

行政院原子委員會  
委託研究計畫研究報告

核電廠反應器冷卻水壓力邊界異質銲接件之覆銲特性研究  
**The characteristics analysis for weld overlay on the dissimilar  
metal weld of reactor coolant pressure boundary materials**

計畫編號：NL1060460

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、黃育熙 教授

研究期程：中華民國 106 年 6 月至 106 年 12 月

研究經費：新臺幣 200 萬元

核研所聯絡人員：史名揚

報告日期：106 年 11 月 23 日

## 目錄

目錄.....	I
圖目錄.....	III
表目錄.....	VIII
摘要.....	IX
Abstract.....	X
壹、計畫緣起與目的.....	1
1.1 冷卻水壓力邊界異質銲接組件之應力腐蝕.....	2
1.2 鎳基合金覆層銲補對異質銲接組件之影響.....	9
1.3 覆層銲接之特性分析.....	15
貳、研究方法與過程.....	21
2.1 實驗材料.....	21
2.2 惰性氣體電弧銲接處理 (Gas tungsten arc welding, GTAW).....	23
2.3 屏蔽金屬電弧銲接處理 (Shield manual arc welding, SMAW).....	23
2.4 銲接處理.....	24
2.5 液滲檢測.....	32
2.6 射線檢測.....	32
2.7 金相分析 (Metallographic analyses).....	32
2.8 穿透式電子顯微鏡分析.....	33
2.9 微硬度分析.....	33
2.10 超音波檢測.....	33
2.11 殘留應力分析.....	34
2.12 電化學量測.....	34
2.13 短期浸泡試驗.....	35
2.13 分析設備.....	39
參、主要發現與結論.....	43
3.1 低合金鋼端之 Inconel 182 緩衝層施作對合金銲道之影響.....	43
3.2 不銹鋼端之 ER308L 緩衝層施作對合金覆銲層之影響 (The influence of 308L SS butter layer on 316L SS).....	45
3.3 覆層銲接處理對殘留應力分佈之影響 (The effect of overlay welding on the distribution of residual stress).....	55
3.4 異質銲接件瑕疵之超音波檢測分析.....	69
3.5 覆層銲接處理對超音波瑕疵檢出能力之影響.....	83

3.6 耐蝕能力測試.....	94
肆、具體完成工作項目及結論.....	96
參考文獻.....	98
附錄 A 射線檢測結果.....	102
附錄 B 殘留應力詳細數據.....	103

## 圖目錄

圖 1.1	晶界析出物對晶界滑移、應力集中與微孔生成之影響。(a) 筆直的晶界造成應力集中於晶界三角點、(b) 晶界析出物固定住晶界移動，使應力集中在析出物周遭、(c) 曲折的晶界及析出物限制晶界滑移，同時降低應力集中效應與微孔生成傾向 [5, 6]。.....	5
圖 1.2	在不同回火狀態下之軸向 (axial) 殘留應力曲線圖。(距離熔融介面 0.2 mm) [15]。.....	8
圖 1.3	Half-bead weld 覆層銲接處理 [20]。.....	10
圖 1.4	Temper bead weld 覆層銲接處理 [20]。.....	10
圖 1.5	D.C. Cook Unit 1 之安全端與飼水管嘴覆銲示意圖與施作外觀照 [29]。.....	12
圖 1.6	Millstone 3 之 Spray 管嘴與覆銲示意圖與成品外觀照 [29]。.....	13
圖 1.7	Hot leg 異質銲接件之應力分布圖，上側為軸向 (axial) 殘留應力，下側為周向 (hoop) 殘留應力 [19]。.....	14
圖 1.8	內側覆銲修補後之實際使用狀態下殘留應力分布圖 [31]。(壓力：15.5 MPa，溫度：327 °C).....	14
圖 1.9	單道次覆銲施作後單道次下方的(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。.....	15
圖 1.10	參層覆銲施作後原單道次下方位置的(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 區域之金相圖。.....	16
圖 1.11	雙層覆銲之(a) 第 1 層第 1 道次與第 2 層第 1 道次之介面、(b) 第 2 層第 1 道次之銲冠、(c) 第 1 層第 2 道次與第 2 層第 1 道次之介面、(d) 第 1 層第 1 道次與 A508 介面，以及(e) 第 1 層第 1 道次與第 2 層第 2 道次之介面的區域金相圖。.....	17
圖 1.12	單道次覆銲試片進行 EDS 沿銲冠中心線逐點成分分析。.....	17
圖 1.13	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。.....	18
圖 1.14	取樣位置第 1 層第 1 道銲冠處的 TEM 分析結果。.....	19
圖 1.15	覆銲單道次與覆銲參層於第 1 層第 1 道次之各區域於 3.5 % NaCl(aq)環境下之電化學曲線圖。.....	20
圖 1.16	經電化學實驗後，(a)(b) 覆銲單道次銲冠、(c)(d) 覆銲單道次銲根、(e)(f) 覆銲參層於第 1 層第 1 道次銲冠，以及(g)(h) 覆銲參層於第 1 層第 1	

道次銲根之 SEI 影像。.....	20
圖 2.1 實驗流程圖。.....	21
圖 2.2 A508 之三維金相。.....	21
圖 2.3 (a) GTAW 銲接機台、(b) 半自動 XY 移動銲槍之外觀照。.....	23
圖 2.4 SMAW 銲接機台之外觀照。.....	23
圖 2.5 底材鋼料之加工尺寸圖。.....	24
圖 2.6 中碳鋼固定板之加工尺寸圖。.....	25
圖 2.7 A508 開槽尖端下方置放 IN 182 銲條襯板。.....	28
圖 2.8 A508 開槽端表面施作 IN 182 之(a) 第 1 層、(b) 第 2 層及(c) 第 3 層緩衝層之外觀照。.....	28
圖 2.9 IN 82 滲透銲接處理施作完成之外觀照。.....	29
圖 2.10 異質銲接件之顯微結構示意圖。.....	29
圖 2.11 IN 182 填料銲接處理施作完成之(a) 俯視、(b) 側視及(c) 銲道尾端的外觀照。.....	30
圖 2.12 316L 不銹鋼端表面施作 ER308L 之不銹鋼緩衝層之外觀照。.....	31
圖 2.13 IN 52M 覆層銲接處理施作完成之(a) 俯視、(b) 側視的外觀照。.....	31
圖 2.14 液滲檢測使用之 E-59A (清潔劑)、VP-30 (色比式滲透液)、D-70 (顯像劑) 之外觀照。.....	35
圖 2.15 超音波檢測試片之尺寸加工設計圖 1。(A：銲道中心線底部直刻槽、SDH：側邊深孔 $\phi 3 \times 125 \text{ mm}$ ) .....	36
圖 2.16 超音波檢測試片之尺寸加工設計圖 2。(A：銲道中心線底部 SS/銲道介面斜刻槽、B：碳鋼端頂部銲道/ IN 182 緩衝層介面直刻槽、C：銲道中心線底部直刻槽、D：銲道中心線底部銲道/IN 182 緩衝層介面斜刻槽及 SDH $\phi 3 \times 50 \text{ mm}$ 、E：不銹鋼端頂部 SS/銲道介面直刻槽) .....	37
圖 2.17 ASTM G31 短期浸泡裝置之外觀照。.....	42
圖 2.18 (a) 超音波量測儀、(b) 單晶探頭及(c) 雙晶探頭之外觀照。.....	42
圖 3.1 A508/IN182B 之(a) 50 倍、(b) 500 倍，A508/IN182T 之(a) 50 倍、(b) 500 倍金相圖。.....	43
圖 3.2 (a) A508/IN182B、(b) A508/IN182T 之 SEI 影像及 EDS 成分分析 (wt. %)。.....	44
圖 3.3 使用緩衝層施作參數 (NO.4) 及填料銲接處理參數 (filler) 施作 IN 182 銲料於 A508 表面，A508 底材至異質材料介面之微硬度值。.....	44
圖 3.4 經 IN 52M 覆層銲接處理(a) 無、(b) 有 308L 緩衝層異質銲接件之結構	

示意圖。	47
圖 3.5 經 IN 52M 覆層銲接處理(a) 無、(b) 有 308L 緩衝層異質銲接件之取樣試片外觀照。	47
圖 3.6 (a)-(l) 316L/ IN52M 介面、(m)-(r) 第 1、2 層 IN 52M 介面之 200 倍的金相圖。	48
圖 3.7 (a)-(l) 316L/308L 緩衝層介面、(m)-(r) 第 1、2 層 308L 介面之 200 倍的金相圖。	49
圖 3.8 308L/IN52M 介面之(a)-(l) 200 倍、(m)-(r) 500 倍的金相圖。	50
圖 3.9 (a)(b) 316L/IN52M 介面、(c)(d) 308L/IN52M 介面之 SEI 影像及 EDS 成分分析 (wt. %)。	51
圖 3.10 316/IN52M 介面之 EDS 成分分析。	52
圖 3.11 308L/IN52M 介面之 EDS 成分分析。	52
圖 3.12 308L/IN52M 處之 IN 52M 取樣的 TEM 分析結果。(DP 以[011] zone axis 方向擇區繞射圖)。	53
圖 3.13 316L/IN52M 處之 IN 52M 取樣的 TEM 分析結果。(DP 以[112] zone axis 方向擇區繞射圖)	54
圖 3.14 (a) 銲接件、(b) 覆銲件之 CAD 模型圖及前視圖。(左側為 A508 端、右側為 316L 端)	58
圖 3.15 銲接件之(a) 網格圖、(b) 熔融金屬劃分區、(c) 異質材料相對位置。	59
圖 3.16 覆銲件之(a) 網格圖、(b) 熔融金屬劃分區、(c) 異質材料相對位置。	59
圖 3.17 (a) 銲接件、(b) 覆銲件之拘束條件	60
圖 3.18 (a) 銲接處理施作完成、(b) 銲接件靜置 5400 秒、(c) 覆層銲接處理施作前、(d) 覆銲件靜置 6000 秒之溫度場模擬結果。(°C)	61
圖 3.19 (a) 銲接件、(b) 覆銲件、(c) 308L 緩衝層/覆銲件距離銲道尾端 65 mm 處截面之 S11 殘留應力場量測值。(MPa)	64
圖 3.20 (a) 銲接件、(b) 覆銲件、(c) 308L 緩衝層/覆銲件距離銲道尾端 65 mm 處截面之 S12 殘留剪切應力場量測值。(MPa)	65
圖 3.21 (a) 銲接件、(b) 覆銲件之工件殘留應力模擬結果。(MPa)	66
圖 3.22 銲接件距離銲道尾端 65 mm 處截面之(a) S11、(b) S12、(c) S22 之殘留應力場模擬值。(MPa)	67
圖 3.23 覆銲件距離銲道尾端 65 mm 處截面之(a) S11、(b) S12、(c) S22 之殘留應力場模擬值。(MPa)	68
圖 3.24 加工圖 2.15 之銲接件以 Compound 橫波由(a) A508 端、(b) 316L 端掃	

描之 Side 及 Top 訊號圖。	72
圖 3.25 加工圖 2.15 之銲接件以 P-R 縱波由(a) A508 端、(b) 316L 端掃描之 Side 及 Top 訊號圖。	73
圖 3.26 加工圖 2.16 之銲接件以 Compound 橫波由 A508 端掃描之 Side 及 Top 訊號圖。	74
圖 3.27 在圖 3.26 中之 B 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。	74
圖 3.28 在圖 3.26 中之 C 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。	75
圖 3.29 在圖 3.26 中之 D 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。	75
圖 3.30 加工圖 2.16 之銲接件以 Compound 橫波由 316L 端掃描之 Side 及 Top 訊號圖。	76
圖 3.31 在圖 3.30 中之 A 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。	76
圖 3.32 在圖 3.30 中之 C 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。	77
圖 3.33 在圖 3.30 中之 D 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。	77
圖 3.34 在圖 3.30 中之 E 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。	77
圖 3.35 在圖 3.30 中之 SDH 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。	78
圖 3.36 加工圖 2.16 之銲接件以 P-R 縱波由 A508 端掃描之 Side 及 Top 訊號圖。	78
圖 3.37 加工圖 2.16 之銲接件以 P-R 縱波由 316L 端掃描之 Side 及 Top 訊號圖。	79
圖 3.38 在圖 3.36 中之瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。	80
圖 3.39 在圖 3.37 中之瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。	81
圖 3.40 加工圖 2.16 銲接件經覆層銲接處理之外觀照。	83
圖 3.41 覆銲件之區域劃分之外觀照。	83
圖 3.42 覆銲件以 P-R 縱波由 A508 端掃描之 Side 及 Top 訊號圖。	86
圖 3.43 在圖 3.42 中之 A 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。	86
圖 3.44 在圖 3.42 中之 B 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。	87
圖 3.45 在圖 3.42 中之 C 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。	87
圖 3.46 在圖 3.42 中之 D 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。	88
圖 3.47 在圖 3.42 中之 SDH 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。	88
圖 3.48 覆銲件以 P-R 縱波由 316L 端掃描之 Side 及 Top 訊號圖。	89
圖 3.49 在圖 3.48 中之 A 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。	89
圖 3.50 在圖 3.48 中之 C 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。	90
圖 3.51 在圖 3.48 中之 D 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。	90
圖 3.52 在圖 3.48 中之 E 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。	91
圖 3.53 在圖 3.48 中之 SDH 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。	91

圖 3.54 覆鋅件以 Compound 橫波由 A508 端掃描之 Side、Top、Sector 及 A scan 訊號圖。 .....	93
圖 3.55 覆鋅件以 Compound 橫波由 316L 端掃描之 Side、Top、Sector 及 A scan 訊號圖。 .....	93
圖 3.56 銲接件、覆鋅件、308L 緩衝層/覆鋅件之 316L SS 底材在 3.5 wt.% NaCl 水溶液環境下之極化曲線。 .....	94
圖 3.57 銲接件、覆鋅件、308L 緩衝層/覆鋅件之 IN 182 銲道在 3.5 wt.% NaCl 水溶液環境下之極化曲線。 .....	95
圖 3.58 (a) 銲接件、(b) 覆鋅件、(c) 308L 緩衝層/覆鋅件之 316L SS 底材經電化學實驗後之表面 SEI 影像。 .....	95
圖 3.59 (a) 銲接件、(b) 覆鋅件、(c) 308L 緩衝層/覆鋅件之 IN 182 銲道經電化學實驗後之表面 SEI 影像。 .....	95

## 表目錄

表 1.1	異質銲接件之相關研究。.....	6
表 2.1	所用材料之化學成分。(wt. %) .....	22
表 2.2	銲接參數。.....	27
表 3.1	應力模擬參數之設定值。.....	55
表 3.2	各溫度區間 A508 低合金鋼之材料性質。.....	56
表 3.3	各溫度區間鎳基 82/182 合金之材料性質。.....	56
表 3.4	各溫度區間 316L 不銹鋼之材料性質。.....	57
表 3.5	各溫度區間鎳基 52M 合金之材料性質。.....	57
表 3.6	超音波探頭型號及設定參數。.....	69
表 3.7	銲接件之瑕疵種類與設計尺寸。.....	70
表 3.8	檢出瑕疵的高度。.....	82
表 3.9	覆銲層件之結合性與訊號衰減狀況。.....	84
表 3.10	檢出瑕疵之高度。(粗斜體為尖端繞射法計算) .....	92

## 摘要

本計畫將以鎳基 52M 合金(Inconel alloy 52M, IN 52M)為覆銲金屬，利用惰氣鎢極電弧銲(Gas Tungsten Arc Welding, GTAW)技術，施作覆層銲接於 A-508 低合金鋼/A-182 F316L 不銹鋼之異質銲接件上，探討覆銲對於壓力邊界異質金屬銲道及熱影響區之變化。異質銲接件係以鎳基 82/182 合金(Inconel alloy 82/182)進行 GTAW 及遮蔽氣體電弧銲(Shield Metal Arc Welding, SMAW)填料銲接，另比較使用 ER308L 不銹鋼銲料做為覆銲層與異質銲接件之緩衝層(butter layer)的差異。覆銲件經非破壞檢測後，使用放電線切割加工(Wire Electrical discharging Machine, WEDM)切取垂直覆銲/填料銲方向之試片。透過微觀組織分析、顯微結構觀察及耐蝕能力評估，探討覆銲層施作對於異質銲接件之析出物分佈與腐蝕行為的影響；另一方面，利用殘留應力量測及超音波檢測比較覆銲層施作對異質銲接件之抗應力量腐蝕能力及缺陷檢出能力。

預期在本計畫執行後，能建置對於壓力容器覆層銲補技術具有卓越分析能力的研究團隊、評估超音波檢測技術應用在覆銲處理之異質銲接件的檢測能力、訓練具備前瞻技術的核能材料與核能專業技術之人才、以及使我國能與歐美國家在覆銲技術應用上進行研究交流。

關鍵字：覆銲、異質銲接件、緩衝層、508 低合金鋼、316L 不銹鋼、鎳基 52M 合金。

## **Abstract**

This proposal presents complete analyses for weld overlay using Alloy 52M on dissimilar weldment between A508 low alloy steel and A182 F316L stainless steel as assembling of pressurized water reactor (PWR). The buttering procedure carry out by using gas tungsten arc welding with the filler metal Alloy 82 and 308L stainless steel, while shield metal arc welding is used for butt welding with the filler alloy 182. The effect of buttering layer, weld overlay layer on microstructure, phase transformation, corrosion resistance, residual stress, signal of ultrasonic testing will be fully studied. The correlation among the weld overlay processing, microstructure, corrosion resistance, sensitivity of stress corrosion cracking will be explored additionally. 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, dissimilar weldment, buttering layer, A508 low alloy steel, 316L stainless steel, Alloy 52M.

## 壹、計畫緣起與目的

近年來，在壓水式核能電廠反應器（Pressurized Water Reactors, PWRs）中，以鎳基 82/182 合金做為銲材的填料銲接（butt welding）之異質銲接件，接連被檢測出具有軸向（axial）及周向（hoop）之裂紋自管件內壁向外生成，其原因歸咎於一次側冷卻水應力腐蝕裂紋（Primary Water Stress Corrosion Cracking, PWSCC）。冷卻水壓力邊界組件由 A508、A516 飼水管嘴銲接 A182 F316、A182 F304 安全端，施作前先製作 308LSS 於低合金鋼側，再利用鎳基 82 合金進行滲透銲連接異質金屬與製作緩衝層於 308L SS 上，最後以鎳基 182 合金銲滿溝槽至完成。異質銲接件於銲後將在管壁表面殘留張應力、內部殘留壓應力，當組件持續在高溫狀態運作，以及受到內部水壓力的作用，整體異質銲接管件之殘留應力狀態皆會傾向張應力增長。若再加上冷卻水與材料產生水化學反應，將造成鎳基合金銲道處生成應力腐蝕裂紋（SCC）。覆層銲接處理（weld overlay welding），可分為外部覆層銲接、內部覆層銲接及內部覆層修補等模式，施作前除了需要考慮到移除受損材料的比例之外，覆銲層的面積、位置及厚度都需經過審慎的評估與計算。無論使用何種模式及施作順序，覆層銲接處理皆能有效地影響殘留應力分布的狀態及大小，一般而言，經由覆銲處理的異質銲接件，其內部的殘留壓應力將能大致回復至銲後狀態。透過壓應力的增長與替補損壞的銲道，裂紋將被部分移除或降低其裂紋成長速率，進而提升壓力邊界異質銲接組件的使用壽命。

國內外之核電廠已廣泛應用覆層銲接處理於補強異質銲道結構，研究單位也紛紛投入覆銲結構設計、覆銲材料選擇、覆銲條件對底材影響等議題，做出詳細且深入的探討。其中，以設法抑制、降低異質銲接件的材料敏感性為大宗，如異質銲接件的銲材選擇、緩衝層施作材料選擇以及銲接方式改良等議題。實際應用上之覆層銲接處理，施作完成後僅能以超音波檢測（Ultrasonic testing, UT）、

放射線檢測 (RT) 等非破壞檢測方式，進行訊號評估，一方面觀察 SCC 之裂紋長度有無受到加工而成長外，另一方面則是檢視覆層銲接的品質。對於覆層銲接後的顯微組織狀態、殘留應力模式、耐腐蝕性質，都只能用預測或是模擬來完成，在學術與實務上都較少有相關文獻可做參考。

為了解 IN 52M 覆層銲接件施作在異質銲接件上的實際特性，本研究將著重於緩衝層、覆銲層施作完成後，整塊覆銲件的殘留應力量測、超音波訊號衰減程度分析，同時擷取特定位置之試片進行微觀組織與結構分析、合金元素分布觀察、抗應力腐蝕敏感性評估等實驗。有鑑於覆銲後執行超音波檢測與電廠運轉安全與覆銲層施作合格程度息息相關，為了探討超音波訊號檢測缺陷能力受到緩衝層、覆銲層施作的影響程度，將透過機械加工方式於工件內部埋入設計之缺陷，用以協助分析超音波訊號上的差異性。

### 1.1 冷卻水壓力邊界異質銲接組件之應力腐蝕

核電廠反應器之冷卻水壓力邊界組件大多是由低合金鋼 (Low Alloy Steel, LAS) A508 之飼水管嘴 (Nozzle) 與不銹鋼 A182 Type 316(L) 之安全端 (safe end)，以鎳基 82/182 合金做為銲材銜接而成。經長期使用後，相關技術報告及研究指出，異質銲道以超音波檢測出軸向裂紋、周向裂紋，伴隨著冷卻水洩漏、管線破壞及輻射外洩等潛在危險。由於核電廠內之管線口徑較大、組件運轉區內具有高度的輻射量、可工作區域狹小及內部冷卻水無法移除等先決條件，使得傳統之替換管件手法無法實行。迫使各國核能電廠與研究單位對於裂紋生成之原因、防治技術與修補技術，進行深入的研究探討。

異質銲接件中，肥粒鐵結構材料 (Body-Centered Cubic, BCC) 與沃斯田體結構材料 (Face-Centered Cubic, FCC) 在熱膨脹係數 (Coefficient of Thermal

Expansion, CTE)、原子固溶度及化學成分皆差異甚大，倘若 2 種材料透過銲接處理直接對接、使用不銹鋼銲材對接，將會產生以下幾項問題：(1) 熱膨脹差異過大，使得銲接件在升溫或降溫過程，於介面處產生極大的熱應力集中；(2) 碳原子由 BCC 材料擴散至 FCC 材料中、鉻原子自 FCC 材料擴散至 BCC 材料中，造成碳原子與鉻原子的匱乏區 (depletion) 與碳化物生成於介面；(3) 沃斯田體化溫度不同、物理性質差異過大，Type II 晶界於介面處生成 [1]。因此，低合金鋼/不銹鋼之異質銲接件在服役期間，受到耐蝕性下降、應力腐蝕與介面結合不佳等因素之影響，造成壽命大幅降低。鎳基合金 (nickel-based alloy) 之熱膨脹係數介於低合金鋼與不銹鋼之間，其結構亦使得碳原子的擴散係數 (diffusivity) 相對較低，自 1960 年代，鎳基合金逐漸成為低合金鋼與不銹鋼銲接的主要銲材，除了降低熱膨脹差異外，也扮演著碳原子的阻障層 (carbon diffusion barrier) [2]。然而，隨著應用時間的增加，不可預期的破壞案例卻屢屢出現，相關研究便對鎳基合金銲道與不銹鋼緩衝層 (buttering layer) 之異質銲接件的特徵，進行系列的討論，如表 1.1 所列。

研究結果顯示，受限於鎳基合金之熔點低於不銹鋼底材，於鎳基合金銲道/不銹鋼介面將產生不完全熔融區 (unmixed zone, UZ) [3]。另一方面，鎳基合金銲道/低合金鋼介面則因為合金內之化學成分與沃斯田體化之溫度的差異影響，生成明顯的 Type II 晶界，此種晶界被認為具有高度的應力腐蝕敏感性 (sensitivity of stress corrosion cracking) 及較低的抗拉強度 [4]。相較於沃斯田體不銹鋼銲道組織，經過不等溫度與時間的後熱處理，鎳基合金銲道較不容易於柱狀晶間 (inter-dendritic) 析出低熔點二次相 (secondary phase)，使其在高溫環境使用時，具有較低的失延裂紋敏感性 (sensitivity of ductility-dip cracking) [1, 3-4]。值得一提的是，由於鎳基 52 合金具有較高的鉻、鈦含量，被視為具有較佳的抗熱裂敏

感性 (sensitivity of hot cracking)，在實際工作的環境中，鎳基 52 合金卻較鎳基 82 合金容易產生裂紋。為此，Ramirez 等人 [5,6] 針對鎳基 52 合金與鎳基 82 合金鐸道做了詳盡的討論。其結果指出，鎳基 52 合金於熔融液相時，隨即生成  $M(CN)$  碳化物，在固化時  $M(CN)$  被排除至晶界間，隨著溫度下降轉變為  $M_{23}C_6$  型態之碳化物；鎳基 82 合金則於固相生成時，同時生成  $M(CN)$ ，隨著溫度下降轉變為  $M_7C_3$  與  $M_{23}C_6$  型態之  $NbC$  顆粒狀碳化物於晶界。相比之下，鎳基 82 合金析出之碳化物，其移動之能量與可位移之時間都較少，因此鎳基 82 合金具有較曲折的晶界 (tortuous grain boundaries)。在受到外加張應力情況下，晶界三角點 (triple point of GBs) 可視為應力集中的首要位置，造成此處之空孔濃度 (density of vacancies) 大幅上升，進而生成微孔、微孔聯合 (micro-void coalescence)，以及應力破壞。當晶界受到高溫與應力作用時，產生滑移、類似潛變 (creep-like) 的行為，晶界間的碳化物扮演著固定住晶界的角色，使得晶界形貌變得非常曲折，可視為分散應力集中的重要因子，示意圖如圖 1.1 所示。雖然鎳基 52 合金於晶界處具有大量且細小的  $M_{23}C_6$  碳化物析出，其阻止晶界滑移的能力仍略遜於鎳基 82 合金鐸道之  $NbC$  顆粒狀碳化物。使用 308L 及 309L 不銹鋼製作低合金鋼測的緩衝層之研究中 [8,9]，由於 309L 不銹鋼具有較高的鉻、鎳含量，於鐸道/低合金鋼介面處仍可觀察到 Type I、Type II 晶界及碳化鉻，伴隨著低合金鋼熱影響區內部出現碳匱乏區、麻鐵散鐵結構，降低異質鐸道的耐腐蝕性與機械性質。相較之下，308L 不銹鋼鐸道與低合金鋼介面，僅觀察到麻田散鐵與沃斯田體的混合結構，且鉻、鎳所佔比例經過沃斯田體介面後便急遽上升，提升至與 308L 不銹鋼鐸道金屬之含量相同。透過腐蝕試驗得知，309L 不銹鋼做為低合金鋼緩衝層時，將會有較高的應力腐蝕裂紋敏感性 (sensitivity of stress corrosion cracking)。綜合以上各種合金鐸道成分搭配不同之底材的研究成果，可以推估銜

接低合金鋼與不銹鋼之異質材料組件時，使用鎳基 82/182 合金搭配 308L 不銹鋼做為低合金鋼的緩衝層，將得到較穩定的品質與較高的使用壽命。

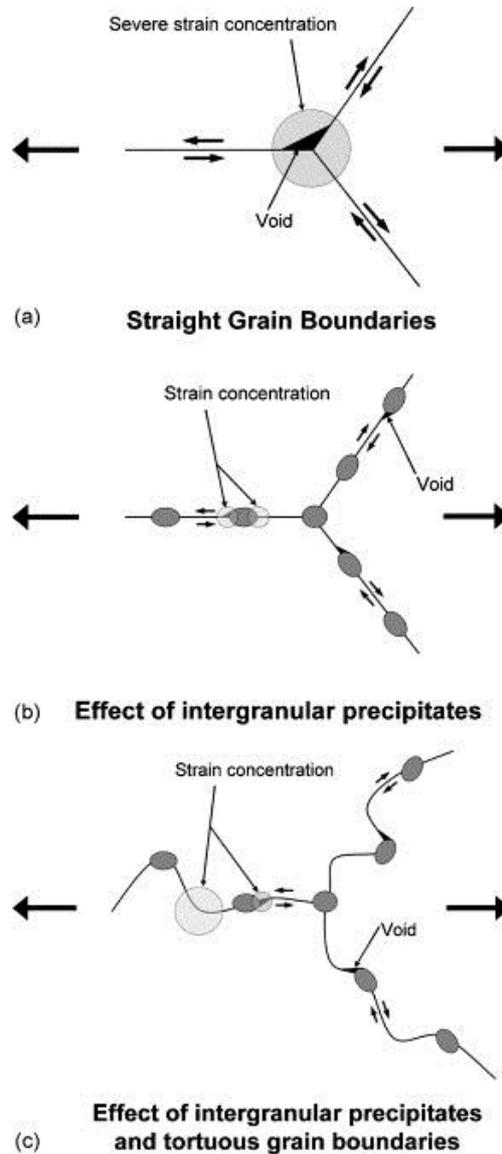


圖 1.1 晶界析出物對晶界滑移、應力集中與微孔生成之影響。(a) 筆直的晶界造成應力集中於晶界三角點、(b) 晶界析出物固定住晶界移動，使應力集中在析出物周遭、(c) 曲折的晶界及析出物限制晶界滑移，同時降低應力集中效應與微孔生成傾向 [5, 6]。

表 1.1 異質銲接件之相關研究。

項次	銲材	銲接方式	底材鋼料	文獻
1	316 stainless steel Inconel 182	SMAW	316LN stainless steel Alloy 800	[1]
	Nickel-based 16-8-2 Inconel 82	GTAW		
2	Inconel 82 (butter)	GTAW	A508 class 3	[2]
	Inconel 182	SMAW	F316 stainless steel	
3	Inconel 82	GTAW	310 stainless steel Inconel 657	[3]
	Inconel A (high Nb)	GTAW		
	Inconel 617 310 stainless steel	(butter) SMAW		
4	Alloy 82	GTAW	Alloy 600 A106 Gr. C	[4]
5	Alloy 52 Alloy 82 (threshold strain 3 %) Alloy 82 (threshold strain 5 %)	GTAW	N/A	[5, 6]
6	Alloy 52Mb (butter) Alloy 52Mw	GTAW	A508 316L stainless steel	[7]
7	309L stainless steel (butter) 308L stainless steel	GTAW	16MND5 LAS Z2CND18-12N SS	[8]
8	309L stainless steel (butter) 308L stainless steel	GTAW	A508 Gr. 3 Cl. 2	[9]
9	Alloy 82	GTAW	A508 Grade 3	[10]
10	309L stainless steel (butter) 308L stainless steel	SMAW	A508	[11]
11	Alloy 52	GTAW	A508 Gr. 3 Cl. 2 316L stainless steel	[12]

應力腐蝕裂紋 (Stress Corrosion Cracking, SCC) 之成長是受到環境因子、具有生成鈍化膜能力之材料及外加張應力負載，此 3 項要素交互作用影響。當冷卻水中富含氧原子時，管件內部將形成具有保護性的氧化膜，受到張應力負載使得氧化膜產生微孔 (void) 或裂縫尖端 (crack tip)。由於保護性皮膜破裂，底材與冷卻水接觸再次生成氧化膜 (repassivation)。在高溫環境且水中氧原子含量較高時，裂縫尖端的氧原子濃度將會因為反覆的生成氧化膜而下降，使得尖端處的腐蝕電位也隨之降低，形成局部陽極並吸引冷卻水中有害的陰離子進入 (如 Cl<sup>-</sup>)，進一步加速裂縫尖端腐蝕與成長 [13]。異質銲接件的銲道及底材熱影響區，是較常被觀察到 SCC 發生的位置。受到多道次的銲接入熱量或長時間處於高溫應用之影響，銲道合金元素將以碳化物形式析出於晶界、底材鋼料之熱影響區則因擴散形成元素匱乏區，使得各區域缺乏特定元素 (如鉻、鈮、鈦)，不足以形成保護性氧化膜或維持晶粒之耐蝕性。除此之外，銲後殘留張應力也對 SCC 成長有顯著的影響 [14]。裂紋成長方向是沿著最大張應力作用面向殘存金屬內部成長，若沿著晶粒間向內侵蝕稱為沿晶應力腐蝕破裂 (Inter-granular Stress Corrosion Cracking, IGSCC)，直接穿透晶粒向內侵蝕則稱為穿晶應力腐蝕破裂 (Trans-granular Stress Corrosion Cracking, TGSCC)。為了防治及減緩 SCC 現象，分析不同銲接製程及不同後熱處理條件之異質銲接件的殘留應力大小與分布便成為重要的課題之一。在殘留應力量測與模擬之研究中 [15-18]，銲後之銲道中心線向管材內壁方向，於 1/2 管壁厚度處，將產生最大之軸向殘留壓應力 (axial residual compressive stress)，隨著後熱處理溫度與次數上升後，又逐漸轉變為殘留張應力模式，如圖 1.2 所示。另外對於鎳基 52/152 合金、鎳基 82/182 合金銲道應用於 RPVH (reactor pressure vessel head) 銲接的殘留應力研究於 Brust 等人研究中有詳盡的敘述 [19]。

Axial Stress (Inner Surface - 0.2 mm from Fusionline)  
after Welding Sequence, Ageing 1<sup>st</sup> / 10<sup>th</sup> Cycle  
and Final Stage

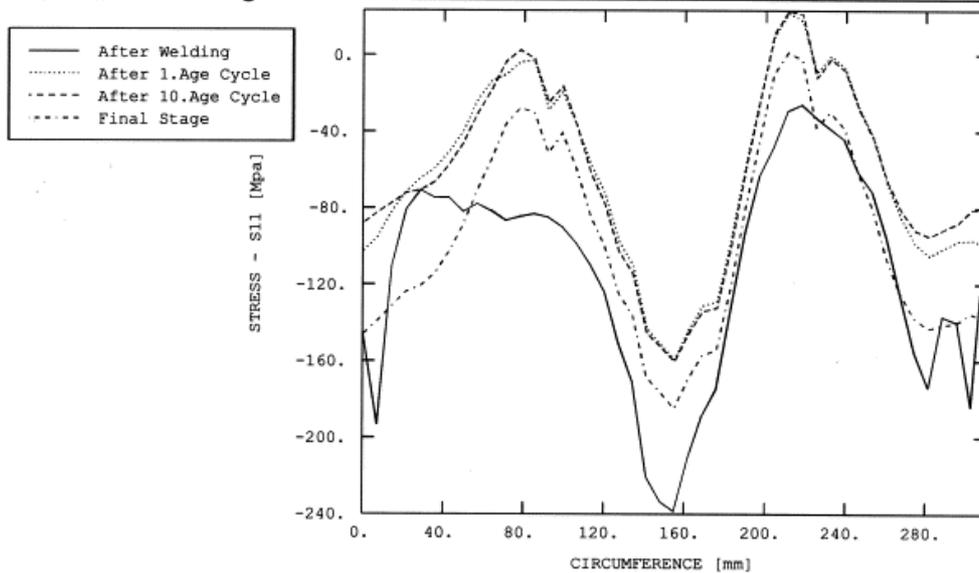


圖 1.2 在不同回火狀態下之軸向 (axial) 殘留應力曲線圖。(距離熔融介面 0.2 mm) [15]。

## 1.2 鎳基合金覆層銲補對異質銲接組件之影響

覆層銲接處理 (overlay welding) 為填料銲接處理 (butt welding) 的衍伸技術，除了可用做修補銲接件表面受損部位，亦可做為改變銲接件殘留應力狀態的工法。由於多道次的銲接伴隨著更多的入熱量，底材、銲道金屬受到熱影響，分別會產生麻田散鐵相轉變以及二次相析出於柱狀晶之間，皆對銲接件有著不良的影響。通常於銲接處理後，銲接件需進行適當的銲後熱處理，以消除銲後殘留張應力與改善銲接件的顯微組織分布。核電廠用異質銲接組件巨大，不易進行銲後熱處理，透過覆銲處理則可同時兼具銲接和銲後熱處理。依據銲材之施作順序，覆銲將可區分為 2 種模式：Half-bead weld (HBW) 及 Temper bead weld (TBW)，如圖 1.3 及圖 1.4 所示 [20]。HBW 於開槽表面覆銲上 1~2 層銲材，再依序將其填滿，此種工法較能有效控制銲材與底材的稀釋率，同時藉由後層覆銲之入熱量，對前 1 層銲道進行銲後熱處理，使底材熱影響區內之麻田散鐵組織及變韌鐵組織進行回火處理 [21-22]。TBW 設定為每道次之銲材皆能對前道次之銲材進行銲後熱處理，相較於 HBW，此種施作方式較能有效地降低銲接處理所產生的殘留張應力以及銲後不良組織的比例 [21, 23]。

