具傾斜角度陶瓷材料之迴轉超音波加工

王士榮*、廖文賢

南亞技術學院機械系

摘要

一般對陶瓷材料鑽孔的原因，主要是因其具有一些高溫的特殊性質及在航空、核子、自動化、和切削刀具應用上之需求。本論文即針對迴轉式超音波加工機(RUSM)鑽孔原理之介紹及鑽孔加工後品質之研究。在商業上使用迴轉式超音波加工機而言，僅針對圓形鑽孔是唯一有效率的加工。而運用迴轉式超音波加工機對鑽孔後圓孔粗糙度量測檢驗所顯示之效應，需考慮的三個加工參數包括主軸速度、進給率、超音波功率等。結果應用在超音波震盪之加工時，應如何增進孔之品質。

實驗方法利用田口法的流程及步驟：實驗因子設定、直交表選用、變異數的分析、最佳化參數評估，且將加工時容易改變圓孔粗糙度的主要因素(孔徑、切削轉速，回受力，進給)設為田口法之實驗參數。

另外加工參數如磨粒粒徑大小及進給量及孔之品質亦為本文探討之重點。

關鍵詞：迴轉式超音波加工(RUSM)、量測檢測、陶瓷

*Email：wzl@nanya.edu.tw　Tel：03-4361070#5121　Fax：03-4365226

Experimental study in An Inclined of Advanced Ceramics Materials

Shu-Lung Wang*、Win-Shin Liao

Department of Mechanical Engineering Nanya Institute of Technology

Abstract

General in the drilling of ceramics materials with superior properties for a number of high-temperature and demanding applications in aerospace, nuclear, automotive, and cutting tools. In this paper, rotary ultrasonic machining (RUM) is introduced into drilling holes and presents the results of a designed experimental investigation into RUM in ceramics. One limitation of the commercial RUM machines is that only circular holes can be efficiently machined. A three-variable factorial design is employed to reveal main effects as well as of three RUM process parameters (spindle speed, feed rate, and ultrasonic power). The surface roughness of the ultrasonically hole drilled workpiece were measured inspection.

The obtained resulted it can show that the application of ultrasonic vibration how can improve the holes quality.

Keywords: Rotary ultrasonic machining、Measured inspection、Ceramics

*Email：wzl@nanya.edu.tw　Tel：03-4361070ext.5121　Fax：03-4365226

壹、 緣由與目的

脆性材料之開孔方法有超音波、雷射、電子束、水刀等，依材料之機械性質、孔徑、孔深、孔精度之要求不同而異。鑽孔加工(Drilling)隨著零件的迷你化，鑽孔直徑縮小化當屬必然的現象。以往小孔徑都是以高速鋼鑽頭和深孔鑽頭進行小孔加工，這些鑽頭由於加工效率低，故無法滿足目前性能需求。小孔徑鑽孔加工是屬於外界供油加工，同時由於切屑排除困難，所以必須採行分段鑽孔加工(step drilling)，因而欲縮短加工時間似乎不大可能。小孔徑加工中可能發生的故障及其發生的比例，而最容易發生的麻煩應該是折損，其主要的原因大部份是切屑阻塞引起。然而，由於小孔徑幾乎都是 L/D=5 以上的深孔，故切屑在高速鋼鑽頭裡對鑿鋒緣(chisel edge)有重大影響，很容易產生過當的止推力。同時會使同心圓的形狀變差。結果將會導致材質性剛性相互作用，並使鑽頭產生撓曲，被鑽穴所彎曲、孔徑擴大等，孔穴精度不良現象。為克服上述缺點之考量及滿足加工效率、切屑排出及鑽頭形狀、剛性等要求，開發能夠從事小孔徑穩定加工之極小直徑內部供油鑽頭乃是迫不及待之要務。

本研究主要是運用旋轉式超音波加工（RUSM）對斜度陶瓷材料的實驗方法，加工過程中雖然脆性破壞（微切屑）仍支配著對斜度陶瓷材料移除機構，若不能適當地控制加工參數，便會造成粗糙度差及較深的次表面裂紋。本研究分為三個部份進行分析，第一部份：藉由 RUM 製程對於具斜度陶瓷材料移除機構、加工表面之完整性及刀具磨耗形態與加工條件相互關係之研究。另外加工參數如刀具直徑、超音波功率、主軸轉速、進給量及磨粒粒徑大小等都是研究所討論的重點，並運用田口品質實驗設計法探討加工品質影響，以確保鑽孔後孔之品質及增進加工效率。

超音波加工（USM）為加工或精密加工科技技術驅動過程，為非傳統機械材料移除過程有較低的材料移除率，其材料移除機構包括衝擊（impacting）、錘擊（hammering）、孔蝕（cavitations）。一般可應用於加工具傳導性或非傳導性之非金屬材料，比較適於低延性【1-5】及硬度高於 40HRC【6-12】，例如非晶質玻璃、矽氮化物、鎳/鈦合金等【13】，孔徑 76μm 均可加工，亦即深度與直徑比可達大約 3：1【8,12】。先進陶瓷由於具有許多優越性質（例如提升溫度時之高強度和高耐磨耗阻力）受到許多工業上之應用。因其優越性質而得到廣泛應用但受限制於高加工成本上。因此，對於陶瓷有效率的加工過程是迫切的需求。

