以超音波加工對抗彈陶瓷材料切削條件孔品質之研究

王士榮*、廖文賢

南亞技術學院機械系

摘　要

以超音波加工抗彈陶瓷片材料是具經濟且有效的方法，主要是運用超音波振動並組合鑽石磨粒以移除材料之混合加工方式，加工時所產生的刀口邊緣之碎屑，在超音波加工陶瓷材料時都可觀察得到。然而一些加工因子會影響到加工表面之品質如進給率、主軸速度、機台功率等。本研究中是以五個變數及兩階的部份因子作為實驗之設計，其主要目的就在於顯現出加工參數間相互作用的主要效應，例如移除率(MRR)、孔入口段表面粗糙度、孔偏差、出口切屑型態等。

關鍵詞：超音波加工法、抗彈陶瓷片、移除率

E-mail:wzl@hanya.edu.tw　Tel: 03-436-1070 ext. 6405

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF THE CUTTING CONDITIONS ON THE HOLES QUALITY OF ARMOR CERAMIC TILES IN ROTARY ULTRASONIC MACHINING

Abstract

Rotary ultrasonic machining (RUM) is regarded as one of the cost-effective machining methods for Armor ceramic tiles material. It is a hybrid machining process that combines the material removal mechanisms of diamond grinding and ultrasonic machining (USM) .Chippings at the holes exit are also observed under a microscope. A number of factors influence the quality of the cut surface：For spindle speed, feed-rate, and ultrasonic power. Furthermore, the paper presents the results of a designed experimental investigation into RUM of ACT. A three-variable two-level full factorial design is employed to reveal main effects as well as interaction effects of three RUM process parameters (spindle speed, feed-rate, and ultrasonic power). The process outputs studied include holes export section surface roughness, material removal rate（MRR）, and holes quality (in terms of Entrance section chipping dimensions).

Keywords: Rotary ultrasonic machining (RUM)、Armor ceramic tiles (ACT) 、Material removal rate（MRR）

E-mail:wzl@hanya.edu.tw Tel: 03-436-1070 ext. 6405

壹、前言

先進抗彈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。因而，也因其優越性質而必須廣泛應用受限制於高加工成本上。因此，決定性的需要有效率價值加工過程在先進抗彈陶瓷上。經由本分析，可提供研究者另一項重要的參考依據，不但提升刀具的加工效率和使用壽命，更能提升能源效益為本研究目標。

先進抗彈陶瓷片（Armor Ceramic Tiles）使用在戰車裝甲系統上以保護軍事人員及車輛免受導彈拋射物攻擊之防護材料。應用時必須考量到防護材料的重量必須能耐得住拋射物的攻擊，若以每一單位重量基礎來計算的話，某些特殊陶瓷片材料就需要具有較高的裝甲防護效率。大部分的陶瓷裝甲系統是由一片或多片的陶瓷外面板所組裝構成，並與一片具有延性且質地較軟的背層板結合而成。所以一旦受到衝擊時，面板就必須堅硬到足夠讓高速拋射體破裂的程度，且一旦受衝擊時也將會使面板本身產生脆性破裂。先進抗彈陶瓷片材料其主要成分為氧化鋁；其含量範圍可從 85%至 99.5%，成分可包含有氧化鋁（Al_2O_3）、碳化硼（B_4C）、碳化矽（SiC）、二硼化鈦（TiB_2）等。考量陶瓷片的尺寸與厚度時，主要是決定於彈道的設計系統以及經濟性的認定。若以較低程度的威脅考量而言，例如以美國國家公認標準機構（NIJ）第三、第四級標準，一般可承受標準為以包含可抗砲彈與抗尖銳裝甲（硬化剛）兩者功能的抗彈陶瓷片為主，絕大部分設計尺寸為 2″×2″（50×50mm）之陶瓷片。張貼陶瓷片主要目的是能促使砲彈解體或變形，所以也必須在面板內植入襯裡材料（如玻璃纖維、電磁波譜）以承接砲彈碎片。

可用機器方法來製造先進陶瓷片的過程就是 USM（超音波加工機）及 RUM (旋轉式超音波加工機)。 而以機器方式來加工抗彈陶瓷片就是當今所提出的非傳統機器加工的製造過程，其種類就有例如 laser 加工， EDM 等非傳統機器加工法。而 USM 與 RUM 卻是屬於符合傳統上使用機器製造基礎架構且相對低成本的加工過程。以商業機械上而言，USM 與 RUM 對抗彈陶瓷片加工過程的潛力被公認為可行的，然而令人訝異的是針對某些特殊材料（如抗彈材料、BMG 材料等）加工過程中的理論分析和研究方面卻比較缺乏。

USM 加工技術是 1964 年由英國原子能當局技術官員 Percy Legge 所發明的[1-3]，而以製程參數 (應用靜壓力、旋轉速度、超音波振動頻率、鑽石類型、磨耗顆粒大小、鑽石濃度和鍵結形式等)在製程性能上(移除率、刀具磨損、表面粗

