

材料工程师系列

# 先进复合材料

胡保全 牛晋川 编著

*Xianjin Fuhhe Cailiao*



国防工业出版社

National Defense Industry Press

材料工程师系列

# 先进复合材料

胡保全 牛晋川 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书共分九章,分别介绍了复合材料增强体、复合材料设计原理、复合材料界面、聚合物基复合材料、金属基复合材料、陶瓷基复合材料、碳/碳复合材料、功能复合材料等内容,系统地讲述了先进复合材料主要组分材料以及将它们组成复合材料的工艺方法和控制复合材料结构与性能的途径,还介绍了根据不同的复合效应来设计高性能复合材料的原理。

本书除可作为材料科学与工程学科高职、高专及本科生教材外,还可供从事材料研究和生产的工程师参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

先进复合材料/胡保全、牛晋川编著. —北京:国防  
工业出版社,2006.6  
(材料工程师系列)  
ISBN 7-118-04538-1

I. 先... II. ①胡... ②牛... III. 复合材料 IV. TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 046660 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 16 $\frac{1}{4}$  字数 385 千字

2006 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 32.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

# 前 言

人类社会的进步与材料的发展密切相关,历史上曾以材料的名称来划分时代,足见材料的重要性,而材料的复合化又是材料发展的必然规律之一。当前随着各种科学技术的发展,对材料性能的要求日益苛刻,先进复合材料已成为影响各行各业发展的关键材料,它的发展水平是衡量一个国家科学技术水平的重要指标,因此其研究和开发受到世界各国的高度重视。由于复合材料的可设计自由度大,常常能满足某些对材料需求的综合指标,特别是在航空航天技术领域的应用得到迅速发展。复合材料现已与金属、高分子及陶瓷并列为四大主要材料。先进复合材料领域的教育和人才培养,对于该类材料的研究、开发和应用及可持续发展起着决定性作用。

《先进复合材料》一书基于对传统复合材料全面系统的介绍,将复合材料的最新成果融入进去。此书对正确选择复合材料以完成常规的工程建设项目,以及如何采用先进的复合材料满足现代高技术工程项目对复合材料提出的某些特殊要求具有一定的指导意义。

本书共分九章,分别介绍了复合材料增强体、复合材料设计原理、复合材料界面、聚合物基复合材料、金属基复合材料、陶瓷基复合材料、碳/碳复合材料、功能复合材料等内容,系统地讲述了先进复合材料主要组分材料以及将它们组成复合材料的工艺方法和控制复合材料结构与性能的途径,还介绍了根据不同的复合效应来设计高性能复合材料的原理。

作者根据自身在复合材料十余年来课程教学和科学研究中的体会,收集了国内外有关先进复合材料方面的大量资料编写本书。本书除可作为材料科学与工程学科高职、高专及本科生教材外,还可供从事材料研究和生产的工程师参考。

本书第二章~第八章及第九章的1~3节由胡保全和牛晋川编著,第九章的4~10节由史育红编著,全书由胡保全统一定稿。

限于我们的学术和技术水平,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编者

2006年3月

# 目 录

第一章 概论	1	2.3.1 碳纤维的分类	25
1.1 复合材料的发展概况	1	2.3.2 碳纤维的制造	25
1.2 复合材料的定义	4	2.4 硼纤维	33
1.3 复合材料的命名和分类	5	2.4.1 概述	33
1.3.1 复合材料的命名	5	2.4.2 硼纤维的制造	33
1.3.2 复合材料的结构	5	2.4.3 硼纤维的性能	35
1.3.3 复合材料的分类	6	2.4.4 硼纤维的应用	35
1.4 复合材料的特性	7	2.5 碳化硅纤维	36
1.4.1 聚合物基复合材料的性能特点	8	2.5.1 概述	36
1.4.2 金属基复合材料的性能特点	9	2.5.2 碳化硅纤维的制造	36
1.4.3 陶瓷基复合材料的性能特点	11	2.5.3 碳化硅纤维的结构	38
1.5 复合材料的应用	12	2.5.4 碳化硅纤维的性能	40
1.5.1 在航空航天工业中的应用	12	2.5.5 碳化硅纤维的应用	41
1.5.2 复合材料在其他行业上的应用	13	2.6 氧化铝纤维	42
第二章 复合材料的增强体	14	2.6.1 氧化铝系列纤维的特性	42
2.1 概述	14	2.6.2 连续氧化铝纤维的制备方法	43
2.1.1 纤维状增强材料的特点	14	2.6.3 氧化铝纤维的应用	44
2.1.2 增强体的分类	15	2.7 晶须	44
2.2 玻璃纤维	16	2.7.1 概述	44
2.2.1 玻璃纤维的组成及分类	16	2.7.2 晶须的性能及应用	44
2.2.2 玻璃纤维的结构	17	2.7.3 其他新型晶须	44
2.2.3 玻璃纤维的性质	18	2.8 芳纶	45
2.2.4 玻璃纤维及玻璃制品的制备	20	2.8.1 芳纶纤维的结构	45
2.2.5 特种玻璃纤维	23	2.8.2 Kevlar 纤维的制备	47
2.3 碳纤维	25	2.8.3 Kevlar 纤维的性能	48
		2.8.4 Kevlar 纤维的品种与规格	51
		2.8.5 Kevlar 纤维的应用	52
		第三章 复合材料设计原理	53
		3.1 概述	53

