

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

覆層銲接處理對核電廠冷卻水壓力邊界異質銲接管之影響研究

**The characteristics analysis for weld overlay on the dissimilar metal
weld of reactor coolant pressure boundary materials**

計畫編號：NL1070523

受委託機關(構)：國立臺灣科技大學

計畫主持人：王朝正

聯絡電話：02-27376441

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

核研所聯絡人員：李建洲

報告日期：107 年 12 月 06 日

覆層銲接處理對核電廠冷卻水壓力邊 界異質銲接管之影響研究

受委託單位：國立臺灣科技大學

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、黃育熙教授

研究期程：中華民國 107 年 5 月至 107 年 12 月

研究經費：新臺幣 234 萬元

行政院原子能委員會核能研究所 委託研究
中華民國 107 年 12 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	IX
摘 要	XI
Abstract	XII
壹、計畫緣起與目的	1
貳、研究方法與過程	9
2.1 金屬材料	9
2.2 銲接件製作	12
2.2.1 惰性氣體電弧銲接處理 (Gas tungsten arc welding, GTAW)	12
2.2.2 屏蔽金屬電弧銲接處理 (Shield manual arc welding, SMAW)	12
2.2.3 低合金鋼端緩衝層	14
2.2.4 管件對接	15
2.3 覆銲層製作	16
2.3.1 不銹鋼端緩衝層	16
2.3.2 鎳基 52M 合金	17
2.3.3 鎳基 52MSS 合金	18
2.4 射線檢測	19
2.5 殘留應力量測	19
2.6 殘留應力模擬	20
2.7 超音波量測	21
2.8 金相分析	21
2.9 微硬度分析	21
2.10 穿透式電子顯微鏡 (TEM) 分析	24
2.11 電化學量測	24
2.12 分析設備	25
參、主要發現與結論	27
3.1 緩衝層對銲接金屬之電化學特性的影響	27

3.2 銲後熱處理與覆銲處理對殘留應力之影響	51
3.3 超音波檢測應用於異質銲接件之檢測能力	70
3.4 鎳基合金的元素含量對覆銲層之特性影響	108
四、具體完成工作項目及結論	118
參考文獻	119
附錄 A、材料證明	121
附錄 B、Ir192 射線檢測結果	126
附錄 C、二維殘留應力量測點之德拜圖	136
附錄 D、陣列式超音波量測	163

圖目錄

圖 1-1	Half-bead weld 覆層銲接處理。	3
圖 1-2	Temper bead weld 覆層銲接處理。	3
圖 1-3	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。	4
圖 1-4	異質銲接件經 IN 52M 覆銲處理(a) 無、(b) 有 308L 緩衝層之示意圖。	5
圖 1-5	(a)(b) A508/IN182B、(c)(d) A508/IN182F 之金相圖。	6
圖 1-6	(a)(b) 316S/IN52M、(c)(d) 316S/308L、(e)(f) 308L/IN52M 之金相圖。	6
圖 1-7	(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)	7
圖 1-8	(a) 銲接件、(b) 覆銲件距離銲道尾端 65 mm 處截面之 S11 殘留應力場模擬值。(MPa)	7
圖 1-9	超音波檢測規塊之尺寸加工設計圖。(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 $\phi 3 \times 50$ mm、E：不銹鋼端頂部 SS/銲道介面直刻槽)	8
圖 2-1	實驗流程圖。	9
圖 2-2	(a) A508、(b) F304 之底材顯微金相圖。	11
圖 2-3	(a) 管件、(b) 覆銲件之加工尺寸圖。	11
圖 2-4	(a) GTAW 銲接機台、(b) SMAW 銲接機台之外觀照。	13
圖 2-5	(a) 全自動複合機組、(b) 半自動 XY 移動平台之外觀照。	13
圖 2-6	(a)(b) IN182 底板安置方法、(c)(d) IN182 緩衝層完成外觀之照片。	14
圖 2-7	(a) 暫時性輔助板銲接、(b) IN82 道次完成、(c) IN182 填料過程，以及(d) 完成之銲接管件的外觀照。	15
圖 2-8	銲道結構示意與實際巨觀金相外觀。	16

圖 2-9	(a) 異質銲接管件欲施作 IN52M 覆銲層之範圍、(b) IN182 緩衝層完成外觀、(c) IN52M 覆銲層施作過程，以及(d) 未完成之 IN52M 覆銲層側視外觀照。	17
圖 2-10	覆銲管件之(a) 俯視、(b) 管內壁、(c) 側視，以及(d) 正視之外觀照。	18
圖 2-11	覆銲板件之(a) 俯視、(b) 裁切側視之外觀照。	18
圖 2-12	二維殘留應力分析(a) 銲接管件 1 (N-PWHT)、(b) 銲接管件 2 (Y-PHWT)、(c) 覆銲管件 (Y-PWHT-52M) 之過程外觀照。	19
圖 2-13	異質銲接管件之定位線與量測點劃分方法。	20
圖 2-14	異質銲接板件之銲道規塊加工圖。	22
圖 2-15	異質銲接管件之銲道規塊加工圖。	23
圖 3-1	182FF 沿底材介面向鎳基合金方向之 EPMA 逐點成分分析。	28
圖 3-2	182BB 沿底材介面向鎳基合金方向之 EPMA 逐點成分分析。	28
圖 3-3	182FF、182BB 沿底材介面向鎳基合金方向之逐點維克氏硬度。	29
圖 3-4	182FF 在 3.5 wt. %NaCl _(aq) 環境中之動電位極化曲線圖。	30
圖 3-5	182FF 之(a)(b) L1、(c)(d) L2、(e)(f) L3 層在 3.5 wt. %NaCl _(aq) 環境中經動電位極化試驗後之表面 SE 影像。	30
圖 3-6	182BB 在 3.5 wt. %NaCl _(aq) 環境中之動電位極化曲線圖。	31
圖 3-7	182BB 之(a)(b) L1、(c)(d) L2、(e)(f) L3、(g)(h) F 層在 3.5 wt. %NaCl _(aq) 環境中經動電位極化試驗後之表面 SE 影像。	32
圖 3-8	182FF 之(a) L1、(b) L2、(c) L3 在 3.5 wt. %NaCl _(aq) 環境中之雙環電位極化曲線圖。	34
圖 3-9	182FF 之(a)(b) L1、(c)(d) L2、(e)(f) L3 層在 3.5 wt. %NaCl _(aq) 環境中經雙環電位極化試驗後之表面 SE 影像。	34
圖 3-10	182BB 之(a) L1、(b) L2、(c) L3、(d) F 在 3.5 wt. %NaCl _(aq) 環境中之雙環電位極化曲線圖。	35
圖 3-11	182BB 之(a)(b) L1、(c)(d) L2、(e)(f) L3、(g)(h) F 層在 3.5 wt. %NaCl _(aq) 環境中經雙環電位極化試驗後之表面 SE 影像。	36

圖 3-12	182BB-L1 之(a) 明視野影像、(b) 圈選基地擇區繞射圖，晶帶軸方向為 $[013]_{\text{FCC}}$ 、(c) 明視野影像、(d) 圈選位置 A 擇區繞射圖，以及(e) 圈選位置 B 擇區繞射圖，(d-e)晶帶軸方向為 $[011]_{\text{FCC}}$ 。	38
圖 3-13	182BB-L3 之(a) 明視野影像、(b) 圈選基地擇區繞射圖，晶帶軸方向為 $[001]_{\text{FCC}}$ 、(c) 位置 A 之 EDS，以及(d) 位置 B 之 EDS。	39
圖 3-14	182BB-L3 之析出物的(a) 明視野影像，(b)(c)(d)(e)(f)(g) TEM-mapping。	39
圖 3-15	182BB-L3 之(a) 擇區繞射圖，晶帶軸方向為 $[011]_{\text{FCC}}$ 、(b) STEM 模式之暗視野影像、(c) 所對應之明視野影像，以及(d)-(e)(f) 高解析影像。	40
圖 3-16	182FF 沿異質介面向上位移 1 mm 之 EPMA mapping 結果。	41
圖 3-17	182BB 沿異質介面向上位移 1 mm 之 EPMA mapping 結果。	41
圖 3-18	304S-52M 沿底材介面向鎳基合金方向之 EPMA 逐點成分分析。	43
圖 3-19	308BB 沿底材介面向鎳基合金方向之 EPMA 逐點成分分析。	43
圖 3-20	308BB、304S-52M 在 3.5 wt. %NaCl _(aq) 環境中之動電位極化曲線圖。	44
圖 3-21	304S-52M 之(a)(b)(c) 52M-L2、(d)(e)(f) 52M-L3 層在 3.5 wt. %NaCl _(aq) 環境中經動電位極化試驗後之表面 SE 影像。	45
圖 3-22	308BB 之(a)(b) 308L、(c)(d) 52M-L1、(e)(f) 52M-L2 層在 3.5 wt. %NaCl _(aq) 環境中經動電位極化試驗後之表面 SE 影像。	45
圖 3-23	304S-52M 之(a) 52M-L2、(b) 52M-L3 在 3.5 wt. %NaCl _(aq) 環境中之雙環電位極化曲線圖。	46
圖 3-24	308BB 之(a) 308L、(b) 52M-L1、(c) 52M-L2 在 3.5 wt. %NaCl _(aq) 環境中之雙環電位極化曲線圖。	47
圖 3-25	304S-52M 之(a)(b)(c) 52M-L2、(d)(e)(f) 52M-L3 層在 3.5 wt. %NaCl _(aq) 環境中經雙環電位極化試驗後之表面 SE 影像。	47
圖 3-26	308BB 之(a)(b) 308L、(c)(d)(e) 52M-L1、(f)(g)(h) 52M-L2 層在 3.5 wt. %NaCl _(aq) 環境中經雙環電位極化試驗後之表面 SE 影像。	48
圖 3-27	304S-52M-L2 之(a)(b) 明視野影像、(c)(d) 擇區繞射圖，晶帶軸方向為 $[013]_{\text{matrix}}$ 及 $[011]_{\text{FCC}}$ 。	49

圖 3-28	308BB-52M-L1 之(a)(b)(c) 明視野影像、(d) 基地之擇區繞射圖，晶帶軸方向為 $[011]_{\text{FCC}}$ 。	50
圖 3-29	308BB-52M-L1 之(a) 明視野影像、(b) 圈選基地擇區繞射圖晶帶軸方向為 $[111]_{\text{FCC}}$ 。(a=0.2995 nm, $d_{111}=0.1729$ nm)	50
圖 3-30	(a) 銲接管件、(b) 覆銲管件之 CAD 模型，(c) 銲道標記尺寸。	52
圖 3-31	(a) 銲接管件、(b) 覆銲管件之網格模型，(c) 銲道細分網格。	52
圖 3-32	在各溫度區間下(a) 低合金鋼及不銹鋼之物理性質、(b) 鎳基合金之物理性質、(c) 低合金鋼及不銹鋼之機械性質、(d) 鎳基合金之機械性質，以及(e) 低合金鋼及不銹鋼之降伏強度。	53
圖 3-33	(a) 模型移動式熱源設定之方向、(b) 模型設定之固定邊界點。	54
圖 3-34	N-PWHT 之(a) 暫態、(b) 冷卻 12000 秒，Y-PWHT 之(c) 暫態、(d) 冷卻 12000 秒之溫度場的模擬值。 $(^{\circ}\text{C})$ 。	55
圖 3-35	N-PWHT 之(a) 暫態、(b) 冷卻 12000 秒，Y-PWHT 之(c) 暫態、(d) 冷卻 12000 秒之 von Mises 應力場的模擬值。 (MPa)	56
圖 3-36	(a) N-PWHT、(b) Y-PWHT 之 von Mises 應力場的模擬值截面示意圖。 (MPa)	58
圖 3-37	(a) N-PWHT、(b) Y-PWHT 之 S_{11} (S_{xx}) 軸向應力場的模擬值截面示意圖。 (MPa)	59
圖 3-38	(a) N-PWHT、(b) Y-PWHT 之 S_{22} (S_{yy}) 周向應力場的模擬值截面示意圖。 (MPa)	60
圖 3-39	Y-PWHT-52M 之(a) 暫態、(b) 冷卻 12000 秒溫度場，(c) 暫態、(d) 冷卻 12000 秒 von Mises 應力場的模擬值。 $(^{\circ}\text{C}, \text{MPa})$	61
圖 3-40	(a) Y-PWHT、(b) Y-PWHT-52M 之 von Mises 應力場的模擬值截面示意圖。 (MPa)	62
圖 3-41	(a) Y-PWHT、(b) Y-PWHT-52M 之 S_{11} (S_{xx}) 軸向應力場的模擬值截面示意圖。 (MPa)	64
圖 3-42	(a) Y-PWHT、(b) Y-PWHT-52M 之 S_{22} (S_{yy}) 周向應力場的模擬值截面示意圖。 (MPa)	65
圖 3-43	Y-PWHT 之(a) S_{11} 、(2) S_{22} ，Y-PWHT-52M 之(c) S_{11} 、(d) S_{22} 沿軸向之內表面的殘留應力模擬值。	66

圖 3- 44	N-PWHT 之(a)A508 端、(b) 304S 端，Y-PWHT-52M 之(c)A508 端、 (d) 304S 端，Y-PWHT-52M 之(e)A508 端、(f) 304S 端，沿軸向之內表面 的 S_{11} 殘留應力量測值。	67
圖 3- 45	異質銲接管件之巨觀金相及金相組合圖。	68
圖 3- 46	Y-PWHT 之(a) 位移場、(b) 各量測點之位移模擬值，以及(c) 各量 測點之位移量測值。	69
圖 3- 47	音波方向於板件之規塊表面掃描的示意圖。	71
圖 3- 48	音波方向與掃描方向、掃描座標零點定義之示意圖。	71
圖 3- 49	508 端掃之 1 st SDH 連續掃描 B scan 圖形與與掃描座標的比較圖。	73
圖 3- 50	508 端掃之 2 nd SDH 連續掃描 B scan 圖形與與掃描座標的比較圖。	74
圖 3- 51	508 端掃之 3 rd SDH 連續掃描 B scan 圖形與與掃描座標的比較圖。	75
圖 3- 52	508 端掃之 4 th SDH 連續掃描 B scan 圖形與與掃描座標的比較圖。	76
圖 3- 53	508 端掃之 5 th SDH 連續掃描 B scan 圖形與與掃描座標的比較圖。	77
圖 3- 54	508 端掃之 SDH 連續掃描 B scan 圖形比較圖。	78
圖 3- 55	316 端掃之 1 st SDH 連續掃描 B scan 圖形與與掃描座標的比較圖。	80
圖 3- 56	316 端掃之 2 nd SDH 連續掃描 B scan 圖形與與掃描座標的比較圖。	81
圖 3- 57	316 端掃之 3 rd SDH 連續掃描 B scan 圖形與與掃描座標的比較圖。	82
圖 3- 58	316 端掃之 4 th SDH 連續掃描 B scan 圖形與與掃描座標的比較圖。	83
圖 3- 59	316 端掃之 5 th SDH 連續掃描 B scan 圖形與與掃描座標的比較圖。	84
圖 3- 60	316 端掃之 SDH 連續掃描 B scan 圖形比較圖。	85
圖 3- 61	(a) 508 端掃、(b) 316 端掃之各入射角度所對應之能量響應。	89
圖 3- 62	508 端掃中各 SDH 最淺量測深度與相對應之入射點位置示意圖。	94
圖 3- 63	316 端掃中各 SDH 最淺量測深度與相對應之入射點位置示意圖。	94
圖 3- 64	銲接管件之陣列超音波檢測進行方式及探頭架設外觀。	99
圖 3- 65	N-PWHT 試件由 304S 不銹鋼端掃描之 B scan、S scan、C scan、A scan，以及 D scan 合併圖。（聲速: 5700 m/s）	100
圖 3- 66	Y-PWHT 試件由 304S 不銹鋼端掃描之 B scan、S scan、C scan、A scan，以及 D scan 合併圖。（聲速: 5700 m/s）	101
圖 3- 67	Y-PWHT-52M 試件由 304S 不銹鋼端掃描之 B scan、S scan、C scan、A scan，以及 D scan 合併圖。（聲速: 5700 m/s）	102

圖 3- 68	N-PWHT 試件由 A508 低合金鋼端掃描之 B scan、S scan、C scan、A scan，以及 D scan 合併圖。（聲速: 5890 m/s）	103
圖 3- 69	Y-PWHT 試件由 A508 低合金鋼端掃描之 B scan、S scan、C scan、A scan，以及 D scan 合併圖。（聲速: 5890 m/s）	104
圖 3- 70	Y-PWHT-52M 試件由 A508 低合金鋼端掃描之 B scan、S scan、C scan、A scan，以及 D scan 合併圖。（聲速: 5890 m/s）	105
圖 3- 71	N-PWHT 鋸切之截面外觀照與 S scan 掃描圖形。	106
圖 3- 72	Y-PWHT-52M 鋸切之截面外觀照。	107
圖 3- 73	52MSS 沿底材介面向鎳基合金方向之 EPMA 逐點成分分析。	108
圖 3- 74	(a)(b) A508/52MSS-L1、(c)(d) 52MSS-L1/52MSS-L2、(e)(f) 52MSS-L2/52MSS-L3、(g) A508/52M-L1、(h) 52M-L1/52M-L2，以及(i) 52M-L2/52M-L3 之金相圖。	109
圖 3- 75	52MSS、52M 在 3.5 wt. %NaCl _(aq) 環境中之動電位極化曲線圖。	110
圖 3- 76	52M 之(a)(b)(c) L1、(d)(e)(f) L2、(g)(h)(i) L3 層在 3.5 wt. %NaCl _(aq) 環境中經動電位極化試驗後之表面 SE 影像。	111
圖 3- 77	52MSS 之(a)(b)(c) L1、(d)(e)(f) L2、(g)(h)(i) L3 層在 3.5 wt. %NaCl _(aq) 環境中經動電位極化試驗後之表面 SE 影像。	112
圖 3- 78	52M 之(a) L1、(b) L2、(c) L3 層在 3.5 wt. %NaCl _(aq) 環境中之雙環電位極化曲線圖。	114
圖 3- 79	52MSS 之(a) L1、(b) L2、(c) L3 層在 3.5 wt. %NaCl _(aq) 環境中之雙環電位極化曲線圖。	114
圖 3- 80	52M 之(a)(b)(c) L1、(d)(e)(f) L2、(g)(h)(i) L3 層在 3.5 wt. %NaCl _(aq) 環境中經雙環電位極化試驗後之表面 SE 影像。	115
圖 3- 81	52MSS 之(a)(b)(c) L1、(d)(e)(f) L2、(g)(h)(i) L3 層在 3.5 wt. %NaCl _(aq) 環境中經雙環電位極化試驗後之表面 SE 影像。	116
圖 3- 82	52MSS 沿異質介面向上位移 1 mm 之 EPMA mapping 結果。	117

表目錄

表 1-1	檢出瑕疵之高度。(粗斜體為尖端繞射法計算)	6
表 2-1	本研究使用之金屬材料的化學成分。(wt. %)	10
表 2-2	本研究使用之銲接參數。	12
表 3-1	182FF、182BB 之動電位極化試驗之腐蝕電位及腐蝕電流。	29
表 3-2	182FF、182BB 之雙環極化試驗之腐蝕電位。	33
表 3-3	304S-52M、308BB 之動電位極化試驗之腐蝕電位及腐蝕電流。	44
表 3-4	304S-52M、308BB 之雙環極化試驗之腐蝕電位。	46
表 3-5	模擬殘留應力之參數設定值。	51
表 3-6	規塊各區域的聲速量測值及材料衰減係數。	70
表 3-7	508 端掃之 SDH 各角度下理論可讀取的水平位置與實際探頭可判讀位置之數值。	72
表 3-8	316 端掃之 SDH 各角度下理論可讀取的水平位置與實際探頭可判讀位置之數值。	79
表 3-9	508 端掃之各入射角度所對應之振幅。	87
表 3-10	316 端掃之各入射角度所對應之振幅。	88
表 3-11	508 端掃之各入射角度所對應之 SDH 深度量測值。(1 st SDH: 6.5、2 nd SDH: 14.8、3 rd SDH: 23.0、4 th SDH: 31.3、5 th SDH: 39.5 mm)	90
表 3-12	316 端掃之各入射角度所對應之 SDH 深度量測值。(1 st SDH: 6.5、2 nd SDH: 14.8、3 rd SDH: 23.0、4 th SDH: 31.3、5 th SDH: 39.5 mm)	91
表 3-13	508 端掃之各入射角度量測 SDH 深度之修正係數對照表。	92
表 3-14	316 端掃之各入射角度量測 SDH 深度之修正係數對照表。	93
表 3-15	508 端掃之各入射角度所對應之 SDH 水平位置量測值。	95
表 3-16	316 端掃之各入射角度所對應之 SDH 水平位置量測值。	96
表 3-17	508 端掃之各入射角度量測 SDH 水平位置之修正係數對照表。	97
表 3-18	316 端掃之各入射角度量測 SDH 水平位置之修正係數對照表。	98
表 3-19	52MSS、52M 之動電位極化試驗之腐蝕電位及腐蝕電流。	110
表 3-20	52MSS、52M 之雙環電位極化試驗之腐蝕電位。	113

摘要

本計畫以之鎳基 52M 合金(Inconel 52M, IN52M)、鎳基 52MSS 合金(Inconel 52MSS, IN52MSS) 為覆層銲接金屬材料 (Filler Metal)，利用惰性氣體電弧銲接處理 (Gas tungsten arc welding, GTAW)，施作 IN52M 覆銲層於異質銲接管件外側表面上、IN52MSS 覆銲層於 A508 低合金鋼底材。探討不同合金元素含量對於覆銲層之顯微組織、耐蝕性及銲接性的影響，IN52MSS/A508 互銲後之微觀組織。異質銲接管件係以鎳基 82/182 合金(Inconel alloy 82/182, IN82/182)為填料，利用 GTAW 與遮蔽氣體電弧銲(Shield metal arc welding, SMAW)技術對接。銲接件、覆銲件經射線檢測後，利用殘留應力量測與陣列式超音波量測，比較覆銲層金屬之差異性，對於殘留應力之分布與超音波缺陷檢出能力的影響。另一方面，透過模擬軟體比較銲後殘留應力之模擬數值及量測數據，以期建立完善的模擬參數資料庫。使用放電線切割(Wire electric discharge machining, WEDM)沿垂直銲接方向切取片狀試片。透過顯微組織分析、微觀結構觀察，以及耐蝕性質評估，探討覆銲層合金對於覆銲結構之析出物分佈與腐蝕行為的影響。

關鍵字：覆層銲接、異質銲接管件、鎳基 52M 合金、鎳基 52MSS 合金、殘留應力、陣列式超音波。

Abstract

This proposal investigates the characteristic of weld overlay (WOL) using Alloy 52M on dissimilar weld (DSW) tube, and Alloy 52MSS on low alloy steel (LAS). The DSW is carried out by using filler metal Inconel 82/182 between A508 LAS and A182 304L stainless steel. Prior to WOL, the buttering process is applied on 304L SS surface with ER 308L as filler metal. The effect of metal element on microstructure, corrosion resistance and weldability of WOL layers will be fully studied. Simultaneously, the correlation between WOL process, residual stress, and signal of ultrasonic testing will also be discussed. On the other hand, the comparison of residual stress between measurement and simulation will be explored additionally. Upon the completion of this project, the application of Alloy 52M and 52MSS on WOL tube will be well-presented.

Keywords: Weld overlay, Dissimilar weld tube, Alloy 52M, Alloy 52MSS, Residual stress, Phase array ultrasonic testing.

壹、計畫緣起與目的

1.1 冷卻水壓力邊界異質銲接管件

以鎳基 82/182 合金為銲料，銲接低合金鋼(A508、A516)銅水管嘴與鑄造不銹鋼(F316L、F304L)安全端之異質銲接管件，應用於壓水式核能電廠反應器 (Pressurized water reactor, PWR) 的冷卻水壓力邊界組件。經長時間使用後，受到管內之冷卻水工作壓力作用，銲接管件內壁之殘留應力 (residual stress) 狀態，將逐漸由殘留壓應力 (residual compressive stress) 轉變為殘留張應力 (residual tensile stress)。另一方面，依據 ASME BPVC Section III 規範要求，低合金鋼端須於銲接對接前，以鎳基 82/182 合金製作緩衝層 (圖 1-1) 並施作銲後熱處理製程。沃斯田鐵系材料，如不銹鋼、鎳基合金等，長期與管內冷卻水產生水化學反應，具有形成鈍態氧化膜的能力。應力腐蝕裂紋 (Stress corrosion cracking, SCC) 藉由張應力、鈍化性材料，以及水化學之相互影響，往金屬底材方向逐漸成長，損壞金屬管件之殘存厚度，又可根據腐蝕行為區分為：沿晶應力腐蝕裂紋 (IGSCC)、穿晶應力腐蝕裂紋 (TGSCC)。異質銲接管件受到長時間的應力腐蝕作用下，於管內壁之銲道根部、低合金鋼與緩衝層介面、緩衝層與銲道介面處，生成周向 (hoop) 及軸向 (axial) 裂紋。當應力腐蝕裂紋穿破管材厚度時，高壓工作水從裂縫中溢漏，在核能電廠環境中則伴隨著輻射量外洩。為抑制應力腐蝕裂紋成長，使用高鉻含量鎳基超合金做為銲料，施作覆層銲接處理 (weld overlay, WOL) 於管件外壁，能有效增加管內壁殘留壓應力數值，以及提升管壁厚度。

針對覆層銲接處理之結構設計、應力分佈，以及施作材料選擇性，國內外研究單位均視為重點研究項目，投入大力的研究資源進行評估與探討。透過施作後定期量測之應力腐蝕裂紋的深度、長度為一有效評估覆層銲接成效的方式。歐美之核電廠已廣泛應用覆層銲接處理於補強異質銲道結構，用以設法抑制、降低異質銲接件的材料敏感性。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，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。

為了解鎳基 52M 合金 (Inconel 52M, IN52M) 應用於覆層銲接處理施作在異質銲接管上的材料特性，本研究著重於緩衝層、覆銲層施作完成後，覆銲管件的殘留應力量測、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、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。另一方面，含有高鈮含量及添加鉬元素的鎳基 52MSS 合金 (Inconel 52MSS, IN52MSS)，具有較良好的抗失延裂紋 (Ductility dip cracking)。為了解其覆銲層之材料特性，擷取各層截面進行顯微結構分析、合金元素與耐腐蝕評估實驗。

1.2 覆層銲接處理 (weld overlay, WOL)

受限於核能電廠內部之可操作空間與人員輻射安全性，實際對覆銲層進行銲接後熱處理 (Post weld heat-treatment, PWHT) 之困難度相當高。為此，Temper bead weld (TBW) 施作工法被應用於核電廠之覆銲施作，利用每道次銲料堆積所產生的入熱量，對前一道次進行熱處理，降低其之銲道結構的殘留張應力，當覆銲結構施作完成即不須再進行 PWHT 處理，結構示意圖如圖 1-2 所示。透過 TBW 的回火處理，雖然覆銲層與底材的顯微結構得以獲得足夠能量進行內部應力調整，然而過多的熱量輸入仍會造成底材、銲道金屬分別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。為此，精準地計算銲材與底材的稀釋率、覆銲之入熱量，對底材熱影響區內之麻田散鐵組織及變韌鐵組織的回火結構、應力分佈顯得相當重要。相關文獻指出 TBW 之重熔率介於百分之 50 至 70 之間，較能有效地降低銲接處理所產生的殘留張力以及銲後不良組織的比例。

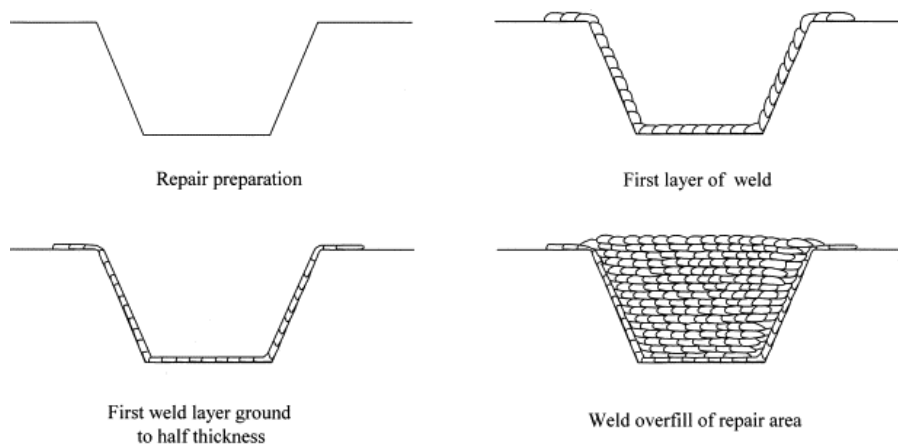


圖 1-1 Half-bead weld 覆層銲接處理。

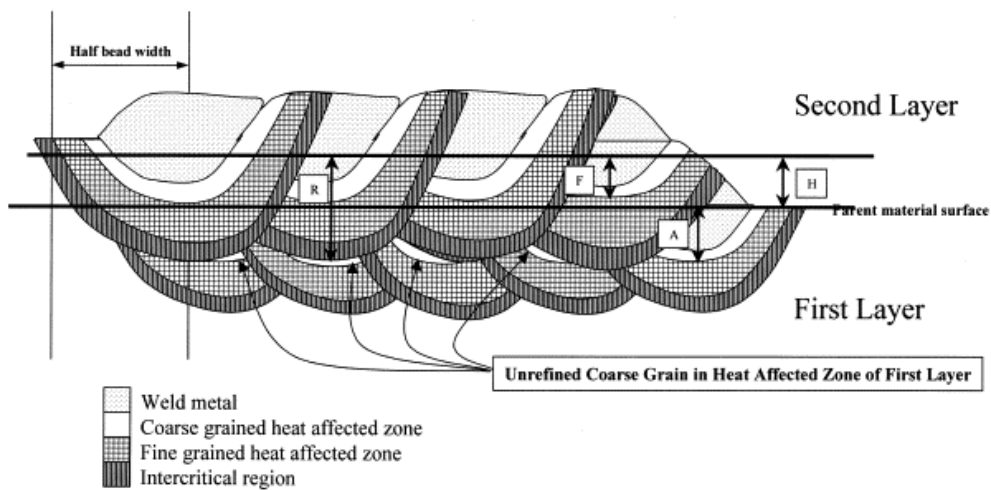


圖 1-2 Temper bead weld 覆層銲接處理。

1.3 鎳基合金銲料

在異質銲接處理之鎳基合金銲料選擇上，鎳基 52 合金與鎳基 82 合金較為廣泛地應用。相關研究結果指出，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。相較之下，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)。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 1-3 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 合金鉬道之 NbC 顆粒狀碳化物。在覆層銲接處理之鎳基合金鉬料選擇上，鎳基 52M 合金與鎳基 52MSS 合金則具有不同之特性。高鉻含量的鎳基 52M 合金受到碳化物作用而具有抗熱裂能力 (hot cracking)，然而多道次的銲接處理將有機會導致失延裂紋的缺陷發生。為降低此缺陷的產生，提升鈮元素的含量，鎳基 52MSS 合金具有較廣的液態溫度區間，得以提供鉬道柱狀晶融合所需的時間。然而，低熔點的二次相將造成後續銲接處理施作時，覆鉬層生成熱裂缺陷的機率。

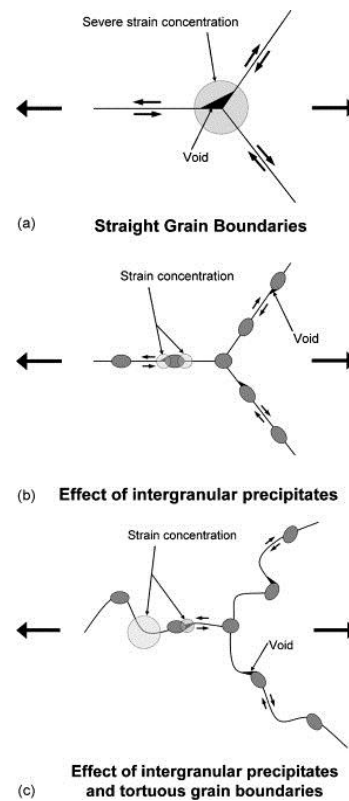


圖 1-3 晶界析出物對晶界滑移、應力集中與微孔生成之影響。(a) 筆直的晶界造成應力集中於晶界三角點、(b) 晶界析出物固定住晶界移動，使應力集中在析出物周遭、(c) 曲折的晶界及析出物限制晶界滑移，同時降低應力集中效應與微孔生成傾向。

1.3 異質銲接件之覆銲特性分析

在先前的計畫中，利用 GTAW 技術以將 Inconel 52M 合金覆銲於 Inconel-182 填料 A508/316L 不銹鋼之異質銲接件，探討覆銲對於壓力邊界異質金屬銲道、熱影響區之變化。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腐蝕能力及缺陷檢出能力。本研究團隊已成功製作較少瑕疵符合核能應用之異質銲接件、覆層銲接件，以及顯微結構、成分、電化學耐蝕性評估、X 射線量測及 ABAQUS 模擬殘留應力之分佈及數值等工作。此外，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。銲接件結構示意圖如圖 1-4 所示。

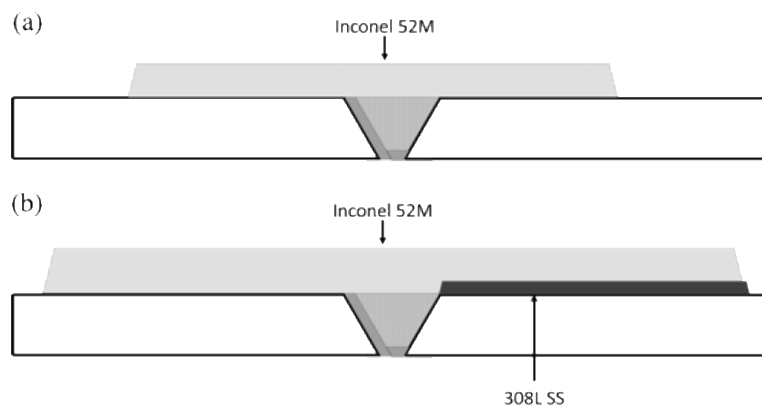


圖 1-4 異質銲接件經 IN 52M 覆銲處理(a) 無、(b) 有 308L 緩衝層之示意圖。

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。如圖 1-5 所示，A508 低合金鋼與 IN 182 緩衝層介面 (A508/IN182B) 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) 則受到填料銲接處理之工作電流量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。

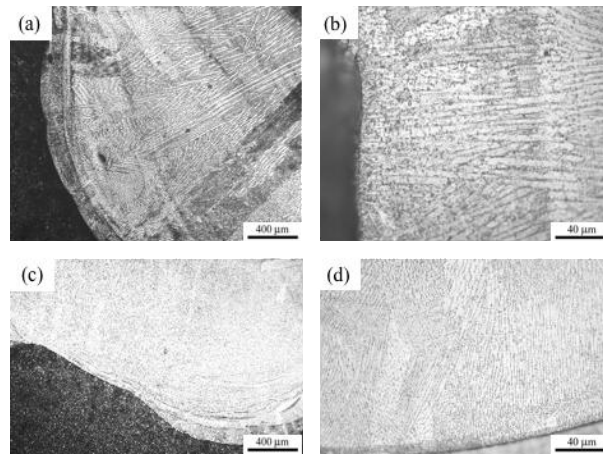


圖 1-5 (a)(b) A508/IN182B、(c)(d) A508/IN182F 之金相圖。

圖 1-6 所示，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 覆鍍層之重熔率提升 10~15%、鐵含量提升 2~3%。316S 與 IN 52M 覆鍍層之介面（316L/IN52M）具有垂直凝固方向之 Type II 晶界，其寬度約介於 5~10 μm。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。而 316S 與 308L 緩衝層其介面（316L/308L）呈現同質鍍接件之顯微結構，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。另一方面，觀察到 308L 緩衝層之柱狀枝狀晶呈現沿 316S 底材晶粒取向方向往鍍冠方向生長，顯示 316L/308L 鍵結強度較 316L/IN52M 佳。

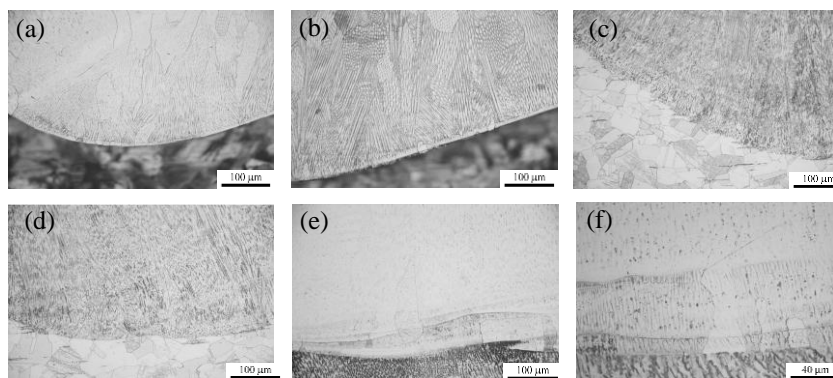


圖 1-6 (a)(b) 316S/IN52M、(c)(d) 316S/308L、(e)(f) 308L/IN52M 之金相圖。

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。如圖 1-7 及圖 1-8 中所見，X 光量測儀與 ABAQUS 模擬軟體皆有此趨勢。

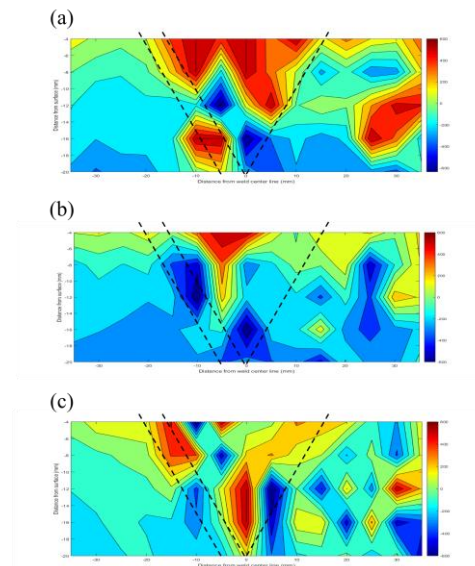


圖 1-7 (a) 銲接件、(b) 覆銲件、(c) 308L 緩衝層/覆銲件距離銲道尾端 65 mm 處截面之 S11 殘留應力場量測值。(MPa)

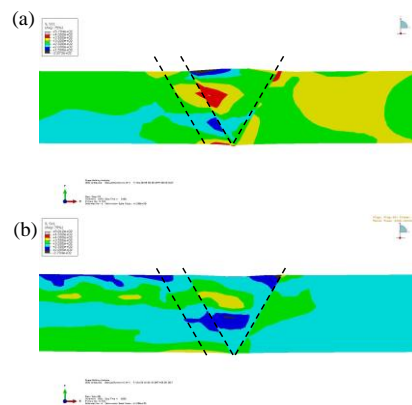


圖 1-8 (a) 銲接件、(b) 覆銲件距離銲道尾端 65 mm 處截面之 S11 殘留應力場模擬值。(MPa)

在超音波量測異質銲接件時(瑕疵規塊加工圖如圖 1-9)，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。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。量測數據詳見表 1-1。

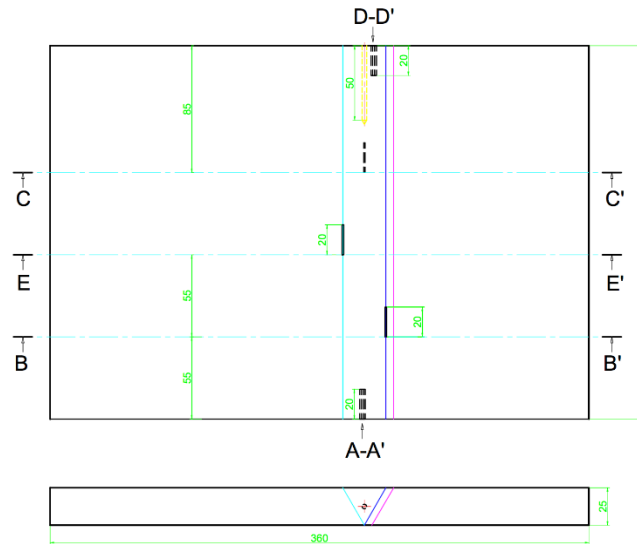


圖 1-9 超音波檢測規塊之尺寸加工設計圖。(A：銲道中心線底部 SS/銲道介面斜刻槽、B：碳鋼端頂部銲道/IN 182 緩衝層介面直刻槽、C：銲道中心線底部直刻槽、D：銲道中心線底部銲道/IN 182 緩衝層介面斜刻槽及 SDH $\phi 3 \times 50 \text{ mm}$ 、E：不銹鋼端頂部 SS/銲道介面直刻槽)

表 1-1 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 (3.8)	N/A	8.6 (3.3)	10.5	N/A	10.5
覆銲件 (A508 端)	11.1	10.4	7.6 (4.8)	7.4 (3.6)	N/A	10.7
覆銲件 (316L 端)	8.9 (3.1)	N/A	8.4 (5.5)	11.9 (3.8)	11.1	11.5

貳、研究方法與過程

為完成本委託研究計畫之分析項目，規劃之實驗流程圖如圖 2-1 所示。

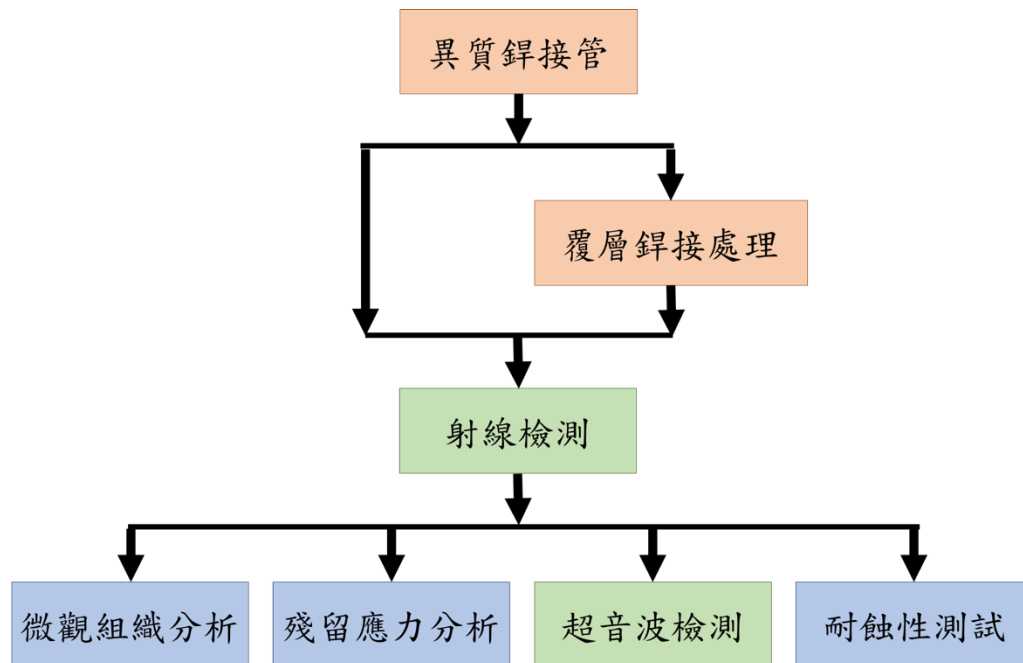


圖 2-1 實驗流程圖。

2.1 金屬材料

本研究之底材使用 A508 Grade 1、A182 F304 管件，分別依照 ASTM A508/508M-95, 4.4.2、ASTMA182/A182M-18a 之規範，以熱鍛成形加工，再進行後熱處理。鋼料之化學成分如表 2-1 所列。A508 鋼管以 930 °C 持溫 3 小時淬火急冷，再以 640 °C 持溫 3 小時快速冷卻，其機械性質之試驗報告與熱處理製程詳見附錄 A。F304 鋼管則施以不銹鋼標準製程之 1050 °C 固溶處理，其材料證明詳見附錄 A。底材之顯微組織如圖 2-2 所示，A508 基地相為細緻的回火麻田散鐵 (temper-martensite)；F304 基地相為沃斯田體結構，黑色條狀物為析出肥粒鐵。

為避免熱鍛加工、熱處理製程產生脫碳層 (decarburation zone)，管件下料之裕度皆設定為 10 mm，再透過車床加工為外徑 350 mm、內徑 250 mm、長度 260 mm 的銲接底材。詳細尺寸如圖 2-3 所示。

表 2-1 本研究使用之金屬材料的化學成分。(wt. %)

	C	Si	Mn	P	S	Fe	Ni	Cr	Mo	N	Cu	Ti
304L SS	0.024	0.28	1.62	0.027	<0.5	Bal.	8.1	18.33	0.25	0.081	---	---
A508 Gr.1	0.19	0.23	1.05	0.01	0.006	Bal.	0.03	0.10	0.02	0.0	0.08	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 (IN82)	0.009	0.11	3.18	0.004	0.003	0.35	73.6	20.0	---	---	<0.01	0.35
ERNiCrFe-3 (IN182)	0.04	0.40	5.45	0.005	0.004	4.24	73.50	14.70	---	---	0.01	0.01
ERNiCrFe-7 (IN52M)	0.03	0.13	0.76	0.003	0.0006	8.53	59.14	30.20	0.01	---	0.03	0.23
ERNiCrFe-13 (IN52MSS)	0.03 max	0.5 max	1.0 max	0.02 max	0.015 max	Bal.	---	28.0-31.5	3.0-5.0	---	0.3 max	0.5 max
	Cb+Ta	Co	Al	Nb+Ta	Al+Ti	B	Zr	Others	Ni+Co			
ERNiCr-3 (IN82)	2.64	<0.1	0.10	---	---	---	---	---				
ERNiCrFe-3 (IN182)	---	---	---	1.52	---	---	---	---				
ERNiCrFe-7 (IN52M)	---	0.010	0.09	0.80	0.32	<0.001	<0.01	<0.50				
ERNiCrFe-13 (IN 52MSS)	---	---	0.5 max	1.5-3.5	1.5 max	---	---	0.5 max	54.0-62.0			

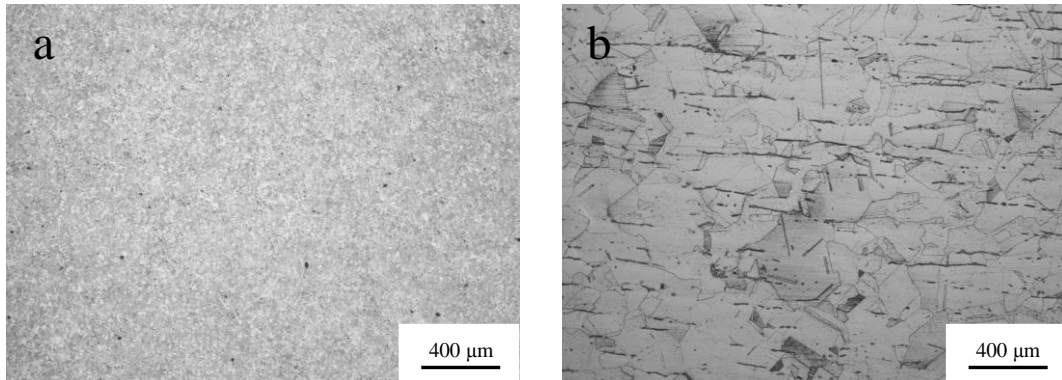


圖 2-2 (a) A508、(b) F304 之底材顯微金相圖。

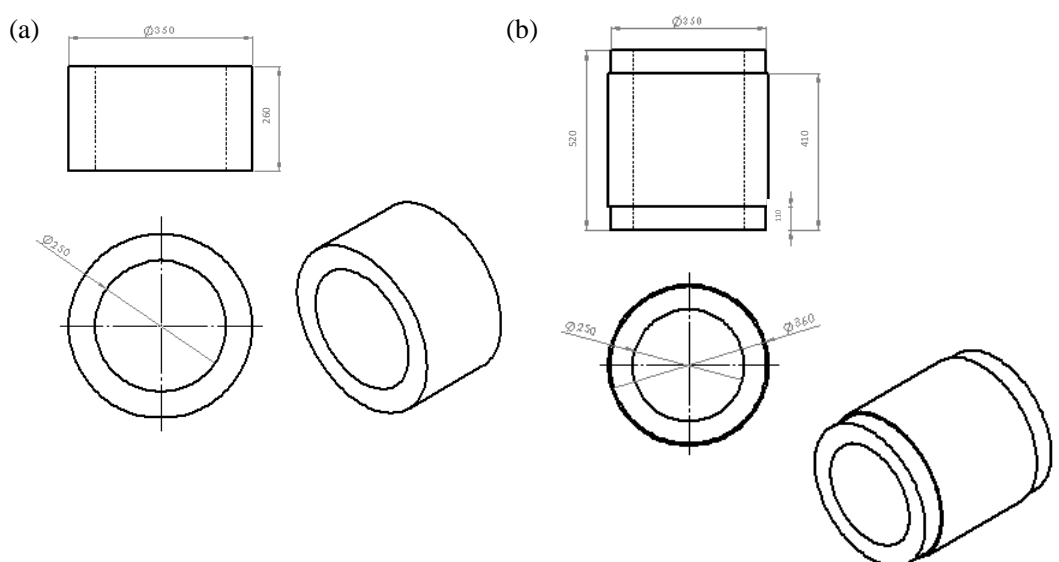


圖 2-3 (a) 管件、(b) 覆銲件之加工尺寸圖。

異質銲接金屬使用鎳基 82/182 合金銲條，以鎳基 82 合金 (Inconel 82, IN82) 為滲透銲接之填料金屬、鎳基 182 合金 (Inconel 182, IN182) 為填料銲接之填料金屬。覆銲層金屬使用鎳基 52M/52MSS 合金 (Inconel 52M/52MSS, IN52M and IN52MSS) 銲線為覆層銲接處理之填料金屬。金屬銲條、銲線之化學成分如表 2-1 所列。

2.2 銲接件製作

本研究之底材為異質銲接件，牽涉多種金屬材料、銲接處理，為簡化實驗分析之變因，銲接參數皆視為固定因子，不另討論分析。核電廠冷卻水壓力邊界管件之施作工法較一般管件對接處理繁複，為避免使讀者混淆，有必要於實驗方法中獨立一節進行說明。詳細銲接參數如表 2-2 所列

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

機台使用 DAIHEN 公司生產之 INVERTER ELECON 300P 機型 (如圖 2-4a)，以 DC-模式進行銲接處理。銲槍視試件形狀架設在不同之載具，管狀試件以全自動複合機組整合起弧位置、轉動速度與送料系統，板狀試件則搭配半自動 XY 平台移動銲槍，相關設備外觀如圖 2-5 所示。

2.2.2 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 2-4b)，以 DC+模式進行銲接處理。IN182 銲料使用前須置入加熱槽體加熱至 300 °C、持溫 1 小時，降溫至 200 °C 備用。銲槍由本團隊之銲接國手以手持方式進行填料。

表 2-2 本研究使用之銲接參數。

工作項目	參數 銲料種類	直徑 (mm)	電流 (A)	電壓 (V)	預熱 (°C)	層間 (°C)
低合金鋼端緩衝層	IN182	3.2	100	26~29	120	110~120
滲透銲接	IN82	2.4	110	11.2	120	110~120
填料銲接	IN182	4.0	140	16~28	120	110~120
不銹鋼端緩衝層	ER308L	1.6	120	10.9~11.5	120	110~120
鎳基合金覆銲層	IN52M/52MSS	0.9	120	10.9~11.5	120	110~120

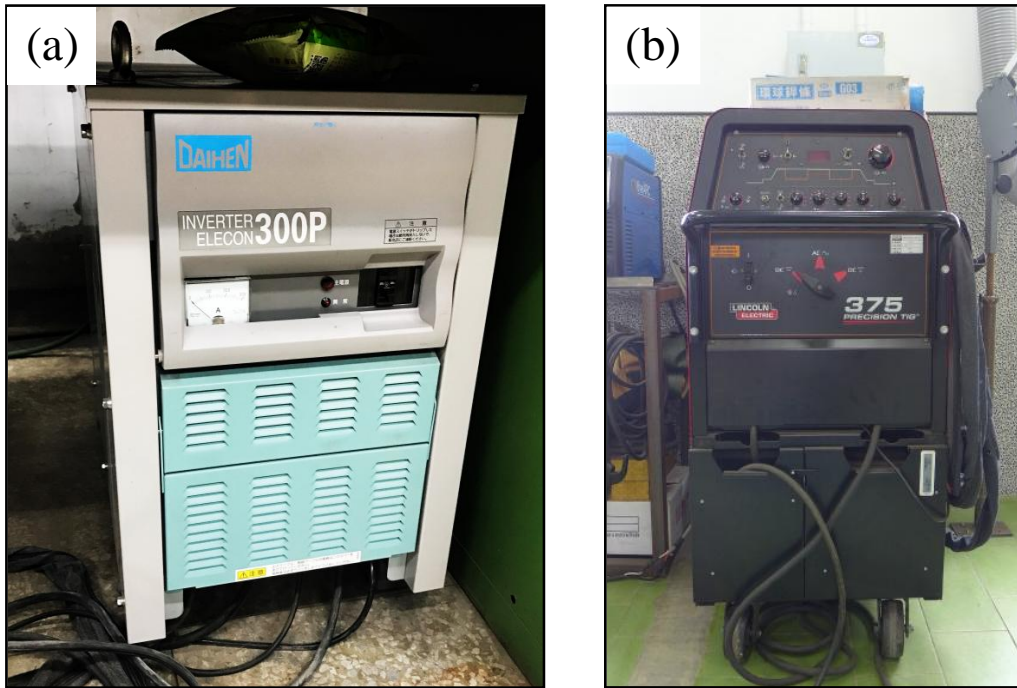


圖 2-4 (a) GTAW 銲接機台、(b) SMAW 銲接機台之外觀照。

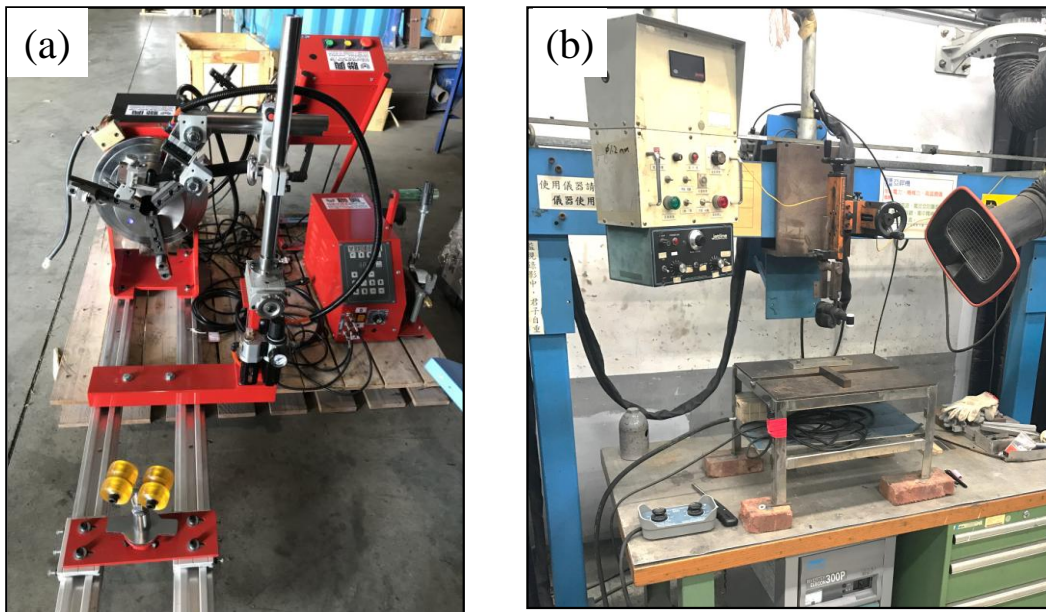


圖 2-5 (a) 全自動複合機組、(b) 半自動 XY 移動平台之外觀照。

2.2.3 低合金鋼端緩衝層

使用 SMAW 技術，於 A508 低合金鋼端之 V 型槽表面，製作 3 層 IN182 緩衝層，共計 32 道次。為避免銲接處理時產生之高溫導致管內壁尖端處的材料熔損，將 IN182 銲條外部包裹之銲藥移除後，以點銲方式連接為底板，並固定於低合金鋼管內壁，如圖 2-6a, b 所示。為降低夾渣、熔合不良等瑕疵發生機率，待每道次 IN182 凝固，依序以手持式砂輪研磨機、手持式電動鋼刷、電刻鑽清潔銲道表面，移除銲料進給特徵。材料移除率約 5~10%。完成之低合金鋼端緩衝層外觀與細部特徵如圖 2-6c, d 所示。為討論銲後熱處理對殘留應力之影響，依據 ASME BPVC Section III-Div.1-Subsection NB 4622 規範，對低合金鋼端緩衝層進行 650 °C 持溫 2 小時之熱處理，以熱處理 A508 件之銲接管件稱為 Y-PWHT，未進行熱處理稱為 N-PWHT。

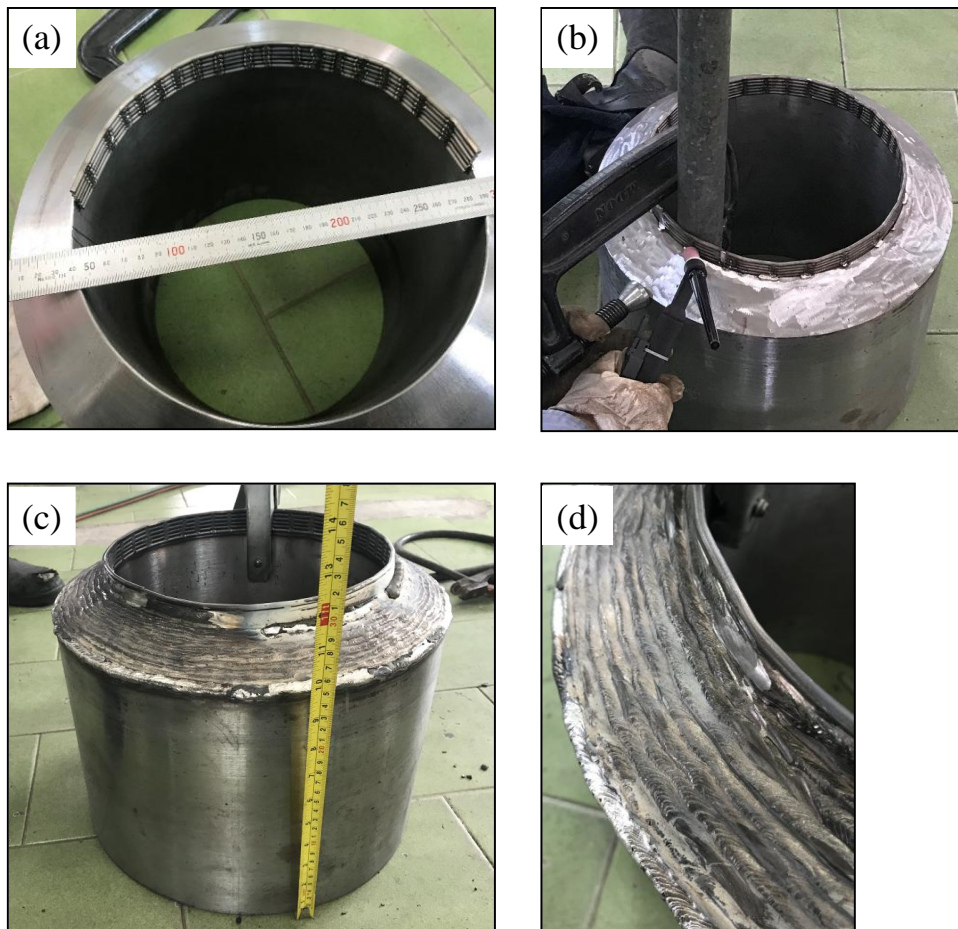


圖 2-6 (a)(b) IN182 底板安置方法、(c)(d) IN182 緩衝層完成外觀之照片。

2.2.4 管件對接

使用 GTAW 技術，以 IN82 為銲料，將低合金鋼與不銹鋼端銜接，施作 3 層共計 3 道次。如圖 2-7a 所示，為避免銲接產生之高溫，造成管件中心軸偏倚，於開槽處每 60 度銲接暫時性輔助板。為避免滲透銲接金屬生成氣孔、夾渣、脆裂等瑕疵，管件內部以銅管通入氬氣背吹（流量 25L/min），管件兩端以耐熱膠布封口。完成之 IN82 對接層如圖 2-7b 所示。

使用 SMAW 技術，由不銹鋼端側依序填入 IN182 銲料，直至表層之銲冠高度高於管件外圓周。填料銲接過程及銲件完成外觀照見圖 2-7c,d。銲道結構示意圖如圖 2-8 所示，施作 IN182 填料 15 層，共計 63 道次。為降低夾渣、熔合不良等瑕疵發生機率，待每道次 IN182 凝固，依序以手持式砂輪研磨機搭配陶瓷砂輪片及碳化矽砂輪片、手持式電動鋼刷、電刻鑽清潔銲道表面，材料移除率約 2~5%。

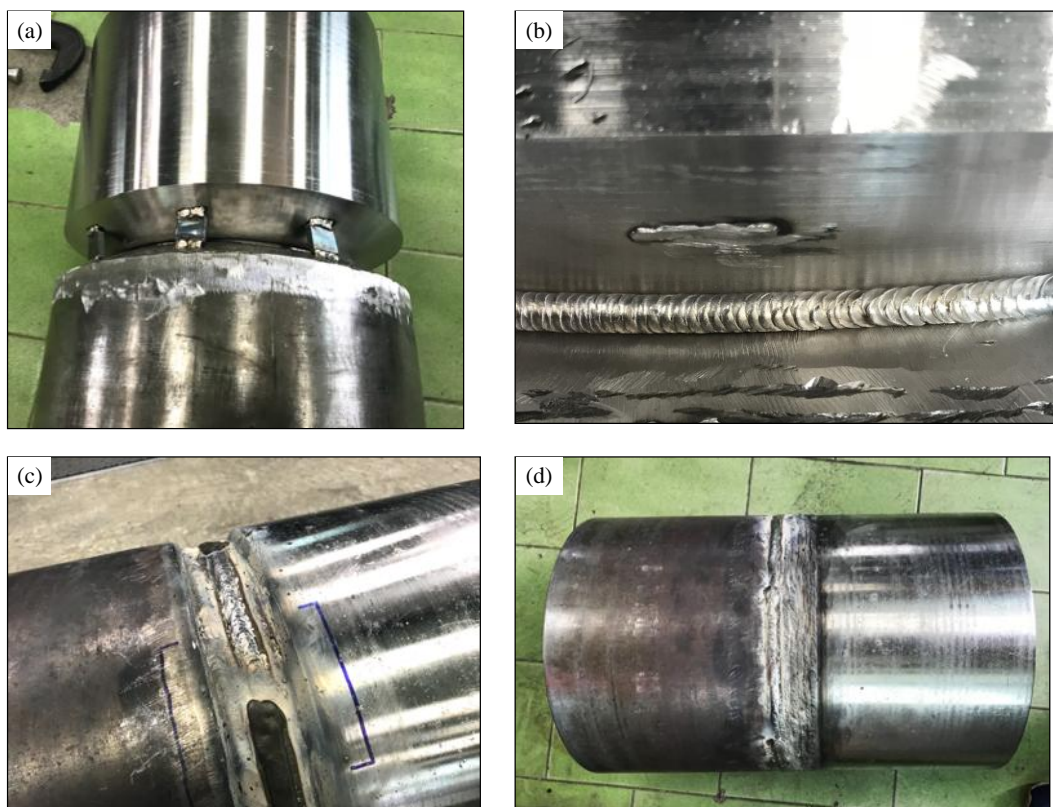


圖 2-7 (a) 暫時性輔助板銲接、(b) IN82 道次完成、(c) IN182 填料過程，以及 (d) 完成之銲接管件的外觀照。

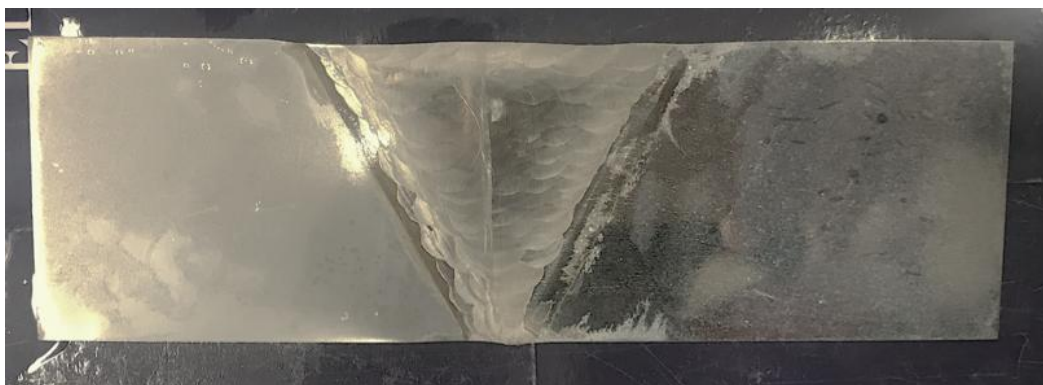
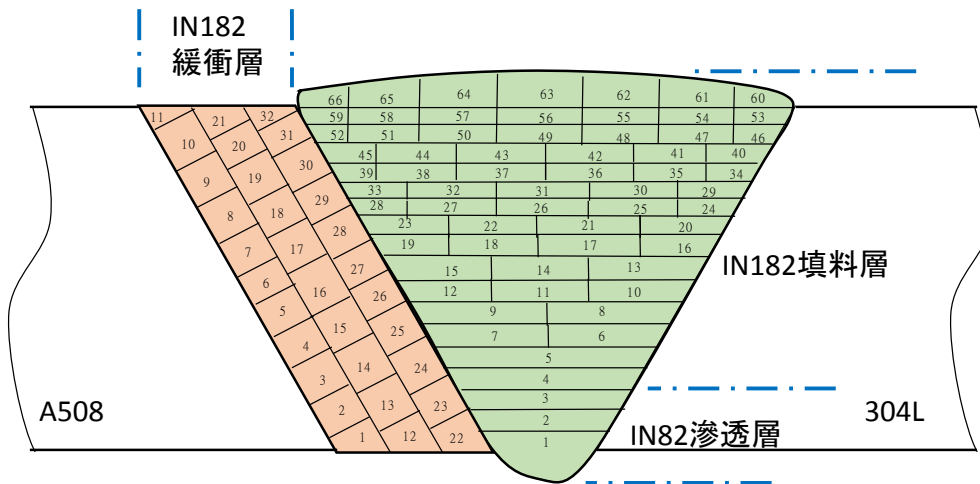


圖 2-8 銲道結構示意與實際巨觀金相外觀。

2.3 覆銲層製作

核電廠冷卻水壓力邊界異質銲接管件進行鎳基合金覆層銲接處理，步驟及注意事項繁雜，為避免讀者混淆，有必要獨立一節討論。本研究將以銲道為中心，向左、右兩端各施作 150 mm 範圍之銲覆層，厚度 5 mm。

2.3.1 不銹鋼端緩衝層

使用 GTAW 技術，以 ER308L 為銲料，搭配全自動複合機組，施作 2 層緩衝層於 304L 不銹鋼端表面，共計 74 道次。為避免熔合不良、熔填不足等現象，銲接管件先以手持式砂輪研磨機將氧化層移除（如圖 2-9a）；施作緩衝層過程中，待每道次 ER308L 凝固，依序以手持式砂輪研磨機搭配陶瓷砂輪片、手持式電動鋼刷移除銲料進給特徵與圓角，材料移除率約 15~20%。不銹鋼端緩衝層完成之外觀見圖 2-9b。

2.3.2 鎳基 52M 合金

使用 GTAW 技術，以 IN52M 為填料，搭配全自動複合機組，製作本研究所需之覆銲管件。由不銹鋼端向低合金鋼端依序施作，為避免熔合不良、熔填不足等現象，待每道次 IN52M 凝固，依序以手持式砂輪研磨機搭配陶瓷砂輪片、手持式電動鋼刷移除銲料進給特徵與圓角，材料移除率約 15 ~ 20 % (圖 2-9c, d)。完成之覆銲管件含 3 層覆銲層：第 1 層 52 道次、第 2 層 84 道次、第 3 層 91 道次，共計 227 道次。覆銲管件稱為 Y-PWHT-52M 外觀如圖 2-10 所示。

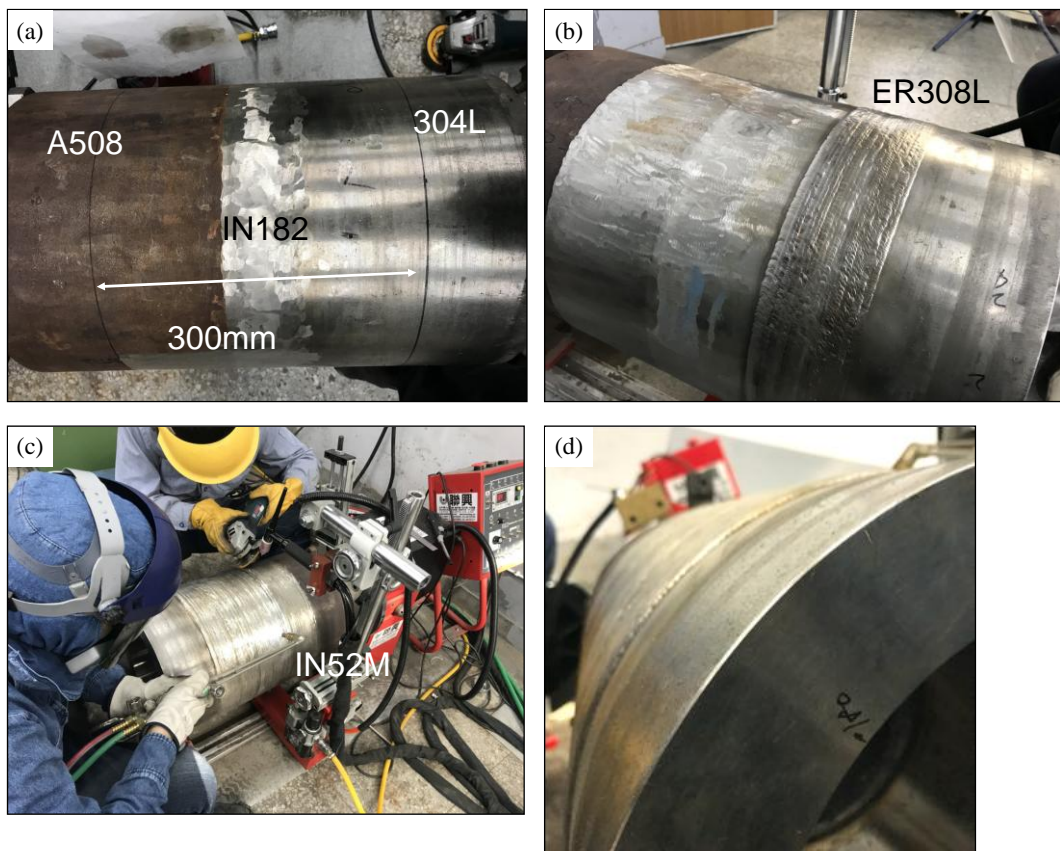


圖 2-9 (a) 異質銲接管件欲施作 IN52M 覆銲層之範圍、(b) IN182 緩衝層完成外觀、(c) IN52M 覆銲層施作過程，以及(d) 未完成之 IN52M 覆銲層側視外觀照。

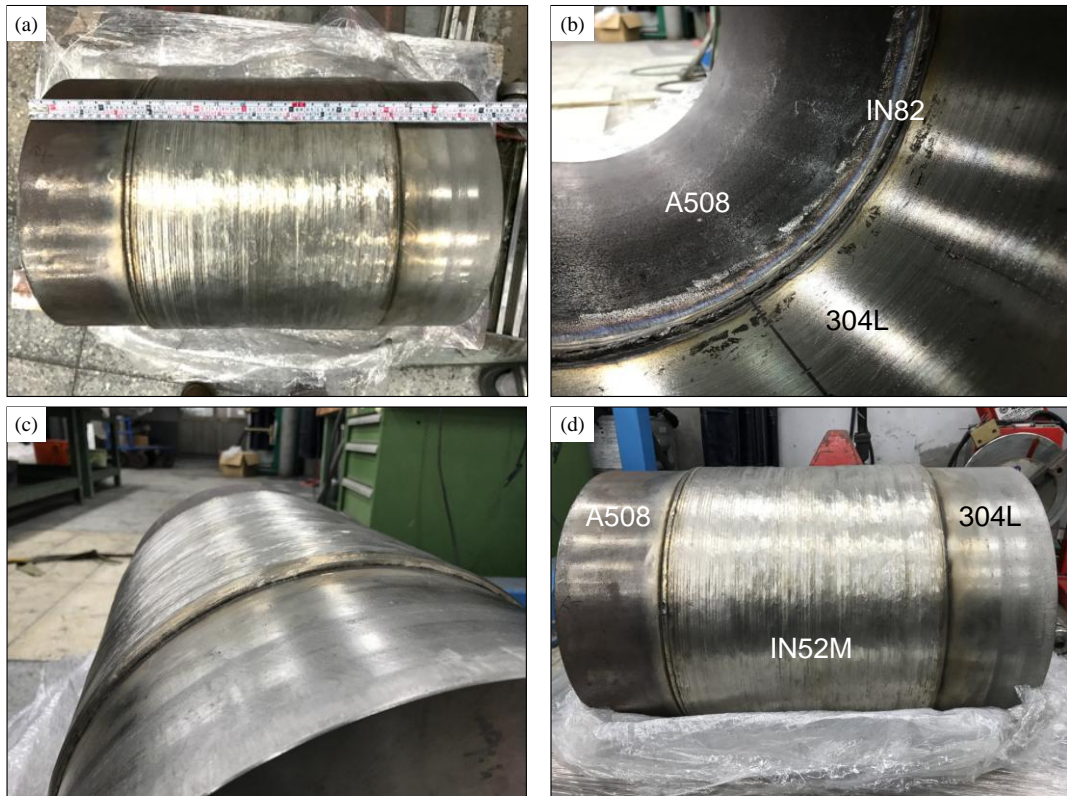


圖 2-10 覆銲管件之(a) 俯視、(b) 管內壁、(c) 側視，以及(d) 正視之外觀照。

2.3.3 鎳基 52MSS 合金

使用 GTAW 技術，以 IN52MSS 為填料，搭配半自動 XY 移動平台，於 A508 低合金鋼板表面製作本研究所需之覆銲板件。施作 3 層覆銲層，共計 61 道次，長度 150 mm、寬度 10 mm。覆銲板件外觀如圖 2-11 所示。

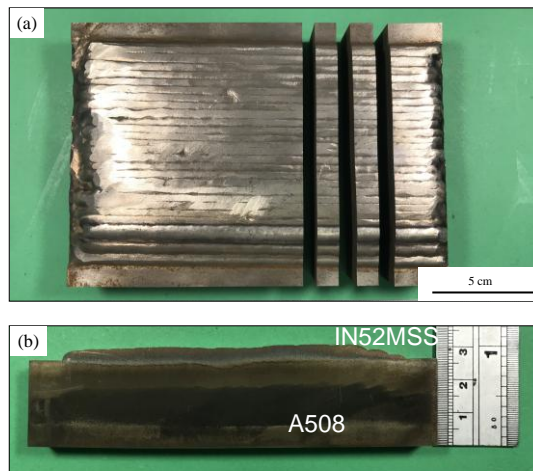


圖 2-11 覆銲板件之(a) 俯視、(b) 裁切側視之外觀照。

2.4 射線檢測

異質銲接管件、覆銲管件施作完成後，依據 JIS Z 3106 – 2001 規範，利用 Ir192 中心照模式之非破壞射線檢測法，探測銲道內部有無銲接瑕疵，如熔合不良、熔填不足、夾渣、氣孔等現象。用以協助評估超音波檢測對瑕疵檢出能力。

本研究製作之 2 支編號異質銲接管件、1 支覆銲管件，其中 1 支(N-PWHT) 於銲道處發現 1 夾渣訊號（底片編號 N-PWHT-3），長度約 9 mm，經判斷後為可接受範圍。詳細檢測結果見附錄 B。

2.5 殘留應力量測

透過二維殘留應力分析儀（PULSTEC u-X360n）量測銲接、覆銲管內壁範圍介於銲道中心兩側，以 3 mm 為 1 間隔之量測點，若有需要則以 10 mm 為間格量測較大範圍之數據。管件內壁除對接前之車削粗加工，受限於管內徑尺寸，並未進一步進行機械精加工及電解拋光處理。為求量測數據之完整程度，將管件以 90 度劃分為 4 條量測線，依序量測後再進行交叉比對。量測過程如圖 2-12 所示。

