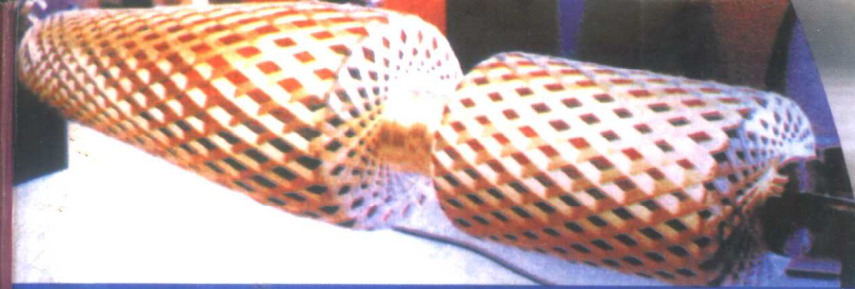


FIBER REINFORCED COMPOSITES

纤维增强复合材料

王善元 张汝光等 编著



中国纺织大学出版社

纤维增强复合材料

王善元 张汝光等 编著

中国纺织大学出版社

内 容 提 要

《纤维增强复合材料》一书全面系统地阐述了增强纤维、基体及其界面的性能,聚合物基复合材料成型加工,复合材料性能和结构设计,混纤和纺织结构复合材料,金属基和陶瓷基复合材料以及纤维增强复合材料的试验。特别对增强纤维、复合材料的性能和结构设计、混纤和纺织结构的预制件进行了较详细的讨论。

本书可供从事纤维增强复合材料科研、教学、工程应用与技术管理等方面人员参考,也可供大专院校的高分子材料、纺织科学与工程、力学学科的教师、博士生、硕士生、本科生阅读和参考。

责任编辑 杜亚玲

封面设计 周 新

纤维增强复合材料

王善元 张汝光等 编著

中国纺织大学出版社出版

(上海市延安西路 1882 号 邮政编码:200051)

新华书店上海发行所发行 上海市印刷四厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:10 字数:50 万

1998 年 11 月第 1 版 1998 年 11 月第 1 次印刷

印数:1—3 100

ISBN 7-81038-180-6/TS·19

定价:30.00 元(平)

38.00 元(精)

作者简介



王善元教授,1937年生,江苏太仓人,研究生学历,美国麻省理工学院访问学者。中国纺织大学纺织材料研究开发中心主任,博士生导师。中国纺织工程学会、美国纤维学会、美国化学学会会员,多次赴美、日、韩及中国香港等地讲学。现任国务院学位委员会纺织轻工评审组召集人,国家博士后管理委员会专家组成员。长期从事纺织材料教学、科研工作,主持承担国家、原纺织部、上海市等十余项重大科研项目,荣获省部级一等奖、二等奖多项和国家专利4项。先后在国际学术会议上宣读论文40多篇,在国内外杂志上发表论文80多篇,并获全国优秀教师、上海市劳动模范和国务院颁发的有突出贡献的专家等荣誉称号。



张汝光高级工程师,1940年7月出生于印度尼西亚,祖籍广东梅县。1965年毕业于北京大学数学力学系。现任国家建材局科教委委员、上海玻璃钢研究所副总工程师、中国硅酸盐学会玻璃钢学会常务理事兼副秘书长、中国复合材料学会理事、全国高校复合材料类教学指导委员会委员、《玻璃钢》主编、《玻璃钢/复合材料》和《复合材料学报》编委。长期从事复合材料力学研究,发表论文60余篇,其中有关强度理论、负泊桑比设计和用好复合材料三篇文章,先后被中国硅酸盐学会玻璃钢学会评为优秀论文。1992年获国务院颁发的有突出贡献的专家荣誉称号。

编著者的话

纤维增强复合材料是20世纪材料科学领域发展十分迅速的一类新材料,由于具有很大的材料设计自由度,可使之具有各种优异的综合性能,而制造工艺又是多样灵活,又带来很高的生产效益和效率其综合性能优异,在各个工业部门,包括国防工业得到越来越广泛的应用。纤维增强复合材料作为材料科学的一个分支,它涉及高分子材料、纺织加工、力学等多学科、多层次,且是相互交叉的一门综合性学科。它包括增强纤维、基体、界面、成型加工、材料性能、结构设计和性能测试等内容和知识。本书是在教学和研究工作的基础上,参考国内外有关文献资料编写而成的。其重点对增强纤维、材料性能、结构设计和混纤、纺织结构复合材料进行了较详细叙述,对复合材料的其他内容作了一般性的概述。

全书共分十一章,具体内容和编写分工如下:

- | | | |
|------|--------------|--------------|
| 第一章 | 绪论 | (王善元) |
| 第二章 | 增强纤维 | (王善元 周建) |
| 第三章 | 聚合物基体 | (张庆) |
| 第四章 | 复合材料的界面 | (于伟东) |
| 第五章 | 聚合物基复合材料成型工艺 | (李龙) |
| 第六章 | 复合材料性能 | (张汝光) |
| 第七章 | 复合材料结构设计 | (张汝光 许君珞) |
| 第八章 | 混杂纤维增强复合材料 | (祝伟中) |
| 第九章 | 纺织结构复合材料 | (李龙 祝伟中 王善元) |
| 第十章 | 金属基和陶瓷基复合材料 | (周建) |
| 第十一章 | 纤维增强复合材料性能试验 | (张汝光) |

全书由王善元(一、二、三、四、八、九、十章)、张汝光(五、六、七、十一章)统稿。在本书编写过程中曾得到中山大学曾汉民教授、中国纺织大学胡学超教授和纺织材料研究开发中心的老师和博士生、硕士生的帮助和鼓励,在此表示感谢。特别得到李龙、张华鹏、刘继涛、王亚雄等同志的协助,亦在此对他们致以谢意。全文插图由姜月玲同志描绘,在此一并表示感谢。

孙晋良院士对本书手稿进行了认真的审阅,并作了序。在此谨表衷心的感谢。

由于编写水平有限,本书还存在不少缺点和错误,欢迎读者提出宝贵意见。

编 著 者

1998年5月

EA046/01

序

在现代高技术中,材料技术已与信息技术、能源技术并列为三大支柱,而高新技术对于新材料的依赖也变得越来越突出。新材料技术的发展对众多产业的发展起着重要的依托和支撑作用。当今世界,新材料正朝着材料性能持续优化,由单一材料向多种材料复合化,结构材料和功能材料整体化,材料制备加工智能化及材料设计超前化等方向发展。材料科学已发展成多学科相互交叉的综合领域,广泛涉及到物理学、化学、热力学、结晶学、工程学等各个分支。人们对新材料的要求是多功能、少污染、低能耗、长寿命。我国的高技术研究规划,即“863”计划,已把“关键新材料和现代材料科学技术”作为重点发展领域之一。

作为材料科学的一个重要分支,纤维增强复合材料以其优异的性能取得了飞速发展,并已广泛应用于航空、航天、交通运输、化工、建材、体育运动及医疗卫生等各个领域。随着高性能纤维及高性能树脂的崛起,更给纤维增强复合材料的发展注入了新的活力。《纤维增强复合材料》以全面、丰富的内容,从增强纤维、聚合物基体、复合材料界面、成型工艺、结构设计、性能测试等诸方面系统而详尽地作了阐述和讨论,同时还对金属基及陶瓷基复合材料等作了详细的介绍。相信该书对从事材料科学研究的人员,对希望了解、熟悉复合材料的人们会有所帮助和启迪;同时,对促进复合材料在各相关产业的应用会起到积极的推动作用。

孙 晋 良

中国工程院院士

1998年7月2日

目 录

第一章 绪论	1
1.1 复合材料定义及其分类	1
1.2 复合材料的特点和性能	5
1.3 复合材料的应用与发展	8
第二章 增强纤维	11
2.1 概述.....	11
2.2 凯夫拉纤维.....	11
2.3 碳纤维.....	30
2.4 玻璃纤维.....	47
2.5 其他纤维.....	56
第三章 聚合物基体	72
3.1 概述.....	72
3.2 聚合物的基本知识.....	72
3.3 树脂.....	73
第四章 复合材料的界面	92
4.1 概述.....	92
4.2 界面的基本概念和粘结理论.....	93
4.3 典型纤维复合材料界面.....	99
4.4 纤维增强复合材料界面分析方法	104
第五章 聚合物基复合材料成型工艺	119
5.1 概述	119
5.2 热固性复合材料成型工艺	119
5.3 热塑性复合材料成型工艺	124
第六章 复合材料性能	132
6.1 概述	132
6.2 复合材料组分材料的性能及其影响	132
6.3 复合材料单层板的弹性常数	133
6.4 复合材料单层板的强度	141
6.5 复合材料单层板的强度准则	149
6.6 复合材料的其他力学性能	155
6.7 环境对复合材料力学性能的影响	157
6.8 复合材料的其他性能	159
第七章 复合材料结构设计	163

