

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫  成果報告  
 期中進度報告

## 表面塗佈優化電磁波吸收體護幕之研究

計畫類別： 個別型計畫  整合型計畫

計畫編號：NSC 93-2216-E-034-003-

執行期間：93 年 8 月 1 日至 94 年 7 月 31 日

計畫主持人：李貴琪 副教授

共同主持人：施家頤 副教授

計畫參與人員：陳鑫淙、林佳詩、游輝仁、何宗翰、黃厚鈞

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告  完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、  
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：中國文化大學紡織工程學系

中 華 民 國 九 十 四 年 十 月 十 一 日

## 摘要

本研究利用導電、導磁性之銅金屬與鐵金屬粉以及碳粉做為降低阻抗之材料，經由樹脂均勻混合後，以表面塗佈之方式將其塗料上於聚酯織物上，做為優化電磁波吸收體之表面護幕和間隔護幕，並且討論不同的塗佈材料，對於降低表面電阻值的成效，再利用表面電阻係數做為參數，完成優化電磁波吸收體護幕之目的，以達到吸收體產生阻抗匹配的效果，經由研究此之實驗方法，以提供喬曼吸收體設計之基本原理的驗證與實際成品測量結果之表現。由實驗得知，當吸收體護幕的阻抗值由高進入至低時可得到較高的衰減值，吸收體層數愈多，吸收效果隨之增加。

關鍵詞: 電磁波吸收體、阻抗匹配、衰減效率、喬曼吸收體

## ABSTRACT

In this study, we use conductive and permeable metal powders and carbon powders were separately mixed with resin, and coating the different type conductive resin on the polyester woven fabrics for designing the electromagnetic wave absorbing screens. We employ the different quantity and type of powders, for example, copper powders, iron powders, carbon powders to control the surface resistance. According to the parameter, to improve absorbing screen by impedance match, and then analysis the performance of attenuation effect from different absorbing screens and the number of layers. The study supply the method of proof theory and measure the effects of absorbing products. From the experimental results, as electromagnetic wave incidence absorbing with the impedance of screen is from high to low the attenuation effect is increased. And the attenuation effect is increased with increasing the number of layers.

Keywords: electromagnetic wave absorbing, impedance match, attenuation effect, Jaumann absorber

## 一、前言

### 1-1 吸收體之軍事用途

自從第二次世界大戰後，無線傳訊技術的發展可說是突飛猛進，尤其在軍事上的偵查方面的競爭，使各國無所不用其極地希望本身在探測技術上可以領先它國，所以在此匿蹤的隱形技術(Stealth Technology)也被廣泛地討論，並且將此列為在戰爭中的重要課題之一以便達到「先發制人」的目的，於是開始著手於材料的研究與發展，從此之後軍事上的隱形技術儼然成為吸收材料最為重要的發展舞台之一，可看出它在現代戰爭中之著足輕重的作用，就算未來勢必亦是扮演著影響戰局結果的關鍵角色[1]。

電磁波吸收體主要應用於雷達的隱形技術上，如美國知名的隱形戰鬥機 A-117 就是利用碳和鐵氧磁粉以塗佈的方式將其塗於機身外部來降少雷達波的反射。隨著科技的快速發展，材料也跟著進奈米的世代，在奈米碳管被開發後，有許多科學家不斷地努力尋找其中的發展契機，並且發現許多的奈米級粉體或是結構上，在雷達波吸收上有令人意想不到的功效，例如塗有奈米碳管或奈米鐵氧磁體的蒙皮，可以有效地降低戰鬥機被雷達探測的機會，且重量和厚度亦可大幅的減少。此外塗層技術的發展也占非常重要的一環，以俄國新式戰鬥機 SU-47 為例，它就使用了多層的匿蹤塗料。在 2000 年後俄國已開發出多層塗料的塗層技術，在很小的厚度中鋪上多層材料，每一層都有吸收的頻譜範圍，因而可以大幅增加適用頻寬。在美國 B-2A 隱形轟炸機早已利用碳纖、環氧樹脂和陶瓷材料做為塑材來代替金屬結構，之後更是將納入奈米的塗層技術，開發出的第四代奈米塗料可以吸收 99%雷達波，而厚度僅有數微米，不像過去的塗料一般使用了大量的鐵氧磁體而使重量爆增[2]。

### 1-2 吸收體發展簡介

吸收體的起源始於 1930 年代，由 William H. Emerson 在荷蘭發展以四分之一波長之共振腔，並採用碳(carbon)表層，TiO 為介電材質的電磁波吸收體，並於 1936 年取得法國專利。

於是電磁波吸收體的發展又因第二次世界大戰的關係引起了美國和德國的注意，相繼投入研究，分別獲得實用的成果。在美國方面，於 1941 至 1945 年間由 Halpero 於麻省理工輻射研究室，致力研究發展於減低船艦設備的雷達反射效果，此外則在設計應用於無回波，反射波產生的微波暗房，並於 1952 年取得美國專利，即為沙氏吸收體。

而在德國方面，其研究計畫名稱為” Schorndteinfeger” 其原義為” 打掃煙囪” chimney sweep”，是取其煙囪內的積碳做為吸收體的材料，針對運用在潛水艇中潛望鏡上，達到雷達偵測的偽裝效果，它是利用硬塑膠及電阻幕交互疊合所製作而成的，即為著名的喬曼吸收體，亦是本文所研究的吸收體類型[3]。

