

# 纤维复合材料

纤维、基体、力学性能

肖长发 编著

中国石化出版社

# 纤维复合材料

## ——纤维、基体、力学性能

肖长发 编著

中国石化出版社

## 内 容 简 介

全书共分七章，分别就聚合物基、金属基、陶瓷基以及碳基等纤维复合材料，介绍了复合材料概况、增强纤维、基体材料、复合方法、界面特征和单向复合材料力学性能等。内容取材广泛，叙述深入浅出，既注重了全书的系统性，又兼顾了近年来纤维复合材料方面的新方法和新技术。

本书可供高等院校、大专院校复合材料、高分子材料、化学纤维、塑料、化工等专业的大学生和研究生使用，亦可供有关的工程技术和科研人员参考。

### 纤维复合材料

——纤维、基体、力学性能

肖长发 编著

\*

中国石化出版社出版发行

(北京朝阳区太阳宫路甲1号 邮政编码：100029)

北京市印刷学校三元印刷厂排版

北方印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

\*

787×1092毫米 32开本 10印张 219千字 印数1—2000

1995年8月北京第1版 1995年8月北京第1次印刷

ISBN 7-80043-574-01/TQ·363 定价：10.00元

# 前 言

纤维复合材料即纤维增强复合材料是近年来材料科学领域发展十分迅速的一类材料,由于其综合性能优异,在航天、航空、能源、交通、建筑、化工、电子、体育、卫生等许多方面得到越来越广泛的应用。随着现代科学技术的进步,各个学科的内容也在不断调整,多学科或跨学科协同发展已成为现代科学技术的特点之一。作为材料科学的一个分支,纤维复合材料是包含多学科、多层次的一门综合性学科,它涉及纤维、基体、复合技术、材料性能等许多方面的内容或知识。本书是作者在为本科生和研究生讲授《高性能纤维》和《纤维复合材料》课程的基础上,参考国内外有关文献资料编写而成的。

全书共分七章。第一章为绪论,概述了纤维复合材料的定义、特点及应用情况。第二章和第三章分别讲述了各种增强纤维和基体材料的制法、结构与性能特点等。第四章介绍了聚合物基、金属基、陶瓷基以及碳/碳、混杂、编织复合材料等的制造方法,还介绍了纤维复合材料的无损检验。第五章讨论了纤维复合材料的界面、增强纤维的表面处理以及界面的研究方法。第六章和第七章,以单向复合材料为对象,介绍了各向异性弹性材料力学基础,对纤维复合材料力学性能的试验方法、增强材料的轴向压缩变形机理、纤维复合材料的疲劳行为和破坏特点等都力求深入浅出,进行了介绍与分析,目的在于使读者了解和掌握有关纤维复合材料结构设计

方面的一些基本知识。

作者希望通过本书能使读者在较短时间内对纤维复合材料的基本原理、制造技术、力学性能等有一个比较全面和系统的了解，以便为继续深造打好基础。同时也希望本书能够对促进我国复合材料科学技术的发展有所裨益。

姚康德教授对本书手稿进行了认真的审阅，并提出许多宝贵意见，在此谨表示衷心的感谢。

由于作者水平所限，加之编写时间仓促，书中不足乃至谬误之处在所难免，敬请读者批评指正。

**肖长发**

1994年8月

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	(1)
第一节 复合材料的定义与分类.....	(1)
第二节 复合材料发展概况.....	(4)
第三节 纤维复合材料的特点.....	(6)
第四节 纤维复合材料的增强机理 .....	(10)
第五节 纤维复合材料的应用 .....	(14)
<b>第二章 增强材料</b> .....	(23)
第一节 概述 .....	(23)
第二节 芳香族聚酰胺纤维 .....	(26)
第三节 芳香族聚酯纤维 .....	(38)
第四节 超高分子量聚乙烯纤维 .....	(47)
第五节 碳纤维 .....	(55)
第六节 无机及金属纤维 .....	(66)
<b>第三章 基体材料</b> .....	(82)
第一节 概述 .....	(82)
第二节 热固性树脂 .....	(84)
第三节 热塑性树脂.....	(124)
第四节 其它基体.....	(135)
<b>第四章 纤维复合材料的制造方法</b> .....	(144)
第一节 概述.....	(144)
第二节 聚合物基纤维复合材料.....	(148)
第三节 金属基纤维复合材料.....	(158)

