

嘉南藥理科技大學專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

利用 Bessel 函數對摩擦攪拌製程之二維熱傳分析

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：CNMI 93-02

執行期間：93 年 1 月 1 日至 93 年 12 月 31 日

計畫主持人：徐宏修

共同主持人：

計畫參與人員：

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：嘉南藥理科技大學 資訊管理係

中華民國 94 年 2 月 21 日

嘉南藥理科技大學研究計畫成果報告

利用 Bessel 函數對摩擦攪拌製程之二維熱傳分析

An Analysis on Two Dimensional Heat Transfer of Friction Stir Process by using Bessel Function

計畫編號：CNMI93-02

執行期限：93 年 1 月 1 日至 93 年 12 月 31 日

主持人：徐宏修 嘉南藥理科技大學資訊管理係

一、中文摘要

摩擦攪拌焊接(FSW)是從固態發展起來焊接技術，在二金屬板的中央直線上以工具快速旋轉並向前移動使二金屬板焊接在一起的技術。它具有優勢包括使晶粒細化，改進板材的機械強度。FSW時在工具頭之前向流動和回復側的移動速度不同。本文擬透過摩擦攪拌製程(FSP)的研究來單一板材在FSP的熱歷史和熱機械過程。在本文中，鋁板的摩擦攪拌的製程，使用Bessel函數來探討溫度在鋁板內的分佈。詳細討論鋁板在熱傳時的塑性變形行為，工具頭轉速，移動速度和工具頭的直徑，板材熱傳遞係數等對溫度分佈的影響。本研究可能獲得單板的溫度分佈的熱歷程。它為了進行鋁板的摩擦攪拌過程提供設計知識。

關鍵詞：摩擦攪拌焊接、Bessel 函數、摩擦攪拌製程

Abstract

Friction Stir Welding(FSW) is developed from solid state weld joint technology for two metal sheets by a rotating tool pin moving along the central line of sheets. It has advantages include refining the grain size and improving the mechanical strength of sheet material. Because the metal flow near advancing and retreating side of weld is moving at different speeds, it is necessary to understand the variation of sheet material by simulating the thermal history and thermal-mechanical process of sheet material during FSP. In this paper, the friction stir process of aluminum sheet is investigated by employing Bessel function for simulating the temperature distribution within the sheet during FSP. The effect the rotating speed, moving speed and the diameter of shoulder of tool pin upon the heat transfer of aluminum sheet, the plastic behavior of sheet material and temperature distribution is discussed in detail. The plastic deformation and thermal history of sheet can be obtained by this analytic model. It offers an knowledge of design to performing the friction stir process of aluminum sheet.

Keywords: FSW, Bessel function, FSP

二、前言

在傳統的熔焊裡，有幾個製程因素包含氣體，電壓，電線進給，電弧間隙等必須考慮。傳統的焊接方法經常用於焊接金屬板，但是它引起物質缺陷。與傳統的熔焊相比較，可熔接的摩擦攪拌焊接(FSW)是新近發展的焊接技術，乃使用自我調適機械特性的焊接技能。FSW 是固態的技術並且，最初在鋁合金單板的焊接點裡發展。由於 FSW 機械特性通常比傳統的氣體電弧可熔接好。

摩擦攪拌過程(FSP)是一個複雜的熱與機械固態過程產生之金屬結構。從摩擦攪拌焊接改進(FSW)。FSW 技術在 1991 年被在英國焊接學會發明。FSW 有一些重要的鋁板的焊接應用[1]。在 FSW 期間，熱分佈和熱機械過程是一個值得研究的領域。根據研究 [2]，FSW 的焊接有些瑕疵，工件的殘餘應力會影響疲勞裂縫。使用 FSW 的一些應用被為汽車，航空太空飛行，造船業和用鐵路運輸的工業發展 [3]。FSW 技術使用旋轉工具頭產生摩擦熱並且引起在焊接附近物質的塑性變形。FSW 使用旋轉螺旋工具頭，壓進那些板的中心線。當旋轉的工具頭接觸鋁板時，引起板的摩擦加熱降低其機械強度。工具頭深度接近欲焊接板的厚度。工具頭旋轉引起周遭工件的塑性變形之流動材料。工具頭總是在焊接區域的末端留下一個鎖眼，並在工具頭後面的板材上形成一道焊接痕。實施 FSW 時，旋轉的速度，前進速度和壓力是最被需要調查的過程參數。