如使用 aluminum 作為鍍層陶瓷材料時，此陶瓷材料絕緣性質大於或等於

100Ωcm【14】，因此使用 EDM 加工並不可行。而使用 LBM 仍存在其問題點；變形時產生之裂縫和陶瓷層之熱應力會直接影響其使用性能（疲勞壽命）。解決此一問題最佳的方法即是使用超音波加工（USM），可先穿透陶瓷鍍層緊接著再運用 EDM 加工，並配合運用或不使用超音波的輔助來加工【15】。另【16】亦使用新的 UC 裝置，嘗試使用切削刀具在主切削震動方向朝工件呈 10˚~30˚做切削加工。迴轉超音波加工（RUM）之超音波鑽孔僅應用於脆性材料，被視為一種對先進陶瓷有效率加工方法，此種加工技術主要原則是以高頻率（16-40kHz）和較低之波對波（pk-pk）震盪頻率（2-30μm），向刀具或工件進給，Azarhoushang et al.【17】提出此切削過程與一般超音波鑽孔（Ultrasonic Drilling）不同。我們所謂的迴轉式超音波加工是歸屬於超音波加工（Ultrasonic Machining）。超音波加工，其金屬的移除效應是藉著漂浮泥漿之磨料顆粒，以循環超音波方式重複沖擊工件表面，超音波加工方式鑽孔是以圓形刀具做超音波加工過程，迴轉之刀具可以加以強調的是針對圓柱外形元件之磨除過程及產生高準確之原因。對陶瓷材料移除率研究而言刀具是最主要影響因素【18】，當轉速及切削深度增加時延性百分比亦增加，而當頻率增加時延性百分比卻降低。此可顯示出當鑽石刀具顆粒由較細磨料粒度改變至較大顆粒時延性百分比會隨着增加，主要是因對陶瓷材料的研磨情況下，可觀察到細的磨料較粗的磨料粒度有較少脆性破壞所造成【19】，進給率之增加粗糙度亦呈線性增加，控制進給率可提高孔之品質【20】，由於超音波加工時刀具穩定震盪之進給將可降低加工時間減少工件殘留應力及應變硬化，因而與傳統加工比較可獲得促進工件表面品質，並提升刀具壽命之優點【21】。

貳、 實驗設計與條件

一、實驗設計與實驗條件

本實驗係針對 RUM 加工精密度之測試，除實驗改進 RUM 技術，穩定控制公差於 10 微米（0.01 ㎜）以下，並比對投影式、光學顯微鏡式真圓度機及輪廓（profile）測試法等精度檢測。RUM 實驗機為 UMT-6 三軸 CNC 超音波（SHIBAYAMA KIKAI（SIMCO）INTL;LTD.TOKYO,JAPAN），RUM 實驗機機型如圖 1 所示。主要機構包含超音波主軸系統、資料擷取系統、和冷卻系統。主軸系統包含超音波主軸電源供應和馬達進給控制，電源供應輸出可將交流電頻率 20KHz 轉換成 50KHz 之高頻，此進給電壓轉換器位於超音波主軸內，將電子式超音波轉換成機械式震動，馬達位於主軸上方，供應刀具旋轉運動和不同之進給

速度之控制。工件材料為陶瓷玻璃（Zerodur）如圖 2，即 α（熱膨脹係數 Zero）之先進玻璃材料，物理性質如表 1 所示。加工材料傾斜角度分別為 0°、30°、45°角，本研究初期以 30°角進行田口分析再持續進行 45°角之最佳化切削分析探討。為建構 RUM 精密加工是運用迴轉式超音波加工機對鑽孔後圓孔粗糙度量測檢驗所顯示之效應，需考慮規劃的四個加工參數包括刀具直徑、機台功率、主軸速度、進給率、刀具鑽石顆粒直徑等。

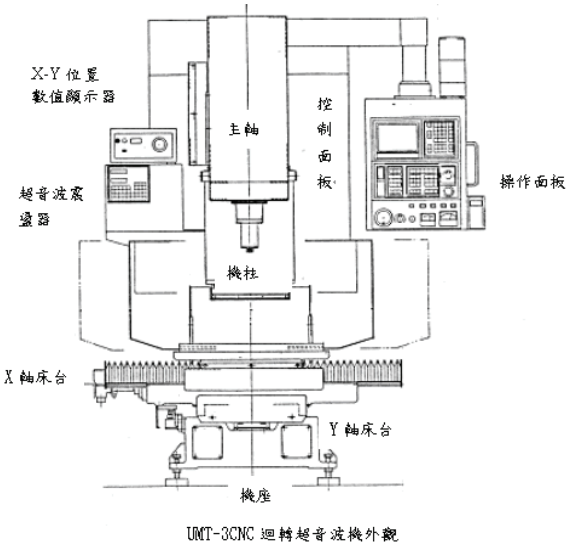

圖 1、超音波機台設備

陶瓷玻璃物理性質
Density（密度）：2.53g/cm^3
Heat capacity（比熱）：0.80J/gK
Young s modulus（楊氏係數）：90.3Gpa
Knoop Hardness 諾氏硬度：620

表 1、陶瓷玻璃物理性質

二、孔精度定義與檢測方法

孔精度可分為幾何尺寸，主要是由真圓度、真直度及平行度所構成之圓柱度公差及表面粗度；此外孔與其他基準幾何形狀如面、圓柱之相對位置公差，及真實位置度。本研究所使用精密量測儀器如下說明：

(1) 表面粗糙度測試儀投影式(Hommelwerke test T surface finish measuring

instruments)：針對鑽孔後表面粗糙度之檢測。

（2）二軸座標光學顯微鏡（ZKM 01-250C Two-Coordinate Measuring Microscope）：主要功能為量測直角座標、極座標、圓柱座標，並可使用於平面及曲線之兩個表面、點、角、軸間之距離。作為鑽孔後孔之垂直度、平行度、直角度之檢測。

