

23. 複合式線上精微研削系統開發

陳順同 副教授、葉明榮、林憲志、楊弘意、杜致緯
國立台灣師範大學 機電科技學系、工業教育研究所

摘要

本研究主要目的在開發複合式線上精微研削系統，應用於光學玻璃或硬化鋼料的研削加工。文中提出一種精微複合製造技術，先開發研磨用之工具胚料，再進行工具成型修整，最後再以及光學玻璃和硬化鋼料進行研削，所有製程技術均於一部微型複合加工系統上完成，以實現精密線上研削技術。精微研削系統開發包含交換式工作槽設計、複合沉積槽設計，以及高/低速軸設計等。研削用的磨輪透過複合沉積製程，可於線上製作、薄化、同心成型，最後線上研削；包括研削工具與被加工工件都不須拆卸，直至加工完成，故能獲致最佳加工精度。實驗顯示，以高速快淺研削方式對光學玻璃進行開溝加工，可獲得溝寬 $15\ \mu\text{m}$ 、溝深 $10\ \mu\text{m}$ 、研削面粗糙度達 $Ra0.0309\ \mu\text{m}$ 的微細溝槽；而線上開發的微細磨研工具磨削硬化鋼微型孔後，可得微孔直徑為 $\phi 201\ \mu\text{m}$ ，表面粗糙度 $Ra0.0529\ \mu\text{m}$ ，真圓度 $0.573\ \mu\text{m}$ ，圓柱度 $1\ \mu\text{m}$ 以內，顯示此項線上精微研削系統能達到預期開發的目標。

關鍵詞：鑽石輪刀，複合沉積，高速快淺研削、微型磨研工具、微線切割放電加工

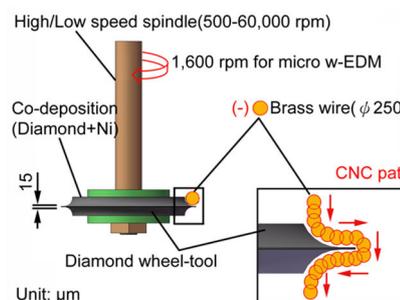
一、前言

微型產品具反應速度快、省能源、省空間優點[1]，應用領域涵蓋精微模具、生醫產業、檢測儀器與光電產業等。相應於微型產品，其加工所需之刀具、工具與夾具等，皆須隨之微小化；為提高精微製品的精度，傳統加工法如車削、鑽孔、磨削、銑製、沖壓成型等已不敷使用，其切削力與加工熱所造成的材料變形及刀具磨耗問題不得不重視，故『非傳統微技術』是重要選項之一；而模具與製品之材料選用，也已由傳統金屬材料偏向超硬材料趨勢，主要取其強度與耐磨耗特性；工件與刀具的夾持更是影響加工精度重要的因素，因此，兼顧製造精度的同時，微型製品易位時的精度維持也是非常重要的。本研究開發一套『複合式線上精微研削系統』，提出多項提高精度的策略，包括高/低速軸合併設計、交換式工作槽設計、微線切割放電加工機構開發[2]、線上複合沉積[3]與高速快淺研削(Hi-speed & fast-shallow grinding)等技術開發；實驗證明，此精微研削系統能符合製造精度需求，部分技術已轉移工業界使用。

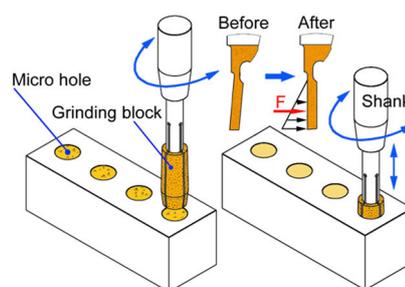
二、研究方法與實驗硬體開發

『複合式線上精微研削系統』主要針對難削材料的精微製造，如玻璃微溝加工以及硬化鋼料微孔磨研等。實驗設計一種可交換式工作槽，透過工作槽改變方式調整製程技術，如更換鑽石沉積槽，或CBN沉積槽，或微線切割放電加工機構等，因此刀具或工具至加工完成前

