

2007 年德國法蘭克福高科技產業用紡織品展—

高性能工業纖維及其應用紡織品之觀後感

工業技術研究院 材料與化工研究所

蕭凱仁

一、前言

筆者這次參加由「財團法人台灣產業用紡織品協會」主辦的「2007 德國產業用紡織品考察團」，順利帶回今年 6 月 11-14 日在德國法蘭克福舉辦的高科技產業用紡織品展覽(2007 techtextil messe frankfurt)資料，包括「techtextil」及「avantex」兩項全球最重要的高科技產業用紡織品的最新發展趨勢。跟讀者說明，筆者撰寫本文內容「高性能工業纖維及其應用紡織品」取得的資料有三個來源，包括：(1)參展廠商商品目錄資料，(2)展覽會場文宣資料，(3)參展廠商網站資料，將此三方面的相關資料彙整完成，以提供讀者最便利的閱讀與瞭解，除了能夠立即掌握高性能工業纖維及其應用紡織品之最新世界工業動態外，也能從搭配該纖維的基本物性輔助了解，而更能夠充分掌握高性能工業纖維及其應用紡織品之全球商機資訊。

筆者在展覽會場逐一拜訪跟「高性能工業纖維及其應用紡織品」有關的參展廠商攤位，發現許多已成功開發的「高性能工業纖維」還是很熱絡的被展示出來，而他們目前的工作重點則是放置在該纖維的「應用紡織品」上繼續推廣，這次在展覽會上看到許多高性能的工業纖維，有幾種特殊的纖維仍是值得我們注意與了解，在有機纖維方面，包括超高分子量聚乙烯纖維(荷蘭 DSM 公司，商品名稱 Dyneema[®])、高模量低收縮聚酯工業纖維(南韓 HYOSUNG 公司)、安全氣囊用尼龍工業纖維(美國 INVISTA 公司，商品名稱 Cordura[®] & 德國 PHP 公司，商品名稱 StanylenkaTM)、氧化纖維(日本 Teijin 公司，商品名稱 Pyromex[®])、碳纖維(日本 Teijin 公司，商品名稱 Tenax[®])、間位芳香族纖維(美國 DUPONT 公司，商品名稱 Nomex[®])，以及對位芳香族纖維(美國 DUPONT 公司，商品名稱 Kevlar[®] & 日本 Teijin 公司，商品名稱 Twaron[®])等；在無機纖維

方面，包括玻璃纖維(德國 BIW 公司)、矽纖維(白俄羅斯 JSC 公司)及陶瓷纖維(德國 Smart fiber AG 公司；商品名稱 Smartcel™)等。在這次展覽會上也有觀察到的許多不強調纖維強度的高性能工業纖維，它則是被聚焦在產業用紡織品的應用面上，例如具有防火性，或者是具有隔音效果功能上的產品就有很多被展示出來。綜合以上的概況說明，筆者將對以上所提及高性能工業纖維逐一敘述在下列數章節中。

二、參展產品及其廠商代表例

2-1 超高分子量聚乙烯纖維

荷蘭 DSM 公司是世界上第一家將超高分子量聚乙烯纖維(ultra high molecular weight polyethylene fiber；UHMWPE fiber)商業化的公司，超高分子量聚乙烯纖維又被稱之為高強度高模量聚乙烯纖維(high tenacity high modulus polyethylene fiber)，這次 DSM 公司在展覽會場的文宣資料上(INTERNATIONAL Fiber Journal，Page 38-40，JUNE 2007)，極力推薦將超高分子量聚乙烯纖維應用在有海水環境的海運(marine)上(如圖 1 所示)，取代怕海水腐蝕的鋼鐵製品或其他不耐水的合成纖維。

由於超高分子量聚乙烯纖維分子鏈節上只有碳和氫，沒有其它的官能基團，因此無法進行染色，這個缺點已經被美國公 FIBER-LINE 公司解決，該公司使用專業塗佈技術(specialty coating)，將有顏色的膠體塗佈在超高分子量聚乙烯纖維表面上，而賦予顏色，儼然給了超高分子量聚乙烯纖維一個新的生命體，往後超高分子量聚乙烯纖維所製作的產品，不再只是單一白色，而是多采多姿的彩色世界，圖 2 為超高分子量聚乙烯纖維之染色紗範例；該公司不是僅僅將有顏色的膠體塗佈在超高分子量聚乙烯纖維表面上而已，這中間包括了有顏色的膠體與超高分子量聚乙烯纖維表面的粘結力專業技術，在有海水環境的海運上此粘結力必須具有耐海水性及耐日光性。FIBER-LINE 公司可應用的纖維包括：(1)Dyneema®，(2)Fiberglass，(3)Kevlar®，(4)Nomex®，(5)Nylon，(6)PBO，(7)Polyester，(8)Spectra®，(9)Technora®，(10)Twaron®，(11)Vectran®等；可應用的專業塗佈技術包括：(1)abrasion resistance，(2)adhesion enhancement，(3)anti-microbial，(4)color，(5)flame/smoke properties，(6)glow in

the dark , (7)processing improvement , (8)UV resistance , (9)water absorption , (10)water repellency 等。

筆者認為在未來的產業用紡織品市場上，超高分子量聚乙烯纖維仍會是一個具有相當競爭力的高性能工業纖維，因此彙整了展覽會場文宣資料及參展廠商網站資料，以提供國內相關業界廠商參考。



