

ANSYS原厂策划 万水精心出品

ANSYS工程行业应用系列

ANSYS

万水ANSYS技术丛书

基于ANSYS的复合材料 有限元分析和应用

李占营 阚川 张承承 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

万水 ANSYS 技术丛书

基于 ANSYS 的复合材料有限元 分析和应用

李占营 阚 川 张承承 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

ANSYS 是国际上先进的大型通用有限元计算分析软件之一, 具有强健的计算功能和模拟性能。本书是基于 ANSYS 软件 18.0 版本进行复合材料有限元分析与应用的入门指南和工程分析教程。全书通过相关例题和讨论, 系统地介绍了 ANSYS 软件在复合材料方面的主要功能和应用方法。包括: 基础知识、快速入门、用户手册、复杂复合材料建模技术、应用案例、专题技术。

本书是应用 ANSYS 有限元软件进行复合材料力学分析和结构计算的必备工具书, 可供从事复合材料工程设计和有限元分析的科研人员和工程师等阅读和参考。

本书配有练习源文件, 读者可以从中国水利水电出版社网站以及万水书苑下载, 网址为: <http://www.waterpub.com.cn/softdown/>或 <http://www.wsbookshow.com>。

图书在版编目 (C I P) 数据

基于ANSYS的复合材料有限元分析和应用 / 李占营, 阚川, 张承承编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2017.8

(万水ANSYS技术丛书)

ISBN 978-7-5170-5576-1

I. ①基… II. ①李… ②阚… ③张… III. ①复合材料—有限元分析—应用软件 IV. ①TB33-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第162864号

责任编辑: 杨元泓

加工编辑: 孙 丹

封面设计: 李 佳

书 名	万水 ANSYS 技术丛书 基于 ANSYS 的复合材料有限元分析和应用
作 者	JIYU ANSYS DE FUHE CAILIAO YOUXIANYUAN FENXI HE YINGYONG 李占营 阚 川 张承承 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)、82562819 (万水)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 18.75 印张 460 千字
版 次	2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	56.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

序

我国正处于从中国制造到中国创造的转型期，经济环境充满挑战。由于 80% 的成本在产品研发阶段确定，如何在产品研发阶段提高产品附加值成为制造企业关注的焦点。

在当今世界，不借助数字建模来优化和测试产品，新产品的的设计将无从着手。因此越来越多的企业认识到工程仿真的重要性，并在不断加强应用水平。工程仿真已在航空、汽车、能源、电子、医疗保健、建筑和消费品等行业得到广泛应用。大量研究及工程案例证实，使用工程仿真技术已经成为不可阻挡的趋势。

工程仿真是一件复杂的工作，工程师不但要有工程实践经验，同时要对多种不同的工业软件了解掌握。与发达国家相比，我国仿真应用成熟度还有较大差距。仿真人才缺乏是制约行业发展的重要原因，这也意味着有技能、有经验的仿真工程师在未来将具有广阔的职业前景。

ANSYS 作为世界领先的工程仿真软件供应商，为全球各行业提供能完全集成多物理场仿真软件工具的通用平台。对有意从事仿真行业的读者来说，选择业内领先、应用广泛、前景广阔、覆盖面广的 ANSYS 产品作为仿真工具，无疑将成为您职业发展的重要助力。

为满足读者的仿真学习需求，ANSYS 与中国水利水电出版社合作，联合国内多个领域仿真行业实战专家，出版了本系列丛书，包括 ANSYS 核心产品系列、ANSYS 工程行业应用系列和 ANSYS 高级仿真技术系列，读者可以根据自己的需求选择阅读。