第四节	陶瓷基纤维复合材料·····	(163)
第五节	其它复合材料·····	(169)
第六节	纤维复合材料的无损检验·····	(178)
<b>第五章</b>	<b>纤维复合材料的界面及其研究方法</b> ·····	(185)
第一节	纤维复合材料的界面·····	(186)
第二节	增强纤维的表面处理·····	(197)
第三节	纤维复合材料界面的研究方法·····	(207)
<b>第六章</b>	<b>纤维复合材料力学基础</b> ·····	(223)
第一节	各向异性弹性材料力学基础·····	(223)
第二节	单层板的弹性特性·····	(249)
第三节	单层板的强度理论·····	(261)
<b>第七章</b>	<b>单向复合材料力学性能</b> ·····	(268)
第一节	复合材料力学性能试验·····	(269)
第二节	增强材料的轴向压缩变形机理·····	(285)
第三节	纤维复合材料的疲劳行为·····	(296)
第四节	单向复合材料的破坏模式·····	(302)
<b>参考文献</b>	·····	(307)

# 第一章 绪 论

## 第一节 复合材料的定义与分类

当前以信息、生命和材料三大学科为基础的世界规模的新技术革命正风涌兴起，它将人类的物质文明推向一个新阶段。在新型材料的研究开发、应用和特种性能的充分发挥以及传统材料的改性等诸多方面，材料科学都肩负着重要的历史使命。近 30 年来，科学技术发展迅速，特别是尖端科学技术的突飞猛进，对材料性能提出越来越高、越来越严和越来越多的要求。在许多方面，传统的单一材料已不能满足实际需要。这些都促进了人们对材料的研究逐步摆脱单靠经验的摸索方法，而向着按预定性能设计新材料的方向发展。复合材料 (Composite materials 或 Composites) 的出现与发展，是现代科学技术不断进步的结果，也是材料设计方面的一个突破。它综合了各种材料如纤维、树脂、橡胶、金属、陶瓷等的优点，按需要设计、复合而成为综合性能优异的新型材料。

### 一、复合材料的定义

根据国际标准化组织 (International Organization for Standardization, ISO) 为复合材料所下的定义，复合材料是由两种或两种以上物理和化学性质不同的物质组合而成的一种多相固体材料。复合材料的组分材料虽保持其相对独立性，但复合材料的性能却不是组分材料性能的简单加和，而有着重



要的改进。在复合材料中，通常有一相为连续相，称为基体；另一相为分散相，称为增强材料。分散相是以独立的形态分布在整个连续相中的，两相之间存在着相界面。分散相可以是增强纤维，也可以是颗粒状或弥散的填料。

广义复合材料的范围十分广泛。木材是纤维素和木质素的复合物；合金可以看成是不同金属的复合；钢筋混凝土是钢筋和水泥、砂、石的人工复合材料；塑料、橡胶一般含有各种填充剂，也是一种复合材料。狭义的复合材料一般可以理解为纤维增强复合材料（Fiber reinforced composite materials）即纤维复合材料（Fiber composites），这正是本书所要介绍的内容。

在纤维复合材料中，纤维起增强作用，承受大部分载荷，使材料显示出较高的抗张强度和刚度。基体与增强纤维通过界面连接在一起，基体将载荷经界面传递给纤维，不仅能够充分发挥纤维抗张性能优异的特点，还能起到使载荷均匀分布和保护纤维免遭外界损伤的作用。

## 二、复合材料的分类

复合材料的分类方法很多，以下列举几种常见的分类方法。

### 1. 按增强材料形态分类

(1) 连续纤维复合材料：作为分散相的纤维，每根纤维的两个端点都位于复合材料的边界处；

(2) 短纤维复合材料：短小纤维无规则地分散在基体材料中制成的复合材料；

(3) 粒状填料复合材料：微小颗粒状增强材料分散在基体中制成的复合材料；

(4) 缠绕复合材料：用连续纤维束缠绕或带状织物卷绕

成一定形状后与基体复合制成的复合材料；

(5) 编织复合材料：以平面二维或立体三维纤维编织物为增强材料与基体复合而成的复合材料。

## 2. 按增强纤维种类分类

(1) 玻璃纤维复合材料；

(2) 碳纤维复合材料；

(3) 有机纤维（如芳香族聚酰胺纤维、芳香族聚酯纤维、高强度聚烯烃纤维等）复合材料；

(4) 金属纤维（如钨丝、不锈钢丝等）复合材料；

(5) 陶瓷纤维（如氧化铝纤维、碳化硅纤维、硼纤维等）复合材料。

此外，如果用两种或两种以上纤维增强同一基体制成的复合材料称为混杂复合材料 (Hybrid composite materials)。混杂复合材料可以看成是两种或多种单一纤维复合材料的相互复合，即复合材料的“复合材料”。

