



“十三五”江苏省高等学校重点教材

飞行器动力工程专业系列教材

Aviation Composite Materials  
and Mechanical Analysis

# 航空复合材料及其 力学分析

◎ 崔海涛 孙志刚 编著



科学出版社



“十三五”江苏省高等学校重点教材  
重点教材编号：2016-2-040

飞行器动力工程专业系列教材

# 航空复合材料及其力学分析

崔海涛 孙志刚 编著

江苏高校品牌专业建设工程资助项目

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

“十三五”期间,国家全面启动实施了航空发动机和燃气轮机重大专项。复合材料作为下一代航空发动机中不可或缺的重要候选材料之一,将有效提升航空发动机的推重比(功重比),并使其各方面性能得到整体提升。本书即是在这一背景下组织编写的。

本书全面梳理和总结国内外航空发动机中的复合材料结构及其设计特点。本书编写中,引入大量国内外航空发动机复合材料结构设计、强度分析、故障分析等实例,紧密结合工程实际,促进学以致用。此外,本书引用日常生活中的实例,以及固体力学等其他学科知识来类比、解释复合材料结构的设计方法,试图建立一个相对完整的复合材料结构设计与分析知识框架。这不仅有利于学生的学习,同时有利于培养和引导学生的自主创新能力。

本书既可作为高等院校飞行器动力工程、动力机械及工程、材料科学与工程等专业本科生和研究生的教材及教学参考书,也可供从事复合材料结构设计、复合材料开发和应用等行业的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

航空复合材料及其力学分析/崔海涛,孙志刚编著. —北京:科学出版社,2017.5  
“十三五”江苏省高等学校重点教材 飞行器动力工程专业系列教材  
ISBN 978-7-03-053639-6

I.①航… II.①崔… ②孙… III.①航空材料-复合材料-高等学校-教材  
IV.①V25

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 137743 号

责任编辑:李涪汁 曾佳佳/责任校对:刘亚琦  
责任印制:张倩/封面设计:许瑞

**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>

**新科印刷有限公司** 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017年5月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017年5月第一次印刷 印张:17 1/4

