

2024 鋁合金摩擦攪拌銲接添加碳化矽粉末特性探討

黃立仁*¹ 張政平² 黃宣翰³

¹ 中州科技大學機械與自動化系 副教授

² 中州科技大學機械與自動化系 研究生

³ 東海大學 應用物理學系 學生

摘要及關鍵詞

近年來由於汽車輕量化的趨勢，鋁合金材料逐漸取代鋼鐵材料，全鋁合金車型的上市已創造輕量化的里程碑，鋁、鎂等輕金屬材料更是不可或缺的原料，而金屬基鋁/鎂合金(MMC)複合材料更是具潛力的輕量化材料。所以利用製程改變銲道特性使陶瓷顆粒均勻分佈在銲道內部，使銲道形成金屬基陶瓷顆粒強化之複合材料，並藉由氧化鋁顆粒的分佈，當作追蹤點探討材料摩擦攪拌的流動行為。實驗時利用 2024 鋁合金添加粉末 SiC+epoxy(環氧樹脂)+丙酮，進行摩擦攪拌銲接，主要探討摩擦攪拌銲接試片顯微結構、機械性質，以及材料流動行為與添加強化顆粒後之機械性質與微結構關係進行討論。

關鍵字：摩擦攪拌銲接(FSW)、金屬基複合材料(MMC)、碳化矽(SiC)

通訊作者

姓名：黃立仁

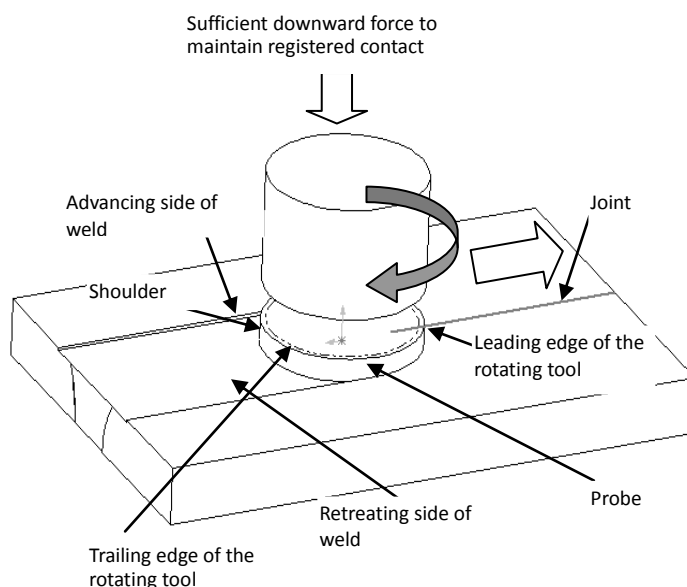
E-mail：lrhwang@dragon.ccut.edu.tw

壹、前言

摩擦攪拌銲接(Friction Stir Welding, FSW)技術是由英國銲接研究中心(The Welding Institute, TWI)在 1991 年發表的完全另類銲接法[1]。利用銑床高速旋轉攪拌刀具中的探針(Probe)旋入對接銲件的接合線 [2]。屬於固態接合技術，主要利用摩擦、壓力、溫度、攪拌等特性，將塑性變形的待銲母材以攪拌的方式銲合，而且熱影響區小對銲道強度可維持高於母材，如圖一所示。因此銲接後結構不需有補強的設計而能使結構進一步簡化，此外銲道處缺陷少，無氣孔無凝固裂縫產生，銲後結構的整體性(Integrity)佳。

鋁基複合材料可有效提升鋁合金的各項機械性質，並改善硬度、彈性係數、屈服強度和最大抗拉強度、疲勞強度[1-5]，且應用摩擦攪動銲接若能於銲接並產生鋁基複合材料，使鋁材表面具更優良機械性質，則有待研究開發。Sun[3]2024 鋁合金先陽極處理和被覆 RHMF-MOS₂-Au 奈米複材和 Ti/Ag 雙層薄膜，實驗步驟 MOS₂-Au 奈米薄膜可降低 2024Al 摩擦係數和改善疲勞壽命。Bekheet[5]擠壓鑄造的 2024+SiCp 複材的疲勞試驗，證明疲勞試驗，證明疲勞限可經由添加 SiCp 和 170°C 人工時效來提昇。Sutton[7]利用 2024-T3 作摩擦攪動銲接後，觀察 Mode I 破壞分析與微結構關係，臨界 COD(crack opening displacement)於裂縫尾端的固定距離可觀察出基材和摩擦攪動銲接部份荷重和裂縫延伸具相關性，且摩擦攪動銲接加工後會從厚度方向抵抗破裂。Jones[8]探討摩擦攪動銲接-2024-T351 之銲道和微結構，內部 HAZ 硬度最小是因 S 相的過時效，而外部的硬度變小因析出物的重溶，而 HAZ 交界處硬度變大因 S 細化相析出。Li[9]考查摩擦攪動銲接 2024 和 6061 鋁合金複雜流動型態，藉著腐蝕不同的鋁合金將流動型態可視化，因摩擦攪動銲接難於去檢驗流動特性。Genevois[10]利用摩擦攪動銲接檢查 5251(0 temper)和 AA2024(T351 and T6 temper)顯示微結構異質性的拉伸性質，平行於銲接方向顯示出主要為結構區，並利用數位影像相關分析(digital image correlation technic) 縱向拉伸強度與應變的分析曲線，以建立拉伸曲線 3D-有限元素模型預測銲道個別區域的銲接性質。Amirized[11]實驗探討 A356+15%SiCp 利用摩擦攪動銲接，因摩擦攪動銲接高速均勻攪動，SiC 顆粒和 Si 針狀晶共存於共晶相均勻分佈來改善硬度、彈性係數屈服和最大抗拉強度，且證明摩擦攪動銲接相當適用於銲接鑄造的鋁基複合材料。Fernandez[12] 利用摩擦攪動銲接鑄造 A359+20%SiC 鋁基複合材料之工具頭磨損與參數最佳化，結果證明工具磨損隨轉速降低但隨進給速度增加。鋁合金或低碳鋼板無插銷孔摩擦攪拌銲接方法探討，減少摩擦攪拌後銲接缺陷產生[13, 14]，另學者使用無探針旋轉工具頭作摩擦攪拌點銲和鋁合金無插銷孔摩擦攪拌點銲方法發展和實務，銲接材料最佳工具頭和材料機械性質研究[15-18]。





