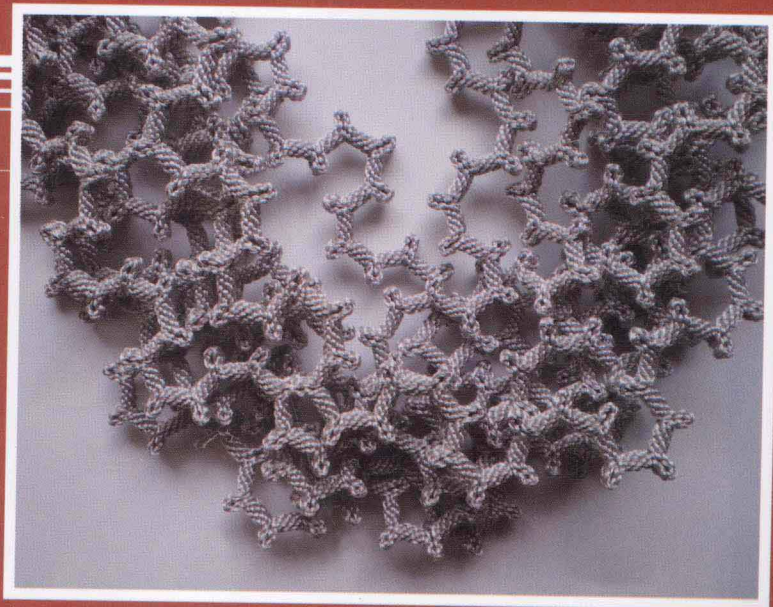


先进复合材料

(第2版)

XIANJIN FUHE CAILIAO

胡保全 牛晋川 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等院校“十二五”规划教材

先进复合材料

(第2版)

胡保全 牛晋川 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书共分十章,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、纳米复合材料等内容,系统地讲述了先进复合材料主要组分材料和将它们组成复合材料的工艺方法以及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. —2 版. —北京:国防工业出版社,2013. 5
ISBN 978-7-118-08653-9

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 059536 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 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 19 字数 234 千字

2013 年 5 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

第2版前言

本书自2006年出版以来,由于内容丰富全面,叙述简洁流畅,便于教与学,一直很受广大读者的欢迎,但随着教学改革以及科技的不断发展,内容有待进一步更新和完善,特进行本次修订。

本次修订对原有内容没有进行变动,只是在原书的基础上增加了第十章“纳米复合材料”,使本书的内容得到完善,但依旧保持了原书的结构与风格。

本书是材料科学与工程类专业的专业课教材,主要对象是高等学校的金属材料工程、无机非金属材料工程、高分子材料及工程、复合材料工程专业的学生,也可供非材料专业(如材料成型机控制、机械、化工)的学生以及工程技术人员参考。

由于水平有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编者
2012年8月

第1版前言

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。

本书共分十章,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、功能复合材料及纳米复合材料等内容,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。

