

國立交通大學

工學院精密與自動化工程學程

碩士論文

低碳鋼與不銹鋼異種材料 MIG-Flux  
接合製程參數最佳化之研究

Optimization of MIG-Flux Welding Process for Joining of  
Low Carbon Steel and Stainless Steel

研究生：陳慶鍊

指導教授：周長彬教授

中華民國九十八年十月

低碳鋼與不銹鋼異種材料 MIG-Flux  
接合製程參數最佳化之研究

Optimization of MIG-Flux Welding Process for Joining of  
Low Carbon Steel and Stainless Steel

研究生：陳慶鍊      Student : Ching-Lien Chen  
指導教授：周長彬      Advisor : Dr. Chang-Pin Chou

國立交通大學

工學院精密與自動化工程學程

碩士論文

A Thesis

Submitted to Degree Program of Automation and Precision Engineering  
College of Engineering  
National Chiao Tung University  
in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of  
Master of Science

in

Automation and Precision Engineering  
October 2009  
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年十月

# 低碳鋼與不銹鋼異種材料 MIG-Flux 接合 製程參數最佳化之研究

研究生：陳慶鍊

指導教授：周長彬

國立交通大學 精密與自動化工程學程 碩士班

## 摘 要

本研究目的主要在探討助鐸劑添加對異種材料鐸道熔透深度與機械性質之影響。鐸接方式採用不開槽對接，且以氬氣為保護氣體的惰性氣體金屬極電弧鐸接法來進行 Butt joint 實驗。實驗材料選用 SAE 1020 低碳鋼及 AISI 304 不銹鋼，活性助鐸劑之選用以氧化劑為主，分別為  $\text{MnO}_2$ 、 $\text{MgCO}_3$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MoS}_2$ 、 $\text{NiO}$ 、 $\text{MoO}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{SiO}_2$  及  $\text{TiO}_2$  共十一種。實驗中發現，當採用鐸接速度 346 mm/min 及鐸接電壓 23.3 V 組合時，將可得到較佳的鐸件機械性質。其中添加  $\text{MnO}_2$  單一型助鐸劑時，可提升鐸道深寬比及降低鐸道中肥粒鐵含量，當添加  $\text{MoS}_2$ - $\text{MoO}_3$  混合型助鐸劑時，可提高鐸道熔深及熔融面積，對於鐸道中肥粒鐵含量及鐸道微硬度表現皆有極佳效果。最後利用田口方法，以不同混合比例之  $\text{MoS}_2$  與  $\text{MoO}_3$  調製成混合型助鐸劑，搭配鐸接電壓、氬氣流量、鐸接速度針對鐸接製程進行最佳化實驗。經田口方法可得，當製程參數設定值為鐸接電壓 21.4 V、氬氣流量 8 l/min、鐸接速度 403 mm/min 且混合型助鐸劑粉末比例為 20% $\text{MoS}_2$ +80% $\text{MoO}_3$  時，為 SAE 1020 低碳鋼與 AISI 304 不銹鋼之 MIG-Flux 接合之最佳參數。透過變異數分析(ANOVA)可知，影響鐸道深寬比的重要參數，依序為鐸接電壓、混合型助鐸劑粉末比例、鐸接速度、氬氣流量。

# Optimization of MIG-Flux Welding Process for Joining of Low Carbon Steel and Stainless Steel

Student : Ching-Lien Chen

Advisor : Chang-Ping Chou

Department of Automation and Precision Engineering  
College of Engineering  
National Chiao Tung University

## Abstract

The purpose of this research is to study the effect of adding several fluxes on the weld penetration and mechanical properties of SAE 1020 low-carbon steel and AISI 304 stainless steel. Butt joint argon MIG(Metal Inert Gas) welding process was made on low-carbon steel SAE 1020 and stainless steel AISI 304 plate. The activating fluxes used in the experiment were  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{SiO}_2$  and  $\text{TiO}_2$ . The experiment found that when using torch moving speed of 346 mm/min and welding voltage of 23.3 V, it will be better mechanical properties. The flux  $\text{MnO}_2$  is the best of all fluxes according to the weld depth/width ratio(D/W ratio) and reduce the weld FN(ferrite content). The mixed fluxes  $\text{MoS}_2$ - $\text{MoO}_3$  can enhance the welding penetration and fusion zone, and it can improve the mechanical properties of the weld micro-hardness and FN. Finally, by employing the Taguchi Methods to achieve optimized welding penetration and the D/W ratio, which were welding voltages, argon flow rate, welding torch travel speed and the weight ratio of  $\text{MoS}_2$  and  $\text{MoO}_3$ . From the results of Taguchi Methods experiment, the optimal welding parameters for joining of the SAE 1020 carbon steel and the AISI 304 austenitic stainless steel are (1) welding voltages of 21.4 V; (2) argon flow rate of 8  $\ell$ /min; (3) welding torch travel speed of 403 mm/min; and (4) mixed powder combination of 20%  $\text{MoS}_2$  and 80%  $\text{MoO}_3$ . Beside, from the results of analysis of variance (ANOVA), the orders of the importance on the D/W ratio of weld pool geometry within the four control factors are (1) welding voltages; (2) mixed powder; (3) welding torch travel speed; and (4) argon flow rate.

## 誌 謝

本論文得以能夠順利完成，在此要先特別感謝恩師周長彬博士的殷切指導，在研究過程中，不厭其煩的給予指導與協助，謹在此致上由衷的謝意與敬意。

論文計劃及畢業口試期間，承蒙林玄良博士、李衍榮博士、黃和悅博士、徐享文博士等委員，對本篇論文的指正與建議，使本篇論文內容更為完備。感謝吳東明同學在課業及研究方面的的相互交流砥礪。感謝同事傅熙華在實驗期間的協助。另外，還要感謝黃清松及李育舟為我撰寫推薦函，使我能順利進入交大機械系攻讀碩士學位，在此表達最誠摯的謝意。

最後，要感謝家人的支持讓我能安心地完成學業，僅以本論文獻給所有關心及祝福我的人，謝謝你們。



# 目 錄

中文摘要 .....	i
英文摘要 .....	ii
誌 謝 .....	iii
目 錄 .....	iv
表 目 錄 .....	vii
圖 目 錄 .....	viii
第一章 緒論 .....	1
1.1 研究動機及背景 .....	1
1.2 研究方法及目的 .....	4
第二章 文獻回顧 .....	5
2.1 碳鋼 .....	5
2.2 不銹鋼 .....	8
2.3 惰性氣體金屬極電弧銲接 (MIG) .....	13
2.3.1 惰性氣體金屬極電弧銲原理 .....	13
2.3.2 銲接參數 .....	15
2.3.3 保護氣體 .....	20
2.4 助銲劑 .....	23
2.5 銲道熔深變異之原因 .....	25
2.5.1 表面張力 .....	25
2.5.2 電弧效應 .....	25
2.5.3 電磁力 .....	26
2.5.4 浮力 .....	26
2.5.5 微量元素的影響 .....	27
2.6 MIG-Flux 製程探討 .....	29
2.6.1 低碳鋼銲接製程對銲道之影響 .....	29
2.6.2 不銹鋼銲接製程對銲道之影響 .....	31
2.7 田口方法之應用 .....	34
2.7.1 田口方法之沿革 .....	34
2.7.2 田口方法的基本原理 .....	34

2.7.3	直交表之定義、目的及型態 .....	34
2.7.4	信號雜音比 (S/N ratio) 之特性 .....	35
2.7.5	變異數分析法 (ANOVA) .....	36
2.7.6	田口方法之步驟 .....	37
第三章	實驗方法與步驟 .....	38
3.1	實驗流程 .....	38
3.2	銲接試片之準備 .....	39
3.3	助銲劑調配 .....	39
3.4	銲接設備 .....	40
3.5	MIG 用銲線 .....	41
3.6	銲件表面觀察 .....	41
3.7	金相試驗 .....	41
3.8	銲道滲透深度與寬度量測 .....	42
3.9	肥粒相量測 .....	42
3.10	微硬度量測 .....	43
3.11	田口方法的實驗配置 .....	43
第四章	結果與討論 .....	46
4.1	銲接參數確認 .....	46
4.2	無助銲劑對銲道型態之探討 .....	46
4.2.1	無助銲劑對銲道外觀之影響 .....	46
4.2.2	無助銲劑對銲道深寬比、熔深與寬度之影響 .....	48
4.2.3	無助銲劑對銲道剖面形狀與面積之影響 .....	50
4.3	單一型助銲劑對銲道型態之探討 .....	52
4.3.1	單一型助銲劑對銲道外觀之影響 .....	52
4.3.2	單一型助銲劑對銲道深寬比、熔深與寬度之影響 .....	53
4.3.3	單一型助銲劑對銲道剖面形狀與面積之影響 .....	55
4.4	混合型助銲劑對銲道型態之探討 .....	57
4.4.1	混合型助銲劑對銲道外觀之影響 .....	57
4.4.2	混合型助銲劑對銲道深寬比、熔深與寬度之影響 .....	58
4.4.3	混合型助銲劑對銲道剖面形狀與面積之影響 .....	60
4.5	助銲劑對銲道顯微組織之觀察 .....	62

4.5.1	單一型助鋅劑對鋅道顯微組織之觀察 .....	62
4.5.2	混合型助鋅劑對鋅道顯微組織之觀察 .....	64
4.6	助鋅劑對鋅道肥粒鐵含量之探討 .....	66
4.6.1	單一型助鋅劑對鋅道肥粒鐵含量之影響 .....	66
4.6.2	混合型助鋅劑對鋅道肥粒鐵含量之影響 .....	66
4.7	助鋅劑對鋅道微硬度之探討 .....	67
4.7.1	單一型助鋅劑對鋅道微硬度之影響 .....	67
4.7.2	混合型助鋅劑對鋅道微硬度之影響 .....	72
4.8	田口方法針對鋅接製程進行最佳化實驗 .....	75
4.8.1	各參數對鋅道外觀之影響 .....	75
4.8.2	製程參數對鋅道型態之影響 .....	77
4.8.3	田口方法結果分析 .....	79
4.8.4	變異數分析 .....	81
4.8.5	確認實驗 .....	82
4.8.6	實驗的再現性 .....	83
4.9	最佳化實驗參數對鋅道顯微組織之觀察 .....	85
4.10	最佳化實驗參數對鋅道肥粒鐵含量之影響 .....	86
4.11	最佳化實驗參數對鋅道微硬度之影響 .....	86
第五章	結論 .....	88
	參考文獻 .....	90

## 表目錄

表 1-1	各種助鐸劑於低碳鋼 TIG-Flux 接合製程之深寬比.....	2
表 2-1	不銹鋼中合金元素的效果.....	9
表 2-2	不銹鋼之主要分類表.....	10
表 2-3	不銹鋼之物理性質.....	10
表 2-4	不銹鋼各系列特性.....	10
表 2-5	沃斯田鐵系不銹鋼與一般碳鋼鐸接特性比較.....	11
表 2-6	鐸接氣體的比重.....	21
表 2-7	鐸接氣體的解離電壓值.....	21
表 2-8	活性助鐸劑與鐸道深寬比之關係.....	32
表 3-1	GM308 化學成份 (wt%).....	41
表 3-2	控制因子及其水準值.....	44
表 3-3	L <sub>16</sub> (4 <sup>5</sup> )直交表的實驗配置.....	44
表 3-4	MIG-Flux 製程參數配置表.....	45
表 4-1	無助鐸劑對鐸道型態之影響.....	48
表 4-2	異種材料 Butt joint 測試參數-11 單一型種助鐸劑.....	54
表 4-3	異種材料 Butt joint 測試參數-6 種混合型助鐸劑.....	59
表 4-4	鐸道型態之鐸道深寬比.....	79
表 4-5	各因子水準之平均 S/N 值.....	80
表 4-6	變異數分析表.....	81
表 4-7	最佳參數表(SAE 1020 與 AISI 304).....	82
表 4-8	確認實驗製程參數配置表.....	83
表 4-9	確認實驗的結果.....	85

## 圖目錄

圖 1-1	各種助銲劑於低碳鋼 TIG-Flux 接合製程銲道深寬比.....	2
圖 1-2	不銹鋼的 TIG-Flux 製程於各電流下之銲道深寬比.....	3
圖 2-1	碳鋼的含碳量和機械性質的關係 .....	5
圖 2-2	銲接縫溫度與組織關係示意圖 .....	6
圖 2-3	敏化發生示意圖 .....	13
圖 2-4	直流正極性電弧示意圖 .....	14
圖 2-5	MIG 銲接設備示意圖.....	14
圖 2-6	CO <sub>2</sub> 電弧銲銲法銲接條件之選擇及電弧種類.....	16
圖 2-7	各種不同直徑銲線及熔融量 .....	16
圖 2-8	銲接電流與熔入深度的關係 .....	17
圖 2-9	同一電流值下電弧電壓與銲道表面形狀和熔深的關係 .....	17
圖 2-10	銲線伸出長度或穿出長度 .....	19
圖 2-11	銲接氣體的熱傳導性 .....	21
圖 2-12	銲接氣體對銲道截面形狀之影響 .....	23
圖 2-13	熔深變異示意圖 .....	26
圖 2-14	各種助銲劑對銲道深寬比之影響長條圖 .....	29
圖 2-15	各種助銲劑對銲道熔透深度影響長條圖 .....	30
圖 2-16	各種助銲劑對銲道微硬度之影響長條圖 .....	31
圖 2-17	活性助銲劑與銲道微硬度之關係 .....	33
圖 3-1	實驗流程 .....	38
圖 3-2	助銲劑調配 .....	39
圖 3-3	助銲劑塗敷 .....	39
圖 3-4	HOBART MEGA-PULSE MPI-350 MIG 銲接機 .....	40
圖 3-5	銲槍、台車及夾具等外觀 .....	40
圖 3-6	銲道幾何型態量測示意 .....	42
圖 3-7	Ferritscope M10B-FE 型肥粒相測定儀 .....	42
圖 3-8	Matsuzawa MHT-1 微硬度測定機 .....	43
圖 4-1	無助銲劑對銲道外觀之影響 .....	47
圖 4-2	不同銲接速度及銲接電壓對銲道深寬比之關係圖 .....	48

圖 4-3	不同銲接速度及銲接電壓對銲道熔深之關係圖 .....	49
圖 4-4	不同銲接速度及銲接電壓對銲道寬度之關係圖 .....	49
圖 4-5	不同銲接速度及銲接電壓對銲道深寬比之關係圖 .....	49
圖 4-6	不同銲接速度及銲接電壓對銲道熔深之關係圖 .....	50
圖 4-7	不同銲接速度及銲接電壓對銲道寬度之關係圖 .....	50
圖 4-8	不同銲接電壓及銲接速度之銲道剖面圖 .....	51
圖 4-9	不同銲接速度及銲接電壓對銲道熔融面積之關係圖 .....	52
圖 4-10	不同銲接速度及銲接電壓對銲道熔融面積之關係圖 .....	52
圖 4-11	單一型助銲劑之銲道外觀圖 .....	53
圖 4-12	單一型助銲劑對銲道深寬比之影響 .....	54
圖 4-13	單一型助銲劑對銲道熔深之影響 .....	55
圖 4-14	單一型助銲劑對銲道寬度之影響 .....	55
圖 4-15	單一型助銲劑之銲道剖面 .....	56
圖 4-16	單一型助銲劑對銲道熔融面積之影響 .....	57
圖 4-17	混合型助銲劑之銲道外觀圖 .....	58
圖 4-18	混合型助銲劑對銲道深寬比之影響 .....	59
圖 4-19	混合型助銲劑對銲道熔深之影響 .....	60
圖 4-20	混合型助銲劑對銲道寬度之影響 .....	60
圖 4-21	混合型助銲劑之銲道剖面 .....	61
圖 4-22	混合型助銲劑對銲道熔融面積之影響 .....	62
圖 4-23	單一型助銲劑之銲道顯微組織 .....	63
圖 4-24	混合型助銲劑之銲道顯微組織 .....	65
圖 4-25	單一型助銲劑對銲道肥粒鐵含量之影響 .....	66
圖 4-26	混合型助銲劑對銲道肥粒鐵含量之影響 .....	67
圖 4-27	單一型助銲劑對銲道硬度值之影響 .....	67
圖 4-28	微硬度分佈曲線-未塗助銲劑之銲件 .....	68
圖 4-29	微硬度分佈曲線-MnO <sub>2</sub> .....	68
圖 4-30	微硬度分佈曲線-MgCO <sub>3</sub> .....	68
圖 4-31	微硬度分佈曲線-Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	69
圖 4-32	微硬度分佈曲線-MoS <sub>2</sub> .....	69
圖 4-33	微硬度分佈曲線-NiO .....	69

圖 4-34	微硬度分佈曲線-MoO <sub>3</sub> .....	70
圖 4-35	微硬度分佈曲線-MgO.....	70
圖 4-36	微硬度分佈曲線-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	70
圖 4-37	微硬度分佈曲線-ZnO.....	71
圖 4-38	微硬度分佈曲線-SiO <sub>2</sub> .....	71
圖 4-39	微硬度分佈曲線-TiO <sub>2</sub> .....	71
圖 4-40	混合型助鉸劑對鉸道硬度值之影響 .....	72
圖 4-41	微硬度分佈曲線-MnO <sub>2</sub> -Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	72
圖 4-42	微硬度分佈曲線-MnO <sub>2</sub> -MoO <sub>3</sub> .....	73
圖 4-43	微硬度分佈曲線-Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -MoO <sub>3</sub> .....	73
圖 4-44	微硬度分佈曲線-MnO <sub>2</sub> -MoS <sub>2</sub> .....	73
圖 4-45	微硬度分佈曲線-MoS <sub>2</sub> -MoO <sub>3</sub> .....	74
圖 4-46	微硬度分佈曲線-MoS <sub>2</sub> -Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	74
圖 4-47	各參數對鉸道外觀之影響 .....	75
圖 4-48	L <sub>16</sub> 直交表鉸道型態之影響.....	77
圖 4-49	因子效果圖 .....	80
圖 4-50	因子效果差異直條圖 .....	80
圖 4-51	控制因子貢獻率 .....	82
圖 4-52	確認實驗之鉸道型態 .....	85
圖 4-53	最佳參數條件下之鉸道顯微組織 .....	86
圖 4-54	微硬度分佈曲線-添加助鉸劑之確認實驗.....	87
圖 4-55	微硬度分佈曲線-未添加助鉸劑之確認實驗.....	87

# 第一章 緒論

## 1.1 研究動機及背景

惰性氣體金屬極電弧銲接法 (inert gas metal arc welding, GMAW, 俗稱 MIG), 與 TIG (TIG, tungsten inert gas) 在許多方面類似, 均有共同的優點。因此 TIG 銲法之優缺點大部份均可適用於 MIG, 在銲接製程中加入適當保護氣體, 可運用於單一材料及異種材料銲接。在材料厚度方面, 最薄約 1 mm, 最厚則不受限制, 在銲接位置方面, 可操作於平銲、橫銲、立銲及仰銲, 銲接效率比手工電弧銲佳, 在銲接品質方面, 銲道為連續性, 可減少起銲、收尾所造成之銲道缺陷, 且具有銲速快、變形少、熱影響區窄與銲道含氬量低等優越之銲接特性, 故在近年已大量取代手工電弧銲接, 成為現今工業界用量最大的銲接方法[1]。

碳鋼是鐵和碳的合金, 根據 Fe-C 平衡狀態圖[2], 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。304 不銹鋼因添加大量鎳與鉻, 具有優異的抗熱性、耐銹性、耐蝕性與耐氧化性, 又因為其含碳量低且銲接後不會有相變化的產生, 可以得到穩定的銲接品質, 因而被廣泛使用於石化、國防、核能、食品以及棉質纖維工業。產品或設備中, 並非全部都需使用不銹鋼, 通常只有與原料或熱源接觸部份有使用不銹鋼的必要, 其餘結構僅需利用價格低廉的低碳鋼即可。因此, 如何以最有效率的銲接製程, 將不銹鋼板與低碳鋼板接合, 即為一重要的課題。

MIG 是使用消耗性電極, 因此大部份採用定電壓之電銲機, 以防因電壓之改變影響電弧長度, 以致產生不均勻銲道之缺點; 施銲時可藉調整電壓值來控制電弧長度, 而熔接電流的輸出完全由金屬線進給速度來決定。施銲過程中, 加入保護氣體可在電弧周圍形成局部的氣體保護層, 將電弧熔池與空氣隔開。保護氣體能影響銲接中的金屬移傳機構、銲道形狀、熔透深度、熔填金屬化學成分以及機械性質等。於是, 施銲過程應選用適當保護氣體以提高銲道品質[3]。

不同銲接材料其適用的助銲劑成分亦不同。TIG-Flux 製程的關鍵技術主要在於活性助銲劑成分的調配。由於活性助銲劑的配方在 Paton Welding Institute, PWI 與 Edison Welding Institute, EWI 方面都有專利保

護，因此不容侵犯。根據文獻資料可得知，過去的研究發現在低碳鋼的 TIG-Flux 的接合製程中，相較多種助銲劑，塗敷二氧化鈦作為助銲劑時，其銲道之熔透深度為最佳，如表 1-1 所示，為各種助銲劑於低碳鋼之 TIG-Flux 製程之深寬比，由圖 1-1 可觀察出塗敷各種助銲劑對銲道深寬比之影響[4]。

表 1-1 各種助銲劑於低碳鋼 TIG-Flux 接合製程之深寬比[4]

	Without flux	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	CaF <sub>2</sub>
Depth, D	3.30	5.25	4.50	4.40	4.35	2.30	2.15
Width, W	10.30	8.60	9.50	10.95	11.50	8.60	11.50
D/W ratio	0.32	0.61	0.47	0.40	0.38	0.27	0.19

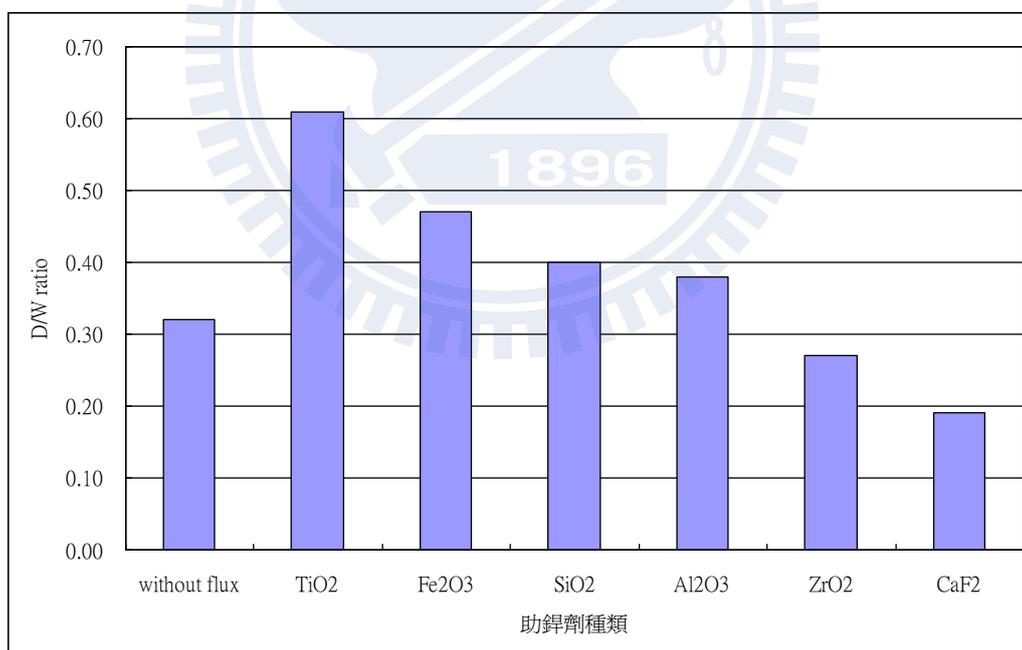


圖 1-1 各種助銲劑於低碳鋼 TIG-Flux 接合製程銲道深寬比[4]

在不銹鋼的 TIG-Flux 接合製程中，由圖 1-2 可知，塗敷二氧化矽作為助銲劑在各種電流皆可得到較佳的銲道深寬比[5]。

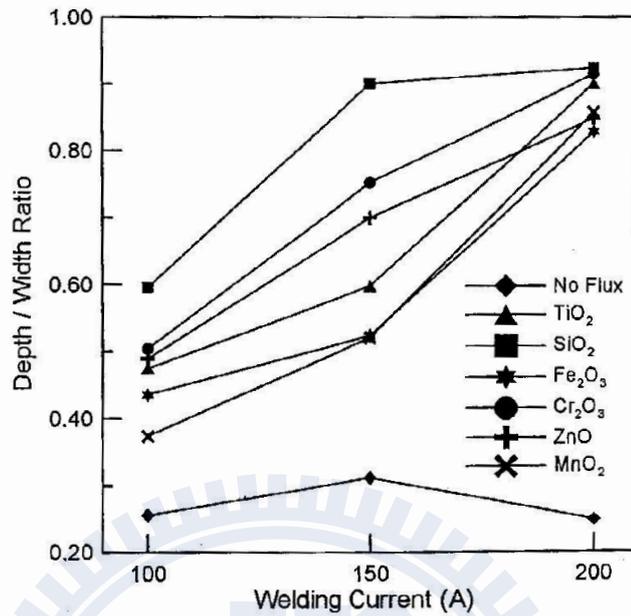


圖 1-2 不銹鋼的 TIG-Flux 製程於各電流下之銲道深寬比[5]

MIG 銲接參數包括：銲線種類及直徑、銲接電壓及電流、保護氣體流量、銲接速度及助銲劑種類等，這些參數皆會影響銲道品質及銲件機械性質。因此如何增加銲道的熔透深度並縮小銲道寬度，以及提昇銲接生產效率，即為銲接界長久以來所致力研發的課題。

本實驗選取數個參數來探討參數對銲接特性的影響，並驗證參數間的關係，所獲得的實驗結果期待對工業界有所助益。

## 1.2 研究方法及目的

銲接目的在於母材獲得良好的機械性質及銲道品質，因此正確的銲接參數組合及適當的助銲劑搭配是重要的。本研究主要在探討活性助銲劑對異種材料（AISI 304 不銹鋼及 SAE 1020 低碳鋼）銲道熔深能力之影響，其探討的範圍包含下列幾項：

- (1) 單一型助銲劑對異種材料銲道外觀的影響。
- (2) 單一型助銲劑對異種材料銲道型態的影響。
- (3) 單一型助銲劑對異種材料銲道微硬度的影響。
- (4) 混合型助銲劑對異種材料銲道外觀的影響。
- (5) 混合型助銲劑對異種材料銲道型態的影響。
- (6) 混合型助銲劑對異種材料銲道微硬度的影響。
- (7) 田口方法針對銲接製程進行最佳化實驗。

為研究活性助銲劑對異種材料銲道熔深能力之影響。銲接方法採用不開槽對接方式，且以氬氣為保護氣體的惰性氣體金屬極電弧銲接法來進行 Butt joint 實驗。實驗材料選用尺寸為 5 mm × 50 mm × 100 mm 的異種材料；活性助銲劑之選用以氧化劑為主，分別為  $\text{MnO}_2$ 、 $\text{MgCO}_3$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MoS}_2$ 、 $\text{NiO}$ 、 $\text{MoO}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{SiO}_2$  及  $\text{TiO}_2$ 、共十一種。銲接過程以金相實驗來觀察銲道微觀組織；以實體顯微鏡來量測銲道型態，並記錄銲道熔深及寬度以計算深寬比；利用微硬度測定機來瞭解銲道機械性質。接下來根據所量測之銲道熔深及熔融面積，取銲件最佳機械性質之銲接參數進行混合型助銲劑 Butt joint 實驗，以各 50% 的比例來調配成六種混合型助銲劑，並探討混合型助銲劑對銲道熔深及熔融面積之影響，取銲件最佳銲道幾何型態。最後利用田口方法的實驗配置，取銲道深寬比、熔深及熔融面積最佳之混合型助銲劑，調製成四種不同比例的混合型助銲劑，搭配銲接電壓、氬氣流量、銲接速度針對銲接製程進行最佳化實驗，以期達到最佳之銲道深寬比與熔深。

## 第二章 文獻回顧

### 2.1 碳鋼

所謂碳鋼是鐵和碳的合金，根據鐵碳平衡狀態圖，碳鋼的碳含量在0.02%~2%皆屬之。現在工業上所用材料以碳鋼為最多，用途也最廣。

碳鋼的各種機械性質大致由含碳量和顯微鏡組織決定，如圖 2-1 所示為正常化狀態的碳鋼之機械性質和含碳量的關係。由圖中可知，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、降伏強度和硬度等皆隨含碳量增加而增加。但伸長率、斷面收縮率則隨含碳量的增加而減少。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[6]。

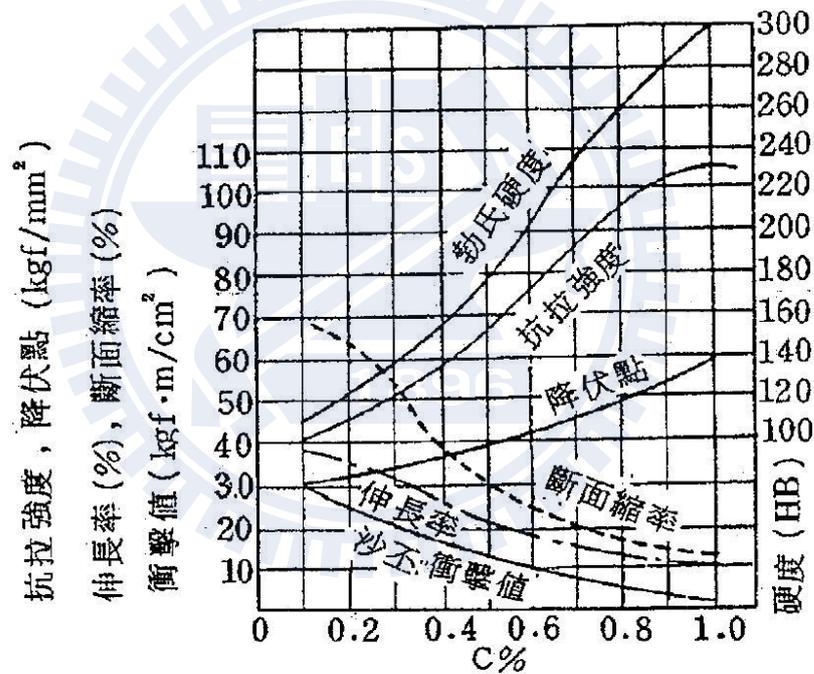


圖 2-1 碳鋼的含碳量和機械性質的關係[6]

碳鋼之鐸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，直到相互接觸為止。在晶粒成長的過程中，有些晶粒成長比較順利，有些晶粒則彼此間受到相互的阻礙。鐸接時，由於熔池的體積小，部分母材又隨同一起熔化，因此鐸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。

偏析現象是鐸道金屬結晶過程中極易產生的一種缺陷。產生晶內偏析主要因為當鐸道結晶時，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。在電弧鐸接的情況下，鐸道的冷卻速度很快，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，故低碳鋼鐸接時，晶內偏析的情況並不嚴重。而在高碳鋼、合金鋼鐸接時，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，於鐸接後常需藉熱處理來改善。

鐸接時，鐸道和熱影響區的金屬在鐸接熱源的作用下，都會發生金相組織的改變，或稱之為“相變”。鐸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。鐸接時熱影響區各段的溫度分佈如圖 2-2[7]所示。

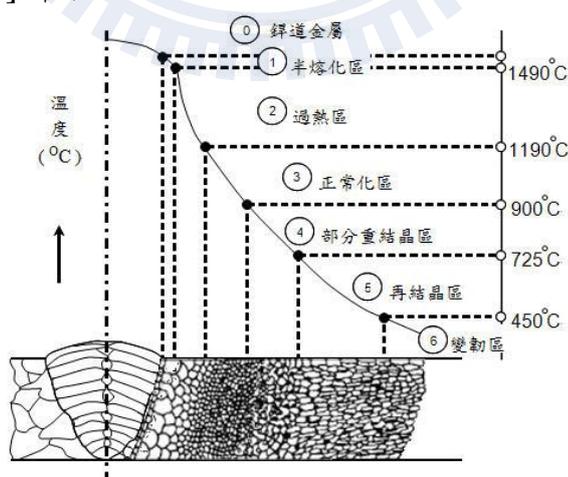


圖 2-2 鐸接縫溫度與組織關係示意圖[7]

