

先進材料研磨拋光製程 技術與加工精度品質預測 系統

文/蔡明義、林岳鋒、黃守正

關鍵字：先進材料、工具機、線上自動拋光、智能化

摘要

目前產業界對於先進材料加工技術及智能化認知甚少，且研磨拋光加工依賴老師傅的經驗來選擇加工方式及加工參數，若遇到未使用過的先進材料，則不知從何下手及採用加工參數。此外先進材料研磨加工的移除率偏低，產品表面之前製程加工痕跡若沒有移除完全，對於後續要求高品質之研磨拋光加工製程影響更鉅。業界在研磨拋光製程方面，目前多半採用人工拋光、磨料噴射拋光和機械手臂搭配砂帶和羊毛輪沾膏拋光。傳統人工拋光仰賴經驗、人力與時間；而磨料噴射拋光所需磨料昂貴且

拋光面積受加工機大小限制；機械手臂搭配砂帶或羊毛輪沾拋光膏需先購買機械手臂和拋光膏，目前尚無在工具機上可直接達到拋光製程技術出現及相關研磨拋光智能模組。隨著智慧機械時代來臨，生產過程全面自動化與智慧化是未來發展趨勢，本實驗室因應不同產品幾何結構、需求以及製程，開發不同先進材料加工策略以及研磨拋光技術，並在設備上導入具有智能化研磨拋光模組功能結合CNC工具機來達到產品由生產經加工到最後一道拋光製程全面自動化生產，並從中培育先進材料加工與研磨拋光研究人才實際與產業鏈結。本實驗室將已累積及建置的資料庫有系統的整理

分析並導入人工智慧開發研磨拋光之加工精度與品質預測系統，亦開發智能化拋光刀把及拋光系統模組產品及相關高品質研磨拋光液和拋光鑽石磨棒模組產品厚植研磨拋光產業競爭力。

研磨拋光加工相關文獻

本實驗室彙整過去相關方面之研究，以利後續研究之規劃。Shiou【1】等人提出一種創新的力傳感器球磨拋光技術，改善模具鋼的表面粗糙度，在最佳拋光力下進行力補償，以滑動接觸的方式拋光斜面或曲面，進而改善表面粗糙度。Lison【2】等人研究發現在傳統人工研磨拋光的過程中，合金裡的鈷顆粒會散布在空氣中，會使工作者吸入體內讓人體肺部發生病變，且工件表面品質優劣關鍵仰賴工作者拋光技巧與經驗。Hilerio【3】等人提到現今大多數拋光製程都是經由手工進行拋光，長期進行模具研磨與拋光作業會對人體膝關節產生健康上的傷害。Avery【4】等人在拋光工具的恆定力作用下，應用赫茲接觸模型計算接觸應力模擬壓力分佈圖並建立刀具速度/扭矩的關係。Tsai【5】等人研究進行一系列田口方法和實驗SiC或Al₂O₃磨粒和水及添加劑拋光模具鋼工件的可行性。Jiang【6】等人為提高光學模具拋光的效率和穩定性，開發一種新型磁製伸縮振動輔助

拋光系統，可以產生頻率9.2kHz，振幅30 μ m的振動，根據拋光結果，研磨刮痕被清除，但仍可觀察到橫向振動痕跡引起的拋光刮痕。Dieste【7】等人研究開發精加工模擬器，在執行實際的加工之前，可以預測的一種數學模型，即曲面中生成的刀具路徑，並且開發具有精加工參數的數據庫。Anthony【8】等人研究發現由於未釋放的彈性接觸引起的晶界錯位和磨粒顆粒嵌入等不利現象，會對流體噴射拋光工件表面完整性產生不好影響。Chenghu【9】等人研究各種溶液和顆粒種類對拋光效益影響以及發現在相同磨料加入下，超音波輔助拋光效益較傳統拋光效益佳且可減少磨料磨損。Wang【10】等人研究拋光輪廓可以透過加工條件(旋轉和旋轉速度)、材料力學、物理性質(赫茲變形理論)及工件和工具的幾何關係來計算，數學模組可用精確模擬工作表面之材料去除深度，進而規劃拋光路徑。Wu【11】等人研究藉由工具機主軸刀具旋轉及配合拋光液來對工件進行加工，其拋光過程利用具有彈性球刀具夾持在刀把上對模具鋼進行拋光。Shiou【12】等人開發一種在CNC銑床上使用球磨和球拋光精密加工表面磨削系統，同時使用田口方法L18矩陣實驗結果找出最佳參數，拋光NAK80曲面拋光，將最佳參數依序用平面球磨光和球面拋光加工，最後球面模具表面粗糙度可達鏡

