

國外公差報告

國防部軍備局中山科學研究院
(九十五)年度國外公差心得報告

出國單位	第一研究所 航材組	出國人員 級職姓名	聘用技士 李乘清 聘用技士 林永崑
單 位	審 查	意 見	簽 章
一級單位			
計 品 會			
政戰綜合 處			
企 劃 處			
批		示	

國外進修(公差)人員返國報告主官(管)審查意見表

本次國外公差係配合本所執行民生材料發展應用科技專案研究計劃，赴美國參加美國汽車工程協會第 24 屆煞車系統國際研討會(Society of Automotive Engineering, SAE)及參加國際知名廠家之相關產品與設備展示會，出國期間並參訪複合材料製造商 Cyctec 公司。本次研討會共計有 24 個國家 800 餘人參加，共計有先進摩擦材料、煞車系統設計、煞車異音分析與防制(NVH)及測試系統等相關文獻發表，展示會場中則有摩擦元料、製程裝備、製程檢驗設備、先進複合基摩擦片與隔音片(Shim)等 30 餘家國際知名廠商參展。研討會中參加了各場次之文獻發表，瞭解煞車系統從材料到系統測試的先進技術，並蒐集了先進複合摩擦材料之研發趨勢；展示會場中，見到了最新的非破壞性之材料 3-D 即時彈性常數量測儀等先進設備。此等均可做為本組發展先進民生材料之重要參考。其心得報告與建議事項中有以下幾點值得予以關切強調：

- (1) 摩擦材料為各種運輸器材最重要之保安零件，國際市場龐大，各國均戮力於此方面之研究與生產。尤其在節能意識逐漸被重視的情況下，具輕質、耐高溫、耐磨耗、無環保危害的纖維強化陶瓷基摩擦材料(CMC)及高鋁、矽介金屬摩擦材料(MMC)等高附加價值產品將取代傳統非石綿系摩材(NAO)及半金屬基摩材，並為歐、美、日等先進國家目前極力發展的方向，在民生及航太之應用上具有極大之潛力，為本所下一階段適合發展之題目。
- (2) 煞車振動與異音(Squeal)是煞車系統最棘手之問題，由於異音的產生牽涉到整車系統、大氣環境、路況及材料本身，理論甚為複雜，惟其影響到摩擦材料的可被接受性，是故為不得不解決之問題，本次研討會即有近 50% 的論文探討此方面之分析與防制技術，因此本所在相關科專計畫中也應適時納入評估，以免與國外差距太遠。
- (3) 煞車系統之測試驗證為確保安全與材料品質與取得商機之必要手段，目前

SAE 已訂有相關國際規範，為本所執行科專與創造產業產值之不可忽略之一環，應善加規劃執行。

依本院 85.11.25 (85) 蓮菁字 15378 號令，返國報告上呈時應附主官評審意見

報 告 資 料 頁			
1.報告編號： CSIPW-96F-E0004	2.出國類別： 考察	3.完成日期： 96.02.11	4.總頁數： 62 頁
5.報告名稱： 飛機系統關鍵技術整合應用三年計畫(3/3)航空關鍵製程分項科專計畫 赴美參加研討會及訪廠之公差報告			
6.核准文號	人令文號	(95)選返字第 0950011191 號	
	部令文號		
7.經 費		新台幣：218,749 元	
8.出(返)國日期		95.10.07 至 95.10.14	
9.公差地點		美國	
10.公差機構		中山科學研究院第一研究所	
11.附 記			

行政院及所屬各機關出國報告
(出國類別：考察)

(裝

釘 (飛機系統關鍵技術整合應用三年計畫(3/3)航空關鍵製程分項科專計畫赴美參加研討會及訪廠之公差報告)

服務機關：中山科學研究院
第一研究所

出國人職稱：聘任技士、
聘任技士

姓名：李乘清、林永崑

出國地區：美國

出國期間：95.10.07 至 95.10.14

報告日期：96.02.11

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：飛機系統關鍵技術整合應用三年計畫(3/3)航空關鍵製程分項科專計畫赴美參加研討會及訪廠之公差報告

頁數 55 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：中科院一所/李乘清/04-27023051 轉
503030

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

李乘清/中科院/一所/荐聘技士/04-27023051 轉 503030

林永崑/中科院/一所/荐聘技士/04-27023051 轉 503714

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：

95.10.07-95.10.14

出國地區：

美國

報告日期：95.12.26

分類號/目

關鍵詞：複合材料、摩擦材料、介金屬、纖維強化陶瓷基、異音。

內容摘要：（二百至三百字）

本報告中內容涵蓋赴美國參加美國汽車工程協會第 24 屆煞車系統國際研討會及參訪 Cytec 公司之複材預浸料製造工廠，瞭解國際上有關先進摩擦材料、煞車系統設計、煞車異音分析與防制及測試系統等技術與市場發展趨勢及研討複材預浸料之材料選用與發展趨勢，包括纖維強化陶瓷基及介金屬摩擦材料等先進製造技術。並於展示會場中搜集有關摩擦元料、製程裝備、製程檢驗設備、先進複合基摩擦片與隔音片等裝備資料。報告中亦針對煞車系統之國際規範測試要求做一綜論與整理。

本文電子檔已上傳至出國報告資訊網 (<http://report.gsn.gov.tw>)

行政院及所屬各機關出國報告審核表

出國報告名稱：飛機系統關鍵技術整合應用三年計畫(3/3)航空關鍵製程分項科專計畫赴美參加研討會及訪廠之公差報告	
出國計畫主辦機關名稱：中山科學研究院第一研究所	
出國人姓名/職稱/服務單位：李乘清/聘任技士/中科院第一研究所 林永崑/聘任技士/中科院第一研究所	
出國計畫主辦機關審核意見	<input type="checkbox"/> 1.依限繳交出國報告 <input type="checkbox"/> 2.格式完整 <input type="checkbox"/> 3.內容充實完備 <input type="checkbox"/> 4.建議具參考價值 <input type="checkbox"/> 5.送本機關參考或研辦 <input type="checkbox"/> 6.送上級機關參考 <input type="checkbox"/> 7.退回補正，原因： <input type="checkbox"/> 不符原核定出國計畫 <input type="checkbox"/> 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容 <input type="checkbox"/> 內容空洞簡略 <input type="checkbox"/> 未依行政院所屬各機關出國報告規格辦理 <input type="checkbox"/> 未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔 <input type="checkbox"/> 8.其他處理意見：
層轉機關審核意見	<input type="checkbox"/> 同意主辦機關審核意見 <input type="checkbox"/> 全部 <input type="checkbox"/> 部分_____（填寫審核意見編號） <input type="checkbox"/> 退回補正，原因：_____（填寫審核意見編號） <input type="checkbox"/> 其他處理意見：

說明：

- 一、出國計畫主辦機關即層轉機關時，不需填寫「層轉機關審核意見」。
- 二、各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。
- 三、審核作業應於出國報告提出後二個月內完成。

目 錄

壹、出國目的及緣由.....	1
貳、公差心得	
2.1 參加第二十四屆制動器國際研討會及展示會.....	3
2.2 參訪 Cytec 複合材料公司	26
參、效益分析	46
肆、國外工作日程表.....	49
伍、社交活動.....	51
陸、建議事項.....	52

壹、出國目的及緣由

本院為推廣軍民通用科技，由經濟部委辦『飛機系統關鍵技術整合應用三年計畫』，以建立民生產業所需之關鍵材料技術開發等相關能量。為充份掌握全球新材料與製程技術發展趨勢與市場需求，吸取國外先進國家發展經驗及技術，以配合未來科專計畫建案需求，本組派員於10月7日至10月14日赴美國德州參加第二十四屆制動器國際研討會及展示會、參訪Cytec公司複材預浸料工廠，以瞭解制動器及複材預浸料技術之最新應用趨勢及市場需求，吸取國外先進國家發展經驗及技術，並搜集摩擦材料之研發趨勢，及觀摹最新製程技術與檢測設備，以作為科專計畫研發創新之重要參考，將有助於計畫執行與未來研發方向之訂定，並提供國內相關業者參考，可利於尋找適合的業界合作廠家，持續順利推動科專計畫。

本次公差之主要任務如下：

- (1) 參加第二十四屆制動器國際研討會及展示會，研討制動器之材料發展趨勢、材料配方設計、製程開發技術、制動器異音與振動控制、模態建構與模擬分析、功能檢測、製程加工變數控制及搜集先進測試裝備。
- (2) 取得先進摩擦介金屬材料(MMC)及纖維強化陶瓷

基摩擦材料之技術資料，供本計畫擬定發展方向
與能量建構參考。

- (3) 參訪 Cytec 公司之複材預浸料製造工廠，研討複
材預浸料之材料選用與發展趨勢。

貳、公差心得

2.1 參加第二十四屆制動器國際研討會及展示會

美國汽車工程協會(The Society of Automotive Engineer, SAE)為國際上有關汽車工程發展與檢測標準之最大法人機構。第二十四屆美國汽車工程協會制動器國際年會(The 24th SAE International Annual Brake Colloquium & Exhibition)是針對車用煞車系統的材料發展、異音防制、系統設計及檢測技術所舉辦之研討會，並同時舉辦國際知名大廠的材料與產品展示。本次會議於美國德州 Grapvine 舉行，共有來自 24 個國家、800 餘人參加，為一大型國際研討會。研討會議程計安排三天半時間，其中包含 6 個場次共 42 場演講，由於場次安排緊湊並同時舉行，因此有二個場次無法參加。台灣除本組人員外，僅有中華民國摩擦材料學會游銘泉顧問參加，未有其它國內單位與會。本次會議之重要主題如下：

- 先進摩擦材料
- 配方設計
- 煞車系統測試
- 振動與噪音分析(NVH)
- 振動與噪音抑制方法

本報告主要針對材料製程作進一步探討，其重點與心得如下：

2.1.1. 摩擦材料最佳化配方設計

摩擦制動材料必須同時滿足高摩擦係數、低磨耗率、熱安定、高熱傳與無環境污染等相互矛盾的條件，因此在材料設計上，必須採用多種物質混合的複材體方可達成，每種成份的含量是一種最佳化(Optimize)的設計結果，而這種最佳化的配方與製程通常被列為商業機密保護，不易獲得，本次研討會亦無材料配方的文獻被發表。

摩擦材料內部通常會包括 10 種以上之添加物，以預成形、熱壓後製成。各成份間的相互作用效應複雜，理論不易被提出。因此，摩擦材料的配方設計通常是使用試誤法(Trial & Error)的方式求得，再加上工程經驗進行微調。通常，這樣的傳統配方設計方式將導致大量的試驗、長研發時間與高研製經費的結果。

為具有較高的配方設計效率，有一些方式被提出，提供 Trial & Error 外的另一思考模式：

(i) 黃金比例迫近法(Golden Section Approach)

