

出國報告（出國類別：進修）

# 赴美國理海大學進修機械工程碩士 心得報告

服務機關：國防部軍備局第二〇二廠

姓名職稱：趙家駿上尉

派赴國家：美國

出國日期：109年8月12日至111年8月11日

報告日期：111年10月28日

## 摘要

本次進修係奉國防部 109 年 12 月 17 日國人管理字第 1090275659 號令核定赴美國理海大學 (Lehigh University) 進修機械工程碩士 2 年，進修期間自 109 年 8 月 12 日至 111 年 8 月 11 日止。職於美國時間 111 年 8 月 11 日完成進修後，搭機返國報到，於臺灣時間 8 月 12 日返臺，並於當日返回原單位軍備局第二 0 二廠報到，於國防部核定文令律定修業期限 8 月 13 日前回國，在學 2 年進修期間內取得碩士學位，並發表論文乙篇，論文題目為「探討以黏著劑噴塗成型技術 (Binder Jetting) 及選擇性雷射融化 (Selective Laser Melting) 技術等 2 項 3D 列印所製造之 17-4 不鏽鋼微細構造」，從兩種不同製造技術，比較其微結構、化學成分分布及機械性質，希利用本項論文研究結果，以作為後續其他金屬分析研究參據；另因本案所探討之結果為先期研究，後續實驗內容將嘗試分析縮小後之樣品，並利用不同金屬及 3D 列印方法，來探討其機械性質及製作可行性。

# 目次

|    |               |    |
|----|---------------|----|
| 壹、 | 目的.....       | 4  |
| 貳、 | 進修過程.....     | 4  |
| 參、 | 心得與建議事項 ..... | 23 |
| 肆、 | 參考資料.....     | 30 |

## 壹、目的

本報告係依「行政院及所屬各機關出國報告綜合處理要點」規定辦理撰擬，旨在提供職於進修期間之研究及學習心得，提供相關人員參用，全案係奉國防部 109 年 12 月 17 日國人管理字第 1090275659 號令辦理。

職自 109 年 8 月 12 日至 111 年 8 月 11 日止，赴美國理海大學(Lehigh University)進修機械工程學系(Mechanical Engineering)碩士 2 年，研究項目為探討 3D 列印金屬之微細構造，利用掃描電子顯微鏡(Scanning Electron Microscope)及 X 射線繞射儀(X-Ray Diffraction Detector)研究顯微構造，亦利用微硬度測試材料機械性質。希透過此研究成果做為其他金屬材料研究基礎。為探討 17-4 不鏽鋼透過黏著劑噴塗成型技術(Binder Jetting)及選擇性雷射融化(Selective Laser Melting)等 2 項 3D 列印技術製作之微細構造。

## 貳、進修過程

### 一、進修學校簡介

美國理海大學(Lehigh University)，又稱利哈伊大學及里海大學，係於 1865 年於賓夕法尼亞州東部伯利恆城市(Bethlehem, Pennsylvania)建立的私立大學，由於學校所在地伯利恆城市於建校初期處於工業革命時期，該市為全美頂尖鋼鐵重工業及貿易重地，於地理及歷史上格外佔有工業領域之優勢，因此理海大學發展為一所以工程科學著名的頂尖私立研究型院校，並成為全美大學綜合排名前 50 名之名校，其中最佳排名達全美第 12 名。

該校占地約 10 平方公里，主要校區地形屬於山坡地段，並有全美占地面積最大之私立大學之一之稱號，其地理位置鄰近美國賓州附近主要大城市，舉凡費城、匹茲堡及紐約等，車程均僅 2 至 3 小時內，交通非常方便。理海具有 3 個校區，主要校區為 Asa Packer，為學生主要上課及活動校區，於主校區後山頂部為 Mountain Top 校區，此校區主要為

能源研究所及部分研究生上課區域，主校區山頭的另一邊為 Murray H. Goodman 校區，主要為體能競技等場館。

另外，理海校內還設有兩座圖書館，一個為 Linderman 另一個為 E.W. Fairchild-Martindale 圖書館，又 Linderman 圖書館歷史悠久並賦予全美前十美麗圖書館之一，第 2 座圖書館具有現代化外貌，為學生主要複習及討論課業之圖書館。

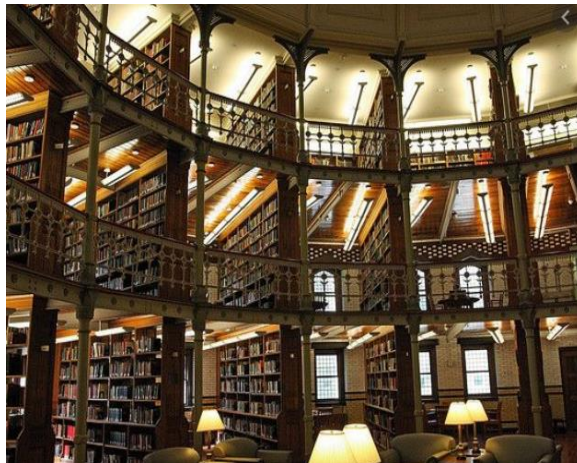


圖 1：Linderman 圖書館



圖 2：Fairchild-Martindale 圖書館

## 二、修業規定

理海大學機械工程碩士律定之研究生畢業要求，主要分為課程學分取得以及論文寫作兩大部分，又職之指導教授為材料工程學系，材料工程學系律定，碩士研究生畢業前，應向全系以 PowerPoint 報告論文（研

究)，時間為 30 分鐘（20 分鐘報告 10 分鐘問答）。

一般美國大學要求攻讀理學碩士（Master of Science）學位之學生須完成論文，另外須取得專業領域課程學分，依理海大學機械工程學系系所規定，須完成 30 學分（含）以上研究生程度課程，方可達到畢業要求。

#### （一）專業領域課程學分

職進修科系為機械工程學系(Mechanical Engineering)，依系所規定，碩士研究生必須修習至少 5 門機械工程必修課程（必須包含 2 門數理有關課程）及至少一門機械工程系選修，機械工程相關課程總共需 18 學分以上，另 12 學分可修習他科系之課程，合計需取得 30 以上學分，以達碩士畢業學分條件。

職在學期間所修習之必修課程為工程數學 I、進階流體力學、進階熱力學、數值模擬分析及進階製造科學等 5 門，另選修其他機械及材料系課程計有金屬粉末、電子顯微鏡操作研究及機械性質可行性分析等 3 門，另有 2 門論文課程用以執行相關研究項目實驗。

#### （二）論文報告

基本上，進入美國碩士就讀前，就會有指導教授，並依據指導教授專業領域，決定未來研究方向。碩士第一年係以修課為主，將必修及選修課程修習完畢後，重心將逐漸轉移至論文研究上。通常論文研究會與企業做合作以爭取研究經費，或是向政府研究機構申請獎助金，故研究期間須與合作企業做定期報告，並於案子結束後，撰擬研究報告，以利提報審查。因職之論文係有關材料，對於職來說，係跨領域研究，故職於第一年就進實驗室學習樣本的製作，並研讀金屬 3D 列印相關文獻。第二年即開始進行研析作業，並每兩週提報研究進度與成果予教授及合作夥伴。

### 三、論文研究

#### (一) 論文題目及摘要

職之論文研究題目為「探討以黏著劑噴塗成型技術(Binder Jetting)及選擇性雷射融化(Selective Laser Melting)技術」等 2 項 3D 列印所製造之 17-4 不鏽鋼微細構造，藉由本案探討之結論，可作為其他 3D 列印金屬研究之參考，以及作為本案後續研究微小金屬之細微構造及機械性質參據。

現 3D 列印係為各製造產業發展趨勢，除因製作產品時間較短外，成本亦較低。一般來說，3D 列印有 8 種印製方法。本案使用黏著劑噴塗成型技術及選擇性雷射融化等 2 項 3D 列印製程，黏著劑噴塗成型技術為現行 3D 列印發展趨勢，選擇性雷射融化則是前 10 年間較為廣泛之製作方式，且現已逐漸發展成熟，且現均廣泛使用於民間，此兩種列印技術較普及原因係能列印結構較為複雜之產品，兩者所製造出來的零件強度、韌性、斷裂強度等性質，均勝過其他 3D 列印製程方法及傳統加工製成，故與本案合作企業爰指定前述兩種技術作為本案製程，來驗證後續使用前述兩種加工技術製作銅製電子零件，為確認銅與前述 3D 列印製程相容性，爰使用 17-4PH 不銹鋼作為先期研究材料，職之論文係透過兩種不同 3D 列印印製方法，比較微觀構造及機械性質的不同，並比較何者有較優之機械性質，可做為後續以其他金屬材料進行 3D 列印的基礎參數。