本书第一章~第十章均由胡保全和牛晋川编著,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 碳纤维	25
1.1 复合材料的发展概况	1	2.3.1 碳纤维的分类	25
1.2 复合材料的定义	4	2.3.2 碳纤维的制造	25
1.3 复合材料的命名和分类	5	2.4 硼纤维	33
1.3.1 复合材料的命名	5	2.4.1 概述	33
1.3.2 复合材料的结构	5	2.4.2 硼纤维的制造	33
1.3.3 复合材料的分类	6	2.4.3 硼纤维的性能	35
1.4 复合材料的特性	7	2.4.4 硼纤维的应用	35
1.4.1 聚合物基复合材料的性能特点	8	2.5 碳化硅纤维	36
1.4.2 金属基复合材料的性能特点	9	2.5.1 概述	36
1.4.3 陶瓷基复合材料的性能特点	11	2.5.2 碳化硅纤维的制造	36
1.5 复合材料的应用	12	2.5.3 碳化硅纤维的结构	38
1.5.1 在航空航天工业中的应用	12	2.5.4 碳化硅纤维的性能	40
1.5.2 复合材料在其他行业上的应用	13	2.5.5 碳化硅纤维的应用	41
第二章 复合材料的增强体	14	2.6 氧化铝纤维	42
2.1 概述	14	2.6.1 氧化铝系列纤维的特性	42
2.1.1 纤维状增强材料的特点	14	2.6.2 连续氧化铝纤维的制备方法	43
2.1.2 增强体的分类	15	2.6.3 氧化铝纤维的应用	44
2.2 玻璃纤维	16	2.7 晶须	44
2.2.1 玻璃纤维的组成及分类	16	2.7.1 概述	44
2.2.2 玻璃纤维的结构	17	2.7.2 晶须的性能及应用	44
2.2.3 玻璃纤维的性质	18	2.7.3 其他新型晶须	44
2.2.4 玻璃纤维及玻璃制品的制备	20	2.8 芳纶	45
2.2.5 特种玻璃纤维	23	2.8.1 芳纶纤维的结构	45
		2.8.2 Kevlar 纤维的制备	47
		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	5.2.1 聚合物的基本概念	92
3.1 概述	53	5.2.2 聚合物材料分类	94
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		5.3 聚合物的结构	96
过程	54	5.3.1 大分子链结构	97
3.3.2 复合材料的结构设计		5.3.2 聚合物的聚集态结构	99
条件	55	5.4 温度对高聚物结构性能的影响	101
3.3.3 材料设计	57	5.4.1 线型无定型高聚物	
3.3.4 结构设计	62	形变与温度的关系	101
3.3.5 复合材料的力学性能		5.4.2 晶态聚合物形变与温	
设计	66	度的关系	102
3.3.6 复合材料其他物理		5.4.3 体型聚合物形变与温	
性能的复合原理	67	度的关系	102
3.3.7 复合材料的制造选择	69	5.5 聚合物的基本性能	103
3.3.8 复合材料的一体化设计——		5.5.1 聚合物的物理性能	103
材料—工艺—设计	69	5.5.2 聚合物的力学性能	103
第四章 复合材料的界面	70	5.5.3 聚合物的其他性能	105
4.1 复合材料界面的概念	70	5.5.4 聚合物材料的发展	108
4.2 复合材料的界面	71	5.6 复合材料用聚合物基体	108
4.2.1 聚合物基复合材料的		5.6.1 环氧树脂	108
界面	71	5.6.2 不饱和聚酯	117
4.2.2 金属基复合材料的		5.6.3 酚醛树脂	118
界面	77	5.6.4 呋喃树脂	121
4.2.3 陶瓷基复合材料的		5.6.5 聚酰亚胺	122
界面	81	5.6.6 有机硅树脂	124
4.3 增强材料的表面处理	82	5.6.7 高性能热塑性树脂	
4.3.1 增强材料的表面特性	82	基体	124
4.3.2 玻璃纤维的表面处理	83	5.7 聚合物基复合材料的制造	
4.3.3 碳纤维的表面处理	87	工艺和方法	129
4.3.4 芳纶的表面处理	89	5.7.1 手糊成型	129
4.3.5 金属纤维	90	5.7.2 模压成型	132
4.3.6 超高相对分子质量聚乙		5.7.3 缠绕成型	136
烯纤维	91	5.7.4 喷射成型	139
第五章 聚合物基复合材料	92	5.7.5 树脂传递模塑及树脂膜	
5.1 概述	92	熔渗	141
5.2 聚合物基体	92		

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
5.8	聚合物基复合材料的力学性能	147
5.8.1	热固性复合材料	147
5.8.2	热塑性复合材料	149
5.9	聚合物基复合材料的应用	150
5.9.1	聚合物基复合材料在航空航天工业上的应用	151
5.9.2	聚合物基复合材料在其他工业产品上的应用	151
第六章	金属基复合材料	153
6.1	概述	153
6.2	金属基体	153
6.2.1	金属材料的力学性能	154
6.2.2	金属材料的物理和化学性能	155
6.2.3	金属的晶体结构和晶体缺陷	156
6.2.4	常用金属基体材料	160
6.2.5	选择金属基体的原则	163
6.3	金属基复合材料各论	166
6.3.1	金属基复合材料的分类	166
6.3.2	金属基复合材料中常用的增强体及特性	166
6.3.3	金属基复合材料的强度及模量	167
6.3.4	金属基复合材料界面结构及特性	168
6.3.5	改善金属基体与增强体之间相容性的方法	172
6.3.6	金属基复合材料的制造方法	173
6.3.7	铝基复合材料	181
6.3.8	镁基复合材料	189