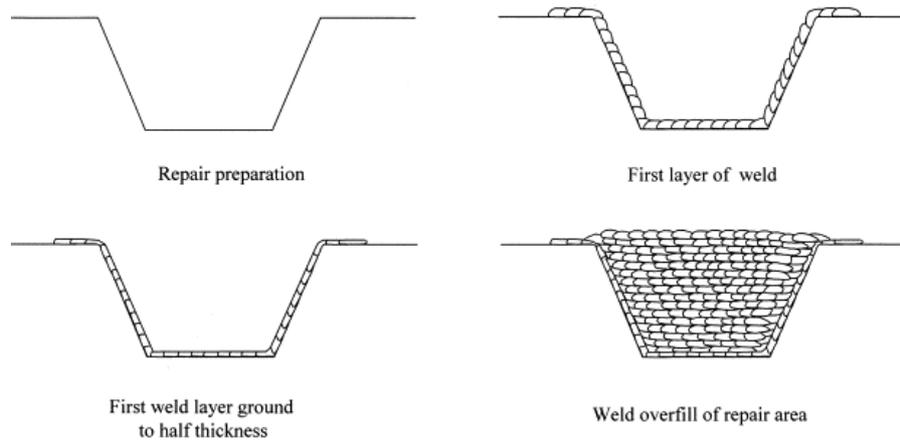


圖 1.3 Half-bead weld 覆層銲接處理 [20]。

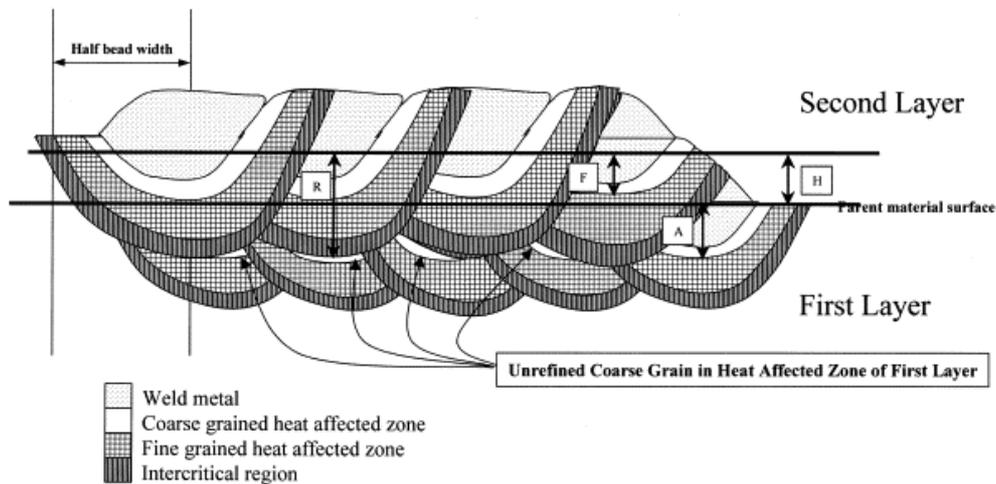


圖 1.4 Temper bead weld 覆層銲接處理 [20]。

在殘留應力量測與模擬之研究中 [24-27]，直接於銲接件外側進行覆層銲接處理 (overlay welding)、移除管件內側受損部位再進行覆層銲接處理 (inlay welding)，皆能有效地增加 1/2 管壁厚度處之殘留壓應力。Bamford 等人[28]於 2006 年之 ASME PVP 研討會中提出 2 項覆層銲接處理成功施作之應用案例。2004 年 11 月於 Donald C. Cook Nuclear Plant 例行性進行超音波檢測時，於 Nozzle 與 Safe end 之鎳基 82/182 合金銲道處，探測出深度達到相當於 88% 管厚之軸向裂紋，依據 ASME code N504-2 及 N-638 之規範，以鎳基 52 合金施作結構性覆銲 (structural weld overlay) 同時包覆鎳基合金與不銹鋼銲道。施作完成後，再

透過超音波檢測並未觀察到缺陷的生成，原有的 SCC 則未有延伸的現象，其示意圖與外觀圖如圖 1.5 所示。同年 1 月時，於 Millstone Nuclear Power Plant 之 spray nozzle 以放射線檢測觀察到 0.22 英吋的周向（circumferential）主要裂紋伴隨 7.7 英吋的次要裂紋延伸至鎳基 82/182 合金鐸道。由於類似 D. C. Cook Unit 1 的幾何形狀，鎳基合金鐸道與不銹鋼鐸道距離過近，維修團隊故決定使用鎳基 52 合金施作結構性覆鐸同時包覆 2 種鐸道，其施作的結果也相當成功，覆鐸層表面光滑不需做後處理，同時降低 IN 52 覆鐸時會產生的缺陷（夾雜物、氧化物），示意圖與外觀圖，如圖 1.6 所示。Brust 與 Scott [29]對於 Hot Leg 之異質鐸接件（A516 - IN 82/182 - 304 SS）進行覆層鐸接的模擬與分析。研究結果指出，為有效消除周向一次冷卻水應力腐蝕裂紋（PWSCC）在修補後再次生成、成長之可能性，內部鐸補需要在外部鐸捕後施行，殘留應力分布圖如圖 1.7 所示。另一方面，在環狀覆鐸的開始/結束處，將對於殘留應力產生較大的影響，可透過此種特性針對 SCC 區域設計覆鐸層，用以降低 SCC 成長速率。Rudland 等人 [19, 30]，連續 2 年於 ASME PVP 會議中探討鎳基 52 合金內側鐸補對殘留應力之影響的議題。依據當時尚在草擬之 ASME Code N-766，首先將 50% 的鎳基 82/182 合金移除再以鎳基 182 合金重新填補，而後於安全端之不銹鋼下端製作 23 道次的鐸鋼覆鐸，最後以鎳基 52 合金內側鐸補填充至超過管材內徑（ID）1.5 mm 厚並修整至 ID 尺寸，完成覆鐸件之應力模擬分布圖，如圖 1.8 所示。雖然 3 mm 內側鐸補施作後，內壁的殘留張應力大幅上升，向覆鐸層內部約 15% 管壁厚度位置之殘留應力狀態卻驟降至約為 0 MPa，顯示覆鐸層施作確實具有抑制 SCC 持續成長的功能。另一方面，關於鎳基 52 合金在各種工作溫度下的裂紋成長速率之研究依舊非常缺乏，因此覆鐸層的使用壽命僅能以鎳基 82 合金的裂紋成長速率做為參考依據，若鎳基 52 合金的裂紋成長速率為鎳基 82 合金的 1/30 時，

於 Hot Leg 工作溫度下 (327 °C)，能增加異質銲接件之壽命至 16 年，Cold Leg (288 °C) 狀態下約 91 年；當裂紋成長速率為 1/100 時，則分別能夠增加 24 年及 145 年。另外在鎳基 52M 合金覆層銲接的製程參數對於覆銲層的硬度研究中 [31]，顯示改變銲珠 (weld bead) 的覆蓋率可以控制最後覆銲層成品的殘留應力值，同時也可利用端淬火試驗 (Jominy end-quench test) 的硬度值進行評估。

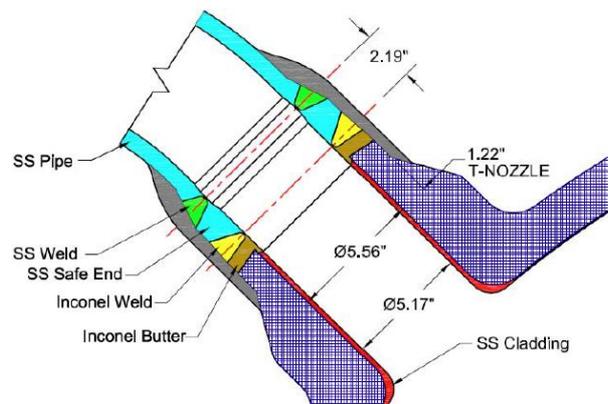


圖 1.5 D.C. Cook Unit 1 之安全端與飼水管嘴覆銲示意圖與施作外觀照 [29]。

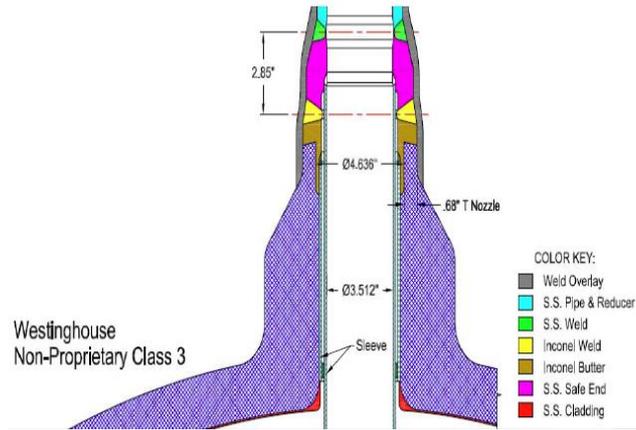


圖 1.6 Millstone 3 之 Spray 管嘴與覆鍍示意圖與成品外觀照 [29]。

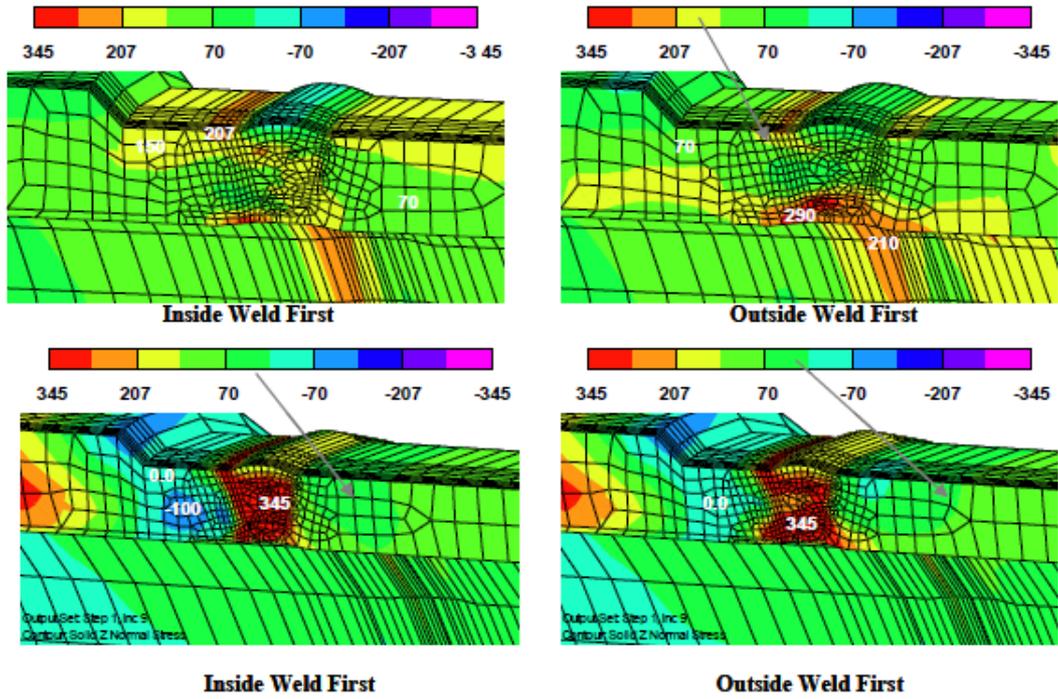


圖 1.7 Hot leg 異質銲接件之應力分布圖，上側為軸向 (axial) 殘留應力，下側為周向 (hoop) 殘留應力 [19]。

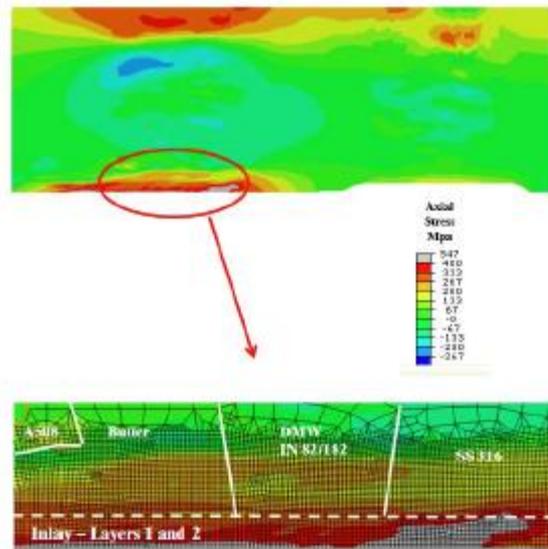


圖 1.8 內側覆銲修補後之實際使用狀態下殘留應力分布圖 [31]。(壓力：15.5 MPa，溫度：327 °C)

### 1.3 覆層銲接之特性分析

在先前的計畫中，本團隊利用低合金鋼 A508 Gr. 1 (LAS) 做為底材，以 GTAW 進行鎳基 52M 合金 (IN 52M) 覆銲層的施作。藉由不同熱輸入量、固化速率、熱影響寬度及深度，比較多道次、多層數覆銲對於底材的顯微組織影響，結果如圖 1.9 所示。單道次覆銲施作之 LAS 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)，其中晶粒細化可視為對底材之 Temper Martensite 再進行一次熱處理，因此其針狀組織會變得更加圓潤、短小。完成叁層覆銲的 LAS，同樣取單道次下方固定位置與單道次做比較，如圖 1.10 所示。經由第 3 層覆銲後，WR 組織均有轉變為 IR 組織及 FR 組織的趨勢，因此 WR 的範圍隨著覆銲層數愈增加而愈減少。CR 將會有細化的現象，使得其與 FR 的界線隨著覆銲層數愈增加而愈模糊。其中，IR 的深度則與覆銲層數有著正比例關係。

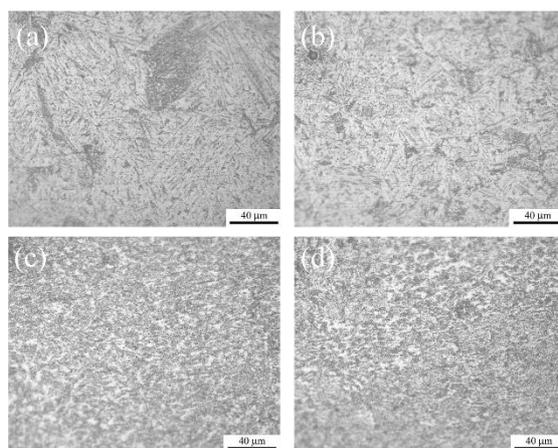


圖 1.9 單道次覆銲施作後單道次下方的(a) 費德曼組織(WR)、(b) 晶粒粗化組織(CR)、(c) 晶粒細化組織(FR)及(d) 臨界熱處理溫度組織(IR)之金相圖。

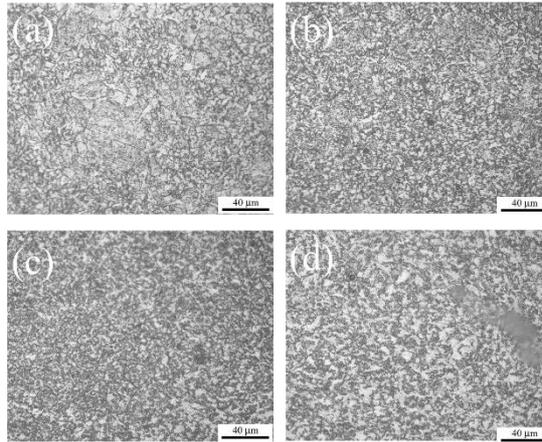


圖 1.10 參層覆鋅施作後原單道次下方位置的(a) WR、(b) CR、(c) FR 及(d) IR 區域之金相圖。

另一方面，覆層鋅接處理對 IN 52M 之影響，如圖 1.11(b)中，顯示第 2 層第 1 道次之鋅冠(Cap)為等軸枝狀晶(equiaxed dendrites)，在與第 1 層第 1 道次介面之鋅根處(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，與第 1 層第 2 道次介面之鋅根處，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，因此覆鋅層固化時內側的溫度梯度將較外側小。第 1 層第 1 道次與底材之介面處，圖(d)，枝晶以柱狀型態為主。值得一提的是，覆鋅層中觀察到遷移晶界生成(migrated grain boundary, MGB)，顯示 IN 52M 鋅道受到後續道次施作之熱影響，具有足夠的驅動力與時間進行原子擴散。為了解 IN 52M 覆鋅層施作對於底材稀釋率的程度、鋅珠中的成分分佈，垂直鋅道方向的 EDS 點掃描與 SEM 影像如圖 1.12 及 1.13 所示，經單道次覆鋅施作後，對底材熔融稀釋區僅約 0.2 mm，另由金相圖計算得知稀釋率約為 40~45%，在鋅珠中的元素成分未有顯著的變化。

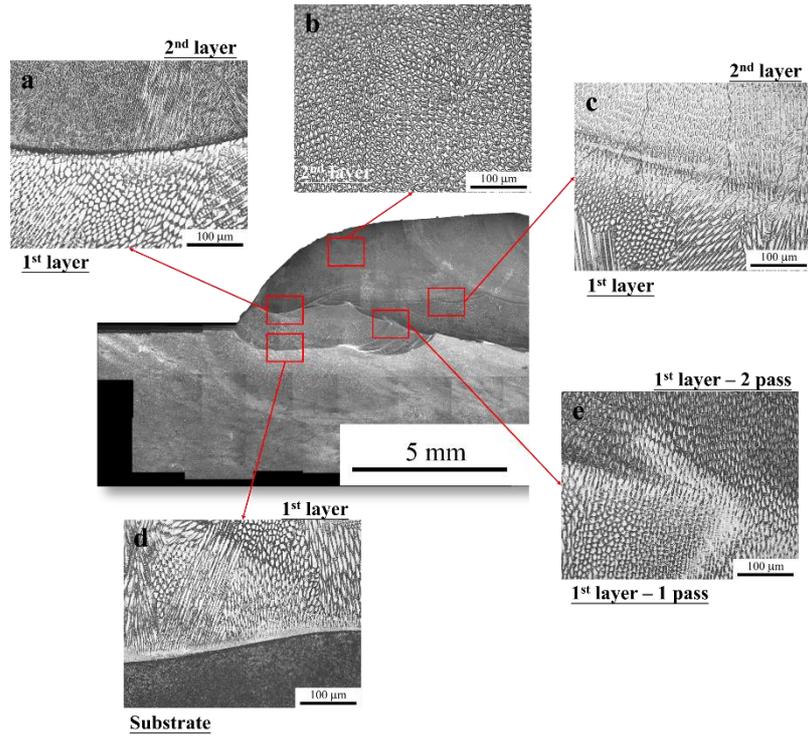


圖 1.11 雙層覆鋅之(a) 第 1 層第 1 道次與第 2 層第 1 道次之介面、(b) 第 2 層第 1 道次之鋅冠、(c) 第 1 層第 2 道次與第 2 層第 1 道次之介面、(d) 第 1 層第 1 道次與 A508 介面，以及(e) 第 1 層第 1 道次與第 2 層第 2 道次之介面的區域金相圖。

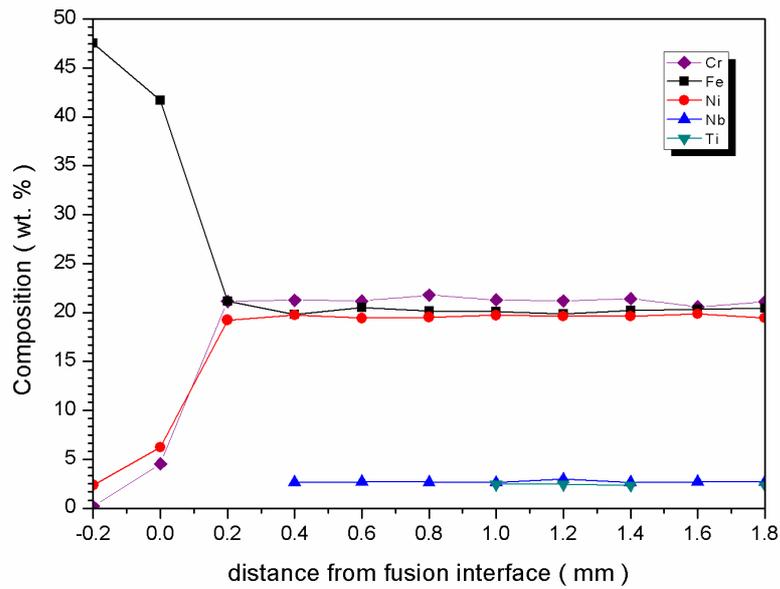


圖 1.12 單道次覆鋅試片進行 EDS 沿鋅冠中心線逐點成分分析。

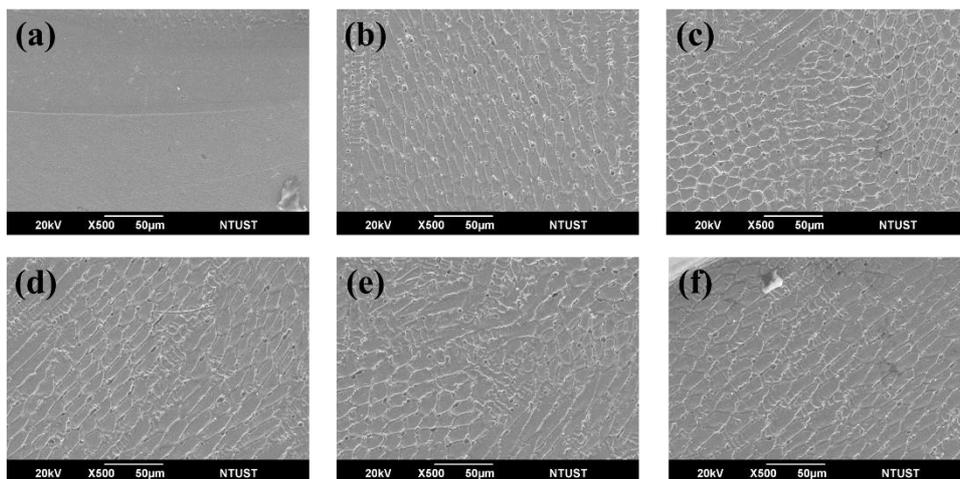


圖 1.13 試片(a) 與 A508 介面、(b) 距離熔接面+0.4 mm 位置、(c) 距離熔接面 +0.8 mm 位置、(d) 距離熔接面+1.2 mm 位置、(e) 距離熔接面+1.6 mm 位置，以及(f) 距離熔接面+2.0 mm 位置之 SEI 影像。

覆鋅雙層件的第 1 層鋅冠之 SEI 影像顯示枝晶型態為等軸枝狀晶，枝狀晶間散佈白色顆粒狀析出物 (Nb, Ti)CN，推估是被 TiN 所包圍的 NbC。在枝晶晶界處觀察到鬚狀的 NbC，相較於受熱影響較小的覆鋅件，其析出物的尺寸及形貌明顯增大且更為明顯。相同區域透過 TEM 觀察也有相同的現象(圖 1.14)，枝晶間白色顆粒狀析出物，為富 Ti 碳化物、TiN。圖(b)明視野影像中的枝狀晶外圍被呈現網狀結構的析出物包覆住，明顯觀察到析出物沿差排析出成長，其密度與其他覆鋅件試片相比，相對較高。研究團隊也分析析出物的多寡與覆鋅層之耐蝕性的關聯，利用電化學試驗(3.5 wt. % NaCl)量測覆鋅層各處之敏感性(如圖 1.15)，於每次試驗後皆以 SEM 觀察其表面狀態，如圖 1.16 所示。根據研究結果可知，當覆鋅層數愈多則腐蝕電位愈低，其中，鋅冠又會比鋅根低。由於析出物多為富 Ti 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。

除此之外，進一步量測與模擬覆鋅施作時的工作溫度分布、不同層數之覆鋅

完成後之殘留應力狀態皆有詳細的觀察與分析。

透過此次的計畫執行，研究團隊對於鎳基 52 合金覆鋅製程累積豐富的經驗與知識，不僅獲得覆鋅處理對 LAS 底材的相變化、硬度、殘留應力及耐蝕性值之影響，也發現鎳基 52 合金實際應用在覆鋅處理時會面臨的困難，並提出相對應的解決方法。與此同時，逐步規劃及改良試驗的手法及設計，用以準備進行更合乎核電廠使用材料組件的深入研究。

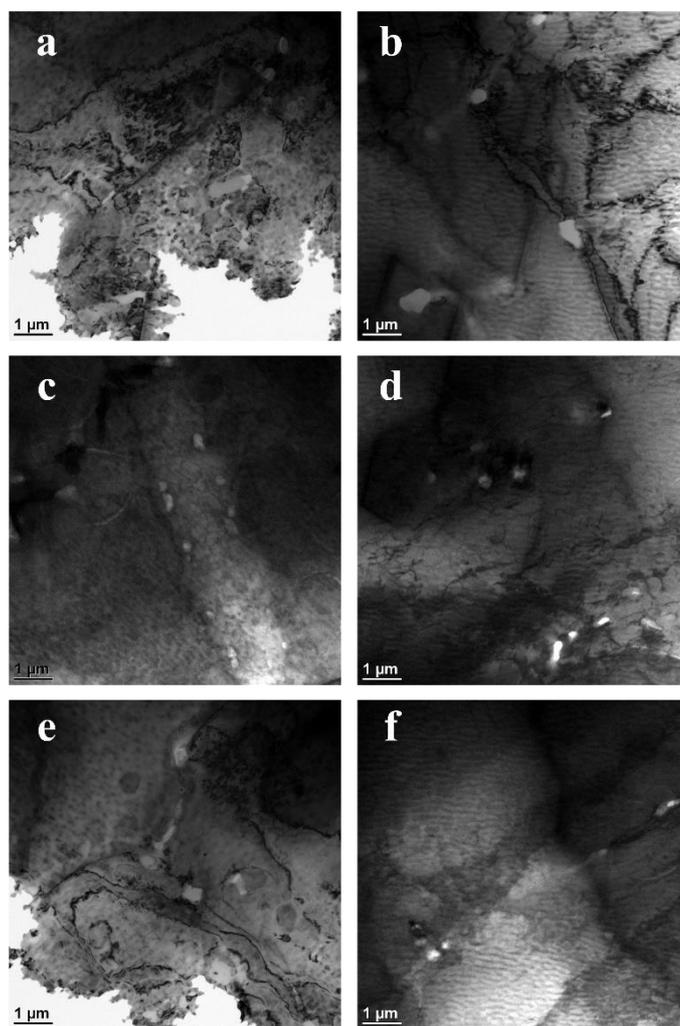


圖 1.14 取樣位置第 1 層第 1 道鋅冠處的 TEM 分析結果。

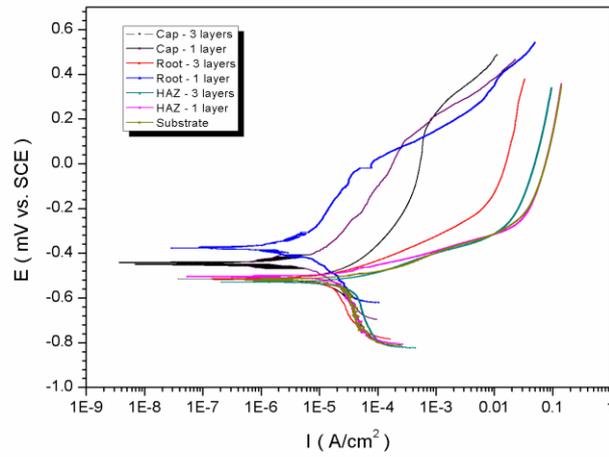


圖 1.15 覆鋅單道次與覆鋅參層於第 1 層第 1 道次之各區域於 3.5 % NaCl(aq)環境下之電化學曲線圖。

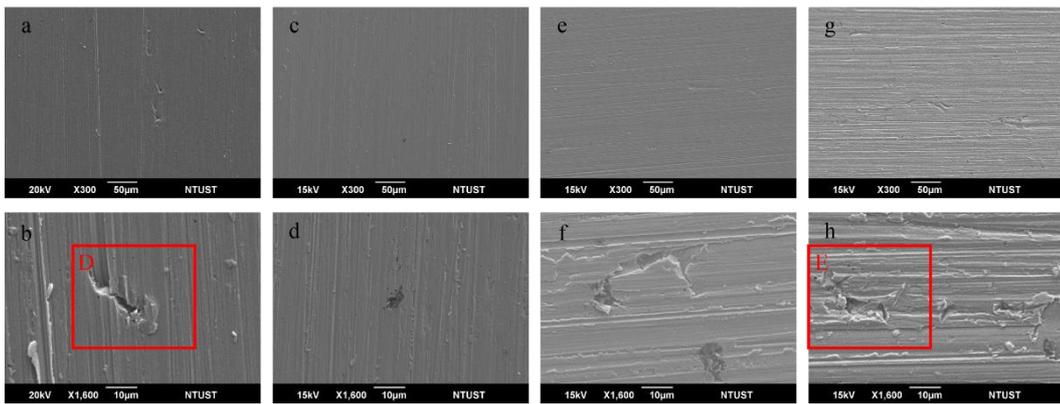


圖 1.16 經電化學實驗後，(a)(b) 覆鋅單道次鋅冠、(c)(d) 覆鋅單道次鋅根、(e)(f) 覆鋅參層於第 1 層第 1 道次鋅冠，以及(g)(h) 覆鋅參層於第 1 層第 1 道次鋅根之 SEI 影像。

## 貳、研究方法與過程

為完成計畫所設定之研究目標，本研究之實驗流程圖如圖 2.1 所示。

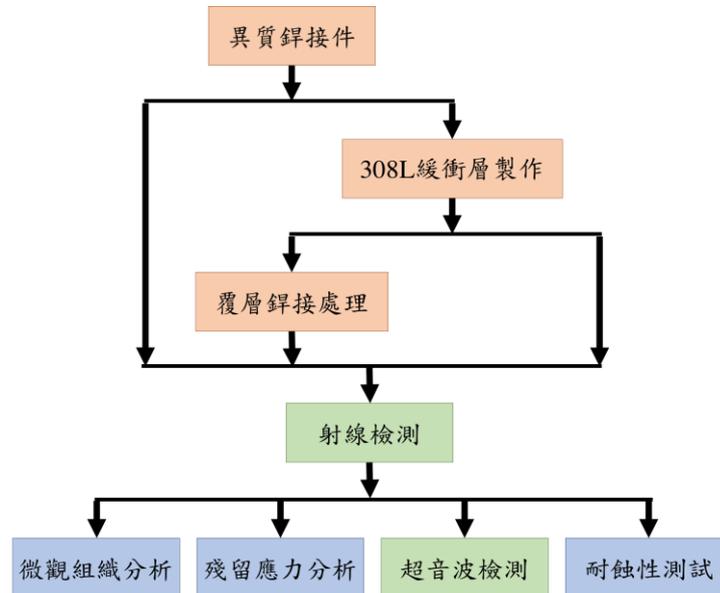


圖 2.1 實驗流程圖。

### 2.1 實驗材料

異質銲接件之底材鋼料使用 A508 Gr. 1、A182 316L 板材。依照 ASTM A508/508M-95, 4.2.2 之規範，對 A508 鋼料進行 923 °C 持溫 1 小時淬火及 623 °C 持溫 0.5 小時回火之熱處理，三維金相如圖 2.2 所示。以鎳基 82 合金 (ERNiCr-3, Inconel 82) 為滲透銲接之填料金屬、鎳基 182 合金 (ERNiCrFe-3, Inconel 182) 為 A508 緩衝層及填料銲接之填料金屬。覆層銲接處理之金屬選用鎳基 52M 合金 (ERNiCrFe-7, Inconel 52M)。為比較不銹鋼端緩衝層對 IN 52M 覆層銲接處理之影響，另使用 ER308L 之不銹鋼銲料。本實驗材料之化學成分如表 2.1 所列。

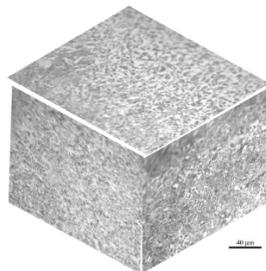


圖 2.2 A508 之三維金相。

表 2.1 所用材料之化學成分。(wt. %)

	C	Si	Mn	P	S	Fe	Ni	Cr	Mo	N	Cu	Ti
316L	0.023	0.60	0.64	0.035	0.001	Bal.	10.05	16.67	2.01	0.011	0.26	---
A508 Gr.1	0.23	0.21	1.04	0.011	0.006	Bal.	0.06	0.09	0.01	0.0	0.09	0.0
ER308L	0.018	0.55	1.94	0.026	0.012	Bal.	10.34	19.61	0.09	0.341	0.23	---
ERNiCr-3 (IN 82)	0.009	0.11	3.18	0.004	0.003	0.35	73.6	20.0	---	---	<0.01	0.35
ERNiCrFe-3 (IN 182)	0.04	0.40	5.45	0.005	0.004	4.24	73.50	14.70	---	---	0.01	0.01
ERNiCrFe-7 (IN 52M)	0.03	0.13	0.76	0.003	0.0006	8.53	59.14	30.20	0.01	---	0.03	0.23
	Cb+Ta	Co	Al	Nb+Ta	Al+Ti	B	Zr	Others				
ERNiCr-3 (IN 82)	2.64	<0.1	0.10	---	---	---	---	---				
ERNiCrFe-3 (IN 182)	---	---	---	1.52	---	---	---	---				
ERNiCrFe-7 (IN 52M)	---	0.010	0.09	0.80	0.32	<0.001	<0.01	<0.50				

## 2.2 惰性氣體電弧銲接處理 (Gas tungsten arc welding, GTAW)

GTAW 銲接機台使用 DAIHEN 公司生產之 INVERTER ELECON 300P 型號，搭配半自動 XY 移動銲槍，如圖 2.3 所示。

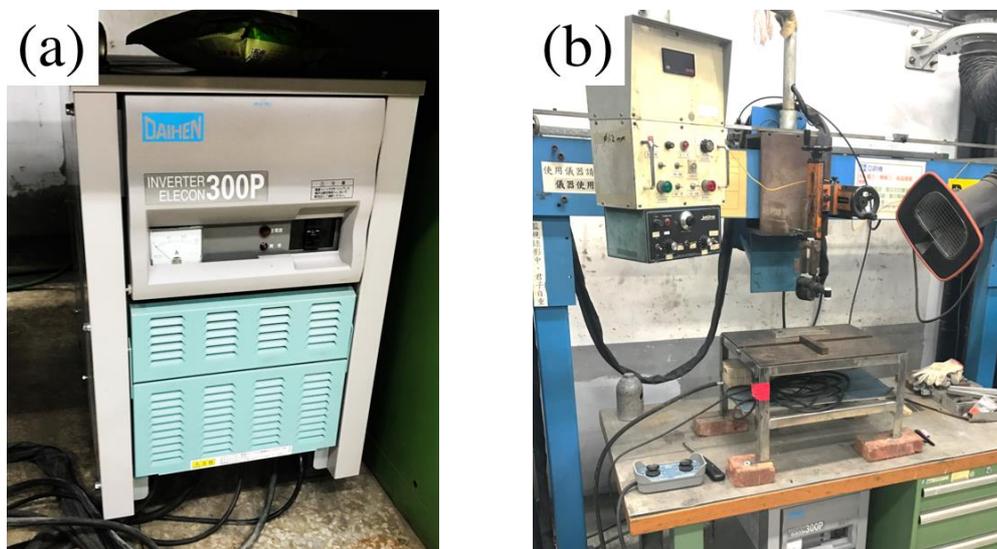


圖 2.3 (a) GTAW 銲接機台、(b) 半自動 XY 移動銲槍之外觀照。

## 2.3 屏蔽金屬電弧銲接處理 (Shield manual arc welding, SMAW)

使用之銲接機台為Lincoln Electric 公司生產之PRECISION TIG® 375 TIG WELDER，如圖2.4(a)所示。IN 182銲料使用前須加熱至300 °C、持溫1小時，降溫至200 °C備用，加熱槽體如圖2.4(b)所示。



圖 2.4 SMAW 銲接機台之外觀照。

## 2.4 銲接處理

由於本研究使用 GTAW 及 SMAW 技術於 2 種類型以上之銲接處理，施作位置與底材皆不盡相同，避免討論混淆，為此有必要獨立一節詳述說明。另一方面，為簡化研究之變因，銲接參數皆視為異質銲接件、覆銲件之固定因子。

### 2.4.1 銲接試片之尺寸加工

A508、316L 鋼料分別銑切成尺寸 250 mm x 145 mm x 25 mm 及 250 mm x 150 mm x 25 mm 之板材，於長邊加工 60° 的 V 型槽，詳細尺寸見圖 2.5。為提供殘留應力分析使用，對接鋼料加工 4 個直徑 26 mm 之貫穿孔，以直徑 25.4 mm 之中碳鋼螺栓安裝於中碳鋼底板的固定位置（加工尺寸見圖 2.6）。為提供超音波檢測使用，對接鋼料未加工貫穿孔以降低邊界效應之影響，另增加 316L 鋼料短邊長度至 210 mm。

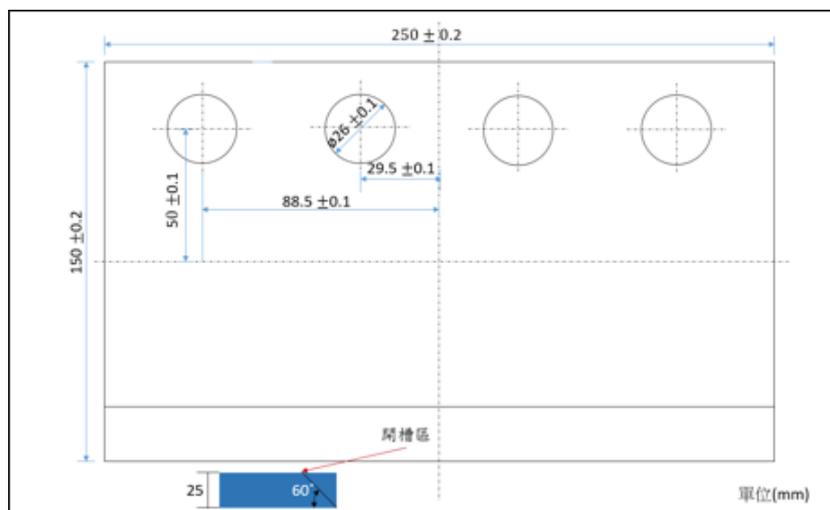


圖 2.5 底材鋼料之加工尺寸圖。

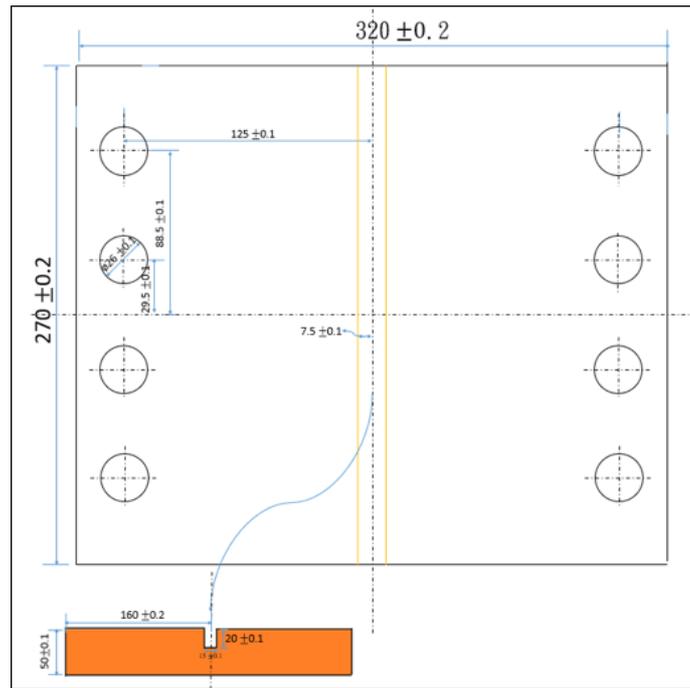


圖 2.6 中碳鋼固定板之加工尺寸圖。

#### 2.4.2 A508 緩衝層製作

使用 SMAW 銲接技術，以直徑 4 mm 之 IN 182 為銲料，於 A508 之 V 型槽表面製作 3 層之緩衝層。每層含有 5 道次，共計 15 道次，每道次之層間溫度控制在 120°C，銲接參數如表 2.2 所列。為避免 V 槽尖端之鋼料受到銲接入熱量影響，導致熔損、塌陷，於尖端下方添加 IN 182 銲條襯板，如圖 2.7 所示，待緩衝層完成後移除。每完成 1 道次，以手持式砂輪機裝配不銹鋼刷輪、手持式電刻鑽移除銲道表面特徵（材料移除率約 10 ~ 15 %），完成之緩衝層厚度約 5 mm，各層之外觀如圖 2.8 所示。

