

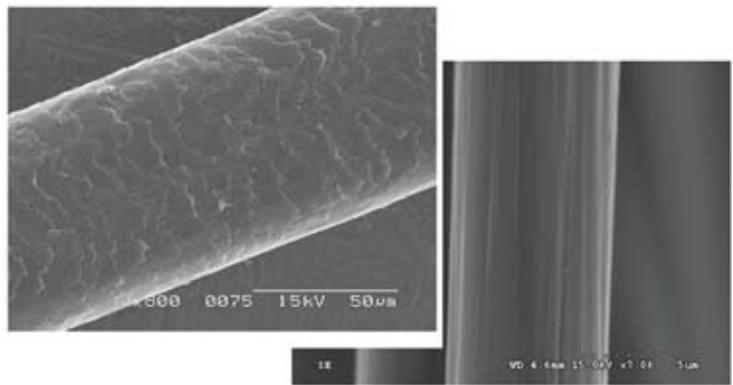
碳纖維的故事

■ 柯澤豪 · 梁恆嘉

熱愛單車的你，知道車架中的碳纖維是如何製作的嗎？
碳纖維又會在生活中的哪些地方出現呢？

市面上的碳纖維製品常被稱做「卡夢」，其實卡夢一詞是日文的音譯，它的原文是「carbon」，泛指以碳纖維編織或多層複合而成的材料。碳纖維是一種重量比鋁輕、強度比鋼大、細度卻比人類頭髮還小的纖維，其含碳量在90%以上。

相同體積下，碳纖維的重量僅是鐵的四分之一，甚至比鋁合金還輕，強度卻大於鋼的四倍。這也是為什麼現在越來越多需要高強度輕量化的商品都趨向使用碳纖維的原因，碳纖維也成為輕量化的代名詞。



頭髮（直徑約80微米）與碳纖維（直徑約7微米）粗細度的差異。

碳纖維是一種重量比鋁輕、硬度比鋼強、直徑卻比頭髮還細的纖維，其含碳量在90%以上。

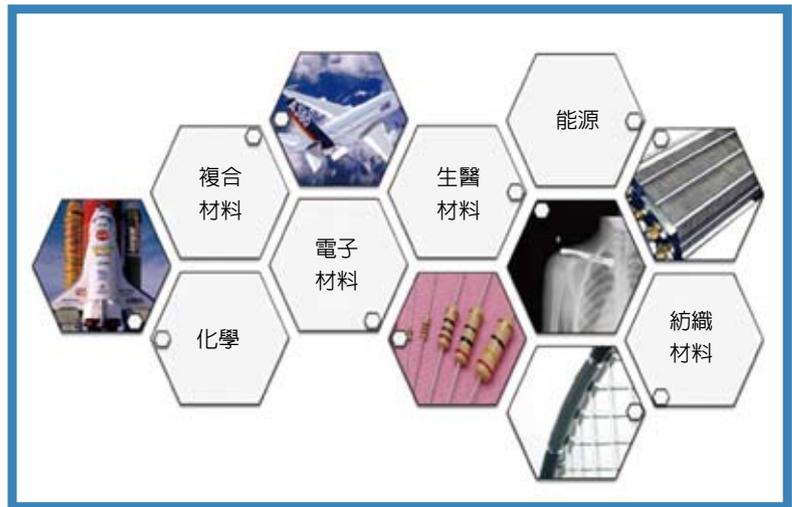
碳纖維的起源

最早使用碳纖維的人就是發明電燈泡的愛迪生。當初他爲了找尋可通電的燈絲，嘗試了不下千種材料，但都無法成功，某次因緣際會下使用了燃燒後的黑色物質，才有意外性的突破。愛迪生又試驗了多種纖維材料，最後才找到了新發光體—日本竹絲，雖然這種碳纖維可通電發光，卻因太脆而放棄，最後仍然使用了鎢絲。

愛迪生因而點燃了人類第一盞真正實用的電燈，開闢了科學的新紀元。但直到上世紀50年代，在美國與蘇俄的太空發展競爭中，人們爲尋求一種質輕、高機械強度的材料，才又開始重視碳纖維。而被成功地製成補強材料的碳纖維，是於1959年由聯合碳化物公司以嫻縈纖維製成的具高強度的碳纖維，開始了人造絲製造碳纖維的工業化生產。