#### (二) 研究背景簡介

3D 列印目前為製造企業發展之主要重點，此製造方法亦被視為製作複雜結構之最有效率方法。與傳統製造方式比較，3D 列印有較不受成品形狀設計的限制，高客製化，以及產出廢棄物量較少等優勢。通過使用電腦輔助設計(Computer-Aided-Design)扮演了在 3D 列印製作過程中的重要角色，藉由此系統的電腦控制來控制製程的參數，來逐層構

建物理部件。現今 3D 列印主要用於正常尺寸的製造。微觀 3D 列印仍然存在很大的局限性，主要是由於它們的幾何、機械和化學特性等。因此，在進入微型 3D 列印的領域之前。應先研究宏觀 3D 列印之樣本，以了解該技術的局限性和挑戰，接著將能夠縮小樣本並研究微觀 3D 列印樣本的製造過程。本案介紹的 3D 列印主要集中在兩種製造方法上，即黏著劑噴射技術和選擇性雷射熔化。研究的材料是 17-4PH 不鏽鋼，係通過上述方法以宏觀尺寸所製造。

17-4 合金為製造工業中最常用的不鏽鋼之一。選擇 17-4 不鏽鋼作為本研究的材料原因係 17-4 不鏽鋼在高達 600°F (316°C) 的高溫下具有高強度和良好機械性能的出色組合，此外，最大限度地減少翹曲和結垢的低溫熱處理亦是 17-4 不鏽鋼的優勢之一。17-4 不鏽鋼將通過適當的熱處理可產生較高硬度、耐用性和強度。17-4 沉澱硬化馬氏體不鏽鋼又稱 17-4PH，是所有可強化硬化不鏽鋼中，耐腐蝕性能最高的。它在 1,100°F (593°C) 左右的溫度下仍具有良好的機械加工性。“17-4”則表示了不鏽鋼的化學成分，17%鉻，4%鎳。除上述元素外，還添加了 3~5% 的銅作為合金元素。添加銅的原因係為限制 Co-Cu 析出物的生長，從而優化析出硬化並提高合金的強度。總而言之，17-4PH 不鏽鋼具有良好的機械性能，包括降伏強度。

選擇性雷射熔化 (SLM) 是從選擇性雷射燒結發展而來之 3D 列印技術之一。它能於電腦輔助設計逐層創建並製造三維金屬零件。選擇性雷射熔化流程簡述如后，從將粉末送入粉末輸送系統開始，粉末輸送系統將從左側輸送至右側 (參見圖 1)。接著粉末將從左活塞移動至右側，直到層厚度達到所設定之高度。粉末沉澱後，雷射束以高能量運行以開始熔化選定區域中的粉末層。在選擇性雷射熔化製造過程中，每一層都經過快速固化加工，接著熔化的粉末形成緻密層。在每一層的熔化和凝固過程完成後，右活塞下降，準備製作下一層。



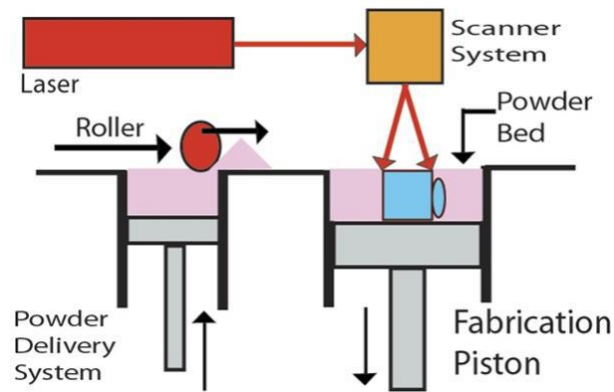


圖 1：選擇性雷射熔化示意圖

雷射功率、掃描速度、孵化間距和各層厚度為選擇性雷射熔化過程中的四個主要關鍵參數。雷射功率和掃描速度經常一起討論。如功率不足以熔化粉末且掃描速度移動過快，則不會發生完全熔化。另一種狀況是在增加雷射能量的同時保持較低的掃描速度，僅有部分粉末會熔化，而在高能量和高掃描速度的情況下會發生熔化並產生成球現象，但此條件會導致表面張力降低。

影線間距之定義為掃描光束中心到下一光束中心的距離(詳見圖 2)。如果孵化間距增加太多，有一定的機率導致顆粒熔化不足。隨著距離的增加，由於金屬顆粒沒有足夠的能量熔化，樣品的孔隙率會增加。這也會導致整個過程完成後的表面品質較差。各層的厚度則會影響最終樣品的強度和延展性。總之，選擇性雷射熔化為製造複雜金屬和合金零件的方法之一。許多參數會對最終產品品質產生嚴重影響。

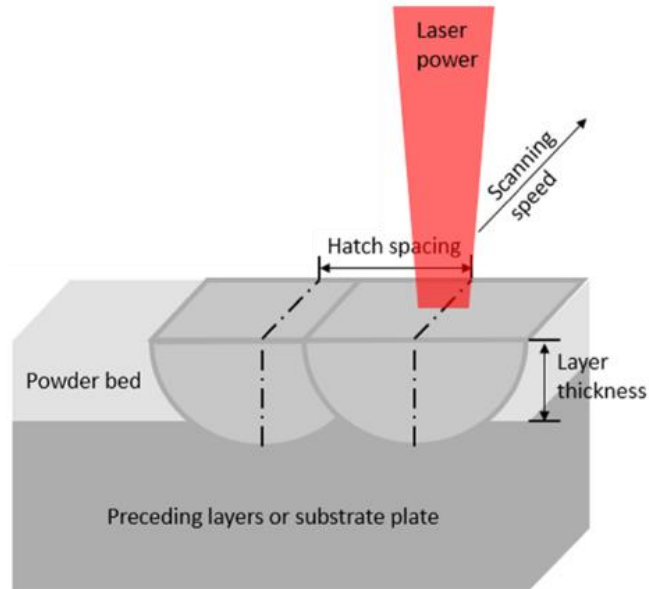


圖 2：選區雷射熔化關鍵參數圖解

黏著劑噴射技術 (Binder Jetting) 與選擇性雷射熔化過程雷同，構建過程以在前一層之上構建層的形式進行。選擇性雷射熔化和黏著劑噴射製程之間的主要區別在於，在執行黏著劑噴射過程中的粉末沉積過程中不涉及高溫熱源。關於黏著劑噴射製程，該製程有七個步驟，包括印刷、固化、脫脂、燒結、滲透、退火和精加工。與選擇性雷射熔化過程相同，需要先創建 3D 電腦文件，與 3D 電腦文件對應的 2D 文件將確定層的厚度。其次，將在影印床上放置一層薄薄的粉末。完成第一層影印後，影印系統中的構建箱將下降並提升提供的床層厚度。第三，將另一層粉末沉積，並在其上放置黏著劑。上述過程將逐層重複，直到電腦模型定義部分達到設定高度。

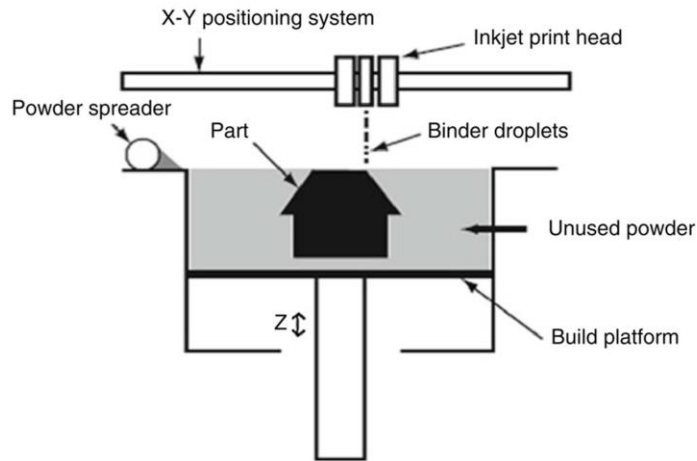


圖 3：黏著劑噴射過程示意圖

黏著劑是黏著劑噴射過程中放置在每一層中的顆粒之間的膠水。通常應用的最常用黏著劑之一是有機液體黏著劑，包括聚合物樹脂、丁縮醛樹脂和聚乙烯樹脂。由於所有材料的黏著劑噴射過程彼此相似，因此選擇最佳黏著劑可以提高零件的生坯密度。

為獲得良好的印刷生產品質，審慎設定黏著劑噴射參數值扮演了重要角色，包括粉末尺寸及其形態、層厚、印刷飽和度、加熱器功率比和乾燥時間。粉末流動性是該過程中受粉末尺寸及其形狀影響的重要因素之一。如果粉末的鋪展性低，則表示外觀流動性不好。由於粉末不能順利均勻地散佈，因而導致零件缺陷。黏著劑噴射使用粉末尺寸通常在  $0.2\mu\text{m}$  和  $200\mu\text{m}$  之間。根據 Saereh Mirzababaei 指出，粉末的尺寸與其流動性密切相關，粉末與黏著劑的反應性、與黏著劑的潤濕性會影響零件的表面粗糙度和一般幾何公差。與粗粉相比，細粉因表面積大，而導致顆粒間的摩擦而流動性差。因此，由於小顆粒之間存在較大的凡得瓦力，它們的流動性較小，堆積性能較差。並隨著中值粒徑的增加，流動性也會增加，且更細的粉末在燒結過程中具有更好的性能。粉末尺寸分佈（PSD）在黏著劑噴射製程中起著重要作用，並影響包裝密度，也會影響零件的最終密度。例如，粉末批次中存在許多細顆粒，則流動性會因