字数:409 000

定价:59.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 《飞行器动力工程专业系列教材》编委会

主 编：宣益民

副主编：宋迎东 张天宏 黄金泉 谭慧俊 崔海涛

编 委：（按姓氏笔画排序）

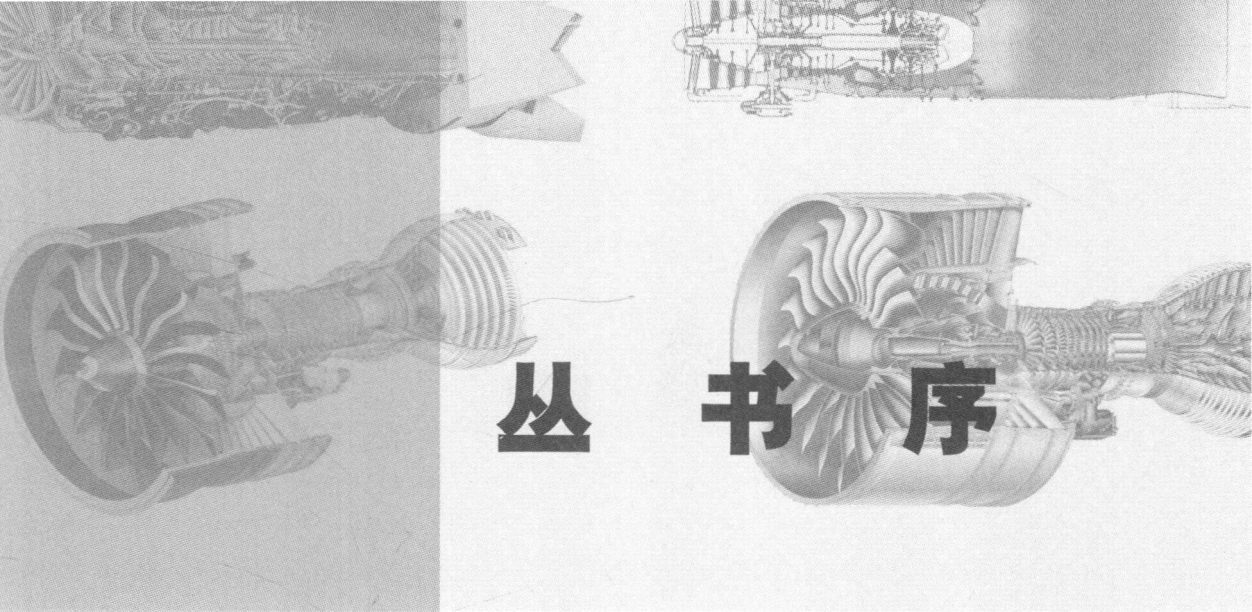
王 彬 毛军逵 方 磊 吉洪湖 刘小刚

何小民 宋迎东 张天宏 陈 伟 陈 杰

陈茉莉 范育新 周正贵 胡忠志 姚 华

郭 文 崔海涛 韩启祥 葛 宁 温 泉

臧朝平 谭晓茗



# 丛书序

作为飞行器的“心脏”，航空发动机是技术高度集成和高附加值的科技产品，集中体现了一个国家的工业技术水平，被誉为现代工业皇冠上的明珠。经过几代航空人艰苦卓越的奋斗，我国航空发动机工业取得了一系列令人瞩目的成就，为我国国防事业发展和国民经济建设做出了重要的贡献。2015年，李克强总理在《政府工作报告》中明确提出了要实施航空发动机和燃气轮机国家重大专项，自主研制和发展高水平的航空发动机已成为国家战略。2016年，国家《第十三个五年规划纲要》中也明确指出：中国计划实施100个重大工程及项目，其中“航空发动机及燃气轮机”位列首位。可以预计，未来相当长的一段时间内，航空发动机技术领域高素质创新人才的培养将是服务国家重大战略需求和国防建设的核心工作之一。

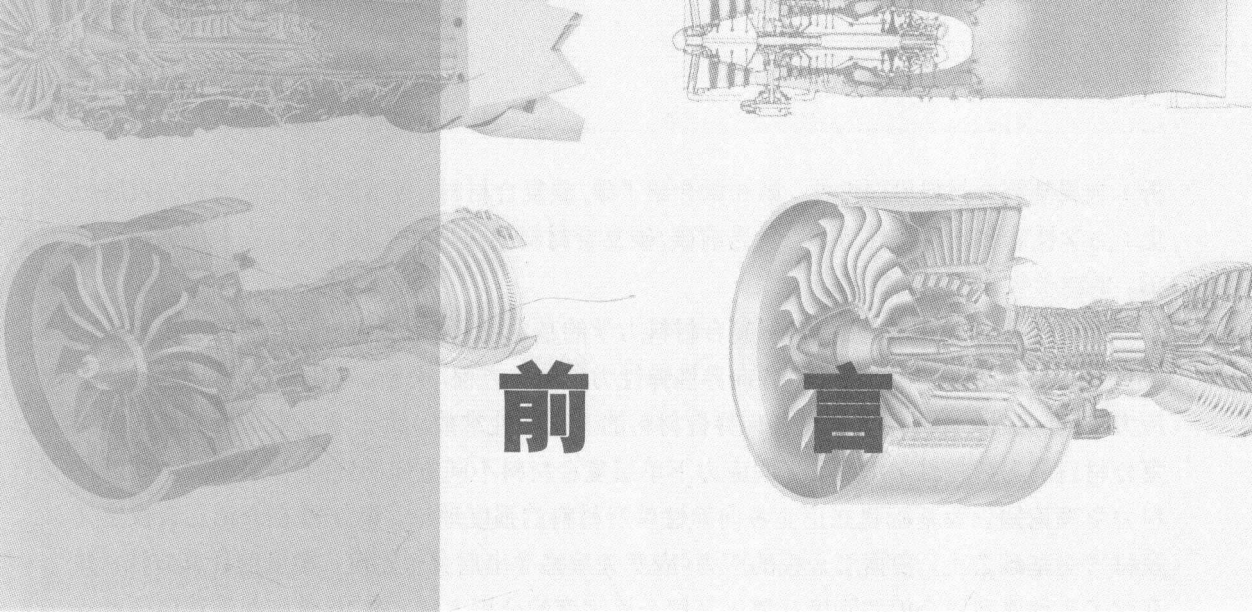
南京航空航天大学是我国航空发动机高层次人才培养和科学研究的重要基地，为国家培养了近万名航空发动机专门人才。在江苏省高校品牌专业一期建设工程的资助下，南京航空航天大学于2016年启动了飞行器动力工程专业系列教材的建设工作，旨在使教材内容能够更好地反映当前科学技术水平和适应现代教育教学理念。教材内容涉及航空发动机的学科基础、部件/系统工作原理与设计、整机工作原理与设计、航空发动机工程研制与测试等方面，汇聚了高等院校和航空发动机厂所的理论基础及研发经验，注重设计方法和体系介绍，突出工程应用及能力培养。

