

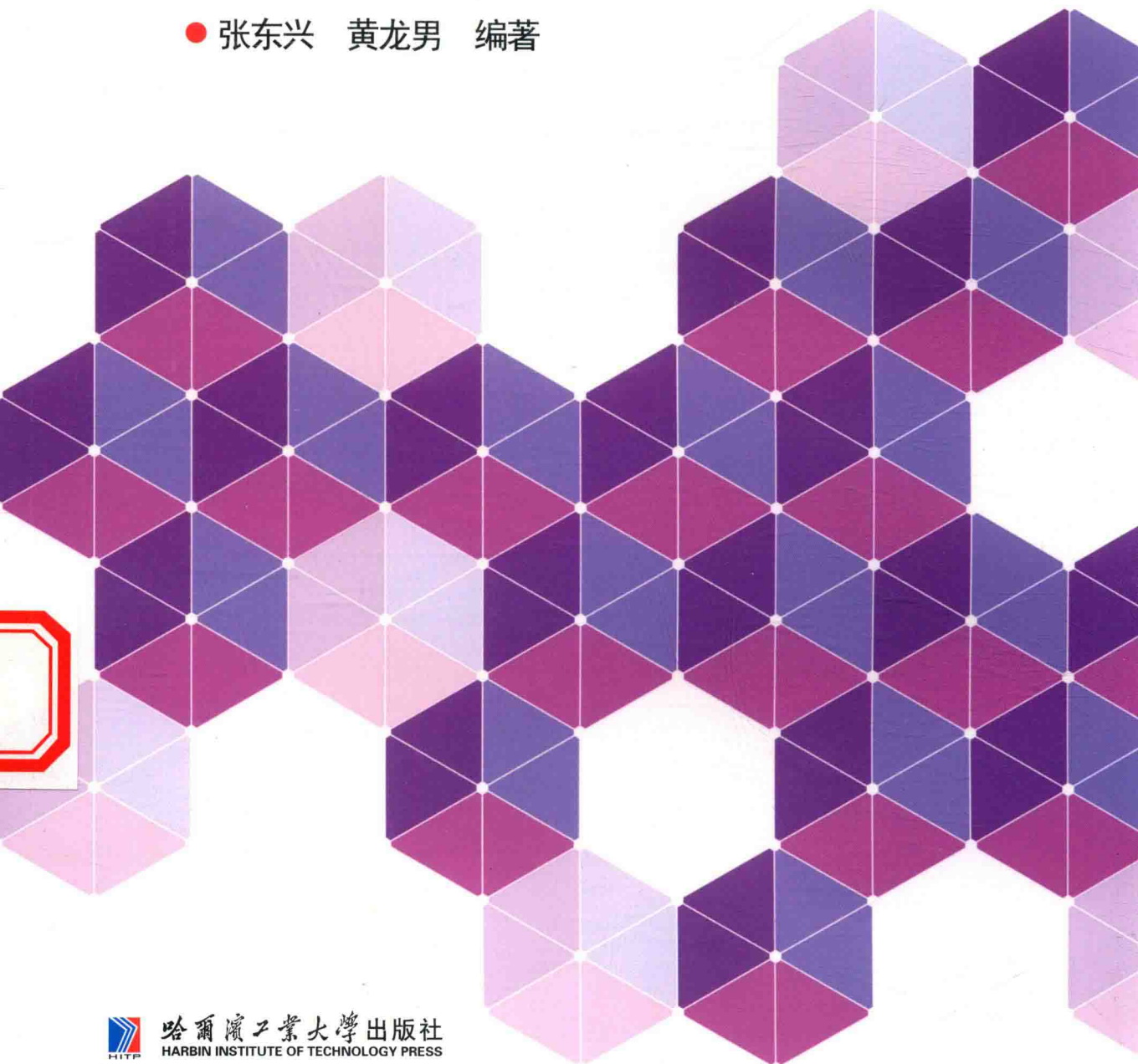


工业和信息化部“十二五”规划教材
“十三五”国家重点图书出版规划项目

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

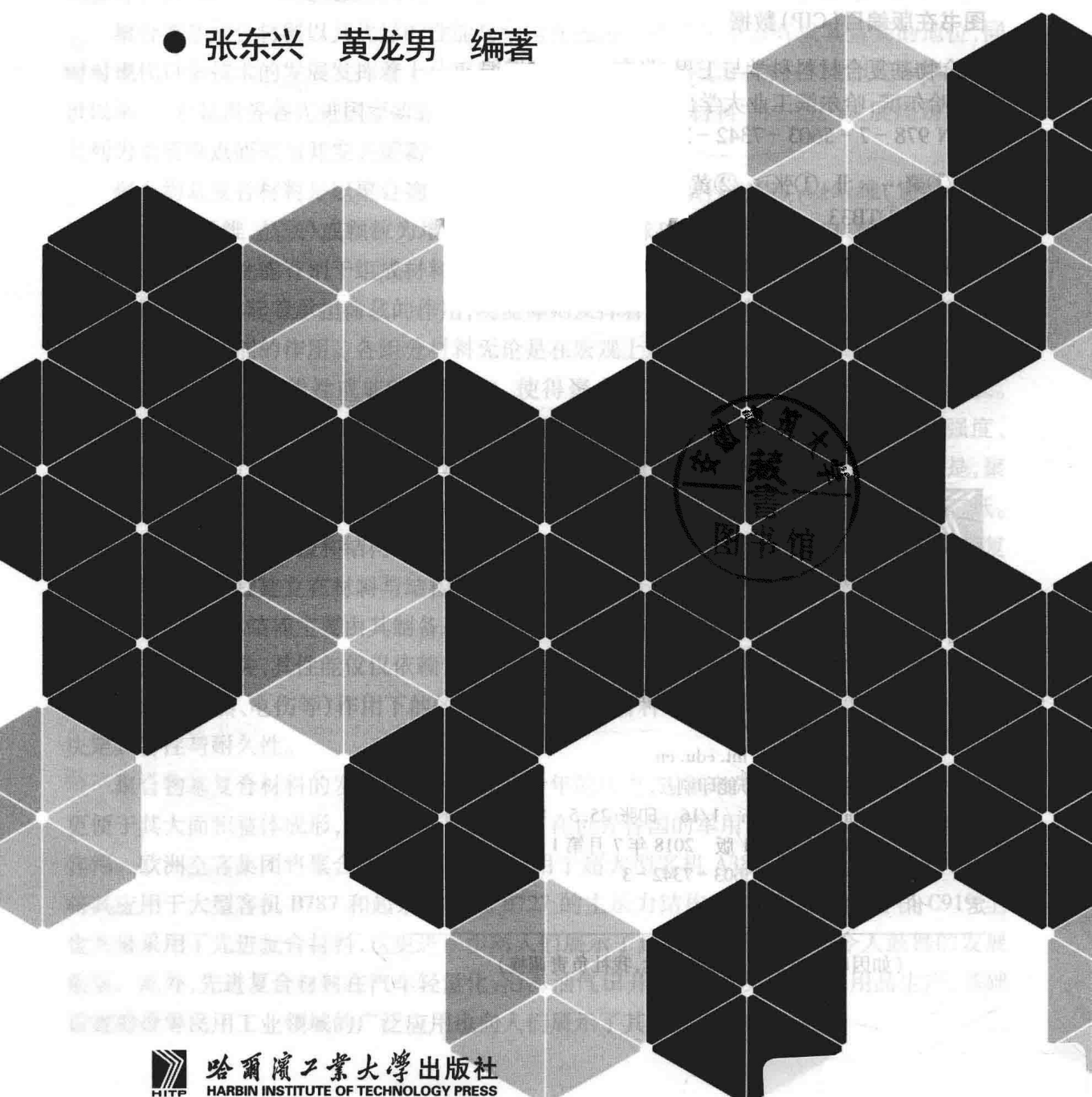


工业和信息化部“十二五”规划教材
“十三五”国家重点图书出版规划项目

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
HITP 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的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。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。

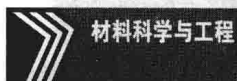
本书可供材料工程、航空航天工程、机械与汽车工程、土木工程等相关领域的研究人员与工程技术人员使用参考,也可作为高等院校相关专业的教学参考书。

