

桌上型雙主軸超精微CNC工具機 開發與應用

陳順同／國立臺灣師範大學 機電系 教授・張智賢／國立臺灣師範大學 機電系 研究生

本專題旨在設計並開發一部「桌上型雙主軸超精微CNC工具機」，主要目的是以此部超精微工具機，發展「精微模具」的製造技術。由於針對精細溝槽結構加工，故「桌上型雙主軸超精微CNC工具機」設計成龍門式結構，並進行承載形變與顫振分析，以建構高剛性及高勁性的工具機，防止加工過程中，結構發生振動或變形而影響加工精度。為減少工件夾持與翻轉校正機會，以維持高精度加工，設計適於精微模具的製作技術，本研究提出「雙主軸」工具機的設計概念，亦即，工具機上設計可裝置互相垂直之「成對」刀具、工具與量具，以便同時或依序精密加工工件。為此，本研究於開發的雙主軸工具機上，建構線式放電研削、高速研削、精拋與量測等技術，用於線上精微刀具開發、線上精微模具製作與線上精微拋光等工作。透由線上放電成型技術，本研究將聚晶鑽石輪刀切刃，精細加工至5 μm 厚度。為成型精微模具之精細結構，本研究亦提出一種「高速快淺研削技術」，將裝置於臥式軸上的鑽石輪刀，經由線上放電薄化成型後，不做拆卸，直接定位於NAK80模具鋼上，進行陣列微溝的成型研削。高速快淺研削的進給切深，被嚴謹控制在奈米等級的超薄移除量，並加快研削速度，以提高單位時間之金屬移除率。經實驗證實，奈米去除量能使鑽石輪刀對NAK80模具鋼，有效地持續成型研削，並成功開發出槽寬8 μm 的陣列微溝，微溝表面粗糙度達Ra10 nm；而輪刀被線上成型且無拆卸，故陣列微溝之成型研削能以主軸原始精度進行，而獲致極高穩定度的研削效能與研削精度，大幅省卻繁瑣校正時間，此項研究深具商用價值。

關鍵字：雙主軸超精微CNC工具機、鑽石輪刀、高速快淺研削、精微模具

1. 前言

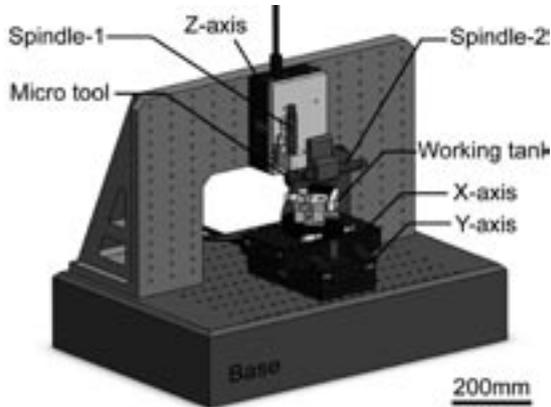
近年來，半導體、光電與生物醫療器材等科技產業，紛紛朝向輕、薄、短、小方向發展，製造技術為符合此潮流，也相應往自動化、高效率化與微型化趨勢開發。其中，關係人類健康的生物晶片市場，更是蓬勃發展。以細胞鏡檢晶片(Microscopic examination chip for cells)為例，多以準分子雷射加工載玻片玻璃而成，醫療院所為節省成本，經常需重複清洗使用，但過程中，檢體易因清洗不完全而致誤判或生感染，甚至操作不小心，玻璃破裂傷及檢驗人員。所以如能以塑膠製成，則可大幅降低製造成本，且安全精確使用，而用畢之塑膠晶片，經妥善處理，亦不致發生污染問題，深具低成本與環保。不過，由於受檢細胞相當微小(紅血球直徑8 μm ；白血球直徑10 μm)，所以細胞鏡檢模仁的特徵尺寸也相對微細，因之相應的製造設備，包括模具、

刀具及夾治具也需隨之微細化。而微型化技術(Miniaturization technology)包含黃光微影蝕刻、X光深刻技術(LIGA)等加工，但其設備投資都相當昂貴，適於大量生產，對於少量模具，或非矽基材料的製造，都不適合。鑑此，本研究開發「桌上型雙主軸超精微CNC工具機」，並於此部工具機上，建構微細製造技術，包括精微線切割放電加工機能、高速研削機能與拋光加工機能等，專為精微模具提供合適之製造技術。

