

高等学校教材

复合材料力学

周履 范赋群

FUHE CAILIAO LIXUE



高等教育出版社

内 容 简 介

复合材料力学亦可视作材料力学(与高等材料力学)的进展。本书内容较新颖、全面,其中包括作者们的研究成果。

在理论方面,着重沟通细观和宏观两个层次内的力学分析,其中包括各向异性弹性理论、各向异性叠层板壳理论、决定论与概率论的细观与宏观力学。在实用计算方面,包括复合材料的设计和结构计算,并有较系统的公式和数据表。为了便于教学,在叙述上着重阐明基本概念与基本理论。

本书的基本内容部分可作为高等学校力学、材料以及有关工程专业的教材,加上带*、**号的内容可作为固体力学和有关专业研究生的教材。本书也可供力学教师和相关工程、科研人员参考。

高等学校教材

复合材料力学

周 履 范赋群

*

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张11.5 字数270 000

1991 年4月第1版 1991 年4月第1次印刷

印数 0 001—1 800

ISBN7-04-002664-3/TB·179

定价4.35元

前 言

材料力学往往沿着新的物性关系和应用弹塑性理论两个方向发展。考虑到复合材料的物性特点,建立强度、刚度等细-宏观力学理论是复合材料力学的任务。它所涉及的材料种类(包括悬浮液)和研究方法非常广泛,且与其他学科交织在一起,并正在迅速发展之中。本教材主要是研究纤维增强复合材料。

使用本教材时,在教与学两方面都应有较大的灵活性。在基本问题的论述上,本书力求透彻,同时也包括了一些介绍性的内容。书中带*号的内容适用于有关专业的研究生(其中第五、六章可仅选用部分内容),带*、**号的所有内容适用于固体力学专业的研究生。各方面的读者在读完本书后,倘感颇有收益,作者将引为欣慰。

本书第五、六章系黄小清执笔。在撰写本书的过程中,得到了国家教委科技司、国家教委材料力学课程教学指导小组、国家教委高等工业学校工程力学专业教材委员会、国家自然科学基金委员会数理学部 and 高等教育出版社的鼓励、关心和支持,也得到全国同行们的关心和支持。作者的科研工作还得到了国家自然科学基金的资助。单辉祖教授审阅了书稿并提出了许多宝贵意见。作者谨致谢意。

由于水平所限,谬误恐所难免,恳请同行、读者批评指正。

周 履 范赋群

1989年3月于华南理工大学

目 录

第一篇 绪论和各向异性弹性力学基础

第一章 绪论	1
§ 1.1 复合材料及其分类	1
§ 1.2 复合材料叠层结构	3
§ 1.3 复合材料可定义为两层次材料·复合材料细观力学与 宏观力学	8
§ 1.4 复合材料的优越性	10
§ 1.5 内容安排与说明	13
习题	15
第二章 各向异性弹性力学基础	16
§ 2.1 各向异性弹性力学基本方程	16
§ 2.2 各向异性弹性力学的本构方程	19
习题	28

第二篇 复合材料宏观力学

第三章 单层宏观力学	29
§ 3.1 平面应力下单层的本构方程·沿轴强度	29
§ 3.2 平面应力下单层沿轴性能(静荷)的测定	43
§ 3.3 平面应力下单层的强度理论	49
习题	63
第四章 线性经典叠层板理论与叠层强度分析	65
§ 4.1 概述·标记法	65
§ 4.2 线性经典叠层板理论的本构方程	67
§ 4.3 一般均匀各向异性叠层板的刚度	79
§ 4.4 叠层刚度计算与实验验证	83
§ 4.5 叠层刚度设计	100
§ 4.6 叠层湿热本构方程·湿热应力	108

§ 4.7	叠层三维弹性力学解·层间应力·边缘效应	115
§ 4.8	叠层强度	122
** § 4.9	叠层效应的统计断裂力学分析	132
	习题	138
*第五章	叠层板的弯曲、振动与稳定	140
§ 5.1	非线性经典叠层板理论	140
§ 5.2	线性经典叠层板理论·弯曲与振动	150
§ 5.3	非线性与线性经典叠层板的稳定性理论	165
§ 5.4	非经典叠层板理论	174
	习题	189
*第六章	线性经典叠层薄壳理论	191
§ 6.1	任意形状叠层薄壳的一般经典理论	191
§ 6.2	任意形状叠层薄壳的近似经典理论	199
§ 6.3	圆柱叠层薄壳的近似经典理论	212
	习题	219

