

# 鋁合金 2024-T3 與 7075-T6 異材對接之摩擦攪拌偏位銲接研究

林非錯<sup>1</sup>、郭聰源<sup>2</sup>、林煥章<sup>3</sup>、王威勝<sup>4</sup>、謝興達<sup>5</sup>

<sup>1</sup>南台科技大學機械工程系(大學生)

<sup>2</sup>南台科技大學機械工程系(教授)

<sup>3</sup>義守大學工業工程與管理系(助理教授)

<sup>4</sup>南台科技大學機械工程系(碩士生)

<sup>5</sup>金屬工業研究發展中心銲接組

<sup>1</sup>E-mail : [milklin76@yahoo.com.tw](mailto:milklin76@yahoo.com.tw)

## 摘要

摩擦攪拌銲接之銲道所產生的冶金性質變化相較於傳統銲接更為單純，因此被廣泛應用在異種金屬銲接方面，但在異材摩擦攪拌銲接中，若母材之硬度有明顯差異，在攪拌過程中材料之塑性流動特性將產生極大的差異，進而影響到銲接品質。本研究選用三種不同攪拌銲外型(圓柱形外切螺紋、三角柱外切螺紋、三角柱)，搭配三種偏位量(+0.6、0、-0.6 mm)對 3 mm 厚之 2024-T3 與 7075-T6 鋁合金進行對接。結果顯示，在銲道形貌上，圓柱形外切螺紋與三角柱外切螺紋兩種外型之攪拌銲，皆在偏向 7075-T6 側時，塑性流動情況較零偏位(0 mm)時為佳，在相同參數下，使用三角柱攪拌銲完成銲接之試件在零、負偏位(0、-0.6 mm)時，銲道容易產生缺陷；而銲道區(STZ)硬度方面，使用圓柱形外切螺紋攪拌銲，並且偏向於 7075-T6 側進行銲接時，會導致硬度較零偏位(0 mm)為高，且使用三角柱外切螺紋攪拌銲時，也有相同的結果，但使用三角柱攪拌銲時，因未具有外切螺紋，而導致銲道區內兩側硬度差異很大。

**關鍵字：**摩擦攪拌銲接、鋁合金、異種金屬、偏位銲接

## 1 前言

傳統熔融銲接製程，依然存在必須改善的問題，如凝固裂紋、銲道內氣孔的形成與合金元素流失等[1]，而摩擦攪拌銲接(Friction stir welding, FSW)，因銲接過程未達材料熔點，並不會產生凝固裂紋或氣孔等現象，已被成功運用在鋁合金的銲接上。此外，FSW 具變形量低、入熱量少、大部份不需添加銲條或保護氣體以及銲接速率快等優點，對鋁合金而言，相較於傳統銲接如 TIG 或 MIG 所形成銲道之機械性質高出許多[2]。

2XXX 及 7XXX 系列為析出硬化型鋁合金，且具備質輕、易加工、耐蝕性佳、比强度高與可回收性等優點，已被大量使用在汽車、船體、航空與 3C 等產業[3]，就汽車工業而言，如何達到輕量化為主要考量之一，且嘗試將鋁合金與鋼板之異種金屬進行接合，以減少整體鋼板的使用量，進而減輕汽車重量。在傳統銲接中，鋁合金與鋼板之異種金屬接合較同材金屬更為不易[4]，而摩擦攪拌銲接對上述之問題有顯著的改善，且已被廣泛的應用在汽車工業上，如汽車鈹金結構、汽車座椅骨架與汽車鋼圈等[5]。此外，鋁合金之異材銲接在其他產業亦

