

科學圖書大庫

纖維混成複合材料之應用

編譯者 張志純

徐氏基金會出版
世界圖書出版公司

科學圖書大庫

纖維混成複合材料之應用

編譯者 張志純

徐氏基金會出版
世界圖書出版公司

編譯者序

全世界大專院校都沒有FRP學系或研究所，此其所以欲從事FRP設計及作業者一開始就要摸索前進，本着一點點玻璃和塑膠的知識，發展玻璃纖維和強化聚酯的理論及實務。後來，應付高級的需要，補強物徵召了碳、硼、克維拉和金屬絲，底質也延伸到環氧、呋喃、聚醯亞胺、熱塑樹脂和陶質或無機塑膠系統，各說各話，頭頭是道，上通天文（太空研究），下探地理（海底實驗），廣義的FRP範圍，包羅萬象，家喻戶曉，有口皆碑，真值得從事強化塑膠者驕傲。

但是，有志之士欲學無門，投石無路，走遍天涯，空手而還。必反而求諸己，建立我們自己的FRP教育系統，才是治本之道。

志純自民國五十八年以來，編譯有關FRP專籍，不下廿部，其中「塑膠ABC」、「玻璃纖維補強塑膠之應用」、「PU製品的發展與應用」及「耐腐蝕塑膠鋼」，可供初學者自修及專科學校的教本。「塑膠學」、「最新纖維補強塑膠之應用」、「塑膠大全」及「玻璃纖維及超級塑膠大全」，可供大專教本。「FRP設計手冊」、「最新FRP手冊」、「玻璃纖維遊艇大全」、「新式接著劑」、「工業化學品安全手冊」、「工商蠟類大全」、「簡易造船術」及「PU金屬成形及塑膠加工法」，可供業者的參考求證。「塑膠製品設計手冊」、「SMC之應用」、「玻璃纖維強化水泥之應用」及本書——「纖維混成複合材料的應用」——除供有志研究發展之士精研資訊外，尚可作為將來成立的大學中「FRP研究所」的起碼教材。

這就是我為何譯述N.L. Hancox編“FIBRE COMPOSITE

HYBRID MATERIALS ” 並增加第九、十、十一等三章使成爲一部極夠分量的專書以饗讀者並留待「研究所」講授的理由。

本書原文購自美國紐奧良希爾頓旅館1984年國際塑膠工程師學會第42屆年會(ANTEC)中展示攤位，薄薄的290頁，售價34.80美元，足見非常名貴，良以其內容多爲太空研究及最新塑膠和纖維的結晶，乃FRP人士爭購的對象。這要感謝英商怡和有限公司贊助我出國，始能帶回一冊。其次，要感謝徐氏基金會董事長徐銘信先生，慧眼識珠，同意譯印——事實上，他也應該感謝我，到現在爲止，我替他們一共編譯有八十部書，差不多都是Best-sellers。

新增第十、十一兩章中資訊，多係轉載「強化塑膠廣用新知季刊」的鴻文，爲此特別感謝中華民國玻璃纖維強化塑膠技術協進會蔣理事長及趙總幹事以及下列諸位學者專家（以轉載先後排名）：

劉虎先生

鄭秋榮先生

姜智埋先生

陳治貞先生

陳麗梅先生

林宗華先生

游錫揚先生

郭孝豐先生

蔣正華先生

衆志成城，團隊精神，實乃成功之母。我國FRP工業，在短短十餘年內，有輝煌的發展，端賴業者與專家們的合作。惟前途似錦，日新又新，猶需學者的指導，培植人才，提携後進，刻不容緩。本書之問世，爲FRP研究所鋪路，以精誠團結爲主旨，豈余一人之力哉。

張志純序於七十四歲生日

原 序

纖維複合物及纖維混成複合物材料的領域乃一年輕而生動者。此等材料具備有趣及新穎的性能，包括高比係數和強度，在甚多情形，極佳熱穩定性、耐腐蝕和相當易於成形，而藉混合不同纖維及 / 或其他材料，能配合其性能以滿足某些設計要求。

