

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

核電廠反應器材料覆銲後之特性研究

The characteristics of weld overlay on nuclear power plant
materials

計畫編號：NL1050429

受委託機關(構)：國立台灣科技大學

計畫主持人：王朝正 教授

聯絡電話：02-27376441

E-mail address：cjwang@mail.ntust.edu.tw

協同主持人：鄭偉鈞 教授、程金保 教授

研究期程：中華民國 105 年 5 月至 105 年 12 月

研究經費：新臺幣 145 萬元

核研所聯絡人員：陳仲衡

報告日期：105 年 11 月 29 日

核電廠反應器材料覆銲後之特性研究

受委託單位：國立台灣科技大學

研究主持人：王朝正教授

協同主持人：鄭偉鈞教授、程金保教授

研究期程：中華民國 105 年 5 月至 105 年 12 月

研究經費：新臺幣 145 萬元

行政院原子能委員會核能研究所 委託研究

中華民國 105 年 11 月

(本報告內容純係研究者之研究觀點，不代表委託單位之政策或意見)

目 錄

目 錄.....	I
圖目錄.....	III
表目錄.....	VIII
中文摘要.....	IX
Abstract.....	X
壹、計畫緣起與目的.....	1
一、核電廠的關鍵管線所存在之問題.....	5
二、應力腐蝕.....	5
三、覆銲技術.....	7
四、殘留應力之量測.....	10
貳、研究方法與過程.....	15
一、實驗材料.....	15
二、電漿轉移電弧銲(PLASMA TRANSFERRED ARC WELDING, PTAW).....	17
三、惰性氣體鎢極電弧銲(GAS TUNGSTEN ARC WELDING, GTAW).....	18
四、液滲檢查.....	19
五、超音波檢測.....	19
六、金相分析.....	20
七、穿透式電子顯微鏡分析.....	20
八、微硬度檢驗.....	21
九、覆銲溫度模擬與量測.....	21
十、殘留應力模擬與量測.....	21
十一、電化學試驗.....	22
十二、試片命名原則.....	22
十三、分析設備.....	23
參、主要發現與結論.....	25

一、顯微組織分析	30
二、覆鋁工法對覆鋁層影響性	52
三、TEM 分析	55
四、電化學試驗	64
五、微硬度試驗	68
六、鋁接溫度模擬與量測	69
七、殘留應力模擬與量測	79
八、結論	81
肆、參考文獻.....	83
附錄 A.1 PTAW 鋁接參數.....	87
附錄 A.2 GTAW 鋁接參數.....	92
附錄 B.1 液滲檢查結果.....	94
附錄 B.2 超音波檢測於覆鋁件之訊號衰減率與缺陷檢出能力分析	96
附錄 B.3 殘留應力量測校正資料.....	108

圖目錄

圖 1-1	Half-bead weld 覆銲工法。.....	3
圖 1-2	Temper bead weld 覆銲工法。.....	3
圖 1-3	SCC 試片多道銲接示意圖。[32].....	9
圖 1-4	309 不銹鋼出水管進行覆銲技術。[33].....	9
圖 1-5	覆銲示意圖與工件外觀。[34].....	10
圖 1-6	銲接過程之溫度與應力變化。[35].....	11
圖 1-7	銲道附近殘留應力分布情形。[35].....	12
圖 1-8	不同傾斜角下測得之 d 值變化。[37].....	13
圖 1-9	覆銲示意圖與應力分析區域。[38].....	14
圖 2-1	實驗甘梯圖。.....	15
圖 2-2	A508 鋼材之三維金相圖。.....	17
圖 2-3	(a) PTAW 機台、(b) RMS 送線機之外觀照。.....	18
圖 2-4	自動 GTAW 機台及送線機之外觀照。.....	18
圖 2-5	E-59A(清潔劑)、D-70(顯像劑)、VP-30(色比式滲透液)之外 觀照。.....	19
圖 3-1	(a) 單層、(b) 雙層、(c) 參層覆銲層之顯微結構示意圖。.....	25
圖 3-2	(a) G-S-1、(b) G-S-2、(c) P-S-7 及(d) P-S-8 之覆銲試片的巨 觀金相圖。.....	26
圖 3-3	(a) G-U-1、(b) G-U-2、(c) P-U-6 及(d) P-U-8 之覆銲試片的 巨觀金相圖。.....	27
圖 3-4	(a) G-D-1、(b) G-D-2、(c) P-D-1 及(d) P-D-3 之覆銲試片的 巨觀金相圖。.....	28
圖 3-5	(a) G-T-1、(b) G-T-2 及(c) P-T-1 之覆銲試片的巨觀金相圖。	29
圖 3-6	(a) 費德曼組織(WR)、(b) 晶粒粗化組織(CR)、(c) 晶粒細 化組織(FR)及(d) 臨界熱處理溫度組織(IR)之金相圖。.....	31
圖 3-7	G-S-1 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相圖。	32

圖 3-8	G-U-1-1u 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相。	32
圖 3-9	G-U-1-1u&2u 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相圖。	33
圖 3-10	G-U-1-4u 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相圖。	33
圖 3-11	G-D-1-1u 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相圖。	34
圖 3-12	G-D-1-1u&2u 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相圖。	34
圖 3-13	P-S-7 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相。	35
圖 3-14	P-U-6-1u 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相。	36
圖 3-15	P-D-1-1u 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相。	36
圖 3-16	P-D-1-1u&2u 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相圖。	37
圖 3-17	P-D-1-5u 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相。	38
圖 3-18	P-U-6-3u 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相。	39
圖 3-19	P-T-1-1u 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相圖。	39
圖 3-20	P-T-1-1u&2u 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相圖。	40
圖 3-21	P-T-1-7u 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相圖。	40
圖 3-22	G-D-2 之(a) G-D-2-1d 與 G-D-2-1u 介面、(b) G-D-2-1d 鍍冠、(c) G-D-2-1d 與 G-D-2-2u 介面、(d) G-D-2-1u 與 A508 介面，以及(e) G-D-2-1u 與 G-D-2-2u 介面的區域金相圖。	42

圖 3-23	P-D-1 之(a) P-D-1-1d 與 P-D-1-1u 介面、(b) P-D-1-1d 鉚冠、(c) P-D-1-1d 與 P-D-1-2d 介面、(d) P-D-1-1u 與 A508 介面，以及(e) P-D-1-1u 與 P-D-1-2u 介面的區域金相圖。.....	43
圖 3-24	(a)(b)(c)(d) P-U-6-2u-Pc 鉚冠之 SEI 影像。.....	45
圖 3-25	(a)(b)(c)(d) P-U-6-2u-Pc 鉚根之 SEI 影像。.....	45
圖 3-26	(a)(b)(c)(d) G-U-1-2u-Pc 鉚冠之 SEI 影像。.....	46
圖 3-27	EDS 線掃描成分分析。(圖 3-25).....	46
圖 3-28	G-S-1-Vc 試片進行 EDS 沿鉚冠中心線逐點成分分析。..	48
圖 3-29	P-S-8-Vc 試片進行 EDS 沿鉚冠中心線逐點成分分析。..	48
圖 3-30	G-S-1-Vc 試片(a) 與 A508 介面、(b) 距離熔接面+0.4 mm 位置、(c) 距離熔接面+0.8 mm 位置、(d) 距離熔接面+1.2 mm 位置、(e) 距離熔接面+1.6 mm 位置，以及(f) 距離熔接面+2.0 mm 位置之 SEI 影像。.....	49
圖 3-31	P-S-8-Vc 試片(a) 與 A508 介面、(b) 距離熔接面+0.2 mm 位置、(c) 距離熔接面+0.6mm 位置、(d) 距離熔接面+1.0 mm 位置、(e) 距離熔接面+1.4 mm 位置，以及(f) 距離熔接面+1.8 mm 位置之 SEI 影像。.....	49
圖 3-32	鉚道搭接位置之 Pc 截面的 SEI 影像。.....	50
圖 3-33	微裂縫於鉚道搭接位置之 Pc 截面的 SEI 影像。.....	51
圖 3-34	(a)(b) G-S-1、(c)(d) P-S-8 之鉚冠表面 SEI 影像。.....	51
圖 3-35	(a)(b) G-U-1-1u-V、(c)(d) P-U-6-1u-Vc 之根部(Root)與熔接介面(Weld Interface)處的金相圖。.....	54
圖 3-36	預熱覆鉚之工件示意圖。(其中藍色箭頭為預熱覆鉚、紅色箭頭為覆鉚層施作位置).....	54
圖 3-37	取樣位置 P-U-6-1u-Pc 鉚冠處的 TEM 分析，(a)及(d) 沃斯田體晶粒明視野影像、(b)及(f) 為針對圖(a)及圖(e)基地相以沃斯田體晶帶軸[001]方向之擇區繞射圖、(c) 沃斯田體晶粒明視野影像。.....	57
圖 3-38	取樣位置 P-U-6-2u-Pc 鉚冠處的明視野影像。.....	58
圖 3-39	取樣位置 P-U-6-3u-Pc 鉚冠處的明視野影像。.....	58

圖 3-40	P-U-6-1u-Pc 鐳冠試片之明視野，(a)及(b) 高解析明視野影像，EDS 線掃描結果 (d) Fe、(e) Cr、(f) C、(g) Ni、(h) Nb。	59
圖 3-41	P-U-6-1u-Pc 鐳冠試片之(a)及(b) 明視野影像，(c)與(f)為析出物的明視野影像、(d)及(g) 則是暗視野影像，(e)與(h) 透過沃斯田體晶帶軸[001]方向及[011]方向之擇區繞射圖。	60
圖 3-42	EDS 成分分析結果。	61
圖 3-43	取樣位置 G-U-1-1u-Pc 鐳冠處的 TEM 分析結果。	62
圖 3-44	取樣位置 G-U-1-3u-Pc 鐳冠處的 TEM 分析結果。	63
圖 3-45	P-S-8-Pc 與 P-T-1-1u-Pc 於 3.5 % NaCl _(aq) 環境下之電化學曲線圖。	65
圖 3-46	經電化學實驗後，(a)(b) P-S-8-Pc 鐳冠、(c)(d) P-S-8-Pc 熱影響區、(e)(f) P-T-1-1u-Pc 鐳冠，以及(g)(h) P-T-1-1u-Pc 熱影響區之 SEI 影像。	65
圖 3-47	G-S-1-Pc 與 G-T-1-1u-Pc 於 3.5 % NaCl _(aq) 環境下之電化學曲線圖。	66
圖 3-48	經電化學實驗後，(a)(b) G-S-1-Pc 鐳冠、(c)(d) G-S-1-Pc 鐳根、(e)(f) G-T-1-1u-Pc 鐳冠，以及(g)(h) G-T-1-1u-Pc 鐳根之 SEI 影像。	66
圖 3-49	第 1 層第 1 道次鐳道上/下方經不同 PTAW 覆鐳施作後之微硬度分布值。	68
圖 3-50	第 1 層第 1 道次鐳道上/下方經不同 GTAW 覆鐳施作後之微硬度分布值。	68
圖 3-51	GTAW 熱電偶埋設示意圖。	69
圖 3-52	GTAW 實際鐳接實驗熱電偶位置。	70
圖 3-53	GTAW 鐳道與熱電偶編號示意圖。	70
圖 3-54	GTAW 溫度量測實驗結果圖。	71
圖 3-55	PTAW 熱電偶埋設示意圖。	72
圖 3-56	PTAW 實際鐳接實驗熱電偶位置。	73
圖 3-57	PTAW 溫度量測結果。	73

圖 3-58	GTAW 量測點溫度模擬。	75
圖 3-59	GTAW 量測點實驗溫度。	75
圖 3-60	GTAW 量測點模擬與實驗比較，距離表面(a) 2 mm、(b) 4 mm。	76
圖 3-61	PTAW 量測點溫度模擬。	77
圖 3-62	PTAW 量測點實驗溫度。	77
圖 3-63	PTAW 量測點模擬與實驗溫度比較，距離鐸道中心(a) 7 mm、(b) 9 mm、(c) 11 mm。	78
圖 3-64	表面殘留應力。	80
圖 3-65	鐸道下方殘留應力之(a) 第一主應力、(b) X、Y、Z 分量應力分佈值。	80

表目錄

表 2-1	ASTM A508 之化學成分表。	16
表 2-2	Inconel 52M 之化學成分表。	16
表 3-1	EDS 成分分析 (wt. %)。(圖 3-24 及圖 3-26)	44
表 3-3	EDS 成分分析 (wt. %)。(圖 3-34)	51
表 3-4	EDS 成分分析 (wt. %)。(圖 3-46 及圖 3-48)	67
表 3-5	Z 方向殘留應力值。(MPa)	79

中文摘要

本計畫將以鎳基 52M 合金為鍍料，覆鍍於核電廠常用組件之 A508 低合金鋼上，透過施予不同之覆鍍參數，建置覆鍍工法用於維修核能鍍接組件分析的卓越研究團隊。依實驗流程，本計畫分為 3 大部分。覆鍍件經由非破壞檢驗後，分別藉由微觀組織觀察、耐腐蝕性能評估、以及殘留應力量測與模擬；探討覆鍍處理在不同之預熱狀態、鍍接電流、以及覆鍍層數等參數調控下，底材之顯微結構、殘留應力變化、抑制應力腐蝕裂紋的能力。進而將覆鍍參數與覆鍍層結構及防護性質整合，以確實獲得製程參數對核能電廠組件覆鍍技術的影響。預期在整期計畫執行後，能縮短我國與歐美國家在覆鍍技術應用上的研究落差。

關鍵字：覆鍍、殘留應力、應力腐蝕、A508、鎳基 52M 合金。

Abstract

This proposal presents residual stress analyses for weld overlay using alloy 52M on A508 steel as assembling of pressurized water reactor (PWR) or boiling water reactor (BWR). The effect of pre-heat treatment, welding current, and number of layers on microstructure, phase transformation, corrosion resistance and residual stress will be fully studied. The correlation among the weld overlay processing parameters, microstructure of substrate material, redistribution of residual stress, and the ability of inhibiting residual stress induced corrosion cracking (SCC) will be explored thoroughly. Upon the completion of this project, the application on weld overlay technology of SCC prevention will be studied widely. At the same time, the weld overlay research and detection gap between Taiwan and Europe/USA academia will be shortened after the execution of this project.

Keywords: Weld overlay, residual stress, SCC, A508, Alloy 52M.

壹、計畫緣起與目的

現行核能電廠中使用反應器之種類，分別有沸水式(Boiling water reactors, BWRs)及壓水式(Pressurized water reactors, PWRs)兩種，在反應器中，依據管件功能及位置會選擇不同成分的鋼料。其中多以熱加工成型沃斯田鐵系不銹鋼(304、304 L、316 L)、鑄造成型沃斯田鐵系不銹鋼(CF8、CF8M)、以及鎳基超合金(Alloy 600、Alloy 690)為主體管線的材料，而壓力槽體出水口則較常使用低合金鋼(SA-508、SA-302 等)。為了能將不同部位的異質金屬互相連接，使用鎳基 82/182 合金做為填料的惰性氣體鎢極電弧銲接處理(Gas tungsten arc welding, GTAW)。然而，隨著反應器的使用時間增長，各國核能電廠陸續於異質銲道處觀察到軸向裂痕及冷卻水洩漏的現象。顯示異質銲接件處於高溫高壓環境中，會受到不等程度之沿晶腐蝕(Intergranular attack)及沿晶應力腐蝕破裂(Intergranular stress corrosion cracking, IGSCC)的破壞而失效，增加核能電廠組件運轉的危險性[1-7]。

應力腐蝕破壞現象是一種環境誘發的腐蝕行為[1, 3, 8]，通常需要同時具備 3 種必要條件才會發生，分別為(1) 環境、(2) 材料、(3) 應力。特定的合金材料在特定的環境中，由於材料本身對於此種環境具有敏感性，因此，材料與環境中的因子持續反應生成腐蝕產物，通常好發於具有形成鈍化膜能力的合金材料。受到拉伸應力作用，鈍化膜缺陷或合金材料微小裂孔的位置可視為裂紋的成核點，持續施以拉伸應力，裂紋將由成核點向垂直拉伸應力方向往材料內部逐漸成長，是謂應力腐蝕裂紋[2, 9-10]。由於應力腐蝕裂痕造成之破壞會經由 3 個階段：裂紋生成、裂紋成長、破斷，

此 3 階段將延續相當長的時間，再加上金屬材料最終破壞強度將遠低於材料本身的降伏應力，檢修及維護人員難以在應力腐蝕裂紋生成初期就發現問題所在，其造成的危害往往超乎預期。在近期的研究中，降低環境誘因[11-13]、降低材料敏感性[3-4, 8, 14-19]、亦或是降低殘留拉伸應力[20-24]，都具有一定程度的抑制應力腐蝕裂紋之效果。其中，又以方便施作、高施工彈性、較低經濟成本的覆銲技術[6-7, 23-28]抑制拉伸應力方法較適合本計畫狀況。

覆銲(Overlay weld)亦可稱為多道次銲(Multi-pass weld)，廣義可定義為「完成一銲接件需要超過一條以上的填料銲接」，狹義上可以特別指「銲接件或工件受損之補銲方法」。銲接處理時，底材受到銲接產生的高溫影響後，底材中的合金元素容易與碳原子反應，生成碳化物 $M_{23}C_6$ 及 M_7C_3 ，或是於晶粒周圍產生合金元素含量較高的析出相，皆會造成底材晶粒形成合金元素匱乏區。另一方面，銲接時提供高熱量，高溫熔融之金屬在冷卻時收縮會於銲接件表面造成殘留拉伸應力，通常會再進行銲後熱處理予以消除。然而，銲後熱處理會伴隨著碳化物析出於晶界或是低熔點金屬化合物皆會對於銲接件機械性質與抗腐蝕能力有一定的影響。覆銲工法則可以同時兼具銲接和銲後熱處理的能力，也可適用於無法進行銲後熱處理的大型銲接件或是銲接管路系統。依據銲道金屬的道次順序，可將壓力容器銲補區分為 2 種模式：Half-bead weld (HBW)及 Temper bead weld (TBW)，如圖 1-1 及圖 1-2 所示[7]。HBW 是先在預填料銲接之開槽表面，覆銲上一層銲材，之後再依層將其銲滿，此種工法有效控制銲材與底材的稀釋率，同時

藉由第 2 覆蓋層銲道之入熱量，對第 1 層銲道施予銲後熱處理，將其熱影響區域內的麻田散鐵組織及變韌鐵組織進行回火處理 [23, 27]。TBW 的工法相較於 HBW 則較為繁瑣，每 1 道次的銲道被設計成能夠對前 1 道次銲道進行銲後熱處理，此種工法較能夠有效地降低銲接處理所產生的殘留拉伸應力以及銲後不良組織比例 [23, 25]。

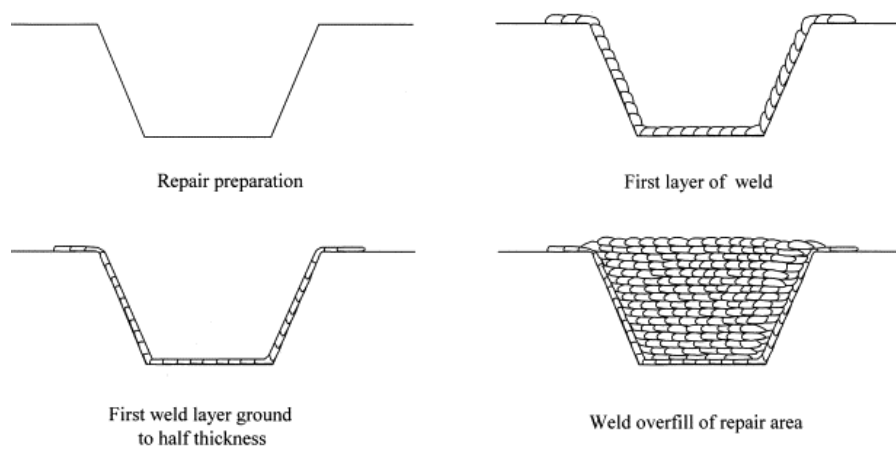


圖 1-1 Half-bead weld 覆銲工法。

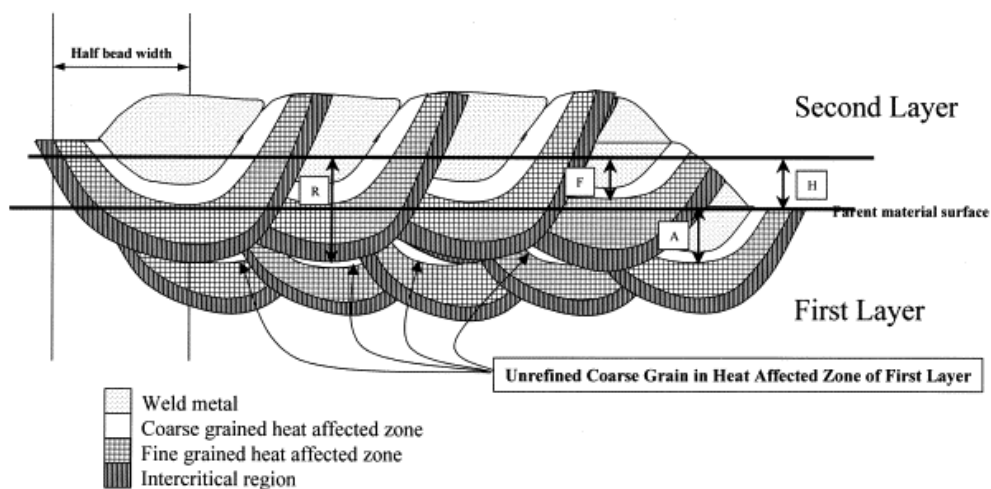


圖 1-2 Temper bead weld 覆銲工法。

經長時間使用之銲接件，會因為接觸腐蝕源而造成銲接件之

合金元素逐漸地消耗，以及造成沿晶腐蝕或是穿晶腐蝕的現象。覆鋁技術應用在修補鋁接件時，可以透過鋁材之化學成分[1, 17-18]，熔融後混入底材中，提升鋁接件的耐蝕能力或是機械性質，或是運用鋁接產生之高溫將底材晶界之析出物重新固溶回晶格中[3, 8, 14-16]。在近期的研究中，覆鋁層將會於鋁接管件內部產生新的壓應力場，壓應力最大值約略等於材料之降伏應力，平衡原先存在的殘留拉伸應力[6, 26]，阻礙應力腐蝕裂紋或是疲勞裂紋繼續成長。然而，在覆鋁道層數與道次對抗腐蝕能力及相變化的影響則是較少被討論，實際之抗腐蝕的反應機制以及顯微結構也是值得更一進步地透徹了解，以掌握關鍵參數的作用。

為了解覆鋁工法用於維修核能鋁接組件的最佳化參數，以提高覆鋁施作的品質及延長設備使用壽命，本研究將著重於覆鋁層施作對於底材所造成的顯微結構變化以及抗腐蝕能力的探討，搭配應力量測與模擬、應力腐蝕裂紋抑制機制探討。根據上述，本計畫擬進行覆鋁專題研究，研究項目為：52M 合金覆鋁層於 A508 低合金鋼，依既有的鋁接參數製作樣品。

本計畫將著重於實驗手法的建立與 52M 合金覆鋁層於 A508 低合金鋼之性質研究，依據核電廠現行鋁接參數以及國外覆鋁技術經驗，進一步檢視顯微組織、殘留應力與耐蝕性質的相關性。

一、核電廠的關鍵管線所存在之問題

核能電廠中反應器是由管件接合經由銲接處理所構建，通常使用低合金鋼、不銹鋼及鎳基超合金等材料，以承受高溫及高壓的運轉環境，材料間的填料則是以鎳基 82/182 合金為主。異質銲道區域(包含銲道及熱影響區)經由長時間的使用後，容易產生孔蝕(pitting)、沿晶腐蝕(intergranular attack)、穿晶應力腐蝕破裂(transgranular stress corrosion cracking)、沿晶應力腐蝕破裂(intergranular stress corrosion cracking)，相關技術報告及研究探討指出，異質銲道的失效多是由維護人員目視觀察到冷卻水滲漏或是表面生成裂紋才被發現，倘若沒有及時且適當的修補，則將會進一步產生輻射外洩或是管線爆裂的危險，對於操作人員與環境安全都將造成嚴重的傷害。其中，又以沿晶應力腐蝕破裂(IGSCC)所造成之異質銲接管線失效的案例為大宗。傳統的維護方式是將損壞的銲道清除，再另行銲填新的銲料覆蓋；或是將銲道兩端的管件裁切掉一部分，再替換新的管件銜接。然而，由於核能電廠的工作環境限制，如：管線內的水可能含有輻射物質、管線內的水無法完全清除、管件尺寸非常大而無法預估組件間的張應力、核電廠組件位於輻射管制區內部、組件間沒有很寬裕之施工區域，因此，必需使用其他具有較高施工彈性且施作期間可以盡量避免操作人員靠近核能組件，覆銲修補法即是一種較符合要求的施工方法。

二、應力腐蝕

沿晶應力腐蝕破裂好發在核能電廠之銲接組件中，是由於運轉的高溫、高壓，引發敏感性材料產生鈍化膜或腐蝕產物，再加

上管線於高壓中承受應力的作用下，使得鈍化膜或腐蝕產物產生微破裂/孔洞，造成腐蝕物質能夠進一步往底材前進，侵蝕更多新鮮的底材。應力腐蝕裂紋形成的原因可以歸納成 4 種：分別是活化路徑溶解 (active-path dissolution)[2-3, 8]、鈍化膜破壞 (film-rupture model)[24]、腐蝕溶質通道 (corrosion tunnel model)[2]、以及氫吸附模式(adsorption model)。

當銲接技術或不當熱處理運用在含合金元素的底材中，易使得合金元素(如鉻、鈦、鈮)形成晶界析出物，造成晶粒中缺乏用以形成保護膜的合金元素。當腐蝕物質與底材表面進行反應時，會由表面能量較高之位置，如晶粒破孔、晶界等位置開始侵蝕，持續沿著匱乏區向底材內部延伸，成為優先腐蝕之路徑，稱為沿晶腐蝕(IGSCC)形貌。假設底材有張應力作用時，鈍化膜有可能會因為應力超過其最大應力值而破裂，這時腐蝕物質便可與底材再一次反應，促使裸露底材產生金屬解離現象，形成新的鈍化膜。這種持續破壞/再生的反應機構，可以視為一種使腐蝕裂紋向底材內部成長的助力。某些特殊環境中，可能誘發高應變的底材在張應力作用下，差排滑移可能造成微孔洞逐漸擴大，受到腐蝕物質侵蝕時，則會加速裂紋成長的速率；另一方面，環境中含有氫原子時，氫原子易附著於裂紋的尖端，其原理就如同氫脆破壞，會使得該裂縫尖端處的鍵結能力下降，造成裂縫成長速度加速。

綜合以上 4 種應力腐蝕裂紋成長原因，可以得知應力腐蝕裂紋成長是由環境因子、材料特性、以及應力作用的交互影響，如能降低其中 1 項影響因素，則能大幅減少應力腐蝕破壞所帶來的潛在危險。對於覆銲技術而言，改變應力作用模式以抑制裂紋成

長速率即是其關鍵技術之所在。然而，至目前為止，相關文獻對於覆銲的顯微組織與抗腐蝕機制之探討則較少，值得以本計畫做進一步的研究與討論。

三、覆銲技術

覆銲技術已經在美國核能電廠中廣泛使用，主要針對核電廠組件在其較常發生洩漏或產生裂縫之異種金屬銲接處，實施覆銲修補加工。由於管路長期暴露在高溫、高壓及輻射的環境下，容易造成異材接合處之銲道產生裂紋，在兼顧成本與防止裂痕擴大的雙重考量，通常會以覆銲方式進行修補，也就是在發生處的外表面上施以一層覆銲層，使其表面形成壓應力以阻止裂痕持續成長。電廠之管路組件均有發生晶間應力腐蝕龜裂之可能，應力腐蝕龜裂為應力與特定環境交互作用下所造成材料破裂現象。在沸水式核電廠中，為了防止沿晶應力腐蝕之裂紋有持續增大進而發生洩漏現象，也經常使用覆銲技術進行現場修補，並累積許多有效防治組件應力腐蝕的成功經驗[29]。美國核管會所發佈之 NUREG-0313 Rev. 2 報告中，證實覆銲技術能有效地阻止沿晶應力腐蝕龜裂現象，並改善管內壁的壓縮殘留應力[30]。

林等人的研究即著眼於此國內沸水式電廠之飼水管嘴異質銲道部位，考量國內電廠實際運轉條件與環境，並且符合法規要求的覆銲設計尺寸，進行核電廠管路覆銲之效果研究及其影響評估[29]。該研究使用 ANSYS 有限元素程式分析結果發現，在施予覆銲後，管路內表壁銲道處之殘留應力為壓應力，表示覆銲對內管壁裂縫有抑制其成長之保護作用，有效防止飼水管嘴異質銲道處之應力腐蝕現象。由分析結果顯示，異材銲道部位不論軸向或周

向應力，於覆銲後皆有壓應力的現象，可以有效抑制不同方向的裂縫成長，證明電廠於飼水管嘴施作覆銲銲接的效應。隨著覆銲層逐層的增加，飼水管嘴內之壓應力亦隨著加劇，因此銲接層之厚度將顯著的影響飼嘴管嘴內應力分佈。

根據相關研究報告，近幾年國外持續以覆銲技術維修沸水式(BWR)及壓水式(PWR)核電廠反應爐冷卻水管路瑕疵，BWR 電廠以覆銲維修劣化異質銲道為主，PWR 電廠以預覆銲防治大口徑管嘴應力腐蝕。核三廠反應爐管嘴材質為碳鋼，安全端材質為不銹鋼，兩者以鎳基合金 Alloy 82/182 材質銲接，屬於相異材質銲接之銲道。依國外壓水式核電廠之運轉經驗顯示，Alloy 82/182 銲道容易發生一次側冷卻水應力腐蝕龜裂(PWSCC)之現象。加拿大 Liburdi Automation Inc.及美國西屋公司，採用鑄造不銹鋼銲接熱裂改善技術、機械應力改善製程技術(Mechanical Stress Improvement Process, MSIP) 與管內雷射覆銲等技術，應用於反應爐管嘴 Alloy82/182 銲道龜裂防治，有一定的成效[31]。

另外，在核電廠中，異質銲接技術廣泛應用在低合金鋼零組件，如反應器壓力槽及蒸汽產生器所連接的不銹鋼管。在這些場合，鎳基合金 Inconel 52 填料常用來降低肥粒鐵系與沃斯田鐵系鋼料之間的熱膨脹係數差異，例如 A508/Alloy 52/316L 的組合。在鎳基合金填料的使用上，最近開發的 Inconel 52M 銲條，由於成份上具有含量較多的 Nb 及額外添加之少量 B、Zr 等元素，不但可以有效降低銲件發生 Ductility-dip cracking 的情況，亦能維持其優異的抗熱裂敏感性，因此 Inconel 52M 銲條應用於本研究之異質金屬銲件特性具有值得深入探討之價值。然而，在銲道附近會形成

一個過渡區，由於擴散效應造成複雜的組織變化與成分差異，特別是在 Alloy 52-A508 的介面，在此區域容易造成應力腐蝕裂痕發生。Chung 等人針對 Alloy 52-A508 設計多道銲接試片，探討其高溫水環境下的應力腐蝕問題，其所使用的試片形狀如圖 1-3 所示 [28, 32]。Lai 等人的研究報告則針對鍋爐的 309 不銹鋼出水管進行覆銲技術，以控制其腐蝕裂痕等問題，其作法如圖 1-4 所示 [33]。Riccardella 的研究報告也利用覆銲技術來修復核電廠中管件與噴嘴之應力腐蝕裂痕問題，並探討其殘留應力，其覆銲示意圖與工件外觀如圖 3-5 [34]。

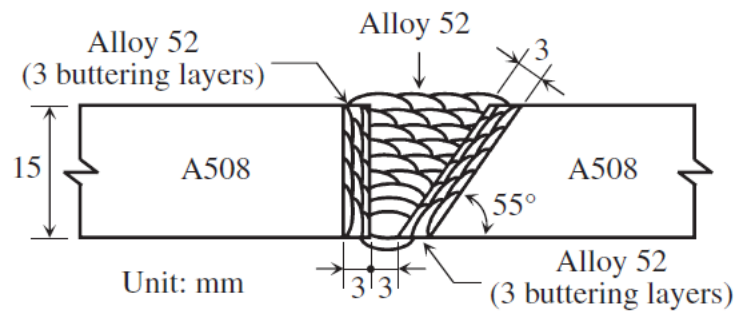


圖 1-3 SCC 試片多道銲接示意圖。 [32]

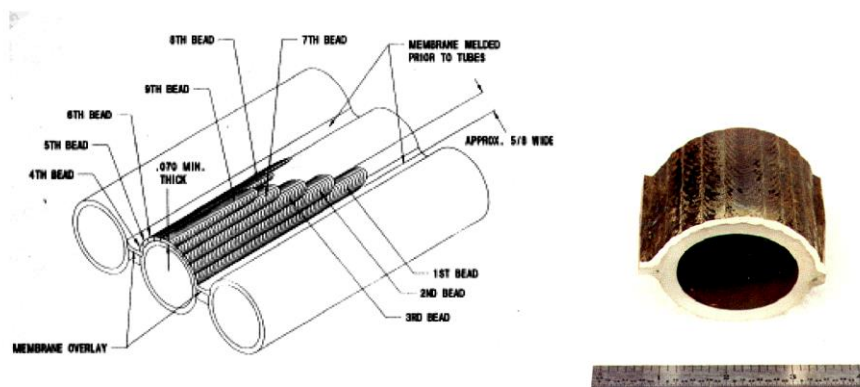


圖 1-4 309 不銹鋼出水管進行覆銲技術。 [33]

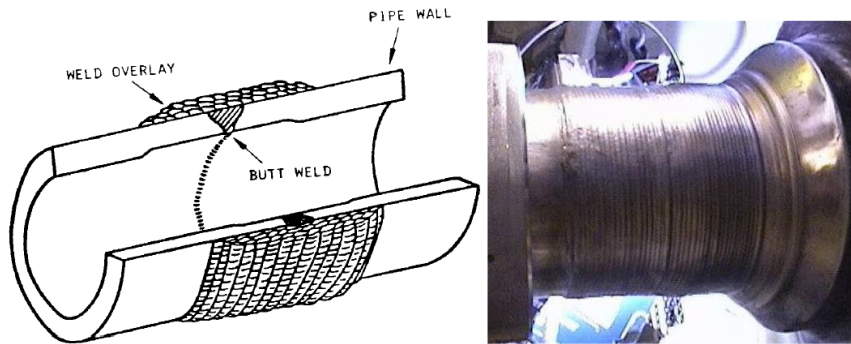


圖 1-5 覆銲示意圖與工件外觀。[34]

四、殘留應力之量測

材料在經過機械加工、切割、銲接、組裝等程序後，會有大量的殘留應力產生，殘留應力容易造成工件之破壞，應力釋放時會造成工件變形，影響精度及品質，且過大的殘留應力甚至導致材料應力腐蝕破壞或應力疲勞破壞等。金屬在進行銲接工作時，銲接部位受到局部之急冷及急熱之交互作用，工件發生不均勻之熱膨脹變形，在高溫部份發生局部塑性變形，且熔融金屬自身收縮，導致銲接部位有殘留應力產生。而殘留應力可能造成銲接缺陷中發生龜裂，並對結構件產生脆性破壞等問題，是從事銲接工作者相當困擾的問題。

銲接殘留應力的形成藉由圖 1-6 說明[35]，當銲接溫度從室溫(位置 A-A)升到最高溫度的熔融區(如位置 B-B)時，靠近銲道附近的材料因受到加熱而膨脹，但受到遠離銲道周圍材料的束縛，因此會在銲道附近產生壓縮應力(compressive stress)。在經過最高溫度以後，溫度開始下降(位置 C-C)，此時靠近銲道溫度附近的材料因受到冷卻而收縮，同樣地也會受到遠離銲道周圍材料的束縛，因此會在銲道附近產生拉伸應力(tensile stress)。當溫度梯度為零時(位置 D-D)，作用於銲件上的熱應力亦會被阻止，而保持在一定

值，此即為銲接殘留應力值。

如圖 1-7 所示為對接銲典型殘留應力的大小與分佈圖[35]。銲道中心為最大縱向殘留應力 σ_m ，一般可達到母材的降伏應力。在銲道中心的殘留應力為拉伸殘留應力，愈接近熱影響區(heat-affect zone)拉伸殘留應力值愈下降，而遠離熱影響區時，這時亦有壓縮殘留應力產生，而當拉伸殘留應力轉變為壓縮殘留應力時的點，正是熱影響區與母材的交接區域。

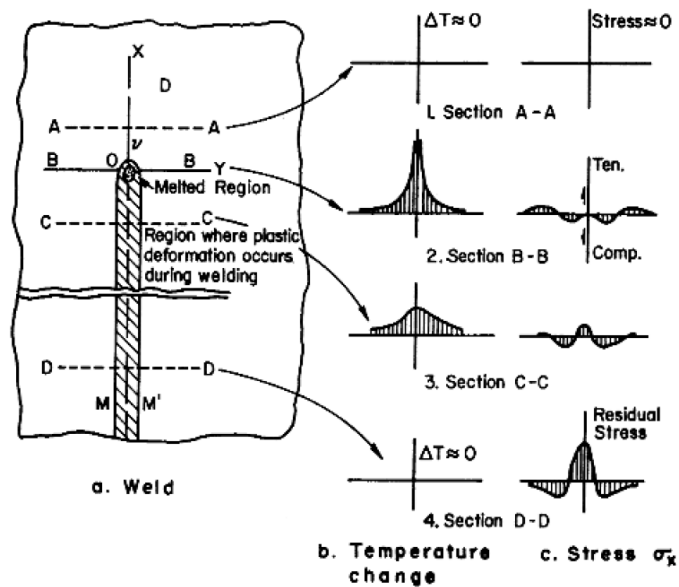


圖 1-6 銲接過程之溫度與應力變化。[35]

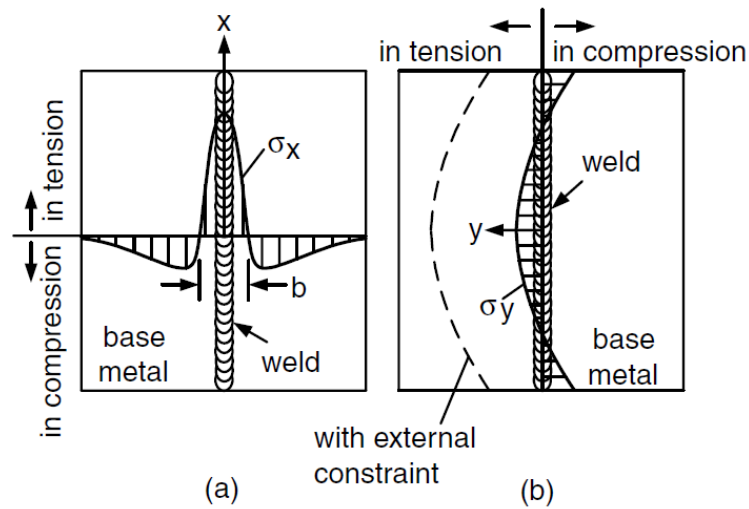


圖 1-7 銲道附近殘留應力分布情形。[35]

