



軍事科技

DOI:10.29683/AFOB.202204_(223).0002

金屬3D列印運用於國機國造之研析

空軍少校 高維駿、空軍中校 蘇園展、空軍中校 林明智

提 要

於1983年由工程師查克·赫爾（Chuck Hull）發明了樹脂光固化成形術，^{〔註1〕}開始了3D列印的基礎，3D列印技術儼然成為了21世紀近代的工業革命。2010年代中期，美國洛克希德·馬丁公司已計畫將金屬3D列印運用於生產F-35戰鬥機，^{〔註2〕}我國隨著國機國造的推動，工研院與漢翔亦於2017年6月15日簽署合作備忘錄，內容包括「航空零組件雷射加工試製開發」與「航空零組件金屬積層製造試製開發」，^{〔註3〕}3D列印包含「合併多個零件」、「降低加工成本」、「接觸複雜幾何形狀」、「不受傳統減法式製造限制」、「輕巧」、「快速反覆設計」等優勢，^{〔註4〕}如運用於國機國造，相信可以帶來龐大效益。

關鍵詞：金屬3D列印、積層製造、國機國造

壹、前言

3D列印又稱為積層製造，源起20世紀80年代中期，至今已成功發展，並應用於許多領域，隨著金屬3D列印的崛起，目前已有許多成功的案例，應用於飛機各系

註1 Richard D' Aveni著，王如欣、葉妍伶譯，《泛工業革命：製造業的超級英雄如何改變世界？》“The pan-industrial revolution: how new manufacturing titans will transform the world”（臺北市：先覺，2019.07），頁17。

註2 同註1，頁15。

註3 林偉、專利佈局情報分析團隊，〈國機國造起飛 靠3D列印裝上翅膀〉，科技產業資訊室，<https://iknow.stpi.narl.org.tw/Post/Read.aspx?PostID=13951>，檢索日期：民國109年10月10日。

註4 Renishaw plc.，〈什麼是金屬積層製造？〉，Renishaw：提高製造與醫療效率，<https://www.renishaw.com.tw/tw/what-is-metal-additive-manufacturing--15240>，檢索日期：民國109年12月1日。



統組件之量產，如發動機組件、機翼骨架、起落架系及其他細部零件。

先前學者已有針對消失性商源做過一些探討，本人則以金屬3D列印運用於國機國造方面，以IDF及勇鷹號高級教練機的製造做為探討。飛機外形講求氣動力學，為製造出最佳的氣動力外形，在製造上有一定難度，且許多細部零件多講求其精密度，如發動機的葉片，需要特殊的工法以及嚴格的測試才能使用，如使用金屬3D列印，可以使用一部機器，即製造出不同部位、特殊形狀並且符合規範之零組件。

藉此一機多用的功能，探討修護能量的維持，減少消失性商源的可能，以減少修護成本、提升研發能力，進而完備軍事工業，強化國防自主能力。

貳、金屬3D列印與國內發展情況

航空器四大組成元素為發動機系統、飛機結構、操縱系統及電子系統，其中發動機系統及飛機結構運用了大量且複雜的金屬零件，全世界正積極投入金屬積層製造，取代部分零組件的製作工法，可望能解省成本及時間。

一、金屬3D列印種類

(一) 粉床式金屬積層製造(如圖1)：

粉床式金屬積層製造有選擇性雷射光熔融(SLM)、直接金屬雷射光燒結(DMLS)和電子束熔融(EBM)等方式，差別在於金屬粉末以及熔融所用的能量如雷射或電子束，產出的零件也會有不同的強度及形變，其中電子束熔融要在真空中狀態下生產，而且只適用於導電材料。【註5】

粉床式金屬積層製造流程，首先平鋪一層金屬粉末於工作臺上並壓實，再以雷射或電子束於欲成形之位置燒結或熔融，完成之後升降工作臺重複平鋪及燒結，將所需的形狀製成，這種方式以金屬粉末為支撐，能減



圖1. 粉床式金屬積層製造

資料來源：同註6

註5 三帝瑪有限公司，〈【3D列印快訊】3D列印(積層)製造技術：概論〉，三帝瑪3dmart，<https://3dmart.com.tw/news/3dhubs-3d-printing-technologies-overview#粉床熔融成型（PBF）>，檢索日期：民國110年2月21日。



少零件的後加工處理，有些積層列印製造機甚至有複合式功能，能在製造過程中即做切削加工處理，讓產品能直接使用。【註6】

(二) 噴粉式金屬積層製造：

噴粉式金屬積層製造又稱為直接能量沉積(DED)，有雷射光工程淨形狀(LENS)和電子束增加製造(EBAM)，兩者的生產方式類似，但電子束較雷射光有效率，而電子束需要於真空狀態下操作，可用於太空運作。【註7】