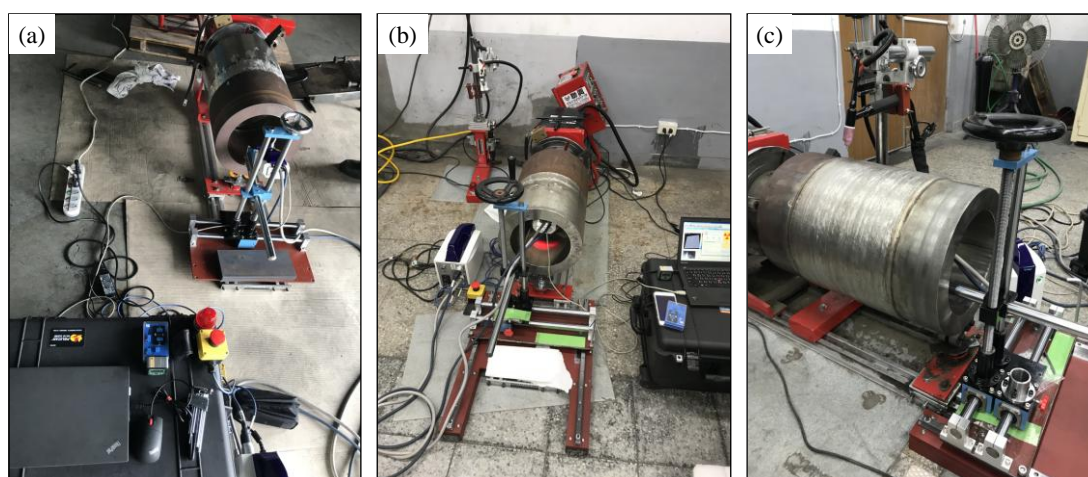


圖 2-12 二維殘留應力分析(a) 銲接管件 1 (N-PWHT)、(b) 銲接管件 2 (Y-PWHT)、(c) 覆銲管件 (Y-PWHT-52M) 之過程外觀照。

2.6 殘留應力模擬

溫度及殘留應力模擬使用 ABAQUS 有限元素分析軟體，建立上述模型，透過熱學及力學理論模組，以移動面積熱源 (heat flux) 分析填料銲接、覆層銲接施作完成後，銲接管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管件之入熱及殘留應力的影響性。

另一方面，為比較殘留應力量測與殘留應力模擬之偏差量，異質銲接管件於滲透銲接完成後，以 60 度劃分 6 條定位線，沿管件軸心方向每 20 cm 劃分 1 量測點，如圖 2-13 所示。量測時間點設定為：填料銲接前、覆銲處理前，以及覆銲處理後。

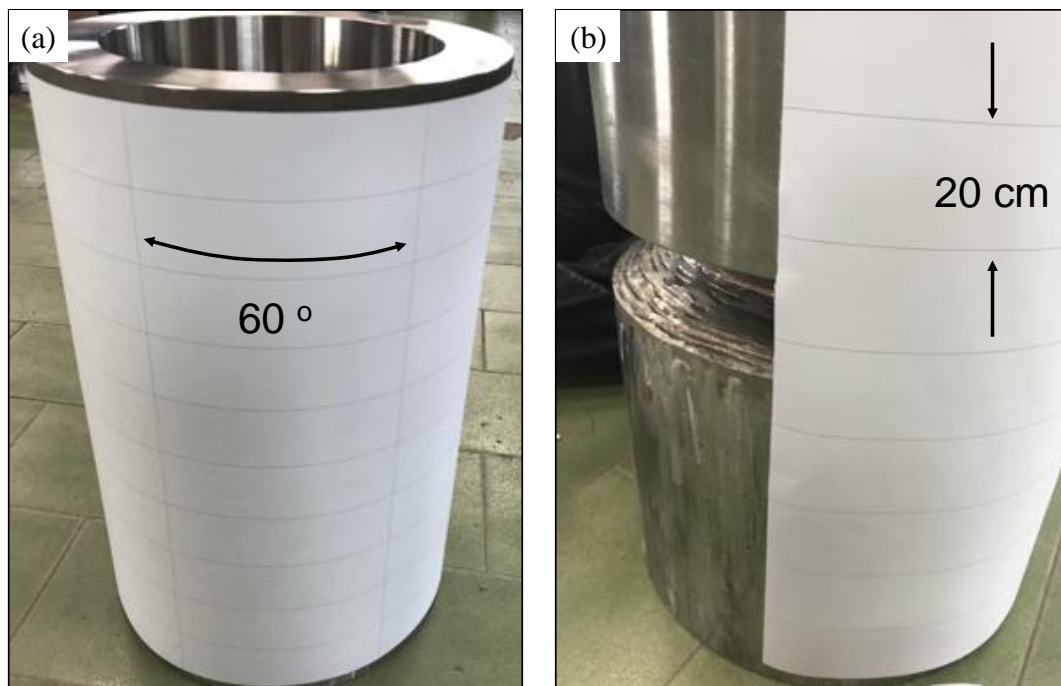


圖 2-13 異質銲接管件之定位線與量測點劃分方法。

2.7 超音波量測

使用雙晶 (P-R S-scan, 縱波) 探頭, 自 A508 端與 304L 不銹鋼端沿垂直銲道中心線方向線掃描, 用以確認波式之檢出能力及準確度。透過超音波檢測儀分析異質銲接及合金覆銲層對衰減率之影響。為定量瑕疵檢出位置與異質銲接介面之關聯性, 依照銲接管件之銲接參數及銲接結構, 施作 2 英吋厚之異質銲接板件。透過放電加工、深孔鑽加工, 以及多軸複合加工機, 製作人工瑕疵。銲接板件及銲接管件之加工圖如圖 2-14 及圖 2-15 所示。

2.8 金相分析

銲接管件以放電線切割加工 (Wire electric discharge machining, WEDM), 沿圓大徑方向垂直銲道切取厚度 10 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 μm 、3 μm 氧化鋁懸浮液及 0.07 μm 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, 304L 不銹鋼端使用以 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。鎳基合金銲料浸至於 10 wt. % 草酸水溶液中, 搭配直流電源供應器, 以 6 V 電解蝕刻 60~100 秒。

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。

2.9 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 0.1 mm 打 1 點。下壓力 300 g、持壓時間 15 秒。探討覆銲層施作對底材之熱影響範圍及程度。

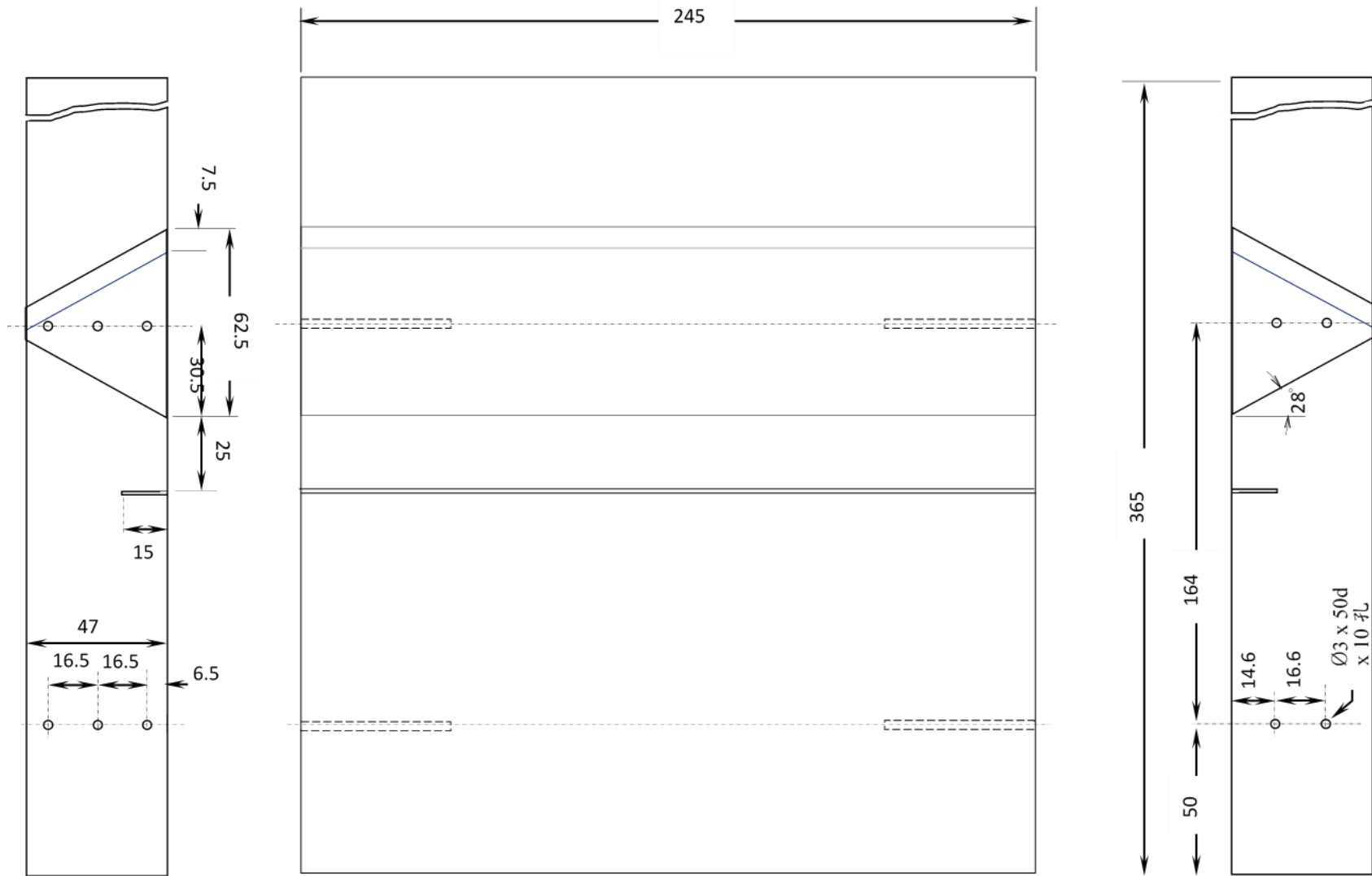


圖 2-14 異質銲接板件之銲道規塊加工圖。

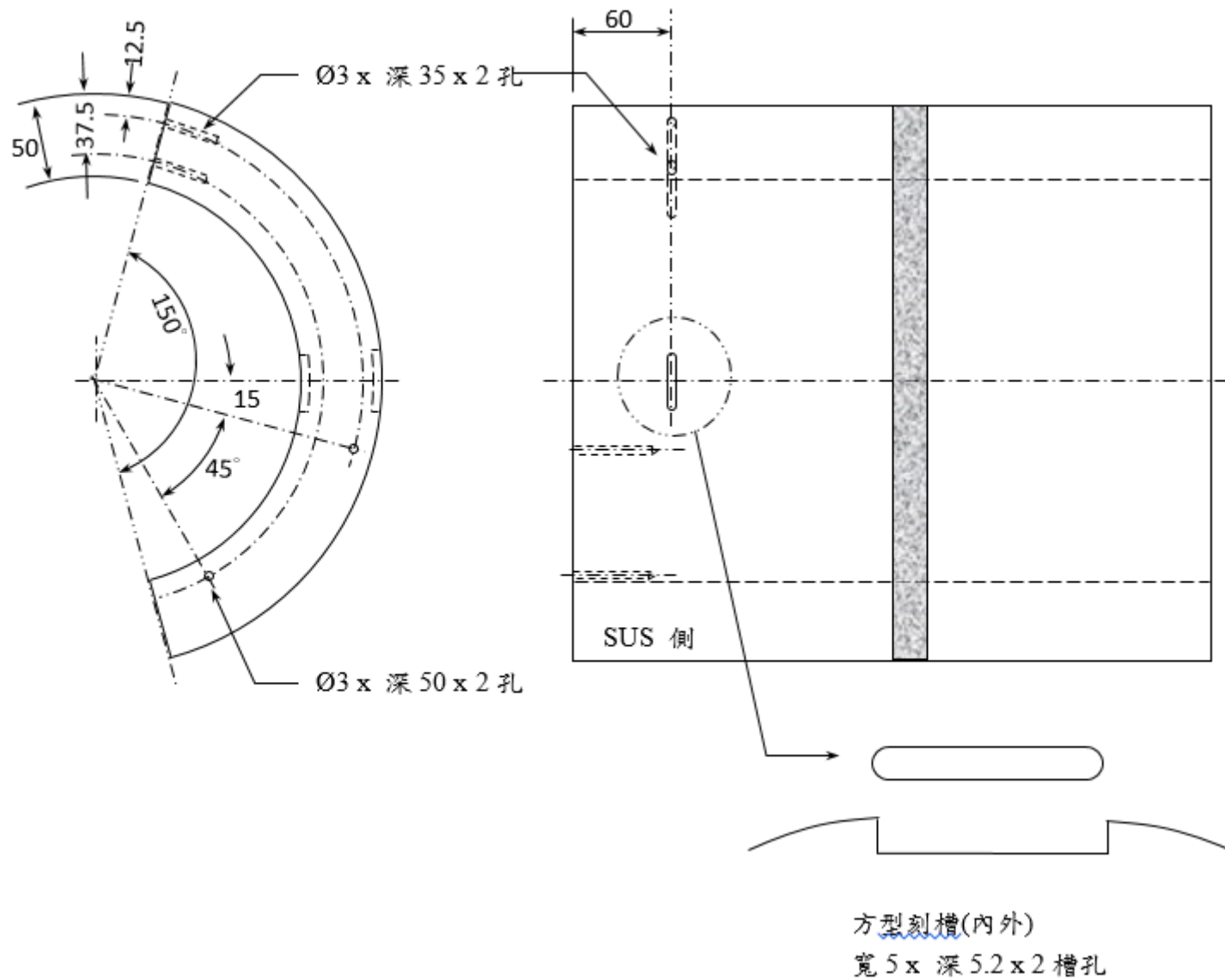


圖 2-15 異質銲接管件之銲道規塊加工圖。

2.10 穿透式電子顯微鏡 (TEM) 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 μm ，再依序以各號數砂紙研磨至厚度低於 80 μm ，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 $^{\circ}\text{C}$ 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。

2.11 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、動電位極化量測、雙環極化量測。試驗溶液使用 3.5 wt. % NaCl 水溶液，試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、異質材料對覆鋅層、異質鋅接件之耐蝕性影響。

2.12 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) 場發射掃描式電子顯微鏡：

型號 JEOL JSM-6500F、JEOL JSM-7900F，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)。此機台皆為台灣科技大學貴儀中心設備。

(三) 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。

(四) 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)。

(五) 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。

(六) 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 ψ 0.8~2.0 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。由於 X 光的屏蔽效應，低合金鋼端需以鉻靶材量測，不銹鋼端則改以錳靶材量測。

(七) 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，搭配雙晶陣列探頭 (2.25DM7X4PM-19X12 A17) 與楔形塊 (SA17-DN55L0) 組。

參、主要發現與結論

3.1 緩衝層對銲接金屬之電化學特性的影響

底材金屬於異質材料銲接前，如異質銲接處理、覆層銲接處理，須預先施作不等厚度之調和金屬層。為了解緩衝層施作對銲接金屬之化學成分、顯微結構、析出物及耐蝕性影響，利用 WEDM 沿底材表面向上逐層切割，裁切之試片表面依序以水砂紙研磨至 600 號。

3.1.1 低合金鋼端鏢基 182 合金

A508/304L 之異質銲接件滲透銲接處理前，需於 A508 鋼材之開槽表面施作 3 層的緩衝層，詳細施作步驟見 2.2.3 節所述。為評估 IN182 緩衝層施作對 IN182 填料銲道之耐蝕性影響，分別製作含 3 層 IN182 緩衝層及 1 層銲接層之試片（182BB）、3 層銲接層之試片（182FF）。填料銲接使用銲條直徑 4.0 mm、銲接電流 140 A 為銲接參數，每道次 182FF 具有較多的填料量及較高之底材稀釋率。182BB 則將銲接電流降低至 100 A、銲條直徑縮減至 3.2 mm，以降低每道次銲道之熔填量。為釐清電化學試驗之試片表面成份差異，以鏢基合金與低合金鋼介面為基準，每 300 μm 量測 1 點，其結果繪製如圖 3-1 及圖 3-2 所示。182FF-L1、182BB-L1 厚度分別約 2.4 mm、1.9 mm，182FF-L1 之 Ni 元素的含量平均介於 40 ~ 50 wt. %、Fe 元素平均介於 30 ~ 45 wt. %；182BB-L1 之 Ni 元素的含量平均 55 wt. %、Fe 元素平均 20 wt. %。其中，182FF 之 Fe 元素的含量至 L3 時，仍維持在 10 wt. % 之上；相反地，182BB-F 中的 Fe 元素的含量則降低至 IN182 銲料合金內的標稱成分。在維克氏硬度結果中（圖 3-3），182BB 之 L1、L2 量測值相較於 182 之 L1、L2 量測值高約 15 ~ 25 HV，少量量測點受到柱狀晶的成長方向而有較大的差異值。兩種試片之硬度值在 182FF-L3 與 182BB-F 時，受到入熱量、過冷度值相似，才具有相同的硬度分佈趨勢。

各試片之動電位極化試驗的測量值列於表 3-1、電位對電流密度做圖如圖 3-4 及圖 3-6 所示。以 FE-SEM 觀察試驗後之試片表面，182FF-L1 試片呈現枝晶間腐蝕（Inter-dendritic corrosion）形貌（圖 3-5b），散布之白色條狀析出物經 EDS 成分分析為 (Nb, Ti)C。圖 3-5c 顯示 182FF-L2 試片表面具有巨大的腐蝕塌陷坑洞，藉由放大倍率掃描結果（圖 3-5d）得知，枝晶間腐蝕為主要腐蝕形貌。另一方面，尺度約 5 ~ 10 μm 葉脈狀之 (Nb, Ti)C 散佈於之枝狀晶晶間。

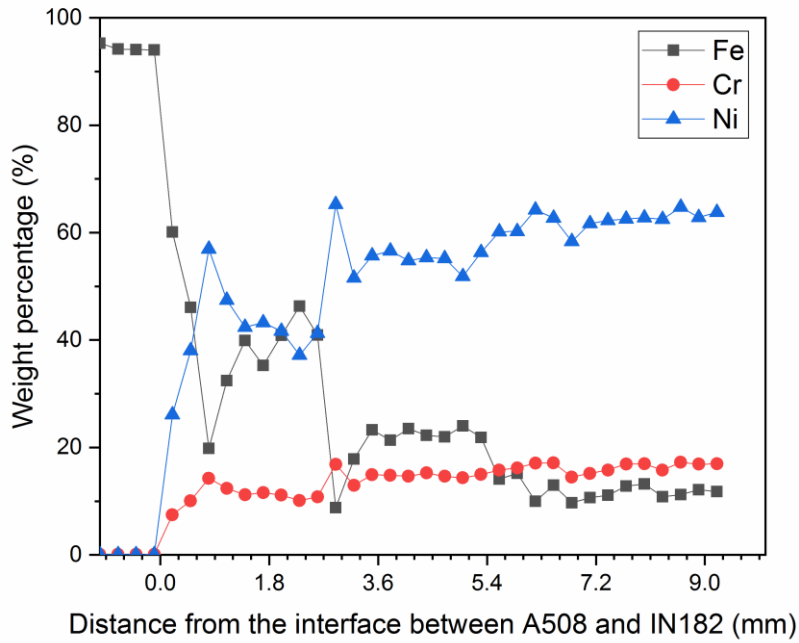


圖 3-1 182FF 沿底材介面向鎳基合金方向之 EPMA 逐點成分分析。

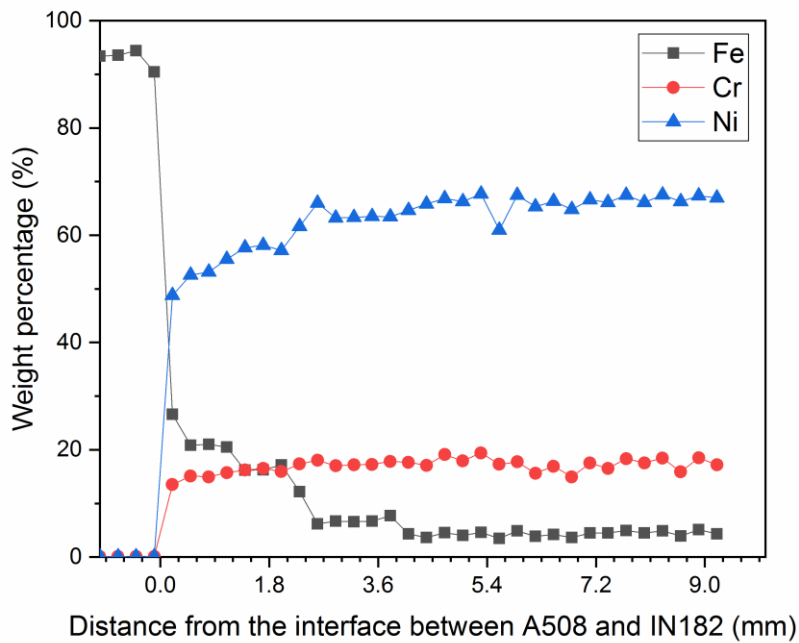


圖 3-2 182BB 沿底材介面向鎳基合金方向之 EPMA 逐點成分分析。

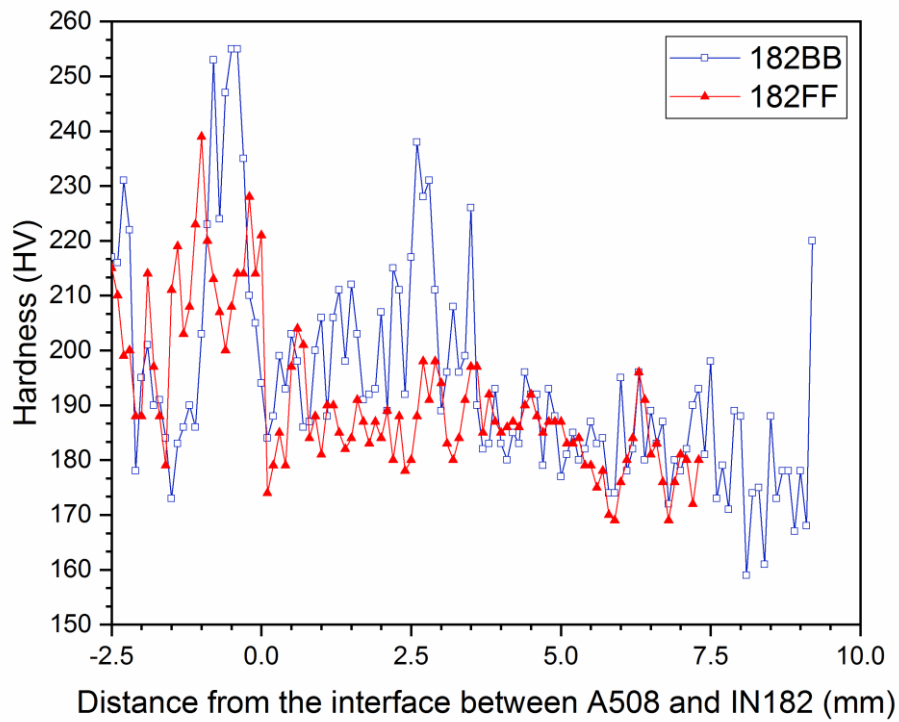


圖 3-3 182FF、182BB 沿底材介面向鎳基合金方向之逐點維克氏硬度。

表 3-1 182FF、182BB 之動電位極化試驗之腐蝕電位及腐蝕電流。

	182FF			182BB			
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	F
$E_{\text{corr}}(\text{mV})$	-392	-261	-219	-523	-314	-323	-298
$I_{\text{corr}}(\text{A}/\text{cm}^2)$	1.01×10^{-6}	1.29×10^{-6}	1.42×10^{-6}	5.41×10^{-5}	1.15×10^{-6}	1.22×10^{-6}	9.79×10^{-5}

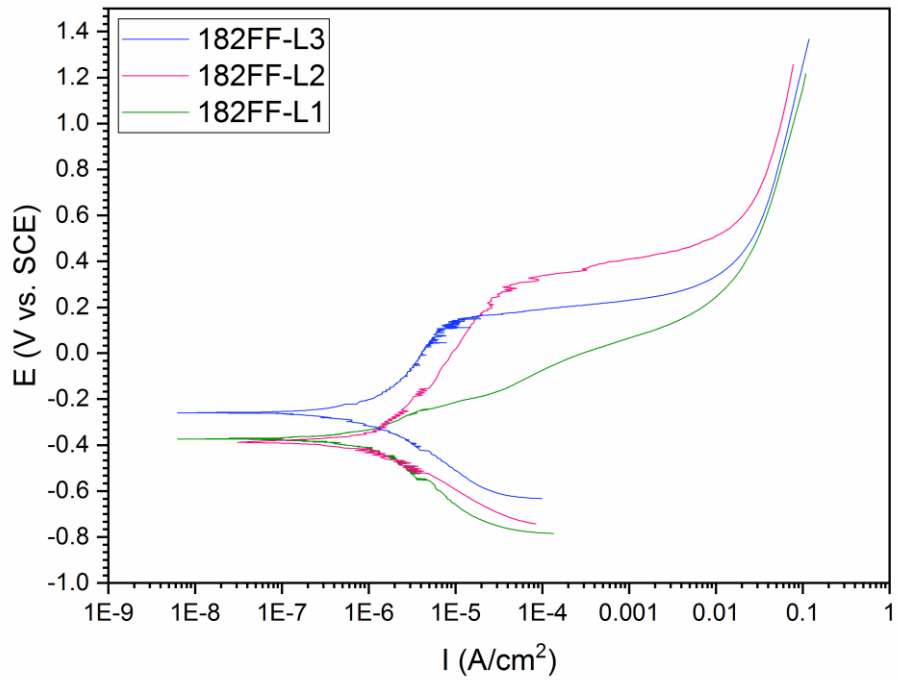


圖 3-4 182FF 在 3.5 wt. %NaCl(aq)環境中之動電位極化曲線圖。

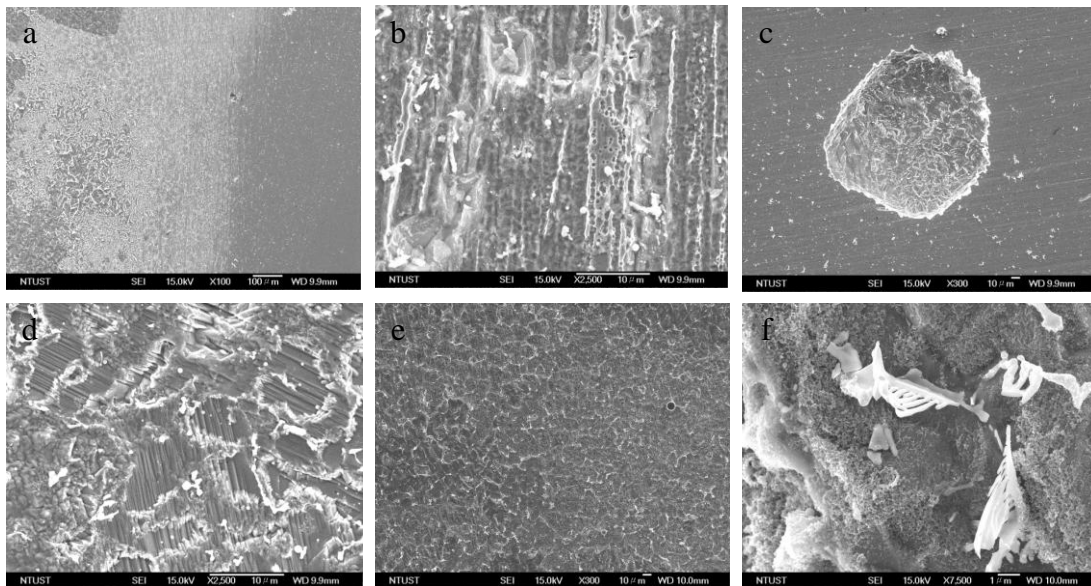


圖 3-5 182FF 之(a)(b) L1、(c)(d) L2、(e)(f) L3 層在 3.5 wt. %NaCl(aq)環境中經動電位極化試驗後之表面 SE 影像。

182BB 試片表面 SE 影像如圖 3-7 所示，182BB-L1 之腐蝕形貌以枝晶間腐蝕為主。放大倍率如圖 3-7b，可觀察到枝晶間有圓型的腐蝕小孔洞，推測 182BB-L1 試片可能同時受到孔蝕 (Pitting) 造成金屬之消耗。當層數愈高時，182BB 的枝晶間腐蝕形貌愈不明顯，直至以孔蝕形貌為主。值得一提的是，182BB 的(Nb, Ti)C 呈現白色顆粒狀，尺度皆介於 $1\ \mu\text{m}$ 之間，見圖 3-7b, h。在動電位極化曲線圖中，182BB 之 L2、L3、F 及 182FF 之 L3 在 $-200\ \text{mV}$ 具有明顯的孔蝕平台 (Pitting plateau, E_{pit})。然而，比較表 3-1 中的腐蝕電位及電流值，IN182 緩衝層的施作並沒有顯著的差異性。為此，以雙環極化模式進行各試片之電化學試驗，在相對緩慢的電位改變下，量測試片表面之氧化膜生成、氧化膜穩定性。

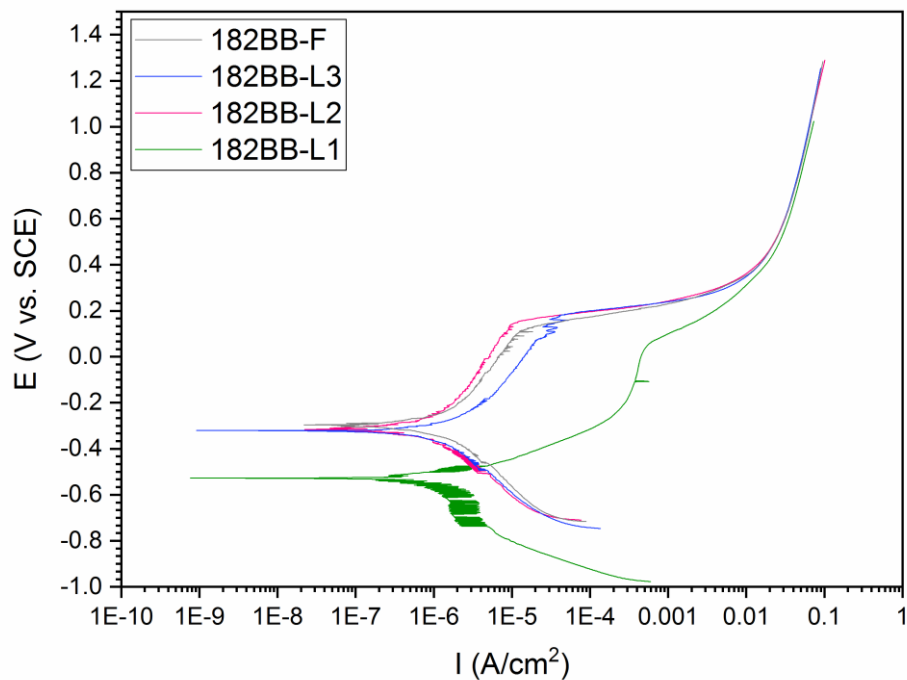


圖 3-6 182BB 在 3.5 wt. %NaCl_(aq)環境中之動電位極化曲線圖。

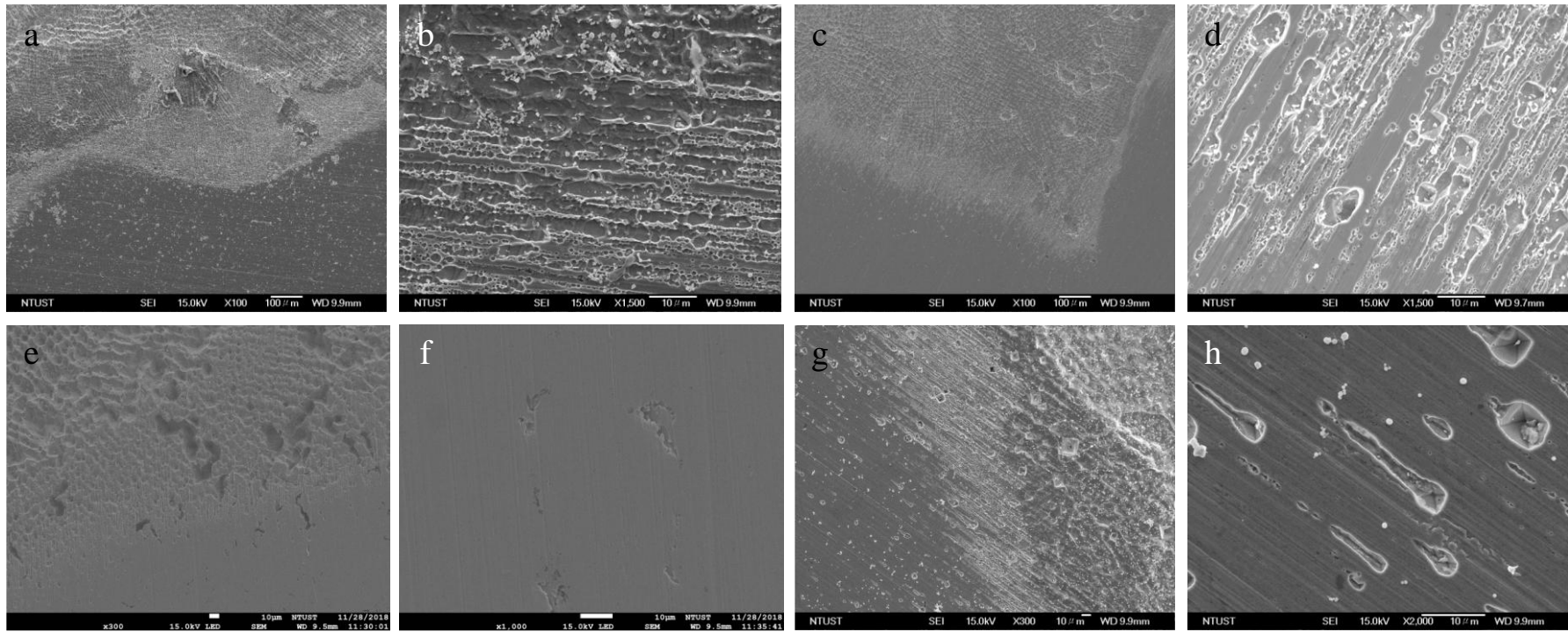


圖 3-7 182BB 之(a)(b) L1、(c)(d) L2、(e)(f) L3、(g)(h) F 層在 3.5 wt. %NaCl(aq)環境中經動電位極化試驗後之表面 SE 影像。

各試片之雙環極化試驗的電位測量值列於表 3-2、電位對電流密度做圖如圖 3-8 及圖 3-10 所示。182FF、182BB 皆沒有再鈍化電位 (E_{rep} , $E_{corr} < E_{pp}$) 的生成，其腐蝕電位經陽極、陰極極化後，均能維持相同的數值。182FF 之雙環極化曲線顯示，隨著層數的增加， E_{corr} 的陽極極化曲線之斜率愈大，傾向形成鈍化區 (passivity region)，亦伴隨著 E_{pit} 的生成。由於電位回掃的曲線未受到層數的影響，導致曲線下涵蓋的面積隨著層數的增加而增加，顯示 182FF-L3 在試驗中吸收最多的能量 (J)。對照試驗後之表面 SE 影像 (圖 3-9)，182FF-L1、L2 之試片表面，除銲接氣孔外，未觀察到明顯的腐蝕形貌。比較未進行試驗之試片表面，182FF-L1、L2 之 EDS 成分分析結果僅有些微的改變，可視為誤差值。如圖 3-9e, f 所示，182FF-L3 試片呈現截然不同之形貌，表面均勻散布白色樹枝狀析出物 NbC，以及晶粒覆蓋厚度 10 nm 左右之不具保護性的氧化鐵薄膜。

圖 3-10 中，182BB 各層之試片在陽極極化曲線生成 E_{pit} ，然其極化曲線並未像 182FF-L3 隨著電位持續上升轉變為電位回掃模式，代表經緩衝層施作之 IN182 鎳基合金具有較佳的化學穩定性。182BB-L1 之表面呈現均勻腐蝕 (General corrosion) 的腐蝕形貌，如圖 3-11a, b 所示，枝狀晶與枝狀晶間未有較大的腐蝕差異量，NbC 之晶界三角點也未觀察到孔蝕特徵。透過圖 3-11c, e 觀察得知，182BB-L2 及 L3 之腐蝕型態由單純均勻腐蝕轉變為均勻腐蝕、孔蝕的混合型態，在放大倍率的影像中 (圖 3-11f)，NbC 受到極化試驗影響，自枝狀晶晶間脫落至晶界三角點的孔洞中。182BB-F 在極化試驗後，試片表面未觀察到明顯之腐蝕形貌，其 EDS 成分分析結果僅較未進行試驗的區域有些微的改變：Fe 含量下降、O 含量上升，可視為 EDS 運算比例受到氧化膜生成產生改變。

表 3-2 182FF、182BB 之雙環極化試驗之腐蝕電位。

	182FF			182BB			
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	F
E_{corr} (mV)	-320	-252	-250	-718	-285	-317	-254
E_{pp} (mV)	-278	-252	-250	-568	-240	-232	-254

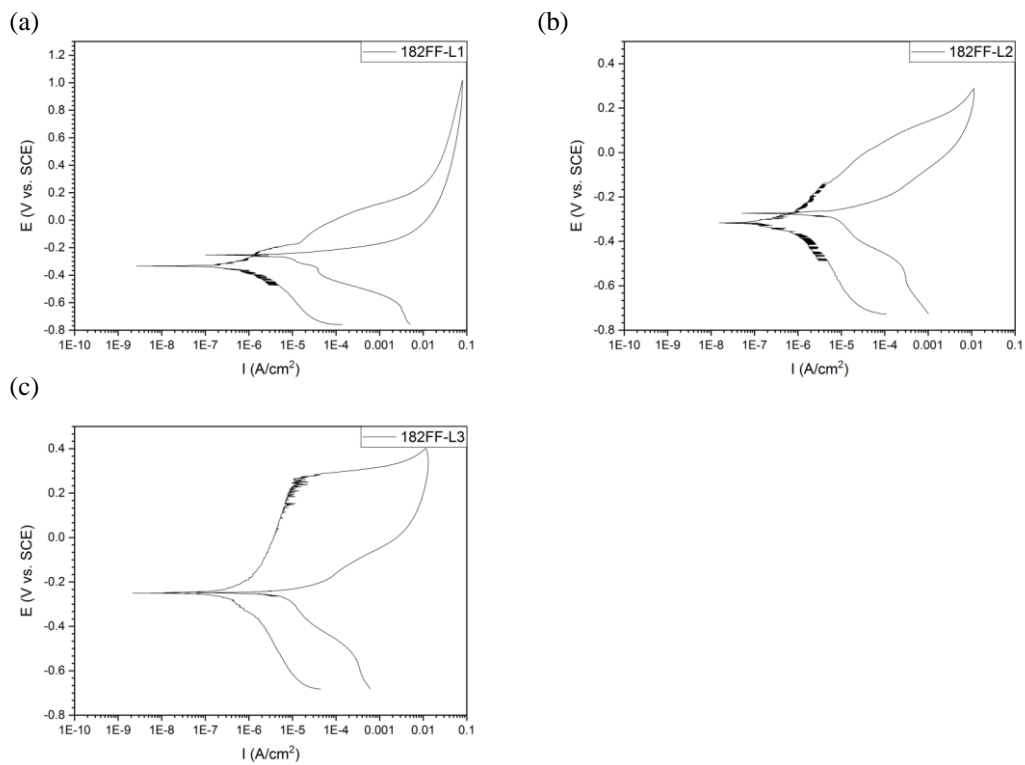


圖 3-8 182FF 之(a) L1、(b) L2、(c) L3 在 3.5 wt. %NaCl(aq)環境中之雙環電位極化曲線圖。

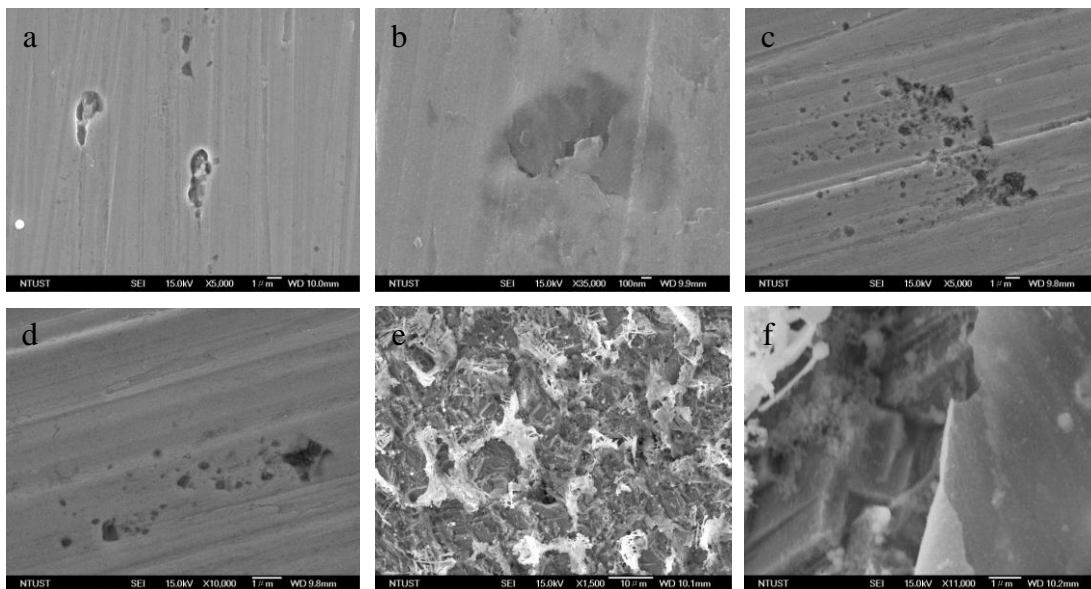


圖 3-9 182FF 之(a)(b) L1、(c)(d) L2、(e)(f) L3 層在 3.5 wt. %NaCl(aq)環境中經雙環電位極化試驗後之表面 SE 影像。

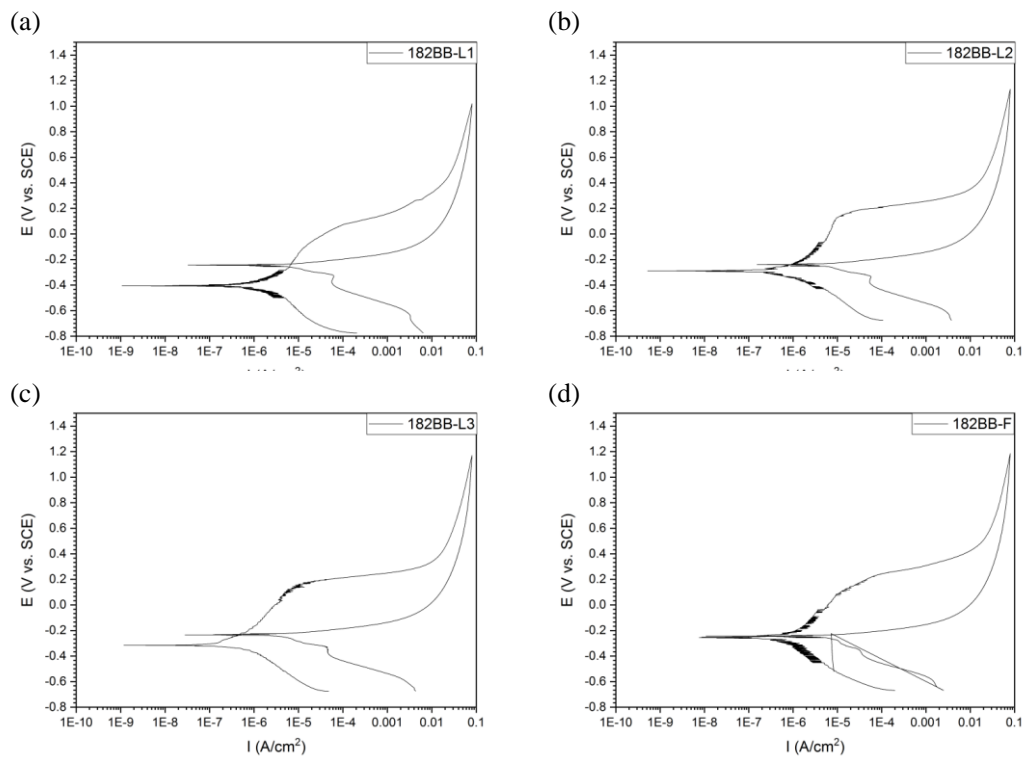


圖 3-10 182BB 之(a) L1、(b) L2、(c) L3、(d) F 在 3.5 wt. %NaCl_(aq)環境中之雙環電位極化曲線圖。

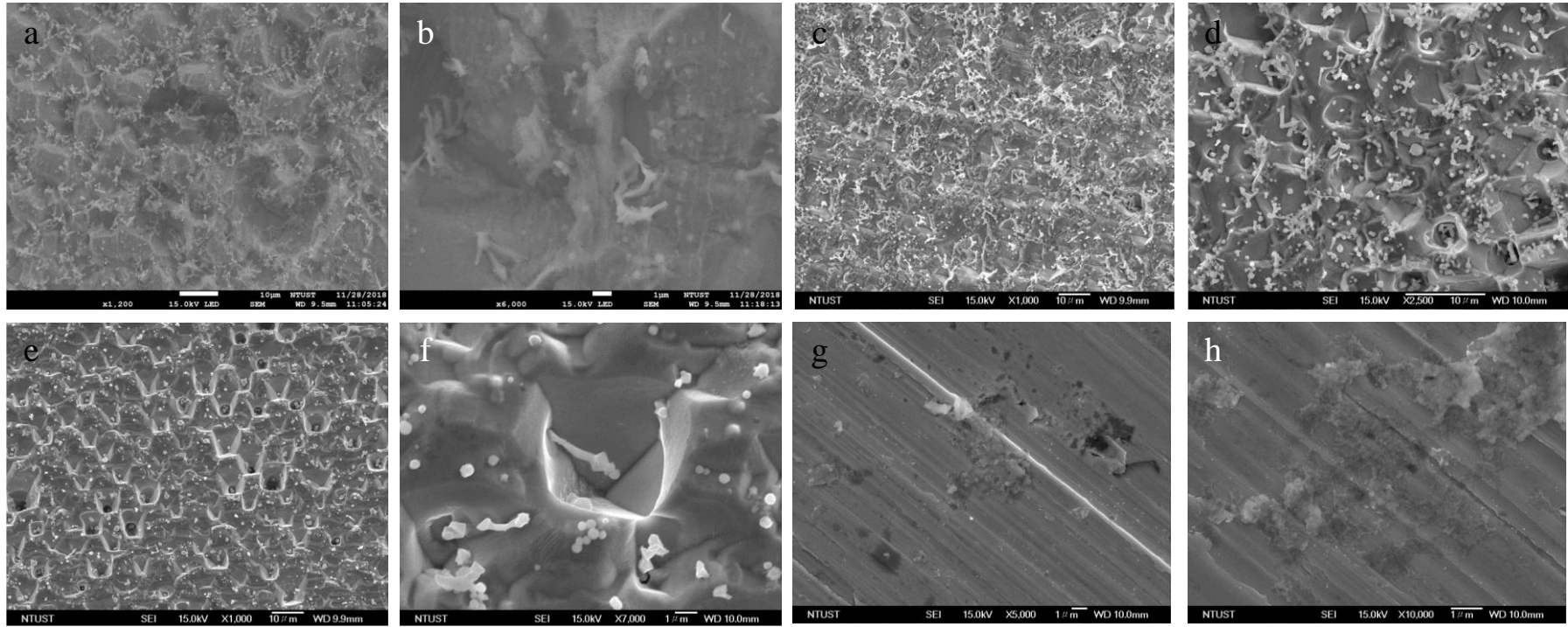


圖 3- 11 182BB 之(a)(b) L1、(c)(d) L2、(e)(f) L3、(g)(h) F 層在 3.5 wt. %NaCl(aq)環境中經雙環電位極化試驗後之表面 SE 影像。

進一步透過 TEM、EPMA 了解低合金鋼端緩衝層施作對鎳基合金鉸道之結構與成分的影響。圖 3-12a 顯示 182BB-L1 之析出物以差排處作為異質成核位置生成，使差排易於明視野影像中發現。結晶結構為面心立方結構(FCC)，晶帶軸為[013] 方向，其平面間距為 $d_{013}=0.1074$ nm、晶格常數為 $a=0.3397$ nm。分析圖 3-12c 中特定位置之成分，B 處係由 Nb 及 Ti 與 C 結合形成碳化物，推測該相為(Nb, Ti)C，其繞射點位於基地相之繞射點背景中。另擇選 182BB-L3 進行 TEM-EDS 及 mapping 分析，圖 3-13 為 TEM-EDS 之鑑定結果，顯示碳化物 TiC 生長於基地相中。圖 3-14 為 TEM mapping 之鑑定結果，確認此析出物為(Nb, Ti)C。在 STEM 模式下之暗視野影像及所對應之明視野影像，觀察到晶粒中分佈許多差排及圓潤顆粒，如圖 3-15b, c，但從繞射圖中並沒有發現多餘的繞射點。放大觀察高階析度影像(HR-TEM)，如圖 3-15d-i 所示，晶界上及晶界附近的原子排列與基地有部分位置不相同。比較明視野影像之相對位置發現原子排列不同處皆為鄰近差排匯聚位置，經傅立葉轉換(FFT)後，則如圖 3-15e, f, h 右上角之插圖為紅框處之 FFT，其繞射圖與基地不同，故而確認為碳化物成核位置。

圖 3-16 及圖 3-17 為 EPMA mapping 鑑定，結果顯示，緩衝層第 1 層(182BB-L1)、無緩衝層之第 1 層鉸道(182FF-L1)之析出物均為 NbC。182FF 之 NbC 為長度介於 5 ~ 10 μm 的連續長條狀，182BB 則散佈尺度小於 1 μm 的 NbC 顆粒，此 NbC 幾何形貌與經電化學試驗之試片表面的 SE 影像觀察相仿。

低合金鋼端緩衝層施作可降低 A508 底材之 Fe 元素熔入鎳基合金鉸道中，同時具有穩定合金鉸道之 Cr 元素的效果。另一方面，由於低合金鋼擁有較高的 C 含量，低合金鋼端緩衝層能降 A508 熔融進鉸道的稀釋量，使 IN182 鉸道中的碳化物尺寸縮小及不連續分佈。進而使得 IN182 鉸道具有較高的抗電位敏感性 (Degree of sensitivity)，經由雙環極化試驗後，其腐蝕型態僅為小區域、不連續的孔蝕。

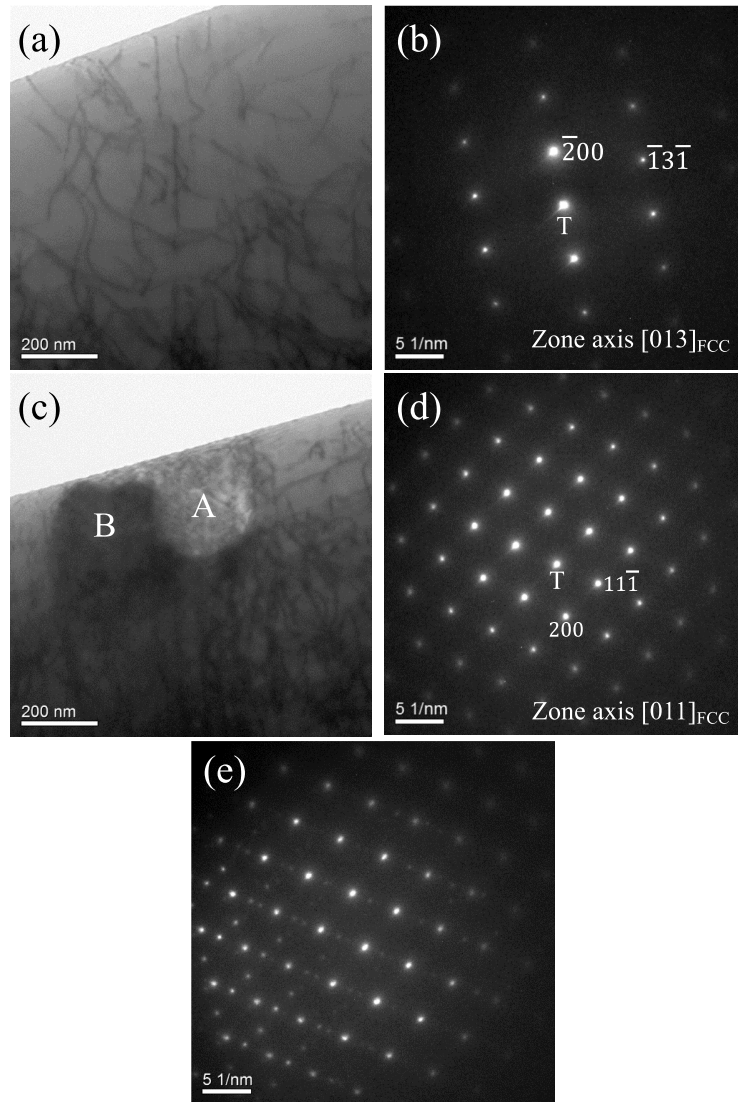


圖 3-12 182BB-L1 之(a) 明視野影像、(b) 圈選基地擇區繞射圖，晶帶軸方向為 $[013]_{\text{FCC}}$ 、(c) 明視野影像、(d) 圈選位置 A 擇區繞射圖，以及(e) 圈選位置 B 擇區繞射圖，(d-e)晶帶軸方向為 $[011]_{\text{FCC}}$ 。

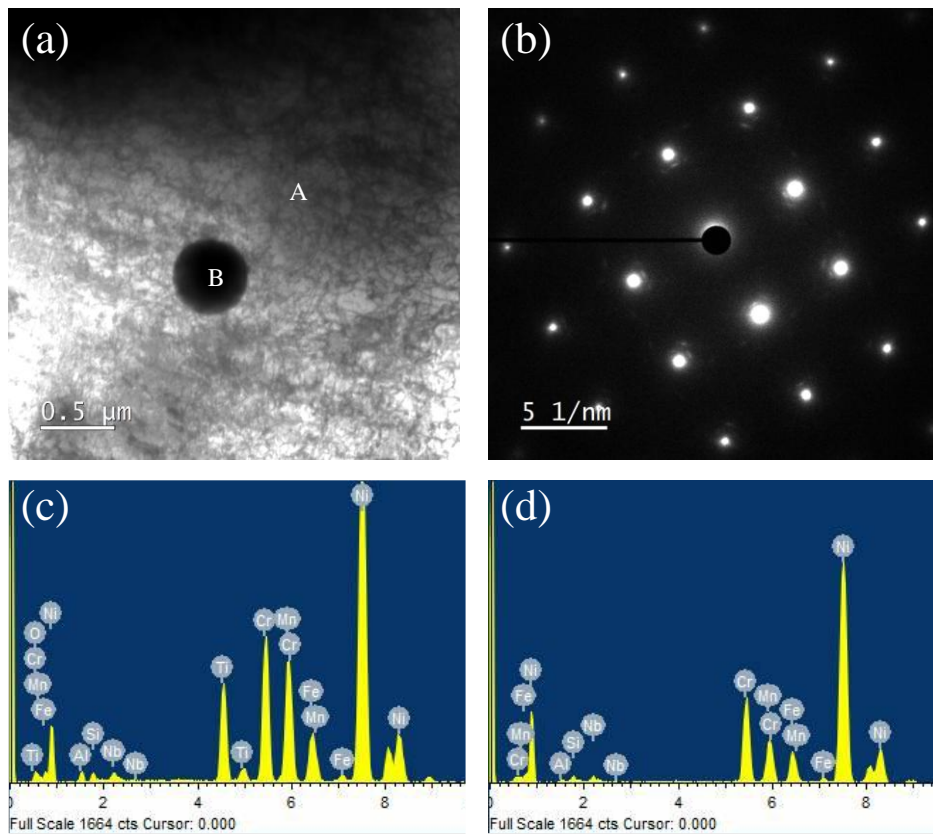


圖 3-13 182BB-L3 之(a) 明視野影像、(b) 圈選基地擇區繞射圖，晶帶軸方向為 $[001]_{\text{FCC}}$ 、(c) 位置 A 之 EDS，以及(d) 位置 B 之 EDS。

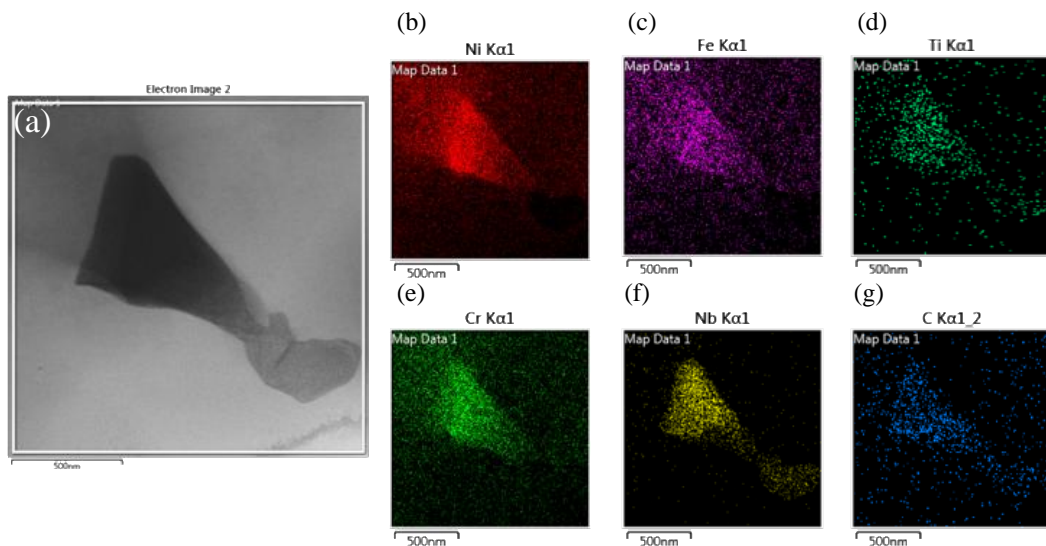


圖 3-14 182BB-L3 之析出物的(a) 明視野影像，(b)(c)(d)(e)(f)(g) TEM-mapping。

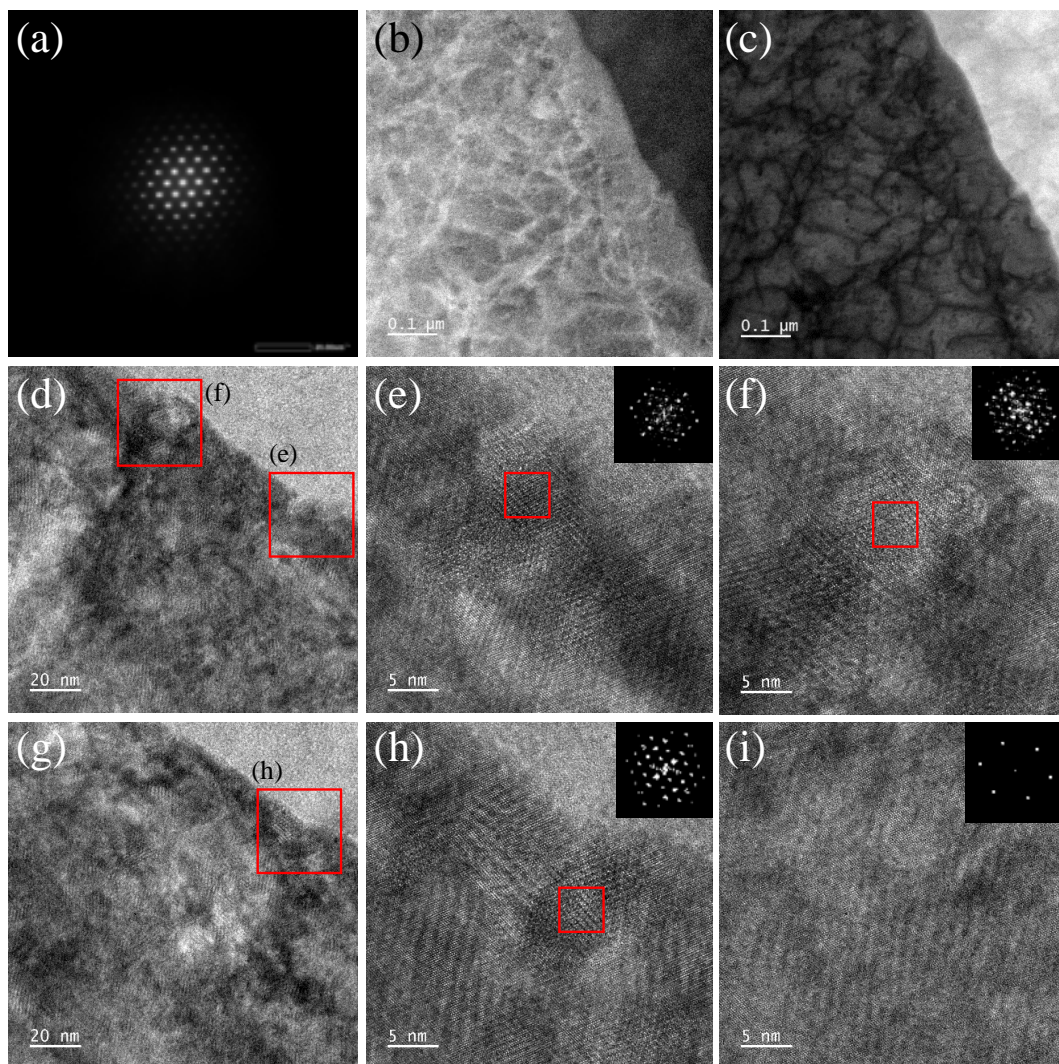


圖 3-15 182BB-L3 之(a) 擇區繞射圖，晶帶軸方向為 $[011]_{\text{FCC}}$ 、(b) STEM 模式之暗視野影像、(c) 所對應之明視野影像，以及(d)-(e)(f) 高解析影像。

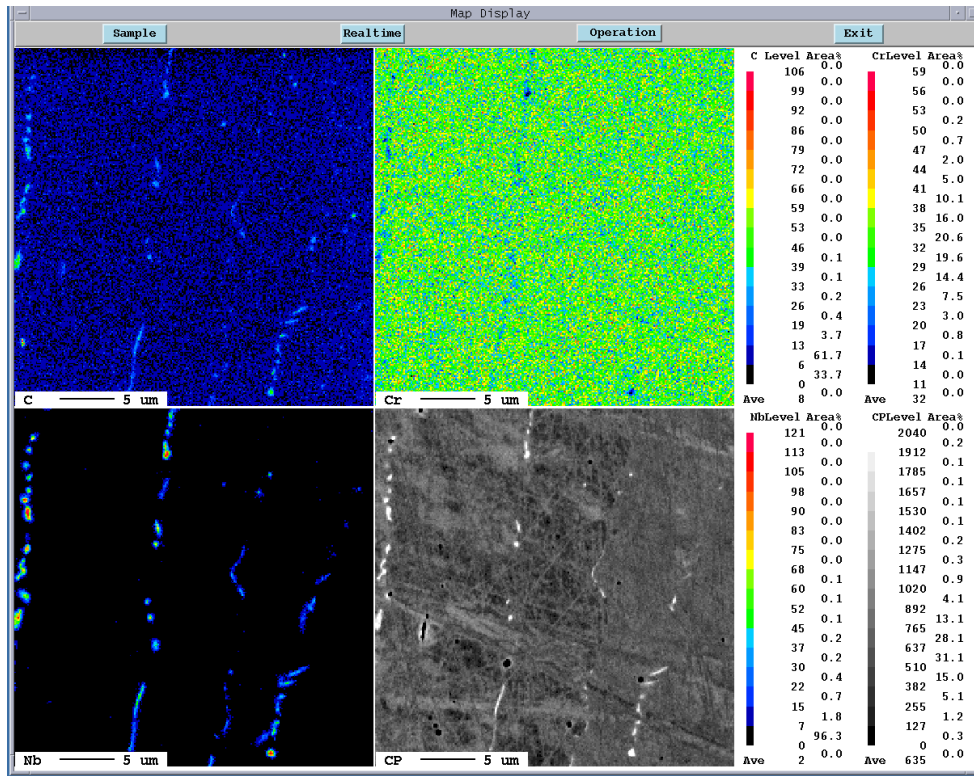


圖 3-16 182FF 沿異質介面向上位移 1 mm 之 EPMA mapping 結果。

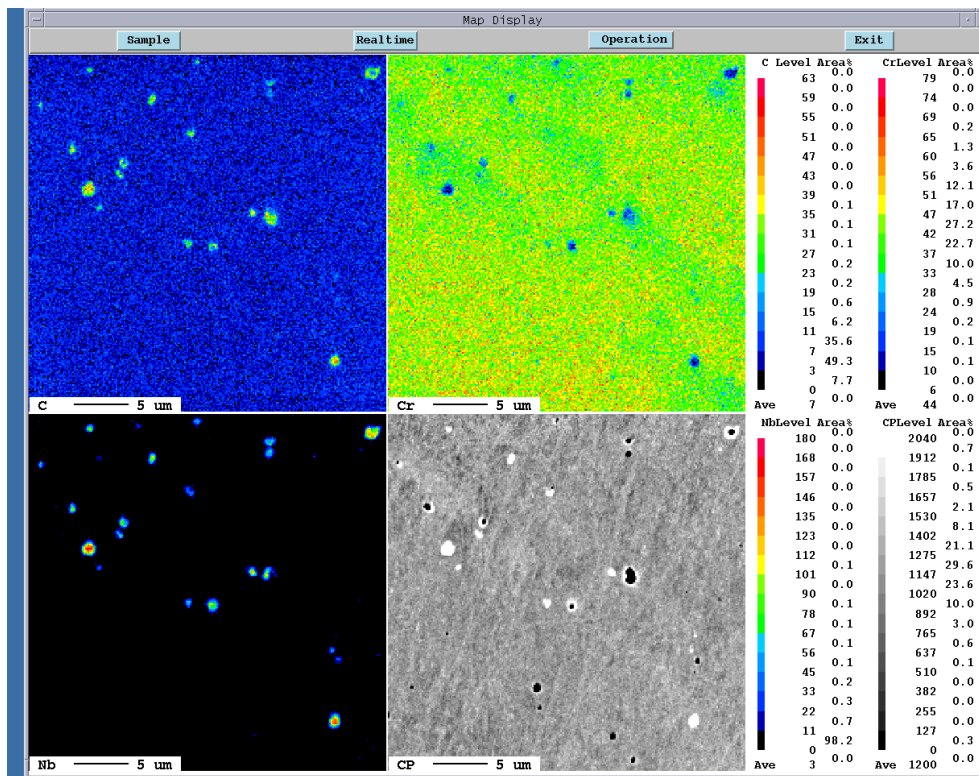


圖 3-17 182BB 沿異質介面向上位移 1 mm 之 EPMA mapping 結果。

3.1.2 不銹鋼端 308L 不銹鋼

304L/IN52M 之覆層銲接處理前，需於 304L 鋼材之表面施作 2 層的緩衝層，詳細施作步驟見 2.3.1 及 2.3.2 節所述。為評估 308L 緩衝層施作對 IN52M 覆銲層之耐蝕性影響，分別製作含 2 層 308L 緩衝層及 2 層覆銲層之試片 (308BB)、4 層覆銲層之試片 (304S-52M)。為釐清電化學試驗之試片表面成份差異，以鎳基合金與不銹鋼底材介面為基準，每 300 μm 量測 1 點，其結果繪製如圖 3-18 及圖 3-19 所示。308BB 之緩衝層經鎳基合金覆銲處理後，剩餘厚度約 0.6 mm、IN52M 混合區厚度約 1.4 mm；304S-52M 之 IN52M 混合區厚度約 2.0 mm。緩衝層施作對化學成份之影響較不明顯，兩種試片之混合區的 Ni 元素含量介於 45 ~ 48 wt. %、Fe 元素含量介於 19 ~ 24 wt. %、Cr 元素含量介於 30 ~ 34 wt. %。

各試片之動電位極化試驗的測量值列於表 3-3、電位對電流密度做圖如圖 3-20 所示。兩種試片之腐蝕電位均未呈現穩定之趨勢，施作緩衝層之覆銲層由於 Fe 元素含量相對較高而具有較大之腐蝕電流。試片 308BB-308L、308BB-52M-L1、304S-52M-L3 分別在 800、500、720 mV 觀察到 E_{pit} 電位，304S-52M-L2 在 950 mV 有生成較不明顯之孔蝕平台。以 FE-SEM 觀察試驗後之試片表面，304S-52M-L2 試片表面顯示氯離子偏好沿遷移晶界 (Migration grain boundary) 向底材侵蝕，枝狀晶受到 Fe 元素之消耗而呈現深色形貌。晶間析出物受到孔蝕而脫落，形成典型的晶界三角點侵蝕，寬度約為 10 ~ 20 μm 。圖 3-21e, f 中，304S-52M-L3 晶間產生深黑色斑塊，經 EDS 分析為 Fe 元素含量較低之區域，中間白色顆粒狀析出物則為 NbC。308BB 試片之 308L 緩衝層表面特徵 (圖 3-22a) 未觀察到明顯之枝狀晶晶間腐蝕。308BB-52M 之腐蝕形貌以遷移晶界侵蝕為主，如圖 3-22c, e 所示，相較於無緩衝層之 52M 試片，孔蝕塌陷坑洞較容易發生於晶界三角點位置處，然未產生 Fe 元素含量較低之深色斑塊。各試片之 EDS 分析結果大致與未進行試驗區域相同，受到 Fe 元素下降、NbC 脫落而有些許變動。另以雙環即化模式進行電化學試驗，量測試片表面之氧化膜生成與穩定性。

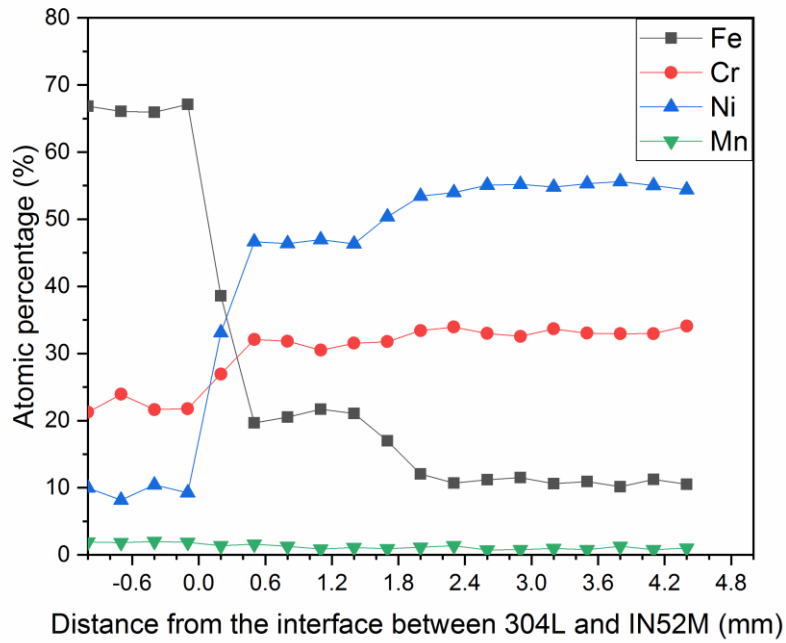


圖 3-18 304S-52M 沿底材介面向鎳基合金方向之 EPMA 逐點成分分析。

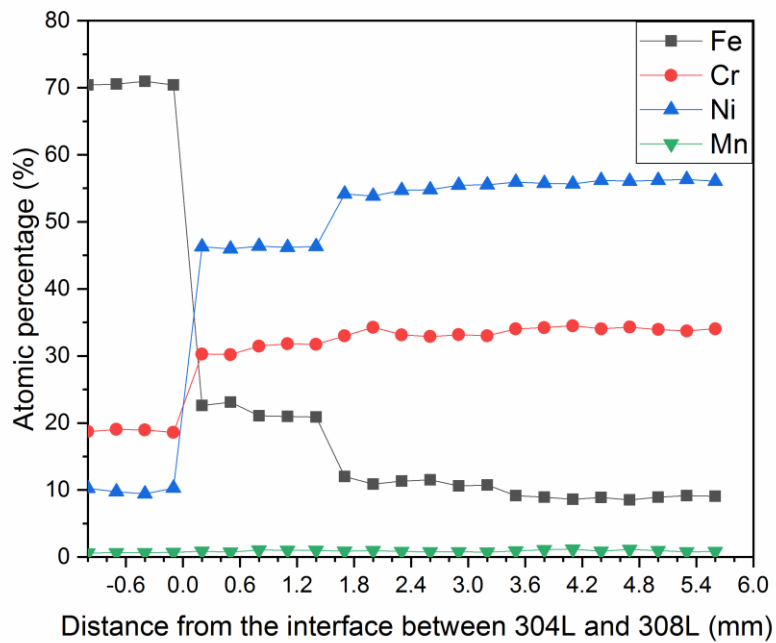


圖 3-19 308BB 沿底材介面向鎳基合金方向之 EPMA 逐點成分分析。

表 3-3 304S-52M、308BB 之動電位極化試驗之腐蝕電位及腐蝕電流。

	304S-52M		308BB		
	52M-L2	52M-L3	308L	52M-L1	52M-L2
$E_{\text{corr}}(\text{mV})$	-94	132	200	31.5	-81.9
$I_{\text{corr}}(\text{A}/\text{cm}^2)$	9.39×10^{-5}	1.11×10^{-6}	3.50×10^{-5}	5.54×10^{-5}	8.76×10^{-5}

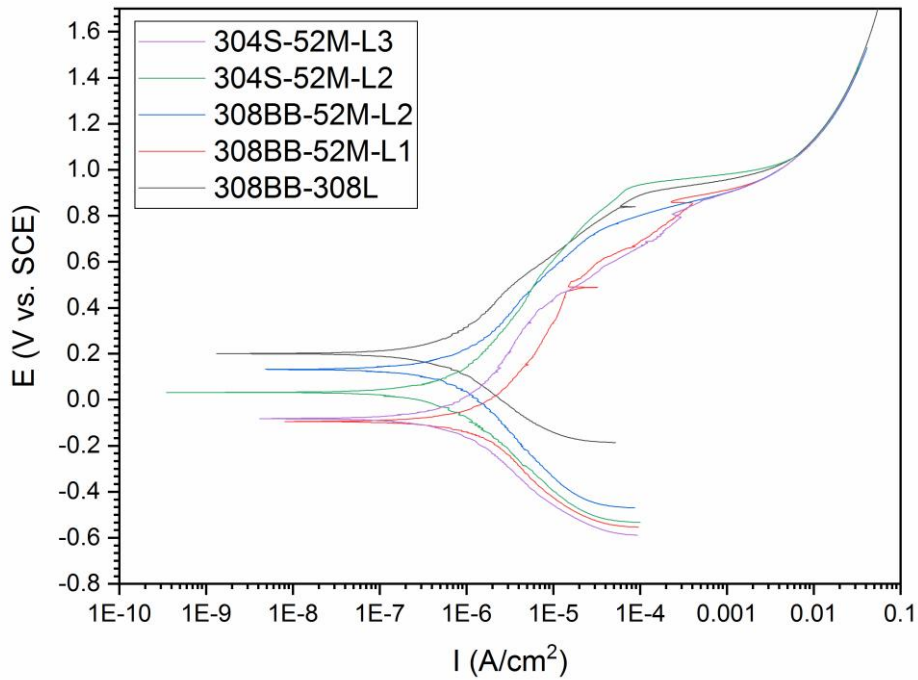


圖 3-20 308BB、304S-52M 在 3.5 wt. % NaCl_(aq) 環境中之動電位極化曲線圖。

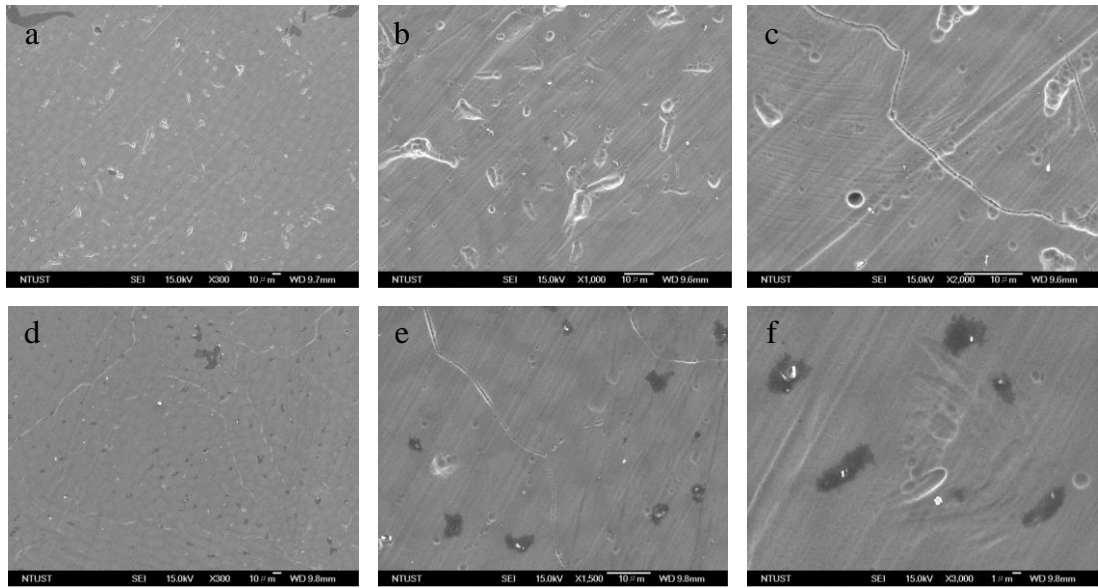


圖 3- 21 304S-52M 之(a)(b)(c) 52M-L2、(d)(e)(f) 52M-L3 層在 3.5 wt. %NaCl(aq) 環境中經動電位極化試驗後之表面 SE 影像。

