

15. 氣浮式振動機構與振動輔助加工技術

許文政¹、陳建昌¹、鍾智賢²

¹大漢技術學院機械工程系 副教授

²國立臺灣大學機械工程學所 研究生

摘要

本文提出一高速氣浮式振動機構的新設計，與應用於難切削材之振動輔助加工技術。傳統CNC工具機要加工硬脆材、高硬度高強度材料(如花崗石材與寶石這類材質)，需變更機構或刀具設計。本文所設計機構的特點是採用花崗石氣浮載台做為振動源的傳動機構，因幾乎無摩擦而得以對工件載台或刀具進行高速振動，據此進行直接切削(例如銑削或研磨)或輔助排屑之間接加工效果。另一特色是振動方式為XY工作平面雙軸向作直接振動，有別於傳統習用的振動主軸進給方向。另一方面，本方案之振動機構具交換性與高可攜性。經初步實驗應用於花崗石、玻璃與玉石類之研磨與雕刻，證實對刀具之壽命與加工效率、表面品質顯現相當優異效果，因此形成一種新式高速振動輔助加工技術。

關鍵字：高速振動、氣浮式載台、振動輔助加工、加工效率、表面品質

一、前言

針對難切削硬脆材料之加工為研究對象，由過去文獻可發現研究者大都以振動切削來提升硬脆材料加工的效率及表面精度。當輔助切削的振動頻率能達到超音波範圍，即形成超音波輔助加工UAM效果(ultrasonic assisted machining)。

所謂超音波輔助加工，是結合超音波振動與切削理論，配合頻率系統與進給控制技術，利用振動輔助切削加工之方法。尤其在複雜形狀與特殊成型方面，UAM擁有諸多優點可克服傳統切削所難以處理的問題(例如玻璃、陶瓷、寶石玉石之銑削或研磨)，不只展現實用技術之可行性，更提供高效率優異表面品質。

文獻[1]-[5]顯示振動加工常以超音波致動器驅動，因它具有穩定的頻率(20kHz~40kHz)、低振幅(3 μ m~50 μ m)、及可控制之振動。在60年代，振動加工方式為振動磨漿對工件進行微移除，但對深孔加工時，磨粒無法有效進入，故Tyrrell率先提出刀具直接黏合磨粒對工件進行微移除[1]，解決了深孔加工的問題，現今已廣為振動切削所應用[2]。而超音波加工機常以主軸頭型式提供，可安裝於一般工具機(須特殊設計主軸頭)或特殊專用機床上。其提供動力範圍自60w至數千瓦特。

早在1927年Wood等[6]發表第一篇利用超音波振動對玻璃基板進行鑽孔的研究。隨後隈部淳一郎提出工件振動系統模式的振動切削理論，將切屑及刀口積屑帶出進而降低切削阻力，改善加工精度及延長刀具壽命[7]。在1963年Balamuth[8]提出迴轉式超音波振動加工的概念，提高加工效率。

另一方面，比較進一步的設計是迴轉式超音波輔助加工(URM)。迴轉式超音波振動加工方式有三種，即：(一)刀具振動，工件迴轉[9]；(二)刀具迴轉，工件振動[10]-[13]；(三)刀具迴轉且振動[14]-[16]等方式。其中，第一種加工方式易受到工件大小影響迴轉能力，但超音波易實施。第二種加工方式易受工件大小影響振頻，可能無法達到超音波振動，但主軸轉速不受限。最後一種加工方式不受工件大小限制，是目前加工硬脆材採用最廣的方式。但其振動方向與切削方向(XY方向)互為垂直，較適於鑽孔，若做端面切削時須透過刀具的幾何形狀變換振動方向。另主軸馬達受限於振動子的電刷供電方式，無法提供高轉速與充足扭力，且機構複雜、散熱及維修困難。

綜觀上述三種迴轉式振動加工方式，本文旨在於提出一種幾乎無摩擦的氣浮振動載台。主要目的是提出一使振動的振頻及振幅提升的振動輔助加工機構。並能延用於原工具機主軸，使主軸轉速不受限。並於初步實驗中嘗試證實對刀具之壽命與加工效率、表面品質之效益。