糙度等)作用的實驗研究探討 [4-10]。主要的結果可在[11]做一回顧。而有關 RUM 加工過程模式，若以 RUM 加工陶瓷材料而言可提出有二種材料之移除方式：即脆性斷裂方式和延性方式[12]。因而目前已有兩種有關 RUM 加工脆性破裂模式被探討出來，其中的一種就是應用切痕破裂理論來說明材料切削時的移除過程結果是非常理想的 [13]。而另一種則是以利用切削學的觀念，即藉著切削參數來預測 MRR 的實驗結果[14]結果也是相當的一致，且最近相關類似的延性模式也逐漸被開發出來[15]。商業上對 RUM 機器的限制是僅局限在對圓形孔加工有高效率的製造應用上。以此加工方式使用 RUM 以端銑（End Milling）方式對陶瓷材料的加工方法及發展仍然保有超過其他加工方法的優點。在早期文獻記載 [16]，有關實驗裝置設備的發展和切削工具的設計已被描述出來且已獲得初步的實驗結果。而後續的切削加工後的品質檢測研究工作會在本計劃中提出。且為了進一步探討新開發的 USM 與 RUM 對抗彈陶瓷材料切削技術及加工過程，並擬定一組實驗參數。本實驗的結果將顯示出可控制的製程參數(振動頻率、旋轉的速度、進給率、切削深度和切削刀具對材料加工結果 (MRR、表面粗糙度和真圓度等)的影響。

由以上的說明來看，對脆性材料的超精密加工時也必需對切削機構來作深入了解，有足夠的檢測設備來支援品質的控制，就可以縮短摸索的時間，而依功能特性來設計量測程序的話可以大量降低工時和成本；以發展出適合設計需求的超精密孔的製造加工程序，基於此目的超精密加工對特殊材料之檢測應有更深入探討的價值。

貳、研究進行方法、步驟

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。USM 材料移除機構加工原理如圖 1。另旋轉式超音波加工機（RUM）實驗機之機器規格為 UMT-6 三軸 CNC 超音波（SHIBAYAMA KIKAI（SIMCO）INTL;LTD.TOKYO,JAPAN），RUM 實驗機機型如圖 2 所示。超音波加工機主要機構有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 50Hz 轉換成 20KHz 之高頻，此進給壓電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（RUM 型式並將馬達置於主軸上方，以供應刀具旋轉運動）和不同之進給速度之控制。為建構 RUM 精密加工且運用固定式

及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，切削精度包括粗糙度、真圓度、平行度、圓柱度等。RUM 均使用鑽石刀具（Branson Sonic Power），RUM 機台功率設定為 10％、20％、30％、40％，主軸速度分別為 1200、2700、3200、4900（rpm），進給率分別為 0.2、0.4、0.6、1.2（mm/min），刀具直徑選擇為 1.0mm、1.5mm、3.0mm、8.0mm，刀具鑽石顆粒粒度固定為＃200（65~90）、＃325（36~54）號數。以 2^{5-1}（two-level,five-variable,16-test）作為四個控制因子搭配四個水準的實驗配置，控制因子之設計可參閱 DeVor et al. [29]，四個輸出變數（Outputs）為: (1) MRR (Material removal rate); (2)Roundness; (3) Surface roughness; (4) Cylindricity。工件材料（Workpiece）：為抗彈陶瓷片（Armor Ceramic Tiles）其各項性質如表 1 所示。