FSW 在焊接礦塊附近產生一熱影響區和機械影響(TMAZ)區域。在焊路下發生熱機械影響區(TMAZ)和熱影響區域(TAZ)，即旋轉的工具頭引起 TMAZ 和 TAZ。FSW 過程是一固態的焊接，當溫度達到材料的熔點溫度時，熱流量被假設為零。因為邊界表面的溫度梯度是微量的，在工件上的熱對流現象可被忽視。觀察摩擦攪拌期間的實驗，熱變形模式存在於 FSW 的塑性變形。實施 FSW 後的工件金屬與原先結構相比較，會有更細緻的金屬晶粒。由於材料的塑性流動受溫度影響，在 FSW 期間，工件裡的溫度分佈領域是一個重要的因素。為了調查 FSW 的參數處理並且改變工件的機械特性材料，一些研究人員已經開發幾個分析。Zhu[4]為摩擦發展一個三維的非線性的熱和機械分析摩擦攪拌焊接(FSW)。工具頭旋轉的速度在整個過程期間是 300 和 500 rpm。也探討 304 L 不鏽鋼之 FSW 之溫度和殘餘應力。溫度分佈的實驗結果與 FSW 的數值模擬結果相比較。熱轉換過程在 FSW 期間是

在 FSW 內的一有趣主題研究。在工件裡的熱轉換過程的預測能利用有限元素法探討 FSW 過程在焊接區域內的硬度和應變率等特徵，能估計焊接品質等。Chao[5]假設一個三維的熱傳輸模型，從工具肩到工件的熱流被設為常量。Zahedul[6]透過 FEM 對熱傳輸進行重疊摩擦攪拌焊接的研究。工件的溫度歷史在 FSW 期間已經被 Song [7]以及 Wang [8]獲得。Chao [9]確定 FSW 過程到兩邊值的熱傳輸問題。Frigaard [10,11] 開發數值計算程式和實驗值比較。他提出一個含摩擦係數的 FSW 模型，計算工件的溫度在達到材料熔點時，保持溫度不變。在本文中，我們研究 FSP 期間，不同的高寬比的鋁合金板 A6061 的熱傳遞問題。

三、數學模式

兩種分析的方法，一個是二維的公式分析 FSW 的幾何學和變形。包括工件的溫度，以時間為自變數的模型，可計算在工件內的溫度分佈。另一種為 FEM 分析。摩擦攪拌的示意圖如圖 1。為三維的等軸立體圖。但為方便起見，我們做二維的分析。Bessel 函數用來決定塑性變形和在 FSW 工具附近的溫度場的可能性。工件幾何形狀如圖 2 所示。熱流在 FSW 期間包括兩主要部分如下：

- 1) 由於工件的剪切變形，由塑性變形產生的熱源
- 2) 在工具肩部上因摩擦產生的熱源
- 3) 被焊接板在工具頭附近受摩擦產生的塑性變形

在 FSW 過程裡的拋物線的熱傳輸方程式是 PDE 和工具和工件的熱傳方程被定義為如下：

$$\rho c \frac{dT}{dt} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - h_c \cdot (T - T_s) + \dot{Q} \quad \text{於 } \Omega \quad (1)$$

其中 Ω 為工件的區域， \dot{Q} 為工具和板材間摩擦攪拌所產生的熱源。 ρ ， c ， k ， T_s 和 T 是板材密度，熱比容、熱傳導係數、環境溫度及板的溫度 h_c 為熱對流係數。項 $h_c(T - T_s)$ 表示板和環境間的熱對流量。 $\frac{\partial T}{\partial x}$ ， $\frac{\partial T}{\partial y}$ 和 $\frac{\partial T}{\partial z}$ 為 x ， y 和 z 方向的溫度梯度。

為方便，取 $U = T - T_s$ 及一新的變數 ξ 定義如下：

$$\xi = x - vt \quad (2)$$

得到 $\partial \xi / \partial x = 1$ ， $\partial \xi / \partial t = -v$ ，從式(1)中可得：

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial U}{\partial \xi}; \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 U}{\partial \xi^2}; \quad \frac{\partial T}{\partial t} = -v \frac{\partial U}{\partial \xi} \quad (3)$$

定義 $k / (\rho c) = \alpha$ ，則式(1)重新整理如下：

$$-\frac{v}{\alpha} \frac{dU}{d\xi} = \left(\frac{\partial^2 U}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) - \frac{h_c \cdot U}{k} \quad (4)$$