#### 2.4.3 鎳基 82 合金滲透銲接

使用 GTAW 銲接技術，以直徑 3.2 mm 之 IN 82 為銲料，銲接固定於中碳鋼底板上之 316L 不銹鋼與 2.4.2 節之 A508 低合金鋼，滲透銲接 IN 82 金屬 3 層，共 3 道次。每道次之層間溫度控制在 120°C，銲接參數如表 2.2 所列。為避免滲

透金屬產生銲接瑕疵，如氣孔、夾渣等現象，背吹保護氣體 (Ar) 由兩端同時通入 (25 L/min)。每完成 1 道次，以手持式砂輪機裝配不銹鋼刷輪、手持式電刻鑽清潔銲道表面 (材料移除率約 1~3%)，滲透銲接完成之外觀如圖 2.9 所示。

#### 2.4.4 鎳基 182 合金填料銲接

使用 SMAW 銲接技術，以直徑 4 mm 之 IN 182 為銲料，填充異質銲接件之槽體，銲道結構示意圖如圖 2.10，IN 182 填料金屬共 9 層，23 道次。每道次之層間溫度控制在 120 °C，銲接參數如表 2.2 所列。為避免銲接瑕疵產生，如熔合不良 (Lack of fusion, LOF)、熔填不足 (underfill) 等現象，每完成 1 道次，以手持式砂輪機裝配不銹鋼刷輪、手持式電刻鑽清潔銲道表面 (材料移除率約 2~5%)，填料銲接完成之外觀如圖 2.11 所示。

#### 2.4.5 308L 緩衝層製作

利用 GTAW 銲接技術，以直徑 2.4 mm 之 308LSS 為銲料，於異質銲接件之 316L 不銹鋼端表面製作 2 層之緩衝層。每道次之層間溫度控制在 110 °C，銲接參數如表 2.2 所列。為避免 LOF 現象，除了施作前以手持式砂輪機裝配陶瓷砂輪片研磨 316L 不銹鋼表面至金屬色澤外，每完成 1 道次，皆須依序以陶瓷砂輪片、不銹鋼刷輪、電刻鑽移除銲道表面特徵 (材料移除率約 15~25%)，緩衝層完成之外觀如圖 2.12 所示。

#### 2.4.6 鎳基 52M 合金覆層銲接

利用 GTAW 銲接技術，以直徑 0.9 mm 之 IN 52M 為銲料，於 2.4.4 節之異質銲接件表面製作 3 層之覆銲層、2.4.5 節之異質銲接件表面共製作 4 層之覆銲層，每層含有 50 道次。由於底材之材料差異，每道次之層間溫度控制在 90 ~ 120 °C，銲接參數如表 2.2 所列。為避免 LOF 現象，除了施作前以手持式砂輪機裝配陶瓷砂輪片研磨銲接件表面至金屬色澤外，每完成 1 道次，皆須依序以陶瓷砂輪片、不銹鋼刷輪、電刻鑽移除銲道表面特徵（材料移除率約 15 ~ 25 %），覆銲層完成之外觀照如圖 2.13 所示。

表 2.2 銲接參數。

	Current (A)	Voltage (V)	Pre-heated Temp. (°C)	Inter-pass Temp. (°C)
IN 182 butter	100	26.0 ~ 29.0	120	110 ~ 120
IN 82 penetrating	115	11.2	100	110 ~ 120
IN 182 filler	140	26.0 ~ 28.0	120	100 ~ 120
ER308L butter	120	9.5 ~ 10.5	70	90 ~ 100
IN 52M overlay	120	9.5 ~ 10.5	100	90 ~ 120



圖 2.7 A508 開槽尖端下方置放 IN 182 鋅條襯板。



圖 2.8 A508 開槽端表面施作 IN 182 之(a) 第 1 層、(b) 第 2 層及(c) 第 3 層緩衝層的外觀照。

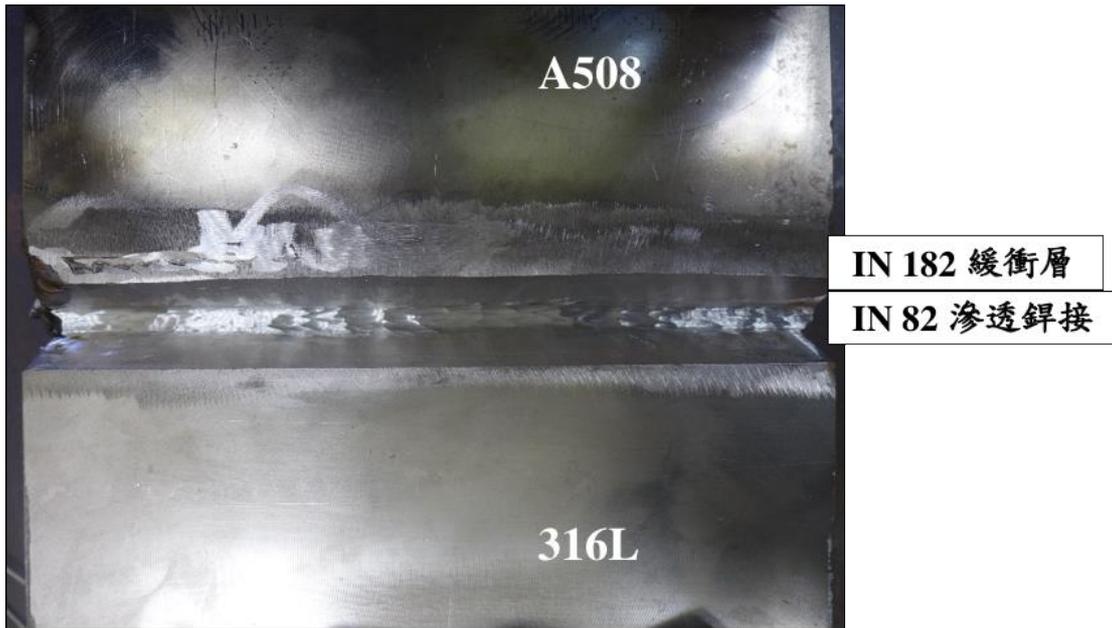


圖 2.9 IN 82 滲透銲接處理施作完成之外觀照。

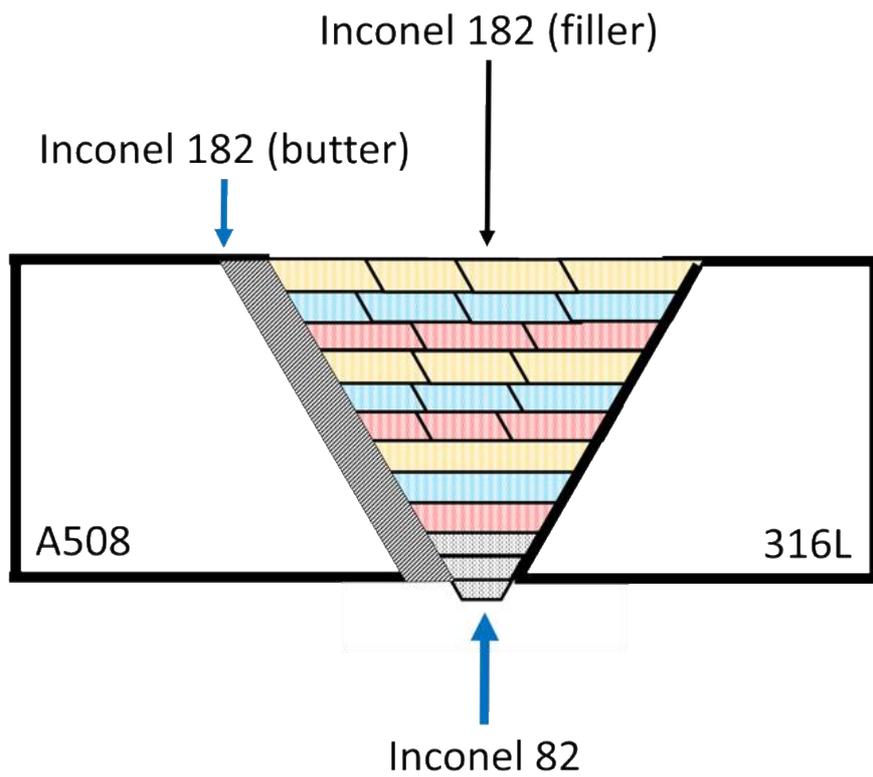


圖 2.10 異質銲接件之顯微結構示意圖。

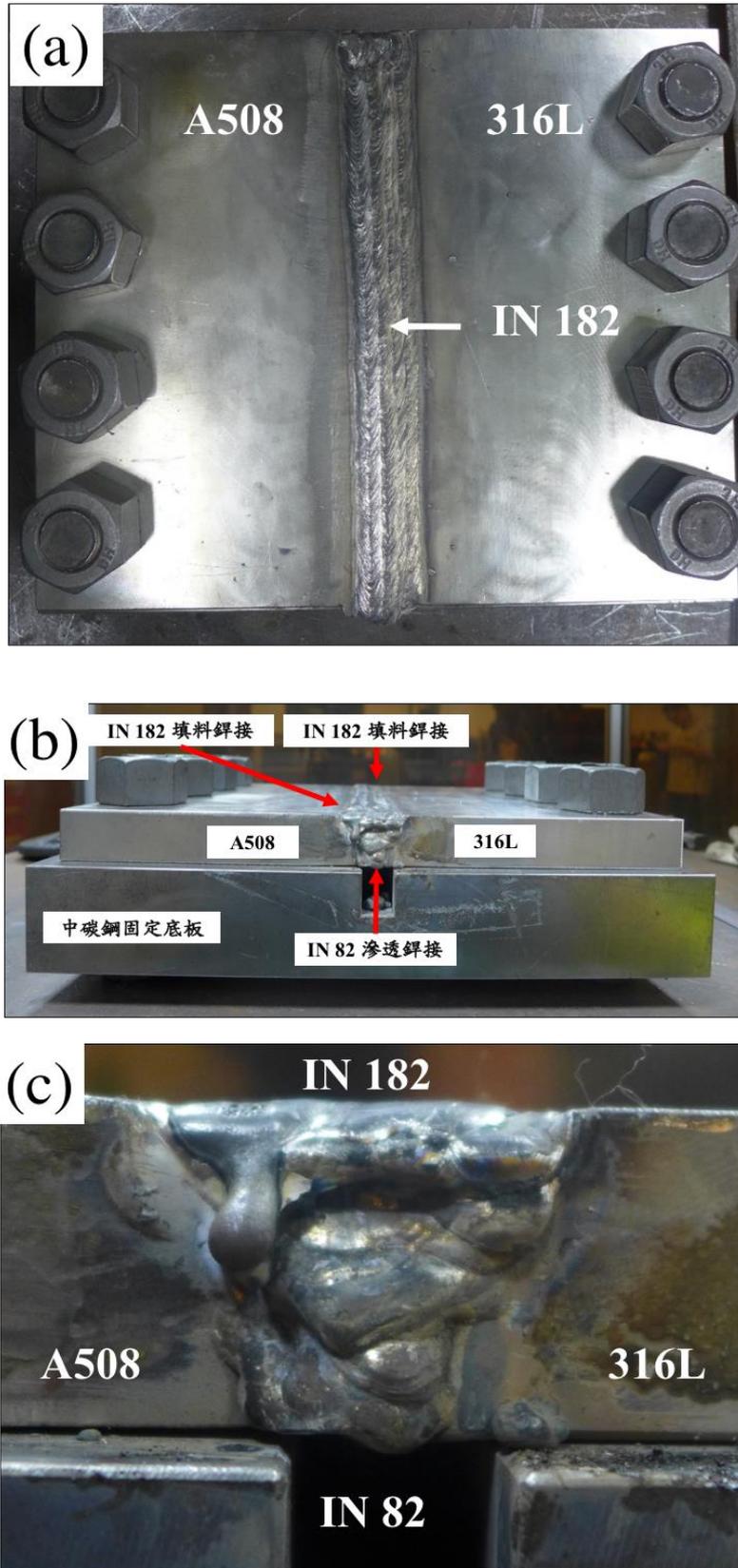


圖 2.11 IN 182 填料銲接處理施作完成之(a) 俯視、(b) 側視及(c) 銲道尾端的外觀照。

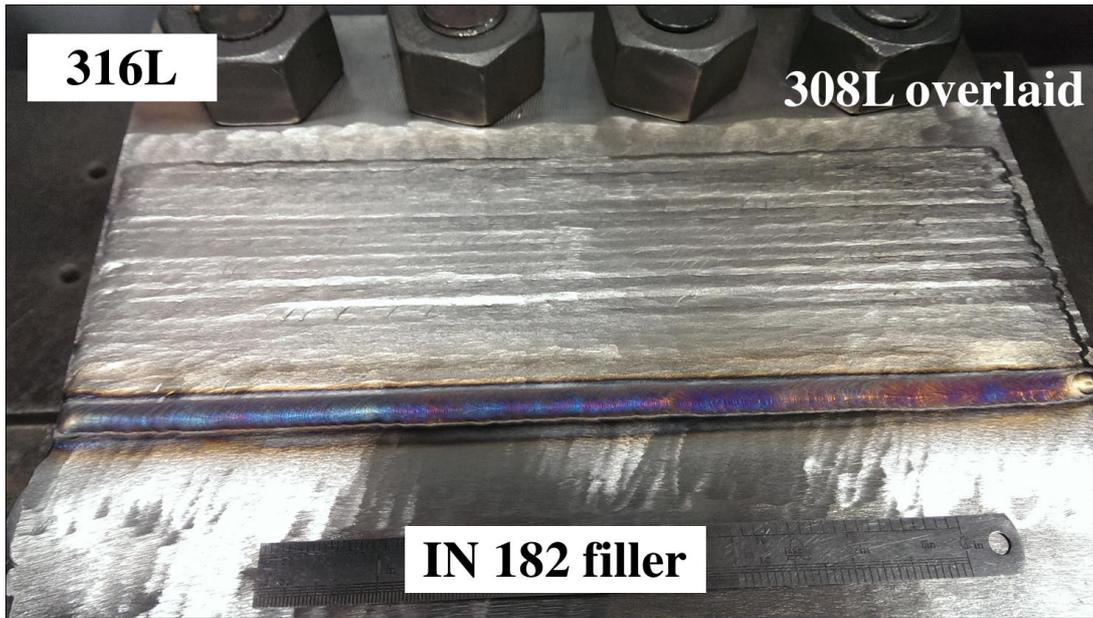


圖 2.12 316L 不銹鋼端表面施作 ER308L 之不銹鋼緩衝層的外觀照。

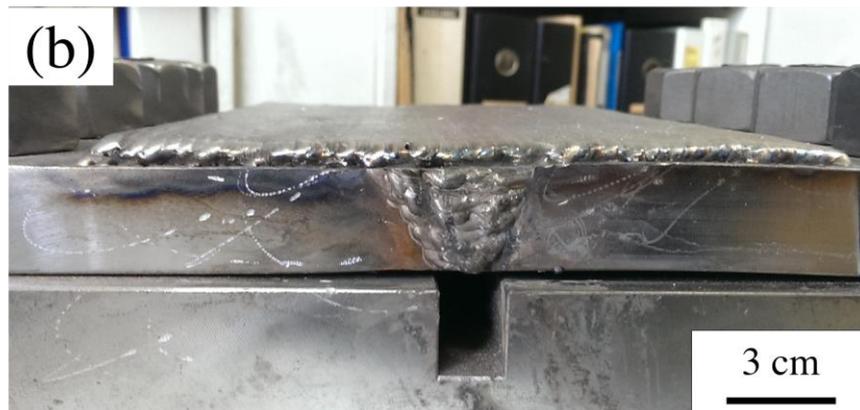


圖 2.13 IN 52M 覆層銲接處理施作完成之(a) 俯視、(b) 側視的外觀照。

## 2.5 液滲檢測

鐸道施作完成後，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 2.14 所示，依據 ASME B&PV Code 標準，評估鐸道之合格性。先利用清潔劑噴覆鐸道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。

## 2.6 射線檢測

鐸接件、覆鐸件施作完成後，利用 Ir192 為射線源之非破壞檢測法，探測鐸道內部有無鐸接瑕疵，如熔合不良、熔填不足、夾渣、氣孔等現象。用以輔助改善鐸接參數，以及協助評估超音波檢測對瑕疵檢出能力。檢測結果見附錄 A。

## 2.7 金相分析 (Metallographic analyses)

以放電線切割加工 (Wire electric discharge machining, WEDM) 垂直鐸道方向切取厚度 5 mm 之試片，依序以#100、#240、#400、#600、#1200、#1500、#2000、#2500 號數之碳化矽水砂紙研磨，再使用 10  $\mu\text{m}$ 、3  $\mu\text{m}$  氧化鋁懸浮液及 0.07  $\mu\text{m}$  氧化矽懸浮液搭配特定尺寸的絨毛布拋光。蝕刻液依據 ASTM E407 規範選擇，A508 低合金鋼端以 5 vol. % 之硝酸浸蝕 30 秒，316L 不銹鋼端及鎳基合金鐸料使用以 1:3:2 比例調配之硝酸、鹽酸、水浸蝕 1~3 分鐘。浸蝕後以棉花沾水拭淨，依序以乙醇、甲醇、丙酮清洗，置放於 80  $^{\circ}\text{C}$  烘箱 10 分鐘烘乾備用。

透過光學金相顯微鏡觀察顯微組織、掃描式電子顯微鏡及穿透式電子顯微鏡針對特定區域分析晶體結構與成分分佈。

## 2.8 穿透式電子顯微鏡分析

以精密水砂輪及 BUEHLER 慢速切割機搭配 3 吋立方氮化硼切割刀片，切取厚度 0.2 mm 之特定區域。TEM 觀察之試片先以粗砂紙減薄至 100  $\mu\text{m}$ ，再依序以各號數砂紙研磨至厚度低於 80  $\mu\text{m}$ ，同時降低試片表面之刮痕粗糙度。以試片衝壓器將特定區域之試片衝壓成直徑 3 mm 之 TEM 試片初胚。再使用雙噴射式電解拋光機 (Automatic Twin-Jet Electro-polisher) 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可觀測之試片厚度。

## 2.9 微硬度分析

依據 ASTM E384-11e1 規範，以異質材料介面為原點，向兩側每 0.25 mm 打 1 點。下壓力 300 g、持壓時間 15 秒。探討緩衝層施作、覆鋅層施作對底材之熱影響範圍及程度。

## 2.10 超音波檢測

異質銲接件依照設計之加工圖，如圖 2.15 及圖 2.16 所列，透過放電刻槽加工 (Electric discharge machining) 及深孔鑽加工 (Deep drilling)，製作多種人工瑕疵，模擬熔接不良 (LOF)、銲道裂紋 (Cracking)，以及內部瑕疵 (Defects)。透過超音波檢測儀分析瑕疵的位置及大小，以及評估覆鋅處理之熔合狀況與衰減率影響。

## 2.11 殘留應力分析

固定於中碳鋼底板之銲接件、覆銲件，以 WEDM 由側邊向內位移 60 mm 處切取試片。透過二維殘留應力分析儀 (PULSTEC u-X360n) 量測範圍介於銲道中心兩側 35 mm，以 5 mm 為 1 間隔；底材表面向下 20 mm，以每 4 mm 為 1 間隔，共 75 個量測點。輔以高解析度 X 光繞射儀 (High resolution X-ray diffractometer, HRXRD) 針對特定量測點進行二次確認。由於 WEDM 會造成試片表面生成殘留張應力層，增加殘留應力量測誤差，須透過電解拋光處理 (Electro-polishing) 確實移除張應力層。

溫度及殘留應力模擬使用 ABAQUS 有限元素分析軟體，建立上述之固定銲接件的模型，透過熱學及力學理論模組，以移動面積熱源 (heat flux) 分析填料銲、覆層銲接施作完成後，固定銲接件經若干時間後之溫度分佈。結合異質材料在不同溫度區間之物理性質，與溫度場模擬耦合，進一步分析殘留應力場之分布與大小。探討覆層銲接處理對異質銲接件之入熱及殘留應力的影響性。

## 2.12 電化學量測

利用恆電位儀，依據 ASTM G5-14 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，評估緩衝層、異質材料對覆銲層、異質銲接件之耐蝕性影響。使用電化學工作站進行動電位極化 (PD) 雙環動電極化曲線 (DLP) 之全區量測，探討材料在 NaCl(aq) 水溶液環境下的鈍化膜敏感性，以及藉由極化曲線圖量測 (Ir/Ia)，計算敏感值 (Degree of sensitization, DOS)。

## 2.13 短期浸泡試驗

依據 ASTM G31-72 規範，試片浸泡於 70 °C 之 3.5 wt.% NaCl 水溶液，以反應槽上蓋密合，裝置架設見圖 2.17。浸泡 48 ~ 168 小時後取出，以光學顯微鏡觀察試片之截面，評估受到侵蝕的深度。



圖 2.14 液滲檢測使用之 E-59A (清潔劑)、VP-30 (色比式滲透液)、D-70 (顯像劑) 之外觀照。

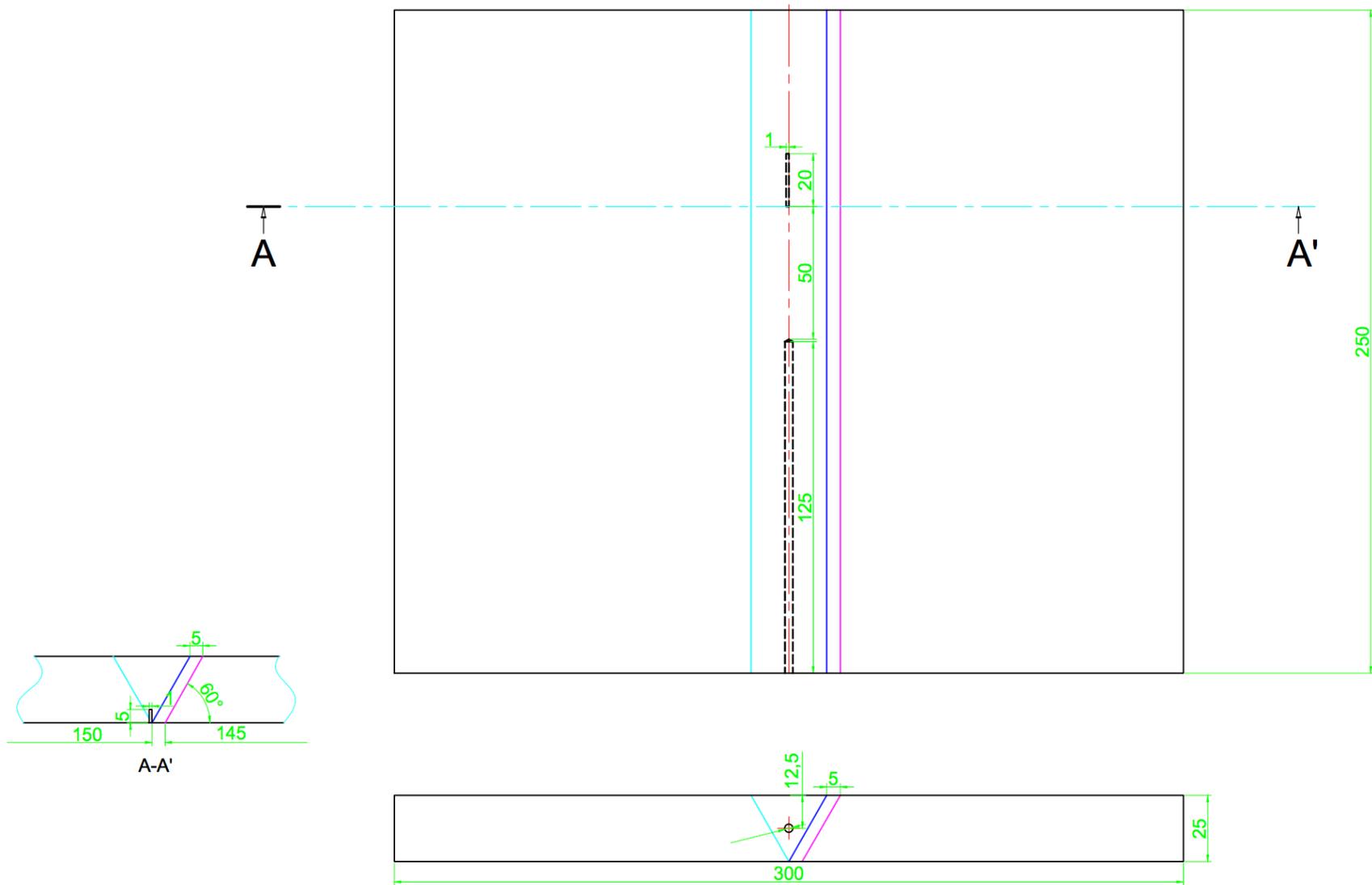


圖 2.15 超音波檢測試片之尺寸加工設計圖 1。(A：銲道中心線底部直刻槽、SDH：側邊深孔  $\phi 3 \times 125$  mm)

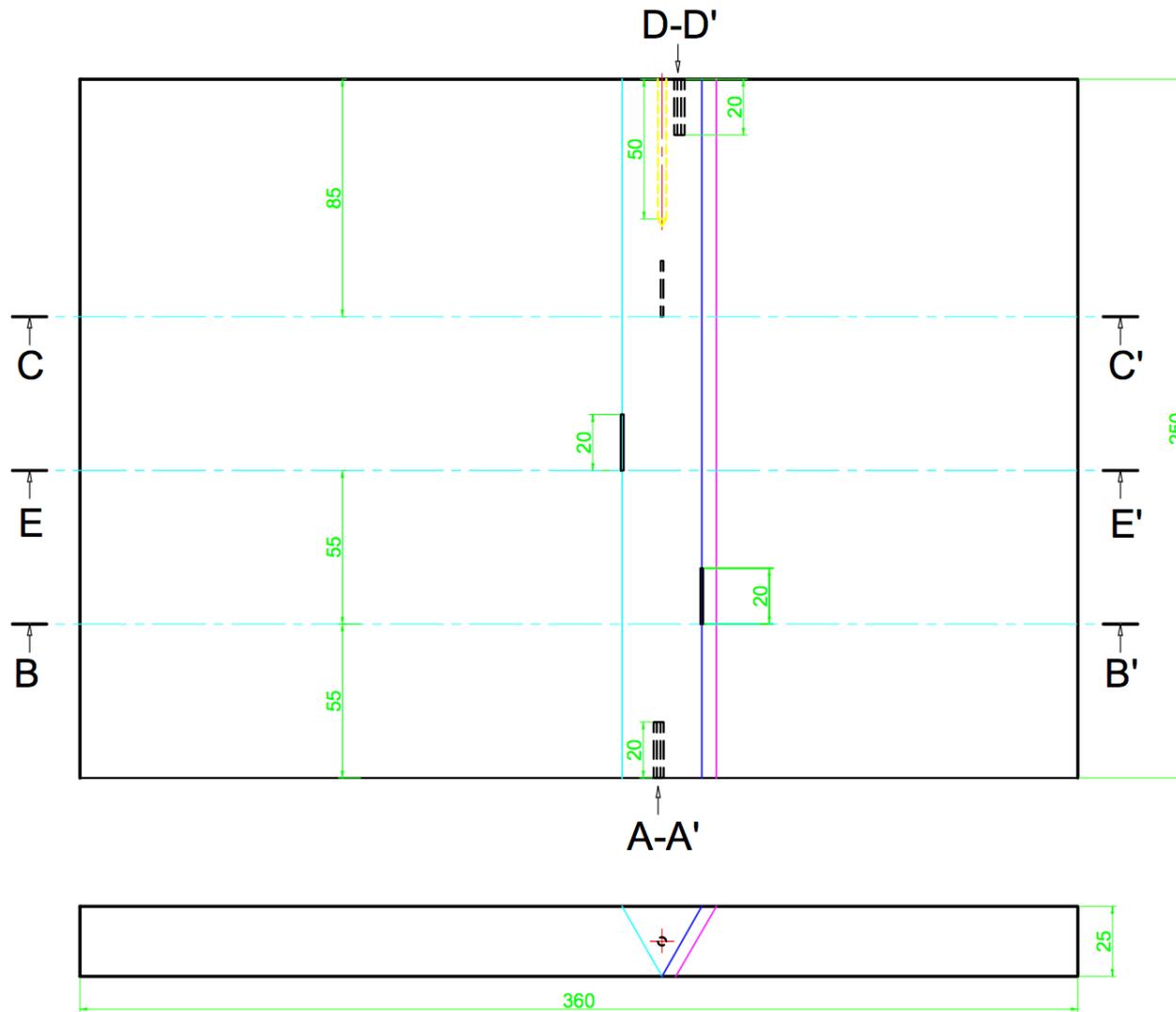


圖 2.16 超音波檢測試片之尺寸加工設計圖 2。(A：鉚道中心線底部 SS/鉚道介面斜刻槽、B：碳鋼端頂部鉚道/IN 182 緩衝層介面直刻槽、C：鉚道中心線底部直刻槽、D：鉚道中心線底部鉚道/IN 182 緩衝層介面斜刻槽及 SDH  $\phi 3 \times 50$  mm、E：不銹鋼端頂部 SS/鉚道介面直刻槽)

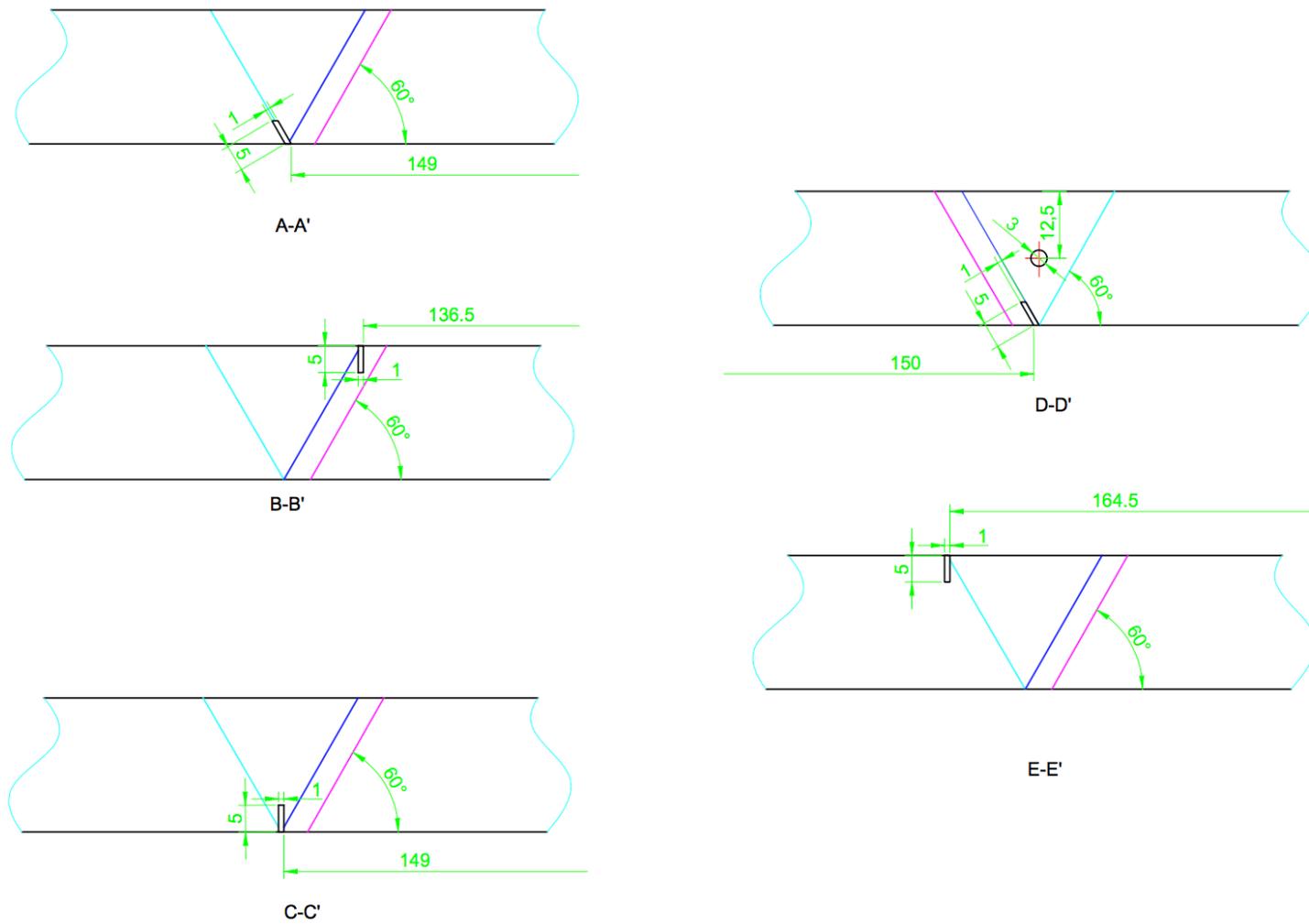


圖 2.16 超音波檢測試片之尺寸加工設計圖 2 (續)。(A：鉚道中心線底部 SS/鉚道介面斜刻槽、B：碳鋼端頂部鉚道/IN 182 緩衝層介面直刻槽、C：鉚道中心線底部直刻槽、D：鉚道中心線底部鉚道/IN 182 緩衝層介面斜刻槽及 SDH  $\phi 3 \times 50$  mm、E：不銹鋼端頂部 SS/鉚道介面直刻槽)

### 2.13 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)。可針對試片之表面及截面之顯微組織觀察與記錄。

(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、保持壓力試驗時間 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  $2\theta$  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、錳靶，輸出電壓為 30 kV、電流為 0.6 ~ 1.5 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。

(九) 超音波檢測儀：

超音波檢測使用美國 OLYMPUS 公司生產之相位陣列超音波量測儀 (Phase array ultrasonic test, PAUT)，型號 OMNISCAN MX2 32/128PR，搭配單晶陣列探頭 (5L64A2) 與楔形塊 (SA2N55S) 組、雙晶陣列探頭 (2.25DM7X4PM-19X12 A17) 與楔形塊 (SA17-DN55L0) 組，設備外觀如圖 2.18 所示。



圖 2.17 ASTM G31 短期浸泡裝置之外觀照。



圖 2.18 (a) 超音波量測儀、(b) 單晶探頭及(c) 雙晶探頭之外觀照。

## 參、主要發現與結論

### 3.1 低合金鋼端之 Inconel 182 緩衝層施作對合金鐳道之影響

為瞭解鎳基 182 合金緩衝層施作於 A508 低合金鋼之開槽表面，對於鎳基 182 合金填料鐳接處理之影響性。利用填料鐳接參數直接施作於 A508 鋼表面上，比較有/無緩衝層施作，異質材料介面之顯微結構、成分分佈及微硬度之差異性。顯微結構如圖 3.1 所示，A508 低合金鋼與 IN 182 緩衝層介面 (A508/IN182B) 以柱狀枝狀晶結構為主，是因熔融金屬接觸底材時便快速冷卻，使得枝狀晶生長之過冷度大，驅使枝狀晶以柱狀形態生長。A508 低合金鋼與 IN 182 填料介面 (A508/IN182F) 則受到填料鐳接處理之工作電流量較緩衝層施作高約 40 A，提供較充足之入熱量及稀釋率，枝狀晶以柱狀枝狀晶及胞狀枝狀晶之混合結構為主。透過 SEM 針對異質材料介面進行成分分析，結果如圖 3.2 所示。在 A508/IN182F 中，IN 182 枝狀晶中含有較高的鐵成分，顯示以填料鐳接處理之工作電流施作 IN 182 鐳料於 A508 表面時，將造成鐳道之鐵成分過高，亦有可能降低其耐蝕能力。另一方面，未施作 IN 182 緩衝層之 A508 鋼料受到填料鐳接處理之入熱量影響，微硬度將呈現大幅度的下降，如圖 3.3。

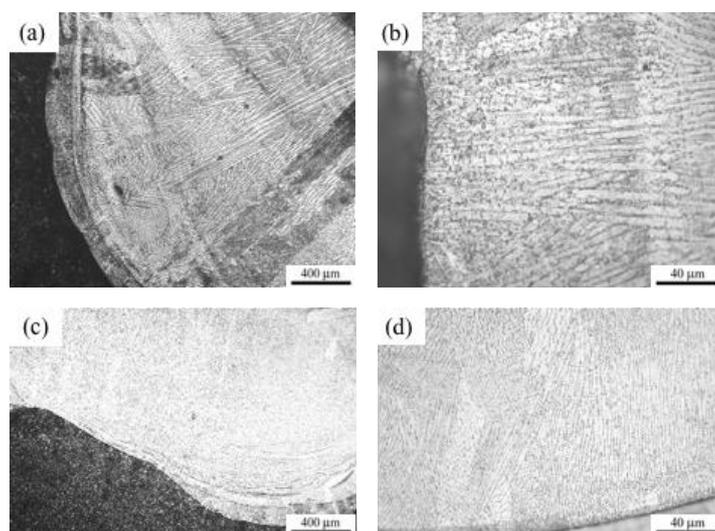
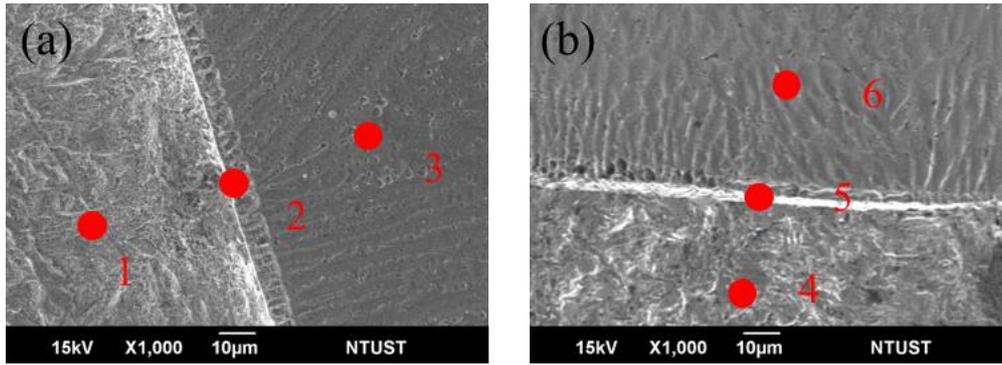