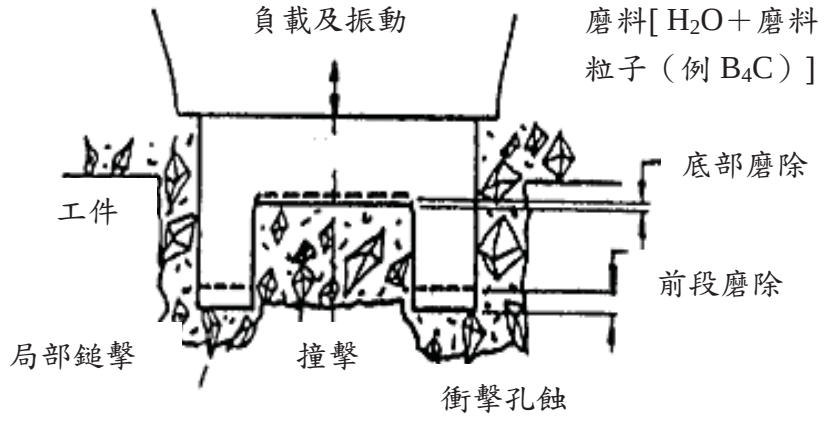


圖 1 USM 材料移除機構

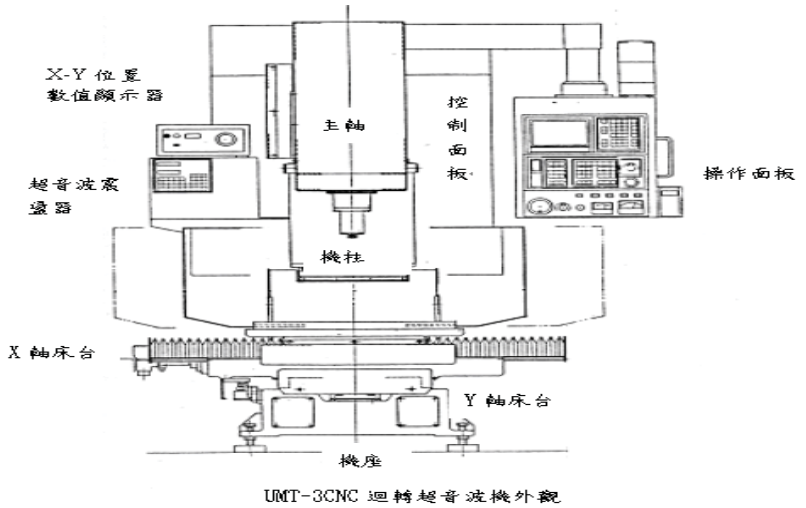


圖 2 迴轉式（RUM）超音波機台設備

表 1 氧化鋁性能表（High Performance Alumina）

氧化鋁含量	Alumina Content, Al_2O_3	Wt%	＞98%
密度	Density, ρ	g/cm^3	＞3.80
硬度	Hardness,HV_{50}	Mpa	＞1350
彈性模數	E-Modulus, E	Gpa	＞335
剛性模數	G-Modulus, G	Gpa	＞145
波以松比	Poisson’s, ν	----	～0.25
四點抗折強度	4-point Bending Strength, σ	Mpa	＞260
耐壓強度	Compressive Strength, σ	Mpa	＞2000
線性熱膨脹係數	Coefficient of Thermal Expansion, α	$1/K\times10^{-6}$	～7.9

一、田口方法直交表之選擇及品質特性之量測

本研究田口方法，係針對有關直交表之選擇及品質特性之量測之設計，以及對於四個控制因子的最佳化實驗將使用 L_{16}（4^5）直交表，作為四個控制因子搭配

四個水準的實驗配置[30]，並將雜音因子配置於直交表之外側，實驗配置表及實驗直交表如表 2、表 3 所示，將此製程最佳化之品質特性，選定為材料 RUM 加工製程中 16 組製程參數試片之量測檢驗，以探討各參數之相對關係及最佳參數組合。

實驗分析比較－應用田口方法靜態特性中之「望大（望小）特性」，信號雜音比（Signal to Noise Ratio，SN）的設計計算，如公式（1）所示

$$SN=\eta=-10\times\log10（MSD） \quad (1)$$

$$MSD=1/y_{12}+1/y_{22}+1/y_{32}+1/y_{42}$$

y_1、y_2、y_3、y_4 為各組試片之鑽石刀具鑽孔後各孔徑粗糙度、真圓度、平行度、圓柱度等值，將各組試片分別帶入公式中，即可求得各組參數實驗之 SN 值，根據 SN 比值定義，SN 值較大代表品質越佳，因此經計算結果選擇 SN 值較大的水準，決定最適水準組合選擇數組並進行品質特性測試分析。

二、孔精度定義及檢測方法

孔精度屬於幾何尺寸公差，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（True Position Tolerance）此種標示方法是最容易與製造程序相互吻合，也方便檢驗人員建立檢驗程序。其主要公差之定義，可參照 ANSIY14.5M 規範，圓柱度公差，最常用的是接觸試探頭量測法，可利用表面粗度儀之 PT 值（Profile Test）量測之，但上述之量測法，隨著孔深加深孔為之縮小，必須有特殊設計之探頭；對於透明之工件，則可利用座標工具顯微鏡二度空間之檢測，而在三度空間量測上則有困難。以時效論，若能掌握在三度空間之變化差異之非破壞式方法，以透明工件為例，是以座標工具顯微鏡連接 CNC 控制器之自動量測法較快。本研究所使用精密量測儀器如下說明：

（一）表面粗度測試儀投影式（Surface Finish Measuring Instruments）：針對鑽孔後孔表面粗造度之檢測，廠牌型式為HOMMELWERKE TEST T。

（二）二軸座標光學顯微鏡：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，廠牌型式為ZKM 01-250C Two-Coordinate Measuring Microscope。

（三）真圓度機輪廓（profile）測試法精度檢測：利用探頭接觸工件圓周位

置旋轉獲取數據，廠牌型式為Form－PC 930 tester（Mahr Gmbh）真圓度機。本機可量測工件之真圓度、平坦度、真圓度、同心度等功能，座標軸之定義為如圖二所示，各座標軸設定；X（axis）軸：向右為正方向（positioning movement to the right），Z軸（axis）：向上為正方向（upward positioning movement），C軸：順時針旋轉方向為正（rotate clockwise）。而真圓度機所量測位置如圖3所示。

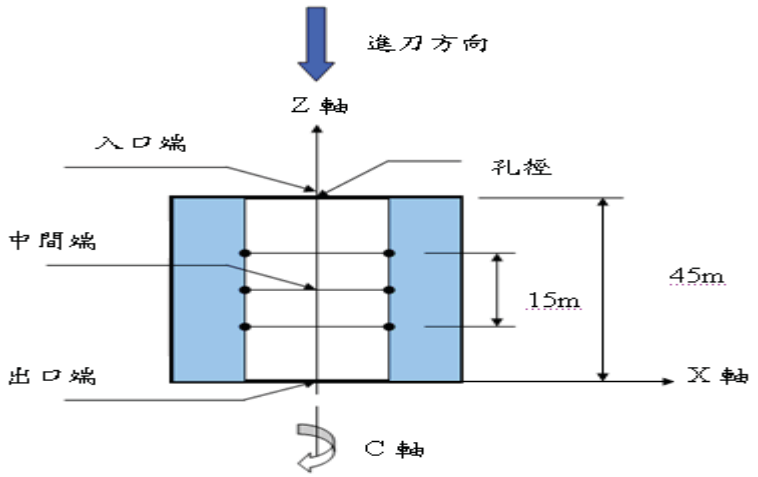


圖 3 鑽孔方向與入口段（截面 A）量測位置示意圖

三、表面粗糙度影響分析

在 RUM 加工中，由於影響理想加工表面粗糙度之製程參數包括主軸速度、進給率、和鑽石刀具顆粒粒度大小。理想平均表面粗造度（Ra）為刀具幾何形狀函數，類似平均高度之中心線平均粗糙度之數學式。