圖 1、超高分子量聚乙烯纖維應用在有海水環境的海運上



圖 2、超高分子量聚乙烯纖維之染色紗範例

超高分子量聚乙烯纖維是使用凝膠紡絲法，將超高分子量聚乙烯先製成半稀薄溶液，經紡嘴(spinneret)擠出後驟冷成凝膠原絲，之後再對凝膠原絲進行萃取和乾燥工程，最後進行高倍率延伸加工，可製得高強度高模量的聚乙烯纖維。超高分子量聚乙烯的溶解是大分子解纏的過程，而凝膠原絲的形成，實際

上是超高分子量聚乙烯大分子，在凝膠原絲中保持著解纏狀態，該狀態為其後的大分子高倍率延伸建立了基礎；高倍率延伸不僅使纖維的結晶度和順向度增加，而且又能使呈褶疊鏈片晶(folded-chain lamellae)的結構向伸直鏈轉換，因此顯著地提高了聚乙烯纖維的強度和模量。目前超高分子量聚乙烯纖維有三種主要的商品上市，它們是荷蘭 DSM-日本 Toyobo 聯合公司的 Dyneema SK60，美國 Honeywell 公司(在 1999 年 Allied Signal 公司與 Honeywell 公司合併，合併之後係以 Honeywell 公司為存續公司名稱，接收 Allied Signal 公司的工業用纖維事業)的 Spectra 900、Spectra 1000 與 Spectra 2000，以及日本 Mitsui 公司的 Tekmilon I 和 Tekmilon II。從中國大陸東華大學化纖研究所獲悉，該所與中紡投資公司合作，也成功研製超高分子量聚乙烯纖維，並且進入批量生產，打破了歷年來由荷蘭、美國及日本長期對這一技術的壟斷；這種纖維目前全球年產量約 8,000 噸，中國大陸目前年產量約 1,000 噸左右，其核心技術全部由大陸東華大學化纖研究所技術移轉過來的。中國大陸研發成員經歷二十多年的努力，逐步克服從紡絲到拉伸等一系列技術難題，並全部採用中國大陸國內市場能拿到的原料實現了商業化產品，該研發單位共申請了 9 項專利，已獲 6 項授權(商業化廠房預計 2008 年 6 月左右才會建廠完成)，最高纖維強度和纖維模量可達 45g/den 及 1580g/den 以上。表 1 為全球目前已商業化的超高分子量聚乙烯纖維之纖維物性比較。

荷蘭 DSM-日本 Toyobo 聯合公司之製程路線為，將 $\overline{M}_w > 1 \times 10^6$ 的超高分子量聚乙烯和溶劑十氫萘置於溶解槽內加熱至 130°C 溶解，製成濃度低於 10% 的半稀薄溶液，先經由孔徑為 0.5mm 的紡嘴擠出，再進入冷卻系統內，將半稀薄溶液絲條冷卻凝固成凝膠原絲，爾後將此凝膠原絲喂入熱延伸板中，再以捲取裝置對其進行熱延伸。纖維的強度和模量會隨著延伸比的增大而提高，其最高纖維強度和纖維模量可分別達到 40g/den 及 900g/den 以上。

表 1、全球目前已商業化的超高分子量聚乙烯纖維之纖維物性比較

公司 及商品名	DSM+Toyobo	Honeywell			Mitsui	
	Dyneema	Spectra	Spectra	Spectra	Tekmilon	Tekmilon

	SK 60	900	1000	2000	I	II
商品名稱						
纖維規格 (den/f)	1000/100	1200/120	1300/240	180/60	1000/200	500/60
單纖細度 (dpf)	10	10	5.4	3	5	8.3
纖維強度 (g/den)	30	30	35	38	33	28
纖維伸度 (g/den)	3.8	3.9	3.4	2.9	3.9	3.9
纖維模量 (g/den)	1000	850	1150	1350	1130	1020

美國 Allied Signal 公司(此購買案發生在 1999 年以前，故本文仍以 Allied Signal 公司為名做說明)購買了荷蘭 DSM 公司的專利權後，對原有製程作了重大改良，該公司製程是將 $\overline{M}_w > 1 \times 10^6$ 的超高分子量聚乙烯和石臘油置於熔解槽內，加熱至 180°C 進行溶解，製得濃度 2-8% 的超高分子量聚乙烯的半稀薄溶液，經捏和器充分攪拌後，使漿料變成均勻溶液，將此均勻溶液輸送進入雙螺桿擠壓機進行混鍊和脫泡後，通過計量幫浦擠出，經孔徑為 1mm 的紡嘴後，先在空氣層中冷凝，再進入水槽冷卻，使紡絲溶液變成凝膠原絲，該凝膠原絲在萃取槽中用三氯三氟乙烷，對包含在凝膠原絲中的石臘油進行萃取，在乾燥箱中進行乾燥，收集在捲取裝置上，之後將乾燥的凝膠原絲喂入熱延伸板中進行熱延伸，其最高纖維強度和纖維模量可分別達到 30g/den 及 1000g/den 以上。

日本 Mitsui 公司之製程路線為，將特性粘度為 5-30dL/g 的超高分子量聚乙烯和平均分子量為 30-1000g/mol 的石臘按一定比例混和，從進料口加入至雙螺桿擠壓機中，加熱至 190°C 熔融捏和，從孔徑為 1mm 的紡嘴擠出，經 1cm 的空氣層冷卻，再進入 20°C 的水槽中冷卻凝固成凝膠原絲，隨後喂入裝有癸烷的萃取延伸槽中，並在 130°C 下進行熱延伸，在捲取裝置上收集製得的聚乙烯纖