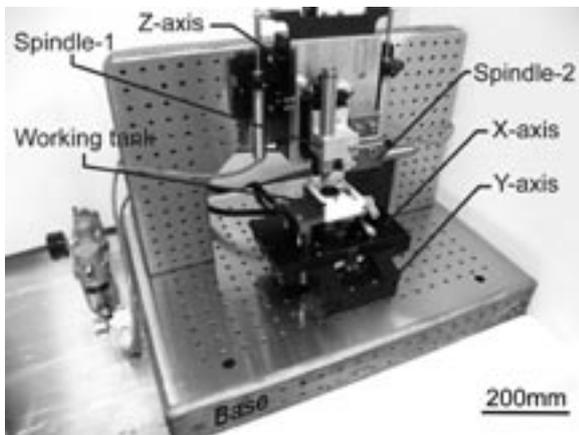
2. 雙主軸超精微CNC工具機建構

開發具10 μm 以下特徵尺寸微細結構的精微模具，如在NAK80模具鋼上，用以進行大量射出成型，以目前市售精密機器而言，無法達此加工精度與製造能力水準。因之，本研究設計並開發「桌上型雙主軸超精微CNC工具機」，且將此工具機設計成龍門式結構，以建構高剛性及高勁性

的工具機，防止加工過程中，結構發生變形或振動而影響加工精度。圖1(a)所示為桌上型超精微CNC工具機設計，圖1(b)為完成的桌上型超精微工具機實體，它可提供精微模仁之微細溝槽陣列加工，以及模仁的表面精拋等作業。



(a) 桌上型雙主軸超精微CNC工具機

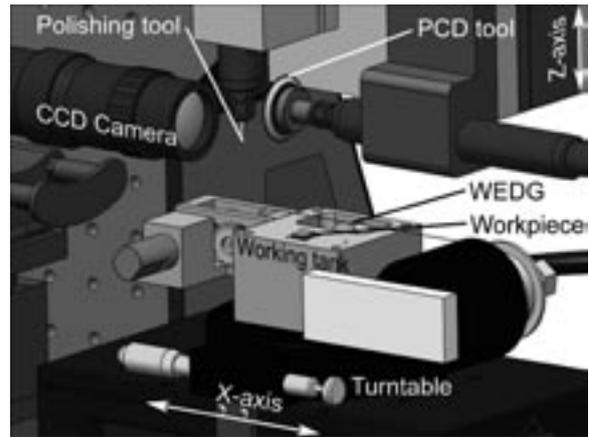


(b) 完成開發的雙主軸超精微工具機

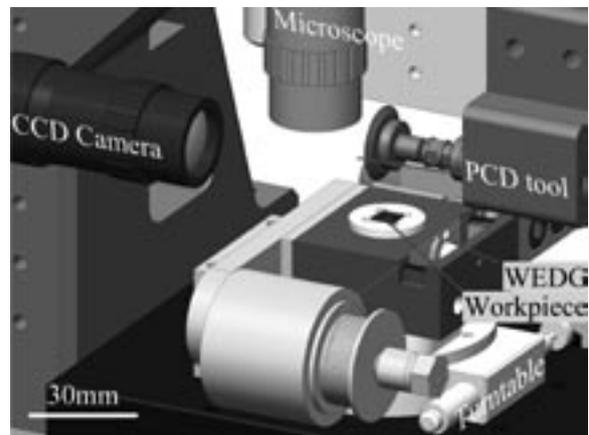
(圖1) 桌上型雙主軸超精微CNC工具機設計與製造

2-1 雙主軸設計

為減少精微模具於加工過程中的夾持與翻轉校正機會，以維持高幾何精度的加工，本研究提出「雙主軸(Dual-spindles)」工具機設計概念，亦即，工具機上設計成可裝置互相垂直的「成對」刀具、工具和量具。此項設計非常適於精微模具，特別是高精度模具之製作，藉由雙主軸設計，微細模具可同時或依序被雙主軸上的「工具」進行加工或量測，進而減少工件拆卸與校正時間，能有效提高加工精度與加工效率。如圖2(a)所示，臥式軸裝置PCD輪刀，可對工件進行切溝加工，完成後，隨即切換成立式軸，進行模面精拋，最後再以工具機上的顯微鏡進行模具特徵尺寸量測，以提供線上補償或再加工的依據，如圖2(b)所示；而側向的工具顯微鏡，則是提供加工過程中的線上監看之用。



