



科技新知

複合材料構件受力行為 分析與應用

助理教授 孫允平
助理教授 梁燕祝

提

要

現代科技發展迅速，針對功能性需求的產品一直在求新求變，要發展質量輕、強度強、製程便宜、維修方便等等產品外，具備特定功能或作用的產品就更受使用者歡迎。複合材料的廣為使用就是符合這些市場趨勢的發展，本文從近幾年複合材料的市場趨勢發展，到複合材料的種類、材料特性、受力行為分析、強度估算、各式各樣功能的複合材料，以及針對市場的應用有一系列的介紹。

壹、前言

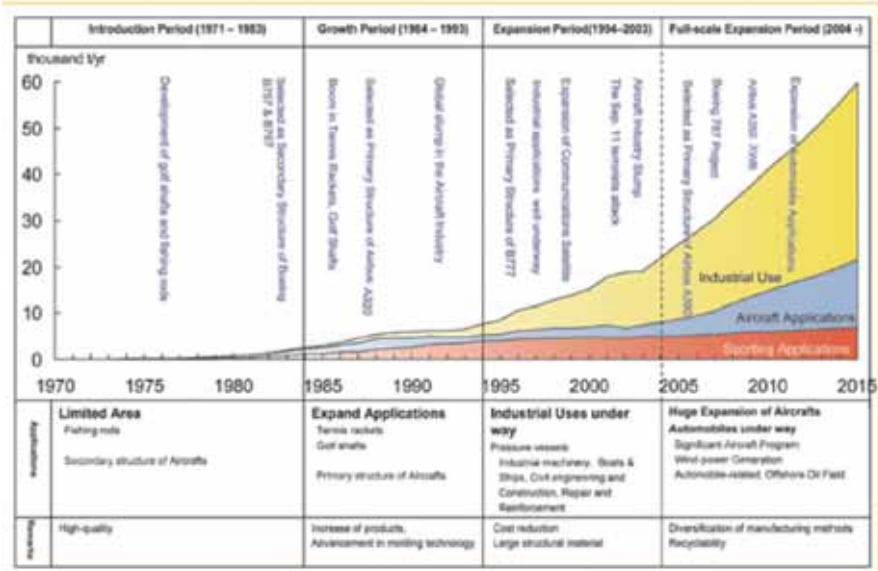
複合材料具備質輕、强度高、耐疲勞、抗腐蝕、且加工性能好與複雜構型備製容易等特色，不論在民生工業與國防航空等科技都廣泛地被使用。民生工業上，小至電冰箱門縫的磁條與便利商店贈送的玩偶磁鐵，大到車用輪胎、防彈與防爆玻璃、農用導光遮板、魚塭用補強等等，都是生活應用上的好幫手。國防航空等科技應用上，不只民用航空飛機、軍用飛機與直升機製作也漸漸以複合材料取代鋁合金等金屬材料以減輕重量增加載客率、減少燃油使用量、與增加操控過程最大受力範圍等等。圖一為自從1970年以來，複合碳纖維材料統計上應用在工業、航空、以及運動器材的應用趨勢[1]，最早是最下方紅色區域碳纖維應用在運動產品，以台灣最矚目的例子是全世界第一個製作碳纖維網球拍的公司，Kennex肯尼士產品在全盛時期下游代工廠遍佈台中一兩百家，擁有60億的資產；最上方黃色區域為碳纖維應用