複合物已提供為學術研究，並仍提供一碩果累累的園地於廣幅問題，從纖維和底質的失效，組成物間表面結合，熱彈性的預測，多相材料的破斷及強度性能，至積層板理論的應用以導出夾層殼的性能。不過，材料的肯定 (*raison d'être*) 為運用於實際應用，從太空衛星至醫藥、紡織機器至汽車，和運動器材至化學工場。範圍甚廣，為獲得最多的利益，複合物及混成物應該用以補足而非代替現存材料及開始在新材料設計的人工製品，不應這樣想：學術與實用方面間有矛盾——二者都是綜合探索所絕不可少的。

補強物及底質的化學及物理型式和運用這些的模式之泛濫，已經遍及全世界。在本書中，吾人目的為集中於一型纖維複合物—混成物 (*Hybrid*)，它實際似乎貢獻很大的範圍，並希望如此，顯示此等構造的性能如何關聯基本纖維複合物和芯料的性能，如何預測及衡量長短期機械、化學及熱性能，和調查纖維混成物的現行用途。吾人經常不得不藉外挿法從傳統複合物的習性接近混成物的性能。此點在吾人知識中指出若干漏洞，希望本書成果之一將為刺激這些方面的研究發展。為保持篇幅適合讀者，故意將範圍限於由連續性或編織碳、玻璃或芳香醯胺纖維在熱固性底質製成的纖維複合混成物，必要時，帶泡膠或填充聚合物、

金屬截面、蜂巢或木質的芯料。無疑，有時作者們將迷失此等嚴格限制，並可能遺漏讀者喜歡的資訊或題材。若此情況發生，尚請原諒，吾人目的為給工程師、科學家及使用人若干工具，無論如何不完美，以從事專業工作，其創新已經達成，剩下的就是再接再勵了。

N.L. Hancox
Materials Development
Division Atomic Energy
Research Establishment
Harwell, Oxfordshire UK

目 錄

編譯者序	I
原 序	III
第一章 纖維混成複合物概論	1
1.1 前 言	1
1.2 纖維複合物材料	1
1.3 混成物型式	3
1.4 混成物實例	6
1.5 混成物的應用	8
1.6 混成物材料的鳥瞰	10
1.7 結 論	17
1.8 參考文獻	18
附錄 熱誘導應力	20
第二章 補強物樹脂及製造方法	24
2.1 補強物	24
2.2 樹脂系統	37
2.3 製造程序	53

第三章 複合物的彈性及熱學性能	69
3.1 前 言	69
3.2 單一纖維複合物	69
3.3 分散纖維混成物 (A 型)	82
3.4 混成物積層 (B 及 C 型)	93
3.5 玻璃及泡膠或非纖維芯混成物 (D 型)	106
3.6 設計及成本效益	107
3.7 總 結	108
3.8 參考文獻	109
第四章 混成複合物的破斷及疲勞	113
4.1 前 言	113
4.2 試驗方法	116
4.3 說明破斷習性的參數	122
4.4 總 結	123
4.5 應用於混成物的混合法則	124
4.6 混成物的衝擊和破斷習性	126
4.7 可用的混成物	126
4.8 實驗性混成物	137
4.9 混成物的疲勞	145
4.10 曝露於模擬使用狀況後混成物的殘餘性能	149
4.11 參考文獻	154
第五章 混成複合物材料的環境退化	155
5.1 產品使用壽命及可靠性	155
5.2 未補強樹脂的化學抵抗力	158
5.3 纖維的化學侵襲	163

5.4	混成物構造其他組成分的化學侵襲	166
5.5	纖維樹脂界面	166
5.6	基本及混成複合物中水熱作用	167
5.7	高低溫度	172
5.8	現行知識對混成複合物的外插法	175
5.9	芯子表皮構造的芯料	178
5.10	含碳纖維的結構中電池腐蝕	181
5.11	不良天候狀況	183
5.12	火中的混成複合物	186
5.13	結 論	188
5.14	參考文獻	188
第六章 試驗方法		191
6.1	前 言	191
6.2	待測定的性能	193
6.3	測定一複合物或混成物的構成分	194
6.4	FRP 及混成物的機械試驗法	196
6.5	FRP 及混成物的熱學試驗法	208
6.6	結 論	208
6.7	參考文獻	209
第七章 纖維複合混成物的實際利用		211
7.1	前 言	211
7.2	結構性設計指導原則	213
7.3	非汽車的應用	230
7.4	汽車結構性組件	243
7.5	參考文獻	250