希望本系列教材的出版能够起到服务国家重大需求、服务国防、服务行业的积极作用，为我国航空发动机领域的创新性人才培养和技术进步贡献力量。

匡道民

南京航空航天大学

2017年5月



复合材料具有比强度高、比模量大、耐高温、抗疲劳性能好、可设计性强等独有的优越性能，不仅在机械、化工、能源、交通、建筑等行业中得以广泛应用，而且也成为航空航天、船舶等高新技术领域的备受青睐的明星材料之一。

复合材料是一种多相材料，它具有非均匀性和各向异性，其强度和刚度分析的理论与方法不同于金属材料。随着复合材料应用范围的不断拓展，以及对复合材料力学特性研究工作的进一步深入，复合材料力学作为一门科学，已经成为力学学科的重要分支。复合材料力学课程已经成为飞行器设计、飞行器动力工程、材料科学与工程以及力学等专业本科生和研究生的必修课或选修课。在国家启动实施航空发动机和燃气轮机重大专项的喜人形势下，为了更好地了解复合材料的性能与特点，进一步拓展复合材料的应用范围，提升我国复合材料的结构设计水平，满足高校本科生和研究生的复合材料力学课程教学工作的需要，根据近年来复合材料力学的发展特点和专业教学的实际需要，作者结合多年来从事复合材料力学课程教学以及科研的体会编写了本书。

为构建航空复合材料结构分析与设计知识体系，增强教材的系统性和理论性，便于学生的学习、掌握与拓展，全书内容划分为两部分，10 个章节。

第一部分 (1~6 章) 主要讲解聚合物基复合材料、陶瓷基复合材料、金属基复合材料及碳/碳复合材料的制备工艺，及其在航空领域尤其是航空发动机领域的应用。第 1 章是复合材料及其力学分析绪论，介绍了复合材料的定义、种类以及发展历史，并概要介绍了复合材料在航空航天领域的应用。第 2 章介绍了复合材料的组分，常用基体的种类和特点、常用纤维的种类和性能。第 3 章介绍了聚合物基复合材料的种类和性能，并概述了聚合物基复合材料的结构设计、成型工艺和应用。第 4 章在介绍了陶瓷基体的种类和特点的基础上，阐述了陶瓷基复合材料的种类、性能和成型工艺及其在航空航天领域的应用。第 5 章介绍了金属基复合材料的种类和特点、结构设计、成型工艺和应用，特别是在航空航天领域的应用，并分

析了金属基复合材料界面性能。第 6 章介绍了碳/碳复合材料,包括碳/碳复合材料的发展历史、力学性能和物理特性等,以及当前碳/碳复合材料的成型加工技术及其在航空航天、汽车、生物学等各领域的应用。

第二部分(7~10 章)主要讲解复合材料力学的基本概念,为复合材料的结构工程设计实践奠定一定的基础。第 7 章基于各向异性弹性力学基本方程,分析了不同结构特点弹性体的应力-应变关系,并介绍了正交各向异性材料的工程弹性常数。第 8 章在宏观层面分析单层复合材料的力学特性,介绍了平面应力下单层复合材料不同方向的应力-应变关系,并以材料力学理论知识为基础建立正交各向异性单层材料的强度理论。第 9 章在介绍层合板定义及特性的基础之上,根据层合板的应力-应变关系推导出层合板刚度、柔度的计算方法,并介绍了几种典型层合板的刚度计算以及层合板强度的分析方法。第 10 章则在细观层面对复合材料进行相应的力学分析,首先介绍了尺度和代表单元的概念,并以此为基础分析了单层板刚度的材料力学、弹性力学行为以及单层板强度的材料力学行为,并对其热膨胀力学行为进行了分析,最后简述了复合材料多尺度分析方法。