維。聚乙烯纖維的強度和模量，會隨延伸比的提高出現規律性的變化，但聚乙烯纖維的最高強度和模量並不高，這是由於纖維中的殘留石蠟不能清除的結果。為了解決這個問題，該公司曾採用增大紡絲延伸比，由此製得的纖維強度有所上升，但模量僅在 590g/den 以下。Mitsui 公司的製程路線所得到的纖維力學性能，比其他兩家公司差的原因，是採用的超高分子量聚乙烯分子量偏低，以及石蠟在延伸過程中並不能完全除盡，但該公司使用的超高分子量聚乙烯溶液濃度，則較前兩種工程路線高出 2 倍以上，此點在對降低生產成本和提高生產能力的因素下是有利的，為改善該公司所製得的纖維力學性能，Mitsui 公司曾對溶劑進行更換實驗，以十氫萘取代石蠟，仍使用 $\overline{M}_w < 1 \times 10^6$ 的超高分子量聚乙烯，從其所製得纖維的力學性能得知聚乙烯的纖維強度雖有較大幅度的上升，但模量仍未被預期提高，由此可以證實一件事，使用較低分子量的超高分子量聚乙烯，將有礙於聚乙烯纖維的力學性能提高。表 2 為全球目前已商業化的超高分子量聚乙烯纖維之製程比較。

超高分子量聚乙烯纖維的高強度、高模量、耐磨、耐蝕和耐光，廣泛應用於繩索、纜繩和漁網，尤其適用於海洋工程，如超級油輪、海洋操作平台、燈塔的固定錨繩，解決以往使用鋼纜繩遇到的銹蝕缺點，以及使用尼龍和聚酯纜繩遇到的腐蝕、水解和紫外線降解等引起纜繩強度降低和斷裂，需經常進行更換的問題。由於高強力聚乙烯纖維比重只有 0.97g/cm^3 ，可自由懸掛在長度無限長的海水中，也解決了以往使用鋼纜繩，因長度過長導致鋼纜繩的自身重量而斷裂。在航空工程中，已應用於飛機的減速降落傘和飛機上懸吊重物的繩索。國際上已將聚乙烯纖維編織成不同織度繩索，取代了傳統的鋼纜繩和合成纖維繩索，發展速度非常快速。超高分子量聚乙烯纖維可以製成多種類型的織物，目前已上市的有防彈衣和防切割手套等，其中以防彈衣最為引入注目，它具有輕柔的優點，防彈效果優於芳香族纖維。另外，超高分子量聚乙烯纖維的耐衝擊性好，且比能量吸收大，是製備複合材料的優良補強纖維，在無需高溫條件下比芳香族纖維為佳，軍事上已用於裝甲兵器的殼體、雷達的防護外殼罩、頭盔等，其中以兵器尤為突出，民生用品上已用作防護擋牌和大型儲罐等，在體育用品上已製成弓弦、雪橇和滑雪板等。

表 2、全球目前已商業化的超高分子量聚乙烯纖維之製程比較

公司及商品名	Honeywell	DSM + Toyobo	Mitsui
項目	Spectra 900	Dyneema SK60	Tekmilon I
	Spectra 1000	Dyneema SK65	Tekmilon II
	Spectra 2000		
溶劑	石臘油	十氫萘	石臘
重量平均分子量 ($\overline{M}_w \times 10^6$)	2	2	<1
濃度 (%)	<10	<10	<25
凝膠原絲成形條件，萃取和拉伸方式	(1)先空氣 (2)後水冷卻 (3)萃取後拉伸	(1)空氣冷卻 (2)不萃取拉伸	(1)先空氣 (2)後水冷卻 (3)在萃取劑中拉伸
蠕變性	好	好	差

2-2 高模量低收縮聚酯工業纖維

在這次展覽會上高模量低收縮聚酯工業纖維(high modulus low shrinkage PET industrial fiber ; HMLS PET industrial fiber)處處可見，本章節以南韓 HYOSUNG 公司為代表例說明，該公司從 1978 年開始發展輪胎簾布用的工業纖維，它們稱此系列纖維為 HSP(high strength PET)，其實就是我們所熟悉的 PET HMLS 纖維，從開始的第一代纖維(regular type)到目前第五代纖維(HSP 50 type)，同時也為了因應不同的用途需求，而發展出非活化紗及活化紗等級，當然使用在輪胎簾布用的工業纖維一定是要活化紗等級，這樣才能促使 PET HMLS 纖維與橡膠結合，以供應優良的接著強度。HYOSUNG 公司也開發了纖維物性優於 PET HMLS 纖維的 PEN HMLS 纖維，在 1948 年 Cook 等人首次對聚萘二甲酸乙二醇酯(PEN)的聚合方法進行報導，但隨後幾十年裡對 PEN 的研究卻相當少見，近年來 PEN 以其優異的力學性能和獨特的熱穩定性重新引起了

人們的注意，PEN 纖維結構中的萘環結構使其主鏈剛性明顯增加，與 PET 纖維相比，PEN 纖維的結晶度、結晶尺寸、玻璃轉移溫度均較高。圖 3 為 PET HMLS 和 PEN HMLS 之應力-應變比較圖，明顯地 PEN HMLS 比 PET HMLS 之纖維強度和纖維模量都更高，纖維伸度也更低。