圖 3.1 A508/IN182B 之(a) 50 倍、(b) 500 倍，A508/IN182T 之(a) 50 倍、(b) 500 倍金相圖。



Point	Fe	Cr	Ni	Mn
1	100	---	---	---
2	62.44	5.69	31.87	---
3	17.57	16.45	58.93	7.05
4	100	---	---	---
5	63.31	8.78	27.90	---
6	25.84	14.46	54.96	4.7

圖 3.2 (a) A508/IN182B、(b) A508/IN182T 之 SEI 影像及 EDS 成分分析 (wt.%)。

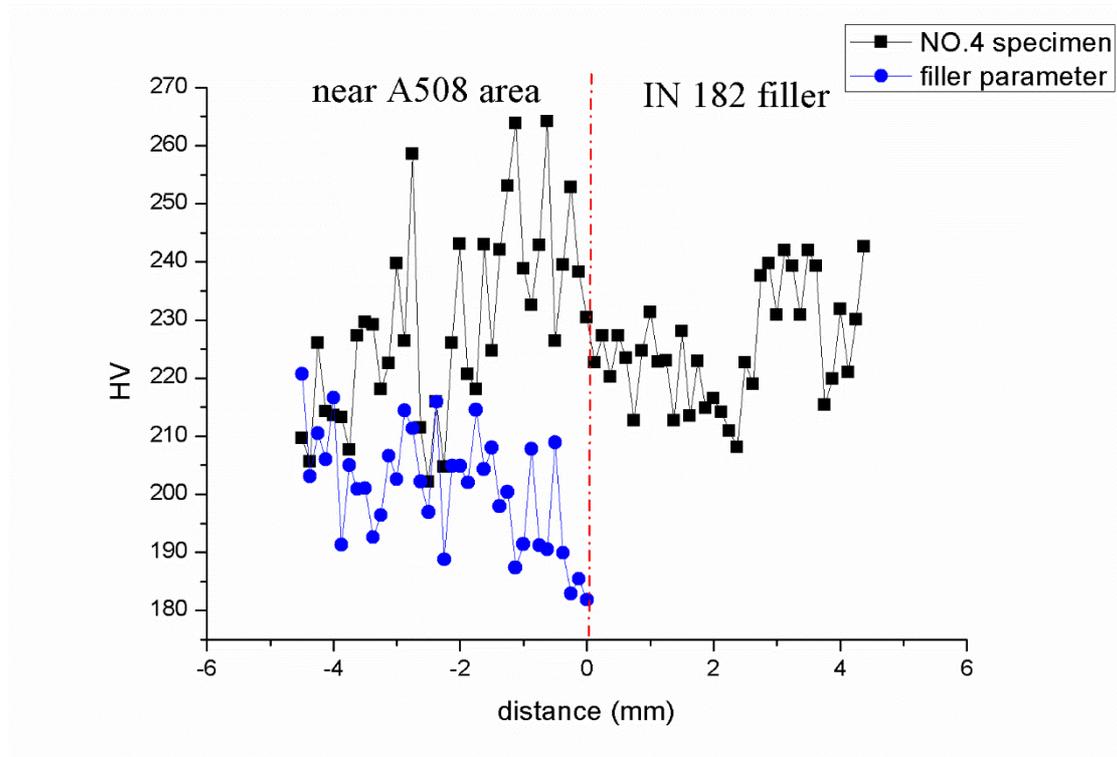


圖 3.3 使用緩衝層施作參數 (NO.4) 及填料銲接處理參數 (filler) 施作 IN 182 銲料於 A508 表面，A508 底材至異質材料介面之微硬度值。

### 3.2 不銹鋼端之 ER308L 緩衝層施作對合金覆銲層之影響 (The influence of 308L SS butter layer on 316L SS)

本節探討有/無 308L 緩衝層於 316L 不銹鋼 (316L SS) 端，比較其 IN 52M 覆銲層、底材之顯微組織、成分分佈、相組成的差異。含 308L 緩衝層之工件透過覆層銲接處理將 ER308L 銲料以 TWB 工法製作 2 層之緩衝層於異質銲接件的 316L 不銹鋼端，再製作 2 層之 IN 52M 覆銲層於 308L 緩衝層之上，緩衝層及覆銲層之厚度共約 7 mm。不含 308L 緩衝層之工件則以 IN 52M 為銲料以 TWB 工法製作 3 層之覆銲層於異質銲接件的 316L 不銹鋼端，覆銲層厚度約 5 mm。覆銲件之結構示意圖見圖 3.4。

由於取樣之試片僅包含銲道中心軸兩側 40 mm (圖 3.5)，316LSS 開槽上端處至試片邊界僅約 25 mm 寬。為確保緩衝層、覆銲層與底材介面之完整性與數據可靠性，每隔 2 mm 拍攝 1 張金相照進行比對。介面金相圖如圖 3.6 至圖 3.8。異質材料介面、道次介面與層介面中未觀察到銲接之瑕疵或瑕疵。

316L SS 與 IN 52M 覆銲層之介面 (316L/IN52M) 金相如圖 3.6 所示，異質材料介面具有垂直凝固方向之 Type II 晶界，其寬度約介於 5~10  $\mu\text{m}$ 。根據金屬凝固模式理論，IN 52M 內之枝晶型態主要以柱狀枝狀晶 (columnar dendritic) 為主，顯示熔融金屬凝固前鋒沿著溫度梯度較低之方向成長，如圖 3.6(f)中之樹枝狀結構。其中，柱狀枝狀晶晶胞間具有明顯之遷移晶界 (migrated grain boundary, MGB)，如圖 3.6(g)所示。

由於 316LSS 與 308L 緩衝層皆屬於面心立方結構且化學成分相似(表 2.2)，其介面 (316L/308L) 呈現同質銲接件之顯微結構，枝狀晶之結構偏向平面狀枝狀晶 (planar dendritic) 生長模式。當過冷度大時，平面狀枝狀晶的生長枝構將轉變為胞狀枝狀晶 (cellular) 及柱狀枝狀晶為主。然而，本研究中僅觀察到平面

狀枝狀晶直接轉變為柱狀枝狀晶，推論是過冷度（G/R）較大，使得枝狀晶未有足夠時間成長（圖 3.7(b)）。另一方面，由圖 3.7(f)中，觀察到 308L 緩衝層之柱狀枝狀晶呈現沿 316LSS 底材晶粒取向方向往鉚冠方向生長，顯示 316L/308L 鍵結強度較 316/IN52M 佳。

308L 緩衝層與 IN 52M 覆鉚層介面(308L/IN52M)並無明顯之 Type II 晶界，如圖 3.8 所示。相較於 316L/IN52M，IN 52M 介面處為平面狀枝狀晶及胞狀枝狀晶之混合結構，枝狀晶粒之形貌較圓潤、尺寸較短小。值得一提的是，308L/IN52M 之稀釋率較 316L/IN52M 高約 10~15%，使得 IN 52M 枝晶生成多個平行介面之過渡區，造成枝晶結構得以連續朝向鉚冠方向生長，如圖 3.8(q)中所示，

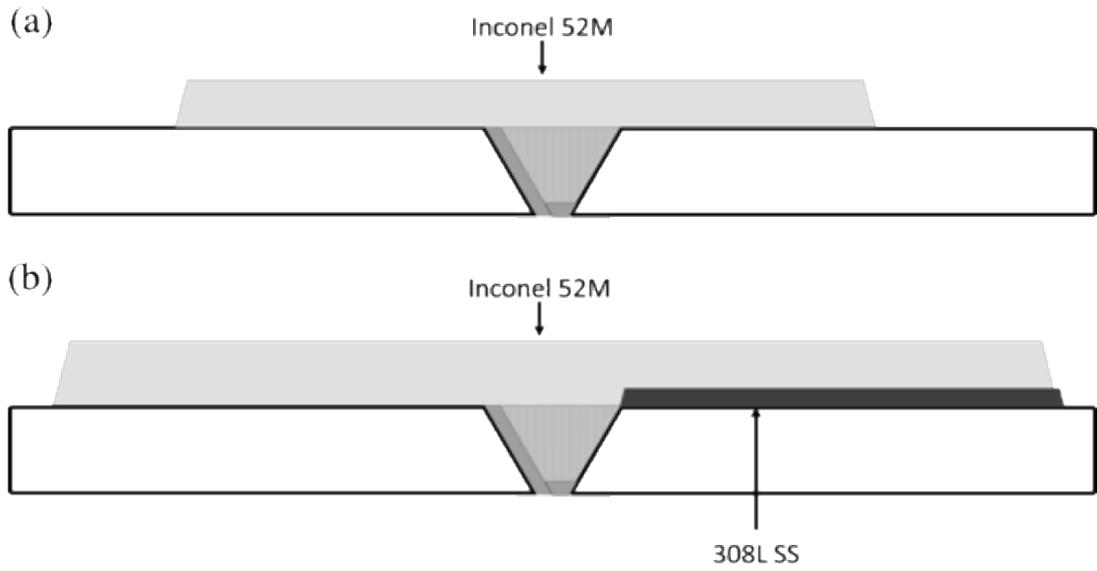


圖 3.4 經 IN 52M 覆層銲接處理(a) 無、(b) 有 308L 緩衝層異質銲接件之結構示意圖。

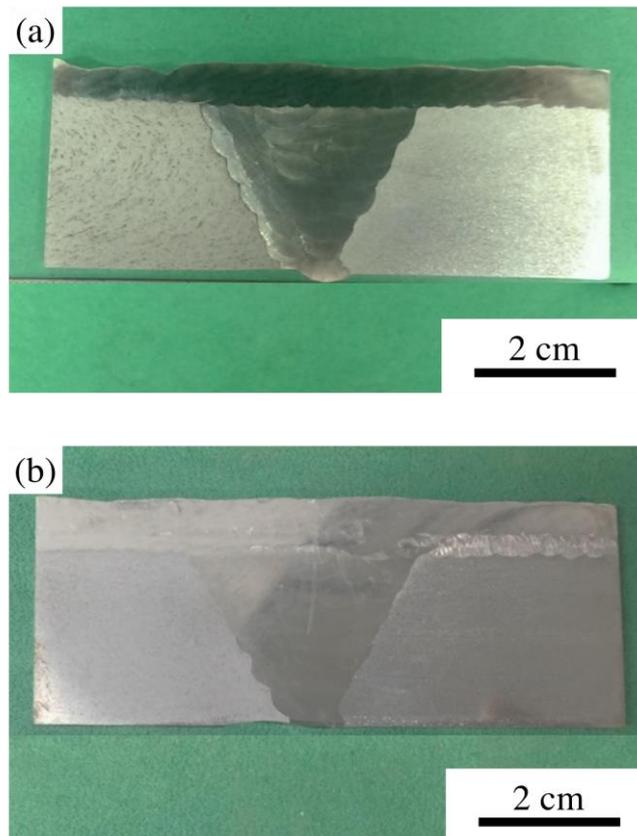


圖 3.5 經 IN 52M 覆層銲接處理(a) 無、(b) 有 308L 緩衝層異質銲接件之取樣試片外觀照。

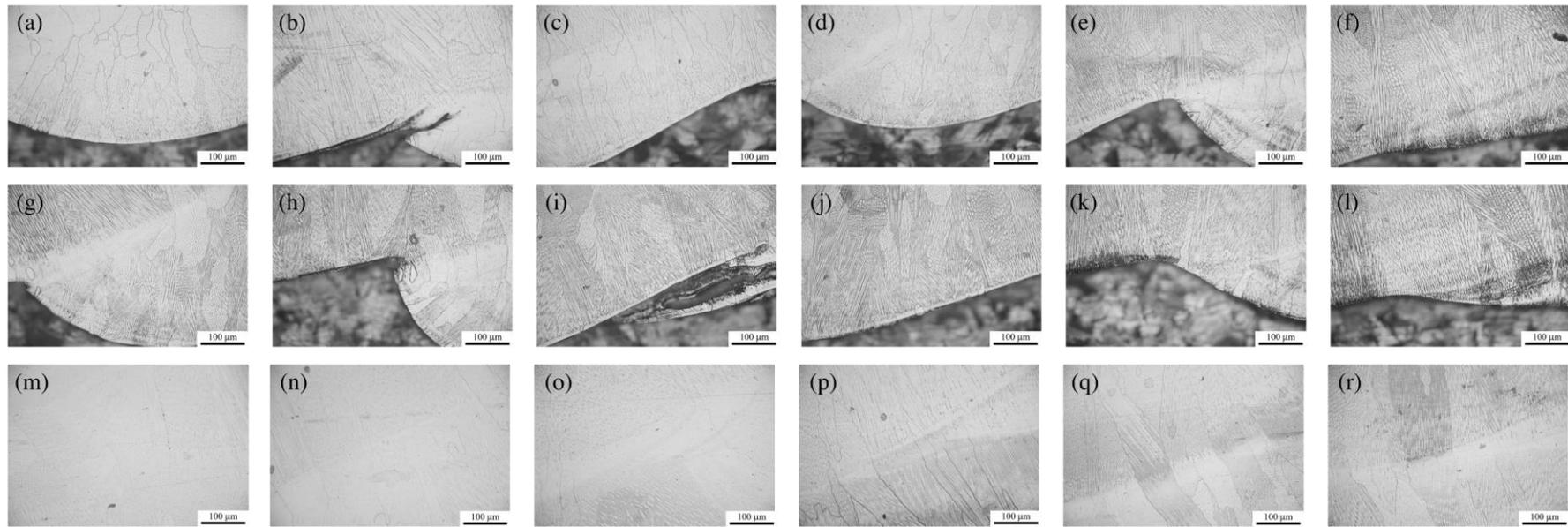


圖 3.6 (a)-(l) 316L/ IN52M 介面、(m)-(r) 第 1、2 層 IN 52M 介面之 200 倍的金相圖。

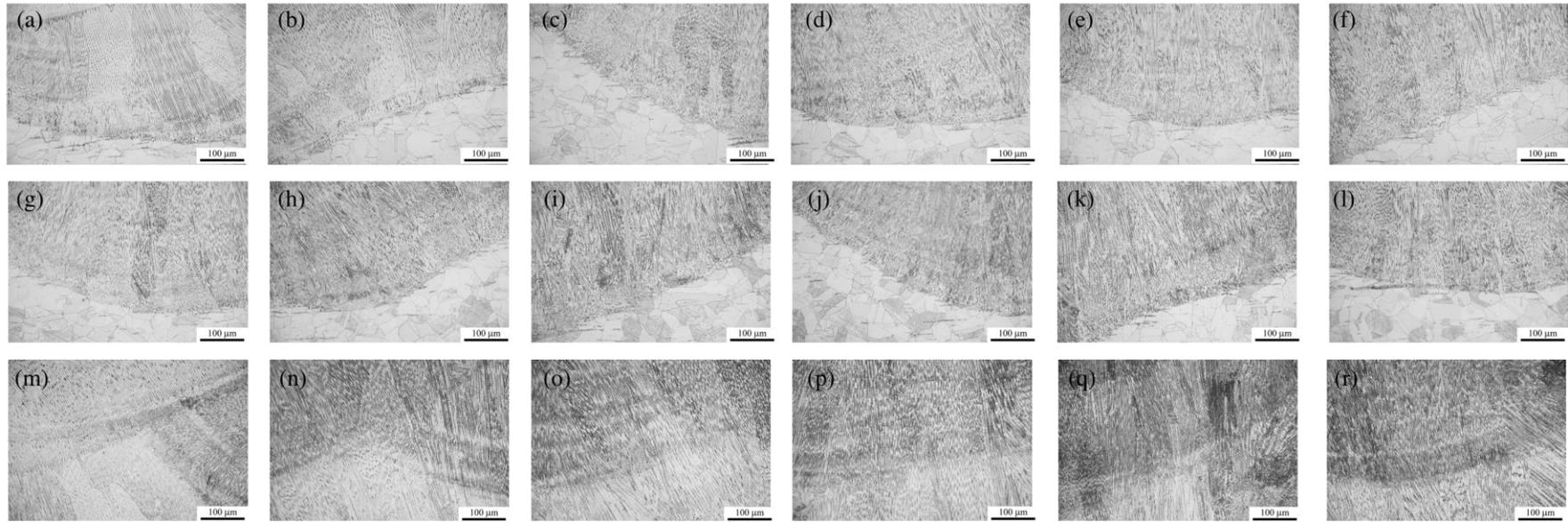


圖 3.7 (a)-(l) 316L/308L 緩衝層介面、(m)-(r) 第 1、2 層 308L 介面之 200 倍的金相圖。

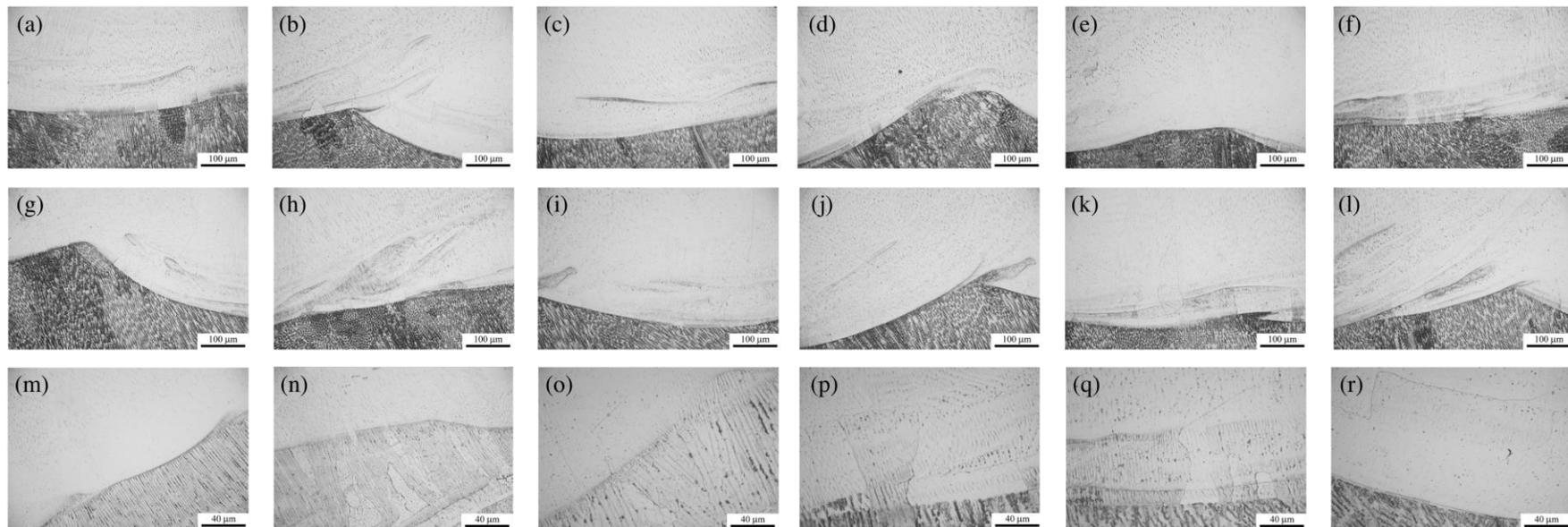
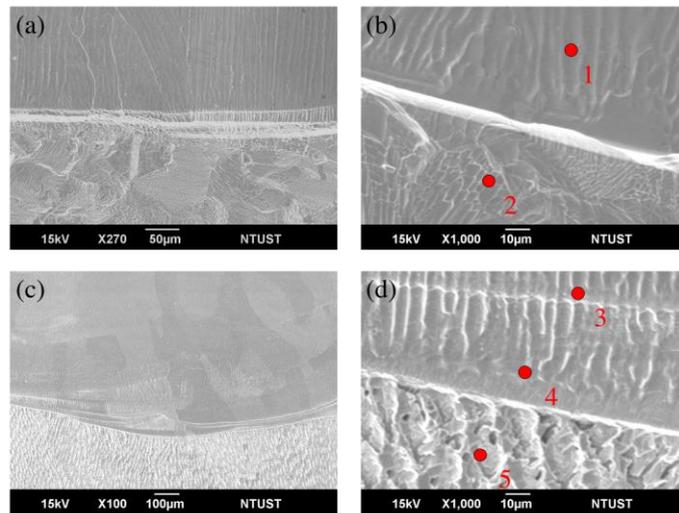


圖 3.8 308L/IN52M 介面之(a)-(l) 200 倍、(m)-(r) 500 倍的金相圖。

透過 SEM 與 EDS 進一步分析，如圖 3.9 所示，IN 52M 覆鋅層之鐵含量在 316L/IN52M 介面處較高、鎳含量則在 308L/IN52M 介面處較低。為瞭解施作緩衝層對覆鋅層內合金元素的分佈之影響，由介面處為起始點，向 IN 52M 覆鋅層方向，每隔 0.1 mm 做成分分析，結果如圖 3.10 及 3.11 所示。316L/IN52M 之鎳、鐵含量約在距離介面 1.8 mm 處回復至 IN 52M 之原始化學組成成分（表 2.1），其位置約略在 IN 52M 覆鋅層之第 1、2 層交界處。於第 2 層後，覆鋅層將不會受到底材成分之影響，此結果與去年度計畫研究成果相同。然而，308L/52M 之鎳、鐵成分在距離介面 2 mm 後才開始有明顯之變化，此區域由金相圖確認，約為 IN 52M 覆鋅層之第 1、2 層交界處。於第 2 層覆鋅層之鐵含量仍維持 10 ~ 13 %，顯示 308L 緩衝層施作將些許提升 IN 52M 覆鋅層的鐵含量。



Position	Fe	Cr	Ni	Mn
1	28.68	25.00	46.32	---
2	71.95	17.96	10.09	---
3	50.58	23.19	24.49	1.74
4	57.82	21.84	20.34	---
5	68.59	19.57	9.37	2.47

圖 3.9 (a)(b) 316L/IN52M 介面、(c)(d) 308L/IN52M 介面之 SEI 影像及 EDS 成分分析 (wt. %)。

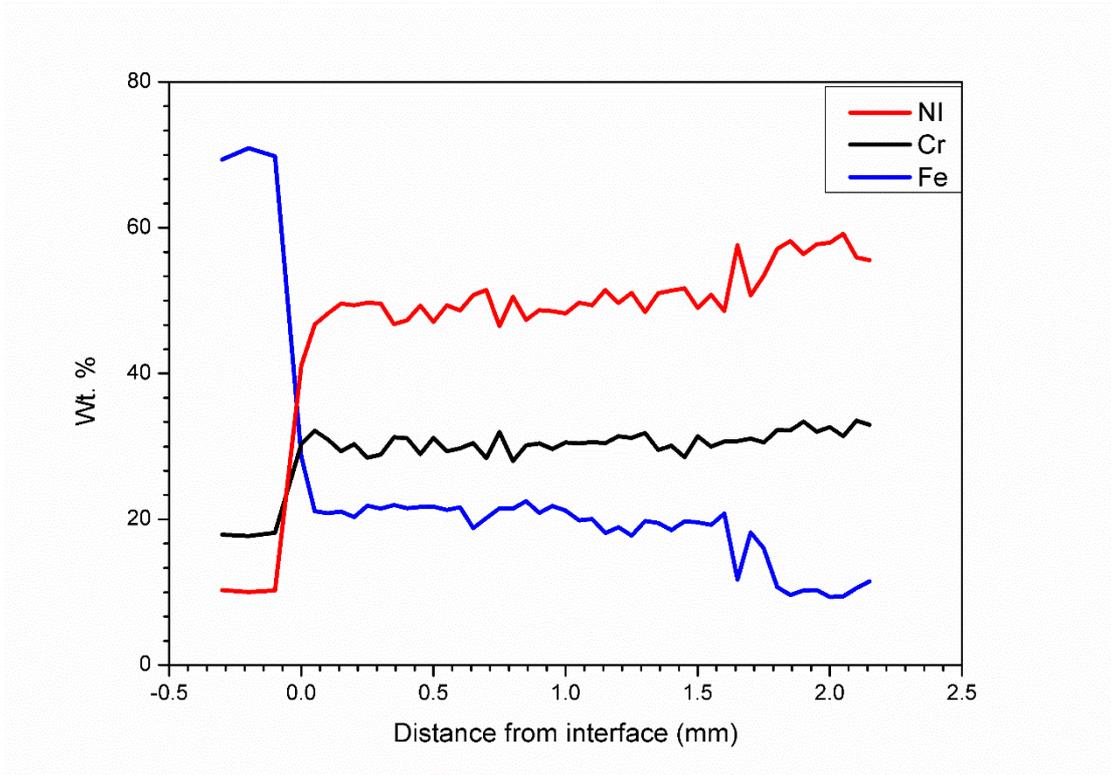


圖 3.10 316/IN52M 介面之 EDS 成分分析。

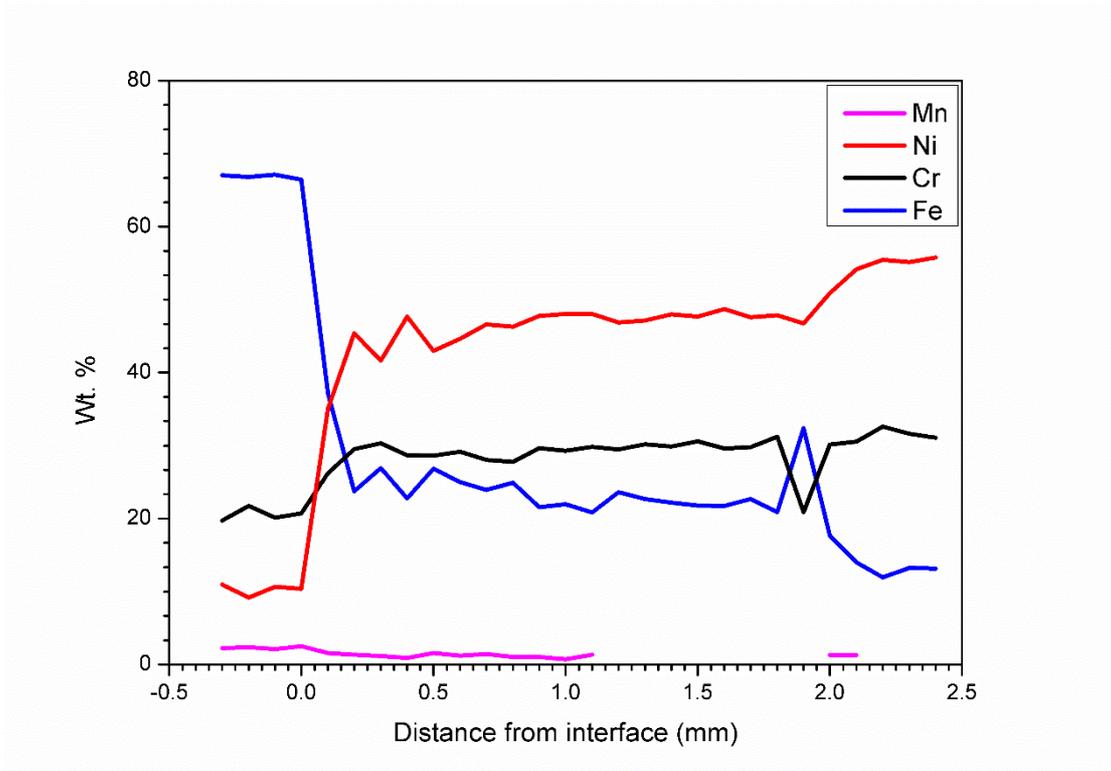


圖 3.11 308L/IN52M 介面之 EDS 成分分析。

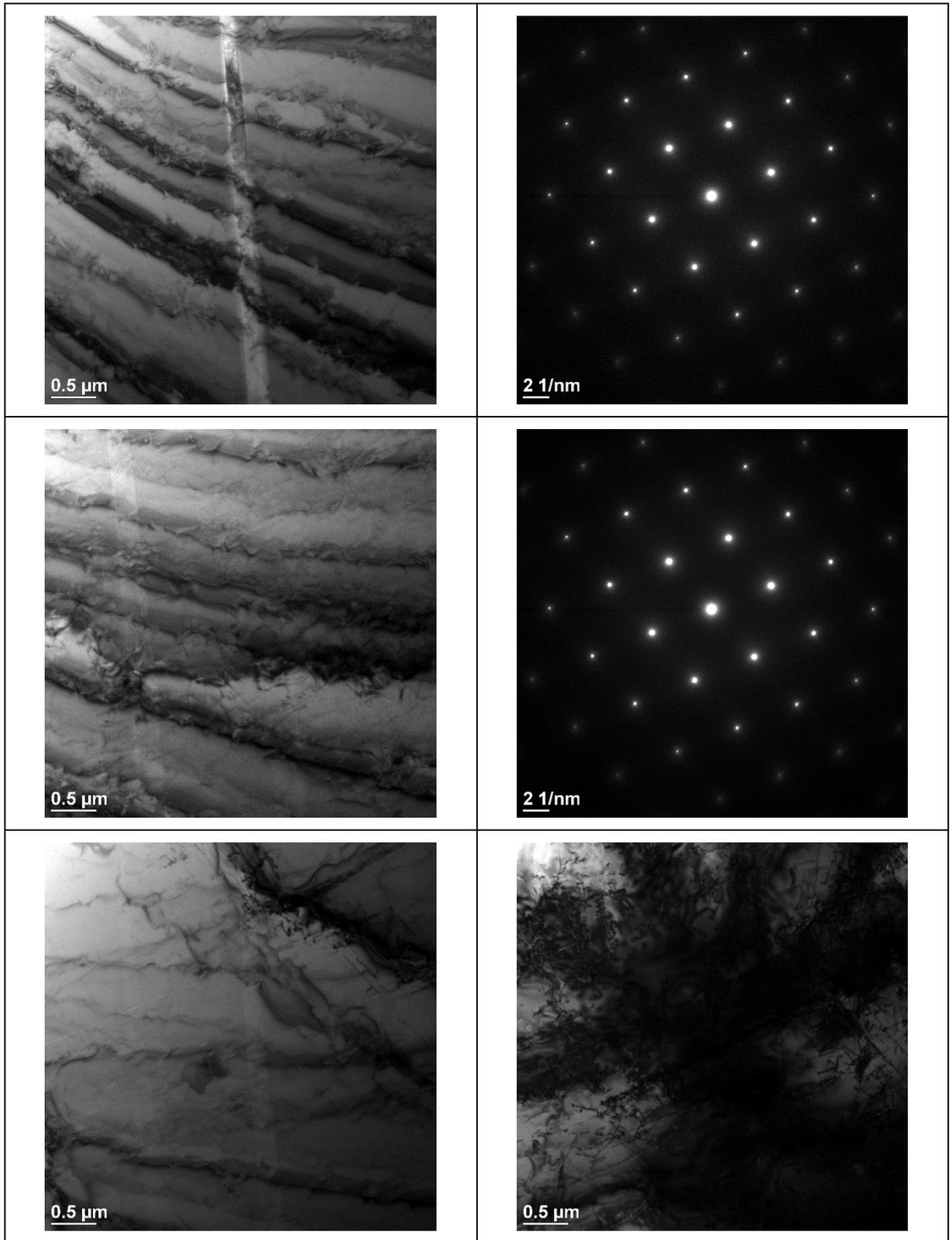


圖 3.12 308L/IN52M 處之 IN 52M 取樣的 TEM 分析結果。(DP 以[011] zone axis 方向擇區繞射圖)。

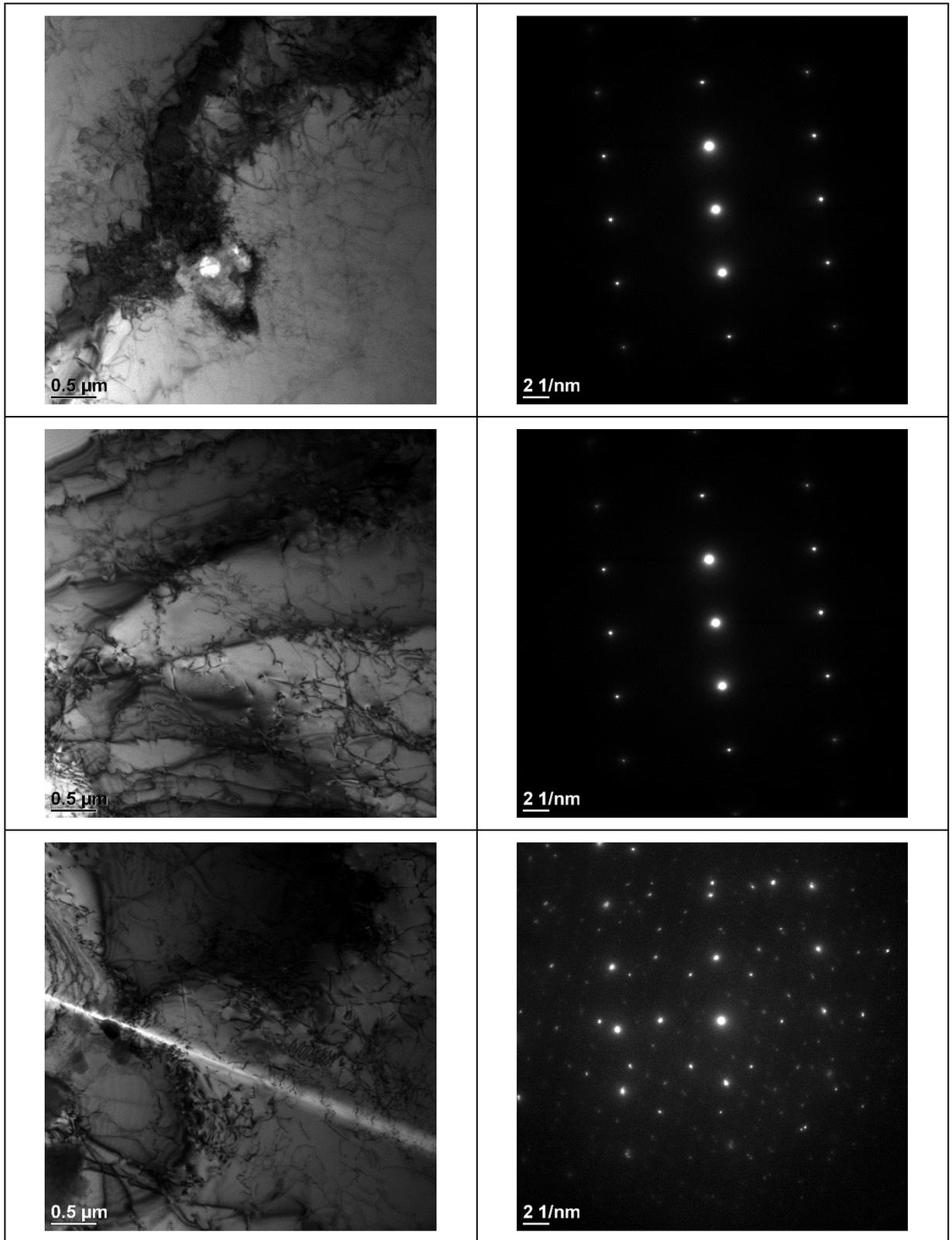


圖 3.13 316L/IN52M 處之 IN 52M 取樣的 TEM 分析結果。(DP 以[112] zone axis 方向擇區繞射圖)

### 3.3 覆層銲接處理對殘留應力分佈之影響 (The effect of overlay welding on the distribution of residual stress)

本節透過 X-ray 射線量測及 ABAQUS 軟體模擬異質銲接件經過覆層銲接處理後之殘留應力場分佈。鋼料依照圖 2.5 及圖 2.6 之尺寸圖加工為試片，利用螺栓固定為組件後，依序將 IN 182 銲料填入開槽區進行銲接處理，再使用 IN 52M 為銲料製作覆銲層。比較異質銲接件與施作 IN 52M 覆銲 3 層之覆銲件的殘留應力狀態，以釐清覆層銲接處理之入熱量、熔融金屬收縮量、熱傳導量之影響性。

參考實際施作工件之幾何條件，利用 CAD 軟體繪製銲接件、覆銲件之模型，如圖 3.14 所示。考量到電腦分析之運算量，沿厚度方向將銲接件底材切割成 8 等分、覆銲件底材切割成 7 等分，網格模型如圖 3.15 及 3.16 所示，銲接件及覆銲件分別含有 30308 單位 (element)、36398 單位。應力模擬參數設定如表 3.1 所列，各溫度區間之底材材料性質如表 3.2~3.5 所列，本研究採用之熱傳分析模組為 DC3D8，應力分析模組為 C3D8I。由於熱源模式是參考實際銲接處理之移動式熱源，得以採用動態模擬計算，故設定工件最終溫度狀態為冷卻至接近室溫再進行分析。模組之邊界條件以 8 顆螺栓作為固定邊界(圖 3.17)，限制鋼料於 X、Y、Z 方向皆不得位移或變形。另考量到實際施作之層間溫度，故工件初始溫度設定為 120 °C。

圖 3.18 展示銲接熱分佈模擬結果。銲接件、覆銲件施作完成後，分別靜置於室溫中 5400 及 6000 秒，由於 316LSS 在固體狀態下，其熱傳導係數僅略高於 IN 52M，當溫度呈穩定狀態，316L 不銹鋼端之溫度均略高於 A508 低合金鋼端。

表 3.1 應力模擬參數之設定值。

Chunk 含 element 數	Chunk 停留時 間 (s)	熱對流係數 (W/m <sup>2</sup> K)	環境溫度 (°C)	初始溫度 (°C)	金屬放射 率
5	5	25	25	120	0.9

表 3.2 各溫度區間 A508 低合金鋼之材料性質。

Temperature (°C)	Young's Modulus (MPa)	Coefficient of thermal expansion (1/°c)	Thermal conductivities (mJ/s-mm-°c)	Specific heat (mJ/tone-°c)	Yield Strength (Mpa)	Ultimate Strength (Mpa)
21.1111	1.92E+05	1.15E-05	40.6451	4.40E+08	344.7379	551.5806
260	1.77E+05	1.31E-05	39.2614	5.44E+08	297.8535	551.5806
371.1111	1.70E+05	1.37E-05	37.3589	5.86E+08	280.6166	551.5806
593.3333	1.48E+05	1.48E-05	32.8620	6.45E+08	165.4742	386.1064
815.5556	1.10E+05	1.55E-05	26.1166	7.24E+08	48.2633	220.6322
1371.1111	6.89E+02	1.71E-05	8.6479	8.54E+08	6.8948	13.7895