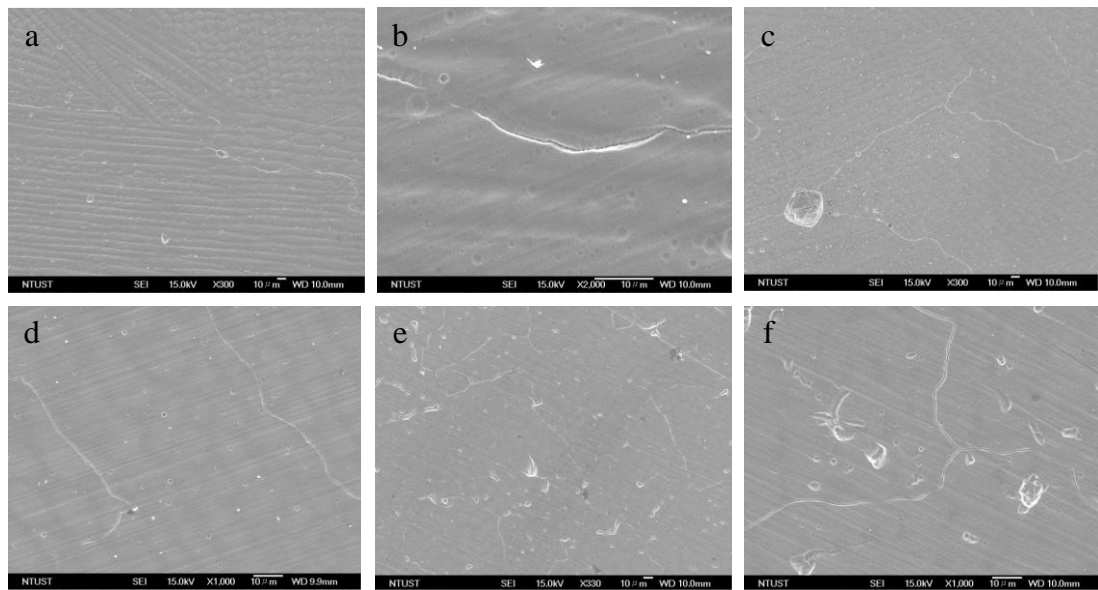


圖 3- 22 308BB 之(a)(b) 308L、(c)(d) 52M-L1、(e)(f) 52M-L2 層在 3.5 wt. %NaCl(aq) 環境中經動電位極化試驗後之表面 SE 影像。

各試片之動電位極化試驗的測量值列於表 3-4、電位對電流密度做圖如圖 3-23 及圖 3-24 所示。304S-52M 之 L2 及 L3 分別於 900、820 mV 處形成鈍化電位，然而其鈍化膜未能有效提供保護性，隨著電位持續上升， E_{corr} 陽極極化曲線回復正斜率。進入電位回掃模式後，304S-52M 在電位 1000 mV 以上，回掃曲線均沿原 E_{corr} 陽極極化曲線掃描。回掃電位低於鈍化電位，304S-52M-L2 與 304S-52M-L3 之 E_{pp} 生成鈍化區，L2 之曲線下涵蓋面積較 L3 曲線小。施作 308 緩衝層之試片，308BB-52M-L1 (圖 3-24b) 在 600 mV 生成孔蝕平台、800 mV 處形成鈍化電位。L1 及 L2 進行電位回掃呈現逆時鐘掃描 (圖 3-24b, c)，較原 E_{corr} 陽極極化曲線具有更小之腐蝕電流，保護範圍分別約 40、90 mV。比較 308BB-52M-L1 及 L2，隨著層數上升， E_{pp} 提升而極化吸收能量下降，顯示 L2 之化學較穩定。觀察電化學試驗後之表面特徵，無緩衝層之 IN52M 表面除遷移晶界侵蝕外，沿枝狀晶晶胞的邊界也生成侵蝕痕跡 (圖 3-25a, d 及圖 3-26c, f)。304S-52M-L2 及 308BB-52M-L1 受到孔蝕平台的生成，表面產生直徑 3~10 μm 之圓孔。經 EDS 成分分析，晶界處未觀察到 Cr 元素聚集之現象，顯示細小之白色顆粒仍為 NbC。

表 3-4 304S-52M、308BB 之雙環極化試驗之腐蝕電位。

	304S-52M		308BB		
	52M-L2	52M-L3	308L	52M-L1	52M-L2
E_{corr} (mV)	74	-70	-24.7	-120.5	-34.4
E_{pp} (mV)	-42	227	-51	-60.6	-53

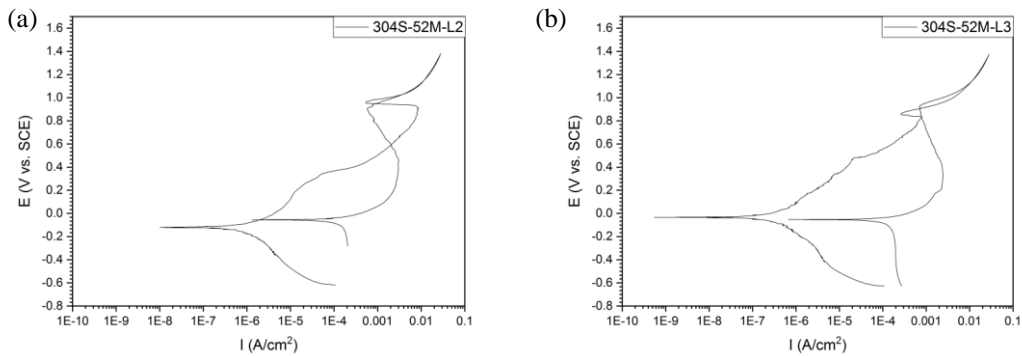


圖 3-23 304S-52M 之(a) 52M-L2、(b) 52M-L3 在 3.5 wt. %NaCl(aq)環境中之雙環電位極化曲線圖。

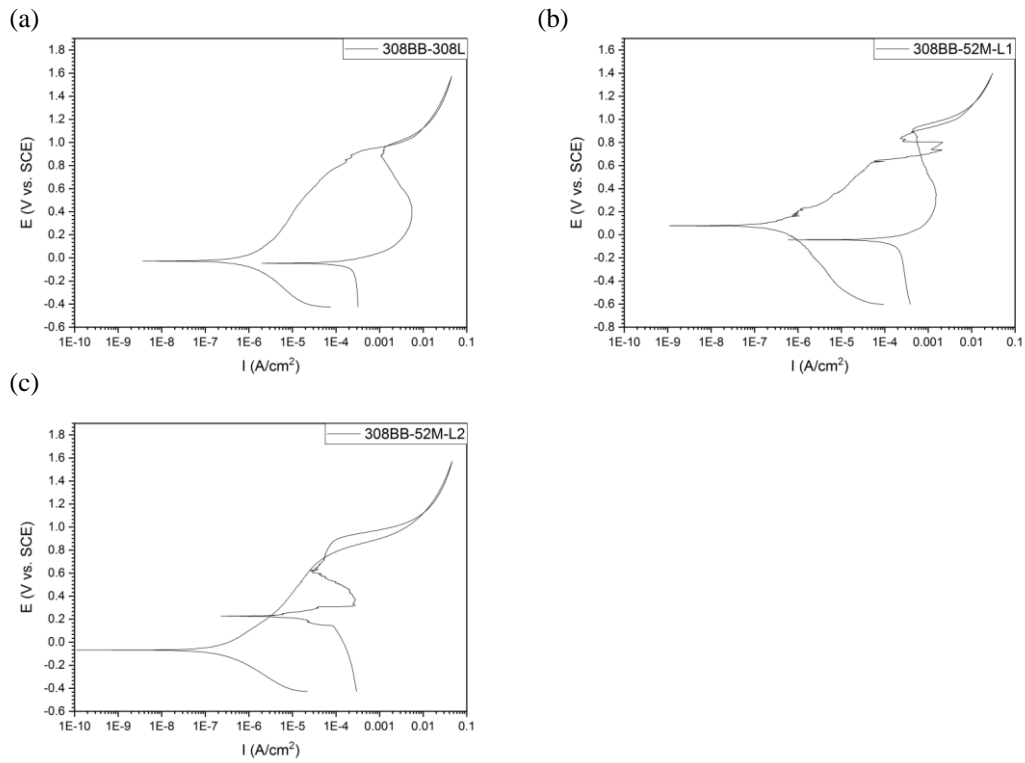


圖 3- 24 308BB 之(a) 308L、(b) 52M-L1、(c) 52M-L2 在 3.5 wt. %NaCl_(aq)環境中之雙環電位極化曲線圖。

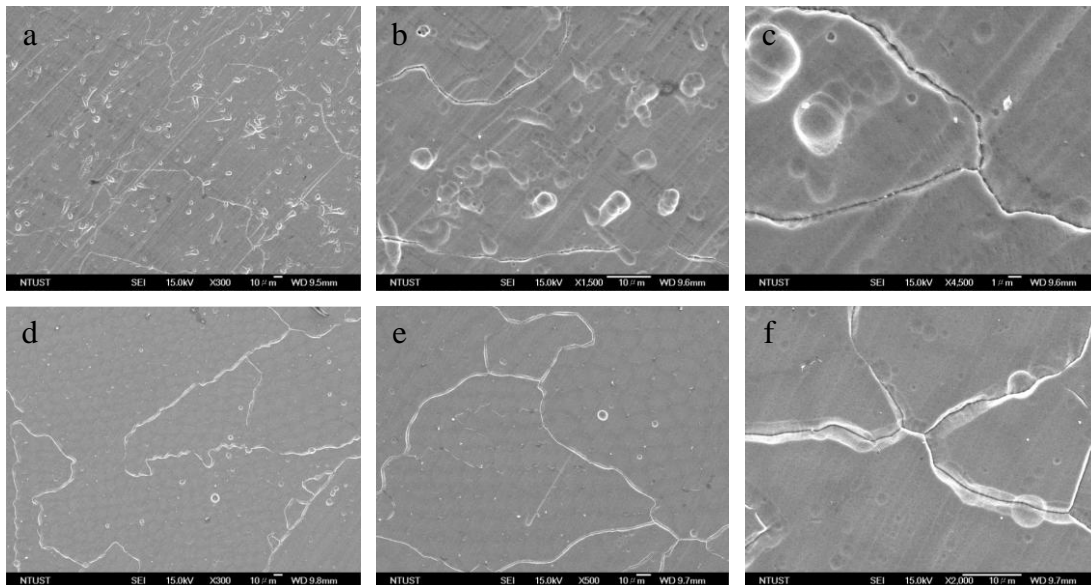


圖 3- 25 304S-52M 之(a)(b)(c) 52M-L2、(d)(e)(f) 52M-L3 層在 3.5 wt. %NaCl_(aq)環境中經雙環電位極化試驗後之表面 SE 影像。

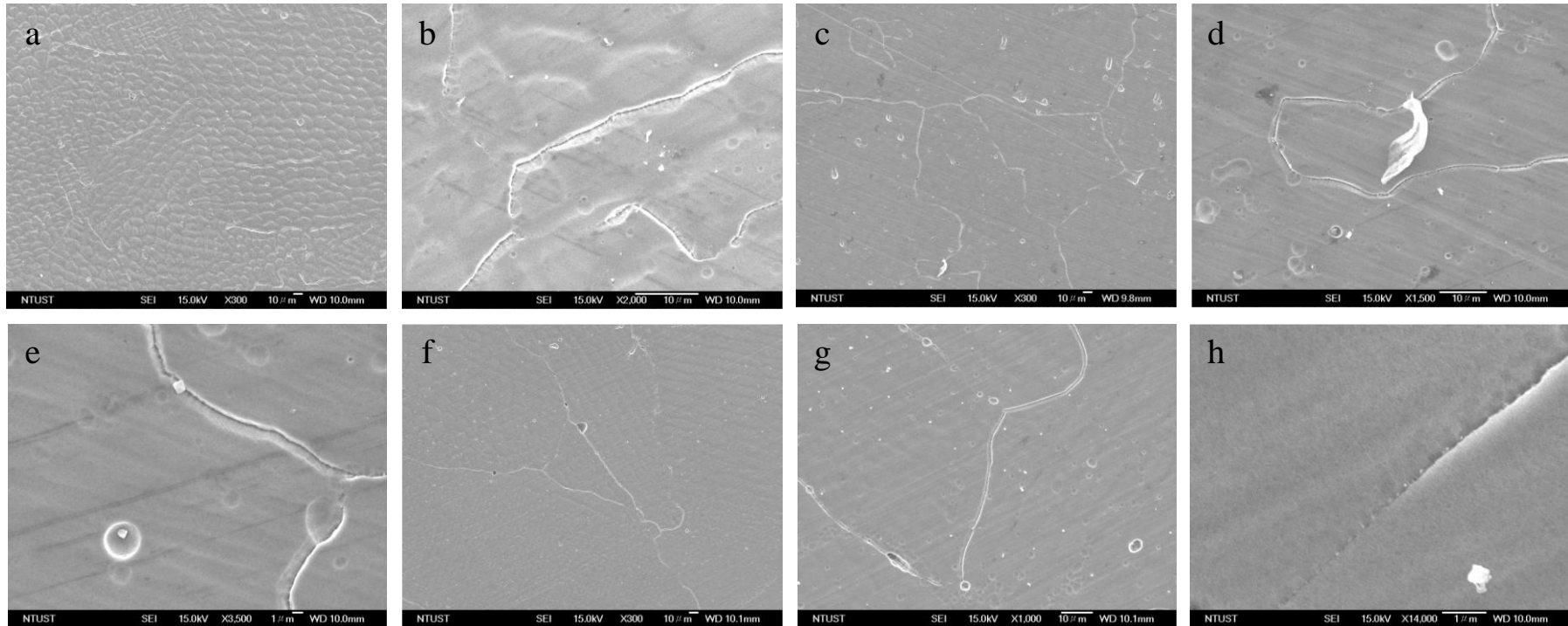


圖 3- 26 308BB 之(a)(b) 308L、(c)(d)(e) 52M-L1、(f)(g)(h) 52M-L2 層在 3.5 wt. %NaCl_(aq)環境中經雙環電位極化試驗後之表面 SE 影像。

進一步透過 TEM 分析了解不銹鋼端緩衝層施作對覆鋅層結構與析出物成分之影響。TEM 取樣位置相對於電化學試驗之試片編號約等於 304S-52M-L2、308BB-52M-L1。圖 3-27 顯示 IN52M 基地之明視野影像，晶界處有白色細長之析出物生成，圈選基地之繞射圖並無多於之繞射點（圖 3-27c）、晶界處之擇區繞射圖則有許多繞射點產生，其晶帶軸方向為 $[011]_{\text{FCC, oxide}}$ ，推斷為氧化物及碳化物之繞射點。圖 3-28 顯示，由明視野影像發現於晶界處有白色細長狀之析出物，推測為碳化物，如圖 3-28b, c 所示。觀察基地之擇區繞射圖，晶帶軸方向為 $[011]_{\text{FCC}}$ ，平面間距 $d_{011} = 0.3376 \text{ nm}$ ，晶格常數 $a = 0.4775 \text{ nm}$ ，其中並無多餘的繞射點產生。圖 3-29 以晶帶軸 $[111]_{\text{FCC}}$ 觀察基地之擇區繞射圖，則可觀察到氧化物及碳化物之繞射點。

在低入熱量（小熔填量）、0.9 mm 直徑 IN52M 鋁線之鋁接參數下，不銹鋼端緩衝層施作僅降低覆鋁層金屬中之 Fe 元素（約 2~3 wt.%），對析出物的成分與尺寸仍由鋁道金屬之過冷度決定。IN52M 覆鋁層之動電位極化曲線主要由遷移晶界數量、尺度及析出物分佈位置影響。經雙環極化試驗後，有緩衝層施作之 IN52M 覆鋁層產生逆時針方向掃描曲線，對試片表面成分與腐蝕電流較無明顯之影響，僅稍微降低電位敏感性。

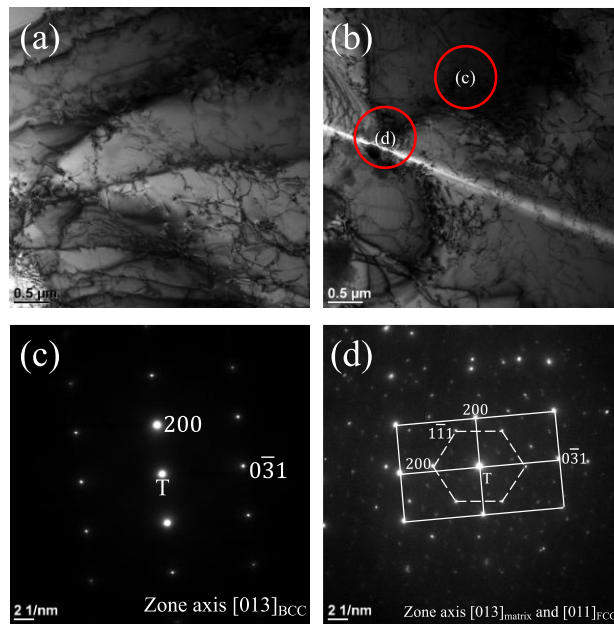


圖 3-27 304S-52M-L2 之(a)(b) 明視野影像、(c)(d) 擇區繞射圖，晶帶軸方向為 $[013]_{\text{matrix}}$ 及 $[011]_{\text{FCC}}$ 。

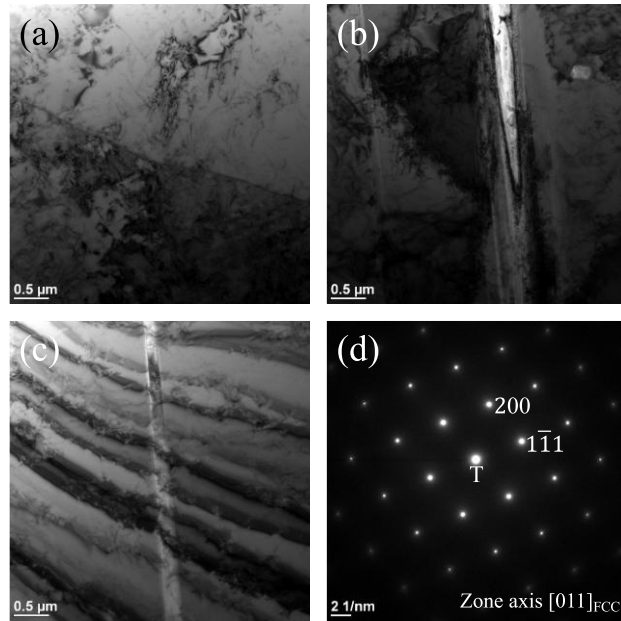


圖 3-28 308BB-52M-L1 之(a)(b)(c) 明視野影像、(d) 基地之擇區繞射圖，晶帶軸方向為 $[011]_{\text{FCC}}$ 。

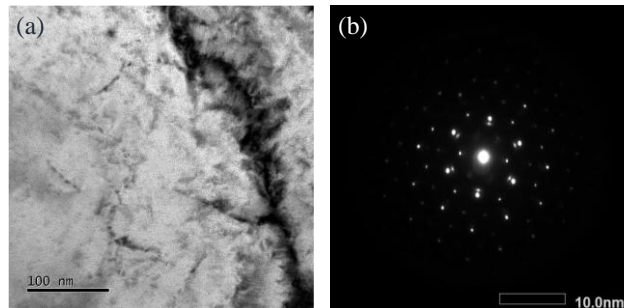


圖 3-29 308BB-52M-L1 之(a) 明視野影像、(b) 圈選基地擇區繞射圖晶帶軸方向為 $[111]_{\text{FCC}}$ 。(a=0.2995 nm， $d_{111}=0.1729$ nm)

3.2 銲後熱處理與覆銲處理對殘留應力之影響

本節討論殘留應力模擬與量測的差異性與影響因素。透過 ABAOUS 軟體模擬及二維 X-ray 機台測量，低合金鋼端緩衝層經銲後熱處理及異質銲接管材經覆層銲接處理後之殘留應力場分佈。另一方面，於銲接管件表面標記量測點，計算填料銲接處理完成與覆層銲接處理完成後之位移量，用以輔助探討軟體模擬與實際量測之偏差值。

3.2.1 應力模擬

參考實際施作工件之幾何形狀，繪製銲接管件、覆銲管件之 CAD 模型，如圖 3-30 及圖 3-31 所示，管件垂直銲道方向之剖面設計則依據巨觀金相標記尺寸。參考相關研究及上一年度之分析模型，為使模擬結果符合實際情況，細化銲道熔融區之網格模型、加入滲透銲接層與填料銲接層之結構，網格模型如圖 3-31 所示。銲接管件及覆銲管件分別含有 21584、25232 個網格單位。模擬之參數列於表 3-5，金屬材料在各溫度區間之機械、物理性質如圖 3-32 所示。本研究採用之熱傳分析模組為 DC3D8，應力分析模組使用 C3D8I。

表 3-5 模擬殘留應力之參數設定值。

Chunk element	Time period (s)	Film coefficient (W/m ² K)	Sink Temp. (°C)	Intermediate Temp. (°C)	Emissivity
5	18.75	25	25	120	0.9

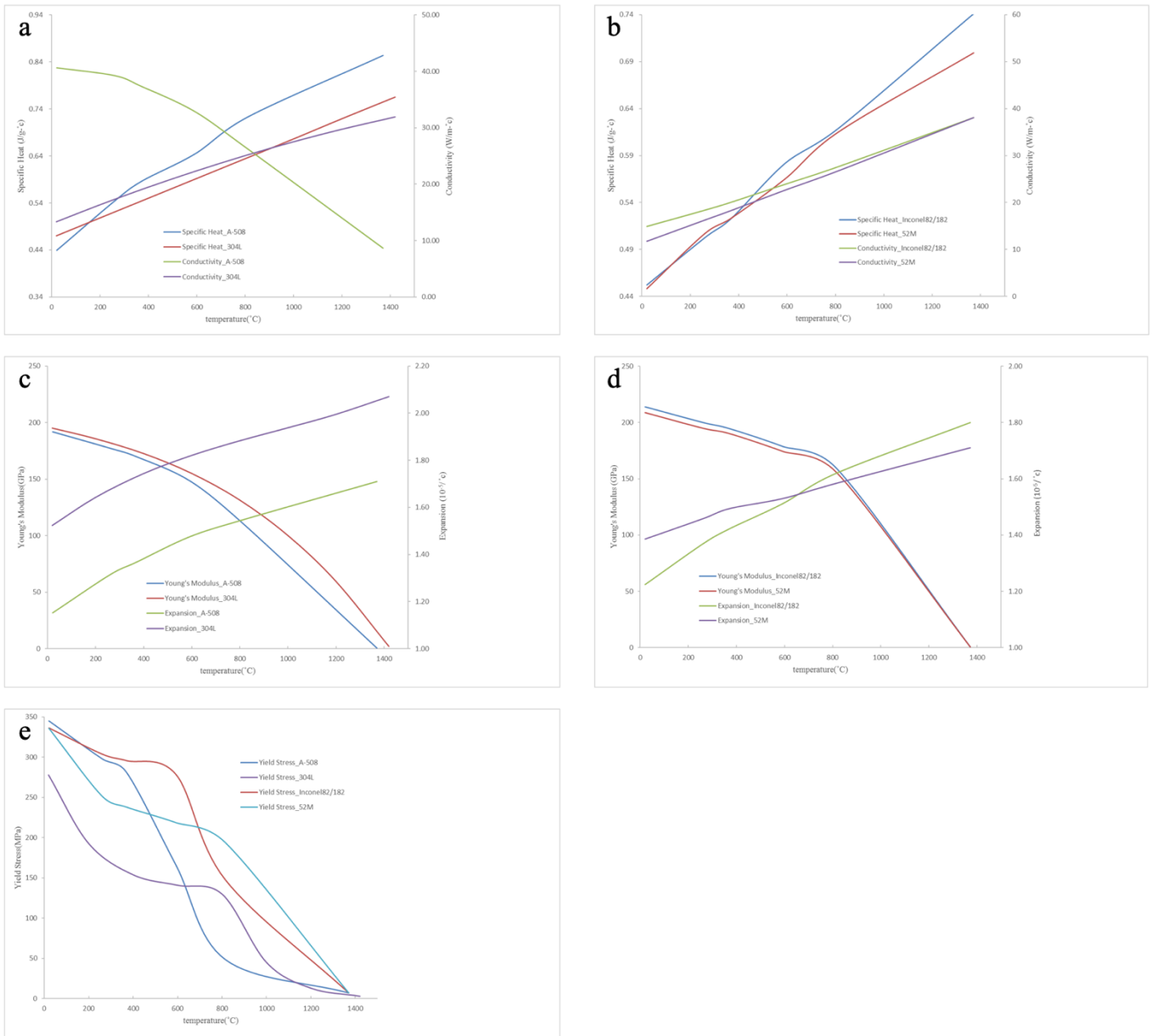


圖 3- 32 在各溫度區間下(a) 低合金鋼及不銹鋼之物理性質、(b) 鎳基合金之物理性質、(c) 低合金鋼及不銹鋼之機械性質、(d) 鎳基合金之機械性質，以及(e) 低合金鋼及不銹鋼之降伏強度。

模擬銲接運作模式選用移動式熱源，依照圖 3-33a 所示之方向進行道次銲接，最終分析結果設定冷卻 12000 秒至室溫。模型之邊界條件設定參考圖 3-33b，銲道點銲做為固定邊界，限制固定點之 X 方向、Y 方向與 Z 方向變形及移動。考量到實際銲接現場之預熱條件，因此將 A508 底材初始溫度設定為 100 °C，304L 底材初始溫度設定為 80 °C。

低合金鋼端緩衝層施作有無進行銲後熱處理對銲接管件之溫度場(圖 3-34)及 von Mises 應力場(圖 3-35)之分布影響。N-PWHT 與 Y-PWHT 在暫態溫度場與冷卻 12000 秒溫度場分佈上，並未有明顯之差異性。由於設定模擬 N-PWHT 與 Y-PWHT 的溫度場時，緩衝層之材料參數皆是使用 IN182，因此熱傳導係數相同。在 von Mises 應力場的模擬中，Y-PWHT 之緩衝層經過銲後熱處理，不視為銲道模型的一部分，設定為底材模型。比較冷卻 12000 秒 von Mises 應力場，Y-PWHT 之銲道外表面的應力較 N-PWHT 低約 50 MPa、不銹鋼端之應力分佈範圍較小。顯示 PWHT 對降低銲接管件的銲道外表面之 von Mises 應力具有良好的效果。

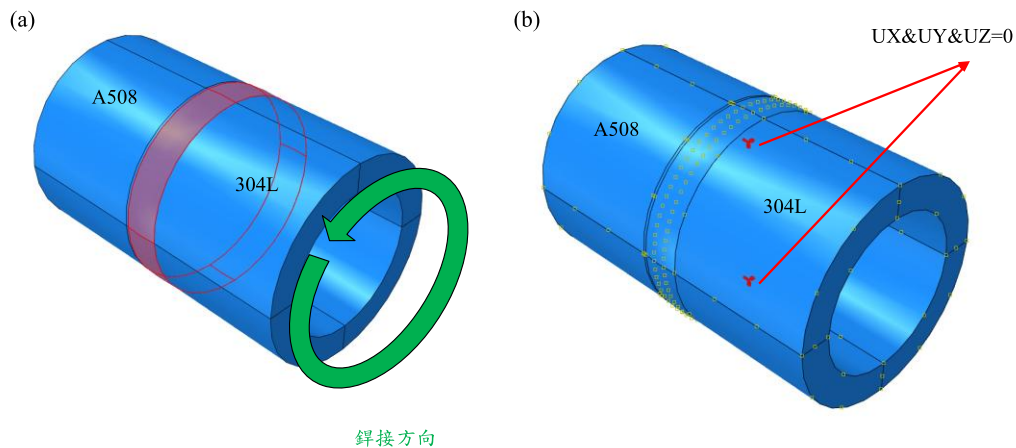


圖 3-33 (a) 模型移動式熱源設定之方向、(b) 模型設定之固定邊界點。

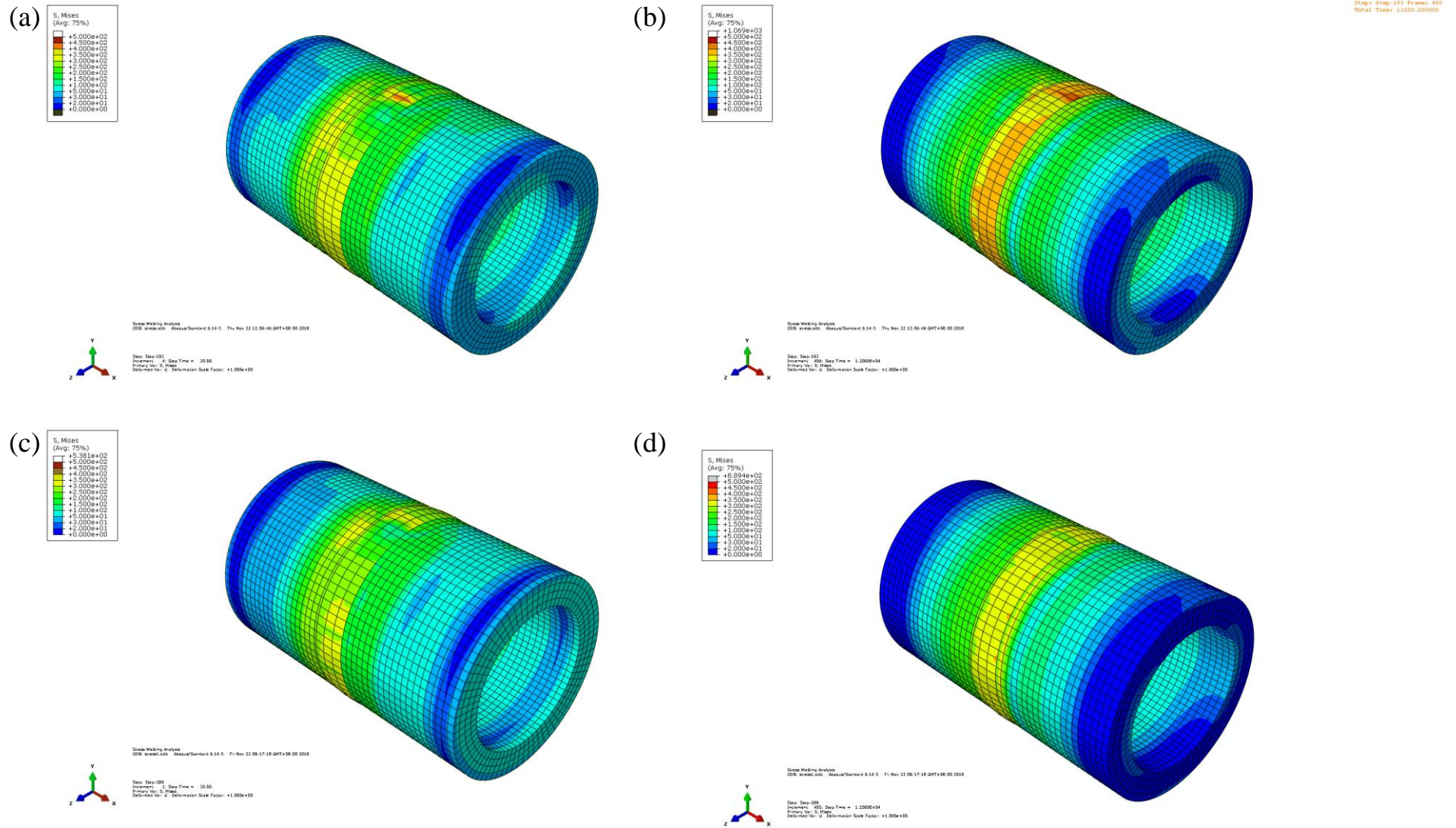


圖 3- 35 N-PWHT 之(a) 暫態、(b) 冷卻 12000 秒，Y-PWHT 之(c) 暫態、(d) 冷卻 12000 秒之 von Mises 應力場的模擬值。(MPa)

為比較 N-PWHT 與 Y-PWHT 經銲後熱處理之管厚應力場差異性，分別繪製 von Mises、 S_{11} (軸向)、 S_{22} (周向)應力場呈現(圖 3-36 至圖 3-38)。圖 3-36b 顯示，經熱處理後之銲道外表面與緩衝層/銲道異質介面的 von Mises 應力均由 350~400 MPa 區間下降至 300~350 MPa 區間。然而，銲道內表面的 von Mises 應力由 250~300 MPa 區間上升至 300~350 MPa 區間。在此模擬系統中，比較 S_{11} 、 S_{22} 應力場，如圖 3-37b 與 3-38b 得知，Y-PWHT 的軸向應力整體上升、緩衝層/銲道異質介面的周向應力場範圍則些許增加，顯示緩衝層之銲後熱處理能有效降低緩衝層/銲道異質介面之銲接殘留張應力場，對於後續之鎳基合金填料銲接等步驟則無顯著影響性。

覆銲管件(Y-PWHT-52M)之溫度場與 von Mises 應力場如圖 3-39 所示。由於 304L 不銹鋼之熱傳導係數隨溫度下降而下降，致使溫度場累積於不銹鋼端(圖 3-39b)，冷卻 12000 秒 von Mises 應力場最大值位於銲道與不銹鋼端熱影響區以及覆銲層於低合金端之邊界。為比較 Y-PWHT 與 Y-PWHT-52M 管件之沿管厚方向 von Mises 應力場，將模型沿管件直徑剖半，應力場分布圖如圖 3-40 所示。von Mises 應力為三軸主應力與三平面剪切應力的計算合成值，代表材料真實承受的總和應力值，用以評估材料發生破壞的機率。如圖所見，IN52M 覆銲層銲接處理後，Y-PWHT 整體之 von Mises 應力場上升至 150~250 MPa 區間，然銲道外表面之 von Mises 應力由 300~350 MPa 區間下降至 250~300 MPa 區間，顯示外側之覆銲層對管件之應力場分布具有一定的調整能力。

檢視 S_{11} 方向殘留應力(axial direction)與 S_{22} 方向殘留應力(hoop direction)，比較覆層銲接處理對異質銲接管件應力場之影響，分別列於圖 3-41 及圖 3-42。觀察圖 3-41a，Y-PWHT 之低合金鋼端內表面，距離銲道中心 30 mm 以內皆為殘留張應力，最大值約為 370 MPa~400 MPa，位於 9 mm 處。距離銲道中心 40 mm 以外則呈現殘留壓應力，最小值約為-230 MPa~-220 MPa，位於 70 mm 處。不銹鋼端內表面，距離銲道中心 60 mm 以內皆為殘留張應力，最大值約 340 MPa~350 MPa，位於銲道金屬介面處。距離銲道中心 70 mm 以外則呈現壓縮殘留應力，最小值約為-130 MPa~-120 MPa，位於 100 mm 處。觀察圖 3-41b，Y-PWHT-52M 之低合金鋼端內表面，距離銲道中心 30 mm 以內皆為殘留張應力，最大值約為 290 MPa~300 MPa，位於 9 mm 處。距離銲道中心 40 mm 以外則呈現殘留壓應力，最小值約為-165 MPa~-150 MPa，位於 90 mm 處。

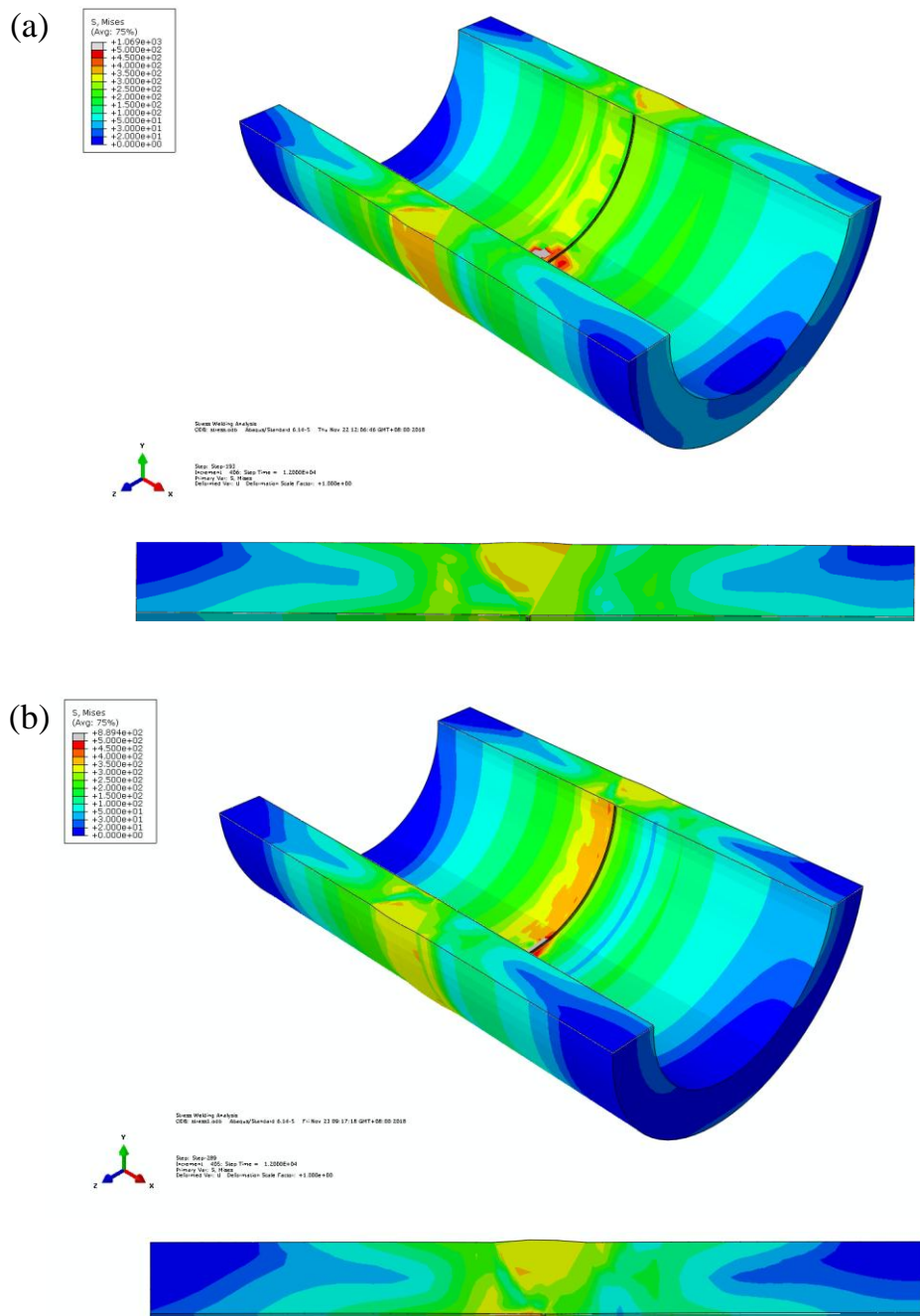


圖 3-36 (a) N-PWHT、(b) Y-PWHT 之 von Mises 應力場的模擬值截面示意圖。
(MPa)

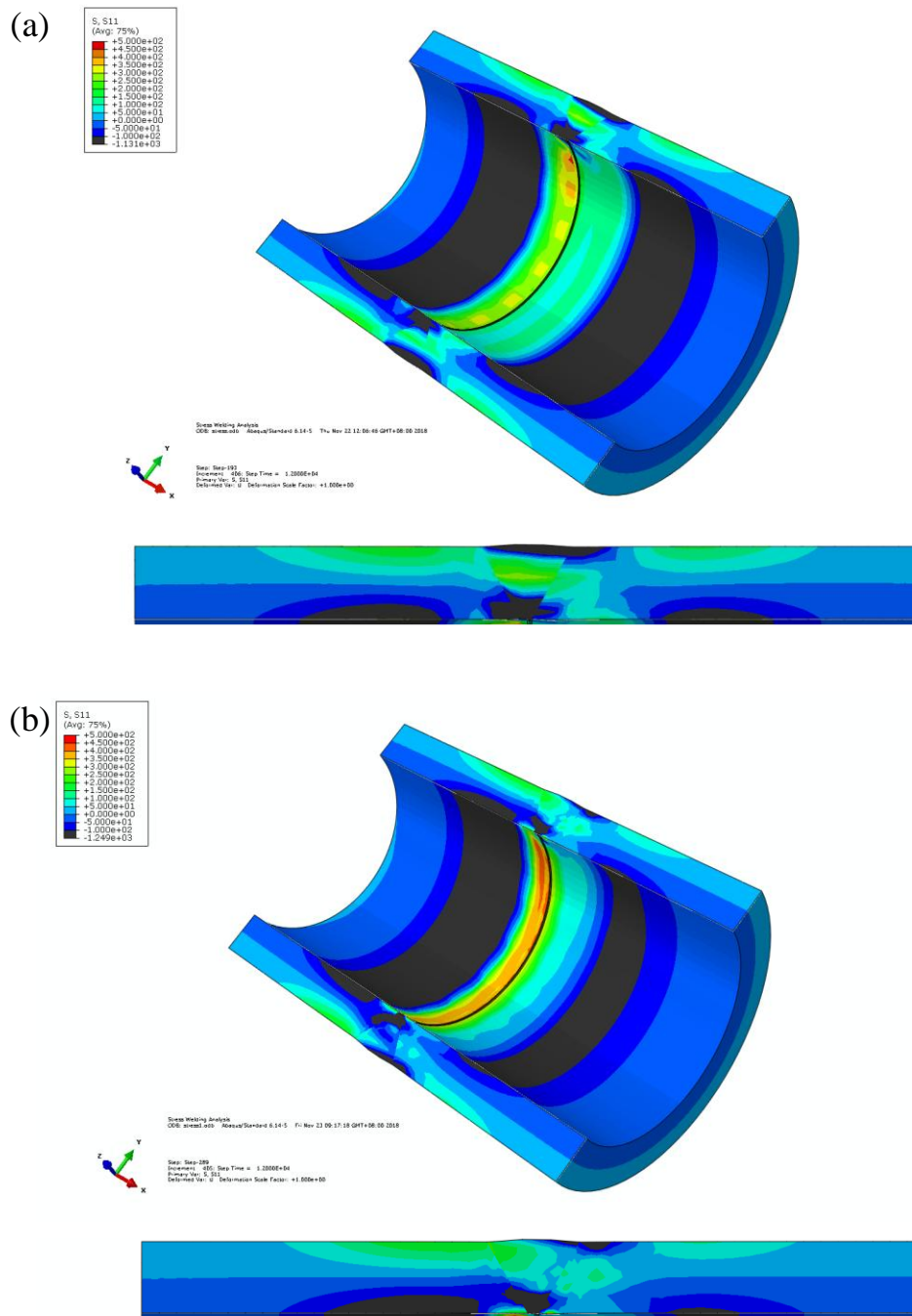


圖 3- 37 (a) N-PWHT、(b) Y-PWHT 之 S_{11} (S_{xx}) 軸向應力場的模擬值截面示意圖。(MPa)

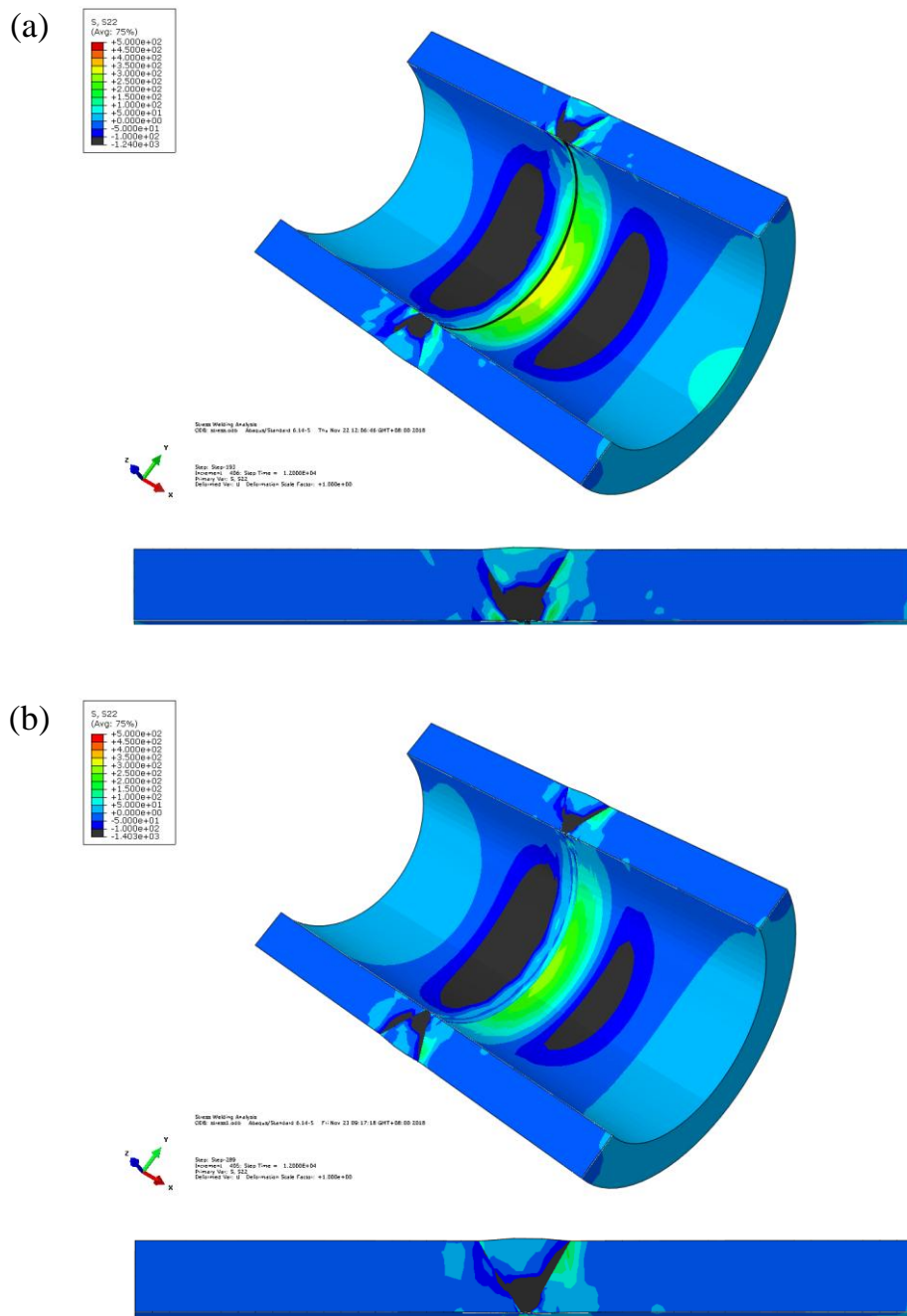
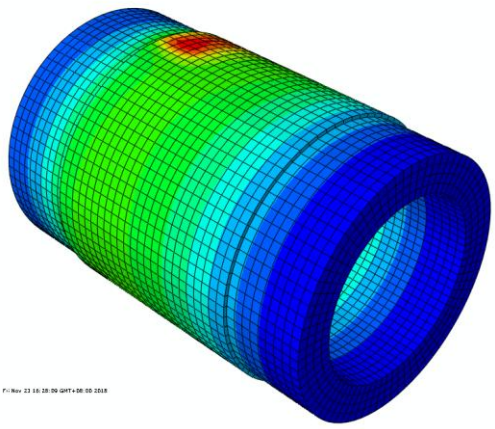
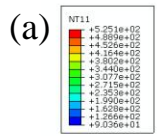
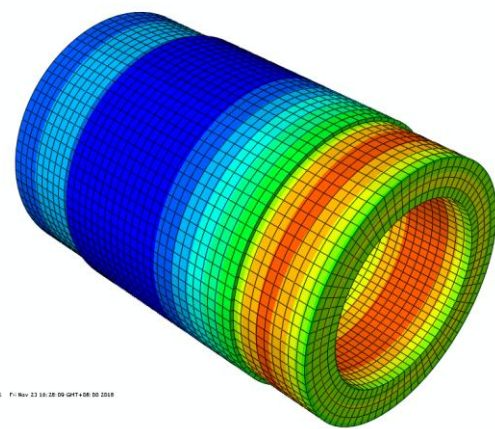
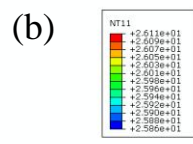


圖 3- 38 (a) N-PWHT、(b) Y-PWHT 之 S_{22} (S_{yy}) 周向應力場的模擬值截面示意圖。(MPa)



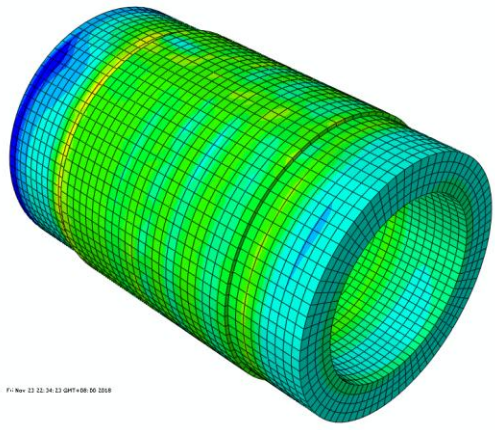
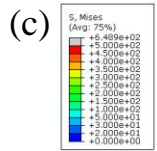
Heat Transfer Working Analysis
 CDB: shenm00 - Abaqus/Standard 6.14-5 - Fri Nov 23 10:28:09 GMT+08:00 2018

Step: Step-322
 Increment: 21 | Step Time = 30.00
 Element No.: NT11
 Deformed (in): yes (off) | Deformation Scale Factor: 100 (mm)



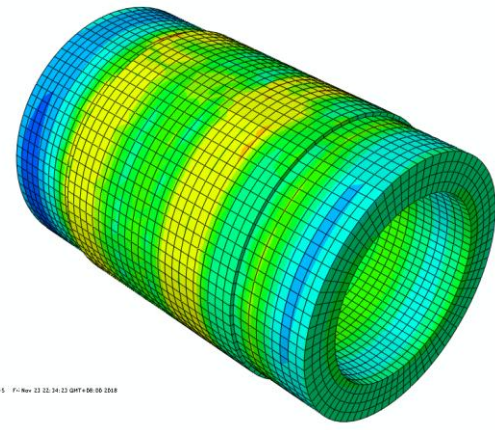
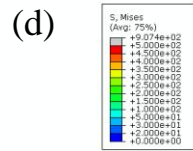
Heat Transfer Working Analysis
 CDB: shenm00 - Abaqus/Standard 6.14-5 - Fri Nov 23 10:28:09 GMT+08:00 2018

Step: Step-322
 Increment: 427 | Step Time = 1.2000e+04
 Element No.: NT11
 Deformed (in): yes (off) | Deformation Scale Factor: 100 (mm)



Stress Working Analysis
 CDB: shenm00 - Abaqus/Standard 6.14-5 - Fri Nov 23 12:34:23 GMT+08:00 2018

Step: Step-492, From: ELS_2mm
 Increment: 5 | Step Time = 1.000e+00
 Element No.: S, Mises
 Deformed (in): off | Deformation Scale Factor: +1.000e+00



Stress Working Analysis
 CDB: shenm00 - Abaqus/Standard 6.14-5 - Fri Nov 23 12:34:23 GMT+08:00 2018

Step: Step-492
 Increment: 492 | Step Time = 1.2000e+04
 Element No.: S, Mises
 Deformed (in): off | Deformation Scale Factor: +1.000e+00

圖 3- 39 Y-PWHT-52M 之(a) 暫態、(b) 冷卻 12000 秒溫度場，(c) 暫態、(d) 冷卻 12000 秒 von Mises 應力場的模擬值。(°C, MPa)

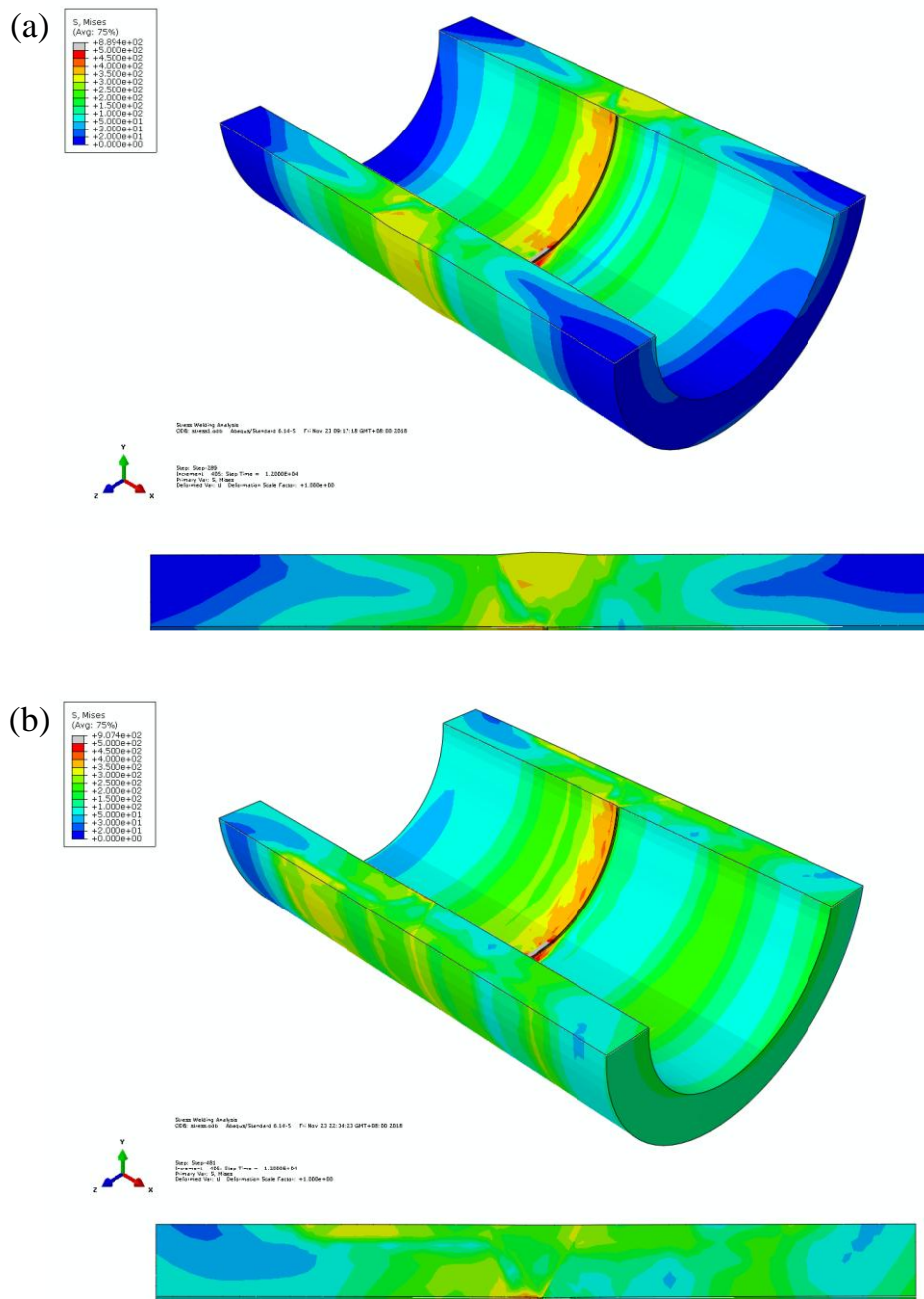


圖 3-40 (a) Y-PWHT、(b) Y-PWHT-52M 之 von Mises 應力場的模擬值截面示意圖。(MPa)

Y-PWHT-52M 之不銹鋼端內表面，距離銲道中心 100 mm 以內皆為殘留張應力，最大值約為 260 MPa ~ 280 MPa，位於銲道金屬介面處。距離銲道中心 110 mm 以外，則呈現殘留壓應力。

觀察圖 3-42a，Y-PWHT 之低合金鋼端內表面，距離銲道中心 12 mm 以內皆為殘留張應力，最大值約為 45 MPa ~ 60 MPa，位於銲道金屬介面處。距離銲道中心 20 mm 以外，則呈現殘留壓應力，最小值約為 -170 MPa ~ -160 MPa，位於 40 mm 處。不銹鋼端內表面，距離銲道中心 50 mm 以內皆為殘留張應力，最大值約為 165 MPa ~ 175 MPa，位於銲道金屬介面處。距離銲道中心 60 mm 以外，則呈現殘留壓應力，最小值約為 -90 MPa ~ -85 MPa，位於 100 mm 處。觀察圖 3-42b，Y-PWHT-52M 之低合金鋼端內表面，皆為殘留壓應力，最小值約為 -150 MPa ~ -130 MPa，位於 60 mm 處。不銹鋼端內表面，距離銲道中心 70 mm 以內皆為殘留張應力，最大值約為 105 MPa ~ 130 MPa，位於銲道金屬介面處。距離銲道中心 80 mm 以外，則呈現殘留壓應力。

將兩種模型、兩種應力方向沿軸向之內表面繪圖，如圖 3-43 所示。綜觀而言，覆層銲接處理對於不銹鋼端，具有同時降低 S_{11} 及 S_{22} 殘留張應力場、延伸殘留張應力場分佈範圍的效果。對於低合金鋼端， S_{11} 及 S_{22} 靠近銲道中心位置之殘留張應力值下降、遠離銲道中心位置之殘留壓應力值上升。由於模型之邊界條件為限制銲接件兩端變形 (Free-end)，不銹鋼端距離銲道中心 60 mm 以內之殘留應力場皆趨向同一數值之張應力： S_{11} 100 MPa、 S_{22} 50 MPa，超過 60 mm 後旋即轉變為殘留壓應力。顯示覆銲層能使異質銲接管件內表面的殘留應力場往壓應力轉變，然而模型設定之參數及條件仍需做更進一步之修正，方能切合實際異質管件之使用狀態。

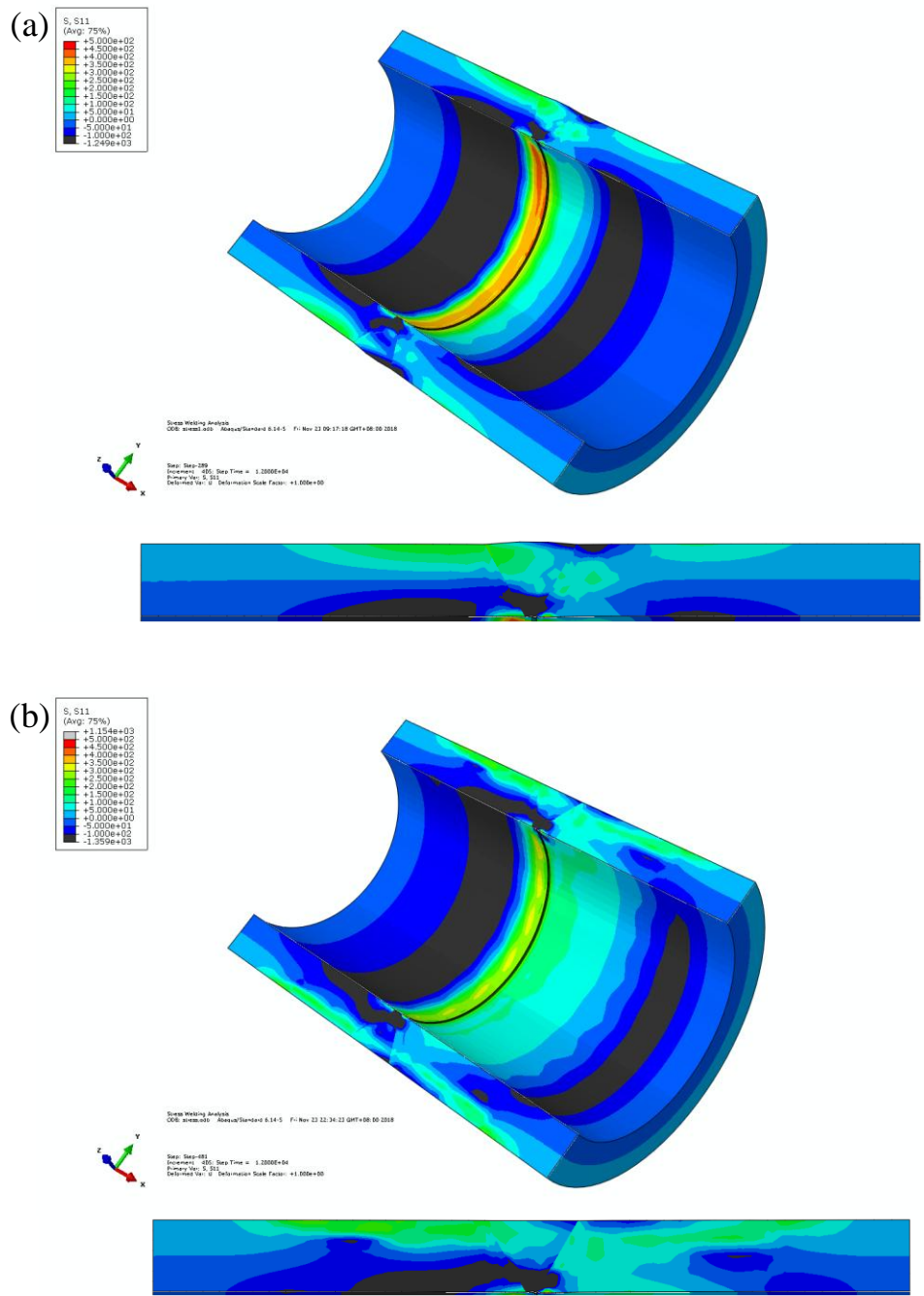


圖 3-41 (a) Y-PWHT、(b) Y-PWHT-52M 之 S_{11} (S_{xx}) 軸向應力場的模擬值截面示意圖。(MPa)

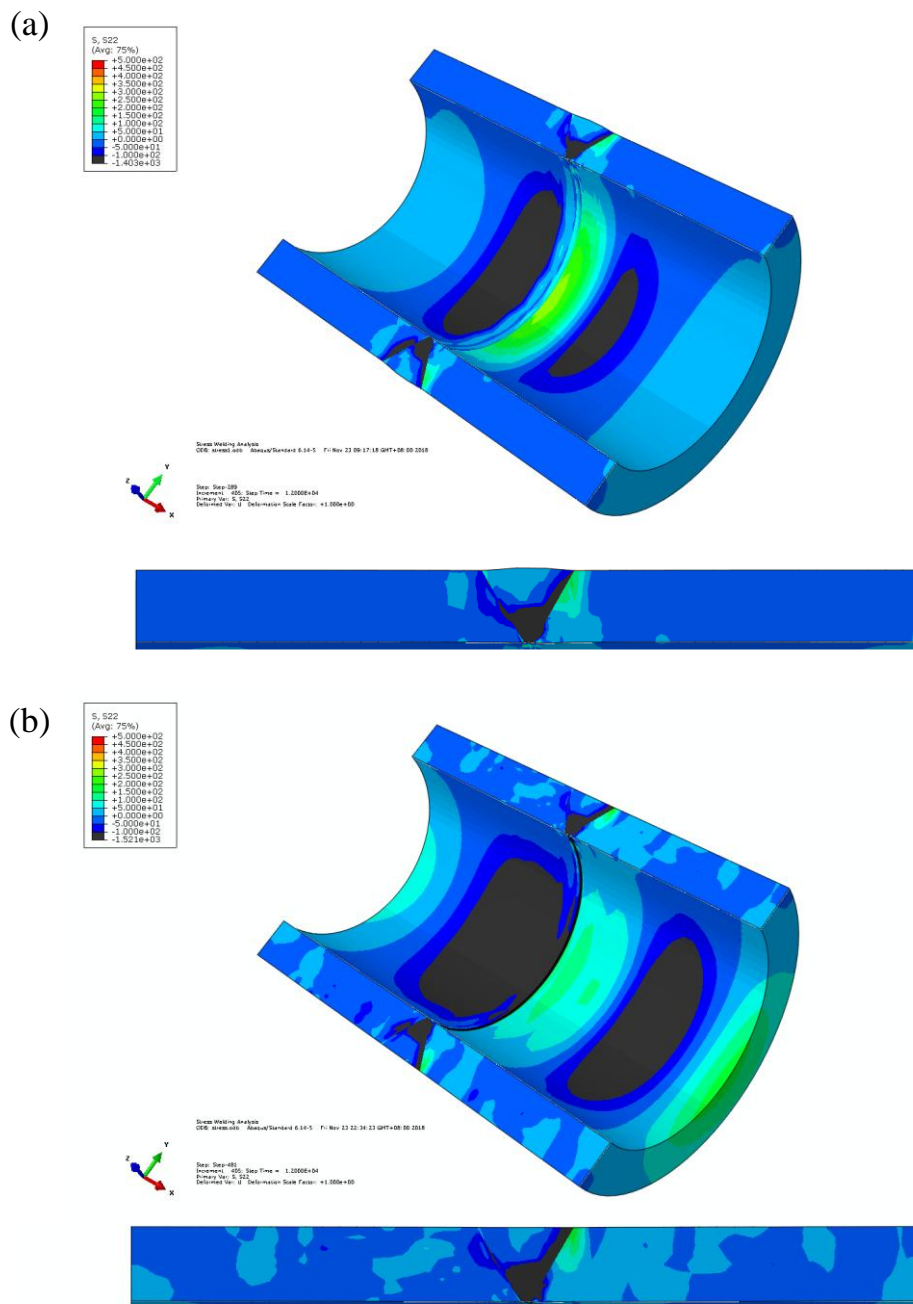


圖 3-42 (a) Y-PWHT、(b) Y-PWHT-52M 之 S_{22} (S_{yy}) 周向應力場的模擬值截面示意圖。(MPa)

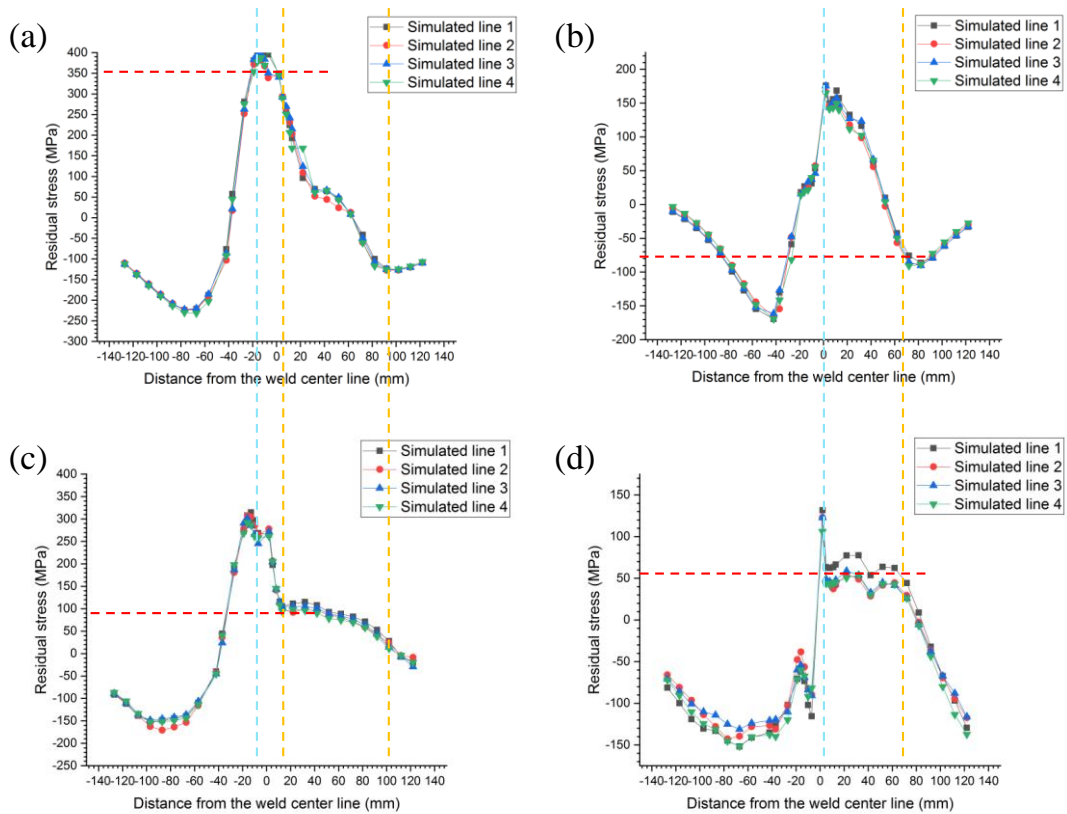


圖 3-43 Y-PWHT 之(a) S11、(b) S22，Y-PWHT-52M 之(c) S11、(d) S22 沿軸向之內表面的殘留應力模擬值。

3.2.2 應力量測

為了解殘留應力量測數值與實際量測值之吻合程度、評估非破壞之二維殘留應力量測儀應用於異質銲接件之可靠性，以 X 光量測儀器沿軸向之內表面，由銲道中心處向兩側測量。將管件劃分為 4 等份，量測底材的殘留應力量值趨勢，低合金鋼端底材起始點為距離銲道中心 7 mm 處、不銹鋼端底材起始點為距離銲道中心 2 mm。受限於管件內徑尺寸，在未剖切管件的前提下，儀器僅能測量 S₁₁ 之殘留應力量值。圖 3-44a, b 顯示，低合金鋼端之 X 光量測值皆高於 400 MPa，不銹鋼端之量測值約為 600~700 MPa，距離銲道中心 60 mm 處才下降至 0 MPa。觀察圖 3-45a 及圖 3-46a 得知，低合金鋼端之第 1 個量測點 (-7 mm) 具有最低的殘留張應力量值，約為 50~200 MPa。低合金鋼端之第 2~5 個量測點 (-10、-13、-16、-19 mm) 之殘留應力量值，由 700 MPa 下降至 350 MPa。後續之量測點則呈現維持 400~475 MPa 的趨勢。觀察圖 3-45b 及圖 3-46b 得知，不銹鋼

端距離銲道中心 20 mm 以內之量測點的殘留張應力值維持在 720 ~ 920 MPa，遠離銲道中心 40 mm 以外之量測值逐漸下降至與模擬數值相似。距離銲道中心 20 ~ 40 mm 之量測值雖較模擬數值大，其曲線與模擬數值曲線皆隨銲道距離愈遠而愈降低。

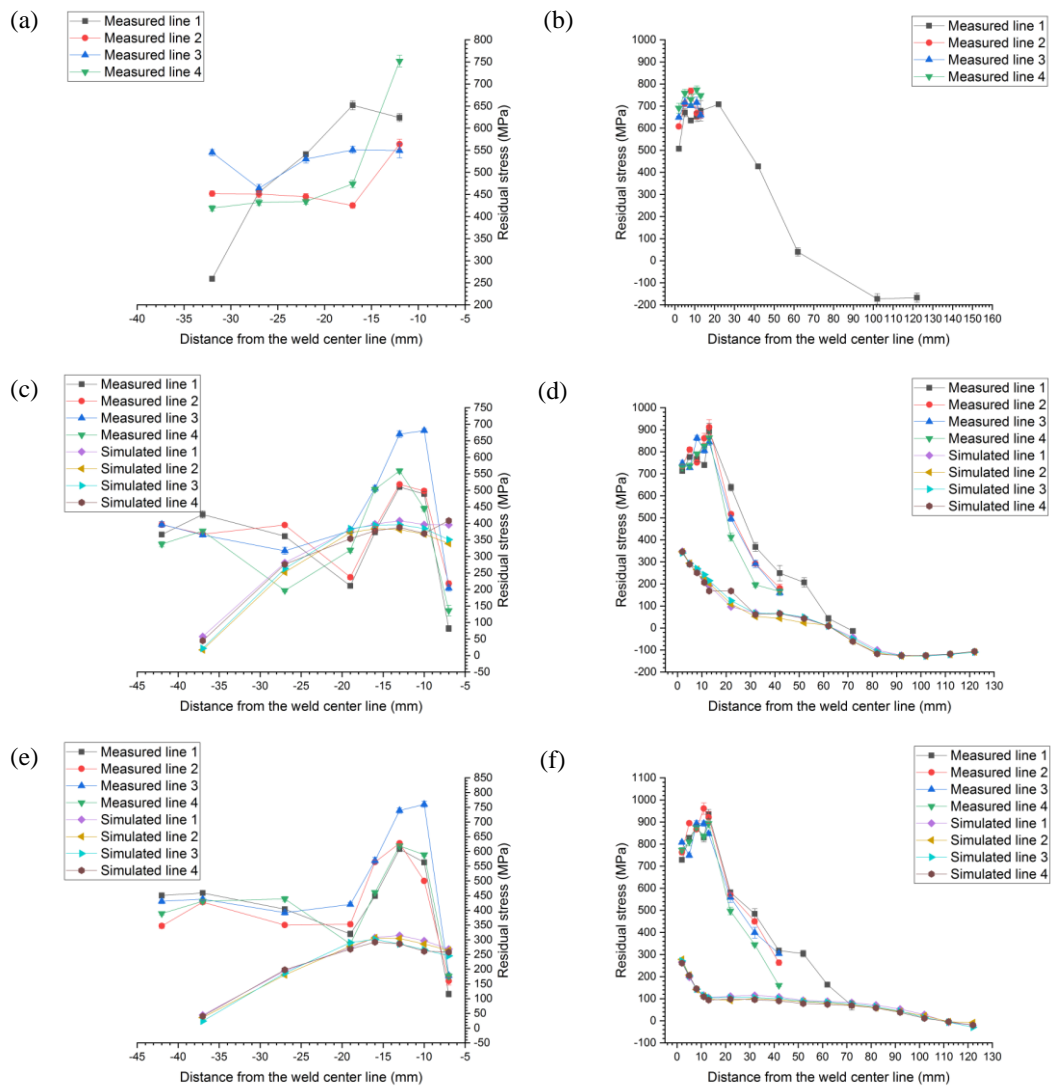


圖 3-44 N-PWHT 之(a)A508 端、(b) 304S 端，Y-PWHT-52M 之(c)A508 端、(d) 304S 端，Y-PWHT-52M 之(e)A508 端、(f) 304S 端，沿軸向之內表面的 S_{11} 殘留應力量測值。

為釐清造成 X 光量測產生誤差之原因，圖 3-45 標示低合金鋼端-19 mm、銲道中心位置，以及不銹鋼端+40 mm 位置。觀察銲接管件內表面，受到銲接處之入熱量影響，管件底材靠近銲道處之內徑值已有明顯之變形。比較模擬位移場與量測位移場（參照圖 2-13），如圖 3-46 所示，X 方向位移與模擬分析有良好的對應性，靠近銲道兩側的底材位移量相較於端側較小。實際量測之位移量大約為 0.1~1.8 mm，模擬分析的位移量卻只有 0.05~0.55 mm 之間，推測原因為實際銲接過程為每道次銲接完成時皆有重新打磨、冷卻造成應力累積，而模擬分析為連續施作，因此低估應力造成位移量的誤差。另一方面，X 光量測之試片表面要求較為嚴苛，除變形量易造成量測值誤差值增大外，機械加工會造成表面殘留張應力層，需以電解拋光處理以降低外部影響因素。

