

5. 光學玻璃之高精度微型研鑽技術開發

陳順同¹、江宗翰²、吳宜穎²、楊弘意³
¹國立台灣師範大學 機電科技學系教授
²國立台灣師範大學 機電科技學系專題生
³國立台灣師範大學 機電科技學系研究生

摘要

本研究主要是利用創新的桌上型微鑽孔機進行研鑽技術之開發，此微鑽孔機結合了微放電加工與研鑽技術，能在光學玻璃上成型精密微孔。首先是以銅為基材之燒結合金鑽石刀具，利用逆向同心微孔放電加工及逆向微線切割，將鑽石磨棒加工出同心的空心軸及負後斜角造型，加工完成之刀具，可直接對光學玻璃或石英進行研鑽。此外，荷重元的加入可偵測研鑽時所產生的及時壓應力，並回饋到刀具的進給速率上。實驗結果顯示，微孔在尺寸與幾何形狀都能達到很高的精度，且本研鑽技術方法簡易、成本低廉，對微製造產業將能有顯著的貢獻。

關鍵字：逆向同心微孔放電加工、逆向微線切割、研鑽技術、光學玻璃

一、前言

現今許多產品多朝向微小化的趨勢發展，除了符合經濟效益且較能吸引消費者之外，也能節省空間、減少廢物產生及能源消耗。除了3C產品外，其他如光電產品、生物醫學儀器及通信系統也都有此趨勢。其中，光學玻璃更是在上述應用中扮演著舉足輕重的角色，尤其是觸控面板，為了因應各種產品需求，對光學玻璃進行切削、鑽孔、磨削等加工程序，都是無法避免的。由於光學玻璃具有高硬度及脆性，許多具有高效率及高精度的加工技術也隨之發展起來，例如超精密加工[1,2]、蝕刻[3]、放電加工[4]及雷射加工[5,6]，還有超音波震動輔助加工[7,8]，這些加工方法都有其應用的場合，但這些加工設備大都非常昂貴因而只適合大規模的生產；其產生的有毒化學物質亦會對環境造成威脅。因此，在考慮光學玻璃元件的加工方法時，除了須克服其先天的硬脆特性，加工方法、經濟效益及對環境的影響都需要一併考慮。

本研究將重新審視傳統加工概念及商業價值，以開發一結合高精度研鑽技術及逆向放電加工技術之桌上型微鑽孔機，這項發明將會在實驗中得到驗證。本研究所使用之鑽石刀具，透過線上的逆向放電加工技術，加工出同心空心軸及多刃結構的特殊造型，以利在光學玻璃上成型精密微孔，而荷重元感測機制能及時偵測研鑽時所造成的壓應力，並對進給速率作出及時的回饋調整。研鑽過程將會一層

一層的進行，本研究亦會在實驗中對尺寸精度、幾何精度及刀具壽命作出評估。

二、研究方法

2.1 鑽石刀具同心微孔放電加工

圓柱形鑽石刀具在鑽孔過程中，其切削速度 V (m/min)如式1所示。

$$V = \frac{\pi DN}{1000} \quad (1)$$

其中 D (mm)為鑽石刀具直徑，1000為修正系數， N (rpm)為磨棒轉速。由式(1)可知，磨棒中心靜點位置沒有切削速度(因 $D=0$)，為避免此點對玻璃工件造成擠壓，必須將磨棒軸心去除。本實驗採磨棒在上，銅管電極在下的倒置方式進行放電加工，在放電加工的同時，銅管電極與鑽石磨棒分別以20及500rpm同時反方向旋轉，如圖1(a)所示。此“逆向同心微孔放電加工”是將刀具軸心與銅管電極中心對齊並加上啄鑽模式的加工，如圖1(b)所示。啄鑽模式的抽吸效果使放電殘渣能因壓力差及重力而快速由下自動排出，亦可減少放電短路的頻率[9]。而所謂的“同心微孔”指的是微孔與圓柱型刀具有相同的圓心，而此微孔可加速切屑的排除並減少加工時的熱聚積。

