

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:郭宗鑫上尉

派赴國家/地區:美國

出國期間:107年8月12日至109年8月16日

報告日期:109年9月9日

摘要

本次進修係奉國防部 107 年 8 月 2 日國人管理字第 1070013222 號令核定赴美國理海大學(Lehigh University)進修機械工程碩士學位，進修時間自 107 年 8 月 15 日至 109 年 8 月 14 日止。職於規劃期程 2 年間完成碩士學位修業並取得碩士學位，並於民國 109 年 8 月 16 日返國，並依返國防疫規定執行居家隔離 14 天，另遵單位規定執行乙週自主健康管理，並於 9 月 7 日返回軍備局第二 0 二廠辦理報到手續。本心得報告係針對個人在美國期間之進修過程及論文研究等心得做一整理，內容格式分為目的、過程、心得與建議、參考資料來源等項。本次碩士論文範疇主要針對鎢合金金屬粉末 3D 列印執行研究，探討其金屬粉末經過雷射列印之機械性質及微結構與列印參數最佳化之關係，以期獲得高密度之樣品，以利後續機械性質之研究。

目錄

壹、目的	3
貳、進修過程	3
參、心得建議	19
肆、參考資料	21

壹、目的

本次係奉國防部 107 年 8 月 2 日國人管理字第 1070013222 號令，赴美國理海(Lehigh University)機械工程研究所進修碩士學位 2 年，主要研究項目針對鎢合金金屬粉末 3D 列印樣品之機械性能成果與列印機器參數關係之探討，進修期間自 107 年 8 月 15 日至 109 年 8 月 15 日止，並於 109 年 8 月份達成碩士學位要求後取得碩士學位，於核定修業期間(含交通往返路程)前返廠辦理報到手續。

本報告係依「行政院及所屬各機關出國報告綜合處理要點」相關規定撰擬，旨在提供進修經驗及論文研究心得予相關人員參考運用。

貳、進修過程

1、進修學校之校園與環境簡介

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。



圖 1：伯利恆鋼鐵工廠舊址

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。另外學生主要課外學習的區域為兩座圖書館，圖 2 為該校創校保持迄今的圖書館，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，如圖 3。

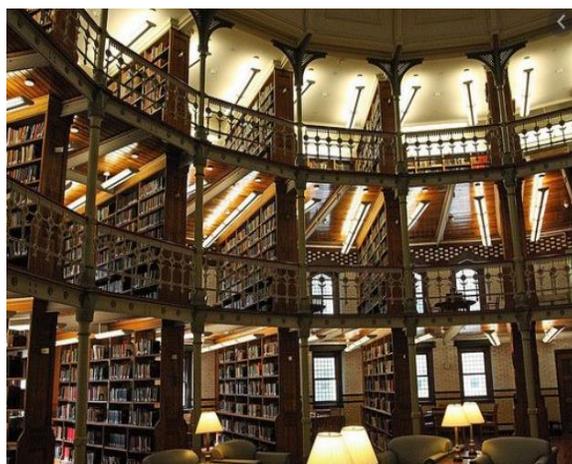


圖 2：理海大學圖書館 1



圖 3：理海大學圖書館 2

2、 碩士學歷修業規定及歷程

(一)、課程修業：

理海大學針對機械系工程學碩士畢業標準總共為 30 學分，其中碩士生各課程主要以 3 學分計算，合計總需 10 門課，由於碩士進修可分為撰寫論文或不撰寫論文兩者，職屬於前者，故按照修業規定及進修期課程主要分為核心課程主修 5 門、專業課程選修 3 門以及論文研究項目 2 門。

在課程選修上，每學期選課前均需與指導教授討論並經同意後，方可獲得選課密碼以進入選課系統後依指導教授建議進行選課，逾期者屬個人疏失並將會以罰金處分。有關職的選修課程介紹為核心主修課程為：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、複合材料學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，每學期至少需舉行期中考或期末考各乙次以上筆試、不定期隨堂考、每兩至三週專題實作及簡報乙次、每週均

有作業、期末專題總報告(含口頭及書面)，所有簡報、書面報告、大小考、出席率及課程中表現度均納入計算成績。由於制度嚴謹，學生學習氣氛各個努力求上，並體現大家自我求知學習之渴望，職也時時刻刻盡心盡力，努力充實自我，否則將無法如此順利達成修課成績要求。

(二)、研究項目及論文：

每個研究生均必須由指導教授帶領，加入指導教授研究團隊並賦予論文研究題目，並進行研究實驗設計及數據蒐集與分析，定期回報相關研究成果，並與指導教授進行研究方向及階段成果討論，以訂定各個階段所需執行之實驗，並參考及研讀相關題目之書籍、發表論文或期刊，將其實驗紀錄及成果與研討結果撰寫成論文，經指導教授及系主任於論文簽名頁依序簽屬，此時將可由校方研究生辦公室循系統於網路發表後，即達碩士畢業標準並准予被授予碩士學位證書。

3、 論文研究

(一)、論文題目及摘要

本次碩士論文題目為「鎢合金粉末雷射融合研究」，本項目係有關 93%鎢-5.6%鎳-1.4%鐵之鎢合金金屬粉末透過金屬列印方式，探討其雷射融合成果之研究。該粉末材料係由全球鎢金屬及粉末公司(Global Tungsten and Powder Corporation)提供，並以選擇性雷射融化(選擇性激光融化)製造方式執行樣品製造及研究。由於該種合金之耐火特性相當高，樣品的緻密化具有相當的挑戰性，因此，須根據樣品密度結果，設計並優化大量不同的列印參數組合，並分析其雷射能量密度和掃描速度對密度變化的影響程度。

