

國立交通大學

機械工程研究所

博士論文

助銲劑對 1020 碳鋼及 304 不銹鋼電漿銲接特
性之研究

**Effects of flux on the characteristics of plasma arc weldment
of 1020 carbon steel and 304 stainless steel**

研究生：徐享文

指導教授：周長彬

中華民國九十八年一月

助銲劑對 1020 碳鋼及 304 不銹鋼電漿銲接特
性之研究

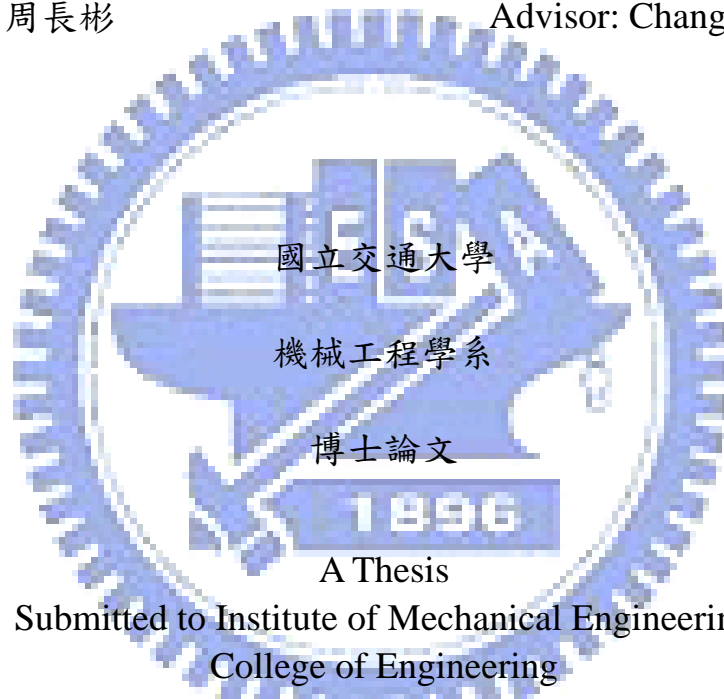
**Effects of flux on the characteristics of plasma arc weldment
of 1020 carbon steel and 304 stainless steel**

研 究 生：徐亭文

Student: Sheang-Wen Shyu

指 導 教 授：周長彬

Advisor: Chang-Pin Chou



A Thesis

Submitted to Institute of Mechanical Engineering
College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Doctor of Philosophy

in

Mechanical Engineering

January 2009

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年一月

助銲劑對 1020 碳鋼及 304 不銹鋼電漿銲接特性之研究

研究生：徐享文

指導教授：周長彬

國立交通大學機械工程學系

摘要

本研究之主要目的在探討活性助銲劑對電漿銲接特性之影響研究。本文除了對電漿銲接加入助銲劑所產生穿深能力之增加機制作探討外，亦針對惰氣鎢極電弧銲接的各種性質作一差異性之比較。為了瞭解活性助銲劑對不同材質的效應，實驗中分別採用 AISI 1020 低碳鋼與 AISI 304 沃斯田鐵型不銹鋼以不填料方式來進行 Bead-on-plate 實驗。使用之活性助銲劑有氧化物之 MoO_3 、 MnO_2 、 TiO_2 、 SiO_2 、 Cr_2O_3 、 Fe_2O_3 及 ZnO 等與碳酸鹽之 NiCO_3 、 MgCO_3 、 MnCO_3 等粉末，銲接過程中利用影像擷取系統即時記錄銲接過程，並採訊號同步接收方式來擷取銲接電弧動態影像。

銲接完成後，截取銲道之橫截面來觀察銲道型態與微觀組織、測定硬度及量測不銹鋼銲道殘留肥粒相含量，並做拉伸試驗來瞭解銲道機械性質。利用 EDS 來分析銲道合金元素成份之變化，以平均垂直位移法來量測銲件角變形。

實驗結果顯示添加氧化物所組成之活性助銲劑將可有效提高低碳鋼與

不銹鋼銲接金屬熔深效率與銲接熱源之能量密度，而得到窄而深的銲道截面與較小的銲接熱影響區，亦可有效降低銲件變形。提高銲道穿透能力的主要作用機制是由於活性助銲劑能促使電漿電弧收縮並減少熔融銲池面積所致。添加活性助銲劑之銲接製程導致不銹鋼在銲後會有較多的殘留肥粒相含量，因此可有助於降低金屬熱裂敏感性的效果。在電漿銲接中單一成分助銲劑以 SiO_2 對 304 型不銹鋼熔深效果改善最為顯著，與不使用助銲劑時比較約可提升 200%。混合助銲劑則以 SiO_2 60%+ MnO_2 40% 較佳，與不使用助銲劑時比較約可提升 300%，熔深效果極為顯著。由本文實驗結果顯示，活性助銲劑添加後，在實際銲接工程應用上確實可大幅提高生產效率與降低生產成本，極具工業應用之潛力。



Effects of flux on the characteristics of plasma arc weldment of 1020 carbon steel and 304 stainless steel

Student: Sheang-Wen Shyu

Advisor: Chang-Pin Chou

Department of Mechanical Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

The purpose of this paper was to investigate the effects of activating flux on the characteristics of plasma arc welding process. This study compares plasma arc welding with TIG welding on the various properties of weldment, and also explores the mechanism of how activating flux improves weld penetration. In order to evaluate the effect of activating flux on the different materials, AISI 1020 low carbon steel and AISI 304 austenitic stainless steel were used to produce a bead-on-plate welded joint. The activating fluxes were oxides (MoO_3 , MnO_2 , TiO_2 , SiO_2 , CrO_3 , Fe_2O_3 and ZnO) and carbonates (NiCO_3 , MgCO_3 and MnCO_3) powders. During welding, a CCD camera system was used to observe and record images of the arc profiles.

The microstructure and morphology of the welds obtained were examined by means of an optical microscope using transverse weld cross-sections prepared by cutting. The retained ferrite content of welds was measured by using the Ferritscope. Transverse tensile and Vickers hardness tests were used to determine on the mechanical properties of weldments. EDS were employed for studying the elemental analysis of the welds. The mean vertical displacement method was utilized for calculating the welding angular distortion.

The experimental results indicate that higher penetration depth and narrower HAZ range are the results of the increased energy density of the welding heat source, and therefore the angular distortion of carbon steel and austenitic stainless steel weldments can be reduced, while using a certain oxide

flux. Physically constricting the plasma column and reducing the anode spot are the possible mechanisms for the main contribution to the augmented weld penetration capability. The number of ferrite in stainless steel welds was increased due to the flux additions, and thus helps reduce hot cracking susceptibility in welded structures. The penetration capability up to 200% can be obtained in plasma welds that use SiO_2 flux when compared with the non-flux addition welds. The SiO_2 60%+ MnO_2 40% mixture flux can greatly increase penetration depth up to around 300%. TIG and plasma welding with activating flux could bring about large benefits in terms of productivity and cost-effect and achieve practical use.



誌謝

經過多年的博士生涯，學生生活終於要劃下句點。一路走來，感謝許多人的幫助與指引，讓我在學術知識與個人發展上都獲得許多充實與成長。在此首先要謝謝恩師周長彬教授您的熱誠督促與指導及就學期間對我的關懷勉勵，讓我在探索知識的路上收獲良多，人格發展及待人處事上更益成熟。僅在此致上深深的謝意與敬意。亦對交大的師長們指引致上深誠的謝意。

在求學期間，感謝學長曾光宏博士與黃和悅學長的頃囊相授與方針指引使得本研究能更快更順利的進行，亦感謝研究夥伴江中彥、杜俊豪等在銲接過程中的分工與合作無間，使得銲接的技術更加純熟，實驗進度掌控更加從善如流。實驗中亦感謝台灣師範大學的學長鄭慶民教授，提功儀器操作上的協助與指點。此外，還要感謝銲接實驗室的所有同仁，由於你們在銲接知識上不吝惜之經驗交流與知識傳承使我受益良多。

接著要感謝周遭時時予我不斷關懷與鼓勵的父母、太太、親朋好友及學校的同事們，使我在忙錄的工作之餘能不斷的追求新知，並且順利完成博士學程。而聯合大學的同事蔡攻岑老師更是兩肋插刀，挺力相助，總是三番兩次的在百忙之中抽空完成最後英文校正之工作，在此表答最誠摯的謝意。

總之，要感謝的人實在太多了，僅以此論文獻給所有關心及祝福我的人，謝謝你們！

目錄

第一章 緒論

1.1 研究背景與動機	1
1.2 研究目的	3
1.3 研究方法	4

第二章 文獻探討

2.1 電漿電弧銲接原理	5
2.2 電漿電弧銲與氬銲及惰氣金屬線銲的比較	6
2.3 銲接材料	10
2.3.1 AISI 1020 成分與機械性質	10
2.3.2 AISI 1020 冶金特性	12
2.3.3 AISI 1020 銲接特性	14
2.4 不銹鋼	15
2.4.1 不銹鋼之成分與機械性質	15
2.4.2 不銹鋼的分類	16
2.4.3 沃斯田鐵不銹鋼之凝固過程	19
2.4.4 肥粒相組織對沃斯田鐵不銹鋼之影響	22
2.4.5 沃斯田鐵不銹鋼之銲接性	24
2.5 銲接氣體	25

2.5.1 銲接氣體之功用	-----	25
2.5.2 銲接氣體之特性	-----	25
2.5.3 銲接氣體之選擇	-----	27
2.6 銲接缺陷	-----	30
2.6.1 銲接變形之形式	-----	30
2.6.2 銲接變形之形成機制	-----	32
2.7 助銲劑	-----	33
2.7.1 助銲劑之功用	-----	33
2.7.2 助銲劑之種類	-----	34
2.7.3 助銲劑中之成份對銲接金屬之影響	-----	36
2.8 銲道熔透深度變異之原因	-----	39
2.8.1 表面張力影響熔融區流體流動之機構	-----	40
2.8.2 電弧效應	-----	41
2.8.3 微量元素對銲接性之影響	-----	42
第三章 實驗方法與步驟		
3.1 實驗流程	-----	45
3.2 銲接試片之準備	-----	46
3.3 銲接機設備	-----	46
3.4 助銲劑之準備與配製方法	-----	48

3.5 角變形量測-----	50
3.6 電弧形態與熔池拍攝-----	52
3.7 金相實驗-----	52
3.8 鐳道深寬比量測-----	52
3.9 肥粒相含量量測-----	54
3.10 維氏硬度試驗-----	54
3.11 拉伸試驗-----	54
3.12 SEM 與 EDS 分析-----	55
第四章 結果與討論	
4.1 AISI 1020 低碳鋼-----	56
4.1.1 電漿鐳接參數與助鐳添加劑對鐳道熔深之影響-----	56
4.1.2 電漿鐳接參數與助鐳添加劑對鐳道深寬比之影響-----	60
4.1.3 電漿鐳接參數與助鐳添加劑對鐳道硬度之影響-----	62
4.1.4 碳酸鹽助鐳劑對低碳鋼電漿鐳接熔深之影響-----	64
4.1.5 EDS 成份分析-----	65
4.2 304 型不銹鋼-----	66
4.2.1 活性助鐳劑添加對於 PAW 鐳件角變形之影響-----	68
4.2.2 PAW 鐳接參數對鐳道熔融面積之影響-----	71
4.2.3 鐳接參數對鐳道熔透深度之影響-----	72

4.2.4 銲接製程參數對銲道肥粒相含量之影響 -----	73
4.2.5 銲接製程對銲道機械性質之影響 -----	75
4.3 TIG 與 PAW 銲接特性比較-----	77
4.3.1 助銲劑對表面外觀之影響 -----	77
4.3.2 助銲劑對銲道型態之影響 -----	78
4.4 添加助銲劑對增加銲道熔深之機制 -----	79
4.5 混合型活性助銲劑添加對電漿銲接之影響 -----	84
4.5.1 混合型活性助銲劑添加對電漿銲接銲道外觀之影響 -----	84
4.5.2 銲道機械性質 -----	87
4.5.3 EDS 成份分析 -----	89
第五章 結論 -----	92
參考文獻 -----	95



圖目錄

圖 2-1 電漿電弧銲接原理 -----	6
圖 2-2 電漿電弧銲接的鑰匙孔(keyhole)效應-----	6
圖 2-3 PAW 與其他銲接原理之比較圖-----	7
圖 2-4 TIG 電弧與 PAW 電弧的弧寬比較 -----	8
圖 2-5 TIG 電弧與電漿弧柱的溫度分布比較-----	9
圖 2-6 AISI 1020 碳鋼之部份平衡相圖 -----	13
圖 2-7 (a)波來鐵(b)變韌鐵(c)回火麻田散鐵($\times 7500$)-----	14
圖 2-8 銲接部份的熱影響區之形成 -----	15
圖 2-9 Fe-Cr-Ni 之虛擬二元相圖 -----	20
圖 2-10 沃斯田鐵不銹鋼之固化模式-----	22
圖 2-11 銲接氣體之熱傳導性-----	26
圖 2-12 銲接氣體對銲道截面形狀之影響-----	29
圖 2-13 銲接變形之基本形式-----	31
圖 2-14 對接銲角變形之形成示意圖-----	32
圖 2-15 銲池中驅動流體流動之力量-----	41
圖 3-1 銲接試片之前處理 -----	46
圖 3-2 電漿電弧銲接機(pwh/m-4a welding torch)與其配件-----	47

圖 3-3 惰性氣體鎢極銲接機(TIG)	-----	48
圖 3-4 活性助銲劑塗敷示意圖	-----	49
圖 3-5 銲件變形量測示意圖	-----	51
圖 3-6 銲道形狀量測示意圖	-----	53
圖 3-7 拉伸試片規格圖	-----	55
圖 4-1 氧化物助銲添加劑對低碳鋼電漿銲道熔深之影響	-----	57
圖 4-2 電漿銲接參數與助銲添加劑對低碳鋼電漿銲道深寬比之 影響	-----	61
圖 4-3 助銲添加劑對低碳鋼電漿銲道硬度之影響	-----	63
圖 4-4 碳酸鹽助銲添加劑對低碳鋼電漿銲道熔深之影響	-----	64
圖 4-5 碳酸鹽助銲添加劑對低碳鋼電漿銲道深寬比之影響	-----	64
圖 4-6 PAW-Flux 銲接製程之 EDS 光譜分析結果	-----	65
圖 4-7 氧化物助銲添加劑對 304 不銹鋼電漿銲接銲道熔深之 影響	-----	67
圖 4-8 氧化物助銲添加劑對 304 不銹鋼電漿銲接銲道深寬比之 影響	-----	68
圖 4-9 銲接參數對銲道角變形之影響	-----	70
圖 4-10 銲接參數對銲道熔融面積之影響	-----	71
圖 4-11 銲接參數對銲道熔融深度之影響	-----	72

圖 4-12 銲接參數對銲道型態之影響-----	73
圖 4-13 銲接參數對銲道肥粒相之影響-----	75
圖 4-14 銲接參數對銲道微硬度之影響-----	76
圖 4-15 SiO_2 助銲劑對不銹鋼銲道外觀之影響-----	77
圖 4-16 添加 SiO_2 助銲劑對 304 不銹鋼銲道型態之影響-----	78
圖 4-17 TIG 和 PAW 使用助銲劑與不添加助銲劑時之銲接電流 與熔透深度之關係圖-----	79
圖 4-18 添加助銲劑對於 TIG 銲接時對電漿電弧柱與陽極斑點 之影響-----	80
圖 4-19 添加助銲劑於 PAW 銲接時對電漿電弧柱與陽極斑點之影響 -----	84
圖 4-20 混合型活性助銲劑添加對電漿銲接銲道外觀之影響-----	85
圖 4-21 混合型活性助銲劑添加對電漿銲接銲道深寬比之影響-----	86
圖 4-22 304 不銹鋼使用助銲劑與否之金相組織-----	88
圖 4-23 拉伸試片破斷面之 SEM 觀察-----	89
圖 4-24 304 不銹鋼 PAW-Flux 銲接製程之 EDS 光譜分析結果---	90

表目錄

表 2-1	AISI 1020 加工特性	11
表 2-2	AISI 1020 物理性質及機械性質	12
表 2-3	不銹鋼之主要分類表	17
表 2-4	不銹鋼之物理性質	17
表 2-5	不銹鋼各系列特性	18
表 2-6	銲接氣體的比重	26
表 2-7	銲接氣體的解離電壓值	27
表 4-1	PAW-Flux 銲接製程之 EDS 成份分析結果	66
表 4-2	不銹鋼電漿銲接之拉伸試驗結果	77
表 4-3	混合助銲劑對 304 不銹鋼電漿銲接深寬比之量測值	86
表 4-4	304 PAW-Flux 銲接製程之機械性質測試結果	87
表 4-5	304 不銹鋼 PAW-Flux 銲接製程之 EDS 成份分析結果	91

第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

銲接素有『工業縫紉機』之稱，可將過於複雜而無法用一般機器加工製作完成之機件，採用多片簡單幾何型形狀的零件經銲合加工而完成，實為製造工業不可或缺的一種成形技術。銲接雖然是發展已久的技術，但隨著科技之迅速進步發展，銲接技術並沒有因科技之進步而被淘汰，反而隨著科技之精進而日新月異，並普遍應用於現今的工業上，例如：機械製造業、航空工業、電子、國防工業、汽車、光電產業...等。然而，隨著各產業屬性不同，對於銲接技術需求也不同。不同產業其所需突破課題與技術需求雖然各有不同，然不外乎是朝著新技術、難熔材料銲接、異種材質銲接、銲接組織與變形改良與更具效率的高熔深銲接技術等目標發展。在這些發展課題中，尤其以銲道熔深不足而需要多次銲接造成熔接效率低落，且因多次之熱循環對銲道及銲接母材產生晶粒粗大等之不良影響，在實務上最常發生。故發展高熔深銲接技術實為當務之急。

電漿電弧銲 (plasma arc welding, PAW) 又名電離氣電弧銲接，是利用電漿作為熱源來施銲的一種銲接方法。其方式是將能夠電離的氣體（通常為氬、氦或氫氣等），加壓後迫使流經銲鎗噴嘴內正負兩極間的直流電弧使之電離成為電漿。氣體分子受到電弧的高溫加熱而分裂成帶電的高溫高壓離

子態的電離氣和游離熱電子，隨同電弧經鉸鎗噴嘴高速噴出至鉸件表面。噴出之電離氣與常溫的鉸接工件接觸時，電離氣與電子再度結合為氣體分子，並釋放出大量的熱量。產生的高溫即可將鉸件熔融而接合。而電離氣除用於鉸接之外，尚可應用於切割、金屬噴鉸（metal spraying）、物理氣相沉積（PVD）以及化學氣相沉積（CVD）等製程[1]。

PAW 的鉸接效率雖然比不上雷射鉸接及電子束鉸接，且鉸件、鉸道成品亦有一段差距。但是，PAW 的設備卻比雷射鉸接及電子束鉸接相對廉宜且有現場使用方便性佳之優點。

PAW 與設備近似的 MIG 鉸接法相比較時，MIG（或 TIG）其使用之氣體僅供保護鉸道不被氧化，但 PAW 有較不會噴濺之優點；當與 TIG 比較，PAW 鉸接速度較快、效率高，縱使形成高熔透深度也不易產生變形。

雖然 PAW 本身有著熔透深度較深且能量密度極高的特性，但如能再次使得電弧及熱量更為集中，使鉸件之熔透深度再次提昇、鉸道的寬度下降，則鉸件的熱影響區將會更小，且在不破壞材料機械性質的情況下，將是極具應用的前景。因為目前工業界普遍面臨節能減碳，以及降低成本的壓力。所以若能使熔透深度提昇，則可提高鉸接品質外，更可節省材料及鉸接能源消耗。

因此近年來，高熔透性電弧鉸接技術逐漸受到鉸接業界的高度重視，其主要的幾種關鍵技術中，最簡單有效者乃在於添加活性助鉸劑(Activating

flux)於傳統電弧銲接中，即可提升銲道熔深效果。然而，目前世界各國對此高熔深銲接技術的探討都集中於如何提升熔深較淺的 TIG 製程，相對於熔透效率已被認為很好之 PAW 製程則在公開發表文獻上鮮少有此類相關的報導。因此，本研究動機乃是基於提高 PAW 銲件熔透深度之條件下，以期瞭解氧化物型助銲劑對高合金鋼與低合金鋼的各種性質影響。使銲接業界對於提升生產效率、品質及節約能源方面更有助益。

1.2 研究目的

本研究之主要目地在於探討「活性助銲劑」對 PAW 電弧銲接熔深、銲接變形、機械性質等特性之影響研究。實驗材料分別採用工業界應用性最廣泛之 AISI 1020 低碳鋼與 304 型不銹鋼，施予 PAW 電弧銲接，觀察其銲道性質影響之變異。

本研究項目包括：

- 一、研究添加活性助銲劑對於 AISI 1020 低碳鋼與 AISI 304 型不銹鋼施予 PAW 銲接時其銲道型態之影響。
- 二、研究添加活性助銲劑對於 AISI 1020 低碳鋼與 AISI 304 型不銹鋼施予 PAW 銲接時其角變形量之影響。
- 三、研究添加活性助銲劑對於 AISI 1020 低碳鋼與 AISI 304 型不銹鋼施予 PAW 銲接時其銲道微觀組織與硬度值的影響。

四、研究添加活性助銲劑對於 AISI 1020 低碳鋼與 AISI 304 型不銹鋼施

予 PAW 銲接時其銲道合金元素成分分析。

五、研究添加活性助銲劑對於 AISI 1020 低碳鋼與 AISI 304 型不銹鋼施

予 PAW 銲接時其銲道拉伸強度之影響。

六、綜合以上之性質從而獲得電弧銲接之最佳活性助銲劑。

1.3 研究方法

為研究「活性助銲劑對電漿銲接特性之影響」，銲接前先將母材用丙酮清洗乾淨並將銲藥均勻塗佈於母材欲銲接之部位，然後採用不加填料金屬的方式來進行 Bead-on-plate 銲接實驗，採用實體顯微鏡來分別觀察 AISI 1020 低碳鋼與 AISI 304 不銹鋼銲道截面形狀，並以平均垂直位移方式來量測銲件角變形量，用光學顯微鏡來觀察銲道微觀組織，及使用維氏硬度試驗機與萬能拉伸試驗機來測試銲件之銲道硬度與機械強度，最後以 EDS 來分析銲道合金元素之成份。其中不銹鋼還使用肥粒相測定儀來量測銲道殘留肥粒相之含量。

第二章 文獻探討

2.1 電漿電弧銲接原理

電漿電弧銲接其銲接原理為：把工件接正極，鎢極電源接負極，將能夠電離的氣體迫使流經銲鎗噴嘴內正負兩極間之直流電弧，氣體分子受電弧的高溫加熱而分裂成高溫高壓的電離氣與電子，隨同電弧經銲鎗噴嘴噴出，噴出之電離氣及電子與常溫的銲接工件接觸時，電離氣與電子再度結合為氣體分子，釋放出大量的熱量，經由縮口噴嘴噴出之電漿束具有高能量而產生高溫熔化金屬表面(如圖 2-1)，其高動量則使電漿氣體繼續深入而貫穿金屬底面，最後藉著表面張力作用，使熔融的金屬收縮成銲珠，此即為鑰匙孔效應(如圖 2-2)。除用於銲接之外，電漿電弧尚可應用於切割(cutting)、金屬噴銲(metal spraying)等[1-4]。

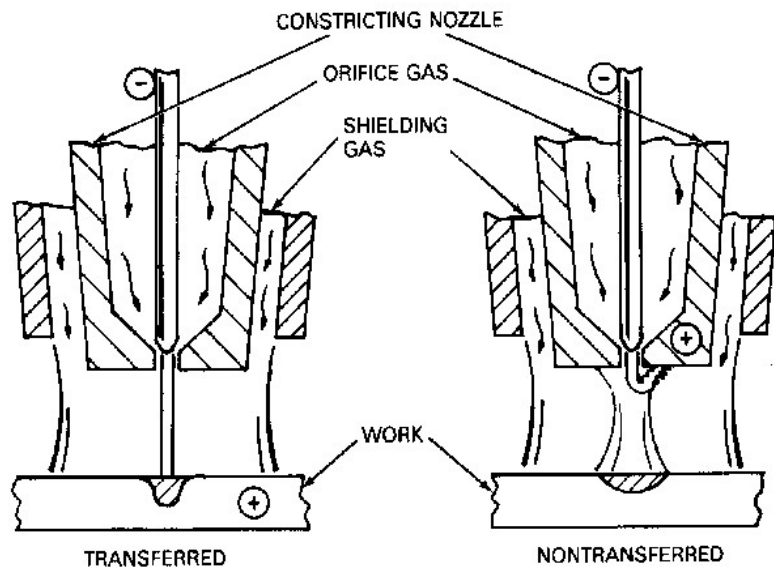


圖 2-1 電漿電弧銲接原理[1]

