



■ 沈銘原

纖維複合材料的發展

纖維複合材料藉由補強材與基材「各盡其長、互補其短」的特性，有效地彌補單一材料的缺點，並產生單一材料無法達到的新性能。

想像一下，千百年前農家住房的牆體都是土堆砌的，家家戶戶都養牛、豬等牲畜。有一天如果牲畜發狂往牆撞過去，牆是否會倒塌呢？古人用什麼方法來解決這個問題呢？複合材料是近幾年常常聽到的名詞，電視新聞也常報導許多新科技產品是用「碳纖維」、「複合材料」做的。但究竟什麼是碳纖維？什麼是複合材料呢？台灣複合材料產業又是如何發展呢？

複合材料的定義與歷史

先來嚴肅一點看學術上的名詞—複合材料，根據國際標準化組織給複合材料所下的定義是：兩種或兩種以上物理和化學性質不同的物質組合而成的一種多相固體材料，各種組成材料在性能上能互相取長補短，因而產生協同效應，使複合材料的綜合性能優於原組成材料而滿足各種不同的要求。

在複合材料中，通常有一連續相，稱為基材；另一相是分散相，稱補強材，而兩相之間有相界面。乍看之下非常複雜，但事實上，從遠古時代開始，複合材料就出現在人們的生活中。複合材料既是一種新型材料，也是一種古老的材料。複合材料的發展歷史大致可區分為古代複合材料和現代複合材料兩個階段。

考古學家發現，早在西元前 2000 年，在中國西安東郊半坡村仰韶文化遺址中，古代人已經懂得用稻草或麥稈補強黏土作為住房牆體的材料。想像一下，當牛衝撞土牆時，牛撞擊所造成的裂縫會一直裂開，直到遇到稻草就停止，這就是當牲畜衝撞土牆不會倒塌的原因。而這樣的原理也應用在現代水泥房舍的建造，在水泥中加入碎石，當地震或牆體產生撞擊而有裂縫時，水泥內的碎石也會阻擋裂縫成長而保護牆體不倒塌。



古代農家房舍土牆

中國古代用漆灰（主要用生漆和磚瓦灰、河沙、黃土灰或石灰調在一起）和麻布為原料製成一種複合胎體。先在用木材或泥土製好的模具上塗一層漆灰，再貼一層麻布，接著再塗漆灰。如此反覆數次，等漆灰乾燥後從模具上取下成形的漆器胎體，稱為「夾紵胎」。這種夾紵胎漆薄體輕、光潔美觀，氣候變化時也不易變形和開裂（這就是麻布作為補強材的功勞），並可以自由地造型，製作比較複雜的器型，深受人們喜愛，可以說是現代複合材料的鼻祖。

另外，元代蒙古弓用木材為芯，再把受拉面貼單向纖維，受壓面黏牛角片，以絲線纏繞，漆作黏膠。這樣做出來的弓輕而有力，是古代複合材料中極佳的應用。

到了現代，由於科技的進步，我們對複合材料有更進一步的了解，因此把複合材料依不同需求進行不同的分類。例如：依補強材的不同，分為纖維複合材料、顆粒複合材料、積層複合材料、薄片複合材料、填充複合材料；如果以基材來分類，則可以分為高分子基複合

複合材料由兩種或兩種以上性質不同的物質組合而成，
各種組成材料在性能上能互相取長補短，使它的綜合性能優於原組成材料。

纖維複合材料是以纖維補強的高分子複合材料，
它的品質與性能主要由纖維與高分子基材的界面特性所決定。

材料、金屬基複合材料、陶瓷基複合材料、碳 / 碳複合材料等。

複合材料種類繁多，但其中應用最廣的，當屬以纖維補強的高分子複合材料（纖維複合材料，簡稱纖維複材），而纖維複材基本的組成是纖維及高分子基材。纖維是決定複合材料機械性質的主要因素，用以承受主要負載，限制微裂紋延伸，提高材料剛性與抗疲勞及潛變性能等。