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,2018.7
ISBN 978-7-5603-7342-3

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(2018)第 085761 号



材料科学与工程

策划编辑 张秀华 杨 桦 许雅莹
责任编辑 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 哈尔滨市工大节能印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 25.5 字数 617 千字
版 次 2018 年 7 月第 1 版 2018 年 7 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5603-7342-3
定 价 48.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

材料是人类赖以生存与发展的重要物质,是诸多发明创造的先导,它的每一次突破都是人类进步的里程碑。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性能与结构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。聚合物基复合材料自 20 世纪 60 年代问世以来,一直是世界各先进国家研究与开发的重点,我国《新材料“十三五”发展规划》也将其列为重要重点研究与开发关键新材料之一。

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,增强体起着承担载荷的作用,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;在性能上表现出可设计性、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其在外伤(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,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、沿海油气田开采、风力发电、体育用品生产、基础设施建设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,逐步改善了最终产品的一致性,减少了使用过程的风险,降低了成本。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的工作体会,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,到材料工艺制备方法与性能表征、外伤(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,亦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

2018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	3
1.3 聚合物基复合材料的发展与应用	4
1.4 聚合物基复合材料科学与工程领域研究	10
1.5 聚合物基复合材料研究机遇及主要问题	11
参考文献	17
第2章 聚合物基体的结构与性能	18
2.1 聚合物基体的定义与分类	18
2.2 聚合物基体在复合材料中的作用	19
2.3 聚合物基体的结构与性能	19
2.4 聚合物基体的共混改性	34
2.5 聚合物基体的发展	36
参考文献	40
第3章 聚合物基复合材料的增强体	42
3.1 复合材料增强体的定义与分类	42
3.2 玻璃纤维	43
3.3 碳纤维	48
3.4 芳纶纤维	53
3.5 有机杂环类纤维	55
3.6 超高相对分子质量聚乙烯纤维	59
3.7 无机纤维增强材料	62
3.8 颗粒增强体	67
3.9 碳纳米管	67
3.10 石墨烯	68
参考文献	69
第4章 聚合物基复合材料的复合原理	70
4.1 聚合物基复合材料中的材料设计与结构设计	70
4.2 聚合物基复合材料的复合效应	73
4.3 聚合物基复合材料的界面	78
4.4 聚合物基复合材料界面的破坏机理	91
4.5 聚合物基复合材料性能的复合规律	94
参考文献	95

第5章 聚合物基复合材料结构分析与结构设计	97
5.1 复合材料的力学特性	97
5.2 复合材料细观力学	99
5.3 单向板在复杂应力下的刚度和强度准则	110
5.4 经典层合理论	120
5.5 复合材料的连接	137
5.6 复合材料结构设计方法	145
参考文献	152
第6章 聚合物基复合材料	153
6.1 概述	153
6.2 聚合物基复合材料的力学性能	153
6.3 聚合物基复合材料的物理性能	158
6.4 聚合物基复合材料的化学性能	165
6.5 聚合物基复合材料的失效分析	168
6.6 仿生复合材料摩擦性能研究	195
参考文献	205
第7章 混杂复合材料	209
7.1 混杂复合材料概述	209
7.2 混杂复合材料的混杂效应	214
7.3 混杂复合材料的力学性能	218
7.4 混杂复合材料的结构设计	230
7.5 混杂复合材料的应用	243
附录 符号说明	258
参考文献	260
第8章 热塑性复合材料	261
8.1 概述	261
8.2 短纤维增强热塑性复合材料	262
8.3 长纤维增强热塑性复合材料	269
8.4 连续纤维增强热塑性复合材料	275
8.5 纤维增强热塑性复合材料的应用	282
参考文献	289
第9章 聚合物基复合材料制备	290
9.1 概述	290
9.2 手糊成型工艺	294
9.3 喷射成型工艺	297
9.4 模压成型工艺	299
9.5 热压罐成型工艺	304
9.6 缠绕成型工艺	305
9.7 拉挤成型工艺	315