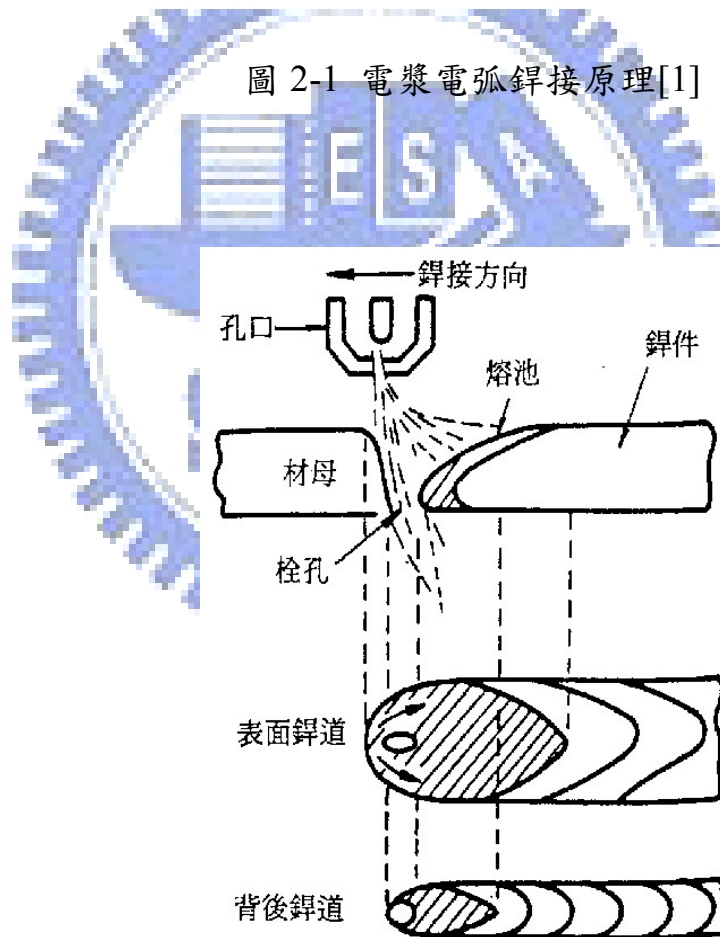


圖 2-2 電漿電弧銲接的鑰匙孔(keyhole)效應[1]

2.2 電漿電弧銲與氬銲及惰氣金屬線銲的比較[3-5]

電漿電弧銲接與 TIG 銲接相同都使用鎢棒作電極，且遮蔽氣體也使用氬氣，所以是屬於惰性氣體電弧銲接法的一種。與 TIG 銲接不同之處(如圖 2-3 所示)，在於鎢電極與遮護罩之間設有銅製的水冷噴嘴(也稱為 Insert tip)，噴嘴與電極間產生先導電弧，氬氣流動於此電弧中(此時氬氣稱為作動氣體或先導氣體)而產生電漿氣。電漿氣通過水冷噴嘴的尖端小孔(口徑 0.8~5.0mm，依電流值而異)，由於熱收束效果而形成高能量密度的電弧束並到達母材。

此外，水冷噴嘴與遮護罩之間通入氬氣作遮蔽氣體，加上遮蔽氣體中通常混有數%的氬氣，可使水冷噴嘴噴出的電漿氣再一次加以熱收束。(電漿切割時並不使用遮蔽氣體，僅使用電漿氣體。)

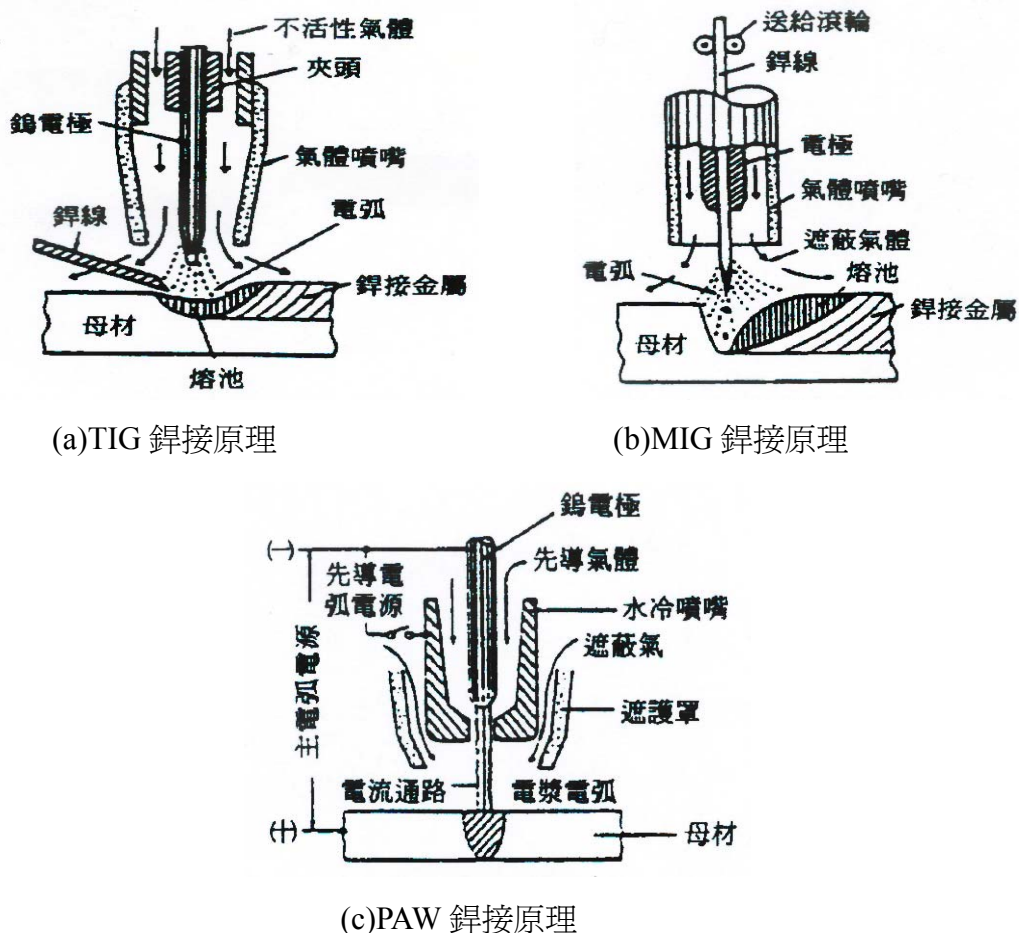


圖 2-3 PAW 與其他銲接原理之比較圖[1]

惰氣金屬線銲接 (MIG) 則與 TIG 銲接非常類似，只是把鎢棒電極更換為消耗式的熔填金屬，其餘構造則大致相同。

在電漿銲接中電漿弧柱由於經過水冷噴嘴充分收束，所以與 TIG 電弧柱比較起來(如圖 2-4 所示)，弧徑較細，弧寬也較窄，因此熱集中度高、熔滲深度深，而且不管是銲接或切割，銲接寬度與熱影響區的寬度均較窄，母材變形也極小。

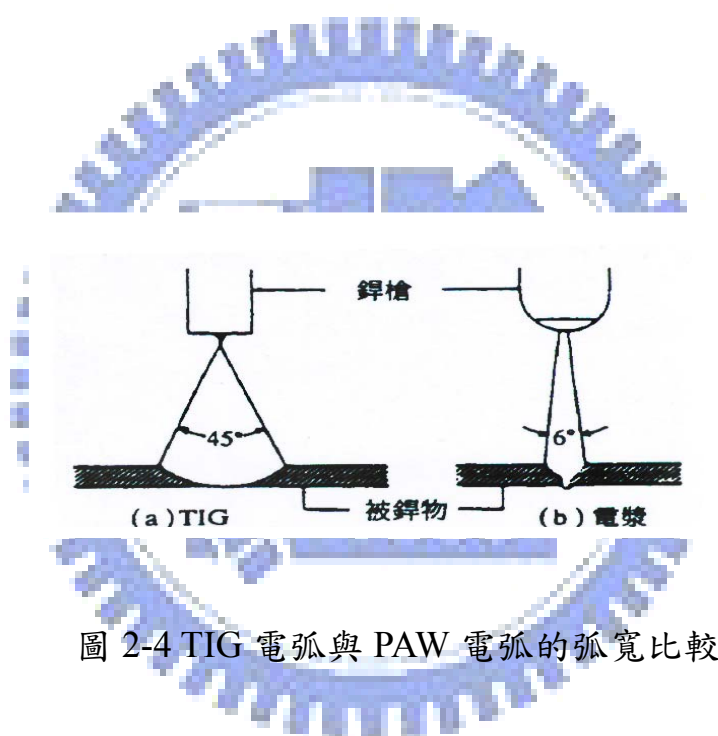


圖 2-4 TIG 電弧與 PAW 電弧的弧寬比較[5]

圖 2-5 為 TIG 電弧與電漿弧柱的溫度分佈比較，如圖所示兩者有很大之差異。部分文獻顯示，TIG 電弧的能量密度約 15 KW/cm^2 ，電漿電弧為 $50\sim 100 \text{ KW/cm}^2$ 。

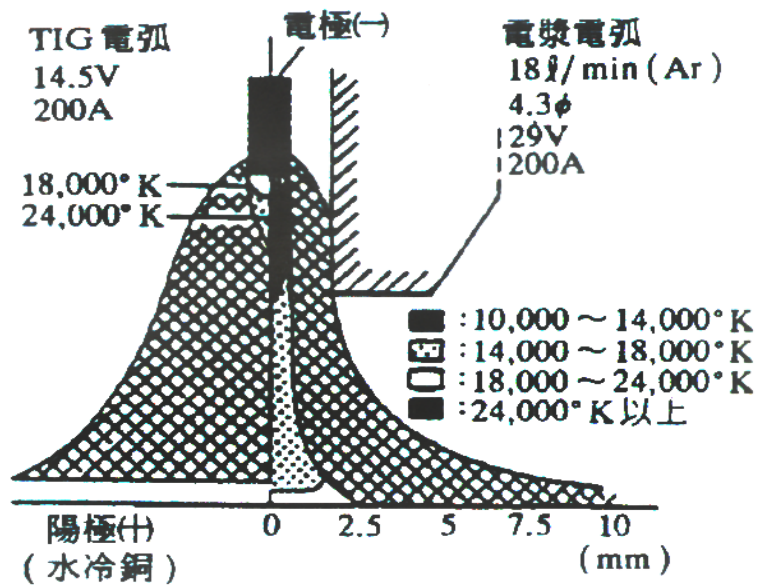


圖 2-5 TIG 電弧與電漿弧柱的溫度分佈比較[5]

另外，電漿銲接的電流範圍、銲接機構與 TIG 電弧來比較時。電漿銲接於小電流銲接時為確保電弧的穩定性，通常採用先導電弧與電漿噴流主電弧重疊的方式。而 TIG 銲接之實用最小電流為 10A，即使使用短電弧銲接也無法以 1A 以下電流來銲接，然而電漿電弧電流可低至 20 mA，因此也有可能對箔類等極薄板銲接。

電漿電弧銲接與 TIG 的應用上比較其優點為：

1. 銲接速度較快，電漿電弧的熱量較氬銲機為高。

2. 銲接金屬較為乾淨。

3. 銲接過程對於參數的變化較不敏感。

4. 貫穿深度較深。也就是銲道深度與寬度之比值較大。

5. 對同樣的銲接僅須較少的電流，所以熱輸入較少。

6. 鎢棒在噴嘴內受到保護，污染較少所以壽命較長。

7. 射出的電弧能維持直線方向和細小的直徑，所以較氬銲能擁有較長的電弧及允許較大的熔池可視度，對手動銲機很有幫助，且極間電壓受電流的變化極小，因此很適合於手工操作。

相對的，電漿電弧銲接與 TIG 相比也有限制與缺點：

1. 具有較高的設備成本，為一般氬銲機的 2~5 倍。

2. 具有較大且重的銲槍。

3. 鎢電極必須精確的固定在銲嘴的中心。

2.3 銲接材料

2.3.1 AISI 1020 成分與機械性質[6]

AISI(American Iron and Steel Institute)和 SAE(Society of Automotive Engineers)所提供的命名系統採用 4 或 5 個數字來命名，其中為首的兩位數代表主要合金元素，而後兩位或 3 位數代表含碳的百分率。AISI 1020 代表含碳量為 0.20%，其物理性質與加工性質如表 2-1 及 2-2 所示。

使用在建築、橋樑、船舶與鐵路車輛，及其他一般構造物上之鋼條、

鋼板、扁鋼、型鋼、棒鋼等，均採用軟鋼程度之碳鋼，其含碳量在 0.12~0.20% 左右，雖其成分無嚴格之規定，但雜質中的 P 與 S 必須低於 0.12~0.050% 左右，這些鋼料為鹼性平爐或轉爐精煉而得之未淨鋼，一般以軋延狀態或鍛造狀態使用，而不加以熱處理。這類鋼材之切削加工、塑性加工及銲接性均良好，而且加工後表面光滑。

表 2-1 AISI 1020 加工特性[6]

機械加工性	特 性
抗腐蝕性	容易生鏽不耐腐蝕
成型性	延展性佳適合加工
銲接性	適合銲接
熱處理	AISI 1020 可加熱至 1500~1600 °F 淬火，亦可做滲碳及各種低碳鋼可做之熱處理
鍛造	鍛造溫度 2300~1800 °F.
熱做	熱作溫度 900~1200 °F.
冷作	1020 適合各種冷作加工，但需做退火
退火	退火溫度 1600 to 1800 °F
時效硬化	不適用
回火	回火溫度 600 -1000 °F 視材料強度需求做調整
硬化法	AISI 1020 硬化法為淬火後回火

表 2-2 AISI 1020 物理性質及機械性質[6]

物理性質與機械性質	大 小
平均熱膨脹係數	6.7
比熱 (Btu/lb/Deg F - [32-212 Deg F])	0.107
比重	7.86
密度(lb / cu. in.)	0.284
熔點 (°F)	2760
蒲松氏比 Poissons Ratio	0.3
熱傳導率 (Btuin/ft ² h°F)	360
抗拉強度 (ksi)	60
降伏強度 (ksi)	33
洛氏硬度	B76
勃氏硬度	137
化學組成	C : 0.18-0.23 ; Mn : 0.30~0.60 ; P : 0.04 ; S ; 0.05

2.3.2 AISI 1020 冶金特性

在圖 2-6 中 Fe₃C 相圖提供了瞭解鋼的熱處理和性質的基礎知識。此相圖中，含碳量 2.11%是鋼和鑄鐵的分界點。對鋼而言，我們把注意力集中在

相圖的共析部份，其中固溶線和共析等溫線特別地被標示出來。 A_3 代表冷卻期間肥粒鐵開始形成的溫度； A_{cm} 代表雪明碳鐵開始形成的溫度；而 A_1 則代表共析溫度。

在冷卻期間當溫度下降至 A_1 變態點以下易產生肥粒鐵與雪明碳鐵的適當組合之混合物。在圖 2-7 可觀察到二種重要的顯微組成(肥粒鐵與雪明碳鐵之排列)其中波來鐵是肥粒鐵與雪明碳鐵的層狀混合物。變韌鐵則是在較大過冷度下由沃斯田鐵變態來的。回火麻田散鐵乃是在生成麻田散鐵之後緊跟著重新加熱得來的，它是在肥粒鐵中有非常細小且幾近圓形的雪明碳鐵之混合物。

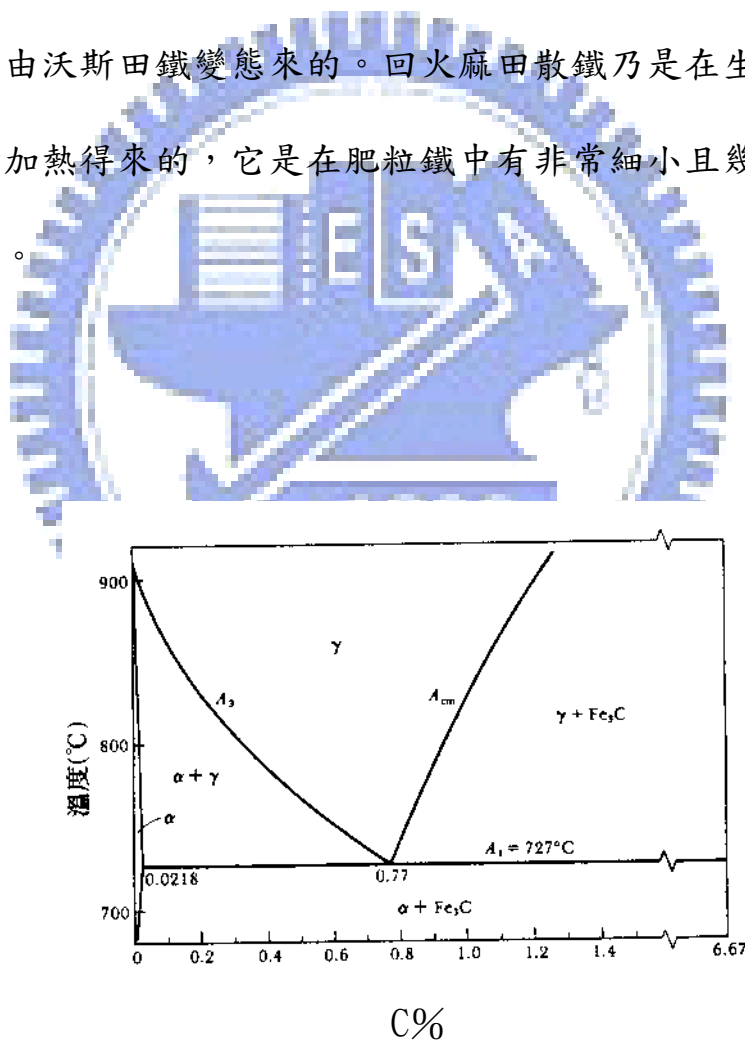


圖 2-6 AISI 1020 碳鋼之部份平衡相圖[6]



圖 2-7 (a)波來鐵(b)變韌鐵(c)回火麻田散鐵($\times 7500$)

2.3.3 AISI 1020 銲接特性

在銲接期間銲接部份附近的母材被加熱至 A_1 溫度以上而形成沃斯田鐵。在冷卻期間此熱影響區(heat-affected zone)的沃斯田鐵變態為一種新的組織，此種組織乃由冷卻速率和鋼之 CCT 圖決定。普通低碳鋼的硬化能很低，所以一般的冷卻速率難以產生麻田散鐵。然而，合金鋼就必須預熱來減緩冷卻速率或銲後加熱以回火形成麻田散鐵。

由圖 2-8 可觀察到，在銲接過程中，原先淬火和回火的鋼會發生兩種問題。第一，被加熱到 A_1 溫度以上的熱影響區，該部份在冷卻之後會形成麻田散鐵；第二，在低於 A_1 溫度的熱影響區，該部份將會過度回火。一般情況下，我們不應該對已淬火及回火處理過的鋼進行銲接。

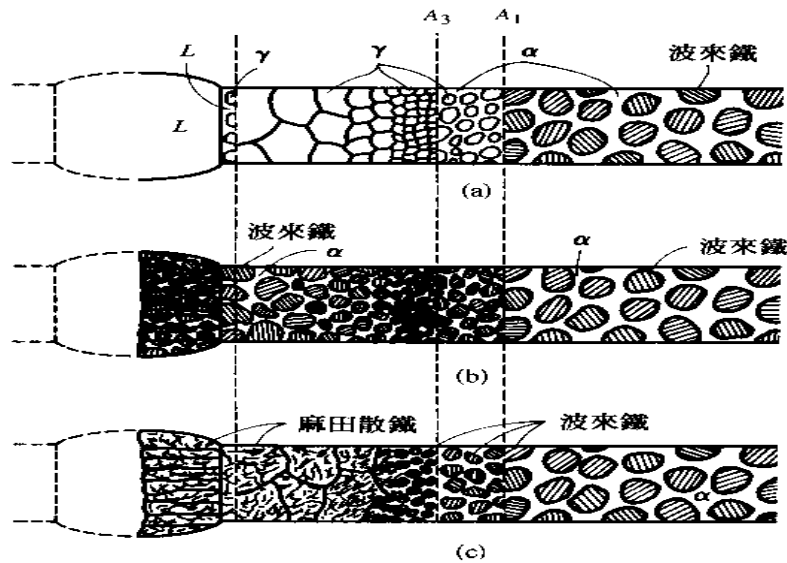


圖 2-8 銲接部份的熱影響區之形成：(a)最高溫度時的組織；(b)低硬化能的鋼冷卻後之組織；(c)高硬化能的鋼冷卻後之組織[7]

2.4 不銹鋼

2.4.1 不銹鋼之成分與機械性質[8]

不銹鋼之主要合金元素以鉻(Cr)為主，其耐蝕力隨 Cr 含量之增加而增高。Cr 與空氣中的氧作用後，在表面會形成一層薄氧化膜 Cr_2O_3 。此氧化物膜十分安定且緻密，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。

一般所稱的不銹鋼是指含 Cr 量在 12%以上，但低於 30%Cr 含量者。超過 12%Cr 者可耐高溫氧化、硝酸、亞硫酸氣體及高溫高壓氫氣等之腐蝕，可說幾乎不被一般之腐蝕環境所侵蝕。因此 12%Cr 為界限，超過者歸類為不銹鋼，即 13 鉻鋼。低於 12%者屬於耐蝕鋼(corrosion resisting steel)，而超

過 30%者，主要是用在高溫的情況，屬於耐熱鋼的範圍。另有在鉻之外再添加鎳(Ni)者，可進一步耐受硫酸、鹽酸等非氧化性酸之腐蝕者，稱為鎳鉻(Ni - Cr)系不銹鋼。

2.4.2 不銹鋼的分類:

不銹鋼依其微觀結構可分為以下四大類:

- 1.麻田散鐵型不銹鋼(matensitic stainless steels)。
- 2.沃斯田鐵型不銹鋼(austenitic stainless steels)。
- 3.肥粒鐵型不銹鋼(ferritic stainless steels)。
- 4.析出硬化型不銹鋼(precipitation stainless steels)。

(表 2-3 為不銹鋼之主要分類表；表 2-4 為不銹鋼之物理性質) [8]

美國鋼鐵協會(AISI)研定的不銹鋼規格，大都用三位數字表示，第一個數字代表特定之系列(參照表 2-5)，本實驗所使用之 304 不銹鋼屬於沃斯田鐵型不銹鋼，故以下將只討論此種不銹鋼之機械性質與特性。

表 2-3 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. 麻田散鐵型不銹鋼 2. 肥粒鐵型不銹鋼
2. 鉻鎳系不銹鋼 (AISI 200 及 300 系)	3. 沃斯田鐵型不銹鋼 4. 析出硬化型不銹鋼

表 2-4 不銹鋼之物理性質[8]

母 材	比重 g/cc	熔點 °C	相對熱導係 數 Cu=1	熱膨脹 係數	比熱 cal/g°C	導電係 數 %	電阻 mΩ/cm
沃斯田鐵系不銹鋼	7.9	1395	0.12	9.6	0.117	3.0	75.0
麻田散鐵系不銹鋼	7.7	1430	0.17	9.5	0.118	3.0	57.0
肥粒鐵系不銹鋼	7.7	1507	0.17	9.5	0.334	3.0	60.0

表 2-5 不銹鋼各系列特性[8]

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	不能硬化但可加工硬化	無磁性
4xx	麻田散鐵	Cr	可硬化	有磁性
4xx (c% < 0.12)	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

沃斯田鐵不銹鋼是從 Fe-Cr-Ni 合金系統中所發展出來的，一般鉻含量高於 16%，並且有足夠的鎳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。此系不銹鋼的標準成份為 C 0.2%以下、Cr 17-20%、Ni 7-10%，即一般所稱的 18-8 型沃斯田鐵不銹鋼。其微觀組織屬面心立方 (face-centered cubic, FCC) 結構，無磁性，也沒有韌性—脆性轉換溫度，所以雖在低溫下仍可保有相當程度的韌性（包括銲後未經任何熱處理之銲件）。沃斯田鐵不銹鋼最主要的特性就是在各種溫度下均保持沃斯田相組織，即不會因溫度的改變而發生相變化的現象。亦即，在沃斯田鐵不銹鋼銲接金屬之熱影響區附近不會產生硬化的現象，因此不須進行預熱處理 (preheat treatment) 與銲後熱處理 (post-weld heat treatment) [9]。

2.4.3 沃斯田鐵不銹鋼之凝固過程

由於大多數的沃斯田鐵不銹鋼，在銲後皆會殘留有或多或少的肥粒相組織 (ferrite structure)，而這些肥粒相乃是經由一連串的熔融固化與固態轉換後所殘留下來的組織。所以肥粒相組織的含量與型態不僅和合金成份有關，同時也會受到冷卻速率 (cooling rate) 的影響 [10]，進而導致沃斯田鐵不銹鋼在銲後的微觀組織顯得十分地複雜。

欲探討沃斯田鐵不銹鋼的銲接性，必須要先對其凝固過程有所瞭解。為了解說方便起見，茲以 Fe-Cr-Ni 之虛擬二元相圖 (pseudo-binary diagram) 來加以說明沃斯田鐵不銹鋼的凝固過程。如圖 2-9 所示，在此平衡相圖中有一 $(\gamma+\delta+L)$ 共存的小三角形區域，成份位於其右方者，將以 $L \rightarrow L+\delta \rightarrow \delta \rightarrow \delta+\gamma$ 的順序來進行凝固及相變化，此過程稱為主肥粒相 (primary ferrite) 固化。此

種銲接金屬在常溫下的微觀結構存在有殘留肥粒相組織 (retained delta-ferrite)，至於其含量則視銲接金屬中的合金成份與冷卻速率而定。合金成份位於小三角形區域左方者，將以 $L \rightarrow \gamma + L \rightarrow \gamma$ 的順序來進行凝固，此過程稱為主沃斯田相(primary austenite)固化，此種銲接金屬之組織不論在何種溫度下均為沃斯田相組織。

