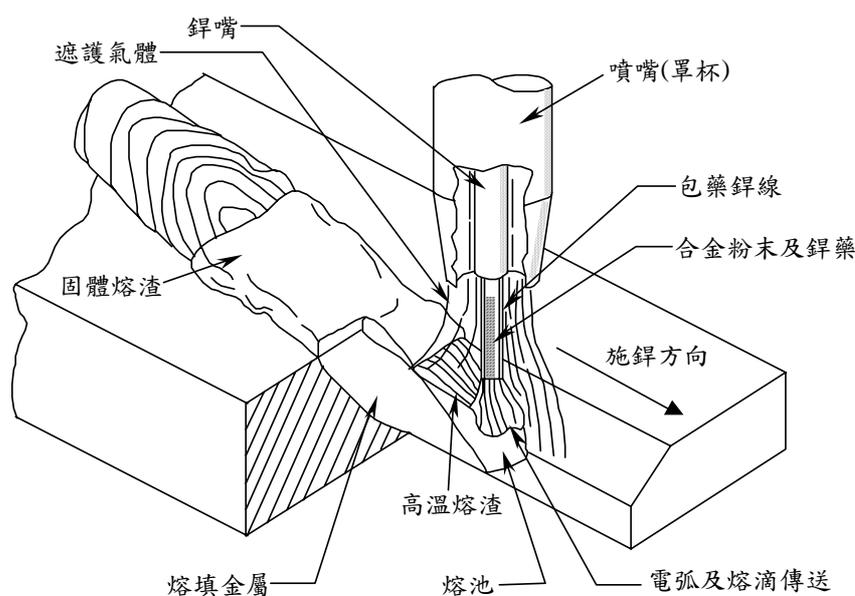


圖 2-17 外加遮護氣體包藥銲線銲接情況[6]

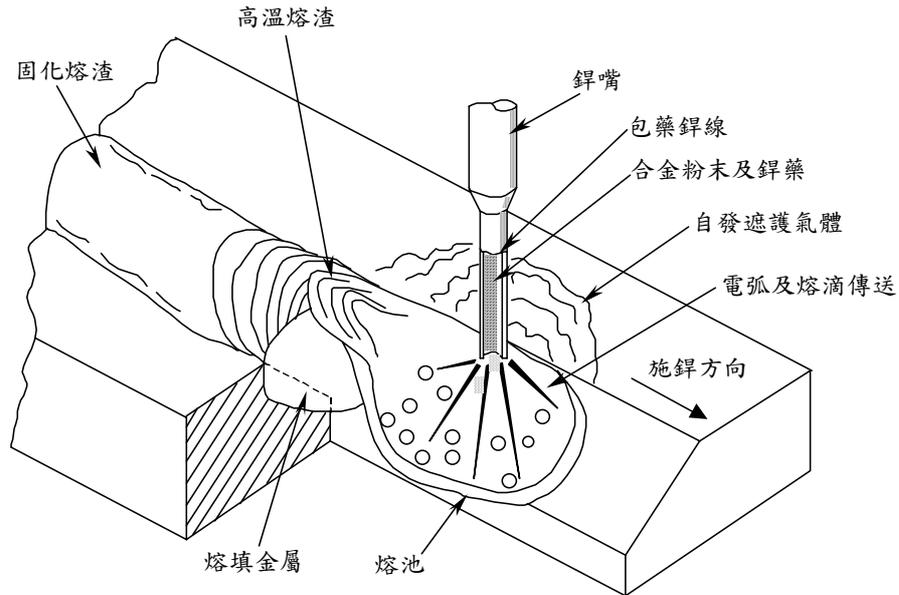


圖 2-18 自發遮護氣體包藥鉚線鉚接情況[6]

2.6.2 包藥鉚線與實心鉚線比較[21]

包藥鉚線具有各種優點，發揮良好的效果，能連續導電鉚接，因此具備實心鉚線無法達到的特長。表 2-2 所示[21]，包藥鉚線與實心鉚線的特徵比較。

以下用包藥鉚線取代實心鉚線的理由為船廠應用實例。即由於工時數減少而達到降低成本的項目：

1. 勞動生產力提高－高熔填速度(率)。
2. 修改工時減少－鉚道外觀良好。
3. 移除濺渣工時減少－產生濺渣減少。
4. 電弧發生率提高－因大電流全姿勢鉚接。

5. 適用場所擴大了。

表 2-2 包藥鉚線、實心鉚線特性比較[21]

