

磁場輔助微電化學銑削特性之研究

崔海平、顏炳華、楊曙光

摘要

本研究提出一種新穎的加工方式，利用磁場輔助精微螺旋電極，進行微電化學銑削 (Electrochemical micro milling, EMM)，以製作微孔、微流道及 3D 微結構。當磁場作用於精微螺旋電極所帶動之電解液時，產生之勞倫茲力有助於電解液的更新及加工效率的提升。根據實驗的結果；在磁場輔助之下，微孔於磁鐵 0° 擺放的微孔孔徑較 180° 擺放為小，且在電極不旋轉的情況下，向上進給加工確實可以改善擴孔量，並減少孔入口端周遭的雜散電流腐蝕區域面積。而槽道加工進給率將可由 $5\mu\text{m}/\text{sec}$ 提高到 $8\mu\text{m}/\text{sec}$ 。除此之外，溝槽的寬度及深度也將各自減少至 $344\mu\text{m}$ 及 $98\mu\text{m}$ 。而溝槽之表面粗糙度亦由 $Ra\ 1.26\mu\text{m}$ ($R_{\text{max}}\ 6.5\mu\text{m}$) 降低到 $Ra\ 0.54\mu\text{m}$ ($R_{\text{max}}\ 4.47\mu\text{m}$)。研究結果顯示，磁場輔助電化學加工將可提升加工效率、精度及表面粗糙度，達到節能減碳之目的。

關鍵詞：微電化學銑削、磁場、精微螺旋電極、微孔、微流道、3D 微結構。



Micro Electrochemical Milling by Using Magnetic Field Assisted Helical Tool

Hai-Ping Tsui, Biing-Hwa Yan, Yao-Kuang Yang

Abstract

The study presents a novel process of micro hole, micro channels and 3D micro structures in electrochemical milling by using magnetic field assisted helical tool. A helical tool and Lorentz force of the magnetic field are utilized to enhance the renewal of the electrolyte and machining efficiency. According to the experimental results, the machined hole at magnet angle of 0 degree is smaller than the hole at magnet angle of 90 degree and the electrolytic current can be raised and stable under the magnetic field assisted. Furthermore, the diameter difference between entrance and exit is substantially improved in upward feed mode. the feed rate can be raised from $5\mu\text{m}/\text{sec}$ to $8\mu\text{m}/\text{sec}$ under the magnetic field assisted. Furthermore, groove width and groove depth are reduced to $344\mu\text{m}$ and $98\mu\text{m}$ respectively. The surface roughness also can be reduced from $R_a 1.26\mu\text{m}$ ($R_{\text{max}} 6.5\mu\text{m}$) to $R_a 0.54\mu\text{m}$ ($R_{\text{max}} 4.47\mu\text{m}$). The study shows that the magnetic field assisted approach indeed can improve machining efficiency, accuracy and surface roughness.

Keywords: Electrochemical micro milling, magnetic field, micro helical tool, micro channel, 3D micro structures.

Hai-Ping Tsui, Department of Mechanical Engineering, Hsiuping University of Science and Technology
Biing-Hwa Yan, Department of Mechanical Engineering, National Central University, Chung-Li 320, Taiwan.

Yao-Kuang Yang, Technical Development and Test Service Section, Regional R&D Services Department, Metal Industries Research and Development Centre, Tai-Chung 407, Taiwan.

Received 4 March 2014; accepted 30 April 2014



1. 前言

由於電子、光學、醫藥及生物科技產業的發展，對微元件的需求也日漸提高。為了滿足這些需求，許多有關微孔、微溝槽及微結構的研究亦迅速的推展。其中以 LIGA (Lithography electroforming micro molding) 為基礎之 MEMS (microelectro mechanical systems) 製造技術，能製造出微米級及次微米級零件，但 MEMS 製造技術仍有其限制及缺點；例如可加工的材料有限、無法加工複雜形狀及高深寬比之零件、成本高昂及需要無塵室等級製造環境等[1]。

微電化學銑削的材料移除機制，是一種陽極溶解的過程[2]。將待加工之工件做為陽極，工具做為陰極，於兩極間施加穩定電壓，並以電解液當傳導介質，便會發生電化學溶解反應。微電化學加工因為加工原理與微放電加工不同，所以擁有多種異於放電加工的特色，包括：工具不易損耗、加工工件不受金屬材料熔點限制、擁有較快的加工速度及較佳的加工後表面。另外，加工工件不會殘留毛邊、應力層或變質層等，亦為電化學加工的優點。基於上述優點，電化學銑削已被成功的運用於微元件的製程中。