有實質的應用，如飛機機身、燃料儲存桶、火車車廂、船體甲板等。

目前在鋁合金異材摩擦攪拌銲接之相關研究大都以攪拌銲零偏位(Offset)，亦即正對銲縫中心之方式進行攪拌接合，至於採用偏位方式的對接銲之相關研究則較少[6-7]。Chen[8]等人選用 6061-T6 鋁合金與 AISI 1018 鋼之異種金屬進行 FSW，採用四種偏位量(0 mm、+1 mm、±2.75 mm)，結果顯示，在偏位量最大為±2.75 mm 時，銲道之接合品質最差，原因是攪拌銲幾乎完全偏往鋁材或鋼材側，致使兩種材料未能均勻攪拌在一起，但對於往鋁材偏位+1 mm 時，可發現銲道區有  $Al_3Fe_4$  與  $Al_3Fe_2$  之兩種金屬間化合物(Intermetallic phases)的產生，且呈均勻散佈，導致銲道區之硬度明顯提升，顯示偏位量對於異種金屬的接合品質會造成極大的影響。江[9]在 1100 鋁合金與 C5191 磷青銅之 FSW，採用四種偏位量(0 mm、±1 mm、+2 mm)，結果顯示，偏位 0 mm 時，銲道孔洞較多，原因是銅鋁充分攪拌，對鋁而言溫度已過高而接近熔化狀態，使得銲接品質變差；而往銅偏位 1 mm 時，攪拌銲有斷裂之情況，無法成功接合，此乃因攪拌銲接觸銅側較多，使摩擦熱過高且受到較大的剪應力，導致攪拌銲過熱軟化而斷裂；但當攪拌銲往鋁偏位 1 mm 時，則銲道無孔洞產生，這是由於銅及鋁皆有足夠的入熱量，且攪拌均勻，為三種偏位量中銲接品質最優。然而，當鋁偏位達 2 mm 時，接合處則有明顯的縫隙產生，無法完成均勻攪拌。

此外，在異種金屬之 FSW 的研究中，以使用單一外型之攪拌銲進行銲接為多 [10-11]，對不同外型之攪拌銲之銲道機械性質的影響則不多。目前有針對不同攪拌銲外型之摩擦攪拌銲接研究均以同材為主，如 Elangovan[12]等人設計五種不同外型之攪拌銲對 2219 鋁合金進行 FSW，結果顯示四方形(Square: SQ)所得之銲道形貌與機械性質較佳，當攪拌銲之外型為四角柱時，因其具有四個切削面可產生較多的脈衝攪拌效應，銲道可獲得較均勻的混合，使銲道形貌與機械性質較其他攪拌銲之外型為佳。本研究則針對 2024-T3 與 7075-T6 兩種鋁合金，選用不同之攪拌銲外型、偏位量與材料擺放位置，在固定轉速與走速下進行異材摩擦攪拌偏位銲接，以探討上述之參數對銲道形貌、硬度等影響。

## 2 實驗方法與步驟

本研究選用之材料為 3 mm 厚之 2024-T3 與 7075-T6 鋁合金，尺寸為 50×160mm，銲接前接合面先以銑床加工以達平整，並以砂紙將氧化層磨除，再以丙酮清潔。攪拌桿材料為 Mo 系高速鋼，並設計三種不同外型之攪拌銷，分別為圓柱形外切螺紋 (Threaded cylindrical)、三角柱外切螺紋 (Threaded triangle)、三角柱 (Triangle)，如圖 1 所示。攪拌桿肩部直徑 12 mm，攪拌銷直徑 4 mm，長度 2.8 mm。銲接參數固定為轉速 1100 rpm、走速 80 mm/min，攪拌桿以逆時針旋轉方式進行銲接。偏位量則選用為 +0.6、0、-0.6 mm 三種，其偏位之定義如圖 2 所示，往 AS 側偏位為正偏位，往 RS 側偏位則為負偏位。材料之擺放位置之定義，當前進邊 (AS) 擺放 2024-T3 材料時，試件標示為 A2，反之，前進邊擺放 7075-T6 材料時，則為 A7，如圖 3 所示。完成銲接之後，使用砂輪切割機切取適當大小進行冷鑲埋，經過研磨拋光後，再以 killer's Reagent 腐蝕液進行腐蝕，並使用工具機顯微鏡與光學顯微鏡 (OM) 觀察銲道形貌與微觀結構，探討之不同攪拌銷外型、偏位量與母材擺放位置對異材銲道形貌與硬度之影響。

