

國立交通大學

工學院精密與自動化工程學程

碩士論文

Ar-CO₂混合氣體與活性助銲劑包覆銲線對
不銹鋼銲道特性之研究



The research of Ar-CO₂ shielding gas and flux cladding
wire addition for stainless steel A-TIG weldments

研究生：郭峯州
指導教授：徐瑞坤 教授
共同指導：周長彬 教授

中華民國九十八年十月

Ar-CO₂ 混合氣體與活性助鐸劑包覆鐸線
對不銹鋼鐸道特性之研究

The research of Ar-CO₂ shielding gas and
flux cladding wire addition for
stainless steel A-TIG weldments

研究生：郭峯州
指導教授：徐瑞坤
周長彬

Student: Feng-Chou Kuo
Advisor: Dr. Ray-Quen Hsu
Dr. Chang-Pin Chou



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

Ar-CO₂ 混合氣體與活性助鐸劑包覆鐸線對

不銹鋼鐸道特性之研究

研究生：郭峯州

指導教授：徐瑞坤教授

共同指導：周長彬教授

國立交通大學 工學院 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不同比例之氬-二氧化碳混合型保護氣體與混合型活性助鐸劑添加，對沃斯田鐵不銹鋼材鐸接時鐸道型態及鐸接變形之影響。實驗材料選用AISI 304沃斯田鐵型不銹鋼及308不銹鋼鐸線，活性助鐸劑採用自行調配之混合型助鐸劑25% Cr₂O₃ — 25% TiO₂ — 30% SiO₂ — 10% MoS — 10% MoO₃，鐸接方法採用配合不同比例之Ar-CO₂鐸接保護氣體添加，來進行在活性助鐸劑氣體鎢極電弧鐸(Activating-Tungsten Inert Gas, A-TIG)之Bead-on-Plate實驗。鐸接過程中利用影像擷取系統(Charge-Coupled Device, CCD)記錄電弧動態影像及電弧電壓的變化；鐸道分析以實體顯微鏡來量測鐸道形態，並記錄鐸道熔深及寬度以計算深寬比；以金相實驗來觀察微觀組織；利用肥粒鐵含量量測儀/微硬度測定機來瞭解鐸道機械性質；並針對不銹鋼鐸道外觀及型態之影響和作用機制，及鐸道穿深能力之增加機制進行探討與分析。

實驗結果顯示：

- (1).以深寬比及鐸道外觀作為評估指標時，此混合型助鐸劑可提升熔透深度及機械性質，皆優於傳統氬鐸製程。
- (2). CO₂ 氣體添加於 A-TIG 及 TIG 製程中，並無法使其熔透深度及硬度再進一步強化與提昇。
- (3).助鐸劑添加於母材或鐸條上，其皆可使熔透深度及機械性質獲得有效提昇。

The research of Ar-CO₂ shielding gas and flux cladding wire addition for stainless steel A-TIG weldments

Student : Feng-chou Kuo

Advisor: Dr. Ray-Quen Hsu

Dr. Chang-Pin 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 the difference concentration of Ar-CO₂ mixed shielding gas and specific mixed activating flux on the angular distortion and mechanical properties of TIG welding process on the 5mm thick austenitic stainless steel plates. The AISI 304 stainless steel plates and 308 wire were selected, the mixed flux is 25% Cr₂O₃-25% TiO₂-30% SiO₂-10% MoS-10% MoO₃. A bead on plate weldment was made using activating-tungsten inert gas arc welding (A-TIG) process. During the welding process, a charge-coupled device (CCD) was used to record the images of arc profile and voltage variation. Besides, the microstructure and morphology of the weldments were examined by the optical microscope, according to the measurement results of the width and penetration of the weld bead, the depth to width ratio (D/W ratio) can be calculated. Furthermore, the Ferrite Scope and Vickers hardness tester was used to determine the mechanical properties of the weldments. According to measurements of surface appearance, welding morphology, and deep of weld shape, micro-hardness, and angular distortion on the weldments were analyzed and studied the influence of Ar-CO₂ and flux cladding wire addition to weldments.

The experimental results show that:

1. According to the surface appearance and weld penetration, the mixed activating flux can enhance the depth of weld and hardness.
2. The addition of CO₂ shielding gas to A-TIG or TIG process shows no effect on the depth of weld and mechanical properties.
3. The cladding of mixed activating flux on both plate and wire can effectively increase the depth of weld.

致謝

本論文得以撰寫完成，首先我必須深深的感謝兩位恩師徐瑞坤教授及周長彬教授，在兩年多的研究過程中，耐心的給予指導與協助，僅在此致上學生由衷的謝意與敬意；口試期間承蒙黃和悅博士與林玄良博士等委員專業的指正與建議，使本論文能夠修整疏漏，使本論文能更加完善，在此表達最誠摯的謝意。另外還要特別感謝黃和悅博士，由於您的不辭辛勞的指導及教導銲接及助銲劑上的知識，使我能於實驗及論文撰寫得以順利進行，並得以瞭解在銲接世界裡的知識；另外我必須再感謝莊弘璋、吳東明、吳崑鵬、陳慶鍊同學，在這段期間感謝你們在銲接學識上提供寶貴的經驗及技術上的協助，使我受益良多。

特別感謝是最敬愛的父母、太太及兩位小寶貝，謝謝您們默默的支持與鼓勵，這幾年來，在這麼忙碌的工作之餘還願意允許犧牲我們相聚的時間，讓我吸收新知及順利完成碩士學程，您們是我朝夢想前進最大的精神支柱及後盾，謝謝您們讓我感到愛及幸福。

此碩士學程及論文的完成，我要將這份喜悅以最感謝的心情獻給所有關心及幫助我的人，謝謝您們。

最後我必須向我最愛的母親及太太再說一次，在這段時間不斷的給我鼓勵及照顧小朋友，在學習上及工作上無怨無悔的作為我最堅強的後盾，使我能無後顧之憂的完成學業，這一切都是妳們的幫忙才有機會讓我能完成碩士學程，辛苦妳們了，謝謝妳們。

目錄

| | 頁次 |
|--|-----|
| 中文摘要..... | i |
| 英文摘要..... | ii |
| 誌謝..... | iii |
| 目錄..... | iv |
| 表目錄..... | vii |
| 圖目錄..... | ix |
| | |
| 第一章 緒論 | |
| 1.1 研究背景與動機..... | 1 |
| 1.2 研究方法與目的..... | 2 |
| | |
| 第二章 文獻回顧 | |
| 2.1 銲接電弧之基本原理..... | 4 |
| 2.1.1 銲接電弧之結構..... | 5 |
| 2.1.2 電壓－電流之靜特性..... | 6 |
| 2.1.3 電弧銲接之熱源特性..... | 7 |
| 2.2 惰性氣護鎢極電弧銲接法(Gas Tungsten Arc Welding)..... | 7 |
| 2.2.1 惰性氣護鎢極電弧銲接法(GTAW)原理及簡介..... | 7 |
| 2.2.2 鎢電極之材質及起弧之方法..... | 9 |
| 2.2.3 銲接參數之影響..... | 11 |
| 2.3 不銹鋼..... | 12 |
| 2.3.1 不銹鋼之簡介..... | 12 |
| 2.3.2 不銹鋼中微元素對不銹鋼的性能和組織的影響..... | 13 |
| 2.3.3 不銹鋼的分類..... | 16 |
| 2.3.4 不銹鋼的銲接特性..... | 19 |

| | | |
|-------|------------------------|----|
| 2.3.5 | 不銹鋼銲條的選擇..... | 24 |
| 2.4 | 銲接氣體..... | 25 |
| 2.4.1 | 銲接氣體之功用..... | 25 |
| 2.4.2 | 銲接氣體之選擇..... | 25 |
| 2.4.3 | 銲接氣體之特性..... | 28 |
| 2.5 | 助銲劑..... | 29 |
| 2.5.1 | 助銲劑之功用..... | 29 |
| 2.5.2 | 助銲劑成份對銲接金屬的影響..... | 30 |
| 2.5.3 | A-TIG 銲接增加銲道熔深之機制..... | 31 |
| 2.6 | 銲道熔透深度變異之原因..... | 34 |
| 2.6.1 | 影響熔融區流體流動之機構..... | 34 |
| 2.6.2 | 微量元素對銲接性之影響..... | 35 |
| 2.7 | 銲接缺陷與防範對策..... | 40 |
| 2.7.1 | 銲道缺陷之種類..... | 40 |
| 2.7.2 | 銲接缺陷之防制方法..... | 47 |
| 2.7.3 | 銲件變形之形式..... | 50 |
| 2.7.4 | 銲接變形之形成..... | 51 |
| 2.8 | 肥粒相對銲道金屬的影響..... | 52 |
| | | |
| 第三章 | 實驗設備及方法 | |
| 3.1 | 實驗流程..... | 54 |
| 3.2 | GTAW 之設備..... | 54 |
| 3.3 | 銲接試驗..... | 57 |
| 3.4 | 電弧形狀與陽極斑點拍攝..... | 60 |
| 3.5 | 電壓值量測..... | 60 |
| 3.6 | 銲道外觀拍攝..... | 61 |
| 3.7 | 角變形量測..... | 61 |
| 3.8 | 金相實驗..... | 62 |
| 3.9 | 銲道深寬比量測..... | 63 |

| | | |
|---|-----|-----|
| 3.10 肥粒相量測..... | 63 | |
| 3.11 微硬度量測..... | 64 | |
| 第四章 實驗結果與討論 | | |
| 4.1 CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接製程對銲道外觀之影響..... | 65 | |
| 4.2 CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接製程對鎢電極之影響..... | 67 | |
| 4.3 CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接製程對銲道型態之影響..... | 69 | |
| 4.3.1 CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對銲道熔透深度之影響..... | 69 | |
| 4.3.2 CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對銲道斷面型態之影響..... | 71 | |
| 4.3.3 CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對銲道熔融面積之影響..... | 79 | |
| 4.4 CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電弧電壓之影響..... | 83 | |
| 4.4.1 CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對平均電弧電壓之影響..... | 83 | |
| 4.4.2 CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對熱輸入量之影響..... | 88 | |
| 4.5 CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電弧型態之影響..... | 89 | |
| 4.5.1 CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電漿電弧之影響..... | 89 | |
| 4.5.2 CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對陽極斑點之影響..... | 93 | |
| 4.6 CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對銲道肥粒相含量之影響..... | 101 | |
| 4.7 CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對銲道微硬度之影響..... | 116 | |
| 4.8 CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對銲件角變形之影響..... | 117 | |
| 第五章 結論..... | | 120 |
| 參考文獻..... | | 122 |

表 目 錄

| | 頁次 |
|--------------------------------|----|
| 表 2-1 TIG 熔接常用之鎢電極..... | 9 |
| 表 2-2 GTAW 電流型式及特性..... | 11 |
| 表 2-3 鋼中合金元素的效果比較..... | 15 |
| 表 2-4 不銹鋼之主要分類表..... | 16 |
| 表 2-5 不銹鋼之物理性質..... | 17 |
| 表 2-6 不銹鋼各系列特性..... | 18 |
| 表 2-7 各類不銹鋼之化學成分表..... | 18 |
| 表 2-8 沃斯田鐵系不銹鋼與一般碳鋼銲接特性比較..... | 19 |
| 表 2-9 不銹鋼電弧銲用銲條選用表..... | 24 |
| 表 2-10 銲接保護氣體之性質和用途..... | 27 |
| 表 2-11 銲接氣體的比重..... | 28 |
| 表 2-12 銲接氣體的解離電壓值..... | 29 |
| 表 2-13(a) 常見之銲道裂縫類型..... | 41 |
| 表 2-13(b) 常見之銲道裂縫示意圖..... | 42 |
| 表 2-14 常見的氣孔缺陷類型..... | 44 |
| 表 2-15 常見的夾渣缺陷..... | 45 |
| 表 2-16 不完全熔融與不良接點滲透..... | 45 |
| 表 2-17 不完全外形缺陷..... | 46 |
| 表 2-18 常見之其他銲接缺陷..... | 46 |
| 表 3-1 AISI 304 不銹鋼金屬成分表..... | 57 |
| 表 3-2 E308 不銹鋼金屬成分表..... | 57 |
| 表 3-3 銲接氣體參數流量比例表..... | 59 |

| | | |
|-------|---|----|
| 表 3-3 | 銲接氣體參數流量比例表..... | 59 |
| 表 4-1 | CO ₂ 氣體添加於 TIG 銲接製程對銲道熔透深度之影響..... | 69 |
| 表 4-2 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接製程對銲道熔透深度之影響..... | 70 |
| 表 4-3 | CO ₂ 氣體添加 TIG 製程對銲道銲道深寬比之影響..... | 71 |
| 表 4-4 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 製程對銲道銲道深寬比之影響..... | 73 |
| 表 4-5 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對銲道熔融面積之影響..... | 80 |
| 表 4-6 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對平均電弧電壓之影響..... | 83 |
| 表 4-7 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對熱輸入量之影響..... | 88 |



圖目錄

| | 頁次 |
|---|----|
| 圖 2-1 熔極式電弧銲接..... | 4 |
| 圖 2-2 非熔極式電弧銲接..... | 4 |
| 圖 2-3 惰氣鎢極電弧銲之電弧結構與電壓降的關係..... | 5 |
| 圖 2-4 電壓-電流的靜特性曲線..... | 7 |
| 圖 2-5 惰性氣體鎢極銲接示意圖..... | 8 |
| 圖 2-6 鎢電極之形狀..... | 10 |
| 圖 2-7 鎢棒角度與熔深關係圖..... | 10 |
| 圖 2-8 鎢棒角度、電弧形狀與功率密度示意圖..... | 10 |
| 圖 2-9 沃斯田鐵不銹鋼中合金元素對強度之影響..... | 16 |
| 圖 2-10 各型號不銹鋼關係圖(304 不銹鋼為例)..... | 17 |
| 圖 2-11 Fe-Cr-Ni 之三相系統圖(1100°C)..... | 20 |
| 圖 2-12 Fe-Cr-Ni 之三相平衡圖..... | 20 |
| 圖 2-13 Fe-Cr-Ni 平衡圖與銲道凝固組織之關係(Schaeffler diagram)... | 21 |
| 圖 2-14 Fe-Cr-Ni 平衡圖與銲道凝固組織之關係(Delong diagram)..... | 22 |
| 圖 2-15 凝固型式 A、B、C 的顯微組織和 C_{req}/N_{ieq} 值的關係圖..... | 23 |
| 圖 2-16 銲接氣體對銲道截面形狀之影響..... | 27 |
| 圖 2-17 銲接氣體的熱傳導性..... | 28 |
| 圖 2-18 熔池中的 Marangoni 對流..... | 33 |
| 圖 2-19 助銲劑吸附電子造成電弧收縮示意圖..... | 33 |
| 圖 2-20 銲池中驅動流體流動之力量..... | 35 |
| 圖 2-21 含硫量對表面張力-溫度變化之影響..... | 36 |
| 圖 2-22 添加氧氣於保護氣體中鎢電極損耗情形..... | 38 |
| 圖 2-23 添加 He-CO ₂ 保護氣體對鎢電極損耗情形..... | 38 |
| 圖 2-24 添加氧氣於保護氣體中金相照片(氣體流量 20L/min)..... | 38 |
| 圖 2-25 添加 O ₂ 及 CO ₂ 於保護氣體對銲道金屬中氧化物之影響..... | 39 |

| | | |
|--------|--|----|
| 圖 2-26 | Fe-O 系統中氧含量及溫度對表面張力之影響..... | 39 |
| 圖 2-27 | 氧化物對深寬比之影響..... | 40 |
| 圖 2-28 | 沿晶式破裂示意圖..... | 43 |
| 圖 2-29 | 穿晶式破裂示意圖..... | 43 |
| 圖 2-30 | 銲接變形之基本形式..... | 50 |
| 圖 2-31 | 對接銲角變形之形成示意圖..... | 52 |
| 圖 2-32 | 銲接熱裂縫之裂縫形式及發生位置..... | 52 |
| 圖 3-1 | 實驗流程圖..... | 54 |
| 圖 3-2 | HOBART 惰氣鎢極電弧銲接機與其配件..... | 55 |
| 圖 3-3 | HOBART 惰氣鎢極電弧銲接機--銲接檯與其配件..... | 56 |
| 圖 3-4 | 鎢電極研磨器..... | 58 |
| 圖 3-5 | 助銲劑調配與塗敷..... | 59 |
| 圖 3-6 | CCD 鏡頭架設圖..... | 60 |
| 圖 3-7 | Web-Cam 鏡頭架設圖..... | 61 |
| 圖 3-8 | 銲件變形量測示意圖..... | 62 |
| 圖 3-9 | 銲件角變形量測原理..... | 63 |
| 圖 3-10 | 銲道深寬比量測示意圖..... | 63 |
| 圖 3-11 | FerriScope M10B-FE 型肥粒相測定儀..... | 63 |
| 圖 3-12 | Matsuzawa MHT-1 微硬度測定機..... | 64 |
| 圖 3-13 | 銲道微硬度量測位置圖..... | 64 |
| 圖 4-1 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接製程對不銹鋼銲道外觀影響..... | 66 |
| 圖 4-2 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接製程對鎢電極之影響..... | 67 |
| 圖 4-3 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接製程對銲道熔透深度之影響..... | 70 |
| 圖 4-4 | CO ₂ 氣體添加對 TIG 製程對銲道深寬比之影響..... | 72 |
| 圖 4-5 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對銲道斷面型態之影響(0%)..... | 74 |
| 圖 4-6 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對銲道斷面型態之影響(0.25%)..... | 74 |
| 圖 4-7 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對銲道斷面型態之影響(0.5%)..... | 75 |
| 圖 4-8 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對銲道斷面型態之影響(0.75%)..... | 75 |

| | | |
|--------|---|----|
| 圖 4-9 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對銲道斷面型態之影響(1%)..... | 76 |
| 圖 4-10 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對銲道斷面型態之影響(2.5%)..... | 76 |
| 圖 4-11 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對銲道斷面型態之影響(5%)..... | 77 |
| 圖 4-12 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對銲道斷面型態之影響(7.5%)..... | 77 |
| 圖 4-13 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對銲道斷面型態之影響(10%)..... | 78 |
| 圖 4-14 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對銲道深寬比之影響..... | 78 |
| 圖 4-15 | CO ₂ 氣體添加對 A-TIG 銲道熔融面積之影響..... | 80 |
| 圖 4-16 | 氧化物層對熔池內流動力的影響..... | 82 |
| 圖 4-17 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電弧電壓之影響(平均電壓)... | 84 |
| 圖 4-18 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電弧電壓之影響(0%)..... | 84 |
| 圖 4-19 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電弧電壓之影響(0.5%)..... | 85 |
| 圖 4-20 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電弧電壓之影響(1%)..... | 85 |
| 圖 4-21 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電弧電壓之影響(2.5%)..... | 86 |
| 圖 4-22 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電弧電壓之影響(5%)..... | 86 |
| 圖 4-23 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電弧電壓之影響(7.5%)..... | 87 |
| 圖 4-24 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電弧電壓之影響(10%)..... | 87 |
| 圖 4-25 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對熱輸入量之影響..... | 88 |
| 圖 4-26 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電漿電弧柱之影響(0%)..... | 90 |
| 圖 4-27 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電漿電弧柱之影響(0.5%)..... | 90 |
| 圖 4-28 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電漿電弧柱之影響(1%)..... | 91 |
| 圖 4-29 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電漿電弧柱之影響(2.5%)..... | 91 |
| 圖 4-30 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電漿電弧柱之影響(5%)..... | 92 |
| 圖 4-31 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電漿電弧柱之影響(7.5%)..... | 92 |
| 圖 4-32 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電漿電弧柱之影響(10%)..... | 93 |
| 圖 4-33 | Ar-0%CO ₂ 對電弧寬度及陽極斑點收縮比例之影響..... | 94 |
| 圖 4-34 | Ar-0.5%CO ₂ 對電弧寬度及陽極斑點收縮比例之影響..... | 95 |
| 圖 4-35 | Ar-1%CO ₂ 對電弧寬度及陽極斑點收縮比例之影響..... | 95 |
| 圖 4-36 | Ar-2.5%CO ₂ 對電弧寬度及陽極斑點收縮比例之影響..... | 96 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 圖 4-37 | Ar-5%CO ₂ 對電弧寬度及陽極斑點收縮比例之影響..... | 96 |
| 圖 4-38 | Ar-7.5%CO ₂ 對電弧寬度及陽極斑點收縮比例之影響..... | 97 |
| 圖 4-39 | Ar-10%CO ₂ 對電弧寬度及陽極斑點收縮比例之影響..... | 97 |
| 圖 4-40 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對陽極斑點之影響(0%)..... | 98 |
| 圖 4-41 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對陽極斑點之影響(0.5%)..... | 98 |
| 圖 4-42 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對陽極斑點之影響(1%)..... | 99 |
| 圖 4-43 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對陽極斑點之影響(2.5%)..... | 99 |
| 圖 4-44 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對陽極斑點之影響(5%)..... | 100 |
| 圖 4-45 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對陽極斑點之影響(7.5%)..... | 100 |
| 圖 4-46 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對陽極斑點之影響(10%)..... | 101 |
| 圖 4-47 | CO ₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對銲道肥粒相含量之影響..... | 102 |
| 圖 4-48 | Ar - 0%CO ₂ 對 A-TIG 銲接金相圖(100x) | 103 |
| 圖 4-49 | Ar - 0.25%CO ₂ 對 A-TIG 銲接金相圖(100x)..... | 104 |
| 圖 4-50 | Ar - 0.5%CO ₂ 對 A-TIG 銲接金相圖 (100x) | 105 |
| 圖 4-51 | Ar - 0.75%CO ₂ 對 A-TIG 銲接金相圖 (100x) | 106 |
| 圖 4-52 | Ar - 1%CO ₂ 對 A-TIG 銲接金相圖(100x) | 107 |
| 圖 4-53 | Ar - 2.5%CO ₂ 對 A-TIG 銲接金相圖(100x) | 108 |
| 圖 4-54 | Ar - 5%CO ₂ 對 A-TIG 銲接金相圖 (100x) | 109 |
| 圖 4-55 | Ar - 7.5%CO ₂ 對 A-TIG 銲接金相圖 (100x) | 110 |
| 圖 4-56 | Ar - 10%CO ₂ 對 A-TIG 銲接金相圖 (100x) | 111 |
| 圖 4-57 | Ar - 0%CO ₂ 對 A-TIG 銲道顯微組織之影響(200x) | 112 |
| 圖 4-58 | Ar - 0.25%CO ₂ 對 A-TIG 銲道顯微組織之影響(200x)..... | 112 |
| 圖 4-59 | Ar - 0.5%CO ₂ 對 A-TIG 銲道顯微組織之影響(200x)..... | 113 |
| 圖 4-60 | Ar - 0.75%CO ₂ 對 A-TIG 銲道顯微組織之影響(200x)..... | 113 |
| 圖 4-61 | Ar - 1%CO ₂ 對 A-TIG 銲道顯微組織之影響(200x)..... | 114 |
| 圖 4-62 | Ar - 2.5%CO ₂ 對 A-TIG 銲道顯微組織之影響(200x)..... | 114 |
| 圖 4-63 | Ar - 5%CO ₂ 對 A-TIG 銲道顯微組織之影響(200x)..... | 115 |
| 圖 4-64 | Ar - 7.5%CO ₂ 對 A-TIG 銲道顯微組織之影響(200x)..... | 115 |

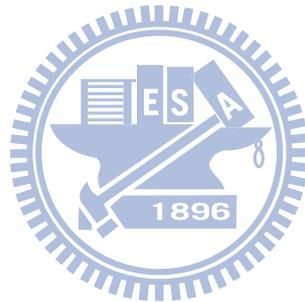
圖 4-65 Ar - 10%CO₂ 對 A-TIG 銲道顯微組織之影響(200x).....116

圖 4-66 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對銲道微硬度之影響.....117

圖 4-67 混合型助銲劑對 304 不銹鋼角變形之影響.....118

圖 4-68 銲件角變形示意圖 (熔深未超過母材厚度一半)119

圖 4-69 銲件角變形示意圖 (熔深超過母材厚度一半)119



第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

電弧銲接法在材料接合技術為機械工業最不可或缺也是最重要的加工方式，隨著機械工業的發展，銲接技術不斷地增進且朝向高品質、高效率、低成本的趨勢發展，而對應的接合材料也不再只是鐵金屬，更多非鐵金屬如鋁合金、銅合金、鎂合金，甚至是鈦合金也可完美的結合。

不銹鋼具有良好機械性質，因添加大量鎳與鉻，具有優異的抗熱性、耐銹性、耐蝕性與耐氧化性等，還具有優良的加工性，所以在石油化學工業、國防工業、航空工業、動力工業、機械設備製造工業等廣泛的被運用。304 不銹鋼係屬於沃斯田鐵型不銹鋼材料，在各種溫度下均保持原有沃斯田鐵組織，因此施以熱處理並不能使材料硬化，所以通常都是以冷加工的方式來增加其硬度與強度。

工業界最常使用之電弧銲接方法為惰性氣體鎢極電弧銲(Inert-gas tungsten arc welding, GTAW)，亦稱為鎢極惰氣銲接(Tungsten inert-gas welding, TIG)，電極使用非消耗性之鎢電極(Tungsten electrode)，及銲接時使用保護性之惰性氣體作為屏蔽，常用之保護氣體為氬或氦，其主要功能除了穩定電弧外還可保護熔池不受空氣中氧、氮、氫等有害元素和水分的影響[1]。氣體鎢極電弧銲在銲接過程中，可看見熔池與電弧的狀況，在銲道的表面不易殘留銲渣，填充金屬也不會穿過電弧，故不易產生銲濺物。

氣體鎢極電弧銲有良好之銲接性、能量密度高、及任何位置皆可銲接之特性，大部分金屬及其合金皆可使用此方法銲接，但傳統氣體鎢極電弧銲中由於其銲道的穿透深度都小於 3mm，為提高其穿透深度，則必須在銲接前開槽進行多道次銲接，因而增加成本與時間。為了使熔接效率及品質獲得提升，活性化銲接(Activating flux TIG, A-TIG) 技術逐漸受到重視，並且國內外諸多學者也相繼地投入研究與開發[11,17,18,25,42,62]，活性化銲接技術是在銲接前於欲銲接部位之銲件表面塗敷活性助銲劑，常用之助銲劑主要成分類型有：氧化物、氯化物及氟化物。此技術是針對熔接厚板材料，可有效的改善熔融深度及熔接品

質，效果可達 2~3 倍，例如：厚度 8mm 的不銹鋼板材銲接，可以免開槽且只需施一銲道即可達成完全熔透之效果，大幅低減銲接前的準備工作及加工成本。

一般常用的銲接保護氣體為氬氣(Ar)、氦氣(He)、氫氣(H₂)、氮氣(N)、二氧化碳(CO₂)或氬氣(Ar)混合氣體等六種氣體，其中氬氣為最常用的銲接保護氣體，氬氣的標準含量通常足以降低氧氣的含量，另外氬氣的解離電壓值低起弧容易；氦氣起弧較氬氣困難，因為其密度低於空氣所以會向上升，因此若作為容器頂端及管類銲接的上半部銲道的保護氣體有較佳的效果，適用於立銲或仰銲；氮氣可提高銲道根部的耐孔蝕性，電弧的能量分佈亦較集中，可有效增加銲道的熔融深度，並改善銲道的品質；氫氣的添加（通常約為 5%）可對沃斯田鐵不銹鋼的滲透深度及銲接速度有正面的影響。二氧化碳則屬於活性（氧化性）氣體，解離電壓值較氬氣低起弧容易，但易產生煙霧及飛濺物。

在許多研究文獻中僅對氣體鎢極電弧銲中的保護氣體比例[12 -16]，或只針對混合型助銲劑配方對銲接性質及銲道特性的影響進行探討[33-34]，且大部分助銲劑的使用方式皆為塗敷於母材表面，鮮少對於助銲劑添加於母材或銲線上與混合性保護氣體(Ar+CO₂)所產生之影響作統合性的討論，因此本實驗以 304 不銹鋼為銲接材料，以添加混合型氧化物助銲劑於母材表面及 308 銲線表面，配合不同比例之氬氣(Ar)與二氧化碳(CO₂)的混合保護氣體作為氣體鎢極電弧銲接過程之保護氣體來進行銲接實驗，探討混合型保護氣體與活性助銲劑包覆於銲線上對銲道特性之影響。

1.2 研究方法與目的

本實驗材料選用 AISI 304 不銹鋼及為 308 銲線，使用氣體鎢極電弧銲為銲接方式，將混合型活性助銲劑均勻塗在母材欲銲接之部位及銲線上，配合不同比例之氬氣(Ar)及二氧化碳(CO₂)之混合型保護氣體，採用 Bead-on-plate 方式對母材進行銲接。本研究目的主要在探討不同比例之 Ar-CO₂ 銲接保護氣體與混合型活性助銲劑添加，對沃斯田鐵不銹鋼材銲接時銲道形態及銲接變形之影響。具體而言，本研究目的包括下列方面：

1. 研究添加不同比例之氬-二氧化碳混合型保護氣體與混合型活性助銲劑，塗敷於母材表面進行氣體鎢極電弧銲接，針對不銹鋼銲件銲道外觀、深寬比、微硬度、微觀組織、殘留肥粒相含量及銲件角變形之影響作探討。
2. 研究氬-二氧化碳混合氣體與活性助銲劑，塗敷於銲線表面對不銹鋼銲件銲道外觀、深寬比、微硬度、微觀組織、殘留肥粒相含量及銲件角變形之影響，並且與塗敷於母材表面之實驗結果相比較。
3. 探討添加不同比例之氬-二氧化碳混合型保護氣體，與混合型活性助銲劑進行氣體鎢極電弧銲接時，對不銹鋼銲接電弧型態與電壓變化之影響。



第二章 文獻探討

2.1 銲接電弧之基本原理

電弧的形成是在一種低電壓高電流的條件下，因電子通過一離子化之氣體所產生的放電作用，而電弧的持續則是由於陰極受熱而釋放的熱電子活動的結果。電弧通常產生於電極與銲接工件之間，母材連接至電線接地端，供電系統(交/直流電均可)可藉由電極的瞬時碰觸母材而造成短路，引起一可受控制的極大的電流，此時熱量增高使電極與母材接觸處達到足夠的高溫度進而釋放出離子化熱電子，此時因電極與母材間產生電位差而導致電流中斷而產生光束即為電弧(Arc)。

一般而言，供電系統的負電極端皆於非消耗性的鎢電極，正電極端則接於銲接之工件上，此熔接法之熱量主要由電弧所供給，其溫度可高達 $2000^{\circ}\text{C} \sim 5000^{\circ}\text{C}$ ；又由於氬氣的活性不佳，故常作為遮蔽電弧之保護氣體，以防止銲接部位高溫氧化之用。銲接的電弧產生於電極及工件之間，其電極形式可區分為熔極式電極與非熔極式電極，其原理皆同，其示意圖如圖 2-1 及圖 2-2 所示[3]，圖 2-1 為熔極式電極方式，即電極會熔解當作銲條使用。通常以金屬電極(銲條)及母材間所發生電弧(稱為金屬電弧)之熱，來熔解電極及母材。採用此方式銲接法有遮蔽金屬電弧銲、潛弧銲、氣體金屬電弧銲、包藥電弧銲等等；圖 2-2 為非熔極方式，以碳化鎢或碳棒作電極，與母材間產生電弧熱量將母材或加入之銲條熔解，採用此種方式之銲接法有碳及電弧銲、氣體鎢極電弧銲與電漿電弧銲。

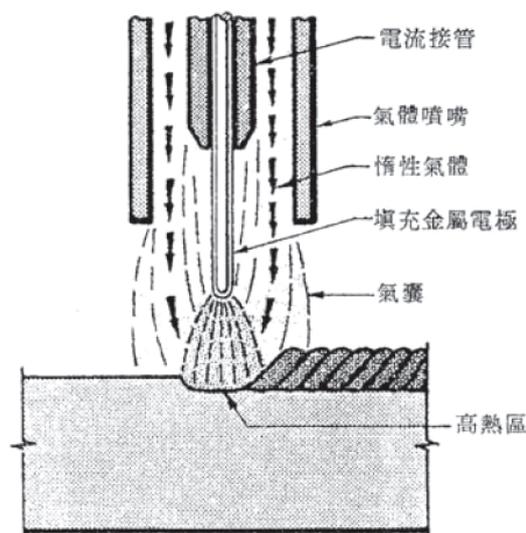


圖 2-1 熔極式電弧銲接[3]

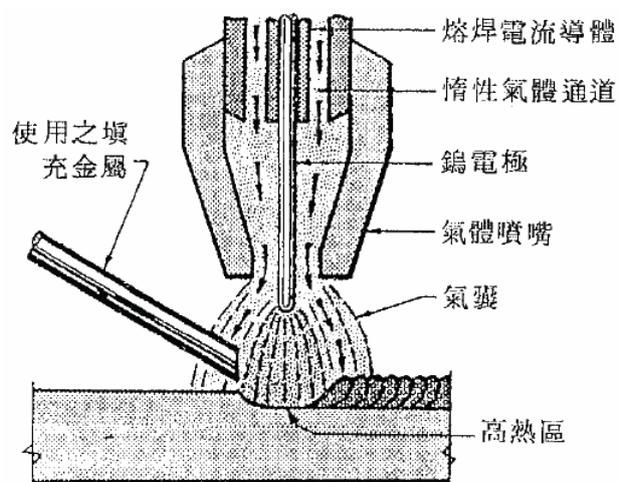


圖 2-2 非熔極式電弧銲接[3]

換言之，電弧是一種可以控制的「局部氣體長時間穩定之導電現象」。值得注意的是，由於電弧在放電或導電的過程中，除了會產生大量的熱能外，同時亦會形成強烈的弧光，因此在進行銲接工作時必須要注意銲接電弧的高溫與強光危害。

2.1.1 銲接電弧之結構

如圖 2-3 所示，為一惰氣鎢極電弧銲之電弧結構與電壓降的關係圖。由圖中可明顯得知銲接電弧之結構主要可分為陰極區(Cathode zone)、弧柱區(Arc column zone)及陽極區(Anode zone)等三大部分，茲將其重要特性簡述如下[4]：

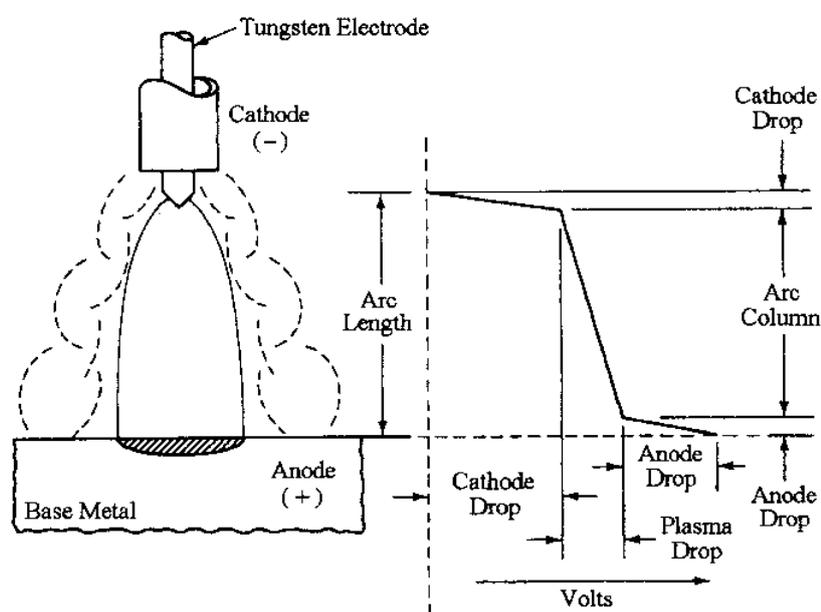


圖 2-3 惰氣鎢極電弧銲之電弧結構與電壓降的關係 [4]

1. 陰極區

此區域的範圍約為 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ cm 左右。由於陰極區之帶電離子呈不均勻的分佈狀態，因此會形成一陡峭的電壓降，此稱為陰極壓降(Cathode drop)。

2. 弧柱區

此區域介於陰極區與陽極區之間。一般所稱的電弧長度(Arc length)其實就是指弧柱長度。由於弧柱區之帶電離子呈均勻的分佈狀態，因此會形成一趨於線性的電壓降，此稱為電漿壓降(Plasma drop)。

3.陽極區

此區域的範圍約為 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm 左右。由於陽極區(工件)之帶電離子亦呈不均勻的分佈狀態，因此也會形成一陡峭的電壓降，此稱為陽極壓降 (Anode drop)。

存在於兩電極間或電極與工件間的電壓降特稱為電弧電壓(Arc voltage)。其中，電弧電壓即為陰極壓降、電漿壓降及陽極壓降三者之總合電壓降。值得一提的是，當電極或銲條材料、電源種類、電流極性及保護氣體等皆維持定值的情況下，電弧電壓值的高低主要係決定於電弧長度的大小(亦即當電弧長度增加時其電弧電壓值將會隨之提高；反之當電弧長度縮短時其電弧電壓值將會隨之降低)。

2.1.2 電壓－電流之靜特性

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

如圖 2-4 所示為電壓-電流的靜特性曲線。由圖中可明顯得知電壓-電流之靜特性曲線呈一 U 形分佈，茲將其重要特性簡述如下：

1.下降特性曲線 (ab 線段)

在較低的銲接電流區間內，當銲接電流增加時其電弧電壓將隨之降低。

2.水平特性曲線(bc 線段)

在較高的銲接電流區間內，無論銲接電流增加或減小其電弧電壓近乎保持一定位。

3.上升特性曲線(cd 線段)

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

(1).電弧長度之影響

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

(2).保護氣體之影響

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

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

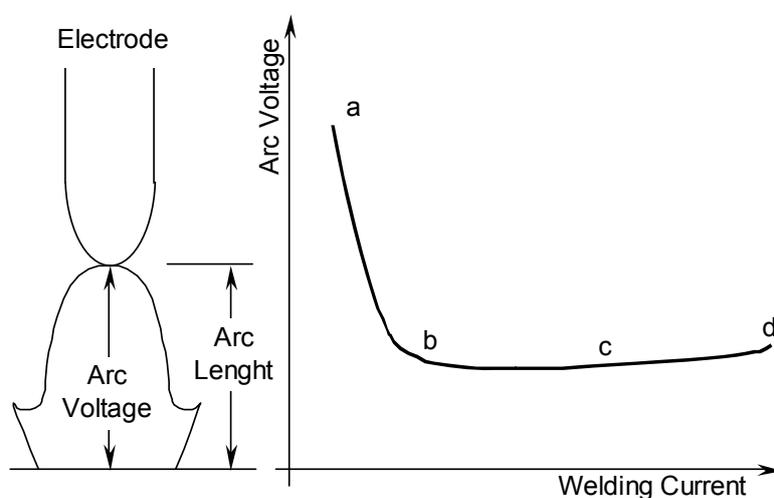


圖 2-4 電壓-電流的靜特性曲線[4,5]

2.1.3 電弧銲接之熱源特性

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

2.2 惰性氣護鎢極電弧銲接法(Gas Tungsten Arc Welding)

2.2.1 惰性氣護鎢極電弧銲接法原理及簡介

惰性氣體鎢極電弧銲(Inert-Gas Tungsten Arc Welding, GTAW)，亦稱為鎢極惰氣銲(Tungsten Inert-Gas Welding, TIG)，電極使用非消耗性之鎢電極(Tungsten Electrode)，其材質常用鎢棒或鎢合金。保護遮蔽氣體從銲槍供給來保護電極、銲池、電弧、及鄰近受熱區域避免氧化現象。熱源的產生是電流通過離子化之保護氣體所引發之電弧所供給，其中電弧在鎢電極與母材之間產生。可添加銲線填料於電弧之間，使填料熔化。銲炬另通出氬、氬惰性保護氣體(圖 2-5)，以保護熔融狀之銲道，使其不被氧化，待凝固後即形成銲道。

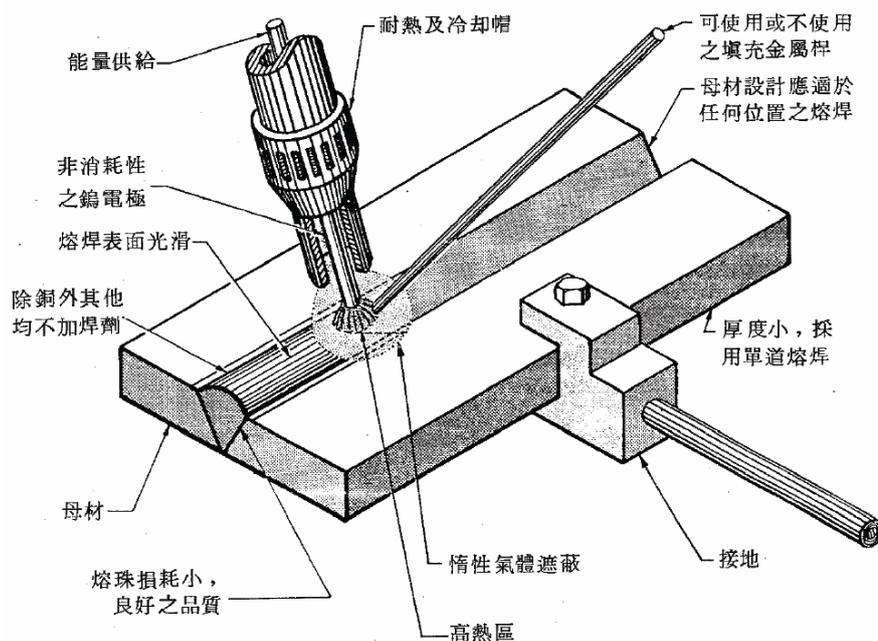


圖 2-5 惰性氣體鎢極銲接示意圖[3]

惰性氣體鎢極電弧銲施銲的方法可分為手動、半自動、全自動，依需求可進行連續銲接銲、間歇銲及點銲。由於此屬非消耗式電極所以時可視需求加添加或不添加熔填金屬。TIG 特別適用於薄板材料之銲接，從 0.13mm 至 6mm 皆可。

大部分的金屬及其合金皆可使用 TIG 銲接，如碳鋼、合金鋼、不銹鋼、熱阻合金（耐熱合金），高溫金屬，鋁合金、銅、鎂、鎳、鈦及鋇等。可銲接但需特殊程序之金屬類為含鋼及其他鍍有鉛、鋅、錫、鎳或鋁之金屬，唯鉛與鋅金屬極易氣化不易銲接[1]。

• TIG 銲接法之優點

1. 沒有銲渣及潑濺物，減少銲接後清理的時間。
2. 適合銲接抗腐蝕性及其他難以銲接之材料，如鋁、鎂、不銹鋼等。
3. 不需使用銲劑，沒有銲劑的影響，可清楚的看見熔池的狀況。
4. 熱輸入控制容易，且可不添加填料，對薄板材料的銲接較為方便。
5. 銲接品質良好。
6. 銲接時煙霧少，銲接環境較佳。

• TIG 銲接之限制：

1. 銲接速率及堆積率慢，厚斷面的銲接費時且昂貴。
2. 電極端易沾上熔池的金屬，更換耗時。
3. 填料式及某些位置之銲接自動化較不易。

2.2.2 鎢電極之材質及起弧之方法

GTAW 常用的電極有三種：純鎢電極棒、鈦鎢電極棒、鋯鎢電極棒，其特性如下：

1. 純鎢電極棒：為未加任何合金之鎢電極，因電極末端施鉸後形成光亮半球形，電弧穩定性良好，但收斂性較差，故於小電流(30A 以下)時不易引弧，其耐電流量亦比同尺寸之鎢合金電極小，故易燒毀且燒毀之鎢電極易熔入鉸道中，造成鉸道的污染，所以一般使用於小電流且鉸接品質要求不高之場合。
2. 鈦鎢合金電極棒：於鎢電極中添加 1~4%ThO₂，一般於市面上常用的為 WTh-1(ThO₂ 含量約為 1%)及 WTh-2(ThO₂ 含量約為 2%)之鈦鎢電極，加入鈦元素可使鎢電極對電流負載能力提升 30%，故燒毀率低，但若於交流環境使用時易使電極形成凹凸不平的表面造成電弧不穩，故較適於直流方面之鉸接；因鈦元素為放射性元素，若長期暴露於鉸接蒸氣中影響鉸接者健康甚巨，需多先進工業國家已不採用。
3. 鋯鎢合金電極棒：於鎢電極中添加 0.3~0.5%ZrO₂，其耐電流能力較鈦鎢電極棒高，適用於交流或直流的鉸接環境中，在鉸接時，電極的末端部會形成小半圓形之光亮面，引弧性良好，且其成分不會混入熔金內，但價格較昂貴。

表 2-1 TIG 熔接常用之鎢電極[6]

| 種類 | 記號 | 成份 (%) | | | | 端面顏色 |
|-----------|-------|---------|------------------|------------------|--------|------|
| | | W | ThO ₂ | ZrO ₂ | 其他 | |
| 純鎢電極棒 | WP | 99.95 ↑ | -- | -- | 0.05 ↓ | 白 |
| 1%鈦鎢電極棒 | WTh-1 | 98.75 ↑ | 0.9~1.2 | -- | 0.05 ↓ | 黃 |
| 2%鈦鎢電極棒 | WTh-2 | 97.75 ↑ | 1.8~2.2 | -- | 0.05 ↓ | 紅 |
| 0.5%鋯鎢電極棒 | WZr | 99.45 ↑ | -- | 0.3~0.5 | 0.05 ↓ | 褐 |

GTAW 鉸接法是以惰性氣體來取代鉸劑，以保護電弧及熔池，但因交流電每秒鐘高達 120 次之電壓歸零，電弧將因電中斷而導致熄滅之現象，因此鉸機本身必須配置高週波產生器來幫助起弧，同時在交流電時不致使電弧停頓，因高週波的頻率有跳躍間隙的特性，故於 TIG 起弧時，鎢電極不需接觸母材。

電極角度對銲接之影響，如圖2-6中所示之鎢棒的端點角度(Vertex angle)及截斷面形狀(Truncation)，會影響電弧形狀、電源密度分佈及銲道熔深，如圖2-21所示。一般而言，在銲接參數固定的情形下，隨著鎢棒端點角度的增加，電弧會較為緊縮，故功率密度(Power density)的分佈也較為集中，所以銲道的深寬比會隨之增加[22,24]，如圖2-7及圖2-8所示。



圖 2-6 鎢電極之形狀[23]

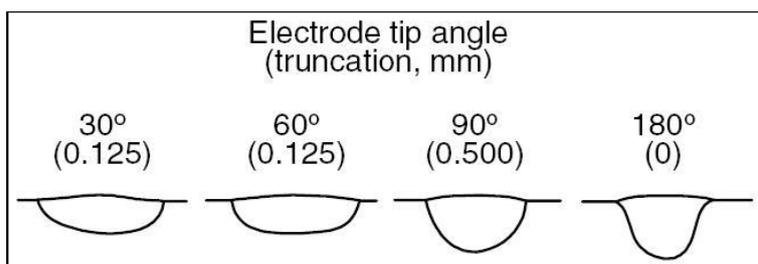


圖 2-7 鎢棒角度與熔深關係圖[22]

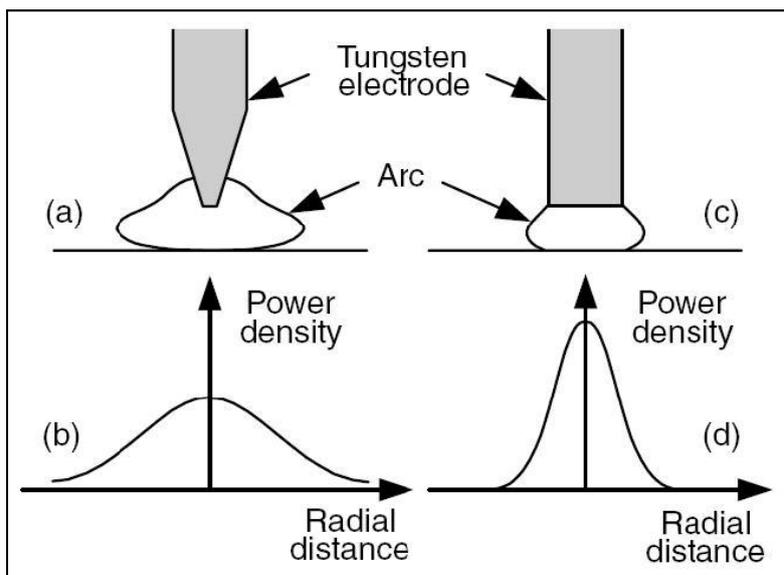


圖 2-8 鎢棒角度、電弧形狀與功率密度示意圖[22]

2.2.3 銲接參數之影響

在應用銲接時為考量得到良好的銲接結果，任何銲接法皆需考量下列主要變數：[8]

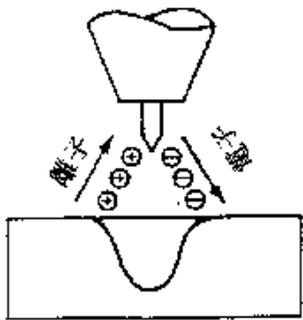
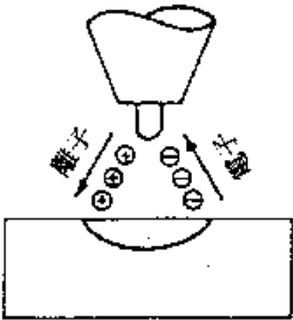
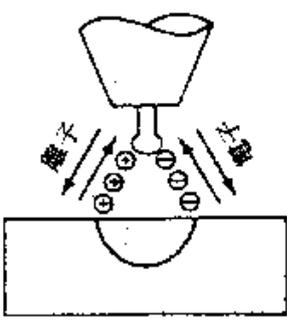
- 1.操作處理上的控制變數：即因銲接處理程序須控制之變數，如電極伸出量、電極距工件距離、銲槍角度、護帽角度、送線速度...等，一般會由銲機來做自動或半自動之控制。
- 2.機械控制變數：即主要影響銲接熱輸入量之變數，如銲接電壓、銲接電流、銲接走速。
- 3.母材控制變數：即依母材成份來決定保護氣體之種類及流量、銲接接頭型式、銲線種類、銲線大小...等。

上述之變數皆有相互之影響關係，故於銲接皆需考量，因本實驗採用自動化 GTAW 銲接機，故針對主要之銲接參數影響性概述如下：

1.銲接電流(I)：

銲接電流越大則表示熱輸入量越高，電弧壓力增大，可增加熔透與熔解效率。常見之電流型態有 DCEN, DCEP, AC 三種，如下表 2-2 所示。

表 2-2 GTAW 電流型式及特性

| 電流型式 | DCEN | DCEP | AC |
|-----------|---|--|---|
| 鎢棒極性 | 負 | 正 | -- |
| 電子及離子流向 |  |  |  |
| 熔融滲透性 | | | |
| 表面氧化膜清潔作用 | 無 | 有 | 有 |
| 電弧熱量分佈狀況 | 70%在工件 30%在鎢棒尖端 | 30%在工件 70%在鎢棒尖端 | 50%在工件 50%在鎢棒尖端 |
| 滲透性 | 深，窄 | 淺，寬 | 中等 |
| 鎢棒承載電流能力 | 優 | 不好 | 良 |

2. 銲接電壓(V)：

銲接電壓變化對保護氣體、電弧長度、與電極幾何形狀有密切關係，圖 2-6 顯示電壓大小與熔融深度之關係。在實驗時，將上述三個參數設定為定值，則電壓大小變化不大。

3. 銲接走速(S)：

銲接走速愈快，熱量集中在銲道，熔解效率高；銲接走速愈慢，熱量由母材吸收，熔解效率低。但銲接走速愈快則易生成 Undercut 及 Centerline crack。

4. 熱輸入量(Q)：

在同一銲接速度下，熱輸入量愈大，則熔透量愈多，不同之電流、電壓與銲接走速之組合，可得相同之熱輸入量。但其熔融狀態和熔解效率隨著銲接速度加快而增加。弧銲的熱輸入量，可以採用以下的公式：

$$Q = \frac{V \times I \times 60}{S \times 1000} \times \text{Efficiency} \quad (2-1)$$