3.2 复合材料的可设计性·····	53	5.2.3 聚合物的命名·····	95
3.3 复合材料设计的基本思想·····	54	5.2.4 聚合物的合成·····	95
3.3.1 复合材料的结构设计 过程·····	54	5.3 聚合物的结构·····	96
3.3.2 复合材料的结构设计 条件·····	55	5.3.1 大分子链结构·····	96
3.3.3 材料设计·····	57	5.3.2 聚合物的聚集态结构·····	99
3.3.4 结构设计·····	62	5.4 温度对高聚物结构性能的 影响·····	101
3.3.5 复合材料的力学性能 设计·····	66	5.4.1 线型无定型高聚合物 形变与温度的关系·····	101
3.3.6 复合材料其他物理 性能的复合原理·····	67	5.4.2 晶态聚合物形变与温 度的关系·····	102
3.3.7 复合材料的制造选择·····	69	5.4.3 体型聚合物形变与温 度的关系·····	102
3.3.8 复合材料的一体化设计 ——材料—工艺—设计·····	69	5.5 聚合物的基本性能·····	103
<b>第四章 复合材料的界面·····</b>	<b>70</b>	5.5.1 聚合物的物理性能·····	103
4.1 复合材料界面的概念·····	70	5.5.2 聚合物的力学性能·····	103
4.2 复合材料的界面·····	71	5.5.3 聚合物的其他性能·····	105
4.2.1 聚合物基复合材料的 界面·····	71	5.5.4 聚合物材料的发展·····	108
4.2.2 金属基复合材料的 界面·····	77	5.6 复合材料用聚合物基体·····	108
4.2.3 陶瓷基复合材料的 界面·····	81	5.6.1 环氧树脂·····	108
4.3 增强材料的表面处理·····	82	5.6.2 不饱和聚酯·····	117
4.3.1 增强材料的表面特性·····	82	5.6.3 酚醛树脂·····	118
4.3.2 玻璃纤维的表面处理·····	83	5.6.4 呋喃树脂·····	121
4.3.3 碳纤维的表面处理·····	87	5.6.5 聚酰亚胺·····	122
4.3.4 芳纶的表面处理·····	89	5.6.6 有机硅树脂·····	124
4.3.5 金属纤维·····	90	5.6.7 高性能热塑性树脂 基体·····	124
4.3.6 超高相对分子质量聚乙 烯纤维·····	91	5.7 聚合物基复合材料的制造工艺 和方法·····	129
<b>第五章 聚合物基复合材料·····</b>	<b>92</b>	5.7.1 手糊成型·····	129
5.1 概述·····	92	5.7.2 模压成型·····	132
5.2 聚合物基体·····	92	5.7.3 缠绕成型·····	136
5.2.1 聚合物的基本概念·····	92	5.7.4 喷射成型·····	139
5.2.2 聚合物材料分类·····	94	5.7.5 树脂传递模塑及树脂膜 熔渗·····	141
		5.7.6 注射成型·····	145
		5.7.7 拉挤成型·····	145