後續樣品的微結構及硬度均為重點研究項目，經實驗，每個樣品表面之微結構上均發現裂縫和孔洞，此研究指出最初較低的雷射能量密度導致列印樣品中產生的開孔相互連接，造成密度僅為 39%(理

論密度)，後續樣品在優化的列印參數下提高能量密度，並成功改善密度結果，在孔洞較少的樣品中獲得了超過 99% 的理論密度。此外，列印程序中由於鎢合金內不同金屬之間的熔點差異很大，鎢金屬大約為鎳金屬及鐵金屬之兩倍以上，在列印過程中產生了兩個主要相態，鎢相態和鎳-鐵相態，雷射曝光時間越長，掃描速度越低，提供鎢粒子於鎳-鐵金屬液體相態中更長的溶解時間，使得鎢金屬粒子有效的重新排列及沉澱而獲得更高的密度結果。

(二)、研究背景簡介

選擇性雷射熔融技術是一種將金屬粉末以層層堆疊並以選擇性雷射燒結方式，逐層完成零件構建的製造技術，它可以透由選擇性地融化粉末並堆疊成三維複雜幾何物體，構建過程始於電腦輔助設計 (Computer Aid Design) 技術，該技術首先針對材料特性進行編程設計，然後將其分切成多個水平薄層，堆疊成型。如圖 4 所示，首先將金屬粉末從進料裝置送至左側粉末輸送系統，其次，左側活塞上升，根據電腦編成之列印粉末層厚度，粉刷移動將粉末推送至右側雷射區域，然後粉末在高功率雷射下於選定區域開始融化燒結，每層均單獨列印且快速固化，融化並固化的粉末不僅於單層互相燒結，且至少融化已固化之上一層粉末頂部，並將各層熔融或燒結於一體，每層粉末融化及冷卻固化過程完成後，右側雷射區域活塞下降，左側粉末待置區活塞上升，重複處理週期，並在前一層已建構之粉末層上逐層構建，直到三維產品層層累加成形。

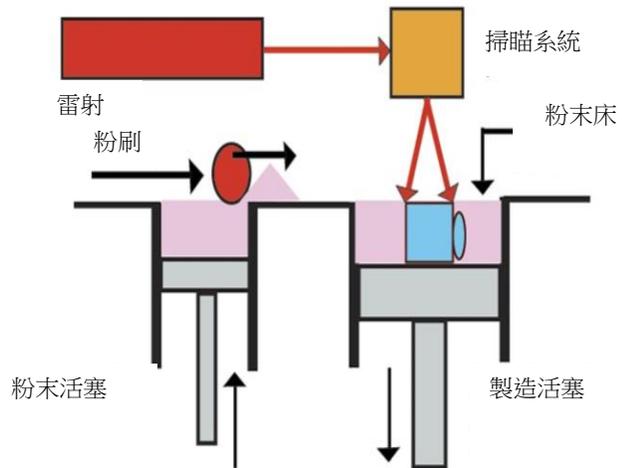


圖 4：選擇性雷射熔融製造方式示意圖

後續評估列印參數對微結構的影響緻密化，選擇並應用了不同的主要加工參數，包括在整個研究中始保持不變的鋸齒形掃描策略、雷射點距離、雷射間距、粉末層厚度、雷射曝光時間和雷射功率，說明請參閱圖 5。

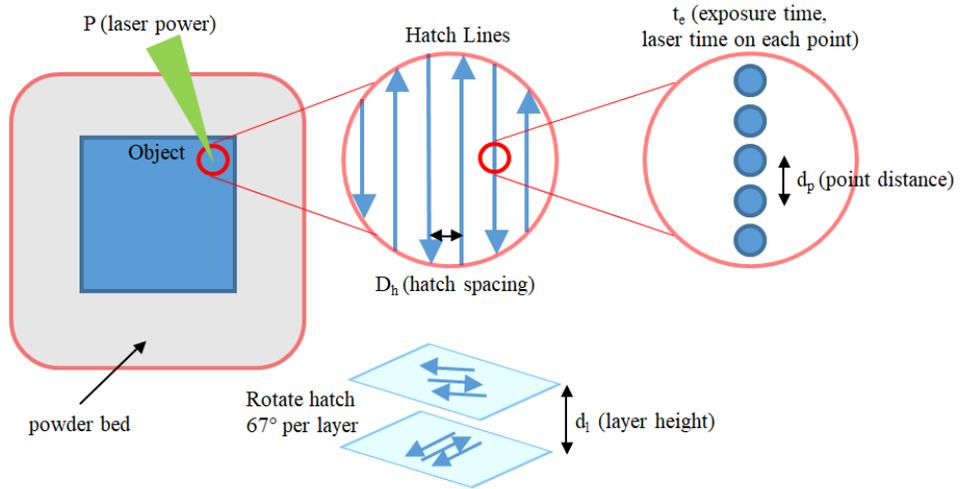


圖 5：過程中的處理參數說明。其中 P 是雷射功率(瓦特)， t_e 是曝光時間(微秒)， d_p 是雷射點距(微米)， d_h 是雷射間距(微米)，而 d_l 是粉末層厚度(微米)。

