

# 複合材料力學近況簡介

葉孟考 黃婉萱 宋棋舜 呂俊麟

國立清華大學 動力機械工程學系  
30013 新竹市光復路二段 101 號

## 一、前言

複合材料泛指由兩種或兩種以上的材料組合而成的材料，利用不同材料性質來補強整體結構的性能。人類使用複合材料的歷史悠久，例如幾千年前人類就已經使用乾草混合泥土製成的複合材料來做為建材。

複合材料通常由補強材料(Reinforcement)與基材(Matrix)組成：補強材料通常擁有高強度與高勁度，負責承受整體複合材料之外加負載；基材則負責傳遞負載並將補強材料黏著固定。補強材料的種類很多，如顆粒、纖維等，最常用的為纖維補強材料，如碳纖維、玻璃纖維、硼纖維與克維拉纖維(Kevlar)；常見的基材有高分子材料、碳、金屬或陶瓷等材料。補強材料與基材是構成複合材料最基本的單元，使用上可依據需求製造出不同複合材料結構體，如疊層板、三明治結構等，都是常用的複合材料結構。

近年來由於奈米材料的發展，補強材料有許多新的選擇，如奈米碳管、奈米黏土等。奈米碳管有高抗拉強度以及高模數，且有可撓性以及高長徑比(Aспект Ratio)，適合做為複合材料的補強材料；此外，奈米碳管的導電性質使其應用範圍更加廣泛，如做為感測器、致動器、應變規等，都是可能的發展方向。奈米黏土也是目前新興的奈米材料，天然黏土是常見且便宜的原料，若以粒徑達奈米尺寸的黏土為補強材料與高分子材料摻合，能提升材料的強度。奈米複合材料提供複合材料一個新的願景，但實務上仍有些技術需要克服，如分散性的問題。補強材料的補強效果與其在基材中的分散性有關，若補強材的尺寸達奈米等級，如何將補強材均勻分散就會是一大挑戰。

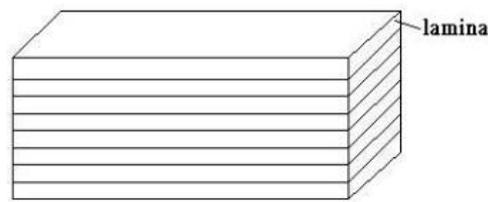
補強材料與基材構成的複合材料擁有質輕且高強度、高勁度之優異機械性質，能耐酸鹼及耐磨耗，因此應用範圍很廣。如航空產業中，飛機的機身、尾翼、副翼就常使用複合材料；汽車產業中，一般車身外殼、車架、保險桿等，也都有應用到複合材料的例子。

複合材料的產生是材料發展上必然的趨勢，隨著科技的進步和突破，未來的應用將會越來越多。本文從常見的複合材料結構介紹起，再簡介奈米補強材料如奈米碳管、奈米黏土，並提出奈米碳管在機電性質上的應用；最後以複合材料在工業上的應用結束。

## 二、複合材料結構

### 2.1 疊層結構(Laminate)

疊層結構(圖一)是常見的複合材料結構物，通常是由單「層」(Lamina)進行疊層加工而成。單層單體通常是由纖維強化物與基材組成，常見的纖維有玻璃纖維、碳纖維或人造纖維；纖維可以是連續、不連續，方向上可以是單軸向或是編織形式。



圖一、疊層結構(Laminate)由單層(Lamina)進行疊層加工而成

疊層結構的優點是可依照需要，針對結構的受力來設計疊層的層數與纖維排列角度，且只要使用適當的模具，結構物的形狀可有多種變化，如腳踏車的車身或高爾夫球桿的管狀或曲面結構都可使用疊層結構。

疊層結構最主要的缺點就是容易形成「脫層」(Delamination)。脫層是指疊層結構在層與層間產生分離的現象；產生脫層的原因很多，可能是在疊層加工過程中黏著結合不良、含雜質，或疊層結構完成後受衝擊、疲勞、熱應力等，使得疊層結構在強度較低的基體產生裂紋，再沿著層與層間的延伸形成脫層。

脫層對整體結構的機械性質有很大的影響，有許多學者針對此問題進行研究。Hallet和 Jiang[1]嘗試以拉伸試驗來探討不同疊層角度之碳纖維疊層板在含基材裂縫時，脫層的產生、延伸與不同的破壞模式。大多數論文在討論疊層板的脫層問題時將脫層簡化，