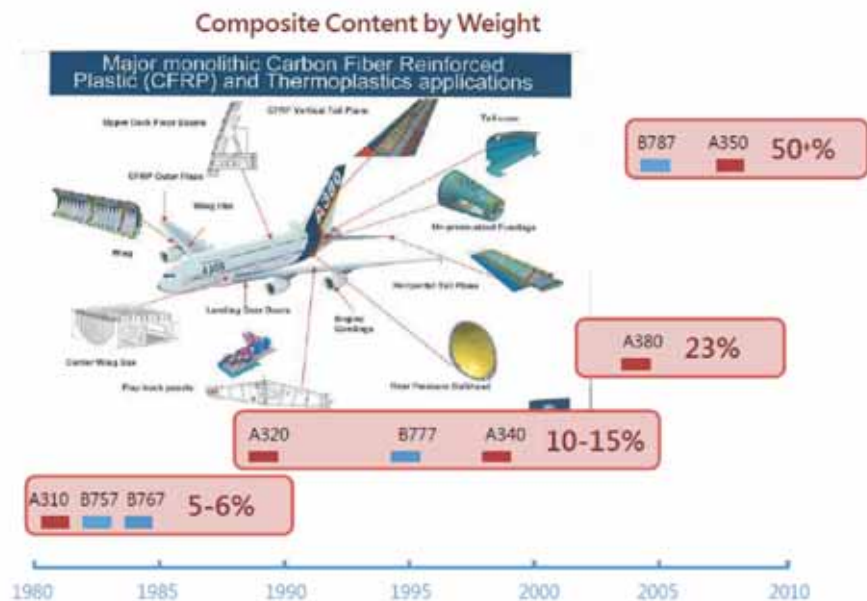
在工業，中間藍色區域為碳纖維應用在航空。

圖二為1980年以來複材在飛機應用上比例增加的趨勢圖[2]，其中空中巴士A380飛機與波音B787飛機複材含量比例已達50%，包括主翼、機身、控制翼面等。空中巴士也在2011年六月的巴黎航空展中展示未來2050年的概念機，利用智能薄膜製造飛機外殼，經過通電機身就變透明可以看遍宇宙太空，實際展覽影片可以在youtube網站看到，<http://www.youtube.com/watch?v=TDWUcTY2LSA>，這些未來產品的概念機show不禁讓我們對未來的科技充滿了期待。本文由複合材料的構件種類介紹開始，簡介複合材料的分類、功能及應用，並簡單介紹複合材料層板理論分析，期使對複合材料感興趣的讀者可以很快地跨入此領域，並依自己的設計製作構件。

圖一 複合碳纖維材料在工業、航空、以及運動器材應用的趨勢(1970~2015年)

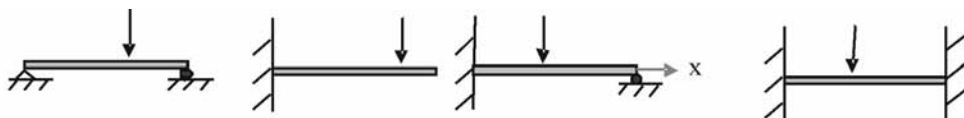


圖一 複合碳纖維材料在工業、航空、以及運動器材應用的趨勢(1970~2015年)



圖二 近年複材在飛機應用上比例增加的趨勢圖

滿了期待。本文由複合材料的構件種類介紹開始，簡介複合材料的分類、功能及應用，並簡單介紹複合材料層板理論分析，期使對複合材料感興趣的讀者可以很快地跨入此領域，並依自己的設計製作構件。



圖三 (a)簡支樑 (b)懸臂樑 (c)左嵌入牆壁右簡支撐 (d)雙邊嵌入牆壁



圖四 各種樑的橫截面設計：方型、圓型、I型、L型、T型、三角型，或內部挖空

貳、複合材料構件的總類

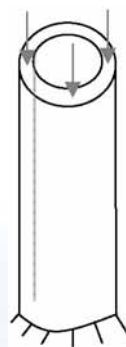
複合材料構件的總類可以依設計維度的情況，分成以下數種：(1)單一直線維度的(a)樑或(b)柱，(2)二維的平板，(3)三維殼構件，(4)三維或複雜構件。

- (1)a單一直線維度的樑：最常在材料力學中出現的基礎構件，屬於橫向支撐負載的結構體，依邊界條件又可分成(a)簡支(simply support, ss)樑：雙邊簡支撐，(b)懸臂(cantilever)樑：一邊嵌入牆壁中一邊自由端，(c)一端嵌入牆壁一端簡支撐，(d)雙邊均嵌入牆壁，如圖三所示。

此外，依樑的橫截面(cross section，即圖二(c)的x軸方向看過去的樑外型)分類，可以分成更多種類，如圖四的各種形狀，其目的是為了減重而不降低其強度和功能的設計。