(a) 雙刀具軸設計



(b) 線上工具顯微鏡檢測

(圖2) 雙主軸超精微工具機之雙主軸設計

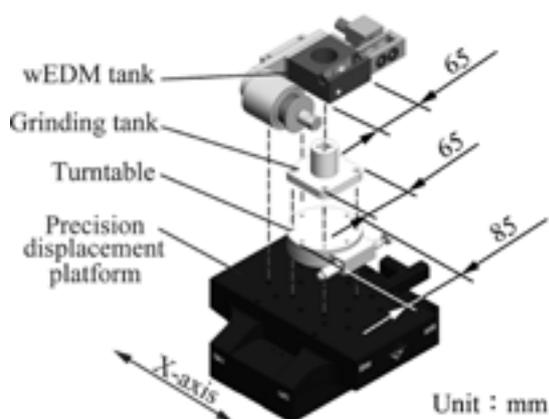
2-2 複合式工作平台設計

為使精微模仁獲致精密微細的製造，本研究提出一種線上加工(In-situ machining)技術，即工件素材定位於平台後，便不再拆卸，直接以被加工完成的刀具，精密移位至工件上方，工件從粗加工至精加工，均在此工具機上完成，主要目的在變換加工的刀具，使精微模具獲致不同加工機制之技術。為能實現線上加工技術，本研究提出「複合式工作平台(Hybrid working platform)」的設計[1]，它包含工件夾持定位、工件旋轉定位，以及精微放電加工等功能，如圖3(a)所示之系統設計。夾持工件的精密治具(Precision jig)具三個互相垂直的精密基準面，工件緊靠此基準面鎖固，整組治具亦被精密定位於一組可水平方向旋轉的平台上，所以工件加工的角度可被精密分度調整。在另一方面，為使刀具能被線上加工，複合式工作台上，亦設計一工作槽，槽中建構線式放電研削機構(Wire Electro Discharge Grinding, WEDG) [2]，以便刀具(或電極)能被線上加工，而加工完成的刀具，再移至工件上方，對工件進行精密加工。以本研究精微模仁加工為例，透由複合式工作平台的設計，一

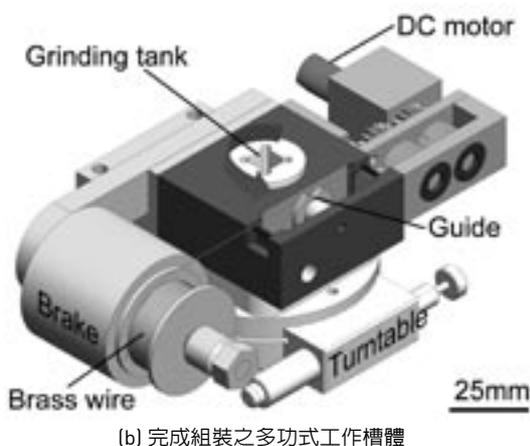
聚晶鑽石輪刀胚料，首先被裝置於臥式高速主軸上，再以線切割放電加工，進行切刃線上成型，鑽石輪刀完成後，即被定位於模具鋼上，進行陣列微溝之成型研削；視需要再使模仁於水平方向旋轉一角度，以成型另一方向的陣列細溝，俟模具成型後，工具再切換成立式軸(裝置拋光工具)，以進行模具表面之精拋作業。如此透過不同製程技術的切換，工件與刀具均無需拆卸，所以無需再次校正，可高精度一次成型，此項技術使得刀具主軸能以原同心精度作線上成型加工，因而可獲致極高穩定度的加工效能，並大幅省卻繁瑣校正時間，圖3(b)為多功式工作平台之組裝設計完成圖。

2-3 工具機人機介面開發

雙主軸工具機人機介面開發，主要功能分別為自動(Auto)、單節(Single)與吋動(Inch)，以及IO監測、警告監測與關閉監測。人機介面系統以Microsoft Visual Studio 2010 C# 軟體開發完成，採用Window 7作業系統。圖形化界面主要功能有即時監控、指令輸入兩部分。「即時監控」如機械座標、程式座標、進給速度及回歸座



(a) 多功式工作平台系統設計



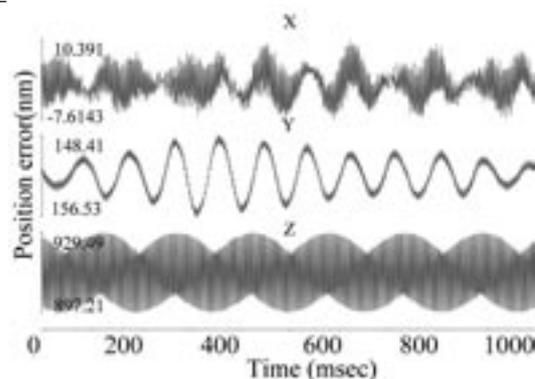
(b) 完成組裝之多功式工作槽體

(圖3) 具精密度之複合式工作槽體設計

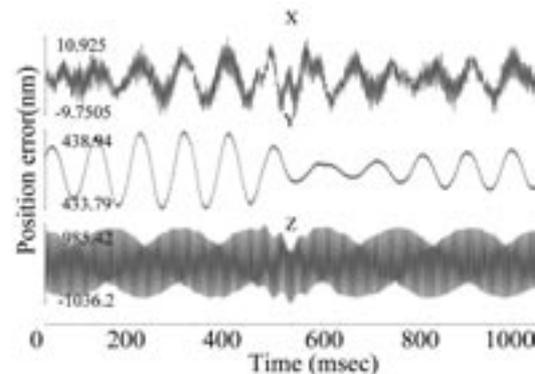
標等位置觀察；「指令輸入」包括程式載入、單節執行、連續執行、循環開始、緊急停止以及手動輸入等功能。CNC程式控制傳輸以IEEE1394界面，將指令傳至控制工具機系統中，透過PC平台執行CNC程式，並回饋(Feedback)至系統電腦，以便操作與監控。

