

國科會國防科技發展方案學術合作協調小組研究計畫

計畫名稱：微超音波製造系統研究

結案報告

計畫編號：NSC-91-2623-7-032-001

執行期間：91年1月1日至91年12月31日

計畫主持人：趙崇禮

共同主持人：林隆湧、馬廣仁

執行機構：淡江大學機械系

合作單位：中山科學研究院二十二廠

中華民國九十二年二月二十日

## 誌 謝

感謝國科會及中科院第二研究所之經費補助及全力支持，使本研究計畫得以順利進行。同時對中科院二所二十二廠之林隆湧廠長，簡學斌副廠長，黃榮祥博士及陳志章先生於研究過程中所給與的協助及於檢討會議中提供之寶貴建議及指正謹此致上最誠摯的謝意。

# 目 錄

誌謝	1
目錄	2
圖錄	5
1. 前言 .....	8
2. 超音波加工 .....	13
2.1 超音波加工加工原理.....	13
2.1.1 前言.....	13
2.1.2 超音波的特性.....	18
2.1.3 超音波加工的基本原理.....	20
2.1.4 超音波加工的特點.....	21
2.1.5 超音波加工設備及其組成.....	22
2.1.6 超音波加工的基本參數.....	30
2.2 超音波加工切削理論.....	34
2.3 超音波加工加工實驗.....	39
2.3.1 實驗流程.....	39
2.3.2 實驗儀具及加工材料.....	40

2.3.3	超音波加工加工實驗加工參數.....	47
2.4	超音波加工研究方法.....	48
3	結果與討論.....	50
3.1	前言.....	50
3.2	超音波加工機制.....	51
3.3	實驗結果.....	52
3.3.1	磨粒大小對超音波加工結果的影響.....	52
3.3.2	粗細磨粒間的關係.....	57
3.3.3	磨粒軟硬對超音波加工結果的影響.....	58
3.3.4	磨料濃度對超音波加工結果的影響.....	58
3.3.5	刀具磨耗對超音波加工結果的影響.....	58
3.3.6	工件形狀結構對超音波加工結果的影響.....	61
3.3.7	加工速率對超音波加工結果的影響.....	62
3.4	多道次加工.....	64
3.4.1	多道次超音波加工表面之改進情形.....	65
3.4.2	超音波加工機進給機構之改善設計.....	66
3.5	刀具表面粗度對超音波加工的影響.....	68
3.6	工件的表面完整性.....	69

3.7 空蝕現象 .....	71
3.8 超音波加工三維結構 .....	72
3.9 超音波加工矽半導體材料 .....	76
3.10 超音波加工石英材料 .....	77
3.11 超音波加工 Zerodur 材料 .....	79
3.12 混和磨粒加工 .....	80
3.13 特殊刀具加工 .....	88
4. 結論 .....	91
5. 重要參考文獻 .....	94

## 圖 錄

圖 1.1. 以準分子雷射加工玻璃時於不同能量密度對加工幾何形狀的影響.....	9
圖 1.2. 以準分子雷射加工玻璃時不同脈衝頻率對加工後表面殘留物之影響 2.4J/cm <sup>2</sup> .....	9
圖 1.3. 以超音波加工 Zerodur 時不同加工條件所得之表面特徵 .....	10
圖 2.1 (自由磨粒)超音波加工—UM.....	12
圖 2.2 旋轉式(固定磨粒)超音波加工--RUM .....	13
圖 2.3 刀具震動會使刀具上或刀具與工件間之懸浮液中的磨粒以高速衝擊工件	14
圖 2.4 配合以工件低頻震動之旋轉式超音波加工 .....	15
圖 2.5 超音波加工造成之切屑可經由工件低頻震動間歇加大刀具與工件間間隙 而得以有效的排出 .....	16
圖 2.6 彈性杆內質點振動狀況 .....	19
圖 2.7 常見變幅杆截面變化形式.....	25
圖 2.8 超音波加工實驗流程.....	39
圖 2.9 微超音波加工機.....	42
圖 2.10 微超音波變幅杆 .....	42
圖 2.11 微超音波加工刀具設計圖 .....	44
圖 3.1 微壓痕周邊之裂痕 .....	50
圖 3.2 加工機制與磨粒粒徑關係之示意圖 .....	51
圖 3.3 磨粒大小與表面粗度的關係.....	53
圖 3.4 經 60 μm 的碳化矽磨粒加工過後的表面情況 .....	53
圖 3.5 經 60 μm 的碳化矽磨粒加工後表面邊緣的微裂.....	54
圖 3.6 經 5 μm 的碳化矽磨粒加工過後的表面情況 .....	54
圖 3.7 經 2 μm 的碳化矽磨粒加工過後的表面情況 .....	55