第三篇 复合材料细观力学

第七章	有效模量理论	220
§ 7.1	有效模量理论	221
§ 7.2	有效模量的材料力学半经验解法	229
* § 7.3	横向同性复合材料的五个有效模量的弹性力学解	243
** § 7.4	用自协方案求短纤维单向复合材料的有效模量	263
	习题	267
第八章	细观强度分析	268
§ 8.1	材料力学半经验法	268
* § 8.2	裂纹扩展统计理论	280
* § 8.3	杂交效应	290
第九章	有效热膨胀系数·湿热对材料性能的影响	296
§ 9.1	有效热膨胀系数	296
* § 9.2	湿热对材料性能的影响	302
	习题	313

附录I	矩阵代数·简缩符号·二次型	314
§ I. 1	矩阵代数	314
§ I. 2	简缩符号	320
§ I. 3	二次型	322
附录II	张量	324
§ II. 1	矢量.....	324
§ II. 2	张量.....	326
附录III	弹性力学基本方程	331
§ III. 1	力学平衡(运动)方程	332
§ III. 2	变形几何方程	333
§ III. 3	物理方程	339
§ III. 4	弹性力学基本方程	341
§ III. 5	弹性力学平面问题	342
附录IV	单位换算表	348
参考文献	350

第一篇 绪论和各向异性弹性力学基础

第一章 绪 论

§ 1.1 复合材料及其分类

材料,是人们生活的物质基础,也是社会发展的重要标志。使用单一材料固然有优越性,但也有某些方面的不足。在古代,人们早就意识到,将几种单一材料混合能获得性能更好的材料。如稻草泥砖,直到后来的夹板、轮胎、钢筋混凝土、球墨铸铁等,以及近三、四十年来出现的纤维增强塑料等材料。通常将这些由不同性能、互不相熔(溶)的原材料复合而成的材料,称为复合材料;而组成复合材料的原材料称为相(材料)或组分。木材,竹、动物骨骼乃至人体都是天然复合材料;稻草泥砖、夹板、钢筋混凝土、玻璃纤维增强塑料(俗称玻璃钢),直到近 20 多年来才使用的碳纤维或硼纤维增强塑料(先进复合材料),则是人造复合材料。通常,将复合材料中一个比较连续的相称为基体,其它相则称为增强。玻璃钢就是玻璃纤维为增强、某种塑料为基体的复合材料。(注意,这里不排斥增强相实质上是起到减弱作用的情形,例如空隙、填料。)各相材料的物理性质总称为相物理,各相材料的几何形状及其分布总称为相几何。改变相物理(如更换某一相材料)、相几何可获得各种性能的(力学的、光学的、电磁学的、热学的,等等)复合材料,以满足使用要求。

粗略地看来,复合材料的性能是其各相材料的性能取长补短、

共同作用的结果(某种平均作用——“混合效应”)。但也未必如此,尤其是对有关破坏问题,还有“协同效应”(后详)。例如,有的复合材料可获得其组分单独使用时所没有的潜在性能。断裂能为 7N/m (0.04lb/in)的玻璃纤维与断裂能为 220.5N/m (1.26lb/in)的塑料组成的复合材料,断裂能却大约为 175000N/m (1000lb/in),是其组分的上千倍^①。在这里,两种相材料的交界面的性能起到重要作用。这个交界面称为界面。研究界面的性能及其作用不在本书讨论范围内,须专门研究;如有可能,将在实验资料或力学模型中加以顾及。

复合材料按其性能和用途可分为功能复合材料和结构复合材料,前者利用它的某些特有的物理性能(如耐烧蚀材料,无线电波可穿透材料等等),后者则是作为承力的结构材料使用的。本书仅研究后者。但就研究方法而论,两者有许多共同之处。