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

### 1. 半熔化區

它是靠近鐸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，但對鐸接縫的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 1100~1490°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熱影響區的塑性、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 900~1100°C 之間，此時沃斯田鐵晶粒比較細小，當熱影響區在空氣中冷卻時，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 725~900°C 之間，低於相變態點 ( $Ac_3$ )。此區相變態不完全，所以晶粒大小不一。該區能降低鐸接縫之機械強度，希望此區越窄越好。

### 5. 再結晶區

此區溫度在 450~700°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 200~500°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，實際上在鐸接低碳鋼 ( $C < 0.25\%$ ) 時只能看到三個區段，即過熱區、正常化區、部分重結晶區。如鐸接熱影響區的大小，係受鐸接方法、鐸接規範、鐸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，鐸接縫產生的內應力愈大，因此易於形成鐸接裂縫。相反地，熱影響區太大時，雖然可以減小內應力，鐸件卻容易產生變形和撓曲的缺陷。

## 2.2 不銹鋼

不銹鋼之主要合金元素以 Cr 為主，其耐蝕性隨 Cr 含量增加而提高。Cr 與空氣中的氧作用後會在表面形成一層十分安定且緻密的薄氧化膜  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ，此氧化膜使金屬與空氣隔絕，不會繼續起氧化作用以保持表面之光澤，其不銹鋼各元素之效果，如表 2-1 所示。

一般所稱的不銹鋼是指含 Cr 量在 12% 以上；Cr 含量超過 12% 且低於 30% 者可耐高溫氧化、硝酸、亞硝酸氣體及高溫高壓氫氣等之腐蝕，可說幾乎不會再被一般之腐蝕環境所侵蝕；超過者歸類為不銹鋼；低於 12% 者屬於耐蝕鋼 (Corrosion resisting steel)，超過 30% 者，主要是用在高溫的情況，屬於耐熱鋼的範圍。另在鉻之外再添加鎳者，可進一步耐硫酸、鹽酸等非氧化性之酸的腐蝕，此稱為鎳鉻 (Cr-Ni) 系不銹鋼[8]。不銹鋼依其微觀結構可分為以下四大類：

- (1) 麻鐵散鐵型不銹鋼 (Martensitic stainless steel)
- (2) 沃斯田鐵型不銹鋼 (Austenitic stainless steel)
- (3) 肥粒鐵型不銹鋼 (Ferritic stainless steel)
- (4) 析出硬化型不銹鋼 (Precipitation stainless steel)

不銹鋼之主要分類表，如表 2-2 所示；不銹鋼之物理性質，如表 2-3 所示。美國鋼鐵協會 (American Iron and Steel Institute, AISI) 研訂的不銹鋼規格大多用三位數字表示，第一位數字代表特定之系列 (參照表 2-4)，本實驗所使用的 304 不銹鋼屬於沃斯田鐵型不銹鋼。

沃斯田鐵型不銹鋼是從 Fe-Cr-Ni 合金系統發展出來的，其所含有的 Cr 元素通常高於 16%，並且有足夠的 Ni 以穩定常溫之沃斯田鐵，或是因高溫急冷所殘留之沃斯田鐵。其微觀組織屬面心立方 (Face centered cubic, FCC) 結構，無磁性，也沒有延脆性轉換溫度[8]。此類型的不銹鋼最主要的特性就是在各種溫度下均保持沃斯田鐵組織 (Austenitic structure)，亦即不會因溫度的變化而產生相變化 (Phase transformation) 的現象[8]。沃斯田鐵型不銹鋼雖不能用熱處理的方法處理將其硬化。但卻可經冷加工來增加其硬度與強度；其冷作硬化速率隨 Cr 含量的增加而遞減。但是，經冷作加工後，抗腐蝕性會降低，尤其是在氮化物環境中會有應力腐蝕 (Stress corrosion) 的問題產生[8,10]。

表 2-1 不銹鋼中合金元素的效果[8]

元素	作用效果
Al	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 強的脫氧劑</li> <li>● 抑制晶粒成長(形成分散氧化物或氮化物)</li> <li>● 氮化鋼的合金元素</li> </ul>
Cr	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 腐蝕及氧化抵抗性增加</li> <li>● 硬化能增加</li> <li>● 高溫強度增加</li> <li>● (高碳鋼)耐磨性增加</li> </ul>
Co	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 硬化肥粒鐵使鋼具有高溫硬度</li> <li>● 降低硬化能</li> </ul>
Mn	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 防止硫造成的脆性</li> <li>● 增加硬化能</li> </ul>
Mo	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 使沃斯田鐵的粗大化溫度上昇</li> <li>● 使硬化層深入</li> <li>● 防止回火脆性</li> <li>● 高溫強度、潛變強度、高溫硬度增加</li> <li>● 使不銹鋼的腐蝕抵抗性增加</li> <li>● 形成耐磨耗粒子</li> </ul>
Ni	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 使鋼之淬火回火韌性增加</li> <li>● 使波來鐵及肥粒鐵的韌性增高</li> <li>● 使高 Cr-Fe 合金變成沃斯田鐵組織</li> </ul>
P	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 增加低碳鋼的強度</li> <li>● 腐蝕抵抗性增加</li> <li>● 改良易削鋼的機械性質</li> </ul>
Si	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 為常用之脫氧劑</li> <li>● 電磁鐵板用合金</li> <li>● 使鋼氧化抵抗性優良</li> <li>● 略使鋼的硬化能增加</li> <li>● 使低合金鋼的強度增加</li> </ul>
Ti	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 易形成 TiC 之碳化物，防止長時間加熱下不銹鋼內鉻的局部減少</li> </ul>
W	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 使工具鋼內生成硬而耐磨耗性粒子</li> <li>● 增進高溫硬度及強度</li> </ul>
V	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 使沃斯田鐵晶粒粗大化溫度升高</li> <li>● 增加硬化能</li> <li>● 抵抗回火軟化及使回火時生二次硬化</li> </ul>

表 2-2 不銹鋼之主要分類表[8]

按成分分類	按組織分類
1. 鉻系不銹鋼 (AISI 400 系)	1.1 麻鐵散鐵型不銹鋼 1.2 肥粒鐵型不銹鋼
2. 鉻鎳系不銹鋼 (AISI 200 及 300 系)	2.1 沃斯田鐵型不銹鋼 2.2 析出硬化型不銹鋼

表 2-3 不銹鋼之物理性質[8]

母材	比重	熔點	相對導熱 係數	熱膨脹 係數	比熱	導電 係數	電阻
沃斯田鐵型 不銹鋼	7.9	1395	0.12	9.6	0.117	3.0	75.0
麻鐵散鐵型 不銹鋼	7.7	1430	0.17	9.5	0.118	3.0	57.0
肥粒鐵型 不銹鋼	7.7	1507	0.17	9.5	0.334	3.0	60.0

表 2-4 不銹鋼各系列特性[9]

系列代號	基地組織	主要合金 元素	熱處理的 硬化能	磁性
2XX	沃斯田鐵	Cr-Ni-Mn	不能硬化但可 加工硬化	無磁性
3XX	沃斯田鐵	Cr-Ni	不能硬化	無磁性
4XX	麻田散鐵	Cr	可硬化	有磁性
4XX	肥粒鐵	Cr	不能硬化	有磁性
5XX	麻田散鐵	Cr-Mo	可硬化	有磁性
PH 型析出 硬化型	沃斯田鐵或半沃斯田鐵或麻田 散鐵或沃斯田鐵+肥粒鐵	Cr-Ni	可硬化 (析出硬化)	視基地組 織而定

沃斯田鐵系不銹鋼與一般碳鋼在材料與銲接特性上相比較，有四項主要差異，分別為：熱膨脹率、熔點、電阻與熱傳導率[11]，其差異特性及對銲接之影響性，如表 2-5 之說明：

表 2-5 沃斯田鐵系不銹鋼與一般碳鋼銲接特性比較[12]

項目	碳鋼	沃斯田鐵系不銹鋼	差異說明 (與碳鋼比較)	對銲接之影響性
熱膨脹率	11.7	17.1~19.2	較高	銲接變形嚴重及容易發生銲道龜裂
熔點	1538	1400~1450	較低	不適合高電流銲接
電阻		69~102	較高	必須使用低銲接電流，以避免過熱
熱傳導率	60	18.7~22.8	較低	電弧熱停留時間長，散熱不易

此外，沃斯田鐵系不銹鋼在銲接時所遭遇到的二項主要問題：一是熱裂縫所引起的銲道龜裂現象，另一則是散熱不易所引發之銲接衰退(Weld decay)或敏化(Sensitization)，茲分述如下：

#### (1)凝固熱裂[13]

沃斯田鐵不銹鋼因具有較一般碳鋼高的熱膨脹係數與低的熱傳導性，因而容易產生熱裂縫。熱裂縫主要區分為銲接金屬之凝固熱裂與熱影響區裂縫，其中以凝固裂縫較受重視。

熱影響區裂縫的理論主要來自液化理論(Liquid theory)。當熱影響區受到高溫時，會在晶界形成液化薄膜，且因熱應力的作用而造成晶界破裂，此現象就是熱裂縫的主要成因。造成液化薄膜的來源有以下三項：

- A. 晶界的液化。
- B. 夾渣物和第二相組成物的液化。
- C. 低熔點偏析物的析出。

通常銲道中若存在 5~10%的肥粒鐵，可有效抑制熱裂縫的發生；但一旦肥粒鐵的含量超過 30%時，熱裂的敏感性再度升高[16]。有關肥粒鐵可降低熱裂縫的原因有以下數點[13]：

- A. 肥粒鐵對 P、S、Si 等雜質的溶解度較高。故先析出肥粒鐵時可有效防止雜質產生偏析，降低熱裂縫發生的機會。
- B. 肥粒鐵具有較佳的高溫延性。所以先析出肥粒鐵可釋放部分熱應力，以避免熱裂縫的產生。
- C. 肥粒鐵的熱膨脹係數較低，當銲件冷卻時，不致受到太大的收縮應力而產生熱裂縫。

- D.若先析出肥粒鐵，可使銲件固化溫度範圍縮小而避免凝固裂縫發生；且可避免 P、S、Si 等雜質在晶界析出造成晶界液化。
- E.由於肥粒鐵-沃斯田鐵的晶介面不易被液化薄膜潤濕(Wetting)，而肥粒鐵-肥粒鐵及沃斯田鐵-沃斯田鐵的晶介面容易被潤濕，因而容易在單相的晶介面上產生熱裂縫。
- F.肥粒鐵有細化晶粒之效果，會使沃斯田鐵之晶粒變小而晶介面積增加，進而減少雜質在晶界偏析的程度。
- G.由於肥粒鐵-沃斯田鐵的晶介面較崎嶇且不規則，而肥粒鐵-肥粒鐵及沃斯田鐵-沃斯田鐵的晶介面較平整且規律，因而容易在單相的晶介面上產生熱裂縫。

## (2)敏化現象

沃斯田鐵系不銹鋼於銲接時，緊鄰銲道的熱影響區於冷卻過程中，長期停留於  $550^{\circ}\text{C}\sim 850^{\circ}\text{C}$  之敏化溫度內，使得碳化鉻在晶界大量析出，造成其週遭地區的鉻含量低於 13%，形成一鉻缺乏區而降低了抗腐蝕的能力，如圖 2-3 所示，此一現象又稱之為銲接衰退[15]。而敏化現象也是造成沃斯田鐵系不銹鋼沿晶應力腐蝕之主因。敏化之發生除了與鋼材化學成分有關外，與銲接時熱影響區所承受的最高溫度與銲接後的冷卻速度有密切之關係，此臨界之最高溫度約為  $950^{\circ}\text{C}$ ，高於或低於此銲接溫度均會降低敏化的程度[16]。在冷卻速度方面，若銲件於敏化溫度區間 ( $550^{\circ}\text{C}\sim 850^{\circ}\text{C}$ ) 的冷卻時間不超過 1 分鐘，也可避免敏化的發生[17]。至於合金元素中以碳對敏化現象有最不利之影響，Ni、Si、P 元素次之；而 N、Mo、Mn 元素則可以降低銲件之敏化之敏感度。故要消除敏化之不良影響，可從以下數點著手：

- A.選用含碳量低之母材，如 304L、304EXL 等，可防止碳化物的析出。
- B.使用含 Nb、Ti 元素之母材，因其活性較鉻高故會先與碳化合，可避免鉻缺乏區的出現。
- C.先使用固溶處理使碳化物固溶於基地中，再施以急速冷卻以避開敏化區間。
- D.對銲件施以長時間的敏化處理，使鉻原子能藉由擴散作用消除鉻缺乏區；但此法需耗費許多的時間與能源(維持在  $550^{\circ}\text{C}\sim 850^{\circ}\text{C}$ )，一般多不採用。

E.預先冷作加工，但是經冷作加工後，抗腐蝕性降低，尤其是在氮化物環境中會有應力腐蝕問題產生。

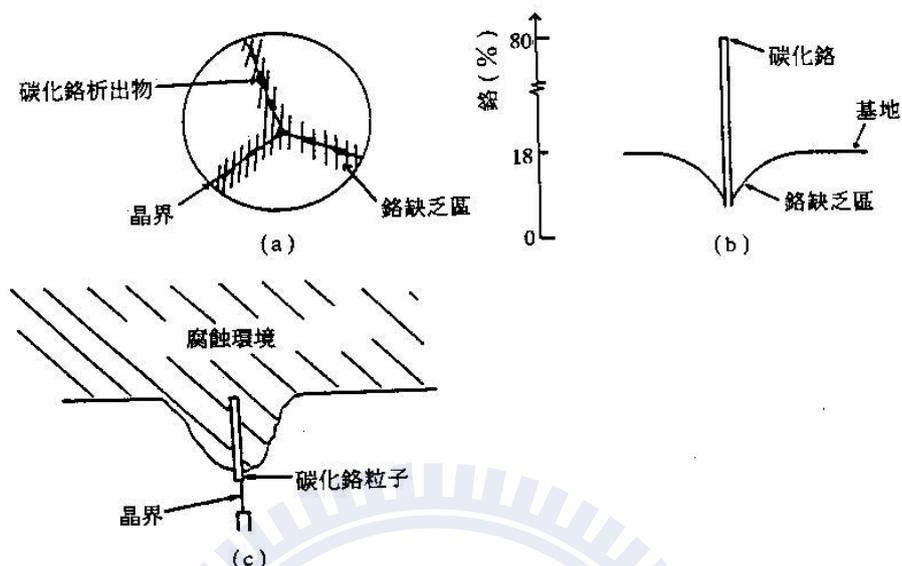


圖 2-3 敏化發生示意圖(a)碳化鉻在晶界析出(b)碳化鉻附近形成鉻缺乏區(c)腐蝕環境下，鉻缺乏區優先被腐蝕[15]

## 2.3 惰性氣體金屬極電弧銲接(MIG)

### 2.3.1 惰性氣體金屬極電弧銲原理

惰性氣體金屬極電弧銲 (inert gas metal arc welding, GMAW, 俗稱 MIG), 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。

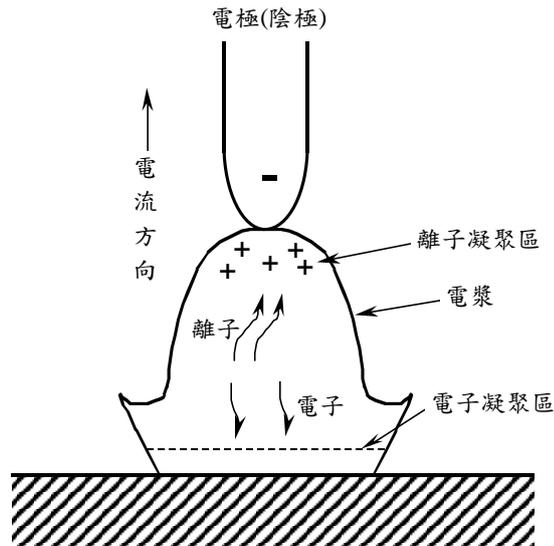


圖 2-4 直流正極性電弧示意圖[18]

電弧之熱量將母材之銲槽表面及銲線頂端熔化。熔融之銲接金屬能將銲接區加熱。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。

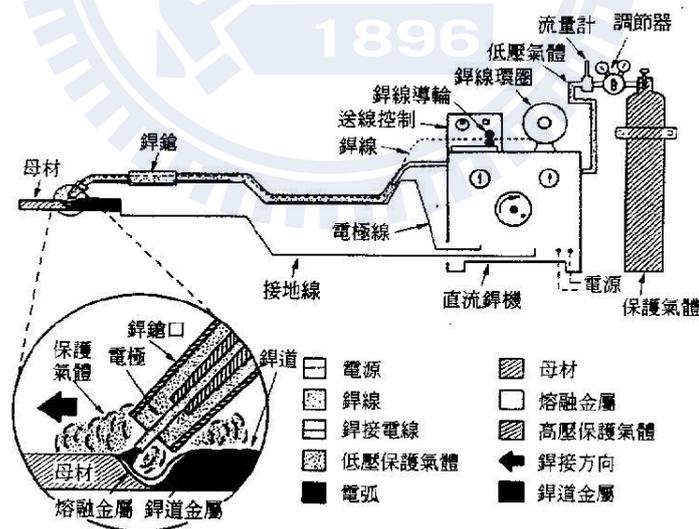


圖 2-5 MIG 銲接設備示意圖[19]

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(direct-current straight polarity)，則較不適用。當使用 DCRP 可以穩定電弧，穿透力較強，且具有清潔銲道及周圍作用。

### 2.3.2 銲接參數

#### (1) 銲接電流(Welding current)

銲接電流是將銲線變成熔滴傳送到母材完成銲接之原動力，銲接電流又是形成電弧熔透深淺之最大決定因素。其中 CO<sub>2</sub> 遮護氣體金屬電弧銲，大部分採用定電壓特性之電源機，銲線經由銲槍的銲線嘴送出熔融；因此，電弧的維持必須依賴控制銲線之送給速度的變化來微量控制銲接電流。

短路傳送式與熔球傳送式電弧的電流範圍隨銲線直徑而不同，若銲線直徑在  $\phi 1.2\text{mm}$ ，電流約 200A 以下為短路傳送式電弧，噴渣少，可獲得外觀美麗平滑銲道。電流約在 200A 以上，則形成熔球傳送式電弧，熔深增加，適宜銲接厚板。

如圖 2-6 所示，為電弧種類和銲接條件之選擇標準，由圖 2-7 得知，定電壓電源下，銲線直徑一定，銲接電流增大，銲線熔融速度則亦變快。換言之，定電壓、定電流下，銲線的熔融速度仍為常數，不因銲線粗細而有不同。

由圖 2-8 得知，如使用 1.6 mm 銲線，維持一定銲線嘴至母材距離，在一定電流之條件下，銲接速度與熔入深度成反比。

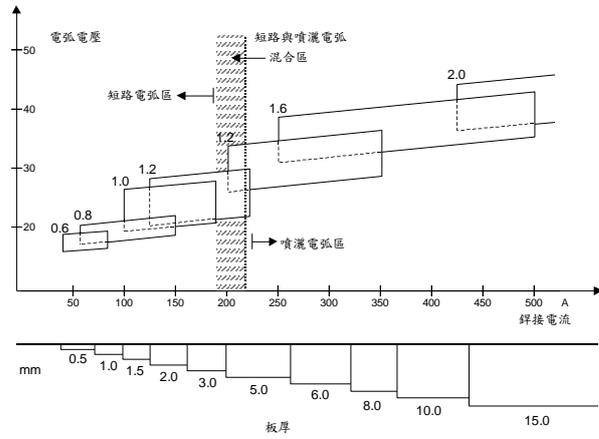


圖 2-6 CO<sub>2</sub> 電弧銲法銲接條件之選擇及電弧種類[20]

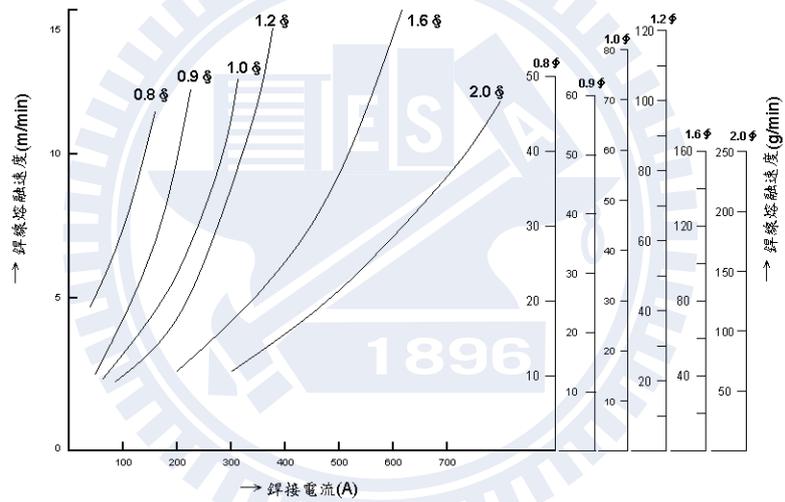


圖 2-7 各種不同直徑銲線及熔融量[20]

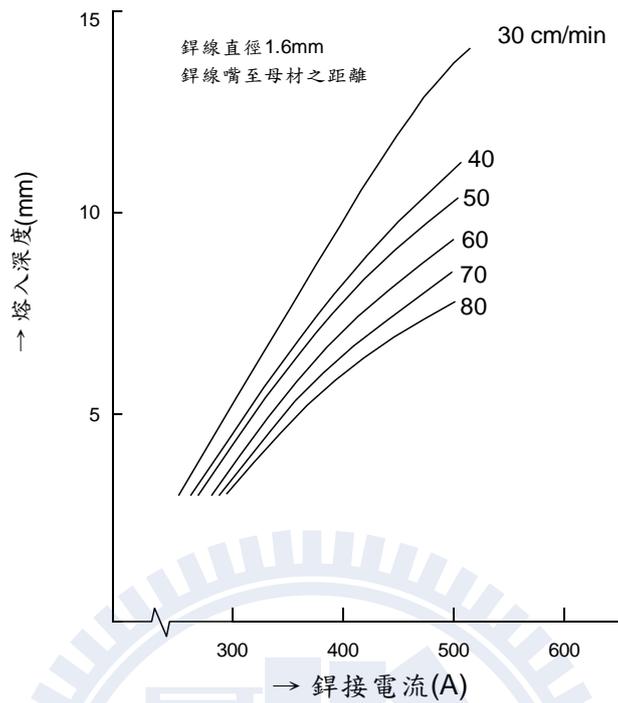


圖 2-8 鐳接電流與熔入深度的關係[20]

## (2) 鐳接電壓(Welding voltage)

電弧電壓是以電弧長度顯示之，也是決定鐳道外觀形狀的最大因素，其電弧電壓與鐳道表面形狀及熔入深度之關係，如圖 2-9 所示。

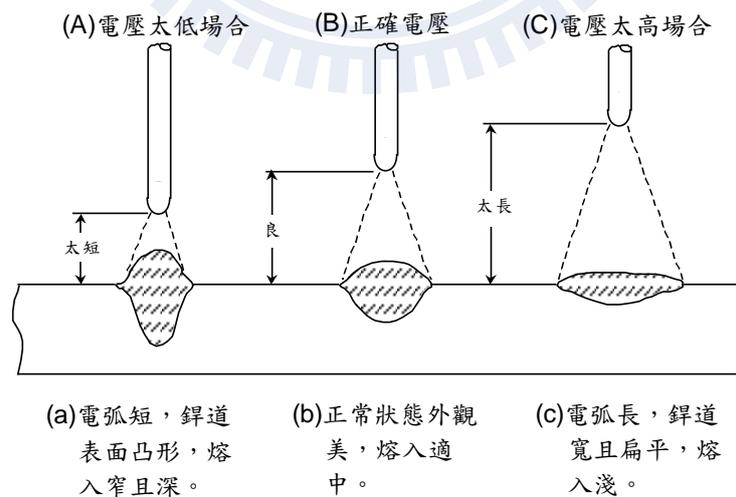


圖 2-9 同一電流值下電弧電壓與鐳道表面形狀和熔深的關係[20]

### (3)移動速度(Travel speed)

- A.移動速度增加，熔透亦增加。但達到某一程度後，移動速度之增加或減少，都將減少熔透量。
- B.移動速度減少之影響：
  - a.單位長度內鐳線之熔填率增加。
  - b.因單位長度熔填金屬增加，故產生大而淺之鐳池。熔透度因此而減少。
  - c.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。
  - d.增加鐳珠高度。
- C.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)。
- D.移動速度增高：
  - a.熱量傳導至母材者減少，即熔填率減少，或熔透減少。
  - b.鐳珠之寬度與高度亦減少。
  - c.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，指鐳線從鐳槍內導電火嘴起至鐳線之最前端為止，其間之距離，如圖 2-10 所示。但為了更符合實用起見，常自導電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。

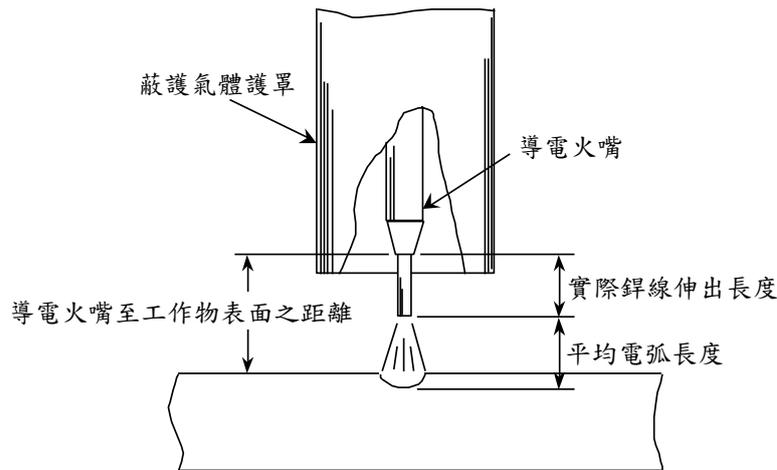


圖 2-10 銲線伸出長度或穿出長度[21]

- A. 增加銲線伸出長度，及增加銲線受到電阻作用之預熱量；故只需少量之銲接電流，即可在所設定之送線速度下將銲線熔化，因此熔填率增加。
- B. 增加銲線伸出長度，減少銲道之熔透量。
- C. 增加銲線伸出長度過大，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銲珠與熔透極淺之銲道。
- D. 增加銲線伸出長度，電弧不穩定，銲渣增加。
- E. 增加銲線伸出長度，減低氣體保護作用。正確長度應為 1/4~1/2 吋，視金屬轉移模式之不同而定。
- F. 調整銲線伸出長度，以因應根隙過大或過小。遇根隙太大時，可增加銲線伸出長度，以減少熔透，增加金屬熔填量。反之，根隙太小時，則需減少銲線伸出長度，以使增加熔透力。

#### (5) 銲線尺寸 (Electrode size)

每種銲線如果其化學變化成分一定，直徑大小一定，則銲接電流可允許使用範圍亦屬一定。

##### A. 若銲線直徑較大者：

- a. 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熔透量。
- b. 如電流保持不變，則電流密集度因直徑較大而減低，但銲線熔化速度，與電流密集度成比例，故比較低。

- c.如電流保持不變，因熔透量之大小與電流密集度成比例，因而較小。
- d.如電流保持不變，鉸珠之外形較為寬大。
- B.直徑較小者：
  - a.如電流保持不變，有較高之鉸線熔化速度，亦即有較大之熔填率。
  - b.如電流保持不變，有較深之熔透度。
- C.不同直徑之鉸線產生之各種熔填率，故鉸線之選擇除了考慮材質之外，其決定使用直徑大小應依據：
  - a.母材金屬厚度。
  - b.需要之熔透度。
  - c.希望之熔填率。
  - d.鉸珠外形。
  - e.鉸接位置。
  - f.考慮價格。

### 2.3.3 保護氣體

電弧鉸接時使用保護氣體的主要目的有二：一為保護電極、電弧、熔融金屬及填料金屬等，以避免直接與大氣接觸；另一目的則為擔負起鉸接時熱能的傳遞，這是由於鉸接機主要的作用乃是將電能轉換成熱能，而這些熱能就是經由鉸接氣體來加以傳遞到鉸件上。

由使用目的可知保護氣體對鉸接工作的影響至鉅，故如何選用適當的保護氣體乃成為重要課題，以下將就保護氣體的特性及如何選用適當的保護氣體作一簡單之描述。鉸接氣體主要的特性，包括有比重、熱傳導性及解離電壓值等，茲將其重要特性簡述如下：

#### (1) 比重

一般而言，比重大的鉸接氣體較適用於平鉸。相對地，比重小的鉸接氣體則較適用於立鉸或仰鉸。如表 2-6 所示即為鉸接氣體的比重 ( $\text{CO}_2 > \text{Ar} > \text{O}_2 > \text{N}_2 > \text{He} > \text{H}_2$ )。

表 2-6 銲接氣體的比重

Welding gas	Ar	He	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Specific gravity	1.380	0.137	1.530	1.105	0.069	0.967

### (2)熱傳導性

銲接氣體的熱傳導性可視為氣體將電弧熱量傳遞到銲件的能力，亦即熱傳導性較高的銲接氣體，將可傳遞較多的電弧熱量到銲件上。如圖 2-11 所示即為銲接氣體的熱傳導性。

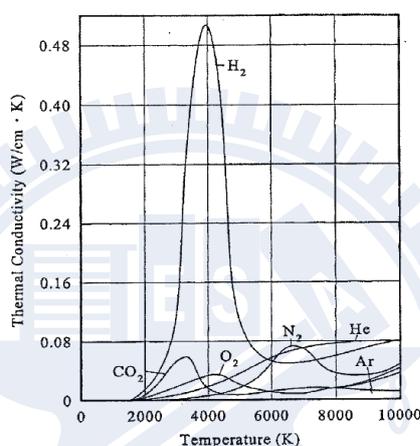


圖 2-11 銲接氣體的熱傳導性[10]

### (3)解離電壓值(Ionization potential)

銲接氣體的解離電壓值可視為氣體形成穩定電弧的難易度，亦即解離電壓值較低的氣體，將可容易形成穩定的電弧。如表 2-7 所示即為銲接氣體的解離電壓值(He>Ar≅H<sub>2</sub>≅N<sub>2</sub>>CO<sub>2</sub>>O<sub>2</sub>)。

表 2-7 銲接氣體的解離電壓值

Welding gas	Ar	He	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Ionization potential <sup>b</sup>	15.7	24.5	14.4	12.5	15.6	15.5

<sup>b</sup> Unit is electron volts

#### (4) 鐸接氣體之選擇

一般常用的鐸接氣體有氬氣、氦氣、二氧化碳、氧氣、氫氣及氮氣等六種氣體，其中氬氣、氦氣、二氧化碳及氮氣可單獨使用或與其他氣體相混合使用，至於氧氣與氫氣則需與氬氣相混合使用。在此僅將氬氣、氦氣、二氧化碳及氮氣等來做一簡單的介紹：

##### A. 氬氣(Argon)

- a. 屬於惰性氣體。
- b. 起弧較氦氣容易(因為氬氣的解離電壓值較氦氣低)。
- c. 適用於平鐸(因為氬氣比空氣重)。
- d. 適合薄板材料的鐸接(因為氬氣的熱傳導性較氦氣低)。
- e. 鐸池的流動性較差(與氦氣相比較)。
- f. 會形成較窄而深的鐸道截面形狀(與氦氣相比較)。

##### B. 氦氣(Helium)

- a. 屬於惰性氣體。
- b. 起弧較氬氣困難(因為氦氣的解離電壓值較氬氣高)。
- c. 適用於立鐸或仰鐸(因為氦氣比空氣輕)。
- d. 適合厚板材料的鐸接(因為氦氣的熱傳導性較氬氣高)。
- e. 鐸池的流動性較佳(與氬氣相比較)。
- f. 會形成較寬而淺的鐸道截面形狀(與氬氣相比較)。
- g. 氣體價格較昂貴。

