

摩擦攪拌銲接銲接力量的變化 Variation of Welding Force During Friction Stir Welding

林本源 許儒仲

Ben-Yuan Lin, Ju-Chung Hsu

黎明技術學院 機械工程系

Department of mechanical engineering, Lee-Ming Institute of Technology

王士賓

Shih-Bin Wang

黎明技術學院 創意產品設計系

Department of Innovative Product Design, Lee-Ming Institute of Technology

摘 要

本研究探討鋁合金板材，在不同銲接參數下進行摩擦攪拌銲接之銲接力量的變化。銲接過程中以自行組裝的力量量測系統來量取進給力、側向力以及下壓力等銲接力量的變化。結果顯示，側向力受到機具震動的影響，約存在 $\pm 20\text{N}$ 高頻率的反覆震盪。在不同的銲接條件下會有不同的進給力，進給力的變化範圍約在 40N 到 140N 之間。在設定為位移控制的摩擦攪拌銲接過程中，下壓力量並非定值而是約有 20% 約 1KN 的變動。進給力隨著攪拌頭進給速率 v 的增加而增加，但隨著旋轉速率 Ω 的增加而減小，進給力與入熱量 (Ω^2/v) 存在著反比例的關係。各不同條件銲接過程的下壓力曲線變化幾乎都有著相同的變動趨勢，而且下壓力大小沒有明顯的差異。轉速、進給速率等製程參數，亦即入熱量的大小對下壓力的變化沒有顯著的影響。

關鍵詞：摩擦攪拌銲接、銲接力、鋁合金、入熱量

Abstract

In this study, the welding force variation in friction stir welding of aluminum alloy plates under different processing conditions were investigated. During the experiment process, the changes of traverse force, lateral force and downward force were measured by using a self-assembled force measurement system. The results show that the value of lateral force was oscillating among the range of $\pm 20\text{N}$ due



to the vibration of the associated machine. Different traverse force was obtained in each welding condition. The value of traverse force was distributed from 40 N to 140 N. The downward force was not kept in constant under a displacement control welding procedure. The value of downward force had a 20 % (about 1 KN) variant. The traverse force increases with increasing the tool traverse rate (v), nevertheless, increasing the tool rotation speed (Ω) decreases the traverse force. The traverse force was inverse-proportional to the heat input rate (Ω^2/v). The change of the curve of downward force in each welding condition has the same trend; moreover the value of downward force has no evident difference. The variation of downward force was little affected by the tool rotation speed and tool traverse rate, i.e. heat input.

Key Words: Friction stir welding, Welding force, Aluminum alloys, Heat input rate



1. 前言

摩擦攪拌銲接(Friction Stir Welding, FSW)，此技術為英國銲接研究所(The Welding Institute, TWI)於 1991 年研發而成，且此技術原理簡單、控制參數少、易於自動化，可將銲接過程中的人為因素降到最低。摩擦攪拌過程，如圖 1 所示，由一只包含有螺紋凸出銷 (projecting threaded pin) 的肩狀圓柱形攪拌頭

(cylindrical-shouldered tool)，以一固定的轉速將凸出銷插入工件的接合部位，接著攪拌頭沿著接合線以等速移動進行銲接。銲接操作時熱量的產生，主要由於工具表面與材料的摩擦以及工具週邊材料塑性變形所導致，攪拌頭在已塑化的材料中進給移動，同時攪拌與擠鍛材料來完成銲接程序。[1, 2]