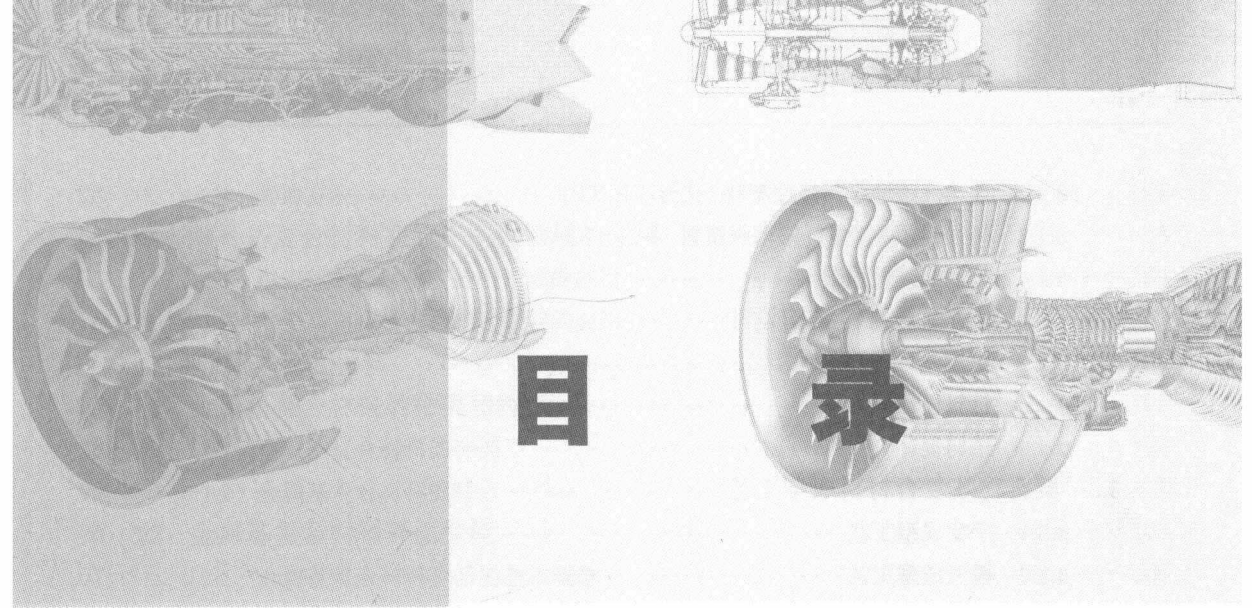
本书第 1 章、第 2 章、第 3 章和第 6 章由崔海涛编写,第 4 章、第 5 章、第 7~10 章由孙志刚编写。陈西辉、刑广鹏、孙剑芬、常亚宁、李宏宇、孙唯一等参与了有关的辅助工作,在此一并表示感谢。

全书内容既有比较完整的理论基础,又力求叙述简洁,内容紧凑实用,各章节前后呼应,便于学习、掌握。本教材内容撰写着力与专业基础课程内容相呼应,使学生在该课程中,促进大学 4 年所学相关知识的融会贯通。本书既可作为国防高等院校有关专业的教材,也可供从事复合材料结构设计、复合材料开发和应用等行业的工程技术人员参考。

限于作者水平,书中难免出现不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

2016 年 10 月



# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 复合材料的定义 .....	1
1.2 复合材料的种类 .....	1
1.3 复合材料的发展历史 .....	3
1.4 复合材料的命名和分类 .....	4
1.5 复合材料的基本性能 .....	5
1.6 复合材料在航空航天领域的应用 .....	7
1.6.1 复合材料在飞机机身上的应用 .....	7
1.6.2 复合材料在航空发动机上的应用 .....	10
1.6.3 复合材料在卫星和宇航器上的应用 .....	14
<b>第 2 章 复合材料的组分</b> .....	15
2.1 常用基体的种类和特点 .....	15
2.1.1 热固性树脂 .....	16
2.1.2 热塑性树脂 .....	21
2.2 常用纤维的种类和性能 .....	23
2.2.1 玻璃纤维 .....	23
2.2.2 碳纤维 .....	32
2.2.3 芳纶纤维 (有机纤维) .....	41
2.2.4 碳化硅纤维 .....	44
2.2.5 硼纤维 .....	45
2.2.6 氧化铝纤维 .....	46
2.2.7 晶须 .....	47
<b>第 3 章 聚合物基复合材料</b> .....	49
3.1 聚合物基复合材料的种类和性能 .....	49
3.1.1 玻璃纤维增强热固性塑料 .....	50



3.1.2	玻璃纤维增强热塑性塑料 (代号 FR-TP) .....	52
3.1.3	高强度、高模量纤维增强塑料 .....	55
3.1.4	其他纤维增强塑料 .....	56
3.2	聚合物基复合材料结构设计 .....	57
3.2.1	概述 .....	58
3.2.2	材料设计 .....	60
3.2.3	结构设计 .....	67
3.3	聚合物基复合材料成型工艺 .....	69
3.3.1	手糊成型工艺 .....	69
3.3.2	模压成型工艺 .....	70
3.3.3	RTM 成型工艺 .....	74
3.3.4	喷射成型工艺 .....	75
3.3.5	连续缠绕成型工艺 .....	77
3.3.6	拉挤成型工艺 .....	79
3.3.7	挤出成型工艺 .....	81
3.3.8	注射成型工艺 .....	81
3.4	聚合物基复合材料的应用 .....	83
3.4.1	玻璃纤维增强塑料 (GFRP) 的应用 .....	83
3.4.2	玻璃纤维增强热塑性塑料 (FR-TP) 的应用 .....	86
3.4.3	高强度、高模量纤维增强塑料的应用 .....	86
3.4.4	其他纤维增强塑料的应用 .....	87
<b>第 4 章</b>	<b>陶瓷基复合材料</b> .....	<b>88</b>
4.1	陶瓷基体的种类和特点 .....	88
4.1.1	氧化铝陶瓷 .....	88
4.1.2	氮化硅陶瓷 .....	89
4.1.3	碳化硅陶瓷 .....	89
4.1.4	玻璃陶瓷 .....	90
4.2	陶瓷基复合材料的种类和性能 .....	91
4.2.1	纤维增强体 .....	91
4.2.2	颗粒增强体 .....	91
4.3	陶瓷基复合材料的成型工艺 .....	92
4.3.1	粉末冶金法 .....	92
4.3.2	浆体法 .....	92
4.3.3	反应烧结法 .....	93
4.3.4	液态浸渍法 .....	94
4.3.5	直接氧化法 .....	95
4.3.6	溶胶-凝胶法 .....	95
4.3.7	化学气相渗透法 .....	96

