



軍事後勤

金屬3D列印科技運用於 空軍航材製造程序之研析

空軍少校 莊智翔、空軍中校 蘇園展

提 要

3D列印技術具備客製化及快速製造特性，可針對急需求、需求性高及需求量少金屬零件之航材進行產製，如能善加應用，必可有效解決我空軍戰機金屬零件急缺及消失性商源問題。經由本研究探討，可建構出金屬原件從3D建模、材料定性定量分析、原件機械性能測試作業、選用3D列印設備、列印試件機械性能測試，最後列印完整物件並執行使用性能評估及飛行驗證之製造程序，期能作為後續籌建金屬3D列印能量之程序參考，以達到迅速獲得維修器材，快速恢復戰機妥善之目的。其中可了解到材料、成本(設備、除膠、熱處理及燒結成本等)、生產速度、最大列印尺寸及成品機械性質為選用3D列印設備五項重要因素，另可藉由後續熱處理改善3D列印成品之內部微觀結構，進而增強其機械性能。最後建議可藉由委外代為列印3D金屬零件，不僅可做為專業人員初步訓練之墊腳石，亦可大大降低3D列印設備初期籌建之龐大經費，並俟人員熟悉該專業領域後再評估未來發展之適切性及可能性。

關鍵詞：金屬3D列印、積層製造

壹、前言

3D列印是一種將材料堆疊成型的積層製造(Additive Manufacturing)技術，



現今已廣泛應用於食品、民生、建築、交通運輸、教育娛樂、機械與航太工業上，而在軍事應用上，美軍F-22「猛禽」隱身戰鬥機已使用3D列印技術，完成座艙鈦金屬零件列印，取代原傳統製造之鋁金屬原件，成功節省龐大維修費用。^{【註1】}3D列印對比傳統減法製造技術(如切削、研磨、鑽鑿或其他削減成形)，具有易於客製化、製造速度快、製造複雜度高、技術門檻低、機台占據空間小、節省材料、可結合多種材料等優勢。

鑒於我空軍三型主力戰機皆已服役逾廿年，近年來故障率逐年攀升，統計資料截至2018年11月15日，顯示F-16戰機故障頻率相較於2015年成長約30%，幻象戰機則成長約42%，^{【註2】}顯見隨著戰機機齡老化，對於後勤維修需求必定逐漸擴大，過去從未發生的故障情況也必定會逐步攀升，再加上消失性商源等問題，因此，如何快速獲得維修航材、降低維修成本，將成為未來必須面對的挑戰。

由於3D列印技術具備客製化製造特性，可針對急需求、需求性高及需求量少金屬零件之航材進行產製，有效解決未來不可預知故障情況所衍生之急需零件及消失性商源問題，並可縮減庫存器材品項，降低庫存管理成本，另製造速度快之特性可有效支援戰機搶修，迅速恢復部頒機隊妥善率。相較於傳統減法製造技術，3D列印可減少材料浪費及縮短製造程序，如能善加應用於戰機維修，必定可有效降低維修成本。

空軍三型主力戰機所使用的材料，主要以金屬材料為主，如F-16戰機所使用鋁合金佔全機金屬比率78.4%、鋼材佔17.8%及鈦合金佔0.8%，^{【註3】}故本研究將運用3D列印技術，探討仿製金屬零件之作業程序，著重於如何選擇適切之3D列印技術。期盼本研究可提供空軍後續籌購急需及消失性商源航材參考選項，並進而達到迅速獲得維修器材，快速恢復戰機妥善，有效支援空軍戰演訓任務。

貳、金屬3D列印應用及技術概況

一、各國金屬3D列印應用於航太產業情況

註1 Ed Adamczyk, 2019/8/19. "Air Force certifies first field unit for 3D printing of aircraft parts," UPI DEFENSE NEWS, <https://www.upi.com/Defense-News/2019/08/19/Air-Force-certifies-first-field-unit-for-3D-printing-of-aircraft-parts/1931566230576/?upi_ss=3D+printer> (檢索日期：西元2019年9月30日)

註2 陳詩雅 蔡岳霖 張政捷 彭冠霖, 2019/4/15日。〈國軍戰機老舊-爆維修年燒68億元〉，《華視新聞》<<https://tw.news.yahoo.com/國軍戰機老舊-爆維修年燒68億元-050200266.html>> (檢索日期：西元2019年9月30日)

註3 Technical Order 00-105E-9 and STANAG 3896, 2006/2/1. "Aerospace Emergency Rescue and Mishap Response Information," Segment 11 <<http://www.0x4d.net/files/AF1/to00-105e-9.htm>> (檢索日期：西元2019年10月27日)