面效果，表面粗糙度平均 $Ra=0.02\mu m$ 。Shiou【13】等人開發出一套自動連續球磨和球型拋光系統，同時導入田口方法L18矩陣找尋最佳的加工參數，經過三次實驗驗證表面粗糙度從原本的 $Ra=0.12\mu m$ 下降到 $Ra=0.022\mu m$ 。Jung【14】等人利用CNC機台拋光鋼材自由曲面模具鋼，用田口法L18直交表研究最佳加工參數，最後得到表面粗糙度 $Ra: 0.531\sim 0.102\mu m$ 之間，並且在震動輔助加工下刀具磨耗減少72%。Chiffre【15】等人對模具鋼進行研磨拋光加工研究，針對不同速度、不同磨粒及負載大小進行改變探討參數變化對工件表面品質之影響。Julien【16】等人提出一種計算5軸機器和工業機器人3D拋光刀具路徑的方法，所提出的方法使用圓柱形研磨工具，刀具路徑是透過在載具刀具路徑上添加基本圖案而獲得，使用五次多項式插值生成CNC程序以獲得平滑的刀具路徑。Jacob【17】等人在5軸銑床上進行預拋光和拋光實驗，利用刀具路徑精確控制刀具和工件表面之間的接觸壓力，減少工具磨損並穩定預拋光過程中施加拋光力。Shiou【18】等人開發出一種在CNC車床上力傳感器，可以高效率的改善不銹鋼表面粗糙度、應力和殘留應力，利用田口實驗方法確定滾動接觸式球磨工具拋光參數，表面粗糙度從原本的 $Ra=1.0\mu m$ 降低到 $Ra=0.025\mu m$ 。目前尚無在工具機上可直接達到拋光製

程技術出現及相關研磨拋光智能模組，隨著智慧機械時代來臨，生產過程全面自動化與智慧化是未來發展趨勢，本實驗室因應不同產品幾何結構、需求以及製程，開發不同先進材料加工策略以及研磨拋光技術，並在設備上導入具有智能化研磨拋光模組功能，結合CNC工具機來達到產品由生產經加工到最後一道拋光製程全面自動化生產。

超音波刀把輔助研磨拋光技術

本實驗室團隊長期投入研究各種難削材加工之相關技術資料庫與加工策略建立，以解決難削材加工材不斷湧現之問題。傳統CNC工具機應用於新材料難切削材加工時存在著加工效率、工件良率、品質不佳等問題，本實驗室團隊在工具機上導入超音波輔助加工系統並建立測試基地(圖1)。在CNC加工機台架設超音波刀把振動輔助難切削材包括鈦合金、Inconel 718、光學模具鋼、藍寶石、碳化矽等材質，並建立超音波刀把的基本特性及工件表面形貌與刀具磨耗加工資料庫，亦探討不同難削材合適製程參數及其對材料表面形貌及特性之影響並建立刀具伸長量及鎖固力對超音波振幅之影響，以建立難切削材加工穩定的實驗流程及結果資料庫。圖2為施予超音波對先進材料會在不同頻率下造成深淺程度不一的等向性的紋理表面特性，