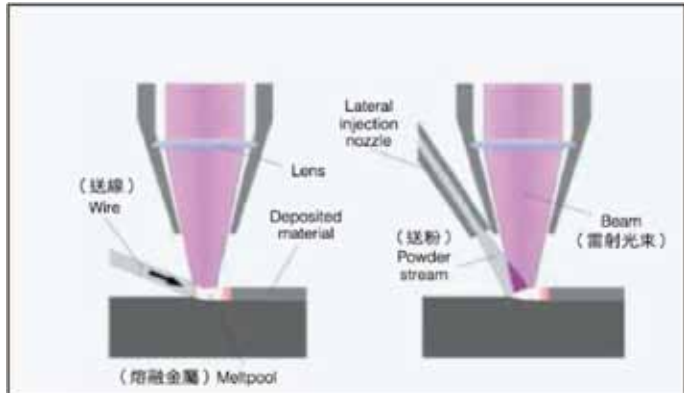


圖2. 噴粉式金屬積層製造示意圖

噴粉式金屬積層製造 資料來源：同註8

流程不同於粉床式需要大量金屬粉末為基底，而以送線或送粉方式直接熔融堆積，可減少材料消耗(噴粉式金屬積層製造示意圖如圖2)，除了製造零件外，也可以融覆的方式用於修復零件，噴粉式積層製造有較高的堆積速率，



圖3. 噴粉式金屬積層製造過程及成品

可用於製造較大的金屬物 資料來源：同註8

件，目前已經能夠製作5到6公尺的大型物件(噴粉式金屬積層製造過程及成品如圖3)。【註8】

二、金屬3D列印的原料

金屬3D列印的製造原料主要為粉末及線材兩種，以線材製造的物品，製作

註6 許富銓、王祥賓、鄭元傑、陳冠佑、呂英誠，〈與時間競賽的複合積層製造〉《科學發展期刊》(臺北市)，第523期，科技部，西元2016年7月，頁22。

註7 同註5。

註8 許富銓、王祥賓、鄭元傑、陳冠佑、呂英誠，〈與時間競賽的複合積層製造〉《科學發展期刊》(臺北市)，第523期，科技部，西元2016年7月，頁23。



的方法會受到限制，完成品所需要的後加工也較多，以粉末製造出來的成品，完成度能更高，應用也較為廣泛。

金屬粉末用於3D列印主要有不銹鋼、鈦合金及鋁合金等，其中鈦合金兼具質輕及堅硬，特別適合用於航空工業，製作金屬粉末主要的工法有還原法、電解法、霧化法……等，以製造出粒徑較細小、粒度分布窄、高球形度、流動性佳和高鬆裝密度等特性之粉末，使粉末在執行3D列印時，流動性佳，製造出來的成品也較為穩定，所以在選擇原料時，要尋找有信譽的原料廠商，優質的金屬粉末(如圖4)有光澤表面、收縮率小、不易變形、力學特性穩定，而次級(如圖5)的就遠遠不及前者。【註9】

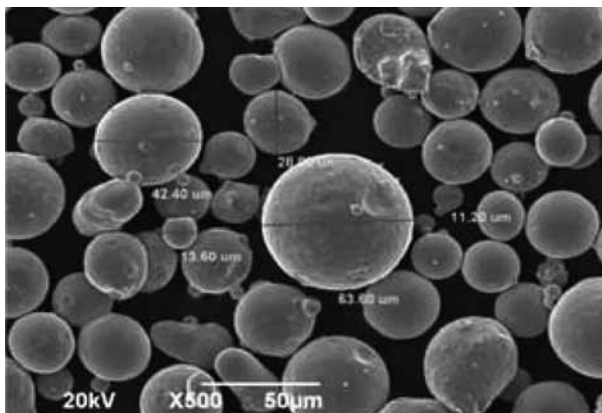


圖4. 優質的金屬粉末微觀結構

資料來源：同註9

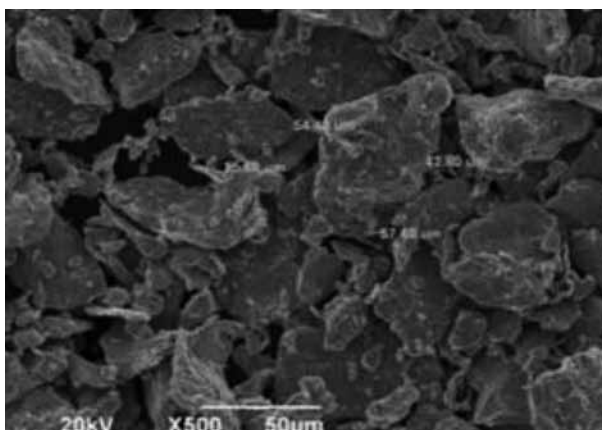


圖5. 次級的金屬粉末微觀結構

資料來源：同註9

三、金屬3D列印的優勢【註10】

(一)降低成本：

傳統零組件製造，使用車床或銑床等方式，是以金屬塊用切削的方式，並且需要多次程序製造出來，又稱為「減法製造」，金屬3D列印作為「加法製造」是將金屬材料一層一層疊加方式製造出來，可以減少原料的浪費，而降低成本的需要。

(二)快速反覆設計：

註9 每日頭條，〈南極熊揭秘3D列印金屬粉末的製備方法〉，每日頭條，<https://kknews.cc/zh-tw/tech/k8eyvav.html>，檢索日期：民國110年3月3日。

註10 Renishaw plc.，〈金屬積層製造（3D 列印）系統〉，Renishaw：提高製造與醫療效率，<https://www.renishaw.com.tw/tw/metal-additive-manufacturing-3d-printing-systems--37011>，檢索日期：民國110年4月12日。