圖一 摩擦攪拌焊接示意圖

本文章討論 2024 鋁合金主要以顯微結構、機械性質討論，材料流動行為預測與添加強化顆粒進行摩擦攪拌銲接做分析與討論。本研究利用添加粉末 SiC+epoxy(環氧樹脂)+丙酮，實行摩擦攪拌銲接，利用此製程摩擦生熱與劇烈塑性變形特性陶瓷顆粒均勻分佈在銲道內部，使銲道形成金屬基陶顆粒強化之複合材料並藉由氧化鋁顆粒的分佈，當作追蹤點探討材料的流動行為。

貳、實驗設備與方法

一、材料準備

本實驗採 Al-Cu-Mg 系 2024 鋁合金，其化學組成如表一所示，將 2024 鋁合金銑床加工為長 60mm、寬 21mm、厚 5mm 之母材，為了方便添加粉末在母材長度方向中央銑出寬 3mm、深 4mm 之凹槽。

表一 2024 鋁合金之化學組成

元素	Si%	Fe%	Cu%	Mn%	Mg%	Cr%	Zn%	Ti%
比例	0.50	0.50	3.8-4.9	0.30-0.9	1.2-1.8	0.10	0.25	0.15

先將碳化矽粉末(SiC, mesh1000)和環氧樹脂(epoxy)以比例 10%、20%、30%混合攪拌，再放入烤箱以 150 度、時間 30 分鐘加以乾燥，在將粉末填入事先銑好母材的凹槽內壓實如圖二所示。

添加碳化矽粉末(SiC)與 epoxy 之比例如表二所示。碳化矽粉末(SiC)被應用在航太、汽車、造船與其他工業上，添加他們與未添加之金屬相比，在拉伸強度、剛性及抗磨耗性等應會有很好的表現。



圖二 添加完粉末之母材

表二 添加之粉末成分

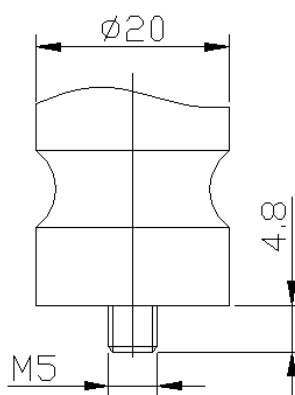
(混合材料)		10%
SiC+epoxy+丙酮	epoxy (環氧樹脂)	20%
		30%

二、摩擦攪拌銲接設備

實驗時採用大立(DL-CH1800) 可調整轉速及進給速率(feederate)的立式銑床。攪拌桿摩擦凸肩(shoulder)直徑為 20 mm，攪拌尖稍探針(probe)直徑為 5 mm，攪拌尖稍探針長度 4.8 mm，如表三所示，圖三為攪拌棒尺寸示意圖。

表三 攪拌桿 stirring rod

攪拌桿摩擦凸肩	直徑 20 mm
攪拌尖稍探針直徑	Φ5 mm
攪拌尖稍探針長度	4.8mm



圖三 攪拌棒尺寸示意圖

三、實驗方法

利用套筒將攪拌桿夾持於銑床主軸上，主軸之旋轉速度調整在 550~1100 rpm，床台進給速率(traverse speed)由機器設定於 45 mm/min，攪拌桿於前進方向向後傾斜 2 度，整個參數設定如



表四所示。兩板狀試片採對接方式利用夾具夾持於床台上，壓接工具攪拌桿固定速度旋轉，經由床台之移動來執行進給動作，且因旋轉作用可分為前進側(advance side)與再處理側(retreating side)。銲接固定用底板採用磨床兩面研磨平行之陶瓷板，底板下方並使用平行塊墊高，來降低摩擦熱經熱傳導而散失影響。