該紋理上的波紋會隨著使用的超音波頻率越高而越密集，這表示施予超音波與否對先進材料的表面狀況是有顯著的影響。圖3為碳化矽加工測試案例，實驗

顯示可降低切削力40%、切削效率提升3倍、刀具壽命提升以及減少加工件微裂縫。因此可助廠商提升加工製程技術的服務能量，擴大廠商的零件生產加工工序優化排程：提供切削工法排程規劃，有效改善工序排程順序，優化切削刀具配置與加工時間。相關導入超音波輔助加工系統及球拋光技術之實際加工案例及成品，如圖4所示。

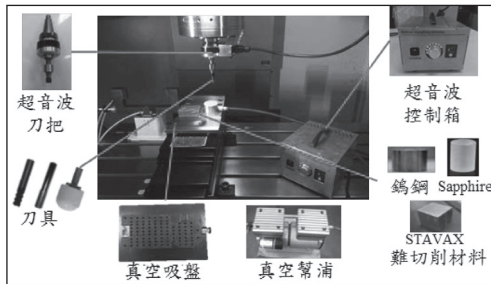


圖1 超音波輔助加工模組平台建置

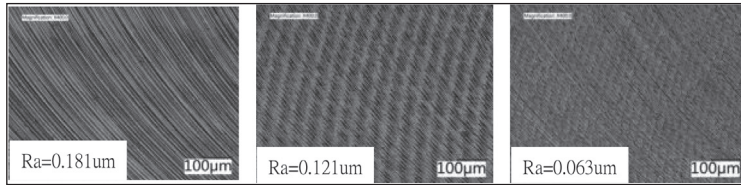


圖2 (a)未使用超音波加工，使用超音波輔助(b)25KHz、(c)50KHz

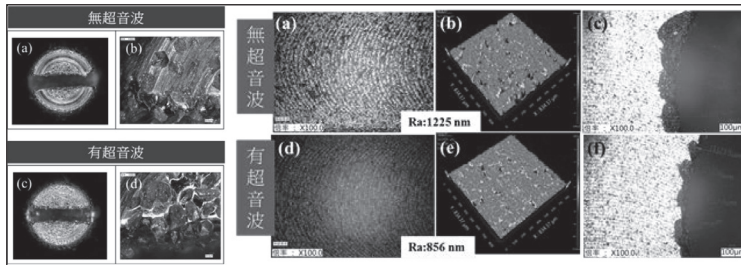


圖3 超音波輔助鑽石磨棒加工碳化矽材後鑽石磨棒表面形貌比較

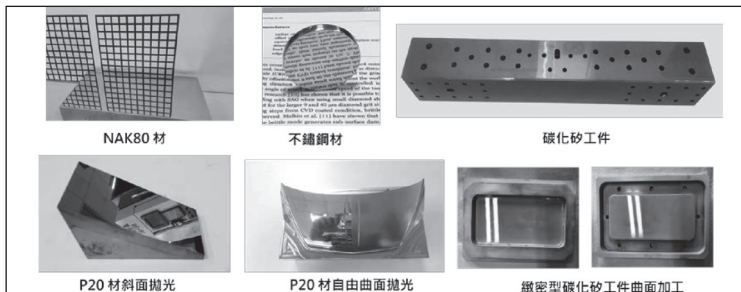


圖4 超音波輔助加工搭配球拋光技術成品

磨粒開發與研磨拋光製程應用技術

本實驗室已建立磨棒開發關鍵技術，取用不同等級結構強度之單晶鑽石於氣氛中燒結，產出結構多孔型鑽石磨料；若與過渡金屬觸媒(鐵、鎳、鈷、銅等元素)混合，於不同溫度燒結蝕刻即會形成表面多刃型、表面粗糙型鑽石磨粒；而對其施予其燒結後鑽石一定壓力則會形成結構錯位型鑽石磨料，如圖5所示。由本實驗室所開發之改質鑽石