- (一) 民用航空應用方面：德國MTU公司使用EOS 3D列印機，列印齒輪傳動渦扇發動機GTF的鎳合金輪殼，而在應用3D列印技術之前，這些零件的生產非常昂貴而耗時。^{【註4】}由於金屬3D列印裝備造價昂貴，適用於製造高單價且客製化之產品，故常定位於少量化製造，但隨著科技進步，批量化製造也逐漸成為未來趨勢，GE航空工廠利用金屬3D列印為Leap航空發動機生產了3萬個燃油噴嘴，成為規模化3D列印直接製造的典型示例之一。^{【註5】}
- (二) 軍事航空應用方面：中國工信部在2015年發布「國家增材製造(3D列印)產業發展推進計畫」，首次明確將3D列印列入國家戰略層面，代表著政府方面對3D列印產業大力支持，而在軍事應用上，殲-20、殲-31、殲-15、殲-16等戰機及運-20都已使用3D列印技術，快速製造大型主承力構件。^{【註6】}中國大陸第五代隱形戰機鶻鷹(殲-31)2.0重大改進型戰機，藉由3D列印技術，增材製造出的鈦合金承力構件，已應用在鶻鷹2.0的首飛測試中。^{【註7】}中國國防大學軍事後勤與軍事科技裝備教研部教授李大光表示上世紀八、九十年代，研發新一代戰鬥機至少要花10-20年的時間，而藉助3D列印技術，最少只需3年時間就能完成。^{【註8】}

二、金屬3D列印技術概況

廣泛稱為3D列印技術實際上是一種積層製造方法(Additive Manufacturing, AM)，經由材料2維列印後，再層層堆疊成3維結構。積層製造技術依據F42積層製造委員會分類，可分為7個類別，分別為材料擠製成型技術(Material Extrusion，簡稱ME)、光聚合固化技術(Vat Photo Poly，簡稱VP)、材料噴塗成型技術(Material Jetting，簡稱MJ)、黏著劑噴印成型技術(Binding Jetting，簡稱BJ或BJT)、疊層製造成型技術(Sheet Lamination，簡稱SL)、粉末床熔融成型技術(Powder Bed Fusion，簡稱PBF)及指向性能量沉積技術(Directed Energy Deposition，簡稱DED)。^{【註9】}

註4 中國航空新聞網，2016/8/11。〈德國MTU將在航空發動機力推3D列印技術〉，《壹讀》，〈<https://read01.com/0NggeE.html#.XcLXyFUzapw>〉(檢索日期：西元2019年10月27日)

註5 活字印刷，2018/10/9。〈Leap引擎標配 GE航空3萬個3D列印燃油噴嘴出貨〉，《每日頭條》，〈<https://kknews.cc/news/p2jj318.html>〉(檢索日期：西元2020年01月14日)

註6 雙木小王子，2019/4/5。〈2018年中國3D列印行業市場解析〉，《美日頭條》，〈<https://kknews.cc/zh-tw/finance/z9n39yg.html>〉(檢索日期：西元2020年01月14日)

註7 張國威，2017/1/20。〈3D列印零件 新科技助殲-31翱翔〉，《旺報》，〈<https://www.chinatimes.com/newspapers/20170120000826-260301?chdtv>〉(檢索日期：西元2020年01月14日)

註8 3D打印世界，2019/3/7。〈2018年中國3D列印產業發展現狀與市場前景分析 3D列印在軍事裝備領域得到廣泛應用〉，《每日頭條》，〈<https://kknews.cc/finance/gap8jzl.htm>〉(檢索日期：西元2020年01月14日)

註9 鄭正元等人，《3D列印-積層製造技術與應用》(出版地：臺北，全華圖書公司，西元2018年)，頁2-2。



然而在金屬應用方面，材料擠製成型技術、黏著劑噴印成型、疊層製造成型技術、粉末床熔融成型及指向性能量沉積技術，可應用在金屬3D列印。另外，隨著科技日新月異，新的金屬3D列印技術不斷推陳出新，不同於上述技術，使用電阻加熱方式直接熔融金屬材料的Joule Printing技術也將介紹如后。

(一) 材料擠製成型技術 (ME)：

材料擠製成型技術即加溫材料使之熔融成半固態之液狀，再經由噴嘴擠壓出來，並依所規劃路徑完成一層層的堆疊，直至完成物件，【註10】此種製造方法通常運用在塑膠製品，且因噴嘴出口是圓形的，因此無法列印出尖銳外角，在成品角落、邊緣都會形成相當於噴嘴半徑之導圓。【註11】在金屬3D列印應用上，運用相同的原理，加溫混合金屬粉末與膠之混合材料，使之熔融成液狀，而加熱之溫度主要在達到膠熔化之溫度，而不是達到金屬熔化之溫度，故加熱溫度大大降低，有效節省加熱成本，後續再經由除膠及燒結程序，使金屬粉末燒結成型。依據材料型式不同，可分為絲狀、顆粒狀及圓棒狀三類，絲狀之金屬材料擠製成型方法如熔融沉積成型技術 (Fused Deposition Molding, FDM)，顆粒狀之金屬材料擠製成型方法如金屬射出成型技術 (Metal Injection Molding, MIM)。

MARKFORGED的Metal 3D列印系統經由加熱金屬混合絲材，使之熔融成液狀，再由噴嘴擠出成形，後續進行除膠及燒結程序，該設備可應用的材料有不銹鋼、工具鋼、鈦合金、鎳合金及銅等金屬材料；BRUSAT的Studio System設備運用同樣的技術原理，加熱金屬混合材料棒，使之熔融成液狀，再由噴嘴擠出成形，後續同樣執行除膠及燒結程序，該設備可應用之材料有合金鋼、不銹鋼、工具鋼、鋁合金、鈦合金及超合金等金屬。【註12】

