



出國報告(出國類別：進修)

赴美國南加州大學  
碩士進修報告

服務機關：軍備局生產製造中心第二〇五廠

姓名職稱：陳正錡上尉

派赴國家：美國

出國期間：111年8月11日至113年5月16日

報告日期：113年5月

## 摘要

本次進修係奉國防部民國 111 年 07 月 13 日國人培育字第 1110174107 號令核定，赴美國南加州大學(University of Southern California) 進修材料工程碩士學位，進修期程自 111 年 8 月 11 日至 113 年 8 月 10 日止。職於規劃期程 2 年間完成修業課程並取得碩士學位，並於 113 年 5 月 16 日返國，且於 5 月 20 日返回軍備局生產製造中心第 205 廠辦理報到手續。

本案內容主要為赴美國進修之學習過程及研究心得，綱目計有目的、修業過程(包含學校介紹、修課及評分制度、研究報告)、心得與建議、參考資料來源等項，職於修業期間加入 Nutt 教授實驗室進行陶瓷複合材料研究，而研究範疇以製作陶瓷複合材料為主，因傳統碳化矽材料大多以粉末冶金法製造，雖製造成本較低且材料均勻性較佳，惟所需模具費用高昂且不利於複雜結構之製造，故本實驗利用 3D 列印機生成碳結構並使用滲透方式將矽粉末融化成液態，使其與碳結構表面反應成生成碳化矽，製作出具有複雜形狀之碳化矽結構，此製程能大幅降低傳統開模所需成本且能依設計需求彈性調整結構形狀，此項技術已被應用於複雜零件之製造，例如：引擎轉子，期望後續能將研究結果運用於抗彈板之生產及研究領域，以打造高質量之個人防護裝備。

本返國報告依據「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，內容主要記述於美國進修經驗及所見所聞，除提供大眾查閱外，亦可供後續申請赴外進修及教學研討人員卓參。

## 目次

壹、目的	1
貳、進修過程	1
參、心得與建議	18
肆、畢業資格證明	20
伍、參考資料	22

R12XXXXXX45  
CnMwng==  
2024/05/29 16:38



## 壹、目的

本次進修係奉國防部民國 111 年 07 月 13 日國人培育字第 1110174107 號令核定，赴美國赴美國南加州大學(University of Southern California) 進修材料工程碩士學位，進修期程自 111 年 8 月 11 日至 113 年 5 月 16 日止，職於核定期程完成修業進度，取得碩士學位證明，並於 113 年 5 月 17 日抵臺。目的在於習得專業知識，提升個人學識涵養並開拓視野，培養宏觀、邏輯性思維及獨立思考能力，且提升本廠研發關鍵技術，俾利將所學運用至國家未來軍需發展為目標。

## 貳、進修過程

### 一、學校及環境簡介

南加州大學（英語：University of Southern California），簡稱南加大，也譯作南加利福尼亞大學，位於美國加州洛杉磯市中心，由羅伯特·M·維德尼於 1880 年創立，是加州最古老的私立研究型大學。在 2019-2020 學年，有 20,500 名學生報讀了四年制的本科課程，有 28,000 名研究生和職業教育學生參加了包括商務、法律、電影、工程、職業治療、藥學和藥物在內的多種課程。南加大是洛杉磯市最大的私營雇主，為洛杉磯和加利福尼亞州帶來了 80 億美元的經濟效益。南加大是 ARPANET 上最早的節點之一，也是域名系統的誕生地 DNA 計算、動態規劃、圖像壓縮、VoIP 和防病毒軟體等技術也誕生於此。南加大擁有被評為全美國排名第一的電影學院、全美國排名第一的老齡學院、全美國排名第三的公共政策學院、全美國排名的第十的工程學院。南加大於 2000 年憑其廣泛的社區服務計劃獲時代雜誌及普林斯頓評論選為年度風雲大學，南加州大學是美國大學協會（AAU）成員、環太平洋大學聯盟成員，被卡內基基金會歸類為「特高研究型大學」。南加大共有 10 名諾貝爾獎得主。南加大也是少數同時擁有兩座由國家科學基金會（NSF）提供資金設立的工程研究中心（ERC—專門研究網路及多媒體的綜合多媒體系統中心（IMSC）以及微電子生物系統中心（BMES）此外南加大被美國國土安全部選為第一所國土安全卓越中心。學校在全球擁有龐大的校友網絡——特洛伊家族（英語：Trojan Family），當中不乏政治、商業、科技、藝術等領域的著名人士，學校每年獲得校友捐贈名列全美前茅。此外學校留學生眾多，超過 10%的

學生來自 110 多個國家。南加大是一所電影明星和體育明星輩出的學校，由於距離好萊塢十分近，因此擁有頂尖的電影藝術學院。此外截止 2021 年南加大的校友和學生已累計獲得 326 枚奧林匹克動會獎牌（153 枚金牌），位列全美大學之。南加大最近的籌款活動中，為學校籌得 29 億美元，是美國高等教育歷史上所籌得的第二高總籌款額。這使南加大及其合作夥伴可在短期內完成興建 27 幢新大樓為學生提供超過 75 萬平方米的活動、科學研究、教學及醫療空間。



圖 1：南加州大學校徽

學校內共有 14 個圖書館提供學生良好的讀書環境。圖書館除了資料齊全外，內部座位也多，電腦及印表機設備也相當完善，校園內網路也覆蓋每個角落，即使不在圖書館，也能在戶外廣場上自習並享受洛杉磯宜人的天氣。





圖 2：維特比工程學院

南加州大學競技體育運動歷史悠久且成績斐然。從籃球運動到水球運動，南加州大學 Trojan 隊已在 10 多項全國性男女運動項目中取得逾 115 項冠軍。在 Lyon 健身中心可參與體育活動、團體活動即其他休閒活。Dalands 游泳館曾是 1984 年奧運會的比賽場地，內有一個 25 碼 x 25 碼跳水池和一個 50 x 25 碼的比賽用游泳池。



圖 3：Lyon Recreation Center





圖 4：參與活動

## 二、學位要求

材料工程碩士學位須取得最少 28 個學分，並且累積 GPA 需達到 3.0 以上，而修業課程可選擇材料科學系核心課程(20-28 學分)，且可選修航太工程、電機工程、化學工程等科系特定課程最多 8 學分，學生可自由選擇感興趣的領域，規劃未來課程選擇。

另研究生需於每學期最少修滿 8 學分的課程，且大部分科目均包含期中考、期末考及期末報告，並不定期安排隨堂考及作業，故學生需要努力充實自我，並妥善運用課後研討時間，針對不懂的地方向教授或助教提出詢問。



### 三、 修課內容簡介

南加州大學材料工程系所提供學生專業領域為陶瓷材料、材料鍍膜、材料合成電腦模擬及半導體材料等方向，職主要以研究複合陶瓷材料為主，且職最終修畢 28 學分，在學期間選修專業課程摘述如下：