如：結構多孔型、表面多刃型，其特點如下：(1)表面多刃型改質鑽石在硬脆材的脆性研磨拋光和一般材料高效率研磨拋光可採用，其表面具有微細多刃適合快速磨削加工，具有類多晶鑽石之特點但價格為類多晶1/5。(2)結構多孔型改質鑽石針對以表面精度為主，大面積均一化研磨拋光之需求，在受壓力研磨時會像多晶鑽石一樣破碎剝離，但形成之大面積微細磨粒具有一定結構強度，其研磨拋光能力高於多晶鑽石，價格則為多晶鑽石的1/10；自製改質的單晶鑽石磨料無論是價格、特性、型態皆俱備與商業鑽石競爭之優勢。此外，為增加先進材料(如碳化矽、藍寶石、陶瓷、模具鋼、鏡面鋼、合金灰口鑄鐵等)之研磨

拋光加工效率，本實驗室開發以溶膠凝膠法，將氧化鋁包覆於立方氮化硼磨料上，形成 Al_2O_3/cBN 複合磨料，因其氧化鋁較為軟質而有而具有拋光功能，基底為較硬的立方氮化硼故能有切削研磨之能力，同時具備研磨與拋光特性，如圖6所示；其上述改質鑽石磨料、氧化鋁/立方氮化硼複合磨料，在研磨拋光機制中，皆能有破碎、剝落、自銳等型態如圖7所示；並已投入相關研磨拋光工具之開發，如應用於CNC中心加工機上的球拋光工具、鑽石磨棒、研磨拋光液等如圖8所示。

研磨拋光之加工品質與拋光刀把系統

一般工件於CNC加工機精加工製程後表面粗糙度約 $Ra : 0.4-0.6 \mu m$ 左右，若需獲得更好的工件表面品質，業界多半採用人力手工拋光或使用機械手臂夾持砂帶或羊毛輪沾鑽石膏進行拋光作業，然而人力手工拋光耗時且機械手臂與鑽石膏單價昂貴，

