

精微磨料螺旋研拋複雜表面精修之研究

曾信智

南臺科技大學機械工程系

hjtzeng@stust.edu.tw

摘要

本研究主要是應用於複雜表面的螺旋研拋技術，其加工機制藉著高速旋轉螺桿傳遞磨料，對被加工件表面產生微細的研拋去除作用，而獲得精細的加工表面，且能達到去除微細毛邊效果的一種精密加工方法。本研究亦可擴展應用到各式精密滾珠導螺桿的超精密拋光，其加工精度與加工時間較一般傳統方法更為優異。本實驗首先設計製作一具有螺旋轉動，可快速傳送磨料的精密拋光裝置，選配精微磨料螺旋研拋重要的加工參數，探討一新型螺旋研拋法改善複雜表面精修之材料去除率及表面粗糙度的效果；實驗的加工參數包括磨料粒徑、濃度、加工間隙、轉速及加工時間，以獲得最大材料去除率與最佳表面粗糙度的加工條件組合。

關鍵詞：螺旋研拋、滾珠導螺桿、材料去除率、表面粗糙度

Investigation on Micro Spiral Polishing Applied to Complex Surface

Hsinn-Jyh Tzeng

Department of Mechanic Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology

Abstract

This study is mainly applied on the surface of the spiral polishing technology. It is an ultra-precision machining method that transmits the abrasive through the high-speed rotary screw to have small polishing effect on machine. It can get a fine processing surface and achieve the removal of fine burrs. This study can also be extended to ultra-precision polishing for all kinds of precision ball screw. Its processing precision and processing time are more excellent than the traditional methods. In the experiment, precision polishing equipment with helical rotation and abrasive that can make rapid transmissions was designed and manufactured. Then, the method was applied to select the important machining parameters in the fine abrasive spiral polishing. By a new spiral grinding method Different parameters were employed to observe the material removal rate (MRR) and the surface roughness (SR). The processing parameters in the experiment included the abrasive particle size, abrasive concentration, gap, revolution speed and machining time, and so on. Each parameter was selected to obtain the processing conditions that contributed to a combination between the maximum material removal rate and the lowest surface roughness.

Keywords: Spiral Polishing, Ball Screw, Material Removal Rate (MRR), Surface Roughness (SR)

壹、前言

近年來，由於精密加工技術日新月異發展與進步，隨著各式產品的加工精度需求，其製程技術日益精進[1—4]，各種精微研拋加工技術的研究相當蓬勃[5—9]。由於精密機械之滾珠螺桿組件、航太工業、車輛傳動、光學產業與生醫工程相關領域研究與應用備受關注，所需元件其形狀相當複雜且大都不易拋光，特別是傳動精密導螺桿件或是具有微細螺旋線等複雜表面之元件，其高效率及高精度製作技術研發已成為重要的研究課題，其中又以利用磨料流動加工法(AFM)最受矚目，如圖 1 所示。磨料流動加工是利用磨粒加入黏滯性流體形成流漿(Slurry)加工介質，具流動特性且均勻分佈，並有良好的循環流動效果，在加工的表面產生均勻研磨效果，在一定壓力下流經或通過工件的表面，同時藉磨粒與加工件在流動過程產生相對運動，使硬質磨粒直接接觸加工表面，產生微量去除作用，達到表面精修目的。目前相關論文有 Gorana[10—11]等人曾探討加工之擠製壓力、磨料濃度與磨粒粒度對材料去除量、表面粗糙度、切割力與作動磨粒密度之影響，如圖 2 所示。磨料之流體是填充於往復運動的密閉容器內，並輔以夾持試件之模具或裝置，利用油壓缸或氣壓缸往復擠壓研磨與精修試件表面，兼具有去除毛邊與拋光效果。Jain [12]等人提出磨料流動加工的材料主要磨耗方式，主要是利用流體研磨之碳化矽磨料顆粒刮除工件表面，取代傳統砂輪研磨法而達到精修目的，如圖 3 所示。現有砂輪缺點是外形剛性固定，易產生過熱，影響工件精度與材質，消耗量大且不能重覆使用及成本高等缺點，流體研磨特點是磨料具黏彈性，幾乎不受工件幾何外形所限制，操作簡便、成本低廉與生產效率高，其組成是利用有機膠質配合高分子材料與碳化矽，調配出具有黏性且經濟實用磨料，選用磨粒種類有鑽石、陶瓷、碳化硼、鋼砂或碳化矽(SiC)與氧化鋁等，基於成本考量與實用性。Rhoades[13—15]等人亦對磨料流動的加工參數進行研究，得知 AFM 特別適合加工內部形狀複雜的工件，同時藉著改變 AFM 的加工參數，精確控制加工後表面的狀態。Yamaguchi [16]等人使用旋轉磁極帶動磁性磨料轉動，探討磁極的形狀和轉動速度對表面粗糙度和材料移除量之影響。Jha[17]等人研發並設計出結合磨粒與電磁流變精拋的加工方式，探討不同磨料配置對表面粗糙度和材料移除量之影響。Singh[18—19]等人則發展磁力磨料流動加工方法，探討對表面粗糙度和材料移除量之影響，並以田口實驗設計和 ANOVA，求得磁力場輔助磨料流動加工的材料移除量，與降低表面粗糙度之最佳參數組合。Jain[20]等人運用神經網路於磨料流動加工建立模式分析，並選擇最佳參數條件。然而這些方法皆藉著推擠磨料作往復直線運動，對於複雜曲面不易加工且磨料移動緩慢，其加工效率亦不佳。此外，在國防軍事科技的應用方面，如各制式武器系統用途之槍管內微細膛線，其高精度成形加工需求或微細毛邊去除問題，目前的傳統加工法皆甚難高效率地改善其表面精度，所耗費的加工時間過長，不符合經濟效益，加工深度亦受到限制。

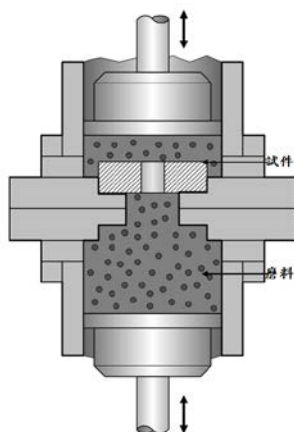


圖 1 磨料流動加工法[9—10]

