

FUHE CAILIAO
LIXUE XINGNENG

王兴业 唐羽章 编著

复合材料力学性能

国防科技大学出版社



复合材料力学性能



王兴业 唐羽章 编著

国防科技大学出版社

内 容 简 介

复合材料作为一种新型材料已在现代科学技术的许多领域得到广泛应用。本书从各向异性弹性力学入手,系统地论述了复合材料的刚度特性、强度特性以及复合材料的细观力学分析。全书有绪论、各向异性体弹性力学基础、单向复合材料的刚度分析、层合复合材料的刚度分析、复合材料应力分析、复合材料强度特性、复合材料的细观力学特性等部分。各章末附有习题,书末附有典型问题的计算机程序。

本书不仅编入了有关复合材料力学性能分析计算的基本知识,而且总结了作者近年来的科研成果。

本书可作为理工院校本科生教材,亦可供教师、研究生和工程技术人员参考。

复合材料力学性能

王兴业 唐羽章 编著

责任编辑:马立群

*

国防科技大学出版社出版发行

湖南省新华书店经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本: 787×1092 1/32 印张: 13 字数: 303 千字

1988年6月第1版 1988年6月第1次印刷 印数: 7 000册

ISBN 7-81024-025-0

TQ·2 定价: 2.20元

前 言

复合材料是由两种或两种以上原材料复合而成的一类多相材料。这种新型材料的性能不同于其组分材料，它可以根据使用条件的要求进行设计以满足多种特殊用途，从而能够极大地提高工程结构的效能。

现代复合材料自本世纪40年代出现以来，已经得到了飞速的发展。它最初在航空、航宇等尖端技术领域崭露头脚，继而在建筑、化工、能源、交通等部门大显身手，迄今已推广应用于生产和生活的各个领域，成为现代社会不可或缺的重要物质基础。复合材料是现代科学技术发展的产物，它既是多种学科成果的综合，又与其他学科互相渗透，互相推动，为解决现代科技发展中愈来愈苛刻的材料问题立下了汗马功劳，业已成为新技术革命的前沿和支柱。社会的进步，始终是和当时新材料的发明与应用密切相关的，人类的文明发展史，曾经用材料作为划分时代的标志，例如石器时代、青铜时代、铁器时代……。可以预见，复合材料的发展，必将把人类文明推向更高的境界。

几种材料的“复合”，改变并提高了单一材料的物理、化学、力学及人们所要求的其他性能，可以解决工程结构中常规材料难以解决的关键问题，而这种复合材料效能与潜力的充分发挥，又有赖于对其力学、物理、化学性能及复合机理、设计方法、成型工艺和性能测试等的深入研究，因此，这一新兴的

科技领域吸引了大批有志、有识、有为之士辛勤耕耘。材料学家、物理学家、化学家、力学家……在这里找到了发挥聪明才智的广阔天地，他们从不同角度对于复合材料科学的探索和对于同一课题的通力合作，正象几种不同材料复合以后所显示的复合效应一样，在知识与人才方面也充分显示了“复合”的优势。同时，一代具有现代科学技术知识的新型复合材料科技专家，也正在这片沃土上茁壮成长，预示着极为光明灿烂的前景。

为了复合材料的研究、设计、生产和应用的高级技术人才的培养，也为了使复合材料能尽快地在工程技术中推广应用，我们从70年代中期起曾为大学本科生和结构设计部门的工程技术人员讲授“复合材料力学性能”这门课程。当时复合材料力学在国内尚未形成体系，只好东鳞西爪地拼凑出几种讲义。近十年来我们经过努力，几经修改形成了现在这本教材。这里溶有国内外同行的劳动，也有我们自己在教学和科研中的心得体会和成果。但愿它象一株幼苗，能为复合材料学科的大花园增添一丝新绿。