此理想平均表面粗造度可近似:曲線下面積和除以量測長度 L（$R_a = \frac{1}{L}\int_0^L |f(x)|dx$ ），如圖 4 所示。

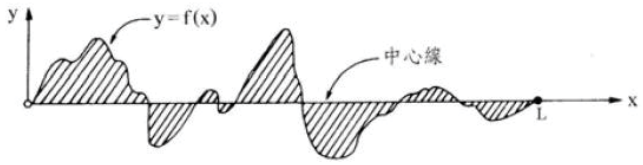


圖 4 中心線平均粗糙度示意圖

四、材料移除率（MRR）之比較

使用以下方程式，當實驗後以量取鑽頭直徑和孔之直徑及計算加工單一孔所需時間，根據[17]使用以下方程式來計算材料移除率：

MRR＝【π【（Dout/2）^{2}－（Din/2）^{2}】×d】÷T

Dout：鑽孔後孔之直徑

Dout：鑽頭直徑

d：代表工件厚度（45mm）

T：代表鑽頭鑽孔通過工件厚度（d）所需時間

鑽孔後孔之直徑是利用二軸座標光學顯微鏡（ZKM 01-250 C）量測所得之數據。主要運用於檢驗鑽孔後出口之切屑及孔之表面輪廓狀況。在本實驗中，主要是針對最佳化條件下之旋轉式超音波加工機（RUM）對抗彈陶瓷加工性能之研究，尤其是探討切削條件對表面粗糙度之影響。

參、結果與討論

一、迴轉式超音波加工機之（入口段）鑽削參數分析

依據鑽削數據之結果，探討入口段表面粗糙度與鑽削參數的關係與架構，因而在表面粗糙度的限制下，來獲得抗彈陶瓷材料最大移除率之最佳鑽削參數組合。本研究之實驗控制參數及各因子水準如表 2 所示。表 3 為本實驗 L_{16}（4^5）直交表的配置。

表 2 實驗控制參數及各因子水準

控制參數		水準 1	水準 2	水準 3	水準 4
A	直徑（mm）	1	1.5	3	8.00
B	轉速（rpm）	1200	2700	3200	4900
C	進給（mm/min）	0.20	0.40	0.60	1.20
D	功率（％）	10.00	20.00	30.00	40.00

表 3 L_{16}（4^5）直交表的實驗配置

控制參數 實驗編號	直徑 A	轉速 B	進給 C	功率 D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	1	4	4	4
5	2	1	2	3
6	2	2	1	4
7	2	3	4	1
8	2	4	3	2
9	3	1	3	4
10	3	2	4	3
11	3	3	1	2
12	3	4	2	1
13	4	1	4	2
14	4	2	3	1
15	4	3	2	4
16	4	4	1	3

表 4 粗糙度 S/N 比(R)值

控制參數 實驗編號	直徑 (mm)	轉速 (rpm)	進給 (mm/min)	功率 (%)	粗糙度 (孔入口段)	S/N 比 (R)	移除率 (mm^3/min)
1	1.00	1200	0.20	10	0.79	2.05	0.009
2	1.00	2700	0.40	20	0.82	1.72	0.015
3	1.00	3200	0.6	30	1.43	-3.11	0.024
4	1.00	4900	1.20	40	0.87	1.21	0.240
5	1.50	1200	0.40	30	0.92	0.72	0.049
6	1.50	2700	0.20	40	0.94	0.54	0.020
7	1.50	3200	1.20	10	1.72	-4.71	1.036
8	1.50	4900	0.60	20	0.63	4.01	0.452
9	3.00	1200	0.60	40	1.93	-5.71	0.667
10	3.00	2700	1.20	30	1.87	-5.44	1.283
11	3.00	3200	0.20	20	0.68	3.35	0.231
12	3.00	4900	0.40	10	0.57	4.88	0.427
13	8.00	1200	1.20	20	0.99	0.09	8.460
14	8.00	2700	0.60	10	1.71	-4.66	3.268
15	8.00	3200	0.40	40	0.71	2.97	0.262
16	8.00	4900	0.20	30	0.54	5.35	0.118