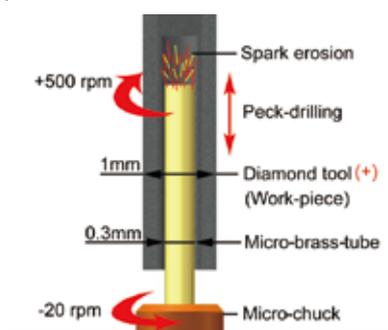


圖1(a) 逆向同心微孔放電加工

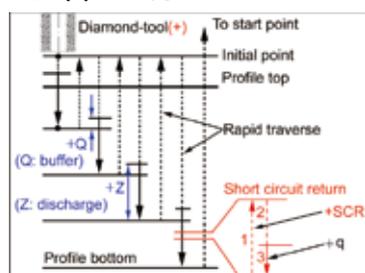


圖1(b) 啄鑽模式[11]

2.2 適當的放電能量及進給率

在微鑽孔機中，RC放電迴路提供微放電加工所需的能量，這個能量使放電電流有短脈衝及高峯值電壓[10]，為了找出同心微孔放電加工的最佳放電效率，鑽削率DR如式(2)所示。

$$DR = \frac{dad}{dpd} \quad (2)$$

其中dad和dpd分別表示放電鑽孔後的實際深度及預測深度。本實驗放電加工條件如表1所示，固定進給速度0.2mm/min，放電能量分別以3000, 9000, 15000與21000pF進行實驗，比較加工時間、加工深度與加工效率。由實驗結果圖2(a)觀察得知，當電容設定3000pF時，雖可獲取最大的實際深度，但因為放電能量過低，致使材料去除率降低，放電短路情況增加，延長加工時間。但當能量提高為9000、15000、21000(pF)時，所得到的加工時間相當接近，這意味著當提供過大的能量時，消耗量大部分集中於銅管電極上，這將使加工效率降低。適當的加工能量，可使材料去除率、銅管消耗率與進給速度達到平衡，得到大的鑽孔深度與最理想的加工效率。為了使加工效率與加工時間達到平衡，故本研究選用15000pF為最理想放電能量。

表1. 加工條件

Parameters	Conditions
Electrode	brass tube (ϕ 0.3 mm)
Work-piece	Diamond-tool (ϕ 1.0mm)
Working voltage	100 (V)
Feed-rate	0.4 (mm/min)
Tool speed	500 (rpm) (CW)
Tube speed	20 (rpm) (CCW)

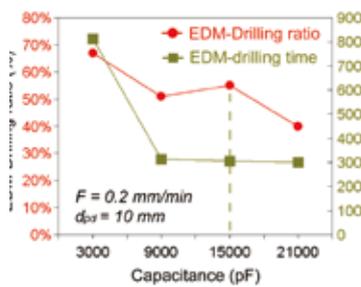


圖2(a) 能量與鑽削效率關係曲線

在進給速度控制方面，速度太快或太慢對於放電情況都不理想，適當的進給速率，不僅可以讓放電情況正常，也可以使銅管電極在安全的放電行為內，以最快速率前進，減少加工時間，提高加工效率。當進給速率小，放電情況最理想，加工短路情況也最少，但加工時間相對增加。隨著進給速度提高，可以獲取有效率的加工時間，但進給速度過大

時，材料及銅管電極會來不及被放電去除而發生加工短路現象，影響加工時間與加工精度。由實驗結果圖2(b)得知，當速度設定為0.4mm/min時，可獲得最低的加工時間(169秒)，為最理想的加工效率。

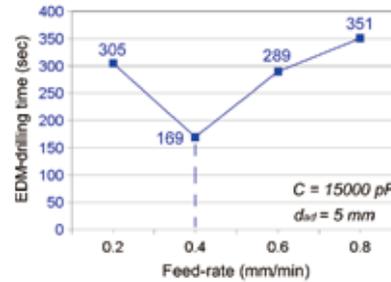


圖2(b) 進給速度與加工時間關係曲線

圖3(a)顯示了令人滿意的加工結果，經掃描式電子顯微鏡(SEM)線上檢驗後，測得其同心微孔直徑為330 μ m，單邊放電間隙僅15 μ m。更有趣的是，因為銅管電極的關係，在同心孔中心殘留了一微桿，如此更證實此加工孔之真圓度與同心度是絕對真圓與絕對同心的。將微孔內壁局部放大，如圖3(b)所示，鑽石磨料粒均勻分佈在銅基材中，這些間隔20-50 μ m的裸露鑽石提供了銳利的切刃及容納切屑的屑袋，以利磨削。