將不同的列印參數組合成之二維及三維雷射能量密度參數(E)和等效掃描速度(V)，比較和樣品的緻密狀態，以下三項公式為後續實驗應用重點。

$$2 \text{ 維空間能量密度} = \frac{P \cdot t_e}{d_p \cdot d_h} \left(\frac{J}{mm^2} \right) \quad \text{公式 1}$$

$$3 \text{ 維空間能量密度} = \frac{P \cdot t_e}{d_p \cdot d_h \cdot d_l} \left(\frac{J}{mm^3} \right) \quad \text{公式 2}$$

$$\text{等效掃描速度} = \frac{d_p \cdot 10^3}{(t_e + 10)} \left(\frac{mm}{s} \right) \quad \text{公式 3}$$

(三)、研究設備與方法

研究中兩種鎢合金是由「粉末混合」和「預合金粉末」之粉末製造方式製造而成，即粉末 1 和粉末 2，其內成份大致相同，本次實驗所使用之選擇性雷射熔融過程均在 Renishaw AM400 3-D 列印機下執行，考量實驗階段僅使用較小份量的粉末，故於列印機內加裝縮小

體積設備(RBV, Reduced Build Volume)執行，此設備涉及一個機械活塞系統，該系統允許處理和測試體積小之成品列印，該系統可以快速建置準備並降低加工成本，這是本次研究和設計的理想選擇。Renishaw 列印機組沉積粉末使用重力進料系統，圖 6 及 7 顯示了上述列印設備，將幾何尺寸立方體為 5x5x5 毫米的樣品列印於縮小體積設備中，本次研究總共列印了 11 個樣板，共計 356 個樣品，並從中選擇了 28 個樣品進行密度優化實驗。



圖 6：Renishaw AM400 3D 列印機

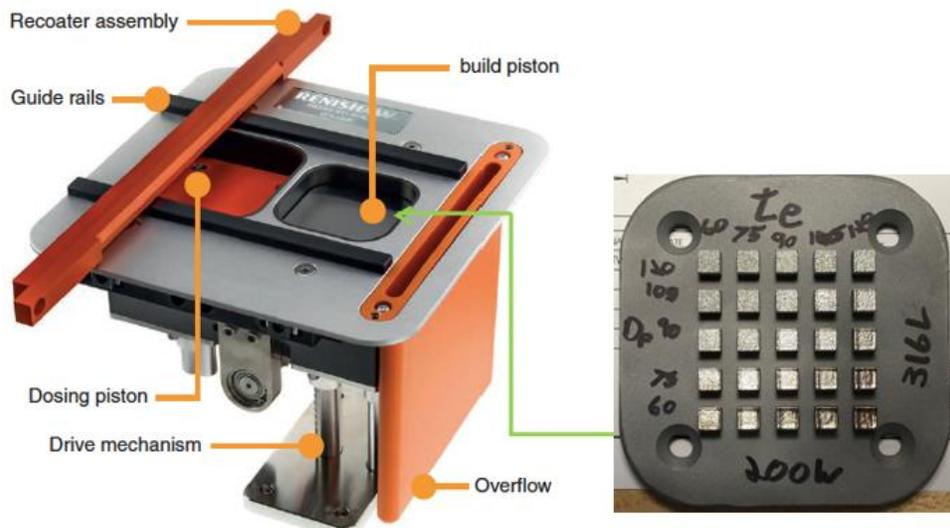


圖 7：縮小體積設備、列印樣板及樣品

(四)、最終樣品分析

在分析了列印參數與樣品密度之間的關係後，最終於 358 個樣品中選擇了 28 個樣品，這些樣品的光學密度最低從 39.9%到最高約 100%，並從 8 個不同參數下列印之樣板中，觀察影響樣品密度的關鍵原因及密度結果。

實驗針對上述 28 個樣品進行了顯微硬度測繪，其中光學縫合圖像顯示了微觀結構中具有部分硬度較高之成份位置。然後從中挑選出低密度和高密度的樣品，用以掃描電子顯微鏡執行樣品成份分析，以確認較低熔點的鎳和/或鐵是否於雷射過程中熔融或蒸發。

1. 密度測量

為了測量樣品的光密度，應用了 ImageJ 軟件。首先樣品表面的圖像由光學顯微鏡拍攝並保存為.png 文件，並在 ImageJ 軟體上開啟，然後將圖像類型更改為 8 位元，然後選擇二元選項，可以清楚地顯示孔洞或裂紋，最後，閾值選項被用來將緻密的部分變成紅色，並顯示出孔洞的大小，該軟件可以計算紅色孔洞或縫隙部分與樣品光滑表面總面積的百分比。以粉末 1-樣品 3 的樣品為例，樣品的光密度為 55.81%，如圖 8 所示。