- (1)b單一直線維度的柱：也是基本建築物中的基礎構件，屬於縱向支撐負載的結構體，如圖五，其橫截面外型也可以如圖四所示各種形狀設計。

不論單一直線維度的樑或柱，均是最常出現在大型的建築結構中，如維修飛機的機棚、大型體育館、橋樑等，機棚最常要承受大型吊掛的機具運作，當吊掛系統到達橫樑的正中央時會在正中央產生最大變形位移量，最大位移量就是檢驗此樑的工程品質最好的靜態測試方式之一，而建築物國際標準上有列出規範供驗收評量；大型體育館最大的特色是，不能有樑柱擋住觀眾的視角，所以在撐起梁柱的設計上施工就很重要，這最常在Discovery的節目介紹，同時複合材料有些具有透明的特性，正好可以彌補遮住觀眾視線的缺陷；橋樑更是最常見的重要交通建設，京滬高速鐵路要通過長江，橋墩(柱)的設計到橋樑的承受橫向與軸向位移、扭矩、甚至於同時六線道都有運載通過以及強側風時等等，都是要考量的重要因素。



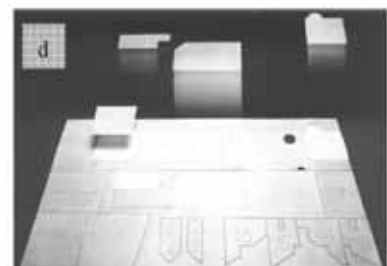
圖五 柱：縱向支撐負載的結構體



- (2) 二維的平板：地板結構是最標準的平板結構體，小如盒裝構件，大如工廠或飛機地板等，都是二維平板結構，研究二維平板結構有助於了解複合材料纖維編織方法與材料主軸方向的設計對於結構強度的影響，而目前空軍官校學生製作複合材料的基礎課程也以平板設計為始，主要目的為讓學生了解製作過程的缺失，如：抽真空處理不當、纖維與環氧樹脂潤澤不全，或有氣泡累積等，都會造成平板製作過程中，內含異質或裂縫的劣品。平板的強度理論分析也簡單易了解，所以將在第陸節介紹。
- (3) 三維殼構件：所謂殼結構，是指厚度相對於長和寬的維度差很多，可視為薄薄的一層，這最常出現在日常生活用品中的設計產品，包括交通工具汽車或摩托車外殼、手機或電腦筆電等外殼，都是目前台灣製造很多的產品，讀者應該不會陌生。飛機的機翼，就是主樑加上很薄的蒙皮結構，翼剖面形狀因為氣動力的關係，針對低速、高速飛機、或超音速飛機有各式各樣的設計，已經停飛的協和號翼展(左翼尖到右翼尖距離)就有超過25m，在超音速飛行時會造成翼展熱膨脹，所以防熱效果要考慮，這在複合材料自然比傳統金屬材料佔優勢。
- (4) 三維或複雜構件：複雜構件除了外型複雜外，還有可能是含多功能的複合材料產品。外型複雜的產品包括陶瓷汽缸引擎與機翼的各種翼剖面曲度的製作等。多功能的複合材料如圖六：

(a) 導電複合材料(如圖六(a))：是指複合材料中至少有一種組成分具有導電功能

的材料，可分為兩大類：一類是將導電體加入到機體中構成的複合材料；另一類是基體本身具有導電功能的複合材料。應用上包括電磁波遮蔽材料(EMI)與感壓元件等。



(b) 摩阻複合材料(如

圖六(b))：七十年代為了開發無石 (a) 導電複合材料 (b) 摩阻複合材料 (c) 光複合材料 (d) GP3 阻尼板 [3]



棉摩阻材料，而開發半金屬摩阻材料，但金屬易鏽蝕且易導熱，對於煞車片的設計有缺點，所以利用複合纖維和耐熱性能優越的粘合劑混合製成的剎車片自然優於前述產品，包括成本低、密度小、耐溫、耐磨、耐環境性能好等特點。這類摩阻材料具有穩定的摩擦性能，且耐高溫技術指標均達到或超過國家標準，在潮濕、酸性氣體環境中不腐蝕生銹、不發生力學衰退，在高溫時的磨損率低。最新穎的突破出現在F1的賽車場上，不同於一般車輛，F1賽車場上的所有車子剎車系統材料採用碳纖維複合材料剎車盤，不但比鋼材更耐溫度（工作溫度可以達到750度），且質量輕（一般剎車盤約3000克，但F1碳纖維複材剎車盤重約1500克），所以因為此類技術的引進，大大地提高剎車技術的效率，F1甚至於想辦法限制了材料與設計規格來阻礙剎車技術的發展，以免在車道上太多車子超車危險。

