

出國報告（出國類別：其他）

赴美國參加 Rapid+TCT 2018(積層製造) 研討會出國報告

服務機關：核能研究所

姓名職稱：鄭勝隆 副研究員

黃俊源 研究員

陳長盈 研究員

派赴國家：美國

出國期間：107 年 4 月 21 日~107 年 4 月 29 日

報告日期：107 年 5 月 28 日

摘要

此行公差主要為參加 RAPID+TCT 2018 研討會及其所屬的工作討論會，並在研討會舉行期間參觀現場商展，用以收集國外相關技術及設備發展資訊，以利本所規畫相關技術開發之參考。

第 1 天(4/23)為大會的金屬零件積層製造工作討論會，第 2~4 天(4/24~4/26)則是研討會及商展。在研討會的舉行期間，一共有 4 場主題演講(keynote presentations)，演講題目聚焦於積層製造(AM)在運動競技及動畫製作、航太、生醫等三方面運用及未來發展。研討會以區分多個主題(產業運用、後加工製程、...等等)進行發表；本次商展共計有 351 家廠商參與，現場展示多項設備及成品。

不同種 AM 製程於金屬成品製造各有其優缺點，因此還在持續發展與改善，其機械性質(特別是耐疲勞性)及後加工製程(熱處理、機械加工)仍有發展及改善的空間，值得評估投入。目前金屬 AM 仍缺乏完整法規，品質驗證為其運用的一大障礙，金屬線之弧銲製程應可參考現有銲接法規，以利於產業運用推廣。

此會議提供積層製造的整體發展現況及未來發展方向的重要資訊，建議應持續派員參加此類會議，以利國外技術發展與產業運用資訊的收集，用於本所規劃技術發展的重要參考。

目次

摘要	1
目次	2
一、 目 的	3
二、 過 程	4
(一) 工作討論會(Workshop)	5
(二) 主題演講(Keynote Presentations).....	8
(三) 研討會	10
1. 產業運用	10
2. 後加工製程	12
3. 製程模擬	12
4. 商業模式	12
5. 成品機械性質	12
6. 製程最佳化	13
7. AM 人力需求	14
8. 其他	14
(四) 參展廠商	15
三、 心 得	19
四、 建 議 事 項	21
五、 附 錄	22

一、目 的

本所原以核能產業為技術發展主軸，為因應國內能源政策轉型，需思考既有技術轉型以配合國家政策調整。積層製造為各國極力發展的一項先進技術，以多次堆疊成品外型，可用於零件原型及設備生產開發，製程模式與本所覆鍍程序類似，可以做為覆鍍技術延伸發展的領域。

雖然國內已有相關的積層製造研發計畫，並有不少產業參與，但本所對此領域的整體發展輪廓仍舊欠缺。此行公差目的為參加 **RAPID+TCT 2018** 研討會及其所屬的工作討論會，並在研討會舉行期間參觀現場商展，以收集國外相關技術及設備發展現況，用於本所未來相關技術開發之規畫參考。

二、過 程

日期	工作內容
107 年 04 月 21 日~04 月 22 日	去程（台北－美國 西雅圖－美國 沃斯堡）
107 年 04 月 23 日	工作討論會
107 年 04 月 24 日~04 月 26 日	第十八屆 RAPID+TCT 研討會及商展
107 年 04 月 27 日~04 月 29 日	返程（美國 沃斯堡－美國 西雅圖－台北）

本屆 RAPID+TCT 2018 會議在德州沃斯堡(Fort Worth)舉行，此國外公差於 4 月 21 日開始，先由台北搭乘長榮班機飛往美國，於美國西雅圖轉搭阿拉斯加航空前往德州，於 4 月 22 日早上抵達德州達拉斯-沃斯堡機場。

4 月 23 日參加大會舉辦的工作討論會，次日(4 月 24 日)至 4 月 26 日則參加研討會及商展，用以收集積層製造的發展現況及商業化資訊。會議結束後隔天(4 月 27 日)則由德州達拉斯-沃斯堡機場飛往西雅圖，轉搭長榮班機於 4 月 29 日返國。



