



陕西出版基金精品项目

复合材料原理及工艺

FU HE CAI LIAO
YUAN LI JI GONG YI

成来飞 梅 辉 刘永胜 张立同◎编著

西北工业大学出版社



陕西出版资金精品项目

FUHE CAILIAO YUANLI JI GONGYI

复合材料原理及工艺

成来飞 梅 辉 刘永胜 张立同 编著



西北工业大学出版社

西 安

【内容简介】 本书全面系统地阐述了复合材料原材料的结构、性能及复合材料的应用,并从界面和工艺角度介绍了复合材料的相关原理和结构设计,同时也对复合材料的成型工艺和制备方法进行了介绍。

本书既可作为高等学校材料专业本科生教材,也可作为从事相关专业的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

复合材料原理及工艺/成来飞等编著. —西安:西北工业大学出版社,2018.3

ISBN 978-7-5612-5892-7

I. ①复… II. ①成… III. ①复合材料—高等学校—教材 IV. ①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 052880 号

策划编辑:卞 浩

责任编辑:胡莉巾

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西金德佳印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:18

字 数:437 千字

版 次:2018 年 3 月第 1 版 2018 年 3 月第 1 次印刷

定 价:48.00 元

前 言

现代复合材料自出现以来,已经发展出聚合物基复合材料、金属基复合材料、陶瓷基复合材料和碳/碳复合材料等几大体系,并广泛应用于航空航天、交通运输、能源、建筑和体育等众多领域。据统计,复合材料的全球市场份额在 2015 年已达 260 亿美元,并保持着高速增长,预计 2020 年此值将达 340 亿美元。

复合材料日新月异的发展对本科生教学工作提出了越来越高的要求,而作为本科生教学基础工作的教材建设也处在不断完善之中。欧美发达国家自 20 世纪 80 年代起便开始了现代复合材料的教学工作,出版了一些经典教材。例如,1987 年出版,由 Krishan K. Chawla 主编的 *Composite Materials: Science and Engineering* 一书以复合材料的微结构-性能关系为主线,反映了聚合物基、金属基和陶瓷基复合材料在当时所取得的研究成果,该书还对复合材料的细观力学、宏观力学和设计原理进行了详细的介绍;2002 年出版,由 Daniel Gay, Suong V. Hoa 和 Stephen W. Tsai 主编的 *Composite Materials: Design and Applications* 一书从工程应用的角度出发,对复合材料的制备工艺、性能特点和设计原理进行了阐释,同时介绍了复合材料层合板承受多种类型载荷下的力学行为和失效判据,并涵盖了复合材料在众多领域的应用实例。自 20 世纪 90 年代以来,国内也开始了复合材料专业的教学工作,陆续出版了一些各具特色的教材。例如,1998 年出版,由闻荻江主编的《复合材料原理》一书重点关注了界面科学与工程以及复合规律这两大基础性问题,并对几类重要的结构复合材料和功能复合材料做了简明介绍,关注了本领域的基本科学问题和工程前沿;2004 年出版,由周曦亚主编的《复合材料》一书侧重各类复合材料的制备工艺和性能,对主要复合材料体系进行了分类论述,兼顾仿生复合材料、纳米复合材料等新材料和原位复合技术、梯度复合技术等新工艺;2011 年出版,由张以河主编的《复合材料学》一书介绍了复合材料的基本概念、基础理论和发展概况,着重体现了矿物复合材料的特色。

综上所述,由于复合材料体系和工艺方法种类繁多、涉及面广,目前本科生教材还没有形成基本固定的知识结构体系。笔者尝试编写一本系统性强、覆盖面广的本科生教材,一方面是为了及时反映复合材料学科的最新研究成果,另一方面也是为了探索建立复合材料本科生教材的基本框架。因此,笔者以各种复合材料体系为基础,以复合材料原理和工艺为主线,将复合材料原理与复合材料及其制备工艺有机结合起来,编著成本书。本书的宗旨是力争使读者站在不同复合材料共性的基础上,更深入地理解复合材料原理与工艺重要的知识点,强化基本功,同时更全面地掌握复合材料原理与工艺发展的本质,扩大知识面。

本书共 15 章,由成来飞教授、梅辉教授、刘永胜教授和张立同教授编著。其中,第 1 章为绪论,第 2 章至第 6 章为材料基础,主要介绍几类复合材料组元的结构与性能以及各类复合材料的应用,涵盖聚合物、金属、陶瓷、碳材料和强韧相几大材料类型,这是设计、制备和应用复合材料的前提;第 7 章至第 10 章为复合材料的复合原理和工艺原理,主要介绍复合材料中不同组元复合时得以实现协同相长的基础性问题,这是掌握复合材料的结构、性能与工艺关系的基础;第 11 章至第 15 章为工艺过程,主要介绍各类复合材料的制备工艺,同时对当前较为前沿