2-4 雙主軸工具機之顫振分析

工具機系統所在環境，需適度控制，包括克服環境振動及刀具偏擺振動等問題。環境振動可透過光學桌加以改善，但刀具偏擺振動，不易抑制。所以本研究提出使用「同軸研削」的線上成型技術，用以修整刀具，以便有效降低刀具偏擺量。本研究所開發之雙主軸工具機系統，透過增益(Gain)調校，在靜態環境下，系統勁度(System stiffness)之振幅可達 $\pm 0.02\mu\text{m}$ 以下。為獲致高穩定度加工，本研究亦測試在不同高速主軸轉速下，以「線上(In-situ)技術」與「非線上(Ex-situ)技術」成型鑽石輪刀[3]，瞭解此開發的工具機系統之振動狀況，以便求出適宜精微模仁細溝研削的主軸轉速。高速主軸轉速分為5,000, 10,000, 15,000與20,000 rpm四階段進行測試。以20,000 rpm測試結果為例，以線上技術成型輪刀後，其工具機系統勁度可維持在 $0.03\mu\text{m}$ 以下的振幅，如圖4(a)(b)所示；若以非線上技術成型輪刀，則產生約 $2\mu\text{m}$ 的振幅誤差。由上述實驗得知，線上成型鑽石輪刀，能有效防止工具機系統振動發生。



(a) 20,000 rpm之系統勁度誤差(線上)



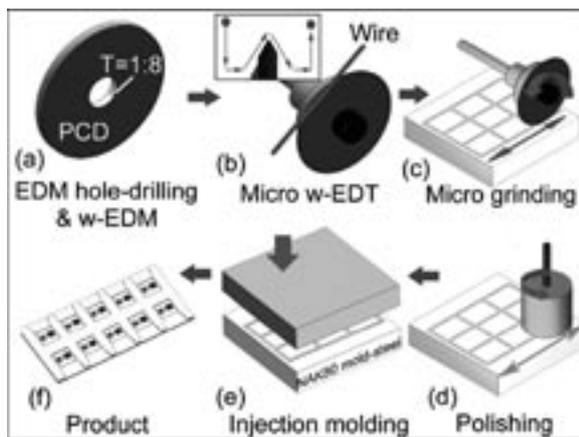
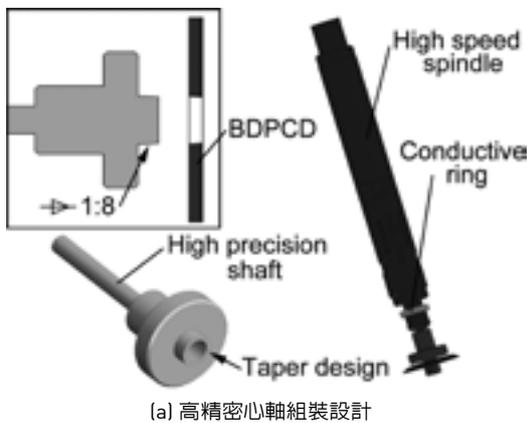
(b) 20,000 rpm之系統勁度誤差(非線上)

(圖4) 線上與非線上刀具修整後的系統振動比較

3. 聚晶鑽石輪刀之線上開發

3-1 聚晶鑽石輪刀之削正與削銳

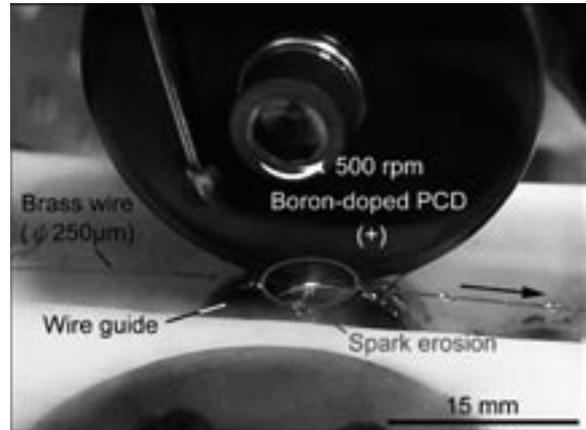
為線上製作刀具，雙主軸工具機設計線上放電研削機能，此項技術主要目的係為製作高同心度之鑽石輪刀所設計，以便就地加工精微模具。為提高聚晶鑽石胚料與高速主軸的同心度，本研究自行設計高精密心軸(High precision shaft)，此心軸以SKD11工具鋼製成，經熱處理及精密研磨，並在心軸前端設計1:8錐度，使材料與心軸自動對心配合，消除偏心問題，並產生自鎖效應(Self-locking effect)。最後，再以螺絲鎖固心軸與鑽石胚料，以增強夾持力，如圖 5 (a)所示。聚晶鑽石以雙主軸工具機上的線式放電研削技術，製作成與高速主軸同心的輪刀形式，主要用途在於以此同心輪刀在模具鋼表面進行陣列細溝成型研削，開發流程如圖 5 (b)所示。