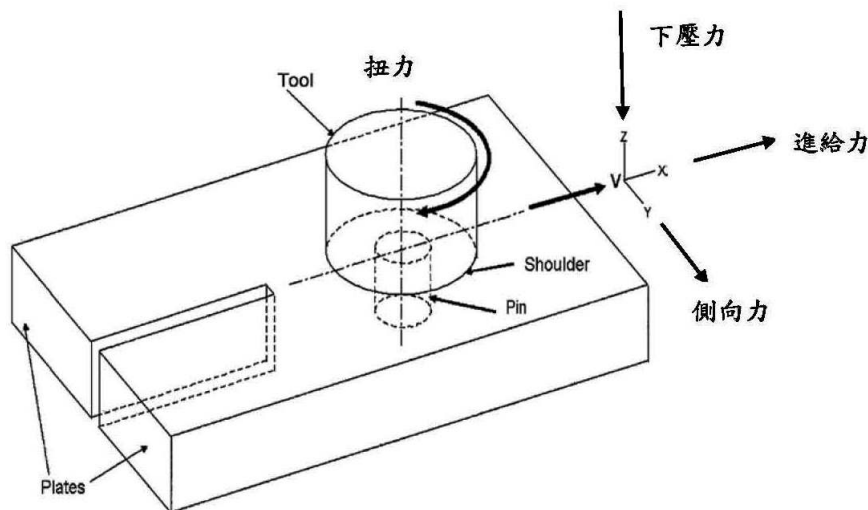


圖 1 FSW 以及銲接力量示意圖

摩擦攪拌銲接的最大特色，為整個銲道溫度未超出材料的溶點，屬於一種固態的銲接技術，摩擦攪拌銲接與傳統的熔銲相比，擁有許多優點，例如：銲接前銲件不須開槽不須清除表面氧化物；銲接過程中不需要填料及保護氣體；銲接後銲件內幾乎不存在氣孔，裂縫變形量也小，因此具有廣泛的工業應用前景和發展潛力[3]。摩擦攪拌銲技術是世界銲接技術發展史上，自發明到工業應用時間跨度最短和發展最快的一項連接技術，被譽為“世界銲接史上的第二次革命”的技術，目前已在航太、車輛、造船、建築等行業得到成功的應用。

摩擦攪拌銲接過程中攪拌頭將受到幾個力量的作用如圖一所示[4]：1.下壓力(downward force)－用以保持攪拌頭在材料表面或表面下適當位置的力量，有許多摩擦攪拌銲接機在操作時設定為壓力控制(Load control)即下壓力保持固定，但有許多情況攪拌頭必須保持在垂直方向的固定位置，操作時設定為位移控制(Displacement control)，則下壓力在銲接過程將會改變。2.進給力(traverse force)－平行於攪拌頭移動方向，為材料對工具產生的阻力，當阻力增加時進給力也會增加，所以預期當攪拌頭與材料間的溫度增加時，進給力將降低。3.側向力(lateral force)



一垂直於工具移動方向的力量。4. 扭力 (torque) — 用以轉動攪拌工具的力矩，其大小與下壓力、摩擦係數及材料流動強度有關。為了避免攪拌頭與機具過度的磨耗或破損，銲接力以及銲接力的變化愈小愈好，也就是選擇高入熱量以及低進給速率的銲接程序，但過高的入熱量以及太低的進給速率，將不利於銲件品質以及製程效率，所以如何選擇適當的製程參數，能在銲接力、品質與效率間取得平衡，是值得進一步探討的。

近幾年有關摩擦攪拌銲接力量量測 Blignault et al.[5] 曾利用多軸位感器 (multi-axial transducer) 來測量攪拌頭的受力及溫度的變化；Hattingh et al.[6] 則改變攪拌頭的幾何形狀來測量銲接力量的改變以及對抗拉強度的影響；Vilaca et al. [7] 將包含有四具荷重元 (load cell) 的荷重量測平台 (load measurement table) 所測量力量的變化，加上溫度分佈資料輸入套裝軟體，來建立銲件品質與銲接參數的關連性。

本研究選擇不同攪拌頭轉速、進給速率等銲接參數，在傳統銑床上對 A6061-T6 鋁合金板材進行摩擦攪拌銲接，銲接過程利用一套包含有動力計、訊號放大器、USB 訊號擷取卡以及個人電腦的力量量測系統來量取銲接力的變化，實驗所得的數據用來探討分析摩擦攪拌銲接過程中銲接力量的變化，以及銲接力量、銲接參數以及入熱量之間的關聯性。