的增材制造技术也有所涉及。

本书为高等学校复合材料专业本科生教材,也可作为相关研究人员和工程技术人员的参考书。作为教材,本书授课时数为 64 学时左右,先修课程有材料科学基础、物理化学、材料表面与界面等。

复合材料是一门融合性学科,众多不同领域的研究者为此学科的发展做出了贡献。本书引用了许多学者的研究成果,在此一并致以谢意。

由于水平和时间有限,书中难免存在诸多不足,敬请读者批评指正。

编著者

2017 年 12 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 复合材料的发展历程	4
1.3 复合材料的组成	5
1.4 复合材料的分类	6
1.5 复合材料的性能特点	6
第 2 章 聚合物材料的结构与性能	9
2.1 概述	9
2.2 聚合物材料的微观结构	9
2.3 聚合物的力学特性	15
2.4 复合材料中常用的聚合物基体	17
2.5 聚合物基复合材料的应用	29
2.6 本章小结	32
习题	33
第 3 章 金属材料的结构与性能	34
3.1 概述	34
3.2 金属材料的微观结构	34
3.3 金属材料力学性能的影响因素	36
3.4 复合材料中常用的金属材料	37
3.5 金属基复合材料的应用	46
3.6 本章小结	52
习题	53
第 4 章 陶瓷材料的结构与性能	54
4.1 概述	54
4.2 陶瓷材料的微观结构	54
4.3 陶瓷材料的力学性能	54
4.4 复合材料中常用的陶瓷基体	57
4.5 陶瓷基复合材料的应用	70
4.6 本章小结	75
习题	76

第 5 章 碳材料的结构与性能	77
5.1 概述	77
5.2 碳材料的微观结构	77
5.3 碳材料的性能演变	82
5.4 复合材料中常用的碳材料基体	83
5.5 碳/碳复合材料的应用	87
5.6 本章小结	91
习题	92
第 6 章 强韧相的结构与性能	93
6.1 概述	93
6.2 颗粒	93
6.3 晶须	94
6.4 纤维	98
6.5 界面层材料	122
6.6 本章小结	124
习题	124
第 7 章 复合材料的复合效应	126
7.1 概述	126
7.2 尺寸效应	126
7.3 界面效应	129
7.4 尺度效应	134
7.5 结构效应	135
7.6 本章小结	137
习题	137
第 8 章 复合材料的界面相容性	138
8.1 概述	138
8.2 复合材料的物理相容性	138
8.3 复合材料的化学相容性	142
8.4 本章小结	145
习题	145
第 9 章 复合材料的力学特性	146
9.1 概述	146
9.2 复合材料中的混合法则	146
9.3 复合材料的界面力学特性	147

9.4	复合材料的模量匹配和强韧机制	158
9.5	本章小结	164
	习题	164
第 10 章	复合材料的设计与工艺原理	165
10.1	概述	165
10.2	复合材料的设计原理	165
10.3	复合材料的工艺原理	174
10.4	本章小结	181
	习题	182
第 11 章	树脂基复合材料制备工艺	183
11.1	概述	183
11.2	预浸料的制备	184
11.3	手糊成型工艺	187
11.4	模压成型工艺	190
11.5	层压成型工艺	193
11.6	缠绕成型工艺	194
11.7	拉挤成型工艺	198
11.8	树脂传递模塑成型工艺	201
11.9	本章小结	203
	习题	203
第 12 章	金属基复合材料制备工艺	204
12.1	概述	204
12.2	固态制备工艺	205
12.3	液态制备工艺	213
12.4	原位自生成法	225
12.5	本章小结	231
	习题	231
第 13 章	陶瓷基复合材料制备工艺	232
13.1	概述	232
13.2	化学气相渗透法	232
13.3	先驱体浸渍裂解法	237
13.4	反应性熔体浸渗法	241
13.5	浆料浸渍结合热压法	243
13.6	组合制备方法	245
13.7	其他制备方法	247