項 目	包 藥 鉚 線	實 心 鉚 線	
鉚機作業性	鉚道形狀、外觀	平滑漂亮	凸起情形，表面稍粗糙
	熔滴的移行	細微粒狀移行	粒狀移行
	電弧的安定性	非常良好	良好
	電弧聲音	柔軟	生硬
	濺渣產生量	粒小而少	粒大而稍多
	鉚渣之包覆性	均一包覆	不均一，包覆極少
	鉚渣剝離性	良好	不良
	熔滲深度	相當深	深
	送線性	稍不良	良好
	煙塵產生量	稍多	普通
全姿勢性	良好	稍困難	
鉚接性	抗拉強度(kg / mm ²)	55-58	55-58
	衝擊值，vEo(kgf-m)	普通(8-10)	良好(10-13)
	擴散性氫量(CC / 100g)	低氫型(2-4)	極低氫型(0.5-1)
	抗裂性	普通	良好
	RT性能	優秀	良好
效率經濟性	熔填效率	普通(83-87)	良好(94-96)
	同一電流熔填速度	非常快	快
	鉚渣，濺渣移除	容易	困難
	適用電流範圍	高	普通

2.7 銲接缺陷之原因與防範對策

銲接工作之良窳決定於：1.銲接與母材匹配之選擇、2.接頭設計與施工計劃、3.銲接技術。

以下將針對銲接工作之缺陷原因對策分四個部分說明。

2.7.1 銲道不良的種類

銲道不良有發生在表面及內部者，其種類計有熔透不足、熔渣捲入、堆塔、燒缺、氣孔、收尾不良、龜裂等。

1.熔透不足(Incomplete penetration)

在接縫處，熔填金屬未和母材完全融合，致形成空隙，因而應力集中，易引起接縫斷裂。



原因：(1)銲接速度不當、(2)電流太低、(3)接縫口角度太小、(4)銲條選擇不當。

檢查方法：(1)X光透視、(2)超音波、(3)剝削、(4)彎曲。

2.熔渣捲入(Slag inclusion)

多層銲接時，未將前一層熔渣除淨，致使熔渣夾雜於銲道中之現象，影響強度甚鉅。

原因：(1)技術欠佳，操作角度不適當、(2)前層熔渣未清除乾淨、(3)接縫設計不良、(4)電流太低、(5)銲條不良。

檢查方法：(1)目視、(2)X光透視、(3)超音波、(4)彎曲試驗。

3. 實際喉厚不適

乃指鐸道增強層和接縫強度不配合而言。

凸過多原因：(1)電流太小、(2)鐸速太慢、(3)鐸道上行、(4)鐸條性質。

凹過多原因：(1)電流太大、(2)鐸速太快、(3)鐸條性質。

4. 重疊(Over-lap)或稱鐸淚或堆塔

鐸條之熔金在鐸接趾部末和母材熔合之堆積金屬。

原因：(1)電流太小、(2)鐸速太慢、(3)電弧太短。

檢查方法：放大鏡觀察，游標卡尺量測。

5. 鐸蝕(Under-cut 又稱下陷、燒缺或邊蝕)

指鐸道趾部和母材接合處所形成之凹陷槽痕，鐸蝕造成接縫強度不足，應力集中。

原因：(1)鐸條保持角度和鐸速不適當、(2)鐸條選擇不當、(3)母材過熱、

(4)鐸條移動至鐸趾部未適當停留。

檢查方法：放大鏡觀察，游標卡尺量測。

6. 表面氣坑(Pitting)

在鐸道表面形成噴火孔穴群，此乃因熔金高溫時產生重氣體，於欲冷固時逸出表面所留下之痕跡。

原因：(1)母材雜質太高(如 Mn、P、S 等)、(2)厚板冷卻過快、(3)母材表面污染、(4)鐸條潮濕致使 CO 太多鐸道留下氣體之痕跡、(5)電流過大。

檢查方法：放大鏡觀察。

7. 鐸道外觀不良(Bead appearance)

指鐸道的高低、寬窄及波紋不均等之缺陷。

原因：(1)電流不適當(過高或過低)、(2)鐸條選用不適當、(3)母材銹蝕、(4)技能欠佳(如鐸速、弧長、織動及操作角度等)。

8. 鐸疤(Crater)

鐸道末端所形成之凹坑亦稱為熔坑。

原因：(1)鐸接時電弧切斷過快熔金未能將熔池補滿、(2)熔池之熔金收縮、(3)多層鐸道收尾重疊。

檢查方法：外觀。

9. 氣孔(Blowhole ; Gas pocket)

氣孔的產生是由於鐸道金屬在高溫時吸收了過多的氣體，或由於熔池內部的冶金反應產生了氣體(如碳的脫氧反應)。隨著溫度的降低，這些氣體在鋼水中溶解度下降，氣體就要排出熔池，但因為熔池冷卻速度太快或其他種種原因，使氣體排不出來，因而在鐸道金屬內部形成了孔穴，這就是氣孔。

原因：(1)鐸條潮濕施鐸前未烘乾、(2)熔金急速冷卻致使內部氣體來不及排出、(3)母材中含硫量高形成偏析、(4)接縫處不潔、(5)電弧太長及電流不適當。

對策：(1)選擇適當的鐸條，並烘乾、(2)鐸接施予熱或後熱、(3)選擇含硫少之金屬、(4)將接縫口之金屬清除乾淨、(5)選定適當鐸條直徑。

10.線狀組織

係由非金屬介在物及氫氣之影響，在鐸接部之斷面呈現微細柱狀晶霜柱組織，有微細孔及非金屬粒夾雜在其間。

原因：(1)熔金急速冷卻成為微細之柱狀組織、(2)由高熔點之鋼脫氧或生成物(即非金屬介在物)成微細之小粒分散而成、(3)鋼中之氫氣超過飽和溶解度，大量存在時分散於趾部斷面，成為細微之柱狀並列而成。