二、氣浮式振動輔助加工機制

一般來說，硬脆材的加工效率多是由轉速、進給速度、切深及振動等參數所決定。前三種設定參數對加工性能的影響與傳統加工大致相近，且轉速、進給速度及切深等三種加工參數可由原工具機設定。故以下說明氣浮平台低摩擦特性對加工效率，與磨棒式刀具對硬脆材加工的振動輔助磨削機制。

2.1. 機械摩擦與加工效率的關係

振動磨削是在磨削的過程當中導入振動，藉此達到提昇加工精度、加工效率及降低刀具損害的一種因應對策。其振動源的產生是利用可做高速線性位移的致動器，如壓電式或磁伸縮式等致動器。例如振動切削多以壓電材料做為超音波振動源的致動器，因為它可以輕易產生超音波振動頻率等級。但除了增加振動頻率來提升加工速度外，機械摩擦所

引起的黏滯力亦會影響加工效率。因此，本研究提出的氣浮式振動機構主要是用來改善機械摩擦，如平台摩擦力或阻尼。

首先，分析工件振動平台的物理系統，假設振動平台的系統模式是一簡化的二階系統

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F \sin \omega t \quad (1)$$

其中 m, c, k, F, ω 分別為平台動子質量、阻尼、彈簧常數、致動器有效出力及振動頻率；分別為平台的振動位移、速度及加速度。方程式(1)中的 m, c, k 與平台機構的物理量有關； F 是與致動器出力 F_a 及平台摩擦力 f 有關，即

$$F_a = F \sin \omega t + f \operatorname{sgn}(x) \quad (2)$$

為了方便分析，方程式(2)已假設致動器輸出有無限大頻寬。由方程式(1)可求得如下的穩態解：

$$x = A \sin(\omega t + \phi) \quad (3)$$

$$A = \frac{F}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2}} \quad (4)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{c\omega}{k - m\omega^2}, \quad \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

其中 A 為振幅，是 ω 的函數； ϕ 為相位移，是 ω 的函數； ω_n 為共振頻率，是 m, k 的函數，與質量成反比。由方程式(1)(2)知，摩擦力會影響致動器輸出功率的損耗，間接影響加工效率，因為相同的輸出功率操作在無摩擦力情形下，對一般壓電致動器的輸出力或振動頻率是可以相對提升，則由方程式(3)-(4)知變大，加工效率就大。同理，由方程式(3)-(4)知，當振動頻率低於共振頻率時，供給的頻率大，則越大，加工效率就越大；當振動達共振頻率時，振幅為輸出力與(阻尼 c 共振頻率乘積)之比值，加工效率達到最大，且阻尼愈小，則振幅 A 愈大。明顯地，在機構的質量、彈簧常數不變情形下，要提升加工效率，唯有使振動頻率操作在接近共振頻率，或使平台動子的摩擦減小。一般來說，氣浮式平台的摩擦係數遠比油膜面接觸式硬軌甚至滾珠式的更小數個數量級。假設硬軌阻尼係數 0.1 ，滾珠式的約 0.01 ，採氣浮式阻尼係數約為滾珠式線軌的百分之一，甚至達十萬分之一，則如圖1所示，依上式(1)(4)模擬運算其振幅之頻譜圖，可見摩擦減小，可使共振之震幅大增。

圖2(a)說明振幅大小與材料切除率的關係，切除率與振幅呈現線性相關，甚至振幅越大時幾乎有幾何級數增長效果[4]。另外，如圖2(b)所示振動頻

率大小與切除率的關係也呈現線性正比率關係[4]。因此，本研究提出採低阻尼係數特性的氣浮式平台做為高速線性位移傳動機構。

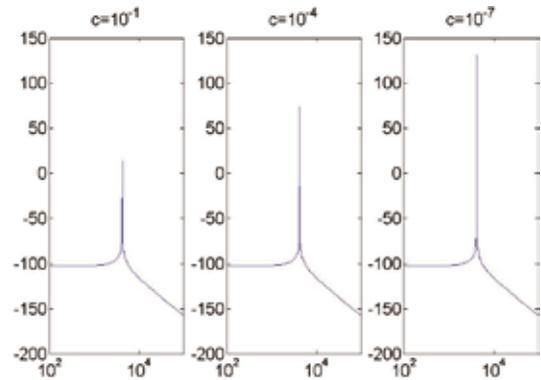


圖1 振動平台的振幅頻譜圖，橫軸為頻率(Hz)。

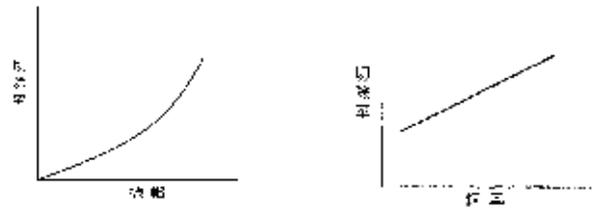


圖2 (a)材切除率與振幅關係，(b)切除率與振頻關係

2-2. 振動磨削機制：

振動磨削機制是一方面在工件上導入高頻振動，使工件與刀具產生高速撞擊，致使磨粒嵌入材料之中形成脆性破壞，使刀具快速撞擊並迅速脫離工件表面，在脫離的過程中，刀具離開工件產生一微小空間有助於切削液的滲入。另一方面又藉由極小的振動配合主軸的旋轉，使得磨屑可以藉此快速的排除，並使原本連續性的切屑變成斷續的切屑，使切屑變薄，進而降低切削力。

硬脆材料因塑性變形區非常的小，在受到磨粒上下振動撞擊後幾乎會產生無預警的破壞性裂紋，藉由裂紋的成長、連結而達到材料去除的目的。在刀具退出後切屑成片狀脫離工件面，達到斷屑切削的效果。最後，又因磨棒迴轉對材料進行磨削移除。

以下簡化振動切削之模型，以利於基礎分析。假設刀具的進給速度為定值，振動速度定義於(4)，則刀具對工件的切削速度即是振動切削的總速度

$$V_c = V + \dot{x} \quad (7)$$

如圖3顯示刀具切削速度初步分析，圖中， t_1 是拔出發生時間點，此時刀具與工件的空隙是瞬間產生，形成真空的狀態，將切削液吸入；時間區間

t2至t3是刀具脫離工件表面，切削液將切屑帶離工件表面，工件及刀具獲得冷卻的時間；t3是刀具銼擊發生時間點，時間持續至t4。圖3亦顯示振動過程中，刀具切削的速度非定值，且大部份的時間是在做動態加速及減速過程，故整個切削過程刀具與工件是在做動態摩擦，故降低了刀具與工件的摩擦減少摩擦熱，切削面的粗糙度有所改善，並使切屑變薄降低切削阻力。

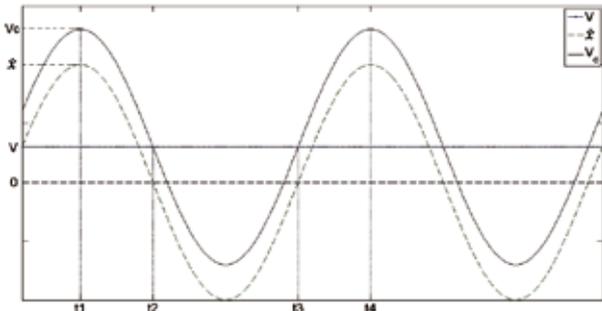


圖3 刀具與切削速度之無因次分析圖(橫軸表時間)

三、氣浮式振動機構與振動輔助實驗

為達上述目的，本文設計一種高速振動氣浮式平台應用於工具機與加工機具等產業，或主要用以輔助習知的工具機旋轉主軸進行硬脆材之雕刻與研磨。本機構設計之特色一是在於提出一種幾乎無摩擦的氣浮振動平台，此機構容易以低耗能方式達到沿XY方向獨立且同時高速振動，且振動源與主軸或承載台分開操作；特色二是在於提出一種高速振動機制可加速切削硬脆材與一般材料，此並改善加工面品質；特色三是在於提出一種可對硬脆材與一般材料作高速振動的工件承載台與應用法，此高速振動機制可加速切削並改善加工面品質；特色四是在於使氣浮式高速振動旋轉主軸得以直接與傳統無振動機制的工具機主軸結合，主軸轉速的提升不再受限於振動機構的牽制，具高可交換性與可攜性佳；其他特色是在於降低主軸的建置及拆卸、維護保養之成本；與降低主軸刀具製造成本，不須專用刀具之特殊幾何設計。

參閱第4至第6圖所示，其為本機構的氣浮式高速振動平台之外觀立體圖、氣浮溝槽形成氣浮板原理示意圖、與所使用之花崗石材平板。圖4中之上下為花崗石材平板，另側面板採高強度結構用鋁7075結合若干限制性彈簧鋼材，形成高剛性封閉結構。

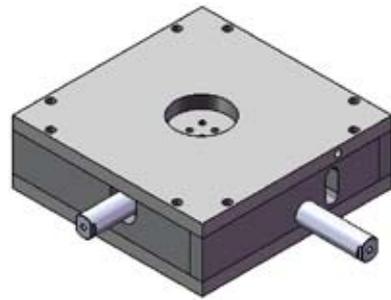


圖4 氣浮式高速振動載台機構示意圖

參閱圖5所示，為本機構所設計平台之氣浮機制亦即上平台基座、動子X載台與動子Y載台的下平面及各平面間以氣膜間隔。示意圖為方便說明，所示氣膜厚度遠較實際大小為厚，氣膜厚度約為 $10\mu\text{m}\sim 15\mu\text{m}$ 。動子X載台與動子Y載台受到氣膜的壓縮氣體作用產生氣浮作用，將動子推起並容許XY方向獨立驅動且高速振動並無干涉。氣浮平台的氣浮力產生機制與無摩擦性質是藉由圖6內所顯示的氣膜，其經由氣浮通道及氣浮溝槽所形成。在預壓足夠重量條件下使氣膜厚度約再降低至 $10\mu\text{m}$ 以內之微小間隙產生相當之剛性，足以承載工具或主軸並使致動器得以在雙自由度上推使動子Y承載台產生高速且微小位移的振動。

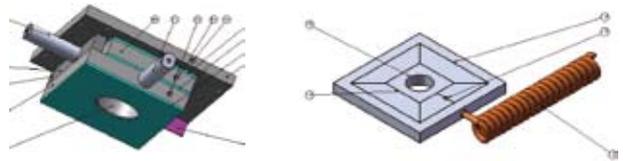


圖5 氣浮載台動子示意圖 圖6 氣槽形成氣浮板之示意圖

如圖7所示為實施本載台機構所用之花崗石材氣浮板，其製作精度特別要求平面度與平行度，以獲得氣浮薄膜所需之結構環境，並得與確保氣靜壓系統之穩定性。



圖7 製作載台所使用之花崗石材氣浮板

本機構設計的實施方式係先將壓縮氣體注入氣浮平台使其動子漂浮，然後再驅動X、Y致動器及工具機主軸馬達使其產生輔助振動之旋轉切削效果。其應用例，如圖8為氣浮式高速振動工件承載平

台，若將旋轉主軸改由圖5所示XY氣浮式高速振動載台支撐，則形成一高速振動之旋轉主軸。

因此，根據本文構想設計之高速振動氣浮式平台，其特徵為應用多層花崗石材具真平面(3 micron/300mm)結構之氣浮平板以產生精密氣浮薄膜，應用超音波製致動器之高頻振動模組，以產生振動源驅動氣浮平台；及一安裝於的氣浮平台下方的旋轉軸，或上方的工件承載平台，用以達成旋轉同時振動之直接切削，或輔助排屑的間接加工。

例如圖9，應用本文設計之氣浮式平台作為高速振動輔助加工之承載台，對臺灣豐田玉之CNC振動加工測試，配合高馬力測試由低轉速至24000rpm，嘗試對硬脆材質之CNC雕刻。



圖8 作為CNC氣浮式高速振動工件載台



圖9 應用氣浮式振動台對臺灣玉之振動輔助加工

如圖10所示CNC銑床測試玻璃硬脆材研磨切削後之樣品與10X顯微照片。由圖中可見，本方案初步可適用於硬脆材質之二維與三維CNC加工，顯微照片也顯示刀具磨削面除末端尖點外，其餘表面良好。



(a) 玻璃樣品與 (b) 磨削後顯微照片(10X)
圖10 硬脆材經振動輔助磨削後之

另，本設計機構可附加於一般傳統工具機使用，將傳統的寶玉石硬脆材之加工技術提升至CNC加工，使加工速度得以提升、刀具耗損減少，並使玉石藝品具更高生產效率與加工面品質。

四、結論

本文提出一種新式高速氣浮振動輔助之加工機構，尤指一種讓多層氣浮式載台於交錯之軸向產生高速振動效果之設計。配合幾乎無摩擦之特性，本設計容易以低耗能方式達到高速振動。其次，由於得以直接與傳統無振動的工機主軸結合，進而形成高速旋轉振動主軸，乃具有主軸轉速的提升不再受限於振動機構的牽制，本創作具可交換性與可攜性佳，因而應用範圍極廣。並且得以提升切削速率並改善加工面品質之功效。本案並已申請專利。雖然，因本機構精度需求，需精密製作調校與組裝而形成另一種成本。然所需之高精密的平坦度已由本校精密石材構件研發中心提供完整之解決方案。

致謝:部份經費感謝經濟部對學研聯合研究計畫98-EC-17-A-29-S2-0003的支持。並感謝石材暨資源產業研究中心魏文正、何文正對本機構製作之協助。

參考文獻:

1. W.R. Tyrrell, "Rotary ultrasonic machining," SME Technical paper, pp.70-516, 1970.
2. A.I. Markov, "Ultrasonic drilling and milling of hard non-metallic materials with diamond tools," Machine and Tooling, vol. 48, pp.45-47, 1977.
3. 劉恩廷、蘇裕軒，"運用超音波於硬脆材料之精密加工之發展與評估"，國立台灣科技大學機械工程系碩士論文，2009.
4. 張萬欽、陳政雄，"超音波輔助切削之發展與展望"，機械月刊，第二十七卷第八期，2001年8月
5. 楊忠義，"超音波輔助機械加工"，機械月刊，第三十四卷第三期，2008.
6. R.W. Wood and Loomis, Philosophical Magazine, Ser.7, pp.417-436, 1927.
7. 隈部淳一郎著，韓一昆譯，精密振動加工切削：基礎與應用，北京機械工業出版社，1985.
8. L. Balamuth, "Ultrasonic rotary drive may open up many new applications for micro-devices," Electronics, vol. 36, no. 2, pp.63, 1963.

9. Anonymous, "Ultrasonic drilling with a diamond impregnated probe," *Ultrasonics*, vol. 2, no. 1, pp.1-4, 1964.
10. W. Qu, K. Wang, M.H. Miller, Y. Huang and A. Chandra, "Using vibration assisted grinding to reduce subsurface damage," *Int. J. JSPE*, vol. 24, pp. 329-337, 2000.
11. 潘冠衛, "振動加工應用於高速微銑削之研究", 國立雲林科技大學機械所碩士論文, 2004.
12. 林繼永, "振動磨削技術應用於陶瓷材料加工之研究", 國立雲林科技大學機械工程系碩士論文, 2005.
13. 張淵智, "振動切削技術應用在微銑削之研究", 國立雲林科技大學機械工程系碩士論文, 1999.
14. 江浩寧, "壓電致動刀具載台之設計分析及其在類銑削加工上之應用", 國立成功大學機械工程研究所碩士論文, 2004.
15. 馬嘉駿, "迴轉式超音波輔助硬脆材料銑削及工具設計", 國立台北科技大學車輛工程系碩士論文, 2006.
16. 范忠達, "超音波輔助鑽削之研究", 國立台灣大學機械工程系碩士論文, 2004.