本书在编写过程中曾得到许多同志的帮助，周必飞同志整理了习题和个别章节，誊写了全部手稿，谢仁华同志提供了计算机程序，在此谨向他们表示衷心的感谢。

由于我们的水平有限，书中疏漏与错误之处在所难免，恳请读者提出批评指正。

王兴业

唐羽章

1988年3月于长沙

目 录

前 言

第一章 绪论

- § 1-1 复合材料介绍 1
- § 1-2 复合材料力学分析与设计的特点 15

第二章 各向异性体弹性力学基本方程

- § 2-1 应力 22
- § 2-2 应力变换 26
- § 2-3 应变 33
- § 2-4 应变变换 37
- § 2-5 应力—应变关系 41

第二章 习题 51

第三章 单向复合材料的刚度

- § 3-1 引言 53
- § 3-2 单向复合材料的正轴刚度 57
- § 3-3 单向复合材料的偏轴刚度与偏轴应力—应变关系 67
- § 3-4 单向复合材料偏轴模量变换 70
- § 3-5 单向复合材料偏轴模量的特点 78
- § 3-6 单向复合材料的偏轴柔量 87
- § 3-7 偏轴工程常数 95

第三章 习题 104

第四章 层合板的面内刚度

- § 4-1 引言 108
- § 4-2 层合板的应力—应变关系 114
- § 4-3 层合板的工程常数 116
- § 4-4 层合板面内模量的计算 118

§ 4-5	层合板正则化面内模量	121
§ 4-6	层合板面内模量变换	124
§ 4-7	典型层合板面内模量	134
第四章	习题	160
第五章 层合板的弯曲刚度		
§ 5-1	引言	162
§ 5-2	层合板的广义变形	164
§ 5-3	层合板的应力—应变关系	168
§ 5-4	单向板的弯曲特性	175
§ 5-5	对称层合板的弯曲模量	178
§ 5-6	夹芯层合板的弯曲模量	185
§ 5-7	一般层合板的模量	188
§ 5-8	平行移轴定理及其应用	195
§ 5-9	典型层合板的弯曲刚度	201
第五章	习题	218
第六章 复合材料层合板的应力分析		
§ 6-1	层合板的热应力	222
§ 6-2	考虑温度变化时层合板的应力计算	227
§ 6-3	铺层应力计算实例	229
§ 6-4	层合板的层间应力	246
§ 6-5	边缘效应产生的层间应力	261
§ 6-6	正交层合板的边缘效应	268
§ 6-7	层间应力对层合板性能的影响	270
第六章	习题	272
第七章 复合材料的强度准则		
§ 7-1	引言	274
§ 7-2	最大应力准则和最大应变准则	278
§ 7-3	蔡——希尔 (Tsai—Hill) 强度准则	283
§ 7-4	蔡——吴张量多项式准则	294
§ 7-5	蔡——吴准则方程强度参数的变换	307
§ 7-6	强度比方程	312

§ 7-7 层合板的强度分析	315
第七章 习题	326
第八章 复合材料的细观力学	
§ 8-1 引言	329
§ 8-2 复合材料的密度、应力和应变	331
§ 8-3 用材料力学方法确定复合材料的工程常数	336
§ 8-4 用弹性力学方法确定复合材料的工程常数	345
§ 8-5 用半经验法确定复合材料的工程常数	364
§ 8-6 用材料力学方法确定复合材料的强度	366
§ 8-7 用材料力学方法确定短纤维复合材料的模量和强度	382
第八章 习题	391
附 录	

第一章 绪 论

§ 1-1 复合材料介绍

一、复合材料的定义

复合材料是用两种或两种以上不同性质与不同形态的原材料通过复合工艺组合而成的多相材料。

通常复合材料中至少有两相，其中一相在复合材料中是连续的，称为基体，另外一相被基体所包容，称为增强相（或增强材料）。增强相与基体之间的交接面称为界面。复合材料中的各个相，在界面上可以物理地区分开。许多学者在对复合材料微观结构的深入研究发现，界面附近的基体和增强材料由于复合时的化学与物理原因，具有不同于基体及增强材料本体的复杂结构，这一部分的结构又是随离开交界面的距离而逐渐向本体结构变化的。因此，在更精细的研究中，有人将界面附近的这一结构与性能变化的区域也算作复合材料的一个相，即界面相。如果采用这一概念，则应该说复合材料中通常至少有三相。