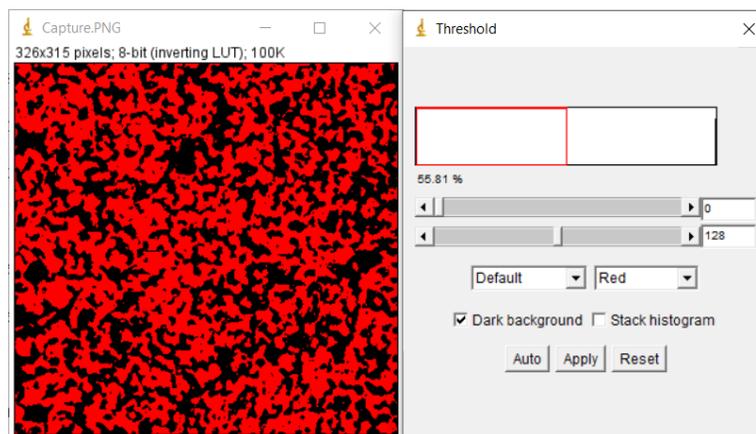


圖 8：使用ImageJ 軟件進行光密度測量的範例。

粉末 1-樣板 3 的樣品是具有良好質量的第一個範例，顯示在 200 瓦雷射功率下搭配 20 微米粉末層厚度的樣品幾何完整度高，無過度熔融跡象，樣品拋光後表面採用光學顯微鏡進行拍攝，圖像顯示於圖 9 中，同一樣板上的樣品密度由左上至右下顯示出明顯低至高的趨勢，雷射曝光時間範圍為 100 至 500 毫秒，點距離範圍從 130 到 70 毫米，並套用掃描速度公式 3，說明掃描速度越慢，提供更充足的掃描及曝光時間，且更短的雷射點距離將產生更高的密度。

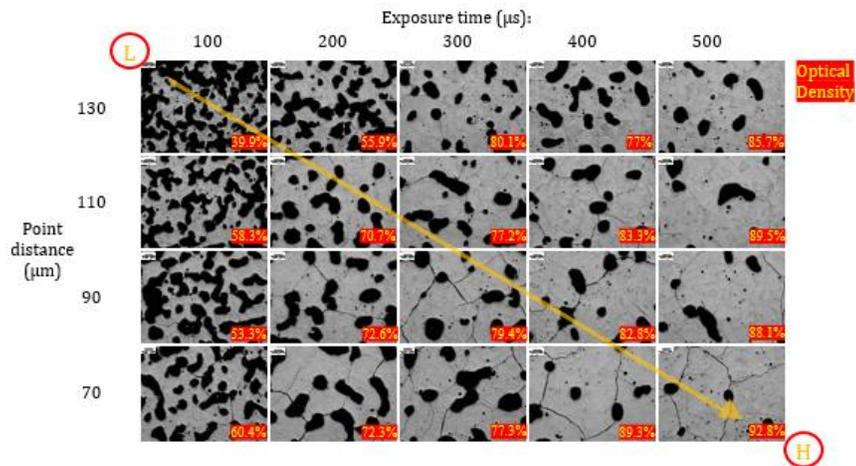


圖 9：粉末 1-樣板 3 的樣品密度分布圖(“L”和“H”代表最低和最高密度)。

為獲得更高的樣品密度，圖 10 中顯示的密度趨勢表示曝光時間增加從 600 到 800 微秒(增量為 100 微秒)，經實驗顯示對於粉末 1-樣板 4 -20 微米的粉末層厚度，此次參數調整可以實現密度提升之期望。如圖所示雷射點距 90 及 110 微米可獲得超過 99% 的密度成果，經本次調整，樣品間不再有明顯密度趨勢，且確認 130 微米點距離的樣品密度效能較差，因此在最終的構建實驗中取消了此距離設置。

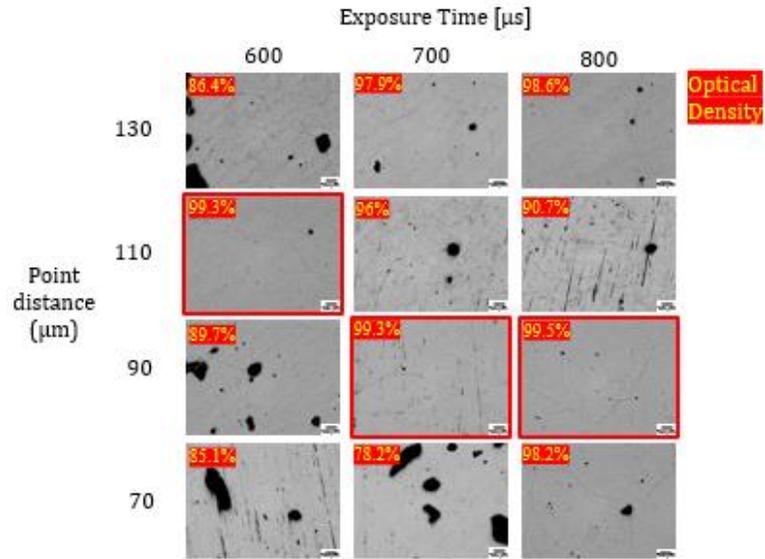


圖 10：粉末 1-樣板 4-20 微米粉末層厚度的樣品密度分布圖。
(高密度樣品以紅框標示)

在得知更長的雷射曝光時間可能提高密度後，粉末層厚度隨之增加到 30 微米，以分析其厚度對最終密度的影響。如圖 11 所示，粉末 1-樣板 4-30 微米厚度之樣品最高密度僅為 92.3%，這說明了通過增加粉末層厚度，導致三維雷射能量密度的下降且不足的狀況產生，故本次實驗結果顯示粉末 1 採用 20 微米粉末層厚度列印之密度結果比 30 微米高得多，因此 20 微米厚度被確定為之後最終構建的優化參數之一。

