

## 碳化矽粉體之合成及其微波吸收特性研究

張清志<sup>1\*</sup> 陳頤專<sup>2</sup> 黃其清<sup>2</sup> 李景民<sup>2</sup> 洪耀勳<sup>2</sup>

<sup>1</sup>國防大學理工學院 國防科學研究所

<sup>2</sup>國防大學理工學院 化材系

### 摘 要

本研究目的使用不同的原料在1450 °C下合成製備 $\beta$ -碳化矽( $\beta$ -SiC)粉體，合成過程以X光繞射儀(XRD)、熱重-示差分析(TG-DSC)、掃描式電子顯微鏡(SEM)來檢測分析。不同合成方式所製得的產物，其外觀型態皆不同，但具有相同的晶體結構。常溫下，厚度1.5-3.0 mm之60 %  $\beta$ -SiC與橡膠或矽膠之複合材料，以及厚度3.0-5.0 mm之陶瓷複合雙層吸波片的微波吸收特性，其反射損失 $\geq 10$  dB；高溫下，當外層由厚度2 mm的玻璃陶瓷片結合內層厚度2 mm的碳化矽陶瓷片所組成的複合雙層吸波片表現最佳，在300-500 °C的測量中，其最大反射損失均維持24 dB以上。

**關鍵字：** $\beta$ -碳化矽，粉體，微波吸收

## Studies on Synthesis and Microwave Adsorption Properties of SiC Powders

Ching-Chih Chang<sup>1\*</sup>, Yi-Chuan Chen<sup>2</sup>, Chyi-Ching Hwang<sup>2</sup>,  
Ching-Min Lee<sup>2</sup>, and Yaw-Shun Hong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Defense Science, Chung Cheng Institute of Technology, NDU

<sup>2</sup>Department of Applied Chemistry and Materials Science, Chung Cheng Institute of Technology, NDU

### Abstract

In this study,  $\beta$ -silicon carbides ( $\beta$ -SiC) particles were prepared at 1450 °C by using many different starting materials. The synthesis process was characterized using X-ray diffraction (XRD), thermogravimetry-differential scanning calorimetry (TG-DSC), scanning electron microscopy (SEM). All final products are crystal with  $\beta$ -SiC phase, but different size and particle shape were obtained by different starting materials. However, at room temperature, it was found that the 1.5-3.0-mm-thickness 60 wt%  $\beta$ -SiC-rubber/silicon composites and 3.0-5.0-mm-thickness two layer dielectric absorber exhibited good microwave-absorbing efficiency with low reflection losses of  $\geq 10$  dB. At high temperature, the optimized microwave absorption of two-layer absorbers was~ 24 dB and it was manufactured with 2 mm thickness outer layer and 2 mm thickness inner layer thickness for heating 300-500 °C.

**Keywords:**  $\beta$ -SiC, Particles, Microwave-adsorbing.

文稿收件日期 99.3.8; 文稿修正後接受日期 99.7.12; \*通訊作者

Manuscript received March 8, 2010; revised July 12, 2010; \* Corresponding author

## 一、前言

隨著現代戰場戰術戰技的演進以及軍事科技的日新發展，提高現代武器系統的攻擊和生存能力，發展匿蹤隱形技術已成為軍事技術發展的重要方向。武器裝備需匿蹤的部位依其工作溫度可分為常溫和高溫兩類。大部分的磁性材料因受限於居里溫度 (Curie temperature)，在高溫下會失去磁性而喪失吸波性能 (磁性材料之居里溫度一般低於400℃)；因此磁性吸波材料一般只能用於武器常溫部分的隱形，不適合在超高速導彈、火箭及飛機上應用。武器高溫部位的匿蹤必須採用高溫吸波材料，一般為陶瓷吸波材料，其使用介電材料製作高溫微波吸收體 (Absorber)，由於材料僅藉其介電損耗 (Dielectric dissipation) 來吸收電磁波 [1,2]。陶瓷材料在高溫條件下具有強度高、熔點高、熱穩定性好、熱膨脹係數較小、抗氧化性好、密度低、硬度大、耐磨等特點。目前對高溫結構陶瓷的研究主要集中於 SiC、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 ZrO<sub>2</sub> 等。

國外高溫吸波材料的研製主要集中在陶瓷基複合材料，其中較早報導的是 SiC、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 等的複合體，可以通過其各自混合比例調整電磁參數，製備出耐高溫吸波材料。此外日本研製的一種 SiC/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/C/BN 陶瓷材料，可耐高溫並具有良好吸波性能 [1]。另據報導，美國已經研究出 SiC 纖維增強的玻璃陶瓷基複合材料，在高溫下也具有吸波性能。美國洛克希德公司在 F-117 隱形飛機的研製中，使用陶瓷基材料研製吸波結構材料，裝設於機尾噴管後緣，能承受 1100℃ 的高溫 [1, 3]。據報導，美國 F-22 飛機的發動機向量推力噴管也可能採用陶瓷基複合材料，以提升匿蹤能力 [1]。