##### C. 二氧化碳(Carbon dioxide)

- a. 屬於活性(氧化性)氣體。
- b. 電漿電弧的能量分佈。
- c. 一般用於低碳鋼材料的鐸接。
- d. 容易產生煙霧與飛濺物。
- e. 氣體價格較低廉。

##### D. 氮氣(Nitrogen)

- a. 屬於活性(高溫反應性)氣體。
- b. 電漿電弧的能量分佈亦較集中。
- c. 一般用於銅及銅合金材料的鐸接。

d.容易形成氣孔。

e.容易造成鎢電極的損耗與污染。

值得一提的是，由於氬氣電漿電弧呈現中心區域較高而外圍區域較低的能量分佈，因此會形成窄而深的漏斗狀銲道截面(如圖 2-12(a)所示)。至於氬氣電漿電弧的能量分佈由於較為均勻，因此會形成寬而淺的碗碟狀銲道截面(如圖 2-12(b)所示)。由此可得知若欲得到一寬且深的銲道截面形狀 則可採用氬-氬混合氣體(如圖 2-12(b)所示)。

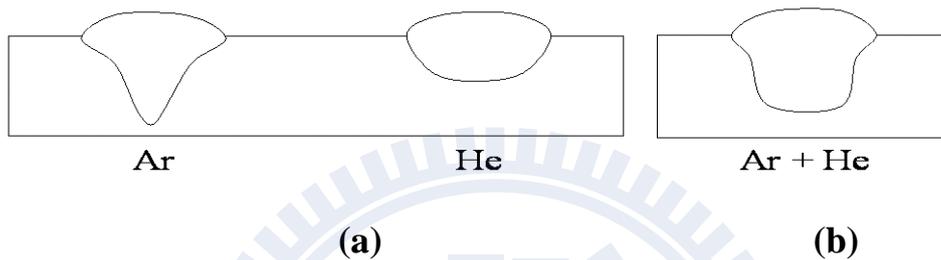


圖 2-12 銲接氣體對銲道截面形狀之影響(a)氬氣與氬氣對銲道截面之影響；(b)氬-氬混合氣對銲道截面之影響

## 2.4 助銲劑

助銲劑中的化學性質決定了助銲劑的冶金性能，助銲劑鹼度及活性是常用來表示助銲劑化學性質的指標。根據國際銲接學會 (International Institute of Welding, IIW)將助銲劑鹼度以鹼性指數(Basicity Index B.I.)作為說明，B.I.計算公式為：[20,22]

$$\text{B.I.} = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{BaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaF}_2 + \frac{1}{2}(\text{MnO} + \text{FeO})}{\text{SiO}_2 + \frac{1}{2}(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2)} \dots\dots\dots(2.1)$$

上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)鹼性鐸劑(B.I.>1.5)：

通常鹼性鐸劑之熔接金屬的含氧量較低，可以獲得較高的衝擊強度，但是鐸接性較差。

鐸劑中的 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，鐸渣愈偏酸性渣系。此時鐸劑的耐火性愈高。熔融速度可提高，鐸道比較寬及平整。

此外，相對化學活性係數(Af)可以把各種成份的助鐸劑分為高活性助鐸劑(  $Af \geq 0.6$  )，活性助鐸劑(  $Af=0.3 \sim 0.6$  )，低活性助鐸劑(  $Af=0.1 \sim 0.3$  )和惰性助鐸劑(  $Af \leq 0.1$  )。助鐸劑在鐸接過程中，是以液態熔渣形式覆蓋在鐸接金屬表面以保護鐸接熔池(Weld pool)不受大氣的污染，並可改善鐸接金屬的化學成份、機械性質及微觀組織等，因此茲將助鐸劑中成份之功用分述如下：[20,22-28]

- (1) 鐸劑中屬於鹼性鐸劑的成份有：CaO、MgO、FeO 及 MnO。而屬於酸性的則有 SiO<sub>2</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、TiO<sub>2</sub>，及 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。鹼性鐸劑具有去硫及磷的能力，因此衝擊韌性及延性較佳。酸性鐸渣則是在鐸接過程中容易控制及去除鐸渣容易。但鐸接金屬中含有較多的介在物(Inclusion)，因此韌性較低。
- (2) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 及 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 會降低電弧穩定性。
- (3) CaO 可改善電弧穩定性，並使鐸渣(Slag)之粘度下降。
- (4) 鐸劑中的 SiO<sub>2</sub> 增加，可調整粘度並增加電流能量(耐高電流)。SiO<sub>2</sub>，並可使鐸渣中的 MnO<sub>2</sub> 及 FeO 含量增加，鐸接金屬中的 Si 及 O 含量也會增加。
- (5) 增加 MnO 可增加電弧熔透性能(Penetration)以及減少對銹的敏感。MnO 增加同時可增加鐸接金屬中的 Mn 及 O 含量。
- (6) 鐸藥中加入 CaF<sub>2</sub> 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，鐸接時 CaF<sub>2</sub> 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。CaF<sub>2</sub> 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，為鐸劑中的 CaF<sub>2</sub> 可促進 CaO 的熔化，降低鹼性渣的粘度。
- (7) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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

升鐸道的熔透深度。

(8) 鐸劑中的  $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{MgCO}_3$  與  $\text{BaCO}_3$  經鐸接後起分解作用形成  $\text{CO}_2$ ，分解的  $\text{CO}_2$  氣體可與氫原子直接作用生成  $\text{OH}$ ，達到脫氧的作用。

(9)  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{AlF}_3$  與  $\text{SiO}_2$  可增加鐸道的熔透深度。

## 2.5 鐸道熔深變異之原因

對電弧鐸接而言，驅動鐸池(Weld pool)中熔融金屬流動之力量有四個：

- (1) 熱毛細作用所引起的表面張力。
- (2) 鐸池表面的電漿電弧。
- (3) 流過鐸池表面的電流形成之電磁力。
- (4) 因鐸池內流體密度差異所形成之浮力[15]。

### 2.5.1 表面張力

根據 Heiple 等人[29-30]的研究結果顯示，鐸道熔透深度與熔融液態金屬之流動狀態有著極密切的關係。其中熔融液態金屬的流動方向主要是受到鐸池表面張力梯度之影響。至於鐸池表面張力梯度效應主要則取決於鐸池表面張力之溫度係數( $d\gamma/dT$ )，其中鐸池表面張力之溫度係數的正負值係取決於有無添加活化元素。在純金屬或鐸池中不存在活化元素時，鐸池表面張力一般隨溫度的升高而減小(亦即鐸池表面張力之溫度係數為負值)，因此熔融液態金屬將會形成由鐸池中央向鐸池外緣流動的表面張力流(Outward flow)，進而形成寬而淺的鐸道截面形狀。然而，當鐸池中存在有活化元素時，鐸池表面張力則會隨溫度的升高而增加(亦即鐸池表面張力之溫度係數為正值)，因此熔融液態金屬將會形成由鐸池外緣向鐸池中央流動的表面張力流(Inward flow)，進而形成窄而深的鐸道截面形狀(如圖 2-13 b 所示)。

### 2.5.2 電弧效應

在電弧鐸接的過程中，因為微量元素的影響，常常可以發現電漿電弧柱會產生收縮現象，伴隨此一現象的發生可以發現鐸道的熔透深度增加。如圖 2-13a 所示，由於電漿電弧中心區域的溫度要遠高於分子解離溫度，因此微量元素在電漿電弧的高溫作用下，微量元素中的原子將會被電離成電子與正離子。而在相對溫度較低的電漿電弧柱外圍區域，微量

元素中被蒸發的物質仍會以分子或解離原子的形態存在，且解離原子將會大量地吸附電漿電弧柱周邊區域中的電子而形成負離子，使得電漿電弧柱周邊區域中作為主要導電物質的電子數急劇減少，亦即會降低電漿電弧柱之導電能力或縮小電漿電弧柱之導電面積，進而迫使電漿電弧柱產生收縮現象。至於此現象將可有效集中電弧熱量，進而使熔深增加。

### 2.5.3 電磁力

如圖 2-13c 所示，由於流過鐸池表面的電流形成之電磁力，引導中央之高溫熔融金屬向鐸池底部流動，可增加電弧鐸接之熔深，進而形成窄且深之鐸道。

### 2.5.4 浮力

鐸接時在電弧下方的熔融金屬溫度最高，而鐸池二側的溫度最低，由於物體熱漲冷縮之特性，使得二側的熔融金屬密度高於鐸池中央而下降至鐸池底部，迫使中央的金屬液體向二側移動而形成寬而淺之鐸道。如圖 2-13d 所示。

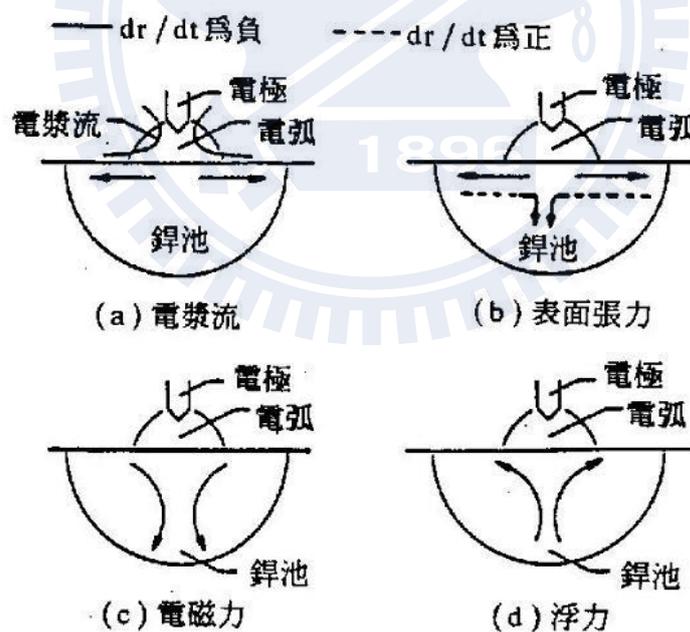


圖 2-13 熔深變異示意圖[28]

## 2.5.5 微量元素的影響

除上述四種作用力會影響鐸道熔深變異外，母材、鐸條及保護氣體中的微量合金元素對於鐸池內熔融金屬的流動，亦有重大的影響，以下將摘要介紹微量元素對鐸接性之影響[31,32]。

### (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，對鐸接性卻產生了一些的影響。其鐸道穿深/寬度(D/W ratio) 比值會隨著 S 含量的降低而減低，也就是鐸接性變差。這是由於 S 是表面活性元素，當其含量在 50 ppm 以下時，表面張力溫度係數是負的，因此會形成淺而寬的鐸道，也就是低的 D/W 比值。當 S 含量高於 50 ppm 時，表面張力溫度係數由負變正，形成深而窄之鐸道，也就是高的 D/W 比值。雖然增加 S 含量可增加穿深，但鐸道表面之波紋(Ripple)及鐸蝕(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 60 ppm 時，D/W 比值約 0.3 左右；當 O 含量提高到 100 ppm 時，D/W 比值大幅提高至 0.7。由於 O 也是表面活性元素，當其含量高於 60 ppm 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 40 ppm 時，D/W 比值高達 0.7 左右；當 Al 含量增加到 90 ppm 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，飄浮在鐸池表面的含 Al 介在物增多，造成電弧不穩定，使空氣被捲入鐸池中，容易導致鐸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

會降低鐳池中固溶 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<sub>2</sub> 或 SO<sub>2</sub> 氣體可提高穿深，但保護氣中的 O<sub>2</sub> 會污染電極而加速電極之消耗。另外，在 Ar 氣中加入約 5% H<sub>2</sub> 以提高鐳接熱量也可以增加穿深。



## 2.6 MIG-Flux製程探討

### 2.6.1 低碳鋼銲接製程對銲道之影響[33]

當銲接電壓 23.3 V、銲接電流 220 A、銲接速度 346 mm/min、對接間距 2mm 的銲接條件下，其銲接製程對銲道之影響：

#### (1)助銲劑對銲道形態之影響

裸線、單一助銲劑、混合成分助銲劑及包藥銲線對 SAE 1020 低碳鋼銲道截面型態之實驗結果，以  $\text{MoO}_3$  100%助銲劑、 $\text{MoO}_3(60\%)+\text{Fe}_2\text{O}_3(40\%)$ 助銲劑、 $\text{MoO}_3(60\%)+\text{SiO}_2(40\%)$ 助銲劑、 $\text{MoO}_3(80\%)+\text{MgCO}_3(20\%)$ 助銲劑及  $\text{Fe}_2\text{O}_3(40\%)+\text{SiO}_2(60\%)$ 助銲劑成效最佳，對低碳鋼銲道成形的作用效果最為顯著，可達到完全熔透的最佳銲道穿深效果。

#### (2)助銲劑對銲道深寬比之影響

圖 2-14 係裸線、單一助銲劑、混合成分助銲劑及包藥銲線對銲道深寬比之影響，圖中顯示，對深寬比影響最大為  $\text{MoO}_3(60\%)+\text{Fe}_2\text{O}_3(40\%)$ ，其比值可達到 0.53。Without flux（沒有添加任何助銲劑時）之深寬比為 0.31，包藥銲線之深寬比為 0.23 為最小者。

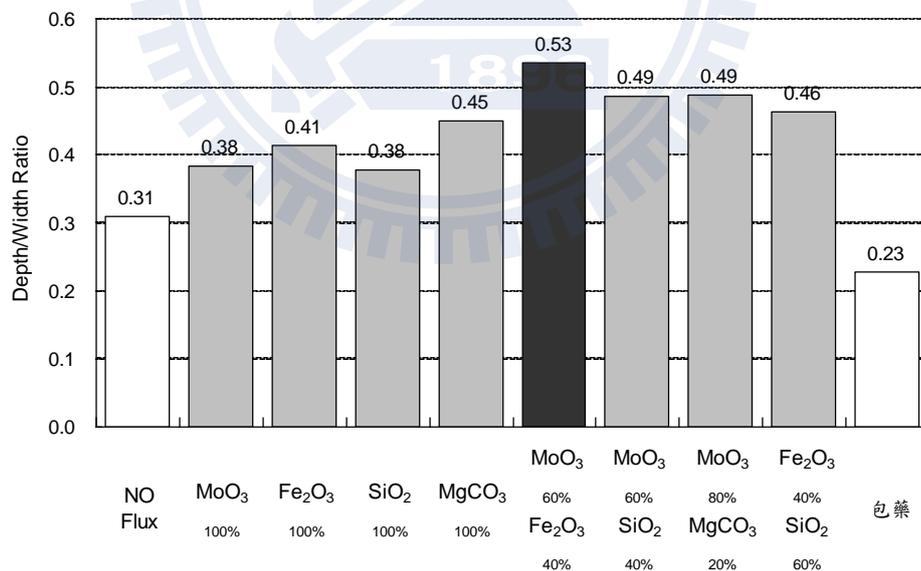


圖 2-14 各種助銲劑對銲道深寬比之影響長條圖[33]

### (3)助鉲劑對鉲道深度之影響

圖 2-15 所示為裸線、單一助鉲劑、混合成分助鉲劑及包藥鉲線對鉲道熔透深度之影響，由圖中得知，以  $\text{MoO}_3(60\%)+\text{Fe}_2\text{O}_3(40\%)$  之混合助鉲劑效果為最佳，鉲道深度為 4.63 mm。Without flux (沒有添加任何助鉲劑時)鉲道深度為 2.79 mm，包藥鉲線鉲道深度最差為 1.99 mm。

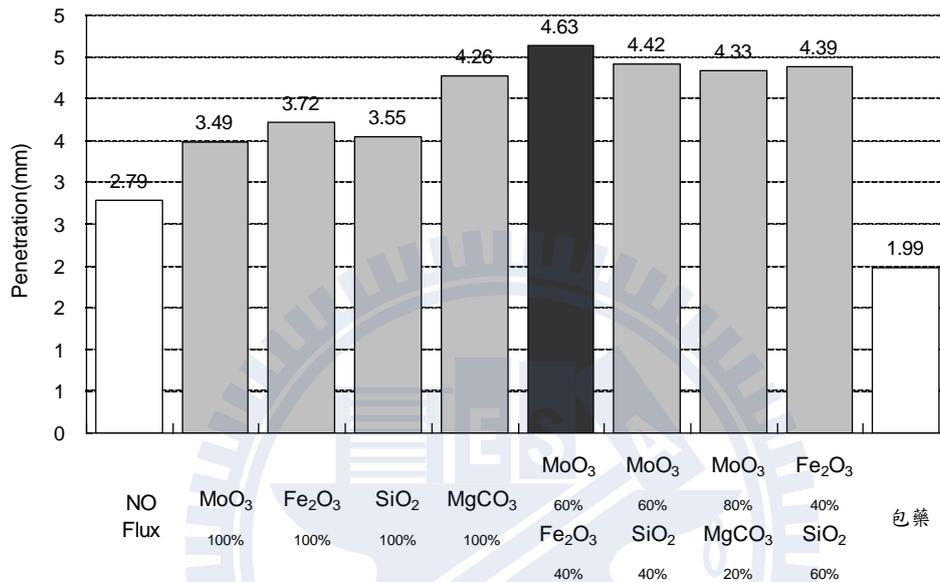


圖 2-15 各種助鉲劑對鉲道熔透深度影響長條圖[33]

### (4)助鉲劑對鉲道微硬度之影響

在施鉲的過程中，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鉲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 為裸線、單一助鉲劑、混合成分助鉲劑及包藥鉲線對鉲道微硬度之影響，從圖中可知以  $\text{MgCO}_3$  對微硬度值之影響最高約 274.8 Hv，另外  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  最差為 200.6 Hv，Without flux (沒有添加任何助鉲劑時)微硬度值為 228.3 Hv，包藥鉲線為 243.7 Hv。

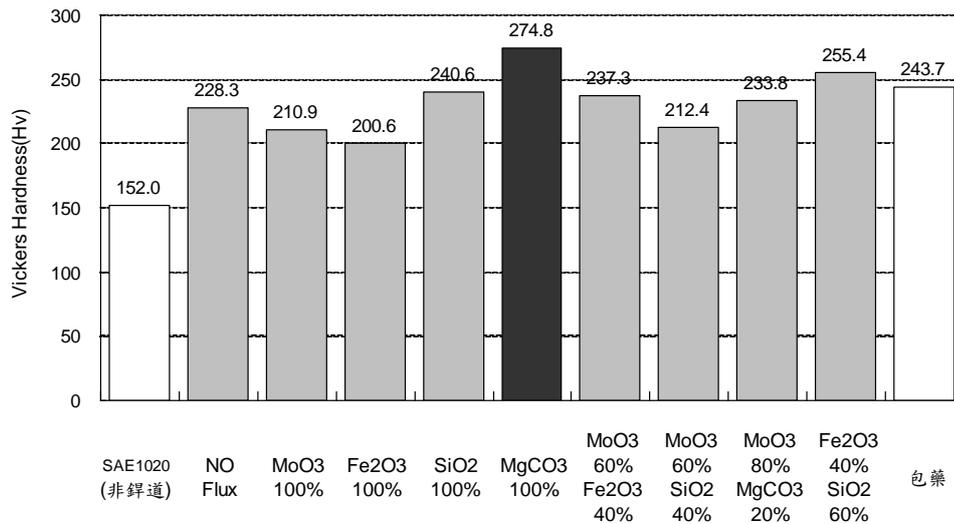


圖 2-16 各種助鐸劑對鐸道微硬度之影響長條圖[33]

### 2.6.2 不銹鋼鐸接製程對鐸道之影響[34]

當鐸接電壓 18.9 V、鐸接電流 220 A、鐸接速度 454 mm/min、對接間距 1mm 的鐸接條件下，其鐸接製程對鐸道之影響：

#### (1) 活性助鐸劑對鐸道深寬比之影響

以深度來說，由表2-8中可得知添加活性助鐸劑所得到的深度比沒有添加活性助鐸劑要深的鐸藥有MgO、MnO<sub>2</sub>、CaF<sub>2</sub>、CaCO<sub>3</sub>、CaO、ZnO。其中效果最好的鐸藥是MgO，有些鐸藥所得到的深度比沒有添加活性助鐸劑要差的有Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、NaF、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>及包藥鐸線，其中以包藥鐸線的效果最差，其熔透深度僅有GM308鐸線不添加任何助鐸劑時的50%。以寬度來說越窄越好，相對地熱影響區愈小，較不會破壞材料機械性質，由表2-8得知添加活性助鐸劑所得到的寬度比沒有添加活性助鐸劑要窄的鐸藥有MgO、MnO<sub>2</sub>、CaF<sub>2</sub>、CaCO<sub>3</sub>、CaO、ZnO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、NaF、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>及包藥鐸線。其中效果最好的鐸藥是MnO<sub>2</sub>，鐸道寬度較不加鐸藥時約縮減40%。只有SiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>所得到的寬度是比沒有添加活性助鐸劑要寬的。以鐸道深寬比來說越高越好。所以由表2-8得知添加活性助鐸劑得到的深寬比比沒有添加活性助鐸劑要高的鐸藥有MgO、MnO<sub>2</sub>、CaF<sub>2</sub>、CaCO<sub>3</sub>、CaO、ZnO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。其中效果最好的鐸藥是MnO<sub>2</sub>，其鐸道深寬比值為1.04。

表2-8 活性助銲劑與銲道深寬比之關係[34]

銲藥種類	銲道熔透深度	銲道寬度	銲道深寬比	效果
MnO <sub>2</sub>	5.35	5.12	1.04	193%
CaF <sub>2</sub>	5.27	5.38	0.98	181%
CaCO <sub>3</sub>	5.28	6.22	0.85	157%
MgO	5.72	7.56	0.76	140%
CaO	4.92	6.59	0.75	138%
ZnO	4.73	7.78	0.61	112%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.46	7.44	0.60	111%
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	4.37	8.00	0.55	101%
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.99	7.30	0.55	101%
Without flux	4.58	8.47	0.54	100%
NaF	3.89	7.94	0.49	91%
TiO <sub>2</sub>	3.94	9.31	0.42	78%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.26	8.43	0.39	72%
SiO <sub>2</sub>	3.82	10.08	0.38	70%
Flux core	2.28	8.44	0.27	50%

## (2) 活性助銲劑添加對銲道形態之影響

單一成分之活性助銲劑對不銹鋼銲道形態之實驗結果。在同一銲接製程參數條件下，MgO、MnO<sub>2</sub>、CaF<sub>2</sub>、CaCO<sub>3</sub>、CaO、ZnO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等活性助銲劑有助於提升銲道的深寬比，可以得到窄而深的銲道截面形狀。其中又以MnO<sub>2</sub>活性助銲劑的添加對不銹鋼銲道成形的作用效果最為顯著(可達到完全熔透的最佳銲道穿深效果)。但若添加K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>活性助銲劑效果則不明顯。反之，若添加了NaF、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>與及Flux core 則將會使銲道的深寬比下降，其中以 Flux core 的衰減最為明顯，僅有原有之 50%。值得一提的是，添加CaF<sub>2</sub>之助銲劑，雖可提高熔透深度，但於銲道內卻產生嚴重的氣孔現象，而且銲道產生些微的銲蝕(Undercut)情況，因此CaF<sub>2</sub>並不是一個最佳的助銲劑。

### (3) 活性助銲劑對銲道之外觀及熔融面積之影響

單一成分之活性助銲劑對不銹鋼銲道外觀之影響。塗敷 $\text{MnO}_2$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{CaCO}_3$ 與 $\text{K}_2\text{CO}_3$ 活性助銲劑會在銲道附近將會產生比較多的飛濺物(Spatter)。塗敷 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 與 $\text{MgO}$ 活性助銲劑則會在銲道附近雖會產生少許的飛濺物，但可得到較平整的銲道外觀。由此實驗結果可得知， $\text{SiO}_2$ 與 $\text{MgO}$ 活性助銲劑的添加可得到較佳的不銹鋼MIG銲道外觀。

銲道熔融面積與熱輸入量有明顯之關係，熱輸入量愈高，銲道熔融面積隨之上升；在MIG-Flux 銲接中，添加活性助銲劑對於熔融面積雖然有所提升，但以銲道之深寬比進行交叉分析，發現熔融面積與銲道深寬比並無一定之關係存在，亦即表示輸入熱量的提升並無法完全反應至銲道的深寬比上，仍須視銲池內之浮力、電磁力及微量合金…等因素之作用而定。

### (4) 活性助銲劑對銲道微硬度之影響

添加活性助銲劑與無添加助銲劑之銲道微硬度量測結果（如圖2-17所示）。除 $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{K}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{NaF}$ 對於銲道的微硬度值有明顯之提升外，其餘之活性助銲劑對微硬度值的改變並不明顯。

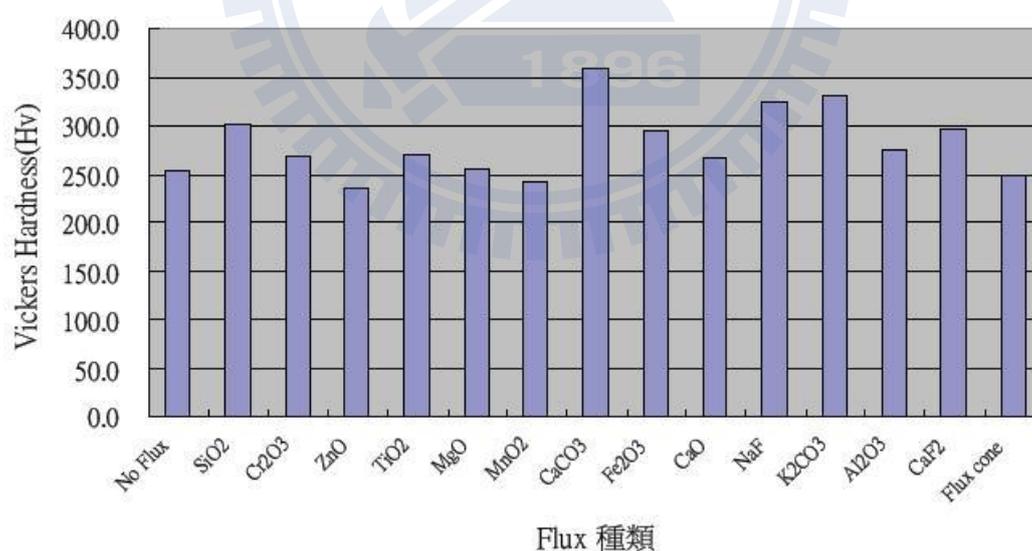


圖 2-17 活性助銲劑與銲道微硬度之關係[34]

## 2.7 田口方法之應用

### 2.7.1 田口方法之沿革

田口方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]。

### 2.7.2 田口方法的基本原理

田口方法之基本原理，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。

### 2.7.3 直交表之定義、目的及型態

在田口方法中，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  $L_a(b^c)$ ，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：

- A. 研究可控因子效果。
- B. 研究雜訊因子效果。
- C. 評估 S/N 比。
- D. 針對特殊應用、決定最佳的品質特性。

(3)型態：

- A. 兩水準系列：例如  $L_4(2^3)$ 、 $L_8(2^7)$ 、 $L_{16}(2^{15})$ 。
- B. 三水準系列：例如  $L_9(3^4)$ 、 $L_{27}(3^{13})$ 。
- C. 主效果型：例如  $L_{12}(2^{11})$ 。
- D. 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。

#### 2.7.4 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：

$$\eta = 10 \cdot \text{Log}_{10} [\mu^2 / \sigma^2] \dots\dots\dots (2.2)$$

其中，  $\mu$ ：平均值  $\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \dots\dots\dots (2.2.1)$

$\sigma^2$ ：變異數  $\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \mu)^2 \dots\dots\dots (2.2.2)$

(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：

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

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

(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 $\infty$ 。

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：

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

$$\eta = -10 \cdot \text{Log}_{10} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \dots \dots \dots (2.4)$$

### 2.7.5 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  $\eta$  值相當於所觀測到的信號。

(2) $\eta$  值的平方和相當於信號的強度。

(3) $\eta$  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。

### 2.7.6 田口方法之步驟

Phadke[36]認為田口方法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方法的最後一個步驟，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。

# 第三章 實驗方法與步驟

## 3.1 實驗流程

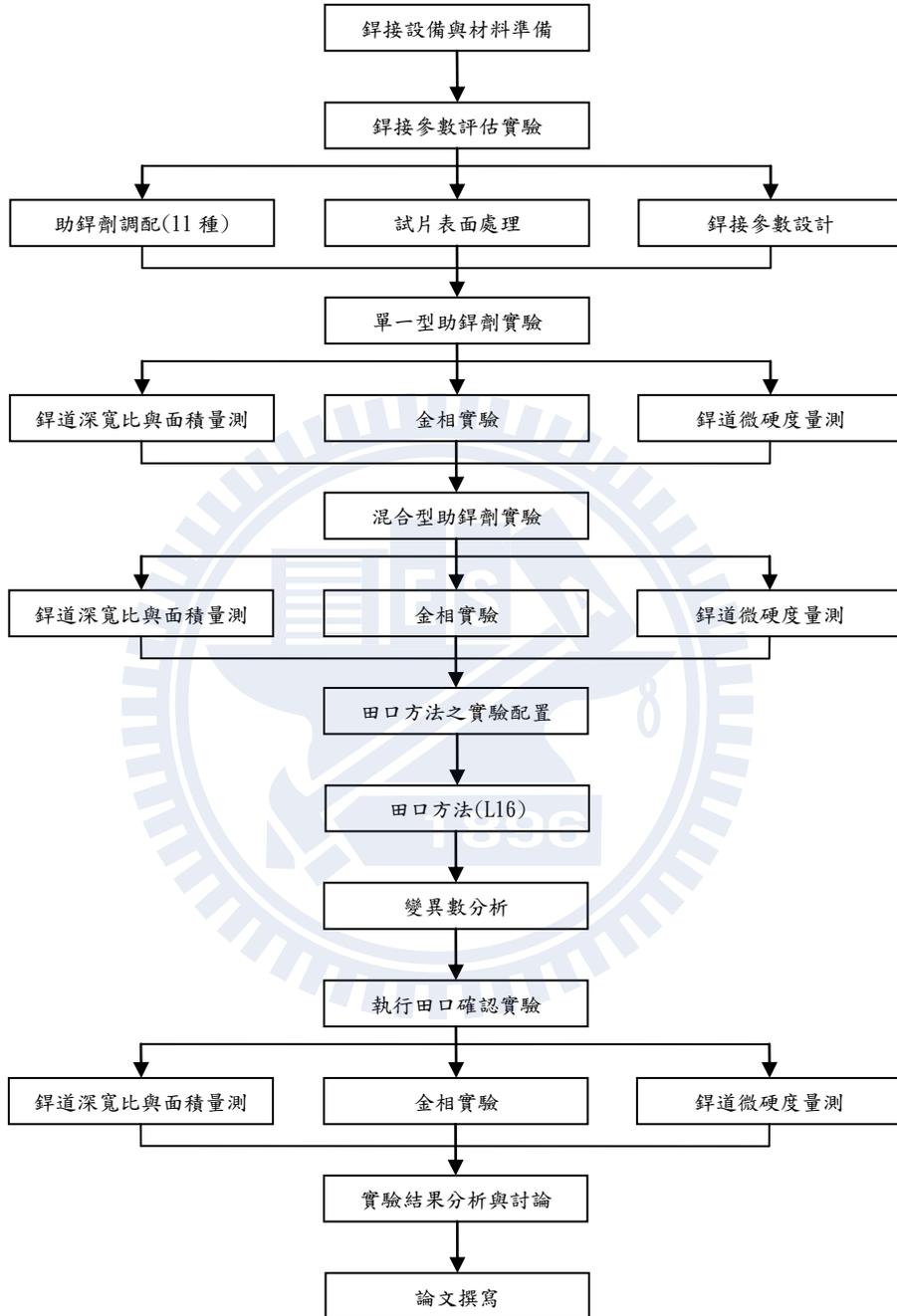


圖 3-1 實驗流程

### 3.2 銲接試片之準備

銲接方式採用對接，兩種銲接試片分別為 SAE 1020 低碳鋼及 AISI 304 沃斯田鐵型不銹鋼，試片尺寸皆為 100 mm (L) x 50 mm (W) x 5 mm (T)。先以貼附透氣膠帶圍出 100 mm x 20 mm 的面積，再將助銲劑粉末塗敷於銲道表面，以利 MIG-Flux 銲接實驗。