研究吸收體的目的在於衰減不必要的反射電磁波。在時下，工業用的吸收體已廣泛的運用在微波暗房、雷達截面積的衰減、3c 產品的電磁波干擾以及導波管負載上。所以吸收體的考量，通常以頻寬、厚度、價格、重量、耐久等因素為其評估的標準[4]。

## 二、研究目的

國內外之文獻大多是針對網路模型進行公式的設計與計算 [3, 4, 5, 8, 9]，除此之外，雖然有電磁波吸收體是以濺鍍方式和塗佈導電樹脂 [7, 10] 進型優化護幕，但尚無研究論文是針對護幕間距大小、層數、表面電阻做一綜合性的討論。本研究目的是利用國內外先前文獻之電磁波吸收原理，以塗佈工程進行優化護幕，在以護幕間距大小、層數、表面電阻作為設計參數，設計符合理論之電磁波吸收體，測試其電磁波吸收效果並檢討之。

## 三、文獻探討

### 3-1 吸收體之分類

當電磁波進入阻抗大小變化極大的物質時如:空氣對金屬，由於介質的導磁和導電性之

不同，非常容易產生反射的效果，如同：以不同的繩子相接，有波傳遞時，將會有反射波回傳能量的現象，而其中物質波對線密度就同電磁波對特性阻抗一般，所以我們必需如以控制阻抗的變化，期望將電磁波的反射降到最低。所以當雷達送出電磁波前進時，遇到不同介質可能發生的行徑有反射、散射、穿透或在介質內產生共振現象， $R+A+T=1$ （其中 R 代表反射、A 代表吸收、T 代表穿透），一般而言，電磁波進入金屬材質時在表面可將入射電磁波全反射，而無穿透現象產生，故隱形技術和信號抑制不考慮穿透的部份，而是著重於共振中產生的損失和如何將電磁波“引入”吸收體的傳輸線原理與阻抗匹配之理論，所以電磁波吸收材與遮蔽材最大的不同，就在於反射與穿透效果之要求不同[5]。

如前所述，在材料裡共振損失基本上的原理，就是把入射的雷達波能量在其內部轉換成熱量，吸收材料在電磁波的消耗損失方式可分為電阻性、磁性、介電性三種吸收材料各別加以探討[6]。

#### (1) 電阻性吸收材料：

電阻性吸收體就如同在鎳線上通以電流使之產生熱一樣，其原理為材料中傳導帶的自由電子在電磁波電場的加速下衝撞到電阻性材料內的晶格，運動就會突然停止，此時電子的運動能將會瞬間轉換成熱量，而藉此散發電磁波所給予之能量。另外不同思考方向是在於表面護膜的阻抗值，利用吸放體材料本身有限的導電率  $\sigma$  與較小自由電子密度，形成阻抗體或阻抗體薄膜，例如使用導電性金屬纖維或蒸鍍金屬氧化物、金屬氮化物薄膜，形成阻抗體，配合著電磁波吸收與阻抗匹配之原理，以達到寬頻的計設要求。

#### (2) 磁性吸收材料：

當電磁波電場與磁性材料作用時，會使內部電子呈旋轉的狀態而產生磁偶矩 (Magnetic Moment)，此磁偶矩之發生由材料的導磁率  $\mu$  所決定，材料之複數導磁率為 ( $\hat{\mu} = \mu' - i\mu''$ )，其中虛數部份  $\mu''$  的物理意義為吸收程度的大小，而材料之  $\hat{\mu}$  值也會隨著頻率而變化，當電磁波之磁場方向隨著頻率轉換時，使得磁區改變因材料的矯頑力 (Coercive Force)，而發生磁滯現象以消耗電磁波能量，所以吸收特性將隨著頻率增大而有所改變。磁性吸收體的重量比其它材料來的重，但是厚度可以比較薄，一般是由彈性膠體，如異戊烯橡膠、腈基橡膠、矽酮橡膠等添加磁性鐵氧磁粉 (Ferrite)，如鋅化錳、鋅化鎳、鋅化鎂等尖晶鐵氧體、平板狀鐵氧體或軟磁性金屬粉，與 PU 混煉成薄片 [7]。

#### (3) 介電性吸收材料：

由於電阻性材料自由電子密度很高，會使得電磁波產生反射現象，所以降低材料中的電子密度，則有助於吸收電磁波的功能，將其電阻材料分散開來，如石墨粒子分散於發泡之聚乙烯中，而形成石墨粒子本身所具有的電阻與粒子間的電容之複雜結合的形態，而材料電容作用是由複數之介電常數 ( $\hat{\epsilon} = \epsilon' - i\epsilon''$ ) 來決定，其中虛數部份  $\epsilon''$  的物理意義為介電材料的吸收損失。

### 3-2 吸收體之類型

電磁波吸收體，除了材料本身的吸收特性之外，包括耐環境特性與施工性、用途上的不同等因素考慮下，有許多不同的外型設計呈現。以吸收原理來區別可分為阻抗消耗與共振消耗。

#### (1) 變形吸收體：

變形吸收體 (Geometric Transition Absorber) 應用範圍很廣，外型類似泡棉，一般的微波暗房 (Anechoic Chamber) 中所採用的吸收體便屬於此類。形狀有金字塔型、刀型、楔型等，此種吸收體的吸收效果非常好，但厚度較厚，耐候性也不佳，不適合做為武器的匿蹤材料。

