



■ 沈銘原

纖維複合材料 的未來

台灣是全世界製造尖端複材產品的重鎮，
也是世界最大、技術最佳的複材代工國家，
從網球拍、自行車到飛機零組件，台灣廠商在世界舞台上發光發熱。



纖維複合材料經千百年來的發展，演變至今成為所謂的尖端複合材料，而台灣竟然是全世界製造尖端複材產品的重鎮，也是世界最大、技術最佳的複材代工國家，從網球拍、自行車到飛機零組件，台灣廠商在世界舞台上發光發熱。尖端複合材料目前雖廣泛應用於各種產業，但它最大的缺點是什麼呢？未來纖維複材的發展方向又是什麼呢？

碳纖維複合材料

常常在電視上或者媒體廣告看到，某某新產品是碳纖維做的，似乎產品能用碳纖維來做是相當厲害的。其實，這樣的敘述是不正確的，正確的名稱應該是「碳纖維複合材料」或者稱為「碳纖維強化塑膠」。因為單以碳纖維是無法製造所需要的產品，必須結合樹脂來製備纖維複合材料，纖維＋樹脂＝複合材料就是複合材料的基本概念。

碳纖維複合材料的起源約於 1960 年代，航空太空領域對使用材料提出新的要求，由此先後研發出以高性能纖維作為補強材料的複合材料，宣告了先進複合材料的問世。在航太應用領域，起初尖端複合材料主要用於航空次結構件，如飛機艙門等。經過十年的發展至 70 年代中期，先進複合材料結構件已經逐漸由次結構件向主構件發展，如翼肋、垂尾、機身蒙皮壁板等。進入 21 世紀以來，尖端複合材料特別是碳纖維複合材料在飛機上的用量日益增多，已逐漸被視為衡量飛機先進性的重要指標之一。

不得不提的是，台灣碳纖維複材的歷史源自於「網球拍」，這跟航太有何關係呢？台灣的網球拍工業從 1960 年代時替國外代工木製的球拍開始，經歷鐵拍、

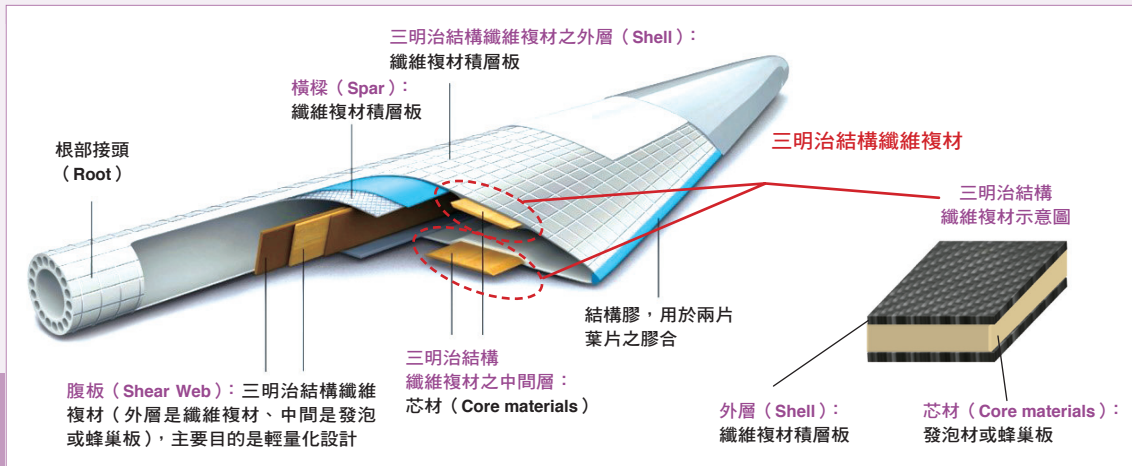


網球木拍（圖片來源：<https://read01.com/M7edy.html#.XJDOLij7SUK>）



碳纖維複材自行車整車重量甚至不到 6.5 公斤，一隻手就可舉起。（圖片來源：亞洲精工複材公司）

鋁拍的階段。1978 年由台中豐原的光男公司率先從國外引進碳纖維複合材料製造技術，開始製造碳纖維複材球拍之後，短短的幾年間不但淘汰了木製球拍，更改變了世界網球拍的產銷結構，也使得台灣成為世界知名「網球拍王國」，更重要的是奠定了台灣在全球複合材料加工技術上重要的地位。