## 3 結果與討論

### 3.1 銲道形貌

圖 4 為圓柱形外切螺紋之異材對銲道形貌圖，結果顯示，2024-T3 擺放於 AS 處 (A2)，可發現到三種偏位量之銲道形貌差異不大，且在銲道上方皆有材料未攪拌均勻的情況，此現象推測，乃因圓柱形外切螺紋之攪拌銷，並無多個切削面，無法對材料產生類似脈衝效果，因此攪拌效果較差。若將 7075-T6 擺放於 AS 處 (A7) 時，正偏位之銲道形貌較佳，而零與負偏位較差，其因推測為正偏位時，較偏向於 7075-T6 之材料，材料較容易塑性流動；反而在負偏位時，亦即較偏向於 2024-T3 之材料，塑性流動則較差。母材 7075-T6 之硬度明顯較 2024-T3 為高，若單就硬度的影響而言，7075-T6 理應會有較差之材料流動性能，造成此現象可能因本研究選用轉速及走速的搭配，導致銲接時入熱量對 7075-T6 之材料而言，恰好使塑性流動達到最佳化，若轉速與走速的改變，或許會在 2024-T3 側產生較佳之塑性流動。此外，不論正負偏位的影響，A7 的銲道形貌皆比 A2 為佳。上述結果顯示，以圓柱形外切螺紋攪拌銷，將材料擺放於 AS 或 RS 之影響可能大於偏位量。

圖 5 為三角柱外切螺紋之異材對銲道形貌圖，將 2024-T3 擺放於 AS 處 (A2)，負偏位時銲道形貌較佳，而在正偏位時有材料流動不佳的現象，造成之原因為攪拌區多在 AS 側之 2024-T3，不利於 RS 側之材料回填與攪拌。但若 7075-T6 擺放於 AS 處 (A7) 時，零偏位之銲道形貌較佳，而在正負偏位時較差。另外，亦發現到 A2 與 A7 在正負偏位時銲道形貌差異性不大。

圖 6 為三角柱之異材對銲道形貌圖，發現到材料 2024-T3 擺放於 AS 處 (A2) 時，負偏位兩種材料明顯未均勻攪拌，零偏位有同樣的現象，而正偏位較為均勻。將 7075-T6 擺放於 AS 處 (A7) 時，在零、負偏位之下容易產生缺陷，而正偏位則無。因此，使用三角柱攪拌銷

且得到較佳之銲接品質，必須使用偏位銲接的方式才能達到。另外，產生缺陷之原因為攪拌銷未具有外切螺紋，使得材料只會水平旋轉或塑性流動 [13]，並不會有垂直漩渦流動的現象。因此，攪拌銷是否具有外切螺紋為產生缺陷的重要因素之一。

圖 7 為 A2 試件之銲道形貌，結果顯示，在負偏位時，以圓柱形外切螺紋與三角柱外切螺紋為攪拌銷時，因 7075-T6 受到較多數的攪拌作用，使得銲道區 (STZ) 較能均勻，但三角柱卻有缺陷的產生，這是因三角柱攪拌銷，未具有外切螺紋，材料塑性流動性較差所致。另外，亦發現到圓柱形外切螺紋上方皆有材料未攪拌均勻，三角柱外切螺紋材料分佈較為平均，三角柱兩種材料明顯未攪拌均勻，因與攪拌銷之外型有極大的關連性。圖 8 為 A7 試件之銲道形貌，結果顯示，在負偏位而言，圓柱形外切螺紋與三角柱外切螺紋之銲道形貌較佳且無缺陷的產生，而三角柱則較差且容易產生缺陷，此現象與圖 7 相同。此外，發現在所有參數下圓柱形外切螺紋與三角柱外切螺紋皆無缺陷的產生，主要原因為攪拌銷之外切螺紋，能增進 STZ 之攪拌並提升材料均勻混合 [14]。

### 3.2 硬度

圖 9 為圓柱形外切螺紋對 A2 與 A7 之異材銲件硬度分佈趨勢圖，在圖 9(a) 之 A2 試件結果顯示，STZ 以正偏位之銲道硬度較低，乃因正偏位時 STZ 攪拌較多 2024-T3 材料，因 2024-T3 硬度較 7075-T6 低，使得其硬度亦較低，反之負偏位因偏向於 7075-T6，硬度較為偏高。另外，亦發現負偏位在 STZ 之硬度較為平均，偏位其次，而零偏位差異較大，原因可能是在正、負偏位時，銲道可能受到單一材料 (2024-T3 或 7075-T6) 的影響較大，相較於零偏位時，兩側材料所受到的入熱量較為平均，因母材本身之析出機制的不同，導致兩側銲道硬度的差異 [15]。在圖 9(b) 之 A7 試件顯示，STZ 正偏位之銲道硬度較高且平均，這與 A2 試件原理相同，本組試件為攪拌銷偏向 7075-T6 側，因而導致 STZ 之硬度偏向硬度較高之 7075-T6；零偏位之銲道硬度略低於正偏位，乃因有研究指出 [11、16]，STZ 主要以 RS 側之材料為主，且與圖 9(a) 之零偏位有相同之現象，銲道硬度明顯偏低；而負偏位則因攪拌銷偏向 2024-T3，硬度為最低，但整區硬度之分佈趨勢則較為平均。若不探討圖 9(a) 與 (b) 之偏位量的關係，而比較材料擺放位置之不同，可發現同樣在兩側熱影響區 (HAZ) 之硬度為最低，而熱機影響區 (TMAZ) 在 RS 側之硬度為 A2 時較高，則 A7 時卻降低很多。因此，材料擺放位置不同會明顯導致 RS 側 TMAZ 之硬度趨勢變化。

