

高純淨粉體的製造

蔡孟修

《經濟學人》指出，製造業的數位化與社群化會掀起第 3 次工業革命，而最關鍵的技術就是積層製造，最主要的材料則是高純淨粉體。

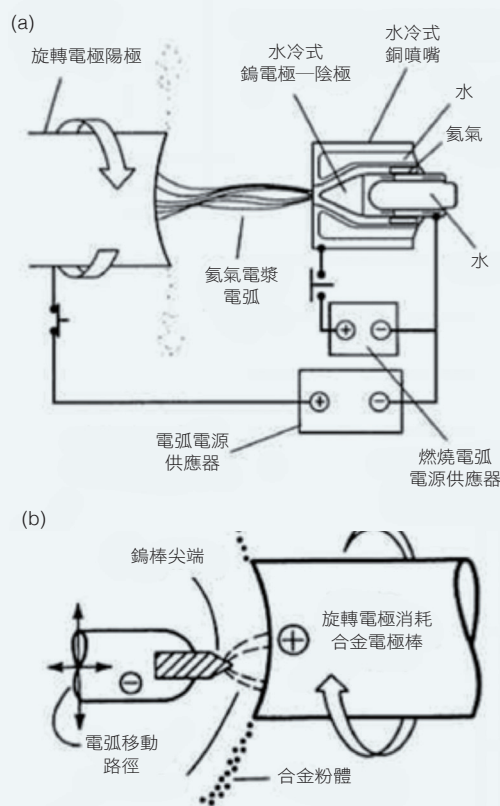
第 3 次工業革命

自從《經濟學人》雜誌於 2011 年把積層製造（3D 列印）視為第 3 波工業革命後，它已經成為一門顯學。

積層製造技術又稱快速成形技術，是近代革命性的先進製造技術。這技術源於美國，經過二十多年的不斷改進已經日臻成熟，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）、成品具使用功能（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」，即使用者以電腦繪製零件的設計圖或掃描現有物件，再以積層製造設備把原材料層層堆疊形成堅固物件。

根據《Wohlers Report 2013》報導，積層製造市場在 2012 年持續成長，設備、服務與材料區塊的產值從 2011 年的 17 億美元增加到 22 億美元，預估至 2019 年會超過 65 億美元。



(a) 旋轉電極設備示意圖；(b) 旋轉電極製程原理示意圖。

積層製造技術主要用來製造「形狀與設計一致」、「尺寸符合公差適合度」、「成品具使用功能」的成品。

積層製造技術採用「加法式製造」，即以電腦繪製零件的設計圖或掃描現有物件，再以積層製造設備把原材料層層堆疊形成堅固物件。

金屬積層製造技術透過設備、金屬粉末材料與成形技術製造出積層金屬製品，雖可彌補傳統減法製造工藝無法實現的複雜形狀金屬成品的製造，但成本較高，且在實際應用時也有尺寸精度、表面粗糙度、邊角毛邊、與燒結製程緊密關聯的機械強度等問題需克服。然而，金屬製品才是積層製造技術的真正機會，探索積層製造用的高純淨粉體已是當務之急。

高純淨合金熔煉技術

高純淨合金如鈦合金，其熔煉按照是否需製作海綿鈦電極，可分為需要把海綿鈦製作成電極的真空電弧重熔、不需要把海綿鈦製作成電極的電子束熔煉與等離子弧光熔煉。

真空電弧重熔的熔煉速率快，能生產大型鑄錠，全世界 85% 的鈦金屬是以真空電弧重熔生產的，是生產純鈦及鈦合金鑄錠的主流方法。真空電弧重熔爐主要包含電源供應器、水冷銅坩鍋、真空腔體及海綿鈦電極鑄錠四大構件。其電極鑄錠製作方式有兩種，一是利用真空感應熔煉爐直接澆鑄出電極，另一是利用油壓機把粒狀金屬原料加壓成電極形狀，適用於一些熔點高且活性大，易與氧化物坩鍋反應的金屬，如鈦、鎢、鋳等。

真空電弧重熔爐熔煉時，主要是利用電極鑄錠與水冷銅坩鍋之間產生的電弧使電極鑄錠熔化，金屬液滴滴落水冷銅坩鍋中形成熔池。由於熔湯熱量被水冷銅坩鍋帶走，因此鑄錠組織較一般鑄造的鑄錠細緻均勻。