圖 1 美國公差及轉機地點。

(一) 工作討論會(Workshop)

美國材料與測試協會(American Society for Testing and Materials, ASTM)於 2009 年成立積層製造(Additive Manufacture, AM)委員會，用於從事 AM 標準化工作，該委員會將相關製程分為七大類，分別是 Vat polymerisation、Material Jetting、Binder Jetting、Material Extrusion、Powder Bed Fusion、Sheet lamination 及 Directed Energy Deposition。

圖 2 為大會現場，會議過程及其相關研究摘要敘述如下。大會於研討會舉行的前一天(4 月 23 日)，安排 AM 工作討論會，用以提供相關製程資訊。依不同性質，工作討論會分為下列主題同時舉行。

- Fundamentals of 3D Scanning and 3D Modeling
- Casting Processes and Materials
- Fundamentals of Additive Manufacturing
- Making the Business Case for Additive Manufacturing
- Metal Part Fabrication Using Additive Manufacturing Technologies
- Regulatory & Quality System Considerations for 3D Printed Medical Devices
- 3D Printing in Hospitals: What You Need to Know
- Biomaterials and Bioprinting Fundamentals & Applications

依照本所未來技術發展需求，本所公差人員選擇參加 Metal Part Fabrication Using Additive Manufacturing Technologies 工作討論會。

Metal Part Fabrication Using Additive Manufacturing Technologies 工作討論會講師為任職於美國 Edison Welding Institute (EWI)的 Frank Medina，他是 EWI 水牛城製造工廠的 AM 技術主管，曾任職於 Arcam 公司，執行 EBM 的積層製造技術開發，具有豐厚的金屬積層製造實務及教學經驗。金屬積層製造方法的介紹、金屬 AM 的最新技術、積層製造案例說明及 AM 方法的比較。

AM 優點包含可以用相對較低的成本生產複雜幾何形狀(Geometric complexity)零件、可生產難以加工的材料(如 TiAl、GrCo84、Ti6Al4V 等材料)、不需昂貴工具配合即可進行小批量生產，其他還有交期快、低 buy-to fly 比率及可以降低生產製程的複雜性。

依據工作討論講義內容，AM 於 2014 年的產值約為 41 億美金，預估 2020 年成長到 200 億美金；相關製造設備於 2016 年約銷售 983 套，2017 年則成長達到 1,766 套(成長約 80%)，而且預計將有越來越多公司採用 AM 製程進行生產。

在使用領域上，目前金屬 AM 的主要應用為航太領域的飛機引擎與葉片...等，醫學運用的人工骨材次之。美國奇異(GE)公司為首先運用 AM 生產航太零件的公司之一，其生產的 LEAP fuel nozzle 已獲得美國聯邦飛行委員會(U.S. Federal Aviation Administration)認證，而其生產的渦輪螺旋槳發動機(Turboprop)將是第一款 AM 引擎產品，其零組件將由 800 多個變為 15 個，組裝時間(cycle time)減少為原來的一半。其他大廠如普惠(Pratt&Whitney)、勞斯萊斯(Rolls-Royce)及空中巴士(AirBus)等公司均有相關 AM 的生產計劃與規劃。

目前金屬 AM 製程包含模型製造(pattern-based)、間接(Indirect)及直接(Direct)等三種，模型製造方式多用於鑄造，包含精密鑄造模型(Investment Casting Pattern)、砂模鑄造模(Sand Casting Mold)；間接方式則是先生成濕性金屬粉末零件，再揮發其高分子接合劑，進行零件燒結，最終進行浸潤，填充第二項材料於其孔隙。