X 光繞射法量測材料表面殘留應力是目前最準確也最方便之方法，其優點是非破壞且能測量出整體之應力分佈，此方法必須利用到材料的彈性係數與蒲松式比兩個常數，來將應變換為應力數據[36]。利用 X 光繞射測量殘餘應力的原理如圖 1-8 所示，當試片表面受到拉伸應力時，則平行於表面方向之晶面間距會比沒有應力時窄一些，當試片傾斜後，繞射雖然發生在同一種晶面上，但卻來自於不同的晶粒，若此時晶面較垂直於應力，則這些晶面間距會較寬些。結果造成繞射峰位置往低角度位移。從 d 值隨試片測試傾斜角的變化關係，可推算試片所受之應力[37]。

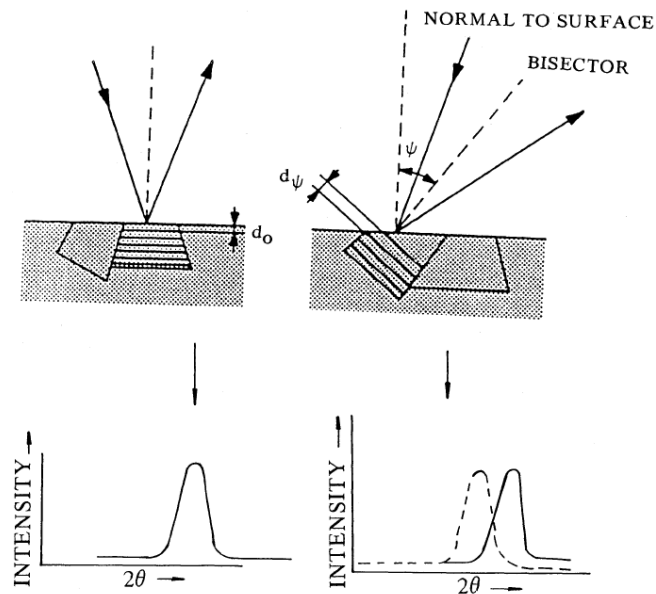


圖 1-8 不同傾斜角下測得之 d 值變化。[37]

X 光繞射是從特定之晶面來獲得有關之應變值，如何獲得材料中特定晶面之材料常數，是 X 光繞射測量殘留應力之重要問題。由於一般晶體多是異向性(anisotropic)，晶面(lattice plane)具有不同之材料常數，利用機械方法測得多晶材料常數，乃是各晶面之平均值，並不適用，若利用單晶材料常數來換算所需晶面之數據亦不可靠。最準確之方法藉由 X 光繞射量測在一外加固定負荷下之有關應變值來換算繞射晶面之材料常數，如此所得之材料常數稱為 X 光彈性常數[36]。Melo 等人的研究利用 X 光繞射法來探討在 ASTM A36 鋼板上以 FCAW 銲接方式覆銲一層 AWS E308L T-1 不銹鋼的殘留應力，如圖 1-9，實驗結果顯示在覆銲層部位主要承受殘留壓縮應力，在中央部位之壓應力則低於周圍區域[38]。

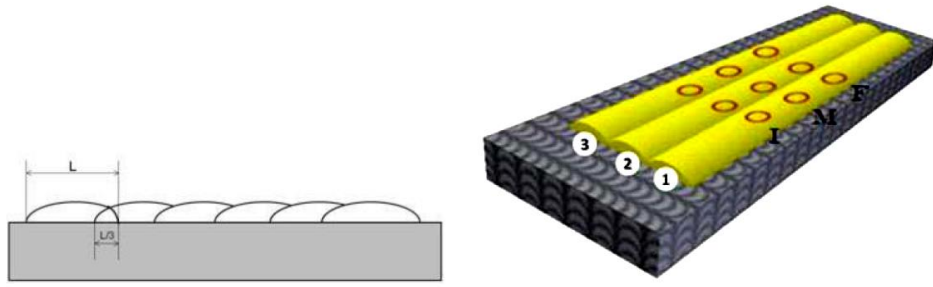


圖 1-9 覆銑示意圖與應力分析區域。[38]

貳、研究方法與過程

為完成此研究目的，本研究之實驗甘梯圖如圖 2-1 所示。

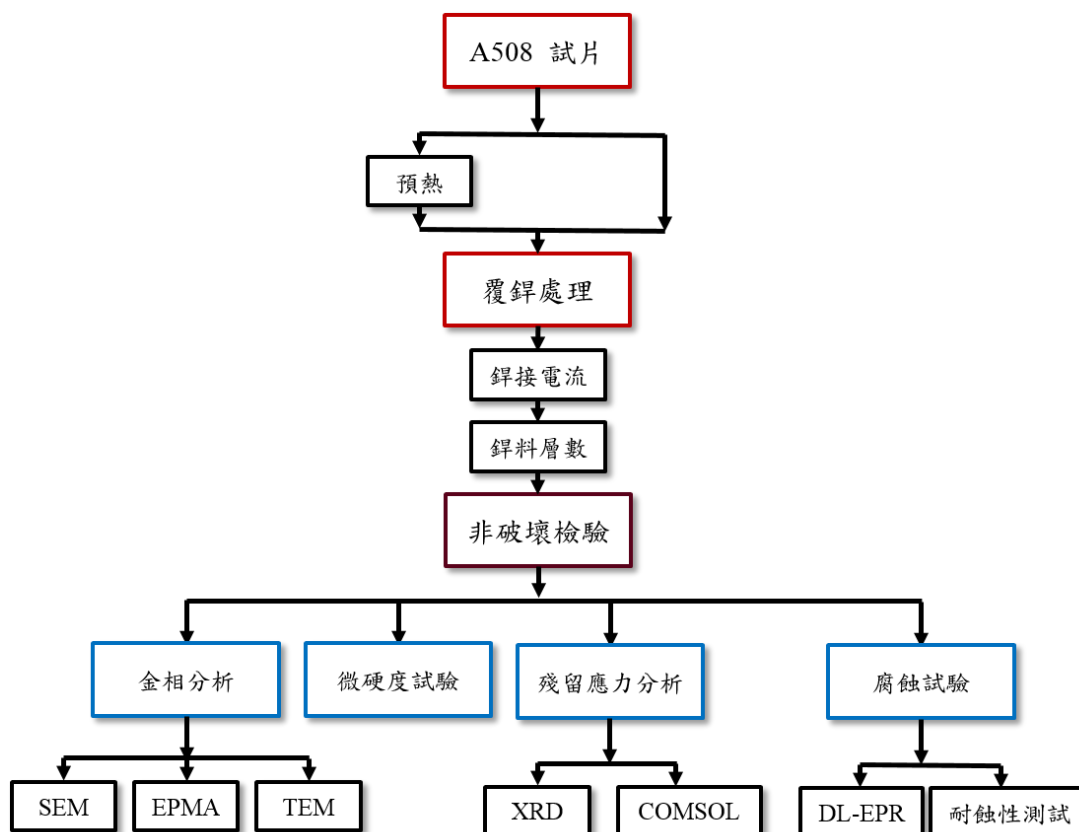


圖 2-1 實驗甘梯圖。

一、實驗材料

本實驗使用之底材為 ASTM A508 Grade 1 低合金鋼，其化學成分表如表 2-1 所列。鋼材經由鍛打加工後，依據 ASTM A508/508M-95, 4.2.2 之規範，依序進行 923 °C 持溫 1 小時淬火、623 °C 持溫 0.5 小時回火的熱處理，得到的金相組織為回火麻田散鐵基地相(Temper Martensite)，如圖 2-2 所示。為避免鋼材在鍛打及熱處理時之脫碳組織影響實驗的準確性，因此鋼板每面均預留 5 mm 厚度，待熱處理完成後再以銑床加工至 250 mm ×

150 mm × 25 mm。

覆銲層之銲接材料則是使用 UNS 6054；AWS 5.14 ERNiCrFe-7 的鎳基 52M 合金，此銲線為美國 Special Metal 公司商品，化學成分如表 2-2 所列。由於本研究使用 2 種銲接技術施作覆銲層，其施作機台與覆銲參數皆不盡相同，因此選用 2 種線徑之銲線(1.6 mm、0.9 mm)及配合不同的銲接參數，以製作出無缺陷的覆銲層。

表 2-1 ASTM A508 之化學成分表。

	× 100	× 100	× 100	× 100	× 100	× 100	× 100	× 100	× 100	× 100	× 100
Composition	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	N	Ti
Weight % (ASTM standard)	35	40	40 105	2.5	2.5	20	40	25	10	5	1
As-received	23	21	104	1.1	0.6	0.9	6	9	1	0	0

表 2-2 Inconel 52M 之化學成分表。

Composition	C	Mn	Fe	P	S	Si	Cu	Ni	Co	Al	Ti	Cr	Nb+Ta	Mo
Weight % (Special Metal)	.03	.76	8.53	.003	.0006	.13	.03	59.14	.01	.09	.23	30.20	.80	.01

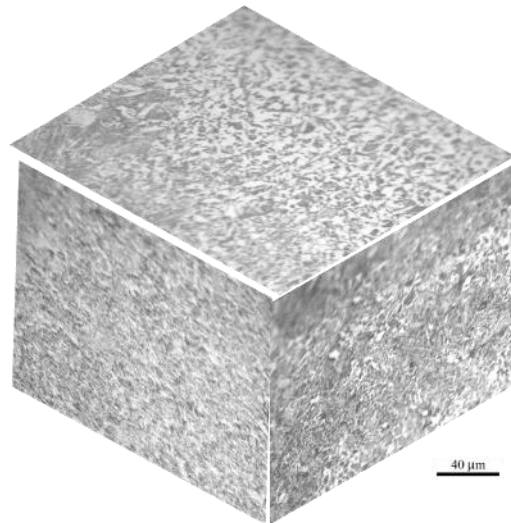


圖 2-2 A508 鋼材之三維金相圖。

二、電漿轉移電弧銲(Plasma Transferred Arc Welding, PTAW)

自動 PTAW 機台外觀如圖 2-3，搭配 RMS TW2800 送線機，覆銲層使用線徑 1.6 mm 的銲線、銲接電流為 55 ~ 90 A、銲接電壓為 20 ~ 30 V、層間溫度控制於 200 度以下，稀釋率則控制在百分之 20 至 30，以及採用 Temper bead weld 工法。覆銲銲冠高度約 1.5 mm。詳細銲接參數列於附錄 A.1 中。



圖 2-3 (a) PTAW 機台、(b) RMS 送線機之外觀照。

三、惰性氣體鎢極電弧銲(Gas Tungsten Arc Welding, GTAW)

全自動 GTAW 機台外觀如圖 2-4，覆銲層使用線徑 0.9 mm 的銲線、銲接電流為 100 ~ 120 A、層間溫度控制於 200 度以下，稀釋率則控制在百分之 40 至 50，以及採用 Temper bead weld 工法。覆銲銲冠高度約 1 mm。詳細銲接參數列於附錄 A.2 中。



圖 2-4 自動 GTAW 機台及送線機之外觀照。

四、液滲檢查

覆銲層施作完成後，使用美國 Met-L-Chek 公司之產品：E-59A(清潔劑)、VP-30(色比式滲透液)、D-70(顯像劑)，如圖 2-5 所示，進行非破壞檢測，依據 ASME B&PV Code 標準，評估覆銲層的合格性。首先，使用清潔劑噴覆表面並以紙巾擦拭待其自然乾燥，再以滲透液噴覆表面，靜置 15 分鐘後利用清潔劑清洗待測試片表面。顯像劑噴覆至遮蓋檢測物背景之厚度，於室溫下靜置 7~8 分鐘，最後目視表面是否顯示紅色印記。檢測結果詳見附錄 B.1。



圖 2-5 E-59A(清潔劑)、D-70(顯像劑)、VP-30(色比式滲透液)之外觀照。

五、超音波檢測

利用 GTAW 銲接技術施作參層覆銲層，完成之覆銲件以銑床加工成平面，覆銲金屬寬 3.6 mm、厚 4.7 mm。詳細之試片細節及檢測結果詳見附錄 B.2。

六、金相分析

使用水冷式精密砂輪切割機切取試片，依序以#100、#240、#400、#600、#1000、#1500、#2000、#2500 號水砂紙研磨，再利用粒徑 10 μm 、3 μm 之氧化鋁以及 0.07 μm 氧化矽水溶液搭配特定絨毛拋光布依序進行拋光。蝕刻液則依照 ASTM E407 規範之金屬選擇，A508 底材利用 2 vol. % 硝酸乙醇溶液浸蝕 5 ~ 10 秒，再以水、乙醇、丙酮清洗後烘乾；Inconel 52M 覆鍍層利用 10 wt. % 草酸水溶液，搭配外接直流電源供應器，以 6 V 電解蝕刻 5 ~ 10 秒，再以水、乙醇、丙酮清洗後烘乾。

透過金相顯微鏡觀察顯微組織、掃描式電子顯微鏡、穿透式電子顯微鏡觀察特定的微觀晶體結構、對特定區域以場發射電顯微鏡檢視覆鍍處理後截面的成分分布。

七、穿透式電子顯微鏡分析

使用 BUEHLER 慢速切割機搭配鑽石切割刀片，得以切取厚度 0.2 mm 之覆鍍層特定區域，將欲進行 TEM 觀察之試片以粗砂紙研磨至厚度低於 100 μm ，換上細砂紙將試片繼續研磨至 80 μm 且降低試片表面之刮痕粗糙度。預先以電解蝕刻方式區分出各道次鍍道之區域，再以試片衝壓器將不同區域之試片衝壓成直徑 3 mm 之 TEM 試片初胚。其後以雙噴射式電解拋光機(Automatic Twin-Jet Electropolisher)進行電解拋光，其電解拋光液配方為 10 vol. % 過氯酸與 90 vol. % 甲醇並且使用液態氮降溫，使電解拋光於零下 20°C 之環境下進行，將試片中間區域電解拋光出薄區以達 TEM 可觀測之試片厚度。

八、微硬度檢驗

本檢驗參照 ASTM E384-11e1 規範，以覆鋅層與底材之介面為原點，分別向底材與覆鋅金屬方向進行硬度量測。量測條件為荷重 300 g、保持時間為 15 秒，每隔 0.25 mm 量測一點，藉以瞭解覆鋅技術、覆鋅層數對底材及覆鋅層之硬度影響。

九、覆鋅溫度模擬與量測

溫度模擬使用有限元素軟體 COMSOL，利用固體熱傳物理量進行 3D 模擬。模型尺寸建置與 A508 鋼材相同，為了簡化材料變數，故不考慮填料速率與材料之相變化，銲接參數則依據實際覆鋅層施作設定。熱源模型參考覆鋅單道次的金相圖計算。

為了量測實際覆鋅層施作之溫度，預先於 A508 鋼材側邊鑽取 ϕ 1.1 mm、深度 8mm 的量測孔，透過埋設 K type 熱電偶配合多點式溫度記錄器，紀錄後繪製成圖表與模擬值比較。

十、殘留應力模擬與量測

殘留應力模擬利用 COMSOL 的物理耦合功能，將熱傳模組與固體力學模組耦合，藉由覆鋅層施作時之溫度變化、材料熱膨脹係數計算殘留應力。為了簡化計算點以及增加模擬收斂，模擬時只建立半對稱的板材，且將試片 4 個角設定為固定。

殘留應力量測分別使用有限元素軟體模擬與高解析 X 光繞射儀(High resolution X-ray diffractometer, HRXRD)、PULSTEC u-X360n 量測覆鋅後之 A508 板材表面下方 2 mm 位置的殘留應力。由於機械加工法切取試片會造成額外的殘留應力，本研究採用線切割放電加工技術(Wire Electrical Discharging Machine,

WEDM)切割。試片於殘留應力量測前需經電解拋光處理(Electro-polishing)，確保放電加工造成的殘留張應力層已去除。

十一、電化學試驗

本實驗之電化學耐蝕性分析利用恆電位儀，依據 ASTM G5-14 之規範，以甘汞電極做為參考電極；輔助電極為碳棒電極，進行開路電位及動電位量測。實驗完成後再以掃描式電子顯微鏡(SEM)觀察試片表面，評估覆鋅層施作技術對覆鋅層、底材之耐蝕性影響。

十二、試片命名原則

本研究之試片種類、銲接道次及銲接參數眾多，為了清楚表達研究之標的物位置，試片之命名原則如下：

X - Y - Z - W - Q

其中，X 代表銲接方法：G 表示 GTAW、P 表示 PTAW

Y 代表覆鋅層數：S 表示單道、U 表示單層、D 表示雙層、T 表示叁層

Z 代表相同 X-Y 但不同銲接參數：1、2、3 依序編號。

W 代表覆鋅道次：1u 表示第 1 層第 1 道次、2u 表示第 1 層第 2 道次、1d 代表第 2 層第 1 道次、2d 代表第 2 層第 2 道次，以此類推。

Q 代表試片取向方向：Vc 表示垂直覆鋅道中心線方向切取、Pc 表示平行覆鋅道中心線方向切取。

例：命名為 G-T-1-3d-Vc 之試片則為「以 GTAW 技術完成之編號 1 的叁層覆鋁層，其第 2 層第 3 道次鋁道，由垂直鋁道方向切取之試片」。

十三、分析設備

本次研究所使用之分析設備如下：

- (一) 金相顯微鏡：使用 OLYMPUS BX41M 之金相顯微鏡，最大放大倍率為 1000 倍，使用感光耦合元件(Charge-couple Device, CCD)，做試片表面及橫截面之金相形態觀察記錄。
- (二) 熱燈絲電子顯微鏡：型號 JEOL JSM-6390LV，操作加速電壓 5 ~ 30 kV，最大放大倍率為 30000 倍，可進行 SEI 及 BEI 觀察，並配合 EDS 分析系統，實施元素定量及半定性分析。
- (三) 場發射掃描式電子顯微鏡：型號 JEOL JSM-6500F，解像力：1.5 nm @15 kV、加速電壓：0 ~ 30 kV、放大倍率：10 x ~ 500 kx、二次電子成像(SEI)、背散射電子成像(BEI)、附屬設備：能量分散光譜儀(EDS)。此機台為台灣科技大學貴儀中心設備。
- (四) 穿透式電子顯微鏡：機型為 Philips Tecnai F20 G2 型，加速電壓為 200 kV，點分辨率為 0.24 nm，放大倍率在 25 x~1030 kx 之間，最大繞射角度 $\pm 13^\circ$ 。利用 TEM 儀器所搭配的能量散布光譜儀(EDS)分析析出相的成份。此機台為台灣科技大學貴儀中心設備。
- (五) 恆定電位儀：使用 GAMRY G750 電化學工作站，搭配 UDC4 UNIVERSAL DUMMY CELL 校正片，參考電極為飽和甘汞電極(Saturated calomel electrode, SCE)。

- (六) 維克氏硬度試驗機：使用 Future-Tech FM-700 型微維氏硬度試驗機進行微硬度(Micro Vickers Hardness)量測，量測荷重範圍由 10 ~ 1000 g、保持試驗時間 15 秒。
- (七) 高解析 X 光繞射儀(High resolution X-ray diffractometer, HRXRD)：廠牌型號為 BRUKER D8 SSS，使用旋轉陽極銅靶，輸出電壓為 20 ~ 60 kV、電流為 10 ~ 300 mA。角度測量範圍 2θ 可設定 $-10^\circ \sim +168^\circ$ 。藉由高解析 X 光繞射儀可量測材料的晶體結構資訊加以探討材料性質的變化，為一即時且兼具非破壞性檢測之分析設備。此機台為中興大學貴儀中心設備，配備最新發展的 2 維偵測器 VANTEC-2000，針對具有優選取向之結晶材料能提供比一般 X-ray 偵測器更精確的結果。
- (八) 二維 x 射線殘留應力分析儀：PULSTEC 型號 u-X360n，X 線管球為鉻靶，輸出電壓為 30 kV、電流為 1 mA，X 光線照射徑可設定 $\psi 0.8 \sim 2.0$ mm。X 光回折環以 360 度全周取得，再透過 $\cos\alpha$ 法演算得到殘留應力數值。

參、主要發現與結論

為瞭解覆鋅施作層數對底材顯微組之影響，討論覆鋅參數與殘留應力量測、微硬度測試、耐蝕性測試之關係。因此，每一覆鋅層施作的道次數皆不同，如圖 3-1 所示，當製作共 N 層覆鋅層時，底層覆鋅層由左向右施作 $2N+1$ 道次、向上每層遞減 2 道次至完成。同時，為比較各種銲接參數對底材的影響性，製作簡化版覆鋅層：N 層覆鋅之底層覆鋅層由左向右施作 N 道次，每層向上遞減 1 道次。各系列試片如圖 3-2 至 3-5 所示。

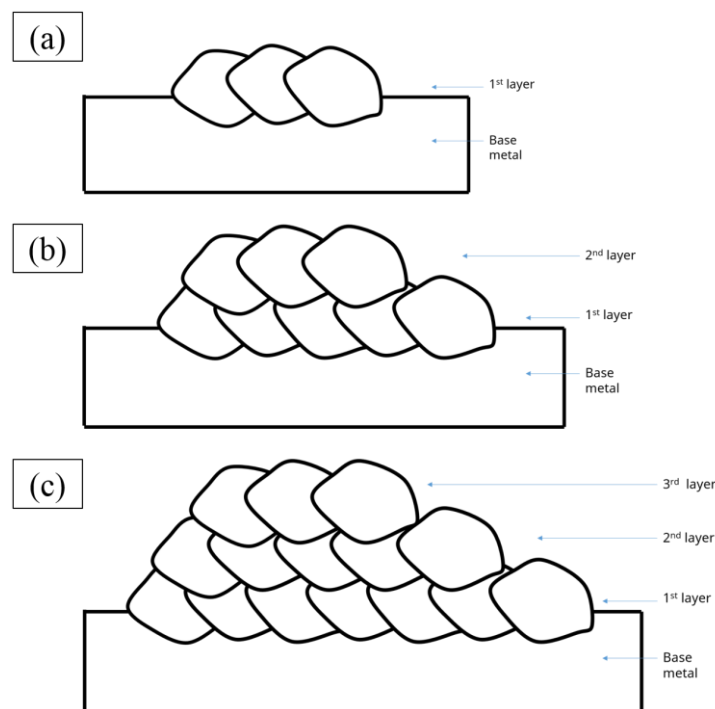
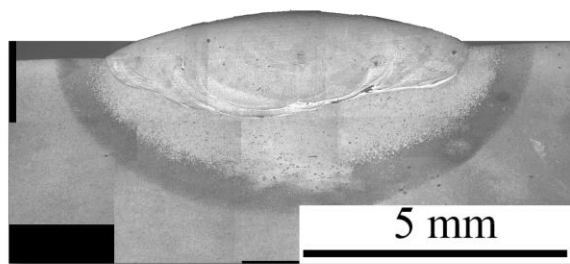
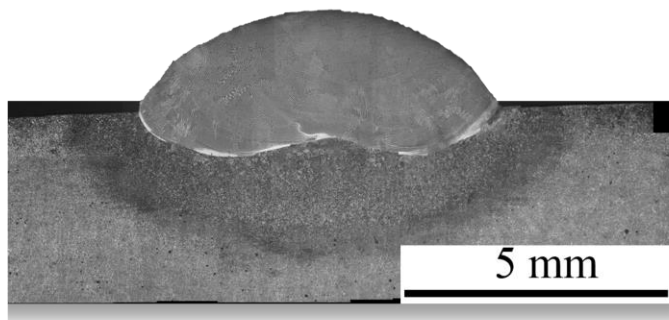


圖 3-1 (a) 單層、(b) 雙層、(c) 參層覆鋅層之顯微結構示意圖。

(a)



(b)



(c)



(d)



圖 3-2 (a) G-S-1、(b) G-S-2、(c) P-S-7 及(d) P-S-8 之覆鋅試片的巨觀金相圖。

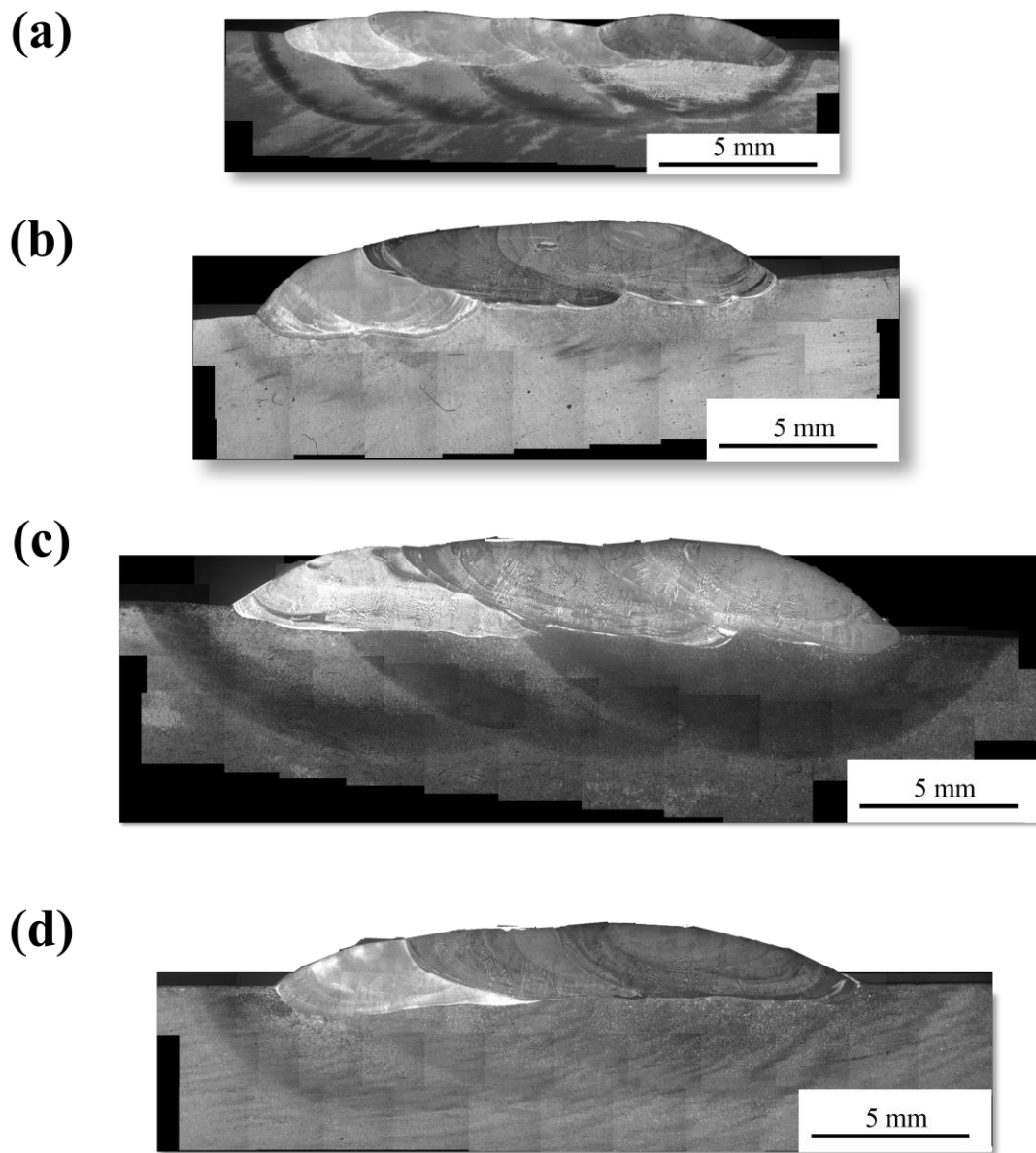


圖 3-3 (a) G-U-1、(b) G-U-2、(c) P-U-6 及(d) P-U-8 之覆鋅試片的巨觀金相圖。

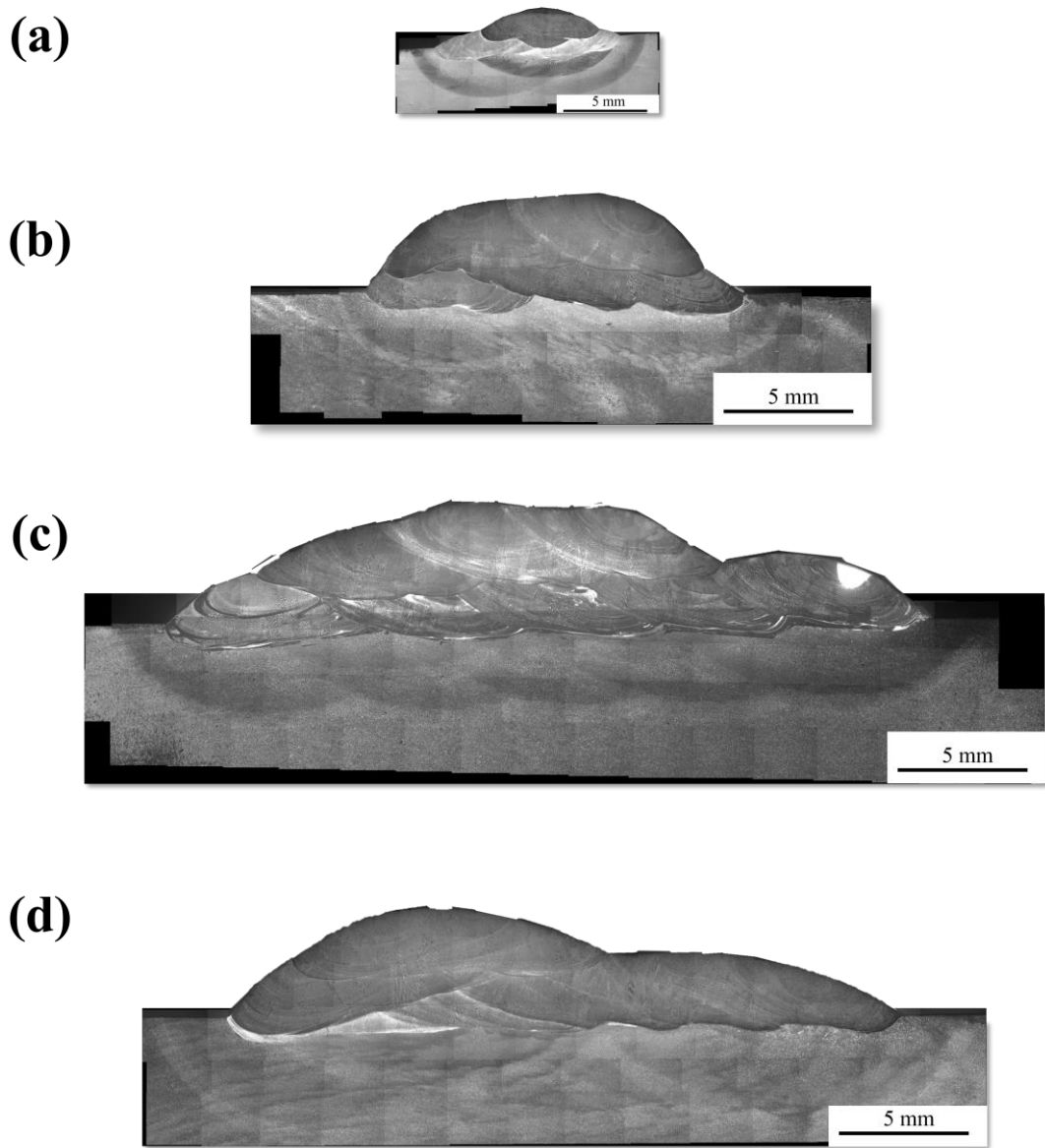


圖 3-4 (a) G-D-1、(b) G-D-2、(c) P-D-1 及(d) P-D-3 之覆鋅試片的巨觀金相圖。

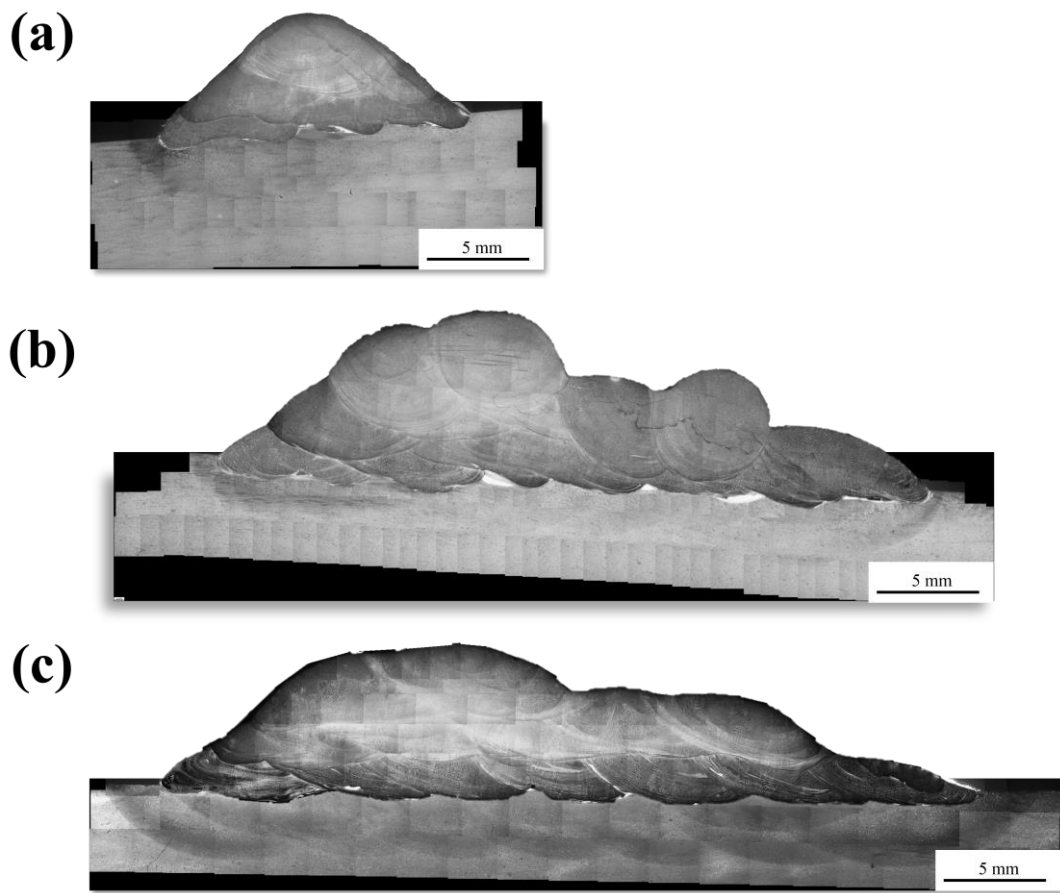


圖 3-5 (a) G-T-1、(b) G-T-2 及(c) P-T-1 之覆鋅試片的巨觀金相圖。

一、顯微組織分析

(一) A508 鋼材

覆銲層施作完成後，底材之顯微組織的金相圖，由垂直銲道方向向下，依照受熱影響程度可區分為費德曼組織(Widmanstatten structure region, WR)、晶粒粗化組織(Corse grained HAZ region, CR)、晶粒細化組織(Fine grained HAZ region, FR)、臨界熱處理溫度組織(Intercritical region, IR)，如圖 3-6 所示。其中，晶粒細化可視為對底材之 Tempered Martensite 再進行一次回火處理，因此其針狀組織會變得更加圓潤、短小。相關研究指出，鎳基 52M 合金銲道組織為沃斯田體，靠近熔融區介面則因鎳、鉻含量減少，使得晶體結構逐漸轉變成肥粒體為主且麻田散體變態開始溫度(M_s)將下降，因此在銲道靠近熔融區介面將會形成薄層麻田散鐵。然而，在本研究之試片中，未觀察到此現象。

GTAW 覆銲層 G-S-1 及 G-U-1 之巨觀金相圖如圖 3-2(a)及圖 3-3(a)所示，稀釋率經計算後約為百分之 45 至 55。透過金相圖觀察，顯示單道次覆銲的 3 種組織，均會受到下 1 道次的入熱量影響，形成再次熱影響組織型態，下一道次之 CR 區域將會穿越原本的 FR 區域，形成複合型的晶粒細化區域。另一方面，金相圖顯示 GTAW 的 FR 組織(黑色區域)形成明顯帶狀紋路。圖 3-7 至圖 3-10 分別為 G-S-1、G-U-1-1u、G-U-1-1u&2u 之熱影響區交界、G-U-1-4u 之 4 種顯微組織的金相圖。比較 G-S-1 與 G-U-1-1u 的 WR 組織，如圖 3-7(a)與圖 3-8(a)所示，顯示覆銲第 1 層時，第 1 道次銲道已經有部分費德曼區域被回火成 IR 與 CR。

為瞭解 GTAW 複數層覆銲對底材熱影響的程度，製作 G-D-1

的覆鋅試樣，覆鋅雙層之巨觀金相圖如圖 3-4(a)所示，金相中第 2 層鋅道之熱影響區未超過第 1 層鋅道的熱影響區範圍。由圖 3-11 及圖 3-12 中，在 G-D-1-1u 與 G-D-1-1u&2u 的 WR 與 CR 經第 2 層鋅道施作後，距離試片表片相同垂直深度的顯微組織轉變為均勻的 FR。