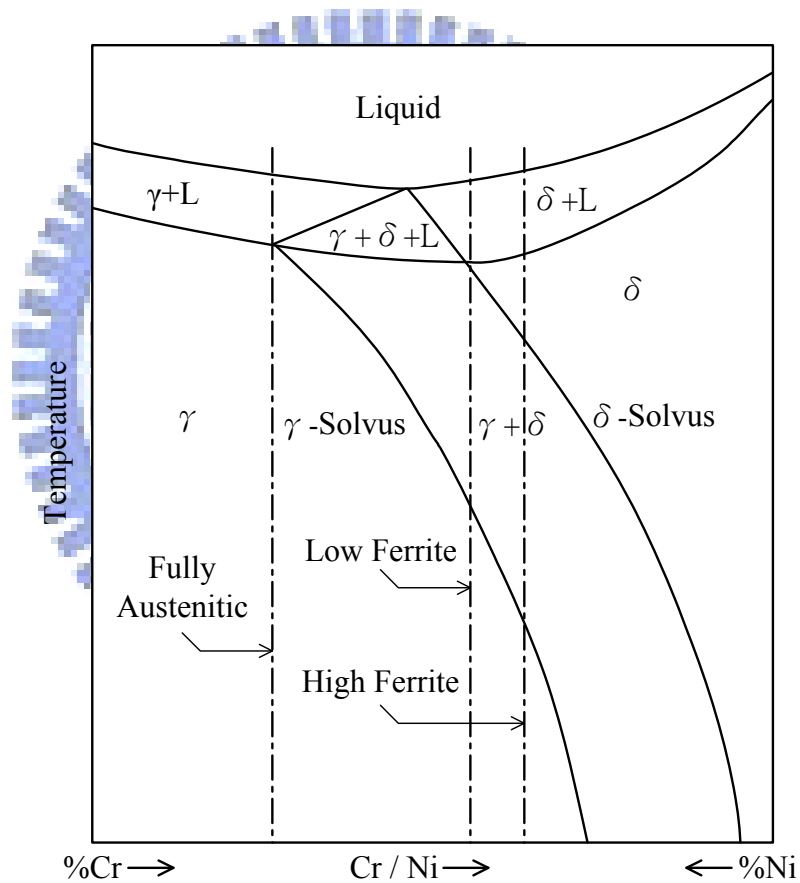


圖 2-9 Fe-Cr-Ni 之虛擬二元相圖[11]

沃斯田鐵不銹鋼的固化模式，最早是由 Suutala 等人[12-17]所提出，緊接著 Brooks 等人[18,19]、Katayama 等人[20]及 Savage 等人[21]也相繼提出相

關的研究結果。其中，根據 Suutala 觀察到凝固時的微觀結構，依其特徵及肥粒相的含量，區分為五種程度。最後將所提出的沃斯田鐵不銹鋼之固化模式，依其特徵及肥粒相組織含量及對應之 Cr_{eq} / Ni_{eq} 比，可區分成如圖 2-10 所示的三種型式，茲將此三種型式簡述如下：

1.A 型式(如 a、b 圖)： $Cr_{eq} / Ni_{eq} \leq 1.48$

固化時主要為沃斯田相組織。若有肥粒相組織存在，則必為 vermicular ferrite 型態，且位於樹枝狀結構之間。

2.B 型式(如 c、d 圖)： $1.48 \leq Cr_{eq} / Ni_{eq} \leq 1.95$

固化時主要為肥粒相組織，其同時具有 vermicular ferrite 與 lathy ferrite 兩種型態，且位於樹枝狀結構之心部。至於沃斯田相組織，則位於樹枝狀結構之間。

3.C 型式(如 e 圖)： $Cr_{eq} / Ni_{eq} \geq 1.95$

固化時幾乎全部為肥粒相組織，且為 lathy ferrite 型態。而在後續的冷卻過程中，沃斯田相組織將會以魏德曼(widmanstatten)結構的型態沿著肥粒相之晶癖面(habit plane)析出。

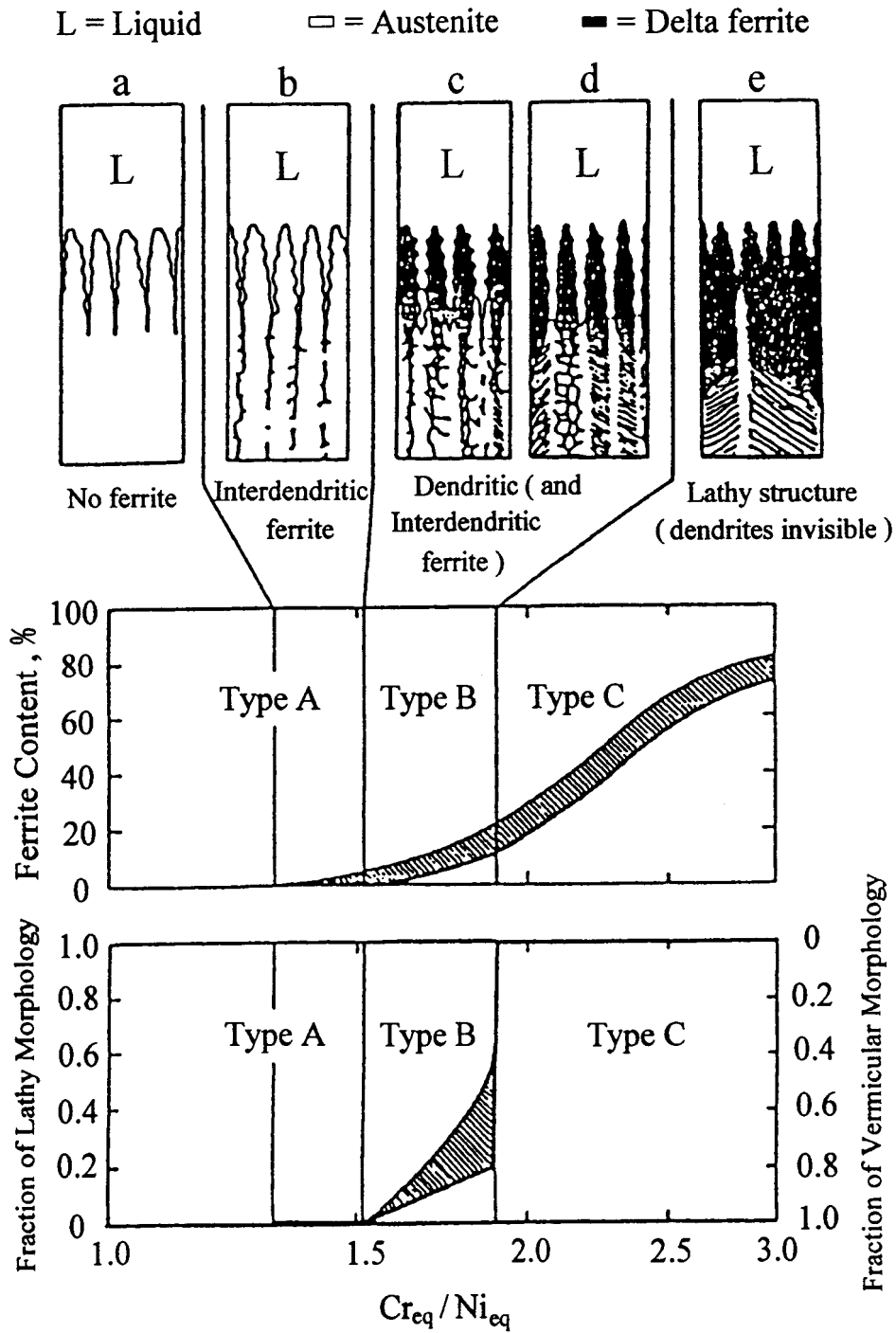


圖 2-10 沃斯田鐵不銹鋼之固化模式[12]

2.4.4 肥粒相組織對沃斯田鐵不銹鋼之影響

根據文獻[22-26]指出，沃斯田鐵不銹鋼鐸後會有肥粒相之產生，而且對鐸道之性質影響頗大。茲將肥粒相組織對沃斯田鐵不銹鋼之重要影響分述

如下：

1. 在沃斯田鐵不銹鋼銲道內所殘留的肥粒相組織含量與型態，皆會影響其銲接熱裂(hot cracking)的程度。換言之，當沃斯田鐵不銹鋼在進行固化過程時，若先析出肥粒相組織則可降低銲接熱裂的形成。
2. 對於 S、P、Si 等有害雜質，肥粒相具有較高溶解度，使得固化時晶界的偏析現象大為減少，因此可減少熱裂產生。當為了避免銲接時產生熱裂縫，肥粒相的存在有很大的助益，但過多的肥粒相會降低孔蝕的抵抗能力，並產生 σ 相脆化，因此適當的肥粒相是必須的，通常肥粒相指數為 2~8%。
3. 肥粒相組織在高溫熱循環條件下 (500~800°C)，會加速 σ 相析出物的形成， σ 相是由 Fe 與 Cr 化合而成，由於此種析出物之性質十分硬脆，除了會降低沃斯田鐵不銹鋼的韌性與延展性外，亦會對其耐腐蝕性產生不良的影響。
4. 肥粒相的熱膨脹係數比沃斯田相小，因此冷卻過程中，以主肥粒相凝固的銲道將產生比較小的熱收縮力，減低在凝固的最後階段產生裂縫的機會。
5. 肥粒相在沃斯田組織中有細化晶粒效果，從而增加晶界面積。因此析出於晶界薄膜較薄，使裂縫不易產生，而且肥粒相與沃斯田相的相界面非常崎嶇不規則，不像以單相存在之晶界那般平滑，因此在肥粒相—沃斯田相相界上裂縫將遭受阻擋，難以傳播。

6. 肥粒相組織的耐腐蝕性通常較沃斯田相組織差，特別是在腐蝕能力較強的酸性溶液中，肥粒相組織極易被溶解而產生孔蝕(pitting)的現象。然而，殘留肥粒相組織的存在不僅可減緩應力腐蝕裂縫(stress corrosion cracking)的進行，同時也能降低不銹鋼敏化(sensitization)的程度。
7. 肥粒相組織的存在，也會導致沃斯田鐵不銹鋼低溫破裂韌性的降低。

2.4.5 沃斯田鐵不銹鋼之銲接性

沃斯田鐵不銹鋼是高合金鋼材中最容易銲接之材料，銲接接頭尤具有很好的韌性（包括銲後未經任何熱處理之銲件）。但因沃斯田鐵不銹鋼之熱膨脹係數甚高（約為碳鋼的 1.5 倍），而熱傳導係數則只有碳鋼的 1/3 倍左右。因此銲接時之變形及收縮影響銲接品質甚大。

欲成功的銲接沃斯田鐵不銹鋼，可藉由控制熔填金屬的化學成份及微觀組織而達到理想結果。這種方式可由選用銲接製程及銲件後熱處理去完成。如果不銹鋼材之成分較複雜，或板厚較大，亦或使用環境的需求較多時，則須深入探討不銹鋼冶金特性，方能獲得優良之銲接品質。

不銹鋼銲接的重要工藝不外是：(1)銲接接合處具耐腐蝕的保護作用。(2)銲接區內或附近區域，須能防止龜裂。(3)避免有害的 σ 相形成。因此，在探討不銹鋼的銲接，必須涵蓋三個領域，始能對不銹鋼的銲接有深入的認識[27]：

- (1) 確認不銹鋼母材及填料金屬的化學成份，主要合金成份、次要殘留合金

元素及含量皆須瞭解。尤其是母材與銲接材料（填料金屬）間之成份差異更須清楚。銲接材料的選用則儘可能與母材相近，如此可確保銲道之品質。

(2) 不銹鋼母材與熔融金屬之金相組織最好能充分瞭解。金相組織主要由化學成份及熱歷程(thermal history)所支配。因此，銲接製程的改變將使得母材與熔融金屬處於不同組織結構中。

(3) 接合處熔融金屬之性質須詳細分析。因為在靠近熔融線附近的機械性質、物理特性及耐腐蝕性皆有明顯的變化，有時因銲接導致局部區域的性質改變，此區域雖很窄小，但是卻可能影響整體材料之使用性。

2.5 銲接氣體

2.5.1 銲接氣體之功用

1. 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。
2. 熱能的傳遞(由於銲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銲接氣體來加以傳遞到銲件上)。

2.5.2 銲接氣體之特性[28-29]

銲接氣體主要的特性，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(density)

一般而言，比重大的銲接氣體較適用於平銲。而比重小的銲接氣體則較適用於立銲或仰銲。如表 2-6 所示即為銲接氣體的比重 ($\text{CO}_2 > \text{Ar} > \text{O}_2 > \text{N}_2 > \text{He} > \text{H}_2$)。

表 2-6 銲接氣體的比重[29]

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

2. 熱傳導性(thermal conductivity)

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[30]。如圖 2-11 所示即為銲接氣體的熱傳導性。

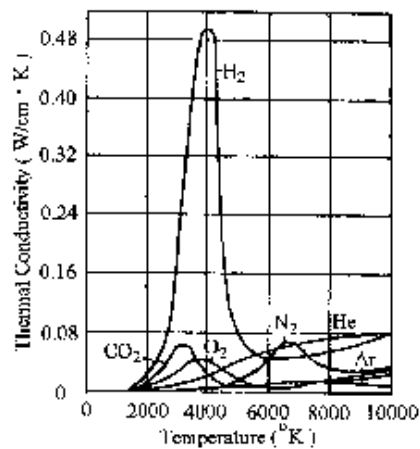


圖 2-11 銲接氣體的熱傳導性[30]

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($\text{He} > \text{Ar} \cong \text{H}_2 \cong \text{N}_2 > \text{CO}_2 > \text{O}_2$)。

表 2-7 銲接氣體的解離電壓值[29]

Welding gas	Ar	He	CO ₂	O ₂	H ₂	N ₂
Ionization potential ^b	15.7	24.5	14.4	12.5	15.6	15.5

^b Unit is electron volts

2.5.3 銲接氣體之選擇[29]

一般常用的銲接氣體有氬氣、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：

1. 氬氣(argon)

(1).屬於惰性氣體。

(2) 因為氬氣的解離電壓值較氦氣低，因此起弧較氦氣容易。

(3) 因為氬氣比空氣重故適用於平銲。

(4)適合薄板材料的銲接(因為氬氣的熱傳導性較氬氣低)。

(5)銲池的流動性較差(與氬氣相比較)。

(6)會形成較窄而深的銲道截面形狀(與氬氣相比較)。

2. 氦氣(helium)

(1)屬於惰性氣體。

(2)起弧較氬氣困難(因為氦氣的解離電壓值較氬氣高)。

(3)適用於立銲或仰銲(因為氦氣比空氣輕)。

(4)適合厚板材料的銲接(因為氦氣的熱傳導性較氬氣高)。

(5)銲池的流動性較佳(與氬氣相比較)。

(6)會形成較寬而淺的銲道截面形狀(與氬氣相比較)。

(7)氣體價格較昂貴。

3. 二氧化碳(carbon dioxide)

(1)屬於活性(氧化性)氣體。

(2)電漿電弧的能量分佈較不集中。

(3)一般用於低碳鋼材料的銲接。

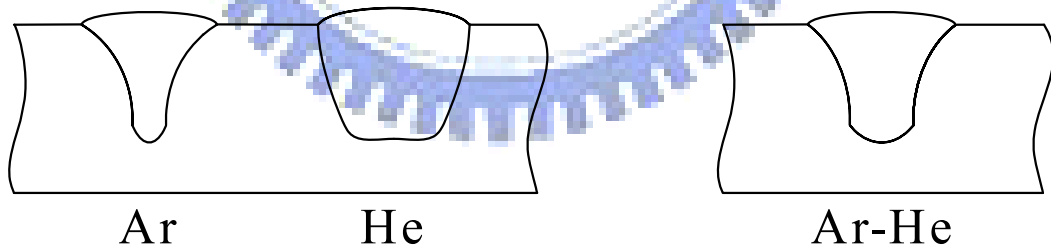
(4)容易產生煙霧與飛濺物。

(5)氣體價格較低廉。

4. 氮氣(nitrogen)

- (1)屬於活性(高溫反應性)氣體。
- (2)電漿電弧的能量分佈亦較集中。
- (3)一般用於銅及銅合金材料的銲接。
- (4)容易形成氣孔。
- (5)容易造成鎢電極的損耗與污染。

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)。至於氮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(a)所示)，若採用氬-氮混合氣體(如圖 2-12(b)所示)，則可得到一寬且深的銲道截面形狀。本實驗欲得到一窄而深的銲道截面，故採用氬氣電漿電弧。



(a) 氬氣與氮氣對銲道截面之影響 (b)氬-氮混合氣對銲道截面之影響

圖 2-12 銲接氣體對銲道截面形狀之影響[9]

2.6 銲接缺陷

2.6.1 銲接變形之形式

銲接變形的形式，如圖 2-13 所示：

1. 橫向收縮(transverse shrinkage)

垂直於銲道方向的收縮變化。

2. 縱向收縮(longitudinal shrinkage)

平行於銲道方向的收縮變化。

3. 角變形(angular distortion)

由於沿厚度方向之溫度不均勻分佈所引起的角度變化。

4. 迴轉變形(rotational distortion)

由於熱膨脹之作用所引起的迴轉變化

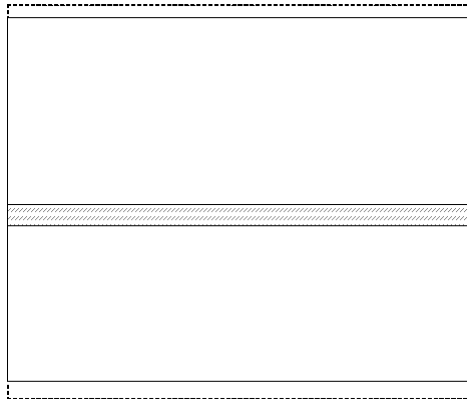
5. 撓曲變形(bending distortion)

當銲道位置不在母材中性軸時，因熱收縮不均勻而形成沿銲道方向的撓曲變化。

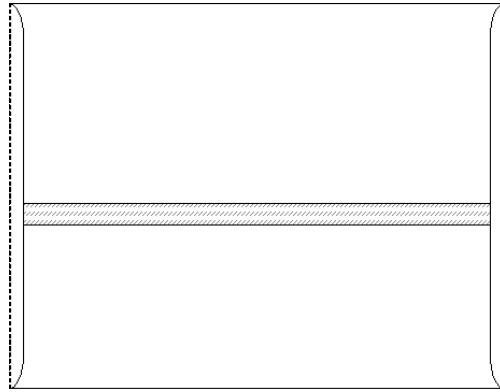
6. 挫曲變形(buckling distortion)

當銲接薄板時，由於熱壓應力之作用所引起的波浪狀變形。

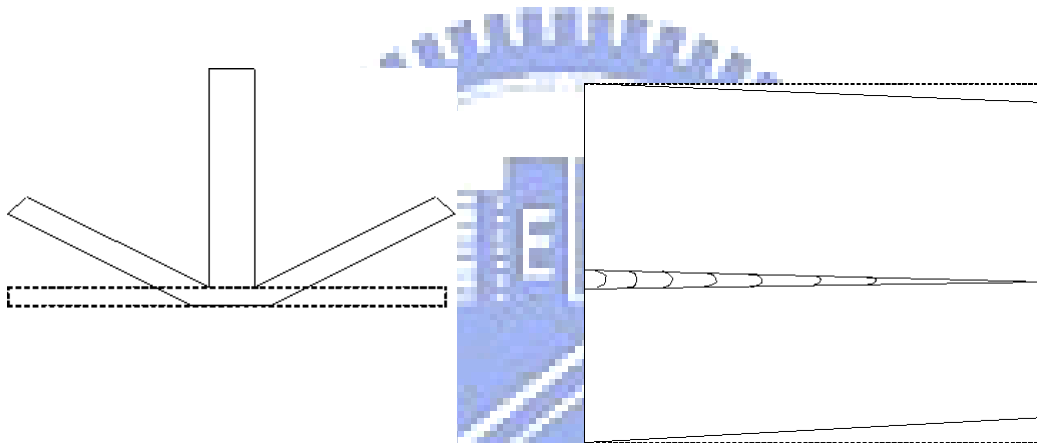
上述各種變形在銲接過程中往往是同時產生且相互影響的，因此，實際銲接結構所產生的變形形式是非常複雜的。



(A) Transverse Shrinkage

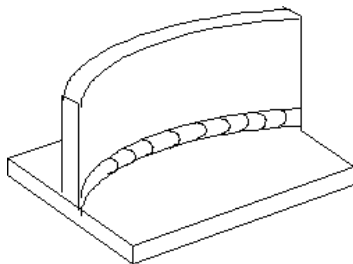


(B) Longitudinal Shrinkage

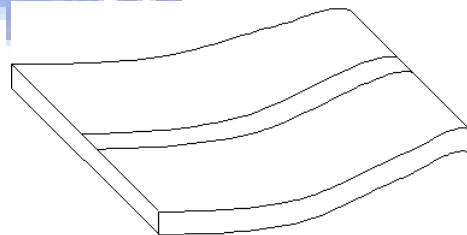


(C) Angular Distortion

(D) Rotational Distortion



(E) Bending Distortion

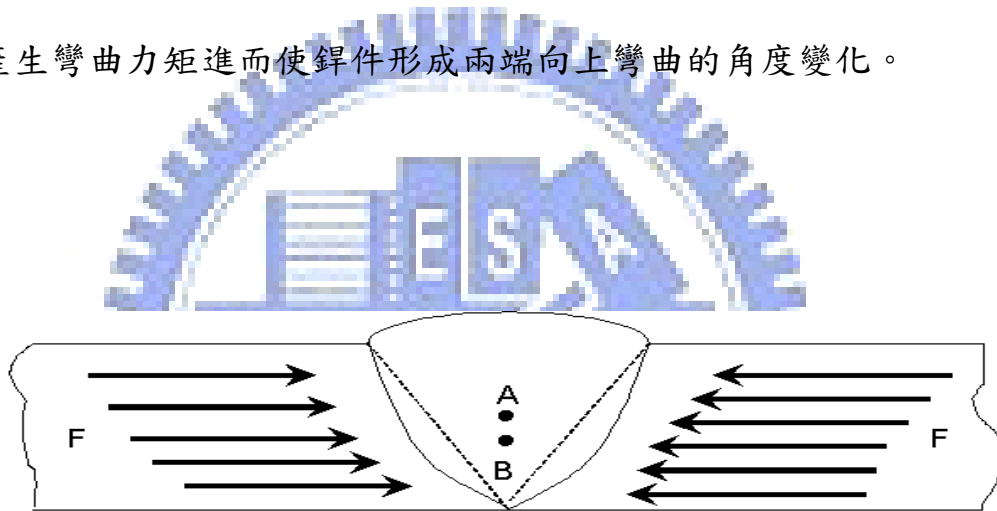


(F) Buckling Distortion

圖 2-13、銲接變形之基本形式[33]

2.6.2 銲接變形之形成機制[31-34]

為了解說方便起見，茲以對接銲(butt-welded)角變形的形成來加以說明。如圖 2-14 所示，在銲接過程中，由於沿厚度方向之溫度不均勻分佈，使得熔填金屬產生不均勻的橫向收縮力(transverse shrinkage force)，此不均勻之橫向收縮力可視為一個作用在熔填金屬形心(如圖 2-14 中 A 點所示)的合力，當此合力作用點與母材形心(如圖 2-14 中 B 點所示)不在同一位置時，便會產生彎曲力矩進而使銲件形成兩端向上彎曲的角度變化。



A : Centroid of the filler metal

B : Centroid of the base metal

F : Transverse shrinkage force

圖 2-14 對接銲角變形之形成示意圖[34]

2.7 助銲劑

2.7.1 助銲劑之功用 [1]

助銲劑(塗料)是構成銲條的要素，它在銲接過程中因為電弧熱源之作用，會產生複雜的化學變化形成氣體及溶渣，及其它冶金之效果，以提高銲接件之品質。茲將助銲劑之主要功用分述如下：

(1)保護熔池防止外圍氣體侵入

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

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

(2)脫氧作用

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

(3)助銲劑內加入合金元素以調整銲接金屬的成份

為調整銲接金屬之合金成份，可在助銲劑中加入所要之合金粉末，銲

接過程中合金燃燒損失小，可達到添加合金成份於鐸道金屬之目的。

(4)穩定電弧作用

常用之穩弧劑為鹼金屬和鹼土金屬的化合物，如 CaCO_3 、 K_2CO_3 、 Na_2CO_3 、 KNO_3 、長石、花崗石、水玻璃等，穩弧劑中所含之 K、Na、Ca 等元素，其電離電位很低，助鐸劑內含有這些低電離電位的物質，可以改善電弧空間氣體的電離條件，使鐸接電流易於通過電弧空間，因此可以增加電弧的穩定性。

2.7.2 助鐸劑之種類[1]

不同系統之助鐸劑其成份、特性、功用亦不同，以下僅就不同系統助鐸劑之鐸條作簡要之介紹：

1.高纖維素系(E6011、TC-11)

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

2.高氧化鈦系(E6013、TR-13、R-13)

