

A6061-T6 之摩擦攪拌點銲製程的材料流場分析 A Study of Material Flow on Al Alloy A6061-T6 Friction Stir Spot Welding

劉如真* 賴全

Ju Jen Liu*, Chuan Lai

黎明技術學院機械工程學系

Department of Mechanical Engineering, Lee-Ming Institute of Technology

摘 要

本研究將利用 Tracer 進行攪拌凸銷幾何形狀對上板材料流動的影響的觀察。為觀察不同幾何形狀的工具凸銷對工具肩部下方之材料流動的影響，在上板適當的位置埋入銅粉末，待銲後觀察斷面顯微組織中的 Tracer 分佈。另一方面將藉由不同的擠入深度及停留時間的製程設計，觀察工具幾何形狀究竟是藉由何種機制及如何影響材料塑性流動及接合行為。實驗結果發現拘束空間 (Constrain Space) 之建立為形成攪拌區及銲件接合行為的必要條件。摩擦攪拌點銲期間，除工具的攪拌作用 (Traction Force) 直接造成材料的塑性流動外，由於攪拌工具幾何形狀在拘束空間內造成的壓力梯度 (孔隙效應) 更是形成攪拌區的關鍵因素，因此適當的攪拌工具設計將可大大提升銲件的接合效能。

關鍵詞：摩擦攪拌點銲、材料流動、孔隙效應、攪拌工具形貌

Abstract

Friction stir spot welding (FSSW) is a derivative process of the friction stir welding (FSW), which is a solid-state joining technique, due to the process temperature below the melting point, so it therefore does not exit porosity, solidification cracking and other defects generated by traditional fusion welding. It is especially suitable for magnesium, aluminum and other light metal alloys. Results showed that, the construction of the transient constrained space is a prerequisite to the formation of a stirring area and the bonding of the welding work pieces. Friction stir spot welding (FSSW) is driven mainly by the materials flow induced by the stirring tool in a constrained space that gradually diminishes the contact interface between the upper and lower plates leaving them bonded to each



other. The stirring tool has a decisive influence on the flowing behavior of the plastic and the bonding strength of the welding work pieces.

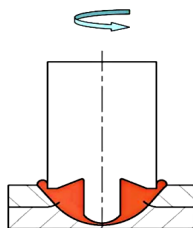
Key Words: FSSW, Materials flow, Void effect, Tool geometry



1. 前言

摩擦攪拌銲接(friction stir welding ; FSW) 是 The Welding Institute 在 1992 年研發出一種固態銲接技術[1-4]，開發初期主要應用於鋁合金的銲接，近年來，FSW 已成功地應用於許多材料的接合上[5-13]。

摩擦攪拌點銲(FSSW)技術有類似於摩擦攪拌銲接的製程，首先將銲件以搭接放置在襯板上(backing plate)並將之緊緊的夾持住，如圖一所示。摩擦攪拌點銲發展至今雖已多年，但板材接合的機理研究仍十分有限，遠不及其實務應用上的蓬勃發展。在製程中因複雜的熱與機械力及材料的交互作用，再加上不同的銲接參數及攪拌工具設計的差異，大部分的研究都僅就特定合金、板材厚度在固定攪拌工具或銲接參數條件下建立相關最佳的製程條件，但製程參數影響銲道型貌及銲件性質的機制等相關研究相對較缺乏。近年來各種形態的工具，在 FSSW 期間引發的材料流動模式已逐步被建立，但仍有許多的疑點待釐清。此外工具幾何形狀究竟是藉由何種機制及如何影響材料塑性流動及接合行為，則尚未有完整的論述被提出，這些都是工具設計時，重要的參考依據，也是未來研究的重點。



