

出國報告(出國類別:進修)

赴美國理海大學進修機械工程博士 心得報告

服務機關:國防部軍備局第二〇二廠

姓名職稱:黃盟富少校

派赴國家/地區:美國

出國期間:103年8月9日至107年8月10日

報告日期:107年9月10日

摘要

本次進修係奉國防部 103 年 7 月 14 日國人培育字第 1030011666 號令核定赴美國理海大學(Lehigh University)進修機械工程博士，進修期間自 103 年 8 月 9 日至 107 年 8 月 13 日止。職於 4 年進修期間完成修業取得博士學位，另於 8 月 10 日返抵國門，並於當日向軍備局第二 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。本次研究內容主要係針對航太暨軍事應用材料鈦 β 合金經過雷射焊接後之微結構及機械性質變化進行探討，並將該材料進行焊後熱處理，以期獲得較佳之材料機械性質。

目次

壹、	目的.....	4
貳、	進修過程.....	4
參、	心得與建議.....	17
肆、	參考資料.....	20

壹、目的

本次係奉國防部 103 年 7 月 14 日國人培育字第 1030011666 號令，赴美國理海大學(Lehigh University)進修機械工程博士 4 年，係以雷射焊接鈦合金及其熱處理為主要研究方向，進修期間自 103 年 8 月 9 日至 107 年 8 月 13 日止，並於 107 年 8 月份完成所有學位要求後取得博士學位，於核定修業期限前返廠辦理報到手續。

本報告係依據「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，提供相關人員參考運用。

貳、進修過程

一、進修學校暨環境介紹

理海大學(Lehigh University，圖 1)係一所以工程科學著稱的美國私立研究型大學，於 1865 年在美國賓州伯利恆(Bethlehem)市成立。該校為全美國綜合排名前 50 名之大學，其中最佳排名可達全美排名第 12 位。理海大學設有四個學院，分別是羅森工程與應用科學學院、文理學院、商學院和教育學院，職所進修之機械工程學系即屬於羅森工程與應用科學學院。全校大學部及研究生人數每年約 7 千餘人，是一所典型的小型私立大學。



圖 1:理海大學校徽及標誌

理海大學擁有 3 個校區，主要校區 Asa Packer 位於伯利恆市南區、Mountain Top 為主要研究設施區、Murray H. Goodman 為各種體育設施區，總面積約 1600 英畝，涵蓋了 100 英畝之教學區及 180 英畝之運動場地。在圖書館部分，理海大學擁有兩座圖書館，其中乙座圖書館係自創校以來即使用至今(如圖 2、3)。兩座圖書館共計有 120 萬冊藏書和 21500 冊期刊和雜誌。除此之外，部分美國政府重要之聯邦歷史文件亦藏於該校圖書館內。學生亦可利用電腦教室電腦或自用電腦，下載各種學術期刊及館際合作服務，在學術資源之豐富性及方便性上，足供研究工作所需。



圖 2: 圖書館外觀



圖 3: 圖書館內部一隅

二、博士學程修業規定

理海大學針對機械工程博士學程規定之進修期程，主要概分為核心課程(Core Course)修課、博士生資格考(General Exam)、研究論文提報(Dissertation Proposal)、博士論文口試(Defense)與論文提交。前述各階段均需逐步完成後方可進入下一階段，亦即學校逐步在每一階段培養博士需具備之能力，同時也在每一階段進行考核，若無法順利通過每階段之考試，即無法繼續博士學程修習。現就各主要期程分述如后：

(一) 核心課程修課：

為使博士生具備應有之基礎研究能力，機械工程學系要求博士生至少需要修滿 48 個課程學分，其中 15 個學分需以機械系核心課程為主，且修課平均成績需達標準以上方屬完成，核心課程為：工程數學 I、工程數學 II、高等流力學、進階產品整合、高等熱力學、高等力學、數值模擬等。另有副修其他機械系課程，如高等數值模擬、AI 人工智慧、機器人模擬、進階流力學、進階熱力學、進階力學、高等工數等。修課期間，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、每兩至三周專題實作及簡報乙次、每周均有作業、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。因此在修課期間需兢兢業業、戮力以赴爭取各項分數，否則可能無法順利達成修課成績要求。若核心課程修課成績未達要求，則僅能進修碩士，而無法進修博士學位。此外，在課程選修上需先經指導教授同意後，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。

