

複合材料

顧 宜 / 主編

林金福 林尚明 段維新 葉逸彥 嚴建國 / 審定



COMPOSITE MATERIALS



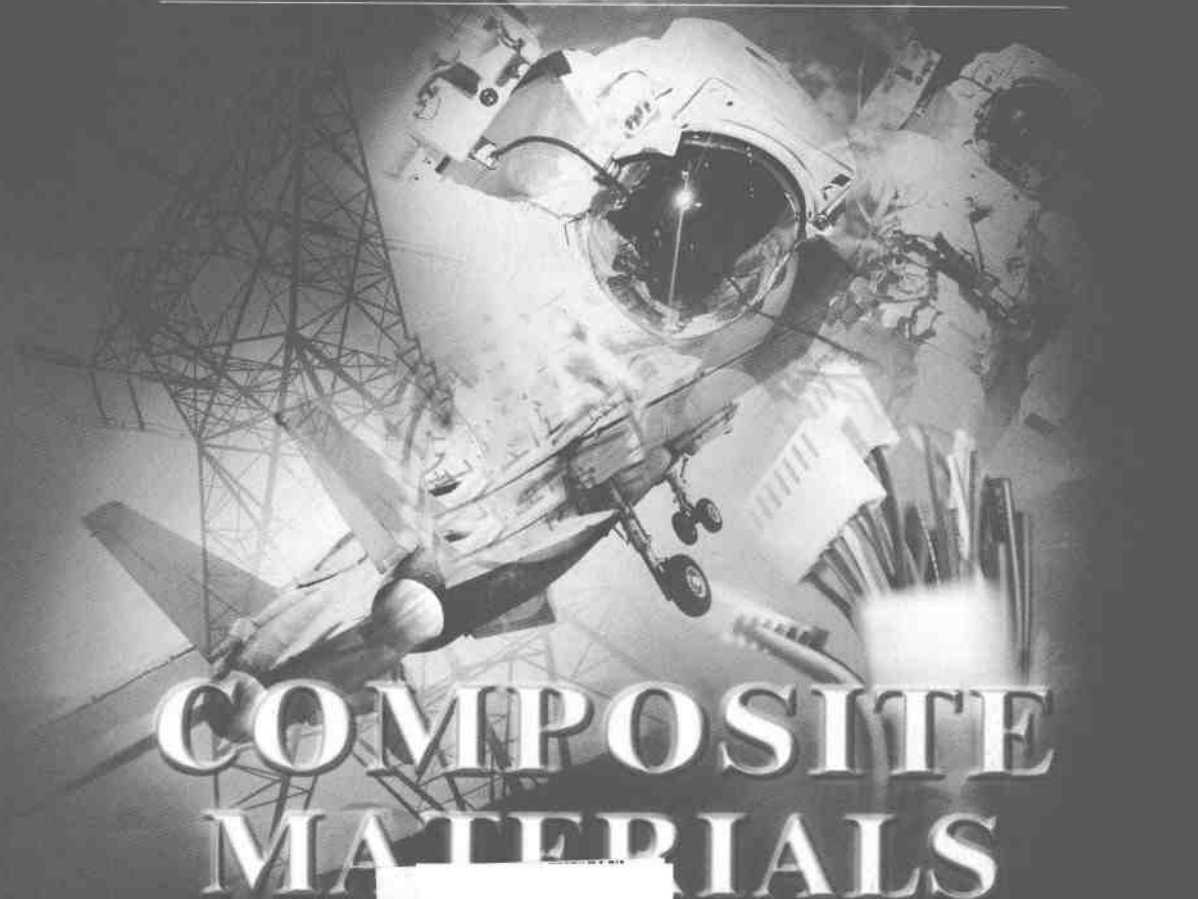
新文京開發出版股份有限公司

New Wun Ching Developmental Publishing Co., Ltd.

複合材料

顧 宜 / 主編

林金福 林尚明 段維新 葉逸彥 嚴建國 / 審定



COMPOSITE
MATERIALS



新文京開發出版股份有限公司

New Wun Ching Developmental Publishing Co., Ltd.