圖一：摩擦攪拌點銲(FSSW)示意圖。

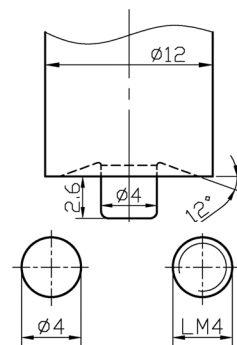
本研究將利用 Tracer 進行攪拌凸銷幾何形狀對上板材料流動的影響的觀察。為觀察不同幾何形狀的工具凸銷對工具肩部下方之材料流動的影響，在上板適當的位置埋入銅粉末，待銲後觀察斷面顯微組織中的 Tracer 分佈。另一方面將藉由不同的擠入深度及停留時間的製程設計，觀察工具幾何形狀究竟是藉由何種機制及如何影響材料塑性流動及接合行為。

2. 實驗方法

本文中摩擦攪拌點銲的材料是使用人工時效處理後的 A6061-T6 鋁合金軋延板材。試片長、寬為 80 mm×35 mm、厚度為 1.6 mm。

2.1 攪拌工具

FSSW 的攪拌工具材質為熱處理硬化的 SKH9 高速鋼，硬度為 HRc60-65，其肩部(shoulder)直徑及內凹傾角分別固定為 12 mm 及 13°，凸銷(pin)的長度(自肩部下緣至凸銷末端之距離)固定為 2.6 mm，如圖二所示。為瞭解凸銷之幾何形狀對材料流動及機械性質的效應，分別在工具的凸銷上再加工螺牙，形成不同型態的工具凸銷：



圖二：不同 Tool Pin 型態的攪拌工具之示意圖(單位：mm)。

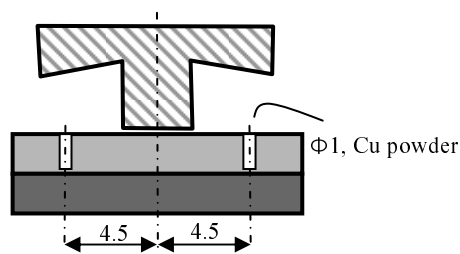
1. Tool with Smooth and Cylindrical Pin (簡稱 SC)。
2. Tool with Threaded and Cylindrical Pin (簡稱 TC)。

2.2 摩擦攪拌工具機

摩擦攪拌點銲是使用電腦數控(CNC)銑床之位移控制模式下進行。

2.3 流場分析

本研究將利用 Tracer 進行攪拌凸銷幾何形狀對上板材料流動的影響的觀察。為觀察不同幾何形狀的工具凸銷對工具肩部分下方之材料流動的影響，在上板適當的位置埋入銅粉末，如圖三所示，待銲後觀察斷面顯微組織中的 Tracer 分佈。



圖三：上板埋設銅 Tracer 位置示意圖 (單位：mm)。

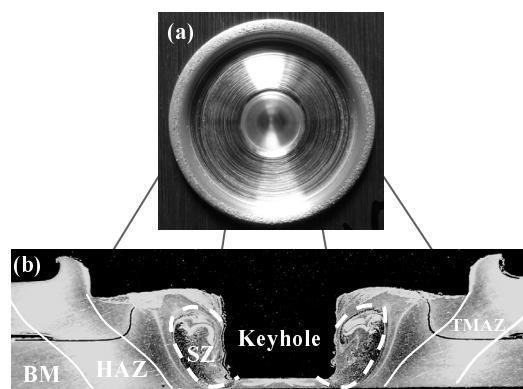
2.4 組織觀察

將銲後的銲件在匙孔中心位置沿縱向(LD；軋延方向)取其縱切面，經研磨拋光等標準金相製程後，以 Keller' s Reagent (5 ml acetic acid, 5 g picric acid, 10 ml H₂O, and 100 ml ethanol)腐蝕 3-5 min 後，以數位相機及光學顯微鏡(Olympus-BX51M)觀察其銲道組織分佈。