复合材料亦可按基体或增强来分类。前者如环氧树脂基复合材料、金属基复合材料、陶瓷基复合材料等;后者又视增强材料的几何形状分为:长纤维、短纤维或晶须增强复合材料(还可按纤维的方向性分为单向、双向、三向和随机方向增强复合材料)、片状增强复合材料和颗粒增强复合材料。结构复合材料多按基体分类。

以上说明和分类不是绝对的。譬如,对于多晶体,通常视作传统材料,但也可视为复合材料。前者只是在宏观层次内进行研究;后者就需要考虑其细观结构,在细观和宏观两个层次内进行研究,且其宏观性能可通过细观理论分析得到。因此,后者比前者更深刻。再如,以橡胶颗粒去增韧聚苯乙烯,在弥散过程中,聚苯乙烯颗粒又将渗入橡胶颗粒内。这种材料可称为基体模糊的复合材料。此外,还有相互贯穿网状复合材料,它的每一相都是连续的。目

^① Edwin P, Plaeddemans, *Interfaces in Polymer Matrix Composites*, *Composite Materials Vol. 6*, (1974).

前还正在研制自增强分子复合材料和智能材料。这些复合材料都没有列入上述分类中。

复合材料中各相材料的性能一般应有明显的差别，每相材料也应有相当的份量，不宜太少，以组成性能与相材料有显著差别的复合材料。

就某种细观意义来说，复合材料是一种细观性能分区等值的非均匀体。

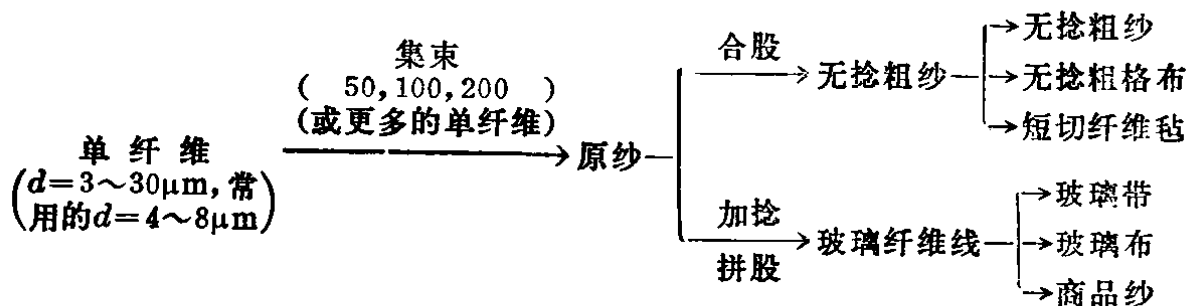
§ 1.2 复合材料叠层结构

纤维增强复合材料的叠层结构是目前结构复合材料的主要形式。常用的纤维有：玻璃纤维、硼纤维、碳纤维、芳伦 (Kevlar) 纤维、碳化硅纤维等。常用的非金属基体材料有：环氧树脂、酚醛树脂、聚酰亚胺树脂、聚醚醚酮 (Poly-Ether-Ether-Kelone, 简称 PEEK)，以及碳、陶瓷等。金属基体材料有：铝合金、镁合金、钛合金等。

一、纤维材料

玻璃纤维是较早使用的一种纤维，其品种很多。在结构复合材料中使用得更多的是 E 玻璃 (SiO_2 54.4%， Al_2O_3 14.4%， CaO 17.5%， B_2O_3 8.0%， MgO 4.5%，及少量的氧化物： Na_2O 、 K_2O 、 TiO_2 和 Fe_2O_3 ，属于无碱玻璃纤维) 和 S 玻璃 (SiO_2 65%， Al_2O_3 25%， MgO 10%)，尤其是 E 玻璃更为普遍。由于玻璃纤维的延伸率较大，所以除纱线形式外还可做成各种织物，见表 1.1。