(二) 黏著劑噴印成型技術 (Binding Jetting, 簡稱BJ或BJT)：黏著劑噴印成型技術原理為使用黏著劑將一層一層粉末材料逐層黏合堆疊成型，成形程序首先將材料粉末鋪於粉末床後，由噴頭將黏著劑噴灑於選定位置上，類似噴墨印表機作用原理，粉末床降下一層，再鋪上新一層粉末，重複上述黏著劑噴灑方式，使得上下二層粉末黏合，不斷重複此步驟，直至物件製造完畢，但後續必須將物件進行燒結作業。該技術可應用於陶瓷 (如玻璃或石膏) 及金屬材料 (如不銹鋼)，金屬黏著劑噴塗零件可以用作功能性零件，比選擇性雷射光

註10 鄭正元等人，《3D列印-積層製造技術與應用》(出版地：臺北，全華圖書公司，西元2018年)，頁4-1。

註11 鄭正元等人，《3D列印-積層製造技術與應用》(出版地：臺北，全華圖書公司，西元2018年)，頁4-17。

註12 BRUSAT, "Studio System設備," <<https://www.brusat.tech/>> (檢索日期：西元2019年11月18日)



熔解 (SLM) 和直接金屬雷射光燒結 (DMLS) 金屬零件更具成本效益，但是有較差的機械性能。【註13】

- (三) 疊層製造成型技術 (SL)：疊層製造成型技術原理是以薄片材料層層結合產生物件的技術，可使用於紙張、塑膠及金屬薄片材料，【註14】其接合方式為關鍵技術，金屬薄片材料可採用超音波焊接技術，利用超音波的振動能量使兩層表面摩擦，形成分子間接合，另須搭配CNC銑床來切割每一層內外輪廓，【註15】因此系統空間需求較大，加工複雜度亦較高。【註16】

(四) 粉末床熔融成型技術 (PBF)

粉末床熔融成型技術是使用雷射或電子束為能量源，在鋪平的材料粉末床上，執行切層圖形掃描，使得材料粉末熔融或燒結結合在一起，接著粉末床下降一層，再重新鋪上新的一層粉末，如此反覆燒熔材料粉末，層層疊加成三維物件。相較於其他積層製造技術，粉末床熔融成型技術具有不需支撐設計之優點，因堆積的粉末提供懸空、鏜空、倒角等結構設計之支撐點；【註17】另此技術可運用各式的粉末材料，從金屬、陶瓷、高分子及複合材料均可使用，擴大應用範圍。【註18】

在金屬應用上的技術計有直接金屬雷射光燒結 (Direct Metal Laser Sintering, DMLS)、電子束融化成型 (Electron Beam Melting, EBM) 及選擇性雷射光熔解 (Selective Laser Melting, SLM) 等。DMLS與SLM兩種技術主要差別在於雷射能量源施加於粉末材料造成之溫度差別，DMLS不使粉末產生熔融，而是使之燒結在一起，也就是粉末加熱至熔點以下溫度，相反地，SLM則是將粉末加熱熔點以上溫度使之熔融結合。【註19】

- (五) 指向性能量沉積技術 (DED)：指向性能量沉積技術是使用能量源 (雷射、電子束及電漿) 將金屬粉末或線束加熱至熔點以上，使之直接塗覆沉積成三維物件。與PBF技術相比，不受粉床尺寸限制，適合製造大尺寸之元件。【註20】此

註13 Ben Redwood, 2019. "Additive Manufacturing Technologies: An Overview", 3D HUBS, <<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview/#/powder-bed-fusion>>. (檢索日期：西元2020年1月19日)

註14 鄭正元等人，《3D列印-積層製造技術與應用》(出版地：臺北，全華圖書公司，西元2018年)，頁8-1。

註15 鄭正元等人，《3D列印-積層製造技術與應用》(出版地：臺北，全華圖書公司，西元2018年)，頁8-2。

註16 鄭正元等人，《3D列印-積層製造技術與應用》(出版地：臺北，全華圖書公司，西元2018年)，頁8-5。

註17 鄭正元等人，《3D列印-積層製造技術與應用》(出版地：臺北，全華圖書公司，西元2018年)，頁9-1。

註18 鄭正元等人，《3D列印-積層製造技術與應用》(出版地：臺北，全華圖書公司，西元2018年)，頁9-2。

註19 Gordon Jones, 2019/4/13, "Direct Metal Laser Sintering (DMLS) - Simply Explained" <<https://all3dp.com/2/direct-metal-laser-sintering-dmls-simply-explained/>> (檢索日期：西元2019年11月27日)