為高粘合力而降低。此外，較大的顆粒往往會增強鋪展性，而較小的顆粒會降低大顆粒之間的孔隙率，導致流動性和總填充密度增加。

### (三) 研究方法及設備

如前所述，樣品是通過選擇性雷射熔化和黏著劑噴射製程所製作的。在對每個樣品的最終微觀結構進行典型金相分析之前，應用標準金相樣品製備，包括樣品安裝、研磨和拋光。

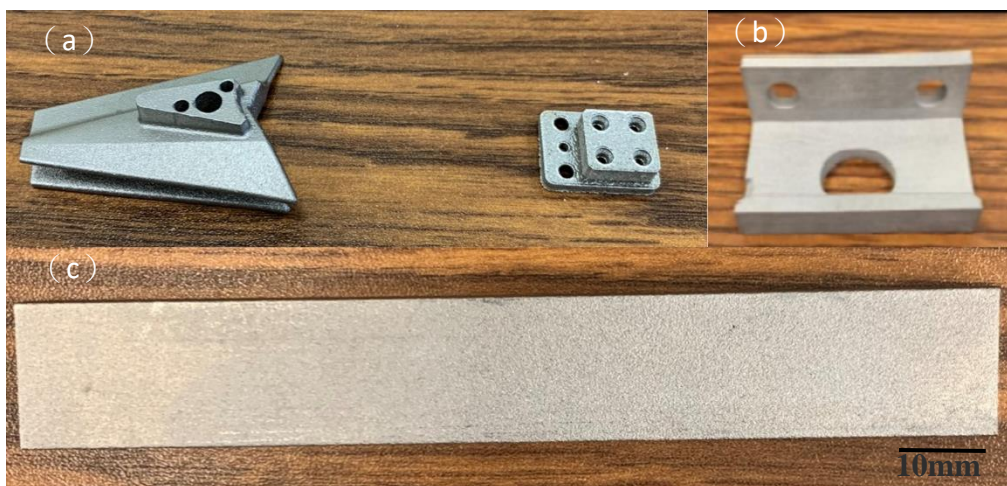


圖 4；17-4 不鏽鋼樣品 (a) 選擇性雷射熔化 (b) 黏著劑噴射 (c) 17-4 不鏽鋼鍛造樣品

在分析樣品的微觀結構之前，實驗樣品將進行密度測量。通過了解密度，可以對金相分析做出若干假設。例如，如果樣品密度低，則可以預期任何金相樣品中都存在較高的孔隙率。本案使用了兩種不同的方法來測量樣品密度。第一種技術稱為阿基米德，為基本物理概念，在工業界和研發界被廣泛使用。計算公式如下所示。

$$\text{樣品密度} = \frac{\text{空氣中重量}}{\text{空氣中重量} - \text{酒精中重量}} \times \text{酒精密度}$$

這個概念是使用被置換的流體的體積等於物體的體積。乙醇，密度為 0.789g/ml 用作實驗室測量的液體。本案所使用之阿基米德測量的設備如圖 5 所示。

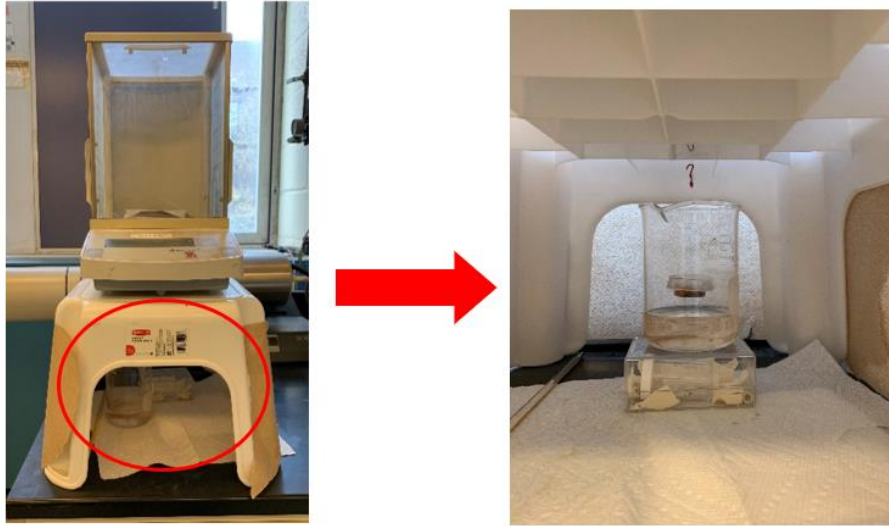


圖 5；阿基米德密度測量設備

測量密度所使用之第二種技術為 ImageJ 圖像分析軟體。通過應用來自樣品的光學顯微鏡圖像並應用 ImageJ 軟體，可以測量和累加樣品特徵橫截面內存在的所有孔隙表面，並估計整個樣品的密度。

無論是對於微觀或宏觀 3D 列印製程，都應選擇樣品的特徵部分並在低速鋸上切割。切割刀片材料係為金剛石，並帶有金剛石切割表面，能夠精確切割 17-4PH 不鏽鋼樣品。

鑲埋係樣品切割後安裝於電木粉中，以便安全和輕鬆地製備樣品。此步驟能保護易碎樣品，並且在金相程序中更容易處理，保護樣品免保存於腐蝕性環境。鑲埋的另一個優點是能夠藉由底座來觀察小、薄和鋒利的樣品。

研磨是通過去除金屬氧化產物來增強金屬表面外觀的過程。通常使用的砂紙等級從 240 到 600 不等。完成網格化後，在拋光輪上使用 1mm 金剛石漿、0.6 $\mu$ m 矽漿和 0.3 $\mu$ m 矽漿進行拋光處理。

在一般情況下，可以使用光學顯微鏡觀察和分析晶粒結構。然而，為了使晶粒結構更明顯，可以應用蝕刻劑。電解 10%草酸（3.15g  $C_2H_2O_4+250ml H_2O$ ）用於選擇性雷射熔化製備的樣品，Kalings No.2 蝕

刻劑 (5g  $\text{CuCl}_2$ +100ml  $\text{HCl}$ +100ml  $\text{H}_2\text{O}$ ) 應用於黏著劑噴射製程和鍛造樣品。案內黏著劑噴射製程所使用不同之蝕刻劑係因草酸對於微觀結構內的相識別來說過於激進，且容易過度蝕刻。製備後的樣品如圖6所示。本案使用光學顯微鏡 Axiovert 400 用於觀察每個樣品在不同放大倍率下的顯微組織。



圖 6：完成製備後的樣品

掃描電子顯微鏡 (SEM) 具有高能電子的光束，樣品表面將產生不同信號。此信號將反應樣品之表面狀況，包括表面紋理、化學成分等。在目前的研究中，SEM Hitachi 4300 用於獲取高倍率圖像以研究樣品的特徵，如晶粒尺寸、化學成分等。在使用掃描電子顯微鏡過程中，固定孔徑和電壓，調整使用不同之放大倍率和工作距離以取得顯微組織特徵和晶粒結構。

能量色散 X 射線光譜法 (EDS) 係一種分析樣品的化學成分之方法。使用 SEM Hitachi 4300 並施加電壓 15HV 來分析樣品，並透過 EDS，由光譜中不同的峰高度，識別不同的元素。

X 射線繞射儀 (XRD) 係使用 X 射線分析和識別不同的結晶相和有關晶胞尺寸的信息。該項目使用了 Panalytical Empyrean X 射線繞射儀系統。所有樣品均在相同條件下以 40mA 從 20 到 100 ( $2\theta$ ) 角掃描。

#### (四) 結果

Leco LM248AT 顯微硬度測試儀以 100 克力作用 10 秒，用於測量來自三種不同製造方法的樣品硬度，又因黏著劑噴射技術和鍛造樣品製造方法與構建方向較無關係，因此僅在一個方向上進行了測量。然而，於在選擇性雷射熔化過程中製造之樣品，則應用了兩個測量方向。

蝕刻可使微觀結構更加明顯。在黏著劑噴射樣品中，顆粒的形狀類似於多邊形。然而在經歷燒結後，由於傳熱條件，樣品的核心和邊緣的微觀結構略有不同。在樣品的核心部分，微觀結構的形狀是多邊形。然而，在樣品的邊緣部分，也有發現多邊形結構，但一些為型結構卻發生了拉伸效應。根據 Daniel Huber 等人的說法，拉伸效應係因燒結而發生的。燒結溫度使馬氏體拉長（圖 7a 中的紅色箭頭）並導致  $\delta$  鐵素體變為  $\delta$  鐵氧體網絡而不是  $\delta$  鐵素體晶粒。拉伸效應通常發生在 1360°C 左右的燒結溫度下，持續時間為 30 分鐘。此外，由於傳熱問題，在核心部分附近不會發生拉伸效應。