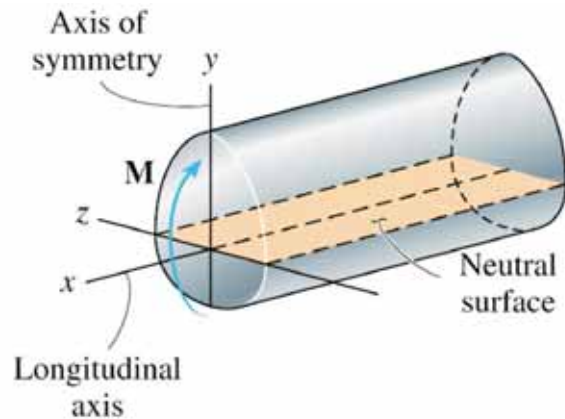
- (c)光功能複合材料(如圖六(c))：傳統以玻璃纖維和透明合成高聚物為原料複合而成的具有透光功能的複合材料。為提高透光率，首先是選透光性好的玻璃纖維及其織物，同時固化後的高聚物基體透光率亦應很高；其次要求玻璃纖維和固化後的高聚物折射率基本上一致。其主要用於建築物採光(窗、透光頂板)、農用暖房、工業設備防護罩和圍牆以及照明燈具擋板和照明天棚等。光功能材料結合太陽能技術在建築結構上有很大的變革，不只是綠功能建築，在外觀與美學上也是很好的設計。
- (d)阻尼複合材料(如圖六(d))：主要也是利用高阻尼材料特性置入複合材料基體中，達到降低振動或吸收阻絕振動以降低噪音的功能，例如：GP3阻尼板等產品。此外，最常高檔地應用在音響設備上，這類材料的改進剛好可以讓音響設備更完美。

叁、複合材料構件的受力

目前很多的設計均加入複合材料的結構或構件，其優點在於增加單位重量的結構強度或勁度、簡單的製程或因為複合材料所帶來更創新的設計。複合材料的選擇範圍可以從便宜的玻璃纖維(glass fiber)製品到碳纖維(carbon fiber)、或防彈的克維拉(kevlar)等各種外型的製品。設計複合材料產品最大的挑戰來自於決定設計構件所能承受的勁度與強度。由於真實複雜世界的結構系統真正受力的情況與理論分析過程中簡化的模擬方式有所差異，通常在理論分析或數值模擬過程都加以簡化成理想的邊界拘束條件以及單純的受力條件，如何決定理想化狀況下與實際邊界條件或受力條件的差異，需要進行有限元素分析和實際的實驗驗證比對，這就可以在



設計產品的過程中，決定壽命與安全使用範圍的最佳依據。設計的產品可能包括厚的複合材料層漸縮到薄片，產品要承受的力可能包括彎矩(bending)、扭力(torsion)、到剪力(shear)如圖七。彎矩力M會造成y軸上方有-x方向的壓應力，以及y軸下方有+x方向的張應力；扭力T會在構件最外圈產生最大的扭轉角，所以愈細長的設計就容易損壞，短胖的管子較能耐扭轉；剪力V是較複雜的力，



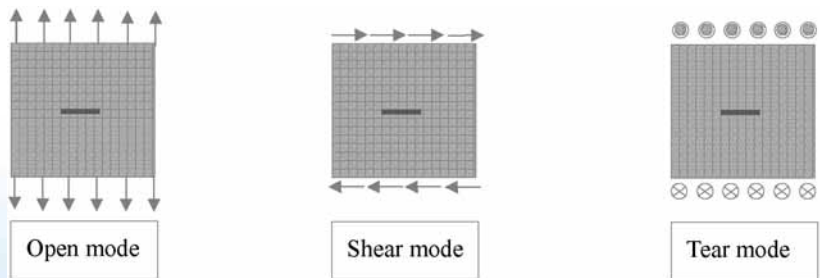
除了會產生彎矩力矩外還有在橫截面產生剪應力，造成y方向每一層會有剪應力，但此應力相較於剪力V所產生的彎矩應力小很多。要改變構件的強度可能變化的重要參數，包括纖維的編排方向以及複合材料疊層板的厚度與堆疊的層數等等都會影響設計構件承受應力的精確度。