當電化學技術應用於精微等級的加工時，因為電極相當微小，內部已無法設計電解液供給流道，電解液更新困難，持續的電解反應，使得兩極間電化學反應所產生的氣體、金屬氧化物及熱能等電化學加工產物，無法順利排出，造成加工精度的下降。有數位學者提出採用奈米級脈衝電壓[1,3-5]、電極高頻上下振動[6-7]及電極循環運動[8]等方法，期能加速加工間隙中之電解液更新，但由於前述各方法之設備價格昂貴，且加工後表面粗糙度仍停留於數微米，較不具實施之經濟性。

針對前述各項問題，有研究以精微螺旋電極進行電化學銑削，成功改善了這些問題[9]。電極於加工中旋轉時，新電解液會被捲入螺旋結構中，並沿著螺旋結構進入電極底部。如此可將含電化學反應所產生的氣體、金屬氧化物及熱能等電化學加工產物擠壓，往電化學加工區外逸散，使加工區域內電解液獲得更新，改善微電化學加工後擴孔量、擴槽量及槽深等值，提升加工精度。

使用精微螺旋電極雖可改善加工精度，但由於加工進給速率難以大幅提升，致使該技術於實務加工上受到限制，雖然可採用提升電解液濃度及加工電壓，增進加工進給速率，但會造成加工精度降低及環保等問題，因此另有數位學者提出採用磁場複合電化學加工方式[10-11]，以增進加工進給速率，但其磁場設置方向必須與電極-工件方

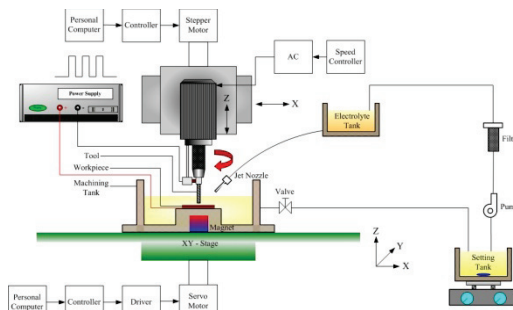


向垂直，方能產生勞倫茲力效應(effect of Lorentz force)，如此大大限制了電化學銑槽加工範圍或增進電極設計之困難度。

本研究利用精微螺旋電極加工時，解離離子流動方向相對於水平線具傾斜角，故磁場方向可與電極-工件方向平行，無礙於勞倫茲力效應產生。除可簡易地提升加工效率，並可兼顧高加工精度及環保節能課題，以達成高效率、高精度及兼具環保節能加工的目標。

2. 實驗方法與條件

2.1 實驗設備架構



圖一 實驗設備架構圖

本實驗所使用之微電化學銑槽加工設備示意圖如圖一所示。高速主軸配置於步進馬達之 Z 軸滑動平台上，直徑為 $\phi 200 \mu m$ 之螺旋電極套入筒夾固定後，再夾持於高速主軸上。工件為不銹鋼 SUS304 薄板試片。試片固定於電解槽內，於微孔加工時，鈦鐵鋇(Nd-Fe-B)永久性磁鐵依照向上或向下加工需求，分別置於試片上方或下方(圖三)。而於微槽或微結構加工時，鈦鐵鋇(Nd-Fe-B)永久性磁鐵放置於試片下方(圖五)，並使用硝酸鈉(NaNO_3)溶液為電解液。電解液在加工中可做循環過濾，並且將電解槽配置於 X-Y Stage 上。高脈衝工作電壓則施加於可高速旋轉之螺旋電極(陰極)與不銹鋼試片(陽極)上，使試片表面產生電化學銑削加工反應。

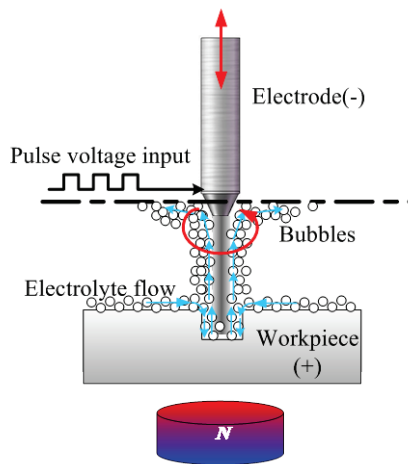
2.2 實驗過程

2.2.1 微孔電化學銑削實驗過程

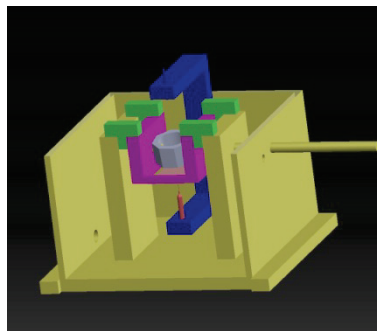
本實驗在進行微孔電化學銑削之前，工件與電極皆需以丙酮加上超音波振盪洗滌，以去除附著於表面的污垢與油漬。實驗所使用的電解液，為重量百分比 12%之硝



