

金屬積層製造的化妝師— 3D 列印後的處理加工

洪宗彬、王祥賓、王緯晴、陳尹銜、許富銓、呂英誠

3D 列印的產品由於形狀、精度與表面粗糙度都不如直接加工或模造的好，利用噴砂、CNC 超音波振動輔助磨削、雷射平坦化、電化學加工等後處理方式精修與拋光產品的表面，可增加 3D 列印產品商品化的可能性。

電影〈不可能的任務〉(Mission Impossible) 中利用掃描及 3D 列印技術製造人臉面具，令人印象深刻。在現實生活中，這項技術也能實現。自從《經濟學人》雜誌於 2011 年把 3D 列印 (3D printing) 或稱為積層製造 (additive manufacturing, AM) 視為第三波工業革命，它已經成為一項顯學。

積層製造技術又稱為快速成形技術，主要分為快速原形 (rapid prototyping, RP) 技術與快速製造 (rapid manufacturing, RM) 技術兩大類，是近代革命性的先進製造技術。源於美國的一批中小科技公司相繼研發出立體光固成形、選擇性雷射燒結、熔絲沉積造形等主流技術路線，經過二十多年的沉澱和不斷的完美化已經日臻成熟，主要用以製造符合 3F 原則的成品—形狀 (form) 與設計一致、尺寸符合公差適合度 (fit)、成品達使用功能 (function)。

與傳統的「減法式製造」不同，積層製造技術採用「加法式製造」。它的原理是使用者透過電腦繪製零件的設計圖或掃描現有物件，接著以積層製造設備把原材料層層堆疊起來，最終形成堅固的物件。我國積層製造產業尚屬於萌芽階段，發展方向主要包括材料設計分析、試作、試量產、量產、測試驗證、行銷推廣等項目，而目前主要缺口有：利基粉末材料、利基材料積層製造製程、利基材料積層製品後處理技術。

過去台灣醫材廠多鎖定在醫療病床、手術導管，以及血糖計與血壓計等大眾化與侵入式的醫材，未來若跨入人體植入式醫材的材料及製程技術開發，將有助於國內醫療器材產業拓展高階產品市場，擺脫殺價競爭的紅海市場。若配合新興製造技術的發展，如運用積層製造，把原本大規模生產的醫材結合利基醫用合金，轉朝重視功能性材料、個人化差異、客製化方向發展，如牙科、骨科產品，對臨床品質的提升與治療更有效益。

因此，透過跨領域技術的整合是迎向未來健康照護商機的重要策略。雖然醫用合金材料的種類很多，但能在滿足人體生理條件下使用的卻不多。目前較廣泛應用的主要有不銹鋼、

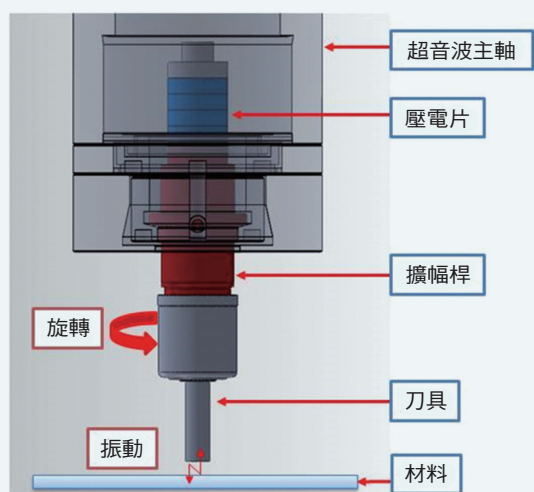
鈷基合金、鈦合金、形狀記憶合金、貴金屬等，主要應用於軟組織和一些器官的修復、功能恢復等方面，包括骨科、口腔科、心血管科、耳鼻科、顱腦外科等的人工關節、骨折固定器、骨板、髓內釘、骨釘、脊柱固定器、人工椎間盤、人工牙根、陶瓷燒附用金屬、矯正線、血管支架、手術器械等。