第八章 人工義肢及外撐系統	251
8.1 前言	251
8.2 彌補物的應用	252
8.3 直體具的應用	255
8.4 傳統直體具的構造 / 加工	256
8.5 CFRP 混成複合物構造	257
8.6 用CFRP 混成複合物建造直體具	267
8.7 臨床應用一種直體具	270
8.8 將來工作	273
8.9 參考文獻	274
第九章 交連混成複合物的彈性性能	275
9.1 前言	275
9.2 理論	276
9.3 實驗	281
9.4 總結及討論	284
9.5 參考文獻	284
第十章 塑膠複合物的加工設備	286
10.1 玻璃纖維強化塑膠模造作業的康倍四用設備	286
10.2 全能康倍噴佈機一般使用說明	294
10.3 康倍噴佈機組使用法	296
10.4 康倍注射器使用法	297
10.5 自動化鋪帶技術	298
10.6 工業機器人於FRP 加工的應用	306

附 錄 轉載技術資訊	315
1. 克維拉	315
2. 克維拉纖維	323
3. 芳香醯胺纖維的由來	357
4. 碳纖維	376
5. 玻璃纖維的製造及其特性	407
6. 纖維強化金屬複合材料	433
7. 碳纖維強化鋁合金複合材料	449
8. 高級纖維材料	462
9. 混成複合材料	481
10. 碳纖維強化熱熔塑膠	499
11. 希普恩—最新式高性能塑膠	504
12. 玻璃纖維強化水泥	511
13. 十年來 GRC 評鑑及績效的發展	520
14. 克維拉纖維布製防彈衣	536
15. 自行強化塑膠——一條至高績效樹脂的新路	563
譯者編譯科技書籍一覽表	568

第一章 纖維複合混成物概論

N. L. HANCOX

Atomic Energy Research Establishment, Harwell, Oxfordshire, UK

1.1 前言

任何熟悉木塊板、積層粒子板、由紙蜂巢芯木板面製成的門和內部隔牆的人，或曾在一個由壓克力構造用聚烏（PU）泡膠或玻璃纖維補強塑膠（FRP）強化的浴缸內鬆弛過的人已經和一種混成物構造（Hybrid structure）相接觸了。

在此吾人考慮一種較專門型式的混成物，一種在例如：運輸、營造及休閒中有極大潛力者，其中，不是整個結構，就是面層，係由高績效纖維補強樹脂底質複合物製成者。混合物提供甚多纖維複合物材料的優點，諸如極佳比剛勁和強度（亦即每單位質量的剛勁，等等）、易於加工、性耐腐蝕，連同藉細心選用組成物造成的降低成本和最優績效。藉包含碳纖維增加FRP的係數、強度和疲勞績效，或者藉包含若干玻璃或芳香醯胺纖維增加碳纖維補強塑膠（CFRP）的衝擊能量，是絕對可能的。

1.2 纖維複合物材料

所有討論的混成物的共同要件為連續單向或積層的FRP的存在。一種高績效複合材料含有與必須能滲透該纖維然後固化的底質密切混合，基本上提供剛勁和強度的對準而連續的補強纖維。為增進軸外性能的

表 1-1 60 v/o 單向FRP及芯料在室溫的機械和熱性能

材 料	密 度 kg/m ³ ($\times 10^3$)	縱向抗張 強度 GPa	縱向抗張 係數 GPa	縱向剪力 強度 GPa	縱向剪力 係數 GPa	波松比	熱膨脹係數 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ($\times 10^{-4}$)
碳纖維 VHM	1.69	0.7	300	0.05	6.0	0.25	-1.0
碳纖維 HM-S	1.63	0.9	210	0.05	4.5	0.28	-0.5
碳纖維 HT-S	1.55	1.45	175	0.07	5.0	0.26	0.5
碳纖維 A-S	1.54	1.2	130	0.07	5.0	0.26	1.0
玻璃纖維 E	2.0	1.4	40	0.065	4.5	0.3	3.0
芳香醴胺	1.38	1.4	40	0.06	2.0	0.34	-2.0
鋁合金	2.7	0.43	70	0.19	24		22
鋁蜂巢	上達 0.16	上達 0.02	上達 3.7	上達 0.005	上達 0.9		
泡 膠	上達 0.1	上達 0.002	上達 0.05	上達 0.001	上達 0.005		
木 材	上達 0.8	上達 0.08	上達 12				上達 9