國家圖書館出版品預行編目資料

複合材料／林金福等審定，顧宜主編，初版
臺北縣中和市：新文京開發出版有限公司
民 91
面： 公分

ISBN 957-512-690-4（平裝）

1. 工程材料 2. 材料科學

440.3

91016736

複合材料

（書號：A239）

審定者	林金福 林尚明 段維新 葉逸彥 嚴建國
編著者	顧宜
出版者	新文京開發出版有限公司
地址	台北縣中和市中山路二段 362 號 8 樓（9 樓）
電話	(02) 2244-8188（代表號）
F A X	(02) 2244-8189
郵撥	1958730-2
初版	中華民國 91 年 12 月 30 日

有著作權 不准翻印

基本定價：12 元 8 角 9 分整

法律顧問：蕭雄淋律師

ISBN 957-512-690-4

序 言

複合材料係指將兩種以上不同的材料合理地進行複合而得的一種新材料；隨著金屬材料、無機非金屬材料和高分子材料自身的發展及相互間的滲透和複合，使得複合材料發展十分迅速，在許多產業也得到了廣泛應用。目前，複合材料的應用領域正從傳統的結構材料往功能材料方向發展，而奈米複合材料的出現則把材料的研究和應用推向了一個新的階段，因此學習和了解複合材料的相關知識，對於從事材料工作的相關人士是十分重要的。

本書共分九章，系統地說明不同基體複合材料的組成、結構、加工技術、基本性能和應用，並詳細地介紹成型方法以及應用面最廣的聚合物複合材料；同時在書中安排了複合效應、複合材料介面及複合材料結構設計等章節，以使學生在理論上對複合材料有一定了解，從而掌握複合材料的全面知識。

本書由顧宜主編，編者群包括湯嘉陵（第一～三章）、劉軍（第四～六章）、蔡緒伏（第七～九章），並由顧宜負責統稿。同時台灣大學林金福教授、段維新教授及亞東技術學院林尚明教授、葉逸彥教授、嚴建國教授根據實際課程要求予以細心審定，在此併致謝忱。

本書既可作為大專院校相關科系的教材，同時也可供從事這方面工作的科研人員或對複合材料有興趣的讀者參考。編者衷心地希望本書能對複合材料技術及研究起拋磚引玉的作用。本書雖經審慎編寫與統整，並經審定者細心校閱及修訂。若仍有疏誤或疑義，尚祈不吝賜正，以便再版時能更臻完美。

編著者 謹識

2002 年 12 月

目錄

CONTENTS

第一章 緒 論 1

1.1 複合材料的定義	1
1.2 複合材料的分類及命名	2
1.3 複合材料的特性	7
1.4 複合材料的發展概況	8
1.5 複合材料的應用	14
習 題	18

第二章 複合材料的複合效應 19

2.1 複合材料各組元（相）相互作用	19
2.2 複合材料的基本結構形式與模型	20
2.3 複合材料的複合效應	29
2.4 複合材料性能的複合規律	44
習 題	64

第三章 複合材料界面 65

3.1 複合材料的相與界面	65
3.2 界面化學基礎	67
3.3 複合材料界面的形成過程	81
3.4 複合材料的界面結構及界面破壞機制	82
3.5 複合材料的界面理論及界面處理	96
3.6 複合材料界面微細結構分析	111
習 題	121

第四章 複合材料的補強材料 123

4.1	概 述	123
4.2	玻璃纖維	123
4.3	碳纖維	139
4.4	其他無機纖維補強材料	151
4.5	有機纖維	159
4.6	晶 鬚	168
4.7	顆 粒	172
	習 題	174

第五章 複合材料的基材 175

5.1	概 述	175
5.2	酚醛樹脂	177
5.3	環氧樹脂	187
5.4	不飽和聚酯樹脂	217
5.5	其他熱固性樹脂	234
5.6	熱塑性樹脂	241
5.7	無機非金屬類基材	248
5.8	金屬材料類基材	256
	習 題	262

第六章 樹脂基複合材料成型技術 263

6.1	概 述	263
6.2	接觸低壓成型技術	268
6.3	壓製成型技術	289
6.4	纏繞成型技術	312
6.5	夾層結構製造技術	322
6.6	纖維補強熱塑性塑膠成型技術	333
	習 題	350

第七章 複合材料的設計 351

7.1	複合材料的性能	351
7.2	複合材料的結構設計	362
7.3	複合材料的界面設計與控制	385
7.4	複合材料製品設計	391
7.5	複合材料的性能測試	397
	習 題	405

第八章 結構複合材料 407

8.1	聚合物基複合材料	407
8.2	碳／碳複合材料	425
8.3	金屬基複合材料	428
8.4	陶瓷基複合材料	435
8.5	無機膠凝複合材料	444
8.6	混雜複合材料	452
	習 題	468