但疊層結構內可能含多層脫層，形狀也不一定規則。因此，有學者以多層脫層來進行探討，如 Wang 和 Lezica[2]曾研究含兩層脫層之玻璃纖維疊層板 $[0/\pm 45/0]_s$ 之抗壓強度，並討論脫層位置對強度的影響；Hwang 和 Liu[3]則討論含多層(0 至 4 層)脫層之碳纖維疊層結構受單軸向壓力時的挫曲問題；在脫層形狀上，也有學者以非條形脫層如圓、橢圓形脫層進行研究。此外，一般疊層結構的研究多以疊層板為主，但也有探討曲面結構者，如何學書[4]曾討論含脫層的曲面碳纖維疊層結構受軸向壓縮後挫曲行為以及脫層成長。

除脫層的產生容易造成疊層結構的缺陷外，疊層結構尚有一大缺點，就是厚度較厚的結構物較難加工。儘管疊層結構有其缺點，但仍是常見且實用的複合材料結構之一。

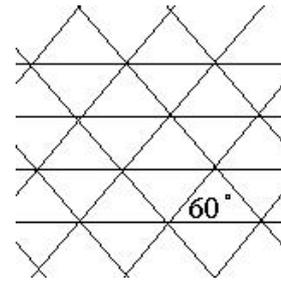
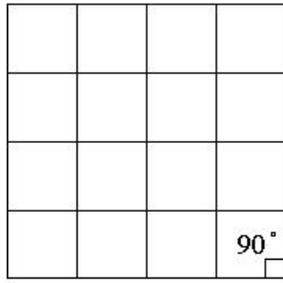
## 2.2 織物複合材料(Woven Structure)

在疊層結構裡有所謂的織物複合材料，指的是以單層編織再進行疊層加工而成的結構，但這裡的織物複合材料泛指三維編織結構。

三維編織結構可改善疊層結構層間脫層及厚度方向強度較弱的問題；但編織結構由於纖維編織後的彎曲造成整體結構強度的下降，且有纖維占有率的問題。此外，編織的加工技術較為困難也尚未普及。但編織結構能做到一體成形，在纖維編織完成後灌入樹脂便能一次加工完成，不會有接合上的問題[5]，這是其他複合材料結構較難達成的。若能改善加工程序繁雜的問題，織物複合材料是值得發展的複合材料結構之一。

## 2.3 格狀複合材料(Composite Grid)

格狀複合材料通常是以單軸向連續纖維製成格狀加勁物，格狀架構可有不同種類，常見的有正交格狀結構(Orthogrid Structure)、等向格狀結構(Isogrid Structure)等，如圖二及圖三所示。

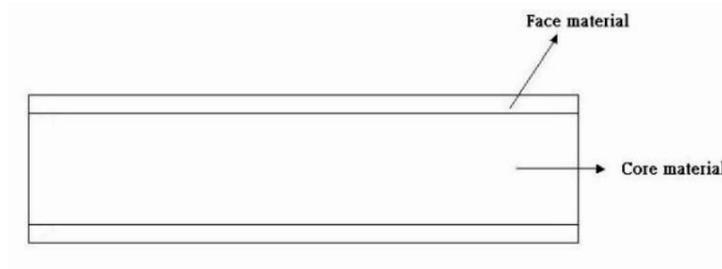


圖二、正交格狀結構(Orthogrid Structure) 圖三、等向格狀結構(Isogrid Structure)

格狀加勁複合材料應用範圍包含航空、汽車、壓力容器、造船、建築等。常見的應用如FRP(Fiber-Reinforced Plastics)加勁混凝土，Tavarez等人[6]曾以實驗配合模擬，研究不同長度之格狀FRP加入混凝土樑在四點彎曲加載情況下負載與位移之關係。格狀複合材料結構的優點在於沒有疊層結構的脫層問題；此外，此種結構屬於開放性的結構，因此能從外觀就發現損壞並易於修補。

#### 2.4 三明治結構(Sandwich Structure)

三明治結構(圖四)也是一常見的複合材料結構，由上下面材(Face Material)與芯材(Core Material)構成。面材主要功用在承受平面內的負載及彎矩，因此面材的選擇多以高強度、高勁度為主，可以是金屬合金、纖維複合材料等；芯材的功能則是在增加上下面材的距離以及抵抗剪力。一般為了減輕整體結構的重量，芯材多採用輕質材料如木材、發泡高分子材料等，也有使用蜂巢狀結構為芯材的三明治結構。



圖四、三明治結構示意圖

三明治結構的上下芯材不一定要使用同一種材料，也不限於上、下面材與芯材夾層的三層結構，可根據使用上的需求任意更換為多層；結構上也不一定呈平板狀，可以是曲面或其他形狀，因此在設計上有很大的彈性。

三明治結構之主要優點在於高比強度與比勁度；除此之外，也具備吸收能量、消音或是抗震、阻燃、抵抗衝擊等優良性能，其應用層面十分廣泛，如航空、造船、汽車、建築、國防等都有使用三明治結構的例子。