此系鐸條助鐸劑含約 35% 之氧化鈦，鐸接時電弧安定，火花量較低，熔渣易清除，鐸道光滑波紋細緻，作業性極優秀，且穿透深度較淺，故多

適用於薄板銲接。

3. 鹽基鈦礦系 (D4303、F-03、TAC-03)

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

4. 鈦鐵礦系 (D4301、E-10、EL-10)

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

5. 低氫系 (E7016、D4316)

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

這類銲條之特長乃熔化時氫含量較其他種類低，且富強力脫氧作用，使熔填金屬富韌性，機械性能異常優越。但此類銲條電弧較不安定，且於銲道開端及接頭處極易生氣孔，故今日此類銲條皆於先端塗抹一層氣孔防

止劑以防氣孔之生成，另外，鐸道稍凸且鐸條易受水份之影響，故於施工技术術及使用前之烘乾乃必要注意之事項。

6.鐵粉低氫系(E7018、E7028)

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

7.鐵粉氧化鈦系(E7024、T-24)

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

8.鐵粉氧化鐵系(E-6027、T-27、T-27L)

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

2.7.3 助鐸劑中之成份對鐸接金屬之影響

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

明，B.I.計算公式為[35-36]：

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

式中所列為鐳劑中的重量百分比。根據計算結果作如下的分類：

1.酸性鐳劑(B.I.<1.0)：

通常酸性鐳劑具有良好的鐳接性、鐳道成形美觀，但是鐳道金屬含氧量高，耐衝擊韌性較低。

2.中性鐳劑(B.I.=1.0~1.5)：

熔融金屬的化學成份與鐳絲的化學性質相近，鐳道金屬含氧量有所降低。

3.鹼性鐳劑(B.I.>1.5)：

通常鹼性鐳劑之鐳接金屬的含氧量較低，可以獲得較高的衝擊強度，但是鐳接性較差。

鐳劑中的 B.I.值愈大，則鐳接金屬之 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，鐳渣愈偏酸性渣系。此時鐳劑的耐火性愈高。熔融速度可提高，鐳道比較寬及平整。

此外，相對化學活性係數(Af)可以把各種成份的助鐳劑分為高活性助鐳

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，因此將助鐸劑中之成份功用對 304 不銹鋼分述如下 [37-38]：

1. 鐸接電流增加時，添加 SiO_2 、 Cr_2O_3 、 ZnO 、 MnO_2 、 Fe_2O_3 及 TiO_2 助鐸劑，均可有效地提高鐸道深寬比，但是無添加鐸藥之鐸件，其深寬比幾約為 1。
2. 同時考量不銹鋼鐸道外觀、鐸道穿深能力及鐸件角變形等三項因素時，單一成分之 ZnO 、 SiO_2 或 TiO_2 氧化物應是較佳的不銹鋼活性助鐸添加劑。
3. 添加 Al_2O_3 活性助鐸劑並無法改善傳統 304 不銹鋼氬鐸鐸道熔深不足之缺失，而其主要原因可能是由於氧化鋁熔點較熔融鐸池溫度要來的高，因此會造成未熔融的氧化鋁顆粒懸浮於熔池表面，進而降低電弧熱量的穿深能力。
4. 當使用氬鐸鐸接 304 不銹鋼時，添加 SiO_2 、 Cr_2O_3 、 ZnO 、 MnO_2 、 Fe_2O_3 及 TiO_2 助鐸劑之氬鐸，成功地克服了熔透深度不足之問題，在 100A 與 150A 的鐸接電流之條件下，約可提升約 2 倍的熔透深度，在

- 200A 的鐸接電流，幾乎可達到 3 倍的高熔透深度。
5. 添加氟化物組成之 CaF_2 、 NaF 活性助鐸劑並無法改善傳統不銹鋼氬鐸鐸道熔深不足之缺失，而其中 CaF_2 卻能與丙酮均勻混合，當塗敷於鐸件表面上時，形成極佳之附著力，因此可以利用此一特性，混合附著力較差的鐸藥，增加助鐸劑之附著力。
 6. 目前以氬鐸鐸接不銹鋼所用之助鐸劑來講，深度來說效果最好的助鐸劑是 SiO_2 ；寬度來說越窄越好，效果最好的助鐸劑是 Na_2CO_3 ；以鐸道深寬比來說越高越好，效果最好的助鐸劑是 SiO_2 。
 7. 添加 SiO_2 、 Cr_2O_3 、 ZnO 、 MnO_2 、 Fe_2O_3 及 TiO_2 助鐸劑，在 150A 與 200A 的鐸接電流之條件下，均可有效地降低角變形，但在 100A 電流時，其角變形卻比未添加助鐸劑時來得大。

2.8 鐸道熔透深度變異之原因

在 304 不銹鋼之鐸接時，除了有鐸道熱裂及 HAZ 敏化之問題外，因不同爐次之微量元素差異所形成穿深變異是鐸接時常面臨之問題[39-42]，對於此一問題，國外已有不少學者，進行此方面之研究[43]，結果顯示鋼材中之 S、Mg、Al、Ca 等微量元素對穿深變異有顯著之效應。為了解釋上述微量元素對穿深之影響，有二種機構被提出，一為表面張力驅動鐸池流體流動之機構[44-49]，另一則是電弧之效應[50-54]，以下針對上述之機構加以說明。

2.8.1 表面張力影響熔融區流體流動之機構

對電弧銲接而言，驅動銲池(weld pool)中熔融金屬流動之力量有四個，(1)銲池表面之電漿流，(2)熱毛細作用所引起之表面張力，(3)流過銲池表面之電流所形成之電磁力及(4)因銲池內流體密度差異所形成之浮力，上述四種力且對流體流動之效應如圖 2-15 之示意圖所示。在一般的情況下，表面張力對流體流動具有主宰之效應。當液體表面存在表面張力梯度時，液體會被拖曳，從低表面張力區流向高表面張力區。對純金屬而言，隨著溫度的上昇表面張力會降低，所以表面張力溫度係數(dr/dt)是負的，如圖 2-15(a)所示。但對於添加了表面活性元素，如 S、O 之金屬而言，隨著溫度的上昇，表面張力則會增加，所以表面張力溫度係數(dr/dt)是正的，如圖 2-15(b)所示。於銲接時，在電弧下面之溫度為最高，而銲池二側之溫度為最低，因此對沒有添加表面活性元素之鋼材而言，由於表面張力溫度係數是負的，所以銲池中之最熱點(銲池中心)有低的表面張力，而在銲池之最冷處(銲池二側)有高的表面張力，造成流體由中心往外側流動，使熱量從銲池中心傳遞到銲道二側，形成寬而淺之銲道；然而，對添加了 S、O 等表面活性元素之銲池而言，由於表面張力溫度係數是正的，所以在銲池中央之最熱點有高的表面張力，而在銲池二側有低的表面張力，造成流體往銲池內部流動，形成窄而深之銲道。

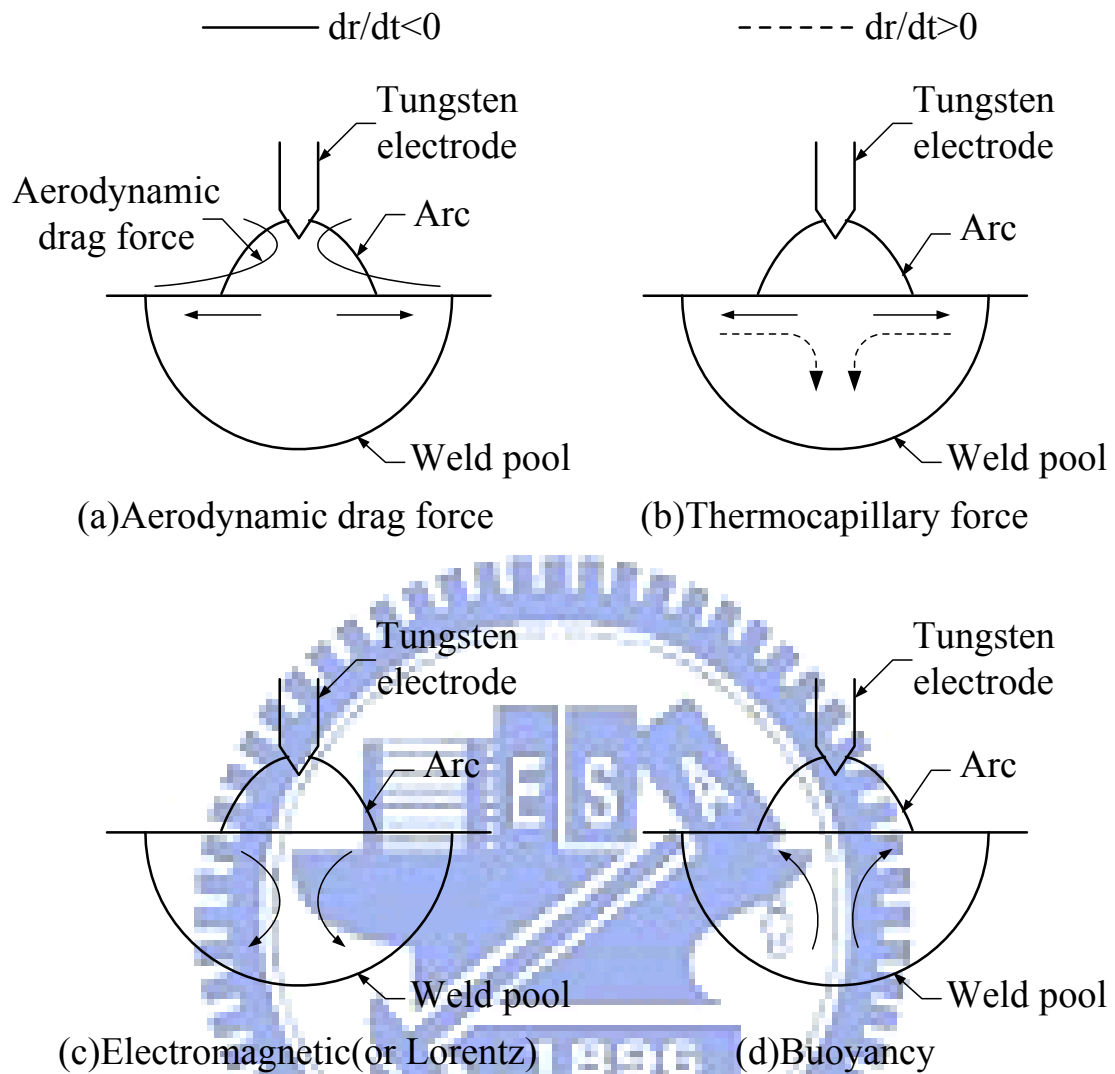


圖 2-15 鐳池中驅動流體流動之力量[51]

2.8.2 電弧效應[50-54]

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

2.8.3 微量元素對銲接性之影響[55-57]

雖然有上述二種機構被提出來解釋鋼材銲接時穿深變異的問題，但表面張力理論仍是目前廣為大家所接受者。以下將從表面張力之觀點，說明微量元素對銲接性之影響。

1. 硫(S)之效應

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

2. 氧(O)之效應

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

3. 鋁(Al)之效應

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

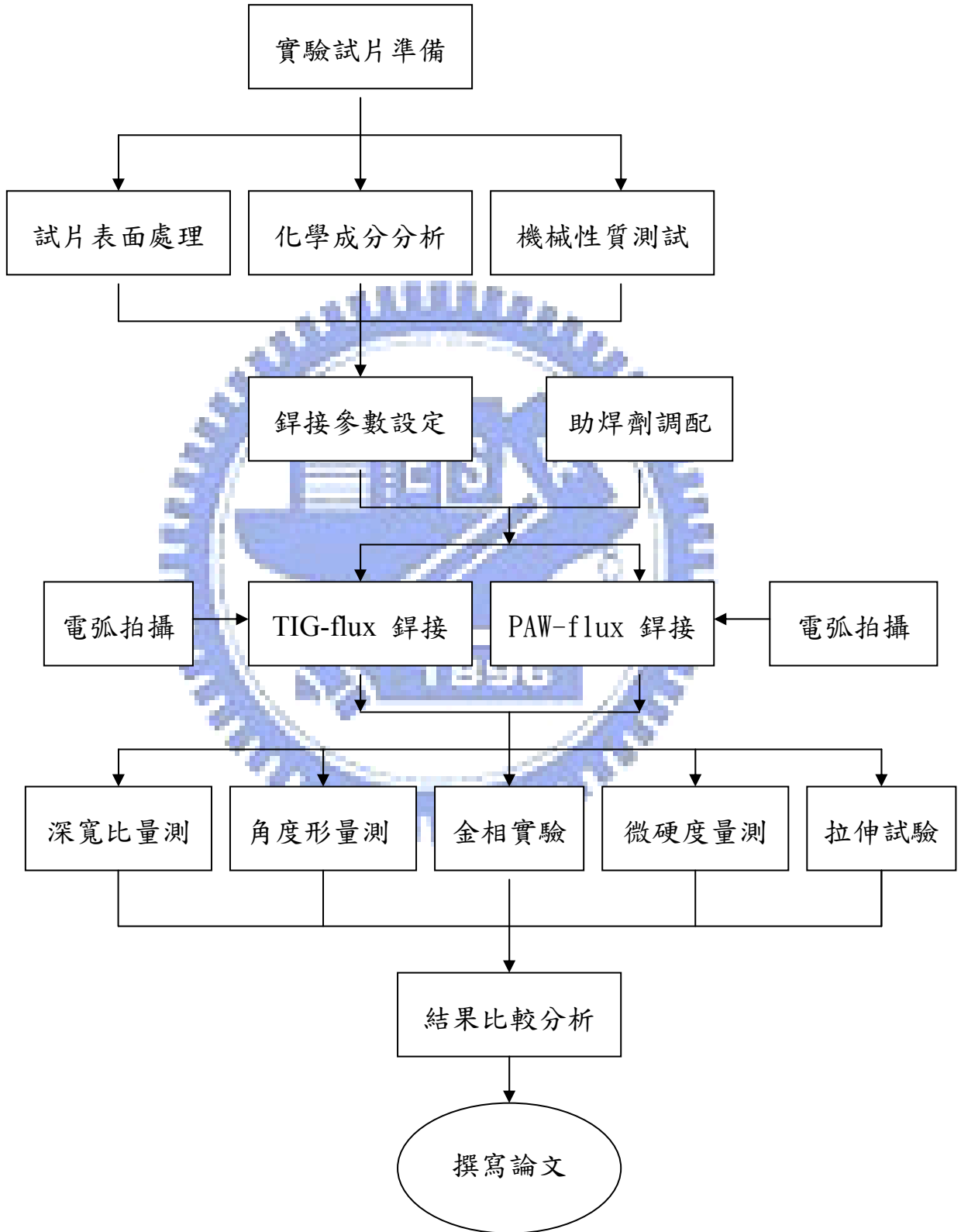
為了改善上述因爐次不同造成穿深變異的問題，許多的改善措施被提出，例如：於鐳接前在母材之表面散佈含氧化物及氟化物之鐳藥，試片表面經噴砂處理來提高粗糙度及採用含輕微氧化性氣體之遮護氣等。雖然在 Ar 氣中加入微量的 O₂ 或 SO₂，氣體可提高穿深，但保護氣中的 O₂ 會污染

電極而加速電極之消耗。另外，在 Ar 氣中加入約 5% H_2 以提高銲接熱量也可以增加穿深。



第三章 實驗方法與步驟

3.1 實驗流程



3.2 鐳接試片之準備

本研究所採用的實驗材料有 AISI 304 沃斯田鐵型不銹鋼及 AISI 1020 低碳鋼等兩種材料，在鐳接過程中，所有的實驗試片均採無束縛固定方式 (constraint-free)，藉以量取鐳件自由角變形量。在進行鐳接工作前，先將試片欲鐳接位置處表面的氧化物與油污利用#400 砂紙予以清除，再以丙酮清潔乾淨。試片尺寸為 150mm×150mm×5mm，如圖 3-1 所示。

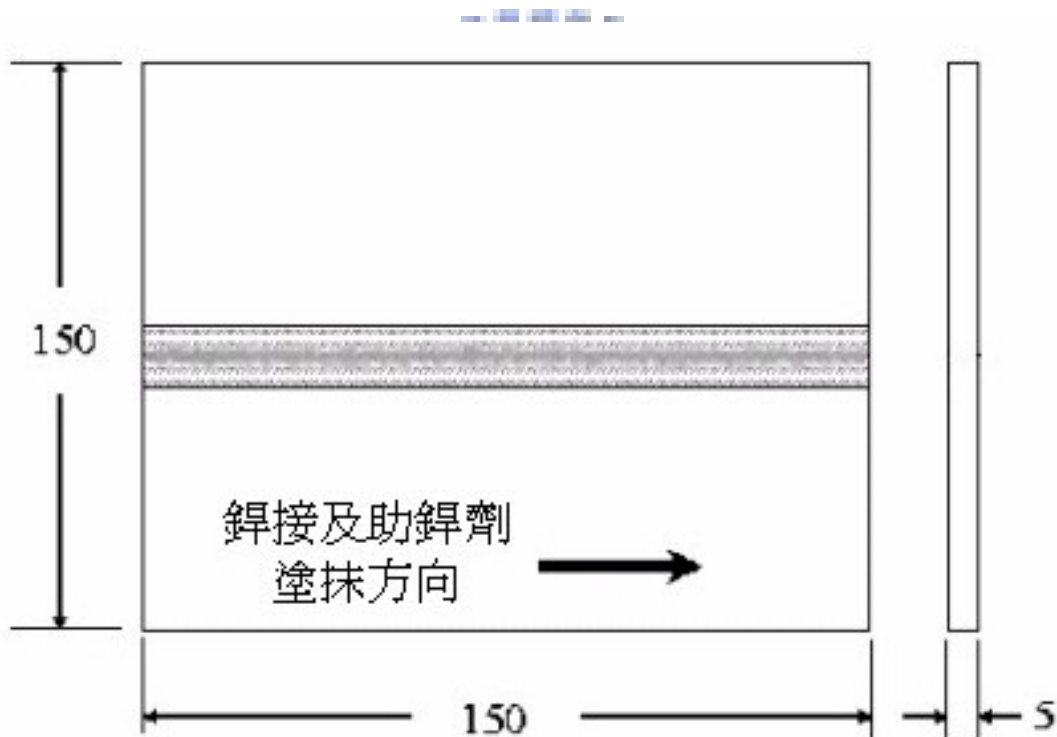


圖 3-1 鐳接試片之前處理

3.3 鐳接機設備

本實驗設備係採用電漿電弧鐳接機 (PAW) 與惰性氣體鎢極鐳接機 (TIG) 兩種及可數位控制走速的鐳接檯車，如圖 3-2，3-3 所示。鐳接方法

採用不加填料金屬的方式銲接來進行 bead-on-plate 實驗，其中鎢電極至實驗試片的距離均為 3mm，實驗材料為 AISI 1020 低碳鋼與 AISI 304 不銹鋼，試片尺寸均為 150×150×5mm。本實驗的銲接參數中銲接電流為 75A、100A、125A，銲接走速為 100mm/min、125 mm/min、150 mm/min。



圖 3-2 電漿電弧銲接機（pwh/m-4a welding torch）與其配件



圖 3-3 惰性氣體鎢極銲接機 (TIG)

3.4 助銲劑之準備與配製方法

銲接不銹鋼時助銲劑採用日本試藥工業株式會社所生產之單一成分試藥，助銲劑的種類分為氧化物之 Cr_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MnO_2 、 MoO_3 、 SiO_2 、 TiO_2 與 ZnO 等粉末。

碳鋼接銲助銲劑有 Cr_2O_3 、 SiO_2 、 TiO_2 、 MnO_2 、 MoO_3 及碳酸鹽基之 NiCO_3 、 MgCO_3 、 MnCO_3 等粉末，粒度為#400 號。

助銲劑配製方式為先將適量的丙酮溶劑與經充分研磨均勻後的粉末混合成泥漿狀，接著再利用扁平毛刷將此泥漿狀助銲劑均勻塗敷於工件欲進行結合位置處。均勻攪拌後，塗敷於銲道表面上（寬 10mm，長 150mm）如圖 3-4 所示，塗敷厚度以能遮蓋待銲工件表面金屬光澤為宜。待丙酮揮發

後，錫藥即覆著於錫道上，然後再進行銲接。

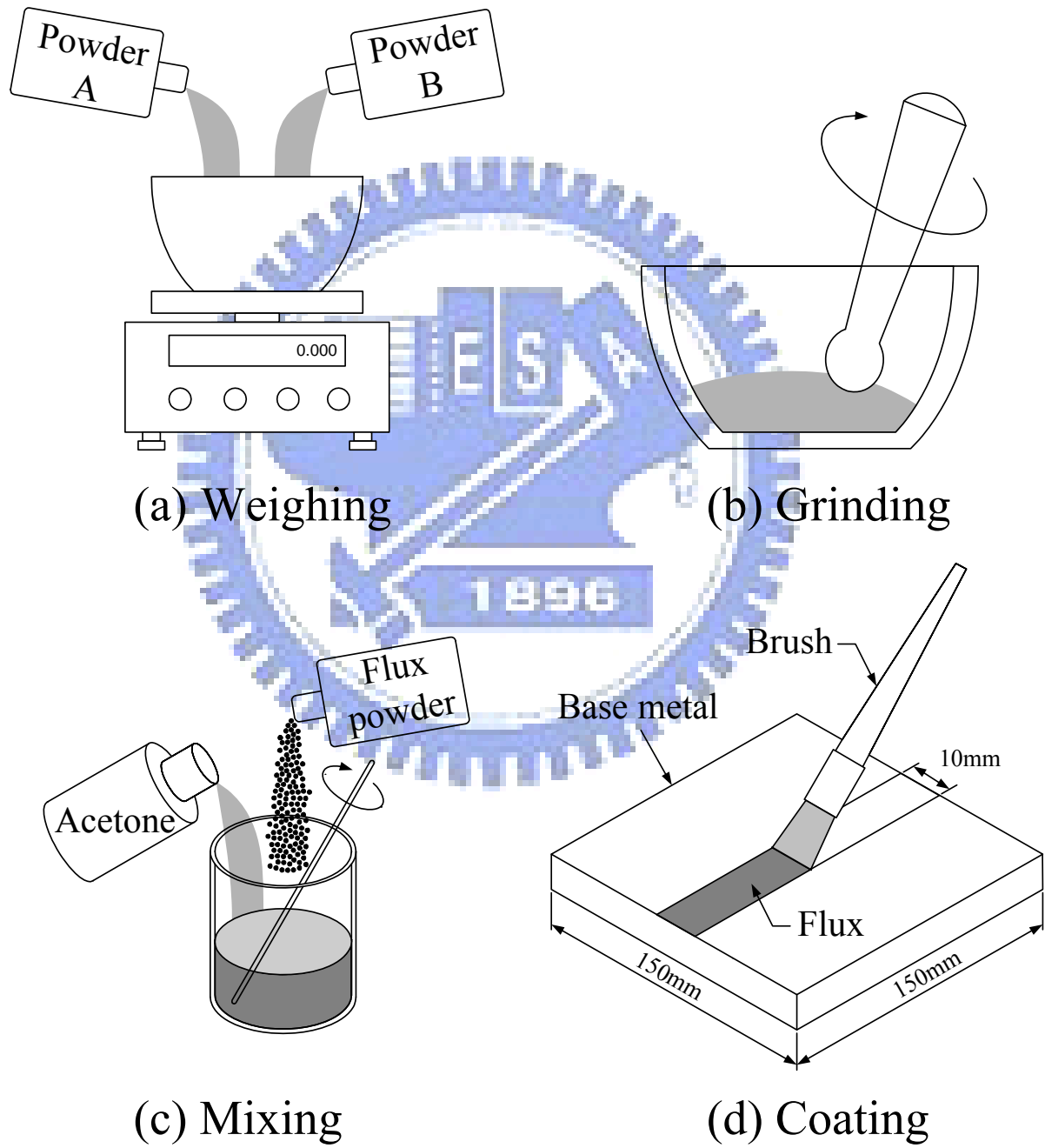
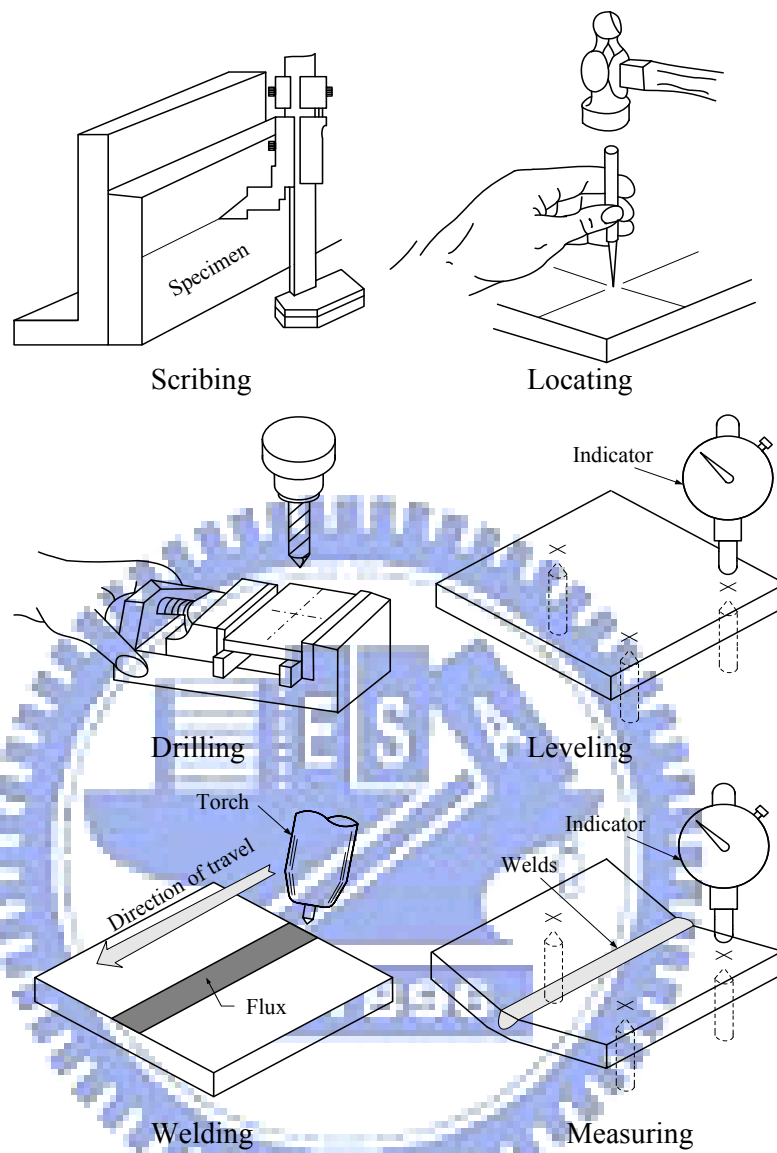