## 3. 按基体材料分类

(1) 聚合物基复合材料：以有机聚合物（主要为热固性树脂、热塑性树脂及橡胶）为基体制成的复合材料；

(2) 金属基复合材料：以金属为基体制成的复合材料，如铝基复合材料、钛基复合材料等；

(3) 陶瓷基复合材料：以陶瓷材料（也包括玻璃和水泥）为基体制成的复合材料；

(4) 同质物质复合材料：用属于同种物质的增强材料和基体制成的复合材料，如碳/碳复合材料。

## 4. 按材料作用分类

(1) 结构复合材料：用于制造受力构件的复合材料；

(2) 功能复合材料：具有各种特殊性能（如阻尼、导电、

导磁、换能、摩擦、屏蔽等)的复合材料。

## 第二节 复合材料发展概况

作为一门科学,复合材料的出现与发展不过几十年的历史,但人类利用复合材料,的历史可以追溯到远古时代。最早的人造聚合物基复合材料大约出现在公元前5000年,当时中东地区在造船业中开始以沥青作为芦苇的粘结剂。约在3000年前,印度人用虫胶树脂制作层合板。为了提高强度和刚度,中世纪欧洲武士使用具有叠层结构的头盔。我国三国时期著名武将吕布所用方天画戟的杆,是以木为芯,沿木芯纵向用竹丝铺层,再用真丝缠绕胶接而成,也是典型的复合材料制品。

酚醛树脂的问世开创了现代合成高分子工业的先端。1909年,出现了用酚醛树脂与纸或布制成的最早的现代复合材料制品。40年代初期,玻璃纤维增强塑料(Glass fiber reinforced plastic GFRP,俗称玻璃钢)的出现是现代复合材料发展的重要标志。1947年玻璃纤维复合材料被用于试制火箭发动机壳体,后来在固体火箭发动机、导弹的压力容器、直升飞机旋翼桨叶等方面得到应用(见表1-1)。从60年代开始,用碳纤维、硼纤维、Kevlar(即美国杜邦公司生产的聚对苯二甲酰对苯二胺纤维的商品名,国内商品名为芳纶1414,是芳香族聚酰胺纤维中最有代表性的品种)等高性能纤维制成的先进复合材料(Advanced composite materials, ACM)相继问世,使复合材料的发展进入了新的阶段。优异的比强度和比模量、出色的韧性和弹性变形能力,使得先进复合材料在航空、航天等高新技术领域得到越来越多的应用。1986年,美国

Burt Rutan 公司及其合作者设计和制造了一架主要承载构件全部为碳纤维复合材料的轻型飞机“旅行者 (Voyager)”号，两名男女飞行员驾驶这架飞机创下历时 9 天、航程约 42000 公里不着陆和不加油环球飞行的世界记录。纤维复合材料不反射无线电波，微波透过性好，无磁性，可以用于制作隐形飞机。1988 年，美国在 B-2 隐形轰炸机上应用复合材料获

表 1-1 复合材料的发展情况

年代	事 项
1909	酚醛树脂基复合材料
1928	脲醛树脂基复合材料
1940	玻璃纤维增强聚酯树脂军用飞机雷达罩
1942	试制成功第一艘玻璃钢渔船
1944	玻璃钢机翼飞机试飞成功
1946	玻璃纤维增强聚酰胺
1950	环氧树脂工业化生产，与玻璃纤维复合制成直升飞机旋翼
1951	玻璃纤维增强聚苯乙烯
1951~1960	石棉、高硅氧/酚醛烧蚀型复合材料
1956	石棉纤维增强酚醛树脂（制造导弹头锥）
1958	我国试制成功玻璃钢游艇
1963	我国制成玻璃钢蜂窝夹层结构地面雷达罩
1964	碳纤维增强复合材料
1965	硼纤维增强复合材料
1966	我国建成不饱和聚酯树脂生产厂
1969	碳纤维—玻璃纤维混杂复合材料
1972	芳香族聚酰胺纤维增强复合材料
1975	芳香族聚酰胺纤维—石墨纤维混杂复合材料

得成功。目前，发达国家在军用飞机制造方面，许多承载构件包括机翼、尾翼、整流罩及机身等都大量使用复合材料。在民用飞机方面，纤维复合材料特别是碳纤维复合材料的用量也很大，如前苏联安-124 巨型运输机使用的复合材料达 5 吨之多，其中一半为碳纤维复合材料。目前，复合材料在一