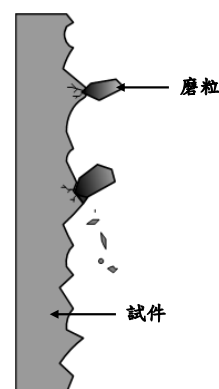


圖 2 磨料加工機制[12]

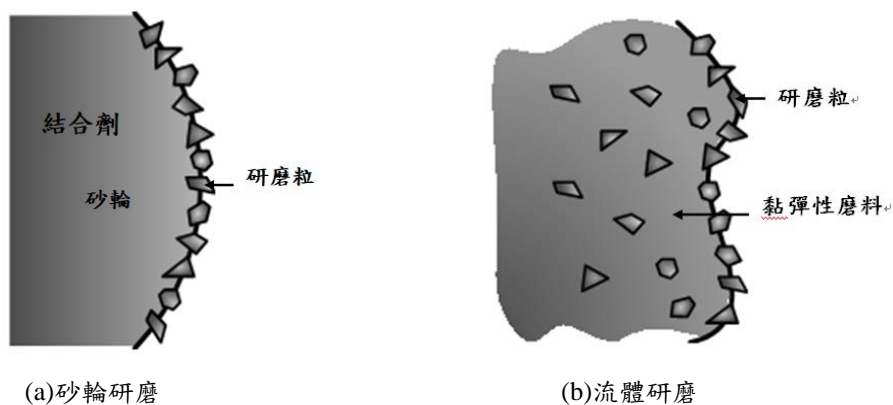


圖 3 磨料外觀示意圖

貳、研究動機與目的

為有效解決複雜曲面不易加工技術瓶頸，本研究設置一種新型的精微磨料螺旋研拋法，改善其複雜曲面精度，進而延長產品使用壽命，並能有效的去除毛邊，快速精修前加工道次殘留在加工件表面之屑渣或變質層，降低表面粗糙度或精度，達到表面精拋目的。

本研究之精微磨料螺旋研拋法，係一種利用高速螺旋迴轉傳遞磨料拋光加工的技術，研拋前試件表面粗糙不平整，經研拋後試件表面拋光平整，有明顯精修改善效果，其基本加工機制，如圖 4 所示。當螺桿高速旋轉時，磨料順著螺桿的螺旋溝槽朝上移動，被傳動之磨料直接高速接觸被加工件，其流動行程較傳統往復運動長，而達到表面均勻拋光作用，本實驗裝置內之磨料具有循環作動，所以磨料成本不高，可獲得低成本、快速且有效率去除毛邊、變質層等功能，達到被加工件快速精拋的加工效果。基於前述此加工法的優異特性，所以本研究利用螺旋拋光法，特別適用於精密傳動元件、生醫工程或國防軍事用途之零組件表面精微加工，諸如滾珠導螺桿、生醫用微細流道的微射出模具、人工關節或骨架之微細固定針銷或內孔微細螺旋線，槍炮管螺旋膛線等傳統研磨法所不易加工的複雜曲面之精密研拋方法。

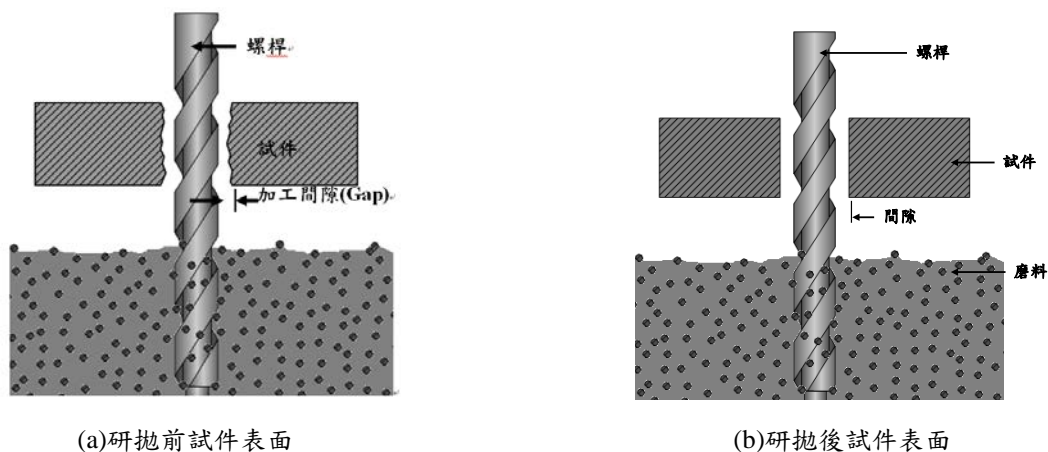


圖 4 磨料螺旋研拋作動機制示意圖

參、實驗方法

一、實驗材料

本實驗選用材料合金鋼(Alloy steel)，成份性質及尺寸，如表 1 所示。化學成分元素主要是鐵(Fe)、碳(C)及鉻(Cr)。尺寸為外徑 30.7×內徑 7.6×高度 8mm，內表面有一條螺旋溝槽，試件外形及剖面，如圖 5 所示。使用磨料組成是砂油、腊油與高分子膠液等，再添加不同粒徑的碳化矽(SiC)混合調配後，磨料

