

金屬粉末的製程與應用

黃揚升

在我們生活中到處充斥著以金屬粉末所生產出來的製品，例如智慧型手機的許多零組件，包括磁鐵芯、射頻線圈、電池等。

二次大戰故事

近代金屬粉末技術主要因戰爭的需求而快速發展，生產出來的高反應性金屬粉如鋁粉、鋇粉、鎂粉等，因為反應面積大、活性高，可當作炸藥、火箭的固態推進燃料，甚至是慶祝戰爭結束的煙火！戰爭時期帶來的並不只有金屬粉末在火藥應用上的發展而已，二次大戰中後期，德軍由於銅材短缺，無法生產砲彈用的驅動帶，因此發展出生產鐵粉的新技術，並把鐵粉燒結於砲彈上，代替原本銅製的砲彈驅動帶，讓德軍得以再度大量生產砲彈繼續作戰。

德軍在二次大戰中所使用的鐵粉燒結技術，於戰後並未消失，並衍生出粉末冶金技術。這技術帶來了零組件加工技術的突破，製造出形狀複雜、難以成形加工的太空梭零件，帶著太空人飛向月球。

粉末冶金技術後來應用到工業上，廣泛用於複雜零組件的大量製造，如車輛的軸承、齒輪、引擎等，金屬粉末材料如銅粉、鐵粉、不銹鋼粉、鈦粉等也較為大量地生產及使用。次世代的飛機目前也應用同樣技術，以最先進的輕量化合金材料—鈦鋁合金粉末（密度是鋼的一半以下），生產出高強度、耐溫、耐磨耗的次世代噴射引擎，使飛航時除了更節能外，飛機的強度及可靠度也大幅提升。

除了上面提到的軍事與運輸工具外，其實在我們生活中到處都充斥著以金屬粉末所生產出來的製品，例如智慧型手機的許多零組件，包括磁鐵芯、射頻線圈、電池等，且使用的金屬元素組合比起二次大戰時期更為多樣。

3D 列印是新興的製造技術，用來解決難成形材加工及複雜零組件製作的問題，目前主要用於航太、醫療器材等。

適用於 3D 列印的金屬粉末材料
必須滿足粉末球形度及材料純度上的要求。

金屬粉末市場

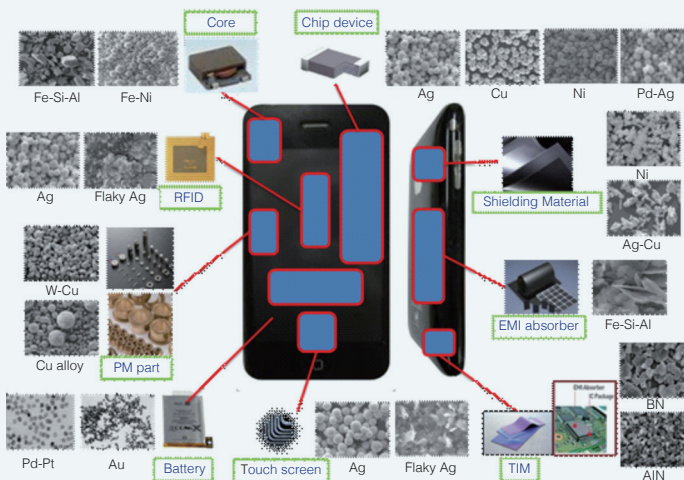
目前全球金屬粉末市場以冶金用粉末的用量最大，粉末冶金是一種已發展成熟的技術，主要應用於車輛產業。根據 GKN Powder Metallurgy 公司的報告，2013 年全球金屬粉末的使用量約為 109.1 萬噸，其中 75% 用於汽車零件製造。在冶金用金屬粉末方面，北美市場的需求量約占全球的 45%，鋼鐵類粉末就占了其中的 84.8%，其他依序是鋁合金 7.7%、銅合金 3.5%。

相較於粉末冶金，3D 列印是近 10 年間逐漸成熟的新興製造技術，用來解決難成形材加工及複雜零組件製作的問題，目前主要用於航太、醫療器材等。相較於粉末冶金材料主要以鋼鐵類為主，3D 列印用粉末材料的選用則較多元。

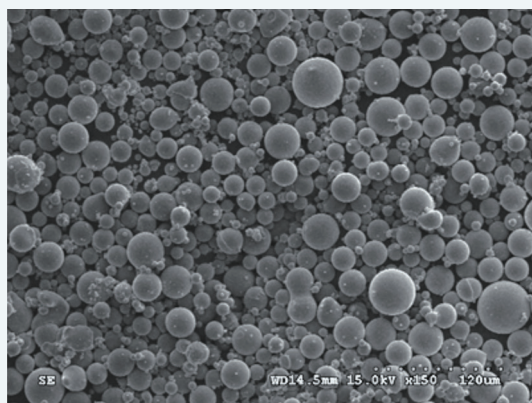
根據 SmarTech 公司 2014 年的統計，3D 列印用粉末以用於航太及生醫的不銹鋼（主要是鎳基）、鈦合金及鈷鉻合金為主。這 3 種材料總共占整體積層製造用粉末使用量的 98%，粉末冶金常使用的鋁及銅合金粉末則僅占 2%。主要是現有粉末生產系統無法生產低氧含量的鋁合金粉末，而銅合金粉末呈不規則狀，流動性很差，不符合 3D 列印的需求，需委託廠商特製。