表 1.1 玻璃纤维纱及织物的工艺流程表



常用的是:无捻粗纱、平衡型织物(经纱量:纬纱量=1:1)、单向织物(4:1或7:1)和短切纤维毡。由它们基本上可制成各种性能的玻璃钢。

玻璃纤维价格低廉,国内外均已广泛应用。由于玻璃纤维在性能上还有些不足(如弹性模量较低),因而就生产出了更先进的高性能的硼、碳等纤维。

硼纤维($d \approx 100 \mu\text{m}$)是由硼蒸气在钨丝(载体, $d \approx 12.7 \mu\text{m}$)上沉积而形成的,所以硼纤维本身就可看作一种复合材料,呈玉米棒状。硼纤维的比强度(即强度 σ /重度 w)与玻璃纤维的相差不多,但其比刚度(即弹性模量 E_1 /重度 w)却是玻璃纤维的五倍(见表7.1),且有高熔点(2050°C)。由于硼纤维的价格昂贵,因此使用上受到限制。现在正在研究以其它材料(如碳丝)作载体,降低硼纤维的价格。

碳纤维($d \approx 7 \mu\text{m}$)是有机纤维[如聚丙烯腈(PAN)、尼龙等]碳化而成的。碳化温度在 1400°C 以下者为碳纤维,在 2500°C 以上者为石墨纤维。通常所称的碳纤维实际是指石墨纤维。尼龙系碳纤维的表面呈锯齿状。牌号为T300(Thornel 300)的纤维便是尼龙系碳纤维,它是由两股原纱经加捻、拼股而制成的纤维线。现在国际市场上的碳纤维大都是聚丙烯腈系碳纤维,截面呈圆形,不宜加捻。近年来,以沥青为原料生产价廉物美的高弹性模量碳纤维的工艺已实用化,为大量使用碳纤维提供了基础。硼、碳纤维都是横向同性(一种特殊形式的各向异性,后详)的纤维。有的碳纤维的线膨胀系数为负值! PAN系碳纤维是目前最重要的一种先进纤维。碳纤维的品种和牌号也很多。

芳纶纤维是60年代后期研制成的一种芳香族聚酰胺合成纤维

① 重度的单位是 N/m^3 ,密度的单位是 kg/m^3 。1 kg 质量重=1 kgf=9.81N。

维，是一种断裂伸长(延伸率)大的有机纤维。由于它具有一些独特的优点，所以很快得到了比较广泛的应用。这种纤维的线膨胀系数是负值！

碳化硅纤维有两种形式：一为多相碳化硅纤维，是60年代采用类似于制作硼纤维的工艺制成的；另一为70年代(日本)用合成有机硅聚合物的方法制成的单相碳化硅纤维(商品名为Nicalon)，性能较前者为好且成本较低。碳化硅纤维可耐高温，易与金属基体亲和，是制作金属基复合材料的良好材料。

此外，晶须也是一种极细的增强材料。为了获得所需复合材料的性能，多种纤维还可杂交使用，构成所谓的杂交纤维复合材料(后详)，它更能发挥复合材料的优越性。现在还在寻求性能更好的新型纤维材料。

二、基体材料

塑料基体材料有热固性塑料和热塑性塑料。聚酯树脂、环氧树脂、酚醛树脂、聚酰亚胺树脂和硅树脂属于前者，它们加热固化后再加热时不会软化(不可逆)；聚乙烯、聚苯乙烯、尼龙和聚醚醚酮属于后者，当它们达到转变温度时会重新软化，具有可模锻性。目前用得最多的是环氧树脂，因为它的粘合力大，制造工艺简单，固化后收缩小，硬度高，韧性好(破坏应变约为2~10%)，一般能在120°C以下长期使用。如在更高温下使用，可采用聚酰亚胺树脂。

以碳为基体(用炔热解沉积法或碳化有机物“浸渍”^①法)可制成碳纤维与碳(碳/碳)的复合材料。这种材料可在高达3000°C的温度下使用，它可能成为制造高效率燃油发动机的材料。现在很多研究工作都朝着“黑色引擎”(以碳/碳复合材料为基本材料的引

① “浸渍”二字的意义见本节三中的树脂“浸渍”。

擎)努力。碳/碳复合材料除了用以制造飞机的制动器外,已用于航天飞机的前缘与火箭燃烧室的首部。

目前,金属基体材料有铝合金、镁合金、钛合金等。金属基复合材料通常可耐高温(300°C 以上)且兼有金属的特点,如表面抗侵蚀、耐湿性好、导电、导热、不透气等。金属基复合材料正在迅速发展。金属基体的重量较大,费用也较高,是其缺点。对于颗粒复合材料,如金属陶瓷等,这里不拟讨论。