複合材料風力機葉片結構圖 (圖片來源: <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-material-light-weight-balsa-wood-29265/>)

碳纖維自行車是台灣的另一個驕傲。早期碳纖維複合材料主要用於航空、軍事等高階工業用途，一直到了 1990 年代後期才開始大量用於專業自行車比賽。在 1999 年時，Lance Armstrong 使用碳纖維複材自行車贏得勝利，之後更創下七連霸紀錄，碳纖維複材自行車開始在環法賽及各大自行車賽事中普及。

台灣複材廠商自 1990 年代開始，由於製造碳纖維複材球拍的技术精良，因此開始開發碳纖維複材自行車零組件。時至今日，台灣已成為全世界最大的碳纖維複材自行車代工國家。全世界幾大知名自行車品牌，其碳纖維自行車零件如車架、前叉等都由台灣企業所代工。台灣企業在碳纖維自行車的製造技術冠居全球，一台公路車中幾乎 90% 以上是碳纖維複材所製成。

另一方面，近年來由於綠色能源議題發燒，越來越多的綠色能源相關應用因應而生，風力發電就是其中一項關鍵領域，也是我國政府目前重點發展的綠能產業之一。風電葉片是風力發電機中最基礎和最關鍵的部件，良好的設計、可靠的品質和優越的性能是保證機組正常穩定運行的關鍵因素。

然而以大型的離岸風力發電機為例，在海上會面臨各種惡劣的氣候環境以及長期不停的運轉，對葉片的要求著實嚴格，比重輕且具有最佳的疲勞強度和機械性能，能經受暴風等極端惡劣條件和隨機負荷的考驗，是葉片的基本要求。不僅如此，葉片的彈性、旋轉時的慣性及其振動頻率特性，其傳遞給整個發電系統的負荷穩定性佳，耐腐蝕、紫外線照射和雷擊的性能好，發電成本較低，維護費用最低等都是應用於風力發電機的葉片所需考量的。

據國際諮詢公司 UtiliPoint 總裁 Bob Bellemare 稱：對於風力發電機而言，碳纖維複合材料是最佳的解決方案。一般較中小型的風機葉片可選用量大價廉的玻璃纖維複合材料，而較大型的葉片（如 42 m 以上）則需採用碳纖維複材或碳纖、玻纖混合的複合材料製備。玻璃纖維和碳纖維是目前葉片製造中最重要的一種材料。

有句話說：「一代飛機，一代材料。」自 20 世紀 50 年代初噴射客機問世以來，大約每隔 10 年就會出現新一代具有不同技術特點的大型民航機。其中，材料的更替



隨著纖維複材的應用領域擴大，產生的複材廢棄物也相當驚人，複材廢棄物的回收再利用技術的開發和產業化已迫在眉睫。

是主要技術特點之一。1903年美國萊特兄弟發明世界上第一架飛機，所使用的材料主要是木材和帆布。那時因為簡陋的機體結構很不可靠，普通人不敢冒險從事飛行，當時的飛機設計師就是試飛員。

1911年，鋁合金研製成功，很快便取代了木材和帆布成為當時最主要的航空材料，自此開始了高性能全金屬結構飛機的發展。到了第一次世界大戰期間，全金屬結構的飛機已很普遍。1949年，美國DC-7運輸機的發動機艙和隔熱板上第一次採用了鈦合金。鈦合金密度約為結構鋼的60%，而強度接近結構鋼，具有高比強度和比剛性的優點，且耐腐蝕性好，具有優良的綜合性能。20世紀60年代當時開發的波音747飛機，其鈦合金用量約占結構重量的4%，主要用於主起落架的鈦合金鍛件，重約1,290公斤。

飛機的結構體常常把輕量化放在第一位（當然在絕對安全的前提下），特別是從20世紀60年代後期開發了碳纖維及其複合材料後，以其優異的比強度、比剛性對機體的輕量化帶來了應用可能性與無限想像空間。70年代美國軍方為了追求極限的運動性能，首先在要求迫切的戰鬥機上採用複合材料。而在民航機的發展上，70年代發生的石油危機成了採用複合材料的重大契機。