7.1	概述	163
7.2	复合材料简单层板性能的方向性	163
7.3	复合材料层合板的力学性能	172
7.4	复合材料构件	179
7.5	复合材料夹层结构	186
7.6	复合材料结构设计的基本观念	190
第八章	混杂纤维增强复合材料	196
8.1	概述	196
8.2	混杂纤维增强复合材料的混杂方式	198
8.3	混杂纤维复合材料的力学性能	202
8.4	混杂效应	207
第九章	纺织结构复合材料	216
9.1	概述	216
9.2	纺织结构增强材料类型	216
9.3	三轴向平面织物	220
9.4	三维整体织物结构	224
9.5	三维织物复合材料的性能	230
9.6	纺织物柔性复合材料	232
第十章	金属基和陶瓷基复合材料	248
10.1	概述	248
10.2	金属基复合材料	248
10.3	陶瓷基复合材料	260
第十一章	纤维增强复合材料性能试验	267
11.1	概述	267
11.2	组分材料的基本力学性能试验	268
11.3	复合材料力学性能试验	273
11.4	其他物理性能试验	285
11.5	纤维增强复合材料的无损检测	290

第一章 绪 论

人类发展的历史和材料发展的历史息息相关。研究人类历史可以清楚地看到,人类历史上各方面的进步与新材料的创造、出现和应用是分不开的。

材料一般可分为无机材料(包括水泥、砖瓦、陶瓷、玻璃等)、金属材料、高分子材料(包括塑料、橡胶、纤维等)及复合材料 4 大类。

从泛义来讲,复合材料的范围极广,其发展和应用可追溯到人们使用草杆粘土、纸筋石灰材料的时代。生物材料例如竹、木、草、骨头、牙齿、肌肉、毛皮和贝壳等,都是天然复合材料,它们都具有很复杂的微观构造和复合材料的全部特点,它们的构造和复合机理可以给人们很多深刻的启示,有助于理解和研制性能优异的复合材料。由于单一材料的局限性,往往需要具有各种特性的材料进行复合,因此复合材料的发展将是不可限量的。但复合材料学作为一门学科、复合材料作为一种新兴材料工业,直到本世纪 40 年代初才出现。现代科学技术的发展已进入一个各种材料综合使用的新阶段。人们预测 21 世纪将是复合材料大发展的时代。

材料学家认为:就世界范围而论,从 1940 年开始到 1960 年的这 20 年是玻璃纤维增强塑料的时代,可称为复合材料发展的第一代。而 60 年代开始到现在是玻璃纤维增强塑料(我国简称为玻璃钢)的成熟和完善时期。在这一时期中,同时出现了硼纤维增强塑料和碳纤维增强塑料。到了 70 年代是 Kevlar 纤维增强塑料、碳化硅纤维增强塑料和氧化铝金属纤维增强塑料以及各自的金属基、陶瓷基、碳基等复合材料等先进复合材料相继出现的时代。1960 年到 1980 年的 20 年间是先进复合材料的开发时期,称为复合材料发展的第二代。而从 1980 年开始直到 2000 年这 20 年将是先进复合材料得到充分发展的时期,在这一时期中,复合材料不仅在宇航及飞机材料中应用,而且在所有的工业领域中都得到应用,这一时期可以认为是先进复合材料发展的成熟时期。在这一时期中,不仅纤维增强塑料(FRP),就连纤维增强金属(FRM)也将作为各种结构材料而被实用化了。这一时期称为复合材料发展的第三代。

复合材料可以在很大程度上改善和提高单一常规材料的力学性能、物理性能和化学性能,并且可以解决在工程结构上采用常规材料无法解决的关键性问题。因此,不仅飞机、火箭、导弹、舰艇、坦克和人造卫星这些军工产品离不开它,而且运输工具、建筑材料、机器零件、化工容器和管道、电子材料、原子能工程结构材料、医疗器械、体育用品和食品包装等产品也离不开它。由此可见,复合材料在国民经济中的作用十分重要,要使工业和国防现代化,没有新型复合材料的开发和应用是不可能的。

1.1 复合材料定义及其分类

复合材料是由两种或两种以上的单一材料,用物理的或化学的方法经人工复合而成的一种固体材料。因此在微观构造上它是一种不均匀材料,具有明显的界面。各种组分材料在界面上存在着力的相互作用。复合材料可保留组分材料的主要优点,克服或减少组分材料的许多缺

点,还可产生组分材料所没有的一些优异性能和弱点,其微观构造和复合机理是非常复杂的。通常是使高强度、高模量、脆性的增强材料和低强度、低模量、韧性的基体材料经过一定的成型加工方法制成复合材料。

复合材料是与常规材料如金属、塑料等等完全不同的一类材料,它本质上是结构物。用常规材料进行设计和加工制造常规材料结构物,而复合材料结构物是与复合材料一起设计、一起成型制造出来的。这种材料与结构物是一体,一起设计、一起制造的特点,为复合材料结构物的设计提供了很大的设计自由度,带来很大的优越性,可以得到各种单一材料所不能具有的特殊性能。

