

薄型曲面電化學加工之研究

Study of the Thin Curved Surface by Electrochemical Machining

張振暉*、范智文、陳佑論、陳峻偉

Chen Hui Chang, Zhi Wen Fan, You Lun Chen, Chun Wei Chen

金屬工業研究發展中心

Metal Industries Research & Development Centre

*eddie@mail.mirdc.org.tw

摘要

本研究以不銹鋼SUS304之塊材為加工基材，利用電化學加工技術對塊材進行薄型曲面之加工；透過電腦模擬分析了解流場與電流密度在加工間隙的分佈，流場分析了解飽壓區是否需要，實驗方面以曲線加工路徑形成一曲面、透過兩次的曲線加工路徑即可形成一薄型曲面。由模擬結果得知，飽壓區確實改善了流場分佈；由實驗結果得知，兩曲線路徑確實可形成一薄型曲面體。

關鍵字：電化學加工、SUS304、薄型曲面

Abstract

In this study, the material SUS304 block was used as the processing of substrate. We machine the shape of the thin curved surface by use the electrochemical machining technology. Through computer simulation analysis we understood the distribution of flow field and current density in the machining gap. And by the flow field analysis we understood that whether the saturate pressure zone is needed. In the experimental aspect, a curved surface is formed by a curved machining path, and a thin curved surface formed by two curved machining path. From the simulation result, the saturate pressure zone improve the flow field distribution. And from the experimental result, two curved path can made a thin curved body.

Keywords：Electrochemical Machining, SUS304, thin curved surface.

1. 前言

葉輪中的葉片是一薄型曲面，不同葉輪外型構造必須選擇不同加工技藝，以端面式葉輪來說，其構造有如在厚板上鑽數個非直線的貫穿圓陣列孔洞；必須五軸加工才得以將其曲面加工出，或是以鑄造先製一毛胚，再以五軸加工機進行最後的加工。一般可實施端面式葉片加工的方法有五軸銑床、放電加工、電化學加工...等，五軸銑床機械切削方式加工後有殘留應力產生，兩葉片間的流體通道必須執行前後兩側入刀加工才能將流體通道貫穿。放電加工

由於放電刀具形狀不斷地改變，故必須準備較多的刀具來應對，且加工後表面亦有變質層[1]產生，表面硬脆的熱再鑄層使得材料的強度降低，當應力集中時容易從熱再鑄層中的微裂縫產生材料的破壞。電化學加工表面無熱再鑄層與毛邊的產生，加工後不會有殘留應力的產生，加工過程中刀具無損壞，故不失為端面式葉輪葉片加工的可行方案。

電化學加工是一種利用電位調整電極表面電子能量，使得電活性的物質與電極發生電子轉移的化學反應[2]；當電子由該物質轉移至電極時，稱該反應為氧化反應，該電極則稱為陽極；反之，則稱為還原反應，電極稱為陰極。電化學反應主要是根據法拉第(Faraday)宣稱電解反應中具離子的存在及其導電功能，並在1883年發現電化學反應兩項基本定律[3]。

(1)第一定律：電解過程中，游離出之產物的質量與通過電解質之電量成比例。

(2)第二定律：電解過程中，用相同之電量，其產生游離物質之質量與它們的化學當量成比例。

在電解反應中，陽極的反應式為[4]



依法拉第定律，溶解的金屬質量為

$$m = \frac{I \times t}{F} \left(\frac{M}{z} \right)$$

其中 m 為金屬去除量(g) (Metal Removal Rate, MRR)， I 為電流量(Amp)， t 為通電時間(sec)， F 為法拉第常數(96487庫侖)， M 為金屬原子量，而 z 為金屬原子價。依據法拉第定律，加工之電解反應的金屬去除量，主要和被加工之試片的本身結構性質和電流量兩者有密切的關係[5]。

美國波音公司推斷在未來20年裡將需要34,000架新飛機，總產值達4.5兆美元[6]。中國大陸近年經濟成長躍居全球之冠，航空運輸市場需求急遽成長，依據波音公司預測估計未來20年新機需求數量達5,000架左右[6]。電化學加工在航太製造的應用有小孔與異形孔、整體葉盤、葉片型面電化學加工...等[7]，航空發動機上使用的整體葉輪形式有端面式、帶冠式與開式整體葉輪[8]，本研究以端面式葉片為主，期望能在航太葉片製作找到切入點。

