

碳化矽/聚丙烯腈之奈米複合纖維材料於電磁波特性研究

張博學¹ 張樹峰¹ 韓依帆¹ 陳邦旭¹ 彭政雄^{1*}

1：明新科技大學化學工程與材料科技系 地址：30401 新竹縣新豐鄉新興路 1 號

摘要

本研究為利用靜電紡絲技術製備吸收電磁波之碳化矽/聚丙烯腈(SiC/PAN)複合奈米纖維材料。本實驗將聚丙烯腈(Polyacrylonitrile, PAN)與在二甲基甲醯胺(N,N-dimethylformamide, DMF)溶液中均勻混合後，藉由改變四種製程參數：PAN 濃度、收集板電壓、注射速率及收集距離，探討這些參數對 PAN 奈米纖維形貌及直徑的影響。合成 SiC/PAN 複合奈米纖維部份，分別添加不同重量百分比濃度的 SiC 奈米顆粒至前驅溶液中，再以前述 PAN 條件進行電紡製備。同時，藉由不同重量百分比濃度的 SiC/PAN 複合奈米纖維進行電磁波吸收之探討研究。在本研究中使用掃描式電子顯微鏡觀察其纖維形貌與直徑尺寸、X 光繞射分析儀作 SiC/PAN 晶相鑑定、熱重分析儀觀察樣品之重量變化及穿透式電子顯微鏡之微觀結構鑑定及四點探針電性分析，再利用向量網路分析儀，進行雷達波頻段 (3-18 GHz)之電磁特性研究。實驗結果顯示，PAN 奈米纖維在濃度為 10 wt.%、電壓為 20 kV、注射速率為 0.025 ml/min 及收集距離為 15 cm，可獲得較均勻直徑的 PAN 奈米纖維。而在添加 15 wt.%的 SiC 奈米顆粒後，表面粗糙度增加，這表示 SiC 奈米顆粒開始凝聚，但與 20 wt.%的相較之下，沒有明顯的碳化矽奈米顆粒團聚。常溫量測時，A2 隨著厚度的增加最大反射損失隨之增加，並會往低頻移動，厚度為 8 mm 時，於 13.79-17.54 GHz 頻率範圍內，反射損失小於-10 dB 之頻寬為 3.75 GHz，雷達頻率在 15.29 GHz 時最大反射損失為-38.19 dB。

關鍵字：靜電紡絲、聚丙烯腈、碳化矽、電磁波吸收材料

Studies on electromagnetic properties of silicon carbide/polyacrylonitrile nanofiber

Po-hsueh Chang^{1*} Shu-feng Zhang¹ Yi-fan Han¹ Pang-Shiu Chen¹ Cheng-Hsiung Peng¹

¹ : Department of Applied Material Science and Technology, Minghsin University of Science and Technology, No.1, Xinxing Rd., Xinfeng Hsinchu 30401, Taiwan (R.O.C)

Abstract

In this study, silicon carbide/polyacrylonitrile (SiC/PAN) composite nanofiber material for absorbing electromagnetic waves was prepared by electrospinning. In this experiment, polyacrylonitrile (PAN) was mixed with dimethylformamide (N, N-dimethylformamide, DMF) solution by changing the four process parameters: PAN concentration, collecting plate voltage, feeding rate, and the effects of these parameters on the morphology and diameter of PAN nanofibers were discussed. Synthesis of SiC/PAN composite nanofiber fraction, respectively, adding different concentrations of SiC nanoparticles into the precursor solution, and then the above PAN conditions for electrospinning. At the same time, the electromagnetic wave absorption of SiC/PAN composite nanofibers with different weight percentages was studied. In this study, the fiber morphology and diameter were observed by scanning electron microscopy. The X-ray diffraction apparatus was used to identify the SiC/PAN phase. The weight change of the sample was followed by thermogravimetric analysis and the microstructure of the penetrating electron microscope Identification and four-point probe electrical analysis, and then use the vector network analyzer, the radar wave band (3-18 GHz) of the electromagnetic properties of the study. The results showed that PAN nanofibers could obtain more uniform diameter PAN nanofibers at a concentration of 10 wt%, a voltage of 20 kV, a feeding rate of 0.025 ml/min, and a collection distance of 15 cm. The surface roughness increases with the addition of 15 wt% SiC nanoparticles, which means that the SiC nanoparticles begin to agglomerate, but there is no apparent aggregation of silicon carbide nanoparticles compared with 20 wt%. At room temperature measurement, the sample number (A2)

* 通訊作者：彭政雄 地址：30401 新竹縣新豐鄉新興路 1 號 Tel：(03)5593142 轉 2119
E-mail：chpeng@must.edu.tw

increases with the thickness of the maximum reflection loss increases, and will move to low frequency, the thickness of 8 mm, in the 13.79-17.54 GHz frequency range, the reflection loss is less than -10 dB of the bandwidth of 3.75 GHz, the maximum reflection loss at the radar frequency of 15.29 GHz is -38.19 dB.

Keywords : Electrospinning, polyacrylonitrile, silicon carbide, electromagnetic wave absorbing material

一、前言

近年來，電子數位科技、通訊設備、電子產品日新月異，帶給人們便捷舒適的環境，但這些舒適便利的電子產品對人體有意料之外的影響，給人們帶來了無形的副產物-電磁波(Electromagnetic wave)。電磁波波長較長能量較低，雖然不會對環境造成什麼影響，但長期暴露可能會對人體上造成某種程度的傷害。電子產品所發出的電磁波相互干擾(Electromagnetic interference, EMI)，而造成機器運作失效或者電磁相容(Electromagnetic Compatibility, EMC)的故障，這都是因為沒有建立良好的電磁波防護。所以任何電子儀器在上市前都必須通過電磁波干擾檢定標準，以避免電子儀器間電磁波輻射干擾來影響其他電子產品之正常運作，而同時也可以降低電磁波輻射對人體造成傷害。

因此，屏蔽材料(Shielding materials)及吸收材料(Absorb materials)的開發使用與發展應用上也越顯重要。理想的吸波材料必須滿足以下兩個條件：(1)自由空間與材料表面的阻抗匹配以減少電磁波的反射，要求材料的複介電常數與複磁導率接近；(2)進入材料內部的電磁波需盡可能的被損耗，因此材料要有足夠大的電損耗或者磁損耗，即夠高的複介電常數或者複磁導率。而複磁導率與複介電常數基本相等的吸收體；1/4 波長“諧振”吸收體；阻抗漸變“寬頻”吸收體；衰減表面電流的薄層吸收體。同時需具有“材料薄、重量輕、頻段寬、強度強”等特點，但單一類型之材料很難同時滿足這些要求，因此需將具有不同特性之材料進行複合，而得到展新的吸波材料。本研究以碳纖維為基體材料，碳化矽為介電材料，以靜電紡絲法製備 SiC/PAN 複合奈米纖維材料。首先藉由改變四種

製程參數：PAN 濃度、收集板電壓、注射速率及收集距離，探討這些參數對 PAN 奈米纖維形貌及直徑的影響。合成 SiC/PAN 複合奈米纖維部份，分別添加不同重量百分比濃度的 SiC 奈米顆粒至前驅溶液中，再以前述 PAN 條件進行電紡製備。同時，藉由不同重量百分比濃度的 SiC/PAN 複合奈米纖維進行電磁波吸收之探討研究。

二、實驗介紹

(一)實驗流程

本實驗分為三大部分，第一部份為控制不同製程參數(濃度、電壓、注射速率及收集距離)以獲得纖維直徑分布均勻的PAN奈米纖維；第二部份為添加不同重量百分濃度的SiC奈米顆粒的複合奈米纖維；第三部份為自由空間法之電磁波分析。實驗流程如下表示：

1. 製備PAN奈米纖維

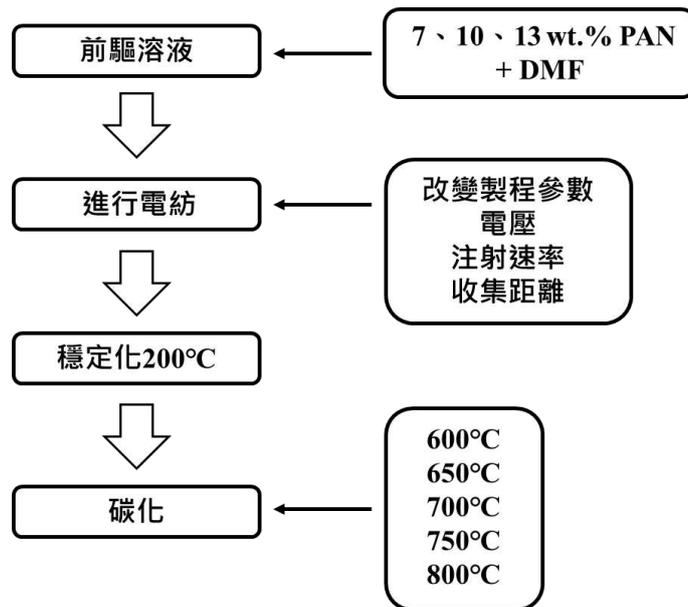


圖2.1 實驗流程圖(PAN奈米纖維)

2. 製備SiC/PAN複合奈米纖維

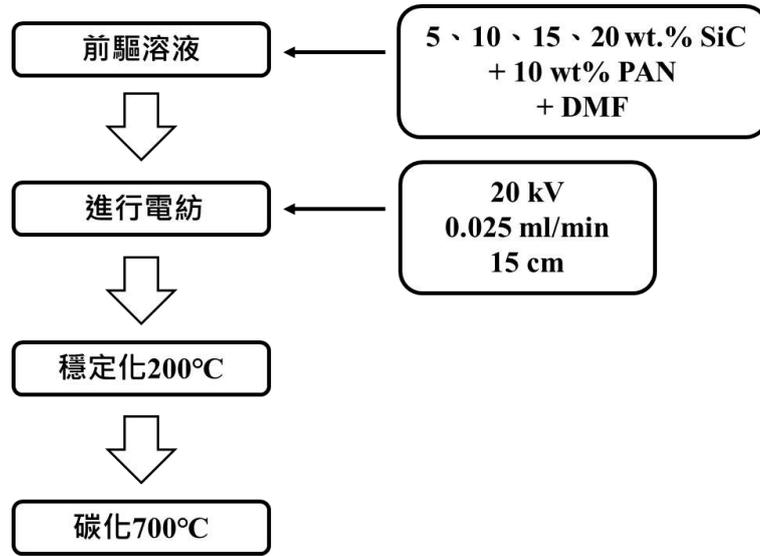


圖2.2 實驗流程圖(SiC/PAN複合奈米纖維)

3. 吸收膠片製作流程

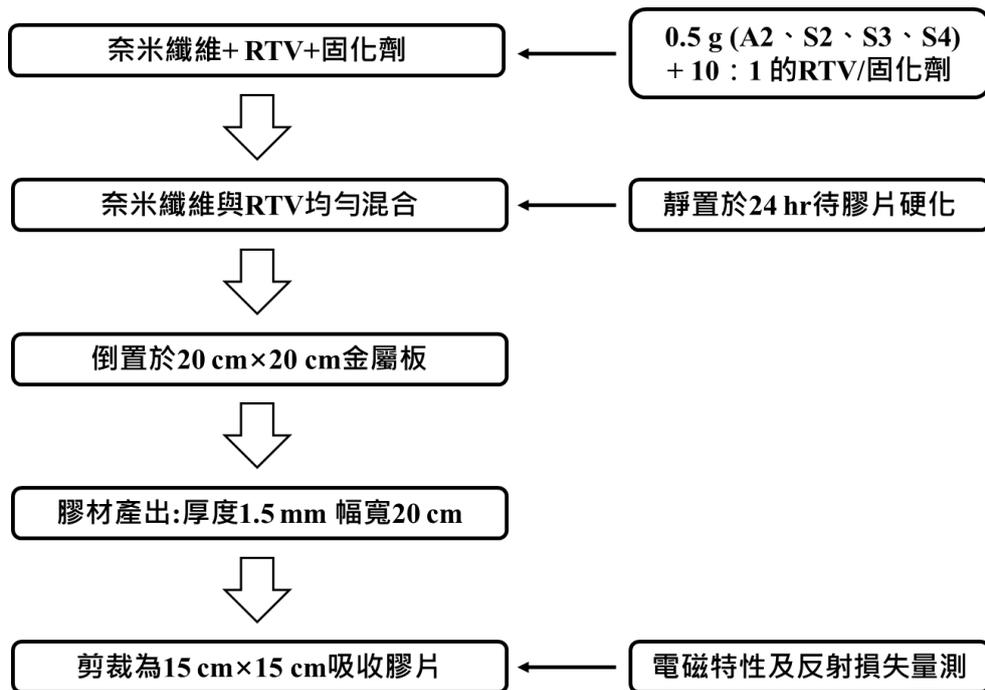


圖2.3 實驗流程圖(吸收膠片)