應該記着碳、玻璃及芳香醴胺纖維值指 60 v/o 單向複合物，所有值是近似的。VHM = 甚高係數，HM = 高係數，HT = 高(抗張)強度，S 指示表面處理。S 玻璃與 E 玻璃類似，但有一較高係數。芳香醴胺纖維商名克維拉(Kevlar)，有兩種等級。纖維複合物和木材係非等向性的。與纖維或紋理縱向正交的機械性能比較列者將較小，熱性將較大。木材性能視水份含量而定。

單向複合物可予合併製成積層，使每層有一相關參考方向的指定定向，考慮的底質將限於熱固樹脂（主要是環氧和聚酯），由於儘管此等及補強纖維的組合不能用於約 200°C 以上溫度，它們迄今乃最廣幅使用的底質型式。

為給讀者可能混成組合材料性能範圍的大小觀念，表 1-1 列舉含樹脂底質 60 % 體積 (60 v/o) 纖維及各種芯料的單向連續纖維複合物的熱學及機械性能。應了解者，FRP 性能將隨纖維的明確型式及供應者、複合物製造的技巧，和所有底質型式及其硬化週期而變易。對芯料，目的是提供此等與 FRP 的性能間存在的大不相同的指示。進一步材料性能的申論見第二章。

1.3 混成物型式

混成物優點之一為補強物和（如使用的話）芯料的選擇和部署的彈性。此導致很多型式的構造而當討論這些時有一種共同語言是重要的。目前，尚無大家協議的混成物分類，雖然 Chamis 及 Lark [1]、Lovell [2] 和 Summerscales 及 Short [3] 曾建議若干方案。為免嘗試一可能混成物構造的冗長分類，茲擬議劃分各該結構為四種一般型式，A、B、C 及 D。

1.3.1 A 型—分散的纖維

在限界內此乃一種含兩型或多型對準但隨機分散於一共同樹脂底質的連續性纖維的親密混合物。實務上，它是頗易於處理含數千纖維的纖維束 (Fibre tows) 並使此等以一隨機或有秩序的方式在整個底質內對準及分散。此型已研究的實例為由橫過板寬鋪設的交替層不同厚度的碳和玻璃纖維束製成的極薄夾板。由兩種不同型的纖維調製的編織布可能亦歸入此類。

1.3.2 B 型—分散的纖層

基本上此乃一種含兩型或多型纖層 (Fibre ply) 的隨機或交替混合物。因為不向一中央平面對稱的積層從其硬化溫度冷卻或受應力時易於變形，隨機積層較少使用。纖層可能單向、角式或由分散的纖維材料、A 型混成物建立。陸續層的同樣材料的厚度不一定相同，亦不必使用等厚的不同型纖維。

1.3.3 C 型—纖維皮芯

此型係由一種或多種施諸另一纖維積層 (Fibre laminate) 製的芯子的纖維積層表皮 (outer skins) 所組成，皮和芯 (core) 二者可能係由單向或角式層料或 A 型或 B 型混成物製成。它通常是，雖然不必須，在皮上有較挺纖維 (例如碳纖維施諸 FRP 芯的任何一面)，並有一向一中央平面對稱的構造。不過，其中芯子僅一面補強，例如碳纖維施諸一芳香醯胺補強塑膠 (ARP) 芯的壓縮面，或者不相似表皮施諸芯的兩面的混成物曾被製造。另一變易利用進入纖維芯的上及 / 或下表面的薄條補強物。

1.3.4 D 型—纖維皮，非纖維芯

此型混成物，係由施諸一種泡膠、填充樹脂、某型蜂巢實心金屬或木質的芯子的纖維表皮所組成，往往被稱為一種夾心構造。此型材料，雖無高績效 FRP 皮，曾被廣幅使用若干年。表皮可能亦含一型或多型排列成單向或角式纖層形式或者 A 型或 B 型混成物的纖維。結構通常向一中央平面對稱，但不必須如此。帶若干芯料，諸如填充樹脂、固體金屬及木材，補強物條片可用以代替表皮。在甚多情形，樹脂底質外的接着劑層被用以結合表皮及芯，D 型混成物的實例為天線盤 (CFRP 與鋁蜂巢)、直體具 (CFRP 與實心鋁)，及貯槽 (FRP 與端紋白塞木)。