5.7.8 真空压力成型 .....	146	7.1 概述 .....	194
5.8 聚合物基复合材料的		7.2 陶瓷基体 .....	194
力学性能 .....	147	7.2.1 陶瓷的晶体结构 .....	194
5.8.1 热固性复合材料 .....	147	7.2.2 常用陶瓷基体材料 .....	197
5.8.2 热塑性复合材料 .....	149	7.3 陶瓷基复合材料 .....	200
5.9 聚合物基复合材料的应用 .....	150	7.3.1 陶瓷基复合材料的分类 .....	200
5.9.1 聚合物基复合材料在航		7.3.2 陶瓷基复合材料中常用的	
空航天工业上的应用 .....	151	增强体及特性 .....	201
5.9.2 聚合物基复合材料在其他		7.3.3 纤维增强陶瓷基复合	
工业产品上的应用 .....	151	材料 .....	202
<b>第六章 金属基复合材料</b> .....	<b>153</b>	7.3.4 短纤维、晶须及颗粒增初	
6.1 概述 .....	153	陶瓷基复合材料 .....	204
6.2 金属基体 .....	153	7.3.5 陶瓷基复合材料的显微	
6.2.1 金属材料的力学性能 .....	154	组织 .....	208
6.2.2 金属材料的物理和		7.3.6 陶瓷基复合材料的	
化学性能 .....	155	制造 .....	209
6.2.3 金属的晶体结构和		7.3.7 陶瓷基复合材料的	
晶体缺陷 .....	156	应用 .....	213
6.2.4 常用金属基体材料 .....	160	<b>第八章 C/C 复合材料</b> .....	<b>215</b>
6.2.5 选择金属基体的原则 .....	163	8.1 概述 .....	215
6.3 金属基复合材料各论 .....	166	8.2 C/C 复合材料用碳纤维的	
6.3.1 金属基复合材料的分类 .....	166	选择 .....	215
6.3.2 金属基复合材料中常		8.3 C/C 复合材料的基体前	
用的增强体及特性 .....	166	驱体 .....	215
6.3.3 金属基复合材料的强		8.4 C/C 复合材料的制备 .....	216
度及模量 .....	167	8.4.1 预成型坯体 .....	216
6.3.4 金属基复合材料界面		8.4.2 致密化处理 .....	217
结构及特性 .....	168	8.5 C/C 复合材料的性能 .....	221
6.3.5 改善金属基体与增强体		8.6 C/C 复合材料的应用 .....	224
之间相容性的方法 .....	172	<b>第九章 功能复合材料</b> .....	<b>227</b>
6.3.6 金属基复合材料的制造		9.1 概述 .....	227
方法 .....	173	9.2 功能复合材料的设计 .....	227
6.3.7 铝基复合材料 .....	181	9.2.1 功能复合材料调整	
6.3.8 镁基复合材料 .....	189	优值的途径 .....	227
6.3.9 钛基复合材料 .....	190	9.2.2 功能复合材料的复	
6.3.10 铜基复合材料 .....	192	合效应 .....	229
<b>第七章 陶瓷基复合材料</b> .....	<b>194</b>	9.3 功能复合材料类别及应用	

情况 .....	230	制备方法 .....	241
9.4 磁性复合材料 .....	231	9.7 摩擦功能复合材料 .....	244
9.4.1 永磁复合材料 .....	231	9.7.1 摩阻复合材料 .....	244
9.4.2 软磁复合材料 .....	231	9.7.2 减摩复合材料 .....	245
9.4.3 磁记录复合材料 .....	232	9.8 阻尼功能复合材料 .....	247
9.4.4 磁流体 .....	234	9.9 梯度功能复合材料 .....	250
9.5 导电复合材料 .....	235	9.9.1 概述 .....	250
9.5.1 金属填充材料的导电 特性 .....	236	9.9.2 梯度功能复合材料的 制备方法 .....	251
9.5.2 聚合物基导电复合材料 .....	236	9.9.3 功能梯度材料的应用 .....	253
9.5.3 陶瓷基导电复合材料 .....	239	9.10 其他功能复合材料 .....	255
9.5.4 金属基导电复合材料 .....	239	9.10.1 热功能复合材料 .....	255
9.5.5 电屏蔽复合材料 .....	239	9.10.2 隐身复合材料 .....	257
9.5.6 超导复合材料 .....	240	9.10.3 光功能复合材料 .....	258
9.6 压电复合材料 .....	241	9.10.4 仿生复合材料 .....	259
9.6.1 概述 .....	241	<b>参考文献</b> .....	<b>260</b>
9.6.2 压电复合材料类型及			