金属基复合材料的制作方法很多,大体上说,须先对纤维表面进行处理,以形成能与金属亲和并能防止高温氧化的表面层,然后用液态金属渗透法或等离子体喷射法构成复合材料。此外还有烧结法、电铸法以及从熔料中同时生成增强和基体的方法(共晶复合材料)等等。

下面叙述一下树脂基纤维增强复合材料的制作方法。

三、纤维增强叠层材料的制作过程

为了对纤维增强叠层材料进行力学分析,了解其制作过程是非常必要的。增强纤维有多种形式,如单丝、无捻粗纱、线纱,以及它们的织物、短切纤维毡、晶须等等。受力较明确和效率较高者是单丝或无捻粗纱按预定方式排列的增强形式。纤维增强树脂基复合材料的制作,有干法和湿法两种形式。

干法 先将纤维排成 $(1\sim 3)\times 10^{-2}\text{m}$ 的平行纤维带,再通过粘性液态树脂,将此有树脂“浸渍”的平行纤维带稍加温,使树脂处于乙阶树脂半熔阶段(B-阶段),而制成所谓的预浸带(样子就像现今市场上包装重物箱、商品箱用的玻璃纤维增强蜡封带),见图1.1。预浸带是制作叠层板材的中间半成品。当然,也可以制成更宽些的预浸带。

将预浸带切成所需长度,沿一个方向铺成一单层;在此单层上,又沿某一设计方向铺设第二单层;如此铺设下去,直到所需层



图 1.1 预浸带

数(可至上百层)为止。这样便形成了叠层板的初型。此一操作称为铺层。将初型置入热压罐里慢慢加热并抽出残留的气泡和挥发物。随着温度的增加,树脂会重新软化、流动,直到形成聚合物分子的交联链而逐渐开始固化。对于环氧树脂,此阶段的温度约为 135°C ,压力约为 590kPa ,历时约1小时;然后再增加温度至 177°C 并保持1~2小时,以完成固化;最后降至室温,便完成了叠层板的制作。典型固化过程的温度、压力控制见图1.2。因为大部分交联链是在最高温度下形成的,故将最高温度定为固化温度。固化温度下的叠层板可视为处于无应力自然状态。

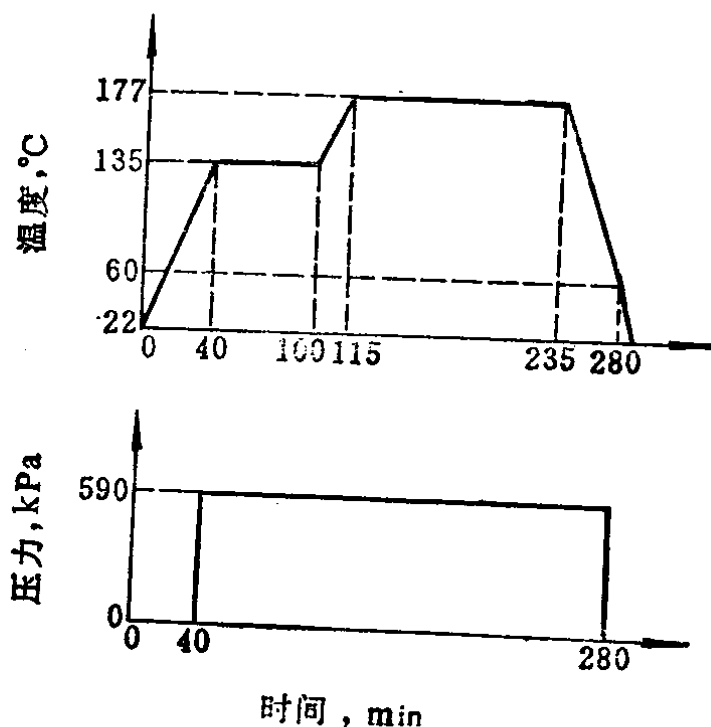


图 1.2 碳纤维/环氧树脂复合材料的典型固化期^[1]