圖 10 為三角柱外切螺紋對 A2 與 A7 之異材銲件硬度分佈趨勢圖，圖 10(a) 之 A2 試件顯示，其中 STZ 以負偏位之銲道硬度較高，與圖 9(a) 之負偏位為相同之原因；零偏位之銲道硬度較低，推測為銲道內部具強化作用的析出物會溶回基地 [17]，因攪拌銷為三角柱外切螺紋，導致銲接時入熱量較圓柱形外切螺紋多；正偏位因偏向於材料 2024-T3，而導致硬度偏低。因此，當使用三角柱外切螺紋攪拌銷所完成之 A2 試件，採用正與零偏位進行銲接時，對 STZ 硬度趨勢之變化不明顯，亦

發現到正與零偏位之整體硬度變化趨勢差異不大，但卻略低於負偏位，因此說明使用固定外型之攪拌銷時，偏位量的影響可能較於材料擺放位置為大。圖 10(b)為 A7 試件硬度變化趨勢圖，STZ 之硬度以零偏位最低，原因與圖 10(a)零偏位相同，而負偏位之鐸道硬度較高，可能是材料 7075-T6 擺放於 AS 處，且使用三角柱外切螺紋，導致入熱量為增加，使 2024-T3 之析出物溶解，而 7075-T6 並未完全溶回，此外，三組試件皆在兩側之 HAZ 硬度較略有明顯的偏低，初步研判原因為三角柱外切螺紋攪拌銷而導致入熱量增加，因此硬度明顯偏低。圖 10(a)與(b)比較材料擺放位置不同時，可發現到 STZ 皆以負偏位較高，正與零偏位較低，因此當使用特定外型之攪拌銷時，材料擺放位置之不同而導致 STZ 鐸道硬度變化較不明顯。

圖 11 為三角柱對 A2 與 A7 之異材鐸件硬度分佈趨勢圖，圖 11(a) 為 A2 試件硬度變化趨勢圖在 STZ 之硬度顯示，三種偏位量在兩側硬度不平均，主要原因為使用三角柱攪拌銷，並未具有外切螺紋，導致材料只會水平流動，並無垂直流動，因此材料未能均勻攪拌，且在圖 6 之異材鐸道形貌中可明顯看到 2024-T3 與 7075-T3 的區別，此外，也發現到兩側之 TMAZ 硬度有很大的差異，與圖 9(a)略有相似之處，因此攪拌銷之外型的差異與是否帶有外切螺紋，將會影響到兩側 TMAZ 硬度的趨勢變化。圖 11(b)為 A7 試件硬度變化趨勢圖，STZ 之鐸道硬度以正偏位較高，其因偏向於 7075-T6 之材料，導致材料更容易塑性流動；而零偏位較低，可能是兩種材料因攪拌銷的關係，並未均勻攪拌，此外，圖中亦發現到零、負偏位皆有缺陷的產生。雖然已有研究指出[11、16]，鐸道之 STZ 主要以 RS 側之材料為主，但此論點在本研究中並不完全符合，主要原因為偏位鐸接之效果下，偏向於不同材料而導致塑性流動的不同，會造成機械性質之變化。

#### 4. 結論

1. 就零偏位而言，以使用圓柱形外切螺紋與三角柱外切螺紋為攪拌銷時，鐸道形貌較佳，而三角柱攪拌銷則有缺陷形成，因無具有外切螺紋，導致塑性流動較其他攪拌銷為差。
2. 採用偏位鐸接時，以圓柱形外切螺紋、三角柱外切螺紋在 A2 之負偏位以及三角柱在 A7 之正偏位等三種情況下，因偏向 7075-T6 側而形成之鐸道形貌較佳。
3. STZ 硬度分佈趨勢在零偏位時，圓柱形外切螺紋與三角柱外切螺紋之硬度變化較小，而使用三角柱攪拌銷時則變化趨勢較大。
4. 使用圓柱形外切螺紋攪拌銷在 A2 之負偏位與 A7 之正偏位；三角柱外切螺紋攪拌銷在 A2、A7 之負偏位時，STZ 鐸道硬度較零偏位為高，因此，採用偏位之方式鐸接會導致 STZ 硬度的提高且較為平均。