式中 Q 為熱輸入量 (kJ/cm)，V 為電壓 (V)，I 為電流 (A)，S 為銲接速度 (cm/min)，Efficiency (效率) 的取值取決於所採用的銲接法：手工電弧銲為 0.75，氣體金屬電弧銲和埋弧銲為 0.9，氣體鎢極電弧銲為 0.8。

5. 電極角度

銲接參數固定的情形下，隨著鎢棒端點角度的增加，銲道的深寬比會隨之增加[22,24]

2.3 不銹鋼

2.3.1 不銹鋼之簡介

不銹鋼乃於鋼材中加入鉻(Cr)及鎳(Ni)之元素，來改善鋼材的耐蝕性，使其在各環境中不易生銹，其中主要合金元素以鉻(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[2]，另再添加鎳(Ni)元素之不銹鋼，可增進對非氧化性之抗腐蝕能力(如：鹽酸、硫酸之腐蝕)，此為鎳鉻(Cr-Ni)系不銹鋼。

一般所稱的不銹鋼是指含 Cr 量在 12% 以上，但低於 30%Cr 之鋼材，Cr 含量超過 12% 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，可說幾乎不再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)，超過 30% 者，主要是用在若超過 30% 一般用於高溫之狀態下，屬耐熱鋼之範圍[2]。

2.3.2 不銹鋼中微元素對不銹鋼的性能和組織的影響

目前已知的化學元素有 100 多種，在工業中常用的鋼鐵材料中可以遇到的化學元素約二十多種，對不銹鋼系列來說，最常用的元素有十幾種，除了組成鋼的基本元素鐵以外，對不銹鋼的性能與組織影響最大的元素是：碳、鉻、鎳、錳、硅、鉬、鈦、鈮、鈦、錳、氮、銅、鈷等。這些元素中除碳、硅、氮以外，都是化學元素週期表中位於過渡族的元素。實際上工業上應用的不銹鋼都是同時存在幾種以至十幾種元素的，當幾種元素共存於不銹鋼中時，它們的影響要比單獨存在時複雜得多，因為在這種情況下不僅要考慮各元素自身的作用，而且要注意它們互相之間的影響，因此不銹鋼的組織決定於各種元素影響的總和。下面針對主要影響之元素進行介紹[2,19,20]。

1. 鉻(Cr)在不銹鋼中的作用：

鉻為決定不銹鋼屬性的重要元素，每種不銹鋼都含有一定數量的鉻。目前尚沒有不含鉻的不銹鋼。所以鉻之所以成為決定不銹鋼性能的主要元素，主要原因於鋼中添加鉻作為合金元素以後，促使其內部的形成鐵鉻合金。鐵鉻合金其含鉻量愈多，在一般大氣中之防蝕性就愈好，有利於抵抗腐蝕破壞的方面發展。添加鉻於不銹鋼中之效果：

- (1). 腐蝕及氧化抵抗性增加
- (2). 硬化能增加
- (3). 高溫強度增加
- (4). 耐磨性增加(高碳鋼)

2. 碳(C)在不銹鋼中的作用

碳是工業用鋼材的主要元素之一，鋼的性能與組織在很大程度上決定於碳在鋼中的含量及其分佈的形式，在不銹鋼中碳的影響尤為顯著。碳在不銹鋼中對組織的影響主要表現在兩方面，一方面碳是穩定沃斯田鐵相的元素，並且作用的程度很大（約為鎳的 30 倍），另一方面由於碳和鉻的親和力很大，與鉻形成一系列複雜的碳化物。所以，從強度與耐蝕性兩方面來看，碳在不銹鋼中的作用是互相矛盾的。

3. 鎳(Ni)在不銹鋼中的作用

鎳是優良的耐腐蝕材料，也是不銹鋼的重要合金元素。鎳在不銹鋼中是抑制肥粒相增生形成沃斯田鐵相的重要元素，但低碳鎳鋼要獲得良好的沃斯田鐵相組織，由 Fe-Cr-Ni 平衡圖中可得知，若單獨添加鎳使其組織變化成沃斯田鐵相，其合金鋼中含鎳量要達到 24% 以上；且在含鎳 27% 以上時才使鋼在某些介質中的耐腐蝕性能顯著改變。所以鎳元素添加於鋼中是不能單獨構成不銹鋼。但是鎳與鉻同時存在於不銹鋼中時，含鎳的不銹鋼卻具有許多可貴的性能。添加鎳於不銹鋼中之效果：

- (1). 使鋼之淬火回火韌性增加。
- (2). 使波來鐵及肥粒鐵的韌性增高。
- (3). 使高 Cr-Fe 合金變成沃斯田鐵組織。

4. 錳(Mn)和氮(N)在不銹鋼中的作用

鉻鎳沃斯田鋼的優點雖然很多，但近幾十年來的大量發展與使用，而鎳的礦藏量較少且又集中分佈在少數地區，因此鎳在供需方面產生問題。所以在不銹鋼與許多其他合金領域中，開始找尋其他元素取代鎳，在這方面研究和應用比較多的是以錳和氮來代替不銹鋼與耐熱鋼中的鎳。

錳對於沃斯田鐵的作用與鎳相似。但說得確切一些，錳的作用不在於形成沃斯田鐵，而是在於它降低鋼的臨界淬火速度，在冷卻時增加沃斯田鐵的穩定性，使高溫下形成的沃斯田鐵得以保持到常溫。在提高鋼的耐腐蝕性能方面，錳的作用不大，如鋼中的含錳量從 0 到 10.4% 變化，也不使鋼在空氣與酸中的耐腐蝕性能發生明顯的改變。這是因為錳對提高鐵基固溶體的電極電位的作用不大，形成的氧化膜的防護作用也很低，所以工業上雖有以錳合金化的沃斯田鐵鋼（如 Cr-Mn-Ni 系鋼），但它們不能作為不銹鋼使用。由雪弗圖可得之，錳在鋼中，可抑制肥粒相生成穩定沃斯田鐵相，其作用約為鎳的一半。添加錳於不銹鋼中的效果：

- (1). 防止硫造成的脆性
- (2). 增加硬化能

氮為抑制肥粒相生成有要元素，添加氮在鋼中使用，其作用的程度比鎳還要大。

5.上述元素為對影響較大之元素，仍有許多元素會使不銹鋼中組織及特性產生變化，其將元素效果表列如表 2-3 所示，其相關合金元素對沃斯田鐵的強度影響如圖 2-9 所示。

表 2-3 鋼中合金元素的效果[2]

| 元素 | 效 果 |
|-----------|--|
| 鋁 (Al) | 1.強的脫氧劑 2.抑制晶粒成長(形成分散氧化物或氮化物) 3.氮化鋼的合金元素 |
| 鈷 (Co) | 1.硬化肥粒鐵使鋼具有高溫硬度 2.降低硬化能 |
| 鉬 (Mo) | 1.使沃斯田鐵的粗大化溫度上昇 2.使硬化層深入 3.防止回火脆性 4.高溫強度、潛變強度、高溫硬度增加 5.使不銹鋼的腐蝕抵抗力增加 6.形成耐磨耗粒子 |
| 磷 (P) | 1.增加低碳鋼的強度 2.腐蝕抵抗力增加 3.改良易削鋼的機械性質 |
| 矽 (Si) | 1.為常用之脫氧劑 2.電磁鐵板用合金 3.使鋼氧化抵抗力優良 4.略使鋼的硬化能增加 5.使低合金鋼的強度增加 |
| 鈦 (Ti) | 1.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 2.可防止晶界腐蝕 |
| 鎢 (W) | 1.使工具鋼內生成硬而耐磨耗性粒子 2.增進高溫硬度及強度 |
| 釩 (V) | 1.使沃斯田鐵晶粒粗大化溫度昇高 2.增加硬化能 3.抵抗回火軟化及使回火時生二次硬化 |
| 銅 (Cu) | 1.耐蝕性、強度增加 2.使高合金耐酸鋼的性能增強 |

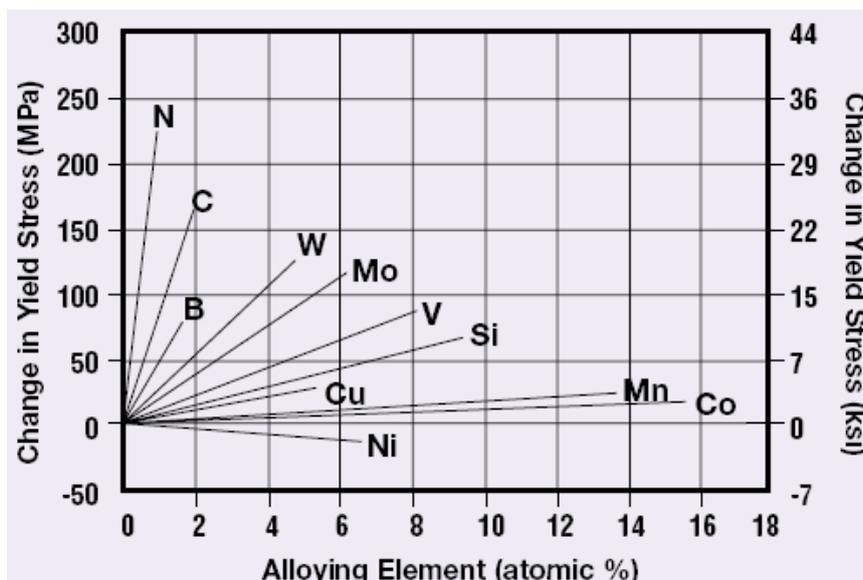


圖 2-9 沃斯田鐵不銹鋼中合金元素對強度之影響[20]

2.3.2 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 2-4 與表 2-5 分別為不銹鋼之主要分類表及不銹鋼之物理性質)[2]

表 2-4 不銹鋼之主要分類表[2]

| 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 2-5 不銹鋼之物理性質[2]

| 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 |

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 2-6)，本實驗所使用之 304 不銹鋼屬於沃斯田鐵型不銹鋼，其 304 與其 300 系不銹鋼關係圖可參閱圖 2-10[18]；以下將只討論 304 不銹鋼之機械性質與特性：

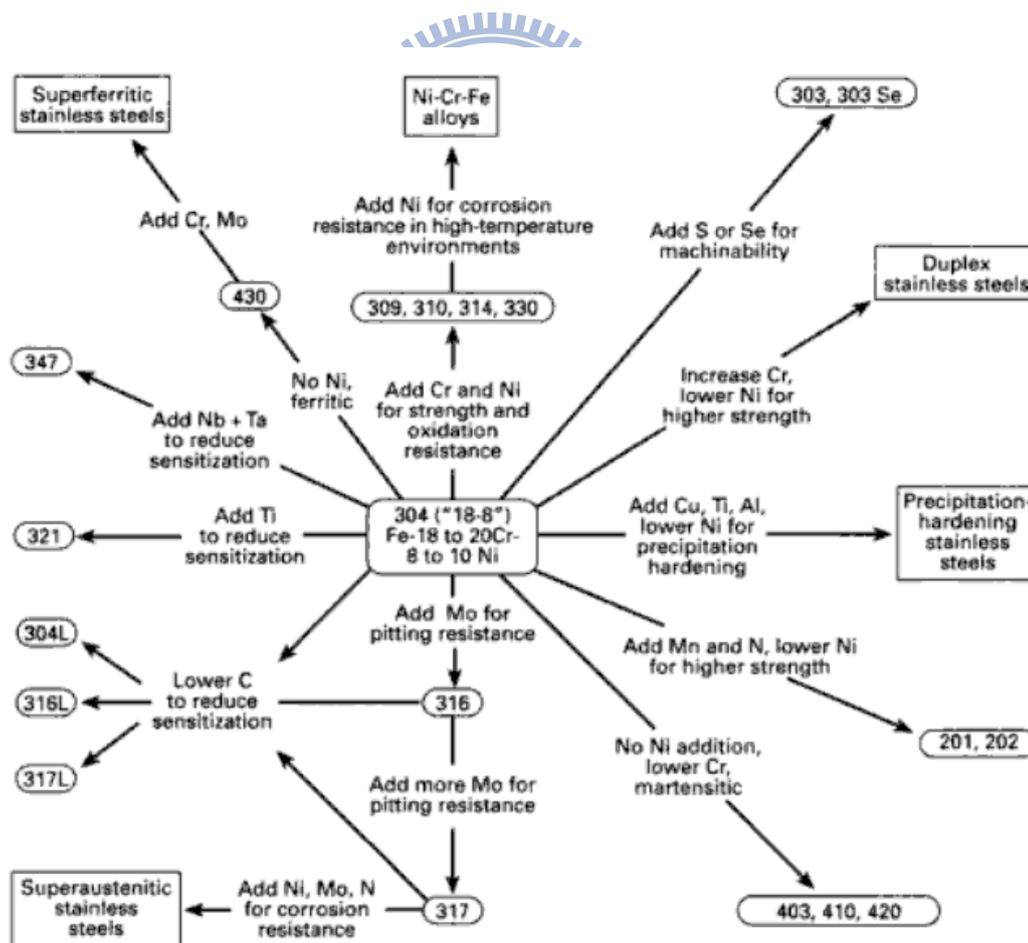


圖 2-10 各型號不銹鋼關係圖(304 不銹鋼為例)[19]

表 2-6 不銹鋼各系列特性[2]

| 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 |

沃斯田鐵型不銹鋼是從 Fe-Cr-Ni 合金系統發展出來的，其所含有的鉻(Cr)元素含量通常高於 16%，且其鎳(Ni)元素含量有一定之比例(表 2-7 為各類不銹鋼之化學成分表)，用以維持在室溫下沃斯田鐵結構之穩定性。其微觀結構屬面心立方體結構，無磁性，也沒有延脆性轉換溫度。所以在極低的操作溫度下，仍保持相當的韌性，其使用的範圍由 240°C ~ 1093°C [9]。

表 2-7 各類不銹鋼之化學成分表[9]

| AISI 規格 | 新 JIS 規格 | 對應之舊 JIS 規格 | 化 學 成 分 (%) | | | | | | |
|------------|---------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|--------------|
| | | | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr |
| 201 | SUS201 | -- | 0.15 | 1.00 | 5.5~7.5 | 0.06 | 0.03 | 3.5~5.5 | 16~18 |
| 202 | SUS202 | -- | 0.15 | 1.00 | 7.5~10.0 | 0.06 | 0.03 | 4.0~6.0 | 17~19 |
| 302 | SUS302 | SUS40B | 0.15 | 1.00 | 2.00 | 0.04 | 0.03 | 8.0~10.0 | 17~19 |
| 304 | SUS304 | SUS27B | 0.08 | 1.00 | 2.00 | 0.04 | 0.03 | 8.0~11.0 | 18~20 |
| 304L | SUS304L | SUS28 | 0.03 | 1.00 | 2.00 | 0.04 | 0.03 | 9.0~13.0 | 18.0~20.0 |
| 310 | -- | -- | 0.25 | 1.50 | 2.00 | 0.045 | 0.03 | 19.0~22.0 | 24.0~26.0 |
| 310S | SUS310 | SUS42B | 0.08 | 1.50 | 2.00 | 0.04 | 0.03 | 19.0~22.0 | 24.0~26.0 |
| 316 | SUS316 | SUS32B | 0.08 | 1.00 | 2.00 | 0.04 | 0.03 | 10.0~14.0 | 16.0~18.0 |
| 316L | SUS316L | SUS33B | 0.03 | 1.00 | 2.00 | 0.04 | 0.03 | 12.0~16.0 | 16.0~18.0 |
| 321 | SUS321 | SUS29B | 0.08 | 1.00 | 2.00 | 0.04 | 0.03 | 9.0~13.0 | 17.0~20.0 |

L.代表極低含碳量

S 代表安定化 (stabilization)

此類型的不銹鋼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)，因此不能用熱處理的方法將其硬化。但卻可經冷加工來增加其硬度與強度；其冷作硬化速率隨 Ni 含量的增加而遞減。但是，經冷作加工後，抗腐蝕性降低，尤其是在氯化物環境中會有應力腐蝕(stress corrosion)問題產生，此為沃斯田鐵型不銹鋼在應用上所遭遇的問題之一，應特別注意[28]。

2.3.4 不銹鋼的銲接特性

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[10]，其差異特性及對銲接之影響性如表 2-8 之說明：

表 2-8 沃斯田鐵系不銹鋼與一般碳鋼銲接特性比較[29]

| 項目 | 碳鋼 | 沃斯田鐵不銹鋼 | 差異說明 (以碳鋼為 BASE) | 對銲接之影響性 |
|------|------|-----------|---------------------|------------------------|
| 熱膨脹率 | 11.7 | 17.1~19.2 | 較高(約增加 50%) | ◆ 銲接變形嚴重 ◆ 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 | 約為碳鋼之 40~50% | ◆ 電弧熱停留時間長，散熱不易 |

不銹鋼的基本銲接特性如上述，其銲接過程凝固過程產生的變化，如圖 2-11 及 2-12 為 Fe-Cr-Ni 之系統圖及平衡圖[19][27]所示，由於銲道的冷卻速度極快，無法達到平衡的相變化，而會有偏析(Segregation)之現象，當冷卻速度產生變化時其結果便有所差異。有關銲道的凝固現象探討源自傳統的凝固理論，其差異僅在於凝固的範圍大小與速度。由於不銹鋼的合金成份複雜，一般均以鐵-鎳-鉻合金含鐵 70%的擬二相圖(pseudo-binary diagram)來探討“液-固”相間的變化。

當鎳鉻成分在三相 $\gamma + \delta + L$ 共存區右邊時，固溶中任何肥粒鐵會出現在樹枝狀之間，對此區域的組成是肥粒鐵一開始固溶成樹枝狀，然後因包晶反應使肥粒鐵轉變成沃斯田鐵，最後固溶成沃斯田鐵(γ)與肥粒鐵(δ)；而低 Ni 含量時(鉻含量增加)，樹枝狀結構一開始也是肥粒鐵固溶，然後轉變成沃斯田鐵+肥粒鐵固溶體，與前面不同的是，前者固溶後以 γ 為主，而後者則以 δ 佔大多數。

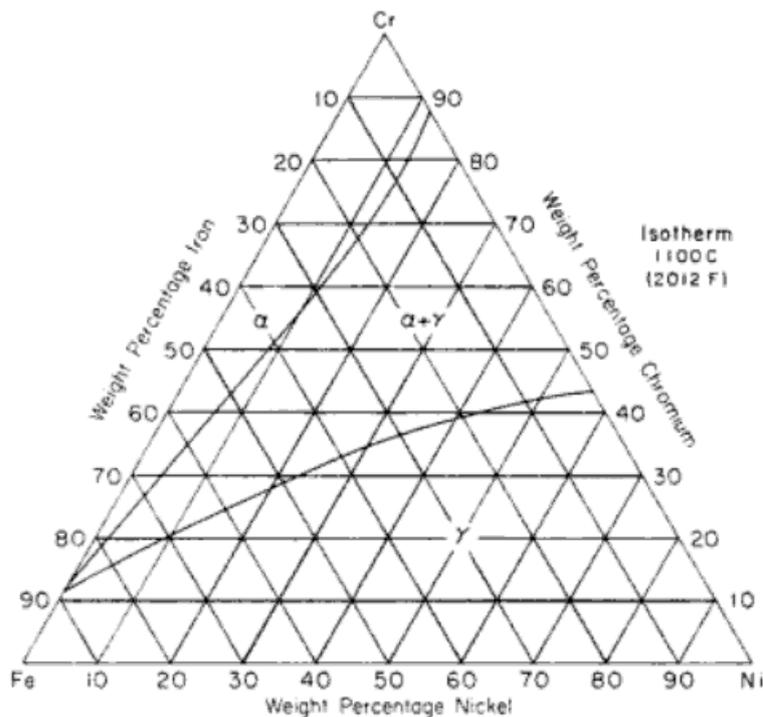


圖 2-11 Fe-Cr-Ni 之三相系統圖(1100°C)[19]

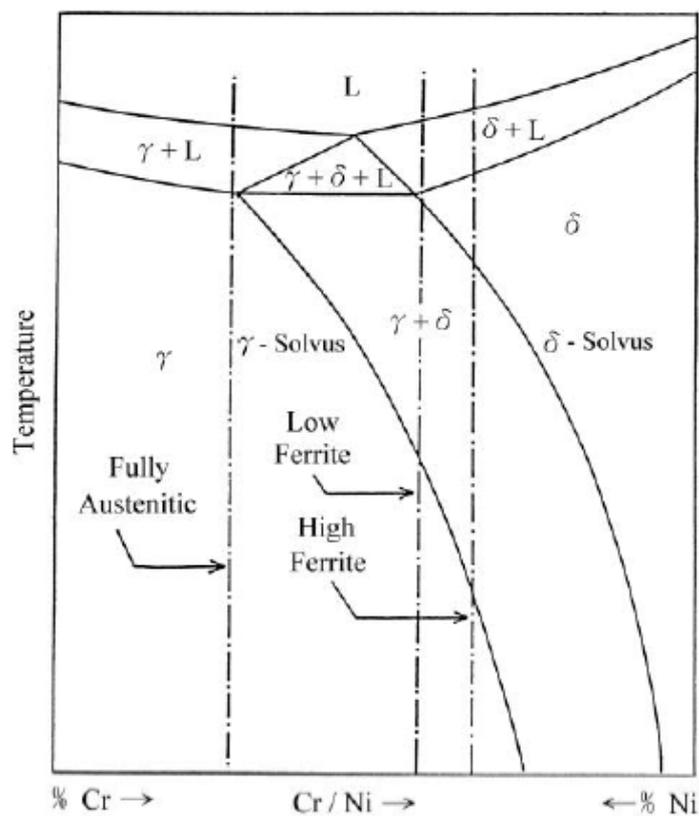


圖 2-12 Fe-Cr-Ni 之三相平衡圖[27]

評估 Fe-Cr-Ni 平衡圖與鐳道凝固組織之關係及特性(如熱裂、抗腐蝕)已有多方學者探討，但其中近年來被各方常使用主要的有 Schaeffler diagram(圖 2-13)、Delong diagram(圖 2-14) 下列分別介紹[19]。

Schaeffler diagram 雪弗圖：於 1949 年 Anton Schaeffler 提出，探討合金元素(Creq, 鉻當量)對肥粒相提升及合金元素(Nieq, 鎳當量)對肥粒相抑制之關係圖。使用此圖，先計算熔池內之鉻/鎳當量再於此圖估算其微組織的範圍。實驗顯示其對常見的 300 系列不銹鋼推估是合理的。一般少使用於高氮存在的條件下。

Delong diagram 杜龍圖：於 1974 年由 W.T DeLong 提出主要用於探討氮在增進沃斯田鐵相及肥粒鐵相消耗之影響，若氮分析量於計算中無法取得，則一般在 TIG 製程假設為 0.06%，MIG 製程中假設為 0.08%，即杜龍圖是乃在鎳當量中加入氮元素因子，因氮元素添加可使鐳道形成沃斯田鐵穩定相。

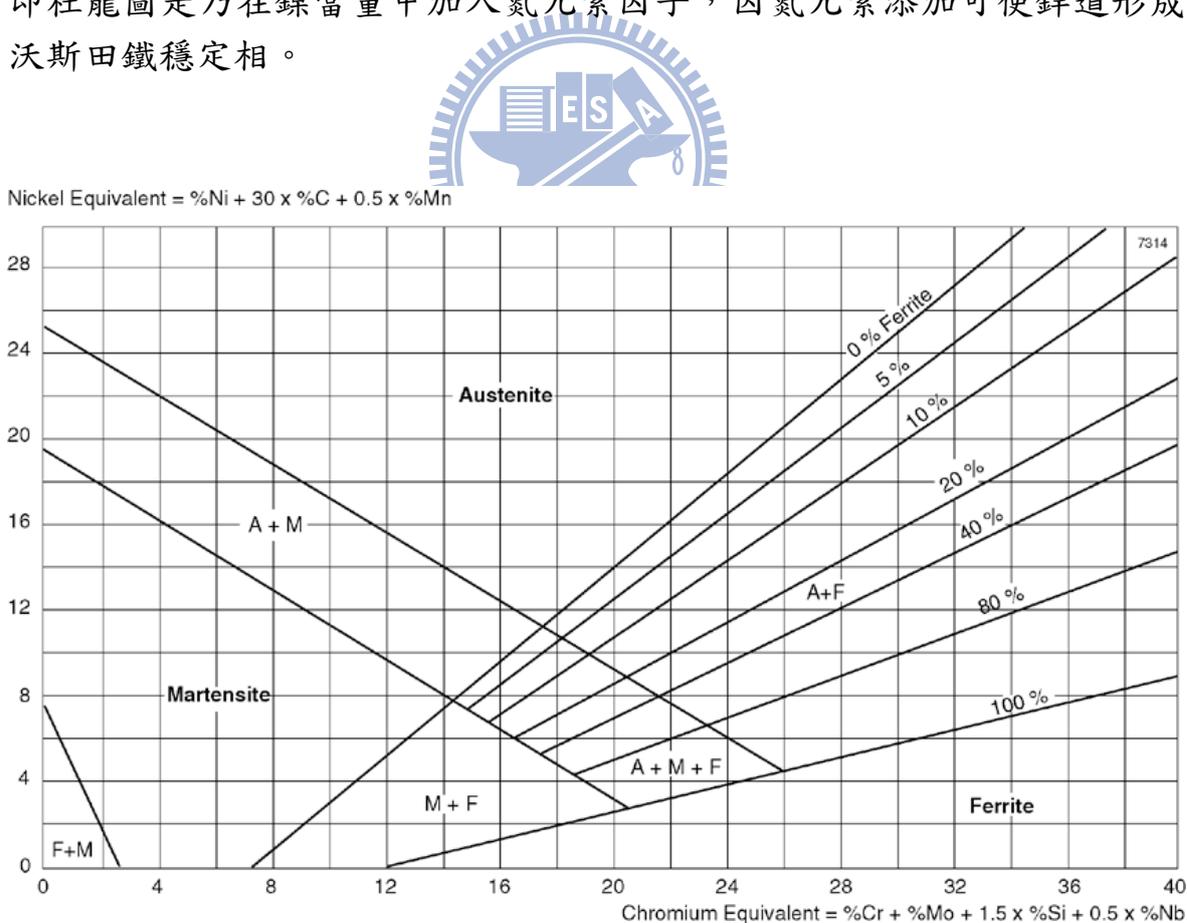


圖 2-13 Fe-Cr-Ni 平衡圖與鐳道凝固組織之關係(Schaeffler diagram)[19]

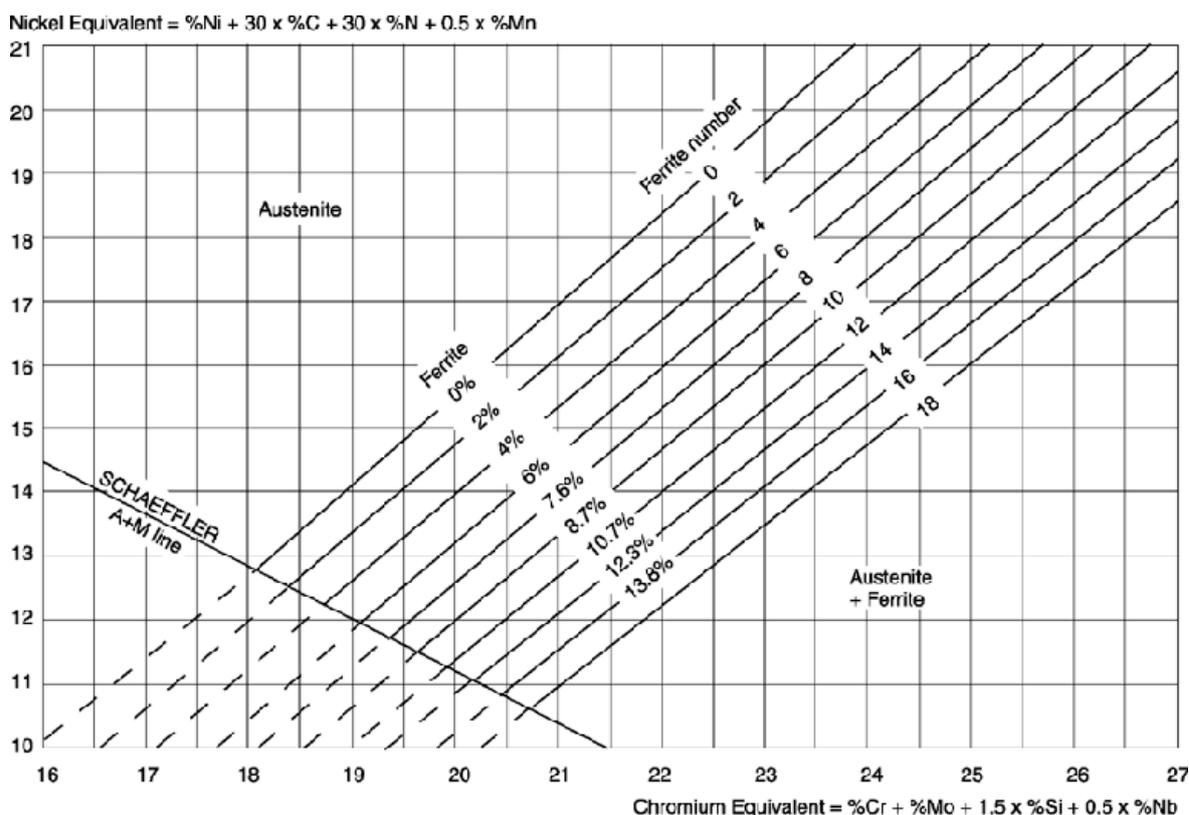


圖 2-14 Fe-Cr-Ni 平衡圖與銲道凝固組織之關係(Delong diagram)[19]

雪弗圖之計算： $Cr_{eq} = Cr + Mo + 1.55 Si + 0.5 Nb$ (2-2)

$Ni_{eq} = Ni + 30 C + 0.5 Mn$ (2-3)

杜龍圖之計算： $Cr_{eq} = Cr + Mo + 1.55 Si + 0.5 Nb$ (2-4)

$Ni_{eq} = Ni + 30 C + 30 N + 0.5 Mn$ (2-6)

Suutala 等更將其觀察到之凝固時的微觀結構，依據其特徵及肥粒相的含量，區分為五個程度(圖 2-15)，並綜合歸納成 A、B、C 三種型式，並找出其對應的 Cr_{eq} / Ni_{eq} 值。 Cr_{eq} 和 Ni_{eq} 是依銲接金屬的成分而變，但冷卻速率會影響凝固態，因此實際對應的 Cr_{eq} / Ni_{eq} 值會隨著銲接條件的不同而變更。[32]

1. 型式 A(圖 2-9, a、b)： $Cr_{eq} / Ni_{eq} < 1.48$

凝固時主要為沃斯田相，若有肥粒相出現也只是少量並存在於枝狀結構(Dendritic)，含量約在 3~6%。

2. 型式 B(圖 2-9, c、d)： $1.48 < Cr_{eq} / Ni_{eq} < 1.95$

固化時肥粒相為主要相，沃斯田相則存在於枝狀結構中。

3. 型式 C(圖 2-9, e) : $Cr_{eq} / Ni_{eq} > 1.48$

凝固時幾乎全部為肥粒相，很少有沃斯田相出現，而在稍後的固態冷卻中以魏德曼(Widmanstätten)組織析出。

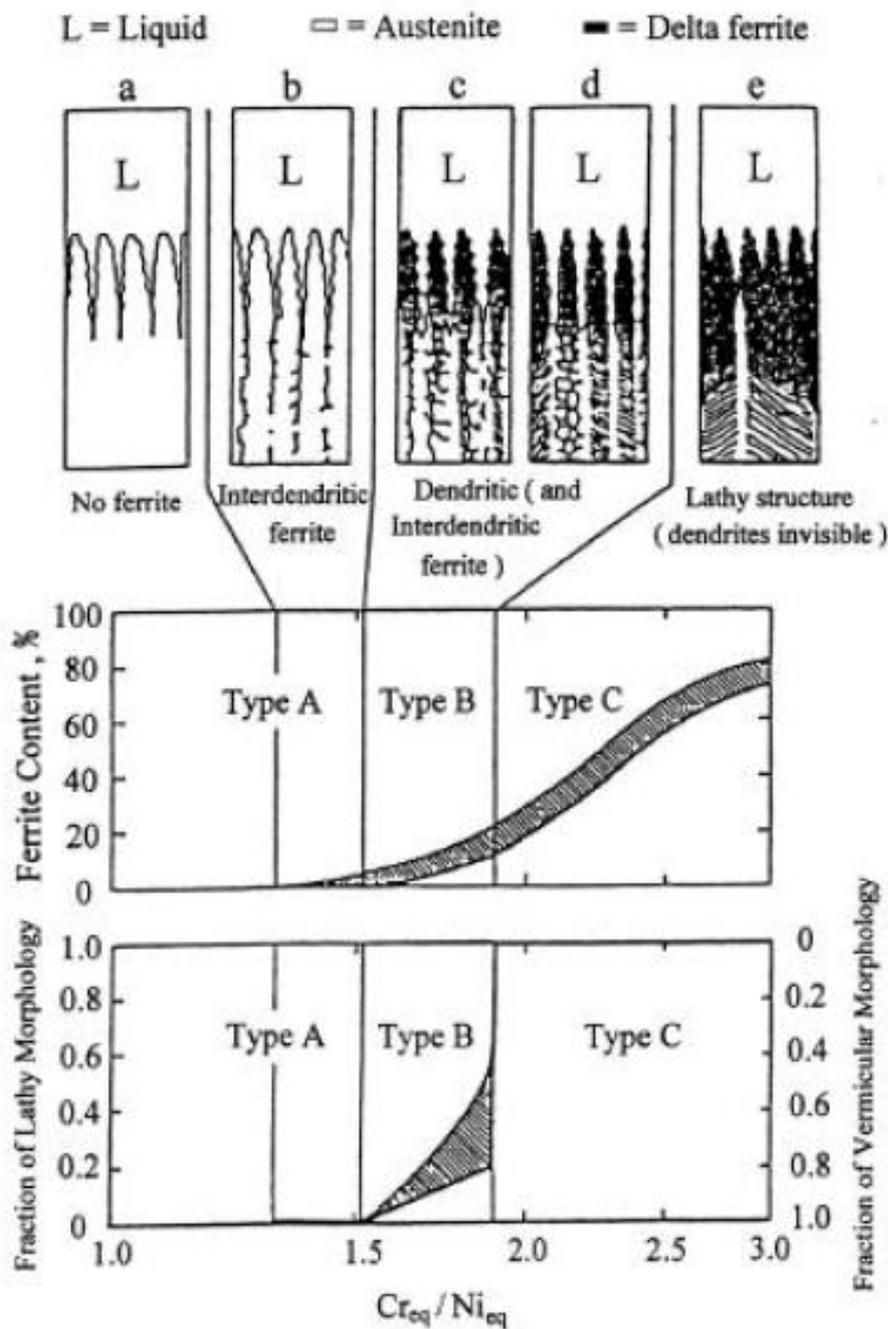


圖 2-15 凝固型式 A、B、C 的顯微組織和 Cr_{eq} / Ni_{eq} 值的關係圖[32]

2.3.5 不銹鋼鐸條的選擇

鐸接不銹鋼時鐸條的選擇是非常重要的，除鐸接時的鐸層強度及機械性質外，原則上須依母材之性質選取適用之鐸條，否則易發生鐸接不良如熱裂、碳化物析出等問題，表 2-9 為常用不銹鋼鐸條選用表

表 2-9 不銹鋼電弧鐸用鐸條選用表[3]

| 類別 | 母材 | 使用狀態(a) | 鐸條(b) | 備註 |
|-----------------------|---------------------|---------|-------------|-----|
| 沃 斯 田 鐵 系 | 301,302,304,305,308 | 1、2 | 308 | (c) |
| | 302B | 1 | 309 | (d) |
| | 304L | 1、4 | 347,308L | -- |
| | 303,303(Se) | 1、2 | 312 | (e) |
| | 309,309S | 1 | 309 | -- |
| | 310,310s | 1 | 310 | -- |
| | 316 | 1、2 | 316 | (f) |
| | 316L | 1、4 | 318、316L | (f) |
| | 317 | 1、2 | 317 | (f) |
| | 317L | 1、4 | 317(Cb) | (f) |
| | 318,316(Cb) | 1、5 | 318 | (f) |
| | 321 | 1、5 | 347 | (g) |
| | 347 | 1、5 | 347 | (h) |
| | 348 | 1、5 | 347 | (j) |
| 麻 田 散 鐵 系 | 403,410,416,416(Se) | 2、3 | 410 | (k) |
| | 403,410 | 1 | 308,309,310 | (m) |
| | 416,416(Se) | 1 | 308,309,312 | (m) |
| | 420 | 2、3 | 420 | (n) |
| | 431 | 2、3 | 410 | (n) |
| | 431 | 1 | 308,309,310 | (p) |
| 肥 粒 鐵 系 | 405 | 2 | 405(Cb),430 | (q) |
| | 405,430 | 1 | 308,309,310 | (m) |
| | 430F,430F(Se) | 1 | 308,309,312 | (m) |
| | 430,430F,430F(Se) | 2 | 430 | (r) |
| | 446 | 2 | 446 | -- |
| | 446 | 1 | 308,309,310 | (s) |

註：(a). 1：鐸接狀態

2：退火狀態

3：硬化後再作應力消除

4：應力消除

5：安定化處理與應力消除

(b).前面 E 或 ER 省略

(c).308 的鐸接金屬亦即 18-8 與 18-9 的成份，其成分為 0.08% max C、19%min Cr、9%min Ni

- (d).也可用 310(1.5%min Si)但易生熱裂紋。
- (e).316,316L,317 與 317(Cb)鐳條的耐蝕力差，可藉下列熱處理來改善：316 與 317 母材：1066~1121°C 完全退火：316L 與 317L871~899°C 安定化處理。
- (g).321 的包覆鐳線很少製造。
- (h).厚板鐳接時要注意熱影響區的龜裂問題。
- (j).核子用途時，母材與鐳接金屬的 Ta 不可超過 0.1%，Co 不可超過 0.2%。
- (k).熱影響區與鐳道作退火軟化，增加延性。鐳接金屬的熱處理方法與母材同。
- (m).鐳接狀態下，沃斯田鐵的鐳接金屬軟且具延性，但熱影響區的延性較差。
- (n).預熱與鐳後熱處理要小心，以避免龜裂。
- (p).預熱要謹慎，若在鐳接狀態下使用，要考慮熱影響區為硬度較高的組織。
- (q).退火增加熱影響區與鐳接金屬的延性，405 鐳條的鐳接金屬含有 Cb 可減小硬度，且 Cb 的效果比 Al 好。
- (r).退火可增加鐳接接頭處的延性。
- (s).308 鐳條對銹皮的抵抗能力比母材差，而且母材與鐳接金屬的熱膨脹係數不同。

2.4 鐳接氣體

2.4.1 鐳接氣體之功用

電弧鐳接時使用保護氣體的主要目的如下：

- 1.鐳接時由鐳炬同出保護氣體，保護電極、電弧、填料金屬、熔融狀之鐳道等，以避免直接與大氣接觸，防止大氣中氧和氮與熔金作用，造成氧化。
- 2.提供熱能的傳遞，由於鐳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鐳接保護氣體來加以傳遞到鐳件上。

2.4.2 鐳接氣體之選擇

一般常用的鐳接氣體有氫氣、氬氣、二氧化碳、氧氣、氫氣及氮氣等六種氣體，其中氫氣、氬氣、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氫氣相混合使用，其鐳接保

護氣體之用途請參閱表 2-10。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)

- 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)。

2. 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。

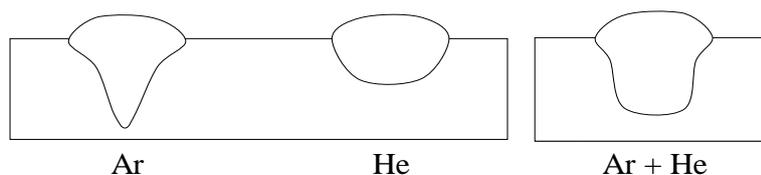
3. 二氧化碳(carbon dioxide)

- a、屬於活性(氧化性)氣體。
- b、電漿電弧的能量分佈較均勻。
- 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。

4. 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鐸道截面(如圖 2-16(a)所示)。至於氦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鐸道截面(如圖 2-16(b)所示) 由此可得知若欲得到一寬且深的鐸道截面形狀 則可採用氬-氦混合氣體(如圖 2-16(b)所示)。



(a) 氬氣與氦氣對鐸道截面之影響 (b)氬-氦混合氣對鐸道截面之影響

圖 2-16 鐸接氣體對鐸道截面形狀之影響

表 2-10 鐸接保護氣體之性質和用途

| 鐸接氣體 | 性質 | 用途 | | |
|---|-----|----------------------|-------------|---------------------------|
| | | 熔極式 | 非熔極式 | |
| Ar | 惰性 | 鋼料，合金使用 | 所有金屬鐸接施工 | |
| He | 惰性 | 美國為主要鐸接氣體 | --- | |
| Ar+Cl ₂ | 惰性 | 防止鋁合金產生氣孔 | --- | |
| H ₂ | 還原性 | Plasmajet 鐸接 1896 | 原子氬鐸接 | |
| Ar+10%~50%H ₂ | 還原性 | | --- | 鋁、銅、鎂等金屬之 Plasma Cutting |
| N ₂ +10%~40%H ₂ | 還原性 | | --- | 碳鋼、不銹鋼等金屬之 Plasma Cutting |
| N ₂ | 還原性 | | 入熱量大，適合鐸銅使用 | 不銹鋼之 Plasma Cutting |
| Ar+1%~5%O ₂ | 氧化性 | 合金鋼用 | --- | |
| Ar+25%CO ₂ | 氧化性 | 短路電弧法使用 | --- | |
| Ar+15%CO ₂ +5%O ₂ | 氧化性 | 多層鐸，短路電弧法使用 | --- | |
| Ar+75%CO ₂ | 氧化性 | 管線鐸接 | --- | |
| CO ₂ | 氧化性 | 碳鋼、低合金鋼使用 | --- | |
| CO ₂ +10%~25%O ₂ | 氧化性 | | | |
| CO ₂ - 50%>O ₂ | 氧化性 | 沃斯田鐵系不銹鋼用 | --- | |
| CO ₂ - 50%>N ₂ | 氧化性 | | | |

2.4.3 銲接氣體之特性

由使用目的可知保護氣體對銲接工作的影響甚鉅，其主要為銲接氣體的特性所影響，其中包括有比重、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，比重大的銲接氣體較適用於平銲。相對地，比重小的銲接氣體則較適用於立銲或仰銲。如表 2-11 所示即為常用之銲接氣體的比重，其 $CO_2 > Ar > O_2 > N_2 > He > H_2$ 。

表 2-11 銲接氣體的比重

| 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

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 2-17 所示即為銲接氣體的熱傳導性。

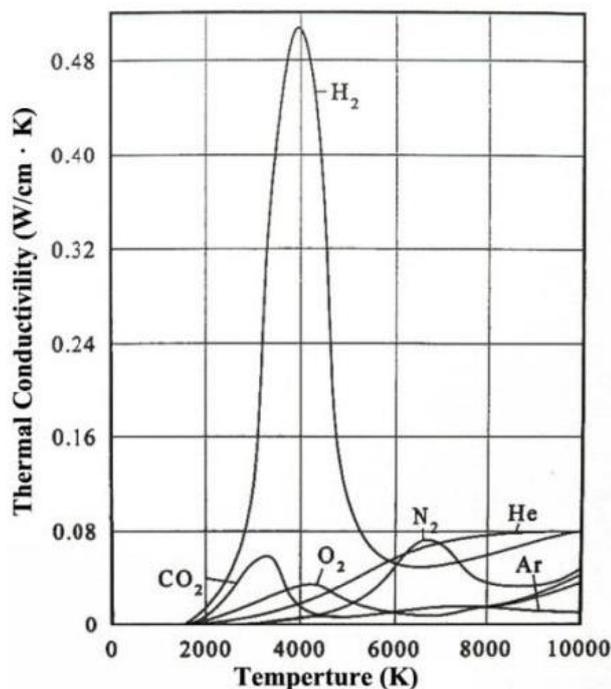


圖 2-17 銲接氣體的熱傳導性[5]

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 2-12 所示即為銲接氣體的解離電壓值，其 $\text{He} > \text{Ar} \cong \text{H}_2 \cong \text{N}_2 > \text{CO}_2 > \text{O}_2$ 。

表 2-12 銲接氣體的解離電壓值

| 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 助銲劑

2.5.1 助銲劑之功用

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熔渣，及其它冶金之效果，以提高銲接件之品質。茲將助銲劑之主用功用分述如下[1]：

(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銲道金屬之目的。

(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 CaCO₃、K₂CO₃、Na₂CO₃、KNO₃、長石、花崗石、水玻璃等，穩弧劑中所含之 K、Na、Ca 等元素，其電離電位很低，助銲劑內含有這些低電離電位的物質，可

以改善電弧空間氣體的電離條件，使銲接電流易於通過電弧空間，因此可以增加電弧的穩定性。

2.5.2 助銲劑成份對銲接金屬的影響

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：

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

式中所列為銲劑中的重量百分比。根據計算結果作如下的分類：

1. 酸性銲劑 (B.I. < 1.0) :

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

2. 中性銲劑 (B.I. = 1.0~1.5) :

熔融金屬的化學成份與銲絲的化學性質相近，銲道金屬含氧量有所降低。

3. 鹼性銲劑 (B.I. > 1.5) :

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

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

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

助銲劑在銲接過程中，是以液態熔渣形式覆蓋在銲接金屬表面以保護銲接熔池 (weld pool) 不受大氣的污染，並可改善銲接金屬的化學成份、機械性質及微觀組織等，因此茲將助銲劑中成份之功用分述如下：[14]

1. 助銲劑中屬於鹼性助銲劑的成份有：CaO、MgO、FeO 及 MnO。而屬於酸性的則有 SiO₂、P₂O₅、TiO₂，及 Al₂O₃。鹼性助銲劑具有去硫及磷的能力，因此衝擊韌性及延性較佳。酸性助銲劑則是在銲接過程

中容易控制及去除銲渣容易。但銲接金屬中含有較多的介在物 (inclusion)，因此韌性較低。

2. Al_2O_3 及 Cr_2O_3 會降低電弧穩定性。
3. CaO 可改善電弧穩定性，並使銲渣(Slag)之粘度下降。
4. 助銲劑中的 SiO_2 增加，可調整粘度並增加電流能量(耐高電流)。 SiO_2 ，並可使銲渣中的 MnO_2 及 FeO 含量增加，銲接金屬中的 Si 及 O 含量也會增加。
5. 增加 MnO 可增加電弧滲透性能(Penetration)以及減少對銹的敏感性。 MnO 增加同時可增加銲接金屬中的 Mn 及 O 含量。
6. 助銲劑中加入 CaF_2 的作用，是希望形成 HF 的氣體以降低熔填金屬中的擴散氫含量。此外，銲接時 CaF_2 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_2 另外還有二個重要的作用，其一，為提高熔渣的透氣性，有利於熔池中氫的逸出；其二，為銲劑中的 CaF_2 可促進 CaO 的熔化，降低鹼性渣的粘度。
7. Al_2O_3 在鹼性助銲劑中可降低粘度，在酸性助銲劑中則可增加粘度，但是無法提升銲道的熔透深度。
8. 助銲劑中的 CaCO_3 、 MgCO_3 與 BaCO_3 經銲接後起分解作用形成 CO_2 ，分解的 CO_2 氣體可與氫原子直接作用生成 OH ，達到脫氧的作用。
9. TiO_2 、 Fe_2O_3 、 AlF_3 與 SiO_2 可增加銲道的熔透深度。

2.5.3 A-TIG銲接增加銲道熔深之機制

為探討提升TIG銲接的效率，於1960年由烏克蘭Paton Electric Welding Institute (PEWI) 研究群提出，在TIG銲接製程中加入活性助銲劑(Activating flux)的方法，此方法亦稱為A-TIG銲接法；A-TIG一直到1990年代，由於人們對提高銲接效率和降低銲接成本的追求，才引起學者的注意而進一步研究及發表，包括更Edison Welding Institute (EWI)及United Kingdom Welding Institute (UKWI)及日本大阪熔接研究所等大型研發中心；有關A-TIG銲接對銲道熔深之機制，目前有許多學者提出，針對A-TIG銲接製程能增加銲道熔深的物理機制[43]，簡述說明如下：

第一個解釋是由於Heiple et al. [45]於1982年所提出的Marangoni效應。由於活性助銲劑能改變熔池的表面張力，融化在熔池中的表面活性劑更可能使對溫度梯度相依的表面張力係數 $\partial\gamma/\partial T$ 由負轉正，將熔池的Marangoni對流逆轉，對流從放射狀往上往外，轉由往內往下。在鋼中的表面活性劑更S、O、Se及Te等元素。在圖2-18(a)、(b)及(c)表面活性劑較低的鋼中，靠近熔池中央表面張力較低且溫度較高的液態金屬，被靠近熔池邊緣張力較高且溫度較低的液態金屬往外拉；在圖2-18(d)、(e)及(f)表面活性劑較高的鋼中，靠近熔池邊緣表面張力及溫度皆較低的液態金屬，被靠近熔池中央表面張力及溫度皆較高的液態金屬往內拉，因此造成銲道熔深增加。

第二個被提出來的機制是為Simonik et al.在1976及Howse et al.在2000所提出的電弧收縮理論[49-50]。他們認為氣化的活性助銲劑能使電弧收縮是藉由捕捉電弧外圍的電子，使外圍負責傳遞電流的電子數量減少所造成。收縮的電弧之所以增加陽極的溫度是由於電流密度的增加與較高的電弧電壓造成，如圖2-19所示。由於氣化的助銲劑中可能含有氧，也時候也可能包含了氟。已知此類的蒸氣會吸附電子，被吸附的電子在電弧邊緣會產生較電子移動慢之氧或氟的負離子，因此，在給定的電流下，電弧中心的電流密度就會增加，因此就更可能會造成熔深的增加。

被吸附的電子與氣化分子及解離原子形成負電荷粒子，會對電子的吸收作用造成影響。電子吸附僅能發生在較低溫的外圍區域，因電子能量較低且電場較弱；接近電弧中央的區域，其電場較強且溫度較高，所以電子更非常高的能量，故電離作用為主要的支配力量。因此，收縮的電弧流場使得在電漿中及陽極上，靠近電弧中央區域的電流密度增加，所以造成緊縮的電弧及較深的銲池。

活性助銲劑的組成分子或原子若更較大的電子吸附截面積，則會促進電弧收縮的現象。如當鹵素化合物解離時，因其更較大的電子吸附截面積，故對電子更較佳之親和力。其它的化合物，如金屬化合物，雖然更較小的電子吸附截面積，但是因其更較高的解離溫度，故能等效地收縮電弧，就如同他們能在電弧外圍提供較大量的氣化分子與原子一般。

第三個解釋是由Lowke et al.[43]在2005所提一種更可能的機制來解釋活性助銲劑所扮演的角色。其解釋電弧收縮理論是由於活性助銲劑為絕緣體所造成。一般而言，活性助銲劑是金屬的氧化物，故為電的絕緣

體，雖然氧化物的阻抗隨著溫度的增加而降低，但仍顯著大於液態的熔池，如 TiO_2 在2123K時的阻抗為107 ohm-cm，因此助錒劑的效用為在熔池的外圍區域增加一層高電子阻抗區。所以，在熔池中央因為更較高的電流密度及表面熱能，所以助錒劑很更可能揮發，造成較深之錒道。