目前全球金屬生醫材料以不銹鋼、鈦合金及鈷基合金為大宗，約占全球生醫材料的 40% 左右。鈳鈦合金則是近幾年大量應用在生醫材料上，除具有獨特的形狀記憶功能外，還有超彈性、耐磨損、抗腐蝕、高阻尼、射線不透性和核磁共振（MRI）無影響性等優異特點。隨著微創醫療的蓬勃發展，鈳鈦合金已逐漸成為全球挹注各方資源投入研發的新興生醫金屬。

醫療器材在積層製造應用領域中排行第三，然而在醫材領域積層製造是直接應用於完成品的製造，有別於在消費性電子產品與汽車領域僅應用在快速原形製作。有產業分析專家大膽預測，在接下來的 20 年內，會有 80% 以上的醫材植入物是以積層製造方式生產的。

全球金屬醫材積層製造目前僅局限於鈦金屬與鈷鉻合金，應用產品集中在骨科植入物、創傷與手術器材、牙冠等。這些積層製造金屬產品的特色有：骨科植入物—具備促進骨整合的多孔表面，如人工關節的幹部或髓臼等；創傷與手術器材及牙冠—客製化部件，如顏面骨板、金屬牙冠等。

然而，積層製造後的產品不像電影中能馬上使用，因為有尺寸精度不足、表面粗糙度過高等缺點，必須藉由後續的加工



超音波振動輔助磨削原理與設備說明

才能達到商品化的需求。3D 列印後對於外表面的形狀精度與粗糙度，處理方式可利用超音波振動輔助磨削、雷射輔助平坦化、電化學拋光等方式來完成。例如利用 3D 列印的鈦合金骨釘，就是藉由傳統與非傳統加工方式對外表面做細部精修與研磨。

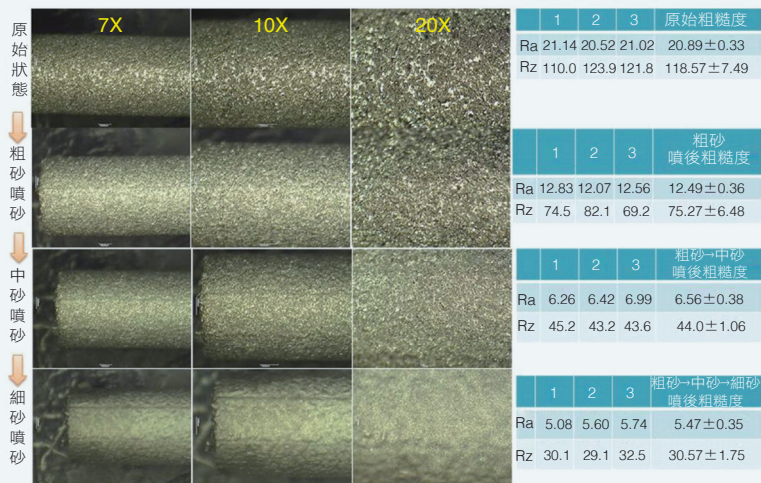
3D 列印後以傳統加工方式，即以噴砂、CNC 車削、銑削、研磨等方式加工，或以非傳統加工方式，即以超音波振動輔助加工、雷射加工、電化學拋光等方式加工。其中又以噴砂、CNC 銑削、超音波振動輔助研磨加工等方式能夠迅速在材料外表面做粗加工。最後再以雷射加工、電化學拋光等方式做表面拋光。

噴砂

噴砂處理的英文是 sand blasting 或 peening（珠擊），是一種工業上常用的金屬

目前積層製造後的產品不能馬上使用，因為有尺寸精度不足、表面粗糙度過高等缺點，必須藉由後續的加工才能達到商品化的需求。

AM 鈦合金管材噴砂處理對粗糙度的影響



3D 列印後的鈦合金骨釘經由不同粒徑砂粒噴砂處理後的表面粗糙度

前處理製程，利用高速砂流的衝擊作用清理和粗化基體表面。它採用壓縮空氣為動力，形成高速噴射束把噴料（銅礦砂、石英砂、金剛砂、鐵砂、海南砂等）高速噴射到需要處理的工件表面，使工件的外表面或形狀發生變化。