3. 結果與討論

3.1 工具螺牙之攪伴效應

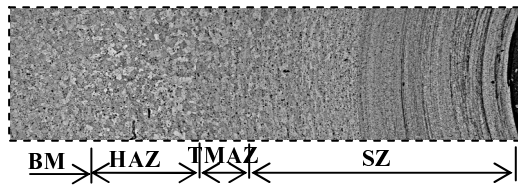
摩擦攪拌期間由於攪拌工具的作用導致材料溫度上升及塑變行為，因此銲道的型態與微觀組織明顯受到攪拌工具的影響。由於凸銷型貌的不同對摩擦熱的產生及材料塑性流動效應也不同，圖四顯示為採用具螺紋圓柱的工具之典型 FSSW 銲件，圖四(b)中所示的橢圓狀虛線所圍起的區域為攪拌區(SZ)，因攪拌區內的特有的再結晶組織及織構(Texture)形成不同的對比，即使是在低放大倍率下觀察仍舊清晰可辨。



圖四：典型的 FSSW 銲件：(a)銲道上視巨觀影像，(b) 銲道斷面組織分佈。

FSSW 銲件依顯微組織不同可將之分為四個區域：由外至內依序為底材(BM)、熱影響區(HAZ)、熱機影響區(TMAZ)以及攪拌區(SZ)，如圖五所示。



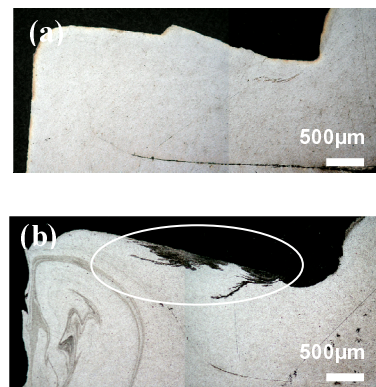


圖五：使用 TC 的 FSSW 製程之銲件，依顯微組織不同可將之分為四個區域：由左至右依序為底材(BM)、熱影響區(HAZ)、熱機影響區(TMAZ)以及攪拌區(SZ)。

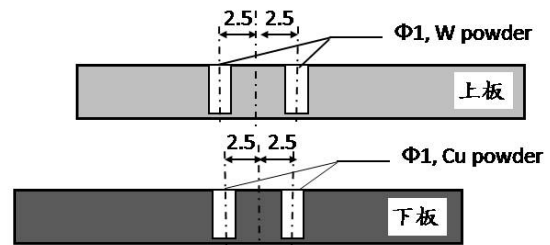
為方便觀察具傾角設計的工具肩部對材料流動的效應，部份試片在銲接前在上板表面距銲接中心 4.5 mm 的位置鑽直徑 1 mm 的盲孔(圖三)，並埋入銅粉末作為 Tracer，並以快乾膠封口，待銲後觀察斷面顯微組織中銅粉的分佈。如圖六示，銅 tracer 在使用 TC 於 3 s 保持時間的 FSSW 製程後，有明顯往凸銷移動的趨勢，證明在使用具螺紋圓柱的凸銷的 FSSW 過程，工具肩部下方的材料有朝向凸銷移動的趨勢。此乃因孔隙效應提供周圍材料朝向凸銷移動的驅動力，再加上肩部傾斜面的幾何效應，銅粉末朝凸銷移動的現象十分明顯。而使用光滑凸銷的 SC-FSSW 製程，因工具肩部的傾斜面的幾何效應，銅 tracer 亦有朝向凸銷移動的趨勢，只是不像具螺紋的凸銷的 FSSW 過程明顯。

為進一步觀察凸銷幾何形狀對材料流動的效應，在銲接前部份試片在上/下板適當的位置鑽盲孔(圖七)並埋入追蹤粉末(上板鎢/下板銅)，待銲後觀察其微觀組織中的 Tracer 分佈。圖八顯示二種銲件下板為埋入銅 Tracer 在銲前/後所鑽的盲孔位置。匙孔周圍白色區域為銲件攪拌區。其中較特別的是圖八(b)所示，如前段所述，