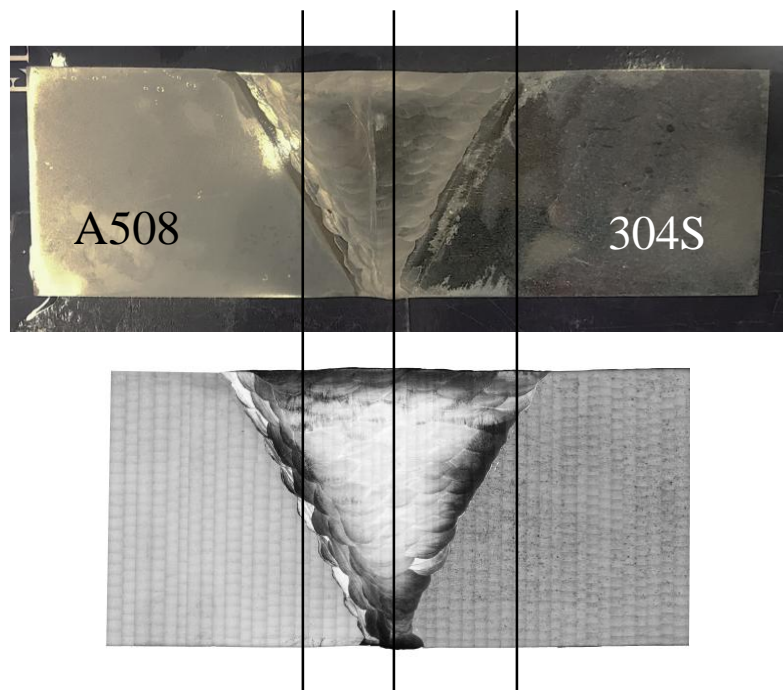


圖 3-45 異質銲接管件之巨觀金相及金相組合圖。

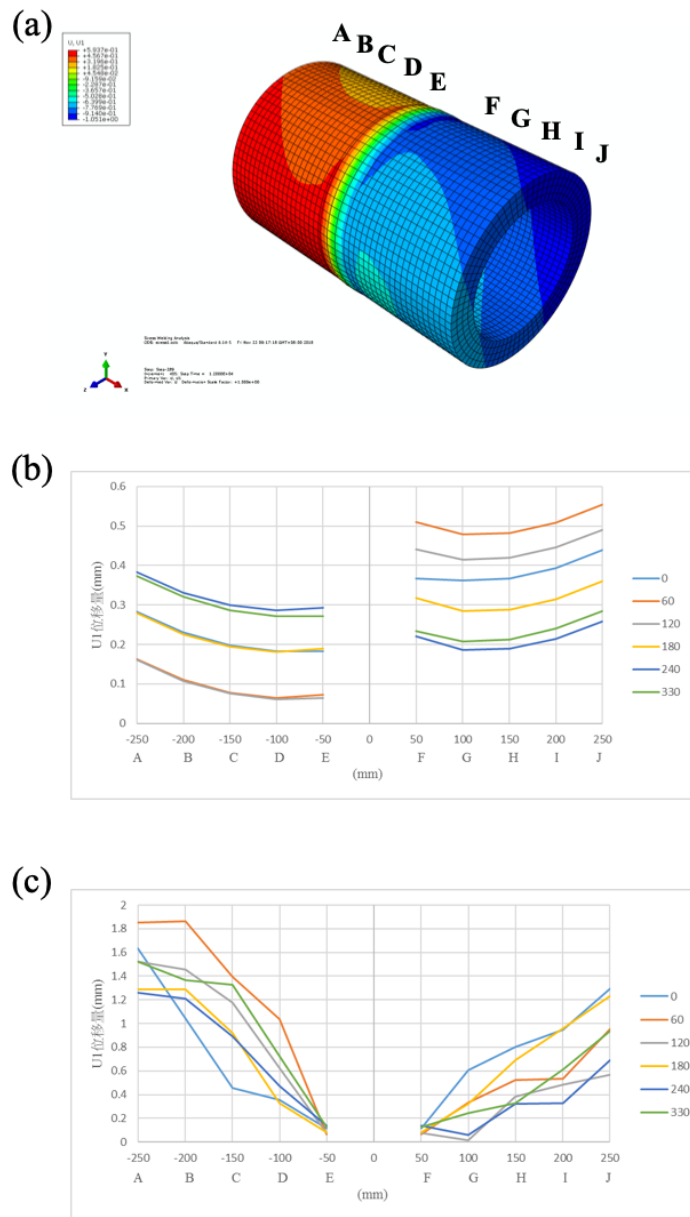


圖 3-46 Y-PWHT 之(a) 位移場、(b) 各量測點之位移模擬值，以及(c) 各量測點之位移量測值。

3.3 超音波檢測應用於異質銲接件之檢測能力

為定量陣列超音波分析儀在冷卻水壓力邊界之異質銲接管件的瑕疵深度、瑕疵檢出率，先進行異質銲接板各區域的聲速量測，再以不同探頭方向沿垂直銲道方向連續掃描。透過陣列超音波分析儀之聚焦量測的優勢，依序計算水平量測距離、垂直量測深度以及訊雜比的比較。板件之規塊加工圖見圖 2-14，板厚平均 5 等分位置以深孔加工處理，施作直徑 3 mm、深度 50 mm 的側鑽孔 (Side-drill hole, SDH)。為探討異質材料介面對波式的影響，在不銹鋼板端側 50 mm 處相同深度加工 5 個 SDH。利用板件之規塊所獲得之結果與校正，實際使用於管件之規塊 (見圖 2-15)，以確認陣列超音波之檢測能力。

3.3.1 超音波聲速與衰減率量測

以游標卡尺量測板件之規塊為 50.4 mm，再以超音波之第 1 底面回波及第 5 底面回波的音程距離進行計算，各區域的聲速量測值列於表 3-6。另使用第 1 底面回波及第 5 底面回波的振幅差值取 log 後乘以 20，獲得各區域的衰減值。由於管件外表有弧度(非平面)，其表面未進行精加工處理，衰減較板件銲接件(平面)大。在 3 種規塊中，銲道擁有最小的聲速值、最大的衰減值。

表 3-6 規塊各區域的聲速量測值及材料衰減係數。

音速(m/s)	A508	A508 HAZ	Weld	304S HAZ	304S
50 mm plate	5905	5930	5550	5582	5720
Y-PWHT	5918	6010	5588	5648	5730
N-PWHT	5922	5980	5674	5656	5735
衰減 (dB/mm)					
50 mm plate	0.08	0.12	0.40	0.24	0.09
Y-PWHT	0.10	0.22	0.24	0.31	0.13
N-PWHT	0.13	0.21	0.34	0.26	0.18

3.3.1 銲接板掃描圖形

以精密磨床加工將板件之規塊表面研磨至 3 個加工符號後，以音波由低合金鋼方向往不銹鋼端方向掃描（以下簡稱 508 端掃）及不銹鋼端方向往低合金鋼方向掃描（以下簡稱 316 端掃），示意圖如圖 3-47 所示。掃描座標零點定義為楔形塊邊界與不銹鋼端之邊界重合之處，如圖 3-48 所示。

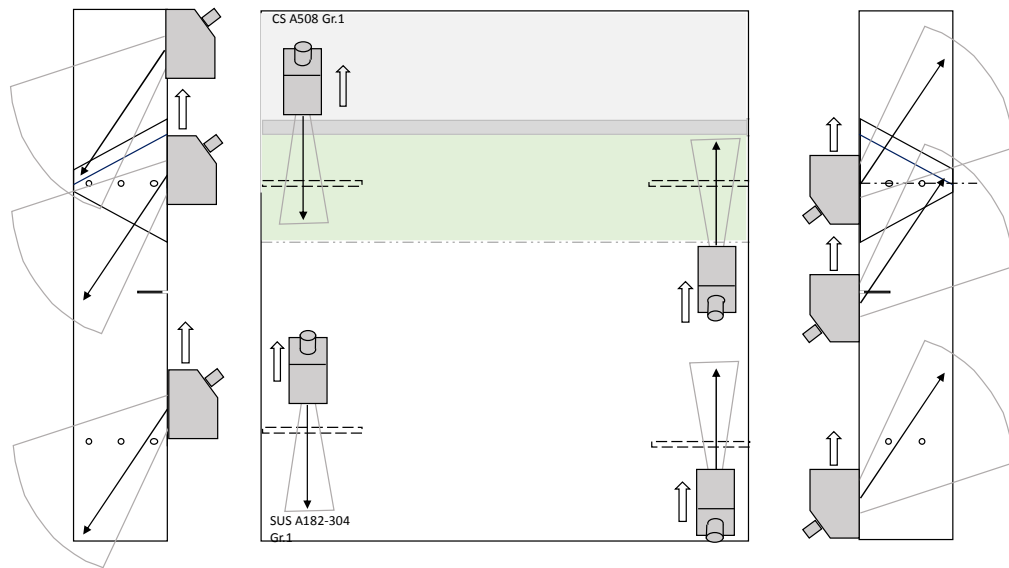


圖 3-47 音波方向於板件之規塊表面掃描的示意圖。

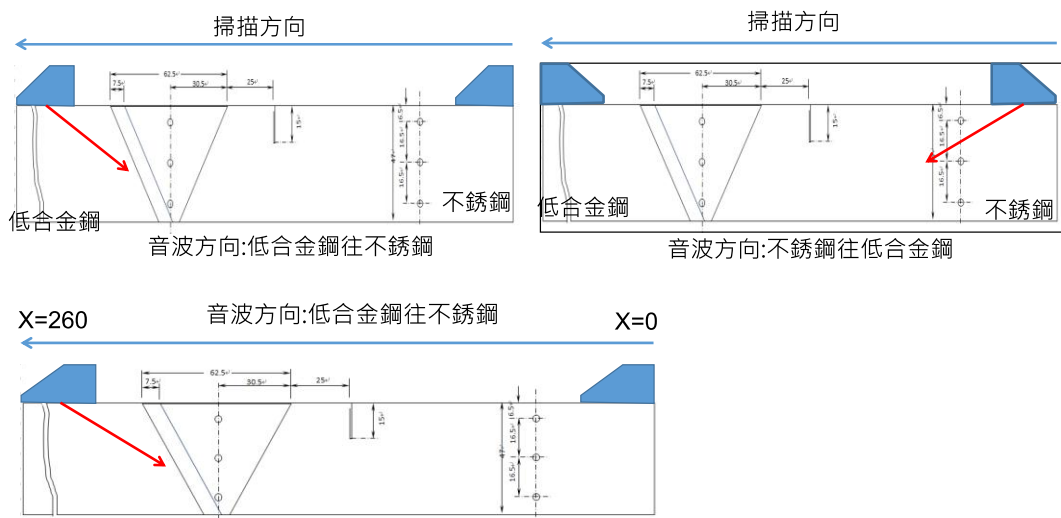


圖 3-48 音波方向與掃描方向、掃描座標零點定義之示意圖。

利用 Snell's Law 計算各 SDH 在超音波入射角介於 35 ~ 75 度時，理論可讀取的水平位置，比對實際探頭可判讀位置，以及紀錄 SDH 量測深度與能量響應。雙晶探頭使用 2.25DM7X4PM-19X12 A17，搭配楔形塊型號 SA17-DN55L0，以水浸法進行陣列超音波試驗。另一方面，508 端掃之儀器預設聲速為 5890 m/s，316 端掃之儀器預設聲速為 5700 m/s。508 端掃及 316 端掃之掃描 B scan 圖形（側視）、S scan 圖形（截面）、C scan 圖形（俯視）、A scan 圖形（振幅）詳列於附錄 D。508 端掃之 B scan 圖形與掃描座標之比較圖，列於圖 3-49 至圖 3-53。理論可讀取的水平位置與探頭實際可判讀位置之數值，見表 3-7。各 SDH 之連續掃描 B scan 圖形彙整如圖 3-54 所示。觀察結果得知，當掃描角度為高入射角度區 ($>55^\circ$) 時，能量擴散大致衰減率上升，造成水平探測位置產生誤差。隨著 SDH 的深度增加，儀器讀取的訊雜比逐漸下降，使得 SDH 之訊號隱藏於背景之中，人員不易判讀。自 2nd SDH 起，位於鉸道之側鑽孔，隨著入射角度的逐漸增加，深度變軌跡呈現拋物線，拋物線頂點處(SDH 深度最淺)，音波入射點接近低合金鋼端之 IN182 緩衝層介面。顯示音波進入鉸接板件內，受到異質材料介面的影響將會產生偏折，尤以低合金鋼端緩衝層之多層介面與結晶方向對音程的往返有極大之影響。使得 SDH 深度隨角度愈高，有先變淺再變深的現象。

表 3- 7 508 端掃之 SDH 各角度下理論可讀取的水平位置與實際探頭可判讀位置之數值。

	1 st SDH		2 nd SDH		3 rd SDH		4 th SDH		5 th SDH	
	低角度	高角度	低角度	高角度	低角度	高角度	低角度	高角度	低角度	高角度
316L SS										
計算訊號出現位置	41	63	48	97	54	129	60	159	66	190
實際可判讀位置	40	57	46	93	52	100	56	105	63	100
Weld center										
計算訊號出現位置	204	225	212	261	215	260	224	261	230	261
實際可判讀位置	204	218	213	244	217	260	229	261	236	261

註：粗黑斜體為理論可讀取的水平位置已超過板件之規塊邊界。

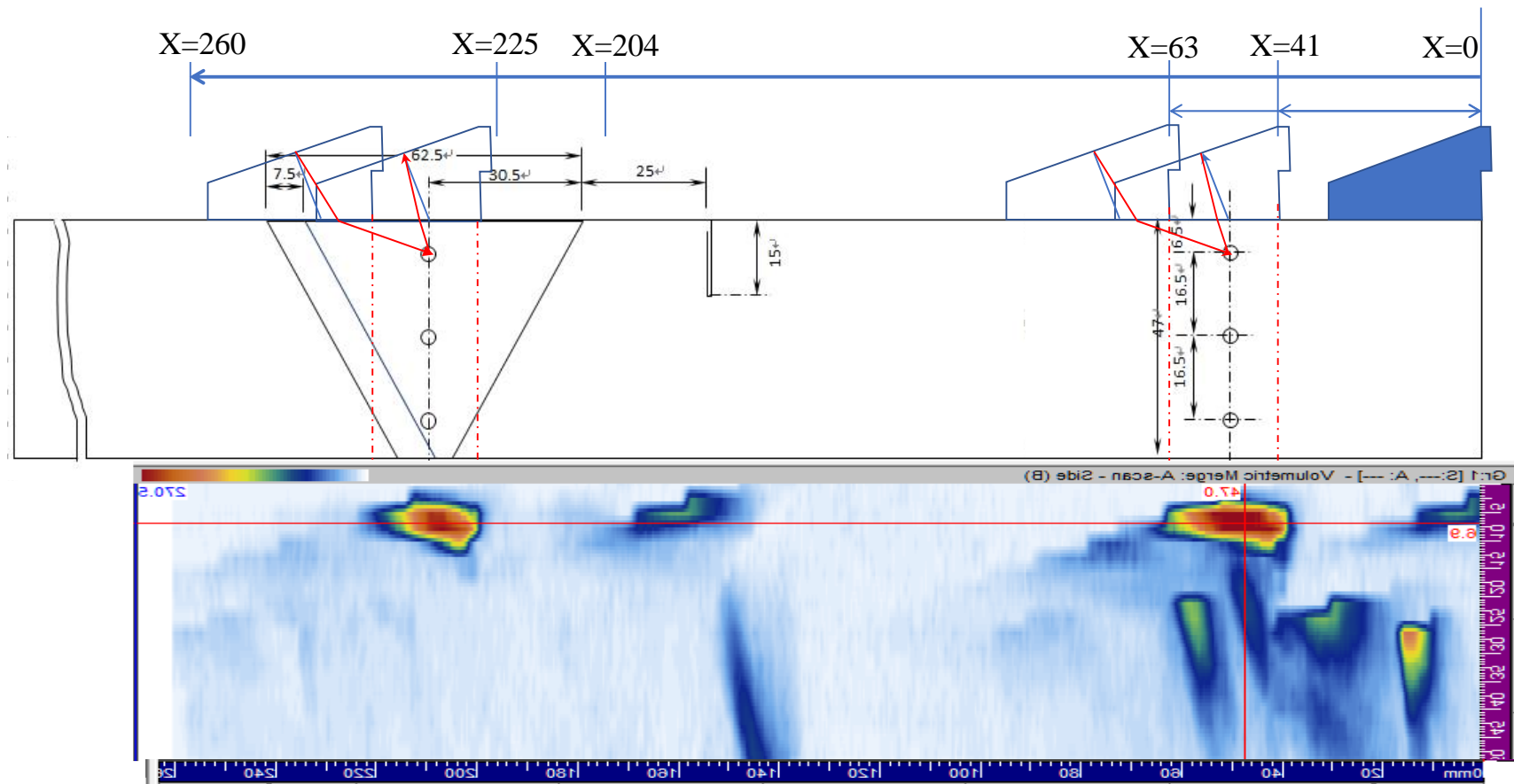


圖 3-49 508 端掃之 1st SDH 連續掃描 B scan 圖形與與掃描座標的比較圖。

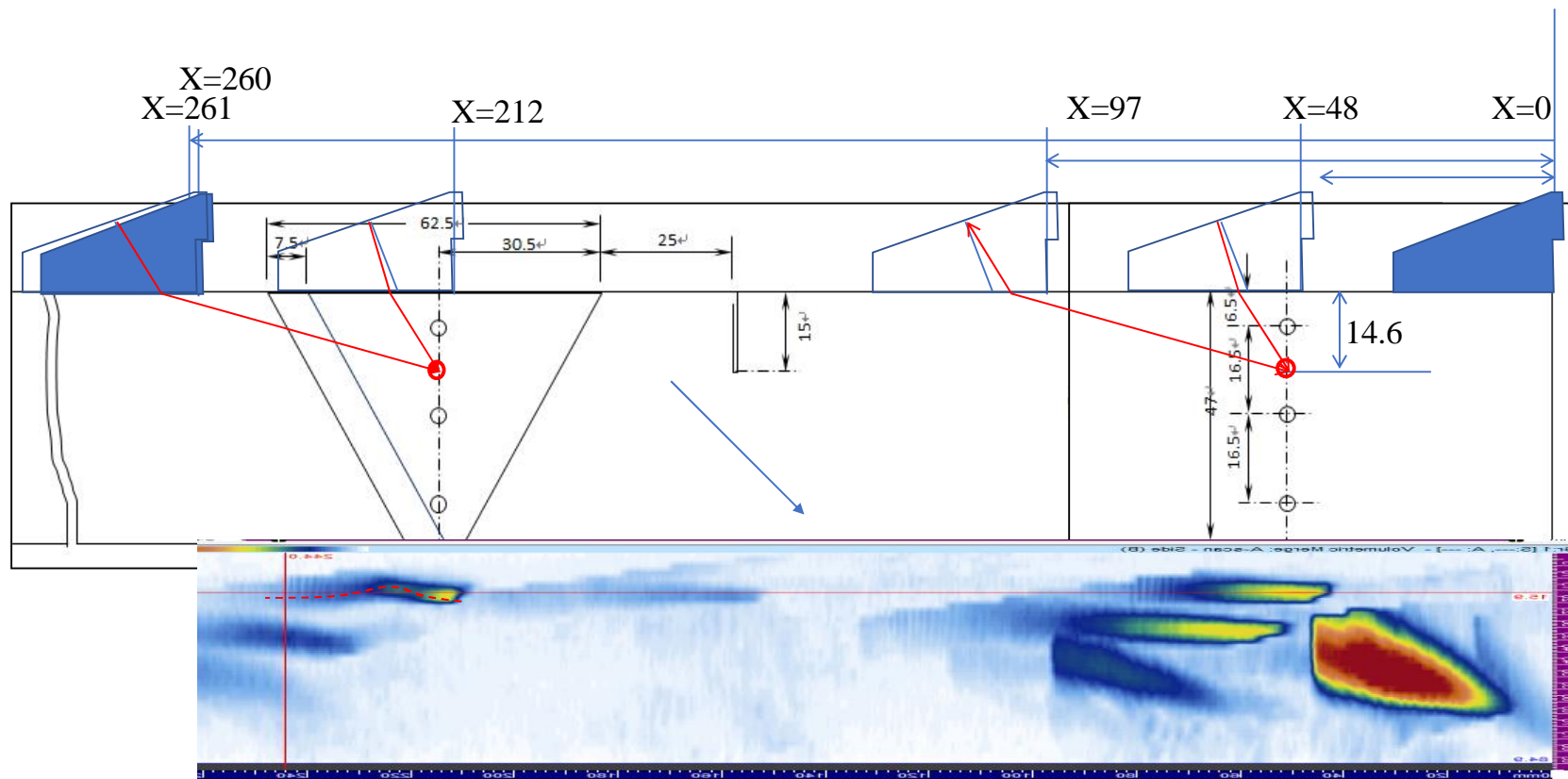


圖 3-50 508 端掃之 2nd SDH 連續掃描 B scan 圖形與與掃描座標的比較圖。

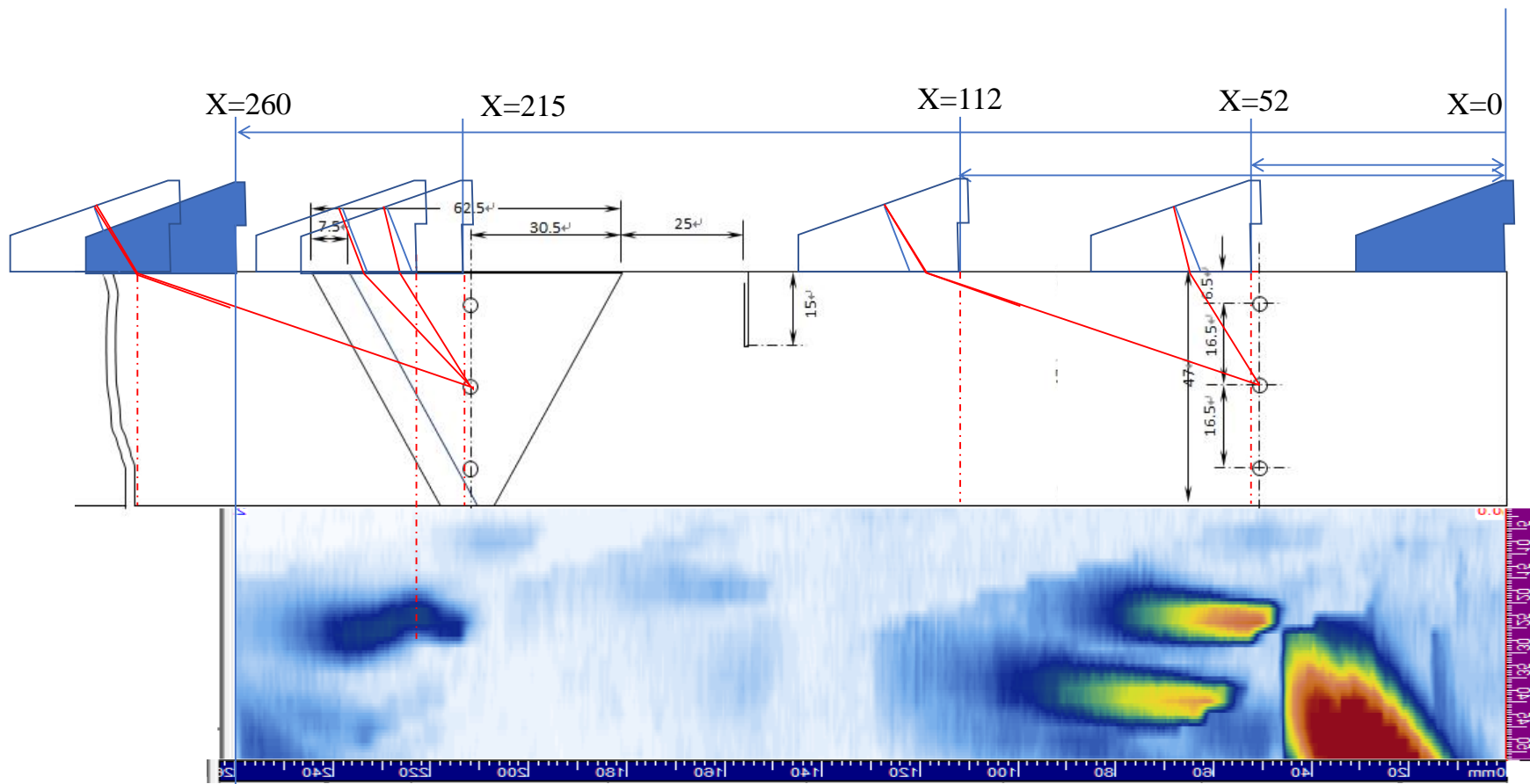


圖 3-51 508 端掃之 3rd SDH 連續掃描 B scan 圖形與與掃描座標的比較圖。

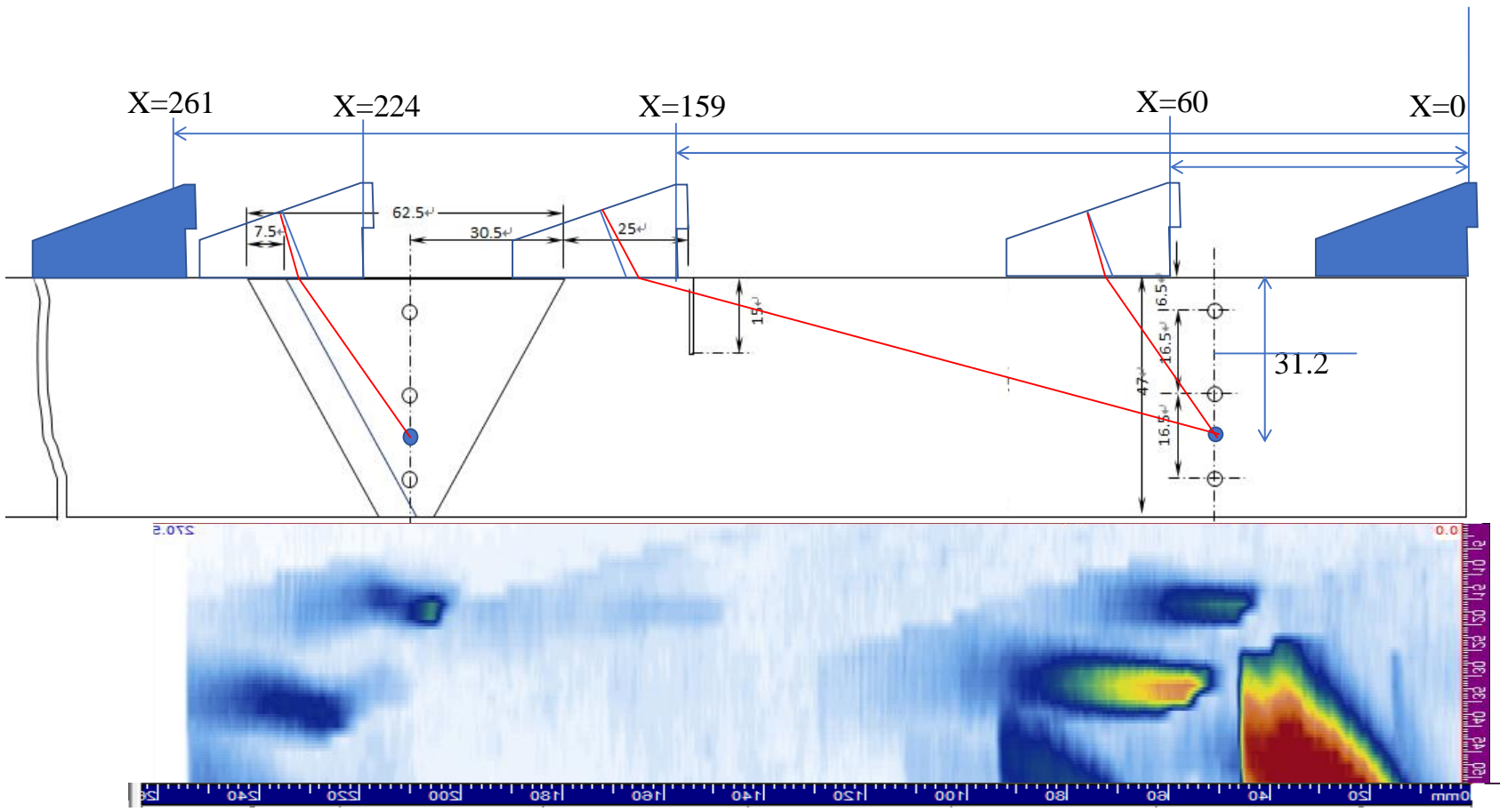


圖 3-52 508 端掃之 4th SDH 連續掃描 B scan 圖形與與掃描座標的比較圖。

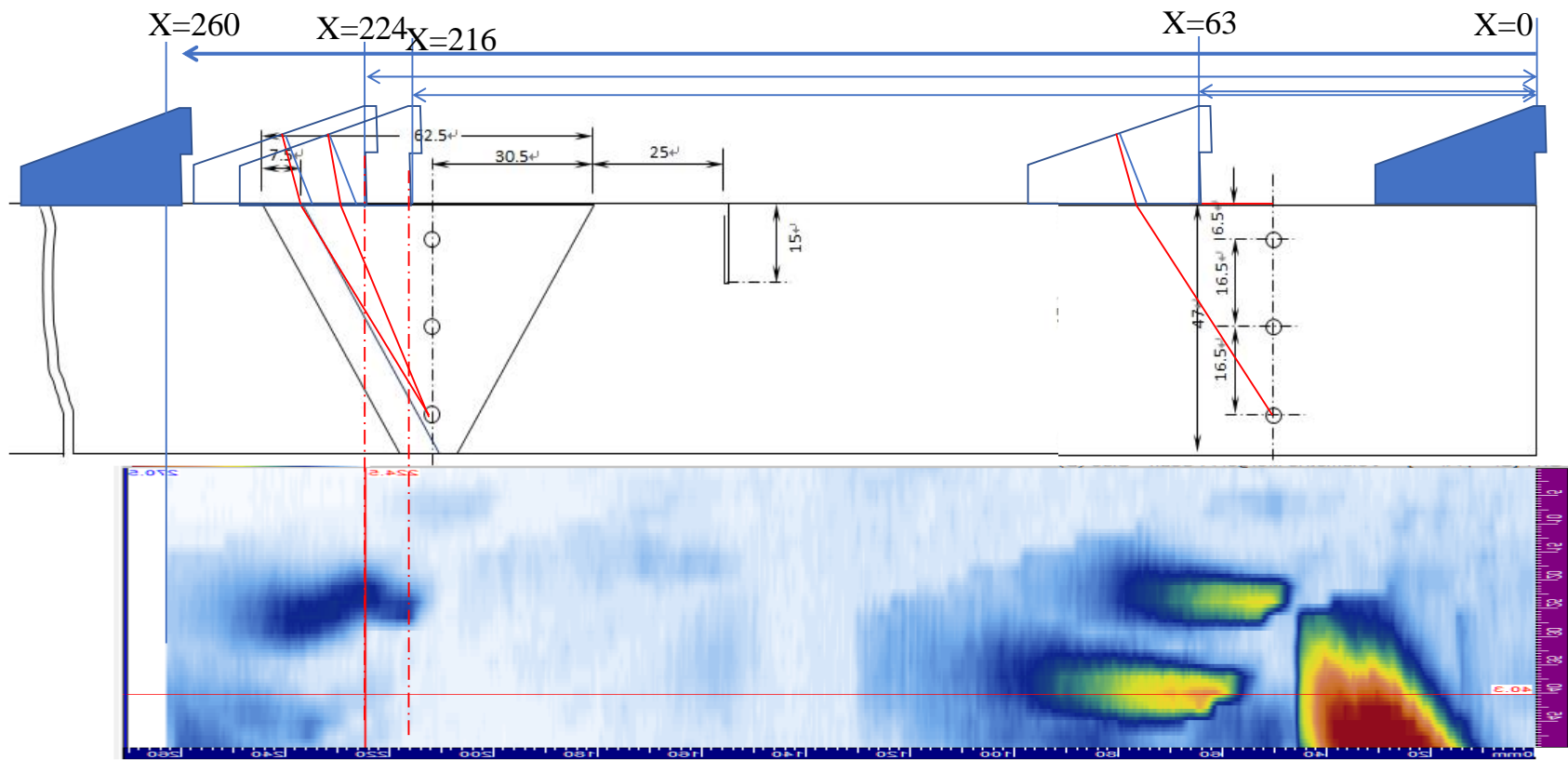


圖 3-53 508 端掃之 5th SDH 連續掃描 B scan 圖形與與掃描座標的比較圖。

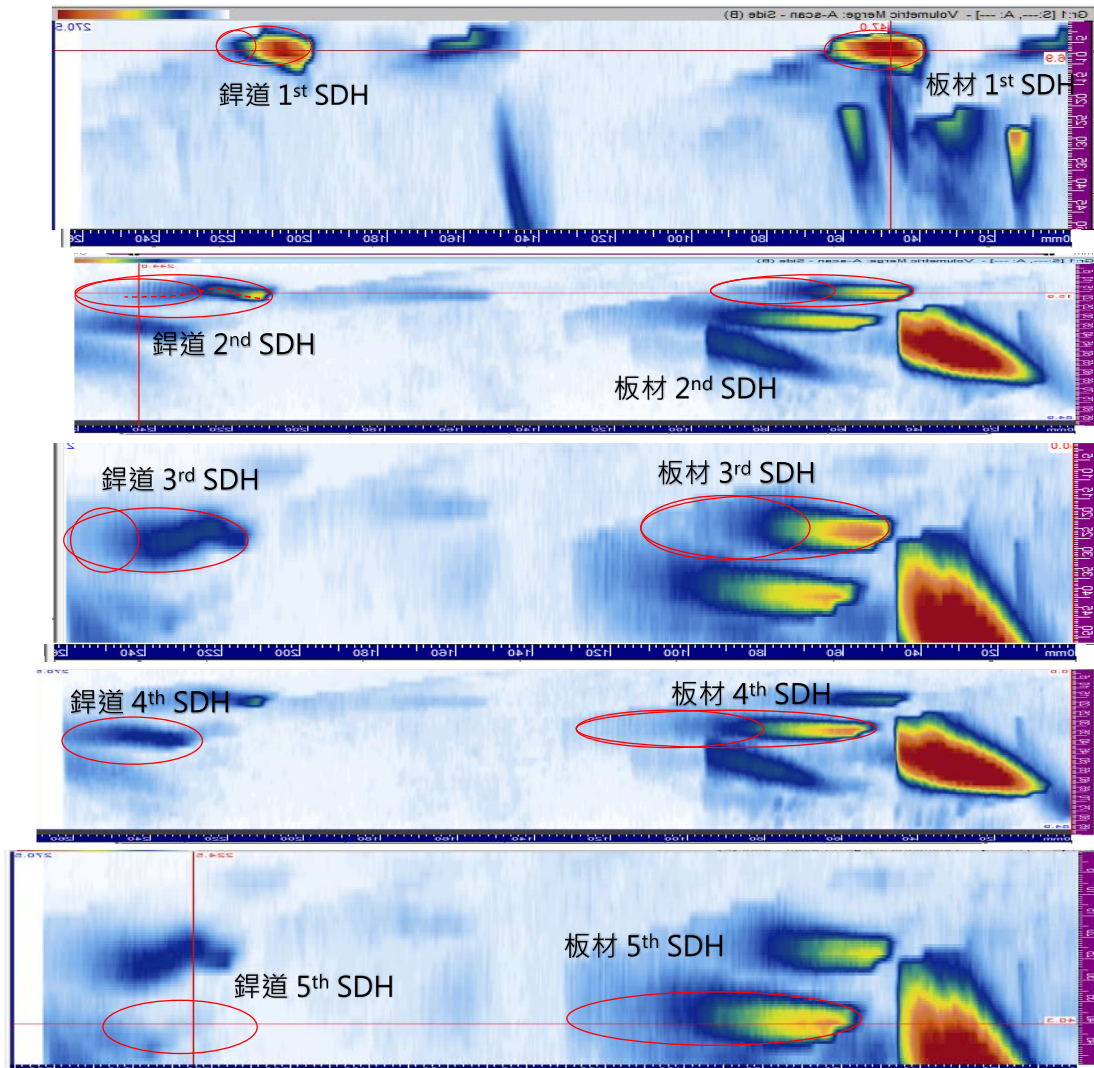


圖 3- 54 508 端掃之 SDH 連續掃描 B scan 圖形比較圖。

316 端掃之 B scan 圖形與掃描座標之比較圖，列於圖 3-55 至圖 3-59。理論可讀取的水平位置與實際探頭可判讀位置之數值，見表 3-8。各 SDH 之連續掃描 B scan 圖形彙整如圖 3-60 所示。觀察結果得知當掃描角度愈高時，音程行走距離愈長，能量衰減造成訊雜比急速下降，以致水平探測位置產生誤差。與 508 端掃之訊號相同，自 2nd SDH 起，位於鐸道之側鑽孔，隨著入射角度的逐漸增加，其軌跡微呈拋物線。由於 316 端掃時聲速設定為 5700 m/s，音速設定值較接近各區域的聲速實際值時，故推測板材之測量深度值得以穩定於某定值。

表 3-8 316 端掃之 SDH 各角度下理論可讀取的水平位置與實際探頭可判讀位置之數值。

	1 st SDH		2 nd SDH		3 rd SDH		4 th SDH		5 th SDH	
	低角度	高角度	低角度	高角度	低角度	高角度	低角度	高角度	低角度	高角度
316L SS										
計算訊號出現位置	29	7	22	0	14	0	10	0	0	0
實際可判讀位置	28	0	20	0	14	0	8	0	3	0
Weld center										
計算訊號出現位置	194	173	186	137	178	105	174	75	164	74
實際可判讀位置	189	170	185	165	175	142	171	142	166	137

註：粗黑斜體為理論可讀取的水平位置已超過板件之規塊邊界。

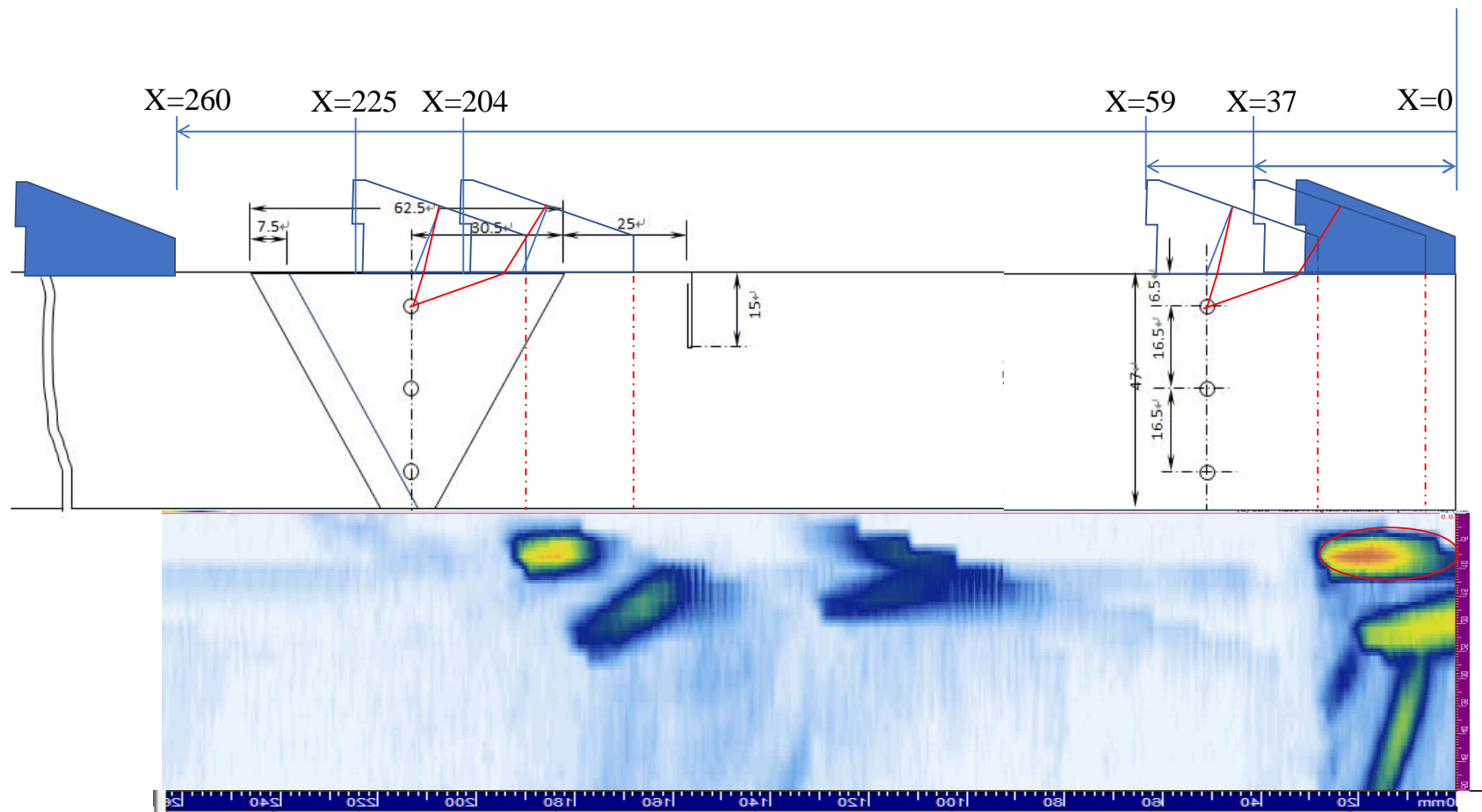


圖 3-55 316 端掃之 1st SDH 連續掃描 B scan 圖形與與掃描座標的比較圖。

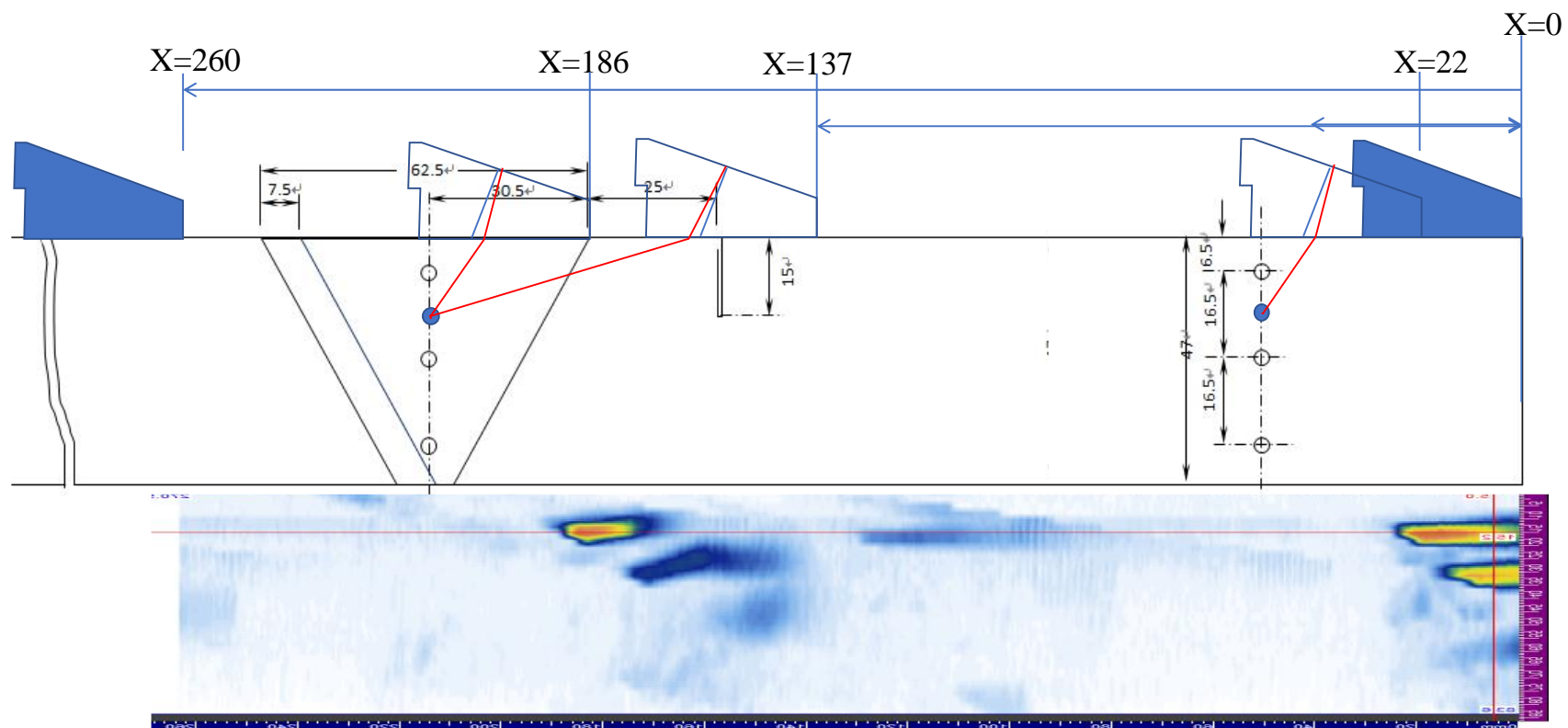


圖 3-56 316 端掃之 2nd SDH 連續掃描 B scan 圖形與與掃描座標的比較圖。

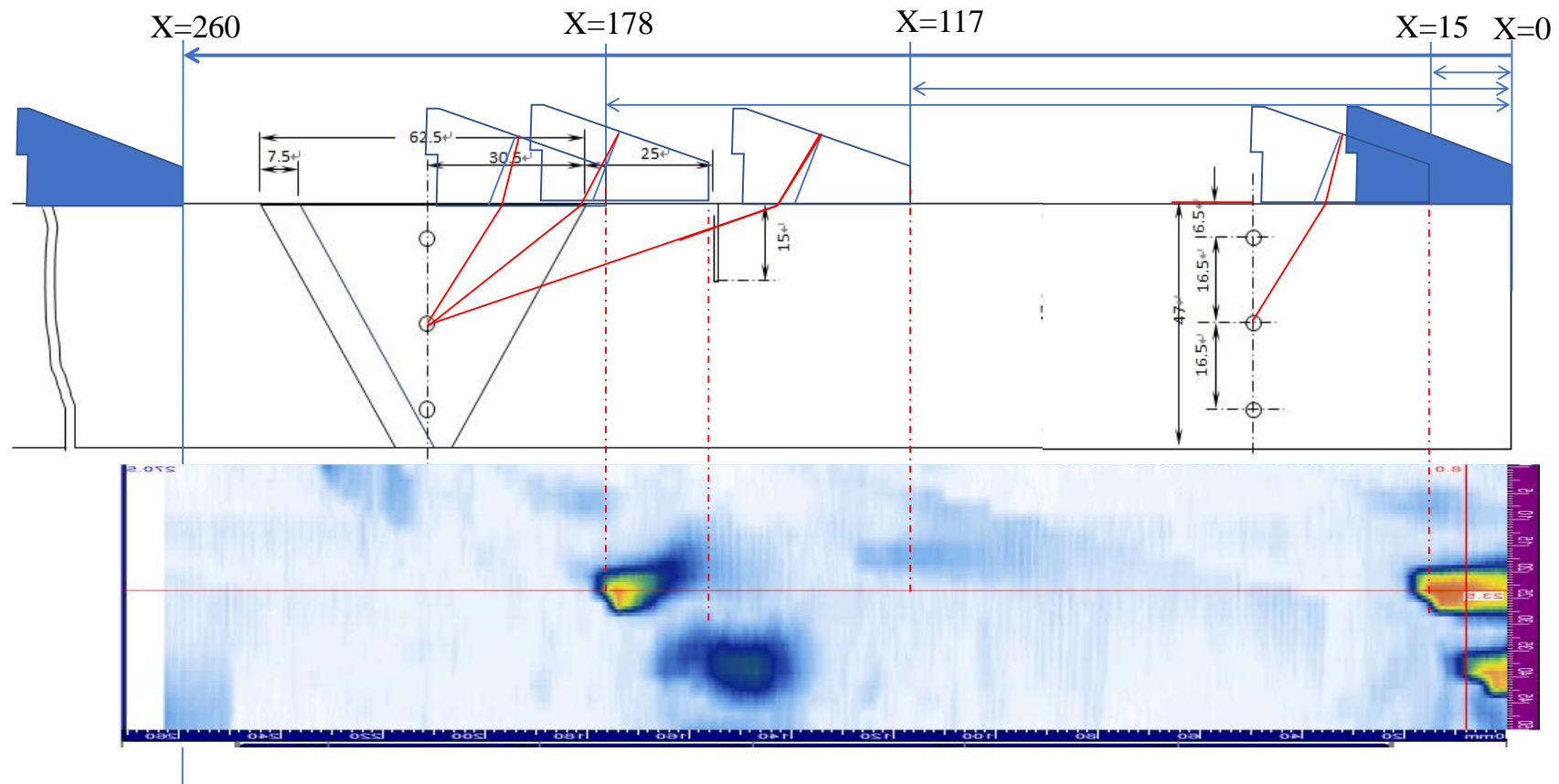


圖 3-57 316 端掃之 3rd SDH 連續掃描 B scan 圖形與與掃描座標的比較圖。

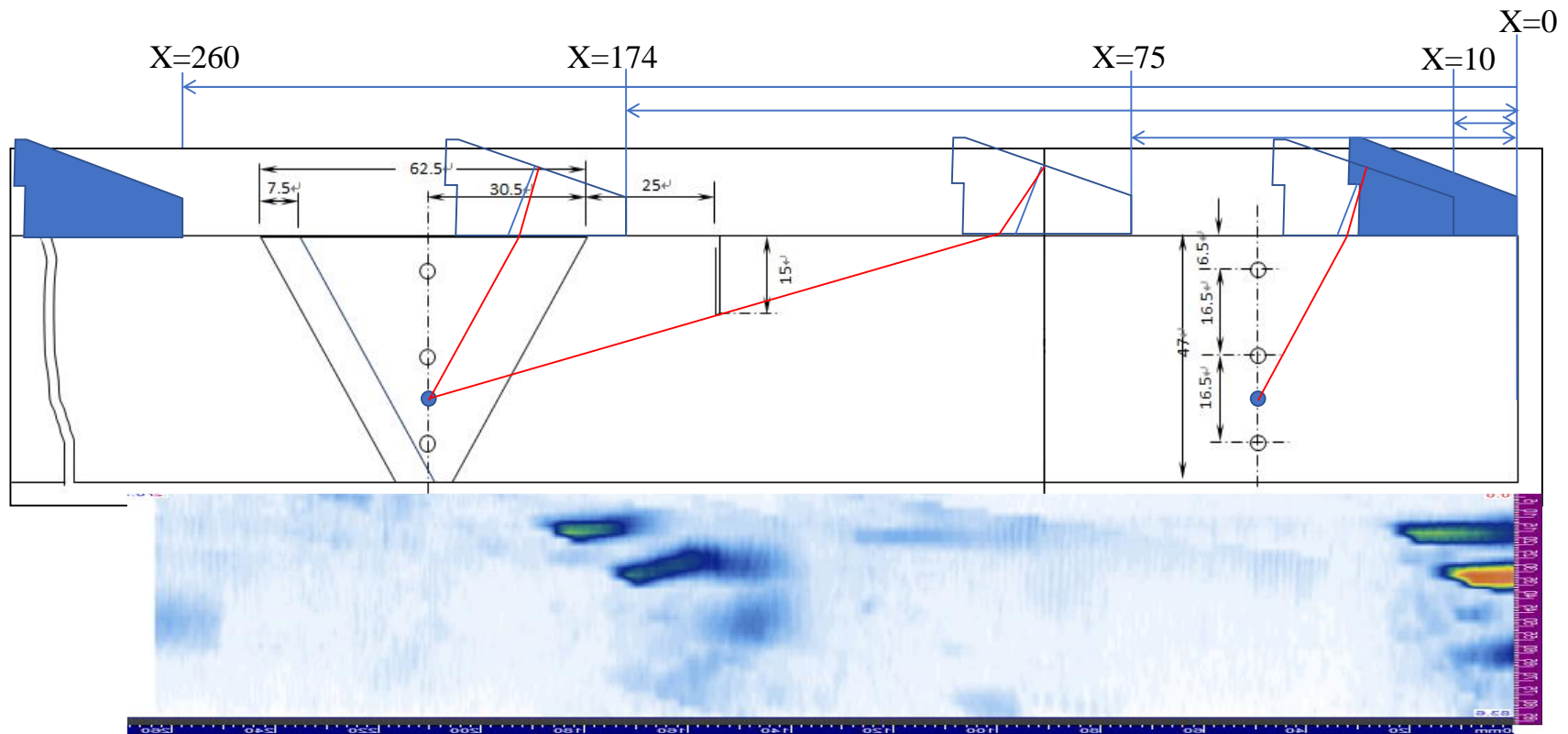


圖 3-58 316 端掃之 4th SDH 連續掃描 B scan 圖形與與掃描座標的比較圖。

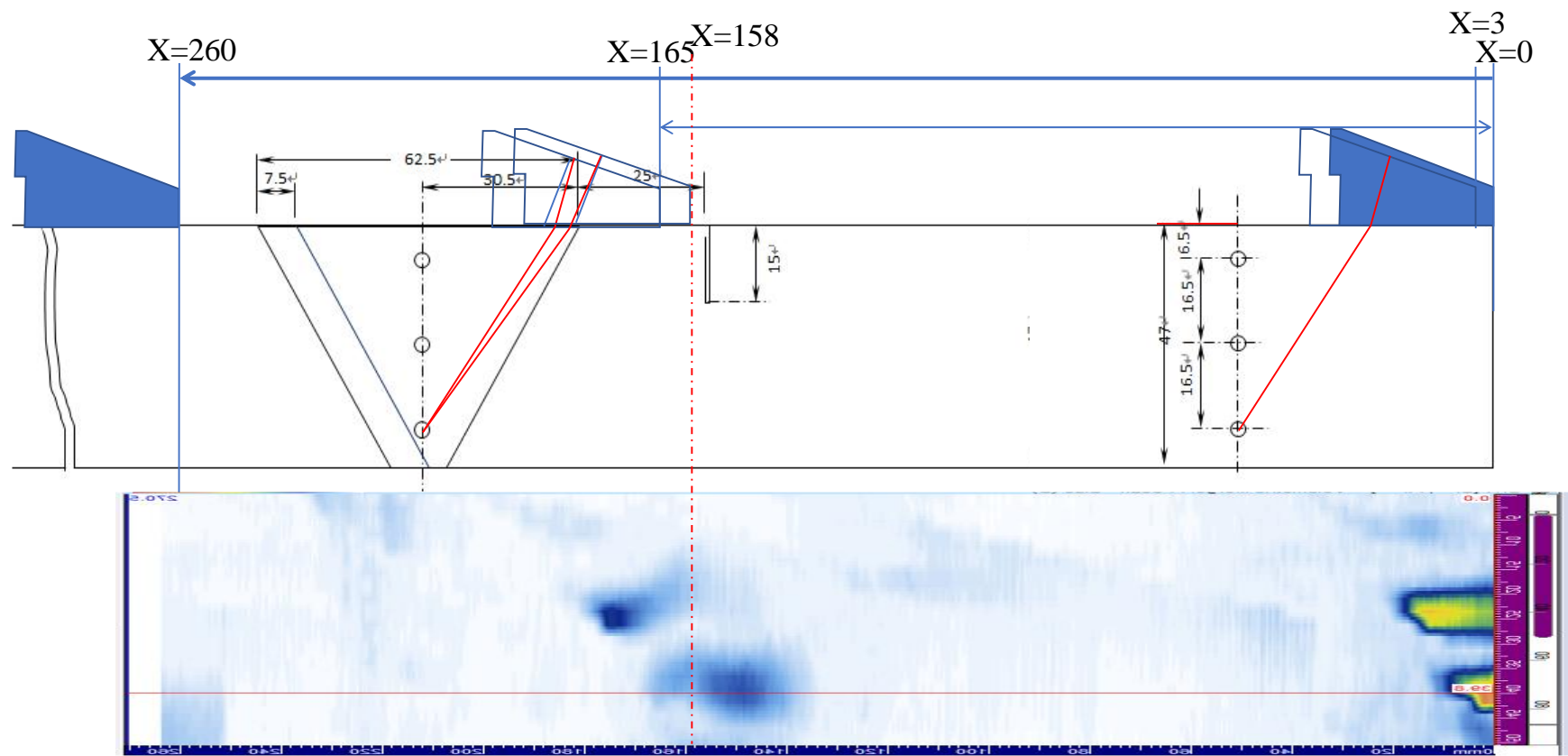


圖 3-59 316 端掃之 5th SDH 連續掃描 B scan 圖形與與掃描座標的比較圖。

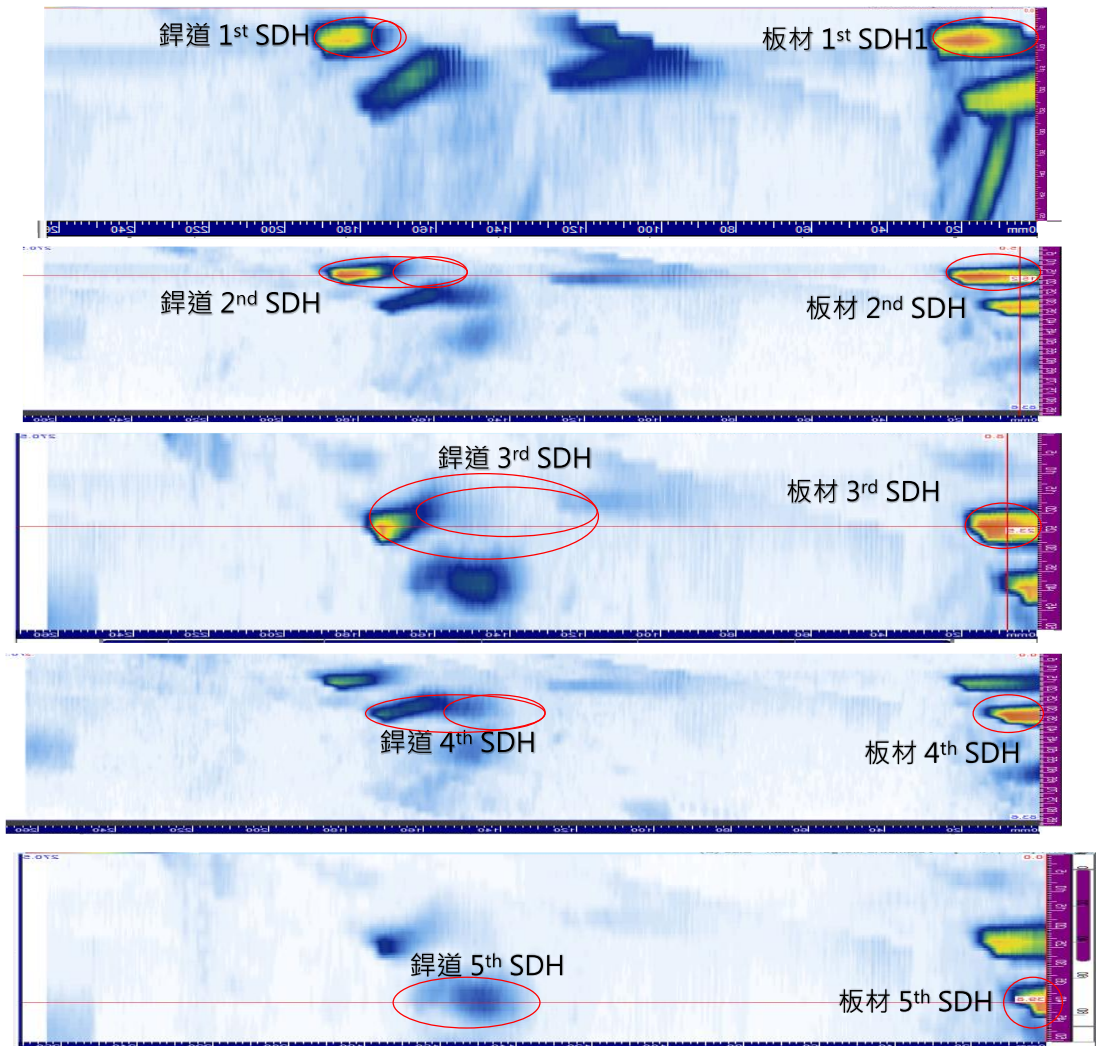


圖 3- 60 316 端掃之 SDH 連續掃描 B scan 圖形比較圖。

3.3.2 訊號分析與修正係數

透過 A scan 圖形將各入射角度所對應之振幅分別依照 508 端掃及 316 端掃紀錄於表 3-9 及表 3-10，繪製之能量響應對入射角做圖，如圖 3-61 所示。由能量響應得知，當入射角度大於 55° 後入射角度，能量擴散造成響應大幅衰減，連帶使得訊雜比不佳。在本研究之實驗儀器系統與規塊設計中，陣列超音波之入射角需以低於 55° 進行探測，可獲得較準確之量測值以及較優良之訊雜比。

透過 S scan 圖形將各 SDH 深度量測值由 508 端掃及 316 端掃紀錄於表 3-11 及表 3-12，另透過與實際 SDH 深度換算得到表 3-13 及表 3-14 之量測修正係數表。透過分析入射角度與量測深度之相關性，在 508 端掃中，SDH 深度最淺之入射點位置，大多接近低合金鋼端之 IN182 緩衝層介面，如圖 3-62 所繪。由於聲速設定值大於實際聲速值，實際的折射角度與儀器顯示的角度不同，產生誤差，隨著折射角越高測量得到的深度值越淺。在 316 端掃中，相較於碳鋼聲速設定值，不銹鋼聲速更貼近實際聲速值，其測量深度值於特定折射角後便不再劇烈下降，入射點位置如圖 3-63 所繪。比較 508 端掃與 316 端掃結果，可得到以下結論：（1）508 端掃，相同之鐸道 SDH 測量到的深度值大於實際 SDH 之深度值，即瑕疵顯示深度較實際深度更深。（2）316 端掃相同之鐸道 SDH 測量到的深度值小於實際 SDH 之深度值，即瑕疵顯示深度較實際深度更淺。因此，在此研究系統中，超音波入射方向由不銹鋼端往低合金鋼端方向進行掃描較為合適，並且聲速需設定為不銹鋼傳遞聲速（5700 m/s）。

另一方面，透過 3.3.1 節中的表 3-8 及表 3-9 所列低角度至高角度之水平判讀位置，亦可與實際水平位置間距（164 mm，見規塊加工圖）換算製成水平量測修正係數表，如表 3-15 與表 3-16 所列。

表 3-9 508 端掃之各入射角度所對應之振幅。

入射角	316S 1 st SDH	Weld 1 st SDH	316S 2 nd SDH	Weld 2 nd SDH	316S 3 rd SDH	Weld 3 rd SDH	316S 4 th SDH	Weld 4 th SDH	316S 5 th SDH	Weld 5 th SDH
35	46	42	86	79	83	28	73	24	59	19
38	48	44	87	74	83	28	71	27	59	16
41	49	45	86	66	79	28	69	30	56	16
44	51	47	86	59	75	28	63	30	53	17
47	53	48	83	54	70	32	58	29	51	17
50	54	49	81	51	65	32	51	29	49	16
53	55	50	72	51	60	31	48	26	43	14
56	55	51	70	51	53	31	40	24	39	15
59	55	49	60	48	46	28	32	20	33	---
62	54	47	52	44	40	21	27	15	31	---
65	53	43	43	33	30	17	18	---	24	---
68	51	39	33	24	22	13	15	---	17	---
71	49	33	22	13	17	11	9	---	13	---
74	44	25	14	10	11	---	8	---	11	---

表 3-10 316 端掃之各入射角度所對應之振幅。

入射角	316S 1 st SDH	Weld 1 st SDH	316S 2 nd SDH	Weld 2 nd SDH	316S 3 rd SDH	Weld 3 rd SDH	316S 4 th SDH	Weld 4 th SDH	316S 5 th SDH	Weld 5 th SDH
35	31	29	81	82	100	71	85	40	73	9
38	33	29	81	80	97	69	83	38	68	12
41	35	30	82	77	95	65	80	35	---	13
44	37	31	82	73	91	59	74	34	---	15
47	37	31	77	67	87	53	---	35	---	20
50	38	32	75	64	80	48	---	35	---	22
53	40	31	69	59	72	42	---	33	---	17
56	40	32	63	53	---	38	---	33	---	8
59	38	31	55	44	---	33	---	29	---	---
62	36	29	49	35	---	29	---	17	---	---
65	34	26	---	28	---	22	---	---	---	---
68	30	22	---	23	---	13	---	---	---	---
71	25	19	---	13	---	---	---	---	---	---
74	20	14	---	7	---	---	---	---	---	---

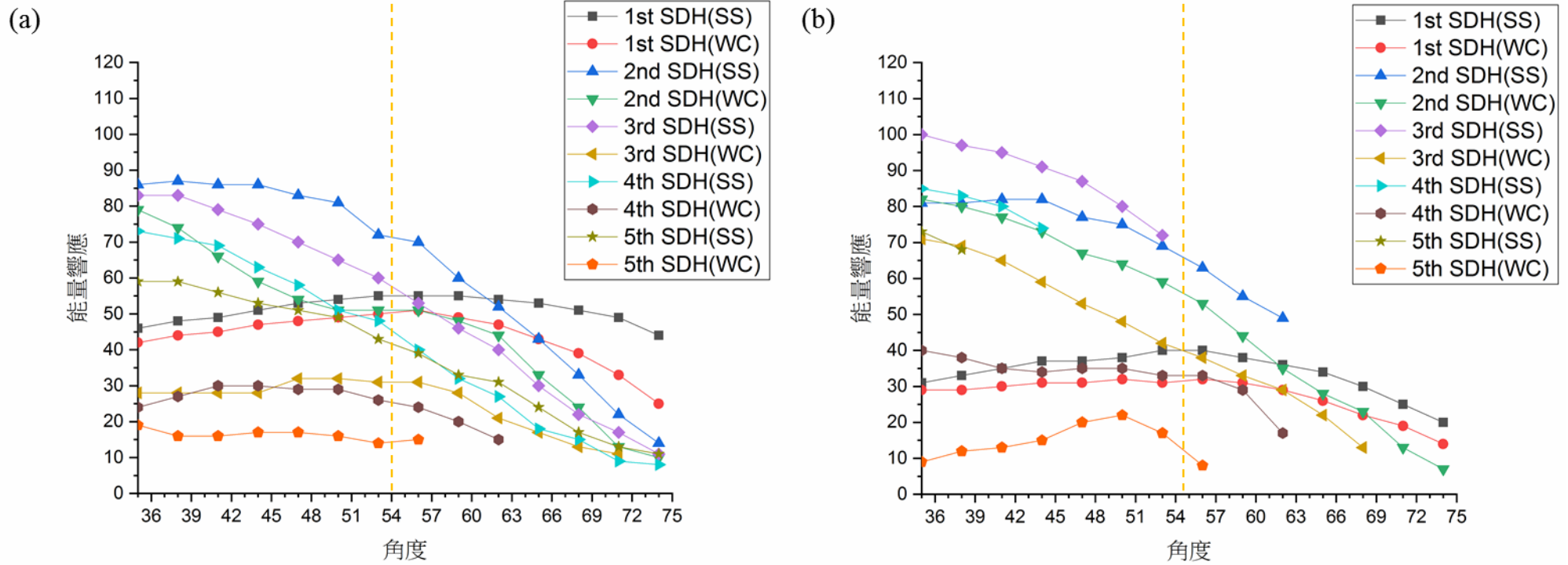


圖 3-61 (a) 508 端掃、(b) 316 端掃之各入射角度所對應之能量響應。

表 3-11 508 端掃之各入射角度所對應之 SDH 深度量測值。(1st SDH: 6.5、2nd SDH: 14.8、3rd SDH: 23.0、4th SDH: 31.3、5th SDH: 39.5 mm)

入射角	316S 1 st SDH	Weld 1 st SDH	316S 2 nd SDH	Weld 2 nd SDH	316S 3 rd SDH	Weld 3 rd SDH	316S 4 th SDH	Weld 4 th SDH	316S 5 th SDH	Weld 5 th SDH
35	7.7	8.2	16.2	17.2	23.9	25.7	32.9	33.4	40.3	40.6
38	8.0	8.0	16.2	17.0	23.9	24.9	32.4	32.9	40.1	45.4
41	8.0	8.0	16.2	16.7	23.6	24.7	32.6	37.2	39.8	44.8
44	7.7	7.7	16.0	16.5	23.4	23.9	32.4	36.6	39.3	44.3
47	7.4	7.7	16.0	16.2	23.4	23.4	31.8	35.8	39.3	43.8
50	7.4	7.4	15.8	15.8	23.0	22.8	31.8	35.2	39.0	43.3
53	7.4	7.2	15.3	15.4	23.0	22.6	31.4	34.5	38.2	42.3
56	7.2	6.9	15.1	14.9	22.7	25.8	31.0	34.1	37.8	41.9
59	6.9	6.9	15.0	14.3	22.3	25.6	30.5	33.7	37.4	---
62	6.5	6.6	15.0	13.7	22.2	25.4	30.0	33.2	36.4	---
65	6.2	6.2	15.0	14.3	21.4	25.4	29.7	---	35.2	---
68	6.0	6.0	14.6	15.4	20.8	---	---	---	---	---
71	5.7	5.6	14.6	16.2	20.8	---	---	---	---	---
74	5.1	5.0	14.3	16.2	20.6	---	---	---	---	---

表 3-12 316 端掃之各入射角度所對應之 SDH 深度量測值。(1st SDH: 6.5、2nd SDH: 14.8、3rd SDH: 23.0、4th SDH: 31.3、5th SDH: 39.5 mm)

入射角	316S 1 st SDH	Weld 1 st SDH	316S 2 nd SDH	Weld 2 nd SDH	316S 3 rd SDH	Weld 3 rd SDH	316S 4 th SDH	Weld 4 th SDH	316S 5 th SDH	Weld 5 th SDH
35	8.4	7.6	15.9	15.4	23.5	23.8	32.1	31.4	40.0	40.0
38	7.8	7.8	15.9	15.4	23.3	23.5	31.9	30.6	39.5	38.9
41	7.8	7.8	15.9	15.1	23.3	23.0	31.9	30.3	---	37.4
44	7.8	7.8	15.9	14.9	23.3	22.7	31.6	29.3	---	37.1
47	7.8	7.6	15.7	14.6	22.7	22.2	---	28.5	---	38.2
50	7.8	7.3	15.4	14.1	22.7	21.4	---	27.7	---	38.2
53	7.8	7.6	15.4	13.8	22.5	20.9	---	26.7	---	38.2
56	7.6	7.3	15.2	13.3	---	19.9	---	25.6	---	38.2
59	7.6	7.1	15.2	12.8	---	18.8	---	26.9	---	---
62	7.6	6.8	14.9	12.3	---	17.8	---	27.2	---	---
65	7.6	6.5	---	11.8	---	17.5	---	---	---	---
68	7.6	6.5	---	12.0	---	17.5	---	---	---	---
71	7.6	6.5	---	---	---	---	---	---	---	---
74	7.6	5.7	---	---	---	---	---	---	---	---

表 3-13 508 端掃之各入射角度量測 SDH 深度之修正係數對照表。

入射角	316S 1 st SDH	Weld 1 st SDH	316S 2 nd SDH	Weld 2 nd SDH	316S 3 rd SDH	Weld 3 rd SDH	316S 4 th SDH	Weld 4 th SDH	316S 5 th SDH	Weld 5 th SDH
35	-1.2	-1.7	-1.4	-2.4	-0.9	-2.7	-1.6	-2.1	-0.8	-1.1
38	-1.5	-1.5	-1.4	-2.2	-0.9	-1.9	-1.1	-1.6	-0.6	-5.9
41	-1.5	-1.5	-1.4	-1.9	-0.6	-1.7	-1.3	-5.9	-0.3	-5.3
44	-1.2	-1.2	-1.2	-1.7	-0.4	-0.9	-1.1	-5.3	0.2	-4.8
47	-0.9	-1.2	-1.2	-1.4	-0.4	-0.4	-0.5	-4.5	0.2	-4.3
50	-0.9	-0.9	-1	-1	0	0.2	-0.5	-3.9	0.5	-3.8
53	-0.9	-0.7	-0.5	-0.6	0	0.4	-0.1	-3.2	1.3	-2.8
56	-0.7	-0.4	-0.3	-0.1	0.3	-2.8	0.3	-2.8	1.7	-2.4
59	-0.4	-0.4	-0.2	0.5	0.7	-2.6	0.8	-2.4	2.1	---
62	0	-0.1	-0.2	1.1	0.8	-2.4	1.3	-1.9	3.1	---
65	0.3	0.3	-0.2	0.5	1.6	-2.4	1.6	---	4.3	---
68	0.5	0.5	0.2	-0.6	2.2	---	---	---	---	---
71	0.8	0.9	0.2	-1.4	2.2	---	---	---	---	---
74	1.4	1.5	0.5	-1.4	2.4	---	---	---	---	---

表 3-14 316 端掃之各入射角度量測 SDH 深度之修正係數對照表。

入射角	316S 1 st SDH	Weld 1 st SDH	316S 2 nd SDH	Weld 2 nd SDH	316S 3 rd SDH	Weld 3 rd SDH	316S 4 th SDH	Weld 4 th SDH	316S 5 th SDH	Weld 5 th SDH
35	-1.9	-1.1	-1.1	-0.6	-0.5	-0.8	-0.8	-0.1	-0.5	-0.5
38	-1.3	-1.3	-1.1	-0.6	-0.3	-0.5	-0.6	0.7	0	0.6
41	-1.3	-1.3	-1.1	-0.3	-0.3	-0	-0.6	1	---	2.1
44	-1.3	-1.3	-1.1	-0.1	-0.3	0.3	-0.3	2	---	2.4
47	-1.3	-1.1	-0.9	0.2	0.3	0.8	---	2.8	---	1.3
50	-1.3	-0.8	-0.6	0.7	0.3	1.6	---	3.6	---	1.3
53	-1.3	-1.1	-0.6	1	0.5	2.1	---	4.6	---	1.3
56	-1.1	-0.8	-0.4	1.5	---	3.1	---	5.7	---	1.3
59	-1.1	-0.6	-0.4	2	---	4.2	---	4.4	---	---
62	-1.1	-0.3	-0.1	2.5	---	5.2	---	4.1	---	---
65	-1.1	0	---	3	---	5.5	---	---	---	---
68	-1.1	0	---	2.8	---	---	---	---	---	---
71	-1.1	0	---	---	---	---	---	---	---	---
74	-1.1	0.8	---	---	---	---	---	---	---	---

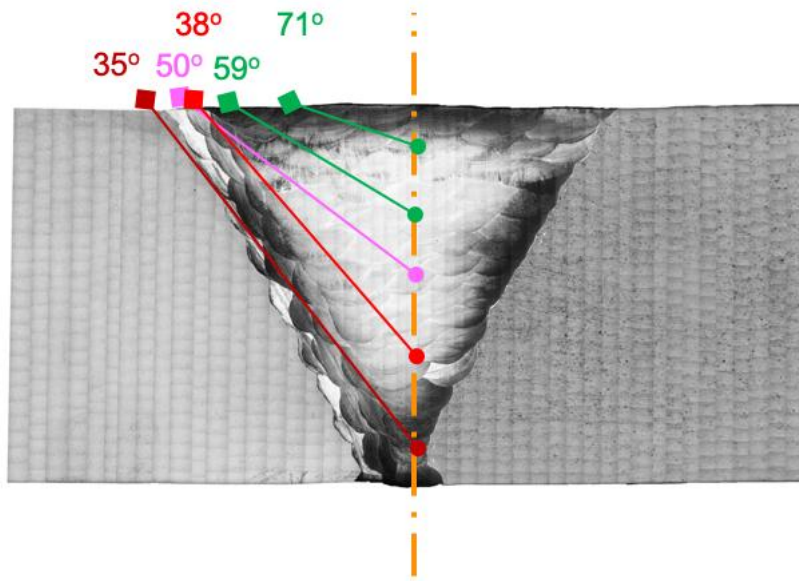


圖 3-62 508 端掃中各 SDH 最淺量測深度與相對應之入射點位置示意圖。

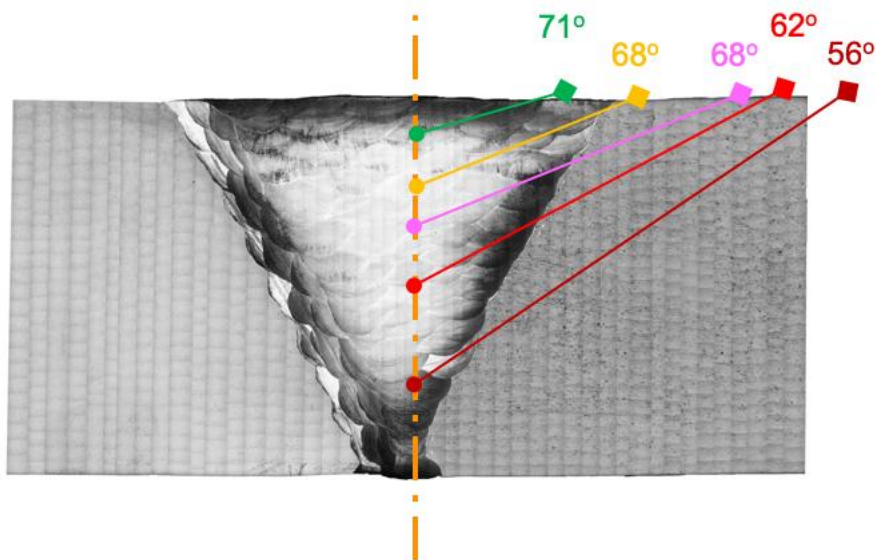


圖 3-63 316 端掃中各 SDH 最淺量測深度與相對應之入射點位置示意圖。

表 3-15 508 端掃之各入射角度所對應之 SDH 水平位置量測值。

入射角	316S 1 st SDH	Weld 1 st SDH	316S 2 nd SDH	Weld 2 nd SDH	316S 3 rd SDH	Weld 3 rd SDH	316S 4 th SDH	Weld 4 th SDH	316S 5 th SDH	Weld 5 th SDH
35	40.5	204	45.5	213	51.5	217.5	57	220.5	62	223
38	41.5	204.5	47	214	53.5	218.5	59	223.5	65	237.5
41	42.5	205.5	49	215	55.5	220	62.5	235	68.5	241
44	43	206	50	216.5	57.5	221	65	237.5	71.5	244
47	43.5	207	52	217.5	60	223	68	240	75.5	247
50	44.5	207.5	53.5	219	62.5	224.5	71.5	243	80	251.5
53	45.5	208.5	55	221	65.5	228	75.5	246	84	255.5
56	46.5	209	57.5	222.5	69	239	79.5	251	89.5	261.5
59	47.5	210.5	60	224	72.5	243	84.5	256.5	95.5	---
62	49	211.5	63.5	225.5	77	248	89.5	262.5	101.5	---
65	50	212.2	67.5	231.5	81	255	97	---	107.5	---
68	51	214	71.5	239	86.5	---	---	---	---	---
71	53	215.5	78	248	95.5	---	---	---	---	---
74	54.5	217	85	257	106	---	---	---	---	---