第九章	功能複合材料	469
------------	---------------	------------

9.1	壓電複合材料	470
9.2	導電複合材料	481
9.3	磁性複合材料	490
9.4	摩阻複合材料	494
9.5	生物功能複合材料	504
9.6	其他功能複合材料	508
習題		514

附錄	習題解答	515
-----------	-------------	------------

參考文獻	561
-------------	------------

緒 論

1.1 複合材料的定義

什麼是複合材料？迄今還沒有一個嚴格精確而又統一的定義。若著眼於性能特徵，一個比較完整的定義如下：“複合材料是由有機高分子、無機非金屬或金屬等幾類不同材料通過複合技術組合而成的新型多相固體材料，它既能保留原組成材料的主要特色，又通過複合效應獲得原組成所不具備的性能，可以通過材料設計使各組成的性能互相補充並彼此關聯，從而獲得新的優越性能，與一般材料的簡單混合有本質上的差異”。

所謂“複合”即含有多元多相組合之義，簡單地說，複合材料就是用兩種或兩種以上不同性能，不同形態的組成材料通過複合手段組合而成的一種多相材料。從組成與結構分析來看，其中一相是連續的，稱為基材相，另一相是分散的被基材包容的，稱為補強相，複合材料的各個相在界面上可以物理性地分開。從微觀層次上，發現補強相和基材相之間的界面由於複合時複雜的物理和化學原因，變得既不同於基材相、又不同於補強相組成本體的複雜結構，同時發現這一結構和形態對複合材料的宏觀性能產生影響，所以，界面附近這一結構與性能發生變化的微區也可作為複合材料的一相，稱為界面相。一般說來，複合材料是由基材相、補強相和界面相所組成的。

這裏需要指出的是，從廣義上講，複合材料包括的範圍比較廣泛，如天然材料：竹、木、椰殼、動物骨骼、皮膚……，人工材料如合金、塑膠等等，這些都具有一定的複合材料特徵，不屬於本章討論的範圍。

1.2 複合材料的分類及命名

目前，對材料的分類普通認為可分成：金屬材料、無機非金屬材料、有機高分子材料和複合材料。複合材料是以前三種材料為組成經人工複合而成的。如表 1-1 所示。

表 1-1 複合材料的系統組合

分 散 相			連 續 相		
			金 屬 材 料	無 機 非 金 屬 材 料	有 機 高 分 子 材 料
金 屬 材 料	金屬纖維（絲）		纖維金屬基複合材料	鋼絲／水泥複合材料	補強橡膠
	金 屬 品 鬚		品鬚／金屬基複合材料	品鬚／陶瓷基複合材料	
	金 屬 片 材				金屬／塑膠板
無 機 非 金 屬 材 料	陶	纖 維	纖維／金屬基複合材料	纖維／陶瓷基複合材料	
		晶 鬚	晶鬚／金屬基複合材料	晶鬚／陶瓷基複合材料	
	瓷	顆 粒	彌散強化合金材料	顆粒陶瓷基複合材料	粒子填充塑膠
		纖 維			纖維／樹脂基複合材料
	玻 璃	粒 子			
		纖 維	碳纖維／金屬基複合材料	纖維／陶瓷基複合材料	纖維／樹脂基複合材料
	碳	炭 黑			顆粒／橡膠 顆粒／樹脂基複合材料

表 1-1 複合材料的系統組合（續）

分散相		連續相		
		金屬材料	無機非金屬材料	有機高分子材料
有機高分子材料	有機纖維			纖維／樹脂基複合材料
	塑膠	金屬／塑膠		
	橡膠			

複合材料通常有以下幾種分類：

1. 按使用類型分為：①結構複合材料；②功能複合材料；③智慧複合材料。
2. 按基材類型分為：①樹脂基複合材料；②金屬基複合材料；③無機非金屬基複合材料等。
3. 按補強纖維分為：①玻璃纖維複合材料；②碳纖維複合材料；③有機纖維複合材料；④陶瓷纖維複合材料等。
4. 按分散相形態分為：①顆粒增化複合材料；②連續纖維增化複合材料；③短纖維或晶鬚增化複合材料；④片粒狀材料增化複合材料（二維）；⑤三維編織複合材料等。