在缺點方面，主要有四點：

- (1)面材與芯材間易產生脫鍵(Debonding)；
- (2)面材可能產生皺褶(Wrinkling)及挫曲；
- (3)芯材受剪力破壞；
- (4)整體機械性能與核心密度有關。

脫鍵是三明治結構最主要的問題。三明治結構通常將面材與芯材製備好，再進行合成，如此一來面材和芯材間的黏著層就形成整體結構的脆弱面，易因外加負載而分離。有許多國內外研究針對三明治結構的脫鍵與黏著問題，如Huber 和 Klaus[7]以一次成形的的方式製造曲面的三明治滑板，並針對含黏著層與未含明顯黏著層的兩種三明治試體進行三點彎曲測試；實驗結果發現沒有明顯黏著層的試體其彎曲強度有明顯的上升，且在達最大強度後較一般三明治結構能承受大負載。蕭銘志[8]以五層法理論研究三明治結構的挫曲行為，將試體分層為上下面材、芯材、芯材與上下面材之黏著層五層，發現將黏著層納入分析條件中時，板的挫曲強度會增加，因此黏著層的強度可能會影響到整體結構的強度，強度弱時容易形成脫鍵。

三明治結構在受外加負載時，面材的皺褶與挫曲以及核心材料剪力破壞也是常見的破壞模式。通常芯材的強度和芯材密度有關，Mahfuz 等人[9]同時考慮脫層與芯材密度兩因素，以發泡芯材三明治試體進行單軸向壓縮測試，發現發泡核心密度較高的三明治板有較大的挫曲強度；預埋鐵氟龍之脫層則會降低三明治板的挫曲強度，且對密度越高的三明治板影響越大。除芯材密度，厚度也是影響芯材強度的因素之一，Styles 等人[10]

以不同三種厚度(5、10、20 mm)的發泡材為芯材將三明治結構進行四點彎曲測試，討論不同破壞模式，結果發現核心厚度較小的三明治試體其破壞主要在表面材料的皺褶，隨著核心厚度增加，核心材料在試驗後產生剪變形。

另有學者針對三明治結構進行改良，如曾亮及崔征國[11]以一體成型的三維編織結構改良三明治結構。為符合芯材輕質的要求，中間芯材以孔洞較大的三維織物構成，上下面材則是編織之玻璃纖維結構；由於面材與芯材以編織接合，不會有脫鍵的問題。Fan 等人[12]進行芯材結構與材質的改良，三明治結構常以六角蜂巢狀為芯材結構，材料多為鋁合金，在 Fan 等人[12]的研究中，以剪力強度為變因進行最佳化設計，設計出 Kagome-Grid 芯材結構；在材料方面選擇碳纖維疊層來滿足輕質材料的要求；在研究中將此種芯材結構與其它芯材比較，發現碳纖維疊層之 Kagome-Grid 芯材之比強度與比勁度皆高於其它兩種芯材。

三明治結構在材質、層數以及外形選用上有很大的彈性，若能改善黏著層的問題且發展適當的芯材結構、材料，三明治結構定能多方面運用在不同領域上。

### 三、奈米複合材料

#### 3.1 奈米碳管補強複合材料

奈米碳管具有低比重、高剛性、高強度之優良機械性質並具有高導電性、高散熱能力等優秀的物理性質。奈米碳管的研究有多方面，其中之一是將奈米碳管當作填充材添加入高分子材料中，利用奈米碳管優秀的機械性質與高分子材料混合，可以提升高分子材料的各項機械性質。奈米碳管可被視作一種短纖的填充材，與高分子混合並與基材的接合性良好，製作出來的成品可被視作是均向性複合材料。

##### (a) 奈米碳管/酚醛樹脂複合材料

酚醛樹脂為樹脂的一種，是人類經常使用的高分子材料之一，其成品常被用在家具與建材等方面。酚醛樹脂價格低廉，耐腐蝕但強度有限，因此強化酚醛樹脂為研究的課

題之一。在 Tai 等人[13]的文中指出將多壁奈米碳管當作短纖混入酚醛樹脂中，形成後的複合材料機械強度明顯增強，3 wt% 碳管含量與純的酚醛樹脂相比可提升抗拉強度 97.0 %；3 wt% 碳管含量與純的酚醛樹脂相比可提升楊氏係數 49.8 %。由上面的敘述可知，將多壁奈米碳管加入酚醛樹脂確有強化的效果。Yeh 等人[14]透過填充粉碎與未粉碎的奈米碳管討論不同製程對於楊氏模數與抗拉強度的影響，結果發現未粉碎的奈米碳管填充材的補強效果較粉碎的奈米碳管佳，其原因可能是由於未粉碎的奈米碳管長度較長並具網狀結構，使基材對碳管間之應力傳遞較佳。