直接方式則主要包含粉床融熔製程(powder-bed fusion process)、直接能量沉積(directed energy deposition process)及超音波壓實(ultrasonic consolidation)等三項製程，焊接、電漿沉積...等則是比較少見的製程。近年來，光纖雷射技術的急速發展，解決傳統雷射熱源的諸項缺點，一併帶動金屬 AM 的研發與應用。

金屬粉床融熔製程以雷射為最常見的熱源(電子束為次之)，並在室溫常壓下的保護氣體環境(氬氣或氮氣)內執行，掃描速度約為 20 m/s，聚焦直徑(focus

diameter)範圍為 0.06~0.1mm，每一積層的厚度為 0.02~0.10mm。不銹鋼、鋁合金、鈦合金、鎳基合金及鈷鉻合金等材料均可以使用此製作，而其成品也可達到一般製程成品的機械性能要求(除延伸率外)，成品常具有孔隙及殘留應力，需配合後處理(如熱均壓(HIP))等，以消除此類缺陷，影響因素包含雷射掃描方式、氣氛控制...等。

若以電子束為積層熱源(50~3000W)時，AM 則需改在真空環境($<1 \times 10^{-4}$ mbar)下執行。電子束具有極快的移動速度(8,000 mm/sec)，其成品含雜質低而具有較佳的機械性質，並因其融熔溫度高而有較低的內部殘留應力，可以不用執行熱處理消除應力及孔隙。可以用於鈦合金、鎳基合金、鈷鉻合金...等金屬材料，但無法適用於高分子材料。

就兩者間(雷射與電子束)的比較，電子束具有較高的能量效率、可分成 50~100 點同時製造，成品密度及延伸率皆較高，AM 速度較快等優點；但電子束的 AM 則需在真空環境內執行，成品表面較差，尺寸誤差較高，低功率輸出無法精準控制而難以執行精細尺寸堆積，但兩者成品的尺寸收縮(shrinkage)均與其路徑、侷限、支撐...等製程因素有關。

直接能量沉積(directed energy deposition process)製程的填料方式可以採用送粉或送線兩種，具有能在既有結構(pre-existing structure)上執行積層，適合於修補組件，具有優異的組織及機械性質，可以用於接合不能銲接的兩母材，母材影響較低等優點；但此製程則有表面粗糙度及精準度較差，製造懸空物較難，製程速度較慢，成品材料性質不同於鑄造與鍛壓傳統製程材料的缺點。

送粉式直接能量沉積製程的成品組織會隨位置與厚度不同而改變，也就是底部、中間及上部的組織均不同，較厚成品的性質不同較薄成品，但該製程可以用於合金化製程(combinatorial alloying)。除粉末較貴外，送粉式製程需特別注意粉末保存、選用及生產製程，同時細小粉末通常是易燃，需特別注意環境、製程及人員安全。

(二) 主題演講(Keynote Presentations)

1. From Hollywood to the Winter Games – Making Additive Manufacturing the Competitive Advantage for Innovation

此演講由 Stratasys Americas 董事長 Rich Garrity 引言，邀請 LAIKA 公司快速原型總監 Brian McLean 及美國雪橇團隊的技術經理 Jon Owen 說明 AM 在動畫製作及運動競技上的運用。

LAIKA 公司 Brian McLean 先生首先說明 AM 用於 3D 動畫「Kubo and the Two Strings」的製作，該動畫曾獲得多項大獎及提名。該公司以 3D 繪圖方式繪製的動畫人偶的圖像，藉由 AM 方式製作動畫的人偶及背景，也因此動畫內的主角及怪物的人偶表情栩栩如生，再加上聲光特效配合，使得影片內容宛如實際人物拍攝。

美國雪橇團隊的技術經理 Jon Owen 則介紹 AM 用於美國冬季奧運的無舵雪橇(Luge)競賽，無舵雪橇競賽可分為單人及雙人，男女競賽距離分別是 1000~1400 公尺及 800~1200 公尺。競賽團隊須考慮人員背部與雪橇表面的貼合，以避免過大風阻減低競賽速度。也因為每個運動員背部形貌均不相同，競賽團隊採用 AM 製作適合每一個運動員背部的雪橇，以求獲得競賽勝利。

