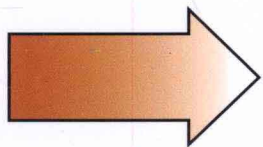


材料科学与工程专业
应用型本科系列教材

面向卓越工程师计划·材料类高技术人才培养丛书



高性能纤维复合材料

主 编 代少俊



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

材料科学与工程专业应用型本科系列教材
面向卓越工程师计划·材料类高技术人才培养丛书

高性能纤维复合材料

代少俊 主编



 华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

·上海·

图书在版编目(CIP)数据

高性能纤维复合材料/ 代少俊主编. —上海:华东理工大学出版社,2013.2
ISBN 978-7-5628-3425-0

I. ①高… II. ①代… III. ①纤维增强复合材料 IV. ①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 309952 号

材料科学与工程专业应用型本科系列教材
面向卓越工程师计划·材料类高技术人才培养丛书

高性能纤维复合材料

主 编 / 代少俊

责任编辑 / 马夫娇

责任校对 / 李 晔

封面设计 / 裘幼华

出版发行 / 华东理工大学出版社有限公司

地 址: 上海市梅陇路 130 号,200237

电 话: (021)64250306(营销部)

(021)64251137(编辑室)

传 真: (021)64252707

网 址: press.ecust.edu.cn

印 刷 / 常熟新骅印刷有限公司

开 本 / 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 / 14.75

字 数 / 356 千字

版 次 / 2013 年 2 月第 1 版

印 次 / 2013 年 2 月第 1 次

书 号 / ISBN 978-7-5628-3425-0

定 价 / 39.80 元

联系我们:电子邮箱 press@ecust.edu.cn

官方微博 e.weibo.com/ecustpress

淘宝官网 <http://shop61951206.taobao.com>

前 言

当前材料、能源、信息是现代科技的三大支柱,材料的发展会将人类物质文明推向新的阶段。现代高科技的发展更紧密地依赖于新材料的发展,同时也对材料提出了更高、更苛刻的要求。纤维复合材料是应现代科学技术而发展起来的具有极大生命力的材料。本书为适应当前纤维复合材料教学的需要而编写,本书在编写过程中力求体现纤维复合材料专业的特点,反映纤维复合材料发展状况。本书的内容包括复合材料的界面理论和界面控制、纤维复合材料的强度及复合理论、高性能纤维复合材料的增强体和基体材料以及成型技术等。

本书由代少俊(1~5章)和王静静(6~8章)编写。在编写过程中,参考了国内外相关文献,在此向相关作者们表示深深的感谢。

本书得到盐城工学院自编教材出版基金的资助,教材编写过程中得到盐城工学院教务处及材料学院领导和教师的帮助及支持,特此表示感谢。

由于水平有限,书中不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 复合材料的发展.....	1
1.1.1 材料概述.....	1
1.1.2 复合材料的发展历史 and 意义.....	3
1.1.3 复合材料的应用和发展.....	7
1.1.4 复合材料的前景	10
1.2 复合材料的概念、结构及特点.....	10
1.2.1 复合材料的定义	10
1.2.2 复合材料的特点	12
1.2.3 复合材料的基本结构模式	14
1.2.4 复合材料的分类	15
1.2.5 复合材料的基本性能	18
1.2.6 复合材料目前存在的缺点	20
1.2.7 复合材料的命名	21
思考题.....	21
第 2 章 复合材料的界面理论和界面控制	22
2.1 复合材料的界面	22
2.1.1 复合材料界面的基本概念	22
2.1.2 润湿与结合	25
2.1.3 复合材料的界面控制	26
2.2 界面模型和界面类型	29
2.2.1 界面结合类型	29
2.2.2 界面模型	36
2.3 复合材料界面的要求	38
2.3.1 对界面的力学要求	38
2.3.2 对界面的物理化学要求	39
2.3.3 纤维复合材料受力时界面的力学环境	40
2.4 陶瓷基复合材料的增韧及界面控制	45
2.4.1 陶瓷基复合材料的增韧	45
2.4.2 纤维增强陶瓷基复合材料的界面控制	50
2.5 界面相的结构与性能表征	53