酸鈉溶液，以適量硝酸鈉和去離子水調製而成。調配完的電解液置於磁石攪伴器上方，在實驗過程中不斷攪拌以保持溶液均勻。除此之外，不同的磁鐵放置角度對電化學加工的影響，亦將一併觀察。表一所列為實驗之固定參數，而表二所列則為實驗之變動參數。圖二為向下加工模式之電化學加工示意圖。圖三則為向上加工模式下的電化學加工示意圖。加工完的微孔表面形貌，入口端以及出口端孔徑，都將以光學顯微影像系統 PSC-3000PRO(Pentad scientific Co.)進行觀察量測。此外，向上和向下兩種加工模式下，實驗所產生的氣泡，亦將以光學影像設備進行觀察。



圖二 向下加工模式電解液相對於磁場的流動方向



圖三 向上加工模式實驗設備示意圖

2.2.2 微槽電化學銑削實驗過程

本實驗另比較在有、無磁場輔助之下，使用精微螺旋電極進行電化學為槽銑削之加工性能差異。表一所列參數為本實驗的固定因子，而表二所列參數為本研究設定之



單因子參數。所設定的單因子參數包括：工作電壓、Y 軸進給速度、磁場距離等，再分別對其單因子參數做溝槽尺寸、形狀探討，並選擇較佳加工參數，進行幾何形狀微流道銑削及 3D 微結構銑削，並且以顯微影像量測儀、SEM (Scanning electron microscope)、AFM (Atomic force microscope)、共軛焦表面形貌量測儀來作銑削後外徑尺寸量測與表面形貌觀察。

表一 實驗固定因子

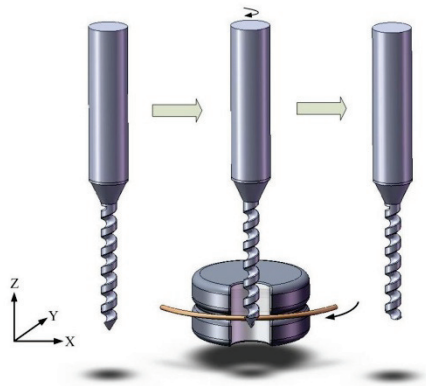
Parameters	Description
Pulse-on time (μs)	50
Pulse-off time (μs)	100
SUS304 specimen size (mm)	30 x 60 x 1.5t
Initial gap (μm)	100
Z Axis feed stroke (μm)	150
Rotation (rpm)	20000
Electrolyte concentration (wt%)	12
Solution	Pure water
Additive	Sodium nitrate

表二 實驗單因子參數

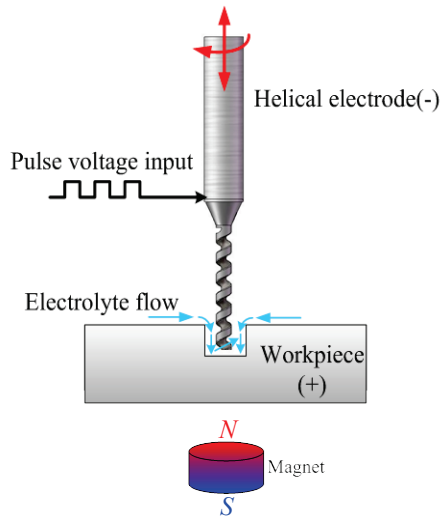
Parameters	Description
Voltage (V)	4.5, 5, 6, 7, 8
Feed rate ($\mu\text{m/s}$)	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
Magnet distance	3, 5, 7, 9, 11

在進行實驗之前，工件與電極皆需以丙酮加上超音波振盪洗清，以去除附著於表面的污垢與油漬。為了使電極以較平整的平面對工件進行加工，需先以 Wire electrical discharge grinding(WEDG)方式，修平電極的尖端部份，其過程如圖四所示。