此外，還有一些專指某些範圍的名稱，如：近代複合材料、先進複合材料、生體複合材料、混雜複合材料等，比如所謂先進複合材料是指由碳、碳化矽(SiC)、硼等纖維補強的複合材料，先進複合材料比強度大於 4×10^6 MPa/g，比模量大於 4×10^8 Mpa/g。這裏不再一一敘述。

按基材材料分類詳見圖 1-1，按補強材料類型及在複合材料中分佈狀態分類，以 PMC 為例，如圖 1-2 所示。

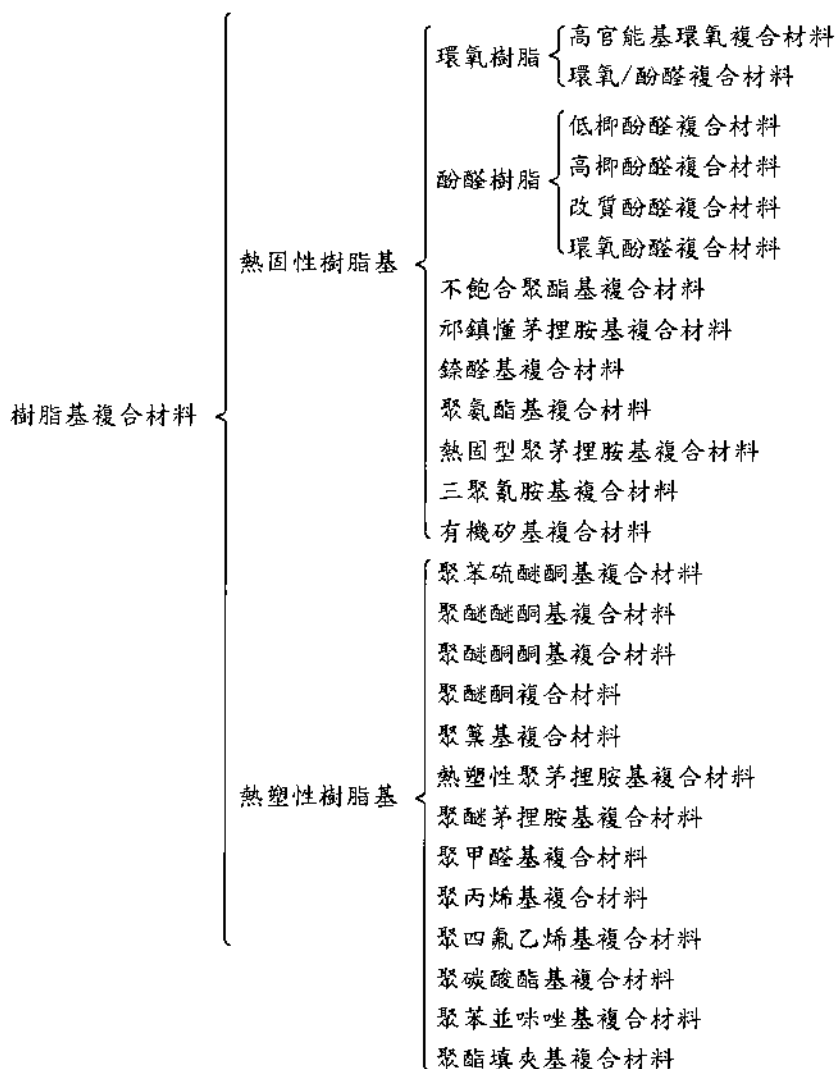


圖 1-1 按基材材料分類的複合材料

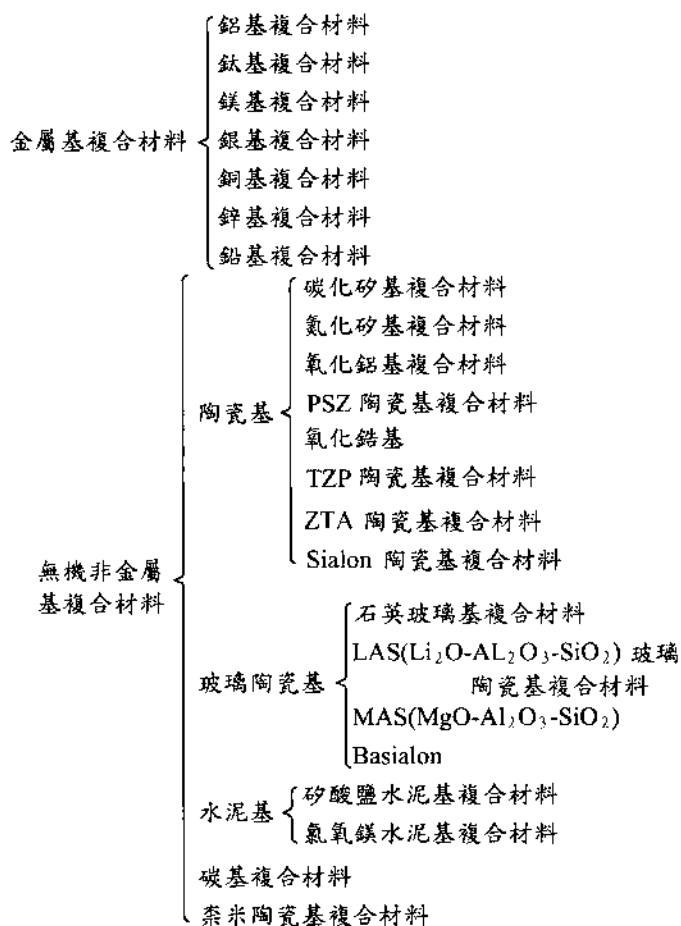


圖 1-1 按基材材料分類的複合材料 (續)

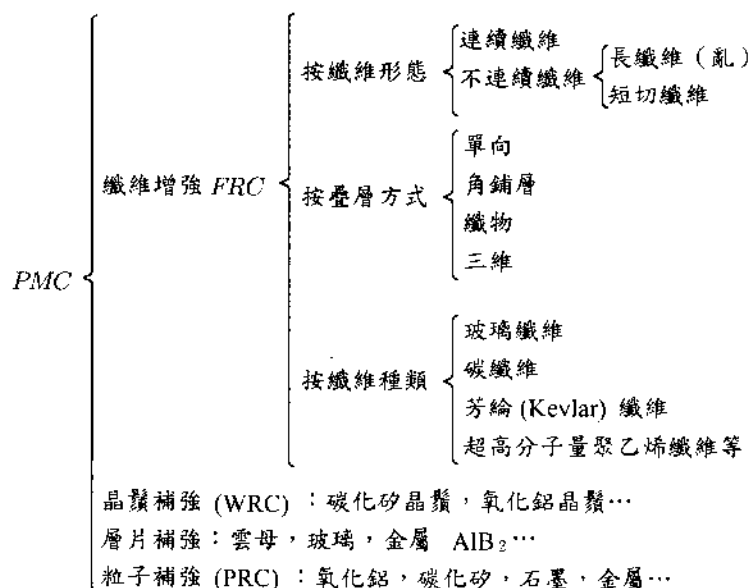


圖 1-2 聚合物基複合材料按補強劑分類

根據上一節關於複合材料的定義，對它的命名是以相為基礎的，命名方法是將補強相或分散相材料放在前面，基材相或連續相材料放在後面，之後再綴以複合材料。如碳纖維和環氧樹脂構成的複合材料稱為碳纖維環氧基複合材料，通常為書寫簡便，在補強相材料與基材相材料中間劃一個半字線（或斜線），再加複合材料。