2.5.1	界面相的结构测试方法	53
2.5.2	界面相的力学性能表征	53
2.6	复合材料界面设计	55
2.7	复合材料界面理论	56
2.7.1	浸润性	57
2.7.2	界面黏结	58
	思考题	60
第3章	复合材料的复合理论	61
3.1	复合材料增强机制	61
3.1.1	颗粒增强复合材料增强机制	61
3.1.2	纤维(包括晶须、短纤维)复合材料增强机制	63
3.2	纤维复合材料的复合法则——混合定律	63
3.2.1	混合定律	63
3.2.2	连续纤维单向增强复合材料的力学性能(单向层板)	64
3.2.3	短纤维增强复合材料的力学性能	65
3.2.4	复合材料其他物理性能的复合原理	65
	思考题	67
第4章	纤维复合材料的设计及强度	68
4.1	复合材料的设计	68
4.1.1	概述	68
4.1.2	材料的使用性能、设计目标和设计类型	70
4.1.3	复合材料设计的原则	70
4.2	复合效应	72
4.3	复合材料设计的内容	75
4.3.1	单元组分材料的选择	75
4.3.2	复合材料制造方法的选择	75
4.4	单向连续纤维复合材料的宏观强度理论	76
4.4.1	最大应力强度判据	77
4.4.2	最大应变强度判据	78
4.4.3	Tsai-Hill 强度判据	79
4.5	单向连续纤维复合材料的细观强度理论	80
4.5.1	复合材料细观力学的基本方法	80
4.5.2	纵向拉伸强度	84
4.5.3	纵向压缩强度	86
4.5.4	横向强度	87
4.5.5	面内剪切强度	88
4.6	短纤维复合材料的强度	91

4.6.1 应力传递理论	91
4.6.2 短纤维复合材料强度	93
4.7 单向复合材料的断裂	95
4.7.1 引言	95
4.7.2 累积损伤断裂的链式模型	96
4.7.3 接力传递断裂模型	98
4.7.4 复合断裂模型	100
4.7.5 断裂的能量吸收机制	104
思考题	108

第5章 高性能纤维复合材料的增强体

5.1 概述	109
5.1.1 增强体在复合材料中的作用	111
5.1.2 增强体的分类	112
5.1.3 高性能复合材料对纤维增强体的要求	112
5.1.4 纤维具有高强度的原因	112
5.2 玻璃纤维	113
5.2.1 玻璃纤维概述	113
5.2.2 玻璃纤维的种类	114
5.2.3 玻璃纤维的制造	116
5.2.4 玻璃纤维的结构	118
5.2.5 玻璃纤维的性能与应用	119
5.3 硼纤维	120
5.3.1 硼纤维概述	120
5.3.2 硼纤维的制造	121
5.3.3 硼纤维的结构和组织	122
5.3.4 硼纤维的性能	125
5.3.5 硼纤维的应用	125
5.4 碳纤维	126
5.4.1 碳纤维概述	126
5.4.2 碳纤维的制造	127
5.4.3 工艺过程中碳纤维的结构变化	131
5.4.4 碳纤维的性能	134
5.5 碳化硅纤维	138
5.5.1 化学气相沉积法制造的碳化硅纤维	138
5.5.2 聚合物转化碳化硅纤维	141
5.6 氧化铝纤维	147
5.6.1 制备氧化铝纤维的几种成功的方法	147
5.6.2 氧化铝纤维的性能及应用	149

5.7 晶须及其制备方法	150
5.7.1 概述	150
5.7.2 晶须的制备方法	151
5.7.3 晶须的性能、结构及应用	153
5.8 有机纤维	155
5.8.1 芳纶	155
5.8.2 超高分子量聚乙烯纤维	163
思考题	168
第6章 高性能纤维复合材料的基体材料	169
6.1 金属材料	169
6.1.1 选择基体的原则	170
6.1.2 结构复合材料的基体	171
6.1.3 功能用金属基复合材料的基体	172
6.2 陶瓷材料	173
6.2.1 玻璃	174
6.2.2 玻璃陶瓷	174
6.2.3 氧化物陶瓷	174
6.2.4 非氧化物陶瓷	174
6.3 聚合物材料	175
6.3.1 聚合物基体的种类、组分和作用	175
6.3.2 聚合物的结构与性能	176
6.3.3 热固性树脂	179
6.3.4 热塑性树脂	186
思考题	188
第7章 高性能纤维复合材料成型技术	189
7.1 聚合物基复合材料的成型	189
7.1.1 手糊工艺	189
7.1.2 模压成型工艺	195
7.1.3 RTM成型工艺	199
7.1.4 喷射成型工艺	200
7.1.5 连续缠绕成型工艺	200
7.1.6 拉挤成型工艺	201
7.1.7 挤出成型工艺	202
7.1.8 注射成型工艺	203
7.2 金属基复合材料的成型工艺	204
7.2.1 连续增强型金属基复合材料的制备	204
7.2.2 非连续型增强金属基复合材料的制备	205

