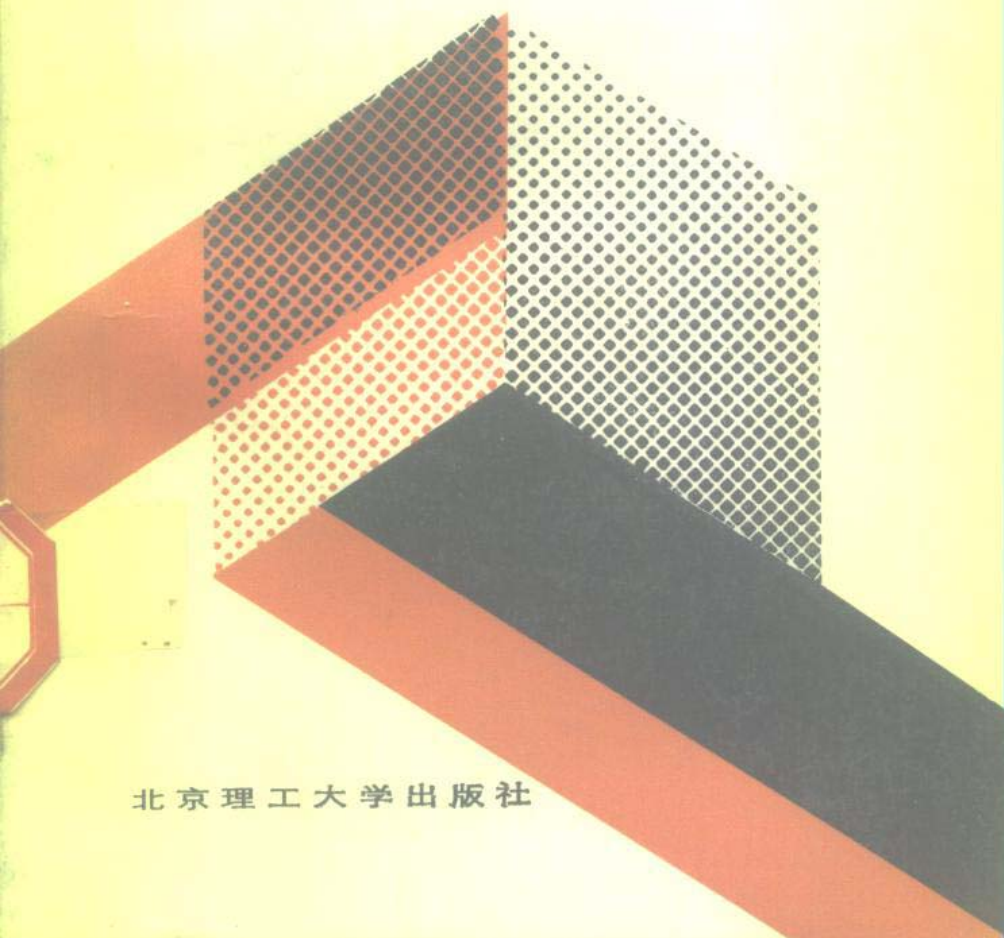


复合材料结构的 力学性能

张双寅 刘济庆 于晓霞 蔡良武 编著



北京理工大学出版社

TB 33

Z. 24

复合材料结构的力学性能

张双寅 刘济庆 编著
于晓霞 蔡良武

北京理工大学出版社

(京)新登字149号

2232/13
内 容 简 介

本书从宏观力学角度出发,向读者提供复合材料结构的力学性能方面的全面知识,包括层合板、梁(杆、柱)与壳的变形、稳定和振动特性的分析与计算方法,供工程设计人员使用。为了使读者更好地理解复合材料结构的力学性能,也对复合材料及其力学的基本知识进行了介绍,并系统地提供了复合材料各向异性弹性理论和层合板理论的各种力学关系式,其中包括考虑横向剪切变形,各种耦合效应与湿、热效应的极有实用价值的本构关系式。此外,本书还详细介绍了复杂结构力学分析的能量法,强度理论,接头力学分析与强度计算,以及结构服役阶段的蠕变、断裂和疲劳问题。