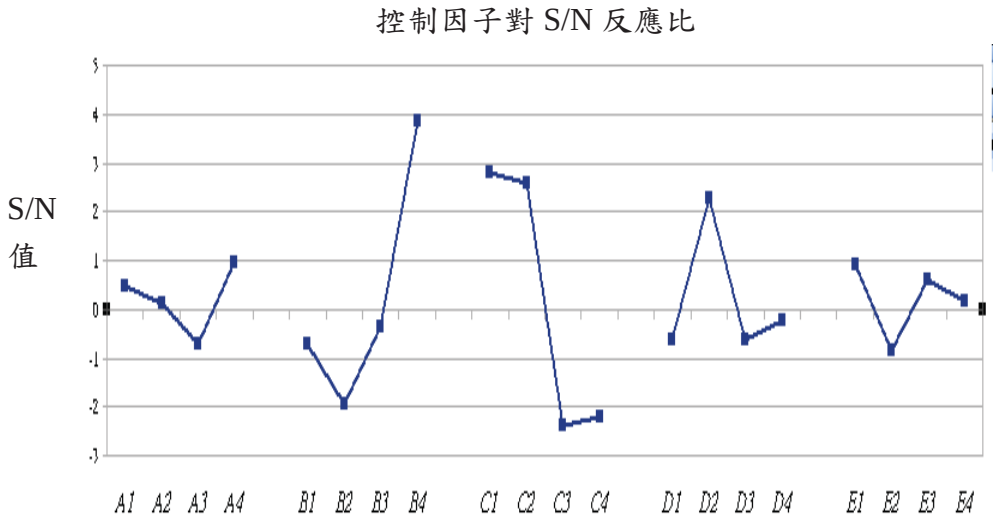


圖 5 粗糙度控制因子 S/N 比反應圖

表 5 粗糙度 S/N 比一覽表

控制參數	直徑	轉速	進給	功率	移除率
實驗編號	A	B	C	D	E
水準 1	0.468518831	-0.713	2.82171	-0.61	0.9
水準 2	0.141076613	-1.959	2.57633	2.2935	-0.84
水準 3	-0.72891342	-0.373	-2.3662	-0.617	0.6
水準 4	0.938582932	3.8644	-2.2126	-0.247	0.156
EFFECT	1.667496352	5.8233	5.18786	2.9103	1.736
RANK	5	1	2	3	4

由表 3 與圖 5 可比較出控制因子組合為 A3B2C3D3E2 時品質特性最好，如依影響力大小來排列為 B2C3D3E2A3 在此可先利用"一半準則"算出粗糙度的預測值。一般常用一半準則就是將具影響力的 前半數因子當做重要因子, 其它乘餘因子可視為不重要因子，其預測方式如下：

S/N 預測值=ý+(AA-ý)+(BB-ý)+(CC-ý)+(DD-ý) ..... (1-1)

表 5 為本研究範圍粗糙度 S/N 比一覽表。式(1-1)中 AA.BB.CC.DD.....表最佳組合，ý 表 S/N 比的平均值。依一半準則選出本實驗中具最影響力之三大因子為 B2C3D3。

所以該 S/N 的預測值計算值如下：

S/N 的預測計算值 0.2+(-1.96-0.2)+(-2.37-0.2)+(-0.62-0.2) = -5.35

S/N 的預測計算值皆比 L_{16} 表其餘 16 組實驗大，這表示品質特性可改善。另基於『一半準則』於理論方面沒有基礎，尚需經由變異分析法來預估實驗誤差以利與"因子和"誤差相比較,以定位個因子的重要性。假設有 n 組實驗而每組實驗有 r 個重覆的實驗數據，其總變異量 SS_{TOTAL} 與總自由度 DOF_{TOTAL} 分別可以下列表示：

SSTOTAL=[Σni=1Σrj=1y2ij]-n*r*y-2 ..... (1-2)

=213.84-[16*1*(0.22)]=213.2

DOFTOTAL=(n*r)-1 ..... (1-3)

(16*1)-1=15

每個因子變動產生的變異(因子效應向量)，變異數(Variance)與因子自由度分別可以下列表示：

SS_{Factor}=n*r/L*(ΣLK=1(yk-y)^2 ..... (1-4)

DOF_{Factor}=L-1 ..... (1-5)

$Var_{Factor}=SS_{Factor}/DOF_{Factor}$ ..... (1-6)

上式中 yk 代表因子在水準 k 時的反應值，L 表示水準數目。

以控制因子 D 為例說明 SS_D=16*1/4*((-0.61-0.2)^2+(2.29-0.2)^2+(-0.62-0.2)^2+(-0.25-0.2)^2) =16*1/4*((-0.61-0.2)^2+(2.29-0.2)^2+(-0.62-0.2)^2+(-0.25-0.2)^2)＝3

DOF_D=4-1=3

$Var_D=SS_D/DOF_D$=23.6/3=7.86

表 6 粗糙度變異(因子效應向量)，變異數(Variance)、因子自由度、貢獻度各因子的重要性

控制因子		SS	DOF	Var
A	直徑	5.96	3.0	1.98
B	轉速	76.86	3.0	25.62
C	進給	99.77	3.0	33.25
D	功率	23.6	3.0	7.86
E	移除率	6.93	3.0	2.31

表 7 粗糙度因子變異數與自由度計算結果

5 因子變異量相加總和（A-E Total）	213.12	15	NA
總變異量(SS_{Total})	213.2	15	NA

由計算結果表 6 得知五個因子變異量相加總和為 213.12 與總變異量 213.2 接近如表 7 所示，所以該實驗因子為影響入口粗糙度之主要因子，依實務經驗判定重要因子選定結果相符，變異分析之後比較原始設計與最佳設計的 S/N 預測如下：

