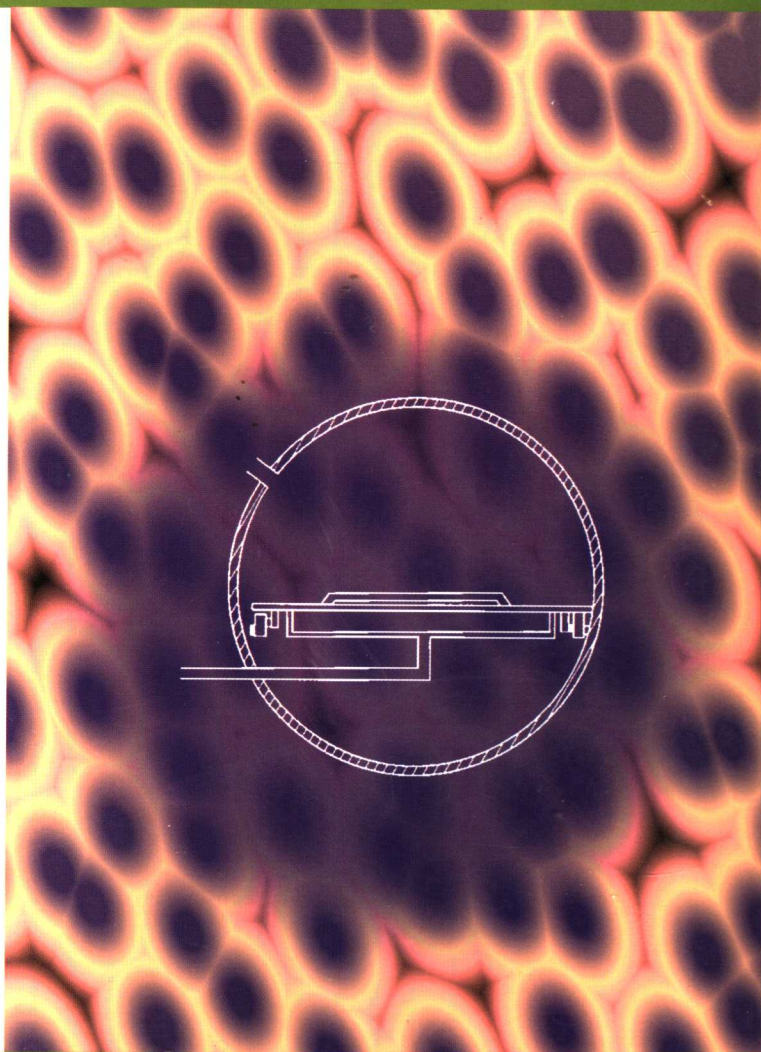


21世纪高等院校教材

聚合物基复合材料及工艺

王汝敏
郑水蓉 编著
郑亚萍



科学出版社

www.sciencep.com

21 世纪高等院校教材

聚合物基复合材料及工艺

王汝敏 郑水蓉 郑亚萍 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地阐述了聚合物基复合材料的基本概念、基本知识和基本性能。全书共分4篇11章。首先概述聚合物基复合材料的概念、性能特点、应用领域和进展。然后分别介绍主要增强纤维的制备、结构与性能,增强材料的品种与使用特点;基体材料的作用、性能及其对复合材料性能的影响,聚合物基体的配方设计与选择;聚合物基复合材料界面的形成、作用与破坏原理,纤维表面处理与界面研究方法;半成品的制备与复合材料的成型原理,复合材料固化工艺参数的制定,复合材料的质量控制;用细观力学方法分析复合材料的基本力学性能,复合材料的各向异性与复合材料层板的力学性能;复合材料的断裂与损伤、冲击、疲劳、蠕变和环境影响;复合材料的高频介电性能与雷达罩;复合材料的其他性能与新型功能复合材料等。

本书可作为高等院校高分子材料、材料学及相近专业本科生的必修或选修课教材,相近专业研究生的参考教材,也可作为从事复合材料研究、工程设计和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

聚合物基复合材料及工艺/王汝敏,郑水蓉,郑亚萍编著. —北京:
科学出版社,2004

(21世纪高等院校教材)

ISBN 7-03-012058-2

I. 聚… II. ①王… ②郑… ③郑… III. 高聚物-基质-复合材料-高等学校-教材 IV. TB33

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第078851号

责任编辑:胡华强 杨向萍 吴伶俐/责任校对:钟 洋

责任印制:安春生/封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004年6月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2004年6月第一次印刷 印张:28 1/4