組成比例是以濃度重量百分比計算調製，使用碳化矽(SiC)磨粒之重量與混合矽油、腊油與高分子膠體之重量比，即磨料濃度(wt%)=(碳化矽磨粒重量)/(混合碳化矽磨粒與矽油、腊油與高分子膠體總重量)×100%，使磨料具有流動性，增加磨潤精修去除能力，初始磨料具有高黏滯性，如圖 6 所示，因磨料為高分子鍵結，顯示有較佳凝聚特性，故適用於本研究表面研拋。圖 7 改變磨粒粗細與濃度對初始磨料黏度之影響的實驗結果。由圖可知，磨粒粒徑 12 μm 及濃度 30% 的黏度最小，究其原因 SiC 細磨粒之濃度含量的易受到泥漿狀磨料所包覆，使黏度變小，反而阻礙磨粒的流動，降低磨削速度，不利於微細流道表面精修，當濃度增大時，而實際參與磨粒的移動數量增加，有利於提升磨削效率。圖 8 顯示加工條件對磨料黏度影響，粗顆粒 150 μm 磨料對不同濃度比較其黏度變化，初始調製磨料為半固體凝膠(Gel)類似半固狀，具有較高的黏滯性，以拉壓力計量測其黏性，再經過磨料流動擠壓或螺旋研拋後，形成低黏性且具有良好的流動性之流體性質，其黏度有明顯下降趨勢，研磨機制亦有攪拌均勻效果，促使磨料有分散且增加流動性，從各項加工條件對表面粗糙度影響及研拋前後之 SEM 照片比較獲得驗證，確能達到研磨效果。本實驗是以可程式黏度計觀察其磨料在研磨前後的黏度變化。磨料流動溫度方面，使用數位式溫度設備量測，利用感溫線深入模具之試件接觸磨料，便於觀察並紀錄磨料在研磨前後溫度變化，不論在磨料粒徑與濃度，經過磨料流動研拋後，磨料溫度並未有明顯差異，隨著加工時間增加，上昇溫度最高 5 °C 以內，故對試片形狀精度的影響甚微。磨料的調配過程中，由於磨料於不同粒徑和濃度的變化影響下，會使得調製出的磨料呈現截然不同的黏滯性，尤其是剛開始所形成的磨料，經過高速螺旋研拋後呈現較高的流動性。

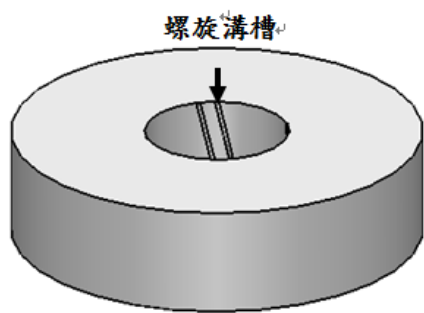


圖 5 實驗材料示意圖



圖 6 初始磨料外觀形貌；12 μm-50%

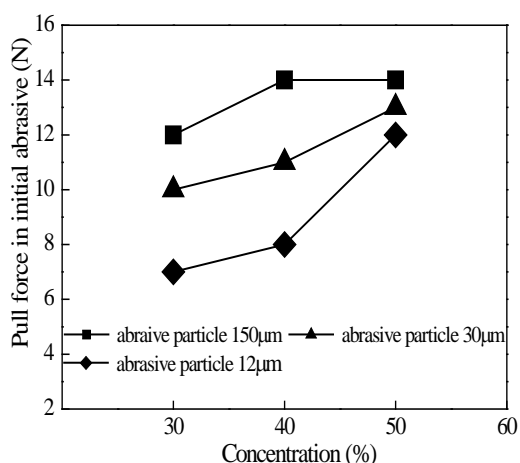


圖 7 初始磨料之黏性測試比較

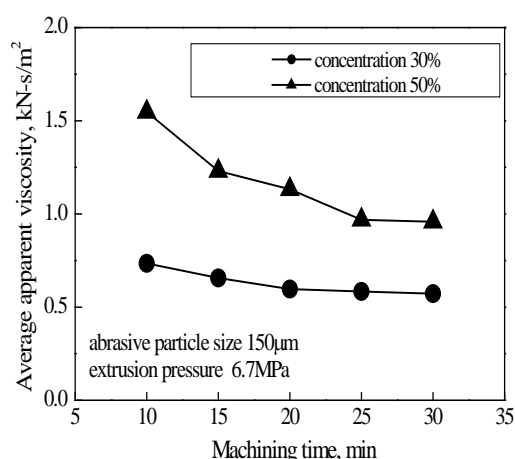


圖 8 加工條件對磨料黏度之影響

表 1 實驗材料尺寸與成份性質

項目	規格
材質	合金鋼
尺寸 (mm)	30.7 OD, 7.6 ID, 8 H
Tensile strength (MPa)	880~1030
Yield strength (MPa)	785~930
Impact (Kg-m/cm ²)	8
Elongation (%)	12
Hardness	HRc 27~28
C	<11.6%
Cr	<1.3%
Fe	<84.5%
Other	Rem.

二、實驗設備

螺旋研拋的裝置，主要是由轉動螺桿、上蓋、本體與底座所構成，圖 9 磨料循環作動機制示意圖，本體內裝填調製黏性磨料，試件裝置於上蓋與本體的空間內，當研拋作動時，因磨料封閉於本體內，不會有外洩，可重覆循環使用，當螺桿高速旋轉帶動磨料螺旋轉動時，磨料會一面擠壓試件表面，一面進行高速螺旋移動，由於該磨料是一種適合精微加工的黏性磨料，具有快速精拋效果。主軸柄上端與加工機台旋轉軸旋合，裝置在 CNC 或傳統加工機台上，利用加工機控制主軸轉速，其下端與上蓋間的軸承組配鎖合一螺桿，使該螺桿穿設於上蓋而伸入研拋裝置本體中，本體並與上蓋鎖合呈中空狀容器，加工時之磨料與試件裝入本體內，螺桿通過試件內孔後再上蓋，內孔與螺桿直徑之差為加工間隙，即試件內孔螺桿直徑/2，磨料藉由複數夾板周圍數個通孔循環作動與補充，更具實用性，如圖 10 所示。本體裝填操作簡易且快速，藉著高速旋轉螺桿傳遞磨料，試件表面產生微小的研拋作用，而獲得精細的加工表面，達到去除槽孔表面之微細毛邊與精修效果。初始磨料具較佳凝聚特性，材料去除速度較快，但經由螺桿高速旋轉攪動作後，其黏度會隨著加工時間與加工溫度而有下降的趨勢，顯示組成高分子之磨料的鍵結遭受破壞，形成流動性較佳之研拋流體，有減緩材料移除效果，由於磨料拘束性較低，所以材料去除速度下降，進入精密研拋狀態，有助於流體磨料的微量精修能力，大幅改善試件表面精度，獲得極佳的表面粗糙度。