#### (一) 材料熱力學

主要探討材料原子受熱後的變化及影響，主要包含材料熱力學、統計熱力學及金屬熱處理，其應用領域主要在各工廠的熱處理流程，例如：馬田散鐵、珠光體、萊氏體…等。

#### (二) 工程材料機械表徵

課目內容主要討論工程材料在不同條件及狀況下的金屬表徵，包括大部分金屬加工過程中產生的蠕變、疲勞斷裂及加工過程與溫度的關係，其基礎可廣泛用於所有金屬類加工工廠。

#### (三) 基礎材料機器學習

課目內容主要討論如何運用機器學習方式完成材料各方面性能之推算及開發，相較於利用傳統實驗收集數據之方法，不僅能節省大量時間及經費，更能利用現有材料數據推斷尚未發現之材料，課程基礎程式語言主要以 Python 為主。

#### (四) 擴散與相平衡

課程的目的是介紹科學和應用材料系統中的熱力學和動力學，將著重於物理性質和相的系統演變。內容將涵蓋一系列材料系統主要關注金屬、合金、陶瓷和共價半導體。課程亦包括聚合物、準晶相和亞穩態相之介紹及研究。

#### (五) 工程分析

學習線性代數、向量分析、複數變量理論及偏微分方程式，掌握工程發展之核心理論。

#### (六) 指導研究

已合成陶瓷複合材料為研究主題，嘗試以 3D 列印配合預浸處理方式合成碳化矽陶瓷材料，改變以往需要龐大的模具費用，以較低的成本，製作不同形狀之客製化零件，主要著重於克服碳結構之膨脹問題及成分配比及樣品結構調整。

#### (七) 複合材料製程

課目內容主要涵蓋複合材料製造科學與技術，並討論如何選擇製程、分析材料特性、材料可持續性、製造挑戰及缺陷控制等基礎。學習如何評估和選擇適合的製造工藝或在有限條件下評估不同製程所導致的影響，最後了解如何調整製程來控制零件質量

#### 四、 研究內容

##### (一) 摘要

本研究介紹了用於製造碳纖維增強陶瓷基複合材料 (CMC) 和碳化矽複合材料合成的增材製造 (AM) 技術的開創性發展。CF-PEKK 採用熔絲製造 (FFF) 技術，將碳短纖維融入熱塑性聚醚酮 (PEKK) 基質中作為原料，透過熱解方式形成所需碳結構。此外本研究還對 CF-PEKK 和 CF-PEEK 進行了比較，以驗證哪種材料更適合做為該技術之原料。另亦監測三軸 (X, Y, Z 軸) 之長度的變化，為樣品設計提供數據。

為了克服熱解過程中，樣品結構重新熔化所導致之影響，本實驗引入了一個關鍵步驟-交聯，即在空氣中於 325°C 下預先反應 48 小時，以確保熱解時，碳纖維強化聚合物的穩定性。這項步驟使得本研究能夠透過液態矽滲透製程 (LSI) 製造複雜的陶瓷複合材料零件，從而實現設計自由和複雜的組件製造。

製造的碳/碳化矽零件經過了全面的表徵及微觀結構分析。項研究代表了用於陶瓷複合材料生產的積層製造技術的重大進步，並推出了一種具有改進性能的新型複合材料，為各種工程應用提供了廣闊的前景與不同的選擇。

##### (二) 背景簡介

陶瓷基複合裝甲板可以放置在防彈板載體中以防禦子彈、彈頭、碎片和刺傷威脅。陶瓷裝甲比鋼板更輕、更厚。它也易於儲存，因為它不會受到環境濕度或溫度的影響。使用 3D 列印機製造陶瓷複合材料可以降低模具成本並客製化防彈板的尺寸，更能滿足單兵的需求。士兵奈米技術研究所 (ISN) 使用奈米級 3D 列印技術來形成一種材料，據報導這種材料在阻止彈體方面比 Kevlar 或鋼更有效。他們使用光敏抗蝕劑形成奈米結構材料的基礎，根據雷射的曝光強度來調整其形狀。在此過程中，緊密聚焦的雷射在光刻膠內進行三維追蹤使材料固化，直到列印出完整的結構。後續將列印的



結構在熔爐中以極高的溫度熱解，藉此將聚合物轉化為碳。據 ISN 團隊稱，以重量計算，奈米結構材料的性能優於鋼 100% 以上，優於 Kevlar 複合材料 70% 以上。

因考量實驗室無雷射 3D 列印機，故以擠出式 3D 列印機取代該項設備進行研究，為有效的產生碳結構及減少樣品膨脹，須使用含碳成分高之原材料進行列印，該設備所能列印之高含碳材料為 CF-PEEK 及 CF-PEKK，材料簡介如后：

1. 碳纖維增強聚醚醚酮樹脂基複合材料(CF-PEEK):具優秀機械性能、耐腐蝕性、比重小、高疲勞強度、抗衝擊强度高並具備較高之含碳量。
2. 碳纖維增強聚醚酮樹脂基複合材料(CF-PEKK):具有與 CF-PEEK 類似的材料特性，唯一的不同在於分子結構中醚基與酮基數量差異及較低的列印溫度。

本研究以類似該報導之概念製造碳化物結構並將矽滲透到其中，透過形成碳化矽來增加材料的硬度與韌性。

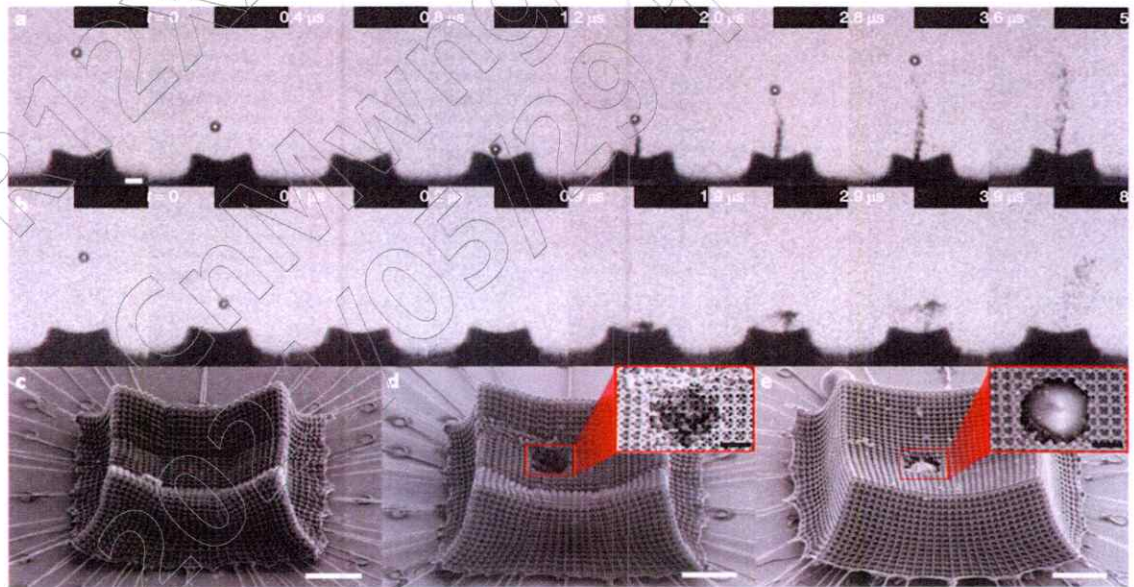


圖 5：奈米級碳結構的衝擊測試。

### (三) 研究方法

#### 1. 材料與製程

首先使用由 PEKK 填充 15wt% 短碳纖維組成的 CF-PEKK 複合材料當作原材料，使用 Autodesk Fusion 360 設計尺寸為  $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$  (長