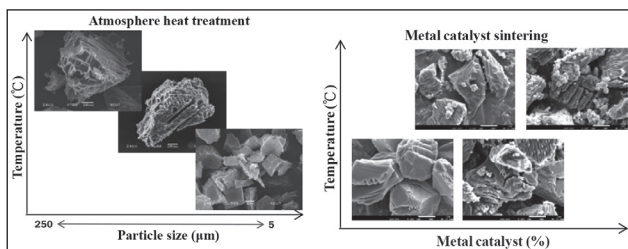


圖5 單晶鑽石氣氛燒結、金屬催化蝕刻燒結

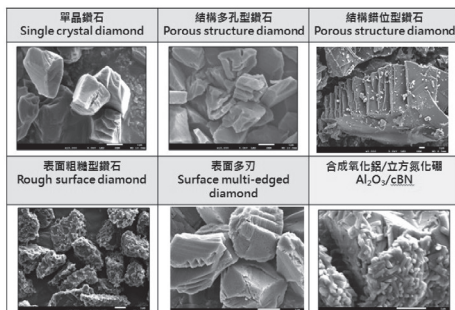


圖6 單晶鑽石、自製各型態改質合成氧化鋁/立方氮化硼磨料SEM圖

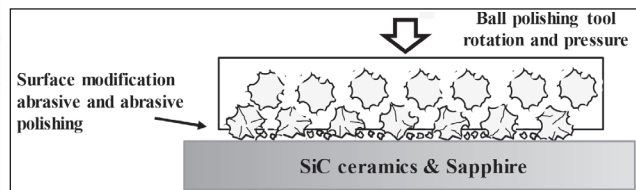


圖7 改質鑽石磨料、氧化鋁/立方氮化硼複合磨料之研磨拋光加工破碎、剝落、自銳等機制。

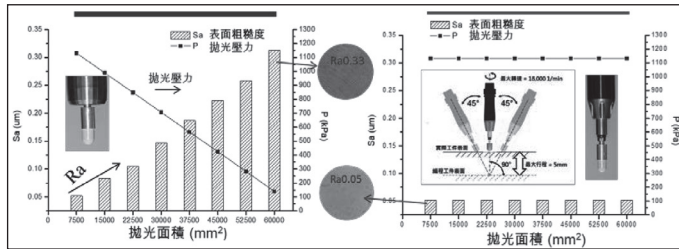


圖8 傳統刀把搭配拋光工具與拋光刀把搭配拋光工具之差異性比較

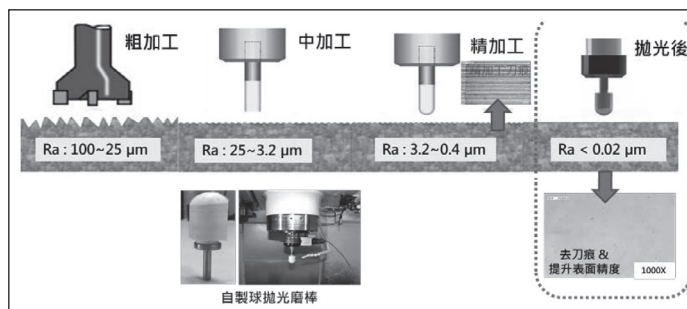


圖9 應用於CNC超音波輔助加工及球拋光技術

本實驗室已開發出用於CNC加工機上拋光專用磨棒，可直接在傳統CNC機台進行拋光作業，除去精加工所殘留下來刀痕且可直接達到拋光工件表面品質 ($Ra < 0.02 \mu m$)，然而在拋光過程中磨棒會因加工面積變大而消耗導致拋光壓力不足造成拋光品質降低，本實驗室為解決拋光壓力不足問題，開發可裝置於傳統CNC機台之專用拋光刀把，進行自動刀具補償，使工件材料在拋光的過程當中一定下壓行程內維持定壓力，不受刀具磨損影響維持定壓研磨拋光(圖8)。業界多數在先進材料的加工需求上，希冀直接在CNC中心加工機上直接達到平面及自由曲面拋光之製程能力，本實驗室導入其加工工具磨棒開發之技

術，並且為使工件表面的前製程切削痕跡完善移除，在CNC中心加工機上導入超音波輔助研磨拋光技術，搭配不同工件產品精度需求擬開發設計並製作[鑽石研磨棒材]、[精密球拋光工具]，其針對製作方式、磨粒粒徑、集中度、填充材料及結合劑與修整方式及切削液之影響，並探討前切削製程刀痕移除率、拋光刀具之磨耗機制及使用壽命(圖9)。

為使先進材料加工應用上更有效率，本實驗室透過實驗設計方法針對先進材料工件(碳化矽、藍寶石、陶瓷、玻璃以及超合金鋼等)設計不同斜面角度工件 ($0^\circ \sim 90^\circ$)，利用加工刀具或拋光工具對工件進行加工，並於工件下方架設動力計，蒐集工件加工過程中各軸向力；蒐取加工過程中各種加工資訊，並記錄每一次加工完成後工件之加工精度、形狀精度、表面粗糙度、脆裂邊型態和影像等實驗結果上傳給雲端資料庫，建置不同先進材料曲面加工完整之資料庫。藉由加工資料庫建立，未來使用者可直接根據加工需求，選擇所需的製程和使用機器，選擇合適的加工刀具或拋光工具。