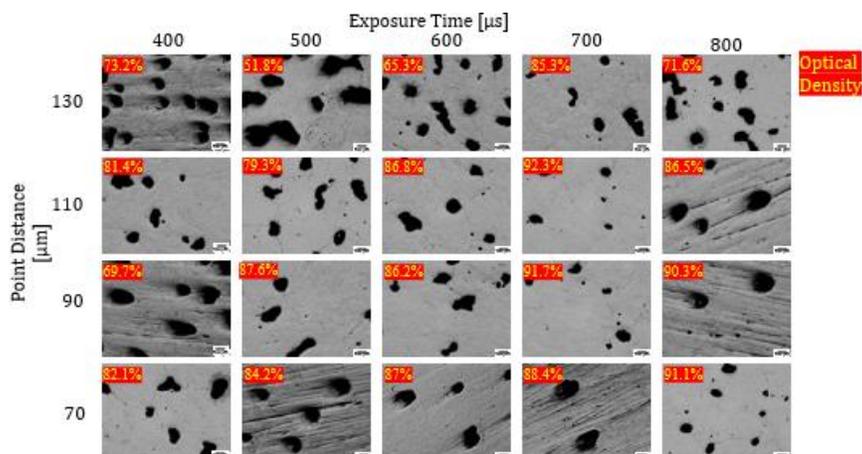


圖 11：粉末 1-樣板 4-30 微秒粉末層厚度的樣品密度分布圖。

粉末 2-樣板 1-20 微米的粉末層厚度如圖 12 所示。最低密度於在 400 微秒曝光時間和 130 微米點距離產生，最高密度發生於 500 微秒曝光時間和 70 微米點距離，且超過 99% 的理論密度，在這種情況下，結果顯示曝光時間增加範圍從 600 至 800 微秒不會產生比 500 微秒更高的密度結果，但是密度仍然於 600 和 700 微秒中可以達到 98.7% 和 98.9%。

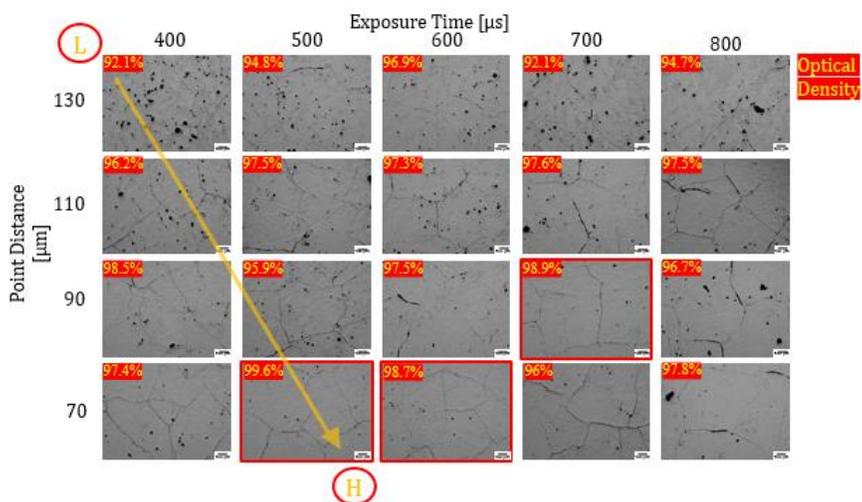


圖 12：粉末 2-樣板 1-20 微米粉末層厚度的樣品密度分布圖。(L 和 H 分別代表最低和最高密度，高密度樣品用紅線框註)

通過應用相同範圍的列印參數來增加粉末層厚度，粉末 2 樣本從 20 增加到 30 微米以研究三維能量密度減少對樣品密度的影響。如圖 13 所示，較高的樣品密度發生於 70 至 90 微米的點距，最高密度在曝光時間 800 微秒處發現，此結果可以用以下事實解釋：囿於不同於粉末 1，粉末 2 的金屬粒子分布較為均勻且外表圓滑，粉末層的厚度從 20 微米增加至 30 微米使得三維能量密度總體上降低了，曝光時間越長，圓滑金屬粒子於燒結中更有效結合在一起，因此 20 微米的厚度可產生較高的樣品密度。

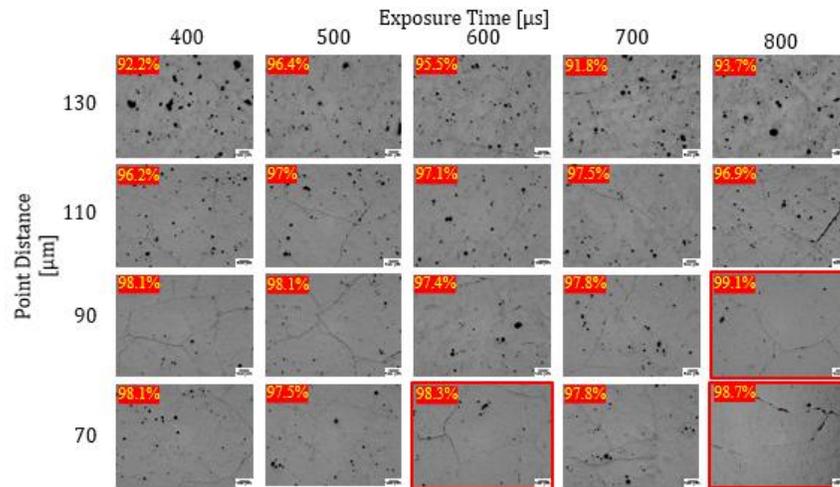


圖 13：粉末 2-樣板 1-30 微米粉末層厚度的樣品密度分布圖。
(高密度樣品用紅線框註)