由於磨料對工件表面的衝擊和切削作用，能使工件的表面獲得一定的清潔度和不同的粗糙度，而達到除銹、去毛邊、去氧化層或表面處理等目的。3D 列印後的鈦合金管材經粗砂、中砂、細砂等不同粒徑砂粒噴砂處理後，其表面粗糙度可由原本的 $Ra = 20.89$ 降至 $5.47\mu m$ 。

超音波振動輔助磨削

金屬積層製品因選擇性金屬融化（selective laser melting, SLM）積層製造層疊與顆粒材料熔融結合等特性，製品表面的原始粗糙度品質僅能達成 $Ra 12\mu m$ 左右等級，且熱處理後會有表面黑化現象。對於醫材等級的應用，如骨釘的需求，通常需再搭配後處理工法才可達 Ra 約 $1\mu m$ 等級以下的鏡面表面品質，避免植入後造成表面組織

傷害。在研磨拋光上，可導入超音波輔助研磨加工製程，提供積層製造骨髓內釘所特有複雜外曲面加工特徵的表面精修處理。

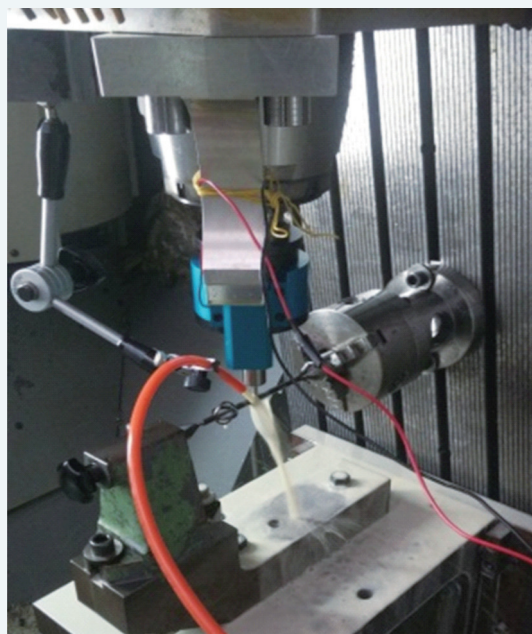
因為鈦合金材料的硬度很高，為了解決傳統研磨的缺點，提高超精密研磨技術，在保證研磨加工精度和加工品質的同時，還得降低加工成本，提高加工效率。因此，在 CNC 磨削上利用超音波振動輔助加工方式進行磨削。

超音波振動是利用安裝在擴幅桿後方的壓電片產生軸向振動，振動經過擴幅桿及刀具傳遞到研磨、切割刀具。因安裝於旋轉主軸上，所以同時具有圓周向及軸向的切削能力，通過這種振動方式就能夠獲得超音波加工所需要的振動方向。因此，超音波的作用使切割刀具在軸向產生瞬間的伸縮式振動，就能在極短的時間內，使磨粒與加工物之間在高加速度狀態下反覆碰撞。其結果是一邊使加工物表面產生微小的破碎層，一邊對其加工，因此能大幅地降低研磨棒的加工負荷。

另外，由於超音波的振動使切割刀片與加工物之間產生間隙，從而大大改善了磨粒的冷卻效果，並且可防止磨粒鈍化、

氣孔堵塞等現象的發生，就能夠提高加工物的加工品質，並延長研磨棒的使用壽命。因此超音波適合研磨高硬脆性材料，可以有較精確的研磨，有效降低加工應力，減少崩邊現象，而可降低轉速的需求，提升主軸壽命及加工品質，更能降低製程成本。

藉由治具由鎢鋼棒與鋁合金底座組合，適用積層製造骨釘內徑治具設計，並以第四軸旋轉用固定尾座等共用治具件，配合五軸加工的治具設計，單道次可進行 1 件工件加工。經加工實驗確認骨釘外表粗度可由原先 SLM 積層製造的 $Ra\ 12.4\ \mu m$ ，經超音波輔助研磨加工後，平均改善至 $Ra\ 0.2\ \mu m$ 以下，可獲得光滑亮面品質，且不發生裂痕或材料殘留剝落孔穴等缺陷。