湿法 在湿法制作中,不经过中间半成品预浸带阶段,而是直

接将有树脂浸渍的纤维一层层地绕成所需要的结构形状，然后整体固化。例如火箭的叠层胴体。

复合材料的零部件可通过各种方式与其它零部件相联接而构成整个结构。联接问题是一个很重要的问题，本书不拟讨论这一问题。

为了充分利用材料和减轻重量，可用两个薄的叠层做面板，中间的芯部材料采用轻质填料或蜂窝结构(图 1.3)。这种材料称为夹层(芯)复合材料。其道理与梁的合理截面形状相类似。

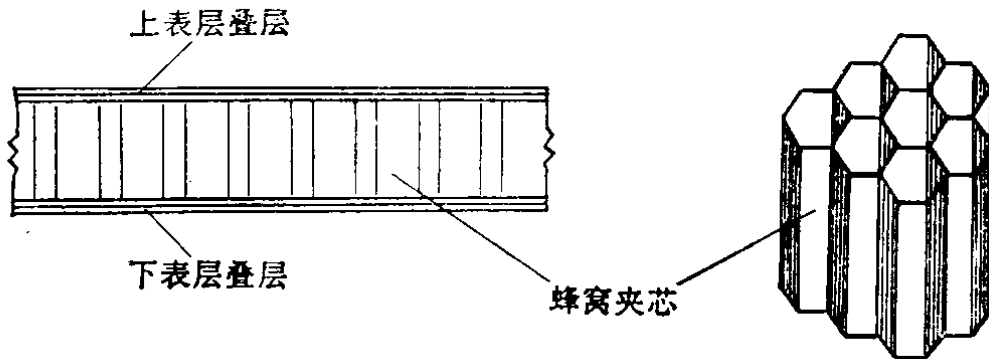


图 1.3 蜂窝夹层复合材料

§ 1.3 复合材料可定义为两层次材料·复合材料细观力学与宏观力学

现以单层为例来说明复合材料可定义为两层次材料。即从力学观点来看，需要在细观和宏观两个层次内进行理论分析的材料。这是复合材料与传统材料关键性的区别，传统材料通常只需要在宏观层次内进行理论分析。

在前述叠层中，每一层的纤维都是沿一个方向设置的，这样的一层称为一单层。此外，也还有沿两个方向(经、纬方向，如纤维布)或随机方向(如纤维毡)设置的单层。单层是复合材料的一种基本形式。力学分析时，细观地看，单层有纤维和基体两种介质(相)，必要时还须考虑到界面或介相(mesophase)的存在。由于增

强纤维极为细小而又众多,并以某种方式密布于基体内,所以又提供了对单层进行宏观分析的可能性。所谓宏观分析,指的是从宏观(某种综合平均意义下)的角度来看,单层可看作是一种宏观均匀的介质(在纤维非均匀分布时将是宏观非均匀的),有其宏观应力与应变。以后将会看到,这种宏观均匀介质具有明显的各向异性,拉、压强度不等,剪切性能很差,等等。

单层的宏观性能(如弹性模量,拉、压强度,膨胀系数等)可通过宏观实验测出。另一方面,单层的宏观性能还可通过它的细观结构与性能从理论上推算出来。这一领域称为复合材料细观力学(也可称为微观力学,但与该词原义有所区别)。所以一单层作为复合材料,它包括了细观和宏观两个层次,并通过细观力学由细观量过渡到宏观量。在工程应用上通常用的是复合材料的宏观量。

以上讨论仅对单层而言,实际上,有的纤维本身就可视作复合材料,例如硼纤维(见上节),也可以有细观和宏观两个层次。至于叠层,如不考虑垂直于叠层方向的非均匀性,可将它看作大宏观均匀介质;如将单层视为组分,考虑到垂直于叠层方向的非均匀性,叠层便是一种高一层的复合材料。在论及复合材料的各物理量时,应严格区分隶属哪一层次。