Yeh 等人[15]也以短碳纖維混奈米碳管補強酚醛樹脂，文中提到碳管補強效果較碳纖維補強效果佳也比同時添加碳管與碳纖維佳，這是由於兩者混合時，碳管團聚現象過於明顯，導致碳管成為複合材料中的雜質，並非均勻分散於基材中，使整體的機械性質下降。

#### (b) 奈米碳管/環氧樹脂複合材料

Yeh 與 Hsieh[16]與 Yeh 等人[17]以多壁奈米碳管增強環氧樹脂的機械性質，與純的環氧樹脂相比，5 wt% 碳管含量可以提升楊氏係數 51.8 %，而在抗拉強度方面，3 wt% 碳管含量與純的環氧樹脂相比可以提升 17.5 %。奈米複合材料的混合隨著碳管含量的增加而較難混合，碳管間的團聚現象更加嚴重，團聚現象導致材料的不均勻性提升，因此材料特性反而隨著添加過多的奈米碳管下降。對於不同基材添加不同比例的奈米碳管，在同樣比例的奈米碳管添加量時，奈米碳管/酚醛樹脂複合材料抗拉強度的提升比奈米碳管/環氧樹脂複合材料來的明顯[18]，可能是因為碳管加入環氧樹脂後，會導致環氧樹脂的結晶化，使環氧樹脂變脆，造成抗拉強度的提升效果較差。而酚醛樹脂變脆的現象則沒有這麼明顯，抗拉強度的提升效果相對起來較佳。

#### (c) 三明治結構核心材料

奈米複合材料也以芯材形式用在三明治結構上。三明治結構分為核心材料與表面材

料。三明治結構常運用於航空，船舶與汽車等等交通工具，材料的動態特性影響交通工具的安全性與可靠度。較佳的阻尼特性，也有助於噪音的吸收。三明治結構的核心材料影響三明治結構的動態特性與阻尼特性。添加奈米碳管可使核心材料擁有更高的剛性，增加材料的自然頻率；添加奈米碳管也可提升核心材料的阻尼特性。Yeh 與 Hsieh[18]指出環氧樹脂添加 2wt%的碳管時有最佳的阻尼特性，而在添加 3 wt%奈米碳管時，酚醛樹脂試片有最佳的阻尼特性。當試片受到振動負載時，碳管能吸收部分的振動能量，使阻尼特性提升，但是當碳管的添加量過高時，碳管在高分子中的分散不均，導致阻尼特性的提升效果減弱。

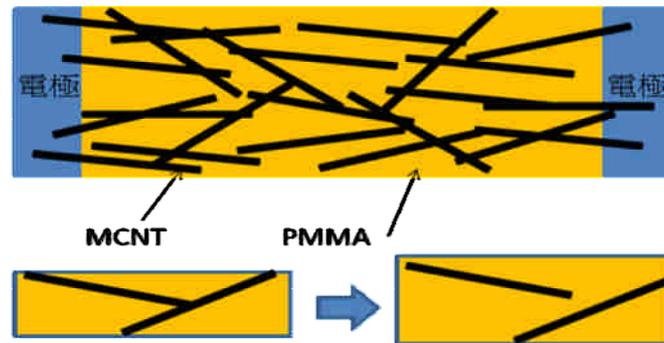
#### (d) 電磁屏蔽

在日常生活中，大量的電子產品被廣泛的使用。隨著使用量的增加，電磁波干擾的問題也越來越嚴重。電子產品在運作上常會受到外部電磁波的干擾，因此，如何遮蔽電磁波的干擾也成為大家討論的問題之一。奈米碳管有高長徑比與導電性，使奈米碳管有機會成為優秀的電磁屏蔽的強化材。在聚合物材料中添加奈米碳管，可使聚合物複材變成優秀的電子屏蔽材料。Yeh 等人[19]將奈米碳管添加入環氧樹脂中以改善環氧樹脂的導電性質，並運用在電磁波的屏蔽上。當碳管的添加量到達 1 wt%時可使複合材料從絕緣體變成導體，電磁屏蔽效率隨著碳管添加量上升，當碳管添加量為 2 wt%時奈米碳管/環氧樹脂複材的電磁屏蔽率為 16.89 dB。

#### (e) 感測元件

另外，因奈米碳管有高長徑比與導電性，只需添加少量，即可使不導電的基材變成導電材料。如圖五所示，將奈米碳管添加入高分子材料後，奈米碳管如同電線一般形成導通的電路，當體積發生變化時，可變成非導通的電路，使材料的電阻值上升。Yoon 等人[20]等人指出將奈米碳管添加入PMMA中，PMMA吸收氣體 $\text{CH}_2\text{CL}_2$ 並產生一定程度的體積膨脹造成電阻值的改變，可用以偵測 $\text{CH}_2\text{CL}_2$ 氣體。Thostenson和Chou [21, 22]將

