



国家出版基金资助项目  
“十三五”国家重点图书  
材料研究与应用著作

# 聚合物基复合材料科学与工程

POLYMER MATRIX  
COMPOSITES SCIENCE  
AND ENGINEERING

张东兴 黄龙男 编著

哈尔滨工业大学出版社  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



国家出版基金资助项目  
“十三五”国家重点图书  
材料研究与应用著作

# 聚合物基复合材料科学与工程

POLYMER MATRIX  
COMPOSITES SCIENCE  
AND ENGINEERING

张东兴 黄龙男 编著

哈尔滨工业大学出版社  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内容简介

本书概述了聚合物基复合材料的定义与分类、发展与应用,研究机遇及主要问题等内容。从材料设计与结构设计、基体与增强体及功能体二相或多相材料间的相互作用、复合效应以及界面作用机制与作用理论、界面效应,到材料工艺制备方法与性能表征方法,外伤作用下含缺陷复合材料性能演变规律与表征方法,混杂复合材料、热塑性复合材料等方面,较为全面系统地介绍了相关理论知识与相关研究工作。涉及内容较多,作者试图从逻辑上梳理清楚,使书中的内容循序渐进、由表及里。

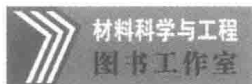
本书可供复合材料、航空航天工程、机械与汽车工程、土木工程等相关领域的研究人员与工程技术人员使用参考,也可作为高等院校相关专业的教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

聚合物基复合材料科学与工程/张东兴,黄龙男编著. —哈尔滨:  
哈尔滨工业大学出版社,2017.6  
ISBN 978-7-5603-5915-1

I. ①聚… II. ①张… ②黄… III. ①聚合物-复合材料-  
IV. ①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 062175 号



材料科学与工程  
图书工作室

策划编辑 张秀华 杨 桦  
责任编辑 范业婷 刘 瑶  
封面设计 卞秉利  
出版发行 哈尔滨工业大学出版社  
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006  
传 真 0451-86414749  
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>  
印 刷 黑龙江艺德印刷有限责任公司  
开 本 660mm×980mm 1/16 印张 32.25 字数 571 千字  
版 次 2017 年 6 月第 1 版 2017 年 6 月第 1 次印刷  
书 号 ISBN 978-7-5603-5915-1  
定 价 138.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

# 《材料研究与应用著作》

---

## 编写委员会

(按姓氏音序排列)

毕见强	曹传宝	程伟东	傅恒志
胡巧玲	黄龙男	贾宏葛	姜越
兰天宇	李保强	刘爱国	刘仲武
钱春香	强亮生	单丽岩	苏彦庆
谭忆秋	王铀	王超会	王雅珍
王振廷	王忠金	徐亦冬	杨玉林
叶枫	于德湖	藏雨	湛永钟
张东兴	张金升	赵九蓬	郑文忠
周玉	朱晶	祝英杰	

# 前 言

材料是人类赖以生存与发展的物质基础,是人类进步的里程碑,是多数发明创造的先导。现代先进材料科学与技术对科学技术及国民经济的发展具有重要的推动作用。在当今社会中,新材料已成为各工程领域的共性关键技术之一,是高科技的重要组成部分,也是最重要和发展最快的学科之一。

聚合物基复合材料以其优异的材料与结构特性在先进材料领域中占有极其重要的地位,同时对现代科学技术的发展发挥着十分重要的作用。自20世纪60年代问世以来,聚合物基复合材料一直作为世界各先进国家重点研究与开发的重要领域,也是我国“十三五”期间材料科学与技术发展规划中重点研究与开发的重要关键新材料之一。

聚合物基复合材料是以聚合物为基体(热固性树脂、热塑性树脂),以纤维(连续纤维、短纤维、纳米纤维、晶须)或颗粒为增强体,附以具有特殊功能的功能体(电、磁、热等)经复合而制成的一种性能有别于组成材料的新材料。其中,基体起着黏合增强体、传递与均衡载荷的作用,增强体起着承担荷载的作用,功能体则发挥着赋予聚合物基复合材料具有除力学性能外的特殊功能的作用。各组分材料无论是在宏观上还是在微观或亚微观状态上都相互作用,产生协同效应(线性或非线性效应),使得聚合物基复合材料结构与性能协同相长。在结构上表现出可设计性、各向异性、非均质等特点;在材料上表现出可设计性、高比强度、高比模量、耐疲劳性、过载安全性,以及减震性能、耐烧蚀性能好等特点。值得注意的是,聚合物基复合材料的结构与材料性能分散性较大,韧性不足,且一维、二维结构的层间强度低。所以,在结构设计与造型和结构的可靠性分析上要充分认识其不足之处。总之,聚合物基复合材料科学与工程建立在材料与结构可设计的概念上,这是