所謂黃金比例是指滿足：

$$r^2+r-1=0 \text{ 之解；}$$

$$\text{即 } r=0.618 \text{ 及 } r=-1.618$$

由統計分析的結果發現，在未知的情況下，初始值以

$$r^n, n = 1, 2, 3, \dots (r=0.618)$$

做為起始值，通常會有不錯且容易收斂的結果。也因此，此法被使用在摩材各添加物的最初含量設計。

摩擦材料的配方可分為三類，即：摩擦調整劑(如金屬硬質顆粒、金屬氧化物、陶瓷顆粒等)、摩擦潤滑劑(如：括二硫化鉬、石墨、硫化銅、滑石粉、氮化硼、鉛、鈹，硫酸鋇等)及基材(如最常用之酚樹脂)。黃金比例逼近法在摩擦材料配方設計的運用理念，就是先將三類成份先做黃金比例得切割，依序再將此三類材料的內部成份做黃金比例的切割，如下表示：

	Left Line	Right Line
	$0.618^0 = 1$	
	$0.618^1 = 0.618$	$0.618^2 = 0.382$
	$0.618^2 = 0.382$	$0.618^3 = 0.236$
	$0.618^3 = 0.236$	$0.618^4 = 0.146$
	$0.618^4 = 0.146$	$0.618^5 = 0.09$
	$0.618^5 = 0.09$	$0.618^6 = 0.056$
	$0.618^6 = 0.056$	$0.618^7 = 0.034$
	$0.618^7 = 0.034$	$0.618^8 = 0.022$
	$0.618^8 = 0.022$	$0.618^9 = 0.014$

以此方式先設計數種配方，如下分配，進行試驗：

One fiber and one filler

V_{F1}	V_{f1}	V_B
0.382	0.382	0.236

One fiber and two fillers or two fibers and one filler

V_{F1}	V_{f1}	V_{f2}	V_B
0.382	0.236	0.146	0.236
0.382	0.146	0.236	0.236

Two fibers and two fillers

V_{F1}	V_{F2}	V_{f1}	V_{f2}	V_B
0.236	0.146	0.236	0.146	0.236
0.236	0.146	0.146	0.236	0.236
0.146	0.236	0.236	0.146	0.236
0.146	0.236	0.146	0.236	0.236

and so on.

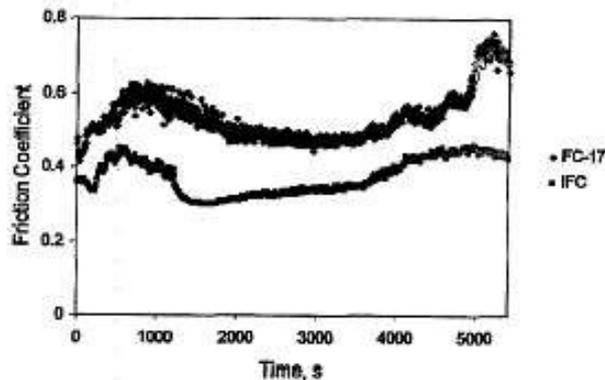
待完成試驗後，依以下的關係等級研判法進行各元素影響之權重評估，並進行成份微調與修改。

$$\xi_i(k) = \frac{\min \min |y_i(k) - x_i(k)| + 0.5 \max \max |y_i(k) - x_i(k)|}{|y_i(k) - x_i(k)| + 0.5 \max \max |y_i(k) - x_i(k)|}$$

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum \xi(k)$$

文獻指出，以非石綿系材料為例，僅需 19 種試驗將可得到良好之結果，如下：

	FC-16	FC-17	FC-18	FC-19
Copper chips	0.058	0.060	0.054	0.052
Steel wool	0.247	0.253	0.225	0.219
Al_2O_3	0.072	0.074	0.066	0.064
SBR	0.027	0.028	0.025	0.024
Graphite	0.152	0.157	0.140	0.135
Coke	0.152	0.157	0.140	0.135
$CaCO_3$	0.027	0.028	0.025	0.024
$ZrSiO_4$	0.017	0.017	0.015	0.015
$BaSO_4$	0.046	0.046	0.040	0.040
Phenolic resin	0.202	0.180	0.270	0.292
Average μ	0.542	0.535	0.497	0.483
Wear, wt. %	6.93	6.24	6.93	6.66



(ii) 理論解法

有三種理論解法被提出，第一種為等壓解，建構於假設摩擦材料於使用中，材料內部各顆粒物質所受力量是相等的。在此假設下，摩擦材料的整體摩擦係數會等於各別元素的摩擦係數乘以體積比之總和。

此種理論的缺點，在於每種元素的剛性並不相同，尤其像石墨本體與金屬硬質顆粒即有極大之差異，真正承受正向力者，高剛性物質將高於低剛性物質，因此，不同顆粒所受力量是相等的

假設將不為真，會造成試驗值與理論值間產生極大之差異。

為了修正上述的誤差，第二種等變形的理論被提出。不同於等壓法假設，等變形法是假設在摩擦過程中，每個元素受力變形是相同的，尤其當摩擦面的磨合情形是完美的，則此種假設將更趨近實際物理現象。由等變形法的推導結果可知，摩擦材料的整體摩擦係數是各別元素的摩擦係數及磨損因子的函數乘積總和。經驗證，此理論解與試驗結果吻合情形良好。

第三種的理論解，則是再修正等變形法中之非均勻磨合的現象，摩擦材料的整體摩擦係數會與各別元素的摩擦係數及磨損因子的函數乘積再乘以一修正因子而得。上述三種理論之數學方程表示如下：

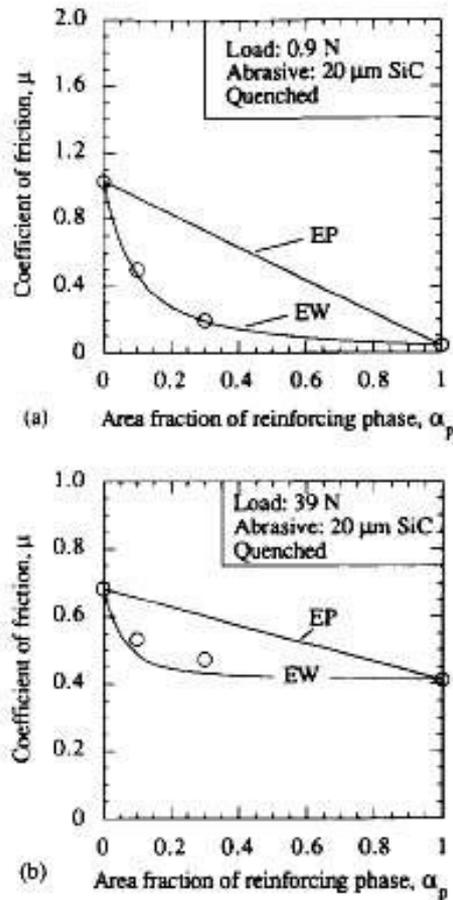
$$\mu_{EP} = \sum_{i=1}^N \mu_i \alpha_i,$$

$$\mu_{EW} = \sum_{i=1}^N \mu_i \frac{\Omega_i}{\sum_{n=1}^N \alpha_n \Omega_n} \alpha_i$$

and

$$\mu_I = \sum_{i=1}^N \mu_i \left(\theta \frac{\Omega_i}{\sum_{n=1}^N \alpha_n \Omega_n} + 1 - \theta \right) \alpha_i$$

等壓法與等變形法之試驗結果比較如下圖，結果顯示，等變形法較等壓法有更好的預測結果。



上述三種數學式其實就是在不同假設下，設法求得一混合理論(Mixing Law)。而這種混合理論如何運用於摩擦材料配方設計呢？

假設各別元素的摩擦係數與磨耗因子為已知，則在所設定所需的整體摩擦係數下，可以求得各元素體積比間的函數關係。惟此一函數關係是多解的，必需運用最佳化設計工具求得，例如基因工程法或 Matlab 等軟體工具。無論如何，

會場上所提出的這些理論解，都可大幅降低配方設計流程，惟設計者必須擁有各別元素的摩擦係數與磨耗因子的龐大數據資料庫，方可解之。

(iii) 多變因子理論解法

此法為日本學者提出，與前者有所雷同，目標都在求得所需的整體摩擦係數與各元素體積比間的函數關係，如下

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_px_p$$

然其所採用的方式並不是用等壓、等變形的方式求得，而是用大量的試驗結果進行迴歸整理 (Regression)，然後再用最佳化的工具求得所需元素之體積比。因此，實際上此法並不經濟。

(iv) 田口式法

此法是目前最被常用之方法，被發表的文獻也是最多。通常，摩材內部元素會有 10 餘種，因此採用 $L_{27}(3^{13})$ 直交表，應可滿足需求，亦即執行 27 種試驗即可獲得最佳化配方成份。

2.1.2. 常用的摩擦材料成份種類及其特性

如前述，摩擦材料的添加元素可分三大類：基材、摩擦調整劑與摩擦潤滑劑。基材用以提供強度、

耐磨性及熱穩定性，目前常用的有熱固性樹脂基(如酚樹脂)、鐵基、銅基、鎳基、陶瓷基。鐵基一般含有大於5%的石墨含量，顯微金相組織為肥粒鐵加波來鐵，或完全波來鐵組織，雖較銅基具有較大之摩擦係數，但其缺點為容易與對磨材料發生黏著(Adhesion)。

銅基有較好之熱傳導與熱穩定性，基材通常以銅-錫(5~10%)或銅-鉛(8~12%)為主，再添加鎳、鐵、鋅、鈦、鉬，以提昇高溫強度與熱穩定。酚樹脂基具有製程容易與低成本之優點，但耐溫性比金屬基為低。

摩擦調整劑用以增加摩擦係數，可為金屬粉末或合金粉末。金屬粉末常用的是鐵、鉬、鉻、鎢；合金粉末常用的包括三氧化二鐵、三氧化二鋁、三氧化二鉻、氮化鈦、氮化鎢等。摩擦調整劑之硬度均必須高於基材。

摩擦潤滑劑用以提高抗摩擦與耐磨耗性，大都為低熔點金屬，如鉛、鈹、錫、鋅等。此外，亦可使用非金屬固體潤滑劑，常用的有二硫化鉬、二硫化鎢、石墨、硫化銅、金屬磷化物、滑石粉、氮化硼等。其中二硫化鉬在高溫易還原成鉬粉，將增加磨耗。摩擦潤滑劑之硬度通常低於基材。