现代材料科学所讨论及研究的复合材料一般是指纤维增强、颗粒物增强或自增强的高分子聚合物基、陶瓷基(即无机非金属基)或金属基的复合材料。现代复合材料学科包括增强材料、基体材料、界面粘结、结构设计、成型工艺、性能及其测定等方面,并逐步形成了一门与化学、物理、力学及各种应用学科有关的跨学科性的、有着广泛的内在联系并互相渗透和互相推动的材料科学。

复合材料的命名习惯上把增强材料的名称放在前面,基体的名称放在后面。例如以玻璃纤维和聚丙烯塑料构成的复合材料称为“玻璃纤维增强聚丙烯基复合材料”,简称为“玻璃纤维聚丙烯复合材料”或“玻璃纤维/聚丙烯复合材料”。又如以碳纤维和环氧树脂构成的复合材料称为“碳纤维增强环氧树脂基复合材料”,简称为“碳纤维环氧树脂复合材料”或“碳纤维/环氧复合材料”。我国称为“玻璃钢”的复合材料,一般是指玻璃纤维和饱和聚酯树脂构成的复合材料。

复合材料的组分材料,绝大多数是由人工制成的或可由人工合成的,因此不会产生资源枯竭的问题。复合材料及其结构产品与金属材料及其结构产品相比,可大大降低能源消耗,减少材料消耗和装配工作量,大幅度地减少腐蚀和磨损,缩短生产周期,提高部件和产品的性能,延长使用寿命。复合材料是大有发展前途的新型材料,90年代和下一世纪将是复合材料的时代。

复合材料可按用途、基体材料、增强材料进行分类。

1.1.1 按用途分类

1.1.1.1 结构复合材料

利用复合材料各种良好的力学性能,例如比强度高、比刚度大和抗疲劳性能好等优点,用于建造或构造结构的材料,称为结构复合材料。并非所有利用复合材料力学性能的材料都是结构复合材料,而结构复合材料有时也具有一些良好的非力学方面的功能。结构复合材料由基体和增强材料组成,增强材料分散在基体之中,用以增强基体;基体材料将增强材料粘结成一个整体,成为复合材料并产生优异的性能。本书侧重讨论结构复合材料。

1.1.1.2 功能复合材料

利用复合材料的物理、化学和生物学的功能作为主要用途的,称为功能复合材料。例如,利用复合材料的电学性能、磁学性能、光学性能、热学性能、放射线特性、化学性能、生物学性能和力学性能作为其主要功能的,称为功能复合材料。有些复合材料同时兼有许多功能,也可设计和制造成具有多种功能的复合材料。

1.1.2 按基体材料分类

复合材料又可按基体材料的不同而分为聚合物基体复合材料、金属基体复合材料和陶瓷基体复合材料。本书专列章节讨论基体材料和金属基复合材料、陶瓷基复合材料。

聚合物基体复合材料的应用最广,生产工艺比较成熟,一般说来,价格比较便宜,使用温度较低。金属基复合材料可用于高温,但制造工艺中所涉及的许多问题非常复杂,影响产品的质量和性能,价格昂贵。金属基复合材料具有许多非常突出的优点,是高技术中不可缺少的一种新型材料。陶瓷基复合材料本身坚硬、模量较高且可耐高温,但性脆、断裂应变很小,抗拉和抗冲击性能很差;在陶瓷材料中加入延伸率较大的增强纤维,则可明显改善韧性和耐冲击性能。

1.1.3 按增强材料分类

本书主要讨论纤维增强复合材料。以下较细致地按增强纤维的形状、增强纤维的长短和增强纤维的性能进行分类。

1.1.3.1 粒子增强复合材料

在粒子增强复合材料中,基体起比较主要的作用。比基体坚硬的增强微粒,均匀地分散在基体之中,用以增强基体抗错位的能力,因而提高了材料的强度和刚度,但同时增大了脆性。按增强颗粒的大小来分,又有弥散强化(粒径为 $0.01\sim 0.1\mu\text{m}$,粒子体积分数为 $1\%\sim 15\%$)和粒子强化(粒径大于 $1\mu\text{m}$,粒子体积分数大于 25%)两种。粒子增强复合材料在宏观上可认为是均匀各向同性材料,但在微观构造上是不均匀的和很复杂的,也存在着界面、缺陷和微裂纹,它不同于均匀、连续和各向同性的金属材料 and 工程材料。