對策：(1)鐸接施預熱及鐸後之後熱防止急冷、(2)鐸選擇含 Mn、Si 適量之鐸條、(3)使用低氫系塗料鐸條並烘乾之。

11.銀點

又稱為魚眼，蓋在熔著金屬之引張或變曲時其破壞斷面成魚目狀之光輝脆化斷面。

原因：(1)母材及鐸條受潮氣而產生、(2)塑性變形過程中急速轉變、(3)母材表面附著油脂、銹垢等。

對策：(1)母材及鐸條和前均須烘乾、(2)鐸後施予退火使氫氣消失、(3)使用低氫系電鐸條、(4)徹底清除母材上之附著物。

2.7.2 龜裂之種類

龜裂之發生計有熱內應力、外應力、材質強度與韌性有關。

1.依照收縮發生之形狀及位置區分：如圖 2-19[6]

(1)鐸道：(a)直裂、(b)橫裂、(c)弧狀裂紋、(d)趾部龜裂、(e)鐸道下龜裂。

(2)熔池龜裂：(a)直裂、(b)橫裂、(c)星狀裂紋。

直裂：鐸道因受材料橫方向應力，收縮所致。

橫裂：鐸道受材料縱向應力外亦受縱橫收縮影響。

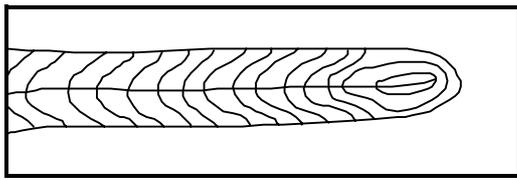
弧狀裂：鐸道波紋垂或斜交之裂紋，乃因母材或鐸條含磷、硫太多及急速冷卻所致。

熔池龜裂：鐸道末端熔金量不足和急速冷卻所致。

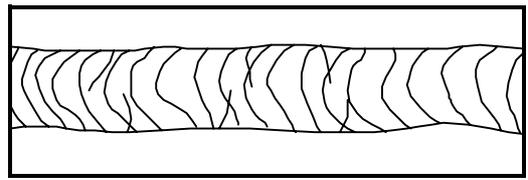
原因：(1)應力集中、(2)氫氣侵入金屬(鐸道下龜裂，發生在鐸後 4~8 小

時)、(3)急冷硬化、(4)母材合金過高或含硫、(5)母材夾層，硫、磷

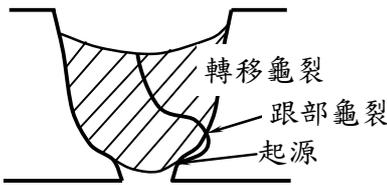
偏析。



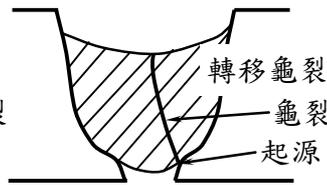
(a)直裂



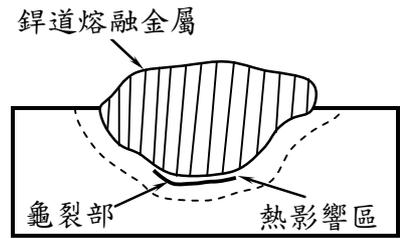
(b)橫裂



(c)跟部合併龜裂



(d)跟部龜裂



(e)鉸道下龜裂

圖 2-19 各種龜裂[6]

2.依發生龜裂時之溫度區分：

(1)熱裂(Hot cracking)

熱裂產生於銲接金屬從高溫冷卻凝固之高溫狀態下，其破裂的特徵為延晶界破裂。形成之主要因素為在冶金過程中，熔填金屬凝固時，有低熔點介在物於晶界中析出(如硫化鐵)，因此晶界上形成了脆弱的組織。另一方面，熔填金屬冷卻時體積收縮，但周圍母材金屬企圖阻止其收縮，因此熔填金屬便產生了拉應力，如圖 2-20[6]所示，即為熱裂之原因。