註20 鄭正元等人，《3D列印-積層製造技術與應用》(出版地：臺北，全華圖書公司，西元2018年)，頁10-1。



技術也可應用基材材料上局部特性補強或修補。【註21】

(六) Joule Printing技術：由電阻加熱法使金屬線材熔融，並披覆在所需位置，如此反覆動作，層層堆疊製成，相似於材料擠製成型技術，一樣是經由加熱材料至液狀，但是不同的是Joule Printing技術未經過噴嘴擠出成形，而是線材熔融後直接披覆，且線材不為混合膠，為純金屬材料，故不須進行除膠及燒結程序；【註22】另亦不同於指向性能量沉積技術使用之能量源為指向性能量(雷射、電子束及電漿)，Joule Printing技術為使用電阻加熱法加熱線材。

參、金屬3D列印前置作業

一、3D建模概述

在執行金屬3D列印前，首先必須先具備原件之尺寸才能進一步建構零件模型，轉換為電腦可讀取之數位資料，本研究為針對已完成之成品進行仿製，故原廠如能提供原始的物件規格，便可經由CAD軟體直接完成建模；然原廠通常是不會提供規格，故必須對原件外型進行3D掃描，以獲取近似原件之模型尺寸。

因此，模型建立主要可歸納為二種方式獲得，一是經由CAD軟體完成建模，前提之下，需具備零件外形尺寸，如能獲取製造商提供之詳細尺寸及公差，則可運用商業CAD軟體據以建構實體模型，這也是最符合原零件規格之方式；二是經由逆向工程獲取近似原件尺寸，所得數據之誤差程度，則視3D掃描裝置、使用掃描方法及掃描重建軟體而異，並經由經驗法則訂定公差，為實際航材仿製過程中最有可能發生情況。

二、材料儀器分析概述

要使材料從實驗室走向商品化，必須進行材料工程化應用研究，以滿足安全性、可靠性、耐久性和經濟性的考量，因此，為實現上述目標，需要設計、材料、工藝及性能等四方面共同合作才能達到。【註23】在本研究因為使用3D列印方式進行原件仿製，故僅能針對材料成份進行分析，以獲得原件所使用之材料，並使用相同材料製造或使用機械性能更佳之材料代替，而原件之表面及內部組織結構則是3D列印無法泡製，但可經由後續工藝(表面處理、熱處理)改變列印成品表面及內部組織結構，進而改善機械性能，故本小節將針對材料分析介紹，機械性能測試將於下一小節介紹。

註21 鄭正元等人，《3D列印-積層製造技術與應用》(出版地：臺北，全華圖書公司，西元2018年)，頁10-8。

註22 DIGITAL ALLOYS, <<https://www.digitalalloys.com/technology/>>(檢索日期：西元2019年11月21日)

註23 郭廣平、丁傳富，《航空材料力學性能檢測》(出版地：北京，機械工業出版社，西元2018)，頁2。



原件在製造原廠未提供材料成份的情況下，就必須對原件進行材料分析，以提供3D列印所需材料依據。材料可靠性鑑別(Positive Material Identification, PMI)是一種特殊非破壞檢測方法，為對金屬成份執行定量、定性分析，並判別其金屬材料牌號，最常使用的檢測方法包括X射線螢光分析(XRF)與發射光譜分析(OES)，【註24】說明如下：

(一) X射線螢光分析(XRF)

X射線螢光分析法(X-ray fluorescence, XRF)是利用高能量X射線照射樣品表面材料，X射線光子與原子產生碰撞，原子內層軌域電子被驅離形成空洞，接著外層軌域電子填補內層軌域空洞，釋放出X射線螢光，利用此螢光作為元素定性定量分析的方法。【註25】

X射線螢光分析儀器在分類上又可分為手持式、可攜式及桌上型等三類，依據使用者要求的精確度而選用，手持式X射線螢光分析儀Hitachi X-MET8000可在2秒內快速鑑別合金的種類，最高可測Mg(12) U(92)範圍的元素。【註26】

(二) 發射光譜分析(OES)

發射光譜分析(OES)基本原理為使用發射光源激發樣本，使處於最低能態之原子獲得足夠能量，外層電子由基態能階躍升至較高能階，而處於激發態，當從激發態回到基態時，多餘的能量以光子形式釋出特定波長，【註27】藉波長特性及輻射強度進行元素定性定量分析，其發射光源可分為電弧及電火花發射光源、雷射激發源、感應耦合電漿激發源，【註28】因以感應耦合電漿為激發源之發射光譜分析儀須將樣本製成溶液，不易直接對樣本進行鑑別，故僅針對其餘2種激發源做介紹。

電火花發射光譜分析儀Hitachi手提式火花SPARK分光儀，可測超低碳不銹鋼(304L, 316L)，並可測C、P等23種元素。【註29】雷射激發之發射光譜分析儀Vulcan手持式雷射分光儀，鑑別速度快，可於1秒完成金屬牌號鑑別

註24 能邁科技，2012/2/9，〈金屬/合金PMI：Positive Material Identification(材料可靠性鑑別)專用金屬分光儀〉〈<http://www.tisamax.com/article/view/117>〉(檢索日期：西元2019年11月14日)

註25 能邁科技，2019/5/10，〈XRF常見5種設備分析原理簡介〉〈<http://www.tisamax.com/article/view/298>〉(檢索日期：西元2019年11月14日)

註26 昇航股份有限公司，〈手持式X-MET8000 系列〉，〈<http://www.astcorp.com.tw/product/absYgN2/ezdp2ph/CiMyH64>〉(檢索日期：西元2019年11月14日)