4. 實驗參數與代號說明

本實驗利用靜電紡絲法製備PAN奈米纖維，藉以探討紡絲溶液濃度、電壓、注射速率以及收集距離對奈米纖維的影響；第二部分，使用粒徑約為45-65 nm的SiC奈米顆粒添

加至前驅溶液中，並探討不同重量百分比濃度的SiC/PAN複合奈米纖維；最後，利用自由空間法探討電磁波之特性。

表2.1、參數編號

| 試片代號 | 聚丙烯腈(A) (wt%) | 碳化矽(S) (wt%) | 電壓(V) (kV) | 注射速率(R) (ml/min) | 距離(D) (cm) |
|------|------------------|-----------------|---------------|---------------------|---------------|
| A1 | 7 | - | 20 | 0.025 | 15 |
| A2 | 10 | - | 20 | 0.025 | 15 |
| A3 | 13 | - | 20 | 0.025 | 15 |
| V1 | 10 | - | 15 | 0.025 | 15 |
| V2 | 10 | - | 20 | 0.025 | 15 |
| V3 | 10 | - | 25 | 0.025 | 15 |
| V4 | 10 | - | 30 | 0.025 | 15 |
| R1 | 10 | - | 20 | 0.015 | 15 |
| R2 | 10 | - | 20 | 0.020 | 15 |
| R3 | 10 | - | 20 | 0.025 | 15 |
| R4 | 10 | - | 20 | 0.030 | 15 |
| D1 | 10 | - | 20 | 0.025 | 10 |
| D2 | 10 | - | 20 | 0.025 | 15 |
| D3 | 10 | - | 20 | 0.025 | 20 |
| S1 | 10 | 5 | 20 | 0.025 | 15 |
| S2 | 10 | 10 | 20 | 0.025 | 15 |
| S3 | 10 | 15 | 20 | 0.025 | 15 |
| S4 | 10 | 20 | 20 | 0.025 | 15 |

三、結果與討論

(一) 聚丙烯腈纖維

1. 聚丙烯腈濃度

在PAN濃度實驗中，其餘電紡參數皆為固定，電壓為20 kV，注射速率為0.025 ml/min，收集距離為15 cm及收集時間為1小時。由實驗結果歸納得知，紡絲溶液濃度直接影響可電紡性，當紡絲溶液黏度過低，在電紡過程中射流不穩定，使纖維帶有大量的串珠結構，甚至會使溶液以液滴的形式滴落；而黏度過高會導致靜電力無法克服表面張力，在電紡過程中無法形成射流。PAN濃度為10 wt.% 電紡纖維較為均一(平均直徑為687 nm)，因此選擇此濃度為最佳紡絲溶液條件，以下實驗均以此濃度作為紡絲溶液。

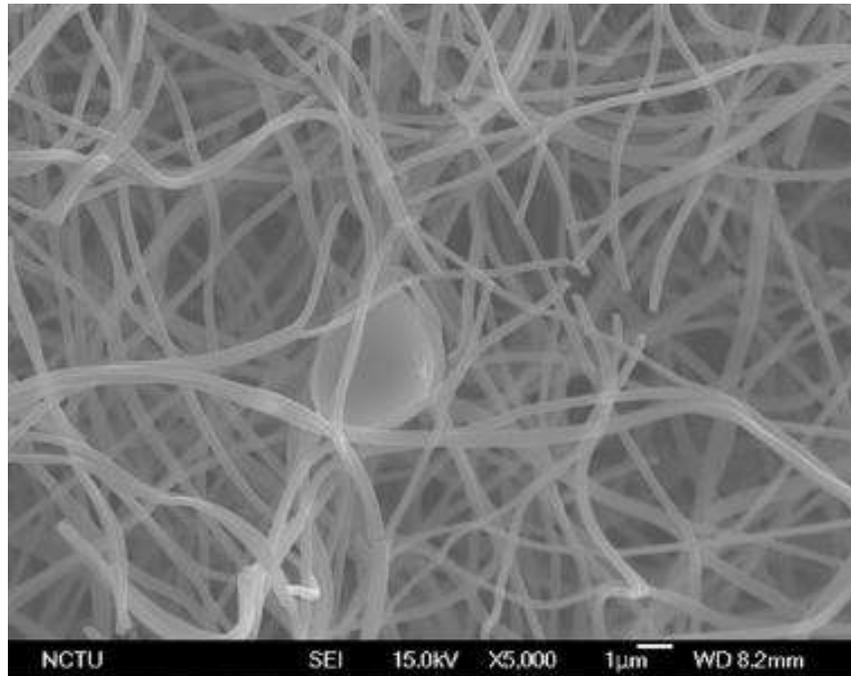


圖 3.1 試片編號 A1 之 SEM 圖

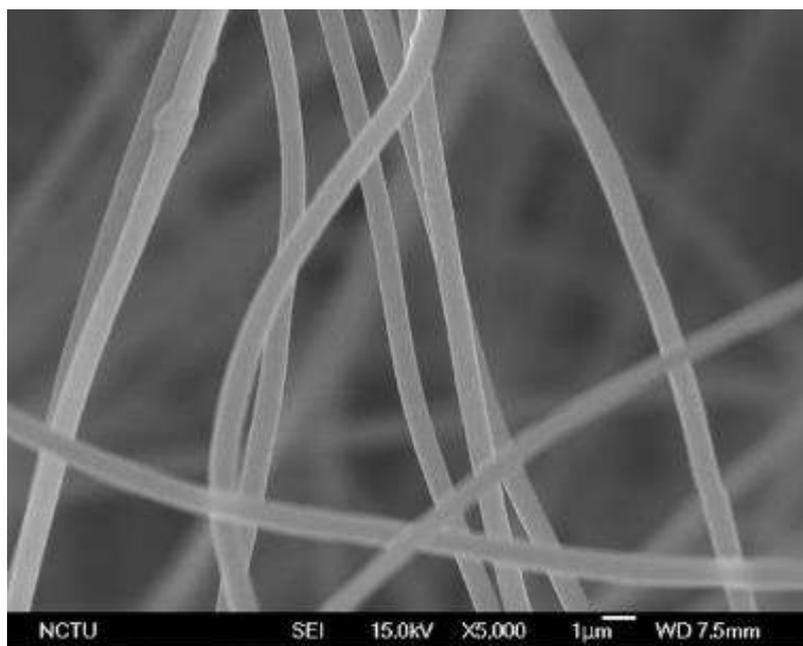


圖 3.2 試片編號 A2 之 SEM 圖

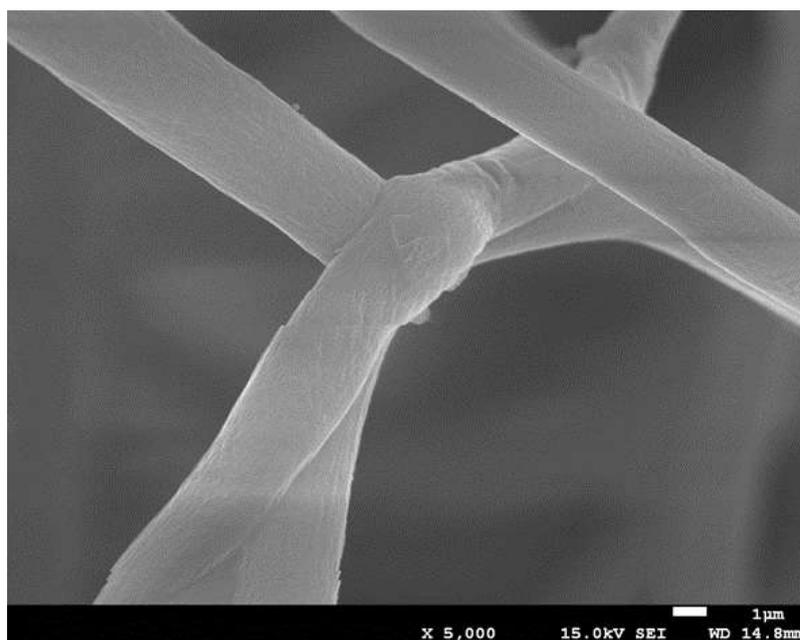


圖 3.3 試片編號 A3 之 SEM 圖

2. 電壓

在電壓實驗中，其餘電紡參數皆為固定，濃度為10 wt.%，注射速率為0.025 ml/min，收集距離為15 cm及收集時間為1小時。所有的奈米纖維都經由熱退火後而縮小。由實驗結果歸納得知，電壓的增加對射流的穩定性影響很大，過高或過低的電壓均不能穩定電紡，且電壓對纖維的粗細均勻性有較大的影響。當電壓在20 kV時，所產生的纖維直徑較為細小，且差異不大，因此選擇此電壓為最佳實驗條件。不同電壓所電紡的纖維直徑分佈圖如3.8所示。