圖四 WEDG 修整電極過程示意圖



圖五 實驗過程示意圖

實驗所使用的電解液為重量百分比 12%之硝酸鈉溶液，以硝酸鈉與去離子水調製而成。磁通量密度則以高斯計進行量測。整體實驗的過程如圖五所示。

3. 結果與討論

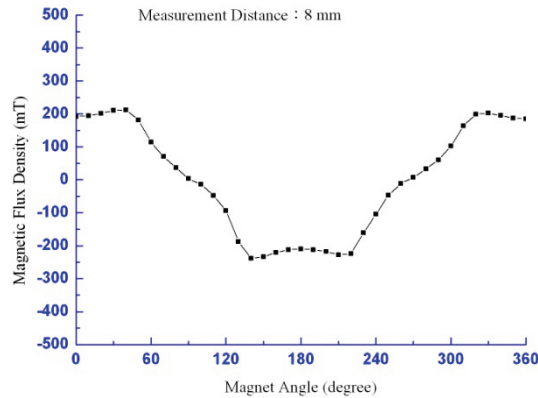
3.1 微孔電化學銑削

3.1.1 磁鐵角度對磁通密度與加工特性的影響

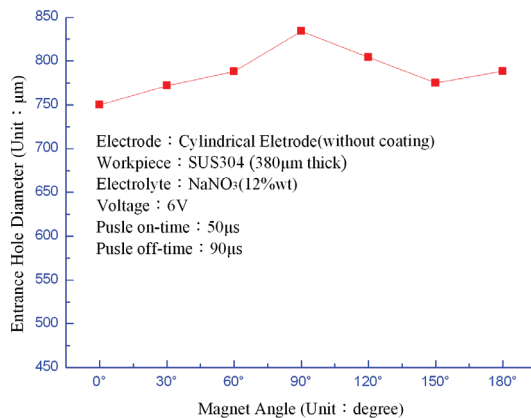
為了瞭解不同角度放置時，磁通密度的變化情況。磁鐵每旋轉 10°便量測其磁通密度，結果如圖六所示。將磁鐵 0°擺放時定義為 N 極朝上，可以發現磁通密度相對於



角度的變化，呈現如正弦波般的變化情況，波峰值及波谷值分別出現於 40° 、 320° 、 140° 及 220° 位置。圖七表示不同角度下入口端孔徑的變化。結果顯示磁鐵 90° 放置時，加工後孔徑最大；而磁鐵 0° 放置時孔徑最小，故在磁場輔助下，所產生之勞倫茲力對加工結果有較大之影響。



圖六 磁鐵不同角度放置下磁通密度



圖七 磁鐵於不同角度放置下入口端孔徑

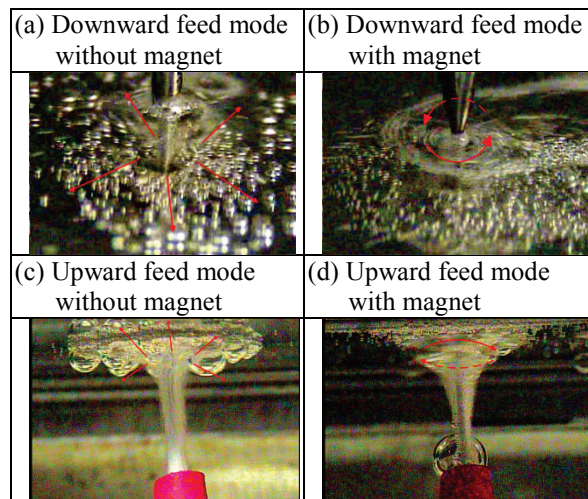
3.1.2 磁場輔助下向上與向下加工氣泡的運動型態與影響

在向上、向下加工模式下，為了瞭解氣泡和磁場之間的關係，將磁鐵統一放置於 0° 的位置。本研究使用數位鏡頭記錄加工過程中，氣泡的變動狀況如圖八所示。根據實驗結果：有足夠的浮力，因此會黏附於陽極的工件表面上如圖八(a)。然而陰極表面生成的大量氫氣泡，由於較大的曲率半徑，以及強力湧升而輻射出去的氣泡流，造成接觸面積減小，因此氣泡能輕易地從電極上脫離。在這種對流擴散系統下，陽極工件