本书可供研究、设计与使用复合材料结构的工程技术人员参考,也可作为工科大学研究生与教师的参考书。

复合材料结构的力学性能

张双寅 刘济庆 编著
于晓霞 蔡良武

*

北京理工大学出版社出版发行

各地新华书店经售

三河县潮河印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 14.875 印张 333千字

1992年12月第一版 1992年12月第一次印刷

ISBN 7-81013-601-1/O·91

印数: 1—3000 册 定价: 7.40 元

前 言

近30年来,复合材料在许多领域里的研究与应用取得了飞速发展。为了设计制造高质量的复合材料结构,工程设计人员亟需掌握复合材料结构力学性能方面的系统知识,学会各类常用结构的力学分析与强度计算方法。于是,许多高等院校相继开设了复合材料力学方面的选修课。

本书的主要目的在于培养复合材料结构设计师,向他们提供一个科学的理性思维方法,使他们对这类结构的力学特性与设计计算方法有更好的了解。着眼点不在于探讨实现复合材料所需性能的物理机制和微观力学过程。本书根据这一原则选择与编排各章内容。

全书共十章,可分为三个单元。前三章为第一个单元,重点介绍复合材料及其力学性能的基本知识。第一章为绪论,扼要地介绍了复合材料及其力学概况。第二章讲述了复合材料的各向异性弹性理论与层合板理论,介绍了包括各种耦合效应,横向剪切变形以及湿、热效应的本构关系式。第三章力图全面、系统地介绍复合材料各种力学性能参数的测试方法,这对工程师们了解与获取这些材料特性参数是十分必要的。

第四、五、六、七章为第二个单元。前三章分别讨论层合板、梁(杆、柱)与壳这些典型简单结构的力学性能,介绍了基本理论,推导了基本方程,并以实例介绍了这些结构元件的变形、稳定与振动特性的计算方法。第七章讲述了复杂问题的能量解法。对于各种耦合因素和复杂边界条件的

板、壳问题，能量法是获取近似解的强有力工具。从本书的宗旨来看，这个单元是全书的核心内容。

本书的第三个单元由最后三章组成，讨论了与结构设计和应用密切相关的三方面问题。第八章介绍强度理论，包括单层板和层合板强度预测方法；第九章是关于复合材料结构的接头力学问题，介绍了胶接头与机械接头的主要力学模型、强度测试和经验公式。最后一章讲述了涉及复合材料结构可靠性的三个专题：蠕变、断裂与疲劳。由于这三个专题内容很多，研究进展迅速，这里只选择最重要、较成熟的理论介绍给读者，力求深入浅出，精简扼要。

在编排各章内容时，尽量避免与国内同类书籍内容重复；关于复合材料力学的基础知识，意在少而精，而用较多的篇幅讲述可直接用于结构设计的计算方法与公式。从而使它既是工科院校学生与教师的参考书，又可供结构设计师们参考。

本书的起点较高，从基本方程到各类结构分析都考虑了各种耦合效应，横向变形与湿、热效应。既照顾到基础知识的系统性，又尽可能联系工程实际问题，反映80年代的最新进展；同时也尽可能包括编著者们的研究成果。本书宜于学过普通材料力学，有板、壳力学初步知识的人阅读。若略懂一点复合材料及其力学的入门知识，读起来更为合适。

本书由张双寅构思、倡议并拟定编著大纲。第一、三、九章由张双寅负责；第二、八章由刘济庆负责；蔡良武和张双寅负责第五、七、十章；第四、六两章由于晓霞、刘济庆和张双寅联合完成。赵旭生和张志民审阅了全部书稿，提出了许多宝贵意见，特此致谢。