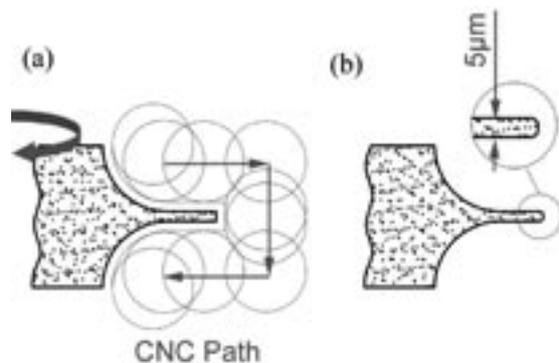
(圖5) 聚晶鑽石輪刀開發流程與高精精密心軸設計

聚晶鑽石輪刀先行以微線切割放電加工技術進行削正(Micro electric discharge truing, Micro EDT)，接續再使用所開發的雙主軸CNC工具機，其上所建構的精微放電加工機能，進行微線切割放電之削銳(Micro electric discharge dressing, Micro EDD)，以精密控制鑽石輪刀刀

寬。如圖 6 (a)所示為輪刀之削銳加工，採用倒置式微放電法(Reverse micro w-EDM)，以利放電殘渣因重力而排除[4]，圖 6 (b)為鑽石輪刀之削銳路徑安排。



(a) 精微CNC工具機之倒置放電



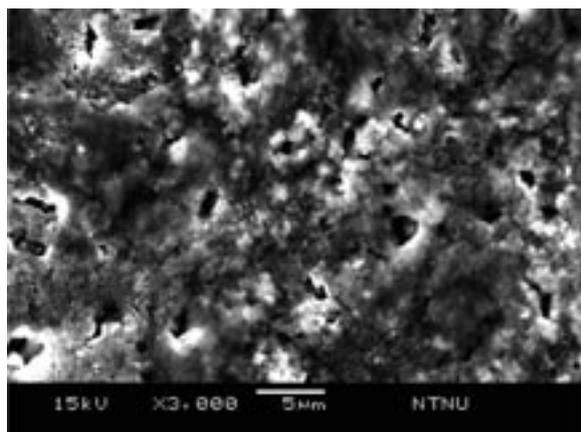
(圖6) 聚晶鑽石輪刀之線上削銳

3-2 聚晶鑽石輪刀之表面變質層探討

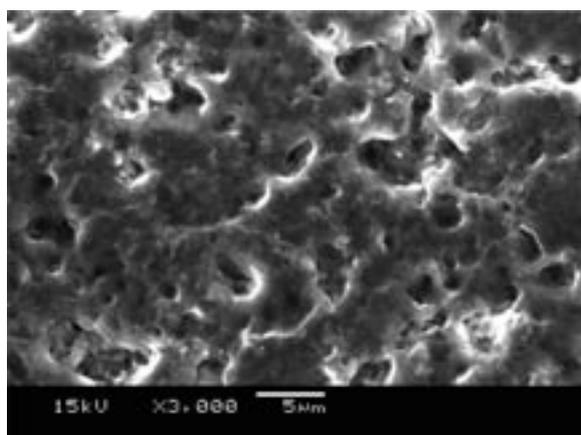
本研究利用精微放電加工，以削銳含硼聚晶鑽石輪刀，放電加工係以熱加工去除材料，加工過程中，雖無切削力，可成型微細切刃，但材料受到高溫影響，易生變質層。一般鑽石溫度達600°C以上時，便還原成石墨組織[5]。石墨組織影響輪刀壽命甚鉅。本研究以「RC放電迴路」及「電晶體放電迴路」加工含硼聚晶鑽石，並進行表面變質層之探討。放電能量 $Q(t)$ 是功率與時間之比，而單發放電所需能量 E_T 可以式1表示， t_s 為單一脈衝時間[6]：

$$E_T = \int_0^{t_s} Q(t) dt$$

所以，放電能量隨放電時間縮短而變小。從能量觀點看，在精加工模式下，兩種迴路都提供足夠小的放電能量，作用在鑽石輪刀表面。圖 7(a)為電晶體放電迴路以精修能量加工的PCD表面型貌，其可發現放電坑較大；再從RC放電迴路看，精加工如圖 7(b)所示，比使用電晶體放電迴路具有更平坦的表面。