高模量低收縮聚酯工業纖維具有高強度、高模量、低收縮、耐衝擊及耐疲勞性等優良的物理性能，同時生產成本較低，生產環境較好，因而獲得了迅速發展。高模量低收縮聚酯工業纖維已成為當代四大橡膠骨架材料之一，在乘用車胎、傳動帶、運輸帶、安全帶、水龍帶等方面有著廣闊的應用前景。近幾年來又應用於塗層織物、過濾布、土工布等領域，獲得了良好效果。美國的高模量低收縮聚酯工業纖維開發應用處於領先地位，主要是因其輪胎子午化發展很快，且乘用胎比例很高。例如美國 Goodyear 公司開發出「全聚酯」(胎體骨架材料全用聚酯簾布絲)和「半鋼絲」(胎體骨架材料鋼絲簾布絲與聚酯簾布絲各占一半)輪胎，首先實現乘用車胎子午化、輕型化。該公司採用在聚酯簾布浸膠體系中加入第三代粘合劑，提高了產品與橡膠的結合力，第四代粘合劑為異氰酸酯系列，其粘合力更大及穩定性好的優點。日本乘用子午胎胎體及傳動帶幾乎全用聚酯簾布，歐洲聚酯工業纖維主要應用於膠管、膠帶、傳動帶、水龍帶、運輸帶等橡膠製品領域上，在輪胎的使用量上也在逐年增加當中。高模量低收縮聚酯工業纖維主要有二種技術製程。目前國際先進國家的高模量低收縮聚酯工業纖維生產技術大部份為高速紡絲牽伸一步法，二步法則是先紡製預延伸絲(partially oriented yarn ; POY)，再延伸成全延伸絲((fully oriented yarn ; FOY)。就纖維性能而言，一步法與二步法差異不大，但就產能而言，一步法則優於二步法。

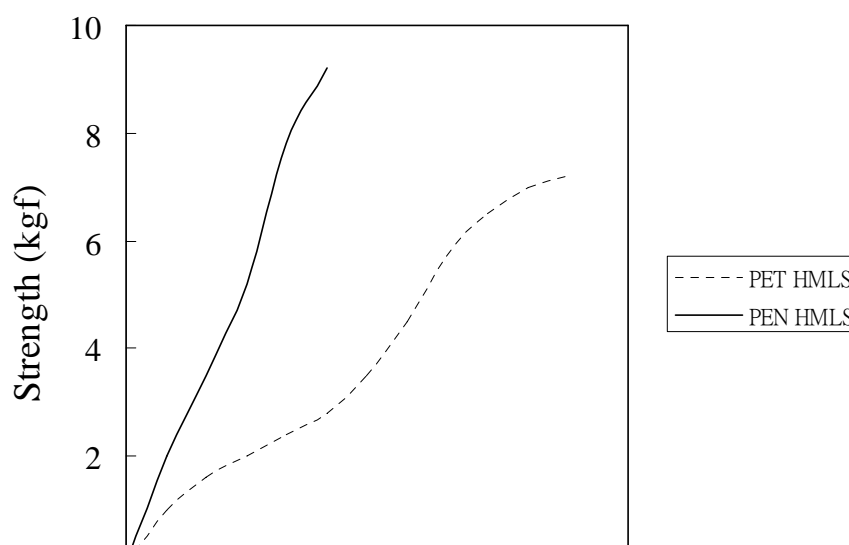


圖 3、PET HMLS 和 PEN HMLS 之應力-應變比較圖

2-3 安全氣囊用尼龍工業纖維

1990 年全世界汽車安全氣囊的銷售量 400 萬套，到 1994 年時猛增到 2,000 萬套，2002 年時為 9,000 萬套，2006 年已達 1 億 2,000 萬套以上，市場潛力不容忽視。在汽車安全氣囊市場上，尼龍 66 工業纖維仍是一支獨秀的纖維，圖 4 為尼龍 66 工業纖維應用於汽車安全氣囊示意圖，美國 INVISTA 公司則是目前全球供應安全氣囊袋用工業纖維的最大廠商，尼龍 66 工業纖維以前是由 DUPONT 公司掌管，目前則由成立的新公司 INVISTA 接手尼龍 66 工業纖維之相關業務。最新消息顯示 INVISTA 公司在中國上海設立一家氣囊纖維工廠，投資 5000 萬美金，生產尼龍 66 工業纖維(商品名稱：Cordura[®])，其年產能約 11,000 噸左右，該公司已於 2007 年 4 月 26 日舉行開工動土典禮，正式宣佈 INVISTA 公司在汽車安全氣囊的業務觸角延伸到中國的汽車市場上。而今尼龍 46 工業纖維除了具有尼龍 66 工業纖維的基本物性外，同時擁有更佳的耐熱性質，可以應用於汽車安全氣囊上。目前在世界上只有德國的 PHP(polyamide high performance)公司有生產尼龍 46 工業纖維(商品名稱 StanylenkaTM)。尼龍 46 工業纖維和尼龍 66 工業纖維相比，具有更高的結晶度和密度，較小的長周期和無定形區尺寸，其結晶顆粒大小和順向度則差不多。由於尼龍 46 工業纖維分子鏈結構規整，又不容易產生交聯和分支化，所以其結晶性能很好，不但結晶度比尼龍 66 工業纖維高，而且它的結晶速率也明顯比尼龍 66 工業纖維快速。