## (2) 平板型吸收體:

平板型吸收體之吸收原理包括阻抗與共振消耗兩種，又可以層數分為單層如沙氏吸收幕(Salisbury Screen)和戴倫薄幕(Dallenbach Layer)、雙層和多層如喬曼吸收體(Jaumann Absorbers)吸收體[8]，目前研究沙氏吸收幕許多工作者中，以范氏(R. Fante)以范氏的理論發展較為完善，由其推導出遞迴的反射係數數學式中，可以知道影響吸收體頻率響應的參數有層數、間距(填充物的厚度)、護幕阻抗、填充物特性等[9]，而多層吸收的層數愈多吸收的頻寬也會加大，以觀念來看，若強調材料的介電損失，填充材料的選擇是一重點，相反地，如果強調共振消耗，多以電阻被膜如氧化銦(ITO)和在電阻性吸收材料提到的薄膜等，以四分之一波長與金屬相隔，間層為空氣和無損失材料填充，其中材料的表面阻抗的匹配原理，將會決定吸收材料的吸收效果。一般而言，欲達效果較好的吸收體必需兩者都考慮，配合間層的介質材料 $\epsilon_r$ ，可以將吸收體厚度降至 $\lambda/4\sqrt{\epsilon_r}$ 。在武器的匿蹤材料中多以蒙皮和塗料為主，因為其表面平滑，在此亦歸類為平板型吸收體。在塗料和蒙皮上，大部份的材料為導電性樹脂 Conducting Polymers (CPs)，如 Ployaniline (PANi)[10]，或者是碳粉。

## (3) 類比電路吸收體:

類比電路吸收體(Circuit Analog RAM)雖然外觀亦屬於平板型吸收體，但其吸收原理和以上介紹的吸收體有所差異，於製作方法是以蒸鍍或濺鍍，製成具有幾何圖案型的金屬膜或金屬氧化膜，利用薄膜的厚度來控制阻抗的實部，控制幾何圖案型式來決定阻抗的虛部，此種方法的優點為阻抗可以控制，但是製作上則較為困難，此外科學家們更在設計方面著手於和多層吸收體互相搭配以尋求吸收頻帶更寬的效果。

## 3-3 電磁波吸收體之應用

電磁波吸收體的應用範圍非常廣，大至上可分為防止雷達探測和電磁波干擾等二大項。

### (1) 反雷達探測雷達:

戰機上的隱形技術主要工作是提高反雷達偵測的能力，通常用目標的雷達散射截面積 RCS(Radar Cross Section)表示，RCS 是指飛機對雷達波的有效反射面積，雷達隱身的方法便是採用各種手段來減小飛機的 RCS。例如美國的 B-52 轟炸機的 RCS 大約 1000 平方米，很容易被雷達發現，而與其同類的採用了隱身技術的轟炸機 B-2 的 RCS 約為 0.01 平方米，一般雷達很難探測到它。目前用來減小飛機 RCS 的主要途徑有兩種：一是改變飛機的外形和結構角度，研究角度對它的影響[7]，二是採用吸收雷達波的塗敷材料和結構材料。而大部份雷達吸收材料為多層材料，大致分為三層：最外層是透波層：中間層(蜂窩芯或泡芯)是雷達波損耗層：最內層是基板，具有反射抵消雷達波的特性，當雷達能量輻射到此材料結構上時，就會被大量吸收和抵消掉。常用的吸收體有：聚氨基甲酸酯泡芯和環氧樹脂蒙皮、聚苯乙烯泡沫芯和膠合板(尼龍)蒙皮或碳纖蒙皮、玻璃纖維蜂窩芯和石墨複合蒙皮。另外含具有濾波功能之頻率篩選面 FSS (Frequency Selective Surface)，亦可配合電阻被膜或類比電路吸收體應用於雷達天線等之隱形[1]。

### (2) 防止信號干擾與雷達假像:

而電磁波吸收材料除了在軍事上的用途外，在工業用途上電磁波吸收材料也提供了屏蔽作用，減少設備或裝置所產生的電磁波反射。近年來，電子科技發達使得大量的電子產品充斥在我們生活環境的周圍，電子產業以十倍速的方式快速發展，並且朝向高速化、高頻化、小型化的目標，使得電磁波干擾的問題形成對產品功能和安全的影響越來越大，甚至對於電磁波是否會影響到人類健康的問題，一直都成為熱門討論的話題，為

了管理電磁波干擾的問題，除了已經有許多國家立法規定：在醫院和飛機上禁止使用行動電話等電子產品，另外在電子產品設計時便考慮電磁波相互干擾的問題，在減少電磁波干擾也是電磁波吸收體材料應用重要的一環。另外因為多路徑效應所產生的雷達假象，也可以利用電磁波吸收體來排除。目前日本 Takenaka 公司，特別研究開發出可以吸收電磁波的瀝青和混凝土，希望運用於電子收費站、隧道內甚至是大型橋樑、大廈建築上，來防止船舶或者是車輛上行車雷達所發生多路徑干擾的問題。而由高樓大廈導致的電視鬼影，此一問題的對策，雖然有改善天線的指向性，或者在電視接收機內予以消去的方法，被檢討的幾個對策之中，仍以在大廈的壁面貼上電磁波吸收體削減反射方法，在直接消除造成障礙原因的意義上算是出色的方法，在各方面業已付諸實用化。這些電磁波吸收體，因為頻率存在於二頻，所以採雙層構成的製品居多，其材料一般都使用陶鐵磁體[6]。