13.8 本章小结.....	249
习题.....	249
第 14 章 碳/碳复合材料制备工艺.....	250
14.1 概述.....	250
14.2 液相浸渍碳化法.....	250
14.3 化学气相渗透(CVI)法	263
14.4 碳/碳复合材料的石墨化	266
14.5 本章小结.....	267
习题.....	267
第 15 章 增材制造技术	268
15.1 概述.....	268
15.2 增材制造技术的工艺方法及过程.....	268
15.3 增材制造技术的特点.....	275
15.4 本章小结.....	276
习题.....	276
参考文献.....	277

第1章 绪 论

1.1 概 述

现代工业的发展离不开材料的发展,同时它也对材料提出了更高的要求。研发更轻质量、更高强度、更强功能的材料越来越受到人们的重视。人们在传统材料的应用实践中发现,单一材料在具备某些优点的同时,也不可避免地存在着一些难以克服的缺点。这促使了人们对复合材料的研究和应用。

将两种或两种以上的材料以某种方式组合可以获得新型材料,这种新型材料既继承了组元材料的优点,克服或弥补了缺点,又可以获得任何组元都不具备的新特点。同时,人们可以根据应用需求,对这种新型材料的组成、结构和性能进行设计。这便是复合材料的基本思想。

经过多年的研究和应用实践,复合材料已经发展出聚合物基复合材料、金属基复合材料、陶瓷基复合材料和碳/碳复合材料等几大体系,复合材料及其相关技术日趋成熟,并且成本大大降低,制品性能优势突出。复合材料在众多领域逐渐取代传统材料,成为材料解决方案的一大趋势。纵观工程材料的应用史,可以发现复合材料扮演着越来越重要的角色(见图 1-1)。