研磨拋光之加工品質預測系統軟體

本實驗室建立加工研磨拋光智慧化系統資料庫，因應不同產品幾何結構、需求以及製程，開發不同先進材料加工策略以及研磨拋光技術，並在設備上導入智能化功能結合CNC工具機，圖10為先進材料加工資料庫建立與性能指標預測執行之流程圖，根據使用者需求依序分為先進材料種類(碳化矽、藍寶石、陶瓷、玻璃以及高合金鋼等)、加工方式(加工刀具和拋光工具)以及加工目標(加工精度、形狀精度、表面粗糙度和脆裂邊狀態)，依據工件不同曲率蒐集加工資訊(切削轉速、進給率、切削深度、拋光壓力等)，並針對每一次加工完之工件進行精度量測和影像拍照存取存放至資料庫系統；根據加工參數以及加工結果導入人工智慧演算法並建置工具機加工專家系統，根據加工性能指標預測結果進行實際驗證比對是否符合實際加工需求標準，透過AI技術來最佳化機器拋光加工製程，結合深度學習技術，使此模型與系統具備自我學習、擴充、參數優化及預測的功能，以供業界滿足其研磨拋光之需求，根據建置之加工資料庫，配合神經網路及優化演

算法建置工具機加工專家系統，導入人工智慧演算法建立模型，透過AI技術來最佳化機器拋光製程之加工，並結合AI深度學習技術使此模型與系統俱備自我學習、擴充、參數優化及預測的功能。除加工層面外，研磨拋光耗材資料庫之建立也極其重要，希冀能在取得硬脆材料樣品欲達到表面精度之標準後，採用表面影像辨識判別其各參數，從耗材資料庫中取得改質磨料使用之粒徑大小、改質狀態等符合其製作耗材之需求，再於耗材製作後進行研磨拋光加工得到最佳之研磨拋光參數，達到該難削材最佳研磨拋光耗材之開發。故高性能的研磨拋光技術與參數，是需嚴格的原料端品質掌控、產品製程監製等，本實驗室將其拋光耗材製做之原料如：鑽石、立方氮化硼、氧化鋁等磨料依來源控管、粒徑、強度、等級、價格等依序分類；並實行磨料改質時採用之溫度、氣氛、觸媒、壓力等參數建檔納入耗材資料庫

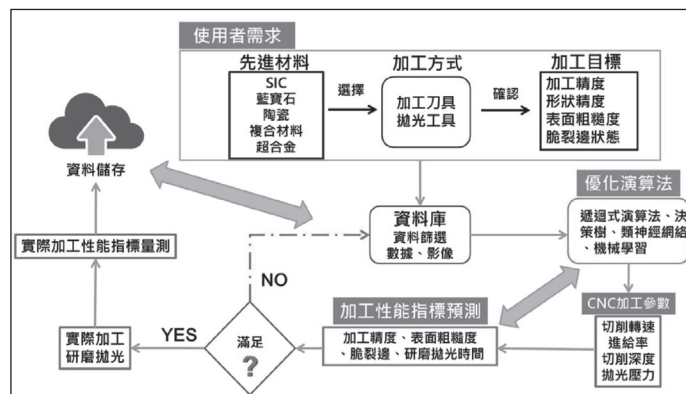


圖10 先進材料加工資料庫建立與性能指標預測流程圖

裡，並提供最佳之改質磨料製作研磨拋光工具與耗材。在其研磨拋光工具與耗材製作過程，為確保其加工效益與品質一致性，掌控成型溫度、時間與改質磨料的添加量等；並於CNC中心加工機進行硬脆材研磨拋光測試交叉驗證AI加工性能指標預測結果比對是否符合實際加工需求標準後將其研磨拋光參數儲存於拋光資料庫中，並導入建立研磨拋光之加工品質預測系統軟體及表面粗度與智

能化拋光刀把及拋光系統模組產品，如圖11和圖12所示。

結論

本文研究因應不同產品幾何結構、需求以及製程，開發不同先進材料加工策略以及研磨拋光技術，並在設備上導入智能化功能結合CNC工具機。根據使用者需求依序分為先進材料種類(碳化

矽、藍寶石、陶瓷、玻璃以及合金鋼等)、加工方式(加工工具和拋光工具)以及加工目標(加工精度、形狀精度和脆裂邊狀態)，依據工件不同曲率蒐集加工資訊(切削轉速、進給率、切削深度、拋光壓力等)，並針對每一次加工完之工件進行精度量測和影像拍照存取存放至資料庫系統；根據加工參數以及加工結