表 3-16 316 端掃之各入射角度所對應之 SDH 水平位置量測值。

入射角	316S 1 st SDH	Weld 1 st SDH	316S 2 nd SDH	Weld 2 nd SDH	316S 3 rd SDH	Weld 3 rd SDH	316S 4 th SDH	Weld 4 th SDH	316S 5 th SDH	Weld 5 th SDH
35	25.5	188.5	20	184.5	15	175	8	171	3	165.5
38	25	187.5	18.5	183	13	174	5	169.5	0.5	164.5
41	24	186.5	16.5	182	11	172.5	2	167.5	---	163
44	23	185.5	15	181	8.5	171	0.5	166	---	161.5
47	22	185	13	179.5	6.5	169.5	---	164.5	---	157
50	20.5	184	11.5	178.5	3.5	168	---	163	---	149.5
53	19.5	182.5	9	177	1	166	---	160.5	---	144
56	18.5	182	7	176	---	164.5	---	159	---	138.5
59	17	181	4.5	174.5	---	163.5	---	150	---	---
62	15	180	1.5	173.5	---	161.5	---	144	---	---
65	13	178.5	---	170.5	---	157.5	---	---	---	---
68	10.5	176.5	---	166.5	---	151	---	---	---	---
71	7	174	---	---	---	---	---	---	---	---
74	2	173	---	---	---	---	---	---	---	---

表 3-17 508 端掃之各入射角度量測 SDH 水平位置之修正係數對照表。

入射角	316S 1 st SDH	Weld 1 st SDH	316S 2 nd SDH	Weld 2 nd SDH	316S 3 rd SDH	Weld 3 rd SDH	316S 4 th SDH	Weld 4 th SDH	316S 5 th SDH	Weld 5 th SDH
35	+0.5	+1	+1.5	-2	+1	-1	+1.5	+2	+2	+5
38	+0	+1.5	+1.5	-1.5	+1.5	+0	+2	+1.5	+2.5	-6
41	+0	+1	+1	-1	+1.5	+1	+2	-7	+3	-6
44	+0.5	+1.5	+1.5	-1	+2	+2.5	+2.5	-6	+3.5	-5
47	+1	+1.5	+1	+0	+2	+3	+3	-5	+4	-3.5
50	+1	+2	+2	+0	+2.5	+4	+3	-4	+4.5	-3
53	+1	+2	+2.5	+0.5	+2.5	+4.5	+4	-3.5	+6	-1.5
56	+1	+2.5	+2.5	+1	+3	-3	+5	-3	+6.5	-1
59	+1.5	+2.5	+3	+2.5	+4	-3.5	+5.5	-2.5	+8	---
62	+1.5	+3.5	+2.5	+4	+4.5	-3.5	+7.5	-1.5	+11	---
65	+2.5	+4	+2.5	+3	+6.5	-4	+8.5	---	+15	---
68	+3.5	+4	+3.5	+0	+8.5	---	---	---	---	---
71	+4.5	+6	+3.5	-3	+9.5	---	---	---	---	---
74	+6.5	+8	+5	-3	+12	---	---	---	---	---

表 3-18 316 端掃之各入射角度量測 SDH 水平位置之修正係數對照表。

入射角	316S 1 st SDH	Weld 1 st SDH	316S 2 nd SDH	Weld 2 nd SDH	316S 3 rd SDH	Weld 3 rd SDH	316S 4 th SDH	Weld 4 th SDH	316S 5 th SDH	Weld 5 th SDH
35	+0.5	+1.5	+0	-0.5	-0.5	+3	-0.5	+2	0	+1.5
38	+0	+1.5	+0.5	+0	+0.5	+2	+1	+0.5	-1	-1.5
41	+0.5	+1.5	+0.5	-1	-1	+1.5	+1	-0.5	---	-3
44	+0.5	+2.5	+0.5	-1	-0.5	+1	-1	-2	---	-5.5
47	+0.5	+2	+1	-1.5	-1.5	-0.5	---	-4.5	---	-6
50	+1	+2	+0.5	-2.5	-1.5	-2	---	-7	---	-3.5
53	+1	+2.5	+0.5	-3	-2	-3	---	-8.5	---	-3
56	+1	+2	+0	-5	---	-5.5	---	-12	---	-3.5
59	+1	+1	+0	-6.5	---	-8.5	---	-9	---	---
62	+1.5	+0	-0.5	-8.5	---	-11.5	---	-10	---	---
65	+1.5	+0.5	---	-9.5	---	-14.5	---	---	---	---
68	+2	-0.5	---	-10.5	---	-15	---	---	---	---
71	+2.5	-1	---	---	---	---	---	---	---	---
74	+2.5	-3	---	---	---	---	---	---	---	---

3.3.3 銲接管件掃描檢查

N-PWHT 與 Y-PWHT-52M 以環形夾具及軌道固定後，透過陣列超音波進行量測分析。由 3.3.2 節所獲得之成果延伸，此節儀器設定參數為音波方向由不銹鋼端往低合金鋼端方向掃描、聲速設定 5700 m/s。受限於無法得知、定位銲道可能生成瑕疵之深度，因此使用固定量測水平位置（距離銲道中心 300 mm 處），以不同入射角度進行探測。檢測進行方式及探頭架設外觀如圖 3-64 所示。各試件之 B scan、S scan、C scan、A scan，以及 D scan 合併圖，如圖 3-65 及圖 3-67 所示，為使讀者確信銲接管件與銲接板件規塊的訊雜比趨勢相同，將低合金鋼端掃之結果一併呈現（圖 3-68 及圖 3-70）。觀察圖 3-65 得知，N-PWHT 除銲道根部凸起之特徵信號外，尚有一夾渣信號顯示，位於 X 位置 759 ~ 771 mm（長 12 mm）、深度 37.4 mm、最高振幅 22.0 %。此夾渣訊號亦可由附錄 B 射線檢測結果，N-PWHT 試件之底片編號 N-PWHT-3 中觀察，長度約為 8 mm。觀察圖 3-66 得知，Y-PWHT 除銲道根部凸起之特徵信號外，尚有一夾渣信號顯示，位於 X 位置 413 ~ 426 mm（長 13 mm）、深度 37.1 mm、最高振幅 20.0 %。此夾渣訊號經覆層銲接處理（52M）後，位於 X 位置 29 ~ 42（長 13mm）、深度 41.7 mm、最高振幅 20.4 %。



圖 3-64 銲接管件之陣列超音波檢測進行方式及探頭架設外觀。

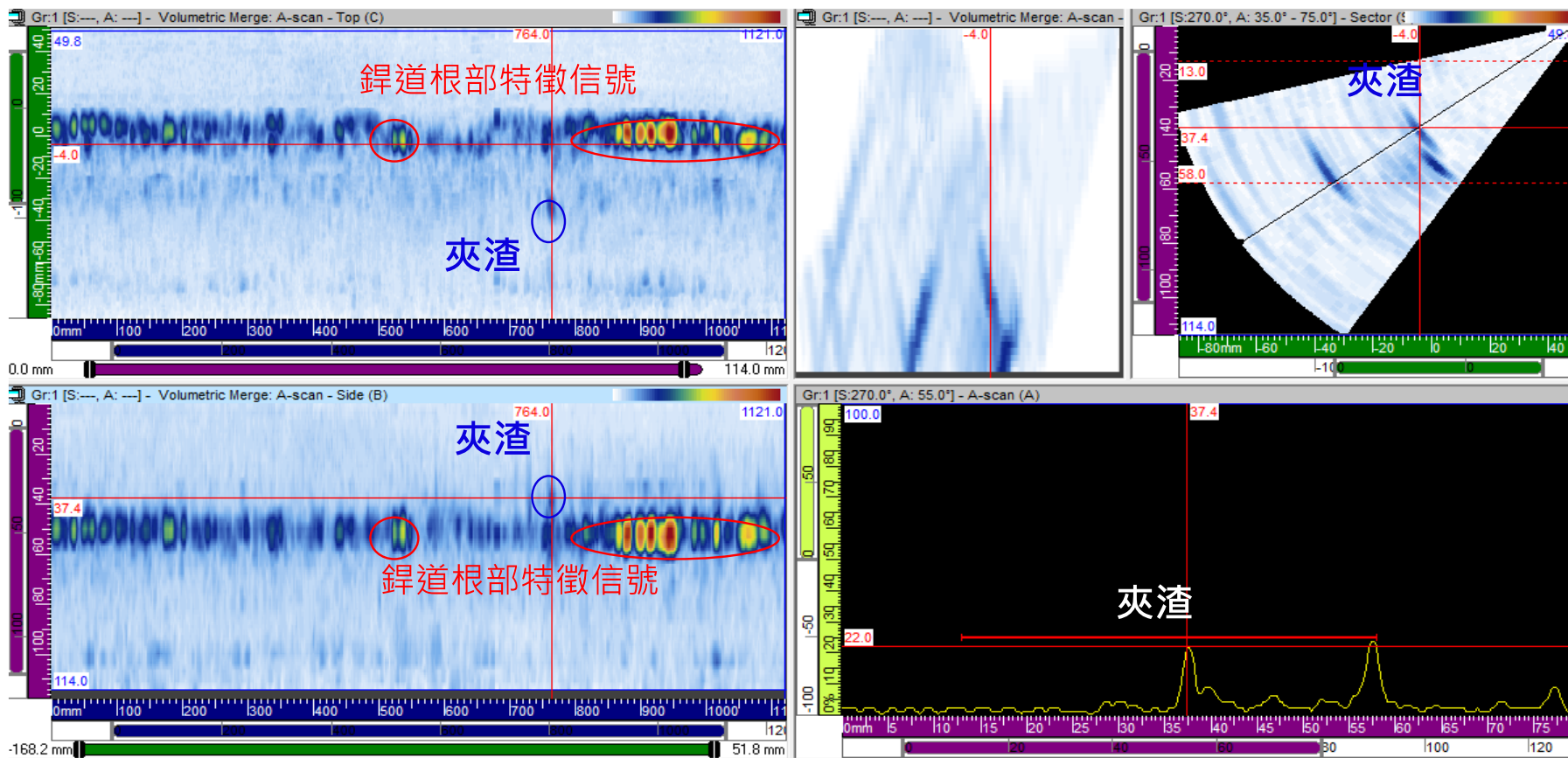


圖 3- 65 N-PWHT 試件由 304S 不銹鋼端掃描之 B scan、S scan、C scan、A scan，以及 D scan 合併圖。（聲速: 5700 m/s）

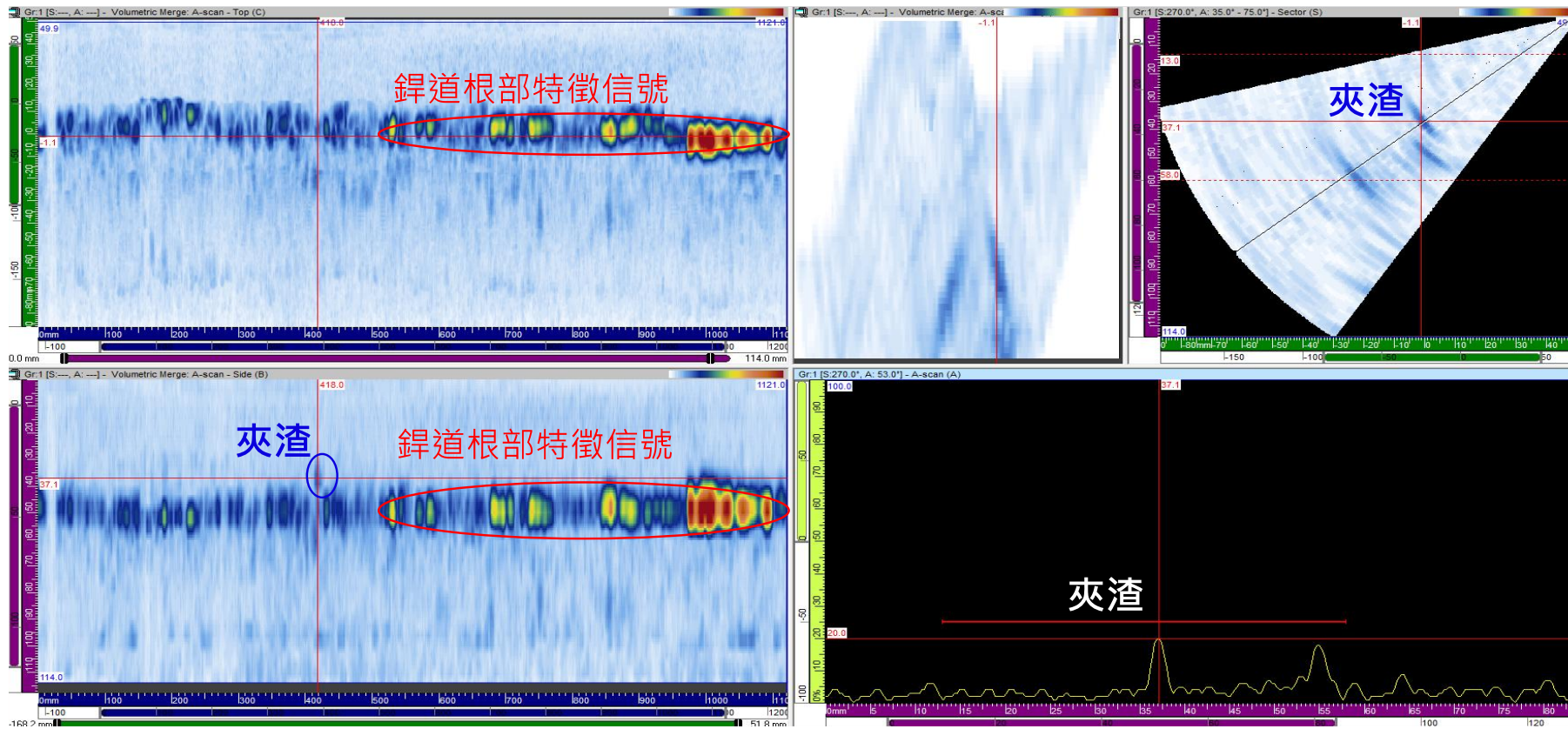


圖 3-66 Y-PWHT 試件由 304S 不銹鋼端掃描之 B scan、S scan、C scan、A scan，以及 D scan 合併圖。(聲速: 5700 m/s)

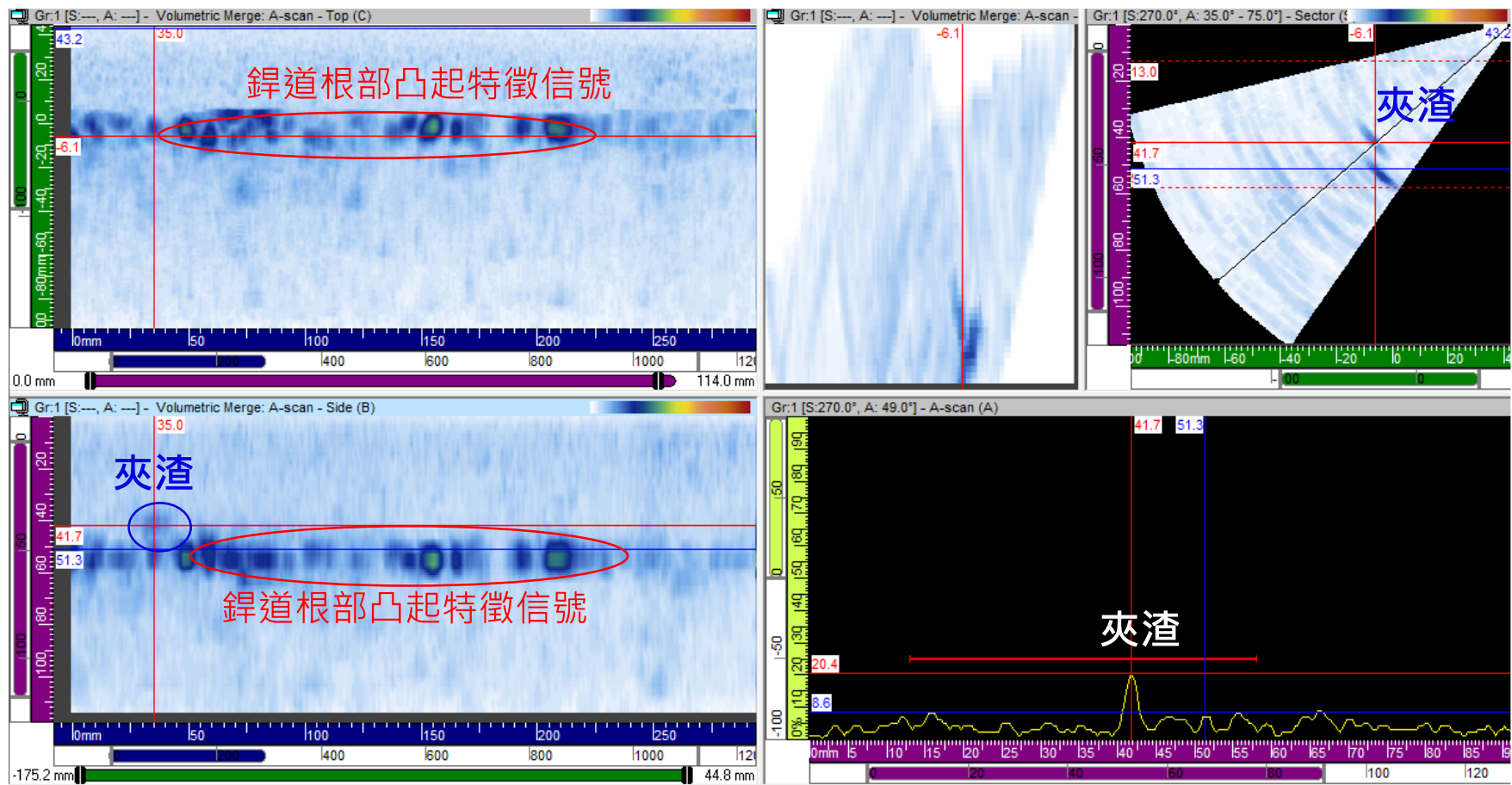


圖 3- 67 Y-PWHT-52M 試件由 304S 不銹鋼端掃描之 B scan、S scan、C scan、A scan，以及 D scan 合併圖。（聲速: 5700 m/s）

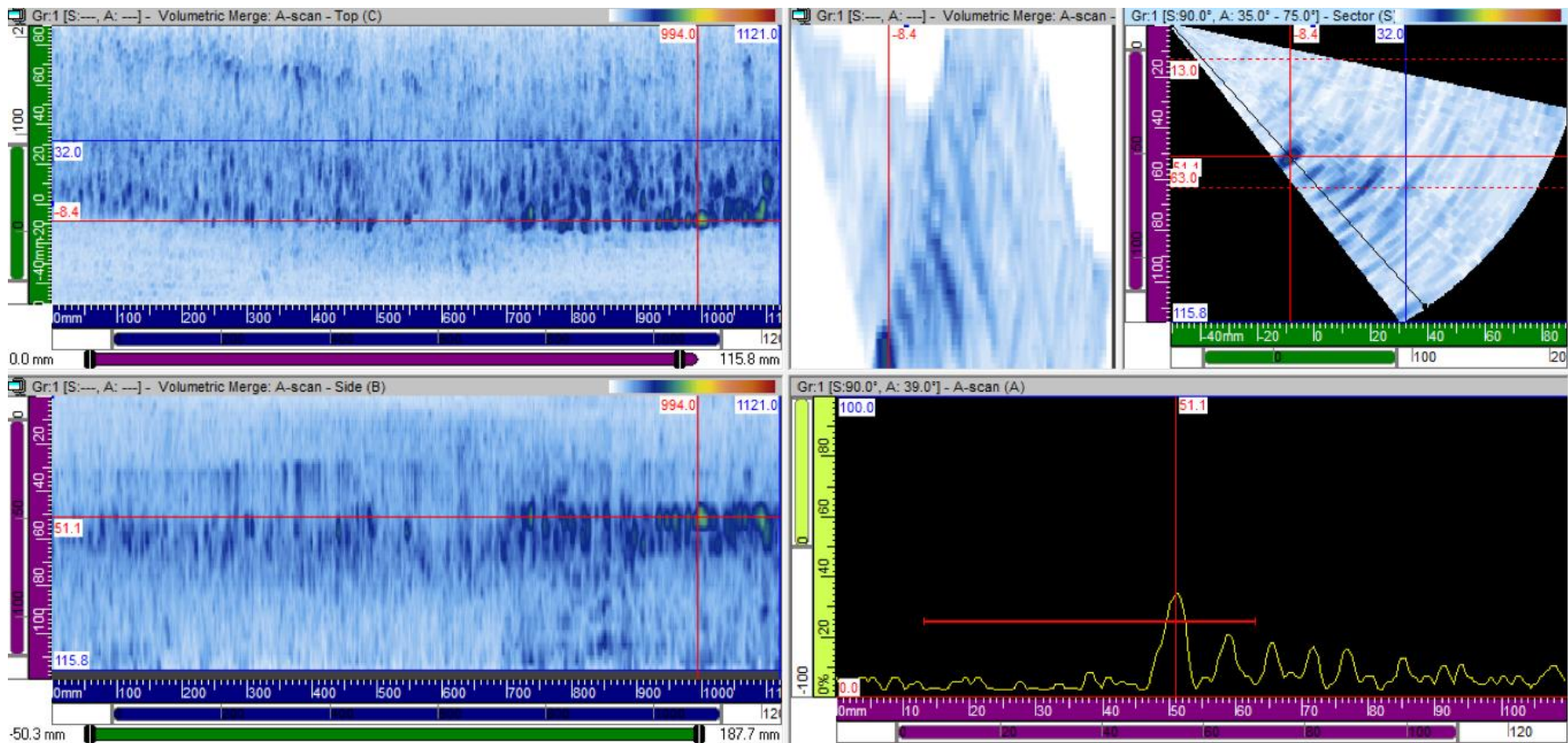


圖 3- 69 Y-PWHT 試件由 A508 低合金鋼端掃描之 B scan、S scan、C scan、A scan，以及 D scan 合併圖。（聲速: 5890 m/s）

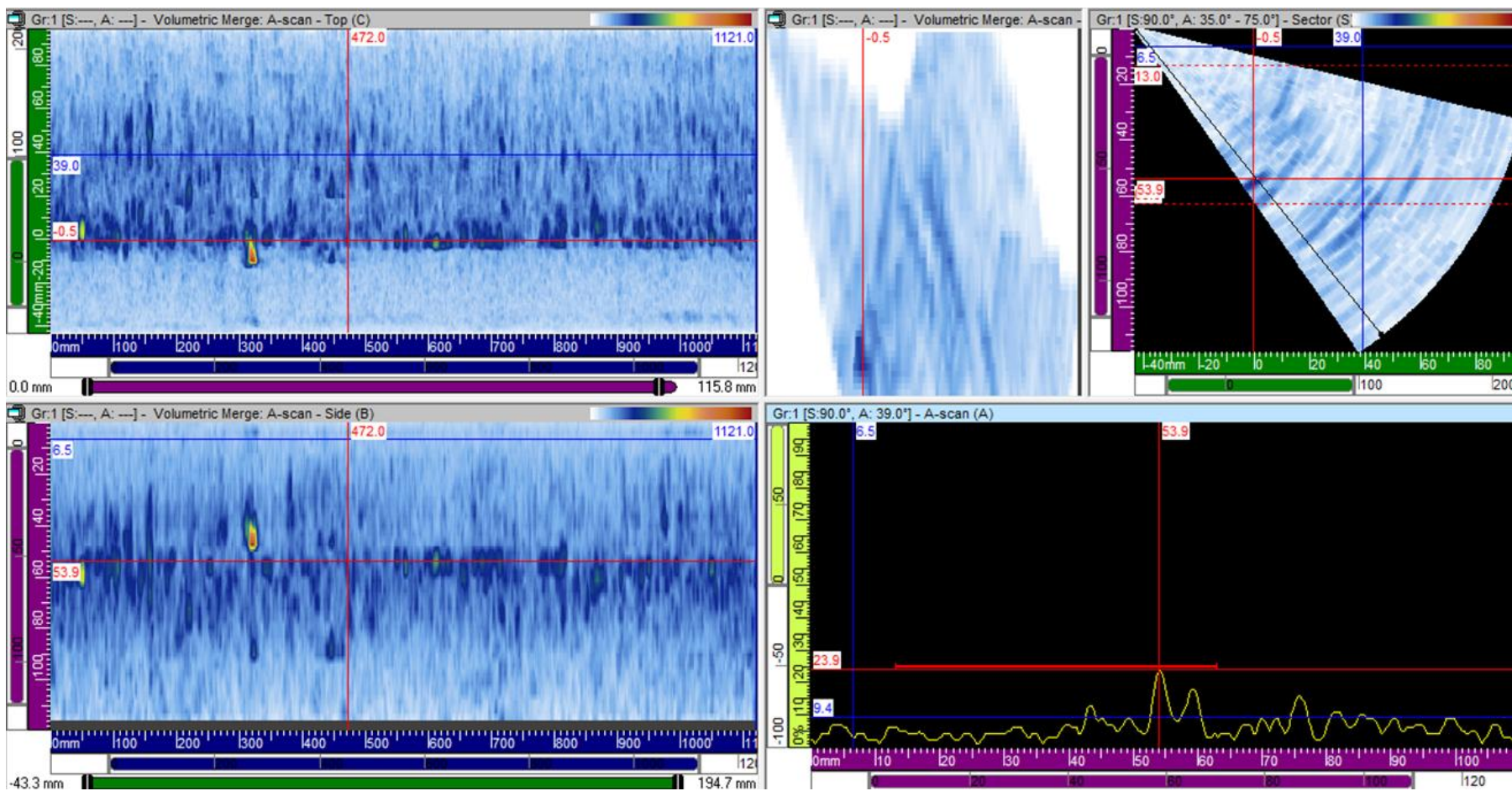


圖 3-70 Y-PWHT-52M 試件由 A508 低合金鋼端掃描之 B scan、S scan、C scan、A scan，以及 D scan 合併圖。（聲速: 5890 m/s）

透過 3.3.2 節以板件規塊所製作之量測值修正係數表，在入射角為 54° 情況，參考表 3-14，N-PWHT 需對位於銲道 SDH 的垂直深度修正 $+1.3$ mm，儀器 S scan 讀值為 37.4 mm，修正值為 38.7 mm。將 N-PWHT 沿夾渣訊號處鋸切（圖 3-71），以游標卡尺實際量測夾渣深度為 39.0 mm，誤差值為 0.3 mm。參考表 3-18，在入射角為 54° 情況下，需對位於銲道 SDH 的水平位置修正 $-3.5 \sim -3.0$ mm，儀器 S scan 讀值為 $+3.0$ mm，修正值為 $-0.5 \sim 0.0$ mm。實際之夾渣位置僅距離銲道中心 $+2.0$ mm，此水平校正誤差可歸因於環形夾具及軌道固定並未安裝確實，導致探頭沿圓周掃描一圈後已偏離原本之位置（不銹鋼端， $+300$ mm）。後續之環形夾具與管件圓周垂直度需更加謹慎評估，以降低誤差值。

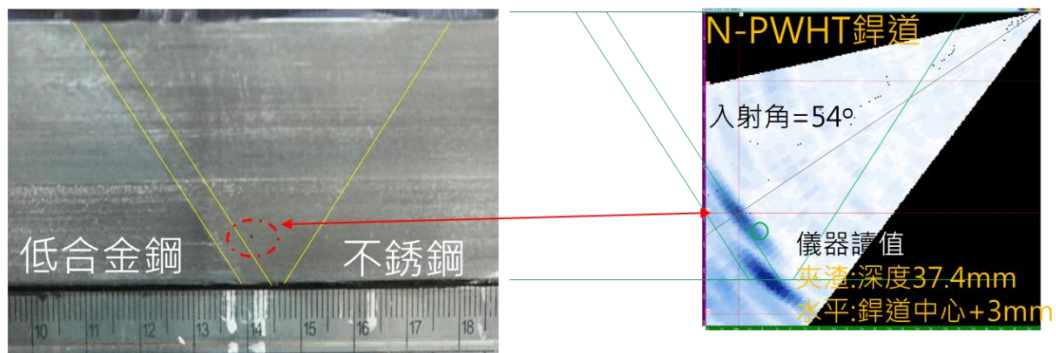


圖 3-71 N-PWHT 鋸切之截面外觀照與 S scan 掃描圖形。

透過 3.3.2 節以板件規塊所製作之量測值修正係數表，比較圖 3-67 及圖 3-68，在入射角為 53° 情況下，參考表 3-14 及表 3-18，Y-PWHT-52M 需對位於銲道 SDH 的垂直深度修正 $+1.3$ mm、水平位置修正 $-3.5 \sim -3.0$ mm。Y-PWHT 經儀器 S scan 垂直深度讀值為 37.1 mm、水平讀值為 -1.1 mm。Y-PWHT-52M 之覆銲層經車削整平加工後，厚度由 5 mm 下降至 3 mm，其儀器 S scan 垂直深度讀值為 41.7 mm、水平讀值為 -6.1 mm。沿夾渣訊號處鋸切（圖 3-72），以游標卡尺實際量測夾渣距離管內壁為 10.0 mm、距離銲道中心為 -4.0 mm。依照修正係數表得到的修正值（垂直，水平）：Y-PWHT（ $38.4, -4.6 \sim -4.1$ ）、Y-PWHT-52M（ $43.0, -9.6 \sim -9.1$ ），與實際量測位置之誤差值（垂直，水平）：Y-PWHT（ $1.6, 0.1 \sim 0.6$ ）、Y-PWHT-52M（ $0.0, 5.1 \sim 5.6$ ）。此垂直校正誤差可歸因於管件表面之弧度、接觸面僅粗車削加工處理，量測楔形塊與管件表面接觸並不完

整。由水平校正誤差可得知顯示覆銲層與不銹鋼端緩衝層之枝狀晶組織對水平位置影響較大，Y-PWHT-52M 的夾渣水平位置向低碳剛端偏移 5 mm。

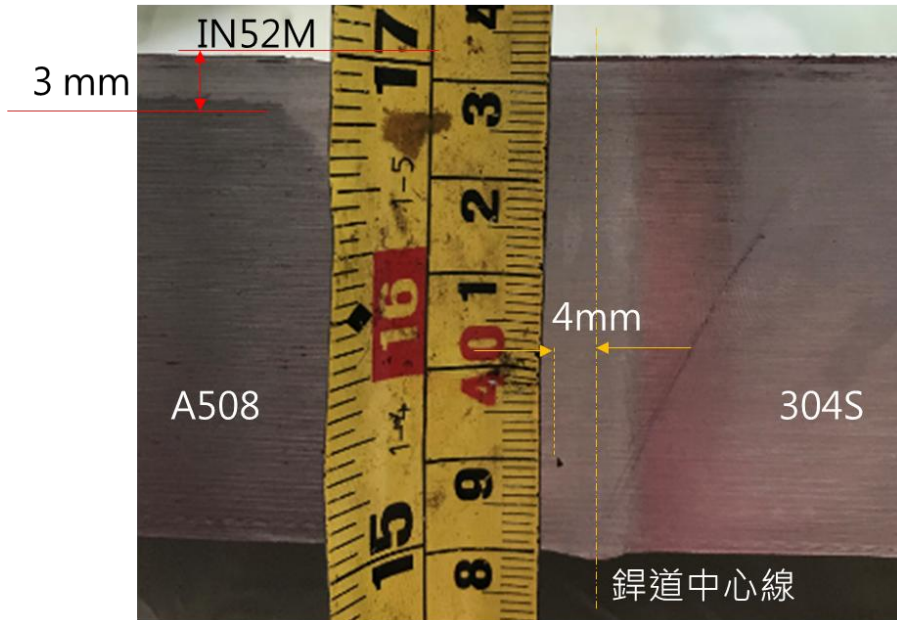


圖 3-72 Y-PWHT-52M 鋸切之截面外觀照。

3.4 鎳基合金的元素含量對覆鋅層之特性影響

為評估鎳基合金之化學成分對覆鋅金屬的特性影響，以相同之銲接參數：銲接電流 120 A、銲線直徑 0.9 mm、層間溫度 120 °C，分別於 A508 低合金鋼表面製作含 4 層 IN52M 覆鋅層之試片 (52M)、4 層 IN52MSS 覆鋅層之試片 (52MSS)。為釐清電化學試驗之試片表面成份差異，以鎳基合金與低合金鋼底材介面為基準，每 300 μm 量測 1 點，其結果繪製如圖 3-73 所示。

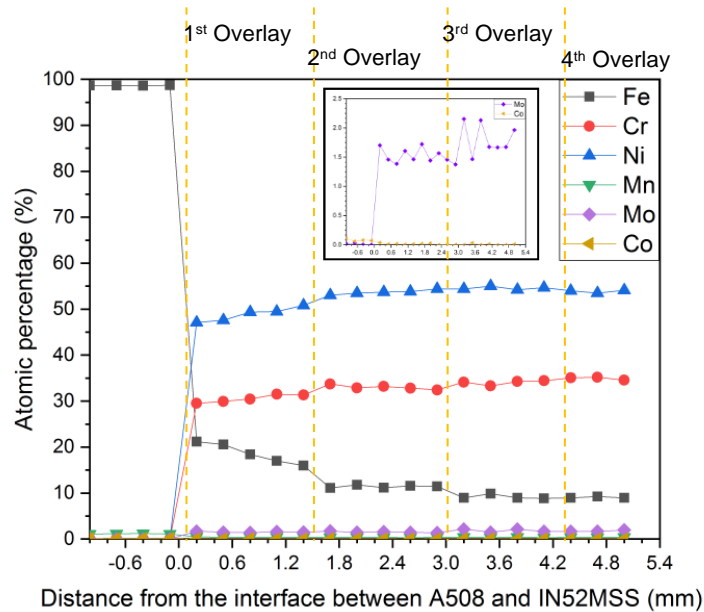


圖 3-73 52MSS 沿底材介面向鎳基合金方向之 EPMA 逐點成分分析。

3.4.1 顯微組織差異性

52MSS 覆鋅層之顯微組織，如圖 3-74 所示，由於 IN52MSS 之合金含量較高，形成明顯的 Type II 晶界，厚度約為 200 μm 。圖 3-74d 中，52MSS-L2 生成細微的遷移晶界，晶胞尺寸介於 40 ~ 200 μm 。比較 52M-L3 與 52MSS-L3 之顯微組織 (圖 3-74f, i)，其枝晶結構皆以胞狀枝晶及柱狀枝晶為主，顯示在此銲接條件下，每道次之過冷度並未產生極大的差異值，其底材之化學成分穩定性需透過電化學極化試驗進一步分析。

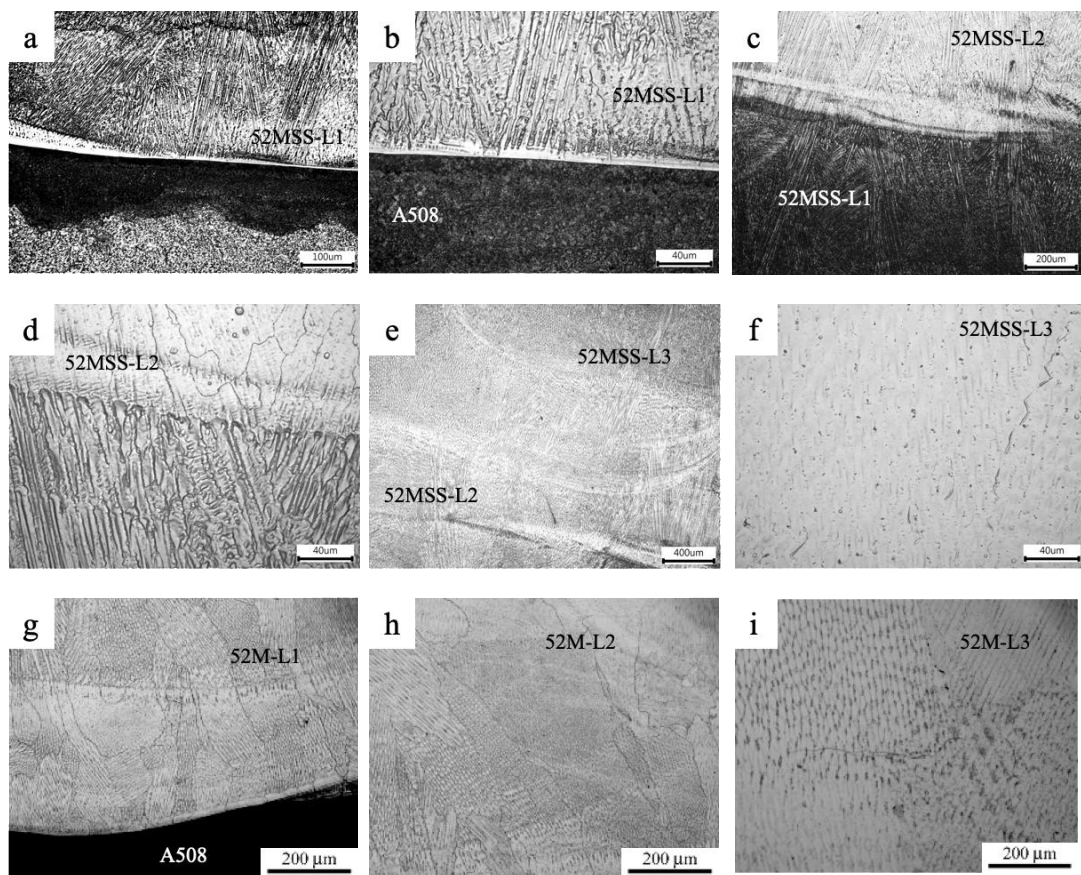


圖 3- 74 (a)(b) A508/52MSS-L1、(c)(d) 52MSS-L1/52MSS-L2、(e)(f) 52MSS-L2/52MSS-L3、(g) A508/52M-L1、(h) 52M-L1/52M-L2，以及(i) 52M-L2/52M-L3 之金相圖。

3.4.2 電化學特性分析

各試片之動電位極化試驗的測量值列於表 3-19、電位對電流密度做圖如圖 3-75 所示。52MSS 試片各層之腐蝕電位均較相對 52M 試片高，腐蝕電流值約提升 0.6 個級數。52M 之腐蝕電位隨著覆鋅層之層數上升而有逐漸下降之趨勢，相較之下，52MSS 試片則無此現象。以 FE-SEM 觀察試驗完成之試片表面形貌，如圖 3-76 及圖 3-77 所示。經動電位極化之 52M 覆鋅層經 EDS 成分分析，化學成分比例與未經試驗的表面區域相似。52M-L1、52M-L2 僅觀察到有些許遷移晶界受到侵蝕，如圖 3-76b, e。52M 試片在陰極極化曲線掃描時產生之震盪現象（圖 3-75），應為吸氫反應不穩定，氫氣泡脫離試片表面時造成圓滑的沖蝕孔如圖 3-76c, f, i。52M-L3 呈現遷移晶界腐蝕與孔蝕之混合型腐蝕形貌。針對 52MSS 之 E_{corr} 值提升現象，可歸因為動電位極化初始階段，試片表面形成氧化

鉻薄膜（圖 3-77）。在氧化鉻薄膜中夾帶著尺寸小於 $1\ \mu\text{m}$ 的白色顆粒，如圖 3-77c, i，以 EDS 定量圈選後分析得知為 NbC 碳化物顆粒。當覆鋅層之層數上升時，電化學試片表面之碎裂氧化鉻薄膜的尺寸有增大的趨勢（圖 3-77a, e, g），放大倍率觀察得知 L1 及 L2 之碎裂氧化鉻為雙層疊合、厚度較薄；L3 之碎裂氧化鉻為單層結構、厚度較厚。推測氧化層形成初期即受到極化影響而破裂，失去連續性之氧化鉻薄膜不具保護性，因而底材金屬持續消耗用以形成新的氧化層。比較動電位極化曲線圖中 52MSS 各層之掃描曲線（圖 3-75），未觀察到明顯之鈍化電位、孔蝕平台的生成，可驗證此氧化鉻薄膜不具有產生鈍化的能力。

表 3-19 52MSS、52M 之動電位極化試驗之腐蝕電位及腐蝕電流。

	52MSS			52M		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3
$E_{\text{corr}}(\text{mV})$	281	176	279	9.2	-171	-46.5
$I_{\text{corr}}(\text{A}/\text{cm}^2)$	1.03×10^{-6}	6.72×10^{-5}	1.02×10^{-6}	2.45×10^{-5}	2.60×10^{-5}	1.78×10^{-5}

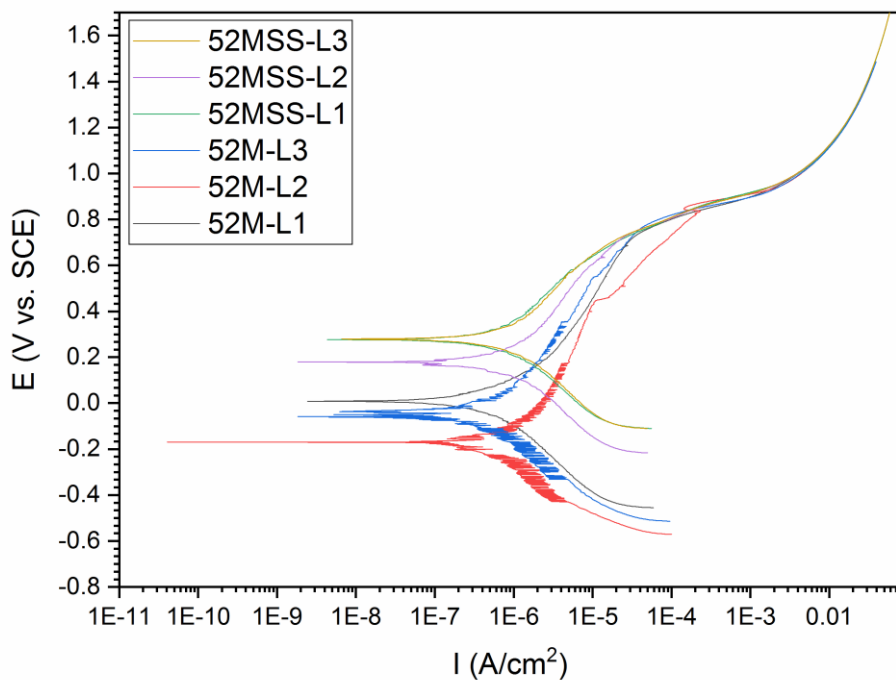


圖 3-75 52MSS、52M 在 3.5 wt. %NaCl_(aq)環境中之動電位極化曲線圖。

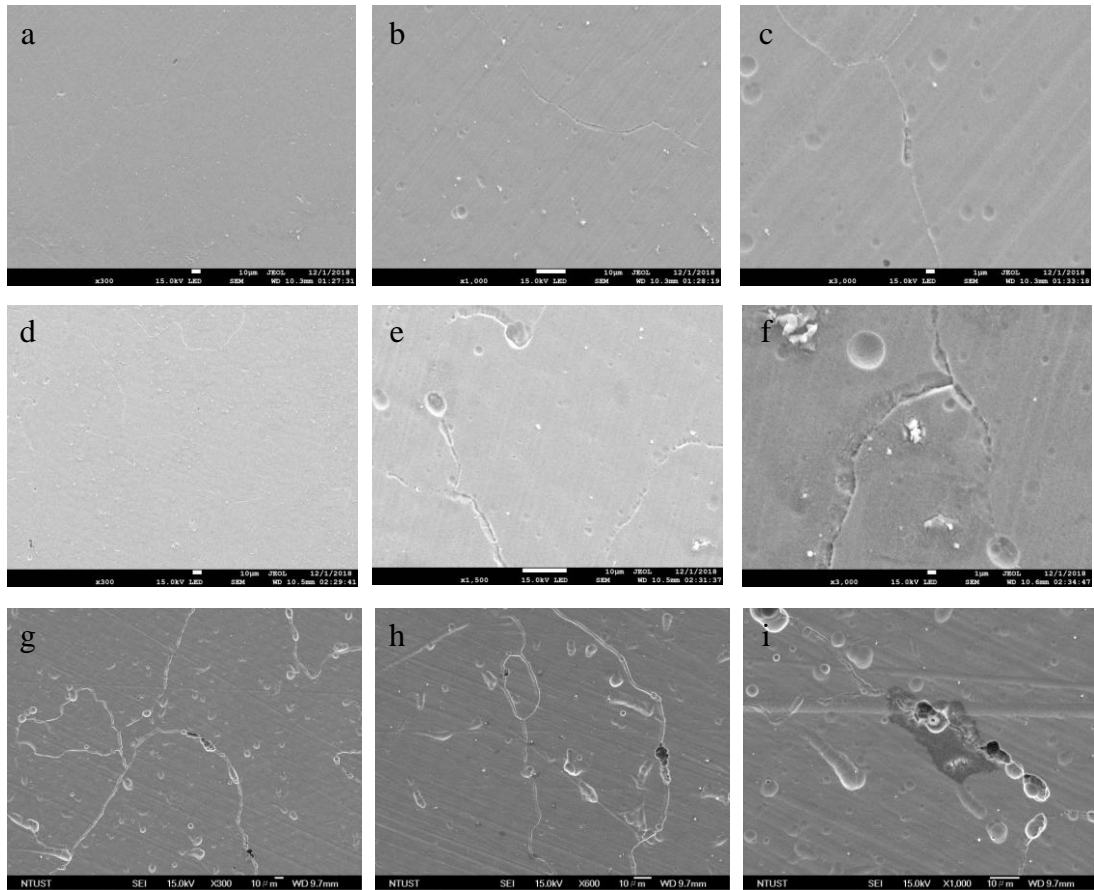


圖 3-76 52M 之(a)(b)(c) L1、(d)(e)(f) L2、(g)(h)(i) L3 層在 3.5 wt. %NaCl_(aq)環境中經動電位極化試驗後之表面 SE 影像。

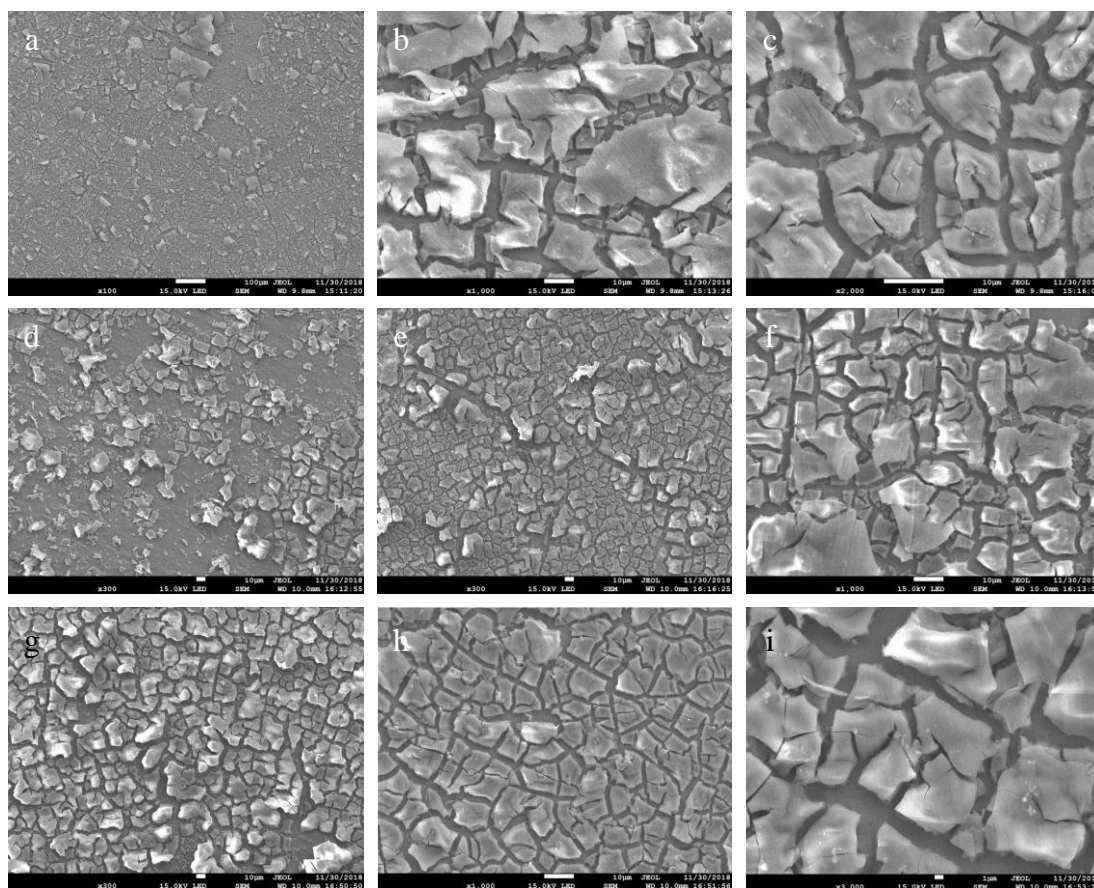


圖 3-77 52MSS 之(a)(b)(c) L1、(d)(e)(f) L2、(g)(h)(i) L3 層在 3.5 wt. %NaCl_(aq) 環境中經動電位極化試驗後之表面 SE 影像。

以雙環極化電位模式分析 52M、52MSS 試片在電位改變狀態下，經陽極極化、陰極極化後，試片表面氧化膜之電位敏感性。腐蝕電位、保護電位列於表 3-20，電位對電流密度做圖如圖 3-78 及圖 3-79 所示，各覆鋅層經試驗之表面 SE 影像則列於圖 3-80 及圖 3-81。雙環極化試驗後之 52M、52MSS 試片表面的腐蝕形貌與動電位極化試驗具有相同趨勢，52MSS 仍覆蓋夾帶 NbC 之碎裂氧化鉻薄膜。觀察圖 3-79 得知，52MSS 之 E_{corr} 陽極極化曲線的斜率隨著電位上升，先緩慢下降再上升。當極化曲線開始電位回掃模式時，52MSS 覆鋅層皆呈現逆時針方向掃描，產生電位遲滯區域、腐蝕電流約降低 1 個級數。另一方面， E_{pp} 之數值較 E_{corr} 高約 600~800 mV，可視為生成有效的鈍化保護電位 (E_{prot})。然而，電位回掃曲線之陽極極化區域有明顯的孔蝕平台 (920~950 mV)，比較動電位極化試驗之 SE 影像，氧化鉻薄膜僅能承受較微小的電位改變速率，若電流密度上升速度過快，則氧化鉻薄膜將因破裂而喪失保護性。52M 在電位回掃模式進行試驗時，皆呈現逆時針方向掃描 ($E_{pp} > 820$ mV)，產生電位遲滯區域。當 E_{pp} 低於 800 mV、高於 400 mV 時，為鈍化區的特徵，52M-L1 及 52M-L2 的 E_{pp} 數值較 E_{corr} 高約 200 mV。

進一步以 EPMA mapping 分析 IN52MSS 覆鋅層中的析出物成分與分佈狀態，如圖 3-82 所示。52MSS 的析出物以 NbC 為主，合金中添加的 Mo 元素並未顯示明顯的偏析，NbC 顆粒尺度約略等於 52M 覆鋅層中的 NbC。然而，自圖 3-82 中 Nb、C mapping 的圖像，觀察到奈米尺寸的 NbC 聚集在枝晶晶間，與文獻中所提及 IN52MSS 於鋅道熔融金屬凝固初期，NbC 於高溫生成並被凝固前鋒排擠至晶界處之論述相同。

表 3-20 52MSS、52M 之雙環電位極化試驗之腐蝕電位。

	52MSS			52M		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3
E_{corr} (mV)	57.6	151	159	-225	-161.7	12.72
E_{pp} (mV)	731	708	784	-71.9	74.1	-77

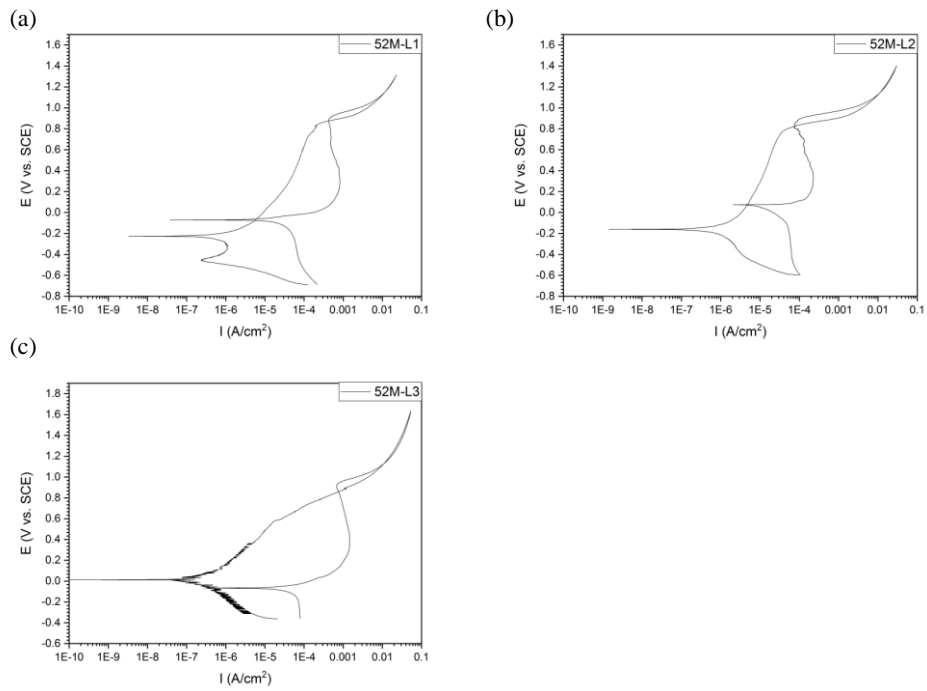


圖 3-78 52M 之(a) L1、(b) L2、(c) L3 層在 3.5 wt. %NaCl_(aq)環境中之雙環電位極化曲線圖。

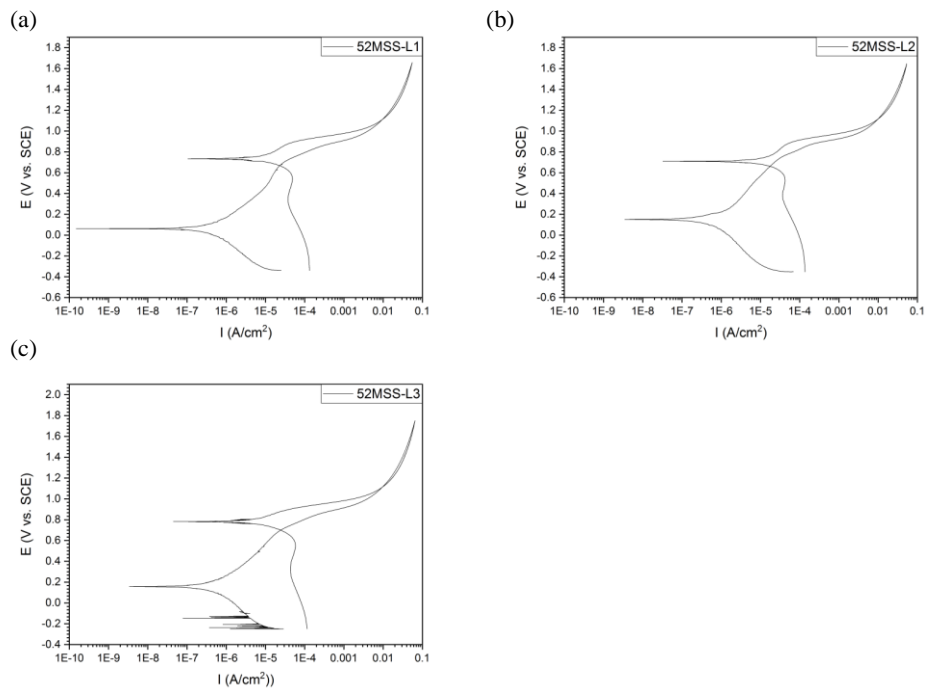


圖 3-79 52MSS 之(a) L1、(b) L2、(c) L3 層在 3.5 wt. %NaCl_(aq)環境中之雙環電位極化曲線圖。

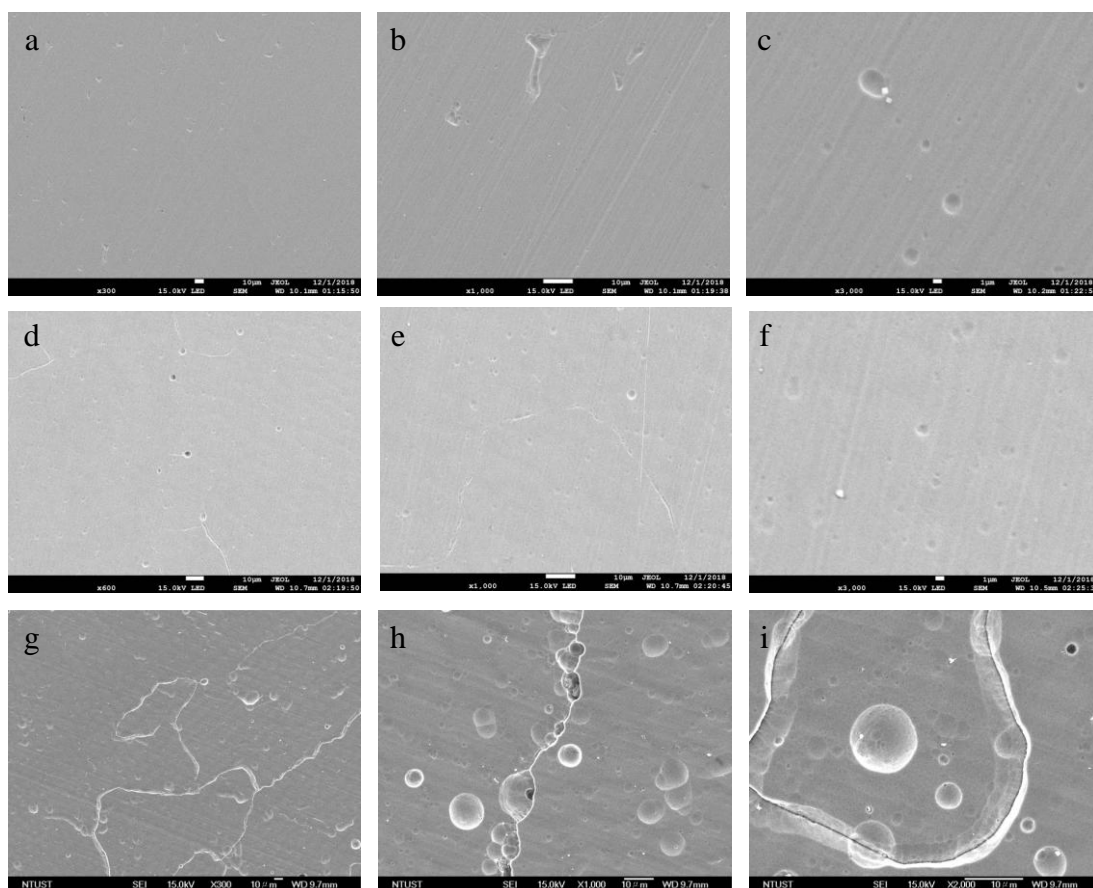


圖 3-80 52M 之(a)(b)(c) L1、(d)(e)(f) L2、(g)(h)(i) L3 層在 3.5 wt. %NaCl_(aq)環境中經雙環電位極化試驗後之表面 SE 影像。

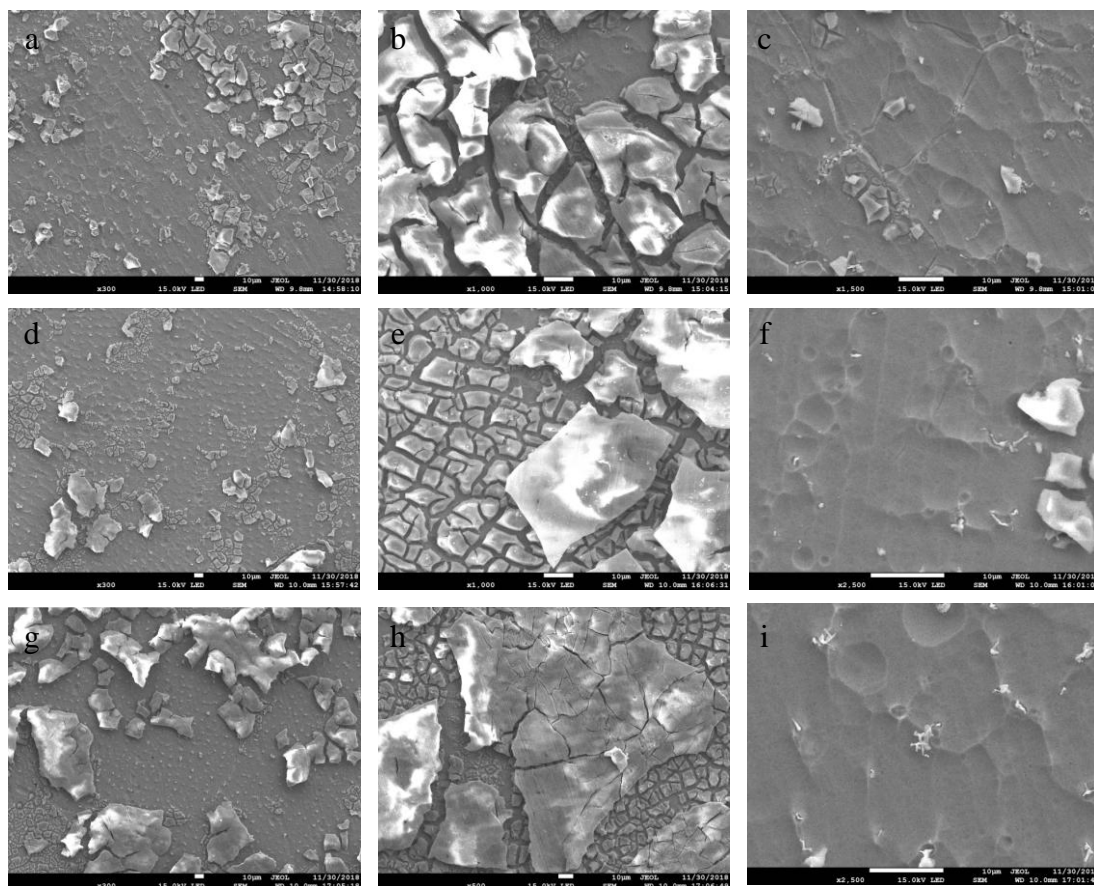


圖 3- 81 52MSS 之(a)(b)(c) L1、(d)(e)(f) L2、(g)(h)(i) L3 層在 3.5 wt. %NaCl_(aq) 環境中經雙環電位極化試驗後之表面 SE 影像。

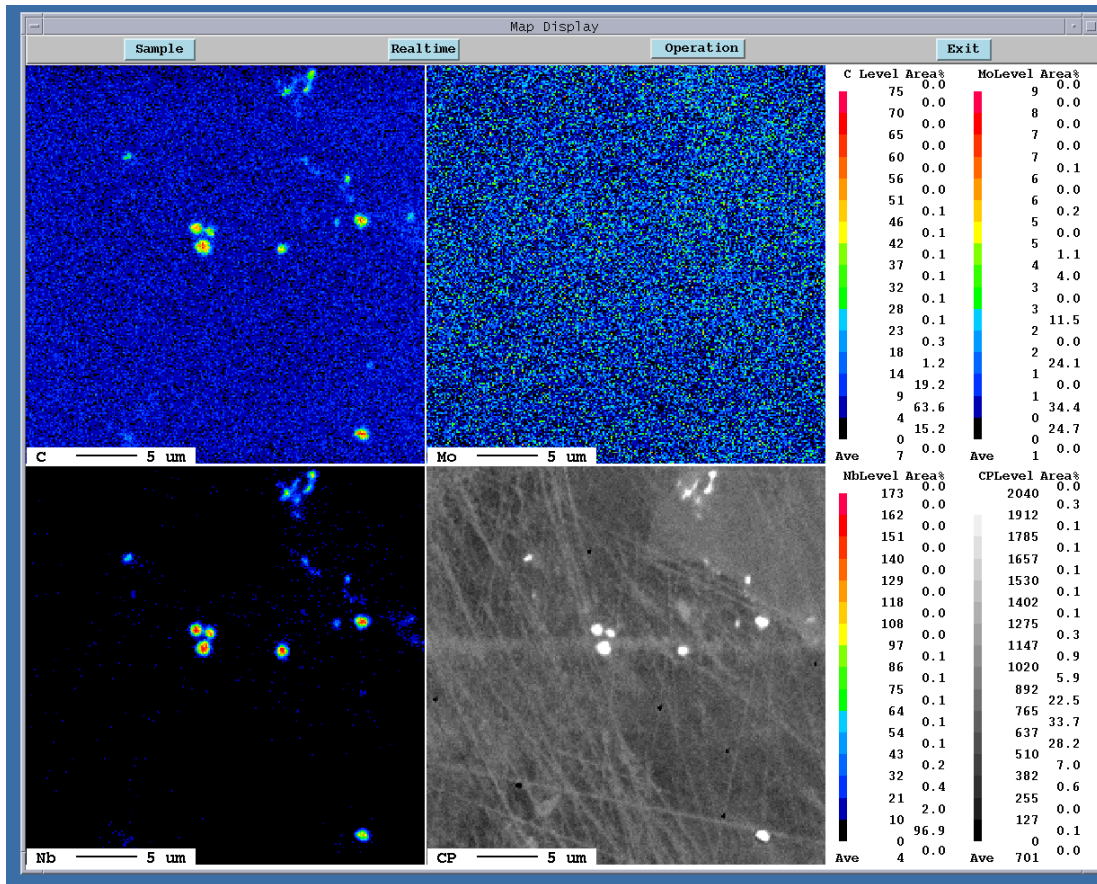


圖 3- 82 52MSS 沿異質介面向上位移 1 mm 之 EPMA mapping 結果。

四、具體完成工作項目及結論

在本研究系統中，透過系列且完整地分析，可以觀察到以下幾項論述。然而，部分實驗結果與實際工作環境、銲接件邊界條件、運作參數仍有相當大的差異，仍須進行更完整的實驗設計與試驗才可更接近實際使用狀態，因此僅能做為實驗數據供讀者參考。

- 4.1 完成低合金鋼端緩衝層製作、退火處理（N/Y-PWHT），異質銲接管件之填料銲接處理。
- 4.2 完成異質銲接管件之覆層銲接處理（Y-PWHT-52M）。
- 4.3 完成殘留應力模擬與量測實驗。
- 4.4 完成板件規塊、管件規塊之陣列超音波波式分析。
- 4.5 完成緩衝層、覆銲層之顯微結構與耐蝕性質量測。
- 4.6 透過應力模擬得知低合金鋼緩衝層 PWHT，能些許降低 Axial、Hoop 張應力值。覆層 IN52M 處理，具有調整內部張應力範圍，降低最大張應力數值的能力。
- 4.7 非破壞 X 光殘留應力分析儀受到管件形變與 X 光失焦，將增加誤差值。
- 4.8 異質銲接件進行陣列超音波掃描時，若以入射角 55 度以內檢測、音波由不銹鋼端往低合金鋼端、音速需設定接近銲道，將會有較良好之訊雜比。建立修正係數表及實際運行得到驗證。
- 4.9 低合金鋼緩衝層施作，可以降低填料銲接之銲道金屬內碳化物尺寸、數量，並減緩晶間腐蝕現象。不銹鋼端緩衝層施作，可以些許提升保護電位，消弭未混合區範圍。
- 4.10 鎳基 52MSS 合金應用於 A508 低合金鋼端表面之覆層銲接處理時，Type II 晶界範圍變寬、氧化膜生成速度較 IN52M 快，然而表面生成的氧化鉻薄膜對急遽的電流密度不具抵抗性。

參考文獻

- [1] 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.
- [2] A. Aloraier, R. Ibrahim, and J. Ghojel, "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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 蔡曜隆，銲接溫度與應力之分析實驗，2001，國立交通大學機械工程研究所碩士論文。
- [7] 廖健宇，三維模擬不銹鋼圓管多道銲接之溫度與殘留應力，2011，龍華科技大學工程技術研究所碩士論文。
- [8] Reactor Pressure Vessel 2N2G Recirculation Inlet Nozzle-To-Safe End Weld Full Structural Weld Overlay Crack Growth Calculations and Stress Analysis, 2011, U. S. Nuclear Regulatory Commission.
- [9] 蔡曜隆，S15C/SUS304 異種金屬銲接之溫度與殘留應力研究，2010，國立交通大學機械工程研究所博士論文。
- [10] 曾光宏，不銹鋼銲件變形與殘留應力之研究，2001，國立交通大學機械工程研究所碩士論文。
- [11] F. H. Ku, P. C. Riccardella, and S. L. McCracken. "3D Residual Stress Simulation of an Excavate and Weld Repair Mockup." In *ASME 2016 Pressure Vessels and*

- Piping Conference, pp. V06BT06A075-V06BT06A075. American Society of Mechanical Engineers, 2016.
- [12] F. H. Ku, and Steven L. McCracken. "Crack Growth Evaluation of Remnant Cracks Underneath an Excavate and Weld Repair." In ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference, pp. V06AT06A039-V06AT06A039. American Society of Mechanical Engineers, 2017.
- [13] X. Wei, M. G. Xu, Q. Z. Wang, M. L. Zhang, W. H. Liu, J. J. Xu, J. M. Chen, H. Lu, and C. Yu. "Effect of local texture and precipitation on the ductility dip cracking of ERNiCrFe-7A Ni-based overlay." *Materials & Design* 110 (2016): 90-98.
- [14] M. D. Olson,, A. T. DeWald, M. R. Hill, and S. L. McCracken. "Residual Stress Mapping for an Excavate and Weld Repair Mockup." In ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, pp. V06BT06A068-V06BT06A068. American Society of Mechanical Engineers, 2016.
- [15] S. L. Jeng, H. T. Lee, T. Y. Kuo, K. C. Tsai, C. L. Chung, and J. Y. Huang. "The effects of Mn and Nb on the microstructure and mechanical properties of alloy 152 welds." *Materials & Design* 87 (2015): 920-931.

附錄 A、材料證明



 SAN YUAN YU IRON WORKS CO., LTD. 24. SHUI-KUAN ROAD, JEN WU DIST KAOHSIUNG CITY, TAIWAN, R. O. C.																	
PURCHASER <u>台灣科技大學機械系</u>												INSPECTION CERTIFICATE EN 10204, 3.1			CERTIFICATE NO. <u>180514002</u>		
ORDER NO. _____															DATE <u>05/14/18</u>		
DESCRIPTION												Specification		ASTM A508-CL1.-2004 AS STATED SIZES			
PARTS 370 OD X 230 ID X 270 =5PCS												Dimension		600D.			
												Surface		600D.			
CHEMICAL COMPOSITION (%)												MECHANICAL TEST					
	x100	x100	x100	x1000	x1000	x100	x100	x100	x100	x100	x100	MPa	MPa	Elongation %	R.A.%	HARDNESS HB	
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	Tensile Strength	Yield Strength				
Std.	Min.	15	40	25	25		40	25	10	5		485	250	20	38		
	Max.	40	105									655					
HEAT NO: Y60-0283		19	23	105	10	6	8	3	10	2	0.7	512	327	36	71		
N:900°C 3HR																	
Remark: We hereby certify that the forging(s) described herein has (have) been made & tested in accordance with the requirements of specification.												 Chief of Inspection					
GENERAL NOTE: For each reduction of 0.01% below the specified carbon maximum (0.35%), an increase of 0.06% manganese above the specified maximum (1.05%) will be permitted up to a maximum of 1.35%																	

圖 A-1 ASTM A508 之材料證明。


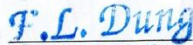
 SAN YUAN YU IRON WORKS CO., LTD. 24. SHUI-KUAN ROAD, JEN WU DIST KAOHSIUNG CITY, TAIWAN, R. O. C.		INSPECTION CERTIFICATE EN 10204, 3.1		CERTIFICATE NO. 180613001													
				DATE 06/13/18													
PURCHASER 台灣科技大學機械系 ORDER NO. _____																	
DESCRIPTION PARTS 370 00 X 230 ID X 270 =5PCS		Specification ASTM A182-F304.-2018 AS STATED SIZES		Dimension GOOD.													
		Surface GOOD.															
		CHEMICAL COMPOSITION (%)										MECHANICAL TEST					
		×100	×100	×100	×1000	×1000	×100	×100	×100	×100	×100	×100	MPa	MPa			
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	N	Ti	Tensile Strength	Yield Strength	Elongation %	R.A.%	HARDNESS HB
Std.	Min.	8	100	200	45	30		800	1800		10		515	205	30	50	
	Max.	2.4	28	162	27	<0.5		810	1833	25	8.1		581	315	61	74	N/A
HEAT NO: 545755																	
1050°C W.Q																	
Remark: We hereby certify that the forging(s) described herein has (have) been made & tested in accordance with the requirements of specification.													 Chief of Inspection				

圖 A-2 ASTM A182-304L 之材料證明。



志 興 熱 處 理 股 份 有 限 公 司
CHI-HONG HEAT TREATMENT IND. CO., LTD.

熱 處 理 檢 驗 報 告 表

通 過 ISO 9001 認 證

HEAT TREATMENT INSPECTION REPORT



ISO 9001
FM 40296

高 雄 市 小 港 區 崇 明 街 163 號
NO 163, CHUNG MING ST.
HSIAO KANG, KAOHSIUNG.