金屬粉末比頭髮還細

除了某些脆性的金屬能使用機械法粉碎加工成粉末外，大部分的金屬粉末並不用機械法生產。化學還原法及電化學沉積法二者相似，是把水溶液中的金屬離子還原為金屬顆粒，藉由反應速率的調整，調



智慧型手機大量採用金屬粉末所製作的零件，包括訊號接收線圈、磁鐵芯、電池、觸碰面板線路、運算晶片等。



比頭髮還細小的金屬粉末，一般介於 1~200 微米之間。上圖：金屬粉末，下圖：鋁粉的電子顯微鏡照片。



高速氣體衝擊金屬熔湯產生高溫霧狀的金屬液滴，冷卻後形成微細的金屬粉末。

控粉體的形貌、顆粒大小，目前廣泛用來生產次微米級（顆粒小於 1 微米）甚至奈米級的金屬粉末。

由機械法、化學還原法、電化學沉積法所生產的粉末粒徑雖然較小，但粉末呈不規則狀，且有介質汙染的問題，並不適合製備 3D 列印用的金屬粉末材料。適用於 3D 列印的金屬粉末材料，必須滿足粉末球形度及材料純度上的要求。3D 列印用金屬粉末的球形度須大於 0.9，因此僅以霧化法所生產的粉末有機會符合要求。

水霧化製程

水霧化法用於商業化量產銅合金、鎳基合金、不銹鋼、鋅等冶金用金屬粉末，產量介於 1 ~ 500 kg / min。水霧化法以水、油等液體為霧化媒介，透過環形配置的噴嘴組，利用高壓液柱（10 ~ 100 MPa）衝擊金屬熔湯，並使金屬霧化成微細液滴。

由於水霧化法製程冷卻速率很快，霧化後的金屬液滴因內聚力而在回復成球狀

前便開始凝固，其粉末都呈不規則狀，因此不適用於 3D 列印製程。另外，由於水霧化法使用液體做為霧化媒介，能量傳遞效率高於氣體霧化法。在特殊設計下，霧化後粉末平均粒徑可達 10 微米以下。

水霧化法雖然具有單位時間產量大、製程成本低等優點，但由於使用水或油等液體為媒介霧化金屬粉末，其粉末的純淨度較差，無法用來生產高活性或高潔淨度的金屬粉末。

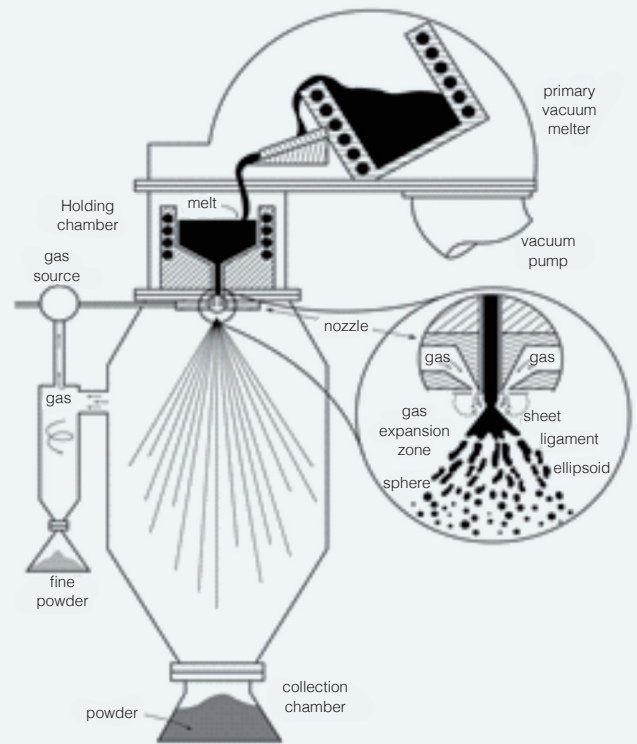
離心力霧化製程

離心力霧化法利用離心力使熔湯甩離高速旋轉的電極或霧化盤而形成金屬粉末。其理論基礎是根據泰勒（G. Taylor）、艾森克蘭（P. Eisenklam）等人對於液體不穩定理論的研究，推論當高速旋轉電極或霧化盤上的液體受到離心力的作用時，液體於電極邊緣上產生周期性的液柱，這些液柱進一步破裂成液滴而冷卻成為粒徑分布集中的粉末。