在基材設計中，銅含量約佔 50%~90%，銅與氧親合力小，氧化速度慢，燒結時對保護性氣體無特殊要求，容易燒結。錫含量約 4~12%，銅與錫的比例約為 9:1。錫-銅是極易合金化的元素組合，在 720~760 °C 間，錫固溶體可達 15%，但其缺點為價格高，且錫會對鐵基摩材產生晶界腐蝕。基於此，可以用部份鋅或全部用鋅取代錫，並同時可強化燒結時之擴散過程。

摩擦調整劑的元素中，鐵密度為 $7.87\text{g}/\text{cm}^3$ ，熔點 1535°C ，含量約 2%。鐵之抗氧化、抗黏結能力差，較不常使用。高熔點金屬如鉻、鎢、鉬等總成含量約 5~12.5%，亦可作為抗氧化劑。石綿則因環保問題，除部份低勞工成本國家外，已不常用。二氧化矽密度 $2.65\text{g}/\text{cm}^3$ ，具良好之摩擦特性，但易產生噪音與刮痕，需限制粒度與含量，通常需小於 6%。

矽灰石 (CaSiO_3)，價格便宜，密度 $2.75\sim 3.1\text{g}/\text{cm}^3$ ，熔點 1545°C ，較常使用。基材添加 Pb、Ca、Mg 等所形成之 Cu_2Mg 、 Ca_2Cu_4 、 Cu_2Pb 等金屬間化合物亦有摩擦劑效用。

摩擦潤滑劑中，鉛之熔點低，易形成表面薄膜，不溶於金屬基材，以單獨夾雜物型態存在，含量約 7~12%，具環保問題，已不常用。鈹無毒，已作為

取代鉛的用途，但價格高，含量通常為 3~10%。石墨密度 2.1~2.3 g/cm³，具良好導熱性，熔點 3850°C，六方晶系，受剪切力容易滑動，摩擦係數低，僅約 0.04~0.12。含量上，(Pb+MoS₂+Gr)需小於 13%。二硫化鉬在 350°C 以下可長期使用，大於 423°C 會快速氧化為 SO₂ 及 MoO₃，MoO₃，摩擦係數可達 0.5~0.6，屬高溫摩擦調整劑，適用於需求溫度大於 400 °C 以上的摩擦材料，其含量約 2~6%。硫化銅可提高耐磨性，因為硫化銅可熔化成摩擦薄膜，減少磨耗。

硫酸鋇密度 4.4~4.6 g/cm³，為最廣泛使用之填充劑，其摩擦係數穩定，磨損小，高溫下會形成穩定摩擦層，防止材料損傷。硫化銻，Sb₂S₃，密度 4.1~4.6 g/cm³，熔點 548 °C，具改善熱衰退，降低高溫磨損之優點，硬度低，可減少制動噪音之優點。

蛭石是一種礦物，密度 2.2~2.8 g/cm³，熔點 1320~1350°C，具良好之吸音性能及減摩效果。上述種類中，以石墨、二硫化鉬與硫酸鋇最常用，較少使用硫化銅、硫化鋅或氮化硼。

2.1.3. 摩擦材料的發展趨勢

摩擦材料用以吸收煞車過程所轉換成的熱能，且必須具備良好的摩擦特性與機械強度需求，除需確保安全無慮外，近年來，更要求煞車時必須無異音、無抖動。

早期摩擦材料以石綿纖維配合填充劑、黏合劑及改良劑混製而成，具有優異的強度、耐熱性及耐磨性等優點，且可藉調配其組成材料的種類及比例，達到不同性質上的要求。但儘管在摩擦性能上之優異表現，石綿纖維最為人詬病的是對人體健康的傷害（尤以肺部為甚）。因此不少先進國家對石綿都限制其使用方式，而逐漸以價格較高的碳纖維或鋼絲纖維取代之。此外，煞車襯墊之另一對摩材-煞車片（Rotor），也是影響車輛煞車表現之另一重要因素；截至目前為止，汽車煞車片大都是由鑄鐵所製成，其生產技術在過去的 50 年裡，已經臻於完善，不過縱使汽車具有最先進的煞車襯墊，一般鑄鐵煞車片在汽車行駛 8 萬到 12 萬公里之後，都必須因磨損而換新。因此使用陶瓷煞車片，將開啟汽車設計另一新契機。

陶瓷煞車片可提高煞車片約 10 倍壽命，同時針對陶瓷煞車片設計的煞車襯墊，亦將比現今使用的煞車襯墊延長約 2 至 3 倍的壽命。此外陶瓷材料耐高溫

之特性是鑄鐵無法相提並論的，且由於其敏感度甚高，因此可輕易地達到煞車效果，其摩擦係數也不會因為溫度及濕度的驟變而產生巨幅的變動。而另一項優點為煞車片的重量比一般鑄鐵輕 60%，單單前輪部分就可降低整個車體重量 6 公斤，可大幅提升避震系統的效果。而且陶瓷煞車片能夠提高 10 倍的阻尼係數，過去因煞車所造成的噪音及因氣候不同所造成的摩擦等問題，都將因陶瓷煞車片的誕生而走進歷史。據 Daimler-Chrysler 和 Porsche 等汽車公司指出，鑄鐵煞車片的受力程度已達臨界點，而才在起步階段的陶瓷煞車片，其可受力程度已經遠遠超過鑄鐵煞車片的極限。儘管如此，陶瓷煞車片仍有一問題極待突破，此問題為陶瓷煞車片的成本太高，約為鑄鐵煞車片的 10 倍，因此唯有將其量產和研發更進一步的製程，才能降低成本。目前 Daimler-Chrysler、Porsche 等汽車公司皆已積極投入研發陶瓷煞車片之行列。相信在未來幾年內，陶瓷煞車片將成為汽車之煞車材料主流。儘管在可預見的將來，陶瓷煞車片將成為汽車煞車系統上的大量需求，但目前有關陶瓷煞車片之製程研究尚在起步階段，極需開發一有效率且低成本之製程方式；此外對於陶瓷煞車材料的磨潤行為及磨耗機構之研究仍相當缺乏，而有關材料組成成份的改變

對煞車材料磨潤行為之影響等，更有待深入探討。

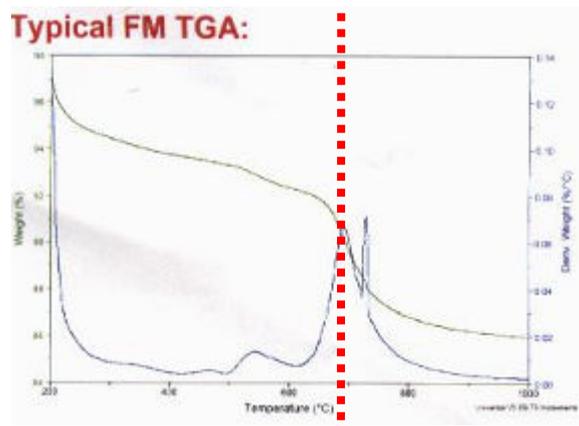
欲完成所需摩擦特性及足夠強度的陶瓷摩擦片，必須以纖維做為強化機構，形成所謂之纖維強化陶瓷基摩擦材料。依研討會所見，可用碳纖維含浸陶瓷溶-凝膠及泥漿兩種方式製作碳纖維/陶瓷預浸材 (Prepreg)，再將預浸材堆疊及熱壓 (Hot press) 製作碳纖維/陶瓷基摩擦材料，其中碳纖維的加入除具有強化韌化陶瓷基材外，也將成為供應自生性 (Self-regenerative) 碳潤滑層所需之石墨來源，除扮演一固體潤滑劑之角色改善陶瓷之磨耗性質，同時因碳纖維的加入，將使材料的密度大幅降低是其另一特點。

下圖為於展示會所見 Starfire 公司所展示的可運用於機車、賽車、摩托車、巴士之纖維強化陶瓷基煞車盤 (Rotor)。

STARBlade™ vs. Carbon/Carbon	
STARBlade™	Carbon/Carbon
<ul style="list-style-type: none">• 65-70% weight reduction vs. steel• Excellent Cold and Hot Friction• Best-in-class wear characteristics• Friction unaffected by moisture• Rotors offer negative fade• Easy retrofit with BrakeTech carrier• Consistent, reliable performance	<ul style="list-style-type: none">• 60-70% weight reduction vs. steel• No Cold Friction• Rotors last one or two races• No friction in wet conditions



本項產品另一關鍵技術為陶瓷漿的配方製程技術，由該公司現場所展示之樣品，該公司所開發之陶瓷漿之 TGA 試驗結果顯示可達 700°C，性質如下圖所示。（惟該公司展示人員不願提供樣品。）



另外一種具有輕量化、耐高溫之先進摩擦材料為介金屬基摩材，其製作是採用粉末冶金（Powder metallurgy）方式，將鋁、矽、碳纖維及摩擦調整劑等原料粉末充分混合，再藉由熱壓方式製作鋁-矽介金屬基摩擦材料。

製作大致步驟如下：（1）選用適當成分比例的原料。鋁及矽為鋁-矽金屬基材的主要原料，並添

加碳纖維及摩擦調整劑等成分一起混合，其中摩擦調整劑可分為硬質金屬粒子（W、Cr 等）及硬質非金屬粒子（SiC、Mullite、SiO₂ 等）兩種。而成分比例依磨潤及機械性質等各方面之表現做適當調整。（2）原料過篩、混合。原料的混合是整個製程中極為重要的部份之一，在混合過程中各種材料的均勻分佈與否對機械性質及摩擦特性有很重要的影響，而粉末中各組成的密度、粒徑分佈等因素對混合的均勻度影響甚鉅。因此金屬粉末在置入混合罐前均須以篩網過篩，逐步將粉末加入混合罐內，避免細粉凝聚結塊。另外可添加約 0.25 wt% 的輕油於金屬粉末顆粒表面形成一層油膜，除可保護成形模具表面及增加壓粉體的脫模性外，亦可避免已完成混合的摩擦原料，因密度之差異所造成分佈不均之現象。最後在混合過程將結束前 5~15 分鐘，再將碳纖維與其他非金屬之摩擦調整劑加入混合罐，以減少因摩擦調整劑之加入而產生金屬顆粒間之障礙層，而影響燒結性。（3）熱壓成型、燒結再成型。其一為真空熱壓方式，主要是將混合完成後之原料粉末置於一模具內，在真空或鈍氣狀態下，藉由高熱高壓之方式使各粉末產生鍵結之作用而順利成型，此方式所製作的摩擦試片較為緻密，孔隙率較低；另一種方式為先將原料粉末冷壓成型，再進

行常壓燒結之方式，此方式所製作的摩擦試片孔隙率較高，但其製作成本較低。(4) 性質測試：包括密度、孔隙率、三點彎曲試驗(Three-point bending test)，藉此可完成各類型金屬基摩擦材料之機械性質。