如上面的碳纖維環氧基複合材料可寫作“碳纖維－環氧複合材料”，更簡化一點寫成“碳－環氧”，硼纖維與鋁構成的複合材料稱為“硼纖維鋁基複合材料”簡寫為“硼－鋁”，餘者類推。

1.3 複合材料的特性

與傳統材料相比，複合材料最顯著的特點是它具有可設計性。材料設計是近 20 年才提出的新概念，這一概念在複合材料中體現更為充分。複合材料的力學、機械、物理、化學性能等都可通過組成材料的選擇和匹配、界面控制、複合技術、成型技術等手段進行設計和控制，以最大限度滿足使用性能要求和環境條件要求。其次，複合材料構件與材料是同時形成的。它由組成複合材料的基料在複合的同時形成構件，一般不再由複合材料“加工”成複合材料構件，使得結構的整體性良好，可大量減少零件和連接件，提高構件的可靠性。再者，複合材料在形成過程中伴有組成材料複雜的物理與化學變化，構件的性能對複合技術過程及技術參數等依賴性較大，在其製備過程中很難精確地控制技術參數（尤其是手積成型法）。故，複合材料構件的性能分散性大。當然複合效應的存在與體現也是複合材料最重要的特點，除上述複合材料的基材特點外，其性能特點如下：