奈米碳管與高分子材料的混合物，進行拉伸變形時，體積的改變造成碳管之間的接合受到破壞，導致電阻值變化，因此可將此應用在結構物的健康監測上。



圖五、將奈米碳管添加入高分子後，奈米碳管如同電線一般形成導通的電路，但是當基材膨脹，導通的線路可能會受到破壞。

### 3.2 奈米黏土補強複合材料

黏土礦物是一種隨手可得的天然礦物，為層狀的矽鋁氧化合物結構。自從 1987 年 豐田研究所首次公開奈米黏土/尼龍 6 (Nylon-6/Clay)複合材料後，以黏土礦物當作填充材，添加入高分子材料的研究，在近年來十分的熱門。利用黏土來改良高分子材料，黏土在材料中的分散性很重要，黏土之間的層狀結構被打開，使高分子材料能混合於其中，才能提高奈米黏土複合材料整體的機械性質。Tsai 與 Su[23]將有機黏土混入環氧樹脂與玻璃纖維的複合材料中，加入 5 wt%的黏土後，經由拉伸實驗得知，環氧樹脂的剛性上升 16 %，但破裂韌度卻下降，其原因可能是因添加入有機黏土，使環氧樹脂複合材料，轉變為脆性的緣故。黏土一般是屬於親水性的表面，不同情況下混合的奈米黏土複合材料，對其機械性質有影響。Tsai 與 Huang[24]指出將 5 wt%的奈米黏土添加入尼龍 6，在乾的情形下與純尼龍 6 相比楊氏係數增加 32%，而在濕的情況下楊氏係數可增加 48%，且材料的應變硬化隨著應變率增加而更加明顯。

## 四、複合材料在工業界的應用

為降低成本與因應環保之要求，輕量化結構為產品發展的趨勢，特別是與石油息息

相關之運輸工業。除結構輕量化外，在工業界之結構常需承受許多不同的週期性負載，如溫度、壓力等，故在安全之要求下，結構本身之疲勞強度也不容忽視。在輕量化及結構強度的雙重考量下，如何利用不同材料合成，以滿足此需求為目前之發展方向。當今之工業界，以複合材料取代鋼鐵或其他合金之結構已屢見不鮮。以下將分別於航太工業、汽車工業及能源工業中，提出幾個運用複合材料之例子，以說明複合材料在工業界之發展與應用。

#### 4.1 航太工業

在航空工業中，由於航空工具運作時，其所承受的環境較為極端，故一般航空業所要求之材料性質標準較高。航運工業其成本考量則為首要。因考量因素不同，所發展及應用之複合材料也有差異。但材料之要求仍為高強度、抗腐蝕、防火及易修補等性質為主。以材料性質要求最為嚴苛之航太工業而言，太空梭在穿越大氣層之高速過程中，其機身表面與空氣摩擦會產生高溫，機身與鼻頭需要在高溫環境下保持高強度，而此部分通常配置高熔點、高拉伸強度之陶瓷基複合材料。

軍事上，性能為主要考量，成本為次要；無人偵察機或戰鬥機就是利用複合材料的例子，其部分機身及機翼以環氧樹脂為基材的碳纖複合材料組成，且利用碳纖複合材料耐高溫之性質，將其用於運作過程會產生約攝氏 204 度高溫的噴嘴處[25]。

一般民航工業中，複合材料更常應用於機身、尾翼、副翼、壓力艙壁等。以空中巴士為例，其部分尾翼、側翼及機身是以玻璃強化鋁疊層板(Glass-Reinforced Aluminium Laminate, GLARE)組成。Wu 和 Yang[26]於 2005 年探討空中巴士結構中之玻璃強化鋁疊層板的機械特性。玻璃強化鋁疊層板是纖維金屬疊層板的一種，由鋁薄板與高強度玻璃纖維之預浸材接合而成。研究指出此材料特性具有抗疲勞、防火、抗衝擊及抗腐蝕特性，而製造容易易修補也是此疊層板之優點。相較於鋁合金機身，此材料也可減少飛機結構約 10% 的重量。

## 4.2 汽車工業

汽車工業也有許多複合材料應用之例子。雖汽車之運作環境不如航空工具那麼嚴苛，但仍須滿足基本強度及使用壽命之要求。近幾年來，人們對轎車的品質要求越來越高，除基本安全要求外，還須滿足外觀、節能、環保及價格等方面之訴求。過去轎車整體結構以鋼鐵為大部分，但自 1978 年石油危機爆發以來，輕量化材料之應用逐年上升。近年來複合材料在汽車上的應用範圍相當廣泛。以下將介紹幾個複合材料應用於汽車之實例。