傳統製造需要從各種方向切入而製造零件，增加程序複雜化，金屬3D列印可以將製造程序單一化，省去人工控制，使機器自行反覆製造所需產品，進而加速產品的製造速度。

(三) 定製或客製化：

傳統製造需要以開模或者設計製造程序的方式製造出客戶所需要的產品，金屬3D列印只要在3D繪圖軟體做出所要的設計，既可使用3D列印製造機，製造出所要的產品，甚至可以用3D掃描的方式，將現有的零件掃描並建置3D圖像，從而使用3D列印製造出相同規格的物件。

(四) 多重工件考量：

只要是繪圖軟體可以設計，就可以使用3D列印製造機製造，使同一台列印機可以製造不同的物件，依列印機的空間，可以一次大量製造相同的物件，抑或是一次性製造不同設計的物件。

(五) 減輕元件重量：

減法製造無法對原料內部進行加工切削，金屬3D列印可以在設計階段，對產品內部僅以必要的結構支撐物件的強度，使物件能以最輕的質量，得到產品所需要的強度，除了可以減低原料成本，還可以輕量化。

(六) 建構複雜幾何：

傳統製造會將物件以最單純的方式製造出來，再將零件結合成所要的產品，金屬3D列印可以依照設計需求，將各零件直接結合成產品，在物件完成之後即為所要的產品。

四、金屬3D列印製造過程易產生問題^{【註11】}

(一) 表面的光滑化：

金屬3D列印的零件實際組裝或使用之前，會先執行珠擊、噴砂或CNC切削等後加工，乃因3D列印出來的金屬零組件會呈現波紋狀態，需要進行表面光滑化處理。像是以DED製得的零件，因為製程本質的因素，必須先經過CNC切削之後，才能接近其最終可用的形狀，而粉床式熔融製程所得到的零件，在製造出來的時候就已經接近最終形狀，只是表面仍然會呈現較為粗燥的狀態，使用較細的粉末顆粒可以得到較小的層厚度，以此能改善粗糙的問題，只是如此一來，會提高材料的成本，因此在表面光滑化的問題與成本之

註11 lazybone1960，〈金屬3D列印需要注意的7個問題〉，痞客邦，<https://lazybone1960.pixnet.net/blog/post/347372957>，檢索日期：民國110年4月12日。



間需要進行取捨。

雖然所有粉床式熔融製造得到的零組件必須在後加工過程中精製到符合規範，但有時候考量經濟效益也會使用較大粒徑的金屬粉末，由此可見對於金屬3D列印而言，製造過程中表面的光滑程度尚沒有其他的問題來得重要，因為不論零件最後光滑程度，還是需要經過某種程度的後加工才能實際使用。

(二) 孔隙度：

列印時，在物件內部產生非常小的孔洞，也就是物體內的孔隙度，這些微小的孔隙會降低物件的整體密度，進而導致物件金屬疲勞或龜裂。發生在金屬3D列印製造過程中或使用的金屬粉末所造成；金屬粉末的微粒化製程中，在粉末原料之間產生氣泡，最後影響製造出來的物件，因此，原料的獲得應該來自自有信譽的供應商。

在3D列印製程中，因供應粉末不足、雷射的強度太低，導致金屬粉末未能正常熔融，形成零件內部的孔隙；當金屬顆粒比物件的厚度還要大，或者粉末的包裝過於鬆散形成孔隙；熔融的金屬未能適切地流動到所要的位置形成孔隙；過量的粉末供應，也容易發生噴濺現象，使熔融中的金屬噴到其他區域。這些問題的解決方法，基本上由機器操作員針對所使用的材料及列印程序來調整設備的參數，如光點尺寸、雷射能量及形狀等參數，以降低孔隙度的影響。此外，也可以滲入其他材料(如青銅)到粉床式熔融零件，只是可能會影響到主要使用的金屬的化學性質，使得零件的可靠度產生潛在的干擾。

(三) 密度：

零件本身的密度和孔隙度是成反比關係，零件緻密性會因為孔洞越多而越差，因此也越容易產生疲勞而在壓力下產生龜裂。於嚴苛的使用條件下，密度通常要大於99%。除了控制孔隙度外，粒徑分佈問題也有助於增加物件的密度，球狀顆粒能增加金屬粉末流動性，也有助於增加密度；而較寬廣粒徑的分佈可藉由細小顆粒填滿空隙，進而提高密度，但相對金屬粉末的流動性會降低。流動性將會影響金屬3D列印物件的密度及孔隙度，3D列印堆疊的越緊密，最終得到的產品就越緻密且孔隙較少。

(四) 殘留應力：

在金屬3D列印製程中所產生的加熱、冷卻、膨脹及收縮，其結果就會產生殘留應力。如果殘留應力超過列印物件的抗拉強度時，就容易產生零件的捲翹或龜裂。殘留應力通常發生在列印零件及基材的交界處，在零件的中



央處屬壓縮的應力，邊緣處則為拉伸的應力。建立支撐結構可以降低殘留應力，但零件移除之後，應力得到釋放可能使零件變形。

可以藉由降低雷射向量時長，不使用連續雷射處理，以控制溫度變動進而減少殘留應力的產生。也可以將基材先施以熱處理，在材料於能量源加熱之前先將其預熱，以較低的操作溫度製作。