7.3 陶瓷基复合材料的成型	207
7.3.1 纤维增强陶瓷基复合材料的加工与制备	207
7.3.2 晶须与颗粒增韧陶瓷基复合材料的加工与制备	210
思考题	212
第8章 纤维复合材料的其他性能	213
8.1 纤维复合材料的疲劳性能	213
8.1.1 纤维复合材料的疲劳损伤	213
8.1.2 影响纤维复合材料疲劳性能的因素	215
8.2 纤维复合材料的蠕变性能和抗冲击性能	216
8.2.1 纤维复合材料的蠕变性能	216
8.2.2 纤维复合材料的抗冲击性能	216
8.3 环境对纤维复合材料力学性能的影响	219
8.3.1 大气对纤维复合材料力学性能的影响	219
8.3.2 湿态对纤维复合材料力学性能的影响	219
8.3.3 温度对纤维复合材料力学性能的影响	220
8.4 纤维复合材料的热、电性能	221
8.4.1 纤维复合材料的热膨胀系数	221
8.4.2 纤维复合材料的导热性能	222
8.4.3 纤维复合材料的电性能	222
思考题	223
参考文献	224

第 1 章 绪 论

1.1 复合材料的发展

1.1.1 材料概述

1. 材料的发展与人类社会的进步

在《辞海》中,材料被定义为“经过人类劳动取得的劳动对象”。材料是能为人类经济制造有用器件的物质。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。每一种新材料的出现和制造技术的进步都在不同程度上促进了生产力的发展。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。

在考古研究和历史学中,材料作为划分时代的依据,将人类历史划分为:石器时代(距今 10 000~6 000 年)、青铜器时代(距今 6 000~2 500 年)、铁器时代(距今 2 500 年起)。从铁器时代起,世界各国多已进入有文字记载的文明时代。

材料是人类社会进步的物质基础和先导,是人类进步的里程碑。纵观人类发展和材料发展的历史,可以清楚地看到,每一种重要材料的发现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。材料的发展与人类进步和发展息息相关。

按照材料的工艺和性质可将材料划分为天然材料、人工材料和合成材料三大类。大约在 1 万年前的旧石器时代,人类使用的是天然材料,即只将自然界的物质从形态上加以改变制成所需的物品,而不改变材料本身的构成与性质。如将石块敲碎、磨凿制作工具;用木材、磨制的动物骨骼作武器和工具;堆石、挖坑作屋;用泥土制泥坯(日晒泥砖)砌墙或夯泥成墙(干打垒);用木材架屋顶并用茅草覆盖和用动物毛皮御寒等。

新石器时代出现陶器,最初的陶器是一种质地粗糙且不透明的黏土制品,但它属于人工材料,即不仅在形态上,而且在质地上改变了天然物质的性质。从天然材料到人工材料,这是材料发展中的第一次飞跃。陶器由黏土(或掺加石英等)经成型、干燥和烧制而成,主要作为生活用具。恩格斯认为,陶器是人类从蒙昧时代进入野蛮时代的标志。另一个人工材料的例子是砖。古埃及人用尼罗河的泥土烧砖修建住宅。中国秦代曾用大量砖瓦修筑长城和宫殿。铜和铁是人类历史上最重要的人工材料,分别由铜矿石(孔雀石)和铁矿石(赤铁矿)冶炼而成。用铜制剑、祭器和酒具;用铁制盔甲、兵器和工具等在史料中均有记载。