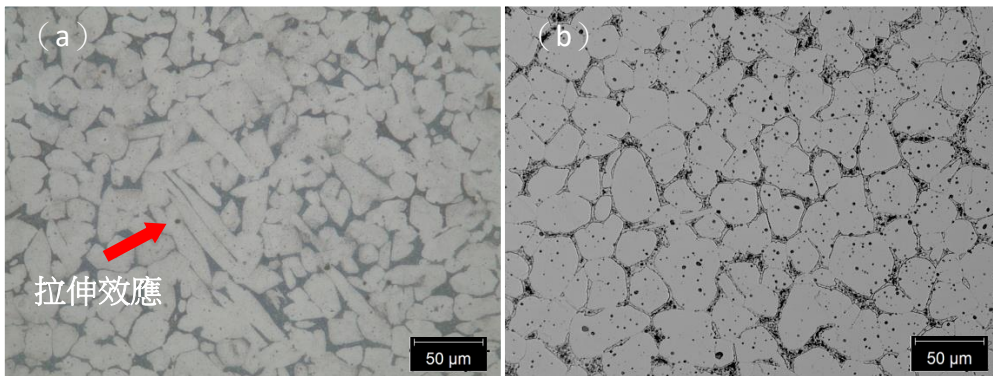


圖 7：(a) 邊緣部分 (b) 核心部分的黏著劑噴射的光學圖像

於選擇性雷射熔化過程中，雷射掃描方向將隨曾改變。它導致微觀結構中的不同外觀。圖 8a 顯示了選擇性雷射熔化樣品，其中構建方向如圖所示，於圖中可熔池清晰可見，且能分辨建築方向和孵化空間。另一方面，圖 8b 顯示了樣本內部的構建方向。圖中沒有顯示熔池，而是

線條，稱為孵化線。不同的建造方向會對力學性能產生影響。結果將在顯微硬度章節中討論。

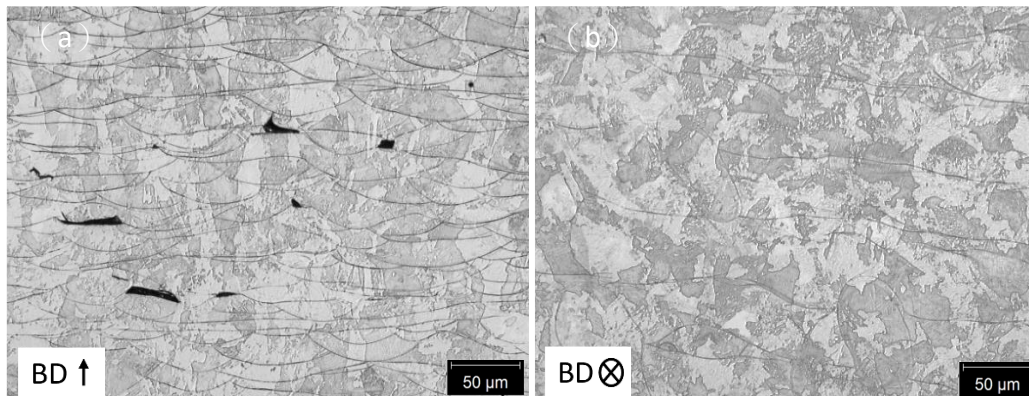


圖 8：相同微觀結構的展示，(a) 觀察方向朝上，(b) 觀察方向朝紙內

與這兩種 3D 列印製程相比，鍛造樣品具有完全不同的微觀結構。在圖 9 中，鍛造樣品顯示了完整的馬氏體顯微組織，這也表明當通過常規方法製造 17-4PH 不鏽鋼時，合金具有完全馬氏體結構。

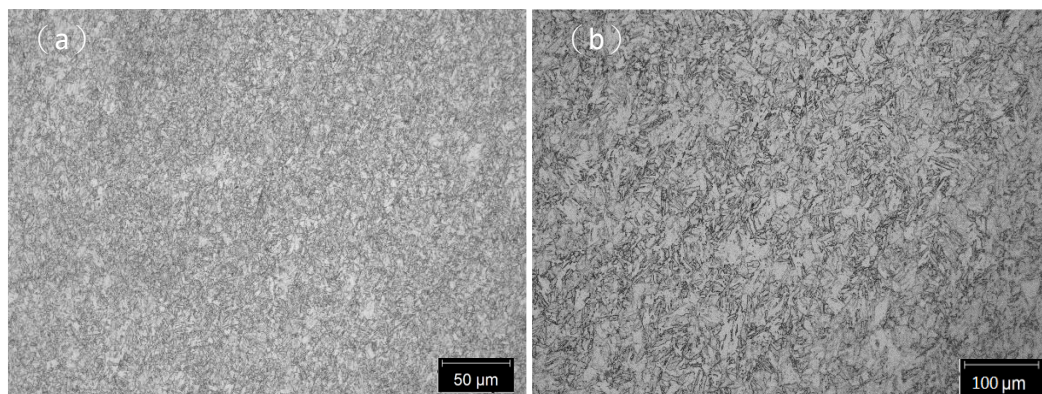


圖 9：(a) 10x (b) 20x 放大倍數的鍛造樣品的光學圖像

為了獲得有關每個樣品的微觀結構的更多信息，使用掃描電子顯微鏡 (SEM) 進行分析。使用 15KV 電壓，同時拍攝黏著劑噴射和選擇性雷射熔化樣品的圖像以觀察微觀結構中的特徵。如上所述，由於製造方法不同，觀察到的晶粒結構也不相同。與鍛造材料相比，通過選擇性雷射熔化和黏著劑噴射製造的樣品具有更細的晶粒結構。在圖 10a 中，於熔池邊界，能觀察到細晶界和板條馬氏體。在黏著劑噴射樣品中，每個



顆粒都與其相鄰顆粒燒結在一起。與其他兩種樣品（選擇性雷射熔化和鍛造材料樣品）相比，黏著劑噴射所製程之樣品有孔隙的存在。在選擇性雷射熔化和鍛造樣品中不存在孔隙。選擇性雷射熔化和鍛造樣品，皆涉及高溫（選擇性雷射熔化：至少 1,190°C 或更高，對於熱軋：最大值為 926°C）鍛造樣品是通過熱軋製造的。由於高溫下的強烈應變，將有效地降低兩個樣品中的孔隙率。在黏著劑噴射樣品中也有凹坑的出現。其他兩種製造方法中，凹坑則不存在於表面上。起初，我們以為這是因為蝕刻劑的緣故。然而，在嘗試了兩種常用於分析 17-4PH 不鏽鋼的不同蝕刻劑、Kalling's No.2 和 10%草酸後，結果仍然相同。因此，我們認為在黏著劑噴射所製程的樣品中脫粘過程之後，仍然有一些殘留碳保留在樣品中。這些缺陷可能會影響從阿基米德和 ImageJ 密度測量技術獲得的密度。

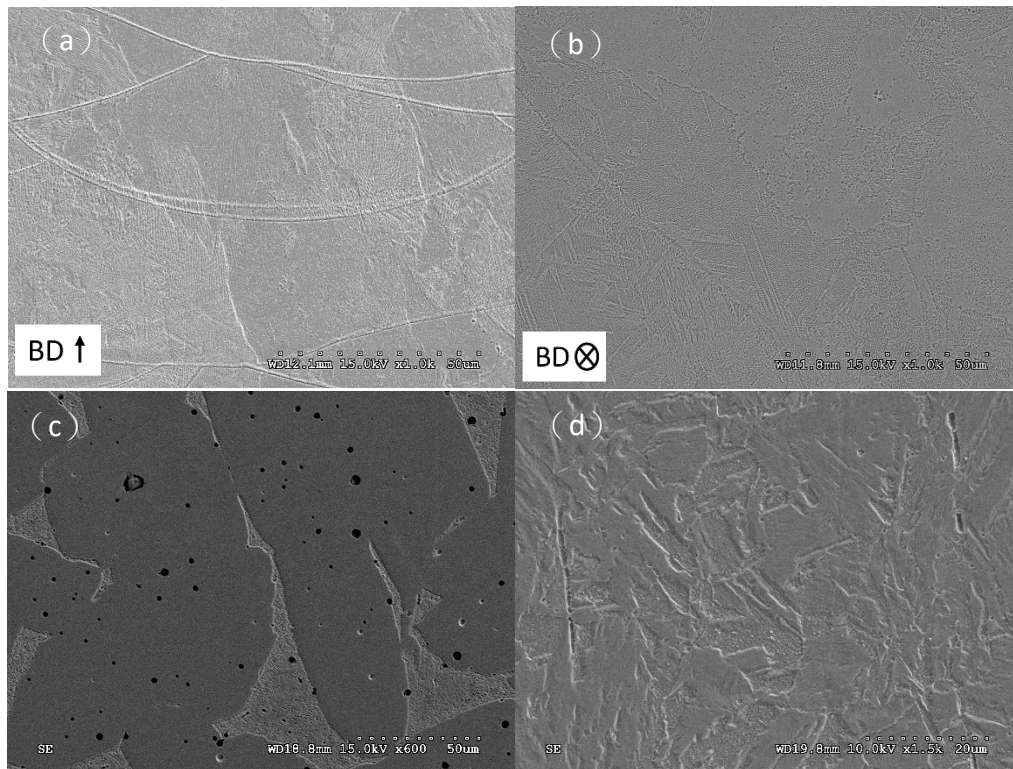


圖 10：(a) 具有正常構建方向的选择性雷射熔化樣品 (b) 具有橫向構建方向的选择性雷射熔化樣品 (c) 黏著劑噴射樣品 (d) 鍛造樣品的掃描電子顯微鏡圖像