(五) 龜裂：

龜裂會在零件內的孔洞裂開，也可能因熔融金屬在固化時或者再加熱的期間發生，通常應力是因為能量源太強，而在固化過程中產生。

當金屬粉末未充分熔化或熔漿下層再熔化，也會發生分層(Delamination)，而造成層間的龜裂。部分龜裂可以藉由後加工修復，但不能用於分層，分層需要以加熱材料的方式克服。龜裂不限於疊加製造中會對零件性能產生影響，同樣發生於傳統製造及加工。為減少龜裂發生，通常在列印時增加合金支撐。加工過程亦可以藉由參數調整來消除或降低龜裂產生。在使用期間因疲勞負載所造成的龜裂，調整3D列印的製程參數有助於控制這些缺陷。不必執著消除所有零件空洞或缺陷，而要知道會發生的孔洞或缺陷，如此增加信心，使工程師在設計組件時將其納入考量，依然可以製得安全且可信賴的零組件。

(六) 捲翹：

通常列印產物時，前幾層必須加熱使之和基材充分融合，但如果基材的熱應力超越基材的強度，就容易產生捲翹，最後導致零件本身也發生捲翹，甚至使粉末刮板在列印過程中撞擊到零件。製程中所要處理的熱因子，當材料厚度不同時，情況會變得更複雜，或者遭遇額外的應力。也有許多快速的狀態變化，使零件自支撐物脫離。有時候拉扯力是在列印台上造成平台的扭轉，使物件不是以預期的方式建造，這時就必須鬆開機器平台或者進行二次加工。為防止捲翹，須在正確位置設定必須數量的支撐物，這通常需要進行反覆測試才能得到結果，然現在已有軟體可以進行模擬。

(七) 其他問題：

金屬3D列印過程會產生的其他問題，如隆起(Swelling)或熔漿結球(melt balling)；隆起是固化的金屬從粉末豎起，而熔漿結球則是熔漿固化成球形而非正常的層狀，造成這些問題是因為熔漿的表面張力，遂將熔漿池的長度與直徑比控制在2:1以下可以得到減緩。

當金屬合金暴露於氧氣及水氣下，組成可能會改變，如Ti-6Al-4V鈦在



含氧增加時，就會減少鋁含量，通常在回收金屬粉末時特別明顯，回收也會使金屬顆粒變得較為不圓，而降低流動性。

金屬合金因熔點不同也可能造成列印過程，熔點較低者先行蒸發，造成金屬粉末組成改變。

五、逆向工程

逆向工程是將實物經由量測建立成CAD(計算機輔助設計)資料，也就是電腦3D模型，再經由此模型經由3D列印機製造出上述量測的實物，透過這樣的流程可以將停產的產品再次開發，通常以光學或雷射光掃描的方式可以簡單建立物件CAD，在物件製造完成後尚需要測試物件的強度，以確立使用的可靠度。

六、國內金屬3D列印發展情況

目前國內金屬3D列印由工研院及中科院帶頭，與民間公司推動合作計畫，可望加速國內金屬3D列印的發展，並應用於各領域，其中中科院已經能製造符合航太及軍事規格的金屬3D列印物件。

(一)工業技術研究院：

工研院於2015年發表了我國自主研發出來的金屬3D列印設備，可以將金屬材料印製成文創、珠寶等藝品。3D列印使用的材料不只塑膠，還可以使用金屬，使各種產業應用得以拓展，傳統產業不再侷限於翻模鑄造、模型打樣，而是可以直接製作出功能性的物件。金屬3D列印更可以應用在航太、汽車、文創珠寶、醫療器材等領域。【註13】

工研院於2017年成功開發了我國自製大尺寸金屬3D列印裝置，可達50x50x50立方公分，可以整合四支雷射同步作業，有效提升列印品質，可望為國內航太及汽車工業廠商搶進全球市場。【註14】

截至目前為止，工研院已擁有的幾項關鍵3D金屬列印技術如下：

1. 不NG的金屬3D列印-模擬可視化應用製程技術：自主粉末式積層製造製程模擬技術，可預先模擬有效縮小參數開發範圍，並可提供製程參數修改參考，大幅提高新材料開發效率。 積層製造熱／殘留應力的風險評估與提

註12 馬路科技，〈何謂逆向工程〉，馬路科技，<https://www.ratc.com.tw/app/2019/12/6937/>，檢索日期：民國110年4月1日。

註13 蘇文彬，〈工研院發表國產金屬3D列印技術，成本只有國外一半！〉，ithome，<https://www.ithome.com.tw/news/96082>，檢索日期：民國110年4月1日。

註14 王友信，〈工研院發表大尺寸金屬3D列印 助台廠拚航太商機〉，工業技術研究院/新聞中心，https://www.itri.org.tw/ListStyle.aspx?DisplayStyle=01_content&SiteID=1&MmmID=1036276263153520257&MGID=744304106165057406，檢索日期：民國110年4月3日。