高分子基材一般分為熱塑性樹脂及熱固性樹脂兩大類。纖維則有不同的材料及型式，常用的有玻璃纖維、碳纖維、克維拉纖維（拿來做防彈背心的纖維材料）、硼纖維、碳化矽纖維幾種，型式上有短纖、連續長纖、纖維編織布、粉狀纖維等。

簡單地說，兩者之間的關係就是用樹脂為基材，把細長狀纖維「黏住並固定」，形成內含纖維狀物的新材料，就稱為纖維複合材料。事實上，「黏住」一詞並不是一個學術上的名詞，但有助於我們對基材與纖維間內含「界面」的情況建立一容易理解的想像。其實在纖維複合材料中，這界面的結合力是由化學鍵結所產生，稱為「固化」。而整體纖維複合材料的品質與性能主要由纖維與基材的界面特性所決定，探討纖維複材的界面行為是另外一個專門的領域，在本文中不另贅述。

現代使用的纖維複材具有良好的力學性質，例如高強度、低密度等，因此常用在航太工業或高階自行車產業。在應用上，由於這些產業對材料強度與輕量化的要求較高，在強化纖維的選擇上，通常以連續長纖維為主。

現代複合材料起源自 20 世紀 40 年代，因航空工業的需要而發展了玻璃纖維複合材料，又稱為玻璃纖維強化塑膠，從此出現了複合材料這一新名詞。而熱固性複合

材料與熱塑性複合材料的發展各有所長，常見的樹脂基材分類如下。

熱固性樹脂基複合材料是指以熱固性樹脂如不飽和聚酯樹脂（做浴缸用的樹脂）、環氧樹脂（就是俗稱的 AB 膠）、酚醛樹脂（俗稱的電木）、乙烯基酯樹脂等為基材，以玻璃纖維、碳纖維、克維拉纖維等為補強材製成的複合材料。目前纖維複材中，絕大部分指的是熱固性纖維複合材料。熱固性複合材料產品主要用於運動器材、建築、防腐、交通運輸、造船、航空太空等工業領域。