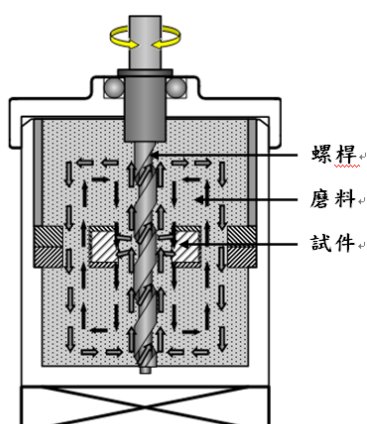


圖 9 磨料循環作動示意圖

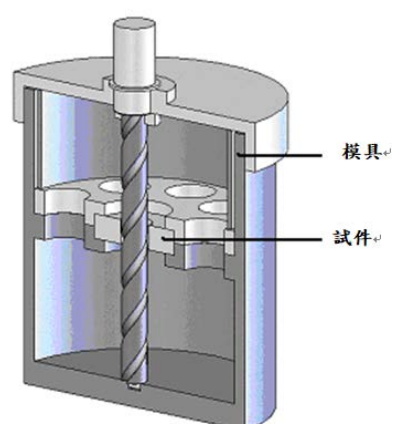


圖 10 實驗研拋裝置示意圖

三、實驗方法

本實驗磨料螺旋研拋方法，具良好的毛邊去除及表面精修加工能力，以研拋裝置與磨料對試件加工，利用磨料粒徑、濃度、加工間隙、轉速與加工時間對表面粗糙度與材料去除率實驗研究，實驗參數條件，如表 2 所示。包含磨料粒徑、磨料濃度、加工間隙、轉速與加工時間，對精修複雜表面的影響，以獲得最佳表面粗糙度的加工條件組合。參數條件分別選取磨料之粒徑(D)12、30 與 150 μm ，濃度(C)30%、40% 與 50%，加工間隙(G) 0.5、0.8 與 1mm，轉速(R)600、800 與 1000rpm 與加工時間(T)30、45、60、75 與 90 min，同時觀察研拋槽孔精度的改善效果。

表 2 實驗參數條件

加工參數	條件
磨料粒徑(μm), D	12, 30, 150
濃度(%), C	30, 40, 50
加工間隙(mm), G	0.5, 0.8, 1
轉速(rpm), R	600, 800, 1000
加工時間(min), T	30, 45, 60, 75, 90

肆、結果與討論

螺旋研拋加工機制，利用流體介質中含有多量的硬質磨粒精微加工，非直接使用成形刀具或磨輪去除材料，所以受刀具或磨輪本身的精度所帶來問題影響甚微，則是由流體磨料的粒徑、濃度、加工間隙、轉速及加工時間等實驗參數影響其研拋精度，為瞭解實驗參數的影響程度，就實驗研究結果探討如后：

一、加工條件對表面精度之影響

(一)轉速與加工時間對磨料黏度的影響

調製初始磨料在細粒徑 12 μm 與磨料濃度 50%，觀察外觀黏度較高具有較佳凝聚特性，以拉壓力計量測其黏性，選擇加工間隙 0.5 mm，隨著加工時間與轉速增加，黏度有明顯下降的趨勢，形成流動性極佳研磨流體，由可程式黏度計量測觀察其磨料在不同加工條件研磨前後的黏度變化，如圖 11 所示。由此可知，磨料經過加工後，黏度下降愈明顯，因而形成良好的流動性，在螺旋研拋過程中，此特性可使加工形式愈趨於精微之研磨拋光，獲得極佳之表面精修效果。