圖 4、尼龍 66 工業纖維應用於汽車安全氣囊示意圖

從表 3 中得知尼龍 46 工業纖維的熔點、玻璃轉移溫度、結晶溫度及熔融焓都比尼龍 66 工業纖維高，最值得注意的是尼龍 46 工業纖維熔點比尼龍 66 工業纖維高出 28°C，這為開發尼龍 46 工業纖維在特殊的應用領域上提供了強而有力的條件。尼龍 46 工業纖維具有與尼龍 66 工業纖維相似的應力-應變曲線，都呈現出「S」形狀，而且尼龍 46 工業纖維更為強韌，特別是隨著溫度的上升時，尼龍 66 工業纖維的曲線下降多於尼龍 46 工業纖維，這說明了尼龍 46 工業纖維的強度及韌性都比尼龍 66 工業纖維優良，特別是在高溫下更為明顯。尼龍 46 工業纖維在 200°C 下處理 6 小時以上時，其強度下降在 10% 以內，而尼龍 66 工業纖維則下降更多，這表示了尼龍 46 工業纖維具有更好的熱性質。尼龍 46 工業纖維在受熱時尺寸很穩定，在 200°C 範圍內其熱收縮低於 5%，而尼龍 66 工業纖維則大很多，尼龍 46 工業纖維的沸水收縮率也明顯低於尼龍 66 工業纖維，這也說明了尼龍 46 工業纖維尺寸穩定性較好。在纖維的楊氏模量與溫度之關係方面，儘管尼龍 66 工業纖維在低溫時模量比尼龍 46 工業纖維高，但隨著溫度的上升，尼龍 66 工業纖維的楊氏模量則下降的很快，在 130°C 以上時尼龍 46 工業纖維的楊氏模量已高於尼龍 66 工業纖維。另外，尼龍 46 工業纖維的粘彈性能和蠕變性能均優於尼龍 66 工業纖維，這也顯示了尼龍 46 工業纖維比尼龍 66 工業纖維有更好的尺寸安定性。

表 3、尼龍 46 工業纖維和尼龍 66 工業纖維之熱性質比較

工業纖維種類	T _m (°C)	T _c (°C)	ΔH _f (J/g)	T _g (°C)
尼龍 46	290	265	98	78
尼龍 66	262	218	77	66

尼龍 46 工業纖維在其他應用領域方面敘述如下：(1)縫紉線：一方面要求在加工時耐高溫，良好的韌性和均勻的摩擦性能，另一方面在應用時要有好的尺寸穩定性，能夠經得起受沸水及乾熱等處理。無疑地，尼龍 46 工業纖維完全可以滿足縫紉線的要求，同時由於其熔點高於聚酯工業纖維及尼龍 66 工業纖維，其耐高溫性能也是最好的，(2)輪胎簾布：尼龍 46 工業纖維在 120°C 時經受 21.8cN/dtex 拉伸時沒有變化，在 160°C 時熱收縮僅為 3%。硫化時尼龍 46 工業纖維在 170°C 時其強度沒有損失，在 180°C 下僅損失 7%，而尼龍 66 工業纖維在 163°C，經 1 小時處理後便損失 7% 的強度，因而尼龍 46 工業纖維是一種比尼龍 66 工業纖維更好的輪胎簾布材料。更重要的是尼龍 46 工業纖維克服輪胎簾布平點效應比尼龍 66 提高 30% 以上，也比聚酯工業纖維好，這些優點都可以說明尼龍 46 工業纖維可以做為輪胎簾布用的好材料，(3)纖維加固的橡膠製品：尼龍 46 工業纖維具有較好的耐磨性及化學穩定性，因此可以用來製造安全氣囊袋、安全帶、傳動帶、水龍帶等製品。(4)織物：由於尼龍 46 工業纖維形狀穩定性和機械性能很好，而且還有較好的親水性和化學穩定性，可以用其織物來做濕或乾的過濾材料，特別是高溫時更適合。隨著人們對尼龍 46 纖維工業纖維材料的深入研究，尼龍 46 工業纖維會越來越多地被應用到各個領域，成為尼龍纖維系列中較有開發前景的品種。

2-4 氧化纖維/碳纖維

在這次展覽會上筆者發現一個很奇特的現象，就是很多販賣產業用紡織品機器設備的參展廠商，在展示他們公司的機器給客戶時，常常看到他們使用一種黑色系列的紗，筆者猜測應該是碳纖維，經詢問後確定就是碳纖維。這次展覽會日本 Teijin 公司就有展出氧化纖維(oxidized fiber)及碳纖維(carbon fiber)，因此本章節就以日本 Teijin 公司為代表例說明之。

Teijin 公司生產地氧化纖維及碳纖維，其商品名稱分別為 Pyromex[®]及 Tenax[®]，氧化纖維是在生產碳纖維時的前一段製程產品(詳細解釋見下段說明)。在這次展覽會上 Teijin 公司極力推薦該公司的 Pyromex[®]纖維，在該公司商品目錄資料上獲知，Pyromex[®]纖維的限氧指數(limiting oxygen index；L.O.I.)達到 50-60，這是一個相當高的限氧指數，它具有自行消火性(self-extinguish)及不

會有熔滴現象(non fusible)，一般防火性的纖維材料其 L.O.I.值達到 26 以上，基本上就具有自行消火性(或稱為難燃性)，比較其他不具有自行消火性的纖維，其 L.O.I.值如後所示：棉(18)、嫘縈(20)、壓克力纖維(20)、聚酯纖維(22)、尼龍纖維(22)及羊毛(25)，我們就可以知道 Pyromex[®]纖維確實具有優良的防火功能。Pyromex[®]纖維除具有良好的耐熱性、絕緣性、抗化學藥品性以外，還擁有無機纖維所沒有的良好紡織加工性能、懸垂性、柔軟性；可製成電焊服、爐前服、防火服、隔熱材、密封材等，在汽車方面經常被應用於隔熱材、防音材、煞車片及離合器表面材料等用途上(如圖 5 所示)。Teijin 公司生產的碳纖維(Tenax[®])等級更高，Tenax[®]纖維具有質輕、高強度、高彈性係數、耐高溫、耐化學藥品、尺寸安定性良好、耐衝擊等優異性能，一般在汽車方面的應用有汽車骨架、緩衝器、彈簧片、引擎零件等用途上，在更高層次的用途上則可應用在飛機及人造衛星等的引擎零件製作材料上(如圖 6 所示)。