材料的发展与人类认识、使用和驾驭能源能力的水平密切相关。19 世纪的产业革命也

是人类开发和获取能源的革命,它促进了钢铁、有色金属等材料的发展,造就了现代文明。由于革新了材料的制造技术,人们利用合成方法制成了自然界不存在的材料,称为合成材料。20世纪初(1909年),贝克兰德(L. H. Backland)用苯酚和甲醛经缩聚反应合成了实用酚醛树脂(俗称电木),这是最早的合成材料。合成材料不仅包含有机材料系列,如酚醛树脂、聚氯乙烯、聚碳酸酯、聚甲醛、环氧树脂等,而且包括无机材料系列,如超铀元素钚(238Pu)、立方晶系氮化硼(CBN)、氧化铝和碳化硅等。核材料的发现,又将人类引入了可以毁灭自己的核军备竞赛,同时核材料的和平利用,又给人类带来了光明。20世纪中后期以来,高分子、陶瓷材料崛起以及复合材料的发展,又给人类带来了新的材料和技术革命,楼房可以越盖越高、飞机越飞越快,同时人类进入太空的梦想成为了现实。图1-1示出了各种材料在各个历史时期的相对重要性。

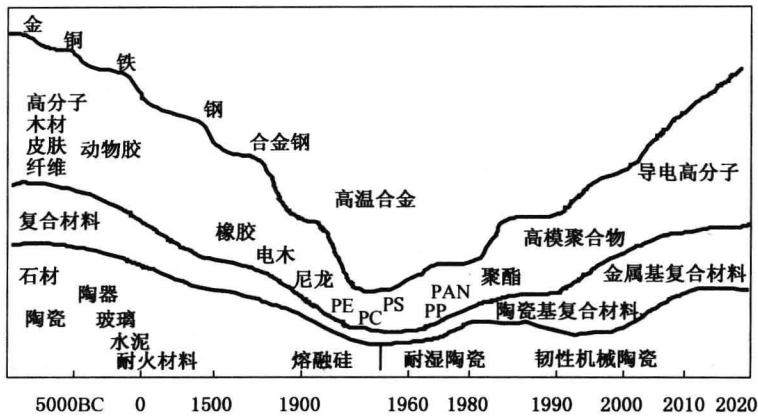


图 1-1 各种材料在各个历史时期的相对重要性

当前材料、能源、信息是现代科技的三大支柱,它会将人类物质文明推向新的阶段。21世纪将是一个新材料时代。

2. 复合材料的提出

材料分为金属、无机非金属、有机高分子材料等,各种材料的性能各有千秋,如何扬长避短,克服单一材料的缺点,产生原来单一材料本身所没有的新性能,就必须用到复合材料。

现代高科技的发展更紧密地依赖于新材料的发展,同时也对材料提出了更高、更苛刻的要求。在现代高技术迅猛发展的今天,特别是航空、航天和海洋开发领域的发展,使材料的使用环境更加恶劣,因而对材料提出了越来越苛刻的要求。例如,航天飞机等空间飞行器在飞行过程中要受到大气阻力、地球引力、太阳辐射力、空间热环境、太阳风、宇宙射线、宇宙尘埃、流星、磁矩等的作用。飞行器发动机还要受到其热环境、内流形成的气动力、结构振动、机件高速转动、液体晃动、振荡燃烧和 POGO 振动等非正常破坏力的作用。同时由于飞行范围(M 数、飞行高度)的扩大以及发动机的推力、比推力和推/重比大大提高,导致了发动机压力比、涵道比、进口温度、燃烧室温度、TIT、转子转速等也日益提高。由此构成的力、热、化学和物理等效应的的作用,最终都要集中到构成飞行器和发动机结构的材料上去,因此对材料的质轻、高强、高韧、耐热、抗疲劳、抗氧化及抗腐蚀等特性也日益提出了更加苛刻的要求。

又如现代武器系统的发展对新材料提出了如下要求:

- (1) 高比强、高比模;
- (2) 耐高温、抗氧化;
- (3) 防热、隔热;
- (4) 吸波、隐身;
- (5) 全天候;
- (6) 高抗破甲、抗穿甲性;
- (7) 减振、降噪,稳定、隐蔽、高精度和命中率;
- (8) 抗激光、抗定向武器;
- (9) 多功能;
- (10) 高可靠性和低成本。