复合材料既保持了原材料的主要特点，又往往具备原材料中所没有的新的特性。通过形成复合材料，可以在下列某些方面获得经过改善的性能，诸如：强度、刚度、韧性、硬度、耐蚀、耐磨、重量、寿命、外观、抗高低温、减振、导热或绝热……等。由于复合后的性能取决于原材料的种类、形态、比

例、配置及复合工艺条件等因素，通过人工调节和控制这些因素，可望获得不同性能的复合材料。因而复合材料是一类性能可以设计的新颖材料，能够在广阔的范围内调节其性能以满足使用要求。

二、复合材料的历史及发展现状

在我们的介绍中，排除了那些非人工而具有复合材料形态的天然材料，例如：竹、木、动物的血管、骨骼……等，只讨论那些经过人为加工制成的复合材料。

从现存的历史陈述和史籍上看，复合材料的应用可追溯到人类文明的前期。在距今七千余年以前陕西西安半坡村原始公社的遗址中，人们发现了用草拌泥所做的建筑材料。草拌泥的复合思想，无疑是受了燕雀衔泥筑巢的启发，这也是仿生学的早期实例之一。草拌泥制造的墙壁或砖坯，性能既优于草，又优于泥。在这个最原始的人造的复合材料中，泥是连续相（基体），草（麦秸或稻草）则起着增强作用。套用现代复合材料的术语，它可以称作草增强泥复合材料。

再一个古老的例子是漆器。我国在四千多年前的虞夏时代就有了使用漆器的记载。其中制做珍贵用具和佛象的脱胎漆器，是我国古代的辉煌工艺成就之一。前几年从日本回国省亲的唐代鉴真法师的座像，虽然经历了一千余年，仍然保持完好，可见这类复合材料具有优良的抗老化性能。脱胎漆器是在底胎（木骨和泥塑）上逐层铺复麻布和涂抹生漆，待漆干固化，挖去底胎，即得到与底胎形状相同的漆器。此时生漆是基体，麻布是增强材料。其他的例子还有：三合土、多层板、早期的合金、混凝土……，我国民间的布鞋底，则是三向编织复合材料的雏型。

近代复合材料的发展，从基体来看，最先是软基体，然后

逐次为较硬和硬的基体，即从橡胶→塑料→金属→陶瓷。制造技术的困难程度，也按这个顺序增大。兹分述如下。

纤维增强橡胶 这类复合材料的两个典型产品是轮胎和纤维增强橡胶膜。充气轮胎从1888年发明和1896年应用于汽车以来，至今支撑着世界汽车工业的发展。曾采用过的增强材料有：棉线、钢丝、尼龙丝、聚酯纤维、玻璃纤维、芳纶；为了提高轮胎的耐磨性，在橡胶基体中加入了颗粒状碳黑。按复合材料定义，这实际是一种三相复合材料，即纤维—碳黑增强橡胶。纤维增强橡胶膜又称橡胶布，可用于制作气球、飞船气囊、帐篷、救生艇、潜水服、雨衣以及吹胀式建筑、吹胀式滑翔飞机和宇航员服等。在纤维增强橡胶膜中，纤维（或其织物）用于提供强度，承担外力，保持尺寸形状，橡胶用于固定和保护纤维，并保证气密或水密性。

纤维增强塑料 用做此类复合材料的纤维有棉、麻、石棉、尼龙丝及玻璃纤维等，其中应用最为广泛的是玻璃纤维。玻璃纤维增强塑料的比强度和比刚度均超过通常的钢材，在我国俗称为“玻璃钢”。美国从本世纪40年代起开始生产玻璃钢，并迅速发展成一个工业部门。日本的玻璃钢从50年代中期开始工业化生产。我国的玻璃钢工业开始于1958年，最初在建筑和军工部门，现在已经渗透到了国民经济的各个领域。目前，我国已经建成许多专门从事玻璃钢的专业研究所和生产厂家，各使用部门也设有相应的研究机构和专用生产车间，已形成了较为完整的包括研究、设计与生产的体系，并为国防和民用工业提供了一大批成果。目前，玻璃纤维增强复合材料在航天工程与战略武器上正趋向于被性能更好的高级复合材料所代替，但作为第一代新型复合材料，它在国民经济中仍有着重大价值，尤其在节省资源（代替稀贵金属及木材）和防腐工程