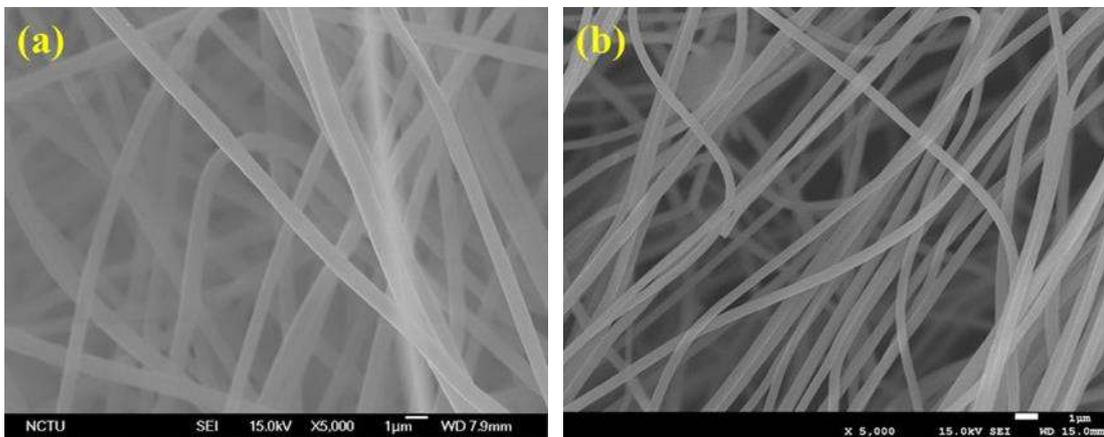


圖 3.4 試片編號 V1 之 SEM 圖；(a)初紡纖維，(b)碳化纖維

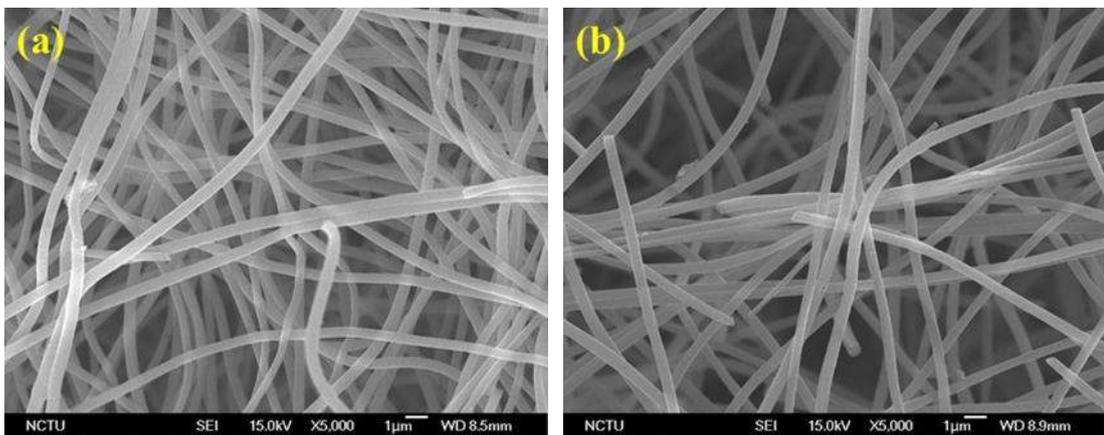


圖 3.5 試片編號 V2 之 SEM 圖；(a)初紡纖維，(b)碳化纖維

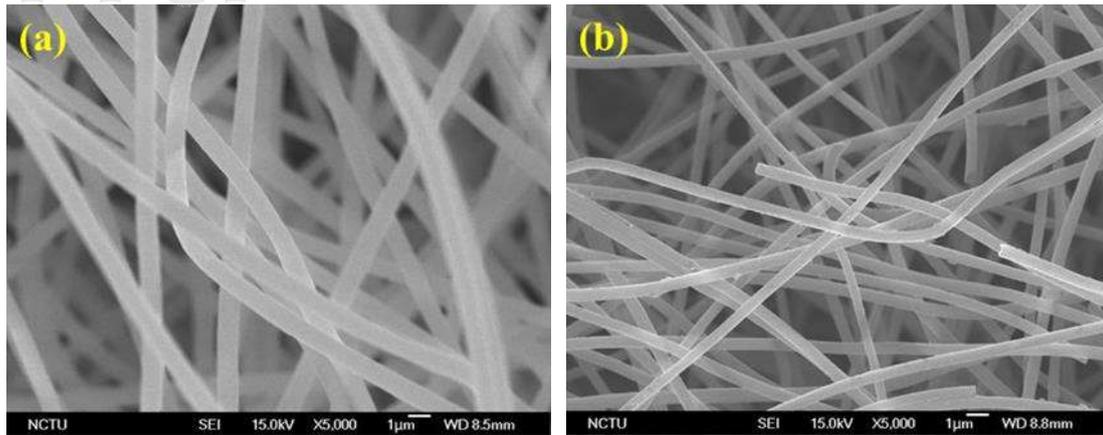


圖 3.6 試片編號 V3 之 SEM 圖；(a)初紡纖維，(b)碳化纖維

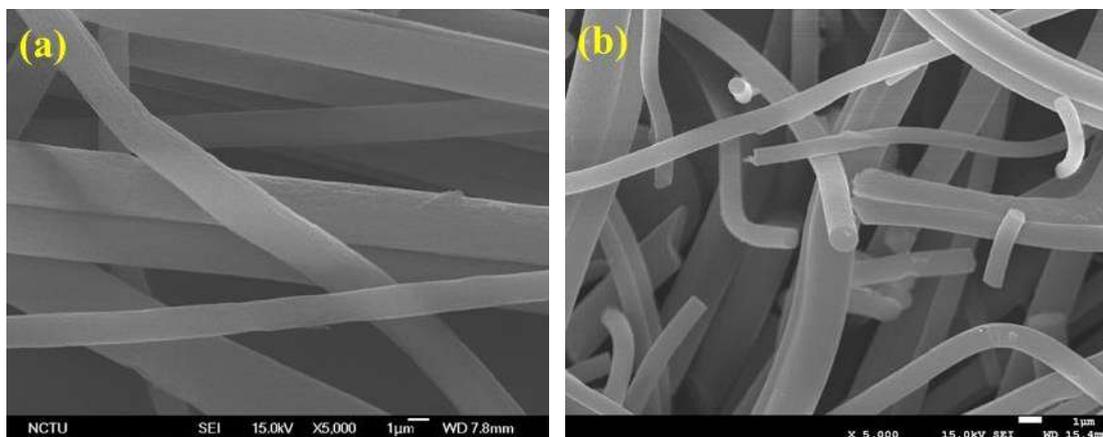


圖 3.7 試片編號 V4 之 SEM 圖；(a)初紡纖維，(b)碳化纖維

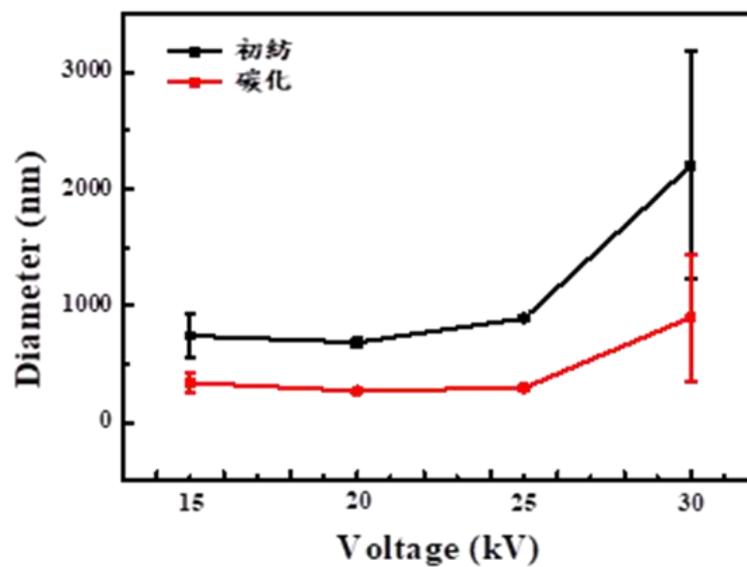


圖 3.8 不同電壓之纖維直徑分佈圖

3. 注射速率

在注射速率實驗中，其餘電紡參數皆為固定，PAN 濃度為 10 wt.%、電壓為 20 kV，收集距離為 15 cm 及收集時間為 1 小時。所有的奈米纖維都經由熱退火後而縮小。由實驗結果中歸納得知，當注射速率過大或過小時，皆會使纖維直徑變得粗細不均。注射速率為 0.025 ml/min，所電紡的纖維直徑均均(初紡纖維平均直徑為 687 nm)，因此選擇此注射速率為最佳條件。不同注射速率所電紡的纖維直徑分佈圖如 3.13 所示。

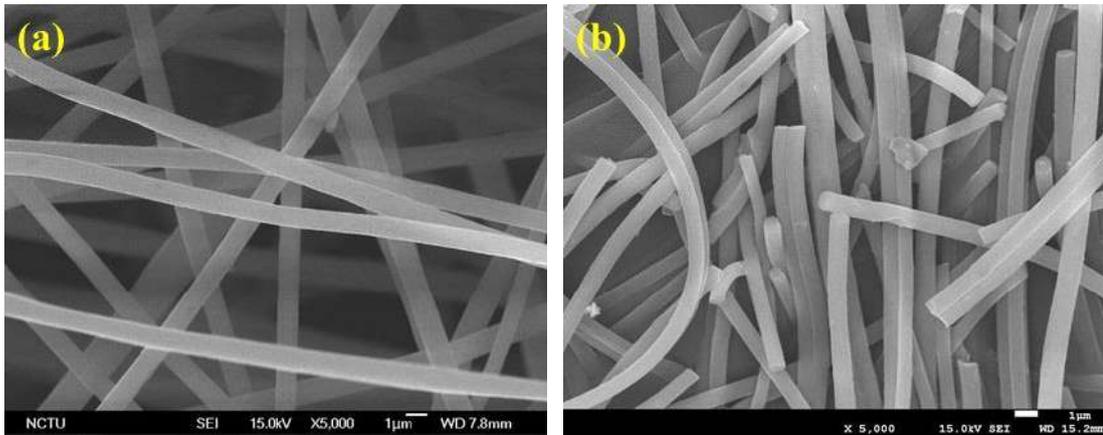


圖 3.9 試片編號 R1 之 SEM 圖；(a)初紡纖維，(b)碳化纖維

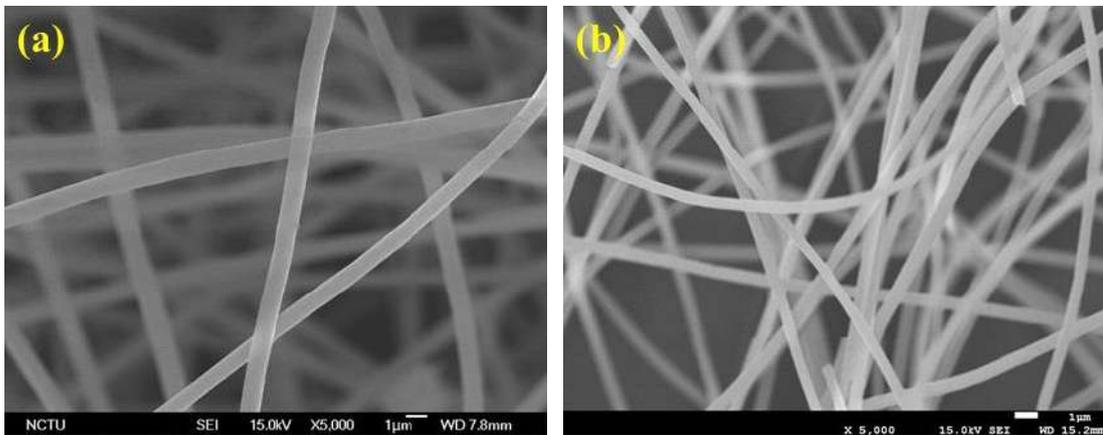


圖 3.10 試片編號 R2 之 SEM 圖；(a)初紡纖維，(b)碳化纖維

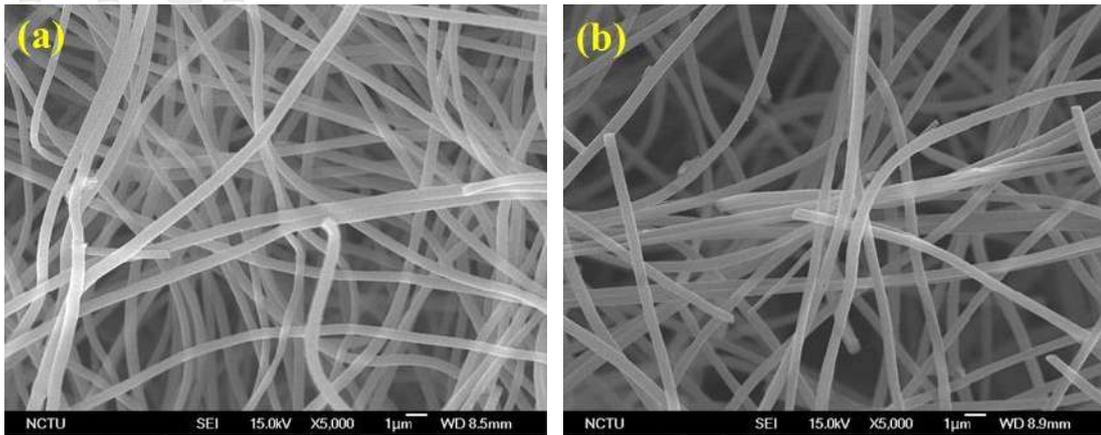


圖 3.11 試片編號 R3 之 SEM 圖；(a)初紡纖維，(b)碳化纖維

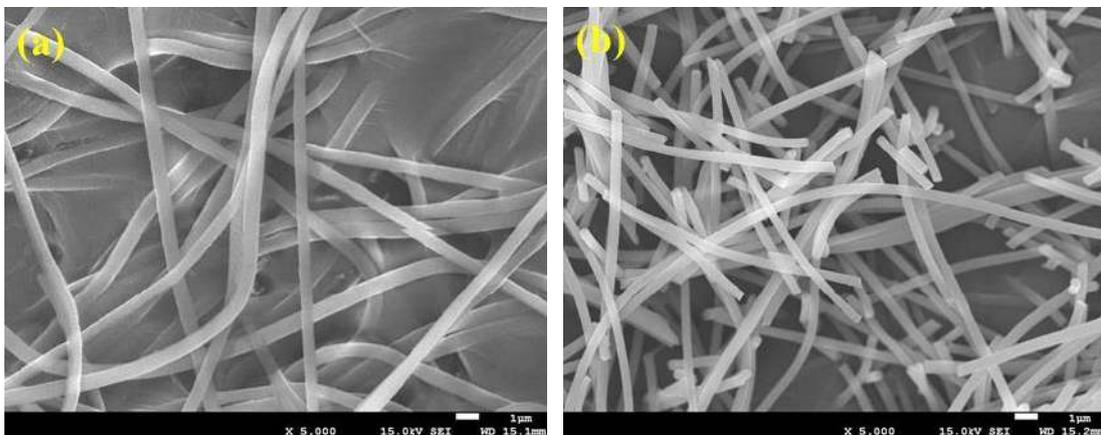


圖 3.12 試片編號 R4 之 SEM 圖；(a)初紡纖維，(b)碳化纖維

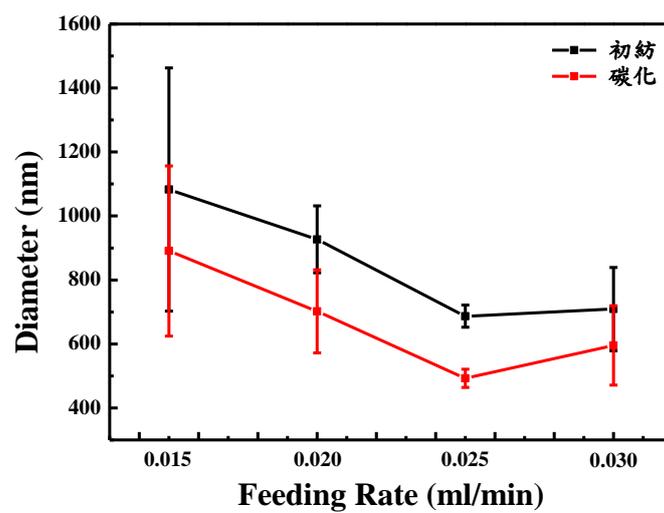


圖 3.13 不同注射速率之纖維直徑分佈圖

4. 收集距離

在收集距離實驗中，其餘電紡參數皆為固定，PAN 濃度為 10 wt.%、電壓為 20 kV，注射速率為 0.025 ml/min 及收集時間為 1 小時。所有的奈米纖維都經由熱退火後而縮小。由上述實驗結果歸納得知，收集距離對纖維直徑大小影響很明顯，所以在固定電壓下，收集距離越大，所得到的纖維直徑越細，但當收集距離到達一定距離後，纖維直徑將不會再減少。不同收集距離所電紡的纖維直徑分佈圖如 3.17 所示。