表 3.3 各溫度區間鎳基 82/182 合金之材料性質。

Temperature (°C)	Young's Modulus (MPa)	Coefficient of thermal expansion (1/°c)	Thermal conductivities (mJ/s-mm-°c)	Specific heat (mJ/tone-°c)	Yield Strength (Mpa)	Ultimate Strength (Mpa)
21.1111	2.14E+05	1.22E-05	14.8744	4.52E+08	336.4642	694.9915
260	2.00E+05	1.37E-05	18.3335	5.02E+08	304.0588	648.1072
371.1111	1.94E+05	1.42E-05	20.0631	5.23E+08	295.7851	632.2492
593.3333	1.79E+05	1.51E-05	23.8682	5.82E+08	278.5482	503.3173
815.5556	1.59E+05	1.62E-05	27.6732	6.20E+08	147.5478	206.8427
1371.1111	6.89E+02	1.80E-06	38.0507	7.41E+08	6.8948	13.7895

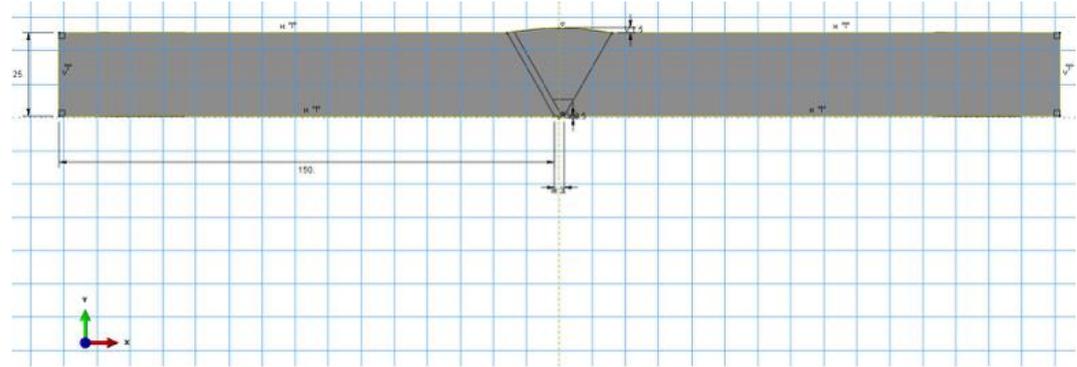
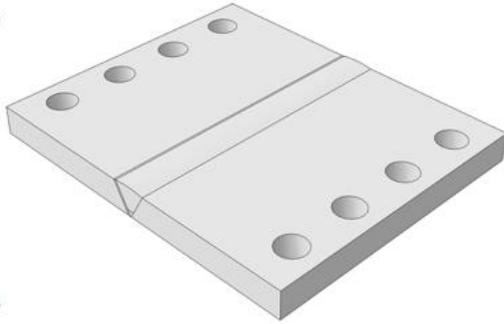
表 3.4 各溫度區間 316L 不銹鋼之材料性質。

Temperature (°C)	Young's Modulus (MPa)	Coefficient of thermal expansion (1/°c)	Thermal conductivities (mJ/s-mm-°c)	Specific heat (mJ/tonne-°c)	Yield Strength (Mpa)	Ultimate Strength (Mpa)
20	1.95E+05	1.52E-05	13.31	4.70E+08	278	7.966E-09
200	1.86E+05	1.64E-05	16.33	5.08E+08	193	7.893E-09
400	1.73E+05	1.74E-05	19.47	5.50E+08	154	7.814E-09
600	1.55E+05	1.82E-05	22.38	5.92E+08	141	7.724E-09
800	1.31E+05	1.88E-05	25.07	6.34E+08	130	7.63E-09
1000	1.00E+05	1.94E-05	27.53	6.76E+08	45	7.535E-09
1200	5.95E+04	2.00E-05	29.76	7.19E+08	13	7.436E-09
1420	2.00E+03	2.07E-05	31.95	7.65E+08	3	7.32E-09

表 3.5 各溫度區間鎳基 52M 合金之材料性質。

Temperature (°C)	Young's Modulus (MPa)	Coefficient of thermal expansion (1/°c)	Thermal conductivities (mJ/s-mm-°c)	Specific heat (mJ/tonne-°c)	Yield Strength (Mpa)	Ultimate Strength (Mpa)
21.1111	2.09E+05	1.39E-05	11.76112	4.48E+08	335.7747	691.5442
260.0000	1.95E+05	1.46E-05	16.25803	5.07E+08	251.6586	597.7755
371.1111	1.90E+05	1.49E-05	18.33352	5.23E+08	237.8691	590.8807
593.3333	1.74E+05	1.53E-05	22.65746	5.65E+08	218.5638	496.4225
815.5556	1.56E+05	1.58E-05	26.80845	6.15E+08	193.7427	279.9271
1371.1111	6.89E+02	1.71E-05	38.05070	6.99E+08	6.8948	13.7895

(a)



(b)

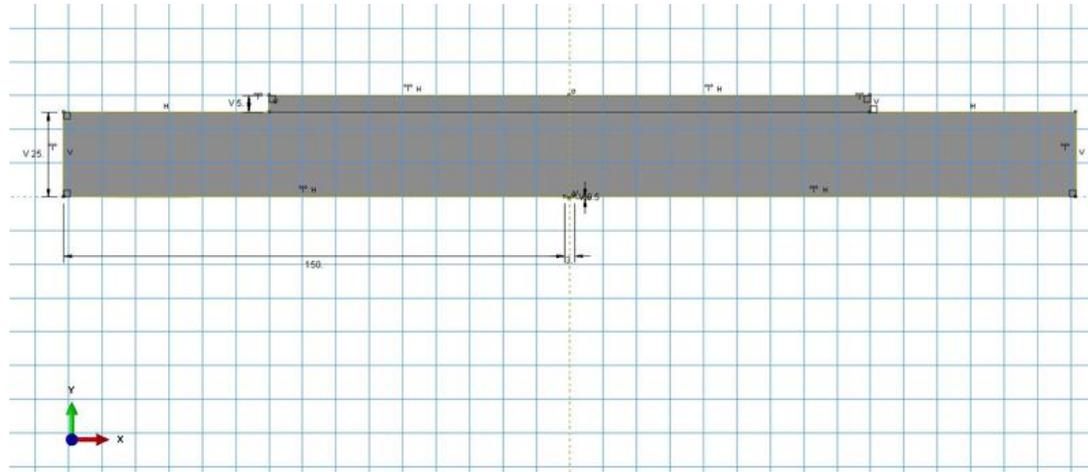
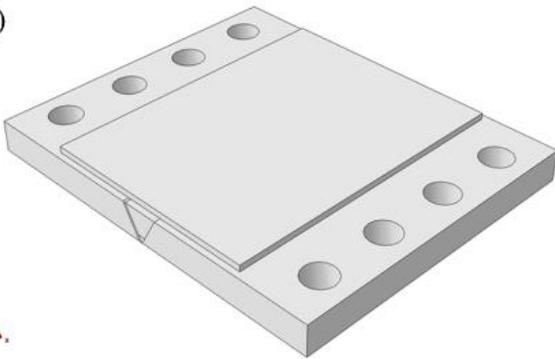


圖 3.14 (a) 銲接件、(b) 覆銲件之 CAD 模型圖及前視圖。(左側為 A508 端、右側為 316L 端)

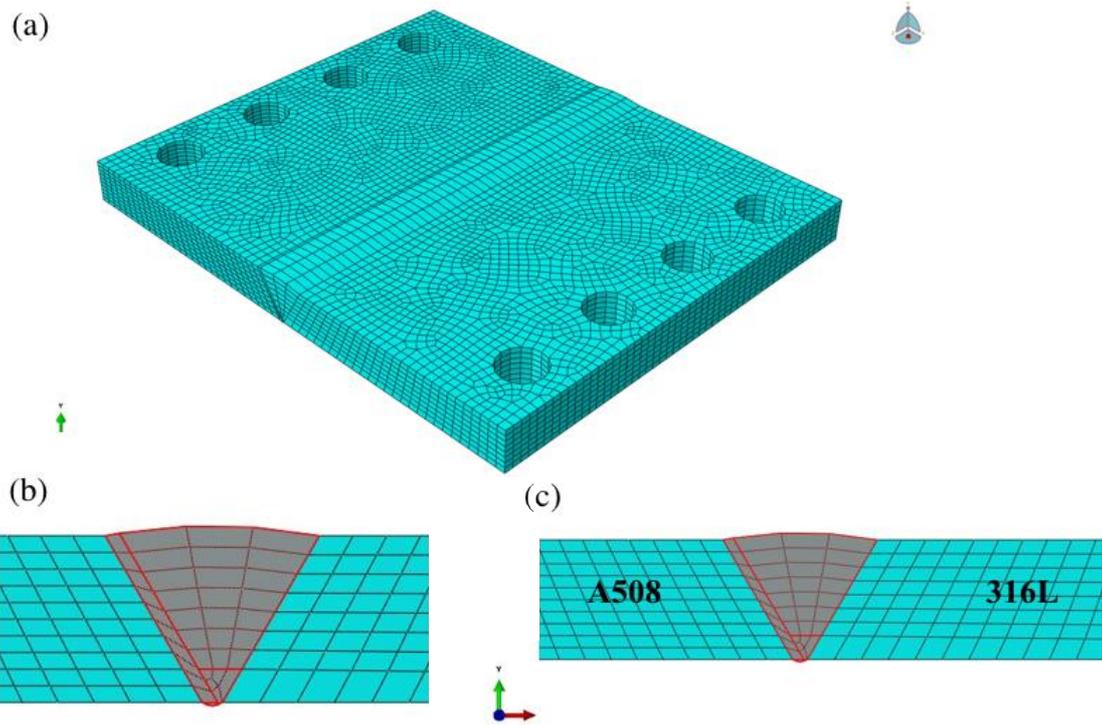


圖 3.15 銲接件之(a) 網格圖、(b) 熔融金屬劃分區、(c) 異質材料相對位置。

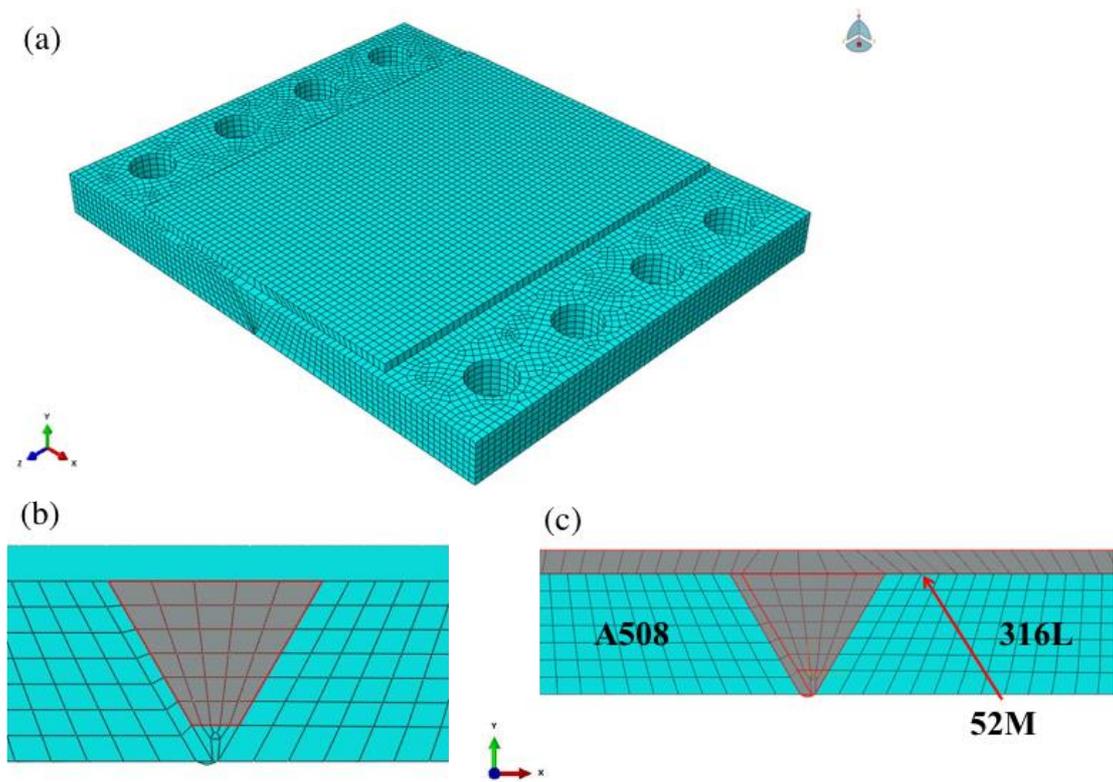


圖 3.16 覆銲件之(a) 網格圖、(b) 熔融金屬劃分區、(c) 異質材料相對位置。

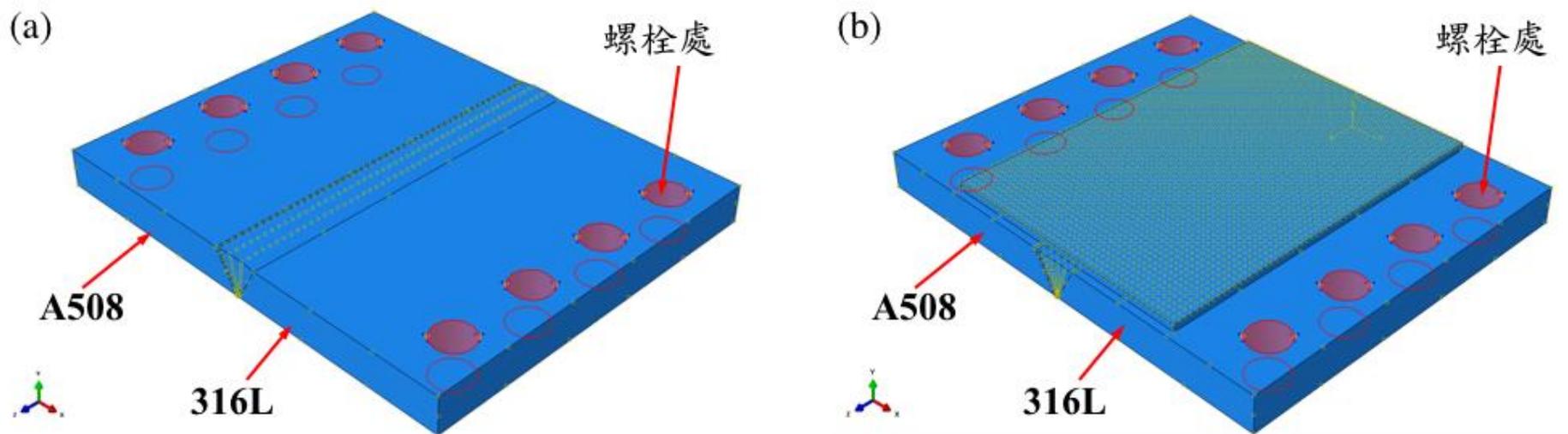
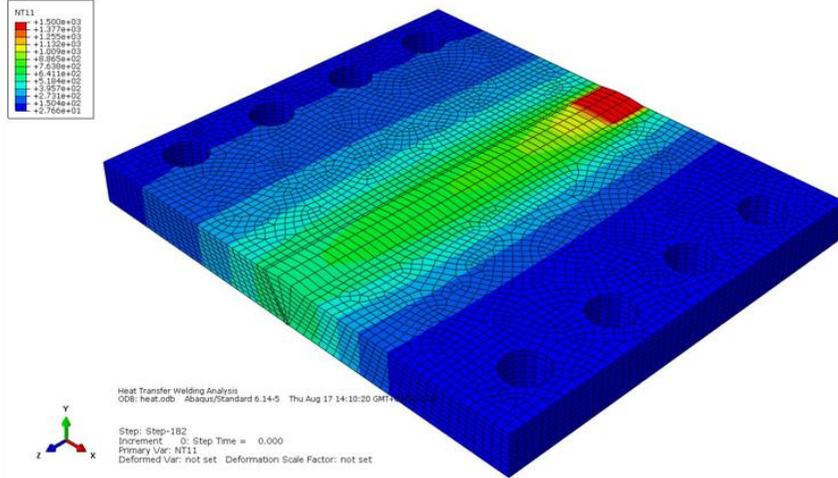
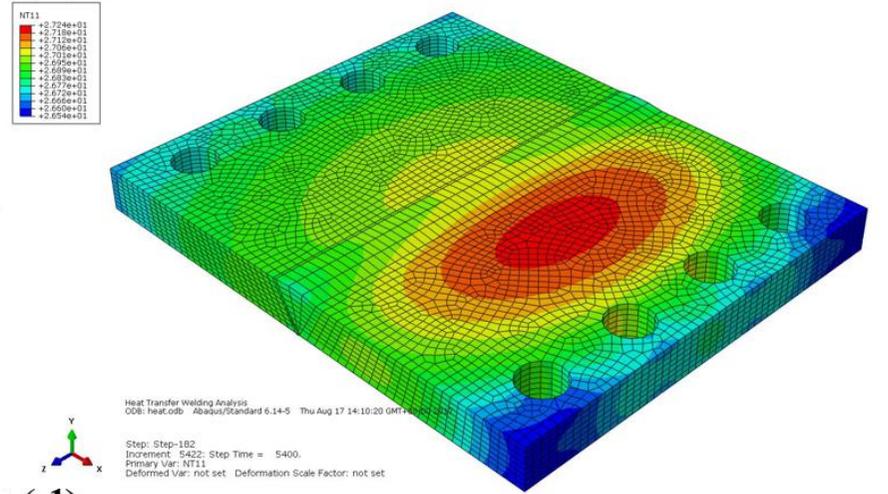


圖 3.17 (a) 銲接件、(b) 覆銲件之拘束條件

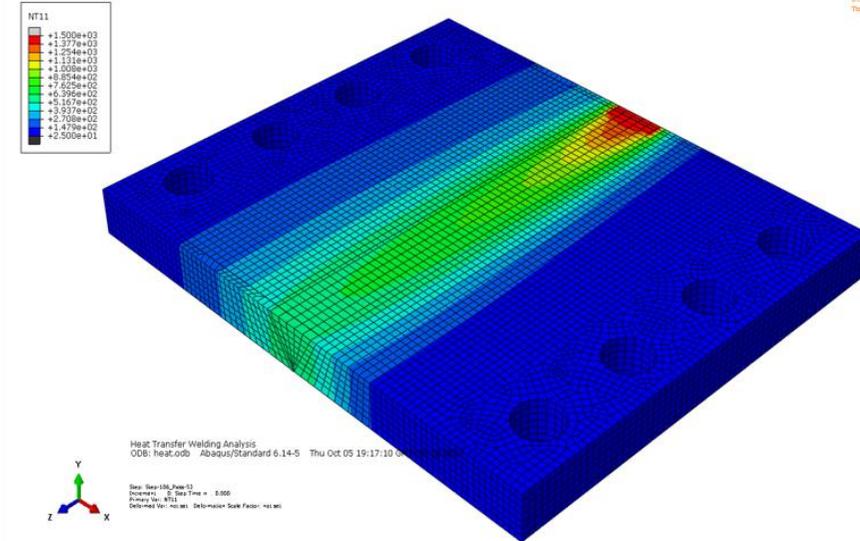
(a)



(b)



(c)



(d)

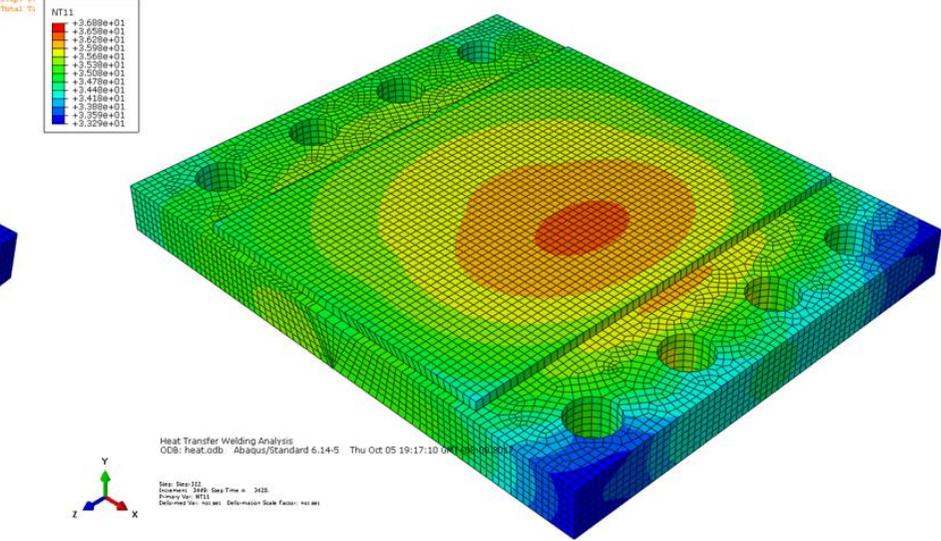


圖 3.18 (a) 銲接處理施作完成、(b) 銲接件靜置 5400 秒、(c) 覆層銲接處理施作前、(d) 覆銲件靜置 6000 秒之溫度場模擬結果。(°C)

殘留應力量測使用二維 X 射線量測儀，針對鉚道尾端向前平移 65 mm 處之截面，以 WEDM 加工藉以保留 6 顆螺栓之拘束力。量測鉚道中心線兩側 35 mm、鋼料表面下 20 mm 範圍之應力值。由於鉚道枝晶組織具有單一方向成長（較強的晶粒取向）、晶粒粗大且富含析出物等特性，將會嚴重干擾 X-ray 繞射之數值，使其產生較大的偏移量及標準差。為了有效地分析殘留應力值，本研究排除了較大及較小的極值，以 600 MPa 至 -600 MPa 為數據分析之上、下限。量測結果如圖 3.19 至 3.20 所示，詳細量測數據見附錄 C。

鉚接件之 S11 殘留應力場（軸向, axial）主要分布於鉚道上半部 1/2 T 範圍、A508 緩衝層介面，以及 316LSS 端靠近鉚道側之 1/2 T 處有較大之殘留張應力。文獻指出，熔融鎳基合金凝固時體積減少，即產生殘留張應力場，雖使用 HWB 鉚接技術已被證實可有效對前一道次進行再次熱處理，以降低其殘留張應力值，然最後一道次之鉚道仍具有最大殘留張應力場。透過 IN 52M 覆層鉚接處理，S11 殘留應力場有著轉變為殘留壓應力場之趨勢，相較於鉚接件，覆鉚件之底部及 1/2 T 處皆已呈現殘留壓應力狀態。透過覆鉚層之凝固束縛，底材之殘留張應力會被外加壓應力抑制，藉以降低其生成應力腐蝕裂紋之機會。施作 308L 緩衝層/覆鉚處理之鉚接件之殘留應力場，呈現鉚道根部、316LSS 端生成殘留張應力場。此現象與覆鉚層厚度愈厚，殘留壓應力場分布愈深的預期不同。推測為 308L 緩衝層施作時，鉚接入熱量累積於 316LSS 端表面，又其熱傳導係數較低致使散熱較慢，因此產生極大的殘留張應力場，超出本研究之固定螺栓的束縛力。當表面殘留張應力過大時，鋼料將由平行鉚道方向之側邊向上翹曲形變，連帶迫使鉚接件之鉚道根部向上彎曲，造成殘留應力狀態呈現張應力模式。S12 殘留剪切應力場顯示異質材料介面均具有相對較大的值，尤以 316L/IN182、A508/IN182 為主。

原因可歸咎於異質銲接件之熱膨脹係數差異性過大，銲接件在升、降溫過程中，異質材料間彼此拉扯生成熱應力（thermal stress）累積在介面處。

透過 ABAQUS 應力模擬結果，圖 3.21 至圖 3.23，本實驗之銲接件經由銲接處理後，固定端靠銲道側已有向上位移 0.8 mm 之現象產生；經由覆層銲接處理後，鋼料之位移量已達到 1.8 mm。證實鋼料累積之殘留應力值已超過螺栓之負荷，使得剛透過形變釋放部分之殘留張應力。經由模擬之殘留應力場，除了 S22（Z 軸方向）具有壓應力外，其餘皆呈現張應力狀態。另一方面，異質材料介面具有較大之殘留應力值，其結果與量測之 S12 應力相似。探討殘留應力模擬與實際施作、理論模組之差異性來源，可歸納出以下幾點緣由：(1) 鍛打 QT 之 A508 低合金鋼及軋延之 316L 不銹鋼含有加工殘留應力、(2) 熔融金屬間伴隨著化學成分擴散、(3) 各溫度區間之材料性質為經驗公式與實際值略有差異、(3) 銲接時間的參數設定仍須調整、(4) IN 182 緩衝層之變形量未納入考量因素。

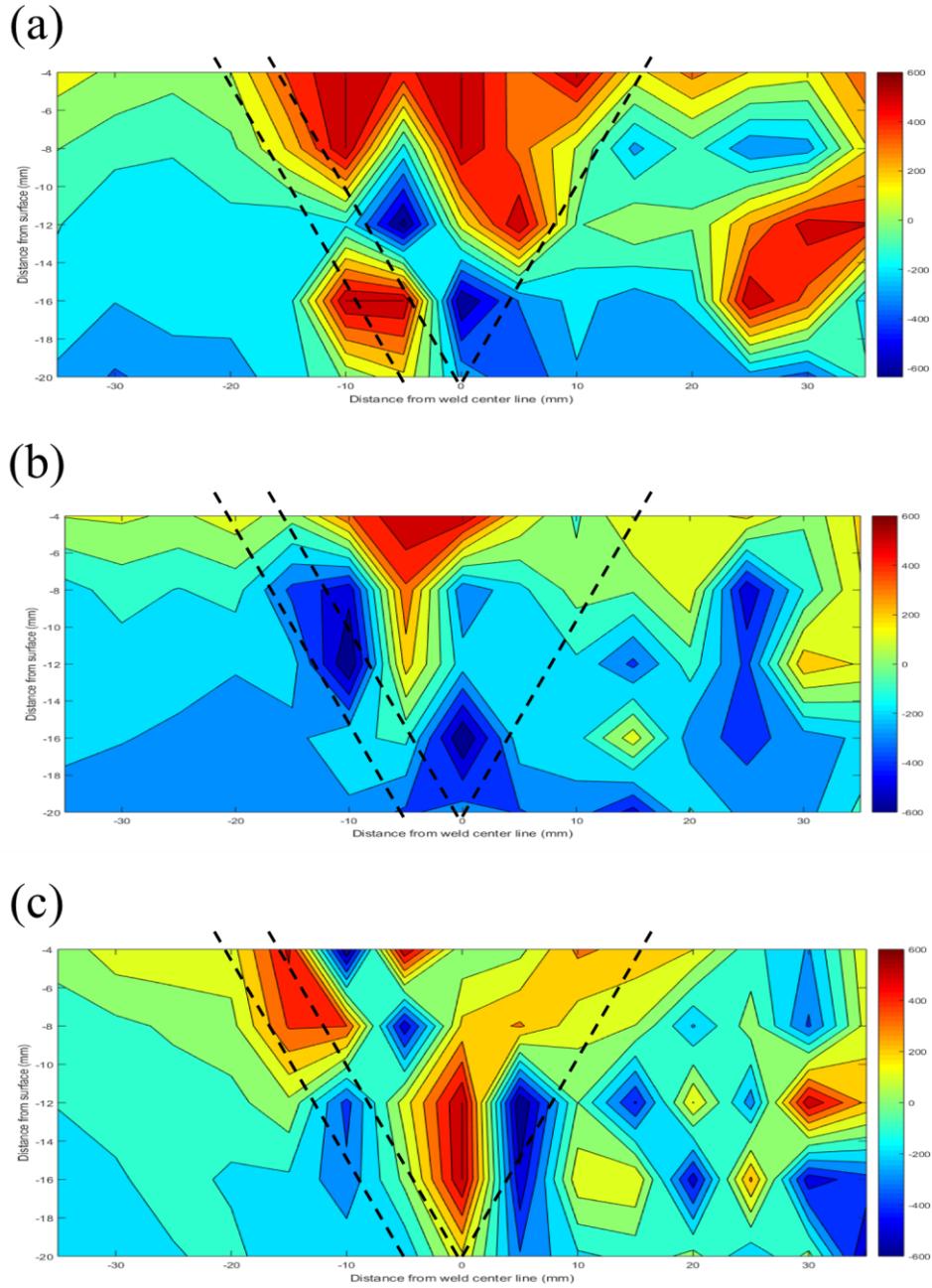


圖 3.19 (a) 銲接件、(b) 覆銲件、(c) 308L 緩衝層/覆銲件距離銲道尾端 65 mm 處截面之 S11 殘留應力場量測值。(MPa)

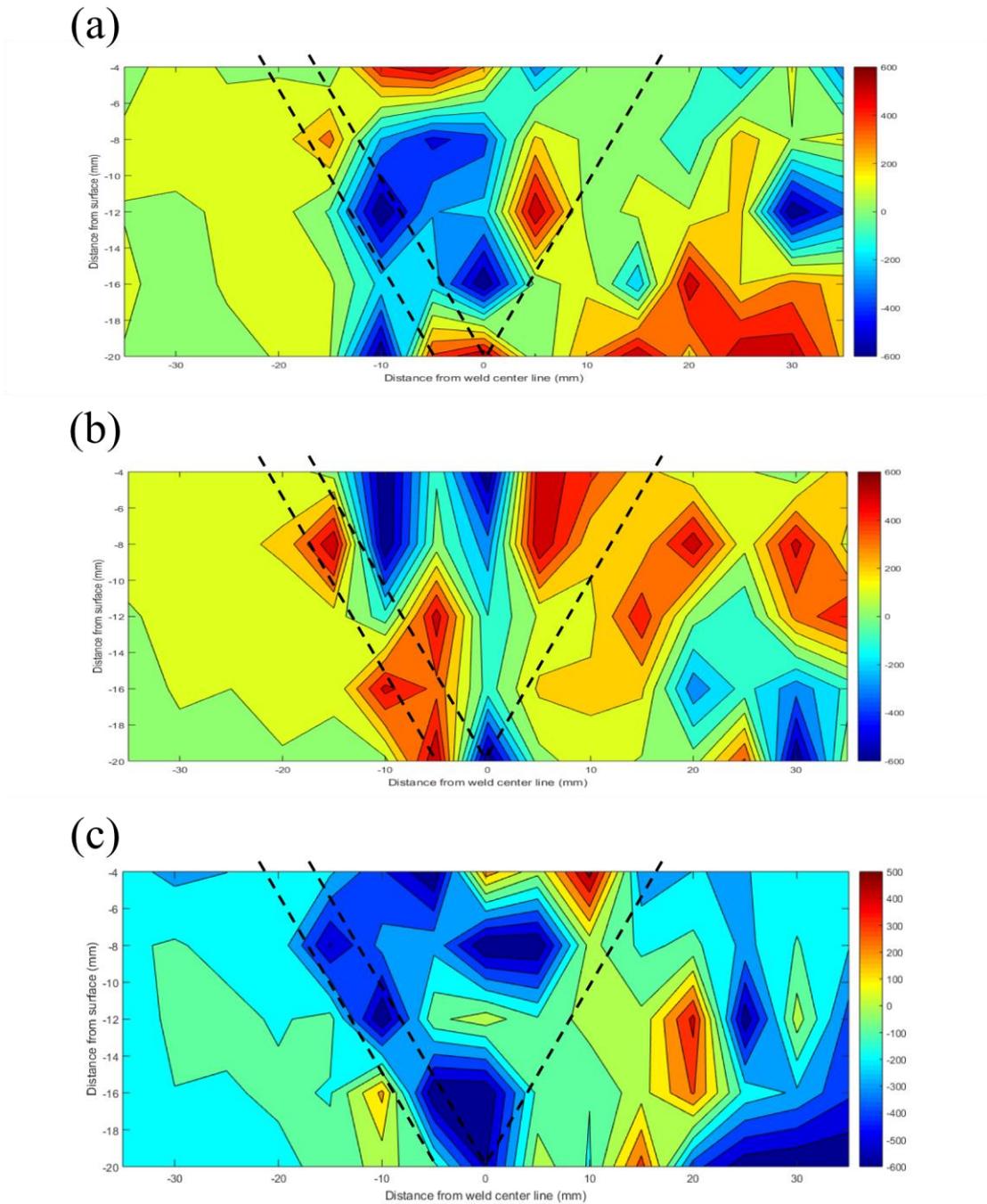


圖 3.20 (a) 銲接件、(b) 覆銲件、(c) 308L 緩衝層/覆銲件距離銲道尾端 65 mm 處截面之 S12 殘留剪切應力場量測值。(MPa)

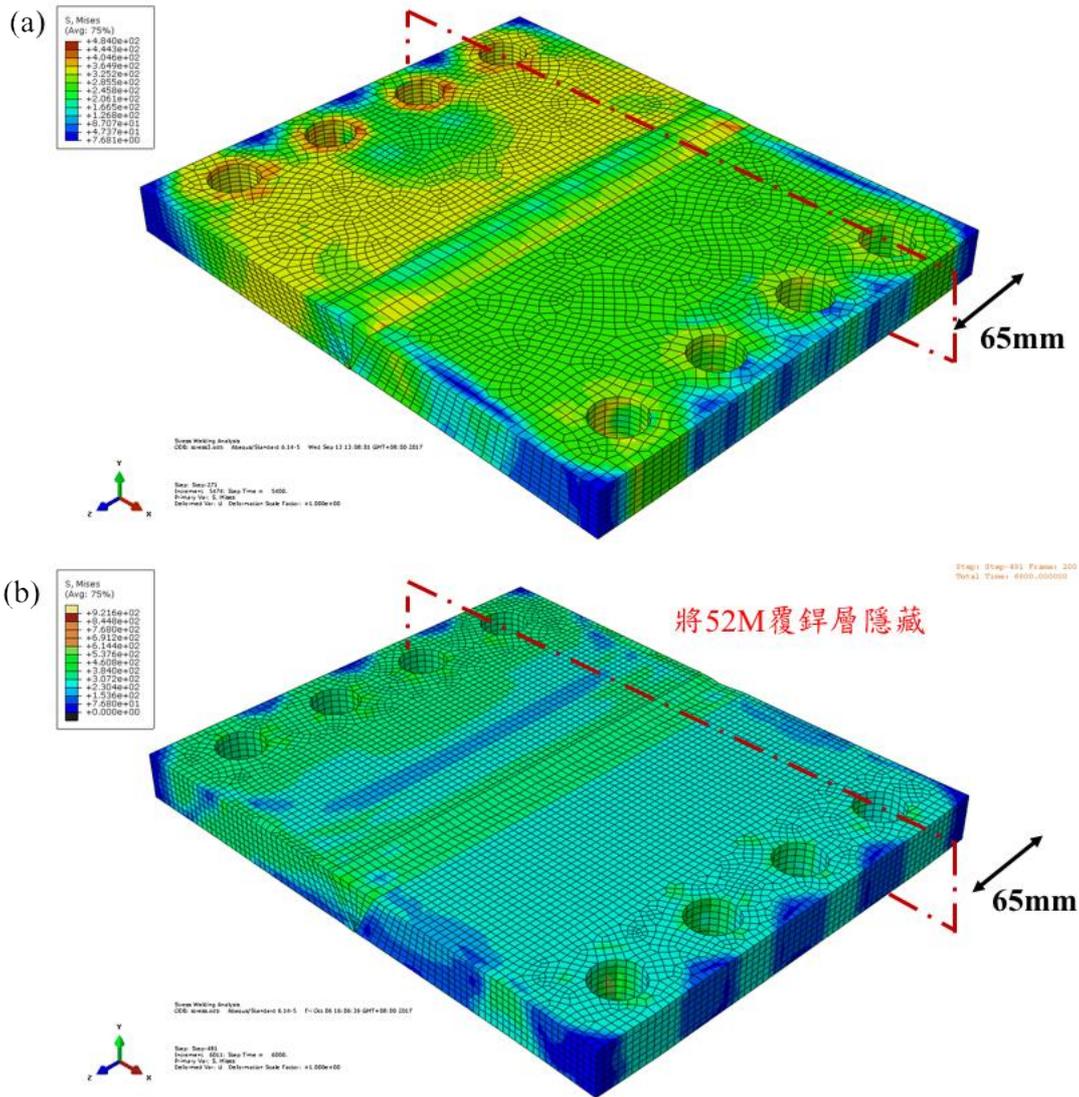


圖 3.21 (a) 銲接件、(b) 覆鋅件之工件殘留應力模擬結果。(MPa)

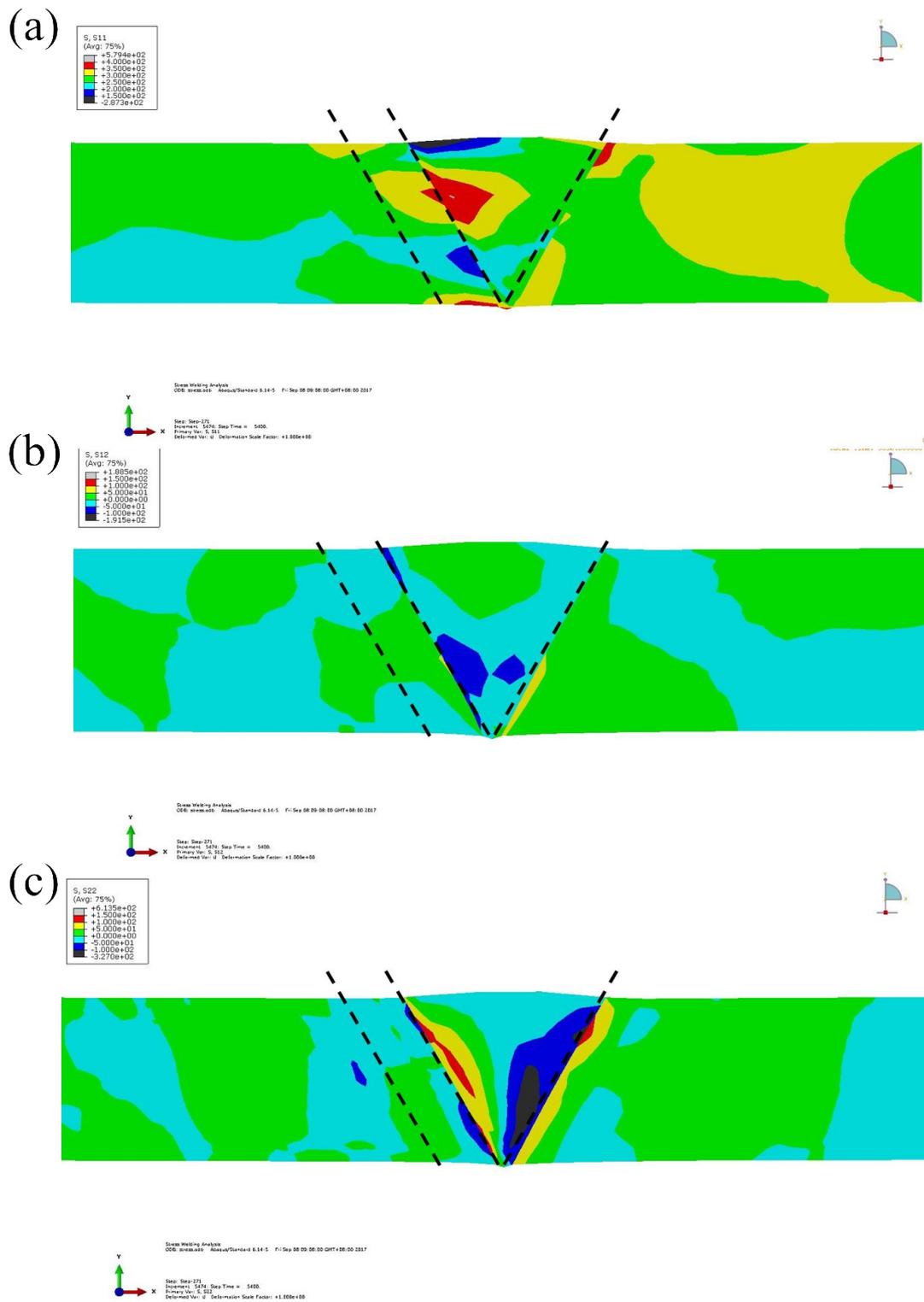


圖 3.22 銲接件距離銲道尾端 65 mm 處截面之(a) S<sub>11</sub>、(b) S<sub>12</sub>、(c) S<sub>22</sub> 之殘留應力場模擬值。(MPa)