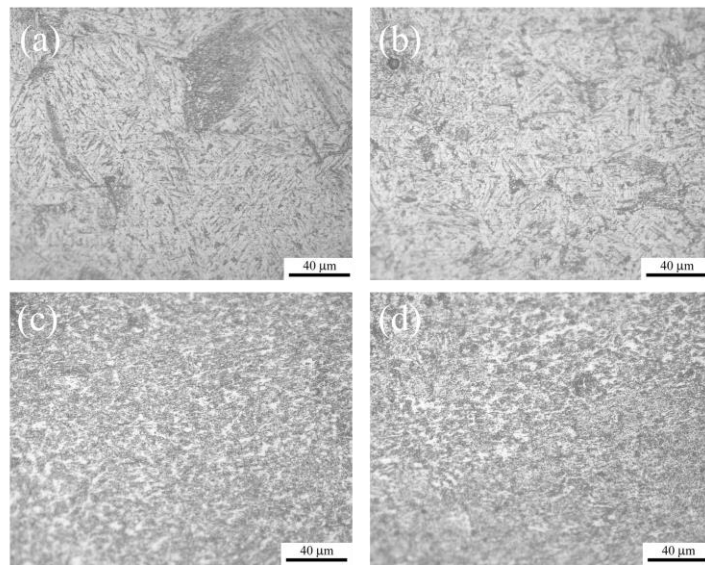


圖 3-6 (a) 費德曼組織(WR)、(b) 晶粒粗化組織(CR)、(c) 晶粒細化組織(FR)及(d) 臨界熱處理溫度組織(IR)之金相圖。

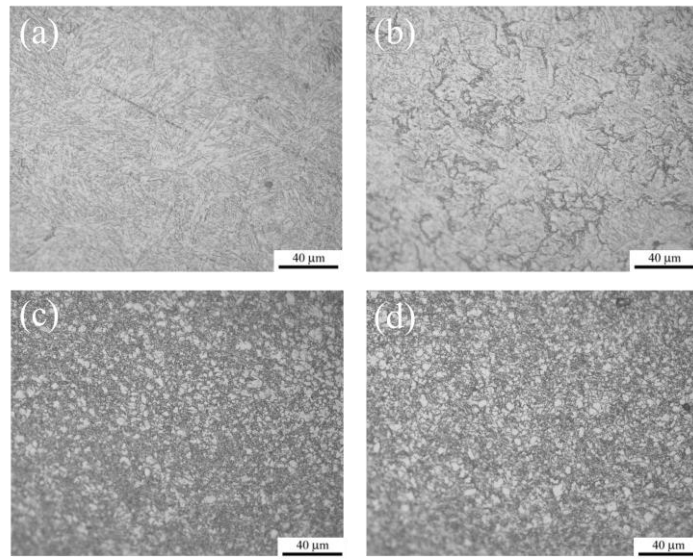


圖 3-7 G-S-1 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相圖。

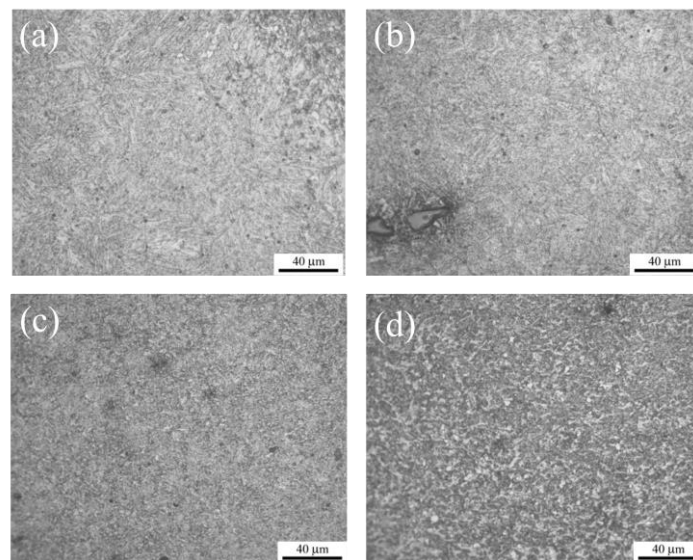


圖 3-8 G-U-1-1u 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相圖。

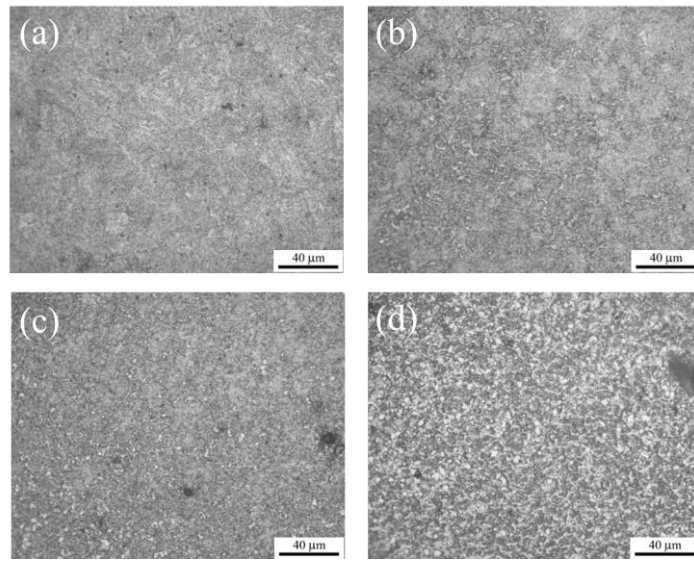


圖 3-9 G-U-1-1u&2u 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相圖。

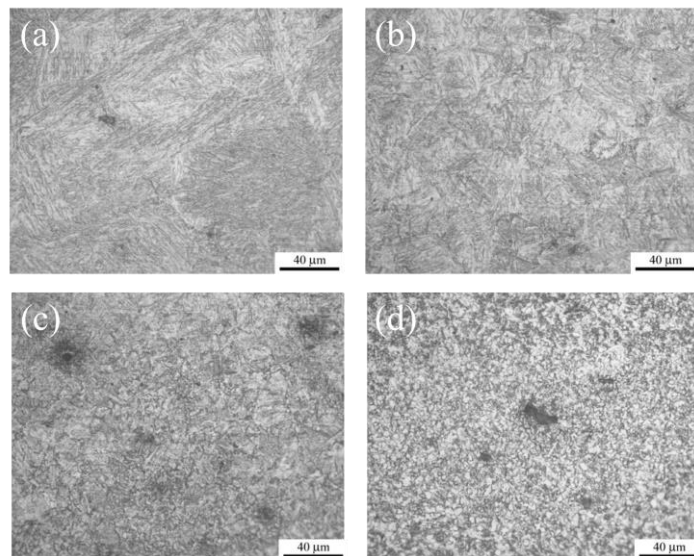


圖 3-10 G-U-1-4u 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相圖。

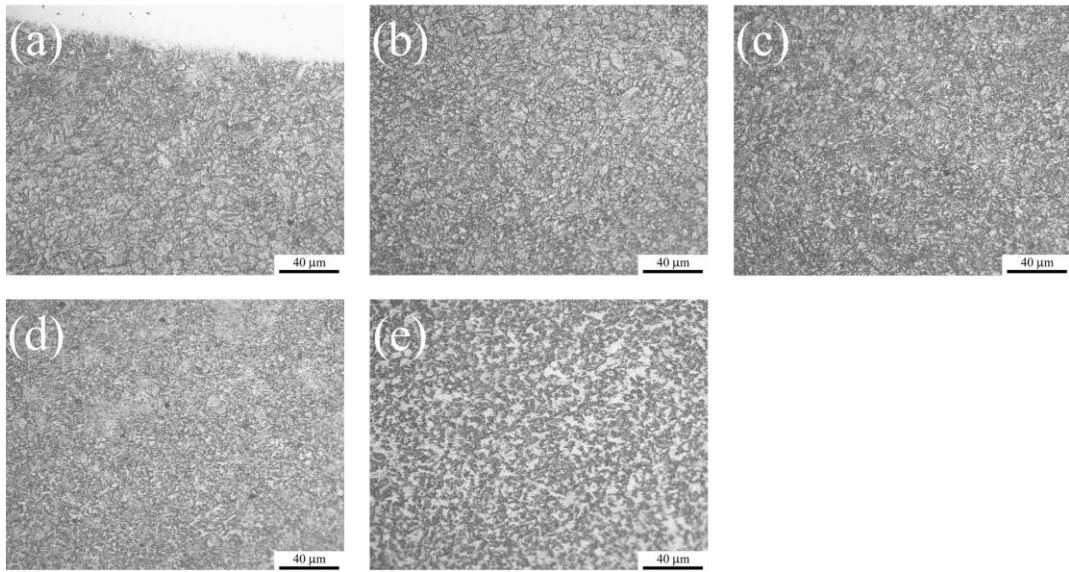


圖 3-11 G-D-1-1u 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相圖。

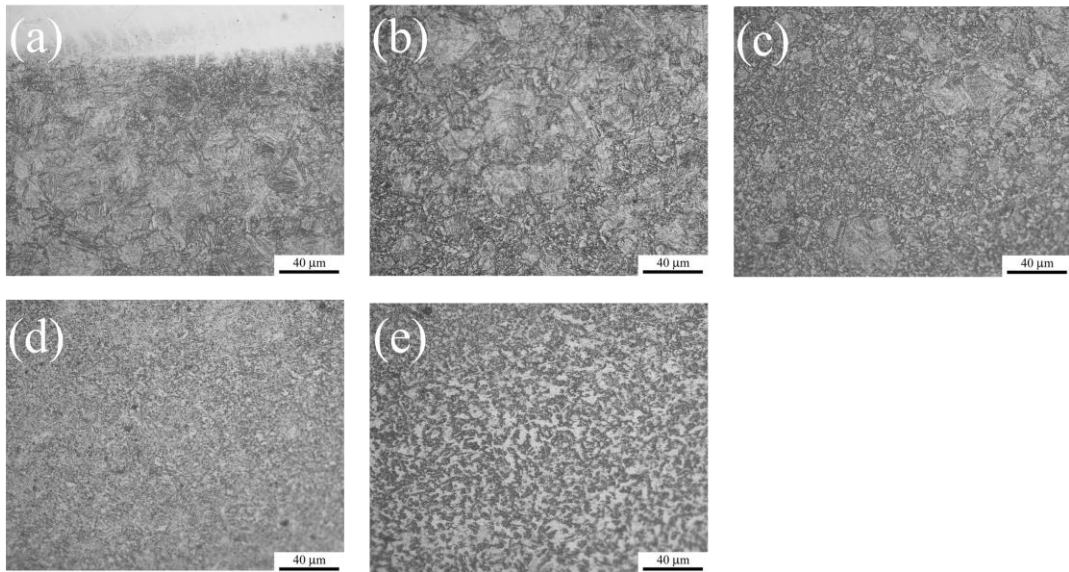


圖 3-12 G-D-1-1u&2u 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相圖。

PTAW 覆鋅層 P-S-7 施作完成後，底材之金相圖如圖 3-13，由垂直方向量測各區域之長度，WR 範圍為 $538 \mu\text{m}$ 、CR 範圍為 $269 \mu\text{m}$ 、FR 範圍為 $346 \mu\text{m}$ 、IR 範圍則不明顯。圖 3-14

則為 P-U-6-1u 的顯微組織，由垂直鐸道表面方向，量測各區域範圍，WR 範圍為 393 μm 、CR 範圍為 317 μm 、FR 範圍為 288 μm 。PTAW 覆鐸雙層之巨觀金相圖如圖 3-4(c)所示，第 2 層鐸道的熱影響區範圍未超過第 1 層鐸道的熱影響區範圍。圖 3-15 及圖 3-16 分別展示雙層覆鐸後，P-D-1-1u 以及 P-D-1-1u&2u 的各區金相圖。對照圖 3-13 及圖 3-15 之金相圖，顯示 P-D-1-1u 相較於 P-S-7 有更明顯且細緻的 WR 組織、CR 也有更粗晶化的趨勢。由圖 3-16(a)中所見，P-D-1-1u&2u 的部分 WR 組織吸收正上方之第 2 層第 1 道次鐸道的鐸接熱，轉為含有 IR 及 FR 的混合組織。比較圖 3-15(c)及圖 3-16(c)，P-D-1-1u 受到第 2 層覆鐸的入熱影響，累積溫度已足夠使 FR 組織產生晶粒成長而粗晶化，顯示第 2 層覆鐸層施作後，對底材的縱向熱影響程度已經至少觸及第 1 層覆鐸層之 FR 範圍。

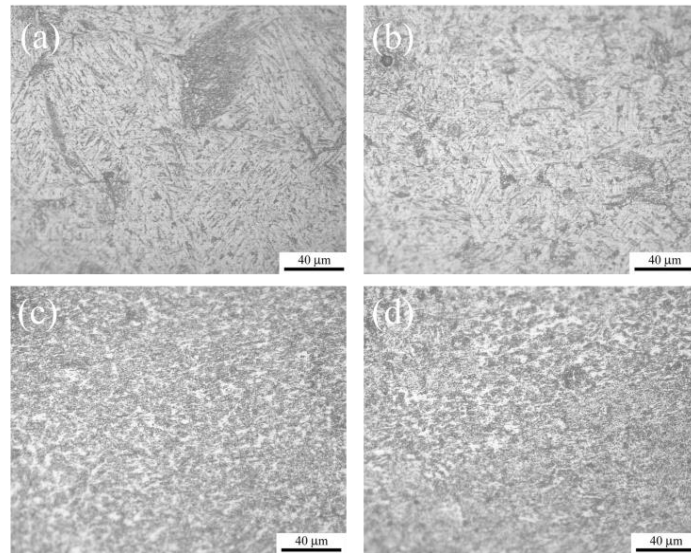


圖 3-13 P-S-7 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相。

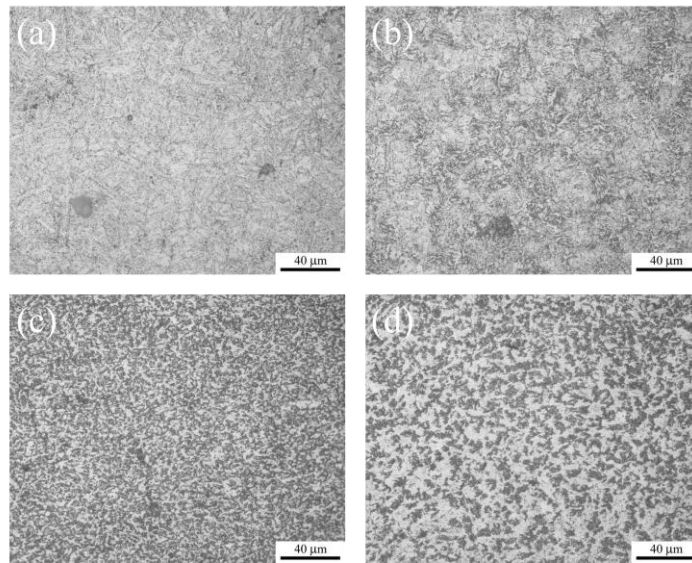


圖 3-14 P-U-6-1u 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相。

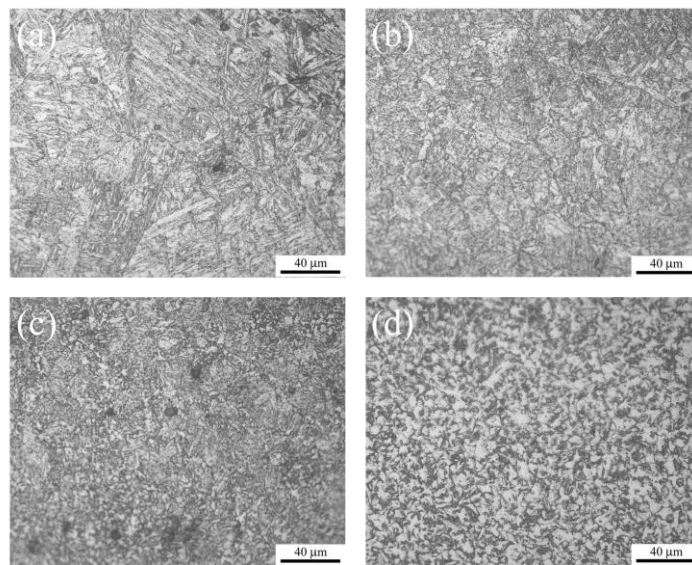


圖 3-15 P-D-1-1u 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相。

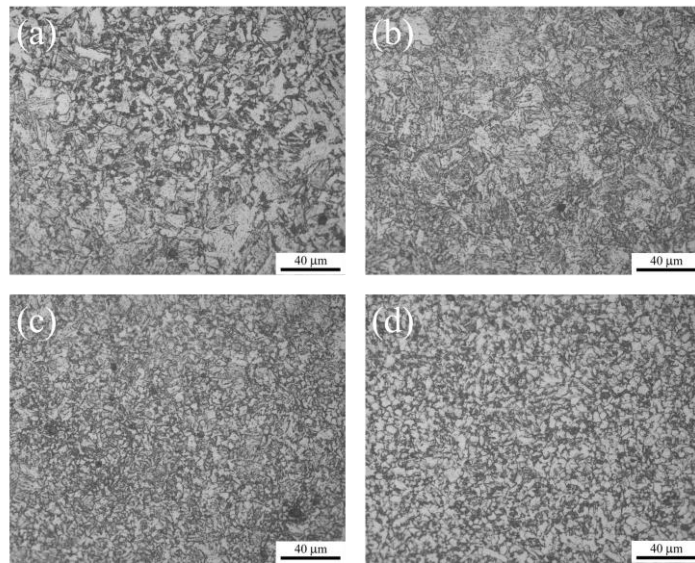


圖 3-16 P-D-1-1u&2u 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相圖。

另一方面，為確認複數覆銲層施作時，產生熱影響區的橫向範圍，檢視 P-D-1-5u 的垂直方向顯微組織是否會受到 P-D-1-3d 銲道的影響，金相圖如圖 3-17 所示。經比對 P-D-1-5u 與 P-U-6-3u(圖 3-18)之顯微組織後，兩者之各區域組織皆較相似，顯示 PTAW 的第 2 層銲道之熱影響區範圍僅限於 1 個 Weld-Bead 之內，P-D-1-5u 之組織形態未受到熱影響。然 P-D-1-5u 區域範圍與 P-U-6-1u 比較仍有所消長，估計是由於整塊鋼材在覆銲過後，將累積一定的熱量而提升底材溫度，需經過一定時間的空冷才能降溫至層間溫度，因此 P-D-1-5u 於此時段內將有可能受到熱影響而調整組織分布。覆銲參層之底材巨觀金相圖如圖 3-5(c) 所示，與覆銲雙層巨觀金相沒有顯著差異。圖 3-19 至圖 3-21 分別為 P-T-1-1u、P-T-1-1u&2u，以及 P-T-1-7u 的 4 種熱影響組織金相圖。

綜合比較覆銲參層與覆銲雙層的縱向組織圖，顯示各道次

經由第 3 層覆鋅後，WR 組織均有轉變為 IR 組織及 FR 組織的趨勢，因此 WR 的範圍隨著覆鋅層數愈增加而愈減少。CR 將會有細化的現象，使得其與 FR 的界線隨著覆鋅層數愈增加而愈模糊。其中，IR 的深度則與覆鋅層數有著正比例關係，由圖 3-5 所見，當覆鋅層數由雙層增加為參層時，IR 深度約增加 200 ~ 300 μm 。

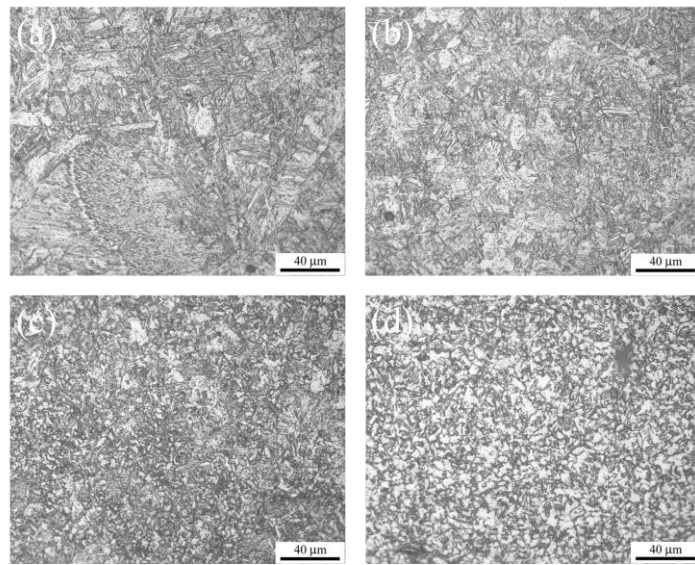


圖 3-17 P-D-1-5u 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相。

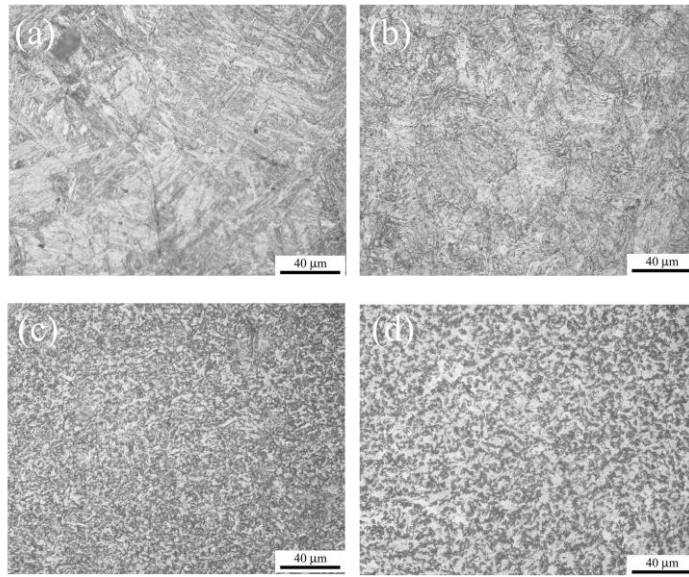


圖 3-18 P-U-6-3u 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相。

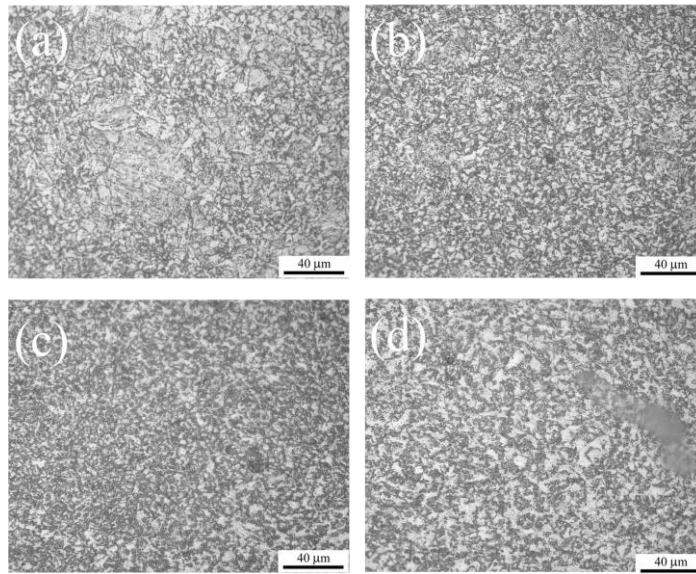


圖 3-19 P-T-1-1u 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相。

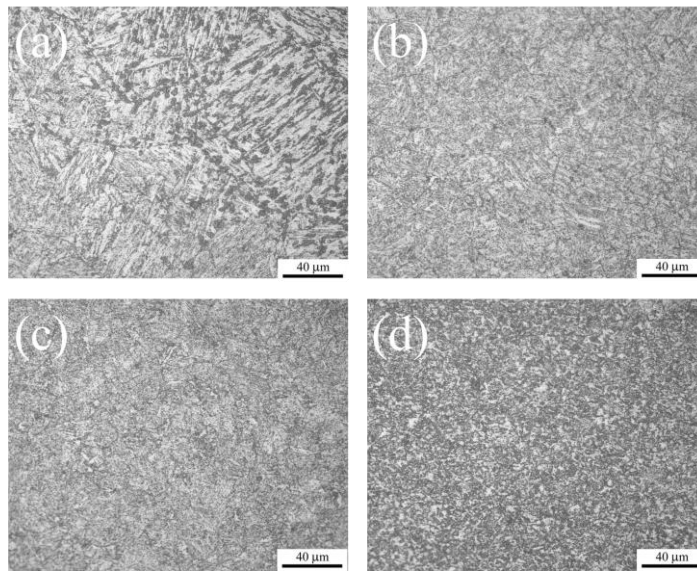


圖 3-20 P-T-1-1u&2u 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相圖。

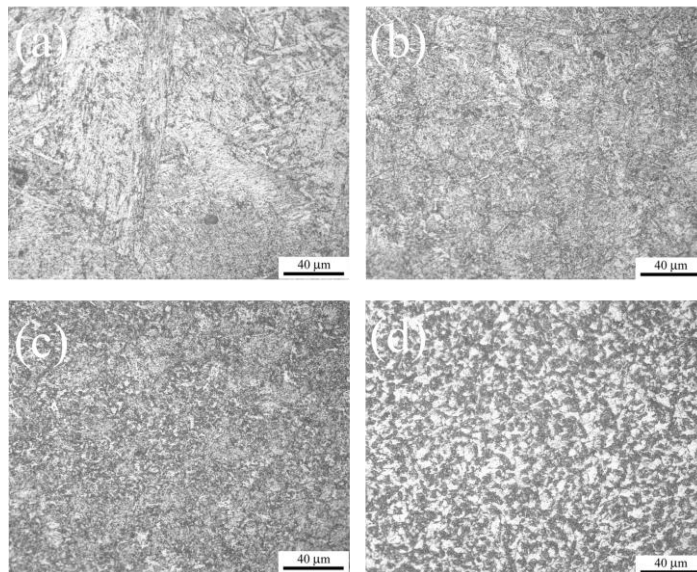


圖 3-21 P-T-1-7u 之(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 之區域金相圖。

(二) Inconel 52M 覆鋁層

GTAW 及 PTAW 雙層覆鋁件之金相圖分別透過圖 3-22 與圖 3-23 展示各個不同道次與介面之顯微組織。由圖 3-22(b)中，顯示 G-D-2-1d 之鋁冠(Cap)為等軸枝狀晶(equiaxed dendrites)，在與 G-D-2-1u 介面之鋁根處(Root)，圖(a)，則為柱狀枝狀晶(columnar dendrites)及胞狀枝狀晶(cellular dendrites)的混合結構；然而，與 G-D-2-2u 介面之鋁根處，圖(c)，是胞狀枝狀晶及等軸枝狀晶的混合結構。由於熔融金屬的凝固模式，係依據凝固前鋒溫度梯度/凝固速率(G/R)的比例決定，因此推測覆鋁層固化時內側的溫度梯度將較外側小。G-D-2-1u 與底材之介面處，圖(d)，枝晶以柱狀型態為主。值得一提的是，GTAW 覆鋁層中可以觀察到遷移晶界生成(migrated grain boundary, MGB)。P-D-1-1d 之鋁冠為柱狀枝狀晶及胞狀枝狀晶的混合結構，圖 3-23(b)中所示。與 P-D-1-1u 及 P-D-1-2u 的介面中，圖(a)及(c)，第 2 層的結構以柱狀枝狀晶為主，然而，第 1 層鋁冠邊界的枝晶結構受到覆鋁熱輸入影響，由柱狀晶轉為等軸晶。與 GTAW 不同的是，PTAW 覆鋁層搭接處，均產生類似雙層 Type II 晶界的結構，如圖 3-23(a)及(e)中之黑色條狀帶，此現象判斷是由於成分差異過大所造成。

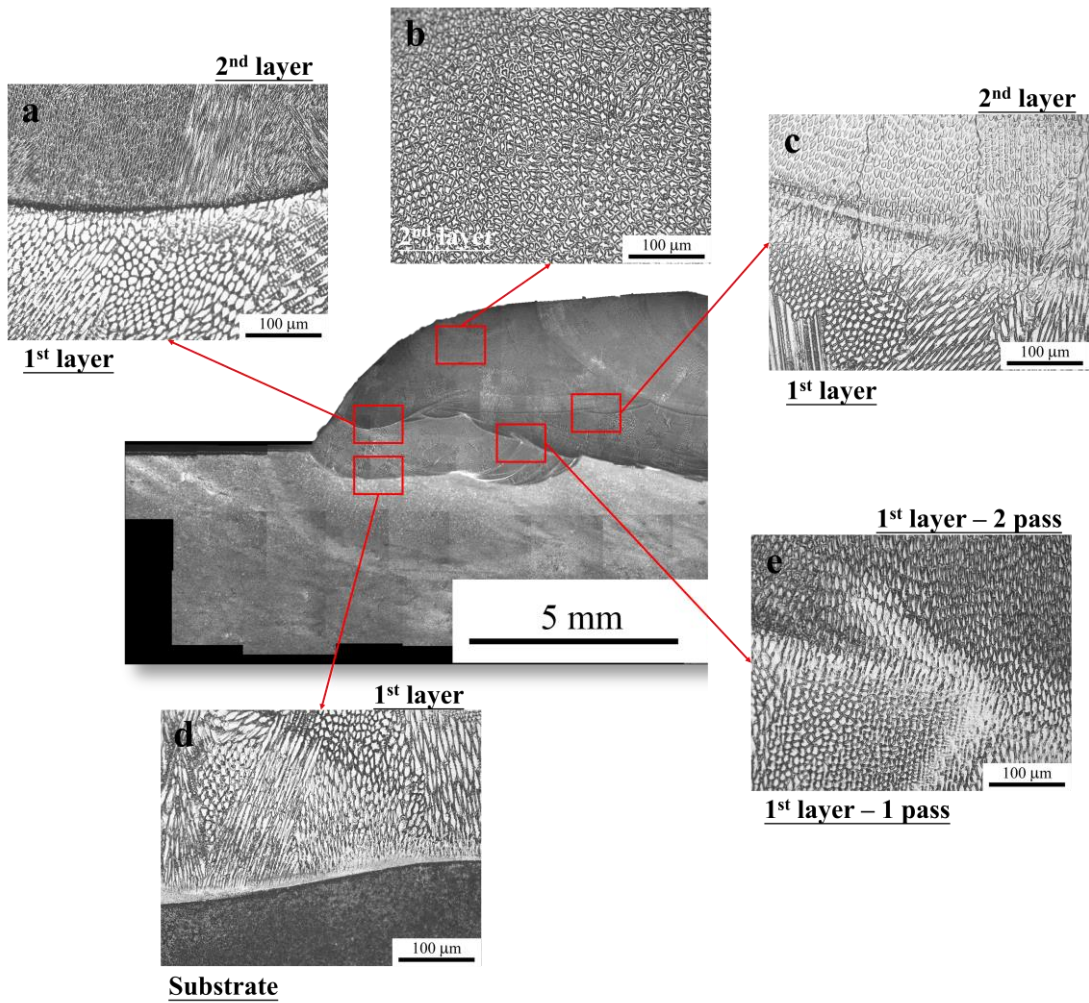


圖 3-22 G-D-2 之(a) G-D-2-1d 與 G-D-2-1u 介面、(b) G-D-2-1d 鐳冠、(c) G-D-2-1d 與 G-D-2-2u 介面、(d) G-D-2-1u 與 A508 介面，以及(e) G-D-2-1u 與 G-D-2-2u 介面的區域金相圖。

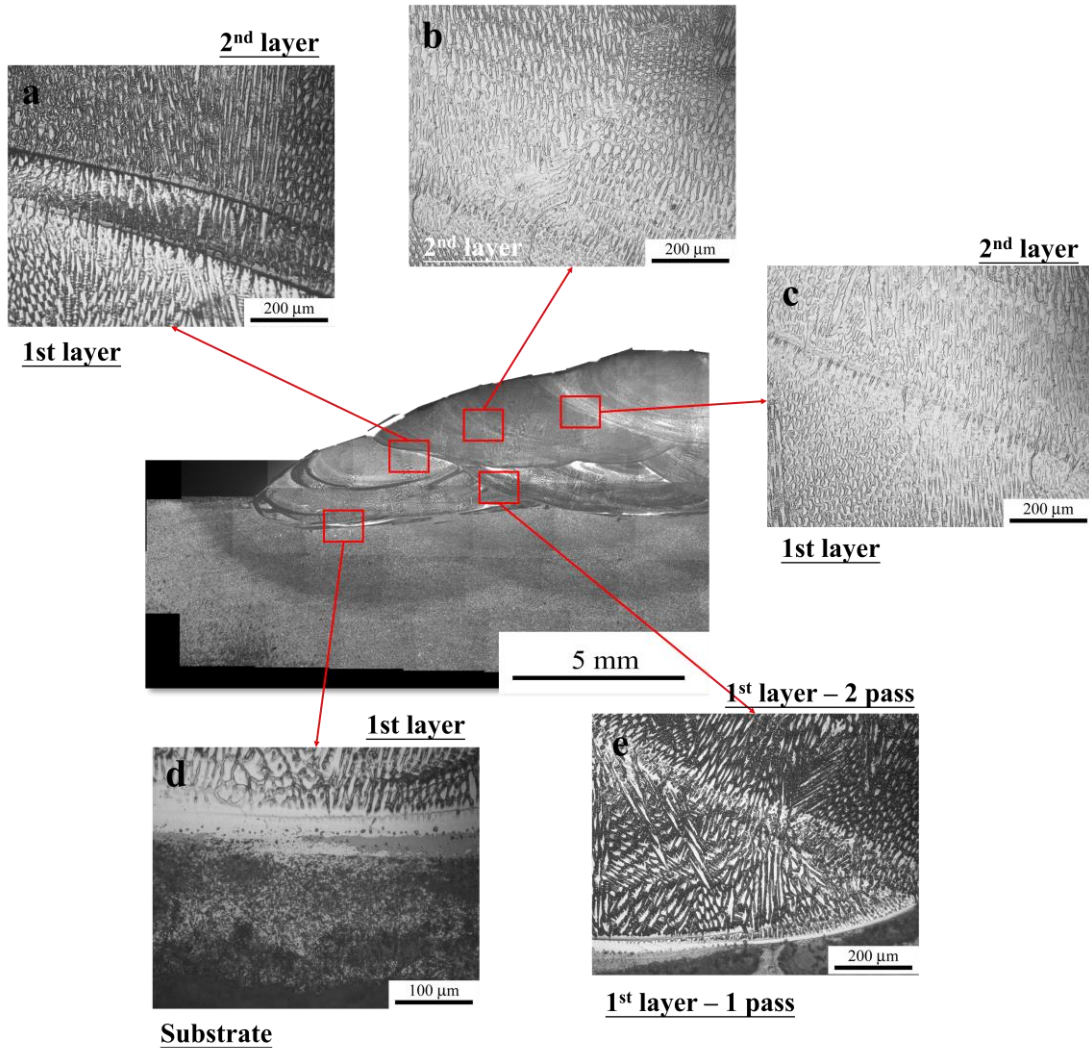


圖 3-23 P-D-1 之(a) P-D-1-1d 與 P-D-1-1u 介面、(b) P-D-1-1d 鉚冠、(c) P-D-1-1d 與 P-D-1-2d 介面、(d) P-D-1-1u 與 A508 介面，以及(e) P-D-1-1u 與 P-D-1-2u 介面的區域金相圖。

將 2 種覆鉚技術施作之單層覆鉚試片，以慢速切割機平行試片表面(鉚接中心線)切取鉚冠、鉚根，分析之 SEI 影像如圖 3-24 至 3-26 所示，EDS 成分分析如表 3-1、圖 3-27 所列。P-U-6-2u-Pc 鉚冠位置為柱狀枝狀晶截面，見於圖 3-24(a)及(c)中，於晶界處有許多白色顆粒狀、灰色方晶狀析出物。經由 EDS 成分分析結果，析出物多為富 Nb、Ti 之化合物，根據文獻指出，Nb 容易由

鎳基基地液相中溶出，與合金中的 C 形成碳化物， $M_{23}C_6$ ，且於固化過程中移至柱狀晶晶界間 (interdendritic region)。在 P-U-6-2u-Pc 鐳根處之線掃描結果則顯示，除了 Nb-Carbide 外，Cr、Fe 也會析出於晶界，形成連續的富(Cr, Fe)相帶狀物，如圖 3-25(c)及(d)中晶界上白色鋸齒狀組織。G-U-1-2u-Pc 鐳冠位置為等軸枝狀晶，在圖 3-26(b)及(c)中，枝狀晶間散佈著細小的白色小顆粒為(Nb, Ti)碳化物，圖(d)則於晶界處觀察到鬚狀的 Nb-carbide。

表 3-1 EDS 成分分析 (wt. %)。(圖 3-24 及圖 3-26)

Positon	Cr	Fe	Ni	Nb	Ti
A	21.29	32.37	38.69	7.66	-
B	17.76	27.86	27.46	7.95	18.98
C	26.29	24.85	47.19	1.68	-
D	24.03	30.66	43.28	-	-
E	19.44	35.82	31.40	11.41	1.94

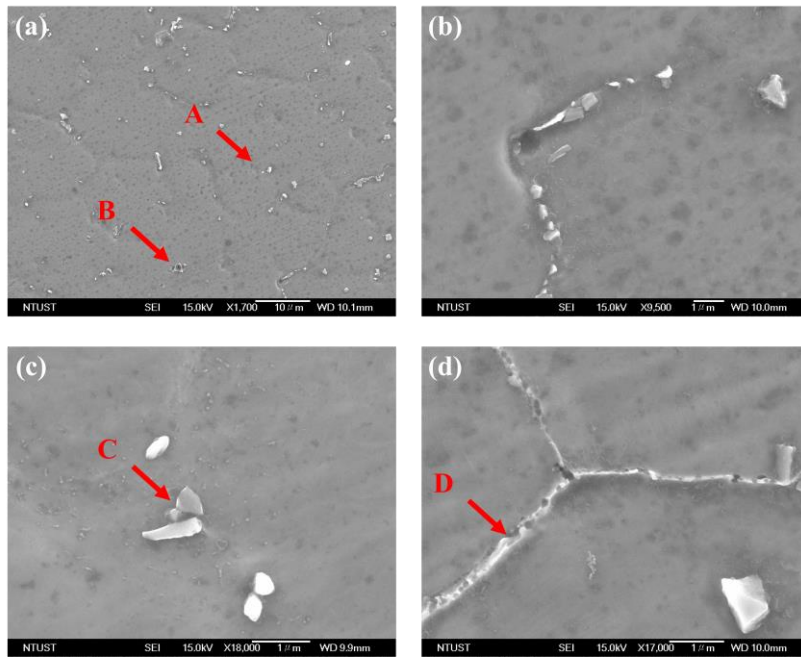


圖 3-24 (a)(b)(c)(d) P-U-6-2u-Pc 鐳冠之 SEI 影像。

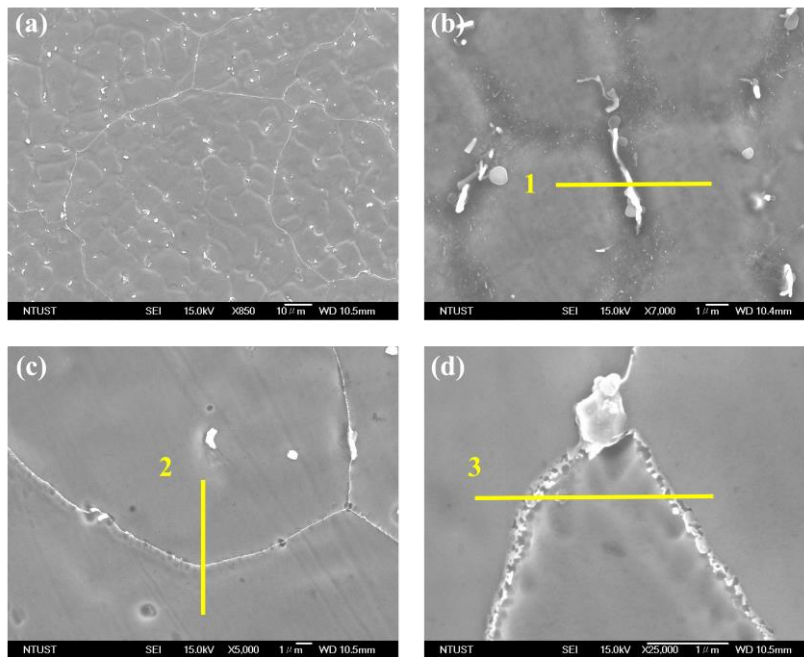


圖 3-25 (a)(b)(c)(d) P-U-6-2u-Pc 鐳根之 SEI 影像。

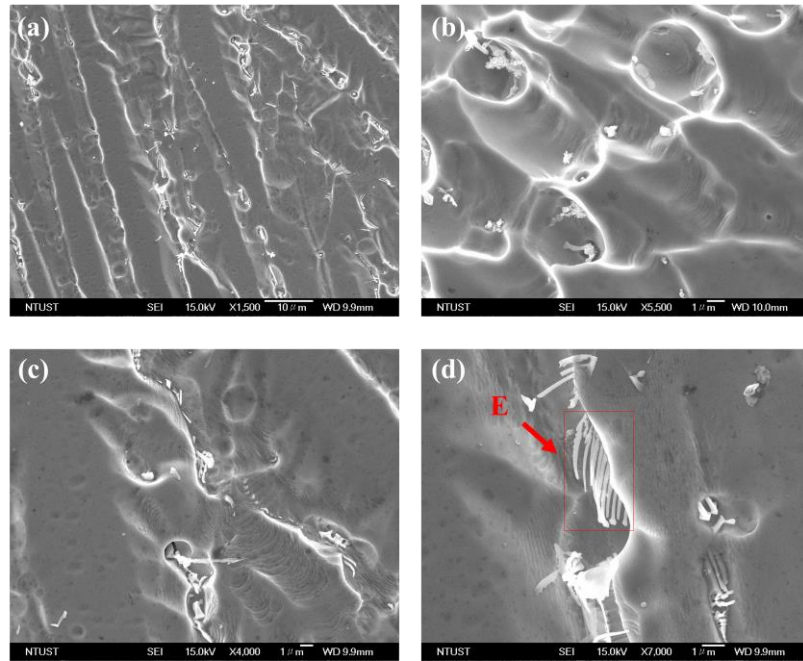


圖 3-26 (a)(b)(c)(d) G-U-1-2u-Pc 銲冠之 SEI 影像。

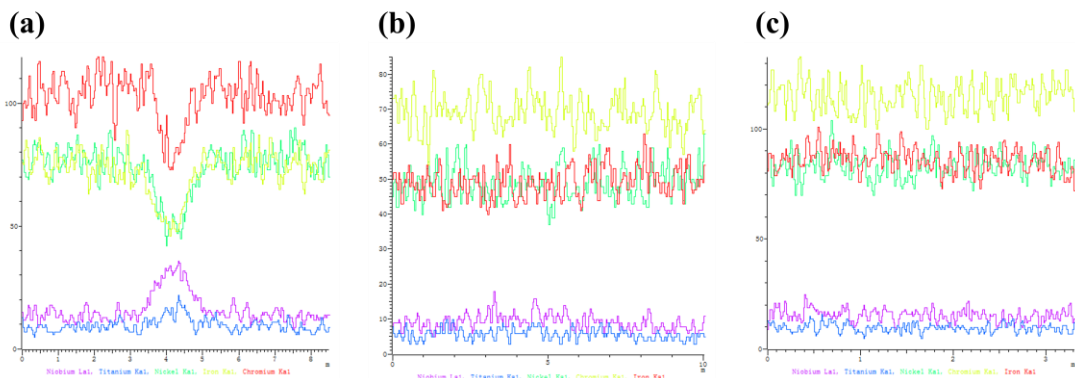


圖 3-27 EDS 線掃描成分分析。(圖 3-25)

