

# 先進複合材料結構技術開發計畫赴美參訪心得報告

## 摘要

- 一、 本次公差派員參加國際著名之「45<sup>th</sup> International SAMPE Symposium and Exhibition」，研討並蒐集有關複合材料製程及工具，與複材之應用趨勢等最新技術與資料。
- 二、 依據見聞本報告綜整複合材料新素材、新加工與成形技術和裝備，先進檢測技術與裝備，供本所後續能量建立之參考。
- 三、 綜整國外研發及產品之方向，主要著重於低成本複材技術之開發，其中包括樹脂轉注成形及封袋真空輔助轉注法，與本所目前研發方向符合，然而許多功能性複材之應用，如抗電磁波干擾或高導熱之複材，可供本所未來研發規劃之參考。

## 目錄

1. 出國目的及緣由	1
2. 公差心得	3
3. 效益分析	13
4. 國外工作日程表	15
5. 建議事項	16
6. 附件	33

## 壹、表目錄

表一、 氰尿酸酯樹脂與環氧樹脂之性質比較	17
表二、 RP-46、 PMR-15 及 AFR-700B 之性質比較	18
表三、 Across 公司之碳/碳複合材料性質	19
表四、 石英蜂巢三明治之機械性質	20
表五、 石英蜂巢之介電性質	21
表六、 碳/碳蜂巢三明治與現有產品之熱性質比較	22
表七、 碳/碳蜂巢心之壓縮與剪切性質	23

## 貳、圖目錄

圖一、 Across 公司之碳/碳複合材料製程與傳統方法之比較	24
圖二、 碳/碳複材彈簧	25
圖三、 碳/碳複材滾筒	26
圖四、 碳/碳複材葉片	27
圖五、 碳/碳複材螺桿與螺帽	28
圖六、 各種蜂巢在厚度方向之熱膨脹係數	29
圖七、 各種蜂巢製作之共振器在不同頻率下之衰減特性	30
圖八、 碳/碳蜂巢三明治結構	31
圖九、 碳/碳蜂巢散熱片之熱傳導比	32

# 1. 出國目的及緣由

## 1.1 緣由

本院第一研究所為推廣軍民通用科技，由經濟部委辦「複合材料先進結構技術開發」三年計畫，目的在於將航空用複合材料加工技術能量應用至民生產業。為了蒐集有關複合材料市場、製程、模具及品保之最新資訊，吸取國外先進國家發展經驗及技術，於 89 年度計畫內編列國外公差項目，派員參訪二家複材產業公司 CytecFiberite 及 Air Tech，研討並蒐集有關複合材料市場，製程及模具之最新資訊，以及複材在防火材料及高溫零件上之應用，及樹脂轉注成型技術之應用趨勢，以利計畫執行及未來研發方向之訂定。參加於美國舉行之國際研討會「45<sup>th</sup> International SAMPE Symposium and Exhibition」，並發表本案之技術研發成果。工作人員為簡聘技正莊毓蕙(領隊)一員。

## 1.2 工作目標

(一)研討耐高溫複合材料之最新加工及工具等技術，蒐集複合

材料市場需求資訊、應用技術與新世代材料 加工、模具、製造及產品應用等資料。

(二) 探討未來複合材料及製程技術於航空及汽車工業應用需求，並蒐集相關先進國家發展經驗及技術資料。

(三) 實地參訪廠商研討複合材料的應用及發展方向，以利科專計畫產品規格與技術指標之訂定，協助先期參與廠商的產品開發及軍民通用科技計畫研發方向之參考。

(四) 與國外業界研討製程及模具之發展及應用，提昇生產關鍵技術，突破技術開發瓶頸。

(五) 於國際會議發表研發成果、以利未來獲得更多國際技術交流與合作之機會。

### 1.3 預期效益

(一) 建立技術與市場資訊管道，以利科專研發方向與產品規格、技術指標之訂定，並累積航太科技軍民通用計畫技術能量及經驗。

(二)獲得國外市場與技術之最新資料，協助科專計畫先期參與廠商，研製現階段具競爭力之產品，並配合其技術能量及公司發展策略，選擇具前瞻性的產品開發，同時協助國內複合材料產業昇級，提昇科專計畫執行成效，以利計畫執行及後續建案工作。