原始設計(A1B3D3) S/N 的預測值計算值

=0.2+(0.47-0.2)+(-0.37-0.2)+(-0.62-0.2)= -0.92

最佳設計的 S/N 預測 B2C3D3 S/N 的預測值計算值

=0.2+(-1.96-0.2)+(-2.37-0.2)+(-0.62-0.2)= -5.35

依上述計算結果得知最佳設計比原始設計佳，其結果亦較合理。

二、以鑽削參數驗證孔鑽削結果分析

（一）本鑽削參數下出口切屑型態分析觀察

本實驗觀察利用二軸座標光學顯微鏡（Two-Coordinate Measuring Microscope）檢測抗彈陶瓷材料加工後孔出口側之切屑型態（Chipping Formed）之觀察比較。圖 6 為有關抗彈陶瓷桿狀（machined rod）之切屑邊厚度及尺寸示意圖，孔之定量品質在於切削加工陶瓷材料後所留下陶瓷桿狀（machined rod）切屑邊厚度及尺寸有關。

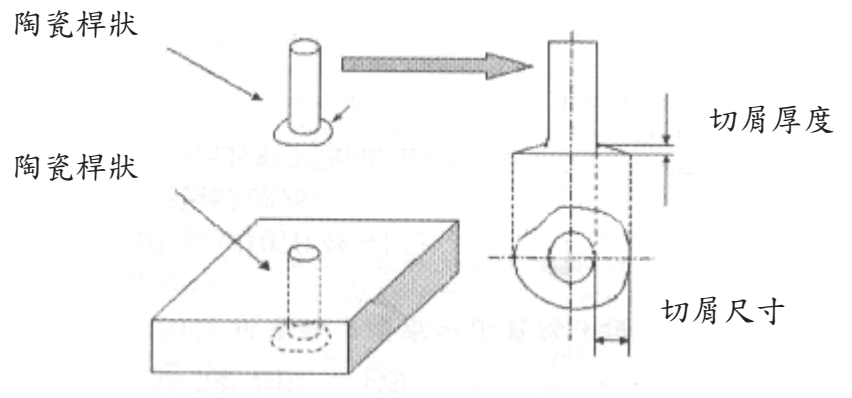
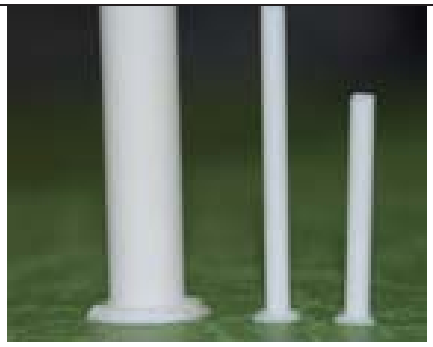


圖 6 抗彈陶瓷桿狀（machined rod）之切屑邊厚度及尺寸示意圖

如圖 7 本研究迴轉式超音波加工機之鑽削參數下之抗彈陶瓷桿狀（Machined Rod）圓孔孔穴切屑邊形狀之觀察，以本實驗加工之工件材料ϕ8 直徑孔為例，在本研究實驗配置表中 13~16 組之鑽削參數數據條件下，經切削後之陶瓷桿件由切屑邊厚度、尺寸品質與孔出口處破裂型態分析，可確認本陶瓷材料工件加工時孔出口破裂（cracks）產生之方式之觀察及說明如下：當切削加工接近尾端出口時，會在圓孔出口處邊緣產生裂縫，而裂縫係沿工件表面以 45 度角方向且有序的按

照脆性破裂模式（fracture mode）直接引導切屑逐漸裂開，此說明可由圖 7（a）、圖 7（b）所示。



a.抗彈陶瓷桿狀切屑邊厚度及角度示意

b.圓孔孔穴及出口處剖面 45°導角切形狀

圖 7 抗彈陶瓷桿狀及圓孔孔穴切屑邊形狀示意圖

（二）切削條件對孔偏差之影響分析

1.粗糙度變化對孔偏差之影響

以鑽削條件中最佳粗糙度之第十六組條件（鑽頭直徑ϕ8.00mm、轉速 4900rpm、進給 0.20mm/min、功率 30%）可獲得粗糙度（入口 0.54μm 、中段 0.18μm、出口 0.17μm）如表 4 所示。而由圖 8 圖形中可觀察到整體孔徑依孔深度距離可分成入口段、中間段及出口段三段位置。輪廓線條變化方式基本上是位於入口（0～15mm）及出口（30～45mm）段係以穩定孔徑尺寸及間距直線穩定方式呈現，而中間段（15～30mm）則以斜線漸縮造成孔徑尺寸由大而小上下變化方式呈現，此加工條件下可獲得本研究最佳粗糙度值，即在各參數穩定作用下可獲得出口段粗糙度最佳粗糙度值（0.17μm）交互效果。而各段孔徑粗糙度變化之原因可說明如下：（1）入口段因刀具鑽石顆粒未磨損，鑽石顆粒磨削能力較佳因而造成孔徑尺寸大之效應，雖以相同間隔間距穩定切削方式但亦造成孔徑入口段、中間段及出口段三段位置粗糙度值高（0.54μm）之效果。而中間段為刀具鑽石顆粒變小磨削能力穩定下孔徑突變小後再呈穩定狀態此粗糙度值效果亦可達 0.18μm，同理出口段粗糙度值亦可達 0.17μm。以上說明在本研究控制條件下，以 ϕ8.00mm 直徑大鑽頭、4900rpm 高轉速、0.20mm/min 小進給、30%功率條件可獲下較小之粗糙度值。