#### 四、研究方法

當電磁波進入阻抗大小變化極大的物質時時如：空氣對金屬，由於介質的導磁和導電性之不同，非常容易產生反射的效果，如同：以不同的繩子相接，有波傳遞時，將會有反射波回傳能量的現象，而其中物質波對線密度就同電磁波對特性阻抗一般，所以我們必需如以控制阻抗的變化，期望將電磁波的反射降到最低。

#### 伍、結果與討論

表 1 是電磁波吸收體護幕之規格，其中以粉末的體積百分比做為吸收體護幕設計的主要變數，以 5%為間隔，依照粉末的比重：碳粉  $0.75g/cm^2$ 、鐵粉比重  $3.46g/cm^2$ 、銅粒比重  $3.53g/cm^2$ ，計算粉末之重量百分比加以調製塗料進行塗佈。

##### 5-1 材料粉末含量對表面電阻值之影響

表 2 為各材料之吸收體護幕之表面電阻值，圖 2 探討不同金屬和碳粉粉末含量對其表面電阻值之影響，表面電阻以對數劃出粉末含量與其之關係，在圖中可發現碳粉和鐵粉之表面電阻值隨著粉末含量之增加而有明顯下降的趨勢，但由於鐵金屬粉易在製作過程中氧化，所以在表面電阻值降低的幅度沒有碳粉明顯，而銅粉也因為粒徑大小大約為  $40\sim 80\mu m$ ，表面活化能較大，容易在製作過程中被空氣氧化，一旦受氧化後電阻值增加程度比鐵粉高，所以在製作樣本上表面電阻值並沒有明顯的下降趨勢。

##### 5-2 單層吸收體之吸收效果

圖 3 為探討單層吸收體護幕之金屬和碳粉粉末含量對其最大衰減值之影響，由圖中可發現其最大衰減值和表面電阻值呈現反比的關係，是由於在低阻抗值之鋁金屬板前放置的單層吸收體護幕其阻抗值必需在空氣與鋁板的阻抗值做出匹配效果，但由於鋁金屬板的阻抗值非常低，所以相對的，需要表面電阻值較低的吸收體護幕做匹配，使得表面電阻低的吸收護幕較表面電阻值高的吸收體護幕，可得到較大的最大衰減值。

##### 5-3 護幕阻抗匹配對吸收效果之影響

表 3 為雙層吸收體護幕以不同阻抗值的排列所得到的最大衰減效果，各雙層吸收體護幕粉末含量總和皆為 55%，以 C1-10 為例，就是將碳粉吸收體護幕編號 1、碳粉體積含量為 5%的單層吸收護幕放置於靠近雷達天線的最上層我們定義為第一層，編號 10、碳粉體積含量為 50%的單層吸收體疊放在 C1 下與鋁金屬板貼合，同理 C10-1 則是將第一層吸收體護幕改為 C10 第二層為 C1。

圖 4 為雙層碳粉吸收材料阻抗高低排列對最大衰減值之影響，由圖中可發現在 C1-10 的配置下可得到最大的吸收效果，最大衰減值可到 3.751dB，是由於第二層 C10 的吸收護幕阻抗值較其它護幕小，所以可在鋁板前產生較大的共振損失，而有較大的衰減值，另外也可發現在 C5-6 和 C6-5 中最大衰減值差距有降低的趨勢，是由於兩者的吸收體護幕阻抗

排列方式與粉末含量的差值比其它組不為明顯，所以最大衰減值略有相同，差距不大，但依然可看出阻抗值排列方式所產生吸收效果的影響，當阻抗值由第一層較高排列至低時最大衰減值要比阻抗值由低至高的明顯增加。

圖 5 為雙層鐵粉吸收材料阻抗高低排列對最大衰減值之影響，由圖中亦發現在 Fe1-10 的配置下可得到最大的吸收效果，是由於第二層 Fe10 的吸收護幕阻抗值較其它護幕小，所以可在鋁板前產生較大的共振損失，而有較大的衰減值，另外也可發現在 Fe5-6 和 Fe6-5 中最大衰減值差距有降低的趨勢，是由於兩者的吸收體護幕阻抗排列方式與粉末含量的差值比其它組不為明顯，所以最大衰減值略有相同，差距不大，但依然可看出阻抗值排列方式所產生吸收效果的影響，當阻抗值由第一層較高排列至低時最大衰減值要比阻抗值由低至高的明顯增加。

圖 6 為雙層銅粉吸收材料阻抗高低排列對最大衰減值之影響，由圖中可發現在 Cu1-10 的配置下可得到最大的吸收效果，是由於第二層 Cu10 的吸收護幕阻抗值較其它護幕小，所以可在鋁板前產生較大的共振損失，而有較大的衰減值，另外也可發現在 Cu5-6 和 Cu6-5 中最大衰減值差距有降低的趨勢，是由於兩者的吸收體護幕阻抗排列方式與粉末含量的差值比其它組不為明顯，所以最大衰減值略有相同，差距不大，但依然可看出阻抗值排列方式所產生吸收效果的影響，但也由於銅粉易被氧化的關係，加上儀器所測量到之衰減值極小，誤差值相對明顯，導致精準度下降，所以在比例上阻抗值的排列影響吸收效果沒有碳粉和鐵粉來的大。

#### 5-4 層數對吸收效果之影響

表 4 為三層吸收體與雙層、單層吸收體之最大衰減值，在此以等比級數 2、4、8 含量為 10%、20%、40% 做為吸收護幕之匹配設計，另外再以等差級數 3、6、9、含量為 15%、30%、45% 做為另外一組匹配效果之設計，以 C2-4-8 為例，就是以 C2 為第一層吸收護幕，C4 為第二層吸收護幕、C8 為最底層也就是貼合在鋁板上之吸收體，同理可知，C2-4 為雙層吸收體，第一層吸收護幕為 C2，第二層吸收護幕為 C4。