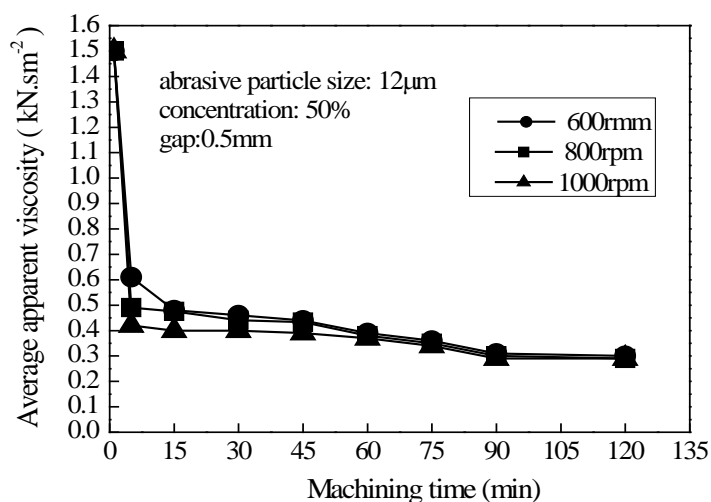


圖 11 轉速與加工時間對磨料黏度之影響

(二)磨料粒徑與加工時間對表面粗糙度的影響

圖 12 不同粒徑對磨料之影響比較，當磨粒粒徑越大是粗研磨狀態，材料去除率較高，對表面粗糙度改善較不明顯，由於粗顆粒的磨粒受磨料作用面愈大，當濃度增加時磨粒間相互擠壓愈易顯露於磨料表面，隨著加工時間增加，有利於表面研磨效率當，當選擇細磨粒是精細研磨狀態，對表面粗糙度改善更明顯，達到快速精修表面效果。圖 13 使用不同粒徑的磨粒在相同的磨料濃度 50%、轉速 1000rpm 與加工間隙 0.5mm 研磨條件下，分別選用磨粒 12、30 與 150 μm 粒徑對表面粗糙度改善效果之關係，由實驗結果得知，磨料粒徑越小，研磨效果較佳，獲得良好精修表面與降低表面粗糙度，究其原因可能是螺旋研拋加工時的磨粒成游離狀態，細小磨粒易受其高轉速離心力影響所致，實際產生的研磨作用較強，有助於表面精拋效果；隨著加工時間的增加，當加工時間 90 分鐘時，選用細顆粒 12 μm 條件下，能獲得較理想的精修改善效果，使其表面粗糙度由 0.23 $\mu\text{m Ra}$ 大幅降至 0.05 $\mu\text{m Ra}$ ，獲得較佳精細表面。反之，對於選用粗顆粒 150 μm ，表面粗糙度雖降至 0.08 $\mu\text{m Ra}$ ，但是改善效果較細顆粒 12 μm 不明顯，其主因使用粗顆粒之磨料，獲得較高材料移除率，即單位時間內粗顆粒之加工量會比微細磨粒高，經由實驗觀察後的表面粗糙度顯示，微細顆粒螺旋研拋效果較為理想，所以判斷細顆粒之磨料可獲得較均勻，且精微的表面研磨效果，而粗顆粒在空間有限的加工間隙內，磨粒間相互擠壓干涉，且移動靈活性差，雖有助於材料去除，惟對於表面研磨加工的均勻性就不理想，影響表面粗糙度改善效果。另外由於粗顆粒處於高速研拋狀態，對精細表面會產生過量磨削，隨著加工時間增長益加明顯。

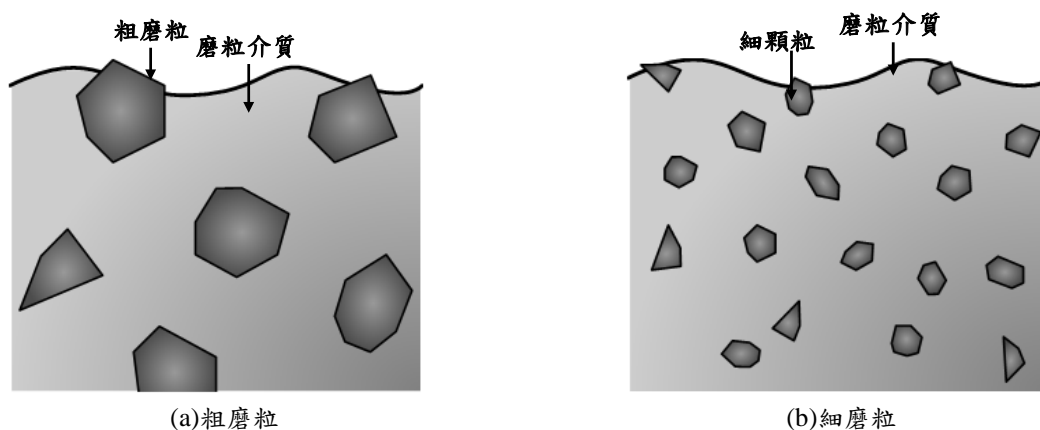


圖 12 不同粒徑對磨料之影響比較

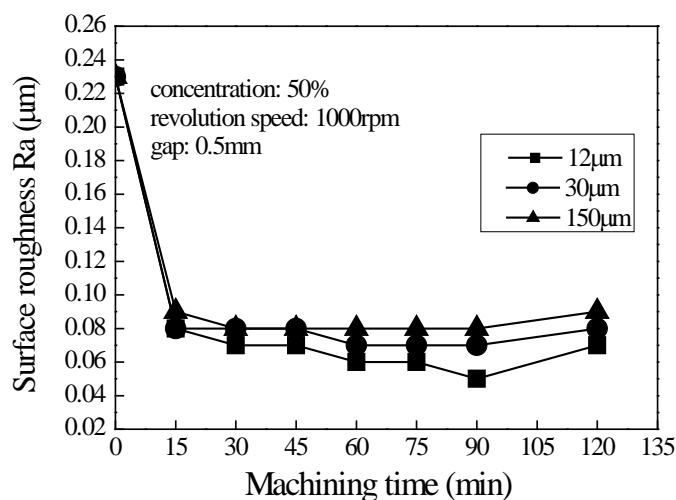


圖 13 磨料粒徑與加工時間對表面粗糙度之影響

(三)磨料濃度對表面粗糙度與材料去除率的影響

圖 14 磨料之 SiC 磨粒含量多寡對表面粗糙度改善的實驗結果，由圖比較可知磨料濃度太小時，因實際參與加工之磨粒數量較少，所以對於表面的改善效果不佳，較高濃度促使磨粒凝聚在試件表面處，而增大磨削能力，獲得較佳細緻表面。由圖中比較可知，當細顆粒 $12\ \mu\text{m}$ ，轉速 $1000\ \text{rpm}$ 與加工間隙 $0.5\ \text{mm}$ 研磨條件下，分別選用三種磨料濃度 50% 、 40% 與 30% 與加工時間對表面粗糙度影響，當高濃度 50% 較低濃度 30% 於研拋過程中，加工時間 $90\ \text{min}$ 有明顯差異，顯示磨料濃度高時，因實際參與加工之磨粒數量較多，所以對於表面粗糙度改善效果極為明顯，高濃度促使磨料凝聚在內孔的表面，增大研磨潤修能力，而獲得較佳細緻表面。圖 15 不同轉速對材料去除率與磨料溫度的影響，當細顆粒 $12\ \mu\text{m}$ 、高濃度 50% 、加工間隙 $0.5\ \text{mm}$ 與加工時間 $90\ \text{分鐘}$ 研磨條件下，分別選用三種不同轉速 600 、 800 與 $1000\ \text{rpm}$ 比較，由實驗結果可知，細顆粒且高濃度之磨料有利於表面精修，惟對於材料去除率影響並不明顯，此理由顯示精微螺旋研拋技術為極微量研磨加工法。雖然 SiC 小磨粒易受到黏滯性磨料所包覆，但隨著轉速增加時，有利於形成極佳流動性研磨體，在高濃度之磨料狀態下，磨粒實際的移動數量增加而提升研磨效率，加工時間 $90\ \text{分鐘}$ ，材料去除率有微量增加，研磨作用相對磨料上升溫度最高於 5°C 以內。當螺旋研拋過程，選擇高轉速 $1000\ \text{rpm}$ 相較於低轉速 $600\ \text{rpm}$ ，使工作溫度由 3°C 上升到 5°C 。究其主因是轉速增加，使得螺桿驅動磨料加快流動速度，增加磨料之磨粒與試件表面間接觸之摩擦，由於摩擦力產生熱量增加，使磨料工作溫度上升，所以加工溫度隨著轉速的增加而升高。顯示螺桿高速旋轉帶動磨料流動時，產生較大摩擦力，不論是磨料之磨粒與磨粒間相互擠壓的摩擦力，或是磨料與試件表面相互研拋的摩擦力都會產生比較劇烈溫度的變動，因此而產生較高的熱量；然而隨著加工時間的增加，磨料的黏度逐漸降低且流動性佳，再加上模具之容器具有良好散熱效果，因而能有效減緩研拋的工作溫度。

