

# 國立交通大學

工學院精密與自動化工程學程

碩士論文

可攜式氫燃料電池儲氫氣瓶之設計與實作

Design and Implementation of Portable Hydrogen

Storage Cylinders for Hydrogen Fuel Cell

研究生：廖紹延

指導教授：周長彬 教授

中華民國九十九年五月

可攜式氫燃料電池儲氫氣瓶之設計與實作  
Design and Implementation of Portable Hydrogen  
Storage Cylinders for Hydrogen Fuel Cell

研究生：廖紹廷 Student : Shao-Yen Liao  
指導教授：周長彬 Advisor : Dr. Chang-Pin Chou

國立交通大學

工學院專班精密與自動化工程學程



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

May 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 九十九 年 五 月

# 可攜式氫燃料電池儲氫氣瓶之設計與實作

研究生：廖紹延

指導教授：周長彬

國立交通大學 工學院精密與自動化工程學程 碩士班

## 摘 要

傳統的發電方式中如天然氣、煤炭、核能等發電方式，所造成之污染不容忽視，且產生之二氧化碳也同時使環境產生變化，致使溫室效應日趨嚴重，因此如何減少二氧化碳的排放量，已成為一項艱難的課題，使得燃料電池領域成為討論之方向，進而促使氫氣儲存相關技術的發展及應用，亦即促使儲氫產品朝著精密化、輕量化、高品質化、高強度化及高容量化等趨勢發展。

本研究探討使用鋁合金 7075 (Al-Zn-Mg)作為氫氣瓶之材料，主要特點為具有高的強度及優良的抗腐蝕性，同時採用鎢電極惰性氣體電弧焊(GTWA)進行填料銲接，且利用田口實驗方法進行深寬比、熔融面積來得到最佳參數，並研究不同位置銲接狀況，同時於銲後進行固溶處理+人工時效之熱處理，針對有/無填料之銲件及銲後有/無熱處理之機械性質中的拉伸、硬度、金相進行探討。

實驗結果在 3mm板厚試片以田口實驗方式求得最佳銲接參數，並由此參數進而衍生至氣瓶之銲接，最後採用上蓋銲接方式為最終式樣，並經由水壓試驗結果可達  $20\text{Kg/cm}^2$ ，達到設計之目標，且經由銲後熱處理後，在銲道微硬度值提升約 43%，抗拉強度也提升約 20%，同時在經由ER5356 填料銲接下，整體機械性質也優於未填料之銲件。

# Design and Implementation of Portable Hydrogen Storage Cylinders for Hydrogen Fuel Cell

Student : Shao-Yen Liao

Advisor : Dr. Chang-Pin Chou

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

## **ABSTRACT**

Traditional ways of power generation such as natural gas, coal, nuclear and other power generation methods, the resulting pollution can not be ignored, and the generated carbon dioxide, also produced changes in the environment, resulting in worsening the greenhouse effect, so how to reduce carbon dioxide emissions has become a difficult issue, making the fuel cell area for discussion of the direction, so as to promote the development of hydrogen storage and application of related technologies, which is to promote hydrogen storage products towards precision, lightweight, high-quality, high strength-based and high-capacity and so on trend.

This study investigated the use of aluminum alloy 7075 (Al-Zn-Mg) as a hydrogen bottle of materials, main features of high strength and excellent corrosion resistance, while use of tungsten inert gas arc welding (GTAW) to fill welding, and Taguchi method aspect ratio, melting area to get the best parameters and welding conditions of different locations, while at the solution treatment after welding + artificial aging heat treatment, for with / without weld metal and welding filler after / no heat

treatment the mechanical properties of tensile, hardness, microstructure were discussed.

The results in the 3mm thickness of the specimen obtained by Taguchi method optimal welding parameters, and thus parameters and then derived from the welding gas cylinder, and finally with the ultimate style cover welding and hydraulic test results by up to 20Kg / cm<sup>2</sup>, to achieve design goals, and by heat treatment after welding, micro-hardness of the weld, by approximately 43%, tensile strength also raise about 20%, while by ER5356 welding filler, the overall mechanical properties are better than not filling weldment.



## 誌 謝

本篇論文之可以順利完成，首先感謝指導老師周長彬教授的辛勤地指導、悉心教誨與關懷，謹於此致上最誠摯的敬意及謝意。口試期間承蒙各位口試委員的悉心指正及提供寶貴的意見，使本篇論文更加完善，亦在此由衷感謝。

在研究期間，承蒙先進能源實驗室吳信達博士悉心指導論文研究之規劃及燃料電池知識之傳授；另感謝銲接實驗室張進春博士在鋁合金銲接製程參數及氣瓶銲接上的指導與協助；最後，感謝學長莊弘瑋及同學吳東明在實驗設備使用上之指導及實驗流程之建議，使實驗能順利進行，在此特予致謝。

最後要感謝時時給予我支持與鼓勵的父母及家人，使我在忙碌的工作之餘能繼續不斷的追求新知並順利完成此論文。另外也要特別感謝內人惠菁默默在旁給予我不斷的支持，妥善的照顧小孩，使我能無後顧之憂的完成學業。父親隨時的詢問研究狀況，給予我持續研究之推力及關懷，由於大家的支持與鼓勵，而使此篇論文及學業的順利完成，是我獻給所有關心、幫助我的人最誠摯的喜悅分享。

# 目 錄

中文摘要	I
英文摘要	II
致謝	IV
目錄	V
表目錄	X
圖目錄	XII
第一章 緒論	1
1.1 研究背景與動機	1
1.2 文獻回顧	2
1.2.1 鋁合金簡介	2
1.2.2 鋁合金的分類	2
1.2.3 7075 鋁合金介紹	5
1.2.4 鋁合金材料銲接特性	7
1.2.5 鋁合金之銲接組織	11
1.2.6 鋁合金銲接常見缺陷	16
1.2.6.1 銲接缺陷防治方法	16
1.2.6.2 鋁合金銲接時常見缺陷	17
1.2.6.3 銲接熱裂縫	20

1.3 研究方法與目的-----	35
第二章 理論分析-----	36
2.1 產品之設計規劃-----	36
2.2 銲接電弧之簡介-----	44
2.2.1 銲接電弧之結構-----	45
2.2.2 銲接電弧之溫度-----	46
2.3 GTAW(gas tungsten arc welding)銲接法-----	48
2.3.1 GTAW 之簡介-----	48
2.3.2 銲接電流性質-----	50
2.3.3 銲接參數-----	51
2.3.4 電流之選擇及其特性-----	51
2.3.5 銲接氣體之功用-----	55
2.4 田口式品質工程-----	55
2.4.1 田口品質工程簡介-----	55
2.4.2 田口品質特性-----	56
2.4.3 影響產品或製程績效的因子-----	58
2.4.4 直交表介紹-----	60
2.4.5 田口實驗分析法之步驟-----	62
2.5 氫燃料池-----	63

第三章 實驗設備及方法-----	70
3.1 實驗流程-----	70
3.2 GTAW 之設備-----	71
3.2.1 GTAW 主要設備-----	71
3.2.2 設備調整控制單元-----	72
3.2.3 其他銲接工具-----	73
3.3 實驗配置-----	74
3.3.1 實驗材料準備-----	74
3.3.2 試片銲接方法-----	76
3.3.3 最佳銲接參數的選擇-----	78
3.4 焊道外觀觀察-----	80
3.5 銲道截面觀察-----	80
3.6 銲道滲透深度與寬度量測-----	82
3.7 微硬度試驗-----	82
3.8 拉伸試驗-----	83
3.9 氣瓶罐體銲接-----	86
3.10 水壓試驗-----	87
3.11 銲後熱處理-----	88
第四章 結果與討論-----	89

4.1 平板銲接參數之探討-----	89
4.1.1 首次銲接實驗分析-----	89
4.1.2 L16 田口實驗分析-----	90
4.1.3 最佳化條件之探討-----	102
4.1.4 金相組織探討-----	104
4.2 對接銲接參數之探討-----	107
4.3 氣瓶之銲接設計-----	115
4.4 水壓試驗分析-----	118
4.5 微硬度試驗分析-----	120
4.5.1 有填料銲件之微硬度分析-----	120
4.5.2 無填料銲件之微硬度分析-----	121
4.6 拉伸試驗分析-----	122
4.6.1 有填料銲件之拉伸試驗探討-----	122
4.6.2 無填料銲件之拉伸試驗探討-----	125
4.7 金相組織分析-----	128
4.7.1 有填料銲件在銲道與熱影響區之金相組織-----	128
4.7.2 無填料銲件在銲道及熱影響區之金相組織-----	130
4.8 討論-----	132
第五章 結論與建議-----	134

參考文獻-----	135
附錄一 SGS 水壓試驗報告-----	140
附錄二 重量、加工法、價格比較-----	141



## 表目錄

表 1-1 鋁及其合金-----	3
表 1-2 鍛鍊用鋁合金之編號-----	4
表 1-3 鋁合金加工與熱處理條件記號表-----	5
表 1-4 7075 鋁合金之規範成份-----	6
表 1-5 7075-T6 鋁合金的機械性質-----	6
表 1-6 鋁合金材料銲接性分類-----	10
表 1-7 TIG銲缺陷的原因及其對策表-----	16
表 2-1 各項金屬材料比強度之比較表-----	38
表 2-2 GTAW電流型式及特性-----	50
表 2-3 DCSP及DCRP比較表-----	52
表 2-4 電流不穩定之原因及解決方法-----	53
表 2-5 鎢棒尺寸與銲接電流容許範圍表-----	54
表 2-6 品質特性與損失函數-----	58
表 2-7 L8(2 <sup>7</sup> )直交表表示法-----	61
表 2-8 L8(2 <sup>7</sup> )直交表實驗配置圖-----	61
表 2-9 儲氫方式比較表-----	67
表 2-10 無縫鋁合金複合材料、鋼製高壓鋼瓶檢查基準-----	68
表 3-1 7075 鋁合金規範成分表-----	75

表 3-2 7075 鋁合金之機械性質-----	75
表 3-3 填料金屬成份表-----	76
表 3-4 $L_{16}(4^4)$ 直交表的實驗配置-----	79
表 3-5 $L_9(3^4)$ 直交表的實驗配置-----	79
表 4-1 初次銲接結果解析-----	89
表 4-2 實驗計劃要因配置表-----	90
表 4-3 $L_{16}(4^4)$ 實驗參數表-----	91
表 4-4 $L_{16}$ 直交表實驗數據與S/N比表-----	102
表 4-5 $L_{16}$ 直交表實驗展開之銲道熔透深寬比輔助表-----	103
表 4-6 $L_9(3^4)$ 實驗要因計劃配置表-----	107
表 4-7 $L_9(3^4)$ 實驗參數表-----	107
表 4-8 $L_9$ 直交表實驗數據與S/N比-----	114
表 4-9 $L_9$ 直交表展開之輔助表-----	114
表 4-10 氣瓶銲接參數-----	115

## 圖目錄

圖 1-1 非熱處理型鋁合金銲件銲接軟化機械性質變化曲線-----	9
圖 1-2 二元或三元鋁合金之共晶溶解溫度-----	12
圖 1-3 鋁合金成份對裂縫敏感性之影響-----	12
圖 1-4 鋁合金銲後熱影響區顯微組織圖-----	15
圖 1-5 銲件(含銲接金屬與母材)區域之劃分-----	15
圖 1-6 銲接熱裂縫的分類-----	21
圖 1-7 凝固熱裂綜合理論示意圖-----	23
圖 1-8 凝固熱裂示意圖-----	23
圖 1-9 $\tau$ 與 $\theta$ 之關係-----	25
圖 1-10 兩面角與金屬液薄膜分佈之關係-----	25
圖 1-11 最高凝聚溫度在 Al-Si 合金的相圖-----	27
圖 1-12 熱影響區定義的示意圖-----	29
圖 1-13 液化龜裂與低延性龜裂示意圖-----	30
圖 1-14 二元相示意圖說明熱影響區在昇溫過程中液化的溫度-----	31
圖 1-15 析出物缺乏區熱裂示意圖-----	32
圖 1-16 合金含量對鋁合金熱裂縫敏感性的影響-----	34
圖 1-17 Al-Zn-Mg 合金中之 Mg 含量對裂縫生成之影響-----	34
圖 2-1 設計流程圖-----	37

圖 2-2 受內外壓力的厚壁圓筒-----	39
圖 2-3 圓洞平端板受內壓之情形-----	42
圖 2-4 簡支樑示意-----	42
圖 2-5 氣瓶本體尺寸設計圖-----	43
圖 2-6 電弧銲接基本原理-----	44
圖 2-7 惰氣鎢極電弧銲之電弧結構與電壓降的關係-----	45
圖 2-8 直流正極性電弧之示意圖-----	47
圖 2-9 鎢電極與鐵電極之電弧溫度分佈-----	48
圖 2-10 GTAW 銲槍示意圖-----	49
圖 2-11 氣體鎢極電弧銲接設備-----	50
圖 2-12 D. C. STRAIGHT POLARITY -----	51
圖 2-13 D. C REVERSE POLARITY -----	51
圖 2-14 焊道滲透之比較-----	52
圖 2-15 產品/製程參數圖-----	58
圖 2-16 燃料電池內部反應示意圖-----	64
圖 3-1 HOBART 銲接設備-----	71
圖 3-2 銲槍、台車、夾具等外觀-----	71
圖 3-3 銲接設備調整控制單元-----	72
圖 3-4 自走台車操作控制-----	72

圖 3-5 保護性氣體流量調整單元-----	73
圖 3-6 銲接工具-----	73
圖 3-7 銲接試片尺寸-----	74
圖 3-8 表面研磨前後之銲接試片-----	75
圖 3-9 3mm 不填料不開槽對接示意圖-----	77
圖 3-10 金相實驗之步驟及設備-----	81
圖 3-11 銲道形態量測示意圖-----	82
圖 3-12 Matsuzawa MHT-1 微硬度測定機-----	83
圖 3-13 硬度量測位置示意圖-----	83
圖 3-14 拉伸試驗片尺寸-----	84
圖 3-15 拉伸試驗片取樣位置示意圖-----	85
圖 3-16 INSTORN 850I 型萬能試驗機-----	85
圖 3-17 氣瓶罐體銲接式意圖-----	86
圖 3-18 氣瓶水壓試驗示意圖-----	87
圖 3-19 Nabertherm 高溫熱處理爐-----	88
圖 4-1 L16 直交表銲道外觀之影響-----	92
圖 4-2 L16 直交表銲道截面型態-----	95
圖 4-3 L16 直交表銲道熔融面積長條圖-----	101
圖 4-4 L16 直交表銲道深寬比長條圖-----	101

圖 4-5 因子效果圖-----	103
圖 4-6 截面金相組織-----	105
圖 4-7 等軸樹枝晶組織-----	105
圖 4-8 柱狀樹枝晶組織-----	106
圖 4-9 鐸道裂痕組織-----	106
圖 4-10 L9 直交表鐸道外觀之影響-----	108
圖 4-11 L9 直交表鐸道截面型態-----	110
圖 4-12 L9 直交表鐸道熔融面積長條圖-----	113
圖 4-13 L9 直交表鐸道深寬比長條圖-----	113
圖 4-14 氣瓶上蓋-----	115
圖 4-15 氣瓶罐體-----	116
圖 4-16 上下本體接合法-----	116
圖 4-17 胴體側施鐸-----	117
圖 4-18 上蓋側施鐸-----	117
圖 4-19(a) 胴體側施鐸鐸道-----	118
圖 4-19(b) 上蓋側施鐸鐸道-----	118
圖 4-20(a) 10Kg/cm <sup>2</sup> 壓力值下氣瓶狀況-----	119
圖 4-20(b) 20Kg/cm <sup>2</sup> 壓力值下氣瓶狀況-----	119
圖 4-21 有填料鐸件之有/無熱處理後微硬度變化曲線-----	120

圖 4-22	無填料銲件之有/無熱處理後微硬度變化曲線-----	122
圖 4-23	有填料銲件在有/無熱處理後之抗拉強度-----	123
圖 4-24	有填料銲件在有/無熱處理後之降伏強度-----	123
圖 4-25	有填料銲件之銲後熱處理拉伸試片結果-----	124
圖 4-26	有填料銲件之銲後無熱處理拉伸試片結果-----	124
圖 4-27	無填料銲件在有/無熱處理後之抗拉強度-----	126
圖 4-28	無填料銲件在有/無熱處理後之降伏強度-----	126
圖 4-29	無填料銲件之銲後熱處理拉伸試片結果-----	127
圖 4-30	無填料銲件之銲後無熱處理拉伸試片結果-----	127
圖 4-31	銲後熱處理之有填料金相狀況-----	129
圖 4-32	銲後熱處理之有填料銲道金相組織-----	129
圖 4-33	銲後熱處理之有填料銲件 HAZ 與銲道交界處金相組織-----	130
圖 4-34	銲後熱處理之無填料金相狀況-----	131
圖 4-35	銲後熱處理之無填料銲道金相組織-----	131
圖 4-36	銲後熱處理之無填料銲件 HAZ 與銲道交界處金相組織-----	132

# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景與動機

在科技發達的今日，先進的科技往往也造成了許多的環境環保問題，傳統的火力、石油、天然氣等發電方式，造成的二氧化碳使地球地表溫度逐年上升，溫室效應日益嚴重；因此未來如何減少二氧化碳等溫室氣體排放，已成為一項艱鉅的課題。欲解決以上所面臨的問題，燃料電池技術在諸多能源替代技術選擇中脫穎而出，成為全球矚目的焦點。

至於氫燃料電池運用在汽車動力上，除了燃料電池本身之構造及電路設計外，不外乎就是氫氣的儲存。一般汽/柴油動力之汽車使用油箱進行燃料之儲存，所以油箱不可有洩漏之情況發生，至於以氫為燃料之動力的燃料電池車，相同也需要一個儲存氫燃料之設備，因氫氣為易燃且危險之氣體，所以對於儲存之容器要求甚高，如此該設備之製造成本相對變高，目前儲氫之壓力容器大部分體積較大，除運用於汽車上，較無法使用於可隨身攜帶之裝置上，所以對於體積較小之儲氫氣瓶，爾後在燃料電池之運用上，具有舉足輕重之地位，因此本論文針對可攜式氣瓶之設計進行探討及實作。

## 1.2 文獻回顧

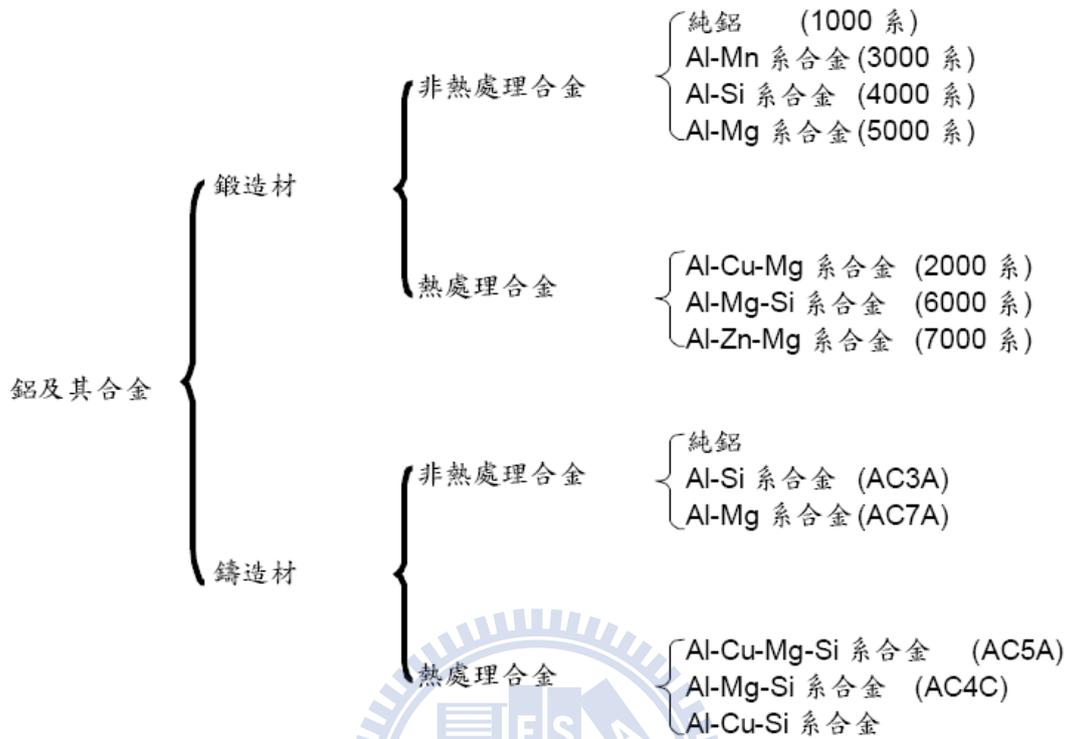
### 1.2.1 鋁合金簡介

鋁密度  $2.7\text{g/cm}^3$ ，熔點  $660^\circ\text{C}$ ，晶格為面心立方結構(FCC)，常溫常壓下極易和氧反應形成緻密的氧化膜( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )，厚度約  $2\sim 2.5\text{nm}$ ，即使被刮除很快又形成一層薄膜。此氧化膜在銲接時雖然有害，但具有防蝕作用，可阻止內部材料進一步被氧化<sup>[11, 12]</sup>。鋁重量輕，質軟加工容易，對電及熱有良好的傳導性，延展性及抗蝕性佳且無毒性，故在工業上應用極為廣泛。在鋁中添加銅、鎂、錳、矽及鋅等元素成為鋁合金，而鋁合金富延展性，加工成型性良好，耐蝕性佳，質輕且比强度高，使其成為航空工業、車輛工業及建築業上的重要材料<sup>[13]</sup>。

### 1.2.2 鋁合金的分類

鋁可以藉添加銅、鎂、矽、錳及鋅等元素，組成各種特性之鋁合金，其種類很多，且分類方法也相當多，如表1-1<sup>[14, 15]</sup>所示。一般鋁合金依製造及成型方法的不同，可分為鑄造用鋁合金(Casting Aluminum Alloys)及鍛造用鋁合金(Wrought Aluminum Alloys)兩大類<sup>[14, 16]</sup>。

表1-1 鋁及其合金<sup>[14, 15]</sup>



此兩大類鋁合金又分熱處理型鋁合金(Heat-treatable Aluminum Alloys) 及非熱處理型鋁合金(Non-heat-treatable Aluminum Alloys)，而熱處理型鋁合金又分自然時效硬化鋁合金(Naturally Aged Aluminum Alloys)及人工時效硬化鋁合金 (Artificially Aged Aluminum Alloys)<sup>[14]</sup>。

鍛造用鋁合金，依據美國鋁業協會 (American Aluminum Association) 制定命名法則，鍛造用鋁合金可分為九大類，並以四位數字編號來表示如表1-2<sup>[11, 15]</sup>，並在末位數字後面加上加工或熱處理條件之代號<sup>[11, 15, 19]</sup>。如表1-3<sup>[31]</sup>所示，編號的第一位數字表示添加的主要合金元

素。第二位數字為0 表示原來合金，其它數字即表示不純物規定或添加微量元素不同之改良合金。第三、四位數字表示不同化學成分之合金識別，但1XXX 系之第三、四位數字係表示純度，例如1050、1070 分別表示該鋁純度為99.5%、99.7%以上<sup>[11, 15, 31]</sup>。

表1-2 鍛鍊用鋁合金之編號<sup>[11, 15]</sup>

編號	主要添加合金元素	熱處理	實例
1XXX	無(99.0%以上之純鋁)	無法時效硬化	1050
2XXX	銅	可以時效硬化	2024
3XXX	錳	無法時效硬化	3003
4XXX	矽	無法時效硬化	4032
5XXX	鎂	無法時效硬化	5056
6XXX	鎂加矽	可以時效硬化	6061
7XXX	鋅加鎂	可以時效硬化	7075
8XXX	其它元素 (如：鋰)		
9XXX	備用合金		

表1-3 鋁合金加工與熱處理條件記號表<sup>[31]</sup>

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

### 1.2.3 7075 鋁合金介紹

7075 鋁合金屬於熱處理型鍛造用鋁合金，主要合金元素為鋅及鎂，其強度在鋁合金中屬於高強度等級。其強度主要來自固溶處理、淬火及人工時效處理，經過處理之後，合金會產生穩定的 $MgZn_2$  及 $Mg_3Zn_3Al_2$  等析出

物，而強化此鋁合金。若添加銅含量高至3%時，會使合金得到更高的強度，但會降低其應力腐蝕裂縫的抵抗能力及使銲接性變差。若添加少量的錳、鉻及鋇等元素，而可以改善應力腐蝕裂縫的抵抗能力<sup>[2,14]</sup>。

7075 鋁合金發展於1943 年，主要添加的合金含量為：5.6%鋅、2.5%鎂、1.6%銅、0.3%鉻。其規範成分如表1-4<sup>[3]</sup>所示，係屬於鋁-鋅-鎂-銅系之鋁合金，為目前廣泛應用於航空及軍事工業材料的高強度鋁合金，其機械性質如表1-5<sup>[2]</sup>所示。

表1-4 7075 鋁合金之規範成份<sup>[3]</sup>

元素含量	鋅	鎂	銅	鐵	矽	錳	鉻	鈦	其它
Wt. %	5.1~6.1	2.1~2.9	1.2~2.0	<0.5	<0.4	0.3	0.18~0.28	0.20	0.15

表1-5 7075-T6 鋁合金的機械性質<sup>[2]</sup>

性質 材料	Tensile strength MPa (Ksi)	Yield strength MPa (Ksi)	Elongation in 50mm, %	Hardness HB	Shear strength MPa (Ksi)	Fatigue limit MPa (Ksi)
7075-T6	570(82.7)	505(73.3)	11	150	330(47.9)	160(23.2)

在7075 鋁合金的時效過程中，由過飽和的固溶體，逐漸隨時效而析出平衡相  $\eta$  ( $MgZn_2$ )，過程為：過飽和固溶體→G. P. Zone→ $\eta$ ，(介穩相)→ $\eta$ 。由Thomas、Embury 和Nicholson 的研究指出G. P. Zone為圓盤狀、FCC結構，而介穩相  $\eta$ ，沿{111}基地平面形成薄板狀(Plate)析出物； $\eta$  平衡相有兩種型態，分別為板條狀(Lath-Like)與針狀(Needle)，沿著基地<

110>方向成長之六方晶系結構。此外，存在7075 鋁合金中的相除了 $MgZn_2$  之外，還有 $Al_7Cu_2Fe$ 、 $Mg_2Si$  和E-Phase( $Al_2Mg_2Cr$ )及S-Phase( $Al_2CuMg$ )，並且當冷速過慢或時效溫度太高時( $T > 190^\circ C$ )，會產生T-Phase( $Al_2Mg_3Zn_3$ ) 的立方結構。

依據7075 鋁合金的時效析出過程研究<sup>[24]</sup>認為：鋁-鋅-鎂-(銅)系之鋁合金主要靠鋅及鎂藉由淬火殘留的空孔聚集而達成時效析出；其中，鎂與空孔的鍵能較鋅強，且鎂擴散速率較慢，故為G. P. Zone 成長的控制因素；因此G. P. Zone 的形成與成長控制在鎂-空孔與鎂-鋅-空孔的移動上。

#### 1.2.4 鋁合金材料銲接特性

鋁及鋁合金之銲接特性與其他金屬不同，其能影響銲接性者，主要包括表層之氧化膜、熱傳導性、膨脹係數、熔點及銲接軟化等<sup>[14、25]</sup>。

茲將這些銲接特性分述如下：

##### 一、氧化層

鋁及鋁合金置於大氣中，在表面上會迅速地形成一層氧化( $Al_2O_3$ )，使鋁材具有優良的耐蝕性及穩定性<sup>[8]</sup>。但氧化膜的 formed，卻造成銲接上的莫大困擾。一般而言，純鋁的熔點為 $660^\circ C$ ，而覆蓋於鋁材表面之氧化層熔點卻可高達 $2040^\circ C$ ，相差有三倍之多<sup>[26]</sup>。在銲接過程中，氧化層阻隔了熔填金屬與母材之熔合，因氧化層無法在銲接過程中熔融，所以在銲接之前必須先清除氧化層，才能達到較佳的銲接品質。一般氧化層的清除方

法，有溶劑、鋸劑、機械式研磨及鋸接電弧作用來清除<sup>[27]</sup>。鋸接進行中，若氧化鋁的粒子滲入鋸道將影響鋸道品質，造成延性降低、熔透不佳或鋸接龜裂等現象<sup>[28]</sup>。

## 二、熱傳導性

鋁合金之特性之一乃是具有高熱傳導性，其導熱速度約為碳鋼的三倍以上，散熱速度相當快<sup>[26]</sup>。因此鋁合金雖具有較低之熔點，但同一厚度的鋁材及鋼材鋸接時，鋁材所需的輸入熱量較高，即需要相當集中的熱輸入量才能順利鋸接。

## 三、膨脹係數

鋁材的熱膨脹係數極大，由熔融至凝固其體積變化約縮小6%，大約為鋼鐵的兩倍<sup>[26、28]</sup>。這種冷卻所產生的收縮，在鋸接加工時，必須有正確的鋸接程序及預留裕度，否則會造成很大的變形或因拘束而產生龜裂<sup>[29、30]</sup>。

## 四、熔點色澤

純鋁的熔點約660°C，而一般鋁合金之熔點大約570°C，遠低於鐵之熔點1536°C及銅之熔點1080°C<sup>[5]</sup>。鋁與其他金屬不同的是：鋁在加熱過程中，甚至到達熔點時，其色澤變化甚微<sup>[28]</sup>。因此，鋁合金在施鋸時，施鋸者必須特別注意液態或濕潤現象的研判，以便於了解鋁合金材料熔融之變化，才不致造成過熱而將工件鋸穿。

## 五、鋸接軟化

鋁合金之結晶格子結構為面心立方(Face-Centered Cubic)，較無低溫脆性，但於高溫環境下，其強度便下降，所以在打底銲接時，易出現熔穿及下陷等缺陷問題，所以於銲接鋁合金時，必需選擇合適之背襯板<sup>[32]</sup>。

鋁合金銲件因銲接時，銲道部份會產生高溫軟化現象，銲道附近亦因溫度太高，使得機械性質也變差。圖1-1<sup>[6]</sup>為非熱處理型鋁合金銲件銲接軟化機械性質變化曲線，由圖可知銲道及熱影響區的抗拉強度、降伏強度及硬度皆下降，而伸長率增加<sup>[33]</sup>。因此，銲接時銲道的設計、銲接方法的選擇及施工的程序皆須詳加考慮規劃。

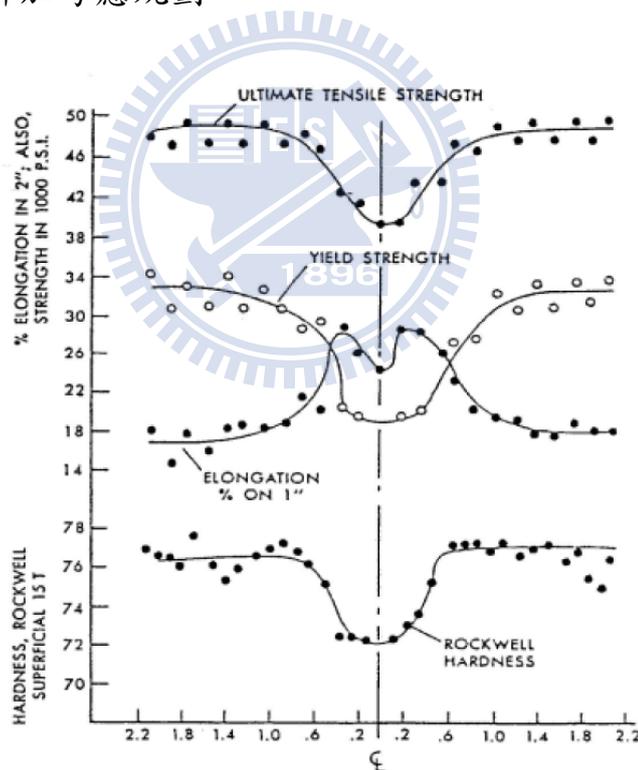


圖1-1 非熱處理型鋁合金銲件銲接軟化機械性質變化曲線<sup>[6]</sup>

鋁中添加合金元素即顯現各具特色之鋁合金，其銲接性略有差異。一般純鋁(1000系)、Al-Mn系合金(3000系)、Al-Si系合金(4000系)、Al-Mg

系合金(5000系)、Al-Mg-Si系合金(6000系)及Al-Cu-Mg系合金(2000系)與Al-Zn-Mg系合金(7000系)中之一部分(如2219、2014、7005、7039等)均屬可鐸合金，而Al-Cu-Mg系合金(2000系)與Al-Zn-Mg系合金(7000系)之大部份合金則屬難鐸(如2024)，甚至不可鐸者(如7075、7079、7178等)<sup>[35]</sup>。表1-6以主要鋁合金之鐸接性分類<sup>[36]</sup>。

表1-6 鋁合金材料鐸接性分類<sup>[36]</sup>

類別	代表性鋁及鋁合金材料	鐸接特徵
工業用(純)鋁 Al-Mn系合金	1080, 1100, 3003	鐸接性良好，若為軟質母材的狀況，接合效率100%，耐蝕性與加工性俱優，但強度差。
Al-Mg系合金	5052, 5083	鐸接性良好，若為軟質母材的狀況，接合效率100%，因處理軟質狀態，故剪强度高。耐蝕性不差，鐸接結構物上用得最多，使用在65.5°C以上溫度時，需限制Mg量(3%以下)，若鎂含量高及母材厚度厚，則鐸後鐸道中氣孔生成會愈多。
Al-Zn-Mg系合金	7N01, 7003	屬於鐸接結構用熱處理合金。鐸接後，可藉自然時效恢復熱影響區的強度。施工時因使用條件的影響關係，會生應力腐蝕裂縫，需格外注意。
Al-Mg-Si系合金	6061, 6N01	在熱處理型合金中，其鐸接性最好。若是只有鐸接狀態時，其接合效率就很低，約為60%。
Al-Cu, Al-Zn系合金	2017, 2219, 7075	鐸接時，易生高溫裂縫，故鐸接性不良。不過其中的2219鐸接性已改良過，因此其高溫特性不差，皆用於航太相關業界。若為鐸接狀態，那麼它的接合效率偏低，僅為60%。

### 1.2.5 鋁合金之鐸接組織

鋁合金鐸接組織可分為熔融區(Fusion Zone)、熱影響區(HAZ)及母材(Base Metal)等三區，其中熔融區又稱為鐸道金屬(Weld Metal)或簡稱鐸道。茲將鐸道金屬及熱影響區的組織特性分述如下：

#### 一、鐸道金屬組織

鐸道金屬組織其微結構組織受母材成份、鐸材成份、鐸道設計及鐸接條件所控制，其中以母材及鐸材合金成份的影響最大。其固化模式(Solidification Mode)主要是由組成過冷度(Constitutional Supercooling)的大小來控制，大致可分為平面磊晶成長(Planar Epitaxial Growth)、晶包(Cellular)、柱狀晶(Columnar Dendrite)及等軸晶(Equiaxed Dendrite)，由鐸道的凝固界面往內成核成長鐸道金屬組織<sup>[33、34]</sup>。

鋁合金的成份很複雜，又容易形成共晶相，由圖1-2<sup>[7]</sup>可看出鋁合金合金成份對其共晶溫度的影響很大。合金成份越多會導致凝固溫度範圍變大，而對鐸接性有不利的影響<sup>[7、33]</sup>。圖1-3<sup>[9]</sup>為鋁合金中合金成份對裂縫敏感性的影響<sup>[33-35]</sup>，由圖中很明顯可看出僅是高銅含量或僅是高鎂含量的鋁合金，鐸接性甚佳，如2219 及5083 鋁合金。而含銅量及含鎂量兩者均高的2024、2091、7075 及8090 鋁合金鐸接性則不佳。圖1-3<sup>[9]</sup>可用來預估鋁合金鐸接性，以及提供如何選用鐸條來稀釋(Dilution)調整鐸道合金成份