圖 7 為探討碳粉吸收材料層數對最大衰減值之影響，由圖中可發現當以三層排列方式 C3-6-9 之阻抗匹配所產生之吸收效果比 C2-4-8 好，是因為此 C3-6-9 吸收護幕的碳粉含量總和比 C2-4-8 來的高，表面電阻值與阻抗也隨之降低，在未影響第一層產生反射效果下，將電磁波能量限制在吸收體內以共振原理來消耗其能量，所以最大衰減值比 C2-4-8 要來的高。另外在圖中亦可明顯看出當層數愈多其最大衰減值也隨之提升。

圖 8 為探討鐵粉吸收材料層數對最大衰減值之影響，由圖中可發現當以三層排列方式 Fe3-6-9 之阻抗匹配所產生之吸收效果比 Fe2-4-8 好，是因為此 Fe3-6-9 吸收護幕的鐵粉含量總和比 Fe2-4-8 來的高，表面電阻值與阻抗也隨之降低，在未影響第一層產生反射效果下，將電磁波能量限制在吸收體內以共振原理來消耗其能量，所以最大衰減值比 Fe2-4-8 要來的高。另外在圖中亦可明顯看出當層數愈多其最大衰減值也隨之提升。

圖 9 為探討銅粉吸收材料層數對最大衰減值之影響，由圖中可發現當以三層排列方式 Cu3-6-9 之阻抗匹配所產生之吸收效果比 Cu2-4-8 好，但其差距不比碳粉和鐵粉明顯，同理是因為吸收體護幕的表面電阻值不能有效降低，所以導致最大衰減值不高，在儀器的測量中誤差值也隨之提高，精準度不比碳粉吸收體護幕和鐵粉吸收體護幕好，但在趨勢上依舊可看出層數對吸收效果之影響。

#### 5-5 疊合多層護幕之吸收效果

因為本實驗利用塗佈方式來降低阻抗值的效果有限，所以得到最大衰減值不如預期高，其原因在於無法有效控制護幕之匹配效果，導致產生的共振損耗效果不佳，但由於平板型吸收體所強調的是在於厚度要比變形吸收體薄，所以在以 1/4 波長做為隔距的條件下

層數上的增加範圍有限，以三層為例厚度大約在 2.1cm~2.2cm 左右，若往上增加層數雖然可以增加其吸收效果，但在厚度上卻沒有平板型吸收體該有的優點，故本節不以 1/4 波長做為間隔改以疊層方式製作吸收體一方面可達到阻抗值匹配的效果，另一方面可大幅降低吸收體之厚度，以十層疊合時厚度大約為 0.5cm 左右。

圖 10 為碳粉吸收材料 C1~10 與 C10~1 疊合之電磁波吸收效果，由圖中可以明顯看出當吸收體 10 層疊合，標號 1 為由阻抗高至阻抗低 C1~10 的最大衰減值為 9.222dB，而標號 2 阻抗值由低至高 C10~1 最大衰減值只有 1.496dB，吸收效果有很大的差距，其原因是因為當電磁波由空氣進入吸收體時，最外層之吸收體護幕之阻抗值必需與空氣相近，由高至低進入吸收體內，若第一層之吸收體護幕阻抗值過低時，容易產生反射效應無法在阻抗上達到匹配效應。

圖 11 為鐵粉吸收材料 Fe1~10 與 Fe10~1 疊合之電磁波吸收效果，由圖中可以明顯看出當吸收體 10 層疊合，標號 1 為由阻抗高至阻抗低 Fe1~10 的最大衰減值為 10.758dB，而標號 2 阻抗值由低至高 Fe10~1 最大衰減值只有 0.396dB，吸收效果有很大的差距，其原因是因為當電磁波由空氣進入吸收體時，最外層之吸收體護幕之阻抗值必需與空氣相近，由高至低進入吸收體內，若第一層之吸收體護幕阻抗值過低時，容易產生反射效應無法在阻抗上達到匹配效應。

圖 12 為銅粉吸收材料 Cu1~10 與 Cu10~1 疊合之電磁波吸收效果，由圖中可以明顯看出當吸收體 10 層疊合，標號 1 為由阻抗高至阻抗低 Cu1~10 的最大衰減值為 5.919dB，而標號 2 阻抗值由低至高 Cu10~1 最大衰減值為 0dB，完全沒有吸收效果，其原因是因為當電磁波由空氣進入吸收體時，最外層之吸收體護幕之阻抗值必需與空氣相近，由高至低進入吸收體內，若第一層之吸收體護幕阻抗值過低時，容易產生反射效應無法在阻抗上達到匹配效應。

## 六、結論

1. 在塗佈鐵與銅金屬粉和碳粉粉末時，含量愈高其護幕電阻值愈低，其中又因金屬粉易受氧化，所以碳粉所呈現的效果最佳。
2. 單層吸收體，在未產生反射效應下，護幕阻抗值愈低，易和鋁金屬板產生阻抗匹配效應，吸收效果愈佳，以 C10 為例，吸收功率最高可達 57%。
3. 當電磁波入射進入多層吸收體之護幕時，阻抗排列由高至低所產生的吸收效果比由低至高明顯，可知阻抗值的匹配為吸收體設計最重要的要素之一，其中 C1-10 之吸收功率最高可達 57.8%。
4. 吸收體層數愈多時，所產生的共振消耗愈大吸收效果愈佳，以三層為例 C3-6-9 最高吸收功率可達 62.3%。
5. 在厚度考量下，以塗佈進行吸收體設計時，多層疊合所產生的材料吸收效果，要比 1/4 波長做為間隔所產生的共振消耗效果明顯，以鐵 Fe1~10 之 10 層塗佈疊合為例最高吸收功率可達 91.6%。