註27 劉惠銘、吳玉琛、陳順基，《儀器分析》(出版地：台北，台灣東華書局股份有限公司，西元2017年)，頁175

註28 劉惠銘、吳玉琛、陳順基，《儀器分析》(出版地：台北，台灣東華書局股份有限公司，西元2017年)，頁178

註29 昇航股份有限公司〈PMI MASTER Smart (PM smart) SPARK分光儀〉，〈<http://www.astcorp.com.tw/product/TO0J104/pBqHGaW/G9oe8TE>〉(檢索日期：西元2019年11月14日)



，可測不鏽鋼、低合金鋼、工具鋼，鈷、銅、鉛、錫、鈦、鋅合金，鋁合金，鎂合金等金屬元素，其特性沒有X-ray安全顧慮，無需原子能委員會的監管，沒有X光管的消耗問題。【註30】

三、材料機械性能檢測概述

材料機械性能可以反應出其受力或負荷與變形的關聯性，其負荷方式可為拉伸、壓縮或剪切，負荷大小可能是固定、隨時間規律或隨機變化，作用時間可能幾分之一秒或持續多年，環境因素(溫度、濕度、酸鹼度)也可參雜其中而影響結果，強度、硬度、延性和勁度都是機械性能的代表參數。【註31】經由測試原件與3D列印之試件之機械性能，可先評估經由3D列印之試件可否達到原件之機械性能，如無法達到時，可更換性能較佳之材料，避免3D列印出成品才發現無法滿足原始設計之性能要求。機械性能試驗包含拉伸、硬度、衝擊、壓縮、彎曲、扭轉、剪切、疲勞、斷裂韌度及潛變等，選定必要之試驗方法，則視原件使用條件及環境而定，過多的試驗方法將會肇致成本增加，故須經由有經驗之工程師多方面去探討。

肆、3D列印金屬零件作業程序研析

一、3D列印前置作業程序

經由第三章3D列印前置作業部分，可了解在執行3D列印前，必須先針對原件進行「3D建模」，而是否使用3D掃描方式建構，則視原廠是否提供原件尺寸而定，後續再實施「材料成分定性定量分析」，以獲得原件所使用之材料金屬類別及成份，進而提供選定可適用3D列印設備之材料依據。下一步驟為「原件材料機械性能測試」，主要用於更精準地確認原件各項機械性能，作為比照3D列印成品之機械性質是否可滿足(甚或超過)原設計規格，其原因是原件可能經過表面處理、熱處理等加工處理，進而改變材料之內部組織結構或改變表面組織結構或成份，而影響機械性能之表現，如僅單純獲得材料成份恐無法徹底了解原件真實機械性能。

二、選定適切3D列印設備

影響選定3D列印設備之因素可從五方面評估，包括3D列印機可適用之材料、成本(設備、除膠、熱處理及燒結成本等)、生產速度、最大列印尺寸及成品機械性質，說明如下：

註30 昇航股份有限公司<Vulcan手持式雷射分光儀(Hand held LIBS)><<http://www.astcorp.com.tw/product/absYgN2/RtqgFhs/F9QG3Qh>>(檢索日期：西元2019年11月14日)

註31 簡仁德、楊子毅、張柳春，《材料科學與工程》(出版地：台北，學銘圖書有限公司，西元2007年)，頁7-5。



(一) 3D列印機可適用之原料：在國外市場上，金屬3D列印機玲瓏滿目，可依據廠家提供適用原料之資訊去選擇合適的設備。理論上來說，可用於銲接之金屬材料大都可以使用「雷射粉末床熔融成型技術 (LB-PBF)」製造，可應用之原料範圍較廣，適用之原料包含不銹鋼、工具鋼、超合金、鈦基合金、鋁基合金及銅，另鎳基合金、貴金屬及鎂基合金現今已有廠家發展成功或研發中。【註32】其中金屬射出成型技術 (MIM) 除鋁金屬外，其餘不鏽鋼、工具鋼、超合金、鈦及碳化物均可使用，使用範圍也逐漸趕上LB-PBF技術，另黏著劑噴印成型技術 (BJT) 可使用之材料雖較少，但也持續不斷在發展其他金屬應用。故在選擇3D列印設備時，不應畫地自限，只依據3D列印技術類型去選擇，應依3D列印機廠家提供之適用材料去決定，但最重要的是其列印出之成品機械性能表現才是決定關鍵。

(二) 成本

在成本方面須考慮的因素包含3D列印機機台成本、原料成本與後續施予除膠及燒結之成本，如黏著劑噴印成型技術及材料擠製成型技術須另外考量除膠及燒結之成本。

圖1顯示雷射粉末床熔融成型技術 (LB-PBF)、黏著劑噴印成型技術 (BJT) 及材料擠製成型技術 (Metal FDM) 在3D列印設備、材料及燒結作業之成本長條圖，以單一雷射源粉末床熔融成型技術 (Single Laser System) 之綜合成本 (設備及材料) 最高，其3D列印設備也是所有設備中成本最高者，而具備四具雷射源之四槍雷射粉末床熔融成型技術 (Quad Laser System) 則可有效降低設備之每立方平均製造成本。由此可知，雖是同一種3D列印技術，但可能因