好的設計工程師在設計產品時，不是設計出保證不壞的產品就是優秀，因為除了沒控制成本外，老闆會不高興炒你魷魚。安全係數SF (Factor of safety)的觀念剛好可以利用此觀念詳細給讀者說明。材料可以忍受的最大受力或應力 σ_y ，就是產品會壞的時候。工程師根據產品設計算出在使用過程中會發生的最大受力或應力，就是產品的允許受力或應力 σ_a 。安全係數定義為：

$$SF = \frac{\sigma_y}{\sigma_a}$$

所以愈大表示愈安全。最厲害的工程師是在產品保固期後，產品一件件故障，公司得以有維修收入，通常電子類產品最明顯，機械式產品就可以壽命久久。一般工程設計安全係數在2~3，飛機因為減重要求所以設計上妥協，安全係數在1點多，核能電廠是屬於不能發生意外的設計所以安全係數在10以上。

使用複合材料產品，最讓使用者擔心的是隱藏的破壞問題，不像



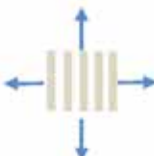
金屬構件整體均質材料的特色，複合材料大多

圖八 裂縫受外力模態：open mode、shear mode、Tear mode



以纖維編織或堆疊成承受主應力的構件，結合這些鬆散纖維的主要任務就由環氧樹脂完成，假如是多功能材料，那就進一步牽涉到異質(磁粉、導體、阻尼材料)存在的問題，在製作過程中極可能發生環氧樹脂潤澤不完全或氣泡孔隙發生的不完美現

表1 二維材料性質的方向性

材料方向性		特性	
等向性	示意圖		每個方向材料特性均相同
	應力(σ)應變(ε)關係 E: 楊氏係數 ν: 柏松比	$\begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E}{1-\nu^2} & \frac{\nu E}{1-\nu^2} & 0 \\ \frac{\nu E}{1-\nu^2} & \frac{E}{1-\nu^2} & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}$ (兩個參數 E, ν)	
正交性	示意圖		只在垂直方向材料特性不同
	應力應變關係	$\begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_x}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} & \frac{\nu_{xy}E_y}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} & 0 \\ \frac{\nu_{yx}E_x}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} & \frac{E_y}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{xy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}, \nu_{xy}E_y = \nu_{yx}E_x \text{ (對稱)}$ (三個參數 E_x, E_y, ν_{xy})	
異向性	示意圖		
	應力應變關係	$\begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}$ (六個參數 C_{ij})	

肆、材料特性

伍、材料的選取

Figure 1-1 is a log-log plot showing the relationship between Young's Modulus E (MPa) on the y-axis and Density ρ (Mg/m³) on the x-axis. The y-axis ranges from 0.1 to 10,000 MPa, and the x-axis ranges from 0.1 to 30 Mg/m³. The plot is divided into three main regions: Engineering Composites (工程复合材料) in the upper left, Engineering Polymers (工程聚合物) in the center, and Alloys (合金) in the upper right. Various materials are plotted as points or small regions, including CFRP, GFRP, KFRP, and various metals like Al, Cu, Fe, Ti, and Inconel. Design reference lines for minimum weight are shown as dashed lines with equations like $E/\rho = k$, $E^{1/2}/\rho = k$, and $E^{1/3}/\rho = k$. A box in the bottom right corner indicates '最小重量设计参考线' (Minimum weight design reference lines).