2. 實驗方法

2.1 加工試件

電化學加工試件材質為SUS304、塊材長度160mm、寬度40mm、高度30mm。不銹鋼304降伏強度 $\geq 205\text{N/mm}^2$ 、抗拉強度 $\geq 520\text{N/mm}^2$ 、伸長率 $\geq 40\%$ 、硬度 $\leq 200\text{HV}$ 。

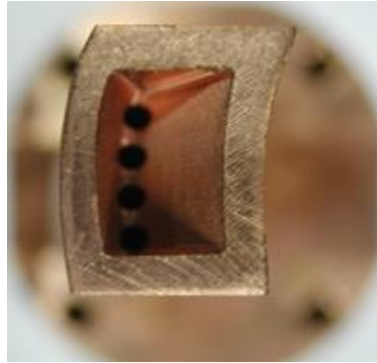
2.2 加工電極與設備

如圖1(a)(b)所示，電極材質選用鉻銅電極，具有良好的熱傳導率、電傳導性。圖1(c)則為加工設備組立，電極藉由一轉接塊與機台的Z軸模組相聯結，利用機台XYZB軸的動作使得加工過程中電極與工件產生Z方向的位置變化；加工過程中電極接陰極、試件接陽極，加工試件則設置在XYB軸上，使試件可以進行轉動與XY平面的座標位置改變，XYZB軸的配合下可使電極與試件進行複雜的相對運動。電解液供應採用電極中空出水方式(圖1(b))、並於其上設置一飽壓區，試件置入一槽體內使得加工中電解液噴濺與排放受到一定的限制，降低對周圍機械零件的腐蝕。鉻銅降伏強度 $\geq 345\text{N/mm}^2$ 、抗拉強度 $\geq 451\text{N/mm}^2$ 、伸長率 $\geq 15\%$ 、硬度 $\leq$

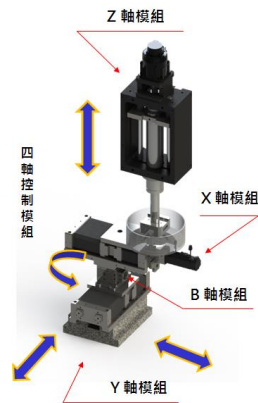
140HV。



(a) 加工電極



(b) 電極頭



(c) 加工設備

圖1 加工電極與設備

2.3 加工參數

- 1.電壓參數：18V
- 2.進給速度：0.45mm/min
- 3.Pump轉速：1000RPM
- 4.電解液濃度：NaNO₃ 10%。

2.4 量測方法

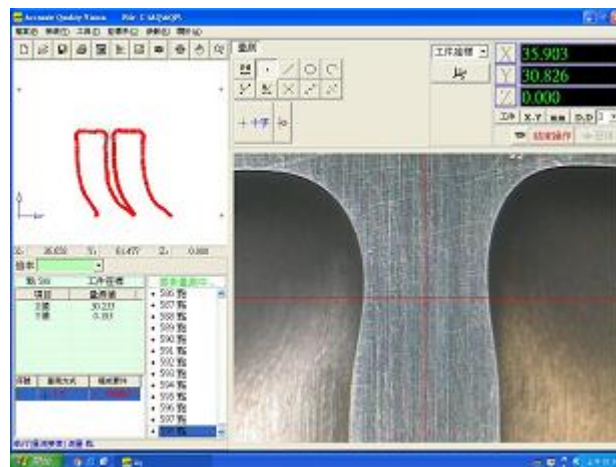


圖2 薄型曲面影像量測

加工後可將試件切割進行剖面的影像量測，CCD配合XY-Table(搭配光學尺)，光學尺顯示位數至小數以下的第三位(1 μ m)，透過曲面邊界座標點可計算出所需的數據。圖2為薄型曲面加工後於CCD下所拍攝到的圖片與座標點。