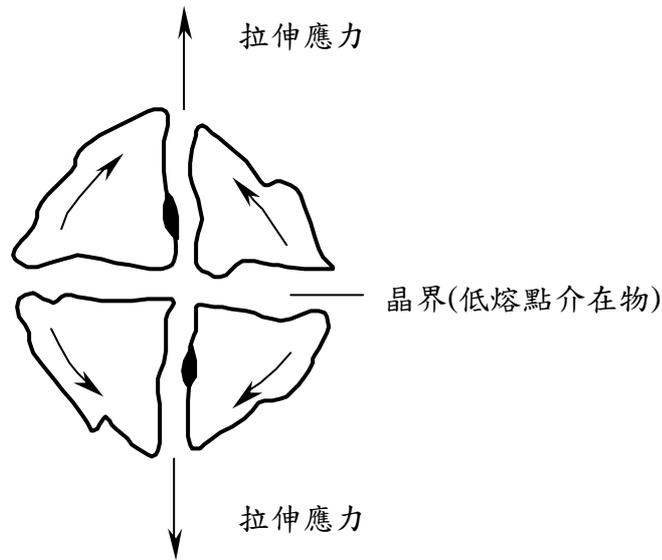


圖 2-20 低熔點介在物於晶界產生拉伸應力龜裂之情形[6]

(2)冷裂(Cold cracking)

冷裂主要發生在熱影響區內，發生之原因是在銲接冷卻過程中，金相組織改變而引起。含高碳當量值的鋼，在熱影響區其溫度已超過 A_{c3} 溫度，因此在冷卻時會產生相變態，由沃斯田鐵變為麻田散鐵或其它硬脆組織。相變態產生，體積發生變化而產生應變及相對應力，此應力加上熱脹冷縮所產生的內應力促成產生裂痕的驅動力，最後促使硬脆組織之裂痕快速傳播，因而造成冷裂。

為防止熱裂、冷裂產生應注意下列幾點：

(a)母材必需具有良好銲接性，一般以碳當量值低於 0.5 為宜。

(b)對於碳當量值較高，銲接性不良的鋼材，銲前應先預熱

($250^{\circ}\text{C}\sim 400^{\circ}\text{C}$)，銲接後降低冷卻速度。

(c)選用適當的銲接方法及銲條(低氫系保持乾燥)。

(d)選擇適當的鐸接條件。

(e)控制層間溫度。

3.防止鐸接龜裂之要領：

(1)構造與形狀

(a)使應力在鐸件中心兩旁均等分佈。

(b)檢討接頭開槽之斜度，即減少熔填金屬。

(c)跟部易龜裂，故第一道可先用強度較大、韌性高之低氫系鐸條，如不銹鋼或高張力鋼鐸底層。

(d)厚鈹裡側剷除穿透之鐸道，再補鐸一道。

(2)母材之選擇

依據鐸件之用途，選擇易於施工之母材。



(3)施鐸要領

(a)施鐸預熱或後熱。

(b)鐸後施行槌擊，減少應力集中。

(c)採用跳鐸法施鐸，以控制入熱量。

(d)鐸疤可用首尾輔導板法施鐸。

(e)避免鐸蝕。

2.7.3 變形種類

銲接變形的基本型態可分為橫向收縮、縱向收縮、角變形等三種，依照實際發生的現象可再分類六種，如圖 2-21[6]，(a)橫向收縮、(b)縱向收縮、(c)旋轉變形、(d)繞曲變形、(e)T 接變形、(f)對接銲變形。