除了高性能、耐高溫的材料發展趨勢外，發展低成本、具環保意識的新材料也在研討會中發表。

為避免石綿之環保問題，目前摩材大都朝非石綿系列發展，原先採用的石綿纖維改以亞拉纖維(Aramid)、碳纖維、玻璃纖維或其它天然礦綿取代，亞拉纖維具有易加工、熱穩定、強度、比重低及避免異音之優點而被常用。但因其價格高，且面臨新興國家低勞工成本之競爭，故而先進國家開始尋找其替代用品。研討會上說明可以取代亞拉纖維的天然纖維包括：大麻纖維(Hemp)、亞麻纖維(Flax)等。這些纖維的特性必需滿足熱穩定、足夠強度及能將摩材添加物予以聚合，大麻纖維的放大觀察如下圖。



講演內容顯示，大麻纖維是最具取代亞拉纖維潛力的天然纖維，但其磨耗率較亞拉纖維還高，適用於自行車等低正壓力環境使用。

2.1.4. 摩擦振動、異音與熱傳分析

煞車異音是煞車系統設計者及摩材製造商最頭痛的問題，此問題於低溫環境最為明顯，如加拿大、北歐國家。煞車片與煞車盤摩擦所引起的異音以及煞車盤因受熱效應產生變形的振動，在研討會中，被許多學者提出與發表。

煞車盤因熱變形所引起的異音及振動研究可區分為兩個主要的分析方式：一個是穩定性複數特徵值分析(Complex eigenvalue analysis)，另一個是暫態的分析法(Transient analysis)。其中穩定性複數特徵值分析法對於動態系統的特徵值及其穩定性的研究具有較完整物理意義的特質，至於暫態的分析法則可將 3D 問題完整建構分析，且對於熱傳方面的處理也有較完整的模式。

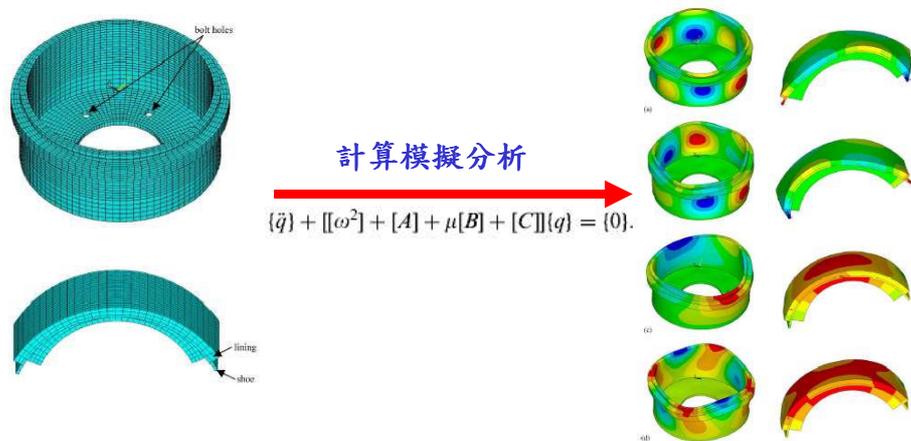
穩定性複數特徵值分析模型的建立可由下列三種方法：(1) 解析法(Analytical method)、(2) 假設 - 模式法(Assumed-modes method)、(3) 有限元素法(Finite element method)。

解析法：在不穩定分析(Instability analysis)

中，利用質量-彈簧模型 (Mass-spring models) 來表示真實結構。

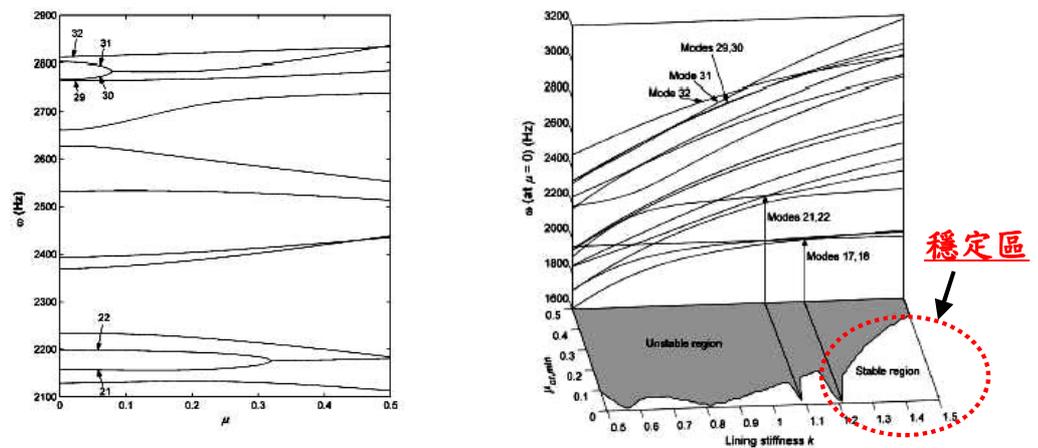
假設 - 模式法: 在煞車系統的元件當中，只有煞車盤是具有相當規則的環狀幾何外形，可將煞車盤考慮成一個薄的環形板，而且把煞車盤的橫向振動當作一個解析元件模式的線性總和，再經由複數的特徵值分析獲得煞車盤的極限-循環(Limit-cycle) 振動頻率。

有限元素法: 對每一個煞車元件建立有限元素模型，而且使用實體元素(Solid element)，如下圖。



煞車盤異音源自於不穩定的顫動(Flutter)。異音頻率常常發生在煞車盤的自然頻率(Natural frequency)附近，並與車盤和卡鉗的特徵值之間有關係，可使用結構最佳化設計避免。

利用有限元素法的另一好處，是可求得煞車系統自然共振頻率與振動模態及摩擦材料間之關係，如下圖。在分析結果中可以界定出系統會屬於穩定或不穩定的狀態，如此可以反應到材料設計的選用範圍，包括摩擦係數與彈性常數。



2.1.5. 煞車檢測

本研討會有關煞車檢測部份，由世界最大的車輛測試公司--林克公司總裁進行講演，煞車檢測包括三部份：摩擦材料、組件及實車檢測。

摩擦材檢測部份執行項目：

- (i) 低壓磨損
- (ii) 可壓縮性能
- (iii) 膨脹和伸長
- (iv) 剪切強度
- (v) 煞車盤厚度變化

(vi) Chase 等級試驗

(vii) Fast 摩擦性能試驗

組件測試部份，包括：

(i) 慣性台試驗

(ii) 制動性能試驗

(iii) NVH 試驗

(iv) 底盤慣性試驗

整車試驗包括：

(i) 煞車平衡

(ii) 推力與曳引

(iii) 微塵侵害

(iv) 高山升、降坡

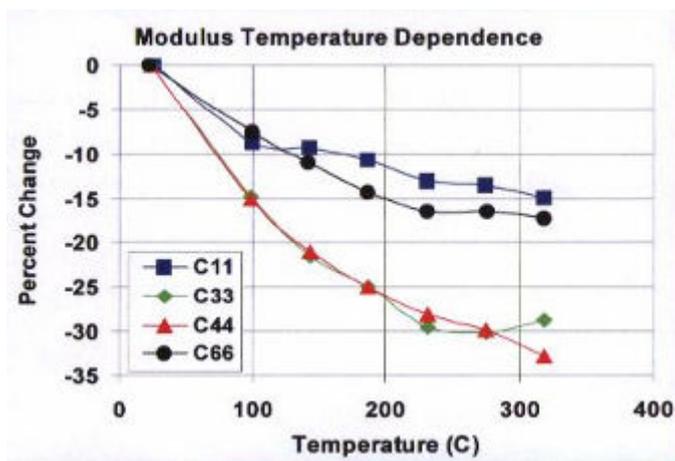
(v) 振動與異音

美國有關煞車之重要測試規範，如下表：

Document	Title
J212_199801	Brake System Dynamometer Test Procedures--Passenger Car
J2430_199908	Dynamometer Effectiveness Characterization Test for Passenger Car and Light Truck Brake Friction Products
J2521_200306	Disc Brake Dynamometer Squeal Noise Matrix
J2522_200306	Dynamometer Global Brake Effectiveness
J2767_200502	Wear Test Procedure on Inertia Dynamometer for Brake Friction Materials
J667_200202	Brake Test Code--Inertia Dynamometer (Cancelled Feb 2002)
J79_197208	Brake Disc and Drum Thermocouple Installation
Work in progress	
Document	Title
J2521	Disc Brake Dynamometer Squeal Noise Matrix

2.1.6. 測試裝備

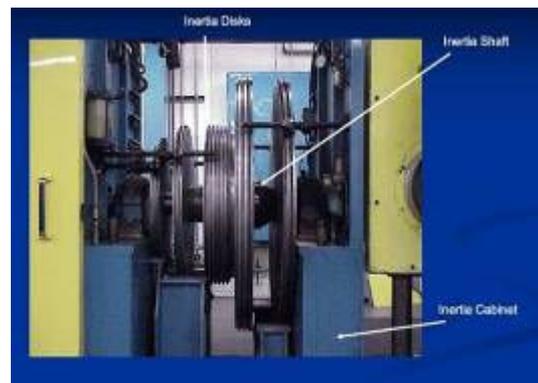
本次參訪除瞭解煞車元件之發展趨勢外，亦希望在展示會中搜集重要之研製設備資料。會場中所展示之設備以 3-D 混料機、大型油壓機及機械加工機為主。其中有一項設備是最值得關切的，即所謂的高溫的彈性常數量測儀，如后圖。此儀器是利用超音波原理的非破壞檢測方式，可以即時求得材料的彈性常數(K_{ij})，由於解析煞車異音時需用到 k_{ij} 值，故對本組後續計畫將有很大幫助。



另外對摩擦材料研製所需之主要測試裝備，於會場中展示的，包括材料高溫摩擦特性試驗機(Chast)，外觀如下：



對煞車系統之慣性矩試驗機(Dynamometer)，如下：



對底盤之慣性矩試驗機(Dynamometer)，如下：



2.2 參訪 Cytec 複合材料公司

美國 Cytec 公司為全球化之特殊化學與材料技術公司，其核心事業皆居於技術領先地位，全球有 25 個工廠，員工 4500 人，營業額約 3 兆元以上。

其中美國 Cytec 公司 Greenville 廠主要從事於纖維複合材料相關產品之開發與應用，以掌握複材重量及性能，並創造高附加價值，有關複材與鋁合金於重量及成本之比較如圖 1 所示，其中最為重要者為可溶性纖維(Soluble Fibers)PRIFORM(如圖 2 所示)之開發及推廣應用。