圖1 各類3D列印技術之設備、原料及燒結成本

資料來源：Maximilian Munsch, Matthias Schmidt-Lehr, Eric WyciskAmpower, "Metal Additive Manufacturing with sinter based technologies," p.17, <<https://am-power.de>>

註32 Maximilian Munsch, Matthias Schmidt-Lehr, Eric WyciskAmpower, "Metal Additive Manufacturing with sinter based technologies," (Hamburg :Ampower GmbH & Co. KG, 2018.10), p.20, <<https://am-power.de>>



為技術精進而降低平均生產成本，這是需要列入考量。

由圖中也可觀察到金屬射出成型技術(MIM)為此三種3D列印技術中綜合成本最低者，主要原因為材料成本是最低，其顆粒狀材料壓縮了每立方平均製造成本，另黏著劑噴印成型(30%堆疊密度)設備之每立方平均製造成本為所有設備最低者，但因為材料成本相較於MIM明顯提高，因此墊高了綜合成本，可見，每一種製造技術均有不同之成本組合，不能只考慮單一成本因素。

隨著積層製造技術不斷開發，未來3D列印材料製造成本也大大下降，經比較材料擠製成型技術(Meatal FDM)、黏著劑噴印成型技術(BJT)及雷射粉末床熔融成型技術(LB-PBF)等3種不同3D列印技術之316L不銹鋼材料目前成本及未來可能降低成本之潛力，發現材料擠製成型技術(Meatal FDM)之材料製造成本目前是三種技術中最高，但未來製造成本可能從200 €/kg降至17 €/kg；另兩項列印技術之材料製造成本在未來也均具有成本降低之潛力(黏著劑噴印成型技術可能從60 €/kg降至8 €/kg、雷射粉末床熔融成型技術可能從60 €/kg降至40 €/kg)。^{【註33】}從以上可知，未來材料製造成本也須列入選定設備之考量，因為材料是後續積層製造必須持續花費之成本，未來具有降低製造材料成本之潛力必可大幅降低3D列印成本。

(三) 生產速度

生產速度會因不同的3D列印技術而所不同，黏著劑噴印成型技術(BJT)生產速度最快，為180 CM³/H，但同樣之3D列印技術也會有不同之生產速度，如BJT技術生產速度最低為6 CM³/H，^{【註34】}由此可見，在選定設備時應依廠家提供之生產速度來衡量。

(四) 最大列印尺寸

最大列印尺寸是指3D列印設備可製造成品之最大長、寬、高尺寸，其取決於每台設備的列印空間大小，在製造大型物件可一次完成，不須拆成多個物件再拼接在一起，有效節省工時成本，但連帶促使設備成本大幅提高。另一個需要考量的因素就是最小壁厚，為確保物件結構強度，3D列印有最小壁厚限制，壁厚越大物件強度就越強，因此，物件尺寸越大，所需最小壁厚也越大。^{【註35】}

註33 Maximilian Munsch, Matthias Schmidt-Lehr, Eric WyciskAmpower, "Metal Additive Manufacturing with sinter based technologies," p.18, <<https://am-power.de>>

註34 Maximilian Munsch, Matthias Schmidt-Lehr, Eric WyciskAmpower, "Metal Additive Manufacturing with sinter based technologies," p.18, <<https://am-power.de>>

註35 e鍵打印，2017/12/26，〈3D列印模型的尺寸、壁厚和公差等都有哪些要求〉，《每日頭條》，<<https://kknews.cc/news/z29l2op.html>> (檢索日期:西元2020年2月26日)



(五)成品機械性質

金屬3D列印成品機械性能的優劣須經由機械性能檢測才能獲得，而這些機械性能指標包括硬度、降伏強度、抗拉強度及伸長量，及其他較特別的檢試項目，如衝擊、壓縮、彎曲、扭轉、剪切、疲勞、斷裂韌度及潛變等，可請廠家提供測試資訊或提供試件進行檢試，以確認3D列印成品之機械性質是否可滿足需求。

以下將列舉316L及17-4PH不銹鋼，在不同3D列印技術與依據ISO 22068及ASTM 276規格製成試件之硬度、降伏強度、抗拉強度及伸長量比較情況。在執行拉伸測試前，所有試件均施予真空環境下1040℃、1小時之固溶處理，另17-4PH不銹鋼增加大氣環境下550℃、4小時之熱處理，其目的為降低黏著劑噴印成型技術(Binder Jetting)及材料擠製成型技術(Metal FDM)在燒結過程中溫度的影響，及其他影響機械性質之因素，與增加試件比較性。

1. 硬度比較

經由不同3D列印技術製成之316L不銹鋼試件進行維氏硬度測試，經與ISO 22068規格之316L不銹鋼數據比較，雷射粉末床熔融成型技術(LB-PBF)製成之試件硬度為最高，黏著劑噴印成型技術(Binder Jetting)及材料擠製成型技術(Metal FDM)試件硬度分別為略低及略高於ISO 22068規格，【註36】由此可知，如需列印硬度較高之316L不銹鋼成品，可選擇雷射粉末床熔融成型技術。