碳纖維的種類有下列幾種區分法：(一)依據製造碳纖維的原料可以分為下列四類：(a)Rayon 系(纖維素纖維系)，(b)Lignin 系(纖維素纖維系)，(c)PAN 系(聚丙烯腈系)，(d)Pitch 系(瀝青系)。(二)按照特性可區分為：(a)普通碳纖維：抗張強力在 120kg/mm² 以下及彈性率在 10,000kg/mm² 以下者，(b)高強度高彈性纖維：抗張強度在 150kg/mm² 以上，而彈性率則在 17,000kg/mm² 以上者稱之。(三)依處理溫度的不同來分類：(a)耐熱質：加熱處理溫度為 200-350°C，此階段纖維就是上一段敘述的氧化纖維，可做電氣絕緣體及耐火材料，(b)碳素質：加熱處理溫度為 500-1,500°C，供電氣傳導性材料用，(c)石墨質：加熱處理溫度在 2,000°C 以上，其耐熱性與電氣傳導性都會增加。(四)按碳纖維製品的形狀可分為：(a)短纖維，(b)長纖維，(c)纖維束，(d)交織物，(e)氈毯，(f)編織物。表 4 為碳纖維的原料及其碳化率歸納比較。



圖 5、Pyromex[®]氧化纖維之應用：隔熱材、煞車片及離合器等表面材料



圖 6、Tenax[®]碳纖維之應用：汽車、飛機、人造衛星等引擎零件材料

表 4、碳纖維的原料及其碳化率歸納比較

原始材料	分子式中所含元素	碳素含量 (wt%)	碳化率 (wt%) (對原料)	碳化率 (wt%) (對含有碳素)
Rayon 系	$(C_6H_{10}O_5)_n$	45	15-20	30-40
Lignin 系	CHOS	-	50	-
PAN 系	$(C_3H_3N)_n$	68	40-45	53-59
Pitch 系	CH	95	85-90	90-95

碳纖維的基本性質說明如下：(1)密度小重量輕，(2)彈性率高比彈性率亦高，(3)抗張強度大比強度亦大，(4)纖維單纖細度尺寸均齊，纖維加工效果優良，(5)傳導性優，(6)耐熱性卓越，能耐 3000°C 的高溫，(7)耐化學藥品腐蝕性強，(8)尺寸安定性良好，(9)不會發生潛變變形，具有高的靜疲勞強度，(10)熱膨脹係數小，熱衝擊性強，(11)熱傳導率大，(12)石墨製品富有自己潤滑性，(13)帶有電氣傳導性，(14)可撓性大，(15)表面積大，(16)容易發生活性化，(17)所含不純物極少，不會污染與其接觸之液態氣體，也不沾污熔融的金屬，(18)碳素質能吸收電波，而石墨質則會反射電波，(19)彈性率會隨著處理溫度的升高而遞增，(20)抗張強度起初會隨著處理溫度的升高而漸增，但在 1600°C 附近時則達到最高峰，其後又逐漸下降。

碳纖維及其複合材料之用途：由於碳纖維具有質輕、高強度、高彈性係數、耐高溫、耐化學藥品、尺寸安定性良好、耐衝擊等優異特性，故為各種工業廣泛採用：(一)太空方面：人造衛星、火箭、太空船、太空梭、噴射引擎、

民航機、戰鬥機、直昇機、機身、機尾、舵、升降梯等，(二)交通運輸方面：汽車骨架、螺旋槳軸心、車輛、車胎、緩衝器、彈簧片、引擎零件、船舶補強材料等，(三)運動休閒器材方面：高爾夫球桿、釣桿、網球拍、羽毛球拍、獨木舟、遊艇、帆船、滑雪板、水中快艇、自行車等，(四)其他工業方面：化學設備、輸送管、汞槽、壓力容器、工業用機器人、義腳、纖維機械、電腦、雷達、複印機等。

2-5 芳香族纖維

筆者在這次展覽會上也發現有很多參展廠商在展示他們公司的機器產品時，經常使用另外一種黃色系列的紗，經查證它就是 Kevlar[®]纖維，是屬於芳香族纖維的一種，目前在世界上最著名的芳香族纖維仍是以美國 DUPONT 公司生產的 Nomex[®]纖維(間位式)及 Kevlar[®]纖維(對位式)最為有名，尤其是 Kevlar[®]纖維。1990 年發生的第一次波斯灣戰爭(當時稱為「沙漠風暴」戰爭)，美軍所穿著的軍用防彈衣及配戴的鋼盔，就是使用 Kevlar[®]纖維所製造的產品，在戰後的傷亡評估方面確實有效降低阿兵哥的傷亡比例，這是 Kevlar[®]纖維應用在軍事用途上的有利證據，而在 2003 年發生的第二次波斯灣戰爭，美軍所穿著的軍用防彈衣及配戴的鋼盔材質還是使用 Kevlar[®]纖維，為什麼呢?因為有了第一次波斯灣戰爭成功經驗，理論上在第二次波斯灣戰爭美軍所穿著的軍用防彈衣及配戴的鋼盔材質是不會被更換的，雖然目前有更好的纖維材料被開發出來，但基於實際經驗應用方面，Kevlar[®]纖維畢竟有經過大戰的洗禮，在「高性能工業纖維」領域方面仍佔有一席之地，第二次波斯灣戰爭再一次證明 Kevlar[®]纖維所製作的軍用防彈衣及配戴的鋼盔材質，確實有效降低阿兵哥的傷亡比例。

