

碳纖維 原本不是一根碳

黃博雄

碳纖維很難生產，但應用很廣。

你可以輕易地找到碳纖維各式各樣的應用，但是關於碳纖維的核心製程很少揭露，原因是碳纖維的前驅物通常是合成出來的，每一種前驅物都是大企業的獨門祕方。

「炭」與「碳」到底差別在哪？令人有些困惑！如果不那麼考究，筆者的見解是：早期常用炭，現今常用碳，傳統的技藝常用炭，現今的科技常用碳。再者，若聽到外國人說「charcoal」，那八成是炭；如果聽到「carbon」，那鐵定是碳。碳纖維（Carbon fiber）是近百年的科技顯學，科技人知道碳纖維如何使用，但不見得知道碳纖維如何製造。在談論「碳纖維原本不是一根碳」之前，先說明「木炭與煤炭原本也不是一塊炭」。

木炭與煤炭原本不是炭

前不久，看到一則報導：日本熊本鬧區大火延燒了 20 棟木造老房子，而從祝融之後的景象可看見，木造梁柱都變成了炭梁炭柱，不過它們的型態依舊。既然木造梁柱都是上乘好材（例如檫木、檜木），當然可以說那些炭梁炭柱也是木炭，只是未經嚴謹的溫度與氣氛掌控下所形成的木炭。所有的木質素在燃燒的過程中若供給大量的氧氣，木質素都會燒成了「灰」，灰可以說是木質素在轉換成碳素時過度燃燒的產物。舉凡植物都含有木質素，例如竹子、椰子殼、棉花等。



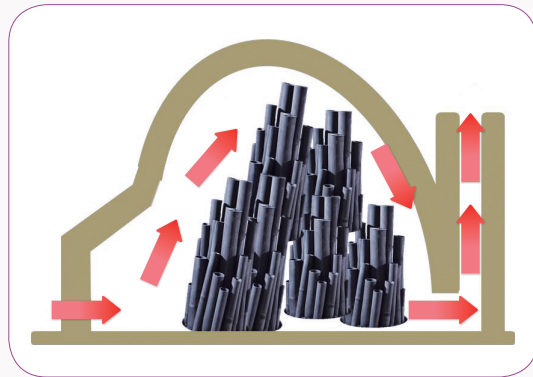
日本熊本鬧區大火延燒 20 棟木造老房子，梁柱都變成炭。（圖片來源：Yahoo Japan）

碳纖維是近百年的科技顯學，
科技人知道碳纖維如何使用，但不見得知道碳纖維如何製造。

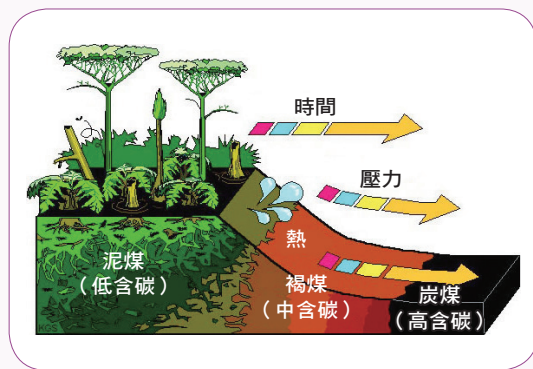
知道木質素系（例如：橡木、孟宗竹、椰子殼）如何燒成炭之後，碳纖維如何燒出來就不難想像了。常聽到的備長炭就是用橡木燒製成的炭，其他如：竹炭就是用孟宗竹在窯爐內燒製成的炭，椰子殼燒製成的炭叫做椰殼炭。橡木、孟宗竹、椰子殼同屬木本質素系，它們都是炭或碳的前驅物。這些前驅物的炭化是不可逆的，也就是以現在的科技來說，竹炭是不可能再還原成孟宗竹，因為竹炭是孟宗竹經過化學反應徹底質變的結果。