圖 3-4 活性助錫劑塗敷示意圖

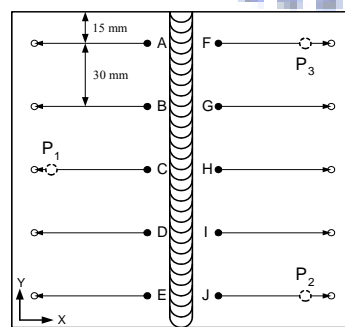
3.5 角變形量測

銲件變形的量測位置，如圖 3-5 所示。試片未施銲前，在 P_1 、 P_2 及 P_3 背面位置各鑽一定位孔，並在其下方分別置放一支柱後，將此三根支柱安置於附有光學尺之可移動式平台裝置（移動精度為 0.005mm），如圖 3-5 所示；並搭配液晶數字顯示型量錶（量測精度為 0.01mm），即可利用此三根支柱（其中一根為固定式柱，其它兩根為可調式）將 P_1 、 P_2 及 P_3 所在的位置調整為水平面，之後即可進行銲接實驗工作。

在進行銲件變形量測工作前，首先將液晶數字顯示型量錶歸零，並將銲道左(A~E)、右(F~J)兩側沿 Z 軸方向各劃分成 5 組量測位置。量測時將平台沿 X 軸方向移動 50mm，即可得一高度差 Z，進而可利用公式($\theta = \tan^{-1} \frac{Z}{50}$)求得銲件角變形量（如圖 3-5 所示）。最後則將銲道左、右兩側各 5 組所量測到的角變形量分別求取其平均值，即可得到銲件平均角變形量。

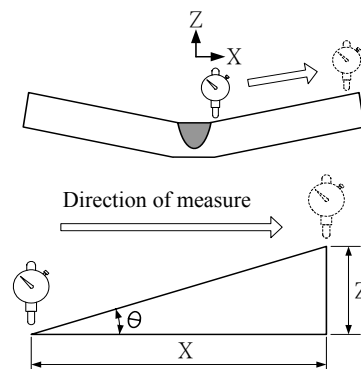


(a) Measuring step



- Start point of measure
- End point of measure
- ⊙ Reference point of measure

(b) Measuring position



(c) Measuring theory

圖 3-5 銲件變形量測示意圖

3.6 電弧形態與熔池拍攝

為了瞭解活性助銲劑的添加對電弧形態產生的影響，在進行 TIG&PAW-Flux 銲接時，另架設影像擷取系統，並採訊號同步接收方式來拍攝銲接電弧動態影像（如圖 3-2 所示），藉以分析添加活性助銲劑對電漿電弧收縮與熔融銲池緊縮之影響行為與作用機制。

3.7 金相實驗

為研究活性助銲劑添加對 1020 碳鋼與 304 不銹鋼銲道形態之影響，在銲後取垂直銲道方向的橫截面來作金相實驗。其中實驗步驟為先取樣與切取試片，經冷鑲埋後用碳化矽砂紙研磨至 #1200，再用氧化鋁粉拋光至 $0.3\mu\text{m}$ ，經拋光完成後的試片，必須以清水與酒精清洗乾淨並用吹風機吹乾，最後則將金相試片予以腐蝕並用光學顯微鏡(optical microscope)拍照。實驗設備採用 Olympus BX60M 型光學顯微鏡。至於在腐蝕方面，本實驗 AISI 304 係採用 $10\text{g CuSO}_4+50\text{ml HCl}+50\text{ml H}_2\text{O}$ 腐蝕液而 AISI 1020 則採用 $2\text{ml HNO}_3+100\text{ml C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 腐蝕液，而腐蝕時間則約為 4~5 秒鐘左右。

3.8 銲道深寬比量測

將銲接試片之頭尾二端約各 40mm 予以切除後，再從剩餘之銲道切取三個試片。這些試片經研磨、拋光後，再以 Marble's 腐蝕液($10\text{g CuSO}_4+50\text{ml}$

HCl+50ml H₂O) (AISI 304) 及 Nital (2%) (AISI 1020) 浸蝕，而腐蝕時間則約為 4~5 秒左右。實驗設備採用實體顯微鏡(stereomicroscope)進行拍照，並且量測銲道之穿深(Depth)及寬度(Width)，以穿深／寬度比值(Depth／Width Ratio)來作為銲道穿深能力之評估指標。圖 3-6 所示為銲道形狀之量測示意圖，其中 W：為銲道寬度；D：為銲道深度；T：為母材厚度；R：為銲道凸面高。

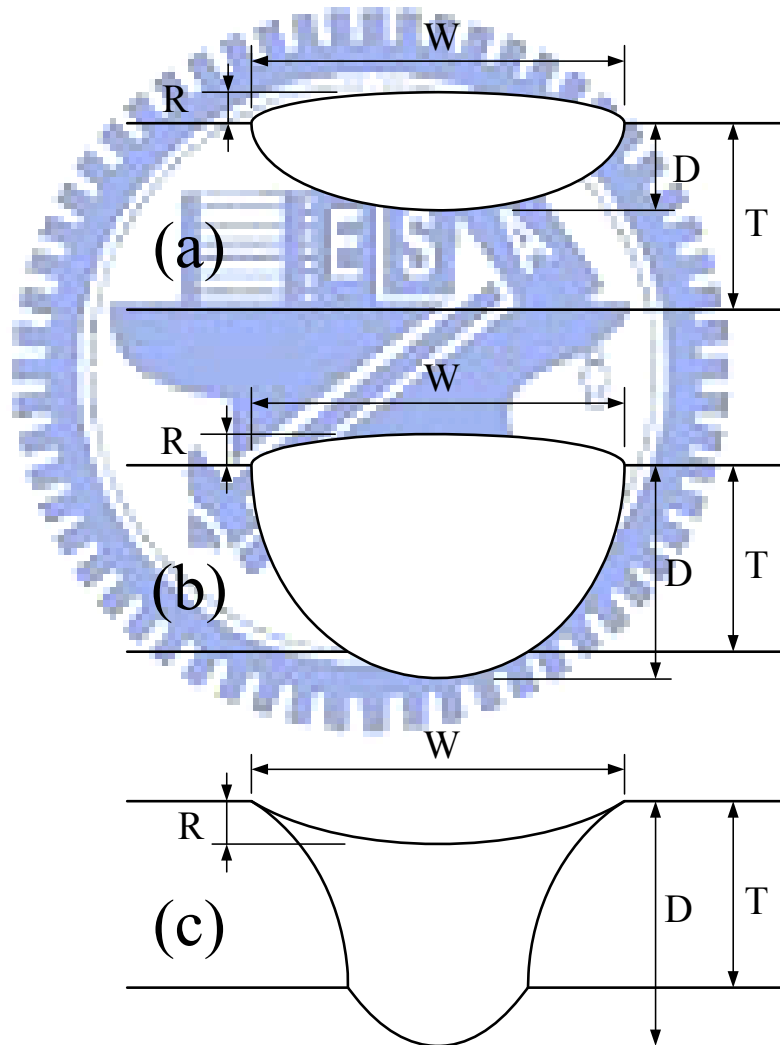


圖 3-6 銲道形狀量測示意圖(a)部份熔透 (b)完全熔透 (銲道高凸) (c)完全熔透 (銲道低陷) (W：銲道寬度；D：銲道深度；T：母材厚度；R：銲道凸面)

3.9 肥粒相含量量測

為研究對不銹鋼銲道肥粒相含量的影響，在銲接後量測其銲道殘留肥粒相含量，量測設備採用 Ferriscope M10B-FE 型肥粒相測定儀（測頭直徑為 1.2mm、平均誤差量為 0.04FN）。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。

3.10 維氏硬度試驗

本研究測量銲道硬度時，採用 Matsuzawa MHT-1 維氏硬度測定機，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，且每點間隔為 0.25mm，最後再將量測之值求其平均值，即為本實驗之銲道硬度值。

3.11 拉伸試驗

試片型式採用 ASTM 標準 E8 規範加工而得，其試片規格如圖 3-7 所示。試驗設備採用 10KN 的 Instron 8501 型拉伸試驗機，拉伸速率為 0.05mm/sec。可由此試驗得到材料銲後之極限抗拉強度(UTS)、降伏強度

(YS)、伸長率(elongation)等。

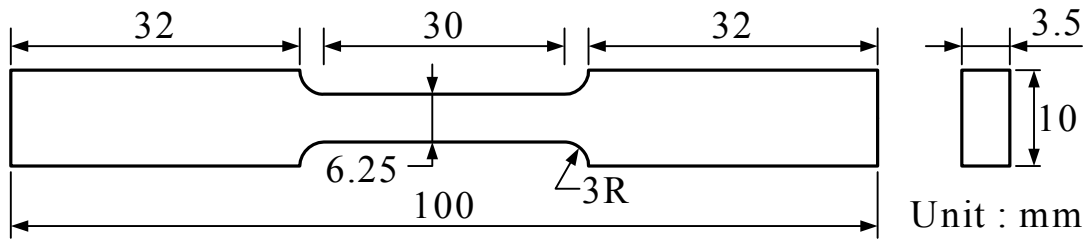


圖 3-7 拉伸試片規格圖

3.12 SEM 與 EDS 分析

為研究各種活性助鋅劑對 1020 低碳鋼與 304 沃斯田鐵不銹鋼鋅道中合金元素成份的影響，在鋅後選取鋅道的微觀組織來作能量散佈光譜儀 (energy dispersive spectrometer, EDS) 分析，以探討活性助鋅劑添加對其鋅道中合金元素成份的影響。此外，為瞭解拉伸試驗後試片破斷面之型態，在完成拉伸試驗後，切下破斷部份，以丙酮浸泡於超音波震盪器中清洗，以高倍率的電子顯微鏡 (scanning electron microscope, SEM) 下觀察與拍照；SEM 分析設備採用 JEOL 的 JSM 6360 型分析儀；EDS 分析設備採用 OXFORD 的 INCA Energy 300 型分析儀，其元素偵測範圍：硼 B~鈾 U (原子序 5~92)。

第四章 結果與討論

4.1 AISI 1020 低碳鋼

4.1.1 電漿銲接參數與助銲添加劑對銲道熔深之影響


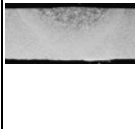
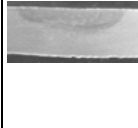
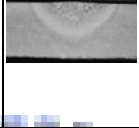
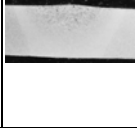
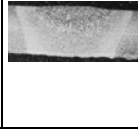
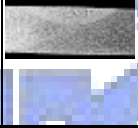
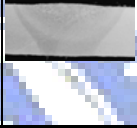
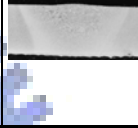
如圖 4.1 所示為電漿銲接參數與助銲添加劑對低碳鋼電漿銲道熔深之實驗結果。結果顯示在同一電漿銲接參數條件下，當添加 MoO_3 、 MnO_2 、 TiO_2 、 SiO_2 及 Cr_2O_3 等助銲劑時，均可提高 AISI 1020 低碳鋼銲道熔深。其中，以 MoO_3 助銲劑的添加對低碳鋼電漿銲道熔深效果最為顯著。

從圖中可發現在同一銲接電流條件下，當銲接走速增加時，銲道熔深將會降低；而在同一銲接走速條件下，當銲接電流增加時，銲道熔深則會提高。由此可知，銲道熔深與銲接熱輸入量有密切關係，亦即提高銲接電流或降低銲接走速都會提高單位銲道長度之熱輸入量，進而提高銲道熔深。其中，在高熱輸入量之電漿銲接參數條件下(125A、100mm/min)，低碳鋼銲道熔深最佳約可提高 33%；而在低熱輸入量之電漿銲接參數條件下(75A、150mm/min)，以添加 MoO_3 助銲劑時，低碳鋼銲道熔深最佳則約可提高 21%。

With MoO ₃ Flux	75A	100A	125A
100 mm/min			
125 mm/min			
150 mm/min			

With MnO ₂ Flux	75A	100A	125A
100 mm/min			
125 mm/min			
150 mm/min			

圖 4-1 氧化物助銲添加劑對低碳鋼電漿銲道熔深之影響

With TiO ₂ Flux	75A	100A	125A
100 mm/min			
125 mm/min			
150 mm/min			

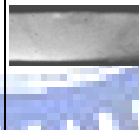
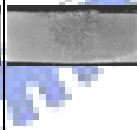
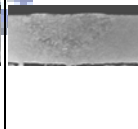
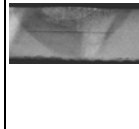
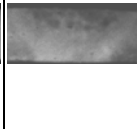
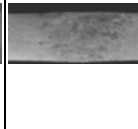
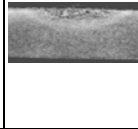
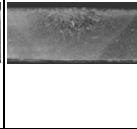
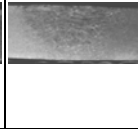
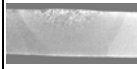

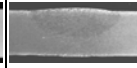

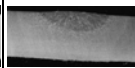
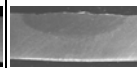



With SiO ₂ Flux	75A	100A	125A
100 mm/min			
125 mm/min			
150 mm/min			

圖 4-1 (續) 氧化物助銲添加劑對低碳鋼電漿銲道熔深之影響

With Cr ₂ O ₃ Flux	75A	100A	125A
100 mm/min			
125 mm/min			
150 mm/min			


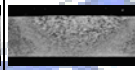
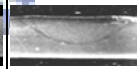

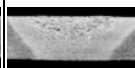

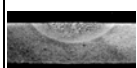

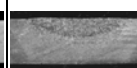
Without Flux	75A	100A	125A
100 mm/min			
125 mm/min			
150 mm/min			

圖 4-1 (續) 氧化物助銲添加劑對低碳鋼電漿銲道熔深之影響

4.1.2 電漿銲接參數與助銲添加劑對銲道深寬比之影響

如圖 4-2 所示為電漿銲接參數與助銲添加劑對低碳鋼電漿銲道深寬比之實驗結果。實驗結果顯示在同一電漿銲接參數條件下，當添加 MoO_3 、 MnO_2 、 TiO_2 、 SiO_2 及 Cr_2O_3 等助銲劑時，均可提高低碳鋼銲道深寬比。銲道深寬比愈高表示電弧熱源之能量密度愈集中。由此可知，添加氧化物助銲劑於電漿銲接製程，將可提升銲接金屬熔融效率。此外，在未添加助銲劑之電漿銲接製程，當提高銲接電流或降低銲接走速參數條件時，其銲道深寬比增加比例並不顯著，其主要原因可能是電弧熱源無法有效集中所致，因此高溫熔液只能朝銲道寬度方向流動，進而形成低深寬比之銲道形態。

隨著銲接電流提高或銲接走速降低，銲道深寬比有提升之趨勢，其主要原因為受銲接熱輸入量增加所致。換言之，當改變銲接電流與銲接走速條件時，銲道所獲致之熔融金屬熱量夠充足，就能提高銲道深寬比。其中，在高熱輸入量之電漿銲接參數條件下，低碳鋼銲道深寬比最佳約可提高 28%；而在低熱輸入量之電漿銲接參數條件下，低碳鋼銲道深寬比最佳則約可提高 12%。本研究主要係以銲道深寬比來作為助銲添加劑對低碳鋼電漿銲道穿深能力之評估指標，而此部份之實驗結果顯示，氧化物助銲劑的添加對集中電漿電弧熱源之能量密度是有助益的，且改變銲接電流或銲接走速條件時，有顯著的正面改善效果，亦即可提高低碳鋼電漿銲道深寬比。

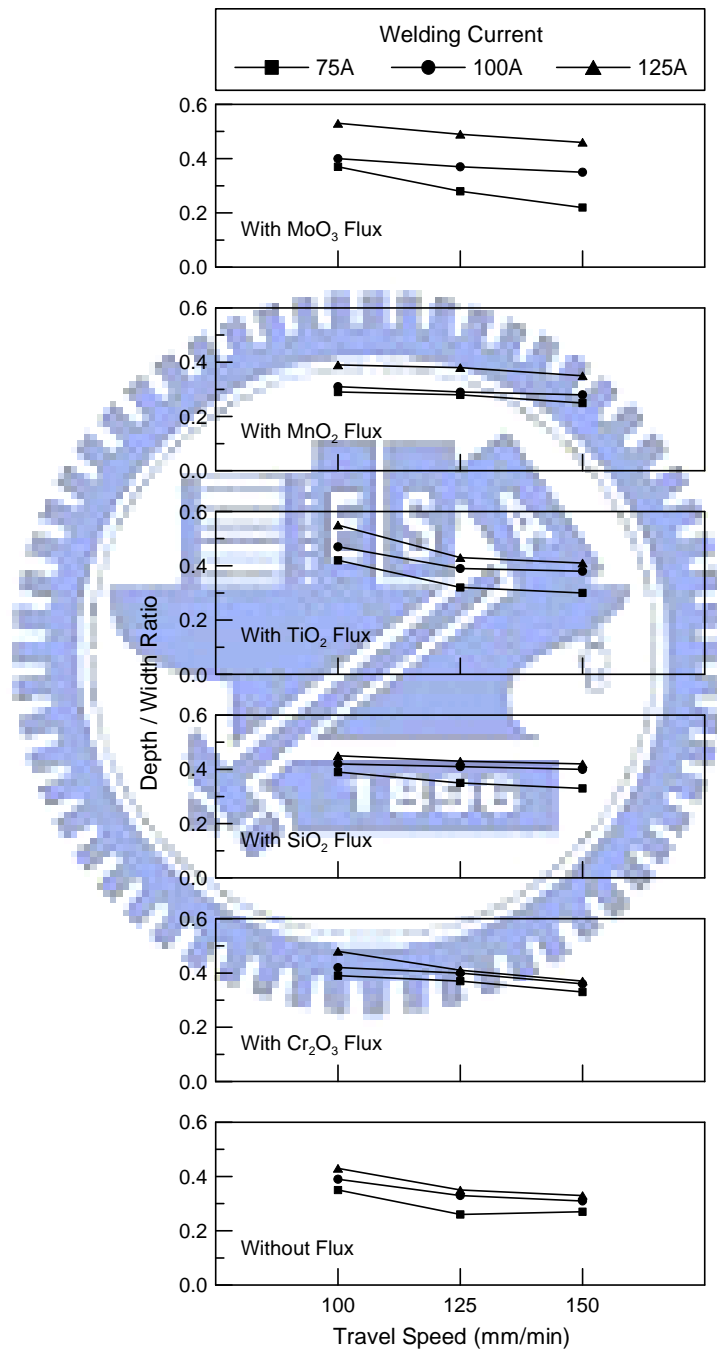


圖 4-2 電漿銲接參數與助銲添加劑對低碳鋼電漿銲道深寬比之影響

4.1.3 電漿銲接參數與助銲添加劑對銲道硬度之影響

如圖 4-3 所示為電漿銲接參數與助銲添加劑對低碳鋼電漿銲道硬度之實驗結果。結果顯示在同一電漿銲接參數條件下，當添加 MoO_3 、 MnO_2 、 TiO_2 、 SiO_2 及 Cr_2O_3 等助銲劑時，均可提高低碳鋼銲道硬度。由於提高銲接電流或降低銲接走速條件，將會提高單位銲道長度之熱輸入量，造成銲道冷卻速率的降低，進而使銲道硬度產生變化。其中，在高熱輸入量之電漿銲接參數條件下，低碳鋼銲道硬度最佳約可提高 9%；而在低熱輸入量之電漿銲接參數條件下，低碳鋼銲道硬度最佳則約可提高 8%。由於添加助銲劑使得電弧柱縮束變窄而使能量密度提升，使銲接時銲道溫度梯度變大，造成銲道有較快之冷卻速率。因而較無添加助銲劑時，銲道有較高之硬度值。值得一提的是，若以銲道硬度性質來探討之，添加氧化物助銲劑雖略比未添加助銲劑之電漿銲接製程佳，然對低碳鋼銲道硬度之提昇效果相較於銲道熔深之提升效果來比較卻顯得硬度之提升相當有限。

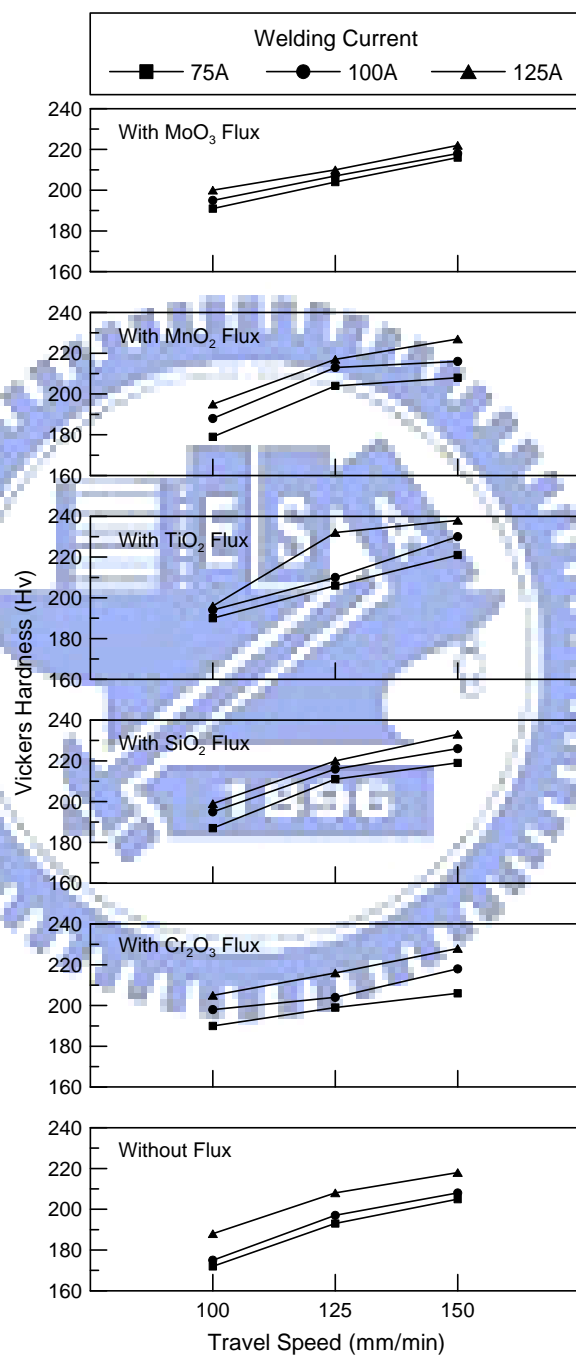


圖 4-3 助銲添加劑對低碳鋼電漿銲道硬度之影響

4.1.4 碳酸鹽助錒劑對低碳鋼電漿錒接熔深之影響

在圖 4-4 與 4-5 中可發現，在選定之三種碳酸鹽助錒添加劑對低碳鋼電漿錒道熔深與深寬比皆有所改善。三者中以 NiCO_3 之改善幅度較大。由此可見此三種碳酸鹽助錒添加劑對低碳鋼電漿錒接其錒道之能量密度皆能提升，亦即對現場錒接有所助益。





Flux	Without flux	NiCO_3	MgCO_3	MnCO_3
Welding current 125A Travelling speed 150mm/min				