原本埋在下板的銅粉很少在攪拌區被偵測到，而埋銅粉的孔洞位置卻隨著攪拌區形成及擴大不斷的被往外推擠，亦即如圖八(c)所示，原本埋 Tracer 的兩孔洞相隔 5mm，銲後兩孔洞間隔 >7mm，影像顯示埋粉的盲孔在銲後依舊出現在攪拌外緣。因此可判斷攪拌區的形成及成長是須經由不斷的上下板材料併入螺牙根部，再沿螺牙而下並在末端被釋放等一系列的動作組合，並在材料釋放過程中有推擠外圍材料之情形。

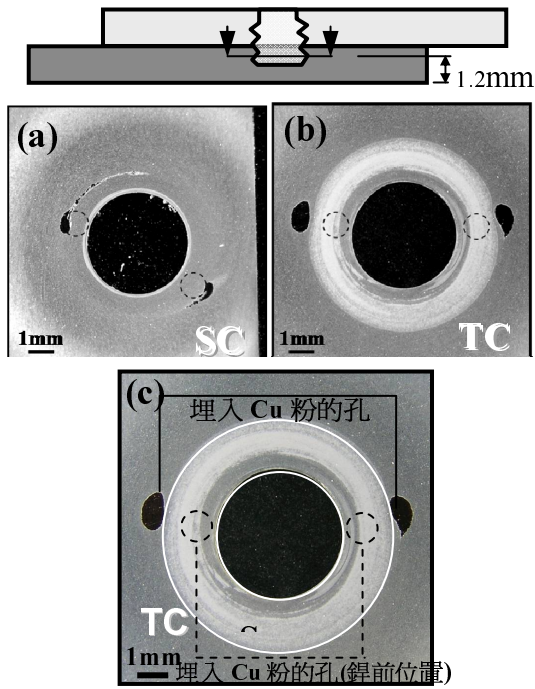


圖六：在 3 s Dwell time 的 FSSW 製程後，銅 Tracer 的分佈。(a) SC-FSSW，(b) TC-FSSW。影像中，Cu tracer 呈現黑色對比。



圖七：上板與下板材鑽孔埋粉位置示意圖(單位：mm)





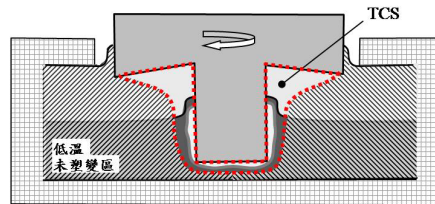
圖八：不同 FSSW 製程之銲件在距底部 1.2 mm 處的上視 OM 影像。
 (a) SC-FSSW, (b) TC-FSSW。
 (c)TC-FSSW 之銲件下板在銲前/後為埋入 Cu 粉所鑽的盲孔位置。

文獻[52]指出在 FSSW 過程，單靠高速攪拌的工具肩部並無法驅使材料沿著凸銷向下流動。在 SC 製程因缺少螺牙效應使材料產生軸向運動，故不論時間長短在銲件的上視影像，都鮮見鎢 Tracer 出現在接合線下方。Tracer 追蹤結果證實了凸銷上的螺紋對摩擦攪拌點銲攪拌區的形成，以及混合上下板材的重要效應。

3.2 FSSW 製程保持階段(dwelling period)的材料流動

高速旋轉的工具肩部接觸上板後，由於工具肩部對接觸材料的擠鍛作用，將使肩部下方的材料產生周向及徑向(朝著凸銷方向)的運動。而在工具肩部完全接觸上

板後，即進入保持階段，強大的軸向及徑向壓力改變被擠出的下板材料流動的方向，此時在工具肩部、凸銷及未塑性變形(低溫區域)材料所包圍的區域，將形成一近似封閉的空間(圖九紅色虛線包圍區域)，將塑性流動的材料拘束於此，此拘束空間會隨材料流動呈現動態變化，本文將其稱為”暫態拘束空間”(Transient constraint space，以下簡稱為 TCS)。