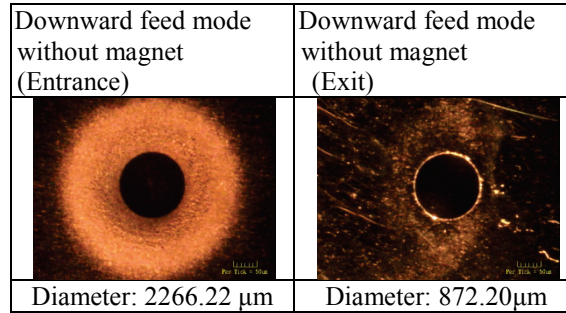
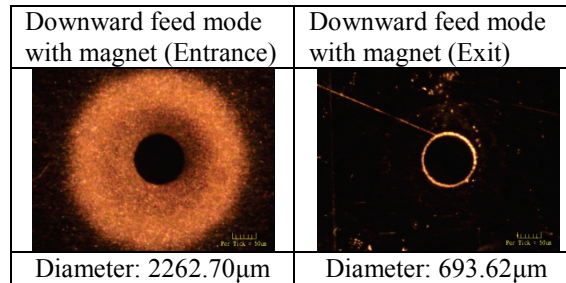
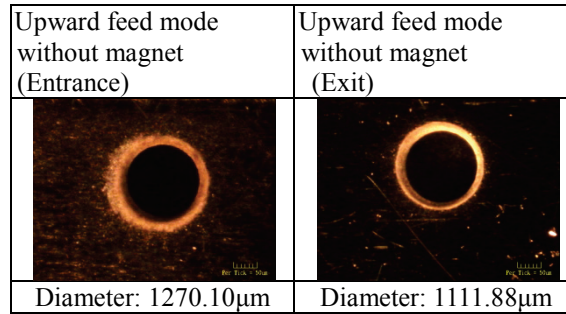
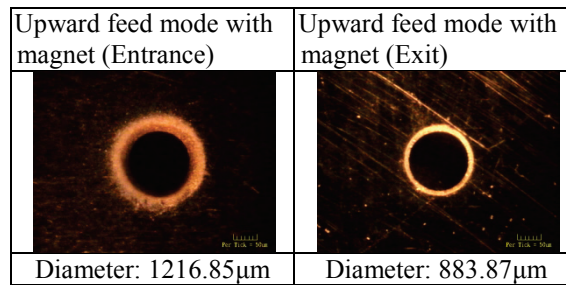
表面上的電解液與氣泡，會被吸入微孔底部，以填補湧升流體產生的空缺。於是便在入口端周圍，形成大面積的雜散電極腐蝕區如圖九。在磁場輔助向下加工的情況下，圖八(b)顯示電解液以旋渦旋轉方式流動。且在勞倫茲力介入影響下，沾附於工件表面上的氣泡，將被更強力地吸入微孔底部。實驗結果如圖十所示：孔徑較上述結果縮小，但加工後仍在孔的入口端，產生相當大的雜散電流腐蝕區。

為克服雜散電流影響區過大的問題，本研究改以向上加工的方式進行實驗。同樣對有、無磁場輔助加工兩種情況，分別觀察其氣泡的運動狀況。圖八(c)顯示：在沒有磁場輔助的情況下，氧氣泡同樣會黏附於陽極工件表面上；陰極同樣會生成大量的氫氣泡。但大量的氫氣泡堆積在反應區互相推擠，使得氣泡沿著輻射方向擠出。於此情形下，雖不發生激烈的流動，但由於氣泡聚集在入口端邊緣，而形成一層保護層，因此大大縮小了雜散電流腐蝕區，如圖十一所示。最後在磁場輔助向上加工方面，圖八(d)可以看見：由於勞倫茲力影響，流場呈現向外旋轉的漩渦狀。同時並帶動小氣泡旋轉脫離加工區域，減少微孔之側邊間隙，提升了加工精度如圖十二。



圖八 向下、向上加工之氣泡與磁場關係(8V, 50 μ s/50 μ s)

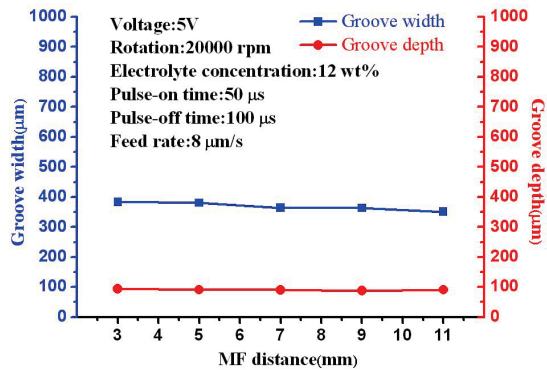


圖九 無磁場輔助向下加工之入口端與出口端(8V, 50 μs /50 μs)圖十 磁場輔助向下加工之入口端與出口端(8V, 50 μs /50 μs)圖十一 無磁場輔助向上加工之入口端與出口端(8V, 50 μs /50 μs)圖十二 磁場輔助向上加工之入口端與出口端(8V, 50 μs /50 μs)

3.2 微槽電化學銑削

3.2.1 磁鐵距離對槽寬及槽深的影響

圖十三為螺旋電極在磁場輔助下，磁鐵距離對加工後槽寬深之關係圖。由圖十三中可得知在磁鐵距離為 11mm 情況下，槽寬尺寸與槽深尺寸分別為 350 μm 及 94 μm ，當磁鐵距離減少至 3mm 時，槽寬尺寸與槽深尺寸分別為 386 μm 及 99 μm ，隨著磁鐵距離的減少，由 11mm 減少至 3mm 時，擴槽量增加 36 μm ，槽深也增加 5 μm ，雖然擴槽量隨著距離的減少而增加，但增加幅度不大。而擴槽量增加的原因為磁通密度的改變，距離磁鐵愈近磁通量愈大，所產生的磁場強度愈強，勞倫茲力產生之影響也愈大，加速電化學加工的反應速度。