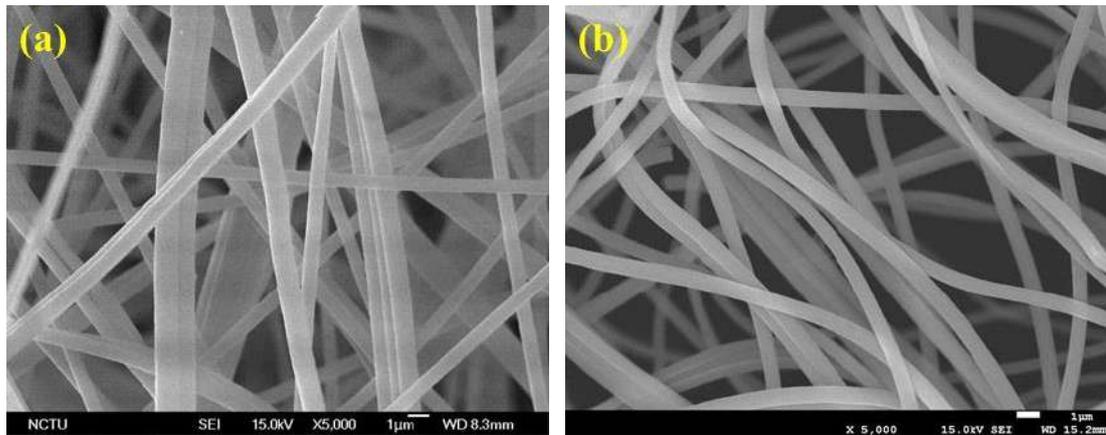


圖 3.14 試片編號 R4 之 SEM 圖；(a)初紡纖維，(b)碳化纖維

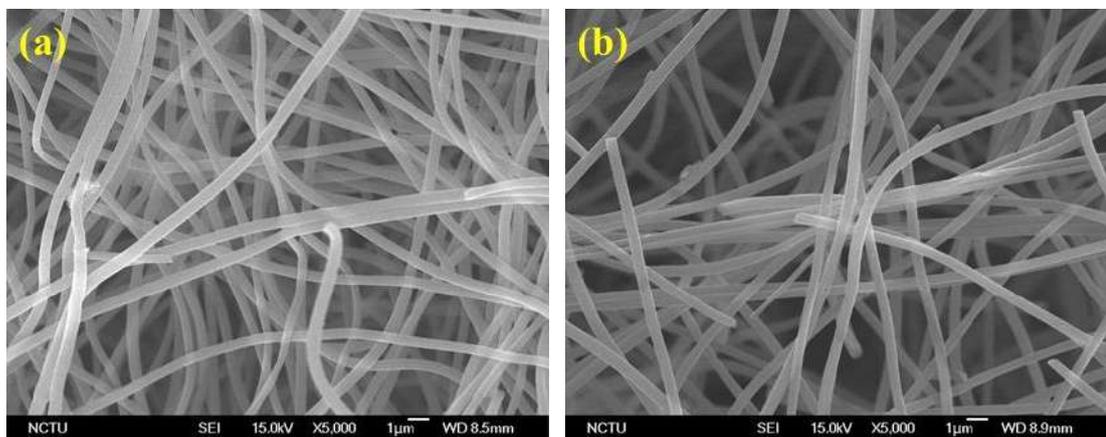


圖 3.15 試片編號 R4 之 SEM 圖；(a)初紡纖維，(b)碳化纖維

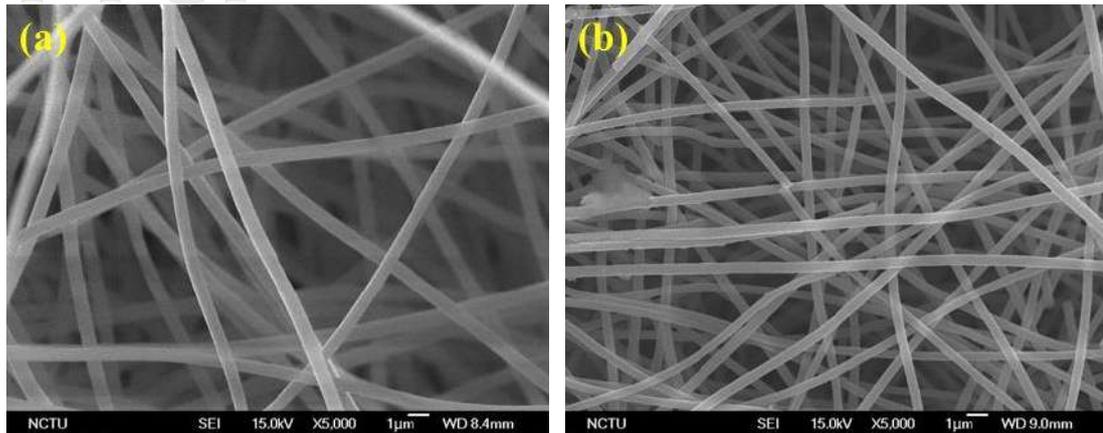


圖 3.16 試片編號 R4 之 SEM 圖；(a)初紡纖維，(b)碳化纖維

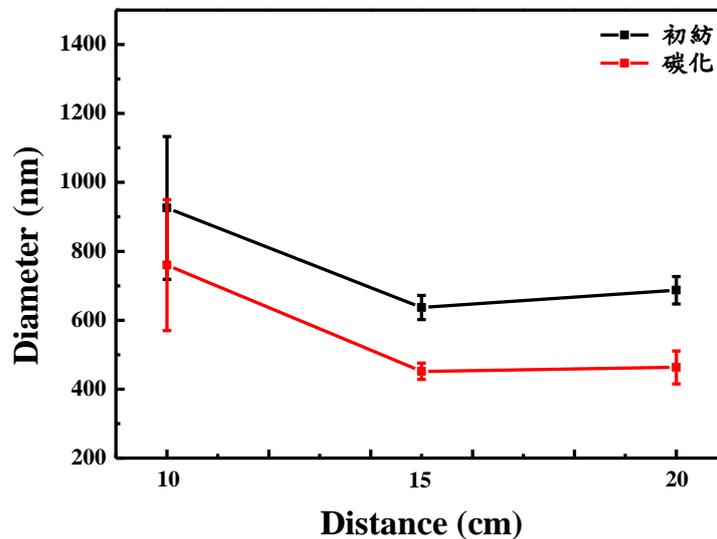


圖 3.17 不同收集距離之纖維直徑分佈圖

(二) SiC/PAN 複合奈米纖維

1. SiC/PAN 複合奈米纖維 XRD 分析

SiC 奈米顆粒之 XRD 繞射圖，在 2θ 角為 35.74° 、 41.54° 、 60.14° 、 71.96° 、 75.82° 呈現較明顯的 β -SiC 繞射峰，分別對應為 (111)、(200)、(220)、(311) 及 (222) 晶面。此外，在 β -SiC 最強峰前面有一個小峰，這為 β -SiC 中 (111) 面的堆疊層錯 (stacking faults) 所引起。圖 3.19 為本實驗所使用的 SiC 奈米顆粒之 XRD 繞射圖。圖 3.18 為 SiC 之 JCPDS-No-

291129，可以驗證本研究所使用SiC為面心立方晶體結構(Face-centered cubic crystal structure)，繞射峰角度分別為 35.62° 、 41.41° 、 60.02° 、 71.84° 、 75.56° 皆與粉體符合。

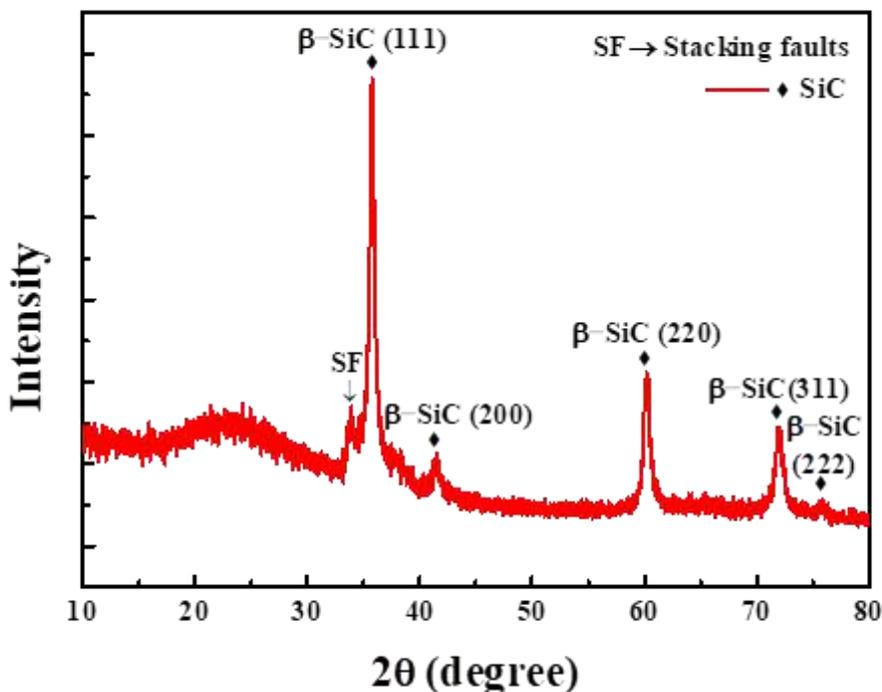


圖 3.18 SiC 奈米顆粒之 XRD 繞射圖

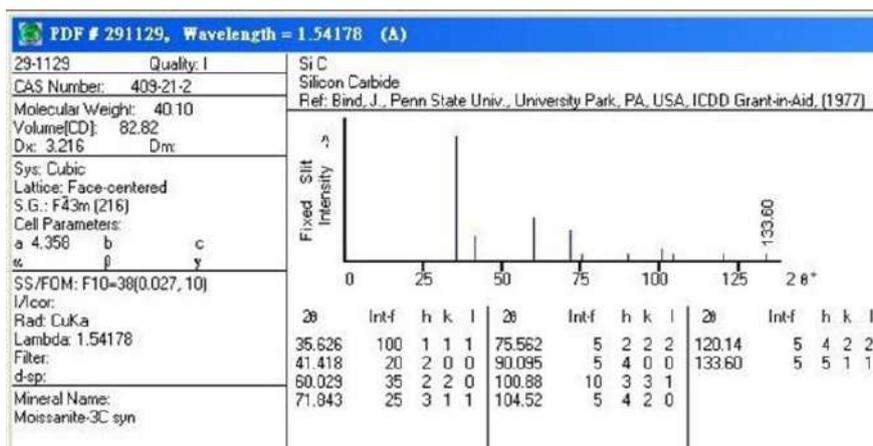


圖 3.19 SiC 之 JCPDS

PAN之XRD繞射圖，在 $2\theta = 17.12^\circ$ 、 29.38° 可以觀察到PAN的繞射峰，對應的晶面

為(010)及(300)。圖3.20為本實驗所使用的PAN之XRD繞射圖。圖3.20為靜電紡絲法所製備的15 wt.%的SiC/PAN的初紡纖維、穩定化及碳化後的奈米纖維之XRD分析結果。如圖3.21(a)可以看出，在初紡纖維中PAN單獨的繞射峰比SiC的繞射峰相對明顯許多。圖3.21(b)為SiC/PAN複合奈米纖維經200°C穩定化處理後的繞射圖，由圖中可以看出穩定化的奈米纖維在 $2\theta = 17^\circ$ 、 29° 處有較明顯的繞射峰，此峰對應於PAN的結晶相；而在 $2\theta = 35^\circ$ 、 60° 、 71° 處的繞射峰，對應於SiC的結晶相。圖3.21(c)為SiC/PAN複合奈米纖維經700°C熱處理後的繞射圖，在 $2\theta = 25.5^\circ$ 處有寬廣的繞射峰，此峰應為碳結晶；而在 $2\theta = 36.45^\circ$ 、 61.12° 、 72.63° 處可以觀察出SiC的繞射峰，結果顯示SiC以面心立方晶體結構存在於奈米纖維裡。