碳纖維是一種兼具化學惰性和半導體性能的纖維材料，具有重量輕、強度高、彈性模數高、耐高溫、耐酸、導電性強、長期受力不發生潛變和耐疲勞、尺寸穩定性強、熱導率高、摩擦係數小、具潤滑性等優異性能。

隨著生產力的提高和功能性的開發，碳纖維成爲21世紀最具潛力的新材料之一，在各領域的應用也越來越廣泛。70、80年代碳纖維主要用於航空、太空等高科技領域，90年代以後，則逐漸轉向



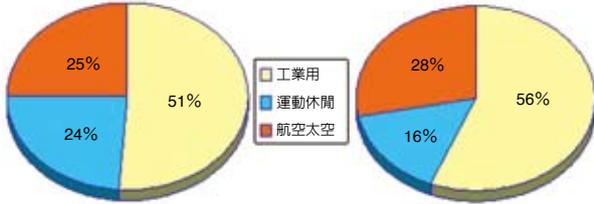
碳纖維的應用領域

體育休閒用品和更廣泛的工業領域發展。

碳纖維的分類

製作碳纖維的原料不下百種，但因製造的難易度、成本、含碳量等考量，主要還是以聚丙烯腈（PAN）、瀝青及嫻縈（rayon）3種爲主，其中以聚丙烯腈系所生產的碳纖維占全球產量的百分之八、九十。碳纖維的需求量也逐年增高，不論在工業、運動休閒或航太方面都是如此，其全球需求量已由2007年的28,580公噸，大幅增加至2010年的41,000公噸。

包括我國在內的很多國家都可以生產碳纖維，但論規模、品質和產能，日本還是當今最大的



全球碳纖維用途（左）及需求量（右）。

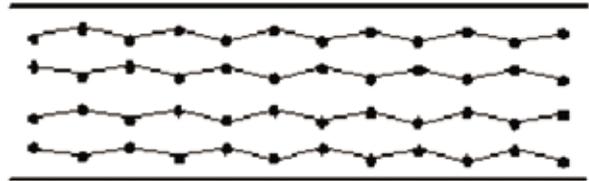
碳纖維生產國，占了全球產量的80%以上。

製造碳纖維的原料與壓克力一樣，都是石化產品聚丙烯腈。聚丙烯腈纖維具蓬鬆、捲曲、柔軟、保暖性佳，密度較羊毛小，強度比羊毛高 1~2.5倍，常用以代替羊毛，有「合成羊毛」的稱號。

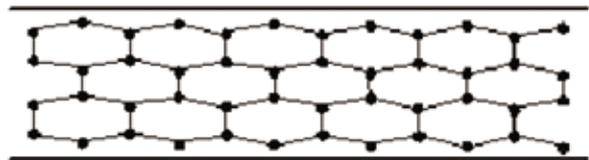
聚丙烯腈若製成壓克力棉，1公斤只賣幾塊錢。但經過繁瑣製作程序後產出的碳纖維紗，至少可賣到1千元以上，可見碳纖維的身價不斐。可惜的是，由於碳纖維研發生產的門檻很高，從原絲的生產到碳化製程都有複雜且嚴格的技術要求，並不是每家公司都可以生產。以



聚丙烯腈纖維（左）與碳纖維（右）的實際樣品。



(a) 聚丙烯腈纖維



(b) 碳纖維

聚丙烯腈纖維與碳纖維的理論結構圖

下是簡易的製程說明：

氧化（又稱為穩定化） 在這過程中，纖維通過含有氧氣且高溫的爐體，溫度是攝氏 200~300度不等。由於高分子材料受熱會軟化，因此在纖維上施加適當的力量，可使它保持線性的形態；內部結構則由原先的聚丙烯腈的線狀結構，轉變成較穩定且堅固的六角形排列。