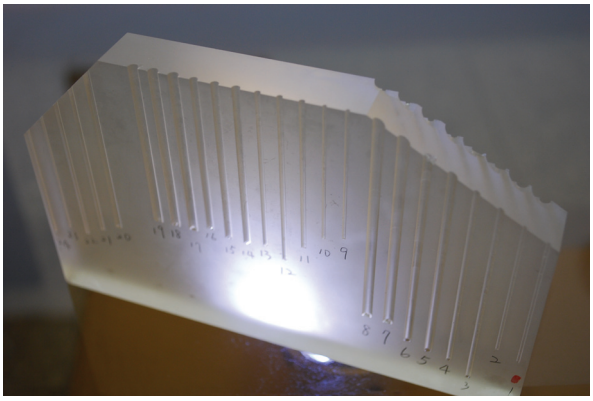

圖 2、陶瓷玻璃材料

三、 田口法設計變數及水準表

在鑽削加工上，孔的品質優劣通常以粗糙度來判定。本實驗應用田口法來規劃鑽削實驗的條件，使用 RUSM 作為鑽削機具。實驗可分二步驟來進行；一、選定四個實驗參數，依鑽削加工所影響表面粗糙度的因素來選取鑽頭直徑，鑽削轉速，進幾率及回受力四個實驗參數如表 2，並設定各實驗參數有三個水準值後，依所選擇 $L_9 3^4$ 之直交表做 9 組實驗，接著使用田口法之平均數分析，將目標函數表面粗糙度的特性轉換成信號雜音比 (Signal Noise Ratio，S/N)

$$S/N = -10 \times \log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right) \qquad (4.1)$$

式中 S 為標準差（Standard deviation），其定義如下：

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \overline{y})^2}{n-1}} \qquad (4.2)$$

依以上所列之公式以評估實驗參數，而求得對表面粗糙度影響最大之參數為鑽頭直徑，其餘影響依次為轉速，回受力與進給等。其實驗上為取得平均性與正確性，將實驗規劃為 9 個 $L_9 3^4$ 直交表，共 81 組實驗，以提高實驗準確性。如圖 3 實驗製程步驟流程圖及圖 4 參數設計步驟。

傾斜 30°				
代號	因素名	水準1	水準2	水準3
A	鑽頭直徑 (mm)	1	2.3	3
B	轉速(RPM)	5000	4500	4000
C	回受力	19	20	21
D	進給	0.4	0.6	0.8

傾斜 45°				
代號	因素名	水準1	水準2	水準3
A	鑽頭直徑 (mm)	1	2.3	3
B	轉速(RPM)	5000	4500	4000
C	回受力	19	20	21
D	進給	0.4	0.6	0.8

0° (平面)				
代號	因素名	水準1	水準2	水準3
A	鑽頭直徑 (mm)	1	2.3	3
B	轉速(RPM)	5000	4500	4000
C	回受力	19	20	21
D	進給	0.4	0.6	0.8

表 2、實驗配置表

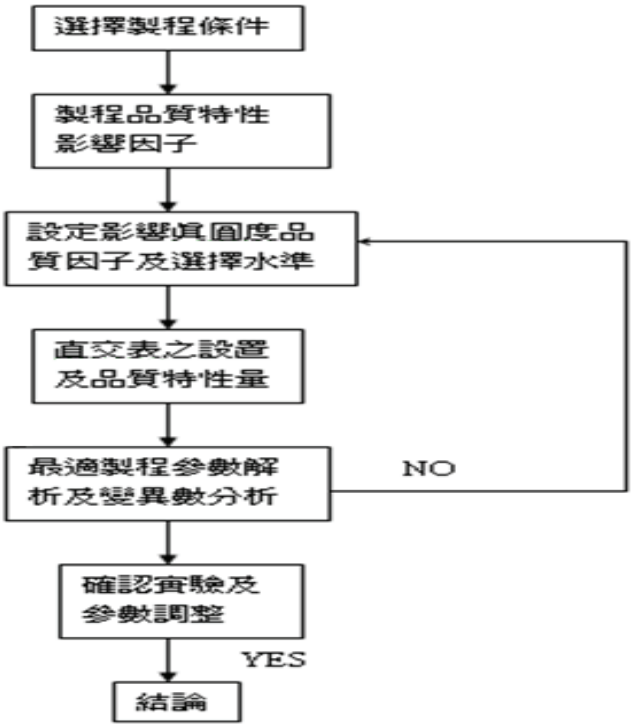

圖 3、實驗製程步驟流程圖

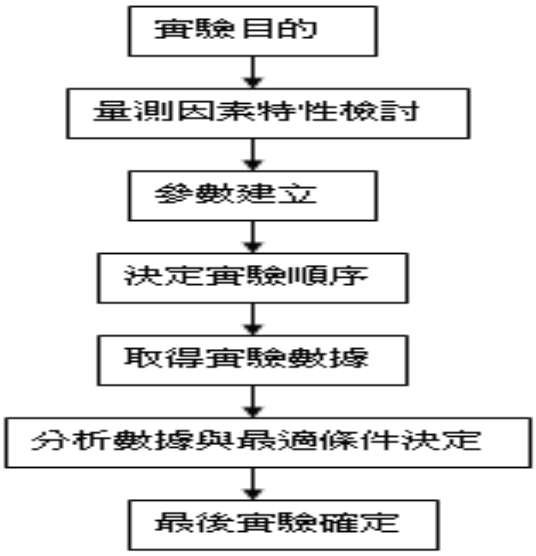

圖 4、參數設計步驟

參、 結果與討論

在陶瓷材料上鑽孔是與在一般金屬材料之加工是非常不同的，鑽孔後之品質是相當重要，通常考量的是以粗糙度、真圓度、平行度等來比較分析鑽孔後之品質。又由於影響孔之粗糙度品質製程參數包括主軸速度、進給率、和超音波功率。