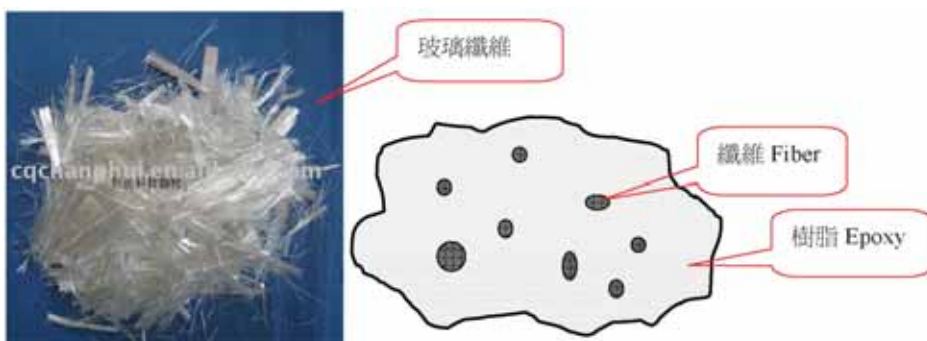
圖九 材料的陽氏係數 E 與密度 ρ 的關係圖[5]

料位在左下方。金屬或合金材料位在右上方。

陸、複合材料理論分析

複合材料產品的定義指非單一材料組成的構件。所以如圖十示意圖，通常含主材料纖維與副材料樹脂兩大項，纖維是承受力量的主要來源，樹脂是為了成型而將纖維聚集在一起的混合劑(需要與硬化劑按比例混合，否則產品將不會硬化，永遠軟軟地)，一般纖維的大小與編織方式有很多種，有規則大小不一致的，如圖十所示，也有統一數量1K(表1000條纖維)，3K(表3000條纖維)平面編織或立體編織的情況，或任意方向像棉花一樣的纖維布。通常，預估各方向之材料常數為進行材料強度分析時最重

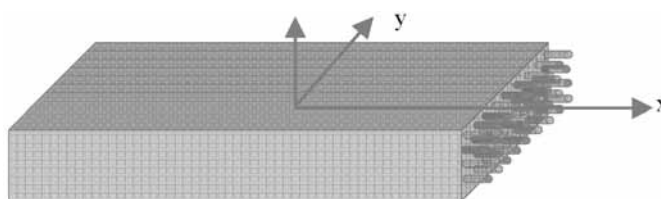
要的課題之一，假如纖維像竹子一樣等方向編排成一平面如圖十一，可以預知x方向承受最大應力，在承受y方向應力時



左圖片來源：<http://www.cqchanghui.en.alibaba.com>

圖十 複合材料主材料纖維與副材料樹脂示意圖

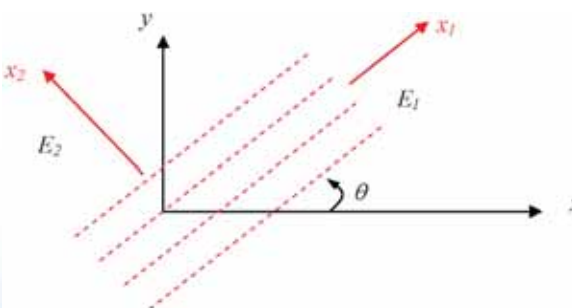
，就容易產生裂痕，因為y方向靠樹脂的黏合來承擔受力。本節以單向斜編的玻纖布為例子，利用x-y平面之座標轉換，計算x-y平面轉換到x'-y'平面時，新方向的材料常數值與原材料主軸方向彼此之間的關係。



圖十一 纖維單向平面編排示意圖

複合材料層理論分析：

如圖十二所示，材料編排方向為 x_1 與 x_2 ，在 x_1 的材料楊氏係數(Young's modulus)為 E_1 ，在 x_2 的材料楊氏係數為 E_2 ，浦松比(poison ratio)為 ν_{21} 。



圖十二 纖維材料主軸編排方向 x_1 與 x_2 ，

(一)單層材料：由材料力學之應力應與任意方向x, y



變關係，可以得到二維的矩陣關係如方程式(1)所示，

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{21}}{E_1} & 0 \\ \frac{-\nu_{21}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