很明显,传统的单一材料无法满足以上综合要求,当前作为单一的金属、陶瓷、聚合物等材料虽然仍在不断日新月异地发展,但是以上这些材料由于其各自固有的局限性而不能满足现代科学技术发展的需要。例如,金属材料的强度、模量和高温性能等已几乎开发到了极限;陶瓷的脆性、有机高分子材料的低模量、低熔点等固有的缺点极大地限制了其应用。这些都促使人们研究开发并按预定性能设计新型材料。

复合材料,特别是先进复合材料就是为了满足以上高技术发展的需求而开发的高性能的先进材料。它由两种或两种以上性质不同的材料组合而成,各组分之间性能“取长补短”,起到“协同作用”,可以得到单一材料无法比拟的优秀的综合性能,极大地满足了人类发展对新材料的需求。因此,复合材料是应现代科学技术而发展出来的具有极大生命力的材料。现代科学技术不断进步的结果是材料设计的一个突破。

1.1.2 复合材料的发展历史和意义

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。实际上,在自然界就存在着许多天然的复合物。例如天然的许多植物竹子、树木等就是自生长长纤维增强复合材料;人类肌肉/骨骼结构也是复合材料结构原理。

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。

人类从很早的时期起就认识到将两种或多种材料混合使用的益处。在中国西安半坡村原始人遗址(原仰韶文化)中发现用草拌泥作墙体和地面,即以天然纤维状材料——草作为黏土的增强剂,用来阻止黏土的干裂和剥落,提高墙体和地面耐受侵蚀的能力,增进了黏土的实用性能,这可以算是纤维复合材料的渊源;公元前3000年左右,古埃及和美索不达米亚人用芦苇、纸莎草加沥青或树胶制造小艇,也可以看作现代复合材料船的前身;中国西周时期(公元前1000年)用木片或竹片、动物的腱和鬃、丝等制作弓,是混杂复合材料的祖先;古埃及干尸(木乃伊)是将用香料处理过的尸体缠绕亚麻布带后再浸渍天然树脂,它是缠绕工艺的一个雏形,与现代复合材料的管道、压力容器等的成型工艺在原理上是一致的,同时也符合现代防腐工程的原理;日本绳纹文化(日本新石器时代)中期以后,已经知道在矾土(黏土)中加云母和砂粒来改进陶器性能,防止烧结时龟裂,这是粒子增强陶瓷复合材料思想的萌芽;中国春秋战国时期(距今2500年),用含锡量较低的青铜作剑身,采用两次浇注技

术,在其刃部复合一层含锡量较高的青铜,并在锡青铜表面涂覆一层硫化铜(含铬和镍)制成花纹,使其剑内柔外刚,刚柔相济,作为其代表的著名的越王勾践剑,1965年在湖北江陵楚墓出土时,仍然光可鉴人,锋利异常,被誉为“永不生锈的青铜剑”,它可看成是最早的包层金属复合材料;印度人用细砂和虫胶制作磨刀石,这是现代砂轮的前身,是颗粒增强复合材料的又一例子;公元前埃及金字塔采用了砂石和火山灰制成的混凝土,这也可看成是颗粒复合材料;中国民间的布底鞋,代表着三向编织复合材料的雏形;古埃及文明时代,木材复合材料已有所应用,人们利用紫檀木贴在普通木材上进行表面装饰(如棺槨),到了工业革命以后,欧、美等国发明了薄片加工机械和各种锯,并与粘接剂(胶)技术结合,才演变到胶合板和装饰板的工业生产,这是叠层复合材料的前身。