印数:1—2 500 字数:540 000

定价:38.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

复合材料是一种新型材料,轻质、高强、高模、抗断裂、耐疲劳,对国防工业尤其是航空航天工业特别重要,在国民经济其他工业部门也获得越来越多的应用。聚合物基复合材料是复合材料中惟一获得较大应用、技术较成熟的品种,也是最重要的品种。因此,它是材料及相近专业一门重要的技术课程。近一二十年来,该材料得到迅速发展,不断涌现性能更优异、功能更多的新材料、新纤维、新基体,新的工艺方法更是不断诞生,旧品种材料的性能也在不断提高,科研生产的技术装备水平、工艺水平发生了巨大的变化。《聚合物基复合材料及工艺》是根据高分子材料与工程专业的本科培养模式,在 20 世纪 80 年代出版的航空高等学校《聚合物基复合材料》、《聚合物基复合材料制品成型工艺》两本教材和西北工业大学复合材料课程长期教学实践的基础上编写而成的。

本书列入西北工业大学材料类面向 21 世纪教材计划,在编写过程中,力求反映复合材料领域的最新发展。作者希望本书能全貌反映聚合物基复合材料的原材料、工艺和性能,适合高分子材料与工程专业的教学,满足航空等国防工业对该专业技术人员在复合材料应用方面的知识技能需求。但限于作者水平,书中错误和不妥之处在所难免,恳请专家、读者多加批评指正,以便我们进行修改、补充,不断完善本教材。

本书由西北工业大学王汝敏、郑水蓉、郑亚萍编著,具体分工为:王汝敏(第 1 章、第 6~9 章),郑水蓉(第 2、5、10 章),郑亚萍(第 3、4、11 章)。全书由王汝敏统稿。在此书的编写过程中,得到了周希真、孙曼灵等老师的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢!

本书由西安交通大学卢凤纪教授主审。她在百忙中逐字逐句审阅并提出了许多宝贵意见和建议,作者在此深表谢意!

作 者

2003 年 7 月

目 录

前言

第一篇 概 论

第 1 章 聚合物基复合材料的概念、特性、应用与进展	3
1.1 引言	3
1.2 复合材料的定义	4
1.3 复合材料的命名及分类	5
1.4 复合材料的成型方法	6
1.5 复合材料的特性	6
1.6 复合材料的应用	9
1.7 复合材料的进展	11
习题及思考题	20

第二篇 组分材料

第 2 章 增强材料	25
2.1 概述	25
2.2 玻璃纤维	27
2.3 碳纤维	40
2.4 芳纶	59
2.5 其他增强纤维	72
习题及思考题	81
第 3 章 基体材料	83
3.1 概述	83
3.2 基体材料的基本性能	87
3.3 基体材料的工艺性	94
3.4 复合材料用树脂基体	98
3.5 高性能树脂基体	121
3.6 耐腐蚀复合材料用树脂基体	132
习题及思考题	138
第 4 章 聚合物基复合材料的界面	139

4.1 界面的基本概念·····	139
4.2 界面的形成与作用机理·····	140
4.3 界面的破坏机理·····	147
4.4 纤维的表面处理·····	153
4.5 复合材料界面的研究·····	167
习题及思考题·····	172

第三篇 复合材料工艺

第5章 聚合物基复合材料成型用半成品的制备·····	175
5.1 热塑性塑料粒料的制造方法·····	176
5.2 热固性模塑料的制造·····	183
5.3 复合材料成型用连续纤维预浸料的制造方法·····	193
5.4 增强热塑性塑料片材的制造·····	199
习题及思考题·····	203
第6章 聚合物基复合材料的成型工艺·····	205
6.1 概述·····	205
6.2 各种成型工艺方法简介·····	215
6.3 模具与辅助材料·····	238
6.4 复合材料的固化成型过程·····	244
习题及思考题·····	253
第7章 复合材料夹层结构制品的成型工艺·····	254
7.1 蜂窝夹层结构制品的成型工艺·····	254
7.2 泡沫塑料夹层结构制品的成型工艺·····	262
习题及思考题·····	279