1.1.3.2 薄片增强复合材料

在这种复合材料中用以增强基体的薄片,在面内任意两个方向例如 x 和 y 方向都起增强作用,它在 x 和 y 方向是同性的。由于这种复合材料的力学性能往往不如纤维增强复合材料,因此很少用作结构材料。用云母薄片增强的复合材料是一种功能材料,用金属薄片(金属箔)增强的复合材料也是功能材料。

1.1.3.3 纤维增强复合材料

这种复合材料由增强纤维和基体组成。纤维(或晶须)的直径很小,一般在 $10\mu\text{m}$ 以下,缺陷较少又较小,断裂应变约为千分之三十以内,是脆性材料,容易损伤、断裂和受到腐蚀。基体相对于纤维来说,强度和模量要低得多,但可经受较大的应变(百分之几或更大些),往往具有粘弹性和弹塑性,是韧性材料——这主要是指聚合物基体和金属基体而不是指陶瓷基体。

在纤维增强复合材料中,纤维比较均匀地分散在基体之中,在纤维方向增强基体,起最主要的承载作用。基体的作用把纤维粘结成一个整体,保持纤维间的相对位置,使纤维能协同作用,保护纤维免受化学腐蚀和机械损伤;并减少环境的不利影响,传递和承受剪应力,在垂直于纤维的方向承受拉、压应力等。纤维增强基体的效果,在某个合理的纤维体积分数 V_f (在复合材料中纤维所占的体积百分比)范围内,与 V_f 成正比。 V_f 太小了起不到增强效果,纤维在基体应变稍大时就已大量断裂,在基体中造成很多缺陷,反而使强度下降,是不可取的; V_f 太大在工艺上不易操作(例如短纤维增强复合材料),纤维和基体间由于粘结变差,缺陷增多,界面强

度下降。韧性基体在复合材料中的体积分数减小了,脆性纤维的体积分数增大了,使复合材料的韧性减小,抗冲击和断裂的性能下降,达不到良好的增强效果,也是不可取的。

纤维增强复合材料,由纤维的长短可分为短纤维增强复合材料和长纤维(连续纤维)增强复合材料,它们具有不同的特点和用途。

短纤维增强复合材料 短纤维增强复合材料可分为单向短纤维复合材料和杂乱短纤维增强复合材料。单向短纤维增强复合材料,在纤维方向的强度和刚度最大,纤维是起决定性作用的因素;在垂直于纤维方向的强度和刚度,以及剪切强度和刚度方面,基体是起主要作用的因素。杂乱短纤维增强复合材料,又分为短纤维在平面内随机分布和空间随机分布两种。纤维在材料中杂乱分布,它是准各向同性的。挤压注射成型的短纤维增强复合材料零部件,具有一定程度(可能是不规则的)各向同性。单向短纤维增强复合材料在纤维方向的力学性能比杂乱短纤维增强复合材料好得多,但在承受剪切和横向拉、压性能方面,就差得多了。

在杂乱短纤维增强复合材料中,制造工艺比较简单,适合大规模生产,因而能大大提高生产率和大幅度降低成本。杂乱短纤维增强塑料比之工程塑料,各种力学性能都有改善,因而很有发展前途。短纤维复合材料,除了制造片状模塑料(SMC)作为板材用外,还可用注射成型、模压成型和离心浇铸等工艺高效率的生产零部件。由于劳动生产率很高,价格又比较便宜,因而近年来应用很广。

连续纤维增强复合材料 连续纤维增强复合材料在纤维方向具有很高的强度和模量,但在剪切强度和模量方面,在垂直于纤维方向的拉、压强度和模量方面,就远不如三维杂乱短纤维增强复合材料,常发生横向开裂和脱层问题。连续纤维复合材料又分为单向复合材料、叠层复合材料和编织复合材料等。各种复合材料都有其特点和最适用的范围。

纤维增强复合材料由于纤维和基体的不同,品种很多,例如碳纤维增强环氧、硼纤维增强环氧、Kevlar 纤维增强环氧、Kevlar 纤维增强橡胶、玻璃纤维增强塑料、硼纤维增强铝、石墨纤维增强铝、碳纤维增强陶瓷、碳纤维增强碳和玻璃纤维增强水泥等。钢纤维(或细钢丝)增强水泥和玻璃纤维增强水泥属于短纤维增强复合材料,它是结构复合材料,主要用于民用建筑。

按纤维性能可将复合材料分为高性能纤维复合材料和工程复合材料。

高性能纤维复合材料 以碳纤维、硼纤维、碳化硅纤维、Kevlar 纤维(芳纶纤维)和晶须等高性能纤维增强的复合材料,称为高性能纤维复合材料。

工程复合材料 玻璃纤维增强塑料(GFRP,俗称玻璃钢)和钢纤维增强水泥等,与高性能纤维复合材料相比,价格比较便宜,某些性能(例如比刚度)较差,在工程上用量较大,称为工程复合材料。