圖 3.8	經 $2\mu\text{m}$ 的碳化矽磨粒加工過後表面邊緣的微裂	55
圖 3.9	磨粒粗細與表面粗度的關係	56
圖 3.10	磨粒粗細與表面形貌的關係	56
圖 3.11	碳化矽 $60\mu\text{m}$ 磨粒造成之次表面裂痕	56
圖 3.12	中碳鋼刀具加工過後的顯微組織	59
圖 3.13	不鏽鋼刀具加工過後的顯微組織	60
圖 3.14	刀具經 $50\mu\text{m}$ 磨粒加工過後的顯微組織	60
圖 3.15	刀具經 $5\mu\text{m}$ 磨粒加工過後的顯微組織	60
圖 3.16	刀具經 $2\mu\text{m}$ 磨粒加工過後的顯微組織	61
圖 3.17	凹面結構的工件	61
圖 3.18	凸面結構的工件	62
圖 3.19	施加荷重過大，造成工件表面破裂	62
圖 3.20	不同加工速率下對表面粗度的影響	63
圖 3.21	多道次加工之表面形貌的結構	64
圖 3.22	多道次超音波加工表面之改進情形(一)	65
圖 3.23	多道次超音波加工表面之改進情形(二)	65
圖 3.24	因定位不準造成結構斷裂	66
圖 3.25	超音波加工機進給機構之改善設計	67
圖 3.26	加工前後的刀具表面顯微組織	68
圖 3.27	中碳鋼刀具加工前後刀具表面的磨耗	69
圖 3.28	$5\mu\text{m}$ 磨粒加工時造成表面邊角處較大的微破裂	70
圖 3.29	$2\mu\text{m}$ 磨粒加工時表面邊角處較輕微的微破裂	70
圖 3.30	氣泡的形成與內爆示意圖	71
圖 3.31	配合多道次加工方式加工出的工件表面顯微圖片	73
圖 3.32	本研究加工出幾何造型的工件	74
圖 3.33	超音波加工出之幾何結構細部放大顯微圖片	75
圖 3.34	矽半導體材料晶超音波加工後之幾何結構	76

圖 3.35 超音波加工石英材料 .....	77
圖 3.36 石英材料經超音波加工之顯微組織 .....	78
圖 3.37 無進給配合空化效應加工之石英材料顯微組織 .....	79
圖 3.38 超音波加工 Zerodur 玻璃陶瓷材料 .....	80
圖 3.39 混和磨粒加工加工機制示意圖 .....	81
圖 3.40(a)純碳化矽磨粒(5 $\mu\text{m}$ )、 $R_a=0.39\mu\text{m}$ (b)碳化矽混和氧化鋁磨粒(0.5 $\mu\text{m}$ )、 濃度比 10:1、 $R_a=0.41\mu\text{m}$ (c)碳化矽混和氧化鋁磨粒(0.5 $\mu\text{m}$ )、濃度比 5:1、 $R_a=0.35\mu\text{m}$ (d)碳化矽混和氧化鋁磨粒(0.5 $\mu\text{m}$ )、濃度比 2:1、 $R_a=0.25\mu\text{m}$	83
圖 3.41 混合低濃度氧化鋁對表面粗度的影響 .....	83
圖 3.42 混和磨粒中對表面粗度和加工速率的影響 .....	85
圖 3.43 混和氧化鋁磨粒對表面粗度的影響 .....	86
圖 3.44 混合高濃度氧化鋁對表面粗度的影響 .....	87
圖 3.45 由於(a)刀具加工或(b)刀具之組裝使刀軸方向與刀具進給方向傾側在進行 加工中會壓迫工件造成破裂 .....	88
圖 3.46 由於刀軸方向與刀具進給方向傾側在進行加工中造成工件破裂 .....	89
圖 3.47 薄板加工刀具示意圖 .....	90
圖 3.48 雷射加工出之薄板加工刀具 .....	90



## 1. 前言

玻璃及陶瓷等材料一般被歸類為"脆性材料"。因為當這些材料承受應力時，在還沒有產生明顯之塑性變形前脆裂破壞便已發生。雖然這種高脆度(Brittleness)使得加工這些材料變得極為困難，但對由這些脆性材料製成之高精度零件的需求卻與日俱增；只因為他們擁有許多現代及未來科技運用所需之優良的物理、電子、光或機械特性。近年來由於航太工業的急速發展，對於光電元件的需求也極為迫切。對於航太工業中，導航系統的精密度佔有絕對之影響力，尤其是雷射陀螺儀的製程與發展更是如此。然而雷射陀螺儀本身所要求之精度關係到其材料的選擇、加工方式的特殊要求。在材料上所要求的是不受環境、溫度影響及具有優良的物理、電子、光及機械特性。而符合這類要求的材料常是脆性材料。對於這些脆性材料製成之高精度零件的需求的與日遽增，只因為他們擁有許多現代及未來科技運用所需的機械特性。而光電系統中要求在脆性材料上鑽深而小且尺寸精度高的孔的機會也會隨光電科技之蓬勃發展而增加。而雷射陀螺儀正是要求在硬度 VHN1000 以上，常溫接近零膨脹係數的玻璃陶瓷 Zerodur 進行鑽深而口徑小且尺寸精度高的鑽孔加工。

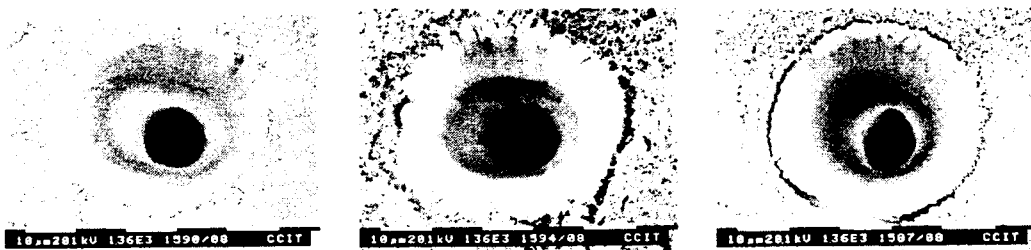
鑑於我國近年來光電科技發展迅速，工業界尤其是國防工業對系統之精度要求也日漸嚴苛；繼續朝著精、薄、短、小、準之目標邁進。而光電系統中要求在脆性材料上鑽深而小且尺寸精度高的孔的機會也會隨光電科技之進步發展而增加。

而在脆性材料上進行微孔加工的方法雖然有蝕刻法、雷射加工、微放電加工法(MEDM-micro EDM)及微超音波加工法(Micro ultrasonic machining, MUSM)；但前三種加工法多僅使用於孔深與孔徑比較小的情況。當需要在脆性材料上鑽深孔(孔深與孔徑比較大)時，若以雷射加工除因焦距景深及小孔效應造成之孔側壁斜角(tapping angle)外因熱效應引發之加工區材質改變、表面微裂(micro-cracks)(圖1.1)及四散於表面之表面殘留物(圖1.2)均使工件之尺寸精度及表面品質難於提升。若以蝕刻法難以避免孔側壁斜角的問題而微放電加工則受限於被加工材料之導電性。目前以微超音波加工在脆性材料上鑽深孔時所受之限制最少且結果亦很好(圖1.3)；故被採用的也最多。微超音波加工亦為目前適用於微機電系統(MEMS)製造方法中唯一非熱、非化學及非電的加工方法，所以對傳統的微細加工法，相對於微放電加工，LIGA和準分子雷射鑽孔的限制，微超音波加工法可說是有最大的應用彈性。若能將微超音波加工系統整合其他為細加工法，如微細放電加工法，則對多層的MEMS應用，如微應力感測器，微傳動元件感微光電元件等，會有進一步實現量產的可能性。然而，國內對微超音波鑽孔加工之相關研究非常缺乏。國外之研究單位(如德國IPT、日本JAE、蘇俄AI等)雖積極在進行研究，但是其研究結果尤其是詳細之加工參數部份對外發表的並不多。故積極研究提升我國超音波鑽孔加工之相關技術實屬當務之急。



1.4J/cm<sup>2</sup> (5Hz/200shots)    2.1J/cm<sup>2</sup> (5Hz/200shots)    2.4J/cm<sup>2</sup>  
(5Hz/200shots)

圖 1.1. 以準分子雷射加工玻璃時於不同能量密度對加工幾何形狀的影響

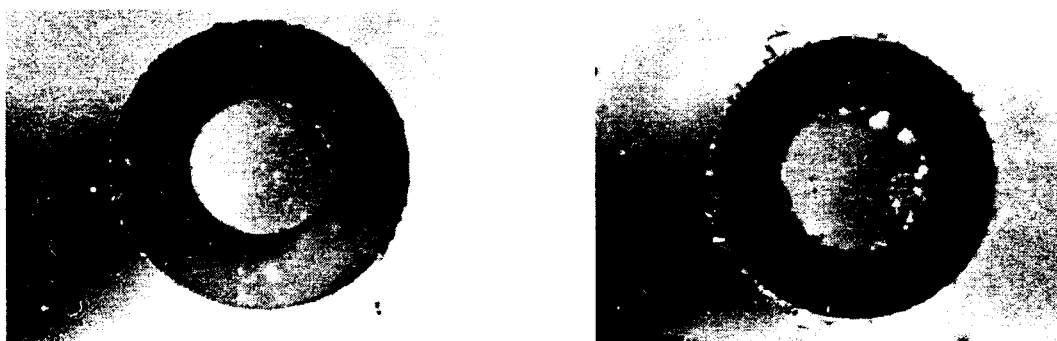


10Hz

5Hz

2Hz

圖 1.2. 以準分子雷射加工玻璃時不同脈衝頻率對加工後表面殘留物之影響 2.4J/cm<sup>2</sup>



(a)

(b)

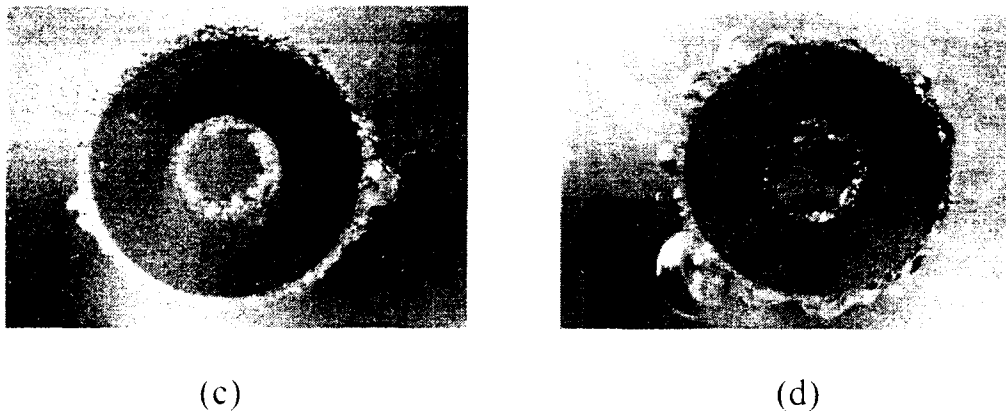


圖 1.3. 以超音波加工 Zerodur 時不同加工條件所得之表面特徵(a) #800, power percentage: 10%, feedrate: 0.8mm/min (b) #800, power percentage: 20%, feedrate: 0.8mm/min (c) #200, power percentage: 20%, feedrate: 0.8mm/min (d) #200, power percentage: 30%, feedrate: 0.8mm/min

微超音波加工( Micro ultrasonic machining, MUSM )是目前適用於微機電系統( Microelectro-mechanical system, MEMS )製造方法中唯一非熱( non-thermal )、非化學( non-chemical )及非電( non-electrical )的加工方法，所以對傳統的微細加工法，如：微放電加工( micro-EDM )，LIGA和準分子雷射鑽孔的限制，微超音波加工法可說是有最大的應用彈性。然而，國內對超音波鑽孔加工之相關研究並不多。鑑於我國近年來光電科技發展迅速，工業界尤其是國防工業對系統之精度要求也日漸嚴苛；繼續朝著精、薄、短、小、準之目標邁進。而光電系統中要求在脆性材料上鑽深而小且尺寸精度高的孔的機會也會隨光電科技之蓬勃發展而增加。故積極研究提升我國超音波鑽孔加工之相關技術實屬當務之急。

本計畫之目的在研究以微超音波加工法加工石英玻璃、

Zerodur、矽單晶等脆性材料時，工件之各項幾何尺寸精度及刀具磨耗與加工參數如進給率(feedrate)、粒度(grit size)、切削液等間之關係。材料之變形機構、加工表面及次表面之顯微組織變化、加工表面及次表面之破壞模式亦將探討以奠定日後在 2-D 和 3-D 形狀 MEMS 加工的基礎。

此外對超音波加工機之各項精度誤差對工件之各項幾何尺寸精度可能造成之影響進行分析。進而由分析所得數據對超音波加工機欲進行精密之微超音波加工時所必須改進之部份提出概念設計。而在第二年之計畫中則將對概念設計之微超音波加工機進行實體細部設計、製作及加工測試並於第三年之計畫中配合微精密平台之研製及刀具設計以進行 3D 之 MEMS 加工。

## 2. 超音波加工

### 2.1 超音波加工原理

#### 2.1.1 前言

超音波加工(ultrasonic machining)是以超音波震動輔助磨粒(abrasive)進行切削之加工過程。以使用磨粒之方式，超音波加工可分為自由磨粒(一般簡稱超音波加工-UM/USM, ultrasonic machining)(見圖2.1)及固定磨粒(即迴轉式超音波加工 -- RUM, rotary ultrasonic machining))(見圖2.2)兩大類。

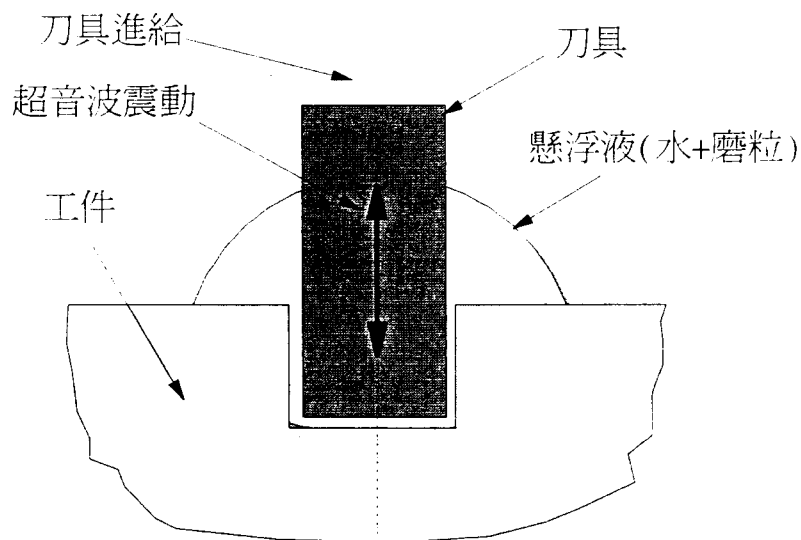


圖2.1 (自由磨粒)超音波加工—UM

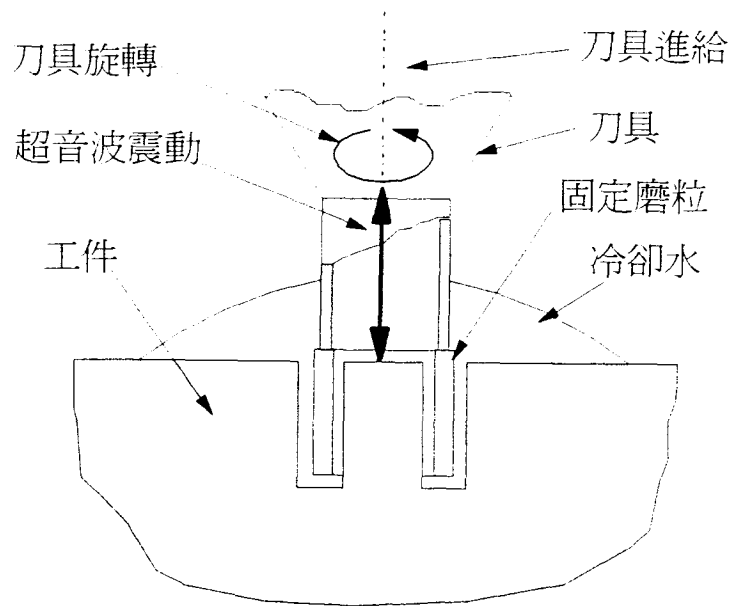


圖 2.2 旋轉式(固定磨粒)超音波加工--RUM

由於超音波加工時刀具以16-25kHz之頻率0.0125-0.075mm 之震幅震動；而刀具震動會使刀具上(固定磨粒超音波加工)或刀具與工件間(自由磨粒超音波加工)之懸浮液(slurry, 水及磨粒之混合液)中的磨粒以高速衝擊工件。由於磨粒的體積很小，其與工件之接觸面積亦很小導致很高的接觸壓力(見圖2.3)。由高速及高接觸壓力造成很高之衝擊應力，致使工件(脆性材料)表面形成微碎屑(micro-chipping)而達成材料去除之目的。