在本文中，我們忽視板的厚度在溫度上的影響，就二維的傳導而論，則溫度場必須滿足作為如下內容給的 PDE：

$$-\frac{v}{\alpha} \frac{dU}{d\xi} = \left(\frac{\partial^2 U}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) - \frac{h_c \cdot U}{k} \quad (5)$$

為了解決 PDE，讓

$$U = e^{-(v/2\alpha)\xi} f(\xi, y) \quad (6)$$

其中 $f(\xi, y)$ 為待定函數。PDE 改寫如下：

$$\left(\frac{\partial^2 f}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right) - \left(\frac{v}{2\alpha} \right)^2 f = -\frac{h_c \cdot U}{k} \quad (7)$$

改變卡式座標 (ξ, y) 為圓柱座標 (r, θ) 則 $f(\xi, y)$ 轉換為 $f(r, \theta)$ ，其中 $\xi^2 + y^2 = r^2$ 和 $\theta = \tan^{-1}(y/\xi)$ 。轉換如下：

$$\frac{\partial^2 f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 f}{\partial \theta^2} - \left(\frac{v}{2\alpha} \right)^2 f = -\frac{h_c \cdot U}{k} \quad (8)$$

因為溫度分佈大約是對稱的。式(8)被簡化作為：

$$\frac{\partial^2 f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial r} - \left(\frac{v}{2\alpha} \right)^2 f = -\frac{h_c \cdot U}{k} \quad (9)$$

上述方程式是 Bessel 形成方程式和函數 f 可被作如下方式解決：

$$f = C_1 J_0 \left(\frac{v}{2\alpha} ir \right) + C_2 Y_0 \left(\frac{v}{2\alpha} ir \right) \quad (10)$$

然後我們獲得 U 並重新安排 f 就修改的 Bessel 功能而言，透過使用式(6)代入式(10)如：

$$U = e^{-(v/2\alpha)\xi} \left[C_1 I_0 \left(\frac{v}{2\alpha} r \right) + C_2 K_0 \left(\frac{v}{2\alpha} r \right) \right] \quad (11)$$

邊界條件可被指定為如下：

$$\left. \frac{dT}{dr} \right|_{r \rightarrow \infty} = 0 \quad (12)$$

$$-k(2\pi r) \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r \rightarrow 0} = \frac{\dot{Q}}{h} \quad (13)$$

其中 h 板厚。板/工具肩部的總熱流量 \dot{Q} 能透過區域的熱生成率之積分 $\dot{q}(r)$ 來估計。可循下面方程式獲得：

$$P = \frac{F}{\pi R_s^2} \quad (14)$$

$$\dot{q}(r) = n\mu\omega rP \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\dot{Q}}{h} &= \frac{2}{3} n\pi\mu\omega P (R_s^3 - R_i^3) \\ &= \frac{2}{3} n\mu\omega F \frac{(R_s^3 - R_i^3)}{R_s^2} \end{aligned} \quad (16)$$

F 是正向力， n 為工具頭作用在板上之功轉變為熱量的係數， P 是壓力。 \dot{Q}/h 為單位厚度的熱生成率。根據式(14)，預估的熱生成率是由工具頭的肩部引起。在工具頭和工件的界面間摩擦功並沒有考慮在此數學模式中。因為在工具/工件之間的摩擦係數錯綜複雜，直到現今仍是不清楚的狀態。為方便起見，本文中假設。

工件的初始溫度在執行FSP常被假設為定量如下：

$$T(x, y, z) = T_s \quad (17)$$

其中 T_s 為環境溫度。

四、結果與討論

在本研究中使用FSW技術的對接焊的工件是A6061 T6的尺寸為254 x 102 x 12.7mm。工具頭由SKD的工具鋼做成，那些SKD工具的硬度大於鋁並且經常用於量產形工扣件的模具材料。工具頭的尺寸是半徑6mm，高12mm，工具肩是半徑50mm。

與實驗的數據相比較，顯示所計算的溫度歷程。焊接點區域所估算的溫度歷史也可指示實驗板材之微結構。

把工具頭推進工件的正向力是25KN。在計算過程中使用的A6061合金的物質特性是密度 ρ 是 $2700\text{kg}/\text{m}^3$ ，熱導率 k 是 $180\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ，工具頭/工件界面的摩擦係數 μ 是0.4，旋轉速度 66.7s^{-1} ，移動速度 $1.6\text{mm}/\text{s}$ ，熱容 c 是 $2.43\text{N}/\text{mm}^2/\text{C}$ ，浦松比是0.3。