(a) 鑽石輪刀之削銳路徑安排



(b) 以RC放電迴路加工(精加工)

(圖7) 不同放電迴路加工含硼鑽石之表面形貌

兩種放電迴路造成不同結果，其差異推估是放電頻率(Discharge frequency)不同所造成。電晶體放電迴路，其放電頻率可達3 MHz (Avg.)；而RC放電迴路，頻率約為33 KHz(Avg.)，單位時間的放電次數差異甚大。以電晶體放電迴路加工者，因放電頻率夠高，聚晶鑽石材料中的鈷，因高速放電的高熱而被快速移除，局部被快速氣化，所以形成較多且大的放電坑；反觀RC放電迴路加工者，因放電頻率低，鈷金屬有時間從基地溶出並凝固於聚晶鑽石表層，這也說明了以RC放電迴路加工，聚鑽石表層形成較平坦的表面原因。不過，這較平坦的表面係所謂的表面變質層(Surface degenerating layer)，對於聚晶鑽石刀具並無好處。

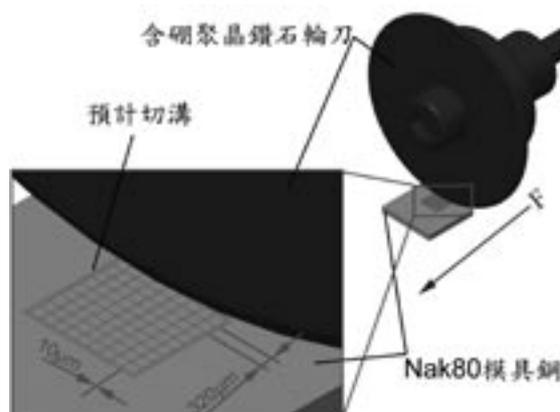
4. 精微模具開發與驗證

4-1 高速快淺研削

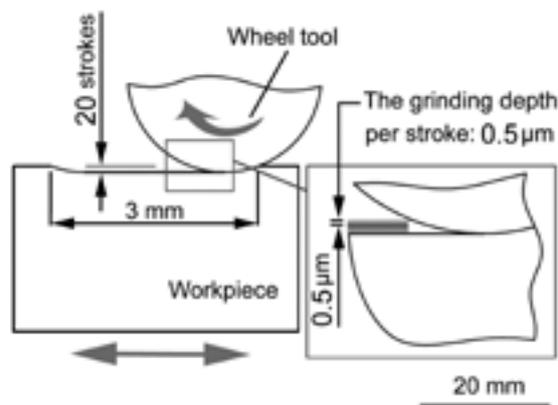
桌上型雙主軸超精微工具機開發完成後，除了於工具機上進行上述的「聚晶鑽石輪刀線上開發」外，本研究亦對精微模具進行線上製作(In-situ machining)，實驗採行的方法是：將NAK80模具鋼裝置於所開發的桌上型雙主軸工具機上，

定位後，再使用微米精度量錶校正加工面的平行度與垂直度。精微模仁其上的微格線設計，係為縱橫交錯的陣列式田埂結構，格線線寬設計為 $10\mu\text{m}$ 寬度，溝與溝之間，彼此距離 $320\mu\text{m}$ ，圖8(a)為精微模具陣列細溝成型研削示意。微溝成型研削實驗參數如下：主軸迴轉數：15,000 rpm，鑽石輪刀每道進給切深： $0.1\mu\text{m}$ ，總切深： $10\mu\text{m}$ ，每道研削長度：3 mm。

為提高製作微細溝槽的效率，本實驗於輪刀成型後，輪刀直接在加工機上對位並進行成型研削(Form grinding)，研削技術採行快速短行程淺研削法，嚴謹控制研削工具於每道切深為 $0.5\text{--}0.1\mu\text{m}$ 的超薄去除量，並以高研削速度及快進給速率進行研削，謂之『高速快淺研削(High-speed and fast shallow grinding)』，由於切屑被快速且超薄量去除，故工件能維持於常溫狀態，可有效減緩鑽石被石墨化的速度，由於採用超薄淺研削進給，故材料移除率極低，但快速進給所累積的行程，也能有效提高金屬去除率，示意圖如圖8(b)。