# 第一章 概 论

## 1.1 复合材料的发展概况

人类发展的历史证明,材料是社会进步的物质基础,是人类进步的里程碑。综观人类利用材料的历史,可以清楚地看到,每一种重要材料的发展和利用,都会把人类支配和改造自然的能力提高到一个新的水平,给社会生产力和人类生活带来巨大的变化。材料的发展标志着社会生产力的发展水平和人类文明进步的程度,同时,材料的发展又为先进生产力发展的要求所推动,并受制于当时生产力发展的总水平。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。在新型材料研究、开发和应用,在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,科学技术迅速发展,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,传统的单一材料已经不能满足实际需要。这些都促进了人们对材料的研究逐步摆脱过去单靠经验的摸索方法,而向着按预定性能设计新材料的研究方向发展。

复合材料的历史一般可以分为两个阶段,即早期复合材料和现代复合材料。这里不包括具有复合材料特征的天然物质,如木材、骨骼、贝壳和海带等。

早期复合材料的历史较长,很多实例散见于现存的历史遗迹中,并且多少可以从中发现现代复合材料的思想萌芽。

现代复合材料的发展只有60多年的历史,它的主要特征是基体采用合成材料。1940年,世界上第一次用玻璃纤维增强不饱和聚酯树脂制造了军用飞机雷达罩。1942年,用手糊工艺制成第一艘玻璃钢渔船。20世纪60年代—70年代,玻璃纤维增强塑料(简记GFRP,俗称玻璃钢)制品已经广泛应用于航空、机械、化学、体育和建筑工业中。这种复合材料中玻璃纤维的用量为30%~60%,所用基体材料主要有不饱和聚酯树脂、环氧树脂和酚醛树脂。玻璃钢的比强度(拉伸强度/密度)比钢还要高,而且耐腐蚀性能好,被称为第一代复合材料。

20世纪80年代以后,由于人们丰富了复合材料设计、制造和测试等方面的知识与经验,如:层合板力学性能的准确计算;短纤维或连续纤维的纱束、垫、毡或编织物、编织布及预浸料的制作;模压、缠绕、拉挤、注射等成型工艺的出现;性能标准化以及玻璃纤维、树脂等原材料的不断改进,使玻璃纤维增强塑料的发展达到了成熟阶段。但是,与现代高新技术所要求的性能相比,它的许多性能尤其是模量和使用温度尚嫌不足,因此,玻璃钢不属于高级复合材料。

现代技术对高级复合材料(Advanced Composite Materials, ACM)的要求是:不仅比强度高,而且要求比刚度(模量/密度)高,同时剪切强度和剪切模量要高;高温性能和耐热性

也要高。针对玻璃纤维模量较低的主要缺点,20世纪50年代—60年代相继开发了硼纤维、碳纤维和芳纶纤维。早期生产的这些纤维的性能见表1-1。由表1-1可见,硼纤维、碳纤维和芳纶纤维均具有比玻璃纤维高得多的弹性模量和更低的密度,这类纤维被称为高级纤维。另一方面,玻璃纤维增强不饱和聚酯树脂的耐热性能较差,当温度大于60℃,其力学性能开始下降,温度为90℃时,力学性能保留率仅为60%。用硼纤维、碳纤维和芳纶纤维增强塑料基复合材料(BFRP、CFRP和KFRP)的最高使用温度长期可达150℃以上,它们兼具高比刚度和高比强度特性,称为第二代现代复合材料。

表1-1 玻璃纤维和初期生产的硼纤维、碳纤维和芳纶纤维的性能

纤维类型	拉伸强度/GPa	弹性模量/GPa	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	备注(代号)
E-玻璃	3.4	72.1	2.54	
S-玻璃	4.6	84.8	2.49	
硼(W芯)	2.8	411.9	2.60	
碳(沥青基)	2.0	343.3	1.60	UCC-50
碳(PAN基)	1.8	411.9	1.95	Morganite
芳纶	2.9	127.5	1.45	Kevlar-49