(二) 博士生資格考

當核心課程完成修課且平均成績達標準以上後，經由系上研究生秘書審查後即可準備本資格考。首先需確認擔任口試委員名單，指導教授為口試主任委員，另尚需三名以上口試委員，其中至少兩

名需為機械系教授。在組成口試委員會後，所有委員將合議出資格考題目，並將乙篇參考文獻提供予受試人，該員於獲得該題目後須於兩週內完成乙篇書面報告，並於繳交後立即進行口頭簡報。簡報後，口試委員立即針對書面及簡報內容進行提問，受試人須當場進行答復，考試結果會由口試委員投票決議通過與否。若未通過，學生可有乙次機會進行複試。若仍未通過，則僅能進修碩士，無法繼續進修博士學位。

(三) 研究論文提報

博士生需與指導教授討論並確定研究主題後，針對該主題進行資料蒐集及實驗設計，並須依實驗設計進行實作以獲得初步實驗結果。此時可申請進行研究論文提報，前述相關資料須整理成書面報告後交口試委員，並須準備簡報以向所有口試委員進行說明，口試委員將針對初步實驗結果及後續研究規劃進行口試。博士生通過此審查後，再經工程學院秘書認證後即成為博士候選人。

(四) 博士論文口試

取得博士候選人資格後，即可依前述研究規劃及口試委員建議逐步完成實驗及研究。所有研究成果必須綜整並完成博士論文撰擬，博士論文需交所有口試委員審查，在獲指導教授同意後，即可安排博士學位口試。此口試不但需所有口試委員出席，且須提前乙周公告口試時間及地點，以開放其他教授、教職員或研究生參與旁聽及提問。因此博士候選人不但需要報告呈現所有研究成果，且需答復所有參與者之問題。最後將由所有口試委員進行投票表決是否通過博士論文口試。

(五) 論文提交

即使通過博士論文口試，指導教授及口試委員仍會提出修訂意

見以供修訂論文內容。修訂後之論文仍須在經指導教授及口試委員認可後，依次於論文內頁完成簽名。此時即可將論文循系統呈與系主任、工程學院院長及相關行政部門作最後審查，通過後，即可被授予博士學位證書。

三、研究方法及內容

本研究主要係針對鈦 β 合金 Ti1023 經過雷射焊接後之微結構及機械性質變化進行探討，並將該材料進行焊後熱處理，以期獲得較佳之材料機械性質。後續在本節中將針對此研究主題進行較深入之介紹：

(一) 鈦及其合金

鈦係佔地球上總元素之第四多儲量之金屬(儲量第一至第三多依次為鋁、鐵、鎂)，粗估在地殼上約佔有 6%之含量。因為其高化學反應特性，鈦在自然界中大部分係以 FeTiO_3 或 TiO_2 之型態存在。在元素週期表中，鈦之原子量為 22、原子重為 47.9g/mol。鈦首先在 1791 年由英國礦物學家 William Gregor 發現，並被德國化學家 Martin Heinrich Klaproth 命名為鈦。但是，因為鈦極容易與空氣中的氧、氮、氫等原子進行反應，因此純鈦是非常困難獲得的。直到 1940 年，由一位盧森堡化學家 Kroll 提出了製造純鈦之提煉方試(又稱為 Kroll 製程)，該製程係在一氫氣中，將 TiCl_4 與鎂進行反應後即可提煉出純鈦。因其形狀呈海綿狀，故又稱為海綿鈦，而此純鈦製造方式的提出也允許及擴大了鈦的應用方式及範圍。

鈦因其特有之機械性質，而廣泛的應用在企業界，尤其是航空產業及賽車產業。第一個也是最重要的特質是其高強度/密度比，相較於其他金屬，在相同強度之下，鈦可以有效的降低其體積及重量，簡而言之，鈦擁有高結構效率。例如與鋼做比較，鈦之強度與