以提高銲接性<sup>[7, 10]</sup>。如選用高銅含量的銲料(Filler)可改善2024、2090、2519 及Weldalite™049 鋁合金的銲接性。而選用高鎂含量的銲料可改善6061、7005 及8090 鋁合金的銲接性。Kim 等人<sup>[39]</sup>曾利用Tig-a-Ma-Jig Vareststraint Test研究合金成份對高強度鋁-鋅-鎂鋁合金之銲道凝固熱裂敏感性的影響，發現銅的添加量會提高凝固裂縫敏感性，而鎂的添加量提高至0.3~0.7%可以大幅降低其凝固裂縫敏感性，其亦指出添加過渡元素銻比添加鉻更能有效降低凝固裂縫敏感性。

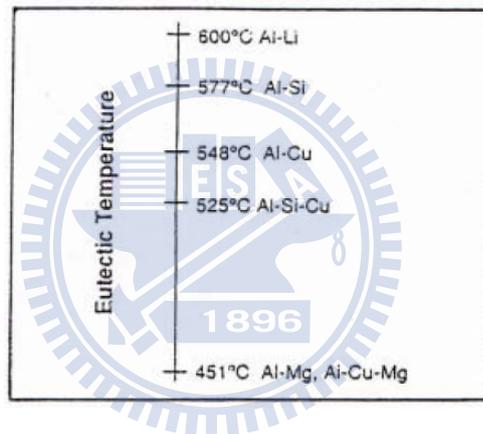


圖1-2 二元或三元鋁合金之共晶溶解溫度<sup>[7]</sup>

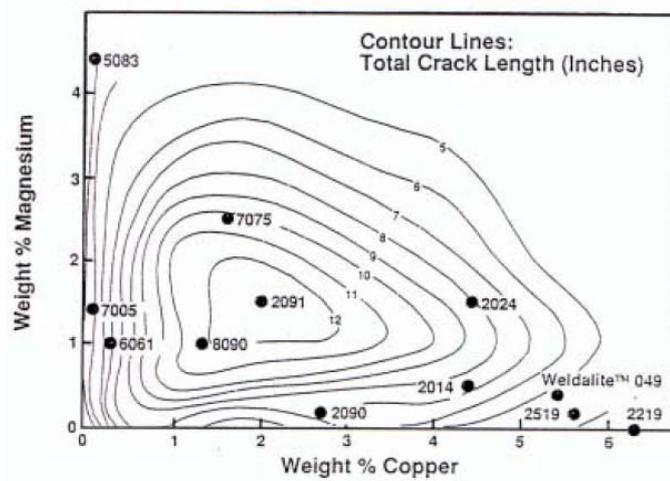


圖1-3 鋁合金成份對裂縫敏感性之影響<sup>[9]</sup>

## 二、熱影響區組織

在銲接過程中，由於高溫熱作用，銲道本身係屬於鑄造組織，強度接近母材之退火狀態，由於材料本身熱導作用，母材靠近銲道之處必然會受到熱量的影響，愈近銲道所承受的熱量愈高，母材在經歷熱循環作用後，如實施一熱處理程序，將使銲道附近母材組織改變。在熱影響區的範圍內由於受到不同的急速升溫及冷卻的銲接熱循環作用，會導致不同的相變化冶金反應，而一般組織之改變大都是基體改變、析出物之析出、晶粒再結晶、晶粒成長等，上述母材內部組織的改變均會影響其機械性質、物理性質及腐蝕行為，故稱為熱影響區<sup>[37]</sup>。影響熱循環過程之因素：(1)熱輸入量(Heat Input)；(2)預熱溫度(Preheat Temperature)；(3)銲道幾何形狀(Weld Geometry)；(4)銲材之熱傳性(Thermal Characteristics)；(5)銲條大小(Electrode Size)。

### (一)非熱處理型鋁合金

對加工硬化非熱處理型鋁合金而言，其熱影響區大致可分為三個區域：(1)晶粒成長區；(2)再結晶區；(3)未受影響之加工硬化區。對此非熱處理鋁合金而言，受到銲接熱循環的作用下，熱影響區會因晶粒成長及再結晶的冶金反應而損失部分的機械強度<sup>[6、33、34、38]</sup>。

### (二)熱處理型鋁合金

熱處理型鋁合金經銲接後母材之熱影響區依其受不同溫度熱循環的作

用，可分為五種顯微組織相異的區域，如圖1-4<sup>[43]</sup>所示，以鐸道為中心向外依序為<sup>[44]</sup>：

#### (1)部份熔化區(Partial Melted Zone)

此區緊鄰鐸道，合金所含之共晶組成因高溫作用而部份熔化和再凝固，而合金內的析出物因過熱和擴散作用將往晶界和晶粒中心聚集，並使晶粒增大，故強度甚低易產生裂縫。此區亦稱為過熱區(Overheated Zone)，而部份熔化區所在位置，如圖1-5<sup>[45]</sup>所示。

#### (2)固溶區(Solution Zone)

在此區母材原本所含之析出物將被重新溶回基地中，鐸後若經適當的自然時效或人工時效可顯著改善其強度。

#### (3)部份固溶區(Partial Solution Zone)

因溫度較低，導致此區部份析出物無法完全固溶回基地中，而尚未固溶之析出物有可能因聚集而使晶粒粗化，導致機械性質變差。

#### (4)過時效區(Overaged Zone)

此區的熱循環溫度有助於析出物的析出成長及粗化，造成過時效狀態，機械性質最差，必須鐸後施以時效處理或熱處理，才能提高機械性質。

#### (5)未受熱影響區(Unaffected Zone)

此區較遠離鐸道，所受到的熱循環溫度較低，母材不會引起任何組織

上的變化，性質與銲前相同。

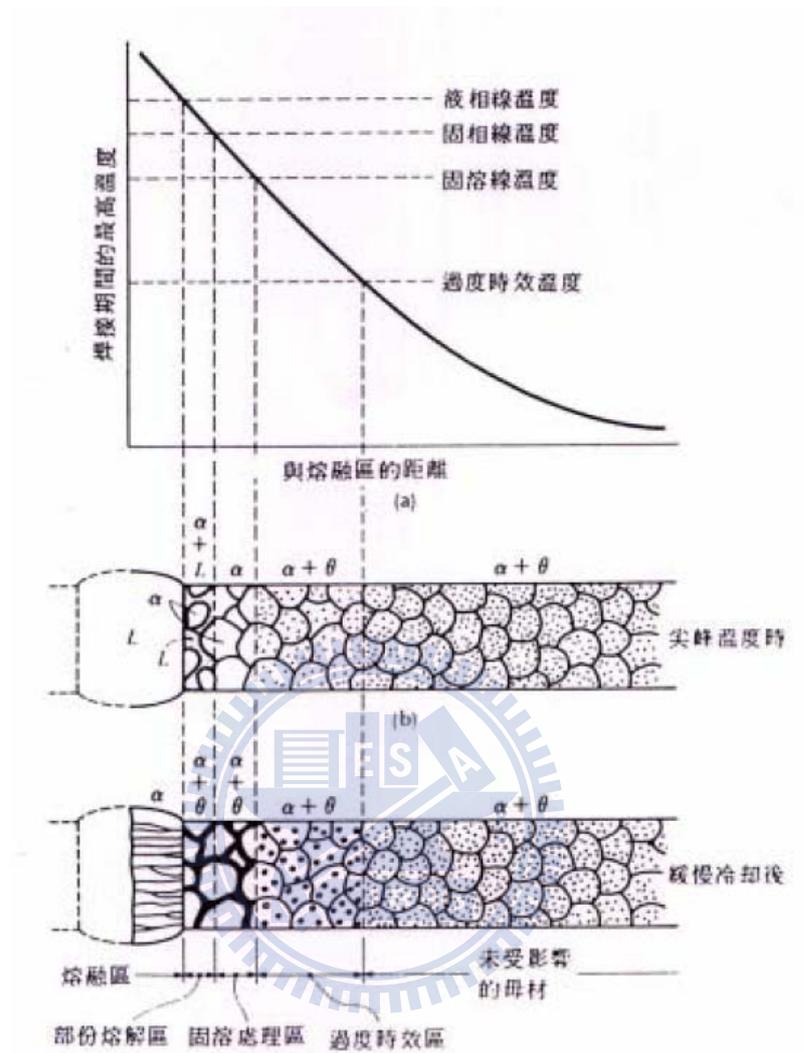


圖1-4 鋁合金銲後熱影響區顯微組織圖<sup>[43]</sup>

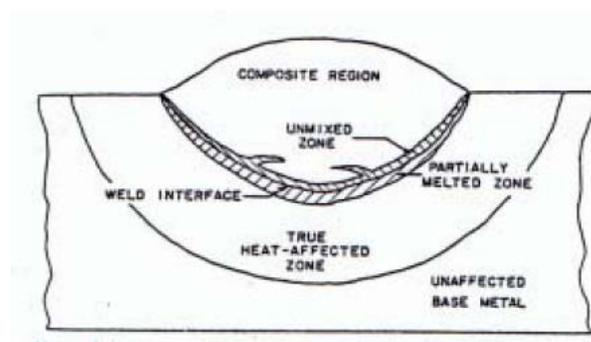


圖1-5 銲件(含銲接金屬與母材)區域之劃分<sup>[45]</sup>

## 1.2.6 鋁合金鐸接時常見缺陷

無論技術多精良，一條鐸道很難完美無瑕，通常鐸層中總可能包含微量的鐸渣或產生一些微細裂紋，無法使整個鐸接物完美無缺，雖然對整體的機械性質並無影響，但由於破壞了鐸接物的完美與連續性，通常稱這些微疵為不連續，這些不連續太多或者太大到超過某一標準限度違反了某些規格標準(specification code)，我們稱之為缺陷。

### 1.2.6.1 鐸接缺陷防治方法

防治方法由表 1-7 及下列方法防治：

- (1) 續熱處理—舒解殘留應力並軟化之。
- (2) 預熱處理—降低鐸材之冷卻速度。
- (3) 選用低硬化能的材料或低碳鋼。
- (4) 選用含氫量低的鐸條。

表 1-7 TIG 鐸缺陷的原因及其對策表

缺陷名稱	發生原因	防止對策
電極消耗量大	<ol style="list-style-type: none"><li>1. 惰性氣體蔽護不正確，造成電極之氧化</li><li>2. 使用反極性之鐸法</li><li>3. 用不合電流所需要的尺寸電極</li><li>4. 在鐸接手把上熱量過大</li><li>5. 使用污染的電極</li><li>6. 當電極在冷卻時受到氧化</li></ol>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. 清潔噴嘴；將噴嘴靠近鐸件；把氣體流量提高</li><li>2. 換用較大的電極或改用正極性鐸法</li><li>3. 改用較大電極</li><li>4. 將電極端頭加工成型；更換固定夾；檢查固定夾不正確接觸部位</li><li>5. 將污染的部位除去，如未除盡則現象會繼續發生</li><li>6. 在電弧停止後，氣</li></ol>

		體流動尚需保持 10~15 秒；一般規則 是：每 10A 為 1 秒
電弧不規則	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 母材太髒，而沾有油脂</li> <li>2. 接頭太窄</li> <li>3. 電極受到污染</li> <li>4. 使用太大的電極</li> <li>5. 電弧太長</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 使用適化學清潔劑，或鋼絲刷或研磨等方式清除</li> <li>2. 接頭開槽，持電極靠近銲件；減低電壓</li> <li>3. 去除電極受污染的部位</li> <li>4. 使用較小的電極；使用做正確操作所需最小的電極</li> <li>5. 將銲接手把靠近銲件以縮短電弧</li> </ol>
銲件受到鎢電極的污染	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 使用電極碰觸式的起弧法</li> <li>2. 電極熔化並與母材結成合金</li> <li>3. 受熱衝擊使電極斷裂</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 使用高週波的起動器；應用銅板做起弧板</li> <li>2. 使用較低的電流或較大的電極；使用含鈦或含鋳的鎢電極</li> <li>3. 當使用高電流時，所使用的電極端頭不致成為銀白色或發生破損；使用較脆的鎢電極，以幫助易於清除破損部位</li> </ol>
氣孔	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 惰性氣體不純（含氫、氮、空氣和水蒸氣）</li> <li>2. 可能使用舊有的乙炔橡皮管</li> <li>3. 氣體導管和水管互相換用</li> <li>4. 母材上粘有油膜</li> <li>5. 惰性氣體保護不週密</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 在起弧之前將管線內的空氣吹出；從管線內清除凝結的水份；使用銲接等級（99.995%）的惰性氣體</li> <li>2. 換用新的導管</li> <li>3. 以化學清潔劑來清除，不可使用能受電弧起分解的清潔劑；同時在未擦乾之前不可進行銲接</li> <li>4. 裡波滲透銲時，背面須加氣體保護；厚板高電流銲時要提高氣體流量</li> </ol>

### 1.2.6.2 鋁合金銲接時常見缺陷

鋁合金在銲接時，常見之缺陷有下列數種：

#### 一、龜裂(Cracking)

對鋁合金而言，其銲接過程中所出現的裂紋缺陷主要為高溫龜裂及熱影響區液化龜裂兩大類。銲道內低熔點共晶組織偏析，形成液體薄膜，並於凝固收縮拉應力作用下分離，為銲道熱裂紋產生的機構。而熱影響區於銲接過程中累積過高溫度，使晶界中之低熔點共晶組織熔融，並於冷卻過程中受收縮拉應力作用而分離，則是熱影響區液化龜裂的成因<sup>[57]</sup>。

#### 二、氣孔(Porosity)

鋁合金銲道產生氣孔最主要的原因是由氫氣所造成的，當銲道熔融金屬中的氫氣，在凝固前若來不及脫離銲道金屬時，則銲道金屬凝固之後會產生氣孔。氫氣的主要來源有母材和銲線填料表面的污染，如氫氧化物、碳氧化物或氧化物所吸收之水氣；另外亦可能從不純的保護氣體中滲入的空氣或濕氣。

#### 三、變形(Distortion)

在銲接的過程中，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(Filler Metal)與母材產生熱應變(Thermal Strain)，由熱應變再產生熱應力(Thermal Stress)，此不均勻的熱應力便是銲接變形(Welding Distortion)產生的主要原因。

#### 四、不完全熔融(Incomplete Fusion)

不完全熔融的原因為不當的銲接條件，如銲接電流太低、銲接速度太快及填料尺寸不當等，以及附著於接口與母材上有高溫氧化物或雜質未除淨，造成銲接金屬的相鄰兩層間或者與母材間之熔解不良情形。

#### 五、滲透不足(Incomplete Penetration)

主要因為銲接熱輸入量不足，不良的接口設計、銲接技術不良、銲條選擇不當、銲接電弧不穩定及母材表面的氧化物或雜質未除淨。

#### 六、夾渣(Dense Inclusion)

銲道中之夾渣，可分為金屬夾渣物(Metallic Inclusion)與非金屬夾渣物(Nonmetallic Inclusion)兩種。前者主要發生在TIG 銲接，鎢由於TIG 銲接電極過熱、空氣導致的污染、電極與母材或銲材接觸等原因，致使電極前端飛散出去，掉落在熔池內而形成。後者主要是因銲接接口與母材介面含氧化物和不潔物，以及銲接技術的瑕疵或設計者所提之銲接方法的失策。

#### 七、過熔低陷(Undercut)(又稱之為銲蝕)

導致銲蝕的主要原因是銲接條件設定不良，例如使用特定的電壓，過量的電流、過度的電弧長度、銲速太快、以及銲接操作不當等所造成。

### 1.2.6.3 銲接熱裂縫

銲接熱裂縫(Hot Cracking)是一種通常發生在銲接過程中，即由液相溫度開始冷卻凝固之高溫狀態下發生裂縫，所以在接近固相線溫度(Solidus Temperature)形成之裂縫稱之為熱裂縫。而通常在銲道金屬或熱影響區上皆可以發現銲接熱裂縫的存在。

#### 一、銲接熱裂縫之分類

Hemsworth, et al. 將熱裂縫分成兩類(如圖1-6<sup>[58]</sup>所示)：(一) 偏析熱裂縫(Segregation Cracking)：包含銲道金屬的凝固裂縫(Weld Metal Solidification Cracking)及熱影響區的液化裂縫(HAZ Liquation Cracking)；(二)延性降低裂縫(Ductility-Dip Cracking)。

而不論是那一種熱裂縫，都有如下相同的特徵：(a)裂縫發生於銲接凝固過程中；(b)裂縫一定是沿著晶粒邊界發生，亦即皆屬於沿晶裂縫(Intergranular Cracking)；(c)裂縫發生時，於固體晶粒邊界有液體薄膜存在。

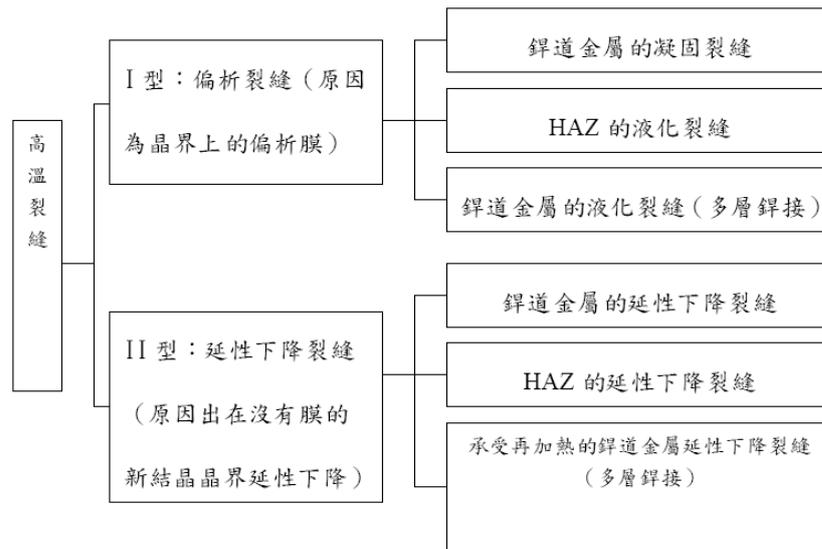


圖1-6 銲接熱裂縫的分類<sup>[58]</sup>

## 二、銲道金屬的凝固裂縫

### (一)銲道金屬的凝固熱裂之理論

凝固熱裂發生於銲道凝固過程接近完成時，又稱銲接金屬熱裂(Weld Metal Hot Cracking)。其發生的原因可歸納為：(a)在高溫下的凝固過程中，材料的延性大幅降低；(b)在凝固過程中承受應力或應變的作用。在鑄造及銲接凝固熱裂機構的研究，已有很多理論提出，如收縮脆化理論(Shrinkage Brittleness Theory)，應變理論(Strain Theory)，液化膜理論(Liquid Film Theory)，綜合理論(Generalized Theory)，液體填充裂縫理論(Liquid Filled Crack Theory)，晶界滑移理論(Grain Boundary Sliding Theory)及臨界速率理論(Critical Speed Theory)等。而目前最合理也較為多數人接受的是由Borland 在1960 年所提出的

綜合理論(Generalized Theory)，這個理論基本上它是歸納、修正及擴充收縮脆化理論(Shrinkage Brittleness Theory)與應變理論(Strain Theory)而成的。以下僅就綜合理論之機構敘述如下：

Borland在1960年提出此理論來解釋在凝固過程中液相之金屬溶液與固相的固化晶粒之量與分佈對熱裂敏感性的影響，其將凝固過程分為四個階段，如圖1-7<sup>[60]</sup>、1-8<sup>[61]</sup>所示。

第一階段：樹枝狀晶結構形成(Primary Dendrite Formation)

樹枝狀晶結構開始形成，尚未成長而連結之自由樹枝狀初晶，可自由的分佈在熔融金屬液中，此時填充率(Rate of Feeding, ROF) > 凝固率(Rate of Shrinkage, ROS)，故此階段無凝固裂縫產生。

第二階段：樹枝狀晶結構相互連結(Dendrite Interlocking)

第一階段分佈於金屬液中之樹枝狀初晶，在此階段開始相互連結，殘留金屬液尚能夠在相互連結的樹枝狀晶間自由移動，若此時有裂縫產生，則殘留金屬液可填充而使裂縫癒合，故此階段無凝固裂縫產生。

第三階段：晶界成長(Grain Boundary Development)

在此階段已相互連結之樹枝狀晶持續成長，晶界已近乎完全長成，因而限制了殘留金屬液的流動，此時若有裂縫發生，殘留金屬液無法回填，所以此裂縫無法癒合。

第四階段：完全凝固(Complete Solidification)

殘留金屬液皆已完全凝固，此時強度與延性均已提高許多，故此階段無凝固裂縫產生。

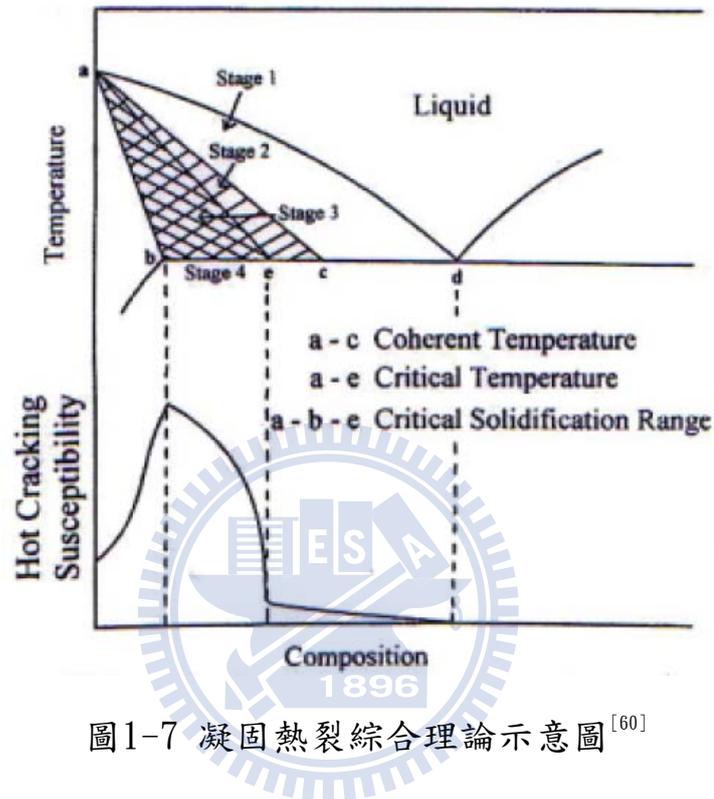


圖1-7 凝固熱裂綜合理論示意圖<sup>[60]</sup>

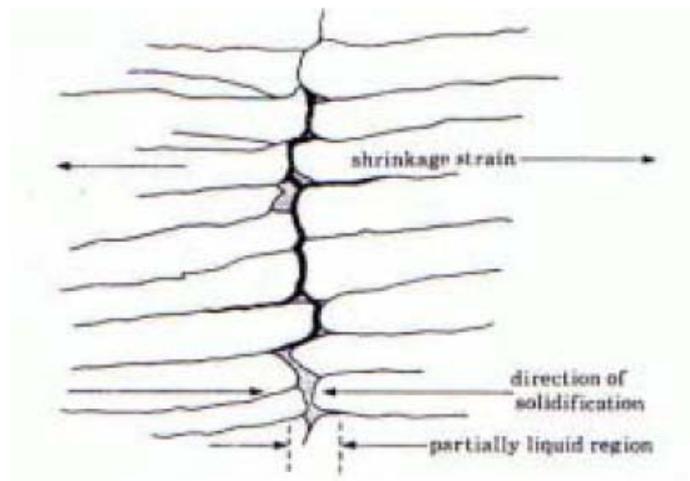


圖1-8 凝固熱裂示意圖<sup>[61]</sup>

Borland 特別稱第三階段為臨界凝固範圍(Critical Solidification Range, CSR)，是自連結溫度開始到完全凝固之溫度範圍。若此臨界凝固範圍愈大，則代表熱裂敏感性(Hot Cracking Susceptibility)愈高，亦即銲接金屬愈容易產生熱裂。

Borland 認為在銲件中會有一些不完全連續的金屬液薄膜存在於已固化的銲接金屬之間，提供狹窄的固體連橋(Solid Bridges)，這些固體連橋必須承受絕大部份的應力，因此很容易被破壞而導致裂縫產生。當金屬液薄膜愈不連續，即固體連橋愈多或愈大，所能承受的應力就愈大，所以熱裂就不易產生。由此可知，固體連橋之多寡與金屬液薄膜的形式為熱裂發生的主要因素。金屬液薄膜的分佈，主要是受到相界能(Interphase Energy,  $\gamma_{L/S}$ )與晶界能(Boundary Energy,  $\gamma_{S/S}$ )之比值  $\tau$  所支配。其中  $\tau$  與兩面角(Dihedral Angle,  $\theta$ )的關係式如下所示(如圖1-9<sup>[62]</sup>所示)：

$$\tau = \frac{\gamma_{L/S}}{\gamma_{S/S}} = \frac{1}{2 \cos \frac{\theta}{2}} \dots\dots(1), \text{ 式中 } \gamma_{L/S} : \text{Interphase Energy}$$

$\gamma_{S/S} : \text{Grain Boundary Energy}$

$\theta : \text{Angle between Faces of Grain of Second Phase}$

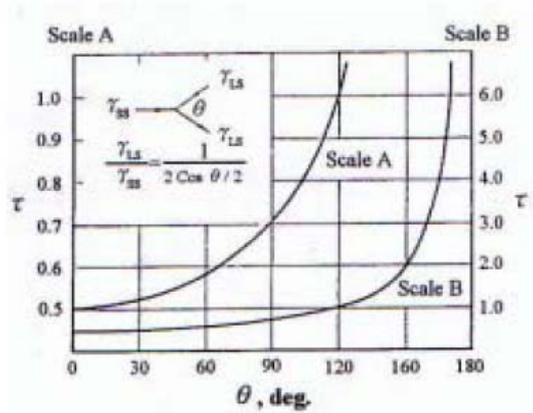


圖1-9  $\tau$  與  $\theta$  之關係<sup>[62]</sup>

由式(1)可知，當  $\tau=0.5$  時， $\theta=0^\circ$ ，其所代表的意義為：金屬液薄膜幾乎完全覆蓋整個晶界面，此情況下的銲接金屬最易產生熱縫。然而，隨著  $\tau$  值的增加， $\theta$  值也會隨之增加，使得金屬液薄膜覆蓋的晶界面區域越來越少，甚至可能只侷限於晶粒的某一角落 ( $\theta > 90^\circ$ )，故  $\tau$  值越大的銲接金屬，越不會發生熱裂，如圖1-10<sup>[62]</sup>所示。

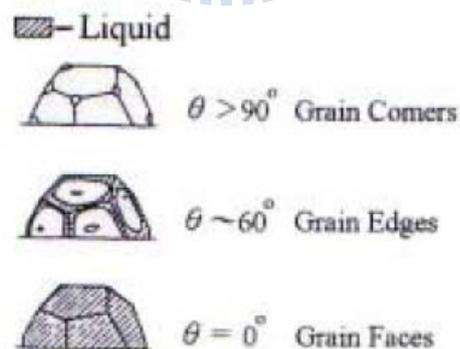


圖1-10 兩面角與金屬液薄膜分佈之關係<sup>[62]</sup>

裂縫敏感組織是鋁道在快速凝固過程中，合金或雜質元素偏析所造成。通常溶質元素會偏析至最後凝固的地方，也就是晶界。這些溶質元素會壓低殘留金屬液體的凝固溫度，造成固、液共存的溫度範圍比平衡凝固時大得多，因而提高材料的裂縫敏感性。

## (二)凝固熱裂的影響因素

造成凝固熱裂的主要因素可分為機械、熱及冶金等方面。以下就機械方面及冶金方面的影響因素敘述如下：

### 1. 機械方面影響凝固熱裂因素

主要是受到凝固過程中收縮應力(包括凝固收縮及熱收縮)，以及外部的拘束(Constraint)程度所影響。假如沒有應力作用，縱使其他因素存在，亦不會產生熱裂。鋁合金具有高的熱膨脹係數及高的凝固體積收縮率，故有較高之熱裂敏感性。

### 2. 冶金方面影響凝固熱裂因素

(1)凝固溫度範圍和低熔點偏析物或共晶相：由Al-Si 合金熱裂發現，影響鋁合金凝固熱裂的主要原因是由最高的凝聚溫度和固相線之間溫度範圍決定之。如圖1-11<sup>[63]</sup>所示。在液相線和最高的凝聚溫度之間的結晶數量很少，熱裂不致產生。但當溫度低於最高的凝聚溫度時，樹枝狀結晶交錯成長，因此在凝固後若出現較大的收縮應力時，會產生熱裂。合金中添加較多之合金元素會使凝固溫度範圍變寬。純鋁並不會產生固化熱裂，因為它

在晶界並沒有低熔點之共晶相產生造成凝固熱裂。高合金含量或高共晶成份之鋁合金，因具有較多之共晶液態相液體能夠回填初始裂縫之癒合，因此具有較低之熱裂敏感性凝固溫度範圍。若合金組成介於純鋁與高合金含量兩者之間，共晶液態相可以形成沿晶連續薄膜，則容易產生凝固熱裂。

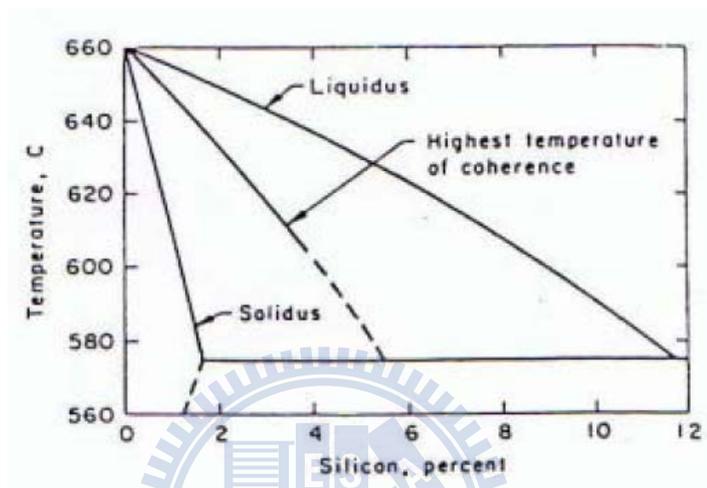


圖1-11 最高凝聚溫度在Al-Si 合金的相圖<sup>[63]</sup>

(2)晶界液體之表面張力：當晶界液體與固體晶粒之表面張力較低時(如圖1-9中 $\theta = 0^\circ$ 的情形)，金屬液的濕潤性較高，則容易在晶界形成液化膜，而固體連橋將較少或較小，凝固熱裂之敏感性增加。相反的，假如表面張力較高時(如圖1-9中 $\theta > 90^\circ$ 的情形)，則液化相將形成球狀，而使金屬液的濕潤性變差，使得固體連橋將較多或較大，大幅降低熱裂敏感性。

(3)熔融區之晶粒結構：細小之等軸晶粒較粗大的柱狀晶粒具有較低的凝固熱裂敏感性。其原因是由於細小之等軸晶粒具有(a)較能承受收縮應變之能力，使應力更加容易由晶粒邊界傳遞而釋放；(b)殘留金屬液較容易

且有效的回填，將有助於裂縫的癒合(Healing)；(c)晶界較多，使得有害的低熔點偏析相或雜質在晶界上的分佈濃度相對地降低，因而降低熱裂縫的發生。

### 三、熱影響區熱裂之理論

在探討熱影響區之熱裂主題之前，首先對熱影響區做一定義。如圖1-12(a)所示，當母材施焊時，在熔融區的四周會產生一個高溫區，溫度由A點之熔點，經過B點之某一特定溫度(通常為相變化溫度或再結晶溫度)而逐漸降至略高於室溫之C點。在A與B兩點溫度所包含的區域內，因受到高溫之影響，會造成微觀組織產生變化，進而影響其機械性質與耐蝕性，而此區域我們特稱之為母材熱影響區。但如果第一道之焊道在未經過均質化處理，受到隨後焊道之影響亦會產生熱影響區，而此區域我們特稱之為焊接金屬熱影響區，如圖1-12(c)所示。由於未經均質化處理過的焊接金屬熱影響區之偏析情形甚為嚴重，因此熱裂產生之機率相對的較母材熱影響區熱裂產生之機率高出許多。

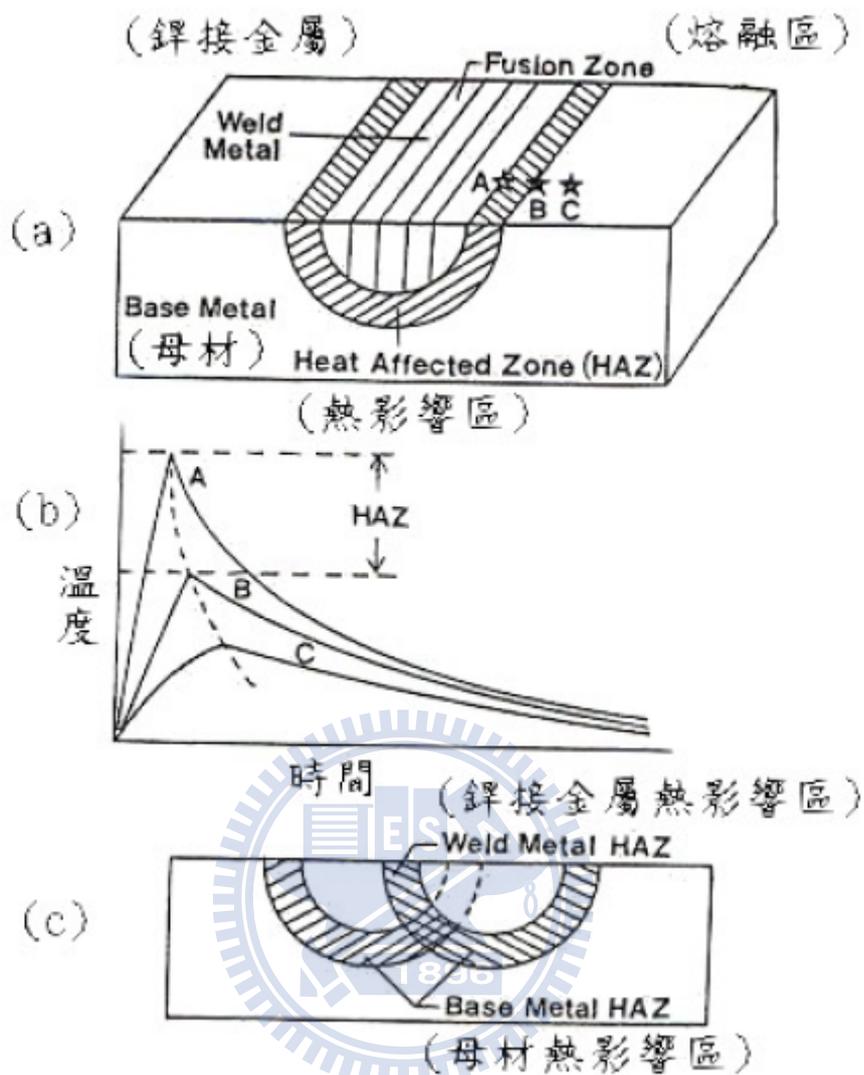


圖1-12 熱影響區定義的示意圖<sup>[64]</sup>

如圖1-13<sup>[65]</sup>所示者即是液化龜裂(Liquation Crack)與低延性龜裂發生機構示意圖。原先便存在於熱影響區粗晶帶粒界中的低熔點化合物或共晶的生成、成份偏析等，故受銲接高熱的影響而熔融，冷卻過程中受到收縮應力而開口所產生的龜裂，即是所謂的「液化裂縫」。液化裂縫是發生在熱影響區緊鄰銲道熔融區的邊界所圍之區域，此區域稱為部份熔化區(Partially Melted Zone, PMZ)。此液化裂縫是由於在銲接過程，在此

部份熔化區的區域內所經歷的熱循環峰值溫度較高，造成在晶界處之低熔點共晶相或偏析組成物產生過熱而重新熔解液化，形成沿晶液體薄膜 (Liquid Film)，再承受超過臨界的應力或應變時，便造成沿晶裂縫的產生。