早期复合材料中最有代表性的例子是中国古代发明的漆器。1972—1974年,湖南省马王堆出土的漆器(距今2200年以上)是西汉初年的文物。这些漆器用丝和麻作增强材料,用大漆作粘接剂,或以木材为胎,外表涂以漆层,制成鼎、酒壶、盆具、茶几等物品,在潮湿地下埋藏了两千多年,依然是熠熠生辉、光彩夺目。20世纪70年代,湖北随县出土的曾侯乙墓中,有许多用于车战的多戈戟和矢,杆长3~4m,是在木制杆芯外面包以纵向竹丝,再用大漆加蚕丝线进行环向缠绕,然后浸渍大漆制成。大漆是漆树分泌的一种天然树脂,干燥后形成漆膜,不但坚硬光泽,而且耐水耐热(250℃)、耐化学腐蚀。中国早在七千多年前的新石器时代,就有了油漆技术的萌芽,在商代已经成熟。在战国时代,除了木胎漆器外,又出现皮胎漆器和夹苎胎(即用麻布作胎)的漆器。秦、汉时期至以后,油漆技术经历了大发展并基本定型。魏晋南北朝时期,在改革底胎和面漆的基础上,创造了夹苎胎法制造佛像的工艺,即先塑出泥胎,再在泥胎外面粘贴麻布,在麻布上进行涂漆和彩绘,当油漆干燥后,挖出并用水冲去泥胎,得到中空的漆佛像。这种佛像十分轻巧且非常坚固耐久。一丈多高的佛像,一个人就轻易举起行走(故又称“行像”)。其制造工艺与当今的手糊成型几乎没有区别。大约在唐朝,脱胎漆佛像技术传到日本。日本至今还保存着当年唐代著名高僧鉴真和尚东渡日本在该国圆寂时塑制的夹苎座像,作为日本的“国宝”级文物,每年只对外开放数天供人瞻仰。这座佛像经历了一千多年仍然保持完好,充分说明了这种早期复合材料优异的抗老化性能。

现代复合材料的发展只有60多年历史,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。至20世纪60—70年代,玻璃纤维增强塑料(俗称玻璃钢, GFRP)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(即抗拉强度/密度)比钢还要高,而且耐腐蚀性能好,被称为第一代现代复合材料。

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的范畴。

现代技术对高级复合材料(Advanced Composite Materials, ACM)的要求是:不仅比强

度(强度/密度)高,而且要求比刚度(模量/密度)高,同时剪切强度和剪切模量也要高;高温性能和耐热性好。针对玻璃纤维杨氏模量较低的主要缺点,20世纪50—60年代相继开发了硼(B)纤维、碳(C)纤维和芳纶纤维(Kevlar)。这些纤维生产初期的性能示于表1-1。

表 1-1 玻璃纤维和初期生产的硼纤维、碳纤维及芳纶纤维的性能

纤维类型	备注(代号)	拉伸强度/GPa	杨氏模量/GPa	密度/(g/cm ³)
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)	UCC-50	2.0	343.3	1.60
碳(PAN基)	Morganite(PAN-1)	1.8	411.9	1.95

表1-1指出,硼、碳和芳纶纤维均具有比玻璃纤维高得多的杨氏模量和更低的密度,这种纤维被称为高级纤维(Advanced Fibers)。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比强度,被称为第二代现代复合材料。

用聚酰亚胺作基体,以上述高级纤维作增强体的复合材料,使用温度较高,但不超过200℃,用金属(铝、镁、钛、金属间化合物)作基体的复合材料,使用温度范围是175~900℃。用陶瓷(碳化硅、氮化硅、碳等)作基体的复合材料,使用温度范围是1000~2000℃。20世纪70年代,开发了耐热性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等),使现代复合材料的性能向耐热、高韧性和多功能方向发展,被称为第三代现代复合材料。

第二代和第三代现代复合材料称为高级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,如航天航空等,也应用于汽车、建筑、医疗、体育及其他领域。

高性能复合材料由各种高性能增强材料(纤维和织物、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性能的多功能复合材料。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相的尺寸在微米(μm)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-芳纶/环氧叠层板(商品名ARALL)已工业化,用作飞机的蒙皮材料。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,即原子或分子水平的称为杂化材料,两者统称微观复合材料,它们主要用作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(即梯度复合材料)。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作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、薄膜叠层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、生物学乃至日常生活领域都有着一定的潜在应用前景。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 Materials)是现代复合材料发展的最新阶段,它(或材料—器件的复合结构)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做出响应,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,有时还需要外接的电源、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纤维一同与基体复合,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构成的执行材料复合在一起。当压电材料感知振动时,信号启动外接电路使形状记忆合金发生形变,从而改变了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 Materials)是机敏复合材料的高级形式。机敏材料对环境能做出线性反应,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。这类材料在宇航、航空、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问世。