2. 實驗方法

實驗用的銲材為 A 6061-T6 鋁合金板材，長與寬為 100 mm×45 mm、厚度 4 mm。攪拌頭的材料選用 SKD61 熱作模具鋼，肩部直徑為 12mm，凸出銷的直徑為 4 mm、長度 3.8 mm，表面車製有 M4 螺紋，攪拌頭加工完畢後再施以 1050 °C / 3

0 min 油淬以及 550 °C / 2 hr 兩次回火處理。銲材在裝有光學尺 (精度 0.005mm) 銑床上進行摩擦攪拌對接 (FS butt welding)，攪拌頭領導角 (leading angle) 為 2°，轉速與銲接進給速率的組合列於表 1 中的第一與第二欄，摩擦攪拌銲接過程設定為位移控制，攪拌頭下陷深度 (plunge depth) 保持在 0.1mm。

表 1 銲接參數、相對入熱量、進給力及下壓力

轉速 Ω (rpm)	進給速率 v (mm/min)	入熱量 Ω ² / v	進給力 (N)	下壓力 (KN)
800	61	10491	104	4.7
	87	7356	115	5.2
	127	5039	142	5.0
1100	61	19836	35	6.6
	87	13908	87	5.0
	127	9527	111	4.6
	187	6470	141	4.4
1250	61	25614	41	4.6
	87	17959	77	4.4
	127	12303	84	4.6
	187	8355	123	4.8
1600	87	29425	47	5.2
	127	20157	70	5.2
	187	13689	103	5.1

摩擦攪拌銲接過程中力量變化的量測，使用 KISTLER Type 9272 動力計，連結多功力量訊號放大記錄器、Advantech USB-4716 資料擷取卡、桌上型電腦等，以及自行撰寫之 VB 程式來量測分析摩擦攪拌點銲過程中進給力 (F_X)、側向力 (F_Y)、下壓力 (F_Z) 三軸力量變動趨勢與大小，每 0.1 秒擷取訊號一次。圖 2 分別為 KISSLER 動力計以及動力計與相關夾治具組合的照片。





圖 2(a) KISTLER 動力計照片

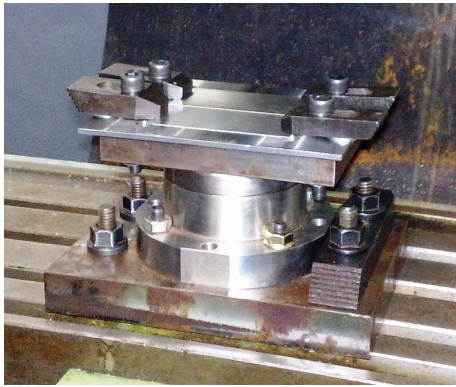


圖 2(b) 夾治具與動力計組合照片

3. 結果與討論

本研究的銲接程序分為下述幾個階段：1、攪拌頭保持固定轉速垂直插進材料表面至固定的深度(Plunge depth 0.1mm)，2、停留 30 秒預熱軟化材料，3、攪拌頭以等速率沿著接合線移動進給 80 mm 距離，4、停止進給，攪拌頭退出材料表面。

3.1 銲接力量的變化

圖 3 為攪拌頭轉速 1100 rpm，進給速率 87 mm/min 摩擦攪拌銲接過程，動力計所記錄下如圖 1 所示三軸力量隨銲接四階段時間變化的曲線圖。由圖 3(a)中實驗數據曲線可以看出，整個銲接過程 X 軸方向的進給力量均存在約±20 N 的震盪，但從數據平滑(Data smoothing)曲線中可觀察到，在攪拌頭停留 30 秒的階段進給力接近於零，當攪拌頭開始移動，受到材料阻力的影響，進給力在 X 軸反方向約上昇至 80

N。最後進給停止攪拌頭抽離材料表面，進給力幾乎又下降至零的大小。至於在 Y 軸方向的側向力(圖 3(b))，與進給力一樣存在著約±20 N 大小的震盪，但由數據平滑曲線可看出，銲接過程中所測得的側向力接近於零而且並無明顯的改變，側向力應該是受到機具震動的影響所產生的。