電子束熔煉主要是在真空下以電子束當作熱源進行熔煉，適合生產高熔點、高活性的金屬。這方法所用的原材料可以是海綿鈦、回收料等，目前回收料用量最高，可是海綿鈦不需壓實成塊就可熔煉（這句請作者在校閱時潤飾 / 確認），常用於回收純鈦的熔煉。熔煉後鈦錠呈方形，不需鍛打可直接軋延。因在高真空下熔煉，雜質元素揮發除去的同时，被熔金屬元素也會揮發，鈦合金熔煉不易。回收鈦中的低密度及高密度雜質都可除去。

等離子弧光熔煉與電子束熔煉相同，所用的回收鈦及海綿鈦不需壓實成塊就可熔煉，熔煉後的鈦錠呈方形，可直接軋延。由於等離子弧光熔煉可在大氣或保護性氣體下進行，可避免 Al、Sn、Mn、Cr 等高揮發性元素揮發，適合熔煉鈦合金。熔煉時，He 或 Ar 等離子高速旋轉衝擊熔湯產生攪拌效果，有助於成分均勻化。

鈦合金由真空電弧重熔熔煉成鑄錠，經過鍛壓、旋轉鍛造後，再進行棒材或線材的軋軋與抽製。一般累積面積縮減率達 30% 時就需進行製程退火，退火溫度為攝氏 600 ~ 800 度。

為解決成形過程產生的表面雜質及缺陷，需於合金製造、成形加工與產品實現過程中，適時搭配合宜的表面處理製程，以避免表面缺陷造成放大效應，並進一步提供美觀、防護、特殊表面性質及機械或工程性質。

旋轉電極製粉法

旋轉電極製粉法是以金屬或合金製成自耗電極，其端面受電弧加熱而熔融為液

體，通過電極高速旋轉的離心力把液體拋出並粉碎為細小液滴，繼而固化為粉末。

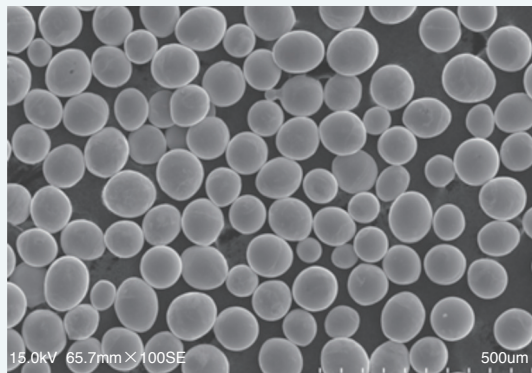
這方法於 1974 年由美國首先開發成功。它在熔融和霧化金屬過程中完全避免了造渣和與耐火材料接觸，消除了非金屬夾雜物污染源，可生產高潔淨度的粉末。

運用這方法可以產生接近球狀的粉末，且不會受到坩鍋污染，是高清淨度的金屬粉末。優點是粉末粒徑容易控制、粉末粒徑分布組距窄，容易滿足特殊品質要求；可以產出各種不同類型的金屬球狀粉末，以及不易脆裂的非金屬球狀粉末；除了低熔點的金屬與合金粉末外，也可製作出球狀高熔點金屬粉末。

電漿旋轉電極製粉法

在電漿旋轉電極製粉技術中，粉末粒徑的主要影響變數是電極轉速、電極棒徑，熔解速率、材料特性則影響經驗常數。

這方法是以電弧熱熔解材料，靠離心力把金屬液甩出形成金屬液滴，藉由表面張力作用使金屬液滴呈球狀，凝固後形成金屬粉末。原理看似簡單，但因製粉過程須在保護惰氣環境下進行而變得不容易，且必須提供足夠大的真空腔體系統（避免



由電漿旋轉電極製程所製造的鎳鈦合金粉體

金屬液滴氧化和碰撞腔壁變形），且須克服電極棒高轉速動力引入和電弧槍前進動力引入的氣密，以及電極轉動模組、腔體散熱等問題。

蔡孟修

金屬工業研究發展中心熔鑄組