離心力霧化製程可細分為電漿旋轉電極法、旋轉電極法、轉盤霧化法，但後二者已完全被氣體霧化法取代。前者因為製程汙染低、粒徑操控性佳，適合用於高活性、高潔淨及高溫粉末如鈦合金、鋳合金粉末的生產。

以電漿旋轉電極法所獲得的粉末粒徑分布狹窄，安格爾等人透過理論及實驗分析，歸結出粉末平均粒徑 D_{50} 可描述為 $D_{50} = K\omega^{-1}D^{-1/2}$ 。其中， D 是電極棒直徑， K 是材料常數， ω 是電極轉速。針對同樣的電極材料，粉末的粒徑僅與電極轉速及電擊棒直徑有關。

藉由上述資訊可推估目前業界的製程能力如下：電極棒徑 60 mm、轉速 20,000 rpm 下，應可獲得平均粒徑 110 微米的球狀鈦合金粉末。相較於利用氣體霧化法所生產的 $D_{50} \sim 50$ 微米鈦合金粉末，雖然以電漿旋轉電極法所獲得的 $D_{50} \sim 110$ 微米粉末平均粒徑較大，但其球形度及純淨度都比氣體霧化法的高，因此電漿旋轉電極法仍無法完全被氣體霧化法所取代。



氣體霧化金屬粉末原理示意圖。金屬原料在坩堝中熔化成熔湯後倒入噴嘴，由高速氣體碎化（霧化）成細小金屬粉末。

氣體霧化製程

氣體霧化法以惰性氣體為霧化媒介，配合高壓氣體及噴嘴設計，形成高速氣體衝擊金屬熔湯而產生微小金屬液滴。由於是以氣體做為製程流體，冷卻速率遠比水霧化法慢，約為 105 K / sec。因此，霧化後的金屬液滴有足夠的時間因內聚力而回復成球狀，凝固後的金屬粉末接近球狀，流動性佳，相當適合於 3D 列印製程。

在粉末潔淨度方面，由於根據金屬特性採用不同的製程氣體，如氮氣或氬氣等，這些氣體氧含量低，且自身不與金屬反應，大幅降低了製程氣體汙染粉末的機會。

以氣體霧化法生產的粉末平均粒徑較小，根據材質的不同，其氣體霧化製程平均粒徑也不相同。不銹鋼可藉由不同的噴嘴設計，使粉末平均粒徑 D_{50} 降低至 30 微米；鋁合金因熔點較低，可利用特殊噴嘴設計使 $D_{50} < 20$ 微米；鈦合金則因高活性、高熔點，坩堝及合金熔解選擇方式有限，平均粒徑較前兩者大， $D_{50} \sim 50$ 微米。

鈦合金是發展重點

創客間 3D 列印的主流材料雖然以工程塑膠如 ABS 為主，但由於塑膠的強度及熱性質遠不如金屬，工業應用上仍以金屬為

創客間 3D 列印的主流材料雖然以工程塑膠為主，
但由於塑膠的強度及熱性質遠不如金屬，工業應用上仍以金屬為主。

主。在金屬粉末材料中，鈦合金是目前 3D 列印材料的發展重點之一。鈦合金具有比强度高、耐高溫、耐腐蝕、低彈性模數等特性，在生醫、航太及車輛領域扮演關鍵材料的角色。

以車輛為例，採用鈦合金渦輪增壓器、連桿等零組件，能大幅提升燃油效率與引擎反應速率，但因難以機械加工成形，使得鈦合金元件成本高，不易被車輛產業採用。由於國際環保法規的壓力，如歐盟將於 2017 年實施更嚴格的汽車排放標準，燃油效率須達到 130 g / km 以下，鈦合金在車輛產業上的應用重新受到重視。近年來在積層製造技術上有突破性的進展，使得鈦合金零組件的生產成本降低，車廠為提升燃油效率已開始計劃以鈦合金製造車輛關鍵零組件，包含引擎、渦輪增壓器等。

雖然鈦合金有很大的應用潛力，但由於高溫時鈦的活性很高，其熔湯與大部分的坩堝材質（CaO、MgO、Al₂O₃、ZrO₂ 等）

都會反應而在鈦側表面形成陶瓷層或介在物，汙染霧化後的鈦合金粉末成品。惟近年來已發展出如水冷銅坩堝—氣霧化技術、感應電極氣霧化技術、電漿線材霧化技術等，並已用於生產高純度，符合生醫及航太規範的鈦合金金屬粉末。

不久之後，複合金屬粉末生產技術將陸續出現。目前美國國家能源實驗室已著手研究，由 3D 列印技術生產出輕量、材質强度高、壽命長的複合金屬材料產品指日可待。

黃揚升

金屬工業研究發展中心銲接組