目前 SiC 粉體的主要製備方法是將碳和矽在高溫下反應，再將碳化矽顆粒粉碎分級，此種製程需要耗費大量的電能 (高溫)，所制得的粉體品質較差，無法滿足精密加工的要求 [4]。SiC 又分成  $\alpha$ -SiC 及  $\beta$ -SiC 兩種晶相，其中  $\beta$ -SiC 在許多工業領域中的應用顯示了優良的性能，因而引起了各國研究單位的重視。在無機吸波材料領域中  $\beta$ -SiC 是一種耐高溫吸波材料，可作為吸收體的基材。尤其在較高溫環境下，磁性材料的磁性消失，材料的吸波功能隨之大幅下降，此時  $\beta$ -SiC 擔任吸波的重要角色。但是由於  $\beta$ -SiC 陶瓷需高溫燒結，因而它

的製作過程繁雜 (需在 Ar 氛圍) 且高溫 (1600-1700℃) 長時間煅燒，生產成本昂貴。

在介電型陶瓷基吸波材料研究方面，E. Mouchon 和 P. Colomban 對 SiC<sub>f</sub>/Nasicon、複合材料的製備、力學性能和在微波頻率下的複介電常數做了報導。由其數據看來，該材料具有吸波性能，Nasicon (Na<sub>2.9</sub>Zr<sub>2</sub>Si<sub>1.9</sub>P<sub>1.1</sub>O<sub>12</sub>) 基體的孔隙率為 0.5%，10 GHz 時的介電常數為  $\epsilon = 5.3 - j4.0$ 。當 SiC<sub>f</sub>/Nasicon 複合材料中 SiC 纖維的體積分率分別為 44%、33% 時，複合材料的介電常數分別為  $\epsilon = 40 - j50$ 、 $\epsilon = 16 - j50$ 。此外，據其報導，能做為高溫吸波材料的另有 Co/Aluminate、SiC<sub>wf</sub>/Zirconosilicophosphate glass/Nasicon、SiC<sub>wf</sub>/GeO<sub>2</sub>、ZrO<sub>2</sub>·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>/mullite 等複合材料。然而，碳化矽 (SiC) 是製作陶瓷基高溫吸波材料的主要成分，亦是國外發展相當迅速的吸波材料之一，且有應用前景。

## 二、實驗

### 2.1 $\beta$ -SiC 粉體之製備

#### 2.1.1 四乙氧基矽烷和酚醛樹脂合成

採用一較低溫溶膠-凝膠製程 [5-14]，以合成  $\beta$ -SiC 粉體；其製程參數及產物之電磁特性尚未被詳細探討，相當值得研究。首先，一定量的酚醛樹脂 (Phenolic resin，其為甲醛與苯酚縮聚物，軟化溫度 80-90℃) 置於乙醇中並予電磁攪拌使其溶解。然後將試藥級的四乙氧基矽烷 (Tetra Ethyl Ortho Silicate, TEOS, Si(CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>O)<sub>4</sub>) 加入數滴鹽酸和去離子水的乙醇溶液緩緩加入上述溶液中，在室溫下攪拌 48 小時，以促進 TEOS 之水解使之形成溶膠 (sol)。最後，少量的六次甲基四胺 (Hexamethylenetetramine, C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>N<sub>4</sub>) 之乙醇溶液 (濃度 35 wt%) 逐滴地加入上述溶膠中，以加速其縮合反應而形成凝膠 (gel) 再將此凝膠置於烘箱中在 100℃ 加熱 24 小時，使之陳化並乾燥，最後可得乾凝膠 (xerogel) 的反應先驅物。將製得乾凝膠至於石英舟皿內，再放進管狀高溫爐管中央，然後將爐管二端封閉，以管蓋上的閥門控制氣體進出。先以氫氣流吹淨 (purge) 爐管內的空氣，然後固定氫氣輸入速率為 40 cm<sup>3</sup>/min 並以 2℃/min 的升溫速率將爐

管自室溫加熱至1450 °C，至設定溫度後持溫20小時，使乾凝膠在該溫度及氬氣氛下發生碳熱還原(carbothermal reduction)反應，合成SiC粉體。在乾凝膠中的酚醛成分提供碳熱還原反應的碳源，而另一成分NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>受熱時會吸熱分解生成大量的氣體，可避免產物凝聚成團並使其內部肇生孔洞，另外，此一合成方式所需之溫度較低(其他方法需高於1550 °C甚至更高)，可抑制產物晶粒成長。由以上現象推論可得到多孔性之奈米SiC粉體，且其晶格缺陷因預期而有較大的介電耗損特性(dielectric dissipation)。合成初得之SiC粉體經在空氣中煅燒已去除殘碳並以氫氟酸溶洗SiO<sub>2</sub>純化之，實驗流程如圖1所示。