第四篇 复合材料性能

第8章 复合材料的基本力学性能·····	283
8.1 引言·····	283
8.2 单向纤维复合材料拉伸性能·····	292
8.3 正交纤维复合材料的拉伸性能·····	312
8.4 单向纤维复合材料的压缩性能·····	315
8.5 单向及正交纤维复合材料的剪切性能·····	322
8.6 复合材料的弯曲性能·····	332
8.7 复合材料的偏轴力学性能·····	335
8.8 多向复合材料的基本力学性能·····	348

习题及思考题	361
第9章 复合材料的其他力学性能	364
9.1 复合材料的冲击、疲劳、蠕变、环境影响、断裂及损伤	364
9.2 复合材料夹层结构的基本力学性能	376
习题及思考题	387
第10章 复合材料的高频介电性能与雷达罩	389
10.1 玻璃纤维复合材料的高频介电性能	389
10.2 雷达罩	393
习题及思考题	412
第11章 聚合物基复合材料的其他性能	414
11.1 热物理性能	414
11.2 复合材料的耐热性能及其应用	423
11.3 耐化学腐蚀性	425
11.4 耐磨性	433
11.5 耐燃性	437
习题及思考题	440
参考文献	441

第一篇

概 论

第1章 聚合物基复合材料的概念、特性、应用与进展

1.1 引言

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,人类对材料的取得和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,同时每当出现一种划时代的新材料,又会使生产力获得一次巨大的发展,人类社会就出现一个飞跃。因此,材料就成为人类文明进步的标志,成为人类历史时代划分的里程碑。从材料的角度来看,人类社会经历了石器时代、青铜器时代、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,材料对于国民经济建设和国防建设起着重要的作用。新材料是高新技术的基础和先导,新材料、材料科学已成为人们普遍认识和关注的学科领域,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三大支柱。

材料科学是一门与多种学科有着密切联系的综合学科。它由化学组成和内部结构的原理来阐明材料宏观性能的规律性,进而设计、制造和使用具有特定性能的新材料。它包括的内容大体分为三个部分:①从化学角度研究材料的化学组成及各组分的关系,研究材料的组成与性能的关系,研究材料的制备方法;②从物理角度研究材料的性能,研究材料的内部结构(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在化学及物理的理论指导下,研究材料的制备及应用有关的技术问题。

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三种类型: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,又可将材料分为两大类:①结构材料;②功能材料。对于结构材料,主要使用它的力学性能,即材料的强度、刚度、变形等特性。对于功能材料主要使用它的声、光、电、热、磁等性能,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,对材料提出更加苛刻的特殊要求和效能,使材料研究正逐步摆脱靠经验和摸索的方法研究材料的轨道,向着按预定性能设计材料的

方向发展。用金属、非金属和高分子材料通过一定的工艺方法制成的复合材料,能保留原有组分的优点,克服某些缺点,并显示一些新性能。这种复合材料的出现和发展,就是材料设计的一个典型例子。

复合材料是由基体材料和增强材料构成的多相体系。基体材料为连续相,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。增强材料为分散相,通常为纤维状材料,如玻璃纤维、有机纤维等。本教材仅讨论聚合物基复合材料。

聚合物基复合材料是以有机聚合物为基体,纤维为增强材料组成的复合材料。纤维材料的强度和模量一般比基体材料高得多,使它成为主要的承载体。但是必须有一种粘接性能好的基体材料把纤维牢固地粘接起来。同时,基体材料又能起到使外加载荷均匀分布,并传递给纤维的作用。此外,复合材料的某些性能主要取决于基体材料的特性。因此,在复合材料中,纤维、基体以及纤维与基体之间界面的性能直接影响复合材料的性能。

1.2 复合材料的定义

复合材料(composite material)一词,国外于 20 世纪 50 年代开始使用,国内使用大约开始于 60 年代。复合材料是一类成分复杂的多元多相体系,很难准确地予以定义。比较简明的定义是,复合材料是由两种或两种以上不同性能、不同形态的组分材料通过复合工艺组合而成的一种多相材料,它既保持了原组分材料的主要特点,又显示了原组分材料所没有的新性能。复合材料具有如下特征:①细观上是非均相材料,组分材料间有明显的界面;②组分材料性能差异很大;③组成复合材料后性能有较大的改进;④组分材料的体积分数应大于 10%。按这种定义,复合材料所包含的范围很广,草泥墙、钢筋混凝土、帘子线轮胎等均属于复合材料的范畴。