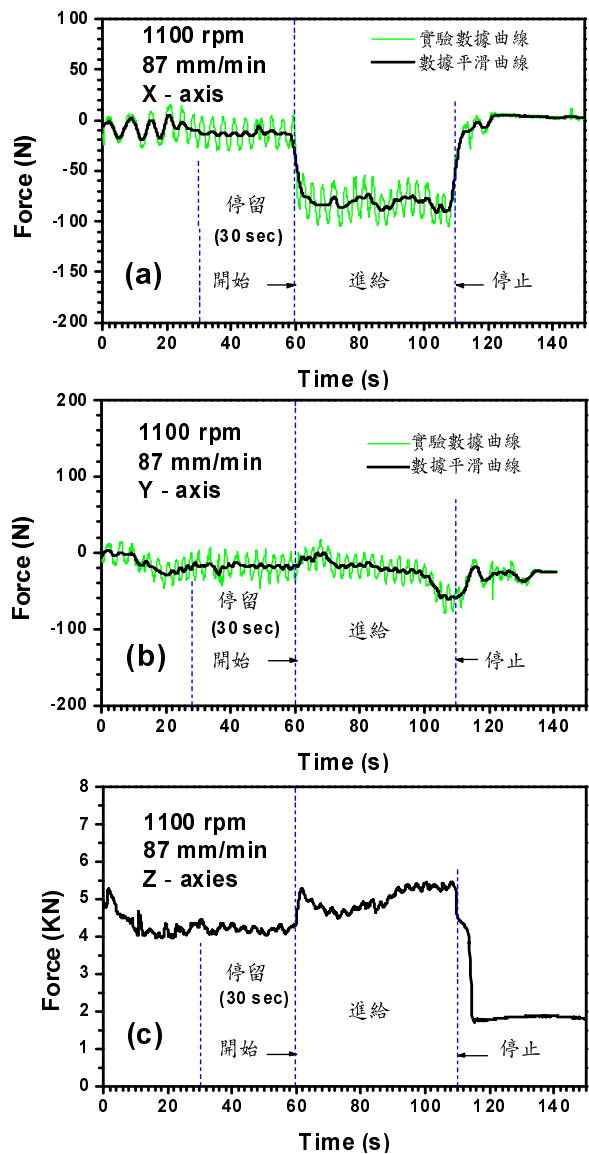


圖 3 1100 rpm，87 mm/min 三軸力量的變化，(a) F_x (進給力)，(b) F_y (側向力)，(c) F_z (下壓力)。



至於 Z 軸方向的下壓力(圖 3(c))，攪拌頭初插入材料表面時下壓力約上升至 5.3 KN。當攪拌頭緩慢的下降至固定的深度，下壓力也漸漸的減少到 4.1 KN，下壓力在攪拌頭停留軟化材料的階段也一直維持在 4.1 KN 上下。當攪拌頭開始進給移動，下壓力瞬間上升至 5.3 KN，進給移動的初期(約 15 秒鐘) 下壓力又漸漸下降至 4.5 KN，之後下壓力量又隨著進給移動緩慢的上升，到銲接進給行程終止前，下壓力又回升到約 5.3 KN。

本研究中摩擦攪拌銲接過程設定為位移控制，即攪拌頭保持在一定的垂直位置，但由圖 3(c)中可以看出從攪拌頭接觸到材料開始至銲接行程結束，受到塑性材料流摩擦係數以及材料強度變化的影響，下壓力量並非定值約有 20%約 1KN 的變動。

3.2 進給速率對銲接力量的影響

圖 4(a)和圖 4(b) 分別為攪拌頭轉速 1100 rpm，進給速率為 61、87、127 以及 187 mm/min 等四種摩擦攪拌銲接製程，進給力(F_X)的數據平滑曲線以及下壓力(F_Z)曲線的比較。由於 Y 軸方向的側向力，如前節所示銲接過程中僅存在約 ± 20 N 大小的震盪並無明顯的變化，故不再進一步討論。