(三)了解複材應用於運輸載具、引擎及高溫複材之應用，以提昇本院零件開發與應用能力，擬訂複合材料研究發展方向。

## 2. 公差心得

### 2.1 會議簡介

今年參加 SAMPE 國際研討會之人數與 1999 年相當，約 5400 人及 230 個參展廠商，及另外 5000 人只參加研討會。會議重點除了傳統上強調飛機用複合材料外，此次著重於複合材料在鋼筋混凝土上之應用，並沒看到新的補強材料系統與製程方式，此次更舉辦了一複材補強施工比賽，強調施工工時與

成品外觀與品質，成品在現場執行結構試驗比較。另一強調重點為複材在太空及通訊上之應用，其中包括樹脂系統及特殊蜂巢等材料。本報告就此次會議內容中較特殊者做進一步之說明。

## 2.2 材料與製程應用

### 2.2.1 複材在太空及通訊上之應用

目前用於衛星之結構材料主要為鋁合金。材料選用之準則主要為材料之可信賴度(reliability)、高比強度(質輕)、抗輻射性(radiation)、熱變化穩定性(尤其是搭接處)、材料不會放出氣體(尤其是水氣)，一般設計壽命為 10 年。高分子複合材料在衛星上之應用主要在:多層隔熱材料(multi-layer insulation)，光學鏡片支撐(optic mirror support)，複材蜂巢三明治面板，複材支軸(shaft boom)，覆蓋結構 (shroud structure)，太陽能板(solar cell)膠合用矽質膠料(不能釋放出鹽酸分子)，超輕量管件，支柱及板材，散熱板，金屬化之高分子膜用於太陽能板或其反射用途。

目前 Aerospace 公司評估太空用之樹脂系統以增韌型聚氰尿酸酯(Cytecfiberite 公司之 polycyanurate)最適用，其性質與環氧樹脂之比較表一。氰尿酸酯樹脂之吸水及釋放氣體量皆比環氧樹脂低，尺寸穩定性亦較佳，且其介電常數較低，而韌性也較高，由此皆顯示氰尿酸酯樹脂為一太空用複材結構件之較佳樹脂。一般而言，氰尿酸酯樹脂之黏度比環氧樹脂低，但成化後之強度則比環氧樹脂高。

#### 2.2.2 高溫複合材料(LARC™ RP46 Polyimide)

NASA 在 1991 發展出 LARC™ RP46，其為一種超耐高溫，且耐水氣及化學腐蝕之聚亞醯胺高分子材料，在 300 後成化 2-6 小時後，玻璃轉化溫度約 710-750，此材料以 3,4'-ODA 代替 PMR-15 中所用可能致癌之 4,4'-MDA 雙胺，且提供較佳之韌性，且解決原來微觀裂縫(microcracking)之問題。RP-46 PMR-15 及 AFR-700B 之性質比較如表二。就成化溫度而言，RP46 之成化溫度(617)略高於 PMR-15(600)卻低於 AFR-700B(700)，但 RP46 之使用溫度卻與 AFR-700B 相同(700)；而 PMR-15 則只有 550。因此 RP46 兼具有良好之加工性與高溫性質之優點。且其

價格與 PMR-15 相近遠低於 AFR-700B。其中以 RP46 之吸水性質最佳，實為一良好之高溫結構樹脂。

此材料之主要用途為飛機、可重複使用之太空船結構，太空探索系統及電子產品。NASA 對此材料之未來研究方向為 1. 非熱壓釜製程 2. 增韌型 LARC™ RP46 3. 應用於樹脂轉注製程，目前已取得執照之製造商有 JD Lincoln, Inc.及 UniTech, LLC 公司，合作夥伴有 Boeing, Space Act 公司