x 寬 x 厚) 的方形樣本 (圖 6)。這些樣本使用 Intamsys Funmat HT 增強型印表機列印，遵循標準化參數，包括 80% 的填充率、無外殼、0.4 毫米的噴嘴直徑、噴嘴溫度為 385 °C 和以網格圖案填滿的樣品。完成結構打印後，在 Vulcan 箱式融爐中進行交聯，包括以 1 K/min 的速度從室溫逐漸加熱到 200 °C，然後以 0.5 K/min 的較慢加熱速率升至 325 °C，將樣品在 325 °C 下保持 48 小時，然後自然冷卻。後續在氮氣或氫氣環境下的管式融爐中，將樣品加熱至 900 °C 以上進行熱解，並保持 15 分鐘，將 CF-PEKK 樣品轉化為具有多孔結構的碳材料。最後多孔碳材料在真空條件下，加熱至 1450°C 進行液體砂滲透約 1.5 小時，使用液態砂將其轉變為緻密的碳\碳化矽結構。這種製程旨在提高 CF-PEKK 複合材料的機械性能並有助於優化複合材料的積層製造流程。

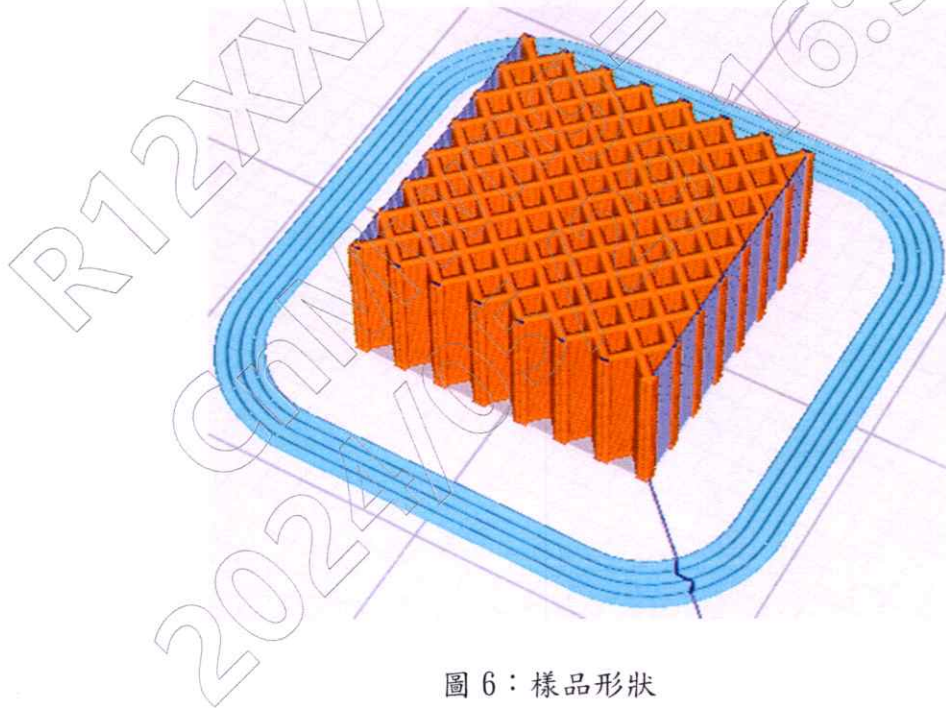


圖 6：樣品形狀

## 2. 微觀結構研究方法

首先將樣品嵌入樹脂中，然後使用粒徑為 120 至 2400 目的砂紙進行表面拋光。隨後使用光學顯微鏡對拋光後的樣品進行檢查，以辨別接合處碳化矽的形成。後續使用影像分析軟體 Dragonfly 來量化碳化矽的生產率。

為準確的分析碳化矽的生成厚度，本研究亦利用能量色散 X 射線光譜儀 (EDS) 來檢查材料的內部元素分布。並透過評估濃度變化來確定碳化矽的實際厚度。此外採用 X 光繞射分析儀 (XRD) 來確定  $20^\circ < 2\theta < 100^\circ$  範圍內是否存在碳化矽材料波峰(參考晶體學資訊文件 00-029-1129)以確認該化合物之形成。

最終本實驗對碳/碳化矽表面進行掃描電子顯微鏡 (SEM) 成像，以闡明缺陷產生的根源，評估矽和碳結構的結合狀態，並分析它們對整體材料強度的影響。

#### (四) 結果分析

##### 1. 交聯與膨脹的關係

這項研究利用流變儀來分析 CF-PEEK，因為 CF-PEEK 和 CF-PEKK 表現出相似的分子結構。故可透過其對 CF-PEEK 的全面分析與研究來確定 CF-PEKK 之交聯成果。CF-PEEK 樣品在  $400^\circ\text{C}$  恆溫下的流變掃描測量結果如圖 7，其顯示樣品在  $325^\circ\text{C}$  下熱處理 48 小時後其黏度約為 1M Pas，並與未經處理的 CF-PEEK 相比，增加了三個數量級，未經處理的 CF-PEEK 其黏度約為 1K Pas。造成上述現象的原因是由於分子於交聯過程中互相連接而形成網絡而導致黏度升高的現象，如圖 8，這表明交聯效應可以有效減輕 PEEK 在熱解過程中的重新熔化。這項研究也比較了有和無交聯的 CF-PEKK 樣品在熱解後的差異，缺乏交聯的樣品在熱解後出現 75-100%的體積膨脹 (圖 9)，這將不利於後續製造複雜結構之樣品，例如引擎轉子。