忽略應變硬化和工件的殘餘應力的影響。為了方便起見，在應用Bessel函數計算工件的溫度起作用的變化，也忽視溫度對焊接區域材料的壓力應變曲線之影響。忽視材料受溫度的影響物，工件的降伏應力設為定值。溫度歷程可能透過使用這個簡化的分析模型而獲得。

圖3顯示在溫度分佈過程在 $t = 100\text{s}$ 之分析結果，在工具頭附近的等溫線分佈比其他區域密集。由於此區域比較接近熱源，而工具頭以外區域不產生熱源，故造成工具頭附近等溫線較為密集。

數值模擬的結果說明如圖4。在全部的步驟中，在工具頭周遭的為同心等溫線。從圖6(c)中，看見高溫在焊接期間是在工具頭內並且有價值在 634 和 538°C 之間。溫度隨步驟增加而增加，不過，溫度的變化也更陡峭。那是由於在工具和工件界面的熱生成率大比熱對流係數之故。當時間增加時，整個工件的溫度的峰值正增加。在FSP的末端，工件的最後的溫度高於初始溫度。

表1顯示圖2中工具頭在步驟 n 的位置。在工件上各點的熱歷程圖顯示於圖5。整個FSP過程中最高溫，發生在工具頭達到板末端的時後。顯然，每條熱歷程曲線有各自的峰值，並且是工具頭移動到感測器附近時達到峰值。比較各條熱歷程曲線的峰值時，發現愈早達到峰值的點，在最後有會較低溫度。而每條曲線能給提供板材的熱歷程曲線，以推測FSP後板材的微架構。

五、結果與討論

本文利用Bessel函數探討FSP上的二維熱傳模式的研究。分析的結果顯示出熱在摩擦攪拌過程裡的功轉換成熱能的過程。可能提供摩擦攪拌焊接過程一有用的數據。得到結論如下：

1) 本文提供FSP裡的熱轉換過程一有用分析模型。可分析在FSP過程工具頭周遭的溫度分佈。有助於估計並設計FSP，並防止工件在FSP期間損壞。

2) 在摩擦攪拌過程之前，以不同的工具頭轉

速，獲得板材的溫度分佈。經由與FEM模擬分析的結果相比較，證實本文FSP分析模式的有效性。

未來，將以FEM分析FSP的三維熱機械模型，並分析FSP過程中，板材的在焊道下材料微結構。

六、參考文獻

- [1] Thomas W.M., Nicholas E.D., Needham J.C., Murch M.G., Templesmith P., Dawes C.J., (1991): "Friction stir butt welding", International patent application no. PCT/GB92/02203 and GB patent application no. 9125978.8, 6 December
- [2] Dalle Donne C., Biallas G., Ghidini T., Raimbeaux G., (2000): "Effect of welding imperfections and residual stresses on the fatigue crack propagation in friction stir welded joints", Second International Symposium on Friction Stir Welding, Gothenburg, Sweden, pp 26-28 June
- [3] Dawes C. J., (1995): "An introduction to friction stir welding butt welding and its developments, Welding and Fabrication", Jan.
- [4] Zhu X. K., Chao Y. J., (2004): "Numerical simulation of transient temperature and residual stresses in friction stir welding of 304L stainless steel", Journal of Material Processing Technology, Vol.146. pp 263-272
- [5] Chao Y. J., Qi X., (1998): "Thermal and thermo-mechanical modeling of friction stir welding of aluminum alloy - 6061-T6", Journal of Materials Processing & Manufacturing Science Vol.7, pp 215-233.
- [6] Zahedul M., Khandkar H., Khan J., (2001): "Thermal modeling of overlap friction stir welding for Al-alloys", Journal of Material Processing and Manufacturing Science, Vol. 10, pp 91-105.
- [7] could be omitted] Song M., Kovacevic R., (2003): "Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, pp 605-615
- [8] Tang W., Guo X., McClure J. C., Murr L. E., (1998): "Heat input and temperature distribution in friction stir welding", Journal of Materials Processing & Manufacturing Science, Vol. 7, pp.163-172
- [9] Chao Y. J., Qi X., Tang W., (2003): "Heat transfer in Friction Stir welding-Experimental and Numerical Studies", ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering. Vol.125, pp.138-145
- [10] Frigaard Ø., Grong Ø., Midling O.T., (1998): "Modeling of the heat flow phenomena in friction stir welding of aluminum alloys", Proceedings of the Seventh International Conference Joints in Aluminum—INALCO '98, Cambridge, UK.
- [11] Frigaard Ø., Grong Ø., Midling O.T., (2001): "A process model for friction stir welding of age hardening Aluminum Alloys", Metallurgical and Materials Transactions A, No.32A. pp.1189-1200