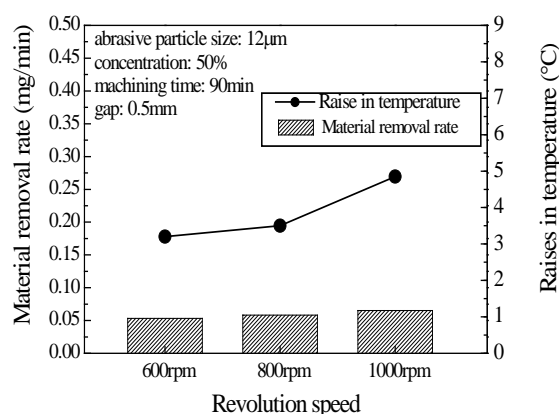
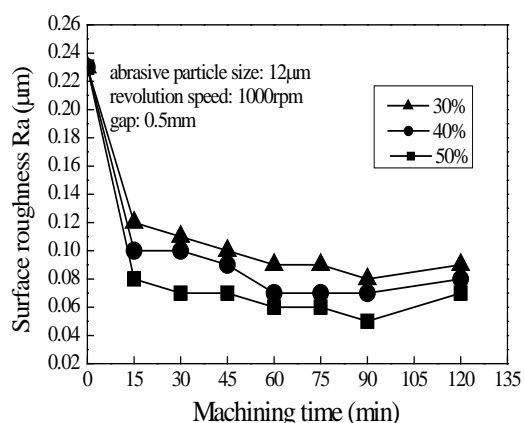


圖 14 磨料濃度與加工時間對表面粗糙度之影響

圖 15 轉速對材料去除率與磨料溫度之影響

(四)加工間隙對表面粗糙度的影響

圖 16 加工間隙對表面粗糙度之影響，當細顆粒 $12\ \mu\text{m}$ 、濃度 50% 與轉速 $1000\ \text{rpm}$ 研磨條件下，分別選擇三種不同加工間隙 0.5 、 0.8 與 $1\ \text{mm}$ 與加工時間比較，由圖可知，在磨料研拋過程，在較小加工間隙 $0.5\ \text{mm}$ ，對於流動性佳之螺旋研拋流體，形成磨粒相互擠壓，使得實際作用於試件研磨力增強，有利於表面精拋效果，不論在高轉速或低轉速條件下，而能獲得較低的表面粗糙度。加工間隙 $0.5\ \text{mm}$ ，轉速 $1000\ \text{rpm}$ 條件下，有助於表面粗糙度改善，隨著加工時間增加到 $90\ \text{分鐘}$ ，改善效果至為明顯，表面粗糙度降至 $0.05\ \mu\text{m Ra}$ ，究其原因在於較小加工間隙 $0.5\ \text{mm}$ ，其螺桿高速驅動磨料的離心力較能發揮在磨料對試件表面的研拋作用，達到穩定且加工效率；反之，越大加工間隙 $1\ \text{mm}$ ，就愈容易使螺桿帶動磨料的驅動力無法有效傳遞到試件的內孔表面，降低研拋力不足問題。當加工時間超過 $90\ \text{分鐘}$ 後，對表面粗糙度並未改善，尤其在增加到 $120\ \text{分鐘}$ ，會有過量研磨加工現象，反而不利於表面粗糙度改善，由實驗得知表面粗糙度提高到 $0.07\ \mu\text{m Ra}$ 。