燒炭工藝再怎麼傳統，除了薪材的本質好與壞之外，不外乎是溫度控制與氣氛控制。燒炭的過程絕對是欲速則不達的製程，當木質素加熱到高於熱解溫度時，從攝氏 200 ~ 400 度時就開始分解出揮發性的氣體，這時空氣中的氧需求量較高，稱為氧化反應。接著，隨溫度逐漸升高（最高溫度約攝氏 1,000 度），必須非常小心地調節空氣，以避免氧氣太多而燒成灰，這就是碳化反應。在高溫下反應後所留下來的碳成分通常必須超過 70% 以上，在本質上這當然與原來的木質素只有約 30% 的碳有很大的不同。

聽說過煤炭也是植物炭嗎？煤炭的形成是遠古森林或沼澤的植物在分解之前就被埋在地底下沉積而成。因為長期處於較高的地層溫度和壓力下，木質素用數萬年的時間慢慢地轉換成碳質。遠古植物遺骸埋在地層下，經過泥炭→褐煤→煙煤→無煙煤的「熟成」之後，碳質越來越高，甚至可以從無煙煤轉化成石墨結構。嚴格說來，煤炭是植物經由地熱、高壓等環境的作用下產生的化石。因此地底層可以說是一座又一座的地下窯爐。經由上述的說明，當然可以說木炭、煤炭原本不是炭，是木質素系的化合物。



製造竹炭用的傳統窯爐



地底層可以說是一座又一座的地下窯爐（圖片來源：<http://slideplayer.com/slide/4195751/>）

為何地方政府禁用生煤

這得從英國的工業革命說起。六十多年以前的倫敦霧霾就像現在北京的天空，不但能見度很低，也造成英國史上最嚴重的公害事件之一。霧霾成因是大量煤炭燃燒所致，當時倫敦政府的報告指出：霧霾導致數千人死亡，近十萬人受到呼吸道疾病影響。大致說來，優質煤含碳高，劣質煤含碳低、雜質多（例如氮、硫化物），因此燃燒後形成硫化物、氮氧化物等有害物質。劣質煤其實就是地層的窯爐碳化反應不完全所致，優質煤因碳化反應完全，碳量高（90%以上），雜質含量較低。

碳纖維有各別的特性分野，高強度需求者的原料以聚丙烯腈系纖維為主，高模數者則採用瀝青系纖維，特殊多孔化纖維則以嫘縈系纖維為主。

談到煤的品級，是根據煤的發熱量、灰分（不能燃燒的部分）、含硫氮量等因素而定。例如做為燃料，含硫高的燃燒會產生二氧化硫污染大氣，必須有脫硫的設備。煙煤就是生煤，直接做為燃料會產生黑煙，造成大氣污染。無煙煤質硬，含碳量最高（92%以上），是優質煤。泥煤是泥狀物質，含碳量低（60%以下），其餘40%是雜質，燃燒時發煙量最多。



60年前倫敦的天空（圖片來源：維基百科）

碳纖維

前面介紹了木炭與煤炭，相信大家不再懷疑炭或碳是在一定的溫度—壓力—氣體環境下孕育出來的。碳纖維這門技術是高科技的代名詞，嚴格說來，碳纖維很難生產，但應用很廣，你可以輕易地找到碳纖維各式各樣的應用，但是很少揭露關於碳纖維的核心製程。原因是碳纖維的前驅物通常是合成出來的，每一種前驅物都是大企業的獨門祕方，歹竹（不好的前驅物）出不了好筍（優質的碳纖維）。

全世界的碳纖維 90% 以上的前驅物來自聚丙烯腈系，而前驅物來自於瀝青系與纖維素嫘縈系的則不足 10%。大體上，三者仍有各別的特性分野，還不致彼此競爭。高強度需求者的原料以聚丙烯腈系纖維為主，高模數者則採用瀝青系纖維，特殊多孔化纖維則以嫘縈系纖維為主。

嫘縈系碳纖維 嫘縈系的纖維是最類似炭的前驅物（例如：橡木、孟宗竹、椰子殼），

煤的種類

種類	含碳	性質
無煙煤（硬煤）	碳量約 92%	燃燒時火力最大，且無煙，煤質最好
半無煙煤	含碳量達 90%	性質介於無煙煤和煙煤之間
煙煤（軟煤）	含碳量接近 80% 以上	色黑無光澤，易點火有煙
半煙煤	含碳量約 75%	介於煙煤和褐煤間
褐煤（木煤）	含碳量約 60%	褐色，質鬆，易點火，燃燒時火力很小，且發煙很多
泥煤（低級煤）	含碳僅約 50%	形狀如泥，火力最小，發煙最多