圖 4-4 碳酸鹽助錒添加劑對低碳鋼電漿錒道熔深之影響

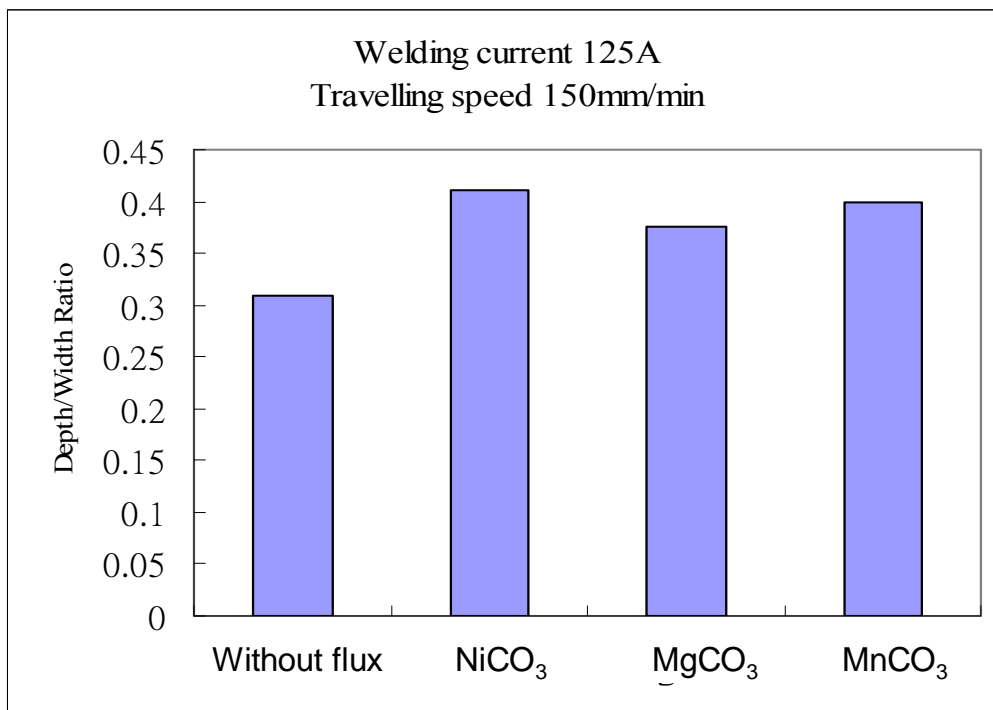
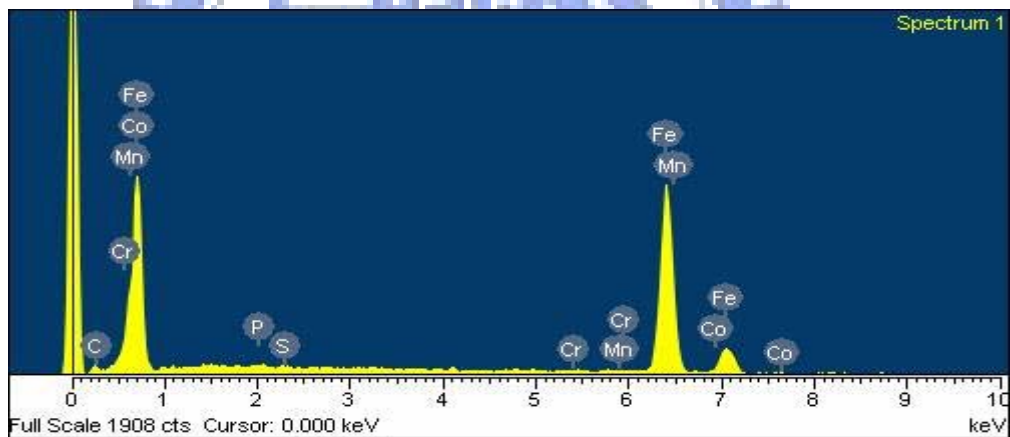


圖 4-5 碳酸鹽助錒添加劑對低碳鋼電漿錒道深寬比之影響

4.1.5 EDS 成份分析

將銲接實驗後之試片取銲道橫切面作 EDS 成份分析，圖 4-6 與表 4-1 分別為其光譜與成份分析之結果。由圖 4-6 中得知在添加 NiCO_3 活性助銲劑與傳統電漿銲接之銲道光譜分析結果其圖形似乎有些類似。但從表 4-1 成份重量比觀察，加入 NiCO_3 活性助銲劑後有些增碳及降低鐵含量之現象。此乃銲接過程中因銲道能量密度提高導致部份活性助銲劑有被熔入或部份元素被燃燒之現象所引起。

Without flux



NiCO_3

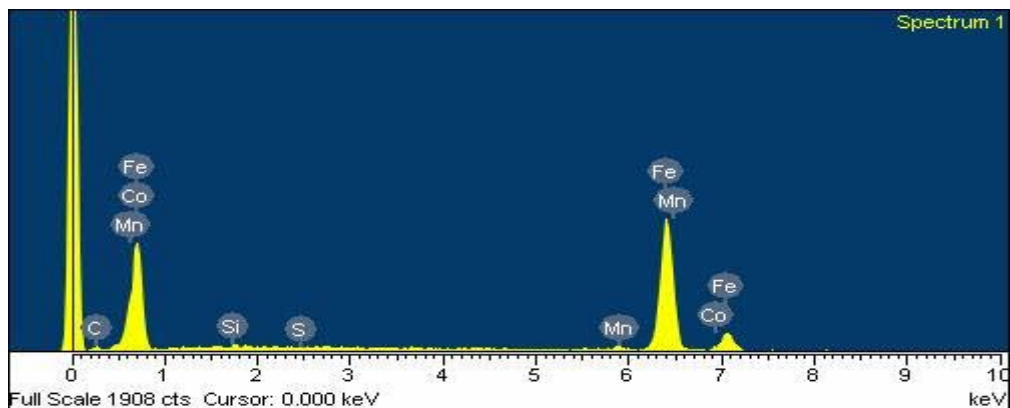


圖 4-6 PAW-Flux 銲接製程之 EDS 光譜分析結果

表 4.1 PAW-Flux 銲接製程之 EDS 成份分析結果

Without flux			NiCO ₃ flux		
Element	Weight, %	Atomic,%	Element	Weight, %	Atomic,%
C	4.57	18.20	C	7.41	26.98
Ti	0.24	0.24	P	—	—
S	—	—	S	0.02	0.02
Cr	0.22	0.20	Cr	—	—
Mn	0.37	0.32	Mn	1.59	1.27
Fe	94.83	80.78	Fe	90.18	70.62
Co	0.22	0.18	Co	0.17	0.13
Ni	0.10	0.08	Ni	—	—
Si	—	—	Si	0.63	0.99

4.2 304 型不銹鋼

如 4-7 圖顯示添加 MoO₃、MnO₂、TiO₂、SiO₂、Cr₂O₃、Fe₂O₃ 及 ZnO 等氧化物型助銲劑將可有效提高銲道深寬比，亦即可得到窄而深的銲道截面。在圖 4-7、4-8 中可明顯看出 SiO₂ 氧化物助銲劑對 304 不銹鋼銲道熔深改善效果最為明顯，與不使用助銲劑時比較約可提升 200% 之熔深效果，深寬比則提高約 350%。換句話說，在厚板銲接時將可降低熱循環次數，減少

因多次銲接而造成材料機械性質之不良影響。

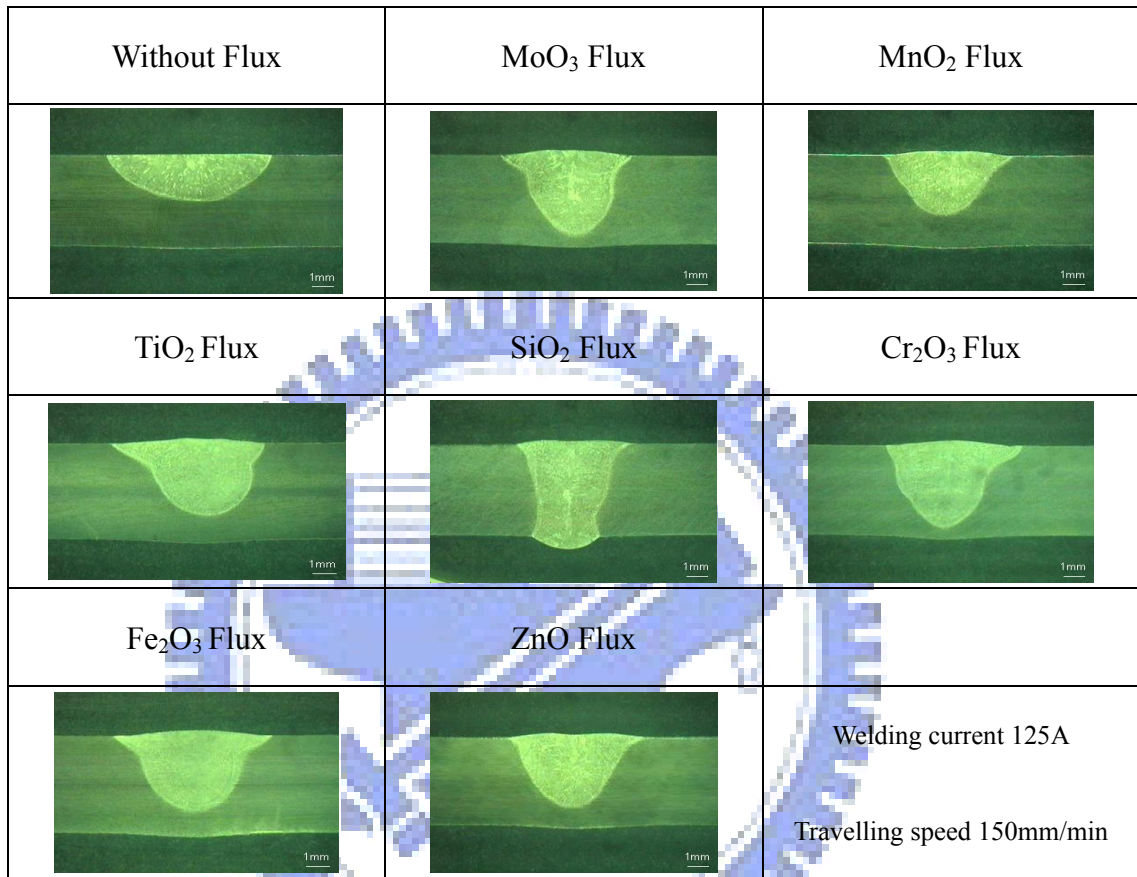


圖 4-7 氧化物助銲添加劑對 304 不銹鋼電漿銲接銲道熔深之影響

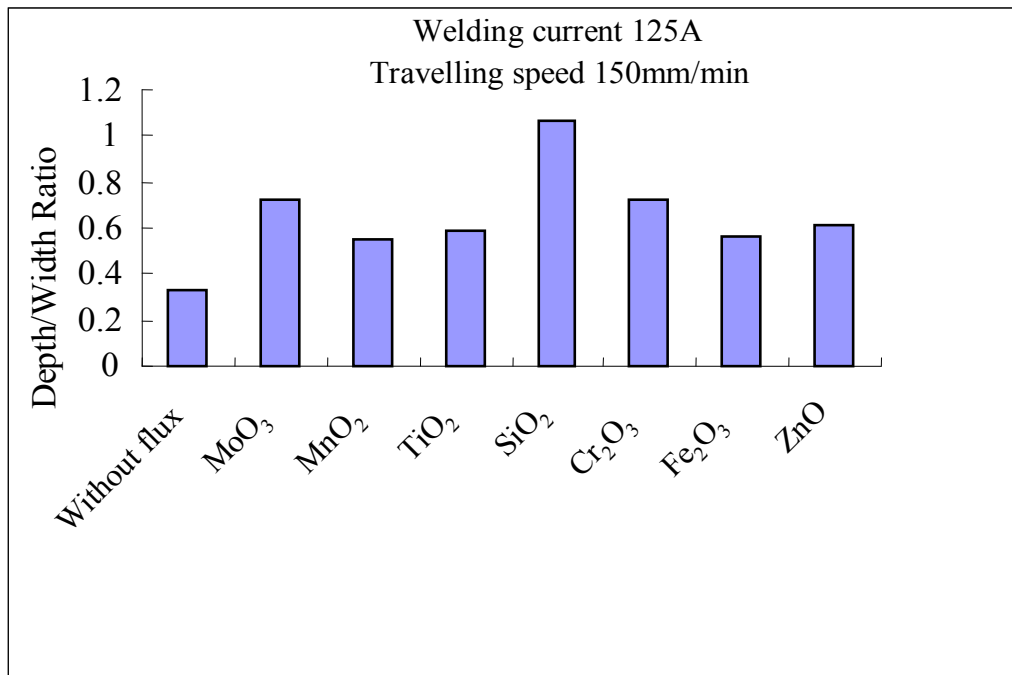


圖 4-8 氧化物助銲添加劑對 304 不銹鋼電漿銲接銲道深寬比之影響

4.2.1 活性助銲劑添加對於 PAW 銲件角變形之影響

由圖 4-9 所示為活性助銲劑銲接製程參數對不銹鋼銲件角變形之影響。在圖中銲接走速固定為 125 mm/min 時可明顯得知添加 MoO₃、MnO₂、SiO₂、Cr₂O₃、Fe₂O₃、及 ZnO 等氧化物型助銲劑時，在 125A 銲接電流參數條件下，可有效降低不銹鋼銲件角變形量，其主要原因可藉由圖 2-14 來加以分析。在銲道熔深超過母材厚度一半之情況下，在中性軸上方之熱收縮應力與下方之熱收縮應力會有相互抵消之作用；換言之，中性軸上方之熱收縮會造成銲件往上翹曲，而中性軸下方之熱收縮將會造成銲件向下翹曲，兩者之合成效應將會促使銲件角變形變小。由此可知，在銲道熔深超

過母材厚度一半之情況下，當熔透深度增加時，由於其熱收縮應力相互抵消之效應亦高，因此可降低鉚件角變形。

此外，由圖 4-9 中亦可觀察出分別添加 MoO_3 、 MnO_2 、 SiO_2 、 Cr_2O_3 、 Fe_2O_3 、 Cr_2O_3 及 TiO_2 等氧化物型助鉚劑時在 75A 鉚接電流參數條件下，其鉚道熔深($\text{MnO}_2=2.18$ ， $\text{TiO}_2=2.02$ ， $\text{Fe}_2\text{O}_3=2.1$ ， $\text{MoO}_3=2.28$ ，mm)比較接近於母材厚度一半，此時鉚件之角變形均呈現最高值。根據 Pavlovsky 等人[58]與 Watanabe 等人的研究報告[58]指出，鉚件最大角變形量一般發生於鉚道熔深／母材厚度的比值約為 0.5 的情況下。關於此現象可解釋為當鉚道熔深／母材厚度的比值小於 0.5 時，若鉚道熔深愈小則意味著鉚件將有較佳的抵抗彎曲變形能力，因此會造成鉚件角變形的降低；當鉚道熔深／母材厚度的比值大於 0.5 時，若鉚道熔深愈大則意味著沿鉚件厚度方向的溫差會愈小，而沿鉚件厚度方向溫差的降低則代表鉚件整體的冷卻速率也會隨之降低，亦即鉚件在冷卻過程中可能會受到較均勻的熱收縮力作用，進而造成鉚件角變形的降低。因此，助鉚劑的添加，除了改變熔池的表面張力，其鉚接熱源的能量密度也會愈集中，同時可減小作用於鉚接金屬中的熱收縮應力，因此提高鉚接金屬整體的品質。

在 75A 鉚接電流參數條件下，當添加 MnO_2 、 TiO_2 、 Cr_2O_3 、 Fe_2O_3 及 SiO_2 等氧化物型助鉚劑時，則會造成鉚件角變形的增加，而其主要原因亦可由圖 2-14 來加以探討。在鉚道熔深未超過母材厚度一半之情況下，當鉚

道產生熱收縮應力時，其銲道幾何形狀之圓弧中心點愈趨近銲件之中性軸，銲件將會產生較大的彎曲力矩，進而提高銲件角變形。換言之，當銲道熔深/母材厚度的比值小於 0.5 時，若銲道熔深愈小則意味著銲件將有較佳的抵抗彎曲變形能力，因此會造成銲件角變形的降低。此外，由圖 4-9 可得知在 75A 銲接電流參數條件下，添加氧化物型助銲劑與未添加活性助銲劑所形成的銲道熔深均未超過母材厚度之一半，其中未添加活性助銲劑所形成的銲道熔深雖較添加氧化物型助銲劑者來的小，但因其銲道熔池較寬，因此比相同熔深但銲道寬者其將會產生較高的角變形量。

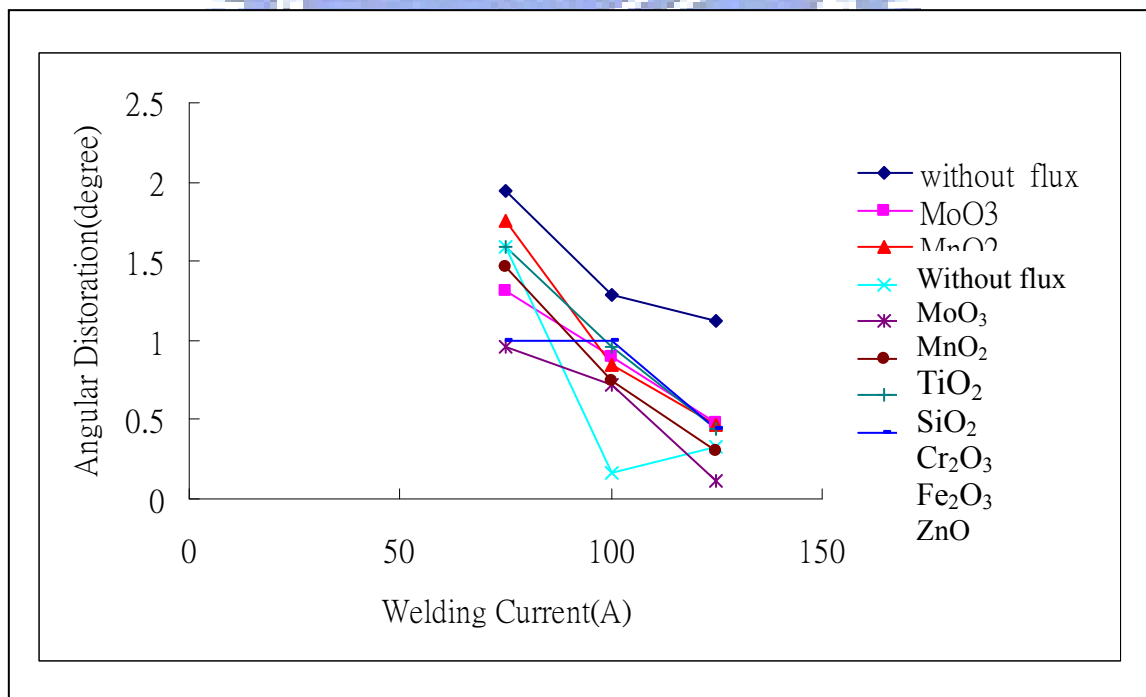


圖 4-9 銲接參數對銲道角變形之影響

4.2.2 PAW 銲接參數對銲道熔融面積之影響

由於 SiO_2 對 304 不銹鋼之熔透效果最為顯著，因此將對此單一成分之 SiO_2 活性助銲劑特予深入探討。

圖 4-10 為單一成分之 SiO_2 活性助銲劑對不銹鋼銲道斷面熔融面積之實驗結果。結果顯示使用助銲劑之銲道熔融面積會隨走速增加而熔融面積減少。此外，在同一銲接走速條件下，隨銲接電流增加，銲道熔融面積有增加的趨勢。綜合言之，銲道熔融面積與熱輸入量有密切之關係，當熱輸入量愈高，銲道熔融面積隨之上升。因此，在本實驗中當提高銲接電流與降低銲接走速時將會提高其銲接熱輸入量，所以銲道熔融面積也較高。另在添加 SiO_2 活性助銲劑時由於能使電弧柱更集中，熔透深度增加因而有較大之銲道熔融面積。

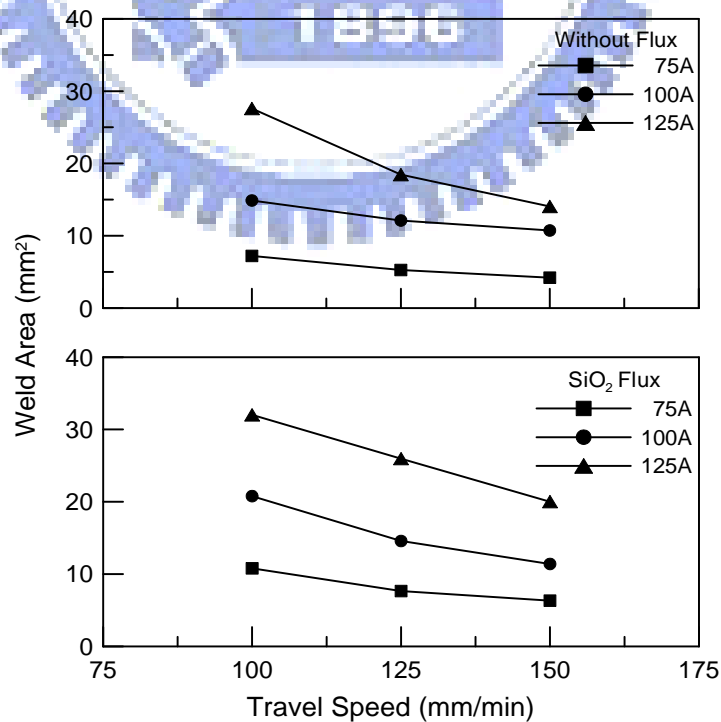


圖 4-10 銲接參數對銲道熔融面積之影響

4.2.3 銲接參數對銲道熔透深度之影響

圖 4-11 與圖 4-12 為不同銲接電流對不銹鋼銲道熔透深度之影響。由圖中可明顯看出，當添加 SiO_2 之活性助銲劑時，隨著銲接走速增加，銲道之熔透深度則愈低。其最主要的原因為受銲接熱源的輸入量不足所影響；換言之，當銲接走速增加時，銲道所獲之熱能不夠充足，而形成較低之熔透深度。在圖中亦可發現，添加 SiO_2 時由於電弧縮束作用，使能量更集中。故在相同銲接參數下有更好的熔深效果。

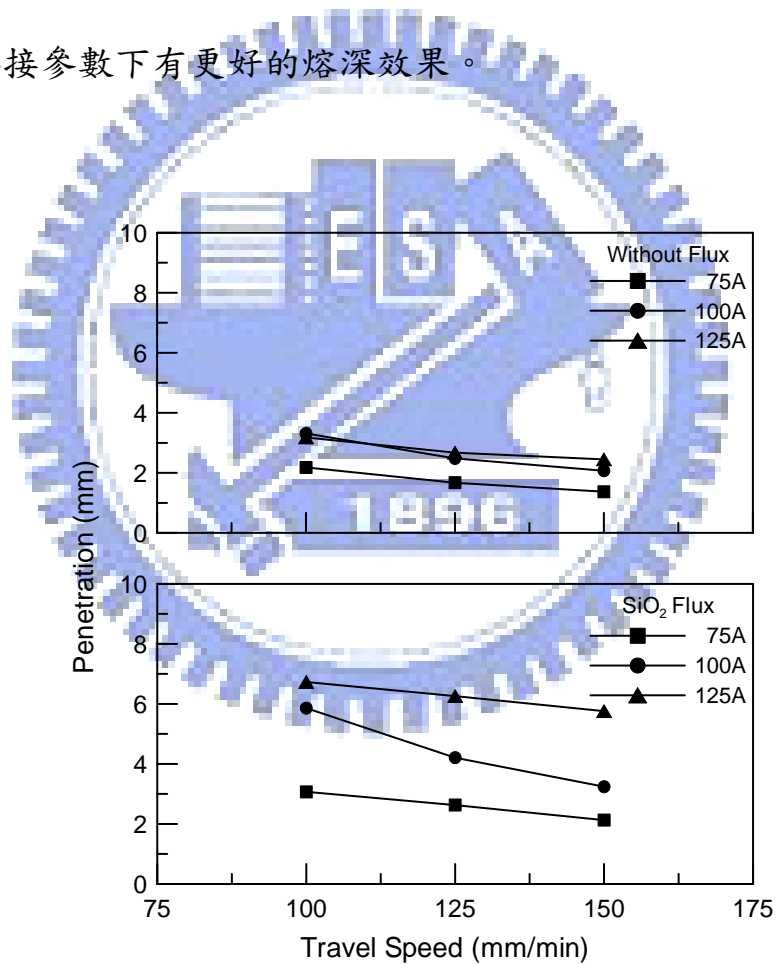


圖 4-11 銲接參數對銲道熔透深度之影響

Without Flux	75 A	100 A	125 A
100 mm/min			
125 mm/min			
150 mm/min			

(a) 無添加活性助鐸劑

SiO ₂ Flux	75 A	100 A	125 A
100 mm/min			
125 mm/min			
150 mm/min			

(b) 添加 SiO₂ 活性助鐸劑

圖 4-12 鐸接參數對鐸道型態之影響

4.2.4 鐸接製程參數對鐸道肥粒相含量之影響

沃斯田鐵不銹鋼在室溫下的微觀組織，理論上應為完全沃斯田相組織。事實上絕大部份的沃斯田鐵不銹鋼鐸接金屬在鐸後皆會殘留有或多或少的肥粒相組織[60-61]。圖 4-13 為電漿鐸接製程參數對不銹鋼鐸道殘留肥粒相

含量之影響。由圖中可得知，當銲接電流高或者是銲接走速慢的參數條件時，其銲道殘留肥粒相含量較高；此外，添加 SiO_2 活性助銲劑之銲道，其肥粒相皆高於傳統電漿銲接製程。