中,玻璃钢的产量和用途正在不断扩大,发展势头喜人。玻璃纤维的强度高、价格低、来源丰富、工艺性好,其使用范围越来越广泛。国内现在供复合使用的玻璃纤维品种有中碱纤维、无碱纤维、高强纤维和高硅氧纤维及其织物等,它们的性能与国外类似产品的比较如表 1-1 所示。当前玻璃纤维及其织物多用作电气绝缘材料和天然纤维的代用材料,用于制造复合材料的玻璃纤维,仅仅是其中很少一部分。

表 1-1 我国玻璃纤维与国外类似玻璃纤维的性能比较

国产玻璃纤维		相当的国外玻璃纤维	
牌号	强度GPa (kgf/mm ²)	牌号	强度GPa (kgf/mm ²)
中碱 5	2.63 (268)	C 玻璃 (英)	3.04 (310)
无碱 1	3.06 (312)	E 玻璃 (美)	3.43 (350)
高强 2	4.02 (410)	S-994 (美)	4.56 (465)

玻璃纤维增强复合材料按照其成型方法大体上可分为三类:纤维缠绕、高压成型(模压或层压)和低压成型(手糊或其他方法)。70年代初期以纤维缠绕成型工艺为主的玻璃钢气瓶在全国很多地方都有研究和生产,但由于当时对产品设计和材料性能缺乏充分研究,致使某些产品在质量上存在着一些缺陷,未能大量推广使用。这一时期群众性的研制为纤维缠绕成型技术提出了一系列需要深入研究的课题。经过自那时以来的持续努力,现在缠绕成型的玻璃纤维增强复合材料产品的质量有了显著提高,品种不断增加,使用范围遍及许多领域。典型产品有固体火箭发动机的燃烧室壳体、槽车、大容积贮罐、气

瓶、液化石油气贮罐、单兵火箭发射筒等。纤维缠绕成型的产品，大都做为结构的主要承力件。低压成型的玻璃纤维增强复合材料，基本上以手糊法为主，在建筑、运输、化工等方面均获得广泛的应用。典型产品有：波纹瓦、冷却塔、建筑预制组件、卫生间成套设备、食品工业用大容积反应罐、化工厂合成氨碳化塔衬里、氯化氢回收塔衬里、防腐层以及贮液反应槽罐、高腐蚀介质的排风扇叶片等。目前正用手糊成型法试制汽车的前端板、发动机罩、车篷、窗框、车门、挡泥板及内部装饰件。手糊成型的玻璃钢赛艇及小型船只已经投入使用。低压成型的另一种重要形式——短切纤维喷射成型设备与技术，近年也已从国外引进，经过消化吸收，现在已能生产出高质量的合格产品。高压成型的玻璃纤维增强复合材料产品在电气绝缘方面早已应用。近年来出现的一些新型模塑料，如片状膜塑料（SMC）、高强模塑料（HMC、XMC）及增强聚丙烯模塑料（Azdel）等，发展很快并被广泛使用。用这种模塑料可模压成型汽车的齿轮、活塞、传动机件、油泵以及承载支架等。模压玻璃钢枪托可以节省稀缺的优质木材。以玻璃纤维织物增强树脂为面板的蜂窝夹层及泡沫夹层材料已被公认是性能良好的结构材料。我国已用玻璃蜂窝夹层材料制成直升飞机的旋翼和直径几十米的雷达天线罩。综合运用纤维缠绕工艺、模压工艺和夹层结构的构件也在研制中，并用于水下管道、石油工业、采矿工业以及受外压、侧压和其他一些特殊载荷的部件。用拉拔工艺制造的单向纤维复合材料杆件，具有极高的强度，已作为承力拉杆及电气绝缘杆件而崭露头角。

