Rotary Ultrasonic Machining of Ceramics Materials and Roughness Inspection Technological

Shu-Lung Wang、 Win-Shin Liao*、Tai-Sheng Xu

Department of mechanical Engineering,

Nanya Institute of Technology

Abstract

Generally 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

聯絡作者：廖文賢、Email：laiowh@nanya.edu.tw、電話：(03) 4361070 轉 5121、傳真：(03) 4365226

陶瓷材料迴轉超音波加工及粗糙度檢測分析

王士榮、廖文賢*、徐台生

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鑽孔原理之介紹及鑽孔加工後品質之研究。以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、超因波功率等。結果顯示應用在超音波震盪之加工時應如何增進孔之品質。

關鍵詞：迴轉式超音波加工、量測檢測、陶瓷

壹、前　言

微細孔加工(Micro Hole Machining)即為因應拉絲模具、捲線機用噴嘴、化纖紡絲噴嘴、燃油噴嘴、噴水噴嘴、印刷基板、半導體積體電路用治具及各種光學零件等微細孔穴加工之需要，使鑽孔作業漸漸有朝向細徑化、深孔化、高品質化、高效率化及不易切削化發展。而目前可應用之微細孔加工方法中計有超音波加工、鑽孔加工、研磨加工、激光加工、放電加工及電子束加工等六種方法，應考量被切削材料性質（硬度、強度、導電性）、孔穴尺寸（直徑、深度）、部面形狀（圖形、奇異形狀）、加工效率及成本，並且配合加工目的從其中選擇合適的加工方法。

超音波加工(Ultra Sonic Machining，簡稱 USM) 【1】為目前日本九州大學正在從事附有超音波振動小徑鑽孔加工之切削機構，超音波振動對加工精度的影響效果，在傾斜面上孔穴加工的適用性，各種展延性材料上的適用性及直徑 50μm 等極小徑鑽頭適用效果進行研究，以下是較為明確的研究成果。

1.由於有超音波振動的關係，除了因摩擦降低使切屑變薄並增加切排出速度外，更會因為鑽頭中心側及稜角側之切屑排出速度差減少，故橫向捲繞切屑會變小，而且會形成平滑螺旋狀或帶狀的切屑，使切屑排出更為順暢，因而不需要分級進刀即可從事深孔加工。

2.因有超音波振動，故對抑制孔穴入口處鑽頭振顫振動有相當程度的效果。因此也不易產應變圓(Strain round)藉著鑿尖鎚繫作用限制鑽頭，鑽頭笪加工物件間歇性接觸，降低鑽頭彈性變形恢復力及摩擦力，相對的也能減少徑向作用力的變動。

3.因增加了超音波振動，在傾斜孔加工裡孔穴的應變也變小了。

4.藉由超音波振動，使用直徑 60μm 極小徑鑽頭從事不銹鋼鑽孔加工變得更容易。

超音波振動之加工切削陶瓷有以下優點：

1.具傳導性與非傳導材料均可加工和複雜三度空間外形加工和一般簡單形狀加工一樣快速。

2.加工過程並不會產生任何熱影響區或因為工件表面任何產生化學/電子之改變。

3.因為加工淺且在工件表面產生之壓殘留應力會提高加工部位之高循環疲勞強度。

超音波振加工理論目前仍是值得研究的專門科學，且為非傳統加工重要之一環，它雖然設備投資較高，刀具選用缺乏彈性，但是在技術開發完成後，其刀具

壽命可大量增長，即可在短期內回償投資耗費是一種具開發價值之非傳統加工技術。

貳、超音波鑽孔原理

超音波鑽孔加工原理目前尚未完備，仍然有許多待研論之處。Wang et al.【2】其主要作用有：一、三體研磨（three-body wear），二、二體研磨（two-body wear），三、孔蝕（Cavitations），四、切削液之化學作用；依據 Shaw【3】所作之研究如下（如圖一）所示：