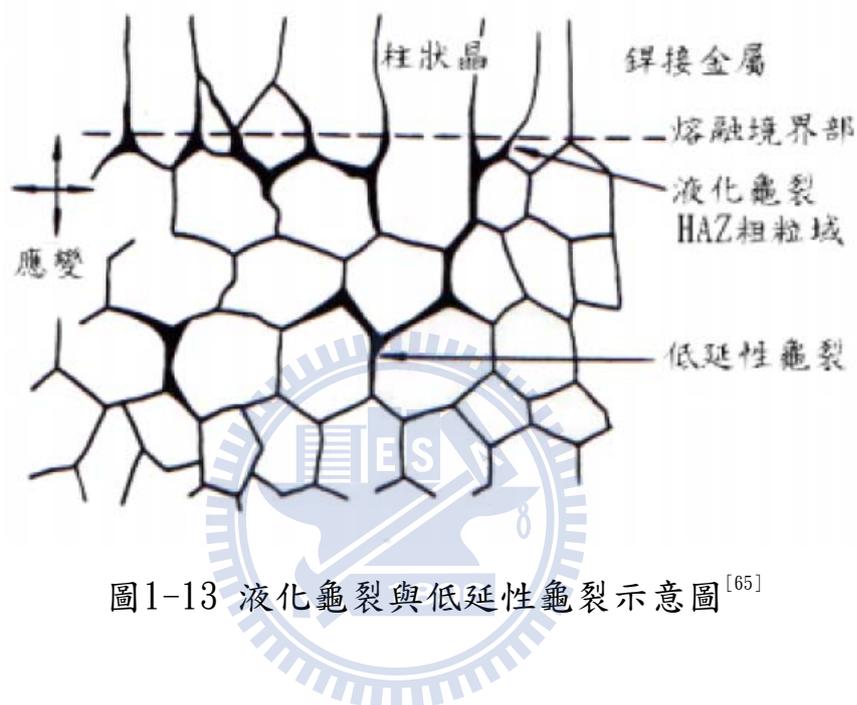


圖1-13 液化龜裂與低延性龜裂示意圖<sup>[65]</sup>

以圖1-14<sup>[66]</sup>的二元相圖，簡單說明材料在昇溫過程中如何造成部份熔化區晶界液化。假設材料的溶質成份是 $C_0$ 且是完全均質，則昇溫至 $T_0$ 時，液體開始出現。因為晶界通常是含雜質或溶質元素較高的地方，而且組織較晶粒內部鬆散，所以液體首先出現於晶界。然而一般工程用材料不可能完全均質，成份局部偏析無法避免。假設溶質成份含量從 $C_1$ 變動到 $C_2$ ，則材料加熱至 $T_2$ 溫度時，液體就發生了。上述只考慮到材料本身的均質程度，而尚未考慮在銲接快速昇溫過程中，溶質元素移動所造成的動態不均

質及造成冶金反應所發生的液化現象。這些動態冶金反應會降低材料的液化溫度，最低可以到達材料的共晶溫度( $T_e$ )。換句話說，熱影響區沿晶液化的溫度範圍可從 $T_L$ 到 $T_e$ 。因此熱影響區液化溫度範圍比一般低速昇溫過程所預期的要大，液體的量也比預期的要多。

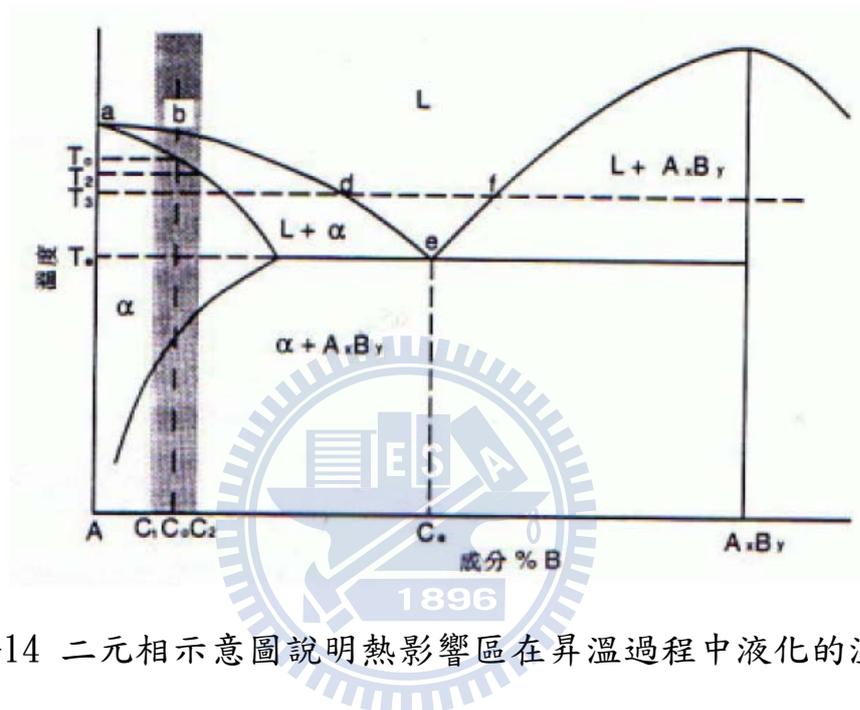


圖1-14 二元相示意圖說明熱影響區在昇溫過程中液化的溫度<sup>[66]</sup>

熱影響區熱裂的理論主要源自液化理論(Liquation Theory)。本理論基本上是因熱影響區在受到銲接高熱，而於晶界間產生液體薄膜。液體薄膜的來源，與下列因素有關：

- (1) 低熔點晶界偏析物(如含S、P 及Si 等的偏析物)，共晶相或不存物，在銲接時受熱循環作用而產生晶界的液化。
- (2) 從熔融的銲接金屬池中吸收溶質偏析至晶界，形成低熔點偏析組成或共晶相而造成液化。

(3)夾渣物與第二相金屬間化合物(或晶出物)或碳化物周圍產生之組成液化(Constitutional Liquation)。

(4)熱量的輸入造成熱影響區的過熱區(Overheated Zone)部份熔化和再凝固，低熔點之不存物或偏析物在晶界聚集而析出物會往晶界或晶粒中心聚集產生一窄且強度低的析出物缺乏區(Precipitate Depleted Zone)，由於晶粒粗化強度甚低無法承受因溫度下降所產生的收縮應力，而產生裂縫，析出理論如圖1-15<sup>[67]</sup>所示。

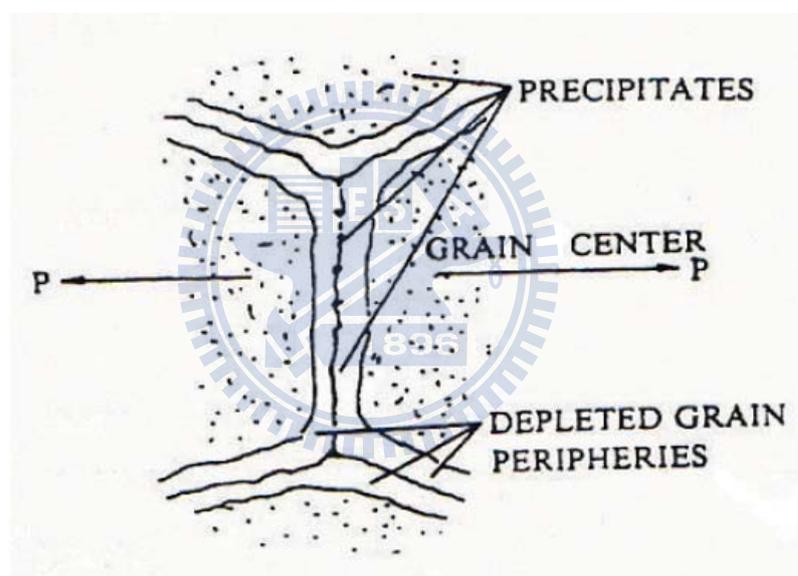


圖1-15 析出物缺乏區熱裂示意圖<sup>[67]</sup>

對鋁合金而言，液化熱裂較容易發生在含高合金成份的熱處理型鋁合金的銲接上，這是由於高合金含量會造成較多的溶質偏析於晶界上，形成低熔點共晶相或偏析組成會比較多。較高的熱輸入量會使部份熔化區變寬，而使液化裂縫敏感性提高。Gittos 等人的研究指出，選擇適當銲條

亦可減少液化熱裂的傾向，若鐸條的合金成份能使鐸道熔融區較部份熔化區後凝固，可降低部份熔化區之應變及液化熱裂敏感性。

#### 四、鋁合金鐸接熱裂縫之特性

鋁合金均具有一定的凝固溫度範圍，在鐸接時容易產生鐸接熱裂縫。鐸道熱裂縫的部份是屬於凝固裂縫，熱影響區熱裂縫的部份是屬於液化裂縫。造成鋁合金熱裂的主要原因是鋁合金熱膨脹係數約為 $23.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，為鋼之2倍，凝固時體積收縮率約為6.5%，所以在凝固過程中容易因收縮應力而造成熱裂。另外有些鋁合金含有一些熱脆傾向的合金元素，若受應力作用即生成熱裂。於多道鐸或修補鐸接會產生再熱熱裂(Reheat Cracking)。鋁合金熱裂縫敏感性受到母材金屬的化學成份影響甚大，由圖1-16<sup>[68]</sup>與圖1-17<sup>[69]</sup>可知，1%  $\text{Mg}_2\text{Si}$  的Al-Mg-Si 系合金及1% Mg 的Al-Zn-Mg 系合金，具有最高的裂縫敏感性。

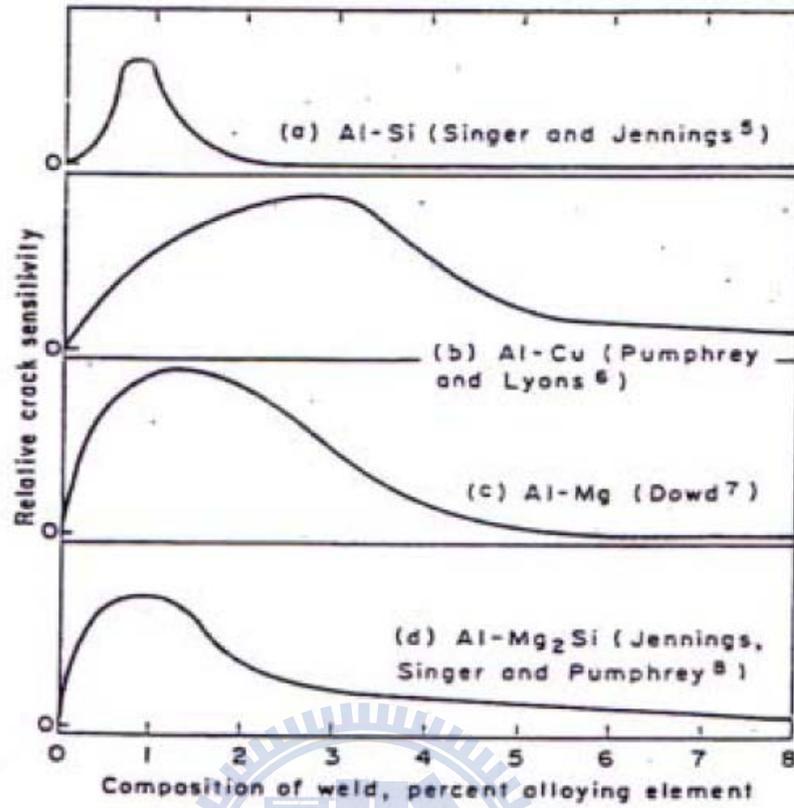


圖1-16 合金含量對鋁合金熱裂縫敏感性的影響<sup>[68]</sup>

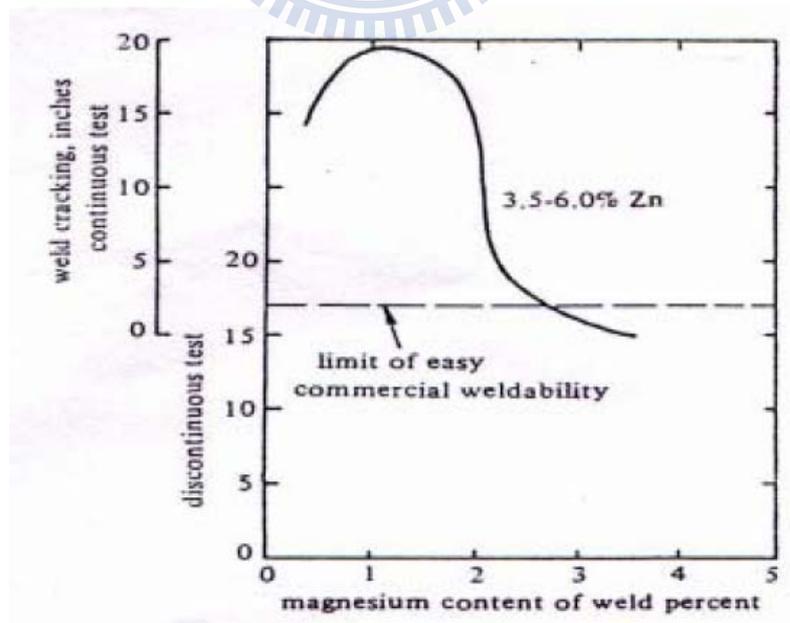


圖1-17 Al-Zn-Mg合金中之Mg含量對裂縫生成之影響<sup>[69]</sup>

### 1.3 研究方法與目的

基於上述理由，本實驗選用 7075-T6 鋁合金為材料，採用鎢電極氣體金屬極電弧銲(TIG)為銲接方式，先經由田口實驗分析法獲得之參數組，再依最佳之深寬比及銲道面積設定為最適參數，並採用對接方式進行實驗。另銲接完後之研磨拋光觀察金相及銲道之寬度及深度量測製成試驗片一，拉伸試驗製成試片二，最後將驗證後之最適參數進行氣瓶實物之銲接，並由水壓試驗確認耐壓程度是否達到  $10\text{kgf/cm}^2$  之需求，最後探討銲後熱處理對於銲件機械性質之提升狀況。並將所得之數據分門別類整理成資料加以分析。具體而言，本研究目的包括下列方面：

- 1.研究板厚 3.0mm 之銲接參數設定。
- 2.研究最適參數之銲道外觀、型態、微硬度、抗拉強度之狀況。
- 3.研究 7075-T6 鋁合金材料之可銲性。
- 4.研究銲接位置對於銲接強度之影響探討。
- 5.研究銲接後之氣瓶耐壓程度可否達到預期之效果。
- 6.研究銲後熱處理對銲道強度之影響及變化。

## 第二章 理論分析

### 2.1 產品之設計規劃

壓力容器之製造，其部份組件可能以鉚接、鑄造、鍛造或挖製而成，但無論以何種方式製成，仍以鉚接為主要之組合方式，所以關鍵技術當然也是鉚接技術。因此在討論壓力容器之製造時，也是以鉚接之相關技術為主軸。影響壓力容器品質之關鍵，大致可分為三大部分，即「設計」、「材料」、與「鉚接」。本研究設計流程如圖2-1所示，將設計分為基本設計、強度設計及設計驗證三項，依此流程圖為原則進行儲氫氣瓶之設計。

近年來所研究的儲氫方式不外乎壓縮、液化、金屬等儲氫方式，但都需要一壓力容器來進行存放，而氫原子在一般正常的條件下是以氣態形式存在於自然界中，所以在儲存與運輸上帶來相當大的困難，加上氫易氣化、著火、爆炸，所以提供氫能穩定之儲存和安全之運輸是儲氫氣瓶或裝置最重要的一環，因此儲氫氣瓶之設計製造需滿足耐用度及可靠度之要求，在滿足安全性要求後，才進行性能之提升及成本之管控，故簡單來說，儲氫氣瓶就是要將氫氣安全的儲放，並穩定的提供燃料電池轉換成電力使用。<sup>[74]</sup>

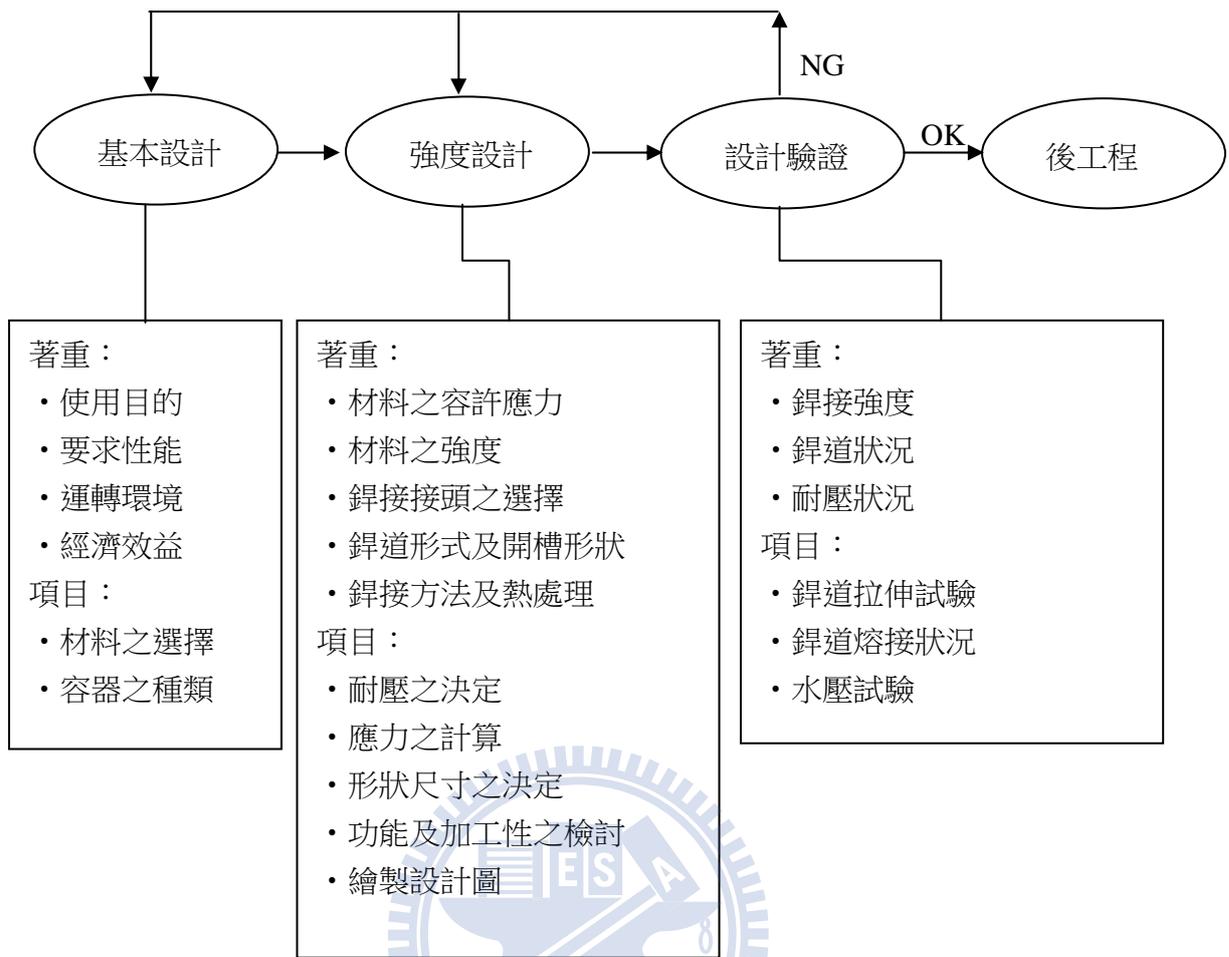


圖2-1 設計流程圖

### (1) 氣瓶本體材質選用

一般壓力容器選用材質為不銹鋼或鐵類金屬，本研究以高強度鋁合金7075-T6為材質，主要為其比強度(每單位重量之強度， $\frac{\text{抗拉強度}}{\text{比重}}$ )較一般材質佳，僅次於鈦合金(比較表如表2-1)，但其成本相對鈦合金低，因本研究主要為可攜式之氣瓶，所以基於此原則選擇以鋁合金7075-T6為材料進行研究探討，但其缺點為銲接性較差，所以本研究採用GTAW進行銲接，主要為TIG常被使用在鋁合金之銲接，且具有銲道強度佳、具延展性、抗蝕性佳、

不用焊劑，不必除渣及飛濺物少之特性，另TIG被使用於焊量不大及母材較薄時，適合本研究之銲接工法。

表2-1 各項金屬材料比強度之比較表

材料	抗拉強度(Mpa)	比重	比強度(Mpa)
鋁合金	7075	560	2.8
	6061	440	2.7
	2024	480	2.75
鎂合金	248	1.77	140
鈦合金	一般	950	4.5
	Ti-6Al-4V	1390	4.5
不銹鋼	304	520	7.9
灰口鑄鐵	264	7.8	34

(2) 受內壓圓筒體之板厚計算<sup>[42]</sup>

圓筒體之最大應力為周向應力  $\sigma_{\max} = \sigma_t = \frac{PR}{t}$  改變為  $t = \frac{PR}{\sigma_{\max}}$  以直徑表示為  $t = \frac{PR}{2\sigma_{\max}}$  以  $D_i$  表示則為再引  $t = \frac{PD_i}{2\sigma_{\max}}$  進熔接效率  $\tau$  及安全因數  $X$  則為由於  $P$  之單位因次為  $\text{kg}/\text{cm}^2$ ， $D$  為  $\text{mm}$ ， $t$  為  $\text{mm}$ ， $\sigma$  為  $\text{kg}/\text{mm}^2$ ，所以尚有一由  $\text{kg}/\text{cm}^2 \div \text{kg}/\text{mm}^2 = 100$  之因次轉換係數，所以為符合因次單位，公式須改為  $t = \frac{PD_i}{200\sigma \times \tau}$  與  $t = \frac{PD_i}{200\sigma \times \tau - 1.2P}$  僅為  $1.2P$  這一項之不同。此項叫修正因素，此修正因素係由此較精確之厚殼理論公式，亦即 Lamé 公式所得，當  $D_i/t=4$  時即符合此式，當  $D_i/t > 4$  時  $1.2P$  項之影響逐漸減小，至  $D_i/t=200$  時便幾乎完全沒有影響，所以當  $D_i/t \geq 200$  時便可完全採用薄膜應力公式，而

不必理會修正因素1.2P。至於1.2P修正因素及Lame公式，另依下列之面厚殼應力分析。

圖2-2中的厚圓筒的內外表面分別承受均勻壓力  $P_i$  與  $P_o$ 。假設頂面和底面(垂直於紙面之兩方向)都沒有負荷。由於物體和負荷都對稱於軸，故切線方向與徑向上的剪應力都不存在，元素上只有法線應力  $\sigma_t$  與  $\sigma_r$ 。

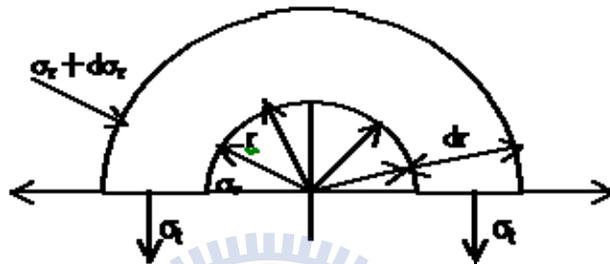


圖2-2 受內外壓力的厚壁圓筒

當圓筒的壁很薄時，可假設切線應力或周向應力  $\sigma_t$  均勻分佈在整個壁厚上，可用基本方程式求出其大小。但是厚壁圓筒則不能做這種假設，必須用以下導出的方程式求應力。

考慮圖2-2中作用在半圓元素上的應力。取垂直於紙面方向的厚度等於1。越過元素直徑向內的徑向應力之鉛直分量等於  $2\sigma_r r$ ，而向外的應力分量則為  $2(\sigma_r r + d\sigma_r)(r + dr)$ 。經轉化： $r \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r = \sigma_t$  垂直於紙面的縱向應變或單位變形  $\epsilon_L$  可由應力  $\sigma_t$  與  $\sigma_r$  求出： $\epsilon_L = \frac{\mu\sigma_t}{E} - \frac{\mu\sigma_r}{E}$  其中  $\mu$  為卜易生比， $E$  為彈性

模數，經換算得

$$\sigma_r = \frac{a^2 p_i - b^2 p_o}{b^2 - a^2} - \frac{a^2 b^2 (p_i - p_o)}{r^2 (b^2 - a^2)}$$

$$\sigma_t = \frac{a^2 p_i - b^2 p_o}{b^2 - a^2} + \frac{a^2 b^2 (p_i - p_o)}{r^2 (b^2 - a^2)}$$

此為Lame 方程式。

惟許多應用上，力壓力  $P_0$  等於零，故

$$\sigma_r = \frac{a^2 p}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{r^2}\right) ; \sigma_t = \frac{a^2 p}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2}\right)$$

其中  $P_i$  稱為  $P$ ，內緣處的應力最大，即為  $r=a$  時之  $\sigma_r$  為，此處的切線

$$\text{應力為 } \sigma_t = p \left[ \frac{1 + (a/b)^2}{1 - (a/b)^2} \right] = \sigma_{\max} \quad \text{以 } b=a+t ; \text{經換算} = p \left[ \frac{a}{t} + \frac{1}{2} + \frac{1}{4(a/t) + 2} \right] \text{當 } D_i/t = 4$$

時，即  $a/t = 2$  時，代入得  $\sigma_{\max} = P \left[ \frac{a}{t} + 0.5 + 0.1 \right] = P \left[ \frac{a}{t} + 0.6 \right]$  改寫得

$$\sigma_{\max} - 0.6P = \frac{Pa}{t}, \quad a \text{ 以 } R_i \text{ 代之，並改寫後得 } t = \frac{PR_i}{\sigma_{\max} - 0.6P} \text{ 以 } D_i \text{ 表示}$$

$\Rightarrow t = \frac{PD_i}{2\sigma_{\max} - 1.2P}$  加入100之因次變換係數，並加入安全因數及熔接效率即得

$$t = \frac{PD_i}{200\sigma \times \eta} - 1.2P \quad (2.1) \text{ 該即為CNS9788所用圓胴型最大應力之公}$$

式。不過，如前所言，此式僅在  $D_i/t$  逐漸加大時，此式中1.2P之修

正因素便逐漸減少其影響。從下面的比較可得知：

$$\sigma_t = \frac{a^2 P}{b^2 - a^2} \left[ 1 + \frac{b^2}{r^2} \right] \text{ 中}$$

$$\text{當 } r=a \text{ 時，內表面切向應力 } \sigma_{ti} = P \left[ \frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} \right]$$

$$\text{當 } r=b \text{ 時，外表面切向應力 } \sigma_{t0} = P \left[ \frac{2a^2}{b^2 - a^2} \right]$$

$$\text{令 } \alpha = \frac{\sigma_{t0}}{\sigma_{ti}} = \frac{2a^2}{a^2 + b^2}, \quad \alpha \text{ 即為所謂的應力梯度}$$

當  $b=1.5a$  時，即  $R_i/t = 2$ ， $\alpha = 0.615$

$b=1.1a$  時，即  $R_i/t = 10$ ， $\alpha = 0.905$

$b=1.05a$ 時，即  $R_i/t=20$ ， $\alpha=0.951$

$b=1\frac{1}{60}a$ 時，即  $R_i/t=60$ ， $\alpha=0.9834$

$b=1.01a$ 時，即  $R_i/t=100$ ， $\alpha=0.99$

當  $R_i/t \geq 100$  或  $D_i/t \geq 200$ ，此時不復有所謂的應力梯度，便完全符合薄膜應

力之分析。回頭看看圓筒體之周向應力公式  $\sigma_t = \sigma_{\max} = \frac{PR}{t}$  其R值係以內外壁

$R_i$  及  $R_o$  之平均值計算，如果用  $R_i$  來表示的話，則為  $R_i+0.5t$ ，因此

$$\text{公式變為 } \sigma_t = \sigma_{\max} = \frac{P(R_i + 0.5t)}{t} \text{ 簡化後得 } t = \frac{PR_i}{\sigma_{\max} - 0.5P} \quad (2.2)$$

比較(2.1)與(2.2)式，可以發現有0.1P的差距，此0.1P係有曲率之圓弧狀結構薄膜應力公式以內半徑表示時共有之一修正項，此修正項可以經常在爾後之同類公式中發現，於有雙曲率之弧狀結構採0.1P，單曲率時採0.6P。

在此採用  $t = \frac{PR_i}{\sigma_{\max} - 0.5P}$  之式子進行筒體板厚之設計，其中

P：最高充填壓力  $\text{kgf/cm}^2$

$R_i$ ：圓桶半徑 mm

$\sigma_{\max}$ ：材料降伏強度  $\text{kg/mm}^2$

求得  $t = \frac{10 \times 12}{51.5 - (0.5 \times 10)} = 2.58\text{mm}$ ，因此選用板厚  $t=3.0\text{mm}$  之7075-T6鋁合金板

材。

### (3) 受內壓力圓形平板之計算公式<sup>[42]</sup>

如圖2-3所示，一直徑為d之圓筒形，受均勻之內壓力P，兩端以圓形平

板側封。如取通過圓形平板中心點之一微小斷面 $dw$ 自由體圖，則類似均勻荷重之簡支樑，如圖2-4所示。

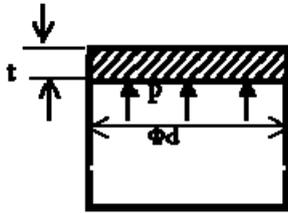


圖2-3 圓洞平端板受內壓之情形

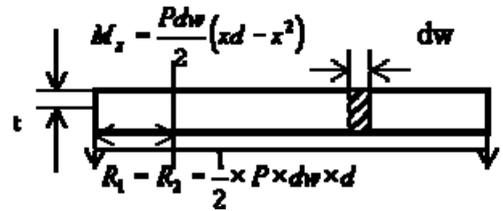


圖2-4 簡支樑示意

反作用  $R_1 = R_2 = \frac{1}{2} \times P \times dw \times d$  任一點之彎曲力矩  $M_x$  為  $M_x = \frac{Pd}{2}(xd - x^2)$

最大彎曲力矩發生於中心點，為  $M_{\max} = \frac{dwPd^2}{8}$  最大應力  $\sigma_{\max}$  則發生於最大彎

曲力矩處之表面，其值為  $\sigma_{\max} = \frac{dwPd^2/8}{Z} \quad t = d \sqrt{\frac{0.49P}{\sigma_{\max}}}$  此式係以純粹之簡支樑

公式導出。一般壓力容器受內壓力之平板，其邊緣均全部或局部受拘束，非為簡單支梁之狀態，受拘束圓形平板之應力分析詳見前節，其最大彎矩

為  $M_{\max} = -\frac{Pr^2}{8}$  最大應力則為  $\sigma_{\max} = \frac{3Pr^2}{4t^2} = \frac{3Pd^2}{16t^2}$  均發生於板之邊緣處。因此

$t = d \sqrt{\frac{0.1875P}{\sigma_{\max}}}$  事實上，壓力容器之平端板，其徑向亦同樣受均勻之內壓 $P$ ，

此壓力對平端板而言，會減低其所受之彎矩，此等應力，甚難做精確的分析。

所以依  $t = d \sqrt{\frac{0.1875P}{\sigma_{\max}}}$  之式子進行罐體上下蓋平板厚度計算，其中

$d$ ：罐體直徑 mm

$P$ ：內壓力  $\text{kgf/cm}^2$

$\sigma_{\max}$  : 材料降伏強度  $\text{kg}/\text{mm}^2$

求得  $t = 30 \sqrt{\frac{0.1875 \times 10}{51.5}} = 5.72 \text{mm}$ ，因此選擇  $t = 6 \text{mm}$  作為上下蓋之厚度。

#### (4) 氣瓶本體尺寸規劃

將計算出胴體側及端板之板厚，依銲接位置規劃成兩種：一種為於胴體側進行胴體與端板施銲，另一種於端板側進行胴體與端板施銲，針對此兩種銲接方式進行探討，其氣瓶本體主要尺寸設計分別如圖2-5 (a)、(b) 所示。

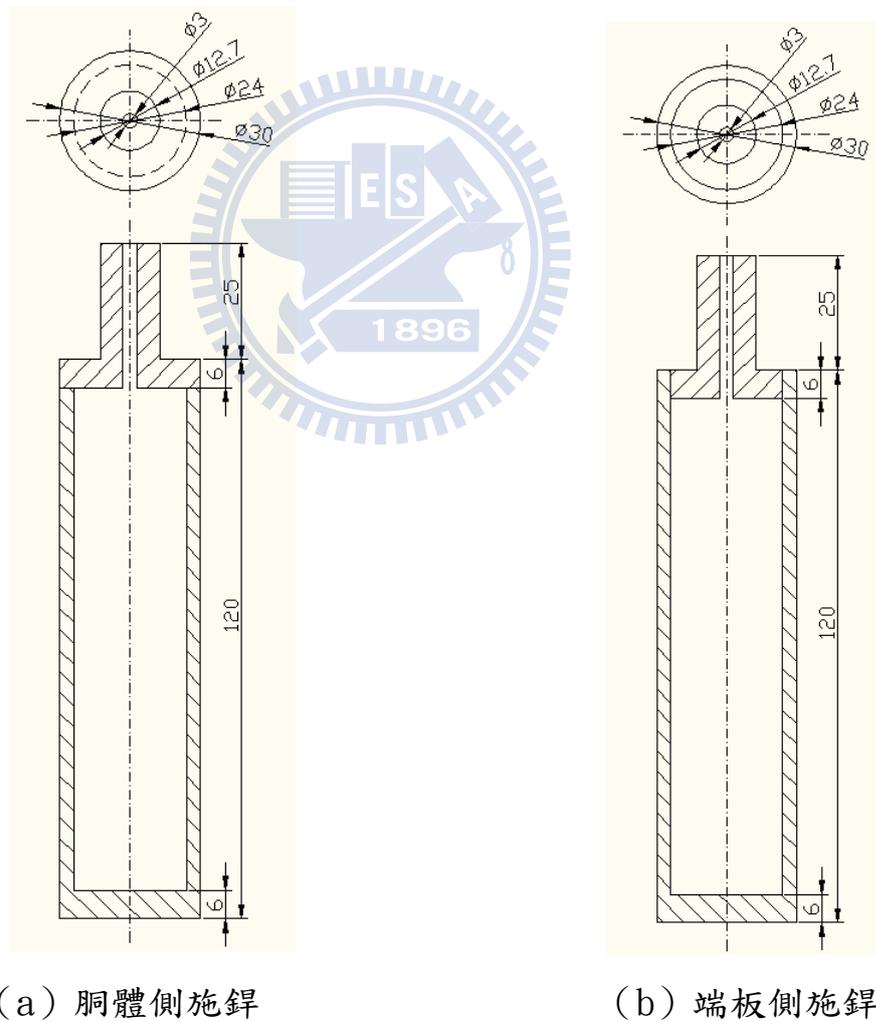


圖2-5 氣瓶本體尺寸設計圖

## 2.2 銲接電弧之簡介

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

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

圖 2-6 為電弧銲接方法之構成原理，圖 2-6(a)為熔極方式，即電極會熔解當作銲條使用。通常以金屬電極(銲條)及母材間所發生電弧(稱為金屬電弧)之熱，來熔解電極及母材。採用此方式銲接法有遮蔽金屬電弧銲、潛弧銲、氣體金屬電弧銲、包藥電弧銲等等。