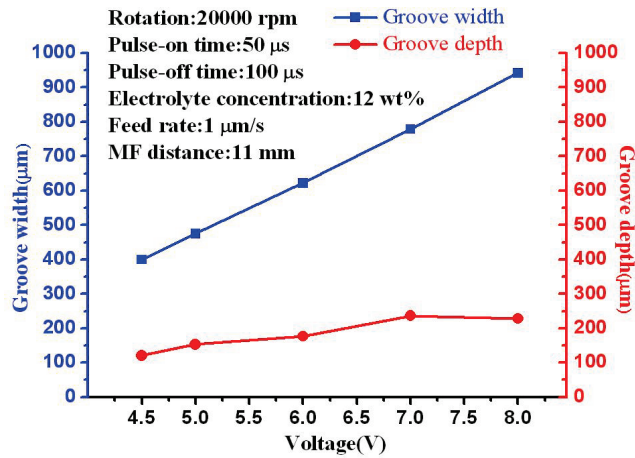


圖十三 磁鐵距離對槽寬深之關係圖

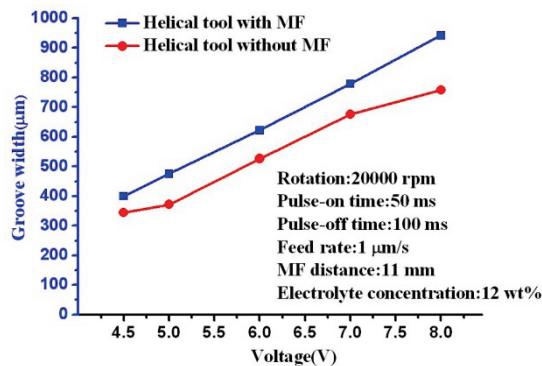
3.2.2 工作電壓對槽寬及槽深之影響

依照法拉第定律，若電解液電阻值不變之情形下，電化學加工金屬去除量，與工作電壓成正比，圖十四為螺旋電極在輔助磁場中，不同工作電壓對加工後槽寬深之關係圖。如圖十四中可得知工作電壓 4.5V 時，槽寬尺寸與槽深尺寸分別為 400 μm 及 120 μm ，隨著工作電壓的增加，由 4.5V 增加到 8V 時，槽寬尺寸與槽深尺寸則分別增加至 942 μm 及 228 μm ；相較於圖十五中，顯示出未有磁場輔助之情形下，參數 8V 的槽寬尺寸為 758 μm ；由比較可知，於磁場輔助的方式進行微電化學加工時，因為勞倫茲力產生之影響，接近工件表面之金屬離子解離速度較快，故槽寬尺寸增加，故磁場輔助微槽電化學銑削有助於提升微電化學銑削之加工效率，而槽深尺寸增加較緩之原因在於勞倫茲力亦會增加陰極表面析出氫氣(氣泡率)之數量，導致螺旋電極前端電導率逐漸下降，降低了螺旋電極前端金屬離子解離速度。





圖十四 工作電壓對槽寬深之關係圖



圖十五 磁場輔助與未加磁場之工作電壓對槽寬關係圖

3.2.3 進給速度對槽寬及槽深之影響

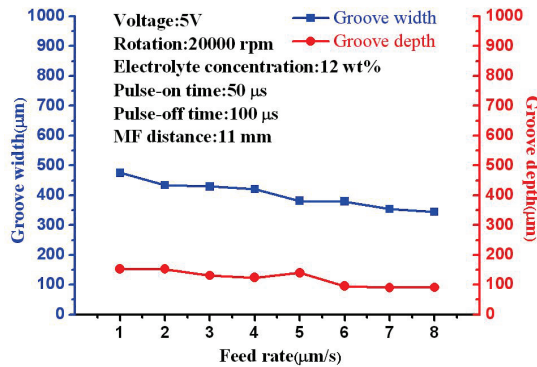
圖十六為螺旋電極在輔助磁場下，Y 軸進給速度對加工後之槽寬深關係圖。由圖十六中可得知在電壓 5V 情況下，最快之 Y 軸進給速度能增加至 $8\mu\text{m}/\text{sec}$ ，當 Y 軸進給為 $1\mu\text{m}/\text{sec}$ 時，槽寬尺寸與槽深尺寸分別為 $475\mu\text{m}$ 及 $153\mu\text{m}$ ，隨著 Y 軸進給速度增加，即由 $1\mu\text{m}/\text{sec}$ 增加到 $8\mu\text{m}/\text{sec}$ 時，槽寬尺寸與槽深尺寸分別為 $344\mu\text{m}$ 及 $98\mu\text{m}$ 。