都不需拆卸，沒有定位誤差與精度校正問題；而研削系統的主機頭座，採用臥/立兩用及高/低速主軸合併方式設計，刀具加工方向與轉數選用更具彈性。圖1(a)所示為超薄輪刀線上研削示意圖，透過WEDG機構[4]，輪刀以線切割放電加工方式修整薄化及同心；圖1(b)為懸臂樑式精微磨研工具開發，經由線上微線切割放電加工，實心磨棒胚料可被切割成懸臂式磨棒。經由放電參數調整，研磨工具之削銳與削正均可同時完成，並立即進行硬脆材料的線上精研。工具與工件的座標均由CNC控制器精密對位，故加工精度可獲致研削系統本身之精度。



(a) 超薄輪刀開發

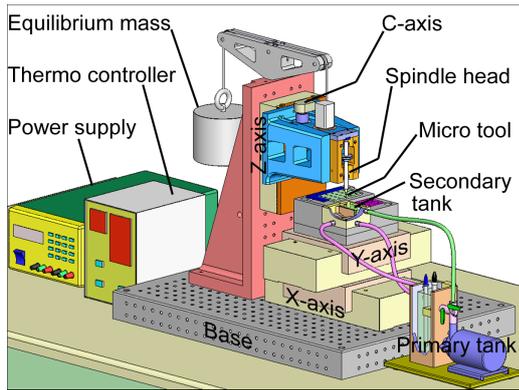


(b) 懸臂樑精微磨研應用(發明第I 309594號)

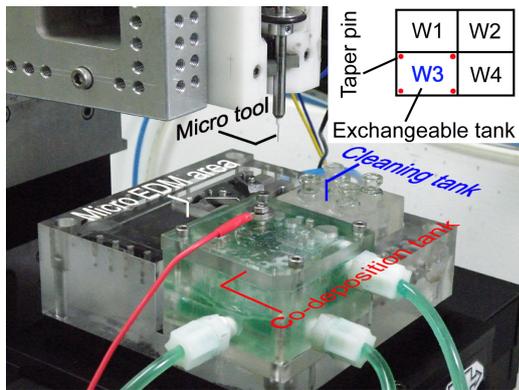
圖1 線上精微研削技術開發

二、實驗硬體開發

為實現高精度的微細研削加工，本研究提出一種『線上微製造技術』方法，藉由改變工作槽方式，達到精密定位與精密加工目的。如圖2(a)所示，線上微製造技術建構於微型綜合加工機上，包括高/低速軸合併設計、線式放電研削(WEDG)加工區、微線切割放電加工區、前處理區與複合沉積區等規劃，這些規劃能使研削刀具獲得線上製造，並達成『線上精微研削』目的。工具素材外型經微放電修整成型後，立即在CNC微綜合加工機上移位至清潔槽中清洗，再進行複合沉積。



(a) 線上精微研削系統開發



(b) 交換式工作槽設計

圖2 線上精微研削系統與交換式工作槽

如圖2(b)所示，工作槽區分4區，分別為量測槽(W1)、放電加工槽(W2)、前處理槽(W4)與可交換式工作槽(W3)；工作槽交換均以錐銷(Taper pin)及錐孔(Taper hole)方式配合，錐銷定位於交換槽四角落，故工作槽自由度為0，並可獲得高重複精度定位。高/低速主軸合併設計於主機頭座前端位置，可視需要進行模組化更換，於有限空間做最佳利用，使設計更具精巧(Compact)；為避免垂直軸(Z軸)長期背負主機頭座重量而造成磨耗，精微研削系統採用平衡機構設計，透過平衡桿，一端為主機頭座，另一端為等重之平衡載重，因此Z軸位移平台僅負責主機頭座的高低升降，不須背負其重量，可使系統運作更穩定，位移平台壽命更長。

四、實驗驗證

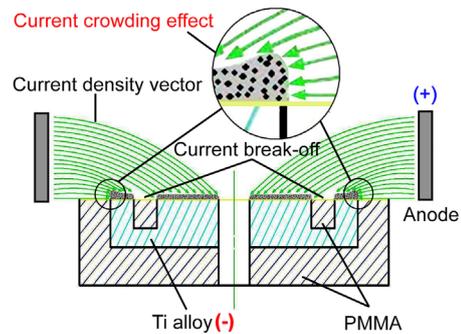
4-1、超硬磨粒之複合沉積

面對高硬度材料的加工，如光學玻璃或SKD11冷模工具鋼等，最適合的研削材料分別是鑽石與立方氮化硼(CBN)，本實驗以電化學複合沉積(Co-deposition)法進行研削工具開發。沉積液以氨基磺酸鎳液與粒徑0-2 μm 磨粒均勻混合。依法拉第定律：(1)電化學沉積的生成物與所通入的電量成正比，(2)通入一定的電量，各物質生成的量，與其化學當量成正比。若複合沉積層厚度為d，則d可由式(1)表示[5]。