分析复合材料的组成和内部相态,均有三种基本的物理相。一是连续的称为基体相,另一是呈分散的、被基体包容的称为增强相。增强相和基体相之间有一交界面称为复合材料界面。在微观结构层次上的深入研究,发现复合材料界面附近的增强相和基体相由于在复合时复杂的物理和化学的原因,变得既不同于基体相又不同于增强相组分本体的复杂结构,同时发现这一结构和形态会对复合材料宏观性能产生影响,所以界面附近这一个结构与性能发生变化的微区成为复合材料的第三相,称为界面相。因此,复合材料是由基体相、增强相和界面相组成的。这三相的结构与性质,它们的配置方式和相互作用以及相对含量决定了复合材料的性能。

由师昌绪主编的《材料大词典》对复合材料给出了比较全面完整的定义:“复合

材料是由有机高分子、无机非金属或金属等几类不同材料通过复合工艺组合而成的新型材料,它既能保留原组分材料的主要特色,又通过复合效应获得原组分所不具备的性能。可以通过材料设计使各组分的性能互相补充并彼此关联,从而获得新的优越性能,与一般材料的简单混合有本质的区别。”该定义强调了复合材料具有可设计性的重要特点。在工业上,复合材料通常是指高强度、高模量、脆性的增强剂和低模量韧性的基体材料经过一定的成型加工方法而制成综合性能优异的材料。现代材料科学所讨论的复合材料一般是指纤维增强、薄片增强、颗粒增强或自增强的聚合物基、陶瓷基或金属基复合材料,它把握了复合材料的本质即增强剂增强的概念。最广泛使用、效果最好的增强剂是纤维材料,因此人们通常讲的复合材料是狭义的复合材料——纤维增强复合材料。本教材讨论限于这类复合材料。

1.3 复合材料的命名及分类

1.3.1 复合材料的命名

许多新材料的发展先于科学命名,故常常习惯地先应用一些通俗的名称。例如,国内20世纪50年代开始出现的玻璃纤维和树脂的复合材料,称为“玻璃钢”,它的其他名称还有玻璃纤维增强塑料、玻璃塑料、玻璃布层压板、玻璃纤维复合材料等。对于同一种材料,若其名称很多,互不统一,甚至有的名称含义不确切,就容易引起混乱,造成错觉,不利于材料的应用与发展。

复合材料可根据增强材料和基体材料的名称来命名。按基体材料类型命名有金属基复合材料、铝基复合材料、聚合物基复合材料、环氧树脂基复合材料等。对于聚合物基复合材料常常以增强纤维的类型来命名,如玻璃纤维复合材料(俗称玻璃钢)、碳纤维复合材料、混杂复合材料。更具体地,将增强材料的名称放在前面,基体材料名称放在后面,再加上“复合材料”而构成,如E-GF和环氧树脂构成的复合材料,可命名为“E-玻璃纤维环氧树脂复合材料”。为书写方便,也可仅写增强材料和基体材料的缩写,中间加一斜线隔开,后面再加“复合材料”,上述复合材料简称为“E-玻璃/环氧复合材料”(俗称环氧玻璃钢)。碳纤维和金属基体构成的复合材料叫“金属基复合材料”,也可书写为“碳/金属复合材料”。碳纤维和碳基体构成的复合材料叫“碳/碳复合材料”或“C/C复合材料”。上述命名法可用商品牌号直接表示,如T300/648、M40/5208、S-GF/5245C、Kevlar49/QY8911等。

1.3.2 复合材料的分类

复合材料的分类方法较多。如根据增强原理分,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。根据使用性能的不同分,有结构复合材料和功能复合材料。功能复合材料又可根据其功能分电功能复合材料、热功能复

合材料、光功能复合材料等。根据制备工艺不同分类有层合结构复合材料、缠绕结构复合材料、拉挤复合材料、纺织结构复合材料等。

根据本书的复合材料的含义和命名原则,复合材料的分类有如下几种。

(1) 根据基体材料类型分类,有①金属基复合材料;②无机非金属基复合材料;③聚合物基复合材料。无机非金属基复合材料中最重要的是陶瓷基复合材料和碳基复合材料如碳/碳复合材料。在聚合物基复合材料中,又有热固性树脂基复合材料和热塑性树脂基复合材料,以及单组分聚合物基复合材料和共混聚合物基复合材料之分。

(2) 根据分散相的形态分类,有①连续纤维增强复合材料;②纤维织物、编织体增强复合材料;③片状材料增强复合材料;④短纤维或晶须增强复合材料;⑤颗粒增强复合材料;⑥纳米增强复合材料。