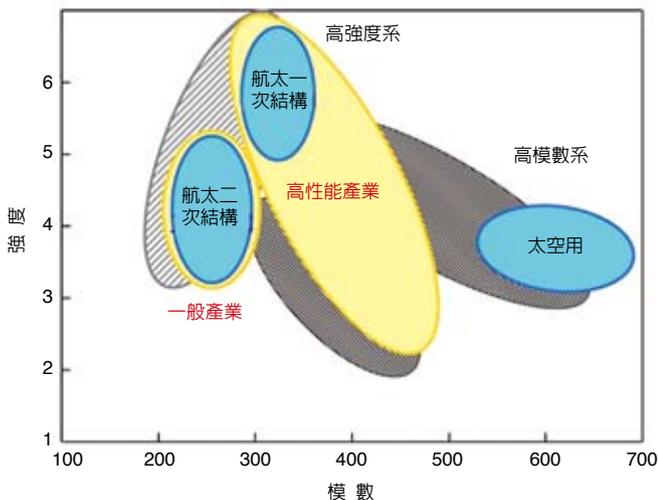
碳化或石墨化 經過氧化處理後的原料，在惰性氣氛中加熱至1千度以上的高溫，這時高分子結構中的氧、氫，以及其他分子都會因受不了高溫紛紛奪門而出，最後遺留下來的就只剩純碳了。

由於原料、製程及碳化條件的不同，所製成碳纖維的機械強度及各種物理化學性質會有很大的差異。根據用途，可劃分為航空用（小絲束）和商業用（大絲束）兩類。大絲束碳纖維應用於不同的民用工業，包括紡織、醫藥衛生、機電等，而小絲束主要應用於國防軍工和高科技，以及體育休閒，像導彈、火箭、衛星和釣魚竿、高爾夫球桿等。

通常48K以上的纖維束稱作「大絲束」，

碳纖維的分類

分類依據	分類條件		碳纖維的類別	
熱處理溫度	1300 < 溫度	< 1400	低溫型碳纖維	
		< 2000	中溫型碳纖維	
		> 2000	高溫型碳纖維	
機械性質	HP級	模數	450GPa	超高模數型碳纖維
			350GPa	高模數型碳纖維
		強度	4.5GPa	超高強度型碳纖維
	3GPa		高強度型碳纖維	
	GP級	模數	200GPa	中模數型碳纖維
			100GPa	低模數型碳纖維



碳纖維機械性質的分布及其應用範圍

而24K以下的稱作「小絲束」。其中的「K」是指一束纖維內有幾千根的單絲，3K就是指一束有3,000根的單絲。

碳纖維的分類是以熱處理及機械性質為準，機械性質中的強度與模數也可劃分纖維的等級。強度比較簡單的解釋是，使物體斷裂所需耗費的力量；模數的定義則是物體受力而變形的容易程度，模數越高表示越不易形變。

製造碳纖維時的碳化溫度上升會使纖維強度隨之提高，但以攝氏2,000度以上的超高溫使纖維

石墨化後，纖維強度會在達到某個平衡點後開始降低，取而代之的是模數的提升。研究顯示，強度逐漸上升而模數卻無顯著的改變，但模數提升隨即伴隨強度的下降，這是碳纖維的特性。高強度碳纖維通常可應用為飛機的補強材料，高模數 / 高強度碳纖維則是太空或航空用的等級，可抵抗發射時的劇烈震動。