對此有關超音波加工【6,7】及旋轉式超音波加工的比較有許多相關之研究【8】，例如以主軸速度而言有關脆性材料之實驗數據，其結論是隨鑽頭圓周速度增加材料移除率而增加【9,10】。本實驗係固定主軸速度為每分鐘 4900 轉，超音波功率為 20% ，粒度＃325 之下改變進給速度對粗糙度之影響，而鑽孔後孔之孔徑是利用表面粗度測試儀及二軸座標光學顯微鏡（ZKM 01-250 C）量測所得之數據並針對以下條件做分析：

一、傾斜角度對切削條件之影響

(一) 45 度角斜度面

如圖 5 在 45 度角斜度面上加工時，基於不同切削直徑下，及固定進給率下可得知切削直徑越大，其移除率越大且隨直徑增加而增加，進給率越大其移除率越大，若考慮相同直徑時，進給率越大則其移除率亦越大。圖 6 顯示以相同轉速 4950RPM 及 19.9 回受力條件下可知較大進給率有較大之移除率，而再以相同轉速 4950RPM 及 20.6 回受力不同直徑及以三倍差異進給率下條件下可知較大直徑仍有較大之移除率如圖 7 所示。

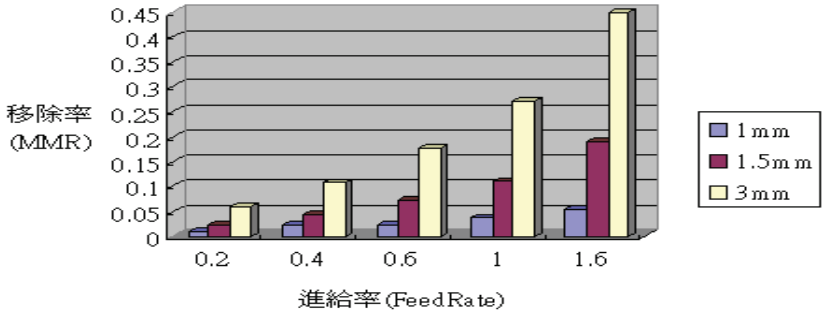

圖 5、傾斜 45°之移除率

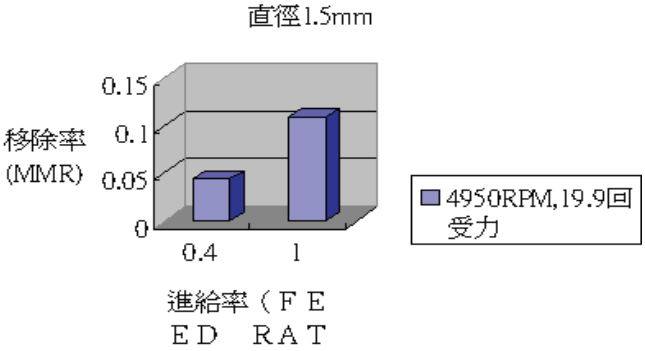

圖 6、傾斜 45°之不同進給與直徑移除率比較

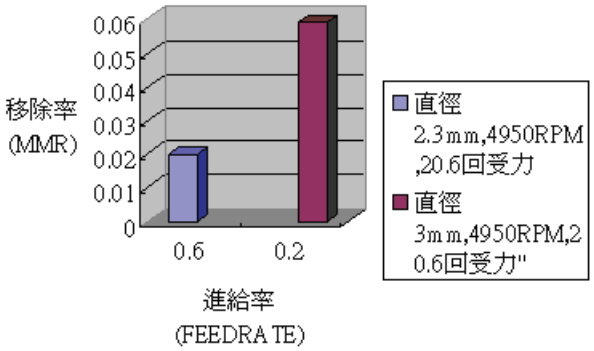

圖 7、傾斜 45°之不同進給與直徑移除率比較

(二) 30 度角斜度面

如圖 8 在 30 度角斜度面上加工時基於不同切削直徑下在改變進給率下可得知切削直徑越大下其移除率越大且隨直徑增加而增加，且進給率越大其移除率越大。

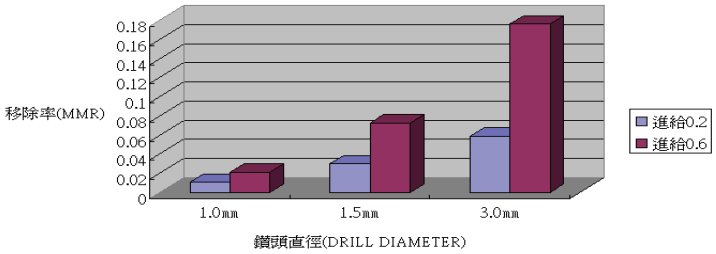

圖 8、傾斜 30°之移除率

(三) 0 度平面加工

如圖 9 在平面加工時基於不同切削直徑及固定進給率下，可得知當切削直徑越大其移除率愈大，且隨直徑大小之增加而增加。若考慮相同直徑下進給率大小時則進給率越大其移除率亦越大。

如圖 10 所示；基於相同切削直徑下(ϕ＝1.5 ㎜及 3.0 ㎜)在固定進給率下，若僅考慮回受力與刀具轉速快慢之變化因素做比較時觀察時，可知當回受力愈大時則移除率亦越大，基本上與刀具轉速快慢影響較小。