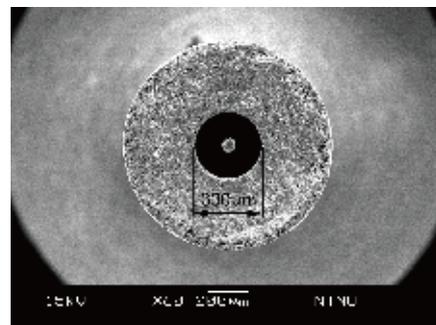


圖3(a) 同心微孔加工結果

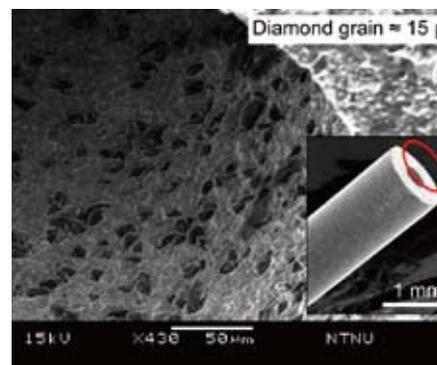


圖3(a) 同心微孔內壁近觀

2.3 鑽石刀具負後斜角加工

因考慮切削力及切屑的儲存空間，鑽石刀具的端面不能太平坦，除了去除刀具的軸心外，本研究對鑽石刀具亦提出了多刃負後斜角的設計。硬脆材料如光學玻璃較適合承受壓應力，而負後斜角($\alpha = -60^\circ$)的設計能對光學玻璃產生負角切削，如圖4(a)所示。透過數控工具機產生的路徑，六刃的負後斜角切刃將很容易在微放電線切割線上加工完成，如圖4(b)所示。本實驗將鑽石磨棒端面圓形等分為三等份，將每一等份採用相同的V行路徑將其端面割出V溝，三等份加工完成後，便可形成六刃負後斜角。切刃的幅射對稱能平衡磨削力的作用。值得注意的是，由於鑽石刀具並未被拆卸直到加工結束，所以能維持精確的加工精度。圖5(a)為加工完成之鑽石刀具。初步的實驗結果顯示，若無負後斜角切刃，將很難在光學玻璃上完成鑽削的動作，如圖5(b)左所示，圖5(b)右則為成功的研鑽加工。切刃提供了銳利的刀刃及容屑的空間，不僅可維持刀具壽命，也可防止切屑堵塞刀具，從而得到高圓度的微孔。