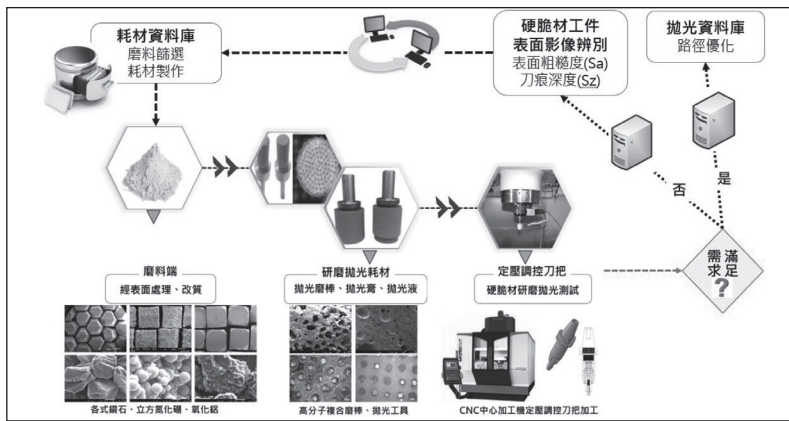


圖11 開發自製高品質研磨拋光工具與耗材產品資料庫建流程示意圖

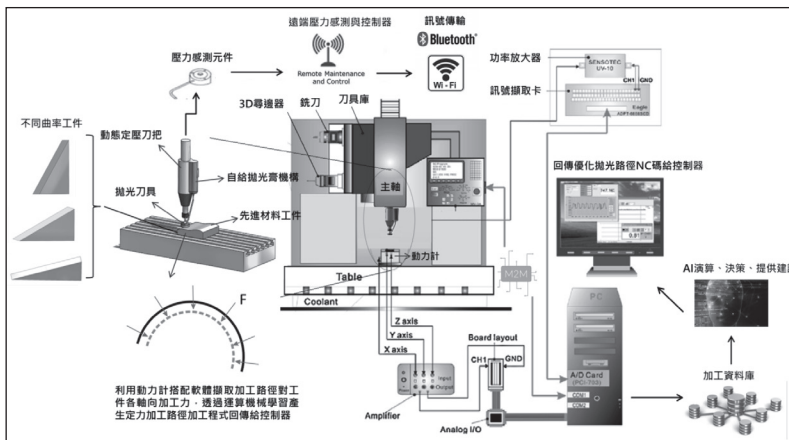


圖12 加工品質預測系統軟體與智能化拋光刀把及拋光系統模組

果導入人工智慧演算法並建置工具機加工專家系統，根據加工性能指標預測結果進行實際驗證比對是否符合實際加工需求標準，透過AI 技術來最佳化機器拋光加工製程，結合深度學習技術，使此模型與系統具備自我學習、擴充、參數優化及預測的功能。另外透過開發高品質研磨拋光液及拋光磨棒來強化先進材料加工效益並建置刀具資料庫，最後搭配整合各專業領域的專業知識(或專家系統)進而建構完成AI應用於智能化拋光刀把及拋光系統模組產品，並開發研磨拋光之加工品質預測系統軟體與研磨拋光專用CAD/CAM系統模組，利用智慧加值的概念將其與CNC 控制器進行人機整合應用，能使控制器的操作更加便利與智能化，以利於使用者的操作並有效地提升先進材料加工效率與產品品質。■