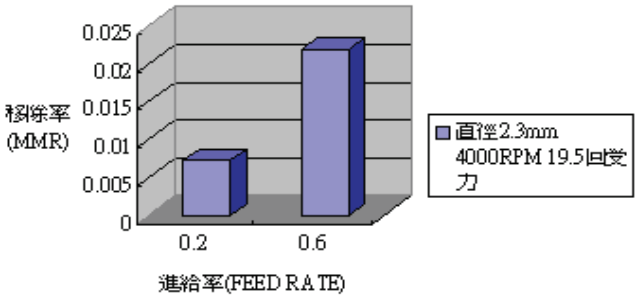

圖 9、平面之移除率

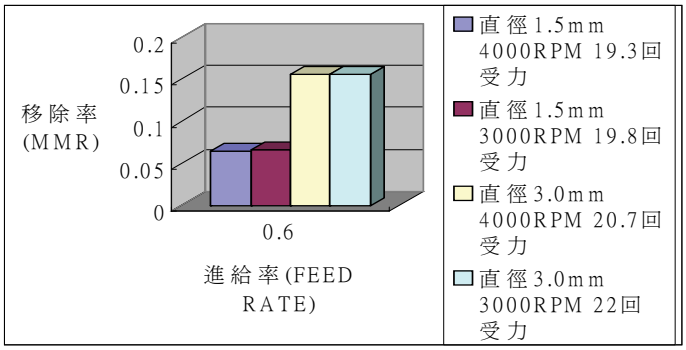

圖 10、平面 Feedback 愈大移除率愈大

二、 進給速度對粗造度之影響

以鑽頭直徑 ϕ1mm 為例，如圖 11 所示，當進給率在 0.4~0.8（mm/rev）之間觀察，發現其粗糙度在 0.4~0.8（mm/rev）之間變化不大，大約在 0.2μm 上下當超過 0.6（mm/rev）以上隨進給率之增加呈線性增加，增加進給率至 0.8 mm/rev 時，粗糙度達 0.39μm。當鑽頭直徑為 ϕ3.0mm 超過 1.2（mm/rev）以上增加至 2.0（mm/rev）時，隨進給率之增加粗糙度亦呈線性增加之增加，進給率至 0.8(mm/rev)時，粗糙度達 0.38μm。Diniz【11】提出在較高的主軸速度及進給時理論粗糙度也增加。主要乃因切屑變形及產生震動之原因所造成。

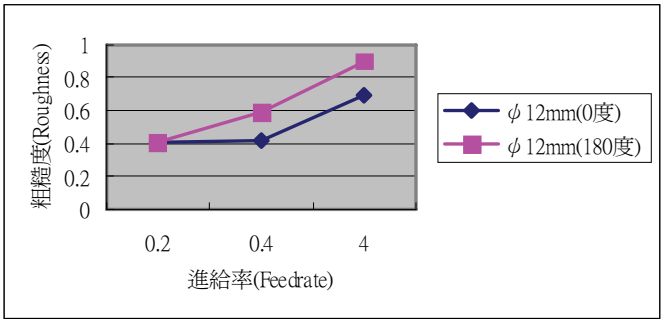

圖 11、RMS 表面粗糙度與進給率之關係

三、 針對鑽頭直徑與粗糙度關係

固定主軸速度為每分鐘 4900 轉，超音波功率為 20% ，在相同粒度＃325 時改變進給速度時，觀察鑽頭直徑對粗糙度之影響，由圖五所示，隨使用之鑽頭直徑增大粗糙度亦增加，尤其在直徑 ϕ1.0mm 至 ϕ1.5mm 之間，其粗糙度由 0.26μm 上升至 0.39μm。主要原因是受鑽頭直徑大小表面磨料顆粒數的多寡影響。

四、 ϕ12mm 直徑圓孔相對角度位置與粗糙度關係

以 ϕ12mm 鑽頭直徑為例，鑽孔後量取孔徑之相對夾角 180 度角位置（如圖 12 所示），觀察進給率與粗糙度關係，隨進給率增加其粗糙度亦增加，在進給率 2.0（mm/rev）兩相對角度粗糙度相差 0.17μm，進給率繼續增加至 4.0（mm/rev）時，兩角度粗糙度相差值提升 0.21μm。此現象不僅影響其粗糙度，相對的亦影響其平行度、真圓度、真直度等鑽孔品質。

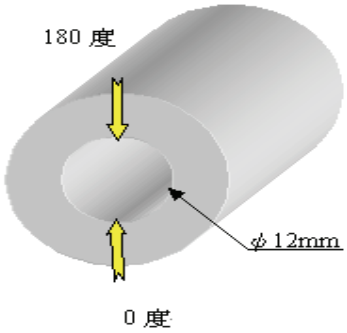

圖 12、φ12mm 鑽頭直徑鑽孔後，孔之相對夾角
0°與 180°位置進給率與粗糙度之關係

五、 粗糙度之均方根值（RMS）

$$R_{qT} = \left(R_{q1}^2 + R_{q2}^2 + R_{q3}^2\right)^{1/2}$$

其中 R_{qT} 為粗糙度之 RMS 總數值，R_{q1} ，R_{q2} 和 R_{q3} 分別為鑽頭直徑 φ1mm，進給率分別為（0.4、0.6、0.8）、φ2.3mm（0.4、0.6、0.8）、φ3.0mm （0.4、0.6、0.8）進給率之均方根粗糙值，以探討在不同鑽頭直徑的總粗糙度之比值如圖 13 所示。

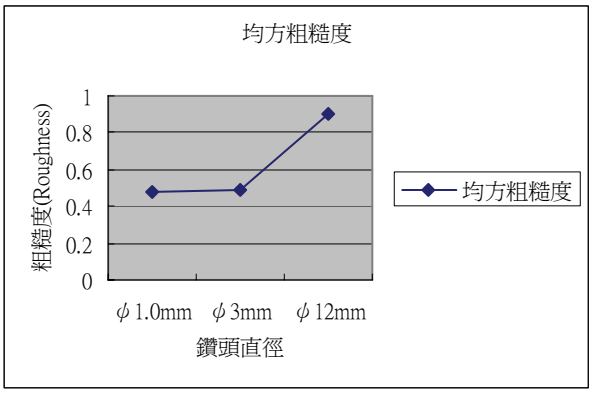

圖 13、不同鑽頭直徑與 RMS 表面粗糙度之關係

RMS 粗糙總值是由各直徑之粗糙度分量所建立，整體粗糙度值亦隨進給率增加而上升，在磨料粒度固定下其粗糙度亦隨鑽頭刀具直徑增加而增加。由所顯示 RMS 值可作為持續建立粗糙度預測模型（model）機制以期建立真圓度及圓柱度等鑽孔輪廓標準差、變異數之相關統計量數。