由于本书的许多内容正处于不断创新发展阶段，并限于

我们的知识水平与工作经验，不妥之处在所难免，欢迎批评指正。

编著者

1990年5月

目 录

第一章 复合材料导论

§ 1-1	复合材料发展简史	1
§ 1-2	复合材料的定义与分类	3
§ 1-3	纤维增强复合 材料	6
§ 1-4	复合材料的制造 工 艺	10
§ 1-5	复合材料力学性能 概 论	16
§ 1-6	复合材料应用现状与发展 前 景	23
§ 1-7	复合材料力学的主要参考书目及出 版 物	33

第二章 各向异性弹性理论和层板理论

§ 2-1	概 述	42
§ 2-2	各向异性弹性刚度矩阵和柔度矩阵	43
§ 2-3	弹性应 变 能	46
§ 2-4	具有弹性对称性时本构关系的 简 化	49
§ 2-5	正交异性材料弹性常数的物理 意 义	57
§ 2-6	弹性常数 预 测	60
§ 2-7	热效应和湿热 效 应	62
§ 2-8	复合材料单层板的弹性 特 性	65
§ 2-9	层合板 分 析	77
参考文献		109

第三章 复合材料性能参数的测试方法

§ 3-1	引 言	110
§ 3-2	拉伸 试 验	111

§ 3-3 弯曲 试验	120
§ 3-4 压缩 试验	126
§ 3-5 平面剪切 试验	133
§ 3-6 横向剪切 试验	145
§ 3-7 层间拉伸强度的 测定	149
§ 3-8 Iosipescu剪切与Arcan剪切夹具	152
§ 3-9 双轴加载试验	155
§ 3-10 结束语	161
参考文献	161

第四章 复合材料平板理论

§ 4-1 引言	167
§ 4-2 薄板理论的平衡方程	168
§ 4-3 复合材料层合板经典弯曲理论	170
§ 4-4 纳维尔解法	173
§ 4-5 复合材料层合板的利维解	181
§ 4-6 简支矩形板的利维解	184
§ 4-7 中面对称、无弯扭耦合的复合材料板弯曲的摄动解法	185
§ 4-8 考虑弯扭耦合影响的中面对称层合板弯曲的摄动解法	188
§ 4-9 考虑横向剪切影响的层合板弯曲问题	192
§ 4-10 层合板弯曲问题的高阶理论	197
§ 4-11 层合板的自由振动	210
§ 4-12 层合板的弹性稳定性问题	213
§ 4-13 考虑横向剪切变形影响的层合板振动问题	219
§ 4-14 复合材料箱形梁	226
§ 4-15 结束语	229
参考文献	230

第五章 复合材料梁、柱、杆

§ 5-1	简单理论的建立	232
§ 5-2	一些简单问题的解	235
§ 5-3	层合梁弯曲的高等理论	240
§ 5-4	轴向受载的简支梁	251
§ 5-5	复合材料梁的本征值问题 ——自由振动与弹性稳定性	253
§ 5-6	复合材料梁的热弹性效应	260

第六章 复合材料圆柱壳

§ 6-1	引言	263
§ 6-2	复合材料圆柱壳的一般方程	263
§ 6-3	轴对称层合圆柱壳的应力函数解	267
§ 6-4	轴对称载荷作用下中面对称铺层圆柱壳的一般解	273
§ 6-5	复合材料圆柱壳的屈曲	280
§ 6-6	复合材料圆柱壳的自振频率	295
§ 6-7	小结	293
参考文献		299

第七章 复合材料结构分析的能量法

§ 7-1	引言	301
§ 7-2	最小势能原理	302
§ 7-3	梁的分析	303
§ 7-4	受侧向载荷与湿热载荷的复合材料矩形板	306
§ 7-5	一般复合材料板在考虑湿热效应时的 弹性稳定性问题	321
§ 7-6	叠层复合材料圆柱壳的最小势能原理	332
参考文献		343