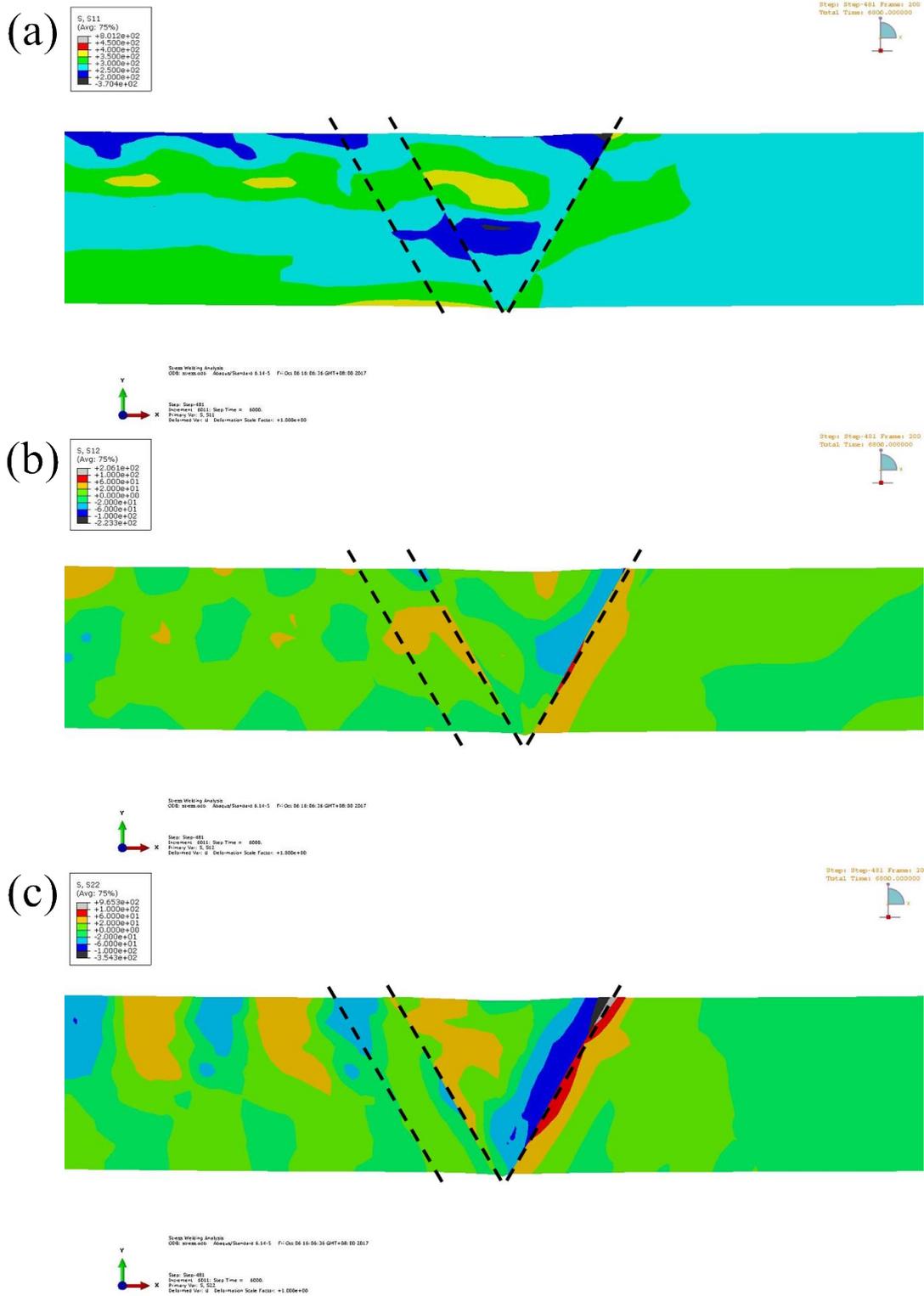


圖 3.23 覆銲件距離銲道尾端 65 mm 處截面之(a) S11、(b) S12、(c) S22 之殘留應力場模擬值。(MPa)

### 3.4 異質銲接件瑕疵之超音波檢測分析

利用陣列式超音波探頭 (PAUT) 評估異質銲接件對瑕疵訊號的接收與判讀之影響性，銲接件的人工瑕疵依照圖 2.15 及圖 2.16 之標示尺寸加工。含瑕疵之銲接件透過射線檢測確認銲道內部無其餘之施作產生瑕疵，避免混淆超音波訊號的準確性，詳細 RT 照片見附錄 B。本研究使用單晶 (compound S-scan, 橫波) 及雙晶 (P-R S-scan, 縱波) 探頭，自 A508 端與 316L 不銹鋼端皆平行銲道中心線方向線掃描，用以確認何種波式具有較高的檢出能力及準確度，相關設定如表 3.6 所列。銲接件之瑕疵種類列於表 3.7。

表 3.6 超音波探頭型號及設定參數。

探頭	楔形塊	波式/ 頻率 (MHz)	音速 (m/sec)		晶 片 量	聚焦 深度 (mm)	距離 中心線 (mm)
			A508	316L			
5L64A2	SA2N55 S	橫波/5	3240	3100	32	25	30
2.25DM7X4PM -19X12-A17	SA17- DN55L0	縱波/2.25	5900	5800	7x4	25	---

表 3.7 銲接件之瑕疵種類與設計尺寸。

加工圖	瑕疵編號	瑕疵種類	長 (mm)	寬 (mm)	高 (mm)
2.15	N/A	銲道中心線底部直刻槽 x 2	20	1	5
	SDH	側鑽孔	1/2T x $\phi$ 3-125 mm		
	IP	銲根滲透不足	15	---	2
2.16	A	銲道中心線底部 SS/銲道介面斜刻槽	20	1	4.33
	B	碳鋼端頂部銲道/ IN 182 緩衝層介面直刻槽	20	1	5
	C	銲道中心線底部直刻槽	20	1	5
	D	銲道中心線底部銲道/IN 182 緩衝層介面斜刻槽	20	1	4.33
	E	不銹鋼端頂部 SS/銲道介面直刻槽	20	1	5
	SDH	側鑽孔	1/2T x $\phi$ 3- 50 mm		

加工圖 2.15 之銲接件以 Compound 橫波由 A508 端向銲道起始方向掃描，訊號圖如圖 3.24 所示，B（側視深度，Side）及 C（平面投影，Top）掃描僅可偵測到銲道中心線底部直刻槽之訊號，且 S 掃描（截面，Sector）訊號比較低不易判讀。由 316L 端掃描時，所有人工瑕疵及 IP 皆有訊號顯示，然而側鑽孔的訊號呈現不連續顯示。另以 P-R 縱波由 A508 端及 316L 端掃描，均可判讀人工瑕疵之訊號（圖 3.25），但 IP 訊號混雜在雜訊中，推測應為 IP 位置靠近銲道邊界，P-R 探頭無法接收到其訊號所致。值得一提的是，此銲接件因未移除銲道底部特徵，使得 B、C 掃描訊號圖呈現連續紅色斑塊，將會造成訊號之誤判或遺漏瑕疵。因此後續之超音波工件須以手持砂輪機研磨銲道至平整。

加工圖 2.16 之銲接件以 Compound 橫波由 A508 端掃描，Side、Top 掃描訊號圖如圖 3.26 所示，僅可觀察到瑕疵 B、C、D 之信號顯示，各瑕疵之 Sector 訊號圖見圖 3.27 至圖 3.29。改由 316L 端掃描時，除了瑕疵 B 未偵測到訊號外（圖 3.30），其餘皆有較明顯之 Sector 訊號回波（圖 3.31 至 3.35）。透過降 6 dB 方法，檢測各瑕疵之量測高度，如表 3.8 所列。以 P-R 縱波進行檢測之結果，如圖 3.36 至圖 3.39。A508 端及 316L 端之可辨別的瑕疵，皆僅有銲道根部刻槽的 A、C、D，以及銲道中心的 SDH，同樣利用降 6 dB 方法，計算檢出瑕疵的尺寸，列於表 3.8。