### 2.1.2 矽粉和酚醛樹脂合成

首先，一定量的酚醛樹脂(phenolic resin, 其為甲醛與苯酚縮聚物，軟化溫度80-90 °C)置於乙醇中並予電磁攪拌使其溶解。依據酚醛樹脂對矽粉(Si particles)的莫耳比1:1，加入適量Si particles後常溫攪拌4小時，再放入真空烘箱於100 °C烘乾24小時。然後，先以氬氣流吹淨(purge)爐管內的空氣，然後固定氬氣輸入流率為40 cm<sup>3</sup>/min並以2 °C/min的升溫速率將爐管自室溫加熱至1450 °C，至設定溫度後持溫20小時，使此混合物在該溫度及氬氣氛下發生碳熱還原(carbothermal reduction)反應，所得產物再經洗滌、過濾、乾燥後，即可得到β-SiC粉體，實驗流程如圖2所示。

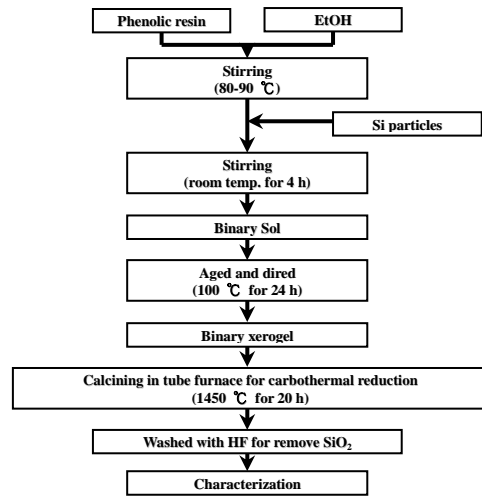


圖2. 矽粉和酚醛樹脂合成SiC之實驗流程。

### 2.1.3 矽粉和奈米碳黑合成

奈米級碳黑(carbon black)與微米級矽粉之重量比2.5:1，將其以球磨機均勻混合常溫研磨4小時，再放入真空烘箱於100 °C烘乾24小時。然後，先以氬氣流吹淨(purge)爐管內的空氣，然後固定氬氣輸入流率為40 cm<sup>3</sup>/min並以2 °C/min的升溫速率將爐管自室溫加熱至1450 °C，至設定溫度後持溫20小時，使此混合物在該溫度及氬氣氛下發生碳熱還原(carbothermal reduction)反應，所得產物再經洗滌、過濾、乾燥後，即可得到β-SiC粉體，實驗流程如圖3所示。

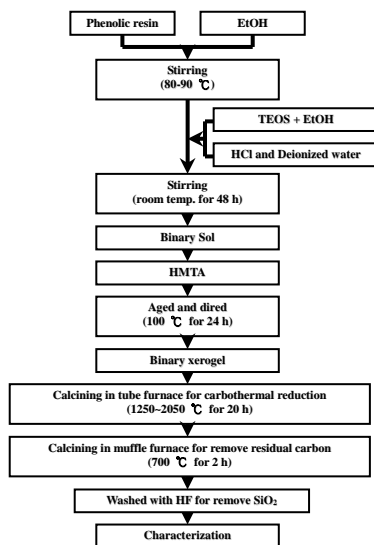


圖1. 四乙氧基矽烷和酚醛樹脂合成SiC之實驗流程。

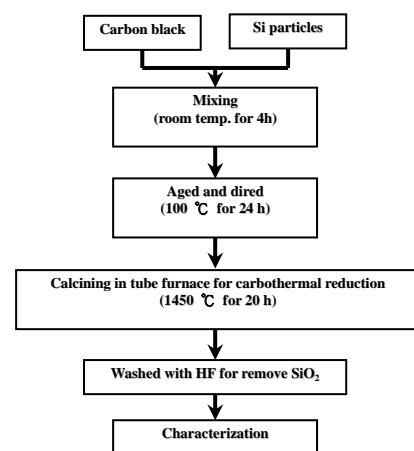


圖3. 矽粉和奈米碳黑合成SiC之實驗流程。

## 2.2 微波吸收片的製備

以 60 wt% 之  $\beta$ -SiC 粉體與 40 wt% 矽膠 (RTV615) 或橡膠 (氯丁二烯橡膠 D5) 製備 160 mm  $\times$  160 mm 厚度不同的微波吸收測試片，藉以探討不同膠體對吸波性能的影響。