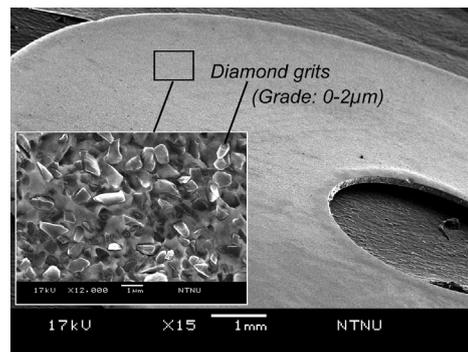
$$\frac{d}{t} = \eta \frac{M}{zF\rho} j \quad (1)$$

式中 d：沉積層厚度，M：分子量， η ：電流效率，t：沉積時間，j：電流密度，z：電子數， ρ ：沉積金屬密度，F：法拉第常數。

電化學沉積過程中，電流會因集中效應(Current crowding effect)而聚集於陰極的尖角及邊緣處，因此電流密度分佈也隨之不同，這些尖角及邊緣承受更多的電流，形成所謂『高電流區』，故沉積的金屬離子隨之增多，厚度也增大，在輪刀沉積方面更為明顯。本研究提出一種不連續陰極模具設計，如圖3(a)所示，用以中斷電流集中效應，圖3(b)為輪刀胚料與鑽石沉積結果，可知中斷電流集中設計發揮效用，確實改善輪刀表面不平整的問題。



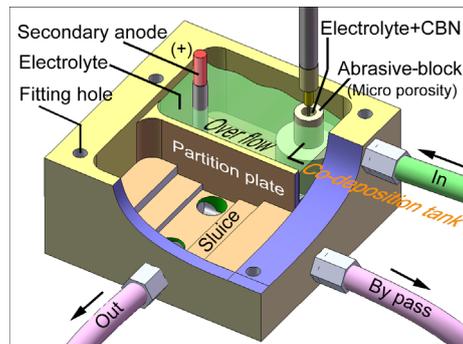
(a) 中斷電流集中設計



(b) 成型輪刀胚料

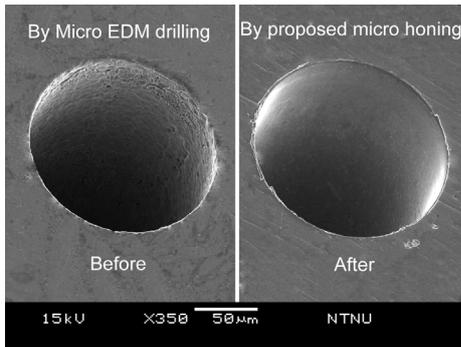
圖3 不連續陰極模具設計與複合沉積成型之輪刀胚料

外徑200 μm 微型糖研磨棒開發以超微粒碳化鎢(WC)為基材，取其硬度與強度。經WEDG機構加工至所需軸徑尺度與同心度，隨即移入前處理槽進行清潔，再移至複合沉積槽中的多孔性載體模具(Porous carrier)進行沉積，如圖4(a)所示。因研削面積很小，為使輪刀與糖研工具有更多磨粒參與，實驗以0-2 μm 磨粒為沉積對象，圖4(b)所示為沉積成型之糖研工具胚料，沉積時間僅5分鐘，即可獲得多層磨粒效果。