TEL: (07) 841-5606
FAX: (07) 831-4352
0905201 T0900-4

客 戶 : Customer: 三 永 裕 鐵 工 廠 (股) 公 司	檢 驗 日 期 : Inspection date: 107/06/11
工 令 / 圖 號 : 3D047 Work order / Drawing No.:	品 名 : Partname: 數 量 : 5 件 Quantity:
材 質 : A508-1 Material:	熱 處 理 要 求 : 如 下 : Requirements hardness: 實 測 硬 度 : HB: 140-145 Inspection hardness:



抗 拉 : 485-655kg/mm²

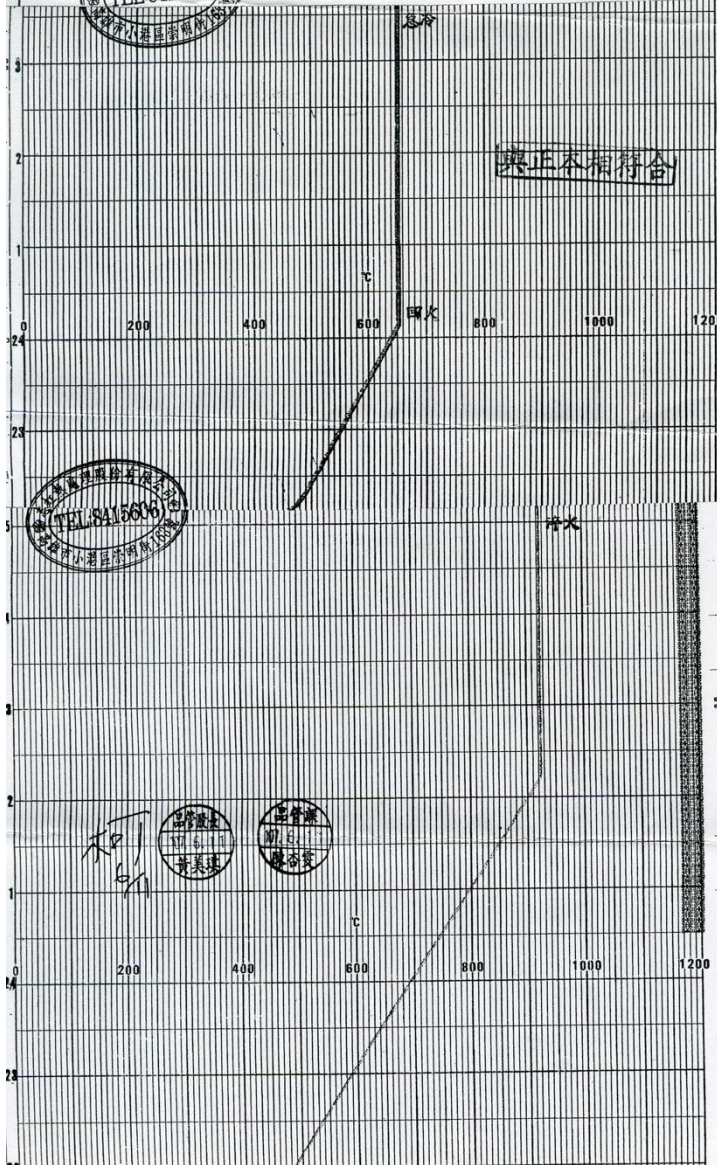


圖 A-3 ASTM A508 之熱處理證明。



材料及工程實驗室-高雄



試驗報告



報告編號：KK-18-05895

頁數：1 OF 2

報告日期：107年07月02日

委託單位：三永裕鐵工廠股份有限公司
 樣品名稱：ASTM A508-1 Y60-0283
 送驗人員：三永裕鐵工廠股份有限公司(董芳伶)
 收件日期：107年06月25日
 試驗日期：107年06月25日~107年07月02日
 產品規範：ASTM A508/A508M-04a
 試驗方法：ASTM A370-17a, ASTM E23-16b

備註：1.以上資料由顧客提供(收件及試驗日期除外)
 2.除非另有說明，此報告結果僅對測試之樣品負責
 未經本公司事先書面同意，此報告不可部分複製

試驗結果：

試件編號	降伏強度 (0.2%offset) ksi	抗拉強度 ksi	伸長率 (G.L.2in.) %	斷面縮率 %
Y60-0283	59	81	32	75
ASTM A508/A508M Gr.1 要求	≥ 36	70-95	≥ 20	≥ 38

衝擊試驗：試驗溫度(4.4°C)

試件編號	試片尺寸 mm V-Notch	吸收能(J)			
		No.1	No.2	No.3	平均值
Y60-0283	10×10×55	252	325	287	288
ASTM A508/A508M Gr.1 要求	---	任一單片值：≥ 14；三片平均值：≥ 20			

----- 1 -----

本報告若有提供規範值，該規範值僅供參考，合格之判定以委託單位實際要求為準

報告簽署人

This document is issued by the Company subject to its General Conditions of Service printed overleaf, available on request or accessible at <http://www.sgs.com/en/Terms-and-Conditions.aspx> and, for electronic format documents, subject to Terms and Conditions for Electronic Documents at <http://www.sgs.com/en/Terms-and-Conditions/Terms-e-Documents.aspx>. Attention is drawn to the limitation of liability, indemnification and jurisdiction issues defined therein. Any holder of this document is advised that information contained hereon reflects the Company's findings at the time of its intervention only and within the limits of Client's instructions, if any. The Company's sole responsibility is to its Client and this document does not exonerate parties to a transaction from exercising all their rights and obligations under the transaction documents. This document cannot be reproduced except in full, without prior written approval of the Company. Any unauthorized alteration, forgery or falsification of the content or appearance of this document is unlawful and offenders may be prosecuted to the fullest extent of the law. Unless otherwise stated the results shown in this test report refer only to the sample(s) tested.

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

Member of SGS Group

cecily_li

圖 A-4 ASTM A508 之機械性質試驗報告。

試驗報告

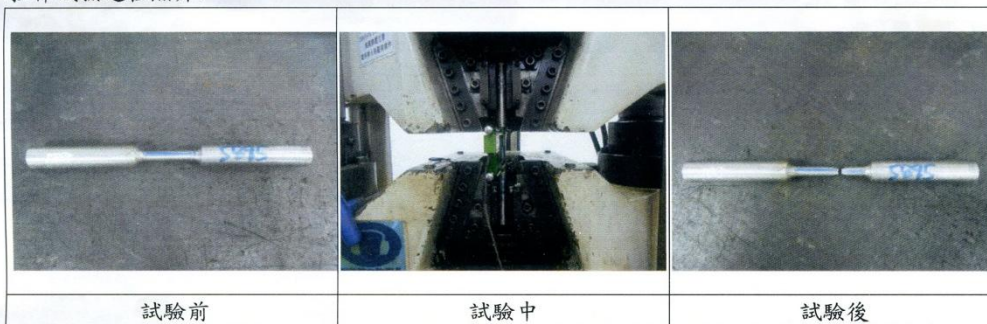
報告編號：KK-18-05895

頁數：2 OF 2

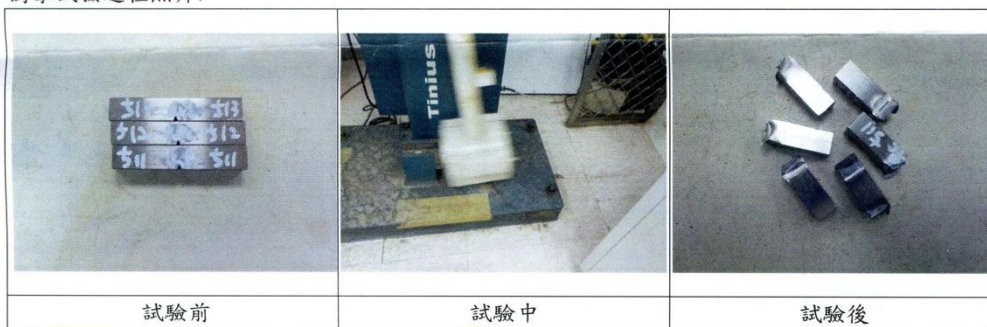
報告日期：107年07月02日

=====
試驗結果：

拉伸試驗過程照片：



衝擊試驗過程照片：



----- oOo -----

本報告若有提供規範值，該規範值僅供參考，合格之判定以委託單位實際要求為準

報告簽署人

This document is issued by the Company subject to its General Conditions of Service printed overleaf, available on request or accessible at <http://www.sgs.com/en/Terms-and-Conditions.aspx> and, for electronic format documents, subject to Terms and Conditions for Electronic Documents at <http://www.sgs.com/en/Terms-and-Conditions/Terms-e-Documents.aspx>. Attention is drawn to the limitation of liability, indemnification and jurisdiction issues defined therein. Any holder of this document is advised that information contained hereon reflects the Company's findings at the time of its intervention only and within the limits of Client's instructions, if any. The Company's sole responsibility is to its Client and this document does not exonerate parties to a transaction from exercising all their rights and obligations under the transaction documents. This document cannot be reproduced except in full, without prior written approval of the Company. Any unauthorized alteration, forgery or falsification of the content or appearance of this document is unlawful and offenders may be prosecuted to the fullest extent of the law. Unless otherwise stated the results shown in this test report refer only to the sample(s) tested.

SGS Taiwan Ltd.
台灣檢驗科技股份有限公司

No.61, Kai-Fa Road, Nanzih Export Processing Zone, Kaohsiung, Taiwan / 高雄市楠梓加工出口區開發路61號
t (886-7) 301-2121 f (886-7) 301-1165




www.sgs.tw

Member of SGS Group

cecily_lin

圖 A-5 ASTM A508 之機械性質試驗報告 (試驗外觀)。

附錄 B、Ir192 射線檢測結果

		射線檢測報告 RADIOGRAPHIC INSPECTION REPORT		台灣金屬材料品質有限公司一檢測實驗室 TAIWAN METAL QUALITY CONTROL CO., LTD.--TESTING LAB. 高雄市小港區漢民路702號7樓 Tel. 07-8019312, Fax. 07-8063017		Page: 1 / 1 Report No.: TM18-2284-1																					
顧客: 國立臺灣科技大學 Client: 國立臺灣科技大學		檢測日期: Oct.15,2018 Exam. Date: Oct.15,2018		報告編號: TM18-2284-1 Report No.: TM18-2284-1																							
地址: 台北市基隆路四段43號 Address: 台北市基隆路四段43號		檢測規範: JIS Z 3106 - 2001 Code/Procedure: JIS Z 3106 - 2001		接受基準: JIS Z 3106 Class 2 Accept. Standard: JIS Z 3106 Class 2																							
名稱: DM-N-PWHT pipe weld Article: DM-N-PWHT pipe weld		零件名稱: N/A Part Name: N/A		圖號: N/A Drawing No.: N/A		照相數量: 8張 No. of Expos.: 8張																					
工程編號: N/A Job/order No.: N/A		材質: SUS 304 Material: SUS 304		增感屏厚度: Front / Back Screen Thickness: 0.005" Pb		墊片厚度: N/A mm Shim Thick.: N/A mm																					
裝備/機型: <input type="checkbox"/> X-Ray Eresco MF3 Equip./Model: <input checked="" type="checkbox"/> γ-Ray Sentinel 880		裝片數: 1 pc No. of film/holder: 1 pc		照相厚度: 母材/鍍冠高Base Metal/Reinfo. Tks 50 / 2 mm Thickness: 鍍材Weld Metal 50 mm																							
照射條件 Radiographic Condition		電壓: KV Voltage: KV		電流: mA Current: mA		強度: 56 Ci Strength: 56 Ci		時間: 65 Sec Time: 65 Sec		底片判讀: <input checked="" type="checkbox"/> 單壁照/單壁判 Single exp./Single view <input type="checkbox"/> 雙壁照/雙壁判 Double exp./Double viewing																	
射源尺寸: 3 * 3 mm Source Size: 3 * 3 mm		源物距(SOD): 175 mm SOD: 175 mm		物片距(OFD): 50 mm OFD: 50 mm		底片型別Film Type: <input type="checkbox"/> Fuji 80 Fuji 100 <input checked="" type="checkbox"/> Agfa D7 <input type="checkbox"/>		底片尺寸Film Size: <input type="checkbox"/> 3.5" x 12" 4.5" x 8" <input checked="" type="checkbox"/> 4.5" x 17" <input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/> 構件Structure <input type="checkbox"/> 管件Piping <input type="checkbox"/> 容器Vessel <input checked="" type="checkbox"/> 中心照Center Exp. <input type="checkbox"/> 管件Piping <input type="checkbox"/> 構件Structure																	
底片編號 Film No.		像質計 IQI O合格 X則退		裂紋 Crack		滲透不足 LP		融合不良 LF		夾渣 Slag		氣孔 Blow Hole		融蝕 Under-cut		夾錫 Tung-sten		瑕疵種類 Classification		等級 Grade		判定 Results		檢測日期 Exam. Date			
N-PWHT-1		O		-		-		-		-		-		-		-		-		-		Accept		2018/10/15			
-2		O		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		Accept		2018/10/15	
-3		O		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		Accept		2018/10/15	
-4		O		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		Accept		2018/10/15	
-5		O		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		Accept		2018/10/15	
-6		O		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		Accept		2018/10/15	
-7		O		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		Accept		2018/10/15	
-8		O		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		Accept		2018/10/15	
-BLANK-																											
檢測人員 Examiner		報告簽署人 Approved																									
級別 Level		簽章 Sign/Stamp		日期 Date		級別 Level		簽章 Sign/Stamp		日期 Date		簽章 Sign		日期 Date		簽章 Sign		日期 Date									
II				2018/10/15		II				2018/10/15																	

註:本測試報告僅對此測試件有效,未獲得實驗室同意,此測試報告不得摘錄複製,但全文複製除外。
 Note:The inspection result is only valid to the inspected part, unless agreed by the Lab in paper form,the report cannot be copied. n-01-1-Rev17-ASME