表四 摩擦銲接之機器設定參數

轉速 rpm	550	800	1100
進給數率 mm/min	45	45	45
傾斜角度	2	2	2

四、機械性質測試

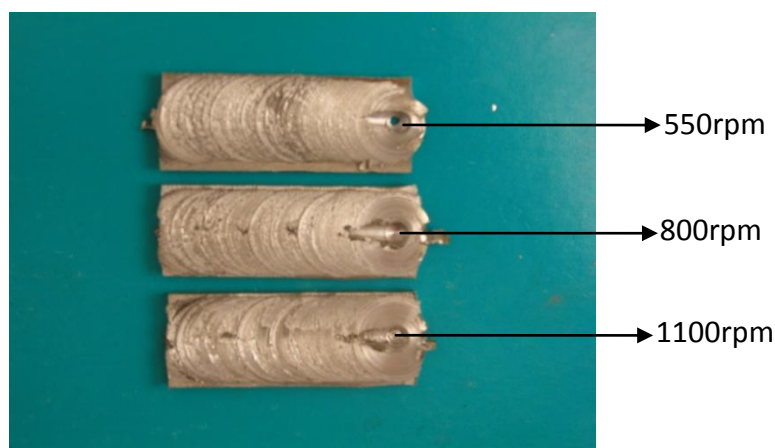
本實驗機械性質測試為硬度試驗、衝擊試驗。硬度試驗採用(Vickers microhardness)，主要取樣於銲道橫截面，以 ASTM E10 為標準。衝擊試驗以 ASTM E23 為標準。採用美國材料試驗協會(ASTM)為測試標準，硬度試驗尺寸、衝擊試驗、金相測試。

參、結果與討論

一、外觀觀察

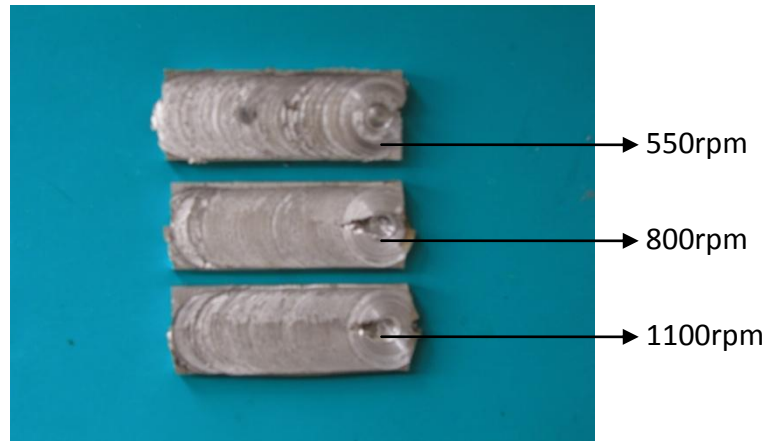
由圖四、五、六可以發現當轉速 800rpm 添加粉末(碳化矽粉末、20%和 30%的環氧樹脂)時攪拌銲接出來的表面會比較平整，是本次實驗較佳參數。

圖四為 2024 鋁合金其轉速為 550rpm、800 rpm、1100rpm 和進給速度 45 mm/min、添加粉末(碳化矽粉末、10%的環氧樹脂)、攪拌棒傾斜角度 2 度之銲道外觀，表面粗糙以 800 rpm 較為平整，但每個試片皆有銷孔(pin hole)。



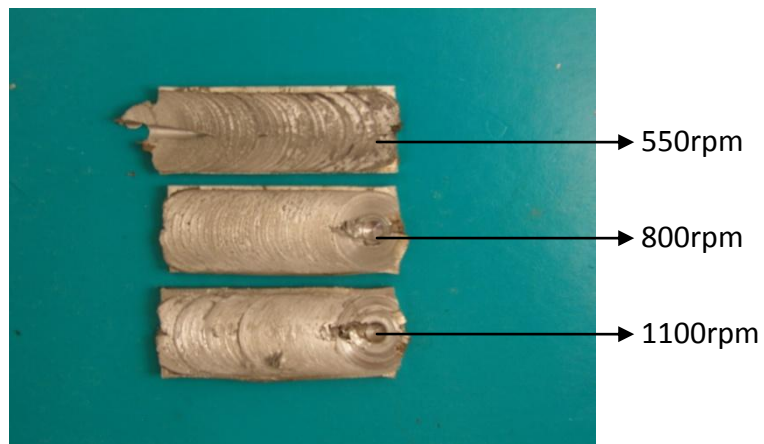
圖四 添加碳化矽粉末+10%的環氧樹脂之銲道外觀

圖五為 2024 鋁合金其轉速為 550rpm、800 rpm、1100rpm 進給速度 45 mm/min、添加粉末(碳化矽粉末、20%的環氧樹脂)、攪拌棒傾斜角度 2 度之銲道外觀，表面粗糙以 550 rpm 較為平整，且試片無銷孔產生。