圖2-6(b)為非熔極方式，以碳化鎢或碳棒作電極，與母材間產生電弧熱量將母材或加入之銲條熔解，採用此種方式之銲接法有碳及電弧銲、氣體鎢極電弧銲與電漿電弧銲。

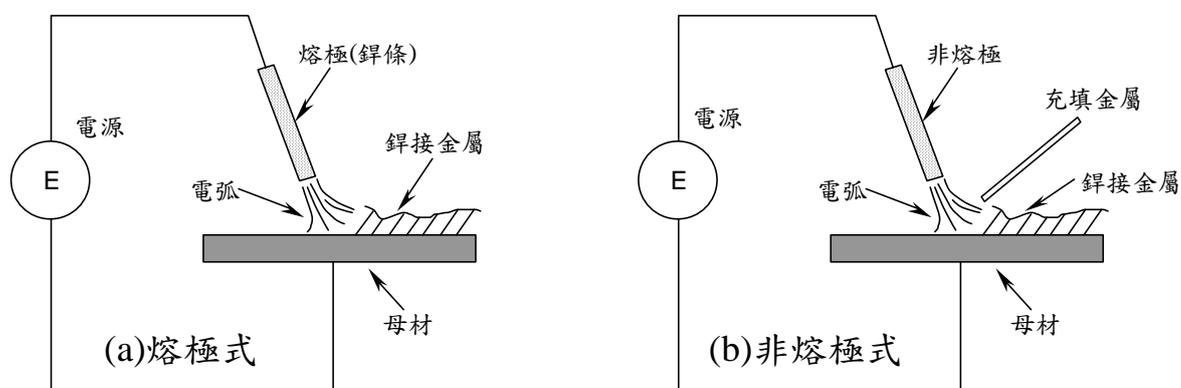


圖2-6 電弧銲接基本原理<sup>[40]</sup>

### 2.2.1 銲接電弧之結構

如圖2-7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：

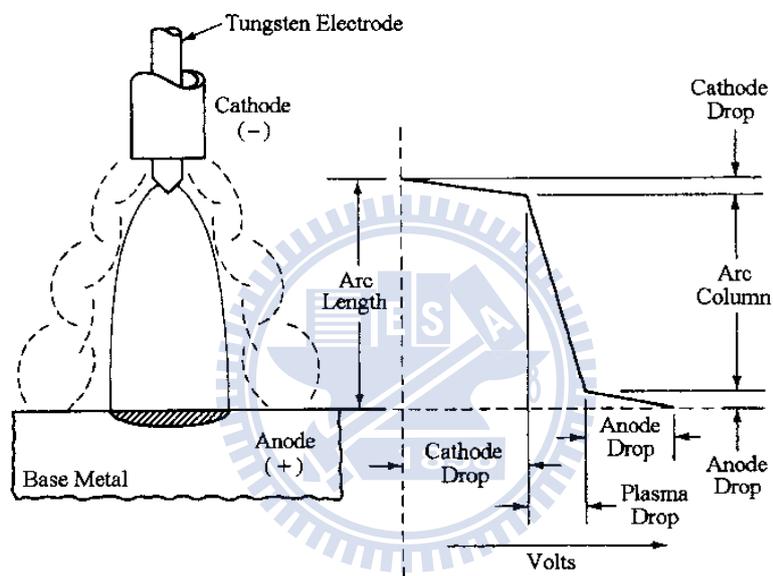


圖2-7 惰氣鎢極電弧銲之電弧結構與電壓降的關係<sup>[41]</sup>

#### 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)。

#### 2.2.2 銲接電弧之溫度

電弧是在高電流(10-200 安培)及低電壓(10-50 伏特)下通過一離子化之氣體時產生之放電現象。

當電弧長度非常長(約 1/16 吋)時，電能轉換成熱能之效率非常高(大約 85% )，圖 2-8<sup>[47]</sup>即為直流正極性電弧之示意圖。在電漿內部，實際上僅一

部份是離子化氣體，其餘部份是高熱氣體分子，其溫度隨下列四種因素而變：

1. 電極型式
2. 電流
3. 電弧長度
4. 圍氣(atmosphere)

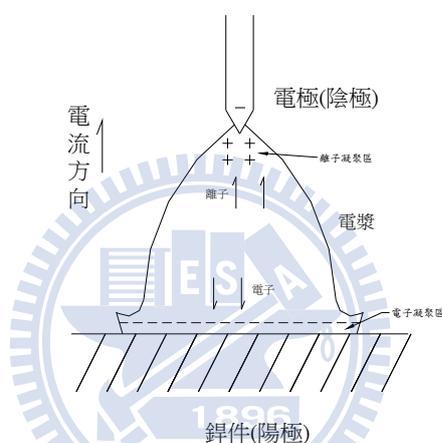


圖2-8 直流正極性電弧之示意圖<sup>[47]</sup>

當針對電極與母材之電弧形態作分析時，在TIG鉚中靠近陰極之溫度可達攝氏 20,000°C，而在手工中電鉚用之鐵電極其最高溫度僅達 6,000°C，主要原因在於氣體是否容易離子化(如圖 2-9<sup>[47]</sup>所示)；換言之，TIG鉚中氣體容易離子化，形成熱效率則比手工電鉚高。

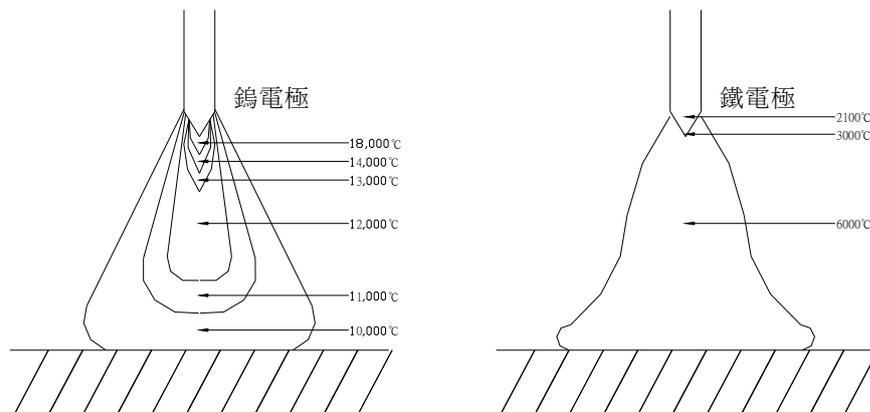


圖 2-9 鎢電極與鐵電極之電弧溫度分佈<sup>[47]</sup>

## 2.3 GTAW(gas tungsten arc welding)銲接法

### 2.3.1 GTAW之簡介

#### (一) TIG 銲接概述

TIG (tungsten inert gas arc welding) 依美國銲接協會 (AWS) 之規格係稱為GTAW (inert gas tungsten arc welding)，其正式之中文名稱為氣體鎢極電弧銲接法。此銲接法係由美國Northrop air-craft company 於1944 年發展出來。

#### (二) TIG 銲接之主要優點

1. 電弧熱限於接頭局部之小面積，變形量與應力減少，是故其熱力限於氣罩下，增加銲接速度，減少火星飛濺物而提高銲接效率，同時更適於薄材之銲接。
2. 不需使用銲劑，於是無銲劑之流動，可清楚的看到熔池，且銲後不需清潔處理，氧化與氮化甚少，抗銹性與延性特佳，優於其它銲法。

3. 熔填金屬控制單純，鐸道的寬窄與高低均可由鐸線之填入量及鎗頭操作速率加以控制，以達最經濟之鐸線消耗量，節省鐸接成本。
4. 使難施鐸之金屬易於鐸接，尤其對鋁與鋁合金。
5. 鐸件品質優良、鐸道美觀且滲透性佳。

### (三) TIG鐸接原理

氣護鎢極電弧鐸亦稱為鎢極惰氣鐸接。此鐸接法屬非消耗式電極之鐸接。俗稱TIG(tungsten insert gas)。保護氣體從鐸槍供給來防止電極、鐸池、電弧、及鄰近受熱區域之氧化現象。熱源之產生是出電流通過離子化之保護氣體所發生之電弧。其中電弧在鎢電極與母材之間產生。可添加填料於電弧之間，使填料熔化。鐸炬另通出氬、氦惰性氣體(圖2-10<sup>[48]</sup>)，以保護熔融狀之鐸道，使其不被氧化，待凝固後即形成鐸道。TIG適用於薄板之鐸接，從0.13mm至6mm皆可。

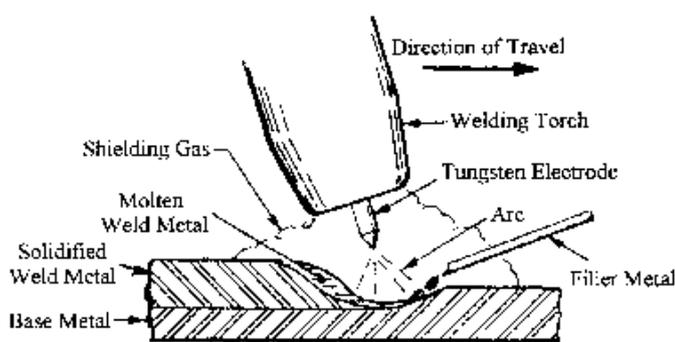


圖2-10 GTAW鐸槍示意圖<sup>[48]</sup>

### (四) TIG 鐸接設備

TIG 鐸接之主要設備包括鐸接機、鐸鎗頭、鎢電極棒、冷卻裝置

及保護氣體裝置等，如圖2-11。

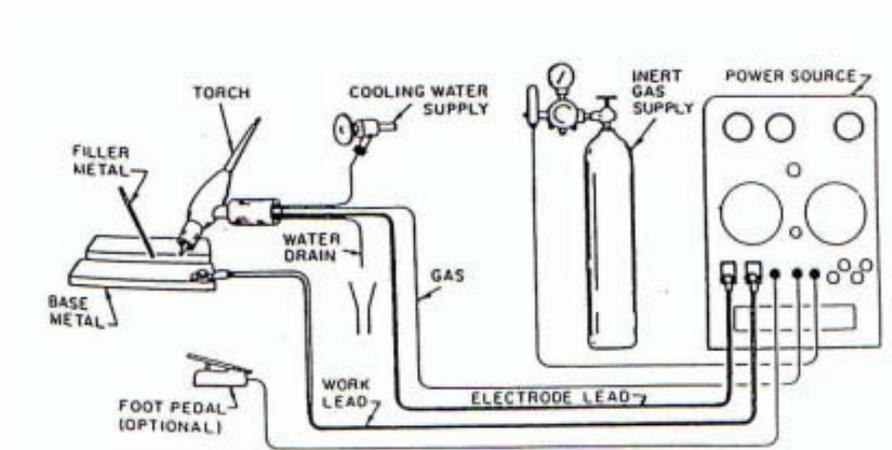


圖2-11 氣體鎢極電弧銲接設備

### 2.3.2 銲接電流性質

GTAW依輸出電流(二次側電流)區分，可分為三種型態如表 2-2<sup>[4]</sup>所示：

表2-2 GTAW電流型式及特性<sup>[4]</sup>

電流型式	DCEN	DCEP	AC
鎢棒極性	負	正	
電子及離子流向			
滲透性			
表面氧化膜清潔作用	無	有	有
電弧熱量分佈	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	深，窄	淺，寬	中等
鎢棒承載電流能力	優	不好	良

### 2.3.3 銲接參數

GTAW 中主要的銲接參數如下：

#### 1. 電流(I)：

電流越大則熱輸入量越高，電弧壓力增大，可增加熔透與熔解效率。

#### 2. 電壓(V)：

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。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。

### 2.3.4 電流之選擇及其特性

電流之選擇可分為DC及AC兩種，而DC又可分為DCSP及DCRP兩種。至於電流之方向及特性見圖2-12、圖2-13<sup>[49]</sup>。

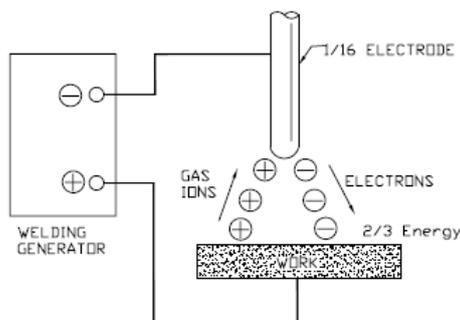


圖2-12 DCSP<sup>[49]</sup>

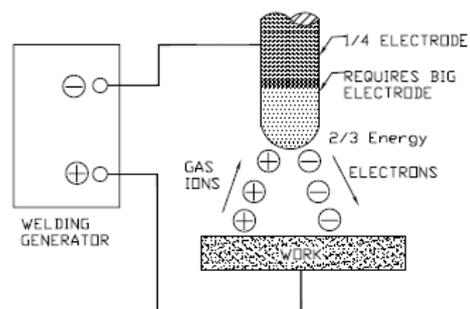


圖2-13 DCRP<sup>[49]</sup>

(一)DC WELDING

現將DCSP(直流正極)及DCRP(直流反極)之比較詳述如表2-3<sup>[49]</sup>，焊道滲透之比較情形如圖2-14<sup>[49]</sup>。

表2-3 DCSP及DCRP比較表<sup>[49]</sup>

	DCSP	DCRP
1	電子由電極流向工件	電子由工件流向電極
2	集中在工件之電弧熱約為全部熱量之 70%，集中在電極之電弧熱約為 30%	集中在工件之電弧熱為 30% 集中在電極之電弧熱為 70%
3	集中在工件之熱產生： (a)小電極產生大電流 (b)母材產生較深之焊接滲透 (c)較快之速度進行	熱集中在電極產生： (a)電極承載電容量降低 (b)較淺之焊接滲透 (c)工件之熱較少 (d)產生較寬之焊道
4	供給一穩定電弧	供給一穩定電弧
5	需要短電弧(長度約 1/32”~1/8”長)來維持較大之熱集中，即焊接速度必需是 DCRP 之 2 倍	電弧長比 DCSP 較長(由 3/16”~1/4”長)，可去除金屬(如 Al 及 Mg...)表面之氧化層，可容許這些金屬不必使用焊藥或助焊劑。

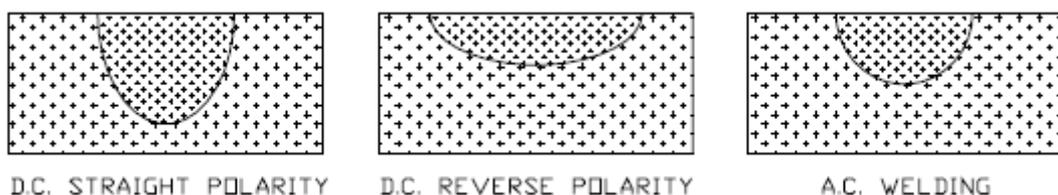


圖2-14 焊道滲透之比較<sup>[49]</sup>

## (二) AC WELDING

AC WELDING在理論上是綜合DCSP&DCRP，在每半個CYCLE裡變化一次極性，也綜合了DCSP及DCRP及之優點(DCSP是熱集中於工件之優點，DCRP是去除表面氧化層之優點)。決定AC電流之最佳值，可由以下公式計算：

$$AC \text{ CURRENT} = 1 \frac{1}{4} \text{ Amp.} \times \text{ELECTRODE DIA. (每.001" )}$$

## (三) 電流不穩定之原因及解決方法，表2-4<sup>[49]</sup>

表2-4 電流不穩定之原因及解決方法<sup>[49]</sup>

	原因(現象)	解決方法
1	焊道外有污物或油脂	去脂，清洗焊道，使用硬刷或化學清洗均可。
2	焊道太窄，電弧由一邊跳至另一邊	加大焊槽，可能的話把電壓降低一些，將電極靠近工件
3	電極因暴露於空氣而受污染或電極與工件之熔化區接觸	切換或磨掉受污染之部份，或換根新電極
4	電極太大	使用較小電極
5	電弧太長	將電極靠近工件減短電弧，可能的話調整電弧電壓。

## (四) 鎢電極簡介<sup>[50、51]</sup>

TIG 銲接法所使用的電極雖稱為非消耗性電極，但在實際銲接過程中仍有少量受電弧高熱而蒸發或熔耗。通常常用的電極有三種：(1)純鎢棒；(2) 鎢銦合金棒；(3) 鎢鈦合金棒。其中又以前兩者使用較為普遍，茲將其分述如下：

1. 純鎢棒—含鎢量99.5%者是為純鎢棒，鎢的熔點約3410°C，適用於交流電小電流的銲接中，代號為EWP。
2. 鎢鋇合金棒—含鋇0.15-0.40%的鎢合金電極，具有極高的污染性，適合以交流電施銲，如核能電廠零件的精密銲件。代號為EWZr。
3. 鎢鈷合金棒—有含鈷1%和2%兩種，鎢棒加入鈷元素後，容易起弧，銲接電流範圍變廣，且電極在施銲時不易粘著為母材，交直流皆適用。代號為EWTh-1、EWTh-2。

鎢棒選用時要根據銲接電流的種類、大小及銲接速度等作適當的選擇，如表2-5所示。若小直徑用大電流，則鎢棒將產生過熱熔融，熔滴會落在熔池而產生污染，同時，鎢棒伸出噴嘴之長度約為其直徑之1~2 倍左右，分別依接頭型式之不同而有所差異。

表2-5 鎢棒尺寸與銲接電流容許範圍表<sup>[50、51]</sup>

鎢棒直徑(mm)	銲接電流(A)			
	AC		DCEN	DCEP
	純鎢(W)	鈷鎢(ThW)	純鎢及鈷鎢	純鎢及鈷鎢
0.5	5~15	5~20	5~20	-
1.0	10~60	15~80	15~80	-
1.6	50~100	70~150	70~150	10~20
2.4	100~160	140~235	150~250	15~30
3.2	150~210	225~325	250~400	25~40
4.0	200~275	300~425	400~500	40~55
4.8	250~350	400~525	500~800	55~80
6.4	325~475	500~700	800~1100	80~125

### 2.3.5 焊接氣體之功能

- 1.保護電極、電弧、熔融金屬及填料金屬等，以避免直接與大氣接觸。
- 2.熱能的傳遞(由於鐸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鐸接氣體來加以傳遞到鐸件上)。

氬(Ar)氣是最常用的保護氣體（尤其是人工鐸時），氦(He)氣用在特殊的場合，比起氬氣來氬氣可以允許在最小電壓影響下有較大的電弧長度變動。氬氣也提供較好的起弧特性及在交流電時有較好的清潔作用。

## 2.4 田口式品質工程

### 2.4.1 田口品質工程簡介

田口式品質工程又稱田口方法，是田口玄一博士（Dr. G. Taguchi）在1949年於日本電信實驗室（the Electrical Communications Laboratory of Japan's Nippon Telephone & Telegraph Company, NTT）研發通序系統時所發展的。經過50年代到60年代的研究工作，發展出一套改善品質的工程方法，在日本稱之為品質工程（Quality Engineering），而在西方國家則稱之為穩健設計（Robust Design）<sup>[52]</sup>。

在傳統的品質觀念中，產品只要在出廠時的規格、性能表現、安全性等，合乎顧客的要求，也就是在容許的誤差範圍內，這項產品的品質就被視為良好。但田口博士並不認同「只要做出符合規格內的產品即可」的想

法，他以損失函數（Loss Function）的觀點，強調製造出與目標值相近的產品的重要性。所以，田口博士將品質定義為：「所謂品質，乃指產品出廠後帶給社會的損失，但是不包括機能所引起的損失。」亦即我們用以衡量產品品質的標準是決定於產品在機能上的變異及其有害副作用所造成的社會總損失。

田口博士更進一步將品質改善的作法從生產階段追溯產品設計階段，如此將品質設計製產品中，可以顯著降低製造的不良率，提高產品的品質與可靠度，並大幅地降低生產成本<sup>[53]</sup>。田口方法是以工程的角度去了解品質問題，利用社會損失成本來衡量產品品質的好壞。田口方法的主要兩個工具為直交表（Orthogonal Arrays）與S/N比（Signal-to-Noise Ratio），強調產品在設計階段就應該考慮品質問題，降低產品績效的變異。其基本概念為：

- (1) 品質不是檢驗出來的，品質必須設計到產品裡面。
- (2) 品質是要最小化「與目標值之間的偏差」，並且免於不可控制的環境因素影響。
- (3) 品質成本應以與標準值偏移的函數關係來衡量<sup>[53]</sup>。

#### 2.4.2 田口品質特性

品質工程的一個重要的步驟是選用合適的量測品質特性，這需要對產品或製程上有所了解，同時也要熟知實驗計劃才能有效選用。田口博士將

田口方法中的品質特性 (Quality Characteristic) 分為望小特性 (the smaller-the better : STB) 、望大特性 (the larger-the better : LTB) 及望目特性 (the nominal-the better : NTB) <sup>[54]</sup>。以下為簡略的說明：

#### (1) 望小品質特性

若品質特性值具有一個規格上限 (Upper Specification Limit ; USL) ，且為非負數值，其值愈小愈好的特性稱之為望小品質特性。此類的品質特性諸如污染程度。

#### (2) 望大品質特性

若品質特性值具有一個規格下限 (Lower Specification Limit ; LSL) ，且為非負數值，其值愈大愈好的特性稱之為望大品質特性。此類品質特性如系統的壽命。

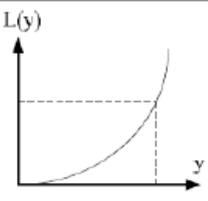
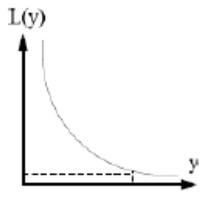
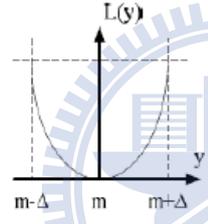
#### (3) 望目品質特性

此類品質特性通常有一個理想的目標值，且規格上限與規格下限，在此目標值的兩側。當產品的特性值偏離此一目標值時，產品的功能就會發生退化。此類品質特性如尺寸特性。

S/N 比的推算，是將損失函數直接取對數值轉換而得，依據不同的品質特性，有不同的轉換公式。田口以 S/N 比替代品質損失函數，作為產品績效衡衡量的準則，主要在於減少交互作用的產生，增強穩健設計中，加法性 (additive model) 模式的成立。將各類品質特性之損失函數與 S/N 比

公式，整理成表2-6<sup>[55]</sup>所示：

表2-6 品質特性與損失函數<sup>[55]</sup>

品質特性	函數圖	損失函數	SN 比
望小		$L(y) = ky^2$	$-10 \cdot \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$
望大		$L(y) = k \frac{1}{y^2}$	$-10 \cdot \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right)$
望目		$L(y) = k(y-m)^2$	$10 \cdot \log_{10} \frac{-2}{s^2}$

### 2.4.3 影響產品或製程績效的因子

Phadke & Dehnad (1987) 提出一個影響產品或製程績效的參數圖，如

圖2-15<sup>[56]</sup>。由圖知，可將影響產品或製程績效的因子歸納為：

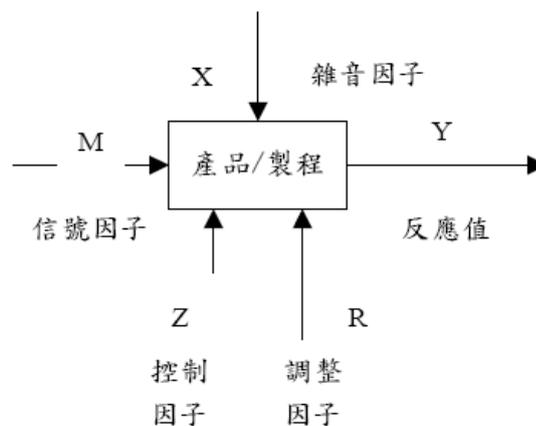


圖2-15 產品/製程參數圖<sup>[56]</sup>

## (一) 不可控制因子 (uncontrollable factor ; 或稱雜音因子)

雜音因子為設計人員所不能控制的因子，因子的水準在實際操作時很難控制，或必須花費非常昂貴的代價去控制。雜音因子可分為下列三類：

### (1)外部雜音 (external noise)

會隨使用條件或環境的變化，而干擾產品的機能。如溫度、濕度、灰塵及人的差異等。

### (2)內部雜音 (internal noise)

當某產品在儲存期間發生劣化或是使用期間造成磨損而發生變化，從而使其無法達到該有的機能。

### (3)單位間的變異 (unit-to-unit variation)

雖然規格值一定，但是在製程中無法避免的會造成每件產品之特性值不一致，而其中原因並不明確。

## (二) 可控制因子 (controllable factor)

此為設計人員為達到產品品質績效，根據本身之工程經驗和知識，對於易於調整控制之因子，依其對品質特性平均值及變異數影響的情形，將可控制因子分為下列三類：

### (1)控制因子 (control factor)

此類因子為對產品品質變異具有顯著影響的因子，透過最佳控制因子水準的選擇，使產品品質機能對雜音因子的干擾有最小之敏感性，以降低

產品變異性。

## (2)信號因子 (signal factor)

對品質特性平均值具有影響的因子，通常由使用者或操作者根據目標值的需求而設定，如風扇轉速通訊系統0、1 轉換。

## (3)調整因子 (adjustment factor)

在參數設計最佳化中，由於為了降低產品變異，有可能會導致產品品質平均值偏離目標值。此時，我們選擇對變異沒有顯著影響的因子，但對產品品質特性平均值有顯著影響的因子，為調整因子，調整產品品質特性之平均值至目標值上，以使產品品質損失降至最低。

### 2.4.4 直交表介紹

田口之實驗計畫法，使用直交表(Orthogonal Array)分析資料的好處，是每一可控因子之主效果(Main Effect)可以獨立且均衡的求出。應用直交表做實驗，事實上是進行完全要因實驗(Complete Factorial Experiment)中之部分要因實驗(Fractional Factorial Experiment)。它是一種以直接、經濟的方式，一次就可以做許多因素的實驗，現以一 $2$ 水準直交表 $L_8(2^7)$ 做說明，如表2-7。其中符號L 是指拉丁方格(Latin Square)之代號，下標 8 是指執行 8 次實驗，2 是指每個因子都是二水準，7 是指總共探討配置了7 個主要因子。表2-8中，本體內的1、2代表因子水準，而「行」代表的是因子及交互作用的配置，「Exp.」則是指

實驗的次數，它的符號如下所示：

表2-7  $L_8(2^7)$ 直交表表示法

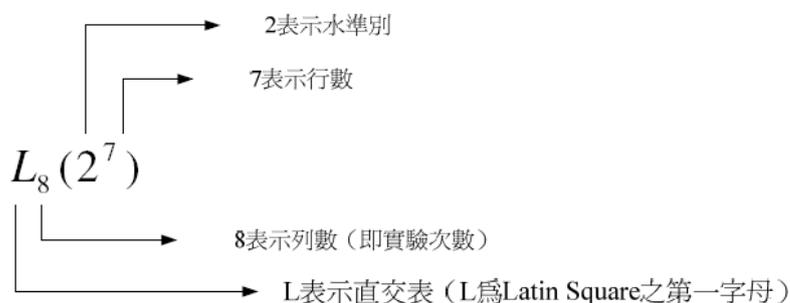


表2-8  $L_8(2^7)$ 直交表實驗配置圖

實驗編號		行						
		1	2	3	4	5	6	7
列	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	2	2	2	2
	3	1	2	2	1	1	2	2
	4	1	2	2	2	2	1	1
	5	2	1	2	1	2	1	2
	6	2	1	2	2	1	2	1
	7	2	2	1	1	2	2	1
	8	2	2	1	2	1	1	2

若進行全因子實驗，則需進行 $2^7 = 128$ 次實驗。

所謂各因子間為直交，意即各水準的組合都必須存在，且出現的次數都須相等利用直交性實驗，各「行」的效應不會互相混淆，故可安全的進行實驗結果的比較。

其優點包括：(1) 實驗次數較少，(2) 由直交表實驗所獲得之結論，在整個實驗範圍裡都是成立的，(3) 具有良好的再現性，(4) 資料分析簡單，各因子的效果只要簡單地計算一些平均值即可決定各因子的效果，

及(5)可用來查核加法模式是否成立(加法模式為數個因子的總效果等於個別因子效果的和)。

構建直交表的注意事項(1)決定因子數、(2)決定每個因子的水準數、(3)估計的二因子交互作用、(4)分析實驗進行時可能發生的困難。

#### 2.4.5 田口實驗分析法之步驟

Phadke<sup>[53]</sup>認為田口實驗的參數設計是一套找出可控因子最適水準的方法，使得產品或製程對雜訊因子不敏感。在使用參數設計時，我們需先確認品質特性，找出可控因子與雜訊因子，並且以直交表、線點圖以及S/N比為工具來選取最佳的因子水準組合。Phadke將參數設計分成三大階段，共計八個步驟：

##### 第一階段：規劃實驗

Step1. 確認實驗的目的，大致決定實驗的規模。

Step2. 蒐集實驗相關資料，加以整理檢討。

Step3. 確定評估品質損失的測試條件及決定品質特性，即望大、望小或望目的型態。

Step4. 決定因子及水準數，通常一次選取四至六個控制因子來進行實驗，對每個因子我們擇定二或三個水準。

Step5. 確定矩陣實驗及資料分析，選擇適合的直交表來配置因子及其水準。使用直交表的好處是：一、實驗次數可以減少。二、實

驗數據容易分析。

## 第二階段：執行實驗

Step6. 進行矩陣實驗。

## 第三階段：分析與驗證實驗結果

Step7. 分析資料，決定最佳因子水準組合，並預測品質特性值。

Step8. 實施驗證實驗和規劃未來對策，進行驗證實驗是田口實驗分析法的最後一個步驟，卻也是最關鍵的一步。目的是驗證矩陣實驗建議的最佳參數是否有如預期的改善效果，若與預測相符，則表示建議之參數為我們所需；反之我們必須加以修正。

## 2.5 氫燃料電池

### 一、燃料電池的簡介<sup>[74]</sup>

燃料電池 (fuel cell) 是一種將燃料的化學能，透過電化學反應直接轉換成電能的裝置。其發展歷史可追溯至一八三九年，首先由威廉·羅伯特·葛羅夫爵士 (Sir William Robert Grove) 所發明，該系統是使用稀釋的硫酸當做液態電解質，成功地產生電能。經過不斷的研究，能斯特在一八九九年，首度發現固態電解質的導電行為。而第一個陶瓷型燃料電池則在一九三七年，由鮑爾與葡來司首先示範成功。

### 二、燃料電池原理<sup>[74]</sup>

燃料電池的運作原理，也就是電池含有陰陽兩個電極，分別充滿電解液，而兩個電極間則為具有滲透性的薄膜所構成。氫氣由燃料電池的陽極進入，氧氣則由陰極進入燃料電池。經由催化劑的作用，使得陽極的氫原子分解成兩個氫質子（proton）與兩個電子（electron），其中質子被氧『吸引』到薄膜的另一邊，電子則經由外電路形成電流後，到達陰極。在陰極催化劑之作用下，氫質子、氧及電子，發生反應形成水分子，因此水可說是燃料電池唯一的排放物。

燃料電池的陽極是多孔性的Ni，陰極是多孔性Ni-NiO混合物，電解質使用高濃度KOH溶液；通H<sub>2</sub>於陽極，通O<sub>2</sub>於陰極，反應溫度為70~140°C之間，反應電壓為0.9伏特。其反應式如下(反應示意圖如圖2-16<sup>[70]</sup>)：

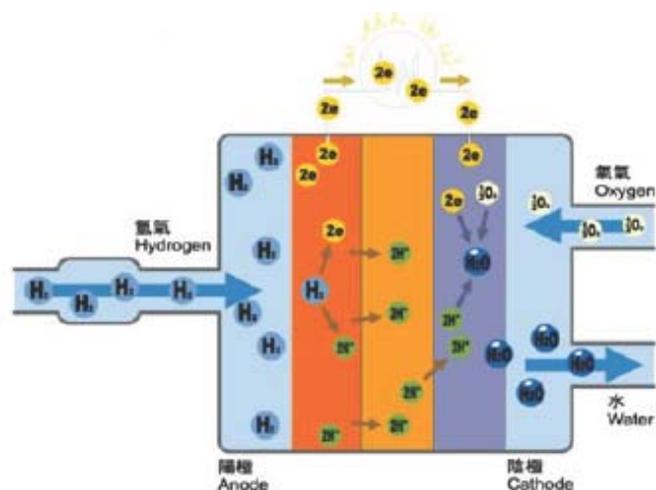
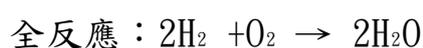


圖2-16 燃料電池內部反應示意圖<sup>[70]</sup>

### 三、 燃料電池種類

依照電解質的不同，可加以區分為：

- (一) 鹼性燃料電池(Alkaline Fuel Cell ; AFC)
- (二) 磷酸燃料電池(Phosphoric Acid Fuel Cell ; PAFC)
- (三) 質子交換膜燃料電池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell ; PEMFC)
- (四) 直接甲醇燃料電池(Direct Methanol Fuel Cell ; DMFC)
- (五) 熔融碳酸鹽燃料電池(Molten Carbonate Fuel Cell ; MCFC)
- (六) 固態氧化物燃料電池(Solid Oxide Fuel Cell ; SOFC)

### 四、 燃料電池的優、缺點<sup>[71]</sup>

#### (一) 優點：

- 1、低污染：燃料電池比一般傳統火力發電方式更清潔，沒有二氧化碳及含硫的問題，更沒有核能發電核廢料的問題。若用氫氣與空氣作為燃料與氧化劑，其生成物只有水和熱。
- 2、效率高：燃料電池的電能轉換效率非常高，主要原因是因為它是由化學能直接轉換成電能，能源轉換效率可達40%以上，如果能利用氣電共生的技術，將廢熱回收，能量轉換效率應該能達到80%以上。

- 3、無噪音：燃料電池發電本體在發電時，不需其它移動機件的配合，因此沒有噪音問題。在 11MW 級的燃料電池發電廠附近，測得的噪音污染在 55 分貝以下。
- 4、用途多：燃料電池所能提供的電力範圍相當廣泛，小至手機大至百萬瓦發電廠，都在其適用範圍內。
- 5、免充電：一般電池是將能量貯於電池本體中，用完後即捨棄，或充電後再重複使用。燃料電池是由燃料中的化學能提供能源，它並不含有在電池本體結構中，因此只要持續不斷地供給燃料，燃料電池便可以不停地發電。
- 6、燃料來源極廣：只要含有氫原子的石化能源如石油、天然氣、煤炭、沼氣、酒精與甲醇等，通過一個轉換器，都可作為燃料電池的能源進料。目前更有利用高壓鋼瓶或金屬氫化物等儲氫材料製成的儲氫卡匣，成為燃料電池電力組，可取代一般的蓄電池。

## (二) 缺點：

- 1、成本較高：在眾多的燃料電池中，質子交換膜燃料電池是最具有發展潛力之一，但是質子交換膜燃料電池必須要以貴金屬鉑為觸媒且須以純氫作為反應氣體，因此成本較高。
- 2、單位體積及單位重量所產生的功率較小：依目前所研究發展之燃料電池其所產生的功率稍嫌太小，若要增大其功率，勢必組合成燃料電池

組，因而會造成燃料電池之體積與重量增加。

3、安全性要求較高：目前，不論是液態氫、氣態氫、儲存在鋼瓶的氫或是由碳氫化合物重整後轉換的氫都是燃料電池唯一的燃料。因此氫氣的產生、儲存、運輸、灌裝或重整都比較複雜，因此對安全性的要求較高。

## 五、 氫的儲存<sup>[72]</sup> [74]

氫可由化石燃料、太陽能、生質能和生物科技或核熱等方式產生。氫氣的儲存及運輸方式，一直是各種氫能應用的技術瓶頸之一。儲存的技術可以由價格、系統穩定性、方便性、能量密度以及應用等方面來考量。近年來研究較多的儲氫方式包括有：壓縮儲氫、液化儲氫、金屬氫化物儲氫、以及奈米碳管吸附儲氫等方式，其擁有的特點及性質如表 2-9 所示：

表2-9 儲氫方式比較表

儲氫方法	優點	缺點
壓縮儲氫	1. 成本低，應用廣泛 2. 充放氣速度快，在常溫下進行 3. 運輸和使用方法較方便	1. 能量密度低 2. 壓力高，消耗較多的壓縮功 3. 氫氣易洩漏和容器爆裂等不安全因素，使用上造成危險性提高
液化儲氫	能量密度最大，是一種輕巧緊湊的儲氫方式	1. 能量損失大，成本高 2. 需要極好的絕熱裝置來隔熱 3. 儲存容器龐大
金屬氫化物儲氫	1. 壓力平穩、充氫簡單、方便 2. 運輸和使用較安全	1. 單位體積的儲氫密度大 2. 金屬氫化物重量高且易破裂 3. 材料成本高
吸附儲氫	奈米碳管儲氫能力可達10%以上	1. 技術尚未成熟 2. 價格昂貴

目前國內外現行輸送與儲存氫氣的技術大多採用高壓氣體和低溫液體儲氫方式，然而近年來，由於材料科技日新月異，固態儲氫技術逐漸受到氫能研究界的關注重視。氫原子在一般正常的條件下是以氣態形式存在於自然界中，所以在儲存與運輸上帶來相當大的困難，加上氫易氣化、著火、爆炸，因此如何妥善解決氫能的儲存和運輸問題，也就成為開發氫能技術的主要關鍵。

## 六、 壓力容器的安全法規

為了安全性之考量，國際上訂定了相當多之規範，如：DOT49CFR、97/23/EC 等等，來界定其測試之標準，其中規定較為嚴苛的首推 DOT49CFR 規範。根據 DOT49CFR 測試規範之規定，對於一合格的壓力容器需通過：水壓爆破、落擊、室溫壓力循環、環境循環、熱循環、槍擊及燃燒等七項測試。而水壓爆破測試是上述測試中最重要也是最先必須達成之項目。針對高壓鋼瓶檢查基準如表 2-10。

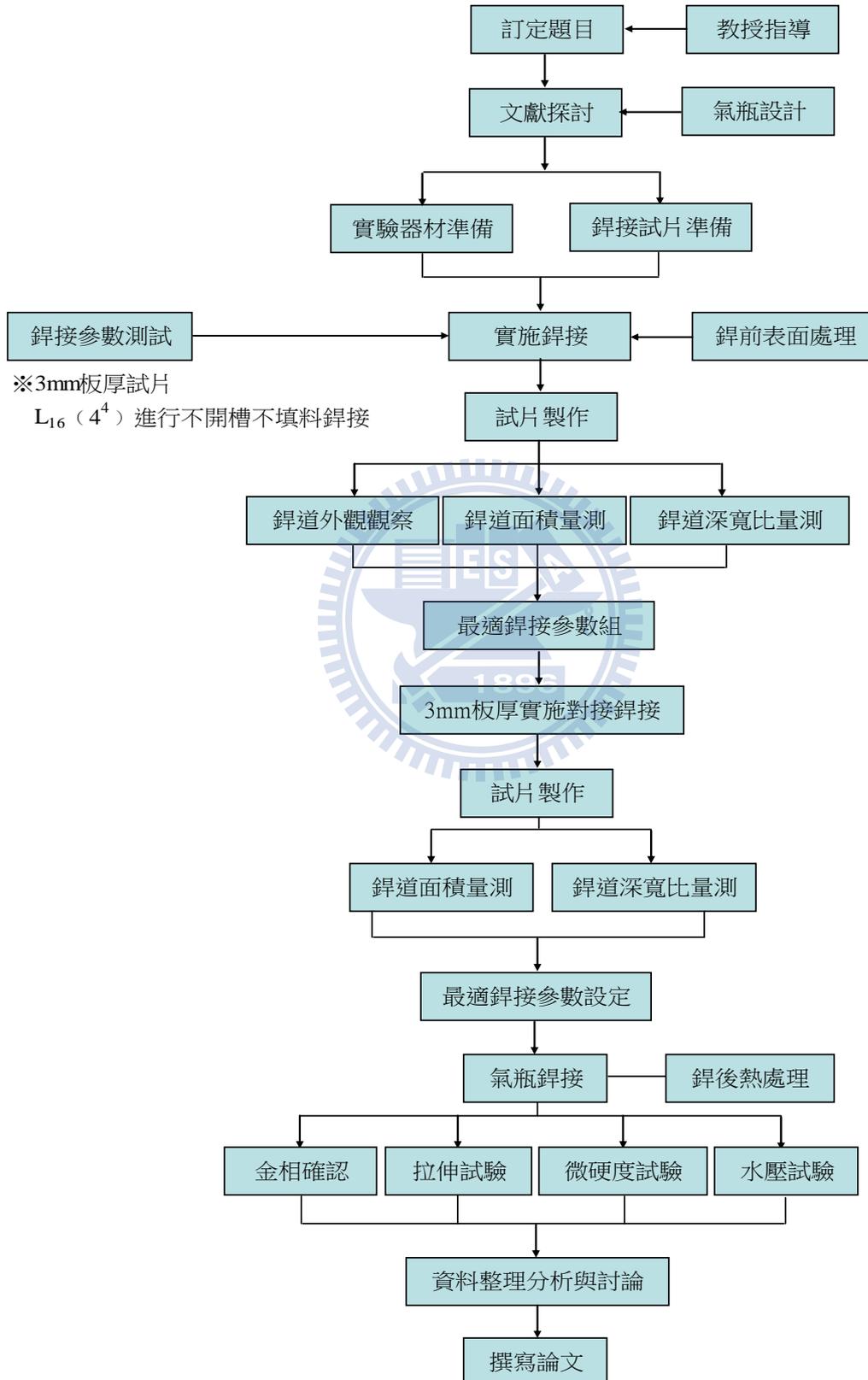
表 2-10 無縫鋁合金複合材料、鋼製高壓鋼瓶檢查基準

檢查項目	檢查方法	檢查要領	判定基準	處理要點
外表檢查 測漏	目視或儀器測漏	以發泡劑如肥皂水檢查開關閥是否有漏，檢查部位包括出口，安全栓螺，心杆及鋼瓶出口處	以不冒泡(沒有氣泡發生)為合格	有漏則處理之或報廢
內部檢查	目視	拆下開關閥，以光纖燈伸入瓶內，檢查內部是否有裂痕，腐蝕，生鏽，疊層及其它異常	鋼瓶內以無傷痕或異常為合格，若鋼瓶內面有薄層生	不合格之鋼瓶應予報廢

			鏽，則以不鏽 鋼刷除鏽	
水壓試驗	水槽式	DOT 49 CFR 173 規定 *水壓（耐壓）試驗壓力：最大灌充壓力的 5/3 倍。 *永久膨脹率：永久膨脹量/全膨脹量 永久膨脹率（鋼瓶）以 10% 以下為合格 永久膨脹率（複合材料）以 5% 以下為合格 *試驗時機：複合材料鋼瓶製造年份在 15 年內，每隔 3 年一 次。鐵、合金鋼瓶，每隔 5 年一次。 *試驗方法：水槽式。 *DOT 每二年會修正檢驗基準。		
頸環檢查	目視 手動	頸環是否固 定良好	頸環必須固 定良好沒有 鬆動	頸環若有異常，例如絲口不良或有 龜裂者應予修理，若不修好則予報 廢
開關閥	目視	拆下開關 閥，檢查鋼瓶 出口螺紋是 否完好	檢查開關閥 是否有漏，心 杆不正或磨 圓，出口螺紋 是否損傷	開關閥沒有異常者為合格，若有損 傷則應予修理，否則要換新

# 第三章 實驗設備及方法

## 3.1 實驗流程



## 3.2 GTAW 之設備

### 3.2.1 GTAW 主要設備

本實驗係採用惰氣鎢電極電弧銲接機(GTAW)，所使用之機型為 HOBART TIGWAVE™ 350 AC/DC 型氬銲機與可數位控制走速的銲接檯車。其外觀照片如圖 3-1 所示。圖 3-2 則為 GTAW 銲槍外觀與所使用銲接夾具之照片。



圖 3-1 HOBART 銲接設備



圖 3-2 銲槍、台車、夾具等外觀

### 3.2.2 設備調整控制單元

銲接設備調整控制單元，主要為調整及控制銲接參數(電流)，如圖 3-3，自走台車操作控制單元，主要為控制銲接速度，如圖 3-4，保護性氣體流量調整單元，主要控制氬氣流量，如圖 3-5。



圖 3-3 銲接設備調整控制單元



圖 3-4 自走台車操作控制



圖 3-5 保護性氣體流量調整單元

### 3.2.3 其他銲接工具

鎢電極材料為 EWTh-2(直徑為 2.4mm)，鎢電極伸出噴嘴的距離為 3mm，鎢電極至實驗試片的距離為實驗之參數，鎢電極角度為 75°，陶瓷罩杯為 7 號，保護氣體(純氬氣)。相關工具如圖 3-6。此外，為確保實驗結果的準確性，在進行每一次銲接實驗前均使用鑽石研磨器重新研磨鎢電極呈標準形式，且重新調整電弧至標準長度，以保證每一條銲道均在製程參數條件下來進行銲接研究工作。



圖 3-6 銲接工具

### 3.3 實驗配置

#### 3.3.1 實驗材料準備

##### 1. 母材(base metal)

本研究所採用的實驗材料為 7075 T6 鋁合金，主要合金元素為鋅及鎂，強度在鋁合金中屬高強度等級，其規範成份如表 3-1 所示，其機械性質如表 3-2 所示。在銲接前先將所有的試片切割為選用之大小(尺寸為 150mm×60mm×3mm) 如圖 3-7，另鋁合金表面因氧化而生成一層氧化膜，所以先使用砂輪研磨器裝上鋼刷輪，並將表面氧化層除去後再利用#400 砂紙研磨試片之表面，研磨後試片如圖 3-8。

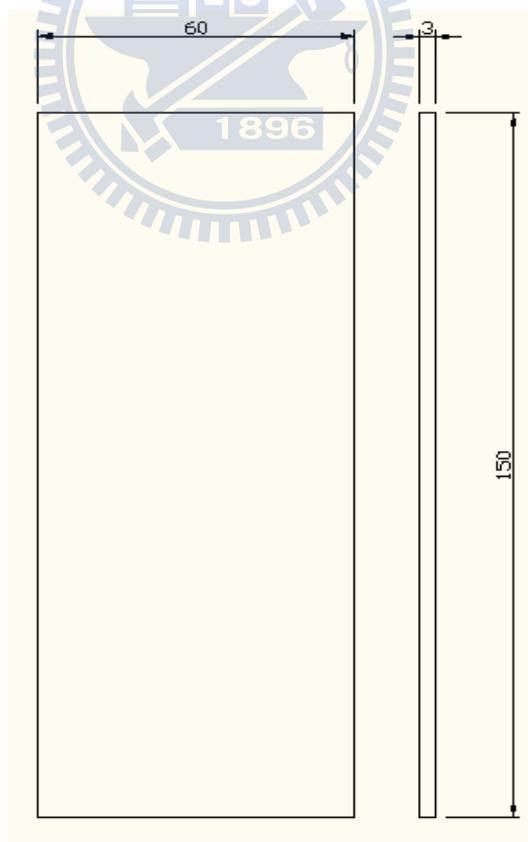


圖 3-7 銲接試片尺寸



研磨前

研磨後

圖 3-8 表面研磨前後之鋁接試片

表 3-1 7075 鋁合金規範成分表

元素	鋅	鎂	銅	鐵	矽
Wt. %	5.1~6.1	2.1~2.9	1.2~2.0	<0.5	<0.4
元素	錳	鉻	鈦	其它	
Wt. %	0.3	0.18~0.28	0.20	0.15	

表 3-2 7075 T6 鋁合金之機械性質

性質 材料	Tensile Strength Mpa (Ksi)	Yield Strength Mpa (Ksi)	Elongation In 50mm, %
7075-T6	570 (82.7)	505 (73.3)	11
性質 材料	Hardness HB	Shear Strength Mpa (Ksi)	Fatigue limit Mpa (Ksi)
7075-T6	150	330 (47.9)	160 (23.2)

## 2. 填充金屬 (filler metal)

本實驗中於氣瓶焊接所使用之填充銲條為 ER5356。銲條直徑為 3.2mm，其成份如表 3-3 所示。銲條之特點為是一種用途廣泛的通用型銲材，適合焊接或表面堆焊的 5% 鎂的鑄鍛鋁合金，強度高、可鍛性好、有良好的抗腐蝕性。

表 3-3 填充金屬成份表

Alloy 銲條型號	矽	鐵	銅	錳	鎂	鉻	鋅	鈦	其他
ER5356	0.25	0.4	0.1	0.05~0.2	4.5~5.5	0.05~0.2	0.1	0.06~0.2	0.1

### 3.3.2 試片銲接方法

本實驗中採用兩階段的銲接方式來得到最適參數，首先使用如圖 3-7 之試片以田口實驗法進行銲接實驗，並依銲道的深寬比與銲道面積以望大值之理論進行較佳銲接條件組之選定，接著使用圖 3-9 之試片並採用較佳銲接條件再次進行田口實驗法進行不填充不開槽(材料厚度：3mm)之對接銲接，其利用如圖 3-1 HOBART GTAW 銲接機進行銲接，接著再製成試片進行銲道外觀及深寬比、銲道面積進行比對確認，最終得到最佳的銲接參數。

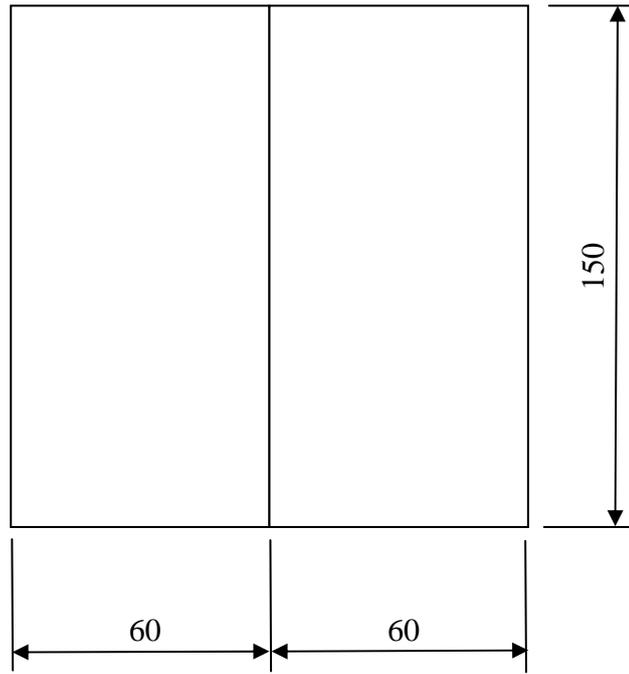


圖 3-9 3mm 不填料不開槽對接示意圖(單位：mm)



### 3.3.3 最佳銲接參數的選擇

實驗開始之首要工作在尋找 7075 T6 鋁合金之最佳銲接參數。參數包括銲接電流、銲接速度、火嘴至工作物表面之距離、保護氣體(Ar)流量。而最佳參數的判定，系依據銲道表面狀況、熔透深度(penetration)、銲道深寬比及銲道面積，經由田口實驗分析法獲得最適參數。

銲接參數之尋找，本實驗預計以下列步驟進行：

#### 1. TIG 銲接試銲

Step1. 將加工完成之試片，以事先選定的一組銲接參數試銲。

Step2. 檢查已經銲完之試片表面狀況是否理想，有無銲蝕(undercut)或試片背面凸出之狀況。

Step3. 沿銲道垂直面，利用切割機截取某一斷面，以細砂紙將斷面磨亮，查看熔透情形。

Step4. 表面熔透不佳或熔透不全則視實際情況，將參數作適當修正。

#### 2. 田口實驗分析法

Step5. 決定銲接因素及水準，3mm 試片實驗以 4 個控制因素、4 個水準，選擇 $L_{16}(4^4)$ 表，如表 3-4 所示，由此得到較佳之銲接參數。

Step6. 接著再以 3mm 鈹厚試驗依照較佳參數以 4 個控制因素、3 個水準，選擇 $L_9(3^4)$ 直交表（如表 3-5 所示）進行對接銲接。

Step7.進行銲道深寬比及銲道面積計算並求得 S/N 比。

Step8.取 S/N 比最大者為銲接最佳參數。

表 3-4  $L_{16}(4^4)$ 直交表的實驗配置

Expt. NO.	Column			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	1	4	4	4
5	2	1	2	3
6	2	2	1	4
7	2	3	4	1
8	2	4	3	2
9	3	1	3	4
10	3	2	4	3
11	3	3	1	2
12	3	4	2	1
13	4	1	4	2
14	4	2	3	1
15	4	3	2	4
16	4	4	1	3

表 3-5  $L_9(3^4)$ 直交表的實驗配置

Expt. NO.	Column			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

### 3.4 鐳道外觀觀察

試片鐳後之表面品質狀況，如鐳道表面之凹陷狀況、鐳道寬度、鐳道表面有無裂痕或氣孔均可進行鐳道品質之判斷，以利後續最佳鐳接參數選擇之參考。

### 3.5 鐳道截面觀察

鐳接後之試片，將鐳接試片之頭尾二端約各 20mm 予以切除後，取垂直鐳道方向的橫截面來作金相實驗，而且每個鐳件至少取 2~3 個試片進行鑲埋成直徑約 40mm 之圓塊。其中實驗步驟為：取樣與切取試片→冷鑲埋→研磨→拋光→腐蝕→鐳道型態觀察，如圖 3-10 所示。

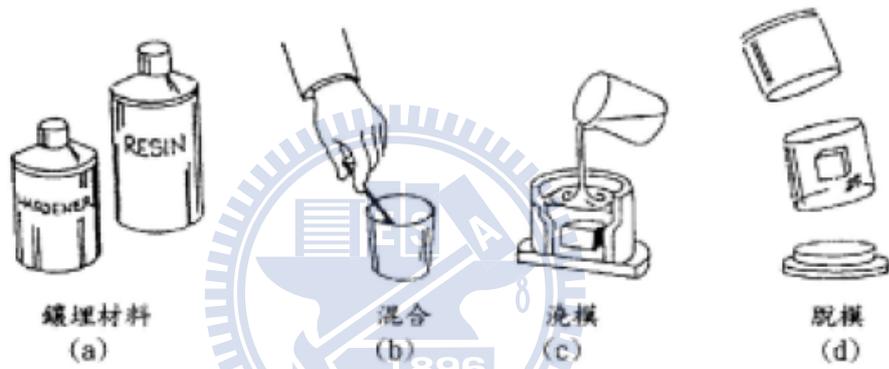
此外，在本實驗中，經冷鑲埋(壓克力樹脂)後用之試片，利用碳化矽砂紙研磨至 2000 號，再用氧化鋁粉拋光至  $0.03\ \mu\text{m}$ 。經拋光完成後的試片，必須以清水與酒精清洗乾淨並用吹風機吹乾，最後將試片予以浸蝕，隨即用光學顯微鏡拍照及觀察其金相組織。浸蝕液的選用係採用 Keller's(調配比例：2ml HF+3ml HCl+5ml HNO<sub>3</sub>+190ml H<sub>2</sub>O)，浸蝕時間則約為 10~15 秒鐘。



(a). 砂輪切斷機



(b). 研磨機



(c). 冷鑲埋製作程序



(d). 拋光機



(e). 顯微組織觀察

圖 3-10 金相實驗之步驟及設備

### 3.6 銲道滲透深度與寬度量測

為研究各參數對銲道形態之影響，並獲得最佳之銲接條件，將浸蝕拋光完成之試片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 3-11 所示。

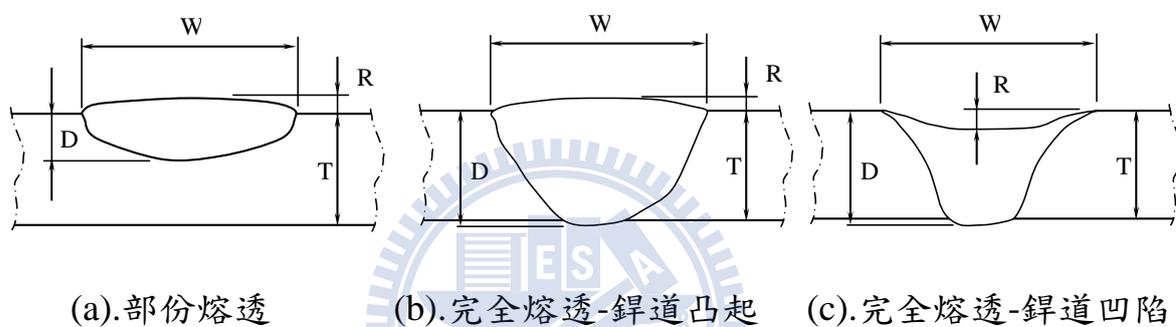


圖 3-11 銲道形態量測示意圖

### 3.7 微硬度量測

本研究測量銲道硬度時，係採用 Matsuzawa MHT-1 微硬度測定機（如圖 3-12 所示），並依 ASTM\_E384-07 規範進行試驗，試驗荷重為 100 公克，荷重加壓時間為 15 秒鐘，而量測位置則為距銲件表面下 1mm 處，且每點間隔 0.5mm 測量一硬度，並以銲道中心往外延伸 8.0mm 為量測範圍，且每片試片共取 2 次硬度值(如圖 3-13 所示)，最後再將量測之值記錄並作各部位之硬度分佈線，試片取樣形式如圖 3-15 所示。



圖 3-12 Matsuzawa MHT-1 微硬度測定機

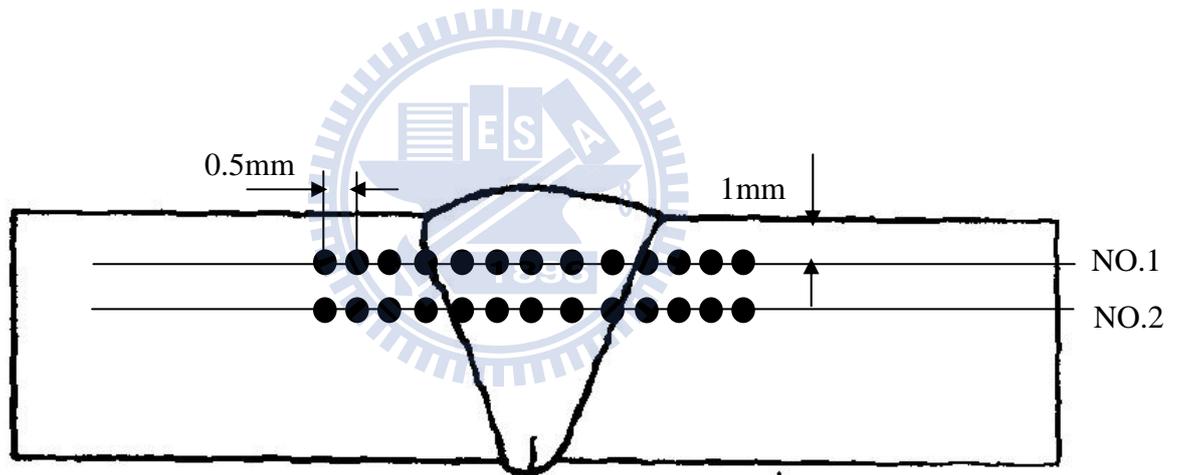


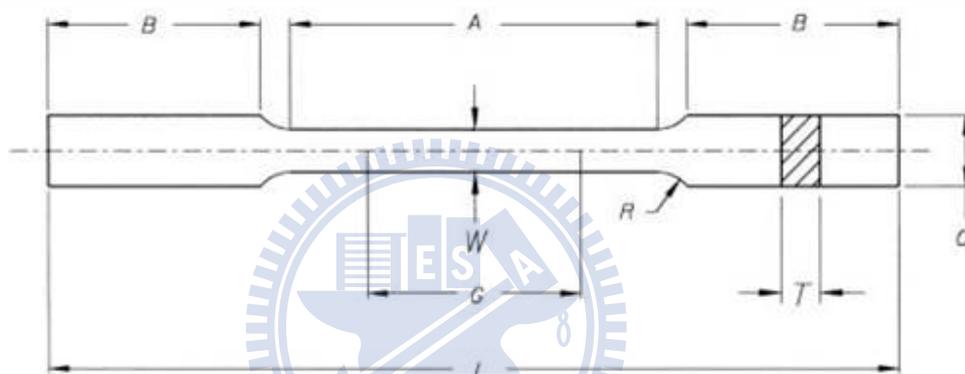
圖 3-13 硬度量測位置示意圖

### 3.8 拉伸試驗

將鉸妥之各組材料切割取樣，依 ASTM-E8M 之拉伸試驗規範製作拉伸試片，試片規格依型式不同進行選擇，如圖 3-14 示意圖所示，拉伸試

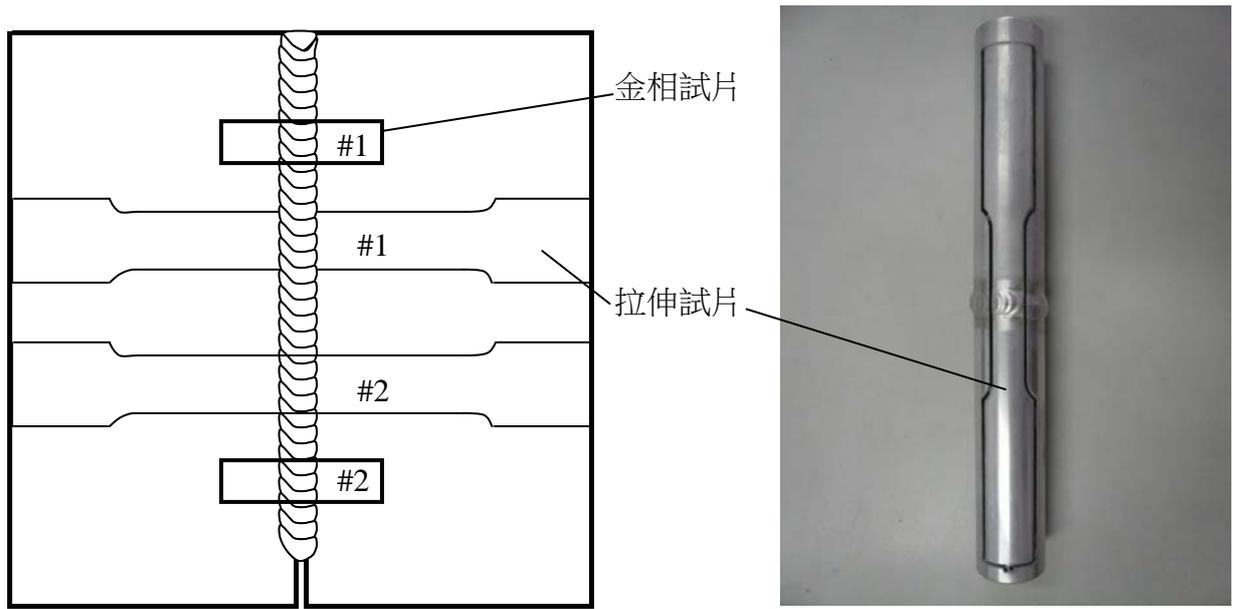
片取樣形式如圖 3-15 所示，所使用之試驗儀器為 INSTORN 850I 型(如圖 3-16)，荷重 100KN 之萬能材料試驗機。

拉伸試驗進行時可用個人電腦(PC)將相關資料全部印出來，由此試驗可獲得經銲接後銲道之極限抗拉強度(UTS)、降伏強度(YS)、伸長率(elongation)、斷面縮率(reduction of area)及應力-應變曲線。



	試片尺寸 mm	
	3mm 板材試片	3mm 管材試片
G-標距	25.0	50.0
W-寬度	6.0	12.5
T-厚度	3.0	3.0
R-圓弧半徑	6.0	12.5
L-總長度	100.0	230.0
A-縮減部位長度	32.0	60.0
B-夾持部位長度	30.0	75.0
C-夾持部位寬度	10.0	20.0

圖 3-14 拉伸試驗片尺寸



(a) 3mm 板材試片

(b) 3mm 管材試片

圖 3-15 拉伸及金相試驗片取樣位置示意圖



圖 3-16 INSTORN 850I 型萬能試驗機

### 3-9 氣瓶罐體銲接

選擇 7075-T6 之鋁棒材，先將外徑車削至 30mm，再以鑽、搪孔方式進行氣瓶本體製作，加工至壁厚為 3mm 及底部厚度為 6mm 之圓柱形罐體，接著再加上一 6mm 厚度之上蓋，將罐體與上蓋組合後，於接合部位進行全周 TIG 方式填料銲接，罐體與上蓋之組合方式分為兩種，並搭配不同銲接方式(a)圖之胴體側開槽填料銲接及(b)圖之上蓋側開槽及填料銲接，組合及銲接位置示意圖如圖 3-17 所示，其銲接參數設定為試片實驗得到之最佳銲接參數，如此以得到熔入深、銲道面積最佳化。

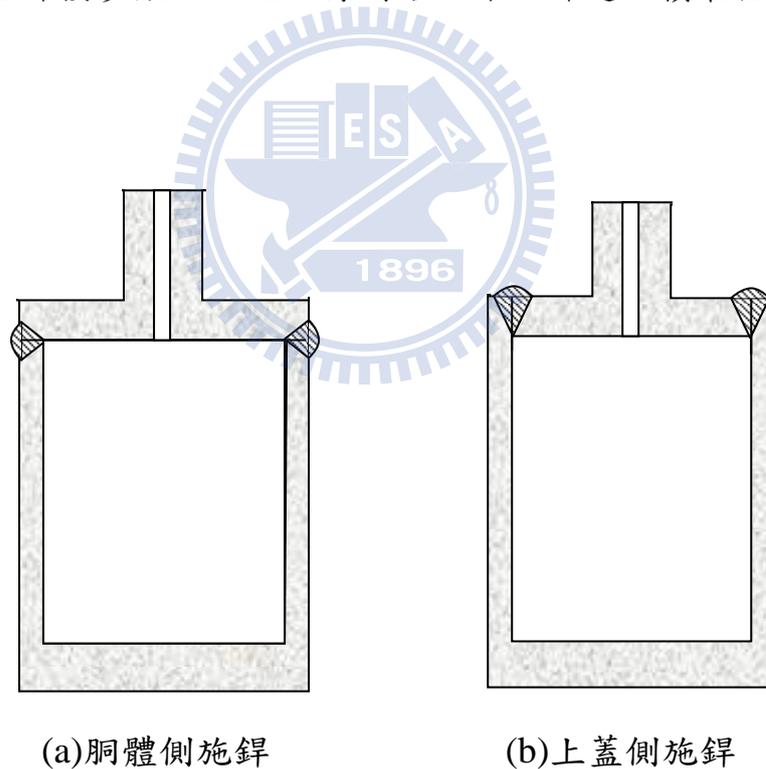


圖 3-17 氣瓶罐體銲接式意圖

### 3-10 水壓試驗

水壓試驗設備其包含有：微型鋁合金氣瓶本體、壓力表、壓力記錄器及水壓機，試驗方式為將鋁合金氣瓶接上連結器，同時並聯一壓力表，主要為量測充填時管內可承受之壓力值，利用水壓機持續對氣瓶填充水壓，充填時利用壓力記錄器來記錄充填之壓力，並記錄最後可承受之最大壓力，試驗方式示意圖如圖 3-18 所示。

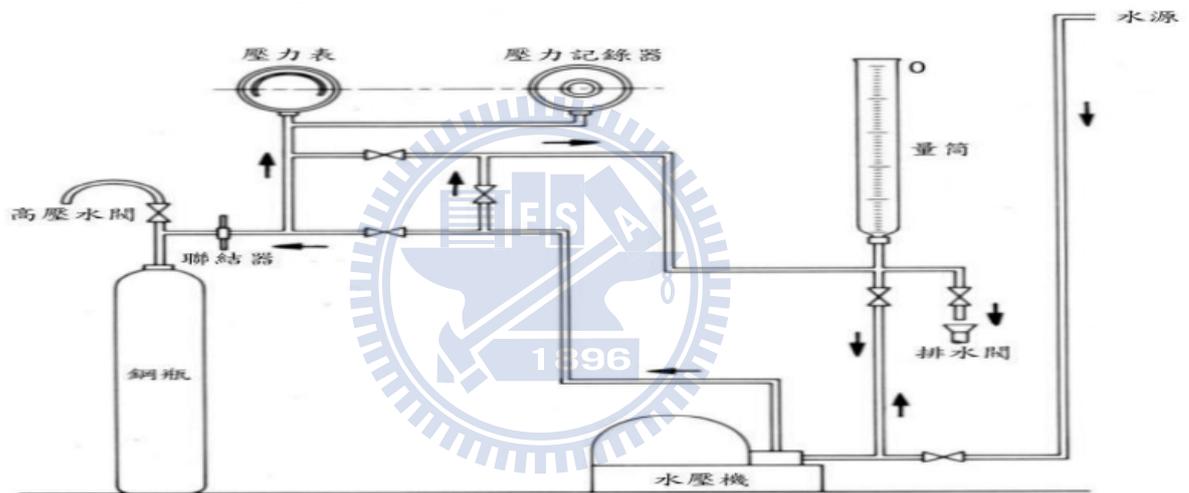


圖 3-18 氣瓶水壓試驗示意圖

### 3-11 銲後熱處理

銲後熱處理設備如圖 3-19 所示。熱處理進行方式依據 ASTM B597-92 之鋁合金熱處理規範，主要進行固溶處理(470°C 40min.)→淬水→人工時效處理(120°C 24hr.)，後續以編號 T6 代表之。



圖 3-19 Nabertherm 高溫熱處理爐

## 第四章 結果與討論

### 4.1 平板銲接參數之探討

#### 4.1.1 初次銲接實驗分析

主要目的在尋找鋁合金 7075-T6 適合銲接之參數範圍區間，主要的作法是參考歷屆相關論文、期刊及相關書籍提供之銲接電流、銲槍走速、保護氣體流量及電極與鈹材距離，再以不填料不開槽銲接方式進行 3mm 板厚初次銲接實驗。期望能從銲道前視圖及背視圖判斷出參數區間。獲得初步結果如表 4-1 所示。

表 4-1 初次銲接結果解析

試片編號	GAP (mm)	電流 (A)	銲速 (mm/min)	氣體流量 (L/min)	正面照片	背面照片	說明
1	1.5	110	200	10			前段之銲道寬度上能接受，但後段銲道過寬及背面熔透。
2	1.5	130	350	20			銲道寬度尚可接受，但在後半段時，銲道背面有熔透狀況。
3	3.0	110	350	10			銲道寬度優良，但依銲道背面狀況確認，熔入深度較差。
4	3.0	130	200	15			銲道寬度及熔入深度均明顯過度。

#### 4.1.2 L16 田口實驗分析

經由首次銲接確認，可從銲道外觀及背視圖判斷出銲接參數之變化。利用田口實驗分析法探討改變銲接電流、銲槍走行速度、氣體流量及銲件至電極間隙值等四個銲接參數。由表 4-1 初步銲接結果解析可歸納出實驗要因分析表，如表 4-2 所示。

表 4-2 實驗計劃要因配置表

因子	水準			
	水準1	水準2	水準3	水準4
A-銲材距電極間隙	1.5mm	2.0mm	2.5mm	3.0mm
B-電流	110A	115A	120A	125A
C-銲槍走行速度	200mm/min	250mm/min	300mm/min	350mm/min
D-保護氣體流量	8 l/min	10 l/min	15 l/min	20 l/min

表 4-2 共有 4 個參數，每個參數分別為 4 個水準，採用實驗規劃法以 L16 直交表來進行實驗，實驗參數配置如表 4-3，實驗結果可獲得如圖 4-1 所示為銲道外觀之影響，由外觀銲道狀況確認較佳者為 7、8、13、14 共 4 組條件。

表 4-3 L16(4<sup>4</sup>)實驗參數表

NO	GAP	電流	鐸速	氣體流量
1	1.5	110	200	8
2	1.5	115	250	10
3	1.5	120	300	15
4	1.5	125	350	20
5	2.0	110	250	15
6	2.0	115	200	20
7	2.0	120	350	8
8	2.0	125	300	10
9	2.5	110	300	20
10	2.5	115	350	15
11	2.5	120	200	10
12	2.5	125	250	8
13	3.0	110	350	10
14	3.0	115	300	8
15	3.0	120	250	20
16	3.0	125	200	15

試片編號	GAP (mm)	電流 (A)	鐸速 (mm/min)	氣體流量 (L/min)	正面照片	背面照片	特徵描述
1	1.5	110	200	8	 NO. 1 試片	 NO. 1 試片	鐸道寬度適中但溶入較深
2	1.5	115	250	10	 NO. 2 試片	 NO. 2 試片	鐸道較窄
3	1.5	120	300	15	 NO. 3 試片	 NO. 3 試片	鐸道太窄
4	1.5	125	350	20	 NO. 4 試片	 NO. 4 試片	鐸道窄及溶入不佳
5	2.0	110	250	15	 NO. 5 試片	 NO. 5 試片	鐸道寬度較窄
6	2.0	115	200	20	 NO. 6 試片	 NO. 6 試片	鐸道寬度正常

圖 4-1 L16 直交表鐸道外觀之影響

試片編號	GAP (mm)	電流 (A)	鐸速 (mm/min)	氣體流量 (L/min)	正面照片	背面照片	特徵描述
7	2.0	120	350	8	 NO. 7 試片	 NO. 7 試片	鐸道寬度及溶入深正常
8	2.0	125	300	10	 NO. 8 試片	 NO. 8 試片	鐸道寬度及溶入深正常
9	2.5	110	300	20	 NO. 9 試片	 NO. 9 試片	鐸道窄且溶入不足
10	2.5	115	350	15	 NO. 10 試片	 NO. 10 試片	鐸道溶入不明顯
11	2.5	120	200	10	 NO. 11 試片	 NO. 11 試片	鐸道寬度正常但溶入較深
12	2.5	125	250	8	 NO. 12 試片	 NO. 12 試片	鐸道寬度正常但溶入較深

圖 4-1 L16 直交表鐸道外觀之影響(續)

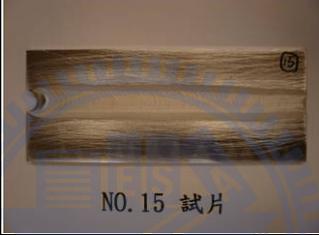
試片編號	GAP (mm)	電流 (A)	鐸速 (mm/min)	氣體流量 (L/min)	正面照片	背面照片	特徵描述
13	3.0	110	350	10	 NO. 13 試片	 NO. 13 試片	鐸道寬度及溶入深正常
14	3.0	115	300	8	 NO. 14 試片	 NO. 14 試片	鐸道寬度及溶入深正常
15	3.0	120	250	20	 NO. 15 試片	 NO. 15 試片	鐸道寬度及溶入狀況可
16	3.0	125	200	15	 NO. 16 試片	 NO. 16 試片	鐸道外觀裂

圖 4-1 L16 直交表鐸道外觀之影響(續)

如圖 4-2 L16 直交表鐸道截面型態確認結果，並由圖 4-3 鐸道熔融面積及 4-4 鐸道深寬比中可比較看出，在 16 組試片中，較佳的溶入狀況條件為 11、12 兩組，可達到熔透且熔融面積最大的最佳鐸道穿深效果。

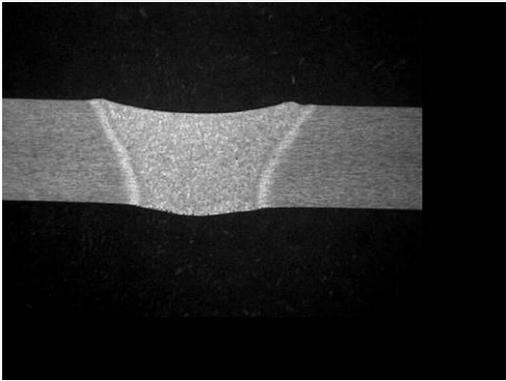
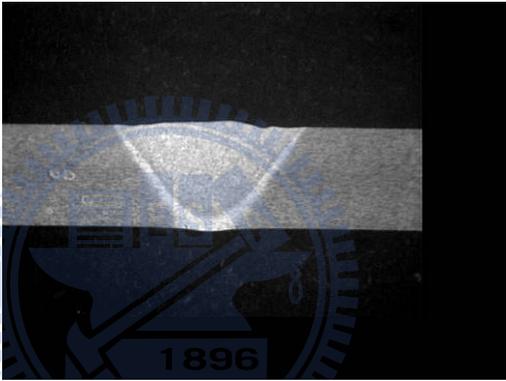
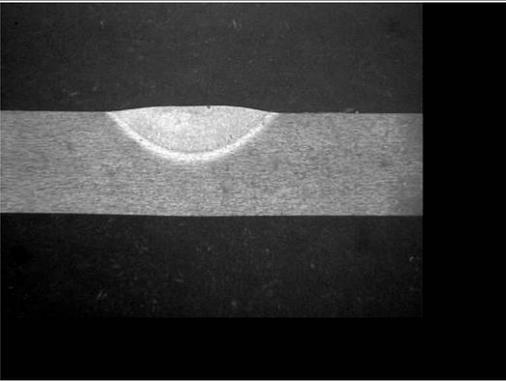
No.	鐸道型態			
1				
	D	W	D/W	鐸道面積
	3.13	6.36	0.49	13.182
2				
	D	W	D/W	鐸道面積
	2.61	5.37	0.48	7.705
3				
	D	W	D/W	鐸道面積
	1.35	4.53	0.30	3.659

圖 4-2 L16 直交表鐸道截面型態

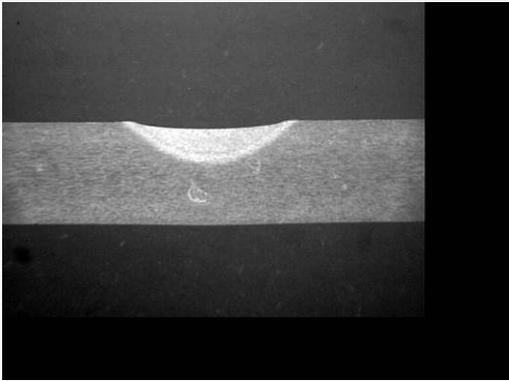
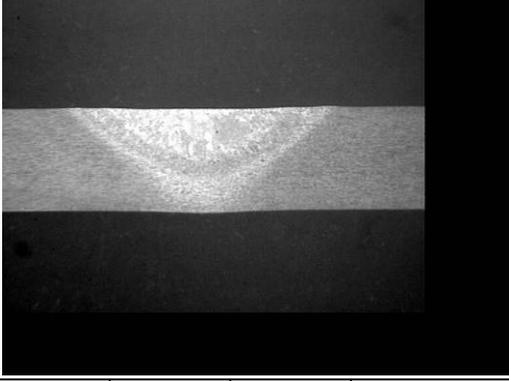
No.	鐸道型態			
4				
	D	W	D/W	鐸道面積
	1.34	4.77	0.28	4.16
5				
	D	W	D/W	鐸道面積
	1.27	5.02	0.25	4.21
6				
	D	W	D/W	鐸道面積
	2.81	7.24	0.38	10.134

圖 4-2 L16 直交表鐸道截面型態(續)

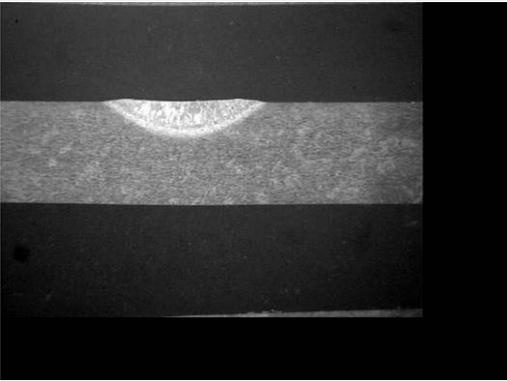
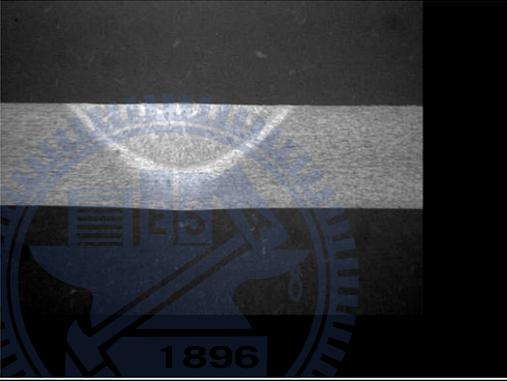
No.	鐸道型態			
7				
	D	W	D/W	鐸道面積
	0.99	4.22	0.23	2.459
8				
	D	W	D/W	鐸道面積
	2.51	6.14	0.41	7.172
9				
	D	W	D/W	鐸道面積
	0.60	3.70	0.16	1.380

圖 4-2 L16 直交表鐸道截面型態(續)

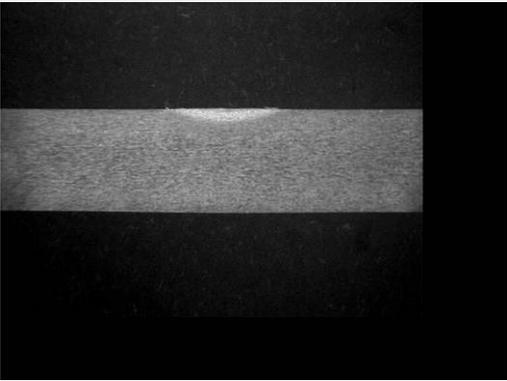
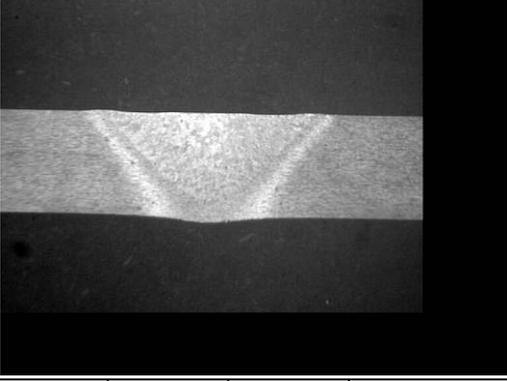
No.	銲道型態			
10				
	D	W	D/W	銲道面積
	0.32	2.17	0.15	0.447
11				
	D	W	D/W	銲道面積
	2.93	7.03	0.42	13.019
12				
	D	W	D/W	銲道面積
	2.94	6.90	0.43	11.910

圖 4-2 L16 直交表銲道截面型態(續)

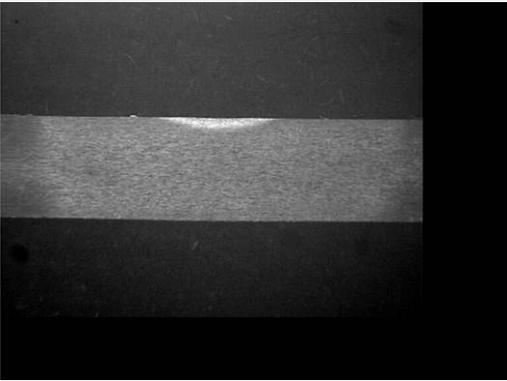
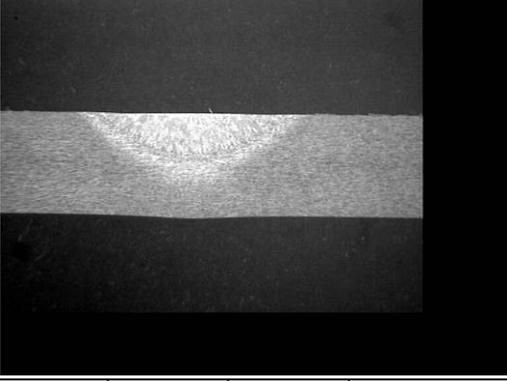
No.	鐸道型態			
13				
	D	W	D/W	鐸道面積
	0.23	2.15	0.11	0.292
14				
	D	W	D/W	鐸道面積
	1.02	5.01	0.20	2.516
15				
	D	W	D/W	鐸道面積
	1.71	5.50	0.31	5.324

圖 4-2 L16 直交表鐸道截面型態(續)

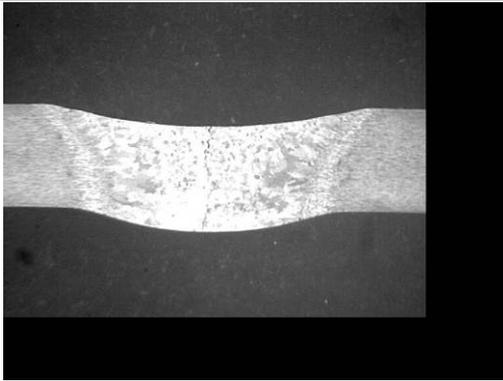
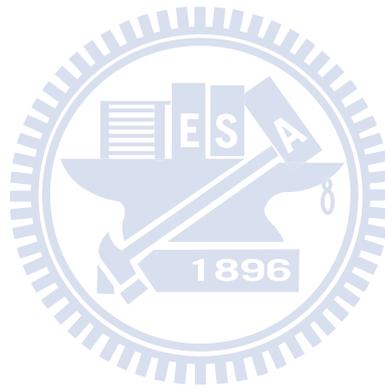
No.	鐳道型態			
16				
	D	W	D/W	鐳道面積
	2.98	9.95	0.30	26.314

圖 4-2 L16 直交表鐳道截面型態(續)



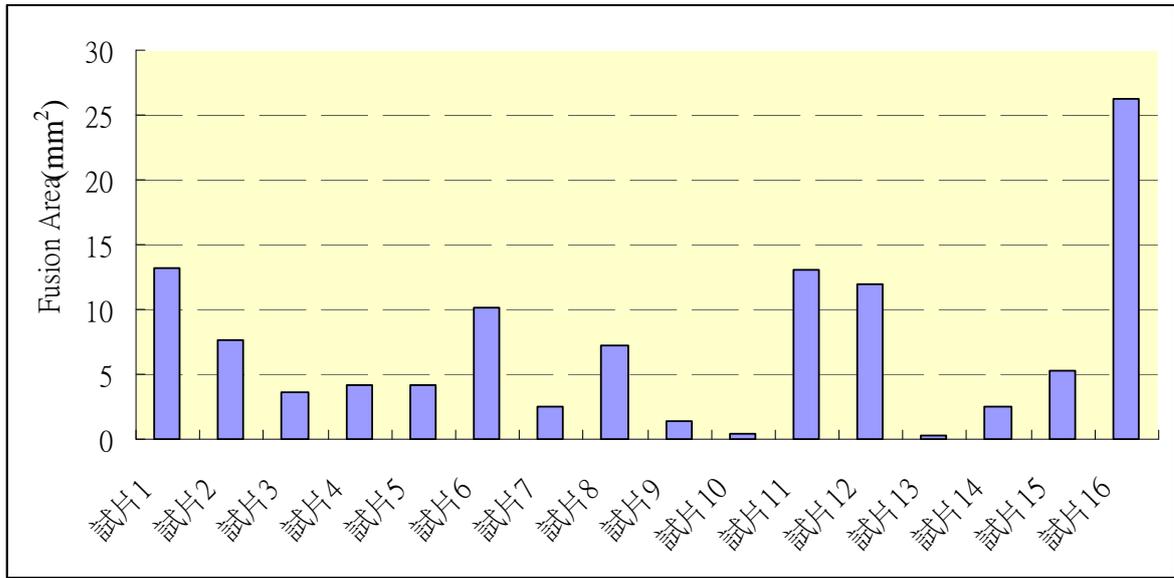


圖 4-3 L16 直交表鉚道熔融面積長條圖

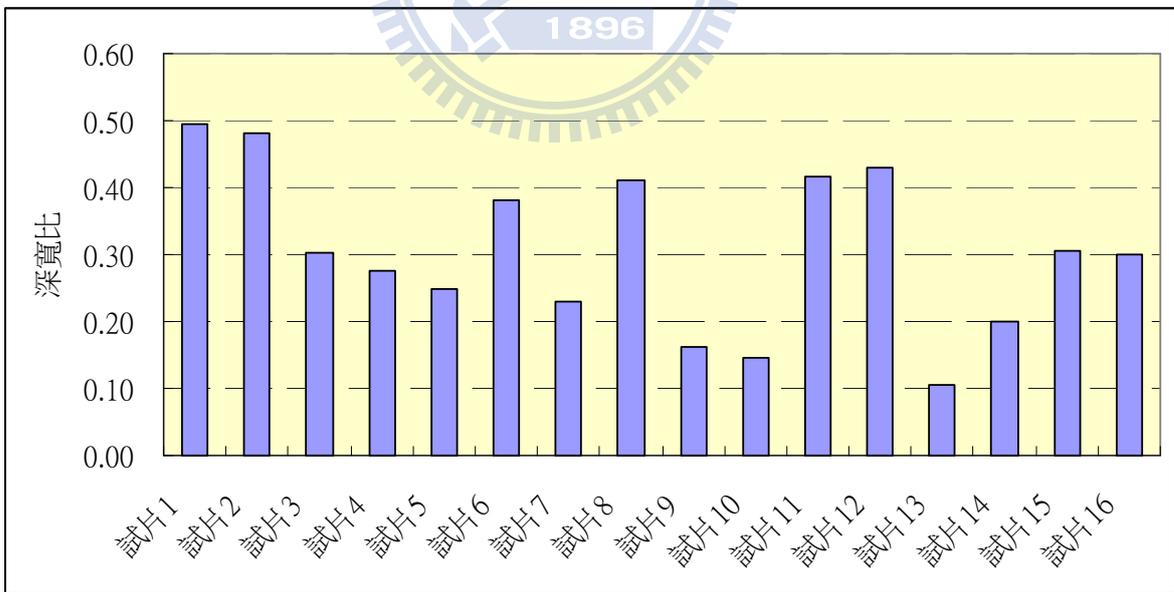


圖 4-4 L16 直交表鉚道深寬比長條圖

### 4.1.3 最佳化條件之探討

表 4-4 為 L16 直交表實驗數據與 S/N 比，其中實驗數據即是本次研究關鍵要素”銲道熔透深寬比”，以望大特性之性質，計算出  $\eta$  值。

表 4-4 L16 直交表實驗數據與 S/N 比表

NO	A	B	C	D	銲道深/寬比值(結果)			深寬比 $\eta$ (望大特性)
	GAP (mm)	電流 (A)	銲速 (mm/min)	氣體 流量 (L/min)	TEST1	TEST2	TEST3	
1	1.5	110	200	8	0.49	0.48	0.51	-6.145
2	1.5	115	250	10	0.53	0.45	0.48	-6.314
3	1.5	120	300	15	0.27	0.37	0.27	-10.637
4	1.5	125	350	20	0.29	0.30	0.24	-11.289
5	2.0	110	250	15	0.21	0.24	0.30	-12.317
6	2.0	115	200	20	0.32	0.42	0.42	-8.472
7	2.0	120	350	8	0.22	0.27	0.22	-12.636
8	2.0	125	300	10	0.36	0.42	0.45	-7.859
9	2.5	110	300	20	0.12	0.16	0.21	-16.408
10	2.5	115	350	15	0.15	0.15	0.14	-16.687
11	2.5	120	200	10	0.37	0.45	0.43	-7.697
12	2.5	125	250	8	0.39	0.42	0.46	-7.525
13	3.0	110	350	10	0.09	0.11	0.12	-19.631
14	3.0	115	300	8	0.18	0.21	0.21	-14.049
15	3.0	120	250	20	0.23	0.34	0.35	-10.758
16	3.0	125	200	15	0.33	0.28	0.29	-10.522

如表 4-5 所示為 L16 直交表展開之輔助表及圖 4-5 因子效果圖，由輔助表與效果圖中即可得知本次研究的初始最佳參數，當試片與電極間隙在第一水準(1.5 mm)、銲接電流在第四水準(125 A)、銲槍走速在第一水準(200 mm/min)、保護氣體流量在第三水準(15 l/min)時，為 TIG 銲接初步之最佳

化製程條件。此四水準之因子效果圖，可以很明顯看出各因子對於產品品質特性的發展趨勢。

表 4-5 L16 直交表實驗展開之銲道熔透深寬比輔助表

	A	B	C	D
1	<b>-34.385</b>	-54.501	<b>-32.836</b>	-40.356
2	-41.284	-45.523	-36.914	-41.500
3	-48.317	-41.727	-48.953	<b>-21.641</b>
4	-54.959	<b>-37.194</b>	-60.242	-46.926
$\Delta P$	20.574	17.306	27.406	25.285
影響度排名	3	4	1	2
最佳參數	A-水準 1	B-水準 4	C-水準 1	D-水準 3

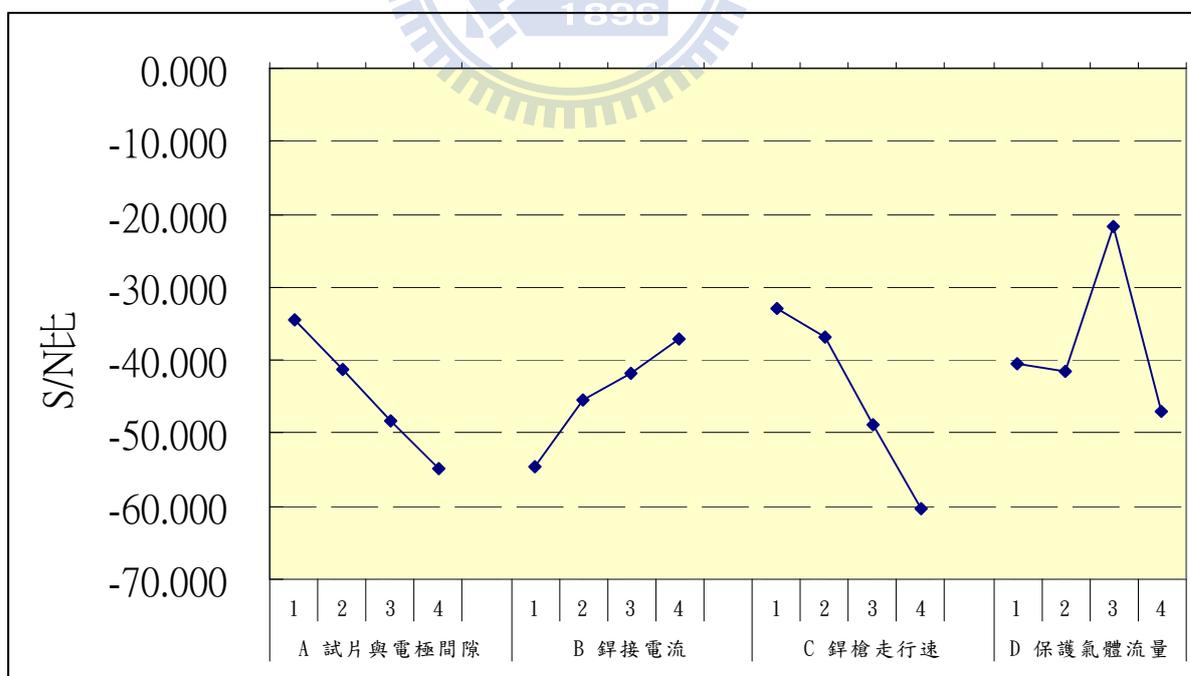


圖 4-5 因子效果圖

#### 4.1.4 金相組織探討

本實驗採用 Keller 腐蝕液腐蝕，且在腐蝕液腐蝕 15~20 秒後進行光學顯微鏡(OM)觀察，並將觀察結果加以分析。

由金相組織看到整個組織部份(如圖 4-6 所示)包含鐳道熔融區、熱影響區及未受熱影響區，其中熱影響區的機械性質最差，熱影響區中有黑色區域為析出物。

在鐳道凝固後可看到鐳道部位組織為等軸樹枝晶組織，如圖 4-7 所示，此現象是由於結構過冷所引起的，而在鐳道熔融線附近有柱狀樹枝晶組織，如圖 4-8 所示，同樣為結構過冷所造成的，其中等軸樹枝晶結構過冷程度較柱狀樹枝晶大。

在 1~15 組試片中，鐳道外觀均正常，但在第 16 組試驗中，於鐳道發生裂的現象，裂痕組織狀況圖 3-9 所示，當發生鐳道裂痕是不被允許發生。

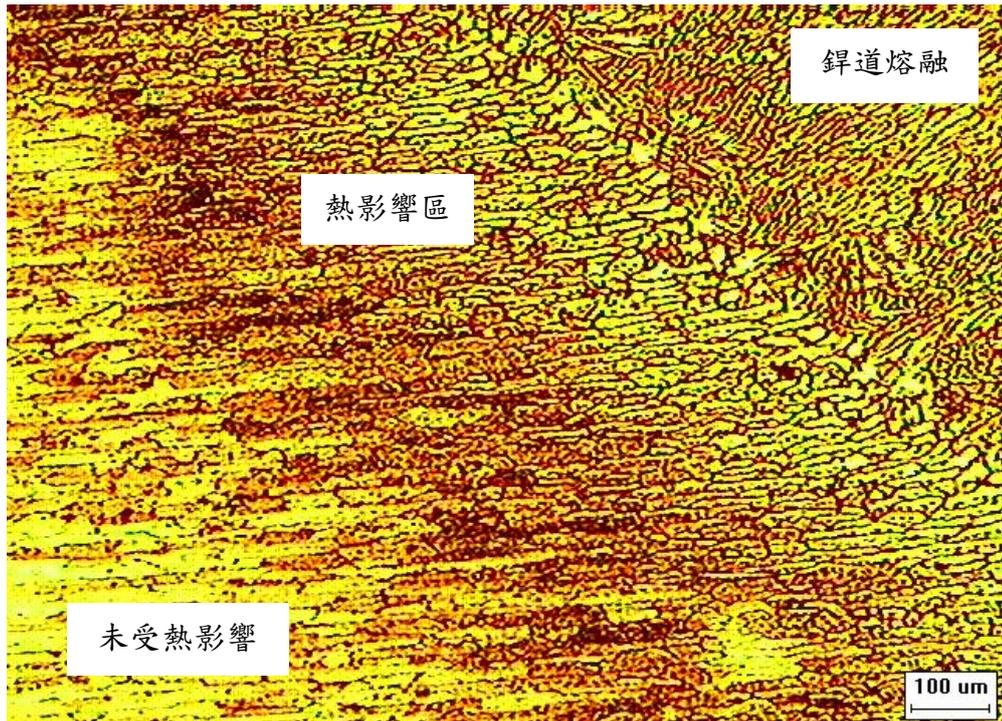


圖 4-6 截面金相組織

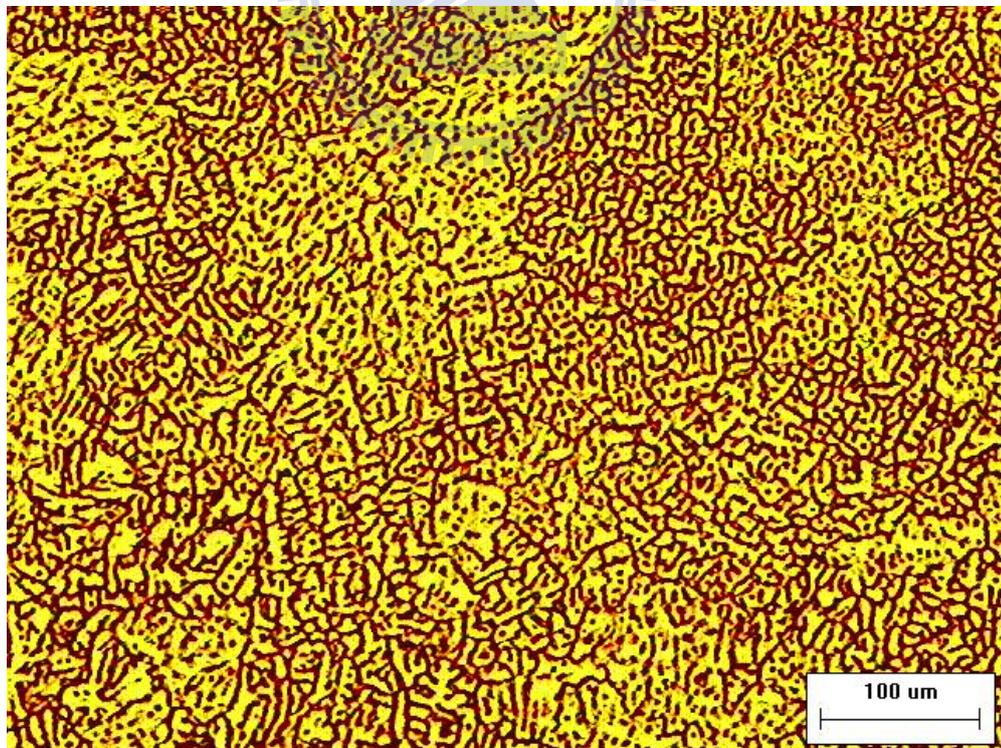


圖 4-7 等軸樹枝晶組織

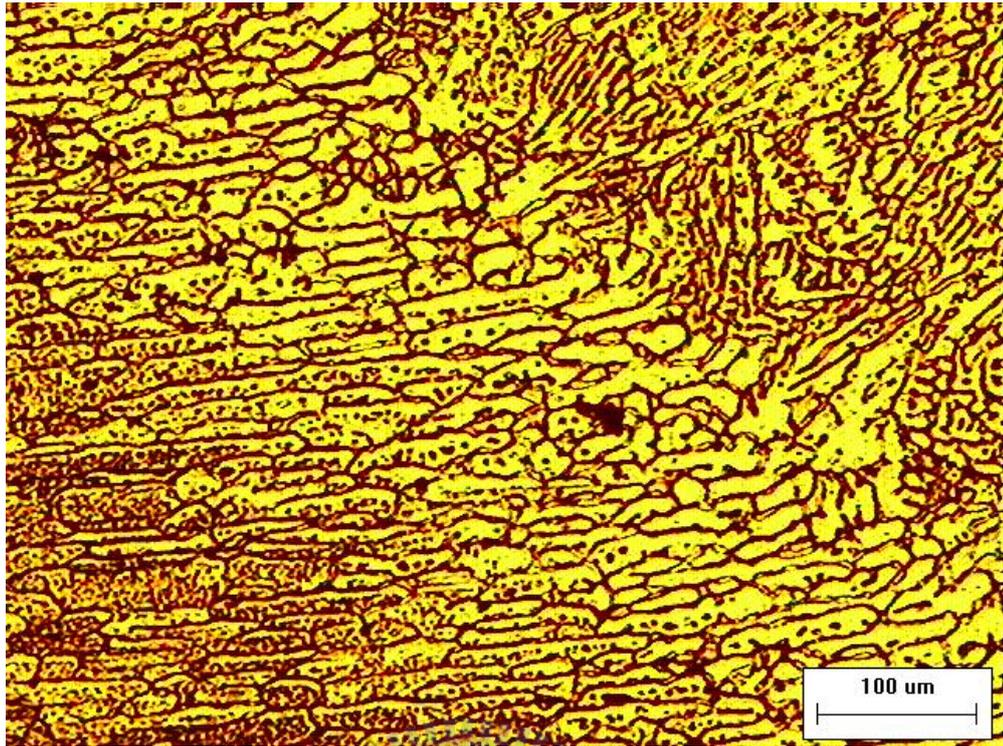


圖 4-8 柱狀樹枝晶組織

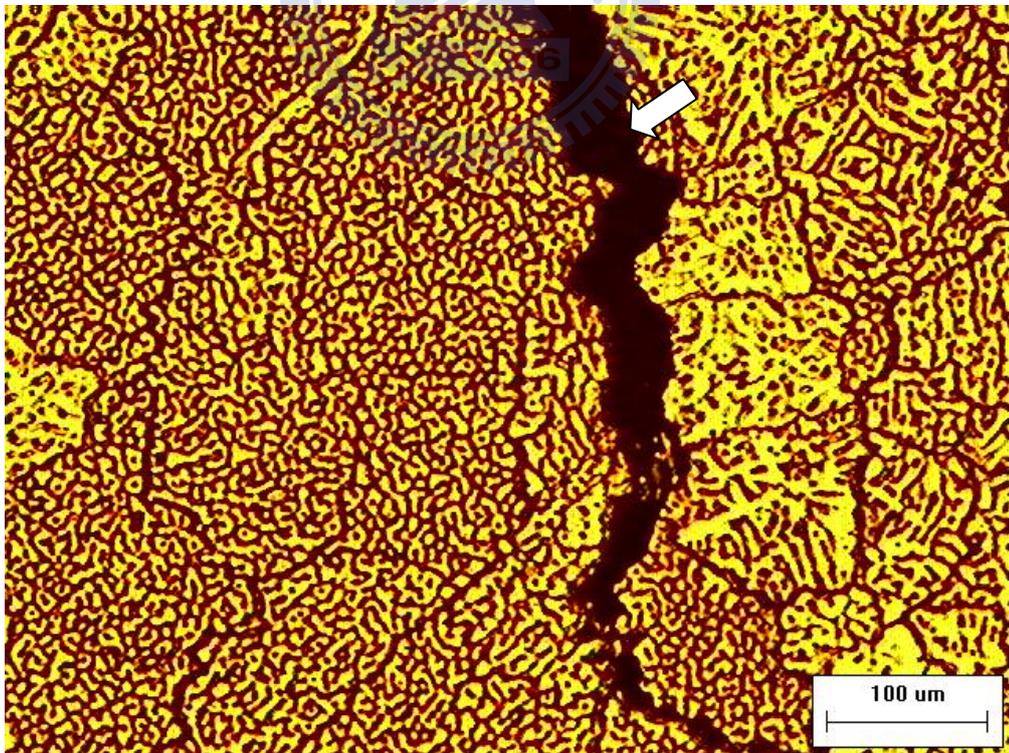


圖 4-9 鐳道裂痕組織

## 4.2 對接銲接參數之探討

參考銲接深寬比及L16 直交表實驗輔助表訂出下階段進行對接銲接之銲接實驗參數，利用表 4-6 實驗要因計劃配置表及表 4-7 L9(3<sup>4</sup>)的實驗參數表進行 3.0mm不開槽不填料對接銲接，再由此實驗求得對接狀態下之銲道深寬比及銲道熔融面積，最終得到銲接最佳參數，再以最佳參數對瓶身進行銲接，待完成氣瓶後，最終進行水壓試驗，確認可填充壓力值。

表 4-6 L9(3<sup>4</sup>) 實驗要因計劃配置表

因子 \ 水準	水準1	水準2	水準3
A-試片距電極間隙	2.0 mm	2.5 mm	3.0 mm
B-銲接電流	120 A	125 A	130 A
C-銲槍走行速度	150 mm/min	200 mm/min	250 mm/min
D-保護氣體流量	10 l/min	15 l/min	20 l/min

表 4-7 L9(3<sup>4</sup>) 實驗參數表

NO	GAP	電流	走速	氣體流量
1	2.0	120	150	10
2	2.0	125	200	15
3	2.0	130	250	20
4	2.5	120	200	20
5	2.5	125	250	10
6	2.5	130	150	15
7	3.0	120	250	15
8	3.0	125	150	20
9	3.0	130	200	10

實驗結果可獲得如圖 4-10 所示為 L9 銲道外觀之影響及圖 4-11 所示為

L9 銲道截面型態確認結果。

試片 編號	GAP (mm)	電流 (A)	銲速 (mm/min)	氣體 流量 (L/min)	正面 照片	背面 照片
1	2.0	120	150	10		
2	2.0	125	200	15		
3	2.0	130	250	20		
4	2.5	120	200	20		
5	2.5	125	250	10		

圖 4-10 L9 直交表銲道外觀之影響

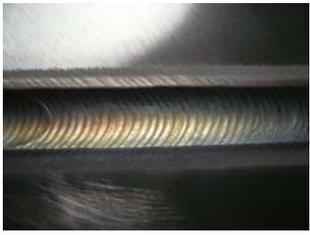
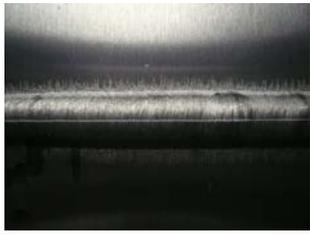
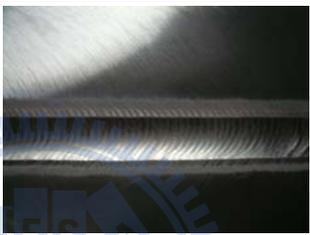
試片 編號	GAP (mm)	電流 (A)	鐸速 (mm/min)	氣體 流量 (L/min)	正面 照片	背面 照片
6	2.5	130	150	15		
7	3.0	120	250	15		
8	3.0	125	150	20		
9	3.0	130	200	10		

圖 4-10 L9 直交表鐸道外觀之影響(續)

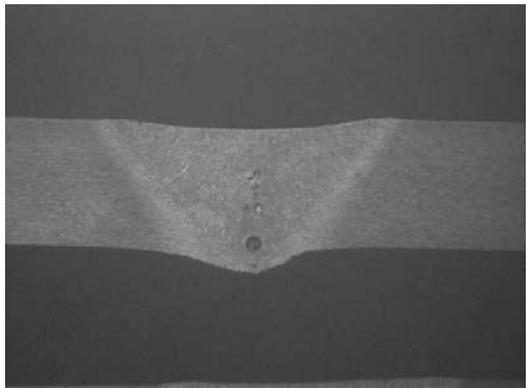
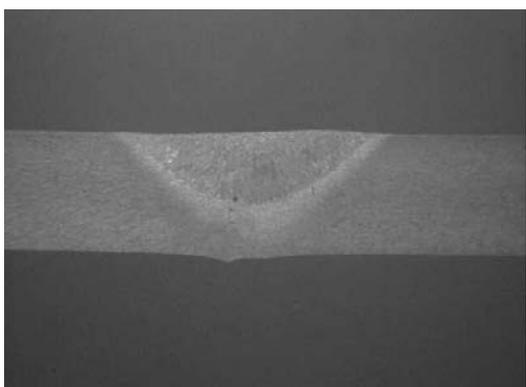
No.	鐸道型態			
1				
	D	W	D/W	鐸道面積
	3.54	6.10	0.58	10.88
2				
	D	W	D/W	鐸道面積
	3.24	6.43	0.50	10.82
3				
	D	W	D/W	鐸道面積
	1.85	5.74	0.32	7.67

圖 4-11 L9 直交表鐸道截面型態

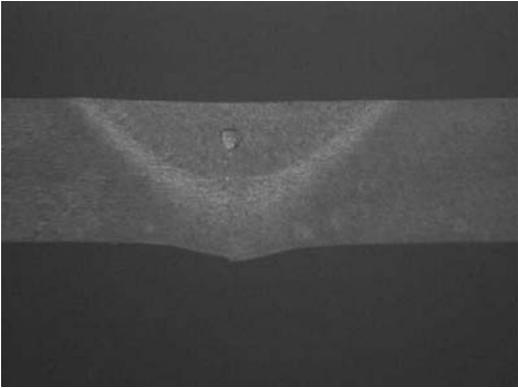
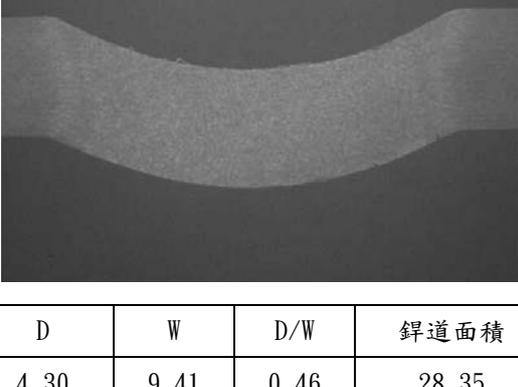
No.	銲道型態			
4				
	D	W	D/W	銲道面積
	1.54	5.55	0.28	8.82
5				
	D	W	D/W	銲道面積
	1.29	5.65	0.23	6.57
6				
	D	W	D/W	銲道面積
	4.30	9.41	0.46	28.35

圖 4-11 L9 直交表銲道截面型態(續)

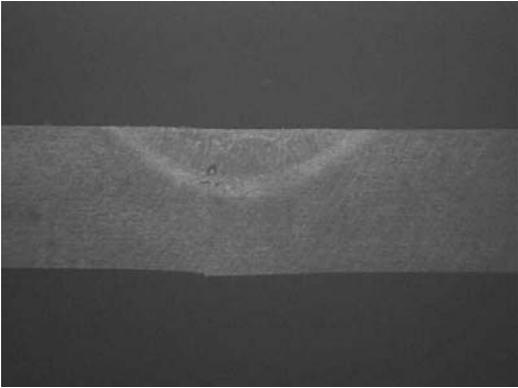
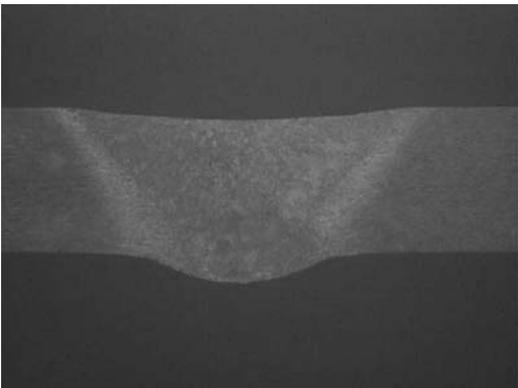
No.	銲道型態			
7				
	D	W	D/W	銲道面積
	1.02	4.48	0.23	4.54
8				
	D	W	D/W	銲道面積
	3.93	8.56	0.46	25.86
9				
	D	W	D/W	銲道面積
	3.64	7.03	0.52	19.8

圖 4-11 L9 直交表銲道截面型態(續)

由圖 4-12 鐸道熔融面積及 4-13 鐸道深寬比中可比較看出，在 9 組試片中，較佳的溶入狀況條件為 NO.6、8 及 9 三組，但因 NO.6 及 8 鐸道凹陷量偏大，所以最後認定 NO.9 的條件為對接鐸之最佳參數。

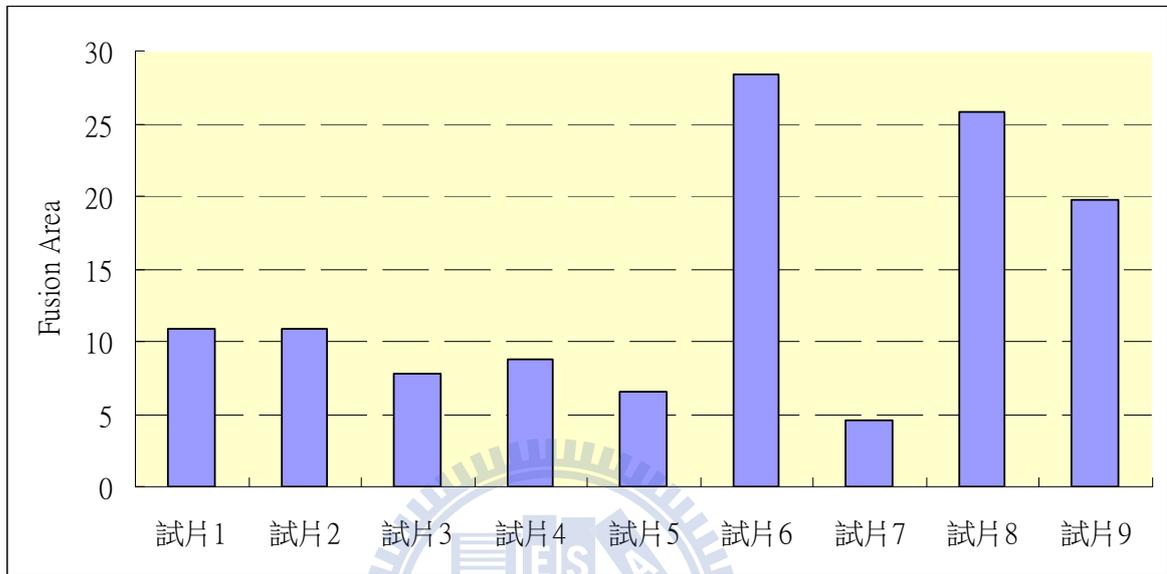


圖 4-12 L9 直交表鐸道熔融面積長條圖

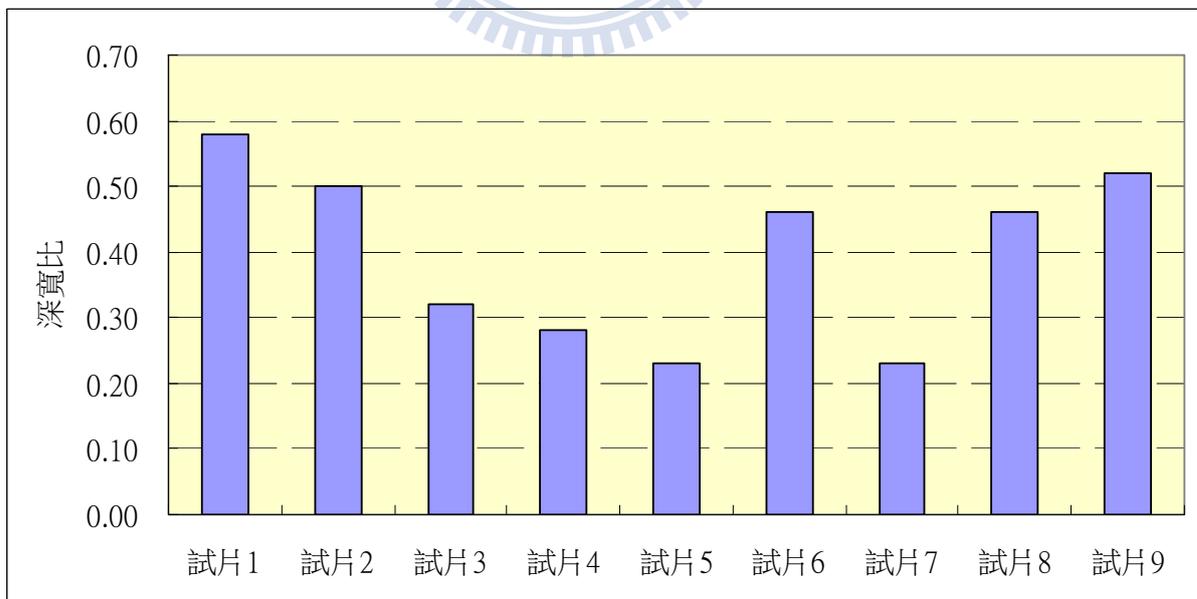


圖 4-13 L9 直交表鐸道深寬比長條圖

若以表 4-8 所示為 L9 直交表實驗數據與 S/N 比及表 4-9 所示為 L9 直交表展開之輔助表可得知本次研究的最佳參數為，當試片與電極間隙在第一水準(2.0mm)、銲接電流在第三水準(130 A)、銲槍走速在第一水準(150 mm/min)、保護氣體流量在第一水準( 10 l/min)。

表 4-8 L9 直交表實驗數據與 S/N 比

NO	A	B	C	D	銲道深/寬比值(結果)			深寬比 $\eta$ (望大特性)
	GAP (mm)	電流 (A)	銲速 (mm/min)	氣體流量 (L/min)	TEST1	TEST2	TEST3	
1	2.0	120	150	10	0.58	0.60	0.59	-4.585
2	2.0	125	200	15	0.50	0.51	0.49	-6.024
3	2.0	130	250	20	0.32	0.33	0.35	-9.560
4	2.5	120	200	20	0.28	0.27	0.27	-11.270
5	2.5	125	250	10	0.23	0.22	0.24	-12.782
6	2.5	130	150	15	0.46	0.47	0.50	-6.452
7	3.0	120	250	15	0.23	0.24	0.23	-12.646
8	3.0	125	150	20	0.46	0.47	0.48	-6.562
9	3.0	130	200	10	0.52	0.55	0.56	-5.312

表 4-9 L9 直交表展開之輔助表

	A	B	C	D
1	-20.170	-28.501	-17.599	-22.679
2	-30.504	-25.368	-22.606	-25.122
3	-24.519	-21.324	-34.988	-27.392
$\Delta P$	10.334	7.177	17.389	4.713
影響度排名	2	3	1	4
最佳參數	A-水準1	B-水準3	C-水準1	D-水準1

### 4.3 氣瓶之銲接設計

依氣瓶尺寸設計圖進行氣瓶上下本體的製作，接著將圖 4-14 上蓋及圖 4-15 氣瓶罐體分成兩種接合方式，如圖 4-16 上下本體接合法進行銲接，銲接參數以未填料平版對接最佳參數為 base，因填料需要提高熱能輸入量，所以氣瓶銲接參數設定如表 4-10，並進行氣瓶全周 TIG 填料不開槽銲接，銲接後狀況如圖 4-17 胴體側施銲及圖 4-18 上蓋側施銲兩種。

表 4-10 氣瓶銲接參數

	GAP (mm)	電流 (A)	走速 (mm/min)	氬氣流量 (l/min)	銲條直徑 (mm)	鎢棒直徑 (mm)
填料	2.0	160	230	15.0	3.2	3.2



圖 4-14 氣瓶上蓋



圖 4-15 氣瓶罐體

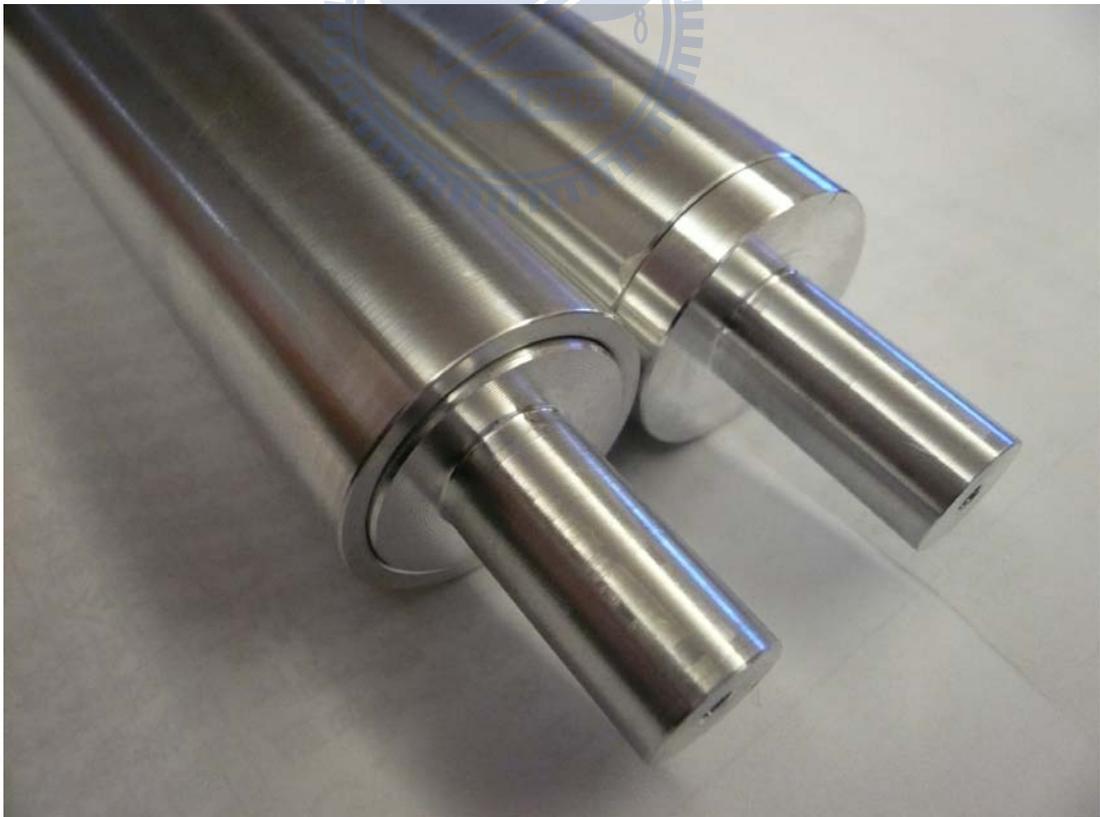


圖 4-16 上下本體接合法



圖 4-17 胴體側施鉸



圖 4-18 上蓋側施鉸

#### 4.4 水壓試驗探討

依銲道之溶深狀況，如圖 4-19(a)胴體側施銲和(b)上蓋側施銲，及銲道外型美觀為選定準則，最後選定以溶入深較淺之上蓋側銲接方式(溶深約 2.0mm)進行耐水壓試驗，經由SGS進行水壓試驗後，氣瓶在 10Kg/cm<sup>2</sup>壓力維持 1min.無洩漏及變形，接著繼續增壓至 20 Kg/cm<sup>2</sup>壓力維持 1min.仍無洩漏及變形，壓力表讀值及氣瓶狀況如圖 4-20(a) 10Kg/cm<sup>2</sup>壓力值及(b) 20 Kg/cm<sup>2</sup>壓力值，最終鋁合金氣瓶耐水壓為 20 Kg/cm<sup>2</sup>高過於D.O.T要求之 5/3 的設計壓力值(約 17 Kg/cm<sup>2</sup>)，所以判定符合要求，SGS水壓試驗報告如附錄一。

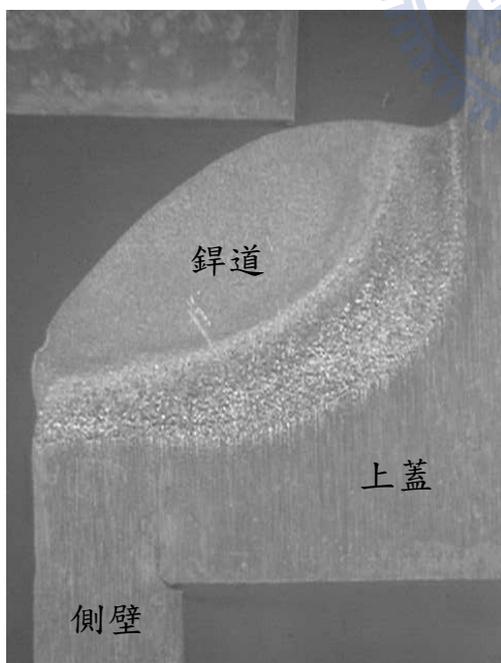


圖 4-19(a) 胴體側施銲銲道

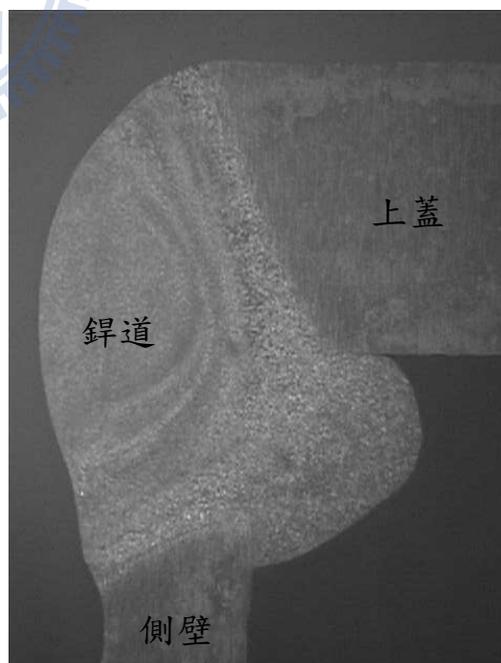


圖 4-19(b) 上蓋側施銲銲道



圖 4-20(a) 10Kg/cm<sup>2</sup>壓力值下氣瓶狀況



圖 4-20(b) 20Kg/cm<sup>2</sup>壓力值下氣瓶狀況

## 4.5 微硬度試驗分析

### 4.5.1 有填料鉚件之微硬度分析

未經鉚後熱處理與經過鉚後 T6 熱處理之有填料鉚件截面積微硬度變化曲線，如圖 4-21 所示。未經鉚後熱處理之有填料鉚道區硬度平均為 74 Hv 與母材區硬度平均為 134 Hv，經過鉚後 T6 熱處理製程之有填料鉚件，其鉚道區硬度平均為 130 Hv 與母材區硬度平均為 172 Hv，所以鉚件經過 T6 熱處理製程後，在鉚道區硬度較未熱處理者提升約 43%，另在母材區硬度則較未熱處理者提升約 22%。

綜合上述實驗結果顯示，當有填料鉚件經過 T6 熱處理後，可明顯提升鉚件整體硬度，尤其以鉚道硬度值增加約一倍左右，主要為固溶處理及淬水後可使鉚件內形成過飽和固溶體，有利於後續的時效處理，產生析出強化之效果。

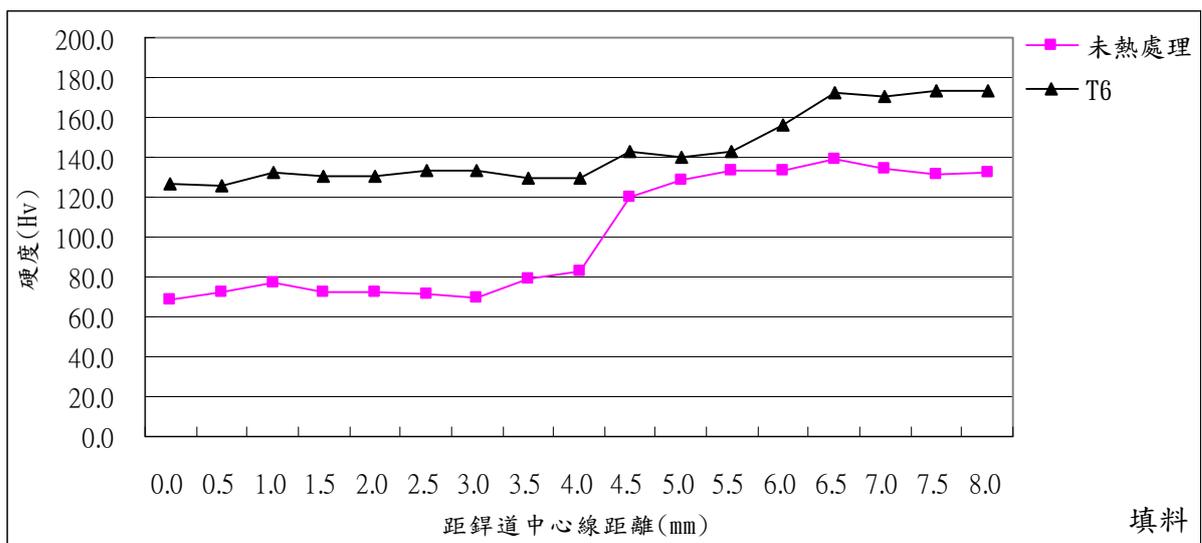


圖 4-21 有填料鉚件之有/無熱處理後微硬度變化曲線

#### 4.5.2 無填料鋁件之微硬度分析

未經鋁後熱處理與經過鋁後 T6 熱處理之無填料鋁件截面積微硬度變化曲線，如圖 4-22 所示。未經鋁後熱處理之無填料鋁道區硬度平均為 105 Hv 與母材區硬度平均為 142 Hv，經過鋁後 T6 熱處理製程之無填料鋁件，其鋁道區硬度平均為 171 Hv 與母材區硬度平均為 176 Hv，所以鋁件經過 T6 熱處理製程後，在鋁道區硬度較未熱處理者提升約 39%，另在母材區硬度則較未熱處理者提升約 19%，整體看起來，未填料之鋁件在鋁後熱處理後，其硬度值回復到原母材的狀況，相當於未經過鋁接過程之熱影響狀態。

綜合上述實驗結果顯示，當無填料鋁件經過 T6 熱處理後，鋁道硬度高於未熱處理前，且仍高於有填料鋁件 T6 熱處理之狀況，在 Hirano<sup>[73]</sup> 等人指出銅、鎂、矽和鋅等元素，為 7000 系列鋁合金介入析出強化的主要溶質原子、惟鋅、鎂等低熔點元素在鋁接過程中易於蒸發，故無填料鋁件之鋁道合金成分濃度相對較有填料鋁件高，故經鋁後 T6 熱處理製程能形成較多微細分佈的過渡相析出物(G.P. zones、 $\eta$  相與  $\eta'$  相)，可具較多機率形成  $\eta'$  析出強化相。因此無填料鋁道之微硬度值經鋁後 T6 熱處理後，其微硬度值較有填料鋁件鋁道者為高。

當在鋁件鋁後未經熱處理前，無填料鋁道硬度值較有填料鋁道硬度值高約 31 Hv，研判為有填料鋁件在鋁接過程中，為使 ER5356 填料能充分與

鋁合金母材熔融，提高電流增加熱能用以增進融合效果，此方式使有填料  
銲道晶粒成長，導致於有填料銲道之微硬度值較低。

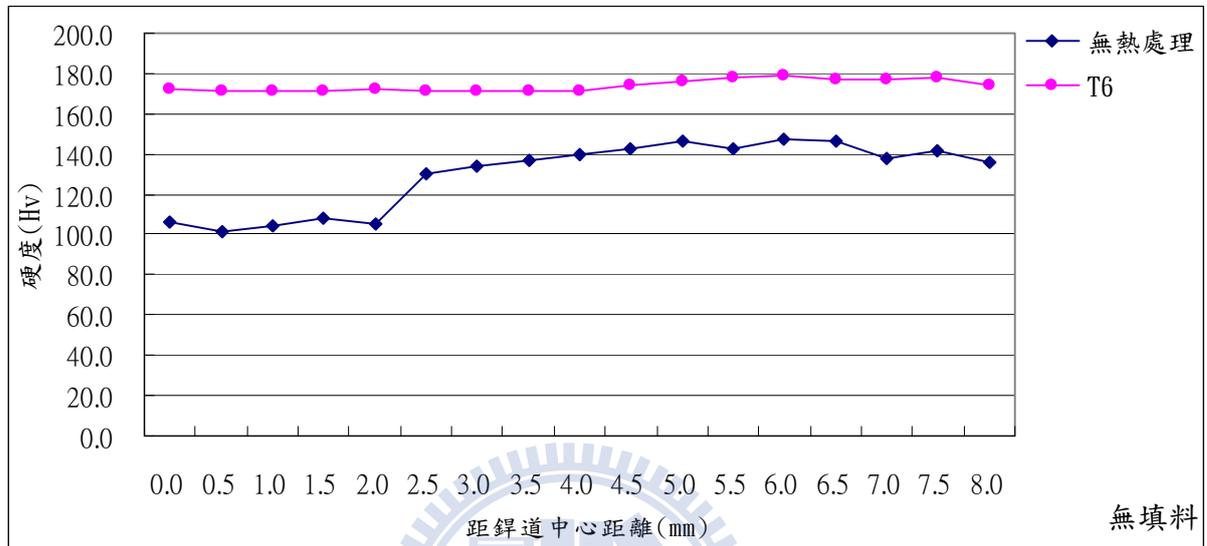


圖 4-22 無填料銲件之有/無熱處理後微硬度變化曲線

## 4.6 拉伸試驗分析

### 4.6.1 有填料銲件之拉伸試驗探討

圖 4-23 及圖 4-24 為有填料銲件在有/無銲後熱處理後，進行拉伸試驗之結果。未經銲後熱處理銲件之抗拉強度為  $35.2\text{Kg/mm}^2$ 、降伏強度為  $22.5\text{Kg/mm}^2$ ，而經過銲後 T6 熱處理銲件其抗拉強度為  $44.7\text{Kg/mm}^2$ 、降伏強度為  $29.3\text{Kg/mm}^2$ ，顯示銲後 T6 熱處理對於銲件具有強化之效果，且較未經銲後熱處理銲件之抗拉強度提升約 21% 及降伏強度提升約 23%。在圖 4-25 及圖 4-26 為拉伸試片在銲後熱處理及未熱處理之狀況，均於銲道區斷裂，斷裂面呈現不規則脆斷狀況。

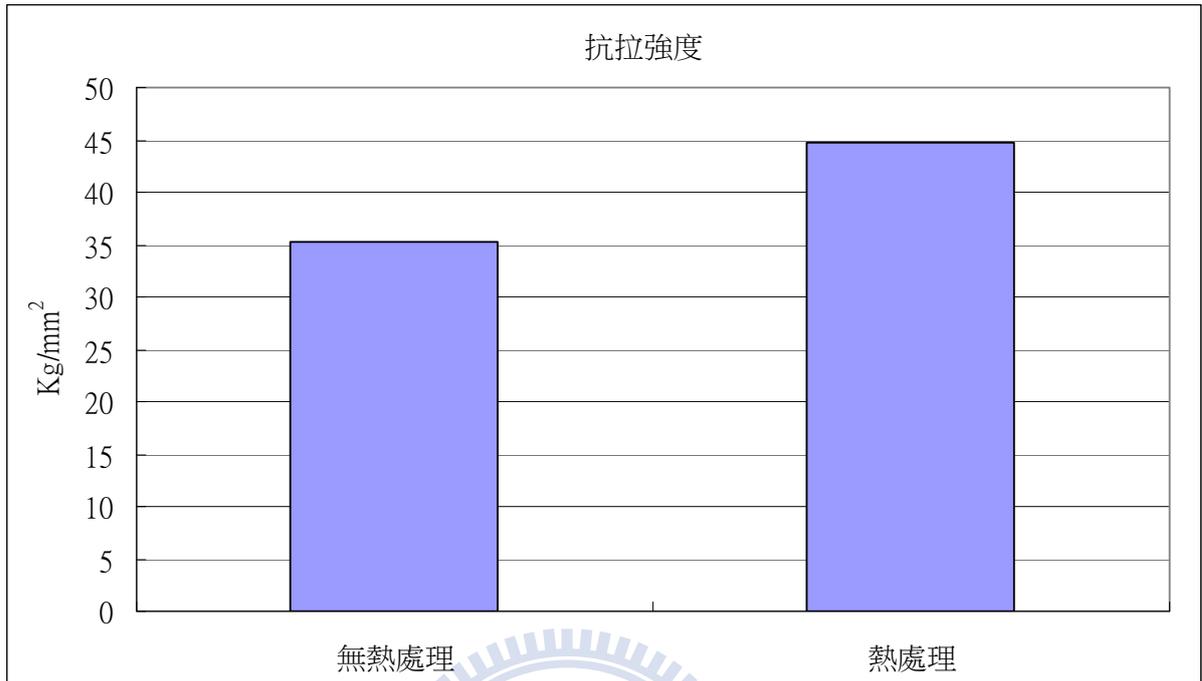


圖 4-23 有填料銲件在有/無熱處理後之抗拉強度

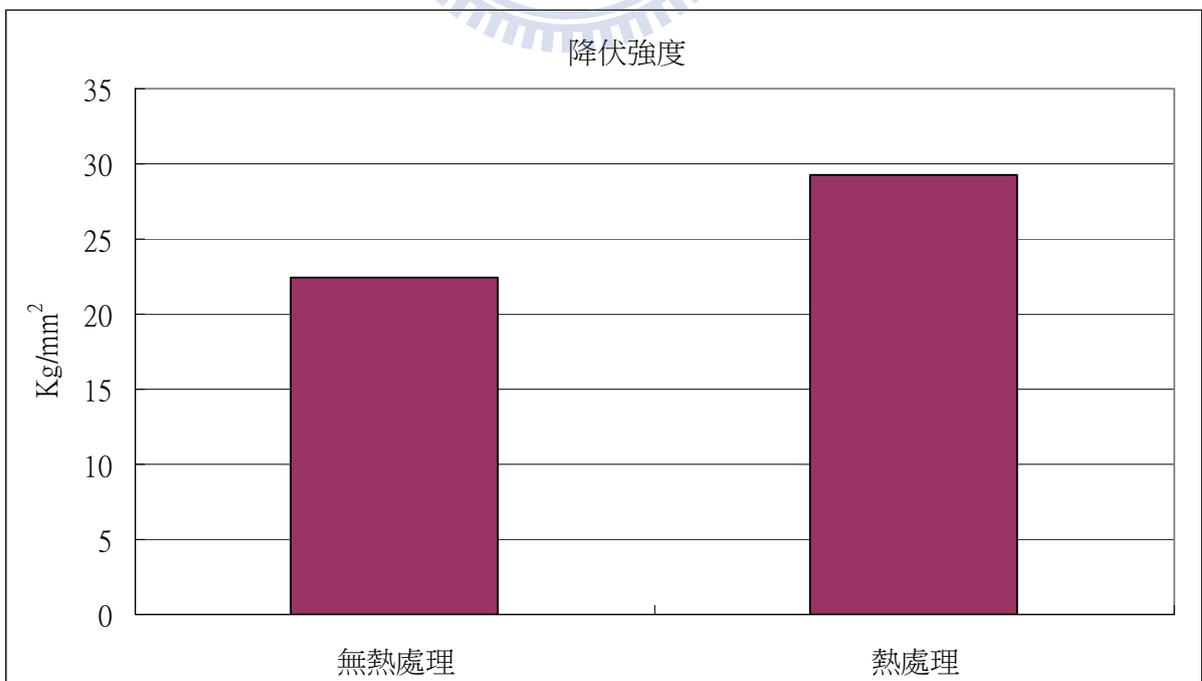


圖 4-24 有填料銲件在有/無熱處理後之降伏強度



圖 4-25 有填料銲件之銲後熱處理拉伸試片結果

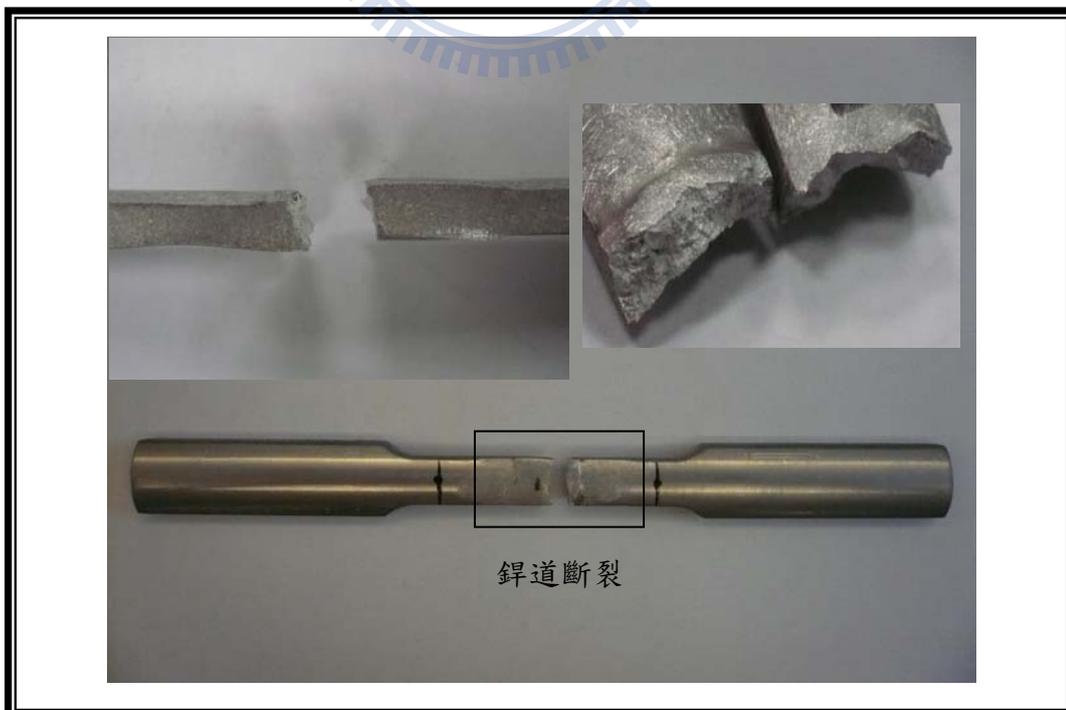


圖 4-26 有填料銲件之銲後無熱處理拉伸試片結果

#### 4.6.2 無填料鉚件之拉伸試驗探討

圖 4-27 及圖 4-28 為無填料鉚件在有/無鉚後熱處理後，進行拉伸試驗之結果。未經鉚後熱處理鉚件之抗拉強度為  $27.7\text{Kg/mm}^2$ 、降伏強度為  $10.4\text{Kg/mm}^2$ ，而經過鉚後 T6 熱處理鉚件其抗拉強度為  $35.1\text{Kg/mm}^2$ 、降伏強度為  $19.2\text{Kg/mm}^2$ ，顯示鉚後 T6 熱處理對於鉚件仍具有強化之效果，且較未經鉚後熱處理鉚件之抗拉強度提升約 21% 及降伏強度提升約 45%。在圖 4-29 及圖 4-30 為拉伸試片在鉚後熱處理及未熱處理之狀況，仍然均在鉚道區斷裂，斷裂面呈現平整脆斷狀況。

綜合有/無填料鉚件的拉伸試驗結果，在無填料鉚件經 T6 鉚後熱處理後之抗拉強度及降伏強度仍較低於無熱處理之填料鉚件，顯示 7075 鋁合金在經 ER5356 填料鉚接後，其強度較無填料者高，且在經鉚後 T6 熱處理可提升鉚件之強度，但仍無法使鉚道強度高於母材。