從圖 4(a)中可以看出，攪拌頭轉速相同，進給力隨著進給速率的增加而增加。此一現象的原因應該是進給速率愈高，相反的熱輸入量將愈少，造成材料塑化程度減小對攪拌頭抵抗力增加所導致。在進給速率為 61 mm/min 的條件下，當攪拌頭移動 40mm 一半的銲接行程(橫坐標 99.2 秒的位置)，進給力約為 35 N。而在速率為 187 mm/min 的條件下，在一半銲接行程的進給力也幾乎提昇了三倍，約為 140 N(橫坐標 72.8 秒的位置)。

至於在相同轉速下，不同銲接進給速率的下壓力變化，從圖 4(b)中可以了解幾乎都有著相同的變動趨勢，當攪拌頭開始進給移動，下壓力瞬間上升，進給移動的初期下壓力漸漸下降，隨後下壓力量又隨著進給移動緩慢的上升，到銲接進給行程終止時，下壓力又回升到一高值。在進給速率為 61 mm/min 的條件下下壓力偏高，在銲接行程為一半距離時約為 6.5 KN (橫坐標 99.2 秒的位置)。而在其餘三種銲接條件的下壓力變化，除了有相同的變化趨勢外，大小的差異也不大。

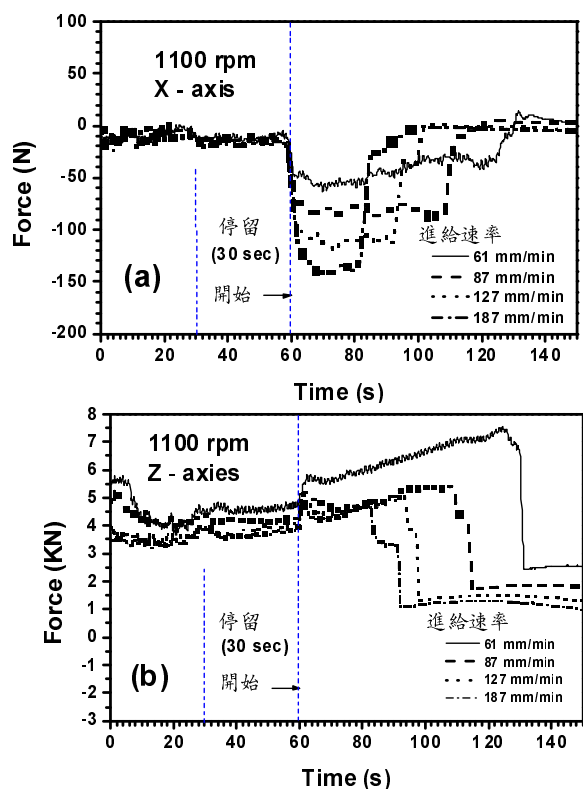


圖 4 轉速 1100 rpm，61、87、127、187 mm/min 四種不同進給速率，X、Z 軸力量的變化，(a) F_X (進給力)，(b) F_Z (下壓力)。

3.3 旋轉速率對銲接力量的影響

圖 5(a)和圖 5(b) 分別為進給速率 127 mm/min，攪拌頭轉速 800、1100、1250、以及 1600 rpm 等四種摩擦攪拌銲接製



程，進給力(F_x)的數據平滑曲線以及下壓力(F_z)曲線隨時間變化的比較。從圖 5(a)中可以了解，當攪拌頭移動進給一半的銲接行程時(40 mm，橫坐標 77.8 秒的位置)，四種不同轉速的進給力分別約為 142 N (800 rpm)、111 N (1100 rpm)、82 N (1250 rpm)和 69 N (1600 rpm)。攪拌頭進給速率相同，進給力隨著轉速的增加而下降。此一現象應該也是與熱輸入量相關，攪拌頭旋轉速率愈高，相對的熱輸入量也愈高，增加了材料的塑化程度，對攪拌頭抵抗力也將更減小。