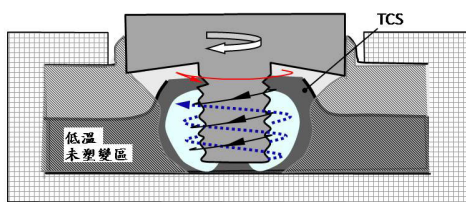
圖九：TCS (transient constraint space)示意圖。

在保持階段，由於工具肩部與上板接觸使材料受到更多的 traction force 作用並引發溫度上升，材料在高溫及連續機械力的雙重作用下，將呈現塑性流動的狀態。而在 TCS 建立的同時，由於凸銷的幾何特徵，導致工具在轉動的過程會於局部區域形成壓力梯度 (pressure gradient or stress gradient)，進而引發一系列包括周向、軸向甚至徑向的材料塑性流動。壓力梯度的形成，則是肇因於凸銷的幾何特徵在工具轉動的過程所形成孔隙，而在孔隙的位置會有陡峭的壓力差，而驅使材料流入孔隙內，稱為孔隙效應(void effect)。而材料的塑性流動行為，除了與攪拌工具的幾何特徵有關，也與材料本身的性質及製程參數有直接關聯。



3.2.1 使用具螺紋圓柱凸銷的攪拌工具之 FSSW 製程

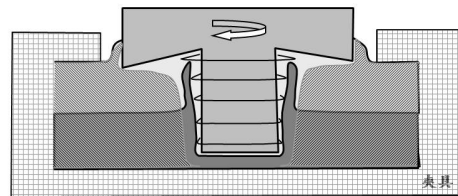
在 FSSW 製程中，當工具肩部完全接觸上板後，工具肩部對下方材料的摩擦效應產生高溫及接觸作用力 (traction force)，而肩部下方材料的塑性流動受到銲道外緣低溫區的限制，不易往外圍發展，因此工具肩部旋轉帶動下方材料形成圓周流動 (rotation flow)。沿厚度方向溫度的分佈，隨著遠離工具肩部的距離加大，溫度逐漸降低，材料的圓周運動也趨緩，形成一個倒錐狀流動形態。由於攪拌工具的螺紋幾何特徵，使其在凸銷的螺紋起始位置具有孔隙效應，並且伴隨凸銷的旋轉，此單一孔隙入口會在旋轉運動過程將周圍材料吸入，並利用螺牙的螺旋效應將上下板材料向下傳送。而沿軸向往下流動之材料，在凸銷的末端被釋放 (discharge) 時所造成的 Circulation effect，使材料產生混合行為，而形成的攪拌區 (SZ)，隨製程時間增加有擴大的趨勢 (圖十)。



圖十：用螺紋圓柱凸銷的 FSSW 製程，Dwell 期間攪拌工具肩部及凸銷對材料塑性流動的效應示意圖。

工具肩部接觸上板，TCS 形成的同時，凸銷表面未被材料填實的螺牙根部位置，瞬間形成多重流入口，吸引周圍材料朝牙根流入。

因此在使用螺紋圓柱凸銷的 FSSW 製程中，TCS 一旦建立後，來自於工具肩部強大的軸向及徑向壓力，將改變在擠入階段被擠出的下板材料的流動方向，鄰近凸銷螺紋起始點的上下板材料，將循螺紋方向向下流動，並於凸銷末端被釋放 (螺旋效應)。如此一再循環而形成/擴大攪拌區 (圖十一)。在攪拌區的擴大過程將排擠周圍的下板材料，而提供接合界面相當的壓縮應力，有助於上下板材料的鍵結。



圖十一：FSSW 製程凸銷 dwell 階段，材料塑性流動示意圖。

3.2.2 使用光滑圓柱凸銷的攪拌工具之 FSSW 製程

在 dwell 階段，TCS 建立後，光滑圓柱凸銷的攪拌工具因缺乏螺旋效應所提供的軸向運動驅動力，無法衍生後續可促使攪拌區形成的材料流動，其周向運動也將侷限於工具凸銷周圍 traction force 影響所及之處 (圖十一)。因旋轉的凸銷擠入後所佔據的體積迫使下板材料往上移動，類似於擠製製程 (back extrusion)，迫使上下板接合界面向上發展，因此所形成的接合界面是陡峭且緊鄰匙孔。