4.3.8 其他方法	97
4.4 陶瓷基复合材料在航空航天领域的应用	98
4.4.1 陶瓷基复合材料在航空领域的应用	99
4.4.2 陶瓷基复合材料在航天领域的应用	102
<b>第 5 章 金属基复合材料</b>	<b>105</b>
5.1 金属基复合材料的种类和特点	105
5.1.1 金属基复合材料的种类	105
5.1.2 金属基复合材料的特点	107
5.2 金属基复合材料界面性能	108
5.2.1 金属基复合材料界面的基本概念	108
5.2.2 金属基复合材料界面的物理化学特性	110
5.3 金属基复合材料的结构设计及成型工艺	117
5.3.1 基体的选择	118
5.3.2 增强材料的选择	119
5.3.3 金属基复合材料工艺方法的选择	121
5.3.4 优化工艺方法及工艺参数	122
5.4 金属基复合材料的制备工艺	122
5.4.1 金属基复合材料制造方法分类	122
5.4.2 固态复合工艺	124
5.4.3 液态复合工艺	127
5.5 金属基复合材料在航空航天领域的应用	136
<b>第 6 章 碳/碳复合材料</b>	<b>141</b>
6.1 碳/碳复合材料概述	141
6.2 碳/碳复合材料的特性	142
6.2.1 力学性能	142
6.2.2 热物理性能	143
6.2.3 烧蚀性能	144
6.2.4 化学稳定性	144
6.3 碳/碳复合材料的成型加工技术	145
6.3.1 坯体加工	145
6.3.2 基体加工	147
6.3.3 碳/碳复合材料的制备工艺	147
6.4 碳/碳复合材料的应用	151
6.4.1 在火箭发动机喷管上的应用	151
6.4.2 在航天器和导弹中的应用	151
6.4.3 在内燃机等结构中的应用	153
6.4.4 在刹车盘中的应用	154
6.4.5 在生物学方面的应用	154

6.4.6	在其他方面的应用	155
<b>第 7 章</b>	<b>各向异性弹性力学基础</b>	156
7.1	各向异性弹性力学基本方程	156
7.2	各向异性弹性体的应力-应变关系	158
7.2.1	具有一个弹性对称平面的材料	161
7.2.2	正交各向异性材料	162
7.2.3	横观各向同性材料	164
7.2.4	各向同性材料	165
7.3	正交各向异性材料的工程弹性常数	166
<b>第 8 章</b>	<b>单层复合材料的宏观力学分析</b>	171
8.1	平面应力下单层复合材料的应力-应变关系	171
8.2	单层材料任意方向的应力-应变关系	173
8.2.1	应力转轴公式	173
8.2.2	应变转轴公式	175
8.2.3	任意方向上的应力-应变关系	176
8.3	单层复合材料的强度	178
8.3.1	各向同性材料强度理论简要回顾	178
8.3.2	正交各向异性单层材料的强度概念	179
8.4	正交各向异性单层材料的强度理论	181
8.4.1	最大应力理论	182
8.4.2	最大应变理论	184
8.4.3	蔡-希尔强度理论	184
8.4.4	蔡-吴张量理论	186
<b>第 9 章</b>	<b>层合板的弹性特性和强度理论</b>	189
9.1	层合板定义及特性	189
9.2	层合板的刚度	191
9.2.1	单层板的应力-应变关系	191
9.2.2	层合板的应力-应变关系	191
9.2.3	层合板的刚度	194
9.2.4	层合板的柔度	196
9.3	几种典型层合板的刚度计算	198
9.3.1	单层板	198
9.3.2	对称层合板	200
9.3.3	反对称层合板	205
9.3.4	不对称层合板	207
9.4	层合板强度的分析方法	207
9.4.1	层合板强度概述	207
9.4.2	层合板的应力分析	208