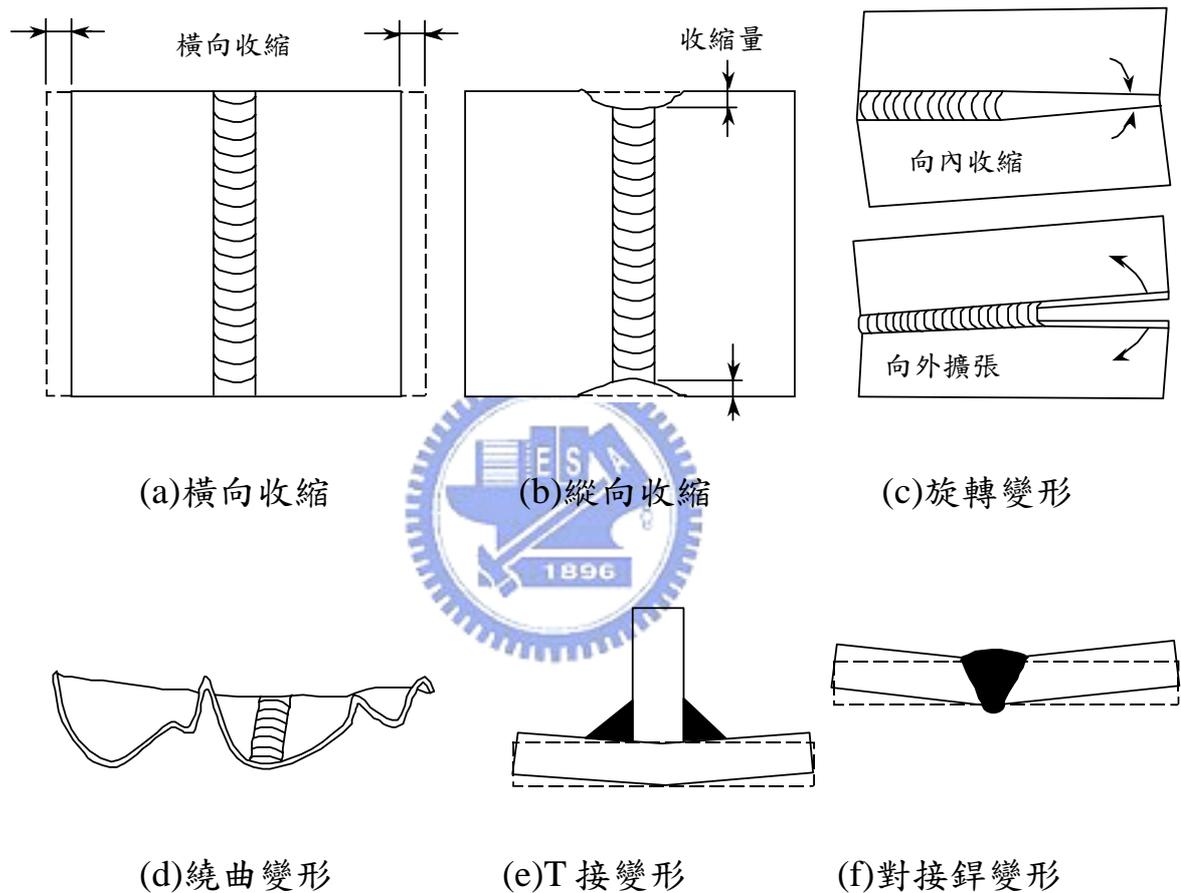


圖 2-21 變形種類[6]

防止或減少銲接變形，在設計或施工上均須考慮加熱及冷卻問題；銲接收縮變形或許是無法完全避免，但卻能抑制到最低程度，防止銲接收縮變形的的方法有很多，如何適當的條件，以防銲接變形，入下說明：

1. 銲縫設計

銲縫設計對銲接變形影響很大，一般來說，減少熔填金屬量可降低變形，而適當的銲縫設計能降低熔填金屬量，故銲縫設計對銲接收縮變形，有決定性的影響。

2. 預熱

均勻的預熱能使母材得到均勻的溫度分佈，使熱應力減少，故預熱為防範變形很有效的方法之一。

3. 控制層間溫度

在銲接過程中，應儘量避免溫度超過母材的變態點，以確保母材原有的性質，此外銲接輸入熱量越小，產生的變形量也越少，施工時應特別注意。



4. 不要銲得過多

熔填金屬越多，越會產生收縮應力，銲接過多或不足，都會產生不好的現象，大小適中銲道，不但可減少變形，而且可以節省銲接的時間和材料。

5. 選用間斷銲接

如設計強度不成問題，選用間斷銲接不但能節省材料，而且能減少收縮變形。

6. 銲道層次越少越好

選用直徑較大鐸條及較少鐸道與選擇直徑較小鐸條及較多鐸道，前者較能防止橫向收縮，因此鐸道層次越多，越能增加收縮力。

7. 鐸道設計應靠近中間軸

鐸縫設計靠近中間軸，可使兩側應力相互平衡，減少變形。

8. 考慮鐸接順序

適當的鐸接順序可以防止鐸接收縮與變形，一般常用的方法有後退法、對稱法、間跳法、交互法等。

9. 預置變形角度法

組合工作時，預先考慮可能的收縮力，將有助於鐸後結構物的收縮作用。



10. 適當的鐸接層次

適當的鐸接層次，能使鐸接收縮變形相互平衡。

11. 鐸後收縮力之消除

鎚擊為鐸接過程中抵抗收縮力及消除殘留應力的一種方法。

12. 儘量減短鐸接時間

鐸接時加熱及冷卻的變化相當複雜，熱傳遞需要時間，因此時間為影響鐸接變形之重要因素。一般來說，鐸接工作都希望能儘快完成，其他還有鐸接方法、鐸材種類及直徑大小、鐸接電流、鐸接速度等，都是影響鐸接變形之因素。

2.8 鐳道熔深變異之原因

鐳接時，除了有鐳道熱裂及 HAZ 敏化之問題外，因不同爐次之微量元素差異所形成熔深變異是鐳接時常面臨之問題[22-25]，對於此一問題，國外已有不少學者，進行此方面之研究[25,26]，結果顯示鋼材中之 S、Mg、Al、Ca 等微量元素對熔深變異有頗著之效應。為了解釋上述微量元素對熔深之影響，有二種機構被提出，一為表面張力趨動鐳池流體流動之機構[27-31]，另一則是電弧之效應[32,33]，以下針對上述之機構加以說明。

2.8.1 表面張力影響熔融區流體流動之機構[27-31]

對電弧鐳接而言，趨動鐳池(Weld pool)中熔融金屬流動之力量有四個，(1)鐳池表面之電漿流，(2)熱毛細作用所引起之表面張力，(3)流過鐳池表面之電流所形成之電磁力及(4)因鐳池內流體密度差異所形成之浮力，上述四種力且對流體流動之效應如圖 2-31 之示意圖所示。在一般的情況下，表面張力對流體流動具有主宰之效應。當液體表面存在表面張力梯度時，液體會被拖曳，從低表面張力區流向高表面張力區。對純金屬而言，隨著溫度的上昇表面張力會降低，所以表面張力溫度係數(dr/dt)是負的，如圖 2-22 (a)所示。但對於添加了表面活性元素，如 S、O 之金屬而言，隨著溫度的上昇，表面張力則會增加，所以表面張力溫度係數