为方便起见,在以后的叙述中,凡是由纤维和基体的性能(相几何和相物理)推导出复合材料的宏观性能的力学理论,作为复合材料细观力学;凡是以宏观均匀的单层性能为基础的力学理论,作为复合材料宏观力学。单层的弹性模量、拉压强度、膨胀系数等可用细观力学的方法计算出来,而不像传统材料那样,通常靠实验测出。还有,叠层的弹性性能亦可通过宏观力学计算出来。因此,复合材料的宏观性能是可以设计的。这些便是复合材料与传统材料的显著区别,也是对材料的认识及力学分析方法的进一步深化。

§ 1.4 复合材料的优越性

近二、三十年来,航空、航天等工业的迅速发展迫切需要高性能的复合材料,这促使一门新兴学科——复合材料力学形成。商用和军用飞机制造厂家估计,近期内,一架飞机的结构重量中,复合材料可达50~70%,可减轻重量30%以上。至于汽车制造和其它工业部门使用的复合材料,其性能可次于飞机工业,但更要经济。例如采用短切纤维(SMC)^①和杂交纤维,可大大减轻结构重量,节省能源。1979年福特汽车公司展出了一辆“格拉纳达”牌轻型轿车,车中大量采用了碳纤维复合材料,使全车重量由17.8kN(4000 lb)减至12kN(2700 lb),经全面试验,效果良好。在这之后,汽车制造业中出现了复合材料热。

复合材料具有一系列的优越性,它可满足单一材料无法达到的性能要求,给人们在选择和设计材料等方面提供了更多的自由和美好的前景。

近年来复合材料在各个部门[宇航、航空、汽车、船舶、建筑、车辆、桥梁、机械、医疗(作韧带、骨骼、心脏瓣膜等的材料)、化工设备、运动器材等]的应用愈来愈广和愈来愈重要。各种复合材料的性能差别很大,一一列举其特性不属本书讨论范围,何况新的品种将会不断出现,其性能也将不断改善。

复合材料的优越性,在于它能实现设计材料的理想。由于复合材料是两层次材料,它的宏观性能可根据人们的需要通过微观性能来设计,因此可以充分发挥材料的潜力。现阶段使用的复合材料主要有下列优越的特性。

一、比强度(强度/重度)、比刚度(模量/重度)高

^① 参见 §4.5 和文献[90]。

为了说明复合材料的优越性,常常采用比强度(单向纤维复合材料沿纤维方向的拉伸强度 X /重度 w)和比刚度(模量 E_1 /重度 w)。这两个数据。这两个数据愈大,似乎可以说明材料既轻,强度和刚度又高。其实这种说法是不全面的,它只不过是说明了沿纤维方向受拉的优越性而已。如有偏离纤维方向的力存在,这两个数据就不能说明问题了。因为在偏离纤维方向,这种材料的性能是很差的。因此在多向受力的情况下,为了发挥复合材料的优越性,纤维不宜沿单一方向铺设。在纤维增强复合材料里,通常,纤维是主要受力相,基体则是保护纤维并将分散的纤维粘合成一整体,起到纤维间的传力作用。这并不是说基体不重要,例如,没有基体,纤维就无法承受压力作用。

就上述两个数据而言,碳纤维 T300/环氧 5208 的比强度是铝的 6.3 倍,比刚度是铝的 4.16 倍。目前在航空工业中使用的结构复合材料,主要还是利用它的高比刚度,例如用作飞机的尾翼和安定面等。至于比强度,由于现阶段的材料数据较为分散,兼之使用经验还不充分,因此用复合材料做飞机结构的主要受力件还有些顾虑。必须进一步改进材料工艺,提高材料水平,积累经验并提高强度分析的理论水平,以期更有效地发挥复合材料的优越性。

二、疲劳性能好

复合材料的疲劳破坏机理^[2,98]与金属等均匀材料完全不同。金属材料往往出现单一的疲劳主裂纹,主裂纹控制着最终的疲劳破坏。而复合材料往往在高应力区出现大规模的损伤(如界面脱胶、基体开裂、脱层和纤维断裂等),并与材料种类、铺层方式、疲劳载荷类型有关,破坏机理较复杂。单向复合材料一般具有较好的拉-拉疲劳性能,且有明显的破坏预兆。至于其他形式的材料,亦可期望作出好的材料设计,以承受各种类型的疲劳载荷。

三、减振性能好