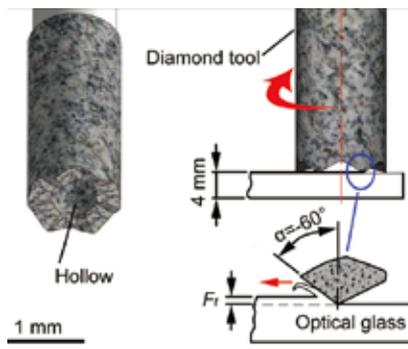


圖4(a) 負角切削

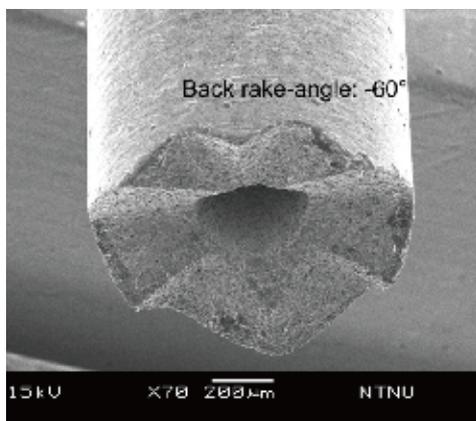


圖4(b) 逆向微放電線切割

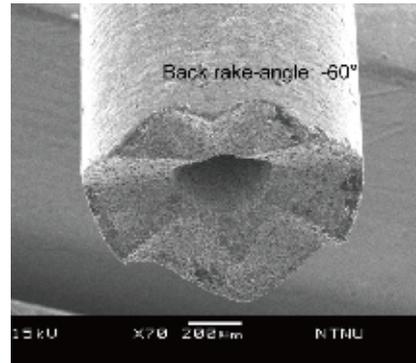


圖5(a) 完成負後斜角之鑽石刀具

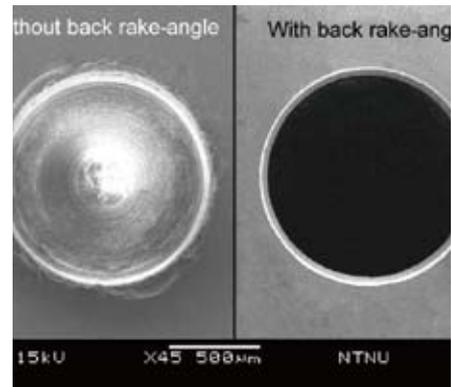


圖5(b) 刀具有無後斜角之鑽孔比較

三、系統介紹

3.1 桌上型微鑽孔機開發

圖6(a)為本研究設計之桌上型微鑽孔機，其主要設計如下：垂直的C型結構；Z軸的伺服線性馬達可進行自動的研鑽加工；主機頭上裝置一高速主軸；另有一平衡機制，用來平衡主機頭重量；最後是手動的X、Y軸精密移動平台。複合式工作槽則利用兩個在對角線的錐銷及兩根螺栓精密定位在工作檯上，此複合工作槽可進行兩種微加工技術：逆向同心微孔加工及研鑽技術。而垂直安裝在主機頭上的高速主軸，具有精密直流馬達，可提拱刀具穩定的轉速，此外，高速主軸亦可定位工件(如鑽石刀具)，使其能夠加工出特殊造型。圖6(b)為本研究開發之微鑽孔機實體。

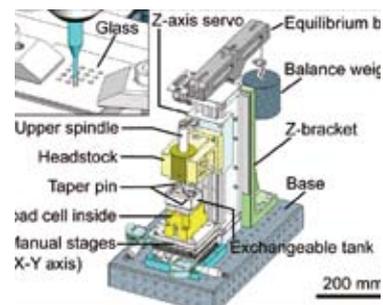


圖6(a) 桌上型微鑽孔機設計圖

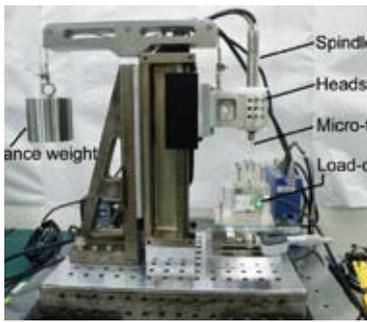


圖6(b) 桌上型微鑽孔機成品

3.2 高精度逆向微放電加工

欲使用圓棒狀的鑽式刀具，以純機械的方式在脆性玻璃上成型一精密微孔是相當困難的。磨棒中心因切削速度為零且缺乏容屑的空間而產生擠壓效應；也因為磨擦的關係，微小切屑會附著在刀具及工件表面，造成加工困難。本研究提出一個去除刀具軸心的簡單策略，除了防止中心擠壓效應，也能提供切屑暫存的空間。因此，我們便開發了逆向同心微孔放電技術，以符合鑽孔機線上加工特殊鑽石刀具的需求。圖7(a)為所設計之小型低速主軸機構，一外徑為0.3-mm之銅管電極垂直架設於有兩V型軸承之支架上，並將其軸心與鑽石磨棒互相對齊。電極軸端套一精密鋼珠與導電材料(Conductor)接觸，使電極轉動時產生『點』接觸，可將摩擦降至最低，並達到導電效果。加工軸與傳動軸之間以低速皮帶傳動，傳動軸皮帶輪與加工軸皮帶輪保持高低位置差，使皮帶與水平線成一夾角 θ ，此傾角 θ 不但能使低速皮帶拉緊加工軸，貼緊V型軸承，更能使加工軸往下移動頂住鋼珠，以保持良好的導電效果，同時，加工軸只能轉動，不能軸向滑動或徑向跳動，亦即加工軸的『自由度為1』。此設計概念驅使加工件以低摩擦、單一自由度穩定地於機構上運動，以此方法加工的微型圓柱體零件，真圓度及圓筒度可達到最高。圖7(a)左上方顯示了電極與加工件之間裝置一眼模(Pipe guide)加以拘束，透過此拘束行為，不僅可抑制電極擺動現象，使放電行為維持穩定，也大大降低加工孔之擴孔現象。此逆向放電加工機制將能精確去除鑽石磨棒之軸心。