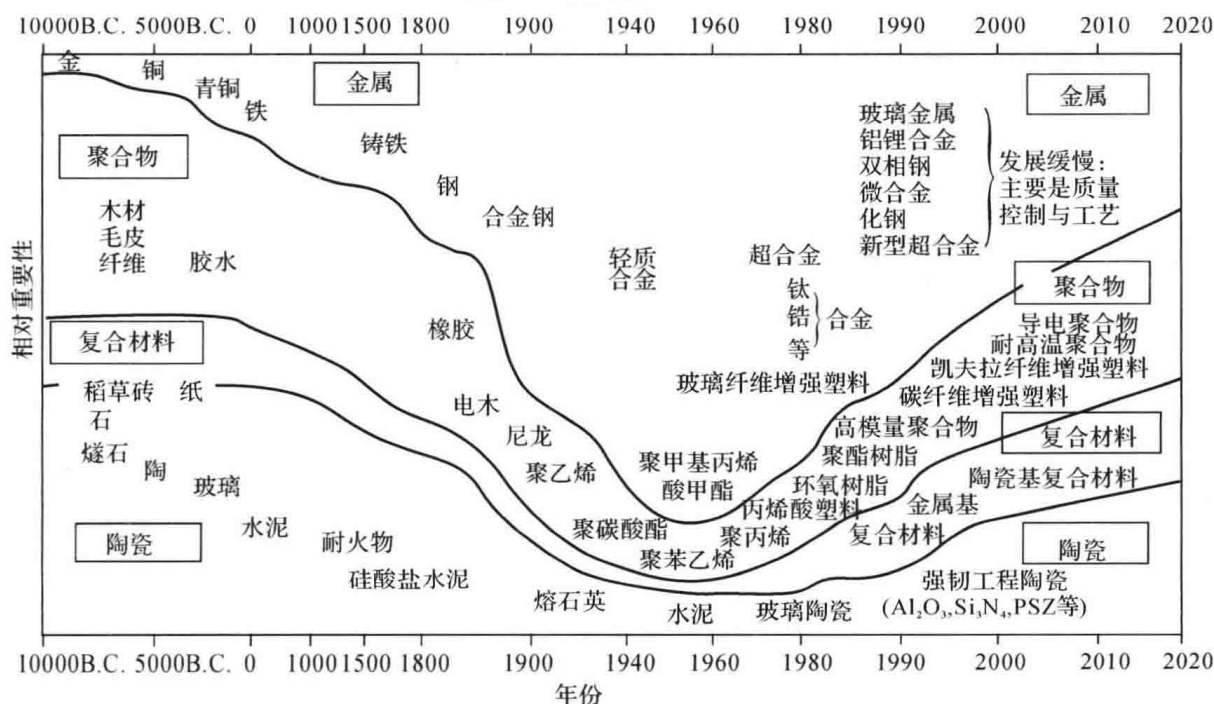


图 1-1 工程材料的发展历史

根据 2004 年的统计结果,全球复合材料市场已经达到 500 亿美元。在各行业中,航空航

天、建筑与基础设施、汽车、体育器材等占据了较大的份额(见图 1-2)。

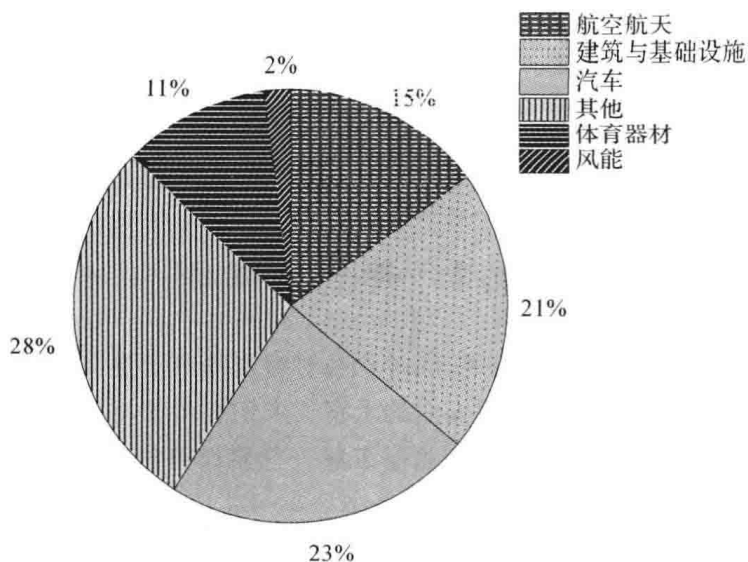


图 1-2 复合材料市场在各行业的比重

先进复合材料用于航空航天结构上可有效减轻结构质量,从而提高飞行器的速度、载重、航程和机动性等各项关键性能。复合材料的应用部位已由非承力部件及次承力部件发展到主承力部件,并向大型化、整体化方向发展,先进复合材料的用量已成为飞行器先进与否的重要标志。美国 NASA 的 Langley 研究中心在航空航天用先进复合材料发展报告中指出,综合各项效益,各种先进技术的应用可以使亚声速运输机获得 51% 的减重。除了减重,复合材料还使飞机结构的其他性能得到提升。例如,复合材料的气动剪裁技术可显著改善气动弹性性能;整体成形技术可大幅减少连接,提高结构可靠性并降低制备周期;耐腐蚀、抗疲劳的特点可降低维护成本。

在航空领域,复合材料逐渐替代钢、钛合金和铝合金,应用于军用飞机和民用飞机的结构件。在军用飞机方面,自 1969 年美国采用碳纤维增强环氧树脂复合材料制备 F-14 战斗机的垂直安定面蒙皮以来,复合材料在军用飞机上的应用一直稳步增长,在 AV-8B 和 F-22 战斗机中,碳纤维复合材料的用量已经占机身总重的 25%。在 B-2 等隐形飞机中,碳纤维复合材料蒙皮还发挥着吸收电磁波的功能。长期以来波音和空客公司都很重视复合材料在大型民航客机上的应用。2007 年,首架下线的波音 787 飞机机体中复合材料的用量达到了 50%(见图 1-3(a)),实现了飞机制造向复合材料基体制造技术的跨越。复合材料的大量使用极大地简化了波音 787 飞机的制备工艺,提高了乘用舒适性,并降低了飞机的使用和维护成本。在竞争压力下,空客公司也将其 A350-XWB 飞机的复合材料用量提升至 52%。图 1-3(b)给出了复合材料用量在不同时代飞机中的占比,可以发现,大量应用复合材料已经成为航空工业的发展趋势。

在航天领域,除了航天飞机、太空飞船等的大型结构件,复合材料还被应用于太阳能阵列、天线、光学设备等的支撑结构。通过结构设计,复合材料可具备极低的热膨胀系数,因而可以在很宽的温度范围内保持尺寸稳定性,大大提高了上述设备的结构可靠性和精度。