6.3.9	钛基复合材料	190
6.3.10	铜基复合材料	192
第七章	陶瓷基复合材料	194
7.1	概述	194
7.2	陶瓷基体	194
7.2.1	陶瓷的晶体结构	194
7.2.2	常用陶瓷基体材料	197
7.3	陶瓷基复合材料	200
7.3.1	陶瓷基复合材料的分类	200
7.3.2	陶瓷基复合材料中常用的增强体及特性	201
7.3.3	纤维增强陶瓷基复合材料	202
7.3.4	短纤维、晶须及颗粒增韧陶瓷基复合材料	204
7.3.5	陶瓷基复合材料的显微组织	208
7.3.6	陶瓷基复合材料的制造	209
7.3.7	陶瓷基复合材料的应用	213
第八章	C/C 复合材料	215
8.1	概述	215
8.2	C/C 复合材料用碳纤维的选择	215
8.3	C/C 复合材料的基体前驱体	215
8.4	C/C 复合材料的制备	216
8.4.1	预成型坯体	216
8.4.2	致密化处理	217
8.5	C/C 复合材料的性能	221
8.6	C/C 复合材料的应用	224
第九章	功能复合材料	227
9.1	概述	227
9.2	功能复合材料的设计	227

9.2.1 功能复合材料调整 优势的途径	227
9.2.2 功能复合材料的复 合效应	229
9.3 功能复合材料类别及应用 情况	230
9.4 磁性复合材料	231
9.4.1 永磁复合材料	231
9.4.2 软磁复合材料	231
9.4.3 磁记录复合材料	232
9.4.4 磁流体	234
9.5 导电复合材料	235
9.5.1 金属填充材料的导电 特性	236
9.5.2 聚合物基导电复合材料	236
9.5.3 陶瓷基导电复合材料	239
9.5.4 金属基导电复合材料	239
9.5.5 电屏蔽复合材料	239
9.5.6 超导复合材料	240
9.6 压电复合材料	241
9.6.1 概述	241
9.6.2 压电复合材料类型及 制备方法	241
9.7 摩擦功能复合材料	244
9.7.1 摩阻复合材料	244
9.7.2 减摩复合材料	245
9.8 阻尼功能复合材料	247
9.9 梯度功能复合材料	250
9.9.1 概述	250
9.9.2 梯度功能复合材料的 制备方法	251
9.9.3 功能梯度材料的应用	253
9.10 其他功能复合材料	255
9.10.1 热功能复合材料	255
9.10.2 隐身复合材料	257
9.10.3 光功能复合材料	258
9.10.4 仿生复合材料	259

第十章 纳米复合材料	260
10.1 概述	260
10.2 纳米复合材料分类	260
10.3 纳米复合材料的设计	262
10.3.1 纳米复合材料的 功能设计	262
10.3.2 纳米复合材料的 合成设计	262
10.3.3 纳米复合材料的 稳定化设计	263
10.4 纳米复合材料的性能	263
10.4.1 纳米复合材料的 力学性能	263
10.4.2 纳米复合材料的 热学性能	268
10.4.3 纳米复合材料的 阻燃性	271
10.5 纳米复合材料的制备	274
10.5.1 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiN}$ 纳米复合 材料	274
10.5.2 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ 纳米复合 材料	274
10.5.3 纳米—微米复合材料	275
10.5.4 纳米—微米复合材料 的制备	275
10.5.5 纳米—微米复合材料 性能	276
10.6 溶胶—凝胶法制备有机— 无机纳米复合材料	278
10.6.1 溶胶—凝胶法的 基本原理	278
10.6.2 溶胶—凝胶的工艺 过程	279
10.6.3 制备有机—无机纳米 复合材料	280
10.6.4 溶胶—凝胶法制备的 OINC 的结构特征与性能	283

10.7 插层复合法制备有机—无机 纳米复合材料·····	284	10.7.4 聚合物/层状硅酸盐纳米 复合物的结构与性能 ···	287
10.7.1 原理和分类 ·····	284	10.7.5 插层复合法制备功能性纳米 复合材料 ·····	290
10.7.2 层状硅酸盐 ·····	285	10.8 纳米复合材料应用前景·····	290
10.7.3 层状硅酸盐的表面 修饰 ·····	285	参考文献 ·····	292

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 70 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显不足,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 ³)	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