其中， σ_1 、 σ_2 、 τ_{12} 分別為 x_1 方向正向應力、 x_2 方向正向應力、平面方向剪應力； ε_1 、 ε_2 、 γ_{12} 分別為 x_1 方向正向應變、 x_2 方向正向應變、平面方向剪應變。表示成矩陣方式為：

$$\{\varepsilon_i\} = [Q]\{\sigma_i\} \quad (2)$$

(二)應力之座標轉換公式：利用座標轉換與靜力平衡，可以得到旋轉任意角度之新座標系統 x - y 方向與原來 x_1 、 x_2 方向之正向應力與剪應力關係為

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

其中， σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 分別為 x 方向正向應力、 y 方向正向應力、平面方向剪應力；(3)表示成矩陣方式為：

$$\{\sigma_x\} = [T_\sigma]\{\sigma_1\} \quad (4)$$

因此， $\{\sigma_1\}$ 也可以用 $\{\sigma_x\}$ 表示成

$$\{\sigma_1\} = [T_\sigma]^{-1}\{\sigma_x\} \quad (5)$$

其中， $[T_\sigma]^{-1}$ 為 $[T_\sigma]$ 之反矩陣，

$$[T_\sigma]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

(三)應變之座標轉換公式：同應力之推導方式，可以得到旋轉任意角度 θ 之新座標系統 x - y 方向與原來 x_1 、 x_2 方向之正向應變與剪應變關係為

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -\sin \theta \cos \theta \\ -2 \sin \theta \cos \theta & 2 \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

表示成矩陣方式為：

$$\{\varepsilon_i\} = [T_\varepsilon]\{\varepsilon_x\} \quad (8)$$

(四)應力應變關係：



把方程式(5)和(8)代入(2)，得到：

$$[T_\epsilon] \{\epsilon_x\} = [Q] [T_\sigma]^{-1} \{\sigma_x\}$$

利用反矩陣關係，最後得到：

$$\{\epsilon_x\} = [T_\epsilon]^{-1} [Q] [T_\sigma]^{-1} \{\sigma_x\} \quad (9)$$

此為標準的任意方向應力 $\{\sigma_x\}$ 一應變 $\{\epsilon_x\}$ 關係以主軸方向的材料關係 $[Q]$ 來表示的方程式。

柒、複合材料應用

一、飛機與飛機控制翼面的設計：

如圖一所示，早在1980年用複合材料製作航空飛行器開始至今已經不是新聞，圖十三為Grumman公司設計的X-29飛機，這是在傳統金屬材料沒辦法實現的產品，利用複合材料的特性取代傳統金屬材料實現前掠翼到33度角的飛機，具備最大攻角(angle of attack)可以到達67度的極限。主要是利用複合材料控制氣彈發散(aeroelastic divergence)扭轉前掠翼機翼的現象且降低重量；所謂氣彈發散指的是此類飛機重心位置在氣動力中心之後，當攻角增加時，升力增加，翼面更向上彎曲(bending)與扭轉(twisting)，造成攻角再增加，這樣一直循環發展下去就會造成發散不穩定現象，是為氣彈發散的特性，使得此類飛機為不穩定設計，而且會造成結構失效。傳統的飛機材料，因為要避免機翼過度彎曲與扭轉，就必須增加韌性，但相對的也增加材料的重量，造成此類前掠翼飛機不可行的主因。提供此設計飛機穩定的來源需要兩項要件：(1)利用碳纖維複合材料抑制氣彈效應：即複合材料層板的設計可以具備輕而韌的強度，且在受力時可以產生彎曲與扭轉的耦合效應。一般情況下，當升力增加時，彎曲的力造成翼尖向上，扭力產生時也會令機翼扭轉到攻角增加，但是碳纖維複合材料耦合效應的設計剛好可以消除這種惡化的現象，亦即耦合現象會在機翼受彎曲的力造成翼尖向上時，耦合的扭力會把翼前緣向下扭轉，剛好降低攻角與減少升力，如此發



圖十三 Grumman公司飛行中的X-29飛機[6]



散現象就不會發生。(2)極靈敏的操控性：由實際飛行顯示，要保持本設計機型穩定飛行，需要電腦飛控系统操控，約每秒40次的修正，而且還具備三套備用的電腦操控飛行控制系统，可見其複雜度。



Shape memory alloy (SMA) Wires

圖十四 主動式氣彈翼active aero-elastic wing(AAW)設計[7]

飛機控制翼面的設計的範例，如圖十四，主動式氣彈翼active aero-elastic wing (AAW)設計為利用記憶合金變形來收縮整個翼表面以移動控制面，此類設計與傳統控制翼面設計最大的區別在於不需要襟翼與連結器等次系統，節省很多維護保養上的問題與維修成本，但一但此構件故障，可以想見是整組拆換。