圖五 添加碳化矽粉末+20%的環氧樹脂之鉸道外觀

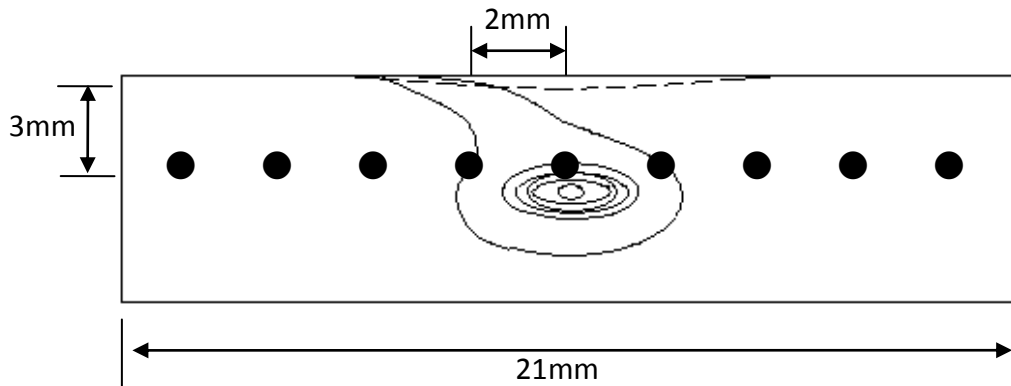
圖六為 2024 鋁合金其轉速為 550rpm、800 rpm、1100rpm 進給速度 45 mm/min、添加粉末(碳化矽粉末、30%的環氧樹脂)、攪拌棒傾斜角度 2 度之鉸道外觀，表面更為粗糙，但其中以 550 rpm 試片較為平整，且試片無銷孔產生。而 800 rpm 表面較為粗糙。



圖六 添加碳化矽粉末+30%的環氧樹脂之鉸道外觀

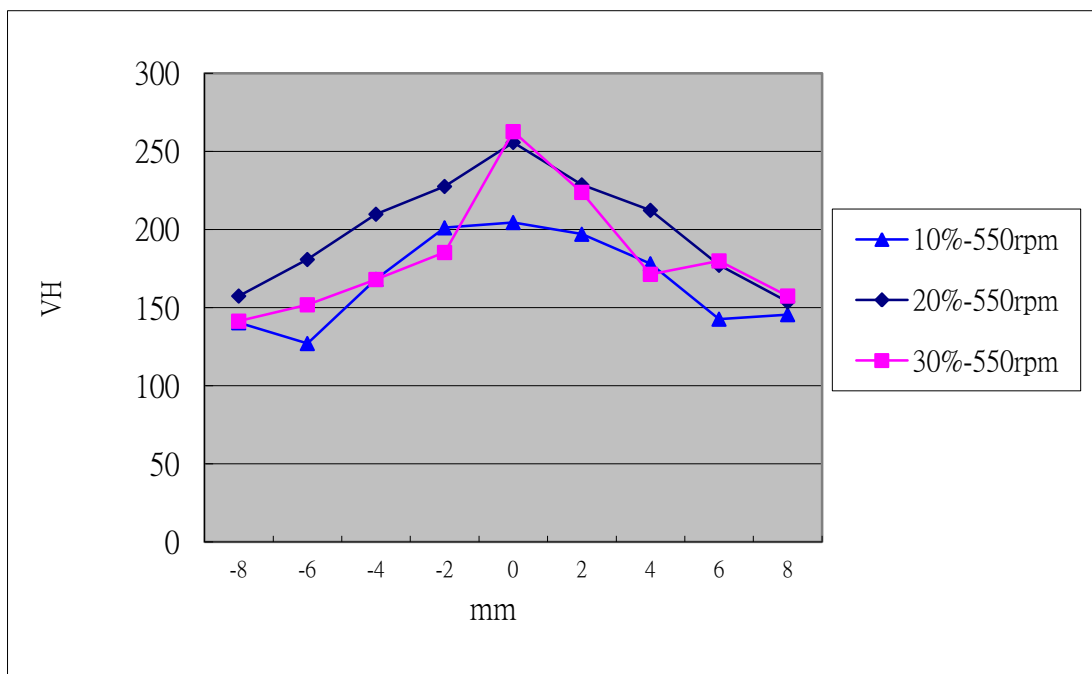
二、硬度試驗

銲後的鋁合金 2024 銲件切取與銲接方向垂直的試片寬度 21 mm，利用微硬度試驗機在試片橫斷面研磨拋光後，作銲道微硬度測試(Vickers hardness, Hv)，在母材向銲道中心方向恆跨越銲道以微硬度測試 (1000 g, 10 sec)，測試時每隔 2mm 打點共其九點，圖七為硬度試驗之位置圖，以測試銲件是否因添加 epoxy 比例不同而改變其硬度。



圖七 硬度試驗之位置圖

圖八、九分別顯示添加 epoxy 之百分比 10%、20%、30% 與轉速(rpm)550 rpm、800 rpm、1100 rpm 作表面攪動摩擦後對硬度試驗的變化圖，隨著測試點的移動越靠近中心點時其 Hv 值則越高，這就可以證明我們所添加的粉末有攪拌進去母材內，並增強其材料本身之硬度。在相同轉速 550 rpm 和相同進給速度 45 mm/min 之下且添加 epoxy 20% 時較佳，硬度提升較為明顯，如圖九所示。