本书集中讨论纤维增强复合材料,即由高强、高模量纤维分散于基体之中。纤维主要承受负荷,而基体处于纤维的周围,保持纤维的位置与定向。纤维增强材料主要包括玻璃纤维、碳纤维、Kevlar 纤维,因此本书较详细地介绍以上 3 种纤维增强材料。同时介绍硼纤维、碳化硅纤维、超高强度和超高模量聚乙烯纤维。纤维增强复合材料主要应用于结构复合材料,且一般以单向复合材料层片为基本构造单位,然后每层叠合成叠层复合材料。本书无论对纤维增强材料、基本材料的选择,复合材料的成型加工、结构设计还是对复合材料的性能分析与讨论,均侧重于结构复合材料及其力学性能。

高性能纤维在全世界的用量很少,Kevlar 纤维加上碳纤维,用量在数千吨以内,再加上高强度的玻璃纤维,总用量大致为 1 万吨,但将以 16%~22%的高速度持续增长。全世界玻璃钢的用量将达到千万吨,也以很高的增长率在不断发展。所以上述分类并不意味着工程复合材

料不重要,但要解决性能指标非常严格和苛刻的重要结构的设计问题,只有高性能纤维复合材料才能实现,这时工程复合材料就无能为力了。

在复合材料中,只采用一种纤维和基体材料,称为单一复合材料;如采用两种或两种以上的纤维材料,称为混杂纤维复合材料,本书将专列一章讨论混杂纤维复合材料。对于叠层复合材料的纤维混杂方式,又可分为按层混杂和层内混杂两种。在按层混杂复合材料中,每层只采用一种纤维和基体,但不同层次可采用不同的纤维和基体,也可采用金属薄片;在层内混杂复合材料中,任何层片都含有两种或多种纤维。也可以采用兼有上述两种混杂形式的超混杂复合材料,以增加设计的自由度。

混杂复合材料可出现混杂效应或称为杂交效应(Hybrid Effect)。若出现了单一复合材料所没有的优异性能,则此效应称为正混杂效应;若出现了单一复合材料所没有的明显缺点,则此效应称为负混杂效应。一般说来,混杂复合材料在主要方面获得正混杂效应的同时,可能在次要方面出现一些负混杂效应。

采用混杂复合材料有多种目的。例如价格贵、模量高而断裂应变小的碳纤维层片和价格较低、模量较小而断裂应变大的玻璃纤维层片叠合而成的复合材料,相对于碳纤维复合材料而言,可明显降低造价而且显著提高抗冲击和断裂的性能,而材料的刚度则有所下降;相对于玻璃钢而言,可明显提高刚度,增大断裂功,而材料的价格则有所上升,断裂应变受碳纤维的影响而降低。Kevlar 纤维增强复合材料具有许多优点,但沿纤维方向的压缩强度低是其重大弱点,它和碳纤维或玻璃纤维混杂制成混杂复合材料,则可提高压缩强度。

1.2 复合材料的特点和性能

复合材料可由单一增强材料和基体材料组成,也可由几种增强材料和基体材料组成。它是由各种组成材料取长补短复合而成的具有各种材料综合性能的新材料,其性能一般由组成的增强材料和基体材料的性能以及它们之间的界面所决定,作为产品还与成型工艺和结构设计有关。因此,复合材料有以下的共同特点。

1.2.1 复合材料的特点

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能。

② 可按对性能的需要进行材料的设计和制造,正如本书在复合材料结构设计一章中特别提出的复合材料是一种结构物。

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。

1.2.2 复合材料的性能

① 比强度高比刚度大。单位质量的强度和模量,称为比强度和比模量,是在质量相等的前提下衡量材料承载能力和刚度特性的一种指标。对于航空、航天的结构部件,汽车、火车、舰艇、分离核燃料的高速离心机等运动、转动结构,这是一个非常重要的指标,它意味着可制成性能好而又质量轻的结构。即使对于土建工程和化工设备等,因为材料的比强度高比刚度大意味着

可减轻自重,承受较多的载荷和改善抗地震的性能等,故也是一个重要指标。

② 成型工艺性能好。这里是指聚合物基体纤维增强复合材料的成型工艺性能好。金属基体复合材料的成型工艺非常复杂。对于连续纤维增强复合材料,可用手糊法、模压成型法、缠绕成型法和拉拔成型法等制造工艺。从原理和设备上讲,其制造工艺比较简单,没有大量的切割,原材料损耗少,所用功率也不大,可制成形状复杂的部件,尤其适宜于制作相当大的整体结构部件。这种较大整体结构部件可一次成型,大大减少了零部件、紧固件和接头数目,减少了装配工作量,显著减轻了结构质量并减少了工时。