(a) 精微模具陣列細溝成型研削示意



(b) 高速快淺研削示意

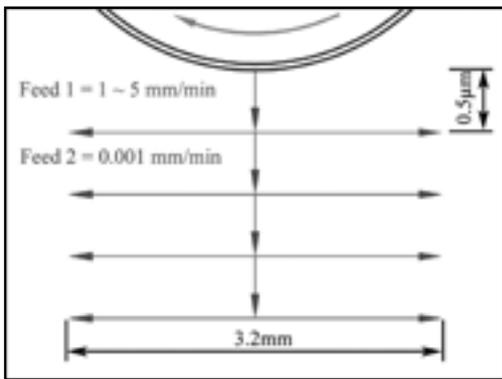
(圖8) 雙主軸工具機之精微模具開發

4-2 輪刀研削路徑影響

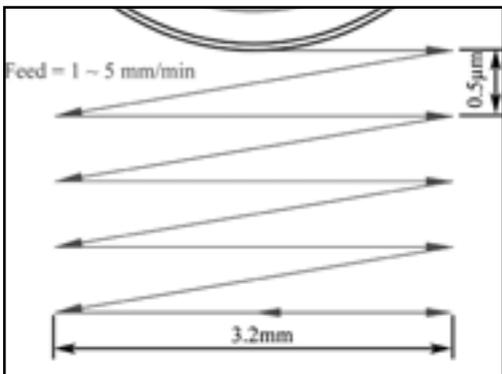
為降低鑽石輪刀所承受的研削力，本研究

於研發的工具機上，設計兩種微溝加工路徑模式，分別為「 \perp 」型與「Z」加工路徑，如圖9所示。 \perp 型加工路徑可保持鑽石輪刀切刃在中心點上，陣列微溝研削除了耗時，也耗輪刀，故當切刃產生磨耗，導致微溝各溝長不一時，此法便可透由左右補償方式進行修正；不過，在中心點處，輪刀下刀時，刀具研削阻力過大，易產生磨耗，除非下刀的進給速度降低，然此將增加加工時間，且一側為順向研削，另一側為逆向研削，輪刀受力不一。Z型加工路徑，其左右成型研削微溝時，以單一速率進給，故較 \perp 型快。且研削方向可控制為先逆向後順向研削，或者先順向再逆向研削，這可使微溝的加工面均一；不過它的缺點在於刀刃為終點進刀，當刀具產生磨耗時，細溝長度便不易補償修正。

對NAK80模具鋼的微溝研削，本實驗選用 \perp 型與Z型兩種不同的加工路徑進行比較。為使含硼聚晶鑽石輪刀可採用此兩種加工路徑，本研究使用較大刀寬的輪刀進行研削實驗，以避免刀具無法承受研削力而變形。研削結果以雷射共軛焦顯微鏡進行量測，比較兩種路徑，研削出的槽寬精度相同，兩者槽底深度皆為 $10\ \mu\text{m}$ ，槽寬為 $12\ \mu\text{m}$ ，並且發現，Z型研削路徑所得的槽底表面形貌較佳，表面粗糙度可達 $Ra0.01\ \mu\text{m}$ 。如圖10所示。