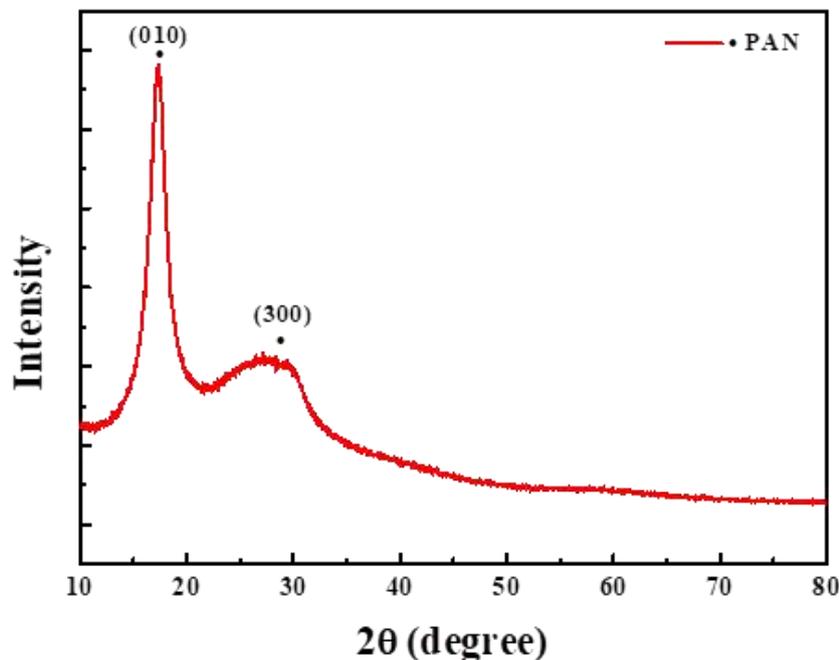


圖3.20 PAN之XRD繞射圖

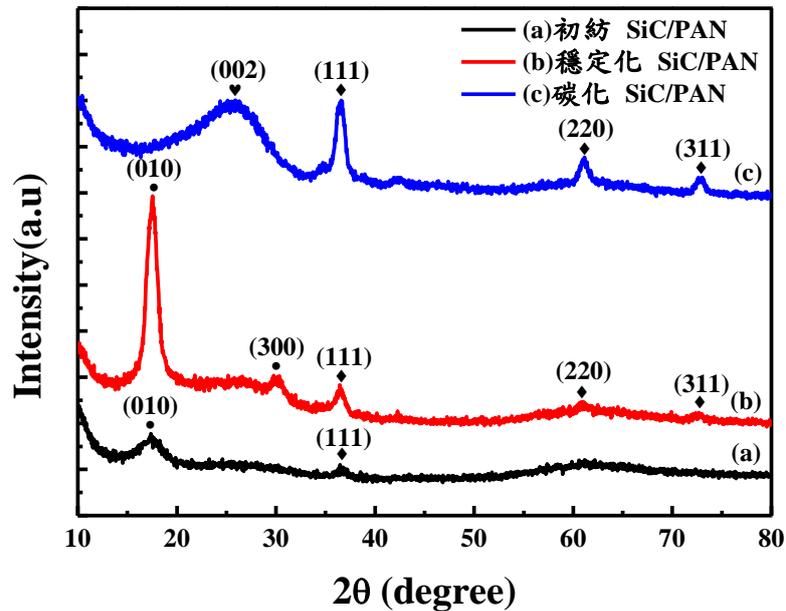


圖3.21 試片編號S3之XRD繞射圖

2. SiC/PAN複合奈米纖維SEM分析

由 SEM 結果顯示，在前驅溶液中的 SiC 奈米顆粒可以穩定的被電紡成 SiC/PAN 複合奈米纖維。當 SiC 濃度不高時，奈米顆粒沿著纖維均勻分佈，而隨著 SiC 濃度的增加，奈米顆粒開始形成團聚並出現不均勻的分佈。當 SiC 濃度在 15 wt.%時，表面雖然顯得粗糙，但並無明顯團聚與分布不均，因此選擇此濃度為最佳條件。

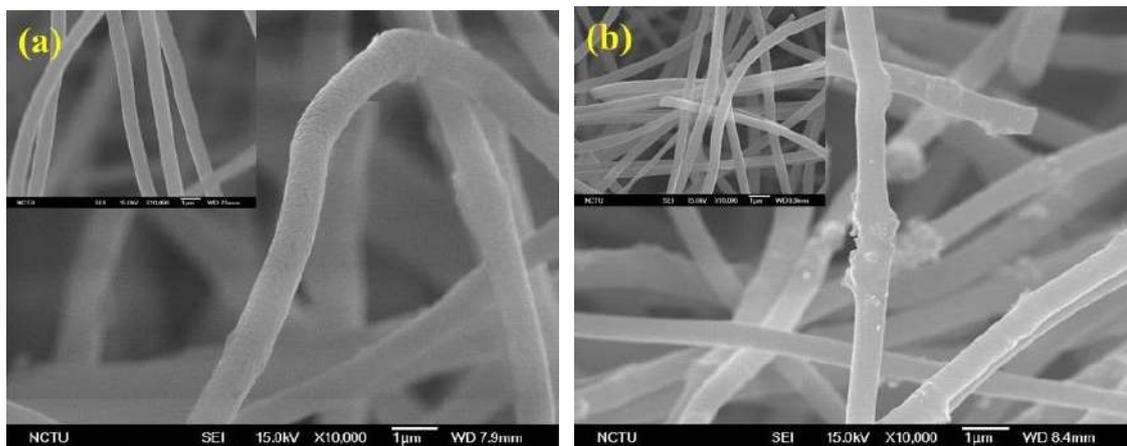


圖 3.22 試片編號 S1 之 SEM 圖；(a)初紡纖維，(b)碳化纖維

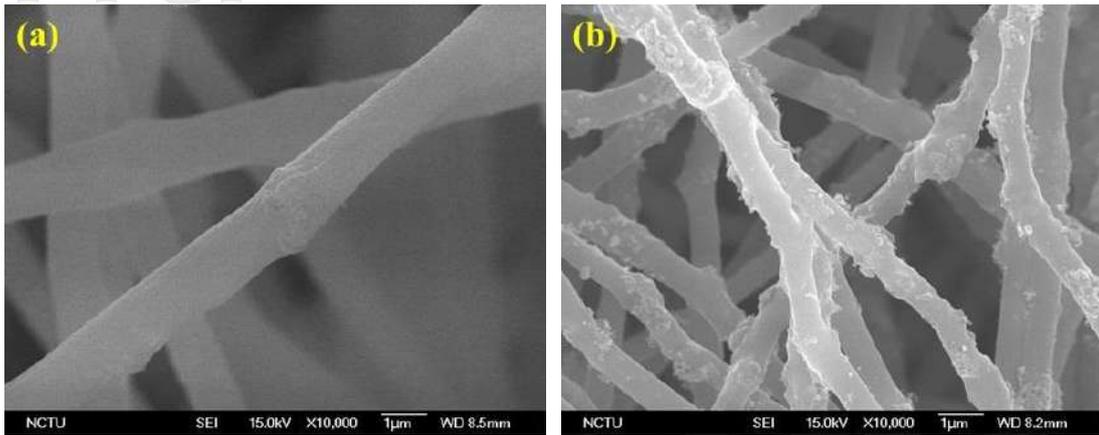


圖 3.23 試片編號 S2 之 SEM 圖；(a)初紡纖維，(b)碳化纖維

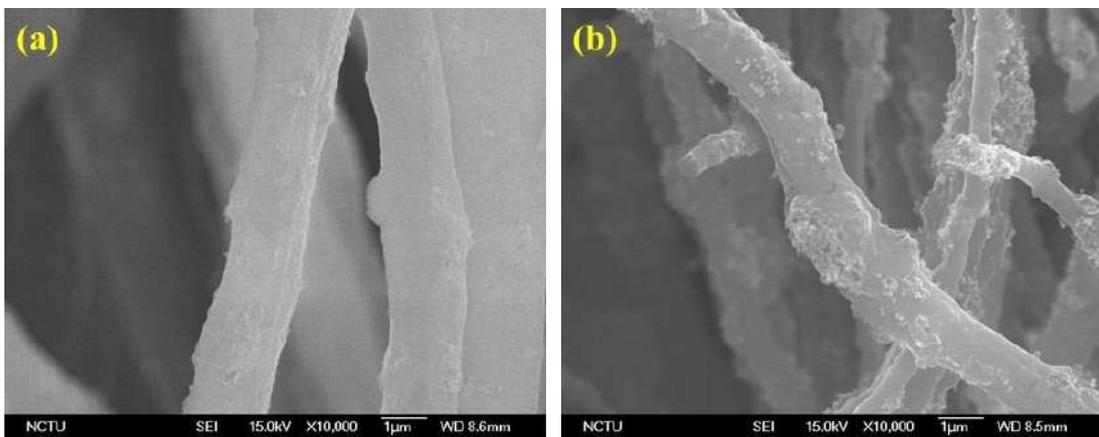


圖 3.24 試片編號 S3 之 SEM 圖；(a)初紡纖維，(b)碳化纖維

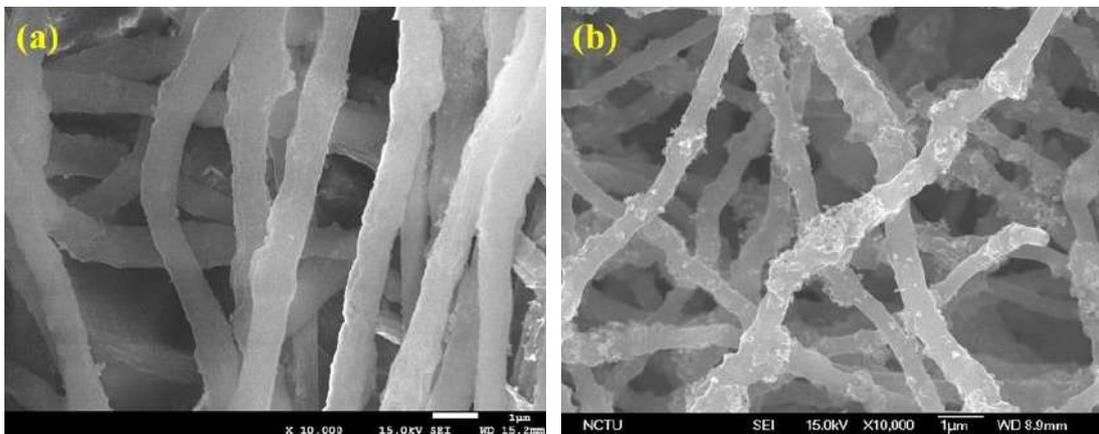


圖 3.25 試片編號 S4 之 SEM 圖；(a)初紡纖維，(b)碳化纖維

3. SiC/PAN複合奈米纖維TEM分析

圖3.26為靜電紡絲法所製備的15 wt.% SiC/PAN複合奈米纖維進行之TEM分析結果。圖3.26(a)為單根15 wt.%的SiC/PAN複合奈米纖維之TEM影像，可以看出纖維表面粗糙，SiC奈米顆粒開始凝聚，但沒有明顯觀察到SiC奈米顆粒團聚。因TEM的電子透光小於100 nm，而導致電子束無法輕易穿透纖維本身，所以無法清楚觀察到SiC奈米顆粒在纖維當中實際的分布狀況。圖3.26(b)為奈米纖維的高解析TEM影像，由晶格影像可以觀察到，SiC/PAN複合奈米纖維沿著[111]晶向生長，晶格平面間距為0.25 nm，此間距對應於 β -SiC為其(111)面的晶面間距。