## 2.3 陶瓷複合雙層微波吸收材料之製作

以  $\beta$ -SiC 粉體和矽酸鹽玻璃陶瓷 (silicate glass ceramics, 指含有矽、氧一個或多個金屬的任何混合物, 含不含氫無所謂), 採熱壓法 (hot-pressing) 製作高溫微波吸收片材料。其可分為二層 (如圖 4), 外層係由矽酸鹽陶瓷經由熱壓燒結所製成, 以作為阻抗變換層 (impedance transformer layer); 內層則由 10 % 的  $\beta$ -SiC 粉體與矽酸鹽陶瓷所組成, 此兩者經

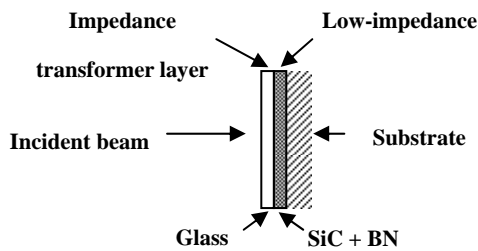


圖 4. 雙層結構吸波片結構圖。

均勻分散, 乾燥後進行熱壓燒結而得, 具有低阻抗共振體 (low-impedance resonator) 之功能 [15-18]。此兩層的長、寬尺寸皆為 15 cm, 而其厚度依實驗條件製作成 1、2、3 mm。完成後將其依序疊放於測試基座上, 先鋪設內層, 即 SiC/矽酸鹽陶瓷複合材料之低阻抗共振體層, 再覆蓋外層, 即全由矽酸鹽陶瓷製作之阻抗變換層, 形成所謂之『雙層微波吸收材料』, 然後再量測其反射損失 (return loss), 或稱為反射係數 (reflectivity), 以及複介電常數 (complex permittivity) 及複導磁率 (complex permeability)。

## 三、結果與討論

### 3.1 結構特性與晶相分析

圖 5 為經不同溫度煅燒後得到之 SiC 的 XRD 分析, 其分別位於  $2\theta$  角  $35.5^\circ$ 、 $41.2^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $72^\circ$  和  $75.5^\circ$  的位置均出現了  $\beta$ -SiC 特徵繞射峰, 經由 JCPDS (編號: 29-1129) 比較証實確

認所製備的產物為  $\beta$ -SiC 成分無誤, 而且隨著合成溫度的升高矽、碳或其他雜質的晶相漸漸消失, 但少量  $\text{SiO}_2$  需經酸洗才能完全被消除, 而殘留的為具有良好晶相的  $\beta$ -SiC。圖 5 (a) 在  $1250^\circ\text{C}$  下所製得的碳化矽粉體, 其波峰強度並不是特別明顯且含有其他雜相, 可能是碳化矽的奈米微晶造成波峰寬化的關係及二氧化矽晶相的存在。圖 5 (b) 實驗又提高管式高溫爐最終煅燒溫度至  $1450^\circ\text{C}$  恆溫 2 小時反應後, 所製得碳化矽粉體經由 JCPDS (編號: 29-1129) 比較証實確認三個強峰位置皆與  $\beta$ -SiC 相同, 且結晶性變佳, 其繞射峰型變得相當尖銳, 因此在  $1450^\circ\text{C}$  煅燒下所製得的  $\beta$ -SiC 是比  $1250^\circ\text{C}$  所煅燒而得的粉體, 其結晶性更好。

圖 5 (c) 是  $\beta$ -SiC 粉體乾壓成胚後再經由高溫爐  $2050^\circ\text{C}$  煅燒後所形成的碳化矽陶瓷 XRD 圖。由文獻 [19] 得知, 室溫中  $\beta$ -SiC 是安定型態, 在煅燒溫度  $1600^\circ\text{C}$  以上會逐漸發生相變化形成  $\alpha$ -SiC。然經 JCPDS (編號: 29-1128) 比對發現經由  $2050^\circ\text{C}$  煅燒後所製成的碳化矽陶瓷部份都轉換為  $\alpha$ -SiC。

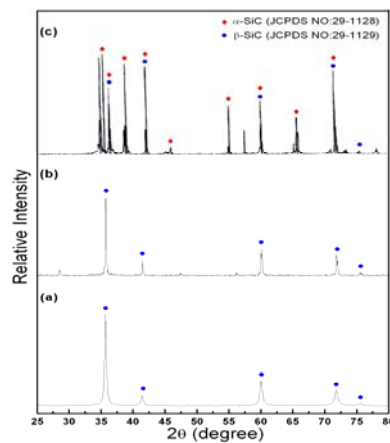


圖 5. 經不同溫度煅燒後得到之 SiC 的 XRD 分析: (a)  $1250^\circ\text{C}$ ; (b)  $1450^\circ\text{C}$ ; (c)  $2050^\circ\text{C}$ 。