二、民生工業應用：下列數項為作者網路搜尋的產品與價格等資料，提供有興趣的讀者在複合材料的應用領域有更進一步的了解。

捌、結論

不論是傳統的金屬製造產品或複合材料的多功能性產品，都具備其領域的特色，要發揮其功能效應到極緻，除了展現其特殊的功能到最高效率外，適用到怎樣的市場也是很重要的發明，本文介紹了航空界複合材料的產品新設計，工業與民生界的新穎發明，以及基礎的分類觀念以及基本材料強度的理論分析。正如金屬材料具備無可取代的延展特性，複合材料漸漸地大量存在我們生活中，它展現了各種需求的功能包括：摩擦、阻尼、光、隔熱、導電等複合功能的產品應用，但因為熱固性複合材料無法回收材料以重覆建置，也帶來對於環境污染的影響，未來怎樣改善這個問題是本研究很重要的挑戰。

(a) 碳纖複合材料馬桶，\$10,000美金[8]。 (b) 碳纖複合材料小提琴，\$10,000美金[8]。





(c) 碳纖複合材料兒童座椅，\$4,000美金 [9]。
(d) 碳纖複合材料安全帽，\$200美金 [9]。



(e) 碳纖複合材料引擎蓋，BMW \$629美金 [10]。
(f) 複合材料衝浪板，測試影片在 [11]。



ModBargains.com

BMW Emblem and Metal Mounting Brackets (Not Included)



(g) 複材隔熱板：適用溫度範圍 0°F 到 1900°F，為熱門綠建築材料 [12]。



(h) 磁纖維複合材料護膝：供膝關節炎患者使用，相較於單純遠紅外纖維織物有明顯改善血流動力學狀態 [13]。





(i)LED纖維複合材料衣服[14]



玖、參考資料

1. JEC Composites, "The global market for PAN-based carbon fiber", Dec. 2007, JEC Magazine#37, jec-composites.com.
2. Guenter Engl, Rainer Meier, Joachim Ritter, and C. Brandt, "Time- and Cost-effective testing of CFRP components by ut multisensory techniques", <http://www.ndt.net/article/v08n11/meier/meier.htm>.
3. (a) <http://tw.page.bid.yahoo.com/tw/auction/1201646364>、(b) <http://www.frphongk.com/a/zixun/20100521129.html>、(c) <http://www.dongyet.com/yyfa/347.html>、(d) <http://www.800nonoise.com/gp3.htm>.
4. R.C., Hibbeler, Mechanics of materials, 2005, 7th Ed, ISBN:0131918990, Pearson Prentice Hall, Inc.
5. A.C., Ugural, Mechanics of Materials, 2008, 1st Ed, ISBN: 9780471721154, John Wiley.
6. http://www.aircraftinformation.info/gallery_limited.htm
7. <http://www.cocatalyst.com/blog/index.php/2008/06/26/ideal-technological-system-some-practical-examples/>
8. <http://www.dirtragemag.com/forums/showthread.php?t=20363&page=2>
9. <http://blog.sajinman.com/wp-content/uploads/2008/11/3-carbon-fiber-babyseat.jpg>
10. https://www.a-safety.com/index.php?main_page=index&cPath=189_269
11. <http://www.innegrity.com/surfboard/images/surfboard.mpg>
12. <http://www.ecohomemagazine.com/news/2009/11/buildinggreen-names-top-10-green-products-for-2009.aspx>
13. http://www.ecplaza.net/tradeleads/seller/4293437/magnetic_kneepad_magnetic.html
14. http://technabob.com/blog/wp-content/uploads/2009/01/lumigram_red_top.jpg

作者簡介

助理教授 孫允平

學歷：國立成功大學航空太空工程研究所博士，經歷：永達技術學院講師，現職：正修科技大學機械系助理教授。

助理教授 梁燕祝

學歷：國立成功大學航空太空工程研究所博士，經歷：成功大學航太所電算中心研究助理、亞洲航空公司工程處專案經理，現職：空軍軍官學校航空太空學系助理教授。