1.3.5 其他結構

可想見有其他型結構。最近 Payen [4] 敘述一種飛機工業用構造，其中，CFRP 夾心於鋁皮間，此處吾人將專論上列型式，其中，統一方案為一種合理數量的連續性對準的或積層的碳，玻璃或芳香醃胺纖維置於一種熱固樹脂底質內的混成物的存在。不同混成物示意如圖 1-1。

在描述一種混成物時，纖維和樹脂，及若使用接着劑和芯料，應予完全指定，連同樹脂的硬化週期。製造過程的意見亦很有用。若使用角式纖層，最重要者為包括積層順序的細節。為完備起見，應包括由單一型纖維調製的相似單向或積層材料的性能。

為澄清若干要點，考慮一種由碳、玻璃和芳香醃胺纖維製成的假想 C 型混成物。一個完全的說明可能如下：

分散的纖層表皮，B 型，係對稱地施諸於一含 16 層預浸纖維的單向 FRP 芯上。二表皮之一係由兩層置於外緣上的單向 CFRP 預浸片、一塊含三纖層對準於 90° 、 0° 、 90° 至碳和玻璃纖維縱向軸的 ARP 積層、另兩層單向 CFRP 及一塊含三層如前排列的 ARP 積層調製者。所有壓製、預浸的材料含 50 v/o 纖維。總厚度 CFRP、FRP 及

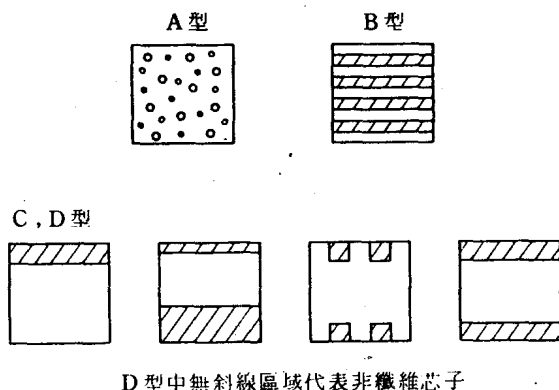


圖 1-1 混成物型式的示意圖—全部端視圖

ARP 之比為 8 : 16 : 12，或者按混成物或混成因數 (Hybridisation factors) 的術語 0.22 : 0.44 : 0.33。(混成因數是一組成分對總混成物之比，按體積計算。)

1.4 混成物實例

考慮一個示範從構造獲得的若干優點的一種實用混成物的簡單例子，是大有幫助的。該系統為一對稱的纖維表皮和芯子，C 型混成物，結果係基於 Wells 及 Hancox [5]，和 Hancox 及 Wells [6] 的研究。試樣的草圖，三點應力彎曲荷重，連同一個含 50 v/o CFRP 及 50 v/o FRP 的樣本的負荷變形特性，如圖 1-2 所示。彎曲係數、強度及 Izod 衝擊能量，作為一現場 CFRP 體積比率的函數，如圖 1-3 至 1-5 所示。應記取著碳和玻璃纖維係連續性並沿桿的長軸對準的。

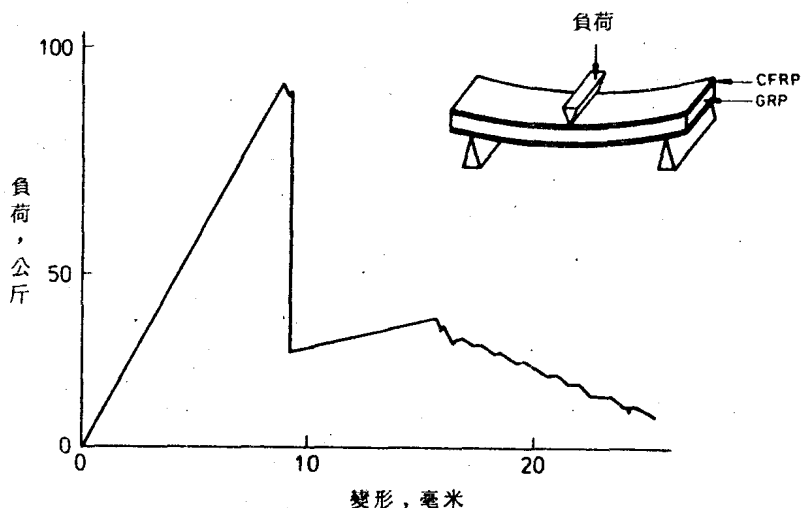


圖 1-2 混成物樑的負荷變形曲線 (來自參考 5)