9.8	RTM 成型工艺	319
9.9	热塑性复合材料的制造工艺	321
9.10	自动化与新兴低成本成型工艺	325
	参考文献	329
第 10 章	聚合物基复合材料的现代分析方法概述	331
10.1	材料表征与分析检测技术的地位及作用	331
10.2	复合材料形貌的表征分析方法	335
10.3	复合材料成分结构的表征分析方法	342
10.4	复合材料界面性能	347
10.5	复合材料热学性能表征	349
10.6	复合材料电学性能测试	355
	参考文献	357
第 11 章	先进聚合物基复合材料	363
11.1	概述	363
11.2	导电复合材料	368
11.3	压电复合材料	372
11.4	智能复合材料	374
11.5	磁性复合材料	378
11.6	纳米复合材料	381
11.7	其他应用领域	388
	参考文献	391
	名词索引	393

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,主要途径是进行试验研究,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,这通常都是在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) 碳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 7 000 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 4 000 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,以生漆作为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,但是以合成材料作为基体、纤维作为增强材料制成的复合材料是20世纪40年代发展起来的,经过半个多世纪的发展,复合材料从开发、制造到应用已经发展成一个较为完整的体系。复合材料今后的发展应着重考虑以下几方面的问题。

1. 降低成本

与传统材料(金属材料、无机非金属材料、高分子材料等)相比,由于复合材料的使用量较小,使研制开发与制造复合材料的成本大大高于传统材料。但复合材料的性能优于传统材料,如能降低复合材料的成本,其应用前景将是非常广阔的。

降低复合材料的成本可以从以下几方面着手:

①原材料。原材料成本高是复合材料价格高的主要原因,因此今后的发展方向是尽量降低现有原材料的成本,以及开发新的低成本的原材料。

②成型工艺。复合材料的成型工艺还存在着生产周期长、生产效率低、有些成型工艺还需要较多人工来完成,这些不足都提高了复合材料的成本。因此,为了降低复合材料的生产成本,运用数字化、建模与仿真技术,实现预浸料自动切割、真空柔性运输、自动铺叠,监控下固化成型,实现设计制造一体化。运用微波、紫外、超声、等离子等先进高效加工技术,提高产品质量,减少检验时间,从而提高复合材料的机械化、自动化程度,开发高效率的成型工艺是今后的发展方向。

③设计。复合材料具有良好的可设计性。复合材料的设计包括原材料设计、成型工艺设计和结构设计,通过复合材料合理的设计可以降低其成本。

2. 高性能复合材料的研制

高性能复合材料是指具有高强度、高模量、耐高温等特性的复合材料。随着人类向太空发展,航空航天工业对高性能复合材料的需求量越来越大,而且提出了更高的性能要求,如更高的强度要求、更高的耐温要求等。因此,要提高材料的耐热性、抗氧化性和热稳定性,进一步研究和开发高性能复合材料,可以从以下几方面着手:

①采用耐高温且具有良好的韧性和良好工艺性的聚合物基体。

②对现有聚合物基体进行耐热改性,提高复合材料的工作温度,充分发挥现有材料的作用。

③采用分子设计合成憎水、热稳定的聚合物基体体系,以开发新的材料。

3. 功能复合材料

功能复合材料是指具有导电、超导、微波、摩擦、吸声、阻尼、烧蚀等功能的复合材料。功能复合材料具有非常广阔的应用领域,这些应用领域对功能复合材料不断提出新的性能要求,而且这些性能是其他材料难以达到的,如透波材料、烧蚀材料等。功能复合材料是复合材料的一个重要分支。

4. 智能复合材料

智能复合材料具有感知、识别及处理的能力,在技术上是通过传感器、驱动器、控制器实现复合材料的这些能力。传感器感受复合材料结构变化的信息,例如材料受损伤的信息,并将这些信息传递给控制器,控制器根据所获得的信息产生决策,发送给控制驱动器的动作信号。又如,当用智能复合材料制造的飞机部件发生损伤时,可由埋入的传感器在线检测到该损伤,通过控制器决策后,控制埋入的形状记忆合金动作,在损伤周围产生压应力,从而防止损伤的继续发展,大大提高了飞机的安全性能。