9.4.3 层合板的强度分析	210
<b>第 10 章 复合材料细观力学</b>	<b>219</b>
10.1 引言	219
10.2 尺度和代表单元的概念	221
10.3 单层板刚度的材料力学分析方法	222
10.3.1 $E_1$ 的确定	223
10.3.2 $E_2$ 的确定	223
10.3.3 $\nu_{21}$ 和 $\nu_{12}$ 的确定	225
10.3.4 $G_{12}$ 的确定	226
10.4 单层板强度的材料力学分析方法	230
10.4.1 纵向拉伸强度 $X_t$	230
10.4.2 纵向压缩强度 $X_c$	233
10.4.3 横向拉伸强度 $Y_t$	237
10.4.4 横向压缩强度 $Y_c$	238
10.4.5 面内剪切强度 $S$	238
10.5 热膨胀的力学分析	238
10.5.1 纵向热膨胀系数 $\alpha_1$ 的预测	238
10.5.2 横向热膨胀系数 $\alpha_2$ 的预测	239
10.6 单层板刚度的弹性力学分析方法	240
10.6.1 弹性力学的极值法	240
10.6.2 精确解	243
10.6.3 接触时的弹性力学解	247
10.6.4 哈尔平-蔡方程	248
10.7 复合材料多尺度分析方法概述	253
10.7.1 宏观力学方法	253
10.7.2 细观力学方法	254
10.7.3 宏-细观统一分析方法	256
<b>主要参考文献</b>	<b>259</b>



# 第1章 绪论

## 1.1 复合材料的定义

复合材料 (composite material) 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然保持其相对独立性,但复合材料的性能却不是组分材料性能的简单加和,而是有着重要的改进。一般复合材料的性能优于其组分材料的性能,并且有些性能是原来组分材料所没有的,复合材料改善了组分材料的刚度、强度、热学等性能。现在的胶合板、钢筋混凝土、夹布橡胶轮胎、玻璃钢等都属于复合材料。

复合材料由基体 (matrix) 材料和增强 (reinforcement) 材料组成。基体材料采用各种树脂或金属、非金属材料,增强材料采用各种纤维状材料或其他材料。其中,增强材料在复合材料中起主要作用,由它提供复合材料的刚度和强度。基体材料起配合作用,它用来支持和固定纤维材料、传递纤维间的载荷、保护纤维等。当然,基体材料也可以改善复合材料的某些性能,如要求密度小,则选择树脂作为基体材料;要求有耐高温性能,可用陶瓷基作为基体材料;为得到较高的韧性和剪切强度,一般考虑用金属作为基体材料。

复合材料的性能不仅取决于组分材料各自的性能,还依赖于基体材料与增强材料的界面性质。两者黏合性好,能形成较理想的界面,对于提高复合材料的刚度和强度是很重要的。

## 1.2 复合材料的种类

根据复合材料中增强材料的几何形状,复合材料可分为三大类:

- (1) 颗粒复合材料,由颗粒增强材料和基体组成;
- (2) 纤维增强复合材料,由纤维和基体组成;
- (3) 层合复合材料,由多种片状材料层合而组成。

### 1. 颗粒复合材料

它由悬浮在一种基体材料的一种或多种颗粒材料组成。颗粒可以是金属,也可以是非

金属。

(1) 非金属颗粒在非金属基体中的复合材料。最普通的例子是混凝土，它是由砂、石、水泥和水黏合在一起经过化学反应而变成坚固的结构材料，如加入钢筋又做成钢筋混凝土。还有用云母粉悬浮在玻璃或塑料中形成的复合材料。

(2) 金属颗粒在非金属基体中的复合材料。例如，固体火箭推进剂是由铝粉和高氯酸盐氧化剂无机微粒放在如聚氨酯的有机黏结剂中组成的，微粒约占 75%，黏结剂约占 25%。为了能有稳定的燃烧反应，复合材料必须均匀和不裂。

(3) 非金属颗粒在金属基体中的复合材料。氧化物和碳化物微粒悬浮在金属基体中得到金属陶瓷，用于耐腐蚀的工具制造和高温应用：碳化钨在钴基体中的金属陶瓷用于高硬度零件制造，如拉丝模具；碳化铬在钴基体中的金属陶瓷具有很高的耐磨性和耐腐蚀性，适用于制造阀门。

## 2. 纤维增强复合材料

各种长纤维比同样块状的材料强度高得多。例如，普通平板玻璃在几十兆帕的应力下就会破裂，而商用玻璃纤维的强度可达 3000~5000MPa，这是因为纤维与块状玻璃的结构不同，纤维内部缺陷和位错比块状材料少得多。