在運動器材方面，台灣是全世界最大且技術最佳的運動器材代工國家，如球拍、自行車零組件、棒球棒、曲棍球棒等，

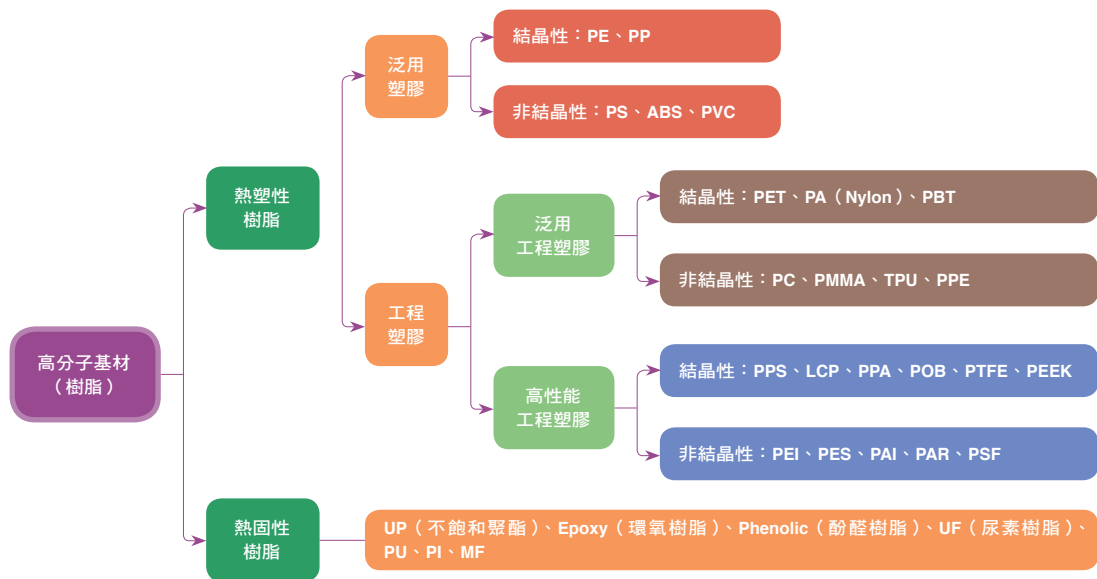


賽克勒美術館的唐代夾紵坐佛（資料來源：<https://www.douban.com/note/553563557/>）

常見的補強纖維種類



高分子基材的分類



不論品質、產能都是世界首屈一指。在建築方面，有內外牆板、透明瓦、冷卻塔、水箱、衛浴用品如浴缸等。在石化應用方面，主要用於管道修補。在交通運輸方面，汽車應用有次結構件、非結構件及改裝件等如車身、引擎蓋、保險桿等配件。火車應用有車廂板、門窗、座椅等。船艇方面主要有船體、船身配件等。在機械及電器領域，如風力發電葉片等。在航空方面，有飛機主結構件、次結構件、非結構件等。在太空及

軍事領域，有衛星天線、火箭噴管、防彈板、魚雷、飛彈等。上述應用領域目前主要都使用熱固性纖維複合材料。

比鋼強比鋁輕的尖端複合材料

纖維複合材料藉由補強材與基材「各盡其長、互補其短」的特性，有效地彌補單一材料的缺點，並產生單一材料無法達到的新性能。因此，纖維複合材料的出現與

材料強度比較表

| 項目 \ 材料 | 碳纖維複材 CFRP | 玻璃纖維複材 GFRP | 鋼 SS400 | 高張力鋼 NiCrMo | 不鏽鋼 SUS304 | 鋁 A2024 | 鈦合金 |
|--------------------------|----------------|----------------|-------------|----------------|---------------|-------------|----------------|
| 密度 (g / cc) | 1.56 | 2.0 | 7.8 | 7.8 | 8.03 | 2.77 | 4.5 |
| 拉伸強度 (MPa) (ksi) | 2,450 (355) | 1,370 (200) | 400 (58) | 1,470 (215) | 980 (142) | 422 (61) | 1,080 (157) |
| 彈性模數 (GPa) (msi) | 138 (20) | 39 (6) | 206 (30) | 206 (30) | 197 (29) | 74 (11) | 114 (17) |
| 比強度 (10 ⁶ cm) | 16.1 | 7.0 | 0.5 | 1.9 | 1.25 | 1.6 | 2.5 |
| 比強度係數 | 12.9 | 5.6 | 0.4 | 1.5 | 1 | 1.3 | 2.0 |
| 比模 (10 ⁸ cm) | 9.0 | 2.0 | 2.7 | 2.7 | 2.5 | 2.6 | 2.6 |
| 比模數係數 | 3.6 | 0.8 | 1.1 | 1.1 | 1 | 1.1 | 1.1 |

發展，可說是現代科技發展的結果。也因為現在科技的突飛猛進，使得對材料的要求日益提高，前面所提的玻璃纖維強化塑膠已經不能滿足產業應用，因此出現所謂的尖端複合材料，專指用於主受力結構和次受力結構的產品，且其剛性（材料抵抗變形的能力）和強度（材料承受破壞的能力）性能相當於或超過鋼材，且重量又相較於鋁合金輕的纖維複合材料。

相較於一般玻璃纖維強化塑膠，尖端複合材料是以高性能纖維（如碳纖維、硼纖維等）為補強材的纖維複合材料，它的比重比鋁合金低，但比強度、比模量卻高於鋼。因此，「比鋼強、比鋁輕」是我們一般對尖端複合材料最佳的詮釋。也由於尖端複合材料憑藉其優異的力學性能、結構強度可設計性等突出優點，在軍用、民用領域得到廣泛的認可和應用。