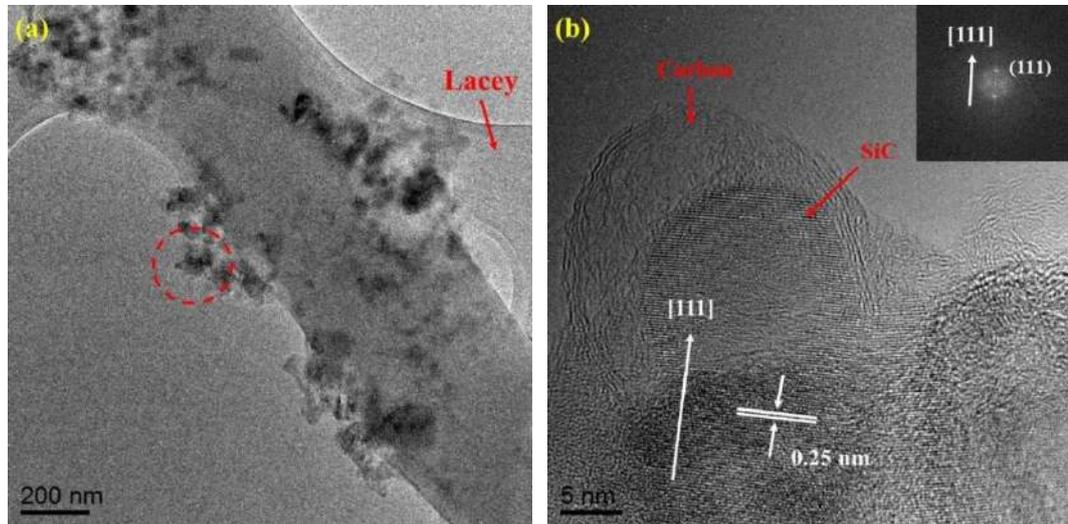


圖3.26 試片編號S3之TEM圖；(a) 微觀影像，(b)高解析TEM影像

圖3.27為靜電紡絲法所製備的20 wt.% SiC/PAN複合奈米纖維進行之TEM分析結果。圖3.27(a)為單根20wt.%的 SiC/PAN複合奈米纖維之TEM影像，纖維表面粗糙度增加，而且可以明顯觀察到SiC沿著PAN奈米纖維的外表面團聚。圖3.27(b)為奈米纖維的高解析TEM影像，如上述所說，經由晶格影像可以觀察到，SiC/PAN複合奈米纖維沿著[111]晶向生長，相鄰的兩晶格平面間距為0.25 nm，所對應於 β -SiC的(111)面的晶面間距。

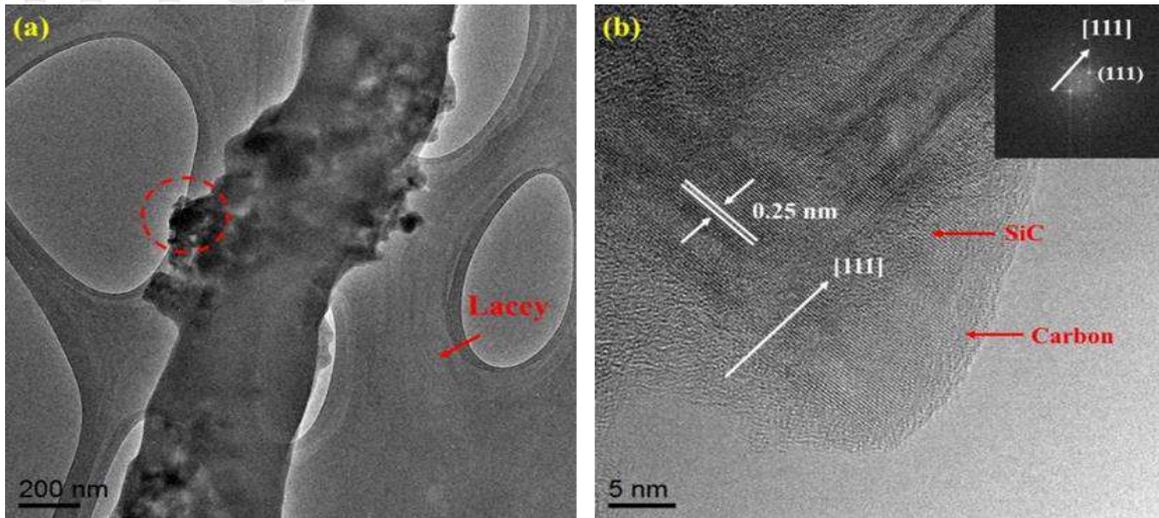


圖3.27 試片編號S4之TEM圖；(a) 微觀影像，(b)高解析TEM影像

4. SiC/PAN複合奈米纖維TGA分析

圖3.28為靜電紡絲法所製備的穩定化之SiC/PAN複合奈米纖維於氮氣氣氛中進行之熱重分析結果，由圖中曲線可以看出約在300 °C開始發生裂解反應，在300 °C以下主要為脫氫及環化反應，形成有序排列的環狀結構。PAN奈米纖維在300 °C以內很穩定，而在300 °C以上快速分解，這與PAN熔點為317 °C的性質吻合。在300 °C ~ 480 °C為H₂O、HCN、NH₃之裂解反應。在480 °C以上，SiC/PAN複合奈米纖維於此溫度以上開始進行N₂、CO、CO₂脫去反應，如圖3.29所示。由曲線可以觀察出加入SiC濃度越高的奈米纖維，在脫氮碳化反應中的重量損失明顯減少且反應溫度相對提高。當溫度由480 °C往上加熱至800 °C時，試片編號A2、S1、S2、S3、S4明顯減少，分別為9.69、12.49、18.16、20.78、24.23 wt.%。

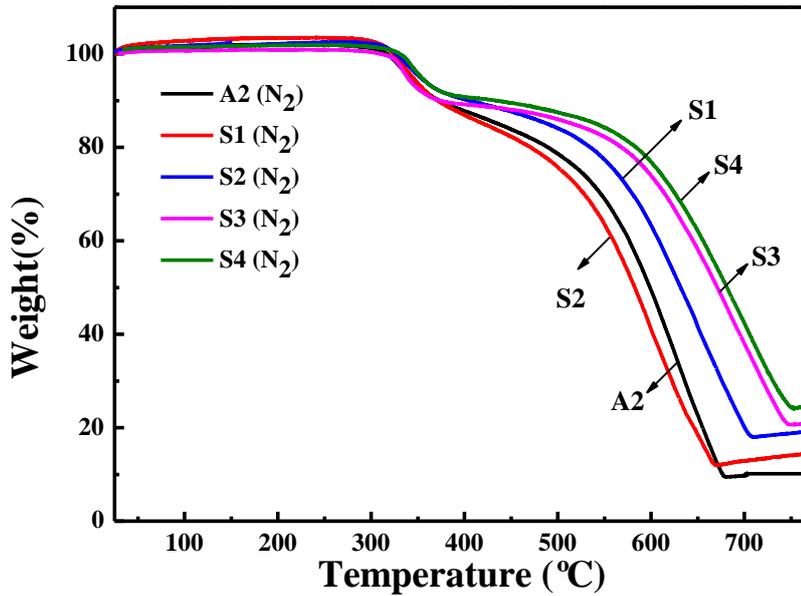


圖3.28 不同重量百分比濃度之穩定化TGA圖

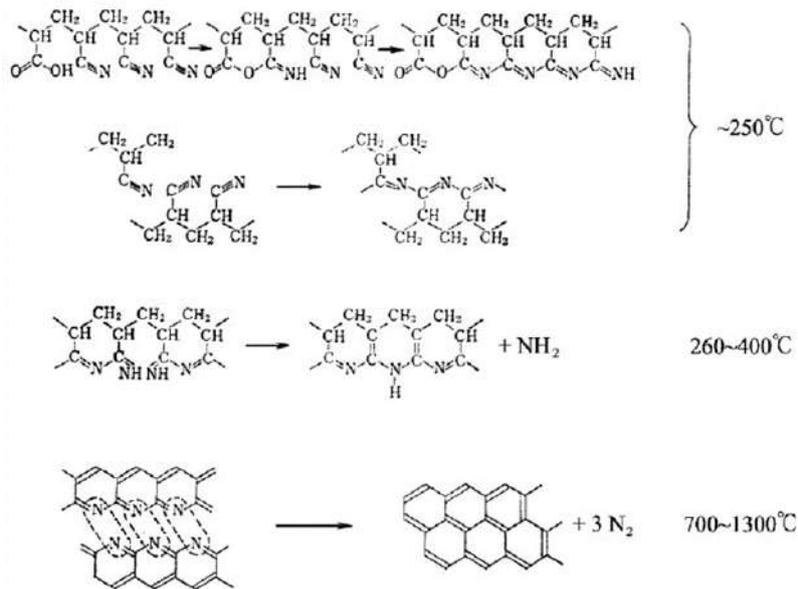


圖3.29 PAN纖維轉變成碳纖維之反應

圖3.30為靜電紡絲法所製備的碳化SiC/PAN複合奈米纖維材料於氮氣氣氛中進行之熱重分析結果，分別以不同重量百分比濃度5、10、15及20 wt.% SiC之TGA圖比較。PAN奈米纖維在500 °C左右重量損失明顯的快速減少，而與PAN奈米纖維相比，SiC/PAN複

合奈米纖維的重量損失開始於稍高的溫度，SiC/PAN複合奈米纖維的總重量損失百分比也隨著SiC含量增加而增加。SiC/PAN複合奈米纖維初期由室溫加熱至550 °C時，重量無明顯減少。當溫度由550 °C往上加熱至750 °C時，試片編號S1、S2、S3、S4明顯減少分別為18.3、26.87、31.86、44.51%；而PAN奈米纖維在氮氣氣氛中顯示近96.19 %的重量百分比損失。

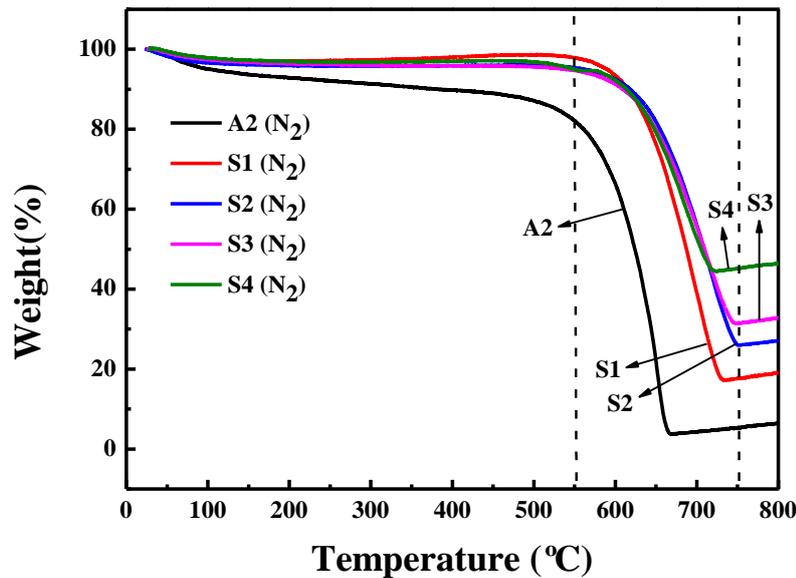


圖3.30不同重量百分比濃度之碳化TGA圖

5. SiC/PAN複合奈米纖維電性分析

圖3.31為在氮氣氣氛中熱處理並且持溫1小時後所得到的PAN奈米纖維之電阻值，本實驗在20處不同位置進行量測，最後獲得一個平均電阻值。試片編號A2-650、A2-700、A2-750、A2-800的平均電阻值分別為698.85、137.46、23.69、14.33 Ω 。

圖3.32為在氮氣氣氛中700 °C熱處理並且持溫1小時後所得到的碳纖維及SiC/PAN複合奈米纖維之電阻值，本實驗在20處不同位置進行量測，最後獲得一個平均電阻值。試片編號A2的平均電阻值為137.46 Ω ，而添加不同重量百分比濃度的SiC電阻值明顯增加，試片編號為S1、S2、S3、S4的平均電阻分別為440.84、468.35、485.78、483.14 Ω 。