## 參考文獻：

1. 郭芳富，船艦隱形技術發展，海軍學術月刊，第三十七卷，第六期，81-86 (2003)
2. 畢源廷，蘇霍金鷹 SU-47 戰機，尖端科技軍事雜誌，第二二七期，27-33 (2003)
3. 李文清，多層微波吸收體之研究，大葉工學院電機工程研究所碩士論文，1-2 (1996)
4. 鄭松武，平板型吸收體寬頻特性之最佳化設計，中正理工學院電子工程研究所碩士學位論文，1-2 (1996)
5. Siddharth Jain and R. C. Jain, Design of a multilayer electromagnetic wave absorber using numerical optimization, *Proceedings of Symposium on Advances in*



*Electronics-ELECTRO-2001*, 56-62 (2001)

6. 何中庸，電磁波吸收體入門，全華科技圖書，臺北，中華民國，1-16 (1992)
7. Mirabel Cerqueira Rezende, Inácio Malmonge Martin, Roselena Faez, Radar cross section measurements (8-12 ghz) of magnetic and dielectric microwave absorbing thin sheets, *Revista de Fisica Aplicada e Instrumentação* **15**, No.1, 24-29 (2002)
8. Leebdert J. du Troit, The design of jaumann absorber, *IEEE Antennas and Propagation Magazine* **36**, No.6, 17-25 (1994)
9. R. L. Fante and M. T. McCormack, Reflection properties of the salisbury screen, *IEEE Trans. Antenna Propag* **36**, 1443-1454 (1988)
10. K. Naishadham and P. Chandrasekhar, Measurement of the broadband microwave absorption and shielding characteristics of a conductive polymer, *1998 IEEE MTT-S International Microwave Symposium digest, June 7-12, 1998, Baltimore Convention Center, Baltimore, Maryland, IEEE*, 78-81 (1998)

#### 計畫成果自評：

本計畫之研究內容與原計畫相符。達成目標計有：

1. 完成導電性粉末之種類對特性阻抗之探討。
2. 完成導電性粉末之含量對特性阻抗之探討。
3. 完成塗佈厚度對特性阻抗之探討。
4. 完成以特性阻抗為設計參數時之電磁吸收體護幕配置情形。
5. 完成電磁波吸收體護幕間距對電磁波吸收效果之探討。
6. 完成電磁波吸收體護幕層數對電磁波吸收效果之探討。
7. 完成各種導電性粉末的電磁波吸收效果綜合評估。

本計畫研究成果之學術及其他應用價值為：

1. 培育參與本研究計畫人員從事應用性研究計畫之基礎能力，增加自身的研發經驗，並提升創新研發能力，且能符合民間企業需求。
2. 提升國內紡織工業應用於高機能電磁波吸收材製造之研究風氣及水準。
3. 本研究所採用的加工製程及製出成品，目前鮮少有人提出相關研究報告。就學術上而言，此製程提供了一個新的研究方向，而製成的各項成品極有可能取代既有的相關產品。
4. 研發出防護效果更佳之電磁波吸收材料，並將其應用於日常生活之各類電器用品上，以期降低電磁波對人體所產生的各種危害，進而提昇生活品質。
5. 將此電磁波吸收材料擴大應用於各類工業、醫療、或軍事國防用途上，以減少因電磁波干擾而產生的意外災害。在軍事上，也可以利用此電磁波吸收材料來防止或躲避雷達的偵測。