目前市面上，樹脂滲透成形技術(RIM; Resin Infusion Molding)所用之樹脂系統缺乏韌性劑(Toughening agent)，因此該技術所製造零件之特性較脆，而無法應用於航太方面之主結構零件。為解決此一問題，特開發具有商業價值之可溶性纖維(為可塑性纖維，Thermoplastic fibers，單根纖維直徑約為 20-50 μm ，一束纖維約有 10-20 根纖維，重量範圍為 25-100tex)，直接與碳纖維混合編織成碳纖維布(Fabric)，如圖 3 所示，再利用樹脂滲透成形技術製作成韌性複材零件，其技術觀念如圖 4 所示，可溶性纖維不僅具有韌性劑的功能，亦可固定預成形物(preform)，在複材成化的過程前，可溶性纖維溶解

且均勻分散於熱固性樹脂(CYCOM 977-20)中。

977-20 樹脂為低黏度的單液型環氧樹脂系統，室溫為液體狀，於溫度 60-90°C 時，黏度介於 100-500cps 之間，容易被注入模具中，其溫度與黏度之特性曲線如圖 5 所示。由圖 6 可觀察到單根可溶性纖維在 130°C 977-20 環氧樹脂溶解的情形，而單根可溶性纖維於高溫 977-20 環氧樹脂之時間與溫度關係圖，如圖 7 所示。可溶性纖維/977-20 環氧樹脂之複材零件成化週期如圖 8 所示，977-20 環氧樹脂於 55-75°C 溫度時注滿模穴，當模溫達到 125-130°C 時，可溶性纖維溶解且均勻分散於 977-20 環氧樹脂，當溫度達到 180°C 時，為 977-20 環氧樹脂之膠化階段。

以樹脂滲透成形技術及可溶性纖維編織布/977-20 環氧樹脂製作試片(簡稱 SFT; Soluble Fiber Technology)，及以壓力釜成形技術(Autoclave)及編織布/977-2 環氧樹脂預浸料製作試片(簡稱 PP; Prepreg)，試片之碳纖維體積含有率為 55%，分別於 Dry/RT(試片於 105°C 真空爐烘烤 48 小時後，於室溫執行測試)與 Hot/Wet(試片於沸騰的水中煮 48 小時後，於 120°C 執行測試)情形下，執行機械性質評估，包括拉伸強度(TS; Tensile

Strength)、拉伸模數(TM; Tensile Modulus)、壓縮強度(CS; Compression Strength)、壓縮模數(CM; Compression Modulus)、層間剪力強度(ILSS; Interlaminar Shear Strength)、平面剪力強度(IPSS; In-Plane Shear Strength)、平面剪力模數(IPSM; In-Plane Shear Modulus)、開孔拉伸強度(OHT; Open Hole Tensile Strength)、開孔壓縮強度(OHC; Open Hole Compression Strength)、衝擊後之壓縮強度(CAI; Compression strength After Impact)、及玻璃轉換溫度(Tg; Glass transition temperature)等性質，其比較圖如圖 9及圖 10所示，結果顯示：兩者之機械性能不相上下。

可溶性纖維針縫(stitching)於碳纖維編織布，如圖 11所示，由於可溶性纖維於複材成化前，即均勻溶解分散於熱固性環氧樹脂中，試片微觀圖如圖 12所示，複材零件之殘留應应力小，且不會增加縫線之重量，針縫預成形物如圖 13所示。

裁切一般的碳纖維平織布時，邊緣都會有起毛現象產生，而裁切 PRIFORM 碳纖維平織布時，則改善此一現象，平面穩定性增加，如圖 14所示。用於疊貼零件時，預成形物幾乎是淨形尺寸，具有良好的邊緣公差，可以精準疊貼每層預浸料，且其曲率半徑

小，其預成形物品質優良，如圖 15至圖 17所示。

可溶性纖維應用於平織布及多層多軸向編織布(Multiaxial fabrics)，如圖 18所示，可溶性纖維編織於平織布之經束(warp)與緯束(weft)間，以作為黏著劑(binder)，減少平面纖維之縐折情形，且沒有針縫問題，其平織布及微結構如圖 19所示，其纖維交織結構如圖 20所示，25 公分高之圓罩單層預成形物如圖 21所示。可溶性纖維應用於編織帶如圖 22所示。

可溶性纖維應用於航太零件之生產包括擾流板樞紐接頭(spoiler center hinge fitting)如圖 23及圖 24所示、窗戶框架如圖 25所示。利用真空輔助樹脂轉注成形技術及可溶性纖維製作圓罩時，其整體之包裝示意圖如圖 26所示，包裝情形如圖 27所示，當進行真空輔助樹脂轉注時，其樹脂滲透情形如圖 28所示，當注膠完成，樹脂流出出膠口時，其情形如圖 29所示，完成品如圖 30所示。

樹脂轉注成形技術所需之設備成本較壓力釜成形技術為低，所使用之乾編織布亦較預浸料便宜，且儲存壽限較長，配合可溶性纖維之開發，其機械性能可媲美預浸料製程，而應用於航太零件之製作，此一趨勢已儼然成形，因此在本所既有之樹脂轉注成形