(dr/dt)是正的，如圖 2-22 (b)所示。於銲接時，在電弧下面之溫度為最高，而銲池二側之溫度為最低，因此對沒有添加表面活性元素之鋼材而言，由於表面張力溫度係數是負的，所以銲池中之最熱點(銲池中心)有低的表面張力，而在銲池之最冷處(銲池二側)有高的表面張力，造成流體由中心往外側流動，使熱量從銲池中心傳遞到銲道二側，形成寬而淺之銲道；然而，對添加了 S、O 等表面活性元素之銲池而言，由於表面張力溫度係數是正的，所以在銲池中央之最熱點有高的表面張力，而在銲池二側有低的表面張力，造成流體往銲池內部流動，形成窄而深之銲道。

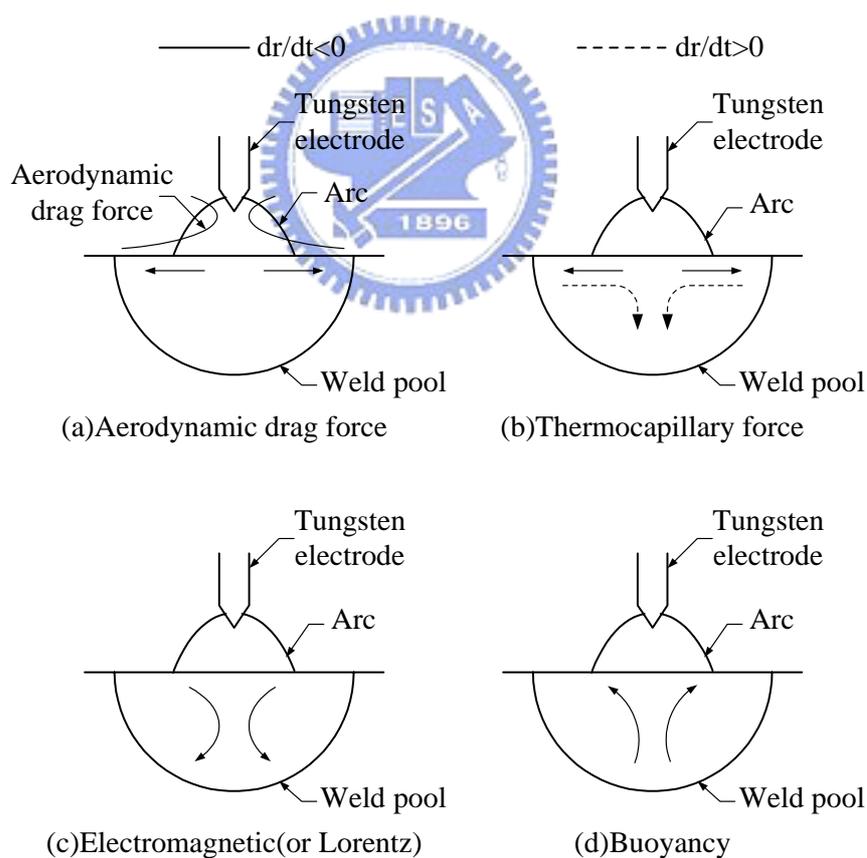


圖 2-22 銲池中驅動流體流動之力量[27]

2.8.2 電弧效應

關於微量元素所造成穿深之變異，也有學者認為是因電弧特性受到改變所致[32,33]。通常在氬銲時，電弧熱傳遞到母材是發生在陽極區 (Anode root)，也就是電弧所涵蓋的區域。所有的電弧熱中有 80% 會被傳遞到陽極區。由於鋼材中之微量元素會改變陽極區之大小，使電流密度受到改變，進而影響了熔深。

2.8.3 微量元素對銲接性之影響

雖然有上述約二種機構被提出來解釋銲接時穿深變異的問題，但表面張力理論仍是目前廣為大家所接受者。以下將從表面張力之觀點，說明微量元素對銲接性之影響[25,26]。

1. 硫(S)之效應

近年來隨著煉鋼技術之進步，高純度之不銹鋼已成功的被開發。但隨著鋼材 S 含量的降低，對銲接性卻產生了一些的影響。其銲道穿深／寬度(D/W)比值會隨著 S 含量的降低而減低，也就是銲接性變差。這是由於 S 是表面活性元素，當其含在 50ppm 以下時，表面張力溫度係數是負的，因此會形成淺而寬的銲道，也就是低的 D/W 比值。當 S 含量高於 50ppm 時，表面張力溫度係數由負變正，形成深而窄之銲道，也就是高的 D/W 比值。雖然增加 S 含量可增加穿深，但銲道表面之波紋(Ripple)