50年代到60年代初期，玻璃纤维增强复合材料曾大量应用于导弹武器和航天飞行器上。用玻璃纤维缠绕成型的大型固体火箭发动机燃烧室，比金属结构减重一半以上，如美国的

北极星—Ⅰ壳体由S-994纤维缠绕代替高强合金钢结构，其重量由原238kg(524 lb)减轻为97kg(214 lb)，使该导弹的射程由1600km增加到2400km。高硅氧酚醛缠绕复合材料可经受几千度高温气流的烧蚀与冲刷，是一种良好的导弹头部大面积防热材料。60年代中期，随着我国战略导弹及空间技术的发展，高强、高弹玻璃纤维缠绕结构已经用于制造固体火箭发动机壳体和各种蓄压器，玻璃纤维增强复合材料已用于制造导弹弹头的防热结构和回收卫星的再入舱。

由于玻璃纤维增强复合材料的比刚度及其他一些性能尚不够理想，在对重量较为敏感、工作条件较为苛刻的尖端技术领域已逐渐被新的复合材料所代替。但玻璃纤维增强复合材料仍不失为一种性能良好的材料，特别由于它的原料来源丰富、价格低廉，因而正在我国国民经济的各个领域继续发挥着日益重大的作用。

为了提高复合材料的性能，研究和发展了许多新型的纤维和晶须材料，例如碳纤维、硼纤维、芳纶、碳化硅纤维，以及兰宝石(Al_2O_3)晶须、碳化硅晶须……等。用这一类新型纤维(晶须)作增强材料的复合材料，称为高级复合材料(Advanced Composite Materials)。

爱迪生首次制成碳纤维并用做白炽灯丝。早期的碳纤维强度很低而且制造困难，直到1930年，美国赖特—帕特森空军基地将人造丝碳化制成了具有较高机械性能的碳纤维，从此这种材料开始了它的新生命。1959年美国碳化物公司开始大批量生产，以后日本和英国又分别以聚丙烯腈为原料研制成性能更好的碳纤维，加快了它的发展速度。目前工业先进国家已普遍建成了碳纤维的生产体系，尤其是日本，近年来不论产品的数量与质量均已远远超过了美、英、法、西德和苏联而成为碳纤维

的主要输出国。碳纤维的优异性能表现在密度低、强度高、模量高、热膨胀系数小并耐多种介质的腐蚀，是一种较为理想的增强材料。现代碳纤维增强复合材料已用做结构材料、隔热材料和阻尼减振材料，广泛应用于航空及航天飞行器上。美国自前已用碳/环氧复合材料制造飞机的机身、翼尖、安定面、起落架、舱门、地板等构件。全复合材料（主要是碳/环氧复合材料）的飞机已经试飞成功。有的公司还制订了《高级复合材料飞机设计标准》。在导弹和航天飞行器上应用碳纤维增强复合材料更多，如三叉戟导弹的仪器舱、级间段、固体发动机的燃烧室、各种压力容器、HEAO-B宇宙飞行器的光学工作台、宇宙望远镜的构架、喇叭天线、太阳能电池基板等。据报导，美国的航天飞机轨道器的舱门使用了碳纤维增强复合材料。碳纤维增强耐热树脂复合材料（如碳/聚酰亚胺，碳/聚砜等）可在 300°C 以上高温长期使用，这种材料已用来做发动机的风扇叶片和喷气发动机罩等高温工作构件。

我国对碳纤维的发展开始于60年代中期。碳纤维增强树脂复合材料，首先被用于航空与航天飞行器的某些构件上。随着新型复合材料对其日益迫切的需要，国家领导机关曾召开了专门会议，规划部署了对碳纤维及其复合材料的研究和生产，并从国外引进了先进的碳纤维生产成套技术及设备。目前我国碳纤维的质量和产量正不断提高，价格有所下降。在多年来研制玻璃纤维增强复合材料的基础上，开展了对碳纤维复合材料的基本性能、典型结构、成型工艺及结构设计和强度分析等方面的研究。开展研制或投入应用的有飞机发动机风扇叶片、进气道外侧壁板、舱口盖、垂直尾翼及水平尾翼翼面、直升飞机旋翼、卫星壳体、太阳能电池基板、天线及天线支架等。