五軸超音波振動輔助磨削

雷射輔助平坦化加工

雷射與物質的作用方式有加熱與光化學，因此可以把雷射拋光分成熱拋光與冷拋光兩種。熱拋光一般使用連續長波長的雷射光，經由熔化、汽化等過程去除材料。但由於熱效應的關係，雷射光斑周圍溫度梯度大，會產生較高的熱應力而出現裂紋，使拋光效果不佳，因此通常用於粗拋光。

而冷拋光主要是藉由材料消融作用，即光化學分解作用去除材料。材料在吸收光子能量後，材料中的化學鍵被打斷，晶格結構被破壞，使得表面材料離開本體，而達到去除材料的目的。在冷拋光過程中，其熱應力很小，不會產生裂紋，材料去除量容易控制，特別適合精密拋光。其特色是乾式非接觸式加工，可應用於微小物件、局部或複雜結構的拋光、深孔與元件內結構的拋光，適用於超軟、超硬、脆性等材料。

相較於傳統的拋光流程必須施加外力拋光，軟質材料拋光容易造成變形，硬脆材料拋光則容易造成破裂等缺點。利用雷



振動磨削前、中、後骨釘表面的情形。

射拋光可克服這些問題，而 3D 列印的鈦合金骨釘，在雷射掃描過後，表面粗糙度由 $Ra\ 20\ \mu m$ 快速降低至 $Ra\ 9.63\ \mu m$ 左右，可迅速改善表面粗糙度約 51.8%。

電解拋光處理

電解拋光是利用陽極處理（溶解腐蝕）的方式，藉由電化學的原理，適當地調整

製作進度：

- ✓ 空間尺寸丈量
- ✓ 設備規格確立
- ✓ 完成報價議價
- ✓ 槽體加工製作
- ✓ 到場安裝測試
- ✓ 試量產測試



- ✓ 初步將以現有鍍鈦矯正線進行電解拋光條件測試。
- ✓ 待團隊提供積層製造生醫級鍍鈦製品進行相關測試。



積層製造生醫級鍍鈦製品的電解拋光鈍化處理製程設備

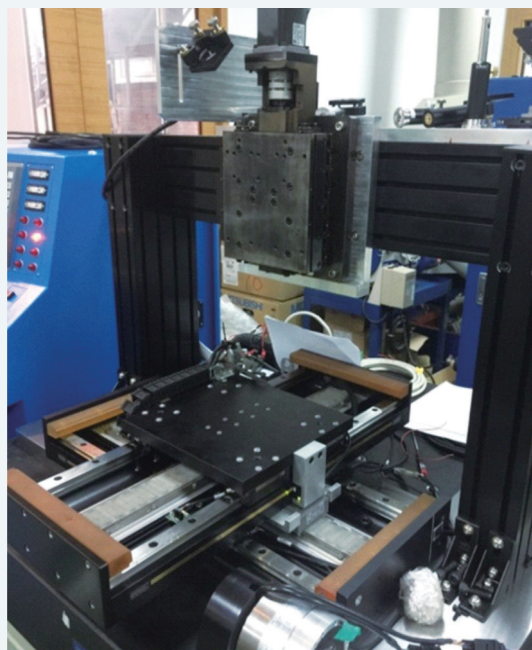
電壓、電流、酸液組成、溫度以及拋光時間，不但可使表面達到明亮、滑順、潔淨的效果，更可提升表面的抗蝕性，是最佳亮化表面的方法。而與機械拋光最大的差異處，在於不會有表面加工變質層及造成表面殘留應力。

電解拋光法具有幾種特性：

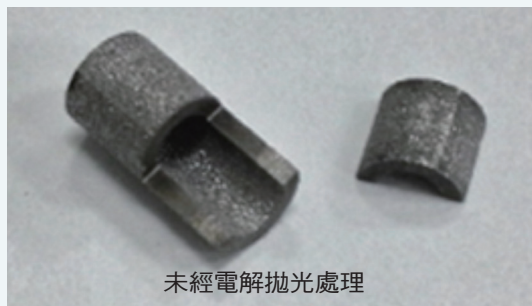
鈍化層—不銹鋼材料經電解拋光處理後，會在表面生成鈍化層。鈍化層的生成原因是因為在電解拋光處理時，鐵鎳移去的速率比鉻快，造成表面富鉻化效應，同時在表面生成氧化鉻層，可有效提升表面的抗腐蝕能力，這是其他拋光無法達到的特色。