在高放大倍率下，白色顆粒出現在兩種 3D 列印製程的樣品上。在圖 11 中，白點係上述提到之顆粒。它們的分佈係隨機且不均勻的，不會沿著選擇性雷射熔化樣品中的熔池或黏著劑噴射樣品中的晶界形成。由此可知，這些白顆粒並不是在製造過程中產生的。我們推測這些顆粒是在拋光過程中沉積的，但這對樣品機械性質及微晶結構並沒有很嚴重的影響。然而，在未來的研究中，我們將應用電子背散射衍射 (EBSD) 技術來測量晶粒組織、晶粒尺寸、光學相位圖等。這些結果將有助於更好地理解影響樣品力學性能的原因。而這項技術需要非常乾淨的表面，才不會影響測量結果，這是本案未來需要再探討的問題。

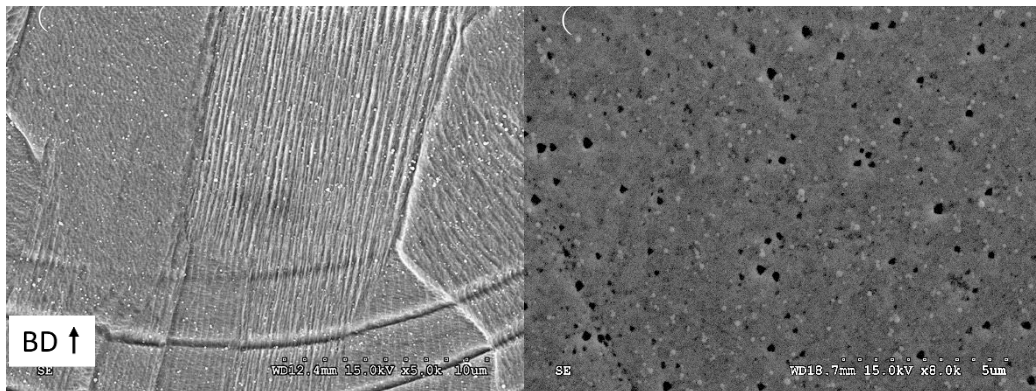


圖 11：(a) 選擇性雷射熔化 (b) 黏著劑噴射樣品中存在的白色顆粒 (點)

在黏著劑噴射樣品中，表面上出現了兩個明顯不同顏色的區域(圖 12a)。基本上，17-4PH 不鏽鋼混合了 $\delta$ 鐵素體和馬氏體相結構。顏色較暗區域為馬氏體，灰色區域應為 $\delta$ 鐵素體區。 $\delta$ 鐵素體通常用於通過使用相關溫度範圍來提高 17-4PH 的可燒結性。於選擇性雷射熔化之樣品中，我們將放大倍數增加到 5K。晶粒如圖 12b 所示，它們的直徑約為  $4\mu\text{m}$ 。圖中所呈現之晶粒是柱狀晶粒的橫截面。可以觀察到一些晶粒彼此更接近。惟表現上有幾處裂縫，目前推測原因係因為溫度不夠高，速度不夠慢，導致兩個晶粒邊界周圍的熔化不足，而該缺陷將對機械性質產生影響。

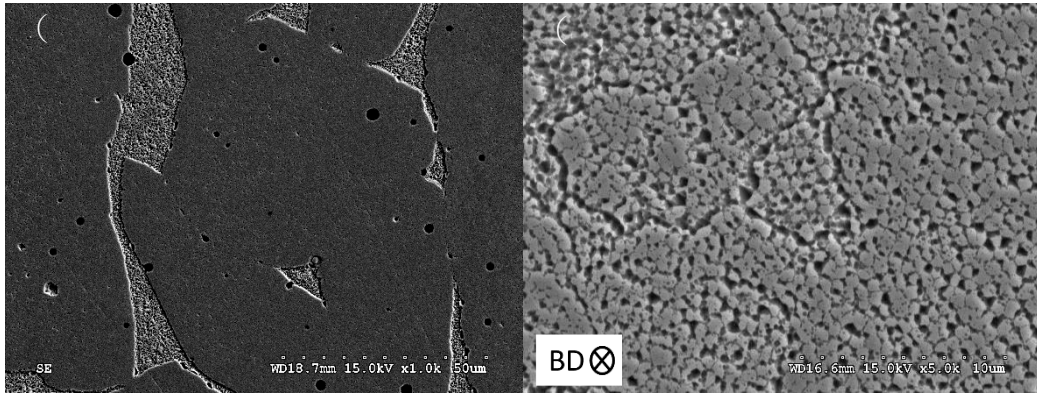


圖 12：(a) 黏著劑噴射樣品中之暗和灰相 (b) 選擇性雷射熔化之晶粒

EDS 分析用於檢查黏著劑噴射和選擇性雷射熔化樣品中合金元素的存在。本案 EDS 分析的目的是找出鐵、鉻、鎳和銅等 4 種元素。在黏著劑噴射樣品中，鐵在樣品中的峰最高，因不鏽鋼的化學成分主要是鐵。鐵主要出現在圖 13a 中的晶界（顏色較暗區域）上。儘管銅沒有出現在 EDS 圖中，但黏著劑噴射樣品的光譜確實表明存在銅。圖像中未顯示銅的原因可能是在創建相位圖時在掃描過程中施加的電壓不足所致。

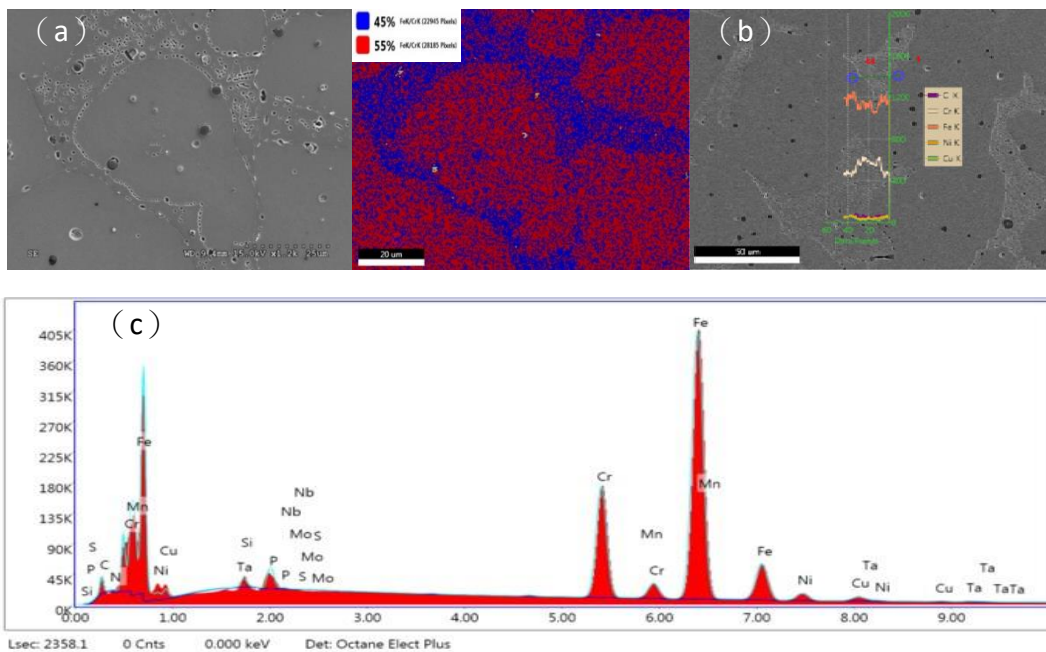


圖 13：通過 EDS 進行的黏著劑噴射樣品分析 (a) 相位映射 (b) 線掃描 (c) 光

譜

在選擇性雷射熔化樣品的情況下，與黏著劑噴射不同。鐵、鉻和鎳在樣品中隨機且均勻地分佈（圖 14）。銅也出現在其中，有趣的部分是銅主要存在於熔池中。此現象解釋如后，銅元素於鐵、鉻和鎳中不溶解情形不理想。因此，在第一層沉積過程中，雷射將頂面材料熔化，形成熔池，但部分銅顆粒並未熔化，故與其它基材併輸送已形成之熔池中。