另經由不同3D列印技術製成之17-4PH不銹鋼試件維氏硬度比較情況，黏著劑噴印成型技術(Binder Jetting)具有最佳之硬度表現，並超過ISO 22068與ASTM A564規格之硬度；【註37】另雷射粉末床熔融成型技術(LB-PBF)則不像316L不銹鋼具有最佳硬度之情況，顯見不同材料及後續熱處理條件均有可能影響硬度測試結果，故在選擇合適3D列印設備時，必須將材料及後續熱處理條件納入考量，也間接說明3D列印試件的初步機械檢試是不可或缺的，另適當應用熱處理可改善3D列印產生之缺點。

2. 降伏強度、抗拉強度及伸長量之比較

不同3D列印技術製成之316L不銹鋼試件執行拉伸測試，在降伏及抗拉強度比較方面，前述三種3D列印技術之試件均大於ASTM A564及ISO 22068規格之試件，表示3D列印技術製成之成品進行固溶處理後，可降低3D列

註36 Maximilian Munsch, Matthias Schmidt-Lehr, Eric WyciskAmpower, "Metal Additive Manufacturing with sinter based technologies," p.26, <<https://am-power.de>>

註37 Maximilian Munsch, Matthias Schmidt-Lehr, Eric WyciskAmpower, "Metal Additive Manufacturing with sinter based technologies," p.27, <<https://am-power.de>>



印形成空孔對降伏及抗拉強度之影響。雷射粉末床熔融成型技術(LB-PBF)之試件降伏強度及抗拉強度明顯高於其餘二種3D列印設備，並優於ASTM A564及ISO 22068規格之試件，但在伸長量部分為最低，由此可知，使用雷射粉末床熔融成型技術(LB-PBF)列印316L不銹鋼物件具有較佳之降伏強度及抗拉強度；另黏著劑噴印成型技術(Binder Jetting)及材料擠製成型技術(Metal FDM)之降伏強度、抗拉強度及伸長量均高於ASTM A564及ISO 22068規格之試件。【註38】

另不同3D列印技術製成之17-4PH不銹鋼試件進行拉伸測試，在降伏及抗拉強度比較方面，三種3D列印技術之試件與316L不銹鋼的情況相似，均大於ASTM A564及ISO 22068規格之試件，也表示3D列印技術製成之成品進行固溶處理及析出硬化後，可降低3D列印造成空孔之影響。而黏著劑噴印成型技術(Binder Jetting)具有最佳之降伏及抗拉強度；在伸長量方面，三種3D列印技術之試件介於ISO 22068及ASTM A564及規格之間。【註39】

綜合上述，可發現雷射粉末床熔融成型技術製成316L及17-4PH不銹鋼試件，在硬度表現方面均大於ASTM A564及ISO 22068規格之試件，顯見該技術對硬度具有加強效果；在降伏及抗拉強度方面，三種3D列印技術製成316L及17-4PH不銹鋼試件之強度均大於ASTM A564及ISO 22068規格之試件，顯見3D列印技術有增進降伏及抗拉強度之潛力，但必須搭配適當熱處理，以彌補3D列印產生之空孔缺陷。

三、金屬3D列印試件機械性能測試

隨著科技日新月異，各種列印技術也不斷再改進其缺點，每家廠商設計的3D設備所列印出來之成品，其內部結構(空孔比率)及外觀(表面粗糙度)必定有些微差異，進而影響成品之機械性能表現，故必須經由機械測試列印之試件，以獲得符合原件要求之性能規格，而這些機械測試如同第三章所介紹之材料機械性能檢測方法，並根據使用條件及環境選擇必要之檢試方法，另外列印之成品是否需實施後續熱處理則依據廠家說明執行。當試件符合機械檢測所要求之規格後，便可開始列印完整之成品；如不能符合檢測要求，則須調整相關列印參數(列印速度、堆疊高度、列印路徑、雷射功率、列印環境等)、熱處理條件、更換材料等，調整原則以最可能影響結果之參數為首要，並符合成本考量。

四、使用性能評估

註38 Maximilian Munsch, Matthias Schmidt-Lehr, Eric WyciskAmpower, "Metal Additive Manufacturing with sinter based technologies," p.26, <<https://am-power.de>>

註39 Maximilian Munsch, Matthias Schmidt-Lehr, Eric WyciskAmpower, "Metal Additive Manufacturing with sinter based technologies," p.27, <<https://am-power.de>>



在經上一步驟確認完3D列印設備可達初步機械性能要求後，便可依據3D掃描或原廠提供之原件CAD資料進行切層運算並製成成品。成品使用性能評估是針對成品所需要機械測試程序去執行，如常見為疲勞測試，針對成品外形訂製疲勞測試設備，並根據真實使用環境條件(溫度、濕度、酸鹼度、壓力等)進行測試，以模擬真實使用環境下之操作，而這些測試目的在於呈現試件測試階段所無法驗證之隱藏缺陷，如無法達到要求，再調整列印參數、熱處理條件或選擇其他材料。最後進入裝機試飛測試階段，如不符合要求之標準，持續不斷進行調整各項參數，直至飛行驗證成功，完成3D原件仿製。