般工业如建筑、造船、汽车、化工、电子、能源、体育器材、医疗器械等方面的应用也在逐渐增多。随着复合材料及其制品成型工艺的不断改进与完善，成本会逐步降低，应用范围亦将进一步扩大。

聚合物基复合材料已得到广泛应用，在国民经济的各个领域发挥着重要作用。但是，这类材料也存在一些不足，如不能在高温下使用，耐磨性不好，使用过程中逐渐老化、变质，尺寸不够稳定等。因此，近些年来金属基和陶瓷基复合材料的开发与应用也受到人们重视。这两类复合材料的耐热温度高，综合性能好其主要应用一是在要求强度高而密度小的场合，如飞机或火箭的构件；二是制作在高温环境下仍要求保持高强度的构件，如燃气涡轮发动机叶片等。由于金属基和陶瓷基复合材料的制造工艺复杂，其发展远未达到聚合物基复合材料的水平，仍处于研究试用阶段。此外，碳/碳复合材料优异的耐高温性能倍受人们青睐，这种材料已在航空航天等领域获得应用。

纵观 21 世纪，材料科学的发展由均质材料向复合材料、特别是复杂体系材料复合是跨世纪材料发展的重要趋势。其中，纤维复合材料增强和增韧将继续保持发展势头，而多功能复合、仿生复合、智能复合、梯度复合、纳米复合、分子复合和原位复合等可能成为新的热点。计算机辅助设计和扫描隧道显微镜等技术的应用将使复合材料的发展进入一个新的阶段。

### 第三节 纤维复合材料的特点

纤维复合材料是由两种或两种以上性质不同材料组合而

成的，它的结构单元包括纤维、基体和界面。基体为纤维提供了一个连续的介质，不仅可保持纤维的铺设形态，而且还从结构上保证了纤维的载荷传递，并允许纤维承受压缩和剪切载荷。同时，基体在纤维之间起着分散和传递载荷的作用，强化了沿纤维方向纤维的承载能力。由于纤维复合材料可以集中和显示各组分材料的优点，并能实现最佳结构设计，所以具有许多优良特性。

### 1. 比强度和比模量高

比强度和比模量是指材料强度和模量与材料密度之比值。通常，增强纤维和基体材料的密度都较低，复合材料的结构不是完全致密的，而增强纤维的抗张强度和模量都比较高，因此纤维复合材料具有较高的比强度和比模量，如表 1—2 所示。当要求材料强度和模量一定时，采用复合材料可大大减轻构件或制品的重量。

表 1—2 材料力学性能比较

材 料	密度 g/cm <sup>3</sup>	抗张强度 GPa	弹性模量 GPa	比强度	比模量
钢	7.8	1.010	206	0.13	26
铝	2.8	0.461	74	0.17	26
钛	4.5	0.942	112	0.21	25
玻璃钢	2.0	1.040	39	0.52	20
碳纤维 I /环氧树脂	1.45	1.472	137	1.02	95
碳纤维 I /环氧树脂	1.6	1.050	235	0.66	147
Kevlar/环氧树脂	1.4	1.373	78	0.98	56
硼纤维/环氧树脂	2.1	1.344	206	0.64	98
硼纤维/铝	2.65	0.981	196	0.37	74

### 2. 抗疲劳性好

一般金属材料的疲劳破坏是没有明显预兆的突发性破坏，而纤维复合材料具有良好的抗疲劳性。首先，增强纤维

的缺陷少，抗疲劳性好。其次，基体的塑性好，能消除或减小应力集中区域的尺寸及数量，使源于基体、纤维缺陷处或界面上的疲劳源难以萌生，抑制微裂纹的出现。如图 1-1 所示，即使形成微裂纹，基体（如聚合物基）的塑性形变也能使裂纹尖端钝化，减缓其扩展。在裂纹的缓慢扩展过程中，基体的纵向拉压将引起其横向收缩，而在裂纹尖端的前缘造成基体与纤维分离 [见图 1-1 (b)]，所以经过一定的应力循环后，裂纹由横向改为沿纤维与基体间的界面纵向扩展 [见图 1-1 (c)]。由于基体中分布着大量纤维，裂纹的扩展常常经历非常复杂和曲折的路径。其疲劳破坏是从纤维的薄弱环节开始，逐步扩展到界面上，破坏前有明显的前兆。因此，纤维复合材料的疲劳强度比较高。一般金属材料的疲劳强度极