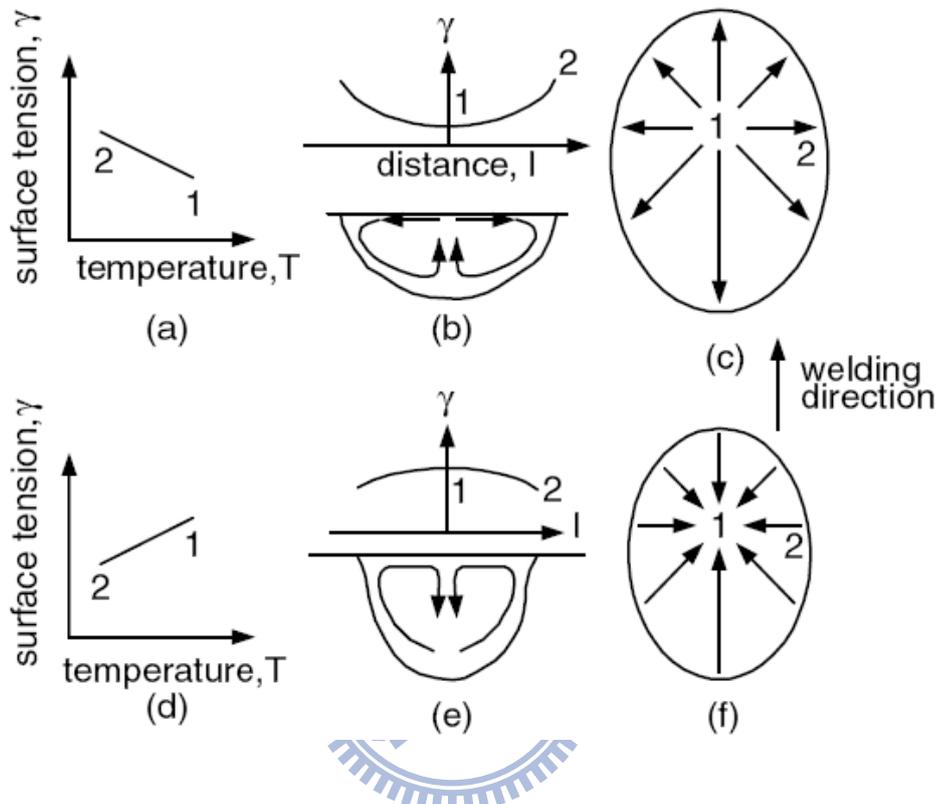


圖2-18 熔池中的Marangoni對流[52]

(a), (b)及(c)為含硫量低之鋼

(d), (e)及(f)為含硫量高之鋼

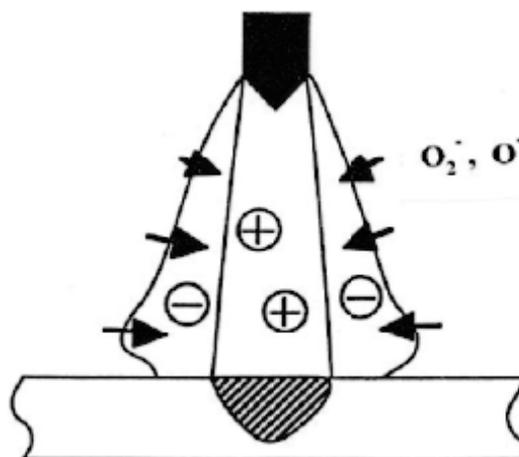


圖2-19 助錒劑吸附電子造成電弧收縮示意圖[22]

2.6 鐳道熔透深度變異之原因

在 304 不銹鋼之鐳接時，除了有鐳道熱裂及熱影響區敏化之問題外，因不同爐次之微量元素差異所形成穿深變異是鐳接時常面臨之問題[44-48]，對於此一問題，國外已有不少學者，進行此方面之研究[48,51]，結果顯示鋼材中之 S、Mg、Al、Ca 等微量元素對穿深變異有頗著之效應。為了解釋上述微量元素對穿深之影響，有二種機構被提出，一為表面張力驅動鐳池流體流動之機構[53-55]，另一則是電弧之效應[56,57]，以下針對上述之機構加以說明。

2.6.1 影響熔融區流體流動之機構[44-48]

對電弧鐳接而言，驅動鐳池(Weld pool)中熔融金屬流動之力量有四種如下：

- (1). 表面張力：熱毛細作用所引起之表面張力
- (2). 電弧效應：鐳池表面之電漿電弧力
- (3). 電磁力：流過鐳池表面之電流所形成之電磁力
- (4). 浮力：因鐳池內流體密度差異所形成之浮力

上述四種力且對流體流動之效應如圖 2-20 之示意圖所示並概述如下。

1. 表面張力

在純金屬或鐳池中不存在活化元素時，鐳池表面張力一般隨溫度的升高而減小(亦即鐳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鐳池中央向鐳池外緣流動的表面張力流(Outward flow)，進而形成寬而淺的鐳道截面形狀。然而，當鐳池中存在有活化元素時，鐳池表面張力則會隨溫度的升高而增加(亦即鐳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鐳池外緣向鐳池中央流動的表面張力流(Inward flow)，進而形成窄而深的鐳道截面形狀(如圖 2-20 b 所示)。

2. 電弧效應

關於不銹鋼因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[56,57]。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之影響，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鐳道的熔透深度增加(如圖 2-20a 所示)。

3. 電磁力

如圖 2-20c 所示，由於流過鐳池表面的電流形成之電磁力，引導中央之高溫熔融金屬向鐳池底部流動，可增加電弧鐳接之熔深，進而形成窄且深之鐳道。

4. 浮力

鐳接時在電弧下方的熔融金屬溫度最高，而鐳池二側的溫度最低，由於物體熱漲冷縮之特性，使得二側的熔融金屬密度高於鐳池中央而下降至鐳池底部，迫使中央的金屬液體向二側移動而形成寬而淺之鐳道。如圖 2-20d 所示。

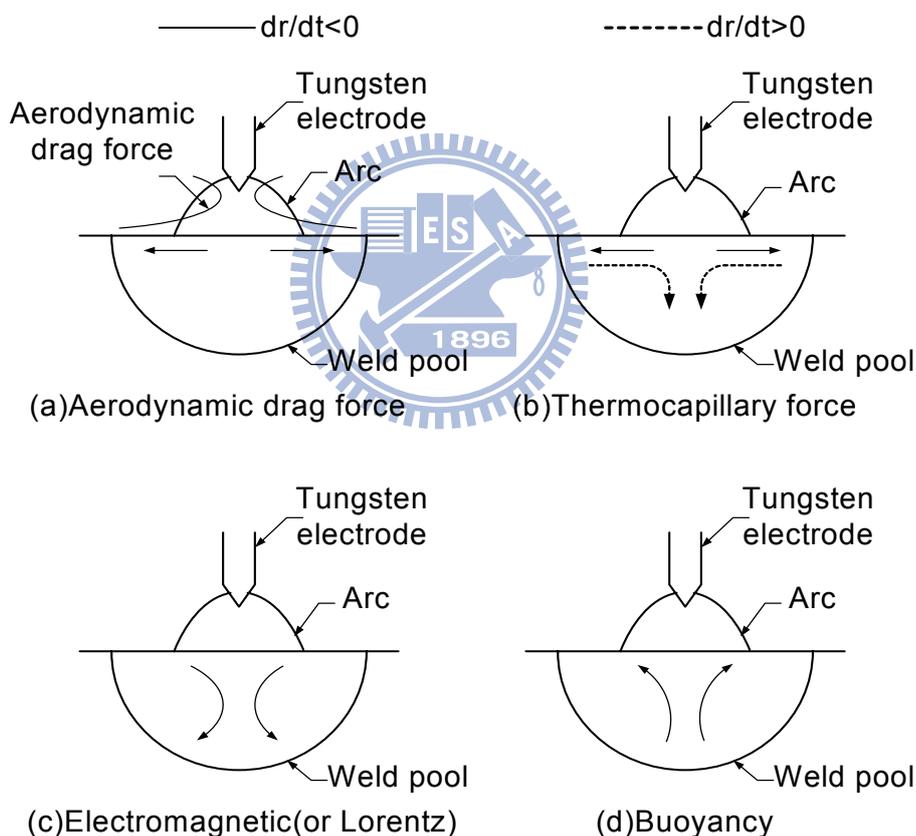


圖 2-20 鐳池中驅動流體流動之力量[39]

2.6.2 微量元素對鐳接性之影響

雖然有上述四種機構被提出來解釋不銹鋼 TIG 鐳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的。以下將從表面張力之觀點，說明微量元素對鐳接性之影響[51,52]。

1. 硫(S)之效應

近年來隨著煉鋼技術之進步，高純度之不銹鋼已成功的被開發。但隨著鋼材 S 含量的降低，對銲接性卻產生了一些的影響。其銲道穿深／寬度(D/W)比值會隨著 S 含量的降低而減低，也就是銲接性變差。由圖 2-21 顯示其含硫量與溫度及表面張力之關係[19]，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。

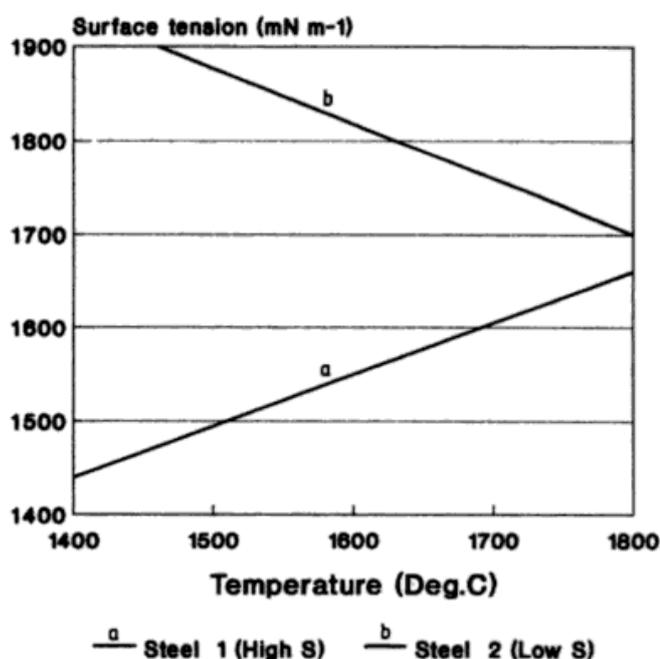


圖 2-21 含硫量對表面張力-溫度變化之影響[19]

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鐸池中固溶 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 之添加會改變鐸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. 鐸接保護氣體之效應

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：於鐸接前在母材之表面散佈含氧化物及氟化物之鐸藥，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% H₂ 以提高鐸接熱量也可以增加穿深。

於 Lu Shanping、Fujii Hidetoshi、Nogi Kiyoshi 等人的研究[12-16]中指出，於鐸接不銹鋼的 TIG 鐸接製程中，使用 O₂ 或 CO₂ 添加於保護氣體中，在少量添加時皆會深寬比得到改變，且添加氧氣的實驗結果中，亦發現電極有損耗現象[13,16]如圖 2-22 及 2-23 所示，其金相照片如 2-24 所示，且於其添加量約達 0.6% 其鐸後熔融金屬中之氧化物將維持一定值約為 200ppm (如圖 2-25 所示)，於鐸接過程中熔池氧化物數量將會影響熔池之表面張力(如圖 2-26 所示)，及氧化物對深寬比之影響(如圖 2-27 所示)。

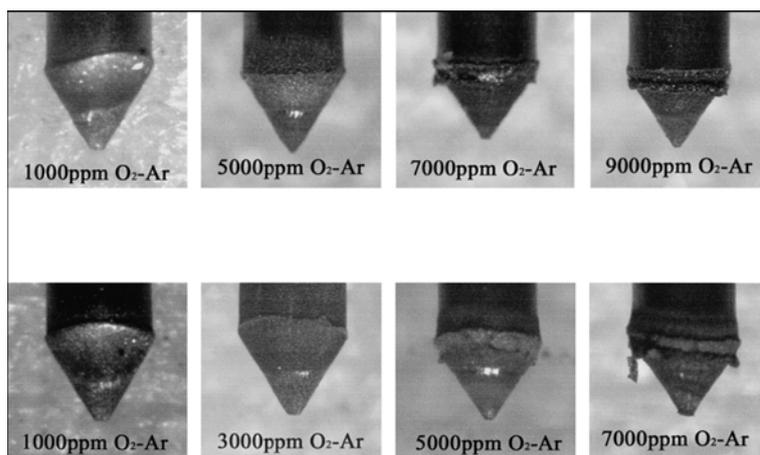


圖 2-22 添加氧氣於保護氣體中鎢電極損耗情形[13]

| Shielding gas | Normal single torch |
|------------------------|--|
| He-0.2%CO ₂ |  |
| He-0.5%CO ₂ |  |

圖 2-23 添加 He-CO₂ 保護氣體對鎢電極損耗情形[16]

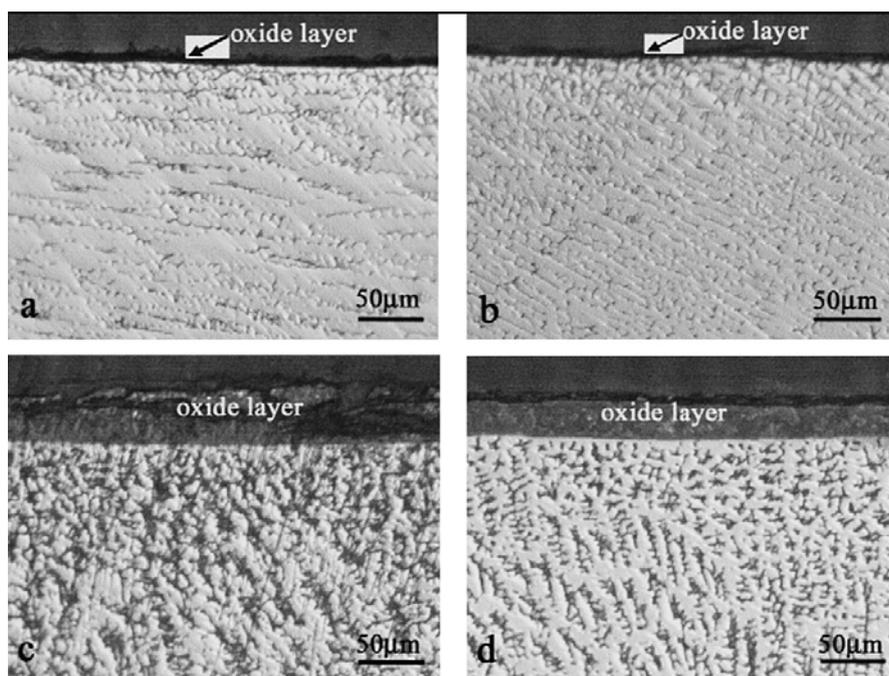


圖 2-24 添加氧氣於保護氣體中金相照片(氣體流量 20L/min)[13]

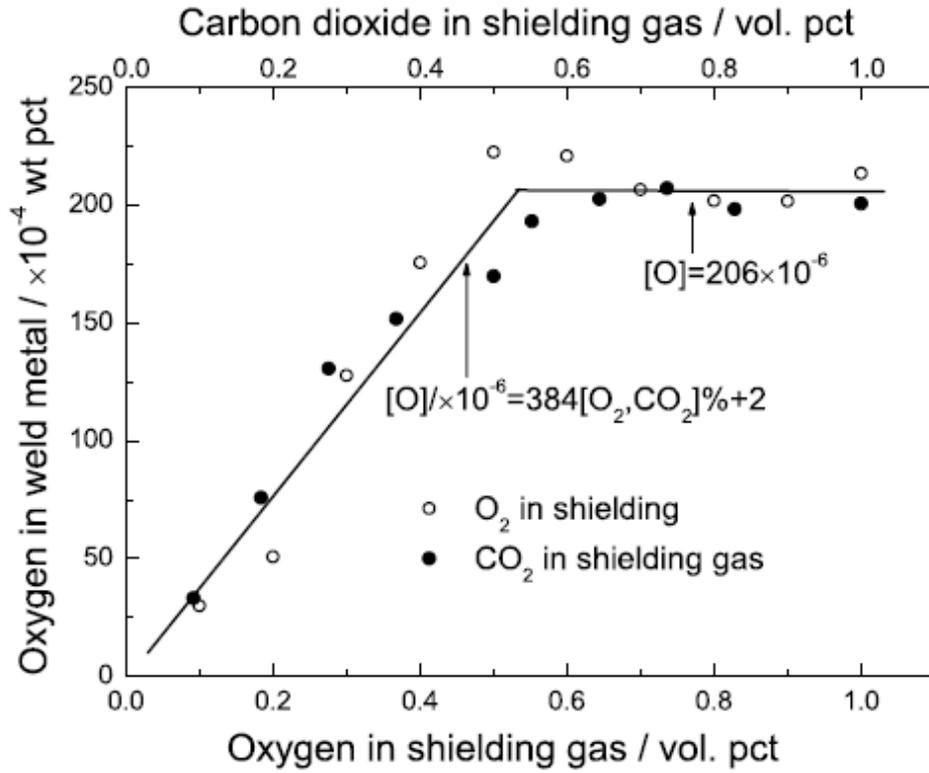


圖 2-25 添加 O_2 及 CO_2 於保護氣體對銲道金屬中氧化物之影響[14]

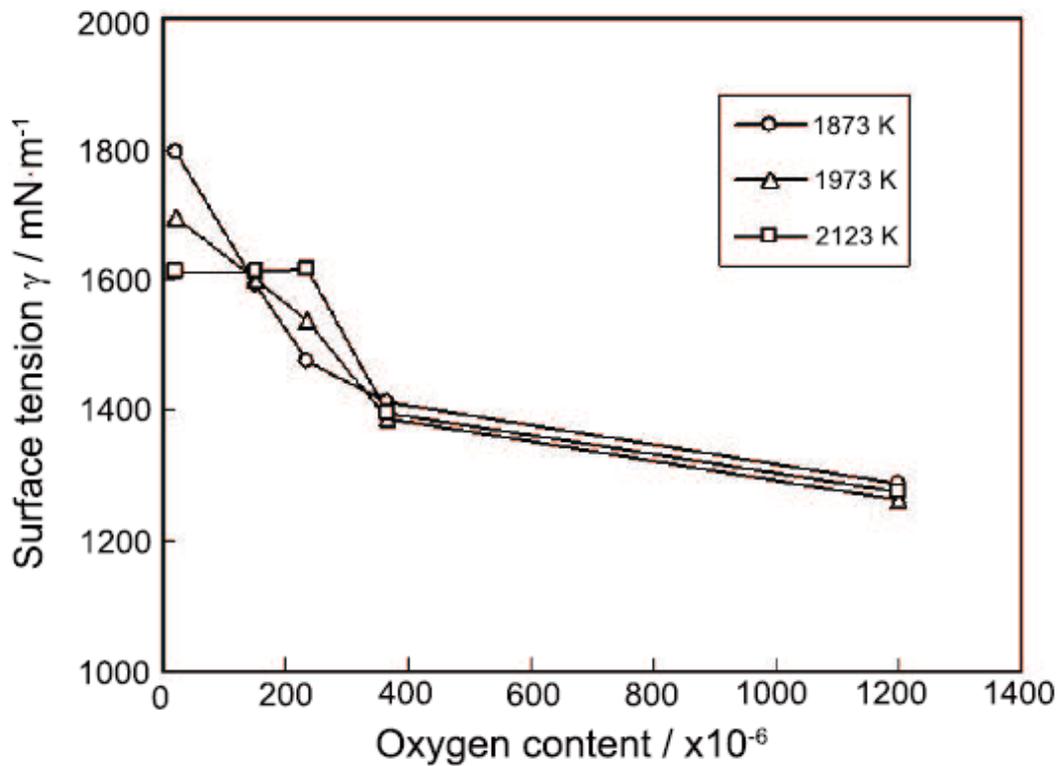


圖 2-26 Fe-O 系統中氧含量及溫度對表面張力之影響[14]

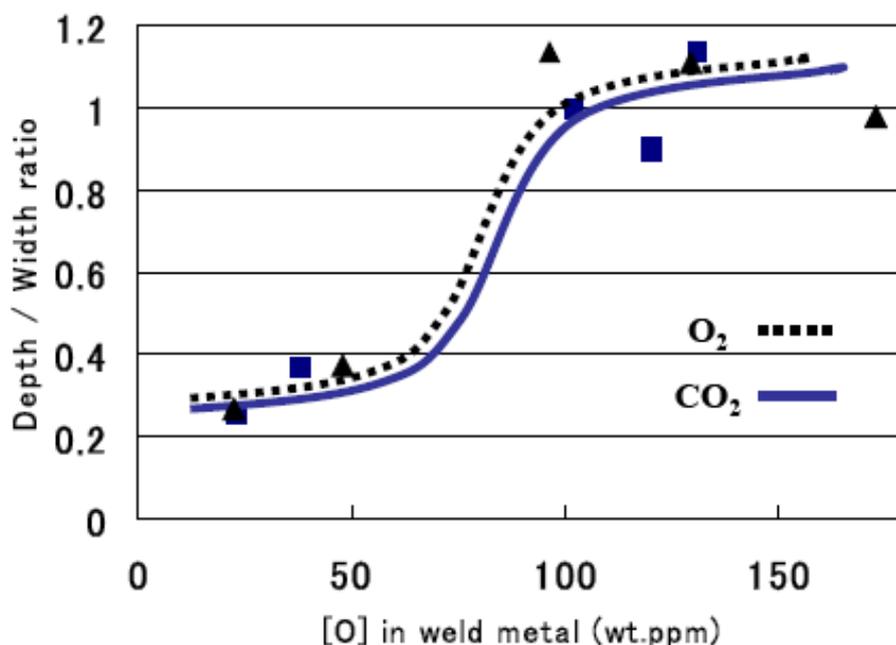


圖 2-27 氧化物對深寬比之影響[16]

2.7 銲接缺陷與防範對策

2.7.1 銲道缺陷之種類[38、39]

根據國際銲接研究所(Internation Welding Institute, I.W.I)之分類，銲接缺陷(Weld defect)可分為以下幾種系列：

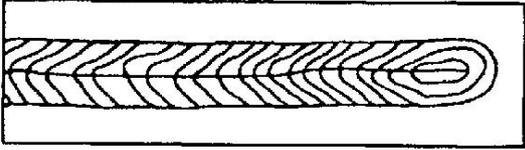
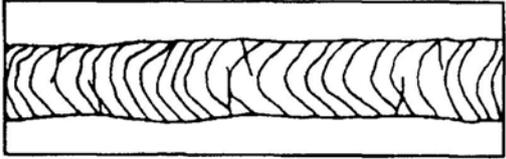
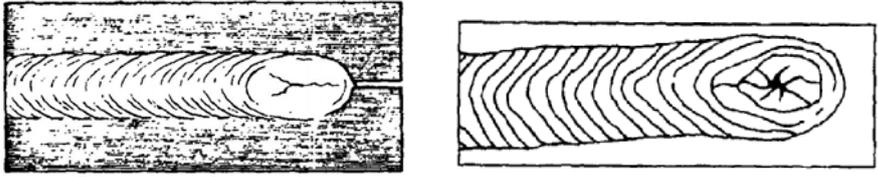
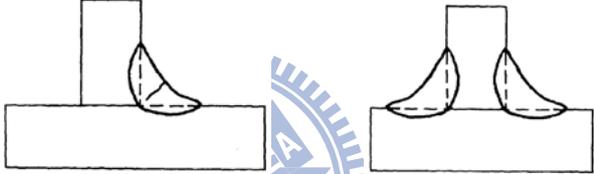
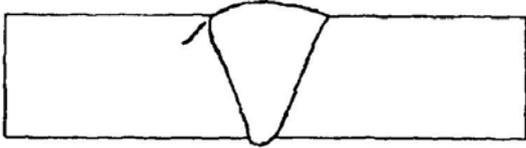
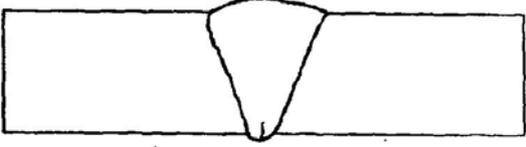
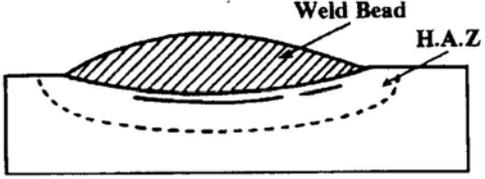
1. 裂縫(cracks)－100 系列

當存在於銲道(Weld bead)或熱影響區(Heat-Affected Zone, H.A.Z)中的缺陷其所承受的局部應力大於母材之極限應力時，裂縫將由此缺陷處形成。故裂縫通常發生在銲道熔融區或熱影響區內有較高殘留應力或應力集中的部位。此外麻田散鐵組織的形成、氫脆或外加束縛度過高...等亦是造成裂縫發生的原因。表 2-13 是常見的銲道裂縫類型。

表 2-13(a) 常見之鐸道裂縫類型

| 類型 | 形成區域 | 形成原因 | 缺陷特色 |
|--------|-------------------|--|---|
| 縱向裂縫 | 鐸道或熱影響區(平行於鐸道縱軸) | <ol style="list-style-type: none"> 1.橫向收縮應力作用於鐸道或熱影響區 2.橫向束縛度過高 3.鐸道或熱影響區冷卻速率太快 | 通常發生在厚板鐸件 |
| 橫向裂縫 | 鐸道或H.A.Z(垂直於鐸道縱軸) | 縱向收縮應力作用於鐸道或熱影響區 | 橫向裂縫通常會由鐸道延伸至熱影響區再傳遞至母材常發生在低延展性或硬脆的鐸件 |
| 鐸疤裂縫 | 鐸道收尾處(熄弧端) | <ol style="list-style-type: none"> 1.鐸接電弧的熄弧處理不當 2.鐸道收尾處之鐸條熔填量不足 3.鐸道收尾處冷卻速率太快 | <ol style="list-style-type: none"> 1.若形成鐸疤裂縫則容易產生腐蝕現象 2.屬於熱裂 |
| 鐸喉裂縫 | 沿鐸道喉深處 | <ol style="list-style-type: none"> 1.鐸道喉深處之斷面積較小之凹面填角鐸 2.鐸道喉深處之橫向拘束應力過高 | <ol style="list-style-type: none"> 1.通常發生於填角鐸 2.屬於縱向熱裂 |
| 鐸趾裂縫 | 熱影響區 | <ol style="list-style-type: none"> 1.鐸冠過高或鐸道凸起過大 2.母材熱影響區硬脆或延展性差 3.鐸趾的拘束應力過高 4.鐸趾的應力集中 5.鐸趾之冷硬化 | <ol style="list-style-type: none"> 1.一般不會發生在鋁或鋁合金之鐸件 2.屬於冷裂 |
| 鐸根裂縫 | 鐸道或熱影響區 | <ol style="list-style-type: none"> 1.鐸根的收縮應力過高 2.鐸根的應力集中 3.鐸根的冷硬化 | 屬縱向熱裂 |
| 鐸道底部裂縫 | 緊鄰鐸道熔融線的熱影響區 | <ol style="list-style-type: none"> 1.麻田散鐵組織的形成 2.氫產生的脆化作用 | <ol style="list-style-type: none"> 1.通常發生在硬化能高的鐸件，如高碳鋼 2.具潛伏區 3.屬於冷裂 |

表 2-13(b) 常見之銲道裂縫示意圖

| 類型 | 缺陷示意圖 |
|--------|--|
| 縱向裂縫 |  <p>A cross-sectional diagram of a weld showing a crack that runs parallel to the weld's length. The crack is depicted as a jagged line following the longitudinal axis of the weld metal.</p> |
| 橫向裂縫 |  <p>A cross-sectional diagram of a weld showing a crack that runs perpendicular to the weld's length. The crack is depicted as a jagged line crossing the weld metal across its width.</p> |
| 銲疤裂縫 |  <p>Two diagrams illustrating weld spatter cracks. The left diagram shows a weld bead with a circular spatter on its surface, with a crack radiating from the center of the spatter. The right diagram shows a weld bead with a star-shaped crack pattern originating from a point on the surface.</p> |
| 銲喉裂縫 |  <p>Two diagrams showing weld throat cracks. The left diagram shows a single weld bead on a base metal with a crack at the throat. The right diagram shows two weld beads on a base metal with cracks at the throat between the two beads.</p> |
| 銲趾裂縫 |  <p>A cross-sectional diagram of a weld showing a crack at the toe, which is the junction between the weld metal and the base metal. The crack is shown as a sharp, V-shaped notch.</p> |
| 銲根裂縫 |  <p>A cross-sectional diagram of a weld showing a crack at the root, which is the bottom of the weld joint. The crack is shown as a sharp, V-shaped notch at the base of the weld.</p> |
| 銲道底部裂縫 |  <p>A cross-sectional diagram of a weld showing a crack at the bottom of the weld metal. The weld bead is labeled "Weld Bead" and the heat-affected zone is labeled "H.A.Z". The crack is shown as a jagged line along the bottom surface of the weld metal.</p> |

若以發生溫度來區分，則銲道裂縫可區分為二大類型，分別為：熱裂縫(315°C 以上)與冷裂縫(315°C 以下)。

熱裂縫產生於銲接金屬從高溫冷卻凝固之高溫狀態下，其破裂的特徵為沿晶性或稱晶粒間性 (intergranular) 破裂(如圖 2-28 所示)，發生區域為母材熱影響區 (base metal HAZ)、銲道熔融區 (weld fusion zone) 及銲接金屬熱影響區 (weld metal HAZ)。其形成之主要因素如下：

- a. 銲接殘留應力的產生
- b. 銲接熱輸入量過高
- c. 外加束縛度過高
- d. 含磷、硫及矽等較高的偏析物
- e. 銲道或熱影響區中的肥粒相組織含量減少
- f. 晶界面的雜質濃度過高
- g. 銲接熱循環次數過多

冷裂縫主要發生在母材熱影響區及銲道熔融區內，其破裂的特徵為穿晶性 (transgranular or intragranular) 破裂(如圖 2-29 所示)，發生之原因如下

- a. 銲接殘留應力產生
- b. 麻田散鐵組織的形成
- c. 氫的脆化作用

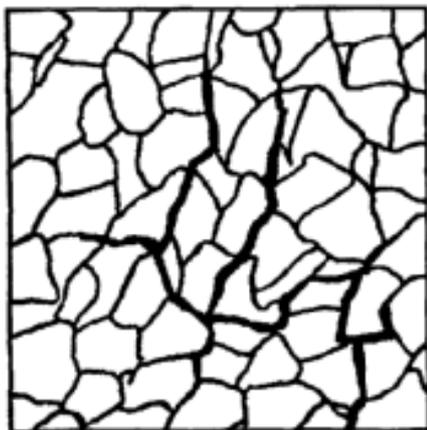


圖 2-28 沿晶式破裂示意圖

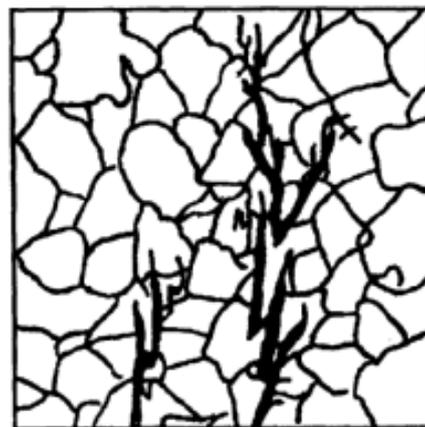


圖 2-29 穿晶式破裂示意圖

2. 氣孔(Porosity)－200 系列

銲接金屬於熔融期間，由於氣體的被凝固的金屬包覆或有機物的分解，使得銲件凝固時再表面或內部形成一氣包（Gas pocket），此空洞即稱為氣孔。若是由於氫氣存在而造成的氣孔，將會使銲道或熱影響區產生裂縫。一般而言，氣孔的形狀大多呈圓形，且除非氣孔的形狀很大，否則並不會像裂縫一樣造成應力集中。依氣孔散佈的位置，可將 200 系列的銲接缺陷整理如表 2-14。

表 2-14 常見的氣孔缺陷類型

| 類型 | 形成區域 | 形成原因 | 缺陷特色 |
|---------|-----------------------|--|--|
| 均勻散佈形氣孔 | 銲道 | 1.母材或銲材表面不潔 2.銲接參數控制不當 3.保護氣體使用不當 4.銲道的冷卻速率太快 | 一般呈圓球狀 |
| 凝聚形氣孔 | 銲道 | 1.母材或銲材表面不潔 2.銲接參數控制不當 3.保護氣體使用不當 4.銲道的冷卻速率太快 5.銲接電弧的起弧或熄弧處理不當 | 一般呈圓球狀 |
| 線狀氣孔 | 1.銲道根部 2.銲層與銲層交接處 | 1.母材或銲材表面不潔 2.銲接參數控制不當 3.保護氣體使用不當 4.銲道的冷卻速率太快 | 一般呈圓球狀 |
| 管狀氣孔 | 銲道 (從銲接根部朝其銲道表面延伸) | 1.母材或銲材表面不潔 2.銲接參數控制不當 3.保護氣體使用不當 4.銲道的冷卻速率太快 | 1.一般呈圓球狀 2.又稱蟲孔狀氣孔 3.氣孔分佈與枝狀晶同方向，並散佈其中 |
| 氣陷、麻點 | 銲道(銲積物表面) | 1.母材或銲材表面不潔 2.銲接參數控制不當 3.保護氣體使用不當 4.銲道的冷卻速率太快 | 一般呈圓球狀 |

3. 夾渣 (Inclusion)－300 系列

在銲接過程中，非金屬或金屬夾雜物存積於銲道中所形成的缺陷，即稱為夾渣，如圖所示。夾渣物可概分為非金屬與金屬二大類，其發生原因及缺陷特性整理如表 2-15。

表 2-15 常見的夾渣缺陷

| 類型 | 形成區域 | 形成原因 | 缺陷特色 |
|-----------|---------|--|--|
| 非金屬夾渣物 | 鐸道或熱影響區 | 1.在多層鐸接時，底層鐸道表面的鐸渣未清除或殘留 2.鐸條外層的包覆層掉落 3.母材表面的氧化物或雜質未清除 4.鐸接技術不良 5.鐸接方法不當 | 1.非金屬夾渣物的形狀較不規則，方便與氣孔區分 2.非金屬夾渣物的形成與不完全熔融有密切之關聯 |
| 金屬夾渣物(夾鎢) | 鐸道或熱影響區 | 1.鎢棒產生過熱現象 2.鎢棒研磨方式不當 3.鎢棒與鐸池或鐸條接觸 4.惰性氣體保護不當 | 1.常發生於 TIG 2.可利用放射線檢查[5] |

4. 不完全熔融(Incomplete fusion)與不完全穿透(Incomplete penetration)—400 系列

不完全熔融與不完全穿透通常發生在鐸道內部，通常為操作技術不精與鐸接參數控制不當，使得產生熔化熱力不夠造成缺陷，可利用超音波或 X-ray 檢測方式來檢驗，如表 2-16 所示。

表 2-16 不完全熔融與不良接點滲透

| 類型 | 形成區域 | 形成原因 | 缺陷特色 |
|-------|------|--|---|
| 不完全熔融 | 鐸道 | 1.鐸接熱輸入量太低 2.鐸接技術不良 3.鐸條選擇不當 4.母材表面的氧化物或雜質未除淨 | 1.lack of fusion 2.熔合不良會造成應力集中，導致鐸件強度降低或破斷 |
| 不完全穿透 | 鐸道根部 | 1.鐸接熱輸入量太低 2.鐸接技術不良 3.鐸條選擇不當 4.母材表面的氧化物或雜質未除淨 | 1.lack of penetration 2.滲透不足也會造成應力集中，導致鐸件強度降低或破斷 |

5. 不完全外形(imperfect shape)—500 系列

不完全外形係指鐸道外觀形狀有鐸蝕(undercut)、堆塔(overlap)、凹下或凸起...等現象，此類缺陷通常以肉眼即可觀察，如表 2-17 所示。

表 2-17 不完全外形缺陷

| 類型 | 形成區域 | 形成原因 | 缺陷特色 |
|--------|------------------|--|---|
| 銲蝕 | 母材 (應力集中區) | 1. 銲接電流太高 2. 不當的銲接角度及銲條 3. 銲接速度太快 4. 銲接技術不良 | 銲蝕會造成應力集中的現象，導致銲件之疲勞強度降低 |
| 銲道凹下 | 銲道 | 1. 銲接速度太快 2. 銲接技術不良 | 熔填金屬不足，導致銲道強度低 |
| 堆塔(搭疊) | 銲道 (銲道與母材交接處) | 1. 銲接電流太低 2. 不當的銲接角度及銲條 3. 銲接速度太慢 4. 銲接技術不良 | 1. 有應力集中的現象，致銲件之疲勞強度降低 2. 堆塔本身為線性的不連續，而其形成有可能會覆蓋住母材的裂縫缺陷，故屬於重要的銲接不連續現象 |
| 銲道凸起 | 銲道 | 1. 銲接速度太慢 2. 銲接技術不良 3. 母材表面的氧化物或雜質未除淨 | 銲道若凸起過高，易因疲勞現象而導致裂縫的生成 |

6. 其他缺陷(miscellaneous defect)—600 系列

凡不屬於前五項之銲接缺陷，均歸納於此項，最常見的不良現象有弧擊及銲物二種；其發生原因及特性整理如表 2-18。

表 2-18 常見之其他銲接缺陷

| 類型 | 形成區域 | 形成原因 | 缺陷特色 |
|----|-------|--|---|
| 弧擊 | 母材 | 1. 電極接觸到母材表面 2. 在母材表面起弧 | 若母材容易產生麻田散鐵變態(如高碳鋼)，弧擊處附近將形成硬脆之麻田散鐵組織，進而產生裂縫 |
| 銲物 | 銲道或母材 | 1. 銲接電流太高 2. 銲接電弧太長 3. 銲條太潮濕 4. 偏弧(arc blow)現象的產生 | 1. 銲件上之銲物附著處容易造成應力集中 2. 銲條若偏心過大，銲濺物將隨之增加 3. 銲物的存在會影響非破壞性檢驗的判斷 |

除上述弧擊及銲物外，還有母材金屬的缺陷、夾層（lamination）與分層（delamination）層狀撕裂（lamellar tearing）概述如下。

母材金屬的缺陷

並非所有的銲接不連續（weld discontinuities）都是由不當的銲接方法造成，許多歸咎於母材規格，包括化學成分，清潔度、夾層（lamination）或線狀物（stringers）、機械性質和尺寸。

夾層（lamination）與分層（delamination）

通常為母材不連續的延伸，出現在滾壓製品之中央區域，鑄錠（ingot）、收縮孔（shrinkage cavity），經過滾壓軋平後由於其壓力不足讓以銲合，將形成夾層。而夾層經應力作用下分隔開來，產生分層。

層狀撕裂（lamellar tearing）

典型的原因是由於銲接引起的熱收縮所造成，撕裂（tearing）約略平行於銲接熔填金屬的下表面或靠近熱影響區表面，撕裂常造成一層平面到另一層平面的破壞，期間的階梯幾乎垂直於滾壓面。

2.7.2 銲接缺陷之防制方法[39]

1. 裂縫（cracks）缺陷

裂縫缺陷是所有銲接缺陷最常見也是最嚴重的問題。裂縫的存在會導致應力集中的現象發生，進而使銲件的強度降低或脆裂、破斷的問題發生，由表 2-13 可以發現，導致裂縫發生原因有熱內應力、外加應力（束縛度）、材質（強度）、銲接工作設計...等幾項；因此若欲防範裂縫缺陷的產生可以從以下數點著手：

(1). 構造與形狀

- a. 盡量避免對銲件施加過多之外應力
- b. 設計適當之接頭，以降低熔填金屬的輸入。
- c. 銲道設計使應力在銲件中心兩旁均等分佈。
- d. 多道次銲接時根部容易產生裂縫，故第一道可先用強度較大、韌性高之低氫系銲條，如不銹鋼或高張力鋼銲底層。
- e. 厚板裏側剷除穿透之銲道，再補銲一道。

(2). 母材之選擇

- a. 依據銲件之用途，選擇易於施工之母材。
- b. 對不易銲接之工件施予預熱或後熱處理。
- c. 在沃斯田鐵型不銹鋼的銲件中，若含有適當的肥粒相，則將可降低熱裂的產生。

(3). 銲接工作設計

- a. 銲後施行槌擊或珠擊，減少應力集中。
- b. 採用跳銲法施銲，以控制入熱量。
- c. 銲疤可用首尾輔導板法施銲。
- d. 避免銲蝕。
- e. 選用適當的銲條。
- f. 選擇適當的操作條件，正確處理銲接電弧之熄弧。
- g. 降低銲道收尾處之冷卻速率

2. 氣孔缺陷

由表 2-14 氣孔缺陷的形成原因中可以發現，絕大多數的問題點來自以下的數項原因：分別是母材或銲線的不潔、使用保護氣體不當、銲接參數的設定不良及銲接操作不當等原因。故欲消除氣孔缺陷可從下列數點著手：

- a. 確實地清除母材及銲線表面的水氣、氧化物及污垢物等
- b. 選用適當的保護氣體。
- c. 調整銲接參數如銲接電流、氣體流量、銲速...等以減少氣孔的發生。
- d. 正確的進行銲接操作(起弧、熄弧)。
- e. 適當地降低銲道的冷卻速率

3. 夾渣

此類缺陷主要發生在銲道及熱影響區內銲渣的殘留，銲渣可區分為金屬與非金屬二大類；其發生的原因隨夾渣物的種類不同而異，故銲接缺陷的防範對策亦不盡相同，茲簡述下：

(1). 非金屬夾渣物：

- a. 多道銲接時要將底層銲道表面的銲渣確實清除乾淨。
- b. 選用銲劑黏固性較佳之銲條。
- c. 徹底清潔母材表面的氧化物或雜質。
- d. 改良銲接技術。
- e. 正確地進行銲接工作。

(2). 金屬夾渣物

- a. 選用適當之鎢棒，以避免鎢棒產生過熱現象。
- b. 正確地研磨鎢棒，依母材之性質研磨適當的形式。
- c. 避免鎢棒與銲池或銲條接觸。
- d. 選擇適當的保護氣體種類。
- e. 適當地增加保護氣體流量。

4. 不完全熔融 (Incomplete fusion) 及不完全穿透 (Incomplete penetration)

不完全熔融與不完全穿透的發生與銲接過程中的熱輸入量及銲接工作設計中的銲條選擇、參數設定及工件清潔有關，其防範對策如下：

- a. 提高銲接電流或降低銲接速度，以增加銲接熱輸入量。
- b. 依母材性質及形狀設計適當的銲接接頭。
- c. 控制適當的銲接參數值。
- d. 正確地選用銲條種類。
- e. 母材/銲線的清潔工作須徹底。
- f. 改善銲接技術。

5. 不完全外形

不完全外形的發生原因主要為銲接參數設定不當、人員操作不當及清潔工作不徹底所致，其防範對策隨缺陷種類與形成因素不同而分為二大類；一為銲蝕與銲道凹下缺陷，防範對策為：

- a. 降低銲接電流。
- b. 降低銲接速度。
- c. 選擇適當的銲接角度及銲條。
- d. 徹底進行母材的清潔工作。
- e. 改善銲接技術

另一類為堆搭(搭疊)與銲道凸起缺陷，其防範對策除上述之c、d、e項外，在銲接條件的參數設定則恰恰與前者相反。

6. 其他

弧擊的發生一般多屬人員操作不當所引起，其防範措施亦非常簡單，只需作業人員注意勿使電極與母材接觸或在母材上起弧即可完全避免此類缺陷的產生。若要防止銲濺物的產生，可從以下幾點著手：

- a. 降低銲接電流
- b. 縮短銲接電弧
- c. 保持銲條的乾燥度或於使用前烘乾
- d. 避免偏弧現象的產生。

2.7.3 銲件變形之形式

銲接變形的形式，如圖 2-30 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。

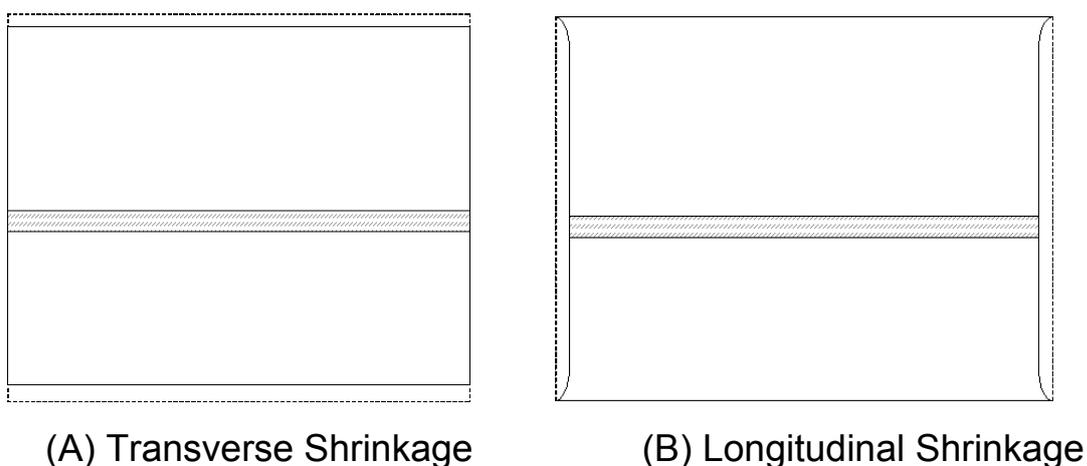


圖 2-30 銲接變形之基本形式[40]

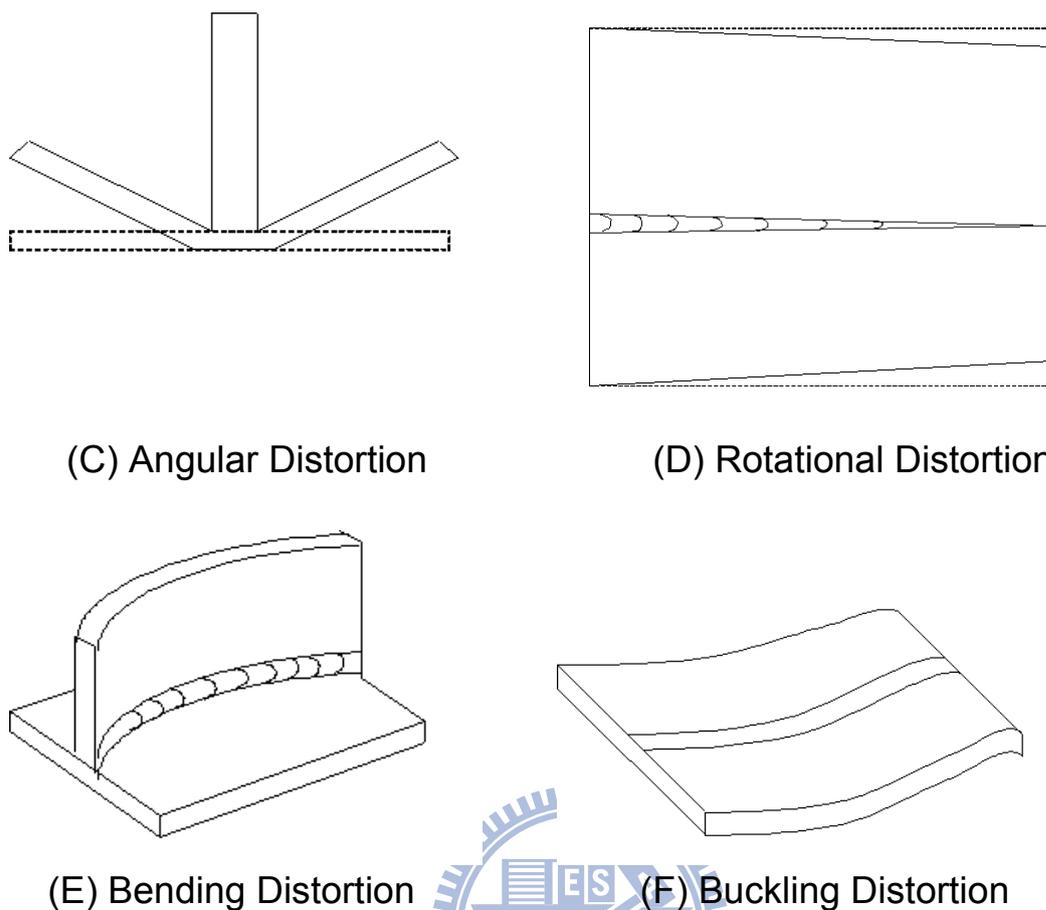
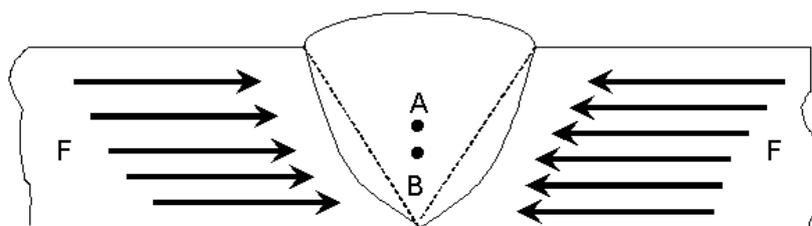


圖 2-30 銲接變形之基本形式[40](續)

值得注意的是，上述變形之形式在銲接結構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。

2.7.4 銲接變形之形成

在銲接過程中，由於銲接熱源於母材上進行局部且不均勻的急速加熱與冷卻，使得銲道附近的填料金屬與母材產生熱應變，由熱應變所引發的不均勻熱應力即是造成銲接變形的要因。如圖 2-31 所示為對接銲 (butt-welded) 角變形的形成，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 (如圖中 A 點所示) 的合力，當此合力作用點與母材形心 (如圖中 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 2-31 對接銲角變形之形成示意圖

2.8 肥粒相對銲道金屬之影響

沃斯鐵型不銹鋼在常溫下之微觀組織，在理論上應為完全沃斯田鐵相組織，然而實際上大部分的沃斯田鐵型不銹鋼在銲接後皆會殘留或多或少的肥粒相組織，因此沃斯田鐵中的肥粒相組織對影響銲道的機械性質有相當程度的影響關係，故將肥粒相對於銲道的影響概述如下：

1. 減少熱裂縫的產生

熱裂(Hot cracking)是一種發生在金屬材料在銲接進行中所形成的高溫裂縫，其中熱裂可能發生區域為銲道或熱影響區。此熱裂現象的形成一般都出現在金屬材料，特別是不銹鋼、鋁合金、鎳基合金，縱使是常用之碳鋼及低合金鋼也常產生。

銲接熱裂縫一般可分為凝固裂縫與液化裂縫兩種基本形式，其中凝固裂縫主要出現於銲接金屬中，而液化裂縫則較常出現於熱影響區中，如圖 2-32 所示

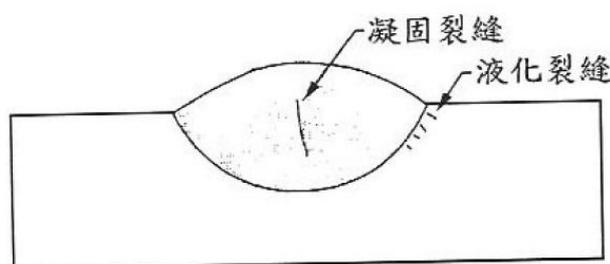


圖 2-32 銲接熱裂縫之裂縫形式及發生位置

凝固裂縫與液化裂縫的形成，主要都是受到銲接時銲接高溫所影響，造成晶界面的低熔點偏析物尚未完全凝固或在晶界產生液化薄膜，若再加上該區外圍產生足夠大之熱應力時，就會導致熱裂縫的形成。在熔填金屬凝固時，柱狀晶粒(Columnar grain)從熔融邊界(Fusion boundary)向著熔池(Weld pool)的中心區域生長，此時許多的合金元素和

不純物被排出晶粒前端，而最終集中在尚未凝固的液體中，此情況會使得液體凝固溫度降低且有液態薄膜，不但使晶粒間面與面的接觸突然減少，且導致熔填金屬的強度及延性降低。由於冷卻時會產生收縮應力，而剩餘的液體金屬不足以填補收縮形成的空洞，結果造成沿晶式的裂縫，其中凝固裂縫通常發生於銲接金屬(即銲接金屬熱裂)，液化裂縫則主要產生於熱影響區(即熱影響區熱裂)，肥粒相在減少熱裂方面的影響有下列幾點：

