

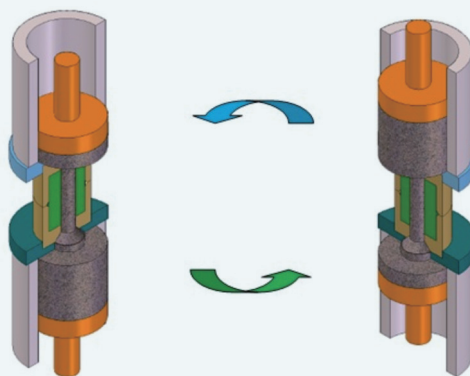
替金屬積層製品 表面去角質

江文欽、吳文傑、林大裕、許富銓、呂英誠

現階段以積層製造的方式所製作的金屬製品，其表面通常還太粗糙，若以磨料流動加工的方式替金屬積層製品「去角質」，或許可以得到適於工業應用的表面品質。

用積層製造 (additive manufacturing, AM) 或稱三維列印 (3D printing) 的方式製作成品的風潮近幾年正夯，這種製作物品的的方式，小自個人文創工作室，大至航太工業用的零組件，都有它大展身手的舞台。

「積層製造技術」是一種「加法」的製造工藝，也就是利用噴塗、擠塑或堆疊等方式，把原本離散的原材料層層堆疊產出所需要的立體物件。這種加法工藝有別於傳統的「減法」製造方式，即使用加工設備對原材料進行車製、銑削、鑽孔、研磨等去除不要的部分來製造出所需要的成品。積層製造技術就好像製作立體地理模型時，把紙板一層一層地往上黏，它就是一種運用「把材料自下而上逐層累加」的



磨料於上、下磨料缸中往復擠壓流動，過程中磨料持續流過欲加工的工作表面，得以達到所要的拋光效果。

概念來製作實體成品的技術，每一層分得越細，所堆疊出的成品就越精緻。

「積層製造技術」是一種「加法」的製造工藝，也就是利用噴塗、擠塑或堆疊等方式，把原本離散的原材料層層堆疊產出所需要的立體物件。

許多過去使用傳統工法無法製作的產品都可以透過積層製造技術來實現，因此顛覆了傳統的商業模式。

積層製造技術帶給人們另一種嶄新的想法，許多過去使用傳統工法無法製作的產品都可以透過這技術來實現，因此顛覆了傳統的商業模式。由於它具有少量多樣、客製化、迅速等彈性，應用範圍十分廣泛，例如個人興趣的文創公仔、工業設計或汽車、航太、醫療等產業，都有它應用的蹤跡。

「磨料流動加工」(abrasive flow machining, AFM) 是一種表面精細處理的方法，是利用上下運動擠壓的方式，驅使磨料流經加工物的表面、內孔或端角，進行拋光、去毛邊及倒角的加工，並以往復運動進行鏡面加工。這種加工方式對於凹窪面、彎曲孔道等通常刀具達不到的複雜形狀是最適合的方法，特別是在小孔、內孔流道或形狀複雜等型態的工件，應用這種製程技術可以完成以往難以使用人工或其他傳統的加工方式來達成的工作。

而採用磨料流動加工技術來處理氣體或液體類流體的導通管，因為其磨光痕和流體通過的方向一致，因此具有流體易於通過並且減少殘留的優點。這在需要潔淨環境的場合，例如食品、生技製藥或光電半導體業界，是一項重要的優點。

一般是在磨料流動加工設備本體上安裝上下兩個方向相反的磨料缸，它的作用是藉著上下磨料缸中的油壓缸，擠壓磨料缸中的磨料使其往復流動通過欲加工的工件表面。此外，安裝有夾緊用油壓缸，以把工件及治具夾緊於上下兩個磨料缸之間加工。實際操作時，把磨料由下磨料缸往上擠壓並通過治具中的工件進入上磨料缸，



一種雙向型式的磨料流動加工設備，其主要構成單元約略可分為機械本體、動力系統、控制系統、油壓單元、磨料冷卻器等。於機械本體上安裝上下兩個方向相反的磨料缸做為容納及推擠磨料流動用，操作時，首先升起固定上磨料缸的機頭，把磨料放入下磨料缸，再於工作台上放置治具及工件，然後機頭下降夾緊治具及工件。接著，擠壓磨料於上下磨料缸之間往復流動，期間並由治具引導磨料流經欲加工的工件表面。加工完成後，使機台上升再取出治具及工件，便完成一次加工作業。

然後再把磨料由上磨料缸中向下擠壓，同樣使磨料通過治具中的工件並進入下磨料缸而完成一個加工循環，如此往復運動，藉以達到需要的加工效果。

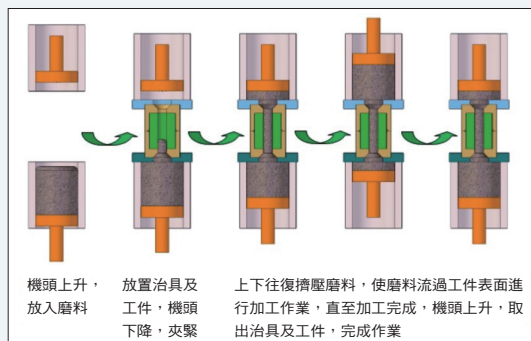
磨料流動加工機台設計的主要原理，在於引導及控制磨料「適當」地通過欲加工的工件表面而達到加工的效果。所謂「適當」的控制包括磨料擠壓流動的壓力、每行程磨料通過加工面的總量，總加工時間（循環次數）等，當然磨料的選用及治具的設計也是決定加工結果的重要因素。