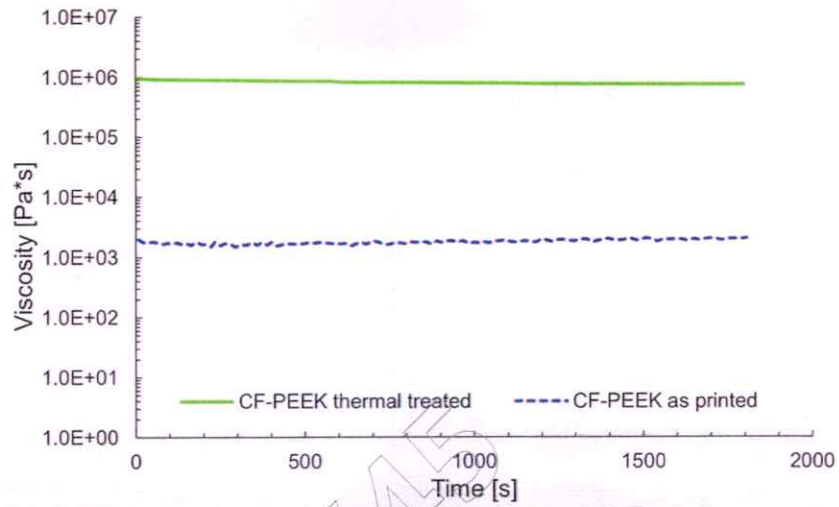


圖 7：在 400°C 下，流變儀的掃描結果。



圖 9：有或無交聯步驟的材料。

## 2. 為何選擇 CF-PEK 當原材料

在先前的研究中，CF-PEEK 通常被用作為創建碳結構的原材料。然而 CF-PEEK 亦具有優異的機械強度、耐高溫性、抗疲勞性和低可燃性。CF-



PEKK 的分子結構比 CF-PEEK 具有更高的耐熱性。本項分析旨在比較這兩種原料之間的差異，並確定哪種最適合用來建立碳結構。這項分析的目的是減少碳結構成形時所產生的顯著膨脹或收縮。因樣品中揮發性物質的含量對於保持結構穩定性至關重要。通常較高的碳含量有助於提高碳結構的品質並減少膨脹。

首先，本研究比較了 PEEK 和 PEKK 的分子式。PEEK 的分子式為  $(C_{14}H_{10}O_3)_n$ ，每個重複單元含有 14 個碳原子。另外 PEKK 的分子式為  $(C_{16}H_{12}O_4)_n$ ，每個重複單元含有 16 個碳原子。因此，PEKK 比 PEEK 含有更高比例的碳元素。根據製造商的規格，CF-PEKK 中含有約 15% 的短碳纖維，而 CF-PEEK 則含有約 10%。因此從原料角度上分析 CF-PEKK 似乎比 CF-PEEK 更合適作為本項研究之原材料。

此外 CF-PEKK 的列印溫度為  $365-385^{\circ}C$  比 CF-PEEK 的  $390-410^{\circ}C$  低，不僅能節省能源並降低堵塞風險。為了驗證這一論點，本研究採用熱重分析儀 (TGA)，測量物質重量隨溫度和時間的變化，藉此確定哪種材料在同等重量下能產生更多碳結構。圖 10 實驗成果表明，CF-PEKK 在超過  $900^{\circ}C$  的溫度下產生約 65% 的碳結構，而 CF-PEEK 在相同條件下僅產生約 55%，故能印證 CF-PEKK 比 CF-PEEK 更適合做為原材料。

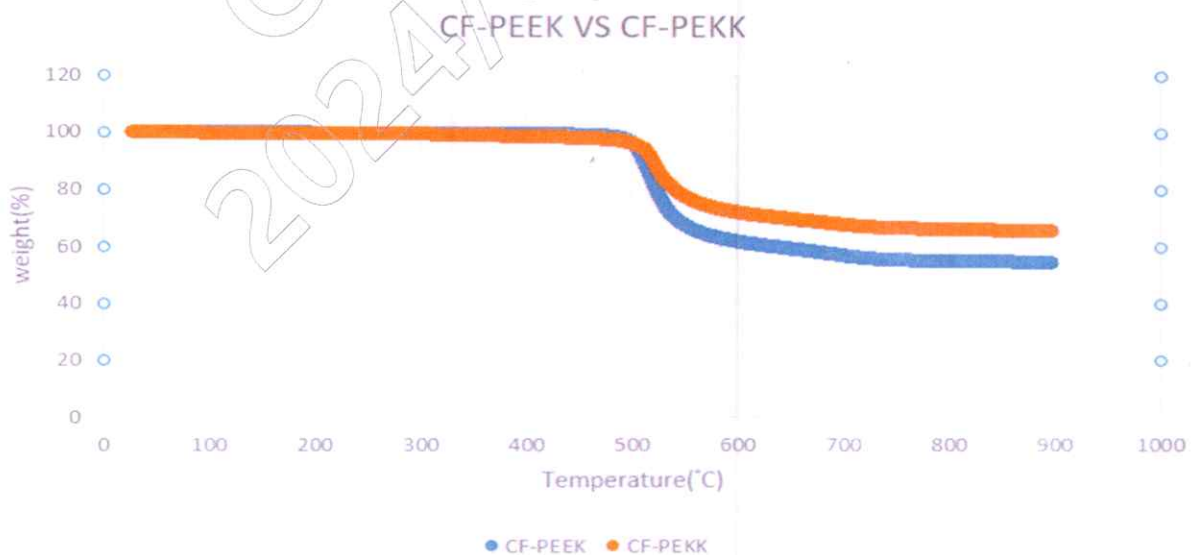


圖 10：CF-PEEK 及 CF-PEKK 比較。

### 3. 樣品微觀結構與收縮分析

本研究採用光學顯微鏡檢查各個階段的樣品橫截面如圖 11 所示，(A) 未經任何處理(B)通過交聯處理(C)通過熱解處理(D)通過預浸處理。圖(A) 顯示出豐富的白色膠體物質，代表樣品內的樹脂已均勻分佈在整個碳結構中。在圖 (B) 中則能觀察到碳結構發生些微的變化 (黑色部份)，而膠體材料亦已轉變為黃色固體並出現體積減小現象。隨後在圖 (C) 中，大部分黃色固體消散，僅留下不含雜質的黑色碳結構。

黃色固體的消失使碳結構內形成空隙。這些空隙有助於增加表面積，而表面積增加則有助於提高碳化矽產量。隨後在圖 (D) 中可發現矽透過毛細管作用已成功滲透到較大的孔隙中，促進了碳化矽的形成。然而許多小且相對封閉的孔隙仍無法導入矽進行填充，這些未被填充的孔隙將損害材料的整體強度。