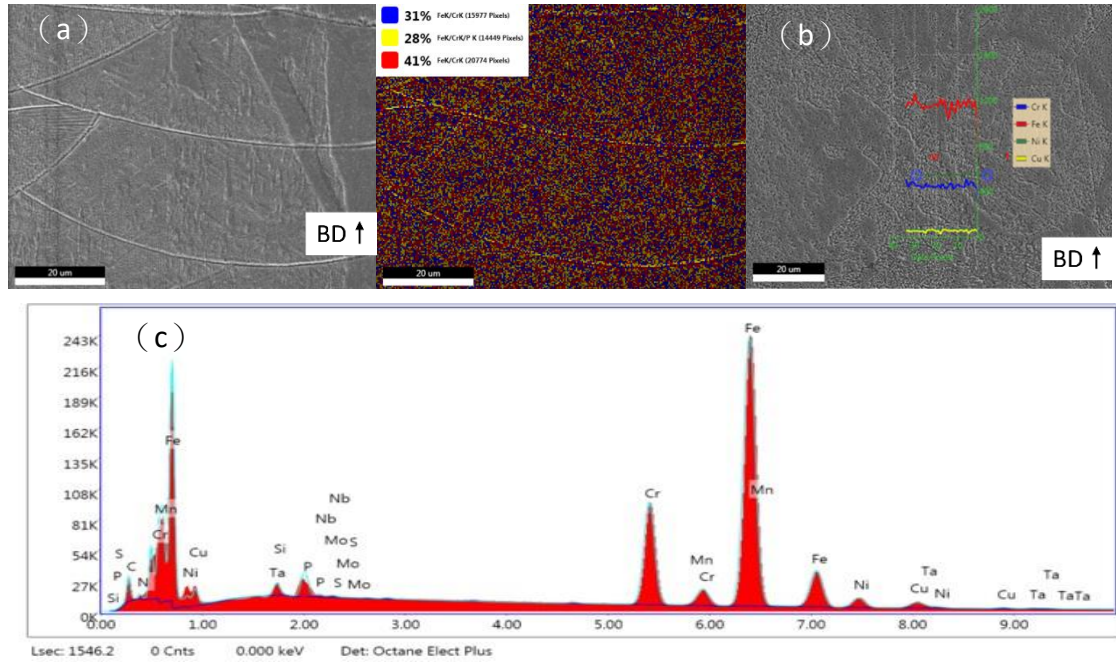


圖 14：通過 EDS 進行的選擇性雷射熔化樣品分析 (a) 相位映射 (b) 線掃描 (c) 光譜

黏著劑噴射和選擇性雷射熔化樣品的 XRD 結果如圖 17 所示。該圖中所示的 17-4PH 不鏽鋼具有馬氏體晶體結構。理論上，這兩種不同 3D 列印樣品的 XRD 結果應該具有相似的結果。在黏著劑噴射樣品中（圖 16a），結果顯示樣品中存在馬氏體相： $(100)$ 、 $(200)$ 、 $(211)$  和  $(220)$ 。然而，其中也出現了非常低強度的奧氏體， $(111)$ 。對黏著劑噴射製程樣品進行兩個方向的掃描結果，但分析結果基本相同，也由此可知，在黏著劑噴射製程的過程中，構建方向並不重要。（參見圖 16a）與黏著劑噴射製程樣品相比，選擇性雷射熔化製程的樣品於不同掃描方向呈現截然不同的結果。奧氏體的強度在橫向或法向都遠高於馬氏體。對於兩個

方向，樣品中出現的馬氏體相包括 (110)、(200) 和 (211)。奧氏體相 (111)、(200)、(220) 和 (311) 都存在於兩個方向。然而，在法線方向，有一 (222) 奧氏體相出現於其中 (圖 16)。將 17-4PH 不鏽鋼鍛造材料作與兩 3D 列印樣品做比較 (圖 15)，結果與黏著劑噴射樣品基本相同，包括：(100)、(200)、(211) 和 (220)。

於鍛造樣品中，沒有奧氏體晶體結構，只有馬氏體。係因奧氏體在低於臨界冷卻速度的情況下達到一定的溫度，即轉變回馬氏體。本研究分析之黏著劑噴射樣品顯示出低強度的奧氏體。推測係因樣品中仍然存殘留之奧氏體。選擇性雷射熔化和黏著劑噴射製程之間之差異解釋如下，在製造過程中，雷射束逐層施加，每一層無法快速冷卻。因此，製造該層後的溫度不會迅速下降，且會立即製造下一層。雷射束之熱能量仍會傳遞到先前製造的層面。故因溫度不會迅速下降，雖在後續的沉積過程之後，溫度達到了轉變點，但條件還是不足以讓晶體產生變化。另一方面，即使本研究中的黏著劑噴射樣品經歷了燒結過程。燒結溫度高到足以將馬氏體轉變為奧氏體，但因快速冷卻，奧氏體又轉變回馬氏體。

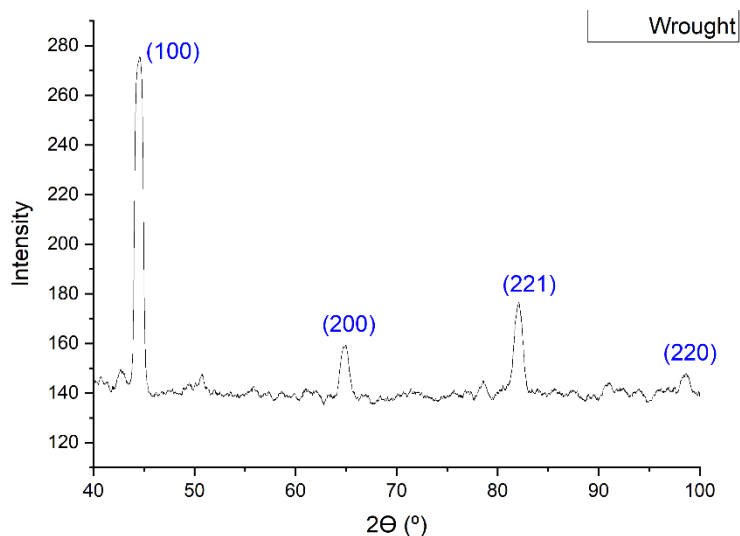


圖 15：鍛造樣品之 17-4PH 不鏽鋼 X 射線繞射儀

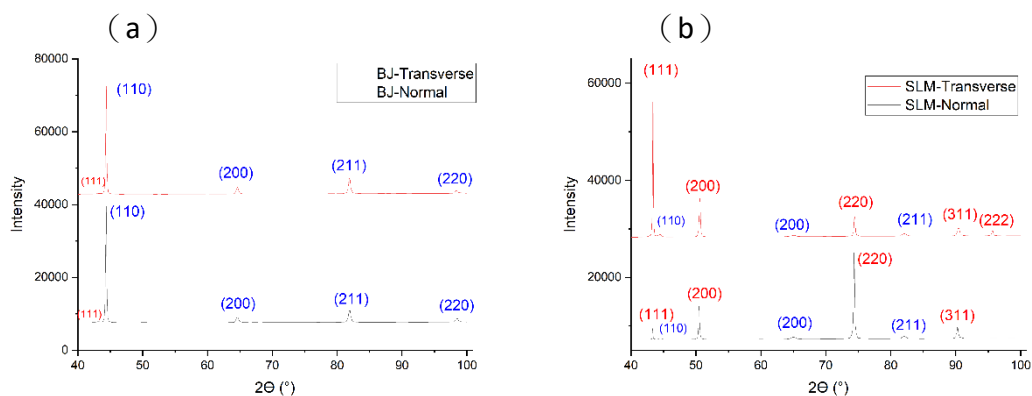


圖 16：17-4PH 不鏽鋼 (a) 黏著劑噴射 (b) 選擇性雷射熔化的 X 射線繞射儀

表 1 顯示了黏著劑噴射、選擇性雷射熔化及鍛造樣品的顯微硬度測試結果。鍛造材料的硬度最高，為 372.16HV，標準偏差為 6.37。黏著劑噴射所製造之樣品，結果為 281.4HV，標準偏差為 10.3。案內針對選擇性雷射熔化樣品測試了兩個方向，正常和橫向，因建構方向於選擇性雷射熔化製程會對成品產生影響。對於正常掃描的選擇性雷射熔化樣品，顯微硬度為 261.4HV，標準偏差為 13.7。在橫向掃描方向，顯微硬度為 234.5HV，標準偏差為 8.9。可鍛材料具有最高的硬度值，係因樣品經過退火，可以快速冷卻樣品，將殘餘奧氏體完全轉變為馬氏體晶體結構，由此可知，如樣品中馬氏體比例較高就會有較高的顯微硬度。該觀點也適用於通過黏著劑噴射和選擇性雷射熔化等 2 項製程樣品的製造。黏著劑噴射樣品中馬氏體組織的比例較高，但其中有參雜了些許的奧氏體，也造就黏著劑噴射樣品硬度值低於本研究中使用的鍛造材料的原因。對於選擇性雷射熔化樣品，奧氏體在兩個構建方向上的存在方式都比黏著劑噴射樣品多，因此，顯微硬度結果都低於其他兩個樣品。