与常用结构材料的显著不同之处。同时,其微观结构主要由其制备过程决定,即微观结构是在加工过程中形成的,也就是说与工艺过程有关,其性能仅仅依赖于其微观结构。某种聚合物基复合材料的性能决定在外伤(如力、热、电伤等)作用下的效应。换言之,在各种外伤下聚合物基复合材料的行为决定其特性与耐久性。

聚合物基复合材料的发展与应用已有几十年的历史,具有优异的性能,随着近年来先进工艺装备的不断出现,更便于其大面积整体成形,使其应用日益广泛,在世界各国的军用民用领域起到了至关重要的作用。欧洲空客集团将聚合物基复合材料应用于超大型客机 A380 上,美国波音飞机公司将其应用于大型客机 B787 和超效率飞机 B727 的主承力结构上,我国即将试飞的大型客机 C919 上也大量采用了先进复合材料,这更进一步向人们展示了聚合物基复合材料令人鼓舞的发展前景。此外,先进复合材料在汽车轻量化、沿海油气田、风力发电、体育用品、基础设施等民用工业领域的广泛应用也向人们展示了其蓬勃发展的未来。

聚合物基复合材料几十年来的发展历史凝聚了前辈科学家、专家们和广大工程技术人员毕生心血以及新一代科技工作人员的辛勤汗水,积累了大量的设计、使用经验和性能数据,使其逐渐向规范化、文件化、成熟化的方向发展,逐步改善最终产品的一致性、减少使用过程的风险、降低成本。为了适应该技术发展的需求,结合工业和信息化部“十二五”规划专著计划,在哈尔滨工业大学出版社给予的大力支持帮助下,作者编写了本书。本书参考了大量国内外专家学者们的相关专著、教材和发表的科技文献,结合作者多年来的教学、科研以及指导研究生工作体会,从材料设计与结构设计、基体与增强体及功能体的二相或多相材料间的相互作用、复合效应、二相或多相材料相互作用结合界面作用机制与作用理论、界面的复合效应,到工艺制备方法与材料性能表征、外场(主要是温度、湿度、冲击能量、腐蚀介质等)作用下,含缺陷复合材料的性能演变规律与混杂混合材料的性能表征等方面,较为全面地介绍了相关知识与相关研究。本书涉及内容较多,作者试图从逻辑上梳理清楚,使书中的内容循序渐进、由表及里,旨在为国内的相关领域研究人员和广大工程技术人员提供一本较为系统全面的参考书籍,意为我国聚合物基复合材料事业的发展进步竭尽绵薄。

各章后面给出了相关综述和研究涉及的专著、教材和参考文献,以便读

者深入查询。

本书由哈尔滨工业大学材料学院张东兴、黄龙男(哈工大威海)编著,哈尔滨工业大学材料学院肖海英、贾近、王冠辉(博士研究生)、邱思(博士研究生)、哈尔滨工业大学航天学院王兵、哈尔滨工业大学材料学院(威海)王新波、大庆油田工程有限公司油田设计院张丽参与撰写。具体撰写分工如下:张东兴、张丽撰写第1、3、11章;黄龙男撰写第5、7、10章;肖海英、王冠辉撰写第9章;贾近撰写第8章;王兵、邱思撰写第4、6章;王新波撰写第2章。

在本书完成之际,衷心感谢培养教育过我们的各位老师、各位学术前辈以及哈尔滨工业大学材料学院的同事们对作者长期以来在教学科研工作的支持与帮助。衷心感谢参与本书完成的工作室作者与合作者,他们是朱红艳博士、张阿樱博士、田野博士、王健博士生、肖琳博士生。