先敘述間位式 Nomex[®]纖維，纖維 Nomex[®]纖維是屬於芳香族纖維的一種，它是由美國 DUPONT 公司發展出來的產品，它的天然顏色為淡黃色，具有優異的形態安定性、耐高溫性及電絕緣性，可以應用在熱空氣過濾袋、熨燙機、緊壓機的護套、耐高溫防護衣服、橡膠輸送帶、水龍帶及窗簾織物等產品上。Nomex[®]纖維的外觀和尼龍纖維頗為相似，但在許多物理性質上則差異甚多，Nomex[®]纖維在 700°F 下不熔融也不流動，但超過 700°F 則迅速衰解，Nomex[®]纖維的初始係數比尼龍纖維大三倍，它的耐 α 、 β 、 γ 、X-射線、抗蒸氣性，以及

耐高溫性均較尼龍纖維為優，在固定長度的 Nomex[®]纖維，也不會受相對濕度的影響而改變，形態安定性相當優異。Nomex[®]纖維除了具有上述良好的耐高溫、電絕緣、機械堅韌性及柔軟性外，最重要的一點，就是它的售價比一般芳香族纖維低廉，因此更廣泛用於馬達及發電機方面，例如導體包布、圈包布、槽的襯墊、整流器 V-環、絕緣套、冷凍箱、鉛及絲錐絕緣、變壓器等。Nomex[®]纖維最初是專供防火目的之用，例如太空衣、嬰兒睡衣、賽車選手衣服、鑄造人員工作服等，之後逐漸拓展應用於高溫的濾布、耐熱性輪胎、強化塑膠加強劑、紡織整理機的導帶、馬達與發電機的各种電絕緣機器及配件、補胎劑、輸送帶、煞車片等方面材料(如圖 7 所示)，在芳香族纖維競爭的激烈市場中仍佔有很好的領先優勢。

Kevlar[®]纖維的抗張強度，比鋼絲大五倍，比鋁絲大十倍。Kevlar[®]纖維在 1965 年美國 DUPONT 公司在試驗階段時，命名為 Fiber B。一群科學工程人員繼續研究，希望此種高分子聚合體的物理性質及化學性質能達到優異的標準，最初獲得的是乳白色稀薄的高分子聚合體溶液，當時研究人員覺得要將這種溶液抽出纖維困難度相當高，但經過多次的紡絲試驗，終於製得 Kevlar[®]纖維，其纖維模量超過 400g/den 以上，抗張強度為玻璃纖維的 2.5 倍。Kevlar[®]纖維的組成成份為對一次苯基二胺(p-phenylene diamine)與異苯二酸(isophthalic acid)，在低溫下產生縮合聚合反應形成高分子聚合體，將此高分子聚合體過濾出來，經洗淨及烘乾後，用乾噴濕式紡絲法在強酸溶液中紡絲，爾後在 51-100°C 高溫下從紡嘴擠壓成纖維，通過空氣層後即進入 0-4°C 冷水中，最後將纖維洗淨，捲成絲餅，烘乾後，即為 Kevlar[®]纖維產品。Kevlar[®] 49 具有優良的結晶結構，在高溫之下它的形態非常穩定，有很高的抗張強度及抗張彈性係數，但斷裂伸度很小；它能耐高溫，耐火焰燃燒，能抵抗一般化學品以及有機溶劑的侵蝕(除了強酸強鹼外)，由於它不像玻璃纖維及石墨纖維等容易脆斷，故可用普通織布機編織成織物。商業上常用的 Kevlar[®] 29 及 Kevlar[®] 49 兩種纖維的物理性質比較如表 5 所示。Kevlar[®]纖維的用途說明如下：(1)可用於輪胎、機械橡膠、熱塑膠性樹脂等方面，(2)可用於繩索、繩纜、防護手套、防彈衣、絕緣性等材料等產品(如圖 8 所示)，(3)可用於樹脂補強、混成複合材料、太空船內耐高壓容器，火箭引擎外殼、競賽船艇、運動器材等領域。



圖 7、Nomex[®]纖維之應用：補胎劑、輸送帶、煞車片等材料

表 5、二種 Kevlar[®]纖維之物理性質比較

物理性質	Kevlar [®] 49	Kevlar [®] 29
比重 (g/cm ³)	1.44	1.44
1.5 丹尼纖維之直徑 (μm)	12	12
吸水率 (%)	4.6	3.9
破壞強度 (MPa)	30.3	32.8
破壞伸度 (%)	2.3	3.9
初始係數 (Gpa)	124.1	69.1
最大係數 (Gpa)	137.9	96.5
計算之軸向壓縮模數 (Gpa)	75.8	40.7
彎曲係數 (Gpa)	105.5	53.1
動態係數 (Gpa)	137.9	96.5