### 3.2 前驅物之熱分析

圖 6 為 SiC 前驅物之 TG-DSC 分析結果。熱分解過程包含三個階段: 第一階段於  $0-400^\circ\text{C}$  處有明顯的吸熱波峰, 且伴隨著凝膠內殘留的水份與乙醇等物質的揮發; 第二階段於  $400-700^\circ\text{C}$  處有明顯的放熱反應與 40 % 重量損失, 可能是凝膠中矽聚合物分子繼續縮合交

聯及樹脂分解所致；第三階段於700-1000 °C處，反應已趨於穩定，此時凝膠已漸形成SiO<sub>2</sub>和游離碳。

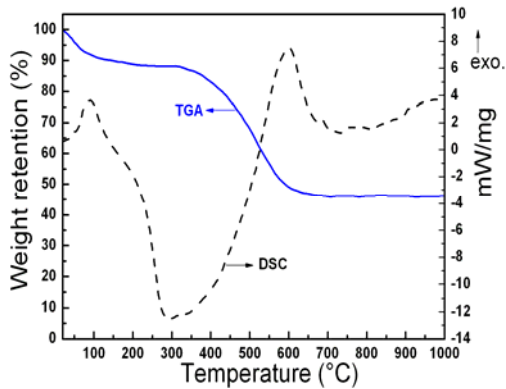


圖 6. 前驅物之熱分析。

### 3.3 微結構特性分析

圖7為不同原料所合成之β-SiC的SEM分析。圖7 (a)以合成原料為四乙氧基矽烷和酚醛樹脂所得產物，其外觀型態為50 nm之球狀所結合而成的粉體。圖7 (b)為矽粉與酚醛樹脂經1450 °C煅燒後所得產物，其外觀型態由兩種相差很大的β-SiC粉體混合而成，其中25-50 nm的球狀佔25 %；而200-300 nm的不規則塊狀佔75 %。圖7 (c)為碳黑與矽粉經混合研磨後經1450 °C煅燒所得產物，其外觀型態為寬0.5 μm，長度分佈於1.0-3.0 μm的尖楔型碎片所構成。

### 3.4 微波吸收特性

#### 3.4.1 基本原理

當電磁波碰到金屬時，電磁波無法進入金屬而產生完全反射。但對於吸收材料而言，當微波或電磁波照射材料時，材料可能將部分電磁波反射，部分電磁波穿入材料中。而材料對於入射的電磁波可產生下列兩種不同形式的耗損使電磁波能量削弱。

一般而言我們分析材料的吸波效能多以反射損失(Return loss)數值來作為比較之基準。最佳吸收厚度及反射損失可由公式(1)、(2)及(3)求得：

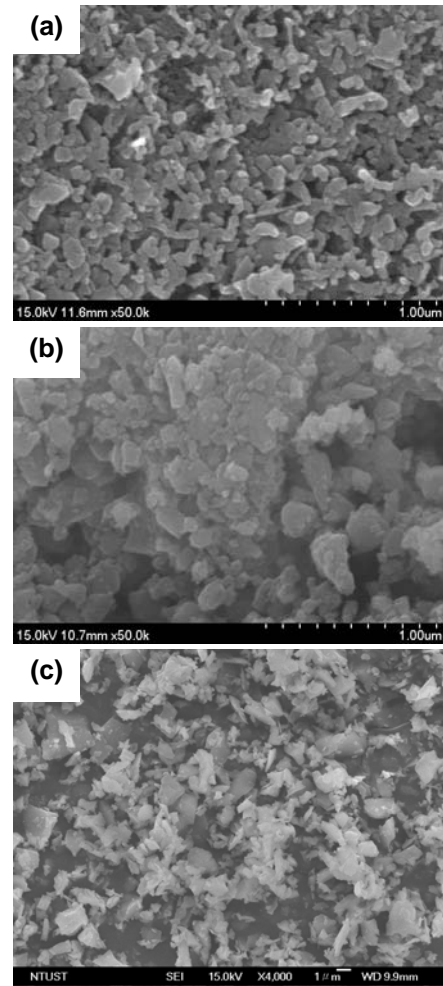


圖7. 不同原料所合成的β-SiC之SEM觀察：  
 (a)合成原料為四乙氧基矽烷和酚醛樹脂；  
 (b)合成原料為矽粉和酚醛樹脂；  
 (c)合成原料為矽粉和碳黑。

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left[ \left( j \frac{2\pi}{\lambda} \right) d \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right] \quad (1)$$