### 3.3 助銲劑調配

本研究參考文獻資料[33-34,38]，選取影響深寬比較大之助銲劑，用於異種材料對接實驗，助銲劑的種類分別為  $MnO_2$ 、 $MgCO_3$ 、 $Cr_2O_3$ 、 $MoS_2$ 、 $NiO$ 、 $MoO_3$ 、 $MgO$ 、 $Fe_2O_3$ 、 $ZnO$ 、 $SiO_2$  及  $TiO_2$ 。11 種所用之助銲劑採用日本試藥工業株式會社所生產，粉末粒度為 #400 號。調配方式主要將單一或兩種不同助銲劑粉末加入甲醇溶劑混合，並利用鉢及杵研磨均勻後（如圖 3-2 示），使之混合成泥漿狀，再利用扁平毛刷將泥漿狀助銲劑均勻塗敷於助銲劑塗佈區（如圖 3-3 示），塗敷時僅需塗 2/3 長度即可，剩於 1/3 可用於實驗對照，待泥漿狀之單一或混合助銲劑中溶劑揮發後再進行銲接實驗。



圖 3-2 助銲劑調配

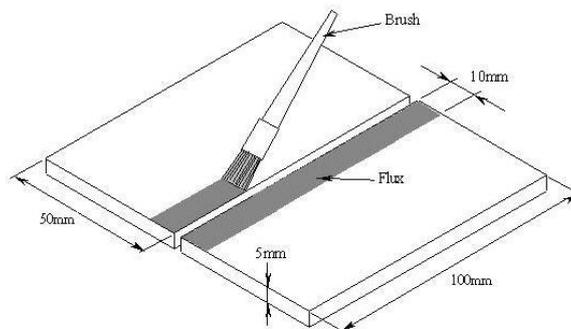


圖 3-3 助銲劑塗敷

### 3.4 銲接設備

本實驗係採用惰性氣體金屬極電弧銲接法(GMAW)，所使用之機型為美國 HOBART MEGA-PULSE MPI-350 型銲接機，搭配 HOBART 2450 型自動送線機，其外觀照片如圖 3-4 所示。圖 3-5 則為 MIG 銲槍外觀與所使用銲接夾具之照片。



圖 3-4 HOBART MEGA-PULSE MPI-350 MIG 銲接機



圖 3-5 銲槍、台車及夾具等外觀

### 3.5 MIG 用鐸線

本研究所使用的鐸線為裸線，由中鋼鐸材公司所生產之 GM308 型不銹鋼鐸線，相當於 AWS ER308，其參考成分如表 3-1 所示。

表 3-1 GM308 化學成份 (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0.04	0.34	1.92	0.019	0.004	20.1	10.3

### 3.6 鐸件表面觀察

鐸接完成後，先以數位相機拍攝鐸道表面、底面，再利用加工機具切除鐸道兩側及頭尾，並於固定位置取樣，以利金相實驗分析。根據拍攝的鐸道外觀照片，紀錄鐸道表面狀況及分析鐸道外觀平整性與飛濺物型態分佈情形。

### 3.7 金相試驗

鐸道兩側切除後，取垂直鐸道方向的切面作金相試驗之試片；每個鐸件於 With Flux 及 Without Flux 區域各取試片做分析，須注意的是，切割時不得距頭尾兩端過近，避免影響實驗分析。因所取試片含 SAE 1020 低碳鋼與 AISI 304 不銹鋼兩種不同材料，於後續金相實驗過程需使用腐蝕液，故先將兩種材料之處理方式分述於下，以利觀察鐸道型態：

#### (1) AISI 304 沃斯田鐵型不銹鋼

將取得之試片，欲觀察之鐸道斷面須先磨平，再進行熱鑲埋，鑲埋後的試片經碳化矽砂紙從低號數砂紙研磨至 2000 號，之後再用氧化鋁粉拋光至  $0.1\mu\text{m}$ ，以清水與酒精清洗乾淨並吹乾，最後再將金相試片進行腐蝕。AISI 304 沃斯田鐵型不銹鋼腐蝕是採用 Marble's 腐蝕液 ( $10\text{g CuSO}_4+50\text{ml HCl}+50\text{ml H}_2\text{O}$ ) 進行侵蝕，腐蝕時間約 4~5 秒。

#### (2) SAE 1020 低碳鋼

同樣試片經熱鑲埋後用碳化矽砂紙研磨至 2000 號，再用氧化鋁粉拋光至  $0.05\mu\text{m}$ ，以清水與酒精清洗乾淨並吹乾，最後再將金相試片進行腐蝕。SAE 1020 低碳鋼腐蝕採用 Nital 腐蝕液 (硝酸 5%+酒精 95%) 進行腐蝕，腐蝕時間約 4~5 秒。

### 3.8 鐳道熔透深度與寬度量測

為觀察製程參數對 SAE 1020 低碳鋼與 AISI 304 不銹鋼的鐳接情形，經腐蝕後的試片利用實體顯微鏡量測鐳道之穿深及寬度，並計算穿深/寬度比值 (D/W ratio)，以此作為評價鐳件優劣的指標。其中鐳道深度定義為鐳件表面往下量測之數據。如圖 3-6 為鐳道型態量測之示意圖。

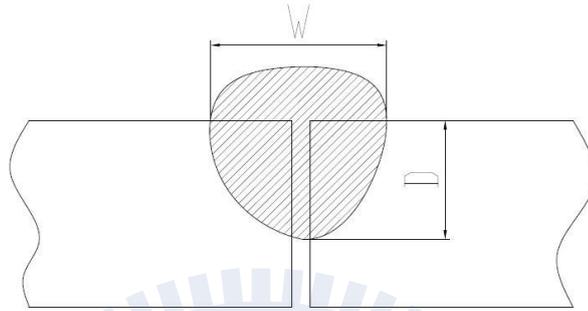


圖 3-6 鐳道幾何型態量測示意

### 3.9 肥粒相量測

為研究鐳道肥粒相含量的影響，在鐳後量測其鐳道殘留肥粒相含量，量測設備採用 Ferritscope M10B-FE 型肥粒相測定儀（測頭直徑為 1.2mm、平均誤差量為 0.04FN），如圖 3-7 所示。此儀器量測的基本原理，係利用肥粒相組織具有鐵磁性而沃斯田相組織不具有鐵磁性的物理特性，藉由儀器磁力感應的程度來量測其肥粒相含量的多寡。其中量測步驟為先將試片欲量測面用砂紙清除氧化物或油污，並用丙酮清潔乾淨，然後使用標準試片來進行校正工作，最後才進行實驗試片的量測工作。



圖 3-7 Ferritscope M10B-FE 型肥粒相測定儀

### 3.10 微硬度量測

本研究測量銲道硬度時，係採用 Matsuzawa MHT-1 微硬度測定機(如圖 3-8 所示)，試驗荷重為 200 公克，荷重加壓時間為 15 秒鐘，而量測位置則為距銲件表面下 1mm 處，且每點間隔 0.25mm 測量一硬度，最後再將量測之值記錄並作各部位之硬度分佈線。



圖 3-8 Matsuzawa MHT-1 微硬度測定機

### 3.11 田口方法的實驗配置

本實驗選擇四個控制因子，分別為銲接電壓、氬氣流量、銲接速度及助銲劑粉末比例，作為 MIG-Flux 製程之參數研究；每個因子選取 4 個水準，各因子水準值如表 3-2 所示，其中 D 因子為  $\text{MoS}_2$  及  $\text{MoO}_3$  兩種不同比例粉末之混合助銲劑。

實驗過程中選擇銲接試片表面之潔淨度作為雜訊因子，並以丙酮 (Acetone) 清除表面油污或不潔物之試片為 N1 試片，而 N2 試片則不作清潔之動作 (清潔程度較 N1 差)，以利與 N1 試片對照及實驗分析。

表 3-4 為 MIG-Flux 製程參數配置表，其中 D 因子為  $\text{MoS}_2$  及  $\text{MoO}_3$  兩種不同比例粉末之混合助銲劑，搭配 3 種不同因子，共有 16 次實驗條件作為後續田口方法分析之研究。值得注意的是，No.4 及 No.16 分別代表的意義是熱輸入量最小及熱輸入量最大。

表 3-2 控制因子及其水準值

因子 水準	A	B	C	D
	銲接電壓 V	氬氣流量 ℓ/min	銲接速度 mm/min	混合型助銲劑 粉末比例
Level 1	21.4	8	285	20% MoS <sub>2</sub> +80% MoO <sub>3</sub>
Level 2	22.3	12	346	40% MoS <sub>2</sub> +60% MoO <sub>3</sub>
Level 3	23.3	16	403	60% MoS <sub>2</sub> +40% MoO <sub>3</sub>
Level 4	24.5	20	454	80% MoS <sub>2</sub> +20% MoO <sub>3</sub>

表 3-3 L<sub>16</sub>(4<sup>5</sup>)直交表的實驗配置

No.	控制因子 Control factor				雜音因子 Noise factor	
	A	B	C	D	N1	N2
					With cleaned	Without cleaned
1	1	1	1	1	量測值	量測值
2	1	2	2	2	量測值	量測值
3	1	3	3	3	量測值	量測值
4	1	4	4	4	量測值	量測值
5	2	1	2	3	量測值	量測值
6	2	2	1	4	量測值	量測值
7	2	3	4	1	量測值	量測值
8	2	4	3	2	量測值	量測值
9	3	1	3	4	量測值	量測值
10	3	2	4	3	量測值	量測值
11	3	3	1	2	量測值	量測值
12	3	4	2	1	量測值	量測值
13	4	1	4	2	量測值	量測值
14	4	2	3	1	量測值	量測值
15	4	3	2	4	量測值	量測值
16	4	4	1	3	量測值	量測值

表 3-4 MIG-Flux 製程參數配置表

因子	A	B	C	D
No.	銲接電壓 V	氬氣流量 ℓ/min	銲接速度 mm/min	混合型助銲劑 粉末比例
1	21.4	8	285	20% MoS <sub>2</sub> +80% MoO <sub>3</sub>
2	21.4	12	346	40% MoS <sub>2</sub> +60% MoO <sub>3</sub>
3	21.4	16	403	60% MoS <sub>2</sub> +40% MoO <sub>3</sub>
4	21.4	20	454	80% MoS <sub>2</sub> +20% MoO <sub>3</sub>
5	22.3	8	346	60% MoS <sub>2</sub> +40% MoO <sub>3</sub>
6	22.3	12	285	80% MoS <sub>2</sub> +20% MoO <sub>3</sub>
7	22.3	16	454	20% MoS <sub>2</sub> +80% MoO <sub>3</sub>
8	22.3	20	403	40% MoS <sub>2</sub> +60% MoO <sub>3</sub>
9	23.3	8	403	80% MoS <sub>2</sub> +20% MoO <sub>3</sub>
10	23.3	12	454	60% MoS <sub>2</sub> +40% MoO <sub>3</sub>
11	23.3	16	285	40% MoS <sub>2</sub> +60% MoO <sub>3</sub>
12	23.3	20	346	20% MoS <sub>2</sub> +80% MoO <sub>3</sub>
13	24.5	8	454	40% MoS <sub>2</sub> +60% MoO <sub>3</sub>
14	24.5	12	403	20% MoS <sub>2</sub> +80% MoO <sub>3</sub>
15	24.5	16	346	80% MoS <sub>2</sub> +20% MoO <sub>3</sub>
16	24.5	20	285	60% MoS <sub>2</sub> +40% MoO <sub>3</sub>

## 第四章 結果與討論

### 4.1 鐸接參數確認

關於鐸接之參數範圍區間，主要作法是參考相關研究[33-34,38]提供之最佳參數表。首先不要塗助鐸劑粉末及試六組不同的參數鐸接後，切成試片觀察其鐸道深寬比。然後經由確認鐸道表面狀況後，再進行單一型助鐸劑鐸接實驗，同時考慮鐸道的熔深及熔融面積因素做為混合助鐸劑之鐸接參數考量，最後以此參數為中間值來調配田口方法之控制因子及其水準值。其鐸接參數的選取步驟如下：

- (1) 參考相關研究[33-34,38]之鐸接最佳參數。
- (2) 選取六組鐸接參數值並進行初次 MIG 鐸接實驗。
- (3) 觀察鐸道表面狀況及考慮熔深及熔融面積因素並選取最佳參數。
- (4) 單一型助鐸劑鐸接實驗。
- (5) 觀察鐸道表面狀況及考慮熔深及熔融面積因素並選取最佳參數。
- (6) 混合型助鐸劑鐸接實驗。
- (7) 將所得之參數為中間值來調配控制因子之水準值。
- (8) 決定控制因子及其水準值(4 個控制因子，4 個水準)。
- (9) 選定適合之  $L_{16}(4^5)$  直交表。
- (10) 實際鐸接實驗。

### 4.2 無助鐸劑對鐸道型態之探討

#### 4.2.1 無助鐸劑對鐸道外觀之影響

如圖 4-1 所示為 MIG-Flux 鐸接製程對鐸道外觀之實驗結果。在沒有塗敷任何助鐸劑時，其在鐸道附近皆會產生少許的飛濺物；改變鐸接速度及鐸接電壓時，其鐸道外觀會有寬度變化及鐸道波紋清晰度差異，若參數設定在鐸接速度 403 mm/min 及鐸接電壓 17.7 V 組合下，其鐸道寬度較窄，且鐸道的波紋清晰度較明顯；至於參數設定在鐸接速度 500 mm/min 及鐸接電壓 20.2 V 組合下，因鐸接參數控制不當，造成鐸接過程出現空洞之不良缺陷，因此適當的鐸接參數組合對鐸道表面影響甚鉅。由此實驗結果可知，當採用鐸接速度 346 mm/min 及鐸接電壓 23.3 V 組合時，其將可得到較佳的鐸道外觀品質。

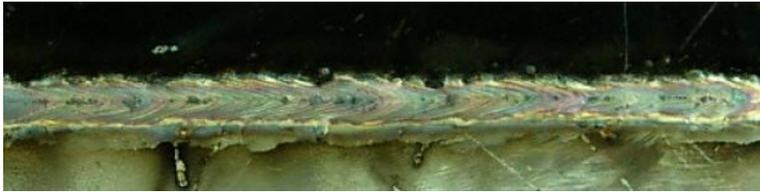
參數條件	銲道外觀	說明
銲接速度： 346mm/min 銲接電壓： 23.3V 助銲劑：無		銲道寬度： 普通 銲道外觀： 紋路普通 噴渣：微量
銲接速度： 454mm/min 銲接電壓： 18.9V 助銲劑：無		銲道寬度： 稍窄 銲道外觀： 紋路明顯 噴渣：少量
銲接速度： 500mm/min 銲接電壓： 20.2V 助銲劑：無		銲道寬度： 不均勻 銲道外觀： 紋路普通 噴渣：普通
銲接速度： 403mm/min 銲接電壓： 17.7V 助銲劑：無		銲道寬度： 較窄 銲道外觀： 紋路明顯 噴渣：少量
銲接速度： 285mm/min 銲接電壓： 22.3V 助銲劑：無		銲道寬度： 稍寬 銲道外觀： 紋路普通 噴渣：微量
銲接速度： 403mm/min 銲接電壓： 24.5V 助銲劑：無		銲道寬度： 稍寬 銲道外觀： 紋路普通 噴渣：微量

圖 4-1 無助銲劑對銲道外觀之影響

#### 4.2.2 無助銲劑對銲道深寬比、熔深與寬度之影響

在沒有塗敷任何助銲劑時，改變銲接速度及銲接電壓時，其銲道剖面量測數據情形，如表 4-1 所示，同時改變銲接電壓及銲接速度時，其銲道深寬比隨銲接電壓和銲接速度增加先增加後減少（如圖 4-2 與圖 4-5）；至於銲道熔深隨銲接電壓及銲接速度增加而呈下降趨勢（如圖 4-3 與圖 4-6）；此外，銲道寬度隨銲接電壓及銲接速度增加先減少後增加（如圖 4-4 與圖 4-7）。

表 4-1 無助銲劑對銲道型態之影響

	第一組	第二組	第三組	第四組	第五組	第六組
銲接電壓 V	17.7	18.9	20.2	22.3	23.3	24.5
銲接速度 mm/min	403	454	500	285	346	403
深寬比	0.55	0.62	0.46	0.31	0.49	0.35
銲道熔深 mm	3.03	2.87	2.52	2.86	3.04	2.68
銲道寬度 mm	5.52	4.60	5.54	9.13	6.21	7.73
熔融面積 mm <sup>2</sup>	18.64	15.11	17.36	34.37	28.86	27.92



圖 4-2 不同銲接速度及銲接電壓對銲道深寬比之關係圖

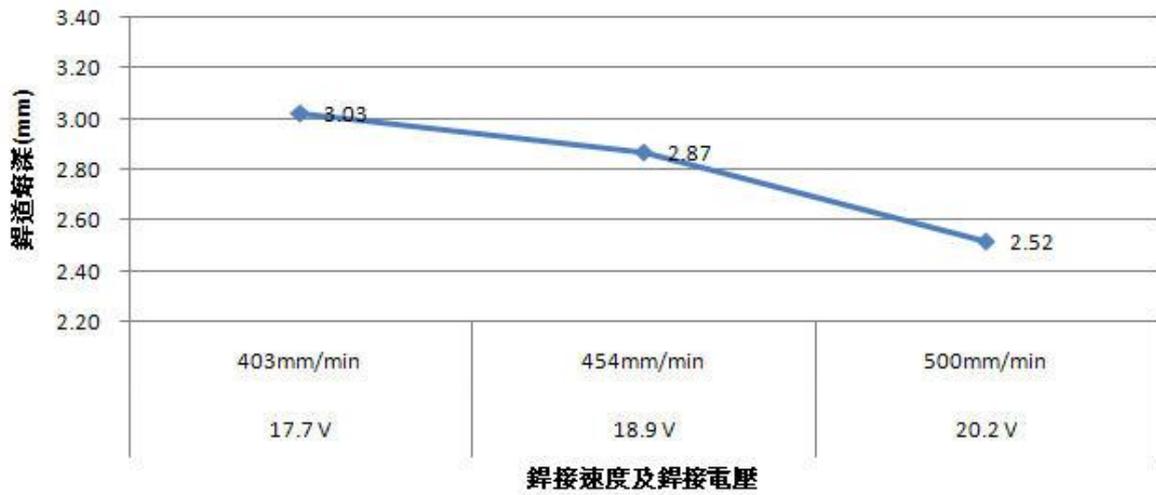


圖 4-3 不同銲接速度及銲接電壓對銲道熔深之關係圖

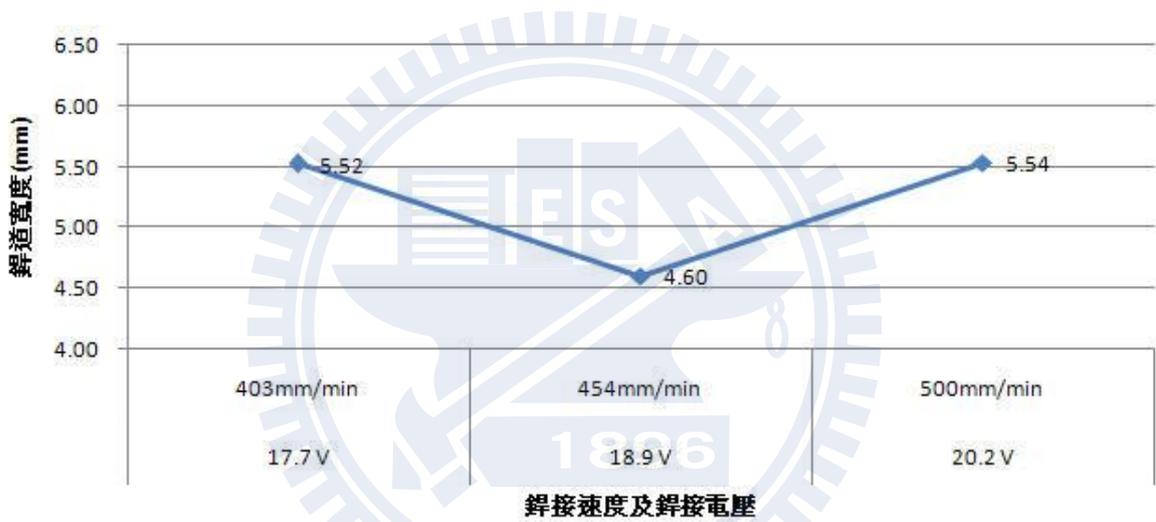


圖 4-4 不同銲接速度及銲接電壓對銲道寬度之關係圖

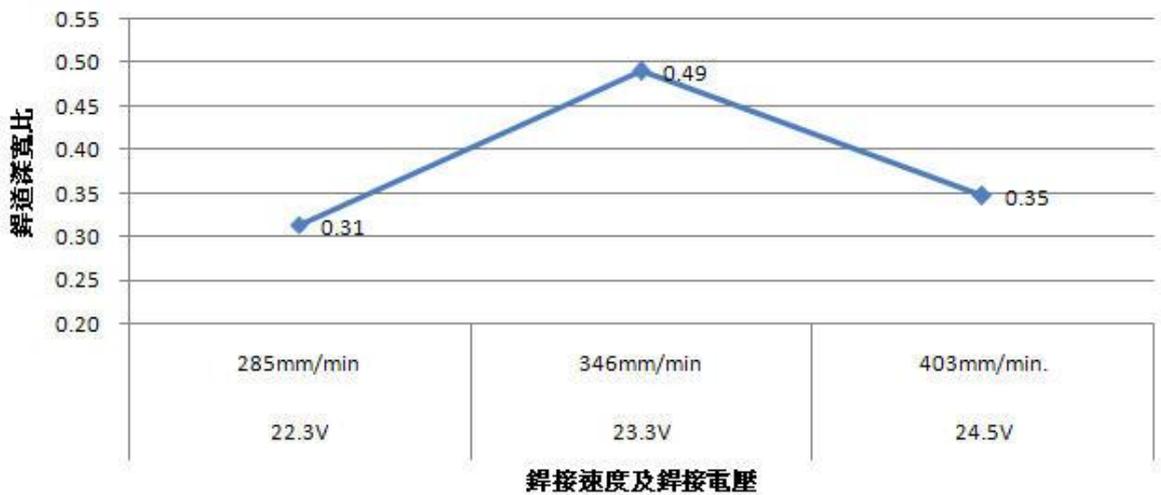


圖 4-5 不同銲接速度及銲接電壓對銲道深寬比之關係圖

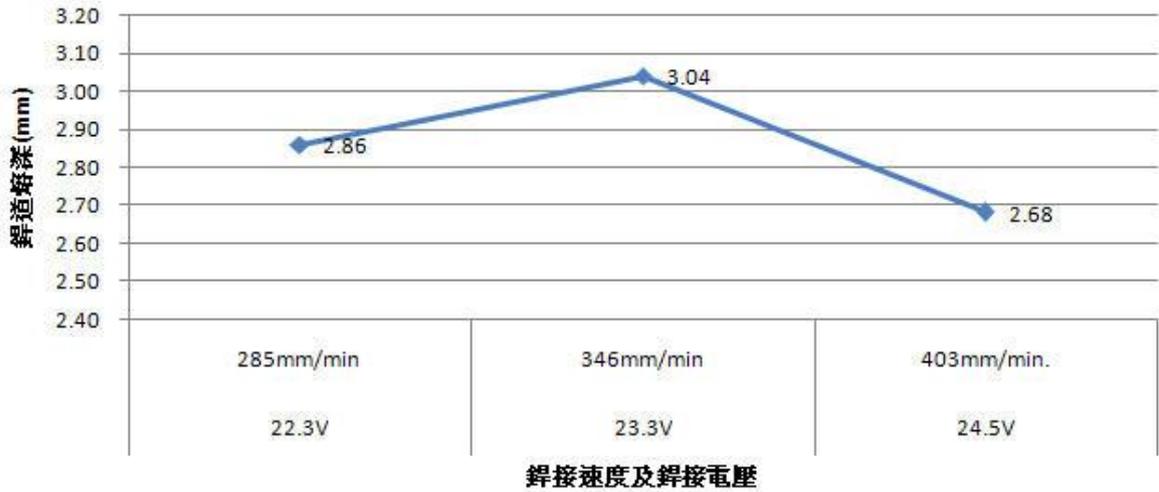


圖 4-6 不同銲接速度及銲接電壓對銲道熔深之關係圖

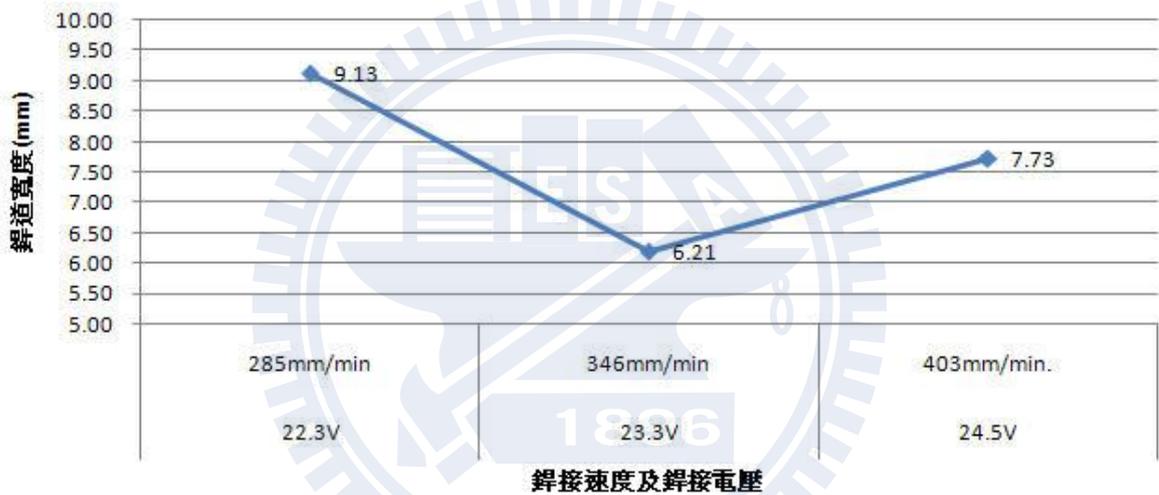


圖 4-7 不同銲接速度及銲接電壓對銲道寬度之關係圖

#### 4.2.3 無助銲劑對銲道剖面形狀與面積之影響

如圖 4-8 所示為 MIG 銲接製程對銲道截面形狀之實驗結果，結果顯示，在 23.3 V 配合 346 mm/min 的走速 MIG 銲接條件下，當沒有添加任何助銲劑時，其銲道深寬比及銲道熔深具有最大值。值得注意的是，因銲接前未施以假銲，造成銲接過程之銲件有高低差缺陷，如圖 4-8 中第三組所拍攝之銲道剖面圖。

如圖 4-9 與圖 4-10 所示為 MIG 銲接製程對銲道熔融面積之實驗結果，結果顯示在不同銲接速度及銲接電壓條件下，其銲道熔融面積隨著銲接電壓及銲接速度增加而呈下降趨勢。其中第五組（23.3 V 配合 346 mm/min 的走速）的熔融面積及熔深較其他組為佳。因此此參數列入單一

型及混合型助銲劑銲接實驗配置。

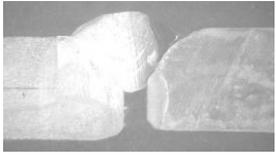
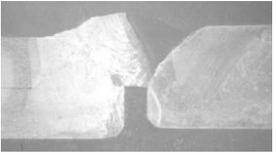
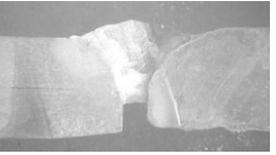
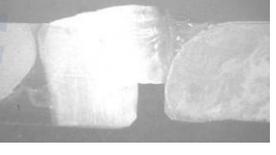
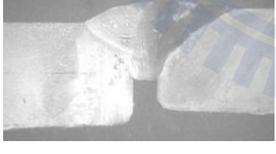
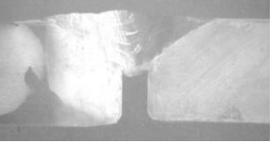
	A 點	B 點	C 點
第一組 17.7 V 403 mm/min			
第二組 18.9 V 454 mm/min			
第三組 20.2 V 500 mm/min			
第四組 22.3 V 285 mm/min			
第五組 23.3 V 346 mm/min			
第六組 24.5 V 403 mm/min			

圖 4-8 不同銲接電壓及銲接速度之銲道剖面圖

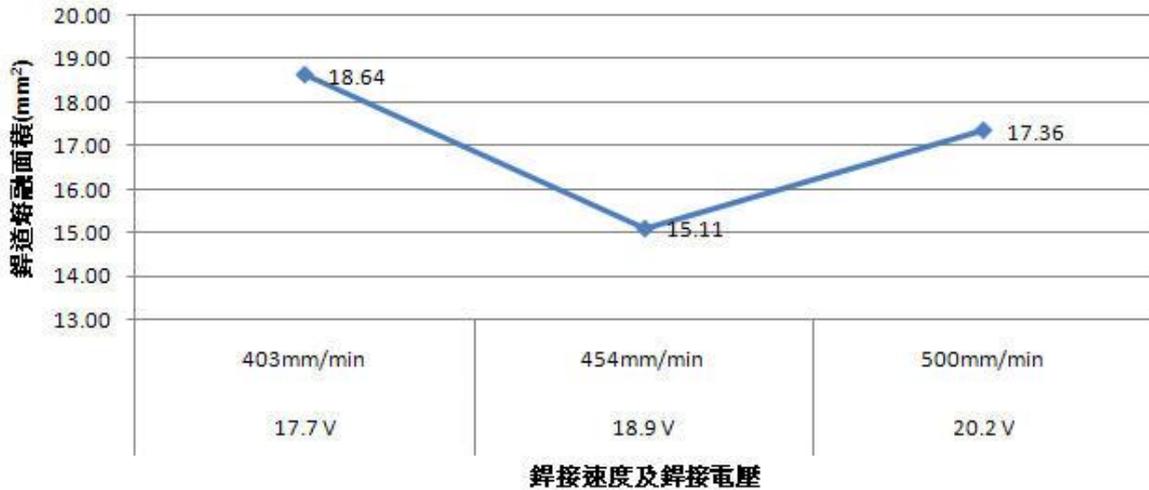


圖 4-9 不同銲接速度及銲接電壓對銲道熔融面積之關係圖

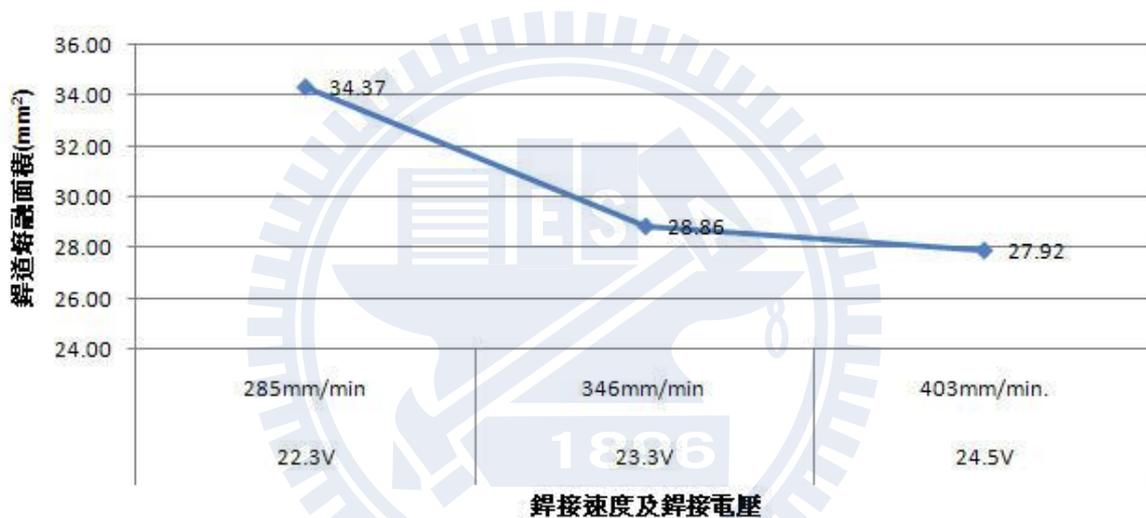


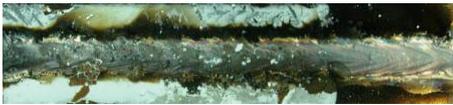
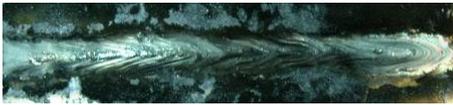
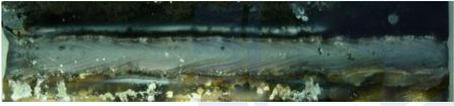
圖 4-10 不同銲接速度及銲接電壓對銲道熔融面積之關係圖