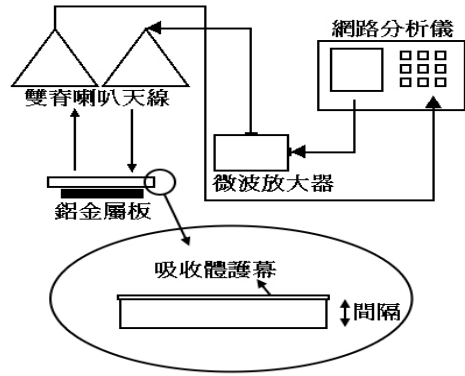


圖 1 測量電磁波吸收體之示意圖

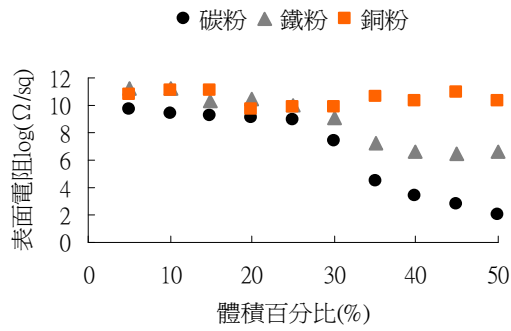


圖 2 鐵粉、銅粉、碳粉之含量對護幕表面電阻值之影響

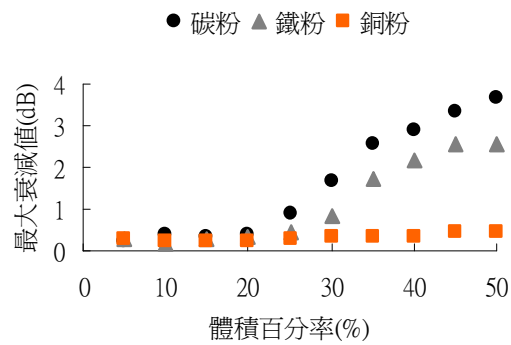


圖 3 單層吸收體護幕粉末含量對最大衰減值之影響

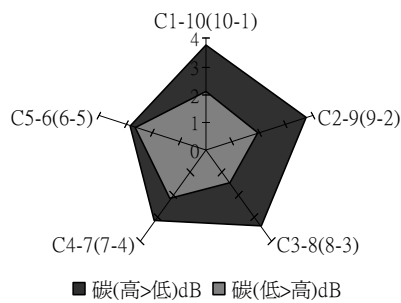


圖 4 雙層碳粉吸收材料阻抗高低排列對最大衰減值之影響

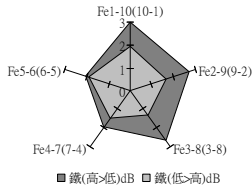


圖 5 雙層鐵粉吸收材料阻抗高低排列對最大衰減值之影響

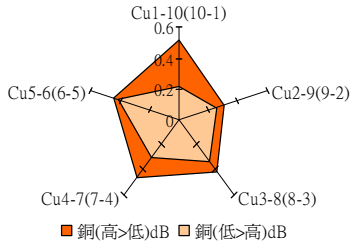


圖 6 雙層銅粉吸收材料阻抗高低排列對最大衰減值之影響

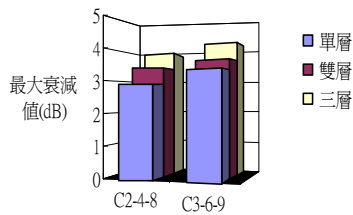


圖 7 碳粉吸收材料層數對最大衰減值之影響

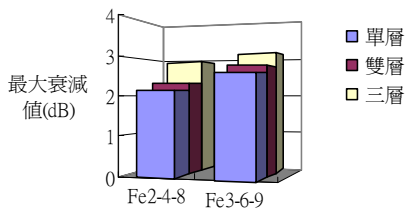


圖 8 鐵粉吸收材料層數對最大衰減值之影響

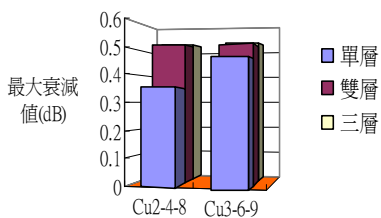


圖 9 銅粉吸收材料層數對最大衰減值之影響

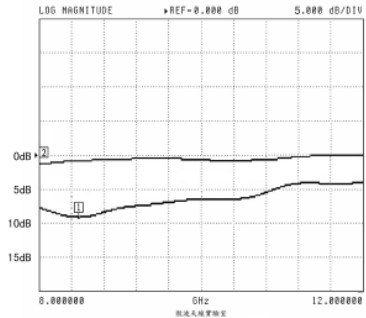


圖 10 碳粉吸收材料 C1~10 與 C10~1 疊合之電磁波吸收效果

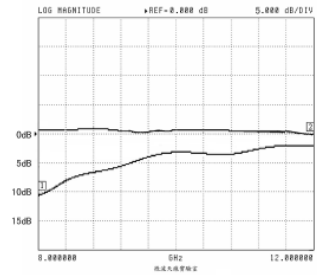


圖 11 鐵粉吸收材料 Fe1~10 與 Fe10~1 疊合之電磁波吸收效果

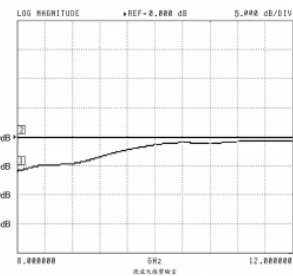


圖 12 銅粉吸收材料 Cu1~10 與 Cu10~1 疊合之電磁波吸收效果

表 1 各電磁波吸收體護幕之規格

標號	碳粉含量 (g)	樹脂含量(g)	重量百分比 (%)	體積百分比 (%)
C1	1.35	39.67	3.29	5
C2	2.70	37.58	6.70	10
C3	4.05	35.50	10.24	15
C4	5.40	33.41	13.91	20
C5	6.75	31.32	17.73	25
C6	8.10	29.23	21.70	30
C7	9.45	27.14	25.83	35
C8	10.80	25.06	30.12	40
C9	12.15	22.97	34.60	45
C10	13.50	20.88	39.27	50
Fe1	6.23	39.67	13.57	5
Fe2	12.46	37.58	24.90	10
Fe3	18.68	35.50	34.48	15
Fe4	24.91	33.41	42.71	20

Fe5	31.14	31.32	49.86	25
Fe6	37.37	29.23	56.11	30
Fe7	43.6	27.14	61.63	35
Fe8	49.82	25.06	66.53	40
Fe9	56.05	22.97	70.93	45
Fe10	62.28	20.88	74.89	50
Cu1	6.35	39.67	13.80	5
Cu2	12.71	37.58	25.27	10
Cu3	19.06	35.50	34.93	15
Cu4	25.42	33.41	43.21	20
Cu5	31.77	31.32	50.36	25
Cu6	38.12	29.23	56.60	30
Cu7	44.48	27.14	62.11	35
Cu8	50.83	25.06	66.98	40
Cu9	57.19	22.97	71.34	45
Cu10	63.54	20.88	75.27	50