③ 材料性能可以设计。复合材料的最主要优点和特点在于它的可设计性。复合材料和复合材料的结构部件(产品)都具有可设计性,这两者在制造时是同步完成的。金属结构用已生产出来的金属材料来进行设计和制造。金属材料是成批生产的,当品种规格选定了,材料的力学性能也就确定了。纤维增强复合材料在微观上是由纤维和基体组成的一种“结构”。在增强材料和基体材料选定以后,尚有许多材料参数和几何参数可以变动,以设计出具有不同性能的复合材料。纤维增强复合材料及其结构的可设计性,表现在选择纤维的种类、性能和体积分数,安排铺层的方向、层数和层次。根据载荷的种类、大小、使用要求和工艺条件等,对结构的形式、尺寸和厚度等进行设计,可使结构的性能、质量和经济指标等都做到合理和优化。

④ 抗疲劳性能好。疲劳破坏是材料在交变载荷作用下,由于裂纹的形成和扩展而造成的低应力破坏。疲劳破坏是飞机坠毁的主要原因之一。复合材料在纤维方向受拉时的疲劳特性要比金属好得多。金属材料的疲劳破坏是由里向外经过渐变然后突然扩展的。在渐变阶段,疲劳裂纹和损伤尺寸甚少且甚小,不易检测到,裂纹一旦达到临界尺寸,就突然断裂。因此在发生疲劳破坏之前,常感到没有明显的预兆。而纤维增强复合材料的基体,是断裂应变较大的韧性材料。在基体中和在界面上,固化后常有缺陷和裂纹存在,纤维和基体间的界面常常能阻止裂纹的扩展或者改变裂纹扩展的方向。因此其疲劳破坏总是从纤维或基体的薄弱环节开始,逐步扩展到结合面上,损伤较多且尺寸较大,破坏前有明显的预兆,能够及时发现和采取措施。

⑤ 破损安全性能好。单向纤维增强复合材料,是成千上万根纤维在同一方向由基体粘合而成的。纤维中不可避免地存在着缺陷。若没有基体在传递剪应力,则在拉伸过程中必定有一些纤维由于应力过大或缺陷较大而首先断裂,不再参与承载。于是各纤维的受力状态发生变化,又有一些应力过大或缺陷较大的纤维再次发生断裂,并使断裂的过程加速发展,直至全部的纤维断裂为止。各根纤维所承受的应力和应变非常悬殊,很不均匀,而全部纤维的平均应力和应变则很低。纤维束几乎没有抗压和抗弯的能力,因而纤维束不能单独作为结构材料使用。在纤维增强复合材料中,由于基体的作用,在沿纤维方向受拉时,各纤维的应变基本相同。已断裂的纤维由于基体传递应力的结果,除断口处不发挥作用和在断口附近一小段部分发挥作用外,其余绝大部分纤维依旧发挥作用。断裂了的纤维周围的邻接纤维,除在局部需多承受一些由断裂纤维通过基体传递过来的应力而使应力略有升高外,各纤维在宏观意义上说几乎同等受力。各纤维间应力的不均匀程度大大降低了,其平均应力将大大高于没有基体的纤维束的平均应力,因而增大了平均应变。这样,个别纤维的断裂就不会引起连锁反应和灾难性的急剧破坏,因而破损安全性能很好。

⑥ 减振性能好。以聚合物为基体的纤维增强复合材料,基体具有粘弹性。在基体中和界面上有微裂纹和脱粘的地方,还存在着摩擦力。在振动过程中,粘弹性和摩擦力使一部分动能转换为热能。因此,纤维增强复合材料的阻尼比钢和铝合金大,若采取措施还可使阻尼增大。这就是纤维增强复合材料减振性能好的原因。

⑦ 热稳定性好。纤维增强复合材料的结构部件(和产品)在大幅度温度变化的环境下,具有非常微小的热变形。石墨纤维和 Kevlar 纤维的复合材料,在纤维方向具有数值很小而且是负值的热膨胀系数。当温度升高时不是伸长而是收缩,当温度下降时不是收缩而是伸长。这种可贵的特性经过合理铺层,可设计出线膨胀系数为零或接近于零的部件。这种特性很重要,只有采用上述纤维增强复合材料才能得到。

复合材料目前还存在一定的缺点,主要包括以下问题。

大多数增强纤维拉伸时的断裂应变很小,所以纤维增强复合材料也是脆性材料。沿纤维方向是这样,垂直于纤维方向更是这样。其断裂应变要比金属材料小得多,这是较大的缺点。但改善纤维的断裂应变、基体的韧性和界面状况,就可提高复合材料的强度和抗断裂、疲劳及冲击等能力。