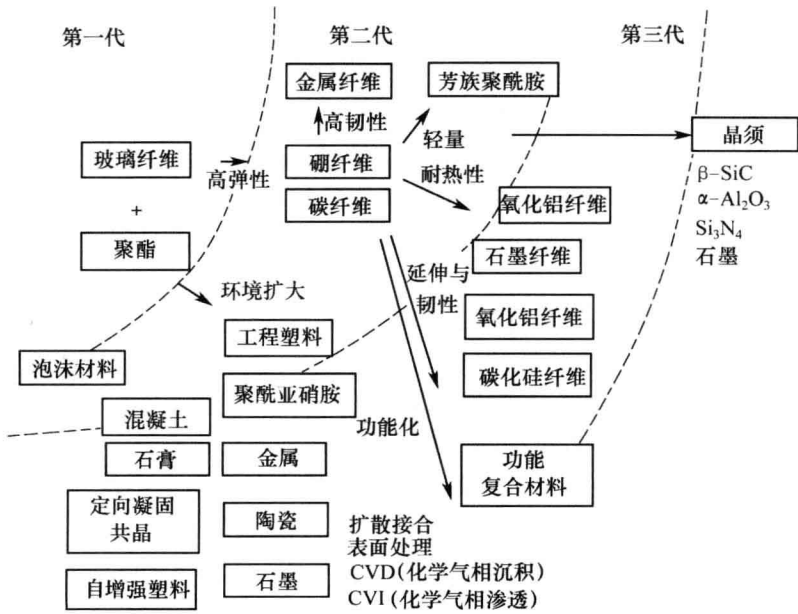


图 1-1 复合材料发展简图

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,如航空航天,也应用于汽车、体育、建筑、医疗及其他领域。

高性能复合材料由各种高性能增强体(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}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,包括物理真空镀膜法、化学气相沉积法、粒子排列烧结法、等离子喷镀法、薄膜合成法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、仿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、高脆性的增强剂和低模量、低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。

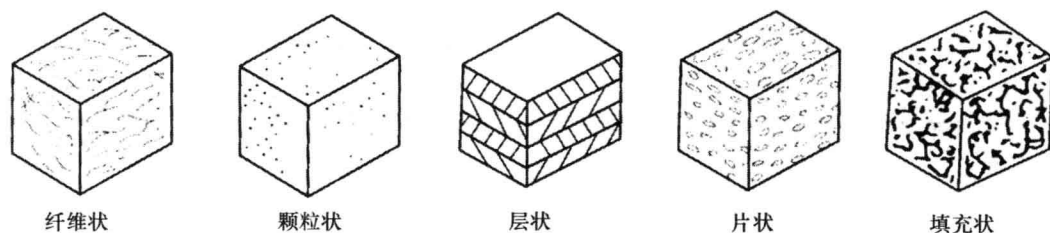


图 1 - 2 复合材料及其增强相的各种形态

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。

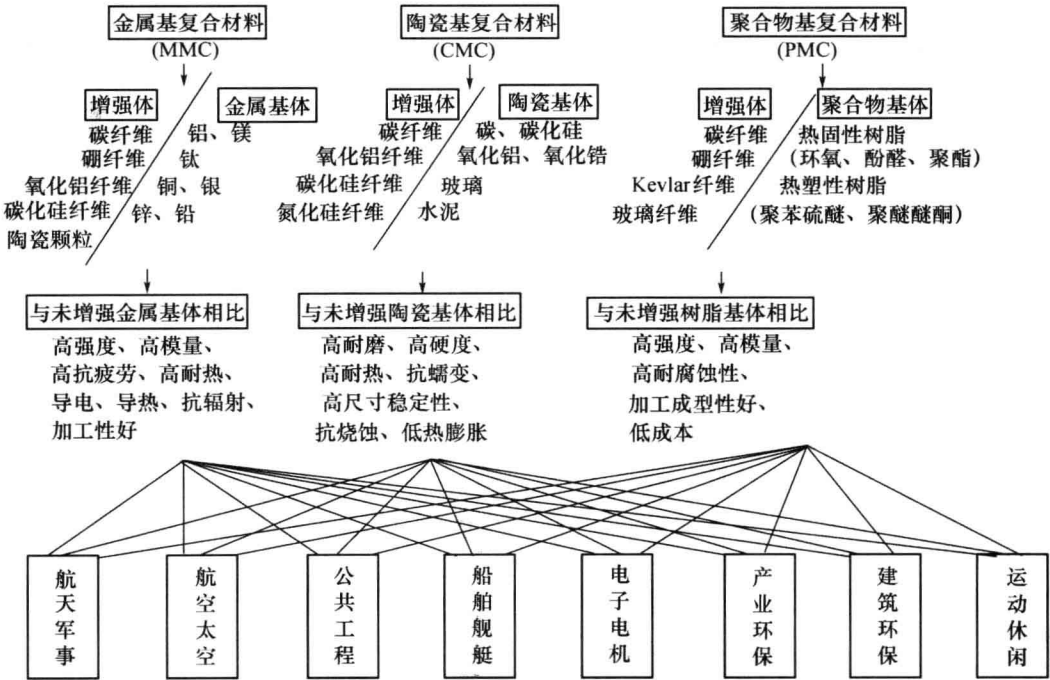


图 1-3 复合材料分类

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: