

壓克力磁力研磨加工特性之研究

蔡東憲、張浮明、江昇翰

摘要

本文以切削加工後壓克力，利用磁場能量配合磨料進行研磨加工與去毛邊加工，並以不同主軸轉速、進給速率、磁力磨料尺寸、刀具與材料間隙等加工參數，研究加工前後壓克力表面透光性與表面粗糙度之特性，搭配不同材質磨料與工件配合磁場強度與轉速的相對關係，觀察磨料顆粒加工使用量的磁場變化和磨料移動關係，以獲得磨料加工製程效益與消耗程度，探討其磁場變化與磨料移動關係。本研究使用之磨料為可被磁鐵吸附的非導磁性 304 不鏽鋼，經設計不同狀態與條件之實驗過程，比較改善壓克力表面透光性與減少磨料損耗之要求，實驗結果顯示前者之重要性大於後者。以不同參數切削與研磨後，實驗顯示可獲得壓克力最佳表面粗糙度分別為 Ra 值 0.12 μm 與 0.16 μm 。

關鍵詞：綜合加工機、磁力研磨、壓克力、透光性。



The characteristics investigation of acrylic with magnetic abrasive finishing

Tung-Hsien Tsai, Fu-Ming Chang, Sheng-Han Chiang

Abstract

This article investigates on how to adopt magnetic field energy and abrasive to grinding and to burr an acrylic. Surface characteristics and roughness of acrylic material are investigated in different machining conditions such as spindle speed, feed rate, nano-magnetic abrasive size and the gap between tool and materials, respectively. The benefits of grinding process and consumption of abrasive are obtained by observing the relationship between the fluctuations of magnetic field with different abrasive amount and abrasive movement in various abrasives, magnetic intensity, and speeds. We use non-magnetic 304 stainless steel abrasive to reduce the abrasive wear through the design of different machining conditions and compare the improvement of the penetrability of the acrylic surface. The experiment results show that the maximum roughness was $Ra^{0.12\mu m}$ and $0.16\mu m$ respectively for different machining and grinding parameters.

Keywords: Machine Center, Magnetic Abrasive Finishing, Acrylic 、 Transmittance.

Tung-Hsien Tsai, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, HUST.

Fu-Ming Chang, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, HUST.

Sheng-Han Chiang, Graduate Student, Graduate Institute of Precision Machinery and Manufacturing Technology, HUST.

Received 5 May 2011; accepted 1 July 2011



1. 前言

隨著人們生活形態改變，無論電子、光電、鏡頭、機械產品等加工成品，品質要求除具備充分的功能外，對於產品內、外觀的精度要求，使工件得到良好的表面等因素，日益殷切，因此常利用拋光等加工方式改善表面特性，而磁力研磨亦為近代發展不可缺的方法之一。磁力研磨因研磨機構設計、加工材料與磨料是否具有磁性之因素而有不同的研磨加工方式，基本上係利用磁場能量所形成之磁力線與具磁性磨料結合，將工件置於磁場中，與磨料形成具有撓性的磁性刷，進行研磨加工。視磨料的大小對於夾縫溝槽、管之內孔等不規則形狀，幾乎不受工件幾何外形影響，因加工應力小，表面不產生變質層，因此具有除去工件毛邊、拋光洗淨、不變形等優點，適合大量精密零件研磨，提高工件精度，較傳統研磨為優，使精密研磨的製程發展日益進步。

磁力研磨觀念最先由俄國學者提出[1]，發展至今已有許多效果，研究者與學者等更分別設計不同形式配合工件材料，分別利用磁場與振動再加鑽石磨料研磨工件，取不同影響加工表面參數，研究精密研磨得到鏡面加工表面，除磨料使用後容易處理並降低環境污染等優

點，更可協助精密加工製程的改善與研究[2,3]。配合多種刀具應用CNC綜合加工機與複合式加工技術，工業界已開發成功使用，但配合銑床後直接研磨加工尚無運用，本研究將多種傳統磨床和非傳統研磨拋光技術，綜合設計使用在CNC銑床加工機上。Wang[4]等以車床夾持管內孔旋轉，配合奈米電解腐蝕液，進行磁力研磨加工，研究經歷不同腐蝕時間之變化，達到表面拋光效果。Yan Wang[5]等以超音波配合磁力進行管內孔之研磨加工特性研究。林清田[6]等以鈹鐵硼磁性圓柱刀具，吸附磨料與空心圓柱附凹槽溝刀具，研究不同形狀刀具且含拋光液研磨下，銑床加工鋁合金材料，尋找最佳參數。Jain [7]等研究工件間隙與研磨速度以改進研磨特性。曾柏昌[8]等使用真空燒結法製成研磨料，將磁性鐵與不帶磁性氧化鋁粉燒結成顆粒狀，粉末混和比例與黏著劑量和燒結溫度時間上變化，尋找最佳製程設計。El-Taweel[9]模式化分析6061鋁合金複合材料混合電化學旋轉磁力研磨特性之研究。Yamaguchi[10]等以陶瓷加鋁合金，進行內孔磁力研磨，研究加工特性。張浮明[11]等進行磁力研磨加工鋁合金6061-T6之特性研究，進行不同高度梯形狀之磁力與加工條件研磨拋光，以不同主軸轉數、進給速率、磁力磨料、刀具



與材料間隙、進給深度之因素為參數，比較加工前與加工後之表面粗糙度量測。使用反應曲面法（RSM）建立預測加工參數之數學模式與變異數分析，比較加工後之量測與預測結果，獲得各項加工參數的最佳化設定，可接近實驗值之95%的可信度。由實驗結果可知，各不同高度之表面粗糙度值皆有改善，其中以3mm之加工參數實際值最接近預測結果，其加工前Ra值為 $0.45\ \mu\text{m}$ ，磁力研磨拋光後可得到Ra值為 $0.09\ \mu\text{m}$ 。Yamaguchi[12]等使用被磁化之鋁合金配合陶磁材料之磨料，通過磁場與加工機構設計，研究不同參數進行孔內加工後，具有改善表面特性與增加材料移除的效果。

壓克力又稱為不碎玻璃，臺灣於1959年開始生產。壓克力(Acrylic)為一種樹脂透光度比玻璃為佳的高分子材料(甲基丙烯酸酯樹脂)。以塑膠製成壓克力玻璃具有高度透明度，耐候性強，常用在廣告招牌、照明器具及日常用品上，現代開發用於光電材料如手機、數位像機與3C產品等。惟材質硬脆，薄板型加工，尤不易達到良好的表面加工效果，若需要更精細的鏡面處理，只能以手工拋光費力耗時缺乏經濟效益。本研究即針對壓克力之特性，使用具磁場迴路吸附不鏽鋼材料之刀具，進行切削後磁力研磨，應用量測儀器探討其表面狀態，

與磨料之損耗，比較不同加工參數之變化。

本文以壓克力為實驗材料，採用不同尺寸之磁粉，不同轉速、不同間隙與不同進給速率為實驗影響參數，研究表面粗糙度與磨料損耗率之探討。

2. 加工原理與磁力分佈

2.1 加工原理

使用永久磁鐵具磁力強度之磁極與端面設計吸附磨粒之刀具，吸附磨粒之刀具與工件表面，必須保持適當之加工間隙，形成含磁力之平面研磨加工，本設計磁極之刀具內為1000高斯之永久磁鐵，配合磁場強度吸附易磁化性質之奈米級磨料顆粒，使得具已磁化之磨粒，在磁場作用下沿磁力切線方向，構成一個封閉的磁場迴路與相互連結，形成具有可配合不同工件表面狀態研磨的撓性磁刷。磁力線產生的力量，使磨粒加壓至工件表面，以磁刷形式作為研磨的工具，當配合適當轉速時，磨粒尖端與工件表面形成相互運動之摩擦作用，工件在載物檯上之平面移動，進而達到研磨之拋光以及去毛邊等功能，磁場中磁力束刷，吸附磨料情況之示意圖與磁棒實際圖，如圖一與圖二所示。



2.2 磁力分佈

磁力研磨裝置設計必須考慮磁力線之分部，以正向力與磨擦係數之乘積為最大磨削力[13]，平面磁力研磨加工，當磨粒受磁場作用，具有磁位線之與磁力線之兩分力，其中磁力線為單位磁分子在磁場中受磁力運動之軌跡，為封閉曲線，由N極至S極，表示磁場的方向與大小，而本設計磁鐵內之磁力線為由S極往N極，磁鐵外由N極歸向S極，磁力線不相交且具互相排斥，線上任一點之切線方向，即為該點的磁場方向，磁力線愈密，磁場強度愈大，磁力線具有尋求最低磁阻的路徑。而視磁場強度相互吸附已磁化之磨粒與堆砌，達到一穩定重量。實驗數據顯示，磨粒吸附量，隨心軸轉速增加，因離心力增加，使得磨粒甩出而減少，因此當加工時心軸轉動超過1200 rpm時，才具有穩定之加工作用。本實驗採用磁場之磁力線由N極在下S極在上的永久磁鐵，刀具尺寸為16 mm圓棒，包覆1000高斯永久磁鐵，使得磁性磨料吸附在刀具棒頂端面同時加壓在工件表面，得以研磨加工表面之拋光，磨料相互吸引、堆疊等方式，形成撓性磁刷，利用磨粒在刀具與工件間隙之壓力進行加工。在研磨拋光過程當中，由於在加工區域內的磁場強度比加工區域外強，因此形成不均勻之集中磁場，加

工區域外部的每一磁性磨粒，受到磁場的作用產生兩個分力法線方向(Fx)與切線方向(Fy)，兩者之合力(F)，其中Fx是在磁力線方向的分力，Fy是等磁位線方向的分力，其中法線方向垂直加壓磨粒於工件表面，使磁粒集中加工的方向與位置，如圖三所示。本實驗之磁性磨具設計，受磁場作用以切線方向之力達到磨擦加工作用，其合力F使磁性磨粒朝向加工區域集中，集中磁性磨粒在加工位置，並防止磁性磨粒，隨著因進給與轉速關係碰觸工件而殘留或飛散。磁力F之法線方向(Fx)與切線方向(Fy)其大小，受到磁場強度、磁極形狀、磁極尺寸影響極大。公式分別表示如下

$$F_x = \mu_0 V_0 X_m H (\partial H / \partial x) \quad (1)$$

$$F_y = \mu_0 V_0 X_m H (\partial H / \partial y) \quad (2)$$

其中 μ_0 為真空的導磁率， V_0 為磁性磨粒之體積， X_m 為磁性磨粒之磁化率， H 為磁場強度， $(\partial H / \partial x)$ ， $(\partial H / \partial y)$ 分別表示在X、Y方向磁場強度的變化率。

磁性磨粒受到磁場的作用而吸附在刀具上，加工區域內，使得磁性磨粒之間，形成撓性排列之磁刷而產生壓力，作用於工件表面，此研磨壓力(Pz)為磨料對工件表面拋光的主要力量，其公式表示如下[14]



$$P_z = \left[\mu_0 H_0 \left(1 - \frac{1}{\mu_m} \right) \right] / 2 \quad (3)$$

其中 μ_m 為磁性磨粒子群的相對導磁率， H_0 為真空之磁場強度。

3. 實驗規劃

3.1 機械設備

本加工實驗使用眾程科技之CNC綜合加工機EMV-600如圖四，其加工方式為開放式虎鉗夾持工件，虎鉗採用低膨脹係數及高硬度之防鏽鋼材料設計，切削液於磨削時噴向刀尖與虎鉗夾持工件區域，減低加工產生之熱應力，適用不同模具材料或表面切削加工，X-Y軸行程 610×460 mm，Z軸行程480 mm，X-Y、U-V軸均採用AC伺服馬達驅動，本實驗採用Z軸為自動定位。機身的進給精度控制在0.001 mm之範圍內，主軸轉速Max. 15000 rpm，切削進給速度Max. 10000 mm/s，刀具直徑Max. 65 mm，其加工條件，如表一所示。

3.2 磁力研磨

磁力研磨裝置設計必須考慮磁力線之分部，以正向力與磨擦係數之乘積為最大磨削力，本實驗研磨刀具磁力線之設計，以不銹鋼棒設計內含八個永久磁鐵串聯排列，磁通密度為1000高斯(Gauss)，N極朝下，S極朝上，建立磁

場環繞並吸附含磁性的研磨料，其磨料吸附在磁棒N極形成磁力刷，使磨料包覆磁棒，磨料吸附於磁棒之磁場示意圖如圖二。研磨料規格尺寸，如圖五所示，吸附於磁棒上之磨料，為豪昱電子有限公司自行研發製造之磁性磨料，以三種不同規格尺寸 (a)氧化鐵奈米磨粒(125 μm)，(b)不鏽鋼奈米磨粒(200 μm)，(c) 200 μm 不鏽鋼奈米磨粒加樹脂成分。本實驗以銑床主軸轉速、刀具與工件的間隙、刀具進給速率、刀具吸附磨粒、研磨時間等為加工參數。主軸轉速為800~1200 rpm範圍內做調整，刀具與工件間隙為固定0.5 mm作為基礎，刀具進給速率為200 mm/s。研磨時間600~1500秒做為調整觀察。磁性磨料在磁力研磨拋光中，所扮演的角色相當於加工機中之刀具，視為磁力研磨拋光極為重要的加工要素。磁性研磨材料必須具磁化性良好且易備被磁化性質，具有研磨能力的複合磨料，傳統使用的研磨材質，如氧化鋁、碳化矽、氮化硼、碳化硼與鑽石粉末等。由於奈米級磁性磨料，所需之製造設備昂貴，製造過程亦需要特殊的專業技術，導致目前國外進口磁性磨料價格居高不下。曾柏昌[8]等為探討燒結後磁性磨料之結合度的狀況，應用不銹鋼SUS304之表面粗糙度及材料移除率，採用真空燒結技術並配合田口實驗



法進行燒結實驗規劃，製造結合鐵與氧化鋁之磁性磨料，以獲得鐵粉粒度、氧化鋁粉粒度、成份比例、壓製成形壓力、黏結劑、燒結溫度、加熱時間等七個不同因子之最佳參數組合，並以SEM搭配EDS分析燒結後之磁性磨料。經過實際的拋光與實驗結果驗證，其研發的磁性磨料，已能將不銹鋼SUS304之表面拋光至鏡面程度（ $Ra\ 0.018\ \mu m$ ），足以媲美進口之磁性磨料，初步已展現出良好的研究成果。

本研究之主要目的，係利用三種不同規格奈米級之尺寸，進行加工，首先以 $125\ \mu m$ 之氧化鐵奈米磨粒，其次以 $200\ \mu m$ 之不鏽鋼奈米磨粒，再以 $200\ \mu m$ 不鏽鋼奈米磨粒加樹脂成分。進行研發304不鏽鋼，更優質、更耐磨且低成本的磁性磨料，及最佳配方參數之獲得。並將研發成功的磁性磨料廣泛的應用於內外徑、不規則平面、彎曲管與螺旋管等的內部等零件之研磨，期望將可為國內磁力研磨技術帶入另一個嶄新的境界。

3.3 實驗材料

壓克力之化學成分，如表二所示，其設計高度為平面凹槽為 $1\ mm$ 。使用磁棒進行磁力研磨不同平面 $600\sim 1500$ 秒進行實驗，壓克力材料實際加工平面如圖五。以壓克力為實驗材料，其化學成分，如表二所示，設計高度為凹槽狀 $-1\ mm$

深度之工件，使用磁棒進行磁力研磨以工件平面 $0\ mm$ 作為基準面加工平面與凹槽處，依照不同參數條件設定實驗，循溝槽邊環繞約單次加工 60 秒為研磨加工，如圖四。

研磨加工，以CNC綜合加工機之特性與作用為基準，分別研究表面粗糙度(Ra)與磨料損失率(MALR)等二項參數。首先使用 MITUTOYO Surface Roughness Tester SJ-201儀器，磨削工件平面 $6\ mm$ 內每間隔 $2\ mm$ 之距離量測一次，取三次表面粗糙度之平均值為量測數據。量測磨粒的長、寬、高度與使用前之單位體積重量，比較加工前與加工後的體積損耗差異，為測定體積的重量損失消耗比。

4. 結果與討論

4.1 磨粒損失

本研究係延續磁力研磨加工鋁合金6061-T6之特性研究的後續實驗，以反應曲面法，決定品質因子之水準，經由品質設計程序、步驟、方法等，盡可能滿足產品的特性需求。結合數學和統計技巧的利用，對於影響製程不同的參數，對於問題的分析與建模，得到有意義的影響反應，進而求得最佳化的條件。獲得最佳二階模式預測磨料重量損耗率之模式，尋找磨粒最佳使用數量值，以實



現高品質低成本的研磨產品。從四個設計參數的調整變化得到使用磨粒數量，在主軸轉速1200 rpm、進給速率200 mm/s、刀具與工件間隙0.5 mm、研磨時間30分鐘參數為最高設定下，得到加工前磨粒20 g使用加工後損失剩餘10.1734 g，其獲得最佳加工性能。

若再調整提高加工參數，會發生磨粒飛散或甩出的情況，無法增加更高效益，由實驗得知，1000高斯之磁場強度，無法負荷主軸轉速超過1200 rpm以上，此時若以增加進給速率、降低間隙等，研磨時接觸工件與磁粒過度密集，會形成磁粒遲滯現象，影響磁場強度分布，隨著研磨時間的增加，效果不佳且會增高溫度，產生反效果，甚至在壓克力表面，有燒結碳化的情況，造成表面黑斑、刮痕等負面效果。

4.2 表面粗糙度

表面粗糙度是加工表面的狀況，目標值越小越佳，本研究係採用磁力研磨加工鋁合金6061-T6之特性研究的後續實驗，以反應曲面法，經由品質設計程序、步驟、方法等，決定品質因子之水準，結合數學和統計技巧的利用，對於影響製程不同的參數，盡可能滿足產品的特性需求，進行問題的分析與建模，得到有意義且得最佳化的條件，建立最佳二階模式預測表面粗糙度之模式，獲

得最佳的表面粗糙度。

為提高加工效率與品質需求，使用四個實驗參數，調整得最佳參數值，於氧化鐵奈米磨粒125 μm 尺寸，在主軸800 rpm、間隙0.5 mm、進給速率100 mm/s、加工時間20分鐘，得表面粗糙值最為平均效果良好，如表三所示。

當奈米磨粒尺寸為200 μm 之不銹鋼材料時，在取主軸轉速1200 rpm、間隙0.5 mm、進給速率100 mm/s、加工時間20分鐘，以多點量測表面粗糙值經計算平均值，得到效果最為良好，如表四所示。綜合以上分析，得到最佳參數設計，磨粒尺寸大小的改善與不同主軸轉速，足以顯示具有提升加工品質的特性，效果顯著。對於200 μm 不銹鋼奈米磨粒加上樹脂成分，以相同主軸轉速加工後，量測表面粗糙度與觀察表面狀態，實驗結果發現，會增加表面透光性但表面粗糙度值變化不顯著。

5. 結論

本文使用CNC綜合加工機切削加工壓克力，係延續磁力研磨加工鋁合金6061-T6之特性研究之後續研究，鋁合金6061-T6，進行不同高度梯形狀之磁力研磨拋光，研究影響磁力研磨加工條件，以不同主軸轉數、進給速率、磁力磨料、刀具與材料間隙、進給深度之因素為參



數，比較加工前與加工後之表面粗糙度量測。使用反應曲面法（RSM）建立預測加工參數之數學模式與變異數分析，比較加工後之量測與預測結果，獲得各項加工參數的最佳化設定，可接近實驗值之95%的可信度。由實驗結果可知，在磨料顆粒0.08 mm、主軸轉速1000 rpm、間隙0.5 mm與進給速率100 mm/s，對磨料消耗的影響是最少的，磨料損耗率為0.0161 g。1~5 mm不同高度之表面粗糙度值皆有改善，皆從0.45 μm 研磨過後改善至0.09 ~ 0.39 μm ，其中以3 mm之加工參數磨料顆粒粗細0.08 mm、主軸轉速1000 rpm、間隙0.5 mm與進給速率100 mm/s，對表面粗糙度的改善影響最多，其Ra值最精細，實際值最接近預測結果，獲得加工性能表面粗糙度為Ra值 0.09 μm 。

主軸轉速屆於800-1200 rpm之間，頻率為13-20 Hz間與夾持載台之自然頻率，皆屬低頻，因磁力研磨時磨料之運動，屬撓性行為，加工時配合工件曲面自動調整間隙，降低自然頻率之影響，進而不影響研磨精度。由以上實驗所獲得數據，觀察到在低轉速800 rpm以下表面粗糙度效果不佳，而高轉速1200 rpm以上磨料損失率因離心力飛甩出導致消耗磨料過多而無法得到好的粗糙度，而關於震動頻率由於本文所使用刀具吸附磨料

顆粒，刀具本身沒有直接碰觸在這轉速範圍內工件，磨料更以吸附刀具端撓性運動，故頻率之影響於本文不列入考量。壓克力磁力研磨標準件規範目前沒有相關文獻於本文磨料類似規範，本文使用豪昱電子有限公司研發的奈米磨料，更加強實驗的可靠度，對於適當的主軸轉速、進給速率、磁力磨料、刀具與材料間隙、進給深度之因素的控制更有心得，提供未來業界使用印證考量之參考，可節省不必要的材料與時間的浪費。由於本文比較表面粗糙度與減少磨料損失率之研究，實驗結果表面粗糙度有改善降低但未達到工件透光性之要求，後續將竭盡所能加以改善，於本文暫無透光性量測數據，僅以觀察改善程度至透過壓克力可清晰或模糊看出工件下方之文字供參考。

本研究經由實驗及分析，獲得以下結論：(1)永久磁鐵刀具為平面設計，可增加磁場強度，形成類似多束刷式之研磨磁刷，增加磨粒對壓克力表面，有最佳的接觸面積與磨削力，提高研磨效率，改善表面粗糙度與降低磨粒損耗的成本。(2)實驗顯示，研磨前使用重量20 g的磨粒，磁場強度對磨料吸附率最佳，不會太多或太少，也就是不會不足或過量。實驗結果，取主軸轉速1200 rpm，進給速率200 mm/s，間隙0.5 mm，加工時間



20分鐘，為最佳的加工效率。(3)對表面粗糙度而言，於氧化鐵奈米磨粒125 μm 尺寸，在主軸800 rpm、間隙0.5 mm、進給速率100 mm/s、加工時間20分鐘，得表面粗糙值0.12 μm ，獲得最佳的表面粗糙度。對於尺寸200 μm 不銹鋼奈米磨粒，在主軸轉速1200 rpm、間隙0.5 mm、進給速率100 mm/s、加工時間20分鐘，得表面粗糙值0.16 μm 最為良好。對於200 μm 不銹鋼奈米磨粒加上樹脂成分，與未加樹脂成分，以相同條件加工後，觀察表面狀態與量測表面粗糙度，表面透光性增加，但表面粗糙度值變化不顯著。

誌 謝

本論文感謝豪昱電子有限公司，廖董事長提供實驗設備、磨粒材料與技術指導。

參考文獻

1. H-J. Ruben, in: A. NiKu-Lari, Advances in surface treatments, vol. 5, Pergamon Press, (1987), pp. 239-256.
2. Dharendra K. Singh¹, V.K. Jain, V. Raghuram, Parametric study of magnetic abrasive finishing process. Journal of Materials Processing Technology, 149 (2004), pp 22-29.
3. T. Mori, K. Hirota, Y. Kawashima, Clarification of magnetic abrasive finishing mechanism. Journal of Materials Processing Technology, 143-144(2003), pp682-686.
4. A. C. Wang, S. J. Lee, Study the characteristics of magnetic finishing with gel abrasive. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 49 (2009), pp1063-1069.
5. Yan Wang, Dejin Hu, Study on the inner surface finishing of tubing by magnetic abrasive finishing. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45 (2005), pp43-49.
6. 林清田，卓漢明，楊烈岱，曾柏昌，“AISI 304磁力研磨加工特性之研究”，磨粒加工學會年會暨加工技術研討會，(2009)。
7. V.K. Jain, P. Kumar, P.K. Behra, S.C. Jayswal, Effects of working gap and circumferential speed on the performance of magnetic abrasive finishing process, Wear 250 (2001), pp 384-390.
8. 曾柏昌，鄭振瑤，“鏡面拋光用磁性磨料製程研究”，磨粒加工學會年會暨加工技術研討會，(2009)。
9. T. A. El-Taweel, Modelling and analysis of hybrid electrochemical turning-magnetic abrasive finishing of 6061 Al/Al₂O₃ composite, The



International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 37(2008), pp705-714.

10. Hitomi Yamaguchi, Takeo Shinmura, Internal finishing process for alumina ceramic components by a magnetic field assisted finishing process, Precision Engineering 28 (2004), pp135-142.

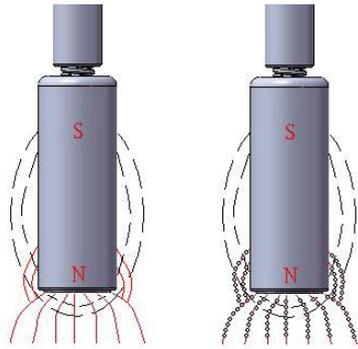
11. 張浮明、蔡東憲、江昇翰，磁力研磨加工鋁合金6061-T6之特性研究，中

國機械工程學會第二十七屆全國學術研討會論文集，DD07-006，台北市，(2010)。

12. 陳燕，巨東英，磁研磨裝置設計中的磁力線分析，Technology and Test, 2004,pp101-103.

13. H. Ysuwn, N.Ikawa, Y. Mori, K. Sugiyama, Numerically controlled elastic emission machining, Annals of the CIRP, vol.28 No.1, (1979), pp193-197.

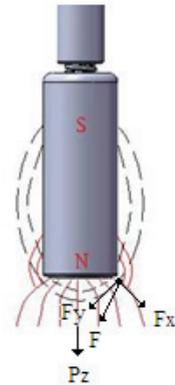
附錄圖表



圖一、磁場中磁力束刷吸附磨料情況示意圖與磁棒實際圖



圖二、吸附於磁棒上之磨料圖



圖三、磁化線之分力分佈情形

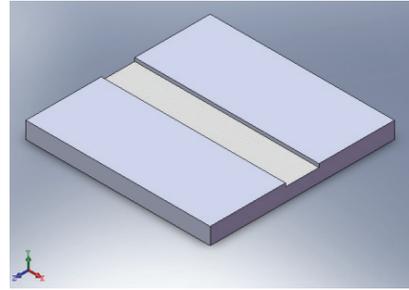


圖四、CNC 銑床加工機(EMV-600)





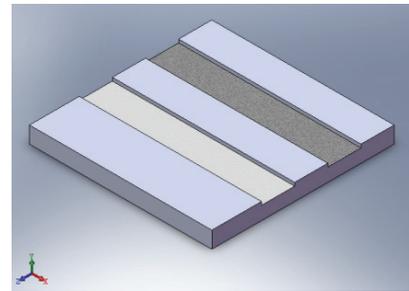
(a) 氧化鐵奈米磨粒(125µm),



(a) 氧化鐵奈米磨粒(125µm)



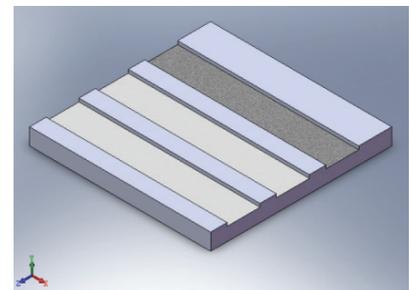
(b) 不鏽鋼奈米磨粒(200µm),



(b) 不鏽鋼奈米磨粒(200µm)



(c) 不鏽鋼奈米磨粒(200µm+樹脂)



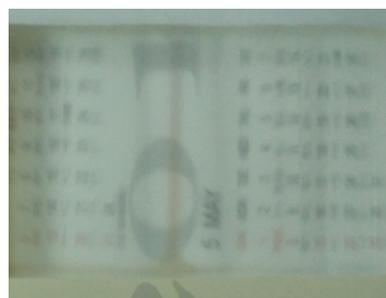
(c) 不鏽鋼奈米磨粒(200µm+樹脂)

圖五、吸附於磁棒上之磨料

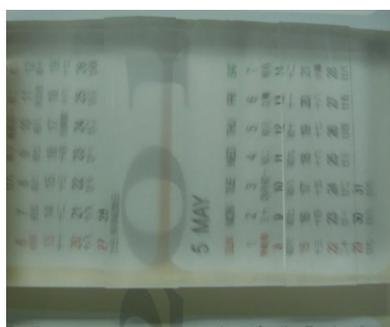
圖六、工件加工示意圖



加工前:銑床加工銑削



加工後: (b)不鏽鋼奈米磨粒(200µm)



加工後:(a)氧化鐵奈米磨粒(125µm)



加工後: (c)不鏽鋼奈米磨粒(200µm+樹脂)

圖七、壓克力加工前與加工後比較圖

表一、加工條件與設備表

工作條件	單位	說明
磁力棒(刀具)		永久磁鐵
實驗材料		壓克力
工件尺寸	mm	120 x 120 x 10
氧化鐵奈米磨粒	µm	125µm磨料
不鏽鋼奈米磨粒	µm	200µm磨料
不鏽鋼奈米磨粒	µm	200µm磨料+樹脂
主軸轉速	rpm	800~1200
進給速率	mm/s	200
刀具與工件間隙	mm	0.5
研磨時間	sec	600~1500
切削液		樹脂



表二、壓克力工件化學成分表

過氧化二苯甲醯	甲基丙烯酸甲酯單體	壓克力
1	200	(C ₅ O ₂ H ₈) _n

表三、氧化鐵奈米磨粒 125 μ m尺寸

工件號數	加工條件		磁力研磨			表面粗糙度 Ra(μ m)		
	轉速 (rpm)	進給 (mm/s)	轉速(rpm)	進給(mm/s)	磨料			
初始條件	3000	200				0.95	0.90	0.89
1			800	800 (時間 10 分鐘)	125 μ m磨粒	0.55	0.52	0.47
2			800	100 (時間 5 分鐘)	125 μ m磨粒	0.19	0.13	0.12

表四、尺寸 200 μ m不銹鋼奈米磨粒

工件號數	加工條件		磁力研磨			表面粗糙度 Ra(μ m)		
	轉速 (rpm)	進給 (mm/s)	轉速(rpm)	進給(mm/s)	磨料			
初始條件	3000	200				0.95	0.90	0.89
1			800	100	200 μ m磨粒	0.33	0.30	0.22
2			1200	100	200 μ m磨粒	0.26	0.17	0.16

表五、尺寸 200 μ m不銹鋼奈米磨粒加樹脂

工件號數	加工條件		磁力研磨			表面粗糙度 Ra(μ m)		
	轉速 (rpm)	進給 (mm/s)	轉速(rpm)	進給(mm/s)	磨料含樹脂			
初始條件	3000	200				0.95	0.90	0.89
1			800	100	200 μ m磨粒	1.24	1.07	0.93
2			1200	100	200 μ m磨粒	1.11	1.21	1.98