用聚酰亚胺做基体,以上述高级纤维做增强体的复合材料,使用温度高,但不超过200℃;用金属(铝、镁、钛、金属间化合物)做基体的复合材料,使用温度范围是175℃~900℃;用陶瓷(碳化硅、氮化硅、碳等)做基体的复合材料,使用温度是1000℃~2000℃。20世纪70年代,开发了耐热性能更高的氧化铝纤维和碳化硅纤维,还开发了各种晶须(如碳化硅晶须和氧化铝晶须),使现代复合材料的性能向耐热、高韧性和多功能方向发展,称为第三代现代复合材料。

图1-1示出现代复合材料的发展过程。第二代和第三代现代复合材料统称为高级

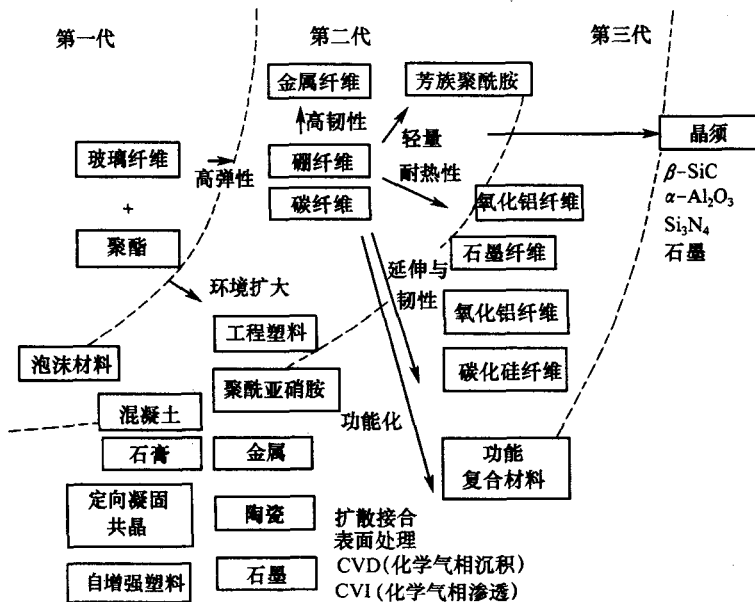


图1-1 复合材料发展简图

复合材料或高性能复合材料(也称为先进复合材料)。高级复合材料是具有特殊优异性能的材料,其制造过程涉及先进技术。它主要应用于尖端科学领域,如航天航空,也应用于汽车、体育、建筑、医疗及其他领域。

高性能复合材料有各种高性能增强体(纤维及其织物、晶须、颗粒)与各种聚合物、金属、碳及非碳陶瓷基体复合而成。高性能复合材料是具有高比模量、高比强度、优异的高温性能或特殊的多功能的复合材料。按照增强纤维和颗粒的直径大小,可将高性能复合材料分为宏观复合材料和微观复合材料。宏观复合材料是指增强体的尺寸在微米级的复合材料。采用混杂纤维(即两种以上的纤维)或混杂基体(即两种以上的基体)制成性能—成型工艺—成本最佳平衡匹配的复合材料,称为混杂复合材料(Hybrid Composite Materials, HCM)。不同类型的增强组分以叠层结构形式组成的复合材料称为混杂叠层复合材料。其增强组分可以分为纤维、片材或蜂窝芯材,其基体可以为树脂或金属。混杂叠层复合材料的典型例子是铝—纤维/环氧叠层板。通常是将经过表面处理的铝片与纤维织物的环氧树脂预浸片交替叠层后热压而成。常用的纤维有芳纶、碳、玻璃等。铝—纤维/环氧叠层板(商品名 ARALL)已工业化,用做飞机的蒙皮材料。增强相的尺寸为纳米(nm)等级的复合材料称为纳米复合材料。增强相尺寸控制在埃级( $10^{-10}\text{m}$ ),即原子或分子水平的称为杂化材料,统称微观复合材料,它们主要用做新型结构材料或功能材料。