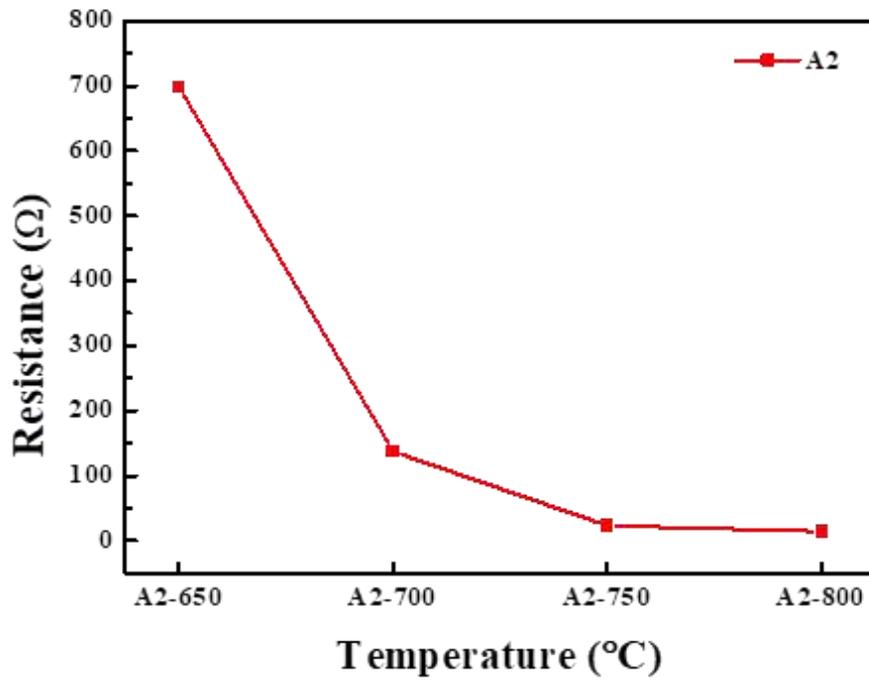


圖3.31 試片編號A2電阻值與溫度變化之關係圖

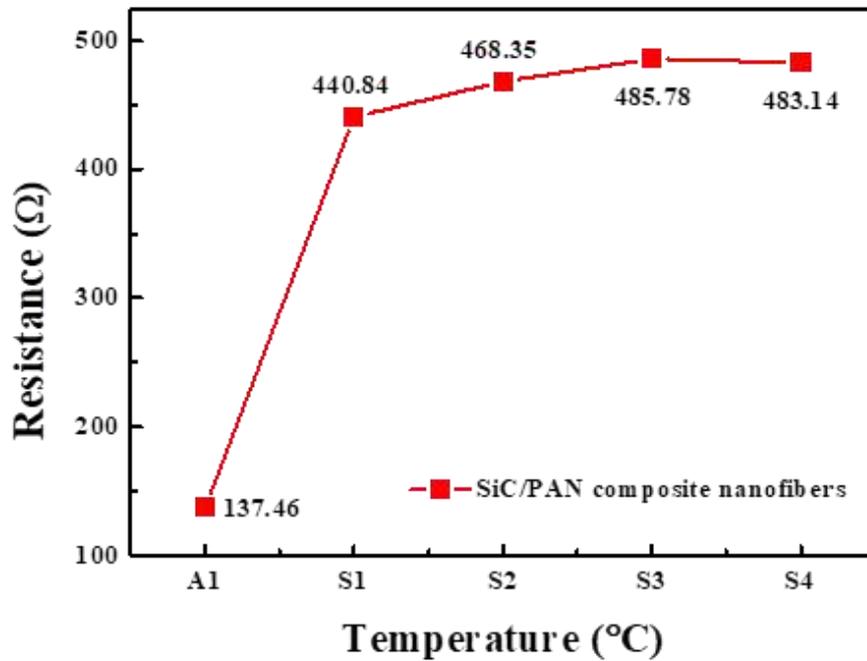


圖3.32 SiC/PAN複合奈米纖維之電阻值分佈圖

(三)自由空間法電磁特性分析

1. 釐米波電磁參數分析

表3.1 電磁波吸收劑電磁特性分析表

| | A2 | S2 | S3 | S4 |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| ϵ' | 4.13-3.05 | 4.11-2.99 | 3.92-2.99 | 4.06-2.97 |
| ϵ'' | 1.02-0.75 | 0.26-0.50 | 0.70-0.47 | 0-0.40 |
| μ' | 1.21-1.05 | 1.20-1.04 | 1.19-1.04 | 1.08-1.06 |
| μ'' | 0.029-0.002 | 0.027-0.014 | 0-0.016 | 0.002-0.004 |
| $\text{Tan}\delta_{\epsilon}$ | 0.247-0.248 | 0.064-0.169 | 0.178-0.159 | 0-0.137 |
| $\text{Tan}\delta_{\mu}$ | 0.023-0.001 | 0.022-0.013 | 0-0.015 | 0.002-0.004 |
| 最大反射損失 dB/GHz | 38.19/15.29 | 17.17/15.59 | 16.09/15.74 | 12.53/15.89 |
| 最佳吸收厚度 | 8 mm | 8 mm | 8 mm | 8 mm |

2. 釐米波反射損失分析

本研究利用SiC/PAN複合奈米纖維材料探討電磁特性之研究，其中以SiC/PAN對RTV重量比為0.9 wt%製作電磁波吸波片，不論是PAN奈米纖維或SiC/PAN複合奈米纖維均呈現優異的反射損失效值。相較於其他電磁波吸波的研究均必須添加大量的電磁波吸收劑，在實際的應用本材料具備材料薄、重量輕、頻段寬、強度強的材料特點。顯示以本靜電紡絲製程所產製之PAN奈米纖維呈現非晶質結晶形態，相較於近年來熱門之石墨烯材料應用於電磁波吸波效果上具備製程簡易、時間短、成本低、效果佳等優勢。

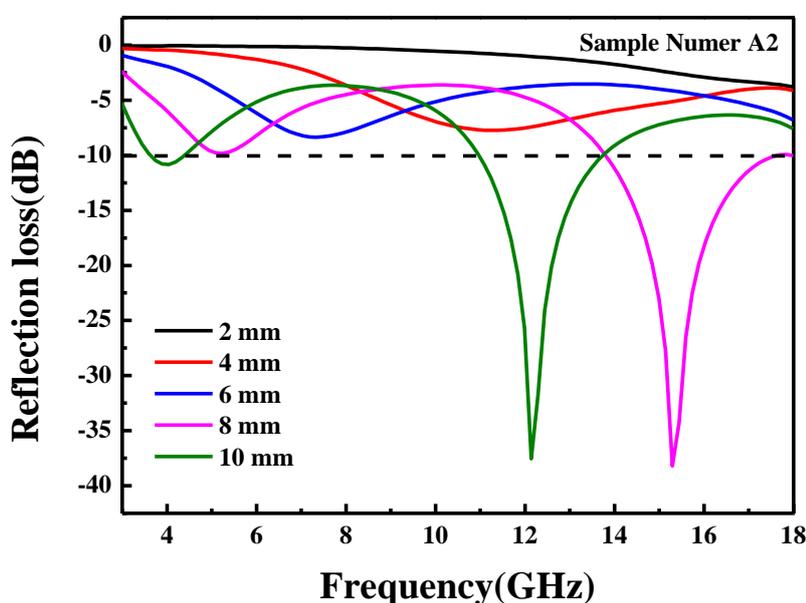


圖3.32 試片編號A2反射損失值與頻率之變化圖

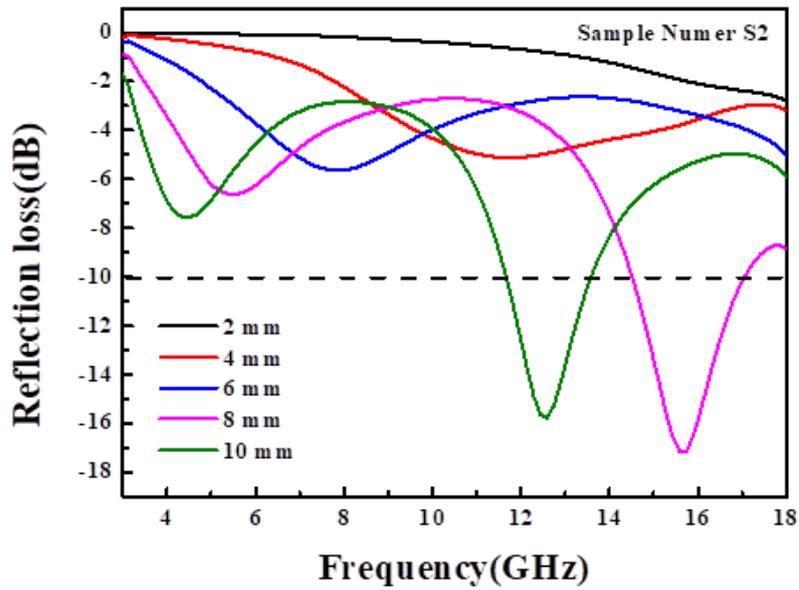


圖3.33 試片編號S2反射損失值與頻率之變化圖

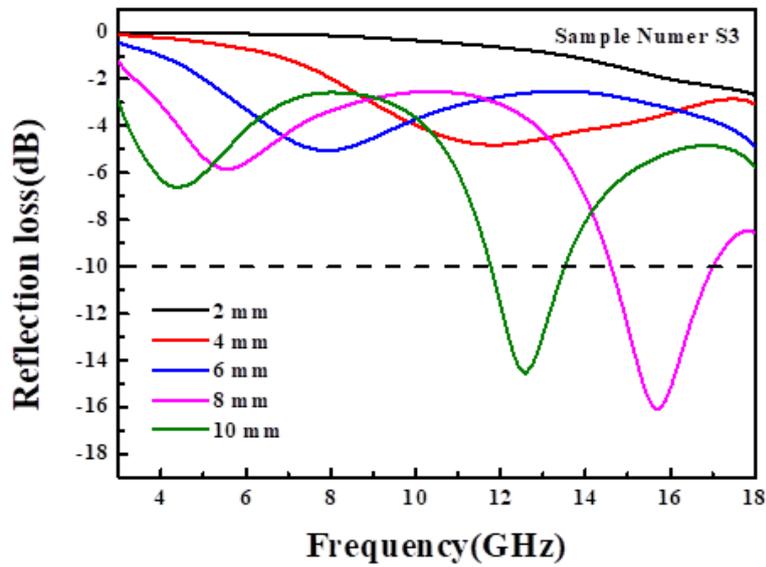


圖3.34試片編號S3反射損失值與頻率之變化圖

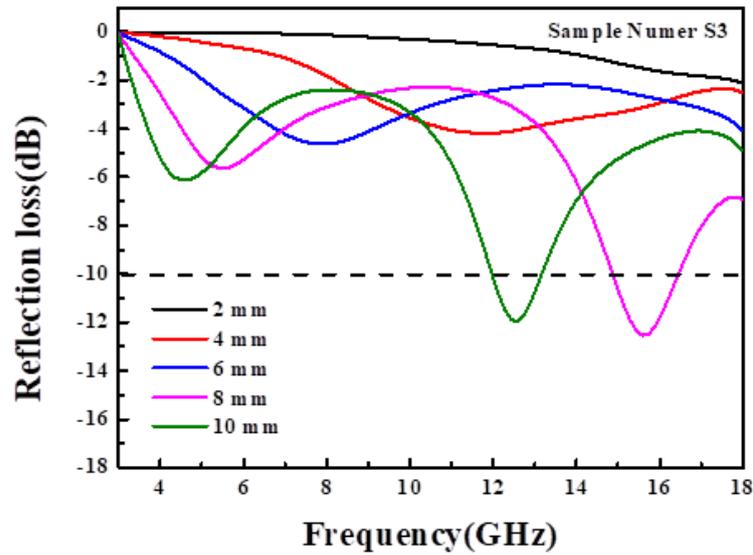


圖3.35 試片編號S4反射損失值與頻率之變化圖

3. 模擬厚度釐米波反射損失分析

由圖3.36可以得知，隨著SiC的重量百分比濃度增加可以觀察到最大反射損失值朝向高頻移動，隨著SiC重量百分比濃度的增加，最大反射損失值呈現遞減狀態。由圖3.37可以得知，隨著SiC的重量百分比濃度增加可以觀察到最大反射損失值朝向高頻移動。由圖3.38可以得知，同樣隨著SiC的重量百分比濃度增加可以觀察到最大反射損失值朝向高頻移動，隨著厚度的增加反射損失明顯往低頻移動且呈現雙峰，而在高頻段部分之吸收波的反射損失顯著增加。由圖3.39可以得知，當吸波材料厚度為10 mm時，隨著SiC的重量百分比濃度增加可以觀察到最大反射損失值朝向高頻移動，而厚度的增加反射損失往低頻移動且呈現雙峰，但反射損失與8 mm相較之下，最大反射損失開始遞減。