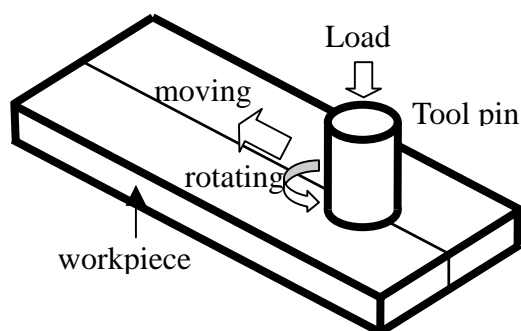


圖1 摩擦攪拌的示意圖

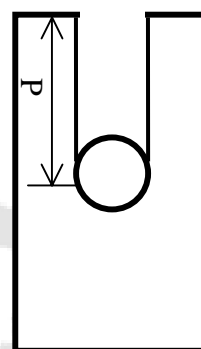


圖2 FEM模擬時工件的幾何形狀圖(步驟 n)

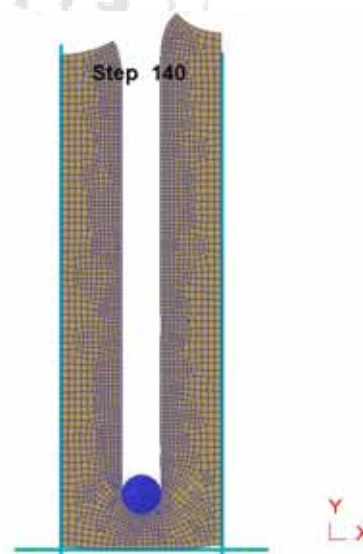


圖3 網格分佈圖(step 140)

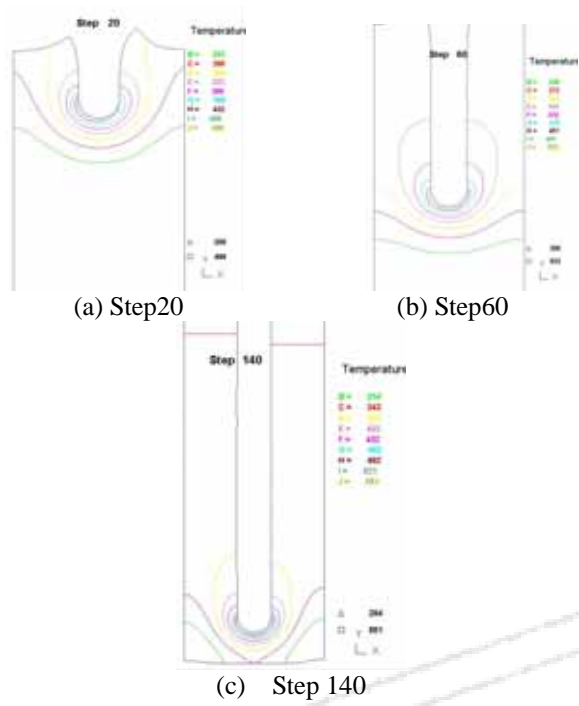


圖4 模擬的溫度分佈

表1 工具頭的位置(步驟 n)

point	1	2	3	4	5	6	7
P(mm)	23	57	90	142	153	200	221
Step n	20	40	60	80	100	120	140

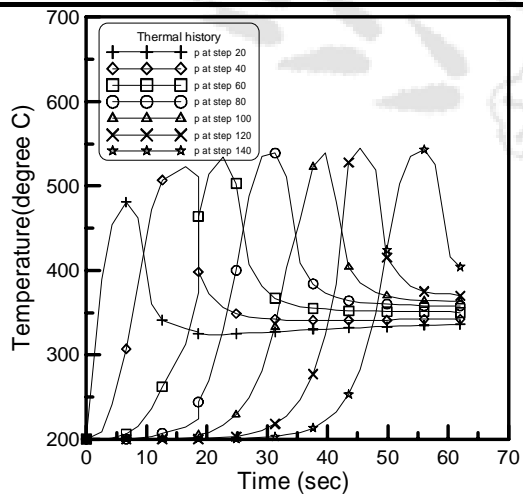


圖5 工件上各點的熱歷程曲線