技術基礎上，配合可溶性纖維之開發，相信亦將可朝著高性能的航太複材零件開發方向邁進。

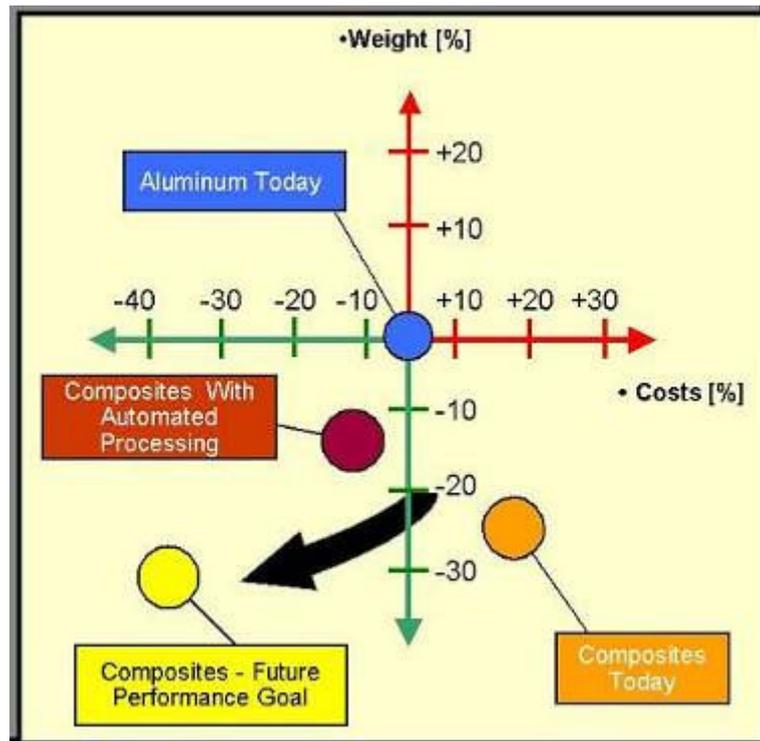


圖 1、複材與鋁合金於重量及成本之比較



圖 2、可溶性纖維產品

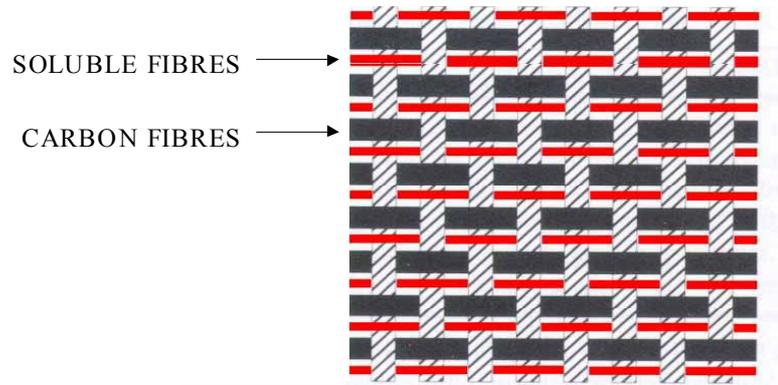


圖 3、可溶性纖維與碳纖混合編織布結構

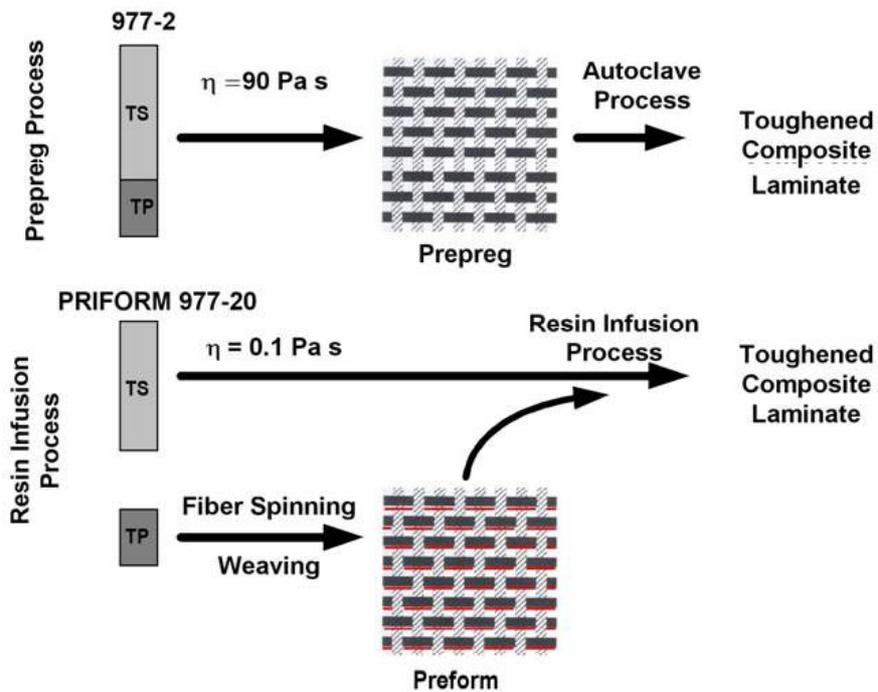


圖 4、可溶性纖維技術之觀念示意圖

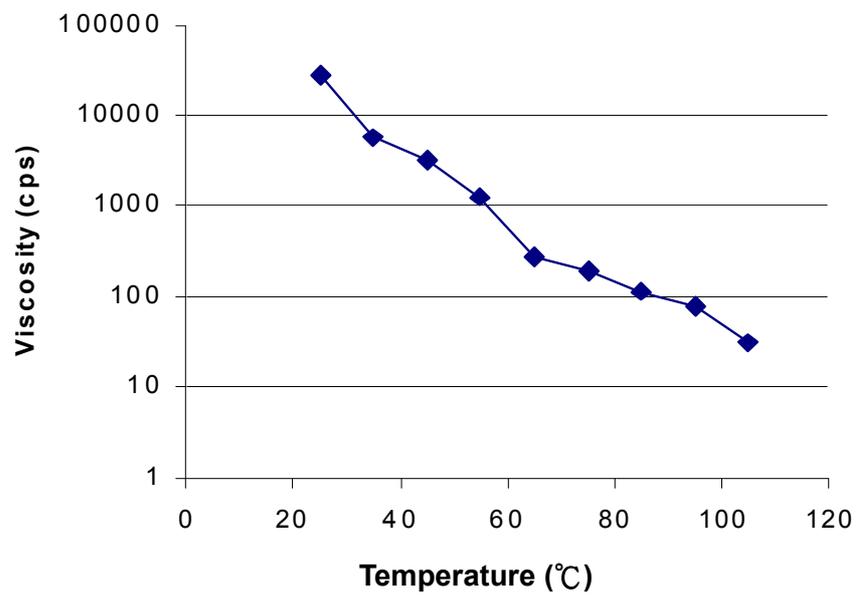


圖 5、977-20 樹脂之溫度與黏度關係圖

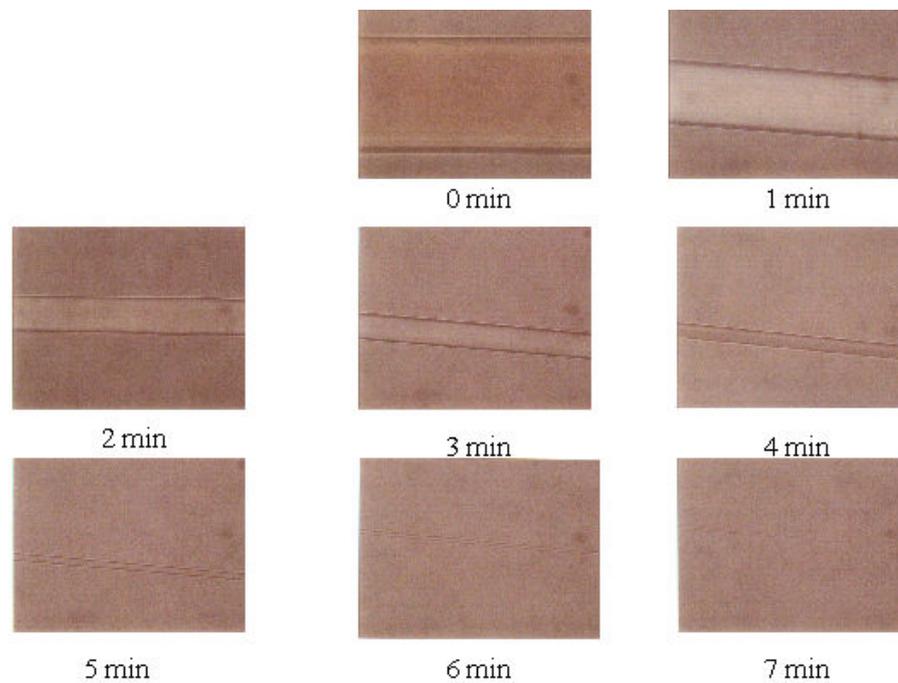


圖 6、單根可溶性纖維在 130°C 977-20 樹脂之溶解微觀圖

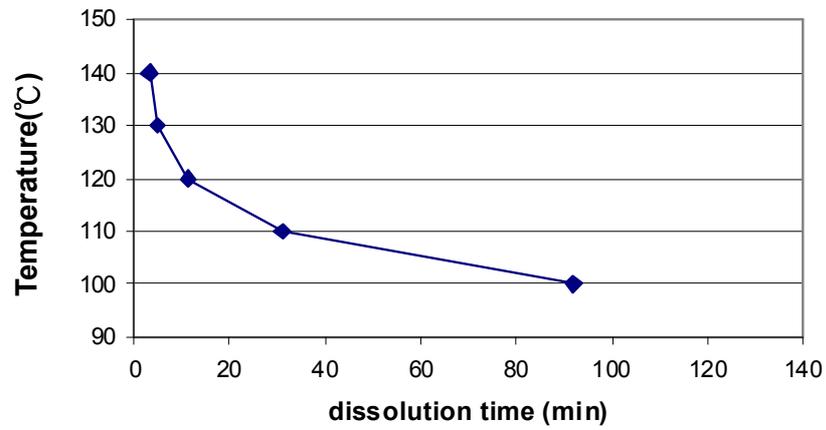


圖 7、可溶性纖維於 977-20 樹脂之溶解時間與溫度關係圖