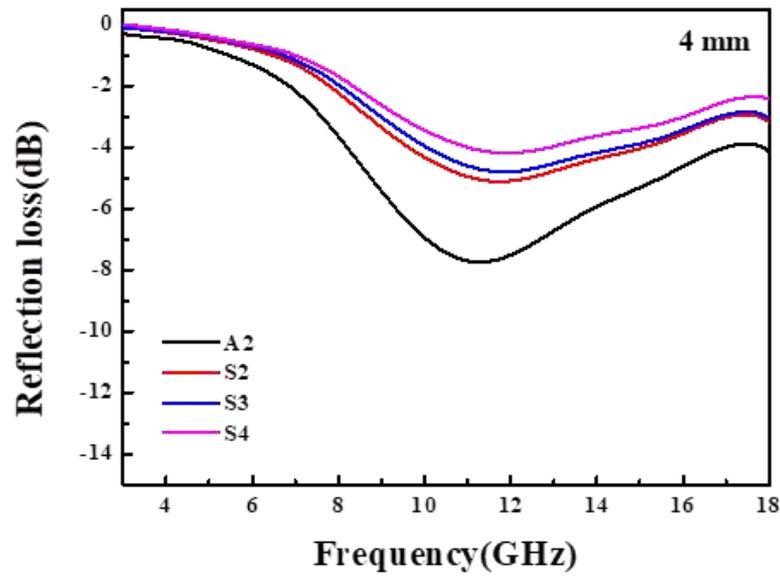


圖3.36 模擬厚度4 mm反射損失值與頻率之變化圖

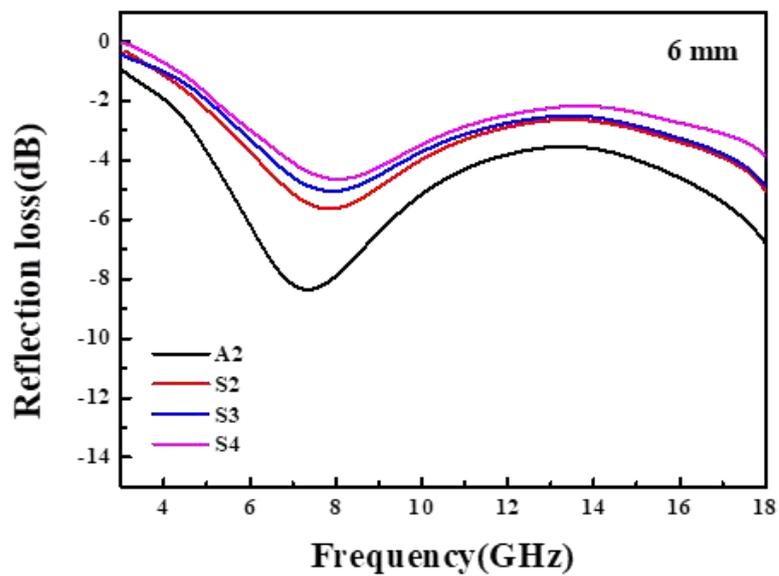


圖3.37 模擬厚度6 mm反射損失值與頻率之變化圖

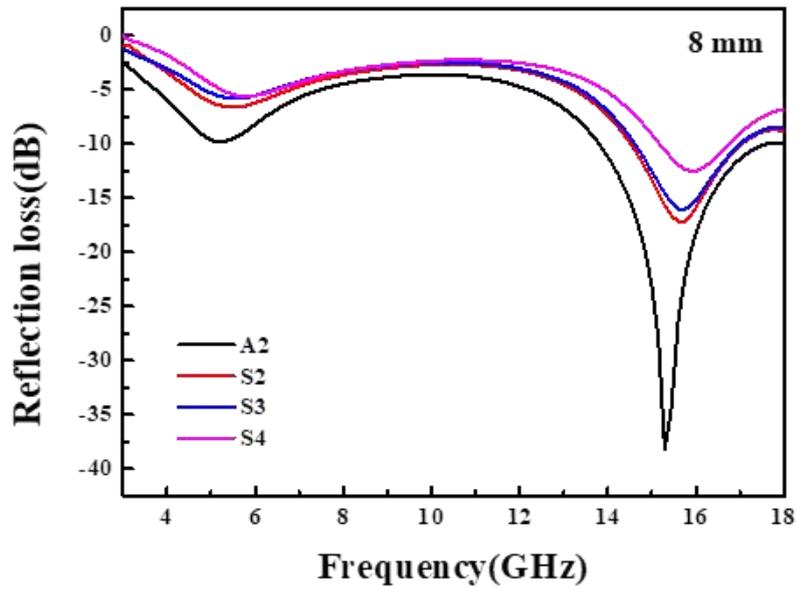


圖3.38 模擬厚度8 mm反射損失值與頻率之變化圖

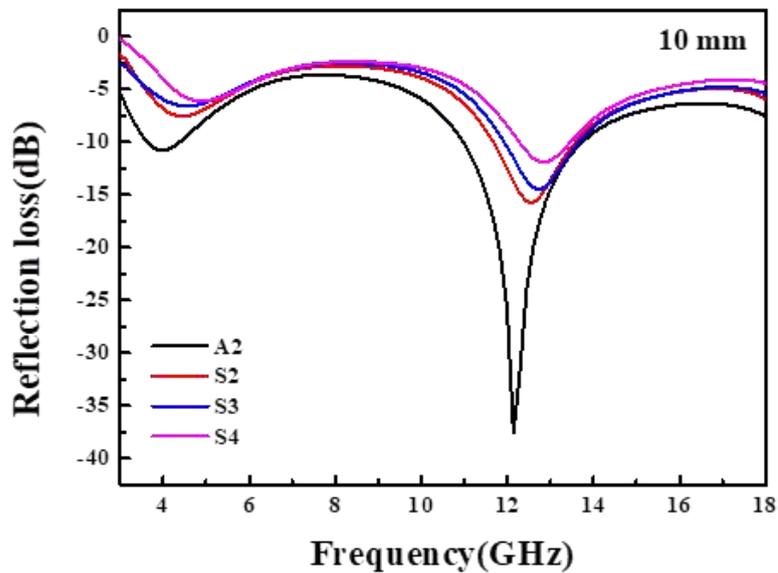


圖3.39 模擬厚度10 mm反射損失值與頻率之變化圖

由以上數據得知，隨著厚度的增加最大反射損失值朝向低頻移動，其中厚度在8 mm時呈現雙峰，此現象推測可能為此兩種吸收材為混合在測試電磁波吸收時較可能出現雙峰行為。

四、結論

本論文首先使用 PAN/DMF 作為前驅溶液，利用靜電紡絲法成功製備了 PAN 奈米纖維，再添加 SiC 奈米顆粒製備成 SiC/PAN 複合奈米纖維及電磁波吸收效應進行研究探討，綜合實驗分析及測試數據得到以下結論：

1. 當紡絲溶液濃度為 10 wt.%、電壓為 20 kV、注射速率為 0.025 ml/min，收集距離在 15 cm 時，所獲得的 PAN 奈米纖維直徑較為均一。
2. 當 SiC 在 15 wt.%時，表面粗糙度增加，這表示 SiC 奈米顆粒開始凝聚，但與 20 wt.%相較之下，沒有非常大的 SiC 奈米顆粒團聚在 PAN 纖維表面上。
3. 由 TEM 分析結果得知，由晶格影像可以觀察到 SiC/PAN 複合奈米纖維沿著[111]晶向生長，而相鄰的兩晶格平面間距為 0.25 nm，此間距對應於 β -SiC 的(111)面的晶面間距，結果顯示 SiC 以結晶形態存在於 PAN 奈米纖維裡。
4. 在雷達頻率 3–18 GHz 介電係數及導磁係數分析中，可以得知此 SiC/PAN 複合奈米纖維吸收材料的吸波貢獻來自於介電損耗而不是磁性損耗。
5. 當 A2 厚度為 8 mm 時，於 13.79–17.54 GHz 頻率範圍內，反射損失小於-10 dB 之頻寬為 3.75 GHz。而 S2、S3 與 S4 厚度為 8 mm 時，S2 於 14.54–17.09 GHz 頻率範圍內，反射損失小於-10 dB 之頻寬為 2.55 GHz，S3 於 14.61–17.01 GHz 頻率範圍內，反射損失小於-10 dB 之頻寬為 2.4 GHz，S4 於 14.84–16.49 GHz 頻率範圍內，反射損失小於-10 dB 之頻寬為 1.65 GHz。
6. 隨著厚度的增加最大反射損失值朝向低頻移動，相較於 S2、S3、S4 反射損耗，可說明 A2 擁有較寬的頻寬以及較大的反射損耗，因 A2 有較大的介電損耗正切值故可製作薄型化設計。
7. 本研究利用 SiC/PAN 複合奈米纖維材料探討電磁特性之研究，其中以 SiC/PAN 對 RTV 重量比為 0.9 wt%製作電磁波吸波片，不論是 PAN 奈米纖維或 SiC/PAN 複合奈米纖維均呈現優異的反射損失效值。

參考文獻

- [1] S. Kciuk, M. Kciuk, R. Turczyn(2009), "Magnetorheological characterisation of carbonyl iron based suspension," J.AMME., Vol. 33, Pages 135–141.
- [2] N. P. Singh, J. L. Phillips, H. Lai(2009), "Electromagnetic fields and DNA damage," Phys.Rev.Lett., Pages 107–118.
- [3] 丁冬海、羅發、周萬城、史毅敏、周亮(2014), "高溫雷達吸波材料研究現狀與展望," 無機材料學報。
- [4] 邢麗英等編著(2006), "隱形材料,"新文京開發出版股份有限公司。
- [5] H. B. Kim, I. B. Jang, J. Y. Lee, J. L. You, H. J. Choi and M. S. Jhon(2005), "Role of organic coating on carbonyl iron suspended particles in magnetorheological fluid," J. Appl. Phys., Vol. 97, Pages 10Q912–10Q912–3.
- [6] D. H. Reneker and I. Chun(1996), "Nanometer diameter fiber of polymer, produced by electrospinning," Nanotech, Vol. 7, Pages 216–223.
- [7] Y. Z. Zhang, Z. M. Huang, M. Kotaki, S. Ramakrishna(2003), "A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites," Composites Sci. and Tech, Vol. 63, Pages 2223–2253.
- [8] G. Taylor(1964), "Disintegration of Water Drops in an Electric Field," Proceedings of the Royal Society, Vol. 280, Pages 383–397.
- [9] D. Li, Y. Xia(2004), "Electrospinning of Nanofibers:Reinventing the Wheel?," Advanced Materials, Vol. 16, Pages 1151–1170.
- [10] J. Fenn, R.Kessick, G. Tepper(2004), "The use of AC potentials in electrospraying and electospinning processes," Polymer, Vol. 45, Pages 2981–2984.
- [11] Y. L. Wang, D. Li, Y. Xia(2003), "Electrospinning of polymeric and ceramic nanofibers as uniaxially aligned arrays," Nano Letters, Vol. 3, Pages 1167–1171.

- [12] M. M. Hohman, Y. M. Shin, M. P. Brenner, G. C. Rutledge(2001), "Electrospinning: A whipping fluid jet generates submicron polymer fibers," *Applied Physics Letters*, Vol. 78, Pages 1149.
- [13] H. F. Cheng, Z. Y. Chu, W. Xie, L. K. Sun(2012), "Effects of diameter and hollow structure on the microwave absorption properties of short carbon fibers," *Ceramics International*, Vol. 38, Pages 4867–4873.
- [14] L. Zhao, Z. H. Wang, P. H. Wang, L. Guo, J. H. Yu(2016), "Low material density and high microwave-absorption performance of hollow strontium ferrite nanofibers prepared via coaxial electrospinning," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 687, Pages 541–547.
- [15] 郭佳憲、李貴琪(2004), "高科技的隱形術「有形無影」的新武器時代," *科學發展*。
- [16] 丁自豪、楊福助、許綜升、洪登南(2007), "微波吸收複合材料開發及特性研究," *黃埔學報*, Vol. 52, Pages 1–8.
- [17] 楊瑞彬(2006), "多層吸波複合材料之最佳化設計," 私立逢甲大學，航太與系統工程學系，碩士論文。
- [18] 趙東林、周萬成(1998), "隱身技術中的結構吸波材料," *金屬世界*。
- [19] 許舜迪(2008), "鐵基複合吸波材料之製備與最佳化研究," 逢甲大學，航太與系統工程學系，碩士論文。
- [20] T. Q. Sai, B. Zhong, L. Xia, Y. I. Yu, G. W. Wen(2017), "High-efficient production of SiC/SiO₂ core-shell nanowires for effective microwave absorption," *Materials and Design*, Vol. 121, Pages 185–193.
- [21] 林博文(1999), "碳化矽及其他碳化物," *陶瓷技術手冊(下)修訂版*, Pages 745–776.