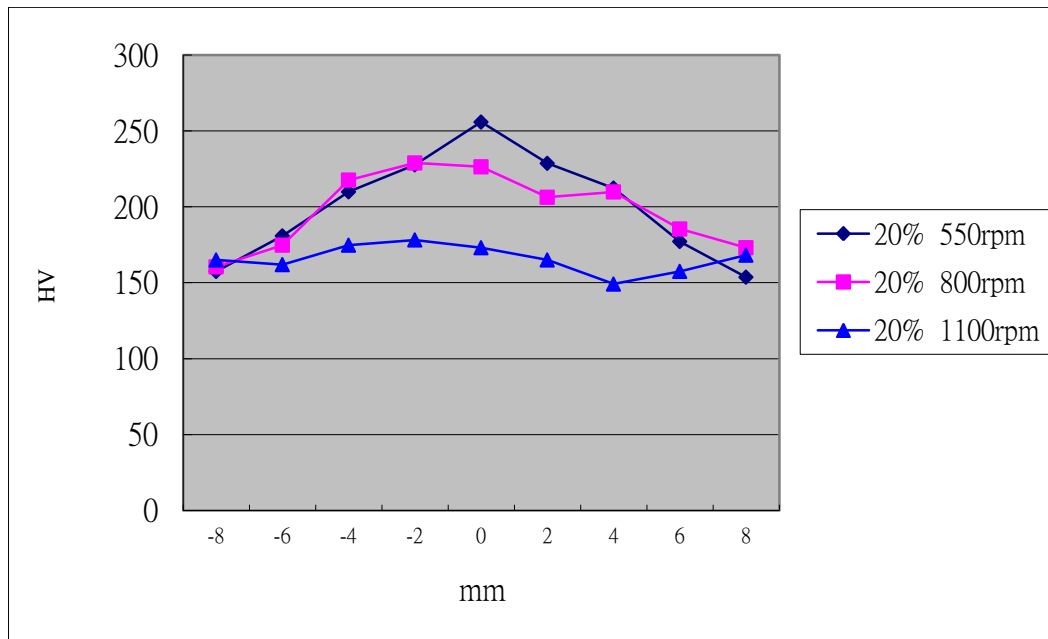


圖八 碳化矽粉末添加 epoxy(環氧樹脂)

比例不同之硬度試驗

在相同碳化矽粉末添加 epoxy(環氧樹脂)

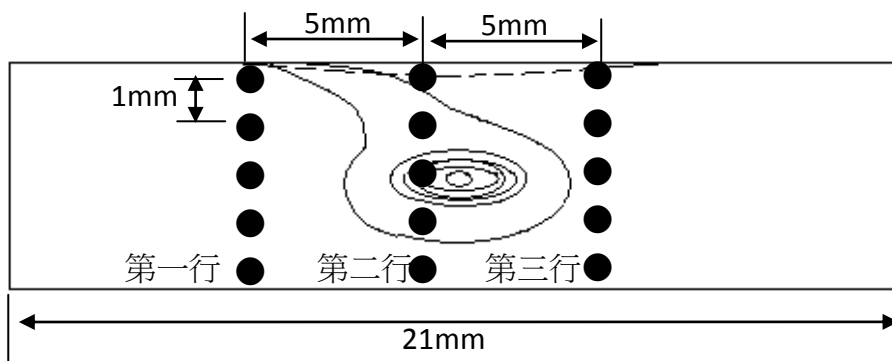
比例 20%時，不同轉速 550 rpm、800rpm、1100rpm 之下，進給速度 45 mm/min，轉速在 550 rpm 時為較佳如圖九所示。



圖九 添加碳化矽粉末+20%epoxy 時不同轉速之硬度試驗

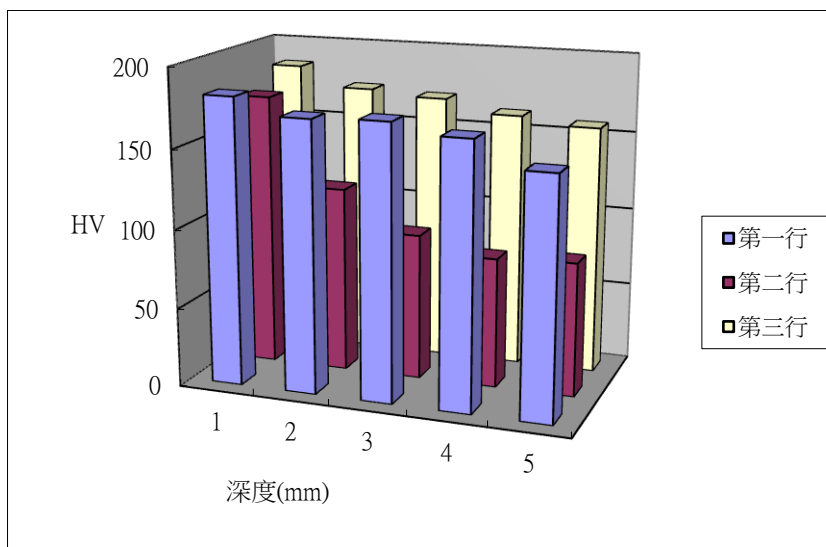
圖十為硬度試驗之位置圖，測試深度每隔 1mm 打點共 5 點。圖十一、十二、十三分別顯示碳化矽粉末添加 epoxy(環氧樹脂)

之百分比 10%、20%、30%與相同轉速 800 rpm 作表面攪動摩擦後對深度硬度試驗的變化圖，隨著測試點深度的增加時其 Hv 值的高低，可以瞭解粉末是否有深入工件，以在轉速 800 rpm 之下且添加 epoxy30%時，進給速度 45 mm/min 為較佳，如圖十二所示。