限于作者学术水平,书中难免会有不妥和疏漏之处,恳请读者批评指正。

作者

2017年3月初春

于哈尔滨工业大学土木楼

# 目 录

第1章 绪论 .....	1
1.1 聚合物基复合材料的定义与分类 .....	1
1.2 聚合物基复合材料的特性 .....	4
1.3 聚合物基复合材料的发展与应用 .....	5
1.4 聚合物基复合材料科学与工程领域研究 .....	13
1.5 聚合物基复合材料研究机遇及主要问题 .....	14
参考文献 .....	22
第2章 聚合物基体的结构与性能 .....	23
2.1 聚合物基体的定义与分类 .....	23
2.2 聚合物基体在复合材料中的作用 .....	24
2.3 聚合物基体的结构与性能 .....	25
2.4 聚合物基体的共混改性 .....	43
2.5 聚合物基体的发展 .....	46
参考文献 .....	51
第3章 聚合物基复合材料的增强体 .....	54
3.1 复合材料增强体的定义与分类 .....	54
3.2 玻璃纤维 .....	56
3.3 碳纤维 .....	61
3.4 芳纶纤维 .....	68
3.5 有机杂环类纤维 .....	70
3.6 超高相对分子质量聚乙烯纤维 .....	75
3.7 无机纤维增强材料 .....	79
3.8 颗粒增强体 .....	85
3.9 碳纳米管 .....	86
3.10 石墨烯 .....	87
参考文献 .....	87
第4章 聚合物基复合材料的复合原理 .....	88
4.1 聚合物基复合材料中的材料设计与结构设计 .....	88



4.2	聚合物基复合材料的复合效应	92
4.3	聚合物基复合材料的界面	98
4.4	聚合物基复合材料界面的破坏机理	115
4.5	聚合物基复合材料性能的复合规律	119
	参考文献	121
<b>第5章</b>	<b>聚合物基复合材料结构分析与结构设计</b>	<b>122</b>
5.1	复合材料的力学特性	122
5.2	复合材料细观力学	124
5.3	单向板在复杂应力下的刚度和强度准则	138
5.4	经典层合理论	150
5.5	复合材料的连接	170
5.6	复合材料结构设计方法	179
	参考文献	189
<b>第6章</b>	<b>聚合物基复合材料</b>	<b>190</b>
6.1	概述	190
6.2	聚合物基复合材料的力学性能	190
6.3	聚合物基复合材料的物理性能	196
6.4	聚合物基复合材料的化学性能	206
6.5	聚合物基复合材料的失效分析	210
6.6	仿生复合材料摩擦性能研究	246
	参考文献	259
<b>第7章</b>	<b>混杂复合材料</b>	<b>263</b>
7.1	混杂复合材料概述	263
7.2	混杂复合材料的混杂效应	269
7.3	混杂复合材料的力学性能	274
7.4	混杂复合材料的结构设计	289
7.5	混杂复合材料的应用	306
	附录 符号说明	324
	参考文献	326
<b>第8章</b>	<b>热塑性复合材料</b>	<b>327</b>
8.1	概述	327
8.2	短纤维增强热塑性复合材料	329
8.3	长纤维增强热塑性复合材料	337
8.4	连续纤维增强热塑性复合材料	345

8.5 纤维增强热塑性复合材料的应用·····	353
参考文献·····	363
<b>第9章 聚合物基复合材料制备</b> ·····	<b>365</b>
9.1 概 述·····	365
9.2 手糊成型工艺·····	371
9.3 喷射成型工艺·····	373
9.4 模压成型工艺·····	377
9.5 热压罐成型工艺·····	382
9.6 缠绕成型工艺·····	384
9.7 拉挤成型工艺·····	396
9.8 RTM 成型工艺·····	401
9.9 热塑性复合材料的制造工艺·····	404
9.10 自动化与新兴低成本成型工艺·····	409
参考文献·····	414
<b>第10章 聚合物基复合材料的现代分析方法概述</b> ·····	<b>416</b>
10.1 材料表征与分析检测技术的地位与作用·····	416
10.2 复合材料形貌的表征分析方法·····	421
10.3 复合材料成分结构的表征分析方法·····	430
10.4 复合材料界面性能·····	436
10.5 复合材料热学性能表征·····	439
10.6 复合材料电学性能测试·····	447
参考文献·····	450
<b>第11章 先进聚合物基复合材料</b> ·····	<b>456</b>
11.1 概 述·····	456
11.2 导电复合材料·····	463
11.3 压电复合材料·····	467
11.4 智能复合材料·····	470
11.5 磁性复合材料·····	475
11.6 纳米复合材料·····	480
11.7 其他应用领域·····	489
参考文献·····	493
<b>名词索引</b> ·····	<b>495</b>