為了獲得更高的密度結果，通過分析先前的列印樣本結果優化了列印參數。針對粉末 1，選擇的粉末層厚度相較 30 微米，20 微米產生較高密度；對於粉末 2，20 和 30 微米粉末層厚度均可產生高密度。以下為點距為 70 至 110 微米及曝光時間 400 至 800 微秒。

各粉末的最終列印版本均以 120、160 及 200 瓦的雷射功率進行列印，從粉末 1 最終生成的密度結果得知，其僅適用於以 20 毫米粉末層厚度列印樣品，且相較 200 瓦雷射功率，120 和 160 瓦可

獲得更高的樣品密度，如圖 14(a)所示，至於粉末 2 最終生成的密度，於這些雷射功率範圍設置內皆有良好的樣品密度結果，請參見圖 14(b)(c)。

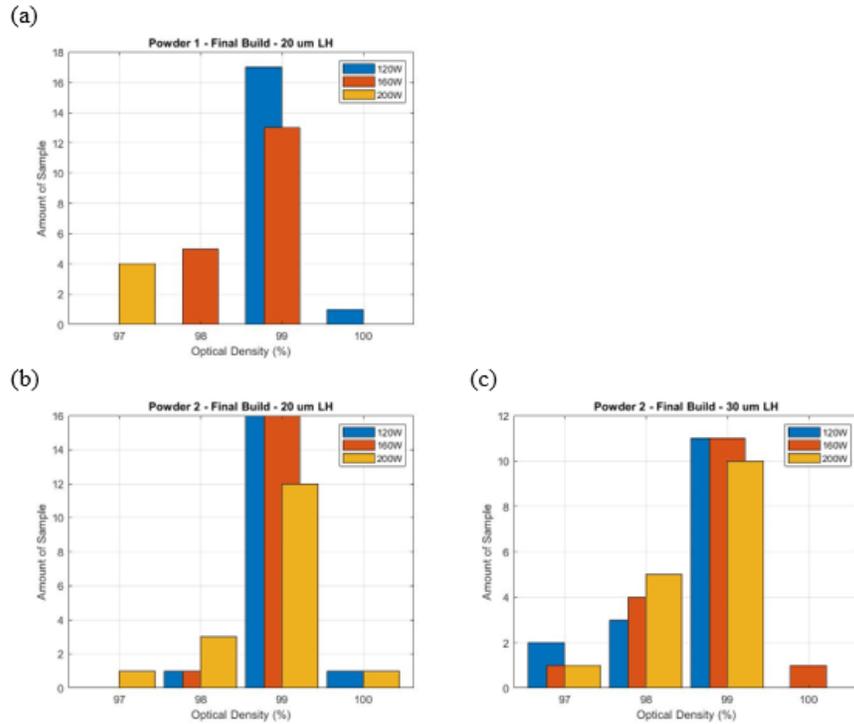


圖 14：120、160 和 200 瓦下的最終組件的密度分佈。(a) 粉末 1-20 微米粉末層厚度。(b) 粉末 2-20 微米粉末層厚度。(c) 粉末 2-30 微米粉末層厚度。

2. 微觀結構及成份

從粉末 1 或 2 列印的樣品中，經針對各粉末微觀結構之觀察，可確認 2 者屬具有相似成份，樣品的大範圍能量散射 X 射線譜 (Energy-dispersive X-ray spectroscopy, EDS) 成份分析及液相燒結 (Liquid Sintering) 理論可以解釋某些鎢粒子於表面拋光加工時脫落的情況。反覆的列印過程中，高熔點鎢粒子僅部分融化，而融化的鎢粒子在鎳-鐵液相的驅動力作用下，互相接觸並於冷卻過程中起成核作用，於液相中形成晶粒，此狀況下發現表面微結構具有

三個明顯不同區域：空隙，脊部和富含鎢的晶粒。如圖 15 及 16 所示，鎢含量約 98%且均勻分佈，鐵和鎳主要分佈於脊部 (Ridge) 形狀上，列印過程中，一部分鎢顆粒融化並溶解在液相基質中，使得鎳-鐵含量較高，鎢粒子在鎳-鐵液相中的毛細作用力和潤濕能力驅使下集中，因此於鎳-鐵基體包圍的脊區域上發現鎢含量更高的晶粒。另外，一些鎢粒子沒有相互接觸融合，而是停留在鎳-鐵液相態基質中，在液相基質中發現只有約 90%的鎢和 10%的鎳-鐵，相較於富有 98%以上之鎢含量部分低。隨著急速凝固(冷卻)過程，那些融化和溶解的鎢粒子在鎳-鐵基體內凝固，部分沒有融化的鎢粒子也有燒結的機會，且鎢粒子亦會以固體粒子於少量鎳-鐵液相滲透，並形成具有豐富鎢晶體含量之區域。