#### 5. 致謝

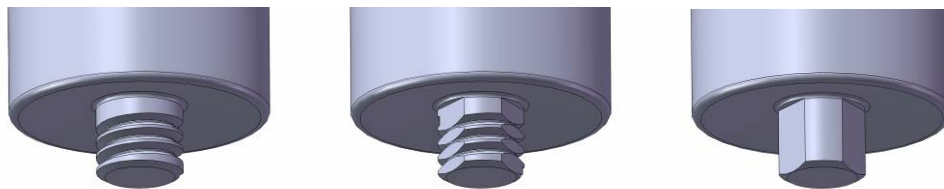
本研究感謝金屬中心提供 FSW 之設備以及鐸接組組員謝興達先生的配合與幫忙，使本研究能順利進行。

#### 6. 參考文獻

- [1] 黃錦鐘 譯，鋁合金的鐸接，機械月刊，第二十二卷第七期，1996 年 7-12 月。
- [2] Z.Y. Ma, R.S. Mishra, M.W. Mahoney, Superplastic deformation behaviour of friction stir processed 7075 Al alloy, *Acta Materialia*, pp. 4419-4430, 2002.
- [3] S.J. Maddox, Review of fatigue assessment procedures for welded aluminium structures, *International Journal of Fatigue*, pp. 1359-1378, 2003.
- [4] 陳冠佑、郭峻谷、謝興達、蔡登財，摩擦攪拌鐸接在異質(鐵/鋁)接合之研究，鐸接與切割，第十五卷第三期，PP. 64，2005。
- [5] 曾秉鈞，摩擦攪拌鐸接之原理及其應用，鐸接與切割，第十六卷第三期，PP. 56-57，2006。
- [6] P. Cavalieve, R. Nobile, F.W. Panalla, A. Sequillace, Mechanical and microstructural behaviour of 2024-7075 aluminium alloy sheets joined by friction stir welding, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46 pp. 588-594, 2006.
- [7] S.A. Khodir, T. Shibayanagi, Friction stir welding of dissimilar AA2024 and AA7075 aluminum alloys, *Materials Science and Engineering B* 148, pp. 82-87, 2008.
- [8] C.M. chen, and R. kovacevic, Joining of Al 6061 to AISI 1018 steel by combined effects of fusion and solid state welding, *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, pp. 1205-1214, 2004.
- [9] 江聰政，鋁銅異種金屬摩擦攪拌接合之研究，國立中興大學碩士論文，2006。
- [10] Yutake S. Sato, Seung Hwan C. Park, Masato Michiuchi, Hiroyuki KoKawa, Constitutional liquation during dissimilar friction stir welding of Al and Mg alloys, *Scripta Materialia* 50, pp. 1233-1236, 2004.
- [11] W.B. Lee, Y.M. Yeon, S.B. Jung, The joint properties of dissimilar formes Al alloys by friction stir welding according to the fixed location of materials, *Scripta Materialia* 49, pp. 423-428, 2003.
- [12] K. Elangovan, V. Balasubramanian, Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy, *Materials Science and Engineering*, A459, pp. 7-8, 2007.
- [13] 陳志鵬、曾天佑、何扭今，摩擦攪拌鐸接鋁合金的顯微組織與纖構演化之研究，92 年台灣鐸接協會年會，台灣，2003 年 11 月。
- [14] Y.H. Zhao T, S.B. Lin, L. Wu, F.X. Qu, The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir weld 2014 Al alloy, *Materials Letters*, pp. 2298-2952, 2005.

- [15] 王威勝，不同攪拌桿凸銷外型對航空用鋁合金之摩擦攪拌銲接，南台科技大學碩士論文，2009年。  
 [16] W.B.Lee, Y.M. Yeon, and S.B.Jung, The joint properties of dissimilar formed Al alloys by friction stir welding according to the fixed location of materials, Scripta Mater, pp. 423-428, 2003.  
 [17] Y.S. Sato, H. Kokawa, M. Enomoto, S. Jogan, Microstructural Evolution of 6063 Aluminum during Friction-stir welding, Metallurgical and Materials Transaction A, pp. 2429-2437, 1999.