首先介紹複合疊層鋼板[27]，其為於兩層超薄鋼板之間壓入塑料的複合材料。相較於具有同樣剛度的單層鋼板，質量可減少約 43%。此種疊層鋼板之隔熱及防震性能良好，主要用於行李箱蓋、車身底板等處。車身外板、車架、車門、保險桿等，可在兩層薄面材中間夾一層厚而極輕的蜂窩組成材料之三明治蜂窩夾芯複合板[27]。根據芯材的不同，大致可分為鋁蜂窩、紙蜂窩、玻璃布蜂窩、玻璃纖維增強樹脂蜂窩等；至於面材部分則可採用鋁板和鋼板等材料。三明治蜂窩夾芯複合板具有質輕、比強度和比剛度高、抗震、隔熱、隔音等特點。

在輕量化及強度之品質要求更高的汽車車身，如 BMW 公司的 Z-22 的車身，M3 系列車頂蓬和車身，福特公司的 GT40 車身等，則以碳纖維複合材料來製作車身[28]。由於其質量輕，具有高強度、高剛性，又有良好的耐腐蝕性。在重量上，可使汽車車身、底盤相較傳統鋼結構減輕約 40-60% 之重量。

## 4.3 能源工業

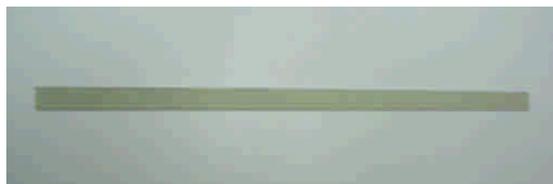
能源及環境保護議題近日甚受重視，其中風力發電為目前世界上重要的乾淨能源之一。近幾年來，可看到許多風力發電機於台灣本土架設。如圖六為架設於台中高美溼地之風力發電機。



圖六、風力發電機架設於台中高美溼地

風力發電機之發展趨勢為提升功率，葉片長度也因此增加。然而風力發電機在運作過程中，葉片除受重力影響外，環境對其產生之不同種循環性負載也需考量。故葉片輕量化及高強度為目前重要的課題。風力發電機葉片依其長度不同，所使用的複合材料也不同。

由於玻璃纖維/環氧樹脂複合材料及碳纖維/環氧樹脂複合材料，如圖七及圖八所示，其比強度、耐久性及耐腐蝕性良好，故此種複合材料常運用在像葉片此種長期暴露在戶外的結構[29]。



圖七、玻璃纖維/環氧樹脂複合材料



圖八、碳纖維/環氧樹脂複合材料

兩者之製程類似，皆以閉模真空浸滲技術製作[30]。首先，將增強材料，如玻璃纖維或碳纖維覆蓋在模具上，再以真空輔助浸滲技術注入基材樹脂。此製程關鍵之要素大致可分三點，一為基材樹脂的選用，須考慮要其樹脂之黏滯性及流動性。其次為模具設計，由於樹脂的流動會影響最後製成之複合材料品質，故模具設計上須考量流動之通道分佈。第三為最佳化真空輔助浸滲製程參數，針對製程進行研究，使其達到最佳化。在強度方面，以碳纖維複合材料製成葉片較玻璃纖維複合材料強，但其成本也相對較高。

2005年 Kong 等人[31]以有限元素法模擬設計複合材料製成之風力發電葉片結構，預測此種葉片在受到各種負載，如氣流負載、不同溫度之負載及機械負載等之疲勞壽命。在此研究之葉片設計中，提出在葉片內部插入一種三明治結構(Skin-Spar-Foam Sandwich Structure)作支撐，可達到重量減輕，抵抗挫屈及振動等目的。此種葉片之製程，首先將纖維放入模具中，再注入樹脂成型，最後與核心發泡材料合成三明治結構。美國 NSE 複合材料公司於 2008 年[32]，也以有限元素分析軟體分析上述類似之葉片結構，探討其運作過程中之變形及應力，也分析預估其能承受挫屈的能力。

在不同工業界中，結構需求也不同，如何利用不同種材料的特性，適當組合成滿足需求之材料性質為重要之課題。就工業界運用複合材料的趨勢而言，在成本的考量下，如何將結構輕量化，又具有更好的強度，仍為未來發展的趨勢。

## 五、結語

複合材料領域中，過去單純的乾草混合泥土而成的複合材料，如今已發展至加入纖維、奈米碳管及黏土而成奈米複合材料。材料領域在近年來的發展，大大提升材料混合的選擇性。複合材料的合成方式也日趨多樣化，如文中提及之疊層板，即可依結構的受力來設計疊層的層數與纖維排列角度，以達到強化材料性質的目的。但疊層板可能產生脫層造成結構的缺陷，故發展出織物複合材料來改善此缺點。織物複合材料缺點是加工較複雜。常見的複合材料結構-三明治結構因具備吸收能量、消音、抗震、阻燃、抵抗衝擊等優良性能，常見於工業應用中。但脫鍵為其主要缺點，這方面的研究也是目前學界探討的主題之一。