表 1：17-4PH 樣品之顯微硬度數據

|      | 鍛造     | 黏著劑噴射 | SLM (正常) | SLM (橫向) |
|------|--------|-------|----------|----------|
| 平均值  | 372.16 | 281.4 | 261.4    | 234.5    |
| 最大值  | 392    | 306   | 314      | 252      |
| 最小值  | 357    | 258   | 230      | 212      |
| 標準偏差 | 6.3    | 10.4  | 13.7     | 8.9      |

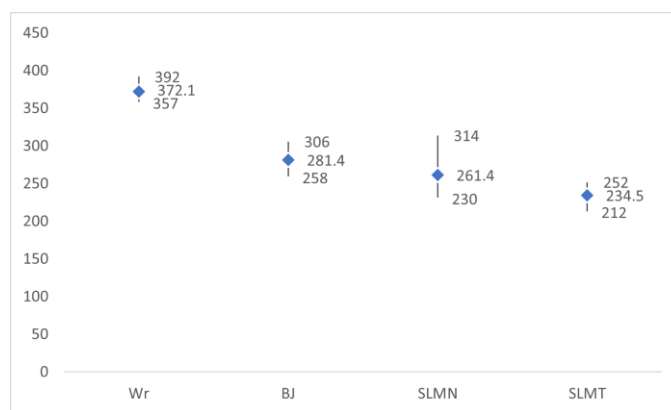


圖 17：17-4PH 樣品之顯微硬度

### (五) 結論

根據以上實驗結果，我們目前得出以下結論

1. 黏著劑噴射樣品的密度 (96.5%) 低於雷射熔化樣品的密度 (98.7%)。
2. 黏著劑噴射樣品於電子掃描微鏡中可以明確分別  $\delta$  鐵素體和馬氏體。
3. 相對於鍛造材料，透過黏著劑噴射和雷射熔化所製造之樣品，可明顯辨識出晶粒結構。
4. 馬氏體存在於黏著劑噴射樣品的比例高於雷射融化所製作之樣品，這也進而影響到黏著劑噴射樣品有較高之硬度。

### 參、心得與建議事項

#### 一、求學歷程

在美求學過程，老實說，沒有想像的那麼簡單，一人隻身赴海外，難免會碰到困難與挫折，畢竟語言、習慣及文化有極大差異，然而這些困難與挫折亦是作為自身成長的養分。

因疫情的關係及簽證問題，職於臺灣實施遠距教學了半年，少了在美國半年的生活體驗，也因為在臺灣上課的關係，必須配合美國大學課程時間，時常日夜顛倒授課，除了時差問題外，美國的教育方式與臺灣亦有差別，臺灣的教育可能較強調“結果”，而美國教育則是希望學生能徹底去瞭解“過程”，也就是從過程中去學習整個理論，一開始，職極度不習慣此種教學方式，因

瞭解此種學習方式的過程，係透過寫程式來修習，職於國防大學理工學院就讀時，主修動力及系統工程學系，雖有上過程式相關課程，但使用語言截然不同，故職於當時上課時除了修習該課程理論外，亦同步自學該程式語言，常常需要花至少上一週完成作業，但除自學外，如有遇到自己無法解決的問題時，也會適時的運用 office hours 的時間，向助教請益，亦會寫電子郵件予教授詢問，教授亦會提供相關資訊或提示，來幫助解決我德問題，隨著時間的推進，也漸漸掌握了寫該程式的訣竅及有效運用方式，寫作業的速度也更快了，而於寫程式的過程中，也逐漸理解教授於課程中所教授的內容，並能有效利用於後續的考試及實驗中。

理海大學機械工程學系碩士畢業門檻為 30 學分，其中 6 學分為論文，其他 24 學分基本上會分配至三個學期，第一及二學期會各修習 9 學分，第三學期會修習 6 學分，第四學期為論文學分（6），而在理海 1 門課基本上為 3 學分，所以第一及二學期將各修 3 門課，雖 3 門課聽起來不多，美國的碩士課程除了期中及期末考外，基本上每周都會有作業，有些課程於還會有專題的部分需要製作提報，可以說把已經把學期整個填滿了，所以時間的分配上很重要，職基本上只要有空堂，都會去圖書館寫作業，晚上吃完晚餐，也會回宿舍繼續寫，寫完後有些空閒時間，才會跟朋友出去走走，只能說在學期間真的很忙，但其實只要找到調適的方法，都會撐過去的，雖然平常忙於課業，但還是需要運動，除了保持身體健康外，也能抒發壓力。

第一、二個學期，基本上就是修習課程，將系上必修課程修習完畢後，才會逐漸將重心轉移到論文及實驗上，然而在學期與學期間的寒暑假，職亦會利用沒有課時間赴實驗室學習操作實驗儀器，並於學習後多練習，以利未來論文撰擬順遂，也因職的指導教授及論文係與材料相關，與職大學修習的課目或做專題實驗內容截然不同，實驗器材的操作亦需從頭學習，在學習過程中，也產生許多問題，遇到問題時，因網路相關資源有限，職還是會主動去詢問實驗室的學長姊們，畢竟除了 SOP 外，操作的經驗亦相當重要，而



職也在詢問的過程中，學習到了許多操作技術及相關知識。

職認為於寫論文期間，最重要的是論文及實驗期程的分配，職於第三學期末放寒假前，製作了一個期程表，律定了什麼時候需完成什麼實驗，論文大綱及草稿的完成時間等，藉此給予自己時間壓力，雖無按照確切期程執行，但還是有再結點的後一週內完成，也因此如期完成論文的撰擬。

## 二、語言培養

派赴美國念書，英語已有基本的溝通能力，因國防部要求出國前需達托福 71 分以上門檻，方可取得國外進修資格，故就英文的聽說讀寫來說，已經有一定的基礎，而職雖然取得了資格，但於一開始抵達美國時，於生活上的對答來說，還不是很流暢，畢竟考試所學，與現實對話是有差的，一開始講話都會支支嗚嗚的，完成一句話，可能就要停頓個兩三次，那時候真的很擔心跟職講話的人，聽了真的會不耐煩，為了避免類似的事情一直發生，我利用課餘的時間，看了許多美劇，從中學習許多生活用語，除此之外，職也持續參加了許多活動，多跟人互動，並藉機練習及交朋友，漸漸低過了一個學期之後，職的英文也說得越來越流暢，速度上也漸漸提升了，基本上生活對達及聊天已經沒什麼問題了，就像是職的第二母語一樣。

至於讀的部分，因職有修習論文，需要閱讀大量文獻，久而久之隨著閱讀的量增多，閱讀能力也隨之增加，隨著閱讀能力的增加，寫作能力也會有所提升，畢竟多看文獻，學習別人的文筆，有助於英文寫作的提升及論文撰擬的流暢度。

## 三、自身成長

本次赴美除收穫許多學術上的新知外，於平常生活與同儕相處上皆有得到體悟，職於第一學期，就體會到美式教育與本國教育的差異，並花了整個學期去適應瞭解，至於生活上的部份，各種大小事亦需自己處裡，又文化較為不同，於處理的過程中，也學會了不少應對進退得方法，也因此自身的心態也成長了不少。

職因新冠肺炎疫情因素，於台灣線上授課半年，雖少了半年於美國當地的生活體驗，但於在台灣學習期間所學知識並不比於美國當地學得少，又因日夜顛倒授課的關係，寫作業及製作報告時間亦相對較多，所學並不比面授方式少，此種經驗對職來說係非常特別的。

除了論文方面知識，職亦學習到寫程式相關技能，美國教育很強調學習的過程，比起結果，過程對他們來說，是一個更重要的學習方式，也因此有許多機械工程系之課程中，有很多需要寫程式的需求，然而職於大學並無學習相關程式應用，所以基本上是從頭自學起，雖然於學習過程中有許多挫折，然而在職完成該們課目並成功通過後，是相當有成就感的。