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (2)$$

$$R(dB) = 20 \times \log |\Gamma| \quad (3)$$

式中  $Z_{in}$ ：輸入阻抗值

$Z_0$ ：特性阻抗值（空氣中為1）

$\mu_r = \mu' - j\mu''$ ：複數比導磁率

$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$ ：複數比介電率

d：厚度                      λ：電磁波波長

Γ：反射係數    R：反射損失

### 3.4.2 微波吸收量測方法

本研究所製出碳化矽陶瓷基微波吸收片以微波自由空間量測系統在常溫下進行電磁波衰減測試，另以高溫槽聚焦天線之向量網路分析儀在不同高溫下進行微波吸收體電磁波衰減測試。使用電磁波反射損失測量系統檢測，電磁波掃瞄頻率範圍為2-18 GHz及26.5-40 GHz。在使用微波網路分析儀利用自由空間量測方法量測前，先以同試片大小(15 cm×15 cm)的金屬板放在待測位置上，先校正水平，調整天線入射角度測原始反射量，再將玻璃陶瓷基吸波片放在金屬板上，量測反射衰減強度。反射損失(Return loss)與能量關係如公式(4)表示

$$RL(\text{dB})=10 \times \log\left(\frac{P_r}{P}\right) \quad (4)$$

$P_r$ ：反射波的能量

$P_0$ ：入射波能量

### 3.4.3 常溫吸收測試

圖8及圖9為β-SiC與橡膠或矽膠所壓製而成厚度1.5-3.0 mm之微波吸收片的微波性質。經由向量網路分析儀量測材料微波吸收值，圖8顯示60 % β-SiC與40 %橡膠之厚度為2 mm的吸波片，在頻率13 GHz時吸收值為14.8 dB；圖9顯示60 % β-SiC與40 %矽膠之厚度為2 mm的吸波片，在頻率14.5 GHz時吸收值為12.2 dB。陶瓷複合雙層吸波片之編號1、2及3（見表1）經由向量網路分析儀量測材料微波吸收值，圖10是為編號1、2及3複合雙層吸波片的反射損失量測。編號1的吸波片最大衰減峰在頻率9.28 GHz時吸收值為28.59 dB，在頻率8.1-11.8 GHz及14.2-18 GHz之間具有10 dB以上的吸收；編號2的吸波片最大衰減峰在頻率14.1 GHz時吸收值為27.01 dB，在頻率11.9-16.2 GHz之間具有10 dB以上的吸收；編號3的吸波片最大衰減峰在頻率13.19 GHz時吸收值為48 dB，在頻率10.2-18 GHz之間具有10 dB以上的吸收。

由以下數據顯示，不同橡膠或矽膠與60 % β-SiC之複合材料的吸波性能，發現在2.0 mm厚度均超過10 dB的反射損失，且最適於Ku頻(12-18 GHz)使用。複合雙層吸波片為編號1的總厚度3 mm最薄，且具有10 dB以上的反射損失之使用頻寬有兩個區段，最適於X頻(8.2-

表 1. 陶瓷複合雙層吸波片

No.	Top layer Glass (mm)	Down layer SiC (mm)
# 1	2	1
# 2	2	2
# 3	2	3

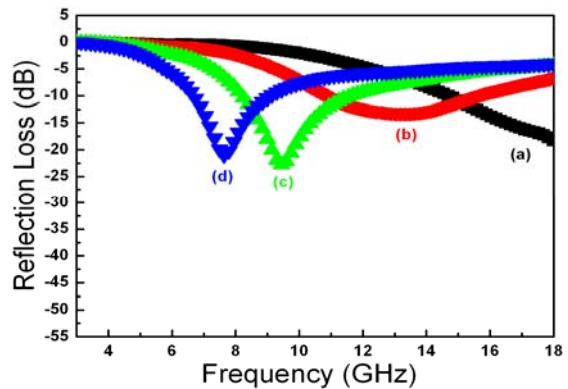


圖 8. 為 60 % β-SiC 材料與橡膠組成之微波吸收體的反射損失圖，測試片厚度分別為：(a) 1.5 mm；(b) 2.0 mm；(c) 2.5 mm；(d) 3.0 mm。

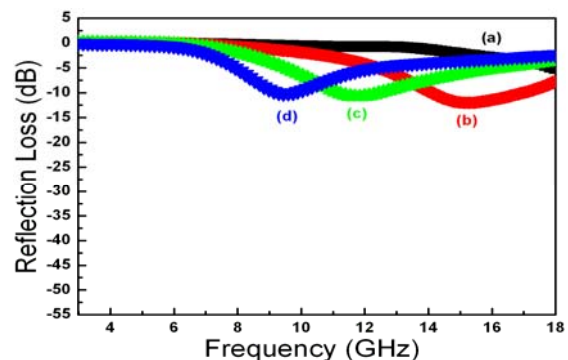


圖 9. 為 60 % β-SiC 材料與矽膠組成之微波吸收體的反射損失圖，測試片厚度分別為：(a) 1.5 mm；(b) 2.0 mm；(c) 2.5 mm；(d) 3.0 mm。