- (1). 對於 S、P、Si 等有害雜質，肥粒相具有較高的溶解度，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。
 - (2). 肥粒相的熱膨脹係數比沃斯田小，因此在冷卻過程中，以主肥粒相凝固的銲道將產生較小的熱收縮應力，降低銲件的變形量及在凝固的最後階段產生裂縫的機會。
 - (3). 肥粒相在沃斯田鐵組織中有細化晶粒效果，增加晶界面積，因此析出於晶界薄膜較薄，使裂縫不易產生。
 - (4). 肥粒相與沃斯田鐵相的相界面非常崎嶇不規則，不像以單相存在之晶界那般的平滑，因此在肥粒相-沃斯田相的相界上的裂縫將遭受阻擋，難以傳播。
2. 肥粒相的抗蝕性較沃斯田相差，即易產生孔蝕(Pitting)現象，但適當的肥粒相可減緩應力腐蝕裂縫(Stress corrosion cracking)的產生。
3. 肥粒相在高溫的環境中(500~800°C)，極易變態成 δ 相， δ 相是由 Fe 與 Cr 化合而成，因肥粒鐵於高溫下會產生碳化物($M_{23}C_6$)析出與 δ 相的轉換，其為一種硬、脆且沒有磁性之 BCT 結構，微細孔容易沿著 δ - γ 沃斯田鐵的介面成長，故會嚴重降低材料韌性，造成脆裂的現象。為避免銲接時產生熱裂縫現象。雖肥粒相的存在是必須的，但過多的肥粒相亦會降低孔蝕的抵抗，並產生 δ 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% [59]。

評估銲道的肥粒鐵含量可用材料合金元素分析法及導磁性量測法。材料合金分析法主要是利用雪弗圖(Schaeffler diagram)及杜龍圖(Delong diagram)進行分析，以計算銲件中鉻(Cr)/鎳(Ni)之當量比估算銲接後銲道之肥粒鐵含量，因此用於材料分析上會比雪弗圖來的準確，導磁性量測法是利用肥粒鐵具有導磁性，而沃斯田鐵不具導磁性之物理特性。藉由以儀器磁力感應方式量測銲道中肥粒鐵含量多寡，常用之儀器有 Ferrite Scope 及 Magne Gage。

第三章 實驗設備及方法

3.1 實驗流程

本實驗流程如圖 3-1 所示，先將 AISI 304 不銹鋼及 308 不銹鋼鐸線裁切成所需之尺寸，助鐸劑則採用自行調配的混合型活性助鐸劑分別塗敷於試片母材及鐸線表面，並配合鐸接參數進行 Bead-On-Plate (BOP) 鐸接。

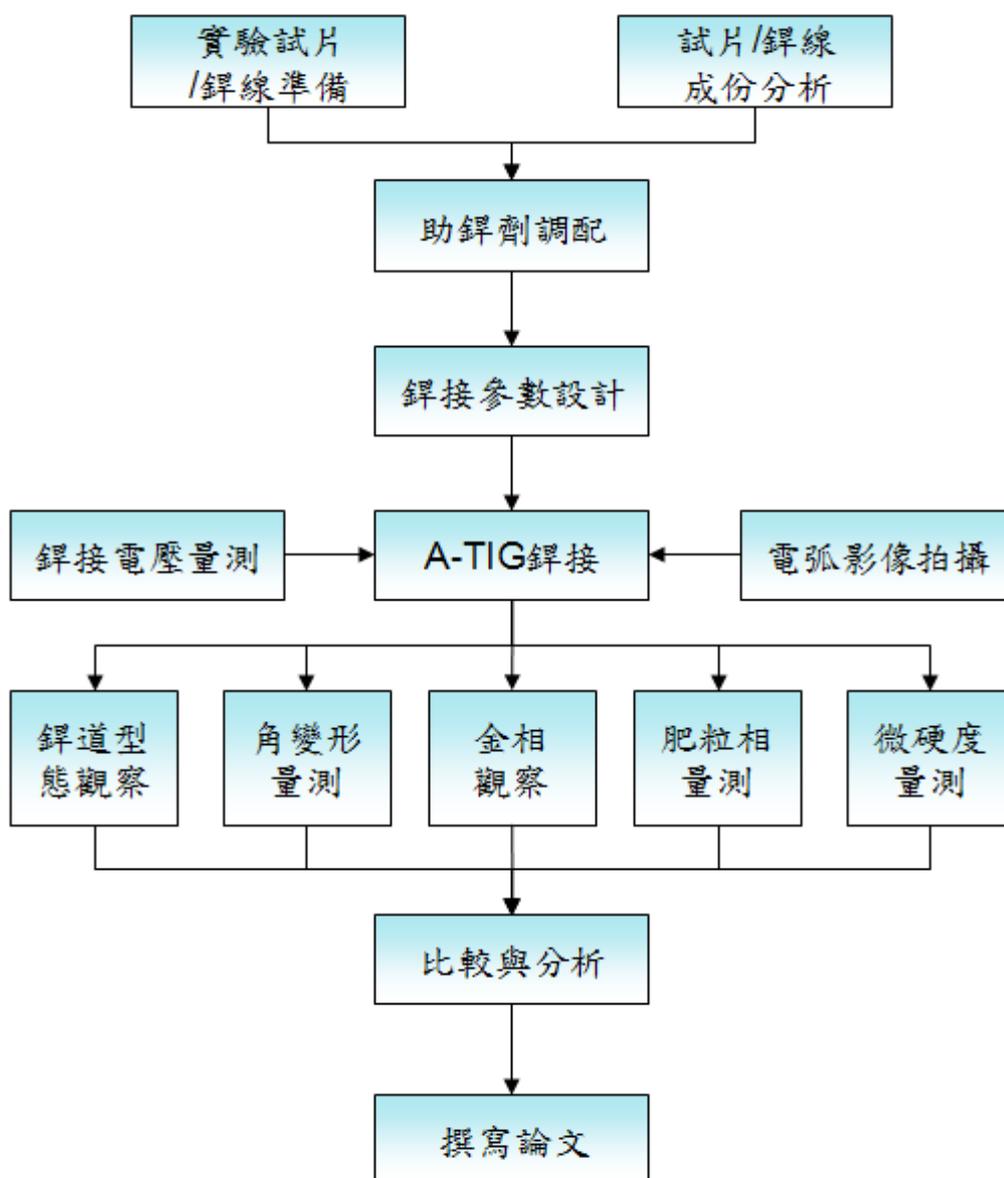


圖 3-1 實驗流程圖

3.2 GTAW 之設備

本實驗係採用惰氣鎢極電弧銲接機(HOBART TIGWAVE™ 350 AC / DC)型氬銲機與可數位控制走速的銲接檯車，如圖 3-2 及 3-3 所示。銲接方法採用氬-二氧化碳混合氣體作為保護氣體來進行 Bead- On-Plate 實驗，銲接電流值為 125A，銲接走速為 75mm/min。鎢電極材料為 EWTh-2(直徑為 3.2mm)，銲炬噴嘴選用 7 號陶瓷罩杯，保護氣體為不同比例的氬氣-二氧化碳混合氣體，並依比例適時調整兩種氣體流量，總流量則設定為 20 Liter/min。



(a)氣體混合器



(b)Plus 產生器



(c)電壓/電流控制器

圖 3-2 HOBART 惰氣鎢極電弧銲接機與其配件



(a) 鐳槍調整器及走行機

(b) 鐳槍

(c) 控制器



圖 3-3 HOBART 惰氣鎢極電弧鐳接機—鐳接檯與其配件

3.3 銲接試驗

一、實驗材料準備

1. 母材(Base metal)：本研究所採用的實驗材料為 AISI 304 沃斯田鐵型不銹鋼，試片尺寸為 100mm × 40mm × 5mm，其金屬成份如表 3-1 所示。

表 3-1 AISI 304 不銹鋼金屬成分表

| 成份 材料 | 金屬成分 (%) | | | | | | | |
|----------|----------|------|-----|-------|------|------|-------|------|
| | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Fe |
| AISI 304 | 0.08 | 1.00 | 0.9 | 0.045 | 0.03 | 8.15 | 18.35 | Bal. |

2. 填料金屬(Filler metal)：本研究中所使用之銲線為不銹鋼 308 銲線，尺寸為 ϕ 1.6mm × 250mm，其金屬成份如表 3-2 所示。

表 3-2 E 308 不銹鋼金屬成分表

| 成份 材料 | 金屬成分 (%) | | | | | | | | |
|----------|----------|-----|------|------|------|-----|------|------|------|
| | C | Si | Mn | P | S | Ni | Mo | Cr | Fe |
| E308 | 0.08 | 0.6 | 0.75 | 0.04 | 0.03 | 9.8 | 0.75 | 18.5 | Bal. |

3. 試片的處理

在進行銲接工作前，為避免試片及銲線表面髒污影響實驗結果，故需進行清潔處理，主要步驟如下：

- (1)表面處理：將表面氧化物及油汙利用#400 砂紙予以磨除。
- (2)清潔：將適量丙酮加於試片及銲線表面，藉以去除油汙，並以擦拭布將表面擦拭乾淨。

二、鎢電極之準備

鎢電極材料選用 EWTH-2(直徑為 $\phi 3.2\text{mm}$)，鎢電極角度為 60° ，鎢電極伸出鉸炬噴嘴距離為 3mm ，電極距試片距離為 3mm 。為確保實驗結果的準確性，鎢電極於每次實驗之前需使用研磨器(如圖 3-4 所示)研磨至所需之電極角度；此外，裝於鉸槍上時亦須調整相關距離至所設定之條件，以確保每次實驗參數的一致性。



圖 3-4 鎢電極研磨器

三、助鉸劑之準備與配製方法

助鉸劑採用日本試藥工業株式會社所生產之產品，助鉸劑的成分為 $25\%\text{Cr}_2\text{O}_3 - 25\%\text{TiO}_2 - 30\%\text{SiO}_2 - 10\%\text{MoS}_2 - 10\%\text{MoO}_3$ [62] 氧化物粉末，粒度為 #400 號。其助鉸劑及調配方法如下(如圖 3-5 所示)：

1. 比例調配：採重量百分比方式進行調配，以電子秤秤出所需之重量比，再予以混合。
2. 研磨混合：將所調配完成之粉末倒入鉢中，並以攪拌棒予以研磨混合，需研磨至細微之粉末狀，再倒至燒杯中，並加入適量之丙酮攪拌均勻使之成泥漿狀。
3. 助鉸劑塗敷：利用筆刷沾取適量之助鉸劑，再塗敷於母材及鉸線上，塗敷原則須遮蔽金屬光澤為最佳，塗敷完成後，待丙酮揮發後鉸藥即可覆蓋於試片上，然後可進行鉸接實驗，若需補塗助鉸劑亦須待丙酮揮發後再予補塗。

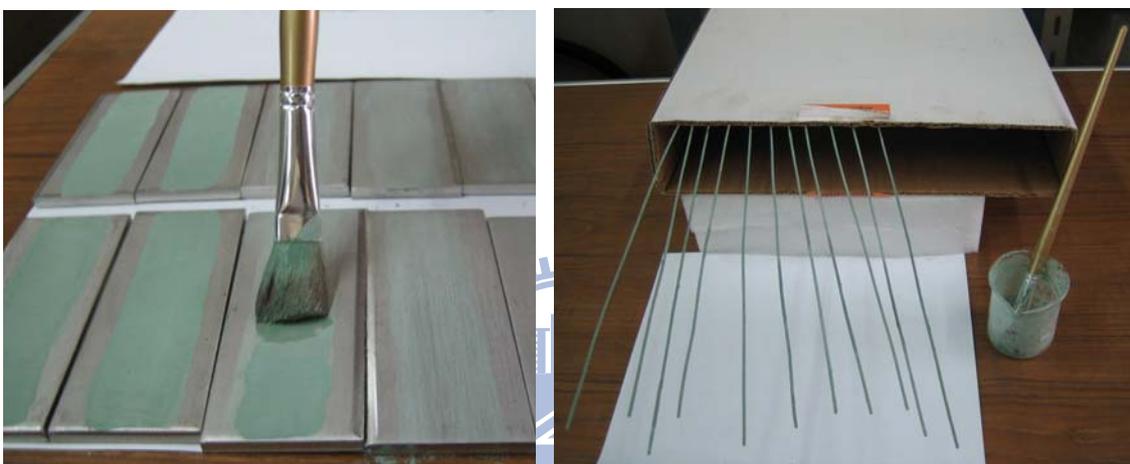
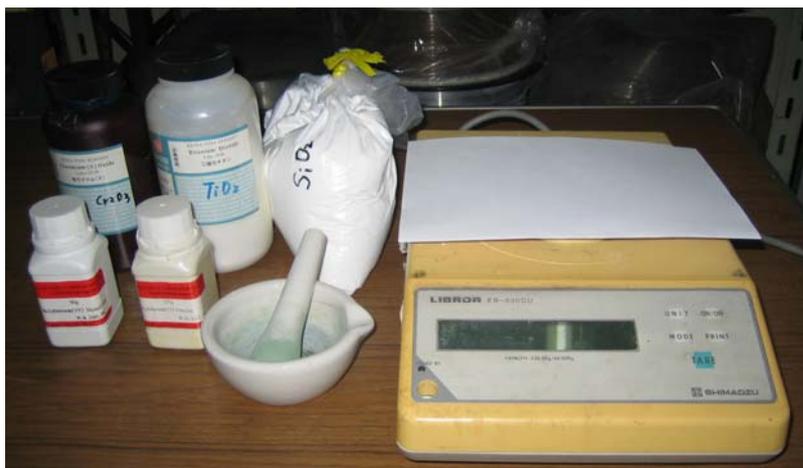


圖 3-5 助銲劑調配與塗敷

四、銲接參數設計

在銲接條件設定為銲接電流為 125A，銲接走速為 75mm/min，其氬氣與二氧化碳不同比例添加量，因測試 30%~100%CO₂ 添加量皆發生銲穿及銲裂之情形，故添加量設定為 0%~10%來進行實驗，氣體添加之參數如表 3-3 所示。

表 3-3 銲接氣體參數流量比例表

| CO ₂ 比例 | Ar | CO ₂ |
|--------------------|----------------|-----------------|
| 0% | 20 liter/min | 0 liter/min |
| 0.5% | 19.9 liter/min | 0.1 liter/min |
| 1% | 19.8 liter/min | 0.2 liter/min |
| 2.5% | 19.5 liter/min | 0.5 liter/min |
| 5% | 19.0 liter/min | 1.0 liter/min |
| 7.5% | 18.5 liter/min | 1.5 liter/min |
| 10% | 18.0 liter/min | 2.0 liter/min |

3.4 電弧形狀及陽極斑點拍攝

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 A-TIG 銲接實驗時，架設 CCD 影像擷取系統於銲槍上(如圖 3-6 所示)，以同步的方式拍攝銲接電弧的影像並將數位訊號儲存在電腦，藉以分析 A-TIG 對電漿電弧收縮與熔池收縮之影響及作用機制



圖 3-6 CCD 鏡頭架設圖

3.5 電壓值拍攝

架設 Web-Cam 之鏡頭，於銲接實驗過程中，同步紀錄電壓值之變化，並將數位資料儲存於電腦上，以分析活性助銲劑的添加對銲接電壓所產生的影響。



圖 3-7 Web-Cam 鏡頭架設圖

3.6 銲道外觀拍攝

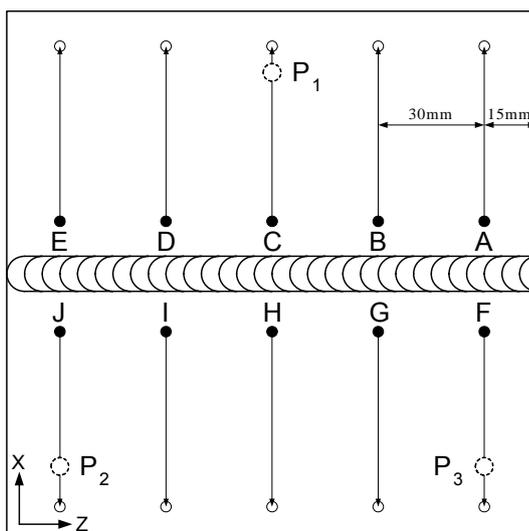
為瞭解各種助銲劑對試片銲後之表面品質狀況，本實驗利用數位相機來拍攝銲道表面之情況，並且將圖形放大分析其銲道外觀平整性與飛濺物之形態。

3.7 角變形量測

銲件變形的量測位置，如圖 3-8 所示。試片未實銲前，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)，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 Y，進而可利用公式($\theta = \tan^{-1} \frac{Y}{50}$)求得銲件角變形量(如圖 3.9 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後再相加，即可得到銲件平均角變形量。



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

圖 3-8 銲件變形量測示意圖

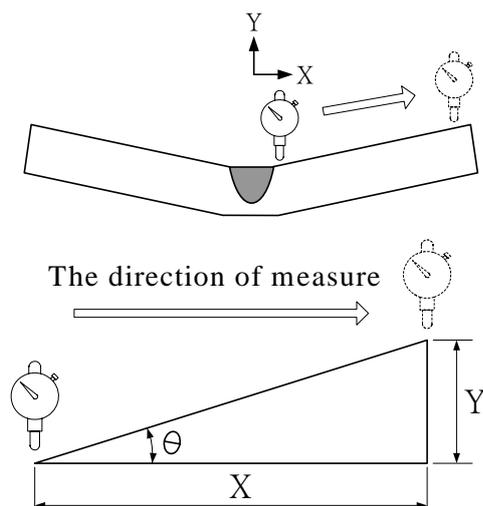


圖 3-9 銲件角變形量測原理

3.8 金相實驗

材料的微觀組織對機械性質影響甚鉅，所以金相實驗即對材料進行細部組織的觀察，最常用之方法即使用光學顯微鏡觀測。本研究主要針對於氫氣與二氧化碳以不同比例之氣體添加於傳統氫銲製程中，搭配活性助銲劑添加於母材或銲線表面時對金相顯微組織之影響，故需針對銲道進行微觀組織之觀察，其金相實驗步驟如下：

1. 取樣：將試片頭尾各約 15mm 切除，並選擇適合觀察的位置進行取樣，並以銼刀及砂紙去除毛邊。
2. 鑲埋：將試片放入熱鑲埋機內並添加電木粉，將鑲埋加熱時間設定為 9min，鑲埋壓力設定為 18KN，冷卻時間為 4min，待冷卻後取出。
3. 研磨：使用碳化矽砂紙及研磨機進行研磨，砂紙號數使用順序由 120、240、400、600、800、1200、1600、2000 號遞增。
4. 拋光：使用拋光機進行拋光，拋光劑為氧化鋁粉，需拋光至 $0.1\mu\text{m}$ ，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。
5. 浸蝕：採用 Marble's 腐蝕液(10g CuSO_4 +50ml HCl +50ml H_2O)將金相試片浸蝕，而腐蝕時間則約為 3~5 秒鐘，浸蝕後迅速用清水沖洗，並用吹風機吹乾；由於腐蝕液具強烈腐蝕性，操作時需配戴手套並小心操作。
6. 顯微組織觀察及拍照：利用光學顯微鏡(Olympus BX60M 型)進行微觀組織觀察及拍照。

3.9 銲道滲透深度與寬度量測

利用實體顯微鏡量測銲道的穿深(Depth)及寬度(Width)。本研究主要係以穿深/寬度比值(D/W ratio)做為熔深特性之評估指標，其銲道形狀之量測示意圖如圖 3-10 所示。

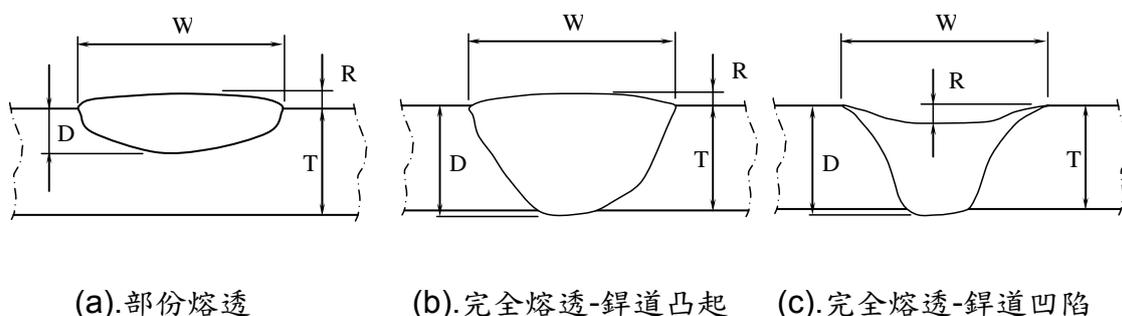


圖 3-10 銲道深寬比量測示意圖

3.10 肥粒相量測

為量測其試片銲道殘留肥粒相含量，量測設備採用 Ferrit Scope M10B-FE 型肥粒相測定儀(測頭直徑為 1.2mm、平均誤差量為 0.04 FN)，如圖 3-11 所示。其量測的基本原理，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 3-11 FerritScope M10B-FE 型肥粒相測定儀

3.11 微硬度量測

本研究測量鐳道硬度時，係採用 Matsuzawa MHT-1 微硬度測定機(如圖 3-12 所示)，試驗荷重為 200 公克，荷重加壓時間為 15 秒鐘，而量測位置則為距鐳件表面下 1mm 處起，且每點間隔為 0.25mm，如圖 3-13 所示，最後共量測十點並予以平均，即為鐳道微硬度值。



圖 3-12 Matsuzawa MHT-1 微硬度測定機

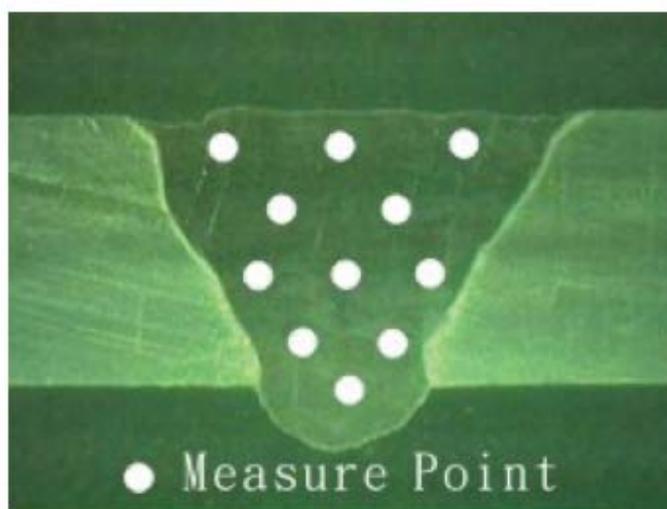


圖 3-13 鐳道微硬度量測位置圖

第四章 實驗結果與討論

4.1 CO₂氣體添加於A-TIG銲接製程對銲道外觀之影響

圖 4-1 為 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接製程對不銹鋼銲道外觀影響的實驗結果，其分析說明如下：

當添加混合型助銲劑其銲道表面相當平整且於表面可觀察出規則的堆疊(Overlap)現象，且於銲道兩側並無發現有飛濺物(Spatter)之情形。

銲條添加對不銹鋼銲道表面外觀之影響，可由圖 4-1 c 中觀察出在未添加銲條之試片中，因添加助銲劑之因素使銲道熔融深度增加，故銲道表面產生凹陷之現象；然而添加銲條添加可使不銹鋼銲道表面變較為平整，填補原不銹鋼銲道凹陷之現象。此外，銲條添加之路徑亦會影響銲道之直線度。

CO₂ 氣體添加於保護氣體中對傳統氬銲製程之不銹鋼銲道，可觀察出隨著 CO₂ 氣體添加比例增加於銲道兩側逐漸形成氧化物之堆疊現象，且在表面仍有規則的金屬堆疊情形，但對添加混合型助銲劑 A-TIG 製程之不銹鋼銲道，則因 CO₂ 氣體添加與混合型助銲劑在銲接的過程，氧化物增生較快，於添加 0.5% 時可發現氧化物在銲道兩側堆疊之情形，隨著 CO₂ 氣體添加增多，其氧化物增生亦愈嚴重，其在銲道表面形成連續分佈狀態之氧化物層，進而使銲道表面的形成不平整之銲道外觀型態。

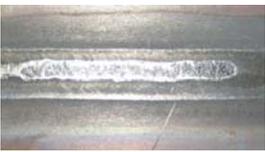
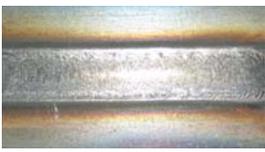
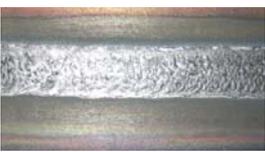
| CO ₂ Content (Vol%) | Flux 添加於 304 母材+ 308 鐸條 | 304 母材+ Flux 添加於 308 鐸條 | Flux 添加於 304 母材 | Without Flux |
|--------------------------------|---|---|--|---|
| 0% |  |  |  |  |
| 0.5% |  |  |  |  |
| 1% |  |  |  |  |
| 2.5% |  |  |  |  |
| 5% |  |  |  |  |
| 7.5% |  |  |  |  |
| 10% |  |  |  |  |

圖 4-1 添加 CO₂ 氣體於 A-TIG 鐸接製程對不銹鋼鐸道外觀影響

4.2 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接製程對鎢電極之影響

圖 4-2 為 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對鎢電極之影響之實驗結果，由於 CO₂ 氣體為活性(氧化性)保護氣體，當添加 0.5%CO₂ 氣體時，在進行傳統氬銲製程或活性化銲接製程時皆會產生鎢電極損耗現象，且由圖中觀測可得知當 CO₂ 氣體添加量增加時，其鎢電極損耗現象有加劇的趨勢；此外，若只添加混合型助銲劑而不添加 CO₂ 氣體條件下，對鎢電極損耗並無明顯的相互影響的現象，故可發現添加 CO₂ 於保護氣體於 A-TIG 中，是造成鎢電極損耗之原因；然而不添加 CO₂ 氣體時，可發現添加與無添加混合型助銲劑對鎢電極污染現象皆無明顯的影響。

鎢電極燒蝕之狀況，在 Shanping LU 等作者[13,16]的研究中發現添加氧氣於保護氣體，其鎢電極亦有損耗之現象；在銲接的過程中，因氧化物附著於鈦鎢電極棒表面，鈦鎢電極棒與氧化物易產生反應造成燒蝕現象，並低減鎢電極之效能，要避免鎢電極燒蝕，未來可使用可分別添加雙保護氣體之銲炬進行銲接[16]。

| CO ₂ Content (Vol%) | Flux 添加於 304 母材+ 308 銲條 | 304 母材+ Flux 添加於 308 銲條 | Flux 添加於 304 母材 | Without Flux |
|--------------------------------|---|---|--|---|
| 0% |  |  |  |  |
| 0.5% |  |  |  |  |

圖 4-2 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接製程對鎢電極之影響(接下頁)

| CO ₂ Content (Vol%) | Flux 添加於 304 母材+ 308 鐸條 | 304 母材+ Flux 添加於 308 鐸條 | Flux 添加於 304 母材 | Without Flux |
|--------------------------------|---|---|--|---|
| 1% |  |  |  |  |
| 2.5% |  |  |  |  |
| 5% |  |  |  |  |
| 7.5% |  |  |  |  |
| 10% |  |  |  |  |

圖 4-2 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接製程對鎢電極之影響(續)

4.3 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接製程對銲道型態之影響

4.3.1 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接製程對銲道熔透深度之影響

本實驗中將銲接參數中的電流設定為 125A 及銲接走速設定為 75mm/min 來探討添加 CO₂ 於保護氣體中對銲道熔透深度之影響，由表 4-1 及圖 4-3 中可發現到添加少量 CO₂ 於 Ar 保護氣體中，可有效提高傳統氬銲銲道之熔透深度。由實驗中可得知添加 0.25%CO₂ 氣體於 TIG 銲接中其熔透深度可達 6.43 mm，而未添加 CO₂ 氣體之熔透深度僅有 3.07mm，明顯可提升熔透深度達 209%之比例，但隨著 CO₂ 氣體添加比例增加超出 5%時，銲道熔透深度不深反降，當添加 10%CO₂ 氣體於傳統氬銲銲接中其熔透深度僅為 1.66mm，相對於未添加 CO₂ 氣體的銲道比較之僅達 54%的比例。

而 CO₂ 氣體的添加於保護氣體中對本實驗中使用混合型助銲劑之 A-TIG 銲接製程中的熔透深度並無法作進一步的提升，由表 4-2 及圖 4-3 中觀察可發現，於不添加 CO₂ 氣體時使用 A-TIG 銲接製程中，其熔透深度可達 7.53mm 為未添加 CO₂ 氣體之熔透深度的 245%之比例，反而隨著 CO₂ 氣體比例添加有下降之現象，特別是當添加量超出 1% CO₂ 氣體比例時其熔透深度即大幅下降。

表 4-1 CO₂ 氣體添加於 TIG 銲接製程對銲道熔透深度之影響

| Without Flux | | |
|---------------------|--------|--------|
| CO ₂ 添加量 | 熔深(mm) | 熔深提升比例 |
| 0% | 3.07 | (Base) |
| 0.25% | 6.43 | 209% |
| 0.50% | 6.12 | 199% |
| 0.75% | 5.37 | 175% |
| 1% | 4.39 | 143% |
| 2.50% | 3.72 | 121% |
| 5% | 1.81 | 59% |
| 7.5% | 1.64 | 53% |
| 10% | 1.66 | 54% |

表 4-2 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接製程對銲道熔透深度之影響

| CO ₂ 添加量 | Flux 添加於 304 母材 +308 銲條 | | 304 母材+ Flux 添加於 308 銲條 | | Flux 添加於 304 母材 | | Without Flux |
|---------------------|-------------------------|---------|-------------------------|---------|-----------------|---------|--------------|
| | 熔深 (mm) | 熔深 提升比例 | 熔深 (mm) | 熔深 提升比例 | 熔深 (mm) | 熔深 提升比例 | 熔深(mm) |
| 0% | 7.28 | 237% | 7.40 | 241% | 7.53 | 245% | 3.07 |
| 0.25% | 6.50 | 101% | 6.86 | 107% | 7.43 | 116% | 6.43 |
| 0.50% | 6.79 | 111% | 6.91 | 113% | 6.66 | 109% | 6.12 |
| 0.75% | 6.38 | 119% | 6.62 | 123% | 3.42 | 64% | 5.37 |
| 1% | 3.99 | 92% | 3.35 | 76% | 2.29 | 52% | 4.39 |
| 2.50% | 1.93 | 52% | 2.96 | 80% | 1.45 | 39% | 3.72 |
| 5% | 0.99 | 55% | 1.49 | 82% | 1.70 | 94% | 1.81 |
| 7.5% | 1.35 | 82% | 1.70 | 104% | 1.79 | 109% | 1.64 |
| 10% | 1.51 | 91% | 1.43 | 86% | 2.03 | 122% | 1.66 |

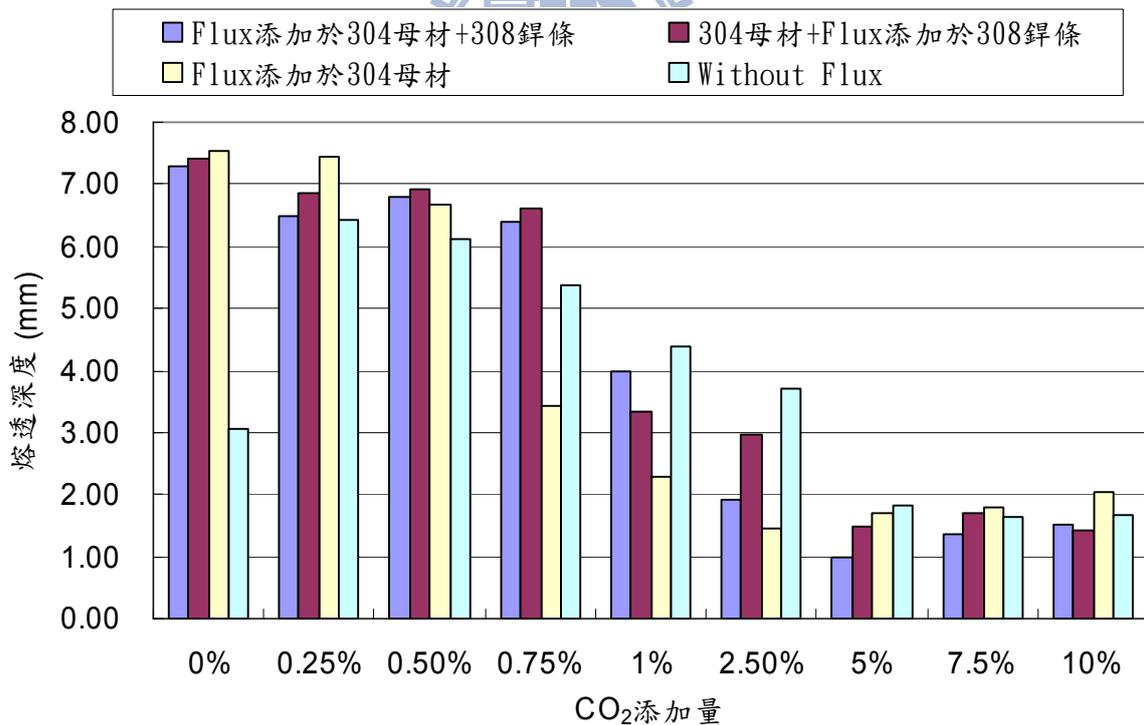


圖 4-3 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接製程對銲道熔透深度之影響

4.3.2 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接製程對銲道截面深寬比之影響

就銲道斷面型態而言，理想的銲道截面其銲道的寬度越窄與熔融深度越深越佳，故有效提高銲道之深寬比為本實驗致力研究之目標之一，由圖 4-4 可觀察出少量添加 CO₂ 氣體對傳統的 TIG 銲接過程，可提升其銲道之深寬比，銲道深寬比可由未添加 CO₂ 氣體時的 0.4 提升至添加 0.25%CO₂ 氣體時的 0.66，升寬比提升 167%，於 Shanping LU 等作者之研究有相同現象[12]；此外，由圖 4-6 深寬比趨勢圖可知添加 CO₂ 氣體之比例增加至 2.5%時其銲道深寬比較不添加 CO₂ 時為低。

表 4-3 CO₂ 氣體添加 TIG 製程對銲道銲道深寬比之影響

| CO ₂ 添加量 | Without Flux | | | |
|------------------------|--------------|-------|------|------------|
| | Wide | Depth | D/W | 熔深 提升比例 |
| 0% | 7.71 | 3.07 | 0.40 | (Base) |
| 0.25% | 9.68 | 6.43 | 0.66 | 167% |
| 0.50% | 9.91 | 6.12 | 0.62 | 155% |
| 0.75% | 10.83 | 5.37 | 0.50 | 125% |
| 1% | 10.49 | 4.39 | 0.42 | 105% |
| 2.50% | 11.01 | 3.72 | 0.34 | 87% |
| 5% | 11.43 | 1.81 | 0.16 | 40% |
| 7.5% | 10.34 | 1.64 | 0.16 | 40% |
| 10% | 10.73 | 1.66 | 0.15 | 39% |

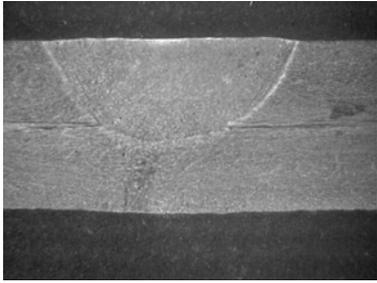
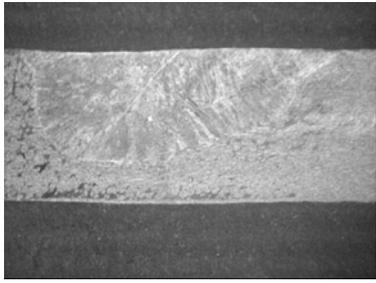
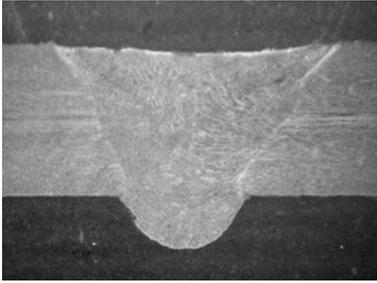
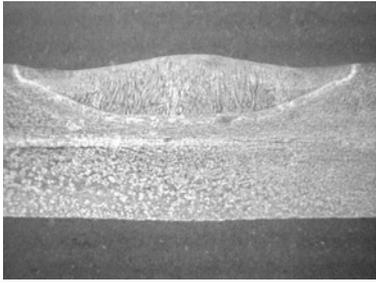
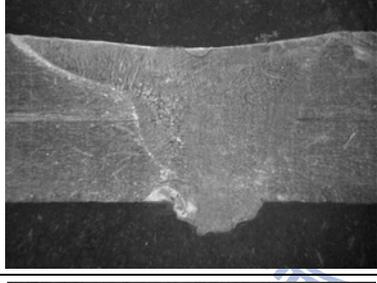
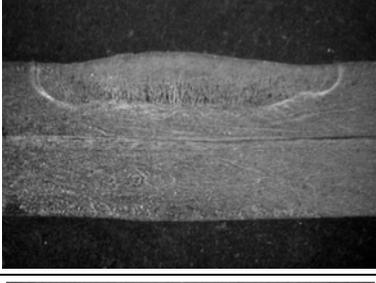
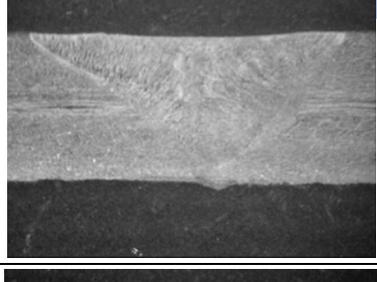
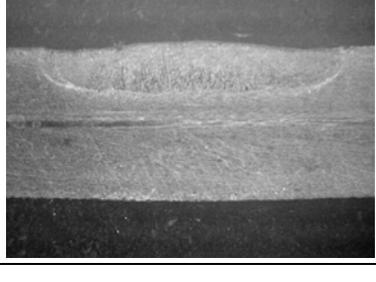
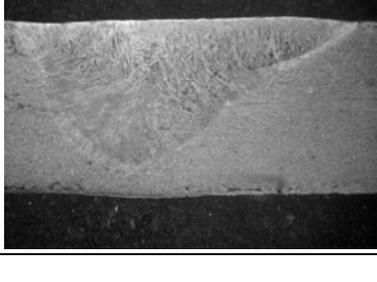
| CO ₂ 添加量 (Vol%) | Without Flux | CO ₂ 添加量 (Vol%) | Without Flux |
|----------------------------|---|----------------------------|---|
| 0% |  | 2.5% |  |
| 0.25% |  | 5% |  |
| 0.5% |  | 7.5% |  |
| 0.75% |  | 10% |  |
| 1% |  | -- | -- |

圖 4-4 CO₂ 氣體添加對 TIG 製程對鐸道深寬比之影響

由表 4-4 及圖 4-5 至 4-13 可觀測出少量添加 CO₂ 氣體，對使用混合型助銲劑的 A-TIG 銲接製程相較於未添加 CO₂ 氣體時，其 CO₂ 氣體的添加並不影響銲道深寬比；換言之，添加 CO₂ 氣體於 A-TIG 製程並無法使銲道深寬比作進一步的提升。此外，添加混合型助銲劑之試片卻很明顯的可提高銲道之深寬比，但是由圖 4-4 之趨勢可見，在未添加銲條的條件下當 CO₂ 氣體添加，銲道深寬比會即產生深寬比的下降趨勢；在添加銲條的條件下，使其深寬比至 CO₂ 添加量至 1% 時產生反向的急遽的下降趨勢。

使用銲條添加入 A-TIG 製程中，對銲道之平整度有明顯的提升及改善之效果，且其對銲道深寬比影響並不顯著，主要仍是以混合型助銲劑影響為主，由圖 4-5 及圖 4-14 可得知混合型助銲劑添加於銲條或添加於母材外加銲條填入銲接模式下，其提升銲道深寬之效果相近，因此對於未來開發為包藥銲線的可行性是可以期待的。

總合上述之結果可得知，當 CO₂ 氣體添加於保護氣體之氬銲製程中，對提升深寬比之效果僅於添加少量之 CO₂ 氣體時，然而添加混合型助銲劑的 A-TIG 與傳統氬銲相較時，則降低銲道深寬比；在添加銲條的條件下，不管將助銲劑添加於銲條或母材上，皆能仍可有效的維持提昇銲道深寬比之效果，且使用銲條有助於改善銲道凹陷之缺陷狀況，但過量的 CO₂ 氣體添加(1% 以上時)在 A-TIG 製程中，將使深寬比產生急遽下降之現象。

表 4-4 CO₂ 氣體添加 A-TIG 製程對銲道深寬比之影響

| CO ₂ 添加量 (Vol%) | Flux 添加於 304 母材 +308 銲條 | | | 304 母材 +Flux 添加於 308 銲條 | | | Flux 添加於 304 母材 | | |
|----------------------------------|----------------------------|-------|------|----------------------------|-------|------|-----------------|-------|------|
| | Wide | Depth | D/W | Wide | Depth | D/W | Wide | Depth | D/W |
| 0% | 7.98 | 7.28 | 0.91 | 7.85 | 7.40 | 0.94 | 8.40 | 7.53 | 0.90 |
| 0.25% | 7.48 | 6.50 | 0.87 | 8.33 | 6.86 | 0.82 | 10.49 | 7.43 | 0.71 |
| 0.50% | 8.12 | 6.79 | 0.84 | 8.76 | 6.91 | 0.79 | 10.72 | 6.66 | 0.62 |
| 0.75% | 8.58 | 6.38 | 0.74 | 7.95 | 6.62 | 0.83 | 11.03 | 3.42 | 0.31 |
| 1% | 9.55 | 3.99 | 0.42 | 8.86 | 3.35 | 0.38 | 11.29 | 2.29 | 0.20 |
| 2.50% | 11.23 | 1.93 | 0.17 | 11.34 | 2.96 | 0.26 | 11.67 | 1.45 | 0.12 |
| 5% | 11.45 | 0.99 | 0.09 | 11.07 | 1.49 | 0.13 | 11.81 | 1.70 | 0.14 |
| 7.5% | 11.31 | 1.35 | 0.12 | 11.65 | 1.70 | 0.15 | 11.82 | 1.79 | 0.15 |
| 10% | 11.15 | 1.51 | 0.14 | 10.95 | 1.43 | 0.13 | 11.96 | 2.03 | 0.17 |

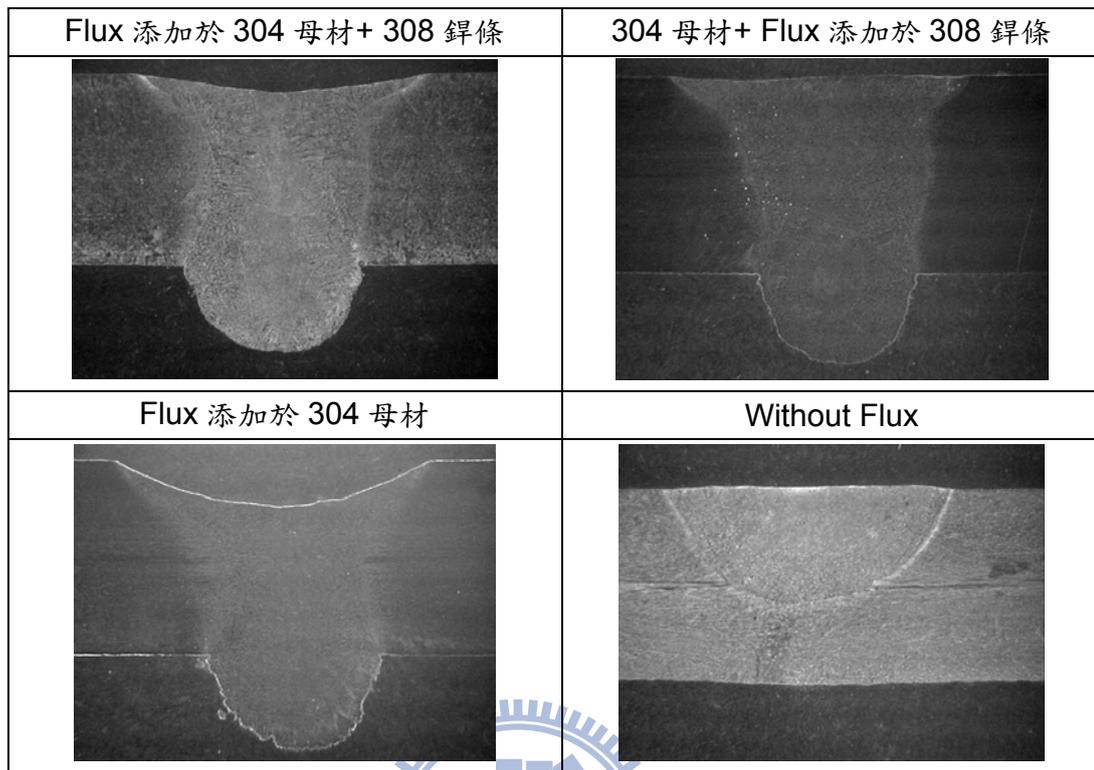


圖 4-5 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 鐸接對鐸道斷面型態之影響(0%)

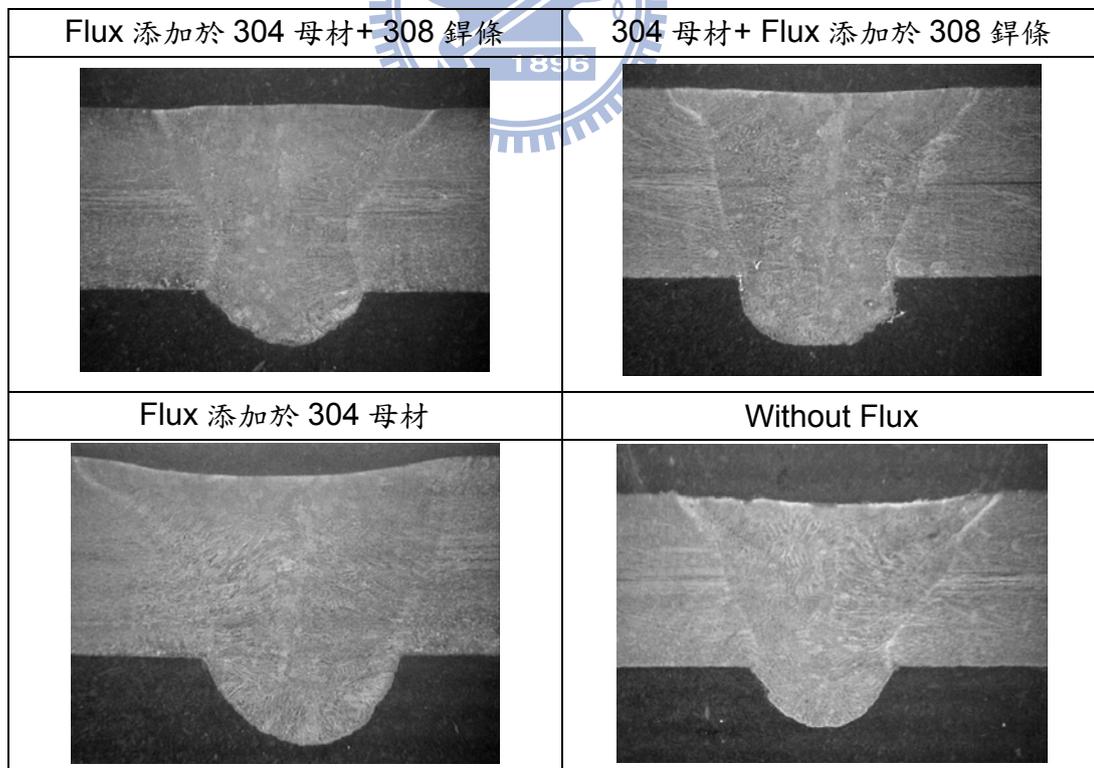


圖 4-6 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 鐸接對鐸道斷面型態之影響(0.25%)

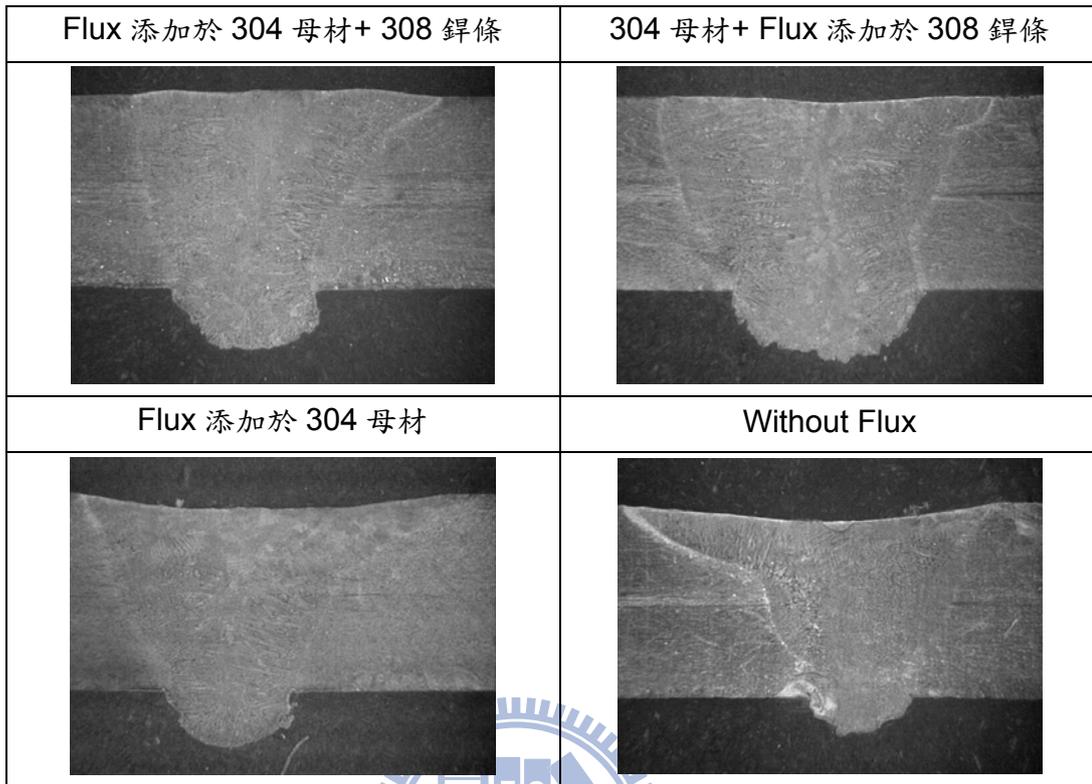


圖 4-7 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 鐸接對鐸道斷面型態之影響(0.5%)