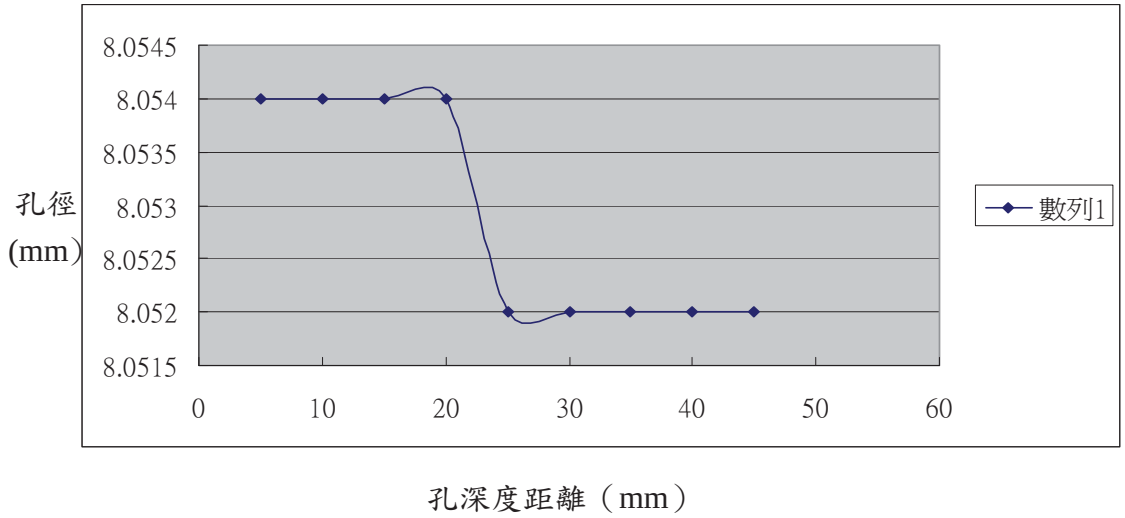


圖 8 各鑽削條件下最佳粗糙度第十六組條件下鑽頭直徑（ϕ8.00mm）、轉速（4900rpm）、最小進給（0.20mm/min）、功率（30%）孔偏差之影響

2.移除率變化對孔偏差之影響

以鑽削條件最佳移除率第十三組條件下（鑽頭直徑ϕ8.00mm、轉速 1200rpm、進給 1.2 mm/min、功率 20%）可獲得移除率最大值（8.46mm/min^3）如表 4 所示，而由圖 9 之圖形中可觀察到整體孔徑依孔深度距離可分成入口段、中間段及出口段三段位置。輪廓線條大致可分為（1）從入口處開始在入口段、中間段（5～10、20～25mm）以水平小間距孔徑穩定尺寸呈現方式，（2）在中間段、出口段（10～20、25～30、35～45mm）位置處等間距傾斜角度斜線孔徑尺寸漸進變化輪廓線條兩種變化方式呈現，即在各參數穩定作用下可獲得最佳移除率值之結果。由圖 9 輪廓線條之變化亦可說明從入口處位置開始，加工時因刀具鑽石顆粒磨削能力佳有造成孔徑尺寸大切削量大之效應，再加以相同漸進逐步間隔間距穩定切削方式亦可造成移除率值（8.46mm/min^3）高之效果。由上說明在本研究控制條件下即（鑽頭直徑ϕ8.00mm、轉速 1200rpm、進給 1.2 mm/min、功率 20%）條件下可獲得較大之移除率（8.46mm/min^3）值。且依田口分析根據平面鑽削參數與移除率 S/N 比一覽表可得知影響鑽削參數順序為鑽頭直徑＞進給＞功率＞轉速。