尖端複合材料具有質量輕，較高的比強度 / 比模數（比剛性），較好的延展性、抗腐蝕、

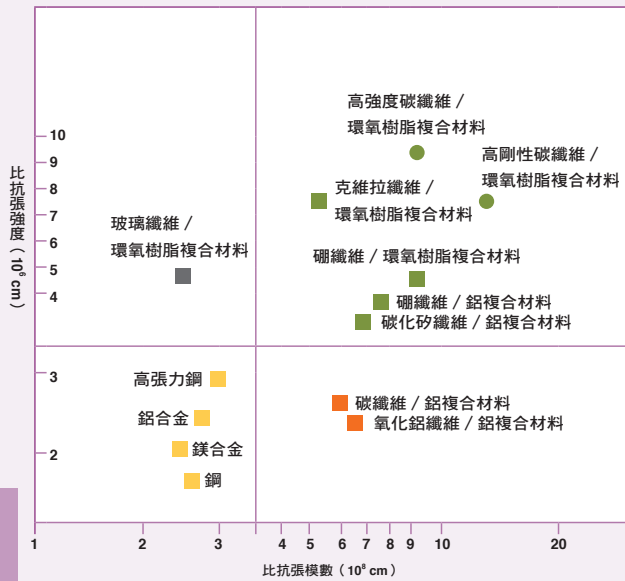
隔熱、隔音、減震、耐高（低）溫等特點，目前大量應用在航太、軍事、醫療、交通運輸、機械、建築、運動器材等行業。以複合材料飛機結構零組件為例，近年來由於油價大漲，而飛機需要抵抗重力飛行於空中，減輕機身重量便可提升速度或性能，如何使飛機更輕更省油，就成為飛機製造公司的首要大事。

再者，在飛行或起降過程中，機身會承受複雜的應力，因此飛機的結構材料除了要輕以外，更要有足夠強度且耐疲勞等特點，尖端複合材料就因此脫穎而出。

我國複合材料的發展歷史

我國複合材料工業的發展，始於 1960 年代玻璃纖維強化塑膠製品（玻璃纖維補強不飽和聚酯樹脂複合材料）的製造。以複合材料遊艇為例：早期從國外引進技術，採用進口原料

尖端複合材料是以如碳纖維、硼纖維等高性能纖維為補強材的纖維複合材料，具優異的力學性能、結構強度可設計性等優點。



尖端複合材料特性圖

生產漁船、遊艇與浴缸，迄今已有五十多年的歷史。而我國遊艇工業約於 1950 年代末期萌芽，當時淡水河畔幾家小型木造船板廠商接受數位喜愛遊艇且又熱心於台灣自行建造小型遊艇的業餘專家協助指導，開始木造遊艇的生產。之後適逢越戰時期美軍休假來台，使用自行設計的設計圖，利用台灣廉價及精良的木工技術製作小型遊艇遊玩。

由於業者的勤勉與模仿領悟性強，以及造船木工手藝精巧等條件，美軍回國後廣為宣傳。台灣的小型遊艇造船能力深受美軍的喜愛，曾外銷至美國西海岸，打開台灣遊艇事業在美國的知名度。到了 1960 年代，由於玻璃纖維複合材料造船技術自國外引進，我國開始把船舶的生產技術由木材轉為複合材料。迄今，台灣的遊艇產業以生產玻璃纖維強化塑膠動力遊艇為主，並涵蓋大中小各種尺寸的遊艇，是世界上生產技術首屈一指的遊艇製造國家。



製造大型玻璃纖維強化塑膠遊艇（圖片來源：嘉鴻遊艇公司）

印刷電路板用的玻璃纖維複材板（圖片來源：<https://www.sunrayfr4.com.tw/>）

過去複合材料的產品應用主要以玻璃纖維複合材料為主，例如：大型桶槽、浴缸及船艇。而近年來由於尖端複合材料的發展，對產品的重量、性能要求越來越高。目前玻璃纖維複材的應用領域主要以建築用材如浴缸、浪板、冷水塔、桶槽等民生用品居多。值得一提的是：台灣另一個驕傲電子業所必須用到的印刷電路板，也是以玻璃纖維補強環氧樹脂所製備的複合材料。

沈銘原

勤益科技大學機械工程系