另一方面，為了瞭解 GTAW 與 PTAW 之覆銲層的化學成分分布以及對底材的稀釋率，取 G-S-1-Vc 及 P-S-8-Vc 試片進行 EDS 沿銲冠中心線逐點掃描。以覆銲層與底材熔接介面為原點，每隔 0.2 mm 量測一次，其結果繪製成折線圖如圖 3-28 及 3-29 所示、SEI 影像如圖 3-30 及圖 3-31 所示。

由於單道以上覆銲施作，在道次與道次搭接界面處都會形成

如圖 3-23(a)中之黑色帶狀結構，尤以層與層之間更為之，依據其組織形貌推測係造成覆銲層失效之主因，因此，特以 SEM 針對銲冠表層、銲道搭接 Pc 截面的成分與結構進一步分析，結果如圖 3-32 至圖 3-34 及表 3-2 至表 3-3 所示。在圖 3-32 中顯示，道次與道次搭接的介面之結構類似柱狀枝狀晶不完全地長晶組織，推測第 N+1 道次銲道在熔融狀態時，未能完善地與第 N 道銲道表面形成熔接介面。另外，EDS 沿線逐點成分分析結果顯示，在兩側柱狀枝狀晶尖端觸碰處(第 3、4、5 點)，Cr 成分偵測值先陡升再驟降。圖 3-33 則展示道次與道次間，因熔接不完全而生成的微裂縫。銲冠表層以 EDS 分析後發現，GTAW 與 PTAW 施作之 Inconel 52M 覆銲道次皆於表層下出現富 Cr 現象，圖 3-34(a)中 A 點推測為殘存附著的 Cr_2O_3 ，圖 3-34(d)中 G、F 點則為(Cr, Fe)-rich 相。 Cr_2O_3 熔點約為 $2435\text{ }^\circ\text{C}$ ，遠高於 Inconel 52M 的熔點，甚至稍高於覆銲時的工作溫度，使得覆銲金屬熔融液體無法依循前 1 道次的金屬晶面成長，造成熔接不完全，甚至覆銲層失效。

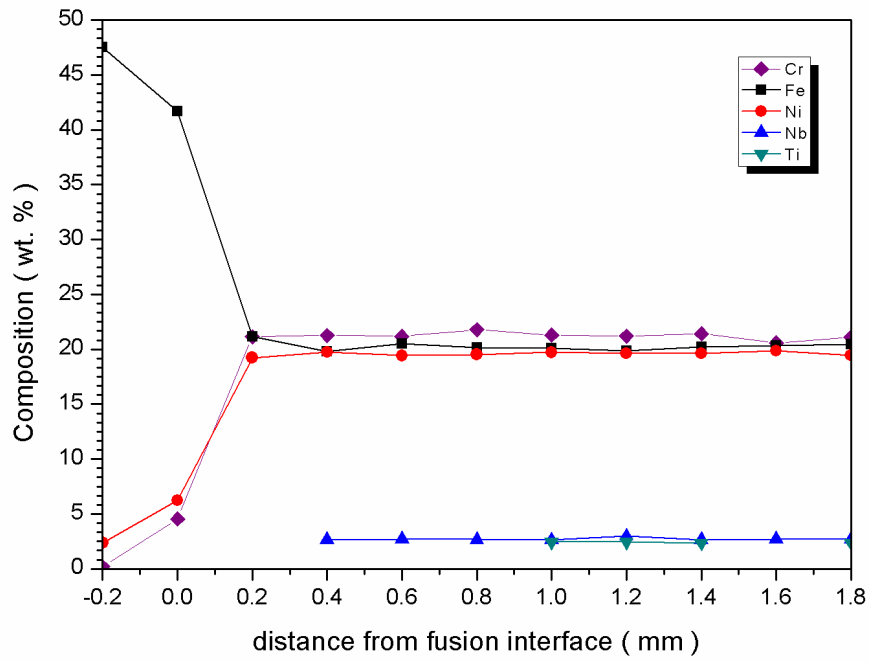


圖 3-28 G-S-1-Vc 試片進行 EDS 沿銲冠中心線逐點成分分析。

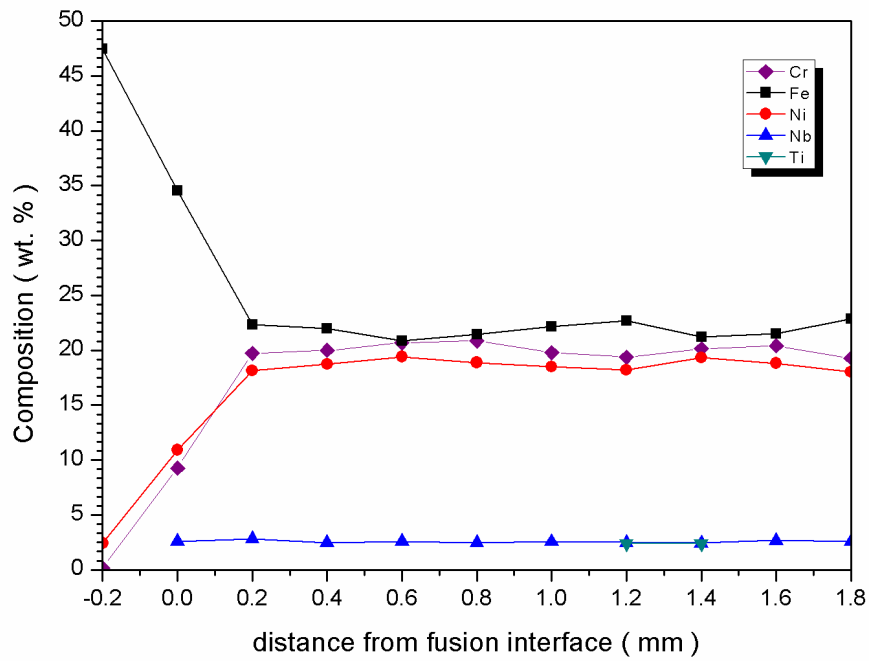


圖 3-29 P-S-8-Vc 試片進行 EDS 沿銲冠中心線逐點成分分析。

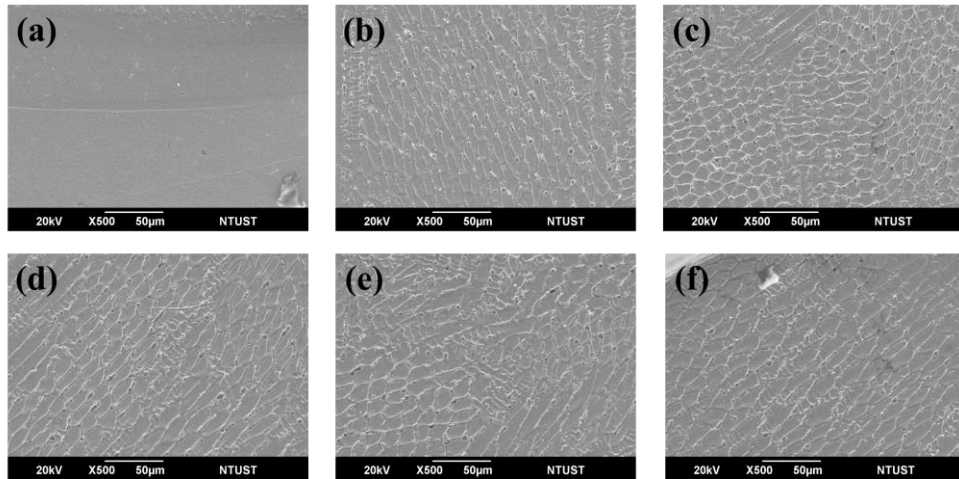


圖 3-30 G-S-1-Vc 試片(a) 與 A508 介面、(b) 距離熔接面+0.4 mm 位置、(c) 距離熔接面+0.8 mm 位置、(d) 距離熔接面+1.2 mm 位置、(e) 距離熔接面+1.6 mm 位置，以及(f) 距離熔接面+2.0 mm 位置之 SEI 影像。

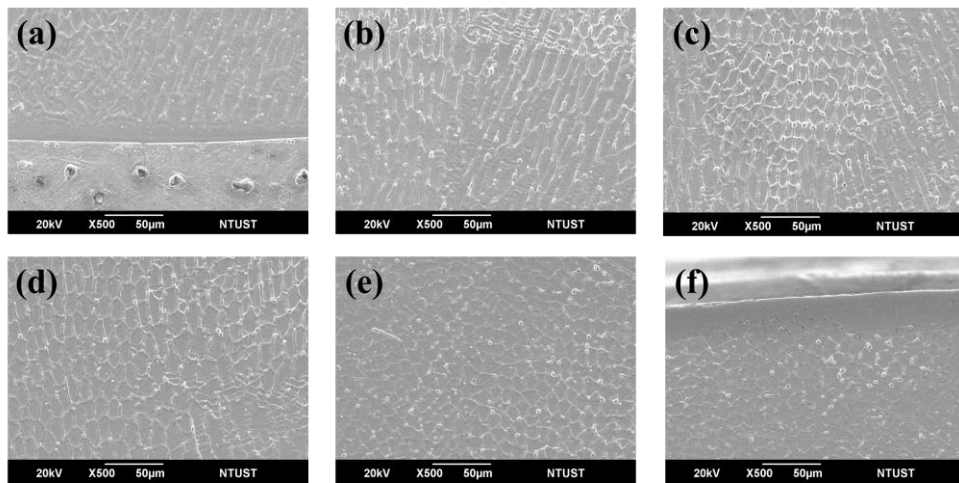


圖 3-31 P-S-8-Vc 試片(a) 與 A508 介面、(b) 距離熔接面+0.2 mm 位置、(c) 距離熔接面+0.6mm 位置、(d) 距離熔接面+1.0 mm 位置、(e) 距離熔接面+1.4 mm 位置，以及(f) 距離熔接面+1.8 mm 位置之 SEI 影像。

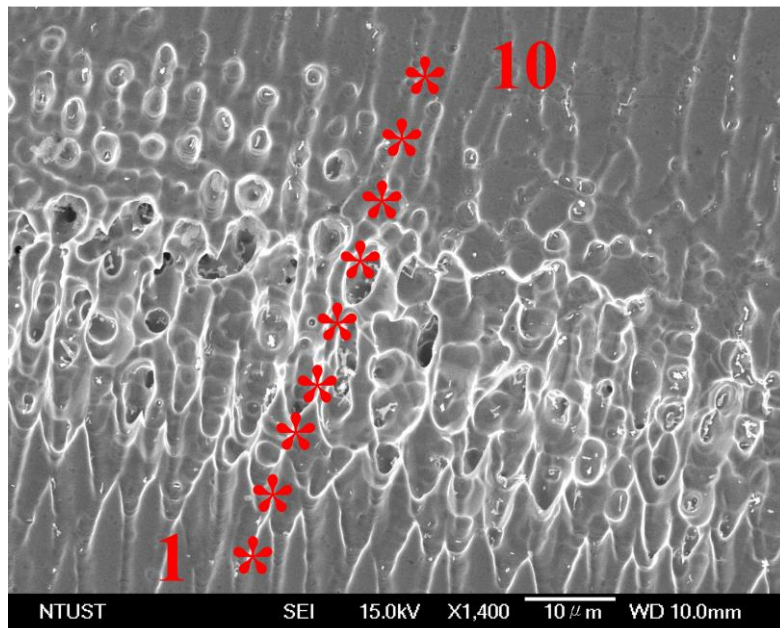


圖 3-32 銲道搭接位置之 Pc 截面的 SEI 影像。

表 3-2 EDS 成分分析 (wt. %)。(圖 3-22)

Positon	Cr	Fe	Ni
1	20.12	46.09	33.78
2	20.24	42.82	36.94
3	22.02	39.45	38.53
4	24.64	37.75	37.61
5	22.46	35.40	42.15
6	21.24	38.90	39.86
7	21.27	40.25	38.48
8	18.95	43.90	37.14
9	19.53	46.93	33.54
10	17.00	48.43	34.57

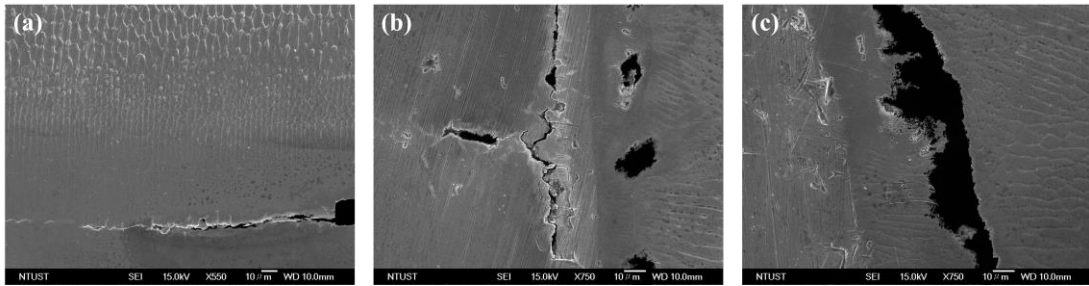


圖 3-33 微裂縫於銲道搭接位置之 Pc 截面的 SEI 影像。

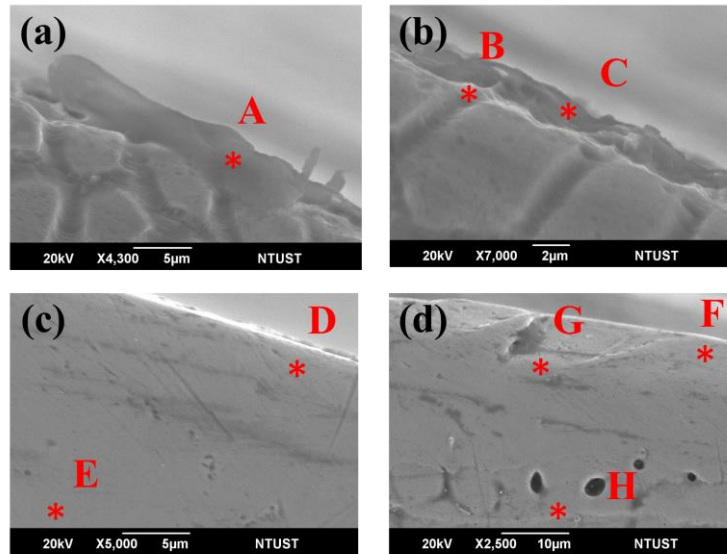


圖 3-34 (a)(b) G-S-1、(c)(d) P-S-8 之銲冠表面 SEI 影像。

表 3-3 EDS 成分分析 (wt. %)。(圖 3-34)

Positon	Cr	Fe	Ni
A	32.13	53.90	13.97
B	31.19	44.00	24.81
C	35.77	49.72	13.53
D	27.61	49.60	22.80
E	21.72	40.38	37.89
F	46.23	43.95	9.82
G	42.70	48.67	8.63
H	19.78	44.67	35.55

二、覆鋁工法對覆鋁層影響性

本部分將討論覆鋁技術施作的參數差異性對於覆鋁層之顯微結構、熱影響範圍以及延伸後續實驗結果。

(一) 預熱

當底材未預熱時，僅有第 1 層第 1 道次之鋁道是在底材金屬為室溫狀態下覆鋁，其餘道次均於層間溫度區間(設定為 200 度)進行覆鋁。對於單道次覆鋁層，不論是以 GTAW 或 PTAW 技術施作，皆未觀察到鋁接缺陷的存在，如圖 3-2(a)及(c)。然而，當覆鋁至單層時，G-U-1、P-U-6 皆於蝕刻後，於 G-U-1-1u-V、P-U-6-1u-Vc 根部(Root)與熔接介面(Weld Interface)處，觀察到未完全接合的黑色區域，如圖 3-35。金屬液體冷卻時，若溫度梯度太大時，容易造成晶體結構成長不完全，使得此道鋁道在受到後續覆鋁施作造成之熱影響、應力作用狀態下生成裂紋。

G-U-2、P-U-8 等覆鋁層施作前，先於 A508 板材兩側皆以高鋁槍走速、低填料速率覆鋁 1 道次，示意圖見圖 3-36，使板材之層間溫度上升至設定溫度，再進行覆鋁層的第 1 道道次。經由金相圖檢視後，證實此預熱方式可以避免第 1 道次鋁道在熔融介面生成裂紋的可能性，如圖 3-2(b)及(d)中所示。

(二) 入熱量

由於每道次覆鋁金屬施工前，僅以鋼刷將鋁道刷至近金屬色，預估 Cr_2O_3 仍有機會附著在鋁道表面；另一方面，(Cr, Fe)-rich 相即為鋁道底材之一部分，無法以鋼刷移除。依據 Ellingham diagram 所示，當工作溫度高於 $1600\text{ }^\circ\text{C}$ 時，Cr 的氧平衡解離壓(dissociation pressure, P_{O_2})僅需低於 10^{-11} atm 便可形成 Cr_2O_3 ，推

測在銲接中的高溫環境下，(Cr, Fe)-rich 相有可能會於熔池金屬接觸到材料前，先一步於表面形成具有保護性、附著性的 Cr_2O_3 皮膜。此 2 現象皆會造成熔接不完全的結果。為此，本研究在以不大量移除銲道底材的前提下，透過改變銲接參數，嘗試降低熔接不完全的發生機率。銲接參數詳見附錄 A.1 及附錄 A.2，GTAW 透過提高送料速度、PTAW 透過降低銲槍走速及增加銲槍擺弧 (oscillation)，藉以提升單位時間內的熱輸入量，探討此參數設計是否能達成目的。實驗結果如圖 3-2(b)及(d)、圖 3-3(b)及(d)及圖 3-4(b)之金相圖所示，在任一道次與道次的搭接介面，皆無觀察到缺陷的存在，顯示較高的單位時間入熱量對於熔接不完全的形成機制有還原的作用。然而，由於銲道底材冷卻速率過慢，造成大量 Cr 析出在枝晶晶界，是謂偏析反應 (segregation)，亦可稱之為固溶失效 (failure of solidification)。此一反應將會使得覆銲層金屬之耐蝕能力大幅下降、敏感性大幅提升，且於腐蝕環境中容易產生孔蝕 (pitting)。

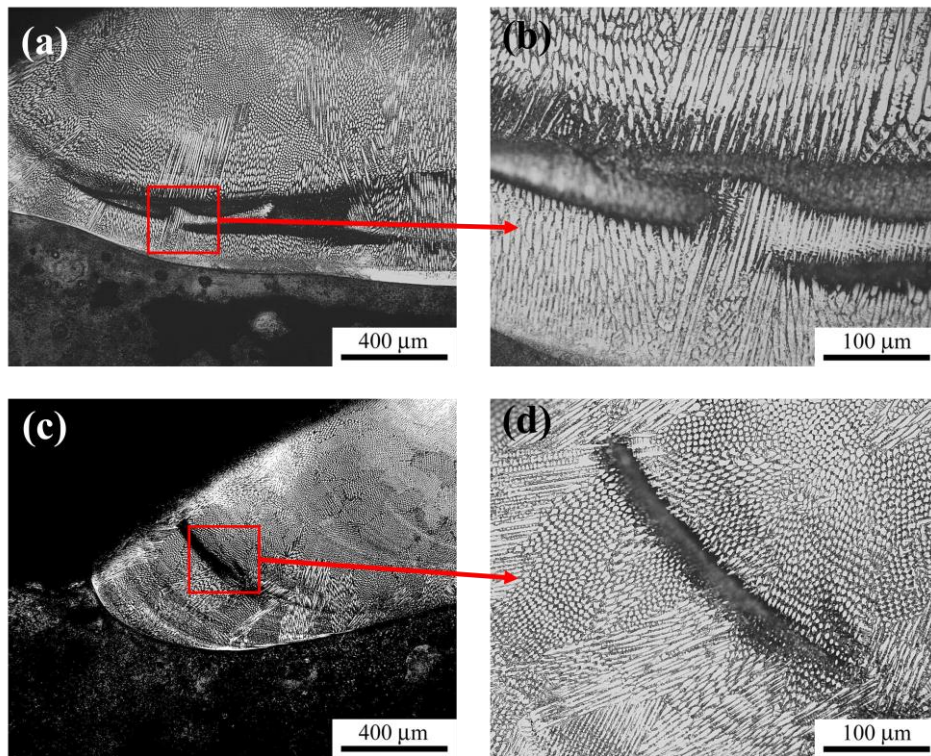


圖 3-35 (a)(b) G-U-1-1u-Vc、(c)(d) P-U-6-1u-Vc 之根部(Root)與熔接介面(Weld Interface)處的金相圖。

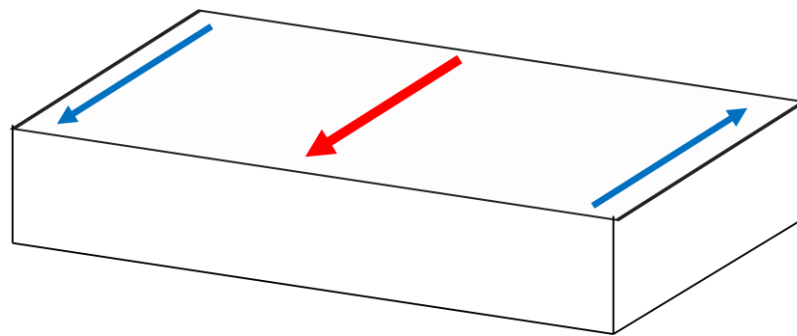


圖 3-36 預熱覆鋅之工件示意圖。(其中藍色箭頭為預熱覆鋅、紅色箭頭為覆鋅層施作位置)

三、TEM 分析

G-U-1-Pc 與 P-U-6-Pc 以 TEM 針對特定道次之特定位置做微觀分析。圖 3-37 為取樣位置 P-U-6-1u-Pc 鉾冠處的 TEM 分析結果，圖(a)及(d)顯示沃斯田體晶粒明視野影像內的枝晶間存在著細長，寬度約僅有數十奈米尺度的析出相。圖(b)及(f)為針對圖(a)及圖(e)基地相以沃斯田體晶帶軸[001]方向之擇區繞射圖。圖(c)則為沃斯田體晶粒靠晶界處有許多差排生成及聚集的明視野影像。而此處明視野影像內之差排，任何旋轉角度皆能被觀察到，顯示晶粒內部應該有析出物以差排為異質成核位置，以致明視野裡差排分布的位置能被發現。圖 3-38 為取樣位置 P-U-6-2u-Pc 鉾冠處的明視野影像，圖(a)及圖(d)之明視野影像中，顯示析出物分布於枝晶間的空間，由於析出物尺度過小，因此無法以擇區繞射圖來判斷其確切組成成分。圖 3-39 為取樣位置 P-U-6-3u-Pc 鉾冠處之分析結果。圖(a)及圖(d)的明視野影像中，皆觀察到差排明顯的位於枝狀晶晶粒內，圖(b)之枝狀晶明視野影像則顯示凝固前鋒周圍散佈著許多大小顆粒尺寸不一的析出物。圖 3-40 則是針對 P-U-6-1u-Pc 鉾冠試片之明視野內的晶界析出物進行 EDS 成分分析，透過圖(a)及圖(b)之高解析明視野影像，得知此析出物是沿晶界析出之片狀結構。而 EDS 線掃描結果則如圖(d) Fe、(e) Cr、(f) C、(g) Ni、(h) Nb 所示，推測其析出物的結構可能為(Fe, Cr)-rich 的 $M_{23}C_6$ 形式碳化物。另外再選取明視野內尺寸較大之析出物進行 EDS 成分分析與擇區繞射，如圖 3-41 所示。圖(c)與圖(f)為 2 種析出物的明視野影像；圖(d)及圖(g)則是暗視野影像分析，分別透過沃斯田體晶帶軸[001]方向及[011]方向之擇區繞射如圖(e)與

圖(h)所呈現。EDS 成分分析結果如圖 3-42 所示，2 種晶界析出物皆是 Cr-rich 的碳化物。圖 3-43 為取樣位置 G-U-1-1u-Pc 鐳冠處的 TEM 分析結果，圖(c)及圖(d)中皆觀察到枝晶間有白色顆粒狀析出物，依據文獻報導以及本研究團隊先前之研究結果，可以得知此種析出物為 Ti-rich 碳化物，亦或是 TiN。圖(b)明視野影像中的枝狀晶外圍被呈現網狀的析出物包覆住，與圖 3-39(b)相比，析出物的量明顯提升。樣位置 G-U-1-3u-Pc 鐳冠處的 TEM 明視野影像如圖 3-44 所示，析出物的量及密度遠超過前面幾個取樣位置。

歸納上述的 TEM 分析結果，得知以 PTAW 技術施作之覆鐳層，析出物大部分分布於枝晶間處(interdedritic region)，細長的黑色析出物以差排為成核點，片狀的(Cr, Fe)-rich 碳化物沿枝晶晶界析出成長。以 GTAW 技術施作之覆鐳層，則會發現白色 Ti-rich 碳化物及 TiN 析出在晶界處，黑色細長析出物呈現網狀結構包覆住枝狀晶。多道次的鐳道則沒有明顯的差異性。

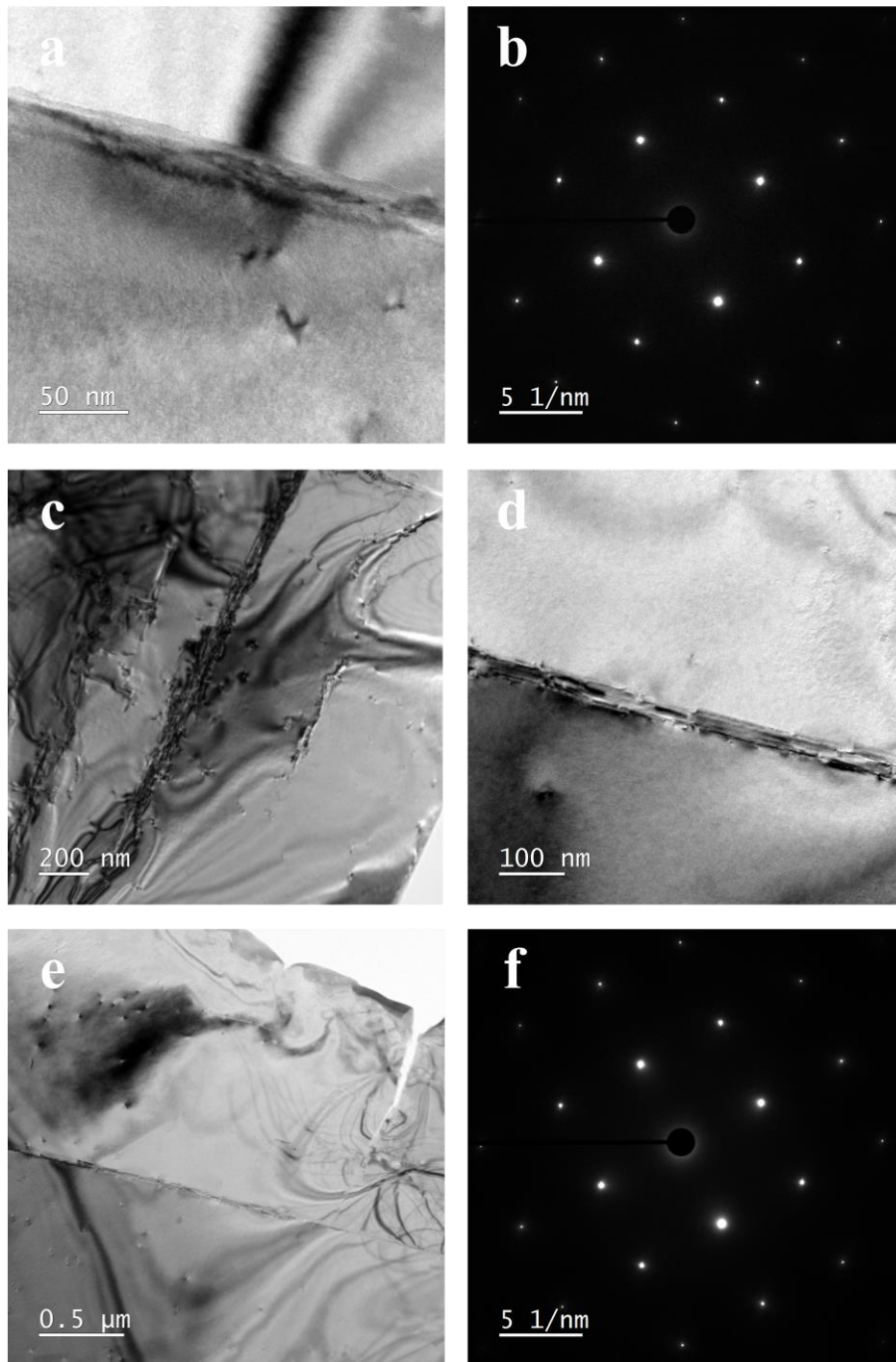


圖 3-37 取樣位置 P-U-6-1u-Pc 銲冠處的 TEM 分析，(a)及(d) 沃斯田體晶粒明視野影像、(b)及(f) 為針對圖(a)及圖(e)基地相以沃斯田體晶帶軸[001]方向之擇區繞射圖、(c) 沃斯田體晶粒明視野影像。

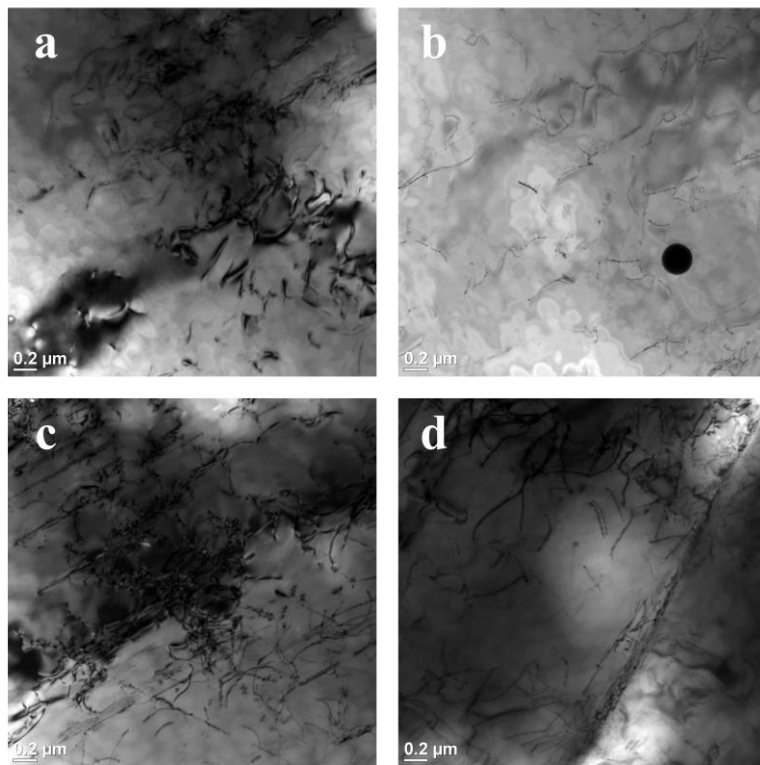


圖 3-38 取樣位置 P-U-6-2u-Pc 鐳冠處的明視野影像。

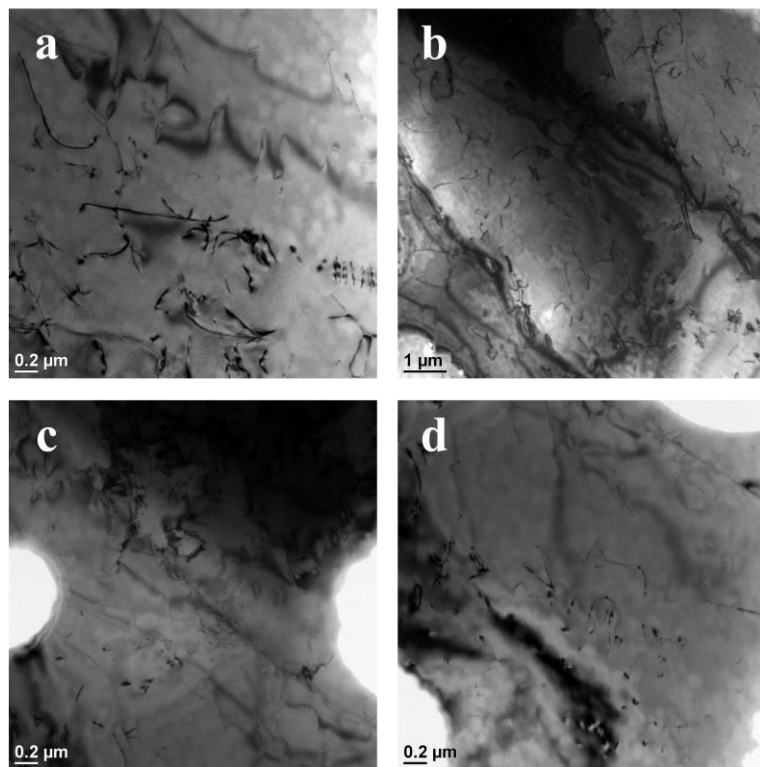


圖 3-39 取樣位置 P-U-6-3u-Pc 鐳冠處的明視野影像。

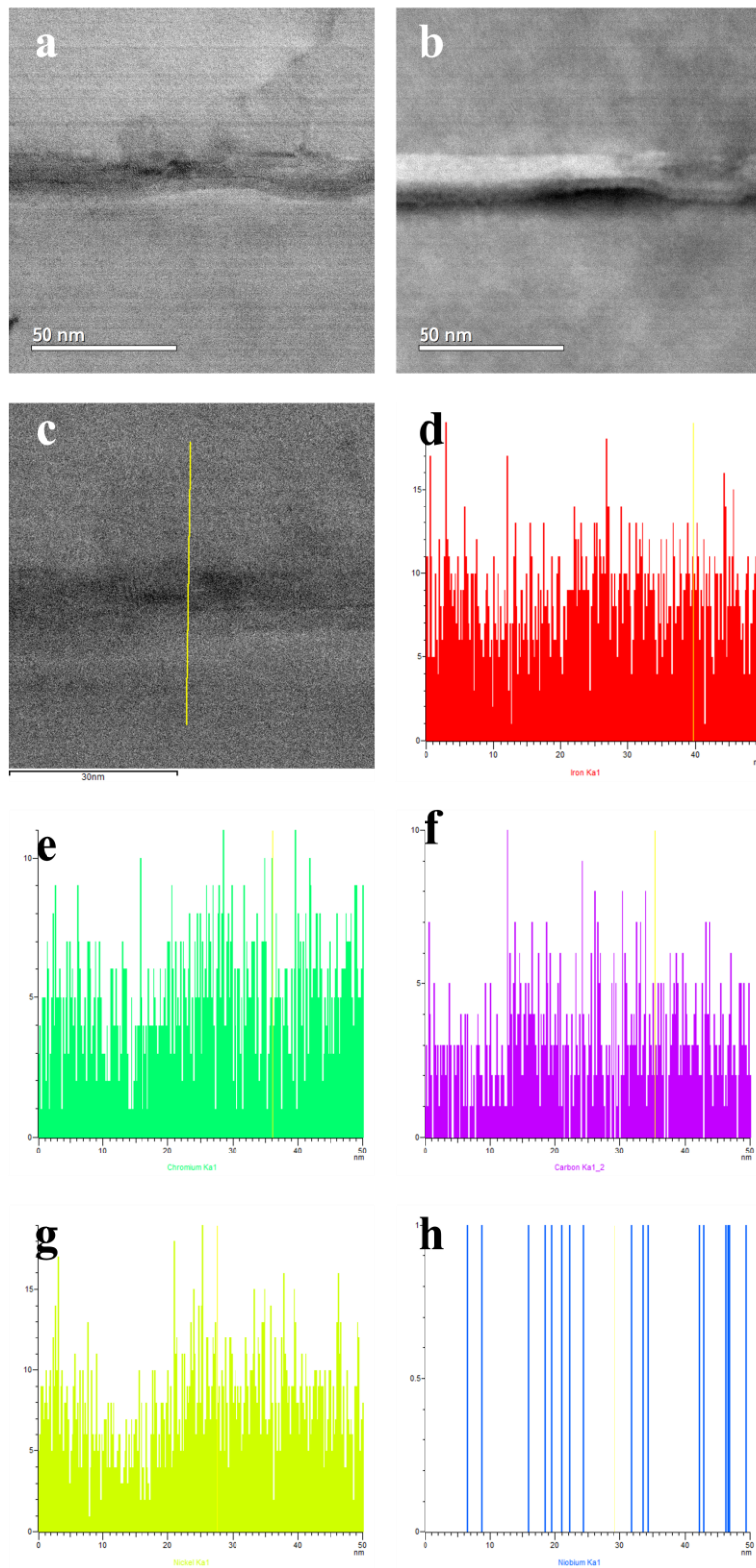


圖 3-40 P-U-6-1u-Pc 銲冠試片之明視野，(a)及(b) 高解析明視野影像，EDS 線掃描結果 (d) Fe、(e) Cr、(f) C、(g) Ni、(h) Nb。