供客戶有關產品的反饋設計，可依市場不同性能需求，快速提供相關設計方案。【註15】

2. 雷射金屬積層製造技術-雷射金屬沉積 (LMD)：以噴射出的金屬粉末或線材材料，利用同時間射出的雷射能量讓熔融後的材料覆蓋在母材上，以此在母材上可以形成金屬保護層(達到抗腐蝕、抗磨耗等功能)，也可以將金屬粉末或線材熔融後直接成型成特殊造型體，而達到金屬3D列印成型。此項技術可以針對大型且複雜的零組件，進行製造或再生修補，以解決傳統加工的耗時且困難問題，可以降低開模成本與時程。【註16】
3. 雷射金屬積層製造技術-粉床熔融成型 (PBF)：作用機制在於將加工物件設計為層層的二維圖案，鋪一層金屬粉末後再使用雷射熔融該層圖案，再鋪一層燒一層以堆疊成型，可以製作複雜的形貌、內部流道或結構。

推動的兩大方向為製程設備與專用材料研發以及試量產工場協助產業新創，工研院具備客製化金屬雷射積層製造平台開發與功能性材料研發優勢，可協助產業建立相關製造能量、開發高效能產品、產品試做及功能確效。【註17】

(二) 中山科學研究院：

中科院在國防部及經濟部技術處的支持下，積極投入金屬3D列印的研發工作，進行熱流、結構、控制、材料以及光電等跨領域軟硬體整合，因國內沒有雷射源的問題，中科院材料暨光電研究所利用其建立之500瓦級偏極化光纖雷射技術，自行設計系統架構，開發出商用雷射雛型機，並與飛彈火箭研究所自製3D積層製造驗證平台整合測試，開發出搭載自製高功率光纖雷射源之國內首座全自主金屬積層製造系統。自製之積層驗證平台可加工尺寸為250x250x300立方公分，成型精度小於50微米。以鋼材料產製金屬件(未熱改質前)抗拉強度可達1,100百萬帕斯卡(MPa)，硬度超過30(HRC)，初步符合航太級材料使用標準(AMS-6514)。【註18】

註15 工業技術研究院，〈智慧化積層不NG技術〉，工業技術研究院，https://www.itri.org.tw/ListStyle.aspx?DisplayStyle=01_content&SiteID=1&MmmID=1036233376235770452&MGID=1034700763510765232，檢索日期：民國110年4月1日。

註16 工業技術研究院，〈雷射金屬積層製造技術-雷射金屬沉積 (LMD)〉，工業技術研究院，https://www.itri.org.tw/ListStyle.aspx?DisplayStyle=01_content&SiteID=1&MmmID=1036233376235770452&MGID=1034700765106775255，檢索日期：民國110年4月1日。

註17 工業技術研究院，〈雷射金屬積層製造技術-粉床熔融成型 (PBF)〉，工業技術研究院，https://www.itri.org.tw/ListStyle.aspx?DisplayStyle=01_content&SiteID=1&MmmID=1036233376235770452&MGID=1034700771457551745，檢索日期：民國110年4月1日。

註18 新聞中心，〈「國內首座自主開發3D金屬列印機台」亮相〉，國家中山科學研究院，<https://www.ncsist.org.tw/csistdup/news/NewsPublishDetail.aspx?PostNo=15179>，檢索日期：民國110年4月3日。



中科院於2020年完成大型粉床熔融成型金屬3D列印製造機，可製造120×40公分的且符合航太及國防需求規格的大型組件。【註19】

(三) 民間金屬3D列印：

政府推動的雷射光谷計畫為金屬3D列印奠基，在2012年經濟部技術處結合工研院及金屬中心，規劃開發雷射光谷關鍵技術；為將研究成果落實於產業界，並解決高階雷射模組和設備需要仰賴進口的現況，於2013年成立南部雷射光谷育成暨試量產工廠，此計畫最後參與的公司達100多家，有70多家公司成功推出成品。

東台精機的董事長是雷射光谷推動促進會的副理事長，他強調「3D列印是全新的工法，積極發掘新工法的優勢及原有工法做不到的事，才能發揮這項新技術的優勢。」【註20】東台精機致力於航太與汽車工業的加工設備，加上已獲得工研院的AM250技術移轉，於近期內將發表相關產品。【註21】

(四) 金屬粉末：

中佑精密材料成立於2015年1月，專門生產3D列印用金屬粉末，成功量產多種3D列印用金屬合金粉末，包含鎳基超合金、鈦鋁鈎合金、鐵基不鏽鋼等超過30種以上的金屬合金粉末。【註22】

圓融金屬粉末公司專門供應在3D列印製造產業上使用的金屬粉末，其技術團隊透過專利核心造粒技術打造出獨一無二的氣噴金屬霧化設備，使金屬粉末媲美國際金屬粉末製造大廠。【註23】

(五) 逆向工程：

立體智動精密機器股份有限公司，可以提供3D掃描及3D列印的服務，直接完成逆向工程程序，也提供獨立掃描的能力，可以獲得3D掃描的CAD模型，自行製造所需的零件。【註24】

註19 朱明，〈【MIT航太零件】中科院運用3D列印技術 量產高教機4項重要零組件〉，上報，https://www.up-media.mg/news_info.php?SerialNo=106066，檢索日期：民國110年4月3日。

註20 工業技術研究院，〈工業技術與資訊月刊〉，工業技術研究院，https://www.itri.org.tw/ListStyle.aspx?DisplayStyle=18_content&SiteID=1&MmmID=1036452026061075714&MGID=654260041343345633，檢索日期：民國110年4月3日。