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 聚合物基复合材料的定义与分类

材料是人类一切生产和生活水平提高的物质基础,是人类进步的里程碑。人类获得和使用材料已有几千年的历史。翻开人类的文明史就会发现,人类对材料的取得与使用是随着社会生产力和科学技术的发展而不断发展的,它反映了人类认识自然和改造自然的能力。同时伴随着一种新材料的出现,就会使生产力获得一次巨大的发展,人类社会就出现一次飞跃。因此,材料成为人类文明进步的标志,也成为人类历史时代划分的标志。从材料角度来看,人类社会经历了石器时代、青铜器时代及铁器时代。20 世纪出现的高性能塑料和复合材料,以历史上少有的发展速度渗透到国民经济和人们生活的各个领域,成为传统材料的替代品,并显示出奇特的优异性能。在科学技术迅猛发展的今天,材料在国民经济和国防建设中起着重要的作用。新材料是高新技术的基础和先导,新材料及材料科学已成为人们普遍关注的重要领域,为此材料科学与能源技术和信息科学一同成为现代科学技术的 3 大支柱。正是由于新材料的不断涌现,新技术、新工艺的不断发展,以及新材料、新技术对材料理论的日益需要和推动,“材料科学与工程”这一新的学科才应运而生。“材料科学与工程”的任务是研究材料的结构、性能(属材料科学研究范畴)、加工和使用情况(属材料工程研究范围)四者的关系。

材料科学的主要任务是研究材料的结构、性能以及二者的关系,主要途径是通过试验研究、总结生产实践经验、建立材料基础理论、预判与设计材料的结构及性能。材料科学是一门与多种学科有着密切联系的综合性的学科,通过化学组成和内部结构的原理阐明材料的宏观性能及规律性,进而设计、制造和使用具有特定性能的新材料。其内容大体分为 3 部分:

(1) 从化学角度研究材料的化学组成及各组分的关系、材料的组成与性能的关系及材料的制备方法。

(2) 从物理角度研究材料的性能以及材料的内部结构(原子和分子的结合方式、在空间的排列分布及聚集状态)与性能的关系。

(3)在化学及物理理论的指导下,研究材料的制备及与应用有关的技术问题。

材料工程的主要任务侧重材料的合成、加工制备与失效分析的基本原理和方法的研究,同时注意把传统材料、技术与新材料、新技术相结合。材料的结构、性能、加工和使用情况相互联系,不可分割。

材料的品种繁多,按主要结合键的本质,可将材料分为性能差异较大的3种类型。

(1)金属材料:金属元素以金属键结合。

(2)有机高分子材料:非金属元素以共价键连接成大分子化合物。

(3)陶瓷材料:非金属元素和金属元素以共价键、离子键或者两者的混合键结合。

从使用性能角度来看,又可将材料分为结构材料和功能材料两大类。对于结构材料,主要是利用它的力学性能,即材料的强度、刚度、变形等特性;对于功能材料,主要是利用它的声、光、电、热、磁等性能,同时,需要了解材料在声、光、电、热、磁场中的行为。

近代科学技术的迅速发展,对材料提出更高的要求 and 效能,使现代聚合物基复合材料科学的研究与发展逐步摆脱靠经验和摸索的方法研究材料的轨道,朝着按预定性能设计材料的方向发展。金属、非金属和高分子材料,可通过一定的工艺方法制备出复合材料,复合材料不仅保留原有组分的优点,而且克服某些缺点,并显示出一些新的性能。

### 1.1.1 聚合物基复合材料的定义

复合材料(Composite Materials)是指由两种或两种以上具有不同物理、化学性质的材料,以不同结构尺度与层次,经过空间组合而形成的一种新材料系统。其性能与功能往往超越其中单质组分材料的性能与功能,这通常都是不同尺度和不同层次上结构设计、结构优化的结果。这种通过复合而产生的高性能和新功能主要源于材料中的复合效应、界面效应、不同层次的尺寸效应等。

复合材料多相体系的构成可分为基体材料和增强材料。基体材料多为连续相,按所用基体材料的不同,可分为金属基复合材料、无机非金属基复合材料和聚合物基复合材料等。增强材料为分散相,通常为纤维状,如玻璃纤维、有机纤维等;功能材料通常也为分散相,赋予复合材料某种特殊性能,如导电、隔热、减摩等。