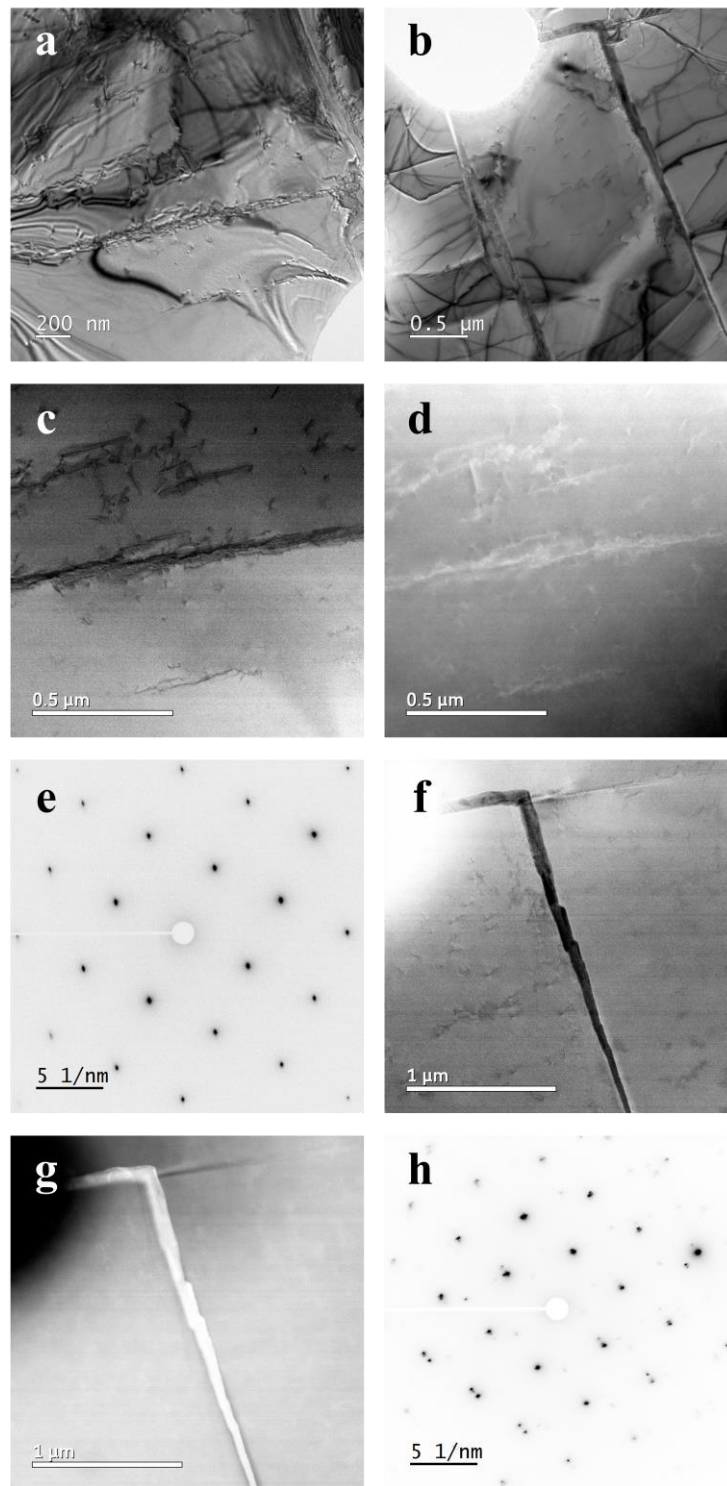


圖 3-41 P-U-6-1u-Pc 鋁冠試片之(a)及(b) 明視野影像，(c)與(f) 為析出物的明視野影像、(d)及(g) 則是暗視野影像，(e) 與(h) 透過沃斯田體晶帶軸[001]方向及[011]方向之擇區繞射圖。

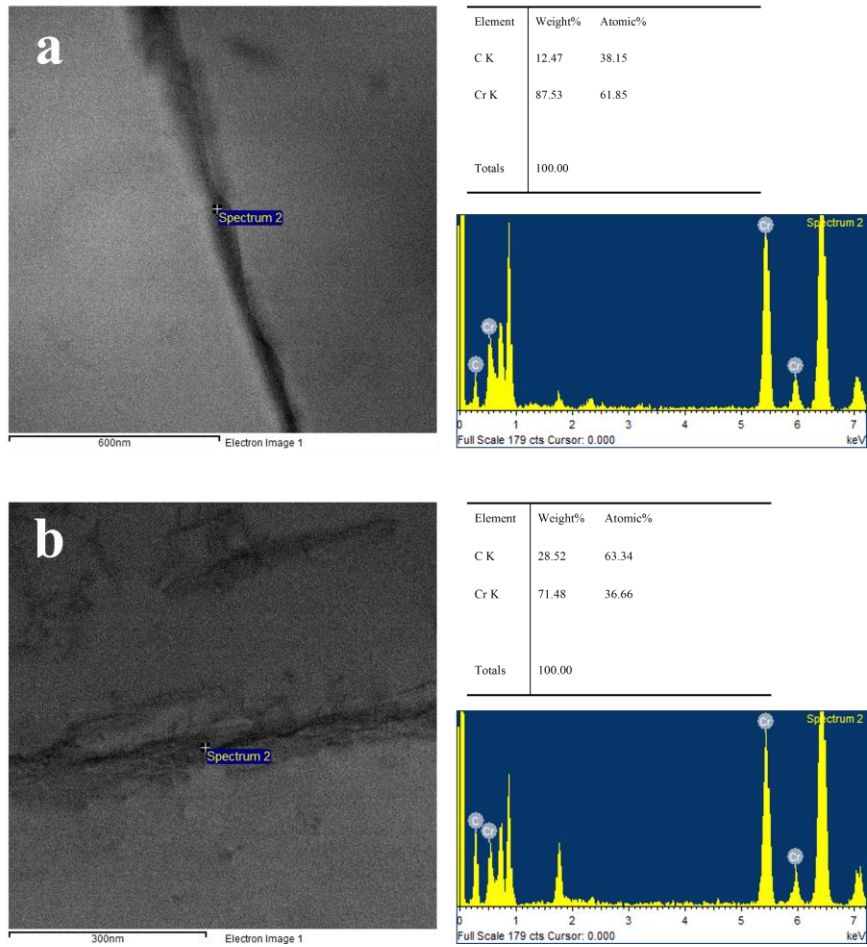


圖 3-42 EDS 成分分析結果。

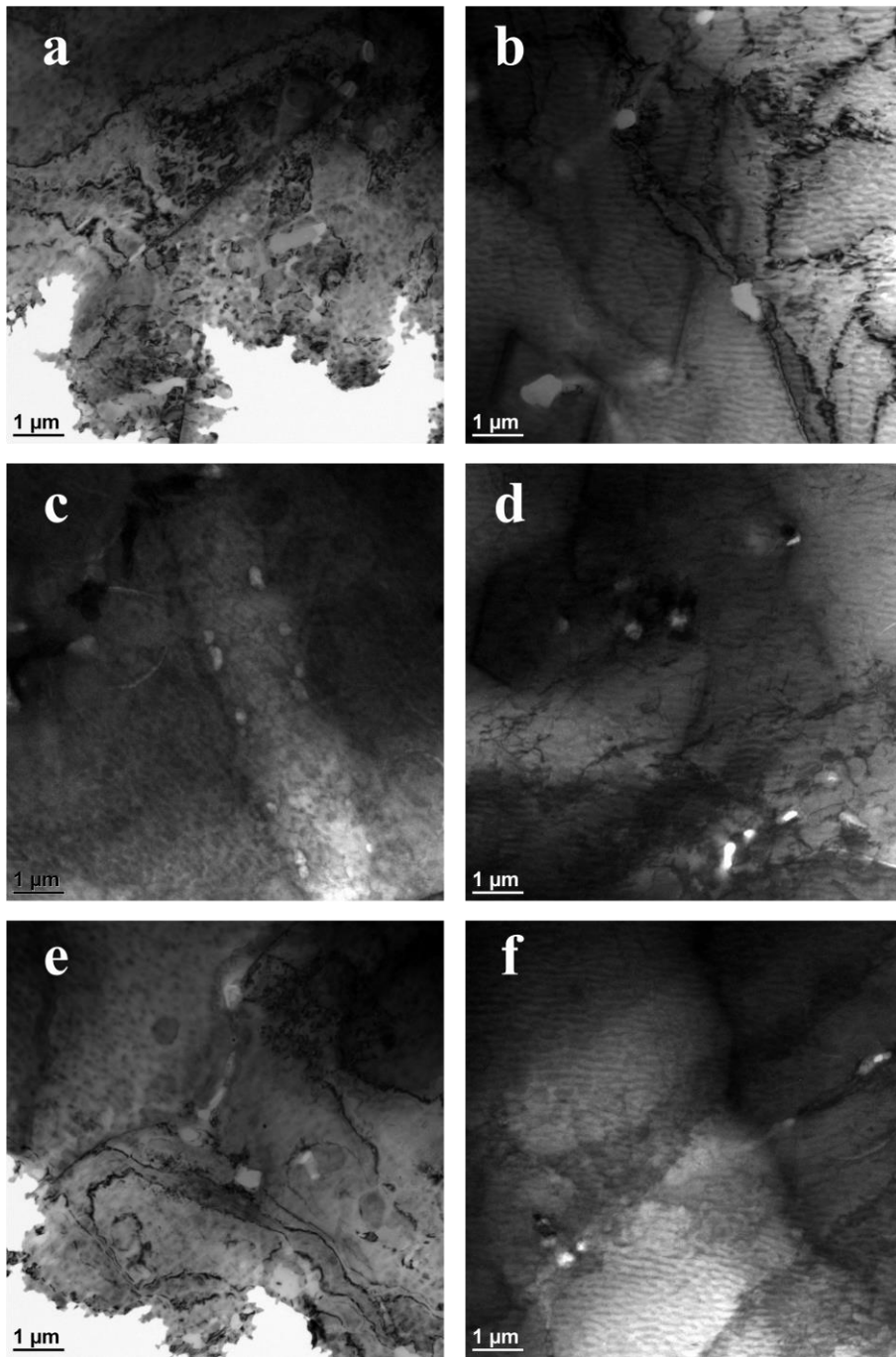


圖 3-43 取樣位置 G-U-1-1u-Pc 鐳冠處的 TEM 分析結果。

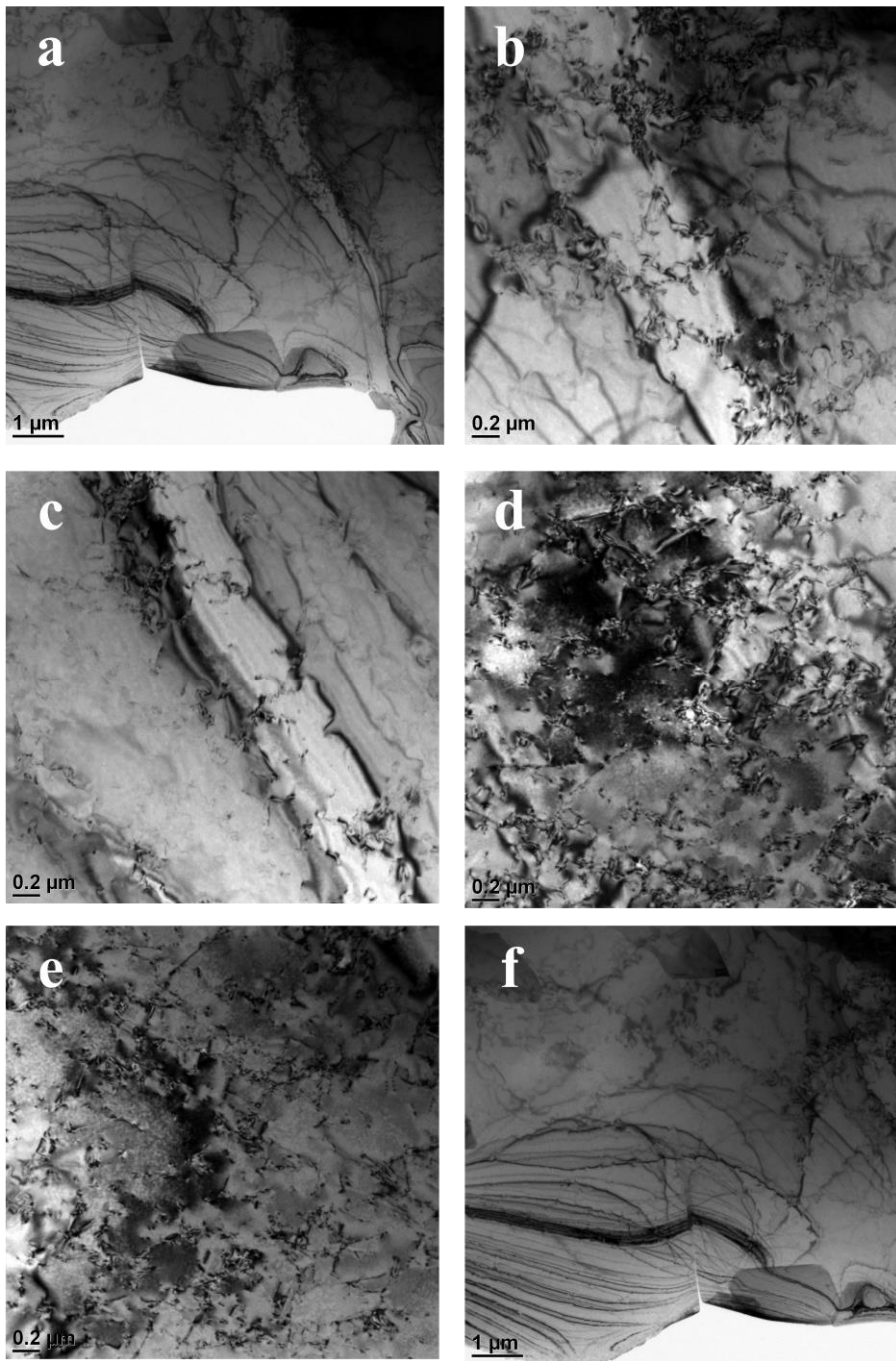


圖 3-44 取樣位置 G-U-1-3u-Pc 鋅冠處的 TEM 分析結果。

四、電化學試驗

為瞭解覆銲施作對於覆銲層、底材熱影響區的耐蝕性影響，分別取 GTAW 與 PTAW 之單道與叁層覆銲件，以 Pc 的方式切取第 1 層第 1 道次銲道之銲冠、銲根與底材熱影響區，進行動電位極化實驗。依據電位對電流密度做圖，再以 SEM 觀察經實驗後之試片表面，探討入熱量與腐蝕型態的關係。

P-S-8-Pc 與 P-T-1-1u-Pc 之電化學曲線見圖 3-45，試片表面形貌如圖 3-46 所示。P-S-8-Pc 的 HAZ 與 P-T-1-1u-Pc 的 HAZ 之腐蝕電位皆與 A508 底材相近，顯示複數層覆銲施作之熱影響對 A508 底材的耐蝕性質並無直接影響性。P-T-1-1u-Pc 的銲根(紅線)，其陽極曲線斜率下降，亦即腐蝕反應發生時，金屬原子氧化成離子的速率較 P-S-8-Pc 快速。P-T-1-1u-Pc 的銲冠(黑線)，在 -100 mV 處生成一個 S 形曲線，代表經過叁層覆銲施作後，第 1 層第 1 道次銲道之銲冠較容易發生孔蝕反應。

G-S-1-Pc 與 G-T-1-1u-Pc 之電化學曲線見圖 3-47，試片表面形貌如圖 3-48 所示。GTAW 系列之腐蝕電位均較 PTAW 系列低；覆銲層數愈多，腐蝕電位愈低，其中，銲冠又會比銲根低。另一方面，G-S-1-Pc 銲根在 0.0 mV 處生成孔蝕平台電位(Pitting plateau)。

延續 TEM 分析結果與覆銲工法 — 入熱量之結果討論，過多的入熱量會使得析出物大量生成，且已存在的晶界析出物也能持續成長，造成晶粒內部生成金屬元素匱乏區(depleted zone)。經 TEM 分析結果可得知，GTAW 覆銲層之析出物多為 Ti-rich 碳化物，其腐蝕電位相對基地相較穩定。在腐蝕反應發生時，富 Ti 相可視為局部陰極不參與反應，使得其周遭的基地相金屬受到劇烈

的氧化作用而腐蝕。另外，(Cr, Fe)-rich 碳化物在枝狀晶晶界析出、成長，同時也造成基相產生 Cr 匱乏區、整體腐蝕電位驟降。

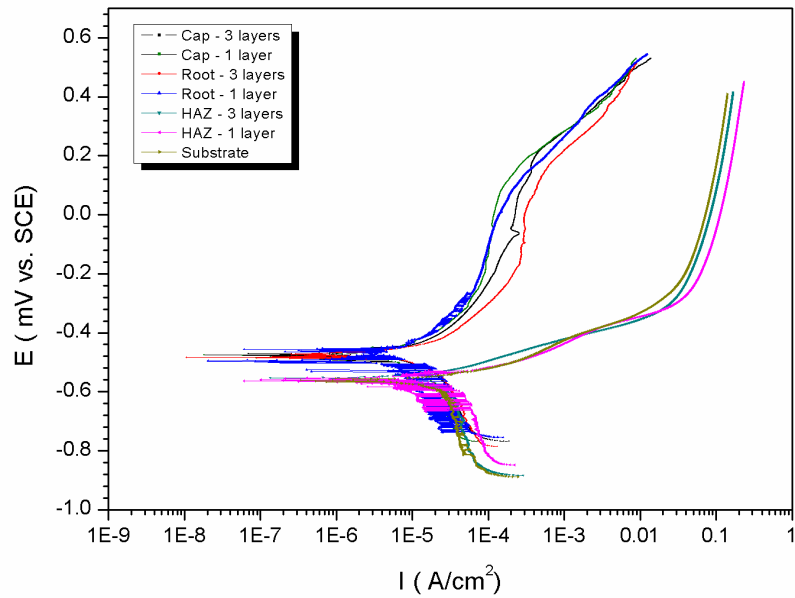


圖 3-45 P-S-8-Pc 與 P-T-1-1u-Pc 於 3.5 % NaCl_(aq) 環境下之電化學曲線圖。

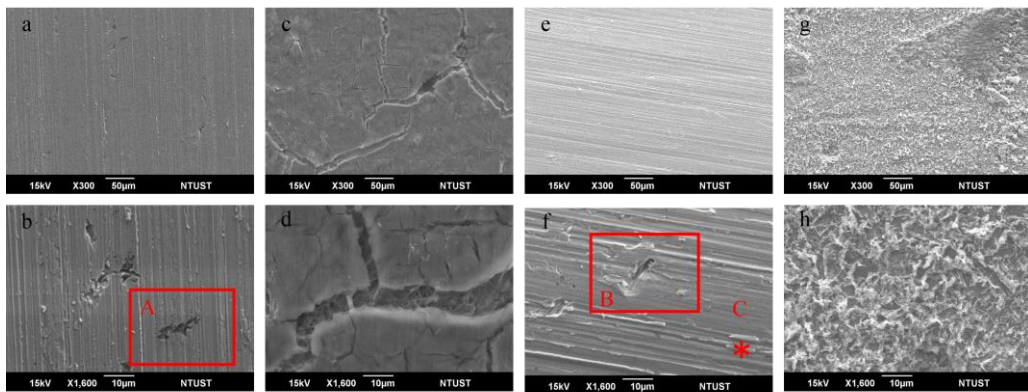


圖 3-46 經電化學實驗後，(a)(b) P-S-8-Pc 鍍冠、(c)(d) P-S-8-Pc 熱影響區、(e)(f) P-T-1-1u-Pc 鍍冠，以及 (g)(h) P-T-1-1u-Pc 熱影響區之 SEI 影像。

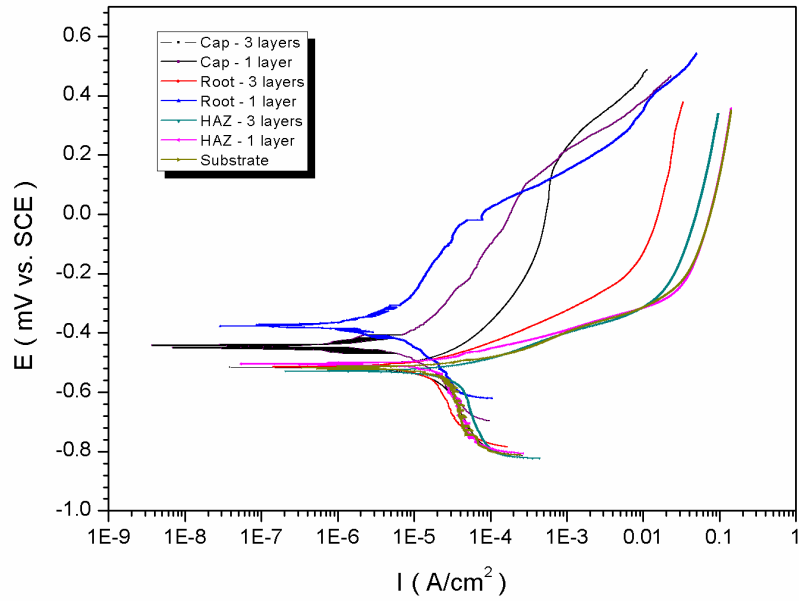


圖 3-47 G-S-1-Pc 與 G-T-1-1u-Pc 於 3.5 % NaCl_(aq) 環境下之電化學曲線圖。

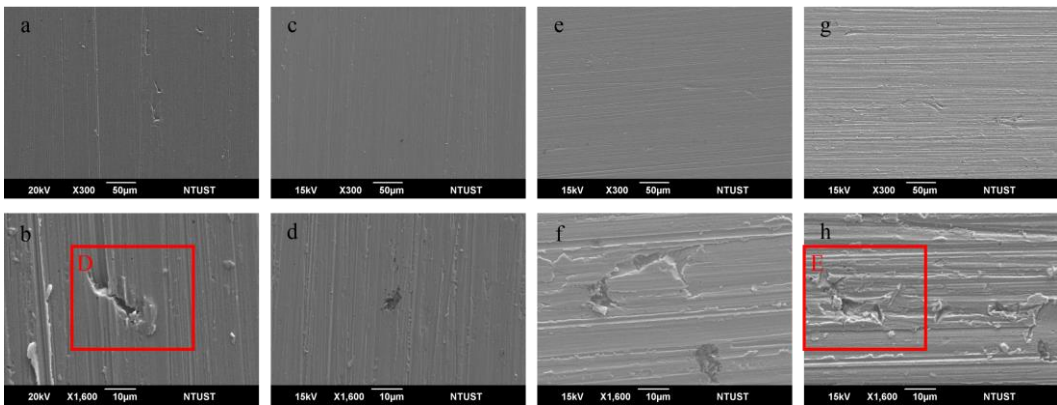


圖 3-48 經電化學實驗後，(a)(b) G-S-1-Pc 鋅冠、(c)(d) G-S-1-Pc 鋅根、(e)(f) G-T-1-1u-Pc 鋅冠，以及(g)(h) G-T-1-1u-Pc 鋅根之 SEI 影像。

表 3-4 EDS 成分分析 (wt. %)。(圖 3-46 及圖 3-48)

Position	Cr	Fe	Ni	Si
A	18.92	41.04	33.02	7.02
B	20.88	34.16	40.27	4.69
C	26.26	28.26	45.48	-
D	24.70	29.17	44.71	1.42
E	26.48	22.49	46.94	4.09

五、微硬度試驗

針對第 1 層第 1 道次覆銲銲道及下方之 A508 底材，比較 GTAW 與 PTAW 覆銲技術對熱影響區之影響，微硬度分布(圖 3-49 及圖 3-50)則顯示單層覆銲之底材熱影響區具有較高的硬度值，經覆銲層施作後，硬度值則下降至底材之平均值；銲道經覆銲施作後，由於入熱量造成再次熱影響細晶的機制，使得硬度稍稍提升。

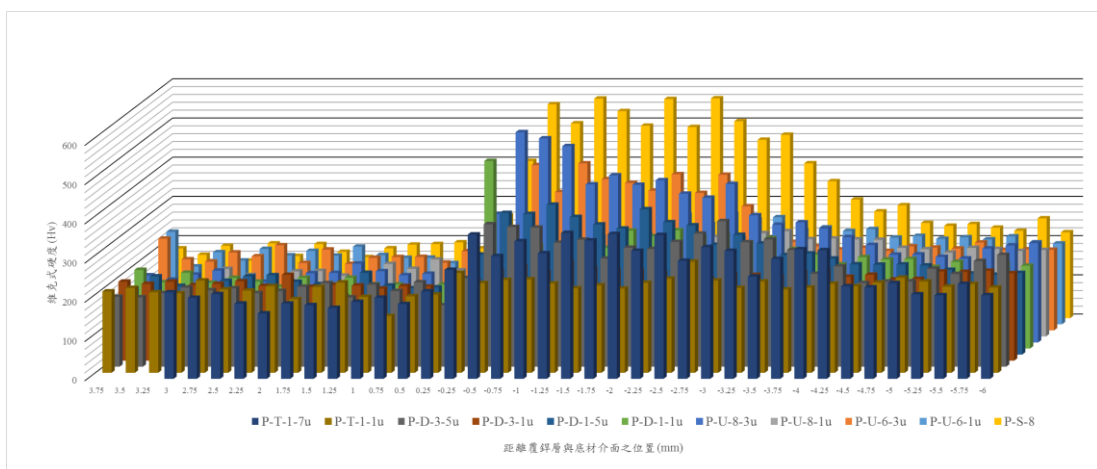


圖 3-49 第 1 層第 1 道次銲道上/下方經不同 PTAW 覆銲施作後之微硬度分布值。

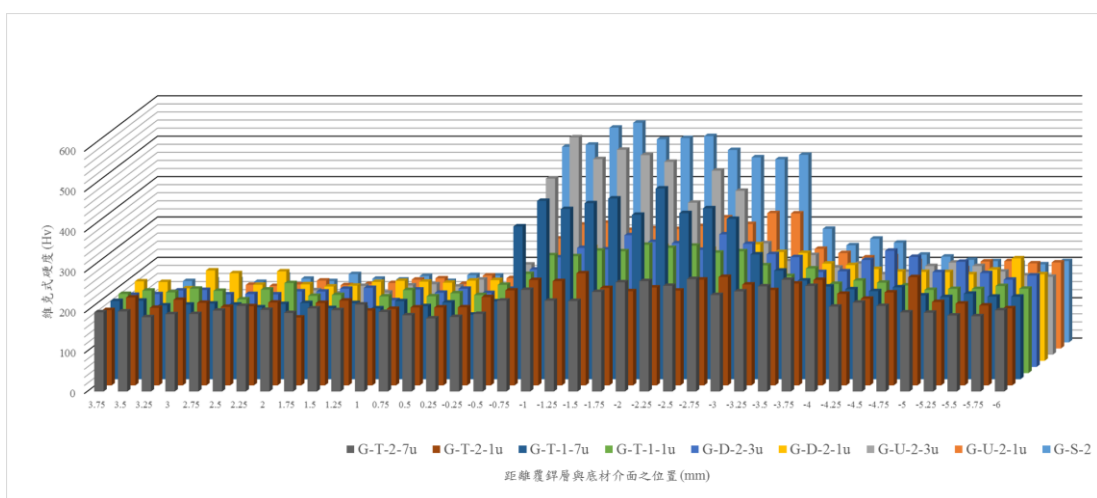


圖 3-50 第 1 層第 1 道次銲道上/下方經不同 GTAW 覆銲施作後之微硬度分布值。

六、銲接溫度模擬與量測

(一) GTAW 溫度量測

以 GTAW 進行參層覆銲，第 1 層有 3 道次、第 2 層有 2 道次、第 3 層 1 道次。銲接電壓 10 V、電流 125 A，銲槍走速為 198 mm/min，送料速度為 870 mm/min。搭接道次重疊距離固定為 3 mm，每次銲接時間為 29 秒，每道次之冷卻時間為 5 分鐘。熱電偶放置在第 1 層第 1 道、第 2 道與第 2 層第 1 道的銲道中心線正下方，距離表面 2 mm 和 4 mm 的 $\phi 1.1$ mm、深 8mm 之孔洞，其示意圖如圖 3-51。實際實驗圖，如圖 3-52。為方便表示，將銲接的道次第 1 層第 1 道表示為 1-1，第 2 道為 1-2，第 2 層第 1 道為 2-1，依此類推；熱電偶由右往左依列編號分別為 A、B、C，上方的孔為編號 1 下方為 2，示意圖如圖 3-53。

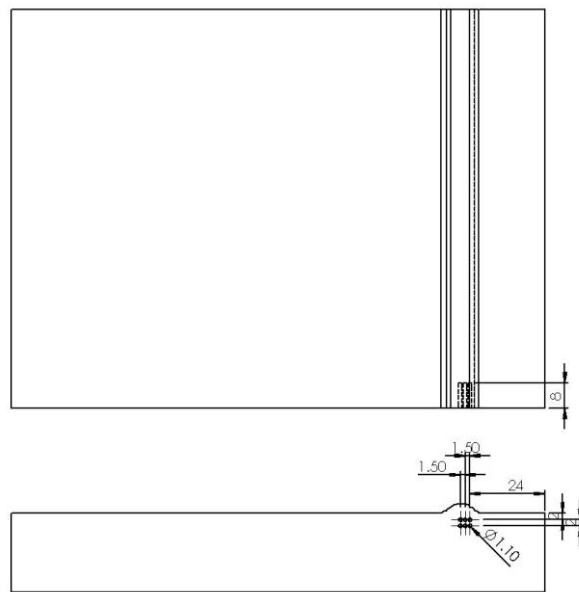


圖 3-51 GTAW 熱電偶埋設示意圖。



圖 3-52 GTAW 實際銲接實驗熱電偶位置。

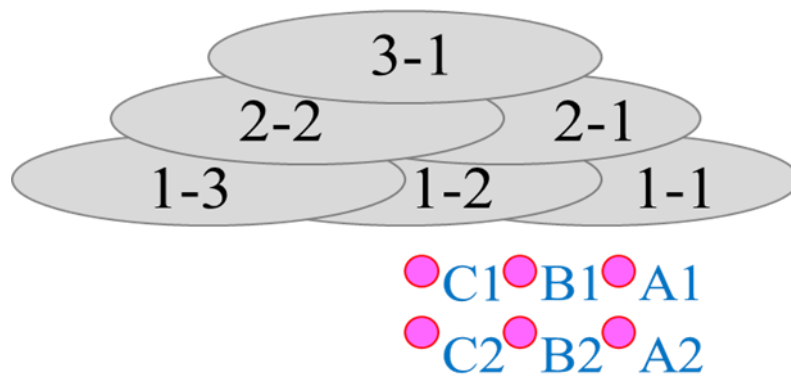


圖 3-53 GTAW 銲道與熱電偶編號示意圖。

溫度量測實驗中設定 0.1 秒紀錄一次資料，其結果如圖 3-54 所示，圖(a)顯示在第 1 道次覆銲時，於銲道下方 2 mm (A1)測得的溫度為 795.8 °C，位於熱影響區的邊緣內；下方 4 mm (A2)測得 325.6°C，已不在熱影響區內，其結果與金相圖符合。圖(c)在 947 秒至 1315 秒時，因人為疏失使量測值失真。此區間為銲接第 2 層第 1 道，銲道中心為熱電偶 A 行與 C 行的中間，因此推估該點在銲接時最高溫度與同時間的 A2 溫度 275.2°C 相似。另在銲接 1-2

道次時，C1 應位於熱影響區內，但其實際測量結果卻未超過 727 °C，可能原因為銲接位置略有偏差。

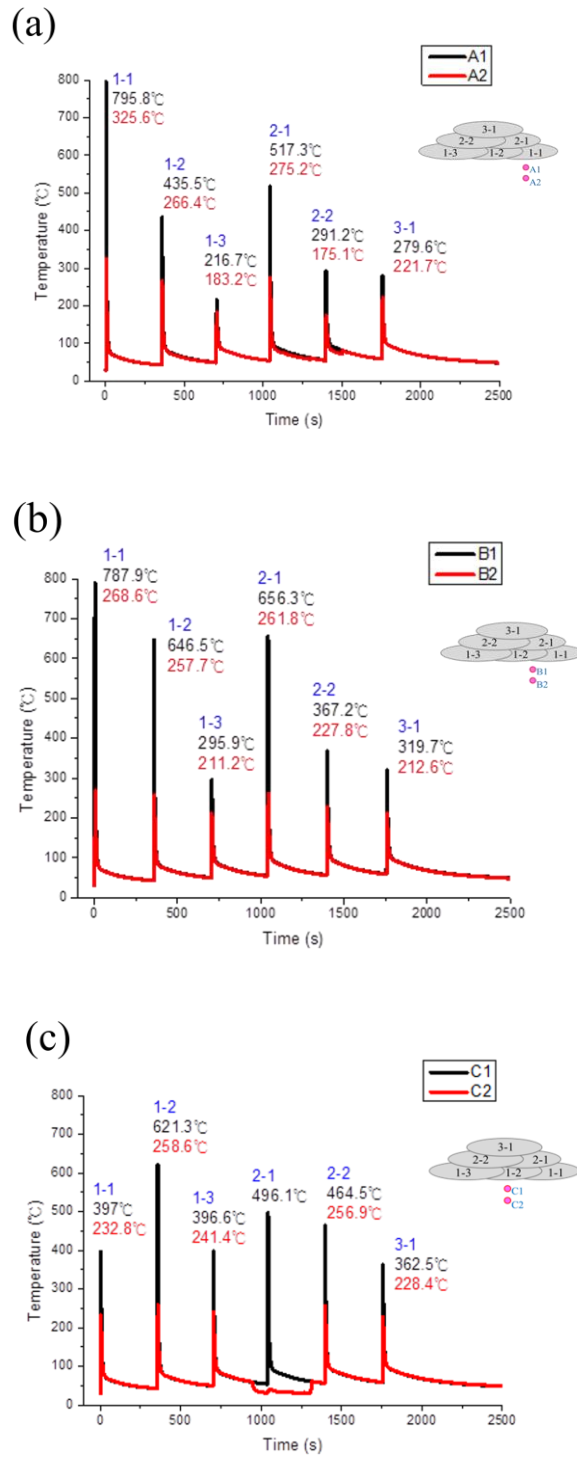


圖 3-54 GTAW 溫度量測實驗結果圖。

(二)PTAW 溫度量測

以 PTAW 進行 3 道銲接，銲接電壓 30V、電流 70A，銲槍走速為 100 mm/min，送料速度為 720 mm/min。而搭接道次重疊距離固定為 4.5 mm，第 1 道冷卻時間為 3.5 分鐘，第 2 道為 13.5 分鐘。熱電偶放置在距離銲道中心 7 mm、9 mm 和 11 mm 處下方深度 1.5 mm 與側面相距 6 mm 之 $\phi 1.1$ mm 的孔洞，示意圖如圖 3-55，實際實驗架設圖為圖 3-56。溫度量測實驗中設定 1 秒紀錄一次資料，其量測結果如圖 3-57。

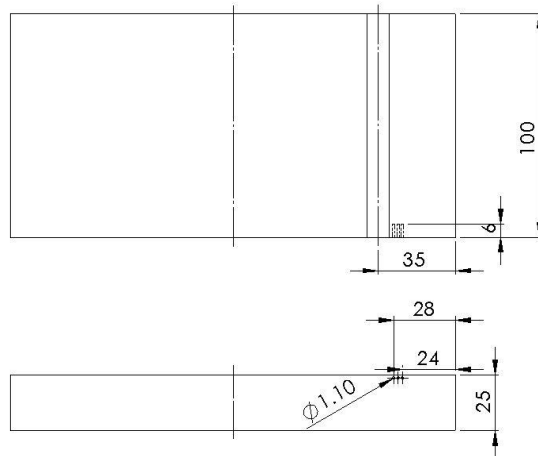


圖 3-55 PTAW 熱電偶埋設示意圖。

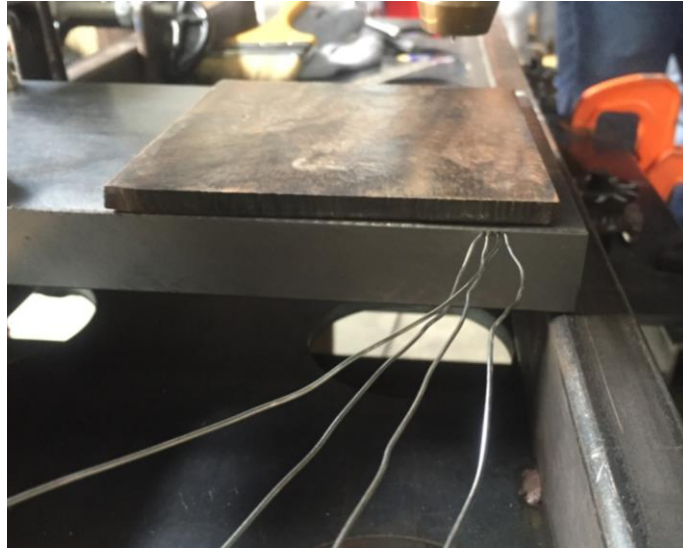


圖 3-56 PTAW 實際銲接實驗熱電偶位置。

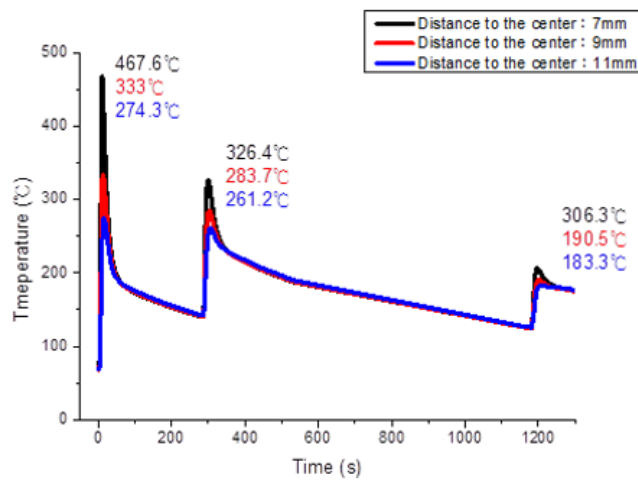


圖 3-57 PTAW 溫度量測結果。

(三)有限元素分析模擬

為了獲得製造或維修核能銲接組件的最佳化參數，以提高施作的品質及延長設備使用壽命，本研究以有限元素軟體模擬銲接溫度與殘留應力，再與實際量測結果進行比對。使用有限元素軟體 COMSOL，利用固體熱傳物理量進行 3D 模擬。因銲接過程中，溫度變化很大，而材料在不同溫度時，其機械與物理性質等皆不

相同，因此在定義材料時需隨溫度變化。本研究的材料熱物理性質設定參考 A508 Class2 [2][3]。為貼合實際量測當下的狀況，在邊界條件的設定上，室溫為 30 °C，在厚板上方的面及四周皆設定自然對流，另在上表面設定有熱輻射。

比對 GTAW 溫度模擬結果，依據實驗的參數，設定模擬的邊界條件，為節省計算時間，溫度模擬的步階時間為 1 秒，其結果擷取實驗測量點單道銲接的數據如圖 3-58，為配合模擬的擷取時間，將量測到 1 秒內的溫度值取平均如圖 3-59。在銲道下方的測量點由靠近表面 2 mm、4 mm 最高溫度依序為 753.64 °C、315.65 °C，皆發生在時間第 2 秒；而實驗的測量點最高溫則依序為 7777.6 °C、321.4 °C，分別發生在時間第 4 秒、5 秒。若將各量測點分開比較如圖 3-60。比較實驗與模擬結果圖，在起始處的升溫有些差異，是由於熱電偶透過熱傳導測得溫度，銲接時溫度突然急速升高，而熱電偶的靈敏度較差，剛開始升溫有延遲的現象。雖然模擬時量測點的最高溫度時間與實際有 2~3 秒的差距，然最高溫度非常接近。在各個測量點的比較圖中，可明顯看到模擬的散熱速度較快，可能為材料的設定與實際有些微不同，或是與外部對流的對流係數設定得比實際狀況大。