2. Tomorrow's Additive Manufacturing: An Aerospace & Defense OEM Perspective

第二場主題演講則是邀請洛克希德馬丁(Lockheed Martin)公司的 Michael D. Packer 先生演講 AM 在航太工業上的應用。洛馬公司擁有大小尺寸不同的高分子及金屬的 AM 系統。在金屬製程上，中小尺寸零件主要採用粉床式的雷射及電子束製程，送線式的電子束製程用在大尺寸的鈦合金及鎳基合金零件上，而大尺寸的鋼及鋁合金零件則使用送線式的電弧銲製程。

減少製造複雜度、零件數量、製造的前置時間以及無法用傳統減法加工製程的零件等原因是洛馬公司採用 AM 的原因，故 AM 常用於生產具複雜銲道的零件(油箱)、天線、熱交換器及零件原型。主結構的積層零件是目前仍在發展工作，

內容涵蓋認證及驗證、相關材料及製造程序開發及與傳統工法的比較。

他舉洛馬公司的電子束直接能量積層製造為例，洛馬公司目前已可以達到 5~15 lb/hr 的熔填速率，但須特殊材料成份(非一般規格)，真空腔體尺寸為 245”X62”X55”，可以運用於 F-35 的 Flaperon Spar、Leading Edge Spar、Aft Spar 及 Root Rib 等零件製作。

因 AM 成品的強度、剛性、熱傳導、熱膨脹係數、導電度...等性質均不同於傳統製程，他更指出可藉此獲得傳統製程無法達到的材料性質。此外，他總結認為 AM 可以用於夾治具及原型生產，具有航空、水下及地面車輛的運用潛力。但在技術發展的同時，也應注意非破壞檢測、製程模擬及分析、製程即時監控、量產零件的品質驗證及產品設計準則及工具等能力的發展。

3. Rise of Point-of-Care Manufacturing: Impacting More Patients with 3D Printing

此演講邀請馬約診所(Mayo Clinic)的 Jonathan Morris 醫師及模型製作實驗室(Modeling Lab.)的 Amy Alexander 小姐介紹 AM 在醫療領域的應用。它們首先介紹 AM 用於植入人體的人工骨材，配合人體外型的 3D 掃描，為口腔癌、鼻腔癌...等癌症病患進行人工骨材準備及術後顏面重建，以利患者術後能融入社會並參與社交活動。

另外，它們結合各科醫師、護理師、放射診斷人員及 AM 工程人員組成 3D 列印團隊，運用於嬰兒/兒童手術及成人微創手術(特別是胸腔內的癌細胞切除、心臟血管修補)的執行規劃。藉由病患的斷層掃描/核磁共振的影像，建立病患個人的體內癌細胞、器官、血管...的 3D 立體影像圖，並以高分子 3D 列印設備製造出實體模型，依不同器官/血管標註顏色，以提供外科醫護人員了解各組織的實際位置及大小，以避免誤判，協助手術順利執行。

4. Printing the Future

最後一場主題演講則是由 Wohlers Associates Inc.的董事長 Terry Wohlers 主講，該公司是 3D 列印產業的管理諮詢顧問公司，此次講題主要針對積層製造的工業成長(Industry Growth)、後加工製程(Post-Processing)、產品多樣性與數位化

投資(Product Variety and Digital Investments)、新設計方法(New Approaches to Design)、研究與發展(R&D)。相關內容摘要如下:

- (1) 若以 AM 製程的前中後來區分成品的成本，金屬與高分子積層成品的後加工成本約佔總成本的 1/3 及 1/5(金屬:13.1%/54.1%/32.8，高分子:10.9%/68.8%/20.3%)。這是 AM 行業未清楚揭露的事。
- (2) 材料成本在零件原型及實際量產的比較上，零件原型所需的材料成本遠低於實際量產，因此 AM 的最佳化設計目標是以減少材料用量為主，零件輕量化為輔。
- (3) 越來越多醫院使用 3D 列印，自有的集中式 3D 列印製程(Centralized 3D Processing)的醫院家數由 2010 年的 3 家，成長到 2016 年的 99 家。
- (4) 研發所得專利的申請件數由 2016 年的 998 件急速增加到 2017 年的 2,028 件。
- (5) 為因應各種需求，積層製造設計應力求多變。
- (6) 越來越多新創公司成立，就業人數由 15700 人(2013)增加到 70000 人(2017)，預估今(2018)年仍有 25.7%的成長。
- (7) 他總結認為，金屬類的 AM 仍將持續成長，積層產品會越來越多樣性，產品設計則是積層製造的機會與挑戰。

(三) 研討會

1. 產業運用

(1) ALM Process for Rocket Engine / Application to Prometheus(ArianeGroup)

歐洲太空總署運用 AM 改善所用亞利安火箭 5 型及 6 型的推進系統，藉由重新設計所屬零件，預期可將其推進系統內的氣體產生器(Gas Generator)的成本降低 60%，重量減輕 40%。

(2) Additive Manufacturing Applications in Defense Simulation and Training Industry (Lockheed Martin)

洛克希德馬丁公司運用 AM 於五個工作領域：提案(proposal)、原型(prototype)、採購(procurement)、量產協助(production support)、量產(production)。他們認為軍事工業的訓練器具有少量(low volume)、高複雜度(high complexity)及高風險性(high risk)，極適合使用 AM 製程生產相關模擬及訓練器。

在 AM 使用上，目前挑戰包含缺乏適合工具及人力、標準及認證及因對新技術不了解而恐懼...等。

(3) Using Additive Manufacturing Technology to Improve Injection Mold Performance (Matsuura Machinery USA, Inc.)

Matsuura Machinery USA, Inc.公司發表具異型水路的模具製作。他們的結果顯示，具異型水路的模具可以降低 55%的冷卻時間，使得高分子塑件射出時間減少約 30%。除製程時間降低外，亦可縮減模具數量及製作成本，模具數量可由 25 件縮減為 3 件，模具製作時間縮短 65%，製作成本降低 49%。

(4) Impacting Product Development and Support Through Additive Manufacturing (Caterpillar Inc.)

Caterpillar Inc.為全球性的建設/採礦機械公司，它發表 AM 的運用現況在此研討會中。其研發團隊認為 AM 的單位價格遠高於傳統製程，因此需視零件特性來運用。相關 AM 優點包含優化設計、簡化製造程序及減少零件失效模式，適合於少量及臨時性需求的零件，如設計階段的零件原型及測試，並可用於組裝所需夾治具及塊規，銷售及訓練所需模型...等等，以及已停止生產的零件製作。

(5) Additive Manufacturing for the Oil and Gas Industry (Baker Hughes)

該公司主要從事石油氣鑽探，它的研究團隊以所用鑽頭刀具為例，說明積層製造運用，並舉出油氣石化產業需要的 AM 發展方向：(1)大且快的機具、(2)強化製程的模擬與分析能力、(3)法規配合、(4) 監控製程執行與熔池融化所

需之機器學習與自動化及(5)材料發展。

2. 後加工製程

(1) Advanced Finishing Technologies for Advanced Processes (Extrude Hone GmbH)

AM 產品從過去的原型技術研發到實際量產製程，成品的單位成本將越受到重視，成本包含設計、材料、製程佈局、實際 AM 製程及後加工製程(研磨、熱處理、珠擊)等項目。其中，後加工成本與其成品的後加工度有關，約為 AM 製程與材料兩者總和的 0.6~3.0 倍。

因複雜組織及空隙、加工形式、尺寸要求、表面粗糙度、耐疲勞性等要求，AM 製品的後加工有需多問題待解決，該公司採用電化學製程，可以進行 AM 成品內外表面的材料移除。