### 7.圖表彙整

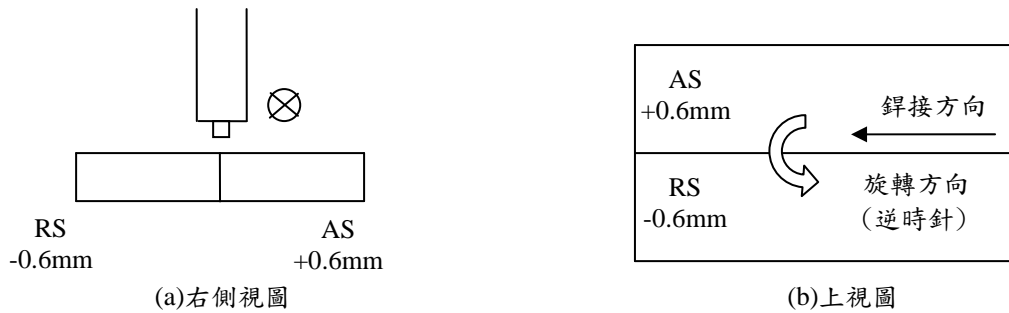


(a)圓柱形外切螺紋

(b)三角柱外切螺紋

(c)三角柱

圖 1 攪拌銷之外型



(a)右側視圖

(b)上視圖

圖 2 偏位量之定義



(a)A2

(b)A7

圖 3 材料擺放之定義

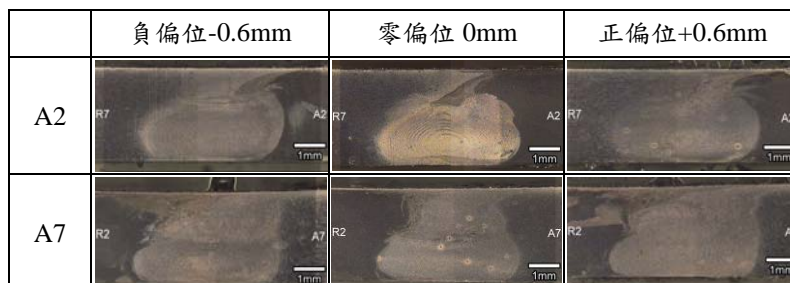


圖 4 圓柱形外切螺紋對材料擺放於不同位置與偏位量之異材對接銲道形貌圖

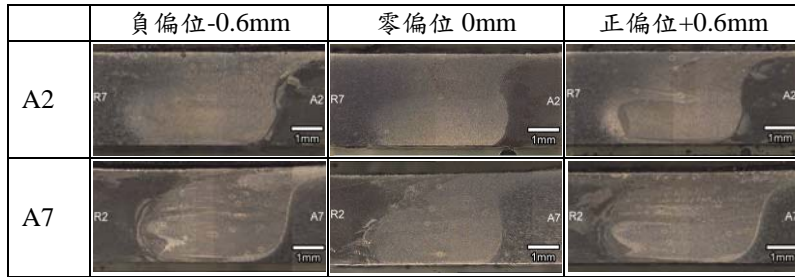