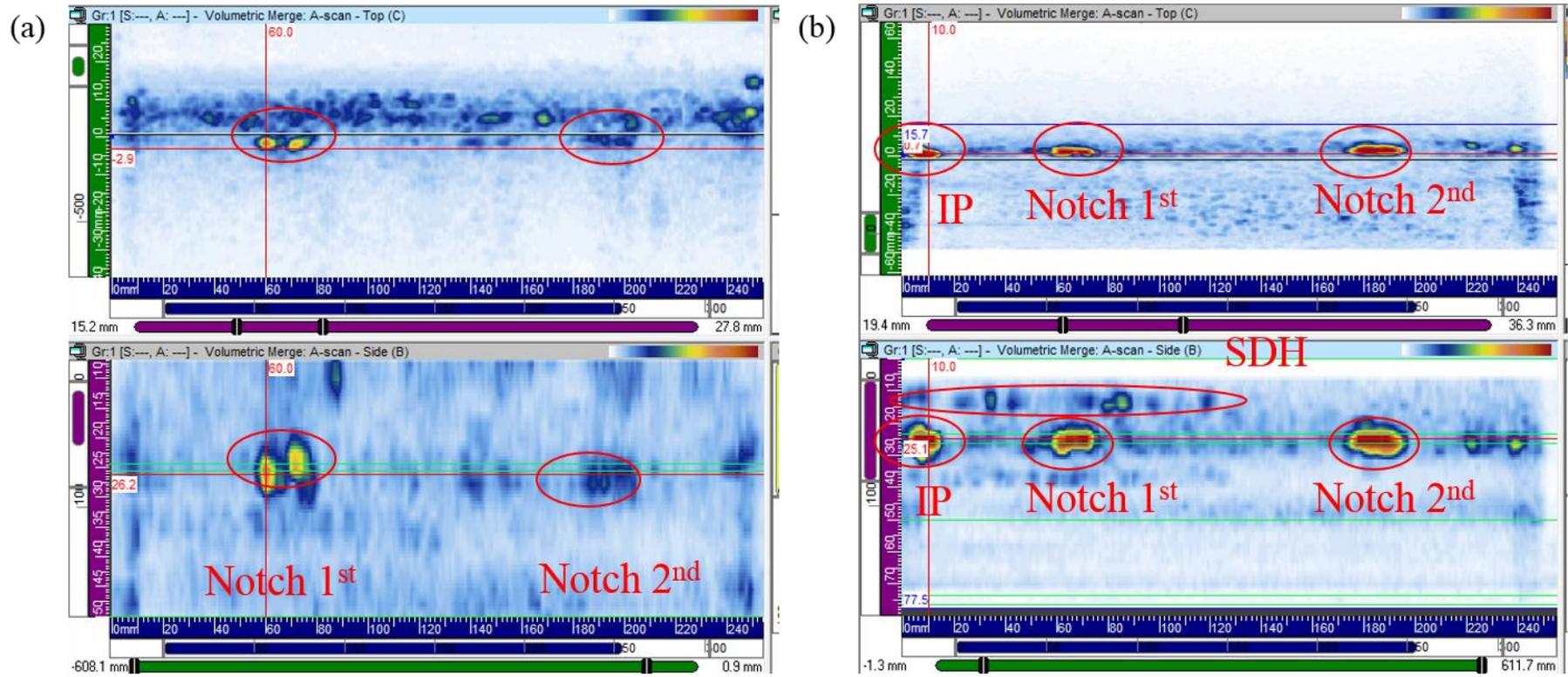


圖 3.24 加工圖 2.15 之銲接件以 Compound 橫波由(a) A508 端、(b) 316L 端掃描之 Side 及 Top 訊號圖。

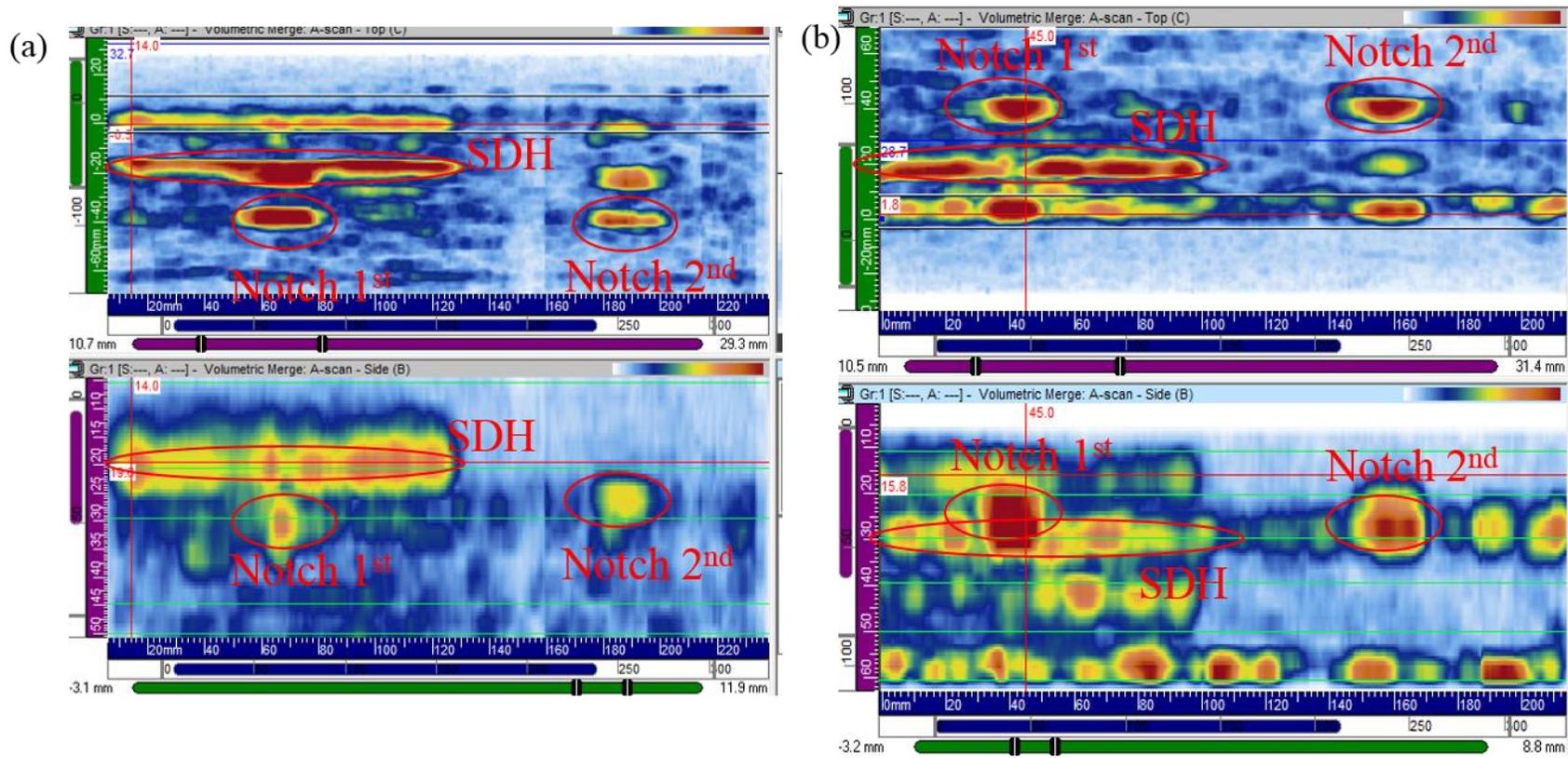


圖 3.25 加工圖 2.15 之銲接件以 P-R 縱波由(a) A508 端、(b) 316L 端掃描之 Side 及 Top 訊號圖。

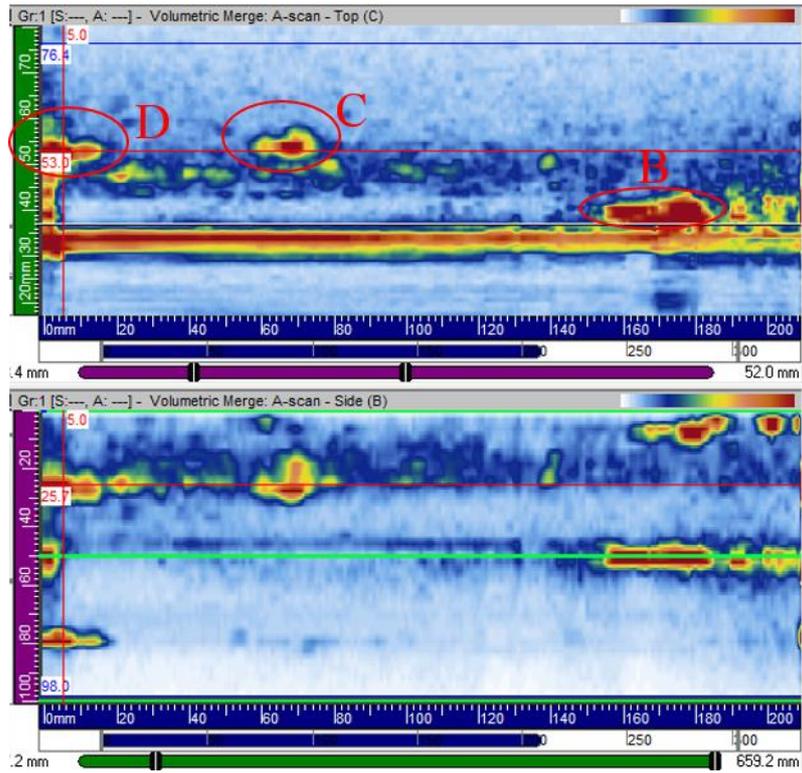


圖 3.26 加工圖 2.16 之銲接件以 Compound 橫波由 A508 端掃描之 Side 及 Top 訊號圖。

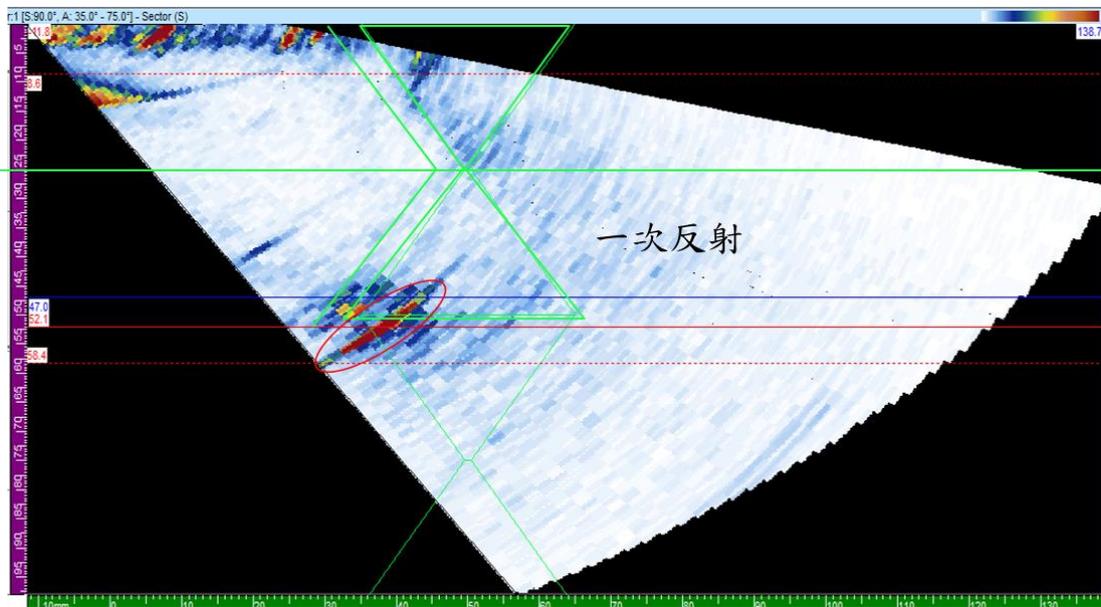


圖 3.27 在圖 3.26 中之 B 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。

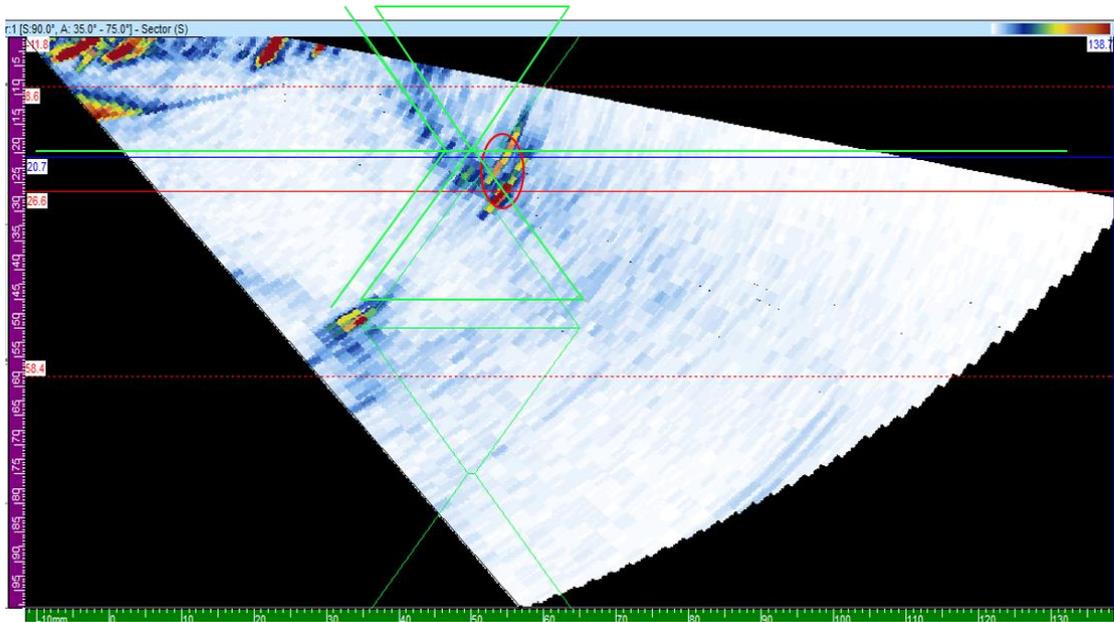


圖 3.28 在圖 3.26 中之 C 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。

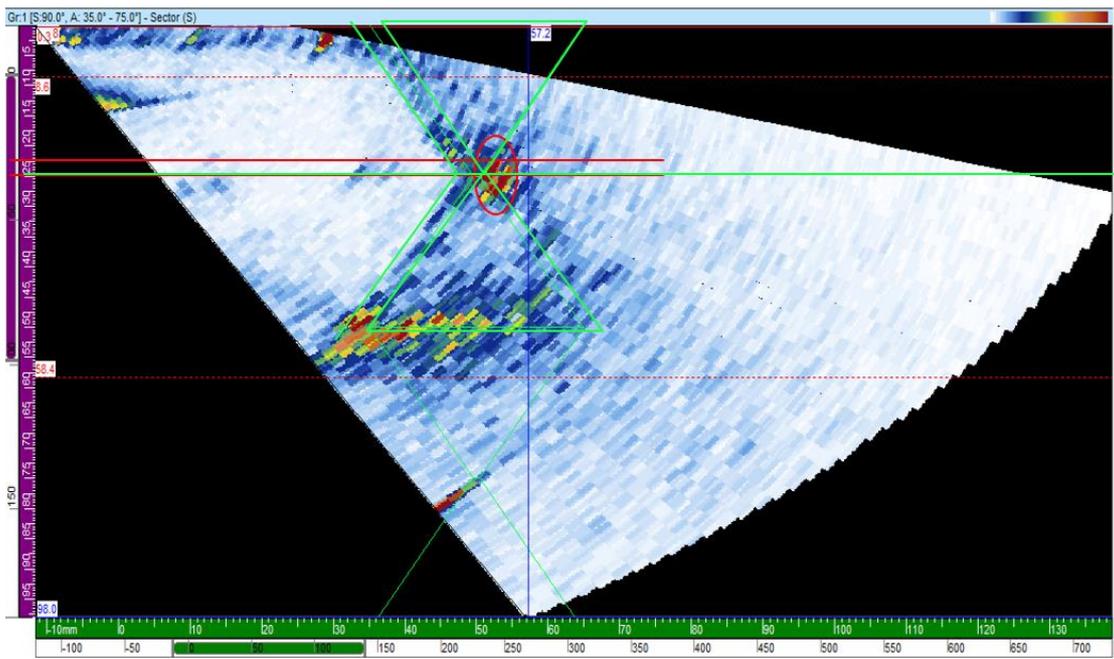


圖 3.29 在圖 3.26 中之 D 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。

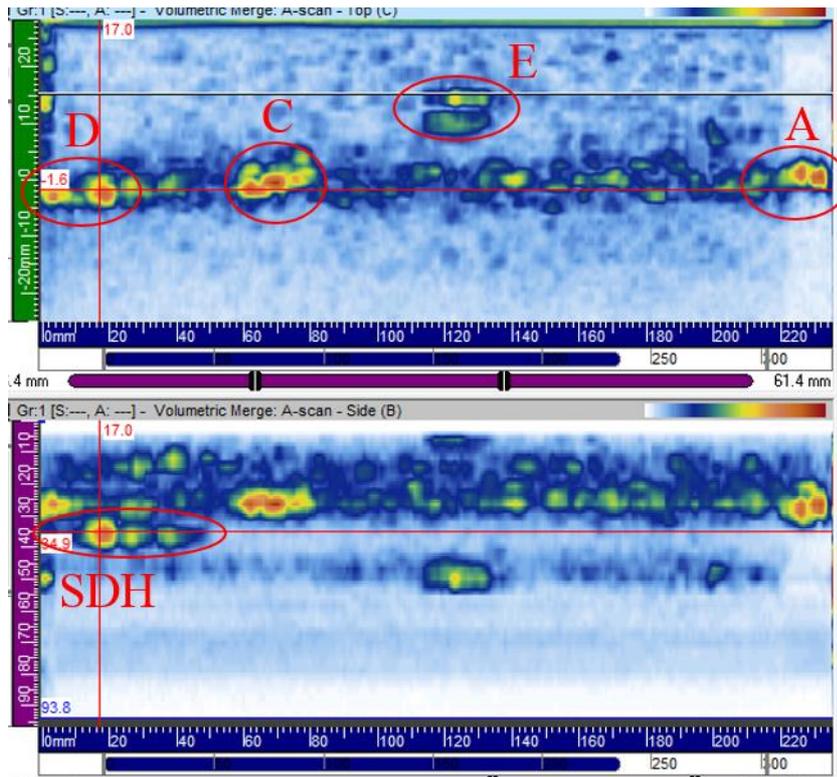


圖 3.30 加工圖 2.16 之銲接件以 Compound 橫波由 316L 端掃描之 Side 及 Top 訊號圖。

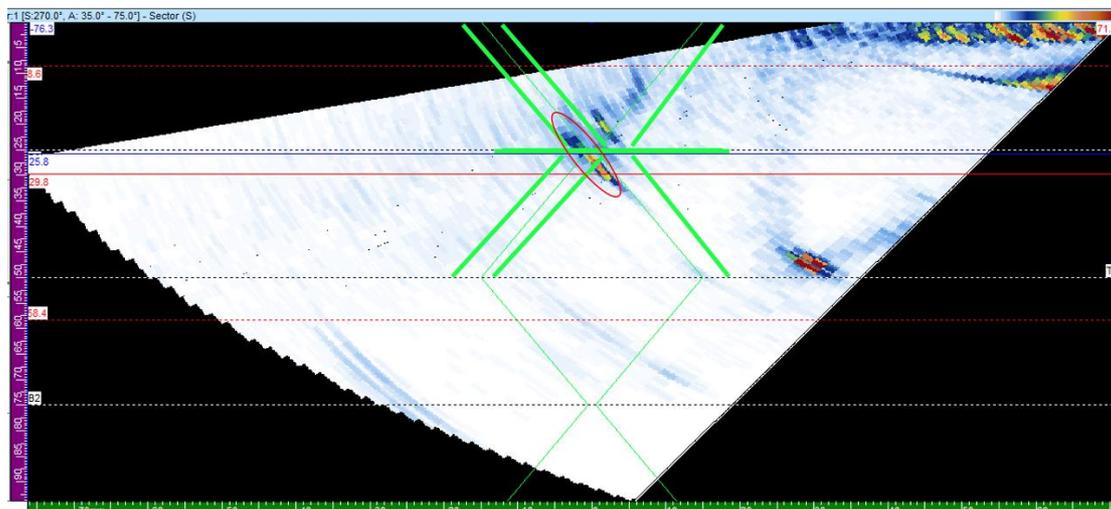


圖 3.31 在圖 3.30 中之 A 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。

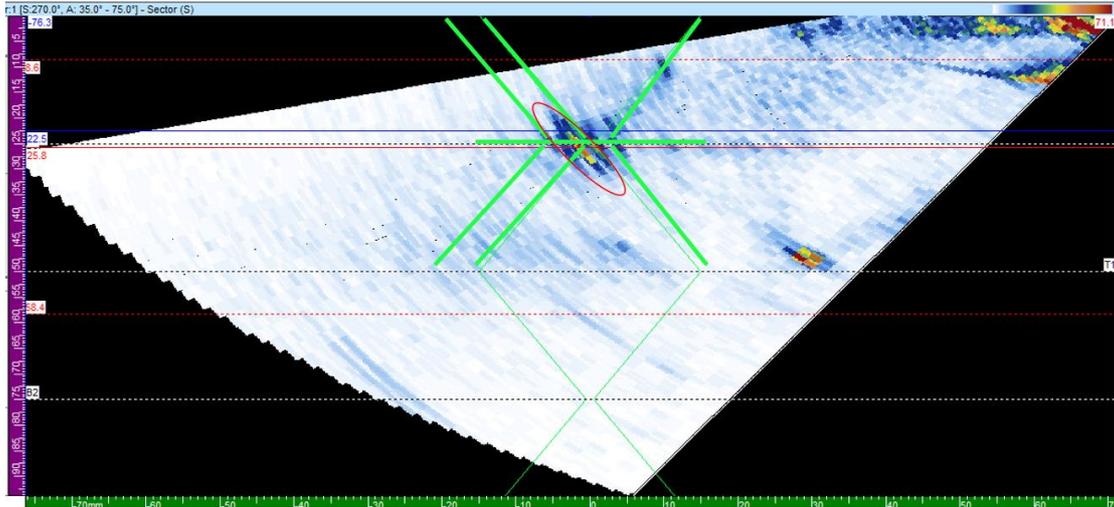


圖 3.32 在圖 3.30 中之 C 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。

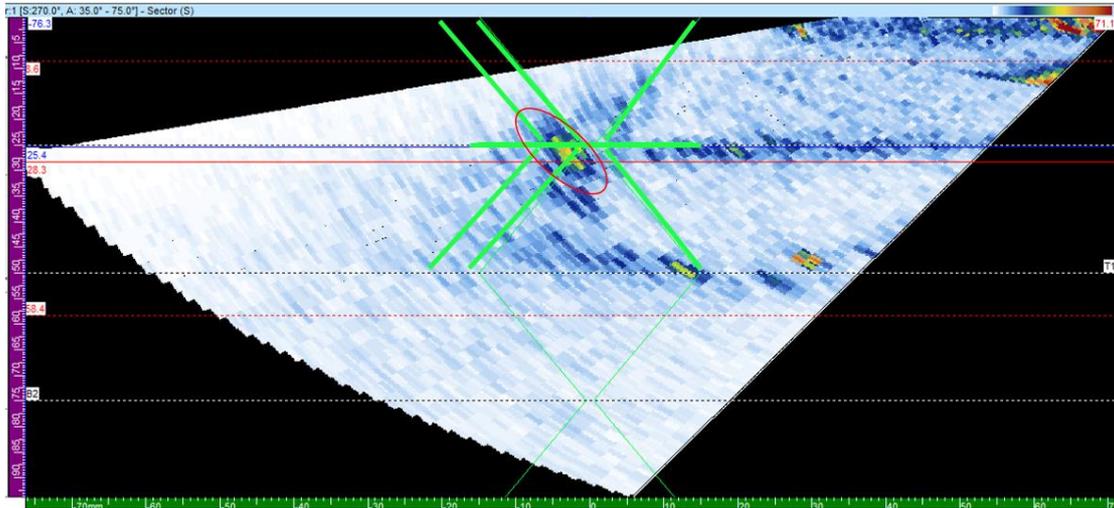


圖 3.33 在圖 3.30 中之 D 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。

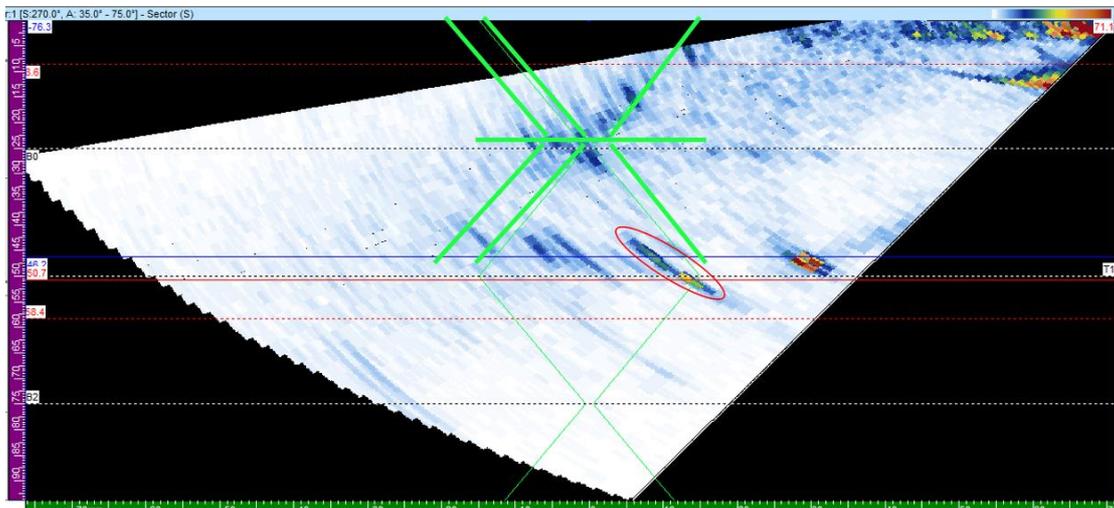


圖 3.34 在圖 3.30 中之 E 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。

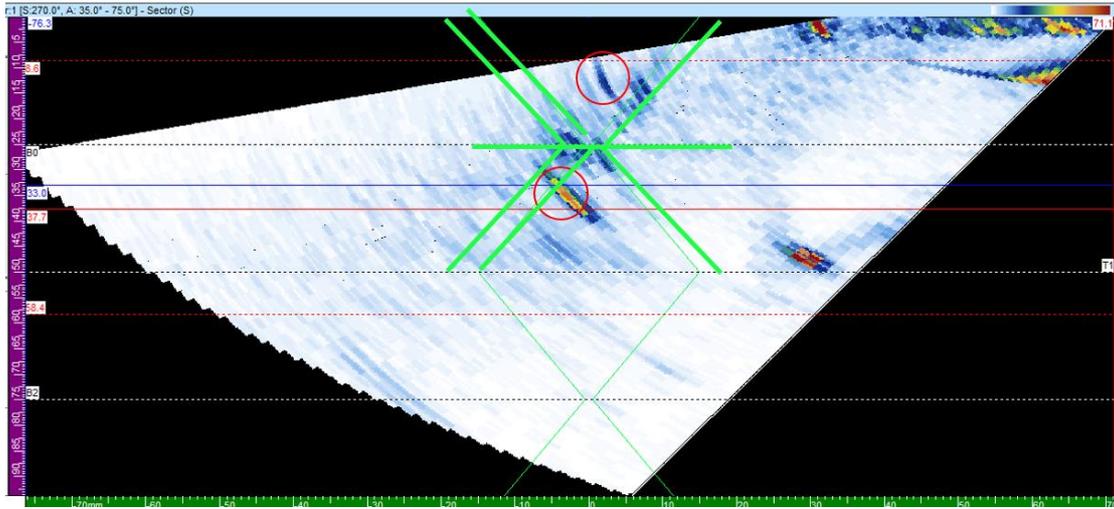


圖 3.35 在圖 3.30 中之 SDH 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。

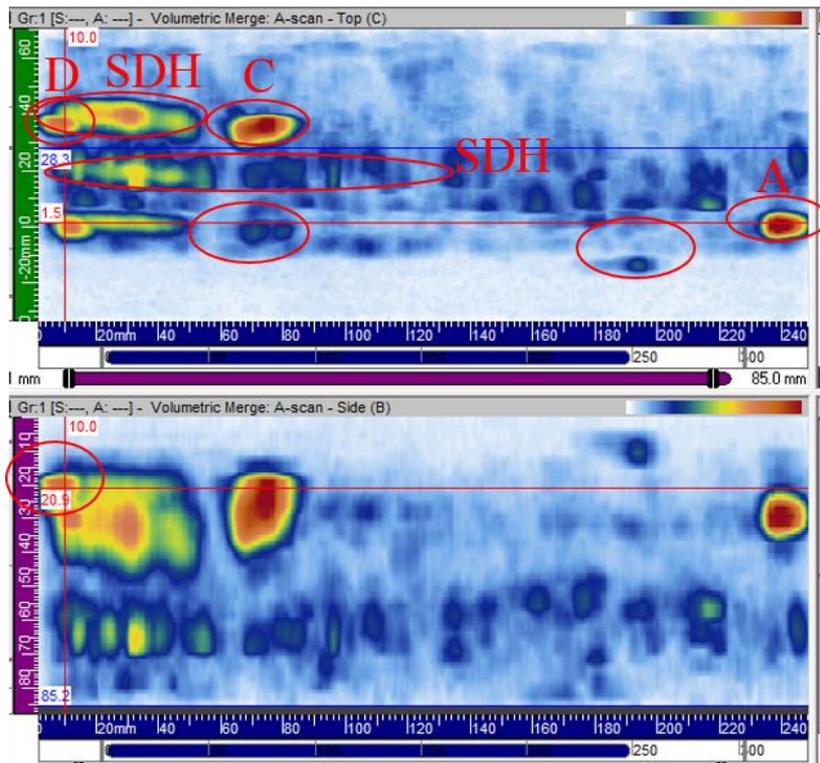


圖 3.36 加工圖 2.16 之銲接件以 P-R 縱波由 A508 端掃描之 Side 及 Top 訊號圖。

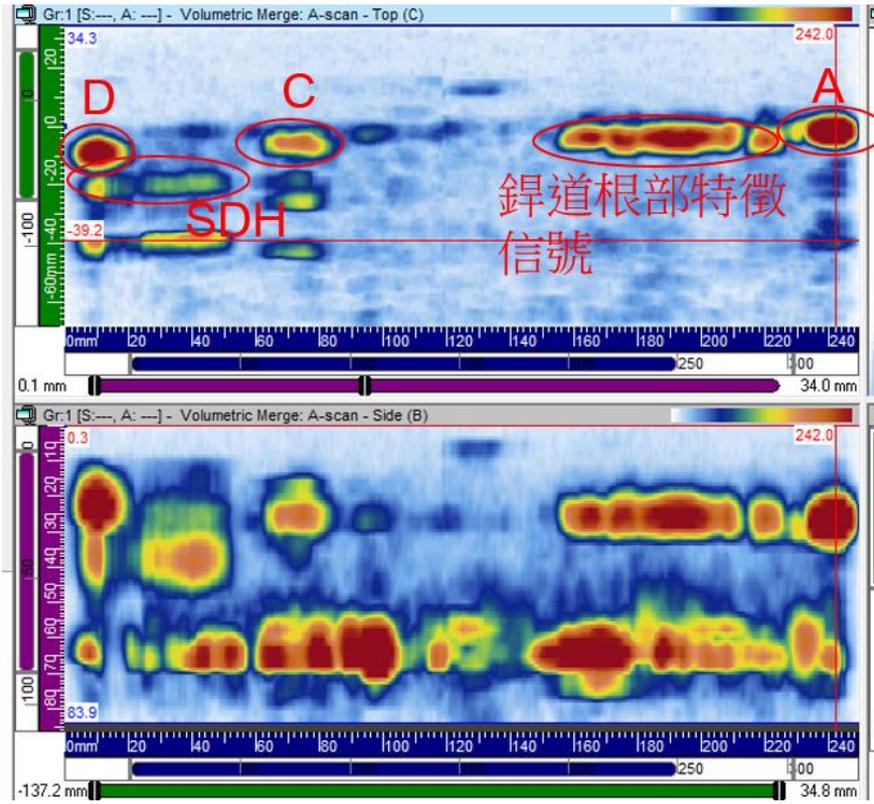


圖 3 37 加工圖 2.16 之銲接件以 P-R 縱波由 316L 端掃描之 Side 及 Top 訊號圖。

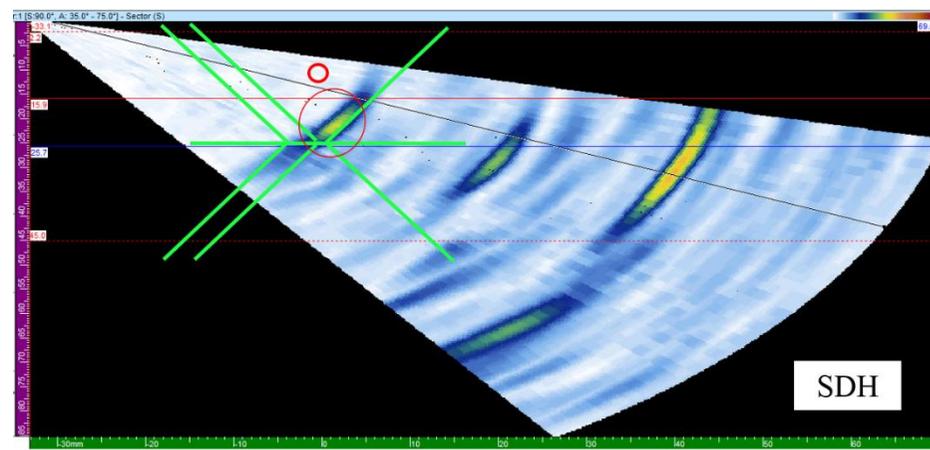
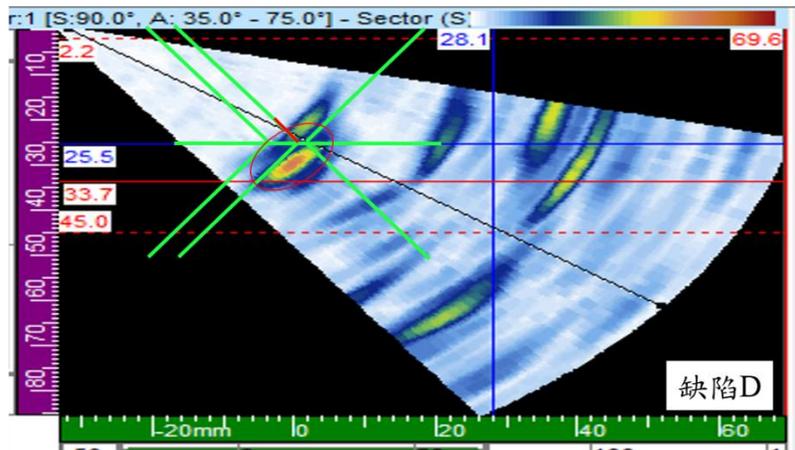
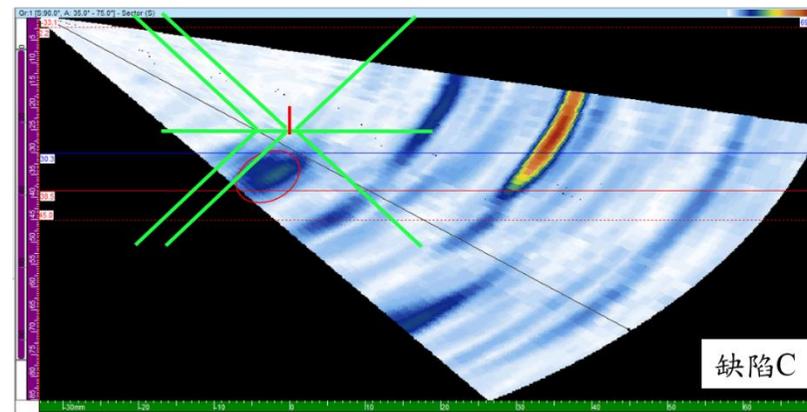
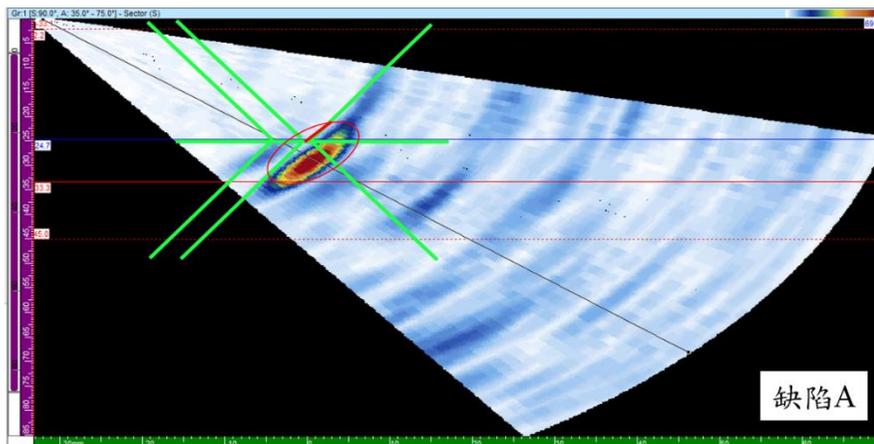


圖 3.38 在圖 3.36 中之瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。

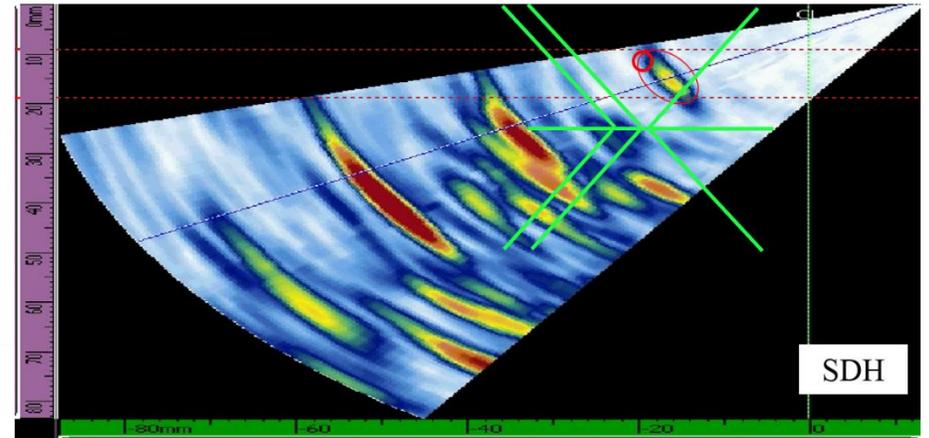
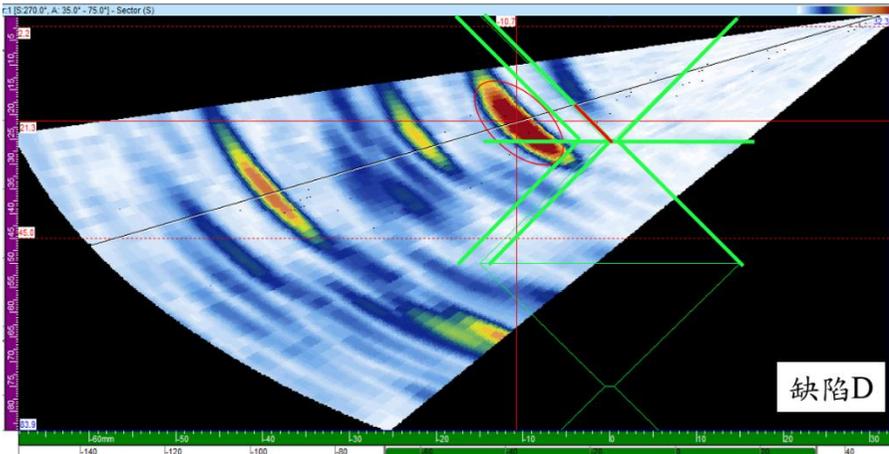
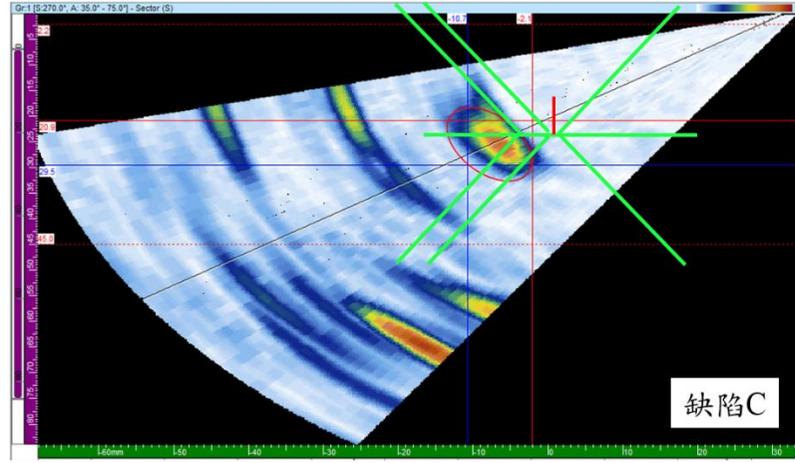
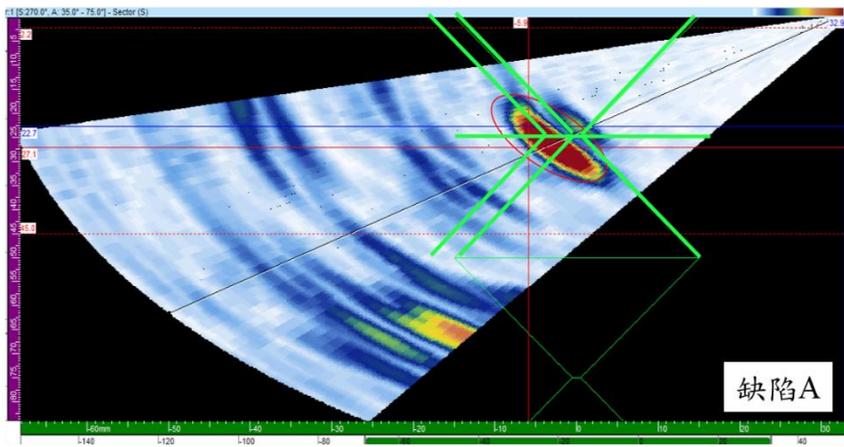


圖 3.39 在圖 3.37 中之瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。

表 3.8 檢出瑕疵的高度。

探頭 \ 瑕疵	編號 (設計高度 mm)					
	A (4.33)	B (5)	C (5)	D (4.33)	E (5)	SDH (3)
橫波 (A508 端)	N/A	4.9	5.9	2.4	N/A	N/A
橫波 (316L 端)	4	N/A	3.3	2.9	4.5	4.7
縱波 (A508 端)	8.6	N/A	8.2	8.2	N/A	9.8
縱波 (316L 端)	11.3	N/A	8.6	10.5	N/A	10.5

由 PAUT 之檢測結果而論，單晶陣列探頭/橫波較不適合用於檢測異質銲接件之內部瑕疵，以降 6 dB 方法之計算值略低於瑕疵設計高度。相較之下，雙晶陣列探頭/縱波對於 A508 端及 316L 端掃描訊號皆具有較佳的訊雜比，同時可以量測到銲道內部之側鑽孔及銲道底部之刻槽，測量高度也偏向望大值。A508 低合金鋼端之訊號，受到銲道組織、銲道介面，以及緩衝層介面之影響，容易產生較大的衰減，造成 PAUT 僅能量測到較不明顯之訊號圖。316L 不銹鋼端與銲道間僅有 1 個異質介面，使其獲得之訊號圖較為清晰，因此由不銹鋼端量測銲道瑕疵將會有較高之檢出能力。

### 3.5 覆層銲接處理對超音波瑕疵檢出能力之影響

加工圖 2.16 銲接件經覆層銲接處理，製作 4 層 IN 52M 覆銲層，再透過研磨拋光加工，去除覆銲層表面之銲道特徵（厚度剩約 5 mm），覆銲件外觀如圖 3.40 所示。本節實驗使用 P-R S-scan 之雙晶縱波探頭，設定參數見表 3.6。

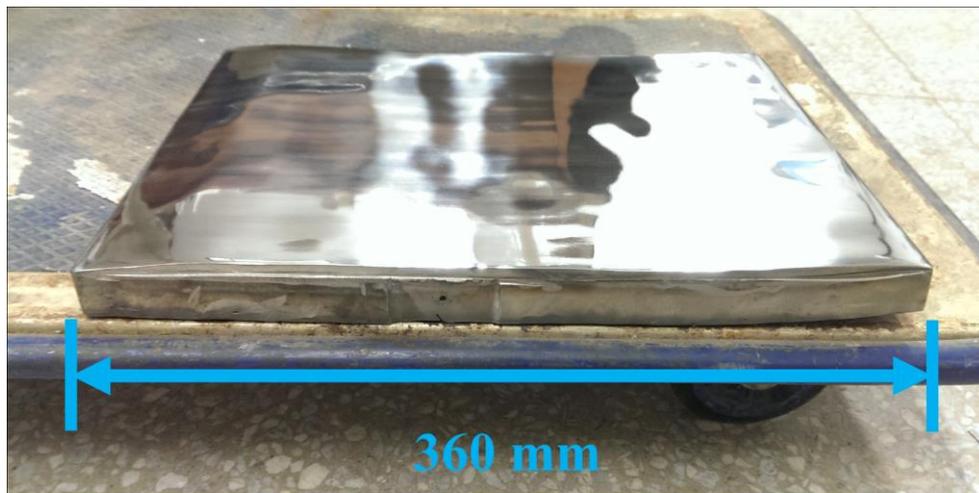


圖 3.40 加工圖 2.16 銲接件經覆層銲接處理之外觀照。

為確認覆層銲接處理施作完成後，IN 52M 覆銲層與底材之接合性，以及訊號衰減程度，使用 2.25 MHz x 9.5 mm 探頭進行衰減測試。覆銲件之區域劃分如圖 3.41 所示，檢測結果如表 3.9。



圖 3.41 覆銲件之區域劃分之外觀照。

表 3.9 覆鋁層件之結合性與訊號衰減狀況。

	測點	DB	A%	SA	Bn%	SB	回波數 n	(A%-B%)dB	dB/mm	Remark
CS	1	30.9	82.2	29.95	11.0	51.81	1	17.47	0.399579	變形傾斜
	2	29.7	79.1	29.83	12.1	57.72	1	16.31	0.29236	
	3	29.7	80.2	30.39	11.0	58.63	1	17.26	0.305518	
	4	29.7	80.2	30.01	10.6	57.81	1	17.58	0.31614	
	5	30.7	81.4	32.34	3.1	151.61	4	28.39	0.118996	平均衰減 0.1098
	6	26.6	79.5	32.34	5.9	152.85	4	22.59	0.093728	
	7	28.0	82.2	32.54	4.7	153.41	4	24.86	0.102819	
	8	26.7	81.8	32.4	2.7	152.26	4	29.63	0.123593	
HAZ CS	1	26.6	80.6	32.28	6.3	122.36	3	22.14	0.12289	平均衰減 0.11429
	2	26.0	80.2	32.48	8.2	122.95	3	19.81	0.109468	
	3	26.1	80.2	32.42	6.7	123.16	3	21.56	0.118812	
	4	26.3	79.5	32.42	8.6	123.54	3	19.32	0.106	
Weld	1	42.7	81.4	32.6	12.1	62.7	1	16.56	0.27503	平均衰減 0.25452
	2	53.1	83.0	32.9	15.3	61.82	1	14.69	0.253937	
	3	50.1	82.2	32.45	15.7	62.32	1	14.38	0.2407	
	4	50.1	79.5	32.42	14.5	62.17	1	14.78	0.248403	
HAZ SS	1	28.1	81.0	33.04	3.9	125.04	3	26.35	0.143198	平均衰減 0.14219
	2	27.5	80.2	33.34	2.7	126.9	3	29.46	0.157419	
	3	27.5	79.5	33.16	5.5	125.78	3	23.20	0.125243	
	4	26.6	81.0	33.04	3.9	125.22	3	26.35	0.142918	
SS	1	26.6	80.2	33.04	4.7	159.38	4	24.64	0.097521	平均衰減 0.10369
	2	27.5	81.0	33.69	2.7	161.36	4	29.54	0.115698	
	3	30.3	80.2	33.72	2.7	159.50	4	29.46	0.117094	
	4	29.4	81.8	33.43	3.5	158.56	4	27.37	0.109381	
	5	29.4	79.8	33.16	4.3	156.7	4	25.37	0.102682	
	6	31.4	81.8	33.84	7.0	160.33	4	21.35	0.084406	
	7	29.9	80.6	33.54	5.5	158.21	4	23.32	0.093525	
	8	26.4	82.2	33.51	3.5	159.0	4	27.42	0.109236	
CS			79.8	27.04	4.7	151.37	5	24.6	0.098923	0.09892
SUS			79.8	28.01	4.7	151.2	5	24.6	0.095201	0.09520

檢測結果顯示，覆層層未有接合不良或是瑕疵的生成，覆鋅層僅較原始材料衰減率略高 0.008 dB/mm。各區域中，鋅道區有最嚴重之衰減。熱影響區衰減率較底材高約 0.04 dB/mm，316L 端與 A508 端之衰減率則是幾乎無差異。

以 P-R 縱波由 A508 端掃描，Side 及 Top 訊號圖如圖 3.42 所示，除了原先已可檢出之瑕疵 A、C、D 及 SDH，由於覆鋅層提供傳導介面，瑕疵 B 也顯示在訊號圖上，各瑕疵之 Sector 如圖 3.43 至 3.47 所示。同理，316L 端也可檢出瑕疵 E 之訊號，Side、Top、Sector 訊號圖如圖 3.48 至 3.53 所示。在厚度 5 mm 覆鋅層施作後，PAUT 之檢測值未有太大之差異，然降 6 dB 之計算方法造成評估皆望大值。若在檢測時觀察到刻槽之訊號產生尖端繞射現象，則可使用尖端繞射法評估瑕疵高度，得將誤差值降低至 2 mm 左右。瑕疵檢測高度值如表 3.10 所列。

另一方面，為了解 3.5 節內所提出之異質介面對檢出訊號的影響性，使用 Compound 橫波針對覆鋅件進行掃描，掃描結果如圖 3.54 及 3.55 中所見，瑕疵訊號被雜訊遮蓋，造成無法判斷瑕疵之正確位置與評估高度。顯示 5 mm 厚之 IN 52M 覆鋅層足以使得訊雜比下降至無法判讀的狀態，同時說明當 A508 端掃描時，Compound 橫波及 P-R 縱波的檢出能力皆較 316L 端弱之原因。