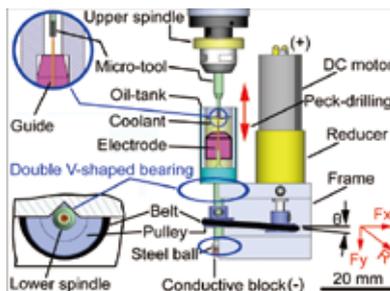


圖7(a) 逆向同心微孔放電加工機制

逆向微線切割是由線放電研磨機制改良而來，它是由一金屬圓盤來輸送精密的微小電極[11]。這項設備裝置在本實驗事先前開發之CNC工具機中，用來加工鑽石刀具端面的特殊造型，如圖7(b)所示[12]。(為了商業目的，逆向微線切割裝置未被安裝在本研究之微鑽孔機上)。此逆向微線切割，有一精密V型槽圍繞在金屬圓盤的圓周上，可讓銅線(直徑0.25mm)緊密接觸並維持穩定的傳動。將鑽石磨棒(已完成同心微孔加工) 連同高速主軸從微鑽孔機上移至先前開發之CNC工具機中，經由逆向微線切割裝置來對磨棒端面進行特殊造型切割。逆向的加工方式可使切屑藉由重力影響而快速排出，除了可縮短加工時間，也能減少放電短路的機會。

四、實驗結果

4.1 及時壓力偵測與回饋

在研鑽過程中，為避免過大的鑽削力對光學玻璃造成破壞，或是過小的鑽削力造成刀具與工件間的過度摩擦，找出適當的切削力是必要的。本研究透過安裝在工作檯上的荷重元(load-cell)來偵測加工時光學玻璃所產生的阻力。圖8(a)為本研究之荷重元感測機制，整個磨鑽過程的受力狀態，透過荷重元不斷地感測壓力並轉換成電壓(V_c)輸出，將能完全地被監控。輸出的類比電壓訊號(V_c)在轉入電腦前，須經過A/D轉換成數位訊號，接著與程式中設定之比較電壓(V_{com})比較。每種硬脆材料皆有其適當之鑽削力(F_d)，圖8(b)為鑽削力(F_d)與及時電壓(V_c)之線性關係圖，若在比較電壓範圍內，荷重元感測的電壓訊號便透過程式即時回饋控制加工軸並自動調整至適當進給率，以達最適切割

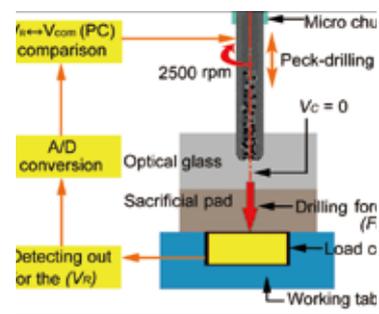


圖8(a) 荷重元感測機制

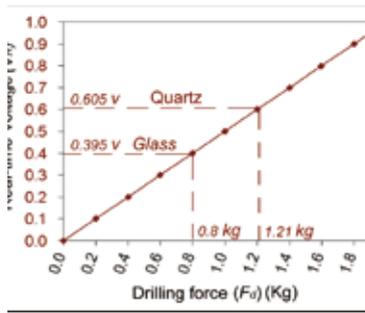


圖8(b) 鑽削力(Fd)與及時電壓(Vr)之線性關係圖

4.2 光學玻璃及石英之微孔鑽削

這個部分將驗證對光學玻璃及石英進行研鑽加工之可行性。在理想條件下，對光學玻璃一層一層的磨削，由於鑽石刀具之六刃切刃造型，在每次進給中會有六個接觸點。若令每轉進給量為Fr，則單獨一個切刃的進給量Ft將為每轉進給量的六分之一(Ft標示於圖4(a))，因此，每分鐘之進給量將可表示如下：

$$F_m = F_r N = 6 F_t N \quad (3)$$

在脆性材料磨削過程中，脆性轉延性是個重要的去除機制[13,14]，為確保脆性材料能以延性方式磨削，因此須找出進給量之臨界深度(Critical cutting depth)，即為最小進給深度，材料切除便能以塑性變形(Plastic deformation)為主，以防止微細裂紋產生。事實上，當考慮加工材料的硬度及鑽石磨料粒之負載時，除了要降低每一切刃(Ft)的負載外，通常轉速N也須超過其理論轉速。本實驗所使用之光學玻璃及石英，其硬度分別為莫氏英度六和七，2500rpm的轉速將能穩定鑽穿工件，光學玻璃及石英所對應的進給率分別為0.16μm/rev及0.12μm/rev，因此，每刃的切削量約為20-27nm，將能形成延性磨削。過高的轉速和太大的進給深度將會導致刀具及工件磨損，表2為光學玻璃及石英的物理性質[15]及加工條件。