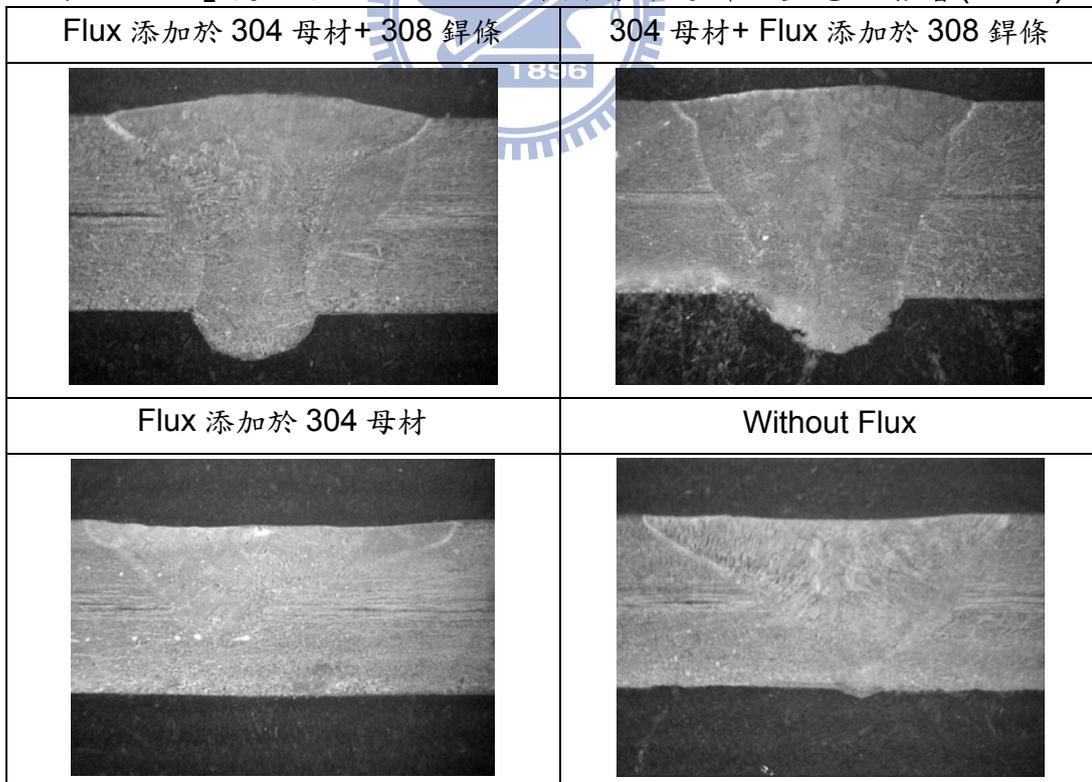


圖 4-8 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 鐸接對鐸道斷面型態之影響(0.75%)

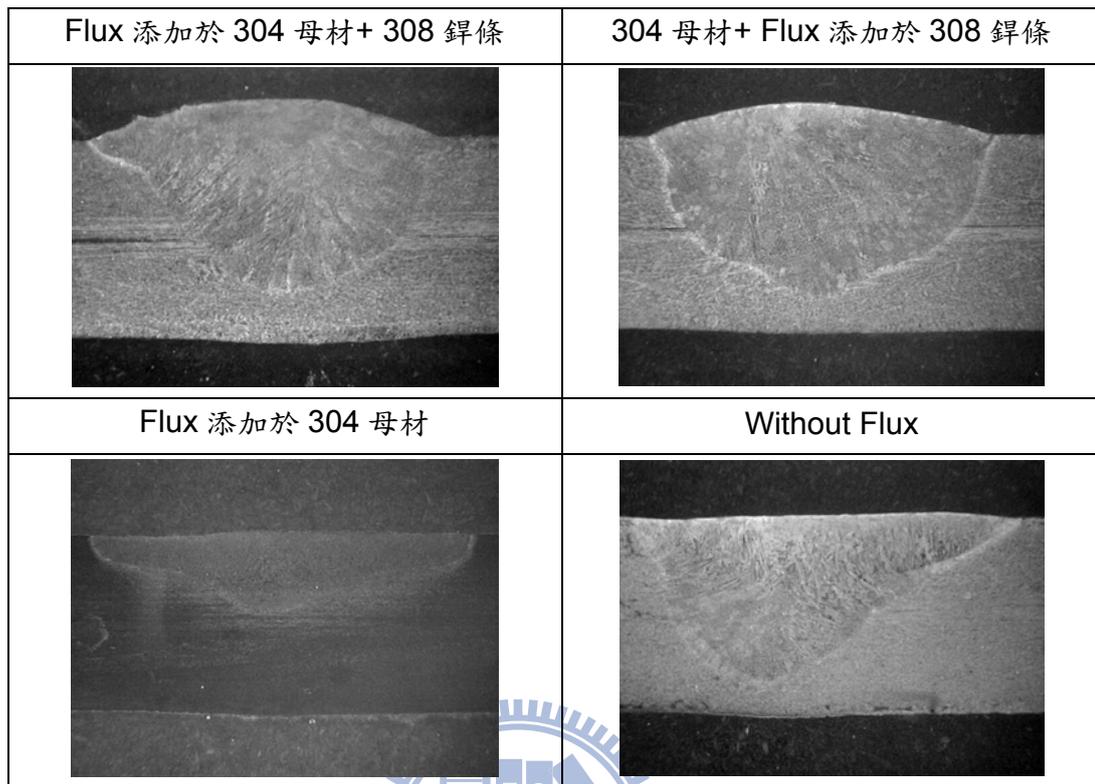


圖 4-9 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 鐸接對鐸道斷面型態之影響(1%)

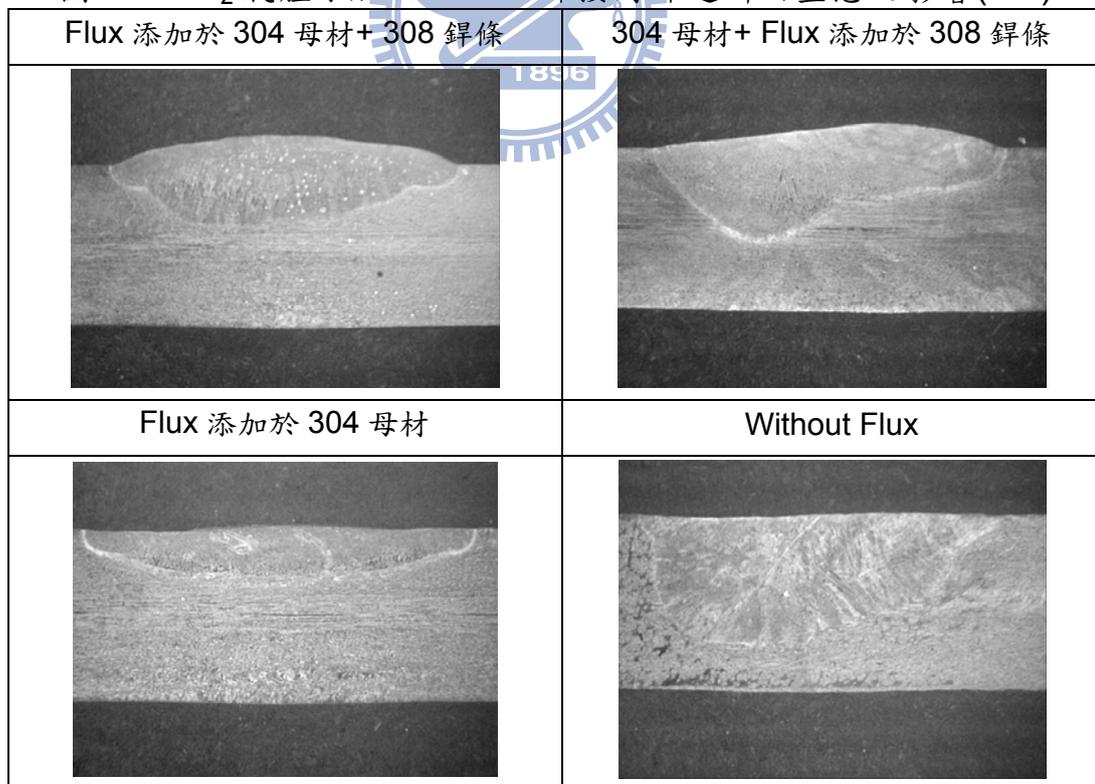


圖 4-10 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 鐸接對鐸道斷面型態之影響(2.5%)

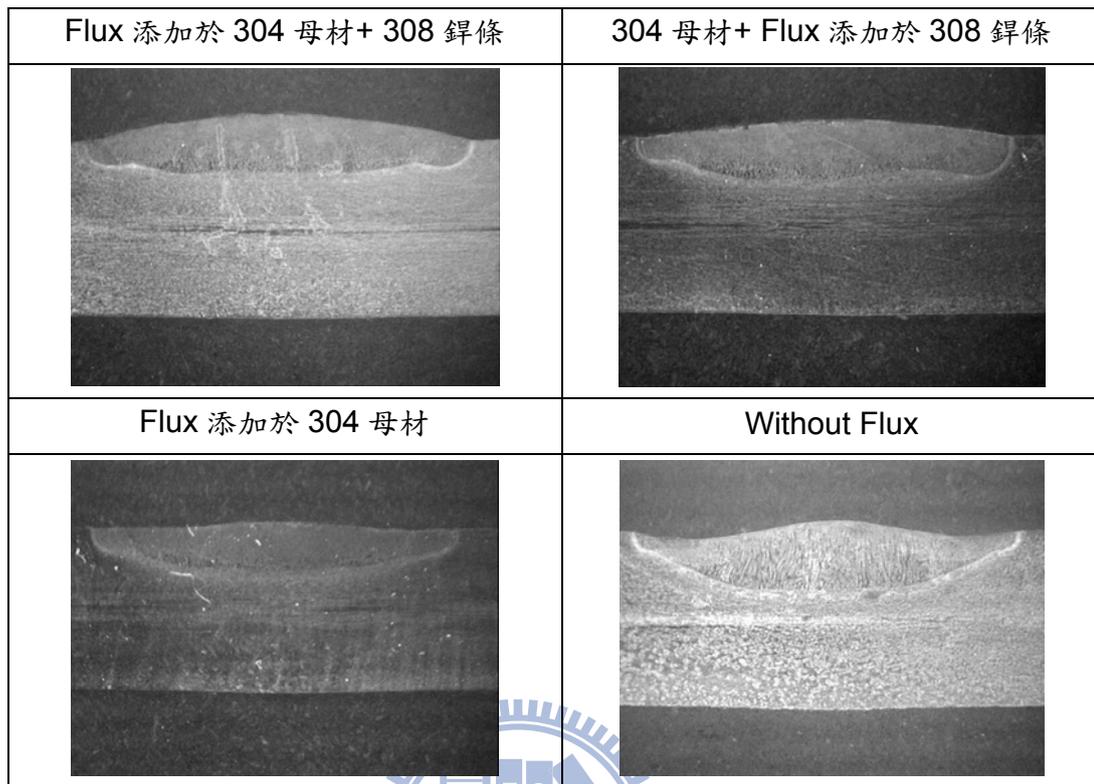


圖 4-11 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 鐸接對鐸道斷面型態之影響(5%)

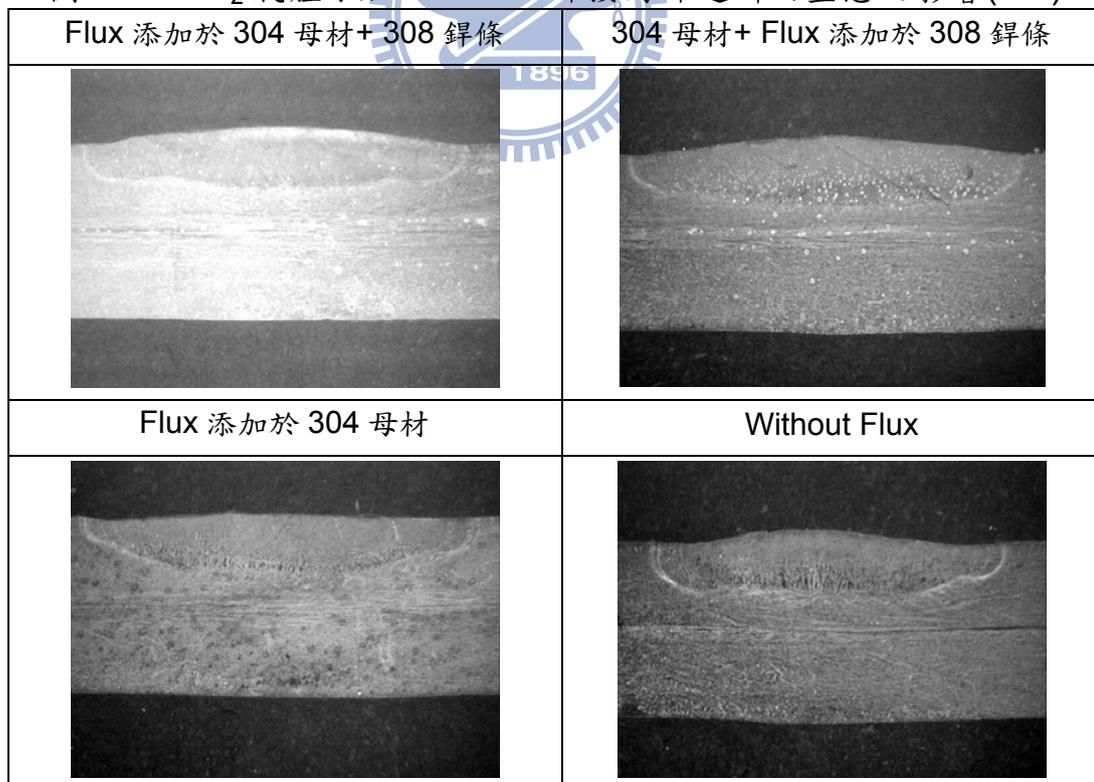


圖 4-12 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 鐸接對鐸道斷面型態之影響(7.5%)

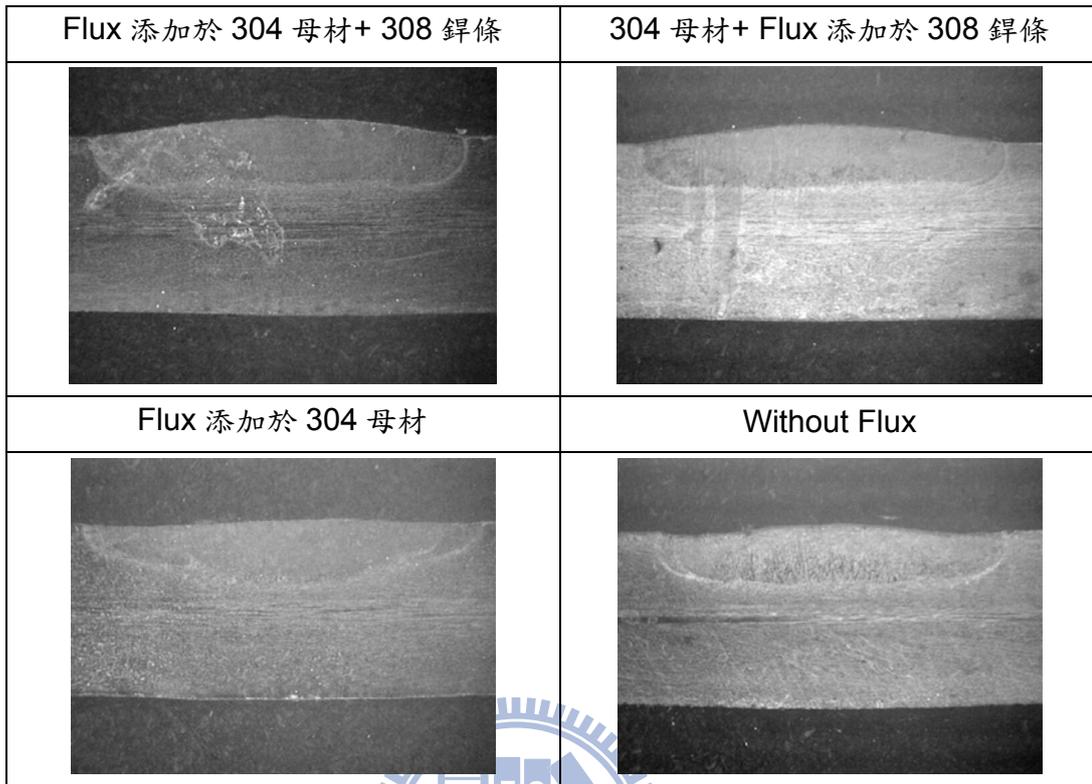


圖 4-13 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 鐸接對鐸道斷面型態之影響(10%)

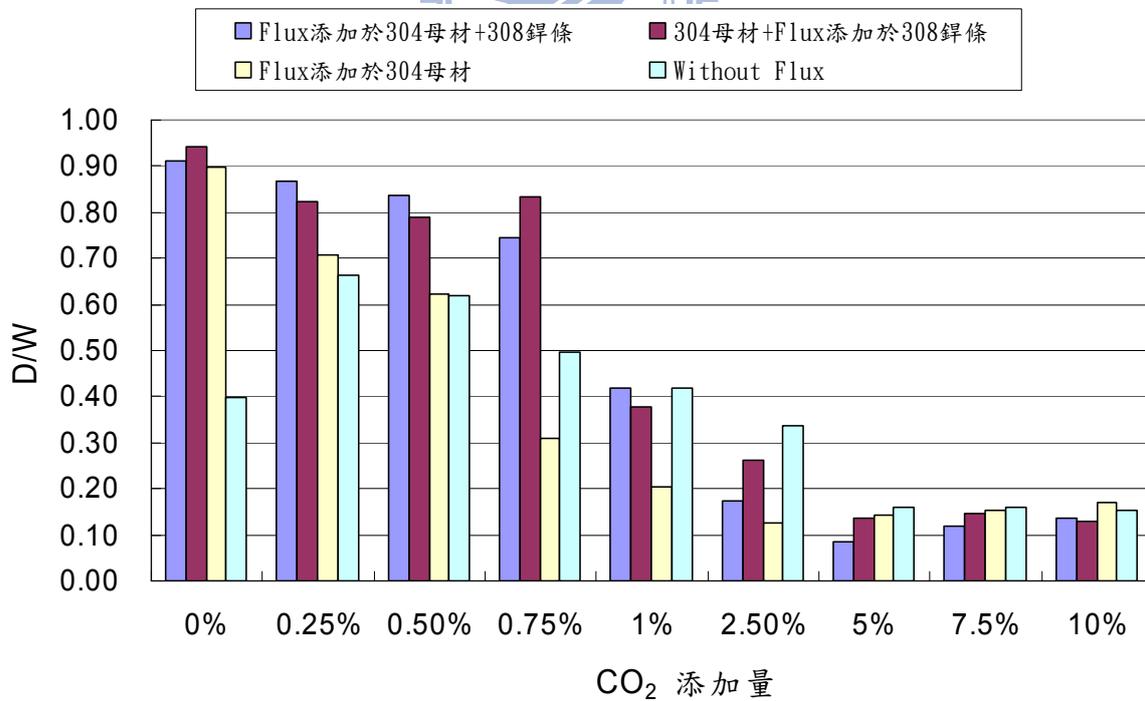


圖 4-14 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 鐸接對鐸道深寬比之影響

4.3.3 CO₂ 氣體添加對 A-TIG 銲接對銲道熔融面積之影響

銲道熔融面積主要受銲接時施作於母材上的熱輸入量所影響，當熱輸入量增加時，有助於銲道熔融面積之提升；反之，當熱輸入量不足時，則容易形成較小之熔融面積或不完全融透之銲道。一般而言，銲接電流及走速是探討銲道熔融面積變化之主要參數；因此本實驗則將銲接電流 (125A) 及銲接走速 (75 mm/min) 等參數固定，針對混合型助銲劑與 CO₂ 氣體添加量對銲道熔融面積之影響來探討。

由表 4-5 及圖 4-15 所示，添加 CO₂ 氣體對 TIG 銲道熔融面積之影響，在添加由 0% 至 2.5% 時，其皆由提升之效果，當於添加 0.25% 時，其熔融面積為 32.28mm²，可提升約 196%，隨著 CO₂ 添加量到達 5% 時，即發現熔融面積產生反向低減之現象；在添加 CO₂ 氣體對 A-TIG 製程中，其銲道熔融面積之影響，其主要仍受助銲劑影響為巨，未添加 CO₂ 氣體時添加混合型助銲劑條件下，能有效提昇傳統氬銲銲道之熔融面積，其中無添加助銲劑熔融面積為 16.45mm²，而添加混合型助銲劑的熔融面積為 28.78mm²，明顯地提升了 175%，隨著 CO₂ 微量添加至 0.5% 時，相較於添加於 TIG 製程中，仍可略微提昇其銲道熔融面積，隨著 CO₂ 添加量到達 0.5% 時，即發現熔融面積產生反向低減之現象；其 CO₂ 添加量較傳統氬銲製程添加比例為低時，即發生熔融面積下降之趨勢。

使用 308 銲條添加至 A-TIG 製程條件下，其熔融面積為 30.79mm²，亦較 TIG 製程可提升約 187%~190%。其提升效果較未添加 A-TIG 製程略佳，且與深寬比趨勢雷同，其熔融面積隨著 CO₂ 添加至 1% 以上時，會急遽下降。

綜合上述之結果得知，混合型助銲劑對銲道熔融面積較 CO₂ 氣體添加於保護氣體時影響為巨；雖然少量 CO₂ 氣體添加 A-TIG 製程中，對銲道熔融面積有略為提升之效果，但過多的 CO₂ 氣體添加量反而降低銲道熔融面積。

表 4-5 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對銲道熔融面積之影響

| CO ₂ 添加量 (Vol%) | A-TIG 製程 | | | | | | TIG 製程 | |
|----------------------------|-------------------------|------|-------------------------|------|-------------------------|------|-------------------------|--------|
| | Flux 304 母材 +308 銲條 | | 304 母材+ Flux 308 銲條 | | Flux 添加於 304 母材 | | Without Flux | |
| | 熔融面積 (mm ²) | 提昇比例 |
| 0% | 30.79 | 187% | 31.30 | 190% | 28.78 | 175% | 16.45 | (Base) |
| 0.25% | 28.10 | 87% | 33.36 | 103% | 38.51 | 119% | 32.28 | 196% |
| 0.5% | 32.68 | 117% | 39.04 | 139% | 30.70 | 110% | 28.02 | 170% |
| 0.75% | 27.19 | 115% | 34.18 | 144% | 17.98 | 76% | 23.69 | 144% |
| 1% | 29.06 | 117% | 31.46 | 127% | 15.46 | 62% | 24.85 | 151% |
| 2.5% | 22.17 | 79% | 25.65 | 92% | 15.03 | 54% | 27.93 | 170% |
| 5% | 15.02 | 102% | 16.11 | 109% | 16.77 | 114% | 14.74 | 90% |
| 7.5% | 15.68 | 108% | 19.46 | 134% | 17.72 | 122% | 14.56 | 89% |
| 10% | 18.36 | 137% | 17.06 | 127% | 15.19 | 113% | 13.40 | 81% |

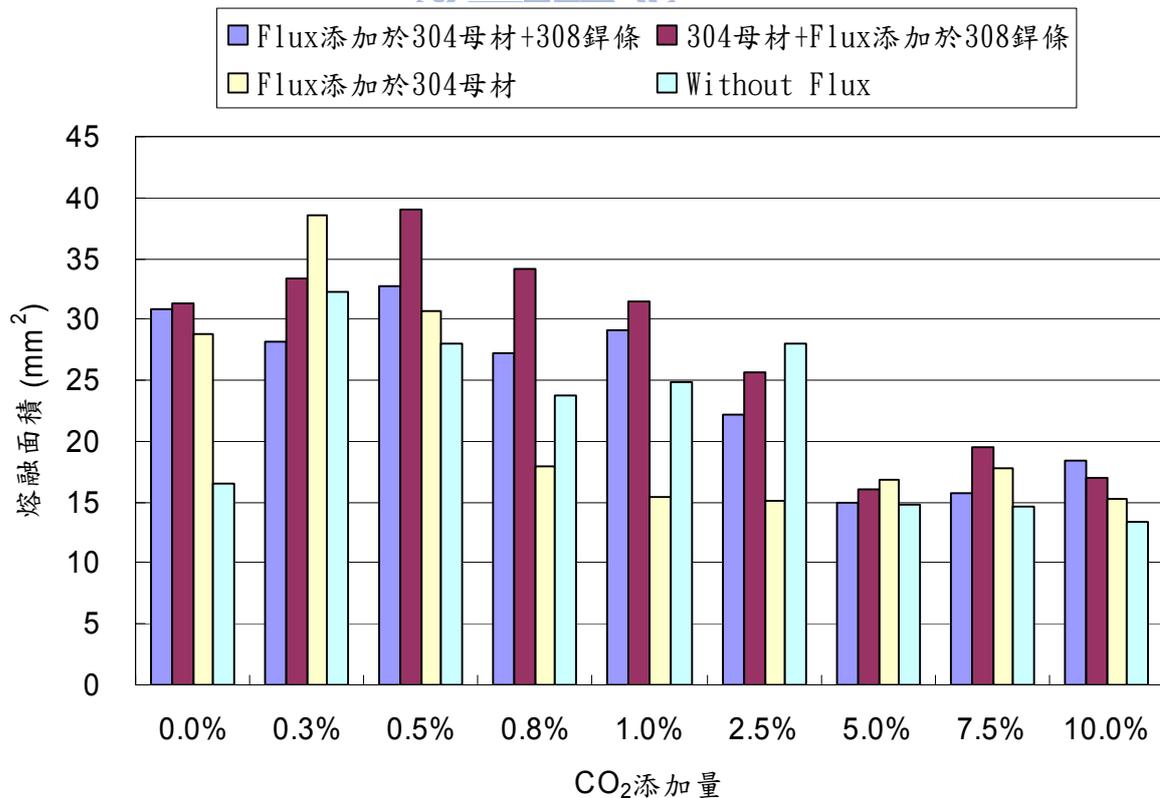


圖 4-15 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對銲道熔融面積之影響

由鐳道截面型態的變化可由圖 4-16 來進一步說明， CO_2 及助鐳劑皆會使鐳接時，因氧分子及助鐳劑微量元素增加而產生氧化物層，此氧化物層會改變熔融區中表面張力溫度係數進而使熔池內流動機構改變，使鐳道截面型態產生變化，此與於 Shanping LU 等作者的研究[12-16]中皆有發現此現象，在 TIG 鐳接過程中，鐳道的形態與深寬比使建立在鐳接時得流動機構有關，其驅動力包含表面張力(F_γ)、電磁力(F_{em})、浮力(F_b)及電漿電弧力(F_p)，在這之中，表面張力是主要對熔池內流動機構主要原因。表面活性元素(如氧化物、硫化物、碲及碲)皆能改變表面張力的溫度係數為負值，使得在熔池表面中 Marangoni 對流形成向外的方向，因此，助鐳劑可容易轉換至此條件進而形成寬且淺的鐳道斷面型態，故氧化物易於鐳道兩側堆積；反之，當表面活性元素或氧化物增生，進而改變表面張力溫度係數為正值(或超出其臨界值)，使得在熔池表面中 Marangoni 對流形成向內的方向，則會形成窄且深的鐳道斷面型態。由實驗結果得知，當 CO_2 微量添加時因氧化物層結構較薄，於造成熔池內 Marangoni 流動力向外流動，形成鐳道寬而淺且底部較平之截面型態，由圖 4-16(a)所示；反之，當熔池內 Marangoni 流動力向內流動時，形成鐳道窄而深之截面型態，由圖 4-16(b)(c)所示，實驗結果顯示與之前的學者研究為相符的；隨著 CO_2 添加比例越高時，其熔池內氧化物增生的結構亦越來越厚，影響 Marangoni 流動再次向外，形成形成寬、淺底部較平的鐳道斷面型態，由圖 4-16(d)，此部份與 Hidetoshi Fujii 等人在添加氧氣於保護氣體的研究中相較，其氧化物增加至 9000ppm，其鐳道型態仍呈現寬淺但鐳道底部仍呈現凹的型態，於本實驗中添加 5%時及呈現鐳道型態仍呈現寬淺但鐳道底部仍呈現平的型態，推判鐳道中氧化物以超出 9000ppm 以上時，將在使表面張力溫度係數由正轉負，使鐳道形成寬淺但鐳道底部平的型態。

由實驗結果可得知助鐳劑的添加亦會使氧化物增生，所以在 A-TIG 製程中添加 CO_2 氣體，當添加量至 0.5%時其熔融深度即急遽下降，由圖 4-14 深寬比的趨勢中亦可發現，其趨勢為當 CO_2 添加時，即開始下降，主要為氧化物的快速增加所致，再次確認其圖 4-1 可發現其 CO_2 微量添加時，其鐳道兩側即有氧化物堆積現象發生。

亦可知鐳條的添加，因是鐳道熔池中之氧化物結構產生變化，研判因熔融金屬的增加，相對使熔池內氧化物含量下降，由圖 4-3 及 4-14 可知其熔融深度及深寬比趨勢，所以鐳條添加可使鐳道截面型態有緩步下降之趨勢，可維持至 CO_2 添加量到達 1%以上時，其熔融深度及深寬比才產生急遽下降變化。

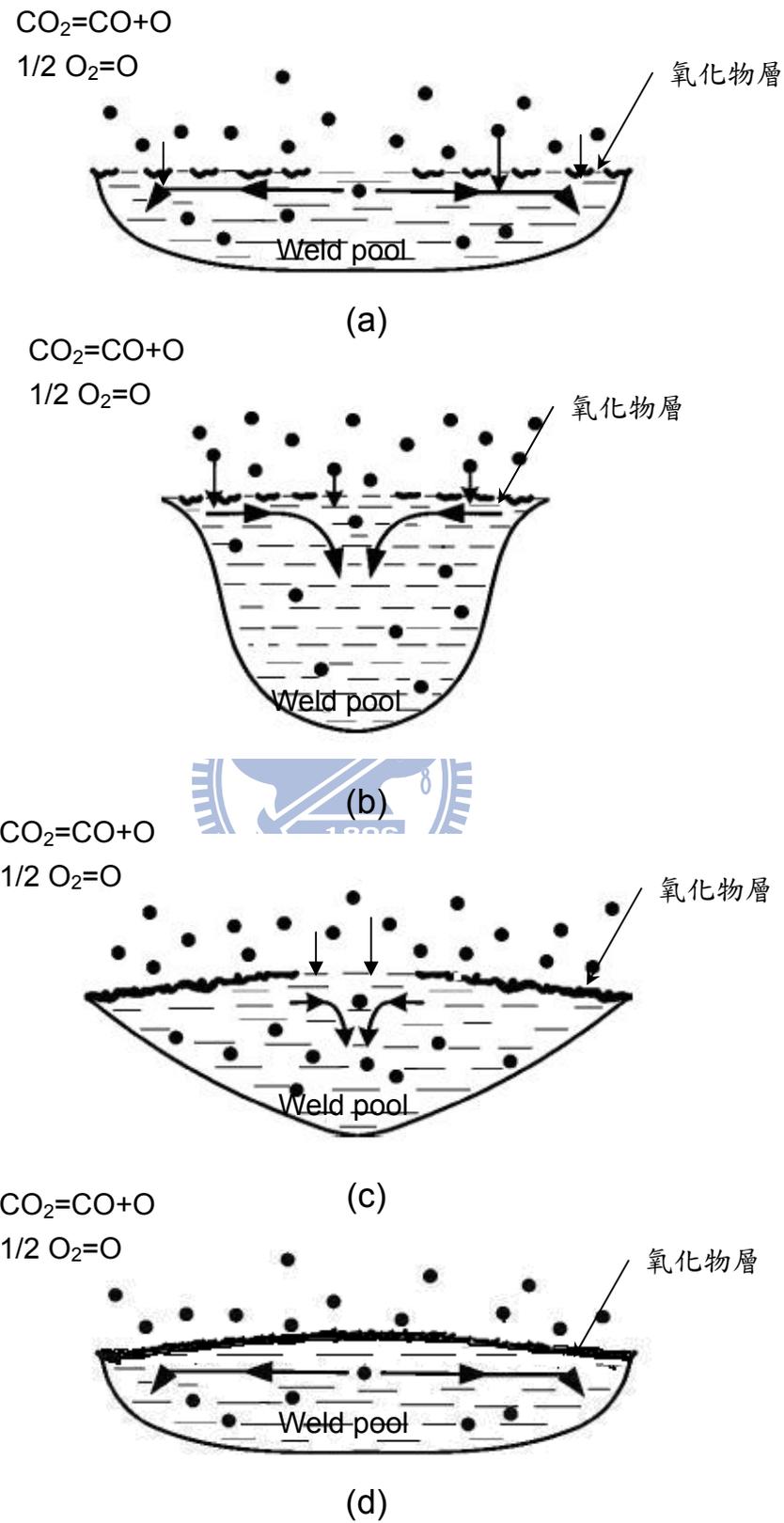


圖 4-16 氧化物層對熔池內流動力的影響

4.4 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電弧電壓之影響

4.4.1 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對平均電弧電壓之影響

保護氣體之影響主要係取決於保護氣體的熱傳導性。CO₂ 比 Ar 氣體會產生較高的電弧電壓值，亦即會提升電壓-電流的靜特性曲線位置。由於 CO₂ 氣體的高溫熱傳導性優於 Ar 氣體，因而會造成 CO₂ 氣體有較高的熱量損失率，進而使得單位電弧長度上要有較高的 IE 值與其保持平衡。因此當銲接電流在維持定值的情況下，其電弧電壓勢必要提高。由圖 4-17 所示為本實驗銲接電流固定為 125 A 與銲接走速設定為 75 mm/min 條件下，CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電弧電壓之影響。

由表 4-6 及圖 4-17 中可得知於傳統 TIG 製程中，其平均電弧電壓值為 13.61 V，當加入混合型助銲劑時其平均電壓值提升至 15.27 V，添加 CO₂ 保護氣體對於未添加混合型助銲劑之電弧電壓曲線可得知，當添加微量之 CO₂ 於保護氣體中可使電弧電壓提高約 10%(由 13.6V 上升至 15V)，且會隨著 CO₂ 添加量增加而增加，且由圖 4-18 至 4-24 觀察得知其電弧電壓亦隨著鎢電極的汙染受損後電弧電壓起伏甚大。其添加微量的 CO₂ (1%以下)其對電弧電壓的影響小於助銲劑對電弧電壓的影響，但添加超出 1%的 CO₂ 則保護氣體對電弧電壓的影響大於助銲劑所產生的影響。

混合型助銲劑塗佈於試片表面其平均電弧電壓為 15.3 V，塗佈銲條表面其電弧平均電壓為 15V，有較低的現象，當隨著 CO₂ 的增加其影響貢獻度較不明顯。添加銲條與不添加銲條對電弧電壓並無明顯差異性。

綜合言之，添加微量之 CO₂ 於保護氣體中雖可提升電弧電壓，但以整體銲接效率而言，仍以添加混合型助銲劑的方式優於添加 CO₂ 的方式，然而添加混合型助銲劑並在保護氣體中添加 CO₂ 氣體，對電弧電壓並無加乘的效果。

表 4-6 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對平均電弧電壓之影響

| 試片種類 | CO ₂ 添加量 | 平均電弧電壓(V) | | | | | | |
|---------------------|---------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0% | 0.5% | 1% | 2.5% | 5% | 7.5% | 10% |
| Fulx 塗佈於試片表面+308 銲條 | | 15.30 | 15.18 | 14.93 | 15.23 | 15.53 | 15.68 | 15.74 |
| Fulx 塗佈於銲條表面+308 銲條 | | 14.96 | 14.80 | 15.20 | 15.42 | 15.55 | 15.75 | 15.44 |
| Fulx 塗佈於試片表面 | | 15.27 | 15.31 | 15.45 | 15.27 | 15.67 | 16.10 | 16.03 |
| Without Flux | | 13.61 | 15.00 | 15.38 | 15.58 | 15.95 | 15.83 | 16.06 |

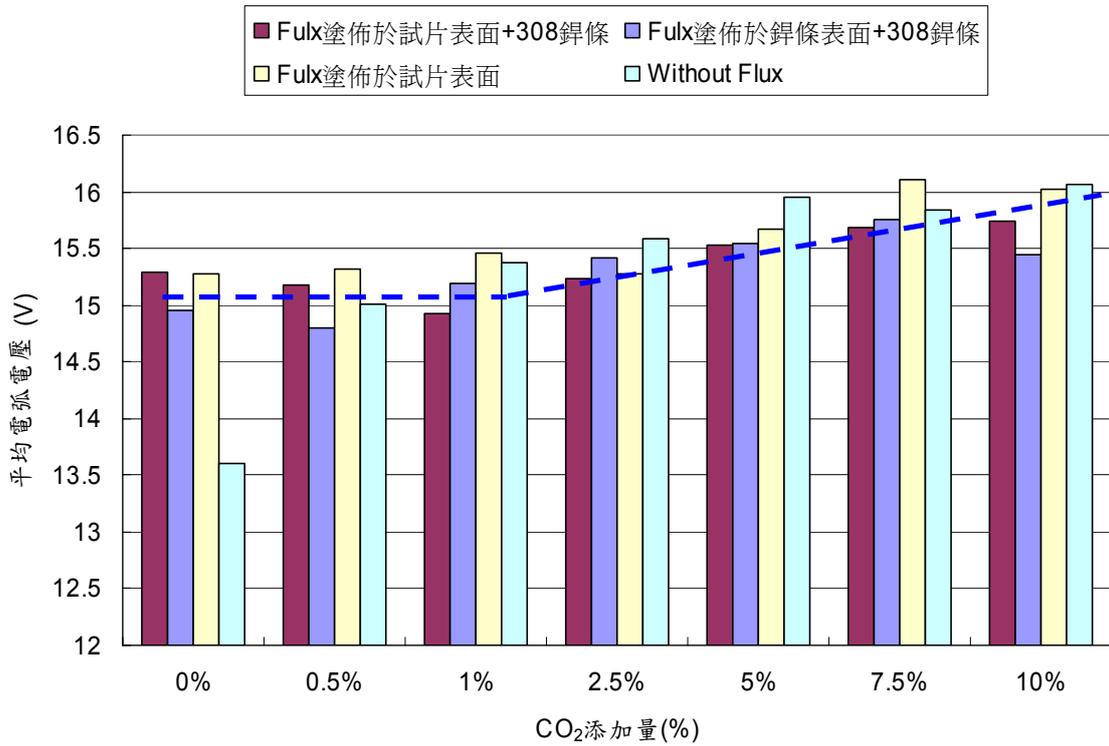


圖 4-17 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電弧電壓之影響(平均電壓)

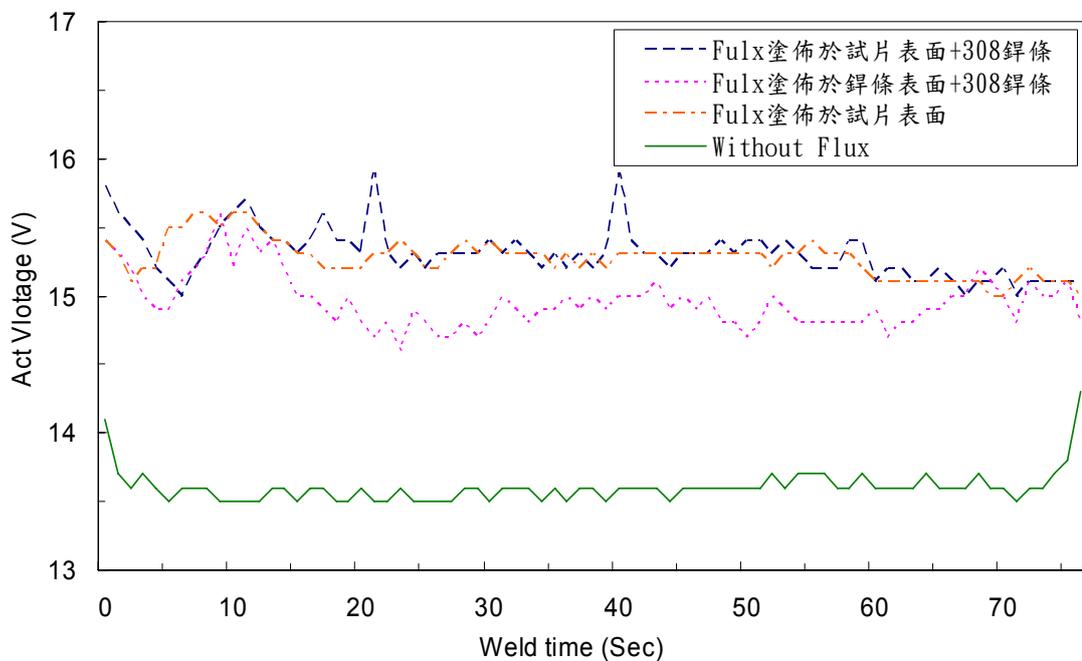


圖 4-18 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電弧電壓之影響(0%)

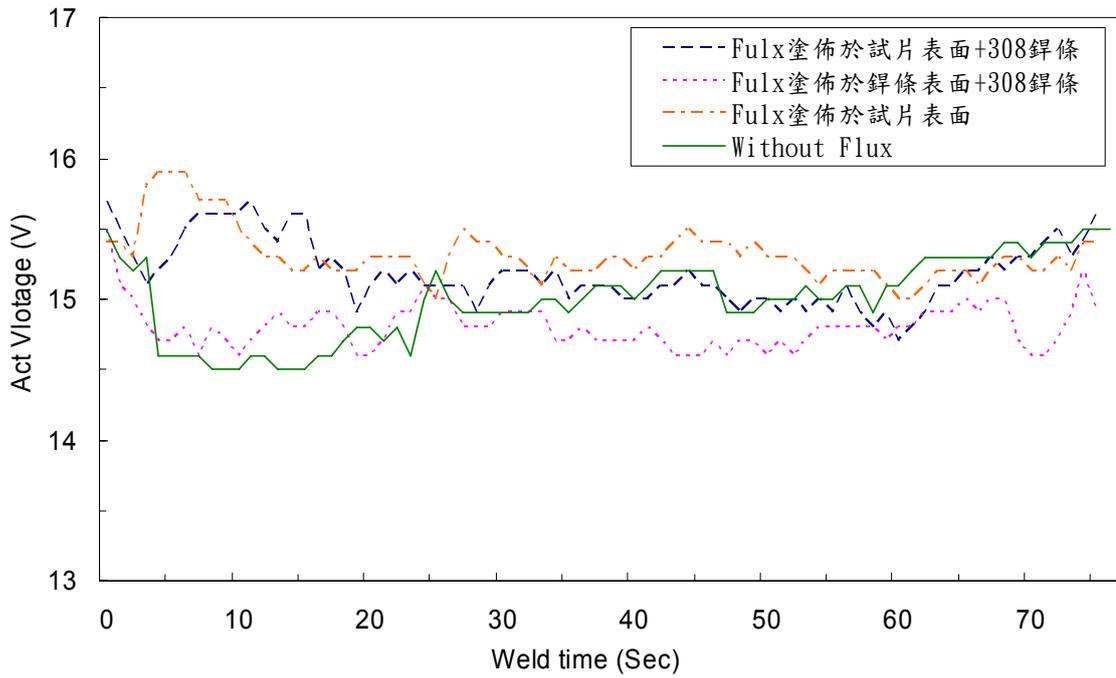


圖 4-19 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電弧電壓之影響(0.5%)

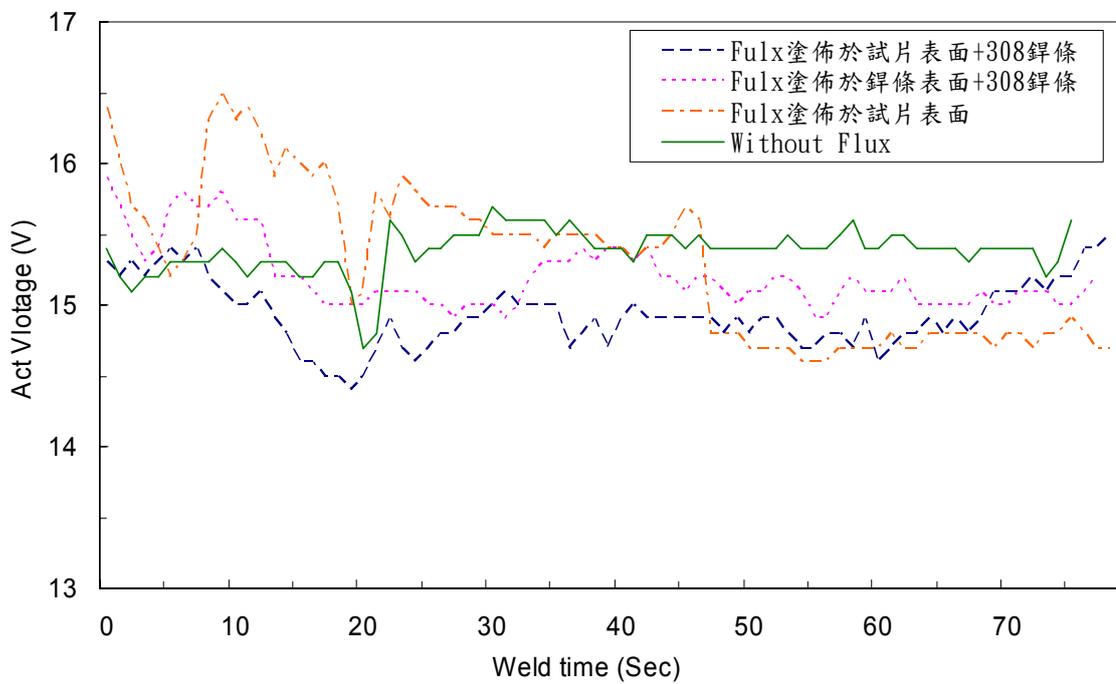


圖 4-20 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電弧電壓之影響(1%)

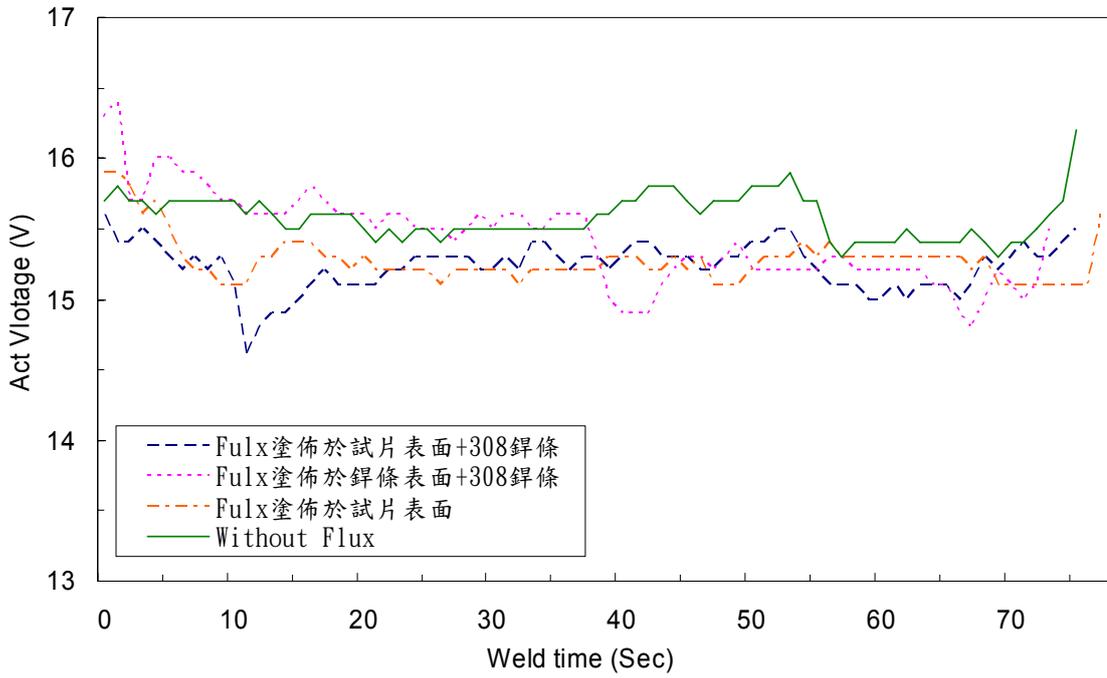


圖 4-21 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 鐸接對電弧電壓之影響(2.5%)

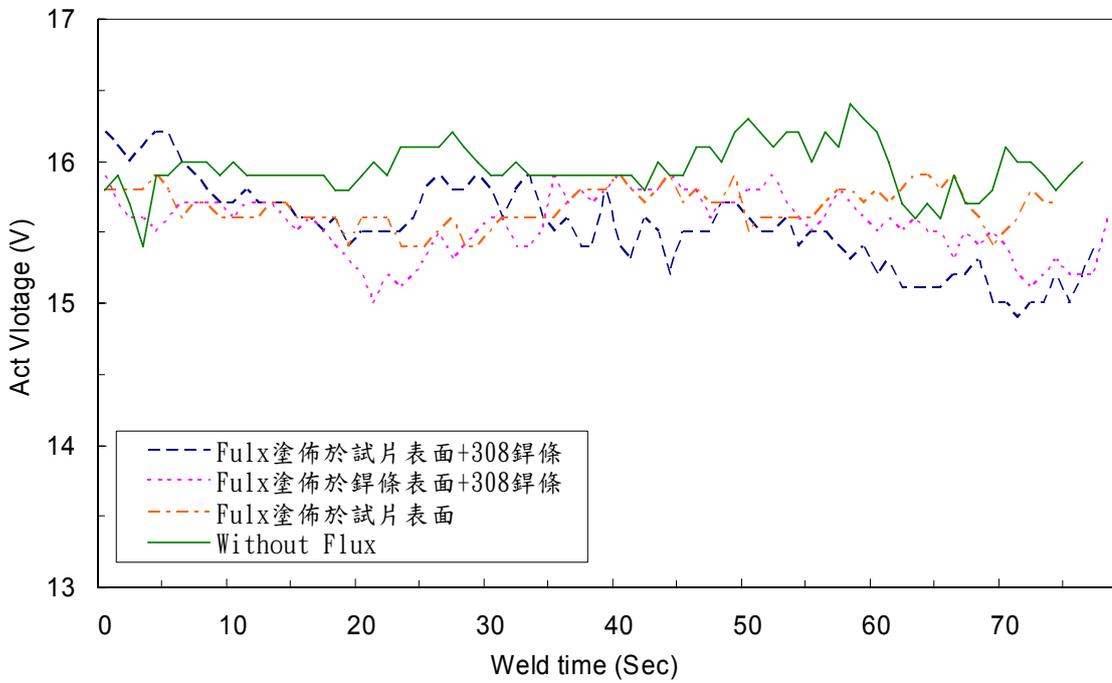


圖 4-22 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 鐸接對電弧電壓之影響(5%)

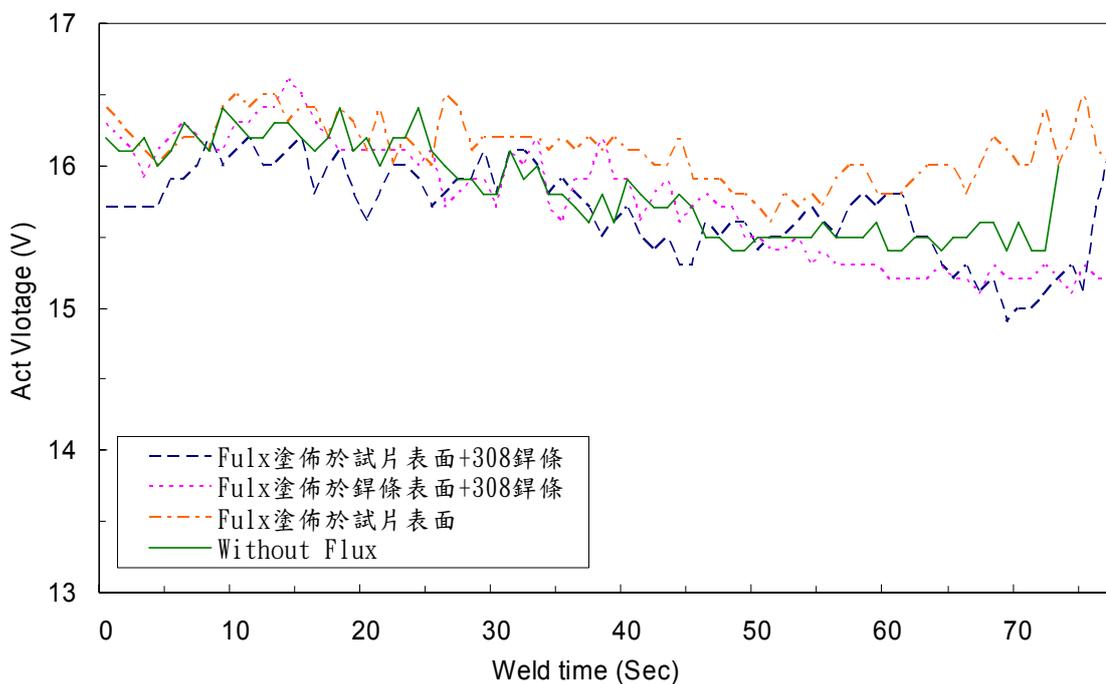


圖 4-23 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電弧電壓之影響(7.5%)