圖 B- 1 N-PWHT 之 RT 檢測試驗報告。

底片編號 N-PWHT-1---no indication

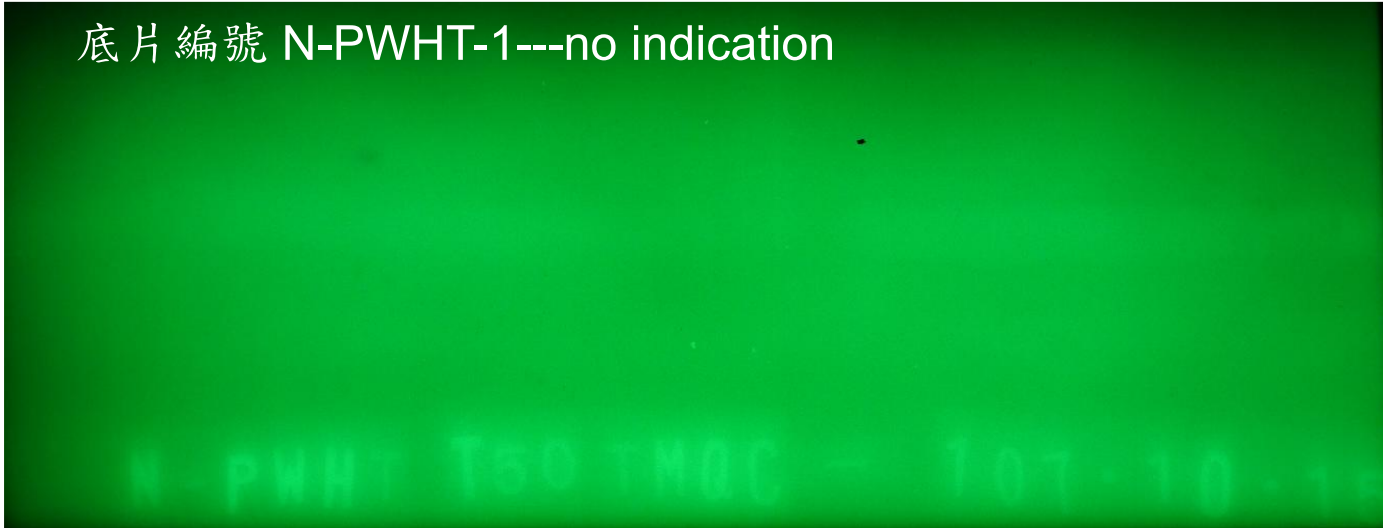


圖 B-3 N-PWHT 之 RT 底片，編號 1。

底片編號 N-PWHT-2---no indication

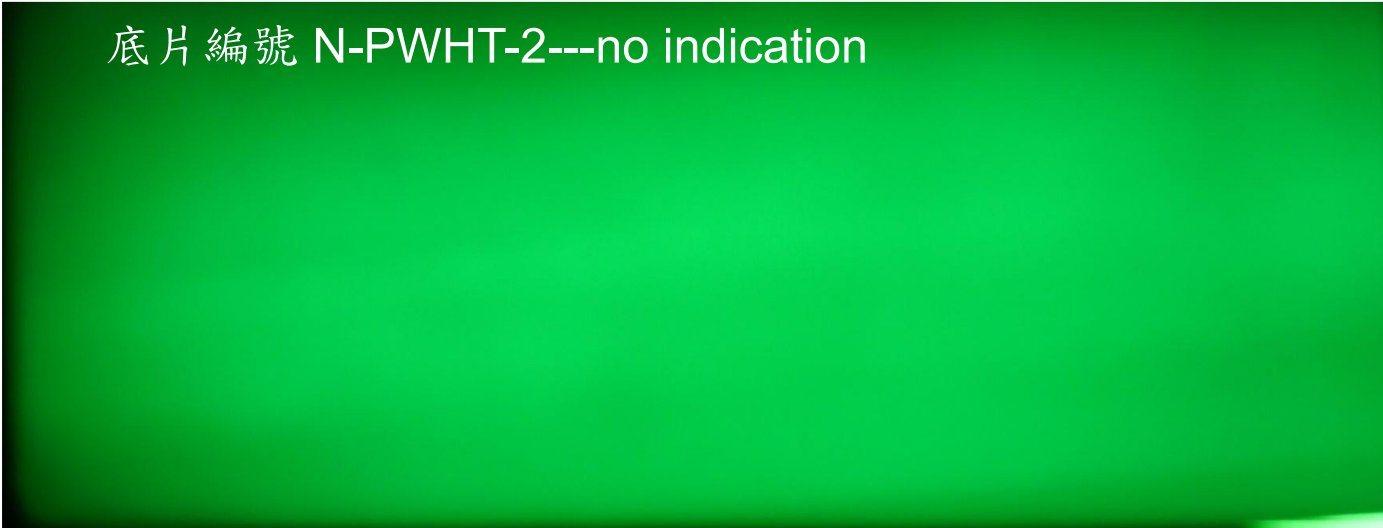


圖 B-4 N-PWHT 之 RT 底片，編號 2。

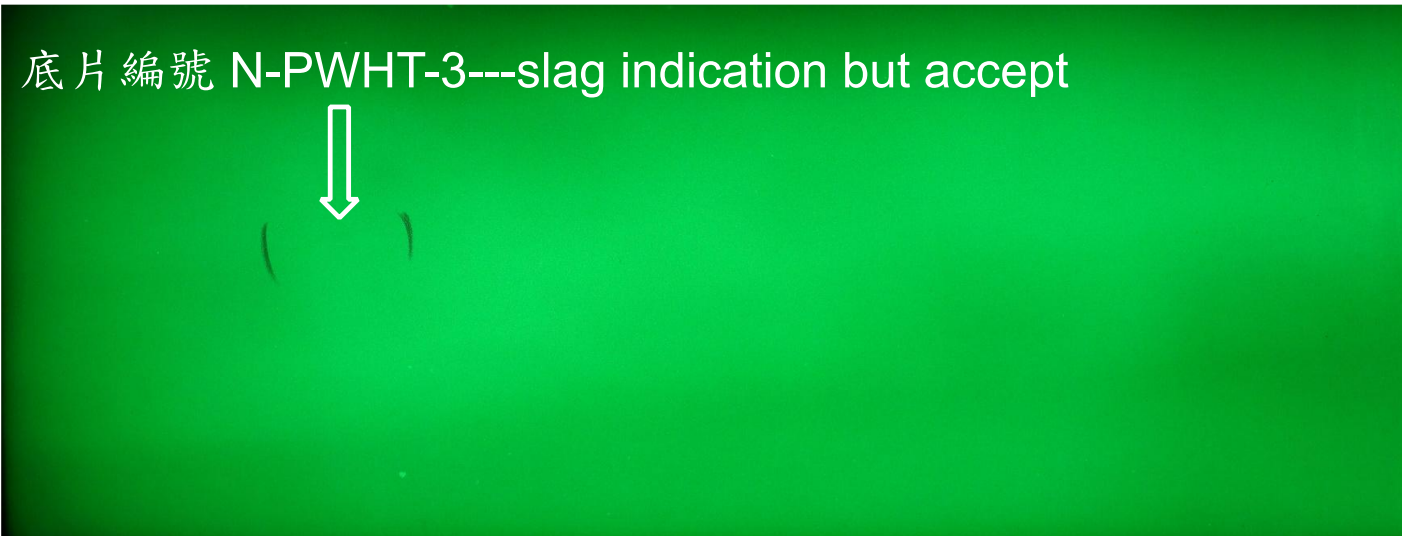


圖 B-5 N-PWHT 之 RT 底片，編號 3。

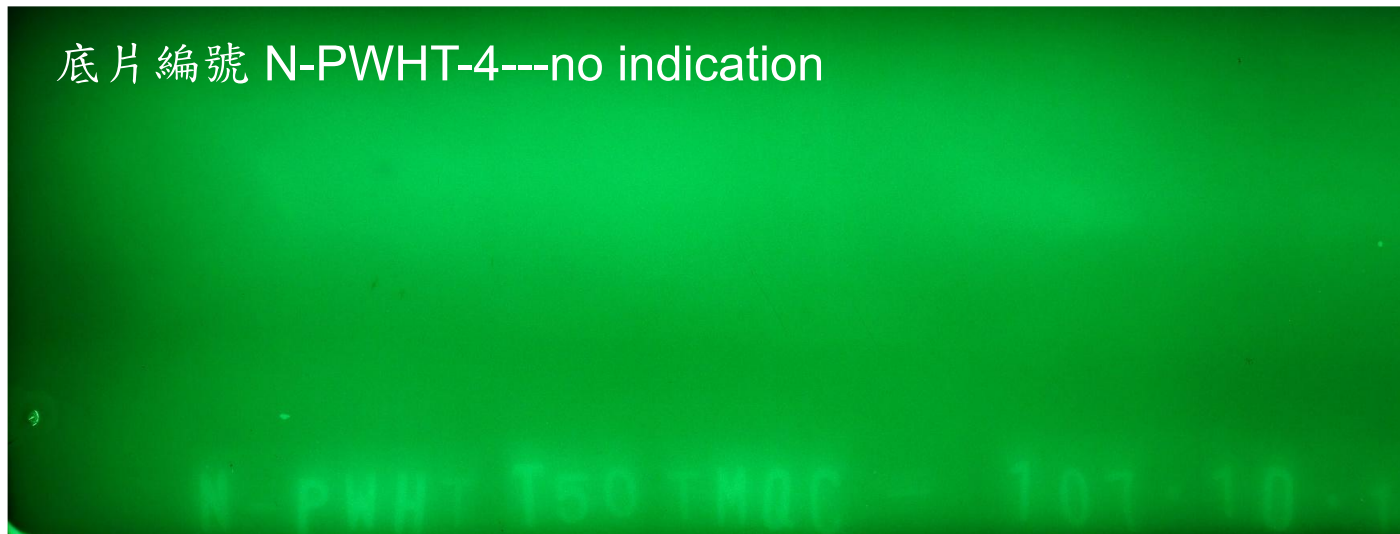


圖 B-6 N-PWHT 之 RT 底片，編號 4。

底片編號 N-PWHT-5---no indication

圖 B-7 N-PWHT 之 RT 底片，編號 5。

底片編號 N-PWHT-6---no indication

圖 B-8 N-PWHT 之 RT 底片，編號 6。

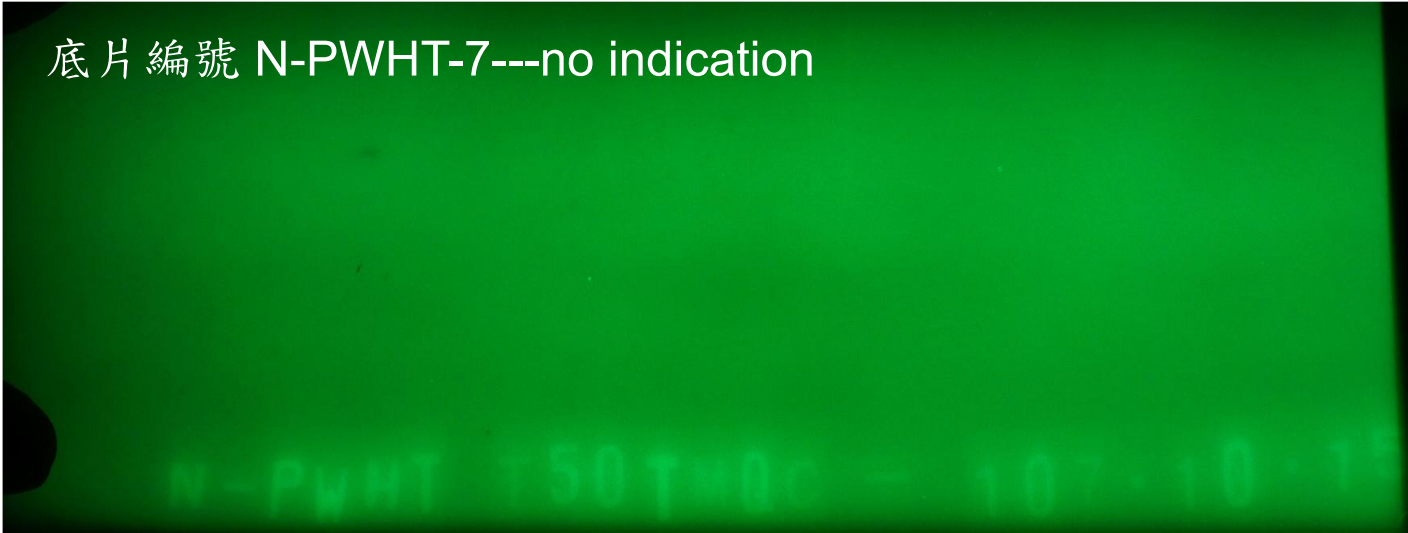


圖 B-9 N-PWHT 之 RT 底片，編號 7。

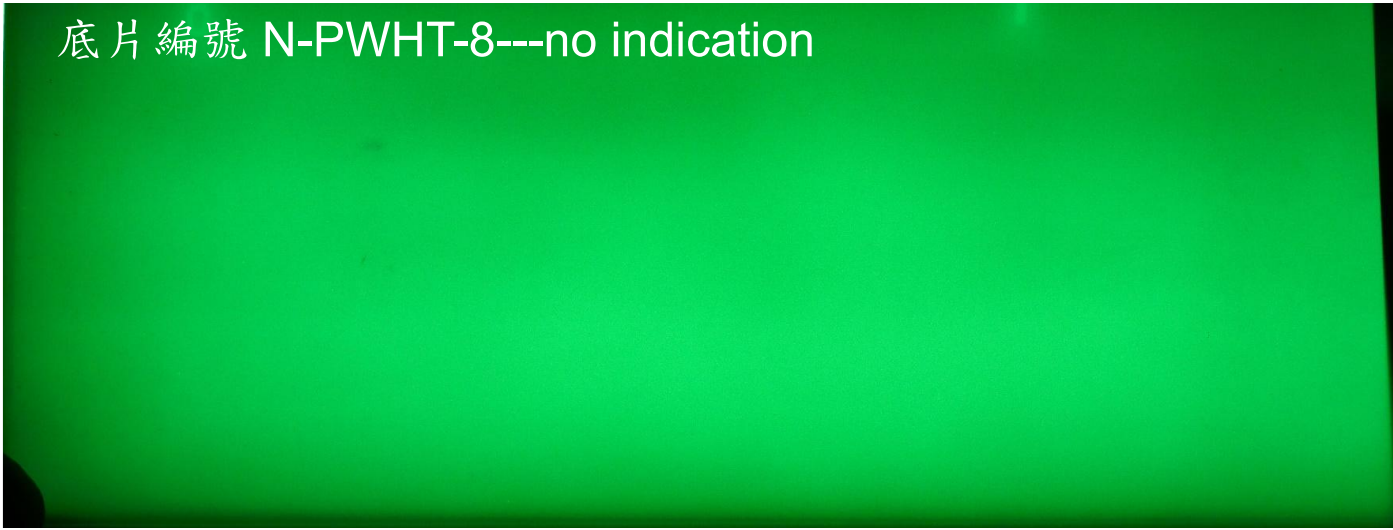


圖 B-10 N-PWHT 之 RT 底片，編號 8。

底片編號 Y-PWHT-1---no indication

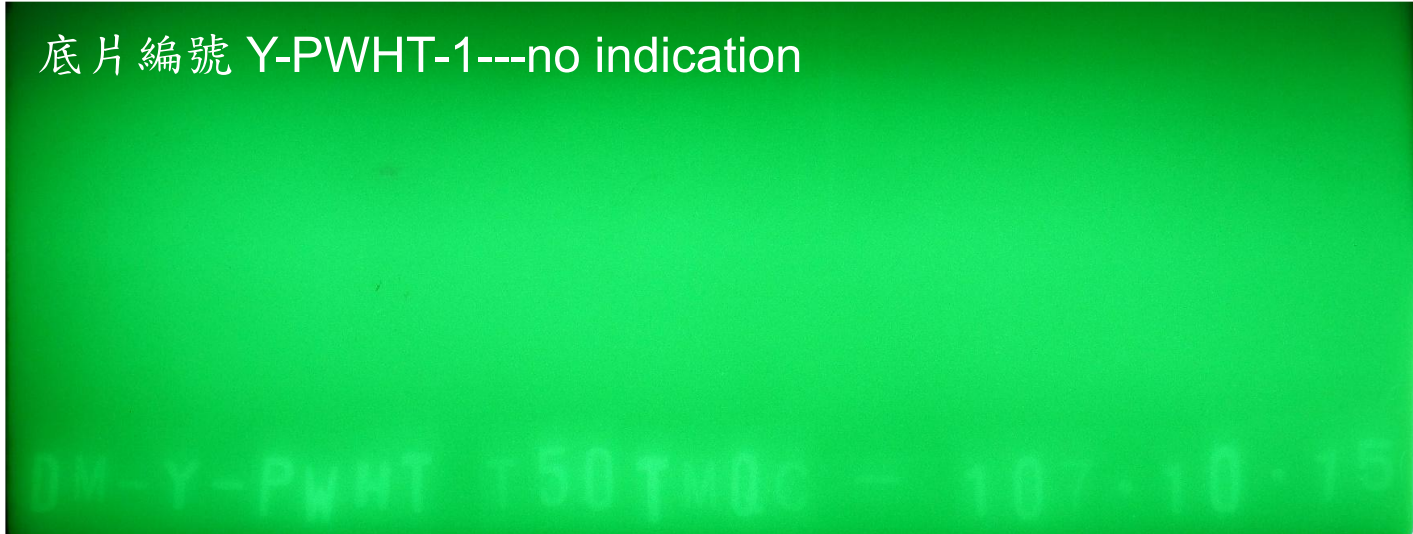


圖 B- 11 Y-PWHT 之 RT 底片，編號 1。

底片編號 Y-PWHT-2---no indication

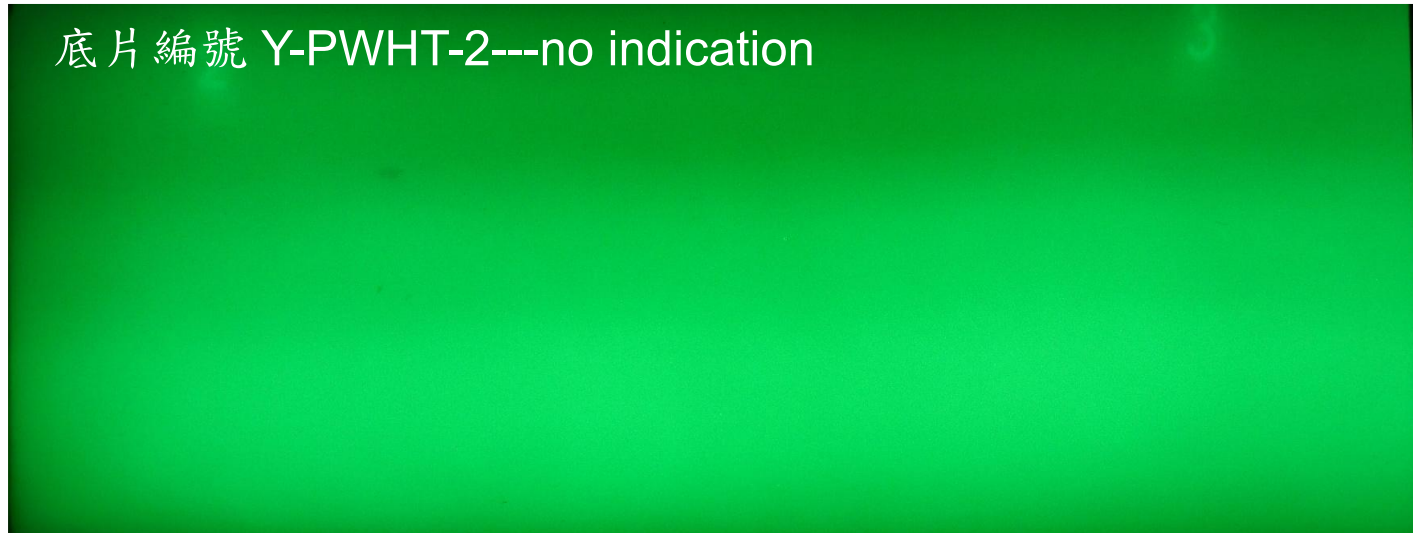


圖 B- 12 Y-PWHT 之 RT 底片，編號 2。

底片編號 Y-PWHT-3---no indication

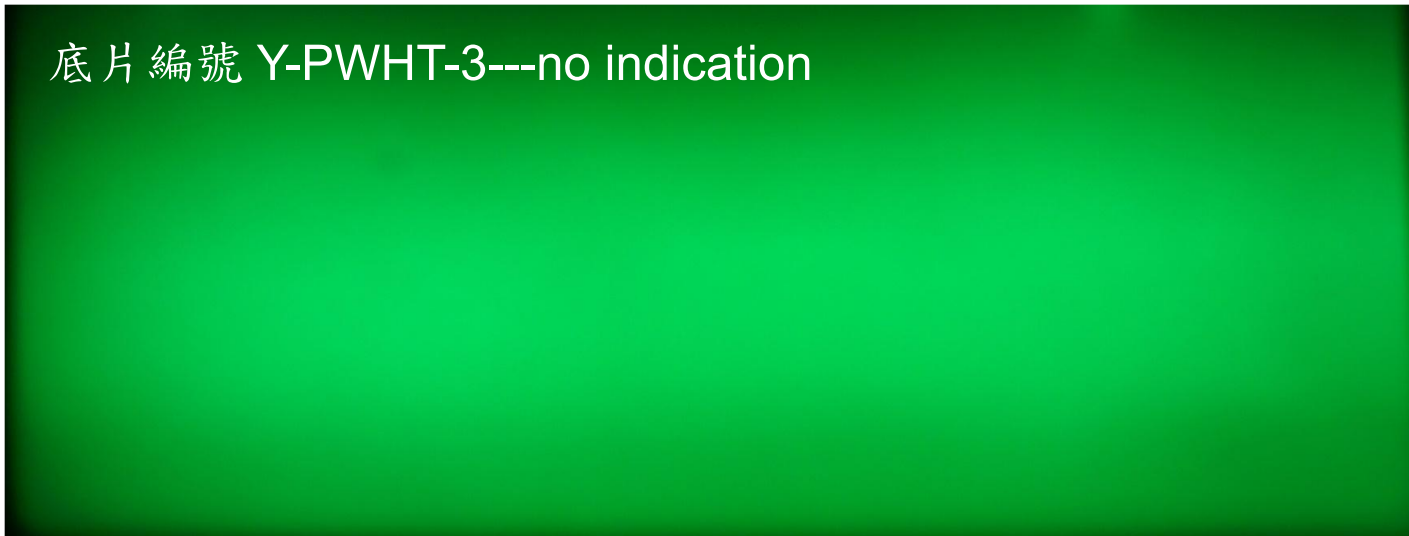


圖 B-13 Y-PWHT 之 RT 底片，編號 3。

底片編號 Y-PWHT-4---no indication

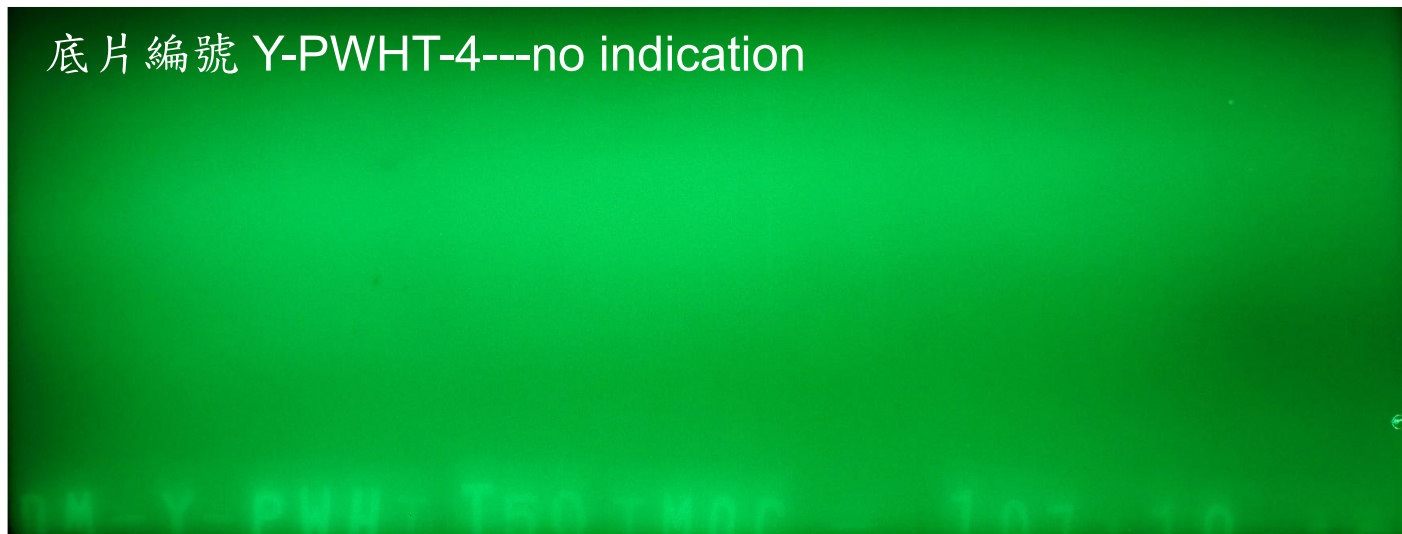


圖 B-14 Y-PWHT 之 RT 底片，編號 4。

底片編號 Y-PWHT-5---no indication

圖 B- 15 Y-PWHT 之 RT 底片，編號 5。

底片編號 Y-PWHT-6---no indication

圖 B- 16 Y-PWHT 之 RT 底片，編號 6。

底片編號 Y-PWHT-7---no indication

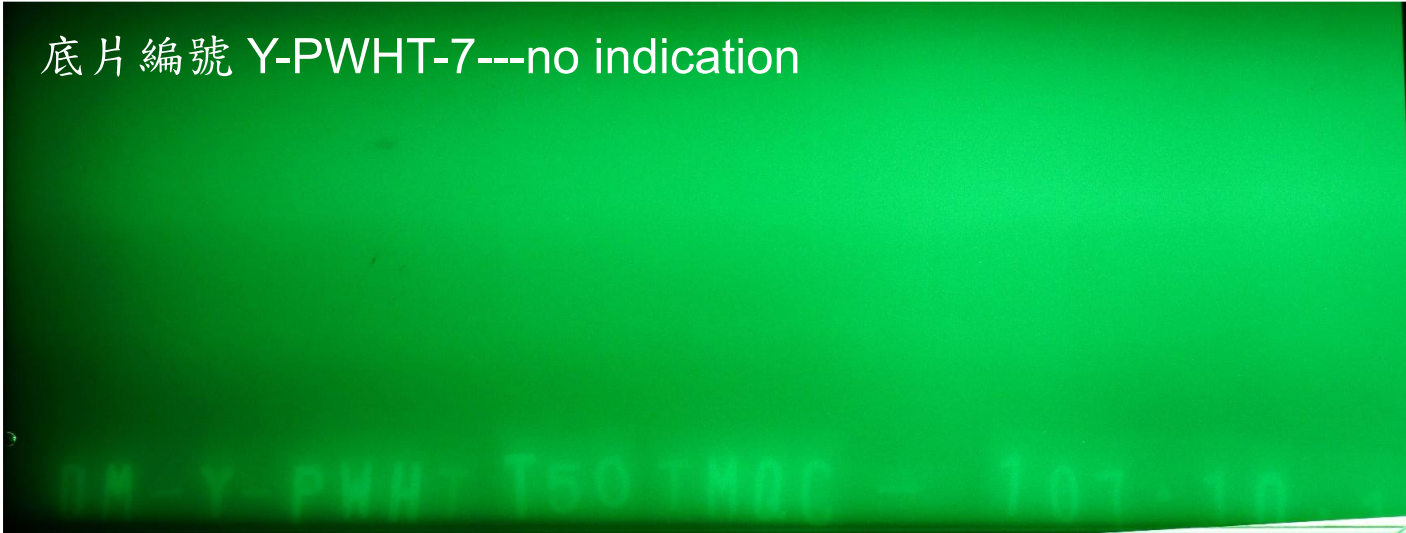


圖 B-17 Y-PWHT 之 RT 底片，編號 7。

底片編號 Y-PWHT-8---no indication

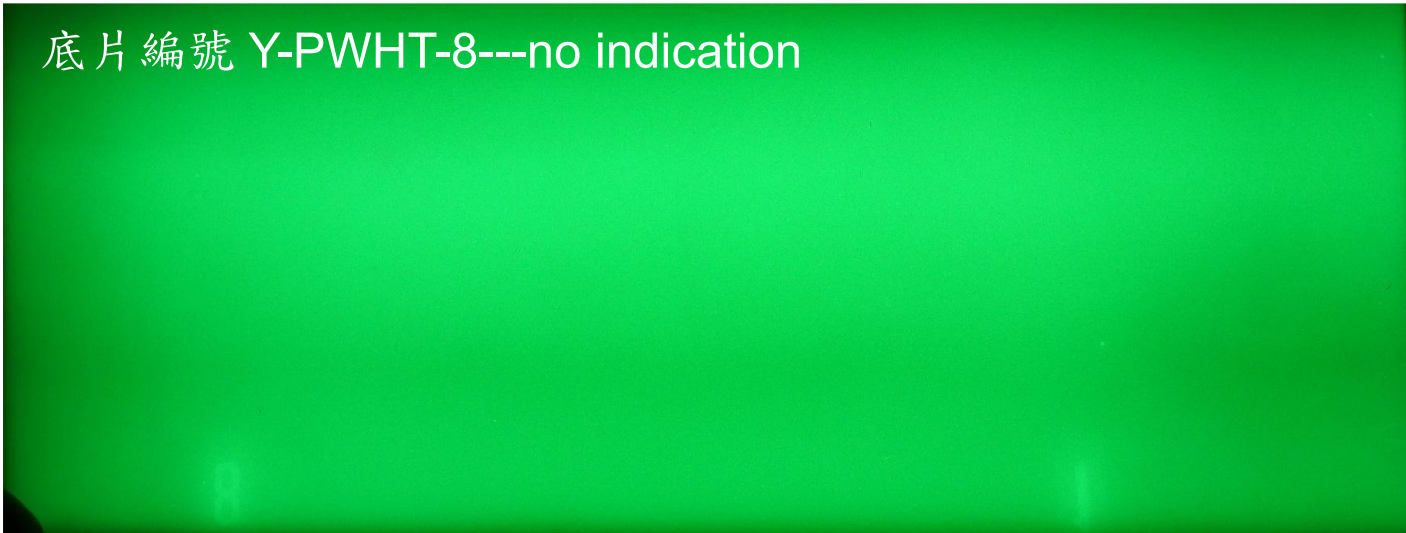


圖 B-18 Y-PWHT 之 RT 底片，編號 8。

附錄 C、二維殘留應力量測點之德拜圖

由於量測數據繁多，僅羅列第一量測線之德拜圖，提供讀者判讀量測誤差性。

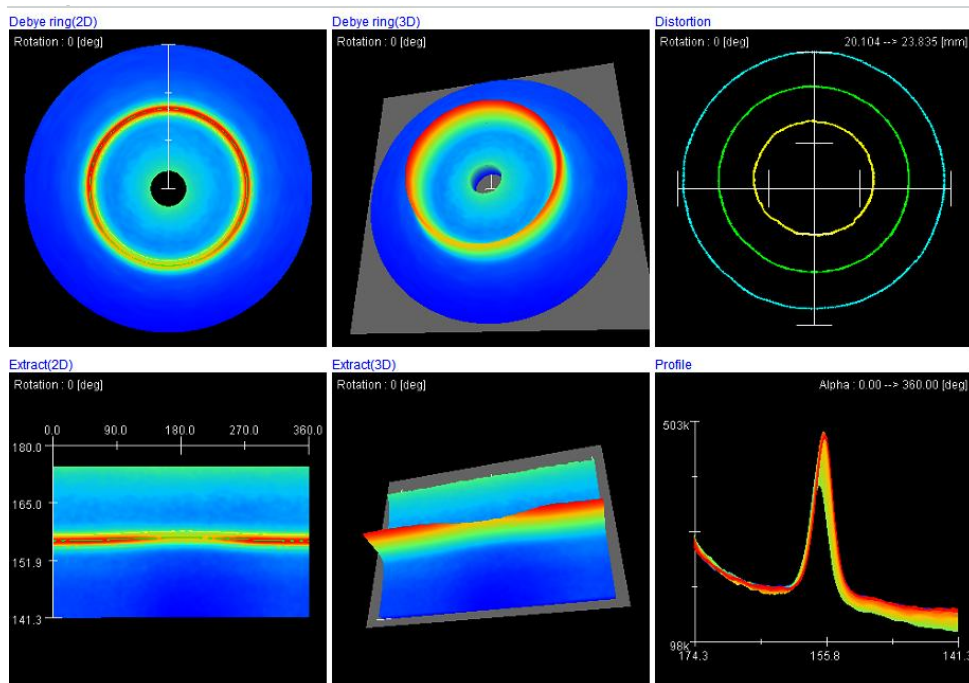


圖 C-1 N-PWHT 低合金鋼端量測位置距離銲道中心 12 mm，第一量測線。

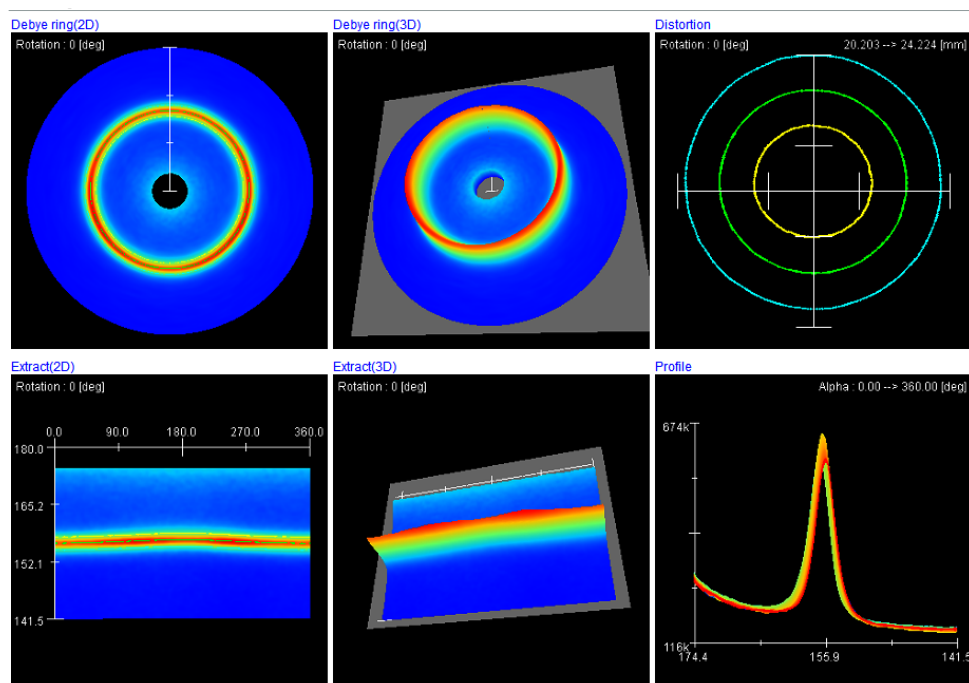


圖 C-2 N-PWHT 低合金鋼端量測位置距離銲道中心 17 mm，第一量測線。

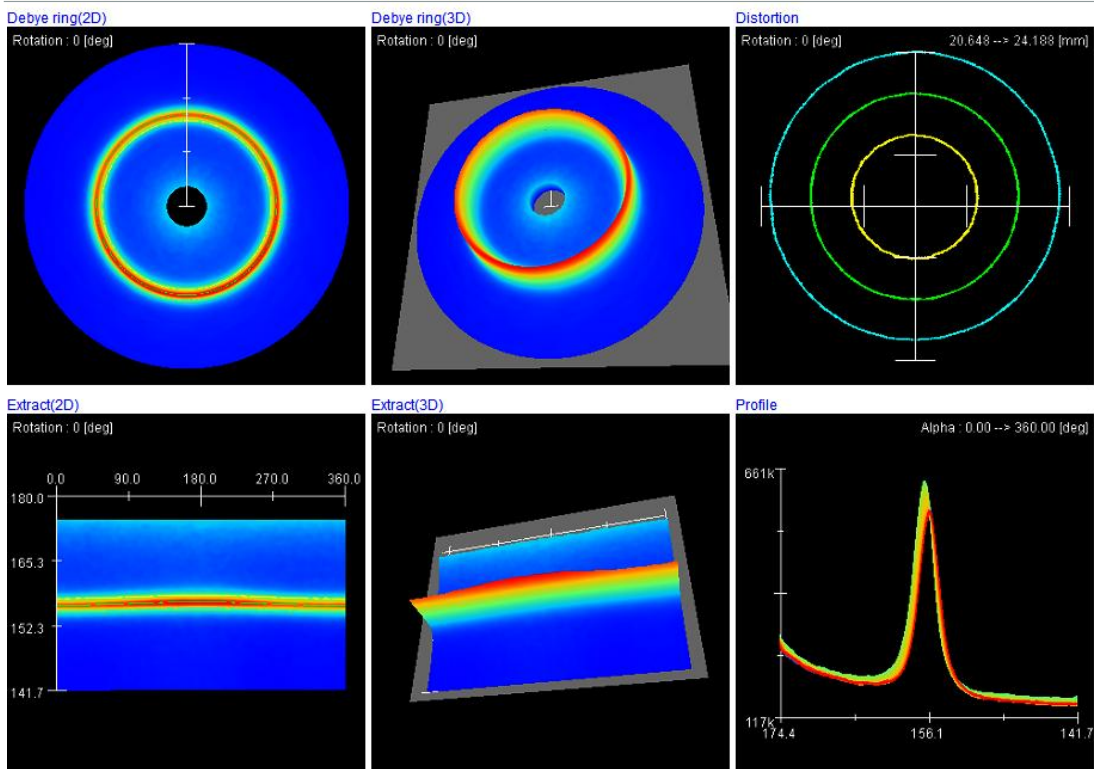


圖 C-3 N-PWHT 低合金鋼端量測位置距離鐳道中心 22 mm，第一量測線。

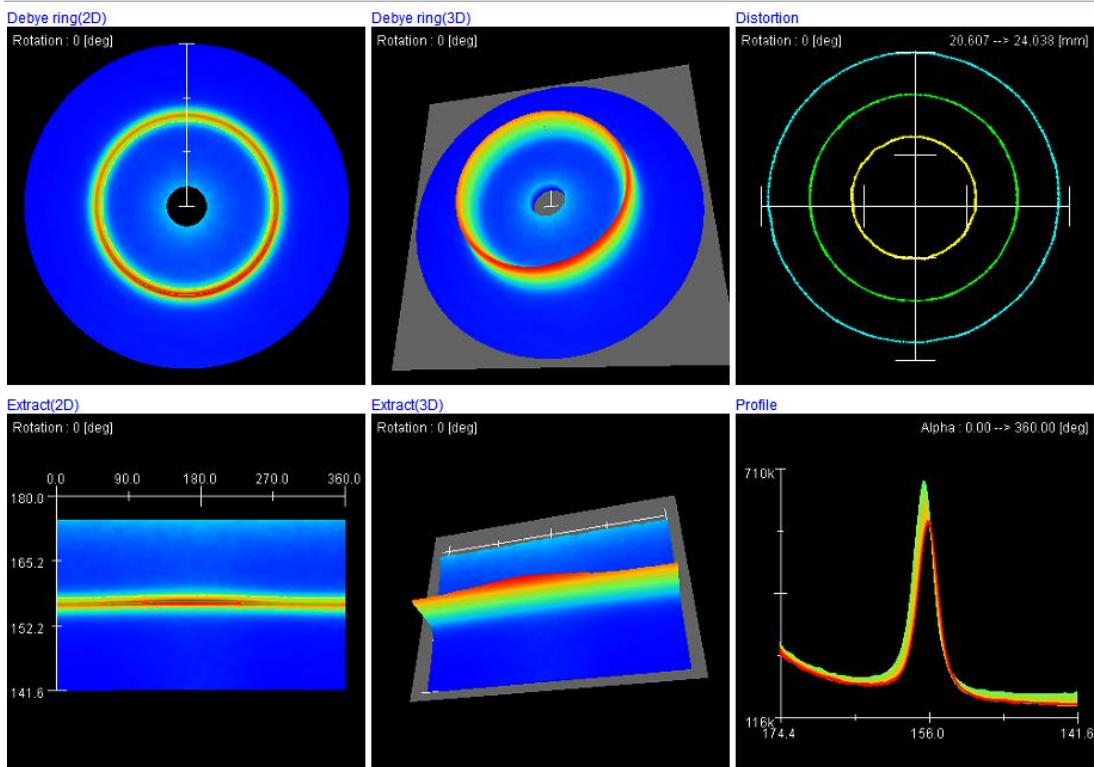


圖 C-4 N-PWHT 低合金鋼端量測位置距離鐳道中心 27 mm，第一量測線。

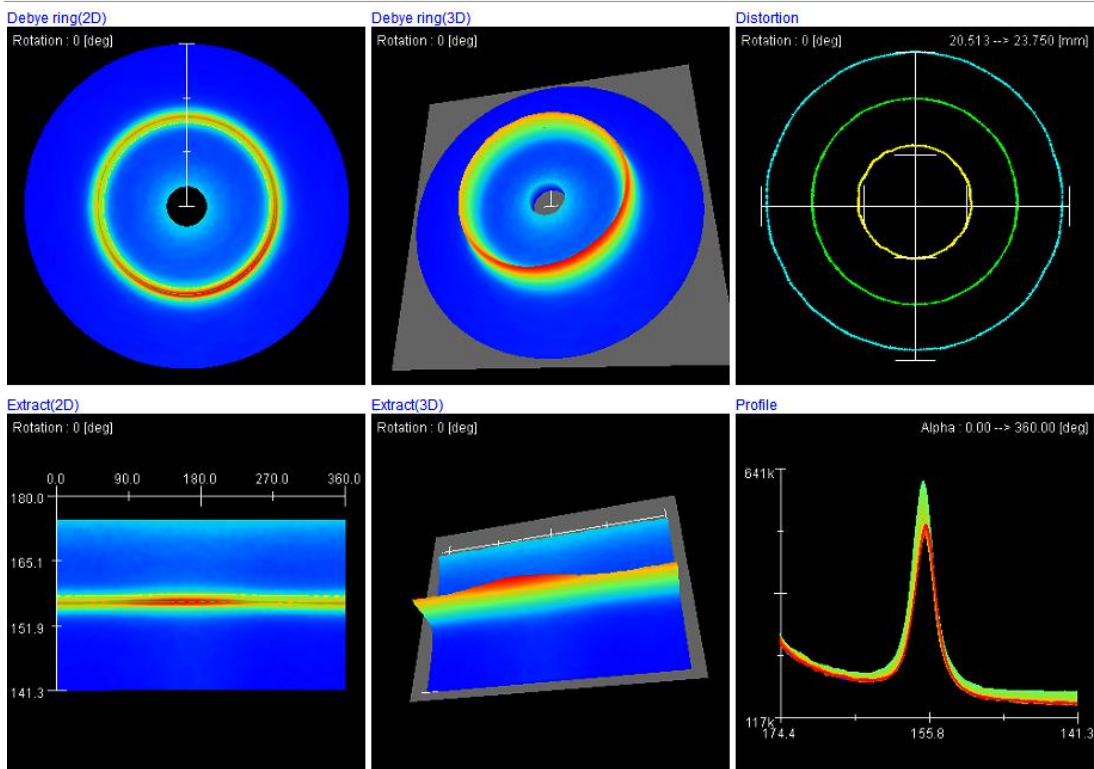


圖 C-5 N-PWHT 低合金鋼端量測位置距離鐳道中心 32 mm，第一量測線。

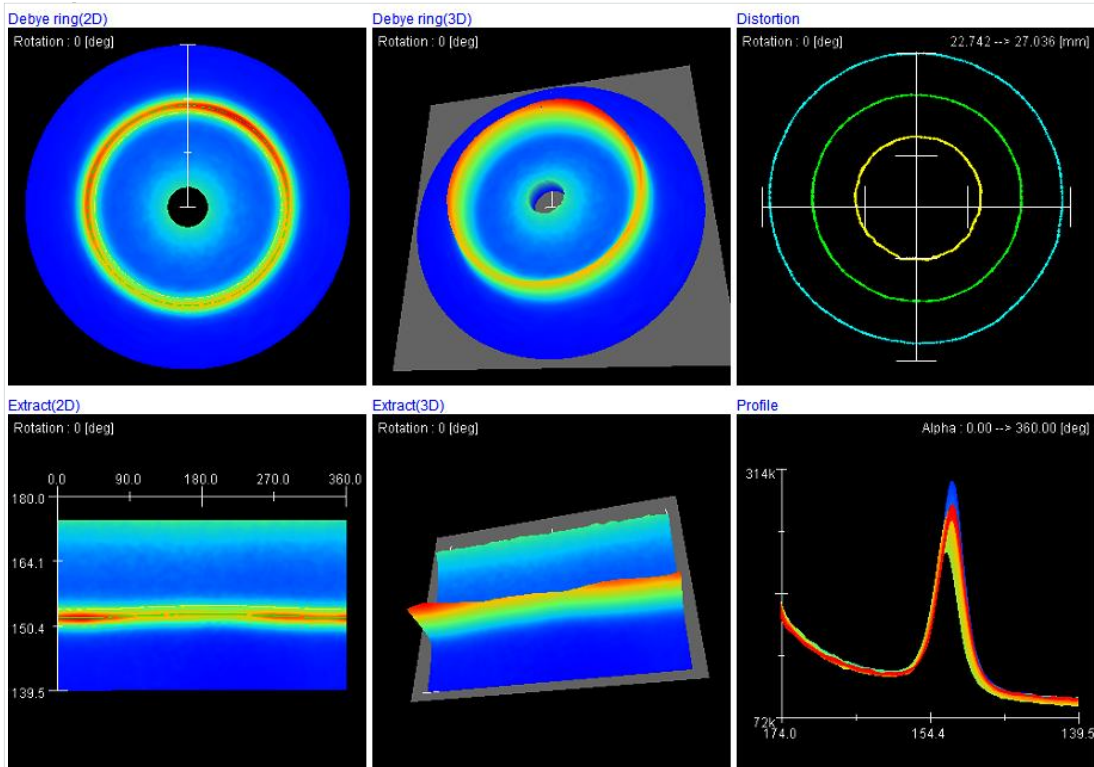


圖 C-6 N-PWHT 不銹鋼端量測位置距離鐳道中心 2 mm，第一量測線。

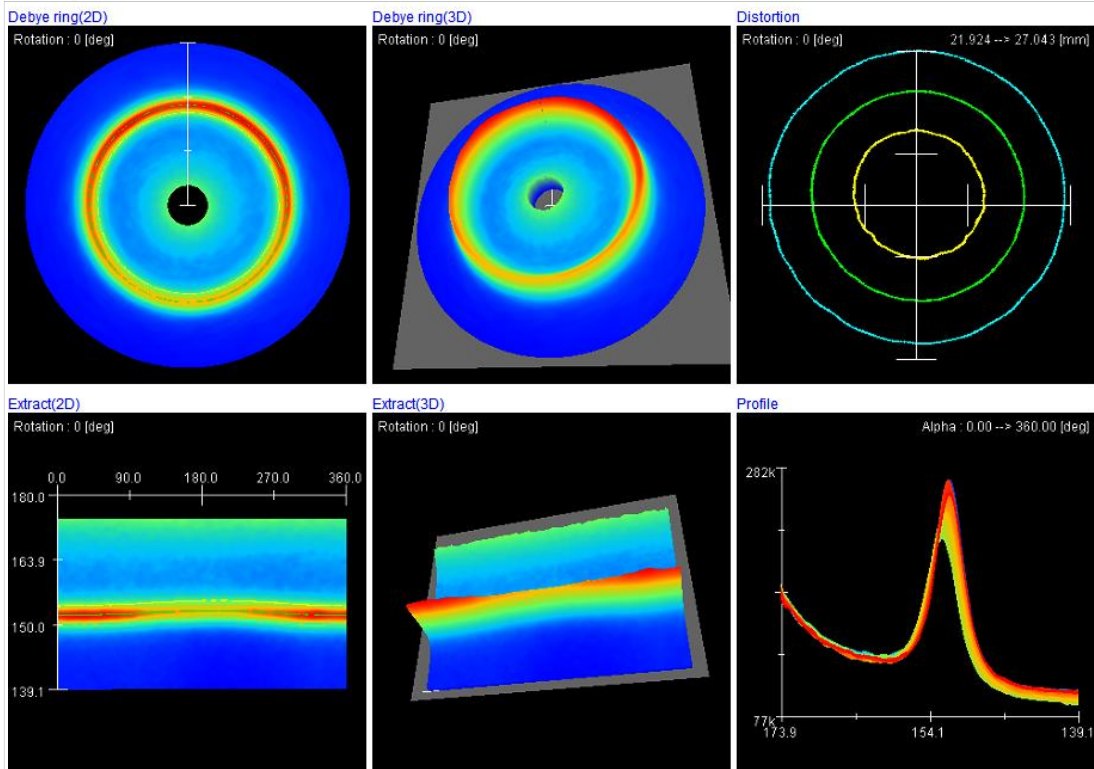


圖 C-7 N-PWHT 不銹鋼端量測位置距離銲道中心 5 mm，第一量測線。

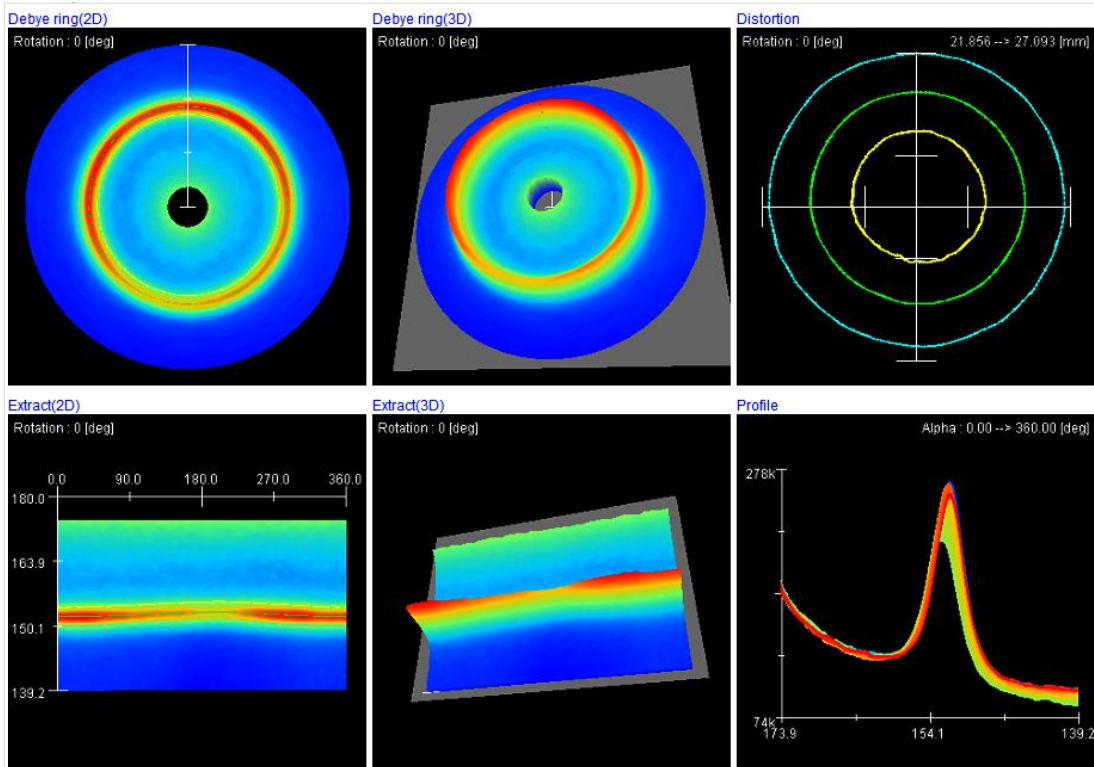


圖 C-8 N-PWHT 不銹鋼端量測位置距離銲道中心 8 mm，第一量測線。

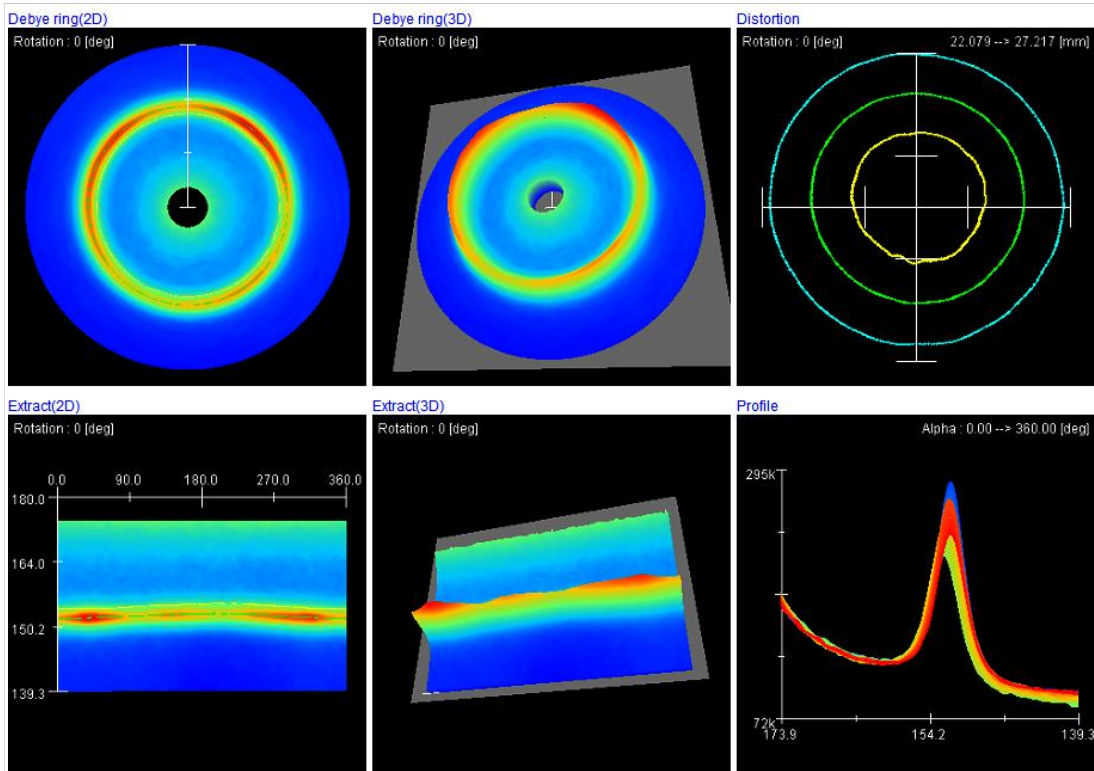


圖 C-9 N-PWHT 不銹鋼端量測位置距離銲道中心 11 mm，第一量測線。

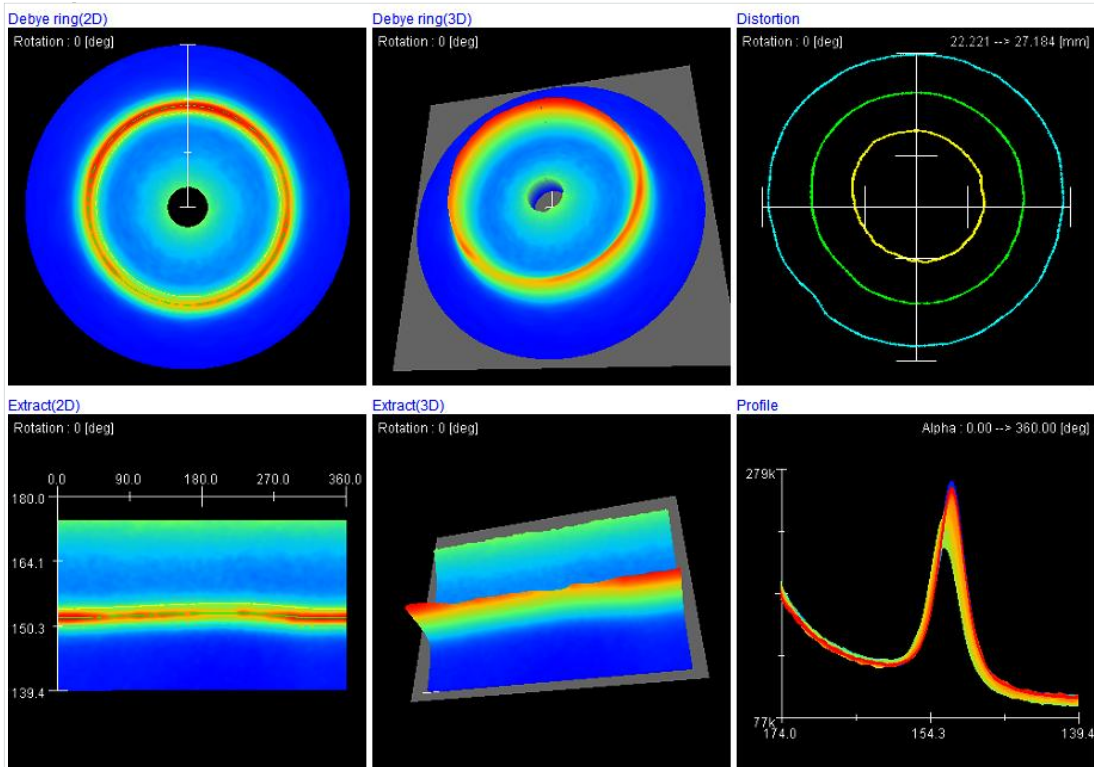


圖 C-10 N-PWHT 不銹鋼端量測位置距離銲道中心 13 mm，第一量測線。

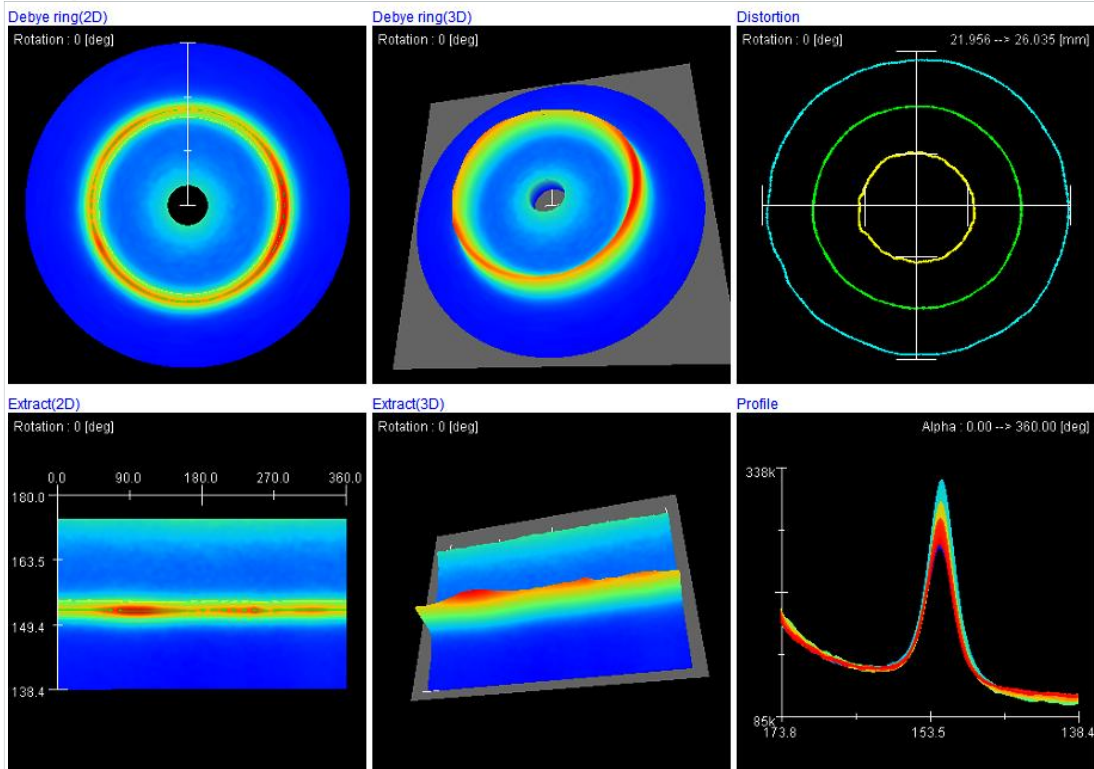


圖 C-11 N-PWHT 不銹鋼端量測位置距離銲道中心 22 mm，第一量測線。

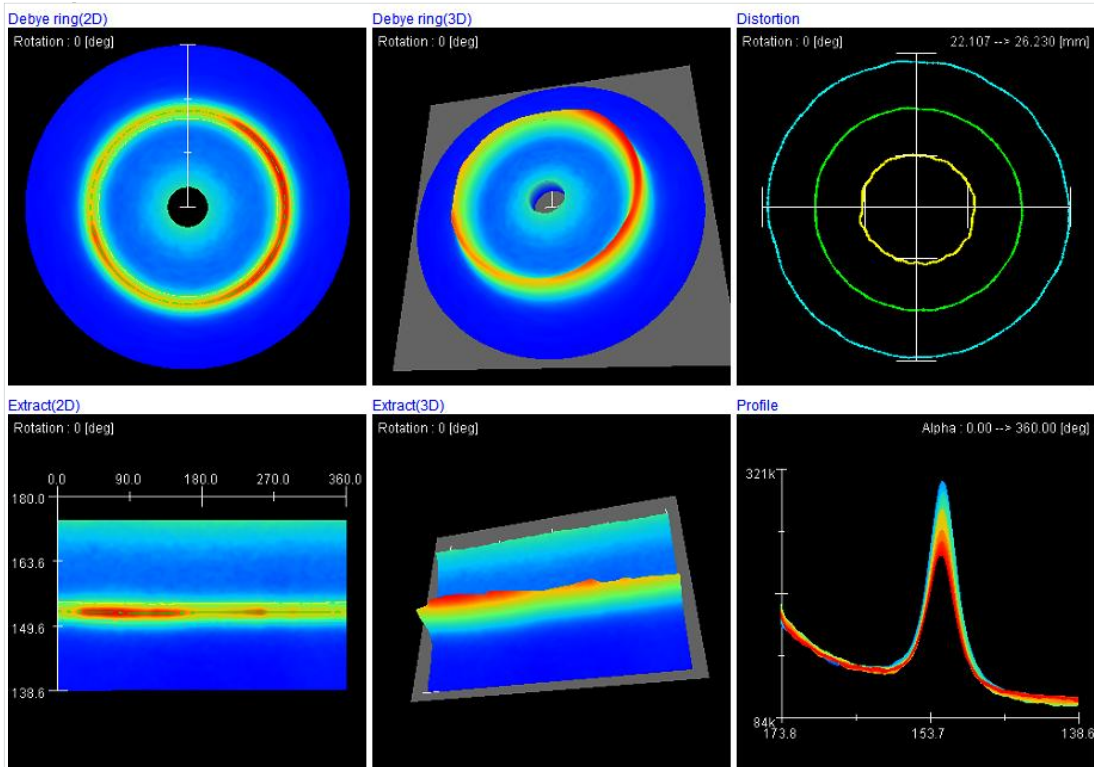


圖 C-12 N-PWHT 不銹鋼端量測位置距離銲道中心 42 mm，第一量測線。

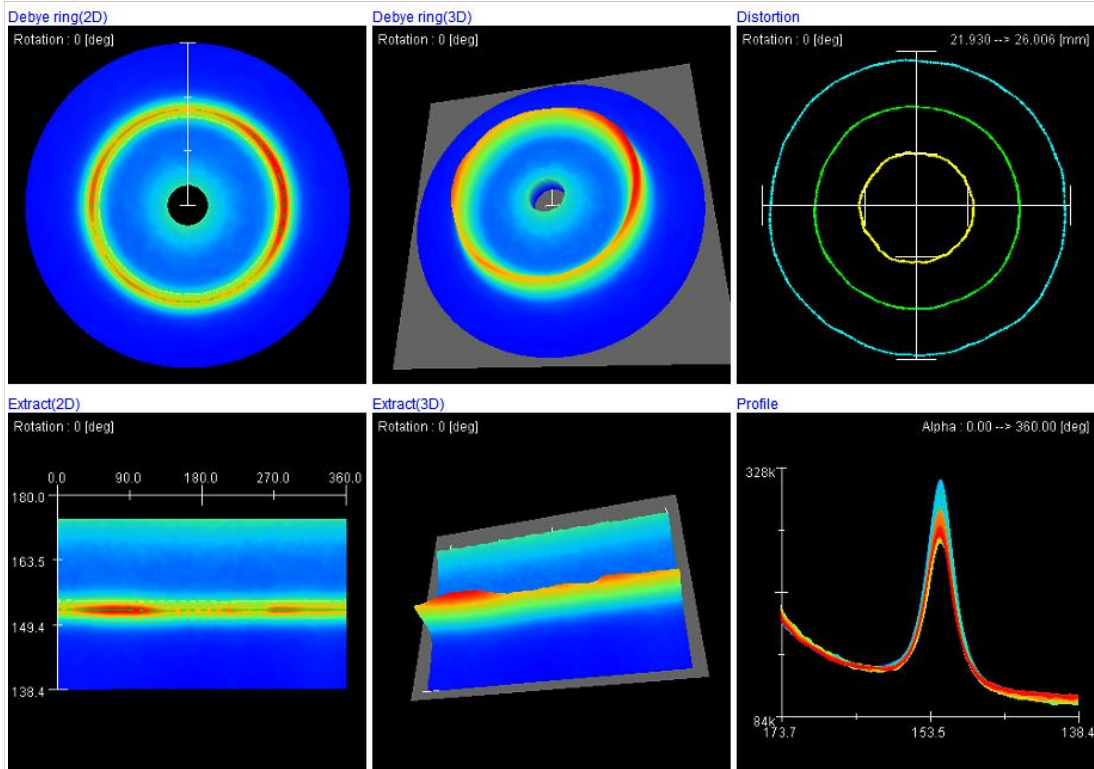


圖 C-13 N-PWHT 不銹鋼端量測位置距離銲道中心 42 mm，第一量測線。

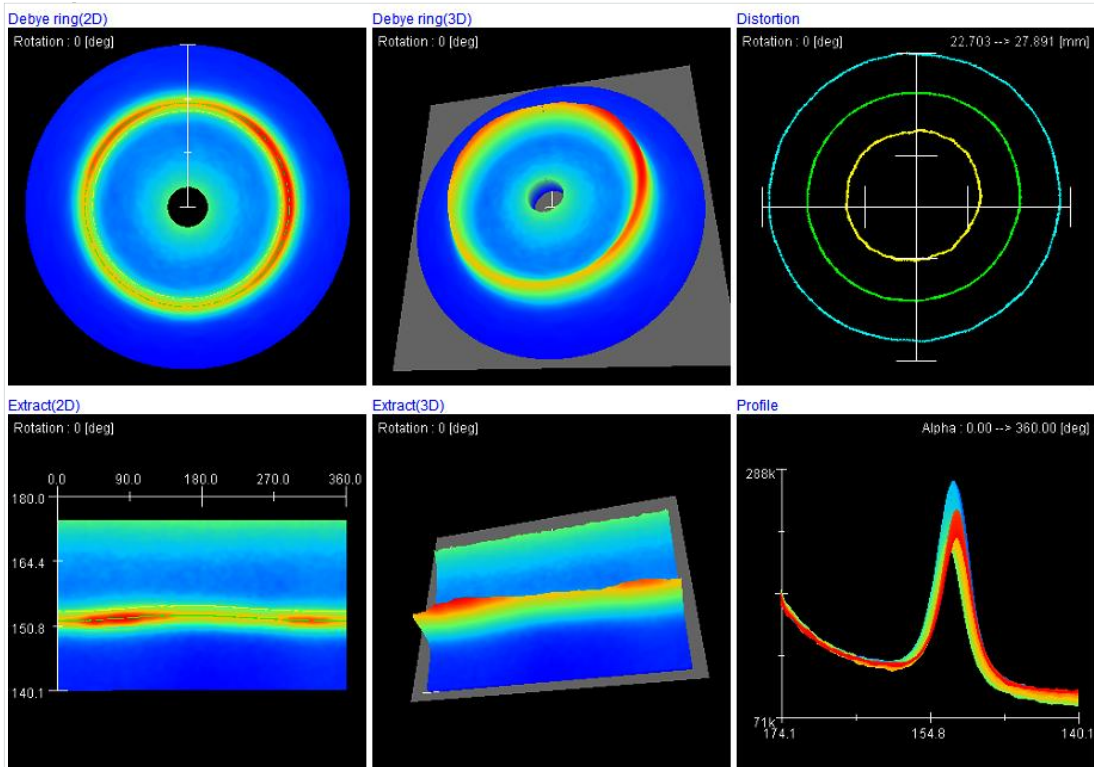


圖 C-14 N-PWHT 不銹鋼端量測位置距離銲道中心 62 mm，第一量測線。

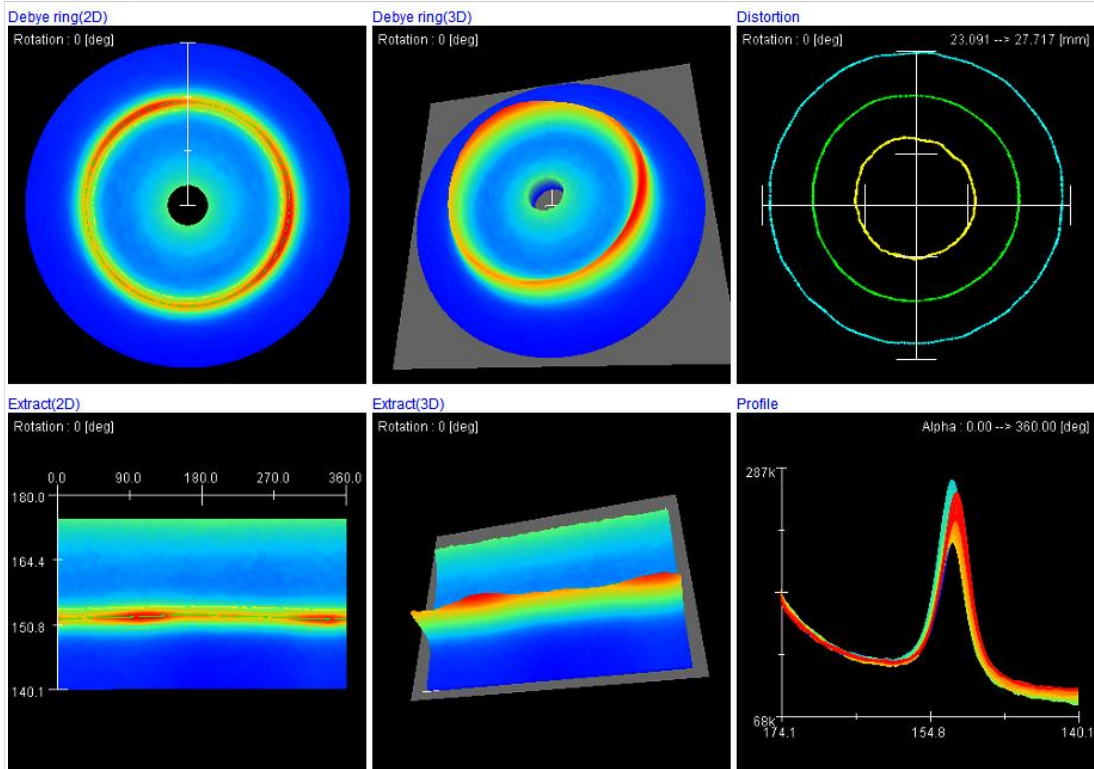


圖 C-15 N-PWHT 不銹鋼端量測位置距離鐳道中心 102 mm，第一量測線。

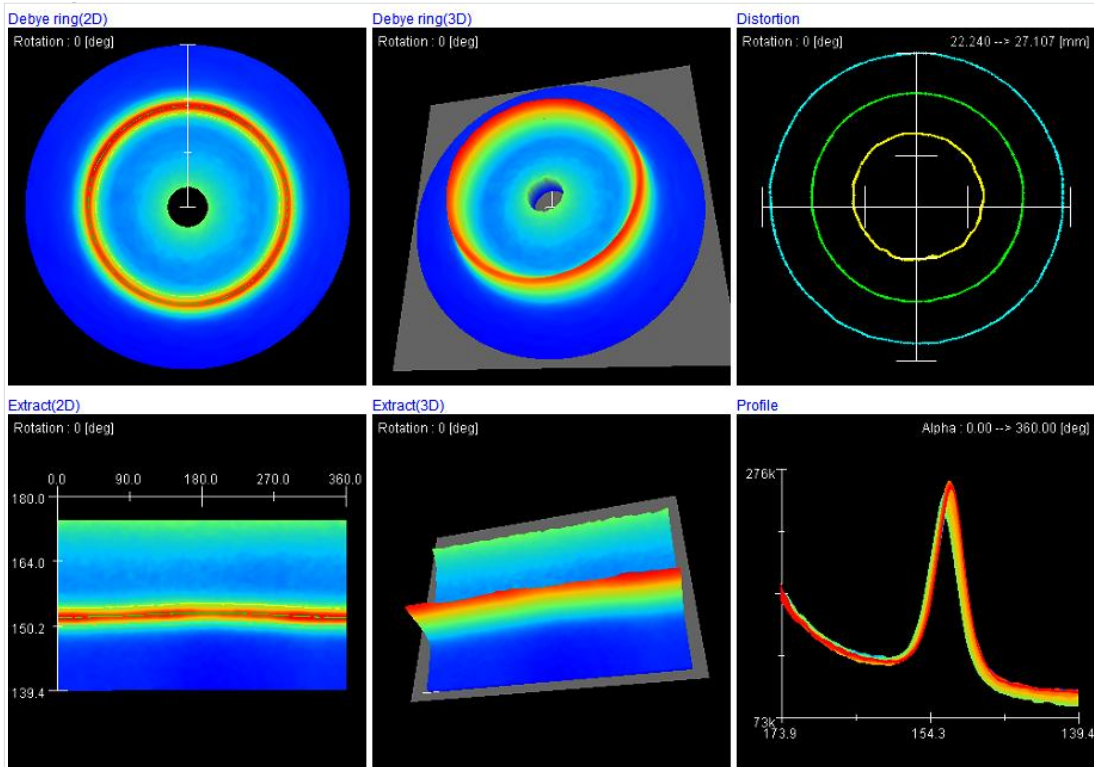


圖 C-16 N-PWHT 不銹鋼端量測位置距離鐳道中心 122 mm，第一量測線。

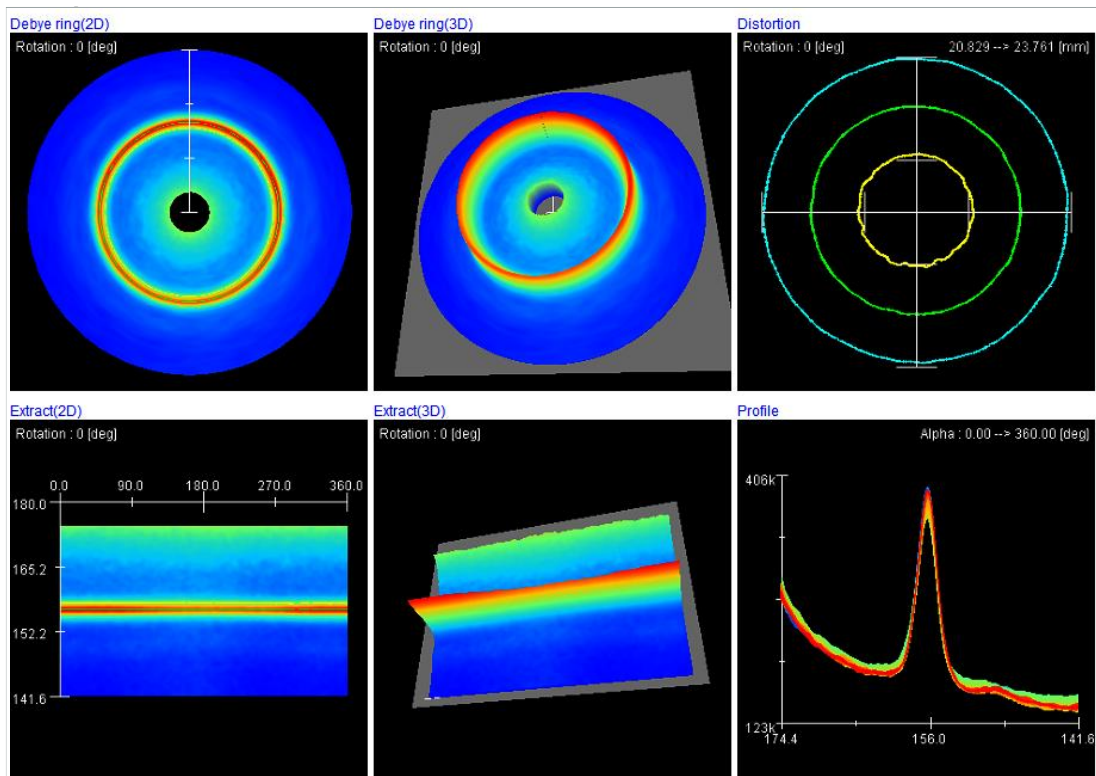


圖 C-17 Y-PWHT 低合金鋼端量測位置距離銲道中心 7 mm，第一量測線。

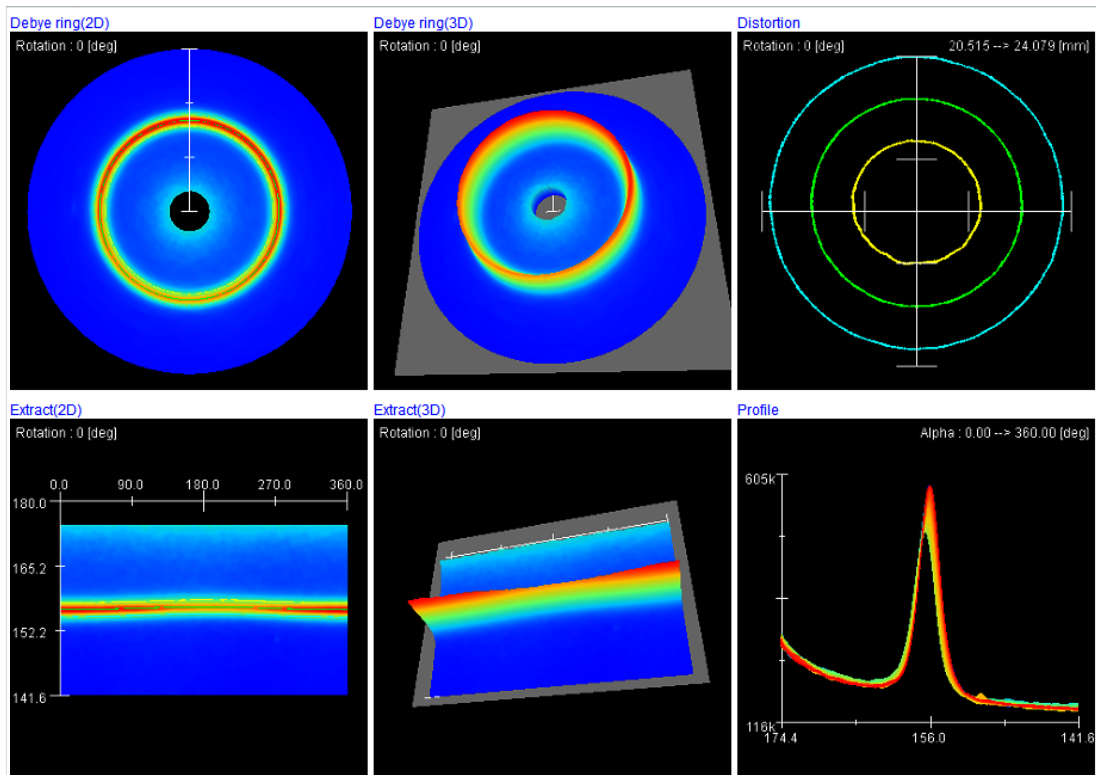


圖 C-18 Y-PWHT 低合金鋼端量測位置距離銲道中心 10 mm，第一量測線。

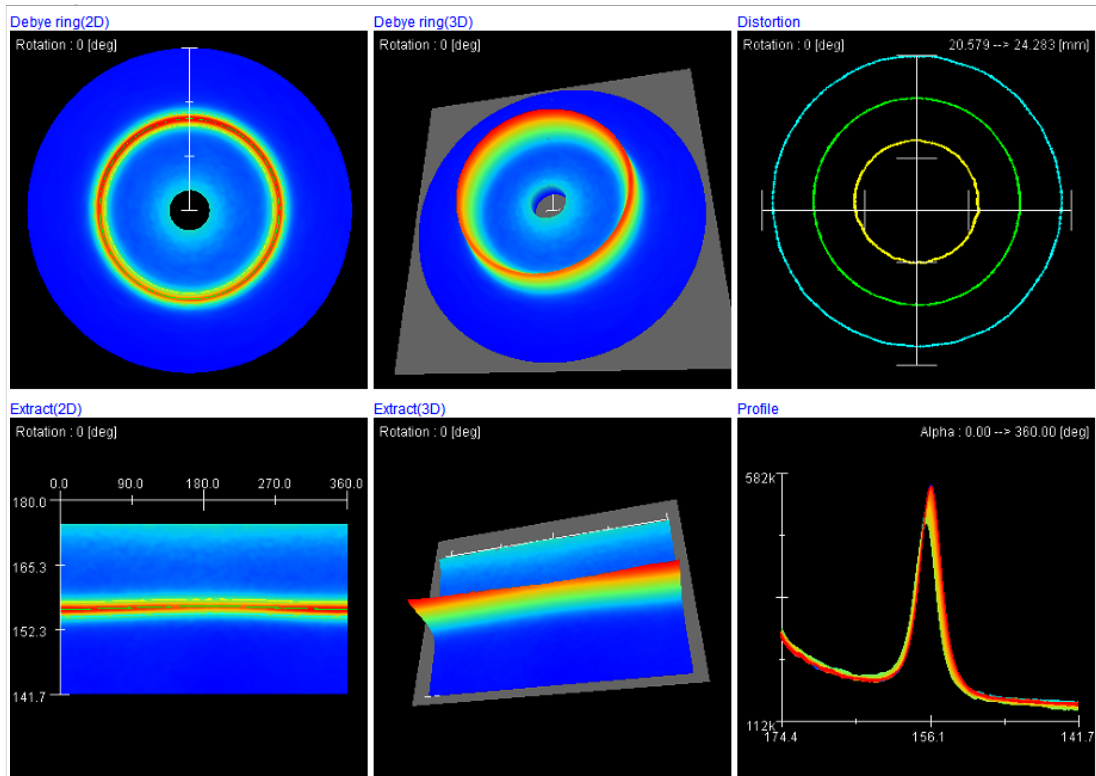


圖 C-19 Y-PWHT 低合金鋼端量測位置距離銲道中心 13 mm，第一量測線。

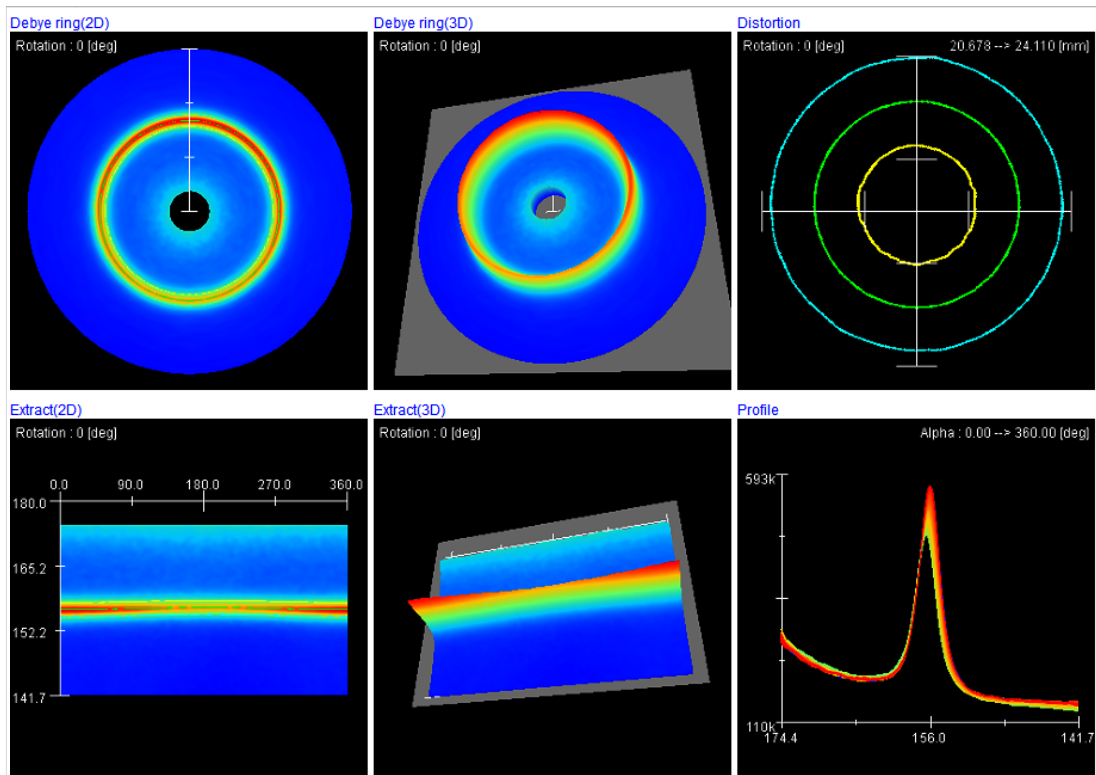


圖 C-20 Y-PWHT 低合金鋼端量測位置距離銲道中心 16 mm，第一量測線。

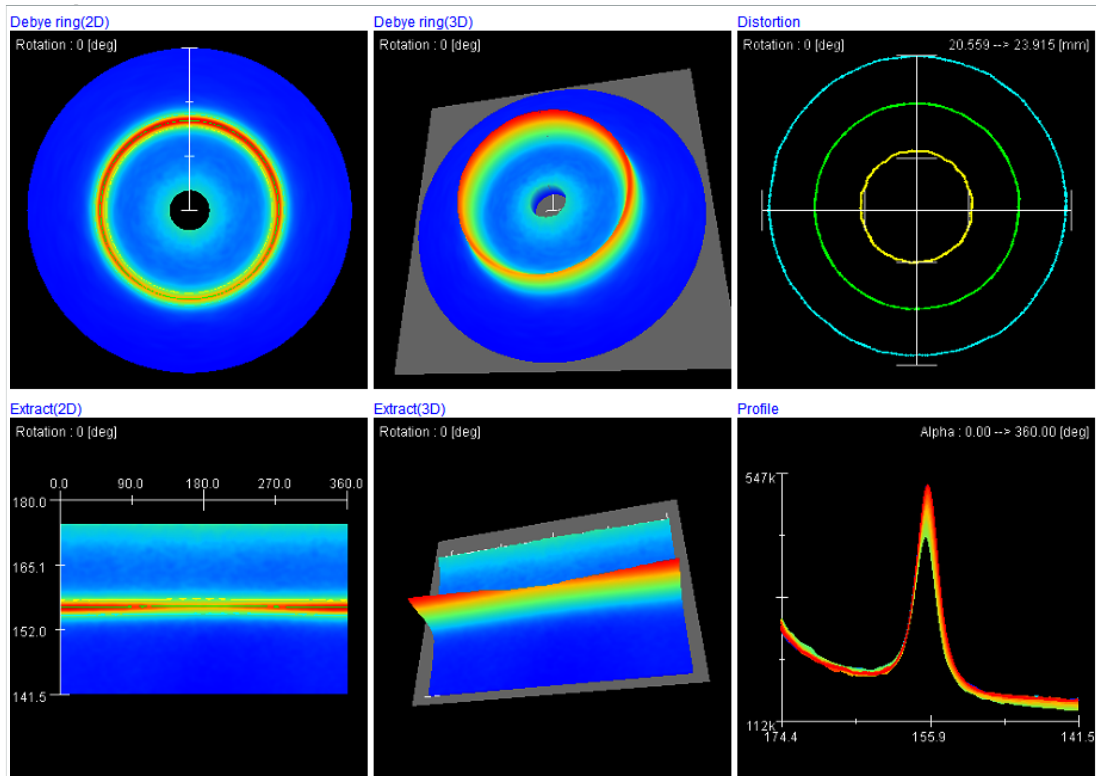


圖 C-21 Y-PWHT 低合金鋼端量測位置距離銲道中心 19 mm，第一量測線。

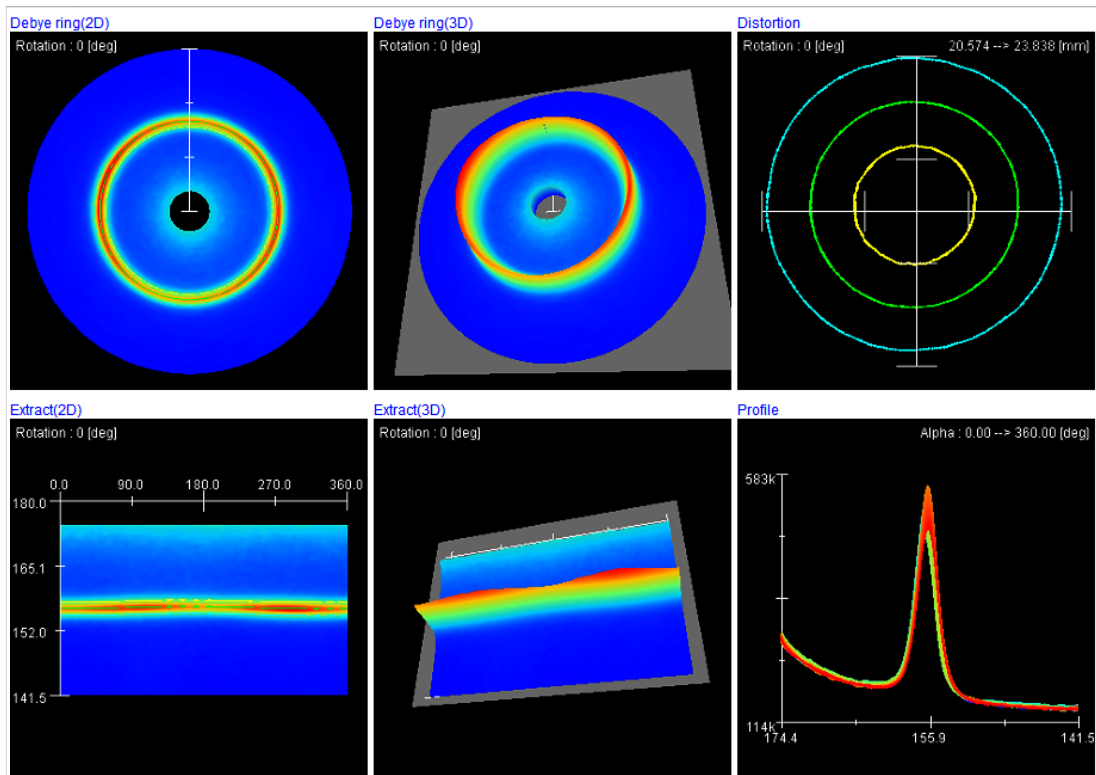


圖 C-22 Y-PWHT 低合金鋼端量測位置距離銲道中心 27 mm，第一量測線。

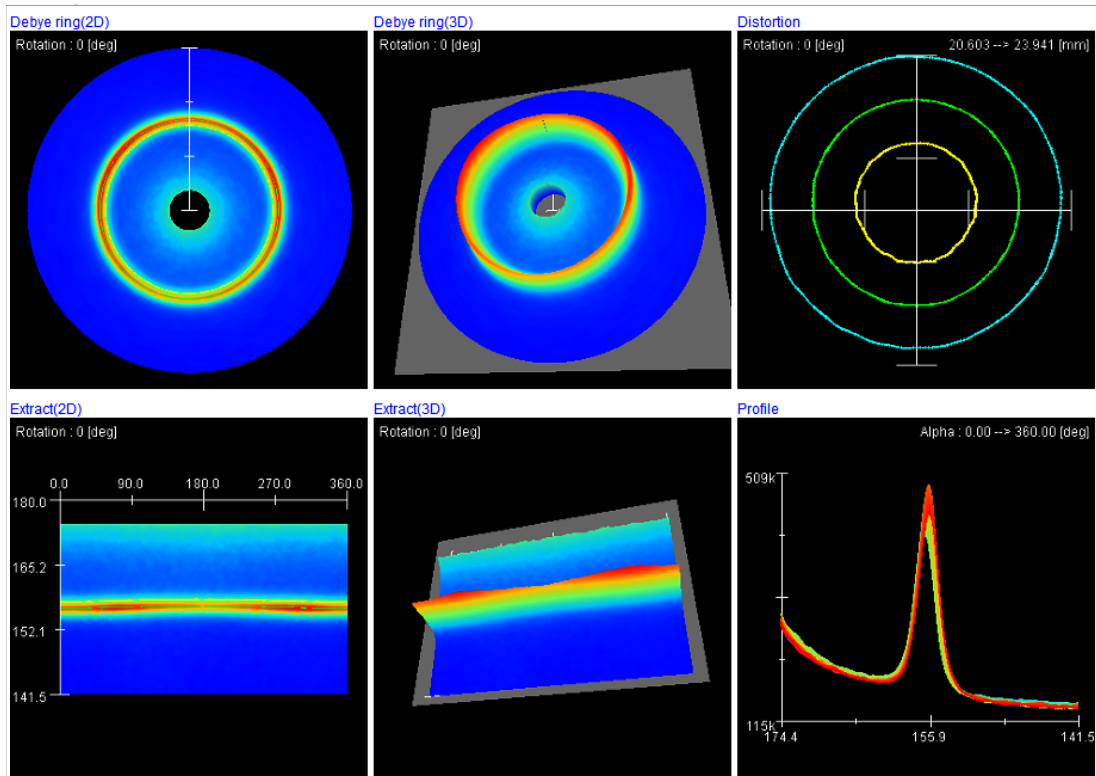


圖 C-23 Y-PWHT 低合金鋼端量測位置距離銲道中心 37 mm，第一量測線。

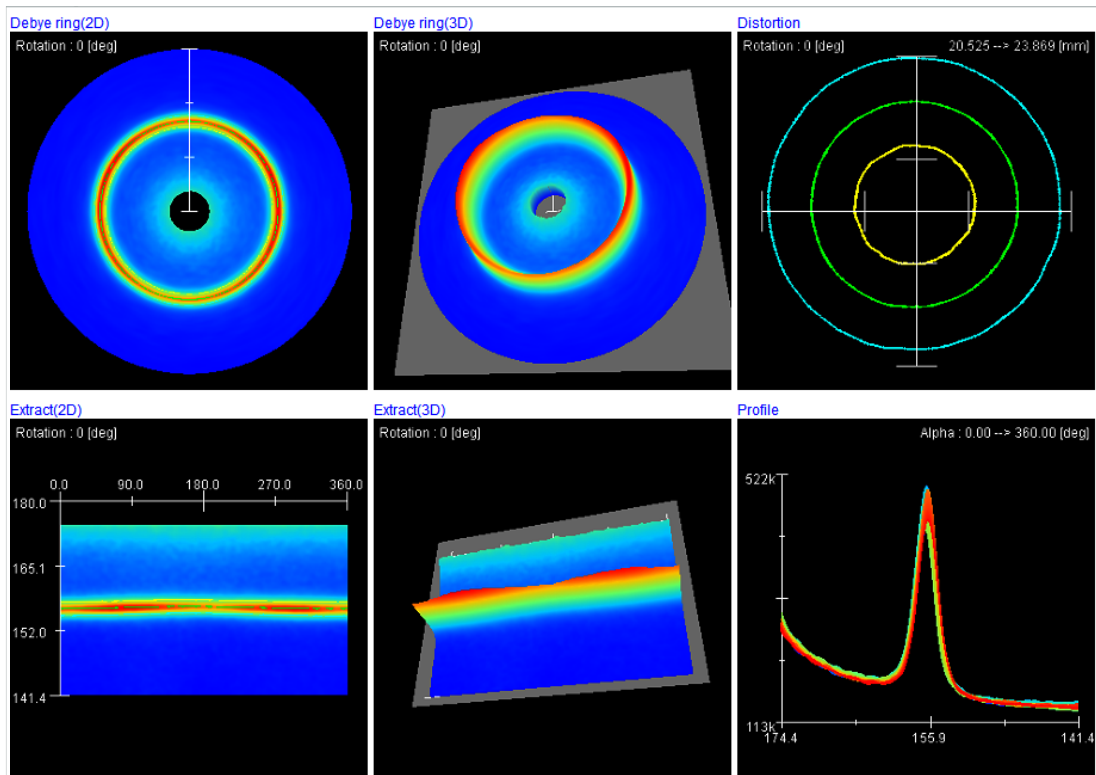


圖 C-24 Y-PWHT 低合金鋼端量測位置距離銲道中心 42 mm，第一量測線。

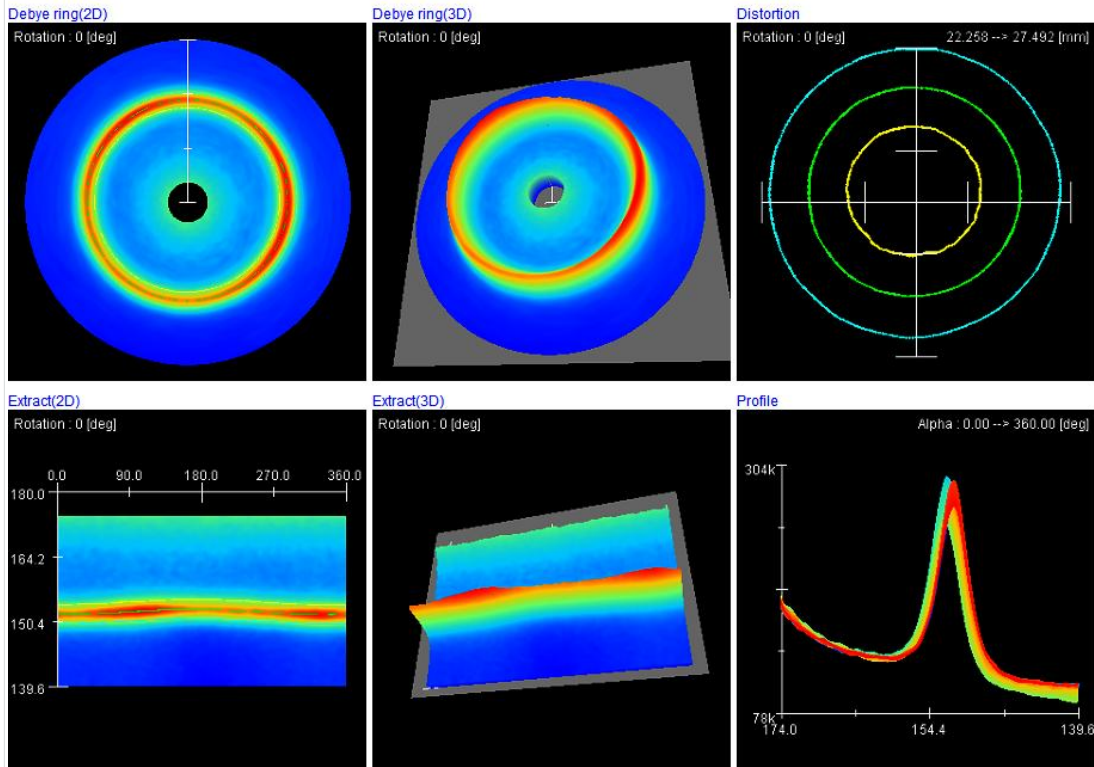