### 2.2.3 碳/碳複合材料

由韓國 Across 公司發明之碳/碳複合材料製造方法為預成形紗法(pre-formed yarn method)，具有美國、歐洲及韓國之專利。此法與傳統之含浸法之最大不同在於只要高溫碳化一次即可，不必像傳統方式須重複含浸再重複碳化，因此可節省大量時間成本，且可快速滿足客戶之需求。比較 Across 公司與傳統製程之流程如圖一。預成形之纖維紗現成形為預成形板材，在經過熱壓成形、碳化及石墨化，及進一步加工成為成品。比起傳統方法利用樹脂轉注成形

法，將樹脂灌入預成形之織物中，在進行碳化及石墨化，其結果會產生許多孔洞，則需重複樹脂灌注及碳化及石墨化之步驟，愈到後面樹脂之灌注愈不容易，因此品質不佳且製造流程很長。Across 製程所製之碳/碳複合材料之性質如表三。

碳/碳複合材料應用於製程相關之機具結構元件之優點如下：(1)減重之考量 – 可節省相當於不銹鋼約 25%之重量，而使機具有較佳之操作性。(2)增加產能 – 增加可處理之產品數量因而增加產能。(3)免維修 – 特別適用於自動化生產機具零件，不像不銹鋼有彎曲變形之問題。(4)使用壽命長 – 使成本降低。

碳/碳複合材料之主要用途有：(1)耐熱材料 – 各式熱處理爐之結構材料與夾具、焊接夾具、玻璃製造之夾具、熱處理爐之隔熱材料之型架(定位銷、螺桿、螺帽、角塊、墊片等)。(2)摩擦材料 - 煞車材料、工業軸承等。(3)耐腐蝕材料 – 電極、化學裝備元件、襯裡材料。

Across 製作之碳/碳複合材料的應用實例有 (1) 碳/碳

彈簧 – 使用溫度約 1000 ，耐摩擦及腐蝕且具良好之疲勞性質，如圖二所示。(2) 碳/碳滾筒 --使用溫度約 2000 ，主要用於金屬熱處理及陶瓷之高溫冶煉，減少維修更換時間而增加產能，由於重量輕可省能源 20 - 50% ，如圖三所示。(3) 碳/碳複材葉片 -- 主要用於金屬熱處理爐之熱循環風扇用途，使用溫度約 2000 ，不會熱變形，如圖四所示。(4)碳/碳複材鏢桿與鏢帽 – 可承受熱衝擊變化而不變形，如圖五所示。

### 2.2.3 特殊電性功能複合材料

#### 2.2.3.1 石英蜂巢

石英蜂巢為一低密度低衰減之蜂巢材料，特別設計給太空雷達(Synthetic Aperture Radar, SAR)、光學偵測系統(Optical Sensor Systems)、雷達罩(Radomes)及相關低介電需求之應用，或用於須精確且穩定定位後才能發揮其功能之低負載結構。

石英蜂巢耐久性佳且比泡棉質輕，可被加工切片至 0.050±0.002”厚。其與石英纖維 Astroquartz®和 RS-3C 樹

脂(UQF-105-1/4-3.0)製作之三明治的機械性質如表四。

石英蜂巢之另一特點為低熱膨脹係數，以下為各種蜂巢在厚度方向之熱膨脹係數值如圖六。

所有無機纖維中，石英纖維具有最佳介電係數(dielectric constant)及衰減切線因子(loss tangent factor)。其在 9.5GHz 之測試結果如表五。圖七為各種蜂巢製作之共振器在不同測試頻率下之衰減切線(loss tangent)之比較。