#### 四、人文差異

在去美國之前，職已知東西方文化差異不同，然而於赴美後，還是有些文化衝擊，美國地大物博，跟台灣比較起來真的是一格截然不同得世界，開車方式、生活習慣及交流方式，均與台灣差異甚大，這並沒有什麼好與壞的區別，就只是文化不同而已，而職也花了一段時間才得以適應，適應之後也漸漸發現，美國文化的有趣之處，舉例來說，人與人第一次見面時，除了「你好」之外，在美國，人們常常也會使用「最近如何」來打招呼，這除了可以有效破除第一次見面得尷尬之外，也能藉由此種打招呼方式，拉近人與人之間的距離，以藉此更了解對方，再來就是交通的部分，美國有很多「Stop Sign」也就是「停止」的交通號誌，如果汽車看到此交通號誌沒有停下來的話，無論有發生車禍與否，被警察取締，必然是重罰，而且美國的車子非常禮讓行人，這也讓我再美國馬路旁行走時非常安心的原因之一。

職花了至少一學期的時間才適應美國生活及教學方式，但於克服文化衝突後，也逐漸能享受美國的生活，並找到研究與生活間的平衡，雖然不輕鬆，但絕對是一個難得的經驗。

建議進修人員能多利用在美台灣同學會或相關互助社團，來提前了解美國生活及學校生態，以緩解出國前憂慮，畢竟國外文化與台灣文化差異甚大，

很多事情還是需要透過他人幫忙及引導來達成。

## 五、社會經驗

也因為美國地大，人口也相對多，警察不是所有地方都能管轄的到，我住在校內的研究生宿舍，雖然說是「校內」，但其實離真正得主要校區開車也需要 10 分鐘左右，警察大概每 30 分鐘會來巡邏乙次，但我的包裹還是被偷走了，即使報了案，調了監視器，還是無法及時抓到小偷，到頭來只能自己認栽，也因此，一人身在國外也須注意自身權益及安全，永遠不會知道會發生什麼樣的事情。

又因美國文化較亞州文化步調相對慢，美國政府部門處理個人申請文件的速度較為緩慢，職於美國申請駕照換發之時間就花了四個月之久，但也有可能係因疫情原故導致作業緩慢，故建議如要申請相關個人證件，應提早辦理，以避免期程延誤。

## 六、語文能力

鼓起勇氣與外國人對話，一定是每個國際學生一開始的挑戰，而職在美國生活的這段時間，除上課以及與研究的同事交流外，亦參加了許多校外活動，以藉此提升英文對話的流暢性，現在英語尤如我的第二語言，刻劃在我腦中，也很慶幸自己多了一項生活應用工具能應用，並可藉此多瞭解各國文化，增廣見聞，提升視野。

## 七、社交活動

理海大學有需多針對研究生的社交活動，除了每周二會有固定的早餐會面外，還有戶外活動，例如登山、泛舟及戶外烤肉等等，這些活動除了能緩解課業壓力外，也能增加研究生之凝聚力，除此之外國際學生辦公室，也很注重理海國際學生的生活，時常提供國際學生交流活動，舉辦不同國家節日慶典，例如，印度的 Diwali、Holi 及伊朗的 Yalda Night 等等，除可了解各國文化外，亦可藉此機會認識不同國家的朋友，增廣見聞。

## 八、研究運用

經過 2 年於國外之碩士生活，除學習相關知識外，亦培養了第二語言，希利用本身英語能力，幫助本廠未來武器研究相關任務；另本廠係為國家重要之兵工廠之一，肩負國軍火砲生產重責大任，具有一定程度之機械加工能力，職於本次進修領域屬金屬粉末加工相關，於現今機械加工工業上屬前衛工法之一，且相對於傳統製程方法有較多的便利性，希能利用所學，提升本廠產製效能，及研究多元性。

本廠有些彈藥另件或火砲零附件需經過車、洗、焊等 3 步驟，才得以製程完整另件部位，利用 3D 列印可直接將前述另件一體成形直接印出，可節省工時。從論文結論可以得知，製程的不同或參數對成品的機械性質會有一定影響針對職論文結論運用，如後續有材料需做微觀結構分析，或是進行微觀檢測的部分，雖探究材料可能不同，但可由前述結論作參考，進行比對分析，本廠軍品多以金屬材料為主，如有於製程中或完成後，有鏽蝕或龜裂等情事發生，可藉由微觀結構分析肇因，推斷是否於製程加工中是否有參數變動或環境等因素影響致最後成品的機械性質改變。

職希利用於研讀碩士期間所學到知識，提升本廠火砲相關零件生產效率，透過 3D 列印技術，也可提升另件製造之自由度，除可節省製造時間亦可節省成本，如有研測相關需求，亦可使用電腦輔助設計將欲測試之另件(零附件)製作出，直接使用於欲測試產品上，提升研製能量，節省成本舉例來說，除火砲零附件外，研製案之彈藥零附件亦可使用 3D 列印製作，舉例來說，現行的 XTC112 105 公厘尾翼穩定脫殼穿甲曳光彈及尾翼穩定脫殼練習曳光彈等 2 工程研究發展案，其尾翼可由 3D 列印製作，另後續所需之彈體零組件，可使用職於研究所所學之相關模具成型知識來製作，例如因雷射選擇性融化技術有較快之製成速度，又不須做後期處理，且本製程技術發展已逐漸成熟，基本上所有金屬材料均適用於此製成，故後續如有研改相關需求，本案預研改模具可使用此技術製程產出，以節省時間，至於參數設定部分，可參照相關材料學術研究，並與職論文研究 17-4 不鏽鋼結果做微觀結構分析

及機械性質比較，來做滾動式修正。

因本廠無引信產製能量，又系製中心做引信製供作業費時，有時為確認彈體與引信是否匹配，需俟系製中心製繳，方能確認，可利用 3D 列印技術並使用 17-4 不鏽鋼製作引信外型，來確認彈體匹配性，且於製作時重量應與系製所做引信相符，以此先行瞭解彈藥飛行軌跡，及後續可能發生狀況，並先行做研改調整；另使用 17-4 不鏽鋼原因係因較好籌獲且成本低廉，又金相學與 3D 列印製程息息相關，利用職研究所得結論，可幫助解決 3D 列印技術製程上產生窒礙，提升本廠研製能量。

本廠係負責製作 40 公厘口徑（含）以上彈藥武器彈藥，彈藥金屬另件結構較為複雜，無法使用單一 3D 金屬列印機完成，需於各金屬另件或總成完成後，再行組裝製成，故於建置時須進行購買數量評估，產線規劃，以提升製程效率，又本廠彈藥製作均使用金屬材料，於 3D 列印時需使用金屬粉末，其粉末直徑需控制於 20 $\mu\text{m}$ ，成品才會有最佳的機械性質，如採選擇性雷射融化技術溫度控制於 1350 $^{\circ}\text{C}$  左右，才足以融化金屬，並適時調整掃描速率以及方向，以提升成品密度，如使用黏著劑噴塗成型技術，可使用後期加工，例如燒結，來生產硬度且可靠度更高的產品，建議可使用選擇性雷射成型技術製造金屬另件，黏著劑噴塗成型技術製造外殼的部分。

另因職亦有學習相 MATLAB 程式語言的撰擬，如有相關公式，亦可利用數值分析來模擬彈藥飛型軌跡，雖無法準確預測，但對於先期的分析，會有一定的幫助，例如可利用此方式針對軍種演訓任務需求，以訂定 120 公厘照明彈之射表。

除前述 3D 列印及數值分析相關應用外，職於美國所學相關材料知識，於廠裡，亦有潛在的應用空間，就現行 81 公厘高爆榴彈點火藥筒研改案，案內先期研究係針對以本廠現行迫砲彈類產品之點火藥筒為基礎，同步蒐集世界各國材質性質相關資料，尋找可行性方案，並進行優化精進，獲得相關參數後，進行研改及後續研測，雖本案以選定材質，職想藉此表達，後續如

有類似研製案，可以藉職所學，針對材質進行分析，並找出最佳可行之材料。

#### 肆、參考資料

1. Weber, M.  
(2018). *What are different types of 3D printing?* Retrieved from Meee-Mechanical Electrical Electronic Engineering. :<https://www.meee-services.com/what-are-different-types-of-3d-printing/>
2. 17-4 STAINLESS STEEL.  
(n.d.). Retrieved from Premium Alloys Special Distributer: [https://premiumalloys.com/products/17-4\\_stainless\\_steel](https://premiumalloys.com/products/17-4_stainless_steel)
3. Barbara L Dutrow, L.S. (2022, 430). *X-ray Powder Diffraction (XRD)*. Retrieved from X-ray Powder Diffraction (XRD) : [https://serc.carleton.edu/msu\\_nanotech/methods/XRD.html](https://serc.carleton.edu/msu_nanotech/methods/XRD.html)
4. Berglund, P.L. (2006). *Austenite*. Retrieved from Austenite. Daniel Huber, L.V.  
(2021). *The effects of sintering temperature and hold time on densification, mechanical properties and microstructural characteristics of binder jet 3D printed 17-4 PH stainless steel.*