3. 實驗結果

3.1 電腦模擬

3.1.1 流場分佈模擬

圖3與圖4分別是以電腦模擬方式顯示電極中空出水有無設置飽壓區的電腦模擬圖，圖3無設置飽壓區可觀察到流體出水的速度非常地不均勻，很容易造成加工生成物排削不良。圖4

設置飽壓區可觀察到流體出水的速度較為均勻，可順利地將加工生成物排出。由此模擬分析可知，出水處的飽壓區設置是必要的。

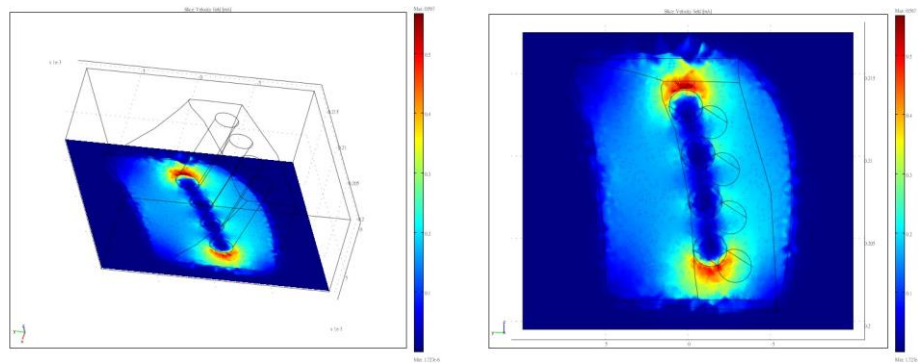


圖3 無飽壓流場分佈模擬

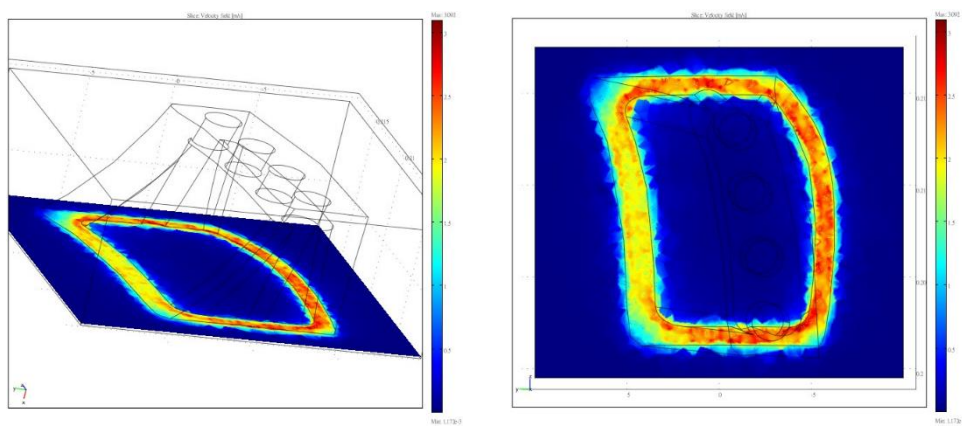
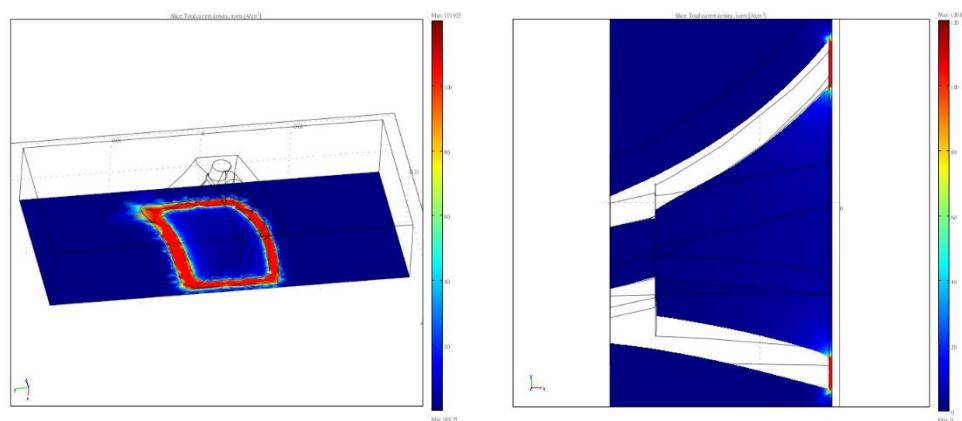