表 2 各護幕之表面電阻值

標號	體積百分比(%)	表面電阻( $\Omega/cm^2$ )
C1	5	5.00E+09
C2	10	2.16E+09
C3	15	2.00E+09
C4	20	1.30E+09
C5	25	7.80E+08
C6	30	2.10E+07
C7	35	3.32E+04
C8	40	2.73E+03
C9	45	5.25E+02
C10	50	1.15E+02
Fe1	5	2.00E+11
Fe2	10	1.70E+11
Fe3	15	2.40E+10
Fe4	20	2.60E+10
Fe5	25	9.20E+09
Fe6	30	1.10E+09
Fe7	35	1.75E+07

Fe8	40	3.87E+06
Fe9	45	2.50E+06
Fe10	50	4.36E+06
Cu1	5	5.90E+10
Cu2	10	1.04E+11
Cu3	15	1.06E+11
Cu4	20	5.10E+09
Cu5	25	6.27E+09
Cu6	30	6.29E+09
Cu7	35	4.72E+10
Cu8	40	1.75E+10
Cu9	45	9.70E+10
Cu10	50	2.38E+10

表 3 雙層吸收體之最大衰減值

編號 (1-2)層	最大衰 減值 (dB)	編號(1-2)層	最大衰減 值(dB)	編號 (1-2)層	最大衰減值 (dB)
C10-1	2.114	Fe10-1	1.945	Cu10-1	0.214
C9-2	1.984	Fe9-2	1.647	Cu9-2	0.257
C8-3	1.451	Fe8-3	1.341	Cu8-3	0.341
C7-4	2.145	Fe7-4	1.481	Cu7-4	0.300
C6-5	2.645	Fe6-5	1.914	Cu6-5	0.413

表 4 單層、雙層、三層吸收體之最大衰減值

編號 (1-2-3) 層	最大衰減 值(dB)	編號(1-2-3) 層	最大衰減值 (dB)	編號(1-2-3) 層	最大 衰減 值(dB)
C8	2.871	Fe8	2.141	Cu8	0.351
C4-8	3.417	Fe4-8	2.341	Cu4-8	0.513
C2-4-8	3.914	Fe2-4-8	2.91	Cu2-4-8	0.524
C9	3.32	Fe9	2.564	Cu9	0.459
C6-9	3.645	Fe6-9	2.767	Cu6-9	0.511
C3-6-9	4.241	Fe3-6-9	3.116	Cu3-6-9	0.526

## 可供推廣之研發成果資料表

 可申請專利 可技術移轉

日期：94 年 10 月 11 日

國科會補助計畫	計畫名稱：表面塗佈優化電磁波吸收體護幕之研究 計畫主持人：李貴琪 計畫編號：NSC93-2216-E-034-003- 學門領域：纖維染整
技術/創作名稱	表面塗佈優化電磁波吸收體
發明人/創作人	李貴琪
技術說明	<p>本研究利用導電、導磁性之銅金屬與鐵金屬粉以及碳粉做為降低阻抗之材料，經由樹脂均勻混合後，以表面塗佈之方式將其塗料上於聚酯織物上，做為優化電磁波吸收體之表面護幕和間隔護幕，並且討論不同的塗佈材料，對於降低表面電阻值的成效，再利用表面電阻係數做為參數，完成優化電磁波吸收體護幕之目的，以達到吸收體產生阻抗匹配的效果，經由研究此之實驗方法，以提供喬曼吸收體設計之基本原理的驗證與實際成品測量結果之表現。由實驗得知，當吸收體護幕的阻抗值由高進入至低時可得到較高的衰減值，吸收體層數愈多，吸收效果隨之增加。</p> <p>In this study, we use conductive and permeable metal powders and carbon powders were separately mixed with resin, and coating the different type conductive resin on the polyester woven fabrics for designing the electromagnetic wave absorbing screens. We employ the different quantity and type of powders, for example, copper powders, iron powders, carbon powders to control the surface resistance. According to the parameter, to improve absorbing screen by impedance match, and then analysis the performance of attenuation effect from different absorbing screens and the number of layers. The study supply the method of proof theory and measure the effects of absorbing products. From the experimental results, as electromagnetic wave incidence absorbing with the impedance of screen is from high to low the attenuation effect is increased. And the attenuation effect is increased with increasing the number of layers.</p>
可利用之產業及可開發之產品	研發出防護效果更佳之電磁波吸收材，並將其應用於日常生活中之各類電器用品上，以期降低電磁波對人體所產生的各種危害。進而提昇生活品質
技術特點	國內外之文獻中，大多是針對網路模型進行公式的設計與計算，除此之外，雖然有吸收體是以濺鍍方式和塗佈導電樹脂優化護幕，但尚無論文是針對護幕材料性質、層數和表面電阻做一綜合的討論。本研究是利用先前文獻的吸收原理，利用塗佈來優化護幕，再以粉末含量、層數、表面電阻值做為參數，設計符合理論的實際吸收體。
推廣及運用的價值	將其電磁波吸收材擴大應用於各類工業、醫療、軍事國防用途上，以減少因電磁波干擾而產生之意外災害。在軍事上，也可以利用次電磁波吸收材來防止或躲避雷達的偵測。

- ※ 1. 每項研發成果請填寫一式二份，一份隨成果報告送繳本會，一份送 貴單位研發成果推廣單位（如技術移轉中心）。
- ※ 2. 本項研發成果若尚未申請專利，請勿揭露可申請專利之主要內容。
- ※ 3. 本表若不敷使用，請自行影印使用。