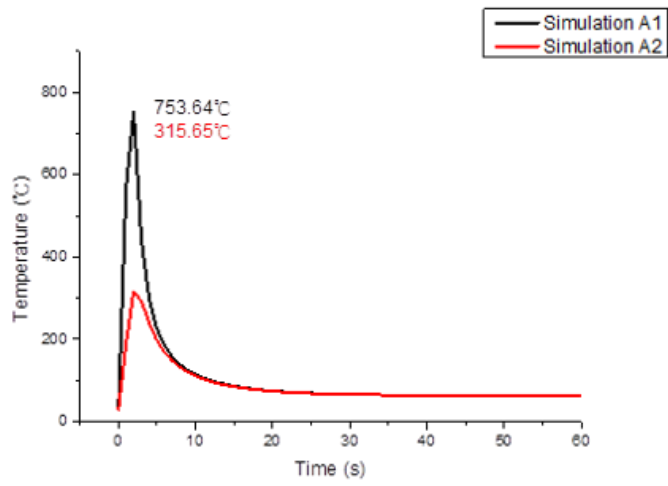


圖 3-58 GTAW 量測點溫度模擬。

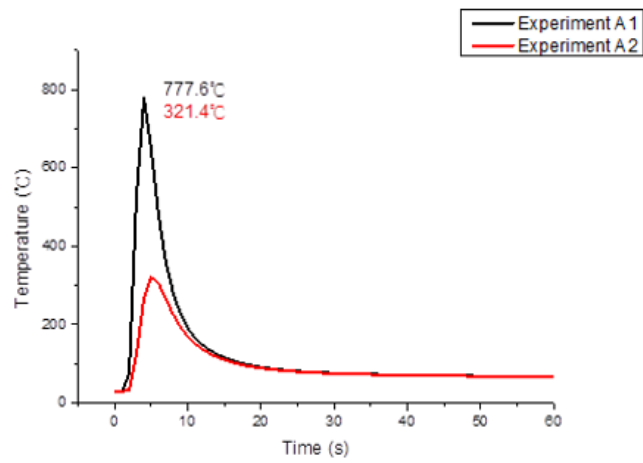


圖 3-59 GTAW 量測點實驗溫度。

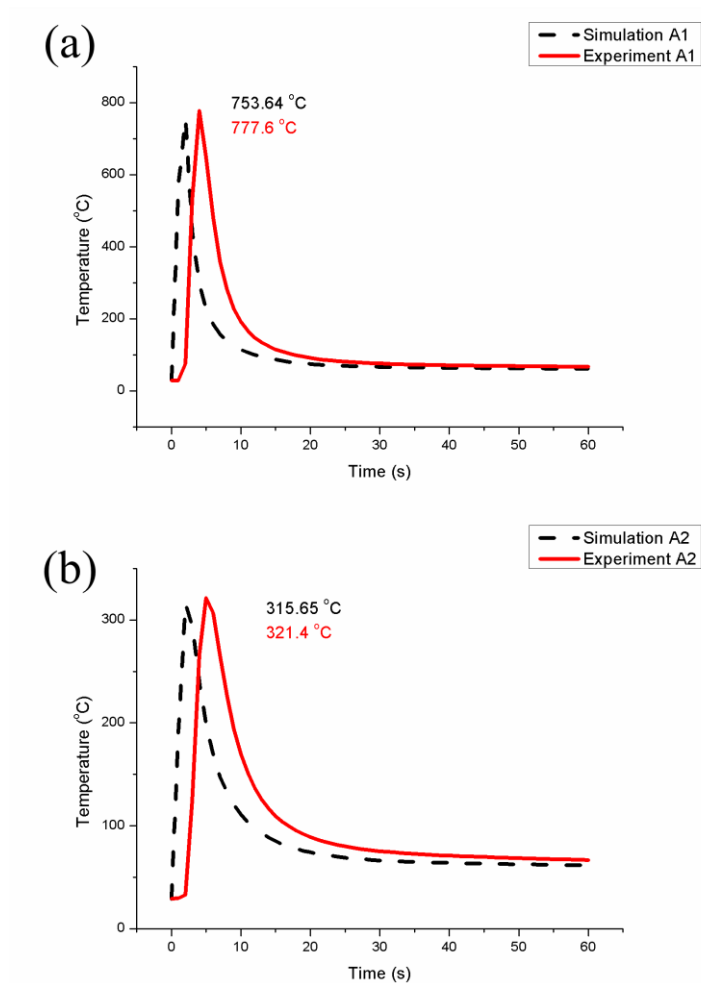


圖 3-60 GTAW 量測點模擬與實驗比較，距離表面(a) 2 mm、(b) 4 mm。

比對 PTAW 溫度模擬結果，依據實驗的參數，設定模擬的邊界條件，其結果擷取實驗測量點單道銲接的數據如圖 3-61，與實際測量到的溫度如圖 3-62。模擬的 3 個測量點由靠近銲道中心最高溫度依序為 462.4 °C、332.7 °C、263.7 °C，分別發生在時間第 6 秒、8 秒、11 秒；而實驗測量點最高溫則依序為 467.6 °C、333 °C、274.3 °C，分別發生在時間第 10 秒、12 秒、15 秒。若將各量測點分開比較如圖 3-63。比較實驗與模擬結果圖，在起始處的升溫有些差異，除了熱電偶延遲外，另一原因為實際銲接時需先起弧，

而在模擬時則忽略。雖然模擬時不考慮起弧以至於最高溫的時間較實驗量測時為快，但 3 個量測點的最高溫度非常接近。

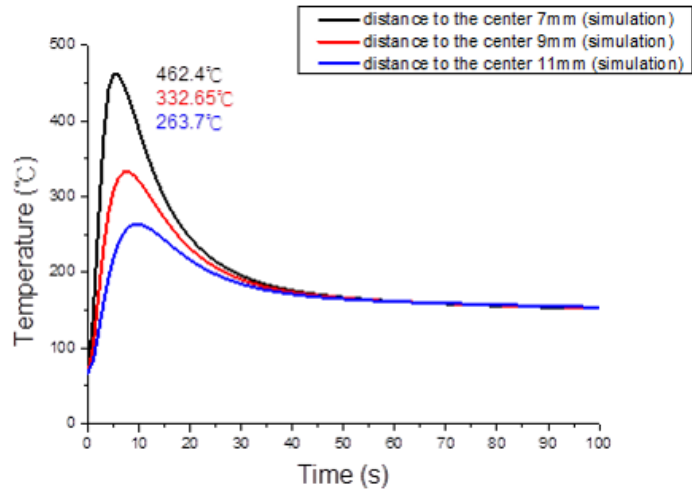


圖 3-61 PTAW 量測點溫度模擬。

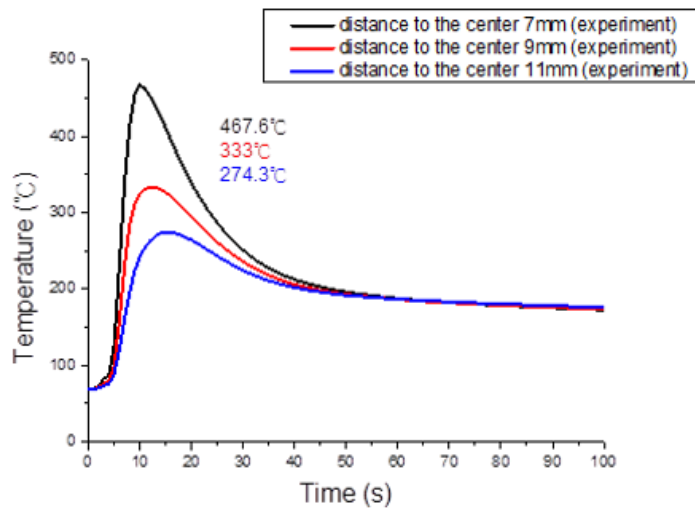


圖 3-62 PTAW 量測點實驗溫度。

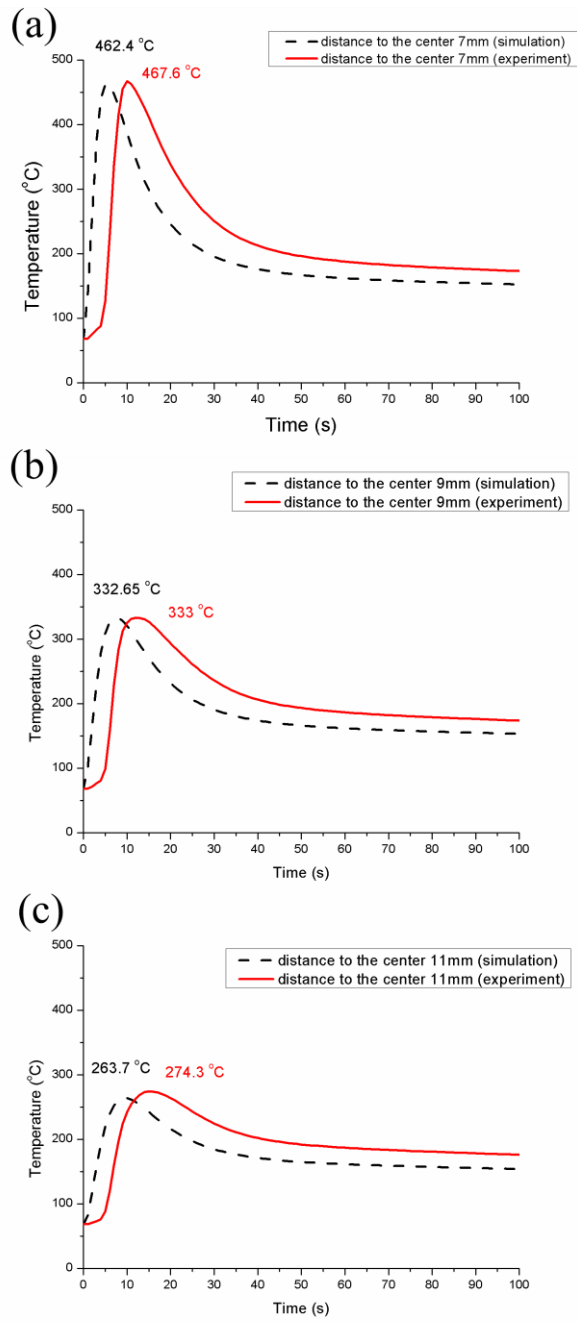


圖 3-63 PTAW 量測點模擬與實驗溫度比較，距離鐳道中心(a) 7 mm、(b) 9 mm、(c) 11 mm。

七、殘留應力模擬與量測

分別使用有限元素軟體模擬與高解 x 光繞射儀 (High resolution X-ray diffractometer, HRXRD)、PULSTEC u-X360n 量測覆銲後 1u 道次位置，距離 A508 板材表面下 2 mm 的殘留應力。量測值如表 3-5 所列。殘留應力量測校正資料詳見附錄 B.2。

表 3-5 Z 方向殘留應力值。(MPa)

Specimen	HRXRD	PULSTEC	COMSOL
	(Normal stress)	u-X360n (Normal stress)	simulation (Normal stress)
P-S-7	-145.0 ± 55.4	185	-125
P-U-6	-154.7 ± 51.4	64	-
P-D-1	-145.2 ± 44.9	-13	-
P-T-1	-161.2 ± 35.1	11	-
G-S-2	-170.6 ± 29.4	-206	-
G-U-2	-154.5 ± 36.8	-73	-
G-D-2	-161.5 ± 24.5	-8	-
G-T-1	-141.7 ± 21.1	-71	-
G-T-2	-161.1 ± 22.7	-18	-

PTAW 殘留應力模擬利用 COMSOL 的物理耦合功能，將熱傳模組與固體力學模組耦合，藉由銲接時溫度上升物體膨脹去推算殘留應力。因為模型為對稱，為減少計算的點，模擬時只建立半邊的模型。為增加模擬的收斂性，在右半邊的四個角落設定為固定(不會有位移)，但因模型的尺寸較大，且固定位置離銲道有段距離，所以其殘留應力不會影響到中間銲道部分。其表面殘留應力如圖 3-64，銲道下方殘留應力分佈如圖 3-65。在銲道下方 8.33 mm

處有最大壓應力 13.94 MPa。而銲道下方 4.17 mm 處殘留應力值突然拉高，推測在塑性應變的設定方面仍有相關技術需克服。

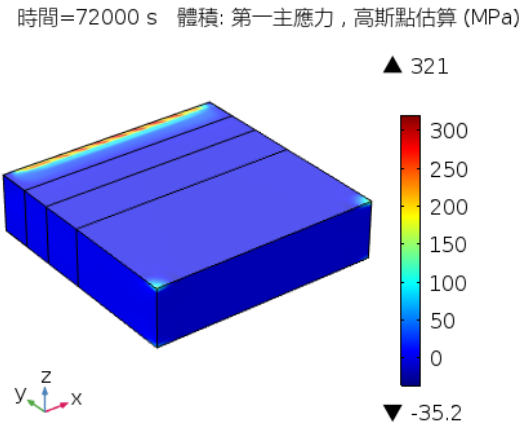


圖 3-64 表面殘留應力。

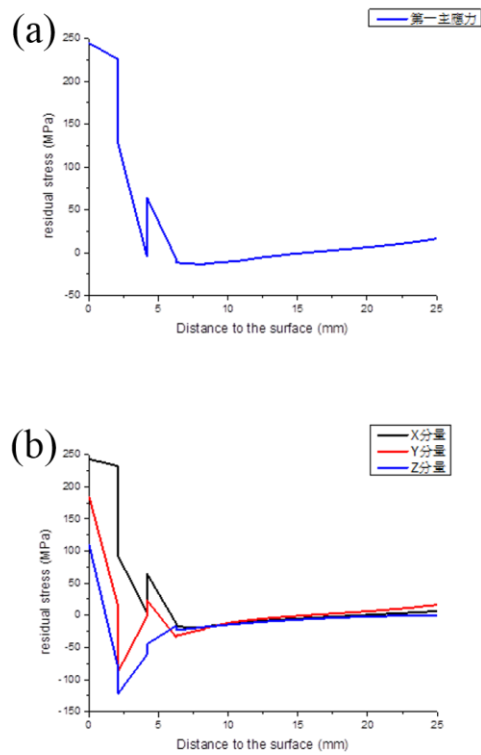


圖 3-65 銲道下方殘留應力之(a) 第一主應力、(b) X、Y、Z 分量應力分佈值。

八、結論

在本研究設計的實驗參數狀態下，透過系列的分析，可以觀察到以下幾項結果。然而，本研究與實際施作的環境、程序與條件仍存有相當大的差異，部分結果不代表實際狀況，僅能做為參考。

- (一)、若控制每層的覆銲層厚度盡量相同，Inconel 52M/A508 之異質覆層銲接對於底材的熱影響範圍，最深不會超過第 1 層覆銲層施作時所造成的熱影響區。
- (二)、GTAW 與 PTAW 覆銲施作均會對前 1 層覆銲層，產生再次熱影響的影響，其中 GTAW 的凝固降溫梯度低於 PTAW。
- (三)、隨著覆銲層數增加，Inconel 52M 合金銲道內的析出物將持續偏析/成長，對於覆銲層的耐蝕性有負面的影響。
- (四)、覆銲施作將對底材產生殘留壓應力場，實驗量測結果顯示第 2 層覆銲與第 3 層覆銲之殘留應力數值相近，推測板材受到覆銲應力將透過塑性變形釋放。
- (五)、PTAW 雖然具有較快的凝固速率，能形成較大的殘留應力場，然而因為其填料率大且對底材熱輸入量較少等特性，使其覆銲時對底材之表面狀態要求度較高。
- (六)、Inconel 52M 銲道表面於凝固時將生成 Cr_2O_3 或 (Cr, Fe)-rich 相，此 2 種結構都將可能造成覆銲道次熔接不完全，致使誘發覆銲件失效的機率。

(七)、GTAW 鎳基 52M 合金覆鋁層在熔接下 1 道次/下 1 層前，應至少打磨掉 20 μm ；PTAW 鎳基 52M 合金覆鋁層則至少需要移除 50 μm ，以確保覆鋁層熔接完全。

肆、参考文献

1. R. Horn, G. Gordon, F. Ford, and R. Cowan, "Experience and assessment of stress corrosion cracking in L-grade stainless steel BWR internals," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 174, pp. 313-325, 1997.
2. Z. Lu, T. Shoji, Y. Takeda, Y. Ito, A. Kai, and N. Tsuchiya, "Effects of loading mode and water chemistry on stress corrosion crack growth behavior of 316L HAZ and weld metal materials in high temperature pure water," *Corrosion Science*, vol. 50, pp. 625-638, 2008.
3. J.-H. Suh, J.-K. Shin, S.-J. L. Kang, Y.-S. Lim, I.-H. Kuk, and J.-S. Kim, "Investigation of IGSCC behavior of sensitized and laser-surface-melted Alloy 600," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 254, pp. 67-75, 1998.
4. H.-T. Lee, S.-L. Jeng, C. Yen, and T.-Y. Kuo, "Dissimilar welding of nickel-based Alloy 690 to SUS 304L with Ti addition," *Journal of nuclear materials*, vol. 335, pp. 59-69, 2004.
5. H. Naffakh, M. Shamanian, and F. Ashrafizadeh, "Dissimilar welding of AISI 310 austenitic stainless steel to nickel-based alloy Inconel 657," *Journal of materials processing technology*, vol. 209, pp. 3628-3639, 2009.
6. C.-C. Huang and R.-F. Liu, "Structural integrity analyses for preemptive weld overlay on the dissimilar metal weld of a pressurizer nozzle," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 90, pp. 77-83, 2012.
7. T. Lant, D. Robinson, B. Spafford, and J. Storesund, "Review of weld repair procedures for low alloy steels designed to minimise the risk of future cracking," *International journal of pressure vessels and piping*, vol. 78, pp. 813-818, 2001.
8. Y. S. Lim, H. P. Kim, J. H. Han, J. S. Kim, and H. S. Kwon,

- "Influence of laser surface melting on the susceptibility to intergranular corrosion of sensitized Alloy 600," *Corrosion science*, vol. 43, pp. 1321-1335, 2001.
9. H.-J. Yen, M. C.-C. Lin, and L.-J. Chen, "Measurement and simulation of residual stress in type 304 weld overlay stainless steel pipe," *International journal of pressure vessels and piping*, vol. 60, pp. 271-283, 1994.
 10. T. Shoji, Z. Lu, and H. Murakami, "Formulating stress corrosion cracking growth rates by combination of crack tip mechanics and crack tip oxidation kinetics," *Corrosion Science*, vol. 52, pp. 769-779, 2010.
 11. B. Pastina, J. Isabey, and B. Hickel, "The influence of water chemistry on the radiolysis of the primary coolant water in pressurized water reactors," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 264, pp. 309-318, 1999.
 12. H. Hosokawa and M. Nagase, "Investigation of cobalt deposition behavior with zinc injection on stainless steel under BWR conditions," *Journal of nuclear science and technology*, vol. 41, pp. 682-689, 2004.
 13. H. Sun, X. Wu, E.-H. Han, and Y. Wei, "Effects of pH and dissolved oxygen on electrochemical behavior and oxide films of 304SS in borated and lithiated high temperature water," *Corrosion Science*, vol. 59, pp. 334-342, 2012.
 14. 林獻洲、黃金城、劉如峰、陳伯毅，飼水管嘴異質鐳道覆鐳之殘留應力分析，中國機械工程學會第二十八屆全國學術研討會論文集，國立中興大學，台中市，2011。
 15. U. S. Nuclear Regulatory Commission, *Technical Report on Material Selection and Processing Guidelines for BWR Coolant Pressure Boundary Piping*, NUREG-0313 Rev. 2, January 1988.
 16. 張益維，實習壓水式核電廠反應爐管嘴 Alloy 82/182 鐳道龜裂防

治技術與經驗報告，行政院及所屬各機關出國報告，2011 年 11 月 16 日。

17. A. J. Ramirez and J. C. Lippold, "High temperature behavior of Ni-base weld metal: Part II – Insight into the mechanism for ductility dip cracking," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 380, pp. 245-258, 8/25/ 2004.
18. M. Collins, A. Ramirez, and J. Lippold, "An investigation of ductility-dip cracking in nickel-based weld metals-Part III," *WELDING JOURNAL-NEW YORK-*, vol. 83, pp. 39-S, 2004.
19. J.C. Lippold, W.A.T. Clark and M. Tumuluru, "An investigation of weld metal interfaces." *The Metal Science of Joining*, published by The Metals, Minerals and Materials Society, Warrendale, PA, pp. 141-146. 1992.
20. S. Kihara, J. B. Newkirk, A. Ohtomo, and Y. Saiga, "Morphological changes of carbides during creep and their effects on the creep properties of inconel 617 at 1000 °C," *Metallurgical Transactions A*, vol. 11, pp. 1019-1031, 1980.
21. G. Gottstein, L.S. Shvindlerman, *Grain Boundary Migration in Metals*, CRC press, Boca Raton, FL, 1999, pp. 133–150.
22. A.J. Ramirez, J.C. Lippold, Internal Research Report, The Ohio State University, Columbus, OH, 2002, pp. 1–35.
23. M. Johnson, S. Fiore, and J. Lippold, "Evaluation of EN82H Filler Metal and shielding Gas," *EWI Project 45371CSP, EWI-OSU Final Report*, Columbus-OH, USA, pp. 1-2, 2002.
24. H. Tipler, Y. Lindblom, and J. Davidson, "Damage accumulation and fracture in creep of Ni-base alloys," in *High Temperature Alloys for Gas Turbines\ Proc. Conf.*, Liege, Belgium, Sept. 1978, 1978, pp. 359-407.
25. E. Bourithis, A. Tazedakis, and G. Papadimitriou, "A study on the surface treatment of “Calmax” tool steel by a plasma transferred arc

- (PTA) process," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 128, pp. 169-177, 10/6/ 2002.
26. R. Iakovou, L. Bourithis, and G. Papadimitriou, "Synthesis of boride coatings on steel using plasma transferred arc (PTA) process and its wear performance," *Wear*, vol. 252, pp. 1007-1015, 7// 2002.
 27. P. Beber, P. Gimondo, B. Grifoni, A. Scaccia, F. Sintoni, in: *Proceedings of the Conference of Materials Development in Rail, Tire, Wing, Hull Transportation*, Genoa, Italy, 22–24 September 1992, pp. 2.83–2.89.
 28. Q. Y. Hou, J. S. Gao, and F. Zhou, "Microstructure and wear characteristics of cobalt-based alloy deposited by plasma transferred arc weld surfacing," *Surface and Coatings Technology*, vol. 194, pp. 238-243, 5/1/ 2005.

附錄 A.1 PTAW 銲接參數

編號	預熱	電流 (A)	電壓 (V)	銲槍走速 (mm/min)	送料速度 (mm/min)	送料時 間 (sec)	回抽時 間 (sec)	擺弧			銲槍高 度 (mm)
								速率	位移	停頓時 間	
P-S-1	-	70	30	100	720	-	-	-	-	-	8
P-S-2	-	90	30	100	720	-	-	-	-	-	8
P-S-3	-	80	30	100	720	-	-	-	-	-	8
P-S-4	-	60	30	100	720	-	-	-	-	-	8
P-S-5	-	70	25	30	720	-	-	1250	±6.7	-	8
P-S-6	-	70	25	30	720	-	-	1500	±6.7	-	8
P-S-7	-	58~60	28~30	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.2	10
P-S-8	Y	65	27~30	40	70	0.4	0.6	1300	±1.6	0.2	9
P-U-1-1u	-	70	26~28	100	720	-	-	-	-	-	10
P-U-1-2u	-	70	25~26	100	720	-	-	-	-	-	10
P-U-1-3u	-	70	24~25	100	720	-	-	-	-	-	10
P-U-2-1u	-	70	26~28	100	720	-	-	-	-	-	10
P-U-2-2u	-	70	27~28	100	720	-	-	-	-	-	10
P-U-2-3u	-	70	27~28	100	720	-	-	-	-	-	10

編號	預熱	電流 (A)	電壓 (V)	銲槍走速 (mm/min)	送料速度 (mm/min)	送料時 間 (sec)	回抽時 間 (sec)	擺弧			銲槍高 度 (mm)
								速率	位移	停頓時 間	
P-U-3-1u	-	70	27~28	100	720	-	-	-	-	-	10
P-U-3-2u	-	70	26~28	100	720	-	-	-	-	-	10
P-U-4-1u	-	70	27~28	100	720	-	-	-	-	-	10
P-U-4-2u	-	70	26~27	100	720	-	-	-	-	-	10
P-U-4-3u	-	70	26~27	100	720	-	-	-	-	-	10
P-U-5-1u	-	80	27~29	100	720	-	-	-	-	-	9
P-U-5-2u	-	80	26~28	100	720	-	-	-	-	-	9
P-U-6-1u	-	58~60	27~29	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10
P-U-6-2u	-	58~60	27~29	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10
P-U-6-3u	-	58~60	27~29	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10
P-U-7-1u	-	57~58	27~29	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.3	10
P-U-7-2u	-	57~58	27~29	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.3	10
P-U-7-3u	-	57~58	27~29	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.3	10
P-U-8-1u	Y	65	27~30	40	70	0.4	0.6	1300	±1.6	0.2	9

編號	預熱	電流 (A)	電壓 (V)	銲槍走速 (mm/min)	送料速度 (mm/min)	送料時 間 (sec)	回抽時 間 (sec)	擺弧			銲槍高 度 (mm)
								速率	位移	停頓時 間	
P-U-8-2u	-	65	26~27	40	70	0.4	0.6	1300	±1.6	0.2	9
P-U-8-3u	-	65	26~27	40	70	0.4	0.6	1300	±1.6	0.2	9
P-D-1-1u	-	57~58	27~29	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10
P-D-1-2u	-	60	29~30	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10
P-D-1-3u	-	57~58	27~29	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10
P-D-1-4u	-	57~58	27~29	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10
P-D-1-5u	-	57~58	27~29	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10
P-D-1-1d	-	57~58	27~29	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10
P-D-1-2d	-	57~58	27~29	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10
P-D-1-3d	-	57~58	27~29	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10
P-D-2-1u	-	58~60	28~30	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10
P-D-2-2u	-	57~58	27~29	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10
P-D-2-3u	-	60	29~30	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10
P-D-2-4u	-	57~58	27~29	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10

編號	預熱	電流 (A)	電壓 (V)	銲槍走速 (mm/min)	送料速度 (mm/min)	送料時 間 (sec)	回抽時 間 (sec)	擺弧			銲槍高 度 (mm)
								速率	位移	停頓時 間	
P-D-2-5u	-	57~58	27~29	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10
P-D-2-1d	-	57~58	27~29	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10
P-D-2-2d	-	57~58	27~29	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10
P-D-3-1u	Y	65	27~30	40	70	0.4	0.6	1300	±1.6	0.2	9
P-D-3-2u	-	65	27~30	40	70	0.4	0.6	1300	±1.6	0.2	9
P-D-3-3u	-	65	27~30	40	70	0.4	0.6	1300	±1.6	0.2	9
P-D-3-4u	-	65	27~30	40	70	0.4	0.6	1300	±1.6	0.2	9
P-D-3-5u	-	65	27~30	40	70	0.4	0.6	1300	±1.6	0.2	9
P-D-3-1d	-	65	27~30	40	70	0.4	0.6	1300	±1.6	0.2	9
P-D-3-2d	-	60~65	27~30	40	70	0.4	0.6	1300	±1.6	0.2	9
P-T-1-1u	-	57~58	27~29	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10
P-T-1-2u	-	60	29~30	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10
P-T-1-3u	-	57~58	27~29	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10
P-T-1-4u	-	57~58	27~29	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10

編號	預熱	電流 (A)	電壓 (V)	銲槍走速 (mm/min)	送料速度 (mm/min)	送料時 間 (sec)	回抽時 間 (sec)	擺弧			銲槍高 度 (mm)
								速率	位移	停頓時 間	
P-T-1-5u	-	57~58	27~29	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10
P-T-1-6u	-	57~58	27~29	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10
P-T-1-7u	-	57~58	27~29	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10
P-T-1-1d	-	57~58	27~29	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10
P-T-1-2d	-	57~58	27~29	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10
P-T-1-3d	-	57~58	27~29	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10
P-T-1-4d	-	57~58	27~29	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10
P-T-1-5d	-	57~58	27~29	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10
P-T-1-1t	-	60	29~30	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10
P-T-1-2t	-	60	29~30	100	65	0.5	0.5	1300	±1.6	0.4	10

註：表中「-」符號代表此道銲道施作未使用該參數。

送料時間與回抽時間係使用送線機之寸動控制，為不連續供料模式。

附錄 A.2 GTAW 銲接參數

編號	預熱	電流 (A)	銲槍走速 (mm/min)	送料速度 (mm/min)	氬氣流量 (m ³ /min)
G-S-1	-	110	97	805	18
G-S-2	Y	120	106	1200	18
G-U-1-1u	-	110	97	805	18
G-U-1-2u	-	110	97	805	18
G-U-1-3u	-	110	97	805	18
G-U-1-4u	-	110	97	805	18
G-U-2-1u	-	120	106	1200	18
G-U-2-2u	-	120	106	1200	18
G-U-2-3u	-	120	106	1200	18
G-D-1-1u	-	110	97	805	18
G-D-1-2u	-	110	97	805	18
G-D-1-1d	-	110	97	805	18
G-D-2-1u	Y	120	106	1200	18
G-D-2-2u	-	120	106	1200	18
G-D-2-3u	-	120	106	1200	18
G-D-2-1d	-	110	106	1200	18
G-D-2-2d	-	110	106	1200	18
G-T-1-1u	-	120	106	1200	18
G-T-1-2u	-	120	106	1200	18
G-T-1-3u	-	120	106	1200	18
G-T-1-1d	-	110	106	1200	18
G-T-1-2d	-	110	106	1200	18
G-T-1-1t	-	110	106	1200	18
G-T-2-1u	Y	120	106	1200	18
G-T-2-2u	-	120	106	1200	18

編號	預熱	電流 (A)	鐸槍走速 (mm/min)	送料速度 (mm/min)	氫氣流量 (cm ³ /min)
G-T-2-3u	-	120	106	1200	18
G-T-2-4u	-	110	106	1200	18
G-T-2-5u	-	110	106	1200	18
G-T-2-6u	-	110	106	1200	18
G-T-2-7u	-	110	106	1200	18
G-T-2-1d	-	110	106	1200	18
G-T-2-2d	-	110	106	1200	18
G-T-2-3d	-	110	106	1200	18
G-T-2-4d	-	110	106	1200	18
G-T-2-5d	-	110	106	1200	18
G-T-2-1t	-	110	106	1200	18
G-T-2-2t	-	110	106	1200	18

附錄 B.1 液滲檢查結果

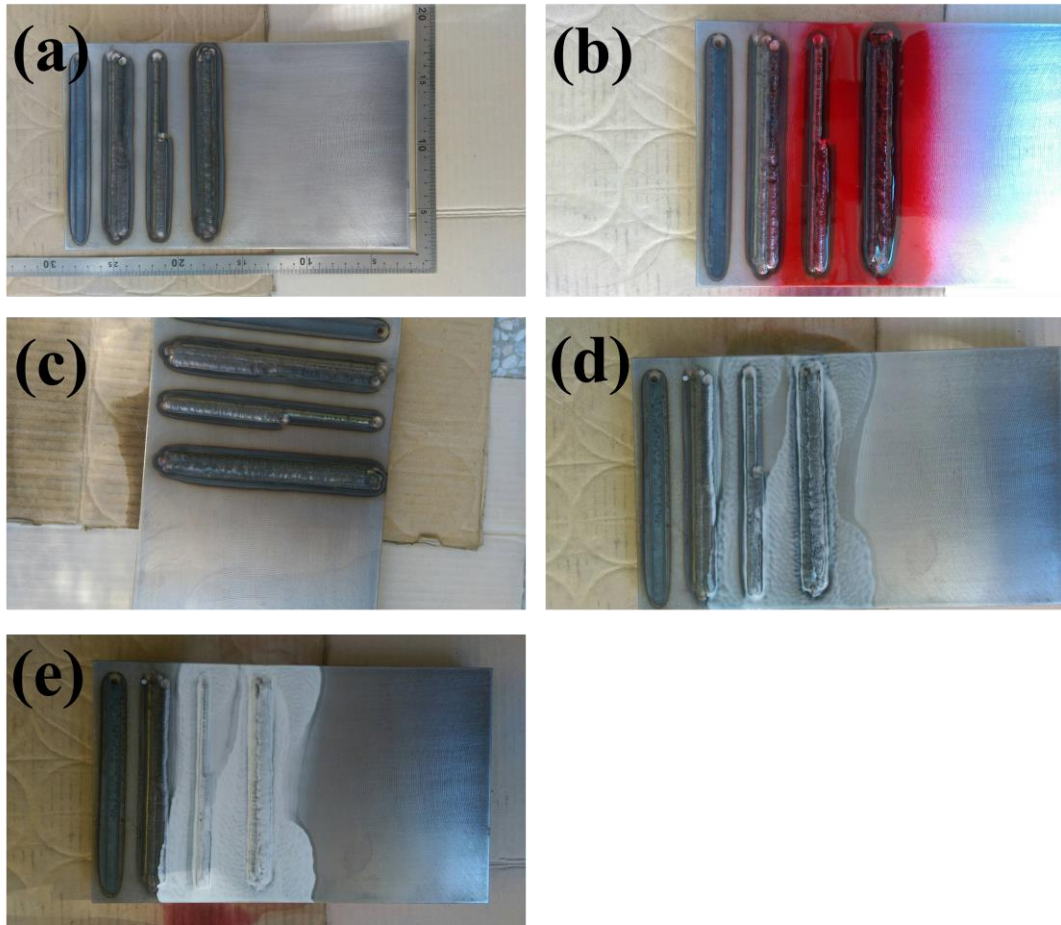


圖 B.1-1 G-D-2 液滲檢查(a) 外觀照、(b) 噴覆滲透劑、(c) 噴覆清洗劑、(d) 噴覆顯色劑及(e) 顯色劑乾燥結果。

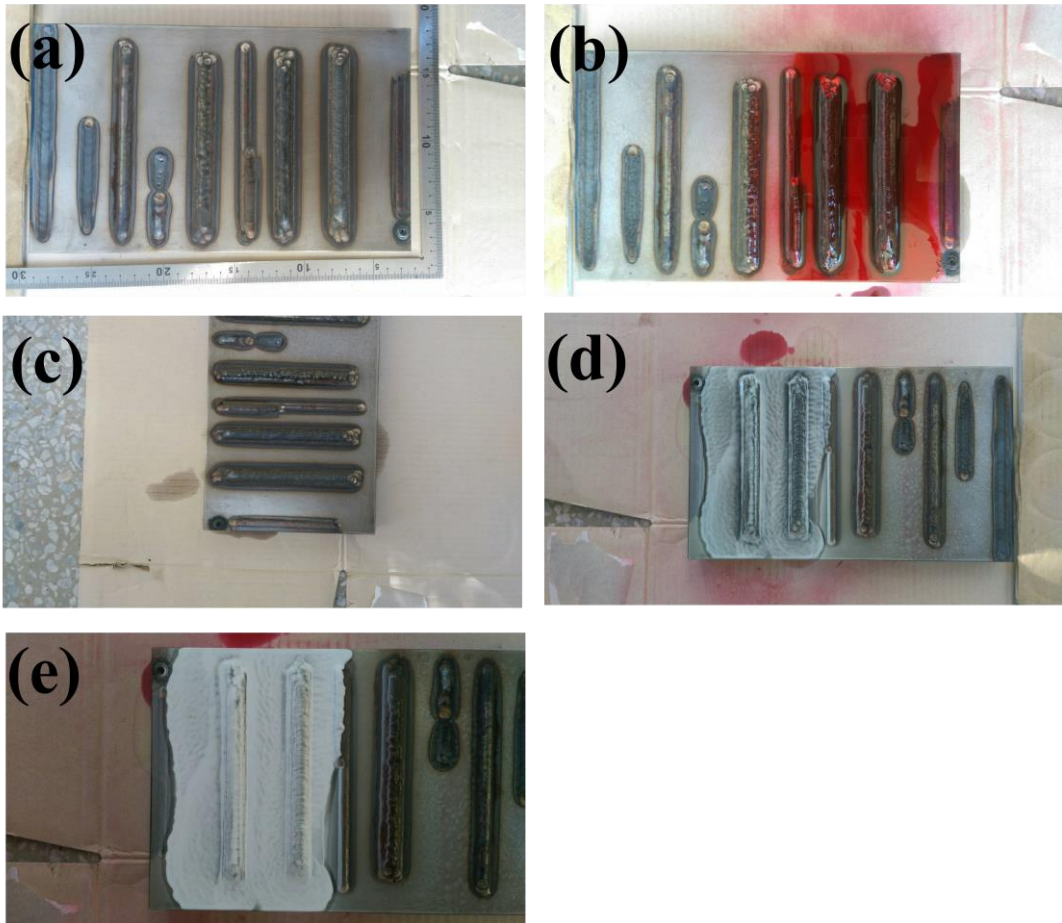


圖 B.1-2 G-T-2 液滲檢查(a) 外觀照、(b) 噴覆滲透劑、(c) 噴覆清洗劑、(d) 噴覆顯色劑及(e) 顯色劑乾燥結果。

附錄 B.2 超音波檢測於覆銲件之訊號衰減率與缺陷檢出能力分析

一、測試樣品(Test Piece)

Inconel 52M 覆銲層厚度(Overlay Metal)： 4.7 mm；

A508 底材厚度(Base Metal)： 25.1 mm。

於叁層覆銲層加工平面之中心線下方以線切割放電加工尺寸：寬 1 mm、深 2 mm 之直線型缺陷，如圖 B.2-1、B.2-2 所示。

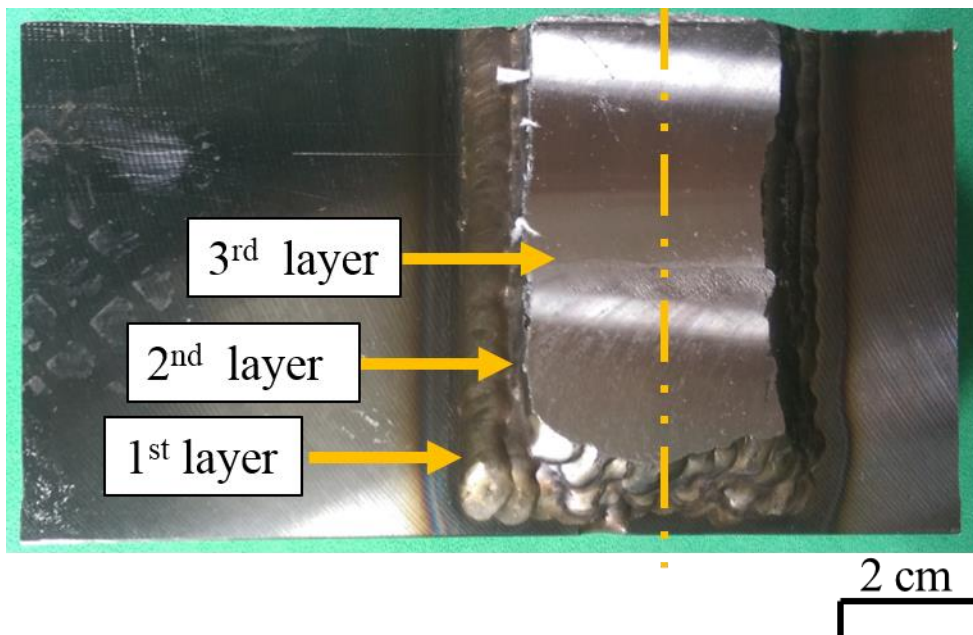


圖 B.2-1 超音波檢測之叁層覆銲件俯視圖。



圖 B.2-2 超音波檢測之叁層覆銲件側視圖。

二、陣列式超音波儀器檢測設備(Phased Array Ultrasonic Test Instrument)： Olympus OmniScan MX 2。

三、超音波探頭規格(Probe)：

Frequency	Number of elements	Size		Active elements	Active Aperture (mm ²)
		Width (mm)	Pitch (mm)		
2.25 MHz	16	12	0.75	16	144
5 MHz	24	10	0.6	24	144