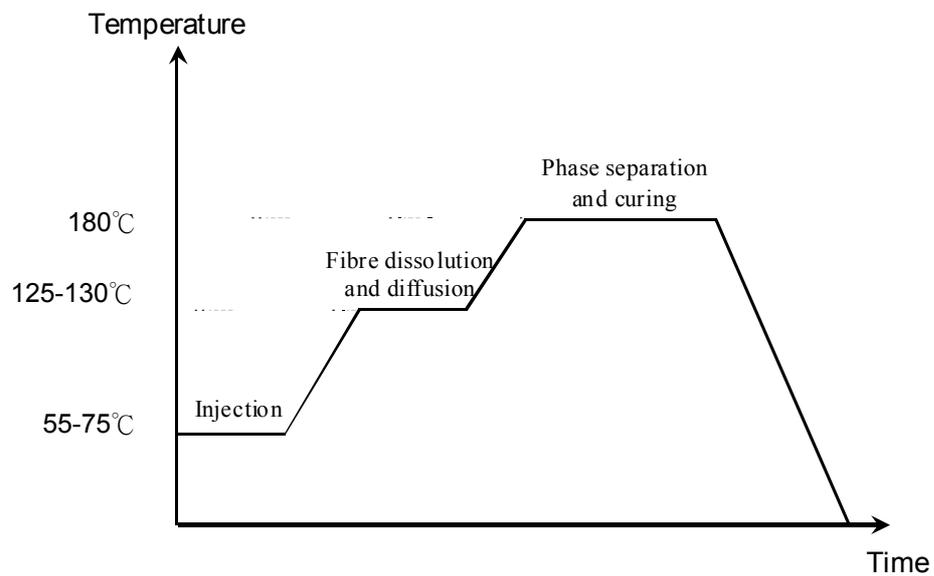


圖 8、可溶性纖維/977-20 環氧樹脂複材之成化週期

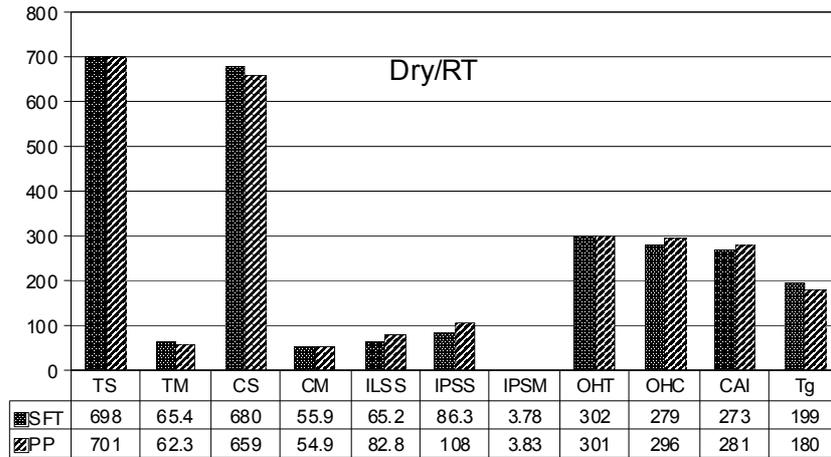


圖 9、Dry/RT 時，可溶性纖維材料與預浸料之熱機械性質

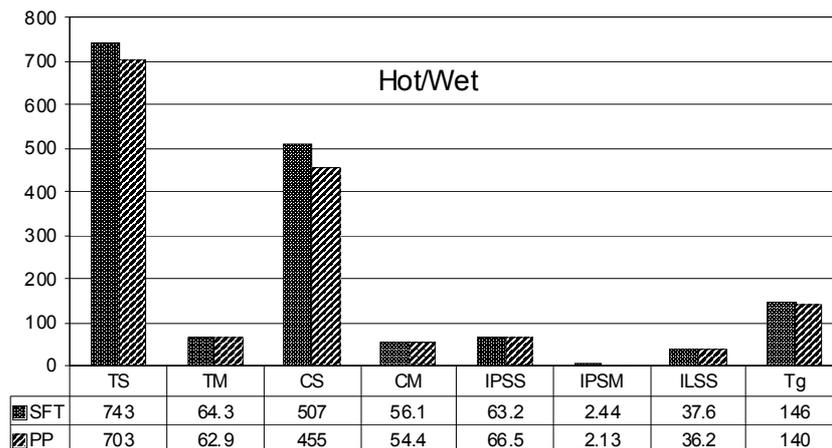


圖 10、Hot/Wet 時，可溶性纖維材料與預浸料之熱機械性質

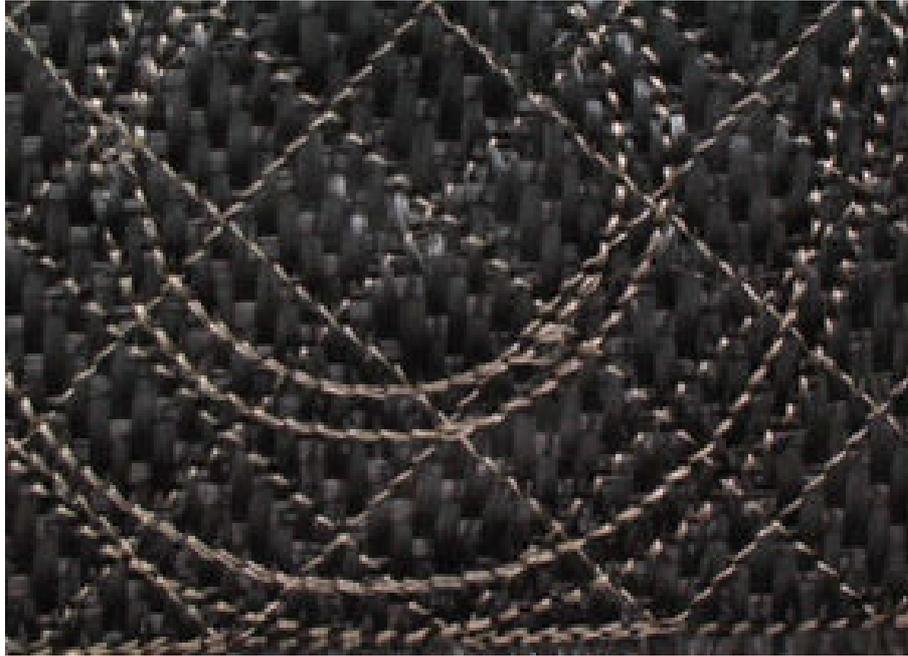


圖 11、可溶性纖維針縫於碳纖維編織布之情形

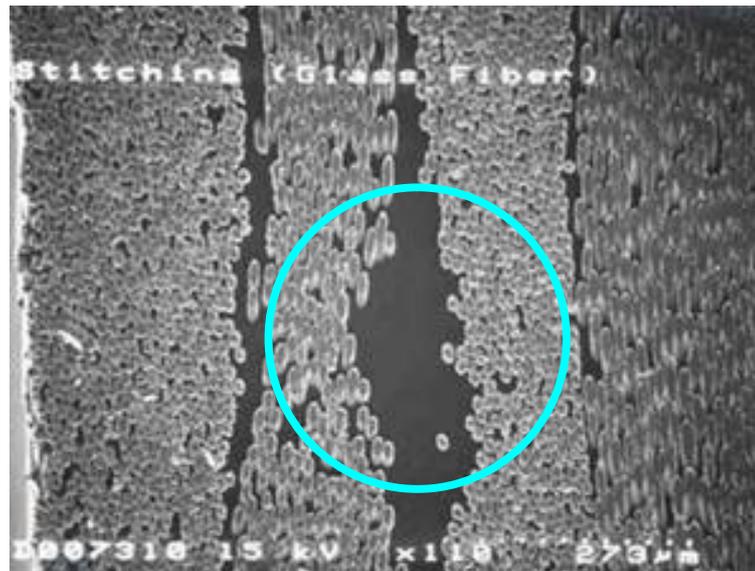


圖 12、可溶性纖維針縫試片微觀圖

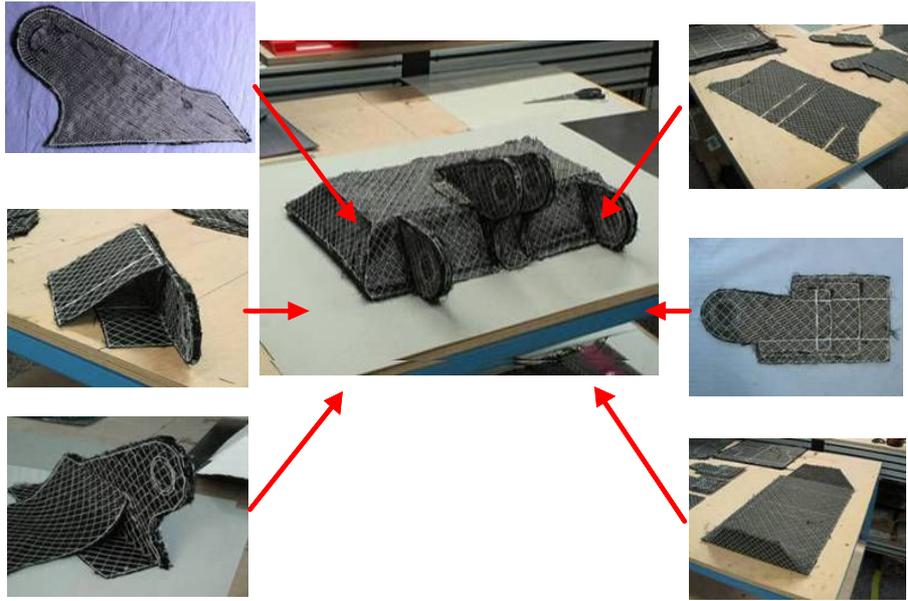
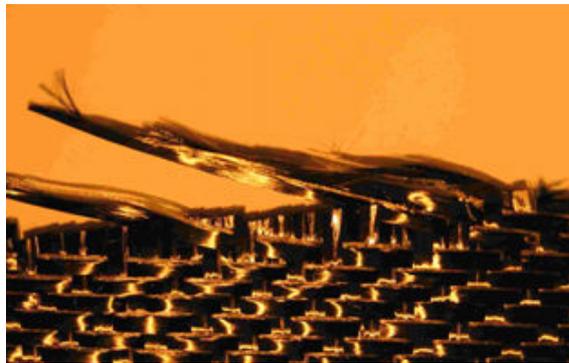
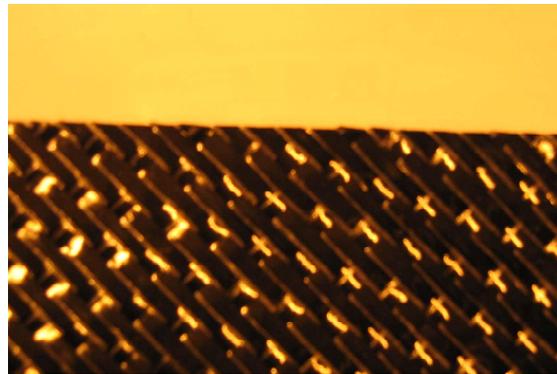