及銲蝕(Undercut)現象會比低 S 鋼明顯。

2. 氧(O)之效應

O 對 D/W 比值有非常顯著的效應。當 O 含量在 60ppm 時，D/W 比值約 0.3 左右；當 O 含量提高到 100ppm 時，D/W 比值大幅提高至 0.7。由於 O 也是表面活元素，當其含量高於 60ppm 時，表面張力溫度係數由負變為正，因此增加了穿深。

3. 鋁(Al)之效應

當 Al 含量在 40ppm 時，D/W 比值高達 0.7 左右；當 Al 含量增加到 90ppm 時 D/W 比值大幅降低到 0.3 左右。Al 雖不是表面活性元素，但 Al 會與 O 結合形成氧化介在物，而減低固溶 O 含量，所以 Al 含量越高時，D/W 比值也越低小。此外，Al 含量越高時，飄浮在銲池表面的含 Al 介在物增多，造成電弧不穩定，使空氣被捲入銲池中，容易導致銲道二側形成氣孔缺陷。

4. 矽(Si)之效應

Si 含量在 0.5% 以下時 D/W 比值隨 Si 的增加而提高；然而，當 Si 含量高於 0.5% 後，D/W 比值隨 Si 的增加而降低。前者是由於隨著 Si 的增加會降低流體之黏度，增加流體流動之速度；後者則是 Si 的進一步增加會降低銲池中固溶 O 含量，使 D/W 比值降低。

5. 錳(Mn)之效應

當 Mn 含量在 1.0% 以下時，D/W 比值隨 Mn 含量的提高而增加，這是由於 Mn 之添加會改變鐳池表面之浮渣特性所致。然而，進一步提高 Mn 含量則會減低固溶 O 含量，使 D/W 比值降低。

6. 鐳接保護氣體之效應

為了改善上述因爐次不同造成穿深變異的問題，許多的改善措施被提出，例如：於鐳接前在母材之表面散佈含氧化物及氟化物之鐳藥，試片表面經噴砂處理來提高粗糙度及採用含輕微氧化性氣體之遮護氣等。

雖然在 Ar 氣中加入微量的 O_2 或 SO_2 氣體可提高穿深，但保護氣中的 O_2 會污染電極而加速電極之消耗。另外，在 Ar 氣中加入約 5% H_2 以提高鐳接熱量也可以增加穿深。作者曾就保護氣體之種類對鐳接穿深及電極消耗之效應進行探討，在 Ar 氣中加入微量的 O_2 或 H_2 確可提高穿深。

2.9 田口實驗分析法

2.9.1 田口實驗分析法之沿革

田口實驗分析法是利用名為直交表 (Inner Orthogonal Array) 的數學工具，以少數的實驗來研究眾多的決策參數。最早利用直交表來規劃實驗者為印度學者 Rao，於 1920 年代，建立了實驗設計的原理及有關資料分析的方法，亦即變異數分析法 (Analysis Of Variance；簡稱 ANOVA)。將直交表

應用於發展設計上最成功者為日本田口玄一先生，他發展出穩健設計的基礎，並且在許多產品的開發成功案例上，驗證穩健設計的基本哲理[35]。

2.9.2 田口實驗分析法的基本原理

田口實驗分析法之基本原理，是經由降低變異原因的影響，來改善產品的品質，而不是去除變異原因。參數設計之原理，是將控制因子配置於直交表內來進行實驗，再依其品質特性之種類，由損失函數導引出訊號雜音比(Signal to Noise Ratio, S/N 比)，將實驗求得之品質特性轉成S/N 比進行分析，經由統計上之推定，可評估在不同參數水準組合下的S/N 比值，其中S/N 比值最大即為最佳參數組合。在此參數下製造之產品，其變異最小。最後再用最佳參數水準組合進行確認實驗(Confirmation Run)，由確認實驗所得之S/N 比與評估之S/N 比相互比較，評定此實驗是否成功。

2.9.3 直交表之定義、目的及型態

在田口實驗分析法中，直交表為參數設計的主要工具。田口博士將直交表的表示法定為 $La(b^c)$ ，L表示拉丁方格（直交表的起源）之意，a為實驗次數（即直交表之列數），b為各因子之水準數，c則表示直交表之行數。透過直交表，我們可以輕易地來配置因子及其水準[35]。

直交表包括內側直交表與外側直交表，內側直交表可用來配置可控因

子，外側直交表則用來配置雜訊因子。利用直交表，我們能以最少次數的實驗，來決定最佳的製程參數水準。

(1) 定義：

直交表任意兩行所有的因子水準組合，出現的次數是一樣的。也就是說，均衡性質是矩陣實驗為直交的充分條件。直交表的行代表研究的因子，列代表實驗組數。

(2) 目的：

1. 研究可控因子效果。
2. 研究雜訊因子效果。
3. 評估S/N比。
4. 針對特殊應用、決定最佳的品質特性。



(3) 型態：

1. 兩水準系列：例如 $L_4(2^3)$ 、 $L_8(2^7)$ 、 $L_{16}(2^{15})$
2. 三水準系列：例如 $L_9(3^4)$ 、 $L_{27}(3^{13})$
3. 主效果型：例如 $L_{12}(2^{11})$
4. 混和型：例如 $L_8(2^1 \times 3^7)$ ，其中一行為兩水準，其他七行為三水準。