表2. 光學玻璃及石英之物理性質與加工條件

Parameters	Optical glass	Quartz
Compressive strength	1.0 x 10 ⁹ pa	1.1 x 10 ⁹ N/m ²
Tensile strength	4.2 x 10 ⁷ pa	4.8 x 10 ⁷ N/m ²
Hardness	MS 6.5	MS 7.0
drilling depth	4 mm	4 mm
Spindle speed	2,500 rpm	2,500 rpm
Feed-rate (Fm)	0.4 mm/min	0.3 mm/min

圖9(a)比較了有無荷重元感測機制對微孔入孔處之影響，結果顯示，當無荷重元感測機制時，光學玻璃入孔孔緣有著明顯的擴孔現象及嚴重的碎裂(圖9(a)左側)，嚴重的擴孔現象也發生在石英的入孔孔緣(圖9(b)左側)，其原因進給率太快，超過工件所能負荷，然而，石英因為其更高的硬度、更大的切削阻力造成刀具的偏擺，而造成較嚴重的擴孔。相較之下，在圖9(a)、9(b)右側顯示了經荷重元感測機制改善後之結果，荷重元即時的感測鑽削阻力並回饋控制進給率，使其保持最佳鑽削速度，因此擴孔及碎裂現象皆能有效的避免。透過掃描式電子顯微鏡(SEM)線上檢驗，在光學玻璃及石英上的微孔直徑分別為1.015mm及1.011mm，由上述結果，荷重元對光學玻璃研鑽加工的貢獻不證自明。

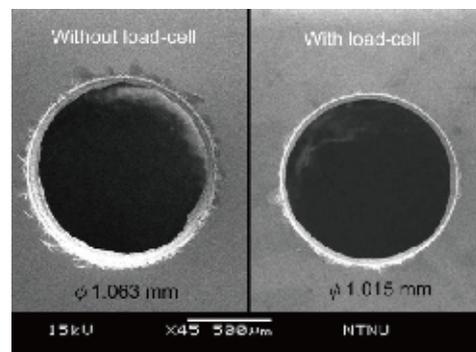


圖9(a) 光學玻璃微孔鑽削

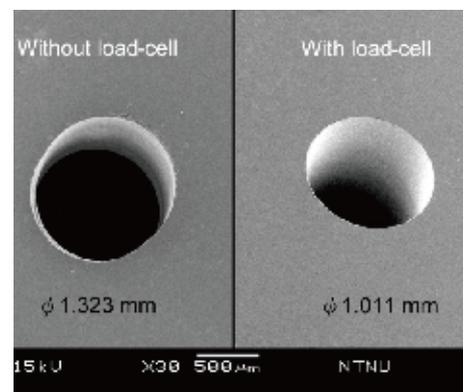


圖9(b) 石英微孔鑽削

4.3 犧牲層影響

由於硬脆材料的拉伸強度較弱，因此在其邊緣常有微細裂紋的產生，這類型的裂紋，除了嚴重影響加工品質，亦會降低工件強度。為避免微細裂紋的發生，本研究提出了兩個策略，一是降低刀具入孔及出孔的進給速率，減少鑽削所造成的壓力；二是在工件底部多墊一層犧牲層以延長其鑽削區(參考圖8(a)示意)。因此，這樣的作法可讓微孔邊緣張應力減少，抑制微細裂紋的發生。圖10(a)為沒有使用犧牲層，石英鑽孔的出孔邊緣，相較之下，圖10(b)的石英微孔因為犧牲層的作用，所產生的崩裂情況較不明顯。