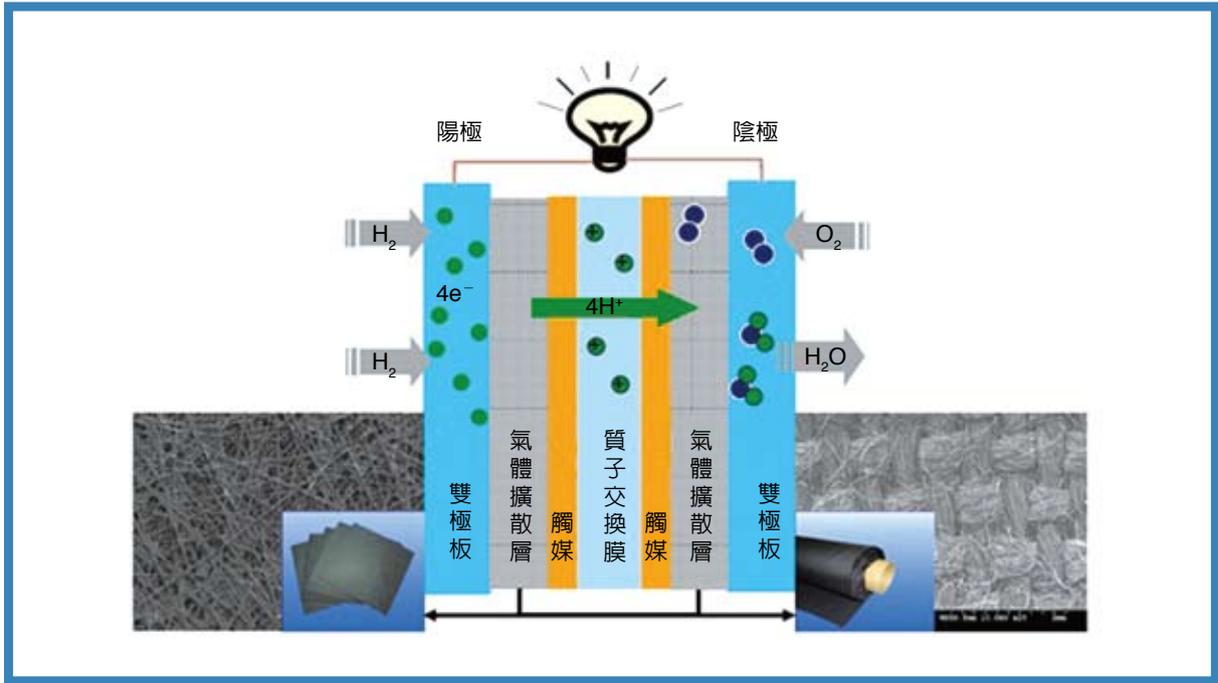
碳纖維在70到80年代的發展著重於航太與運動器材的應用，當時日本東麗公司生產的T300、T700及T1000纖維不斷地研發成功，抗拉強度也由最初的3GPa一直提升至3.6GPa，意味著碳纖維的強度也隨著型號往上攀升。90年以後，發展方向逐漸轉至交通運輸、能源發電等工業用途，這是因為碳纖維的性能考量逐漸被經濟因素所取代。在航太或汽車工業上現在都可發現高模數碳纖維的蹤跡，是人類科技文明躍升進步的驅動力。

此外，在售價方面，市場上碳纖維是秤斤論兩的，而非以長度為單位來銷售，纖維等級提高也直接反映在單價上。以T700為例，1公斤大約17美金，T800則是T700的3倍價錢。而1公斤的碳纖維，對於絲數12K而言通常約為1,250米，3K的碳纖維則有5,000米。但實際上的售價是K數越小，單價越高，成反比關係。這與碳纖維生產的成本有關，因為在生產時是以長度計算的。

很多人會懷疑碳纖維明明很平價，可是一台單車為什麼可以破萬？這是因為纖維還須經過編織成布，又得塗上樹脂固化，經過一連串複雜卻重要的製程後，才得以呈現一台剛性高、重量輕的單車。這些過程的「價值」都不是標價上的「價格」可以顯現的，這也是為什麼單車狂熱者會對這黑色編織物如此地又愛又恨了。

應用於燃料電池

燃料電池是一種高效率、低汙染的新型發電科技，經由連續輸入氫氣及氧氣或空氣，把化學能



燃料電池運作示意圖

轉變為電能。當多組的單位重疊在一起時，就可串聯增加電壓及電能，應用範圍廣泛。

燃料電池元件分為4個主要部分：質子交換膜、觸媒、雙極板、氣體擴散層。其中碳纖維在4大零組件中，如觸媒的載體、雙極板及氣體擴散層中，扮演不可或缺的角色。其中，氣體擴散層是膜電極組和雙極板溝通的橋梁，除了輔助從雙極板通過的氣體可以順利和觸媒反應外，也是電子傳導的媒介。

氣體擴散層須具備高透氣度、抗腐蝕能力、高導電度、熱的良導體、高強度等功能。碳纖維布或碳纖維紙因具有高導電性、抗蝕等特性，自然成為首選，恰好適用於燃料電池內的特殊環境。