4. 結論

基於實驗之結果與觀察，而有下列之結論：



1. 藉由粉末 Tracer 技術觀察到具有螺牙凸銷的攪拌工具，可使材料產生明顯的軸向流動，並將上板材向下傳送形成攪拌區，而光滑圓柱凸銷則無此趨勢。顯示凸銷的螺牙有驅動材料軸向流動的效應。
2. 在摩擦攪拌點銲製程中，當工具肩部 (shoulder) 接觸上板材料後，在肩部下、凸銷周圍及低溫未塑性變形材料之間的區域，將形成一近似密閉的暫態空間 (transient constraint space ; TCS)，將塑性流動的材料拘束於此，進而引發一系列包括周向、軸向甚至徑向的材料塑性流動。TCS 會隨著總輸入功的增加而擴大，但亦伴隨 TCS 內壓力下降，TCS 的建立為攪拌區 (SZ) 形成之必要條件。

參考文獻

1. W. M. Thomas and E. D. Nicholas, Friction stir welding for the Transportation industries, *Materials & Design*, Vol. 18, No. 4/6, 269-273, 1997.
2. R. W. Fonda, J. F. Bingert and K. J. Colligan, Development of grain structure during friction stir welding, *Scripta Materialia*, Vol. 51, 243-248, 2004.
3. W. Deqing and L. Shuhadr, Study of friction stir welding of aluminum, *Journal of Materials Science*, Vol. 39, 1689-1693, 2004.
4. R. S. Mishra, and Z. Y. Ma, Friction stir welding and processing, *Mater. Sci. Eng., R*, Vol. R50, 1-78, 2005.
5. G. Lu and J. C. Williams, *Titanium*, Springer, NY, 109-113, 2007.
6. D. G. Sanders, M. Ramulu and P. D. Edwards, Superplastic Forming of Friction-Stir Welds in Titanium Alloy 6Al-4V: Preliminary Results, *Materialwissenschaft und We-kstofftechnik*, 39, 553-557, 2008.
7. C. Meran, V. Kovan and A. Alptekin, Friction Stir Welding of A101304 Austenitic Stainless Steel, *Materialwissenschaft und We-kstoff-technik*, 38(10), 829-835, 2007.
8. D. J. Shindo, A. R. Rivera and L. E. Murr, Shape Optimization for ToolWear in the Friction-Stir Welding of Cast Al 358-20% SiC, *J. Mater. Sci.*, 37, 4999-5005, 2002.
9. R. A. Prado, L. E. Murr, K. F. Soto and J. C. McClure, Self Optimization in Tool Wear for Friction-Stir Welding of Al 6061 + 20% Al₂O₃ MMC, *Mater. Sci. Eng.*, A349, 156-165, 2003.
10. M. Amirizad, A. H. Kokabi, M. A. Gharacheh, R. Sarrafi, B. Shalshi and M. Azizieh, Evaluation of Microstructure and Mechanical Properties in Friction Stir Welded A356 + 15% SiC", *Cast Composite, Mater. Lett.*, 60(4), 565-568, 2006.
11. C. G. Rhodes, M.W. Mahoney, W.H. Bingel, R.A. Spurling and C.C. Bampton, Effects of Friction Stir Welding on Microstructure of 7075 Aluminum, *Scripta Mater.*, 36, 69-73, 1997.
12. G. Liu, L. E. Murr, C. S. Niou, J. C. McClure and F. R. Vega, Microstructural Aspects of the Friction-Stir Welding of 6061-T6 Aluminum, *Scripta Mater.*, 37,



- 355–359,1997.
13. Y. Li, L. E. Murr and J. C. McClure, Flow Visualization, Residual Microstructures Associated with the Friction-Stir Welding of 2024 Aluminum to 6061 Aluminum, Mater. Sci. Eng., A271, 213–223 ,1999.