圖 8、Kevlar[®]纖維之應用：防護手套、防彈衣、絕緣性等材料

2-6 高性能無機纖維

以上所提及的高性能工業纖維係屬於有機纖維領域，本章節將介紹無機纖維方面的高性能工業纖維。這次在展覽會場上所看到的三種無機纖維類的高性

能工業纖維，他們分別是玻璃纖維(德國 BIW 公司)、矽纖維(白俄羅斯 JSC 公司)及陶瓷纖維(德國 Smart fiber AG 公司；商品名稱 Smartcel™)，玻璃纖維(glass fiber)、矽纖維(silica fiber)及陶瓷纖維(ceramic fiber)實際上都是屬於二氧化矽(SiO₂)的化合物系列，在商業上的區分為玻璃纖維(SiO₂ 含量：54%，耐熱溫度：500℃)、矽纖維(SiO₂ 含量：94-96%，耐熱溫度：900℃)及陶瓷纖維(Al₂O₃+SiO₂ 含量：99%，耐熱溫度：1400℃)。此三種無機纖維的使用用途可因應耐熱溫度的不同而做適當的運用，它們一般常常被使用在汽車應用方面，例如馬達用的絕緣材、隔熱材、隔音材及防火材等方面(如圖 9 所示)，當然耐熱溫度最高的陶瓷纖維也被應用在太空領域上，例如應用在製作太空梭引擎的耐熱材料上。更詳細的玻璃纖維基本物性如下段所述。

玻璃纖維的主要成份為矽砂(即 SiO₂)與石灰石，以及其他的成分如氫氧化鋁、蘇打灰及硼砂等，此等成分的用量視所需製造的玻璃纖維性質而定，例如提供電氣絕緣用者與需要耐化學藥品侵蝕者，此兩種用途各異的玻璃纖維，其製造時的混合體配方也就不相同。普通代表性的玻璃纖維是用矽砂、蘇打灰與石灰石混合置於熔爐中熔化而製成，所生成的化合物沒有一定的化學組成，也無結晶作用發生。在玻璃纖維的構造中，金屬離子的存在是為改善純矽的某些性質，例如透明的矽具有許多構成良好玻璃纖維的特性，但卻難以熔融成絲，因此某些金屬氧化物即被用來當做催熔劑使用，但是某種金屬氧化物不但對玻璃纖維無益，甚至有不良影響，所以金屬氧化物類別的選擇也是一件很重要的事，茲列舉玻璃纖維中一些較常用的金屬氧化物及其優劣點：(1)Na₂O：可減低矽的熔點和縮短提煉時間，但會降低玻璃纖維的強度和水的侵蝕性，(2)CaO：可防水的侵蝕性，(3)Al₂O₃：可減少透明消失的傾向，增加對氣候變化的抵抗性，(4)B₂O₃：可增加玻璃纖維的熔解度，(5)ZnO：可增加玻璃纖維的耐酸性，(6)TiO₂：可減少玻璃纖維的粘度性，(7)BaO：可具有催熔能力，增加耐天候性。玻璃纖維顯著的性質為耐熱、不燃燒、防蛀不發霉及耐化學藥品侵蝕。由於玻璃纖維伸度小和不耐摩擦，對皮膚有刺激性，故不適合製成衣著，可應用於燈罩、帳篷、紗框、傢俱套罩及桌巾等用途的防火織物，也可製成濾布、燈蕊、繩索、編織帶與絕緣用管形套、電纜包覆線、增強塑膠絕緣膜、馬

達用的絕緣材料等，也適合做隔熱材及防音材。表 6 為玻璃纖維的特性和缺點說明。



圖 9、高性能無機纖維之應用：絕緣材、隔熱材、隔音材、防火材等

表 6、玻璃纖維的特性和缺點

特 性	缺 點
<p>幾乎沒有吸濕性</p> <p>尺寸安定性優，富有耐熱性</p> <p>不燃性，耐天候性優</p> <p>具有電氣絕緣性</p> <p>耐化學藥品性、耐腐蝕性強</p> <p>彈性率高、伸張性極低</p> <p>熱傳導率極低，即隔熱性能佳</p> <p>防音性優異</p>	<p>耐摩擦性弱</p> <p>對人體皮膚有刺激性</p> <p>伸度很小</p> <p>表面平滑缺乏相互抱合性</p> <p>染色困難</p> <p>紗不能打結</p> <p>製品有脆性</p> <p>比重大</p>

三、結語

在台灣傳統產業中，基礎最雄厚也最具國際競爭力莫過於纖維紡織產業，但觀察近幾年國內紡織產業的動向，其面臨中國大陸及歐美市場的競爭，工業纖維紡織品的開發是非常明確的指標。近年來工業纖維紡織品受到紡織工業強國的重視，對工業用紡織品而言，日本、美國、德國國內分別佔有 40、30，及 25%的市場，均較我國目前的 10%來的高，顯示我國雖以生產衣著用聚酯纖維聞名，但在工業纖維的「數量與品質」表現上仍顯不足，因此我國在重視衣著用纖維產量發展的同時，亦應積極從事具有成長潛力的工業纖維開發與生產。

近年來，台灣紡織業係以「功能性紡織品」在世界市場上聞名，以目前台灣廠商現有的能量，確實是有「能力」進軍全球「功能性產業用紡織品市場」，這點對台灣產業用紡織品來說，是很好的一件事；另外在工業纖維方面(例如：輪胎簾布用工業纖維)，台灣也已漸漸拉近與世界紡織工業強國的腳步，但在高性能纖維方面(例如：碳纖維、芳香族纖維等)，確實仍跟不上這些產業用紡織品的工業強國，在這方面確實值得我們國內的各研發單位及產業界，再深思、再反省與再努力。

四、參考文獻

1. <http://www.techtextil.com>
2. <http://www.fiberjournal.com>
3. <http://www.techtextiles.com>
4. <http://www.dyneema.com>
5. <http://www.honeywell.com>
6. <http://www.toyobo.co.jp>
7. <http://www.invista.com>
8. <http://www.biw.de>
9. <http://www.polotsk-psv.by>
10. <http://smartfiber.de>
11. <http://tohotenax.com>
12. <http://www.dupont.com.tw/>