聚合物基复合材料是以有机聚合物为基体、纤维为增强体构成的复合

材料。基体的作用是黏结纤维、均衡与传递外载荷。增强体的作用是承受外载荷。复合材料的力学性能,如拉伸性能,要取决于增强体的性能,复合材料的其他性能则与基体材料性能有关,如耐热、耐磨、耐腐蚀性能等。

### 1.1.2 聚合物基复合材料的分类

随着新材料、新技术的不断涌现,聚合物基复合材料的品种也在不断增加。

人们针对材料的分类,通过不同角度往往会有很多分类方法。例如,按照物理性质分类,有绝缘材料、磁性材料、透光材料、半导体材料、导电材料、耐高温材料等;按照用途分类,又可分为航空材料、耐烧蚀材料、电工材料、建筑材料、包装材料等;也可直接概括为结构材料与功能材料两大类。

针对聚合物基复合材料的分类方法也不少,例如,根据增强原理分类,有弥散增强型复合材料、粒子增强型复合材料和纤维增强型复合材料;根据复合过程的性质分类,有化学复合的复合材料、物理复合的复合材料和自然复合的复合材料;根据聚合物基复合材料的功能分类,有电功能复合材料、热功能复合材料和光功能复合材料等。

下面列举出几种针对聚合物基复合材料的分类方法。

#### 1. 根据基体材料类型分类

- (1) 热固性聚合物基复合材料。
- (2) 热塑性聚合物基复合材料。

#### 2. 根据增强纤维类型分类

- (1) 碳纤维增强聚合物基复合材料。
- (2) 玻璃纤维增强聚合物基复合材料。
- (3) 有机纤维增强聚合物基复合材料。
- (4) 硼纤维增强聚合物基复合材料。
- (5) 混杂纤维增强聚合物基复合材料。

#### 3. 根据增强物的外形分类

- (1) 连续纤维增强聚合物基复合材料。
- (2) 纤维织物或片状材料增强聚合物基复合材料。
- (3) 短纤维增强聚合物基复合材料。
- (4) 粒状填料增强聚合物基复合材料。

#### 4. 同质复合与异质复合的复合材料

- (1) 同质复合的聚合物基复合材料。

同质复合的聚合物基复合材料包括不同密度的同种聚合物的复合等。

(2) 异质复合的聚合物基复合材料。

## 1.2 聚合物基复合材料的特性

与传统材料相比,聚合物基复合材料有下述特点。

(1) 比强度、比模量高。

聚合物基复合材料的突出优点是比强度及比模量(即强度与密度之比、模量与密度之比)高。

(2) 耐疲劳性好。

金属材料的疲劳破坏常常是没有明显预兆的突发性破坏。而在聚合物基复合材料中,纤维与基体的界面能阻止裂纹扩展。因此,其疲劳破坏总是从纤维的薄弱环节开始,逐渐扩展到结合面上,破坏前有明显的预兆。通常金属材料的疲劳强度极限为其拉伸强度的 30% ~ 50%,而碳纤维增强聚合物基复合材料的疲劳强度极限为其拉伸强度的 70% ~ 80%。因此用聚合物基复合材料制成的在长期交变载荷条件下工作的构件,具有较长的使用寿命和较大的破损安全性。

(3) 阻尼减振性好。

受力结构的自振频率除与形状有关外,还同结构材料的比模量平方根成正比。聚合物基复合材料有较高的自振频率,同时聚合物基复合材料的基体纤维界面有较大的吸收振动能量的能力,致使材料的振动阻尼较高。

(4) 过载安全性高。

复合材料的破坏不像传统材料那样突然发生,而是经历基体损伤、开裂、界面脱黏、纤维断裂等一系列过程,当少数增强纤维发生断裂时,载荷又会通过基体的传递迅速分散到其他完好的纤维上去,从而迟滞了灾难性破坏突然发生的情况。