圖4 有飽壓流場分佈模擬

3.1.2 電流密度分佈模擬

圖5是加工電流密度分布模擬圖，圖5(b)可觀察到電流密度集中在流體出水速度較快的區域。電流密度高意味著加工生成物亦多，必須以較快的速度將其帶走，以利後續的加工。



(a)視角一

(b)視角二

圖5 電流密度分布模擬

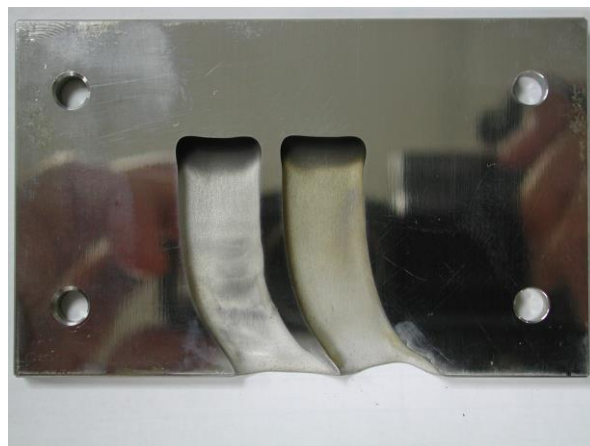
3.2 實驗結果

3.2.1 加工數據

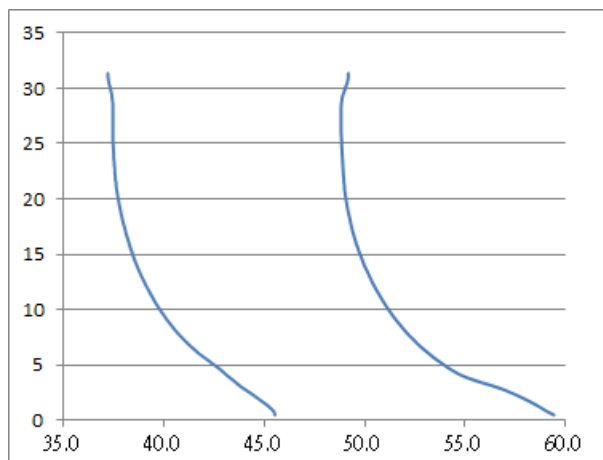
圖6是以圖1之加工電極沿著一曲線路徑所加工之盲孔，圖6(a)兩盲孔夾著帶有一厚度的薄型曲面體，當兩盲孔越接近，則中間夾著的厚度越薄，將圖6(a)切割形成圖6(b)之試件，則可清楚看到兩加工盲孔所夾的薄型曲面體。將圖6(b)左側的盲孔進行影像瞄點，則可得到圖6(c)支曲線分佈，將x軸視為加工寬度、y軸視為加工深度，則可轉換成圖6(d)之數據曲線。加工前段進給速度設為0.15mm/min、中後段進給速度調整為0.45mm/min、末段進給速度設為0.18mm/min，由圖6(d)可知進給速度低時，長時間的加工可形成較大的寬度；進給速度高時，短時間的加工形成較小的寬度。圖7則是連續3個貫穿孔所形成的薄型曲面體，如同圖6(b)所示，圖7孔與孔之間是由曲面所形成的薄板。



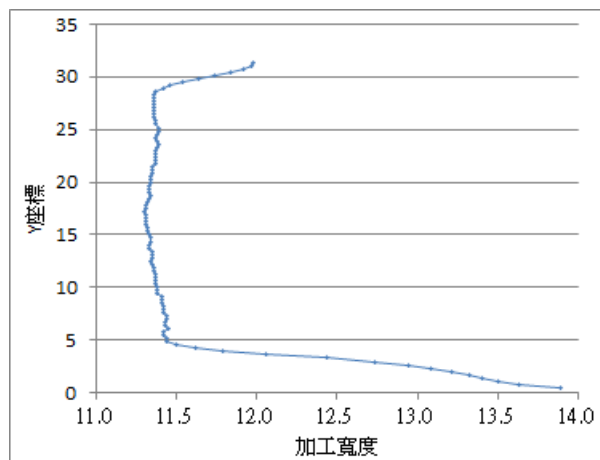
(a) 加工試件



(b) 試件剖面



(c) 加工數據



(d) 寬度曲線

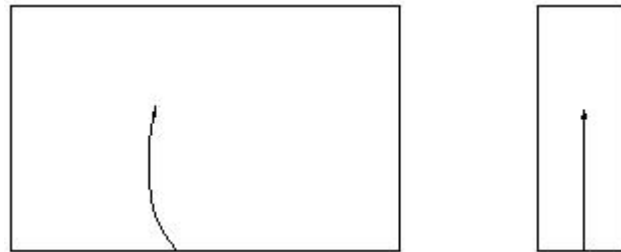
圖6 粗加工示意



圖7 連續加工

3.2.2 加工路徑

由圖6(b)盲孔加工可得知，其加工路徑並非一直線，而是一曲線。圖8加工路徑示意圖是以加工試件為基準所畫出的路徑示意曲線，按此路徑可使加工盲孔形成一如圖6(c)的邊界曲面。