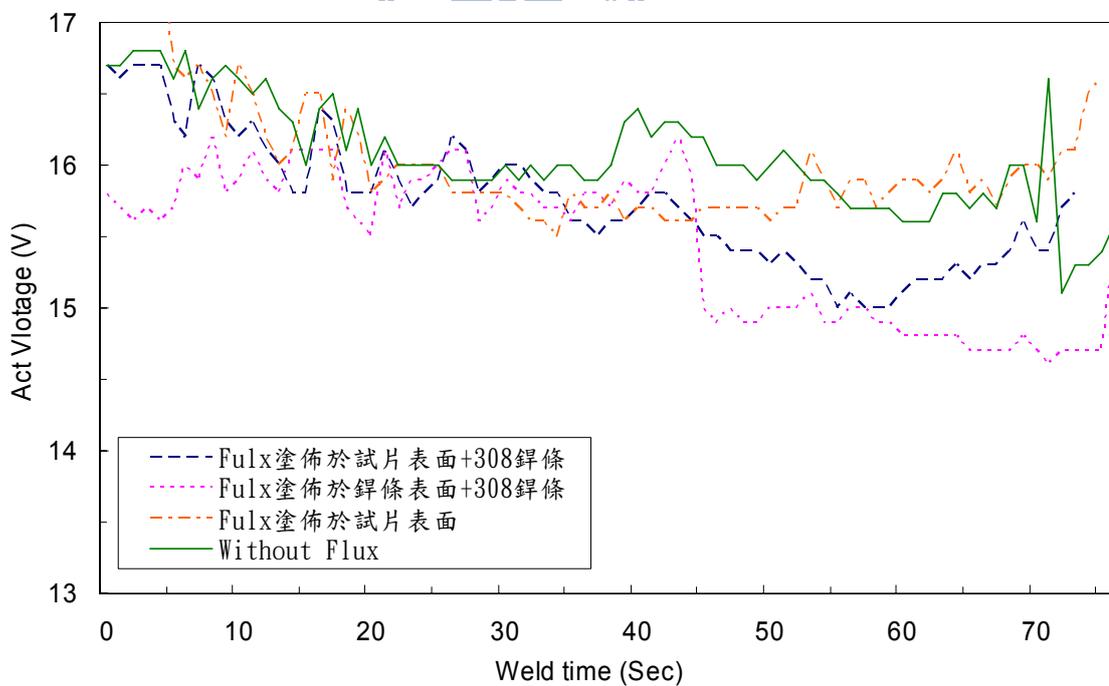


圖 4-24 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電弧電壓之影響(10%)

4.4.2 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對熱輸入量之影響

因其電弧電壓改變進而使其銲接製程中熱輸入量為之改變，本實驗之銲接參數為銲接電流 125A、銲接走速為 75mm/sec，為 TIG 銲接模式故銲接效率取 0.08，並依公式 2-1 試算其熱輸入量，如表 4-7 及圖 4-25 所示，亦可得知因電弧電壓改變其熱數輸入量亦改變，與電弧電壓有相同之趨勢。

表 4-7 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對熱輸入量之影響

| 試片種類 \ CO ₂ 添加量 | 熱輸入量(KJ/cm) | | | | | | |
|----------------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0% | 0.5% | 1% | 2.5% | 5% | 7.5% | 10% |
| Fulx 塗佈於試片表面+308 銲條 | 12.24 | 12.15 | 11.94 | 12.18 | 12.43 | 12.54 | 12.59 |
| Fulx 塗佈於銲條表面+308 銲條 | 11.97 | 11.84 | 12.16 | 12.34 | 12.44 | 12.60 | 12.35 |
| Fulx 塗佈於試片表面 | 12.22 | 12.25 | 12.36 | 12.22 | 12.54 | 12.88 | 12.82 |
| Without Flux | 10.88 | 12.00 | 12.31 | 12.47 | 12.76 | 12.67 | 12.85 |

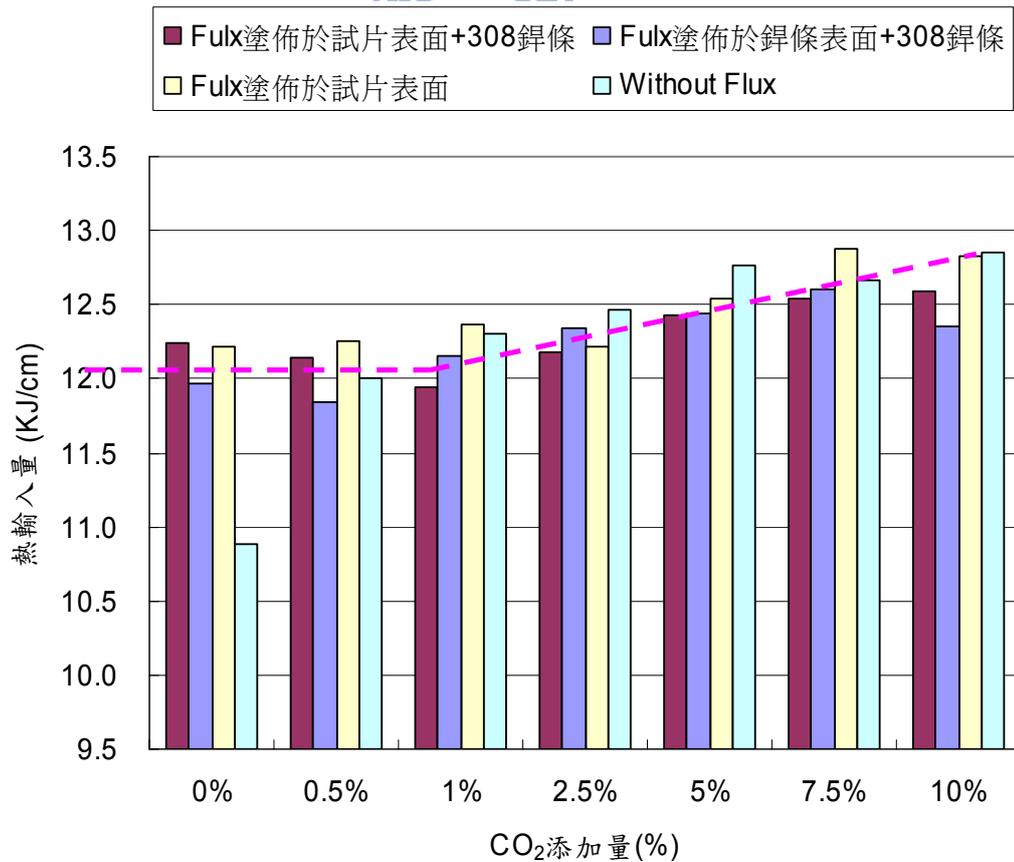


圖 4-25 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對熱輸入量之影響

4.5 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電弧型態之影響

對於 CO₂ 氣體的添加於 A-TIG 銲接中，其對銲道成型的影響行為及作用機制，可藉由電漿電弧柱與陽極斑點的收縮現象來加以解析。

4.5.1 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電漿電弧之影響

在添加 Flux 於 TIG 製程中，在諸多研究[33][34]中皆可發現電漿電弧柱會產生收縮現象，因電漿電弧柱收縮現象將可有效集中電弧熱量，進而使銲道熔透深度增加，由於電漿電弧中心區域的溫度要遠高於分子解離溫度，因此助銲劑在電漿電弧的高溫作用下，助銲劑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，助銲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。至於此現象將可有效的集中電弧熱量，進而使銲道熔透深度增加。藉由電弧收縮拍攝可以與銲道深寬比圖表作對應，可以很清楚的得知電漿電弧收縮的比例愈大，則銲道截面之熔透深度就呈現窄而深狀態；相對地，當電漿電弧柱收縮不明顯時，則銲道截面之熔透深度就會呈現寬而較淺狀態。

本次的實驗過程中，我們利用 CCD 拍攝銲接時電弧柱變化並擷取記錄下來。如圖 4-26 至圖 4-32 所示，並未能明顯觀察出 CO₂ 添加於傳統氬銲及添加混合型助銲劑製程中，其電弧緊縮的變化之情形，這可能是由於電弧會沿著銲接方向產生拖曳的情形，故沿著銲接方向拍攝之電弧，其寬度變化較小，不易觀察到其差異，但若由垂直於銲接方向來觀察電弧，應可明顯看到電弧拖曳的情形，電弧大小之變化則相對明顯。由 4-33 至 4-39 圖中，得知本實驗量測電弧寬度數值，其電弧寬度差異不大。

此外，在實驗中亦可發現到，隨著 CO₂ 添加量增加使鎢電極受到汙染而耗損，造成電漿電弧柱呈現不穩定狀態，易產生左右偏移之現象，因此無法有效的集中電弧熱量，進而使銲道呈現寬而淺的銲道型態。

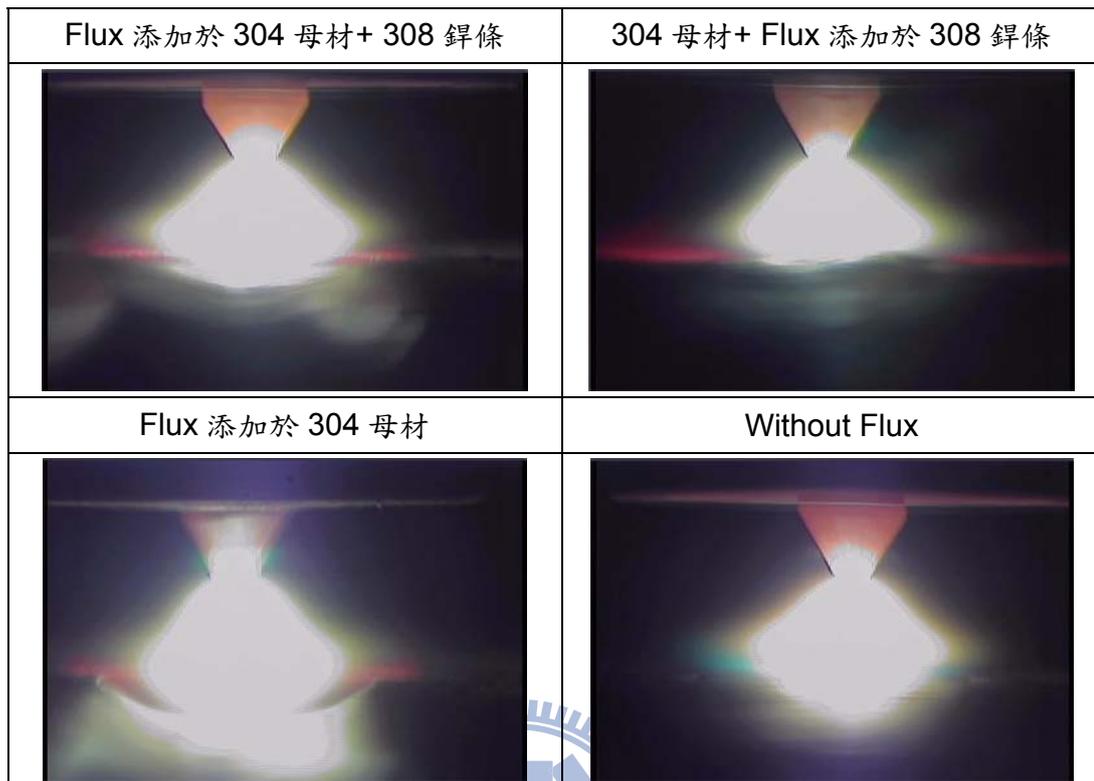


圖 4-26 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 鐸接對電漿電弧柱之影響 (0%)

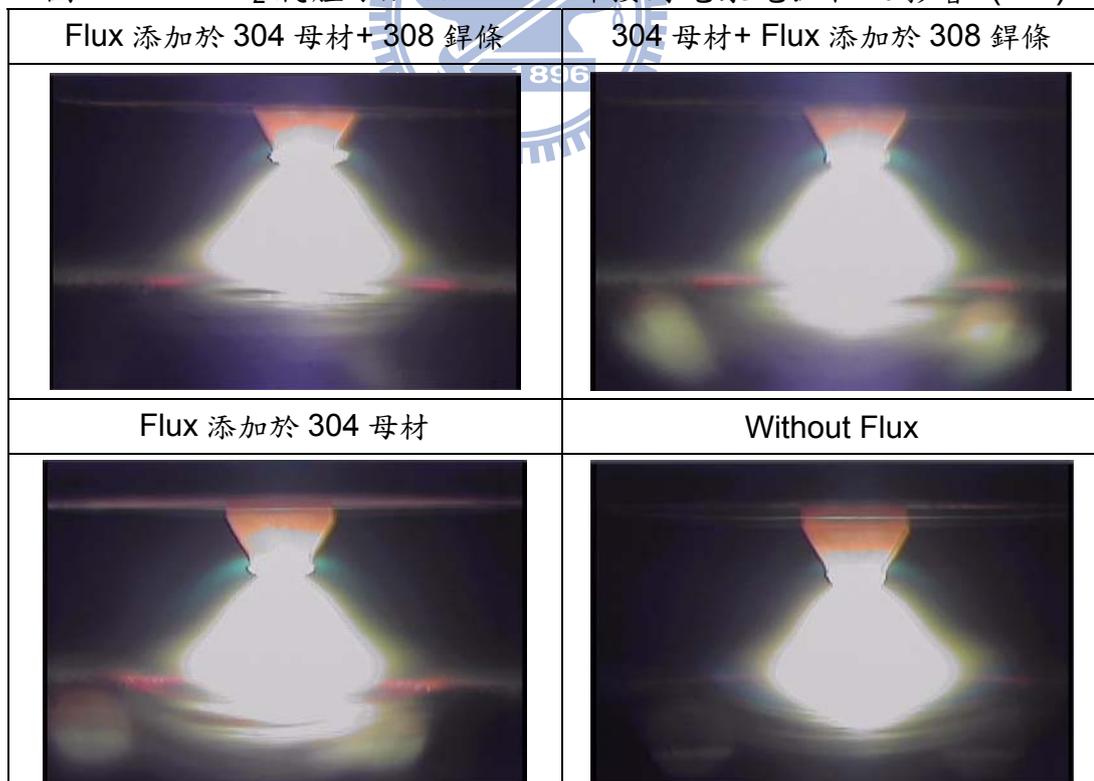


圖 4-27 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 鐸接對電漿電弧柱之影響 (0.5%)

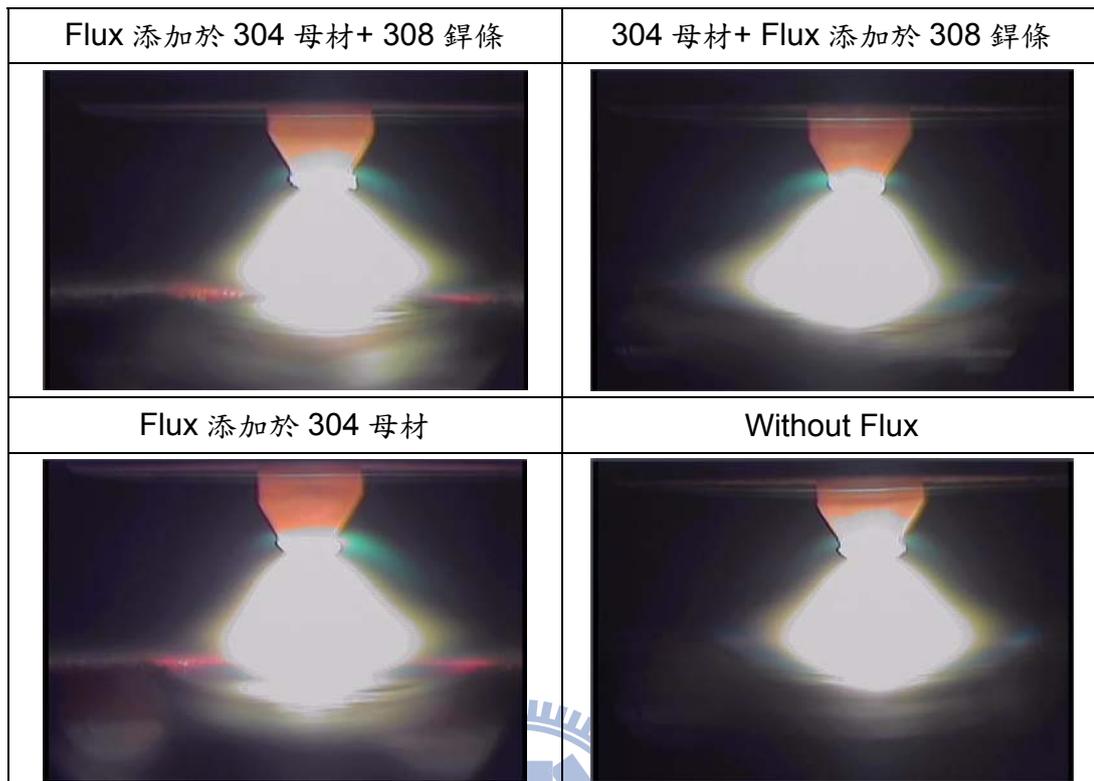


圖 4-28 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電漿電弧柱之影響 (1%)

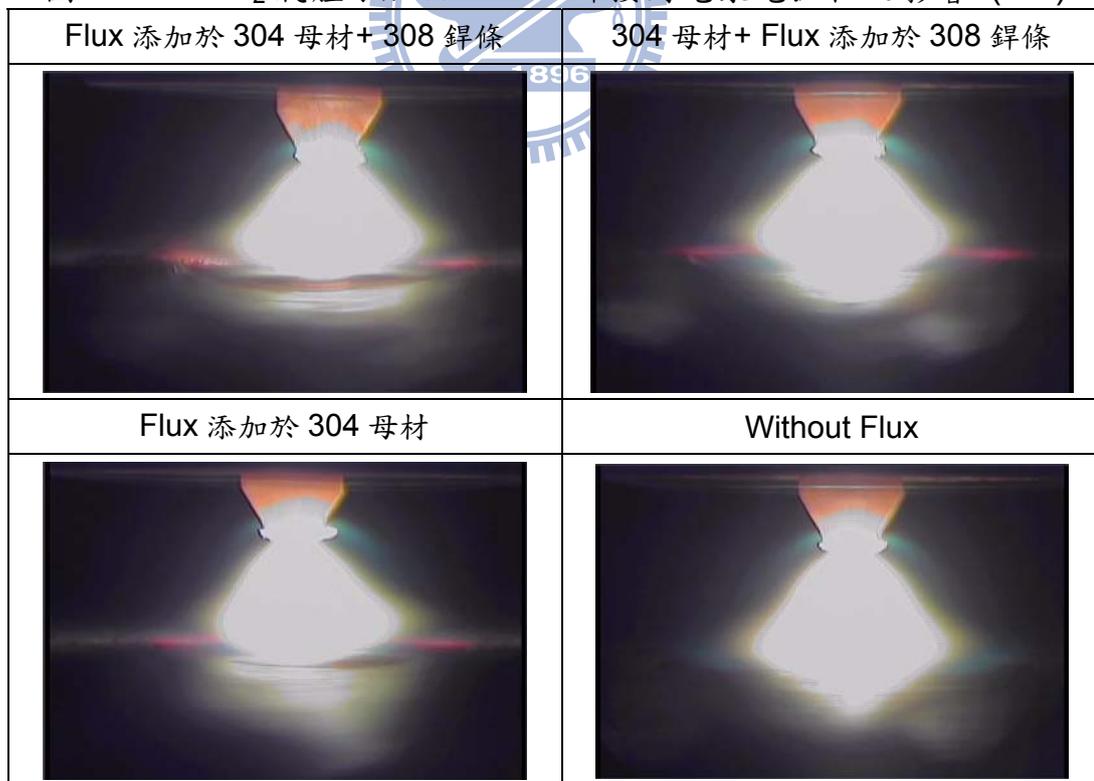


圖 4-29 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電漿電弧柱之影響 (2.5%)

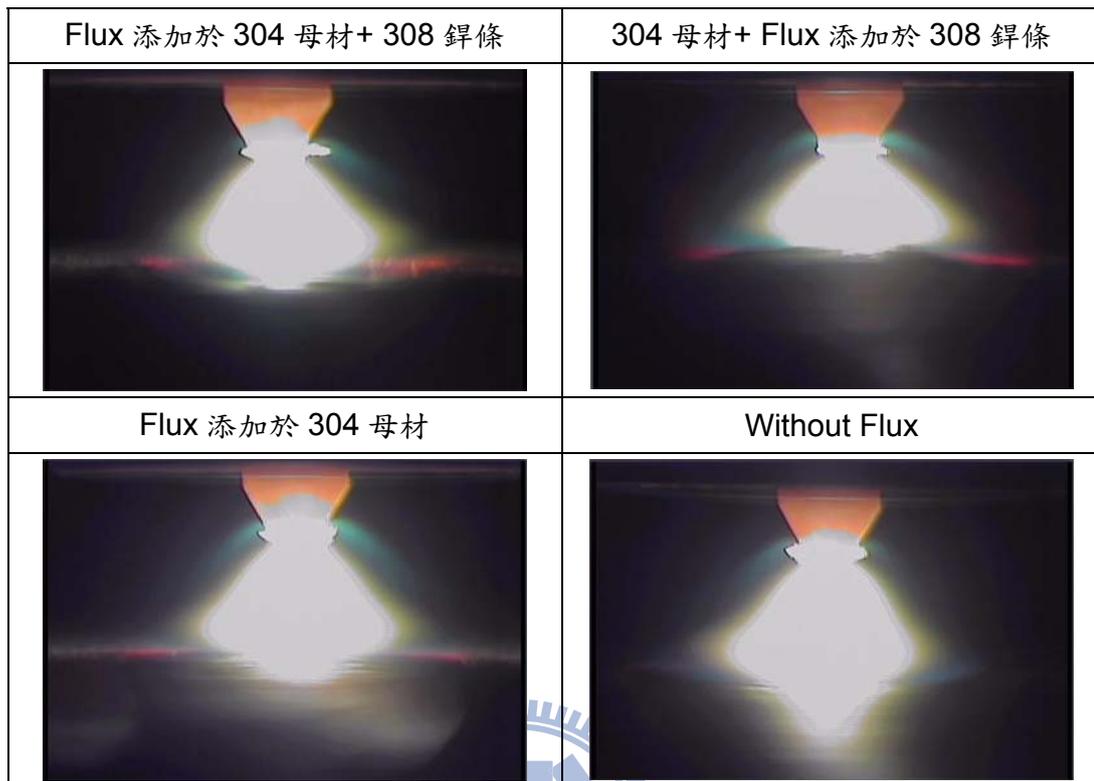


圖 4-30 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電漿電弧柱之影響 (5%)

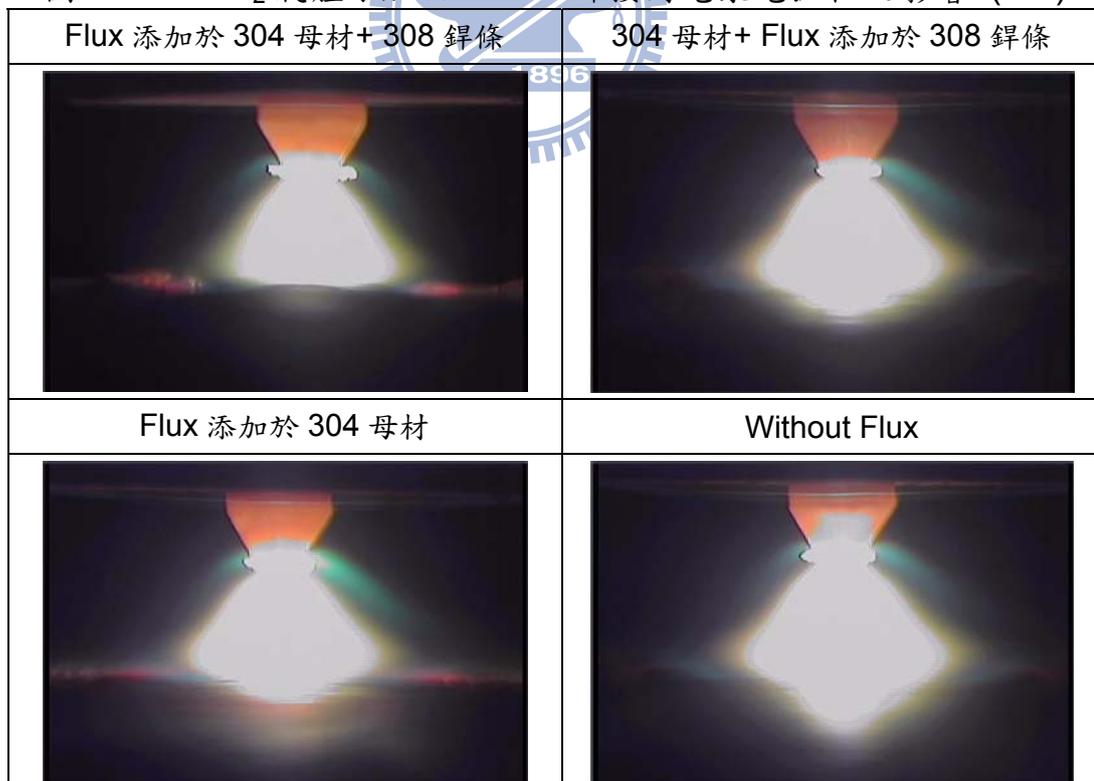
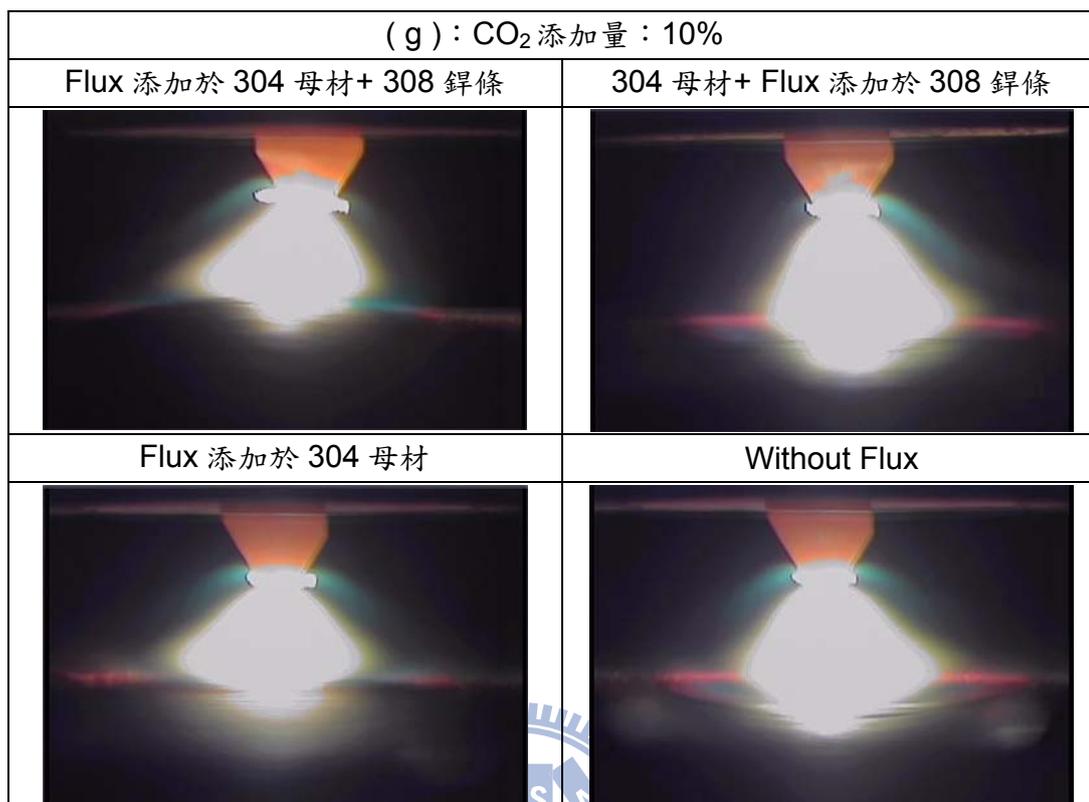


圖 4-31 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電漿電弧柱之影響 (7.5%)

圖 4-32 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對電漿電弧柱之影響 (10%)

4.5.2 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對陽極斑點之影響

陽極斑點(Anode spot)即是銲接過程中呈熔融狀態的熔池，因本實驗所使用的 A-TIG 銲接模式為直流電極負，銲炬為陰極，母材為陽極，藉由 CCD 拍攝母材實驗時的陽極斑點的變化，其對銲道的幾何形狀亦有明顯的影響。

在 A-TIG 銲接過程中，除了電漿電弧會產生收縮現象外，位於銲池中的陽極斑點亦會產生明顯的緊縮現象，但要從圖 4-40 至 4-46 可知，若要直接量測陽極斑點的收縮狀況，因熔池內熔融金屬的拖曳現象，並無法進行直接量測得知；因其收縮情形，將直接影響銲道寬度與熱輸入量的關係，當其單位面積內所收到的熱輸入量越大，即表示其熔接效率較佳，故在此計算將熱輸入量除以銲道寬度，可得單位面積之熱輸入量，將其值再除以未添加助銲劑之熱輸入量可得其影響係數，並進行比對其係數差異，即可得知其陽極斑點收縮之比例。

由圖 4-33 至 4-39 可知，在傳統氬銲中添加助銲劑可有 3% 之收縮比例，且添加銲條可使增加至 8~8.7% 之收縮比例，且隨著 CO₂ 添加量增加其陽極斑

點收縮現象反向成為負值；其 CO₂ 添加於 A-TIG 製程，可發現於添加 0.5% 時其收縮比例為 -5.6%，此因氧化物增加會影響收縮比例有反向變差的效果，隨著 CO₂ 添加量增加，此收縮比例反向變差的狀況有加劇之現象；比對圖 4-40 至 4-46，可觀測得知其陽極斑點有緊縮明顯及氣動拖曳有越明顯的現象，且隨著 CO₂ 添加量增加，熔池緊縮及氣動拖曳現象亦越來越不明顯。

由於 A-TIG 製程中所添加之助銲劑本身不具導電性，且其熔/沸點亦比銲接金屬材料高，所以只由在電漿電弧中心的高溫區域才會產生金屬蒸氣。因此銲接金屬材料在塗敷助銲劑後，其金屬蒸氣將會受到抑制效果，而在較少的金屬蒸氣情況下，熔融銲池會形成較小的陽極斑點區。助銲劑物質的存在將會造成熔融銲池的緊縮現象，而此現象將會提高作用於陽極斑點區的電流密度，亦即會增加銲池內部因電流相互作用所形成的電磁力，且同時降低銲池表面因電漿對流所產生的氣動拖曳力(Aerodynamic drag force)，進而形成窄而深的銲道截面形狀。此外，混合型助銲劑添加於母材試片表面或銲條表面，觀察其陽極斑點均很相似。

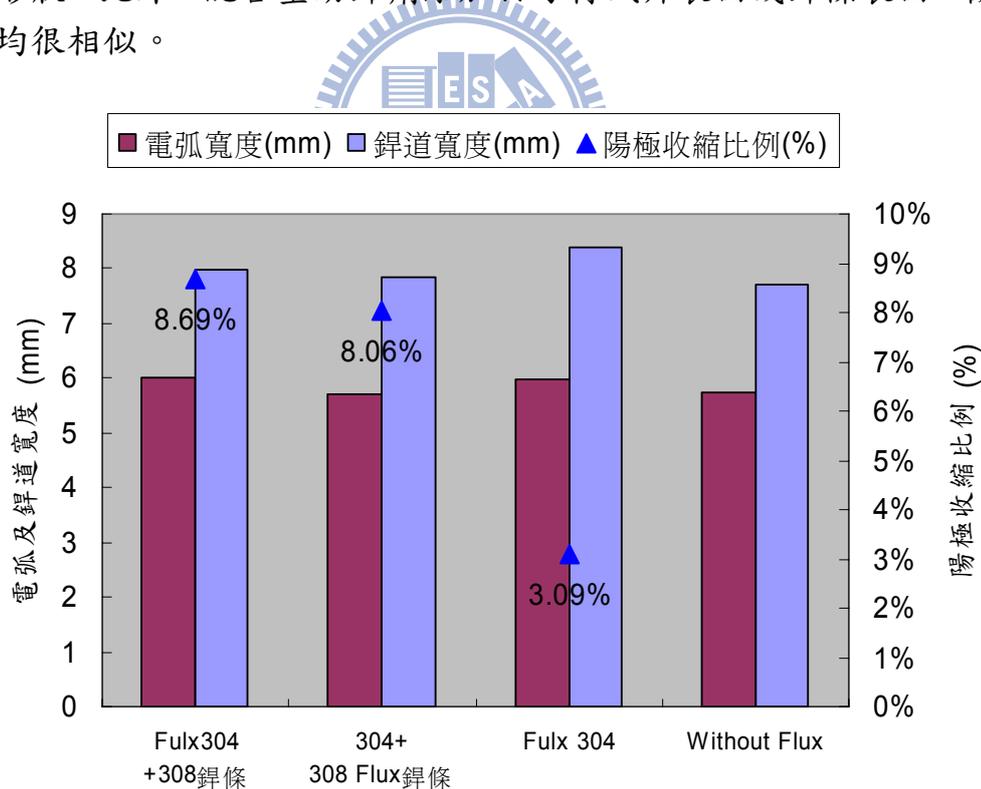


圖 4-33 Ar- 0%CO₂ 對電弧寬度及陽極斑點收縮比例之影響

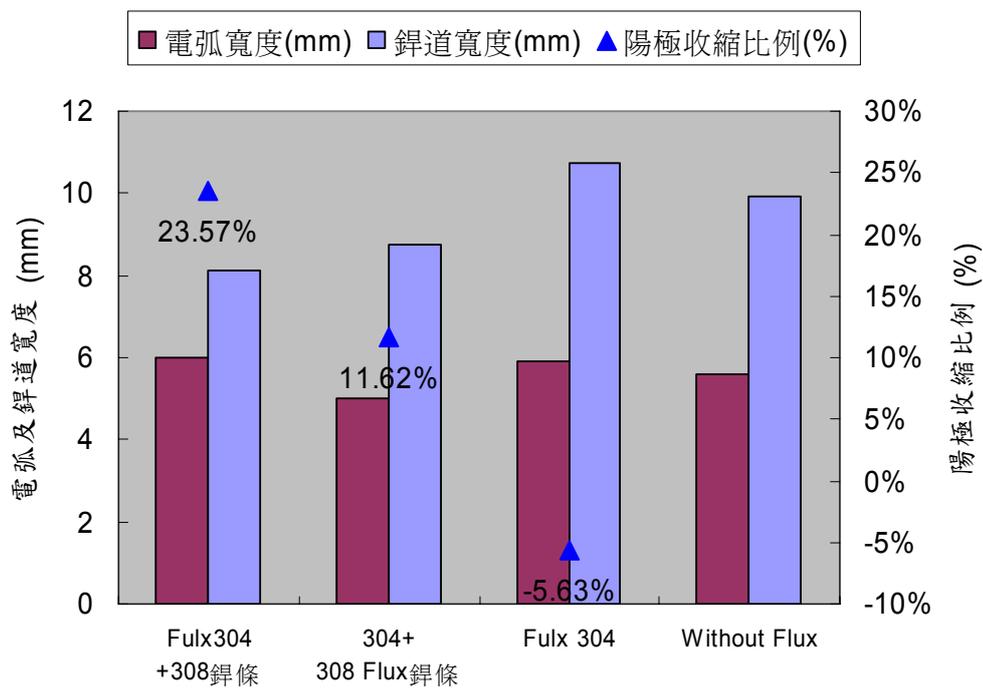


圖 4-34 Ar- 0.5%CO₂ 電弧寬度及陽極斑點收縮比例之影響

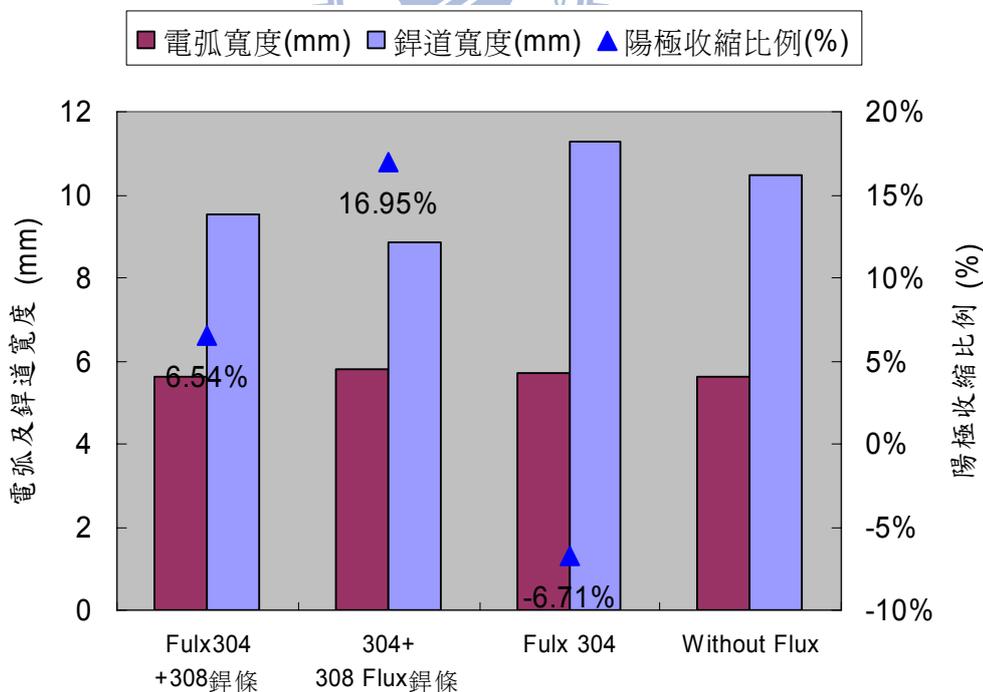


圖 4-35 Ar- 1%CO₂ 電弧寬度及陽極斑點收縮比例之影響

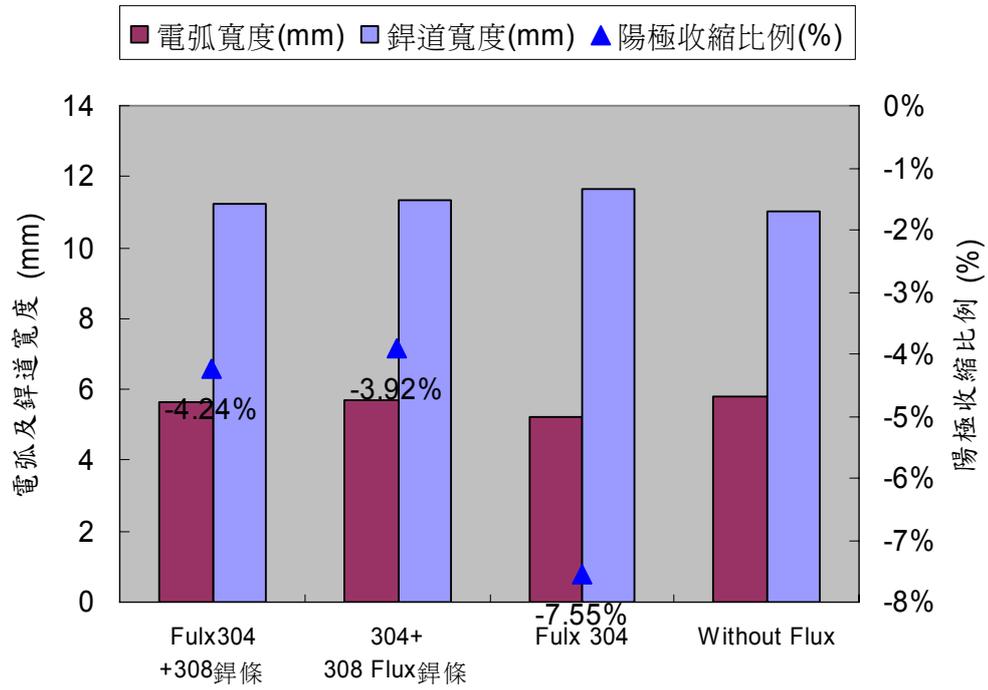


圖 4-36 Ar- 2.5%CO₂ 電弧寬度及陽極斑點收縮比例之影響

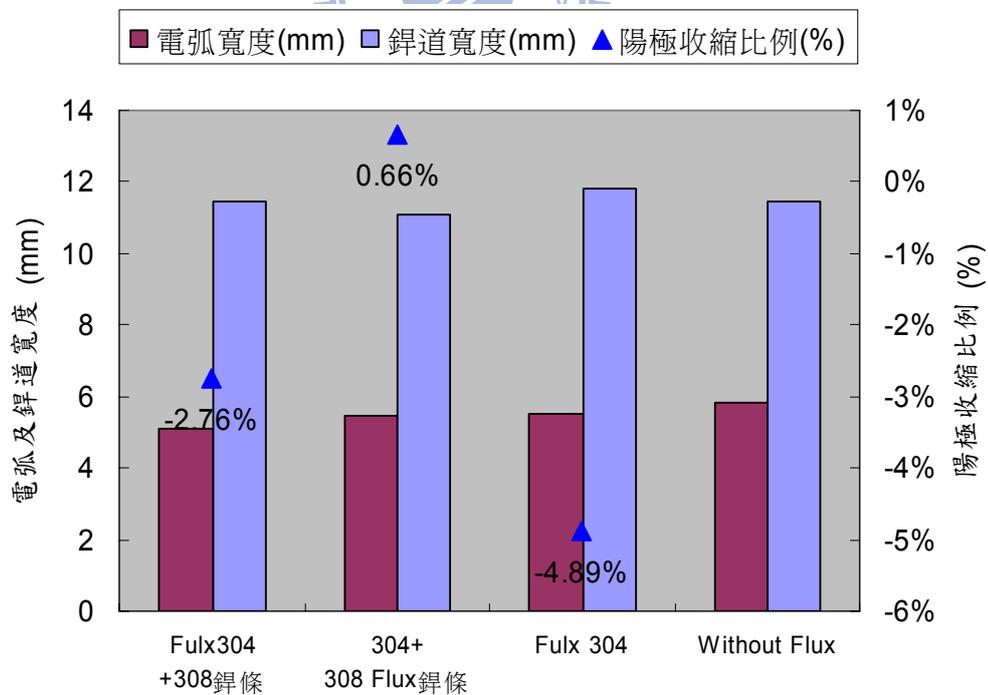


圖 4-37 Ar- 5%CO₂ 電弧寬度及陽極斑點收縮比例之影響

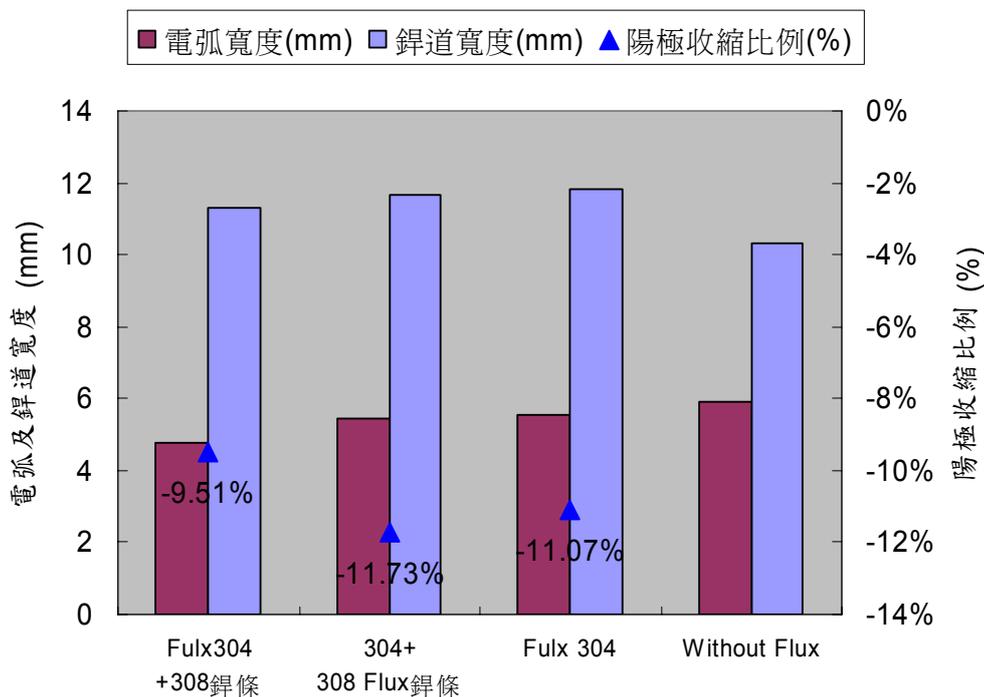


圖 4-38 Ar- 7.5%CO₂ 電弧寬度及陽極斑點收縮比例之影響

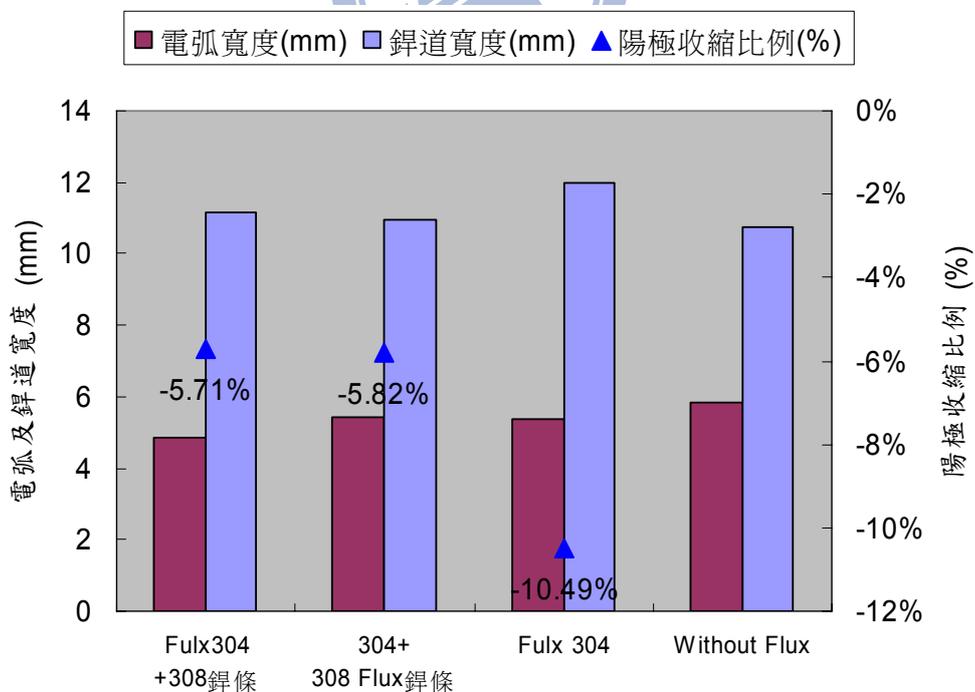


圖 4-39 Ar- 10%CO₂ 電弧寬度及陽極斑點收縮比例之影響

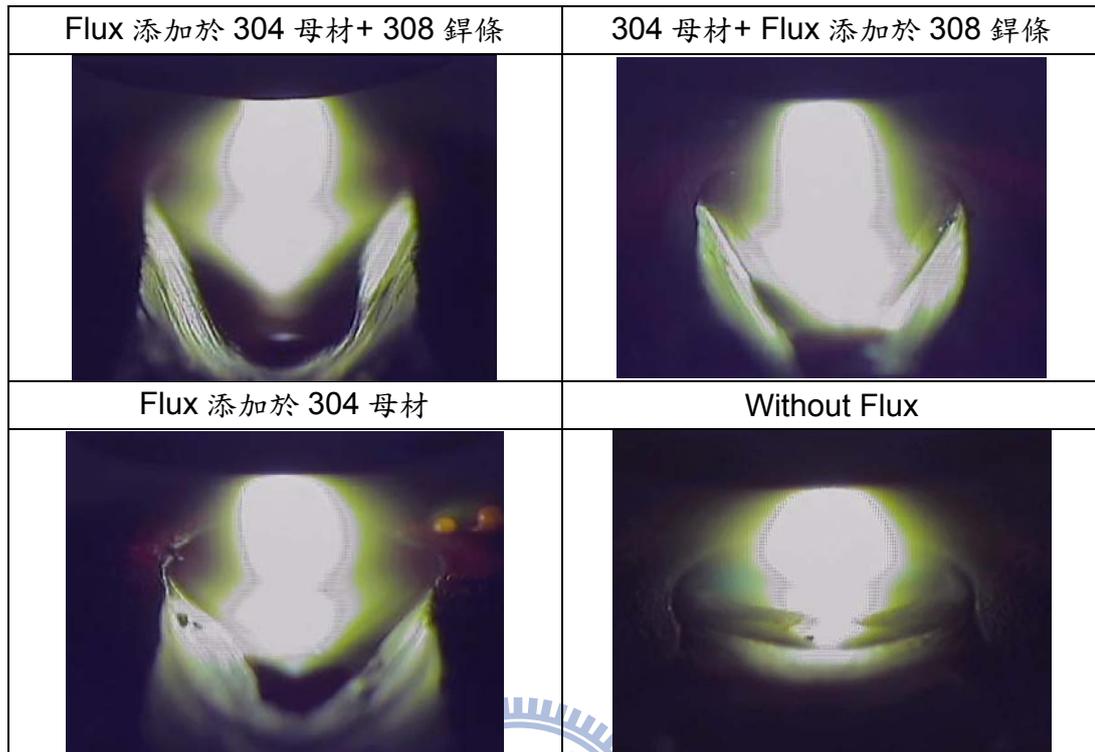


圖 4-40 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對陽極斑點之影響(0%)

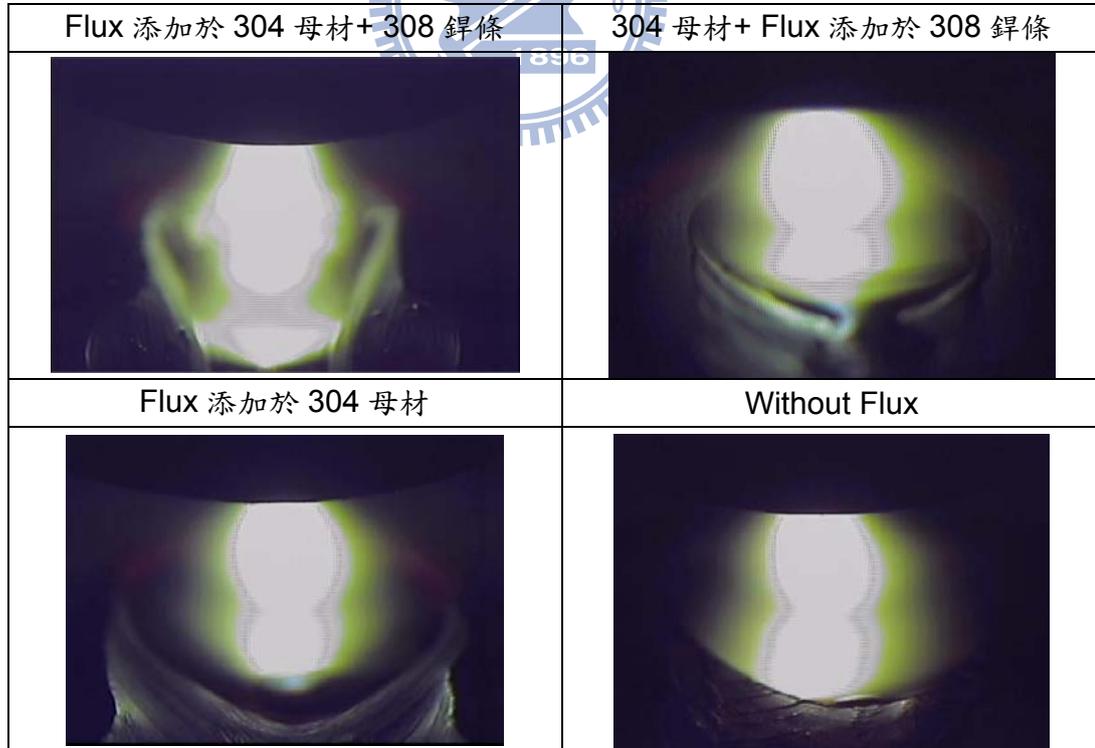


圖 4-41 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對陽極斑點之影響(0.5%)