3. 製程模擬

(1) Advanced Simulation to Leverage the True Additive Manufacturing Potential (e-Xstream engineering)

該公司發表高分子材料的 AM 製程模擬，模擬內容涵蓋原材料性質、積層熱應力、積層熱變形、成品機械性質...等等。

4. 商業模式

(1) Cost Justification/ROI for Metal Additive Manufacturing (3D system)

該公司表示，AM 製程優勢為減輕成品重量、縮減零件數量及執行先進冷卻通道與複雜幾何形狀產品製作。

5. 成品機械性質

(1) Fatigue Crack Propagation Behavior of Inconel 625 Components Manufactured by Laser Powder Bed Fusion (École de technologie supérieure)

經熱均壓/應力消除處理後，粉床式 AM 之 625 合金成品的抗疲勞性與裂紋成長方向有關，最差的跟一般滾壓(wrought)製程相同。

(2) Microstructural Engineering of the Grain Morphology and Microtexture in Additively Processed Beta Titanium Alloys (University of North Texas)

藉由添加硼、碳及矽等微量合，細化積層成品的晶粒，並改變枝晶形貌及成長方向。

6. 製程最佳化

(1) Characterization of Wire Arc Additive Manufacturing of Duplex Stainless Steel Tubes

使用 Gas Metal Arc Welding (GMAW) 弧銲製程用於製作 2205 雙相不銹鋼之 AM 管件。過程中探討 AM 成品之組織及機械性質，雖然管件的上、中、下位置之硬度差異不大，但垂直方向的拉伸性執行明顯降低。

(2) Forgings Made Possible – a Novel AM Technology of Casting, Forging and Milling All in One Process (Huazhong University of Science and Technology)

此研究為結合弧銲製程及微滾壓機構，細化弧銲製程的粗大晶粒，提升 AM 產品的機械性質。

(3) Metal Additive Manufacturing Material and Process Optimization (Element Materials Technology)

- 在粉床的雷射積層技術上，成品很難避免氣孔與收縮等缺陷。
- 目前已可由 3D 圖檔直接轉檔執行金屬 AM 製程。
- 金屬 AM 成品組織帶有氣孔的細緻枝晶，較鑄造製程佳。內部結構不同於傳統製程成品，可執行表面加工、珠擊及熱均壓(HIP)。
- 受制於表面孔洞影響，表面粗糙度較高，須後加工處理，抗蝕性能未知。
- Ti-6Al-4V 的雷射及電子束積層成品(粉床式)的平均拉伸性能仍未符合美國 FAA 適航性認證。相關機械性質易受積層方向及平面影響，儘管使用相同設備及製程參數，成品性質仍有極大變異。主要是機械性質-組織-缺陷間的關係仍未有理解。

- power ratio 可以做為重要製程參數，太低易產生氣孔，太高則容易引發成品收縮，適當控制可以降低氣孔及收縮的產生。

7. AM 人力需求

(1) The Workforce Development Challenge: Bridging the Additive Manufacturing Skills Gap

- 依據 2015 年富比世(Forbes)預估，AM 產值於 2025 年將達 2.5~5 兆美元，相關成長預估將有帶動 350 萬的工作職缺。
- 因戰後嬰兒潮的人口已逐漸遠離工作主力，勞動力缺乏已逐漸顯現，加上無相關經驗及技術競爭力，預估 2020 年將有 200 萬職缺找不到合適工人。招募合適工程師及產線工人預估需 94 天及 70 天，10 個職缺中將有 6 個缺工。
- 最缺乏的人才能力是能一直符合顧客需求(meet customer demand)。

(2) New Collar Job Study Report Defines Manufacturers Skills Needs (Fab Lab Hub)

- 電腦及數位化為未來藍領階級的必需技能，內容涵蓋 3D 電腦輔助繪圖、CNC 切削加工、3D 列印...等工作。

8. 其他

GE 公司於展覽場上也發表相關商業內容:

- 新款引擎採用積層製造(佔 25%)，可減少零件為 12 個(原先 855 個)，減輕 5%重量，降低燃油 20%。
- C-Sump housing 採用積層製造後，僅有一個主體(原 75 個零件)，減輕 20%重量，減少 40%組裝時間，降低 60%成本。
- 其商業模式將包含積層製造設計、零件製造、量產、品管及國防工業的專案。

(四) 參展廠商

此次商展共有 351 家廠商參與，主要為積層原料(塑料及金屬粉末)、設備廠商(積層製造系統設備、後加工設備、工業 CT、後加工設備、雷射光源、3D 外型掃描…等設備)、設計及分析的軟體及提供相關服務的公司。

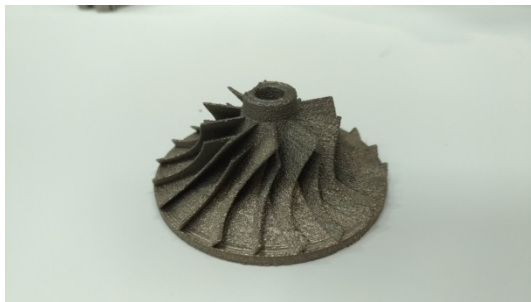
在設備系統上，多家廠商展出金屬用的雙雷射光源積層設備系統；在材料上，多家材料廠商發表新積層粉末，用以符合 AM 製程及實際材料使用性能需求；在軟體上，包含成品設計及積層製造規劃、CT 影像分析及模擬。另外，展覽會上有也多家代工廠商(檢測、加工)參與展出。



圖 2 工作討論會、研討會及商展會場門口。



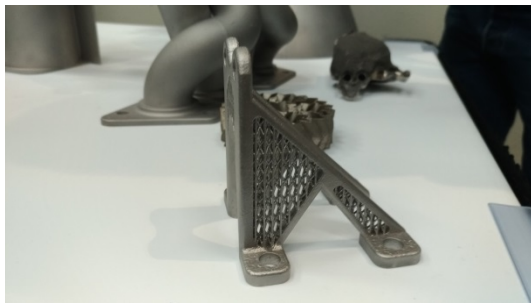
圖 3 工作討論會會場。



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

圖 4 工作討論會講師展示的粉床積層製造成品:(a)葉輪，(b)渦輪葉片，(c)輕量

化托架(bracket)，(d)人工關節帽蓋，(e)人工骨材。



(a)



(b)



(c)



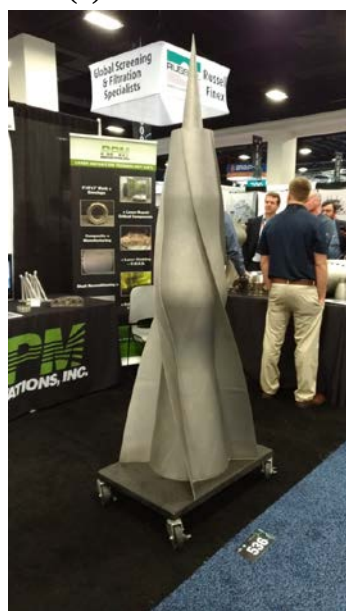
(d)



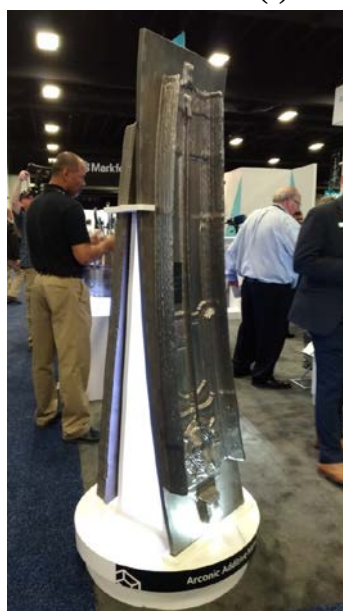
(e)