$R_1 = K_1 (\pi^2 P a^2 d/6\sigma)^{3/4} f^{5/2} d^{1/4}$

$R_2 = K_1 K_2^{1/4} (4ad/\pi\sigma (1+Ka))^{3/4} f d^{-1/2}$

R_1＝自由粒子衝擊之去除率

R_2＝刀具衝擊之去除率

K_1＝常數

P＝磨料粒子的質量密度

a＝刀具之振幅

f＝震盪頻率

σ＝在破壞處工件材料之頻均表面應力

d＝相當球徑（Equivalent Sphere Diameter）

d'＝相對於實際粒子災接觸點之曲率之直徑

K_2＝被魔力覆蓋的工作面積比例

K_3＝工件之勃氏硬度

K_a＝刀具之勃氏硬度

其中

$R_2 \propto d$，f，$a^{3/4}$，$\sigma^{-3/4}$ ，$K_2^{1/4}$

Miller 假設磨粒為立方體形，且在單一結晶材料及沒有考慮振幅之情形下，得到以下之關係式【3】：

$R = \phi (PD)(TN)(WHR)(VC)(CR) K_2$

上式中

R＝體積去除率

ϕ＝常數

PD＝每次衝擊的塑性變形

TN＝每次的衝擊數

WHR＝每單位塑性變形的工作硬化能量

VC＝每次衝擊被移除之體積

CR＝每次衝擊之崩裂率

K_2＝磨料在刀具面積上所佔之比例

Rozenberg【4】及其他學者【5】則認為

$R \propto F$，a^2，$f^{1/2}$，$\sigma^{--3/4}$，$K_2^{1/4}$

F：靜壓力

所以在超音波加工中，控制材料去除率、表面精度之主要變數為振幅、頻率、刀具材料、磨料及漿體。

叁、實驗過程

3.1 實驗建立和條件

本實驗係針對 RUM 加工精密度之測試，實驗改進 RUM 技術，並比對投影式、光學顯微鏡式等精度檢測。RUM 實驗機為 UMT-6 三軸 CNC 超音波（SHIBAYAMA KIKAI（SIMCO）INTL;LTD.TOKYO,JAPAN），RUM 實驗機機型如圖二所示。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，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）即 α（熱膨脹係數）為 0。UMT-6 使用（Branson Sonic Power）鑽石刀具，刀具直徑分別為 ϕ1.0mm、ϕ1.5mm、ϕ3.0mm，磨料粒度（grit mesh size）為＃325，變化不同刀具直徑對孔直徑精度之檢測。

3.2 孔精度定義及檢測方法

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（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：

（1）表面粗度測試儀投影式（HOMMELWERKE TEST T surface finish measuring instruments）：針對鑽孔後孔表面粗造度之檢測。

（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。

肆、結果與討論

鑽孔後量測檢驗孔之粗糙度品質分析：

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 Li et al.【6,7】及旋轉式超音波加工的比較有許多相關之研究 Markov et al.【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 Pei et al.【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：

4.1 進給速度對粗造度之影響

以鑽頭直徑直徑 ϕ1.5mm 為例，如圖三所示，當進給率在 0.2~1.2（mm/rev）之間觀察，發現其粗糙度在 0.2~0.6（mm/rev）之間變化不大，大約在 0.2 μm 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 1.2 mm/rev 時，粗糙度達 0.39 μm。如圖四所示當鑽頭直徑為 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 2.0（mm/rev）時，粗糙度達 0.38 μm。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。

4.2 針對鑽頭直徑與粗造度關係：

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，觀察鑽頭直徑對粗造度之影響，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，其粗造度由 0.26 μm

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。

4.3 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（如圖六所示），觀察進給率與粗糙度關係，由圖七所示，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，兩角度粗糙度值相差提升 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。

4.4 粗糙度之均方根值（RMS）

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

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φ1.5mm，進給率分別為（0.2、0.6、1.2）、φ3.0mm（0.4、1.2、2.0）、φ12mm （0.2、0.4、4.0）進給率之均方根粗糙值，以探討在不同鑽頭直徑φ的總粗糙度之比值如圖八所示。

而由圖九所示 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。

伍、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，以固定主軸速度、超音波功率製程兩參數，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：

1. 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。
2. 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。
3. 進給率（主軸速度）對孔之品質有提升之明顯效應。
4. 可建立預測 RMS 粗糙度預測模型（model）機制，持續建立真圓度及圓柱度等鑽孔後圓孔輪廓標準差、變異數之統計量數。

陸、參考文獻

1. 南台科技大學機械系" MEMS and Nano Technology (Micro Machining) " Make MEMS Innovations,第五章.