(5) 各向异性及性能可设计性。

聚合物基复合材料的另一个突出特点就是各向异性,与之相关的是性能的可设计性。例如,沿纤维轴方向和垂直于纤维轴方向的许多性质,包括光、电、磁、导热、比热容、热膨胀及力学性能,都有显著的差别。这种各向异性虽然使材料性能的计算变得更为复杂,但也给设计带来了更多的选择。材料设计是最近 20 年才提出的新概念,复合材料性能的可设计性是材料科学研究的一大成果。复合材料的力学、机械及热、声、光、电、防腐、抗老化等物理、化学性能都可按照使用要求和环境条件要求,通过对组分材料的选择和匹配以及界面控制等进行设计,最大限度地达到预期目的,以满足工程设

计的使用性能。

#### (6) 材料与结构的统一性。

聚合物基复合材料尤其是纤维增强复合材料,与其说是材料倒不如说是结构更为恰当。传统材料的构件成型是经过对材料的再加工,在加工过程中材料不发生组分和化学的变化;而复合材料构件与材料是同时形成的,它由组成复合材料的组分材料在复合成材料的同时也就形成了构件,一般不再由“复合材料”加工成复合材料构件。基于复合材料这一特点,使之结构的整体性好,可大幅度地减少零部件和连接件数量,从而缩短加工周期,降低成本,提高构件的可靠性。

#### (7) 发挥复合效应的优越性。

聚合物基复合材料是由各组分材料经过复合工艺形成的,但它并不是几种材料简单的混合,而是按复合效应形成新的性能,这种复合效应是复合材料仅有的。

#### (8) 材料性能对复合工艺的依赖性。

聚合物基复合材料的结构在形成过程中有组分材料的物理和化学的变化,过程非常复杂,因此构件的性能对工艺方法、工艺参数、工艺过程等依赖性较大。同时,由于在成型过程中很难准确地控制工艺参数,因此,一般来说,复合材料构件的性能分散性也比较大。

聚合物基复合材料作为一种新材料,尚未达到十全十美的程度,所表现出的特性并不全是优点,还需要不断地创造与提高。但它毕竟是一项超越传统材料的新型材料。正由于它具备了一系列传统材料所不具备的优点,因而在国民经济和国防建设各领域,首先在航空航天领域得到了广泛的应用。20世纪90年代以来,复合材料技术受到各方面的重视,其发展日新月异,相信在21世纪,复合材料将具有更广阔的发展前景。

## 1.3 聚合物基复合材料的发展与应用

人类开始使用复合材料要追溯到几千年以前,在距今7000年以前的西安半坡村遗址中曾发现用草拌泥做成的墙壁和砖坯,用草拌泥制造的建筑材料性能既优于草又优于泥,这是人类最早使用复合材料的先例。大约出现在4000年以前的漆器是一种典型的纤维增强复合材料,它是用丝、麻及其织物为增强相,以生漆做黏结剂一层一层铺敷在底胎(模具)上,待漆干固后挖去底胎成型,这种工艺方法与近代复合材料的手糊工艺十分相近。漆器表面光洁,具有良好的抗老化性能,现保存在扬州平山堂的鉴真法师漆器

像,距今已有1 000多年,仍保存完好。中国古代的弓是用竹片等材料经过巧妙的铺叠得到的高模量、高强度的优良层合复合构件,也是复合材料应用的典型实例。在世界上也发现古埃及人在公元前已知道将木材切成板后重新铺叠制成像现代胶合板似的叠合材料,这样不仅可以提高强度,还可减少由湿、热引起的变形。这些例子都说明了人类早已知道复合材料强于单一材料,并在可能条件下开始了应用。

材料科学发展到了20世纪中叶,聚合物基复合材料的制品已不仅仅是天然材料的复合利用,而是基于现代科学技术的综合产物。在化学、力学、机械学、冶金、陶瓷等学科现代成就的基础上,复合材料已形成集科研、设计、生产、应用为一体的完整体系,作为新技术正在国民经济建设和国防建设中发挥着先导和基础作用。

从基体上看,近代复合材料首先发展的是软的基体,然后逐渐发展较硬的和硬的基体,即从聚合物到金属再到陶瓷。因此,现在复合材料已有聚合物基复合材料、金属基复合材料和陶瓷基复合材料3大类。