综上所述,复合材料对现代科学技术的发展有着十分重要的作用。复合材料的研究深度和应用广度及其生产发展的速度和规模已成为衡量一个国家科学技术先进水平的重要标志之一。复合材料是现代科学技术不断进步的结果,是材料设计的一个突破;复合材料的发展同时又进一步推动了现代科学技术的不断进步。可以预料,随着高性能树脂先进复合材料的不断成熟和发展,金属基特别是金属间化合物基复合材料和陶瓷基复合材料的实用化,以及微观尺度的纳米复合材料和分子复合材料的发展,复合材料在人类生活中的重要性将越来越显著。同时,随着科学技术的发展,现代复合材料也将被赋予新的内容和使命。21世纪将是复合材料的新时代。

1.1.3 复合材料的应用和发展

从20世纪40年代起,复合材料的发展已经历了半个多世纪。随着技术的提高,应用领域已从航空航天和国防军工扩展到建筑与土木工程、陆上交通运输、船舶和近海工程、化工防腐、电气与电子、体育与娱乐用品、医疗器械与仿生制品以及家庭与办公用品等各部门。90年代初世界总产量达到300多万吨,日本近60万吨,我国约占15万吨。

复合材料由于在航空航天和军工领域的重要性,其发展始终由这一领域推动,同时也在国民经济各个领域开花结果。如在1994年美国130多万吨的总产量中,航空航天和国防军工领域的应用不到2万吨,仅占1.5%左右。民用领域的应用主要集中在建筑与土木工程、陆上交通运输、船舶和近海工程、化工防腐、电气与电子5大领域。在美国、西欧和日本,这5大领域的应用量占到总应用量的85%左右。5大领域的侧重面各国有所不同。例如,日本建筑与住宅领域的应用占到总用量的50%以上,而在美国仅占不到20%;美国在汽车上的用量占到总用量的近30%,而在日本仅占不到6%。各个国家根据自己经济发展特点,有自己不同的发展重点。

1. 在建筑上的应用

复合材料在建筑上可作为结构材料、装饰材料、功能材料以及用来制造各种卫生洁具和水箱等。由于价格的原因,多采用玻璃纤维复合材料。

结构复合材料包括承重结构型材、护板和轻质屋盖等,主要用于含有腐蚀介质的厂房和展览馆、体育馆、高级娱乐厅等一类建筑。前者利用玻璃纤维复合材料良好的防腐蚀性能;后者利用其轻质高强和容易造型的优点,易实现建筑学与美学的结合,达到造型轻巧美观的效果。

装饰材料包括建筑物的内、外装饰件,除轻质外,充分利用复合材料造型和色彩调配比较容易的特点,可以制造带有各种图案、花纹、仿造天然材料等的装饰板材和雕塑。

功能材料包括需要采光建筑物,如暖房、商业街的透明拱顶;需要防腐厂房的防腐墙;需要保温或隔音建筑的保温或隔音墙板等。

2. 在陆上交通上的应用

这一领域主要应用于汽车工业。目前尚处在汽车部件的替代阶段,包括内装饰件、外装饰件和机能结构件。内装饰件以造型美观、色彩舒适和使用柔软安全为特点,多采用增强热塑性复合材料;外装饰件包括发动机罩、保险杠、车顶、挡泥板等,是汽车上玻璃纤维增强塑料主要代用部件;机能结构件往往有较高的性能要求,如板簧、传动轴和油箱等。油箱已达到实用化,板簧也有一定的应用,传动轴还在试用阶段。目前复合材料在汽车上的应用主要达到减轻质量的目的,同时也改善性能,如提高疲劳寿命和防腐性能,减小噪声等。高速列车的车头驾驶室外壳、厢内壳及许多装饰件都已采用复合材料。