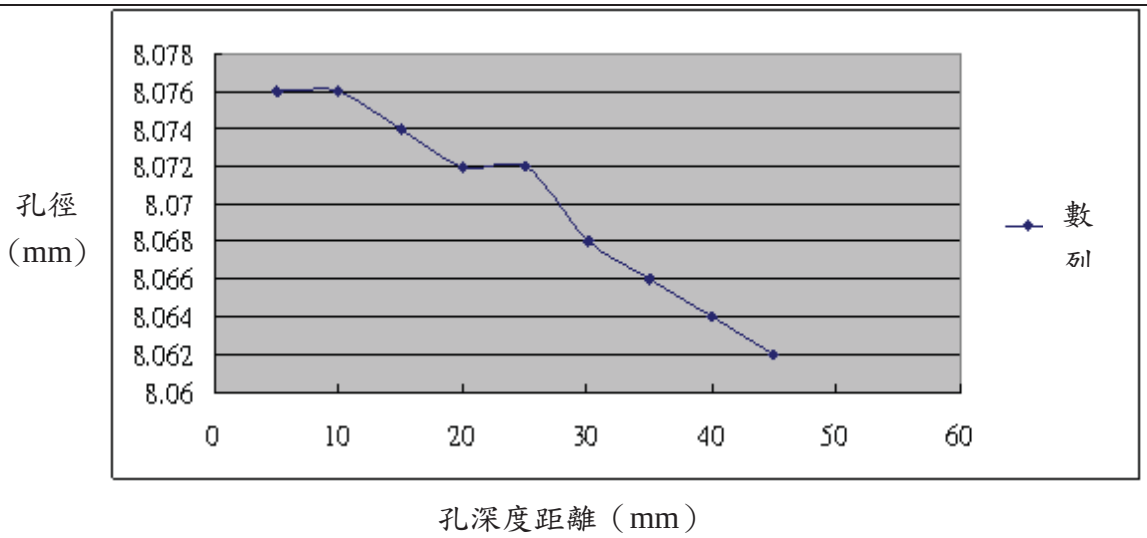


圖 9、各鑽削條件下最佳移除率第十三組條件下（最大鑽頭直徑ϕ8.00mm、最小轉速 1200rpm、大進給 1.2、最小功率 20%）孔移除率之影響

肆、結論與建議

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、鑽削參數與孔入口位置粗糙度結論：

（一）加工鑽削參數與孔入口粗糙度S/N比一覽表可得知影響鑽削參數與孔入口順序為轉速＞進給＞功率＞鑽頭直徑。

（二）孔入口控制因子組合為A3B2C3D3E2時品質特性最好，如依影響力大小來排列為B2C3D3E2A3。

二、鑽削參數與移除率結論：

（一）鑽削參數與移除率S/N比一覽表可得知影響鑽削參數平面加工順序為鑽頭直徑＞進給＞功率＞轉速。

（二）依移除率控制因子組合以A4C4D2E4B4時品質特性最好，若以影響力之大小來排列則為A4C4D2E4B4。針對切削條件中移除率對孔偏差之影響，可由孔偏差圖形及田口分析判斷，最大影響因素為鑽頭直徑、進給次之。

三、經迴轉式超音波加工機之鑽削參數與切屑邊厚度及尺寸之觀察得知；在本陶瓷材料工件加工孔出口破裂（Cracks）產生原因為裂縫係沿工件表面且有順序以45度方向脆性破裂模式（Fracture Mode）引導切屑逐漸裂開。

伍、參考文獻

1. Anonymous, “An improved ultrasonic machine tool for glass and ceramics“, Industrial Diamond Review 26 (308) (1966) 274–278.
2. P. Legge, “Ultrasonic drilling of ceramics“, Industrial Diamond Review 24 (278) (1964) 20–24.
3. P. Legge, “ Machining without abrasive slurry“, Ultrasonics (July) (1966) 157–162.
4. M. Kubota, Y. Tamura, N. Shimamura, “Ultrasonic machining with a diamond impregnated tool“, Bulletin of Japan Society of Precision Engineering 11 (3) (1977) 127–132.
5. A.I. Markov, I.D. Ustinov, “A study of the ultrasonic diamond drilling of non-metallic materials“, Industrial Diamond Review (March) (1972) 97–99.
6. A.I. Markov, Ultrasonic drilling and milling of hard non-metallic materials with diamond tools, Machine and Tooling 48 (9) (1977) 45–47.
7. P.G. Petrukha, “Ultrasonic diamond drilling of deep holes in brittle materials“, Russian Engineering Journal 50 (10) (1970) 70–74.
8. D. Prabhakar, “Machining advanced ceramic materials using rotary ultrasonic machining process“, M.Sc. thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1992.
9. D. Prabhakar, P.M. Ferreira, M. Haselkorn, “An experimental investigation of material removal rates in rotary ultrasonic machining“, Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME XX (1992) 211–218.
10. H.M.S. Wang, L.Y. Lin, “Improvement of rotary ultrasonic deep holes drilling of glass ceramics—Zerodur“, Seminar of the 7th International Precision Engineering, May, Kobe, Japan, 1993.
11. Z.J. Pei, N. Khanna, P.M. Ferreira, “An investigation into rotary ultrasonic machining of structural ceramics—a review“, in: Ceramic Engineering and Science Proceedings, vol. 16, no. 1, 1995, pp. 259–278.

12. Z.J. Pei, P.M. Ferreira, M. Haselkorn, “Plastic flow in rotary ultrasonic machining of ceramics“, Journal of Materials Processing Technology 48 (1995) 771–777.
13. D. Prabhakar, Z.J. Pei, P.M. Ferreira, M. Haselkorn, “A theoretical model for predicting material removal rates in rotary ultrasonic machining of ceramics“, Transactions of the North American Manufacturing Research Institutionof SME XXI (1993) 167–172.
14. Z.J. Pei, D. Prabhakar, P.M. Ferreira, M. Haselkorn, “A mechanistic approach to the prediction of material removal rates in rotary ultrasonic machining“, Journal of Engineering for Industry 117 (1995) 142–151.
15. Z.J. Pei, P.M. Ferreira, “Modeling of ductile-mode material removal in rotary ultrasonic machining“, International Journal of Machine Tools and Manufacture 38 (10–11) (1998) 1399–1418.
16. Z.J. Pei, P.M. Ferreira, S.G. Kapoor, M. Haselkorn, “Rotary ultrasonic machining for face milling of ceramics“, International Journal of Machine Tools and Manufacture 35 (7) (1995) 1033–1046.
17. R.E. DeVor, T.H. Chang, J.W. Sutherland, “Statistical Quality Design and Control, Contemporary Concepts and Methods“, Macmillan, New York, 1992.