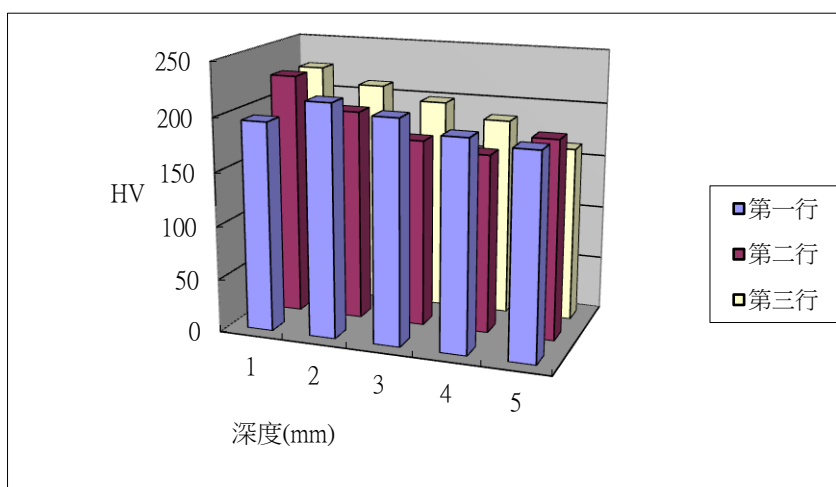


圖十 FSW 鐳道硬度試驗之位置圖

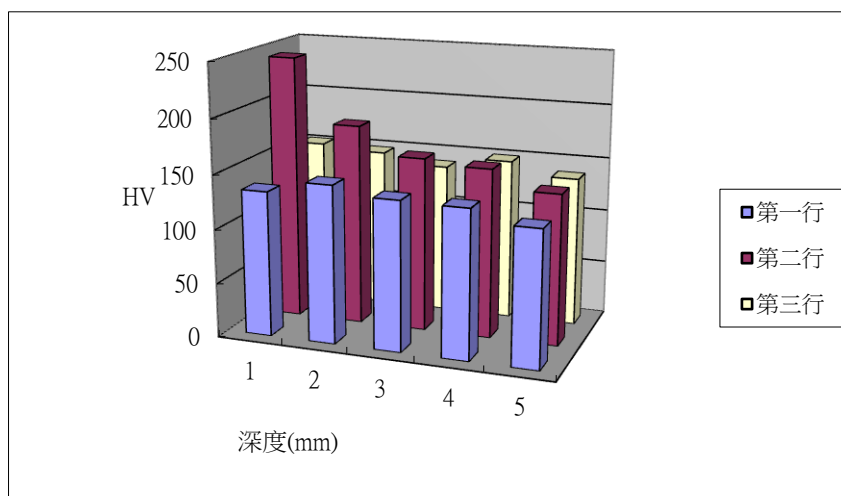




圖十一 添加碳化矽粉末+10%epoxy 時於轉速 800rpm 之深度硬度圖



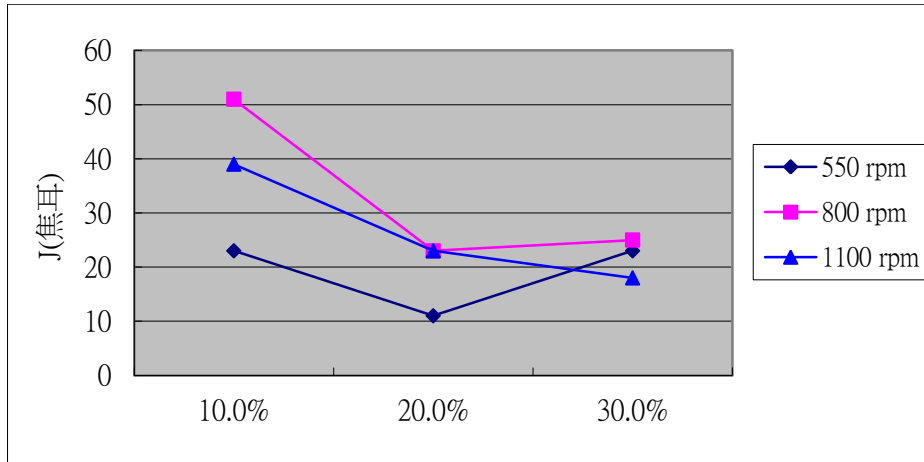
圖十二 添加碳化矽粉末+20%epoxy 時於轉速 800rpm 之深度硬度圖



圖十三 添加碳化矽粉末+30%epoxy 時於轉速 800rpm 之深度硬度圖

三、衝擊試驗

圖十四分別顯示添加碳化矽粉末加 epoxy(環氧樹脂)之百分比 10%、20%、30% 與轉速 (rpm)550 rpm、800 rpm、1100 rpm 作表面攪動摩擦後對衝擊值的影響，添加 epoxy(環氧樹脂) 大於百分 10%，2024 鋁合金的衝擊值有降低趨勢，這可能因為其表面硬度越大的關係緣故。當添加 epoxy 大於 20% 時，其衝擊值會稍微升高，這可能因為是添加 epoxy(環氧樹脂) 比例較多的關係緣故。以在添加 epoxy 10% 時且轉速大於 800 rpm 之下，進給速度 45 mm/min 為較佳。



圖十四 碳化矽粉末添加不同 epoxy(環氧樹脂)比例與轉速衝擊試驗

四、微結構觀察

實驗以不同轉速作接合，觀察銲接前後微結構的差異，對於光學顯微鏡(OM) 觀察的試片取樣，將分為銲道上表面與橫截面兩方面進行觀察，並將試片以砂紙研磨至#2000，在依序用 5 μ m、1 μ m、0.3 μ m 的氧化鋁拋光液進行拋光，拋光完畢進行腐蝕，採用 Keller reagent (2.5mlHNO₃+1.5mlHF+1mlHCl) 進行腐蝕，腐蝕時間約 10~15 秒再以光學顯微鏡觀察其微結構。