3. 在船舶和近海工程上的应用

船舶和近海工程上也主要采用玻璃纤维增强塑料,据统计每年要消耗30万吨以上,占世界复合材料总用量的10%以上。主要利用玻璃纤维增强塑料轻质高强、防腐性能好、维修费用低等优点。建造船舶种类包括渔船、游艇、高速艇、扫雷艇等。近海工程包括港口建设工程和海洋工程(如海洋钻井、海洋采油)上的应用,除了具有良好的防腐性能外,轻质高强给海上材料运输、安装都带来方便。具体构件包括如海洋平台、挡风墙板、护栏、各类管

道等。

4. 在防腐工程上的应用

玻璃纤维增强塑料良好的防腐性能使之在防腐工程上得到最广泛的应用,消费量也要占到复合材料总用量的 10% 以上。化学工业生产中,从原材料、生产过程中的各类物质,直至最后的成品,往往都具有不同程度的,甚至很强的腐蚀性,因此防腐设备的用量最大,包括各类贮罐、塔器、管道、槽车等。除化工防腐外,油田的输油管、污水管、环保设备中都大量采用玻璃纤维增强塑料。作为生活污水处理的净化槽,日本每年的需求量就高达 50 万座。

5. 在电气/电子工业上的应用

在电气/电子工业上的应用主要是利用玻璃纤维增强塑料的良好电绝缘性能和良好的绝热性能,用于电力工业的输配电设备、各类绝缘构架和操作器械,如各类互感器套、开关套、配电箱、电缆箱、电缆槽、电动车接电杆架、绝缘操作设备构件等。可以用玻璃纤维短切毡片板压制成型各类电器仪表和家用电器罩壳,它具有绝缘性能好、造型容易、色彩鲜艳等综合优点;加入适当的炭黑或其他导电粉末,可以控制材料的导电性能制造防静电电灯罩或罩壳,用于矿井、油田或化工厂房中易爆工作场所的各类灯具和电器罩壳。

通信设备中的雷达罩利用玻璃纤维增强塑料的轻质高强和透波性能,在天线反射面中也普遍采用玻璃纤维或碳纤维增强塑料。

6. 在航空航天和国防军工上的应用

复合材料的高比刚度和比强度,使它成为航空航天工业中非常理想的材料,因为减重在这里将带来非常大的效益,也因此碳纤维复合材料成为主要的选择。兼要其他功能时也采用其他纤维或采用混杂纤维。

航空工业上普遍使用玻璃纤维增强塑料的机头雷达天线罩,它既起承力作用,又有良好的透波性能。直升机旋翼桨叶采用复合材料不但可减轻质量,还可采用变截面曲面翼形以提高空气动力学效应,又有疲劳寿命长、对缺口敏感可靠性强等优点。在民用飞机基本结构件上的使用还十分慎重,仅开始在垂直尾翼和水平尾翼上试用。如 A310 空中客车的垂直尾翼采用混杂复合材料减重 397 kg; A320 空中客车在垂直和水平尾翼上应用,减重 800 kg。民用机的更多采用是在非受力件上,如货仓地板、行李柜、座位架、装饰件等。材料性能对于军用战斗机有更重要的意义,也更多采用复合材料。欧洲国家 20 世纪 80 年代末期的目标是结构质量 35% 是复合材料,替代构件包括主翼、机身、尾翼和舵等。

航天工业上应用复合材料带来的效益更为突出,因为减重就意味着可以增加载重或是提高火箭的射程。卫星系统中普遍采用碳纤维复合材料作基本构件,如太阳能系统、微波通信系统、卫星仓内各种结构件。碳纤维复合材料低的轴向热膨胀系数,保持了良好的尺寸稳定性,以确保卫星观测、通信系统的精确度。在火箭系统中,玻璃纤维缠绕固体火箭发动机壳体大大减轻了火箭质量,美国“北极星 A-3”潜-地导弹中复合材料结构质量比原先金属结构质量减轻 50%~60%。用芳纶纤维代替玻璃纤维,又使“三叉戟”潜-地远程导弹结构减轻 35% 以上,使射程增加 500 km。我国的卫星中复合材料构件占总结构质量的 80%~90%,最大运载火箭的碳/环氧发动机壳体质量近 1 000 kg,比铝合金壳体减轻质量 30%。

复合材料在军事工业上应用对于提高武器威力、增大射程、减轻武器质量等方面也起重