一、比強度、比模量大

材料的拉伸強度與密度之比稱為比強度，材料的楊氏模量與密度之比稱為比模量。用比強度和比模量這一概念能很好說明複合材料“輕質高強”方面的優勢。如：碳纖維強化環氧樹脂複合材料的比強度比鋼高 5 倍，比鋁合金高 4 倍，比鈦合金高 3.5 倍，比模量約為鋼、鋁、鈦的 4 倍。

二、破損安全性高

複合材料的破壞不像傳統材料那樣突然發生，而是經歷基材損傷、裂開、界面脫粘、纖維撥出、纖維斷裂等一系列過程，當少數纖維發生斷裂時，載荷又會通過基材的傳遞，迅速分散到其他完好的纖維上去，從而遲滯了災難性破壞突然發生的情況。

三、耐疲勞性好

通常金屬材料的疲勞強度極限是拉伸強度的 30~50%，而碳纖維樹脂基複合材料的疲勞強度極限為其拉伸強度的 70~80%。因此，在長期交變載荷條件下工作的複合材料構件，具有較長的使用壽命和較大的破損安全性。

四、阻尼減震性好

受力構件的自振頻率除與形狀有關外，還同結構材料的比模量平方根成正比，所以，複合材料有較高的自振頻率，同時，複合材料的基材與纖維界面有較大吸收振動能量的能力，致使材料振動阻尼較高。

五、耐燒蝕性能好

複合材料一般耐熱性較好，其比熱、熔融熱和氣化熱大，高溫下能吸收大量熱能，成炭率較高，是良好的耐燒蝕材料。

1.4 複合材料的發展概況

複合材料並不是人類發明的一種新材料，在自然界中，有許多天然複合材料，如竹、木、椰殼、骨骼、甲殼、皮膚等。這些天然複合材料在與自然長期抗爭中演化形成了優化的複合組成與結構形式。以竹為例，結構為許多直徑不同的管狀纖維分散於基材中，纖維的直徑與排列疏密由表層到內層各不相同，表層纖維直徑小而排列緊密，內層則相反，這種複合結構很合理，達到了最佳的強韌組合。

人類幾千年前已開始製造和使用複合材料，在距今 7000 年前的西安半坡遺址中就發現用草拌泥製成的牆壁和磚坯，這種建築材料的性能既優於草，又優於泥。中國古代的弓是用竹片、鋼條等材料經過巧妙的鋪疊得到的高模量、高強度的優良層合複合構件，也是複合材料應用的典型實例。這說明人類早已知道複合材料強於單一材料。

材料科學發展到 20 世紀中葉，複合材料製品已不僅僅是天然材料的複合利用了，而是在化學、力學、機械學、冶金、陶瓷、高分子材料等學科基礎上，形成集科研、設計、生產、應用於一體的完整的工業體系和學科體系。近代複合材料的發展從基材上來看首先是軟基材，然後逐漸發展到較硬和硬的基材，即從樹脂到金屬到陶瓷基材。

樹脂基複合材料（Resin Matrix Composite，簡稱 RMC）也稱纖維強化塑膠（Fiber Reinforced Plastics，簡稱 FRP），是目前技術較成熟、應用最廣的一種複合材料，這種材料是以短切或連續纖維及其織物強化熱固性或熱塑性樹脂基材，經複合而成。於 1886 年發明，至今還支撐著汽車工業發展的輪胎是最早問世的 RMC，其中簾子線和顆粒炭黑（為提高輪胎耐磨性）為強化相，橡膠為基材，按複合材料定義，應為一種纖維-炭黑強化橡膠的三相複合材料。用來製作氣球、救生艇、潛水服、雨衣、吹脹式建築、太空服等製品的橡膠布與輪胎相似，也是最早的纖維強化橡膠複合材料。自 40 年代美國誕生了玻璃纖維強化塑膠（俗稱塑鋼）以來，隨著樹脂基複合材料的製備及成型加工技術不斷發展和改善。如：從 1940 年的手積成型技術到 1946 年的纖維纏繞成型技術，到 1950 年的真空袋和壓力袋成型技術，到 1961 年片狀模塑膠混料，（Sheet Moulding Compound，簡稱 SMC）在法國問世，到 70 年代拉擠成型技術，反應注射成型（Reaction Injection Molding，簡稱 RIM）和強化樹脂反應注射成型（Reinforced Reaction Injection Molding，簡稱 RRM）技術的不斷發展和成熟，RMC 生產從手工到半自動化到連續自動化生產，RMC 製品的表面光潔度、尺寸大