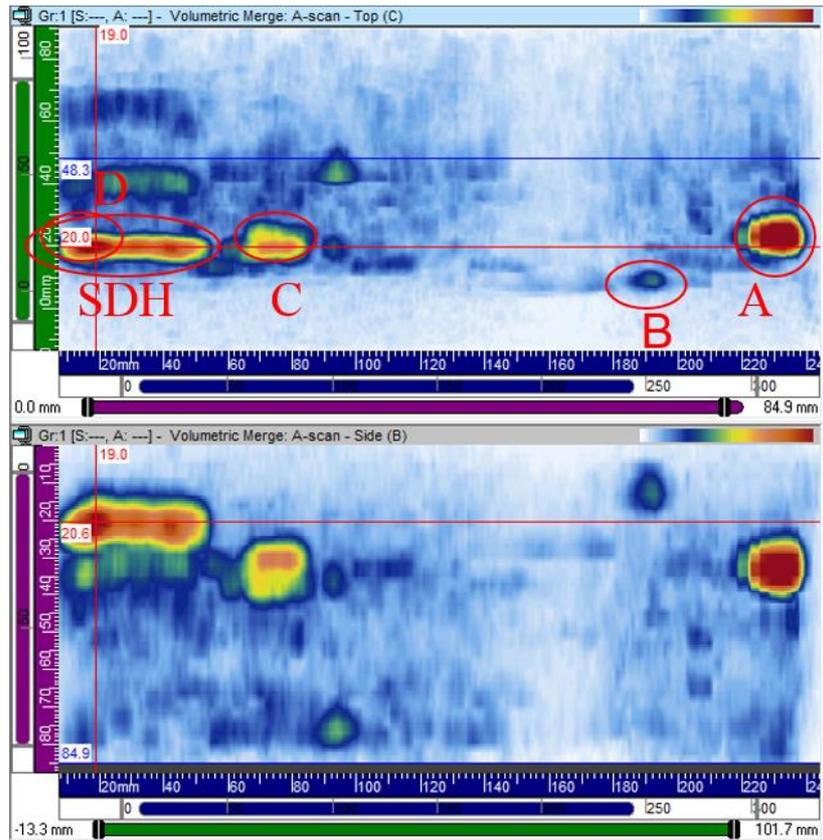


圖 3.42 覆銲件以 P-R 縱波由 A508 端掃描之 Side 及 Top 訊號圖。

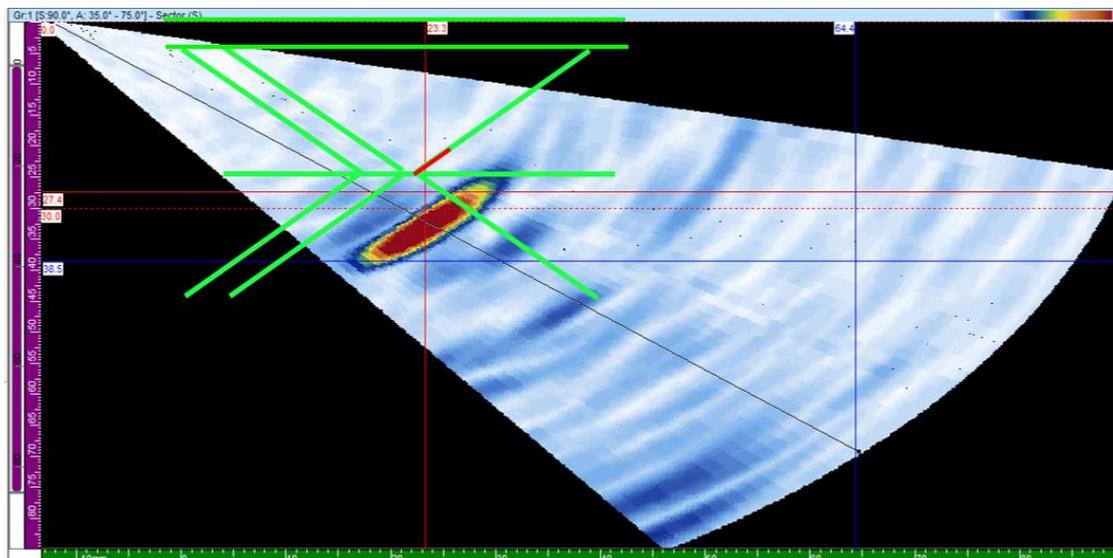


圖 3.43 在圖 3.42 中之 A 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。

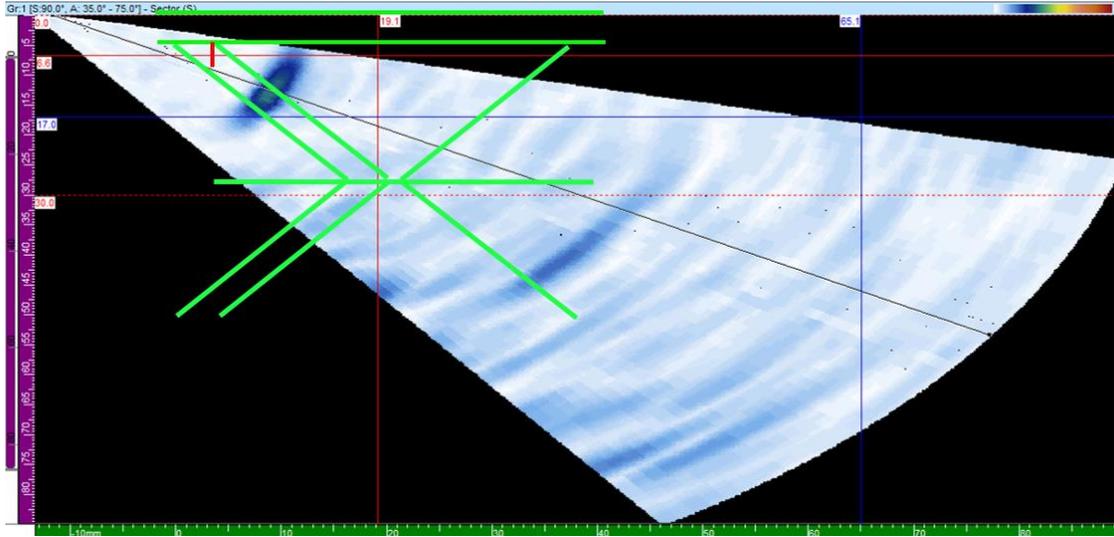


圖 3.44 在圖 3.42 中之 B 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。

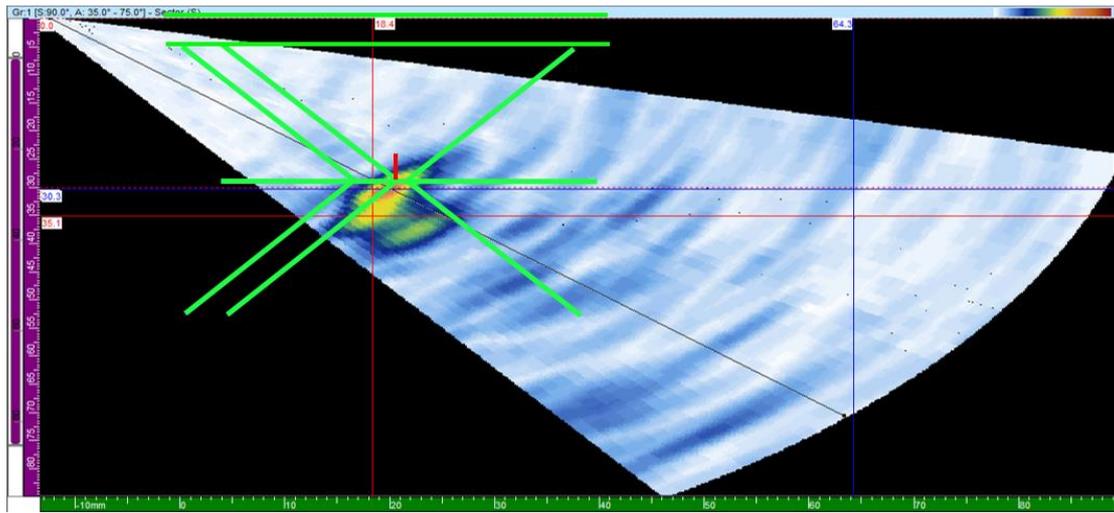


圖 3.45 在圖 3.42 中之 C 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。

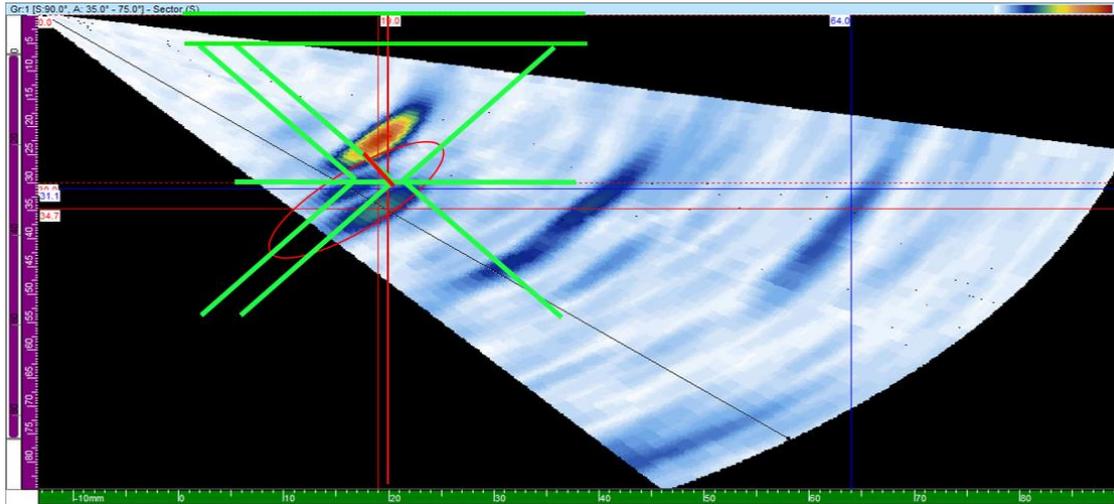


圖 3.46 在圖 3.42 中之 D 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。

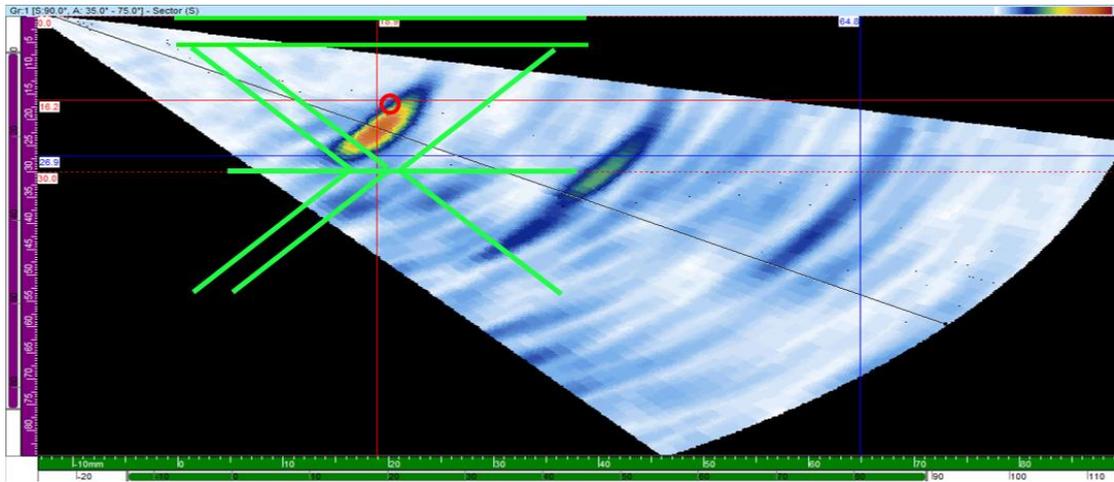


圖 3.47 在圖 3.42 中之 SDH 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。

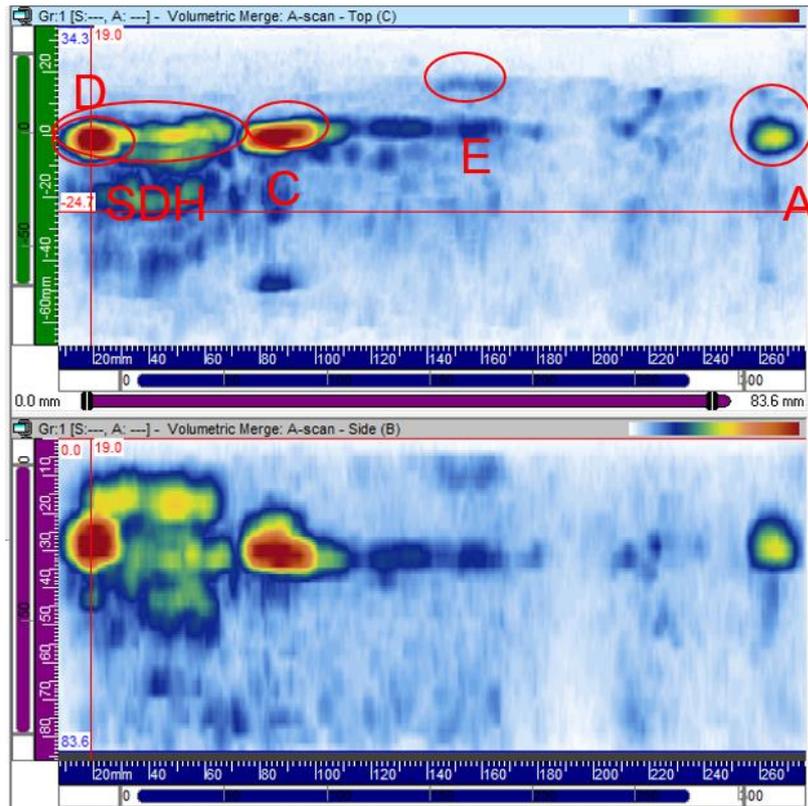


圖 3.48 覆鋅件以 P-R 縱波由 316L 端掃描之 Side 及 Top 訊號圖。

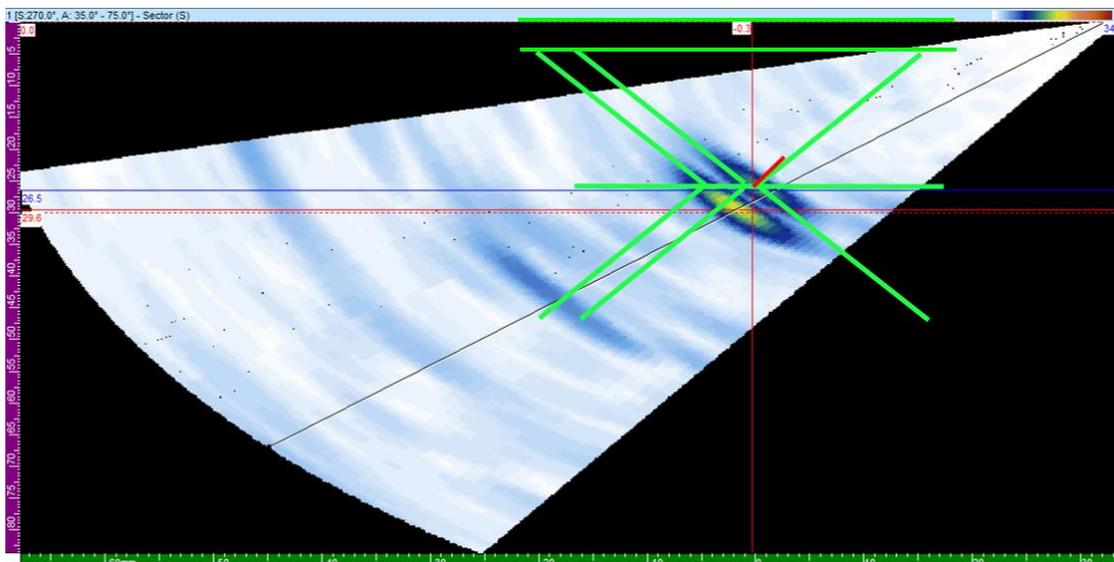


圖 3.49 在圖 3.48 中之 A 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。

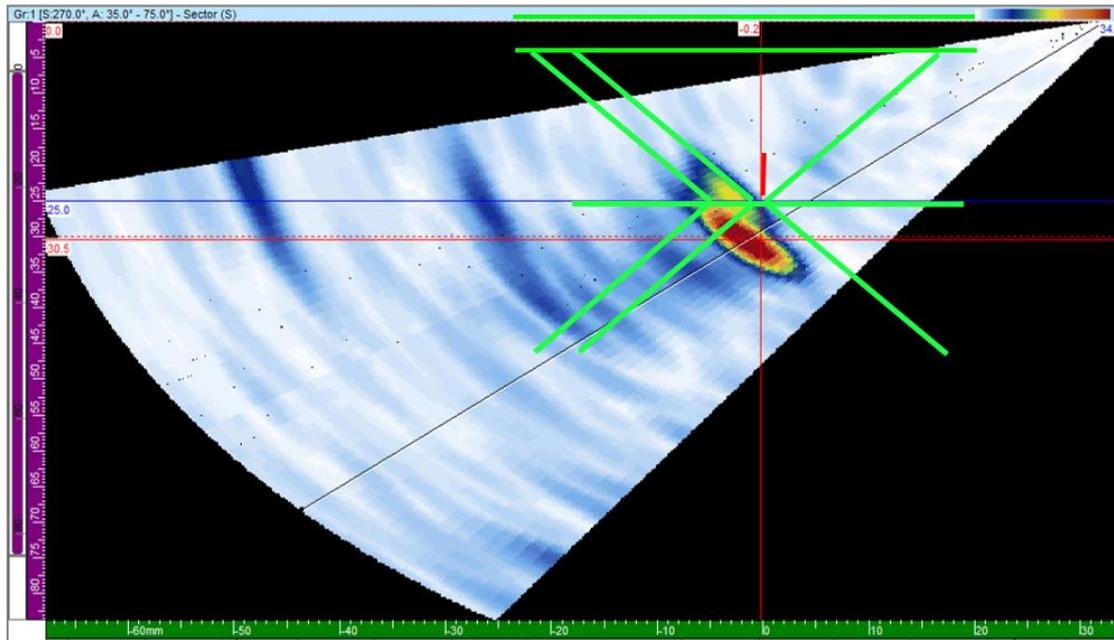


圖 3.50 在圖 3.48 中之 C 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。

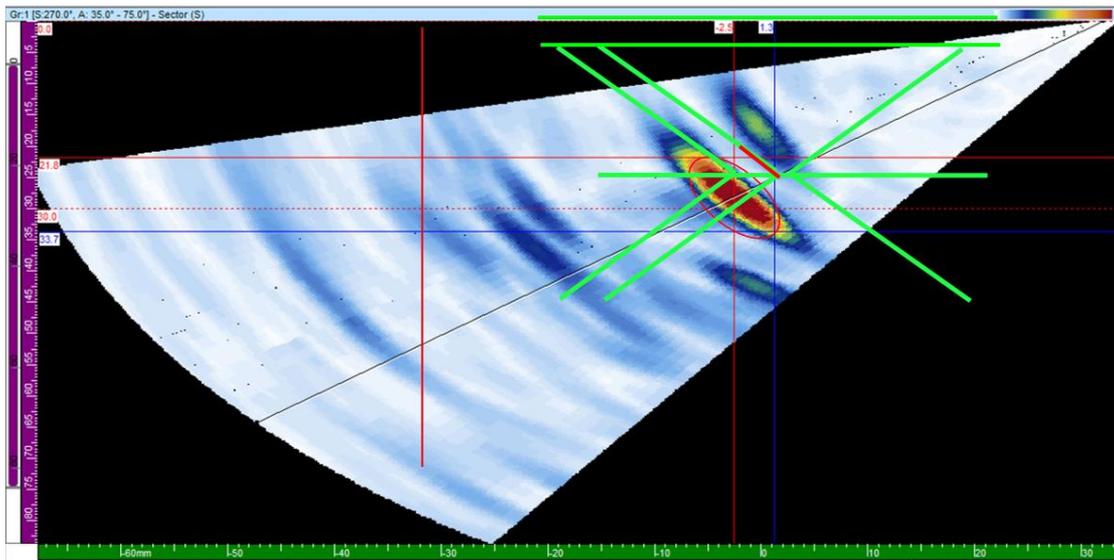


圖 3.51 在圖 3.48 中之 D 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。

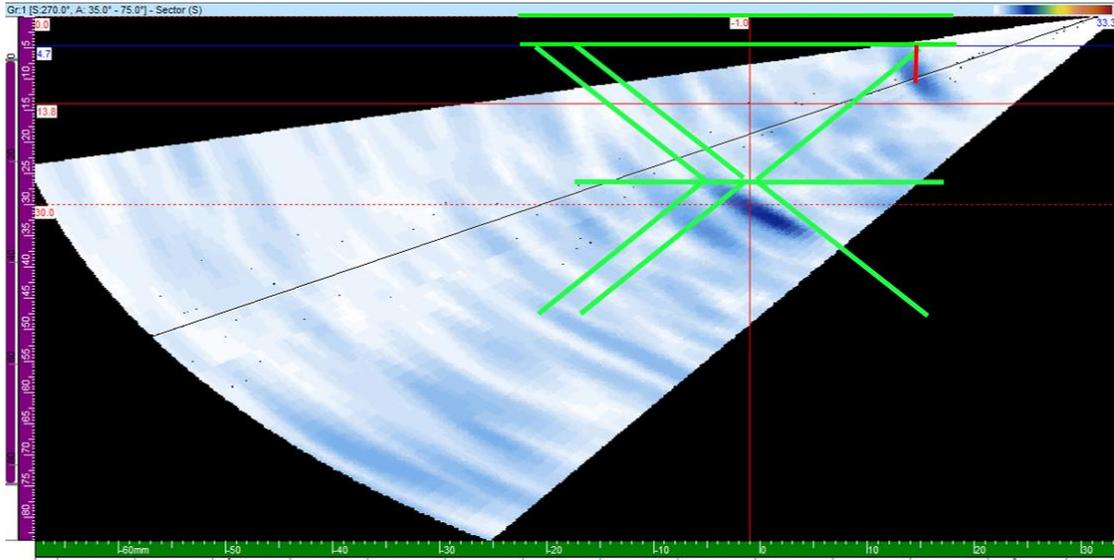


圖 3.52 在圖 3.48 中之 E 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。

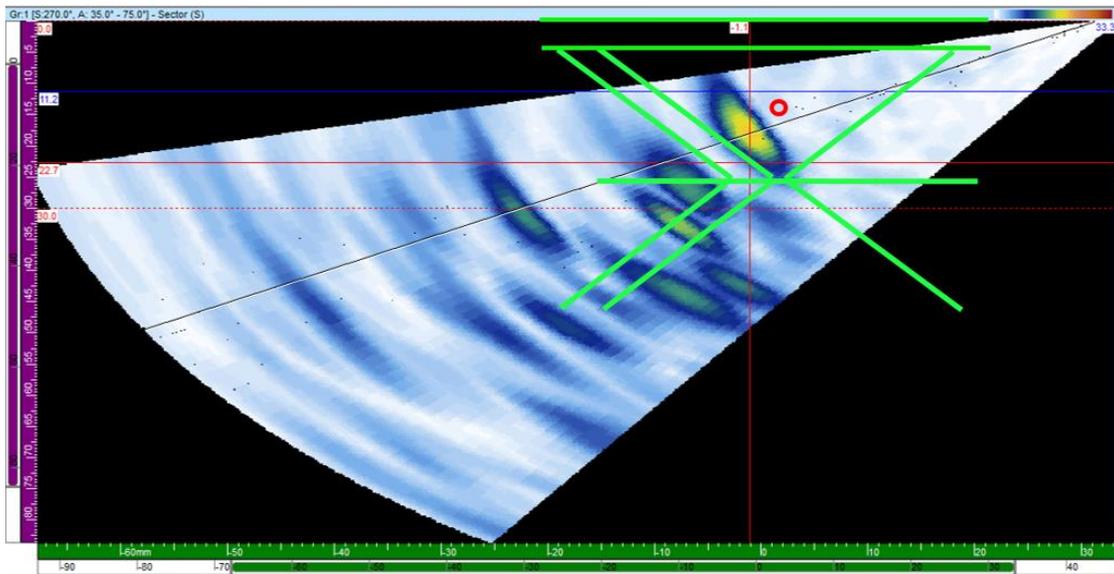


圖 3.53 在圖 3.48 中之 SDH 瑕疵的 Sector 掃描訊號圖。

表 3.10 檢出瑕疵之高度。(粗斜體為尖端繞射法計算)

瑕疵 P-R 縱波	編號 (設計高度 mm)					
	A (4.33)	B (5)	C (5)	D (4.33)	E (5)	SDH (3)
銲接件 (A508 端)	8.6	N/A	8.2	8.2	N/A	9.8
銲接件 (316L 端)	11.3 <b>3.8</b>	N/A	8.6 <b>3.3</b>	10.5	N/A	10.5
覆銲件 (A508 端)	11.1	10.4	7.6 <b>4.8</b>	7.4 <b>3.6</b>	N/A	10.7
覆銲件 (316L 端)	8.9 <b>3.1</b>	N/A	8.4 <b>5.5</b>	11.9 <b>3.8</b>	11.1	11.5

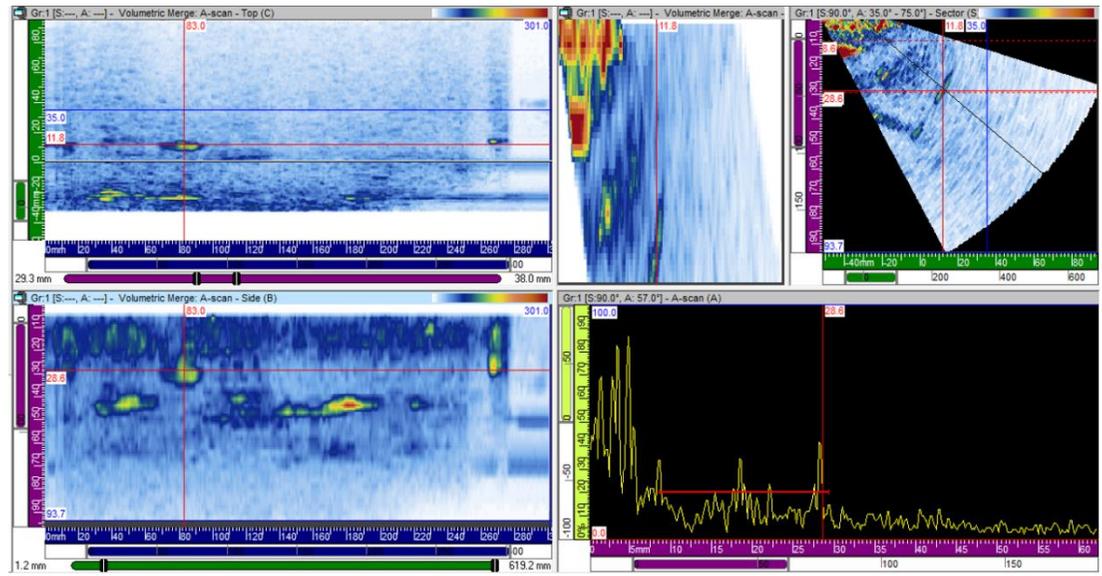


圖 3.54 覆鋁件以 Compound 橫波由 A508 端掃描之 Side、Top、Sector 及 A scan 訊號圖。

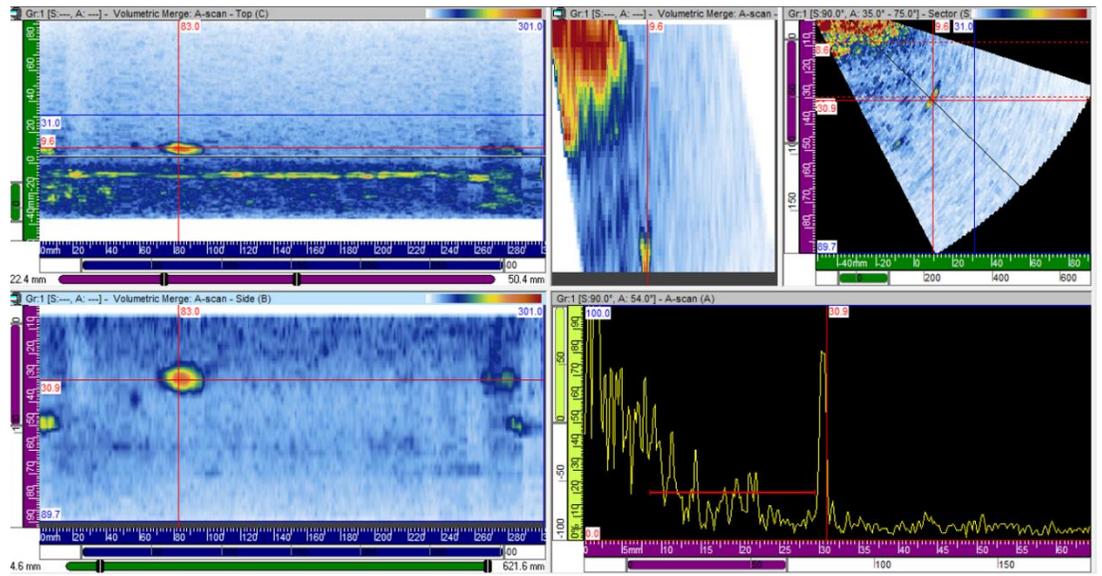


圖 3.55 覆鋁件以 Compound 橫波由 316L 端掃描之 Side、Top、Sector 及 A scan 訊號圖。

### 3.6 耐蝕能力測試

本節著重於 316LSS 與 IN 182 填料經由覆層銲接處理後之電化學性質量測，以及 SEI 表面形貌觀察。利用 3.5 wt.% NaCl 水溶液做為試驗液體，評估材料受到銲接處理之入熱量及殘留應力場變化，其耐蝕能力受影響程度。動電位極化曲線如圖 3.56 及圖 3.57 所示，316L SS 受到覆銲層施作之入熱量影響，其腐蝕電位隨著施作工序增加而下降之趨勢。經電化學實驗之試片表面，如圖 3.58 所示，析出物之晶粒尺寸及散佈面積增加將造成底材金屬生成較嚴重的敏感性。IN 182 銲道為雜亂的柱狀晶組織，其極化曲線沒有顯示規律的平移方向。覆層銲接處理之入熱影響僅有可能造成晶粒間的低熔點共晶產物繼續析出成長，然而在 SEI 影像中並未觀察到此一現象。柱狀枝晶間之晶界仍是首先受到侵蝕之部位，不同試片間的差異性並不顯著，推測殘留應力在切取試片時即已透過形變釋放，因此對電化學量測之影響性遠小於銲接入熱量造成之敏化現象。

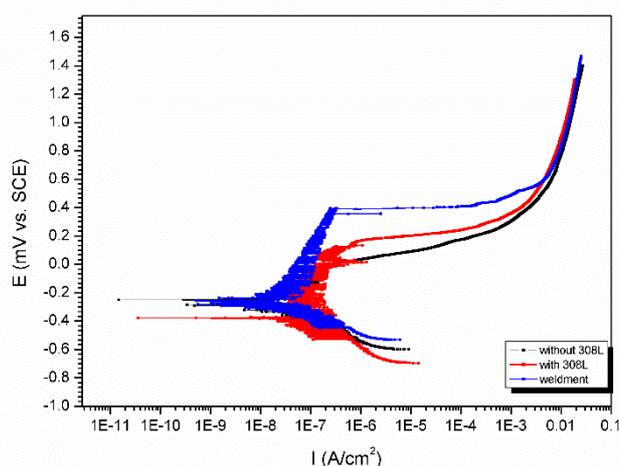


圖 3.56 銲接件、覆銲件、308L 緩衝層/覆銲件之 316LSS 底材在 3.5 wt.% NaCl 水溶液環境下之極化曲線。

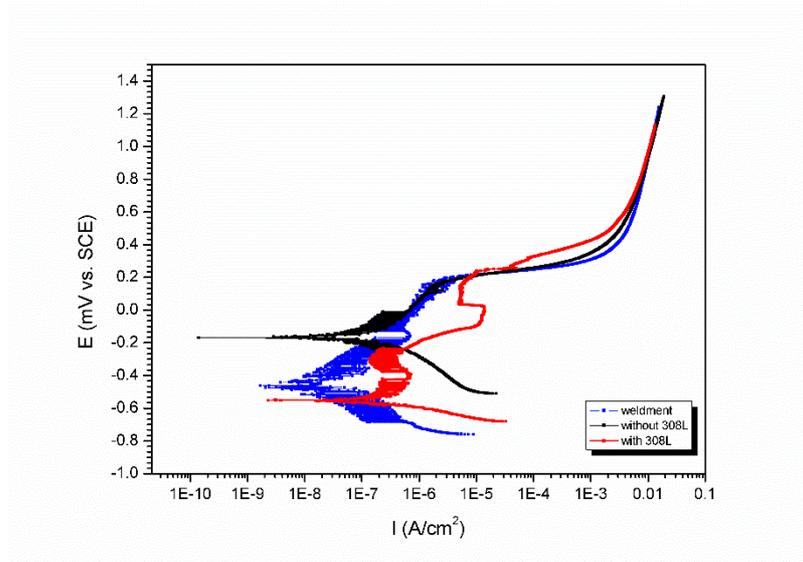


圖 3.57 銲接件、覆銲件、308L 緩衝層/覆銲件之 IN 182 銲道在 3.5 wt.% NaCl 水溶液環境下之極化曲線。

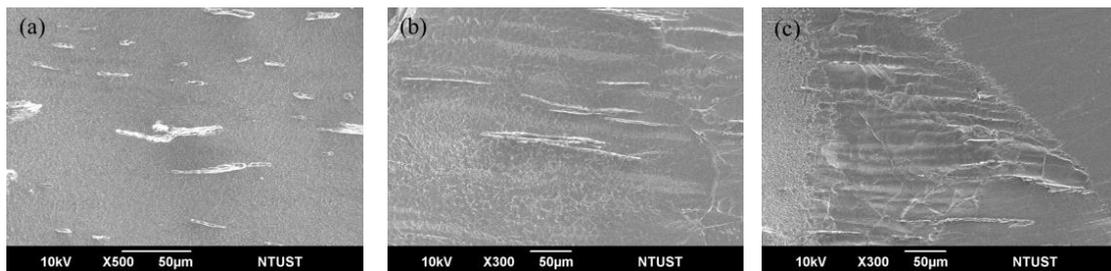


圖 3.58 (a) 銲接件、(b) 覆銲件、(c) 308L 緩衝層/覆銲件之 316L SS 底材經電化學實驗後之表面 SEI 影像。

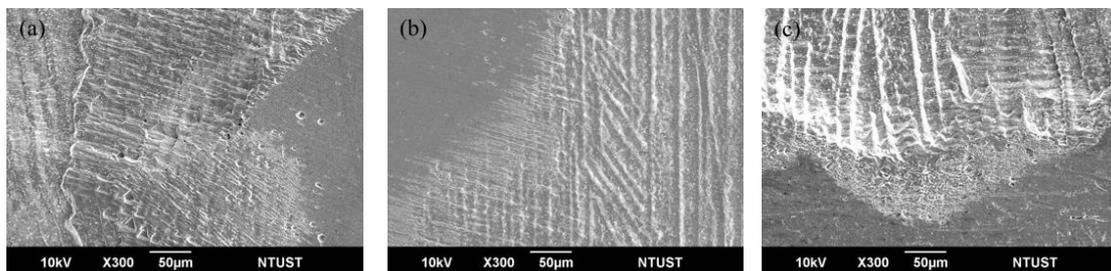


圖 3.59 (a) 銲接件、(b) 覆銲件、(c) 308L 緩衝層/覆銲件之 IN 182 銲道經電化學實驗後之表面 SEI 影像。

## 肆、具體完成工作項目及結論

在本研究設計的實驗參數下，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) 本研究成功製作較少瑕疵之異質銲接件、覆層銲接件。
- (二) 完成緩衝層對底材及銲道之顯微結構與成分之影響性探討。
- (三) 對於特定區域之顯微結構進行 TEM 及微區繞射分析。
- (四) 利用電化學耐蝕性評估覆層銲接處理對底材之影響程度。
- (五) 透過 X 射線量測及 ABAQUS 模擬殘留應力之分佈及數值。
- (六) 系統性地分析異質銲接、覆層銲接處理對超音波訊號檢出能力之影響。
- (七) 低合金鋼端施作 Inconel 182 緩衝層，可降低銲道元素稀釋區域、減緩低合金鋼底材硬度受銲接熱影響而下降之現象。
- (八) 不銹鋼端施作 308L 緩衝層，介面處具有較優良之接合強度，形成平面狀枝狀晶與胞狀枝狀晶之混合結構。Inconel 52M 覆銲層之重熔率提升 10~15%、鐵含量提升 2~3%。

- (九) 透過 X 射線量測及模擬數據，顯示透過覆層銲接處理，能減少異質銲接件內部之殘留張應力場的分佈範圍。於異質材料介面處皆具有最大的殘留主應力場及殘留剪切應力場。
- (十) 藉由超音波訊號圖得知，量測異質銲接件時，單晶陣列探頭/橫波對表面瑕疵具有較高之檢出能力；雙晶陣列探頭/縱波對內部瑕疵具有較高之檢出能力。雙晶陣列探頭/縱波於低合金鋼端及不銹鋼端之掃描訊號皆具較佳之訊雜比。
- (十一) 藉由超音波檢測得知，量測覆層銲接件時，覆銲件之底材位置，較原始底材之衰減率高約 0.008 dB/mm。銲道區具有最高之衰減率 0.254 dB/mm，熱影響區之衰減率略高於底材 0.04 dB/mm。透過尖端繞設法計算瑕疵高度，較降 6 dB 法具有較小之量測誤差。
- (十二) 受到愈多之銲接入熱量，不銹鋼端、銲道區具有愈低之腐蝕電位。顯示本實驗所量測之耐蝕性主要由析出物之數量、分佈及大小所影響，與殘留應力場較無直接關連性。
- (十三) 使用傳統探頭於銲道區具有較大之超音波衰減率，顯示柱狀晶組織將影響訊號之音程。使用陣列式探頭於異質材料介面處之訊雜比及檢出能力也將受到不等程度干擾。欲掌握銲道粗晶及覆銲層之量化影響性，仍須進一步測試。

## 參考文獻

- [1] M. Sireesha, V. Shankar, S. K. Albert, and S. Sundaresan, "Microstructural features of dissimilar welds between 316LN austenitic stainless steel and alloy 800," *Materials Science and Engineering: A*, 292 (2000) 74-82.
- [2] C. Jang, J. Lee, J. S. Kim, and T. E. Jin, "Mechanical property variation within Inconel 82/182 dissimilar metal weld between low alloy steel and 316 stainless steel," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 85 (2008) 635-646.
- [3] 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*, 209 (2009) 3628-3639.
- [4] S. Persaud, S. Ramamurthy, and R. Newman, "The effect of weld chemistry on the oxidation of Alloy 82 dissimilar metal welds," *Corrosion Science*, 91 (2015) 58-67.
- [5] A. Ramirez and J. Lippold, "High temperature behavior of Ni-base weld metal: Part II–Insight into the mechanism for ductility dip cracking," *Materials Science and Engineering: A*, 380 (2004) 245-258.
- [6] A. J. Ramirez, J. W. Sowards, and J. C. Lippold, "Improving the ductility-dip cracking resistance of Ni-base alloys," *Journal of materials processing technology*, 179 (2006) 212-218.
- [7] H. Wang, G. Wang, F. Xuan, and S. Tu, "Fracture mechanism of a dissimilar metal welded joint in nuclear power plant," *Engineering Failure Analysis*, 28 (2013) 134-148.
- [8] G. Li, Y. Yuan, and X. Lu, "Microstructure and Stress Corrosion Cracking of Dissimilar Metal Weld 16MND5/309L/308L/Z2CND18-12N Used for Connecting Reactor Pressure Vessel to Piping in Nuclear Power Plants," *Procedia Engineering*, 130 (2015) 1572-1579.
- [9] Q. Wang, M. Zhang, W. Liu, X. Wei, J. Xu, J. Chen, et al., "Study of type-II boundary behavior during SA508-3/EQ309L overlay weld interfacial failure process," *Journal of Materials Processing Technology*. Available online 14 April 2017.

- [10] Z. R. Chen, Y. H. Lu, X. F. Ding, and T. Shoji, "Microstructural and hardness investigations on a dissimilar metal weld between low alloy steel and Alloy 82 weld metal," *Materials Characterization*, 121 (2016) 166-174.
- [11] H. Ming, Z. Zhang, J. Wang, E.-H. Han, and W. Ke, "Microstructural characterization of an SA508–309L/308L–316L domestic dissimilar metal welded safe-end joint," *Materials Characterization*, 97 (2014) 101-115.
- [12] H. Ming, Z. Zhang, J. Wang, E.-H. Han, P. Wang, and Z. Sun, "Microstructure of a safe-end dissimilar metal weld joint (SA508-52-316L) prepared by narrow-gap GTAW," *Materials Characterization*, 123 (2017) 233-243.
- [13] 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*, 52 (2010) 768-779.
- [14] 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*, 50 (2008) 625-638.
- [15] S. Fricke, E. Keim, and J. Schmidt, "Numerical weld modeling—a method for calculating weld-induced residual stresses," *Nuclear Engineering and Design*, 206 (2001) 139-150.
- [16] X.-L. Wang, E. Payzant, B. Taljat, C. Hubbard, J. Keiser, and M. Jirinec, "Experimental determination of the residual stresses in a spiral weld overlay tube," *Materials Science and Engineering: A*, 232 (1997) 31-38.
- [17] M. Forouzan, S. M. Nasiri, A. Mokhtari, A. Heidari, and S. Golestaneh, "Residual stress prediction in submerged arc welded spiral pipes," *Materials & Design*, 33 (2012) 384-394.
- [18] T. Zhang, F. W. Brust, and G. Wilkowski, "Weld Residual Stress in Various Large Diameter Nuclear Nozzles," *Journal of Pressure Vessel Technology*, 134 (2012) 061214.
- [19] T. Zhang, F. Brust, G. Wilkowski, D. Rudland, and A. Csontos, "Welding residual stress and multiple flaw evaluation for reactor pressure vessel head

replacement welds with alloy 52," in ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference, 577-586.

- [20] 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*, 78 (2001) 813-818.
- [21] A. Aloraier, R. Ibrahim, and J. Ghajel, "Eliminating post-weld heat treatment in repair welding by temper bead technique: role bead sequence in metallurgical changes," *Journal of materials processing technology*, 153 (2004) 392-400.
- [22] A. Aloraier, R. Ibrahim, and P. Thomson, "FCAW process to avoid the use of post weld heat treatment," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 83 (2006) 394-398.
- [23] K. S. Kim, H. J. Lee, B. S. Lee, I. C. Jung, and K. S. Park, "Residual stress analysis of an Overlay weld and a repair weld on the dissimilar Butt weld," *Nuclear Engineering and Design*, 239 (2009) 2771-2777.
- [24] C. Elcoate, R. Dennis, P. Bouchard, and M. Smith, "Three dimensional multi-pass repair weld simulations," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 82 (2005) 244-257.
- [25] P. Dong, J. Hong, and P. Bouchard, "Analysis of residual stresses at weld repairs," *International journal of pressure vessels and piping*, 82 (2005) 258-269.
- [26] T. Brown, T. Dauda, C. Truman, D. Smith, D. Memhard, and W. Pfeiffer, "Predictions and measurements of residual stress in repair welds in plates," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 83 (2006) 809-818.
- [27] K. S. Kim, H. J. Lee, B. S. Lee, I. C. Jung, and K. S. Park, "Residual stress analysis of an Overlay weld and a repair weld on the dissimilar Butt weld," *Nuclear Engineering and Design*, 239 (2009) 2771-2777.
- [28] W. Bamford, B. Newton, and D. Seeger, "Recent Experience With Weld Overlay Repair of Indications in Alloy 182 Butt Welds in Two Operating PWRs," in ASME 2006 Pressure Vessels and Piping Conference, 427-434.
- [29] F. W. Brust and P. M. Scott, "Weld Residual Stresses and Primary Water Stress

Corrosion Cracking in Bimetal Nuclear Pipe Welds," in ASME 2007 Pressure Vessels and Piping Conference, 883-897.

[30]D. Rudland, F. Brust, D. J. Shim, and T. Zhang, "Further Welding Residual Stress and Flaw Tolerance Assessment of Dissimilar Metal Welds With Alloy 52 Inlays," in ASME 2010 Pressure Vessels and Piping Conference, 1351-1361.

[31]S. L. McCracken and B. Sutton, "Qualification of Temper Bead Welding by an Alternative Hardness Testing Approach," in ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference.

## 附錄 A 射線檢測結果



圖 A.1 加工圖 2.15 之銲接件的 RT 檢測照片。



圖 A.2 加工圖 2.16 之銲接件的 RT 檢測照片。



圖 A.3 加工圖 2.16 之覆銲件的 RT 檢測照片。

## 附錄 B 殘留應力詳細數據

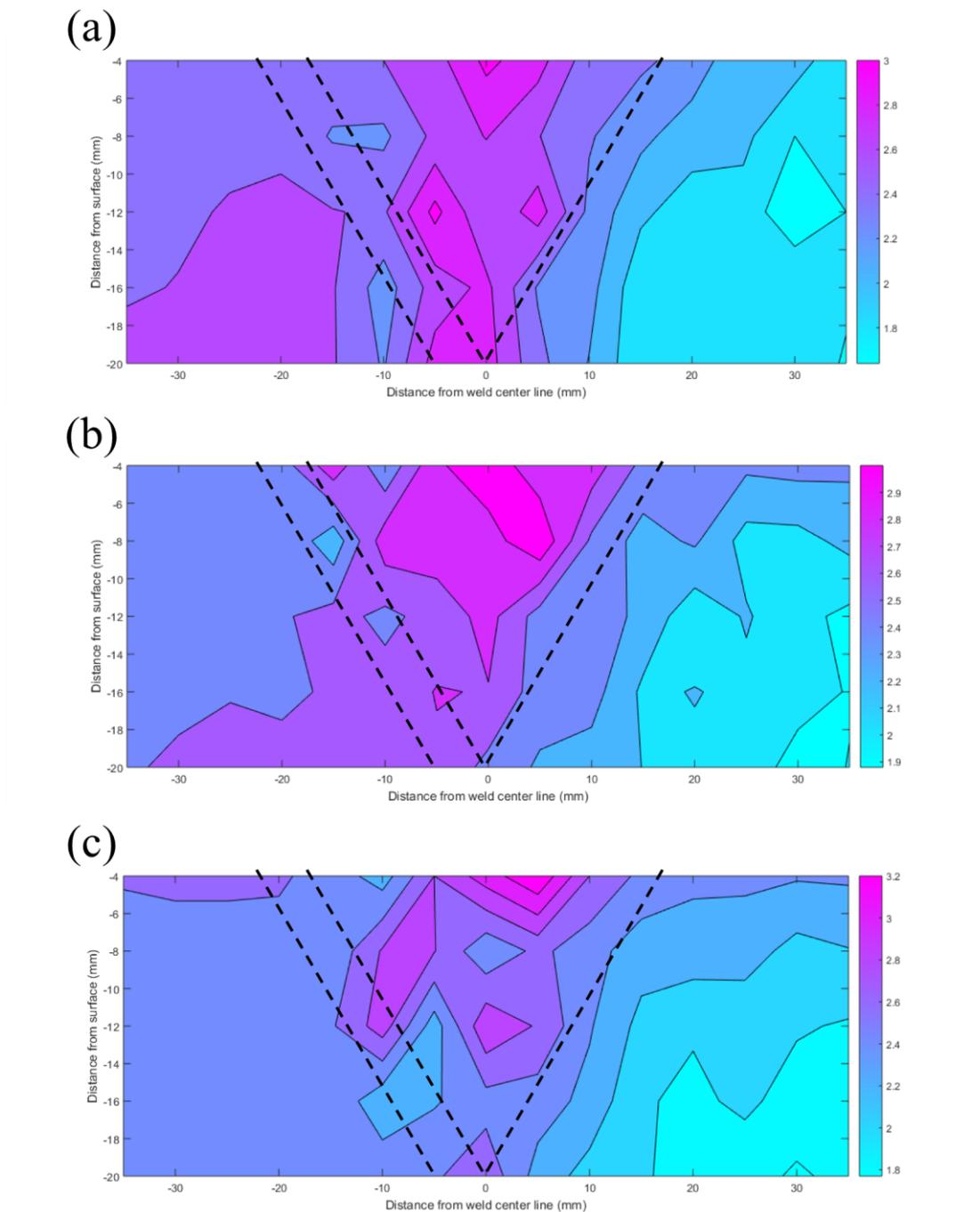


圖 B.1 (a) 銲接件、(b) 覆銲件及(c) 308L 緩衝層/覆銲件之半高寬量測值。

表 B.1 銲接件之 S11 殘留應力量測值。

	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35
-4	146±24	80±13	37±21	93±15	421±303	1201±566	473±240	1624±67	342±120	781±62	162±135	336±228	196±229	146±207	380±196
-8	3±15	-62±22	-96±21	-28±23	212±10	934±48	-134±323	1021±232	346±37	91±68	-230±99	-50±222	-282±185	-248±116	188±396
-12	-92±21	-198±18	-128±15	-129±26	-193±12	-117±179	-636±163	143±160	1167±169	-12±198	92±159	13±196	294±297	552±53	508±341
-16	-152±20	-197±11	-154±17	-171±18	-160±13	679±127	1361±77	-1041±889	-295±105	-165±146	-257±122	-174±129	658±175	361±160	-185±172
-20	-214±8	-313±10	-255±15	-230±12	-164±14	17±86	174±236	-222±247	-393±167	-210±94	-106±278	-299±182	-300±69	-344±265	-66±356

表 B.2 銲接件之 S12 殘留應力量測值。

	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35
-4	65±10	141±16	83±17	92±21	9±172	485±440	847±138	302±73	-260±7	39±76	92±110	80±198	-251±168	134±216	-272±157
-8	117±18	138±19	140±11	145±20	343±10	-207±54	-433±36	-340±220	219±28	77±88	77±262	-100±154	261±66	93±193	137±228
-12	97±18	85±18	112±20	146±25	-14±14	-1098±167	-205±326	-166±132	2373±106	55±103	124±127	108±195	229±174	-1435±54	-315±184
-16	113±18	72±7	107±14	125±18	123±12	-133±162	-140±120	-618±109	25±110	177±49	-182±78	576±96	197±189	341±108	266±382
-20	96±10	50±12	82±7	104±16	104±16	-2136±119	415±127	498±138	-1±177	301±86	902±111	247±159	1766±65	574±228	272±317

表 B.3 覆銲件之 S11 殘留應力量測值。

	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35
-4	105±21	119±19	80±13	156±11	37±258	387±3	731±176	615±357	189±491	-17±750	206±56	148±85	226±57	22±135	224±173
-8	-135±12	-61±10	-105±9	-63±16	-328±258	-468±98	382±614	-282±67	-128±194	39±109	10±207	166±93	-484±180	-97±253	193±119
-12	-100±19	-149±14	-148±15	-187±16	-158±13	-1108±135	245±915	-155±446	-113±245	-120±127	-325±52	-50±418	-327±126	270±191	190±180
-16	-152±15	-193±17	-226±16	-276±12	-229±16	-120±129	-78±90	-993±254	-143±140	-139±121	157±178	-257±1072	-336±371	-251±243	-181±333
-20	-279±13	-278±13	-281±10	-250±9	-276±14	-224±13	-319±173	-248±398	-308±148	-245±154	-441±115	-90±240	-238±272	-238±57	-74±161

表 B.4 覆銲件之 S12 殘留應力量測值。

	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35
-4	144±15	160±12	177±14	155±10	51±139	-1238±8	-14±148	-1986±239	573±187	430±1845	243±69	110±98	118±93	19±153	311±127
-8	125±19	164±21	180±13	215±16	1505±245	-3818±171	46±501	-261±38	1391±197	226±171	238±87	575±68	127±205	538±205	158±205
-12	94±19	118±13	115±10	154±14	148±12	-54±100	552±544	-98±156	113±230	168±57	480±59	38±166	-91±380	336±137	494±247
-16	70±14	109±10	100±14	177±9	113±9	534±66	369±56	-45±335	219±110	225±139	217±137	-268±769	-60±211	-266±217	-70±321
-20	85±13	77±10	61±7	79±12	79±9	71±12	1298±99	-636±457	63±192	158±150	90±158	53±97	417±251	-938±202	91±62

表 B.5 308L 緩衝層/覆銲件之 S11 殘留應力量測值。

	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35
-4	31±8	162±12	175±8	161±14	521±69	-641±252	1145±81	20±127	70±212	322±363	263±89	203±105	-65±146	-210±151	184±43
-8	-39±13	-26±14	17±11	65±11	413±250	403±36	-473±114	226±126	314±224	141±85	98±163	-210±326	54±610	-361±122	143±413
-12	-96±17	-68±9	-51±15	-35±19	76±10	-338±340	152±227	786±28	-953±73	3±65	-410±222	205±219	-253±92	580±110	278574
-16	-144±21	-113±28	-59±20	-119±20	-119±23	-272±142	25±174	691±368	-476±186	168±95	197±180	-456±214	318±235	-463±87	-338±131
-20	-155±17	-124±16	-110±18	-68±15	-182±18	-131±24	-182±165	180±231	-290±132	-121±201	-72±207	39±293	-191±22	35±30	-517±56

表 B.6 308L 緩衝層/覆銲件之 S12 殘留應力量測值。

	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35
-4	-164±8	-228±8	-201±7	-157±9	-181±157	-384±166	-920±431	260±328	34±136	542±136	-268±92	-198±55	-206±84	-148±128	-107±70
-8	-116±14	-88±10	-137±13	-129±17	-509±207	-265±46	-227±298	-1033±106	-967±268	35±33	-123±170	-74±226	-228±411	-93±166	-192±324
-12	-126±16	-90±17	-65±13	-114±16	-62±13	-2724±290	-27±192	59±56	-87±157	47±57	26±190	430±217	-571±107	51±94	-340±407
-16	-130±17	-101±10	-115±20	-76±14	-110±19	227±119	-924±160	-910±109	-70±139	-96±256	59±397	311±186	-138±242	-217±54	-383±171
-20	-115±20	-101±16	-101±22	-137±21	-56±14	32±8	-66±62	-508±79	57±150	-112±209	342±162	-357±294	-570±82	-644±119	-638±92