光澤化—拋光能力優越，較機械拋光更佳，可以達到鏡面級的光澤，商品化的管件可以用電解拋光達到 $Ra = 0.01 \mu m$ 的層次。

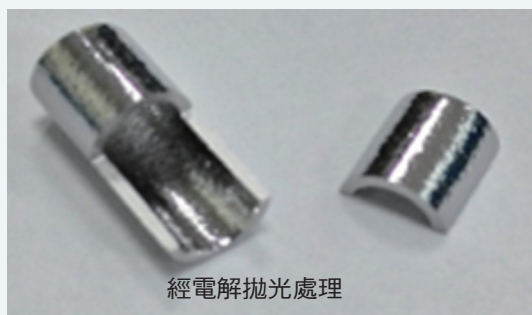
高潔淨度—電解拋光製程把工件表面移去一層，因此表面的髒汙層、氧化層、雜質層、碳化層、應力層等都會被移去，使表面平坦化，無藏汙納垢的凹陷，可使工件表面達到高潔淨程度。



積層製造製品表面拋光的三軸驅動光纖雷射系統



未經電解拋光處理



經電解拋光處理

由於 3D 列印鈦基產品面臨含氧化物增加以及粗糙度增加的問題，因此可藉由電解拋光技術移除表面氧化物及降低表面粗糙度。



- 經 SEM-EDS 表面元素分析顯示：
- ✓ 市售矯正線產品最後都經過電解拋光做表面潔淨化作業
 - ✓ 經電解拋光後表面元素只可見 Ti 與 Ni，顯示已把加工氧化層有效移除，與市售相符

藉由掃描式電子顯微鏡檢視經電解拋光處理前後，與市售產品表面品質的比對。

特殊形狀加工—在電解拋光過程中，接觸工件的僅有電解液，工件在處理過程中不受任何應力，可處理薄型工件，且可除去因機械加工產生的表面應力層。同時，電解拋光可處理特殊形狀工件，對於特殊形狀表面可均勻拋光，對於小型工件的外部電解拋光處理，可大批量一次進行，減少加工時間。

電解拋光處理具有以上的優點，是現今金屬植入物醫材多數採用的表面處理方式。

由於 3D 列印鈦基產品面臨含氧化物增加以及粗糙度增加的問題，因此可藉由電解拋光技術移除表面氧化物及降低表面粗糙度。可達亮面電解拋光處理，並通過 ISO 10993-5 驗證無細胞毒性的表面處理技術，符合醫療器材表面處理規定生醫級鈦製品電解拋光鈍化處理製程設備，其中槽體工作尺寸是寬 400 mm × 長 500 mm × 深 600 mm，一批次約可容納 10 件積層製造生醫級鈦製品進行電解拋光鈍化處理，每批次時間約 1 小時。再加上前後清洗時間 30 分鐘，以每天工時 8 小時計算，一天最高可生產 106 件。

針對電解拋光最佳參數功效與市售產品比對確效分析，可藉由掃描式電子顯微

鏡檢視經電解拋光處理前後，以及藉由表面能階分析儀進行表面元素定性及半定量分析，檢視經電解拋光處理前後與市售產品表面元素比對。

經由掃描式電子顯微鏡分析顯示，未經電解拋光處理的產品表面平坦無波紋，經分析市售產品表面具電解拋光波紋，顯示市售產品最終表面處理須經電解拋光。表面能階分析儀分析顯示，未電解拋光處理前表面有加工殘留的 C 與 O 元素，而市售產品與經電解拋光後產品表面元素只可見 Ti 與 Ni 元素，顯示經電解拋光處理已有效移除加工氧化層並與市售產品相符。

洪宗彬、王祥賓、陳尹銜、許富銓
金屬工業研究發展中心模具與精微加工組

王緯晴
金屬工業研究發展中心複合醫材技術組

呂英誠
金屬工業研究發展中心