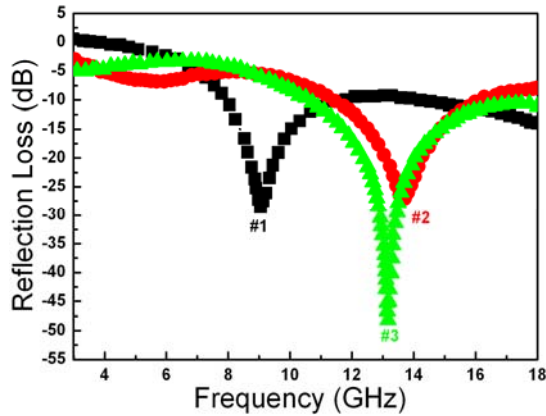


圖 10. 陶瓷複合雙層吸波片之反射損失圖。

12.4 GHz)及Ku頻使用；編號3的吸波片總厚度5 mm最厚，具有10 dB以上的反射損失之使用頻寬為7.8 GHz，雖然厚度較厚，但有最大吸收值48.03 dB，最適於Ku頻使用。

### 3.4.4 高溫吸收測試

陶瓷複合雙層吸波片之編號1、2及3做雷達波反射損失測試分析，以X頻(8.2-12.4 GHz)天線在高溫槽內量測吸收值，溫度由300~500 °C(見圖11至圖13)。吸波片之編號1及3在400 °C以後反射損失值急速上升，而編號2總厚度4 mm的吸波片，其在300 °C時最大衰減峰為42.77 dB，且在各測試溫度中，明顯的比另兩組效果更佳。

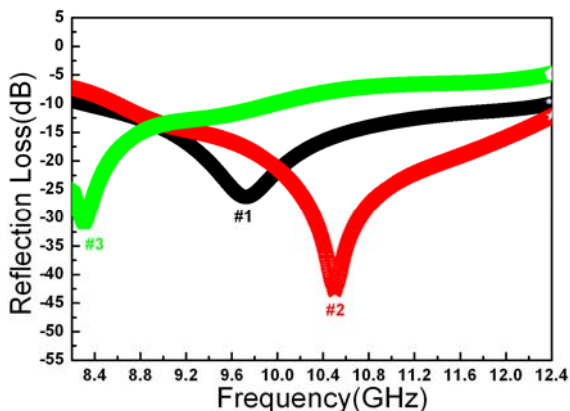


圖 11. 陶瓷複合雙層吸波片於高溫 300 °C 反射損失比較。

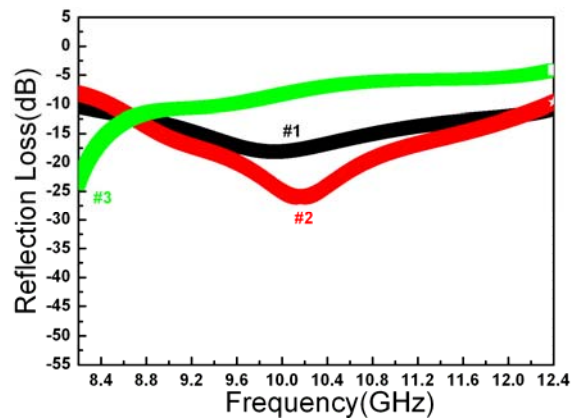


圖 12. 陶瓷複合雙層吸波片於高溫 400 °C 反射損失比較。

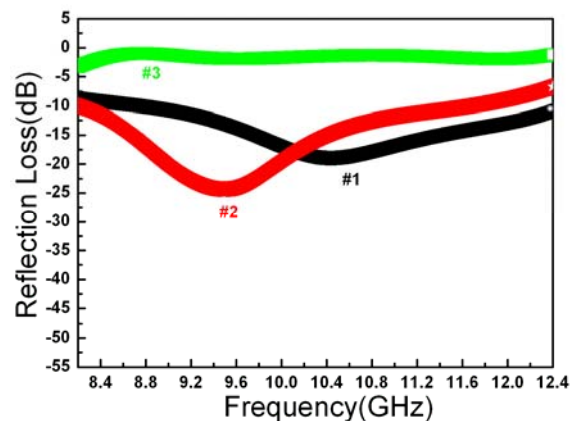


圖 13. 陶瓷複合雙層吸波片於高溫 500 °C 反射損失比較。

## 四、結論

本研究以不同原料(矽源、碳源)合成製備β-碳化矽(β-SiC)粉體，比起傳統Acheson法製程及化學氣相沉積法來的簡單、經濟，且此法比另兩法所需的燒結溫度低。原料和反應溫度決定所合成之β-SiC的外觀型態，且經由鹽酸、氫氟酸的混合酸浸泡可將未反應的矽和矽酸鹽除去。而合成之β-SiC的顆粒大小及形狀微結構不同，亦影響材料的微波吸收特性。在常溫下，測試於3-18 GHz頻段內不同橡膠或矽膠與60% β-SiC之複合材料，以及陶瓷複合雙層吸波片的微波吸收特性，其反射損失均超過10 dB，且皆適於Ku頻(12-18 GHz)使用。陶瓷複合雙層吸波片於高溫雷達波反射損失測試