5. 仿生复合材料

仿生复合材料是参考生命系统的结构规律而设计制造的复合材料。由于复合材料结构的多样性和复杂性,因此其结构设计在实现上十分困难。然而自然中生长的动植物材料经过亿万年的自然选择与进化,形成了大量天然合理的复合结构,这些复合结构都可作为仿生设计的参考。

仿生复合材料可分为3个步骤,即仿生分析、仿生设计和仿生制备。已有的复合材料仿生设计实例包括仿竹复合材料的优化设计,仿动物骨骼的哑铃型增强材料,复合材料内部损伤的愈合等。

仿生复合材料的发展方向是要向更深的层次发展,即从宏观观测到微观分析,再回到宏观的设计、制造,而且仿生复合材料除了结构仿生外,还应进行功能仿生、智能仿生和环境适应仿生的研究与开发。

6. 环保型复合材料

从环境保护的角度考虑,要求废弃的复合材料可以回收利用,以节约资源和减少污染。但是,目前的复合材料大多注重材料性能和加工工艺性能,而在回收利用上存在与环境不协调的问题。因此开发、使用与环境相协调的复合材料,是复合材料今后的发展方向之一。

7. 进一步扩大聚合物基复合材料的应用

发挥先进聚合物基复合材料的功能特性,开辟新的应用领域;发展主承力结构应用技术,更有效地发挥先进复合材料的作用;研究高温、次高温部件应用聚合物基复合材料的可能性;开发在汽车、建筑等民用工业领域中复合材料的应用市场。

1.3.2 聚合物基复合材料的应用

聚合物基复合材料是一种新型材料,其成本在不断地下降,成型工艺的机械化、自动化程度也在不断提高,因此具有广泛的应用领域。

1. 在航空航天方面的应用

由于复合材料的轻质高强特性,使其在航空航天领域得到广泛的应用。自20世纪60

年代以来,聚合物基复合材料以其独有的特性在全球获得迅速的发展,已成为现代航空航天最重要的不可缺少的材料之一。其广泛用于各种航空航天器,特别是各种飞机及其动力装置、航天器及其动力装置。

在航空方面,主要用作战斗机的机翼蒙皮、机身、垂尾、副翼、水平尾翼、雷达罩、侧壁板、隔框、翼肋和加强筋等主承力构件。美国在各种型号战斗机上使用复合材料的比例见表 1.1。在战斗机上大量使用复合材料的结果是大幅度减轻了飞机的质量,并且改善了飞机的总体结构。特别是由于复合材料构件的整体性好,因此又极大地减少了构件的数量,减少连接,有效地提高了安全可靠。某飞机使用复合材料垂尾后减轻的结构质量见表 1.2。

表 1.1 美国在各种型号战斗机上使用复合材料的比例

飞机型号	F4	F15	F16	F18	AV-8b	F117	B-2	ATF
复合材料比例/%	0.8	2.0	2.5	10	26	42	38	59

表 1.2 飞机使用复合材料垂尾后减轻的结构质量

构件名称	铝合金设计质量/kg	复合材料设计质量/kg	质量变化/kg
翼梁	220	157.5	-62.5
肋	67.9	58.4	-9.5
蒙皮	87.5	61.7	-25.8
口盖	18.5	16.6	-1.9
其他	28.7	15.4	-13.3
合计	422.6	309.6	-113

在各种型号的民用飞机上(如波音 737 ~ 767、空中客车 A310 ~ A340 等)复合材料也有较多的应用,主要用作雷达罩、发动机罩、副翼、襟翼、垂直尾翼和水平尾翼的舵面、翼根整流罩以及内部的通风管道、行李架、地板、压力容器、卫生间等。

复合材料在直升机上的应用正在扩大,主要用在旋翼及机身结构,典型的军用直升机为西科斯基的“黑鹰”。波音 V-22 的复合材料用量是最高的,结构质量的 59% 为石墨环氧复合材料,11% 为玻璃环氧复合材料。

复合材料以其优异的性能越来越受到新型发动机设计者的青睐,其中聚合物基复合材料已广泛地在新型发动机的冷端部件中采用。从国内外的 PMC 构件在飞机发动机的应用,主要集中在进气道、风扇、外涵道等温度较低的部位。