圖十七顯示，在磁場輔助之情形下，最大之進給速度已能由 $5\mu\text{m}/\text{sec}$ 增加至 $8\mu\text{m}/\text{sec}$ ，且加工後之槽寬尺寸較小。圖十八為磁場輔助之下，加工後 SEM 圖與共軛焦表面形貌量測儀所拍攝之圖片。圖中顯示出在 Y 軸進給 $8\mu\text{m}/\text{sec}$ 時，溝槽側壁較為筆直且溝槽底部也較為平緩。圖十九為 Y 軸進給速度對表面粗糙度的影響，進給 $1\mu\text{m}/\text{sec}$ 時表面粗糙度值為 $Ra\ 1.26\mu\text{m}$ 、 $R_{max}\ 6.5\mu\text{m}$ ，隨著 Y 軸進給速度增加至 $8\mu\text{m}/\text{sec}$

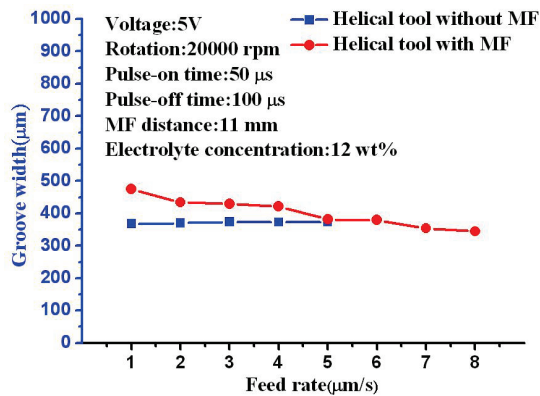


時，表面粗糙度則為 Ra 0.54 μ m、Rmax 4.47 μ m。

因此在磁場輔助之情形下，有較佳的加工效率，而且將 Y 軸進給速度提升至 8 μ m/sec 時，具有更好的加工精度及表面粗糙度。

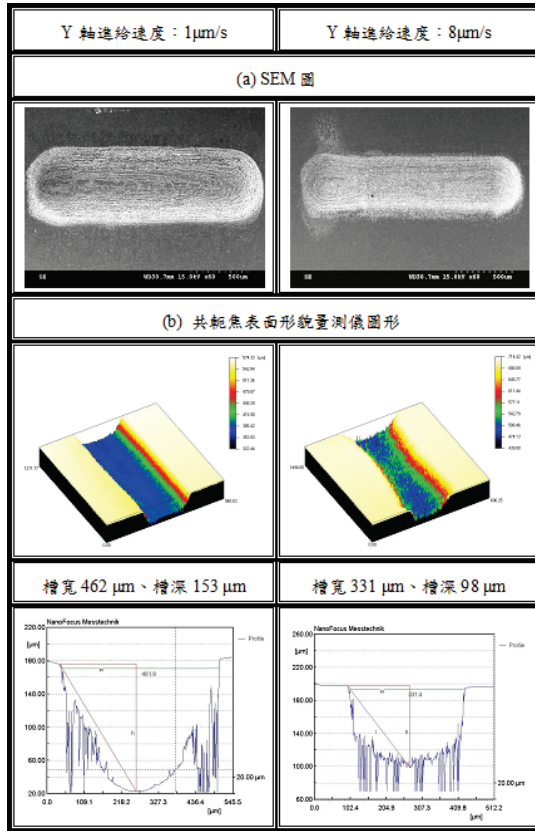


圖十六 Y 軸進給速度對槽寬深之關係圖

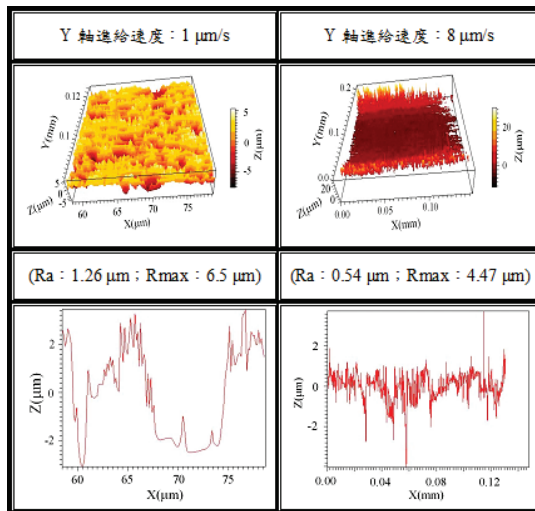


圖十七 磁場輔助與未加磁場之 Y 軸進給速度對槽寬關係圖





圖十八 不同 Y 軸進給速度加工後之形貌比較圖



圖十九 磁場輔助下不同進給之粗糙度比較圖

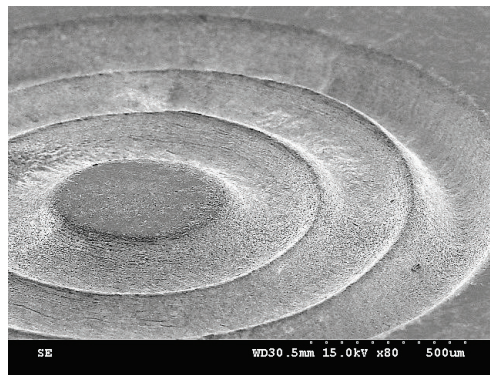


3.5 3D 結構微電化常銑削

根據前面所作各單因子實驗結果，本研究為了取得較高的加工效率，因此在各單因子之結果中，以擴槽量最小且具有較佳效率的實驗參數為主，如表三所示，並且運用這些較佳參數來進行微電化學銑削幾何形狀微流道（圖二十）

表三 較佳實驗參數

較佳實驗參數項目	參數設定值
Voltage (V)	5
Feed rate ($\mu\text{m/s}$)	8
Magnet distance (mm)	11



圖二十 3D 微結構圖

4. 結論

實驗證實：

1. 磁場輔助微孔電化學銑削可以增加氣泡和電解液的擾動，在電極不旋轉的情況下，能有效降低微孔的擴孔量。
2. 磁鐵 0° 放置時，由於磁場平行電場方向，減少勞倫茲力效應，故加工孔徑最小。
3. 微孔電化學銑削能減小微孔入口端周遭雜散電流所造成的腐蝕區域。
4. 於磁場輔助的方式進行微電化學加工時，因為勞倫茲力產生之影響，相較於未加磁場輔助加工方式，有較快之金屬離子解離速度，有助於提升微電化學銑削之加工效率，達到節能減碳之目的。
5. 磁場輔助微槽電化學銑削有助於提升微電化學銑削之精度及表面粗糙度，達成高



精度的目標。

6. 微槽電化學銑削於主軸轉速 20000 rpm 之下，搭配 5 V 工作電壓，可將加工進給率由無磁場輔助之 5 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 提高到有磁場輔助之 8 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 。
7. 微槽的槽寬可在磁場輔助加工，進給速度 8 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 之下，降低至 344 μm 。
8. 微槽電化學銑削於磁場輔助之下，進給速度 8 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 時表面粗糙度降為 Ra 0.54 μm 。

參考文獻

- [1] K. P. Rajurkar, G. Levy, A. Malshe, M. M. Sundaram, J. McGeough, X. Hu1, R. Resnick, A. DeSilva, “Micro and Nano Machining by Electro- Physical and Chemical Processes”, *Annals of the CIRP*, Vol.55, pp.643-666, 2006