(3) 根据增强纤维的类型分类,有①碳纤维复合材料;②玻璃纤维复合材料;③有机纤维复合材料;④硼纤维、碳化硅纤维复合材料;⑤混杂纤维复合材料等。

1.4 复合材料的成型方法

复合材料的成型工艺方法很多,不同类型复合材料的成型工艺差异很大。玻璃钢的手糊成型工艺流程(图 1-1)是热固性聚合物基复合材料制备的一个典型过程。从中可以看出,工艺过程手工劳动多,纤维和树脂的复合、树脂体系的固化反应过程就是复合材料的材料形成过程,同时也是复合材料产品的形成过程。材料制备和产品制备在同一过程完成,是复合材料不同于金属材料的又一特征。

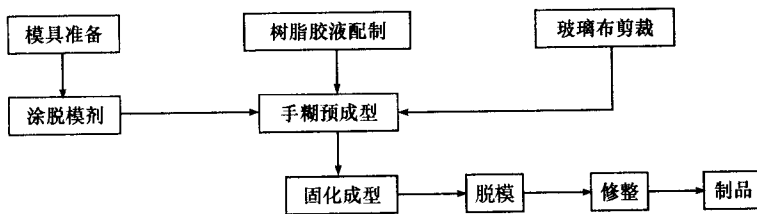


图 1-1 玻璃钢的手糊成型工艺流程

1.5 复合材料的特性

从复合材料的分类中,我们已经知道,复合材料种类繁多。不言而喻,不同种类的复合材料具有不同的性能特征。然而,复合材料也有一些共同的特性。聚合物基复合材料由于其固有的特点,因此是复合材料中发展最迅速、应用最广泛的一

类复合材料。与传统材料相比,聚合物基复合材料有下述特点。

1.5.1 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高。比强度是材料的强度与密度之比值,比模量是材料的模量与密度之比值,其量纲均为长度。在质量相等前提下,它是衡量材料承载能力和刚度特性的指标,对于在空中或太空中工作的航空航天结构材料来讲无疑是非常重要的力学性能。表1-1列出几种材料的比强度和比模量,碳纤维树脂基复合材料表现了较高的比模量和比强度。复合材料的高比强度和高比模量来源于增强纤维的高性能和低密度。玻璃纤维由于模量相对较低、密度较高,其玻璃纤维树脂基复合材料的比模量略低于金属材料。

表1-1 一些常用材料及纤维复合材料的比强度、比模量

材 料	密度 /(g/cm ³)	拉伸强度 /GPa	弹性模量 /10 ² GPa	比强度 /10 ⁶ cm	比模量 /10 ⁸ cm
钢	7.8	1.03	2.1	1.3	2.7
铝合金	2.8	0.47	0.75	1.7	2.6
钛合金	4.5	0.96	1.14	2.1	2.5
玻璃纤维复合材料	2.0	1.06	0.4	5.3	2.0
碳纤维Ⅱ/环氧复合材料	1.45	1.50	1.4	10.3	9.7
碳纤维Ⅰ/环氧复合材料	1.6	1.07	2.4	6.7	15
有机纤维/环氧复合材料	1.4	1.40	0.8	1.0	5.7
硼纤维/环氧复合材料	2.1	1.38	2.1	6.6	10
硼纤维/铝基复合材料	2.65	1.0	2.0	3.8	7.5

1.5.2 耐疲劳性能好,破损安全性能高

金属材料的疲劳破坏常常是没有明显预兆的突发性破坏。复合材料中纤维与基体的界面能阻止裂纹的扩展,其疲劳破坏总是从纤维的薄弱环节开始,裂纹扩展或损伤逐步进行,时间长,破坏前有明显的预兆。从疲劳性能的S-N曲线可以看出,大多数金属材料的疲劳强度极限是其拉伸强度的30%~50%,而碳纤维/聚酯复合材料的疲劳强度极限是其拉伸强度的70%~80%,玻璃纤维复合材料的比例介中。

复合材料的破坏不像传统材料由于主裂纹的失稳扩展而突然发生,而是经历基体开裂、界面脱粘、纤维拔出、断裂等一系列损伤的发展过程。基体中有大量独立的纤维,是力学上典型的静不定体系。当少数纤维发生断裂时,其失去部分载荷又会通过基体的传递而迅速分散到其他完好的纤维上去,复合材料在短期内不会