纤维增强复合材料按纤维种类分为玻璃纤维（其增强复合材料俗称玻璃钢）、硼纤维、碳纤维、碳化硅纤维、氧化铝纤维和芳纶纤维等。

纤维增强复合材料按基体可以分为各种树脂基体、各种金属基体、陶瓷基体和碳（石墨）基体几种。

纤维增强复合材料按照纤维形状、尺寸可分为连续纤维、短纤维、纤维布增强复合材料等。

## 3. 层合复合材料

它至少由两层不同材料复合而成，其增强性能有强度、刚度、耐磨损、耐腐蚀等。层合复合材料有以下几种。

(1) 双金属片。它是由两种不同热膨胀系数的金属片层合而成，当温度变化时，双金属片产生弯曲变形，可用于温度测量和控制。

(2) 涂覆金属。将一种金属涂覆在另一种金属上，得到优良的性能，例如用 10% 的铜涂覆铝丝作为铜丝的替代物。铝丝价廉而质轻，但难于连接，导热性较差；铜丝价高而较重，但导热性好，易于连接；涂铜铝丝比纯铜丝价廉而性能好。

(3) 夹层玻璃。这是为了用一种材料保护另一种材料。普通玻璃透光性好但易脆裂，聚乙烯醇缩丁醛塑料韧性好但易被划损，夹层玻璃是两层玻璃夹包一层聚乙烯醇缩丁醛塑料，具有良好的性能。

## 4. 两种或三种混合的增强复合材料

例如，两种或更多种纤维增强一种基体的复合材料。玻璃纤维与碳纤维增强树脂成为混杂纤维复合材料，这已在很多工程中得到广泛应用。

### 1.3 复合材料的发展历史

复合材料并不是人类发明的一种新材料，在自然界中存在许许多多的天然复合材料。例如，树木和竹子是纤维素和木质素的复合体，动物的骨骼则由无机磷酸盐和蛋白质胶原复合而成。这些天然复合材料在与自然界长期抗争和演化的过程中形成了优化的复合组成和结构形式。以竹子为例，它是由许多直径不同的管状纤维分散于基体中所形成的材料。纤维的直径和排列密度由表皮到内层是不同的，表皮纤维的直径小而排列紧密，以利于增强它的抗弯能力，但内层的纤维粗而排列疏，可以改善它的韧性，所以这种复合结构很合理，达到了最优的强韧组合。

人类很早就接触和使用各种天然复合材料，并仿效自然界制造各种各样的复合材料。在中国的长江下游，发现了 7000 年前的漆器，是用蔓编织、用油漆漆了很多遍的器具，这是复合材料的原型，表明复合的考虑方法在很久之前就已经存在了。古代使用的土坯砖是由黏土和稻草（或麦秆）两种材料组成的，稻草起到增强黏土的作用。古代的宝剑是用复合浇注技术得到的包层金属复合材料，它具有锋利、韧性好、耐腐蚀的优点。

近代的复合材料是以 1942 年制造出的玻璃纤维增强塑料为起点的，随后相继开发了硼纤维、碳纤维、氧化铝纤维，同时开始对金属基复合材料展开研究。纵观复合材料的发展过程，可以将其分为 4 个阶段（图 1-1）。