分析中，在X頻(8.2-12.4 GHz)高溫槽內量測吸收值，結果顯示編號2的吸波片在300-500 °C吸收值變化遞減，但吸收值多維持在24 dB以上，且最大吸收峰隨溫度升高愈往低頻偏移。

### 參考文獻

- [1] 羅發、周方城、焦桓、趙東林，“高溫吸波材料研究現狀”，*宇航材料工藝*，第1期，第8-11頁，2002。
- [2] 馮永寶、丘泰、張明雪、李曉雲、沈春英，“塗覆型雷達吸波材料研究進展”，*材料導報*，第17卷，第12期，第56-58頁，2003。
- [3] 羅發，“高溫吸波材料的製備及性能研究”，西北工業大學博士學位論文，2001。
- [4] 邢麗英，*隱形材料*，新文京開發，第56-60頁，2006。
- [5] Jin, G. Q., Guo, X. Y., “Synthesis and characterization of mesoporous silicon carbide,” *Microporous and Mesoporous Materials*, Vol. 60, pp. 207-212, 2003.
- [6] Guo, X. Y., Jin, G. Q., “Pore-size control in the sol-gel synthesis of mesoporous silicon carbide,” *Journal of Materials Science*, Vol. 40, pp. 1301-1303, 2005.
- [7] Shi, L. M., Zho, H. S., Yan, Y. H., Li, Z. Q., Tang, C. H., “Synthesis and characterization of submicron silicon carbide poeders with silicon and phenilic resin,” *Powder Techonlogy*, Vol. 169, pp. 71-76, 2006.
- [8] Li, J. W., Tian, J. M., Dong, L. M., “Synthesis of SiC precursors by a two-step sol-gel process and their conversion to SiC powders,” *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 77, pp. 1853-1857, 2000.
- [9] Shen, X. N., Zheng, Y., Zhan, Y. Y., Cai, G. H., Xiao, Y. H., “Synthesis of porous SiC and application in the CO oxidation reaction,” *Materials Letters*, Vol. 61, pp. 4766-4768, 2007.
- [10] Zheng, Y., Zheng, Y., Wang, R., Wei, K. M., “Synthesis and characterization of high surface area silicon carbide by dynamic vacuum carbothermal reduction,” *Journal of Materials Science*, Vol. 43, pp. 5331-5335, 2008.
- [11] Warriar. K. G. K., Anilkumar, G. M., “Densification of mullite-SiC nanocomposite sol-gel precursors by pressureless sintering,” *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 67, pp. 263-266, 2001.
- [12] Wu, Z., Zhang Z. Y., Yan, J. F., Zhai, C. X., Yun, J. N., “Preparation of nanometer silicon carbide powders by Sol-Gel processing”, *IEEE International Nanoelectronics Conference*, Shanghai, China, pp. 394-396, 2008.
- [13] Sun, J. J., Li, J. B., Sun, G. L., Zhang, B., Zhang, S. X., Zhai, H. Z., “Dielectric and infrared properties of silicon carbide nanopowders,” *Ceramics International*, Vol. 28, pp. 741-745, 2002.
- [14] Hao, Y. J., Jin, X. D., Han, X. D., Guo, X. Y., “Synthesis and characterization of bamboo-like SiC nanofibers,” *Materials Letters*, Vol. 60, pp. 1334-1337, 2006.
- [15] Luo, F., Zhu, D. M., Zhou, W. C., “A two-layer dielectric absorber covering a wide frequency range,” *Ceramics International*, Vol. 33, pp. 197-200, 2007.
- [16] Zhao, D. L., Luo, F., Zhou, W. C., “Microstructure and effective modeling of the microwave permittivity of nano SiC(N) composite powder,” *Advanced Materials Research*, Vols. 11-12, pp. 141-144, 2006.
- [17] Hou, Z. X., Zhang, Y. M., Zhang, H. S., Zhang, H. B., Shao, J., Su, C. H., “Study on crystallization and microstructure of Li<sub>2</sub>O-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> glass ceramics,” *Materials*, Vol. 13, pp. 564-569, 2006.
- [18] Hatakeyama, K., Inui, T., “Electromagnetic wave absorber using ferrite absorbing material dispersed with short metal fibers,” *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 20, No. 5, pp. 1261-1263, 1984.
- [19] 林博文，*精密陶瓷科技*，經濟部工業局，台北，第395-411頁，1987。