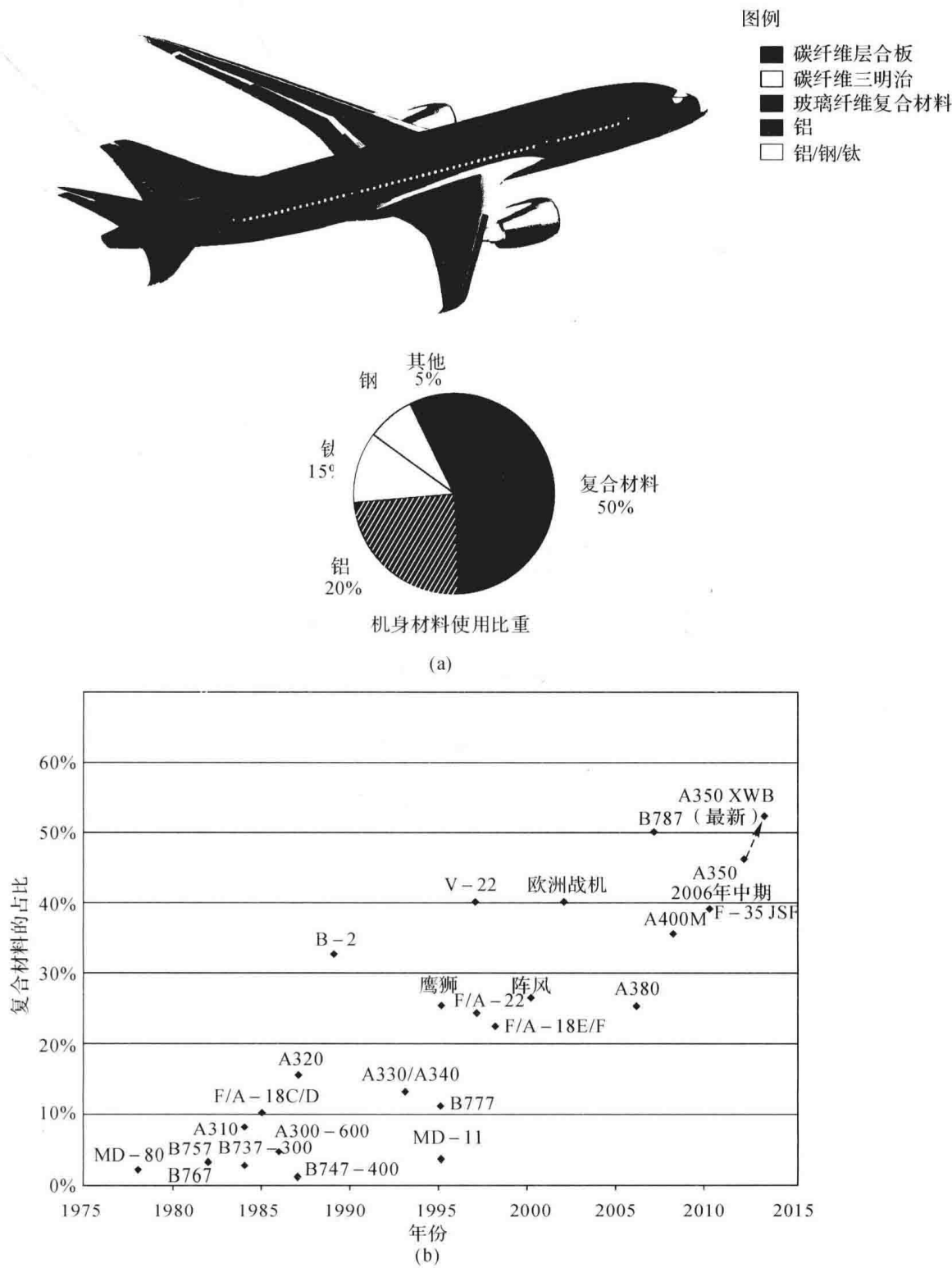


图 1-3 复合材料在航空工业中的应用

(a)波音 787 飞机机身结构用材料的应用状况； (b)不同时期飞机中复合材料的应用占比

除航空、航天、军事等先进领域外,复合材料在众多民用领域的应用也迅速发展。表 1-1 给出了复合材料在诸多行业的典型应用。

表 1-1 复合材料在各领域的应用

应用领域	具体应用
航空	机翼、尾翼、机身蒙皮、雷达罩、起落架舱门、发动机罩板、升降舵
航天	机身支撑结构、载荷舱门、远程机械臂、防热结构、压力容器、小型支撑件
汽车	车身部件(罩板、散热器支架、缓冲梁、车顶梁),底盘(后身钢板弹簧、驱动轴、负重轮)
体育器材	网球、羽毛球拍,高尔夫球杆,钓竿,自行车架,滑板,船体,弓
建筑与基础设施	桥梁面板,建筑修复、加强
风能	风力叶片,发电机罩