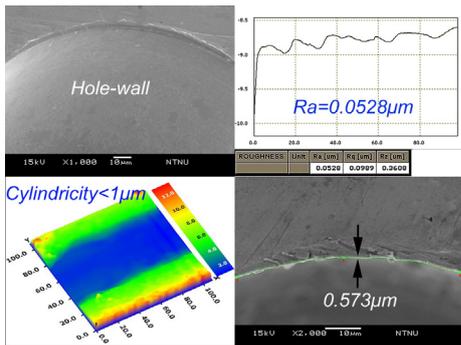


(c) 交換式複合沉積槽設計

力(σ_{cmax}) : 796Mpa(WC(抗拉強度) : 5.0Gpa) ; 一處在磨塊外圓處, 承受最大拉應力(σ_{tmax}) : 531Mpa(WC(抗壓強度) : 1.2Gpa), 兩者都遠小於碳化鎢材料本身的抗壓與抗拉強度, 故此受力大小均在彈性範圍內。圖7為微孔壁面搪研結果比較。由SEM量測得孔徑 $\phi 201 \mu m$; 圖(a)左圖顯示放電鑽孔孔壁呈現許多微細放電坑 ; 右圖顯示搪研後的孔壁獲致非常平整的研削面 ; 圖(b)為孔壁表面粗糙度值 $Ra0.0529 \mu m$, 真圓度 $0.573 \mu m$, 圓柱度依顏色辨識小於 $1 \mu m$ 。



(a) SKD11硬化鋼微孔搪研比較



(b) 硬化鋼微孔壁之表粗、圓柱度與真圓度

圖7 線上硬化鋼微孔搪研與成果

複合式線上精微研削系統的開發是成功的, 不但精密且加工速度快, 更具低本效益, 期望此項技術對精密微模具產業, 具有正面實質的幫助。

參考文獻

- [1] Y. S. Liao, S. T. Chen, C. S. Lin, Development of a high precision tabletop versatile CNC Wire-EDM for making intricate micro parts, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol.15, No.2, 2005, pp.245-253
- [2] S. T. Chen, H. Y. Yang, Y. C. Lai, Z. X. Zhang, S. W. Fan, Fabrication and research of a micro electro-machining system, Proceedings of the Sixth National Conference on Precision Manufacturing SME Taipei Chapter, Tainan, Taiwan, pp.217-222
- [3] S. T. Chen, M. Y. Tsai, Y. C. Lai, C. C. Liu, Development of a micro diamond grinding tool by compound process, Journal of Materials Processing Technology, Vol.209, 2009, pp.4698-4703
- [4] Y. S. Liao, S. T. Chen, C. S. Lin, Development of A Multi-function High Precision Tabletop CNC Machine for Making Micro Parts, Proceedings of the LEM21, International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century October 19-22, 2005, Nagoya, Japan, pp.485-490
- [5] Marc De Vogelaere, Volkmar Sommer, Heike Springborn, Ursula Michelsen- Mohammadein, High-speed plating for electronic applications, Electrochimica Acta, Vol.47, 2001, pp.109-116
- [6] Saito C, 1979 The Construction and 100% Operational Skills of EDM (in Japanese) Mitsubishi Electric Ltd. pp 40-69
- [7] M. Zhou, X. J. Wang, B. K. A. Ngoi, J. G. K. Gan, Brittle-ductile transition in the diamond cutting of glasses with the aid of ultrasonic vibration, Journal of Materials Processing Technology Vol.121, 2002, pp. 243-251

五、結論

在光學玻璃切溝方面, 本研究已順利開發出厚度 $15 \mu m$ 的超薄鑽石輪刀, 並成功切割出寬度 $15 \mu m$ 、深度 $10 \mu m$ 的光學玻璃微細溝槽。沉積成型的輪刀胚料, 可由微放電加工而薄化及同心化 ; 薄化後的輪刀直接以CNC程式定位於加工位置進行微溝高速快淺研削, 故能省卻繁瑣與再校正的時間 ; 因材料移除量很少($0.5 \mu m / stroke$), 移除速度快, 故可得高精微溝槽, 溝槽底部表面粗糙度達 $Ra0.0309 \mu m$ 。在硬化模具鋼的微孔搪研方面, 本研究使用一種陶瓷結合劑磨輪當多孔性載體模具, 成功應用於搪研工具的CBN磨粒複合沉積, 不但能節省磨粒用量, 沉積液更具良好對流效果, 可低成本且快速沉積磨粒 ; 而微線切割放電加工機構能提供搪研工具進行精密剖溝加工 ; 成型的懸壁榫搪研工具, 直接定位於微孔進行精密搪研 ; 搪研後的微孔表面粗糙度達 $Ra0.0529 \mu m$, 真圓度 $0.573 \mu m$ 。兩項實驗所有工作座標均由CNC程式控制, 研削工具沒有拆卸, 故無定位精度問題, 完全實現精微研削加工目標。綜合上述, 本項