目前國內尚無自主生產這些零組件的能

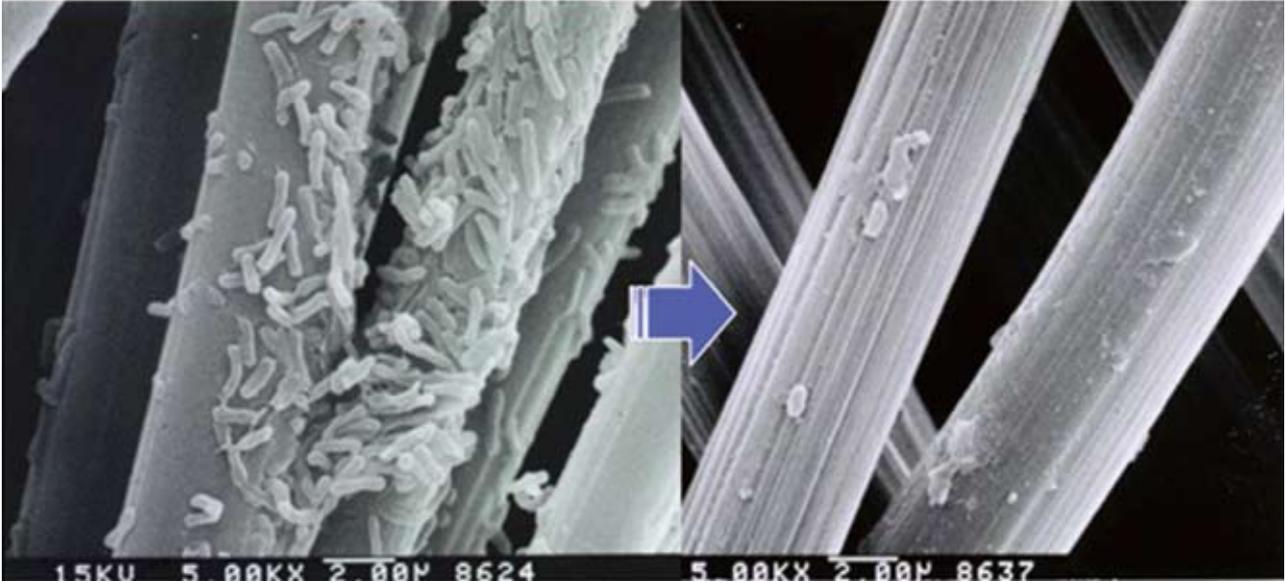
力，幾乎全仰賴國外進口，因此積極開發燃料電池元件，建立國內生產的主導性，可避免新一代能源受制於國外。在國科會補助下，國內學術單位經多年努力已突破目前商業用氣體擴散層的瓶頸，在氣體擴散層的生產技術上，獲得5項世界性專利。

應用於生醫材料

在SARS、H1N1流行時期許多人都戴上口罩，其中的黑色神奇布料可把細菌、惡臭阻擋在外，保護人身安全。這一神奇的布料就是碳纖維經過「活化」變成的「活性碳纖維」，比起傳統使用的活性碳粉或顆粒，能更快速地吸附及脫除異物。