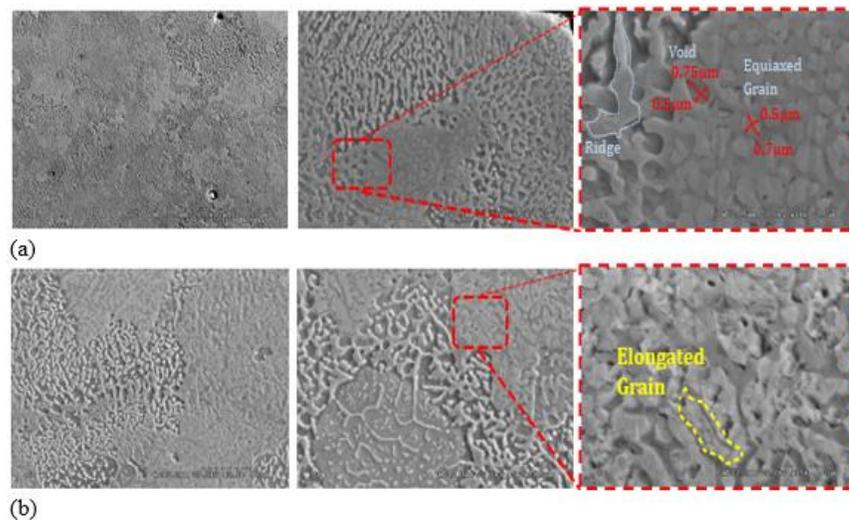


圖 15：在 (a) 粉末 1 和 (b) 粉末 2 的 SEM 圖像上發現的脊區域、

空隙和晶粒。

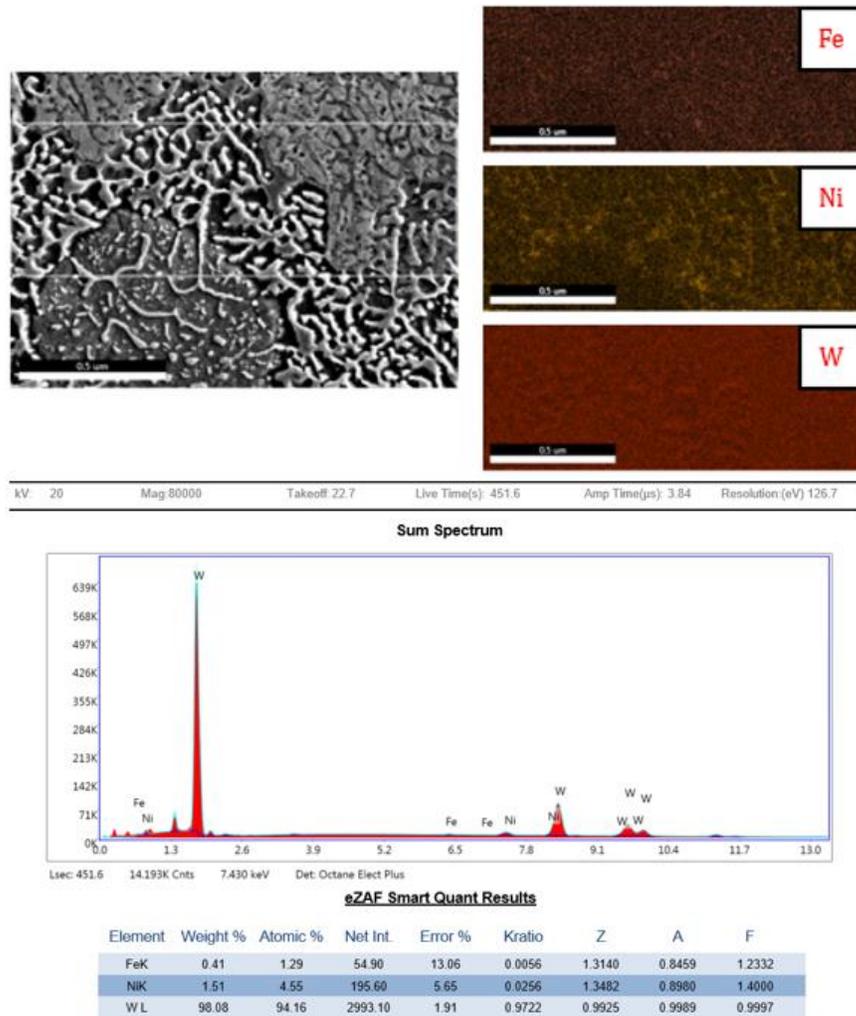


圖 16：能量散射 X 射線譜的元素分佈和微觀結構觀察。

3. 實驗討論

根據實驗結果選擇不同的列印參數組合初步實驗，並應用於選擇性雷射熔融製造的運用中，計算出的二維和三維能量密度和掃描速度確定分別為影響最終樣品密度的最關鍵值。通過減少雷射功率至 160 和 120 瓦，粉末層厚度至 20 微米，並增加了雷射曝光時間達 400 至 800 微秒，完成實驗參數優化並獲得了超過 99% 的緻密化穩定之成果。

本次實驗結果表示，雷射功率和掃描速度是主要因素，這些因素影響選擇性雷射熔融過程中鎢合金粉末製造緻密化行為，獲得的高密度結果顯示，對於極高的雷射能量密度輸入，可以於緻密化執行的實驗中獲得使用各種掃描速度設置的線性趨勢，然而這些針對通過選擇性雷射熔融製成的鎢合金粉末結果，有助於製造更高密度的鎢合金成品研究，通過研究這些優化列印參數下製成的鎢合金性能，獲得了高密度和高硬度的結果，對為未來鎢合金選擇性熔融工業增添了研發及運用價值。