近年来开发了宏观—微观复合为一体的各种新型复合材料,例如 20 世纪 80 年代后期出现了功能梯度复合材料。它以先进的材料设计为依据,采用先进的材料复合技术,通过控制构成材料的要素(组成、结构等)由一侧向另一侧呈连续梯度变化,使其内部界面消失,从而获得材料的性质和功能相应于组成和结构的变化而呈现梯度变化的非均质材料。该材料的研制初衷是用做新航天飞机缓和热应力超耐热材料。其制备方法有相分布控制和粒子排列技术两大类,包括物理真空镀膜、化学气相沉积、粒子排列烧结、等离子喷镀、薄膜合成和自蔓延高温合成法等。梯度复合材料在核能、电子、光学、化学、电磁学、生物医学乃至日常生活领域都有着一定的应用前景。由于这种材料性能在空间位置的梯度分布规律与材料使用中环境条件对材料性能的要求相适应,因此,由它所制成的器件或结构将具有最优的环境匹配性,它也被称为最先进复合材料。

机敏复合材料(Smart Composite)是现代复合材料发展的最新阶段,机敏复合材料能感知环境变化,并通过改变自身一个或多个性能参数对环境变化及时作出响应,使之与变化后的环境相适应,它一般也称为机敏材料或机敏结构。机敏材料具有自诊断、自适应或自愈合功能,因此,它必然是感知材料和执行材料的复合,有时还需要外接的能源、信息处理和反馈系统。例如,具有自诊断功能的机敏复合材料是把光导纤维与增强材料一同与基体复合,每根光导纤维均接于独立的光源和检测系统。当复合材料的某处发生应力集中或破坏时,该处的光导纤维即发生相应的应变或断裂,从而可据此诊断出该处的情况。又如,能对振动产生自适应阻尼的机敏复合材料是由压电材料和形状记忆材料与高聚物复合在一起。当压电材料感知振动时,信号启动外接电路时形状记忆合金产生形变,从而改变复合材料的固有振动模态而减振。机敏复合材料已用于主动检测振动与噪声,主动探测复合材料构件的损伤,根据环境变化主动改变构件几何尺寸等;也可用于控制树脂基复合材料自身的固化过程。

智能复合材料 (Intelligent Composite) 是机敏复合材料的高级形式。机敏复合材料对环境能作出线性反应, 而智能材料则能根据环境条件的变化程度非线性地使材料与之适应以达到最佳效果。也就是说, 在机敏复合材料自诊断、自适应和自愈合的基础上, 增加了自决策、自修补的功能, 体现具有智能的高级形式。但有的学者对两者并不严格区分而将它们统称为智能材料。智能复合材料和系统也可简称为智能材料和系统。显然, 智能材料必然是复合材料而不可能是传统的单一材料。已在研究的智能材料和系统有自诊断断裂的飞机机翼、自愈合裂纹的混凝土、控制湍流和噪声的机械蒙皮、人工肌肉和皮肤等。在航空、航天、舰艇、汽车、建筑、机器人、防生和医药领域已显示出潜在的应用前景。随着复合工艺、集成化和微细加工技术的发展, 将会有更多种实用的智能材料出现。

## 1.2 复合材料的定义

复合材料 (Composite Materials) 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的不同性能、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组分材料性能差距很大; 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, 另一相是分散相, 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。

《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组分的性能互相补充并彼此关联, 从而获得新的优异性能, 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良的材料。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。

## 1.3 复合材料的命名和分类

### 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,不利于材料的应用和发展。

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的有金属基复合材料、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、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,也可只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300/648、M40/5208、S-GF/5245C、Kevlar-49/Q8911。

### 1.3.2 复合材料的结构

复合材料由两种以上组分以及它们之间的界面构成。组分材料主要指增强体和基体,它们也被称为复合材料的增强相和基体相。增强相和基体相之间的界面区域因为其特殊的结构与组成也被视做复合材料中的“相”,即界面相。增强相和基体相是根据它们组分的物理和化学性质以及在最终复合材料中的形态来区分的。其中一个组分是细丝(连续的或断切的)、薄片或颗粒状,具有较高的强度、模量、硬度和脆性,在复合材料承受外载荷时是主要承载相,称为增强相或增强体。它们在复合材料中呈分散形式,被基体相隔离包围,因此也称做分散相;另一个组分是包围增强相并相对较弱和韧的连贯材料,称为基体相复合材料的各种形态,如图1-2所示。

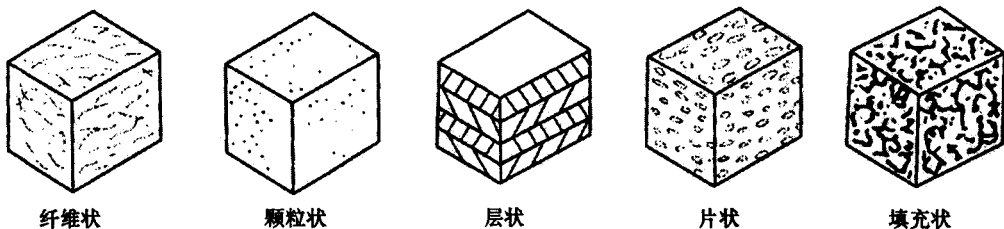


图1-2 复合材料及其增强相的各种形态

在制造前,基体材料的形状可以是薄片、粉末、块体或无定形的流体,它的状态可以是固体、气态、熔融态或半固一半液态。但是在与增强相固结后,基体相在复合材料中就成

为包裹增强相的连续体。因此,基体相也叫连续相。基体相具有支撑和保护增强相的作用,在复合材料承受外载荷时,基体相主要以剪切变形的方式向增强相分配和传递载荷的作用。

在复合材料中,增强相和基体相之间存在着明显的结合面,位于增强相和基体相之间并使这两相彼此相连的、化学成分和力学性质与相临两相有明显的区别、能够在相临两相间起传递载荷作用的区域,称为复合材料的界面(interfaces)。通常复合材料界面层的厚度在亚微米以下,但界面层的总面积在复合材料中相当可观,且复合材料的界面特征对复合材料的性能、破坏行为及应用效能有很大影响。所以,人们以极大的注意力开始对复合材料界面进行研究。为追求制得具有最佳综合性能的复合材料所进行的这类研究,称为复合材料的表面和界面工程。

复合材料的性能取决于组分材料的种类、性能、含量和分布,包括:增强体的性能和它们的表面物理、化学状态;基体的结构和性能;增强体的配置、分布和体积含量。复合材料的性能还取决于复合材料的制造工艺条件、复合方法、零件几何形状和使用环境条件。复合材料能保留原组分材料的主要特色,并通过复合效应获得原组分材料所不具备的性能,还可以通过材料设计使组分的性能相互补充并彼此关联,从而获得新的性能。选择复合材料的组分、增强体分布和复合材料制造工艺,使其具有符合使用要求的性能的过程,就是复合材料设计。

### 1.3.3 复合材料的分类

复合材料的分类方法很多,常见的分类方法有以下几种。

#### 1. 按增强体的几何形态分类

(1) 连续纤维增强复合材料:包括单向纤维(一维)、无纬布叠层、二维织物层合、多向编织复合材料和混杂复合材料。

(2) 短纤维复合材料:晶须、短切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:可分为弥散增强复合材料(颗粒等效直径为  $0.01\mu\text{m} \sim 0.1\mu\text{m}$ , 粒子间距为  $0.01\mu\text{m} \sim 0.3\mu\text{m}$ )和粒子增强复合材料(颗粒等效直径为  $0.01\mu\text{m} \sim 0.1\mu\text{m}$ , 粒子间距为  $1\mu\text{m} \sim 25\mu\text{m}$ )。

(4) 薄片增强复合材料:增强体是长与宽尺寸相近的薄片,以平面二维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(如钨纤维、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。

#### 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、和铜基复合材料等。

(3) 无机非金属基复合材料:以陶瓷材料(包括玻璃、水泥和碳)为基体制成的复合材料。

#### 4. 按材料使用功能分类

(1) 结构复合材料:主要是作为支撑力结构使用的复合材料,它基本上是由能承受载荷的增强体组元与能连接增强体成为整体承载,同时又起分配与传递载荷作用的基体组元构成。

(2) 功能复合材料:具有某种特殊的物理或化学特性,如声、光、电、热、磁、耐腐蚀、零膨胀、阻尼、摩擦或换能等。

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和以后提及的复合材料多属此类。

高性能复合材料按照其基体材料的性质通常分成两类:金属基复合材料(Metal Matrix Composite, MMC)和非金属基体复合材料。后者又可分为两类:聚合物基复合材料(Polymer Matrix Composite, PMC)和陶瓷基复合材料(Ceramic Matrix Composite, CMC)。复合材料分类如图 1-3 所示。