活性碳纖維大多應用於：溶劑的回收、空

碳纖維經過「活化」變成的「活性碳纖維」，
比起傳統使用的活性碳粉或顆粒，能更快速地吸附及脫除異物。



特殊活性碳纖維對大腸桿菌的殺菌效果

氣及飲用水淨化、醫療用材及衛生材料、防毒面具及口罩。在國科會的補助下，國內的研究單位已成功研發出具有濾菌及殺菌雙重效果的活性碳纖維，使它成爲不容小覷的生醫材料。

未來發展

碳纖維的多功能性讓國際市場的需求急遽上升，碳纖維的製造商無不努力提升產能以滿足需求。市場上碳纖維供不應求的因素可歸納如下：

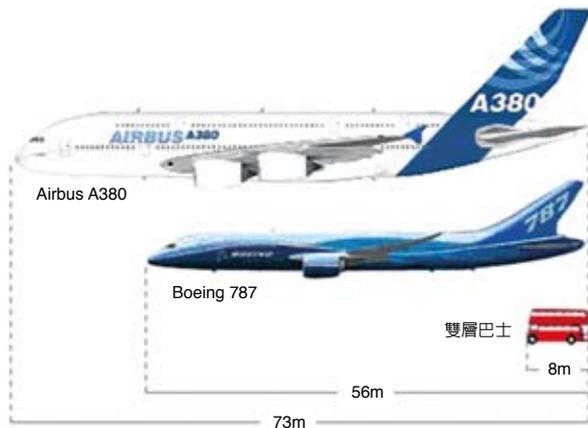
體育用品—在碳纖維的應用中，最早應用聚丙烯腈碳纖維的是釣魚竿。現在世界上碳纖維魚竿的年生產量是1,200萬根左右，相當於使用碳纖維約1,200公噸。至於高爾夫球桿是在1972年起開始使用碳纖維，至今世界上碳纖維桿的年生產量約4,000萬根左右，相當於2,000公噸碳纖維的用量。

除此之外，碳纖維是從1974年開始應用於網球拍的，目前世界上一年應用碳纖維的球拍約450萬個，需碳纖維約500公噸。在其他方面，碳纖維還廣泛地應用於滑雪板、滑雪桿、棒球棒，以及船舶類體育用品上。

運輸工具—爲了降低運輸工具的燃料使用量，人們開始意識到碳纖維的輕量化、耐疲勞性、耐腐蝕性等優點，因而廣泛應用於航空、航太行業上。在太空領域，由於高模數碳纖維的輕量性（剛性）、尺寸穩定性及導熱性，早已應用於人造衛星等方面。另爲因應高油價時代，波音公司的B787與空中巴士的史上最大客機A380，都大量採用碳纖維及其複合材料，藉著它們的高強度與機體重量的減少來換取飛機的高效能及低油耗。

土木建築領域—近幾年在日本的土木建築領

太陽能電池、風力發電、燃料電池等綠色能源逐漸受到重視並加速發展，而在這些新興能源工業中，部分元件已使用了碳纖維。



A380及B787與雙層巴士的比例圖



Bugatti車廠重金打造的全碳纖維車身

域，靠碳纖維進行抗震補修和補強的施工法普及率相當高。以阪神大震災為開端的抗震補強，以及伴隨著因交通量和承載量的大幅度增加而造成的劣化所進行的道路橋梁等補強，都開始採用碳纖維片材的施工法。公路、橋的地面、橫梁、建築物和梁、構架、煙筒等的彎曲補強中，碳纖維的模數變得格外重要。

能源及相關方面—在能源及相關領域，包括風力發電機葉片、燃料電池電極、二次鋰電池、超級電容等之中，也應用大量碳纖維。另外，由於石油逐漸消耗以及價位逐年攀升，尋找替代能源是熱門的話題之一。太陽能電池、風力發電、燃料電池等綠色能源逐漸受到重視並加速發展，期望能取代部分或全部的石油能源。不難發現，在這些新興能源工業中，部分元件已使用了碳纖維，顯示碳纖維已經成為當代不可或缺的材料。

藍寶堅尼（Lamborghini）於2010年宣布成立新碳纖維研究中心，將使用更多的碳纖維和碳複合材料來取代鋼質車架，大大地減輕車身

重量，使油耗的節省、速度的表現及「極速快感」的體驗更上一層樓。

這意味著超級跑車工業對於碳纖維的剛性及輕量化特性情有獨鍾。市面上已經有許多量產超跑的車身採用全碳纖維，那分子結構宛如鑽石的「塑膠」，為超跑增加鑽石般的附加價值！碳纖維的魔力不僅止於材料特性，那亮黑色的纖維交織面，如Bugatti車廠限量版的全碳纖維車身，更讓許多愛車者為之瘋狂。

碳纖維的售價因飛機製造業的大量需求而不斷攀升，間接扼殺了碳纖狂熱者的錢包。這黑金般的纖維卻不因售價讓人卻步，反而非常搶手且愛不釋手！

柯澤豪·梁恆嘉

逢甲大學材料科學與工程學系