- [2] Kim B. H., Ryu S. H., Choi D. K. and Chu C. N., “Micro electrochemical milling”, *J. Micromech. Microeng*, Vol 15 pp 124–129, 2005
- [3] R. Schuster, V. Kirchner, P. Allongue, G. Ertl, “Electrochemical micromachining”, *Science*, Vol.289, pp.98-101, 2000
- [4] J. Kozak, K. P. Rajurkar, Y. Makkar, “Selected problems of micro-electrochemical machining”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.149, pp426-431, 2004
- [5] S.H. Ahn, S.H. Ryu, D.K. Choi, C.N. Chu, “Electrochemical micro drilling using ultra short pulses”, *Precision Engineering*, Vol.28, pp.129-134, 2004
- [6] T. Kurita, K. Chikamori, S. Kubota, M. Hattori, “A study of three-dimensional shape machining with an EC μ M system”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.46, pp.1311-1318, 2006
- [7] K. Chikamori, “Possibilities of electrochemical micromachining”, *International Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.32, pp37-38, 1998
- [8] Hattori, “Electrochemical machining under orbital motion conditions”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.109, pp339-346, 2001
- [9] H. P. Tsui, J. C. Hung, J. C. You, B. H. Yan, “Improvement of Electrochemical micro drilling accuracy using helical tool”, *International Journal of Machine & Manufacture processes*, Vol.5, pp.499-505, 2008
- [10] Z. Fan, T. Wang, L. Zhong “The mechanism of improving machining accuracy of ECM by magnetic field”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.149, pp.409-413, 2004
- [11] J. Fang, Z. Jin, et al., “ECM polishing research of assistant magneticfield Chin”, *Surf. Eng. 15 (3)*, Vol.32, pp.24-26, 2002.