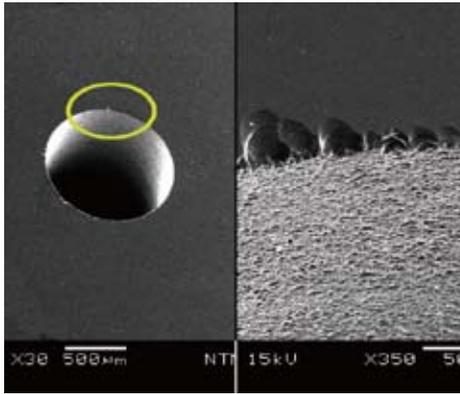


圖10(a) 沒有犧牲層之石英出孔

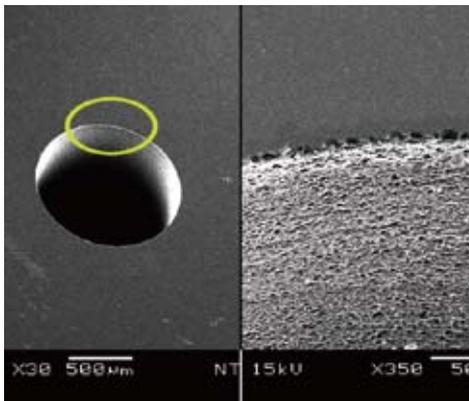


圖10(b) 有犧牲層之石英出孔

4.4 刀具壽命討論

刀具壽命深深受到光學玻璃及鑽石磨粒的影響，因光學玻璃較鑽石刀具之銅基材硬，那就表示玻璃粒子可以削弱覆蓋在鑽石磨粒上的銅粒子鍵結，造成刀具端面磨損。刀具磨損對刀具壽命來說，是個重要的指標。描述刀具壽命最常使用的就是泰勒的刀具壽命方程式[16]，透過刀具壽命與切削速度來描述經驗刀具壽命常數C：

$$VT^n=C \quad (4)$$

其中，V為切削速度(m/min)，T為刀具壽命(min)，n為相依於切削參數之指數，然而式(4)是適用於單點刀具，以找出合理的刀具壽命估計，對於本實驗之刀具因其多刃的結構，將難以估計指數n及經驗係數C。正因如此，另一替代方法為利用刀具端面之平均磨耗深度(W_d)及加工次數(N_m)來估計刀具壽命，另外，用於研鑽功能及儲存切屑的特殊切刃結構，其高度則設為刃深(E_d)(標示於圖4(b))。對於本實驗之鑽石刀具頭端，六個刃深將會平均地在研鑽過程中逐漸磨耗，切刃便會鈍化而造成切削阻力的增加。光學玻璃的研鑽實驗相關數據：加工次數(N_m)、荷重元之偵測電壓(V_r)及刀具端面之平均

磨耗深度(W_d)，其相互關係如圖11(a)所示(兩條實線曲線顯示了回歸關係)。當加工次數(N_m)為30次時，偵測電壓(V_r)明顯地上升，意味著在那一刻，鑽削阻力也產生了陡升的現象，其相對應的 V_r 、 W_d 及鑽削力(F_d)分別為0.395V、0.11mm及0.8Kg(圖8(b))。此時的刀具因為其切刃已磨平，容屑空間大幅減少(圖11(b))，已無法再有效的加工，因此本實驗獲得的合理刀具加工次數(N_m)為30次。