註21 同註20。

註22 王正欽，〈有別於以往的金屬粉末製程：「氣霧化製程」〉，數位雜誌，<http://www.caemolding.org/cmm/mim-gas-atomization-process/>，檢索日期：民國110年4月3日。

註23 圓融金屬粉末公司，〈關於我們〉，圓融金屬粉末公司，<https://www.cmpowder.com/about/AboutUs/>，檢索日期：民國110年4月4日。

註24 3d-ula，〈3D列印代工〉，3d-ula，<https://3d-ula.com/portfolio-items/3d-print/>，檢索日期：民國110年4月4日。



參、航太產業應用實例

航太產業所使用的金屬零件，需要高精密度、足夠的強度及抗疲勞等特性，應用於發動機內部的零件尚需要耐熱的能力，金屬3D列印發展不過十餘年，產出的零件難免令人質疑其運用在航太工業上的可靠性，但經過各種測試證明，這些零件已經可以運用在許多飛機部位上，有些甚至比傳統製造出來的零件更加可靠，同時還具備金屬3D列印的優點，能快速生產還能降低成本，使飛機製造更為便利。

一、全球應用

(一) 發動機葉片製造：

德國西門子公司以選擇性雷射熔化製作了發動機葉片，能以13000 RPM，在溫度超過攝氏1250度的條件下運作，葉片設計具有特殊的孔洞，能改進的內部冷卻。葉片被安裝在功率為13兆瓦的西門子SGT-400工業燃氣輪機上。渦輪葉片由高性能多晶鎳高溫合金粉末製成，這允許它們承受高壓、高溫 and 渦輪高速運轉的旋轉力。【註25】

(二) 發動機葉片修復：

美國Optomec公司以雷射近淨成型(LENS)技術，修復各種發動機葉片，除提升所需耗費的時程，也減少修復成本，即使磨耗過大本該廢棄的葉片，也可透過此技術得到再生，【註26】中共的5719廠也擁有了修復發動機葉片的能力，涉及到的關鍵技術有測量、增材、焊接、切削、磨拋等，而磨拋是在增材後具有獲得所需的型面、尺寸、表面完整性的作用。【註27】

(三) 發動機燃油噴嘴製造：

美國奇異公司以直接金屬雷射光燒結(DMLS)技術製造的燃油噴嘴，已經廣泛用於波音737、空客A320等商用客機。【註28】

(四) 發動機燃燒室：

德國西門子公司製作的發動機燃燒室，將需要由13個獨立部件，且需

註25 Sarah Saunders, "Siemens Engineers Successfully Test New 3D Printed Gas Turbine Blades, Manufactured at Siemens-Owned Materials Solutions", 3dprint.com, <https://3dprint.com/164121/siemens-gas-turbine-blades/>, 檢索日期：民國110年2月21日。

註26 尋夢科技, 〈金屬3D列印翻新渦輪葉片數量突破1000萬〉, 尋夢科技, <https://ek21.com/news/tech/214534/>, 檢索日期：民國110年2月21日。

註27 每日頭條, 〈航空葉片修復, 解放軍5719廠讓葉片重新長出來!〉, 每日頭條, <https://kknews.cc/military/mex6vjg.html>, 檢索日期：民國110年2月21日。

註28 每日頭條, 〈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/p2jj3l8.html>, 檢索日期：民國110年2月21日。



要透過18點焊接製造的物件，使用積層製造技術組成，降低了組合部件的脆弱風險。^{【註29】}印度的INTECH DMLS公司也成功運用鎳基高溫合金，將製造周期為18到24個月的製造燃燒室機匣，縮短為3到4個月，使用的製造工法包括鎳基高溫合金機匣的3D列印、熱處理、機加工、表面處理，以及對5個獨立3D列印部件的雷射焊接工藝。^{【註30】}

(五) 飛機結構部件：

美國為F-22型機製造了腳踏板組件，並以鈦合金取代鋁合金，除強化部件，也讓生產時程縮短；^{【註31】}義大利運用於C-27J型運輸機的翼間小翼，也順利完成了首次飛行測試；^{【註32】}中共殲-15型機也運用了鈦合金和M100鋼的3D列印技術設計試製包括整個前起落架，^{【註33】}且中共民間的鉑力特公司製造的C919型客機的中央翼緣條，是大型鈦合金零部件，長3.07米，重量196公斤，顯示其已經有能力製造大型部件。^{【註34】}

二、國內應用

漢翔與工研院宣布合作，三大主題項目分別為「航空零組件雷射加工試製開發」，「航空零組件金屬積層製造試製開發」及「航空零組件線上3D即時檢測」。^{【註35】}

工研院致力開發的3D列印機，建立全臺最高功率的噴粉式直接沉積式(DED)設備，直接成型製造高複雜、結構強且質輕的金屬零組件，或進行3D表面披覆或修補。^{【註36】}於運用在航太工業上奠定很大的基礎，學習國外所使用的例子，未來可望能自行製造或修補發動機渦輪葉片，降低各種製造及維修成本。

註29 每日頭條，〈西門子慶祝3D列印的燃氣輪機燃燒室成功運行8000小時〉，每日頭條，<https://kknews.cc/zh-tw/news/jbmb3mq.html>，檢索日期：民國110年2月21日。