第八章 强度理论

§ 8-1 各向异性强度理论	346
§ 8-2 单层板强度条件	353
§ 8-3 层合板强度分析	361
参考文献	375

第九章 复合材料结构的连接问题

§ 9-1 引言	377
§ 9-2 胶接接头	378
§ 9-3 机械连接接头	408
§ 9-4 结束语	420
参考文献	422

第十章 其它专题

§ 10-1 引言	425
§ 10-2 复合材料的蠕变性能	426
§ 10-3 复合材料的断裂	434
§ 10-4 复合材料的疲劳	452
参考文献	461

主要参考书目

第一章 复合材料导论

§ 1-1 复合材料发展简史

复合材料是由两种或多种材料组成的新材料，它具有悠久的历史。人类究竟何时开始应用这类材料无人知晓，据记载，世界上几大文明发祥地都在几千年前就开始使用复合材料了。譬如，我们中华民族的祖先使用草秸增强泥巴建造茅屋；古犹太人用稻草增强泥坯盖房子；古埃及人制造木乃伊等等，这些都是最早制造与应用复合材料的实例。后来，复合材料发展愈来愈讲究，例如，中国南北朝时代发明的漆器就是典型的复合材料；中世纪欧洲武士们的头盔也作成叠层结构以提高刚度与强度。近代复合材料的代表是木质胶合板与帘线增强橡胶制作的汽车轮胎等；胶合板通过对木材叠层提高了刚度与强度，并且改善了热膨胀性能与受潮后的容胀特性。

近30年来先进复合材料(Advanced Composite Materials)得到了突飞猛进的发展。首先是玻璃纤维增强塑料(俗称玻璃钢)应用于工业，建筑与家用器具。由于它重量轻，比强度大，在本世纪60年代就开始用于制造滑翔飞机。碳纤维(石墨纤维)、硼纤维与有机纤维的相继问世，使先进复合材料发展到一个崭新的阶段。由于碳纤维增强环氧复合材料的比强度与比刚度都明显优于传统金属材料——高强钢与高强铝合金，特别适合于航空和航天工业中应用。这类材料

从80年代开始用于飞机、火箭和卫星。1987年美国两名男女飞行员驾驶超轻型飞机“旅行者”号(Voyager)创下历时9天航程26000英里不着陆不加油环地球一周的飞行纪录，这架飞机的主要承力构件就是由碳纤维复合材料制造的，这在复合材料发展史上树起了一座新的里程碑。目前，发达国家的军用飞机上许多主承力件，包括机翼、尾翼与机身已普遍采用复合材料制造，大型洲际民航机的部分承力件也开始应用复合材料。在航天飞行器中，复合材料的应用也很多，例如导弹的锥壳结构、卫星接口支架、整流罩的前锥、侧锥和柱段；卫星消旋天线支撑筒、水平梁等都已采用碳纤维复合材料。

近10多年来，除了树脂基（聚合物基）复合材料取得长足进步之外，金属基与陶瓷基复合材料也日益受到人们的重视。这两类复合材料的主要潜在应用领域是航空发动机。由于燃气涡轮发动机的燃烧温度非常之高，现用耐热合金材料的耐热性能已经达到了极限，限制了燃气温度的进一步提高，因而大大限制了发动机工作效率的进一步提高。据这方面的专家们预测，如果采用陶瓷复合材料代替金属制造燃气轮机叶片，可以大大提高燃气温度，发动机工作效率可成倍提高。由于陶瓷基与金属基复合材料的工艺复杂，发展与应用水平远未达到聚合物基复合材料的水平。当前，已有小型陶瓷基复合材料的零件用于汽车发动机上，正在试运行。这类材料在飞机上的应用也有报道。

当前复合材料发展的另一特点是，随着复合材料与其构件制造工艺的不断改进和完善，市场销量的不断增大，成本不断降低，它在民用工业中的应用正获得愈来愈大的发展。陆上与海上运输、化工、运动器械与家用器具等工业领域中

都有相当大的用量，并且用量越来越大。可以毫不夸张地说，21世纪将是复合材料时代。

回顾复合材料的发展史，不难看出，它的每一个成就都离不开科技水平的提高，大量新思想、新工艺、新方法的不断涌现推动着它前进。“科学技术是第一生产力”在这里得到充分体现。