雖然早在1970～1980年代開始，航空產業就已經採用少量複合材料。例如空中巴士的A310廣體客機的機尾就使用複合材料製成。但直到過去十年間複合材料才有突破性的發展，並大量應用於民航機。

在2000年代初期，波音公司與空中巴士公司分別針對飛機輕量化設計提出新的思考方向，也因為如此，纖維複合材料正式成為下世代民航機的主要使用

材料。如波音787夢幻客機與空中巴士A350XWB，這兩款飛機的機身幾乎有一半以上的材料是由碳纖維複材及其他纖維複合材料所製成，其訴求是以材質更輕、強度更佳且耐疲勞的複合材料取代多數金屬零件以省下燃料費。除了讓飛機重量更輕以節省能源外，複材的另一大優勢是，金屬有腐蝕、疲勞等問題，一定時間到了就要更換，而複合材料沒有這樣的問題。

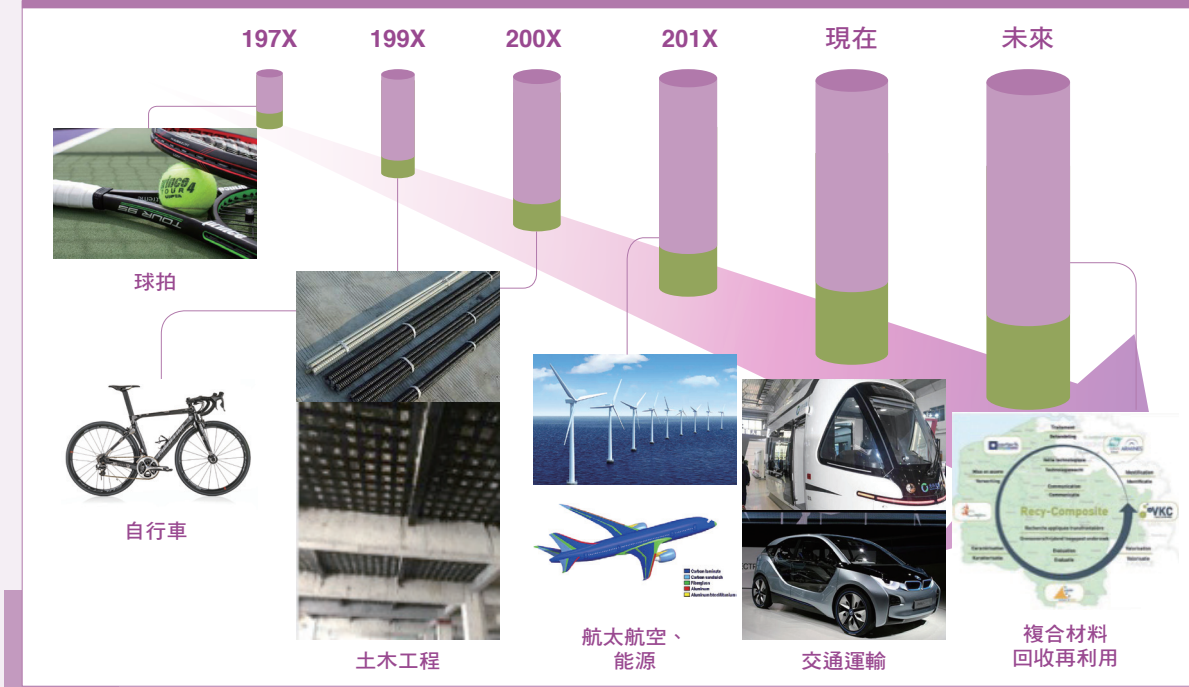
困境與未來發展趨勢

熱固性纖維複合材料目前在產業的應用主要是以碳纖維與玻璃纖維為補強材，而隨著纖維複材在航空、風電葉片、土木建築、船舶、日用電器、機械等領域應用的迅速擴大，產生的複材廢棄物也相當驚人，複材廢棄物的回收再利用技術的開發和產業化已迫在眉睫。根據統計資料，到2025年全球將有超過8,500架的民航機退役，其廢棄物的數量非常大。

此外，隨著風電產業的快速發展和風機葉片尺寸的不斷增大，預估到2034年全球碳纖維複合材料葉片廢棄物的數量會高達225,000噸以上。目前僅海峽兩岸台商在複合材料廢棄物的數量已經超過200萬噸，而且預計每年新增加的複合材料廢棄物將超過10萬噸。