註30 每日頭條，〈印度斯坦航空25KN發動機中的3D列印燃燒室機匣〉，每日頭條，<https://kknews.cc/tech/8592lyg.html>，檢索日期：民國110年2月21日。

註31 Tess Boissonneault, "U.S. Air Force installs first 3D printed metal part on F-22 fighter aircraft", dprinting-media, <https://www.3dprintingmedia.network/air-force-3d-printed-part-f-22/>，檢索日期：民國110年2月21日。

註32 壹讀，〈3D列印軍機機翼零件成功通過飛行測試〉，壹讀，<http://read01.com/MyNzM.html>，檢索日期：民國110年2月21日。

註33 張國威，〈陸3D列印殲-15鈦合金起落架〉，中時新聞網，<https://www.chinatimes.com/newspapers/20140109002108-260309?chdtv>，檢索日期：民國110年4月3日。

註34 每日頭條，〈3D列印3.07米高C919中央翼緣條〉，每日頭條，<https://kknews.cc/zh-tw/military/98krjmb.html>，檢索日期：民國110年2月21日。

註35 王友信，〈漢翔、工研院跨界創新合作3D列印飛機零件不是夢〉，工業技術研究院/新聞中心，https://www.itri.org.tw/ListStyle.aspx?DisplayStyle=01_content&SiteID=1&MmmID=1036276263153520257&MGID=744725562777557112，檢索日期：民國110年4月3日。

註36 同註14



中科院開發出的武器零件3D列印機及金屬粉末，能符合國防及航太產業規格，以鎳金超合金粉末為材料，獨立研發小型飛彈渦輪扇引擎，可使用於射程100公里內的短程飛彈，只是其他需長時間運作及耐高溫的長程飛彈引擎，還是需由傳統技術來製作，但目前我國已能夠建立完整引擎設計、製造與測試能量，是世界少數擁有相關技術的國家之一。【註37】

中科院也運用最新開發的大型金屬3D列印製造機，製造勇鷹號高級教練機上的4項零組件，能使零組件輕量化12到30%，未來這些零組件將持續量產。國防部2021年獲行政院科發基金編列1億5120萬元，預計於2021年到2024年，由中科院開發粉床式熔融設備即時品質監控系統，以提升製造過程的妥善率及成品的可靠度，希望於未來能導入國防武器及航太系統生產，也可運用於民間需求，近而帶動我國航太大型積層製造技術。【註38】

肆、國機國造發展情況

我國國機國造經歷了AT-3自強號教練機、IDF經國號戰鬥機，再到剛完成首飛的新式高教機勇鷹號上，有許多關鍵系統技術是經由與國外合作研發或委外完成。戰機的製造需要經歷設計、研發、組裝、測試、試飛到量產，這些是目前我國已完備的技術能量，從IDF到勇鷹高教機，雖然已踏出了國機國造的第一步，但尚未觸及國機國造的根本意涵，就是達到整架飛機的100%自製率。

勇鷹號目前號稱整體自製率達到55%，但這些多以機體結構如機身、機翼與機尾等為主，還有部分可自製的發動機模組也可以自製，而委外的重要關鍵系統，如飛機上的航電系統，包括導航系統、通訊系統、電力系統等，還有眾多次要系統，像是起落架系統、液壓系統、逃生系統及環控系統等，這些是用來提供飛機起降、機上安全防護等功能，其成本就占了整體成本快一半，國內民間公司其實是有對於這些系統的整合商或製造商，只是領域都不是用在飛機方面。

國機國造目前最新的階段就是勇鷹號高教機，中科院宣布已運用其開發的金屬3D列印製造機，製造勇鷹號高教機上的4項零組件，這是國機國造與金屬3D列印的一大突破，目前金屬3D列印雖然只是用在一小部分的零件上，如能發揮金屬3D列印設計及研發等能力，可望使國機國造更上層樓，因為就算是最新的勇鷹號也是以

註37 朱明，〈利用3D列印提升萬劍彈性能 渦輪扇引擎大幅微型化〉，上報，https://www.upmedia.mg/news_info.php?SerialNo=75814，檢索日期：民國110年4月3日。

註38 同註19。



IDF為雛形製造出來的，而當初IDF的製造也是模仿美國的戰機才能完成，我國想要製造下一代戰機，不能只是使用相同的雛形，而是要再重新設計及研發符合我國需求的下一代戰機，運用金屬3D列印低成本、低時程、複雜幾何形狀等特點，有助於反覆嘗試設計所需要的物件，不論是飛機的外型、發動機或機身結構等。

為能達到國機國造完全自製的未來目標，不單只是機體結構研發與設計，還要做到整機與關鍵系統組件的完全自製，這些有賴於政府大力推動，與國內各行各業結合共同達成，藉由政府的推動，還有助於國內產業升級，使國家能達到軍事升級的目標，也使民間公司有機會外銷世界，這種推動期望能用於金屬3D列印的發展，金屬3D列印堪稱現代的工業革命，運用於零件生產被認為是一種趨勢，而我國雖然尚處於開發中的階段，但也已經有一定的基礎，目前只有工研院及中科院有在自行開發金屬3D列印機，未來如能推展至民間企業，使之互相競爭成長，期能加強國機國造的能力，也可望民間企業將這一趨勢外銷國外。