六、迴轉式超音波加工機鑽削參數最佳化

依據鑽削數據之結果，探討表面粗糙度與鑽削參數的關係與架構，在表面粗糙度的限制下，獲得最大陶瓷材料移除率之最佳鑽削參數組合。在圖表上可發現一趨勢，不論其他三個因子條件為何，只要將三因子固定時，隨著進給的不同，表面粗糙度值會越大，兩者呈線性關係。如表 3、表 5、表 7 在傾斜 45°、30°、平面時 L9（3^2）直交表之配置，本實驗採用望小特性進行 S/N 比並將結果繪製成輔助表及回應圖，如表 4、6、8 如圖 14、15、16；在傾斜 45°時得到最適當條件為 A3B2C1D3；在傾斜 30°時得到最適當條件為 A2B2C2D3；在平面時得到最適當條件為 A3B2C1D1；然而對於田口法之直角表的實驗規劃有以下幾個優缺點(1)均勻分配且不產生重覆之鑽削實驗。(2)迅速、且分析工作簡單。(3)缺點在於不能對多目標函數做分析。

實驗次序	A	B	C	D	量測數據
	鑽頭直徑	轉速	回受力	進給	μm
1	1	5000	19	0.4	0.43
2	1	4500	20	0.6	0.37
3	1	4000	21	0.8	0.38
4	2.3	5000	19	0.4	0.27
5	2.3	4500	20	0.6	0.22
6	2.3	4000	21	0.8	0.24
7	3	5000	19	0.4	0.25
8	3	4500	20	0.6	0.19
9	3	4000	21	0.8	0.23

表 3、45°時 L9（3^2）直交表之配置

因子 / 水準	A	B	C	D
1	8.12	10.3	11.4	11.1
2	12.3	12.1	10.9	11.0
3	13.1	11.2	11.2	11.4
M-m	4.98	0.9	0.5	0.4

表 4、傾斜 45°輔助表

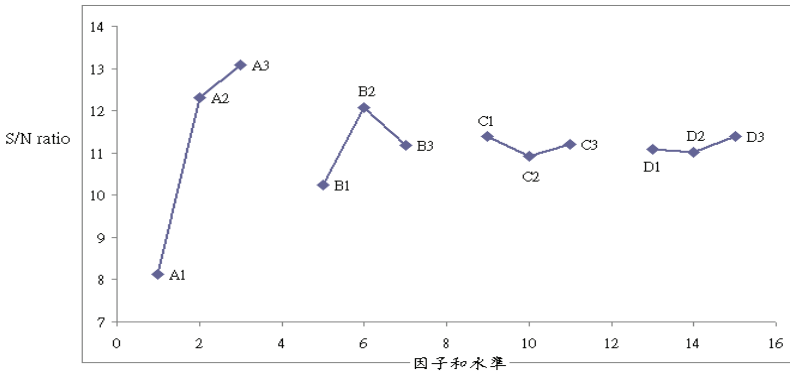

圖 14、45˚時回應圖

實驗次序	A	B	C	D	量測數據
	鑽頭直徑	轉速	回受力	進給	μm
1	1	5000	19	0.4	0.43
2	1	4500	20	0.6	0.28
3	1	4000	21	0.8	0.3
4	2.3	5000	19	0.4	0.17
5	2.3	4500	20	0.6	0.16
6	2.3	4000	21	0.8	0.19
7	3	5000	19	0.4	0.26
8	3	4500	20	0.6	0.23
9	3	4000	21	0.8	0.2

表 5、30˚L9（3^2）直交表之配置

因子 / 水準	A	B	C	D
1	9.6	11.6	11.5	12.4
2	15.2	13.2	13.5	12.5
3	13.0	13.0	12.8	12.9
M-m	5.6	1.6	2	0.5

表 6、傾斜 30˚輔助表

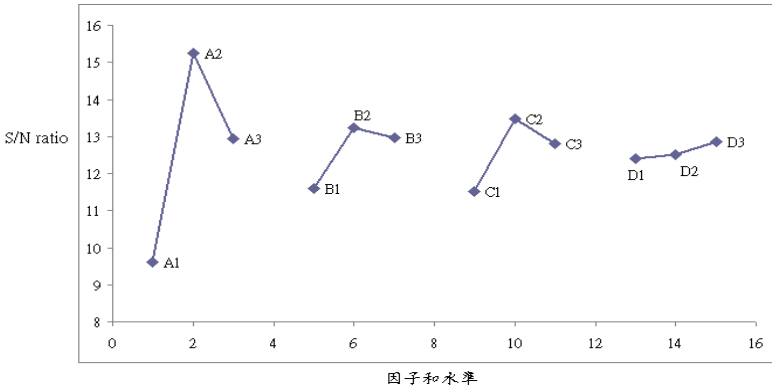

圖 15、30°時回應圖

實驗次序	A	B	C	D	量測數據
	鑽頭直徑	轉速	回受力	進給	μm
1	1	5000	19	0.4	0.32
2	1	4500	20	0.6	0.3
3	1	4000	21	0.8	0.33
4	2.3	5000	19	0.4	0.23
5	2.3	4500	20	0.6	0.17
6	2.3	4000	21	0.8	0.2
7	3	5000	19	0.4	0.21
8	3	4500	20	0.6	0.17
9	3	4000	21	0.8	0.19