因此而丧失承载能力。内部有缺陷、裂纹时,也不会突然发展而断裂。

1.5.3 阻尼减振性好

受力结构的自振频率除了与结构本身形状有关以外,还同结构材料的比模量平方根成正比。所以复合材料有较高的自振频率,其结构一般不易产生共振。同时,复合材料基体与纤维的界面有较大的吸收振动能量的能力,致使材料的振动阻尼很高,一旦振起来,在较短时间内也可停下来。

1.5.4 具有多种功能性

(1) 瞬时耐高温性、耐烧蚀性好。玻璃钢的导热系数只有金属材料的1%,同时可制成具有较高比热容、熔融热和气化热的材料,可用作导弹头锥的耐烧蚀防护材料。

(2) 优异的电绝缘性能和高频介电性能。玻璃钢是性能优异的工频绝缘材料,同时具有良好的高频介电性能,可用作雷达罩的高频透波材料。

(3) 良好的摩擦性能。碳纤维的低摩擦系数和自润滑性,其复合材料具有良好的摩阻特性和减摩特性。

(4) 优良的耐腐蚀性。

(5) 有特殊的光学、电学、磁学的特性。

1.5.5 良好的加工工艺性

(1) 可以根据制品的使用条件、性能要求选择纤维、基体等原材料,即材料具有可设计性。

(2) 可以根据制品的形状、大小、数量选择加工成型方法。

(3) 可整体成型,减少装配零件的数量,节省工时,节省材料,减轻质量。

1.5.6 各向异性和性能的可设计性

纤维复合材料一个突出的特点是各向异性,与之相关的是性能的可设计性。纤维复合材料的力学、物理性能除了由纤维、树脂的种类和体积含量而定外,还与纤维的排列方向、铺层次序和层数密切相关。因此,可以根据工程结构的载荷分布及使用条件的不同,选取相应的材料及铺层设计来满足既定的要求。利用这一特点,可以实现制件的优化设计,做到安全可靠,经济合理。

聚合物基复合材料也存在一些缺点和问题,如工艺方法的自动化、机械化程度低、材料性能的一致性和产品质量的稳定性差、质量检测方法不完善、长期耐高温和环境老化性能不好等。这些问题也正是需要研究解决,从而推动复合材料的发展,使之日臻成熟。

1.6 复合材料的应用

在复合材料中,最早开发和应用的是玻璃纤维树脂基复合材料。20世纪40年代,美国首先用玻璃纤维和不饱和聚酯树脂复合,以手糊工艺制造军用雷达罩和飞机油箱,为玻璃纤维复合材料在军事工业中的应用开辟了道路。此后,随着玻璃纤维、树脂基体以及复合材料成型工艺的发展,玻璃纤维复合材料不仅在航天航空工业,而且在各种民用工业中获得了广泛的应用,成为重要的工程材料。

但是,进入60年代以后,人们注意到玻璃钢的质量比较大、模量比较低,满足不了航天航空飞行器等新产品对材料的高比模量和高比强度的要求,因此在60~70年代相继开发了质轻的碳纤维及其高比模量和高比强度的碳纤维复合材料。继碳纤维之后,又开发出芳香族聚酰胺纤维(芳纶)及其他高性能纤维。这类以碳纤维复合材料为代表的复合材料称为先进复合材料(ACM)。

目前,复合材料世界总产量为百万吨级。确切的产量难以统计。有资料报道1990年的世界产量为390万t,其中美国为150.3万t,西欧为148.5万t,日本为64.3万t,中国为10.6万t。然而复合材料的产量与其他结构材料相比仍很少。目前,世界钢产量达10亿t级,而塑料的产量也达到了亿吨级。这表明,复合材料还有很大的发展余地,也需要加速发展。

虽然复合材料最早应用于航空航天部门,而且其发展一直受航空航天需求的驱动,但航空航天应用的复合材料量只占总产量的很小一部分(1%~2%)。复合材料用量较大的部门为交通运输(汽车、船艇等)、建筑、防腐设备和电器、电子。