國機國造需要整合學術、研究、產業、軍事等單位，由軍方提出需求，中科院、工研院等研究單位提供技術，並與有足夠產能的產業結合，由學界發展前瞻技術，透過彼此分工，達成目標，最後的研發成果也可以技轉至國內各大產業，以創造更多產業效益，我國各項電子及工業技術能力其實不差，只是尚缺乏一股推力，一股務必完整國機國造的決心，當政府決心大力推行，相信可以帶動國內產業升級，進而達到製造下一代戰機的目标。【註39】

伍、結論與建議

一、結論

總統蔡英文女士屢次強調國機國造是我國不可或缺的能量，唯有國機能夠國造才能達到國防自主。我國目前也投入金屬3D列印在各項軍事領域，期望能藉由金屬3D列印強化國機國造能力。茲就筆者於本研究中觀察所見綜整如下：

(一) 金屬3D列印機可以隨時製造出所要的零組件，對於各項修護零件，可以在需要的時候再即時製造，平時以金屬粉末的型態作為倉儲，節省倉儲空間，在我國容易面臨的消失性商源問題，可以透過逆向工程，得到零件的3D模組，以研製零件解決消失性商源的問題，雖然逆向工程在我國以代理為主，但

註39 余至浩，〈漢翔總經理馬萬鈞：國機國造下一階段目標，不只機體設計，連新一代軍用戰機導航、飛控等關鍵系統件都要完全自製〉，ithome，<https://www.ithome.com.tw/news/139851>，檢索日期：民國110年4月5日。



金屬粉末原料及3D模型建立的技術，尚可望有解決消失性商源問題。

- (二) 金屬3D列印可以縮短製造期程，可以降低製造成本，製造快速的優點，可以讓我國研發飛機的能力提升，畢竟百年航空，其他國家付出多少時間以及成本來測試各項材料或氣動力結構，不是我們可以輕易趕上的，飛機的複雜外型，可望透過金屬3D列印易於設計以及製造的特性，不斷的測試以得到符合要求的外型模組。飛機發動機有賴於向國外採購，也是因為材料測試不易，但現在已經有許多積層製造用於發動機零組件成功案例，相信經過不斷嘗試，突破材料熱力及應力所造成的障壁，我國也能發展製造出飛機發動機，達成全面的國防自主。金屬3D列印在我國比較少使用在軍方的實例，目前自製的列印機也只有在中研院及中科院，金屬3D列印是未來工業的趨勢，發展金屬3D列印不只是可以強化國機國造的能力，如果能夠將此能力外銷，如外銷金屬3D列印製造機或飛機製造的技術，也可以增強出口的能量，就像漢翔公司雖然承包了國機國造的事業，但也還是有其他民航飛機的製造能量以及業務。國機國造不只是在我國軍事戰力的提升，也藉由全國產業的加入，相互競爭以及政府提供的幫助，提升民間的能量，民間的能力提升，國力也會跟著堅強。
- (三) 目前國內對於粉床式及噴粉式的3D列印製造機已經有一定的水準，如何運用於航空工業還要測試製造出來的產品可靠度，粉床式積層製造適合複雜幾何形狀的零組件如發動機葉片或燃油噴嘴，噴粉式可以製造大型組件如飛機結構翼樑，還可以做到零件修復等技術，關鍵在於設計以及金屬粉末原料能否達到航太規格，即時運用於逆向還原工程，也需要許多的測試才能確定還原的零件可靠度。

二、建議

- (一) 於單位或地區建立金屬3D列印中心，可以減少修護零件申請及運送所需消耗的時間，只是要將各種零件可以運用金屬3D列印製造出來，還需要各種的設計以及測試，飛機是一種投資成本高的產業，通常使用年限大，以AT-3為例，至今已經使用30幾年，期間可能就有維修零件停產的問題，如果零件能以3D列印製造，只要還有3D模組，就可以製造出零件，就算是軟體不在了，現在也可以運用逆向工程的方式，建立出製造模組。
- (二) 國機國造應兼具研發與製造的技術，金屬3D列印能簡單的建立3D模組，再



利用列印機建立組件，應利用此一特性，研究各種外型與氣動力的關係，發展出輕量、堅固及符合戰術需求的戰機，在我國大型3D列印機尚未發展之前，可以先以小型無人機為發展方向；飛機發動機組件也是發展關鍵，以各種材料列印出來的發動機組件，測試其可靠性，甚至重新設計發動機，可以省去開模的成本，而使用一部列印機，重複嘗試製造。

作者簡介

高維駿 少校

國防大學理工學院大99年班，空軍官校作參班105年班，國防大學空軍學院110年班；曾任飛行官、訓練官、飛安官；現任職空軍第五聯隊第26作戰隊飛行官。

蘇園展 中校

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，國防大學空軍學院101年班，國防大學管理學院資訊管理學系碩士；曾任陸電官、通參官、分隊長、研究教官；現任職國防大學空軍學院教官。

林明智 中校

空軍預官90年班，陸軍步校正規班92年班，國防大學空軍學院104年班，國立政治大學外交系戰略與國際事務所碩士；曾任排長、連長、隊長；現任職國防大學空軍學院教官。