在磨料流動加工的過程中，是使用磨料做為切削的工具。磨料的主要成分有兩種：基礎油（base）及磨粒（abrasive grain）。基礎油是一種柔軟的半固體介質，其成分是一種具有高彈性的有機高分子聚合物混合特殊的潤滑稀釋劑，磨粒則是均勻地散布在基礎油中。可以想像磨料就像是在口香糖中均勻混入研磨用材料顆粒一般，混合後的磨料呈半固體狀態，因此可以使用磨料流動加工設備所配備的油壓缸推擠磨料流經被加工物的表面，藉以達到去除材料及拋光的目的。

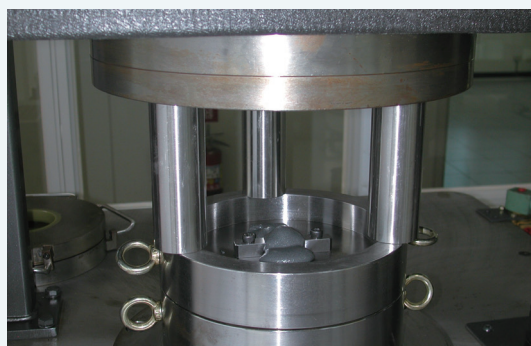
此外，可以依據實際加工的需求，例如被加工物的材質、表面狀態、幾何形狀限制等，選擇適用的磨粒材質與顆粒大小，調配適當的磨料軟硬度，以達到最經濟有效的加工作業。

所使用的磨料通常包含兩種或三種不同顆粒大小的研磨顆粒，所使用研磨顆粒的材質包括氧化鋁、碳化硼、碳化矽或鑽石粉末。其中碳化矽對工件有較大的材料移除率，兼具使用壽命長及經濟性，碳化硼適用於特殊的硬材，氧化鋁是另一種可供選擇的研磨顆粒，至於鑽石粉末一般運用於特殊用途，像是移除工件上的熱鑄層，或用於碳化鎢工件的拋光等。

高黏度趨近固態的磨料是用來均勻研磨大流道的面，低黏度的磨料則適合用來加工小流道。加工壓力的大小控制著磨料



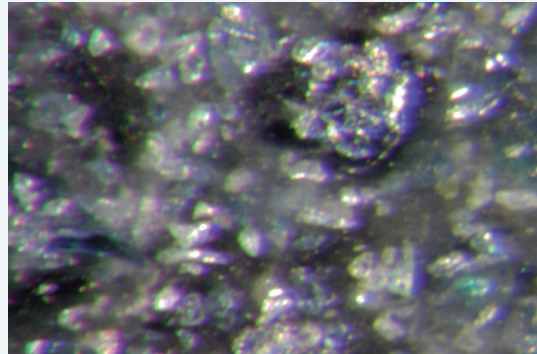
進行磨料流動加工時，先把被加工物置於治具內，再把治具組放置於機台工作台上方的上、下磨料缸之間並夾緊。



當油壓缸擠壓磨料時，利用加工治具引導磨料流經被加工物表面，再流入另一側的磨料缸中。



磨料是半固體狀態的彈性體，受到磨料流動加工設備中的油壓缸擠壓流動，可針對各種幾何型態的工件，例如複雜的異形不規則表面、彎曲內孔流道、微孔細縫或交叉孔洞等進行加工，達到倒角、去毛邊及拋光的效果。

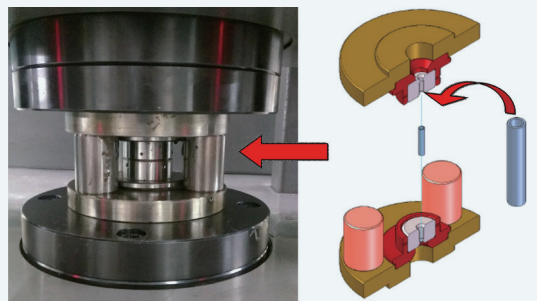


顯微鏡底下的磨料。照片中顯示磨粒分布於半固體的介質中，這些外形呈現不規則銳角的磨粒負起切削的任務。

的流速，慢而均一的流速可以得到較均勻的切削性，適於拋光作業，高流速則可以得到較大的倒角量。磨料流動加工的結果具有可預測性及可重複性，使用者可以依據特殊應用的需求選用適用的磨料，藉以精確控制加工的結果。

進行磨料流動加工作業時，有時需要設計治具把工件固定於加工機工作台上。治具的功用是固定工件及引導磨料通過要加工的區域，並且可以圍堵防止磨料經過工件不加工的部分，以避免該處被擠壓切削。此外，治具也具有保護工件不被機台夾傷的功用。