2.9.4 信號雜音比(S/N)之特性

S/N 比基本上由損失函數可以看出，若調整品質特性之平均值至目標

值上，可使損失減少，而且平均值之調整即為容易，故平均值可視為「有用的訊號」。

品質特性變異增加，將使損失增大，故變異可視為「有害的訊號」。

因此，S/N比可定義為[35]：

$$\eta = 10 \times \text{Log}_{10} (\text{有用的訊號} / \text{有害的訊號}) \text{ (dB)}$$

由此可以推得各類品質之特性S/N比如下：

1. 望目品質特性 (target value is best)：此特性具有某一特定之目標值，

例如：硬度、間隙、厚度等。

A. 品質特性為連續且非負值。

B. 品質特性具有目標值。

C. 一般具有可調因子。



望目品質特性之S/N比計算公式：

$$\eta = 10 \cdot \text{Log}_{10} [\mu^2 / \sigma^2] \dots\dots\dots (2.1)$$

其中， μ ：平均值 $\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \dots\dots\dots (2.1.1)$

σ^2 ：變異數 $\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \mu)^2 \dots\dots\dots (2.1.2)$

2. 望小品質特性 (smaller is better)：目標值為零，例如：磨耗、劣化等。

A. 品質特性為連續且非負值。

B. 品質特性之最佳值為零。

C. 無可調因子存在。

望小品質特性之S/N 比計算公式：

$$\eta = -10 \cdot \text{Log}_{10} [\text{品質特性的平方平均}]$$

$$\eta = -10 \cdot \text{Log}_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \dots \dots \dots (2.2)$$

3. 望大品質特性 (larger is better)：目標值為無限大，例如：強度、壽命等。

A 品質特性為連續且非負值。

B. 品質特性愈大愈好，最佳值為 ∞ 。

C. 無可調因子存在。

處理望大品質特性時，將實驗所得之y 值取其倒數後，以望小品質特性方式處理，計算公式如下：



$$\eta = -10 \cdot \text{Log}_{10} [\text{品質特性倒數平方的平均}]$$

$$\eta = -10 \cdot \text{Log}_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \dots \dots \dots (2.3)$$

2.9.5 變異數分析法(ANOVA)

不同的參數對品質特性影響的程度也不同，但是如果提供各參數的相對效果，變異數分析法(ANOVA)是一項很好的選擇。而變異數分析法也是估計誤差變異及預測誤差變異所需要的。對電子信號做傅立葉分析的一個重要理由，是想決定各個諧波的強度，然後才能判別各個諧波的相對重要

性。一個諧波的振幅愈大，則它的強度也愈強。同樣地，ANOVA 的一個重要目的就是要決定不同參數的相對重要性。事實上，ANOVA 與分解電子信號的強度為不同諧波之間有強烈的相似之處[35]：

- (1) 所觀測到的 η 值相當於所觀測到的信號。
- (2) η 值的平方和相當於信號的強度。
- (3) η 值的總平均相當於信號的直流部分。
- (4) N 個參數就相當於 N 個諧波。
- (5) 矩陣實驗的「行」是相互垂直，這相當於不同諧波的垂直性。

2.9.6 田口實驗分析法之步驟



Phadke[38]認為田口實驗的參數設計是一套找出可控因子最適水準的方法，使得產品或製程對雜訊因子不敏感。在使用參數設計時，我們需先確認品質特性，找出可控因子與雜訊因子，並且以直交表、線點圖以及 S/N 比為工具來選取最佳的因子水準組合。Phadke 將參數設計分成三大階段，共計八個步驟：

第一階段：規劃實驗

Step1. 確認實驗的目的，大致決定實驗的規模。

Step2. 蒐集實驗相關資料，加以整理檢討。

Step3. 確定評估品質損失的測試條件及決定品質特性，即望大、望小

或望目的型態。

Step4. 決定因子及水準數，通常一次選取四至六個控制因子來進行實

驗，對每個因子我們擇定二或三個水準。

Step5. 確定矩陣實驗及資料分析，選擇適合的直交表來配置因子及其

水準。使用直交表的好處是：一、實驗次數可以減少。二、實

驗數據容易分析。

第二階段：執行實驗

Step6. 進行矩陣實驗。

第三階段：分析與驗證實驗結果

Step7. 分析資料，決定最佳因子水準組合，並預測品質特性值。

Step8. 實施驗證實驗和規劃未來對策，進行驗證實驗是田口實驗分析

法的最後一個步驟，卻也是最關鍵的一步。目的是驗證矩陣實

驗建議的最佳參數是否有如預期的改善效果，若與預測相符，

則表示建議之參數為我們所需；反之我們必須加以修正。