§ 1-2 复合材料的定义与分类

一、 复合材料定义

为了便于向读者介绍高性能（先进）复合材料，有必要一开始就对复合材料下个明确的定义。复合材料的定义有多个，最简单、最常见的定义是：“复合材料是由两种或两种以上不同材料复合而成的新材料。”根据这个定义，复合材料包括范围很广，从天然材料到人工材料；从生物材料到无生命材料都可以举出许多符合上述定义的材料。在天然材料中，属于生物材料的有木材、竹子、骨骼、肌肉与动物角等；属于非生物材料的有岩石与云母等。在人工材料中混凝土与共晶态金属都可归于复合材料范畴。

为了缩小复合材料定义所包括的范围，有人提出如下定义：“把两种或更多种不同性能的材料人工复合在一起，形成具有特殊性能的新型材料，就是复合材料。”这个定义排除了属于天然材料与生物材料范围的一大批材料，一般说来是大家可以接受的，但是，它仍然不够严格，含义比较广泛。很多符合上述定义的材料却并非我们所要研究的复合材料。例如，用于热控开关的铜/钛双合金金属片，在宏观尺度上

它是复合材料，但却不属于本书所要讨论的现代复合材料。

很多学者认为复合材料与其称为一种材料不如称为一种“结构”。他们定义如下：“复合材料是由增强相、基体相与填料构成的亚微观（细观）结构，这些组分材料除界面外没有发生化学反应。”这个定义强调了复合材料的“结构”特性。由于复合材料是一种结构，复合材料力学性能可分为细观力学性能与宏观力学性能两大部分，比单一材料的传统材料力学复杂得多。为准确地描述与表征内容广泛的复合材料系统，必须分不同层次进行，并且必须对不同层次的力学问题，建立不同的力学模型，使用不同的分析手段来解决。

以上给出了三个不同的复合材料定义，为了更全面，更准确地定义复合材料，不妨归纳如下：“复合材料是由增强相、基体与填充剂，通过人工复合工艺制造的具有多相细观结构的有特殊性能的新型材料系统；组分材料除界面外没有发生化学反应。”这个定义明确限定了我们将要讨论的复合材料是人工复合的、多相的、具有细观结构的、性能全新的材料系统。

二、复合材料的分类

由于复合材料种类繁多，着眼点不同，分类方法也有多种。下边列举几种常见的分类方法。

1. 按材料作用分类

可分为结构复合材料和功能复合材料两大类。前者是制造工程结构可承受外载荷的复合材料；后者则具有各种独特的物理性质，如换能特性、阻尼特性、摩擦特性、导磁或导电等方面特性。复合材料的隐身性能已引起人们的极大兴趣，美国已研制出第一架隐身复合材料飞机，可以逃避雷达

追踪，具有重要的战略意义。

2. 按基体材料分类

可分为树脂基、金属基、陶瓷基、水泥基以及碳/碳复合材料。树脂基复合材料，又称聚合物基复合材料(PMC)，是本书的主要研究对象。水泥基复合材料主要用于民用建筑；碳/碳材料主要用作导弹弹头超高温烧蚀结构材料。

3. 按增强材料分类

有纤维增强，颗粒增强与碎片增强复合材料。玻璃布碎片增强塑料属于碎片增强复合材料。

4. 按纤维分类

有连续纤维、短纤维与晶须增强复合材料。纤维种类包括玻璃纤维、碳纤维、有机纤维（或称芳纶纤维，杜帮公司的商标名称为 Kevlar 纤维）、硼纤维。近来又开发了过牵伸聚丙烯纤维。碳纤维包括高强型与高模量型两类；按碳化前的原丝不同，碳纤维又分为聚丙烯腈基与沥青基两类。晶须以碳化硅晶须最受重视，晶须很细，直径小于 $2.5\mu\text{m}$ ，主要用于增强陶瓷。