### 4.3 單一型助銲劑對銲道型態之探討

#### 4.3.1 單一型助銲劑對銲道外觀之影響

如圖 4-11 所示為 MIG 銲接製程對銲道外觀之實驗結果。塗敷  $\text{MnO}_2$ 、 $\text{MgCO}_3$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MoS}_2$ 、 $\text{NiO}$ 、 $\text{MoO}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZnO}$  單一型助銲劑結果，其在銲道附近皆會產生少許的飛濺物；塗敷  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$  單一型助銲劑結果，其在銲道附近會產生較多的飛濺物，且銲道寬度較寬；塗敷  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MoS}_2$ 、 $\text{NiO}$ 、 $\text{MoO}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$  單一型助銲劑結果，其銲道波紋清晰度明顯，尤其是添加  $\text{SiO}_2$  單一型助銲劑時，其銲道波紋清晰度特別明顯；塗敷  $\text{MgCO}_3$ 、 $\text{MgO}$  單一型助銲劑結果，其銲道波

紋清晰度較差；塗敷  $\text{MnO}_2$  單一型助鐸劑結果，其鐸道寬度形狀不均勻。

	
$\text{MnO}_2$	$\text{MgCO}_3$
	
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{MoS}_2$
	
$\text{NiO}$	$\text{MoO}_3$
	
$\text{MgO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
	
$\text{ZnO}$	$\text{SiO}_2$
	
$\text{TiO}_2$	

註：鐸槍移動方向為由右向左

圖 4-11 單一型助鐸劑之鐸道外觀圖

#### 4.3.2 單一型助鐸劑對鐸道深寬比、熔深與寬度之影響

如圖 4-12 所示為 MIG 鐸接製程對鐸道深寬比之實驗結果。結果顯示在 MIG 鐸接條件下(如表 4-2 所示)，當添加  $\text{MnO}_2$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MoS}_2$ 、 $\text{MoO}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$  等單一型助鐸劑時，均可提高鐸道深寬比。其中，以  $\text{MnO}_2$  單一助鐸劑的添加對鐸道深寬比最為顯著。鐸道深寬比愈高表示電弧熱源之能量密度愈集中。由此可知，添加氧化物助鐸劑於 MIG 鐸接製程，將可提升鐸接金屬熔融效率。

如圖 4-13 所示為 MIG 銲接製程對銲道熔深之實驗結果。結果顯示在 MIG 銲接條件下(如表 4-2 所示)，當添加  $\text{MnO}_2$ 、 $\text{MgCO}_3$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MoS}_2$ 、 $\text{NiO}$ 、 $\text{MoO}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$  等單一型助銲劑時，均可提高銲道熔深。其中，以  $\text{MoS}_2$  單一助銲劑的添加對銲道熔深最為顯著。

如圖 4-14 所示為 MIG 銲接製程對銲道寬度之實驗結果。結果顯示在 MIG 銲接條件下(如表 4-2 所示)，當添加  $\text{MgCO}_3$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MoS}_2$ 、 $\text{NiO}$ 、 $\text{MoO}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$  等單一型助銲劑時，均可提高銲道寬度。值得注意的是，若添加  $\text{MnO}_2$  單一助銲劑時，其銲道寬度反而可降低。本研究主要係以田口方法針對銲接製程進行最佳化實驗，而此部分之實驗結果，當添加  $\text{MnO}_2$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MoS}_2$ 、 $\text{MoO}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$  等單一型助銲劑時，均可提高銲道深寬比及熔深。因此混合型助銲劑對銲道型態之探討，是以  $\text{MnO}_2$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MoS}_2$ 、 $\text{MoO}_3$  四種助銲劑兩兩混合後，來評估其對銲道之影響。

表 4-2 異種材料 Butt joint 測試參數-11 種單一型助銲劑

銲接 電壓 (V)	銲接 電流 (A)	銲接 速度 (mm/min)	銲線伸出 罩杯長度 (mm)	氬氣 流量 ( $\ell/\text{min}$ )	送線 速度 (cm/min)	銲線 外徑 (mm)	對接 間距 (mm)
23.3	220	346	10	15	120	1.6	1.5

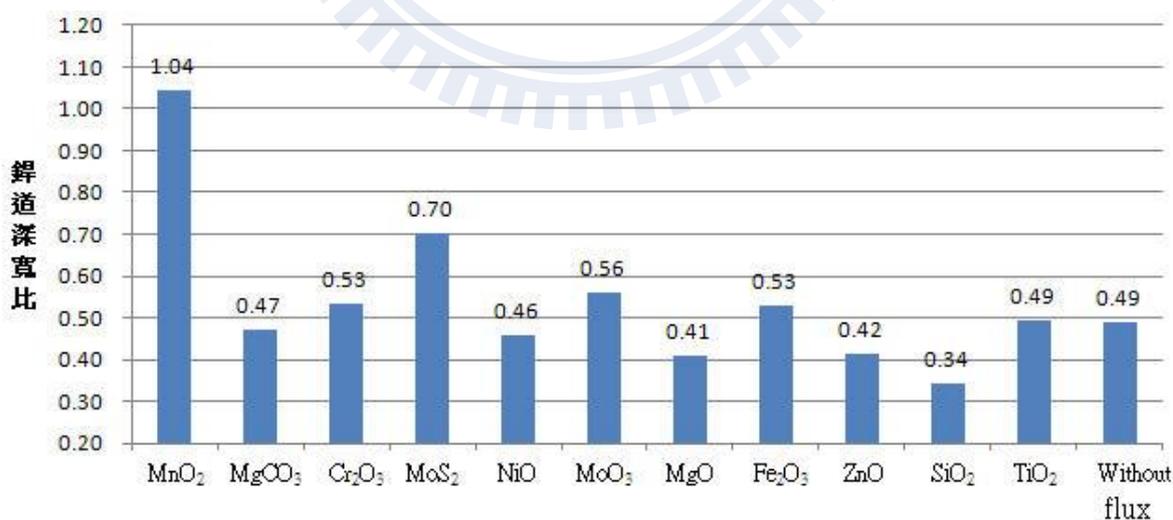


圖 4-12 單一型助銲劑對銲道深寬比之影響

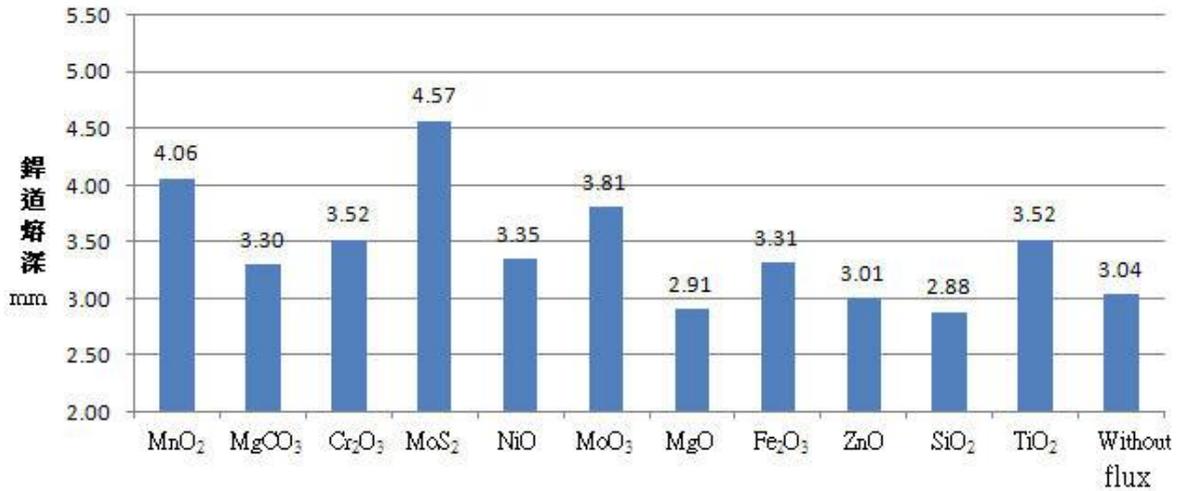


圖 4-13 單一型助銲劑對銲道熔深之影響

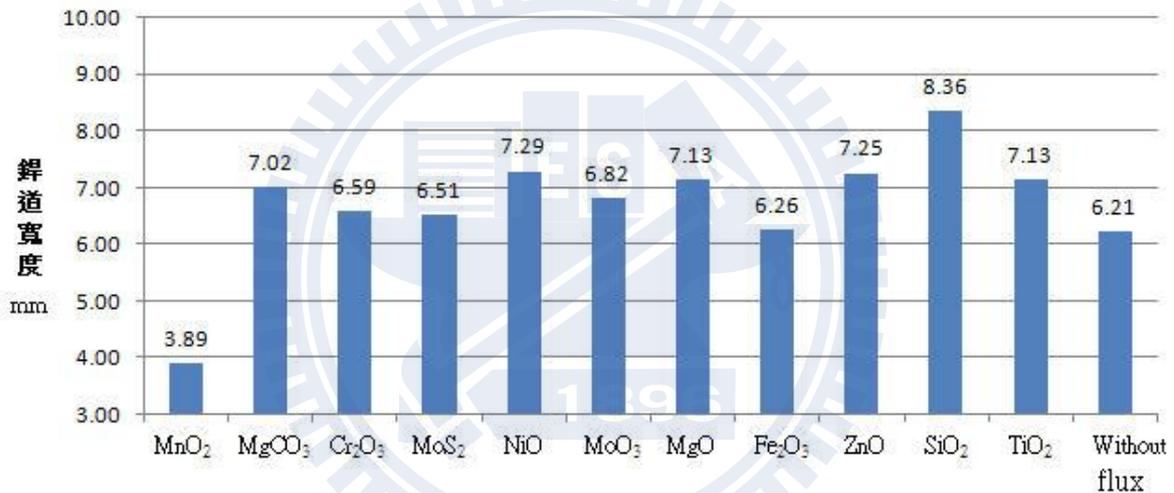


圖 4-14 單一型助銲劑對銲道寬度之影響

### 4.3.3 單一型助銲劑對銲道剖面形狀與面積之影響

如圖 4-15 所示為 MIG 銲接製程對銲道截面形狀之實驗結果，結果顯示在 MIG 銲接條件下（如表 4-2 所示），當添加 MnO<sub>2</sub>、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MoS<sub>2</sub>、MoO<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub> 等單一型助銲劑時，均可提高銲道熔深，且亦可得到窄而深的銲道截面。根據 Heiple 等人的研究結果顯示[29-30]，銲道熔融情況與液態金屬流動狀態有著極密切的關係，如圖 2-13 所示。

如圖 4-16 所示為 MIG 銲接製程對銲道熔融面積之實驗結果，結果顯示在 MIG 銲接條件下（如表 4-2 所示），當添加 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MoO<sub>3</sub>、ZnO、SiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub> 等單一型助銲劑時，均可提高銲道熔融面積。其中，以 TiO<sub>2</sub> 單一助銲劑的添加對銲道熔融面積最為顯著。

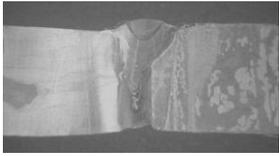
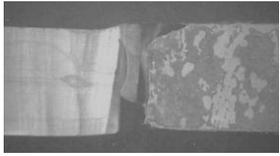
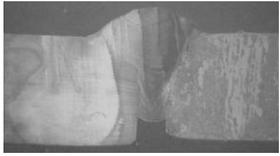
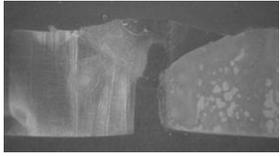
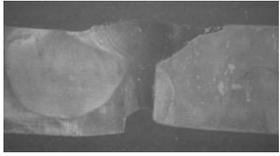
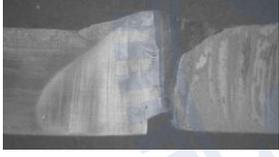
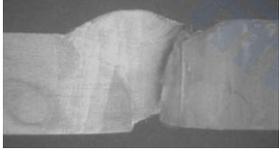
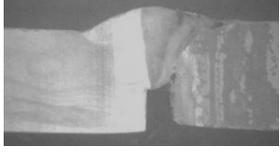
	A 點	B 點	C 點
MnO <sub>2</sub>			
MgCO <sub>3</sub>			
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
MoS <sub>2</sub>			
NiO			
MoO <sub>3</sub>			
MgO			
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			

圖 4-15 單一型助鐸劑之鐸道剖面

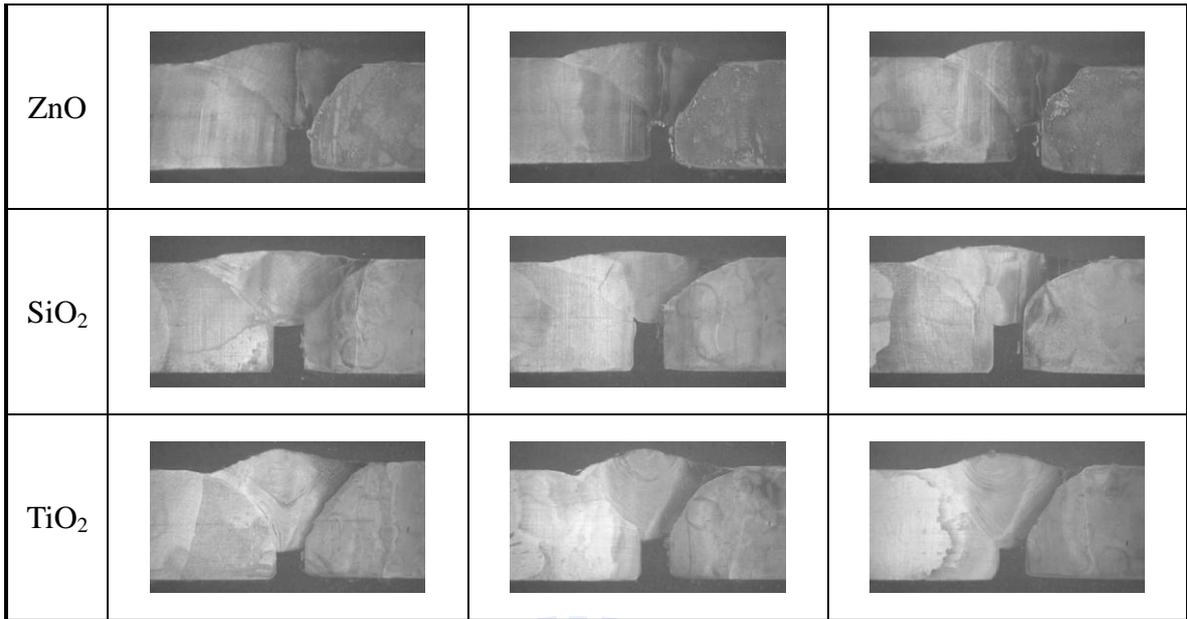


圖 4-15 單一型助銲劑之銲道剖面 (續)

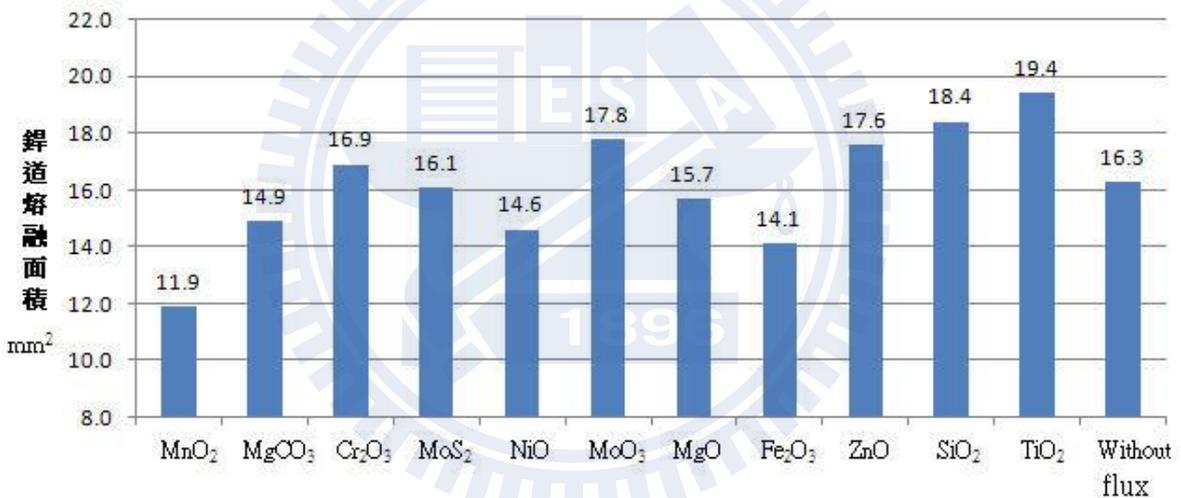


圖 4-16 單一型助銲劑對銲道熔融面積之影響

#### 4.4 混合型助銲劑對銲道型態之探討

##### 4.4.1 混合型助銲劑對銲道外觀之影響

如圖 4-17 所示為 MIG-Flux 銲接製程對銲道外觀之實驗結果。塗敷 MnO<sub>2</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 混合助銲劑結果，其在銲道附近會產生少許的飛濺物；塗敷 MnO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 混合助銲劑結果，其在銲道附近亦產生少許的飛濺物；塗敷 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MoO<sub>3</sub> 混合助銲劑結果，其在銲道附近幾乎沒有飛濺物的產生；塗敷 MnO<sub>2</sub>-MoS<sub>2</sub> 混合助銲劑結果，其在銲道附近幾乎沒有飛濺物的產生，但銲道外觀形狀有明顯改變；塗敷 MoS<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 混合助銲劑結果，其在銲

道附近幾乎沒有飛濺物的產生，且可得到較平整的鐸道外觀；塗敷  $\text{MoS}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3$  混合助鐸劑結果，其在鐸道附近幾乎沒有飛濺物的產生，但在鐸道與母材交界處會產生過熔缺陷。由此實驗結果可知，當採用  $\text{MoS}_2\text{-MoO}_3$  混合助鐸劑時，將可得到較佳的鐸道外觀品質。

	
$\text{MnO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3$	$\text{MnO}_2\text{-MoO}_3$
	
$\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-MoO}_3$	$\text{MnO}_2\text{-MoS}_2$
	
$\text{MoS}_2\text{-MoO}_3$	$\text{MoS}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3$

註：鐸槍移動方向為由右向左；混合型助鐸劑比例各 50%

圖 4-17 混合型助鐸劑之鐸道外觀圖

#### 4.4.2 混合型助鐸劑對鐸道深寬比、熔深與寬度之影響

如圖 4-18 所示為 MIG 鐸接製程對鐸道深寬比之實驗結果。結果顯示在 MIG 鐸接條件下（如表 4-3 所示），當添加  $\text{MnO}_2\text{-MoO}_3$ 、 $\text{MnO}_2\text{-MoS}_2$  等混合型助鐸劑時，均可提高鐸道深寬比。其中，以  $\text{MnO}_2\text{-MoO}_3$  混合型助鐸劑的添加對鐸道深寬比最為顯著。如圖 4-19 所示為 MIG 鐸接製程對鐸道熔深之實驗結果。結果顯示在 MIG 鐸接條件下（如表 4-3 所示），當添加  $\text{MnO}_2\text{-MoO}_3$ 、 $\text{MoS}_2\text{-MoO}_3$  等混合型助鐸劑時，均可提高鐸道熔深。其中，以  $\text{MoS}_2\text{-MoO}_3$  混合型助鐸劑的添加對鐸道熔深最為顯著。

如圖 4-20 所示為 MIG 鐸接製程對鐸道寬度之實驗結果。結果顯示在 MIG 鐸接條件下（如表 4-3 所示），當添加  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-MoO}_3$ 、 $\text{MoS}_2\text{-MoO}_3$ 、 $\text{MoS}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3$  等混合型助鐸劑時，均可提高鐸道寬度。值得注意的是，若添加  $\text{MnO}_2\text{-MoO}_3$  混合型助鐸劑時，其鐸道寬度反而可降低。

在 MIG 對接的過程中，鐸道的熔深及熔融面積很重要，因為這兩個因素是決定鐸件機械性質的主要因素，如  $\text{MnO}_2\text{-MoO}_3$  的助鐸劑組合，雖然其鐸道深寬比最佳（深寬比 0.66），但其熔深及熔融面積並非最佳，相對地， $\text{MoS}_2\text{-MoO}_3$  的助鐸劑組合，其鐸道深寬比平均值雖只有 0.44，但其熔深及熔融面積確均為最佳，其鐸道幾何型態應大於其他各組。因此後續田口方法鐸接之控制因子及其水準值的設定考量是以此部份的實驗數據（23.3 V 配合 346 mm/min 的走速）作為中間值來調配，期能以田口方法的實驗配置，擷取低碳鋼與不銹鋼 MIG-Flux 對接製程之最適參數。

表 4-3 異種材料 Butt joint 測試參數-6 種混合型助鐸劑

鐸接電壓 (V)	鐸接電流 (A)	鐸接速度 (mm/min)	鐸線伸出單杯長度 (mm)	氬氣流量 (l/min)	送線速度 (cm/min)	鐸線外徑 (mm)	對接間距 (mm)
23.3	220	346	10	15	120	1.6	1.5

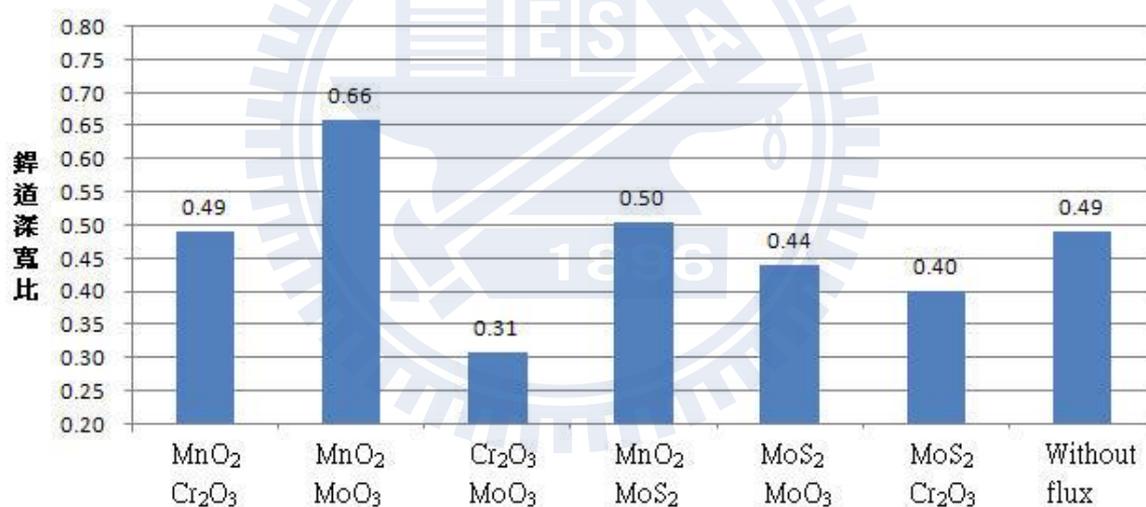


圖 4-18 混合型助鐸劑對鐸道深寬比之影響

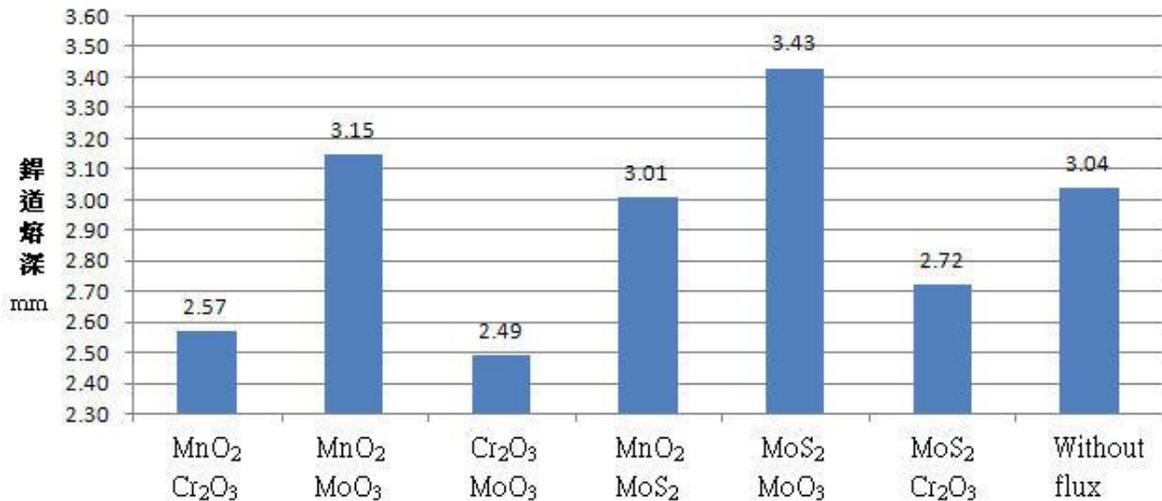


圖 4-19 混合型助錒劑對錒道熔深之影響

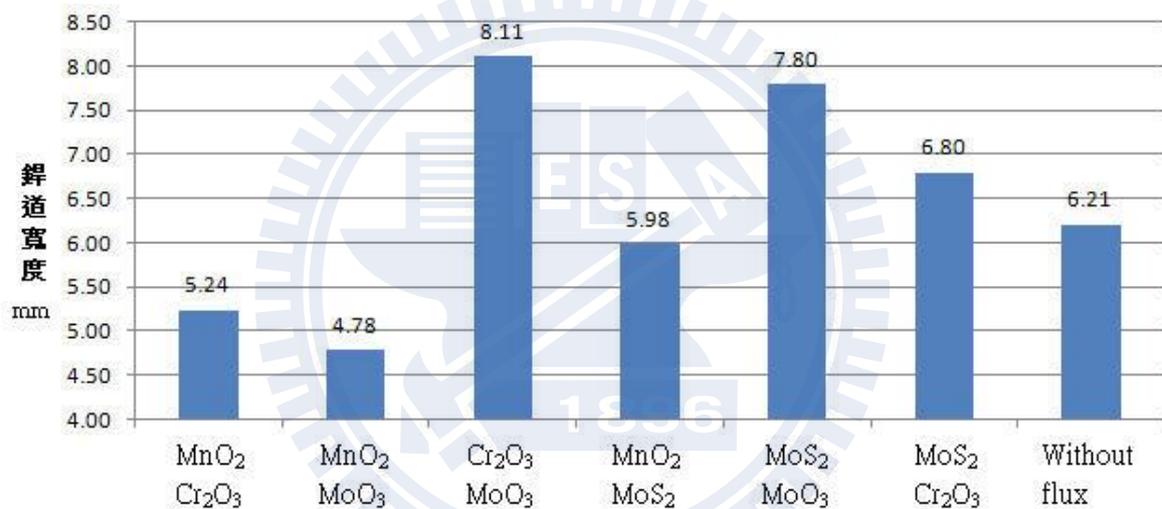


圖 4-20 混合型助錒劑對錒道寬度之影響

#### 4.4.3 混合型助錒劑對錒道剖面形狀與面積之影響

如圖 4-21 所示為 MIG 錒接製程對錒道截面形狀之實驗結果，結果顯示在 MIG 錒接條件下（如表 4-3 所示），當添加 MnO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 混合型助錒劑時，可提高錒道熔深，且亦可得到窄而深的錒道截面。

如圖 4-22 所示為 MIG 錒接製程對錒道熔融面積之實驗結果，結果顯示在 MIG 錒接條件下（如表 4-3 所示），當添加 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MoO<sub>3</sub>、MnO<sub>2</sub>-MoS<sub>2</sub>、MoS<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 等混合型助錒劑時，均可提高錒道熔融面積。其中，以 MoS<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 混合型助錒劑的添加對錒道熔融面積最為顯著。

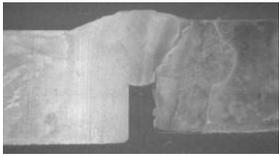
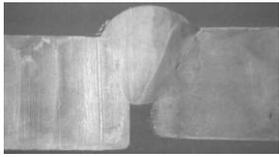
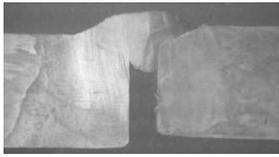
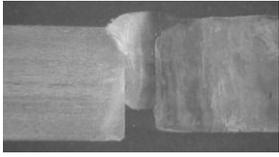
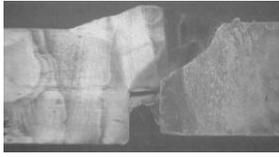
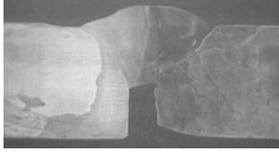
	A 點	B 點	C 點
MnO <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
MnO <sub>2</sub> MoO <sub>3</sub>			
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> MoO <sub>3</sub>			
MnO <sub>2</sub> MoS <sub>2</sub>			
MoS <sub>2</sub> MoO <sub>3</sub>			
MoS <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			

圖 4-21 混合型助鐸劑之鐸道剖面

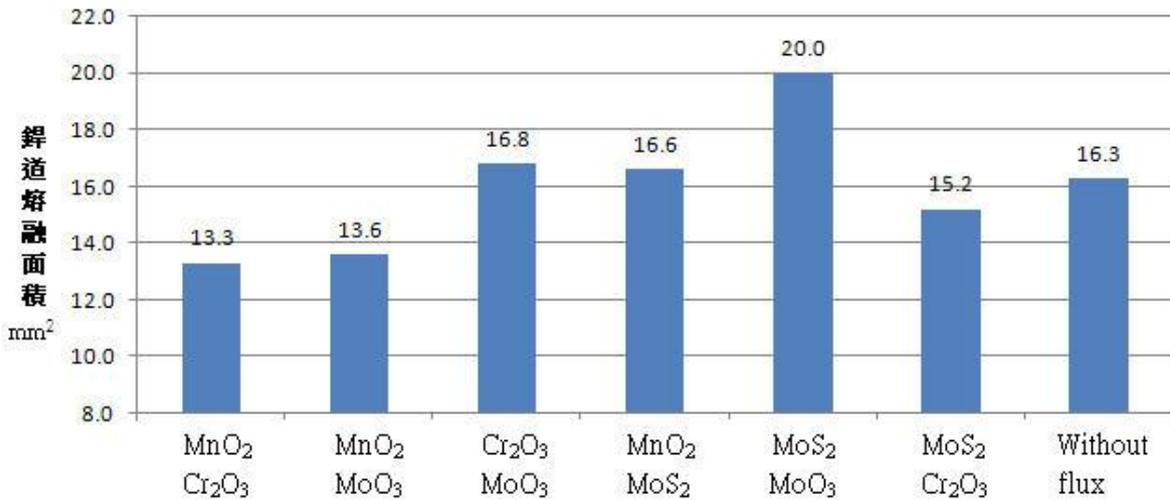


圖 4-22 混合型助銲劑對銲道熔融面積之影響

#### 4.5 助銲劑對銲道顯微組織之觀察

##### 4.5.1 單一型助銲劑對銲道顯微組織之觀察

銲接後之銲道金相組織可以參考圖4-23，由銲道金屬開始，再區分為：熔融線、粗晶區、細晶區、部份變態區、球化區以及母材，一般較易觀察的區域有銲道金屬、粗晶區、細晶區以及母材。於不銹鋼側的銲道邊緣可觀察到沃斯田相加肥粒相之雙相結構，當添加MgCO<sub>3</sub>、MgO等單一型助銲劑時，其熔融線附近可找到一個特別的區域，此區域的晶界特別清晰，但對照圖4-30及圖4-35可知，此區的硬度值變化不大。於低碳鋼側的銲道邊緣可觀察到肥粒鐵晶粒大小及晶粒形狀，當添加MgCO<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等單一型助銲劑時，其肥粒鐵晶界的特徵特別清楚，但對照圖4-30及圖4-36可知，此區的硬度值變化有下降及上升的趨勢。另外，在銲道中央處可觀察到類似肥粒鐵型態或氣孔銲接缺陷。