致謝

本研究感謝科技部計畫「智慧多軸複合製造技術研發-航太與醫療器械先進製程設備」支持，並感謝中興大學機械工程系陳政雄教授在超音波輔助加工系統上的設備提供與技術指導。

參考資料

1. F. J. Shiou, C. H. Chuang, "Precision surface finish of the mold steel PDS5 using an innovative ball burnishing tool embedded with a load cell", *Precision Engineering*, vol. 34 ,pp.76-84,2010.
2. D. Lison, R Lauwerys, M. Demedts , B. Nemery, "Experimental research into the pathogenesis of cobalt/hard metal lung disease". *Eur Respir J*, vol.9, pp.1024-1028, 1996.
3. I. Hilerio, T. Mathia, C. Alepee, "3D measurements of the knee prosthesis surfaces applied in optimizing of manufacturing process", *Wear*, vol. 257, pp.1230-1234, 2004.
4. A. Roswell, F. Xi, G. Liu, "Modelling and analysis of contact stress for automated polishing", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol.46, pp.424-435, 2005.
5. F.C. Tsai, B.H. Yan, C.Y. Kuan, F.Y. Huang, "A Taguchi and experimental investigation into the optimal processing conditions for the abrasive jet polishing of SKD61 mold steel", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* ,vol.48, pp.932-945, 2008.
6. Jiang Guo, Hirofumi Suzuki, Toshiro Higuchi, "Development of micro polishing system using a magnetostrictive vibrating polisher",*Precision Engineering* ,vol.37, pp.81-87, 2012.
7. J. A. Dieste, A. Fern?ndez, D. Roba, B. Gonzalvo, P. Lucas, "Automatic grinding and polishing using Spherical Robot",*Procedia Engineering* , vol.63 , pp.938-946, 2013.
8. A. Beaucamp, Y. Namba, W. Messelink, D. Walker, P. Charlton, R. Freeman, "Surface integrity of fluid jet polished tungsten carbide", *Procedia CIRP*, vol. 13, pp. 377- 381, 2014.
9. C. Zhou, Q. Zhang, C. He, Y. Li, "Function of liquid and tool wear in ultrasonic bound-abrasive polishing of fused silica with different

- polishing tools", *Optik* ,vol.125, pp. 4064-4068, 2014.
10. H. Wang, W. Lin, "Removal model of rotation & revolution type polishing method", *Precision Engineering*, 2017.
 11. X. Wu., "New polishing technology of free form surface by GC," *Journal of Materials Processing Technology*, vol.187-188, pp. 81-84, 2007.
 12. F.J. Shiou, C.H. Cheng, "Ultra-precision surface finish of NAK80 mould tool steel using sequential ball burnishing and ball polishing processes", *Journal of materials processing technology*, vol.201, pp.554-559,2008.
 13. F. J. Shiou, C. Cheng, "Surface finishing of hardened and tempered stainless tool steel using sequential ball grinding, ball burnishing and ball polishing processes on a machining centre", *Journal of materials processing technology* ,vol.205,pp.249-258,2008.
 14. F. J. Shiou, H. S. Ciou, "Ultra-precision surface finish of the hardened stainless mold steel using vibration-assisted ball polishing process", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* , vol. 48 ,pp.721-732,2008.
 15. L. De Chiffre, "Investigation on the surface topography in polishing using atomic force microscopy," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 45, pp. 523-525, 1996.
 16. J. C. Jacob, J. M. Linares , J. M. Sprauel, "Improving tool wear and surface covering in polishing via toolpath optimization", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213,pp.1661-1668,2013.
 17. J. C. Jacob, J. M. Linares, J. M. Sprauel, "Control of the contact force in a pre-polishing operation of free-form surfaces realised with a 5-axis CNC machine", *CIRP Annals - Manufacturing Technology* , vol.64, pp.309-312,2015.
 18. F. J. Shiou , S. J. Huang, A. J. Shih, J. Zhu and M. Yoshino, "Fine Surface Finish of a Hardened Stainless Steel Using a New Burnishing Tool", *Procedia Manufacturing* ,vol.10,pp.208 - 217,2017.

作者簡介



蔡明義
國立勤益科技大學機械工程學系教授
專長：
切削加工
半導體製程技術



林岳鋒
國立勤益科技大學機械工程學系
專長：
精密研磨拋光
難切削材加工

黃守正
國立勤益科技大學機械工程學系
難削材加工實驗室
專長：