表 7、L9（3^2）直交表之配置

因子 / 水準	A	B	C	D
1	10.0	12.1	13.1	13.2
2	14.1	13.7	12.5	12.7
3	14.5	12.7	12.9	12.6
M-m	4.5	1.6	0.2	0.6

表 8、平面輔助表

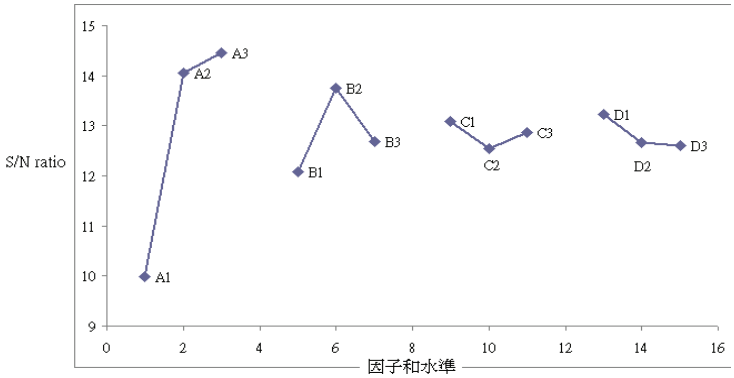

圖 16、平面時回應圖

接著我們應用上述所得到之輔助表及回應圖，重新設計 0°平面較佳之田口法試驗，表 9 為控制參數及表 10 本研究之 L16（4^5）直交表之配置並計算出其變異數及標準差如表 11。

在變異數分析方面，進行變異數分析能提供不同因子相對效果的一個更客觀的判斷方式，如表 11 所示，為此製程之變異數分析表。另外，在變異數分析中，常以 F-test（$F = s_1^2/s_2^2$）值來表示因子效果對誤差變異之關係；F-test 值愈大，該因子對系統之影響愈重要，此可由表 11 得知。同理由表 11 亦可知，若考慮貢獻度大小；會有以下：鑽頭直徑＞功率＞進給＞轉速之順序關係。造成此影響效果原因為當鑽頭直徑大時其刀具所具有之鑽石顆粒較多，因此若僅考慮工件粗糙度而言；其鑽石顆粒與工件接觸磨擦加工之平均機率值較高，因而會造成粗糙度值較高之原因。

因此如圖 17 即可得到最佳回應圖之最適當加工參數為 A2B4C1D4，。此說明在本控制參數下選用 ϕ1.5 鑽頭直徑、4900 轉速、0.2 進給及功率 40 條件可獲得較佳之粗糙度值。

控制參數	水準一	水準二	水準三	水準四
A 鑽頭直徑	ϕ1.0	ϕ1.5	ϕ3.0	ϕ8.0
B 轉速	1200	2700	3200	4900
C 進給	0.2	0.4	0.6	1.2
D 功率	10	20	30	40

表 9、控制參數

編號	序列	直徑	轉速	進給	回受力	Ra
1	1111	1	1200	0.2	10	0.55 μm
2	1222	1	2700	0.4	20	1.78 μm
3	1333	1	3200	0.6	30	1.6 μm
4	1444	1	4900	1.2	40	2.31 μm
5	2123	1.5	1200	0.4	30	0.87 μm
6	2214	1.5	2700	0.2	40	0.92 μm
7	2341	1.5	3200	1.2	10	0.16 μm
8	2432	1.5	4900	0.6	20	0.19 μm
9	3134	3	1200	0.6	40	2.76 μm
10	3243	3	2700	1.2	30	0.77 μm
11	3312	3	3200	0.2	20	0.88 μm
12	3421	3	4900	0.4	10	1.2 μm
13	4142	8	1200	1.2	20	0.81 μm
14	4231	8	2700	0.6	10	0.71 μm
15	4324	8	3200	0.4	40	2.82 μm
16	4413	8	4900	0.2	30	0.61 μm

表 10、L16（4^5）直交表之配置

ANOVA	1	2	3	4	自由度	平方和	均方和	變異數比 F	貢獻度
孔徑 A	-2.793	8.06909668	-1.76	-0.00326	3	291.58	145.792	0.6299045	37.836
轉速 B	-0.173	0.24021548	0.985	2.465617	3	16.174	8.08684	0.0349398	2.0987
回受力 C	5.6254	3.06264936	0.923	-3.410614	3	182.79	91.3932	0.394871	23.718
進給 D	2.8302	-3.59684805	1.125	3.006473	3	113.71	56.8541	0.2456422	14.755