#### 2.2.3.2 碳/碳蜂巢

由於衛星之體積與功能愈來愈大，可產生至 20 仟瓦且酬載至 1000 公斤，熱量處理(thermal management)也愈來愈重要，如何有效散熱且不增加太多重量為一重要之課題。利用碳/碳蜂巢製作之三明治結構當散熱片為解決此問題的方法之一。目前使用中之散熱板主要由鋁合金面板及鋁合金蜂巢製作，或利用高導熱碳纖維面板及鋁合金蜂巢製作。此技術利用低密度且低勁度之碳/碳蜂巢及薄且低勁度之碳/環氧面板所組成，一高導熱、

高勁度之結構，具備極佳之厚度方向導熱效果，低熱膨脹係數和低密度，且與目前產品之價錢相當，產品如圖八。其熱性質與目前產品之比較如表六。其熱傳導比 (specific thermal conductivity) 與目前產品之比較如圖九。碳/碳蜂巢心之壓縮與剪切性質分別採以 ASTM C365 與 C273 測試而得，其結果如表七。

## 2.3 製程裝備

### 2.3.1 製程分析軟體

美國 Convergent Manufacturing Technology 公司推出一套熱壓爐製程專用之分析軟體”COMPRO – Virtual Autoclave Processing on the PC”，主要利用有限分析法及複材設計軟體為基礎，在視窗 95/98 之環境下運作。使用者需輸入零件及工具之幾何形狀、材料性質及硬化週期，此軟體可提供實際之硬化溫度及材料硬化程度(degree of cure)、殘留應力及預估零件之最後幾何形狀，此技術已被應用於 Boeing 747 機翼前樑(front spar winglet)之製程修改、Boeing 767 翼尖(raked

wing tip)之工具設計，及 Boeing 777 水平尾(horizontal stabilizer)之尺寸和製程穩定性控制。此軟體價錢為美金 4.95(試用版)美金 7,500(正式版)。此軟體之功能與應用說明如附件一。

### 2.3.2 纖維縫合系統

由德國 ALTIN 公司推出之機械手臂三度空間纖維縫合技術，主要用於固定大面積之三度空間碳纖維半成品，在厚度方向進行縫合，以利纖維預性物之定位與操作。其特點為對於複雜形狀之結構容易進手，縫合線無須由線軸帶動，縫合頭與機械手臂結合，精確性與重複性高(± 0.1mm/ ± 0.15mm)。國內緯華直昇機公司有意透過經濟部計畫補助技術引進此技術。此技術之功能與應用說明如附件二。

## 2.4 檢測裝備

### 2.4.1 手提式超音波 C-Scan

波音(Boeing)公司推出之手提式自動掃描器(MAUS IV)之專利產品，以真空吸盤固定於待檢測區，在待掃描區先塗

上偶合劑後，以探頭檢測，每組掃描器可接最多四個探頭，可執行回波(pulse-echo)、共振(resonance)、投捕(pitch/catch)、機械阻抗(mechanical impedance)及渦電流(eddy current)。真空吸盤軌道及探頭可延伸至各種複雜形狀。檢測結果存於手提電腦中，軟體可執行自動量測點、線及計算面積之功能，極為適合研發單位使用。另一自動超音波掃描器則為大型生產檢測用，其結果可提供 3D CAD 損傷圖檔。此裝備之功能與應用說明如附件三。

#### 2.4.2 非接觸型超音波

由第二波(Second Wave)公司推出之非接觸型超音波，利用壓電特性及專利之機構使在空氣中產生高換能現象。在 <100KHz 至>5MHz 此非接觸型超音波所得之訊號比接觸型低 30dB。此裝備之特點為 150dB 之動態範圍， $10^{-9}$  秒之準確度及每秒可取 300 個讀值。可用於測厚、速度、密度及脫層。適用之材料為塑膠、橡膠、織物、複合材料、金屬、粉末及陶磁。此裝備之功能與應用說明如附件四。