鋼近似，但其密度僅有鋼的 60%。另外，相較於鋁或鎂，雖然該兩項金屬均有較鈦低之密度，但該兩項金屬強度僅有鈦的 1/3。因此，在設計航空引擎、飛機架構和其主要零配件時，因其輕量化之設計需求，鈦金屬係大受注意與應用。例如，在波音 777 飛機中，不但在其使用之 GE-90 引擎使用鈦合金，其起落架上大部份之組件亦使用鈦合金。第二，鈦有極強之抗腐蝕性。在室溫時，因為鈦本身之高活性，而容易與氧結合，在物件表面形成一細緻之氧化層，此氧化層可輕易的將空氣排除在外，以避免內部鈦也曾受氧化。因此在化學界或業界都大量使用鈦製品。第三個係在較高的溫度環境中，鈦之機械性質仍可維持。鈦之熔點為 1688°C，將較於鋁或鎂，均高 1000°C 以上。此外，當溫度高於 300°C，鋁與鎂之各項機械性質將大幅降低。而鈦即使是在 600°C 下，仍可維持其機械性質。第四，鈦擁有極好之生物相容性及非磁化性，而且，鈦在人體內不易釋放出其離子。因此，鈦合金又被廣泛的運用在假牙、人工關節、人工心臟等。除了前述四項特質，鈦金屬也擁有其他特性，例如低的熱膨脹係數等。簡而言之，鈦已經廣泛的應用在太空、軍事、生化科技等領域中，同時，已有多達千種以上之鈦合金已被科學家進行研究。

純鈦之晶體結構在常溫下為 hexagonal close-packed (α 相)，一旦當溫度高於 882°C，該晶體結構將轉變成 body-centered cubic (β 相)。此外。在合金中所含之元素將影響 α 或 β 相之穩定性。例如，鋁與氧均屬於 α 穩定元素，亦即此類元素將有益於 α 相之生成；而鉬與鈳均屬於 β 穩定元素，亦即此類元素將有益於 β 相之生成；另外，還有錫屬於中性元素，此類元素將輕微的降低 β 相變溫度。因此，依鈦合金相圖(如圖 4)所示，鈦合金可已大略分成

為三大類： α 合金、 $\alpha+\beta$ 合金、 β 合金。

1. α 合金

鈦合金若在其晶體結構上以 α 相為主，且 β 相僅占小部分或甚至沒有，例如純鈦 (CP Ti) 及 Ti-5Al-2.5Sn 等均屬於本項合金。純鈦的主要特色為其極優越之抗腐蝕性，然而因為缺少固溶其他元素而造成其強度降低。藉由添加少量之鐵或氧將可有效解決此問題。在 α 合金中，主要之 α 穩定元素是鋁。一般來說，含有高濃度鋁之鈦合金將在室溫下大量形成 α 相。因此，藉由鋁方程式可計算出若鋁之重量百分比小於 9%，將可保持 α 相之穩定。此外，在本類合金中形成之 Ti_3Al 會造成合金脆化。為了解決其之低延展性問題，鉬或鐵等元素可少量加入本類合金中，以在原先 α 相中生成少量之 β 相來增加其塑性。

α 合金之焊接性極好，在焊接前後觀察其微結構，其仍然維持大量之 α 相。換句話說，在焊接前後並未造成大量之相變化，也因此不會改變其機械性質。總之，相較於 $\alpha+\beta$ 合金及 β 合金， α 合金之特色為：優良之抗破壞力、優良之焊接性、優良之抗磨耗性。

2. $\alpha+\beta$ 合金

鈦合金中，若含有 α 穩定元素及 4-6% 之 β 穩定元素，則屬於 $\alpha+\beta$ 合金。在此類合金中所含之 β 穩定元素足供在其結構中形成並保持住 β 相，因此，此類鈦合金中之 α 相增強了材料強度，而 β 相則增強了材料延展性。在鈦合金相圖中亦可觀察到 α 合金與 $\alpha+\beta$ 合金係以一麻田散態起始線 (Martensite start line, M_s) 為界。經過熱處理後，此類合金的組成相會因此而改變，且其各項機械特性也隨之改變。因此，在業界中經常利用熱處理來控制

其 β 相之組成，以達到調整材料性質的目的。此外，以時效方式或控制冷卻速率來調整 α 相之型態亦可達到類似目的。

與 α 合金及 β 合金相比較，此類合金具有以下特色：第一，因為在同時具有 α 相及 β 相之微結構組成態下，藉由控制其成分、結構型態，可以進行大範圍之材料調質，以符合實際使用需求。第二，藉由增加 α 相，可以增加材料之強度及焊接性。