2. 在交通运输方面的应用

复合材料在交通运输方面的应用已有几十年的历史,发达国家复合材料产量的 30% 以上用于交通工具的制造。由复合材料制成的汽车质量减轻,在相同条件下的耗油量只有钢质汽车的 1/4,而且在受到撞击时复合材料能大幅度吸收冲击能量,保护乘车人员的安全。

用复合材料制造的汽车部件较多,如车体、驾驶室、挡泥板、保险杠、引擎罩、仪表盘、驱动轴、板簧等。例如,德国宝马汽车公司看好玻璃纤维增强热塑性复合材料的性能,在其汽车部件中多处使用。宝马汽车公司生产碳纤维轮毂和各类碳纤维复合材料配件以减少车轮的质量,目前已经公布已有 CFRP 车轮供选择,每个车轮可减少 3 kg 的质量。沃尔沃汽车公

司预计在2019年之前,全部更换其现有车型阵容。该计划包括XC90 SUV以及S90大型轿车与V90旅行车,后两者将替代现有的S80与V70。沃尔沃汽车公司将为新车提供前轮驱动和四轮驱动版本,其悬架将大量采用铝材,后悬架采用科尔维特式的复合材料横向弹簧。

随着列车速度的不断提高,火车部件用复合材料制造是最好的选择。复合材料常被用于制造高速列车的车厢外壳、内装饰材料、整体卫生间、车门窗和水箱等。

3. 在化学工业方面的应用

在化学工业方面,复合材料主要用于制造防腐蚀性制品,聚合物基复合材料具有优异的耐腐蚀性能。例如,在酸性介质中,聚合物基复合材料的耐腐蚀性能比不锈钢优异得多,用其可以制造大型贮罐、各种管道、通风管道、烟囱、风机、地坪、泵、阀和格栅等。

4. 在电气工业方面的应用

聚合物基复合材料是一种优异的电绝缘材料,广泛用于电机、电工器材的制造,如绝缘板、绝缘管、印刷线路板、电机护环、槽楔、高压绝缘子、带电操作工具等。又如,烟气脱硫是当今燃煤电厂控制 SO_2 排放的首要办法,而湿式石灰石洗刷法是当前世界各国运用最多和最为成熟的技术,也是中国火电厂烟气脱硫的主导技术。玻璃钢复合材料具有耐化学腐蚀性强、使用寿命长、轻质、热导率低、强度高、可接受高的热应力等优点,已成为燃煤电厂烟气脱硫排烟冷却塔烟道、喷淋管、除雾器、浆液管道等设备的最好选材。

5. 在建筑业方面的应用

由于玻璃纤维增强的聚合物基复合材料(玻璃钢)具有力学性能优异,隔热隔声性能良好,吸水率低,耐腐蚀性能好和装饰性能好的特点,因此是一种理想的建筑材料。在建筑上,玻璃钢被用作承力结构、围护结构、冷却塔、水箱、卫生洁具和门窗等。用复合材料制备的钢筋代替金属钢筋制造的混凝土,建造具有极好的耐海水性码头、海防构件等,也适合于建造电信大楼等建筑。

复合材料在建筑业方面的另一个应用是建筑物的修补,当建筑物、桥梁等因损坏而需要修补时,用复合材料作为修补材料是理想的选择。因为用复合材料对建筑进行修补后,能恢复其原有的强度,并有很长的使用寿命。常用的复合材料是碳纤维增强的环氧树脂基复合材料。

6. 在机械制造业方面的应用

在机械制造业中,复合材料用于制造各种叶片、风机及各种机械部件,如齿轮、皮带轮和防护罩等。

用复合材料制造叶片具有制造容易、质量轻、耐腐蚀等优点,目前各种风力发电机叶片都是由复合材料制造的。用复合材料制造齿轮同样具有制造简单的优点,并且在使用时具有较低的噪声,特别适用于纺织机械。

7. 在体育用品方面的应用

在体育用品方面,复合材料被用于制造赛车、赛艇、皮艇、划桨、撑杆、球拍、弓箭和雪橇等。

8. 在兵器上的应用

在兵器上应用的聚合物基复合材料可分为热固性树脂基复合材料和热塑性树脂基复合