### 1.3.1 聚合物基复合材料的发展简史

纤维增强橡胶是最早问世的复合材料,这类复合材料的典型代表有轮胎和橡胶布。充气轮胎于1886年发明,1896年用在汽车上,至今还支撑着世界范围内汽车工业的发展。轮胎是帘子线增强橡胶复合材料,帘子线承受充气的压力,提供强度,是增强相;橡胶固定和保护纤维是基体相。为了提高轮胎的耐磨性,在橡胶基体中加入颗粒状炭黑,按复合材料的定义实际上这是一种纤维-炭黑增强橡胶的三相复合材料。橡胶布是与轮胎相似的纤维增强橡胶基复合材料,用来制作气球、救生艇、潜水服、雨衣、吹胀式建筑、宇航服等制品。

聚合物基复合材料(Polymer Matrix Composite)也称纤维增强塑料(Fiber Reinforced Plastics),是目前技术比较成熟且应用最为广泛的一类复合材料。这种材料是用短切的或连续纤维及其织物增强热固性或热塑性树脂基体,经复合而成。以玻璃纤维作为增强相的树脂基复合材料在世界范围内已形成了产业,在我国俗称玻璃钢。聚合物基复合材料于1932年在美国出现,1940年以手糊成型制成了玻璃纤维增强聚酯的军用飞机的雷达罩。其后不久,美国莱特空军发展中心设计制造了一架以玻璃纤维增强树脂为机身和机翼的飞机,并于1944年3月在莱特-帕特空军基地试飞成功。从此纤维增强复合材料开始受到军界和工程界的注意。第二次世界大战以后这种材料迅速扩展到民用,风靡一时,发展很快。1946年纤维缠绕成型技术在美国出



现,为纤维缠绕压力容器的制造提供了技术储备。1949年玻璃纤维预混料研究成功并制出了表面光洁,尺寸、形状准确的复合材料模压件。1950年真空袋和压力袋成型工艺研究成功,并制成直升机的螺旋桨。20世纪60年代在美国利用纤维缠绕技术,制造出北极星、土星等大型固体火箭发动机的壳体,为航天技术开辟了轻质高强结构的最佳途径。在此期间,玻璃纤维-聚酯树脂喷射成型技术得到了应用,使手糊工艺的质量和生产效率大为提高。1961年,片状模塑料(Sheet Moulding Compound, SMC)在法国问世,利用这种技术可制出大幅面表面光洁,尺寸、形状稳定的制品,如汽车、船的壳体以及卫生洁具等大型制件,从而更扩大了聚合物基复合材料的应用领域。1963年前后在美、法、日等国先后开发了高产量、大幅宽、连续生产的玻璃纤维复合材料板材生产线,使复合材料制品形成了规模化生产。拉挤成型工艺的研究始于20世纪50年代,60年代中期实现了连续化生产,在70年代拉挤技术又有了重大的突破,近年来发展更快。除圆棒状制品外,还能生产管形、箱形、槽形、工字形等复杂截面的型材,并带有环向缠绕纤维以增加型材的侧向强度。目前拉挤工艺生产的制品断面可达76 cm×20 cm。20世纪70年代研究成功的树脂反应注射成型(Reaction Injection Molding, RIM)和增强树脂反应注射成型(Reinforced Reaction Injection Molding, RRIM)技术,进一步改善了手糊工艺,使产品两面光洁,现已大量用于卫生洁具和汽车的零件生产。1972年美国PPC公司研究成功热塑性片状模塑料成型技术,1975年投入生产。这种复合材料最大的特点是改变了热固性基体复合材料生产周期长、废料不能回收的问题,并能充分利用塑料加工的技术和设备,因而发展很快。制造管状构件的工艺除缠绕成型外,20世纪80年代又发展了离心浇注成型法,英国曾使用这种工艺生产10 m长的复合材料电线杆、大口径受外压的管道等。综上可知,新生产工艺的不断出现推动着聚合物基复合材料工业的发展。

进入20世纪70年代,人们一方面不断开辟玻璃纤维-树脂复合材料的新用途,同时也发现,这类复合材料的比刚度、比强度还不够理想,满足不了对质量敏感、强度和刚度要求很高的尖端技术的要求,因而开发了一批如碳纤维、碳化硅纤维、氧化铝纤维、硼纤维、芳纶纤维、高密度聚乙烯纤维等高性能增强材料,并使用高性能聚合物、金属与陶瓷为基体,制成先进复合材料(Advanced Composite Materials, ACM)。这种先进复合材料具有比玻璃纤维复合材料更好的性能,是用于飞机、火箭、卫星、飞船等航空航天飞行器的理想材料。

如前所述,人类使用复合材料已经有几千年的历史,但是以合成材料作