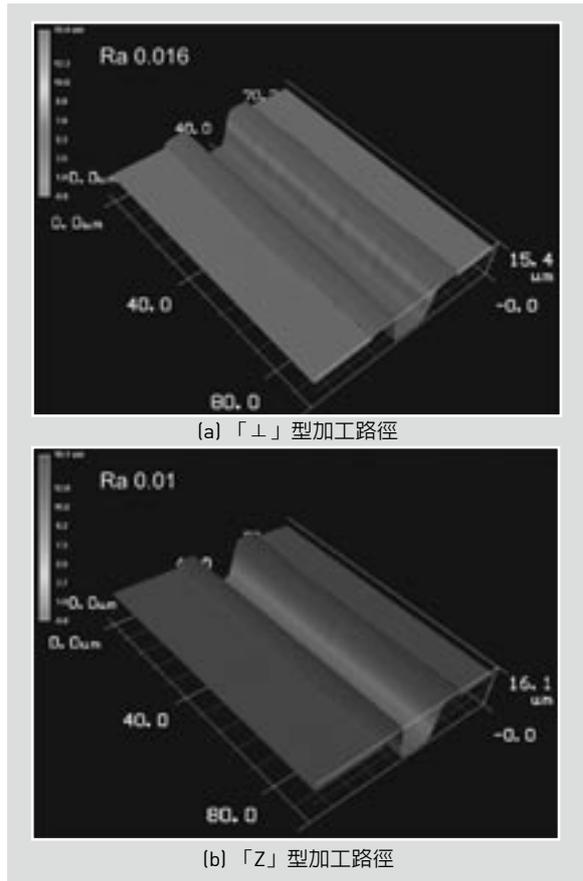


(a) 「 \perp 」型加工路徑



(b) 「Z」型加工路徑

(圖9) 微溝研削之鑽石輪刀加工路徑模式



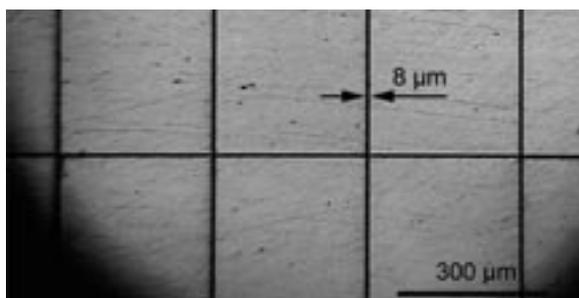
(圖10) NAK80模具鋼不同研削模式結果比較

4-3 精微模具完成加工

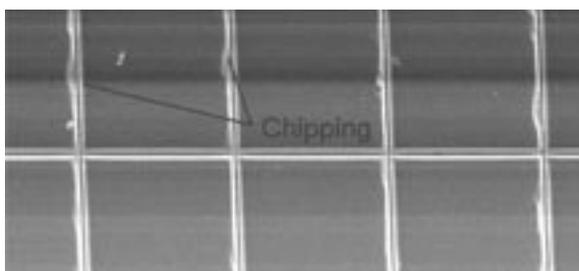
由以上各章節實驗，驗證本研究所開發的超精微雙主軸工具機，已成功地實現高精度的精微模具加工，其中，包括成型研削模仁表面 $8\ \mu\text{m}$ 的微細陣列筆直溝槽， $Ra10\ \text{nm}$ 以下的槽底表面粗糙度，以及乾淨無毛邊的田字型陣列微溝結構，如圖11(a)所示。此外，本研究亦嘗試以含硼聚晶鑽石輪刀，對硬脆材料「矽晶圓」進行加工，探討其陣列微溝研削的可行性。所研削之矽晶圓片成品如圖11(b)所示，證實本研究所開發的精微工具機，搭配聚晶鑽石輪刀與精微製造技術，便可對硬脆材料作成型微溝研削工作。由圖發現，在微溝邊緣有一些微崩落(Micro chipping)，這些微崩落係因研削的延性機制轉為脆性機制，亦即臨界切深(Critical grinding depth)($0.5\ \mu\text{m}/\text{stroke}$)過大之故[7]。當臨界切深再減少，則微崩落便不再發生，成型微溝外貌相當完整。

5. 結論

由上述實驗證實，本研究已成功研發「桌上型雙主軸超精微CNC工具機」，並於其上發展出適於「精微模具」的製造技術。從超精微工具機



(a) NAK80模具鋼陣列微溝成型研削



(b) 矽晶圓陣列微溝成型研削

(圖11) 延脆性材料之陣列微溝成型研削

設備開發、輪刀開發、NAK80模具鋼之精微模仁製作等一系列技術，均逐步獲得成功驗證。本研究提出「雙主軸」的設計概念，即工具機上設計「成對」相互垂直的刀具或工具或量具，以便同時或依序精密加工工件，使工件不須拆卸，維持工件的定位精度。透過雙主軸超精微工具機其上所建構的精微製造技術機能，將含硼聚晶鑽石與高精密切心軸，配合鎖固於高速主軸上，再進行高同心度的精密成型加工，以線上(In-situ)放電成型技術製作輪刀，可有效消除後續加工的顫振問題。而以成型輪刀直接對精微模仁，進行陣列細溝的成型研削，除了可驗證所開發的工具機與鑽石輪刀對延性材料及硬脆材料加工的可行性外，更可透過上述複合技術，對矽晶圓硬脆材料，進行陣列微溝之開溝加工，證實超精微工具機能圓滿達成微溝成型的研削任務，期望此超精微工具機的研發，與其相關技術能為精密工業所用。

參考文獻

1. S. T. Chen, Fabrication of a high-density micro holes by upward batch micro EDM, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol.18, No.8, 2008, pp.85002-85010
2. S. T. Chen, Y. C. Lai and C. C. Liu, Fabrication of a miniature diamond grinding tool using a hybrid process of micro-EDM and co-deposition, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol.18, No.5, 2008, pp.55005-55012
3. S. T. Chen, S. J. Lin, Development of an extremely thin grinding-tool for grinding microgrooves in optical glass, Journal of Materials Processing Technology, in press Vol.211, 2011, pp.1581-1589
4. S. T. Chen, A high-efficiency approach for fabricating mass micro holes by batch micro EDM, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol.17, No.10, 2007, pp.1961-1970
5. V. P. Astakhov and J. P. Davim, "Tools (geometry and material) and tool wear", Chapter 2, Machining: Fundamentals and Recent Advances, Springer, London, ISBN: 978-1-84800-212-8, pp37-38, 2008
6. A. Erden, B. Kaftanoglu, "Thermo-mathematical modelling and optimization of energy pulse forms in Electric Discharge Machining (EDM) ", International Journal of Machine Tool Design and Research, Vol. 21 , pp.11-22, 1981
7. B.K.A. Ngoi and P.S. Sreejith, Ductile Regime Finish Machining – A Review, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2000, vol.16, pp547-550