自奈米碳管發展自今，由於其具有高機械性質及優秀的物理性質，可視作一種短纖維的填充材，與高分子基材混合成為複合材料。藉由奈米碳管的混入，可改善高分子材料之楊氏係數。奈米碳管的形式也值得研究，粉碎的奈米碳管填充材的補強效果較未粉碎的奈米碳管差；碳管團聚現象也是另一探討之主題，團聚過於明顯，會導致奈米複材機械性質下降。綜合而言，奈米碳管複合材料只要適當的混合，會達到材料機械性質有效

提升的效果。文中也提及奈米碳管添加入環氧樹脂中以改善其導電性質，運用在電磁波屏蔽的例子，是目前複合材料研究題目之一。近幾年來，利用奈米黏土來補強高分子材料也是很熱門之研究，其關鍵在於要打開黏土之間的層狀結構，使高分子材料能混合於其中，才能提高整體的機械性質。

現今工業在複合材料的應用上，越來越廣泛。表一是目前工業上常用之複合材料特點及應用之整理。

表一、工業應用複合材料特性及應用

工業應用 複合材料	材料特點	應用
玻璃強化鋁疊層板 (GLARE)[26]	高度抗疲勞、防火、抗衝擊 及抗腐蝕能力好且易修補。	空中巴士之尾翼、 側翼及機身
複合疊層鋼板[27]	隔熱性及 防震性能良好	汽車行李箱蓋、 車身底板等處
蜂窩夾芯複合板 [27]	質輕、比強度和比剛度高、 抗震、隔熱、隔音	一般車身外板、車架、車 門、保險桿等
碳纖維複合材料 [28]	耐高溫、高強度、高剛性， 有良好耐腐蝕性	無人偵察機噴嘴處、汽車 車身、風力發電機葉片

由上表不難看出複合材料之應用甚廣，但每一種複合材料都各有其優缺點，如何根據需求，善用優點，改善缺點，仍是目前各界研究之目標。在更重視環保、節能省碳及降低成本的未來，更凸顯出複合材料在人類世界中為不可或缺的一環。如何由過去的經驗中，將各種材料相互組成產生性質更好的新複合材料也是未來研究方向之一。

## 六、參考文獻

- 1 Hallet, S. R. and Jiang, W. G., 2008, "Modelling the interaction between matrix cracks and delamination damage in scaled quasi-isotropic specimens," *Composites Science and Technology*, Vol. 68, pp. 80-89.

- 2 Wang, X. W. and Lezica, I. P., 2004, "Compressive failure of composite laminates containing multiple delamination ," *Composites Science and Technology*, Vol. 65, pp. 191-200.
- 3 Hwang, S. F. and Liu, G. H., 2001, "Buckling behavior of composite laminates with multiple delaminations under uniaxial compression," *Composites Structures*, Vol. 53, pp. 235-243.
- 4 何學書。1995。曲面複材疊層板承受軸向負載時之挫曲行為與脫層成長。國立清華大學動力機械工程學系碩士論文。
- 5 許明發，郭文雄。2007。複合材料。台北。高立。
- 6 Tavarez, F. A., Bank, L. C. and Plesha, M. E., 2003, "Analysis of Fiber-Reinforced Polymer Composite Grid Reinforced Concrete Beams," *ACI STRUCTURAL JOURNAL*, Vol. 100, No. 2.
- 7 Huber, O. and Klaus, H., 2009, "Cellular composites in lightweight sandwich applications," *Materials Letters*, Vol. 63, pp. 1117-1120.
- 8 蕭銘志。2006。三明治板的挫屈分析-五層理論法。國立中正大學機械工程學系碩士論文。
- 9 Mahfuz, H., Islam, S., Saha, M., Carlsson, L. and Jeelani, S., 2005, "Buckling of Sandwich Composite; Effects of Core-Skin Debonding and Core Density," *Applied Composite Materials*, Vol. 12, pp. 73-91.
- 10 Styles, M., Compston, P. and Kalyanasundaram, S., 2007, "The effect of core thickness on the flexural behavior of aluminium foam sandwich structures," *Composite Structures*, Vol. 80, pp. 532-538.
- 11 曾亮，崔征國。2005。改良式三明治結構複材之製程與力學性分析。技術學刊，第二十卷，第一期，pp. 57-66.
- 12 Fan, H. L., Meng, F. H. and Yang, W., 2007, "Sandwich panels with Kagome lattice cores reinforced by carbon fibers," *Composite Structures*, Vol. 81, pp. 533-539.
- 13 Tai, N. H., Yeh, M. K. and Liu, J.H., 2004, "Enhancement of the Mechanical Properties of Carbon Nanotube/Phenolic Composites using a Carbon Nanotube Network as the Reinforcement," *Carbon*, Vol. 42, No. 12-13, pp. 2774-2777.
14. Yeh, M. K., Tai, N. H. and Liu, J. H., 2006, "Mechanical Behavior of Phenolic-based Composites Reinforced with Multi-walled Carbon Nanotubes," *Carbon*, Vol. 44, No. 1, pp. 1-9.
- 15 Yeh, M. K., Tai, N. H. and Lin, Y. J., 2008, "Mechanical Properties of Phenolic-based Nanocomposites Reinforced by Multi-walled Carbon Nanotubes and Carbon Fibers," *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, Vol. 39, Issue 4, pp. 677-684.
- 16 Yeh, M. K. and Hsieh, T. H., 2007, "Bending Property of Sandwich Beams with MWNTs/Polymer Nanocomposites as Core Materials," *Key Engineering Materials*, Vol. 345-346, pp. 1265-1268.