以往複材產品如球拍、自行車架的廢棄與不良品主要以焚燒與掩埋為主，這是由於熱固性材料無法像熱塑性塑膠一樣可回收熔融再利用。這種回收利用的方法雖然簡單易行，但在焚燒過程中，複合材料廢棄物會釋放出大量有毒的氣體，掩埋焚燒後的灰分還會對土壤造成二次污染，因此工業發達國家已經嚴格明令禁止用這種方法處理複合材料的廢棄物。

纖維複合材料發展歷程



工業革命之後，人們使用線性的生產與消費模式，使不可再生的天然資源經加工與使用就後就直接丟棄。這生產與消費模式不但嚴重消耗有限的地球資源，且隨著科技的日新月異，人們生活水準不斷提升，使得原物料的需求和開採、產品的製造與商品的需求也日漸加劇。這現象不但造成地球資源的嚴重耗損，大量的廢棄物更造成地球環境的嚴重傷害。

為了有效地使用有限的地球資源，且降低廢棄物對環境的侵害，必須探討不同於線性經濟消費行為的循環經濟。2004年，歐盟通過一項法案禁止在垃圾填埋場處理複合材料。另外，直接焚燒可能會釋放出一些有毒物質污染環境。歐盟議會在2000年9月18日頒布了歐盟廢棄車輛指令，規定2015年以後汽車生產商生產車輛85%的部件都必須回收利用，10%可用於能量回收，填埋量不超過5%。面對環境和立法的壓力以及逐漸提高的填埋費用，各國都開始大力發展廢棄碳纖維複合材料回收及再利用技術。

因此，若纖維複材產品可捨棄傳統掩埋及焚燒而能回收再利用，對複材相關產業的循環經濟會有明顯助益。現行廢棄碳纖維複合材料處理的方式，大部分是把廢棄的碳纖維複合材料產品掩埋。但台灣地狹人稠，今日已無可做為掩埋垃圾的垃圾場，更遑論用來當作掩埋碳纖維複材的特殊掩埋場。為了減少碳纖維廢棄物的掩埋體積，也有透過焚燒碳纖維廢料的方式減少其體積後再掩埋。

而歐盟於2016年10月1日集合歐洲數國之力共同開啟「複合材料回收計畫」，主要目的是解決熱固性纖維複材產品的回收與污染問題。有鑑於此，主要營運項目是歐美自行車代工、銷售熱固性樹脂的台商，以及高單價車種欲銷售於歐盟的台灣品牌等，對複材回收議題都會視為當務之急。

複合材料產業屬於「技術性勞力密集」的型態，纖維複材在後加工階段需要大量的勞力，因此台灣大部分的複合材料廠都設在中國大陸。然而中國大陸經濟崛起，

熱固性纖維複材的廢棄物處理是相當令人頭痛的問題，
因此能回收再利用的熱塑性纖維複合材料近年來正逐漸興起。

物價與人力成本大幅增加，早期「技術性勞力密集」的優勢不復存在，台商逐漸走向「技術性資本密集」的型態，並致力於產品品質與附加利潤的提升。

未來複合材料產業的技術核心會朝著「自動化」與「降低製程周期」的方向進行，以利達到有效控管供應鏈成本。舉例來說，飛機上使用的複合材料越來越多，生產率提高意味著必須提升零件製造過程中的自動化以及在線檢查的技術。

目前纖維複合材料還是以使用環氧樹脂基材的熱固性複合材料為主，雖然熱固性纖維複材在結構強度、剛性、耐候性等絕對優勢，但其廢棄物的處理是相當令人頭痛的問題。有鑑於此，能回收再利用的熱塑性纖維複合材料近年來正逐漸興起。

熱塑性樹脂基複合材料有很多獨特的優點，如韌性高、耐衝擊性能好、材料穩定、無貯存時間限制、製造周期短、耐化學性能好、吸溼率低、可重複加工等。自1951年首次採用玻璃纖維補強聚苯乙烯製造複合材料以來，熱塑性複合材料的樹脂基材、補強材及成型方法的研究不斷深入，產量與應用領域也不斷擴大，目前在汽車、電子、電器、醫藥、建材等行業漸漸有許多的應用。