圖 13、可溶性纖維針縫之預成形物



Standard Fabric



Stabilized Fabric

圖 14、可溶性纖維材料之平面穩定性



圖 15、可溶性纖維材料之預成形品質



圖 16、可溶性纖維材料之熱成形預成形物

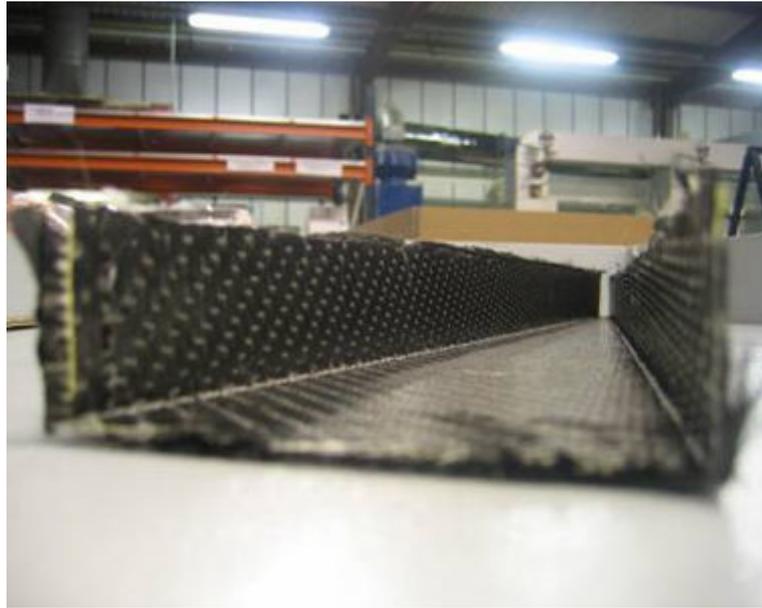


圖 17、以可溶性纖維編織布製作之加強肋預成形物

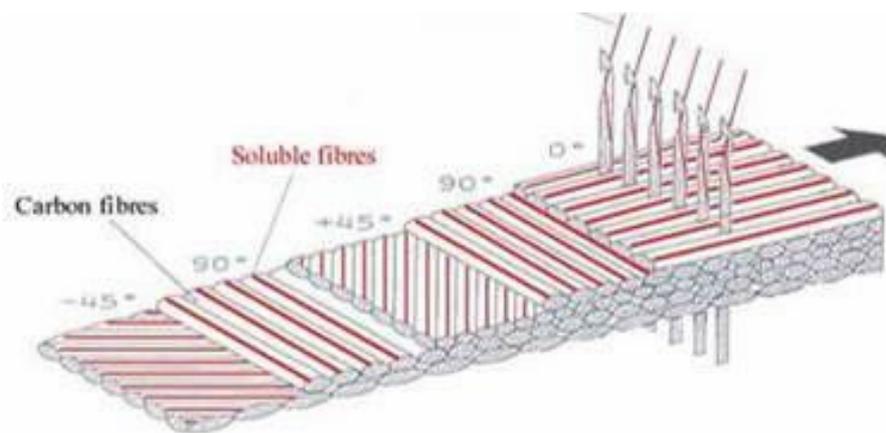


圖 18、可溶性纖維材料之多軸向編織布

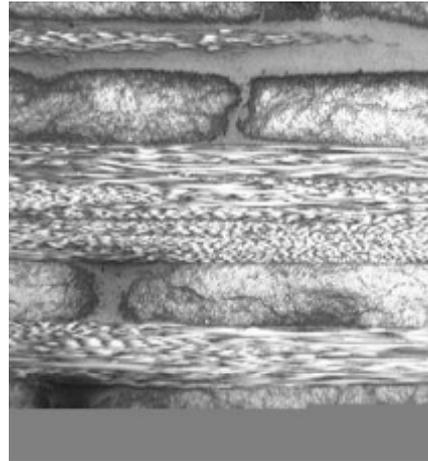


圖 19、可溶性纖維平織布及其成品微觀圖

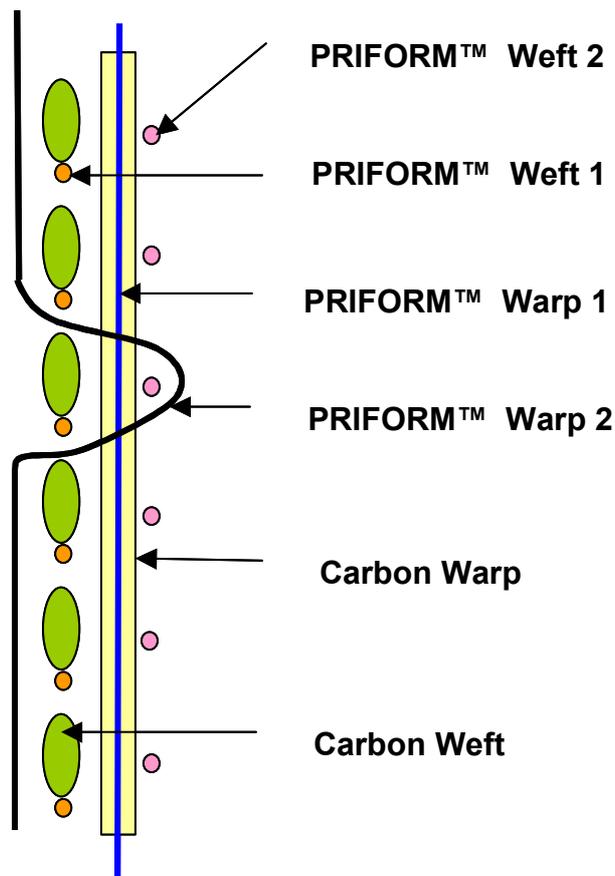


圖 20、可溶性纖維平織布之交織結構



圖 21、可溶性纖維平織布之圓罩預成形物



圖 22、可溶性纖維材料之編織帶



圖 23、可溶性纖維材料應用於擾流板接頭製作



圖 24、安裝完成之擾流板接頭



圖 25、可溶性纖維材料應用於窗戶骨架製作

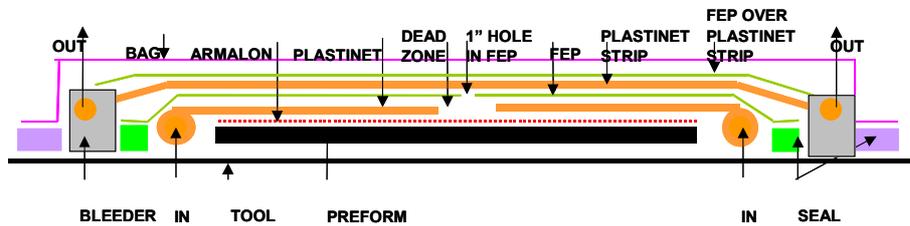


圖 26、可溶性纖維材料應用於圓罩製作之包裝示意圖

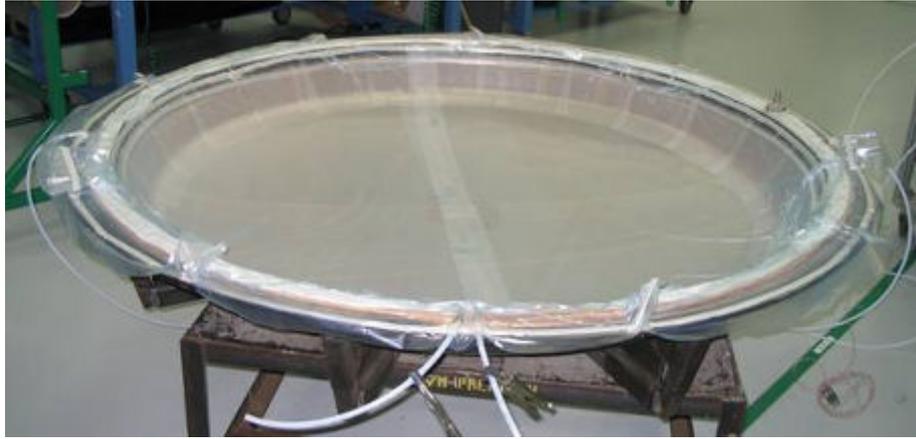


圖 27、製作圓罩時之包裝情形



圖 28、製作圓罩時之樹脂滲透情形

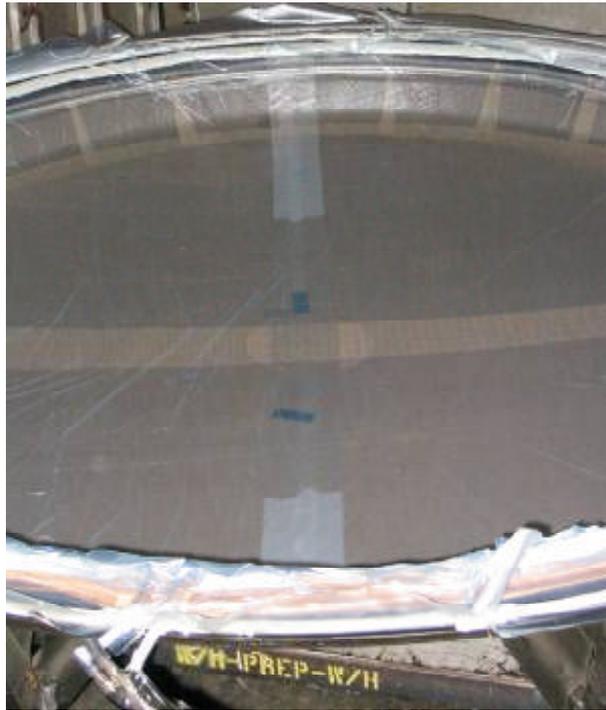


圖 29、製作圓罩時之樹脂流出出膠口情形



圖 30、圓罩之完成品

參、效益分析

本次公差已達成目標如下：(1)參加位於美國德州 Grapevine 市舉辦之第二十四屆制動器國際研討會及展示會，瞭解國際間制動器之開發與市場發展趨勢，並與其他研究單位進行技術交流。(2)參訪美國 Cytec 公司之預浸料製造工廠，研討複材預浸料之材料選用技術與航太產品應用發展趨勢。具以下效益：

3.1 參加第二十四屆制動器國際研討會及展示會中獲致之效益如下：

- (1) 針對複雜的摩擦材料配方設計，於會場上聽取國際學者的研究方向，包括採用黃金比例法、理論解法、田口式法等方式，配合所建構的材料數據資料庫，將可達到真正具邏輯性的配方設計能力，可大幅降低使用 Trial & Error 所需之物力與時間，對本單位後續材料開發具有極大之幫助。
- (2) 因為商業機密問題，會場上雖未有實際高性能材料之配方被發表，但對摩擦材料的種類與主要成份之選用方向有所論述，甚至包括材料內部元素的一些特性與定性上之說明，將對本單位後續開發摩擦材料之選材與初始配方設計有莫大之幫助。
- (3) 在展示會場中，看到具輕質、耐高溫、耐磨耗、無環保危害的纖維強化陶瓷基摩擦材料(CMC)及

高鋁、矽介金屬摩擦材料(MMC)等高附加價值的新材料，並預估將取代傳統非石綿系摩材(NAO)及半金屬基摩材，在民生及航太之應用上具有極大之潛力，可為本單位適合發展之題目。

- (4) 煞車振動與異音是煞車系統最棘手之問題，理論甚為複雜。會場上許多學者採用的解析法 (Analytical method)、假設 - 模式法 (Assumed - modes method)、有限元素法 (Finite element method) 可供本單位之系統設計參考。
- (5) 在展示會場中所見利用超音波原理的非破壞檢測儀器，可以即時求得材料的彈性常數(K_{ij})，可為本單位後續建構測試能量之重要參考。
- (6) 由 SAE 法人及 LINK 公司於會場中所說明之有關汽車安全國際測試法規，有助於後續研發產品之認證設定。

3.2 赴美國 Cytec 公司之預浸料製造工廠參訪研討，獲致下列具體成果與效益：

- (1) 了解該公司開發之可溶性纖維材料技術，並討論此技術在市場上之應用領域與商機。
- (2) 了解該公司在產品開發方向上，總是以核心技術導向高附加價值之商品，此理念之落實與產品化之方法很值得學習。
- (3) 討論可溶性纖維應用於碳纖維編織布之特性，利

用可溶性纖維與真空輔助樹脂轉注成形技術製作
航太零件實例。

肆、國外工作日程表

時間	工作內容
10/07	抵達美國德州達拉斯機場，先尋找租車公司，辦理租車手續後，再開車至 Grapevine 之下榻旅館辦理 check in 及進住。
10/08	早上前往第二十四屆制動器國際研討會及展示會會場，位於 Grapevine 之 Gaylord Texan Resort and Convention Center，並辦理報到及繳費手續。下午參加 Harald Abendroth 制動器系統研發趨勢之專題演講，瞭解國際載具製造商面對制動器開發時之挑戰與因應對策、制動系統和摩擦材料之市場發展趨勢、國際載具製造商之制動器，所採用之材料、製程及所訂定之標準需求。
10/09	參加制動器材料、測試等主題之研討會，研討摩擦材料參數在各種分析中所扮演角色及其物理特性、以及配方設計之影響、航空器制動器性能設計（包括旋轉噪音振動、熱催化作用、熱氧化作用、界面氧化層之熱機性質）、載具制動系統評估方法（包括汽/貨車實車測試、動功計動態測試、煞車閘分流測試、材料評估及分流質量管理）。並於空檔時間參觀展示會活動，蒐集制動器之材料選用、配方設計性能設計、市場發展趨勢等技術資料。
10/10	參加制動器噪音分析、新技術、模擬分析等主題之研討會；研討噪音分析之統御方程式、邊界條件、解析方法、影響噪音之摩擦參數及吸震片之設計，及解決噪音和振動問題之方法學及其產業應用；研討具

- 有發展潛力之制動系統，包括電子取代油壓之電子煞車及冷卻技術、以及碳陶瓷等新材料之發展；研討制動系統模型建構、數值模擬分析方法、磨損破壞行為。並利用時間參觀展示會活動，蒐集制動器之製程開發、新技術發展技術、重負荷高扭矩之運輸器材之制動系統等技術資料。
- 10/11 參加產品之防噪音設計、重負荷制動系統等主題之研討會，研討系統與結構設計，包括摩擦材料與基材、及防噪音的隔絕片 (insulators)；研討重負荷高扭矩之運輸器材之制動系統，包括高制動性能之材料需求及金屬基煞車材料。
- 10/12 開車前往 Greenville，參訪 Cytec 公司研討新開發之碳纖維複材技術，並討論此技術在市場上之應用領域與商機。
- 10/26 參加複材製造協會 (CFA) 舉辦之廠商新產品展示會，蒐集複材產品設計製造與市場發展資料。
- 10/13-10/14 開車至達拉斯轉機至洛杉磯，再由洛杉磯轉機返國。

伍、社交活動

此行公差中所接觸人士包括所參訪的 Cytec 公司，與工程材料部門經理 Chris Pederson 及工程師會談，以及與國際制動器會議出席之各國人士進行制動器技術相關議題之討論，並無額外的社交活動。

陸、建議事項

1. 摩擦材料為各種運輸器材最重要之保安零件，國際市場龐大，各國均戮力於此方面之研究與生產。尤其在節能意識逐漸被重視的情況下，具輕質、耐高溫、耐磨耗、無環保危害的纖維強化陶瓷基摩擦材料(CMC)及高鋁、矽介金屬摩擦材料(MMC)等高附加價值產品將取代傳統非石綿系摩材(NAO)及半金屬基摩材，並為歐、美、日等先進國家目前極力發展的方向，在民生及航太之應用上具有極大之潛力，為本所下一階段適合發展之題目。
2. 煞車振動與異音(Squeal)是煞車系統最棘手之問題，由於異音的產生牽涉到整車系統、大氣環境、路況及材料本身，理論甚為複雜，惟其影響到摩擦材料的可被接受性，是故為不得不解決之問題，本次研討會即有近 50%的論文探討此方面之分析與防制技術，因此本所在相關科專計畫中也應適時納入評估，以免與國外差距太遠。
3. 煞車系統之測試驗證為確保安全與材料品質與取得商機之必要手段，目前 SAE 已訂有相關國際規範，為本所執行科專與創造產業產值之不可忽略之一環，應善加規劃執行。
4. 目前本所在真空輔助樹脂轉注成形技術製作複材三明治結構方面已有些基礎，若能將可溶性纖維技術觀念，結合本所既有之樹脂轉注成形技術，應用於

特殊功能結構元件之開發，如智慧型材料結構之開發、吸波材料結構之開發等，製成具有特殊功能之結構，或許是未來可能之建案方向。