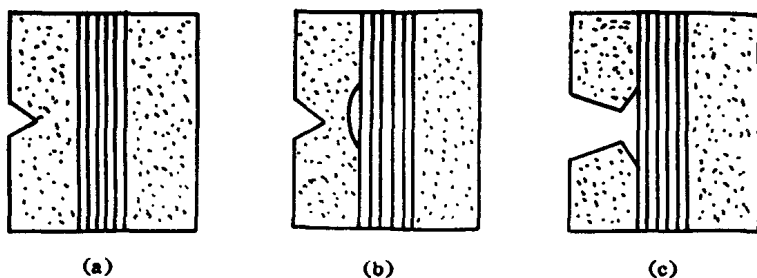


图 1-1 复合材料中疲劳裂纹扩展示意图

限是其抗张强度的 30~50%，而单向复合材料可达 40~80%。

### 3. 减振能力强

构件的自振频率除了与其本身结构有关外，还与材料比模量的平方根成正比。纤维复合材料的比模量大，因而它的自振频率很高，在通常加载速度或频率条件下不容易出现因共振而快速脆断的现象。同时，复合材料是一种非均质的多

相体系，在纤维与基体之间存在着大量的界面。由于界面对振动有反射和吸收作用，所以复合材料的振动阻尼性强，即使激起振动也能很快衰减。对相同尺寸和形状的梁进行振动试验的结果表明，对同一振动，轻合金梁需要 9 秒钟才能停止，而碳纤维复合材料梁只需 2~3 秒钟。

#### 4. 高温性能好

一般金属铝在 400~500 C 以后就完全丧失强度，但用连续碳纤维或氧化硅纤维增强的铝基复合材料，在这样高的温度下仍有较高的强度。陶瓷基纤维复合材料可以承受 1200~1400 C 的高温，而碳/碳复合材料的耐热温度甚至可达 3000 C 左右。另外，聚合物基复合材料还具有优良的耐烧蚀性。在高温下，树脂基体热解形成碳残基而分解出的低分子物质，通过残基的孔隙向外逸出并带走热量，形成温度较低的界面层起到隔热作用。

#### 5. 破损安全性好

纤维复合材料的横截面上有成千上万根独立的纤维。材料受到载荷作用时，增强纤维处于力学上的静不定状态。过载时复合材料中即使有部分纤维断裂（只要不超过一定限度），载荷会迅速重新分配到未被破坏的纤维上，不至于造成构件在瞬间完全丧失承载能力而断裂，仍能安全使用或安全使用一定期限。这种安全地承受一定损伤的能力即破损安全性，纤维复合材料具有较好的破损安全性。

#### 6. 可设计性强

通过改变纤维、基体的种类及相对含量、纤维集合形式及排列方式、铺层结构等可以满足对复合材料结构与性能的各种设计要求。复合材料制品的制造多为整体成型，一般不需焊、铆、切割等二次加工，工艺过程比较简单。



除以上所述,某些特定的纤维复合材料还具有一些其它特点,如电绝缘性好、耐摩擦、耐腐蚀、抗冲击、耐高或低温以及特殊的光、电、磁性能等。由于上述种种优越性,复合材料的应用范围将越来越广,用量将越来越多。

需要指出,复合材料是由纤维与基体组成的,其微观结构是不均匀的。这种结构不均匀性容易产生微观的应力和应变分布不均匀,可能导致材料在应力最大或强度最低或最薄弱的区域发生破坏。在复合材料中存在着纤维断裂、基体开裂、界面结合不良、脱胶、空隙等缺陷和损伤,随着应力水平的提高和外界环境的影响,缺陷和损伤不断扩展而使薄弱区域发生位移,出现应力和应变的不连续现象,因而使连续介质力学原理和方法在复合材料的研究中不能完全适用。此外,纤维复合材料在强度、弹性模量和热膨胀系数等方面具有明显的各向异性,其横向拉伸强度和层间剪切强度都不高;伸长率较低,有时抗冲击性能也不很好;长期耐高温及老化性能差;材料性能的分散性大,工艺质量亦不够稳定等。这些都是复合材料科学与技术发展过程中有待深入研究和解决的问题。

## 第四节 纤维复合材料的增强机理

纤维复合材料的复合不是组分材料的简单组合,而是一种包括了物理的、化学的、力学的、甚至生物的相互作用的复杂结合过程。

### 一、增强机理

在粒子增强复合材料中,载荷主要由基体承受。将适当粒度的粒子分散在基体中,它可以阻碍基体中的位错运动