2. H. M. Wang, "Improvement of rotary ultrasonic deep hole drilling of glass ceramics-Zerodur"7th International Precision Engineering Seminar, May, （1993）

3. 王雪明"脆性材料孔之超精密加工及檢測"新新雙月刊,第二十三卷第一期,民國84年1月1日.

4. "Ultrasonic Cutting "By Rozenberg, Kazantsev, Makarov, yokhimovich.

5. Toshimichi Moriwak and Eiji Shamoto, "Ultrasonic ductile cutting of brittle materials by applying ultrasonic vibration"7th International Precision Engineering Seminar, May （1993）

6. Z.C. Li, Y. Jiao and T.W. Deines, C. Treadwell "Rotary ultrasonic machining and designed experimental" Int. J. of Machine Tools and Manufacture, 45, pp.1402-1411 (2005)

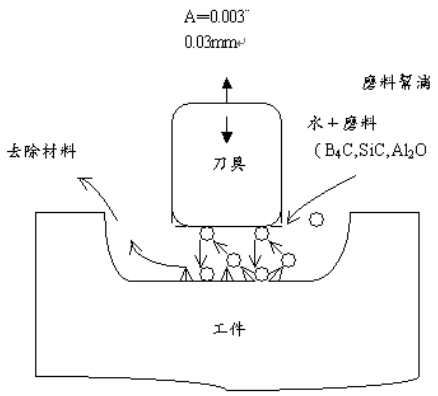
7. K.F. Graff, Ultrasonic machining, Ultrasonic（1975）; pp.103-109

8. A. I. Markov, et al., " Ultrasonic drilling and milling of hard non-metallic materials with diamond tools " Machines and Tooling, 48（9）,pp.45-47 (1977)

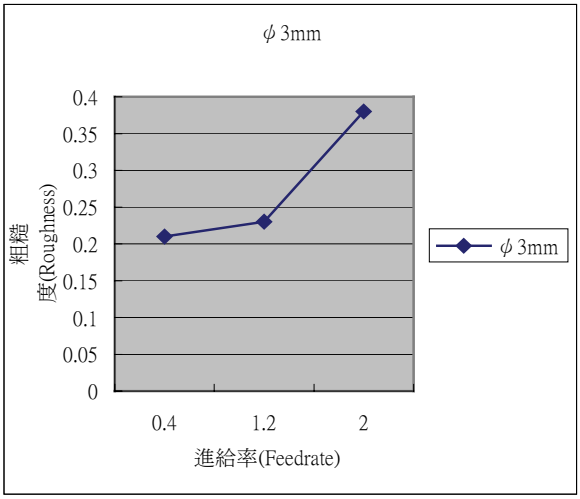
9. P.G. Pei, P.M. Ferreia, "Modeling of ductile-model material removal in rotary ultrasonic machining" Int. J. of Machine Tools and Manufacture,38,pp.1399-1418 (1998)

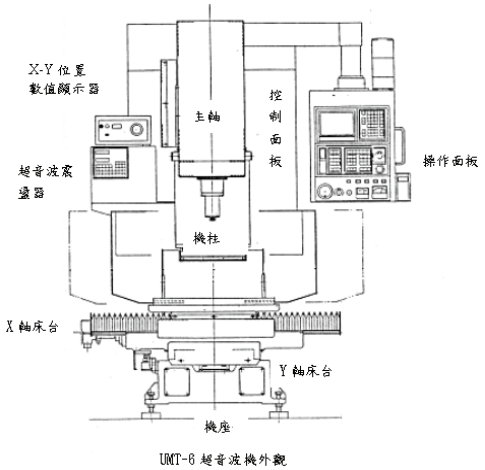
10. A. I. Markov, I.D. Ustinov, "A study of the ultrasonic diamond drilling of non-metallic materials, " Industrial Diamond Review, pp.97-99 (1972)

11. Anselmo Eduardo Diniz, Ricardo Micaroni, "Cutting conditions for finish turning process aiming：the use of dry cutting" Int. J. of Machine Tools and Manufacture,342, pp.899-904 (2002)