雖然熱固性樹脂複合材料目前仍是相對成熟的技術，且產業應用相當廣泛，但有斷裂韌性較低、抗損傷能力較差、使用周期短、加工周期長、廢料回收困難等缺點，發展受到很大的限制，因此又重新喚起產業界對熱塑性複合材料的興趣。到目前為止，業界普遍認為熱塑性纖維複合材料具有很大的發展潛力。

與熱固性纖維複合材料相比，熱塑性纖維複合材料具有以下優點：樹脂選擇性高；



碳纖維複材廢棄物

熱塑性樹脂的韌性是熱固性樹脂的10倍左右，有良好的抗衝擊性；具有類似金屬的加工特性；成型周期短；預浸材料無存放條件限制，使用方便；可以反覆熱熔結合，維修容易；廢料可以回收重新利用。儘管熱塑性複合材料的研究開發還在進行中，一些潛在的優點尚未完全被人們認識，然而熱塑性複合材料的開發和應用日新月異，且不斷有新產品與新技術推出。

熱塑性複合材料的發展一直伴隨著熱塑性樹脂的發展而有新的進展。熱塑性塑膠的發展歷史可以追溯到20世紀20年代，

早在1924年，美國就開發出了醋酸纖維素，接著開發出聚醋酸乙烯酯樹脂。30年代後期，熱塑性樹脂發展快速，1933年英國ICI Chemicals公司使用乙烯在高壓狀態下合成了聚乙烯；同年，美國的杜邦公司發明尼龍66。

上述這些熱塑性樹脂的優點是韌性好、成型製程簡單、成型周期短，缺點是熱變形溫度低、剛性差，難以滿足尖端複合材料的使用要求。因此，國外相繼開發了耐熱和超耐熱的樹脂基材，例如聚醚醚酮樹脂，其熔點高達攝氏334～380度，長期使用溫度是攝氏240～260度，還開發了聚苯硫醚、液晶高分子等高性能樹脂。

台灣複合材料產業自1978年由國外引進碳纖維複合材料，開始製造碳纖維複材網球拍之後，短短的幾年間不但淘汰了木製球拍，改變了世界網球拍的產銷結構成為網球拍王國，而且奠定了台灣在全球複合材料加工技術上重要的地位。簡言之，台灣複合材料產業雖然產值不大，卻是台灣工業化的縮影，其發展過程不但見證了台灣經濟發展的生命力，更為下一個階段的產業升級提供了彌足珍貴的歷史啟示。

台灣複材產業自70年代發展的球拍開始，到90年代的碳纖維複材自行車，再到2000年代的複材飛機零組件，以及近年來急速發展的汽車與能源產業，各世代的複材應用產業都少不了台商的參與。以碳纖維自行車為例，我國碳纖複材自行車的相關技術與產能在世界上有一定的水準，且產能與技術目前都是世界第一！近年來由於科技的日新月異，對材料的要求也日漸嚴苛，因此越來越多的產品看上

這種比鋼強、比鋁輕的纖維複合材料，如飛機、風力發電葉片、汽車等。

然而這些高性能的尖端複合材料雖有其絕對優勢，但其廢棄物的處理卻相當令人頭痛，熱塑性複合材料因而乘勢崛起。熱塑性複合材料發展迄今已逾20年，但始終無法大量應用。以台灣運動器材最大量的自行車零組件而言，目前複合材料自行車零配件的開發方向著重於「高剛性」、「輕量化」等，因此在熱固性複材產品中，其樹脂含量越來越低，甚至低於35%，這也是熱固性纖維複合材料吸引人的地方。但熱塑性複合材料由於其先天特性，製備成纖維預浸材時的樹脂含量都高於50%，對產品的重量要求而言是一大缺點。

隨著汽車、航太、3C產品、建築以及與節能有關等方面的發展需要，熱塑性樹脂複合材料的研究和應用正在不斷地發展。從資源及產品成型製程特點來看，熱塑性樹脂複合材料在生產效率、維修費用等方面明顯比熱固性樹脂複合材料優越，儘管目前熱塑性樹脂基複合材料並不是十全十美，未來將在業界扮演舉足輕重的角色。自動化、快速成型以及回收議題是未來纖維複材產業的發展趨勢。

沈銘原

勤益科技大學機械工程系