圖 C-25 Y-PWHT 不銹鋼端量測位置距離鐳道中心 2 mm，第一量測線。

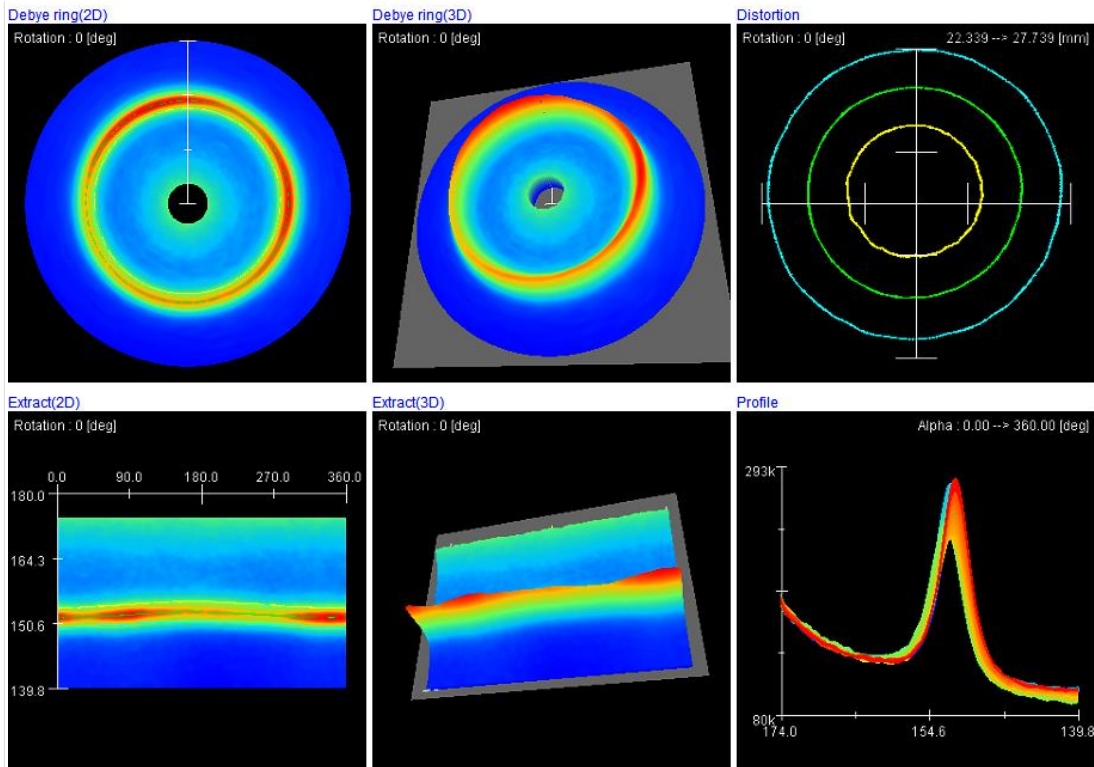


圖 C-26 Y-PWHT 不銹鋼端量測位置距離鐳道中心 5 mm，第一量測線。

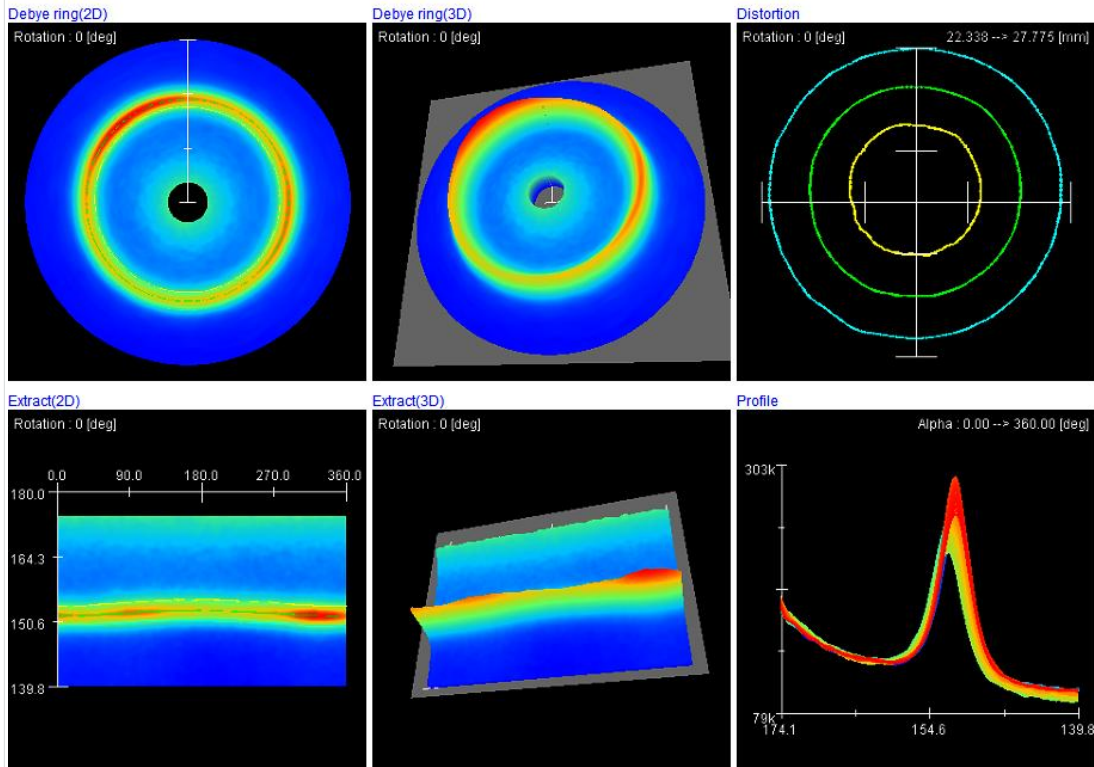


圖 C-27 Y-PWHT 不銹鋼端量測位置距離鐳道中心 8 mm，第一量測線。

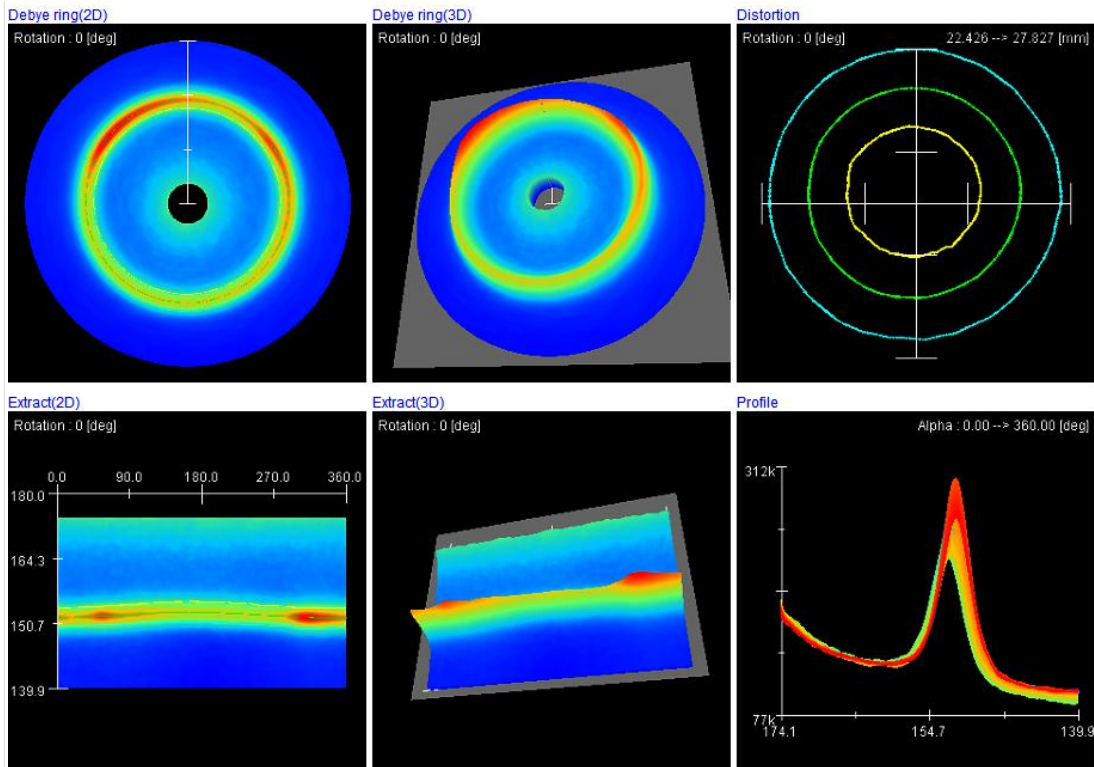


圖 C-28 Y-PWHT 不銹鋼端量測位置距離鐳道中心 11 mm，第一量測線。

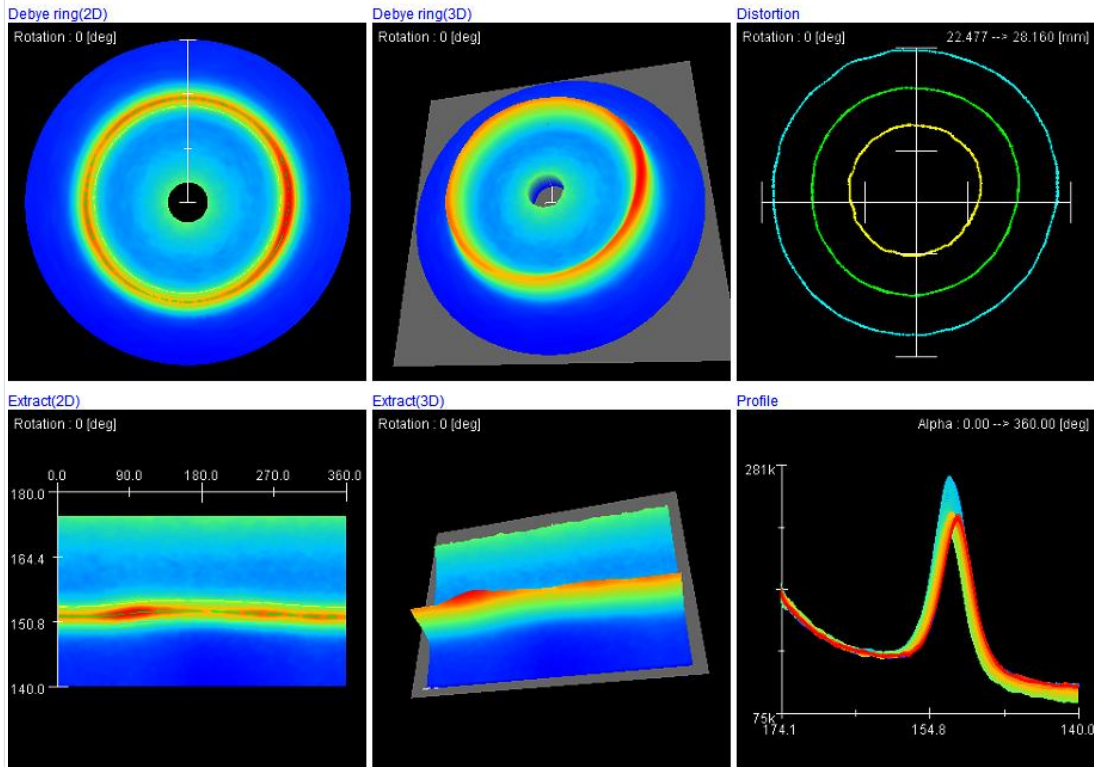


圖 C-29 Y-PWHT 不銹鋼端量測位置距離銲道中心 13 mm，第一量測線。

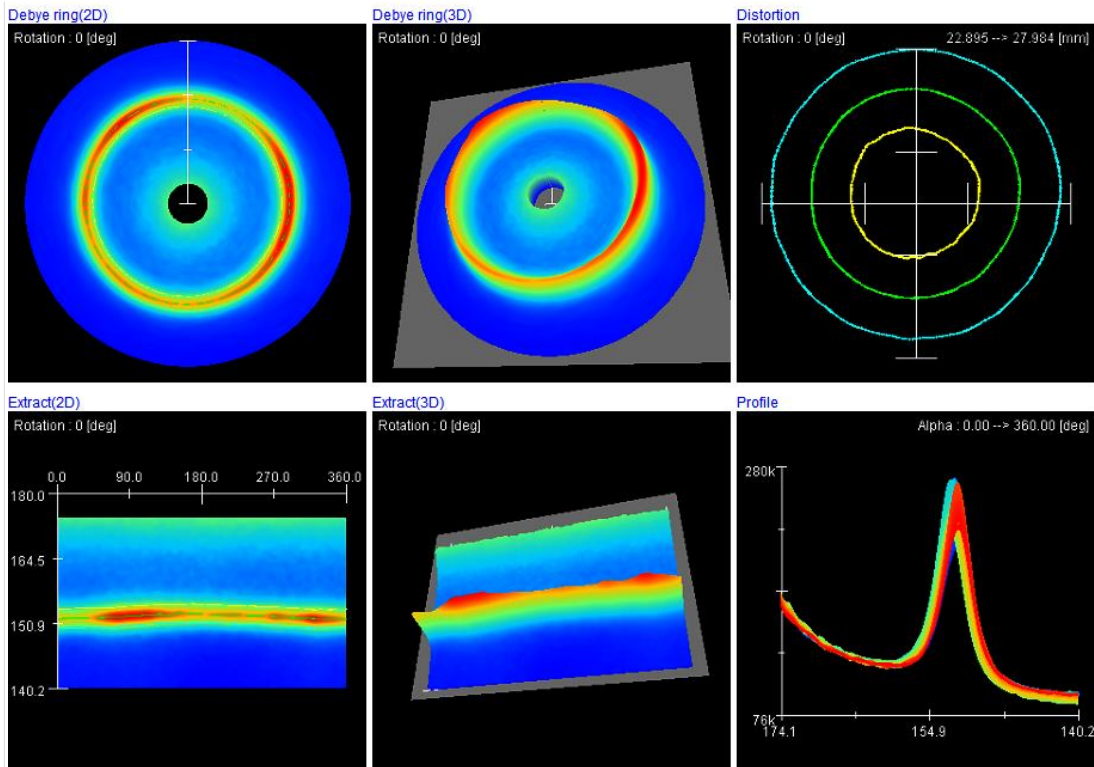


圖 C-30 Y-PWHT 不銹鋼端量測位置距離銲道中心 22 mm，第一量測線。

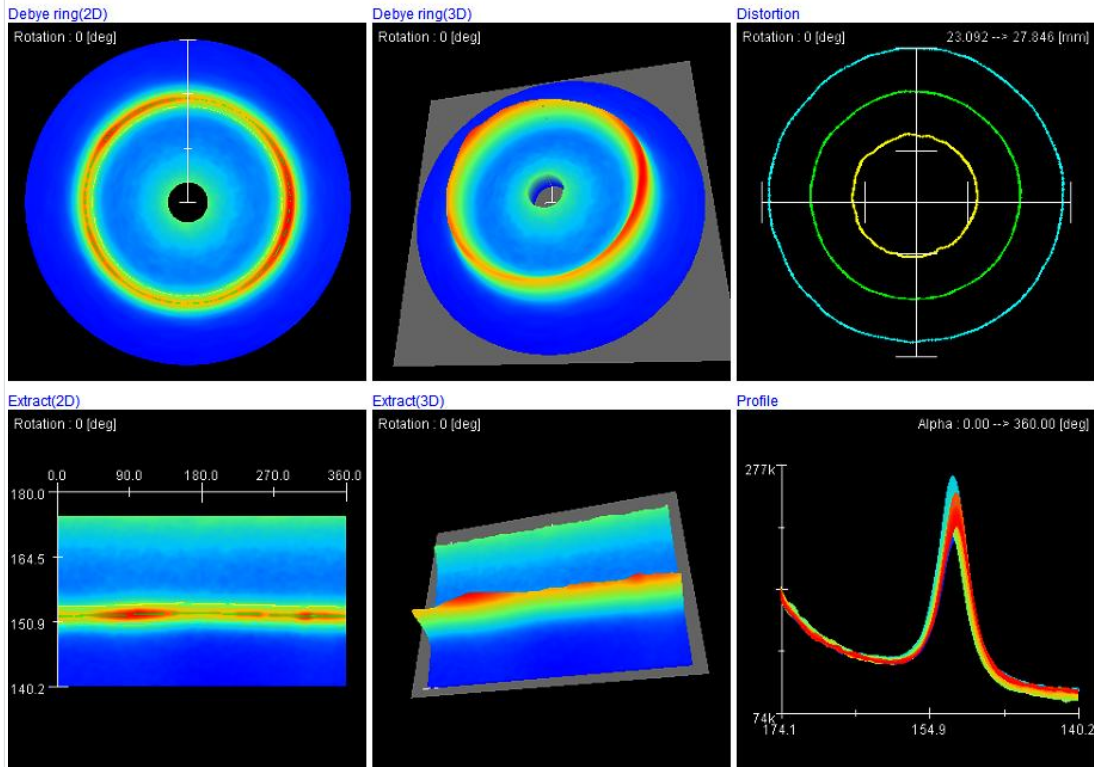


圖 C-31 Y-PWHT 不銹鋼端量測位置距離銲道中心 32 mm，第一量測線。

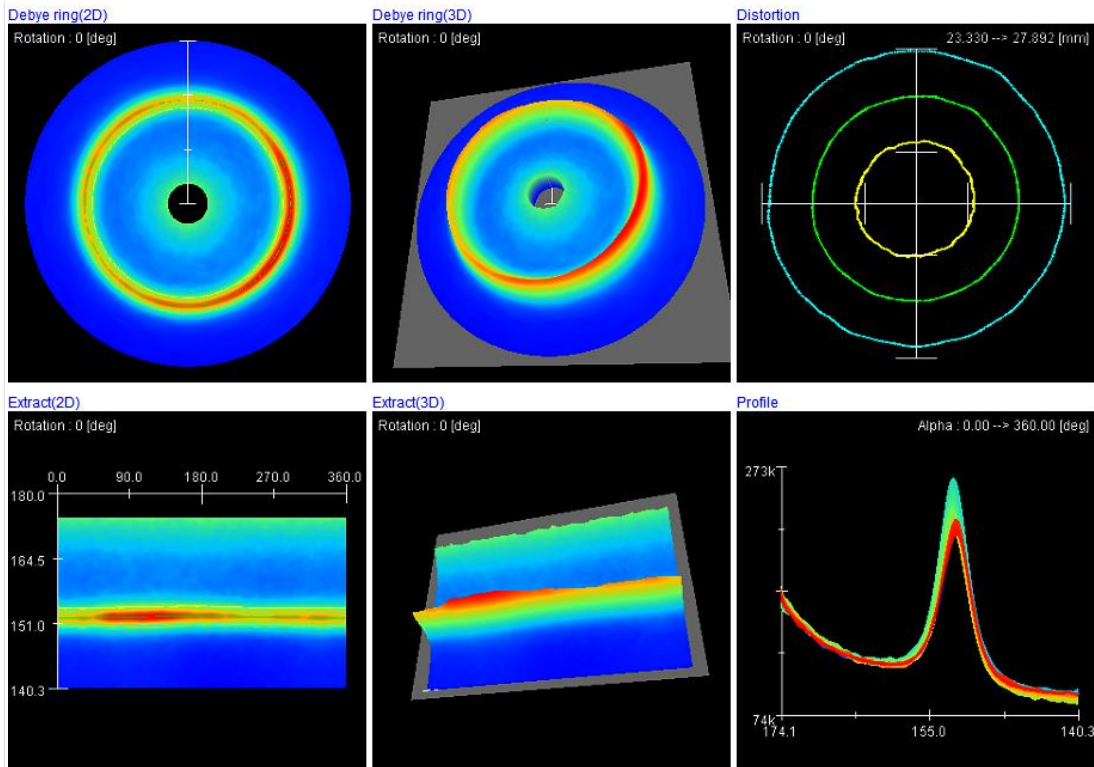


圖 C-32 Y-PWHT 不銹鋼端量測位置距離銲道中心 42 mm，第一量測線。

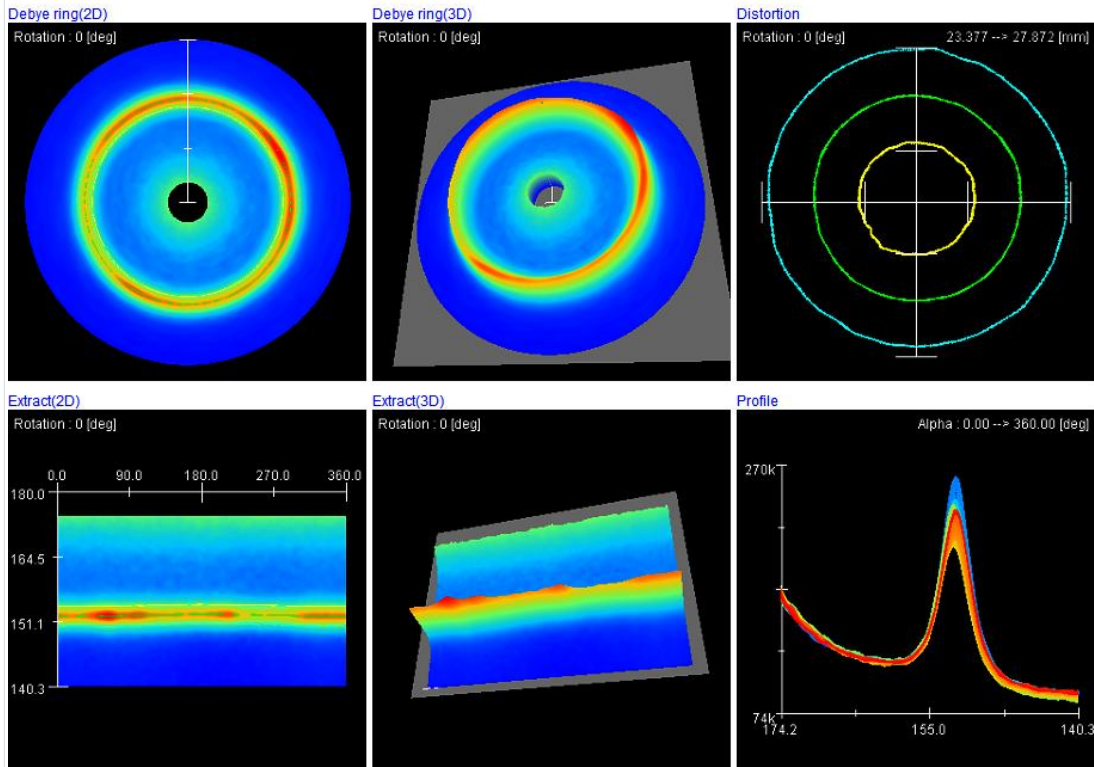


圖 C-33 Y-PWHT 不銹鋼端量測位置距離銲道中心 52 mm，第一量測線。

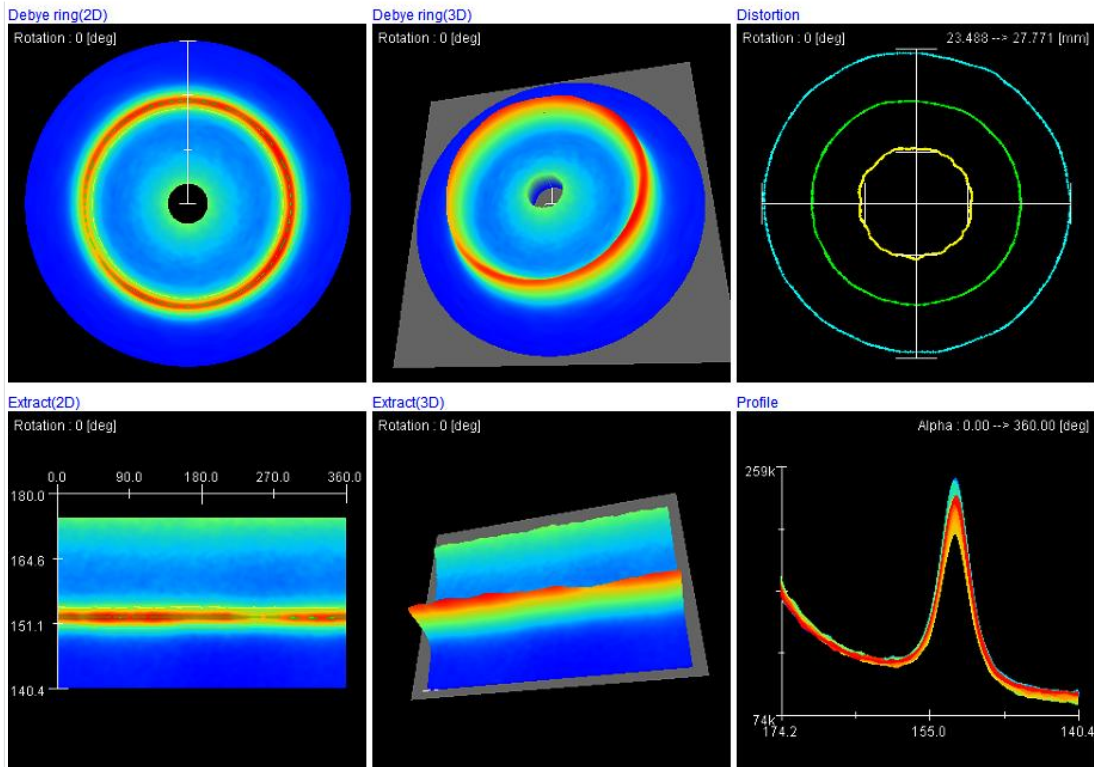


圖 C-34 Y-PWHT 不銹鋼端量測位置距離銲道中心 62 mm，第一量測線。

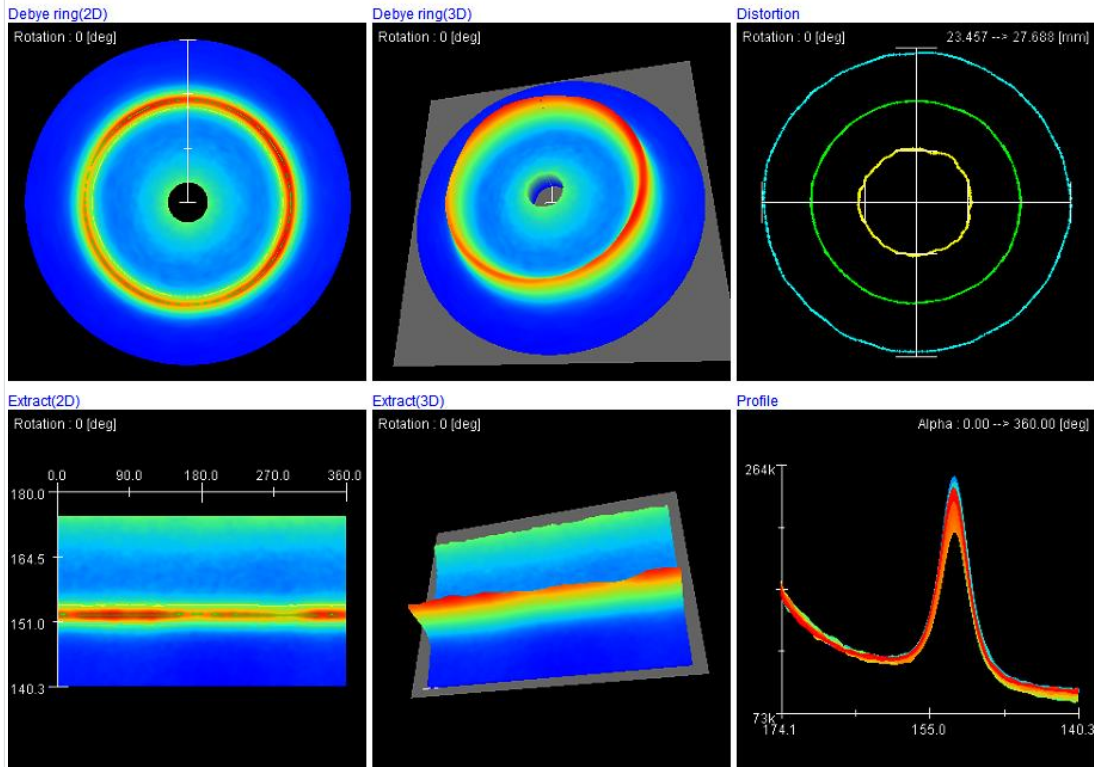


圖 C-35 Y-PWHT 不銹鋼端量測位置距離鐳道中心 72 mm，第一量測線。

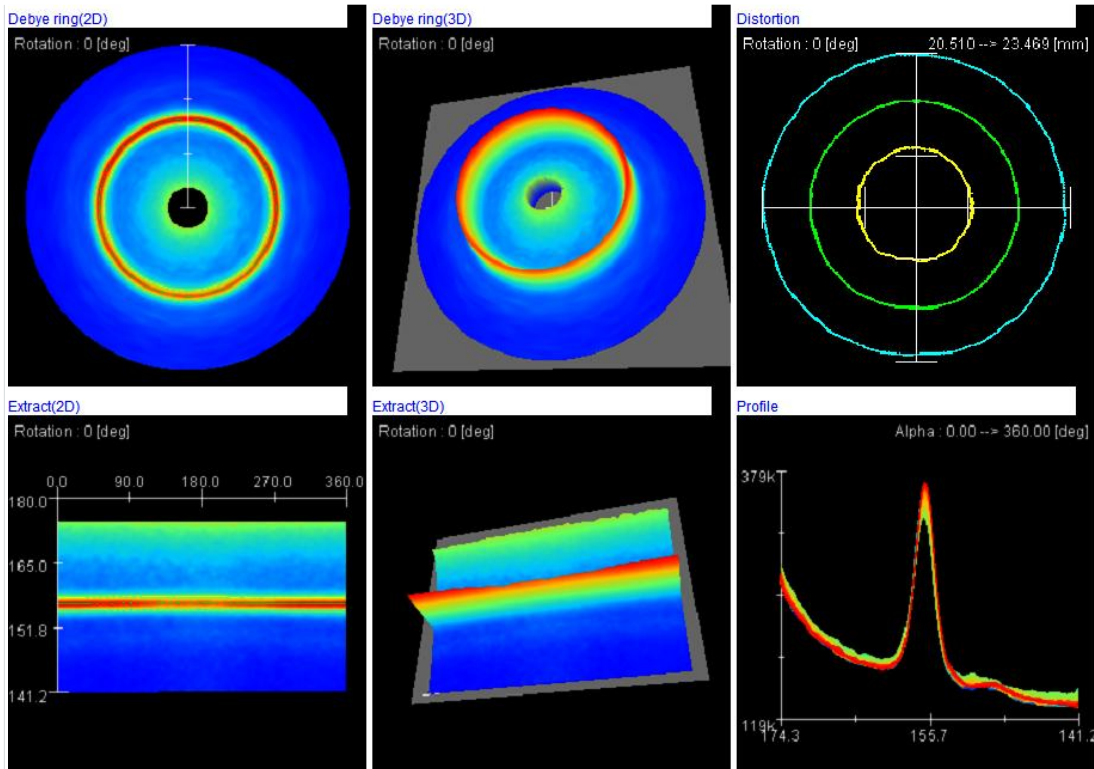


圖 C-36 Y-PWHT-52M 低合金鋼端量測位置-7 mm，第一量測線。

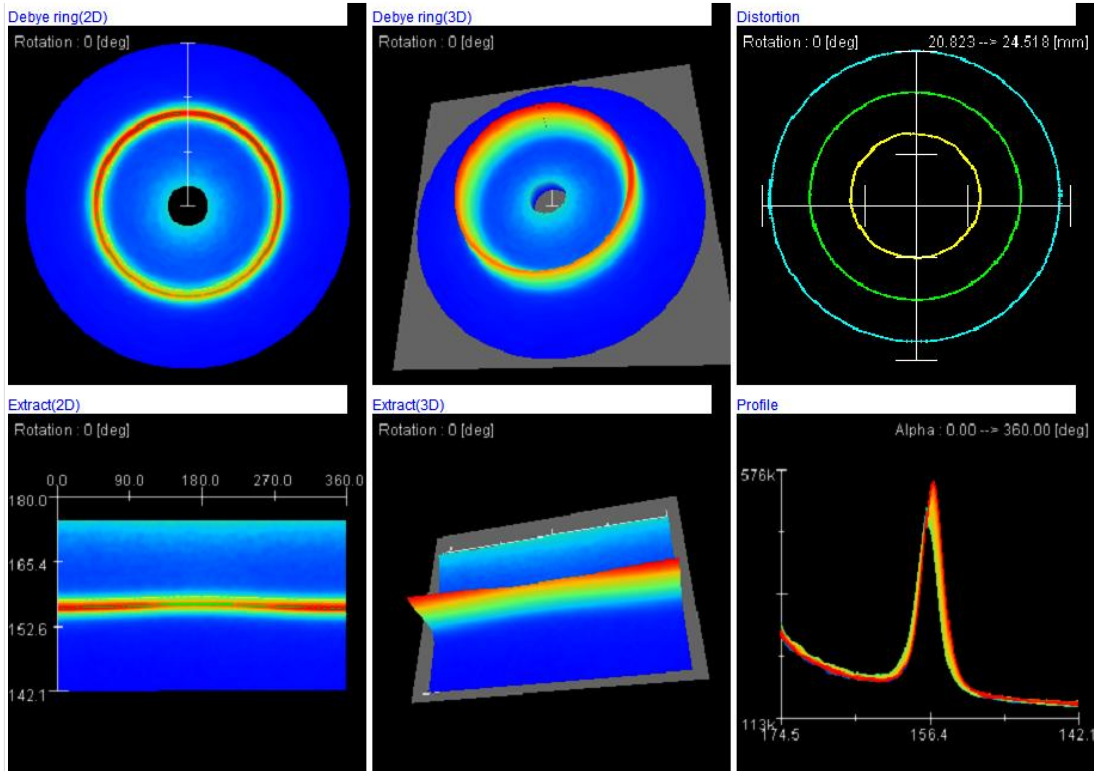


圖 C-37 Y-PWHT-52M 低合金鋼端量測位置-10 mm，第一量測線。

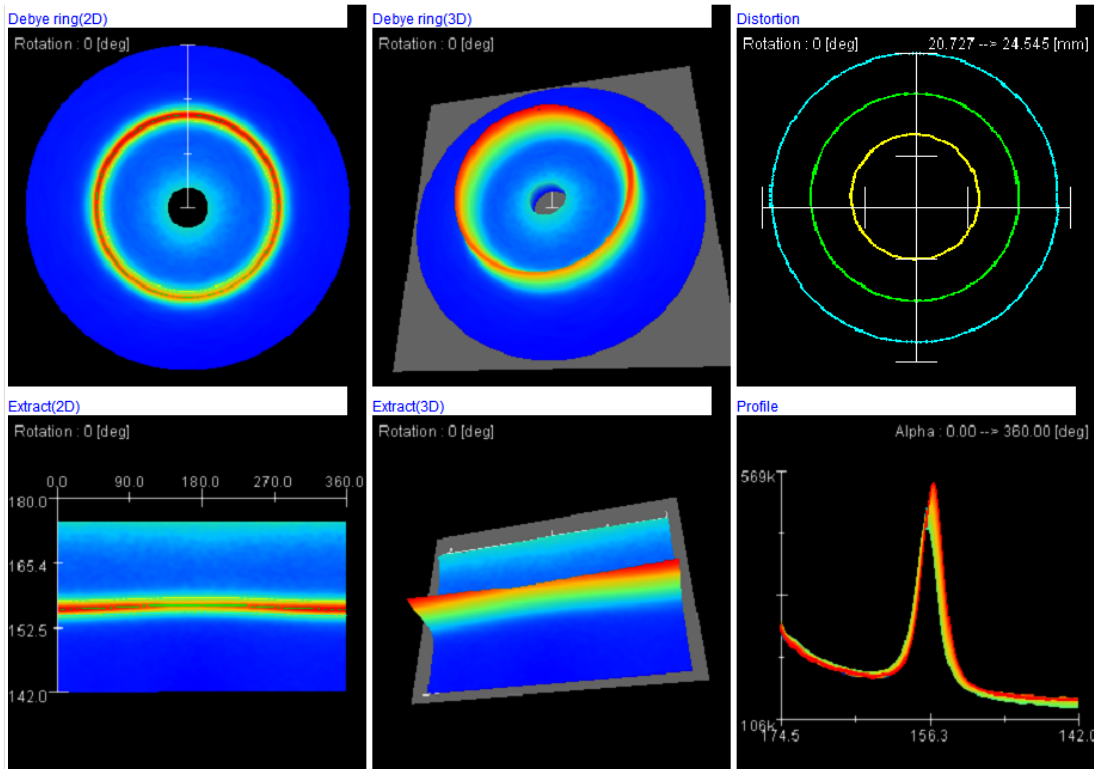


圖 C-38 Y-PWHT-52M 低合金鋼端量測位置-13 mm，第一量測線。

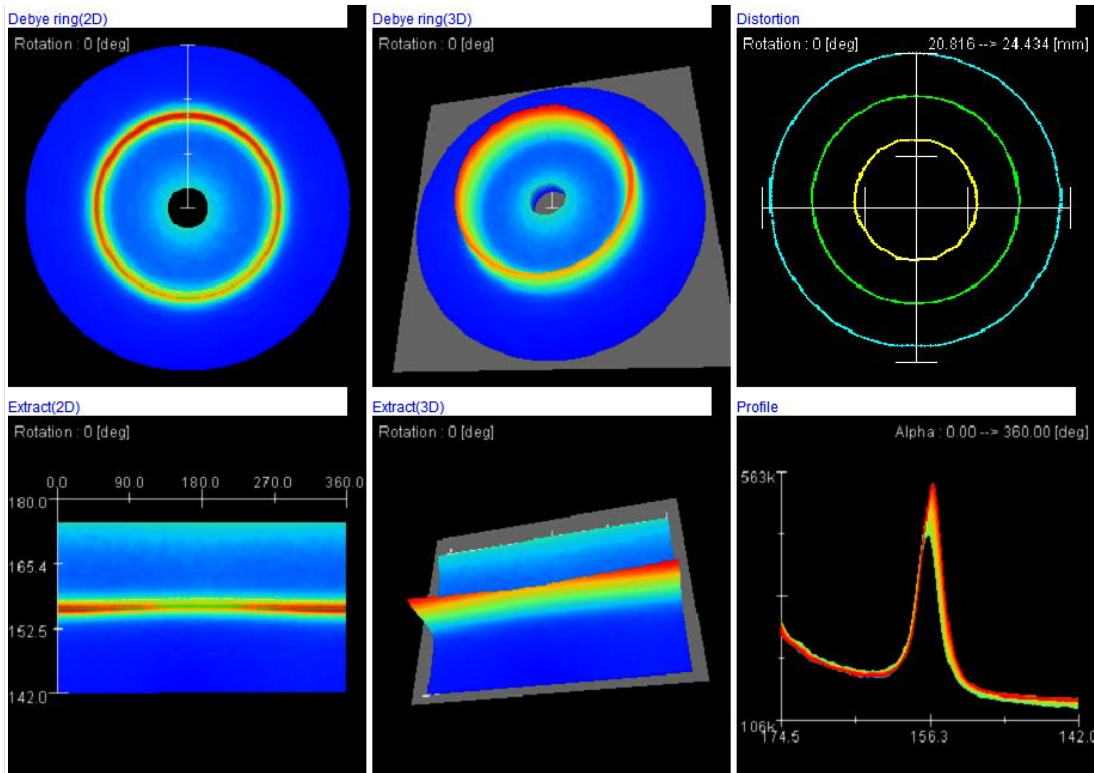


圖 C-39 Y-PWHT-52M 低合金鋼端量測位置-16 mm，第一量測線。

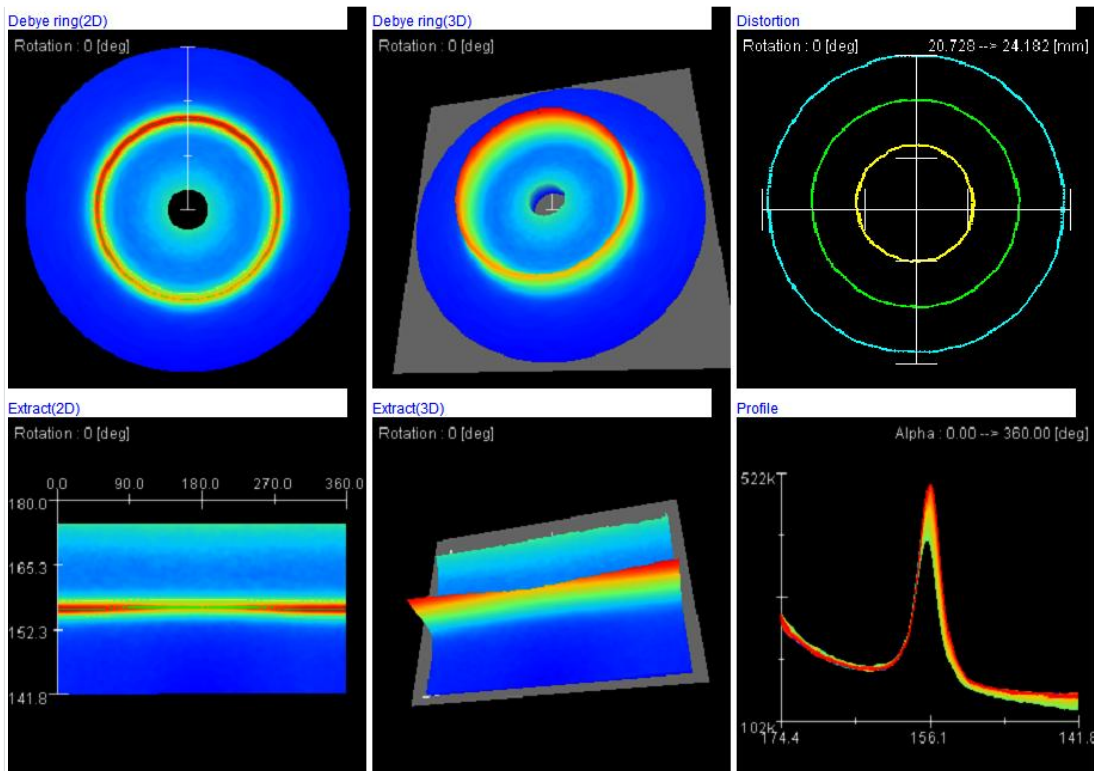


圖 C-40 Y-PWHT-52M 低合金鋼端量測位置-19 mm，第一量測線。

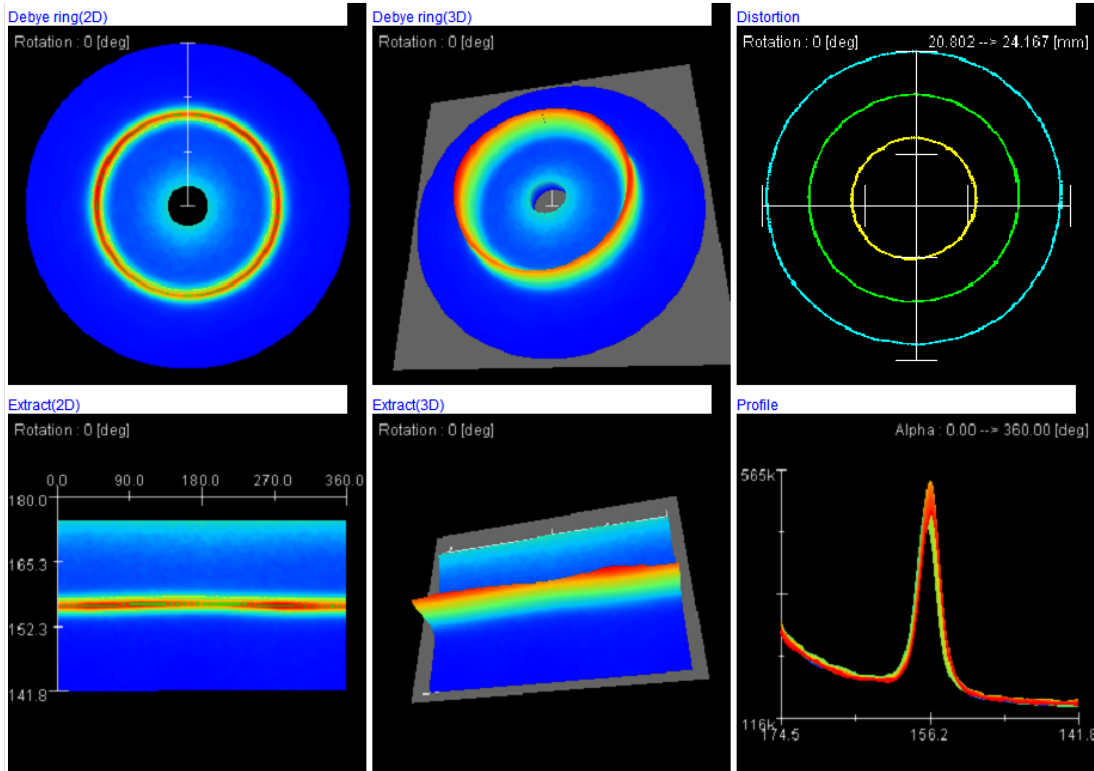


圖 C-41 Y-PWHT-52M 低合金鋼端量測位置-27 mm，第一量測線。

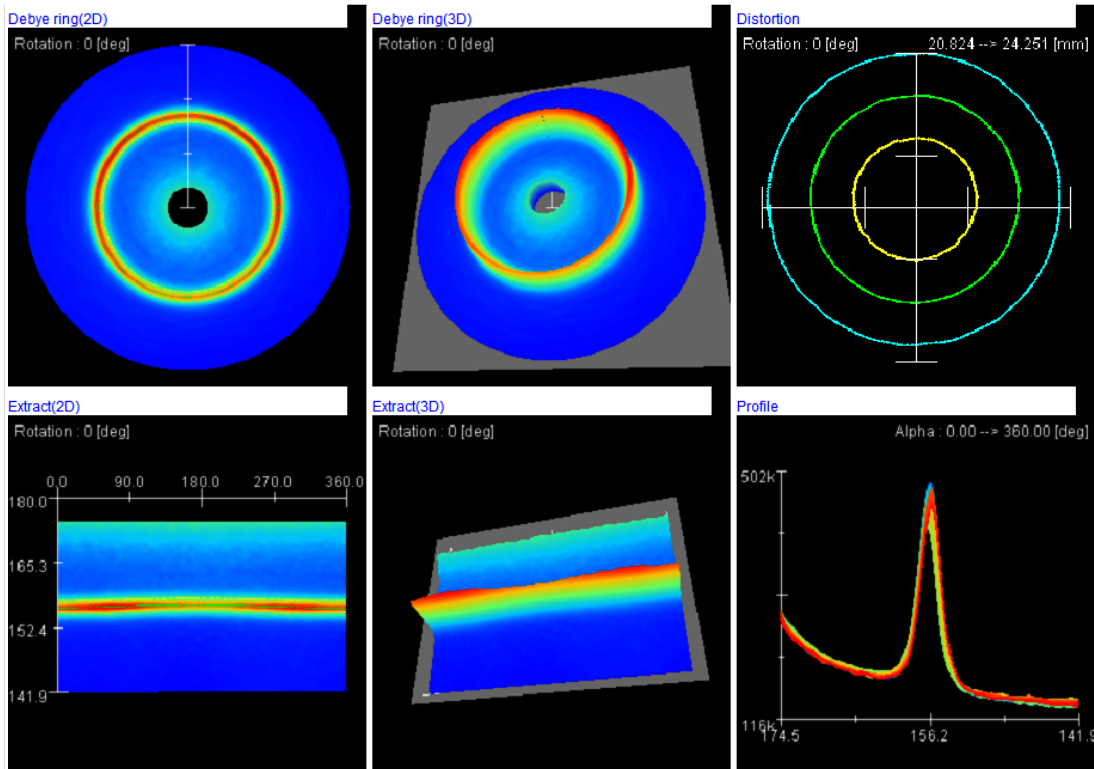


圖 C-42 Y-PWHT-52M 低合金鋼端量測位置-37 mm，第一量測線。

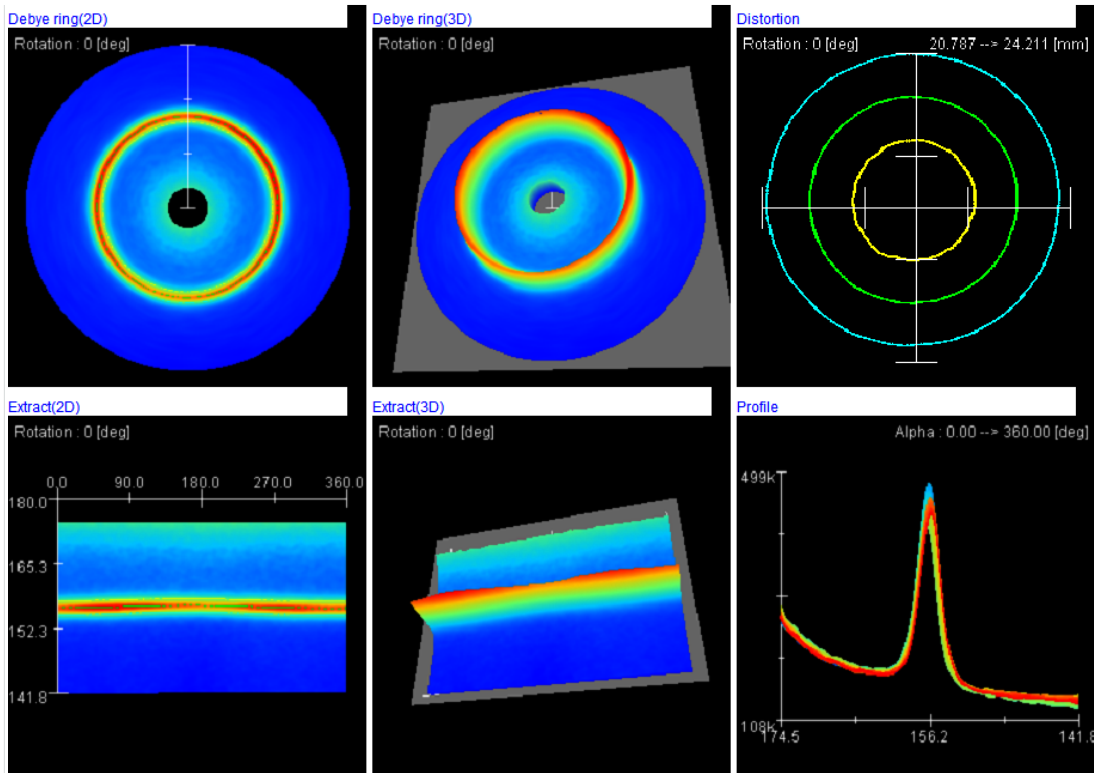


圖 C-43 Y-PWHT-52M 低合金鋼端量測位置-42 mm，第一量測線。

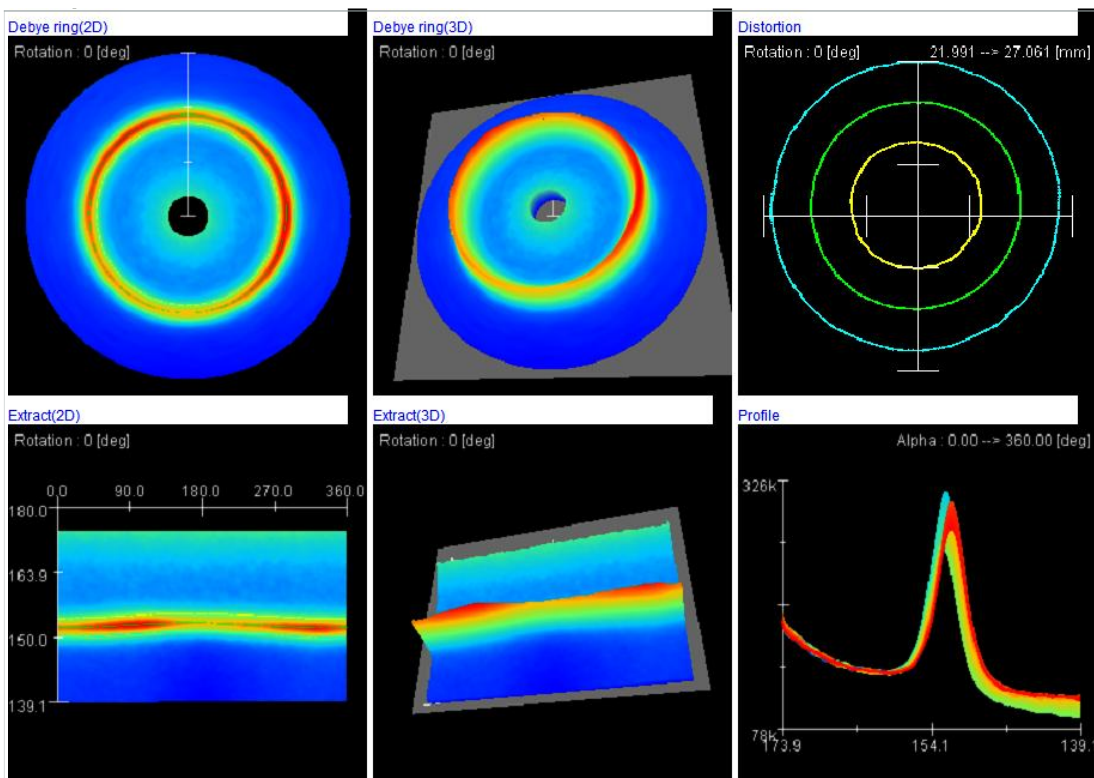


圖 C-44 Y-PWHT-52M 不銹鋼端量測位置 2mm，第一量測線。

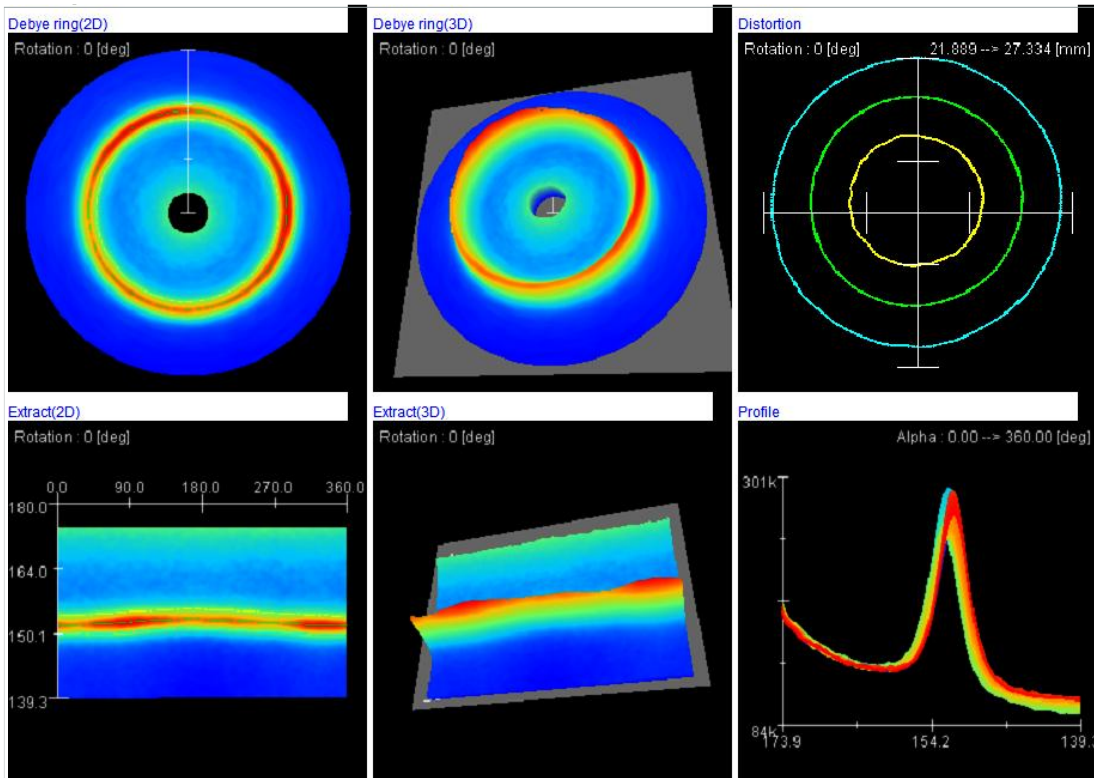


圖 C-45 Y-PWHT-52M 不銹鋼端量測位置 5 mm，第一量測線。

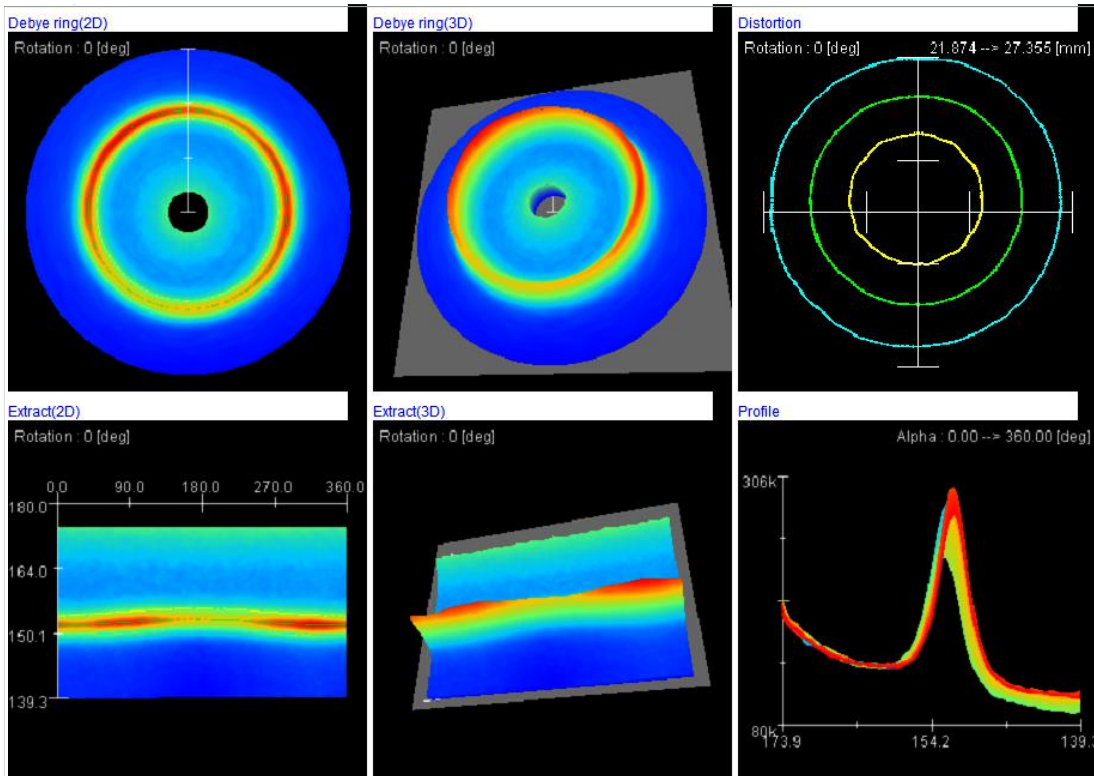


圖 C-46 Y-PWHT-52M 不銹鋼端量測位置 8mm，第一量測線。

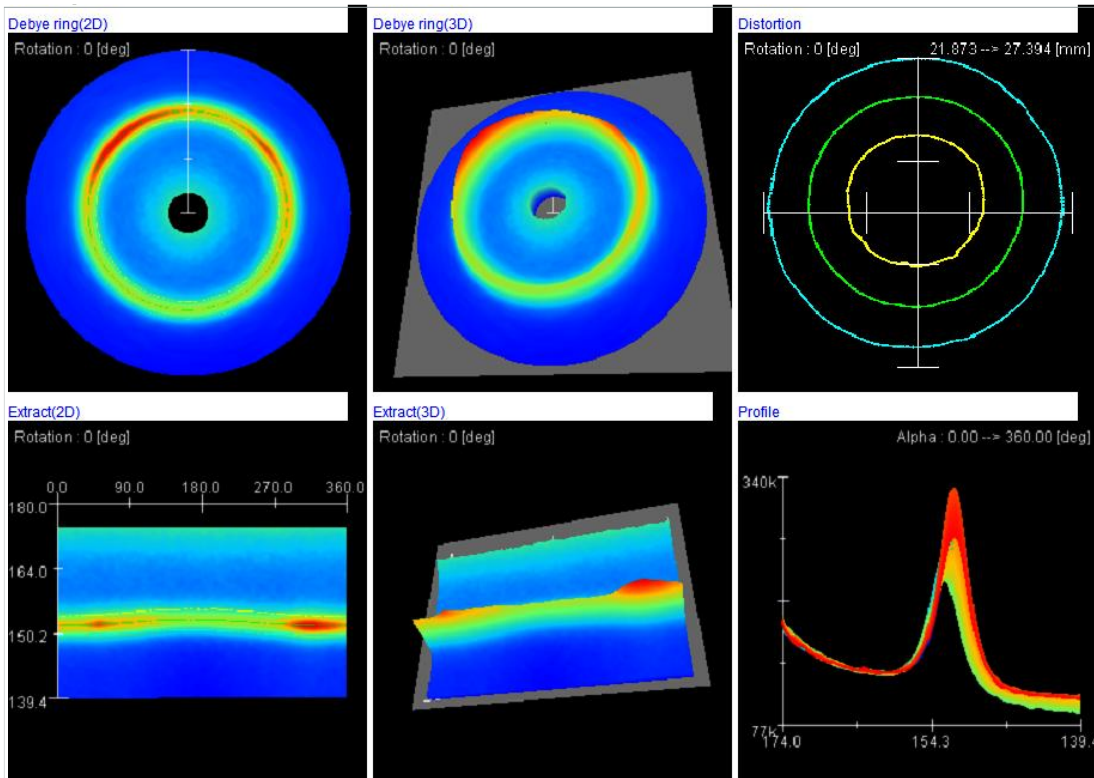


圖 C-47 Y-PWHT-52M 不銹鋼端量測位置 11 mm，第一量測線。

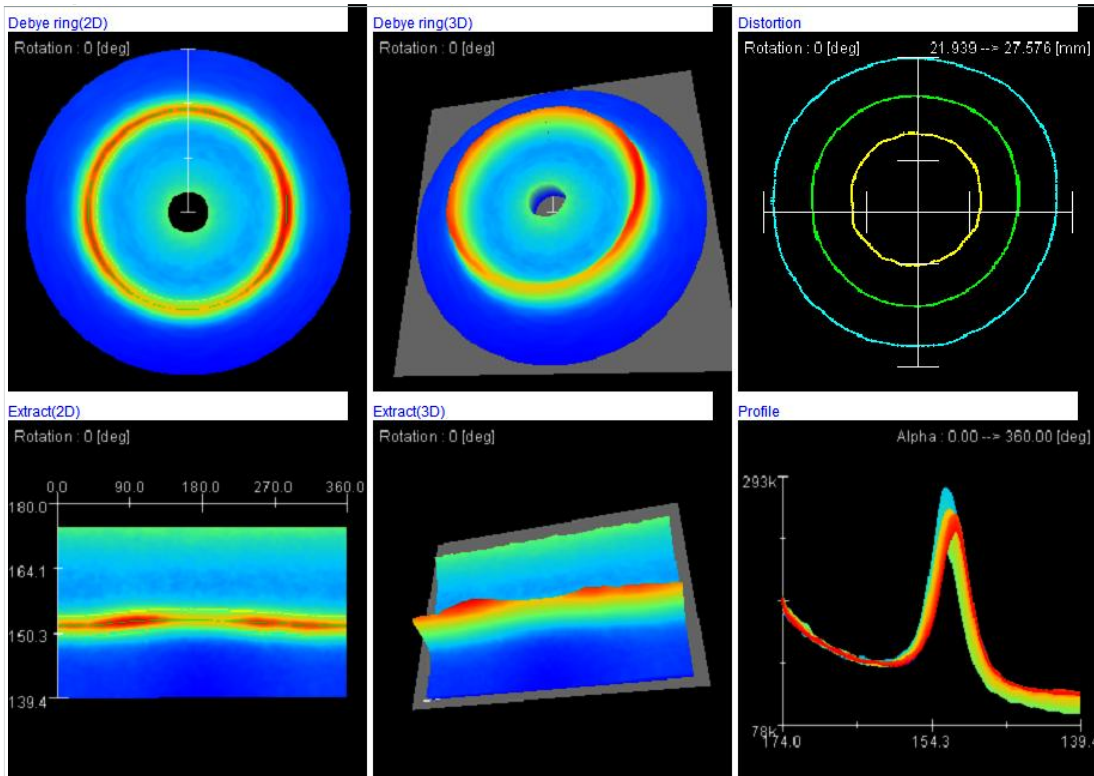


圖 C-48 Y-PWHT-52M 不銹鋼端量測位置 13 mm，第一量測線。

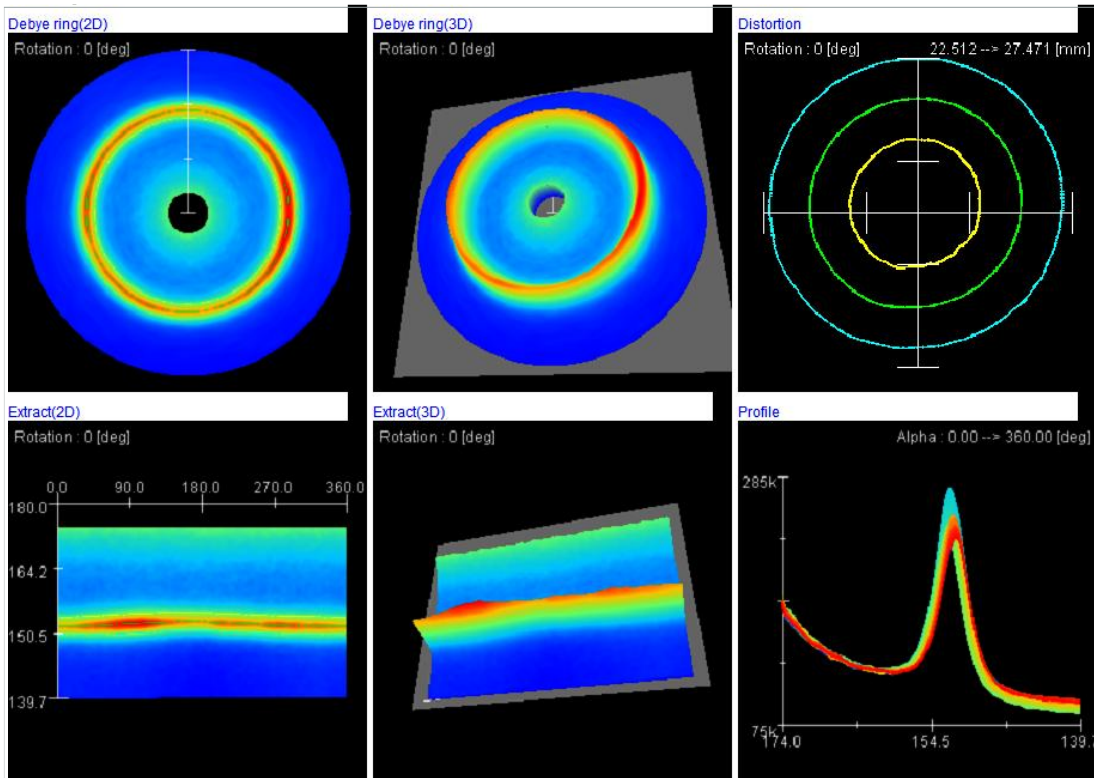


圖 C-49 Y-PWHT-52M 不銹鋼端量測位置 22mm，第一量測線。

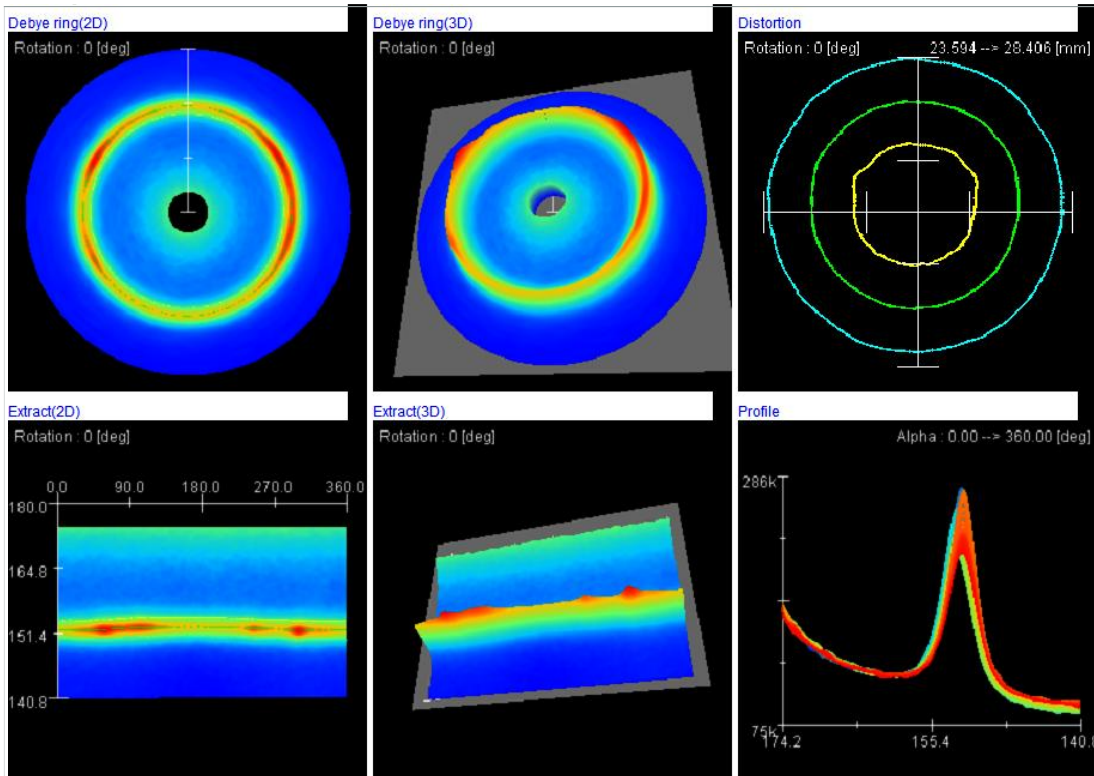


圖 C-50 Y-PWHT-52M 不銹鋼端量測位置 32 mm，第一量測線。

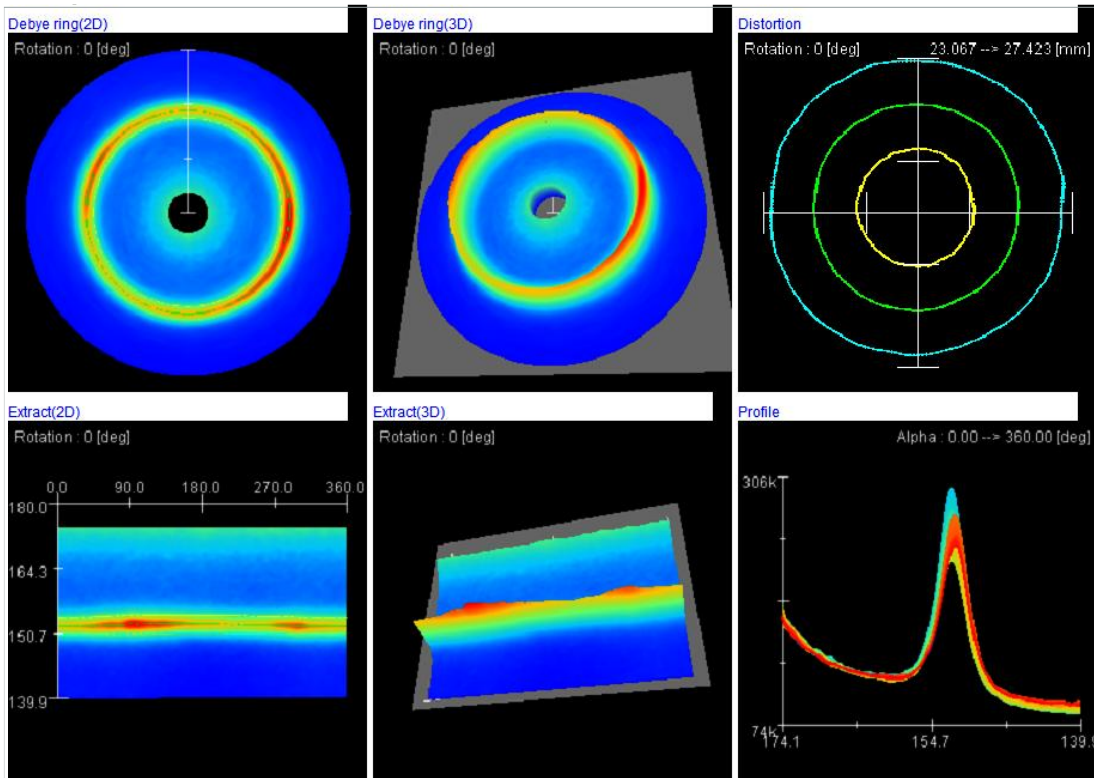


圖 C- 51 Y-PWHT-52M 不銹鋼端量測位置 42 mm，第一量測線。

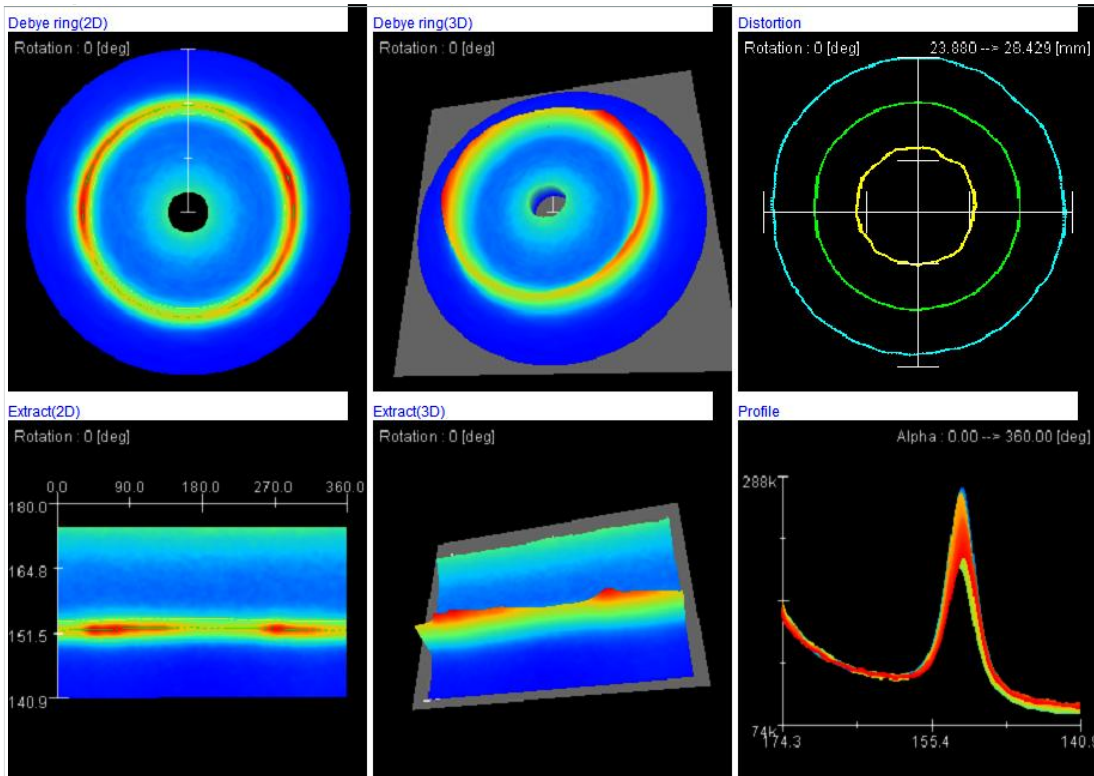


圖 C- 52 Y-PWHT-52M 不銹鋼端量測位置 52 mm，第一量測線。

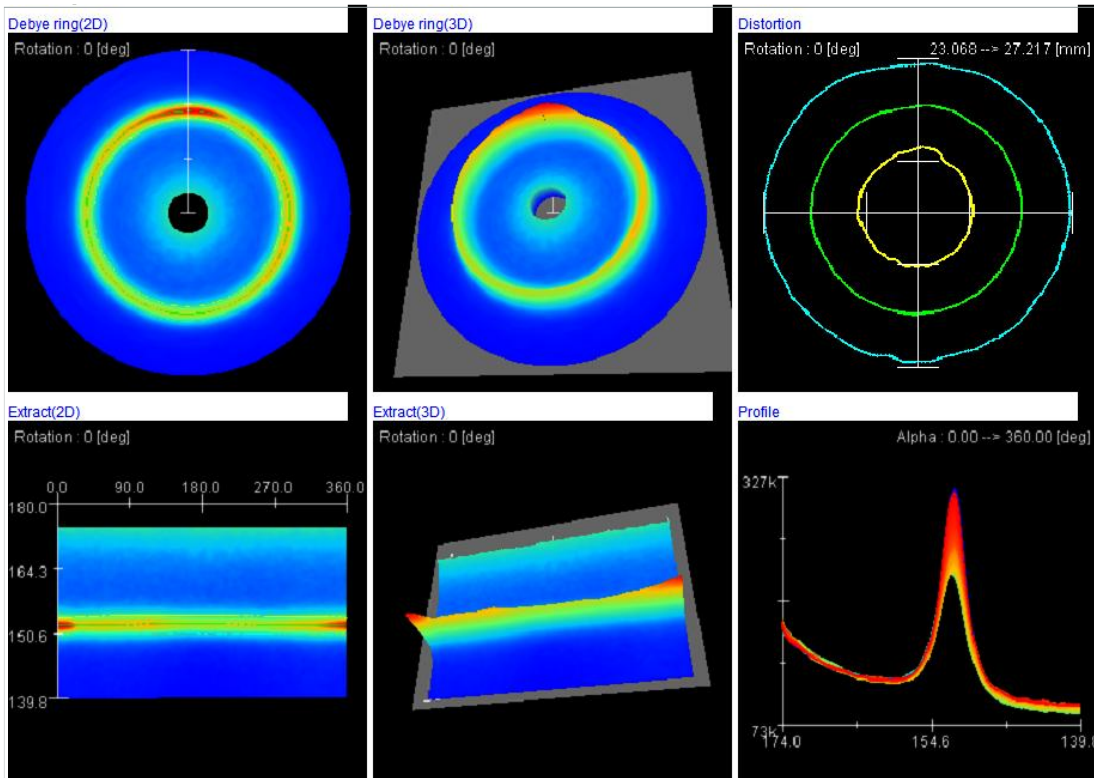


圖 C-53 Y-PWHT-52M 不銹鋼端量測位置 62 mm，第一量測線。

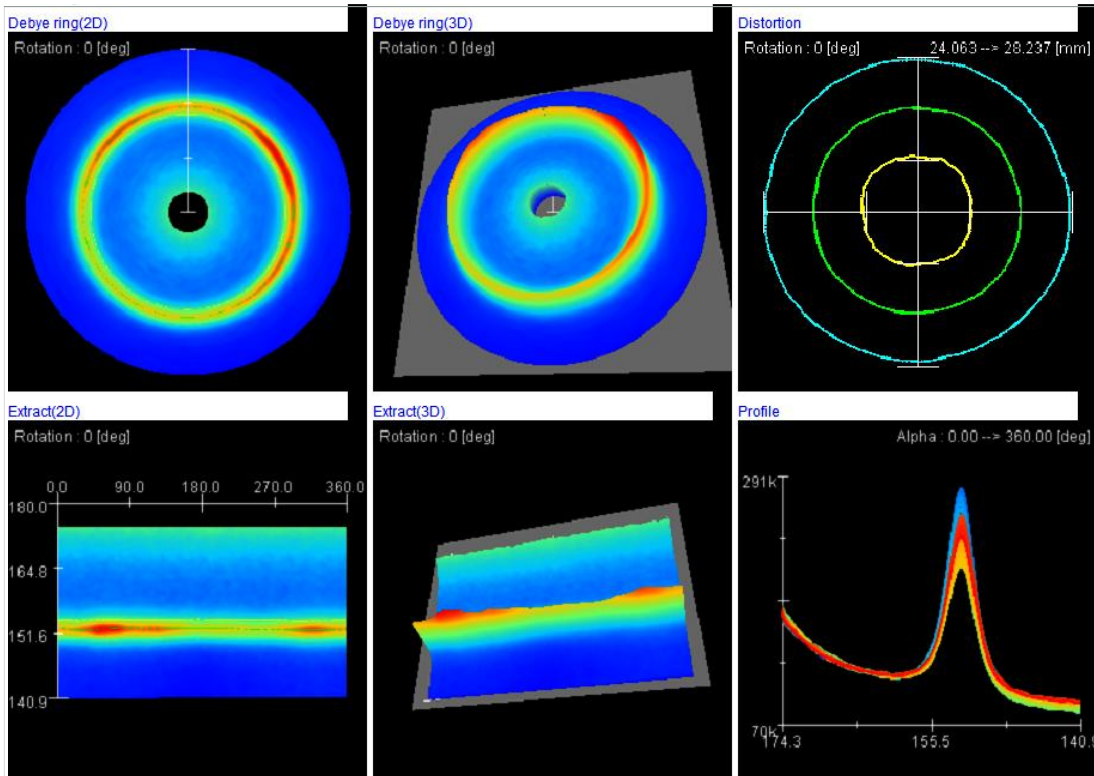


圖 C-54 Y-PWHT-52M 不銹鋼端量測位置 72 mm，第一量測線。

附錄 D、陣列式超音波量測

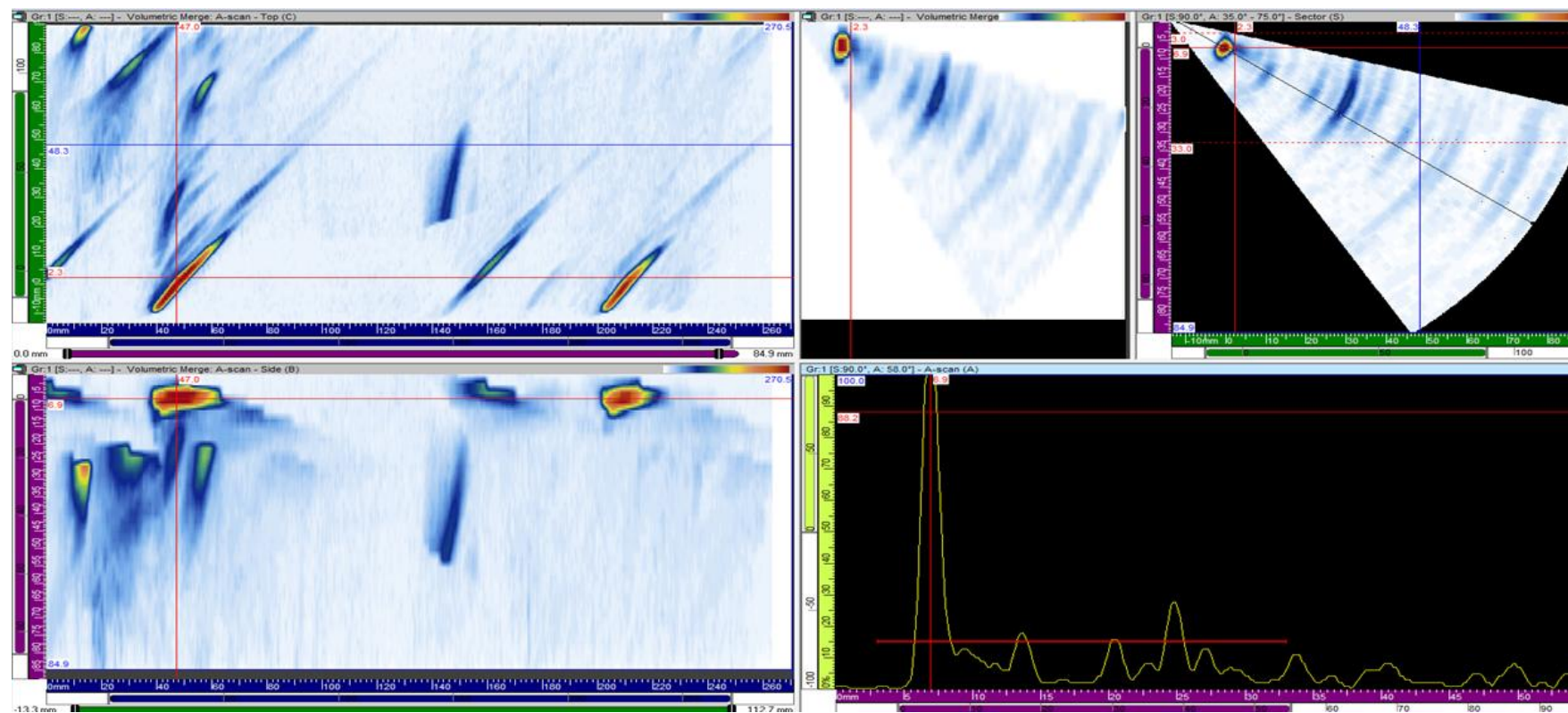


圖 D-1 508 端掃之 1st SDH 的 B scan、S scan、C scan、A scan 以及 D scan。

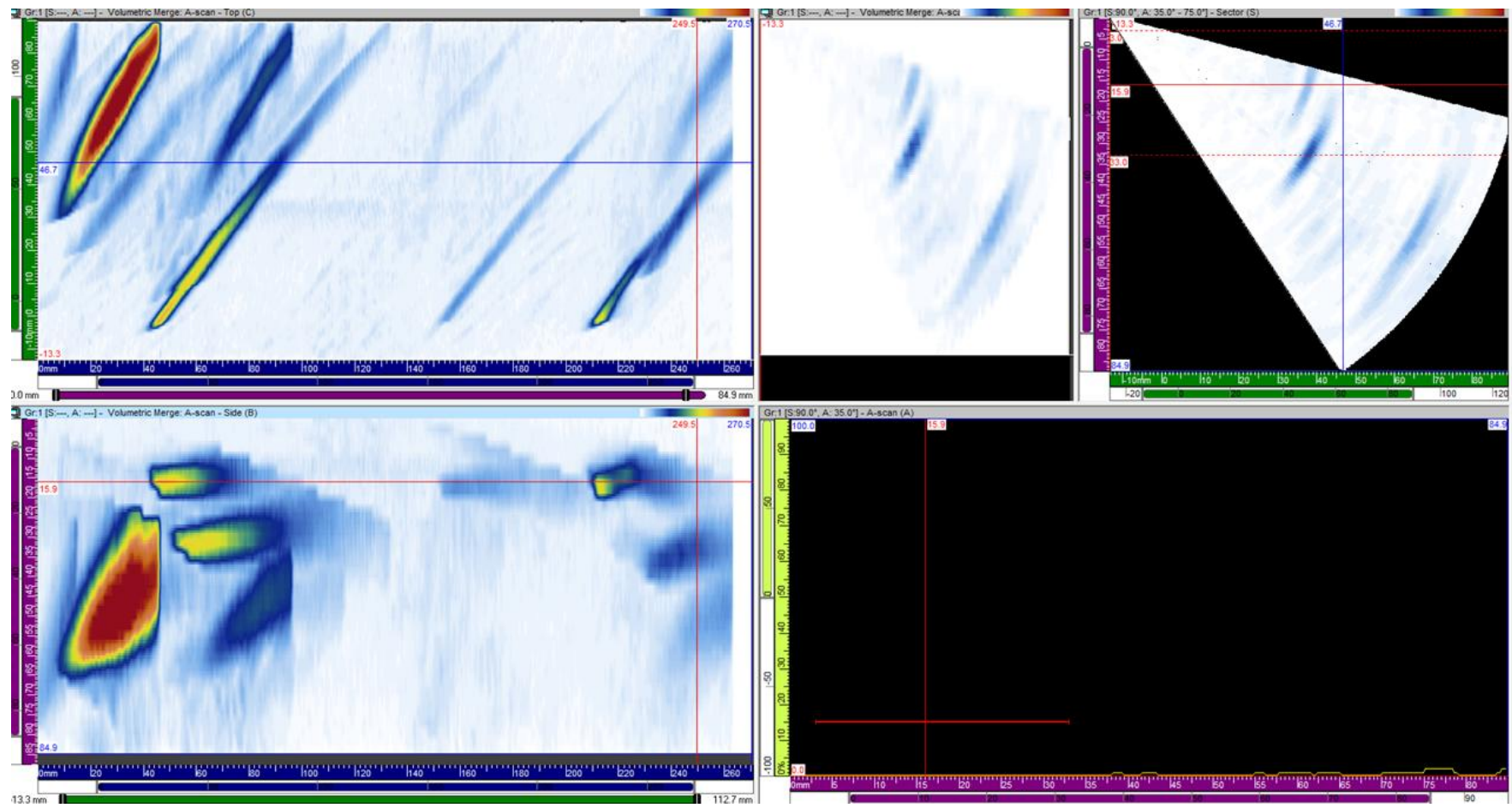


圖 D-2 508 端掃之 2nd SDH 的 B scan、S scan、C scan、A scan 以及 D scan。

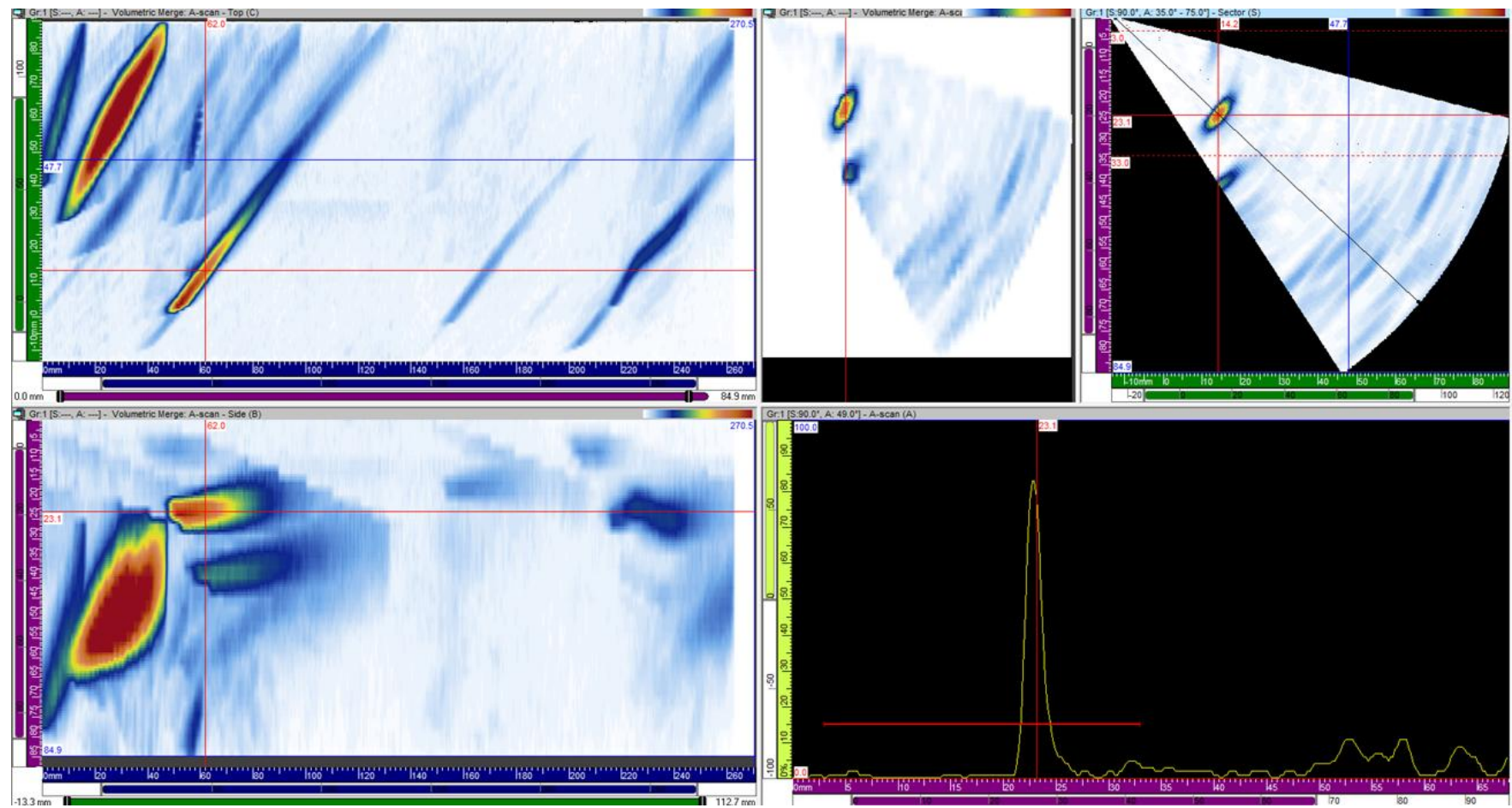


圖 D-3 508 端掃之 3rd SDH 的 B scan、S scan、C scan、A scan 以及 D scan。

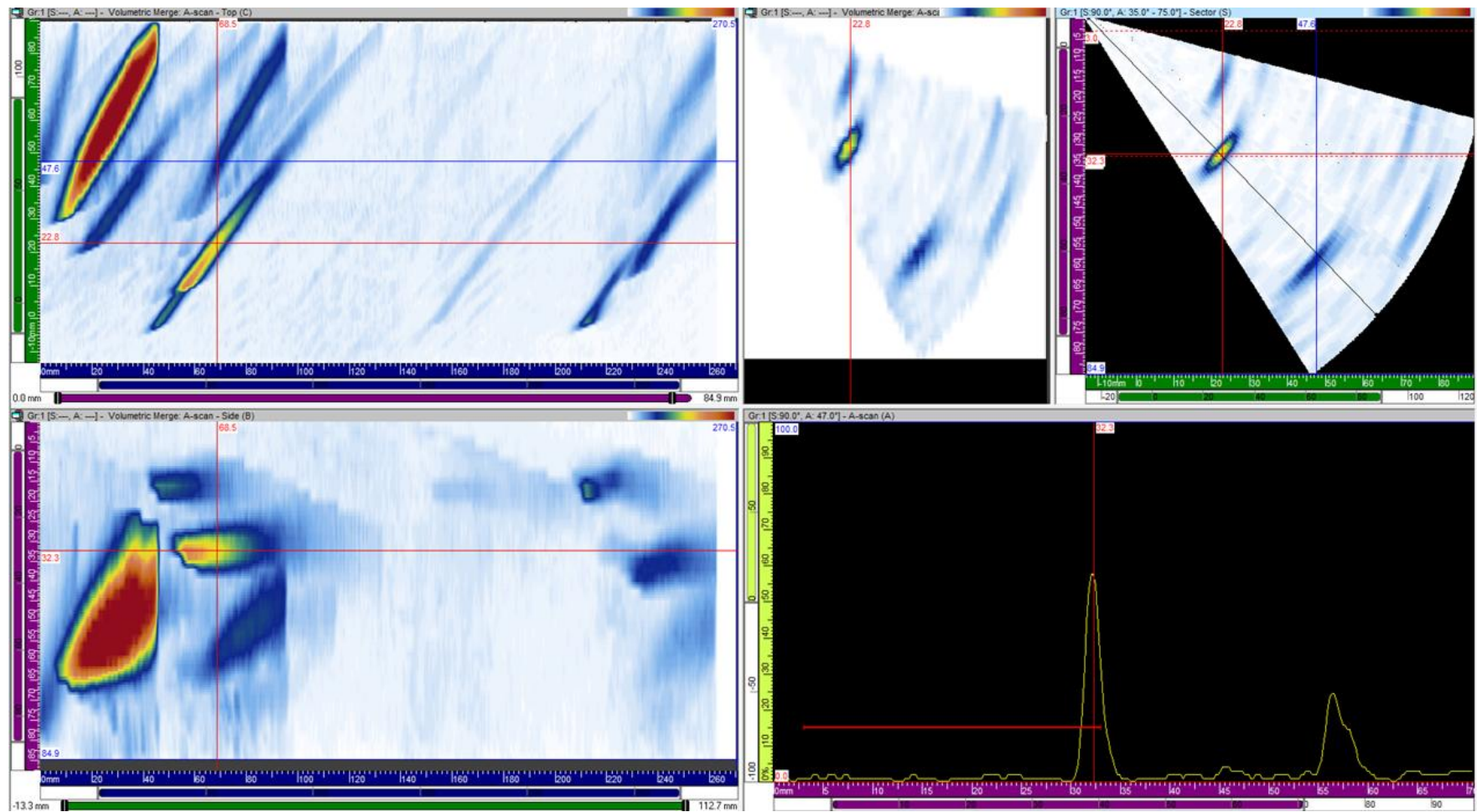


圖 D-4 508 端掃之 4th SDH 的 B scan、S scan、C scan、A scan 以及 D scan。

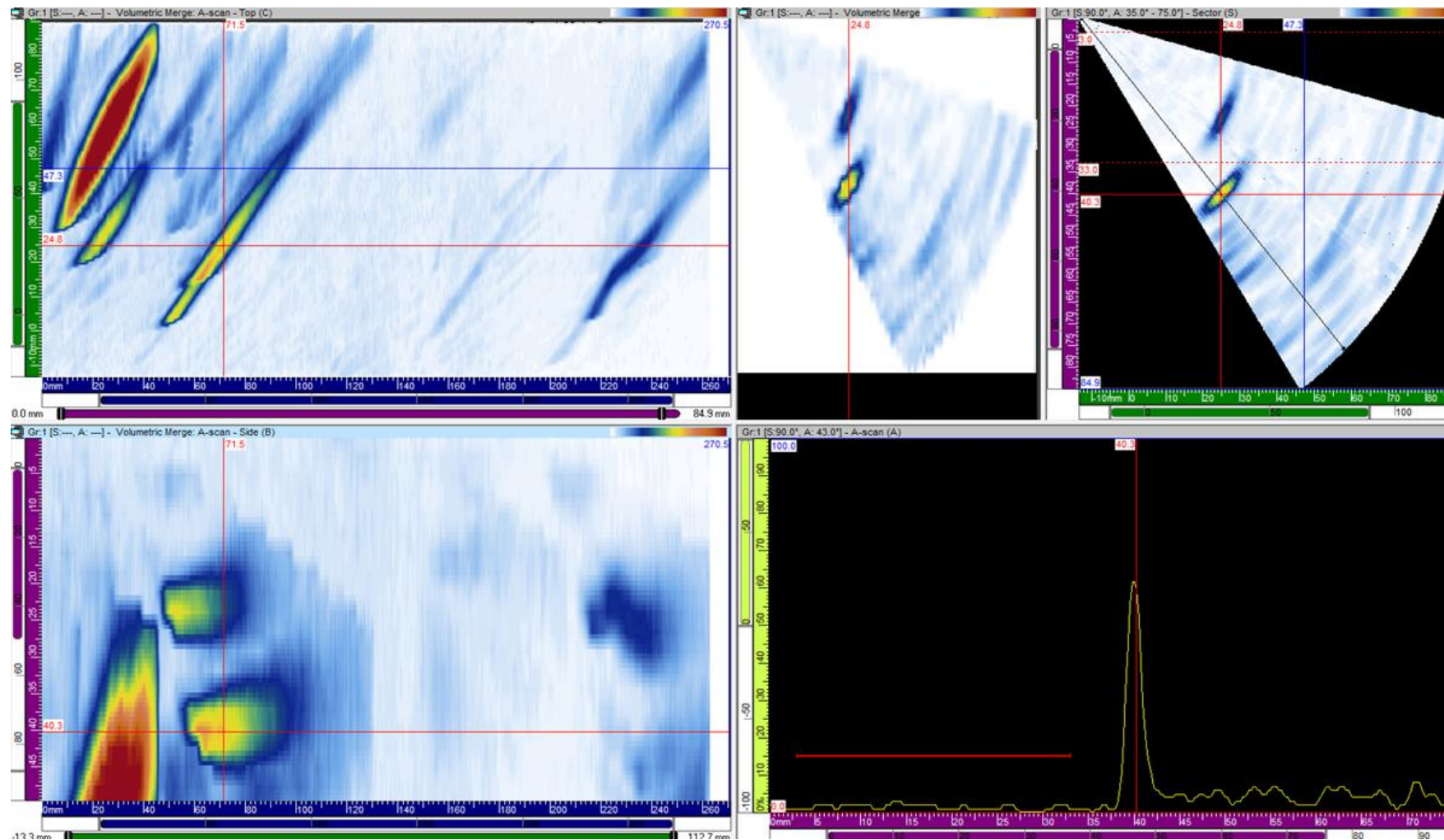


圖 D-5 508 端掃之 5th SDH 的 B scan、S scan、C scan、A scan 以及 D scan。

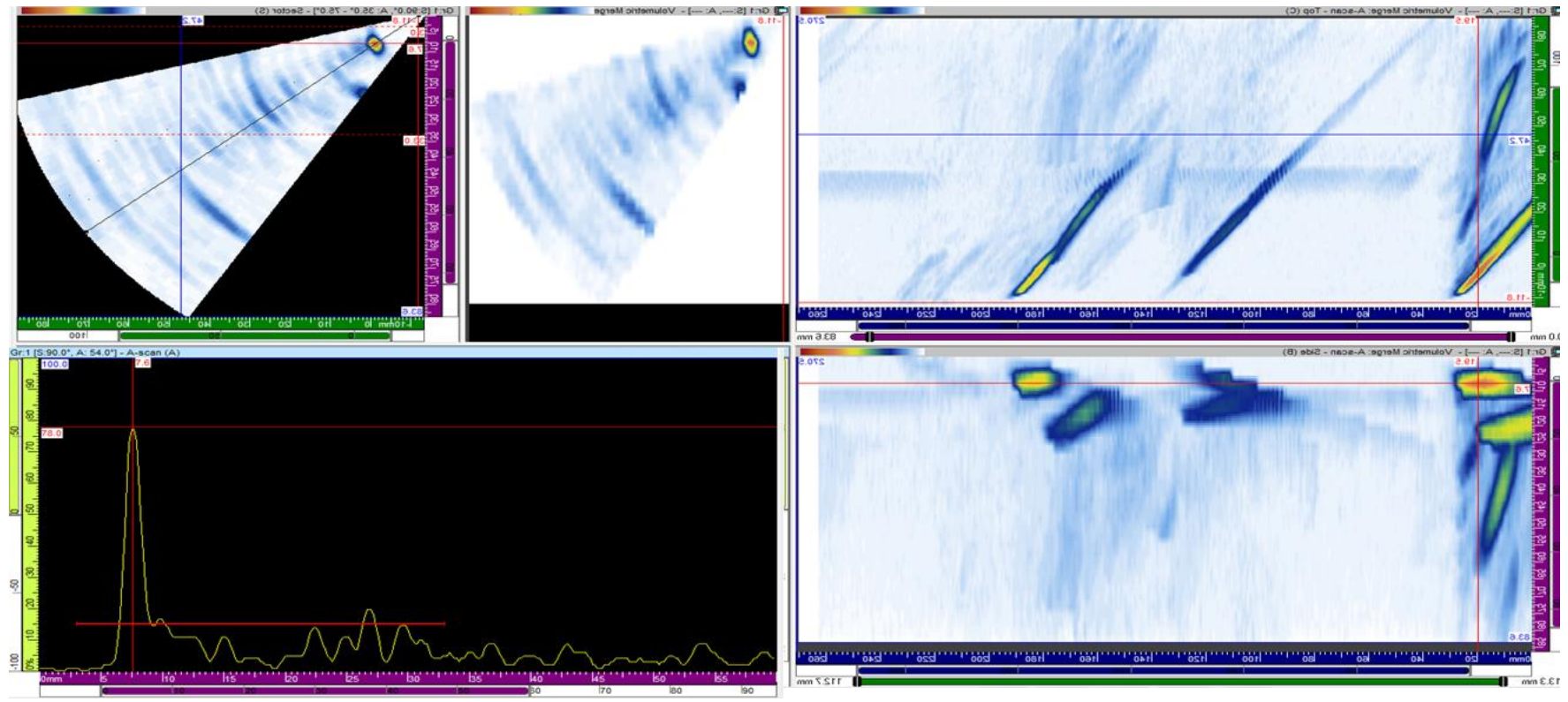


圖 D-6 316 端掃之 1st SDH 的 B scan、S scan、C scan、A scan 以及 D scan。

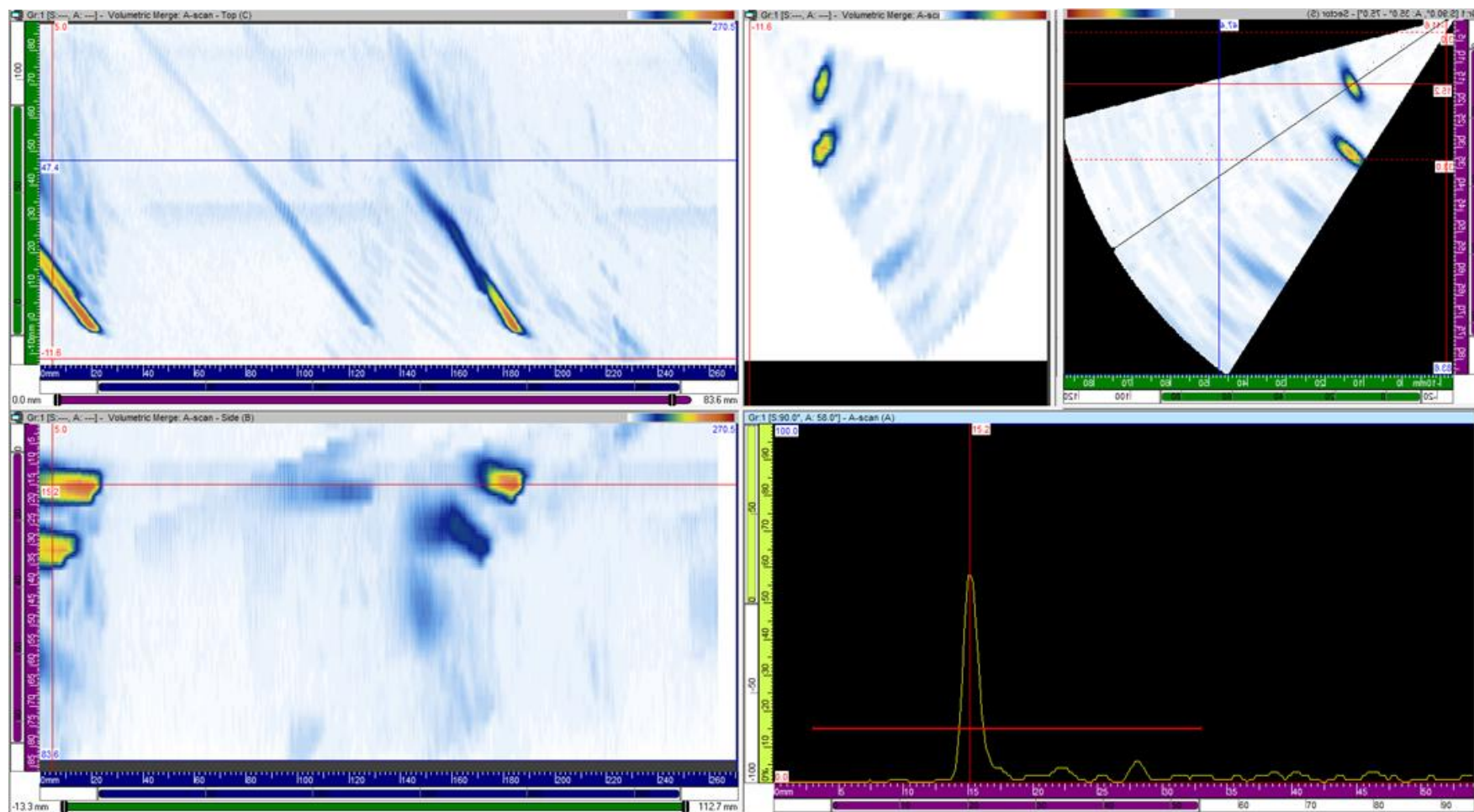


圖 D-7 316 端掃之 2nd SDH 的 B scan、S scan、C scan、A scan 以及 D scan。

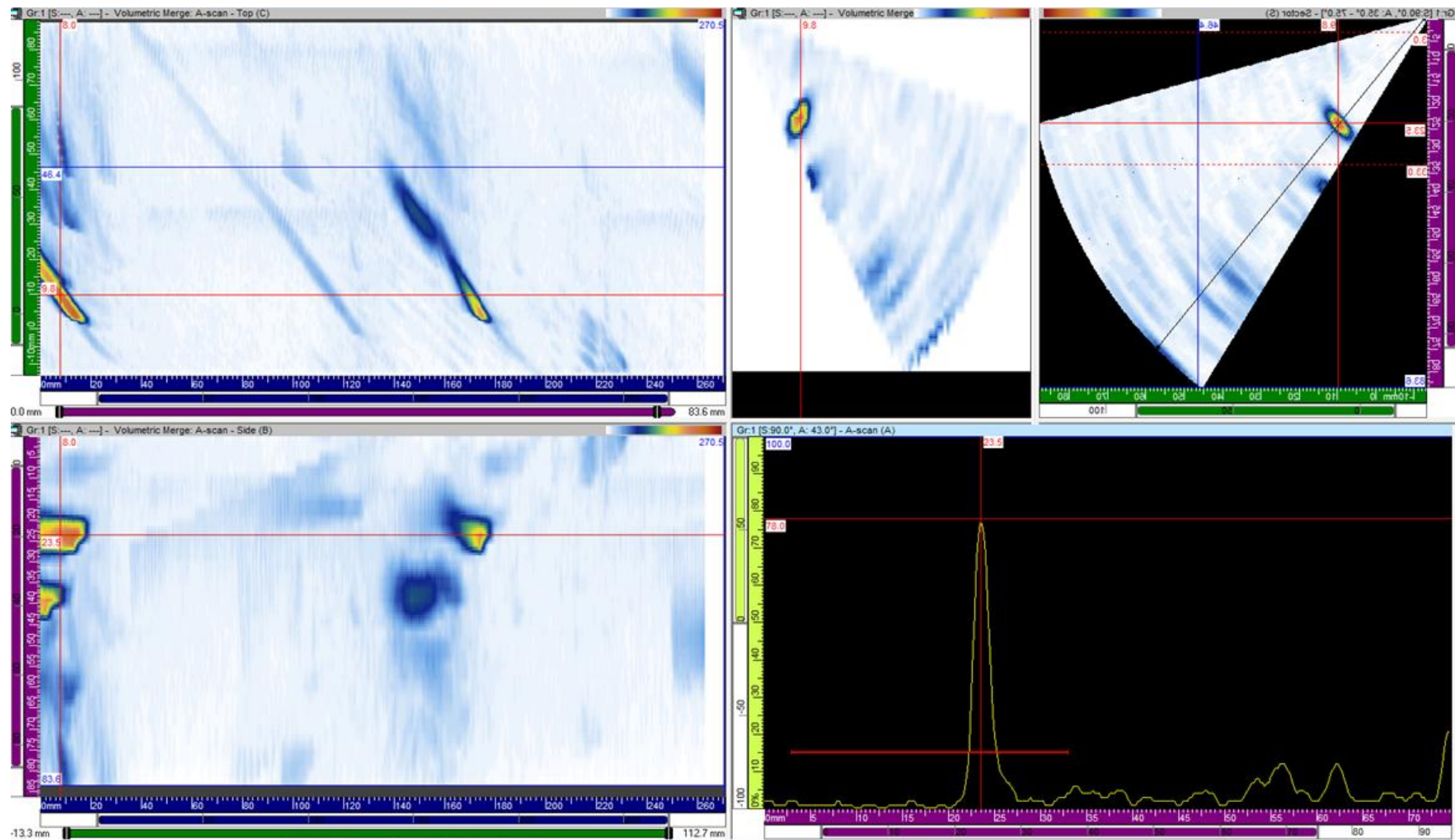


圖 D-8 316 端掃之 3rd SDH 的 B scan、S scan、C scan、A scan 以及 D scan。

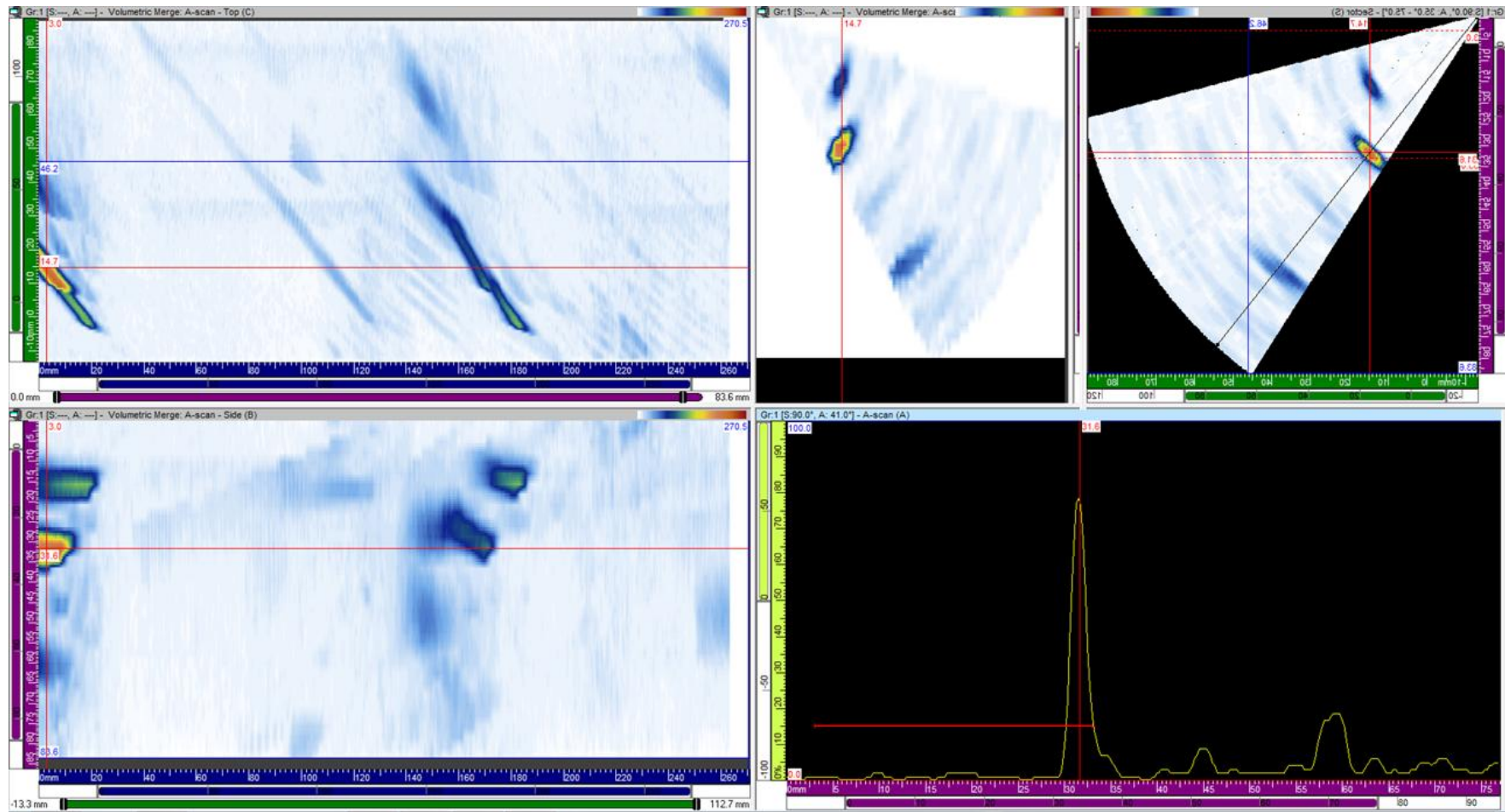


圖 D-9 316 端掃之 4th SDH 的 B scan、S scan、C scan、A scan 以及 D scan。

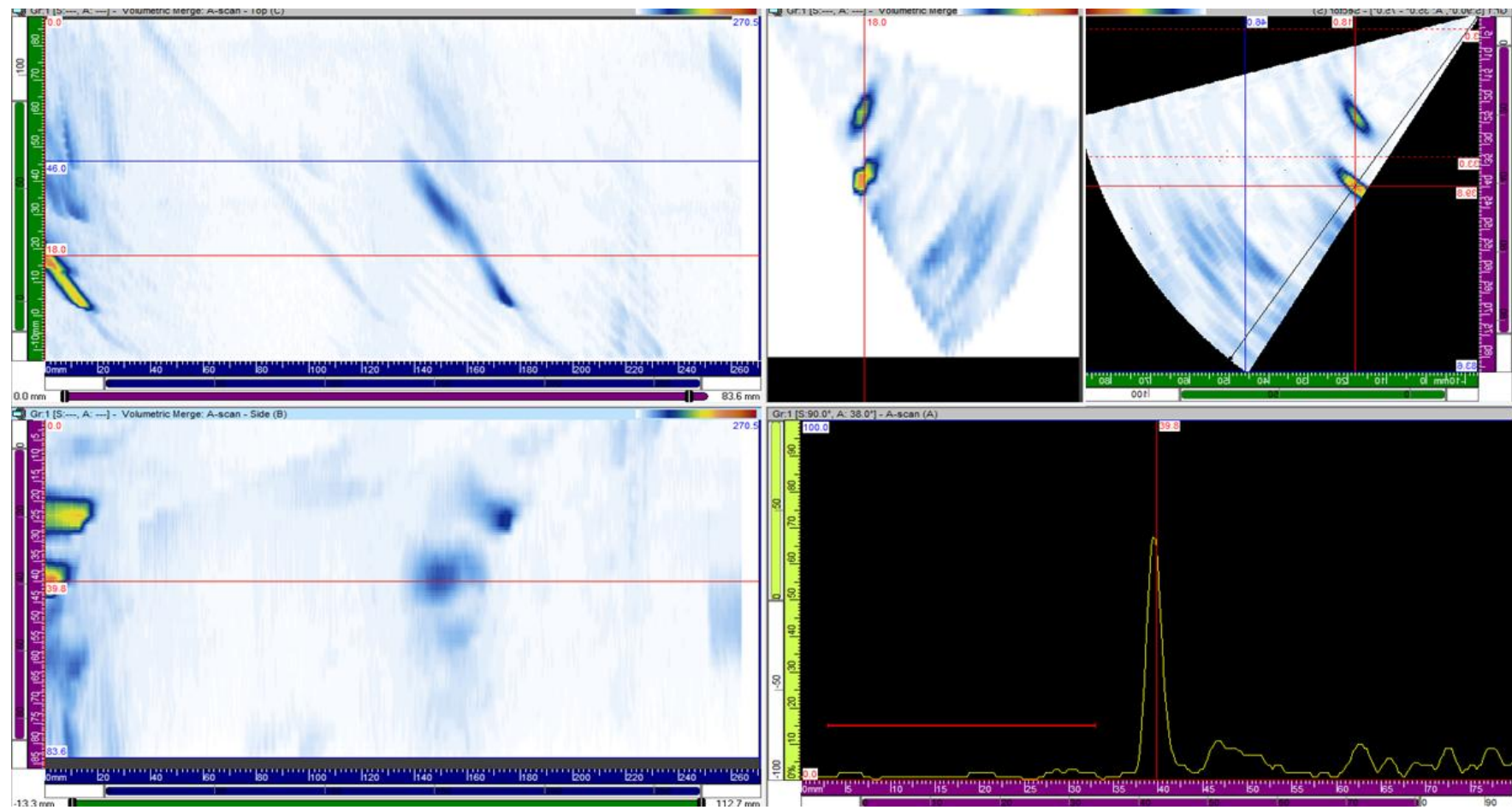


圖 D-10 316 端掃之 5th SDH 的 B scan、S scan、C scan、A scan 以及 D scan。