

硬脆難削材料加工利器-- 超音波主軸技術發展與應用



報告人：黃韋倫

單位：精密機械研發中心

零組件開發部

時間：2015.03.04

大綱

1. 為甚麼需要超音波加工
2. 超音波主軸簡介
3. 超音波加工機與應用
4. 結論

1. 為甚麼需要超音波加工?

※工具機市場的改變

—由汽車進展到3C、光電、生醫與航太…等產業

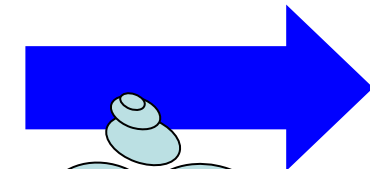
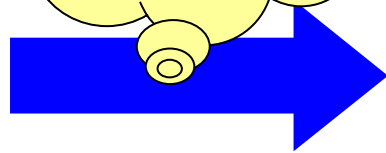
以前

鋁、鋼、鐵、銅
材料

單純構型
實心零件



加工材料
性質不一樣



工件型態
精度更嚴苛

現在

脆硬材料 (玻璃、陶瓷、
cfrp...)

高碳鋼(模具鋼)、高溫合金
非鐵合金 (鈦、鉻鎳合金...)

中空、薄壁、複雜孔位等零件



齒模雕刻(陶瓷)



藍寶石玻璃



Cfrp材料

生產需求與特性的改變促使工具機與切削技術進展!!

脆硬材料切削加工的困難點

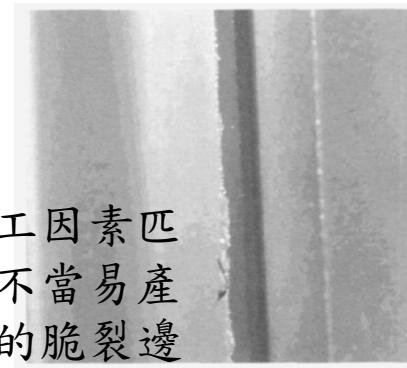
以傳統切削硬化玻璃為例：

- 嚴格的機台性能
- 精選的刀具/加工條件
- 刀具磨損快
- 鑽孔速度慢/加工時間長
- 生產成本高

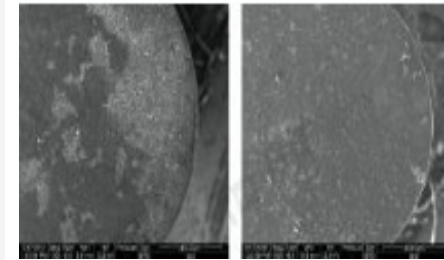


- 高剛性機台結構
- 60,000rpm的高速主軸
- 低慣量高扭力馬達

國產玻璃面板加工機[15]



加工因素匹
配不當易產
生的脆裂邊



PCD刀具
磨損快速

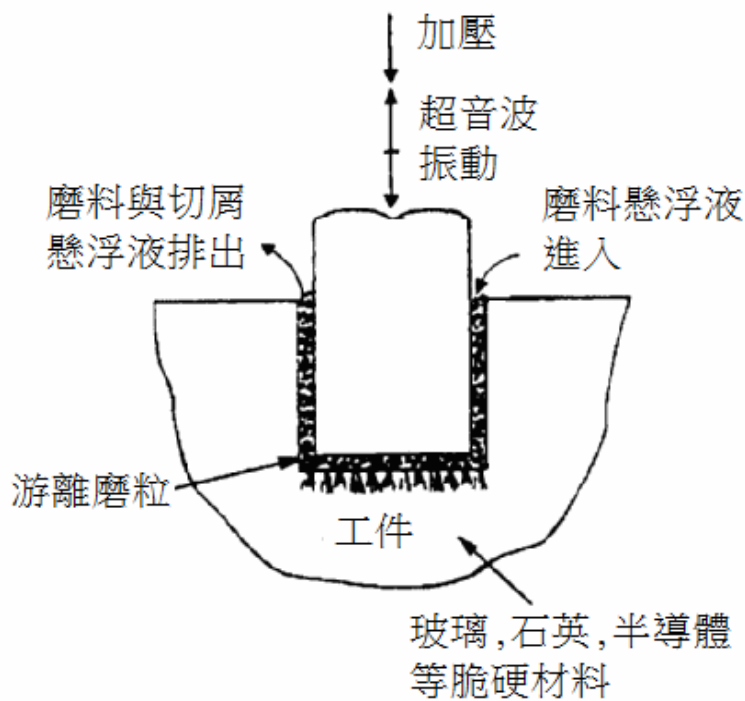
玻璃越硬+硬化層越深加工越困難，而許多的研究與實例顯示超音波加工是脆硬材料加工的有效方法。

超音波加工簡介

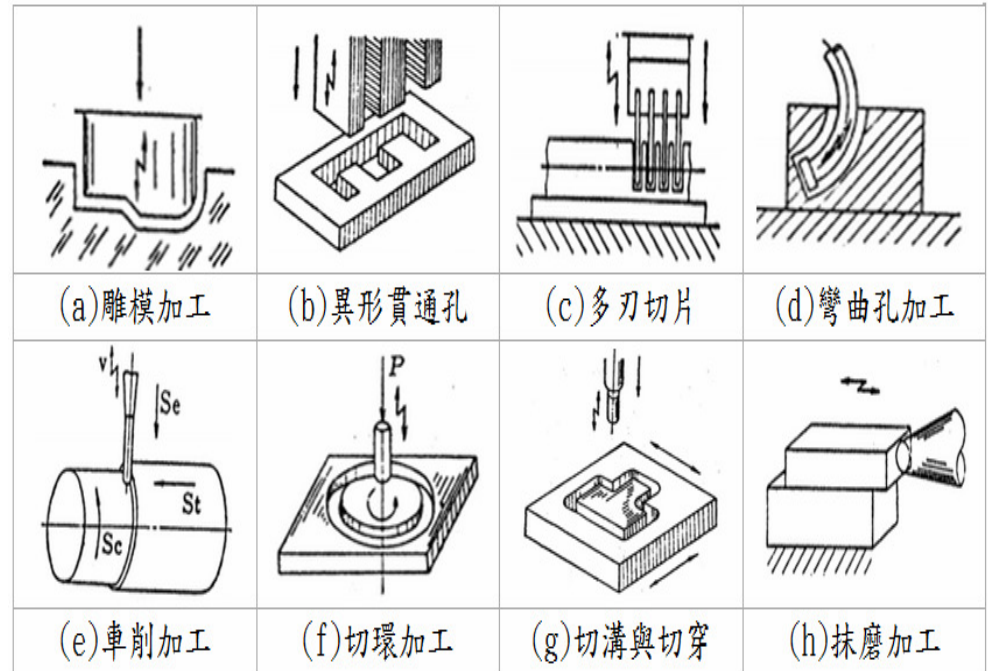
音波是人耳能感受到的一種縱波，高於16KHz，稱之為超音波。超音波加工大致可區分為：固定式超音波加工(USM)、旋轉超音波加工(RUM)、超音波複合加工(如：超音波放電加工)。

※當頻率 $\approx 10\text{KHz}$ 的振動會產生可聽見的噪音，因此一般不予採用。

◎固定式超音波加工



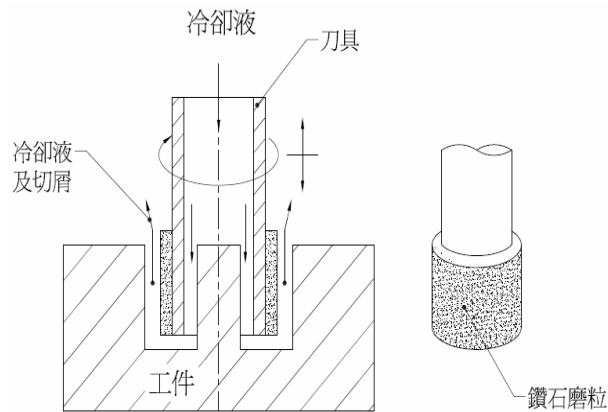
固定式超音波加工示意圖



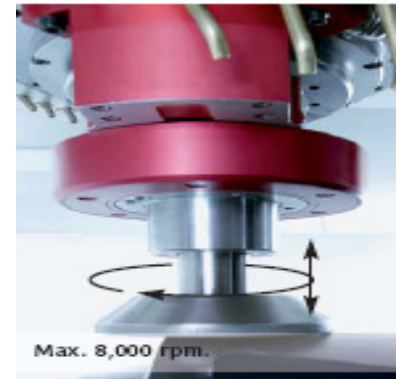
各種固定式超音波加工應用示意

旋轉超音波加工

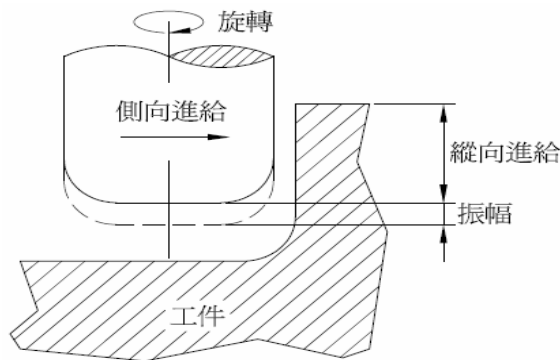
- 刀具旋轉運動+高頻振動來進行切削。
- 加工時**刀具上磨粒**藉由**錘擊、磨蝕與撕扯**等機制把工件粉碎成很小的微粒，從工件去除。
- 藉由冷卻液，將去除的材料微粒迅速帶離加工區。
- 切削方式包含：**鑽孔、深進給加工、層切加工**等。



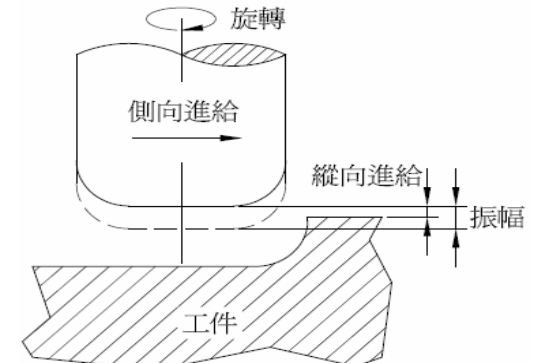
旋轉超音波鑽孔



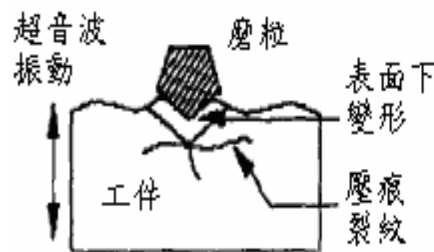
DMG / MORI SEIKI 公司超音波主軸



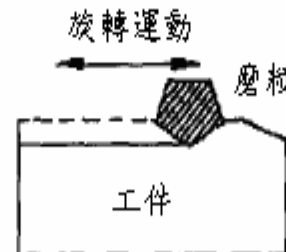
深進給加工



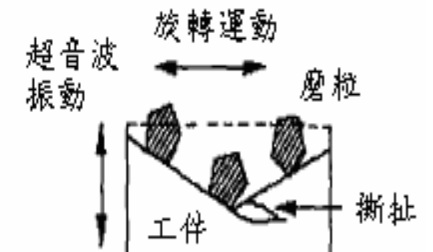
層切加工



(a) 錘擊

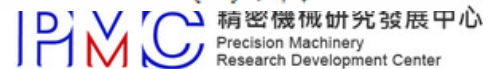


(b) 磨蝕



(c) 撕扯

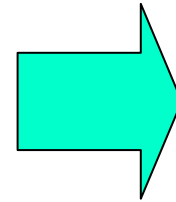
旋轉超音波加工中材料去除機制



旋轉超音波加工技術優點

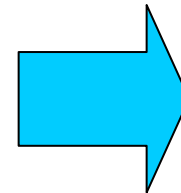
與傳統切削加工比較，旋轉超音波加工具有以下優點：

- 切削力的大幅減少(刀具磨耗減少)
- 切削區域溫度的降低
- 切削液效用的充分發揮
- 切屑的迅速移除



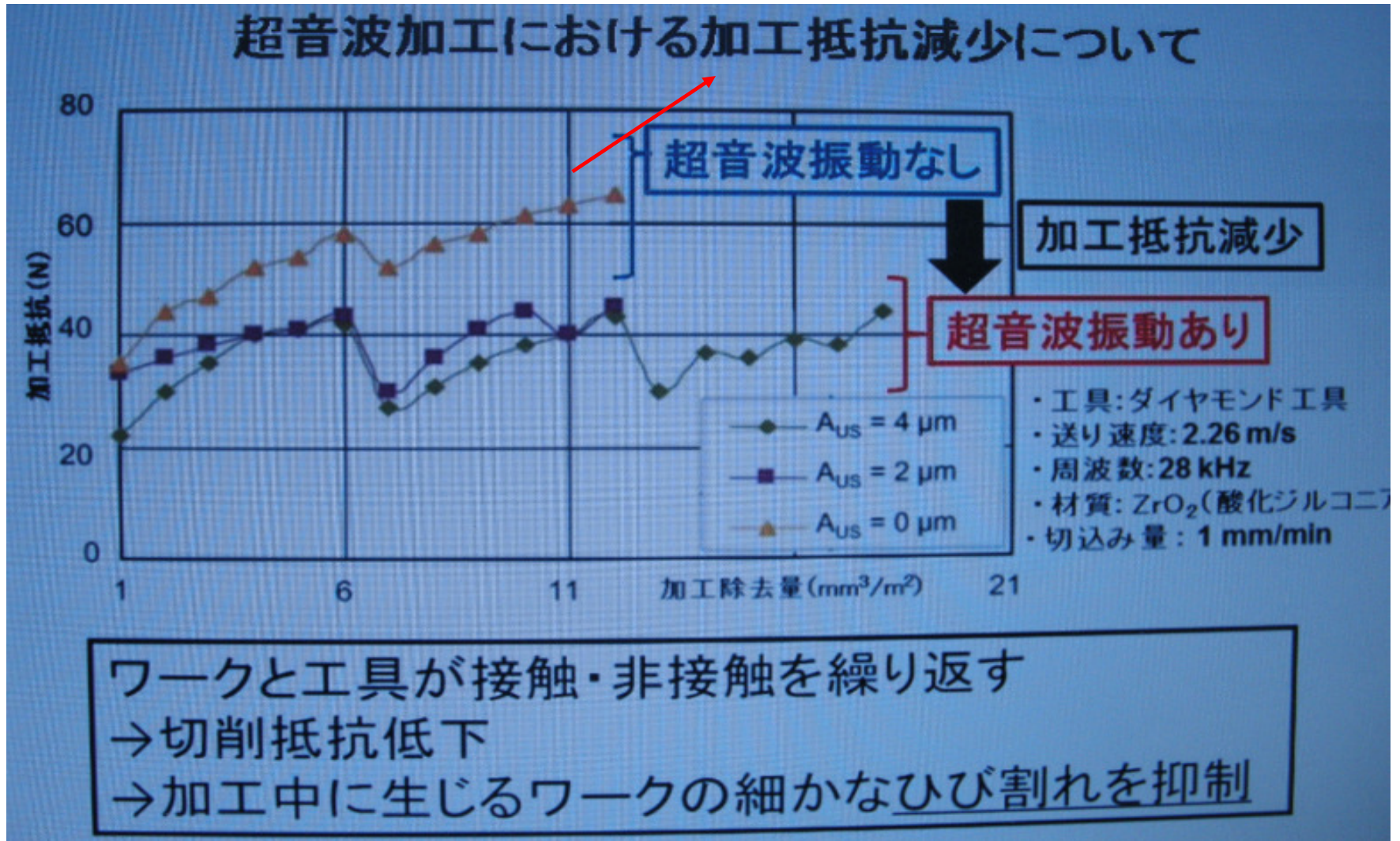
提升刀具壽命
與切削效能，
適合脆硬材料
的切削。

- 刀具(或工件)的有規律強迫振動取代了刀具和工件無規律的自激振動，達到以振制振的功效。
- 超音波加工有提升刀具-工件間整體靜剛性的效果，結合較小的切削力(適合薄壁工件的加工)。



提升工件精度
與品質，達到
高質化的切削
效果。

DMG / MORI SEIKI 公司所展示超音波加工特徵

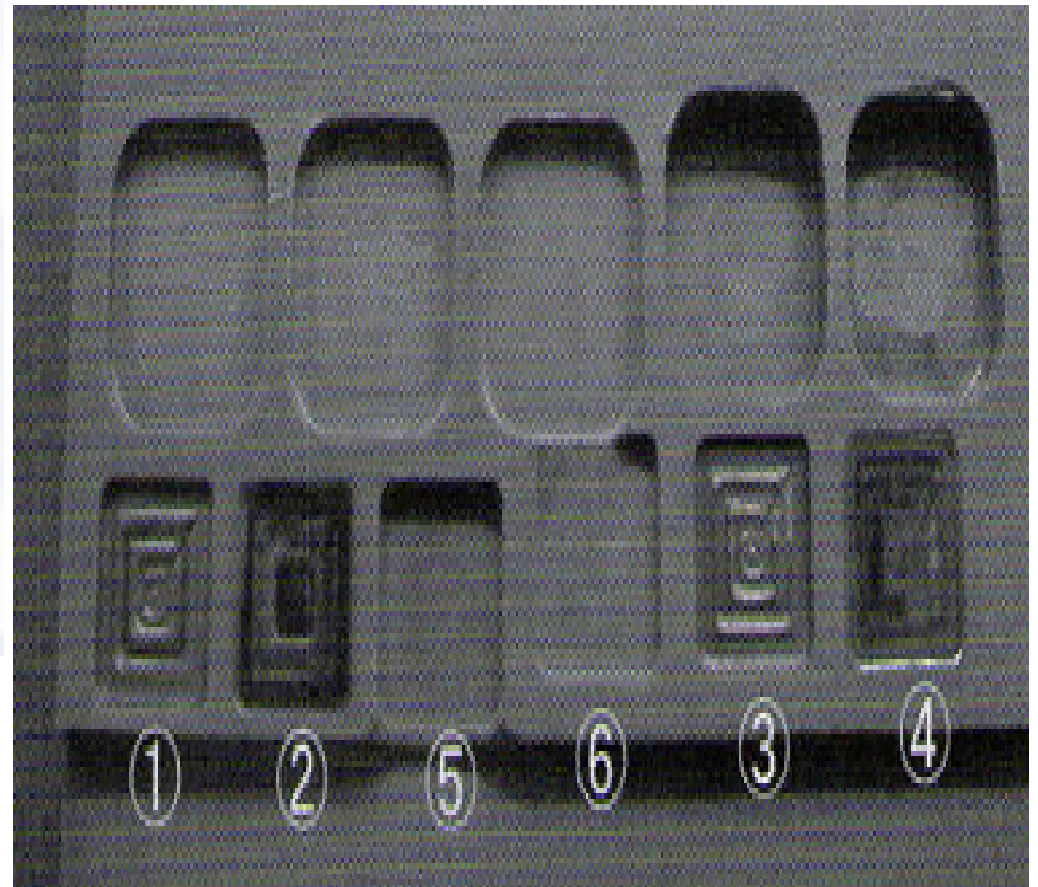


在相同的切削條件下，超音波加工的切削阻抗低於傳統切削，因此其刀具磨耗低於傳統切削，更適用於玻璃等硬脆材料加工。

有無超音波輔助振動切削的比較

超音波振動の有効性確認実

被削材	Si ₃ N ₄
加工内容	座ぐり加工 □5mm×深さ1mm
使用工具	MT-φ1-D64 (#240) *Schott製
加工条件	切り込み0.005mm, F150mm/min.
超音波ON	⑤参照
加工深さ	0.89mm
工具摩耗量	0.097mm
超音波OFF	⑥参照
加工深さ	0.65mm
工具摩耗量	破損



Ø1電鑄刀具(磨粒#170) 加工結果

超音波ON	①、③参照
加工深さ	0.38mm
工具摩耗量	破損
超音波OFF	②、④参照
加工深さ	0.06mm
工具摩耗量	破損

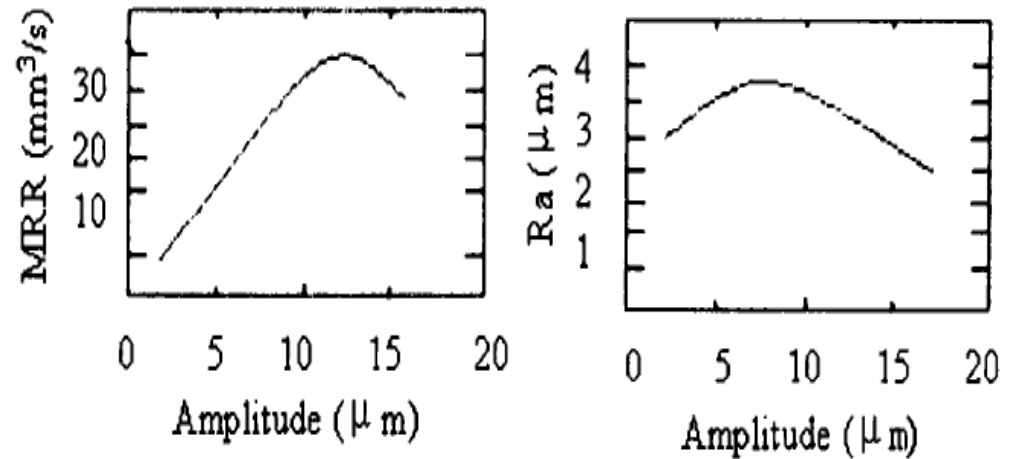
氮化矽(Si₃N₄)搪孔

From: ターヴァイネン さゆり, ハイブリッド型脆性材加工機「龍牙」(Ultrasonic Milling Center), 機械と工具, 2012年6月。

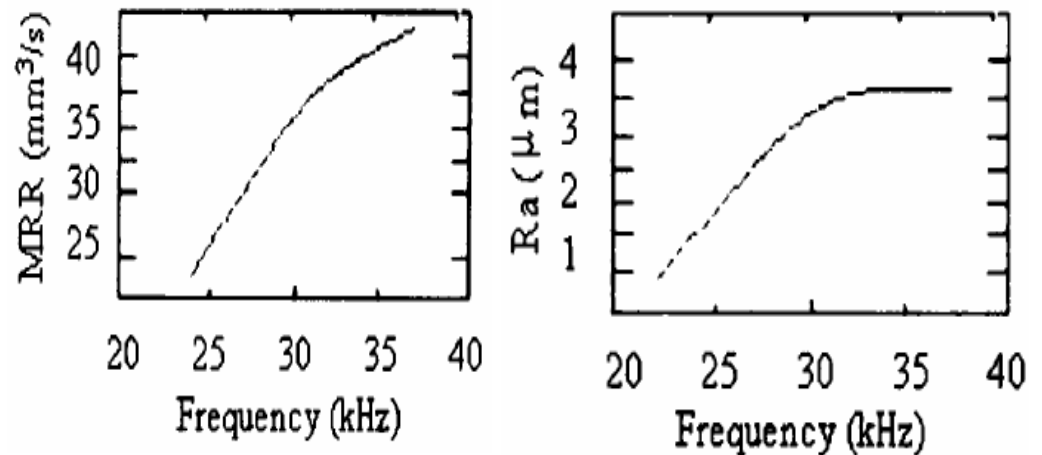
影響超音波加工的重要因素

● 影響切削品質/效能的因素

- 超音波 (振幅/頻率)
- 主軸轉速
- 刀具 (粒度/材質/形態)
- 進給壓力/進給率
- 切削液
- 夾治具(夾持穩固與否)
- 機台特性(剛性與穩定性)



振幅對材料去除率與表面粗造度的影響



頻率對材料去除率與表面粗造度的影響

- 其中超音波主軸(振幅、頻率、轉速)與刀具(粒度、材質、形態)對工件加工結果有相當重要的影響。

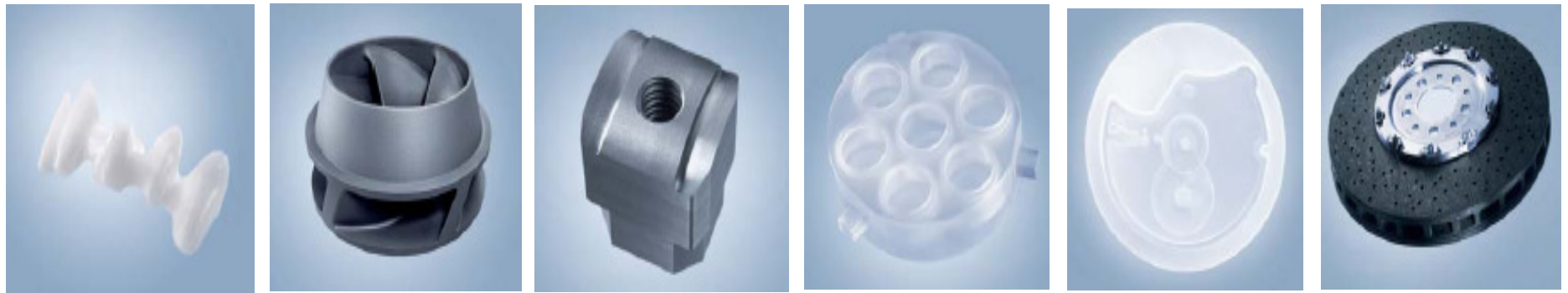
From: 曾偉民, 華僑大學博士論文, 2006

超音波加工的應用範圍

※DMG / MORI SEIKI 型錄所提供適合超音波加工的材料種類



適合超音波加工的產業...



牙科/醫療 配件/泵/紡織 模具/工具機/刀具 光學/光電 精密機械/半導體 航空/汽車

超音波加工在牙科應用

※牙齒製造工藝的變革

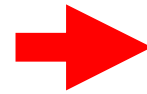
鑄造（脫蠟法）

- 尺寸精度：5‰
- 10mm長度的精度約0.05mm
（相當於1根頭髮絲直徑，在天然牙齒能夠感受到的程度範圍內）
- 變形及尺寸難以控制
- 印模、鑄造與脫模等...共3-5天時程

根據資料：

義齒材質：鋁/鈦/鈷/鉻合金

- 硬質氧化鋁：超聲波加工（DMG Ultrasonic 20），10分鐘可加工1顆牙
- 純鈦、鈷鉻合金：銑削加工，20分鐘可加工1顆牙



切削加工（高精度）

- 尺寸精度：0.01mm
- CAD/CAM資料流程
三維掃描器→電腦輔助製造軟體→加工中心



DMG超聲波加工機

From:董凌雲，全球製造大趨勢及我們的差距，瀋陽機床公司簡報資料，2010年6月。



2. 超音波主軸

固定式(不旋轉)的
超音波主軸

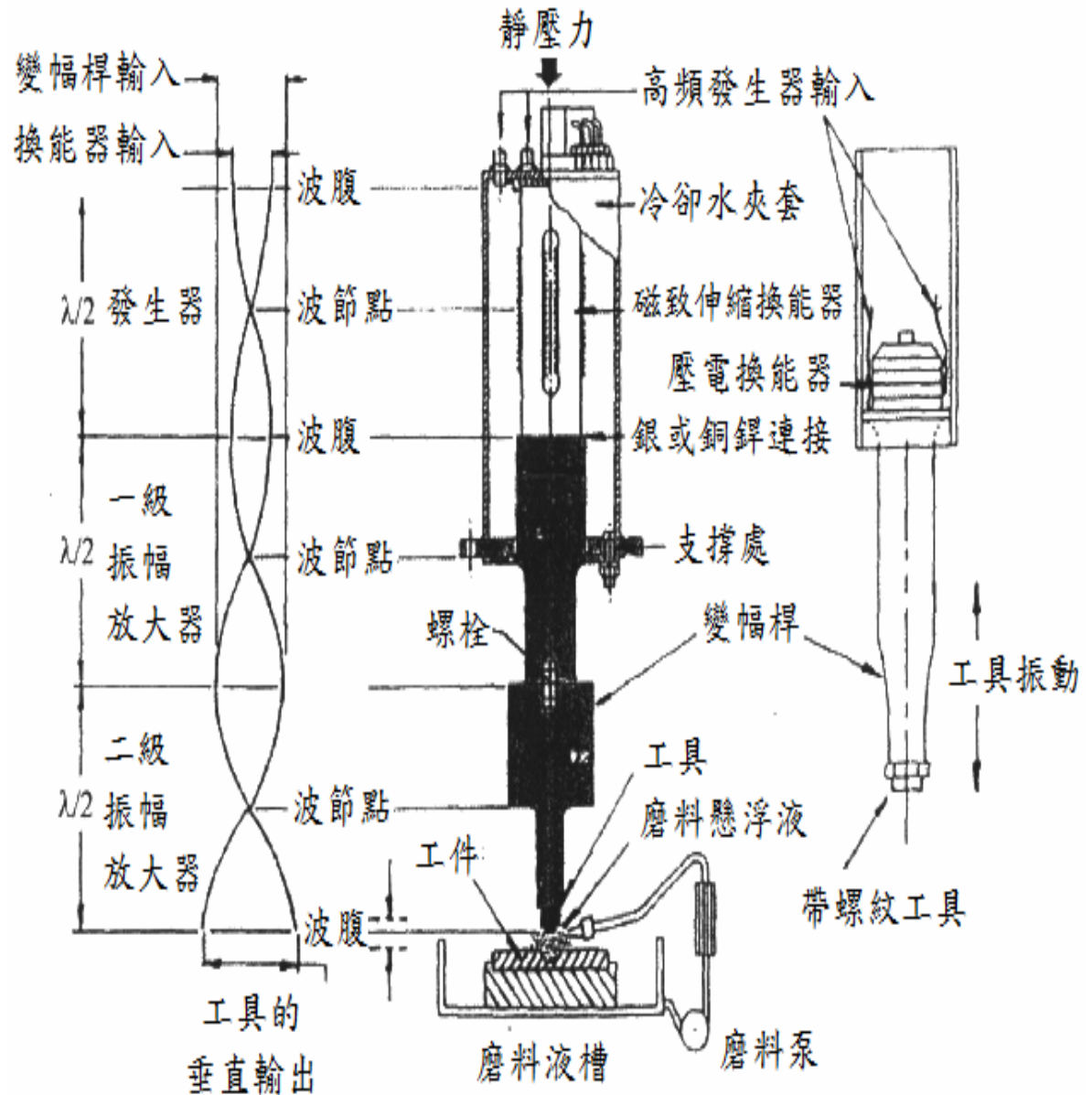
固定式超音波主

軸，其結構包括了：

主軸機構(主軸殼體等
元件)和超音波振動裝
置兩部分。

超音波振動裝置

由：**磁致伸縮(或壓電)
換能器、變幅桿、工
具**等部分組成。



固定式的超音波主軸應用例



超音波穴明機 USD-300C型, USD-300CS型
ULTRASONIC DRILLING MACHINE MODEL USD-300C, USD-300CS

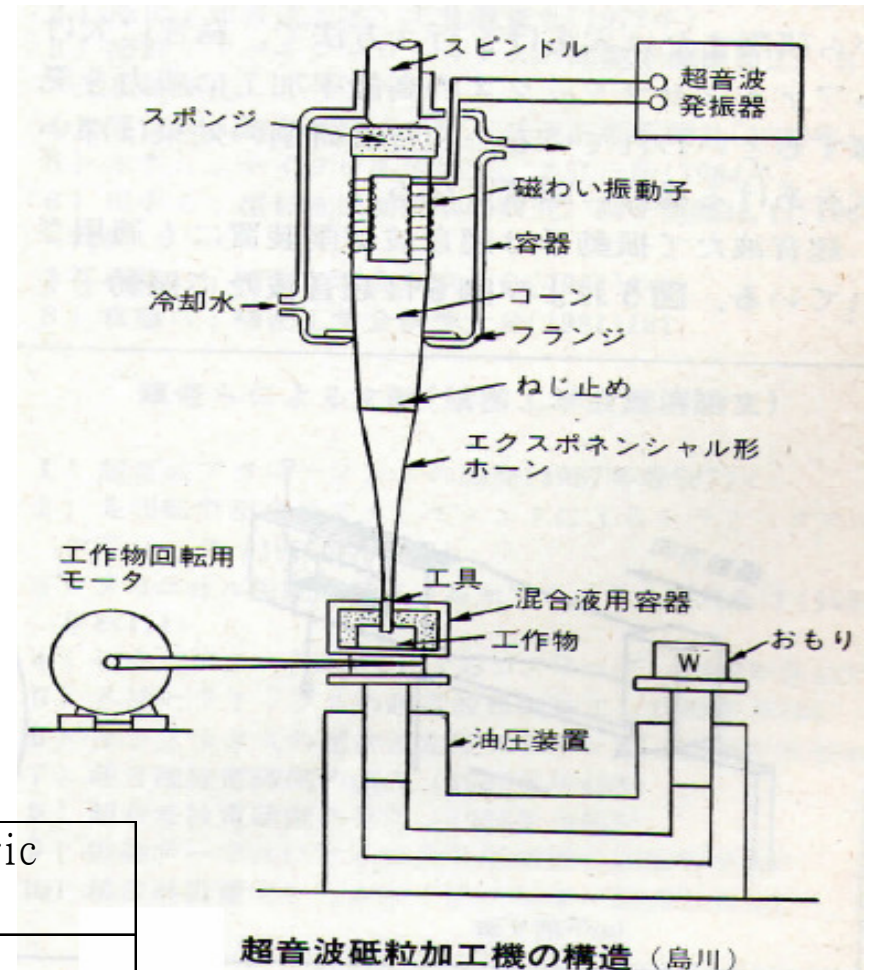


IMAHASHI公司的超音波磨粒加工機



克硬公司的LUD-200B超音波加工機

振動子	:	Piezo-electric vibration
頻率	:	200 KHz
出力	:	200 W
加工面積	:	Max. 10 mm
機台尺寸	:	500x400x700 mm



超音波砥粒加工機の構造 (鳥川)

採用固定式超音波主軸
的加工機結構示意

旋轉超音波主軸

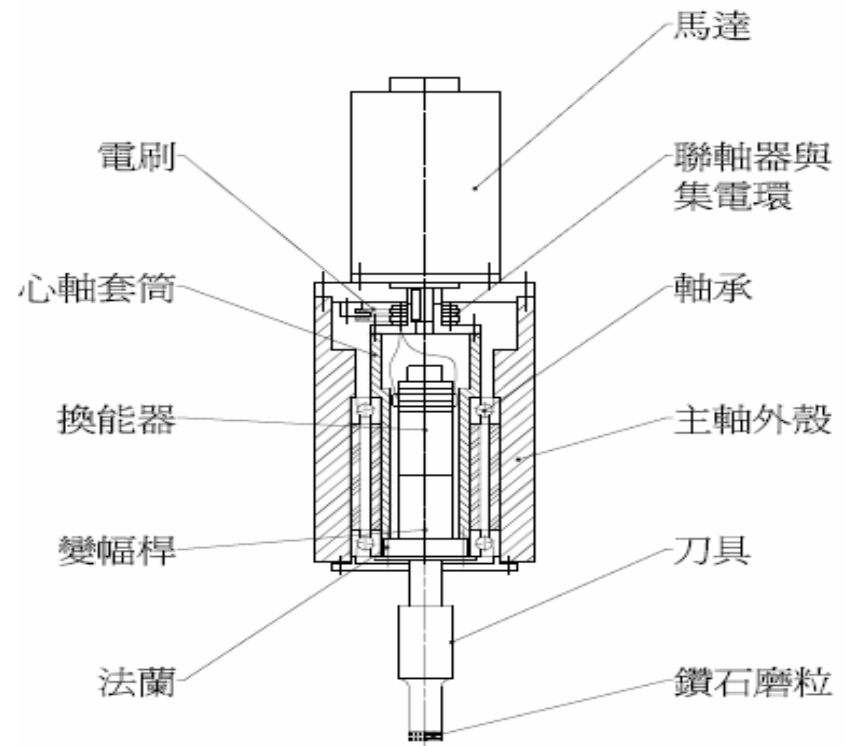
旋轉超音波主軸則是在傳統固定式主軸配置上再添加了旋轉與中央出水等功能。

※技術重點：

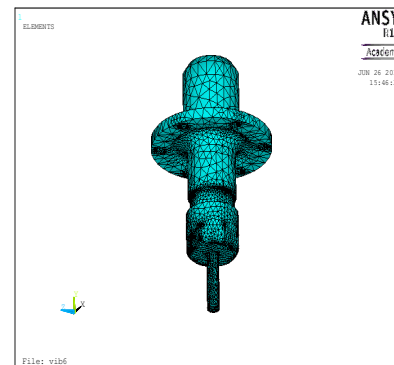
- 變幅桿(振型與頻率)設計
- 設計目標為刀尖振幅最大，刀把與主軸固定端須為節點。
- 在高速旋轉過程中傳輸足夠電流給予主軸或刀把內部的超音波換能器，藉此產生高頻振動等等。

※發展趨勢：

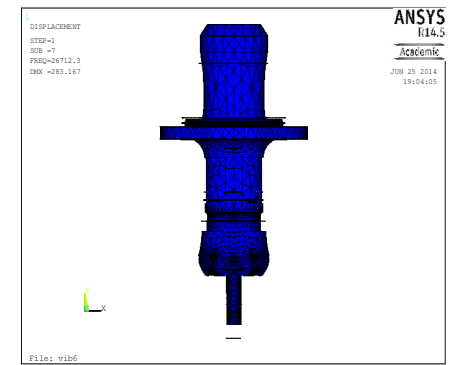
主軸轉速高速化、大型或小型化主軸、附加功能、自動換刀的超音波主軸等等。



炭刷導電的旋轉超音波主軸



變幅桿+刀具的
FEM模型



變幅桿+刀具的模態(縱向振型)

手動換刀的超音波主軸(例)

スピンドル回転数 10,000rpmを実現
セラミックスや硬脆材などの微細加工に



- 〈特徴〉
- 1) 超音波スピンドルで回転数 10,000rpmを実現
 - 2) 研削時の目詰まりや切りくずのはけが良い。
 - 3) 加工抵抗が低減され、加工変質層が生じにくい。
 - 4) 加工仕上がり面が良くなる。
 - 5) ツールの長寿命化が図れる。

型式	JJS38-110AA
最高转速	10,000rpm
發振周波數	38.9KHz
最大振幅	6 μm
重量	24.1kg

歐立美克(日)的超音波主軸

自行開發的手動換刀型式 超音波主軸



加工最高转速	6,000rpm
音波產生器最大功率	1KW
超音波頻率範圍	20/35 KHz
振幅	5-8 μm
特殊配備	採用中央出水系統



材質:石英
转速:3,000RPM
切削進給:F100
切深:0.05mm
刀具長度磨損 0.01mm

自行發展之前一代超音波主軸

可進行自動換刀的超音波刀把與主軸

(1) 自動刀把交換強化機台生產效能

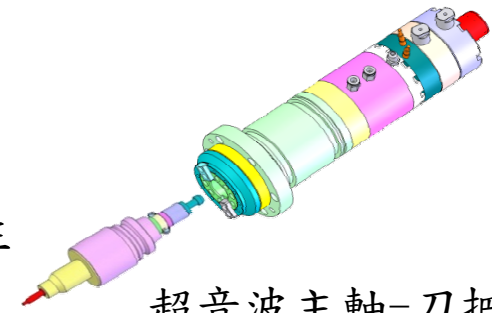
(2) 具超音波切削與傳統切削功能，增加生產彈性

PMC自行開發具自動刀把交換 超音波主軸-刀把

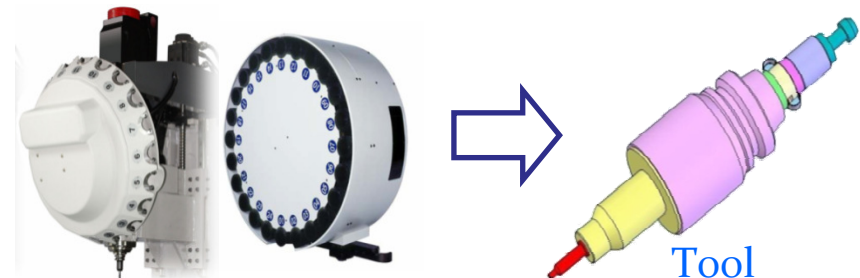
Patent No: M428011



加工最高轉速	10,000rpm
音波產生器最大功率	1KW
超音波頻率範圍	20/30/35 KHz
特殊配備	可自動換刀

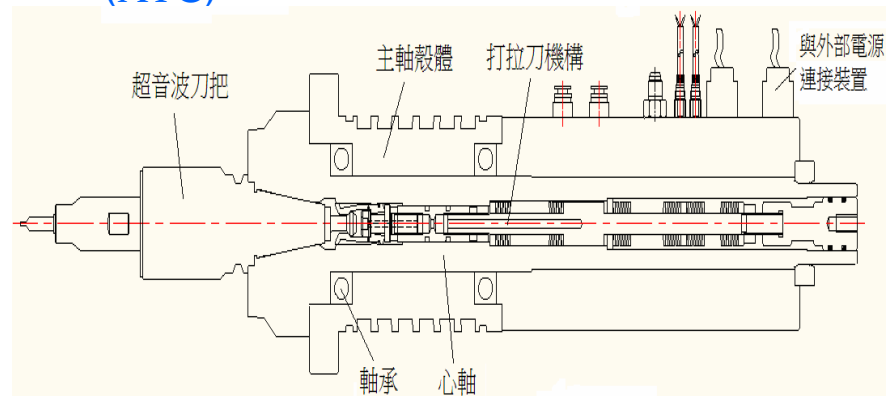


超音波主軸-刀把
以BT介面連接



Automatic Tool Changing
(ATC)

Tool
holder

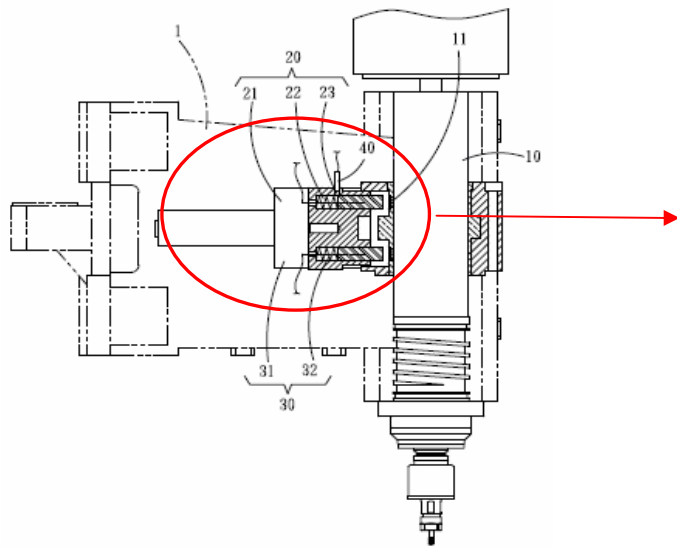


可自動換刀的超音
波刀把與主軸示意圖

複合式超音波主軸

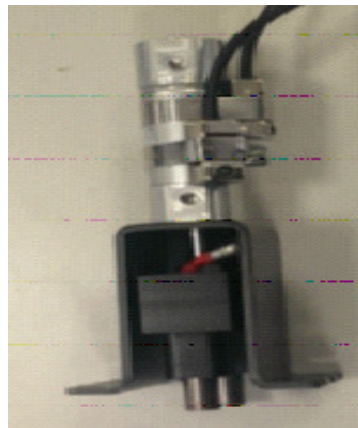
因應主軸兼具一般高速切削與超音波加工的複合加工需求，發展具碳刷離合機構切換模組的超音波主軸。

主軸超音波加工時，碳刷可藉由離合磨模組作動而接觸導電使刀把進行超音波高頻振動；而主軸在進行一般高速銑削時，碳刷可脫離而不會產生碳刷的接觸磨損，增進主軸的工作效能與延長維護時程。



具碳刷離合機構切換模組
複合式超音波主軸示意圖

(專利案號：103221129)



碳刷離合機構
切換模組實體



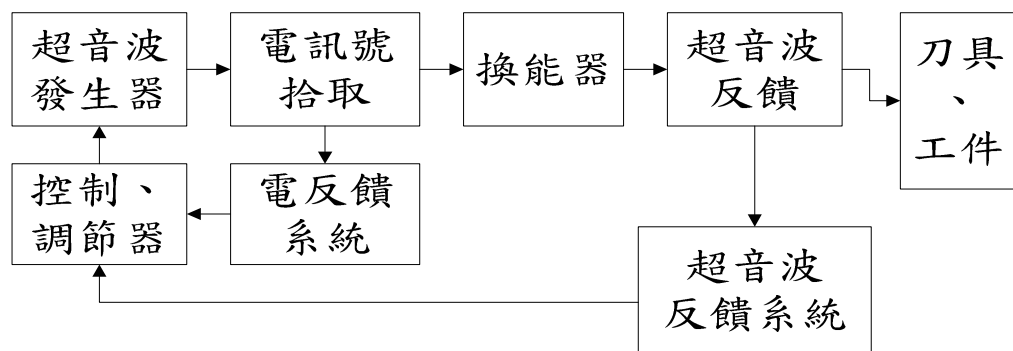
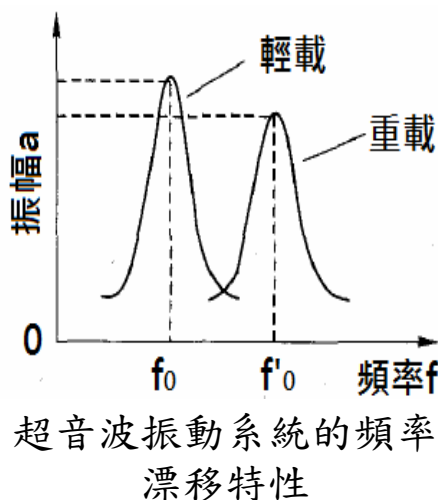
複合式超音波主軸

具有超音波開啟與關閉的複合功能
超音波ON最高轉速：10,000rpm
超音波OFF最高轉速：15,000rpm

主軸長時間加工的穩定性

超音波加工中的頻率追蹤

在加工過程中，當由換能器、變幅桿、刀具組成的振動系統在外界因素(切削負載變化、工具磨損、換能器發熱)影響下，其固有振動頻率發生變化。



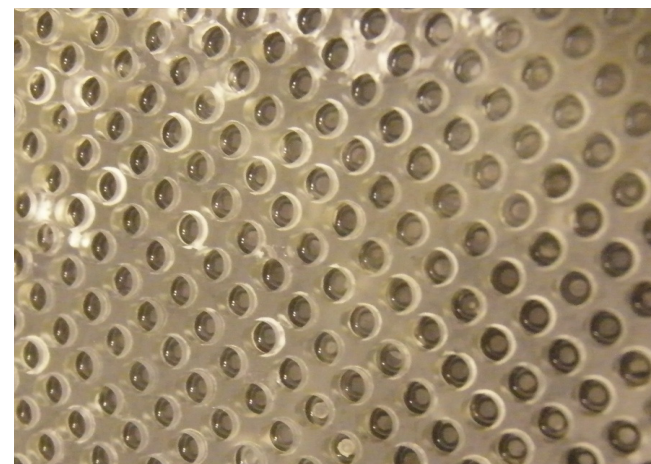
超音波振動系統的頻率追蹤方案

控制系統需能立即發現變化後的固有頻率，及時調整供電頻率與變化後的固有頻率相同，使振動系統始終工作在諧振狀態，以維持振動系統的最大振幅。

材質:玻璃

t=0.5mm 鑽孔: ϕ 1.6mm

孔數:6000 每孔:12秒 共20hrs



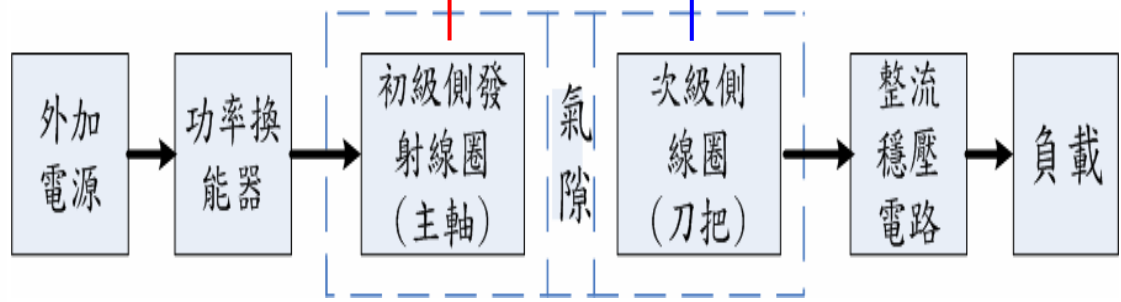
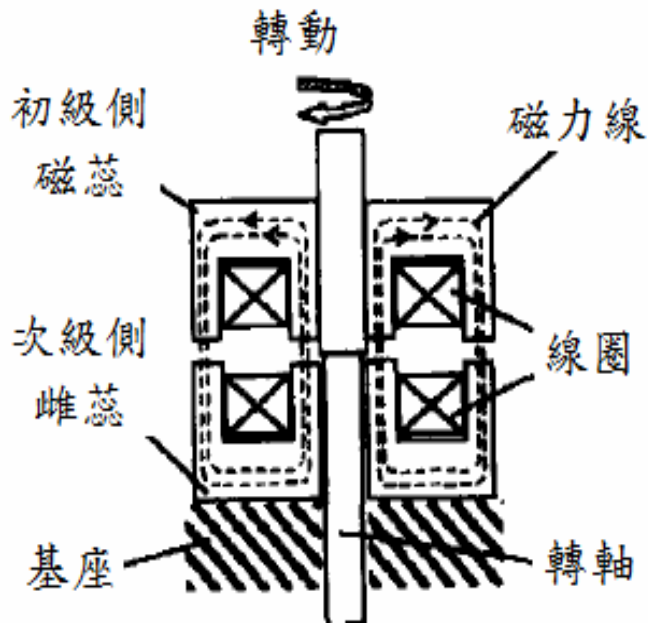
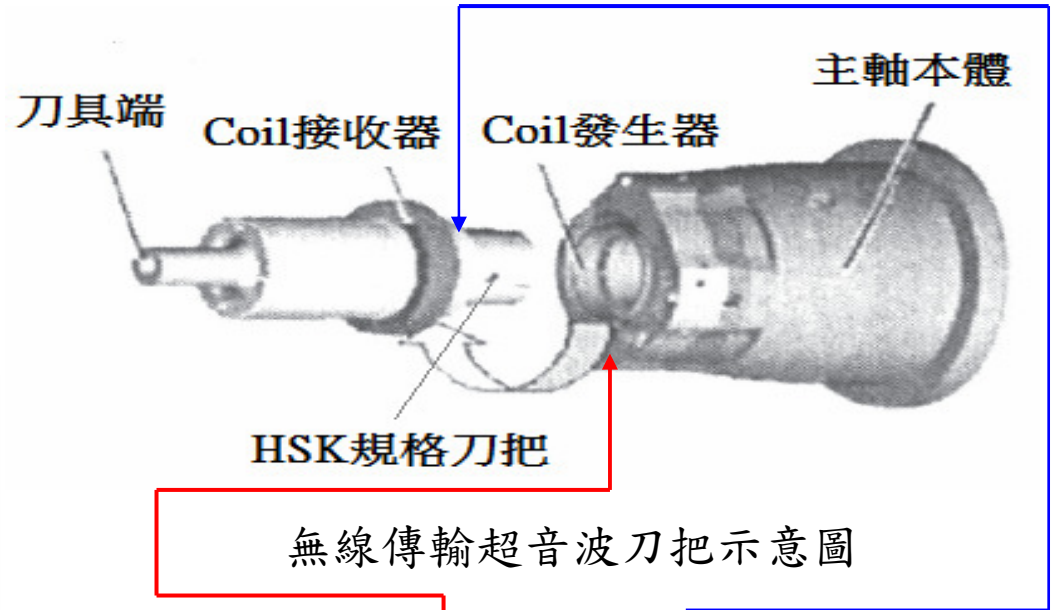
以自行發展的超音波主軸進行鑽孔加工

開發主軸時需考慮到此因素，使主軸具有長時間加工穩定性，並在長時間玻璃鑽孔實切加工中獲得驗證。

高轉速的超音波主軸技術_無線傳輸電能技術

以傳統電刷導電等方式將高壓、高頻交流電流傳入轉動件，容易因碳刷的摩耗等因素而限制了主軸的轉速提升，因此當需要更高速的主軸時，需發展無線傳輸電能技術。

目前使用的無線傳輸電能技術主要是**感應式電能傳輸**技術



感應電能傳輸示意圖

無線傳輸的超音波主軸例

特點: (a) 目前此種無線電能主軸轉速可達40,000rpm

(b) 傳輸效能較滑動電刷為低

(c) 價格較滑動電刷為高

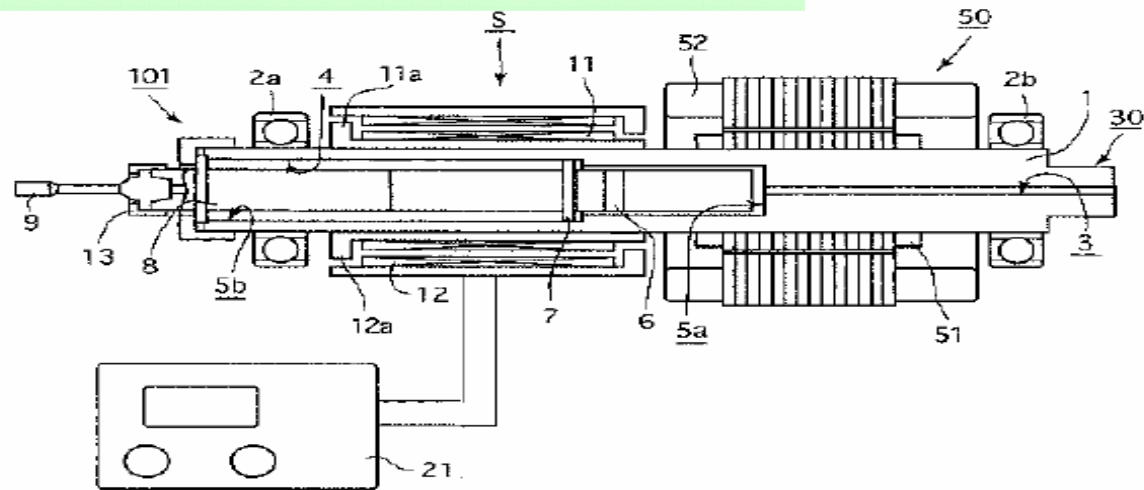
(1) 無線電能傳輸的超音波主軸(JP2007 007810)

6. 換能器

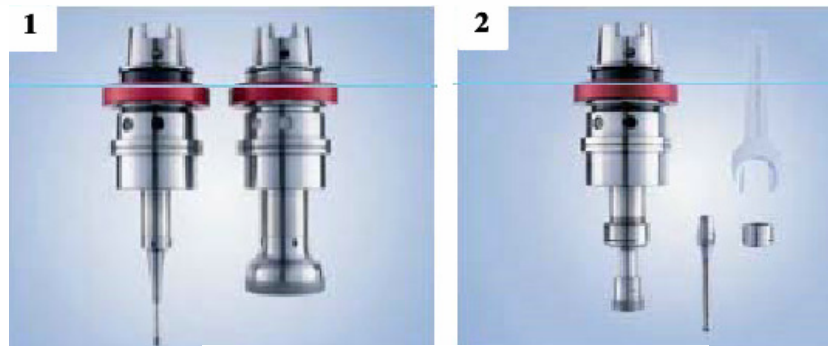
11. 接收線圈

12. 發送線圈

21. 超音波驅動裝置



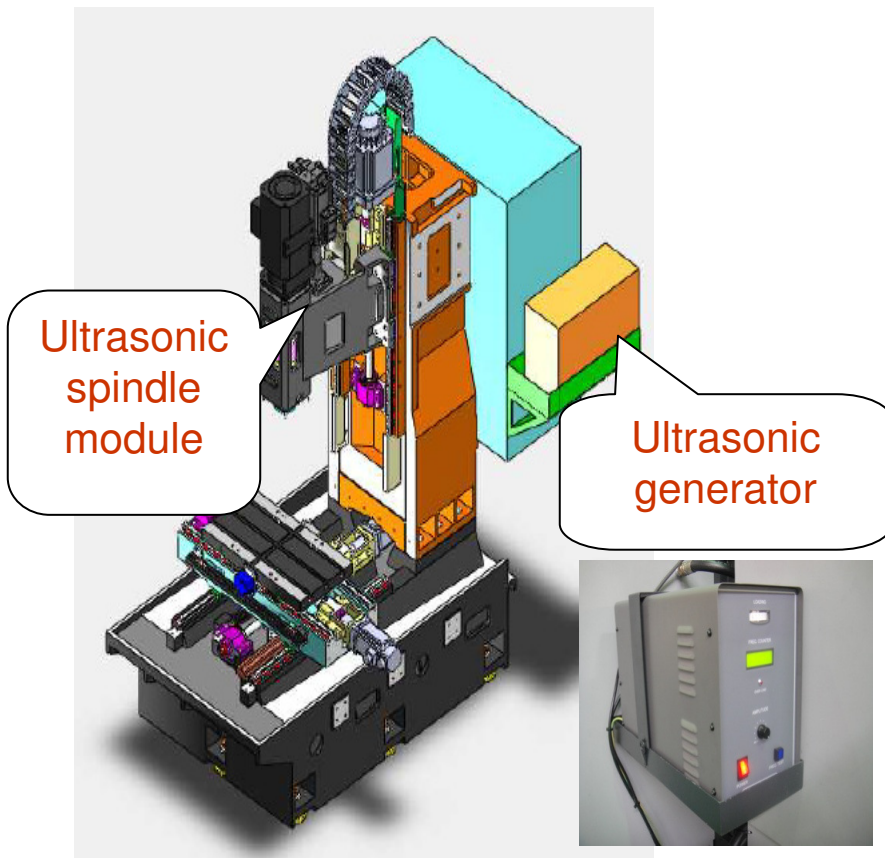
(2) DMG超音波主軸



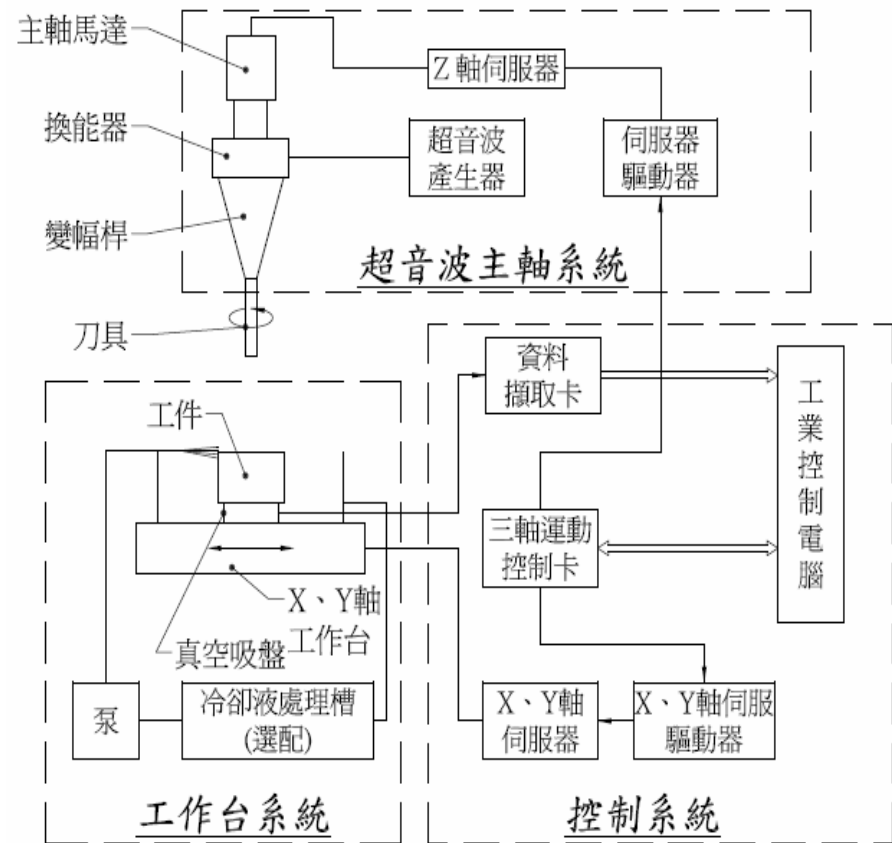
DMG的超音波刀把

3. 超音波加工機與應用

- (1) 超音波加工機主要是由：(a) 超音波主軸系統 (b) 控制系統 (c) 工作台系統再加上床身與相關零組件組成。
- (2) 機台技術發展趨勢：高速化、多軸化、精微加工...等。



超音波加工機示意圖



超音波加工機架構的組成 機械研究發展中心

Machinery Research Development Center

DMG / MORI SEIKI公司的五軸超音波加工機



Maximum dynamics and precision:
Linear technology in X / Y / Z with > 2 g
五軸超音波加工機ULTRASONIC 55



採用HSK63刀把
超音波加工最大轉速18,000rpm

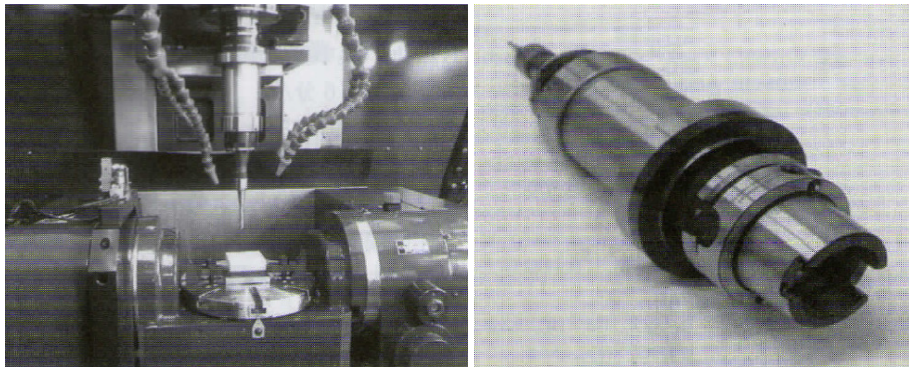
Technology integration: 5-axis ULTRASONIC hard machining and milling with a **maximum of 18,000 rpm** on one machine
Best surface finishes of **Ra > 0,2 μm** and **up to 3-times higher productivity vs. conventional machining**

特徴 Features

- ・ミーリングと超音波加工を一台の機械で連続加工
Continuous machining of ultrasonic machining and milling on one machine
- ・安定性の高い門形構造、5軸すべてにリニアドライブとDDM、スケールフィードバックシステムを採用
Stable bridge-type structure, linear drives and DDMs on all 5 axes, scale feed back system
- ・easy SONIC-Controlにより、周波数を自動識別
Frequency is automatically identified by easySONIC-Control

超音波5軸加工機「龍牙」

Lambda Precision與長島公司合作推出的超音波5軸切削加工機「龍牙」。



主軸與B/C軸的配置 Hsk63的超音波刀把

From:ターヴァイネン さゆり，ハイブリッド型脆性材加工機「龍牙」(Ultrasonic Milling Center)，機械と工具，2012年6月。

- 機台採三軸進給搭配B、C旋轉軸配置。
- 進給軸採用滑動導軌支承，並以鏟花提升機台的剛性。
- 為了提升機台切削能力，採用Hsk63的超音波刀把。

名稱	單位	規格
移動量XYZ	mm	400/430/420
BC軸	(度)	-30°/+105° (B軸) 360° (C軸)
工作台面積	mm	400x400
最大載重	Kg	200
主軸最高轉速	rpm	10,000 (刀把型式HSK-63)
超音波發振器最大出力	W	300
超音波周波數	KHz	17.5~39.5
控制裝置		FANUC31i
機械尺寸	mm	3295x3100x2320

中心

三軸超音波加工機

採用自行發展
主軸的超音波
加工機

主軸轉速10,000rpm
周波數35 KHz
超音波功率1KW



三軸超音波加工機
(可自動刀具交換BT30超音波
刀把與主軸)



主軸轉速
15,000rpm
周波數
28 KHz
超音波功率
500W

鴻碩機械公司
三軸門型結構超音波加工機
(可自動換刀超音波主軸)

TAKESHO(日)超音波加工機

三軸超音波加
工機「音刃」

主軸轉速8,000rpm
周波數40 KHz
具自動換刀功能



超音波微細加工機 UM40V/UM40NSV



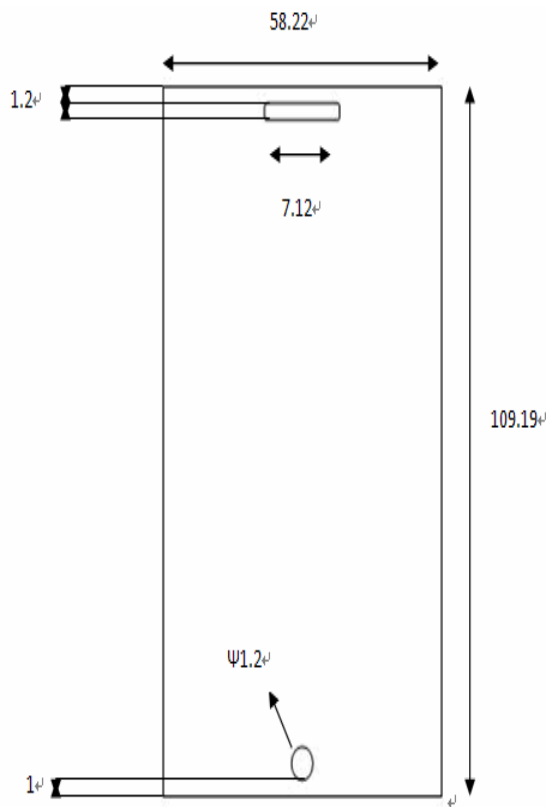
機台進給軸定位精度為
0.004mm，重現性±0.001m

發展中心
it Center

以自行開發超音波主軸進行加工

-- 加工例1_手機玻璃面板切削

強化玻璃：Gorilla， $t=0.7\text{mm}$ ， $D.O.L. > 20\mu\text{m}$ (硬化層)，4“(109.19 x 58.22mm)。



切削玻璃工件面板
工件

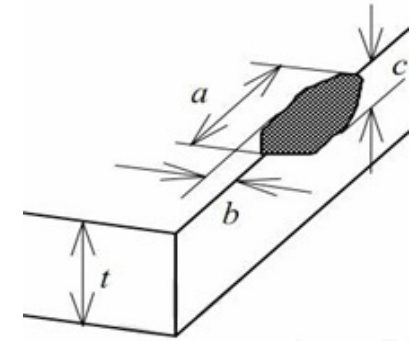
槽(寬1.2x長7.12mm)、洞(φ1.2mm)

★粗銑：鑽石磨棒，φ0.78，Chipping ≤ 0.10mm。

★倒角：鑽石磨棒，φ1.0/φ0.6，Chipping < 0.05mm。

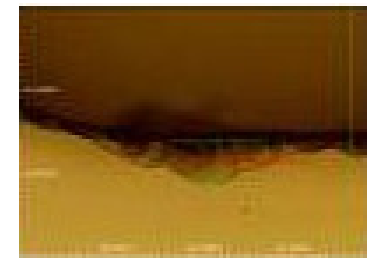


加工之強化玻璃工件

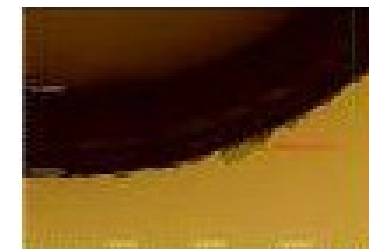


缺陷尺寸示意圖

玻璃邊緣加工後品質
業界要求： $a、b、c$
 $< 0.05\text{mm}$



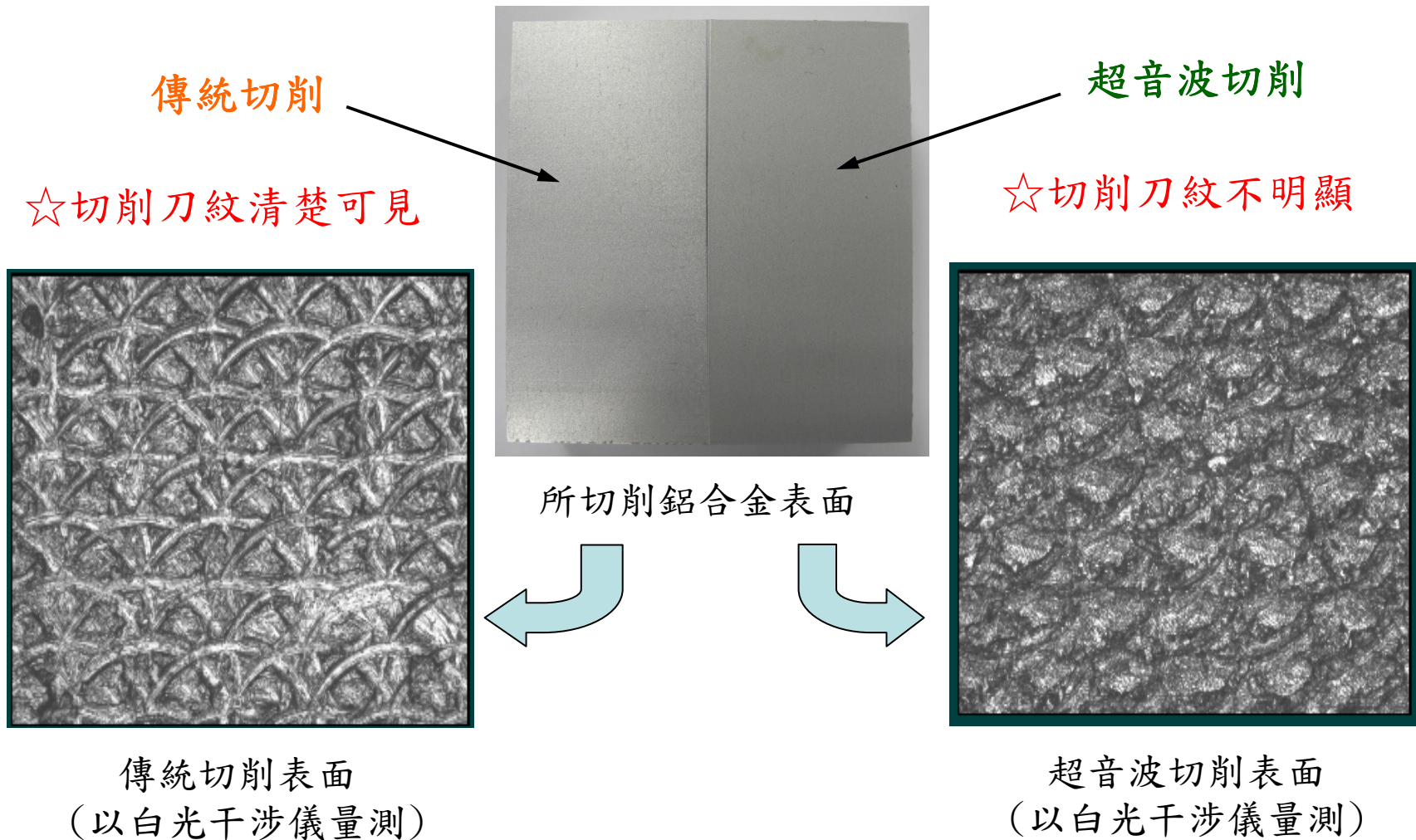
擴孔(倒角前)



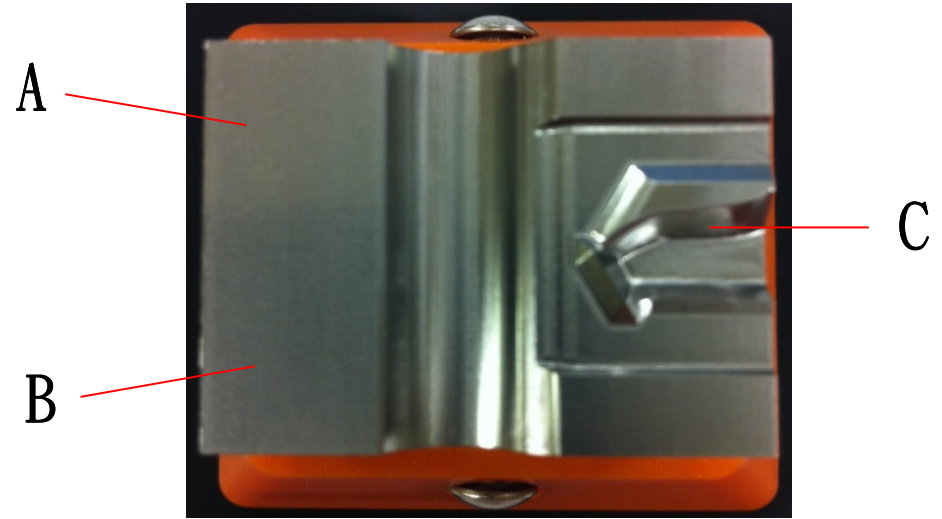
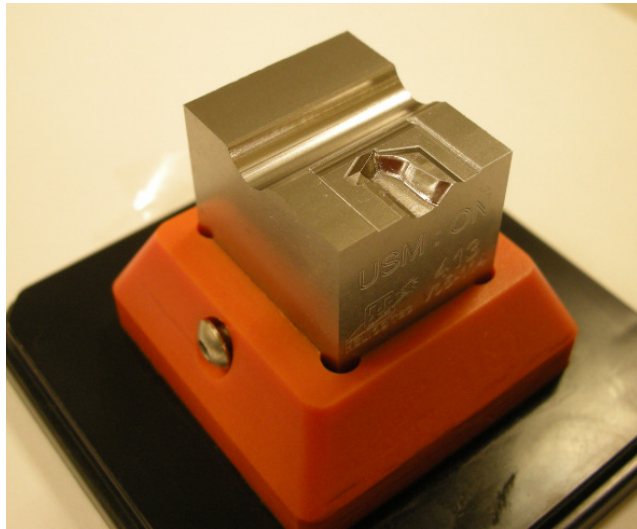
擴孔(倒角後)

加工例2_鋁合金銑削

在相同切削條件下，有無超音波振動的鋁合金表面切削比較

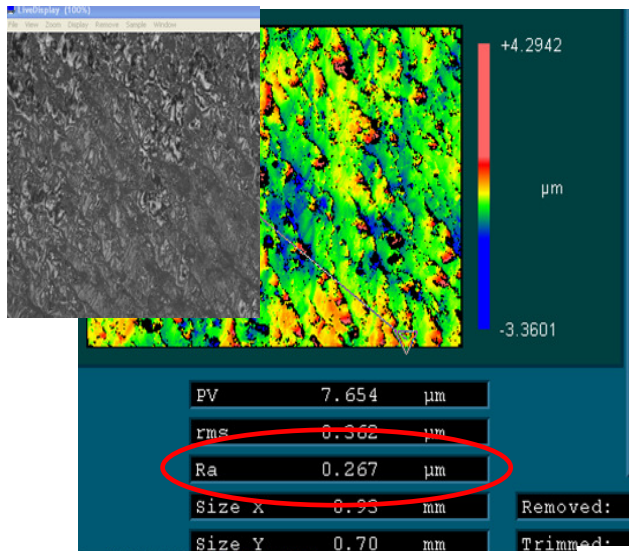


加工例3_脆硬鋼銑削

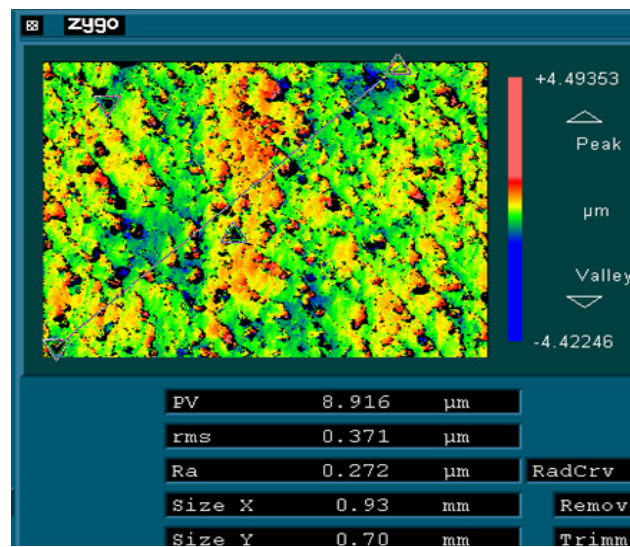


加工件俯視圖與量測位置標示

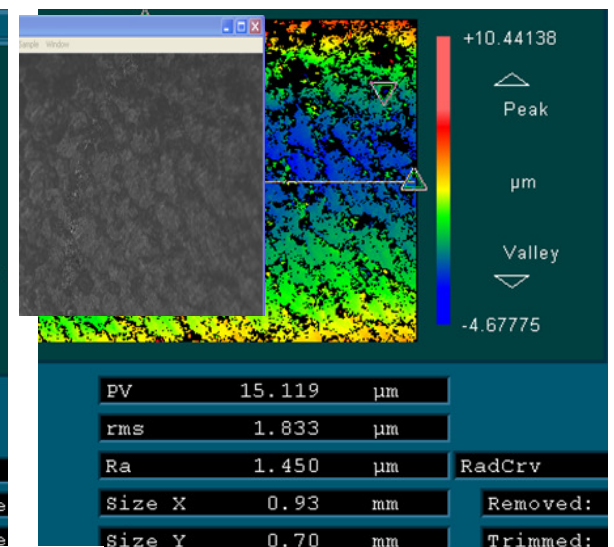
A區域 Ra=0.267 μm



B區域 Ra=0.272 μm



C區域 Ra=1.450 μm



以白光干涉儀量測量測工件表面結果

4. 結論

- 產業對脆硬材料的加工需求日益增加。
- 超音波加工可滿足業界硬脆材料加工需求。
- 與國外超音波主軸產品相較，國產主軸在經濟面上有相當競爭優勢
- 發展高階超音波機台產品與應用技術的環境與時機已逐步成熟。



如何尋求脆硬材料超音波加工
的技術資源與解決方案？

1. 提供高C/P值的超音波主軸
2. 超音波加工機的設計/改裝輔導
3. 加工技術的諮詢與發展

PMC 財團法人精密機械研究發展中心
PRECISION MACHINERY RESEARCH & DEVELOPMENT CENTER

超音波主軸與 硬脆材加工技術

- ① 加工最高轉速：6,000/10000 min⁻¹
- ② 音波產生器最大功率：1KW
- ③ 超音波頻率範圍：20/30/35 KHz
- ④ 可自動換刀

Thank You

敬請指教!

參考資料

- [1] 賴耿陽譯，超音波工學，復文書局，2005年4月。
- [2] ターヴァイネン さゆり，ハイブリッド型脆性材加工機「龍牙」(Ultrasonic Milling Center)，機械と工具(日文)，2012年6月号。
- [3] 呂仲哲等，非接觸式電能傳輸超音波振動輔助切削刀把支開發，2012中興大學精密工具機技術專題實作競賽成果報告，2012年8月。
- [4] 鈴木清與植松哲太郎，超音波加工の新しい提案，機械技術(日文)，1991年12月号。
- [5] 最近の超音波除去加工技術，機械技術(日文)，1991年12月号。
- [6] 長岡技術科學大學，磯部浩己教授，精密加工・機構研究室網頁資料。
- [7] 董凌雲，全球製造大趨勢及我們的差距，瀋陽機床公司簡報資料，2010年6月。
- [8] 王愛玲等，功率超聲振動加工技術，國防工業出版社，2007年。
- [9] 劉禮平，基於機床附件化的旋轉超聲波加工關鍵技術研究，天津大學博士論文，2011年。
- [10] M. Komaraiah, M.A. Manan, P Narasimba Reddy, S. Victor.， Investigation of surface roughness and accuracy in ultrasonic machining. Precision Engineering， 10(2) 1988， pp.59-65。
- [11] 馮冬菊，超聲波銑削加工原理與相關技術之研究，大連理工大學博士論文，2005年。
- [12] 曾偉民，旋轉超聲鑽削先進陶瓷基礎研究，華僑大學博士論文，2006年。
- [13] 隈部淳一郎(日)著，韓一昆，薛萬夫等譯.精密加工振動切削(基礎與應用)，機械工業出版社，1985年。
- [14] 田欣利等譯，先進陶瓷加工導論，國防工業出版社，2010年。
- [15] 陀飛輪公司網頁產品資料。
- [16] Lambda Precision、MORI SEIKI、IMAHASHI、歐立美克(日)、TAKESHO、克硬公司、鴻碩公司等引用的網頁資料與產品型錄。