前边提到，复合材料是具有“细观结构”的材料系统。关于材料结构大致可以分三个层次：第Ⅰ个层次是最基本的结构，就是指任何材料都具有分子结构或晶格点阵结构；第Ⅱ个层次是细观结构，即材料都是由不同相（增强相与基体相）、晶粒或混合物组成；第Ⅲ个层次是宏观结构层次，复合材料常常具有叠层结构，每一层可以由相同的或不同性质的材料构成。本书将主要对第Ⅲ个层次上的材料力学性能进行讨论，偶而也会涉及到第Ⅱ个层次中的问题。于是引出了第5种分类方法。

5. 按复合材料结构分类

可分为单层复合材料（包括纤维、颗粒与碎片增强复合材料）、层状复合材料（或称层合板；叠层复合材料）与填充骨架型复合材料（填充泡沫塑料与填充蜂窝复合材料都属于此类）。这些复合材料种类的简明示意图表示在图1-1中。这里需要说明的是，混杂(hybrid)复合材料是指由两种以上纤维混杂在一起增强树脂复合材料。最常用的是碳与玻璃两种纤维混杂增强环氧复合材料，也有碳与有机纤维混杂的复合材料。混杂结构又可分为层间混杂与层内混杂两类。层间混杂就是不同层的纤维种类不同，但各层内的纤维只限于一种；层内混杂指各层内的纤维都包括两种不同的纤维。层内混杂又有层内混杂编织与层内混杂平行铺布两种。

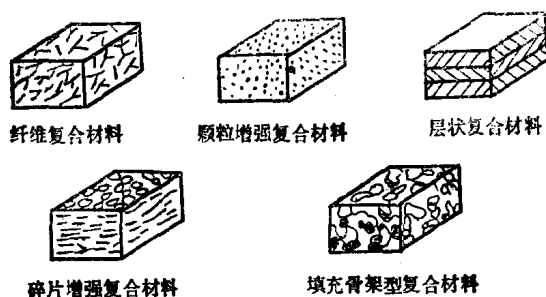


图1-1 各种类型复合材料示意图

§ 1-3 纤维增强复合材料

纤维增强复合材料是由纤维与基体复合而成的，这些组分材料的化学成分、性质与宏观尺寸上的形状是互不相同的。纤维可以是人造的，也可以是天然的（如竹子或麻纤维）；既可以是连续的，又可以是短切的。纤维与基体互不

相溶，复合后各自保持原来的特性。图1-2表示各类纤维复合材料及其相互关系。

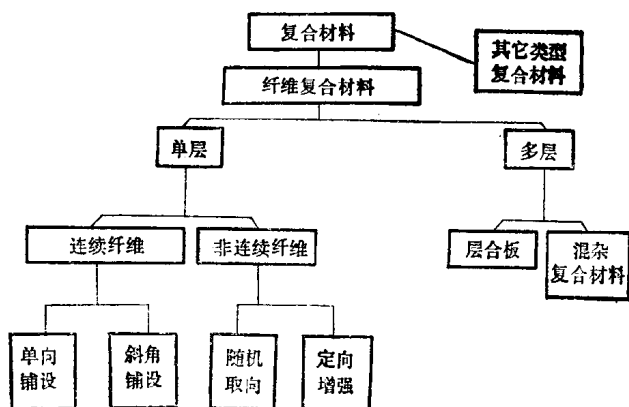


图1-2 纤维复合材料分类框图

为使读者对具有代表性的纤维复合材料得到一个更为直观的概念，现将常用纤维列于表1-1，常用基体列于表1-2。

表1-1 高性能复合材料的增强材料

1.	三氧化二铝	Al_2O_3
2.	铝	Al
3.	硼*	B
4.	氮化硼	BN
5.	铍	Be
6.	玻璃*	Glass
7.	石墨(碳)*	Graphite(Carbon)
8.	有机纤维(芳纶 Kevlar)*	Kv
9.	碳化硅	SiC
10.	氮化硅	Si_3N_4
11.	钛	Ti
12.	钨	W

*表示主要高性能增强材料