随着复合材料技术的成熟,复合材料的应用范围不断扩大。图 1-4 给出了纤维需求量随年份的增长曲线,可以看出,复合材料的发展壮大已经成为一个显著的趋势。

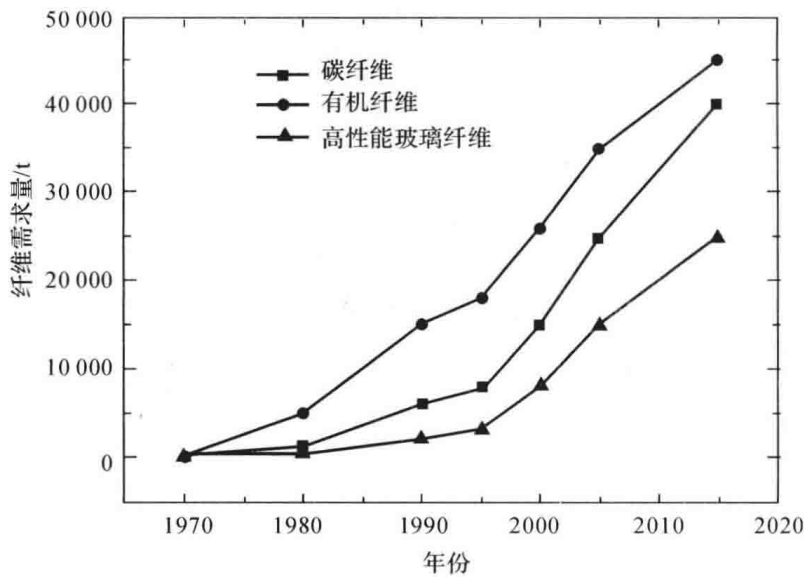


图 1-4 先进纤维的需求量随年份的增长曲线

1.2 复合材料的发展历程

复合材料在自然界中广泛存在,例如木材、竹子、动物的骨骼和肌肉等。人类也很早就开始制造并使用复合材料。从宏观上看,复合材料的发展可以分为早期复合材料和现代复合材料两大时代,而现代复合材料又经历了以下四个阶段:

1940—1960 年,玻璃纤维和合成树脂的商品化生产使得玻璃纤维增强树脂基复合材料成为具有工程意义的材料,人们也展开了复合材料的科研工作。随着相关技术的成熟,复合材料在许多领域取代了金属材料,这被看作是现代复合材料发展的第一阶段。

1960—1980 年,高性能纤维(碳纤维、Kevlar 纤维等)的研制成功带来了先进复合材料的问世,复合材料进入高性能阶段。

1980—1990 年是金属基复合材料的时代,铝基复合材料的应用较为广泛。

1990 年至今被认为是现代复合材料发展的第四阶段,主要发展多功能复合材料,如智能复合材料、梯度复合材料等。

1.3 复合材料的组成

一般来讲,复合材料由基体、分散于基体中的增强体以及两者之间的界面组成。各组元的性能、相对含量、界面结合及增强体的几何形态、分布状况和空间取向对复合材料的性能均有影响。

基体是复合材料中的连续相,它黏结了分散的增强体,使材料成为一个整体,并对增强体提供保护。在结构复合材料中,基体并非主要的承载单元,而是起将应力传递至增强体的作用,然而,在某些复合材料中,基体对复合材料的面间剪切和面内剪切性能具有重要影响。在压缩载荷下,基体还起到支撑增强体、防止其屈曲的作用,因而对压缩强度也有影响。在功能方面,基体的环境性能、电磁性能、热性能等对复合材料的相应性能有重要贡献。

增强相有连续纤维、短纤维、晶须、片层和颗粒等形式,其中连续纤维因其优异的性能和承载能力而应用最为广泛。由于尺度效应,增强相的力学性能通常远远优于块体材料(图 1-5 给出了不同状态材料的力学性能对比),可以有效地提高复合材料的力学性能。此外,具有某些功能特性的增强相还可以赋予复合材料以相应功能,例如, SiC 晶须增强的 $\text{SiC}_w/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复相陶瓷与单项 Al_2O_3 陶瓷相比,不仅具有更好的力学性能,其导电性和导热性也可获得极大提高。