至於在相同進給速率下，不同攪拌頭旋轉速率的下壓力變化，從圖 5(b)中可以看出，除了有著相同的變動趨勢，各個條件在移動進給過程中的下壓力變化曲線也接近重疊。

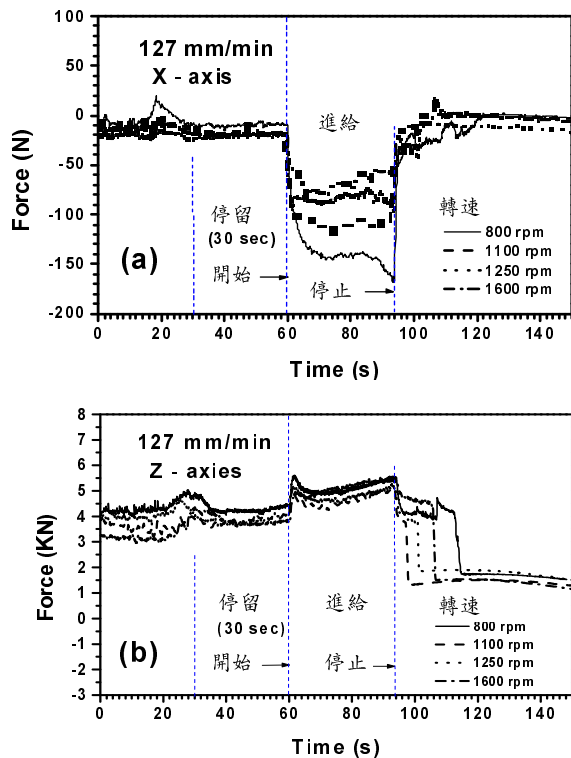


圖 5 進給速率 87 mm/min，800、1100、1250、1600 rpm 四種不同轉速，X、Z 軸力量的變化，(a) F_x (進給力)，(b) F_z (下壓力)。

3.4 入熱量對銲接力量的影響

摩擦攪拌銲接的熱輸入量(Heat input)與攪拌頭的旋轉速率(Ω)和進給速率(v)有關[8,9]，如下列公式表示：

$$\text{入熱量} \propto \frac{\Omega^2}{v} \quad (1)$$

將本研究各組銲接參數之旋轉速率的平方，除以銲接進給速率(Ω^2/v)的值代表各銲接程序的入熱量，列於表 1 中的第三欄。

在一個摩擦攪拌銲接過程，依熱流和溫度分佈的狀態可分成幾個階段[4]：攪拌頭停留階段(Dwell)、攪拌頭開始移動的暫態加熱階段(Transient heating)、熱量產生接近常數的准穩態階段(Pseudo steady-state)、銲接接近完成的後穩定階段(Post steady-state)。本實驗的各個 FSW 製程，將攪拌頭進給移動經過一半行程(40 mm)時，假設為已處於准穩態階段。

表 1 中第四欄和第五欄所列的數值，則分別為各銲接程序中攪拌頭進給移動至一半行程之准穩態階段時的進給力和下壓力。圖 6(a)是利用表 1 中第三欄和第四欄的數據所繪出進給力隨熱輸入量變化的關係圖，從圖中可看出進給力隨入熱量增加成比例的減少，尤其在低入熱量時愈滿足線性變化的關係。圖 6(b)則是利用表 1 中第三欄和第五欄的數據所繪出下壓力隨熱輸入量變化的關係圖，下壓力幾乎不隨入熱量的改變有太大的改變，除了在 1100 rpm / 61 mm/min 條件之下壓力較高(6.6 KN)，其餘均在 4.8 ± 0.4 KN 的範圍內做變化。