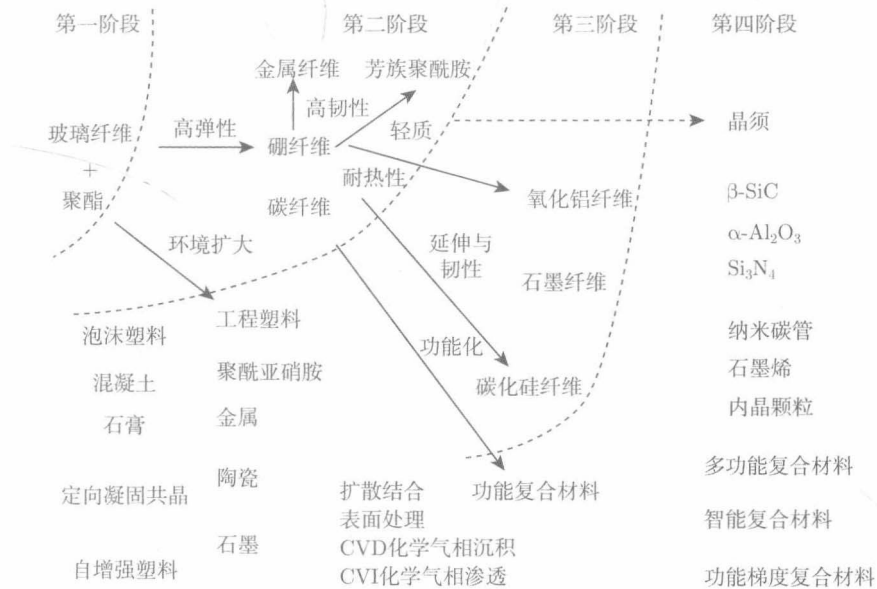


图 1-1 复合材料的发展模式

第一阶段：1940~1960 年，主要以玻璃纤维增强塑料复合材料为标志。

第二阶段：1960~1980 年，主要以碳纤维、凯芙拉 (Kevlar) 纤维增强环氧树脂复合材料为标志，并被用于飞机、火箭的主要承力件上。

第三阶段：1980~1990 年，主要以纤维增强铝基复合材料为标志。以金属或陶瓷为基体

的先进复合材料可称为第三代复合材料。

第四阶段：1990 年至今，主要以多功能复合材料为主，如智能复合材料、功能梯度复合材料等。

## 1.4 复合材料的命名和分类

复合材料可根据增强材料与基体材料的名称来命名。将增强材料的名称放在前面，基体材料的名称放在后面，再加上“复合材料”。例如，玻璃纤维和环氧树脂构成的复合材料称为“玻璃纤维环氧树脂复合材料”。为书写方便，也可以仅写增强材料和基体材料的缩写名称，中间加一斜线隔开，后面再加“复合材料”。如上述玻璃纤维和环氧树脂构成的复合材料，也可写作“玻璃/环氧复合材料”。有时为突出增强材料和基体材料，视强调的组分不同，也可简称为“玻璃纤维复合材料”或“环氧树脂复合材料”。碳纤维和金属基体构成的复合材料叫“金属基复合材料”，也可写为“碳/金属复合材料”。碳纤维和碳构成的复合材料叫“碳/碳复合材料”。

随着材料品种不断增加，人们为了更好地研究和材料，需要对材料进行分类。材料的分类，历史上有很多方法。如按材料的化学性质分类，有金属材料、非金属材料之分；按物理性质分类，有绝缘材料、磁性材料、透光材料、半导体材料、导电材料等；按用途分类，有航空材料、电工材料、建筑材料、包装材料等。

复合材料的分类方法也很多，常见的分类方法有以下几种。

### 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：短纤维无规则地分散在基体材料中制成的复合材料；

(3) 颗粒增强复合材料：微小颗粒状增强材料分散在基体中制成的复合材料；

(4) 编织复合材料：以平面二维或立体三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（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。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) 无机非金属复合材料: 以陶瓷材料 (也包括玻璃和水泥) 为基体制成的复合材料。

### 4. 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。

此外, 还有同质复合材料和异质复合材料。增强材料和基体材料属于同种物质的复合材料为同质复合材料, 如碳/碳复合材料。异质复合材料如前面提及的复合材料多属此类。

## 1.5 复合材料的基本性能

复合材料是由多相材料复合而成, 其共同的特点是:

(1) 可综合发挥各种组成材料的优点, 使一种材料具有多种性能, 具有天然材料所没有的性能。例如, 玻璃纤维增强环氧基材料, 既具有类似钢材的强度, 又具有塑料的介电性能和耐腐蚀性能。

(2) 可按对材料性能的需要进行材料的设计和制造。例如, 针对方向性材料强度的设计, 针对某种介质耐腐蚀性能的设计等。

(3) 可制成所需的任意形状的产品, 可避免多次加工工序。例如, 可避免金属产品的铸模、切削、磨光等工序。

性能的可设计性是复合材料的最大特点。影响复合材料性能的因素很多, 主要取决于增强材料的性能、含量和分布情况, 基体材料的性能、含量以及它们之间的界面结合情况, 作为产品还与成型工艺和结构设计有关。因此, 不论对哪一类复合材料, 就是同一类复合材料的性能也不是一个定值, 在此只给出主要性能。

### 1. 比强度高, 比模量高

复合材料最大的优点是比强度和比模量高。比强度、比模量是指材料的强度或模量与密度之比, 即

$$\text{比强度} = \frac{\text{强度}}{\text{材料密度}}, \text{单位为 MPa}/(\text{g}/\text{cm}^3)$$

$$\text{比模量} = \frac{\text{弹性模量}}{\text{材料密度}}, \text{单位为 GPa}/(\text{g}/\text{cm}^3)$$

材料的比强度越高, 制作同一零件则自重越小; 材料的比模量越高, 零件的刚性越大。表 1-1 中列出了碳纤维、硼纤维、有机纤维增强的聚合物基复合材料的性能。