四、測試樣品表面粗糙度(Surface Roughness)

Inconel 52M 覆鍍層： H_{rms} 178；

A508 底材： H_{rms} 220。

五、超音波耦合劑(Couplant)： machine oil #30。

六、測試方法(Test method)：

接觸式(contact method)，如圖 B.2-3 所示。



圖 B.2-3 陣列式超音波檢測示意圖。

七、測試結果

Frequency		Base metal (dB/mm) (%)	Overlay + Base metal (dB/mm) (%)	Overlay metal (dB/mm) $\log(A\%/B\%)/2*4.7$	Resolution between back surface and notch	Detectability of notch
2.25 MHz	1	0.069 (212.3%/48.0%)	0.1495 (98.8%/12.7%)	0.707	無法分辨	28.02-27.3 = 0.72 mm
	2	0.0726 (194.7%/36.2%)	0.1190 (75.3%/14.7%)	0.878	-	-
	3	0.0713 (193.7%/37.2%)	0.1174 (88.1%/17.6%)	0.728	-	-
	Avg.	0.081	0.1286	0.771	-	-
	Ref.	Fig. B.2-4 ~ 6	Fig. B.2-7 ~ 9	Fig. B.2-4 ~ 9.	Fig. B.2-10, 11	
5 MHz	1	0.035 (229.9%/101.8)	0.1673 (68.5%/6.9%)	1.119	分辨良好	28.73-27.2 7=1.46 mm
	2	0.0352 (223.1%/98.8)	0.1464 (65.6%/8.8%)	1.131	-	-
	3	0.035 (224.1%/99.8)	0.1506 (69.5%/8.8%)	1.082	-	-
	Avg.	0.0351	0.1548	1.111	-	-
	Ref.	Fig. B.2-12 ~ 14	Fig. B.2-15 ~ 17	Fig. B.2-12 ~ 17	Fig. B.2-18, 19	

註：

Detail examined pattern and data see as attached

Material Attenuation (α) formula:

$$\alpha \text{ dB/mm} = [20 \log(A/B)] / 2(n-1)t$$

A: first back echo amplitude (%)

B: the target back echo (n) amplitude (%)

t: : metal thickness been tested(mm)

Overlay metal:

$$\beta \text{ dB/mm} = (B1_{\text{base metal}} / B1_{\text{with overlay}}) / 2t_{\text{overlay}}$$

八、詳細檢測圖形與數據



圖 B.2-4 2.25 MHz Base Metal 衰減(1)。



圖 B.2-5 2.25 MHz Base Metal 衰減(2)。



圖 B.2-6 2.25 MHz Base Metal 衰減(3)。



圖 B.2-7 2.25 MHz Overlay + Base Metal 衰減(1)。

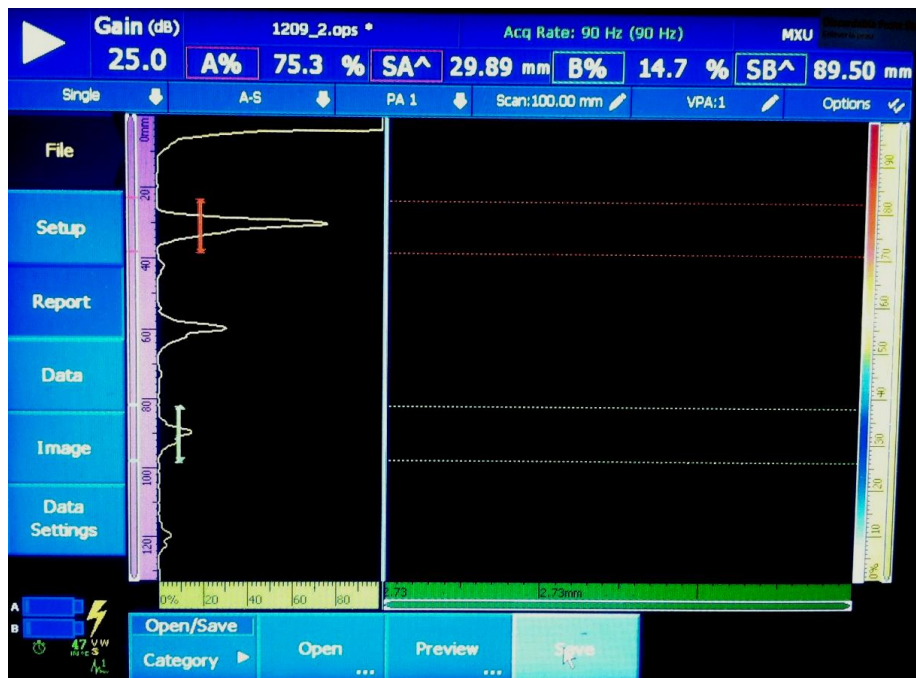


圖 B.2-8 2.25 MHz Overlay + Base Metal 衰減(2)。

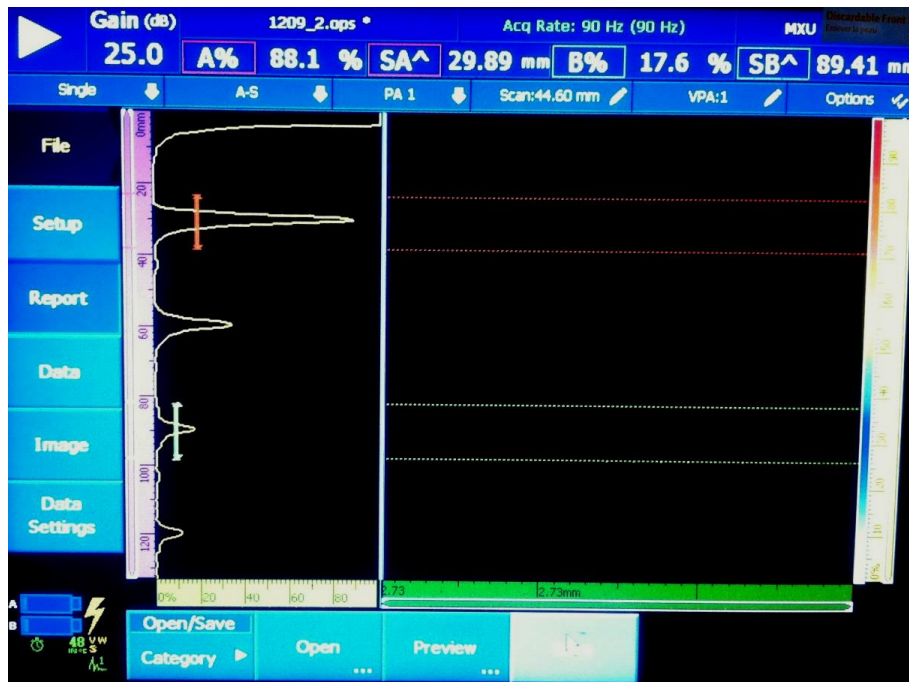


圖 B.2-9 2.25 MHz Overlay + Base Metal 衰減(3)。



圖 B.2-10 2.25 MHz 在 Overlay 建全區之波形及距離量測。

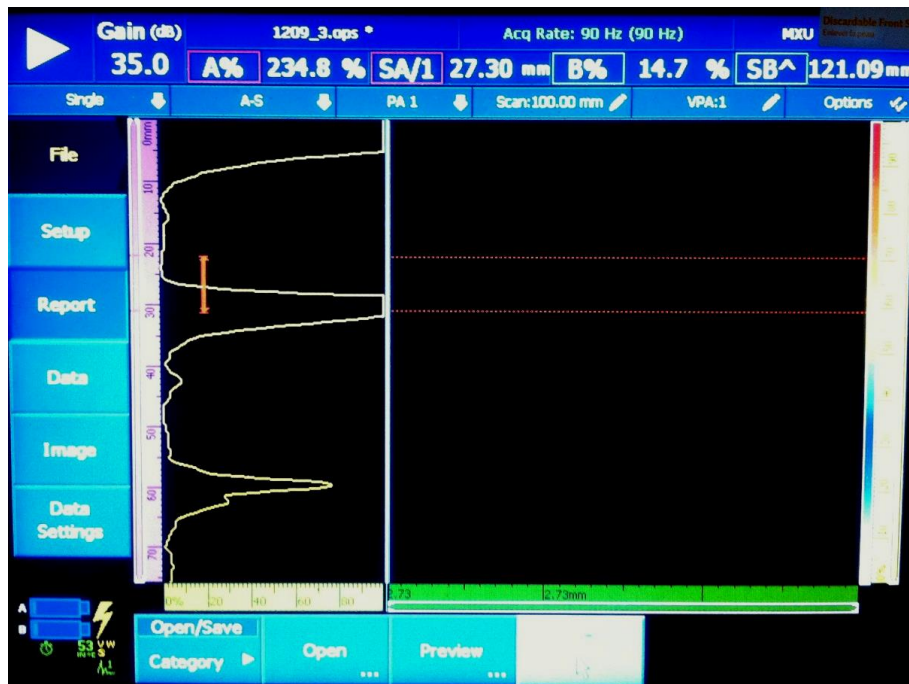


圖 B.2-11 2.25 MHz 在 Overlay 之 notch 區之波形及距離量測。

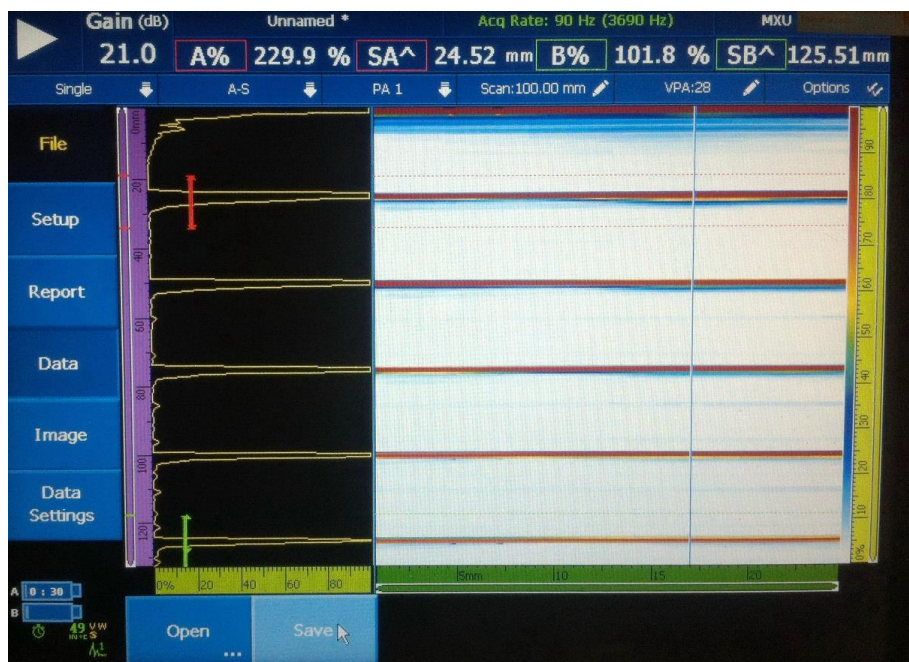


圖 B.2-12 5 MHz Base Metal 衰減(1)。

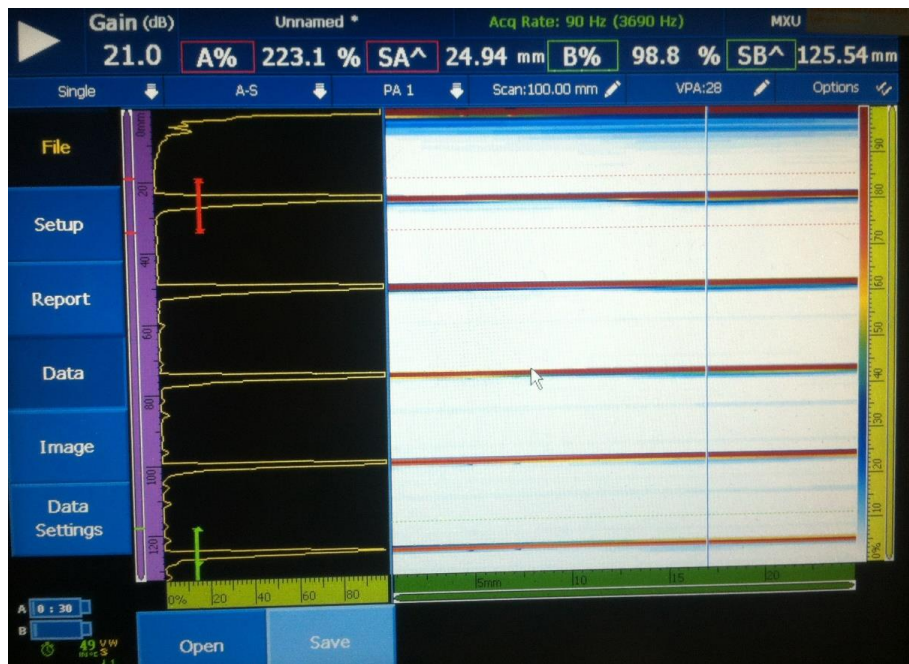


圖 B.2-13 5 MHz Base Metal 衰減(2)。

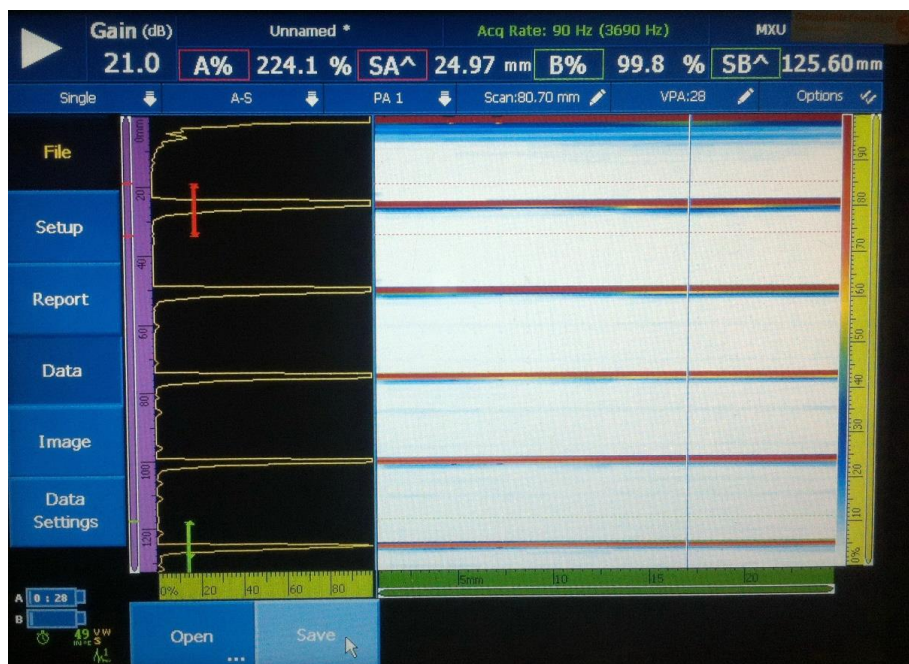


圖 B.2-14 5 MHz Base Metal 衰減(3)。

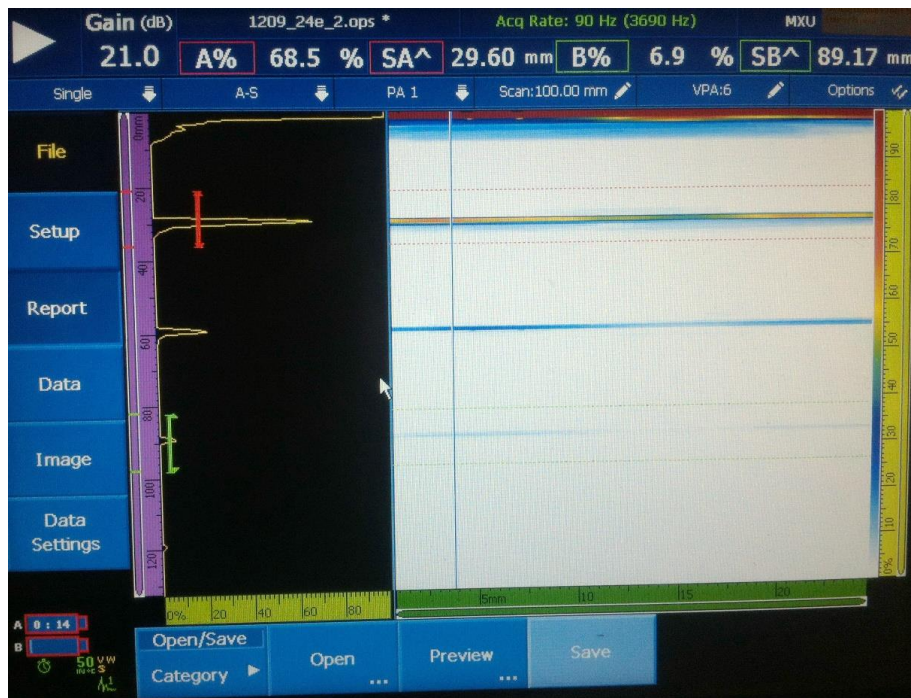


圖 B.2-15 5 MHz Overlay + Base Metal 衰減(1)。

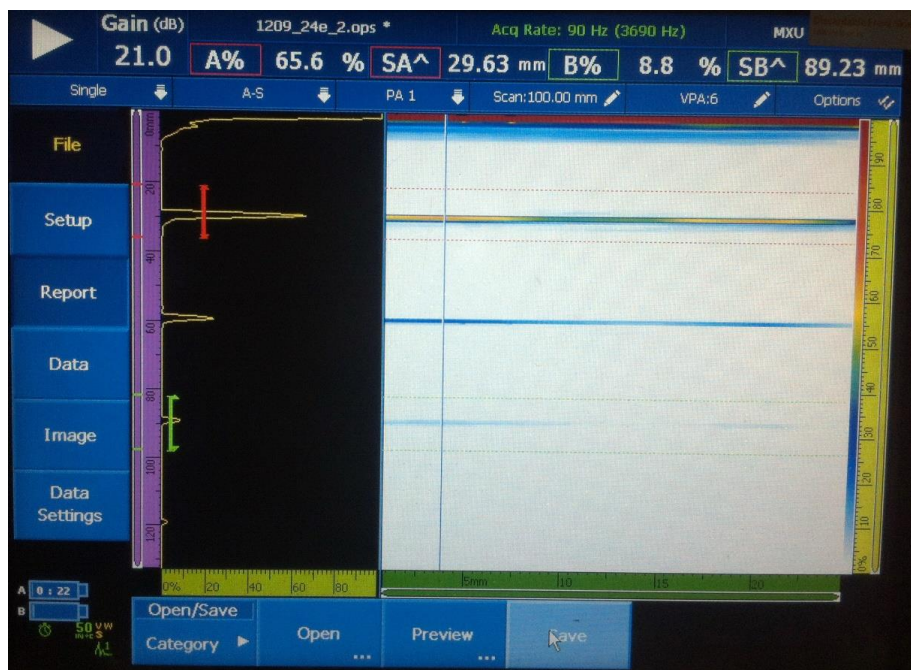


圖 B.2-16 5 MHz Overlay + Base Metal 衰減(2)。

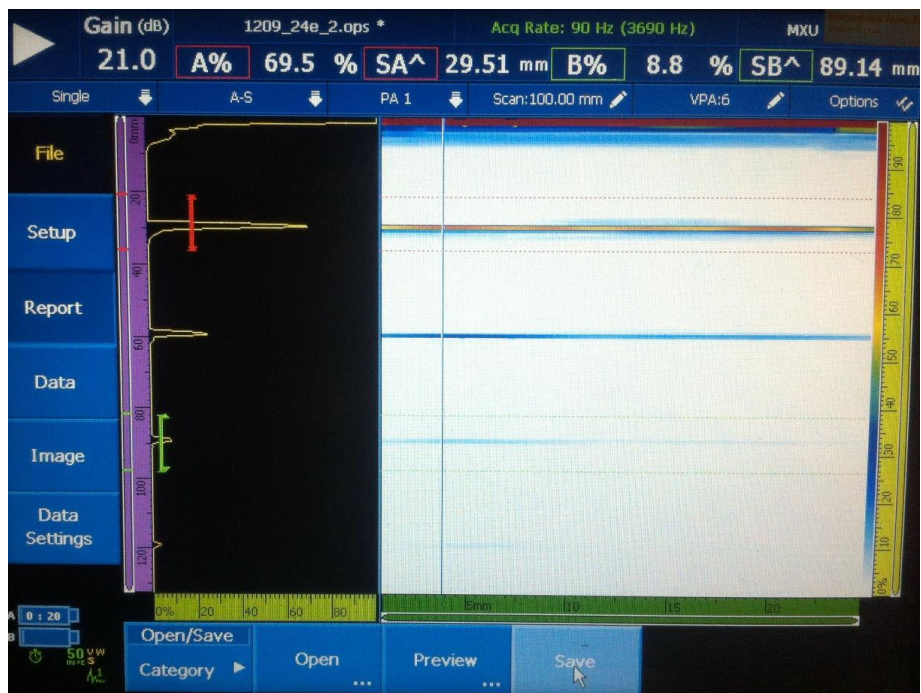


圖 B.2-17 5 MHz Overlay + Base Metal 衰減(3)。

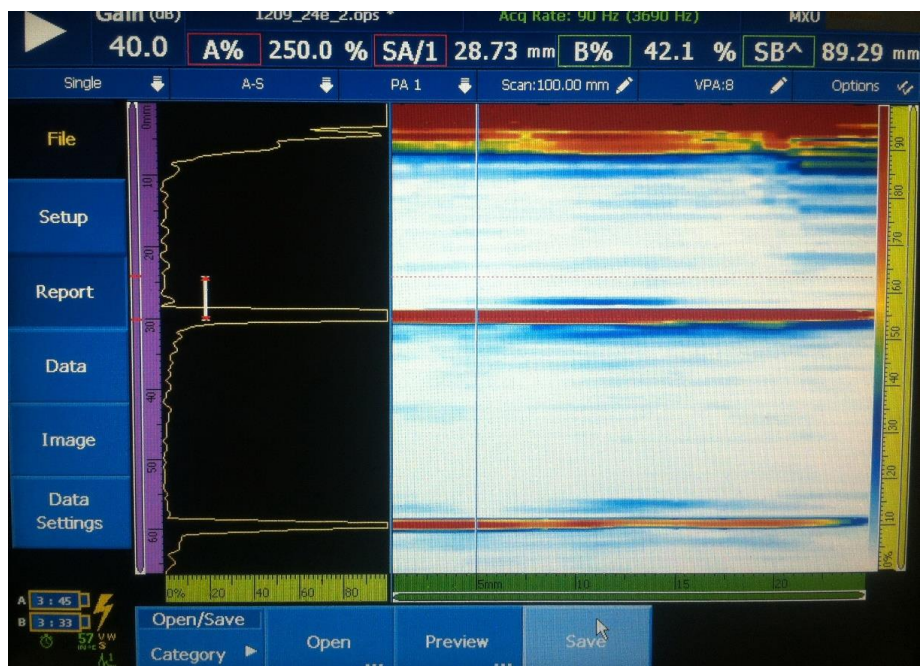


圖 B.2-18 5 MHz 在 Overlay 建全區之波形及距離量測。

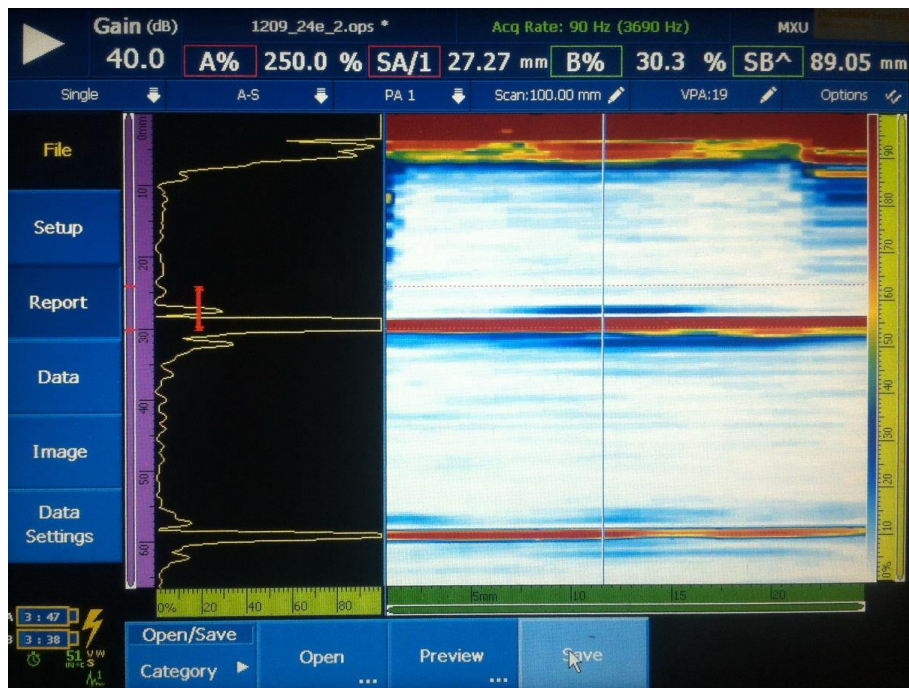
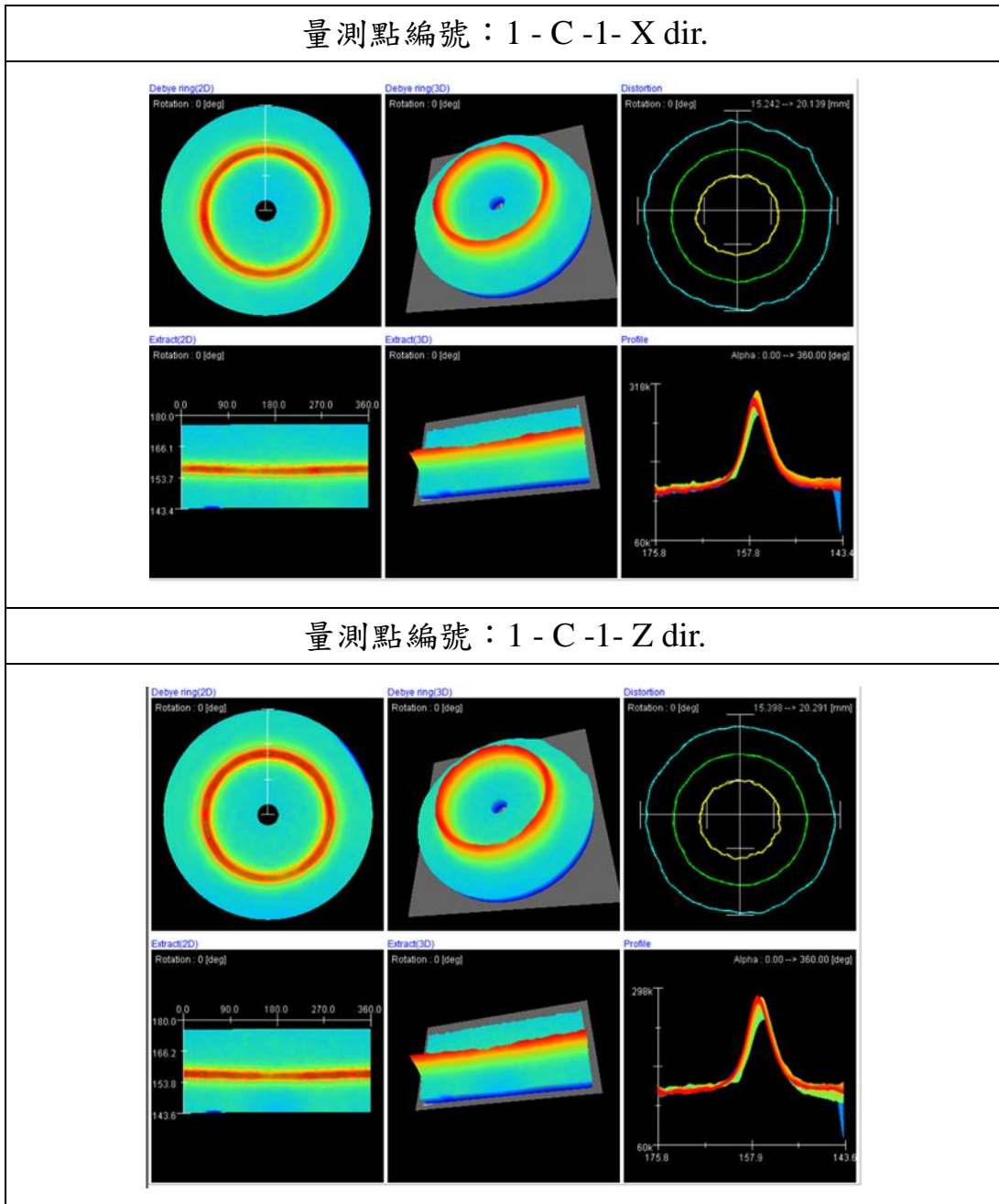


圖 B.2-19 5 MHz 在 Overlay 之 notch 區之波形及距離量測。

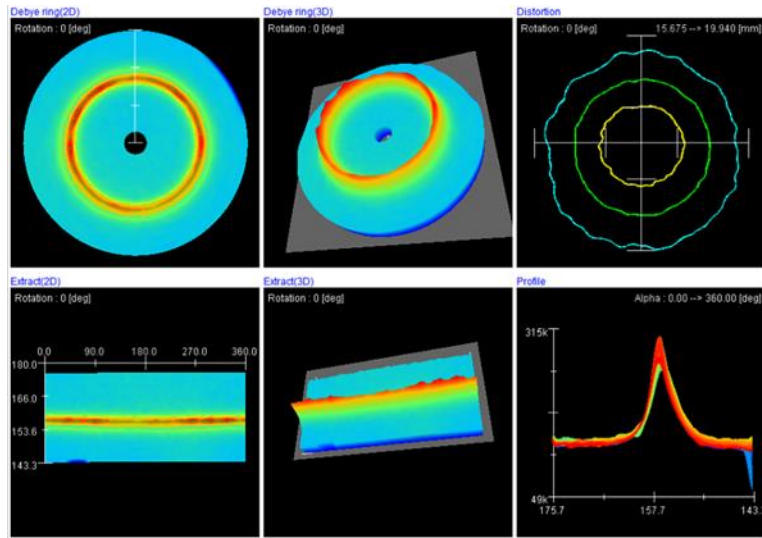
附錄 B.3 殘留應力量測校正資料

第一階段針對 PTAW 覆鋁以 PULSTEC u-X360n 進行殘留應力量測，其各道次量測結果如下所列：

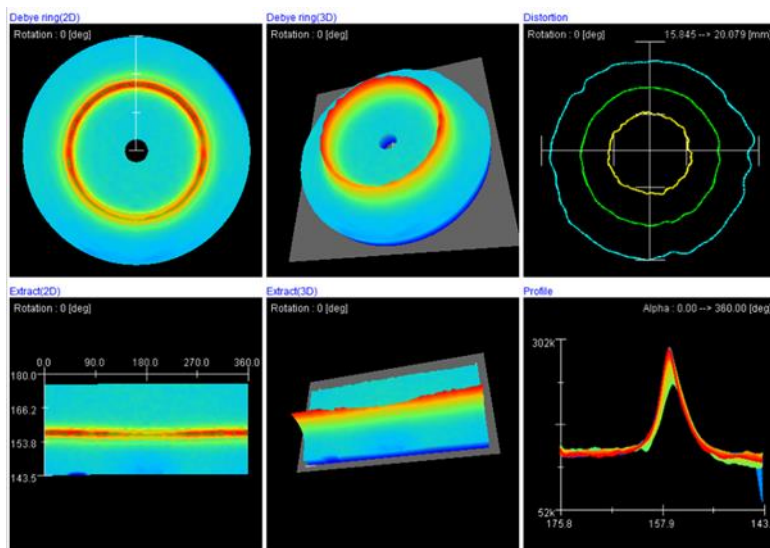
- 試件 1 號編號 C 鋁道第 1~2 點



量測點編號：1 - C -2- X dir.

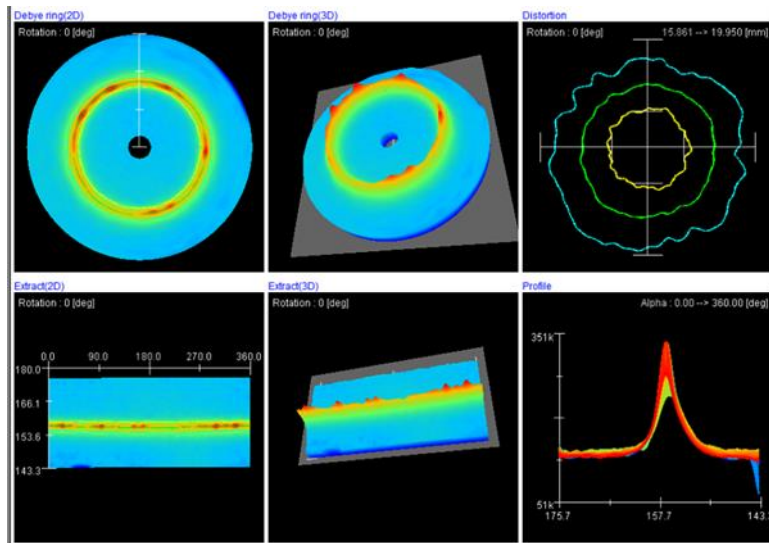


量測點編號：1 - C -2- Z dir.

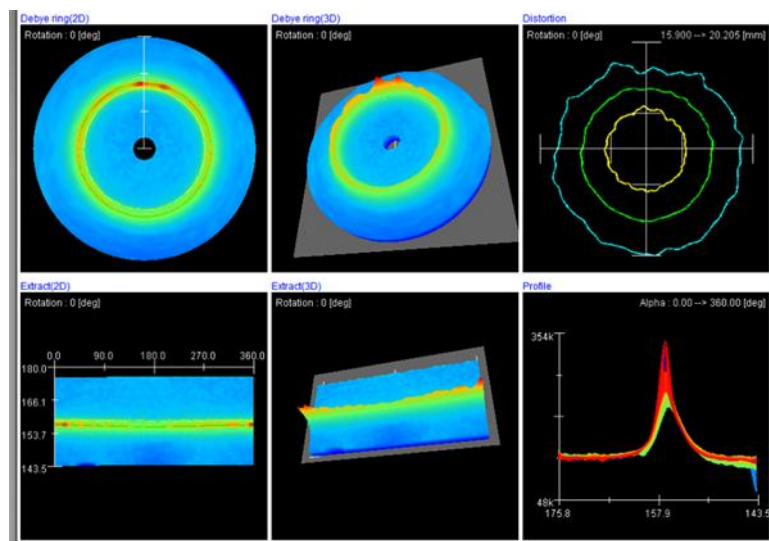


- 試件 1 號編號 C 鉸道第 3 ~ 4 點

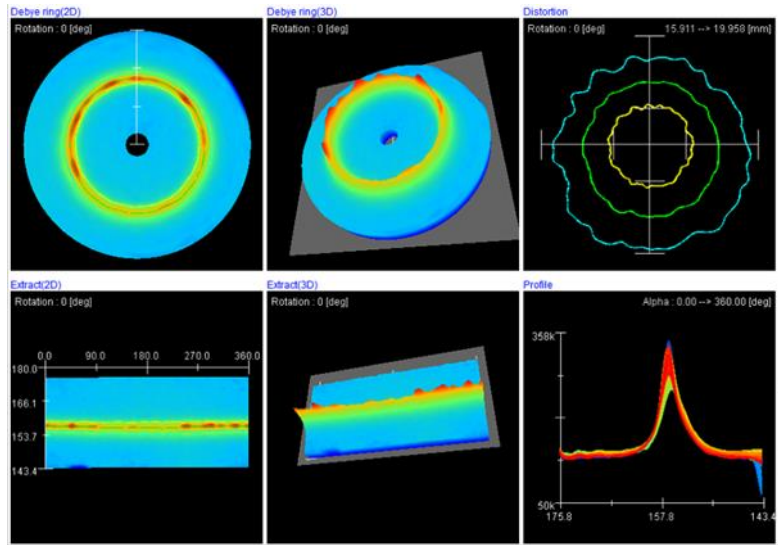
量測點編號：1 - C -3- X dir.



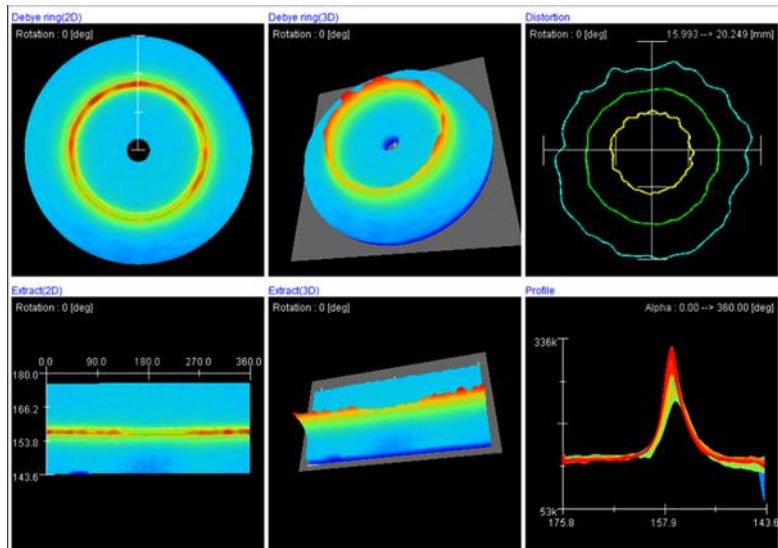
量測點編號：1 - C -3- Z dir.



量測點編號：1 - C -4- X dir.

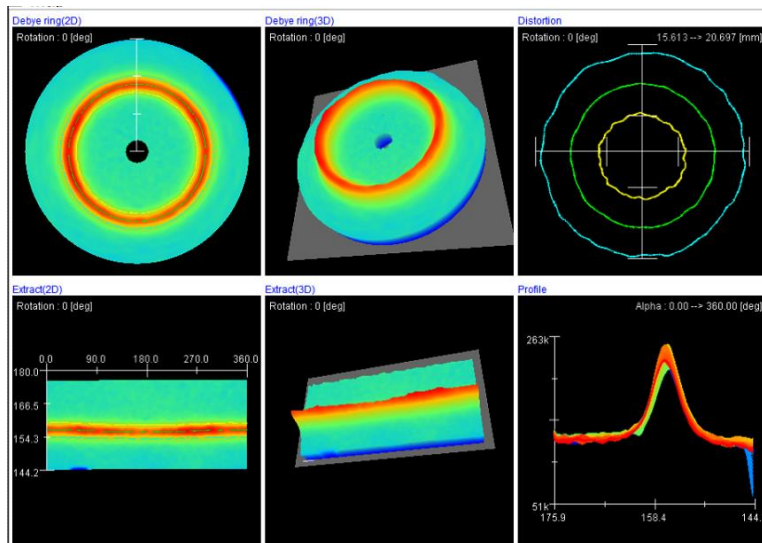


量測點編號：1 - C -4- Z dir.