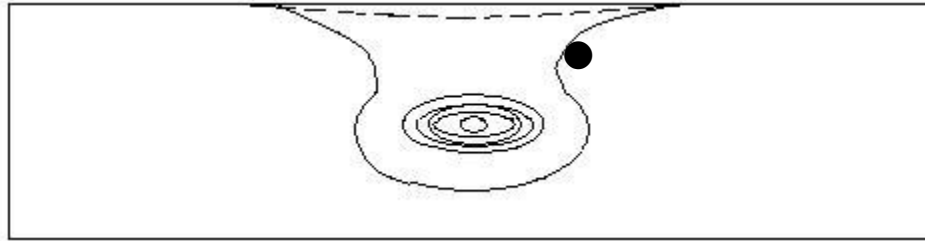
圖十五顯示當其 epoxy(環氧樹脂)比例 20% 不變轉速越快，切開觀察的斷面巨觀所產生的空洞越容易產生，且可以發現當轉速 550rpm 時所產生的斷面最平整。



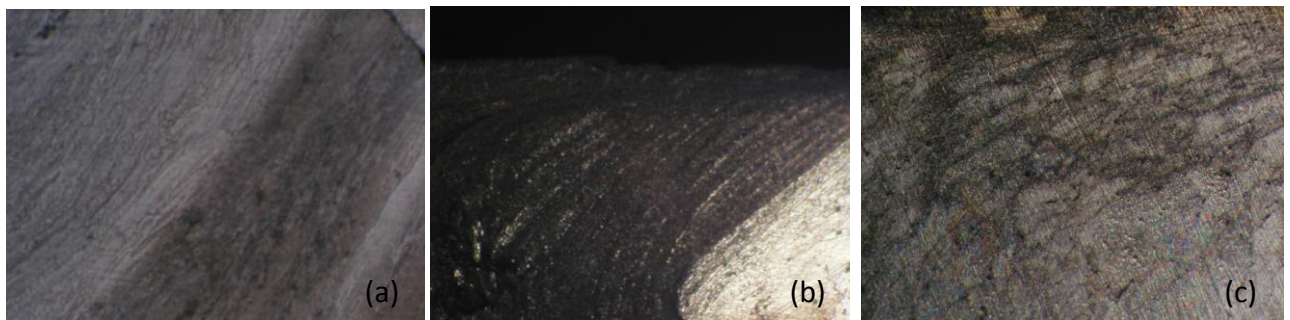
圖十五 不同轉速(a)550 rpm (b)800 rpm (c) 1100rpm (巨觀)之銲道剖面金相(5X)

圖十六為 50 倍率的金相觀察再處理邊位置的示意圖，觀察其同樣的地方金屬流向可以發現其圖十七所產生的金屬流向幾乎是差不多的，但轉速愈高紋路愈細緻，顯示與粉末混合愈均勻，而可以發現其 epoxy(環氧樹脂)比例 20% 不變，轉速大小不會改變金屬的流向。



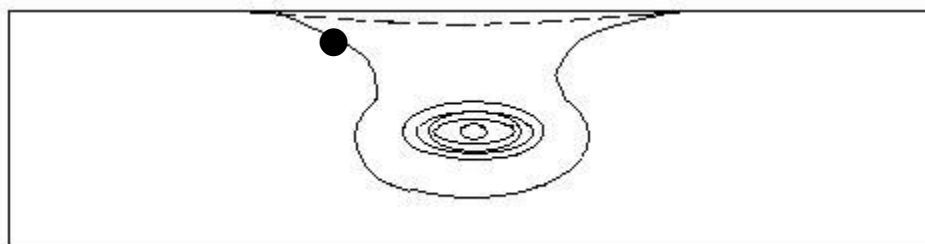


圖十六 50 倍率的金相觀察 FSW 再處理邊位置的示意圖

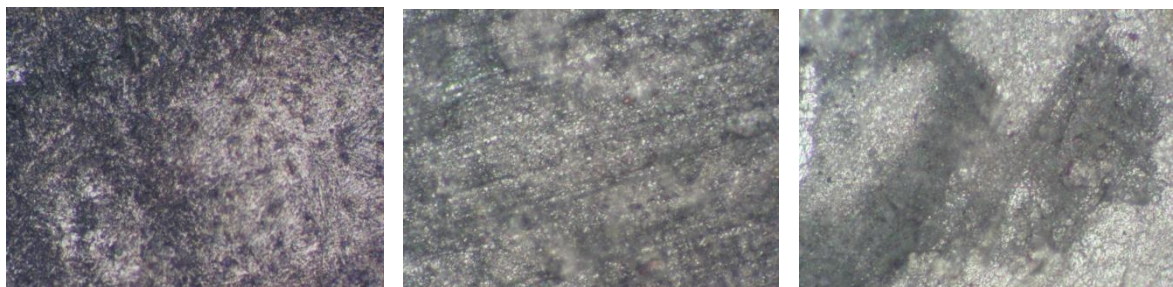


圖十七 不同轉速(a)550 rpm (b)800 rpm (c) 1100rpm 之鐸道再處理邊剖面金相(50X)