圖 5 三角柱外切螺紋對材料擺放於不同位置與偏位量之異材對接銲道形貌圖

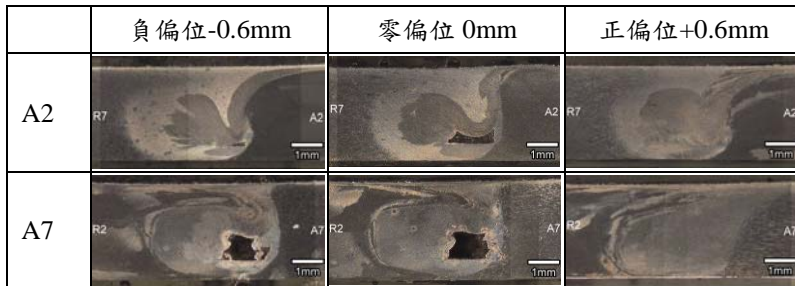


圖 6 三角柱對材料擺放於不同位置與偏位量之異材對接銲道形貌圖

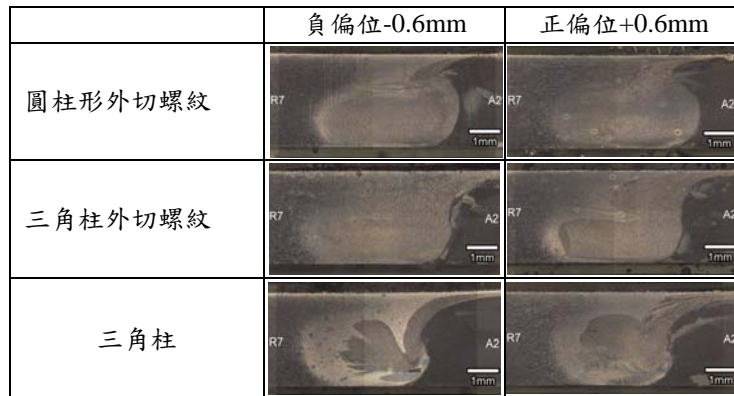


圖 7 A2 對不同攪拌銷外型與偏位量之異材對接銲道形貌圖

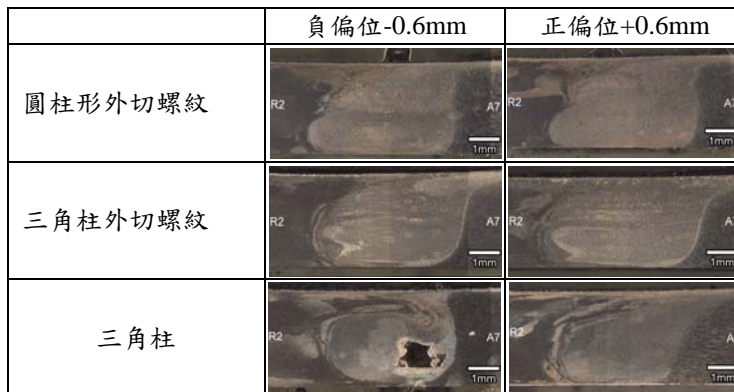
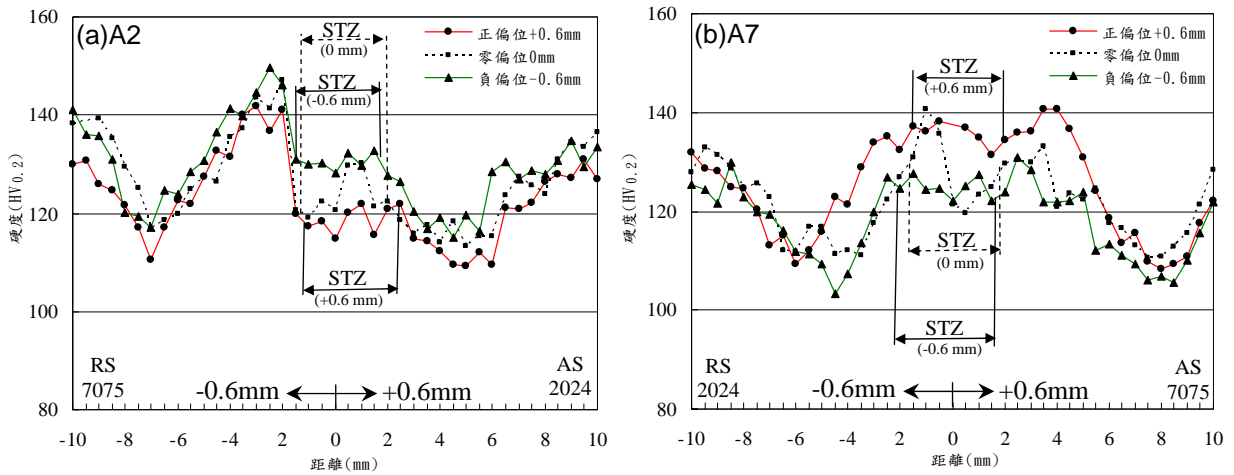
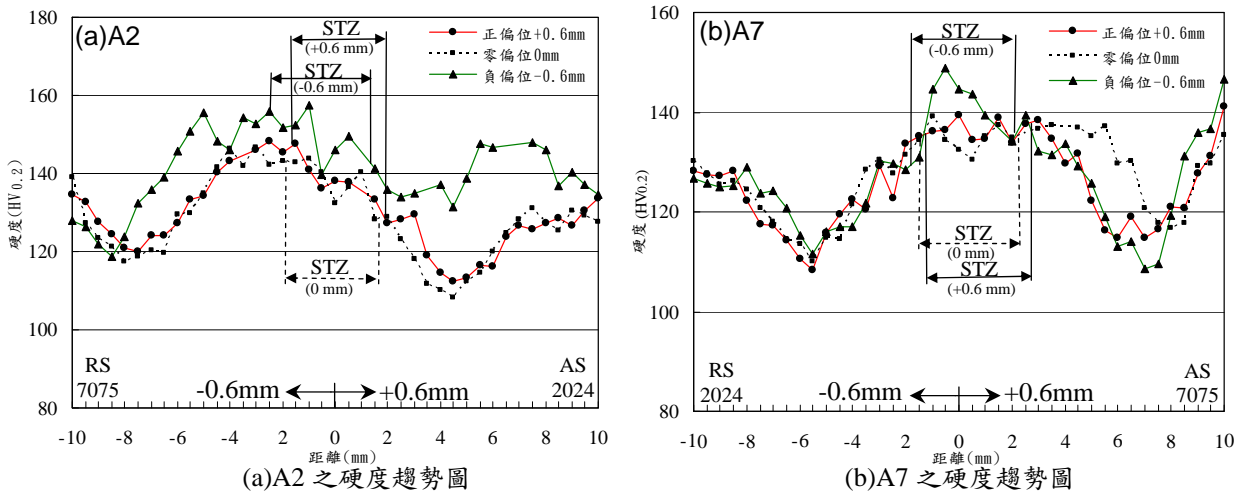