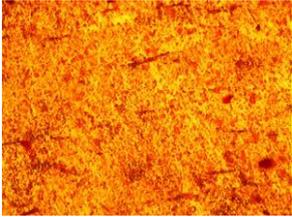
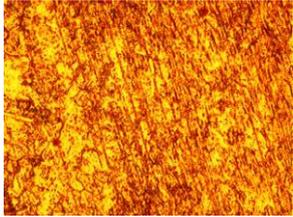
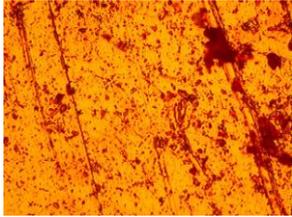
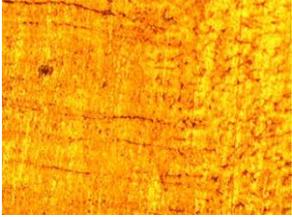
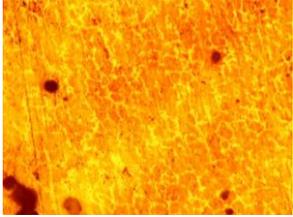
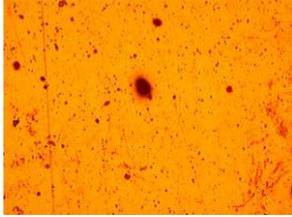
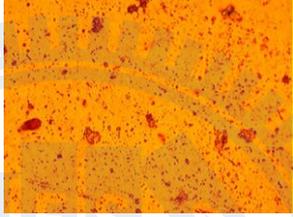
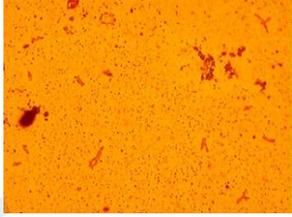
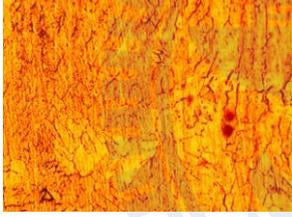
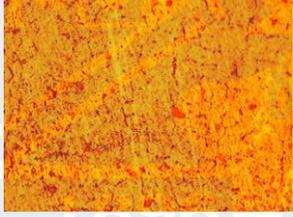
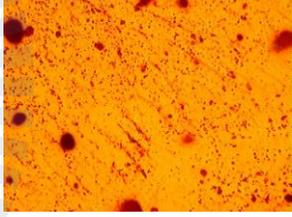
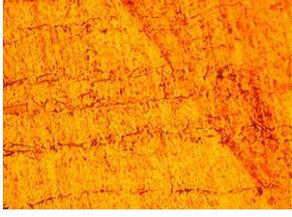
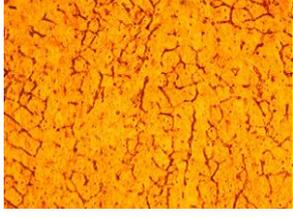
	銲道邊緣 50X (不銹鋼側)	銲道中央 50x	銲道邊緣 50X (低碳鋼側)
Without flux			
MnO <sub>2</sub>			
MgCO <sub>3</sub>			
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
MoS <sub>2</sub>			
NiO			
MoO <sub>3</sub>			

圖 4-23 單一型助銲劑之銲道顯微組織

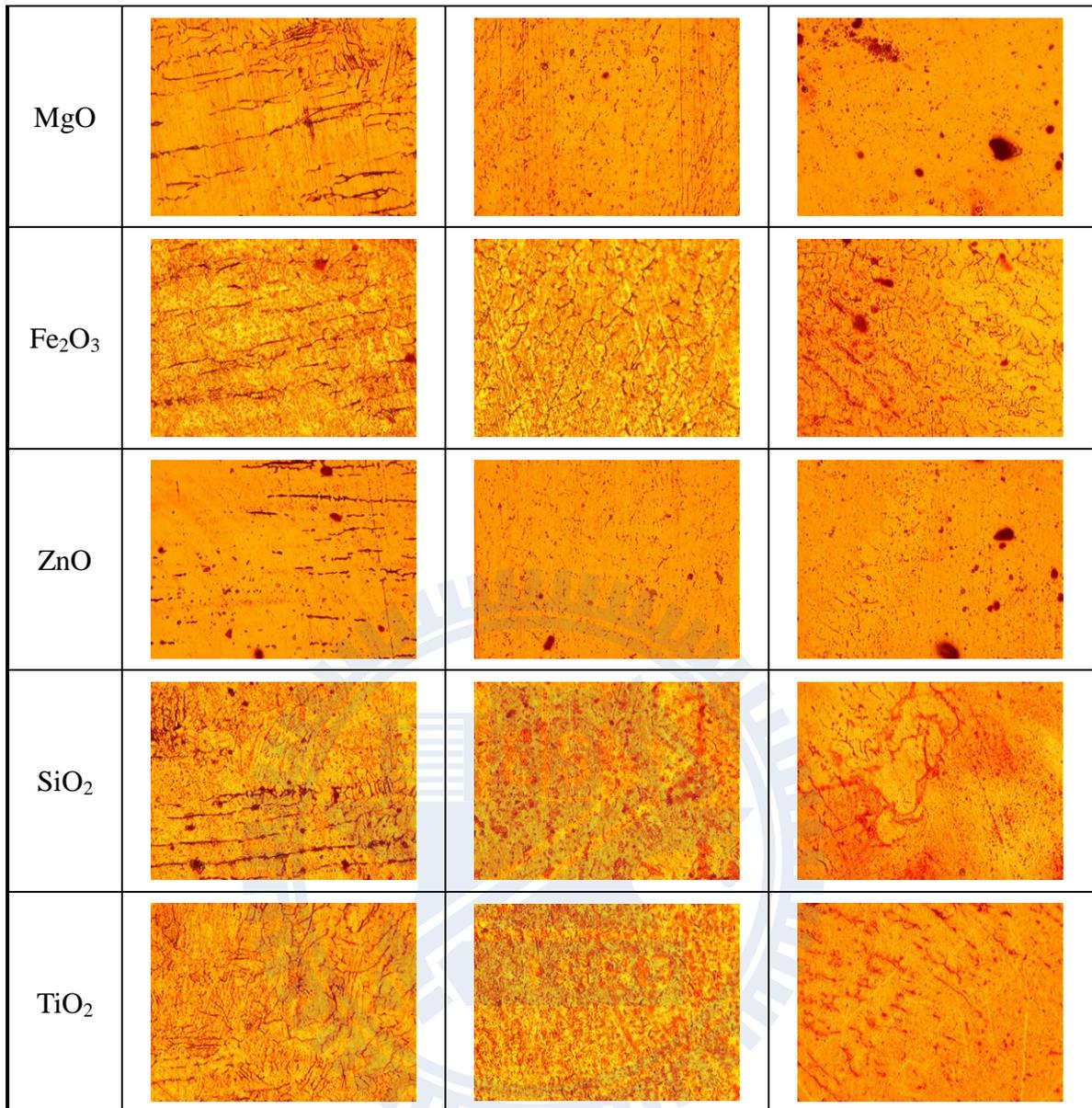


圖 4-23 單一型助銲劑之銲道顯微組織(續)

#### 4.5.2 混合型助銲劑對銲道顯微組織之觀察

銲接後之銲道金相組織可以參考圖4-24，於不銹鋼側的銲道邊緣可觀察到沃斯田相加肥粒相之雙相結構，當添加MnO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub>混合型助銲劑時，其熔融線附近可找到一個特別的區域，此區域的晶界特別清晰，但對照圖4-42可知，此區的硬度值變化不大。於低碳鋼側的銲道邊緣可觀察到肥粒鐵晶粒大小及晶粒形狀，當添加MoS<sub>2</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>混合型助銲劑時，其肥粒鐵晶界的特徵特別清楚，但對照圖4-46可知，此區的硬度值變化呈下降趨勢。另外，在銲道中央處可觀察到類似肥粒鐵型態或顏色深淺不一等銲接組織。

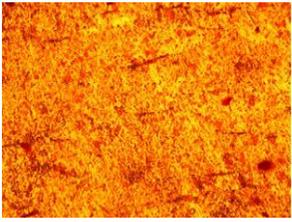
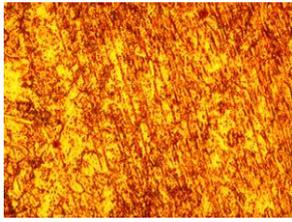
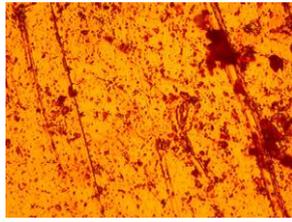
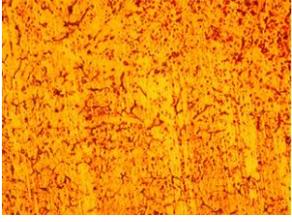
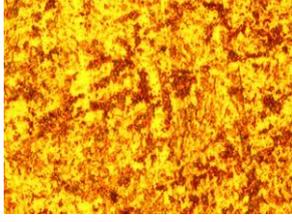
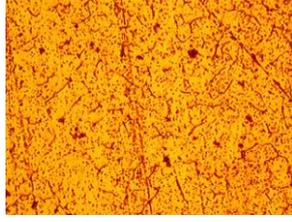
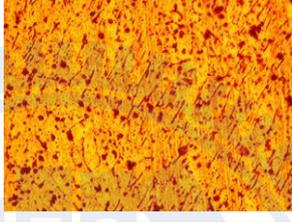
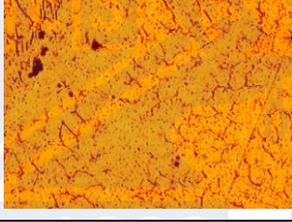
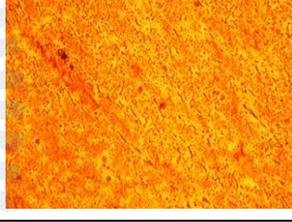
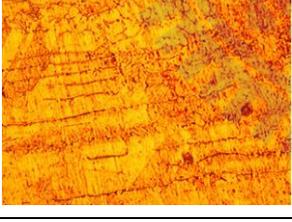
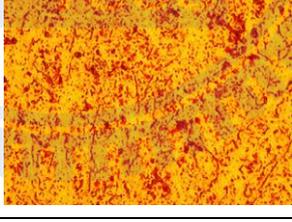
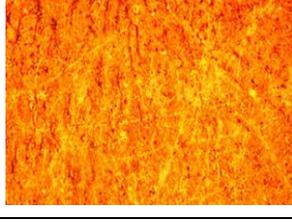
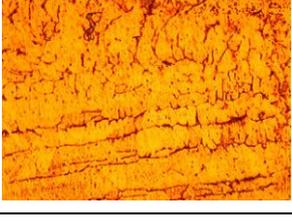
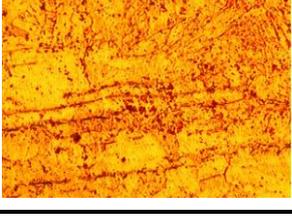
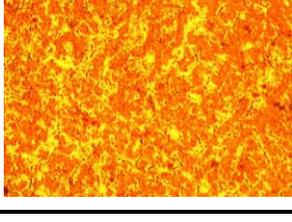
	銲道邊緣 50X (不銹鋼側)	銲道中央 50x	銲道邊緣 50X (低碳鋼側)
Without flux			
MnO <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
MnO <sub>2</sub> MoO <sub>3</sub>			
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> MoO <sub>3</sub>			
MnO <sub>2</sub> MoS <sub>2</sub>			
MoS <sub>2</sub> MoO <sub>3</sub>			
MoS <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			

圖 4-24 混合型助銲劑之銲道顯微組織

## 4.6 助銲劑對銲道肥粒鐵含量之探討

### 4.6.1 單一型助銲劑對銲道肥粒鐵含量之影響

本實驗之肥粒鐵量測位置為銲道中心，量測 9 點並取平均值，其結果如圖 4-25 所示。雖然銲道中肥粒相存在 5~10% 有助於降低銲接熱裂的敏感性，但由於肥粒相組織的耐蝕性不如沃斯田鐵相優良，當銲件處於腐蝕性強的酸性工作環境時，容易造成孔蝕 (Pitting) 的現象，同時肥粒相的存在也會對不銹鋼的韌性及延展性有不良的影響。結果顯示在 MIG 銲接條件下 (如表 4-2 所示)，當添加  $MgCO_3$ 、 $MgO$  等單一型助銲劑時，其銲道中肥粒鐵含量超過 30%，因此熱裂的敏感性再度升高，值得注意的是，肥粒鐵量測值過高，可能的原因為低碳鋼中肥粒鐵所導致。當添加  $MnO_2$ 、 $SiO_2$  等單一型助銲劑時，其銲道中肥粒鐵含量在 5~10% 左右，因此可使銲件降低熱烈的敏感性又不致大幅影響其抗腐蝕及韌性。

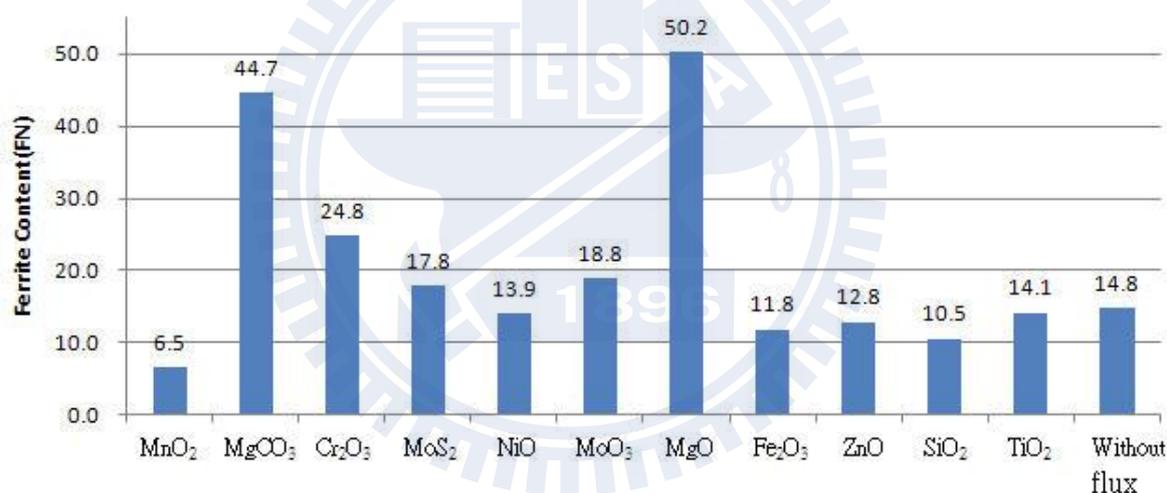


圖 4-25 單一型助銲劑對銲道肥粒鐵含量之影響

### 4.6.2 混合型助銲劑對銲道肥粒鐵含量之影響

如圖 4-26 所示為 MIG 銲接製程對銲道肥粒鐵含量之實驗結果。結果顯示在 MIG 銲接條件下 (如表 4-3 所示)，當添加  $MnO_2$ - $MoO_3$  等混合型助銲劑時，其銲道中肥粒鐵含量接近 30%，因此可能提高熱裂的敏感性。當添加  $MnO_2$ - $Cr_2O_3$ 、 $MoS_2$ - $MoO_3$  等混合型助銲劑時，其銲道中肥粒鐵含量在 5~10% 左右，因此可使銲件降低熱烈的敏感性又不致大幅影響其抗腐蝕及韌性。此部份的實驗結果，印證 4.4.2 節中較佳的銲道熔深及熔融面積具有影響銲道幾何型態。

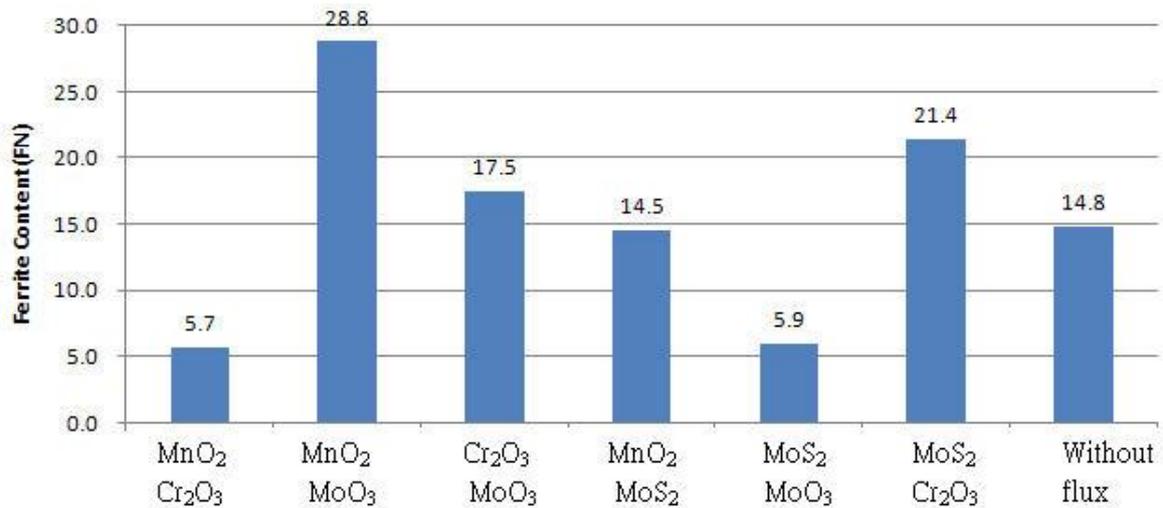


圖 4-26 混合型助銲劑對銲道肥粒鐵含量之影響

#### 4.7 助銲劑對銲道微硬度之探討

##### 4.7.1 單一型助銲劑對銲道微硬度之影響

本實驗針對銲道進行微硬度量測，量測位置則為距銲件表面下 1mm 處，且每點間隔 0.25mm 測量一硬度，最後再將量測之值記錄並作各部位之硬度分佈線，其中對銲道進行 11 點的量測，經計算結果後取平均值(如圖 4-27 所示)。由圖 4-29 至圖 4-39 之微硬度分佈曲線可觀察到，銲道線 (Fusion line) 內硬度平均值最高，不銹鋼側硬度平均值次之，低碳鋼側硬度平均值最低。此外，銲道線附近熱影響區的硬度值變化為，以低碳鋼側硬度變化較不銹鋼側大。另外，銲件斷裂點可能發生於低碳鋼側熱影響區，且以添加 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、NiO 單一型助銲劑的機會最大，其顯微組織晶粒亦較粗大。