1.6.1 在航空航天工业中的应用

虽然在航空航天工业中应用的复合材料所占份额很小,但大多为先进复合材料,代表了复合材料最先进的技术。

飞行器采用复合材料的根本原因是减轻质量,提升飞行器的性能和经济效益。先进复合材料在军用飞机上应用近30年来走过了一条由小到大、由弱到强、有少到多、由结构受力到增加功能的发展道路。世界20世纪80年代后服役的战斗机,其机翼、尾翼等部件基本上都采用ACM,ACM用量已达机体结构质量的20%~30%。1980年首飞的法国Rafale,其机翼、尾翼、垂尾、机身结构的50%均采用ACM,复合材料的结构用量为40%。1989年首飞的美国隐形轰炸机B-2的复合材料结构用量为50%。现在,ACM已广泛应用于飞机的主、次承载结构件,如垂直尾翼、水平安定面、方向舵、副翼、前机身和机翼蒙皮等。在近代直升机上复合材料的用量较军用飞机还要多,目前高达50%~80%。美国对直升机有一个ACAP计划(先进复合材料应用计划),在此计划下研制的H360、S-75、BK-117和V-22等

直升机均采用了复合材料。如垂直起落倾转旋翼后又能高速巡航的 V-22 用复合材料近 3000 kg, 占结构总重的 45%, 其中包括机身机翼的大部分结构以及发动机悬挂接头和叶片紧固装置。美国最新研制的轻型侦察攻击直升机 RAH-66, 具有隐身能力, 复合材料用量约 50%, 机身龙骨大梁长 7.62 m, 铺层最多处达 1000 层。法德合作研制的虎(Tiger)式武装直升机, 复合材料用量更高达 80%。ACM 在客机上的应用情况也日益增多。以波音为例, B707 复合材料使用 18.5 m², B737 为 330 m², B747 为 930 m²。B707 到 B747 经历 10 年, 机身面积增加不到一倍, 复合材料使用面积增加 50 倍。B757 用量 1429 kg, B767 用 1524 kg, 最新研制的 B777 用量则增加到 9900 kg, 占结构总量的 11%。欧洲空中客车 A340 用 ACM 4 t 多, 占结构总量的 13%。法意合作研制的支线客线 ATR-72, 由于用到了机翼, 用量可高达 20%。很多小型全复合材料飞机更是屡屡问世, 举世闻名的“Voyager”(旅行者)号则创下了不加油不着陆连续环球飞行 9 天的世界纪录, 这在复合材料出现之前是无法想像的。

复合材料在航天上主要应用于固体火箭发动机燃烧室绝热壳体结构, 导弹和运载火箭的间段结构、液氢储箱结构、仪器舱结构、导弹和卫星整流罩结构、导弹防热材料以及卫星的各种结构。航天结构材料也经历了从金属到玻璃钢再发展到 ACM 的阶段, 典型的例子是固体发动机的壳体。固体火箭发动机使用的第一代复合材料是玻璃钢。第一个成功范例是 20 世纪 60 年代初的“北极星 A-3”导弹发动机玻璃钢壳体, 它比“北极星 A-1”的合金钢质量减轻了 60%, 成本降低了 66%。此后, 采用 Kevlar-49(芳纶)、IM-7(碳纤维)/环氧的先进复合材料作发动机壳体, 取得更加显著的减重效果。

1.6.2 复合材料在其他行业上的应用

除了航空航天外, 复合材料特别是玻璃纤维复合材料由于自身的性能价格优势在国民经济的其他领域获得了更广泛的应用, 在促进科技进步和国民经济的发展中发挥了重要作用。在美国 1991 年纤维复合材料的 117.1 万 t 市场中, 交通运输 32.4 万 t, 建筑 20.5 万 t, 造船业 16.9 万 t, 防腐设备 16.3 万 t, 电子电器 11 万 t, 商务设备 7 万 t, 日用品 7.5 万 t, 航空航天军事仅 1.8 万 t, 其他 3.7 万 t。

(1) 在交通运输方面, 复合材料在汽车、火车、轮船等交通工具中的应用已有半个多世纪的历史, 复合材料的产品逐年增加, 交通运输业的用量所占比例一直最大。在汽车制造业中, 复合材料主要应用于各种车身构件、引擎罩、仪表盘、车门、地板、座椅、冷藏车、消防车、运输槽车箱车等。在铁路运输中用于客车车箱、车门窗、水箱、卫生间、冷藏车保温车身、运输液体的储罐、集装箱及各种通讯线路器材等。复合材料已逐步成为交通运输中独占鳌头的新材料。

(2) 在建筑工业中, CM 广泛应用于各种轻型结构房屋、大型建筑结构、建筑