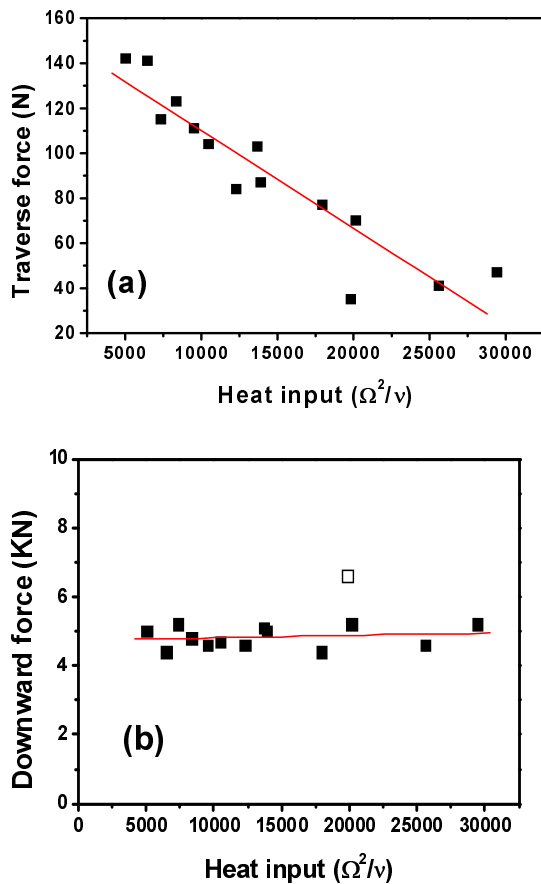


圖 6 銲接力隨入熱量的變化曲線，(a)進給力，(b)下壓力。

4、結論

本研究選擇不同攪拌頭轉速、進給速率等銲接參數，對鋁合金板材進行摩擦攪拌銲接，來探討分析銲接過程中銲接力量中的下壓力、進給力以及側向力的變化。

側向力僅受到機具震動的影響，存在於約 $\pm 20\text{N}$ 高頻反覆的震盪。至於進給力，在不同的銲接條件下會有不同的攪拌頭移動阻力，其變化範圍約在 40N 到 140 N 之間。在位移控制的摩擦攪拌銲接過程中，從攪拌頭接觸到材料開始到銲接行程結束，受到塑性材料流摩擦係數以及材料強度變化的影響，下壓力並非定值約有 20% 約 1KN 的變動。

進給速率愈高，材料對攪拌頭抵抗力愈大，在轉速相同的情況下，進給力將隨著進給速率的增加而增加。至於在相同轉速下，不同進給速率的條件，下壓力變化幾乎都有著相同的變動趨勢，而且大小也差異不大。攪拌頭進給速率相同，旋轉速率愈高，材料對攪拌頭抵抗力減小，進給力隨著轉速的增加而下降。至於相同進給速率下，不同攪拌頭旋轉速率的下壓力變化，除了有著相同的變動趨勢，各個條件的下壓力變化曲線也接近重疊。

摩擦攪拌銲接過程的熱輸入量與攪拌頭迴轉速率的平方成正比，與進給速率成反比。進給力隨入熱量增加成比例的減少，但對下壓力的影響則不明顯。

誌謝

黎明技術學院機械系專題同學黃麟翔、宋志偉、陳振維、謝書維、吳峙宏等，參與本研究中儀器設備的組裝校正以及實驗的操作，在此特予誌謝。

參考文獻

- [1] Y. S. Sato and H. Kokawa, *Welding Int.* Vol. 17 (2003), p. 852.
- [2] P. L. Threadgill, A. J. Leonard, H. R. Shercliff and P. J. Withers, *Int. Mater. Rev.* Vol. 54 (2009), p.49.
- [3] R. S. Mishra and Z. Y. Ma, *Mater. Sci. Eng. R* Vol. 50 (2005), p. 1.
- [4] www.en.wikipedia.org/wiki/Friction_stir_welding, Wikipedia Encyclopedia.
- [5] C. Blignault, D. G. Hattingh, G. H. Kruger, T. I. van Niekerk, M. N. James, *Measurement* Vol. 41 (2008), p. 32.
- [6] D. G. Hattingh, C. Blignault, T. I. van Niekerk, M. N. James, *J of mater. Process. tech.* Vol. 203 (2008), p.45.



- [7] P. Vilaca, L. Quintino, J. Dossantos, R. Zettler , S. Sheikhi, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 445–446 (2007), p. 501.
- [8] J. W. Pew, T. W. Nelson and C. D. Sorensen, STWJ Vol. 12, No. 4 (2007), p.341.
- [9] P. Biswas and N. R. Mandal, Welding J. Vol. 90 (Jul. 2011) p. 129-S.