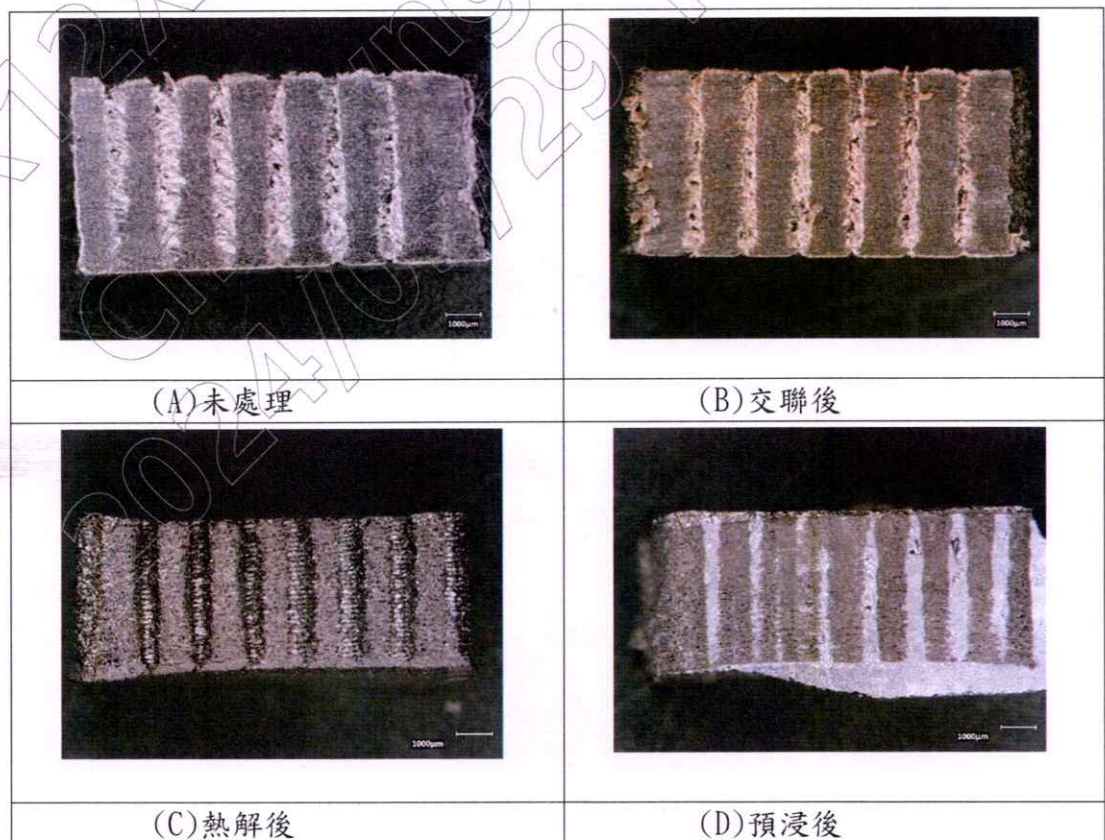


圖 11：各階段之材料結構。



為了分析不同階段在各軸上的收縮率，本研究測量了不同階段的長度、寬度和高度，隨後計算每個步驟樣品的收縮率，如圖 12 所示，在每個方向都經歷不同程度的收縮。這種現象很大程度的受印刷過程中所採用的堆疊模式和重力影響。

在熱解過程中，由於部分成分的揮發，故在各個方向上皆有表現出收縮現象。值得注意的是，從熱解到矽化階段發生的體積變化可以忽略不計，因為矽化階段的溫度仍不足以造成碳結構的熔化或結構改變。而在矽化階段可觀察到 Z 軸方向上的長度有少許增加，這並非是於結構膨脹所導致，而是因矽從樣品底部進入結構，導致樣品下層部分略有增厚。

根據上述結果，若要保留目前的模式和結構，則需要調整樣品尺寸以減輕整個過程中收縮的影響。具體來說，建議沿著 X 軸和 Y 軸的樣品長度增量 6%，沿 Z 軸增量 15%，以確保加工過程中遇到的收縮動態之間的平衡。

與另一篇論文以 CF-PEEK 為主要材料的研究相比，可以發現其 X 軸和 Y 軸的收縮率約為 10%，Z 軸的收縮率約為 20%，均超過了本實驗所得數值。此分析再次強調了材料選擇在製造過程中影響收縮動態的重要性。儘管由於不同的印刷圖案將導致收縮率可能存在差異，但研究結果證實，在複合材料製造方面，CF-PEKK 是優於 CF-PEEK 的，因為其樣品變形量相對較小。



圖 12：不同階段的材料長度變化



#### 4. 碳化矽生成分析

X 射線衍射儀 (XRD) 是材料科學中研究晶體原子結構的關鍵技術。它的原理是透過儀器發射 X 射線至晶體上，透過 X 射線被材料晶格發散後所產生衍射峰進行分析。研究人員可以透過分析這些波峰值來確定晶體對稱性和相組成等特性。XRD 用途廣泛且不損傷材料，可用於分析粉末或薄膜狀之各種材料。它為推進固態物理和材料工程提供了重要的貢獻。

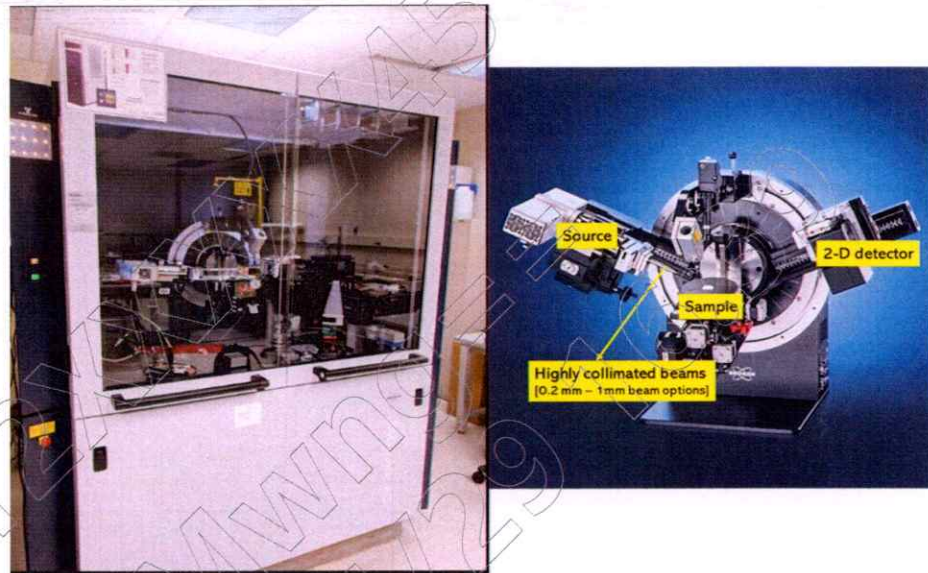


圖 13：Bruker D8 XRD。

研究複合材料結構中碳化矽 (SiC) 的形成對於增強整體強度和性能至關重要，因碳化矽具有耐腐蝕、耐高溫及耐磨耗等多中優異性能。故本研究利用 X 射線衍射儀 (XRD) 深入研究材料的成分，以確定碳化矽的存在和特徵。XRD 分析揭示了複合材料中對應於矽 (Si) 和碳化矽的不同峰值，如圖 14 所示。這項發現至關重要，因為碳化矽是增強結構、提高其強度和耐用性的關鍵成分。儘管矽的波峰占據主導地位，但碳化矽的存在仍有利於材料整體機械性能的提升。