考量本次研究期間遇 COVID-19 新冠肺炎疫情影響實驗室使用規定，未能針對以優化的加工參數列印的高密度樣品執行更多機械性能研究，後續本項目應進行機械性能測試，例如拉伸測試，以更加了解所研究的兩種粉末拉伸機械性能，方能與任何其他重鎢合金進行比較，完整發展該項材料潛在製造技術及應用。

參、心得建議

1、 基礎研究能力

於美國求學的第一學期的第一週開始，就己能體會到不同教學文化所產生的壓力，課業繁忙加上語言的不完全適應，這股壓力使各個國際學生共同成長，課業上主要都需靠自己的努力積極進取去消化老師上課內容，這就是美國教育體系下培養學生有獨立自主的思考能力，於美國上課時，學生提問次數頻繁，教授由衷樂於接受學生問題的挑戰，因此非常鼓勵學生發問，不管是課業或是研究領域的指導教授都如此，因此培養學生時間管理以及基礎研究能力，而非只注重於考試成績。相關的課程進度、考試測驗及課後作業或實作等等，都是培養學生針對自己的專業領域有所想法，並非制式化的要求，很多時候都是沒有標準答案，必須由學生身體力行，才能有所領悟。另外在研究中，指導教授非常重視研究室各學生討論並研

討內容，雖然各有不同研究領域，但是討論及提問就是最好吸取知識的來源，並從中了解自己不足的基礎概念，進而有效率去提升自我並推動研究，討論與發問的能力，是職於本次進修獲取最寶貴的工具之一。

2、 語文能力

身為一位於美國進修的國際學生，英語絕對是非常重要的能力，雖然在我國教育體制下，幾乎所有人都略懂英文，多數卻也只應付於學業上，職覺得英語能力是個工具，藉由此項工具可以更加輕鬆且深刻體會及了解不同文化，在美求學的考驗不僅僅是原文書或全英語授課，食衣住行、社交能力及專業報告等，都需要一定基礎的英文能力，才能融入群體及異地生活，所以英語能力非常重要。

3、 社交活動

理海大學不僅非常用心於學生活動上，更是對國際學生的照顧及推廣非常重視，學校各個社團及國際學生辦公室都會於每學期的特定時間舉辦各項活動、演講及研討會等，內容舉凡生活、節慶、文化、性別、家庭、職場及其他專業題目等，每次都會有非常多學生參與，使得學生們透由這些活動認識彼此，了解不同文化並建立更多元的世界觀，考量課業壓力繁重，學校也非常重視學生心理諮商，使得學生們於校園生活多采多姿，且深受照顧。

4、 生活體悟

建議即將出國進修的同仁，都能於網路上搜尋台灣於美國相關的同學會或互助社團，從中可以提前了解自己將前往的地方文化特色及生活方式，如此可以降低旅外前的不確定因素所造成的壓力及不安，並且可以更安全及更有效率的打點生活，安心將心思放在學業上，在美生活除了學業要全力以赴，生活上也要給自己時間去適應，舉凡銀行開戶、餐飲文化、商店

文化、證件(駕照)取得、交通法規、買賣車輛及醫療保險等等，都需花時間去了解並體悟，套用前面所提到討論及發問的能力，將此應用於生活上將有事半功倍的效果。

5、 研究運用

本廠為國家所屬重要且成熟兵工廠之一，肩負國軍火砲生產重責大任，具有相當成熟之機械加工能力，職於本次進修領域屬金屬粉末加工，於現今機械加工工業上屬前衛工法之一，期盼將研究過程之所學經驗運用於單位生產或研究領域，以此提升研究與加工多元及便利性。

肆、參考資料

- 1、 Li, J., Wei, Z., Zhou, B., Wu, Y., Chen, S., & Sun, Z. (2019). Densification, microstructure and properties of 90W-7Ni-3Fe fabricated by selective laser melting. *Metals*, 9(8), 884. doi:10.3390/met9080884
- 2、 Iveković, A., Montero-Sistiaga, M. L., Vanmeensel, K., Kruth, J., & Vleugels, J. (2019). Effect of processing parameters on microstructure and properties of tungsten heavy alloys fabricated by SLM. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 82, 23-30. doi:10.1016/j.ijrmhm.2019.03.020
- 3、 Chen, H., Zi, X., Han, Y., Dong, J., Liu, S., & Chen, C. (2020). Microstructure and mechanical properties of additive manufactured W-ni-fe-co composite produced by selective laser melting. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 86, 105111. doi:10.1016/j.ijrmhm.2019.105111
- 4、 Humail, I. S., Akhtar, F., Askari, S. J., Tufail, M., & Qu, X. (2007). Tensile behavior change depending on the varying tungsten content of W-Ni-Fe alloys. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 25(5), 380-385. doi:10.1016/j.ijrmhm.2006.12.003

- 5、 Zhou, X., Liu, X., Zhang, D., Shen, Z., & Liu, W. (2015). Balling phenomena in selective laser melted tungsten. *Journal of Materials Processing Tech*, 222, 33-42. doi:10.1016/j.jmatprotec.2015.02.032
- 6、 Weber, M. (2018). What are different types of 3D printing?. *Meee - Mechanical Electrical Electronic Engineering*. Retrieved from <https://www.meee-services.com/what-are-different-types-of-3d-printing/>
- 7、 理海大學， www.lehigh.edu
- 8、 郭宗鑫， 鎢合金粉末雷射融合研究(碩士論文)