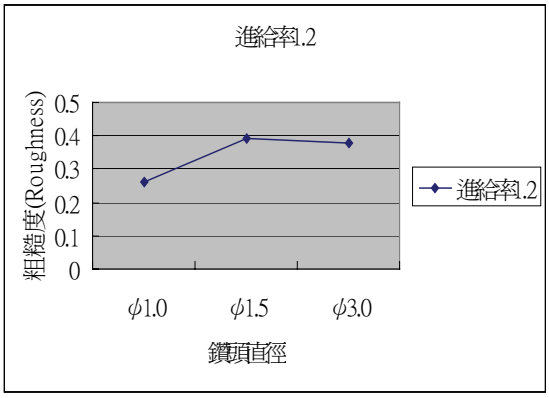


圖一、超音波加工

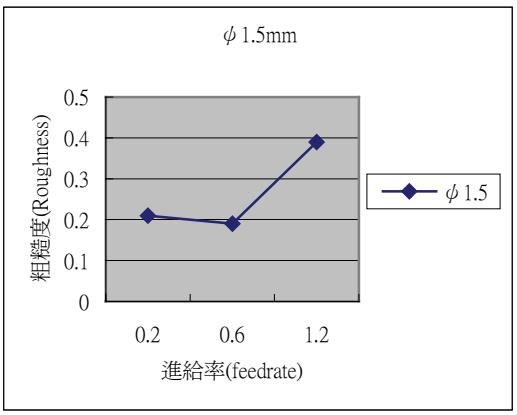




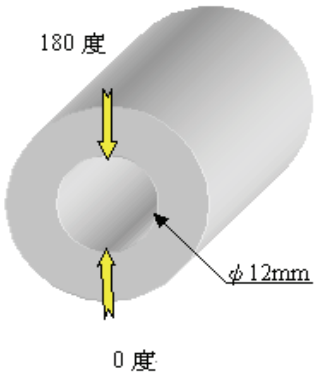
圖二、超音波加工機



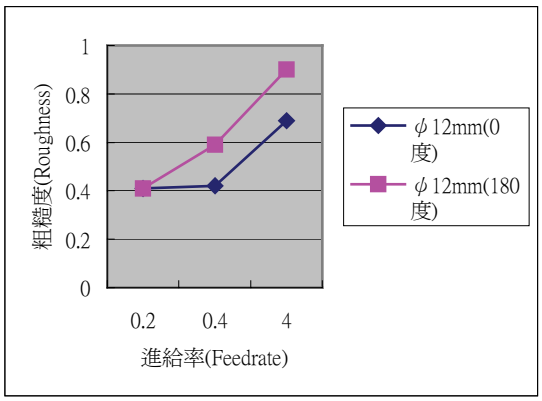
圖五、鑽頭直徑與粗糙度之關係（固定進給率）



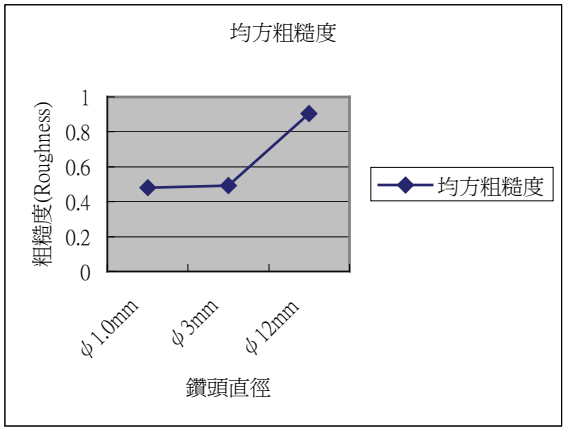
圖三、粗糙度與進給率之關係（鑽頭直徑 φ1.5mm）



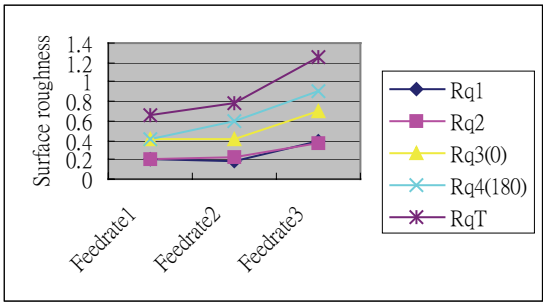
圖六、φ12mm 鑽頭直徑鑽孔後孔之相對夾角 0 度與 180 度粗糙度量測點位置示意圖



圖七、ϕ12mm 鑽頭直徑鑽孔後，孔之相對夾角 0 度與 180 度位置進給率與粗糙度之關係



圖八、不同鑽頭直徑與 RMS 表面粗糙度之關係



圖九、RMS 表面粗糙度與進給率之關係