圖十八為 500 倍率的金相觀察位置的示意圖，當其 epoxy(環氧樹脂)比例 20% 不變轉速越快，經由金相觀察可以發現碳化矽粉末與鋁合金混合程度則越差，經圖十九可以發現當轉速 550rpm 時可以得到較好得混合程度。



圖十八 500 倍率的金相觀察 FSW 進入邊位置的示意圖



圖十九 不同轉速(a)550 rpm (b)800 rpm (c) 1100rpm 之鐸道進入邊剖面金相(500X)

肆、結論

- 一、進行摩擦攪拌加工時，衝擊值在轉速 800 rpm 時， 碳化矽粉末添加 epoxy 10% 會得到較高的衝擊值。
- 二、攪拌桿之轉速太低時無法產生接合效果。控制攪拌桿之旋轉速度 800rpm，進給速率為 45mm/min，碳化矽粉末添加 20%epoxy 時， 再搭配沿進給方向調整 2 度之傾斜角，可以獲得無孔洞之良好接合品質。
- 三、鋁合金 2024 以摩擦攪拌銲接後，隨碳化矽粉末添加 epoxy 粉末的比例的增加其銲道附近之微硬度值比母材微硬度值大，較佳的比例是在碳化矽粉末添加 epoxy20%。



參考文獻

1. W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, P. Templesmith, C. J. Dawes, GB Patent Application, No 9125978.8; U.S. Patent No. 5360317, Oct. 1995.
2. M. Guerraa, C. Schmidta, J. C. McClurea, L. E. Murra, A. C. Nunesb, "Flow patterns during Friction stir welding", *Materials Characterization* 49, PP 95-101, 2003.
3. Jiayi Sun and Lijun Weng and Qunji Xue, "Duplex treatment for surface improvement of 2024 Al", *Vacuum*, 62 (2001) 337-343
4. Manish Narayan, M. K. Surappa, B. N. Pramila Bai, "Dry sliding wear of Al alloy 2024-Al₂O₃ particle metal matrix composites", *wear* 181-183 (1995) 563-570
5. N. E. Bekheeta, R. M. Gadelrabb, M. F. Salahc, A.N. Abd El-Azimc, "The effects of aging on the hardness and fatigue behavior of 2024 Al alloy_SiC composites", *Materials Science and Engineering* (2002) 153-159
6. Mingwu Bai, Qunji Xue, Xiue Wang, Yong Wan, Weiming Liu "Wear mechanism of Sic whisker-reinforced 2024 aluminum alloy matrix composites in oscillating sliding wear tests" *wear* (1996) 100-105
7. Michael A. Sutton, Anthony P. Reynolds, Bangcheng Yang and Robert Taylor, "Mode I fracture and microstructure for 2024-T3 friction stir welds", *Materials Science and Engineering A*, 354 (2003) 6-16
8. M. J. Jones , P. Heurtier, C. Desrayaud, F. Montheillet, D. Allehaux , J.H. Driver, "Correlation between microstructure and microhardness in a friction stir welded 2024 aluminium alloy", *Scripta Materialia*, 52 (2005) 693- 697
9. Ying Li, L. E. Murr and J. C. McClure, "Solid-state flow visualization in the friction stir welding of 2024 al to 6061 al", *Scripta Materialia*, Vol.14, No.9, pp1041-1046, 1999
10. C. Genevois, A. Deschamps, P. Vacher, "Comparative study on local and global mechanical properties of 2024 T351, 2024 T6 and 5251 O friction stir welds", *Materials Science and Engineering A*, 415 (2006) 162-170
11. M. Amirizad, A.H. Kokabi 1, M. Abbasi Gharacheh , R. Sarrafi, B. Shalchi, M. Azizieh, "Evaluation of microstructure and mechanical properties in friction stir welded A356+15%SiCp cast composite", *materials letters*, 60 (2006) 565-568
12. G. J. Fernandez, L. E. Murr, "Characterization of tool wear and weld optimization in the friction-stir welding of cast aluminum 359+20% SiC metal-matrix composite", *Materials Science and Engineering*, 52 (2004) 65-75
13. K. Aota and K. Ikeuchi, "Development of friction stir spot welding using rotating tool without probe and its application to low-carbon steel plates", *Welding International* Vol. 23 (2009) 572-580.
14. Y. C. Chiou, C. T. Liu, R. T. Lee, "A pinless embedded tool used in FSSW and FSW of aluminum alloy", *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 213 (2013) 1818-1824.
15. Y. Tozaki, Y. Uematsu, K. Tokaji, "A newly developed tool without probe for friction stir spot welding and its performance", *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 210 (2010) 844-851.
16. L. Zhang, S. Ji, G. Luan, C. Dong and L. Fu, "Friction Stir Welding of Al Alloy Thin Plate by Rotational Tool without Pin", *J. Mater. Sci. Technol.* Vol. 27 (2011) 647-652.
17. D. Bakavos, Y. Chen, L. Babout, P. Prangnell, "Material Interactions in a Novel Pinless Tool Approach to Friction Stir Spot Welding Thin Aluminum Sheet", *Metallurgical and Materials Transactions A* Vol. 42 (2011) 1266-1282.
18. D. A. Wang, C. W. Chao, P. C. Lin, J. Y. Uan, "Mechanical characterization of friction stir spot microwelds", *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 210 (2010) 1942-1948.