(f)



(g)



(h)

圖 5 (a)商展會場一，(b)商展會場二，(c)半圓積層成品，(d)圓錐積層成品一，(e)圓錐積層成品二，(f)積層不鏽鋼螺旋槳，(g)1 公尺高積層圓錐體，(h)電子束積層之鈦合金成品。

三、心得

- (一) AM 已由實驗室內的研究階段朝向實際運用，航太及生醫等兩大產業最先採用，其他如模具、機械及石化產業皆有運用實例，可與國家推展智慧機械產業相結合，極具發展性及運用潛力。依據國外廠商的相關報告，積層製造的運用將有改變現有企業營運模式，可以應用於在設計端(提案、設計原型)、採購端、生產端(單一生產、量產規劃、量產)、銷售端(樣品展示)及個案開發，涉及新材料(粉末)開發、零件設計開發、製程開發、後加工開發、品質驗證...等技術，值得本所投入發展。
- (二) 高分子積層製造相對成熟，已運用於零件設計的打樣、醫院手術規劃、軍事工業的模擬器、產品展示...等等用途，值得本所參考運用。
- (三) 金屬製程成品已逐步用於航太及生醫，但受限於空孔等缺陷影響，成品的機械性質仍有改善空間(特別是耐疲勞性)，因此還在持續發展及改善中。金屬成品的後加工製程(熱處理、機械加工)則較不被注意，但所占成本可受外型複雜度及加工精度要求而達實際製程的 3 倍，值得本所評估投入。
- (四) 積層產品的設計端則是待開發一塊區域，是此產業未來的機會與挑戰。目前 Autodesk...等軟體廠商已有相關產品發表，並逐步推廣中，但設計端人力思維是否能跳脫舊有思考模式，充分發揮積層製造潛力，以及最後成品是否能符合客戶需求，則仍是一大挑戰。
- (五) 目前金屬 AM 仍缺乏完整法規，品質驗證為其運用的一大障礙，目前僅航太、生醫及國防產業有顯著應用實績，其他產業則仍在起步階段。若本所規畫朝向此產業發展，應先尋找適合運用對象及展示平台。技術發展的初步培植階段，所內計畫運用可以為展示平台，用以展示相關技術並做為與其他產業合作的技術基礎。
- (六) 粉床式金屬 AM 為現今製程發展主軸，此製程特點是可以生產較精細的外型，但有空洞、價格高、速度慢...等缺點，而電子束及弧銲等送線製程則非主流，但卻有組織品質佳、速度快...等優點，應該可以擷取兩者優點加以運

用，發展複合式的積層製程。

(七) 目前粉床式金屬積層製造雖有法規，但仍未完善。金屬線之弧銲製程可運用現有銲接法規，比較容易推廣於產業運用。

(八) 國外廠家以工業用 CT 作為金屬積層製造之非破壞檢測方法，在不易採購及維護昂貴硬體的情形下，本所應與其他機構建立設備使用關係，並建立影像判定的基本能力。

(九) 以軟體模擬評估製程的殘留應力及變形，是製程參數開發的重要一環，應該持續精進相關能力。

四、建議事項

- (一) 持續派員參加此類積層製造技術會議，收集國外技術發展與產業運用資訊，以作為本所技術發展參考。
- (二) 逐步更新及整合本所現有銲接設備，運用本所現有研發能量及經驗，發展弧銲製程之金屬積層製造，以切入相關研發工作。
- (三) 建置本所在材料力學及冶金性質的整合模擬能力，開發積層銲接程序規劃、瑕疵監測及評估機制，以加速本所研發計畫。
- (四) 與其他機構建立工業用 CT 設備之非破壞檢測合作關係，並建立影像判定的基本能力。
- (五) 與國內廠家密切合作，共同進行技術研發計畫，以符合國內產業需求。

五、附 錄

(一)工作討論會講義。

(二)研討會論文表。