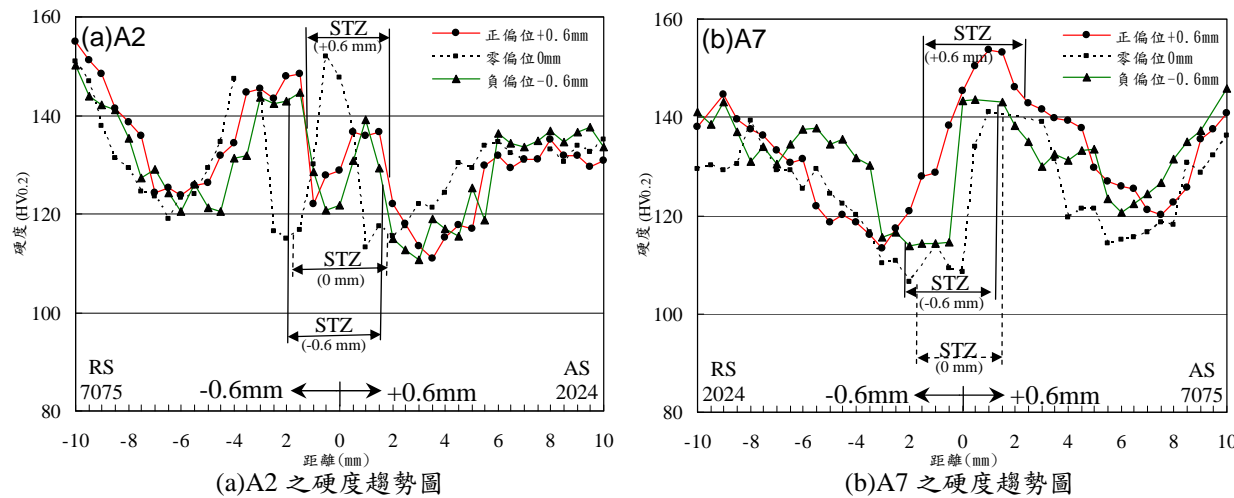
圖 8 A7 對不同攪拌銷外型與偏位量之異材對接銲道形貌圖



(a)A2 之硬度趨勢圖 (b)A7 之硬度趨勢圖  
 圖 9 圓柱形外切螺紋對不同材料擺放位置與偏位量之銲道硬度趨勢圖



(a)A2 之硬度趨勢圖 (b)A7 之硬度趨勢圖  
 圖 10 三角柱外切螺紋對不同材料擺放位置與偏位量之銲道硬度趨勢圖



(a)A2 之硬度趨勢圖 (b)A7 之硬度趨勢圖  
 圖 11 三角柱對不同材料擺放位置與偏位量之銲道硬度趨勢圖