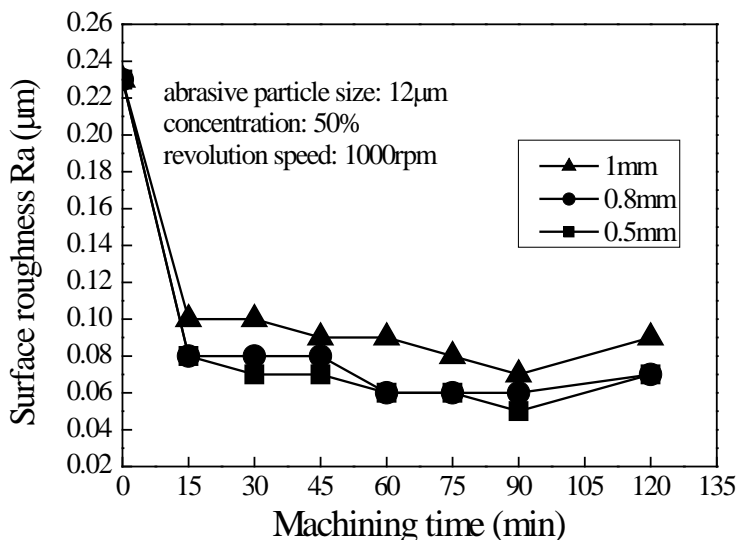


圖 16 加工間隙與時間對表面粗糙度之影響

(五)加工轉數對表面粗糙度與材料去除率之影響

圖 17 不同加工轉速對孔內表面粗糙度之影響，當細顆粒 12 μm、濃度 50%與加工間隙 0.5 mm 研磨條件下，實驗分別設定三種不同轉速 600、800 及 1000 rpm，由圖可知，轉速達到 1000 rpm 時，表面改善效果最佳，由於高轉速 1000 rpm 能提供較大的離心力，且能快速驅動磨料，在一定時間內研拋作動次數會比低轉速 600 rpm 高，對磨料螺旋研拋機制有正面的幫助，顯示受較高轉速的磨粒所受擠壓作用力大，對表面的研磨效果愈明顯，有助於材料研磨去除。隨著加工時間改變，測量試件表面粗糙度值和材料移除率，由圖 17 得知經螺旋研拋時間 15 分鐘後，表面粗糙度有明顯大幅度的改善，由 0.23 μm Ra 降至 0.08 μm Ra；隨著加工時間的增加，當加工時間 90 分鐘時，獲得微量材料去除率增加，而表面粗糙度大幅降至 0.05 μm Ra，改善效果極為顯著；若加工時間再增加到 120 分鐘時，則會因過度加工關係，使得表面粗糙度反而變差，無法再獲得更理想的效果，研判螺旋研拋最佳加工時間 90 分鐘。圖 18 加工時間對材料去除率與表面粗糙度之影響，當細顆粒 12 μm、濃度 50%、轉速 1000 rpm 與加工間隙 0.5 mm 研磨條件下，由圖中觀察對材料移除率影響，隨著加工時間的增加而有略增趨勢，初始的磨料具有較高的黏彈性，材料去除量大為粗研磨狀態，所以加工量較為顯著；隨著加工時間的增加，磨料黏度逐漸下降，形成流動性佳之研拋流體，此時材料去除量雖略增，惟材料移除速度有下降且趨緩，而進入超精密研拋狀態，有助於流體磨料的微量精修能力，表面粗糙度大幅降至 0.05 μm Ra，獲得較細緻的表面。

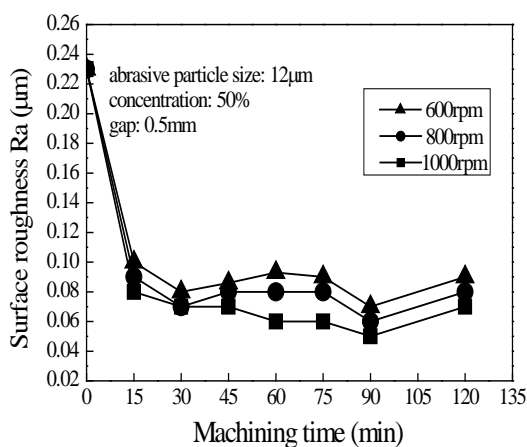


圖 17 轉速與加工時間對表面粗糙度之影響

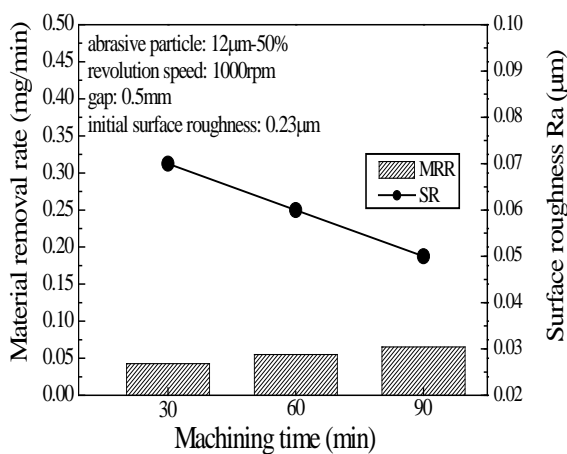


圖 18 加工時間對材料去除率與表面粗糙度之影響

二、螺旋研拋加工法對表面形貌與精修改善效果

圖 19 實驗觀察結果得知，不論在磨料粒徑與濃度對材料去除率與表面粗度影響，隨著加工時間增加，產生微量材料研拋去除，對於表面粗糙度的改善效果更佳，再由掃瞄式電子掃瞄顯微鏡(SEM)放大倍率觀察比較結果，經螺旋研拋後的試件表面有明顯研磨痕跡，尤其選擇較細粒徑 $12\ \mu\text{m}$ 與磨料濃度 50%，獲得精細研拋表面。尤其在使用較小加工間隙 $0.5\ \text{mm}$ 作用下，研拋加工時間 60 分鐘，當轉速 800 rpm，表面粗糙度由 $0.23\ \mu\text{m Ra}$ 大幅降至 $0.08\ \mu\text{m Ra}$ ；再增加轉速 1000 rpm，表面粗糙度降至 $0.06\ \mu\text{m Ra}$ ，隨著加工時間 90 分鐘後，表面粗糙度降至 $0.05\ \mu\text{m Ra}$ ，對表面粗糙度改善成效更佳，呈現精微螺旋研拋法優異特性。

綜合上述實驗結果，選用細磨粒及高濃度之磨料，再搭配較小的加工間隙與適當的加工時間，確能獲得最佳參數條件組合。由實驗結果顯示，隨著加工時間與轉速的增加，磨料會呈現良好的流動性，此特性有利於螺旋研拋均勻，達成理想之表面精拋效果。圖 19(a)是研拋前之試片表面形貌，表面有裂痕散布及凹凸不平，當加工時間 60 分鐘與增加轉速到 800 rpm，觀察研拋後表面形貌，有明顯被磨粒研磨的痕跡，其表面粗糙度在第一階段由 $0.23\ \mu\text{m Ra}$ 大幅降至 $0.08\ \mu\text{m Ra}$ ，如圖 19(b)所示。第二階段增加轉速到 1000 rpm，研拋後之表面之輪廓明顯變的平緩而細緻，表面粗糙度更進一步降至 $0.06\ \mu\text{m Ra}$ ，顯示試件經研拋後，表面粗糙度獲得有效改善，確能快速精修前加工道次殘留在試件表面痕跡，有效降低表面粗糙度，達到表面精拋目的，如圖 19(c)所示。