叠层复合材料的层间剪切强度和层间拉伸强度很低,这已成为致命的弱点;层间切变模量相当低,引起了若干问题,带来了不良的后果。

影响复合材料性能的因素很多,其中包括纤维和基体性能的高低,孔隙、裂纹和缺陷的多少,工艺流程和操作过程是否合理,固化的温度、压力和时间的安排(升温 and 降温阶段)是否合适,生产环境和条件是否满足要求等等,这些都能引起复合材料性能的较大变化。加上产品还缺乏完善的检测方法,因此产品的质量不易控制,材料性能的分散性大,可靠性较差。放松了对分散性的要求,而采用过大的安全系数,将使复合材料的优点得不到充分利用。因此,需要十分重视产品质量问题。

用硼纤维、碳纤维和碳化硅纤维等高性能纤维制成的树脂基和金属基复合材料,虽然某些性能很好,但价格昂贵,影响广泛地应用。

纤维增强复合材料与传统的金属材料相比,具有较高的强度和模量,较低的密度,如表1-1所示。由于纤维增强复合材料具有以上特点,已广泛应用于结构材料。传统的结构材料如钢、铝合金具有各向同性的特点,而纤维增强复合材料一般有很强的方向性,例如沿纤维方向具有最大的拉伸强度和模量,沿其他方向具有较低的强度和模量,垂直于纤维方向具有最低的强度和模量。纤维增强复合材料其他物理性能和机械性能如热膨胀系数、热传导和冲击性能等具有

表 1-1 金属材料 and 纤维增强复合材料的强伸性能

材 料	密 度 /g · cm ⁻³	模 量 /GPa	拉伸强度 /MPa	屈服强度 /MPa
SAE1010 钢(cold worked)	7.87	207.0	365	303
AISI4340 钢(淬火和回火)	7.87	207.0	1722	1515
Al6061-T6 铝合金	2.70	68.9	310	275
Al7178-T6 铝合金	2.70	68.9	606	537
Ti-6Al-4V 钛合金(老化)	4.43	110.0	1171	1068
17-7PH 不锈钢(老化)	7.87	196.0	1619	1515
INC0718 合金(老化)	8.20	207.0	1399	1247
高强碳纤维复合材料	1.55	137.8	1550	
高模量碳纤维复合材料	1.63	215.0	1240	
E-玻璃纤维复合材料	1.85	39.3	965	
凯夫拉 49 纤维复合材料	1.38	75.8	1378	
硼纤维-6061 铝合金复合材料	2.35	220.0	1109	
碳纤维复合材料(半各向同性)	1.55	45.5	579	

类似的情况。如果双向或多向增强则可改善各向同性性能。虽然纤维增强复合材料的其他方向相比于纤维方向具有较低的性能,但仍然优于一般的结构材料。

纤维增强复合材料的结构设计金属材料结构设计相比,由于各个方向性能的差异,困难更多些。但是纤维增强复合材料的各向异性,根据结构物设计的需要而提供制作适应和发挥材料的性能特点,这种特点只有复合材料才可能具有。这种设计的灵活性可以增强某一方向包括强度、刚度等无须另外设计和加工。

除了性能上的各向异性外,纤维增强复合材料与金属材料还存在很多差异。例如一般来讲,金属材料具有屈服和塑性变形,而大部分纤维增强复合材料在强伸性能上表现为弹性,而这些材料的不均匀性形成高能量的吸收。纤维增强复合材料在外界负荷作用下,可能在性能上逐渐衰减但并没有破坏,因此金属材料与纤维增强复合材料在损伤发展的过程、机理方面同样存在较大的差异。

另外,纤维增强复合材料还具有独特的高阻尼性能,因而能较好地吸收振动能量,同时减少对相邻结构件的影响。这种高阻尼性能的纤维增强复合材料应用于汽车,可减少噪音和振动,改善其舒适性。

1.3 复合材料的应用与发展

从本世纪40年代起,复合材料的发展已经历了整整半个世纪。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。

1.3.1 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;后者利用其轻质高强和容易造型的优点,容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。

卫生洁具和水箱等在发达国家已广泛应用。

1.3.2 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,减小噪音等等。

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。

1.3.3 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,轻质高强对海上材料运输、安装都带来方便。具体构件包括如海洋平台、挡风墙板、护栏、各类管道等等。

1.3.4 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。

1.3.5 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;加入适当的碳黑或其他导电粉末,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。

通讯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。

1.3.6 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