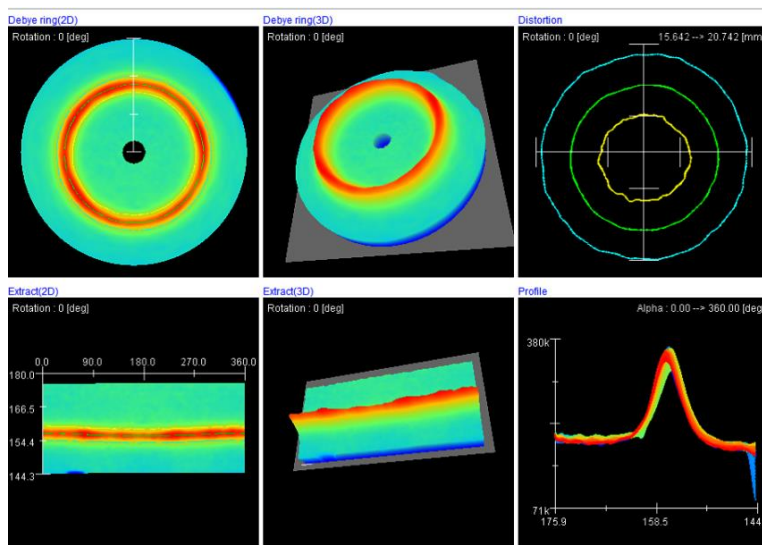


- 試件 2 號編號 D 鉸道第 1 ~ 2 點

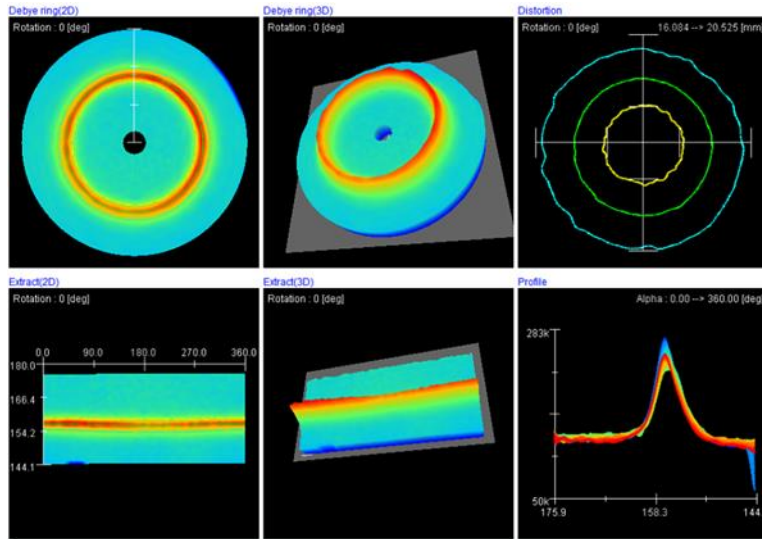
量測點編號：2 - D -1- X dir.



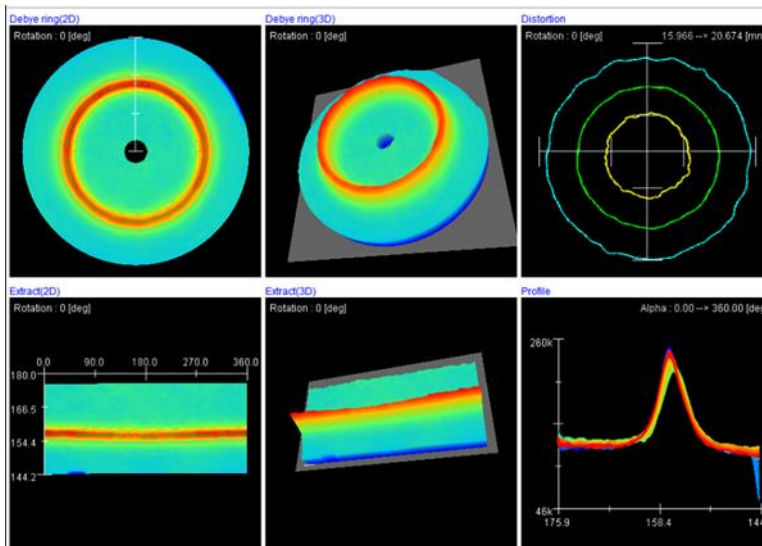
量測點編號：2 - D -1- Z dir.



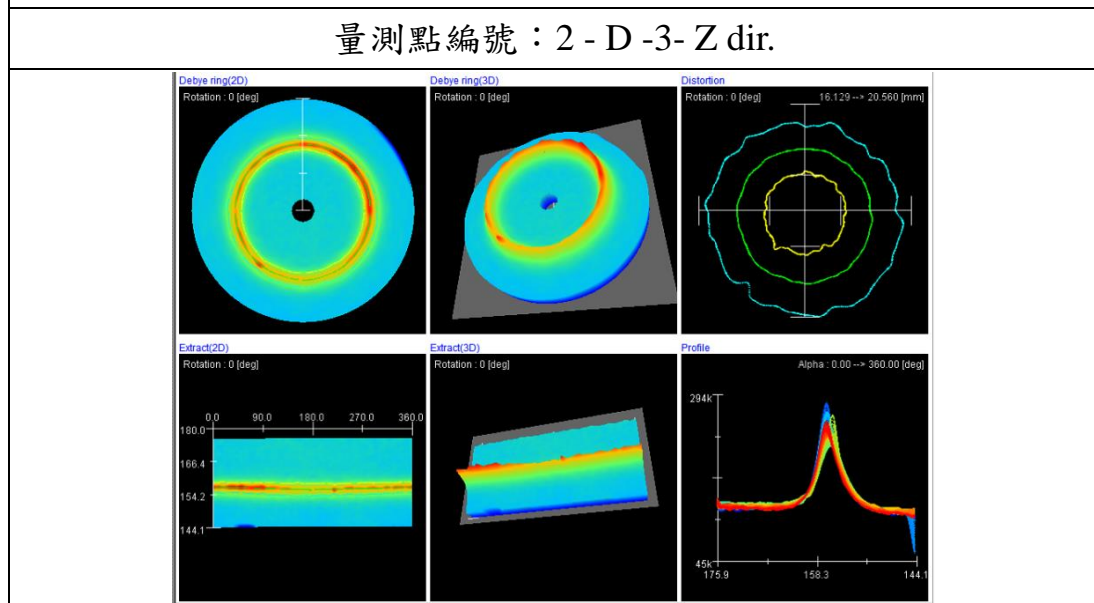
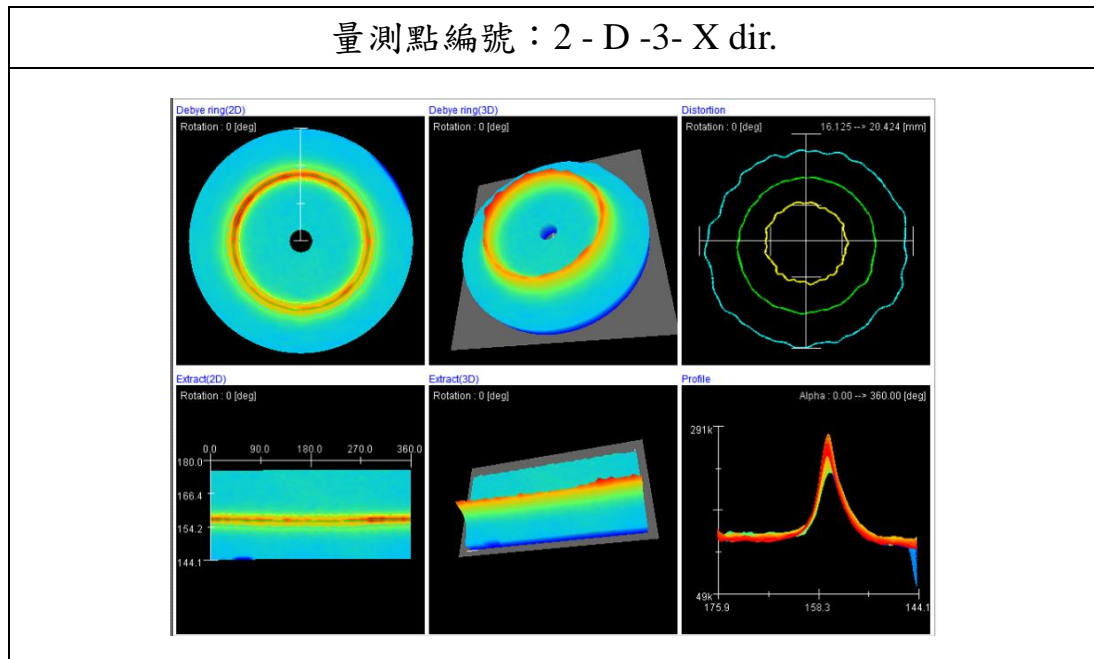
量測點編號：2 - D -2- X dir.



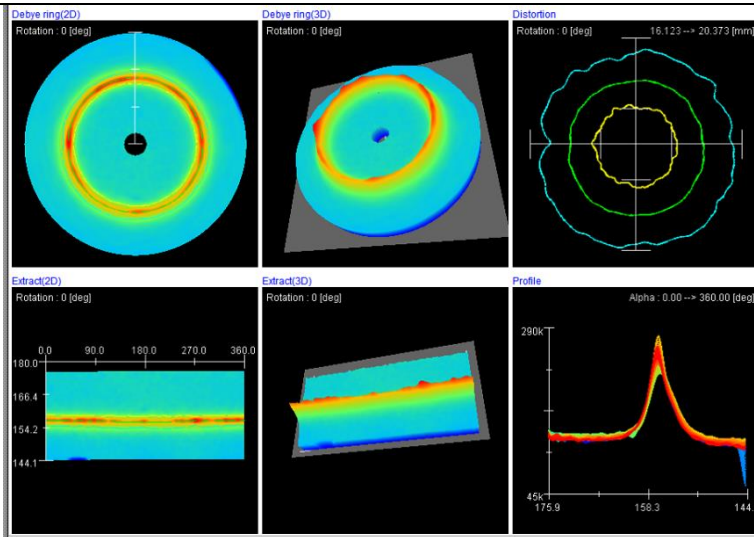
量測點編號：2 - D -2- Z dir.



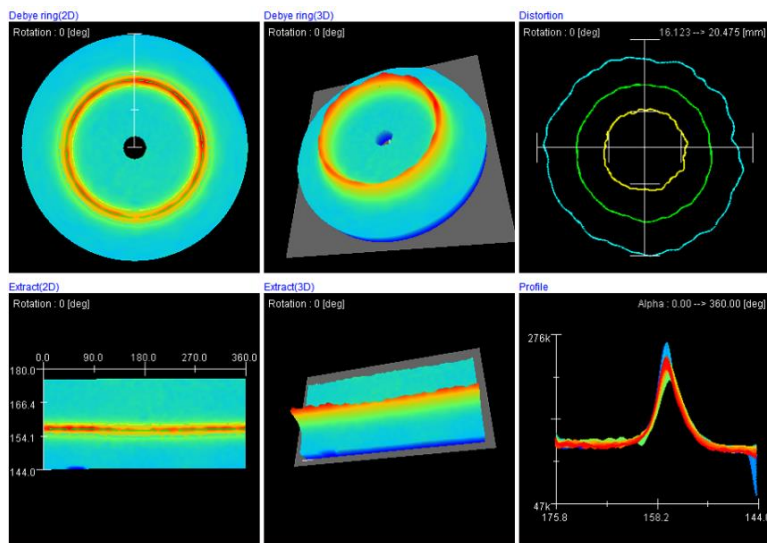
- 試件 2 號編號 D 鉸道第 3 ~ 4 點



量測點編號：2 - D -4- X dir.

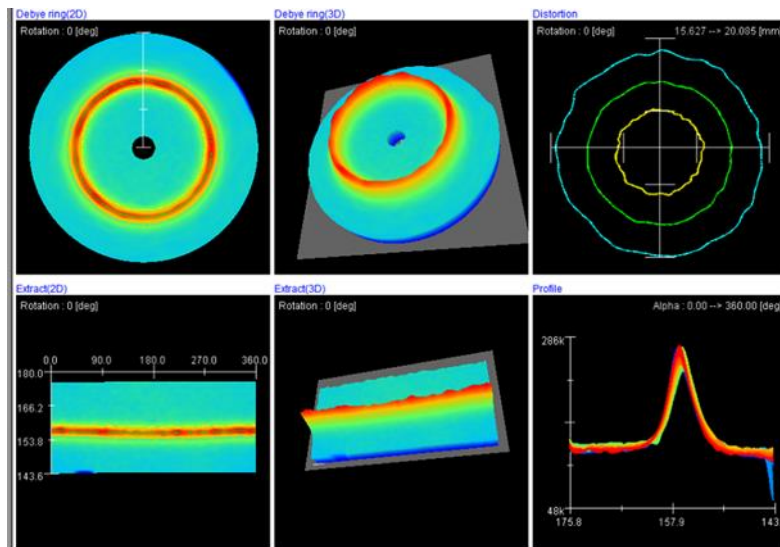


量測點編號：2 - D -4- Z dir.

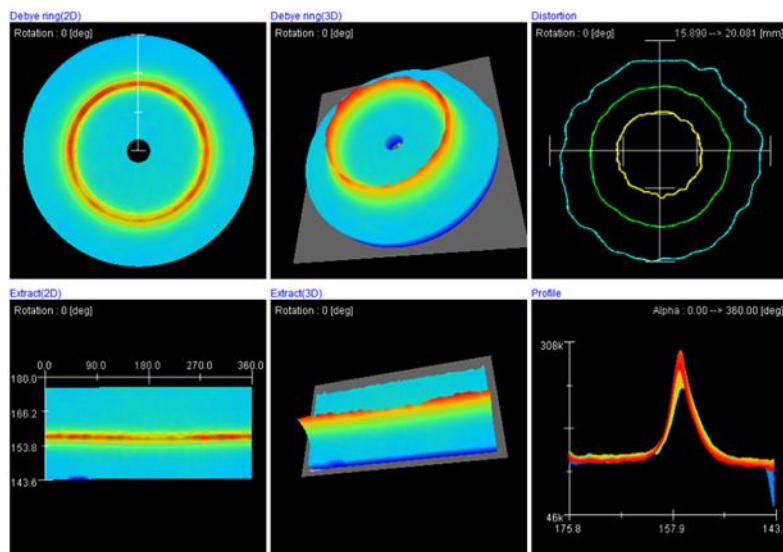


- 試件 3 號編號 A 鉸道第 1~4 點 Z 方向

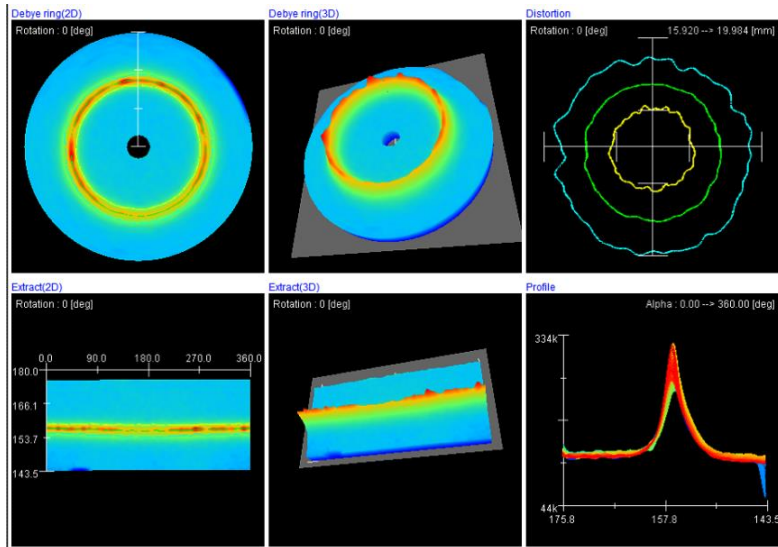
量測點編號：3 - A -1- Z dir.



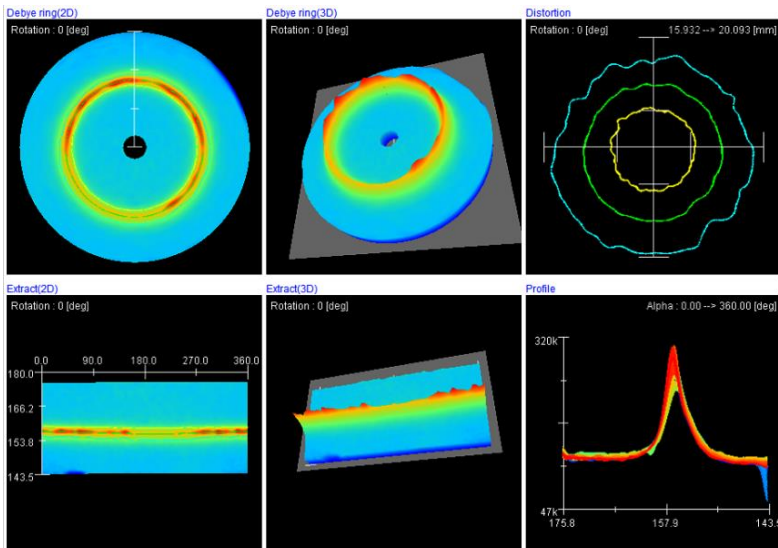
量測點編號：3 - A -2- Z dir.



量測點編號：3 - A -3- Z dir.



量測點編號：3 - A -4- Z dir.



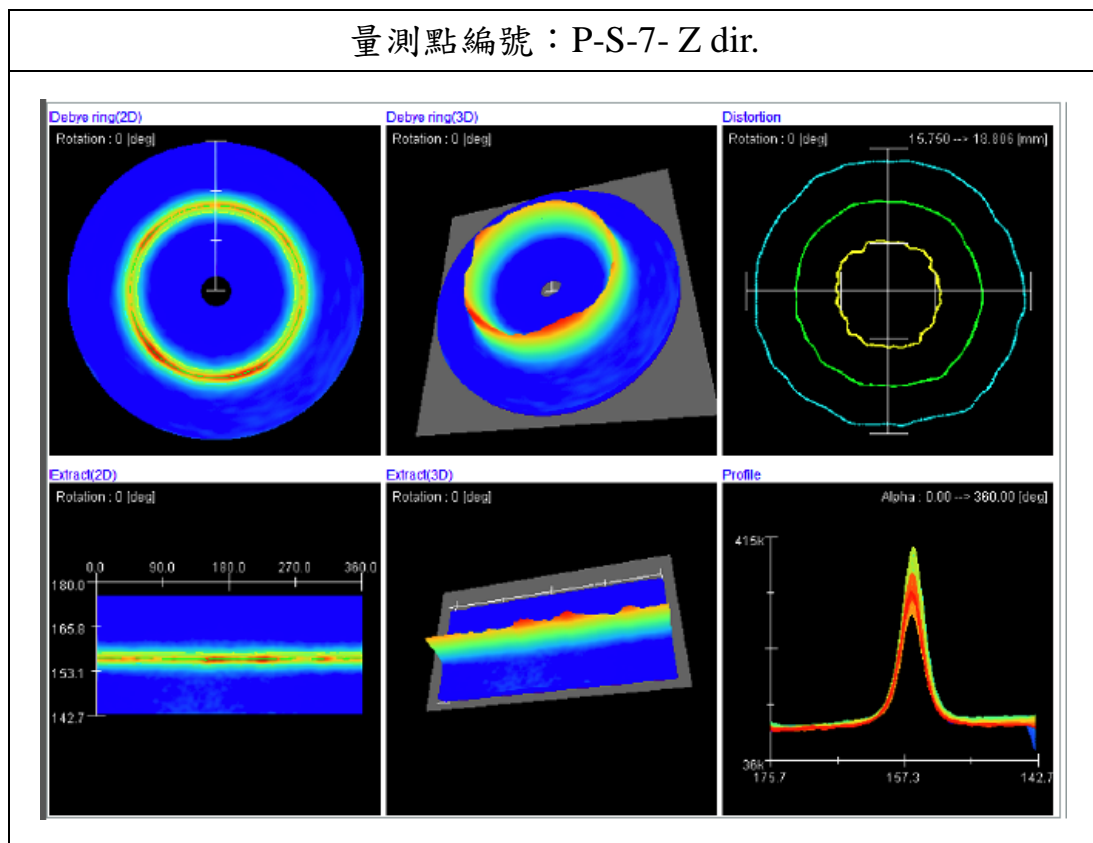
試件 1 號編號 C 鐳道				
量測點	1	2	3	4
X 方向 (MPa)	674	491	457	504
FWHM	4.97	4.24	4.04	3.9
Z 方向 (MPa)	630	575	501	539
FWHM	5.03	4.37	4.16	4.13

試件 2 號編號 D 鐳道				
量測點	1	2	3	4
X 方向 (MPa)	524	514	475	420
FWHM	5.19	4.64	4.42	4.31
Z 方向 (MPa)	710	610	544	484
FWHM	5.12	4.8	4.29	4.25

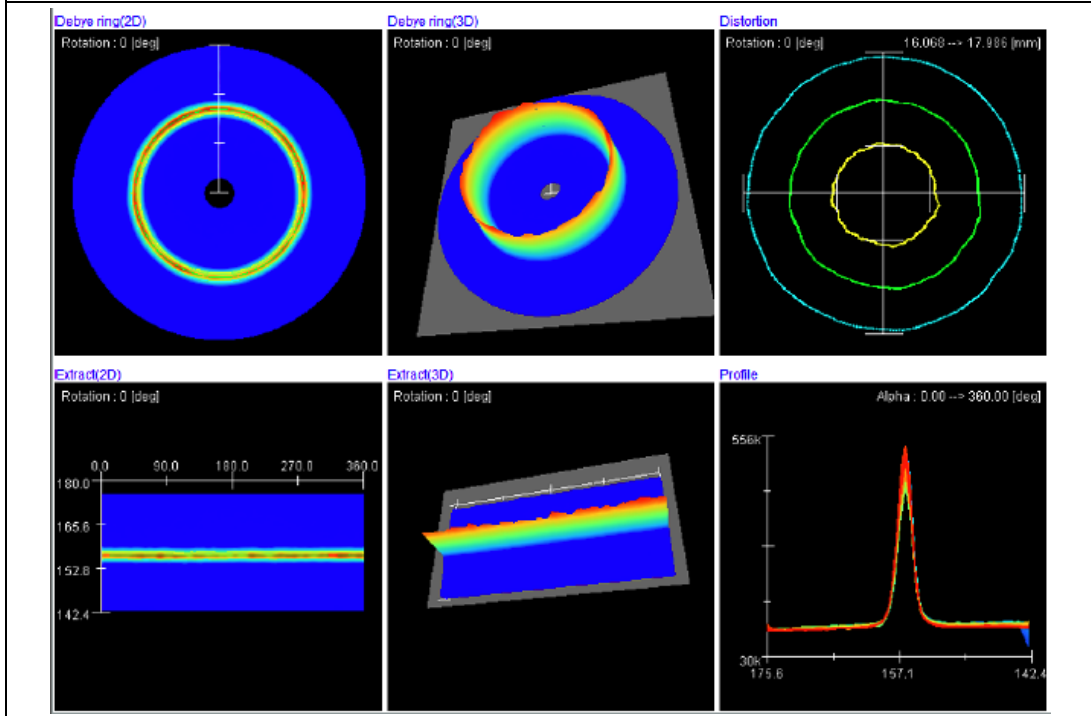
試件 3 號編號 A 鐳道				
量測點	1	2	3	4
Z 方向 (MPa)	613	541	537	555
FWHM	4.62	4.15	3.99	4.02

量測數值皆為正值(張應力)，不符合實際預期數值。由量測圖形 1(左上角)可得知，試片表面處於高張應力狀態；從右上角圖形可得知，量測數據的偏差值很大，造成同心圓歪斜，故研判以線放電加工切取試片時，試片表面仍會存在一加工之殘留張應力層。根據文獻資料，放電加工之殘留張應力層厚度約 $2 \mu\text{m}$ ，必需於量測前以電解拋光方式去除，才能獲得正確的讀值。

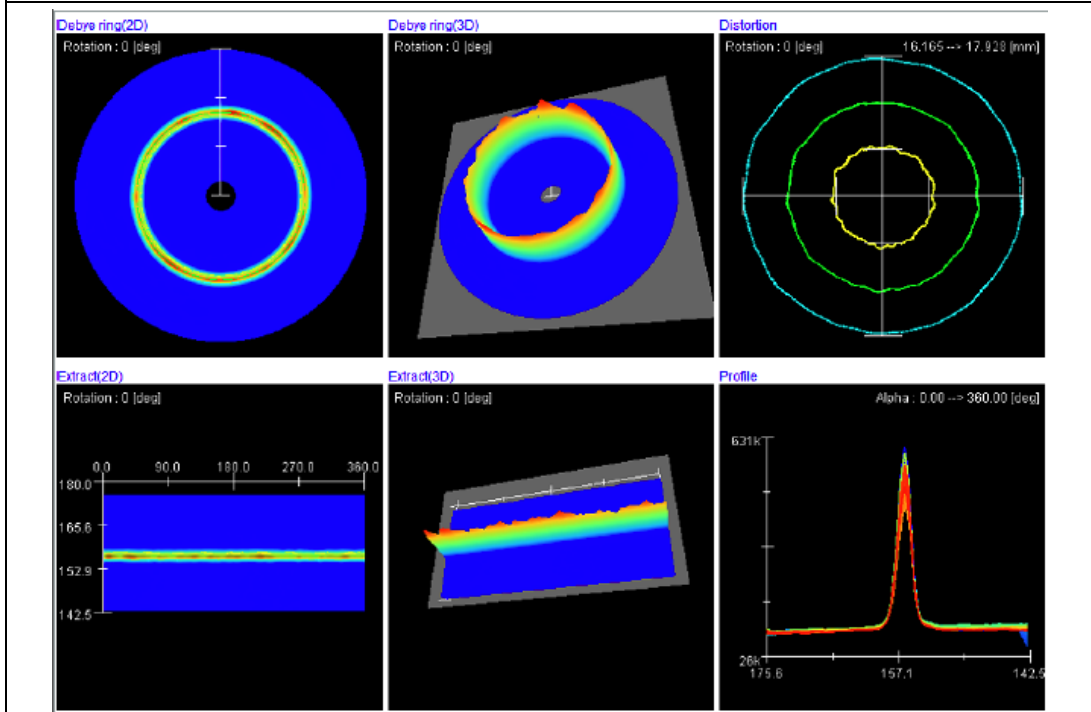
第二階段針對PTAW 與 GTAW 各種覆鋅條件之試片進行殘留應力量測，其量測值如下所列：



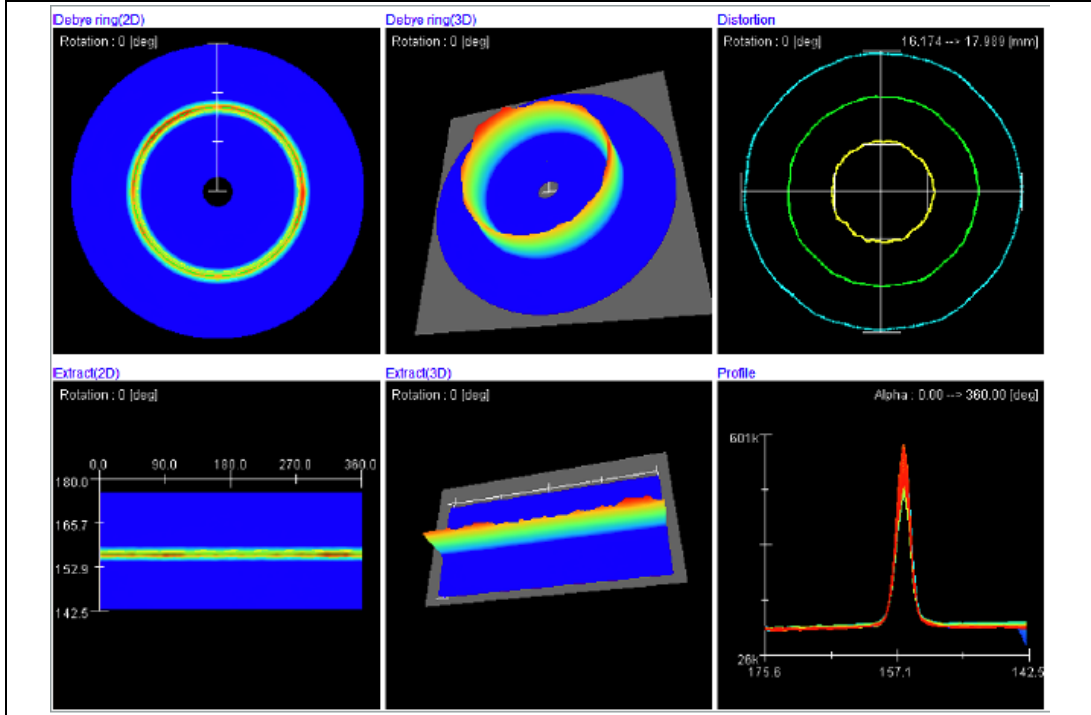
量測點編號：P-U-6-1u- Z dir.



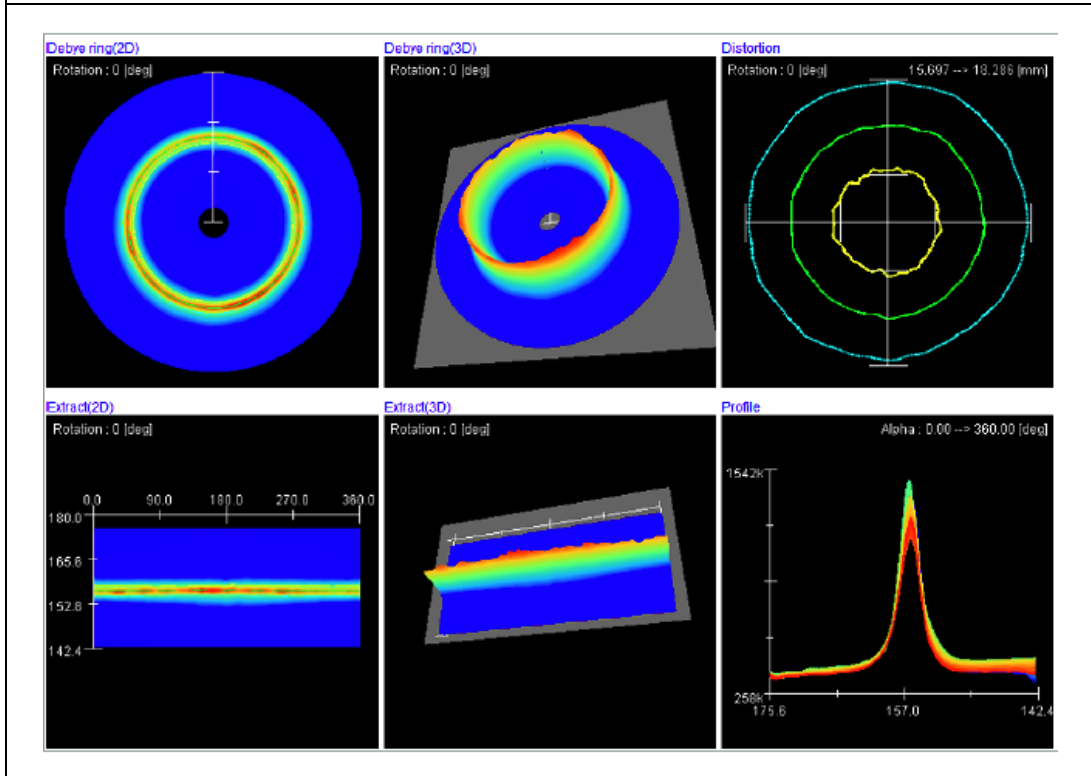
量測點編號：P-D-1-1u- Z dir.



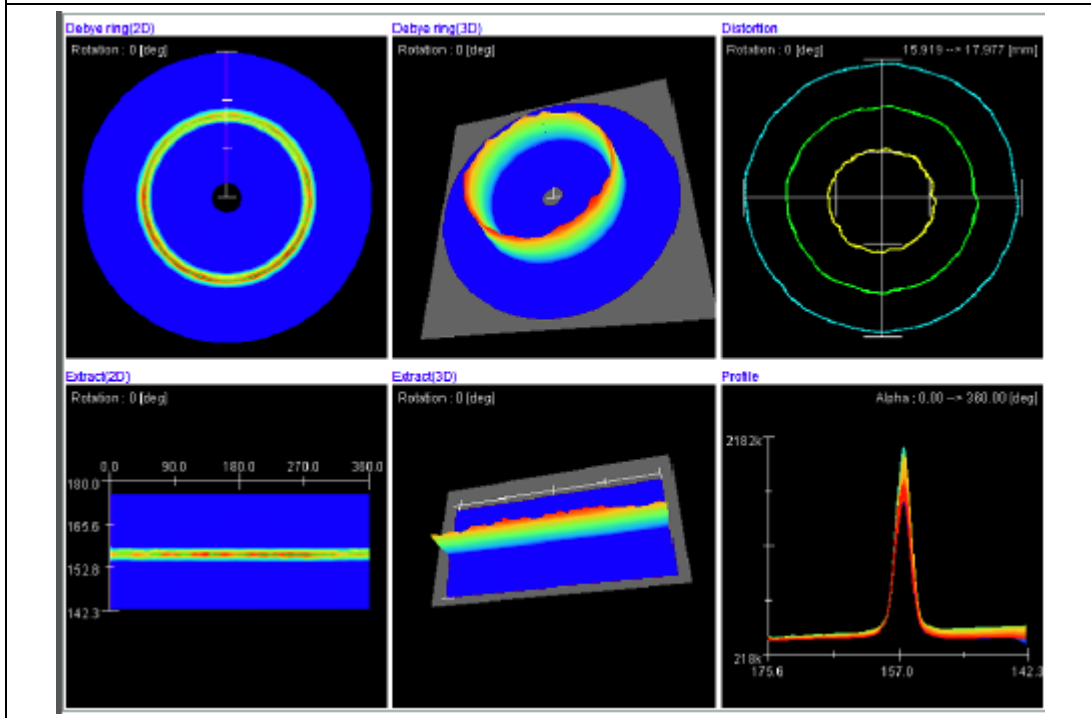
量測點編號：P-T-1-1u- Z dir.



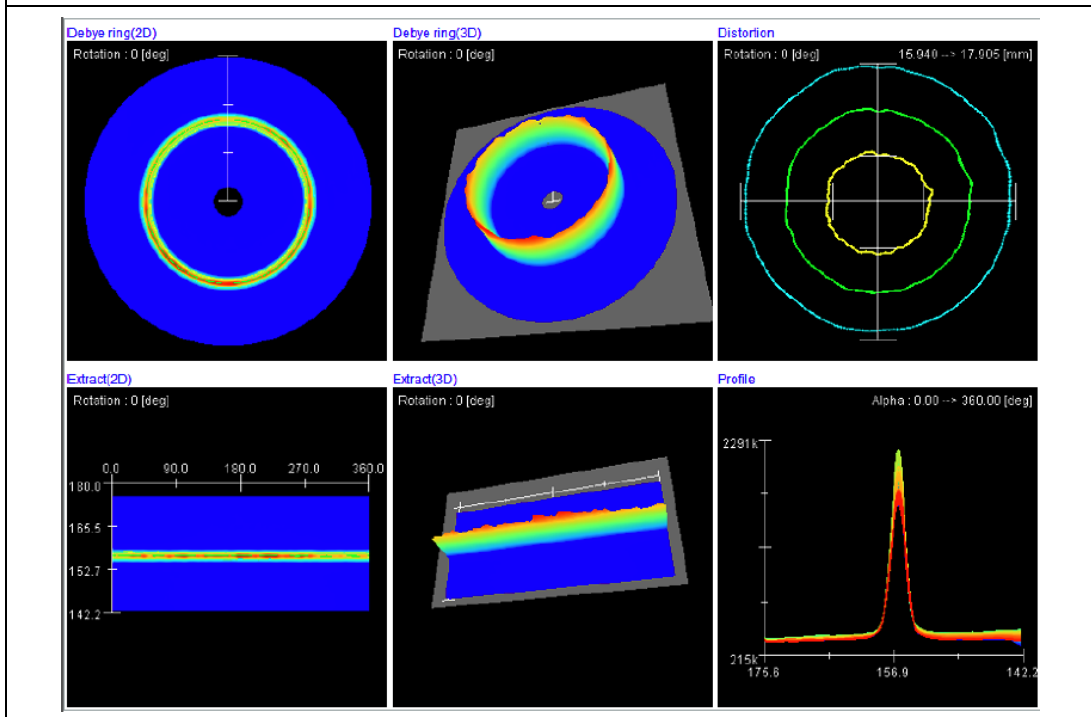
量測點編號：G-S-2- Z dir.



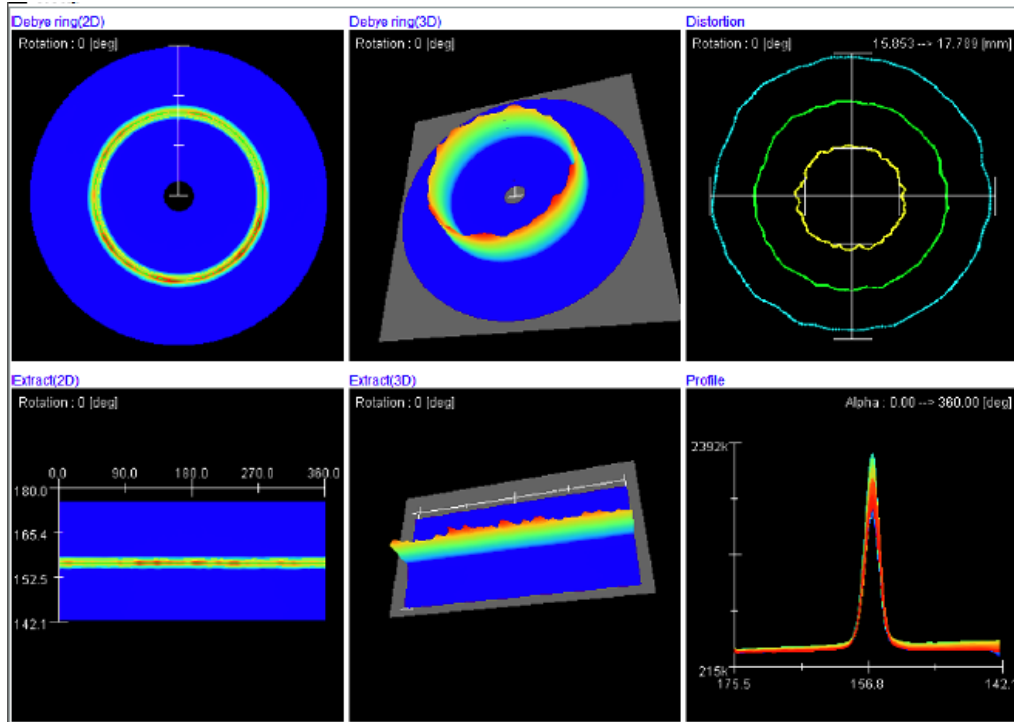
量測點編號：G-U-2-1u- Z dir.



量測點編號：G-D-2-1u- Z dir.



量測點編號：G-T-1-1u- Z dir.



量測點編號：G-T-2-1u- Z dir.