3. β 合金

當鈦合金中所含之 β 穩定元素足供形成大量之 β 相，並在冷卻後仍能維持該 β 相，即屬於 β 合金。在鈦合金相圖中，此類合金位於像圖之右方，且 M_s 線無經過此類合金區，因此可知無論冷卻速率為何，此類合金仍不會形成麻田散 α 相。其中之穩態 β 合金因富含 β 相，即使是經過熱處理，仍無法增加其強度；而介穩態 β 合金之 β 相較不穩定，因此其組成相可經由熱處理進行調整。另外，此類合金之 β 相穩定度可藉由 M_o 方程式進行計算。若 M_o 值高於 10 重量百分比，則表示合金內所含有之 β 量足夠多，以抑制麻田散 α 相生成。因此，相較於前述兩種鈦合金， β 合金通常較重，這是因為此類合金需要加入大量的 β 穩定元素，而這些 β 穩定元素又比較重。另外，大量的 β 相使得此類合金擁有較好的延展性，因此也表示擁有較優良的可塑性。而若想要加強合金強度，熱處理是一個很有效的加工製程。此外，時效將可有效加強疲勞強度。

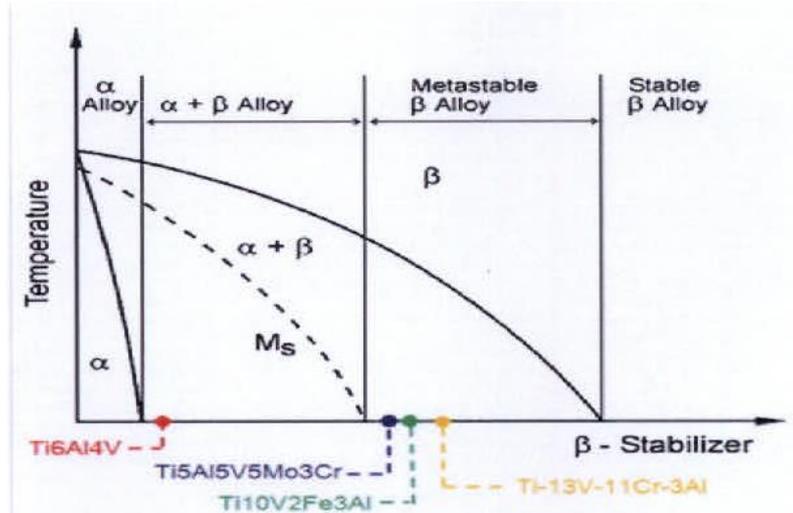


圖 4: 鈦合金相圖

以 Ti-10V-2Fe-3Al(Ti1023)來說，在一般顯微結構中係呈現 α 相分布在 β 基地上。當加工溫度高於 800°C 時 (β 相變化溫度)，所有的 α 相將轉變成 β 相。前述結構將受到製程的影響，例如均質化、成型、再結晶、退火及時效。當試片經過 830°C 熱處理 2 小時，在試片中僅會觀察到 β 相；而當熱處理溫度降到 775°C 時，微結構可觀察到 10% 的長型 α 相；而將試片經過 680°C 熱滾壓後， α 相的結構轉變成球型。因此可知，藉由控制熱處理溫度及製程，可以控制 α 及 β 相之體積比、晶體尺寸及型態等。此外，經由 Ti1023 內含之元素重量百分比，可以計算出 Ti1023 之 Mo 方程式之值為 11.45%，因此可知在 Ti1023 中不可能生成麻田散 α 相。除了微結構，Ti1023 的機械性質也被研究過。例如 Ti1023 的硬度介於 300-470HV，該硬度是受到 α 相體積量、 α 和 β 相之尺寸，以及 ω 粒子析出。