「磨料流動加工」最初是應用在去除飛機閥主機及主軸的毛邊，這種加工方式後來引進到金屬加工業當作「最終整修」技術使用。結果顯示，透過磨料流動加工的方式能提供精密、一致性及柔順的加工，而廣泛應用在航太工業、汽車工業、自動化生產與模具拋光。其他如外科手術用的人工心臟血管及離心泵，都可以採用磨料流動加工的方式處理。



磨料流動加工用治具的設計必須兼顧保護工件及提供足夠的支撐強度

而應用磨料流動加工方式進行表面修飾的工件，從小自直徑 1.5 mm 的齒輪及直徑 0.2 mm 的小孔，大至 50 mm 流道或外徑 1,200 mm 的渦輪葉片，大工件則可以放在導料架上方方便移動。使用磨料流動加工製程可突破長久以來無法有效克服的表面精修製程瓶頸，對於提升產品的品質、性能、可靠度等有莫大的助益。

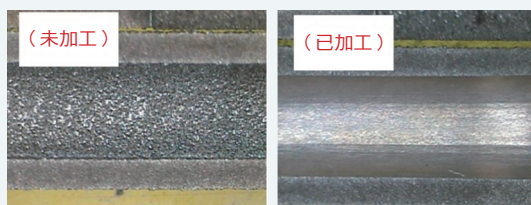
就如前面所說，金屬積層製品因其製程原理，例如採用選擇性雷射熔融製程加工而成的金屬積層製品，是把材料由粉末粒狀或熔融狀態以片狀層疊的方式構成加工目標成品的幾何形狀。因積層製造層疊與顆粒材料熔融結合等特性，受限於片狀切層解析度有限，以及因為材料顆粒燒結或熔融微細結構控制不易，所衍生的粒狀紋路與邊緣毛邊，使製造的產品除了須克服自身強度不足與原材料類別有限等先天限制外，更需面臨實際應用時所需克服的尺寸精度、表面品質、邊角毛邊等問題。

隨著積層製造技術的興起與展現在工業應用上的技術可行性後，產業界開始由製品的實用面正向思考其品質、精度、量產應用性等實務問題。如前所述，金屬積層製品的表面原生粗糙度品質通常僅能達成面粗度 Ra 約 10 ~ 20 μm 等級，若要符合模具、精密金屬零件或醫材等層面的應用，通常需再搭配後處理工法才可達 Ra 約 1 μm 等級的實用性表面品質。

國內業界雖已在積層製造工法與設備端投入研發並有一定成果，但由其發展瓶頸來看，仍有缺乏後處理製程技術支援與產業實用性連結的關鍵問題。因此積層製造工法雖然對於複雜結構的一次成形製作具有強大優勢，能有效應用於如鎳鈦合金等特殊材料與模具、醫材等高值製品領域，但若無具體後處理技術如異形曲面或內孔流道表面粗糙度改善等技術的支援，仍難以解決金屬積層製品的表面品質問題，表



採用選擇性雷射熔融工法製成的鈦合金 (Ti6Al4V) 管件 (部分已剖開方便觀察管內的表面狀態)，因為材料顆粒熔融燒結所衍生的粒狀紋路清晰可見，工件表面顯得相當粗糙。



以積層製造的方式製成的鈦合金 (Ti6Al4V) 管件內孔面，經過磨料流動加工方式拋光後，原來粗糙的顆粒狀紋路明顯變得平整光滑。

面粗糙度也難以由積層製造工法目前能力所能做到的等級提升至次微米的實用化等級。

為了解決金屬積層製品對於表面精修後處理的需求，採用磨料流動加工製程，對 Ti6Al4V 鈦合金粉末以「選擇性雷射熔融」積層製造製程加工成形的管件進行試驗，希望提供特有孔道複雜內曲面的精修處理能力。經設定多種磨料流動加工製程

在金屬積層製品的產業利用面上，已經發展出可行的後處理解決方案，可對金屬積層製品進行表面精修的作業。

條件進行實驗並量測加工結果，可以確認管件內孔面粗糙度由原先積層製造所得的 Ra 約 $12.4\mu\text{m}$ ，經磨料流動加工製程後改善至 Ra $0.2\mu\text{m}$ 以下，獲得光滑亮面的品質，且未發生裂痕或材料殘留剝落孔穴等缺陷。

在金屬積層製品的產業利用面上，已經發展出可行的後處理解決方案，可對金屬積層製品進行表面精修的作業，讓原本呈現顆粒狀粗糙表面的製品，有如經過「去角質」般變得平坦光滑與潔淨，只不過用的不是「磨砂膏」，而是使用工業磨砂膏一磨料。透過磨料流動加工技術的應用，

金屬積層製品的「面子」問題得以確保，積層製造技術的產業應用可更向前邁進一大步了！

江文欽、吳文傑、林大裕

金屬工業研究發展中心智慧技術組

許富銓

金屬工業研究發展中心模具與精微加工組

呂英誠

金屬工業研究發展中心