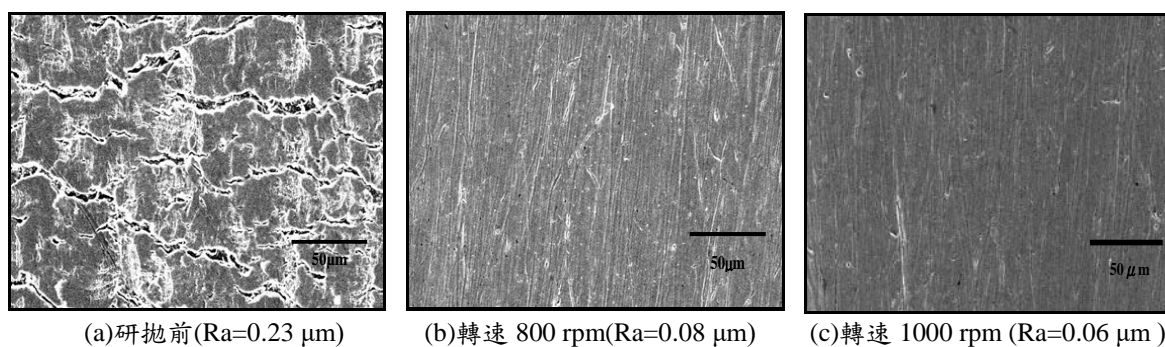


圖 19 研拋前後表面比較之 SEM 照片圖

伍、結論

本研究主要以磨料螺旋研拋法，應用於內孔溝槽表面精修改善，探討表面粗糙度及材料去除率的研究，去除毛邊與精修表面之屑渣，降低表面粗糙度，達到表面精拋目的。由磨料黏度方面，選用較細顆粒與高濃度的磨料，隨著加工時間與轉速增加，大幅降低磨料黏度，形成流動性極佳的研磨流體，有助於精微螺旋研拋能力。研拋過程磨料溫度在 $5\ ^\circ\text{C}$ 內提昇的差異性並不明顯，具有良好且穩定的加工狀態，顯示影響試件表面精度甚微。

實驗結果得到最佳參數條件，分別是磨料粒徑 $12\ \mu\text{m}$ 、濃度 50% 與加工間隙 $0.5\ \text{mm}$ ，對於材料去除率，確實能有效去除毛邊，隨著增加轉速 1000 rpm 及加工時間，有助於研拋作用，表面粗糙度由 $0.23\ \mu\text{m Ra}$ 大幅降至 $0.05\ \mu\text{m Ra}$ ，得到精修表面效果。由研究結果驗證精微磨料螺旋研拋，獲得低成本、快速且有效去除與精修改善技術，達到快速表面精拋目的。

參考文獻

- [1] H. C. Li, H. D. Yang, C. J. Zhu, B. X. Yang, and J. H. Guo. (2018). O simulation-based approach to modeling the chip formation energy of polishing process, *International Journal of Machining Science and Technology*, 22(1), 65-85.
- [2] J. K. Sambharia, H. S. Mali, and V. Garg. (2018). Experimental investigation on unidirectional abrasive flow machining of trim die workpiece, *International Journal of Materials and Manufacturing Processes*, 33(6), 651-660.
- [3] V. H. Bui, P. Gilles, T. Sultan, G. Cohen, and W. Rubio. (2017). A new cutting depth model with rapid calibration in abrasive water jet machining of titanium alloy, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(5-8), 1499-1512.
- [4] K. Kowsari, M. Papini, and J. K. Spelt. (2017). Selective removal of metallic layers from sintered ceramic and metallic plates using abrasive slurry-jet micro-machining, *International Journal of Manufacturing processes*, 29, 252-264.
- [5] K. L. Tan, S. H. Yeo, and C. H. Ong. (2017). Nontraditional finishing processes for internal surfaces and passages: A review, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*, 231(13), 2302-2316.
- [6] M. Sarkar, and V. K. Jain (2017). Nanofinishing of freeform surfaces using abrasive flow finishing process, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*, 231(9), 1501-1515.
- [7] 張耿維 (2003)。磁力研磨與電解磁力研磨之拋光特性研究(博士論文)。國立中央大學機械工程研究所，桃園市。
- [8] 林炎成 (2001)。放電加工表面改質與精修效果之研究(博士論文)。國立中央大學機械工程研究所，桃園市。
- [9] 張浮明、張瑞慶與周志忠 (譯)(2008)。非傳統加工(原作者：E. J. Weller)。新北市：高立圖書公司。
- [10] V. K. Gorana, V. K. Jain, and G. K. Lal. (2004). Experimental investigation into cutting forces and active grain density during abrasive flow machining, *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, 44(2-3), 201-211.
- [11] K. Cheng, Y. Shao, R. Bodenhorst, and M. Jadv. (2017). Modeling and simulation of material removal rates and profile accuracy control in abrasive flow machining of the integrally bladed rotor blade and experimental perspectives, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139(12), 121020-8.
- [12] R. K. Jian, and V. K. Jain. (1999). Simulation of surface generated in abrasive flow machining (AFM) process, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 15(5), 403-412.
- [13] L. J. Rhoades. (1998). Honing with abrasive flow and orbital abrasive flow processes, *SME Technical Paper, MR*, 216, 1-16.
- [14] V. K. Jain, S. G. Adsul. (2000). Experimental investigations into abrasive flow machining (AFM), *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40(7), 1003-1021.
- [15] R. K. Jian, and V. K. Jain. (2001). Specific energy and temperature determination in abrasive flow machining process, *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, 41(12), 1689-1704.
- [16] H. Yamaguchi, and T. Shinmura. (1999). Study of the surface modification resulting from an internal magnetic abrasive finishing process, *Wear*, 225-229, Part 1, 246-255.

- [17] S. Jha, and V. K. Jain. (2004). Design and development of the magnetorheological abrasive flow finishing (MRAFF) process, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44(10), 1019-1029.
- [18] S. Singh, H. S. Shan, and P. Kumar. (2002). Parametric optimization of magnetic-field-assisted abrasive flow machining by the Taguchi method, *Quality and Reliability engineering international*, 18(4), 273-283.
- [19] S. Singh, and H. S. Shan. (2002). Development of magneto abrasive flow machining process, *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, 42(8), 953-959.
- [20] R. K. Jain, and V. K. Jain. (2000). Optimum selection of machining conditions in abrasive flow machining using neural network, *Journal of Materials Processing Technology*, 108(1), 62-67.