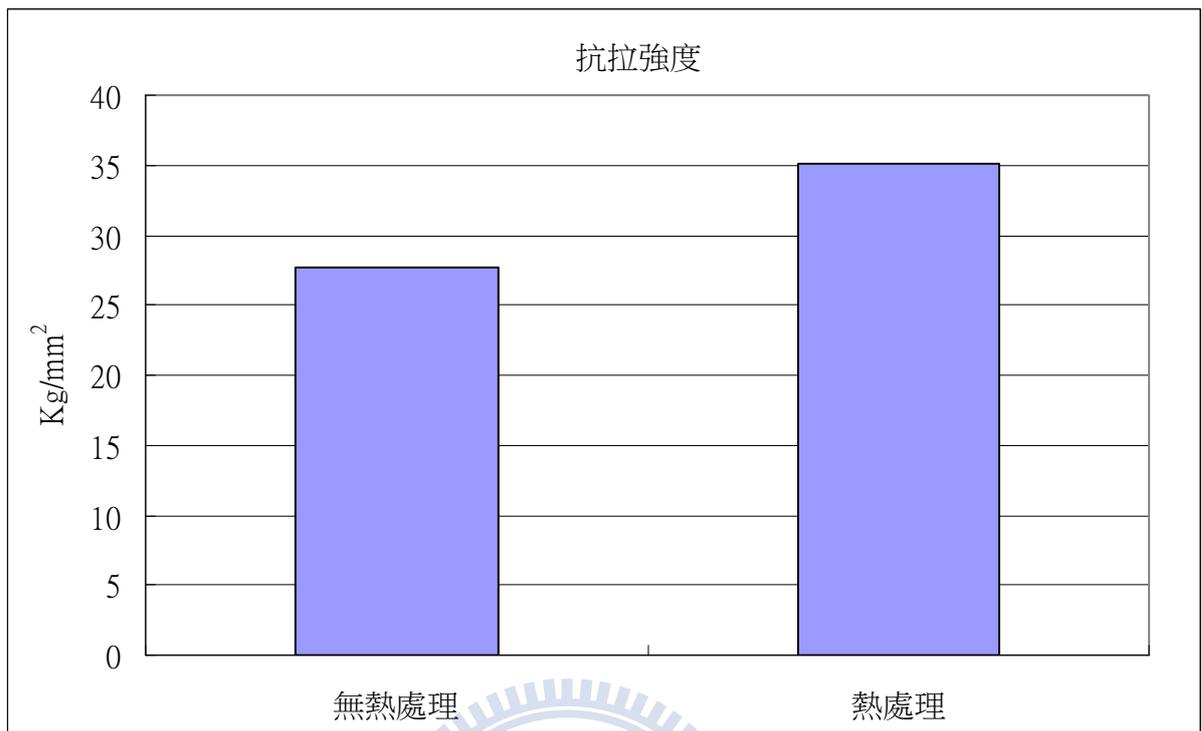


圖 4-27 無填料銲件在有/無熱處理後之抗拉強度

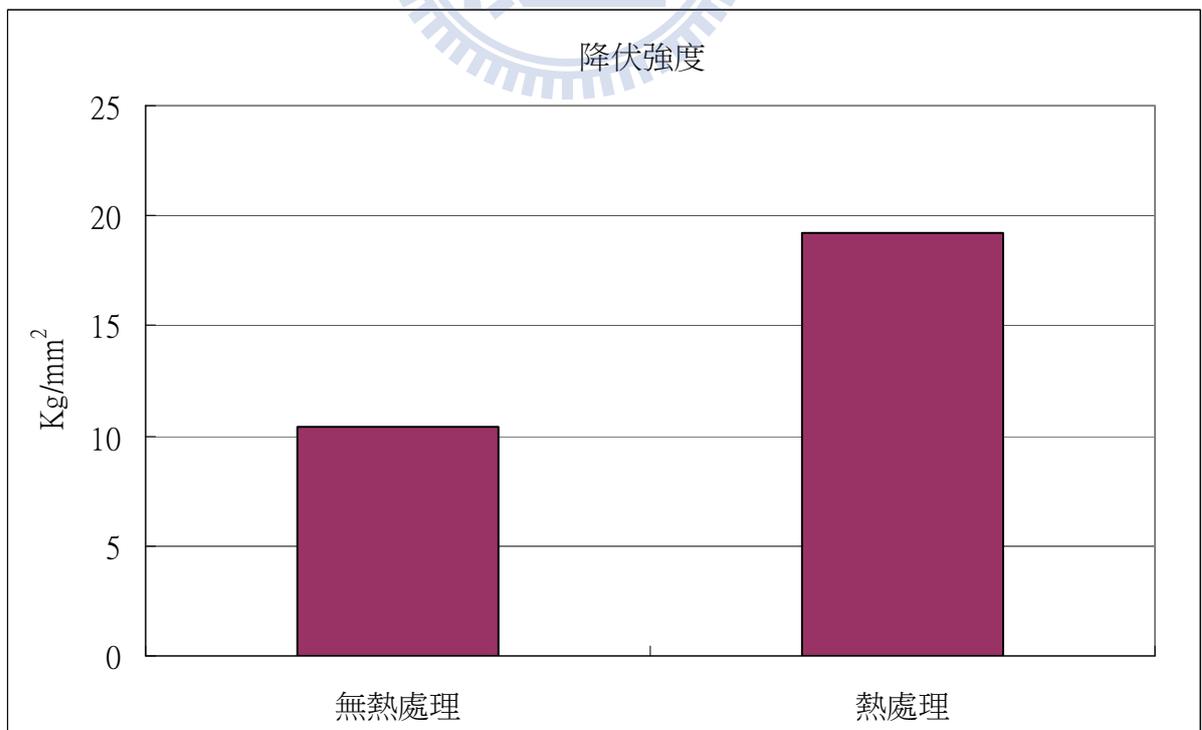


圖 4-28 無填料銲件在有/無熱處理後之降伏強度



圖 4-29 無填料銲件之銲後熱處理拉伸試片結果



圖 4-30 無填料銲件之銲後無熱處理拉伸試片結果

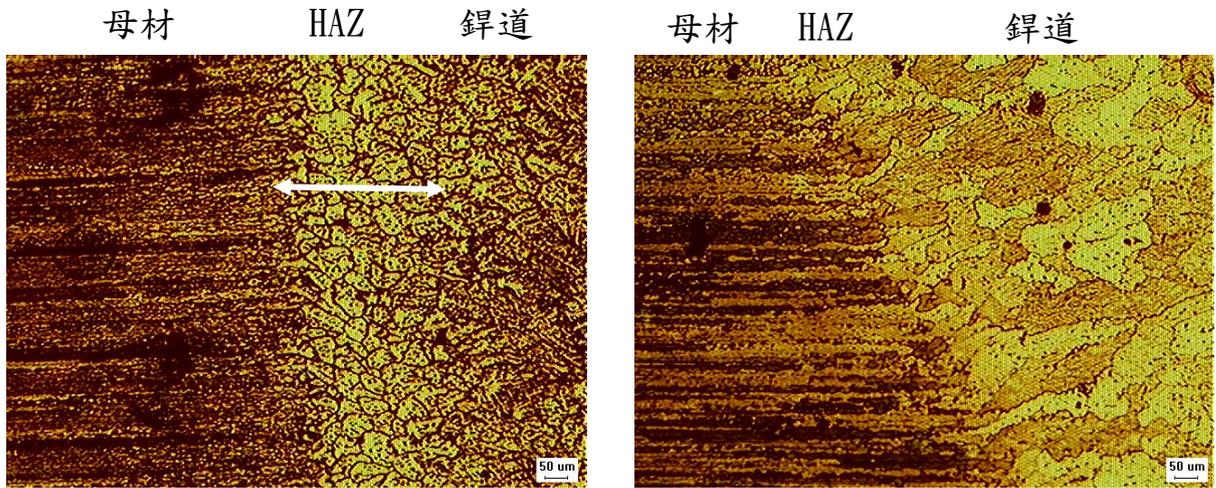
## 4.7 金相組織分析

### 4.7.1 有填料鉚件在鉚道與熱影響區之金相組織

圖 4-31 為無/有鉚後熱處理之有填料金相狀況，當鉚接過程中，鋁合金受到高溫電弧熱而熔化，待冷卻後形成鉚道。在鉚道金屬融化-凝固之原理類似鑄造過程，故其金相組織亦類似鑄造組織。

圖 4-32 為無/有鉚後熱處理之有填料鉚道金相圖，鉚道在無鉚後熱處理呈現為等軸樹枝晶結構，另鉚道在經過鉚後 T6 熱處理後，在經過固溶處理製程，故其金相組織可發現無明顯樹枝狀組織，且可發現偏析物存在於晶粒或晶界。

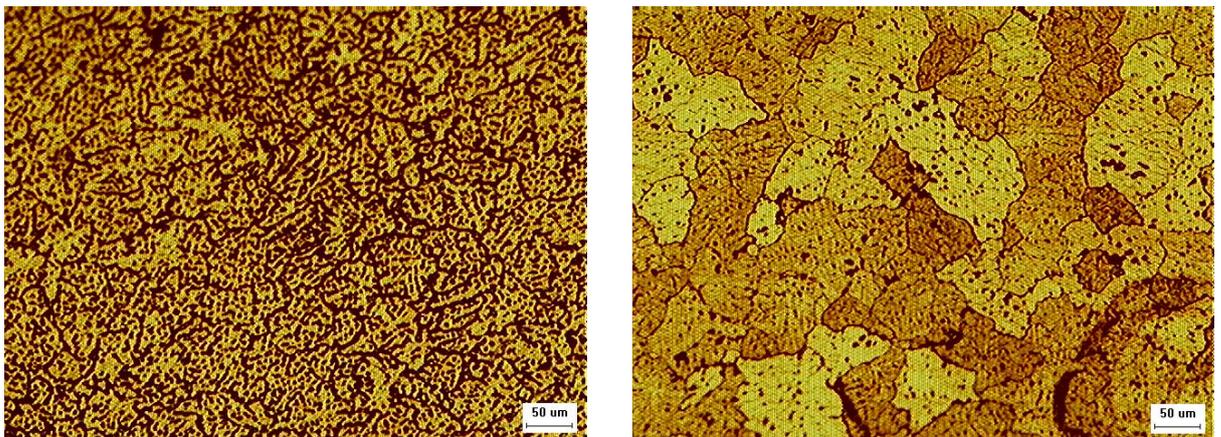
圖 4-33 為無/有鉚後熱處理之有填料鉚件 HAZ 與鉚道交界處金相圖，觀察圖中該區域之金相組織可發現在未經鉚後熱處理之晶粒中，越往鉚道中心晶粒越粗大，經過鉚後 T6 熱處理之熱影響區晶粒也逐漸由小晶粒變為較粗大之晶粒，但有/無熱處理之差異在未經熱處理之鉚件，可發現熱影響區與柱狀晶間存在較為明顯之熔融線，但在經過鉚後 T6 熱處理之熱影響區晶粒，因固溶處理擴散作用，使得熱影響區與柱狀晶間熔融線被消除，變得鉚道與母材交界逐漸模糊。



(a) 銲後未熱處理

(b) 銲後熱處理(T6)

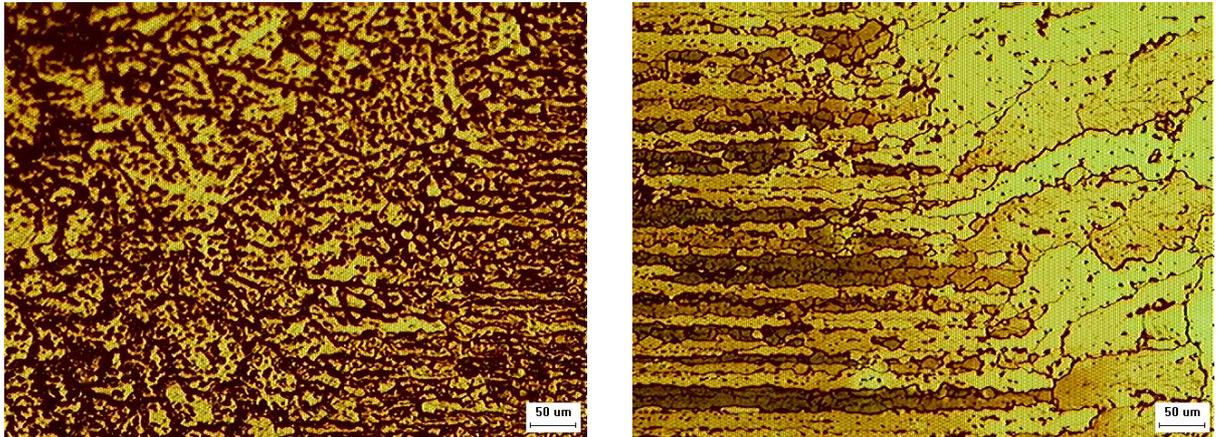
圖 4-31 銲後熱處理之有填料金相狀況



(a) 銲後未熱處理

(b) 銲後熱處理(T6)

圖 4-32 銲後熱處理之有填料銲道金相組織



(a) 鐸後未熱處理

(b) 鐸後熱處理(T6)

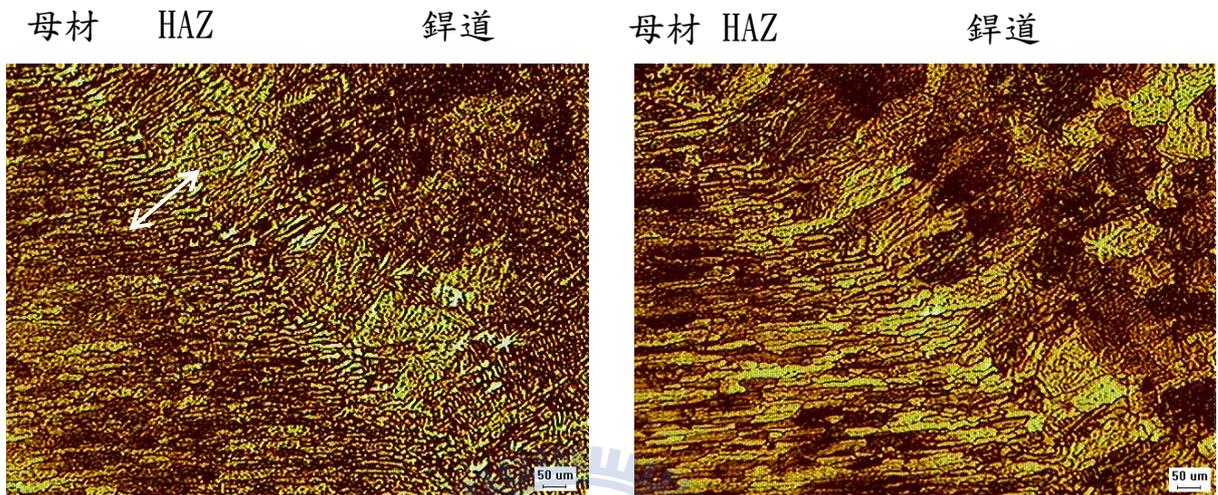
圖 4-33 鐸後熱處理之有填料鐸件 HAZ 與鐸道交界處金相組織

#### 4.7.2 無填料鐸件在鐸道及熱影響區之金相組織

圖 4-34 及圖 4-35 為無/有鐸後熱處理之無填料金相狀況及鐸道金相，鐸後未經熱處理之無填料鐸道金相仍呈現為等軸樹枝晶結構，因無添加鐸條的情況，所以影響鐸道組織的因素在於鐸接速率，當施鐸時間越短時，鐸件熱輸入量越少，因此無填料鐸道晶粒成長程度及尺寸均較有填料者小，令鐸件經過 T6 熱處理後，仍因經過固溶處理，故其金相組織也可發現無明顯樹枝狀組織，且可發現偏析物存在於晶粒或晶界，但析出物的數量較有填料者低。

圖 4-36 為無/有鐸後熱處理之無填料鐸件 HAZ 與鐸道交界處金相圖，在比較圖 4-34(a)與圖 4-31(a)後發現無填料鐸件熱影響區之寬度(約  $80 \mu\text{m}$ )較有填料鐸件者( $150 \mu\text{m}$ )窄，主要為鐸接時輸入之熱量差異。無填料鐸件

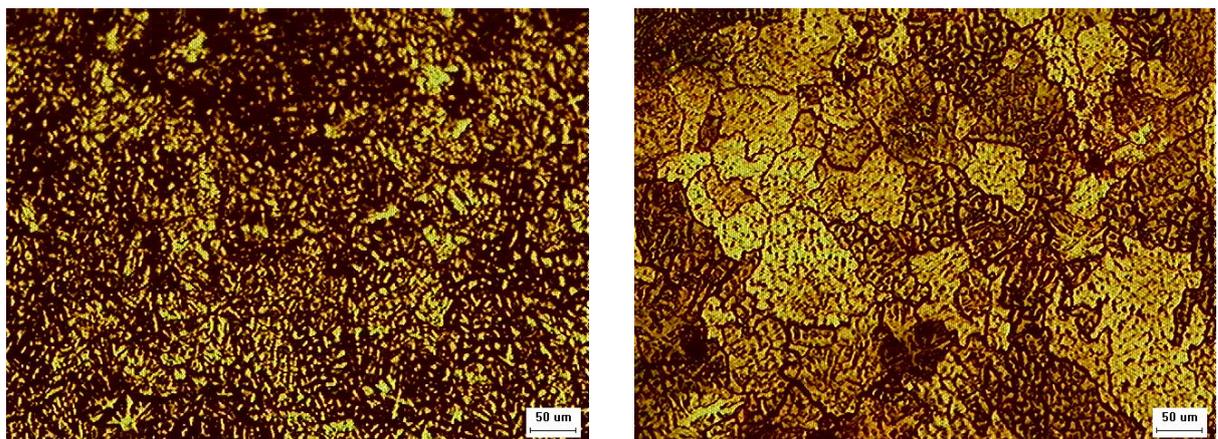
經 T6 熱處理後，熱影響區晶粒同樣受固溶處理擴散作用後，使得鐳道與母材交界逐漸模糊。



(a) 鐳後未熱處理

(b) 鐳後熱處理(T6)

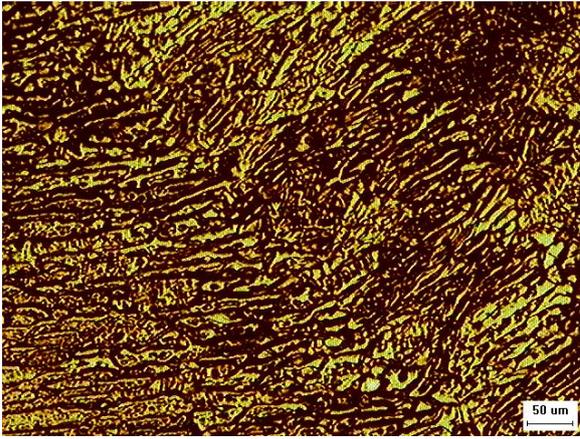
圖 4-34 鐳後熱處理之無填料金相狀況



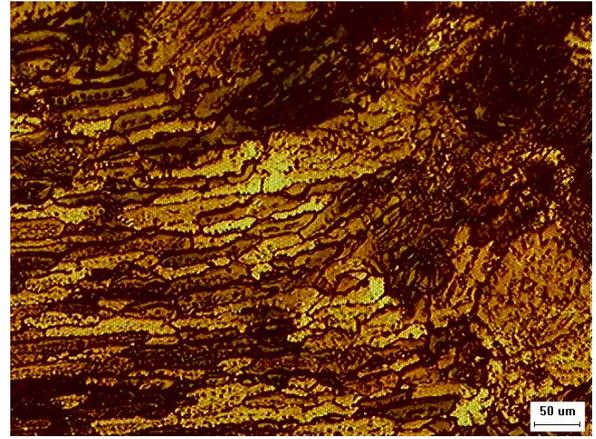
(a) 鐳後未熱處理

(b) 鐳後熱處理(T6)

圖 4-35 鐳後熱處理之無填料鐳道金相組織



(a) 銲後未熱處理



(b) 銲後熱處理(T6)

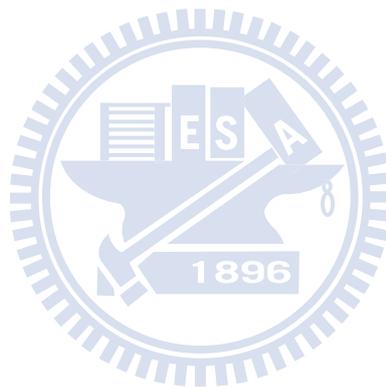
圖 4-36 銲後熱處理之無填料銲件 HAZ 與銲道交界處金相組織

#### 4.8 討論

綜合上述的實驗結果，針對利用 7075-T6 鋁合金進行微型儲氫氣瓶的製作及銲接後各項研究與討論，共歸納下列幾項結果：

- 1、 填料銲接之銲接參數為當試片與電極間隙為 2.0mm、銲接電流為 160 A、銲槍走速為 230 mm/min及保護氣體流量為 15 l/min 進行銲接，結果選定為上蓋施銲之氣瓶經水壓試驗後，可承受  $20\text{Kg}/\text{cm}^2$  之耐水壓，符合設計之  $10\text{Kg}/\text{cm}^2$  值，且氣瓶無變形及銲道無洩漏之狀況。
- 2、 當銲件使用 ER5356 填料銲後，在有經過銲後 T6 熱處理後，銲道之硬度相對於無銲後熱處理之銲件高約 43%，而母材也相對高 22%，明顯提升銲件之強度。

- 3、 在金相組織方面，無論是無填料或有填料鉚件經鉚後 T6 熱處理後，均可因固溶處理擴散作用，使得熱影響區與柱狀晶間熔融線被消除，變得鉚道與母材交界逐漸模糊，相對的熱影響區域面積減少，有利於提升鉚件之強度。
- 4、 因鉚接過程輸入之熱量不同，導致鉚道之晶粒組織大小不同，因而影響鉚件之強度。又因無填料鉚件所輸入的熱量低於有填料之鉚件，所以無填料鉚件熱影響區也相對較有填料鉚件小。



## 第五章 結論與建議

本研究係針對儲氫氣瓶之設計進行研究探討，並經由實驗過程之討論，最後整理得到之結論由下所列：

- 1、本次研究採用 7075 鋁合金為儲氫氣瓶之材料進行銲接，不同於一般採用不銹鋼為材料之氣瓶，有效降低重量約 45%，達到可攜式之目的。
- 2、利用最佳銲接參數進行銲接，除了有效達到銲接強度，同時也防止了銲接熱裂及氣孔之產生。
- 3、本次研究針對在有填料及無填料的銲接製程中，從銲道微硬度值、抗拉及降伏強度都可明顯看出，在有填料的狀態下，其銲接強度均高過於無填料銲接，故添加銲料可有效提升銲道之機械性質。
- 4、銲件經過固溶+人工時效處理後，因熱影響區與柱狀晶間熔融線被消除，使得銲道與母材交界逐漸模糊，進而提升熱影響區之機械強度。

本研究提出下列建議，作為後續研究之參考：

- 1、可進行更高壓力之水壓試驗，用以確認最早破裂之位置，若為銲道，則可再進行銲道填料種類及銲道熱處理之探討，用以提升銲道之強度，同時再提升整個氣瓶之抗壓程度。
- 2、因氣瓶進行氫之儲存，後續針對銲道及材料本身之耐侵蝕性，可進行熱處理以提升鋁合金銲道之耐蝕性或利用不同材質之鍍層，用以提高氣瓶之耐蝕程度，增加使用壽命及安全性。

## 參考文獻

1. 鄭慶民, "熱處理型鋁合金銲接性之研究", 國立交通大學機械工程研究所博士論文, 民國 94 年。
2. J.E. Hatch(1984). Aluminum : Properties and Physical Metallurgy. Metals Park Ohio : American Society for Metals.
3. 劉燕妮, "7075 鋁合金之熱處理及其顯微破壞結構", 國立台灣大學材料科學與工程學研究所碩士論文, 民國 85 年。
4. 林仁治, "混合型之助銲劑對 1020 低碳鋼銲道穿深能力之研究", 國立交通大學工學院精密與自動化工程學程碩士論文, 民國 93 年。
5. 陳石法、蔡希杰等編, "機械材料", 高立, 民國 79 年。
6. Kaiser(1984). Welding Kaiser Aluminum. 1<sup>st</sup> Ed. Oakland, Calif : Kaiser Aluminum & Chemical Scales, Inc.
7. C. E. Cross, W. T. Tack, L. W. Loechel, and L. S. Kramer(1990). Aluminum Weldability and Hot Tearing Theory. Weldability of Materials, AMS. Materials, Park, Ohio.
8. 辛培舜, "淺談鋁及鋁合金相關問題", 機械月刊, 9, 民國 71 年。
9. W. I. Pumphery and J. V. Lyons(1984). Cracking during the Casting and Welding of the MoreCommon Binary Aluminum Alloys of Commerical Quality. J. Inst. Metals, Vol.74
10. I. D. Dowd(1952). Weld Cracking of Aluminum Alloys. Welding Journal, Vol.31 No.10
11. Maurice, L. S. (1992). Behavior and design of aluminum structures. New York: McGraw-Hill, Inc.
12. Reed-Hill, R.E.(1992). Physical metallurgy principles. 3th Ed. New York: PWSKENT Publishing Company。
13. 辛培舜, "淺談鋁及鋁合金相關問題," 機械月刊第八卷第九期, 民國 71 年 9 月。
14. 姜志華編著, "鋁合金電弧銲接及硬軟銲應用技術", 台北徐氏基金會, 民國 84 年。

15. Mazzolani, F. M. (1985). Aluminum alloy structures. Boston: Pitman Publishing Inc.
16. 呂璞石、黃振賢， “金屬材料，” 文京圖書有限公司，民國七十八年九月。
17. 陳俊凱，” 鋁合金 6061 與 7075 之鐸接熱裂研究”，國立台灣師範大學工業教育研究所碩士論文，民國 91 年。
18. 吳木霖撰，”鋁合金 A356 與 6061 應用惰氣鎢極電弧鐸接之研究”，國立台灣師範大學工業教育研究所碩士論文，民 81 年 6 月，pp.4-11。
19. 黃錦鐘 譯， “鋁合金的鐸接，” 機械月刊第二十二卷第七期，1996 年 7-10 月。
20. 陳憲雄， “鋁合金資料集，” 啟學出版社，民國七十八年六月。
21. 王文樑，”鋁合金之鐸接”，金工，21 卷 2 期，民 76 年 3 月，pp.61~75。
22. 朱健松、劉育廷，”鐸接參數對氣體金屬電弧鐸接特性之研究”，農業機械學刊第十四卷第三期，2006 年 9 月。
23. 黃展鴻，” 摩擦攪拌 7075 鋁合金組織特性及拉伸性質之後熱處理效應探討”，國立成功大學材料科學及工程學系碩士論文，民國 96 年。
24. Z. W. Huang, M. H. Loretto, R. E. Smallman and J. White(1994). The Mechanism of Nucleation and Precipitation in 7075-0.7 Li Alloy. Acta. Metall. Mater. Vol.42 No.2。
25. ASM(1985). Metals Handbook. 9<sup>th</sup> Ed. Vol.14, heat treatment of aluminum alloys。
26. Albert, D. (1993). Aluminum alloys in arc welded construction. Welding in the world, Vol.32。
27. ASM(1985). Metals Handbook. 9<sup>th</sup> Ed. Vol.6, Welding, Brazing and Soldering。
28. Cary, H. B. (1994). Modern welding technology. 3<sup>rd</sup> Ed. Englewood Cliff, New Jersey, Prentice-Hall Inc.
29. 劉信男編著，”Tig 鐸接實務與電阻點鐸技術”，全華，民國 80 年。
30. J. A. Pender(1986). Welding. 3<sup>rd</sup> Ed. New York: McGraw-Hill Ryerson Ltd.
31. 楊景元撰，”冷加工對鋁合金 1050 鐸件機械性質影響之研究”，國立台灣師範大學工業教育研究所碩士論文，88 年 6 月。

32. 中華民國銲接協會，"銲接工程管理基礎課程"，民國 86 年。
33. Kou, Sindo(1987). Welding metallurgy. NewYork : John Wiley & Sons.
34. ASM(1993). Metals Handbook. Vol.6 , Welding , Brazing and Soldering 。
35. 王文樑，"鋁合金之銲接"，金工第 21 卷第 2 期，民 76 年 3 月。
36. 黃錦鐘，"鋁合金的銲接(四)~銲接缺陷種類及對策"，機械月刊，第 22 卷第 10 期，1996 年 10 月。
37. J. J. Pepe and W. F. Savage(1970). The Weld Heat-Affected Zone of the 18Ni Maraging Steels. Welding Journal, Vol.49 No.12
38. J. R. Davis(1993). Aluminum and aluminum Alloys-ASM Specialty Handbook. ASM International.
39. H. T. Kim, S. W. Nam and S. H. Hwang(1996). Study on the solidification cracking behaviour of high strength aluminum alloy welds-effect of alloying elements and solidification behaviours. J. Mater. Sci., 31,3, Chapman & Hall Ltd.
40. 董基良，銲接學，三民書局股份有限公司，台北市，民國七十七年 8 月。
41. S.M. Gurevich and V.N. Zamkov, "Welding titanium with a nonconsumable electrode using fluxes, Avt. Svarka, 1966, 8(12).
42. 萬榮富，" 應力分析與壓力容器常用公式之比較與探討"，行政院勞工委員會勞工檢查處，系統主題報導。
43. 王振欽，" 銲接學"，登文書局，民國 76 年 9 月
44. 陳皇鈞譯，"材料工程與科學"，台北，曉園，民國 75 年。
45. 楊智綱，" 高強度航空用 7000 系鋁合金機械性質、抗應力腐蝕破壞性及銲接熱影響區特性之研究"，國立中央大學機械工程研究所博士論文，民國 90 年。
46. W. A. Baselack, J. C. Lippold and W. F. Savage(1979). Unmixed Zone Formation in Austenitic Stainless Steel Weldments. Welding Journal, Vol.58
47. 周長彬、蔡丕椿、郭央謙，" 銲接學"，台北市：全華科技圖書股份

48. 曾光宏、吳春森、王本智，” 活性助銲劑對氬銲銲道成形之影響” ，銲接與切割，2002。
49. 氬銲原理簡介，和崧科技股份有限公司，2008。
50. Brumbaugh, J.E. Welders guide 2nd Ed. New York: Theodore audel & Co.
51. 陳志鵬編，” 熔接學，” 全華科技圖書股份有限公司，民國 85 年 6 月。
52. 詹曉苓撰，” 應用田口方法於汽車空氣濾清器製程不良率之改善—以信通交通器材為例” ，華梵大學工業管理學系碩士論文，民國 89 年。
53. 蘇朝墩，品質工程，三民書局，台北縣，民國 91 年。
54. 陳耀茂(1998)，「田口實驗計劃法」，滄海書局。
55. Phadke, M. S. (1989), Quality engineering using robust design, AT&T Laboratories。
56. 陳明佑，” 利用模糊目標規劃法求解田口式多品質特性最佳化問題” ，國立成功大學工業管理研究所碩士論文，民國 91 年。
57. 洪偉仁，” 鋁合金銲接特性與惰性氣體遮護電弧銲接技術” ，技術與訓練，3，民國 87 年。
58. 黃錦鐘譯，” 鋁合金的銲接(五)-銲接變形、銲接裂縫及氣孔” ，機械月刊，22(12)，民國 85 年。
59. 曾光宏、吳春森、王本智，” 活性助銲劑對氬銲銲道成形之影響” ，銲接與切割，2002，12(6)。
60. Borland J. C. (1960). Generalized Theory of super-Solidus Cracking in Welds. British Welding Journal, Vol. 7, No. 8
61. Easterling K. E. (1992). Introduction to the physical metallurgy of welding. Oxford, Boston, Butterworth Heinemann, 2<sup>nd</sup> Ed.
62. 曾光宏，” 沃斯田鐵不銹鋼熱裂之形成理論與測試方法” ，焊接與切割，11，民國 90 年。
63. J. H. Dudas, and F. R. Collins (1966). Preventing Weld Cracks in High-Strength Aluminum Alloys. Welding Journal Vol. 45 no. 6

64. 周長彬，” 不銹鋼銲接熱裂產生原因之探討” 機械技術，48，民國 78 年。
65. 朱登雄譯，” 銲接龜裂與其防止對策(2)-高溫龜裂” ，機械月刊，民國 78 年。
66. 林旺恩，” 銲接熱裂探討” 機械月刊，3，民國 83 年。
67. 郭飛虎，” 2024, 2219 及 6061 高強度鋁合金的銲接特性研究” ，銲接與切割，2，民國 85 年。
68. 李哲志，” 高強度 2219 鋁合金之銲接特性研究” ，國立交通大學機械工程研究所碩士論文，民國 78 年。
69. 蔡金峯，” 高強度鋁合金之銲接冶金” ，金工，3，民國 76 年。
70. 吳信達，” DMFC 之性能測試與系統設計” ，明道管理學院材料暨系統工程研究所，民國 95 年 7 月。
71. 蘇艾教授、翁芳柏，” 氫能源與燃料電池” ，元智大學燃料電池中心，民國 96 年。
72. 林怡均，” 儲氫材料特性研究” ，能源報導 2006 年 2 月。
73. 蔡和晉，” 錳元素含量對 AA7003 鋁合金銲件銲後熱處理製程影響之研究” ，國立台灣科技大學機械工程系碩士論文，民國 96 年。
74. 吳信達，” 超輕型質子交換膜燃料電池之研究” ，國立交通大學機械工程系博士論文，民國 98 年。

附錄一、SGS水壓試驗報告



材料及工程實驗室-高雄

試驗報告

報告編號：KK-10-01617X-1  
 頁次：1 OF 1  
 報告日期：99年03月10日

委託單位：國立交通大學  
 樣品名稱：鋁合金氣瓶  
 送驗人員：廖紹延;吳信達  
 收件日期：99年03月08日  
 試驗日期：99年03月08日~99年03月10日  
 試驗儀器：水壓試驗機(校正報告編號:EKCC0417909)  
 備註：以上資料由送驗人員提供(試驗日期除外)

試驗結果：

水壓試驗：

檢驗項目 試件編號	壓力表讀值 kg/cm <sup>2</sup>	試驗結果
鋁合金氣瓶	10	無洩漏
	20	無洩漏

註：1.水壓徐徐加壓至 10kg/cm<sup>2</sup> 保持 1 分鐘後再加壓至 20kg/cm<sup>2</sup> 保持 1 分鐘。  
 2.本試驗報告取代 KK-10-01617X，原試驗報告作廢；報告修改日期 99 年 03 月 30 日。

---- o O o ----

本報告若有提供規範值時,該規範值僅供參考,合格之判定以委託單位實際要求為準.

林志功  
 報告簽署人

影本與正本相符

Unless otherwise stated the results shown in this test report refer only to the sample(s) tested. This test report cannot be reproduced, except in full, without prior written permission of the Company. 除非另有說明，此報告結果僅對測試之樣品負責。本報告未經本公司書面許可，不可部份複製。  
 This Test Report is issued by the Company under its General Conditions of Service printed overleaf or available on request and accessible at [http://www.sgs.com/terms\\_and\\_conditions.htm](http://www.sgs.com/terms_and_conditions.htm). Attention is drawn to the limitation of liability, indemnification and jurisdiction issues defined therein. Any holder of this Test Report is advised that information contained hereon reflects the Company's findings at the time of its intervention only and within the limits of Client's instructions, if any. The Company's sole responsibility is to its Client and this document does not exonerate parties to a transaction from exercising all their rights and obligations under the transaction documents. Any unauthorized alteration, forgery or falsification of the content or appearance of this document is unlawful and offenders may be prosecuted to the fullest extent of the law.

SGS Taiwan Ltd. | No.61, Kai-Fa Road, Nanzih Export Processing Zone, Kaohsiung, Taiwan / 高雄市楠梓加工出口區開發路61號  
 台灣檢驗科技股份有限公司 | t (886-7) 301-2121 | f (886-7) 301-1165 | www.tw.sgs.com

TWA1816939

附錄二、重量、加工法、價格比較

項目	本研究開發	傳統產品	備註
氫氣瓶	鋁合金瓶(直徑3Cm*長12Cm) 銲接後水壓測試 20kg/Cm <sup>2</sup>	不銹鋼瓶(直徑2.1Cm*長20Cm) 可承受耐壓10~15 kg/Cm <sup>2</sup>	SGS 測試報告
氫氣瓶整體成本	850 元台幣 瓶身重量約 100g	約 1500 元台幣 瓶身重量約 150g	