表 11、變異數分析表

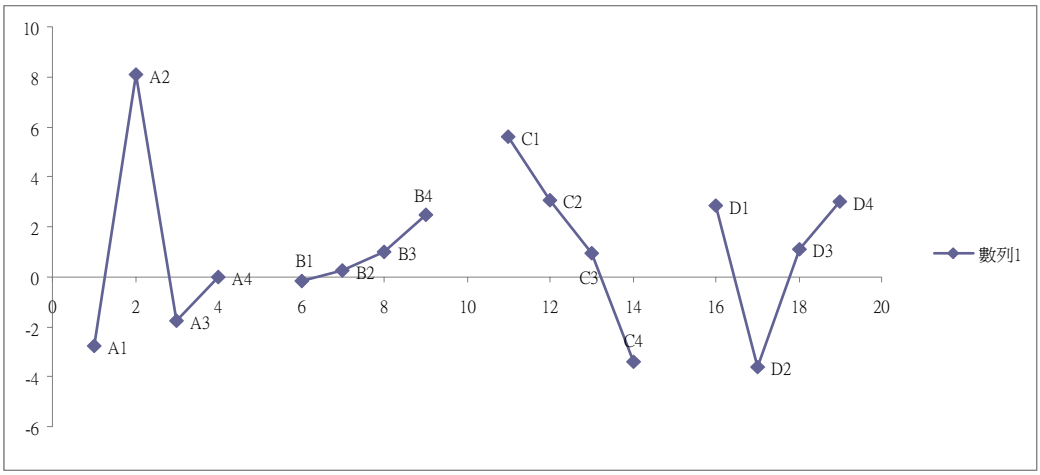

圖 17、最佳回應圖

七、結論

本文是利用迴轉式超音波加工對陶瓷材料之加工探討，改變進給對鑽孔後孔之品質（hols quality）做研究，根據前面的實驗結果可以得到以下結論：

(一) 脆性材料之超精密加工需要對加工機構做深入了解，以及足夠的檢測設備支援品質的控制，可以縮短摸索的時間，而依功能來設計量測程序可以大量降低工時和成本。

(二) 考慮移除率之高低時，發現回受力影響移除率增加量較刀具轉速速度快慢為大。

(三) 進給率之增加粗糙度亦呈線性增加，控制進給率可提高孔之品質。

(四) 固定磨料粒度下，粗糙度亦隨鑽頭直徑之增加而增加。主要參數之影響仍以進給率為最大之因素。

(五)當鑽頭直徑大時，其鑽石顆粒與工件接觸磨擦加工之平均機率值較高，因而會造成粗糙度值較高之原因。

(六)考慮貢獻度大小時會有以下：鑽頭直徑＞功率＞進給＞轉速之順序關係。

(七) 本研究可建立迴轉式超音波加工機切削性能選擇。

致謝：本研究經費為行政院國家科學委員會專題研究計畫補助計畫編號：NSC 97-2221-E-253-009

肆、參考文獻

一、 Moreland, M.A.,Versatile performance of ultrasonic machining. Cer.Bull., 1988,67（6）,1045-1047.

二、 Gilmore R., Ultrasonic machining and orbital abrasion technique, SME Technical Paper（Series）AIR,NM89-419,1989,pp1-20.

三、 Neppiras, E.A. and Foskett, R.D., Ultrasonic machining-2.Operating condition and performance of Ultrasonic drills, Philips Tech. Rev., 1957, 18（12）, 368-379.

四、 Moore D., Ultrasonic impact grinding, Proc. Non-traditional machining Conf., Cincinati, 1985,pp137-139.

五、 Kovalchenko, M.S., Paustovskii, A.V. and Perevyazko, V.A., Influence of properties ofabrasive materials on the effectiveness of ultrasonic machining of ceramics .Sov. Powder Metallurgy and Metal Cer., 1986,25（7）,560-562.

六、 Gilmore R., Ultrasonic machining of ceramics, SME Paper, MS90-346,1990.

七、 Rozennberg L.D., Kazantsev V.F. et al., Ultrasonic cutting, Consultants Bureau, NewYork,1964.

八、 Kohls J.B., Ultrasonic manufacturing process: Ultrasonic machining（USM）and ultrasonicimpact grinding（USIG）.The Carbide and Tool J., 1984, 16(5), 12-15.

九、 Haslehurst M., Manufacturing technology （3rd edn.）, 1981, pp.270-271.
十、 Soundararajan, V. and Radhakrishnan V., An experimental investigation on the basic mechanisms involved in ultrasonic machining. Int. J.MTDR, 1986, 26（3）, 307-321.
十一、Satyanarayana, A. and Krishna Reddy, B.G., Design of velocity transformers for ultrasonic machining Electrical India, 1984,24（14）11-20.
十二、Drozda T.J. and Wick C., Non-traditional machining-book chapter 29 ： Tool and manufacturing engineers hand book（Desk Ed.）Soc, Manuf. Engrs. Dearborn, MI, ISBN No.0872633519,1, 1983,pp1-23.
十三、T.B. Thoe, D.K. Aspinwall, N. Killey, Combined ultrasonic and electrical discharge machining of ceramic coated nickel alloy, Journal of Materials Processing Technology 92-93 (1999) 323-328.
十四、Moreland M.A., Ultrasonic machining-Book chapter: Ceramics and glasses, ASM International, Engineering Material Handbook, 4. pp.359-362, ISBN No.0871702827,Schneider and Samuel J.（1991）.
十五、H. Iwanek et al., Machining of ceramics by different methods, Ceramic Materials and Components for Engines, Proceedings of the Second International Symposium, 1986, pp. 417-423.
十六、Masahiko Jin, Masao Murakawa, Development of practical ultrasonic vibration cutting tool system, J. of Materials Processing Technology 113（2001）342-347.
十七、B. Azarhoushang, J. Akbari, " Ultransonic-assisted drilling of Inconel 738-LC", Inter national Journal of Machine Tools＆ Manufacture , 47（2007）1027-1033.
十八、Z.J. Peia, P.M. Ferreira, An experimental investigation of rotary ultrasonic face milling International Journal of Machine Tools & Manufacture 39 (1999) 1327–1344.
十九、K. Subramanian, S. Ramanath, Mechanism of material removal in the precision grinding of ceramics, PED-vol.58, Precision Machining: Technology and Machine Development and Improvement, ASME, 1992, pp. 1–19.
二十、王士榮、廖文賢、徐台生"陶瓷材料迴轉超音波加工及粗糙度檢測分析"南亞學報 27 期,pp.43-52, 2007/12/30
二十一、王士榮、廖文賢"超音波加工與傳統加工切削條件對孔品質影響研究"南亞學報 29 期,pp. -, 2009/12/3