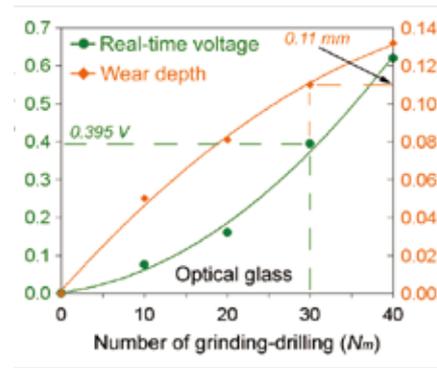


圖11(a) 加工次數(N_m)、偵測電壓(V_r)及磨耗深度(W_d)之關係曲線

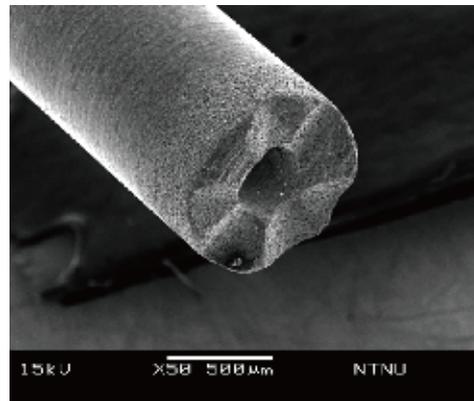


圖11(b) 加工30次後之刀具樣貌

五、結論

本研究所開發之桌上型微鑽孔機，成功的以研鑽技術在光學玻璃上成型微孔。本微鑽孔機包含了精密Z軸伺服系統、完整的研鑽機制、逆向放電加工設備、複合式工作槽及荷重元感測機制。透過雙主軸及雙V型軸承設計與逆向微放電加工的應用，本研究成功的將鑽石磨棒加工出完全同心微孔及六刃負後斜角。六刃負後斜角可在研鑽過程中提供壓應力切削；奈米等級的切削深度能將脆性材料以延性模式加工；荷重元感測機制提供了即時的鑽削力偵測及精確的回饋機制，確保研鑽時能有最佳的進給率，以防止微細裂紋與擴孔現象的發生。此外，犧

性層也能支撐光學玻璃，抑制崩裂的發生。刀具壽命部分，透過刀具切刃之平均磨耗深度與加工次數的計算估計，得到刀具加工壽命約為30次。相較於目前市面上所使用的加工方法，如超音波震動輔助加工，或是化學蝕刻，本研究所開發之研鑽技術提供了一簡易、低成本、環保且易於控制的方法來對光學玻璃鑽孔，預計此研鑽技術的相關特性將可對精密微製造領域產生極大的貢獻。

參考文獻

1. Chen M, An Q L, Lin W M and Ohmori H 2009 Fundamentals of BK7 glass removal in micro/nano-machining *Advanced Materials Research* 76-78 485-490
2. Saleh T, Rahman M S, Lim H S and Rahman M 2007 Development and performance evaluation of an ultra precision ELID grinding machine *Journal of Materials Processing Technology* 192-193 287-291
3. Lim C S, Hong M H, Kumar A S, Rahman M and Liuc X D 2006 Fabrication of concave micro lens array using laser patterning and isotropic etching *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46 552-558
4. Cao X D, Kim B H and Chu C N 2009 Micro-structuring of glass with features less than 10 μ m by electrochemical discharge machining *Precision Engineering* 33 459-46
5. Antonyuk B P, Obidin A Z, Vartapetov S K and Lapshin K E 2008 Light driven self-drilling in glasses *Optics Communications* 281 2139-2144
6. Nikumb S, Chen Q, Li C, Reshef H, Zheng H Y, Qiu H and Low D 2005 Precision glass machining, drilling and profile cutting by short pulse lasers *Thin Solid Films* 477 216-22
7. Weber H, Herberger J and Pilz R 1984 Turning of machinable glass ceramics with an ultrasonically vibrated tool *Annals of CIRP* 33 85-87
8. Moriwaki T, Shamoto E and Inoue K 1992 Ultraprecision ductile cutting of glass by applying ultrasonic vibration *Annals of CIRP* 41 141-144
9. Chen S T 2008 Fabrication of a high-density micro holes by upward batch micro EDM *Journal of Micromechanics and Microengineering* 18 (9pp)
10. Saito C 1979 *The Construction and 100% Operational Skills of EDM (in Japanese)* Mitsubishi Electric Ltd. 40-69
11. Chen S T, Lai Y C, and Liu C C 2008 Fabrication of a miniature diamond grinding tool using a hybrid process of micro-EDM and co-deposition *Journal of Micromechanics and Microengineering* 18 (8pp)
12. Chen S T, Yang H Y and Du C W 2009 Study of an ultrafine w-EDM technique *Journal of Micromechanics and Microengineering* 19 (8pp)
13. Sinhoff V and König W 1998 Generative precision grinding of optical glass *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 47 253-258
14. Zhou M, Wang X J, B Ngoi K A and Gan J G K 2002 Brittle-ductile transition in the diamond cutting of glasses with the aid of ultrasonic vibration *Journal of Materials Processing Technology* 121 243-251
15. OPTICAL GLASS DATA BOOK, Sumita Optical Glass Inc. <http://www.sumita-opt.co.jp>
16. Taylor F W 1907 *On the art of cutting metals*, Transactions of ASME 28 31-58