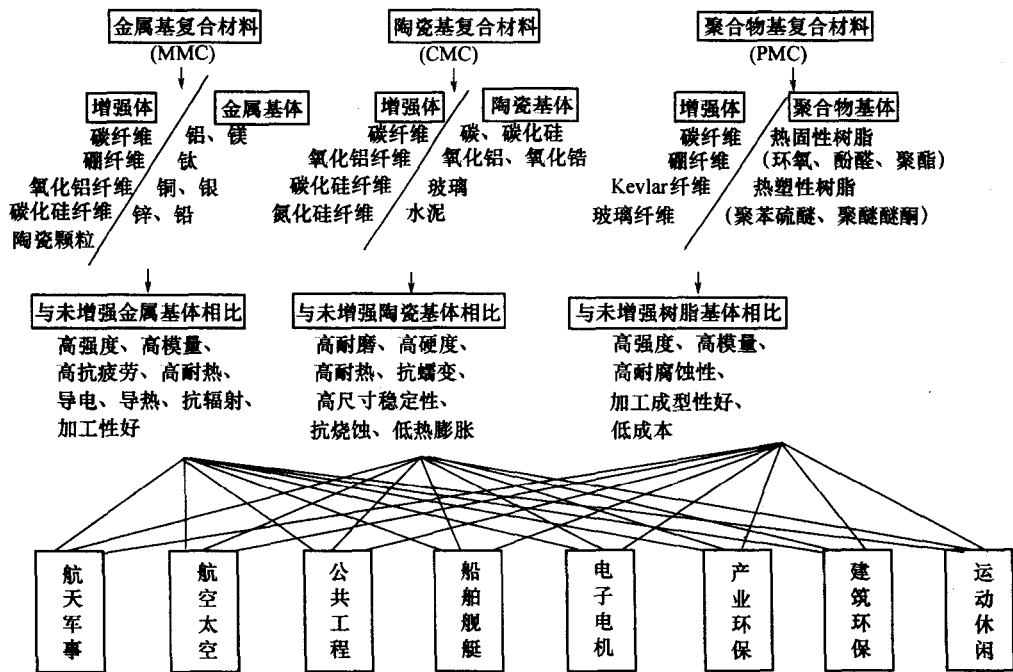


图 1-3 复合材料分类

## 1.4 复合材料的特性

复合材料是由多相材料复合而成,它们的共同特点如下:

(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,玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料,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。

(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、切割、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、含量及分布状况,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,不论哪一类复合材料,就是同一种复合材料的性能也不是一个定值,在此只给出主要性能。

### 1.4.1 聚合物基复合材料的性能特点

#### 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材料来讲无疑是非常重要的力学性能。表 1-2 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 1-2 各种材料的比强度和比模量

材料	密度 /(g/cm <sup>3</sup> )	拉伸强度 /GPa	弹性模量 /10 <sup>2</sup> GPa	比强度 /10 <sup>6</sup> cm	比模量 /10 <sup>8</sup> 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	15.0
有机纤维/环氧复合材料	1.4	1.40	0.8	1.0	5.7
碳纤维/环氧复合材料	2.1	1.38	2.1	6.6	10.0
碳纤维/环氧复合材料	2.65	1.0	2.0	3.8	7.5

#### 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征兆的突发性破坏。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,破坏前没有明显预兆。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%。



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、界面脱黏、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。

### 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吸收振动能量的能力,致使材料的振动阻尼很高,即使振动起来,在较短时间内也可停下来。

### 4. 具有多种功能性

(1) 瞬时耐高温、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,可用做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,可用做雷达罩的高频透波材料。

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

(4) 优良的耐腐蚀性。

(5) 有特殊的光学、电学、磁学的特性。

### 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,减小质量。

### 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。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。

## 1.4.2 金属基复合材料的性能特点

金属基复合材料的性能取决于所选用的金属或合金基体和增强物的特性、含量、分布等因素。通过优化组合可以获得既具有金属特性,又具有高比强度、高比模量、耐热、耐磨等的综合性能。综合归纳金属基复合材料有如下性能特点。