近来，世界许多国家已逐渐将碳纤维复合材料应用于民用

工业。如美国已用碳纤维复合材料制造汽车的车身、底盘和大梁等主要承力构件。试验表明, 由于采用碳纤维复合材料, 一辆普通轿车重量可由1800kg减少到680kg, 油耗由0.28L/km降低到0.1L/km, 在节约能源方面的意义是值得重视的。我国将碳纤维增强复合材料用于民用工业的研究已做了一些工作。在机械行业中已用来制造离心机主要部件、大功率发电机的护环、通讯系统的天线反射器轴承、密封件、刹车片以及人造心脏瓣膜等等。但由于我国碳纤维的产量不高且价格较贵, 在某种程度上限制了它的应用。

碳纤维复合材料是第二代复合材料的典型代表, 它不仅性能良好, 并由于在原材料和工艺方面的改进, 产品的价格可望迅速下降。国际市场上1965年碳纤维的售价是1100美元/kg(500美元lb), 而1980年则降为约44美元/kg (20美元/lb)。我国碳纤维的用量目前虽然不高, 但价格也在明显下降。

硼纤维比模量较高, 这对于要求高刚度的构件的设计者来说是极有吸引力的。60年代初期我国就开始了对硼纤维及其复合材料的研究, 但由于硼纤维的制备工艺复杂, 难于实现大规模生产, 且价格昂贵, 因而一直局限于实验室研究, 没有投入使用。后来由于碳纤维及碳化硅纤维的出现, 并且这些纤维的复合材料的性能大都与硼纤维复合材料接近, 而在组织工业化生产和价格等方面都优于硼纤维, 因此已没有大量发展硼纤维的必要。美国仅有AVCO公司一家继续供应那些原来采用硼纤维复合材料的飞机制造厂, 以维持原设计构件的生产。

1968年美国杜邦公司研制成功一种高强度、高模量的有机纤维——芳纶。1972年正式投产, 商品名称为Kevlar, 产品规格有Kevlar、Kevlar—29和Kevlar—49等几种。前两种多作为增强橡胶的帘子线, 制造汽车轮胎和防弹衣等。Kevlar—49则

主要用于制造树脂基复合材料。芳纶抗拉强度大、弹性模量较高、密度小且易于同树脂亲合，是制造结构复合材料的良好增强材料。芳纶与其他几种纤维的性能比较如表 1-2。由于芳纶的比强度高于其他几种纤维，现已被成功地用于航天、航空、交通、运输等部门。美国近年来已在飞机和宇宙飞行器上大量用它制造受力或非主要受力的构件，在减轻重量提高强度方面收到了良好效果。在飞机上用芳纶/环氧复合材料制成了机翼与机身的整流片、发动机整流罩、机翼的前后翼缘、副翼、襟翼、升降舵与方向舵以及应急气瓶等构件。由于芳纶复合材料具有良好的透波性，因而大量用来制造飞机上的雷达罩。目前芳纶已完全代替高强玻璃纤维缠绕成型大型固体火箭发动机燃烧室壳体。

表 1-2 几种常用纤维性能的比较

材料 性能	芳纶	E-玻璃	碳纤维 T-300	硼纤维	碳化硅纤维		
					Mark-I	Mark-II	Mark-III
密度 g/cm^3	1.44	2.54	1.80	2.60	2.50	2.50	2.50
拉伸强度 GPa	2.75	2.40	2.80	3.43	2.94	3.43	1.96
模量 GPa	137	69	231	392	196	196	147
比强度 10^7cm	1.94	0.965	1.58	1.34	1.2	1.4	0.8
比模量 10^9cm	0.97	0.276	1.30	1.54	0.8	0.8	0.6

我国已经开始研制芳纶及其复合材料。在原材料的合成、纤维生产及复合材料的应用等方面，进行了大量的工作。

碳化硅纤维是近年来发展起来的一种性能较好的纤维。它