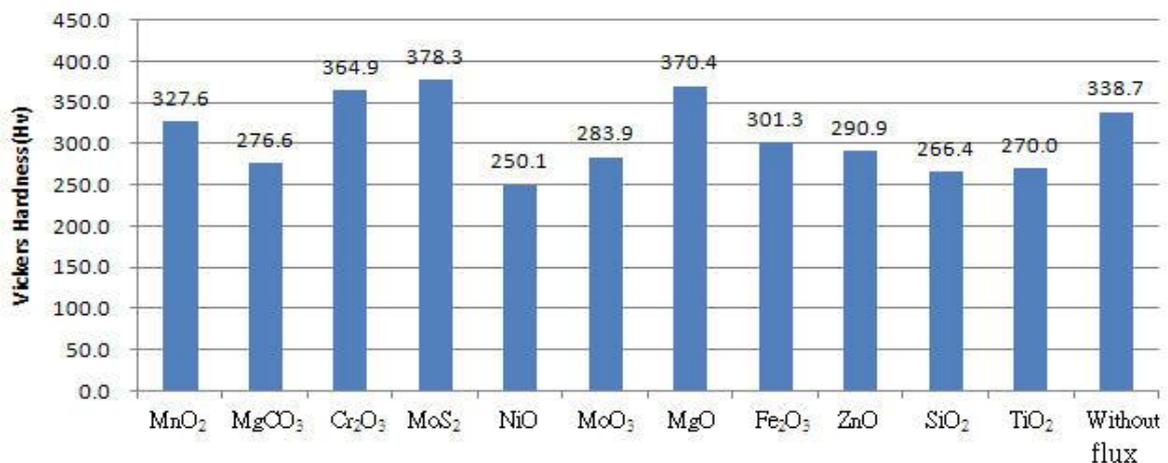


圖 4-27 單一型助銲劑對銲道硬度值之影響

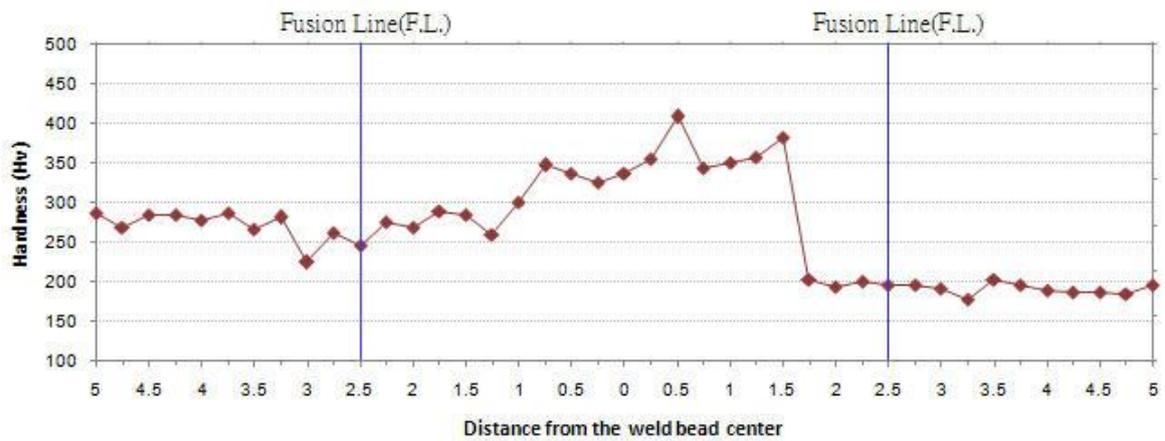


圖 4-28 微硬度分佈曲線-未塗助鋸劑之鋅件

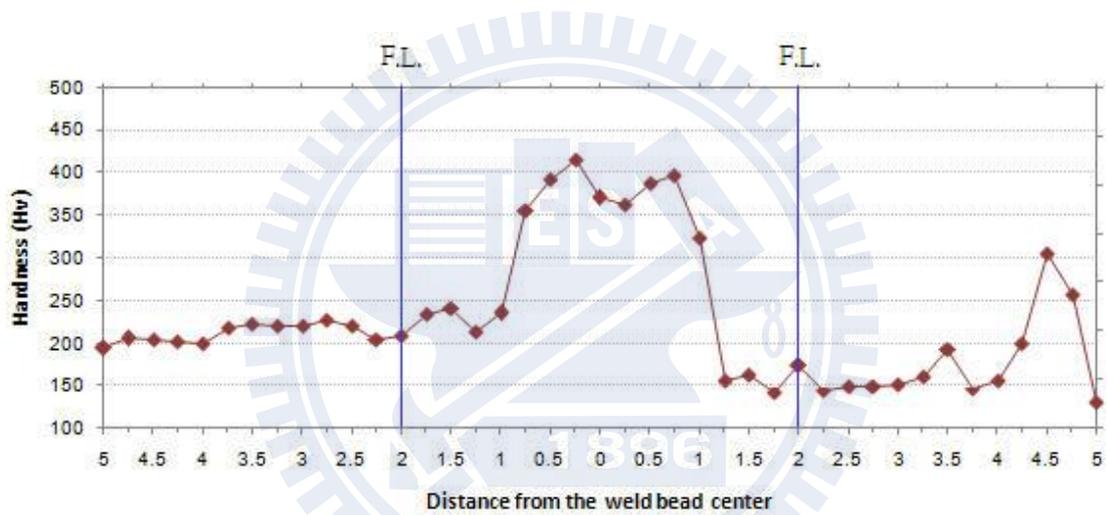


圖 4-29 微硬度分佈曲線-  $MnO_2$

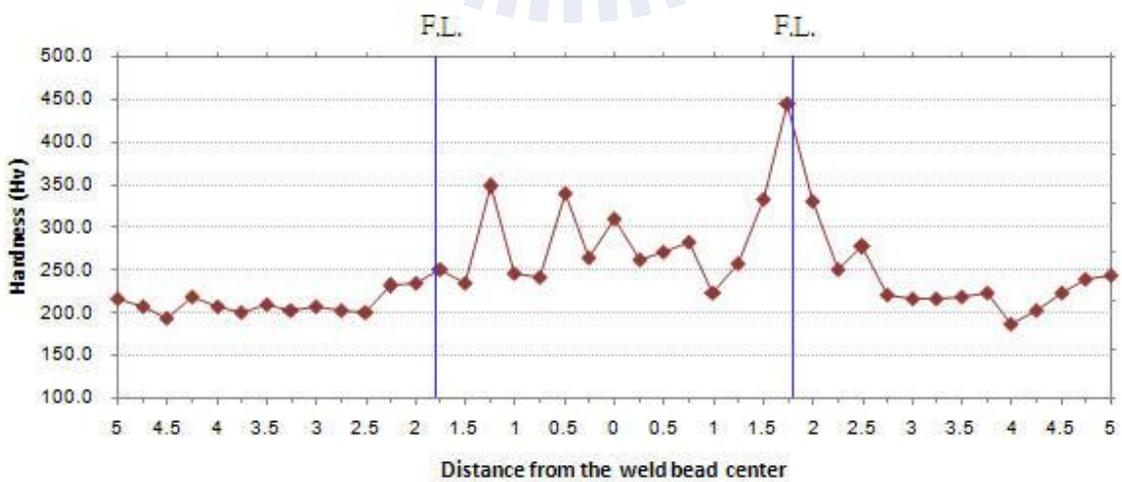


圖 4-30 微硬度分佈曲線-  $MgCO_3$

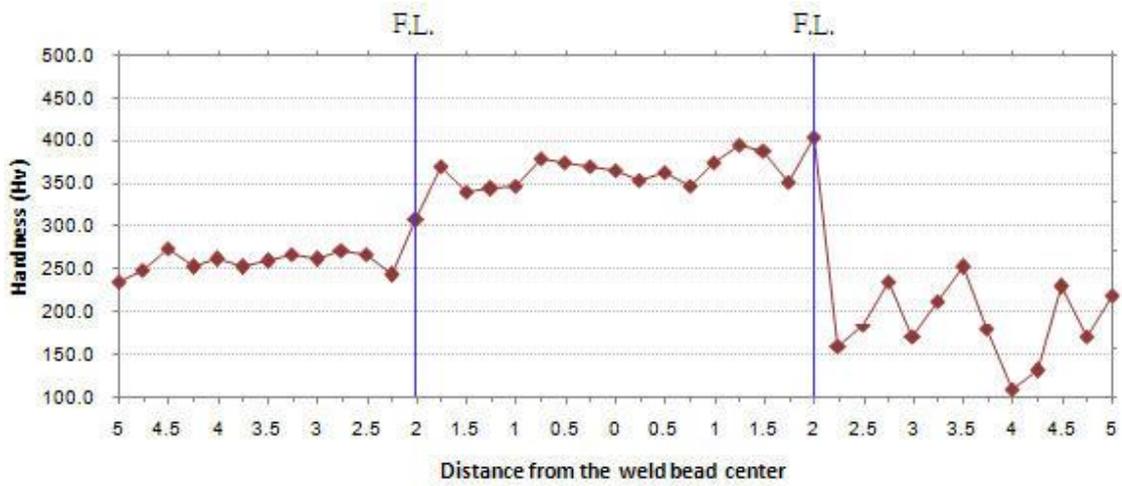


圖 4-31 微硬度分佈曲線- Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

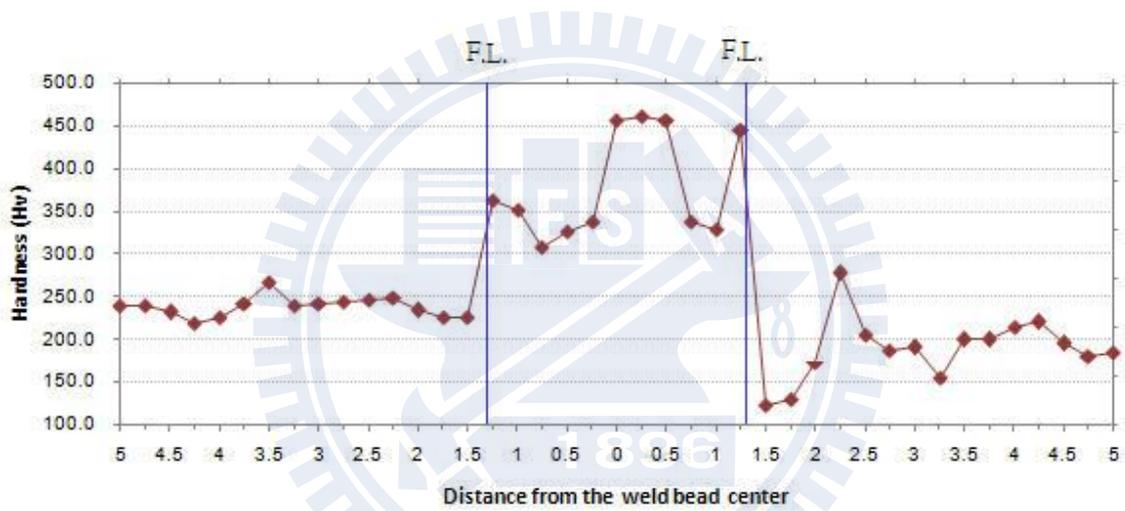


圖 4-32 微硬度分佈曲線- MoS<sub>2</sub>

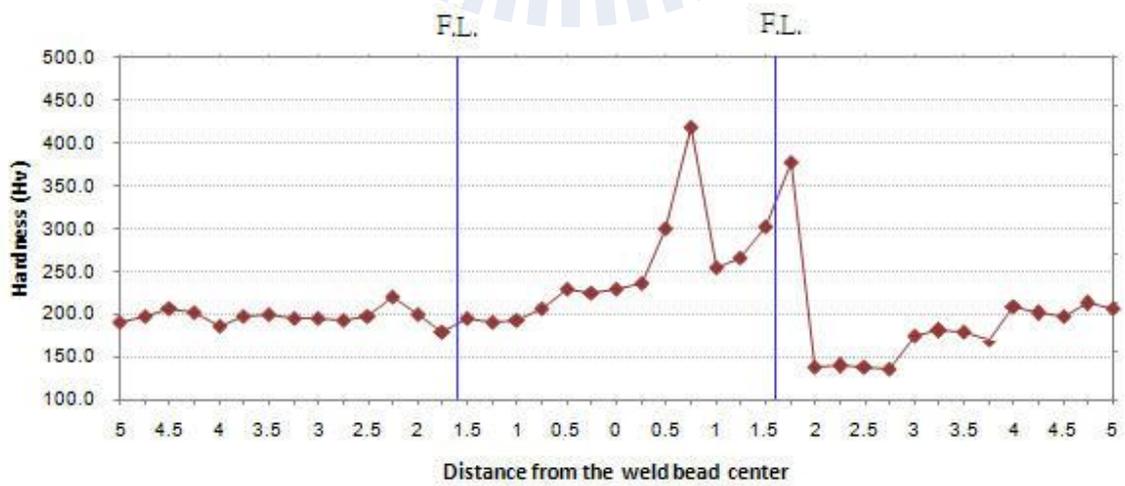


圖 4-33 微硬度分佈曲線- NiO

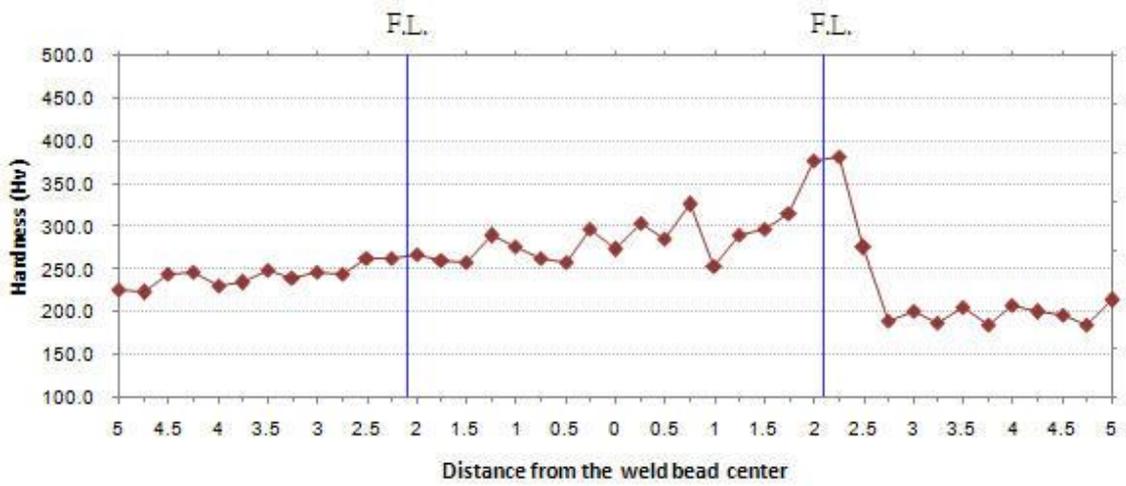


圖 4-34 微硬度分佈曲線- MoO<sub>3</sub>

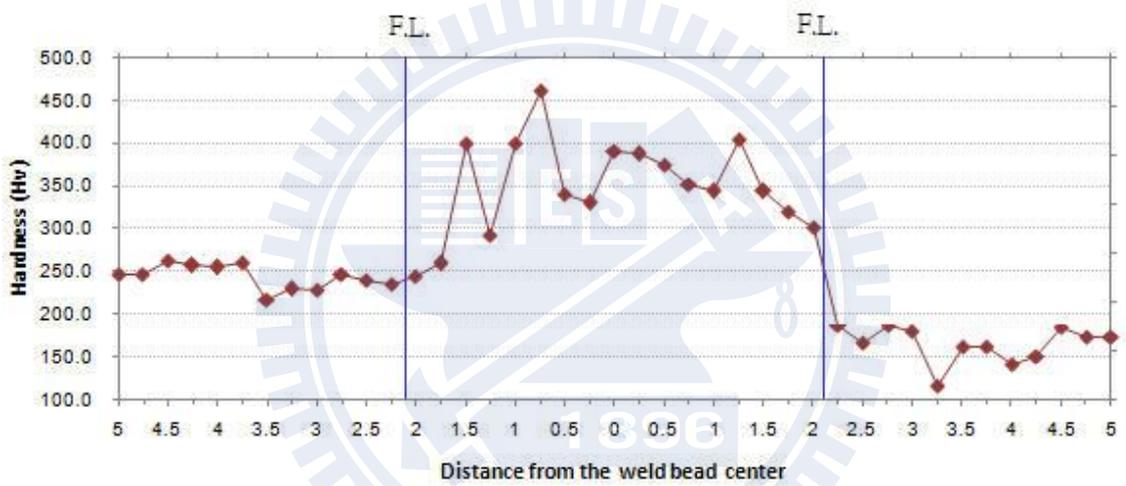


圖 4-35 微硬度分佈曲線- MgO

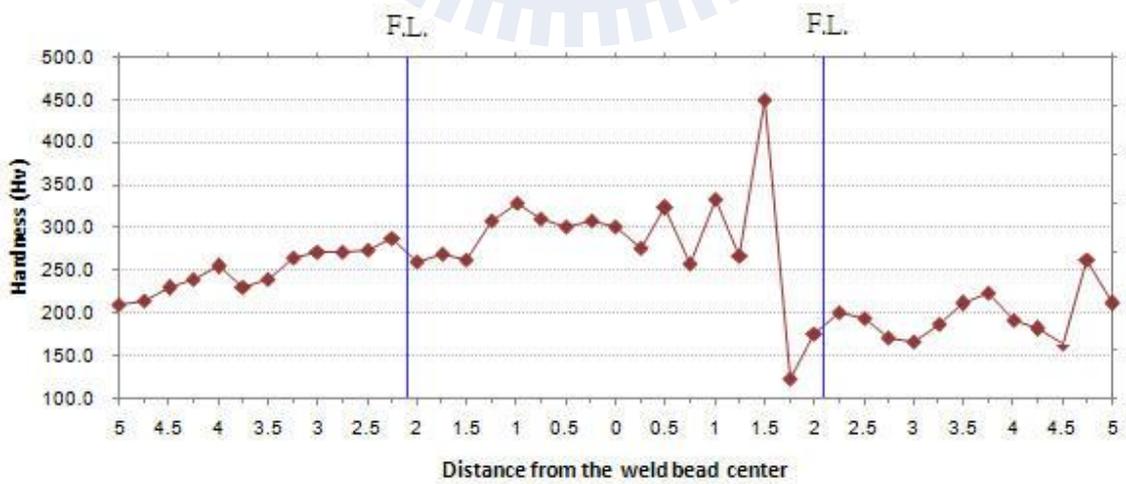


圖 4-36 微硬度分佈曲線- Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

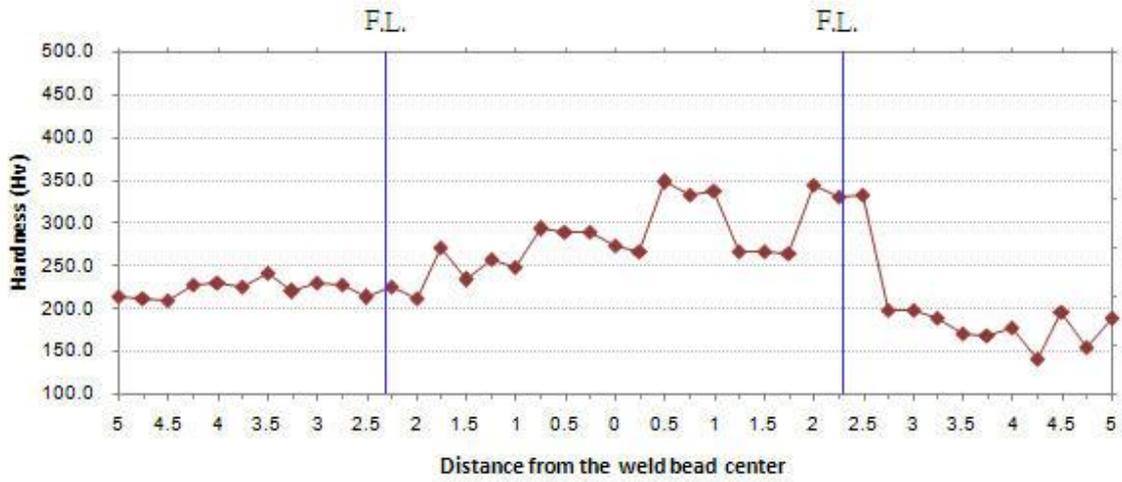


圖 4-37 微硬度分佈曲線- ZnO

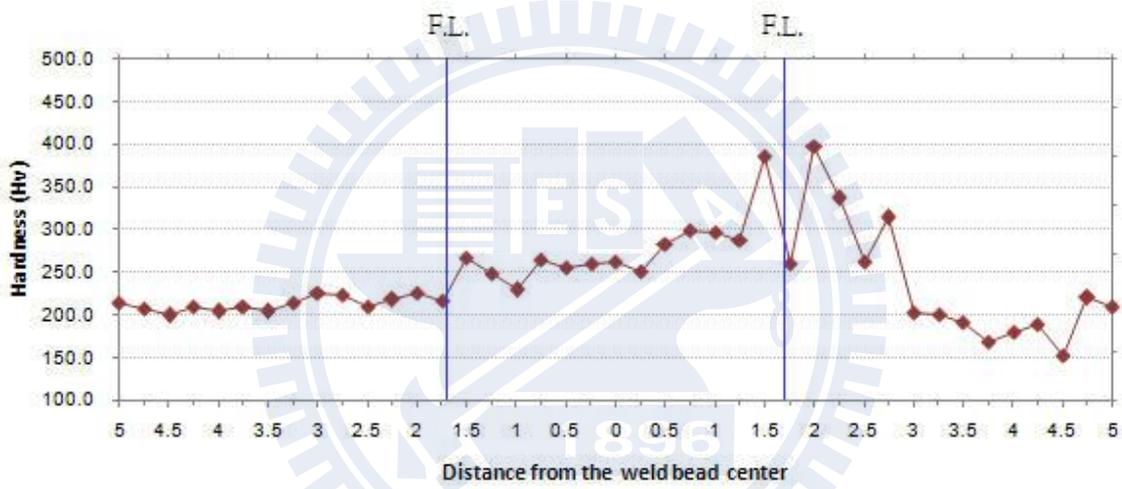


圖 4-38 微硬度分佈曲線- SiO<sub>2</sub>

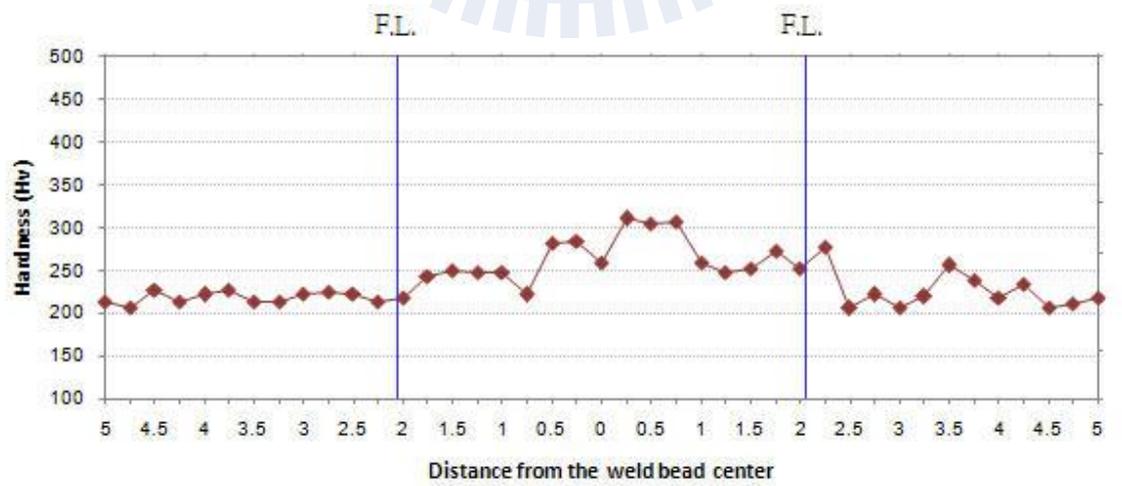


圖 4-39 微硬度分佈曲線- TiO<sub>2</sub>

#### 4.7.2 混合型助銲劑對銲道微硬度之影響

如圖 4-40 所示為 MIG 銲接製程對銲道硬度之實驗結果。結果顯示在 MIG 銲接條件下（如表 4-3 所示），當添加  $\text{MnO}_2\text{-MoS}_2$ 、 $\text{MoS}_2\text{-MoO}_3$  等混合型助銲劑時，均可提高銲道硬度。其中，以  $\text{MoS}_2\text{-MoO}_3$  混合型助銲劑的添加對銲道硬度最為顯著，此部份的實驗結果，再次印證 4.4.2 節中較佳的銲道熔深及熔融面積具有影響銲道幾何型態。由圖 4-41 至圖 4-46 之微硬度分佈曲線可觀察到，銲道線（Fusion line）內硬度平均值最高，不銹鋼側硬度平均值次之，低碳鋼側硬度平均值最低。此外，銲道線附近熱影響區的硬度值變化為，以低碳鋼側硬度變化較不銹鋼側大。另外，銲件斷裂點可能發生於低碳鋼側熱影響區，且以添加  $\text{MnO}_2\text{-MoS}_2$  混合型助銲劑的機會最大，其顯微組織晶粒亦較粗大。

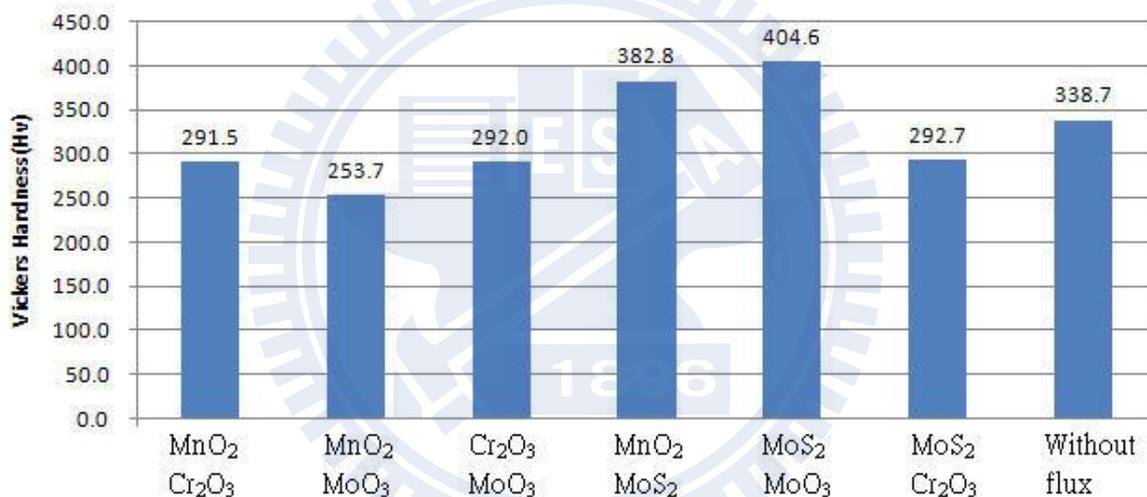


圖 4-40 混合型助銲劑對銲道硬度值之影響

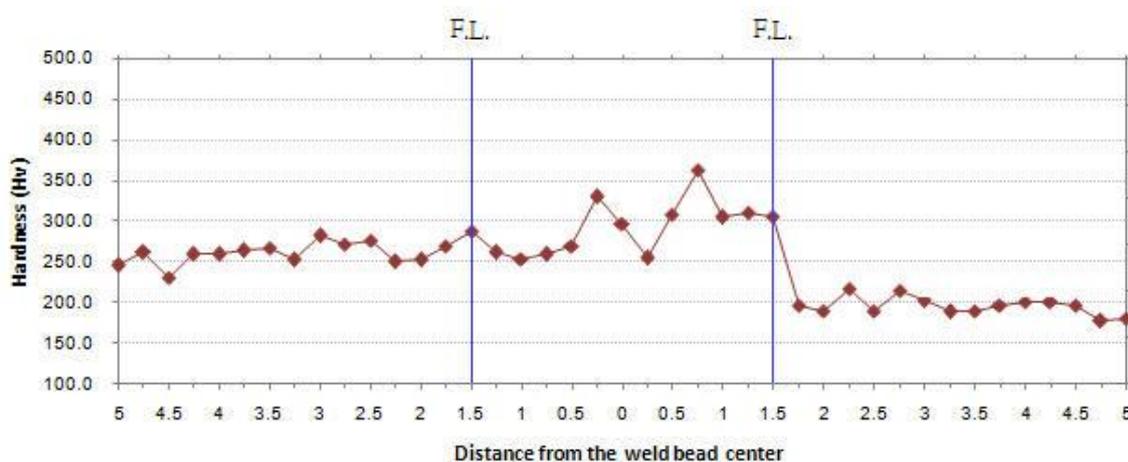


圖 4-41 微硬度分佈曲線-  $\text{MnO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3$

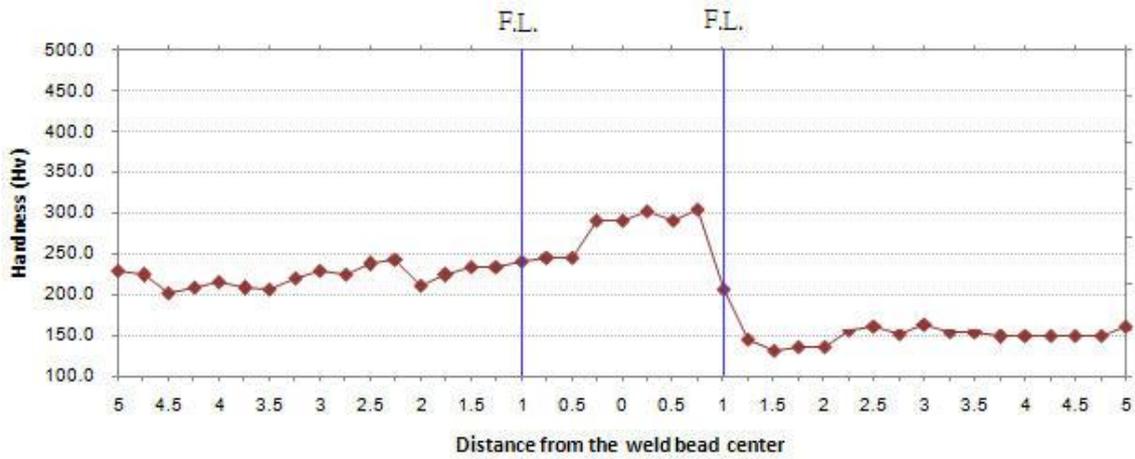


圖 4-42 微硬度分佈曲線-  $\text{MnO}_2\text{-MoO}_3$

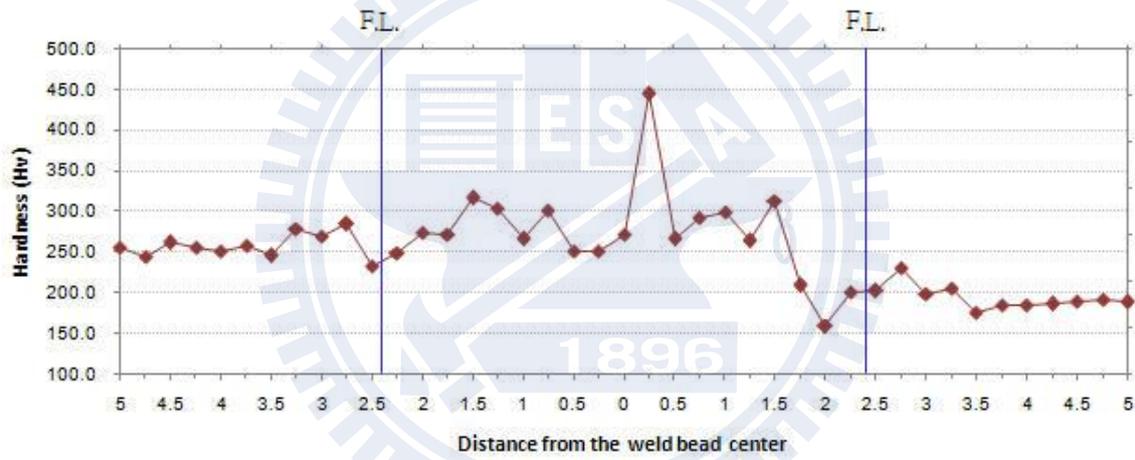


圖 4-43 微硬度分佈曲線-  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-MoO}_3$

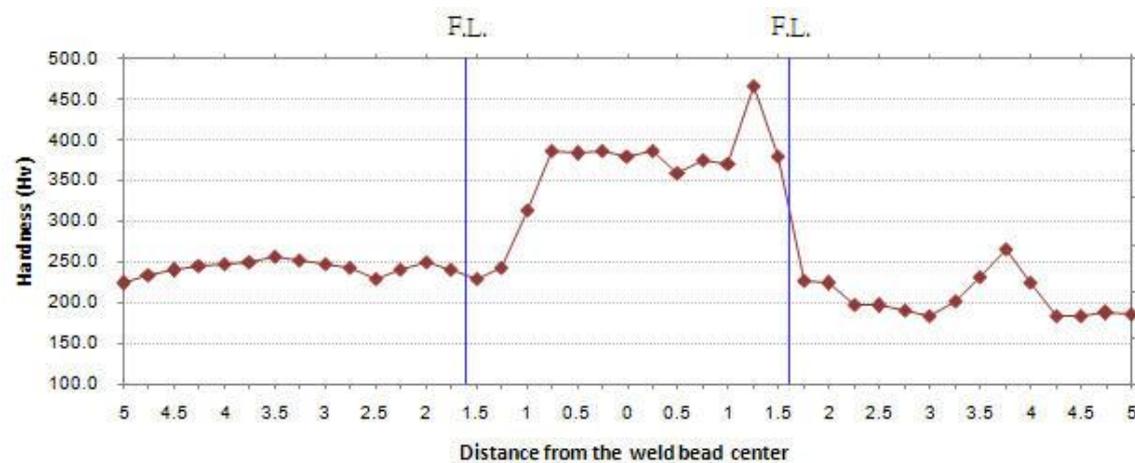


圖 4-44 微硬度分佈曲線-  $\text{MnO}_2\text{-MoS}_2$

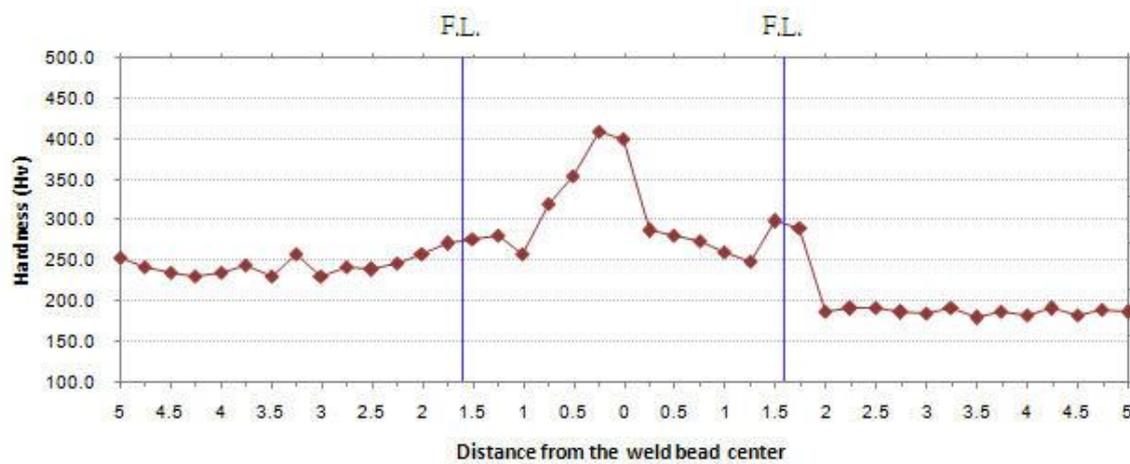


圖 4-45 微硬度分佈曲線-  $\text{MoS}_2\text{-MoO}_3$

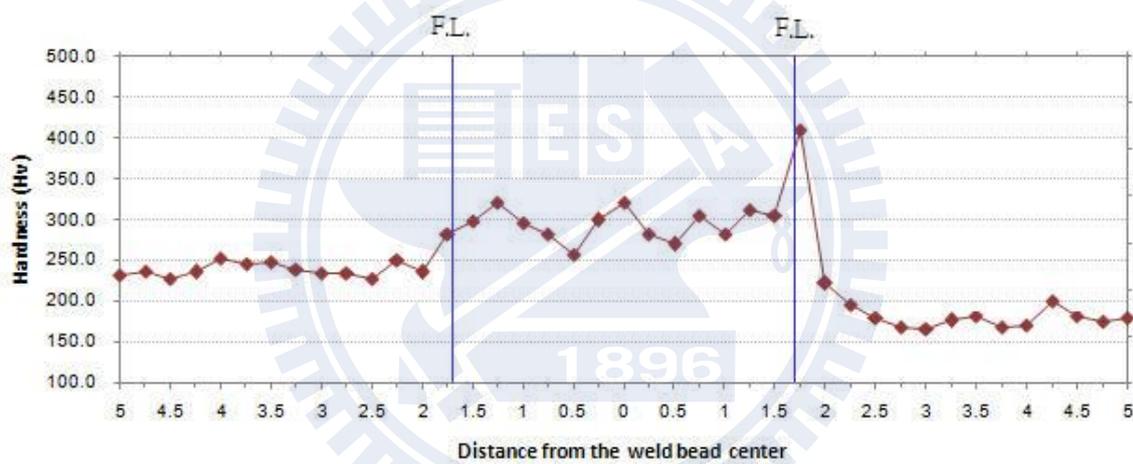


圖 4-46 微硬度分佈曲線-  $\text{MoS}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3$

## 4.8 田口方法針對銲接製程進行最佳化實驗

### 4.8.1 各參數對銲道外觀之影響

就銲道外觀而言，如圖4-47所示，若參數設定值為熱輸入量最小（No.4）時，銲接缺陷有空洞現象(200系)；若參數設定值為熱輸入量最大（No.16）時，熔池形狀呈橢圓形狀。其餘銲件之銲道外觀皆有少許飛濺物附著於銲道附近(600系)。不管試片有無清潔，其銲道外觀差異不大。

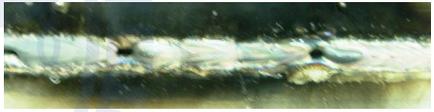
試片編號	N1 試片	N2 試片
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		

圖 4-47 各參數對銲道外觀之影響

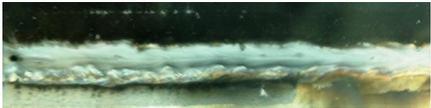
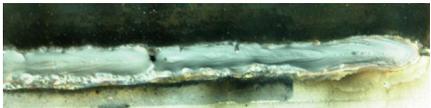
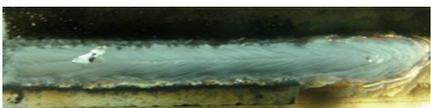
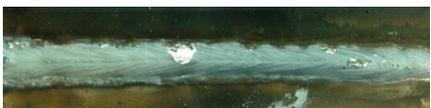
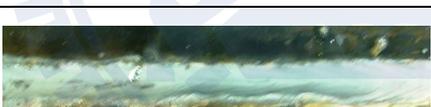
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		

圖 4-47 各參數對鐸道外觀之影響 (續)

#### 4.8.2 製程參數對鐳道型態之影響

圖 4-48 為各試片之鐳道型態。圖中可發現塗有混合助鐳劑的鐳道深度普遍較深，故可知不同比例混合助鐳劑 ( $\text{MoS}_2\text{-MoO}_3$ ) 皆可增加鐳道之深度。考慮雜音因子之鐳道型態，不管試片有無清潔，兩者的鐳道深度並無一定的關係存在。

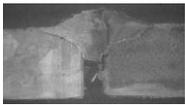
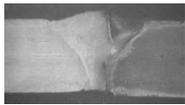
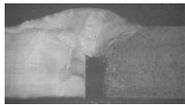
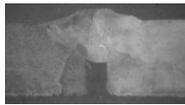
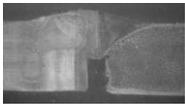
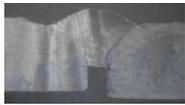
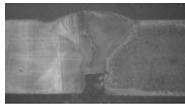
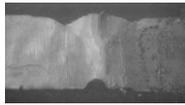
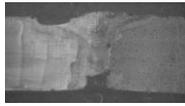
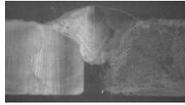
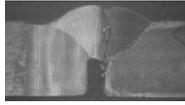
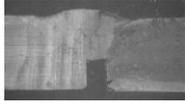
	Without flux N1 試片	With flux N1 試片	Without flux N2 試片	With flux N2 試片
No. 01				
No. 02				
No. 03				
No. 04				
No. 05				
No. 06				
No. 07				
No. 08				

圖 4-48  $L_{16}$  直交表鐳道型態之影響

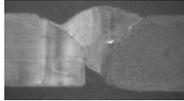
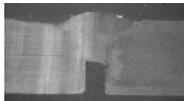
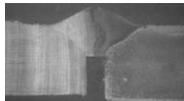
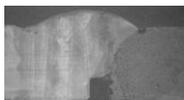
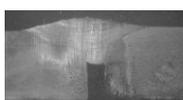
No. 09				
No. 10				
No. 11				
No. 12				
No. 13				
No. 14				
No. 15				
No. 16				

圖 4-48 L<sub>16</sub>直交表銲道型態之影響(續)

表 4-4 鐸道型態之鐸道深寬比

	With flux N1 試片			With flux N2 試片		
	D	W	D/W	D	W	D/W
No.01	4.00	6.56	0.609	3.48	6.41	0.542
No.02	3.48	6.11	0.569	3.51	6.06	0.579
No.03	3.62	5.79	0.625	3.37	5.67	0.594
No.04	2.78	5.53	0.502	2.59	5.53	0.468
No.05	3.64	6.09	0.597	3.38	6.16	0.548
No.06	2.69	7.08	0.379	2.80	7.20	0.388
No.07	3.50	6.19	0.565	2.96	5.76	0.513
No.08	3.06	5.79	0.528	2.64	5.92	0.445
No.09	3.14	6.08	0.516	2.88	5.99	0.480
No.10	2.74	5.29	0.517	2.42	5.18	0.467
No.11	3.72	7.24	0.513	3.05	7.14	0.427
No.12	2.93	6.41	0.457	3.20	6.57	0.487
No.13	2.77	6.37	0.434	2.42	6.28	0.385
No.14	3.26	6.80	0.479	3.11	6.66	0.466
No.15	2.46	7.27	0.338	2.66	6.98	0.381
No.16	2.55	6.99	0.364	2.63	6.88	0.382

#### 4.8.3 田口方法結果分析

根據表 3-3 MIG-Flux 製程參數配置表，經鐸接實驗、金相實驗及實體顯微鏡可量測各組試片之深寬比，並引用信號雜音比望大品質特性公式 (2.4)，分別求出各組試片之 S/N 比值。

求得各實驗參數的 S/N 值後，可整理出四個控制因子的各水準之平均 S/N 值，如表 4-5 所示。為了更容易判讀，可將表 4-5 之數據繪成因子效果圖，如圖 4-49 所示。由表 4-5 及圖 4-49 可知，當參數設定為  $A_1B_1C_3D_1$  時，可以得到最佳的實驗效果，若想進一步瞭解各參數對鐸道深寬比的影響，可將求得的 S/N 值進行變異數分析 (Analysis of Variance, ANOVA)，如表 4-6 所示。

若將表 4-5 各因子水準的 S/N 值差異繪成直條圖，如圖 4-50 所示，圖中可明顯看出，各因子影響鐸道深寬比的重要性，依序為鐸接電壓、混合型助鐸劑粉末比例、鐸接速度、氬氣流量。

表 4-5 各因子水準之平均 S/N 值

	A 銲接電壓	B 氬氣流量	C 銲接速度	D 混合型助銲劑粉末比例
水準一	-5.061	-5.885	-7.089	-5.813
水準二	-6.222	-6.452	-6.283	-6.401
水準三	-6.360	-6.320	-5.802	-5.977
水準四	-7.945	-6.931	-6.414	-7.396
Delta (Max-Min)	2.884	1.047	1.288	1.583