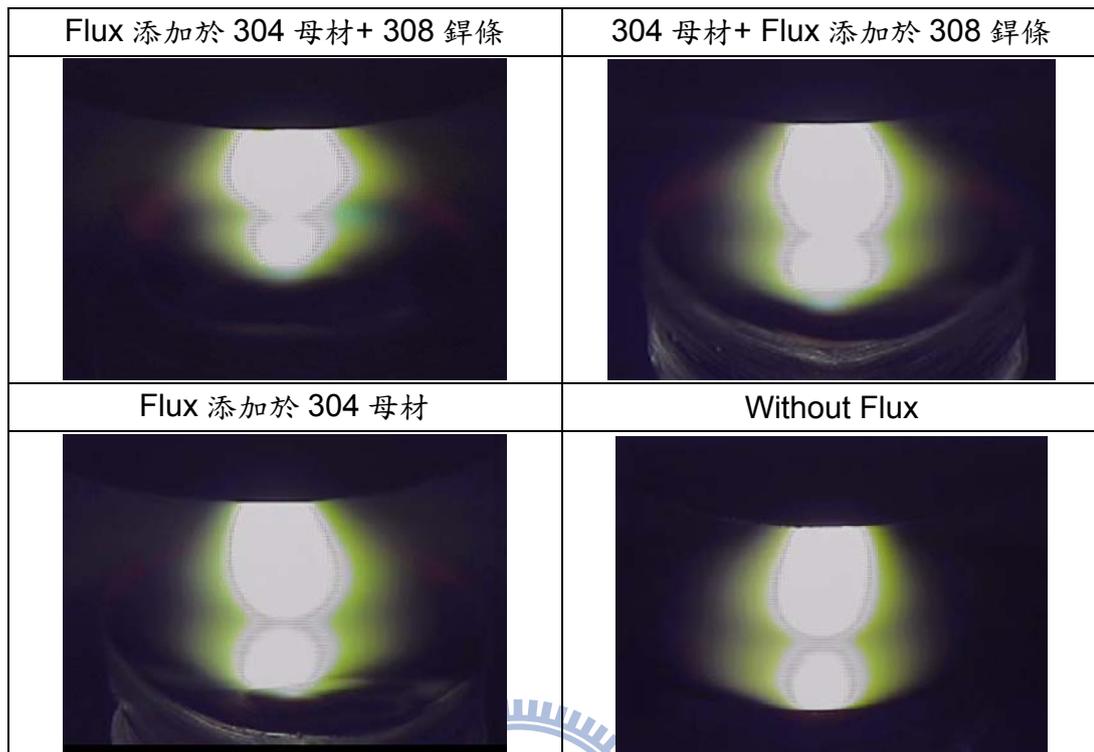


圖 4-42 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 鐸接對陽極斑點之影響 (1%)

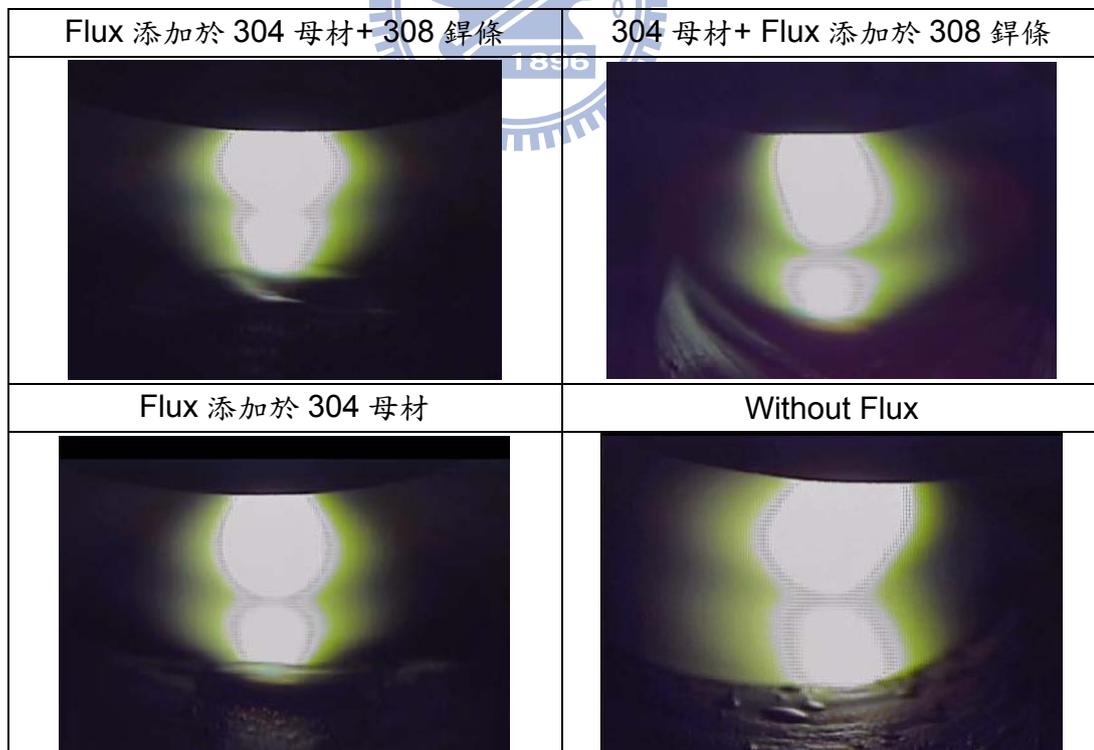


圖 4-43 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 鐸接對陽極斑點之影響 (2.5%)

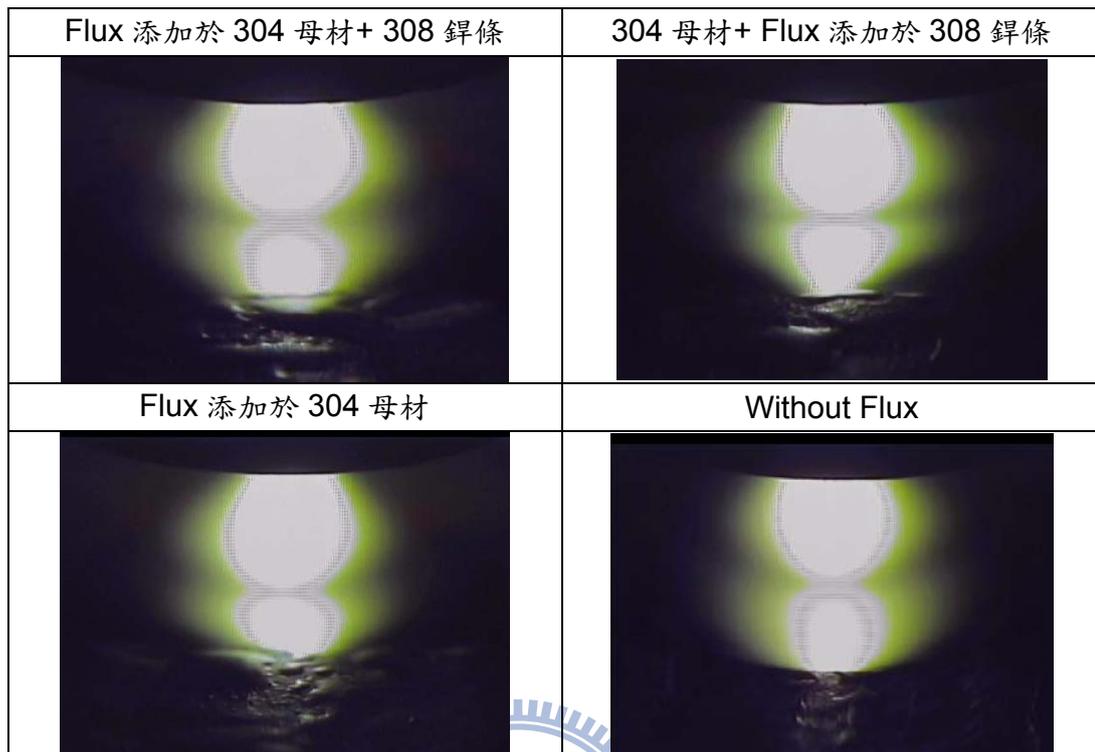


圖 4-44 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 鐸接對陽極斑點之影響 (5%)

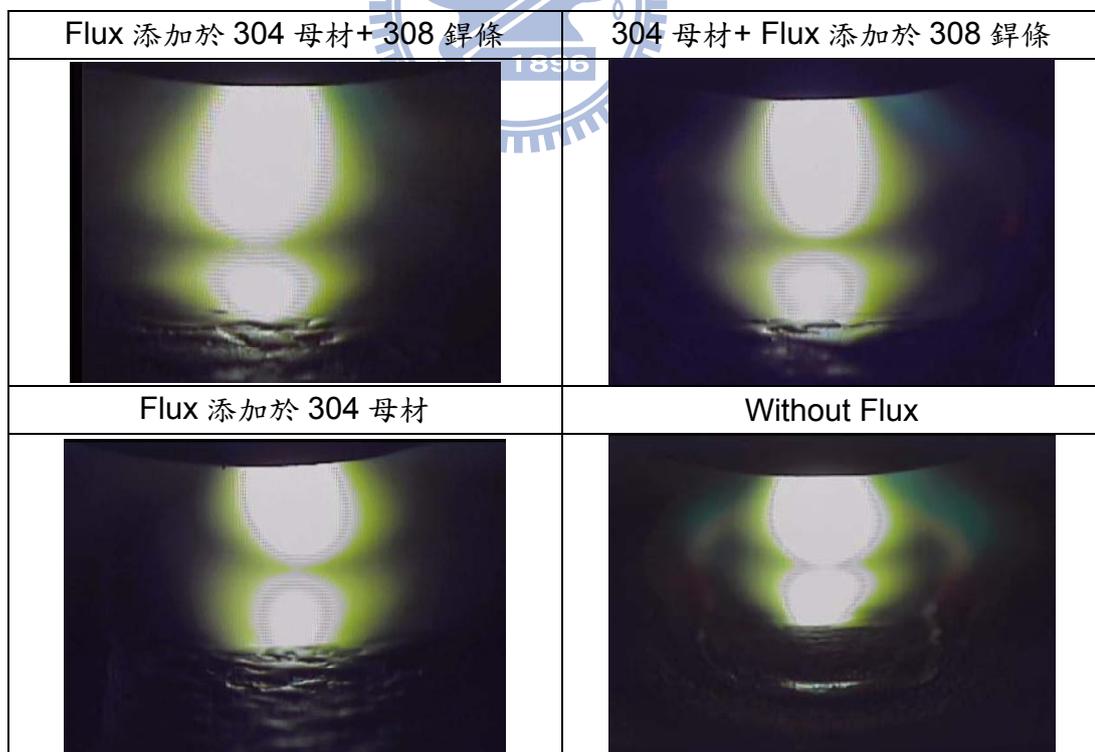
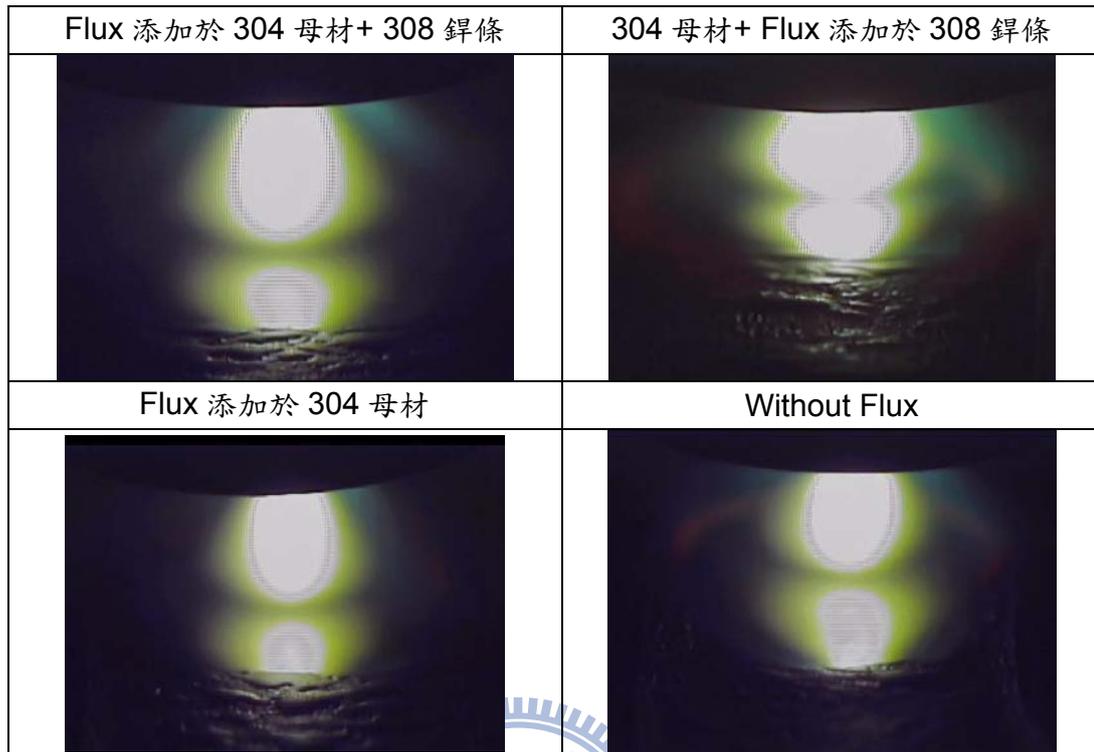


圖 4-45 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 鐸接對陽極斑點之影響 (7.5%)

圖 4-46 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 鐸接對陽極斑點之影響 (10%)

4.6 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 鐸接對鐸道肥粒相含量之影響

304 不銹鋼於未鐸接前乃屬於面心立方體結構的沃斯田鐵相組織，但於鐸接過程中由於鐸道部份熱輸入量較大而且集中，因此在鐸道組織中所殘留的體心立方體的肥粒相組織密度也較高；本實驗量測結果如圖 4-47 所示，因未添加氮化物所以採用雪弗圖來進行分析及說明，依公式 2-2 及 2-3 計算鐸條及母材材料成分計算其 Ni_{eq} 及 Cr_{eq} 其分別為 Ni_{eq} 為 11、 Cr_{eq} 為 19.9、 Ni_{eq}/Cr_{eq} 為 1.81，並配合雪弗圖(Schaeffler diagram)，預測其肥粒相含量為 10FN，由表可觀察出在 TIG 製程中未添加 CO₂，其肥粒相含量量測值 11.3 FN 與預測值相近，隨著 CO₂ 添加而有下降趨勢，依雪弗圖推論因添加 CO₂ ($CO_2 \rightarrow CO + O$)，其氣體中的碳於鐸接過程中亦進入熔池內，由 Ni_{eq} 計算式中可知碳元素對鐸道肥粒相析出有抑制的效果。故推論於鐸道其除氧化物增加外，其碳化物應隨添加量增加而增加。於 A-TIG 製程中未添加 CO₂ 條件下，其肥粒相含量量測值 10.1 FN 與未添加助鐸劑差異不大，且鐸條的添加亦無明顯之差異。添加 CO₂ 於 A-TIG 製程中，由實驗結果與趨勢圖進行比對可知隨著 CO₂ 添加而

銲道肥粒相亦有下降趨勢。因此 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接製程或傳統 TIG 製程中，皆可使抑制肥粒相生成，當添加量超過 1% 時以上時，可明顯的降低銲道肥粒相含量。

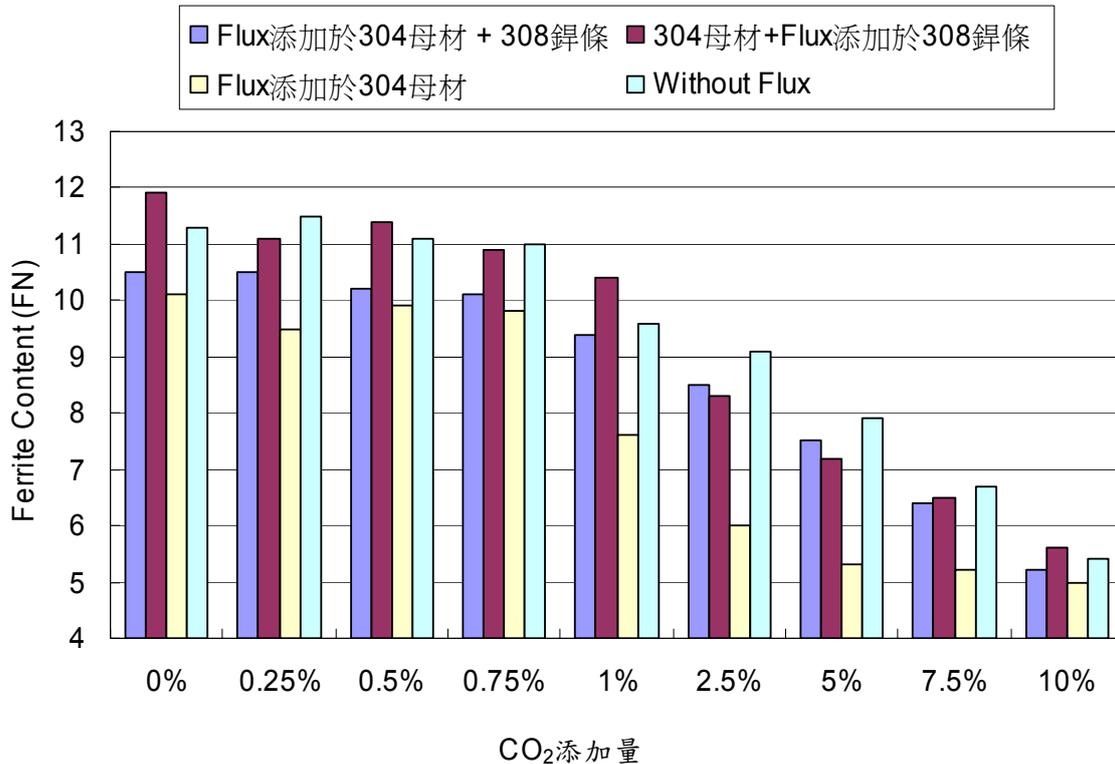


圖 4-47 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對銲道肥粒相含量之影響

其 Cr_{eq} / Ni_{eq} 為 1.81 依據 Suutala 提出之凝固時的微觀結構，為型式 B ($1.48 < Cr_{eq} / Ni_{eq} < 1.95$) 的固化型態，固化時肥粒相為主要相，沃斯田相則存在於枝狀結構中。由圖 4-48 至 4-56 中的顯微組織金相照片觀察其熱影響區及銲道組織，可觀察出其組織均為輻射形樹枝狀顯微凝固組織，在熱影響區明顯為樹枝狀肥粒相 (Dendritic ferrite) 結構，且晶粒較粗大；銲道呈現較散亂的樹枝狀結構排列，熱影響區相較下較完整；再由圖 4-57 至 4-65 中，觀測銲道中組織金相，且晶體結構較不完整 (如 Acicular ferrite)，主要為在冷卻過程中銲道相較於熱影響區冷卻速率較快，晶粒來不及完整發展所致；在添加助銲劑條件下，其晶粒較未添加時為大；CO₂ 添加在傳統氬銲製程中，可發現當添加量增多時，形成較粗大的肥粒相 (Coarse ferrite)。

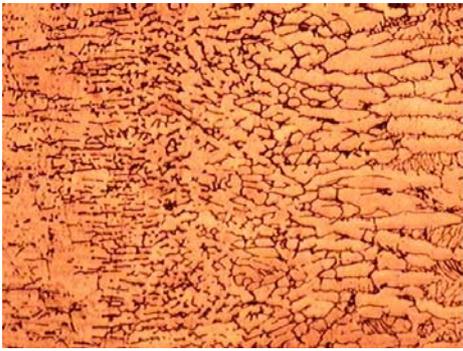
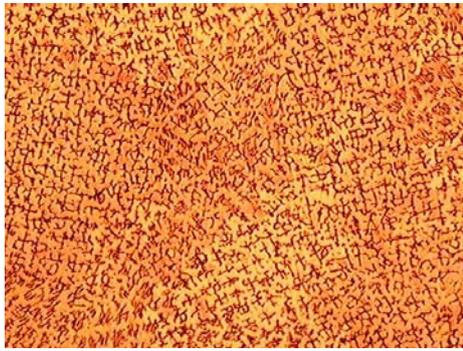
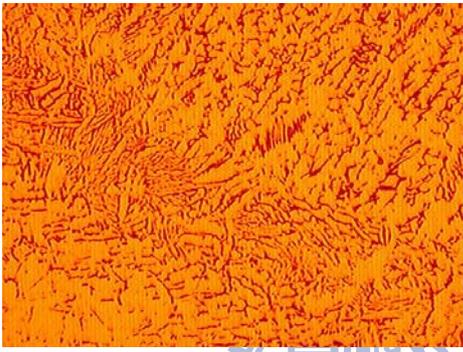
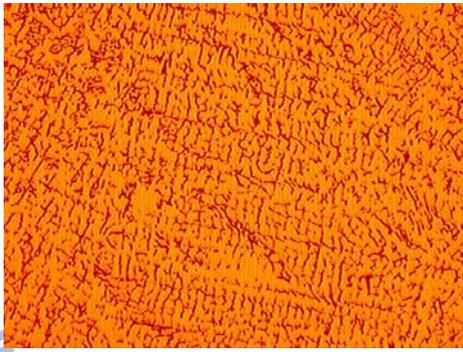
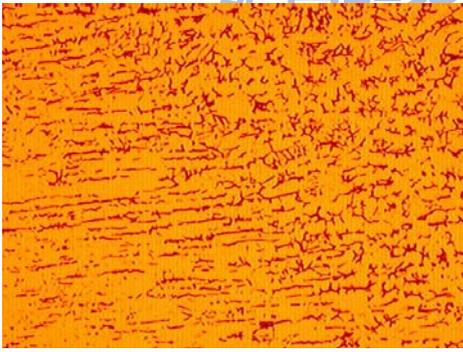
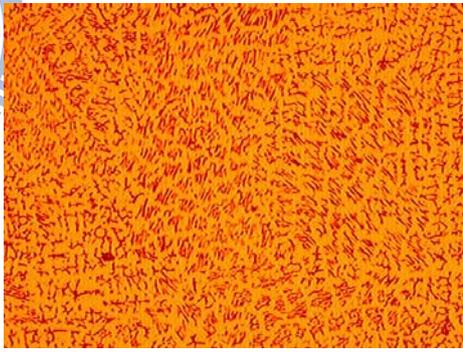
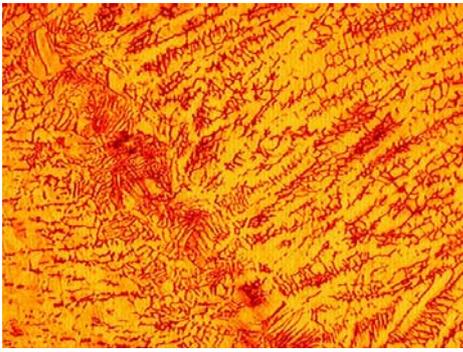
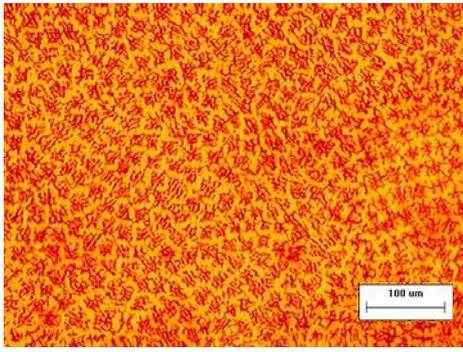
| | 熱影響區 | 銲道 |
|---------------------------|---|--|
| Flux 母材 + 308 銲條 |  |  |
| 母材 + Flux 308 銲條 |  |  |
| Flux 母材 |  |  |
| Without Flux |  |  |

圖 4-48 Ar - 0%CO₂ 對 A-TIG 銲接金相圖(100x)

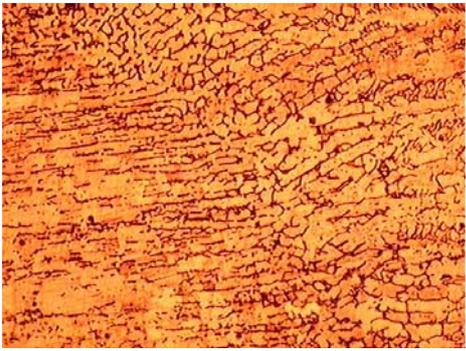
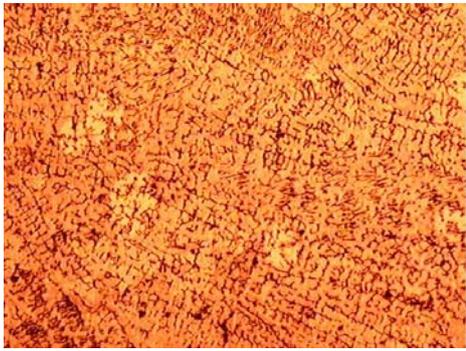
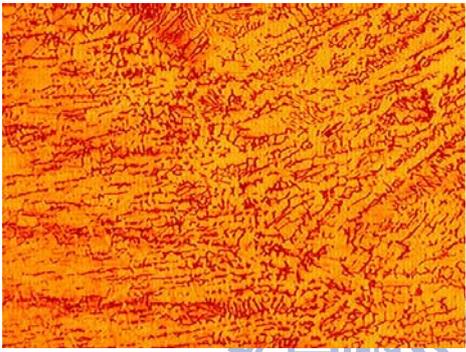
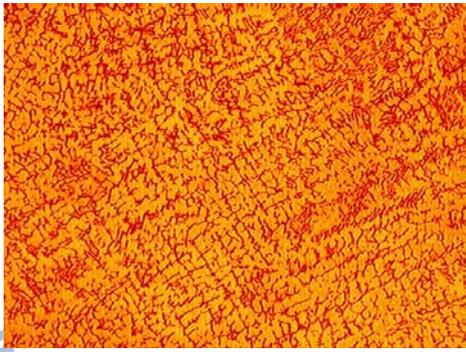
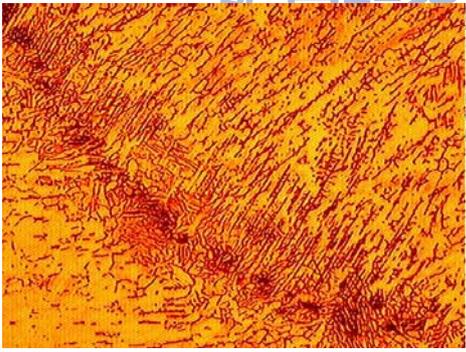
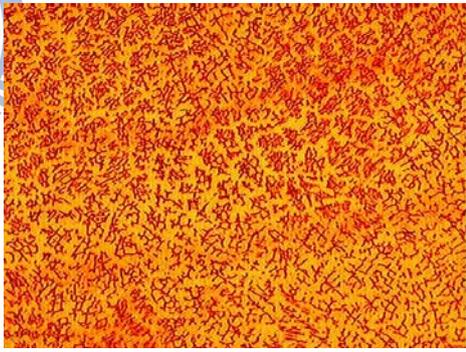
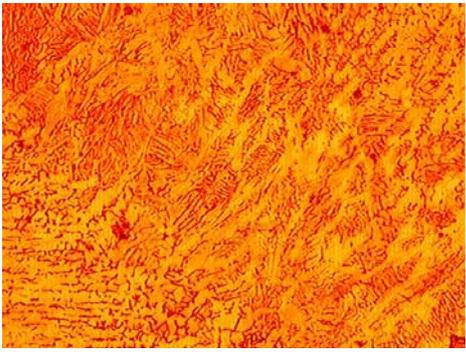
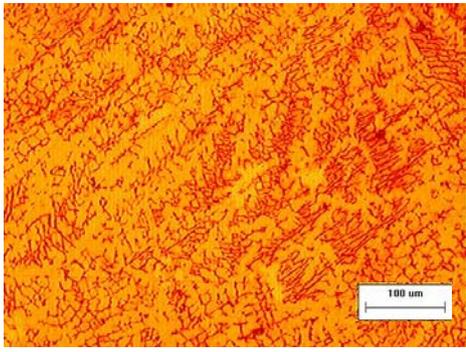
| | 熱影響區 | 銲道 |
|---------------------------|---|--|
| Flux 母材 + 308 銲條 |  |  |
| 母材 + Flux 308 銲條 |  |  |
| Flux 母材 |  |  |
| Without Flux |  |  |

圖 4-49 Ar - 0.25%CO₂ 對 A-TIG 銲接金相圖(100x)

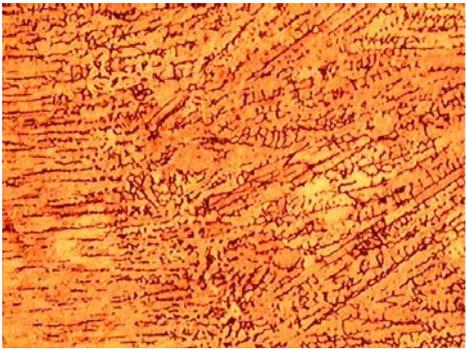
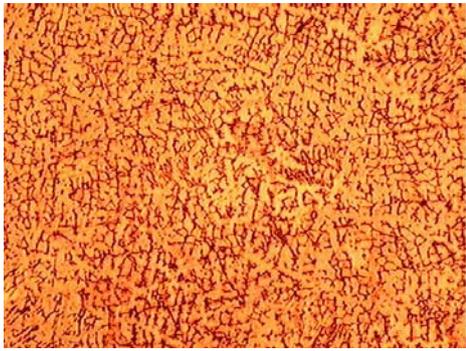
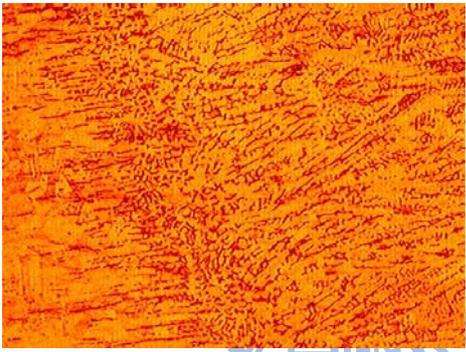
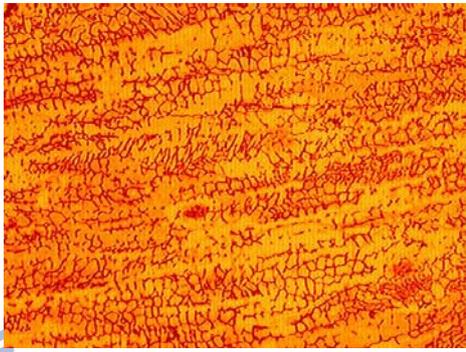
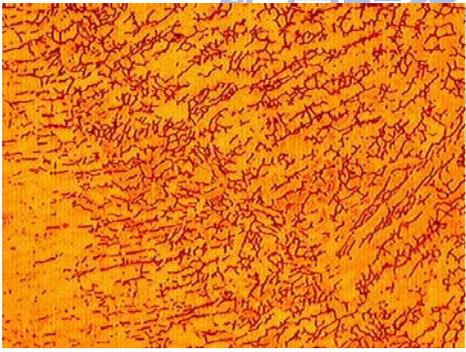
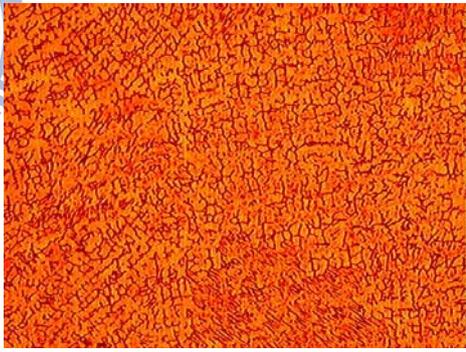
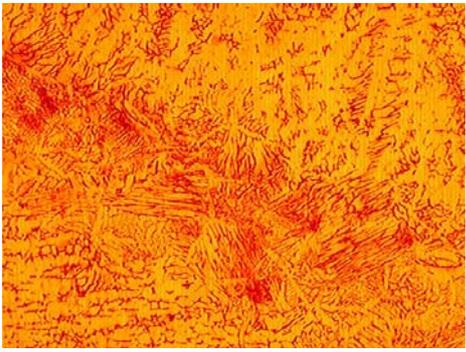
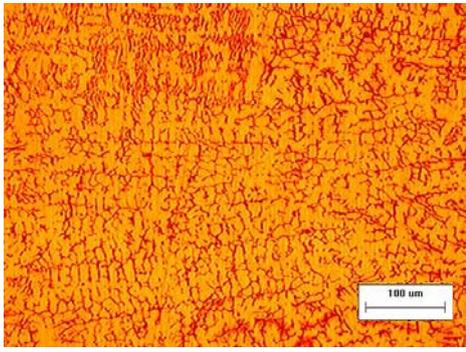
| | 熱影響區 | 銲道 |
|---------------------------|---|--|
| Flux 母材 + 308 銲條 |  |  |
| 母材 + Flux 308 銲條 |  |  |
| Flux 母材 |  |  |
| Without Flux |  |  |

圖 4-50 Ar - 0.5%CO₂ 對 A-TIG 銲接金相圖(100x)

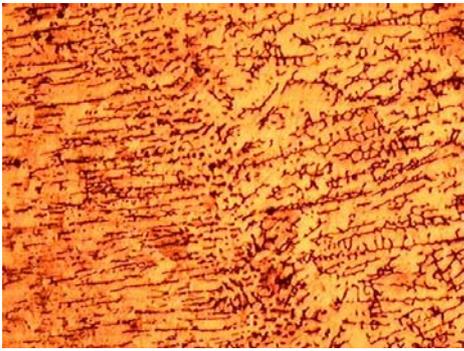
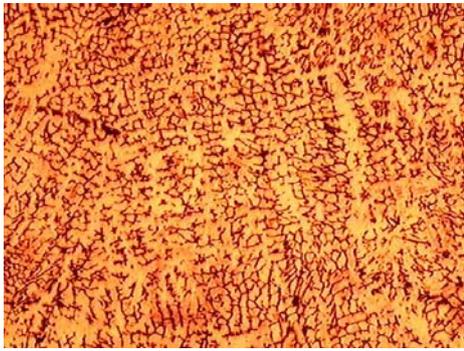
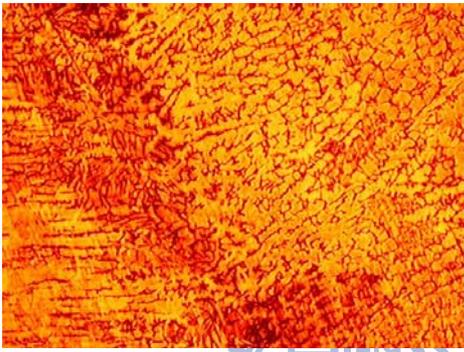
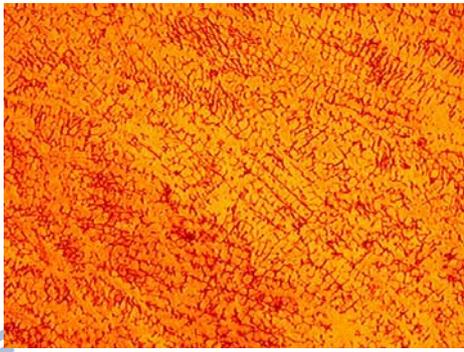
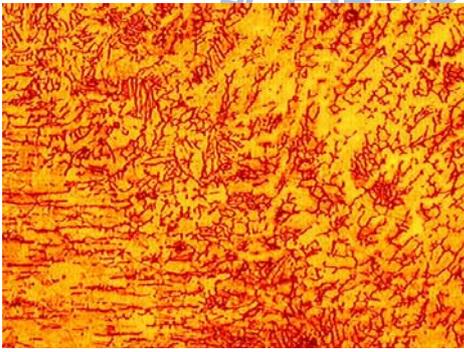
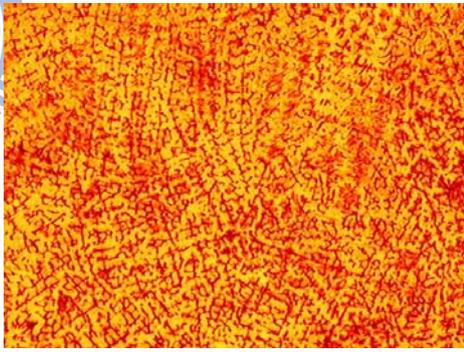
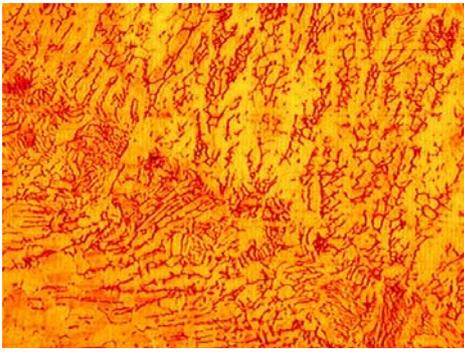
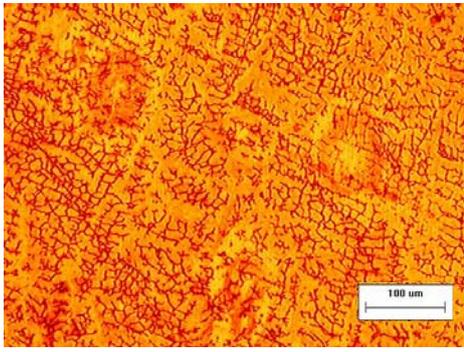
| | 熱影響區 | 銲道 |
|---------------------------|---|--|
| Flux 母材 + 308 銲條 |  |  |
| 母材 + Flux 308 銲條 |  |  |
| Flux 母材 |  |  |
| Without Flux |  |  |

圖 4-51 Ar - 0.75%CO₂ 對 A-TIG 銲接金相圖(100x)

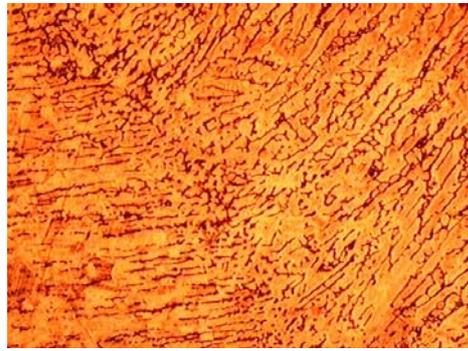
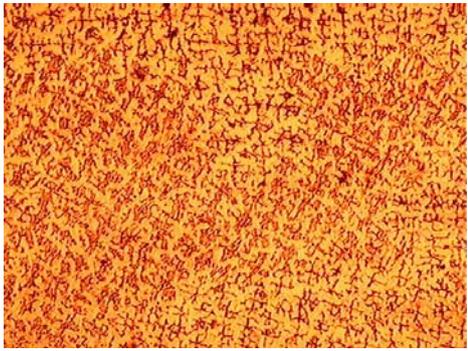
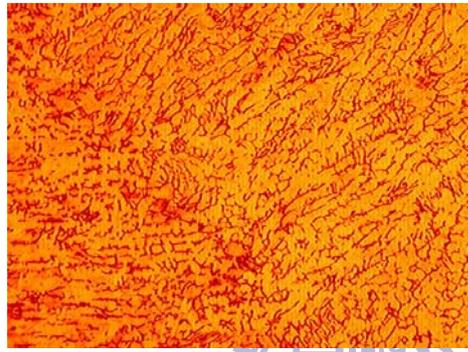
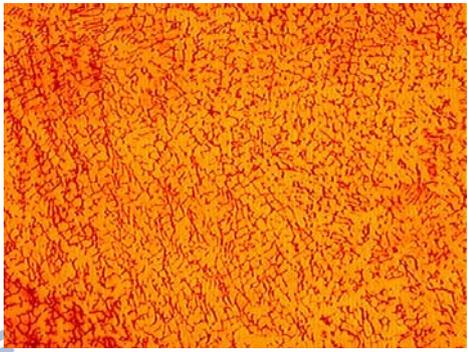
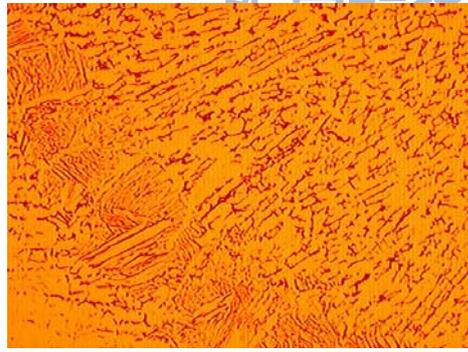
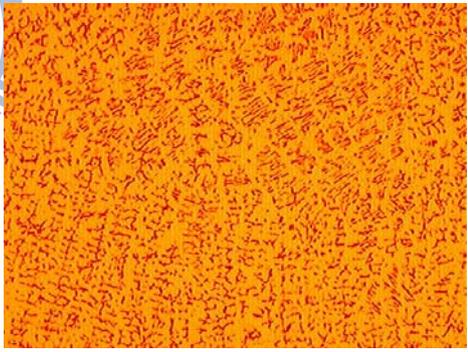
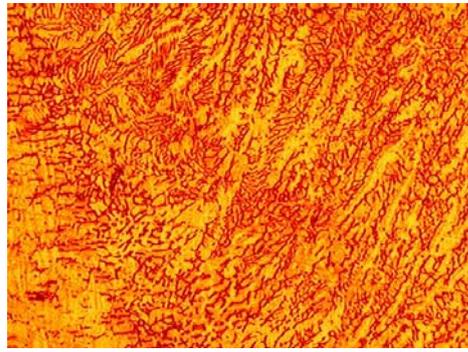
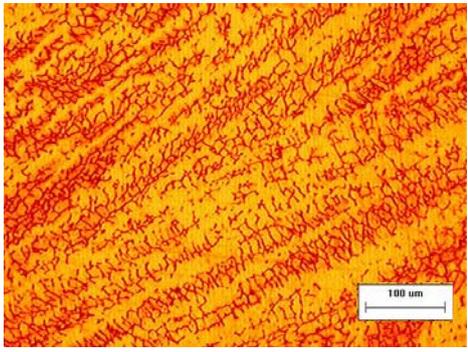
| | 熱影響區 | 銲道 |
|---------------------------|---|--|
| Flux 母材 + 308 銲條 |  |  |
| 母材 + Flux 308 銲條 |  |  |
| Flux 母材 |  |  |
| Without Flux |  |  |

圖 4-52 Ar - 1%CO₂ 對 A-TIG 銲接金相圖(100x)

| | 熱影響區 | 銲道 |
|---------------------------|------|----|
| Flux 母材 + 308 銲條 | | |
| 母材 + Flux 308 銲條 | | |
| Flux 母材 | | |
| With- out Flux | | |

圖 4-53 Ar - 2.5%CO₂ 對 A-TIG 銲接金相圖(100x)

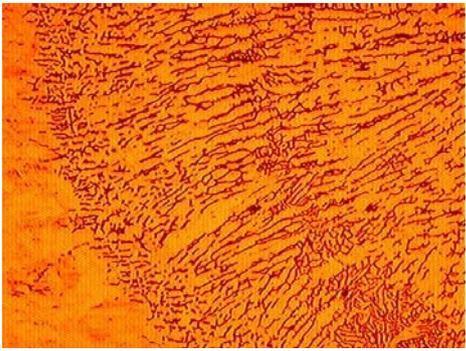
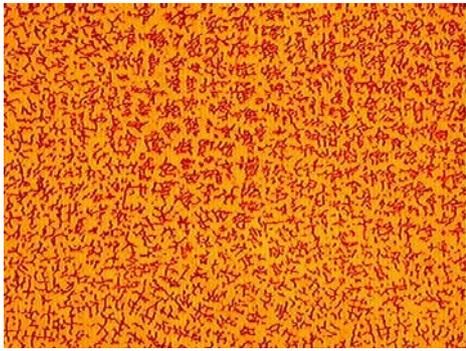
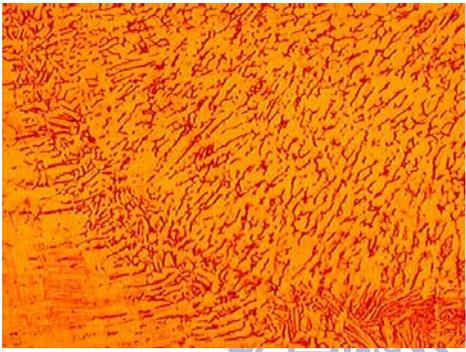
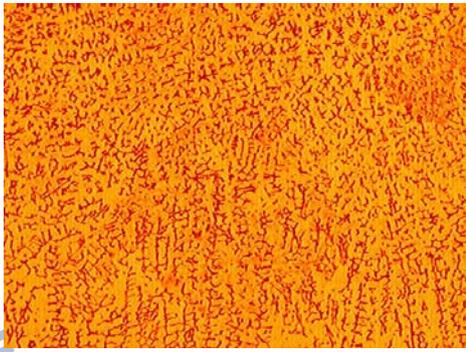
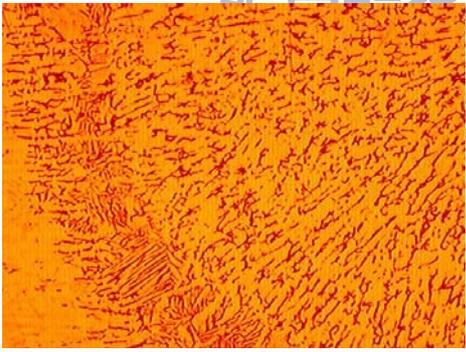
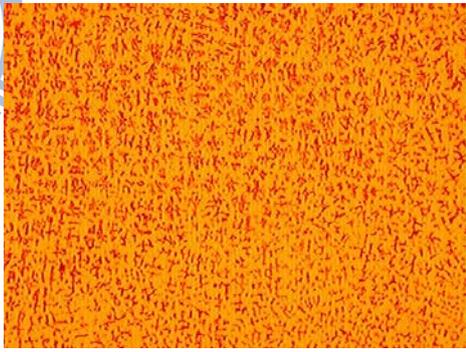
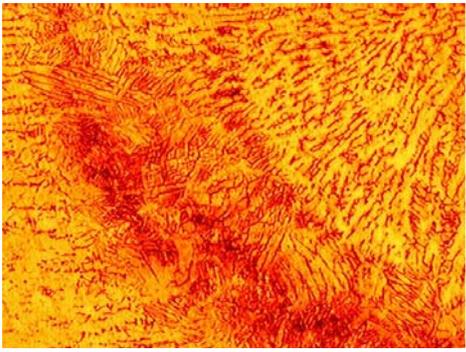
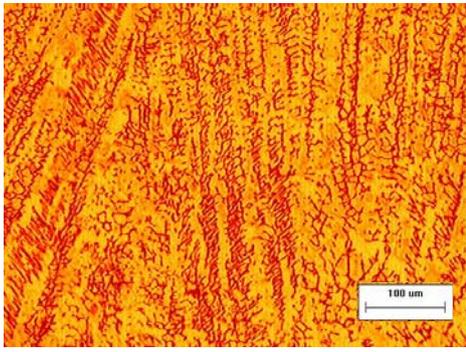
| | 熱影響區 | 銲道 |
|---------------------------|---|--|
| Flux 母材 + 308 銲條 |  |  |
| 母材 + Flux 308 銲條 |  |  |
| Flux 母材 |  |  |
| Without Flux |  |  |

圖 4-54 Ar - 5%CO₂ 對 A-TIG 銲接金相圖(100x)

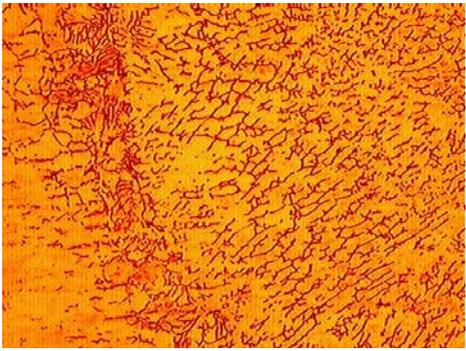
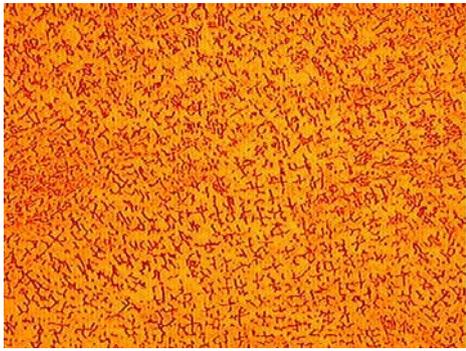
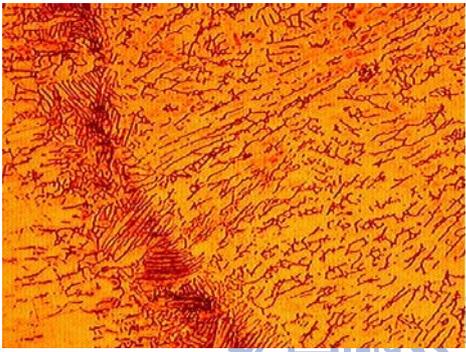
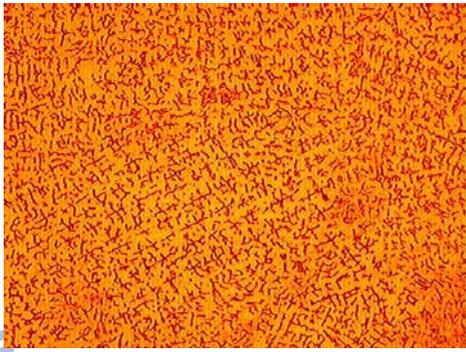
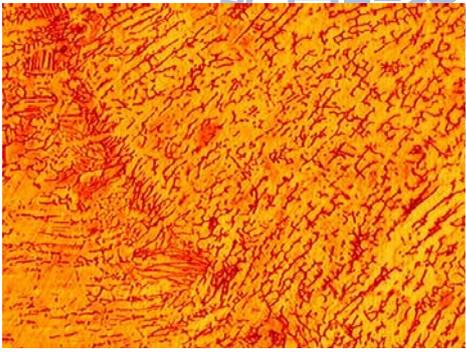
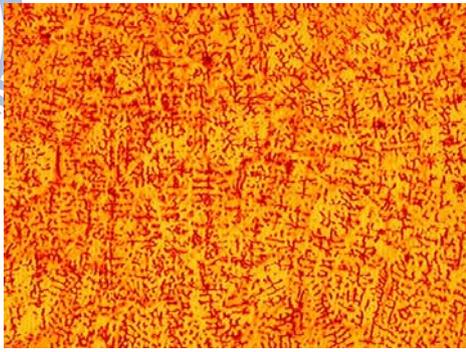
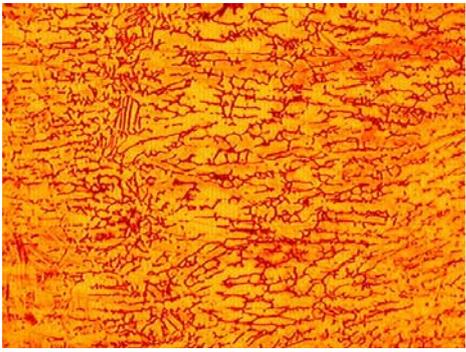
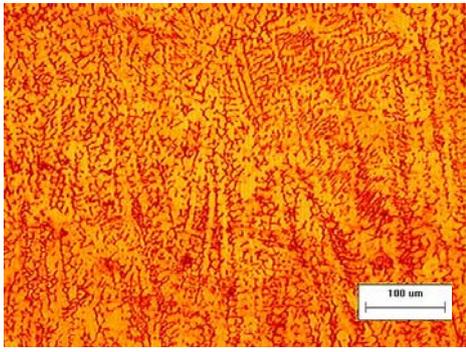
| | 熱影響區 | 銲道 |
|------------------------------|---|--|
| Flux 母材 + 308 銲條 |  |  |
| 母材 + Flux 308 銲條 |  |  |
| Flux 母材 |  |  |
| Without Flux |  |  |