(二) 焊接製程

在業界中，某些物件因為其形狀太過複雜，或需要與其他工件相連，或需要進行修復，焊接技術可以有效的符合前述需求。以傳

統焊接方式應用在鈦或其合金上雖可執行，但仍有其問題，其中之一即其嚴重的污染。這是因為鈦是一高活性金屬，極易與空氣中之元素，例如氫、氧、氮等進行反應，而這些生成物即造成鈦合金脆化。因此，許多焊接方法被提出，以解決鈦合金焊接問題，例如雷射焊接。當鈦合金進行雷射焊接時，須以一保護氣體包圍工件，而此一保護氣體即可避免鈦合金暴露於空氣中而氧化。另一個問題即工件在焊接後，其機械性質會被降低，這是因為孔洞、相變化、焊接汙染等原因。例如 Ti-6Al-4V 焊接後，其熔融區在經過快速融化及固化過程後，微結構產生相變化而影響機械性質。而使用雷射焊接除了前述避免工件氧化，尚有其他多項優點。第一，焊道比。雷射焊接係由 Nd:YAG 發射出雷射並生成 10^3-10^7 W/mm² 之雷射束，以形成高焊接深及窄焊寬之焊道。第二是方便控制，雷射束之尺寸及強度可以設定，這有助於複雜結構之工件進行加工。第三，低輸入能量，雷射焊接可在較低的能量下完成焊接，如此可降低材料所受到之熱衝擊。當 Ti64 經過雷射焊接，工件即呈現三區：基材(base metal)、熱影響區(heat affected zone)及熔融區(fusion zone)。在基材中可以觀察到 α 相鑲嵌於 β 相中；在熱影響區中，針狀 α 相鑲嵌於 β 相中；在熔融區中， α 相仍呈現針狀，而 β 相晶粒變大了。而在機械性質部分，在熔融區之硬度係大於在基材及熱影響區之硬度；而其降伏強度、最終強度、面積縮減比、伸長率等性質在工件經過焊接後均降低。而當 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 經過雷射焊接，在熔融區也可觀察到針狀 α 相存在。此針狀 α 相是因為工件經過快速冷卻後，麻田散化後形成的。而其硬度分布曲線與 Ti64 經過雷射焊接後之硬度曲線是類似的。因為在熔融區生成之針狀 α 相係造成此高硬度結果之原因，該結構同時也造成降伏強度、最終強度及伸

長率之降低。第三種合金， β 合金 Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr 經過雷射焊接後，在基材上可以觀察到 α 粒子散佈在 β 相上；而在熱影響區可以觀察到 β 晶粒呈現等軸化；而在熔融區僅觀察到 β 相。在硬度分布方面，熔融區之硬度明顯小於基材與熱影響區之硬度，此結果與前述兩種鈦合金經過雷射焊接之硬度分布完全相反，這是因為在第三種合金之熔融區中僅有 β 相生成，而針狀 α 相之晶體結構為 HCP，故缺少 HCP 之結構表現出較低之硬度。

在焊接過程中，因為大量的能量被輸入到工件中，所以工作溫度會急遽的上升及下降，因此工件的微結構即受到此過程影響而也發生巨大的改變，同時其相關機械性質也發生降低情形。焊後熱處理(post welding heat treatment)是解決此問題最普遍使用且有效的方法。在焊後熱處理時，其製程通常是將工件重新加熱至一低於相變化溫度之溫度，然後靜置於該溫度一段時間，以供整個工件完成調質(相變化)。其原理係在提供此一能量予工件之原子排列，使其能釋放殘留應力、消除缺陷、甚至可以達到強化強度之效果。許多鈦合金經過熱處理結果被研究及提出：雷射焊接 Ti-23Al-17Nb 經過 980°C 熱處理後可增強其強度及延展性；線性磨擦焊接 TC4 經過熱處理後，其硬度值顯現出增加趨勢；同樣的，雷射焊接 Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn 及 Ti64 經過熱處理後，相關硬度也是增加的。因此可知，在經過焊後熱處理，工件之微結構發生變化，而其機械性質也隨之增強。

(三) 殘留應力

當一外力施加於一材料上，材料內部亦產生一相應壓力以承受該外力。一旦外力消失，材料內部壓力應該完全釋放並回復材料原狀。若外力消失時，材料內部壓力未完全釋放即稱為殘留應力。造

成殘留應力之來源有機械力、熱循環或相變化。一般來說，殘留應力是無法直接量測的，因此，量測殘留應力實際上是量測其應變量。許多方法可以量測材料內部應變量，例如機械、磁性、熱彈性、光彈性及繞射技術等。而在繞射技術中最常使用方式為 $\omega - d_{hkl} \sin^2 \Psi$ 法。簡而言之，此方法原理係從布拉格定理(Bragg's law)開始， $n \lambda = 2d_{hkl} \sin \theta$ ，其中 θ 角所發生之位移量即係晶體平面間距離之改變，此改變即為晶體之變形量。經過公式推導，在量測不同角度之繞射結果後，在此公式 $\sigma_{\theta} = \frac{E}{(1+\nu) \sin^2 \Psi} \left(\frac{d_{\theta \Psi} - d_0}{d_0} \right)$ 中，晶體平面間距離 $\left(\frac{d_{\theta \Psi} - d_0}{d_0} \right)$ 及旋轉角 $(\sin^2 \Psi)$ 之關係可做一線性圖，該線性之斜率即為殘留應力。針對鈦合金殘留應力量測之研究主要集中在 Ti64，結果顯現出在熔融區之殘留應力係大於在熱影響區及基材區之殘留應力，最大殘留應力值係出現在熔融區之中央。而在熱處理後，殘留應力也比較平均分布於三區中。

(四) 材料整備

首先係購買 Ti1023 塊材，獲得後將該塊切割成 1.6 公厘厚度之試片。切割完成之試片需要經過酒精清洗以去除其表面汙染。接下來是雷射焊接試片，焊接完成後再依 ASTM 拉力試驗規格尺寸切割成拉力試驗專用試片。在熱處理設定部分，在參考 Ti1023 相圖後，規劃分成兩大組：退火+時效組及時效組。因為在相圖中顯示，當熱處理溫度介於 700-780°C (退火)時，會形成 α_p 相；而在 400-550°C (時效)熱處理時會形成 α_s 相。因此，為了瞭解 α_p 相及 α_s 相對巨觀機械性質之影響，在退火+時效組之試片中期待可以獲得 $\alpha_p + \alpha_s$ 相之微結構，而在時效組中可以期待獲得 α_s 相之微結構。此外，在熱處理溫度選定上，退火溫度選用 750°C，而時效溫度選用 500°C。另外在熱處理時間上，退火時間選用 1 小時，而時效時間則設

定不同時間，這是因為在鈦合金中， α 相生成體積百分比係依合金中所含有之 α 穩定元素量而定，因此不論是生成 α_p 或 α_s 相，總 α 相應是固定。因此將退火時間選用 1 小時之目的係在控制 α_p 相生成量，並確保尚有剩餘之 α 穩定元素足供時效階段使用(亦即生成 α_s 相)。

(五) 實驗討論

因目前尚未有關於 Ti1023 經過雷射焊接之討論，故本研究首先須將 Ti1023 試片經過雷射焊接後進行分析。其中可以觀察到三區明顯不一樣之微結構：基材、熱影響區、熔融區。在基材部分，基材所顯示的是完全未受到熱影響的微結構，也就是所籌購時之原始結構，其中可以觀察到長條狀或球狀之 α 相鑲嵌在 β 相基地上。此類結構可以在經過熱滾軋後，將大部分之 α 相轉變成球狀後，可以有效增強其塑性。在熱影響區部分，仍可觀察到條狀及球狀 α 相鑲嵌在 β 相中，但是也可觀察到部分條狀 α 相逐步分解成圓狀 α 相，尤其是在靠近熔融區之 α 相分解情形越明顯。焊接所提供的熱將 α 相分解成小塊，當比較在基材與熱影響區之 α 相尺寸大小時，亦可觀察到此現象。在熔融區部分，可以觀察到其晶體結構已完全轉變成 β 相，此外還可觀察到樹枝狀之 β 型態。此樹枝狀型態係受焊接過程中，熱的散佈及散失之影響。在焊接過程中，最高的工作溫度係位於熔融區的中心線，接著往兩方面之基材方向散佈並逐步降低溫度；而當焊接工作結束後，材料固化的方向係呈現相反之走向，將由基材方向往焊接中心線凝固。因此可以觀察到在熔融區 β 相之晶體邊界，位於靠近熱影響區係呈現與試片邊平行，而位於焊接中心線之晶體邊界係呈現與試片邊垂直，故在整體上係呈現此樹枝狀型態。另一項值得討論的是在熔融區僅有 β 相存在，這是因為在焊

接過程中，其工作溫度非常大於 β 相變化溫度，因此所有的 α 相即轉變成 β 相；而在雷射源移開後，溫度呈現快速下降，而依 Mo_{eq} 可知 Ti1023 即使是在高速降溫下仍然不會析出麻田散 α 相，而此論點也可由 Ti1023 相圖推知，所以在熔融區才會僅出現 β 相。在機械性質測試部分，其中硬度分布圖亦進行量測與繪畫，測試結果顯示在熔融區之硬度係小於在基材與熱影響區之硬度，這是與 α 合金及 $\alpha + \beta$ 合金之硬度曲線截然不同之結果。這是因為在 α 合金及 $\alpha + \beta$ 合金之熔融區會析出麻田散 α 相，而因麻田散 α 相之晶體結構為 HCP，是較 β 相之 BCC 擁有較少的滑動系統，因此可以有效增加其硬度。另外，拉力試驗結果顯示，在完成雷射焊接後，Ti1023 之降伏強度、極限強度及伸長率量測值均表現降低，這是因為熔融區所發生之相變化及殘留應力之影響。而後續可藉由嘗試不同熱處理條件，以希望能藉由材料之相變化而有效提升其焊接後之機械性質，而這些實驗成果係可供未來航太、軍事工業在研發、選材、製程開發上運用之。

參、心得與建議

一、基礎研究

在進修第一年之修課過程中，即可明顯感受課業之繁重，這也是因為理海大學為在短時間內培養學生具備基礎研究能力、應付壓力能力、做好時間管理等，而大量的安排課程進度、考試測驗、課後作業、實作及簡報等，在在都希望能幫助學生準備面對外來研究挑戰。同時亦在課程成績上做把關動作，以確認學生已完成第一階段任務並具能力面對下一階段。而在後續研究中，不論是在研究規劃或與指導教授、同學討論

研究內容時，均對基礎理論的定義、推導非常重視。若基礎概念不足，就無法做深入的探討，抑或常常會思路中斷而中止討論。因此，若能先期積累基礎概念，在面對此次進修即可事半功倍。

二、語文能力

英語雖為我方之外語，但卻是美國之母語，故在美進修期間，不論是食衣住行、平常與教授同學交流、修課簡報或參與專業探討，無一不是使用英語進行溝通，在此生活中有時會遇到用英語無法做出完全表達的情況，這樣的經驗總是令人不愉快。即使是已經具備基礎英語能力，仍然感覺尚有許多可以加強的地方，因此在進修前若能加強練習英語，亦有助於更快融入異地生活。

三、活動交流

除了學校專業上的學習及研究，學校的社團和國際學生辦公室在開學期間均不定期舉辦各項活動、演講、研討會等，所有的活動幾乎都是免費的，而且五花八門。而美國學生對這些活動的參與度都很高，學生們可以參加自己有興趣的活動，甚至都不參加活動也可以。另外，在前面提到課業是非常繁重的，但是這些活動仍然有很多學生參與，因為在學校生活中，與同學建立人際網路也是學習的一環，而這些活動對學生來說就是最好的場合，所以在活動中可以感覺參與的人都很開放、大方的交朋友或交換生活心得，同時也可以在繁重的課業壓力中適時的放鬆。

四、學校申請及修課

初次申請學校時一定會遭遇許多困難，建議應與有經驗之前輩多請益，方可留意申請細節；另在修課過程中也可與有經驗之前輩或同學互相討論，也可達事半功倍之效。

五、生活所見

赴美進修除了在課業上需努力以赴外，在生活上也需時間適應，不論是銀行開戶、給小費習慣、租屋、買車、交通規則、飲食、醫療保險等，都與在台灣生活之經驗相異，因此除了先在網路上吸取別人生活經驗或是向前輩請益外，在當地生活一發現問題還是要當場詢問。

肆、參考資料

- 一、 R. Boyer, G. Welsch, E.W. Collings, Materials Properties Handbook: Titanium Alloy, ASM International, 1994, p.3,34,36,836-838
- 二、 G. Lutjering, J.C. Williams, Titanium, 2nd Ed., Springer-Verlag, 2003, p.9,16-21,24,29,30,35,36,182,283-295,337-354
- 三、 H.W. Rosenberg, The Science, Technology and Application of Titanium, Pergamon Press, 1970, p.851
- 四、 F.H. Froes, Titanium-Physical Metallurgy, Processing, and Applications, ASM International, 2015, p.54,69,78-82
- 五、 M.J. Donachie, Titanium: A Technical Guide, 2nd Ed., ASM International, 2000, p.13,16,21-24,66-69,247-253
- 六、 維基百科，理海大學
- 七、 理海大學，www.lehigh.edu
- 八、 黃盟富，雷射焊接鈦合金及其熱處理(博士論文)