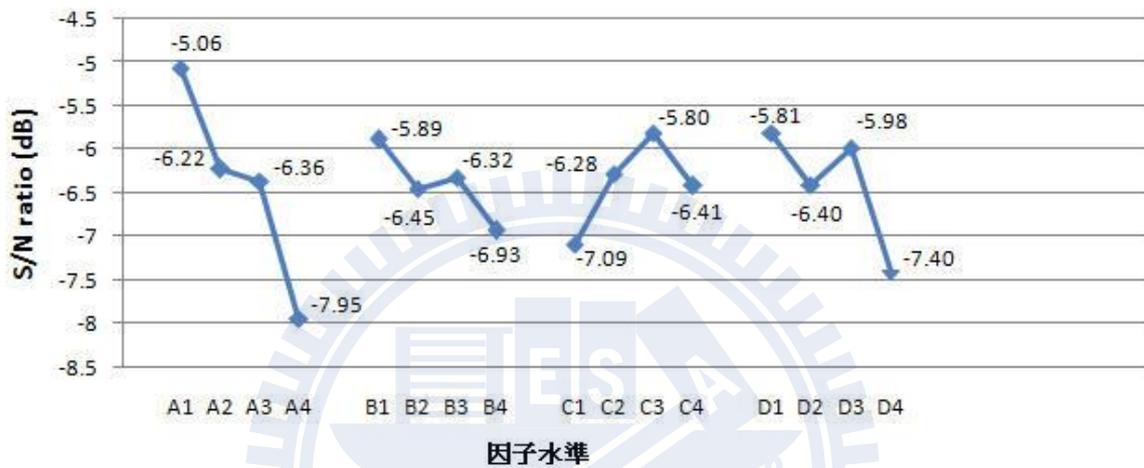


圖 4-49 因子效果圖

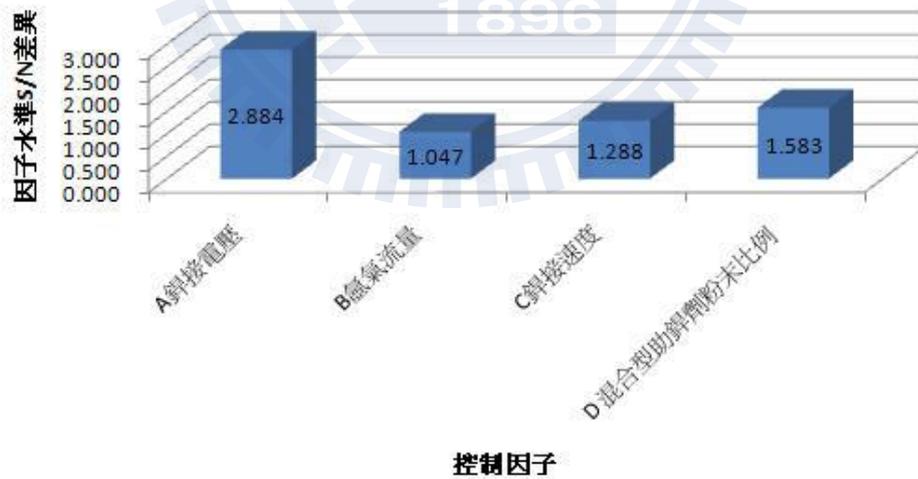


圖 4-50 因子效果差異直條圖

#### 4.8.4 變異數分析

採用變異數分析可以更客觀的判斷不同因子之相對效果，如表 4-6 所示。由表 4-6 可以發現，影響銲道深寬比的最大因子為銲接電壓，其影響度約佔 53.02%，其次為混合型助銲劑粉末比例佔整體影響性的 16.66%，影響最小的因子是氬氣流量，為了避免過度的估計因子效果，田口博士建議合併 (Pooled) 較小的平方和，以估算誤差變異數。表 4-6 中各因子的貢獻率繪成圓形圖 (如圖 4-51 所示)，可由圖形明顯看出影響製程的品質特性中，銲接電壓佔 53.02%、混合型助銲劑粉末比例佔 16.66%、銲接速度佔 7.63%，氬氣流量佔 3.71%，合併誤差佔 18.98%。綜合上述結果可獲得最佳參數如表 4-7 所示，利用此最佳參數進行確認實驗並做進一步的銲接實驗探討。

表 4-6 變異數分析表

因子	自由度	平方和	均方	F 值	淨平方和	貢獻率
A	3	16.846	5.615	14.97	15.72	53.02%
B	3	2.227	0.742	1.98	1.10	3.71%
C	3	3.386	1.129	3.01	2.26	7.63%
D	3	6.064	2.021	5.39	4.94	16.66%
誤差	3	1.125				
(合併誤差)	(3)	(1.125)	(0.375)		5.63	18.98%
總和	15	29.648			13.928	100.00%

表 4-7 最佳參數表(SAE 1020 與 AISI 304)

因子	最佳參數
A 鐸接電壓	21.4 V
B 氬氣流量	8 l/min
C 鐸接速度	403 mm/min
D 混合型助鐸劑粉末比例	20%MoS <sub>2</sub> +80%MoO <sub>3</sub>

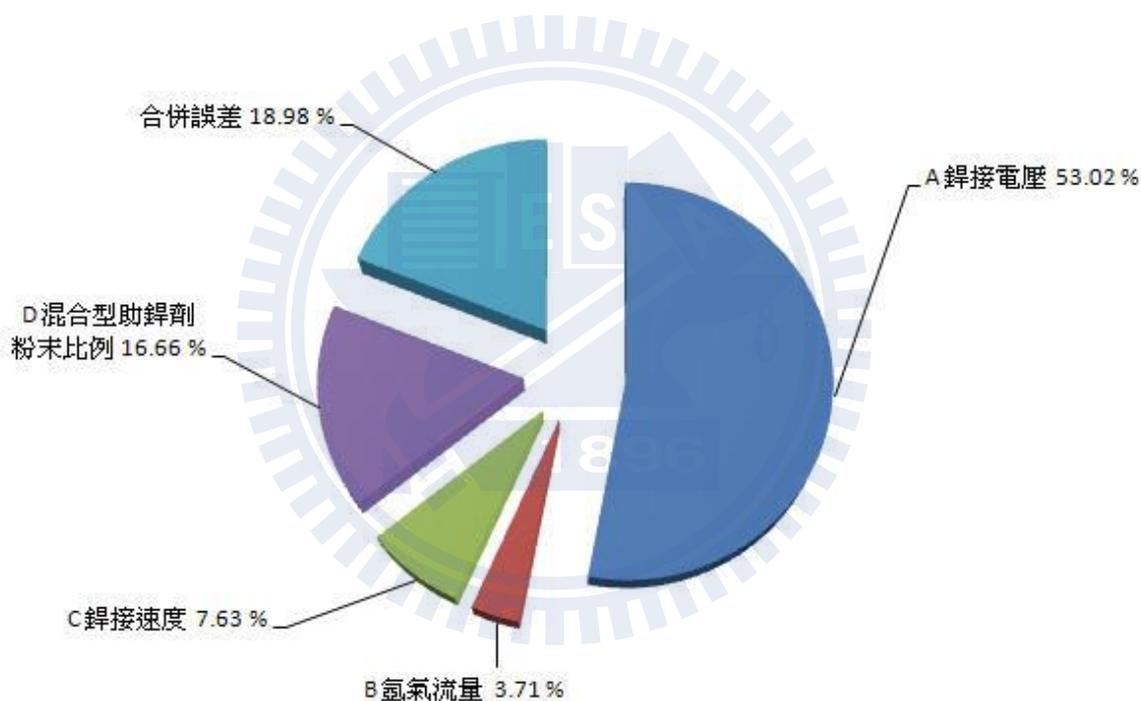


圖 4-51 控制因子貢獻率

#### 4.8.5 確認實驗

為確保所得之參數為最適值，因此必須進行確認實驗。由上文中已知當參數設定為 A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>C<sub>3</sub>D<sub>1</sub> 時，可以得到最佳之鐸道深寬比。其中，確認實驗製程參數如表 4-8 所示，其助鐸劑粉末塗抹部分仍保留未塗區域（實驗分析對照），氬氣流量取最小值，進行確認鐸接實驗。

表 4-8 確認實驗製程參數配置表

No.	銲接電壓 (V)	氬氣流量 (ℓ/min)	銲接速度 (mm/min)	混合型助銲劑粉末比例	
				MoS <sub>2</sub> (%)	MoO <sub>3</sub> (%)
17	21.4	8	403	20	80
18	21.4	8	403	20	80
19	21.4	8	403	20	80

根據表 4-8 實驗結果可得圖 4-52 確認實驗之銲道型態，其中塗敷混合助銲劑區域與未塗區域各取試片作金相實驗及實體顯微鏡鏡拍攝及量測銲道深寬比，整理可得表 4-9，由表可知，No.17、No.18 及 No.19 三組實驗的 S/N 值，均落在 95% 信賴區間 (Confidence interval) 之內，因此，可經由此確認實驗結果，判定本研究應用田口方法所得之最適條件符合再現性。

#### 4.8.6 實驗的再現性

田口方法中確認實驗的進行主要用以確認所選擇的最適條件是否具有再現性。再現性的評估可先將實驗所得的最適條件以「加法模式」預估，亦即將確認實驗實際所觀察到的 S/N 比與所預估的做比較，如果兩者非常接近，則加法模式成立，也表示實驗的再現性良好[37]。

預估信號雜音比：

$$\begin{aligned}\hat{S/N} &= \bar{\eta} + a_i + b_j + c_k + d_l + e \\ &= \bar{\eta} + a_1 + b_1 + c_3 + d_1 + e\end{aligned}$$

因誤差值較小將之忽略，得

$$\begin{aligned}\hat{S/N} &= \bar{\eta} + a_i + b_j + c_k + d_l \\ &= \bar{\eta} + (A_1 - \bar{\eta}) + (B_1 - \bar{\eta}) + (C_3 - \bar{\eta}) + (D_1 - \bar{\eta}) \\ &= A_1 + B_1 + C_3 + D_1 - 3\bar{\eta} \\ &= -5.061 - 5.885 - 5.802 - 5.813 - 3(-6.396) = -3.373\end{aligned}$$

計算最佳條件下之預測平均值的信賴區間公式為

$$CI_1 = \sqrt{F_{\alpha;1,v_2} \times V_e \times \left(\frac{1}{n_{eff}}\right)}$$

以 95% 信賴區間，合併誤差變異數自由度 3 之 F 值查表[37]可知

$$F_{0.05; 1,3}=10.13$$

有效觀測數

$$n_{eff} = \frac{\text{總實驗次數}}{1 + [\text{用來估計平均值之因子 自由度總和}]}$$

$$= \frac{16}{1 + V_A + V_B + V_C + V_D} = \frac{16}{1 + 3 + 3 + 3 + 3} = \frac{16}{13} = 1.23$$

合併誤差變異數(Pooled error variance) $V_e$ 由表 4-8 可知為 0.375。故信賴區間：

$$CI_1 = \sqrt{10.13 \times 0.375 \times \left(\frac{13}{16}\right)} = 1.757$$

因此，最佳條件下之預測 S/N 比的信賴區間為  $-3.373 \pm 1.757$  (-1.616~-5.13)。

確認實驗是用來驗證所預測之最佳條件下之平均值是否有效，因此利用底下公式來計算確認實驗之期望平均值的信賴區間：

$$CI_2 = \sqrt{F_{\alpha; 1, v_2} \times V_e \times \left(\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r}\right)}$$

其中 r 為確認實驗次數， $r \neq 0$ 。本研究之確認實驗做了 3 次，因此 95% 的信賴區間為

$$CI_2 = \sqrt{10.13 \times 0.375 \times \left(\frac{13}{16} + \frac{1}{3}\right)} = 2.086$$

亦即，確認實驗的期望 SN 比之範圍為  $-3.373 \pm 2.086$  (-1.287~-5.459)。

對照實際確認實驗第 17 組、第 18 組及第 19 組參數所得之 S/N 比為 -2.141、-2.060、-2.205 (如表 4-9 所示)，其平均值 -2.135 落在上述的信賴區間範圍內，表示所選取的顯著因子及其對應的水準是很恰當的。故此實驗之再現性良好。

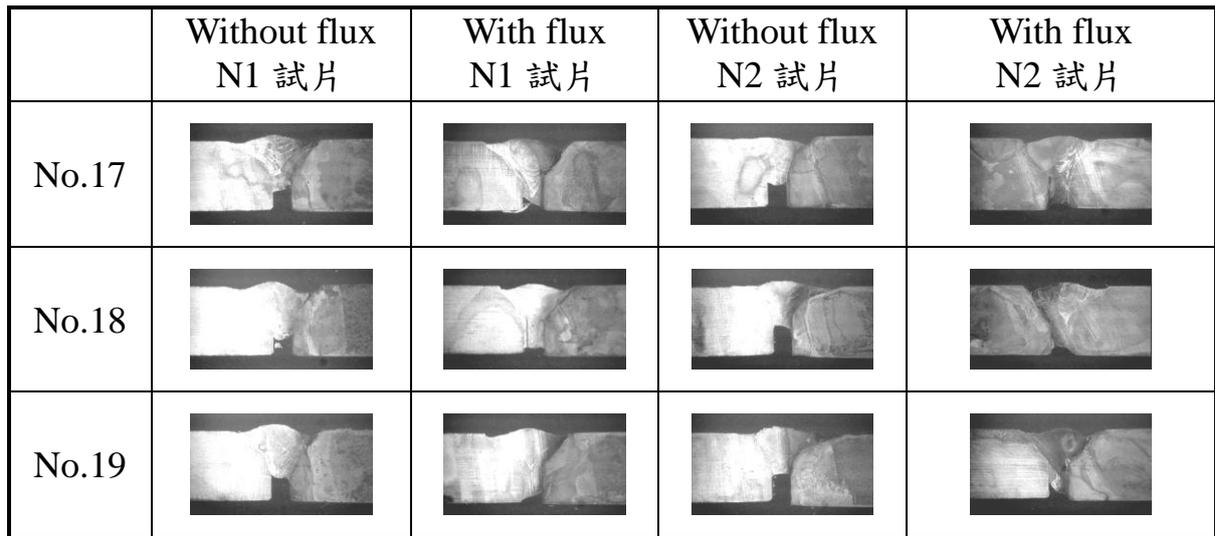


圖 4-52 確認實驗之鐸道型態

表 4-9 確認實驗的結果

	D/W(N1 試片)	D/W(N2 試片)	S/N
No.17	0.740	0.831	-2.141
No.18	0.744	0.843	-2.060
No.19	0.727	0.836	-2.205

#### 4.9 最佳化實驗參數對鐸道顯微組織之觀察

最佳參數條件下之鐸道金相組織可以參考圖 4-53，於不銹鋼側的鐸道邊緣可觀察到沃斯田相加肥粒相之雙相結構，而在熔融線附近可找到一個特別的區域，此區域的晶界特別清晰，但對照圖 4-54 可知，此區的硬度值變化不大。於低碳鋼側的鐸道邊緣可觀察到肥粒鐵晶粒大小及晶粒形狀，尤其肥粒鐵晶界特別清楚，但對照圖 4-54 可知，此區的硬度值變化有下降趨勢。另外，在鐸道中央，未塗有混合型助鐸劑時，其晶粒粗大且完整晶界之顯微組織，此區硬度平均值 248.9Hv。

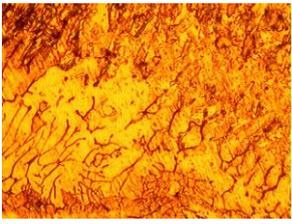
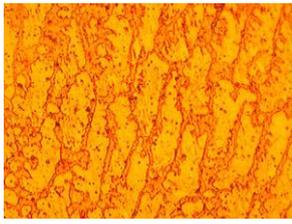
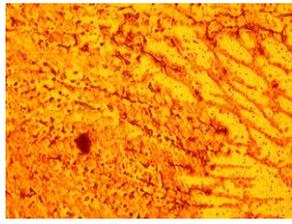
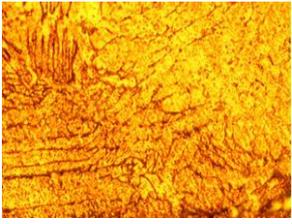
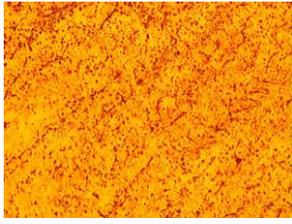
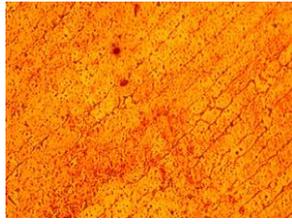
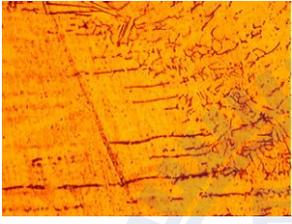
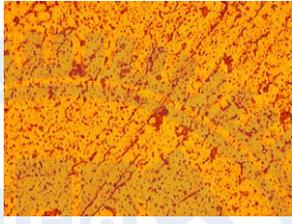
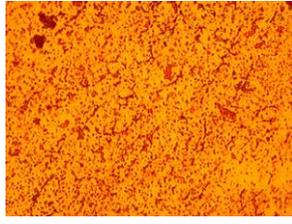
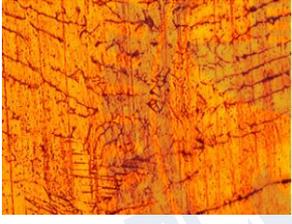
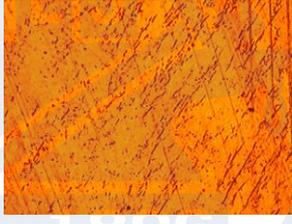
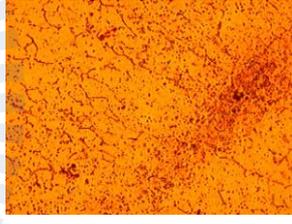
	銲道邊緣 50X (不銹鋼側)	銲道中央 50x	銲道邊緣 (低碳鋼側)
Without flux			
No.17			
No.18			
No.19			

圖 4-53 最佳參數條件下之銲道顯微組織

#### 4.10 最佳化實驗參數對銲道肥粒鐵含量之影響

在最佳參數條件下，當添加  $\text{MoS}_2\text{-MoO}_3$  混合型助銲劑時，其銲道中肥粒鐵含量值為 25.7，表示銲件的熱裂敏感性將再度升高。當未添加混合助銲劑時，其銲道中肥粒鐵含量值為 6.6，其銲件的熱裂敏感性較低。結果顯示，混合型助銲劑的添加，無法降低肥粒鐵含量值。

#### 4.11 最佳化實驗參數對銲道微硬度之影響

在最佳參數條件下，當添加  $\text{MoS}_2\text{-MoO}_3$  混合型助銲劑時，其硬度值變化如圖 4-54 所示，其中銲道硬度平均值 321.9 Hv。當未添加混合助銲劑時，其硬度值變化如圖 4-55 所示，其銲道硬度平均值 248.9 Hv。結果顯示，混合型助銲劑的添加，可提高銲道硬度值。

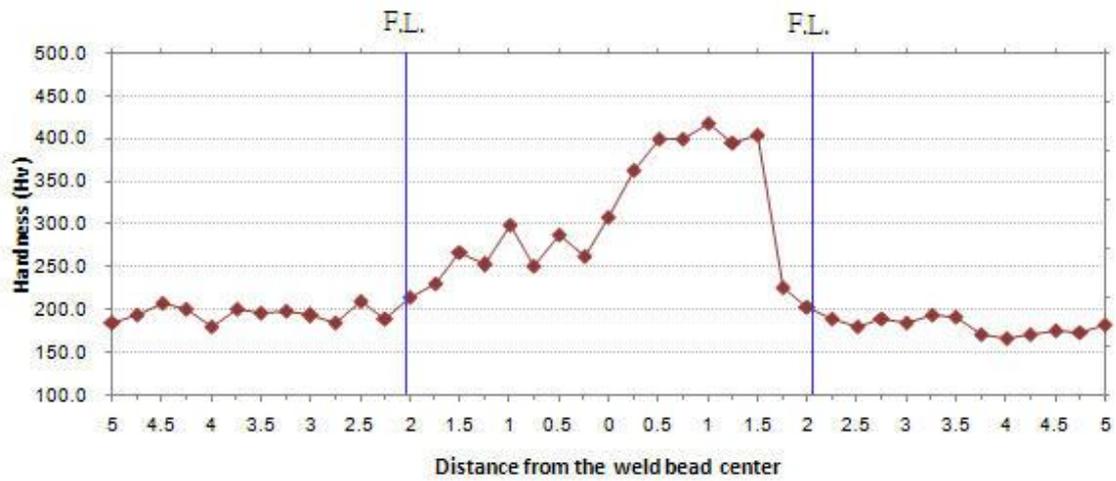


圖 4-54 微硬度分佈曲線- 添加助錒劑之確認實驗

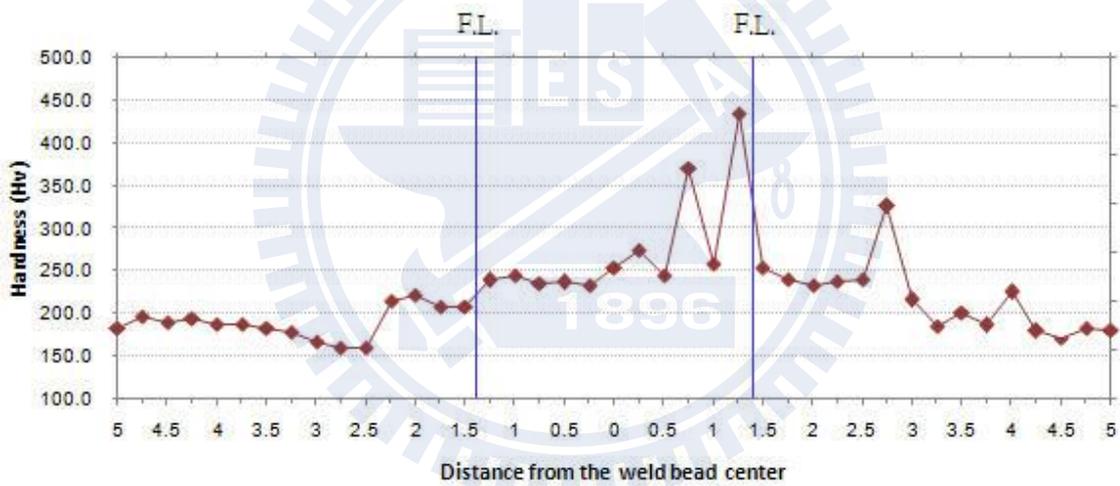


圖 4-55 微硬度分佈曲線- 未添加助錒劑之確認實驗

## 第五章 結論

經實驗結果可歸納出下述結論：

- (1)就鐸道外觀而言，塗敷 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MoS}_2$ 、 $\text{NiO}$ 、 $\text{MoO}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 單一型助鐸劑結果，其鐸道波紋清晰度明顯，尤其是添加 $\text{SiO}_2$ 單一型助鐸劑時，其鐸道波紋清晰度特別明顯。塗敷 $\text{MoS}_2$ - $\text{MoO}_3$ 混合型助鐸劑結果，其在鐸道附近幾乎沒有飛濺物的產生，且可得到較佳的鐸道外觀。進行田口方法鐸接時，若參數設定值為熱輸入量最小(No.4)時，鐸接缺陷有空洞現象(200系)；若參數設定值為熱輸入量最大(No.16)時，熔池形狀呈橢圓形狀；其餘鐸件之鐸道外觀皆有少許飛濺物附著於鐸道附近。其中試片的清潔程度對鐸道外觀影響不大。
- (2)就鐸道形態而言，當添加 $\text{MnO}_2$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MoS}_2$ 、 $\text{MoO}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$ 等單一型助鐸劑時，均可提高鐸道熔深，且亦可得到窄而深的鐸道截面。當添加 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MoO}_3$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 等單一型助鐸劑時，均可提高鐸道熔融面積。其中，以 $\text{TiO}_2$ 單一助鐸劑的添加對鐸道熔融面積最為顯著。當添加 $\text{MnO}_2$ - $\text{MoO}_3$ 混合型助鐸劑時，可提高鐸道熔深，且亦可得到窄而深的鐸道截面。當添加 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ - $\text{MoO}_3$ 、 $\text{MnO}_2$ - $\text{MoS}_2$ 、 $\text{MoS}_2$ - $\text{MoO}_3$ 等混合型助鐸劑時，均可提高鐸道熔融面積。其中，以 $\text{MoS}_2$ - $\text{MoO}_3$ 混合型助鐸劑的添加對鐸道熔融面積最為顯著。進行田口方法鐸接時，塗有混合助鐸劑( $\text{MoS}_2$ - $\text{MoO}_3$ )普遍皆可增加鐸道深度。
- (3)就鐸道顯微組織觀察結果，當添加 $\text{MgCO}_3$ 、 $\text{MgO}$ 等單一型助鐸劑時，於不銹鋼側之熔融線附近可找到一個特別的區域，此區域的晶界特別清晰，但此區的硬度值變化不大。當添加 $\text{MgCO}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 等單一型助鐸劑時，於低碳鋼側之鐸道邊緣有特別清楚的肥粒鐵晶界，但此區的硬度值變化卻有下降及上升的趨勢。當添加 $\text{MnO}_2$ - $\text{MoO}_3$ 混合型助鐸劑時，於不銹鋼側之熔融線附近亦可找到一個特別的區域，此區域的晶界特別清晰，但此區的硬度值變化不大。當添加 $\text{MoS}_2$ - $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 混合型助鐸劑時，於低碳鋼側之鐸道邊緣有特別清楚的肥粒鐵晶界，但此區的硬度值變化呈下降趨勢。

- (4)就鐸道肥粒鐵量測結果，當添加 $\text{MnO}_2$ 、 $\text{SiO}_2$ 等單一型助鐸劑時，其鐸道中肥粒鐵含量在5~10%左右，因此可使鐸件降低熱烈的敏感性又不致大幅影響其抗腐蝕及韌性。當添加 $\text{MnO}_2$ - $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MoS}_2$ - $\text{MoO}_3$ 等混合型助鐸劑時，其鐸道中肥粒鐵含量亦在5~10%左右，因此可使鐸件降低熱烈的敏感性又不致大幅影響其抗腐蝕及韌性。
- (5)就鐸道硬度而言，當添加 $\text{MoS}_2$ 單一型助鐸劑時，其影響鐸道硬度最為顯著，當添加 $\text{MoS}_2$ - $\text{MoO}_3$ 混合型助鐸劑時，其影響鐸道硬度最為顯著。
- (6)當進行田口方法鐸接時，影響鐸道深寬比的重要參數，依序為鐸接電壓、混合型助鐸劑粉末比例、鐸接速度、氬氣流量；其中鐸接電壓的貢獻率為 53.02%，混合型助鐸劑粉末比例為 16.66%。
- (7)應用田口方法的結果，當製程參數設定值為鐸接電壓 21.4 V、氬氣流量 8 l/min、鐸接速度 403 mm/min、混合型助鐸劑粉末比例（20% $\text{MoS}_2$ +80% $\text{MoO}_3$ ）時，可得最佳之鐸道深寬比，且由確認實驗的結果可知，此最適參數組合具有再現性。



## 參考文獻

1. 朱健松、劉育廷，” 銲接參數對氣體金屬電弧銲接特性之研究” ，農業機械學刊，14 卷 3 期，民國 94 年，pp. 11-29。
2. 李金山、吳炳南、陳石法、張添財、蔡希杰，” 機械材料” ，高立圖書有限公司，四版，臺北，民國 82 年 5 月。
3. 周漢標，” 氣體金屬電弧銲接 [GMAW] 中保護氣體之影響 (上)” ，機械月刊，第十六卷第十二期，民國 79 年 12 月，pp. 130-139。
4. 周怡伶，” 氬銲塗覆助銲劑對低碳鋼銲接性質的影響” ，國立中興大學材料工程學系，碩士論文，民國 93 年 7 月 12 日。
5. 張豪文，” 銲藥添加對不銹鋼 TIG 銲件之影響” ，國立交通大學機械工程研究所，碩士論文，民國 92 年 6 月。
6. 黃振賢，” 機械材料” ，文京圖書有限公司，新修定一版，臺北，民國 89 年 4 月。
7. 王振欽，” 銲接學” ，高立圖書有限公司，台北市，民國 86 年 8 月。
8. 董基良，” 銲接學” ，三民書局，臺北，民國 75 年 1 月。
9. 姜志華、蔡全峰，” 銲接冶金概論” ，徐式基金會，140~148 頁，民國 76 年 8 月。
10. Matsunawa, “Modeling of heat and fluid flow in an: welding”, in: S.A. David, J.M. Vitek (Eds.), Recent Trends in Welding Science Technology, Proceedings of the Third International Conference on Trends in Welding Research, ASM International, pp. 3~16, 1993.
11. 楊廈森，” 淺談不銹鋼銲接” ，銲接與切割，五卷五期，民國 84 年 9 月，pp. 51-57。
12. J.A. Lambert, Weld. J., p202s , Vol67, 1988.
13. 曾光宏，” 沃斯田鐵不銹鋼銲接性之探討” ，機械技術，160 期，民國 87 年，pp. 96-103。
14. J.C. Borland, Brit. Weld. J., 7(8):508-512, 1960.
15. 謝榮淵，” 不銹鋼之銲接特性( I )” ，銲接與切割，第七卷第五期，民國 86 年 9 月，pp. 40-49。

16. R. A. Mulford, E. L. Hall and C. L. Braint, Corrosion, p.132, 39 (1983).
17. 井上博，” 熔接學會誌” ，41(1972) ， pp. 115 。
18. 孟繼洛，” 機械材料” ，曉園出版社，pp. 201，pp. 205-7，pp. 211，pp. 214 ，民國 79 年。
19. 周長彬、蔡丕椿、郭央謹，” 銲接學” ，初版，全華科技圖書，臺北，民國 90 年 2 月。
20. C.D. Lundin, W.T. DeLong, and D.F. Spond, “Ferrite Fissuring Relationship in Austenitic Stainless Steel Weld Metals”, Weld. J., 241s-246s , 54(1975)(8).
21. N. Suutala, Metall. Trans., 13A(12), 2121-2130, 1982.
22. N. Suutala, T. Takalo, and T. Moisio, Metall. Trans., 11A(5), 717-725, 1980.
23. N. Suutala, Metall. Trans., 14A(2), 191-197, 1983.
24. J.A. Brooks, J.C. Williams, and A.W. Thompson, Metall. Trans., 14A(1), 23-31, 1983.
25. J.A. Brooks, J.C. Williams, and A.W. Thompson, Metall. Trans., 14A(7), 1271-1281, 1983.
26. 張復萌，” 熱處理對鋁合金銲接熱影響區之研究” ，國立台灣師範大學工業教育研究所碩士論文，民國 81 年 6 月。
27. I.J. Polmear, "Metallurgy of the Light Metals", Edward Arnold, 1981.
28. J.F. Lancaster, “Metallurgy of Welding”, 6th ed, George Allen & Unwin, May 1999.
29. P.J. Modensi, “TIG welding with single-component fluxes”, Journal of Materials Processing Technology,9(9),260-265, 2000.
30. B.J. Keene, K.C. Mills, R.F. Brooks, Mater. Sci. Tech.,1(1085), 568.
31. 陳金富、林宏昌，” 熔接學” ， 二版，全華科技圖書，臺北，民國 75 年 5 月。
32. 曾光宏，” 銲接缺陷之形成(I)、(II)” ，銲接與切割，第九卷第六期，1999年11月，pp. 17-23，第十卷第一期， 2000年1月，pp. 39-45 。

33. 王明堂，”助銲劑對 1020 低碳鋼 MIG 銲件之影響”，國立交通大學工學院精密與自動化工程學程，碩士論文，民國 94 年 6 月。
34. 杜金山，”不銹鋼 MIG-Flux 銲接製程技術之研究”，國立交通大學工學院精密與自動化工程學程，碩士論文，民國 94 年 6 月。
35. 黎正中譯，”穩健設計之品質工程”，臺北圖書公司，1993，pp. 15~195。
36. Phadke. M. S., Quality Engineering Using Robust Design, Prentice-Hall, 1989.
37. 蘇朝墩，”品質工程”，五版，中華民國品質協會，臺北，民國 97 年。
38. D.F. Paulonis and J.J. Schirra, "Alloy 718 at Pratt & Whitney - Historical Perspective and Future Challenges", in Superalloy 718, 625, 706 and Various Derivatives Edited by E.A. Loria, pp. 13-23, TMS, Warrendale, 2001.
39. 黃泰勳，”低碳鋼與不銹鋼異種材料 TIG-Flux 接合製程參數最佳化之研究”，國立交通大學工學院精密與自動化工程學程，碩士論文，民國 95 年 6 月。
40. 周漢標，”氣體金屬電弧銲接 [GMAW] 中保護氣體之影響 (下)”，機械月刊，第十七卷第一期，民國 80 年 1 月，pp. 237-242。
41. 黃和悅、徐享文、曾光宏、周長彬，”A-TIG 銲接製程技術開發”，銲接與切割，第十四卷第二期，民國 93 年 6 月，pp. 14-22。
42. 徐享文、黃和悅、曾光宏、周長彬，”助銲添加劑對低碳鋼電漿銲接特性之評估研究”，銲接與切割，第十七卷第一期，民國 96 年 3 月，pp. 56-60。