（資料來源：維基百科）

因為它們都屬於木質素。不難想像，如果有一根纖維本質像前面提及的木質素，它一定可以燒成纖維。

最典型的木質素纖維就是棉，也是最早想到用來做為碳纖維的前驅物。不過棉纖維因棉花在生長時有太多的非晶結構，也就是瑕疵，在碳化過程中強度損失太大，因此通常使用再生纖維素縲縈製造碳纖維。縲縈系在碳化時會有大量碳損失，因此僅有 20 ~ 30% 的產率，但所得到的碳纖維的熱穩定性甚佳。

纖維狀的碳纖維（活性碳）則是因應國防上的需求而於西元 1970 ~ 1980 年代才開始研究開發，其主要用途是做為化學戰防護衣服的濾毒材料。因此，纖維狀活性碳的開發是先從織物型態開始，也就是先把纖維紡成紗、織成布後，以布狀型態做為前驅體。經過前處理加工，然後再經氧化、碳化、活性化等工程製成織布型態的活性碳，進而用來做為化學戰防護衣服的濾毒材料。

瀝青系碳纖維 原油經高溫提煉後的殘質約含有 90 wt%（重量百分比）以上的碳素，若能進行精緻瀝青化製程，例如去除其中的不純物，便能獲得純度極佳的瀝青。再經由瀝青紡絲後（碳纖維前驅物），復經不融化、碳化與石墨化工程，最後得到碳化率 85 ~ 95wt% 的碳纖維。瀝青系碳纖維價格低廉，來源豐富，不虞匱乏，但前驅物製造困難，紡絲裝置特殊，碳化前需要經過不融化處理，因此發展不易。製作的關鍵技術在於瀝青的純化及紡絲時的熱安定化。

瀝青的碳元素含量高，因此碳化率甚高，可達 70 ~ 80%。但這種碳纖維的抗張強度和壓縮強度卻無法與聚丙烯腈系碳纖維相比，在用途上受到一定的限制。瀝青的來源可區分成煤焦油瀝青及石油瀝青兩大類，煤焦油瀝青分子組成較複雜，但這

兩者的分子量分布較寬，分子結構紊亂，無法形成高順向排列，除非瀝青在純化過程中能去除小分子量直鏈狀物質並有效控制分子結構。

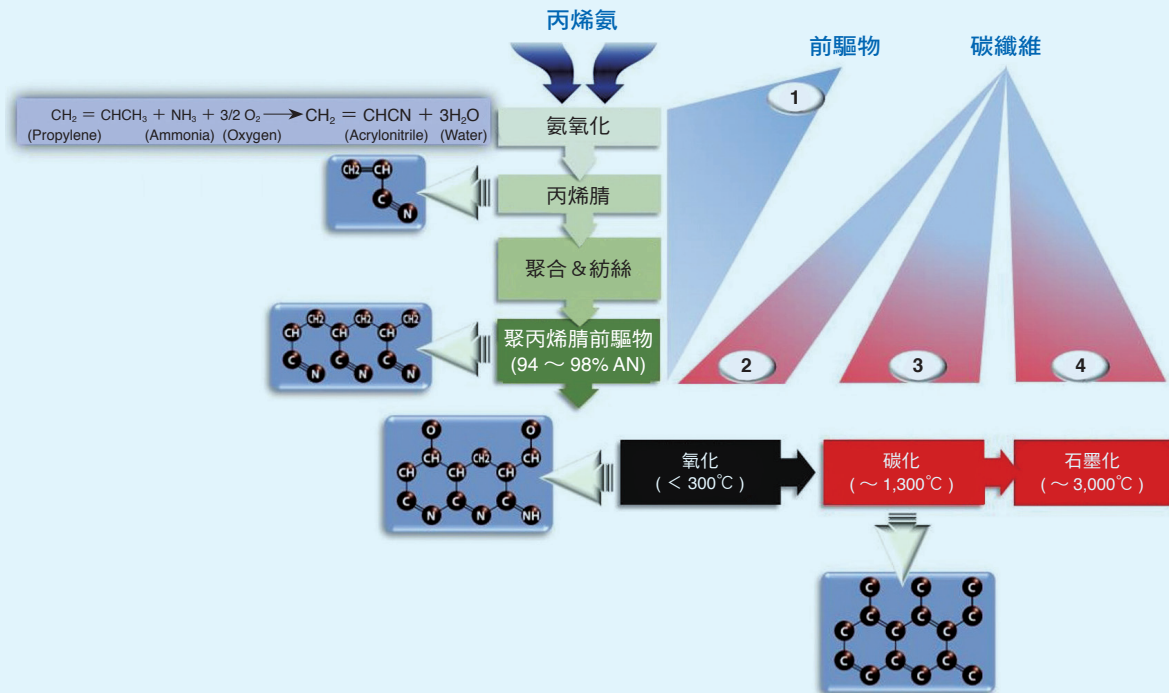
聚丙烯腈系碳纖維 從碳化製程結果來看，聚丙烯腈纖維似乎是目前製造高性能碳纖維前驅體的最佳選擇。因此近年來全球所生產的碳纖維，有 90% 以上是以聚丙烯腈系為前驅物原料。