在文獻[20-25]中指出肥粒相對於 S、P、Si 等有害雜質，具有較高溶解度，使得固化時晶界的偏析現象大為減少，因此可減少熱裂產生。此外肥粒相的熱膨脹係數比沃斯田相小，因此冷卻過程中，以主肥粒相凝固的銲道將產生比較小的熱收縮力，因此在凝固的最後階段會減低產生裂縫的機會。另，肥粒相在沃斯田組織中亦有細化晶粒之效果，從而增加晶界面積。因此析出於晶界薄膜較薄，使裂縫不易產生，而且肥粒相與沃斯田相的相界面非常崎嶇不規則，不像以單相存在之晶界那般平滑，因此在肥粒相—沃斯田相相界上裂縫將遭受阻擋，難以傳播。但肥粒相組織的耐腐蝕性通常較沃斯田相組織差，特別是在腐蝕能力較強的酸性溶液中，肥粒相組織極易被溶解而產生孔蝕(pitting)的現象。

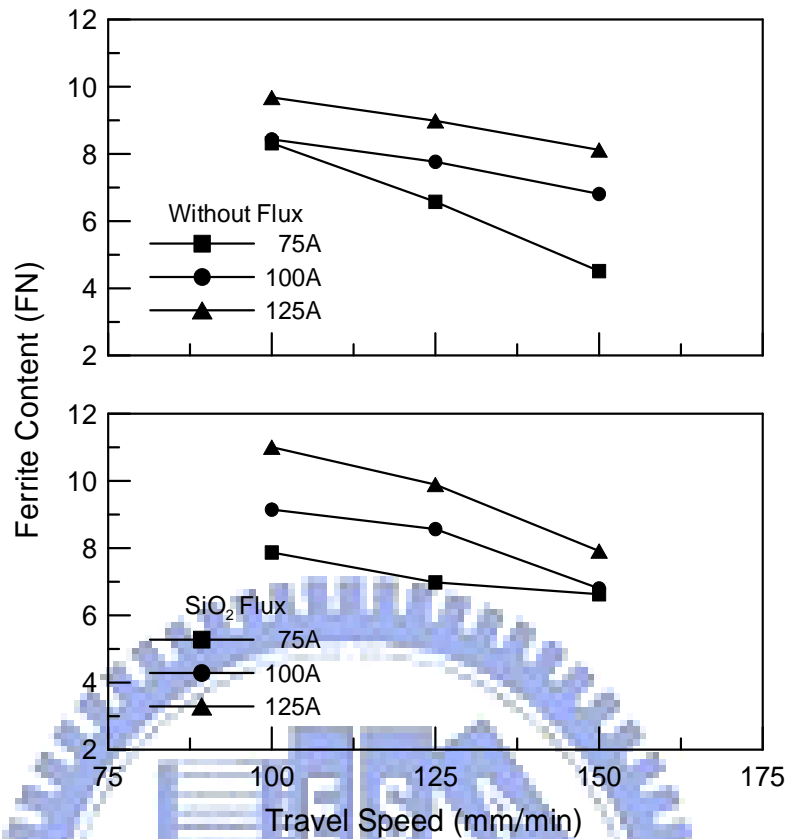


圖 4-13 銲接參數對銲道肥粒相之影響

4.2.5 銲接製程對銲道機械性質之影響

添加 SiO_2 之活性助銲添加劑與傳統電漿銲接製程之銲道維氏硬度量測結果，如圖 4-14 所示。由圖中可發現，添加活性助銲劑之電漿銲道對維氏硬度值的改變稍有增加之趨勢。由低的銲接走速或高的銲接電流輸入時由於單位面積之輸入熱量較多，冷卻速率較單位面積熱量輸入少（即銲接走速快或低銲接電流輸入時）時來得緩慢，故在同為 5 mm 之板件上作銲接會時會有較低的硬度。

另外，在添加 SiO_2 活性助銲劑在各種銲接參數條件下均可獲得較高的

硬度值。此乃銲接電弧柱受到活性助銲劑的縮束效應，使得能量密度更集中、銲道更窄，而使銲道之溫度梯度提升，形成銲道冷卻速度變快，因而得到較高的銲道硬度值。

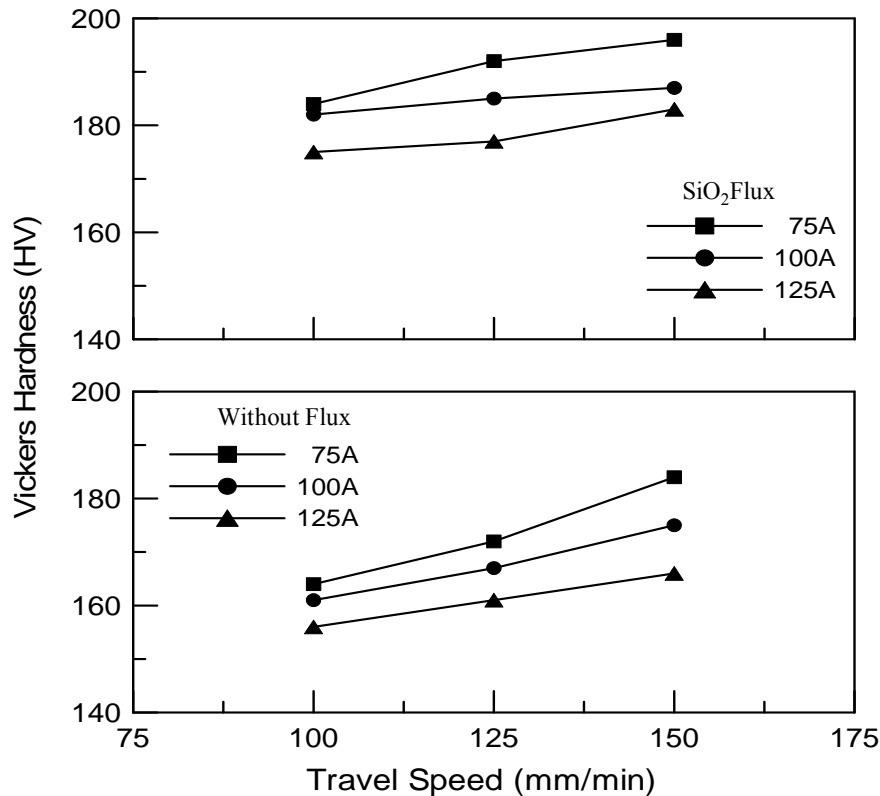


圖 4-14 銲接參數對銲道維氏硬度之影響

如表 4.2 所示為電漿銲接製程對 304 不銹鋼銲道拉伸試驗之結果；其試片之銲接參數為電流 125A，走速 125mm/min。結果顯示，添加 SiO₂ 活性助銲劑對沃斯田鐵型不銹鋼之拉伸強度有稍微增加之趨勢但影響並不顯著，而伸長率的影響亦無顯著的效果。

表 4.2 不銹鋼電漿銲接之拉伸試驗結果

Flux	UTS(MPa)	Elongation(%)
Without flux	589.52	32.53
SiO ₂ flux	612.24	31.27

4.3 TIG 與 PAW 銲接特性比較

4.3.1 助銲劑對表面外觀之影響



圖 4-15 SiO₂ 助銲劑 對不銹鋼銲道外觀之影響

圖 4-15 所示，為 304 型不銹鋼分別使用 TIG 與 PAW 銲接時其銲道之表面外觀圖。圖 4-15 (a)使用 SiO₂ 助銲劑時，在銲道與母材之中間有明顯大數量的銲渣產生，圖 4-15 (b)中顯示令人滿意的銲道表面出現，但仍產生少量的銲渣。在此，經縮口噴嘴的電漿電弧提供了較集中的電弧能量來改善噴射電離子方向的穩定性同時提供較高的熔化效率。因此，在 PAW 銲接時更能讓不銹鋼獲得良好的銲道外觀品質。

4.3.2 助銲劑對銲道型態之影響

圖 4-16 所示，為分別使用 TIG 與 PAW 時銲道型態圖，銲接電流為 125A。在圖中可明顯看出添加 SiO_2 助銲劑較不添加時銲道明顯的變窄且變深。且相同銲接電流下 PAW 之銲道熔深較 TIG 來的深且窄，主要由於電漿銲接之電漿弧柱經過水冷噴嘴充分收束，所以與 TIG 電弧柱比較起來（圖 4-18、圖 4-20.），弧徑較細，弧寬也較窄，因此熱集中度高，因而可獲得窄而深之銲道形態。

圖 4-17 為使用助銲劑與不添加助銲劑時之銲接電流與熔透深度之關係圖。由圖可知，銲接走速相同下，銲道熔透深度與銲接電流成正比。很明顯的是由於輸入熱量增加與電磁力的做用驅使而增加熔透效應，因此，最典型的改善熔透深度的方法即為提高銲接電流。

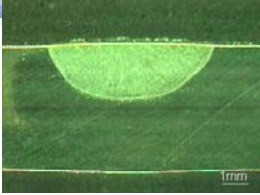
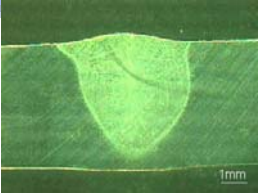
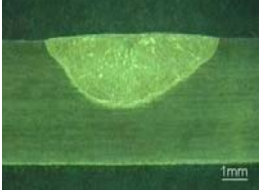
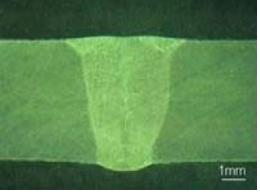
	Without flux	SiO_2 flux
TIG weld		
PAW weld		

圖 4-16 添加 SiO_2 助銲劑對 304 不銹鋼銲道型態之影響

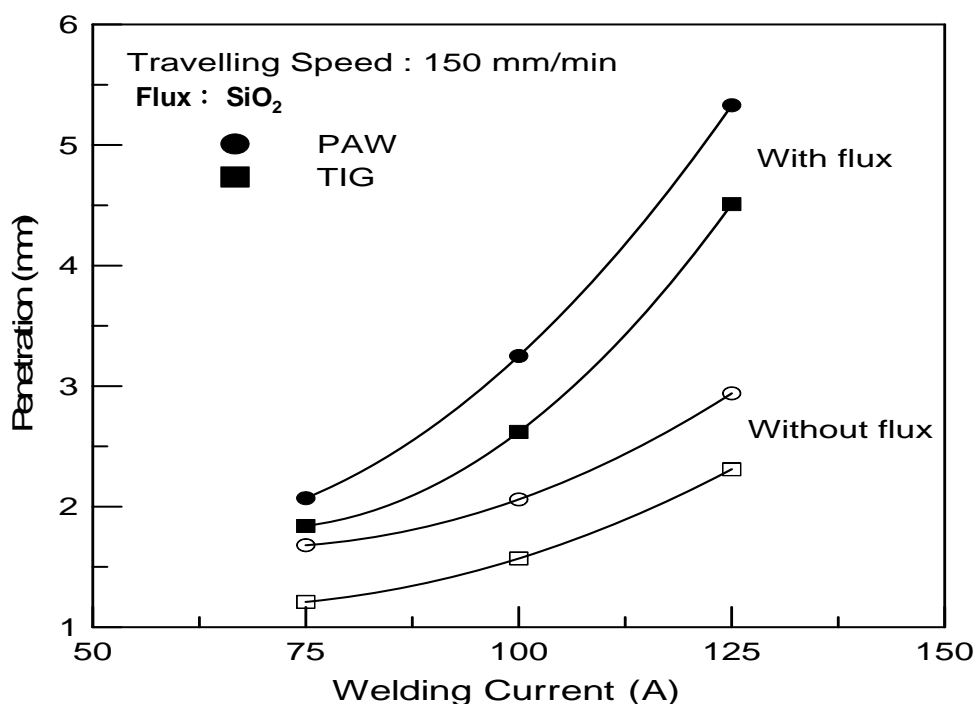


圖 4-17. TIG 和 PAW 使用助銲劑與不添加助銲劑時之銲接電流與熔透深度之關係圖。

4.4 添加助銲劑對增加銲道熔深之機制

(A) TIG 銲接

在 TIG 銲接中，為了觀察活性助銲劑的角色，我們使用 CCD 監視系統來加以研究。圖 4-18 所示，為分別有添加 SiO₂ 助銲劑和沒有使用助銲劑的電弧在氬氣份保護下 TIG 銲接的典型表面，電弧的中央部分清楚的顯示有一個發光區域幾乎佔據了整個弧長。這個區域被認為是電漿電弧柱(由保護氣體的熱電離產生的電子和離子運載的電流)。在圖 4-18 中與沒有加入助銲劑之銲接比較，在相同銲接電流下，添加助銲劑之電漿電弧柱直徑受到拘束而變小，陽極斑點根部電流密度增加，在此同時獲得一窄而深之銲道。

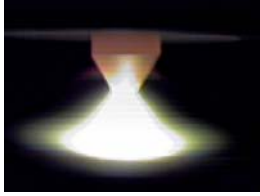
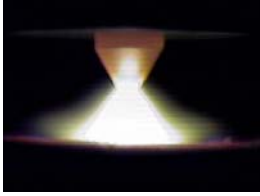


TIG	Without flux	SiO ₂ flux
Plasma column		
Anode spot		

圖 4-18 添加助銲劑對於 304 不銹鋼 TIG 銲接時對電漿電弧柱

與陽極斑點之影響

關於活性助銲劑對銲道熔深形成機制之影響，在此可藉由銲池表面張力梯度改變與電漿電弧柱收縮之電弧效應來加以探討與分析：

(1) 銲池表面張力梯度改變

根據 Heiple 等人[45-49,63,64]的研究結果顯示，銲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銲池表面張力梯度之影響。至於銲池表面張力梯度效應主要則取決於銲池表面張力之溫度係數(dy/dT)，其中銲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。在純金屬或銲池中不存在活化元素時，銲池表面張力一般隨溫度的升高而減小（亦即銲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銲池中央向銲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（如圖 2-15(a)所示）。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 2-15(b)所示）。在活性化鐸接製程技術中，其基本理論乃認為熔融液態金屬的流動狀態係決定鐸接金屬幾何形狀的主要因素，而鐸池表面張力梯度則是驅使熔融液態金屬流動的關鍵因素。當熔融金屬存在有活性化元素時（即添加活性助鐸劑），除了會降低熔融液態金屬的表面張力外，且會改變表面張力之溫度係數為正值，進而使熔融液態金屬形成由鐸池外緣向鐸池中央流動的表面張力流。當鐸池中央區域的電弧熱量藉由熔融液態金屬的流動直接傳遞至鐸池底部，使鐸池底部的熔化效率大幅提昇，進而可提高鐸道熔透深度。

(2) 電弧效應與鐸池熔融緊縮

如圖 4-18 所示，在活性化鐸接過程中，可明顯發現電漿電弧柱會產生收縮現象，而此電漿電弧柱收縮現象將可有效集中電弧熱量，進而使鐸道熔透深度增加。由於電漿電弧中心區域的溫度要遠高於分子解離溫度，因此活性助鐸劑在高溫電漿噴射流的作用下，氣體與助鐸劑原子將會產生電離而形成電子與正離子。然而在相對溫度較低的電漿電弧柱外圍區域，活性助鐸劑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，而此現象將可有效集中電弧熱量，進而使鐸道熔透深度增加。

同時，在活性化鐸接過程中，除了可發現電漿電弧會產生收縮現象外，位於鐸池中之陽極斑點(anode spot)亦會產生明顯的緊縮現象。由於助鐸劑本身不具有導電性，且其熔/沸點亦比鐸接金屬材料高，此外只有在電漿電弧中心的高溫區域才會產生金屬蒸氣。因此鐸接金屬材料在塗敷助鐸劑後，此金屬蒸氣將會受到抑制，而在較少的金屬蒸氣情況下，熔融鐸池將會形成較小的陽極斑點區。換言之，助鐸劑物質的存在將會造成熔融鐸池的緊縮現象，而此現象將會提高作用於陽極斑點區的電流密度[47, 48]，亦即會增加鐸池內部因電流相互作用所形成的電磁力，同時也會降低鐸池表面因電漿對流所產生的氣動拖曳力(aerodynamic drag force)，進而形成窄而深的鐸道截面。

(B) PAW 鐸接

電漿鐸接基本上是鎢極惰性氣體鐸接過程的一種延伸。它除了擁有TIG的熔深機制外，由於電漿鐸接是將能夠電離的氣體（通常為氫、氬或氫氣等），加壓後迫使流經鐸鎗噴嘴內正負兩極間的直流電弧使之電離成為電漿。氣體分子受到電弧的高溫加熱而分裂成帶電的高溫高壓離子態的電

離氣和游離熱電子，隨同電弧經鉸鎗噴嘴高速噴出至鉸件表面，噴出電離氣和游離熱電子與常溫之工件接處時，電離氣和電子再度結合成氣體分子，釋放出大量的熱量，經由縮口噴嘴噴出之電漿束具有高能量而產生高溫熔化金屬表面，其高動量則使電漿氣體繼續深入而貫穿金屬底面，因此它比 TIG 鉸接有更高的電流密度及更高之能量縮收集中度，來製造更深的鉸接熔透深度。在添加助鉸劑於電漿電弧鉸接中，D.S. Howse 和 W. Lucas [65] 認為，任何被壓縮拘束之電漿電弧都不會像在鎖孔模式鉸接一樣，產生完全穿透鉸接來增加鉸接穿透深度。如圖 4-19 所示，在此研究中，塗敷有助鉸劑之母材做鉸接時，很明顯的在沒有鎖孔鉸接模式下，鉸接熔池的電漿電弧產生縮收並生成一強而有力之電弧密度。

使用這個論據，助鉸劑對電弧鉸接其電弧縮收集中的有效影響是一個很好的概念。它導致更大的電弧力量作用在熔池，因而產生更高的電流密度，使獲得更窄而深的熔接鉸道。

綜合言之，無論是 PAW 或是 TIG 鉸接製程其影響電漿電弧收縮與熔融鉸池緊縮的程度一般取決於：(1)助鉸劑蒸氣與電子的親合力；(2)助鉸劑物質的解離溫度。亦即，若助鉸劑蒸氣與電子的親合力愈強或助鉸劑物質的解離溫度愈高，則其對電漿電弧收縮與熔融鉸池緊縮的影響效應將會愈顯著。因此，在活性化鉸接過程中，除了可明顯發現電漿電弧會產生收縮現象外，活性助鉸添加劑的存在亦將會造成鉸池陽極斑點的緊縮現象。

而此電弧收縮與鉸池緊縮等現象的共同作用應是活性化鉸接製程可有效提高鉸道穿深能力的主要作用機制。




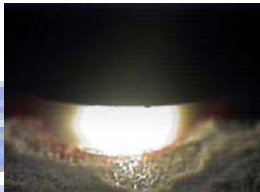
PAW	Without flux	SiO ₂ flux
Plasma column		
Anode spot		

圖 4-19.添加助鉸劑於 PAW 鉸接時對電漿電弧柱與陽極斑點之影響

4.5 混合型活性助鉸劑添加對電漿鉸接之影響

4.5.1 混合型活性助鉸劑添加對電漿鉸接鉸道外觀之影響

本研究以 SiO₂、TiO₂、Cr₂O₃、MoO₃、Fe₂O₃ 及 ZnO 等助鉸劑混以不同比例之 MnO₂，其鉸接參數為電流 125A、走速為 125 mm/min。圖 4-20 所示為不同混合比例之活性助鉸劑對不銹鋼鉸道熔深之實驗結果，結果顯示在同一鉸接製程參數條件下，添加 60%MnO₂ 於上項之各種活性助鉸劑中皆可獲得相當高之熔深效果，鉸道熔深與不添加助鉸劑時比較約可提高 250%。本研究主要係以鉸道深寬比來作為鉸道穿深能力之評估指標，由圖 4-20 與圖 4-21 及表 4-3 所示可得知添加 40%~80%MnO₂ 或 20%~60% SiO₂ 成份組成之活性助鉸劑時，鉸道深寬比的提升效果較為明顯與不添加助鉸

劑時比較約可提高 95%，其中又以 60% SiO₂-40% MnO₂ 所混合組成之活性助銲劑對不銹鋼銲道成形的作用效果最為顯著，其可達到完全熔透的最佳銲道穿深效果。

此外，SiO₂ 與 MnO₂ 混合成份組成之活性助銲劑的添加，除了可有效提高不銹鋼銲道深寬比外，亦可減小其銲接熱影響區。根據研究文獻指出若銲道深寬比愈高且銲接熱影響區愈窄，則代表銲接熱源的能量密度將會愈集中[60-61]。由此可知，若銲接熱源的能量密度愈集中，不僅可提高其對銲接金屬的熔化效率，增加銲道熔深之效果。

Flux	MnO ₂ 80% Other 20%	MnO ₂ 60% Other 40%	MnO ₂ 40% Other 60%	MnO ₂ 20% Other 80%
SiO ₂				
TiO ₂				
Cr ₂ O ₃				
MoO ₃				
Fe ₂ O ₃				
ZnO				

Welding current 125A Travelling speed 125mm/min

圖 4-20 混合型活性助銲劑添加對電漿銲接銲道外觀之影響

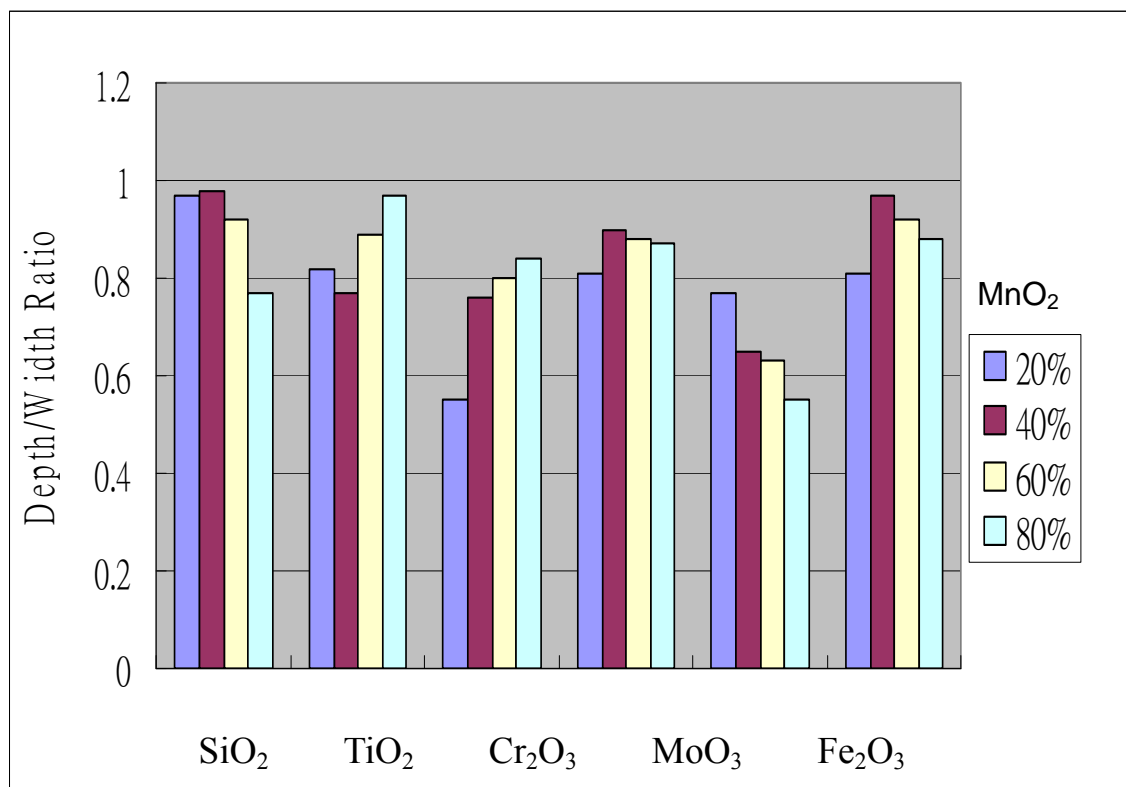


圖 4-21 混合型活性助銲劑添加對電漿銲接銲道深寬比之影響

表 4-3 混合助銲劑對 304 不銹鋼電漿銲接深寬比之量測值

Flux	MnO ₂ 80%	MnO ₂ 60%	MnO ₂ 40%	MnO ₂ 20%
	Other 20%	Other 40%	Other 60%	Other 80%
SiO ₂	0.97	0.98	0.92	0.77
TiO ₂	0.82	0.77	0.89	0.97
Cr ₂ O ₃	0.55	0.76	0.8	0.84
MoO ₃	0.81	0.9	0.88	0.87
Fe ₂ O ₃	0.77	0.65	0.63	0.55
ZnO	0.81	0.97	0.92	0.88

Welding current 125A Travelling speed 125mm/min

4.5.2 鐸道機械性質

如表 4-4 所示，使用 60%SiO₂-40%MnO₂ 活性助鐸劑配方時，對 304 不銹鋼進行抗拉強度及硬度等性質之測試，結果顯示在添加 SiO₂ 與 MnO₂ 混合成份組成之活性助鐸劑對其鐸道之機械性質之影響並不顯著。此外，從圖 4-22 之金相組織亦可發現，此添加混合助鐸劑製程之試片與不添加助鐸劑之試片，其金相組織極為相似。不過，使用 60%SiO₂-40%MnO₂ 活性助鐸劑之鐸道，由於能量密度較集中，因此鐸道有較大之溫度梯度。即鐸道之硬度會稍為提升與結晶顆粒稍有細化現象。