### 3. 效益分析

本次複合材料先進結構技術開發計畫赴美參加技術研討會，見習及資料收所得效益分析效分析如下：

- 一、 本次技術研討 / 展示會中針對耐高溫複合材料之最新應用及原材料開發有熱烈之討論，尤其在高溫樹脂在樹脂轉注成型及樹脂薄膜滲透成形之加工及工具等技術，對本組發展耐高溫且複雜形狀之複材技術有極佳之效益。
- 二、 機械手臂三度空間纖維縫合技術，對於複雜形狀之結構容易進手，國內若能技術引進此技術，對國內開發樹脂轉注成形技術，可達到纖維預形物製造成本降低及品質提昇之效果。
- 三、 複合材料在導熱、防靜電及導電上之應用與實例，與其相關原材料之開發，對複材應用於電子通訊相關產業很有助益。對本院未來科技專案建案之新題目也提供許多資訊。
- 四、 利用複合材料輕量化之優點，除了在航空太空大型結構件應用外、尚有火箭外殼、壓力容器、人造衛星結構件、電力結構件、酬載結構件、光學結構件等，不但拓展相關技術領域

視野，瞭解其最新之發展項目及趨勢，並可充實本身研究工作內容，對計畫之執行及後續研究工作規劃極有助益。

#### 4. 國外工作日程表

中山科學研究院出國人員工作計畫表							
姓名		莊毓蕙					
日期	星期	行程		公差地點			工作
		出發	抵達	國名	(州)省	城鎮	
05 18	四	台北	洛杉磯	美國	加州	洛杉磯	赴美洲行程
05 19	五	洛杉磯	安那翰	美國	加州	安那翰	參訪 Cytecfiberite 公司製造材沖壓成型相關之加工技術
05 20	六			美國	加州	安那翰	整理資料及發表簡報。
05 21	日	安那翰	長堤	美國	加州	長堤	參加 45 <sup>th</sup> International SAM 討論會及展覽，收集複材模具關鍵技術。
05 22	一			美國	加州	長堤	參加 45 <sup>th</sup> International SAM 討論會及展覽，收集複材結構術。
05 23	二	長堤	漢彌敦	美國	加州	漢彌敦	參觀 Air Tech 公司之設計材相關之加工技術資料。
05 24	三	漢彌敦	洛杉磯	美國	加州	洛杉磯	至 Air Tech 公司研討高溫材料，午搭機返台。
05 25	四	洛杉磯	台北				返台行程

## 5. 建議事項

- 一、 此次國際研討 / 展示會議，其中針對高溫樹脂原材料在樹脂轉注成形與薄膜滲透成形上之應用趨勢，確定本組在高溫複材之發展方向與世界先進國家相同。
- 二、 複合材料原料在導電與導熱性質上之突破，配合原本質輕之特性，使複材在電子通訊產業上之應用更上一層樓，值得進一步收集相關資料，作為後續建案之參考。
- 三、 國內複合材料產業正面臨發展瓶頸，各產業領域都在尋找新的產品應用，參加國內外之研討會及展覽，可增廣見聞，增進創意及思考之敏銳度，建議多鼓勵工作同仁參與，以保持研究發展之活力。

表一、氰尿酸酯樹脂與環氧樹脂之性質比較

	氰尿酸酯樹脂	環氧樹脂
吸水性質(%)	< 0.6	~2
釋放氣體(%)	0.2	1
尺寸穩定性	極好	佳
介電常數	2.5 – 3.1	3.5 – 4.0
韌性(J/m <sup>2</sup> )	140	80

表二、RP-46、PMR-15 及 AFR-700B 之性質比較

	RP46	PMR-15	AFR-700B
成化溫度( )	617	600	700
熱壓釜時間	1 天	1 天	2 天
毒性(mosanto 測試結果)	較小	有	較小
樹脂價格(美金元/磅)	24	10	312
預浸料價格(美金元/磅)	60	58	245
使用溫度( )	700	550	700
吸水性(%)	0.45	0.74	2.25
起泡溫度( )	600	450	600
抗化學藥品性質	極佳	佳	無資料

## 6. 附件

附件一、熱壓爐監控系統 PC 版軟體

附件二、纖維縫合機械手臂系統

附件三、手提式超音波 C-Scan

附件四、非接觸型超音波系統