圖 4-55 Ar - 7.5%CO₂ 對 A-TIG 銲接金相圖(100x)

| | 熱影響區 | 銲道 |
|---------------------------|------|----|
| Flux 母材 + 308 銲條 | | |
| 母材 + Flux 308 銲條 | | |
| Flux 母材 | | |
| Without Flux | | |

圖 4-56 Ar – 10%CO₂ 對 A-TIG 銲接金相圖(100x)

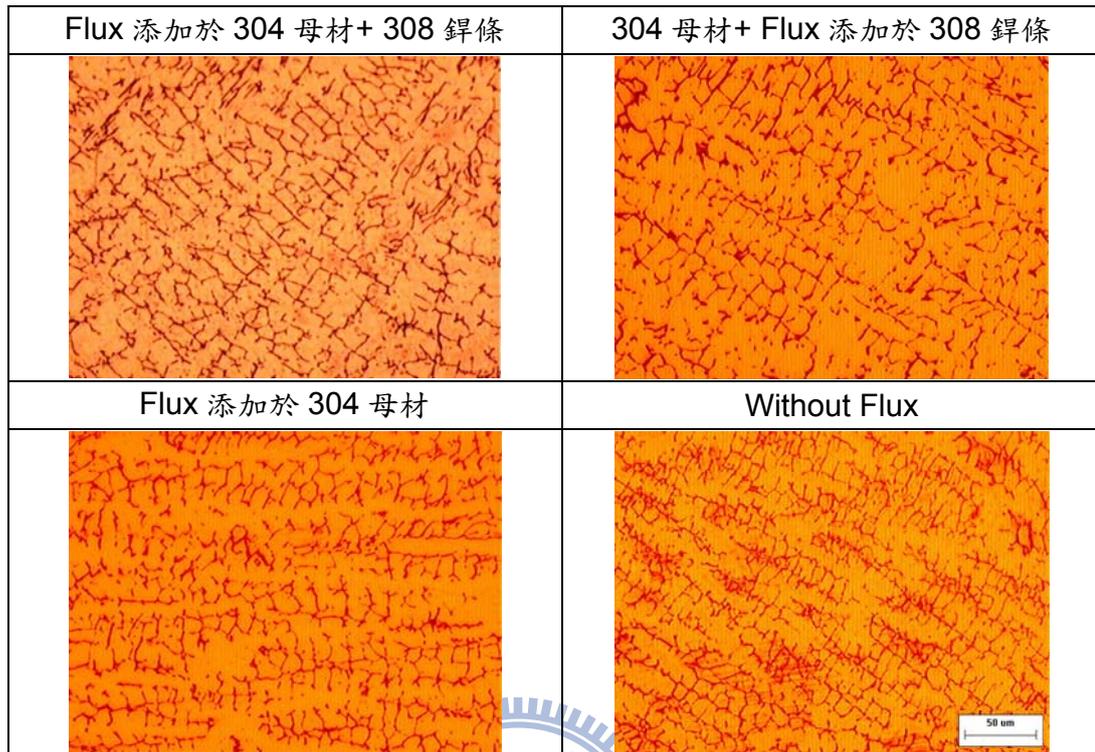


圖 4-57 Ar – 0%CO₂ 對 A-TIG 鐸道顯微組織之影響(200x)

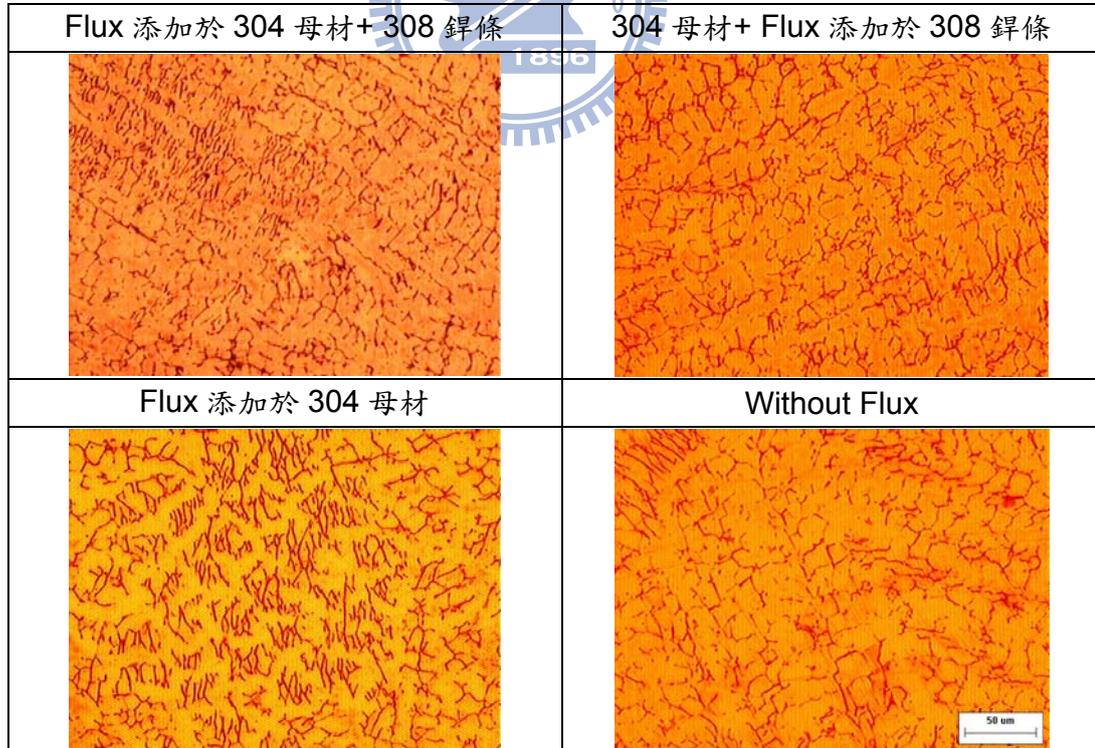


圖 4-58 Ar – 0.25%CO₂ 對 A-TIG 鐸道顯微組織之影響(200x)

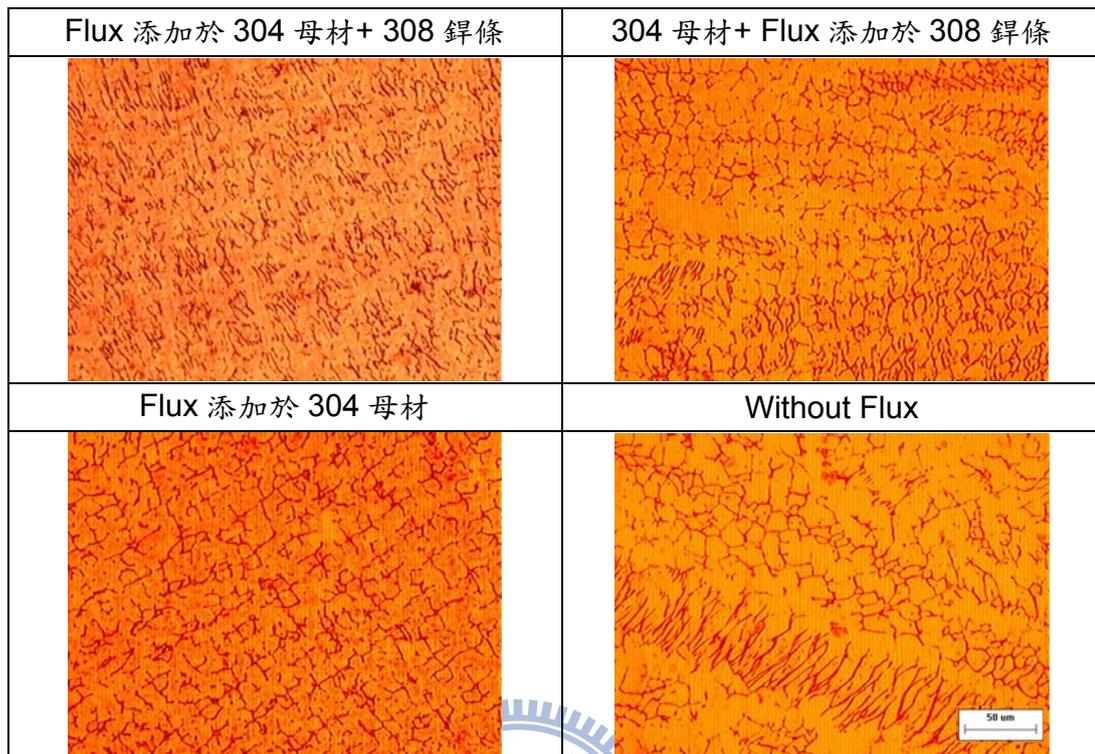


圖 4-59 Ar – 0.5%CO₂ 對 A-TIG 鐸道顯微組織之影響(200x)

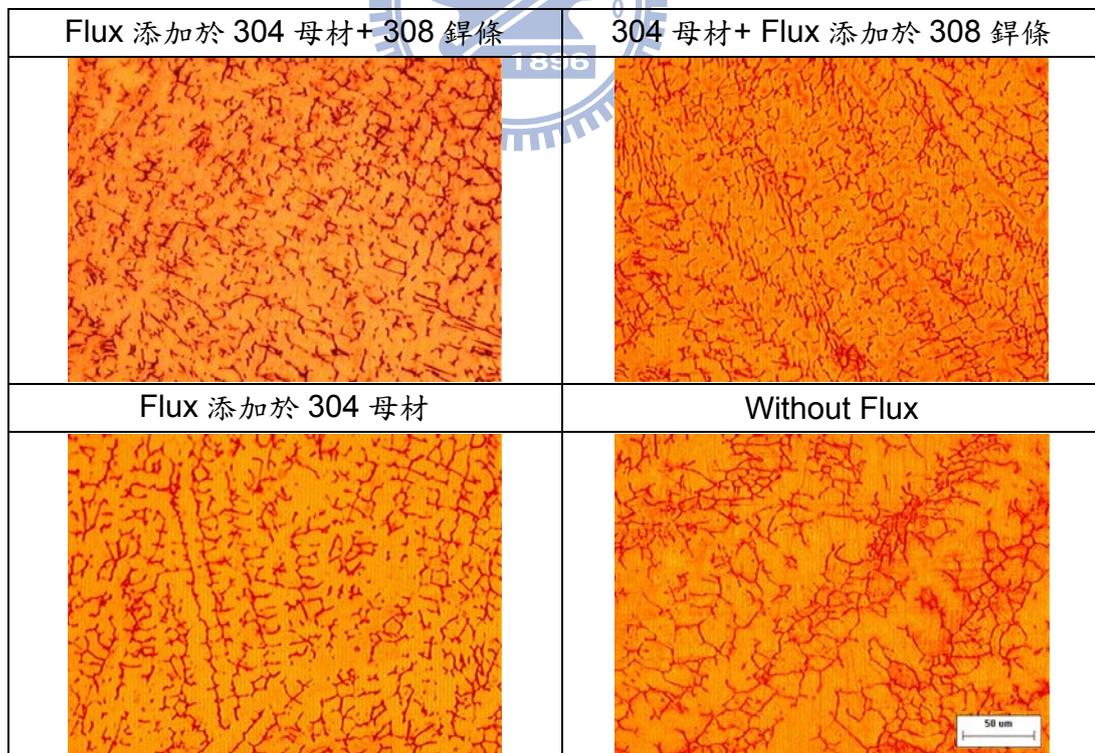


圖 4-60 Ar – 0.75%CO₂ 對 A-TIG 鐸道顯微組織之影響(200x)

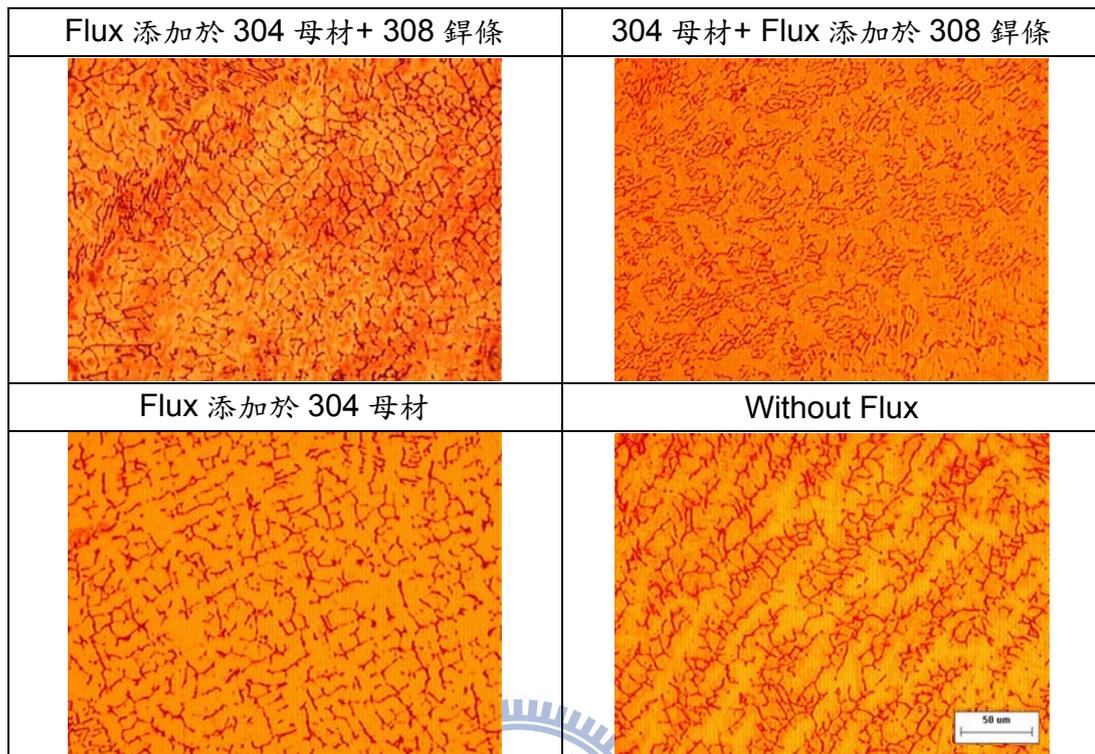


圖 4-61 Ar – 1%CO₂ 對 A-TIG 鐸道顯微組織之影響(200x)

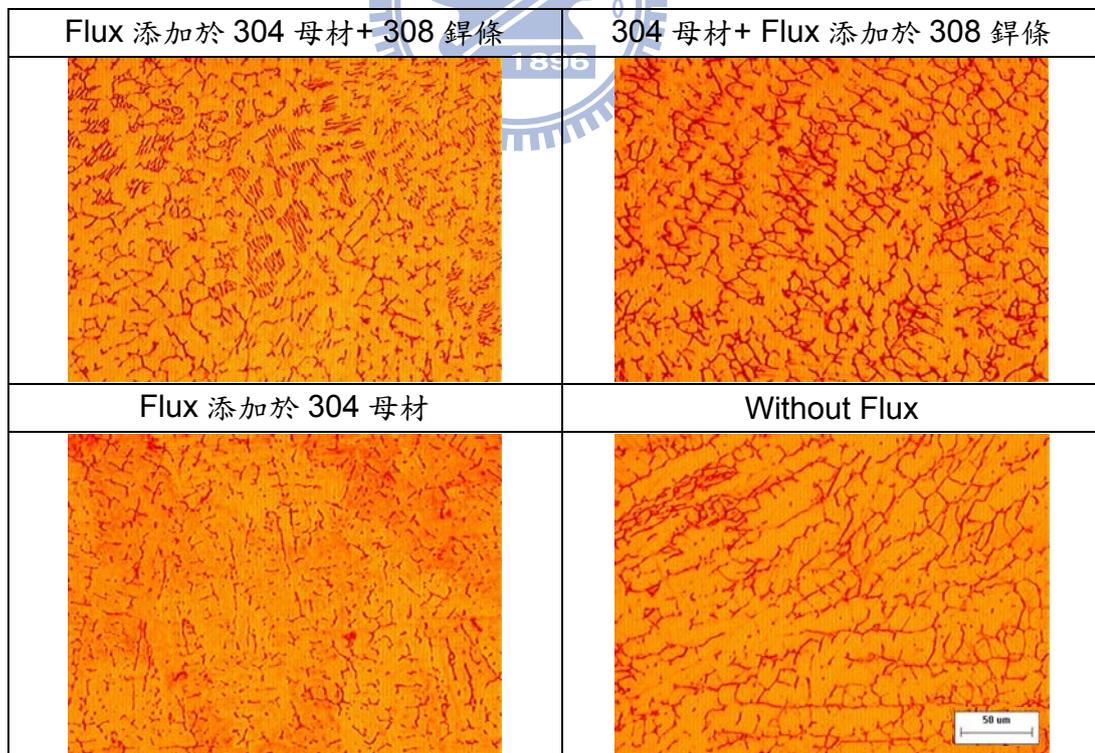


圖 4-62 Ar – 2.5%CO₂ 對 A-TIG 鐸道顯微組織之影響(200x)

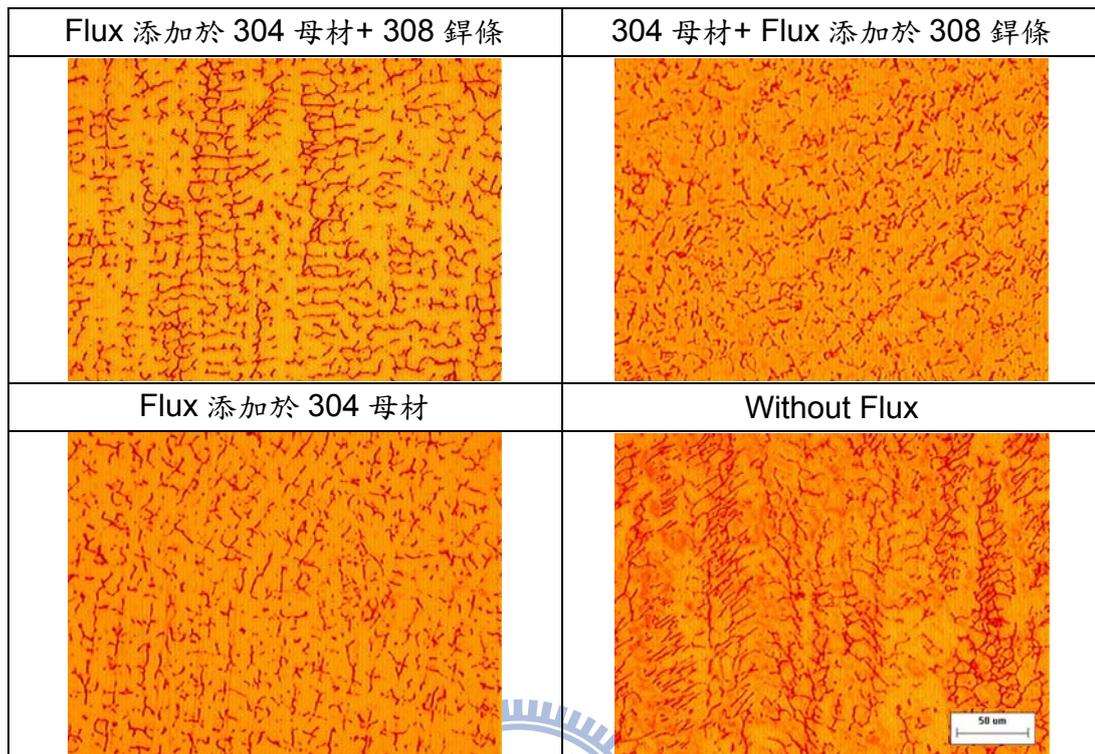


圖 4-63 Ar – 5%CO₂ 對 A-TIG 鐸道顯微組織之影響(200x)

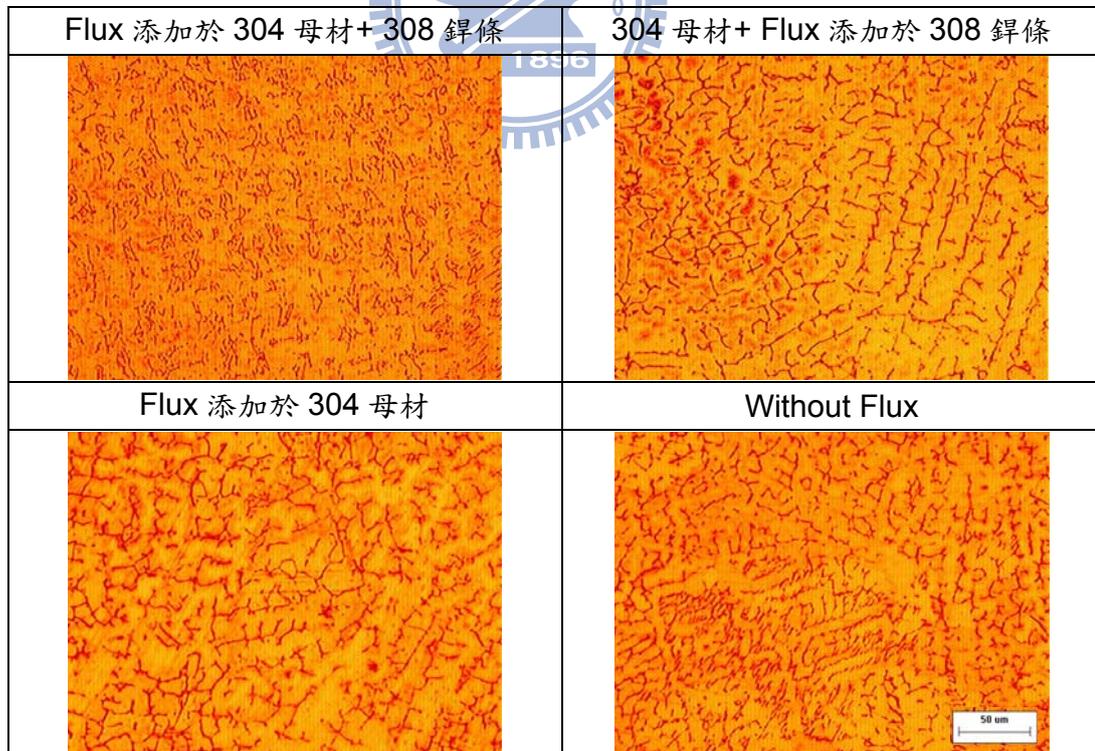


圖 4-64 Ar – 7.5%CO₂ 對 A-TIG 鐸道顯微組織之影響(200x)

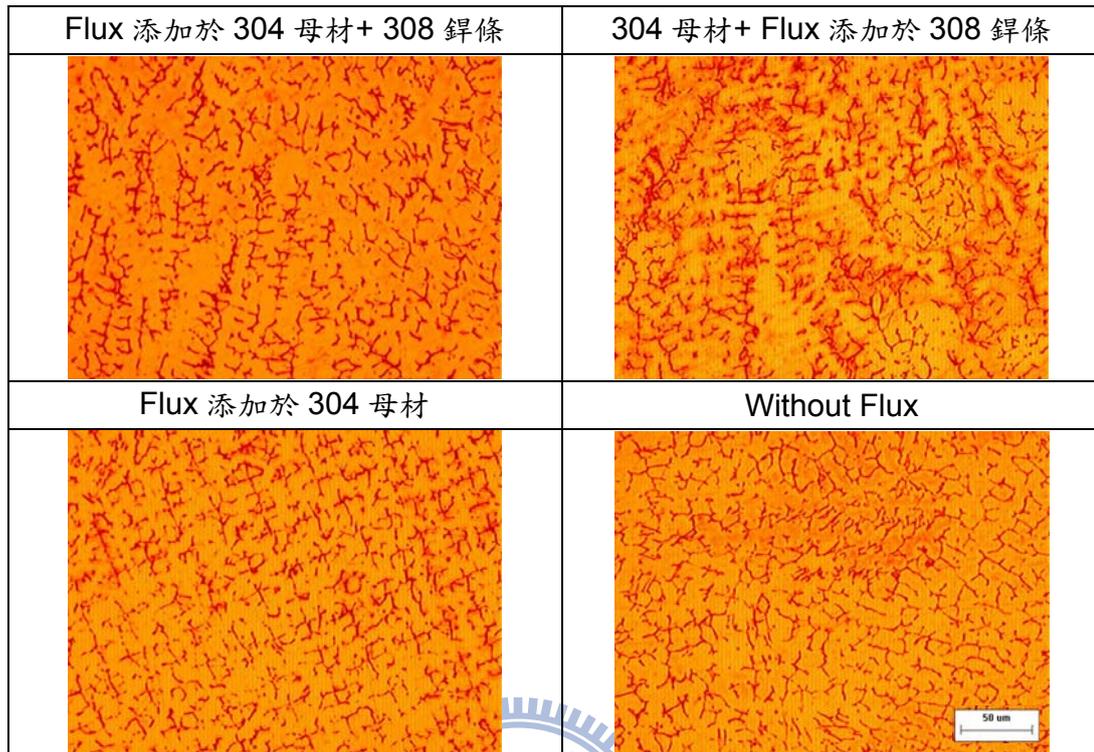


圖 4-65 Ar – 10%CO₂ 對 A-TIG 銲道顯微組織之影響(200x)

4.7 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對銲道微硬度之影響

由於金屬材料的硬度是機械性質最重要的性質之一，因硬度試驗方法簡單，硬度值較易求得，且從硬度值中可推測出其他機械性質，如抗拉強度、疲勞強度等機械性質，所以硬度大小就成為衡量材料機械性質的指標，硬度的量測是量測材料表面受到集中力的壓痕時，材料表面抵抗壓痕的能力，也就是材料抵抗壓痕能力表現出來的性質。

CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對銲道微硬度之影響，如圖 4-66 所示，由圖中可發現，混合型助銲劑添加於傳統氬銲製程中能有效提昇銲道微硬度值約 19(Hv)；然而銲條的添加可彌補 A-TIG 銲道平整性，且相對於 A-TIG 製程下未使用銲線而言，亦使銲道硬度略為降低，其推測為融入銲道內之助銲劑及銲條化學元素(熔融金屬成分)比例有關；在未添加助銲劑之銲道其為微硬度皆低於添加助銲劑之銲道；且由圖中可觀察到混合型助銲劑添加於母材及銲條上，皆可獲得類似效果。此外，對 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 銲接對銲道微硬度的影響並不明顯。

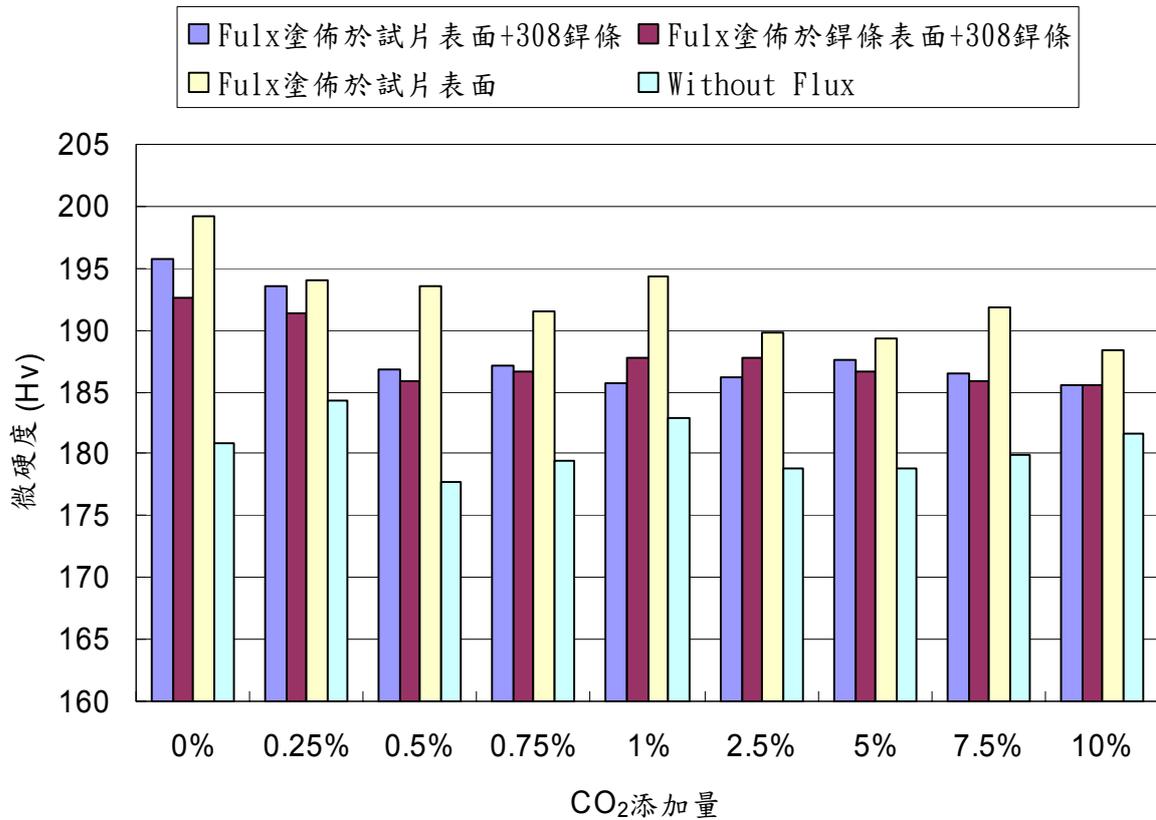


圖 4-66 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 鐳接對鐳道微硬度之影響

4.8 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 鐳接對鐳件角變形之影響

角變形為沿母材厚度方向的不均勻熱分佈所產生的角度變化，在鐳接過程中，由於鐳接熱源於母材上進行局部且不均勻的急速加熱與冷卻，使得鐳道附近的金屬與母材產生熱應變，由於熱應變在產生熱應力即會造成鐳接變形。

由圖 4-67 中的趨勢線得知其 D/T(D：熔透深度、T：母材厚度)接近於 0.5 時，其角變形量為最大，其主要原因可藉由圖 4-68 及 4-69 來加以分析與探討。由於鐳接完後的熱脹冷縮會造成鐳接完後母材的形變發生。在鐳道深度與母材比值由 0 增加到 0.5 時，即鐳道熔深未超過母材厚度一半之情況下，當鐳道產生熱收縮應力時，其鐳道幾何形狀之圓弧中心愈趨近鐳件之中性軸，此時鐳件將會產生較大的彎曲力矩，進而造成鐳件角變形的增加。由此可知，當鐳道熔深/母材厚度比值小於 0.5 之情況下，若鐳道熔深愈小則意味著鐳件將有較佳的抵抗彎曲變形能力，因此可降低鐳件角變形量。

在鐳道熔深超過母材厚度一半之情況下，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將會造成鐳件往上翹曲，而中性軸下方之熱收縮則會造成鐳件向下翹曲，兩者之合成效應將會促使鐳件角變形變小。由此可知，在鐳道熔深超過母材厚度一半之情況下，當熔透深度增加時會使得熱收縮應力相互抵消之效應亦高，因此可降低鐳件角變形量。

由於角變形是受到鐳道熔透深度與母材厚度比值的影響，而與熱輸入量有直接關係，其熱輸入量又與電流大小、走速快慢、助鐳劑、鐳接氣體影響及鐳條添加皆有關係，本回實驗並無法明確區分各參數所對角變形產生的貢獻度。故在這無法很清楚的歸納出助鐳劑對角變形的效果，僅能看出一個角變形趨勢。

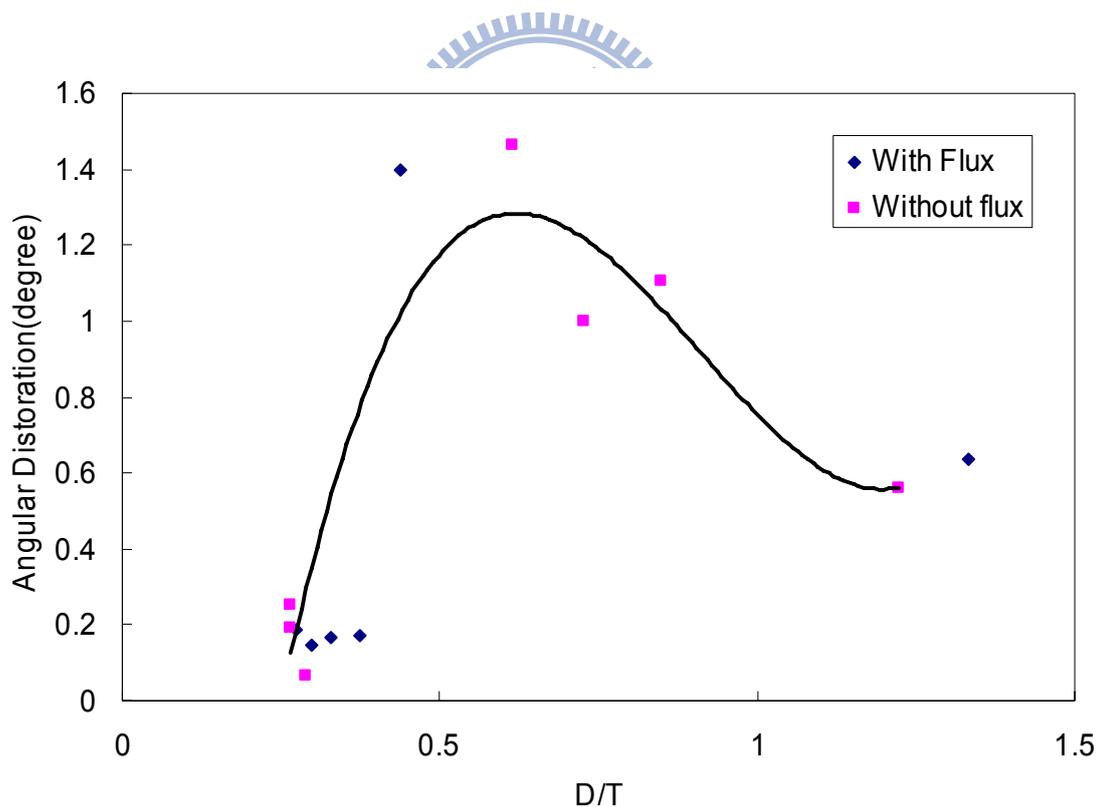
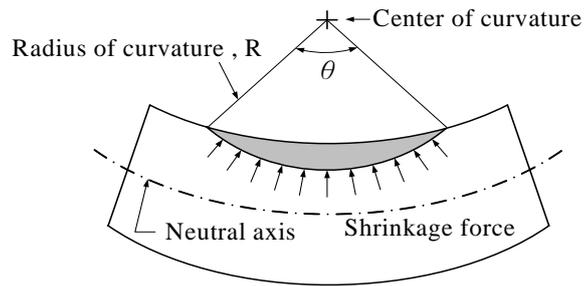
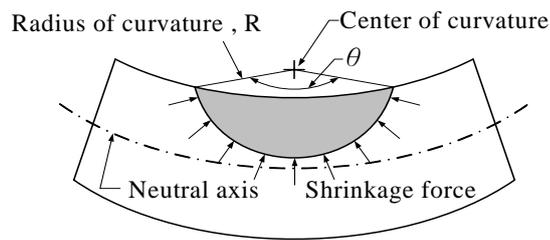


圖 4-67 混合型助鐳劑對 304 不銹鋼角變形之影響



(a) Low penetration



(b) High penetration

圖 4-68 銲件角變形示意圖 (熔深未超過母材厚度一半)

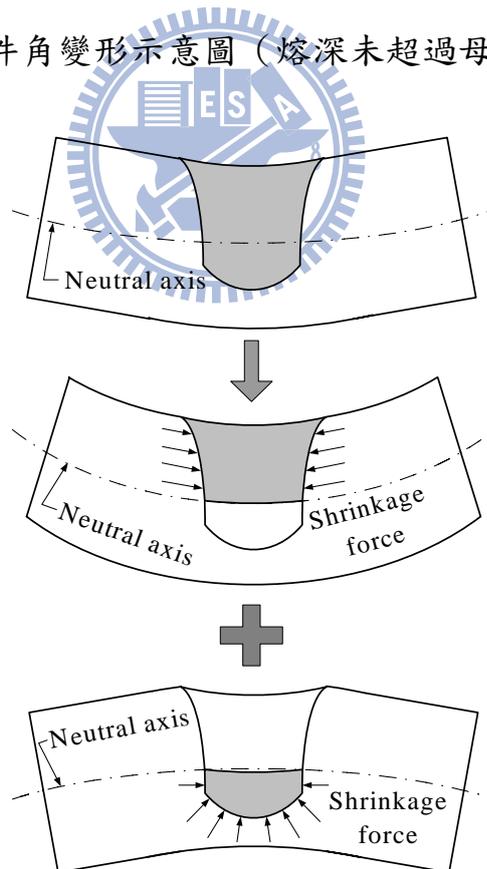


圖 4-69 銲件角變形示意圖 (熔深超過母材厚度一半)

第五章 結論

本研究之目的主要在探討Ar-CO₂混合氣體與活性助鐸劑包覆鐸線對不銹鋼鐸道特性影響及研究，以自行調配之混合型活性助鐸劑，進行一系列之實驗來探討活鐸劑對鐸道截面形態、鐸道顯微組織及鐸道機械性質之影響，根據第四章之實驗結果與討論，可獲得以下之結論：

1. 添加少量 CO₂ 氣體於保護氣體中，對不添加混合型助鐸劑之不銹鋼鐸道外觀並無明顯差異，然而隨著 CO₂ 氣體添加比例提高，鐸道表面的氧化物亦增加進而形成較不平整之鐸道外觀，但 CO₂ 氣體添加於 A-TIG 製程中，當少量的添加即可發現鐸道兩側有氧化物的推疊，隨著 CO₂ 氣體添加比例提高，鐸道表面的氧化物亦增加而形成較不平整之鐸道外觀。
2. 添加 CO₂ 氣體於傳統氬鐸及 A-TIG 製程中，皆可發現氧化物易附著於鎢電極表面與鎢電極損耗現象，而且隨著 CO₂ 氣體添加量增加有加劇的趨勢；此外，當不添加 CO₂ 氣體於保護氣體中時，A-TIG 與傳統氬鐸製程對鎢電極損耗現象並不明顯。
3. 當 CO₂ 氣體添加於保護氣體之氬鐸製程中，對提升深寬比之效果僅於添加少量之 CO₂ 氣體時(0.25%~0.75%)；然而在添加鐸條的條件下，不管將助鐸劑添加於鐸條或母材上，皆能有效的提昇鐸道深寬比之效果，且使用鐸條有助於改善鐸道凹陷之缺陷狀況，但過量的 CO₂ 氣體添加(1%以上時)在 A-TIG 製程中，因氧化物增加，將使深寬比產生急遽下降之現象。
4. 添加微量之 CO₂ 於保護氣體中雖可提升電弧電壓，但以整體鐸接效率而言，仍以添加混合型助鐸劑的方式優於添加 CO₂ 的方式，然而 A-TIG 製程中並在保護氣體中添加 CO₂ 氣體，對電弧電壓並無加乘的效果。
5. CO₂ 添加於 A-TIG 製程中，其可提升陽極斑點收縮的現象。隨著 CO₂ 添加量增加其陽極斑點收縮現象越不明顯。其主要乃因助鐸劑物質的存在將會造成熔融鐸池的緊縮現象，進而形成窄而深的鐸道截面形狀。此外，混合型助鐸劑添加於母材試片表面或鐸條表面，觀察陽其陽極斑點均很相似。

6. CO_2 氣體添加於 A-TIG 銲接製程或傳統氬銲製程中，皆可使抑制肥粒相生成，當添加量超過 1% 時以上時，可明顯的降低銲道肥粒相含量，主要可能因 CO_2 中的碳元素為抑制肥粒相生成之有利元素，在銲接過程中碳元素亦進入熔池內，產生抑制肥粒相生成效果，故於微量添加時對肥粒相含量低減效果並不明顯。
7. 混合型助銲劑添加於傳統氬銲製程中，能有效提昇銲道微硬度值約 19(Hv)，然而銲條的添加可彌補 A-TIG 銲道平整性，且相對於 A-TIG 製程下未使用銲線而言，亦使銲道硬度略為降低，其推測為融入銲道內之助銲劑及銲條化學元素(熔融金屬成分)比例產生的稀釋效果有關；混合型助銲劑添加於母材及銲條上，皆可獲得類似效果。此外，對 CO_2 氣體添加於 A-TIG 銲接中，其對銲道微硬度的影響並不明顯。
8. CO_2 添加於傳統氬銲及 A-TIG 製程中，雖熱輸入量可獲得提升且改善銲道中肥粒相形成，但因鎢電極的燒蝕損耗加劇，產生電弧漂移的不穩定現象，導致銲道各種性質變差。
9. 活性助銲劑包覆銲線或塗敷活性助銲劑不銹鋼表面，其對銲道截面形態、銲道顯微組織及銲道機械性質皆可得類似的結果，故對於未來發展為包藥銲線是可以予以期待的，然而 CO_2 添加僅對肥粒相形成有降低效果外，對於提高熔透深度與機械性質並無明顯的效果。

參考文獻

- [1]. 周長彬、蔡丕椿、郭央謙，"銲接學"，初版，全華科技圖書，台北，民國 90 年 2 月。
- [2]. 董基良，"銲接學"，三民書局，民國 75 年 1 月。
- [3]. 陳金富、林宏昌，"熔接學"，台北，民國 75 年 5 月。
- [4]. 錢在中，"焊接技術手冊"，山西：山西科學技術出版社，1999。
- [5]. 曾光宏、吳春森、王本智，"活性助銲劑對氬銲銲道成形之影響"，焊接與切割，p.63~68，2002，12(6)。
- [6]. 小栗富士雄、小栗遼男共著、張兆豐主編，1984，"機械設計圖表便覽"，台隆書店出版。
- [7]. 王振欽，"銲接學"，高立圖書有限公司，民國 86 年 8 月 10 日初版，10-5~10-7。
- [8]. 王萬泉，"銲接學"，台灣復文興業有限公司，民國 81 年 12 月，p.211~213。
- [9]. 姜志華、蔡全峰，"銲接冶金概論"，徐式基金會，民國 76 年 8 月，p.140-148。
- [10]. 楊廈森，"淺談不銹鋼銲接"，銲接與切割，民國 84 年 9 月，pp.51-57。
- [11]. Y.L. Xu、Z.B. Dong、Y.H. Wei、C.L. Yang，"Marangoni convection and weld shape variation in A-TIG Welding process"，Theoretical and Applied Fracture Mechanics 48，2007，p.178~186。
- [12]. Shanping LU、Hidetoshi Fujii and Kiyoshi Nogi，"Effects of CO₂ shielding gas additions and welding speed on GTA weld shape"，Journal of Materials science，2005，p. 2481-2485.

- [13]. Shanping LU 、 Hidetoshi Fujii 、 Hiroyuki SUGIYAMA 、 Manabu TANAKA and Kiyoshi Nogi , "Effects of Oxygen Additions to Argon Shielding Gas on GTA Weld Shape" , ISIJ International, Vol. 43 , No. 10 , 2003 , p. 1590–1595.
- [14]. Shanping LU 、 Dianzhong LI 、 Hidetoshi Fujii and Kiyoshi Nogi "Time Dependant Weld Shape in Ar-O₂ Shielded Stationary GTA Welding" , J. Mater. Sci. Technol., Vol.23 No.5 , 2007 , p. 650-654.
- [15]. Shanping LU 、 Hidetoshi Fujii 、 Hiroyuki Sugiyama and Kiyoshi Nogi , "Mechanism and Optimization of Oxide Fluxes for Deep Penetration in Gas Tungsten Arc Welding" , Metallurgical and Materials Transactions A , VOL. 34A , 2003.9 , p.1091-1095.
- [16]. Hidetoshi Fujii 、 Shanping LU 、 SATO Toyoyuki and Kiyoshi Nogi , "Effect of Oxygen Content in He-O₂ Shielding Gas on Weld Shape For Ultra Deep Penetration TIG" , Transactions of JWRI , Vol.37 , 2008 , p.19-26.
- [17]. Paulo J. Modenesi, Eustauio R. Apolinario, Iaci M. Pereira , "TIG welding with single-component Fluxes" , Journal of Materials Processing Technology 99 , 2000 , p.260-265.
- [18]. H.Y. Huang and C.P. Chou, "A Study on the TIG-Flux Processing Technology of Stainless Steel", National Chiao Tung University, Ph.D., 2005.
- [19]. J.R.Davis "ASM Specialty Handbook - Stainless Steels " , ASM International Handbook Committee, 3rd , 1999, p.14-32, p.340-342.
- [20]. John Wood and Diran Apelian "Advanced Welding Processes " , IOP Publishing Ltd, 1st , 1992, p.125-128.
- [21]. Curtis W.Kovach "High-Performance Stainless Steels" , Technical Marketing Resources Inc , p.7-27.
- [22]. S. Kou, "Welding Metallurgy" , John Wiley & Sons , 2 , 2003 , p.45-47.

- [23]. "Guidlines for Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)", Miller Welds, 2008.
- [24]. Kiichi Saito 、 Satoru Ohmizu , "Influence of Shielding Gas Composition and Electrode Vertex Angle on Surface Temperature of Weld pool in Stainless Steel TIG Weld" , Memoir of Fkui University of Technology , Vol.29. Part 1 , 1999,p.151-157.
- [25]. P.J. Modensi*, "TIG welding with single-component fluxes", Journal of Materials Processing Technology , 2000 , 9(9) , p.260-265.
- [26]. W. Lucas, D. Howse, "Activating flux -increasing the performance and productivity of the TIG and plasma processes", Welding and Metal Fabrication,1996, **64**(1),p.11-17.
- [27]. J.A. Brooks, Brooks , A.W.Thompson & J.C.Williams , 1984 , "A Fundamenttal Study of the Beneficial Effect of Delta Ferrite in Reducing weld Cracking" , Welding journal , 5 , p.71~83.
- [28]. 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, 1993, p. 3-16.
- [29]. J.A. Lambert, Weld. J., (1988),p.202.
- [30]. J.C.Lippold & W.F.Savage , 1979 , "Solidification of Austenitic Stainless Steel Weldments : Part1-A Proposed Mechanism" , Welding Journal , 12 , p.362~373 ◦
- [31]. J.C.Lippold & W.F.Savage , 1980 , "Solidification of Austenitic Stainless Steel Weldments : Part2-The effect of Alloy Composition on Ferrite Morphology" , Welding Journal , 2 , p.48~58 ◦

- [32]. N.Suutala , T.Takalo & T.Moisio , 1979 , "The Relationship Between Solidification and Microstructure in Austenitic and Austenitic- Ferritic Stainless Steel Welds" , Metallurgical Transactions , 4 , Vol.10A , p.512~514 。
- [33]. 詹志偉 , "氮氣添加於 TIG-FLUX 焊接製程對不銹鋼銲件之影響" , 國立交通大學機械研究所 , 碩士論文 , 民國九十四年六月 。
- [34]. 蔡封灝 , " 硫化物之助銲劑對 SAE1020 低碳鋼與 304 不銹鋼銲道穿深能力之研究" , 國立交通大學機械研究所 , 碩士論文 , 民國九十三年六月 。
- [35]. C.D.Lundin 、 W.T.Delong 、 D.F.Spond , "Ferrite Fissuring Relationship in Austenitic Stainless Steel Weld Metals" , Weld. J. , 1975 , 54(8) , p.241-246.
- [36]. N. Suutala , "Effect of manganese and nitrogen on the solid- ification mode in austenitic stainless steel welds" , Metall. Trans. ,1982, 13A(I2), p.2121-2130.
- [37]. N. Suutala , "Effect of solidification conditions on the solidification mode in austenitic stainless steels" , Metall. Trans ,1983, 14A(2), p.191-197.
- [38]. 曾光宏 , "銲接缺陷之形成(I)、(II)" , 銲接與切割 , 1999 年 11 月 , pp.17-23, 2000 年 1 月 , p.39-45 。
- [39]. 曾光宏 , "銲接缺陷之形成原因與防範對策簡介(I) (II)" , 機械技術雜誌 , 1999 年 7 月 , p.124-130 。
- [40]. 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 , 民國九十年六月 。
- [41]. PC.J. Anderson, R. Wiktorowicz , "Improving productivity with ATIC welding" , Welding and Metal Fabrication,1996, 64 (3) ,p.108-109.
- [42]. 黃和悅、徐享文、曾光宏、楊宗杰、周長彬 , "不銹鋼電弧銲用助銲劑" 中華民國發明專利 , 公告編號 : I231239 , 2005 年 4 月 。

- [43]. J.J. Lowke, M. Tanaka, and M. Ushio, "Mechanisms Giving Increased Weld Depth Due to a Flux", Journal of Physics D: Applied Physics, 38(18), pp. 3438-3445, 2005.
- [44]. C.R. Heiple and J.R. Roper, "Effect of selenium on GTAW fusion zone geometry", Weld. J., 1981, 60(8), p.143-145.
- [45]. C.R. Heiple and J.R. Roper, "Mechanism for minor element effect on GTA fusion zone geometry", Weld. J., 1982, 61(4),p. 97-102.
- [46]. C.R. Heiple, J.R. Roper, R.T. Stagner and R.J. Aden, "Surface active element effects on the shape of GTA, laser, and electron beam welds", Weld. J., 1983, 62(3), p.72-77.
- [47]. C.R. Heiple and P. Burgardt, "Effect of SO₂ shielding gas additions on GTA weld shape", Weld. J., 1985, 64(6),p.159-162.
- [48]. P. Burgardt and C.R. Heiple, "Interaction between impurities and welding variables in determining GTA weld shape", Weld. J., 1986, 65(6), p.150-155.
- [49]. D. Howse and W. Lucas, "Investigation into Arc Constriction by Active Fluxes for Tungsten Inert Gas Welding", Science and Technology of Welding and Joining, 5(3), pp. 189-193, 2000.
- [50]. A.G. Simonik, "Effect of Contraction of the Arc Discharge Upon the Introduction of Electro-Negative Elements", Welding Production (English translation of Svarochnoe Proizvodstvo), 23(3), pp. 68-71, 1976.
- [51]. Y. Takeuchi, R. Takagi and T. Shinoda, Effect of bismuth on weld joint penetration in austenitic stainless steel, Weld. J., 1992, 71(8), p.283-289.
- [52]. H.B.Cary, "Modern Welding Technology", 4th end, New Jersey, Prentice Hall, 1998.

- [53]. G.W. Oyler, R.A. Matsuzesk and C.R. Garr, Weld. J., 46 (1967) , p.1006.
- [54]. B.J. Keene, K.C. Mills, R.F. Brooks, Mater. Sci. Tech.,1(1085), p.568.
- [55]. 謝榮淵，"不銹鋼之銲接特性(I)"，銲接與切割，1997，7(5)，p.40-49。
- [56]. H.C. Ludwig, Weld. J., 47(1968), p.234.
- [57]. J.C. Metaalfe and M.B.C. Quigly, Weld. J., 56(1977), p.133.
- [58]. 品明賢、王文樑，"銲接產業概況"，金工雙月刊、26 卷 3 期，民國 81 年 5 月，p.30-39
- [59]. 林義成，"銲接參數對 304 不銹鋼變形殘留應力與應力腐蝕之影響研究"，國立交通大學機械研究所研究所碩士論文，民國七十七年六月，p.20~23。
- [60]. S. Terashima、H. K. D. H. Bhadeshia "Size distribution of oxides and toughness of steel weld metals"，Science and Technology of Welding and Joining，Vol. 11 No. 5，2006，p580-582.
- [61]. Chunli Yang、Sanbao Lin、Fengyao Liu、Lin Wu and Qingtao Zhang，"Research on the Mechanism of Penetration Increase by Flex in A-TIG Welding"，J. Mater. Sci. Technol.，Vol.19 Suppl.1，2003，p.225-227.
- [62]. 曾光宏，增秉鈞，"用於焊接不銹鋼之活型助銲劑"，中華民國發明專利，公告編號：I 297629，2008 年 6 月。