把聚丙烯腈系纖維燒成高強度的碳纖維，其過程必須經過穩定化（或稱氧化）的重要步驟。穩定化過程主要有 3 種反應，分別是：環化反應、脫氫反應、氧化反應。接下來的碳化過程是穩定化後，聚丙烯腈母材纖維在惰性氣體中，且溫度高至攝氏 1,500 度的條件下進行熱處理。在熱處理過程中除了碳元素外，其他元素幾乎都以副產物的型式被除去而形成像石墨的結構。

聚丙烯腈系纖維的石墨化是指碳化反應後的纖維，增加微晶的尺寸可使得碳纖維結晶更完整。但微晶的規則排列則需借助纖維在攝氏 1,500 度以上的熱處理，例如把溫度控制在攝氏 2,000 ~ 2,500 度，甚至高至攝氏 3,000 度。不過，聚丙烯腈系纖維的前驅物中必須含高純度的丙烯腈，才能練就優質的氧化、碳化甚至石墨化的纖維。

殊途同歸

真的是殊途同歸，「途」者前驅物製程也、「歸」者碳也。碳纖維的前驅物不管是聚丙烯腈系、縲縈系或瀝青系，這些纖維聚合製程完全不同，但經高溫製程之後就變得非常相似，因為它們都變成了碳的纖維。碳纖維的高溫製程是類似的，首先是氧化製程，在可掌握的氧氣供給與可溫控的環境（攝氏 200 ~ 400 度）中進行，



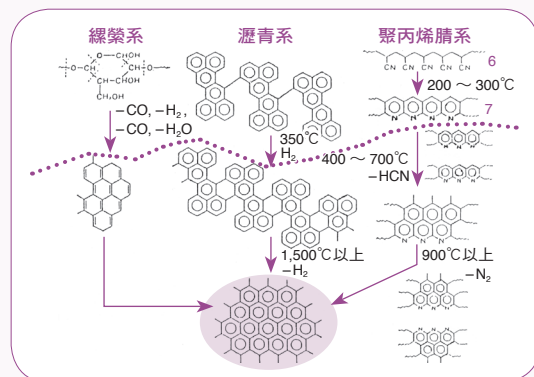
高純度的丙烯腈才能練就優質的氧化、碳化甚至石墨化的纖維。

隨後在惰性氣體保護下，以攝氏 900 ~ 1,500 度的高溫趕走碳以外的物質，最後加熱到攝氏 ~ 3,000 度而形成石墨化碳纖維。

聚丙烯腈系碳纖維的性能好，產率較高（約 60%），因此聚丙烯腈系的碳纖維約占總碳纖維產量的 90% 以上。嫫縈系碳纖維的產率只有 20%，瀝青系碳纖維的產率約 70% 以上，成本最低，很有潛力發展低強度高模數的產品應用。不管是哪一種系統的碳纖維，每一階段的產出物都是很好的商品，例如在氧化階段（攝氏 300 ~ 350 度）製得耐燃纖維，在碳化階段（攝氏 1,000 ~ 1,500 度）製得碳纖維，碳纖維再經攝氏 2,000 度以上高溫處理可以製得石墨纖維，含碳量高達 99% 以上，是航太用級的材料。