- 17 Yeh, M. K., Hsieh, T. H. and Tai, N. H., 2008, "Fabrication and Mechanical Properties of Multi-walled Carbon Nanotubes/Epoxy Nanocomposites," *Materials Science & Engineering A*, Vol. 483-484, pp. 289-292.
- 18 Yeh, M. K. and Hsieh, T. H., 2008, "Dynamic Properties of Sandwich Beams with MWNT/Polymer Nanocomposites as Core Materials," *Composites Science and Technology*, Vol. 68, pp. 2930-2936.
- 19 Yeh, M. K., Tai, N. H., Ling, G. C. and Huang, C. Y., 2008, "Electromagnetic Shielding of Multi-walled Carbon Nanotube/Epoxy Nanocomposites," *Advanced Materials Research*, Vol. 47-50, pp. 475-478.
- 20 Yoon, H., Xie J., Abraham, J. K., Varadan, V. K. and Ruffin, P. B., 2006, "Passive wireless sensors using electrical transition of carbon nanotube junctions in polymer matrix," *Smart Materials and Structures*, Vol. 15, pp. S14-S20.
- 21 Thostenson, E. T. and Chou, T. W., 2006, "Carbon Nanotube Networks: Sensing of Distributed Strain and Damage for Life Prediction and Self Healing," *Advance Materials Research*, Vol. 10.
- 22 Thostenson, E. T. and Chou, T. W., 2008, "Real-time *in situ* sensing of damage evolution in advanced fiber composites using carbon nanotube networks," *Nanotechnology*, Vol. 19.
- 23 Tsai, J. L. and Hsu, S. M., 2008, "Investigating mechanical properties of epoxy/organoclay nanocomposites," *Journal of the Chinese institute of engineers*, Vol. 31, pp.9-16.
- 24 Tsai, J. L. and Huang, J. C., 2008, "Strain rate effect on mechanical behaviors of nylon 6-clay nanocomposites," *Journal of composite materials*, Vol. 40 , pp. 925-938.
- 25 Davies, I. J., 2005, "Applications of composite materials ,"  
[http://mech-eng.curtin.edu.au/davies/pdf/Applications\\_of\\_composite\\_materials\\_02.pdf](http://mech-eng.curtin.edu.au/davies/pdf/Applications_of_composite_materials_02.pdf)
- 26 Wu, G. and Yang, J. M., 2005, "The Mechanical Behavior of GLARE Laminates for Aircraft Structures," *Journal of the Minerals*, Vol. 57, pp. 72-79.
- 27 <http://www.made.com.cn/supply/show.php?itemid-1911/page-1.htm>
- 28 <http://www.2456.com/trad/epub/details.asp?epubiid=1&id=8090>
- 29 羅益峰。2003。世界風能及其葉片材料發展概況與趨勢。高科技纖維與應用，第二十八卷，第五期。
- 30 趙稼祥。2003。複合材料在風力發電上的應用。高科技纖維與應用，第二十八卷，第四期。
- 31 Kong, C., Bang, J. and Sugiyama, Y., 2005, "Structural Investigation of Composite Wind Turbine Blade Considering Various Load Cases and Fatigue Life," *Energy*, Vol. 30, pp. 2101-2114.
- 32 Hoyt, D. M. and Graesser, D., 2008, "Rapid FEA of Wind Turbine Blades,"  
[http://www.nsecomposites.com/res/NSE\\_bladeMesher.pdf](http://www.nsecomposites.com/res/NSE_bladeMesher.pdf)