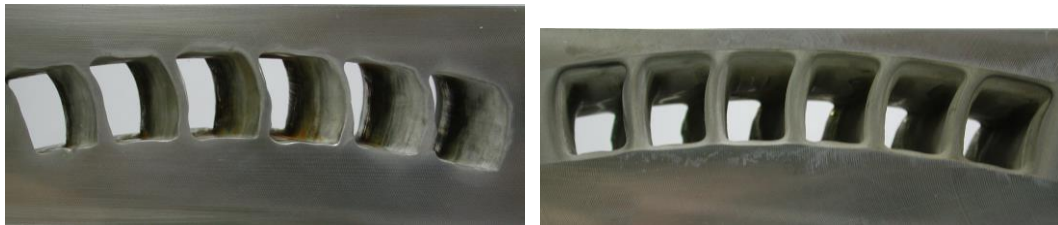


(a)前視圖

(b)側視圖

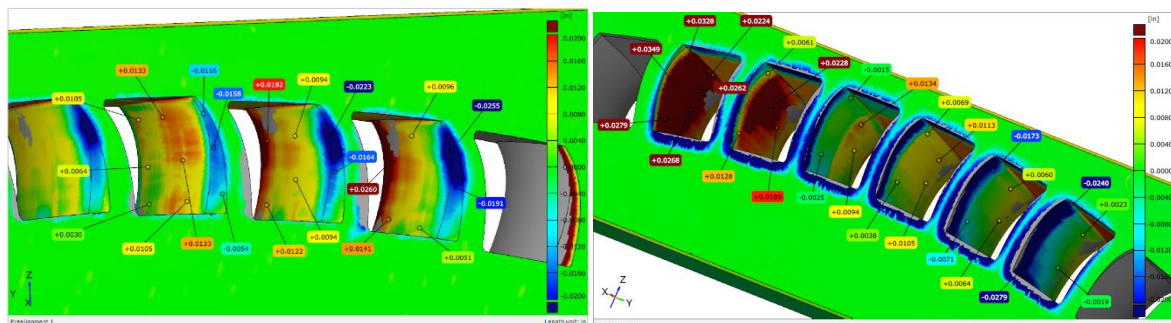
圖8 加工路徑示意圖

3.2.3 陣列加工



(a) 加工入口端

(b) 加工出口端



(c) ATOS量測(入口端)

(d) ATOS量測(出口端)

圖9 陣列加工

圖9是將圖1之電極沿著圖8的加工路徑一個接個加工出來的陣列孔，兩兩貫穿孔形成一薄型曲面體，而貫穿孔是以圓陣列排列著。圖9(a)為加工電極進刀的端面，當貫穿孔形成，電極由圖9(b)之端面破出；圖9(c)(d)是以ATOS影像量測的方式所得到的整場量測數據，其結果可與圖6(d)進行比對，即加工入口端的寬度較大，中後段加工區的寬度較小。由圖9(a)加工入口端可發現入口端的輪廓並不如圖9(b)的一致性，探討原因可能是防水套與加工入口處流場的不一致性所造成的，此防水套為一具彎折性的PU透明膜，隨著時間不斷地改變它的形狀，很難將入口端的流場保持一致；圖9(c)(d)的顏色分布可方便比較兩者的一致性。

4. 結論

1. 由模擬結果顯示，電極頭出水端必須設計一飽壓區使散射出去的電解液可以更均勻的分佈，無飽壓區的設計使得散射出去的電解分布非常不均勻，易造成生成物成物的沉積。電極經過飽壓設計之電流密度分佈亦屬均勻。
2. 由實驗結果顯示，入口端較慢的加工進給速度可形成較大的加工寬度，中段的加工進給速度固定，加工寬度易呈現穩定的寬度。
3. 加工入口區流場不穩定性，將使得入口端的輪廓不易得到一致性。

5. 參考文獻

1. 王建業，電解加工原理及應用，國防工業出版社(2001)，p265。
2. M. Datta , D. Landolt, “Fundamental aspects and applications of electrochemical microfabrication”, *Electrochimica Acta*, Vol.45, pp.2535–2558(2000).
3. 柯賢文，腐蝕及其防治，全華科技 (1995)。
4. John F. Wilson,”Practice and Theory of Electrochemical Machining”, John Wiley & Sons, Inc., 1971.
5. 朱樹敏，電化學加工技術，化學工業出版社(2006)，p12。
6. 雷震台，台灣航空產業發展現況及未來展望，中華民國航空學會會刊，Vol.1，2014。
7. 何紀源，電解加工在航空製造中的應用及發展，科技創新與應用，2016年第6期。
8. 朱永傳，複合平面擺動展成電解加工整體構件異形面的成型分析及應用，機械工程學報，第44卷第12期，2008。