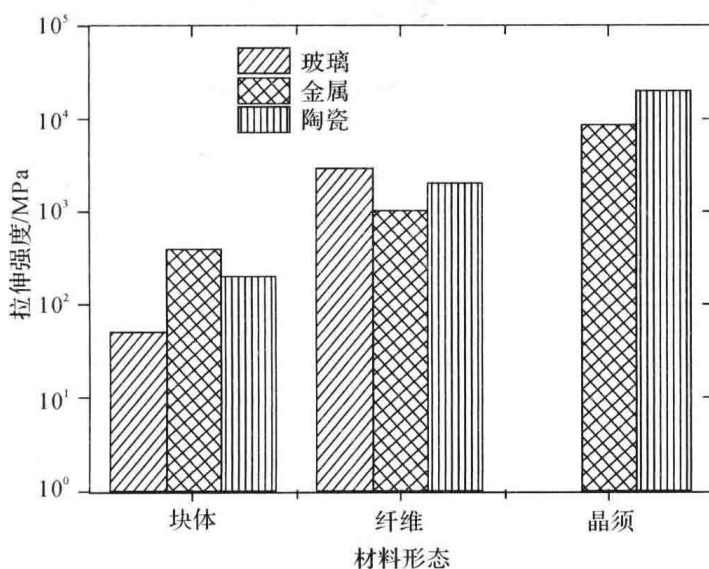


图 1-5 不同形态材料的拉伸强度对比

界面是增强体和基体之间具有一定厚度(一般为数纳米到数微米)的过渡区域,它具有传递应力、阻断裂纹扩展、散射电磁波等多种单一材料所不具备的功能,是复合材料中的重要结构。界面种类和对界面结合状态的调控是复合材料科学与工程中不可忽视的部分。

材料科学发展至今,材料体系极大扩充,人们对各类材料的结构与性能研究日益深入,这为复合材料的设计和制备提供了基础。本书第 2 章至第 6 章(材料基础)即对各类材料进行较为全面的讲解。

1.4 复合材料的分类

在现代材料体系下,众多增强体与基体材料为人们设计和制备复合材料提供了灵活的选择,这也催生了种类繁多的复合材料。人们常依据增强体和基体的类型对复合材料进行分类。

按照增强体类型可对复合材料进行以下分类(见图 1-6):

(1)颗粒增强复合材料。

(2)短纤维/晶须增强复合材料。当短纤维/晶须的排列具有取向性时,复合材料会表现出各向异性;当短纤维/晶须随机分布时,复合材料在宏观上各向同性。

(3)连续纤维增强复合材料。连续纤维具有各种排布或编织方式,详见本书第 10.2.2 节。

按照基体类型可对复合材料进行以下分类:

(1)聚合物基复合材料。

(2)金属基复合材料。

(3)陶瓷基复合材料。

(4)碳/碳复合材料。

本书第 2 章至第 5 章分别介绍以上几种复合材料的基本特点和应用。

除以上两种分类方式外,复合材料按照性能高低可分为常用复合材料和先进复合材料;按照用途可分为结构复合材料、功能复合材料和结构/功能一体化复合材料。

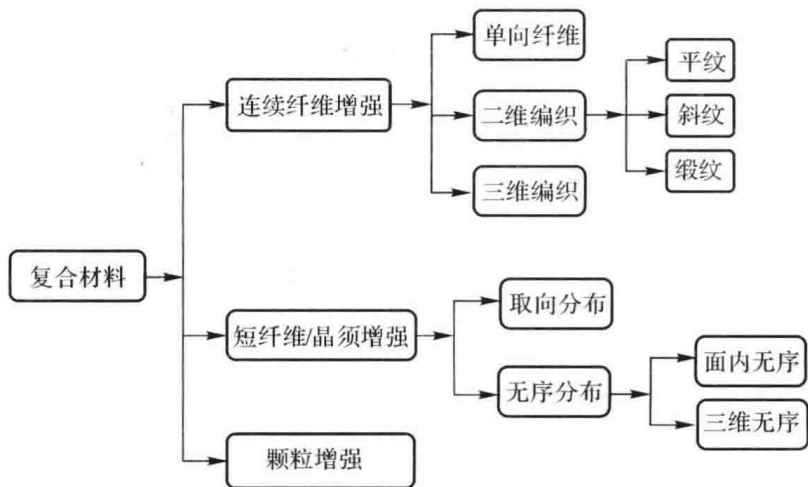


图 1-6 复合材料按增强体类型分类

1.5 复合材料的性能特点

组元间的复合效应赋予了复合材料任何单一组元所不具备的性能,复合效应本质上是基体与增强体的性能,以及由两者之间的界面结合状态相互作用、相互补充所产生的。为了获得具有所期望的性能的复合材料,需要依据复合原理,对复合材料进行设计,并结合工艺原理,选取合适的工艺进行制备(详见本书第 7 章至第 10 章)。

不同体系的复合材料性能各异,但总的来说,相比传统材料,复合材料具有以下性能特点:

(1)比强度和比模量高。复合材料的一项突出特征是比强度和比模量高。在航空航天和交通运输等领域,减重是结构设计的一项重要目标,因而复合材料与传统材料相比具有极大的竞争优势。图1-7给出了某些复合材料与传统材料的比强度和比模量,可以看出,复合材料在轻质高强这一方面具有传统结构材料难以比拟的优势。

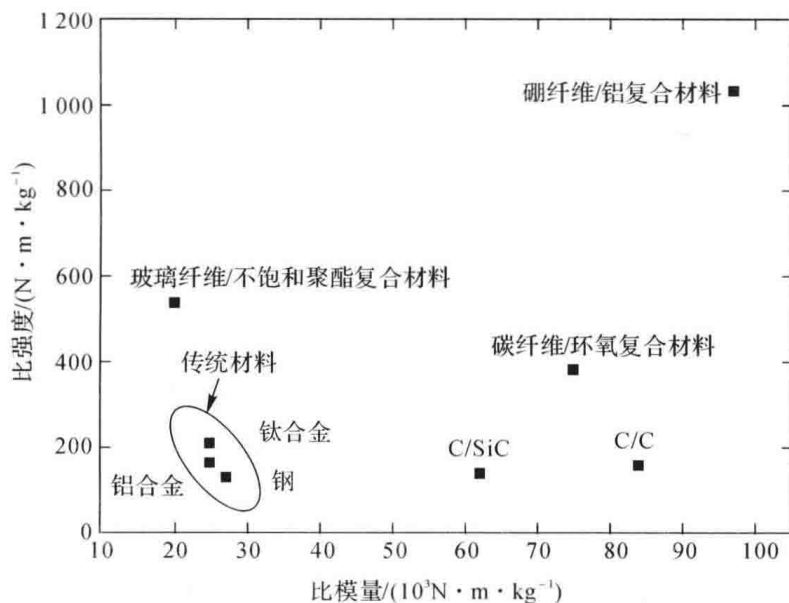


图1-7 不同材料的比强度和比模量对比

(2)具有各向异性。纤维、短纤维/晶须可以沿某一方向或某几个方向择优取向,相应地复合材料的性能也将产生各向异性。例如,在层合板复合材料中,为了提高复合材料在某一方向的拉伸性能,可以通过提高这一方向的纤维体积分数的方法来实现。表1-2给出了不同预制体结构C/SiC复合材料在力学性能上的各向异性。可以看出,2.5D和3D C/SiC复合材料在不同方向上的力学性能具有较大差异。在特定的结构中,人们对材料在不同方向的力学性能的要求是不同的,复合材料各向异性的特性适于应用于这些结构。

(3)性能可设计性强。随着复合材料科学与技术的发展,复合材料组元(增强体、基体、界面相)的可选择范围越来越广,复合材料成型工艺越来越多,人们对复合材料结构与性能关系的理解也日趋深刻和完善,这都为设计出符合需求的复合材料提供了基础。

(4)可制备复杂形状的大型构件。复合材料可以实现制备与成型的一体化。例如,根据构件的形状需要制备出增强体预制体,然后,采用浸渗的方法引入基体,填补增强体间的孔隙即可获得复合材料构件,不需后续加工。目前,聚合物基复合材料已经在大型风力发电机叶片、飞机机身等构件中获得了大量应用。

以上优点使得复合材料在工程上具有极大的吸引力,然而,以下缺点制约了复合材料的推广:尽管性能优异,复合材料目前还较为昂贵,仅被应用于对性能有严格要求的领域;由于制备工艺的限制,复合材料中常常存在某些严重缺陷,复合材料的可靠性还有待提高;复合材料的各向异性在有些情况下是一个不利因素;复合材料的产能还不足,无法满足相关领域的应用需求;最后,人们对复合材料的应用经验尚浅,对复合材料的性能考核工作开展不足,相关性能数据库匮乏。

表 1-2 不同预制体结构 C/SiC 复合材料的各向异性

性能指标	材料类型	
	2.5D C/SiC	3D C/SiC
拉伸强度/MPa	X:325	X:270
	Y:146	Y:15
拉伸模量/GPa	X:169	X:140
	Y:61	Y:13
压缩强度/MPa	X:210	X:235
	Y:405	Y:16
压缩模量/GPa	X:162	X:182
	Y:95	Y:17

尽管存在诸多不足,复合材料在性能上的巨大优越性决定了它的光明前景,复合材料在未来必将得到极大的发展。