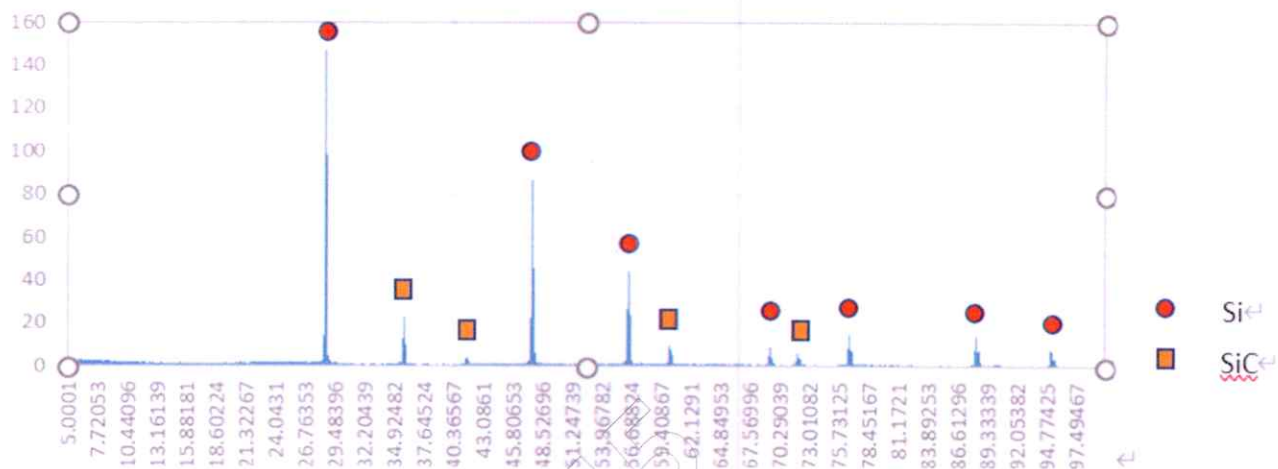


圖 14：預浸後樣品 XRD 圖。

在採用 X 射線衍射 (XRD) 分析碳化矽複合材料表徵後，本研究繼續對碳化矽的生成量進行分析，碳化矽的形成主要發生在碳結構和矽之間的交界處。為了量化該區域內碳化矽的產量，本研究利用 Dragonfly 軟體來分析碳化矽所占比率，檢驗結果大約為 10%，如圖 15 中粉紅色區域所示。根據上述這些觀察結果，可以得出兩個主要結論。首先，增加碳結構的表面積對於增加碳化矽產量至關重要，因為碳化矽會沿著碳結構表面生成。因此表面積的增加與碳化矽的形成成正比，從而增強了樣品的強度。其次，必須保持碳結構的最佳厚度；較厚的碳結構層會阻礙矽的滲透，並於結構中間生成未填充之孔隙。這種孔隙的存在極大地損害了材料的整體強度和韌性。後續可透過開發具有較高表面積和更薄更複雜的網狀碳結構來提升整體材料強度。

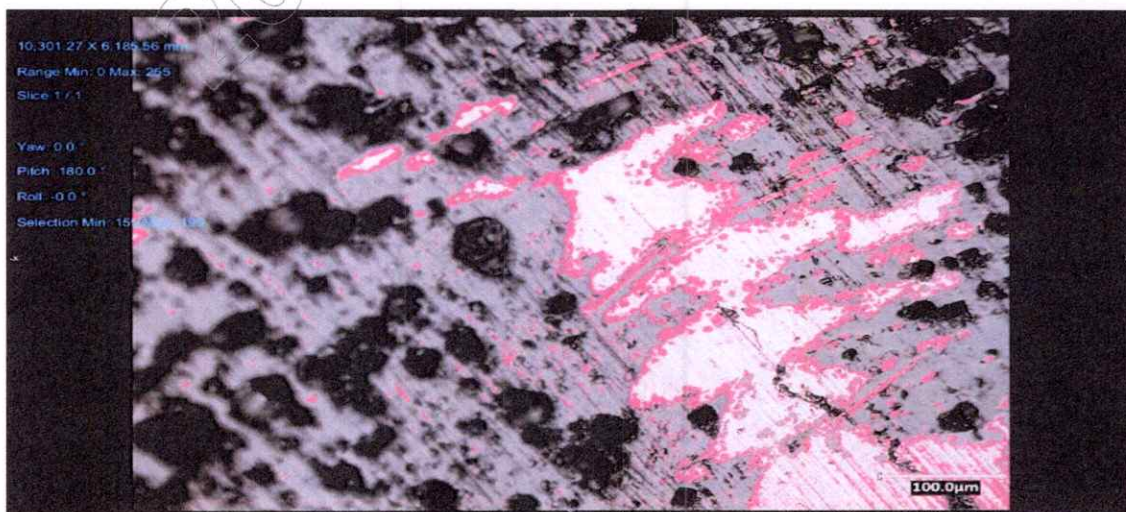




圖 15：碳化矽分佈圖。

### 5. 碳化矽生成的厚度

本研究使用能量色散 X 射線光譜儀 (EDS) 分析碳化矽厚度，這是一種備受推崇的分析儀器，其廣泛應用於材料科學、地質學、法醫學和考古學等不同科學學科裡。EDS 的功能是基於識別樣本在暴露於高能量電子束時發出的特徵 X 射線。這些 X 射線指示了樣品中的元素成分，其各自的強度與元素成分和濃度成正比。

本研究選擇分析的區域是碳結構和矽的邊界。以一條直線穿過這兩個不同的區域，並讓儀器沿著該線分析目標元素的濃度。藉由檢查濃度的重疊區域來推斷碳化矽的厚度。圖 16 的數據顯示碳化矽的厚度約為  $5\mu\text{m}$ 。

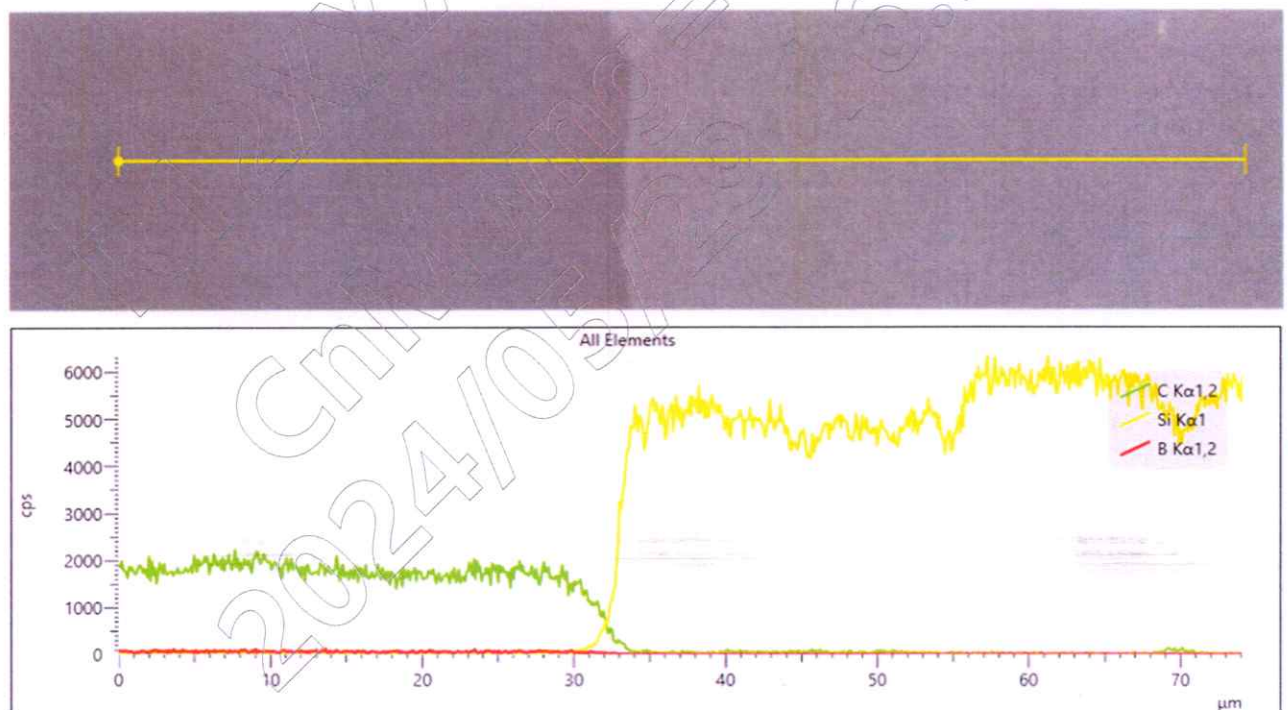


圖 16：目標元素濃度沿線分佈圖。

## (五) 結論

本論文揭示了交聯過程的重要性、CF-PEEK 和 CF-PEKK 的比較分析以及碳化矽形成的幾個重要發現。首先，已經確定交聯過程是必不可少的，儘管該步驟需要較高的時間和能源成本，但它能有效降低樣品約 75-100% 的體積膨脹，故須保留該步驟。

其次，利用 TGA 比較 CF-PEKK 與 CF-PEEK 之性質，前者具備優越的性能，並以實物顯示出 CF-PEKK 在各軸上的收縮率相較於 CF-PEEK 減少約 10-15%，同時能夠增加碳結構中約 10% 的碳產量。這些發現強調了 CF-PEKK 在這項實驗中所具備的優勢。

本研究利用 XRD 和 EDS 進行碳化矽的形成分析，由究結果顯示碳化矽沿著碳結構和矽區域之間的邊界存在且平均厚度約為 5 微米。這項成果將對後續的研發方向提供重要的啟示。

最後，圖片分析軟體使我們有能力把碳化矽密度的量化，顯示平均密度約為 10%。這種定量評估進一步有助於我們了解樣本中碳化矽的分佈和特性。

綜上所述，這些發現有助於本廠後續對陶瓷複合材料之開發與應用，例如：受限於實驗室設備條件無法將樣品之碳結構完全轉換成碳化矽且含有許多未被填充之孔隙，此類缺陷將嚴重影響材料整體強度，經參考本實驗相關研究成果，建議採用高級 3D 列印機打印出結構寬度在 5 微米以下之樣品，俾利將結構完全轉換成碳化矽，進一步製造出無缺陷之陶瓷複合材料。

單一陶瓷材料雖具有耐高溫、高強度及抗腐蝕等優異性能，但材料脆性極高且易折，而陶瓷複合材料因具有陶瓷基纖維，故能大幅提升材料之韌性，未來可嘗試做為防彈背心之夾層，並評估其防彈效能。



## 參、心得與建議

首先感謝單位給予出國進修機會，使職能對美國的生活、學習及研究等各方面皆有深刻的了解與體悟，雖然美國碩士班課程每學期最低僅需修兩門課，但不論修習何種課程其對語文能力皆有一定的要求，而且有些課程須具備一定的背景知識才能選修，而由於職自大學畢業後已較少接觸材料類專業知識，故許多材料課程所需的背景知識也略有不足，故在第一個學期除了到圖書館加強複習上課內容外，更要利用假日時間補充相關背景知識，例如職規劃在第三學期選修材料機器學習課程，該課程須具備基礎程式語言知識(主要使用 Python)，這是職以前所不具備的，故為力求學業上之表現，職於暑假時間利用 Youtube 學習編碼基礎知識及機器學習概論，為該課程提前作準備。

美國的教育更要求學生能主動思考，提出問題，而不是由教授指導學生該如何複習，故大部分的課程皆有每週作業、期末論文報告、期中及期末考試，除了能驗證學生的學習成果，更可讓學生透過不同的方式了解到學習不足之處，每當職遇到較為艱澀的問題時，除了與同學討論外也時常利用教授提供的課後研討時間(Office hour)向教授或助教請益，在第一學期時，職每週約使用 1-2 小時與助教討論課程及作業不理解之處，使自己能更快掌握課程內容及學習重點。

在生活調適部分，初到美國時在陌生的環境中除了要能面對課業上的問題外，還需要能夠處理生活中大大小小的事情，小從單純的購買食物及衣物、銀行開戶到複雜的駕照取得、醫療保險及年度報稅等，都需要花點時間去了解及詢問，所幸在這裡遇到了國防大學的學長及友善的台灣人房東，因此大大降低了在異鄉生活的不安情緒，當然身處用陌生的環境，很多時候難免感到挫折及孤獨，故在學期間亦積極尋找各種戶外活動團體，例如：羽球團、排球團、社區籃球隊及上網尋找喜歡衝浪及滑雪的同伴們，藉此結識不同的人事物，職認為參加各種團體除了能排解學習的壓力外，更能透過與他們的交流增長自己的見聞。

針對研究部份，職於民國 112 年 3 月加入 Nutt 教授實驗室並重新修正研究主題，將研究主題更改為研究陶瓷複合材料製作，由於剛加入實驗室時對諸多儀器的操作不熟悉，所以前一個月由實驗室學長帶領下熟悉各項儀器的操作並申請昂貴儀器的操作許可證，在與學長配合的過程中，職深刻體悟了美國研究風氣之不同，例如一開始職

皆以完成學長交辦的實驗進度為目標，未有過多的思考及想法，後來經學長指正後發現研究過程中應該自行查找論文尋找靈感及嘗試解決實驗上所遇到之問題，例如實驗過程中有儀器發生頻繁的損壞，不能僅將問題回報實驗室負責人後坐等結果，更應該嘗試向設備商主動聯繫並尋求解決方式，這與以往的理念差異甚大，故在整個研究過程中，除了學習到如何操作各種儀器及執行材料研究分析外，職更學習到了如何解決問題及善用一切可用的資源，不因非自身專業而放棄嘗試與學習新事物，故職在實驗室執行研究期間，在教授的指導下利用 3D 列印機製作材料取芯鑽及協助其他博士生執行圖像分析，不僅能幫助別人解決實驗上的難題，亦能提升自己對不同儀器或軟體的操作的能力，另外針對陶瓷複合材料之研究，雖然受限於設備條件及原料購買無法完成較理想的樣品製作，但過程中所產生的研究成果將能為未來陶瓷複合材料之研究提供重要的基礎。

本廠為國軍重要生產工廠，負責 40 公厘口徑以下輕兵器、彈藥、火炸藥、油漆及個人裝備產製等任務，鑑於國軍在防衛作戰中，我軍將處於數量相對劣勢的現實，故在面臨敵方之強大火力下，如何強化「戰力保存」亦是相當重要的課題，因強化戰力保存可使台灣戰力能在第一階段解放軍攻擊後仍能夠存續下去並達成「不對稱戰力」的目的，而陶瓷複合材料具有優秀的抗腐蝕、耐高溫、高韌性及高硬度，故可做為防彈背心抗彈板的原材料之一，而本研究因受限於實驗室器材性能，故主要以陶瓷複合材料的微觀結構分析，期望後續能將研究過程所得之實驗參數與技術運用於抗彈板之生產或研究領域，提升產品品質與研究開發，以利打造高質量的個人防護裝備。



# 肆、畢業資格證明

## STARS Report

You may directly access the following sections in the STARS report

- Pertinent Data Section
- Legend
- Units Required for Degree

The Blue text in the STARS report identifies the degree requirements completed.  
The Red text in the report highlights the outstanding requirements needed in order to graduate.  
Place the mouse pointer over the underline codes in the report to view its description.  
Descriptions will appear in the status bar at the bottom of your browser window.

PREPARED: 05/11/24 14:36  
PROGRAM: 484 CATALOG YEAR: 20223  
STARS - DEGREE PROGRESS REPORT  
Master of Science  
Materials Engineering

### GRADUATE PERTINENT DATA SECTION:

Term of USC Admission 20223  
USC Expected Graduation Date 10 MAY 2024

\*\*\*\*\* ALL DEGREE REQUIREMENTS HAVE BEEN SATISFIED \*\*\*\*\*

YOU HAVE SATISFIED THE CONTINUOUS ENROLLMENT REQUIREMENT. PLEASE ENSURE THAT CONTINUOUS ENROLLMENT IS MAINTAINED IN EACH FALL AND SPRING SEMESTER UNTIL ALL DEGREE REQUIREMENTS HAVE BEEN SATISFIED.

THE TIME LIMIT TO COMPLETE YOUR PROGRAM IS FIVE YEARS FROM THE FIRST USC COURSE APPLIED TO YOUR PROGRAM.

YOUR PROGRAM MUST BE COMPLETED BY THE STATED TERM:  
FROM-----> TERM 223 (THROUGH 272 )

OK A MINIMUM OF 26 UNITS IS REQUIRED FOR DEGREE COMPLETION. REQUIRED COURSE WORK WILL BE DETERMINED BY YOUR ACADEMIC ADVISOR. A MINIMUM GRADE OF "C" OR BETTER IS REQUIRED.  
EARNED: 26.00 UNITS

20223	MASC503	4.0	A	Thermodynamics of Materials
20223	MASC551	4.0	A-	Mechanical Behavior of Engine
20231	MASC504	4.0	A-	Diffusion and Phase Equilibri
20231	MASC515	4.0	A	Basics of Machine Learning fo
20233	AME 525	4.0	A	Engineering Analysis
20233	MASC590	4.0	CR	Directed Research
20241	MASC564	4.0	A	Composites Processing

BASED ON APPLIED COURSE WORK, YOU HAVE SATISFIED THE MINIMUM 500 LEVEL REQUIREMENT (TWO-THIRDS RULE).

OK  
EARNED: 26.00 UNITS

OK 3.0 CUMULATIVE GPA REQUIRED OF ALL GRADUATE LEVEL USC COURSE WORK APPLIED TO YOUR DEGREE:  
EARNED: 3.900 AVE

OK 3.0 CUMULATIVE GPA REQUIRED OF ALL GRADUATE LEVEL COURSE WORK COMPLETED AT USC:  
EARNED: 3.900 AVE

## Starts 報告

STARS 報告中的藍色文字標示了已完成的學位要求。報告中的紅色文字強調畢業所需的要求。將滑鼠指標放在報告中的底線代碼上可查看其說明。說明將顯示在瀏覽器視窗底部的狀態列中。

準備時間：05/11/24 - 14:36

專案：484 年份：20223

顆星 - 學位進度報告

材料工程理學碩士

畢業生相關資料部分：

USC 入學期間 20223

**USC 預計畢業日期 - 2024 年 5 月 10 日**

**\*\*\*\*\*所有的畢業條件已被滿足\*\*\*\*\***

您已滿足持續註冊要求。請確保每個秋季和春季學皆有修課南加州大學課程起五年。期都保持連續註冊，直到滿足所有學位要求。

完成課程的時間限制為自您的課程適用的第一門您的課程必須在規定的期限內完成：從第 223 學期（到 272 學期）

完成 完成學位至少需要 28 學分。

所需的課程將由您的學術顧問決定。最低成績要求為“C”或以上。

已取得：28.00 學分

20223	MASC503	4.0	A	材料熱力學
20223	MASC551	4.0	A-	發動機機械行為
20231	MASC504	4.0	A-	擴散與相平衡
20231	MASC515	4.0	A	機器學習概論
20233	AME525	4.0	A	工程分析
20233	MASC590	4.0	CR	導引研究(CR：評級相當於 B 或更好)
20241	MASC564	4.0	A	複合材料製程

完成 根據應用課程作業，您已滿足最低 500 級要求（三分之二規則）。

取得：28.00 單位

完成 申請您學位的所有研究生級別 USC 課程的累積 GPA 要求達到 3.0：

取得：3.900 AVE

完成 在南加州大學完成的所有研究生水平課程的要求累積 GPA 達到 3.0：

取得：3.900 AVE



## 伍、參考資料

1. Sun, J., Ye, D., Zou, J., Chen, X., Wang, Y., Yuan, J., Liang, H., Qu, H., Binner, J., & Bai, J. (2022). A review on additive manufacturing of ceramic matrix composites. *Journal of Materials Science & Technology*, Volume 138, Pages 1-16. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1005030222005886>.
2. Z. Chen, Z. Li, J. Li, C. Liu, C. Lao, Y. Fu, C. Liu, Y. Li, P. Wang, Y. He, 3D printing of ceramics: a review, *J. Eur. Ceram. Soc.* 39 (2019) 661–687, <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.013>.
3. Everett, H. (2021). “3D printed nanomaterial could replace Kevlar and steel for bulletproof armor for 3D Printing Industry”. Retrieved from <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printed-nanomaterial-could-replace-kevlar-and-steel-for-bulletproof-armor-193486/>
4. Freudenberg, W. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced ceramic matrix composites based on fused filament fabrication. *Journal of the European Ceramic Society*. Retrieved from [www.elsevier.com/locate/jeurceramsoc](http://www.elsevier.com/locate/jeurceramsoc)
5. Zhou, X. (2022). PEEK composite resin with enhanced intumescent flame retardancy loaded with Octaphenylsilsesquioxane and nano calcium carbonate and its application in fibers. *Polymer Degradation and Stability*, Volume 202, Article 110042. Retrieved from <https://www.journals.elsevier.com/polymer-degradation-and-stability>
6. Patel, P. (2011). Investigation of the thermal decomposition and flammability of PEEK and its carbon and glass-fiber composites. *Polymer Degradation and Stability*. Retrieved from <https://www.elsevier.com/locate/polydegstab>
7. Ramaswamy, K. (2023). An investigation of the influence of matrix properties and fiber-matrix interface behavior on the mechanical performance of carbon fiber-reinforced PEKK and PEEK composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 165, Article 107359. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X22005401>
8. Victor Zamora. (2022). Spark-plasma sintering of boron carbide–silicon carbide composites at 1400 °C from B4C+Si: Densification and sintering/reaction mechanisms. *Journal of the European Ceramic Society*, Retrieved from [www.elsevier.com/locate/jeurceramsoc](http://www.elsevier.com/locate/jeurceramsoc)