伍、結論與建議

一、結論

3D列印優點具有產品客製化、多樣化及製造速度快特性，且相較於傳統多工序費時之製造方法明顯可縮短生產時程，更適合因應緊急需求或消失性商源之金屬航材，經由文獻探討可建構出金屬零件3D列印製造完整程序(如圖2)，即從金屬原件進行3D建模、材料定性定量分析、機械性能測試作業、選用3D列印設備(依據可適用之材料、成本、生產速度、最大列印尺寸及原件機械性質)並列印試件執行機械測試，最後列印完整物件執行使用性能評估及飛行驗證。另針對3D列印技術歸納以下重點：

- (一) 選定3D列印設備可從五方面評估：選定3D列印設備可從可列印材料、成本(設備、除膠、熱處理及燒結成本等)、生產速度、最大列印尺寸及成品機械性質等五方面評估，可列印材料及最大列印尺寸列為首要考量因素，餘三項則依據需求權重衡量。
- (二) 各種3D列印技術對於每種材料具有獨特的機械性能表現：每種3D列印技術在列印不同材料時所呈現的機械性能具有獨特性，在某一種材料機械性能突出，不代表列印其他材料之性能均是最佳，換句話說，3D列印技術列印出來之成品機械性能，必須視材料的不同去選定適合之技術，並可經由測試3D列印試件獲得真實之表現。
- (三) 3D列印之成品內部微觀結構與原物件不同：經由3D列印之金屬物件微觀結構與原物件不同，其形成空孔影響著機械性能表現，可經由後續熱處理方式改善，進而增強其機械性能。

二、建議

有關本研究之建議可歸納二項供未來進一步研究：

- (一) 在3D列印成考量方面，本研究僅針對3D列印成本衡量，對於列印設備折舊



、維護、材料儲存、能源供給及場地基礎設施等成本並未列入考量，建議後續研究可針對此方面進一步探討。

- (二)由上述的成本考量可知，要建構完整3D列印設備初期需要龐大經費，例如雷射粉末床熔融成型設備初期自行建構成本為30萬歐元（包含機器、場地、人力及基礎設施等成本），【註40】而委外3D列印生產成本是從零開始，並隨著每年生產公斤數呈線性增長，雖然最終會超越自行建構成本，但是初期3D列印設備建置成本是不需考量的，因此，很適合在初期少量發展階段，並可做為初步訓練3D列印專業人員之墊腳石，俟人員於熟悉該專業領域後再評估未來發展之適切性及可能性。

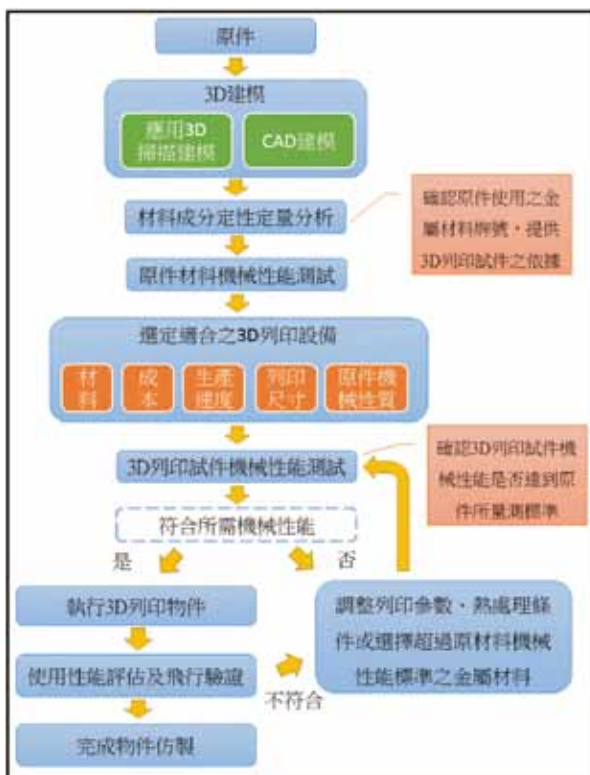


圖2 金屬3D列印製造程序圖

資料來源：本研究整理。

作者簡介

空軍少校 莊智翔

學歷：國防大學理工學院93年班、空軍航空技術學院通信電子參謀軍官班97年班、國防大學理工學院兵器研究所101年班、國防大學空軍指揮參謀學院109年班。經歷：飛彈官、飛修官、電戰官、分隊長。現職：空軍第七飛行訓練聯隊第七大隊模擬機室少校主任。

空軍中校 蘇園展

學歷：中正理工學院85年班、空軍航空技術學院通信電子參謀軍官班91年班、國防大學空軍指揮參謀學院101年班、國防大學管理學院資訊管理學系碩士。經歷：陸電官、通參官、分隊長、研究教官。現職：國防大學空軍指揮參謀學院中校教官。

註40 Maximilian Munsch, Matthias Schmidt-Lehr, Eric WyciskAmpower, "Metal Additive Manufacturing Make or Buy," p.25, <<https://am-power.de>>