在圖 4-23 所示，添加 60%SiO₂ -40%MnO₂ flux 混合成份組成之活性助鐸劑之 SEM 拉伸破斷面觀察中可發現，在與不添加助鐸劑之 PAW 常溫拉伸試片比較時，兩者均呈現極為相似之 Dimple 破斷面；換言之，兩者皆屬於延性破裂對其鐸道之機械性質之影響並不顯著。

表 4-4 304 PAW-Flux 鐸接製程之機械性質測試結果

Flux	UTS(MPa)	Hardness (Hv)
Without flux	589.52	169.5
With flux (60%SiO ₂ -40%MnO ₂)	620.32	178.3

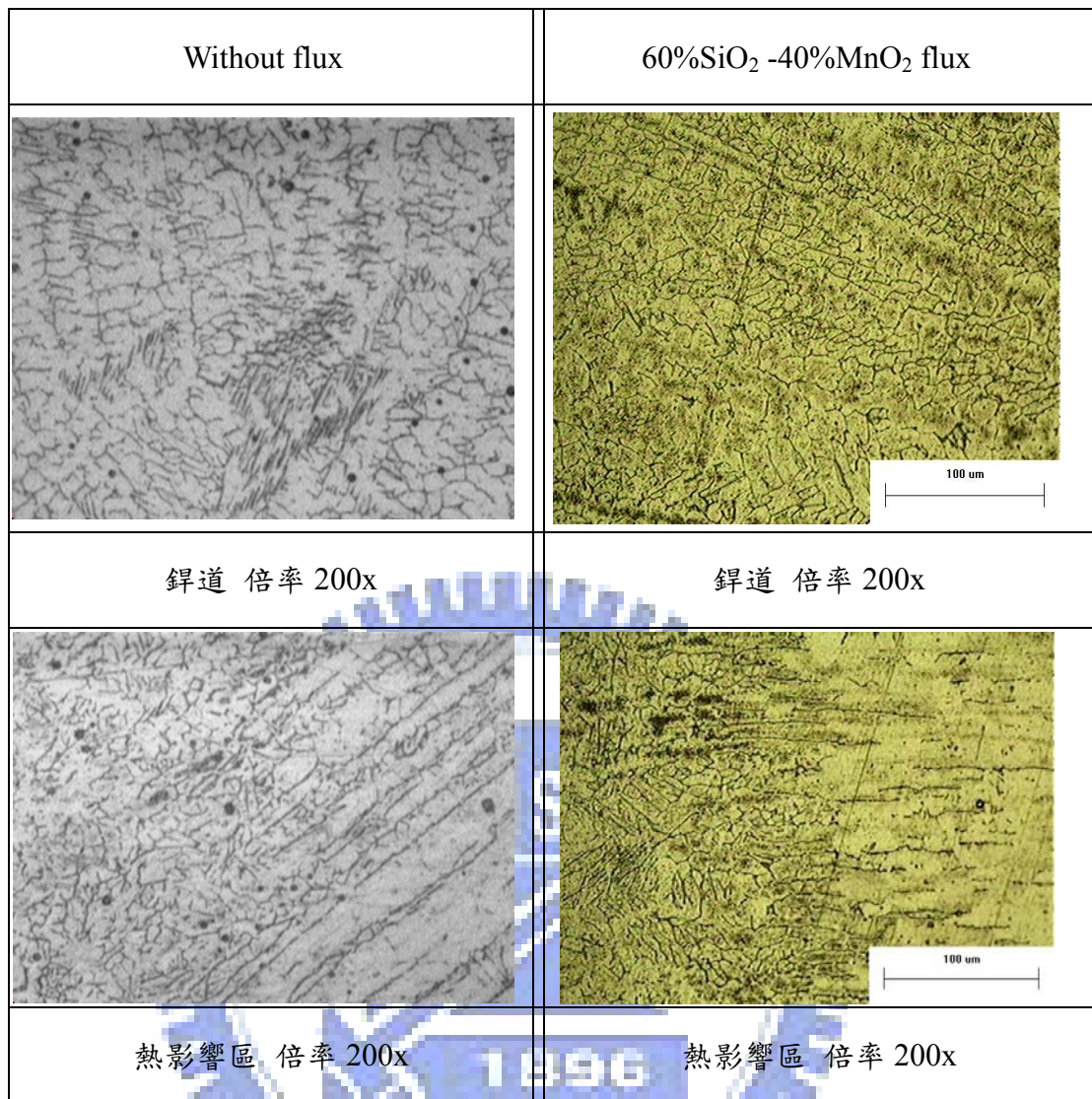


圖 4-22. 304 不銹鋼使用助銲劑與否之金相組織

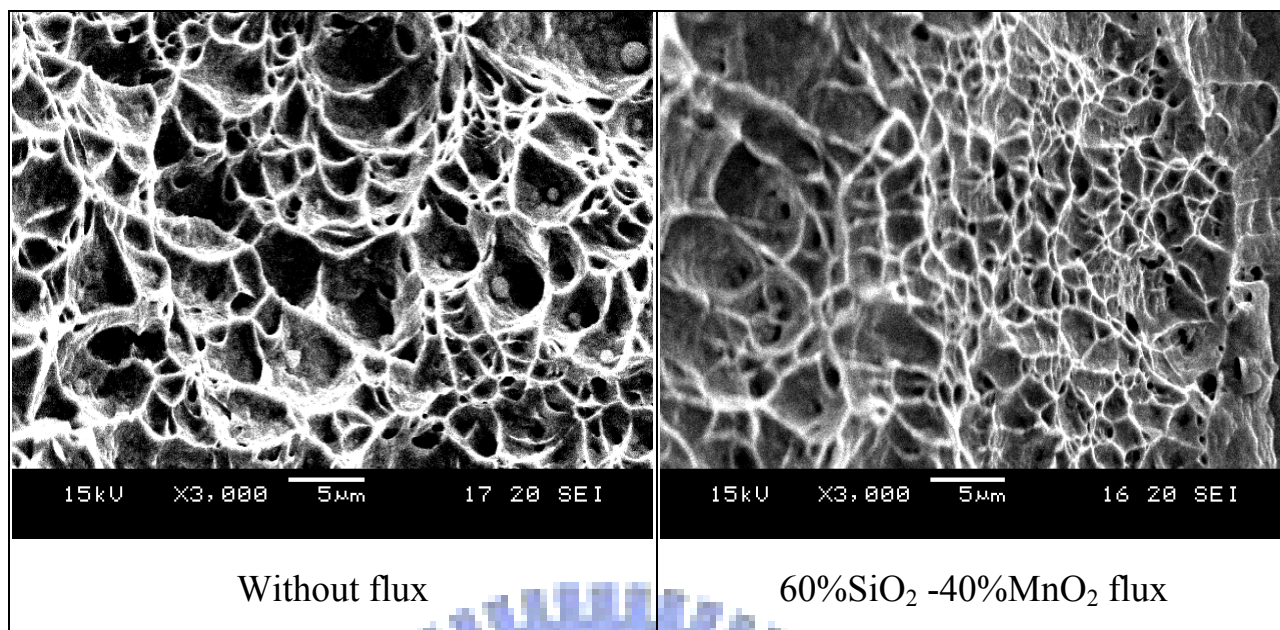
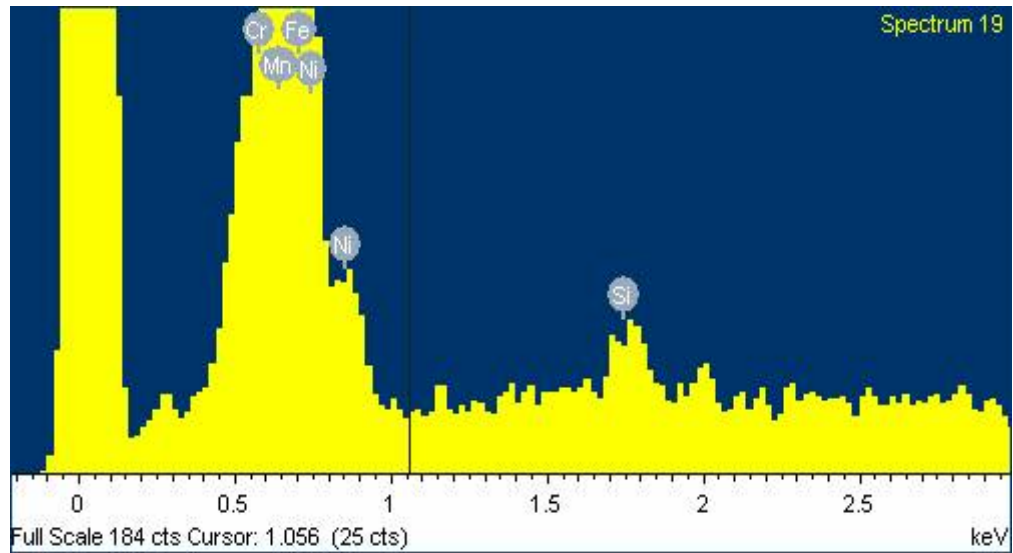


圖 4-23 拉伸試片破斷面之 SEM 觀察

4.5.3 EDS 成份分析

將電漿鍍接實驗後之試片取鍍道橫切面作 EDS 成份分析，表 4-5 與圖 4-24 分別為其成份與光譜分析之結果。由表中得知在添加 SiO_2 與 MnO_2 混合成份組成之活性助鍍劑與無添加助鍍劑時之鍍道相比較其成份重量比相似，觀察光譜分析結果其圖形也幾乎相同。因此，由本文實驗結果顯示此種混合助鍍劑對鍍道成份之改變極小，非常具有工業應用之潛力。

Without flux



60%SiO₂ -40%MnO₂ flux

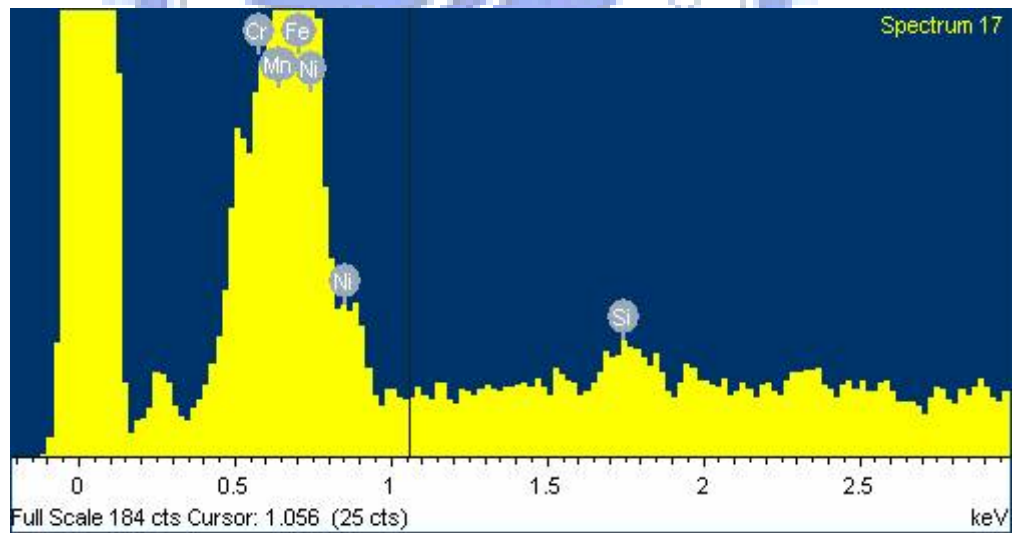
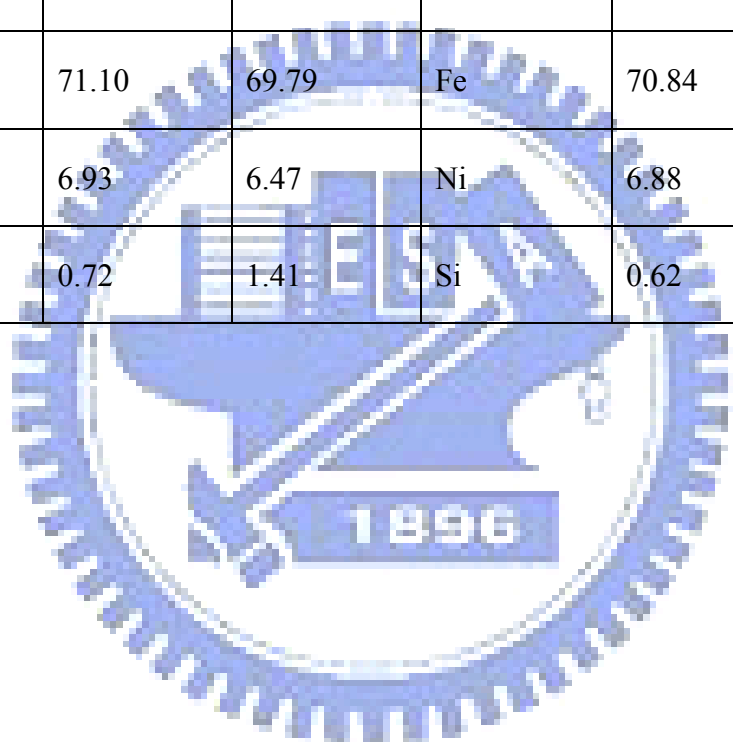


圖 4-24 304 不銹鋼 PAW-Flux 銲接製程之 EDS 光譜分析結果

表 4-5 304 不銹鋼 PAW-Flux 銲接製程之銲道 EDS 成份分析結果

Without flux			60%SiO ₂ -40%MnO ₂ flux		
Element	Weight, %	Atomic, %	Element	Weight, %	Atomic, %
Cr	20.08	21.17	Cr	20.97	22.12
Mn	1.17	1.16	Mn	0.69	0.69
Fe	71.10	69.79	Fe	70.84	69.56
Ni	6.93	6.47	Ni	6.88	6.43
Si	0.72	1.41	Si	0.62	1.20



第五章 結論

本研究主要係針對常用之 AISI 1020 碳鋼與 AISI 304 不銹鋼材料，以自行調配之單一與混合（304 不銹鋼）助銲劑成份系列實驗來探討銲道形態、銲道機械性質、銲道微觀組織、銲件變形、銲道肥粒相（304 不銹鋼）與銲道合金成份之影響及銲道熔深機制加以進行深入探討與分析，根據上述實驗結果從而獲得以下實驗結論：

A. AISI 1020

1. 在同一電漿銲接參數條件下，添加 MoO_3 、 MnO_2 、 TiO_2 、 SiO_2 及 Cr_2O_3 等助銲劑，除了可提高低碳鋼銲道熔深外，亦可提高銲道深寬比。以添加 MoO_3 效果最顯著，低碳鋼銲道熔深最佳約可提高 33%。
2. 在電漿銲接製程中，添加氧化物助銲劑皆可提高低碳鋼銲道硬度值，最高可提高 9%。
3. 在使用 NiCO_3 、 MgCO_3 、 MnCO_3 助銲劑均可提高低碳鋼銲道熔深及深寬比，但有輕微增碳現象。
4. 添加活性助銲劑於電漿銲接製程中，電弧柱產生明顯之縮束作用因而使熔池緊縮、能量密度集中，形成銲道穿深能力之主要機制。

B. AISI 304

1. 實驗結果顯示，添加助銲劑於電漿電弧銲接，可以讓不銹鋼產生令人滿意

的鐸道外觀。

2. 添加 SiO_2 助鐸劑時明顯的對不銹鋼有強烈的影響，鐸接時使熔透深度增加同時讓鐸道寬度明顯的變小。
3. 在助鐸劑添加下，電漿的電弧柱和陽極斑點，在決定鐸道外觀上扮演一重要的角色，實際上，在鐸接中加入 SiO_2 助鐸劑會使電弧寬度變得狹窄及形成很深的熔透效果。
4. 當沒有產生鎖孔模式鐸接情況，助鐸劑對電漿電弧鐸與 TIG 鐸接有相同類似的機制，都產生穿透性較佳的鐸接效果。
5. SiO_2 助鐸添加劑之電漿鐸接製程，將會造成沃斯田鐵型不銹鋼鐸接金屬在鐸後會殘留有較多的肥粒相含量；然而與傳統鐸道相比較時，兩者鐸道之機械性質差異不大。
6. 當添加 MoO_3 、 MnO_2 、 SiO_2 、 Cr_2O_3 、 Fe_2O_3 、及 ZnO 等氧化物型助鐸劑時，在 125A 鐸接電流參數條件下，由於鐸道熔深超過母材厚度一半以上，即熔透深度增加時，由於其熱收縮應力相互抵消之效應亦高，因此可有效降低鐸件角變形量。
7. 電漿-助鐸劑鐸接製程中單一成分助鐸劑以 SiO_2 對 304 型不銹鋼熔深效果改善最為顯著，與不使用助鐸劑時比較約可提升 200%。
8. 混合助鐸劑則以 SiO_2 60%+ MnO_2 40% 較佳，與不使用助鐸劑時比較熔深效果約可提升 300%，熔深效果極為顯著。

9. 以 SiO_2 60%+ MnO_2 40% 來進行電漿銲接時，不但熔深效果極為顯著，銲道成份改變亦非常的低，因此極具工業應用價值。



參考文獻

1. 周長彬、蔡丕椿、郭央謙，“銲接學”，台北市：全華科技圖書股份有限公司，1997。
2. 日鐵溶接工業株式會社機器事業部部長：園田弘文，“電漿電弧原理與電漿銲接之應用（I）”，銲接與切割，1997，5，pp.44~48。
3. 日鐵溶接工業株式會社機器事業部部長：園田弘文，“電漿電弧原理與電漿銲接之應用（II）”，銲接與切割，1997，7，p.50。
4. 蔡俊賢、陳慕平，“電漿電弧的原理與應用”，銲接與切割，1993，9，pp.32~36。
5. 董基良，“銲接學”，三民書局，中華民國 75 年 1 月。
6. 孟繼洛，“機械材料”，曉園出版社，p201,pp205~207,p211,p214.
7. 姜志華、蔡全峰，“銲接冶金概論”，徐式基金會，中華民國 76 年 8 月，pp140~148。
8. 蘇俊源，“沃斯田鐵型不銹鋼電漿銲之測試與分析”，國立交通大學碩士論文，中華民國 86 年。
9. 曾光宏，“不銹鋼銲件變形與殘留應力之研究”，國立交通大學機械工程研究所博士論文，中華民國 90 年 6 月。
10. J.M. Vitek and S.A. David, “The Effect of Cooling Rate on Ferrite in Type

- 308 Stainless Steel Weld Metal”, Weld. J., 1988, **67**(4), 95s-102s.
11. C.D. Lundin and C.P. Chou, “Hot Cracking Susceptibility of Austenitic Stainless Steel Weld Metals”, Welding Research Council Bulletin, Bull., 1983, **289**, 1-80.
 12. N. Suutala, T. Takalo, and T. Moisio, Metallurgical Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science, 1979, **10A**(4), 512-514.
 13. N. Suutala, T. Takalo, and T. Moisio, Metallurgical Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science, 1979, **10A**(8), 1173-1181.
 14. N. Suutala, T. Takalo, and T. Moisio, Metallurgical Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science, 1979, **10A**(8), 1183-1190.
 15. N. Suutala, T. Takalo, and T. Moisio, Metallurgical Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science, 1980, **11A**(5), 717-725.
 16. N. Suutala, T. Takalo, and T. Moisio, Metallurgical Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science, 1982, **13A**(12), 2121-2130.
 17. N. Suutala, T. Takalo, and T. Moisio, Metallurgical Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science, 1983, **14A**(2), 191-197.
 18. J.A. Brooks, J.C. Williams, and A.W. Thompson, Metall. Trans., 1983, **14A**(1), 23-31.
 19. J.A. Brooks, J.C. Williams, and A.W. Thompson, Metall. Trans., 1983,

- 14A(7), 1271-1281.
20. S. Katayama, T. Fujimoto, and A. Matsunawa, Trans. JWRI, **14**(1), 1985, 123-137.
21. J.C. Lippoid and W.F. Savage, Weld. J.(Suppl.), 1980, **59**(2), 48s-58s.
22. F.C. Hull, Weld. J.(Suppl.), 1967, **46**(9), 399s-409s.
23. J.C. Boland, "Suggested Explanation of Hot Cracking in Mild Low Steel Weld", Weld.J., 1982, **61**(5), 139s-148s。
24. J.A. Brooks, A.W.Thompson and J.C.Williams, "A Fundamental Study of the Beneficial Effect of Delta Ferrite in Reducing Weld Cracking", Weld.J., 1984, **63**(4), 71s-83s.
25. F.C. Hill, "Effect of Delta Ferrite on Hot Cracking of Stainless Steel", Weld.J., 1973, **52**(5), 193s-203s.
26. F. Matusda, H. Nakogawa, T. Uehara, S. Katayama and Y. Arata, 1979, Japanese Weld. Res. Inst. Trans., **8**(1), p105.
27. 周漢標、廖德潭、洪文山，"沃斯田鐵不銹鋼之銲接性及熱裂分析(上)"，機械月刊，1992，**18** (2)，155-171。
28. 錢在中，"銲接技術手冊"，山西科學技術出版社，1999。
29. "Welding Handbook", 8th ed., Miami, American Welding Society 1987, **1**.
30. 卓照明、簡宏焯、董中能，"混合氣於 MIG/MAG 銲接之應用技術"，中華民國第一屆銲接學術研討會論文集，中華民國 76 年 12 月，pp.159-172。

31. 邱雲堯等譯，“機械製造”，文京圖書有限公司，1998, 7, PP.51~57。
32. C.L.Tsai，“Welding Stress and Distortion”，銲接工程技術研習會論文集，1985，pp.298~385。
33. K. Masubuchi, “Analysis of Weld Structures”, 1st ed., Pergamon Press, 1980.
34. 蔡宗亮，“銲接應力與變形”，銲接工程技術研習會論文集，中華民國74年12月。
35. 伊士科，“世界銲接材料手冊”，中國標準出版社，1996年4月。
36. 李亞江、楊虎重、任樹全，“銲接材料選用指南”，中國建材工業出版社，1996年6月。
37. Y. Takeuchi, R. Takagi and T. Shinoda, “Effect of Bismuth on Weld Joint Penetration in Austenitic Stainless Steel”, Weld. J., 1992, **71**(8), pp.283~289。
38. H.B.Cary, “Modern Welding Technology”, 4th ed., 1998, New Jersey, Prentice Hall。
39. W.T. DeLong, G.A. Ostrom and E.R. Szumachowsk: Weld. J., 1956, **34**(11), 521.
40. J.F. Lancaster, “Metallurgy of Welding”, George Allen & Unwin, London, 1980.
41. G.W. Oyler, R.A. Matsuzesk and C.R. Garr, Weld. J., 1967, **46**(12), 1006.
42. B.J. Keene, K.C. Mills, R.F. Brooks: Mater. Sci. Tech., 1985, **1**, 568.
43. J.A. Lambert: Weld. J., 1991, **70**(5), 41-52.

44. 謝榮淵，“不銹鋼之銲接特性（I）”，銲接與切割，1997，7(5)，40-49。
45. C.R. Heiple and J.R. Roper: Weld. J., 1981, **60**(8), 143-145.
46. C.R. Heiple and J.R. Roper: Weld. J., 1982, **61**(4), 97-102.
47. C.R. Heiple, J.R. Roper, R.T. Stagner, and R.J. Aden: Weld. J., 1983, **62**(3), 72-77.
48. C.R. Heiple and P. Burgardt: Weld. J., 1985, **64**(6), 159-162.
49. P. Burgardt and C.R. Heiple: Weld. J., 1986, **65**(6), 150-155.
50. M.M. Savitskii: Avtom. Svarka, 1979, **7**, 17.
51. O.E. Ostrovskii, “The effect of activating fluxes on the penetration capability of the welding arc and energy concentration in the anode spot”, Svar. Proiz, 1977, **3**, 3-4。
52. D. S. Howse and W. Lucas : Sci. Technol Weld. Joining., 2000, **5**, (3), 189-193.
53. Paulo J. Modenesi, Eustáquio R. Apolinário, Iaci M. Pereira: J. Mater. Process. Technol., 2000, **99**, 260-265.
54. M. Kuo, Z. Sun, and D. Pan: Sci. Technol Weld. Joining., 2001, **6**(1), 17-22.
55. 謝榮淵、潘永村、劉宏義，銲接與切割，2002，12(3)，20-24。
56. R.I. Hsieh, Y.T. Pan and H.Y. Liou: C.J.M.S., 1998, **30**(4), 283-291.
57. 謝肇琨，銲接與切割，1998，8(6)，58-66。
58. V.I. Pavlovsky and K. Masubuchi: Weld. Res. Counc. Bull., 1994, **388**, 44-48.
59. M. Watanabe and K. Satoh: Weld. J. (Suppl.), 1961, **40**(8), 377s-384s.

60. K.H. Tseng and C.P. Chou: J. Mater. Process. Technol., 2002, **123**, 346-353.
61. K.H. Tseng and C.P. Chou: Sci. Technol. Weld. Joining, 2001, **6**(3), 149-153.
62. Y. Takeuchi, R. Takagi and T. Shinoda: Weld. J., 1992, **71**(8), 283-289.
63. B. Pollard: Weld. J., 1988, **67**(9), 202-213.
64. A.A. Shirali and K.C. Mills: Weld. J., 1993, **72**(7), 347-353.
65. D. S. Howes and W. Lucas : Sci. Technol Weld. Joining., 2000, **5**(3), 189-193.