煉碳如煉鋼

每根碳纖維的直徑約 5 ~ 10 微米，碳原子晶體沿著纖維長軸方向排列，因此具



3 大系列碳纖維的前驅物雖然本質不同，但在熱處理後的化學結構相似（都是碳環）。（圖片來源：<http://eportfolio.lib.ksu.edu.tw/user/T/H/T093000078-20110524105639.pdf>）

有質輕強度高的優異特性。同體積下，碳纖維的重量是鋁的 1/2、鐵的 1/5，然而碳纖維的強度（抗拉強度）卻是鋼的 10 倍。

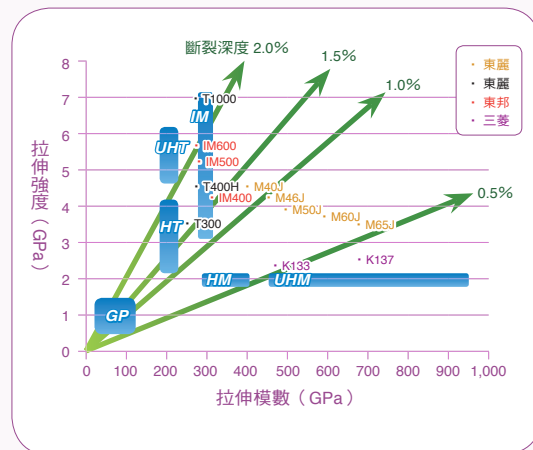
高模數碳纖維的剛性表現佳，而高強度碳纖維的強度表現優。碳纖維由於前驅物、製程及碳化條件不同，製成的碳纖維

碳纖維除了具強度與模數的優異特性之外，長期受力下的尺寸安定性佳。但碳纖維最大的致命傷是耐衝擊性較差，且在強酸作用下會發生氧化反應。

的機械強度及其他物性化性有很大的不同，而依強度與模數的分布，區分為 5 種不同等級：高模數纖維，模數 > 500 GPa；高強度纖維，強度 > 3 GPa；中模數纖維，模數 100 ~ 500 GPa；低模數纖維，模數 100 ~ 200 GPa；一般級纖維，模數 < 100 GPa，強度 < 1 GPa。

碳纖維除了具強度與模數的優異特性之外，長期在受力下不易發生潛變，也就是尺寸安定性佳。另外，它具有耐疲勞性佳、熱傳導率高、摩擦係數小、潤滑性佳、熱膨脹係數小、耐腐蝕性佳、X-ray 透過性佳、比熱及導電性介於非金屬和金屬之間等優點。但碳纖維最大的致命傷是耐衝擊性較差，而且在強酸作用下會發生氧化反應。

即使再過 20 年，碳纖維仍會是高科技的化身。聚丙烯腈系的前驅物牽動著全球碳纖維供給系統，初估每年都有 10% 的成長。這是因為汽車工業輕量化的蓬勃發展，以致碳纖維用量遽增，使得汽車產業成為碳纖維四大應用產業（包含儲能、航太、運動及汽車）之一。碳纖維市場推估到 2018 年總生產量會達 8 萬噸以上，相當於兩千多億日圓，2020 年產量將增至每年十數萬噸。



碳纖維的高強度與高模數靠的是煉碳功力

為滿足區域性需求，碳纖維的生產基地（指碳化製程，非前驅物生產製程）多位於歐美，主要是供應飛機機身用（碳纖維複合材料）。一直以來，聚丙烯腈系前驅物的核心技術幾乎由日本掌握，這些前驅物的生產廠商都是日本公司，而且他們不斷地併購。換句話說，再過 20 年，碳纖維的關鍵技術仍會由少數幾個國家所掌握。

黃博雄
紡織產業綜合研究所