作为工程仿真软件行业的领导者，我们坚信，培养用户走向成功，是仿真驱动产品设计、设计创新驱动行业进步的关键。



ANSYS 大中华区总经理

2015 年 4 月

前 言

复合材料是一大类新型材料，其强度高、刚度大、质量轻，并具有抗疲劳、减振、耐高温、可设计等一系列优点。近 50 年来，在航空航天、能源、交通、建筑、机械、信息、生物、医学和体育等工程和部门日益得到广泛的应用。随着各种新型复合材料的开发和应用，复合材料力学已形成独立的学科体系并蓬勃发展。国内外不少高等院校已将“复合材料力学”列为力学专业及相关的理工科专业本科生和研究生的必修和选修课。

作者多年来从事 ANSYS 软件应用工程师的工作，与不同行业的复合材料技术人员进行接触。如今在参考 ANSYS 最新复合材料相关资料的基础上，编写了这本《基于 ANSYS 的复合材料有限元分析和应用》。ANSYS 是国际上先进的大型通用有限元计算分析软件之一，具有强健的计算功能和模拟性能。本书是基于 ANSYS 软件 18.0 版本进行复合材料有限元分析与应用的入门指南和工程分析教程。全书通过相关例题和讨论，系统地介绍了 ANSYS 软件在复合材料方面的主要功能和应用方法。包括：基础知识、快速入门、用户手册、复杂复合材料建模技术、应用案例、专题技术。

本书是应用 ANSYS 有限元软件进行复合材料力学分析和结构计算的必备工具书，可供从事复合材料工程设计和有限元分析的科研人员和工程师等阅读和参考。

在本书出版之际，感谢北京航空航天大学能源与动力工程学院的阚川、张承承、陈立强、闫成、曲震、刘浩、刘玉、柳恺骋、张涛、吴勇军、崔伟、吴静、廖祐明、韩乐、侯文松、顾毅、刘华伟、王文在本书编写过程中的辛勤工作。

由于时间仓促，作者水平有限，书中不足之处在所难免，恳请广大读者批评指正，作者联系方式为：zhanying.li@qq.com。

编 者

2017 年 5 月

目 录

序

前言

第1章 基础知识	1	2.4.3 不同模型共享复合材料定义 分析流程	36
1.1 复合材料概论	1	2.4.4 实体单元建模工作流程	37
1.1.1 复合材料及其种类	1	2.4.5 多流程装配工作流程	37
1.1.2 复合材料的基本构造形式	5	2.5 入门练习	39
1.1.3 复合材料的制造方法	6	2.5.1 练习1	39
1.1.4 复合材料的力学分析方法	7	2.5.2 练习2	62
1.1.5 复合材料的力学性能	8	第3章 用户手册	72
1.1.6 复合材料的各种应用	9	3.1 详细功能	72
1.1.7 复合材料创新设计方法	11	3.1.1 模型 Model	72
1.2 ANSYS 软件	13	3.1.2 材料数据	74
1.2.1 Workbench 仿真平台	13	3.1.3 单元和节点集	78
1.2.2 Mechanical 模块	16	3.1.4 几何 Geometry	78
1.3 ACP 模块	21	3.1.5 坐标系 Rosettes	81
1.3.1 模块功能	22	3.1.6 速查表 Look-up	82
1.3.2 安装及学习	27	3.1.7 选择规则 Selection Rules	83
1.3.3 应用案例	28	3.1.8 方向选择集 (OSS)	89
第2章 快速入门	30	3.1.9 铺层组 Modeling Groups	91
2.1 图形用户界面	30	3.1.10 分析铺层组 Analysis Modeling Groups	100
2.1.1 主菜单 Menu	30	3.1.11 采样点 Sampling Points	100
2.1.2 特征树 Tree View	31	3.1.12 切面 Section Cuts	101
2.1.3 场景 Scene	32	3.1.13 传感器 Sensors	103
2.1.4 工具栏 Toolbar	32	3.1.14 实体模型 (Solid Models)	104
2.1.5 Shell 视图	32	3.1.15 铺层图 Lay-up Plots	114
2.1.6 History 历史视图	32	3.1.16 失效准则定义 Definitions	116
2.1.7 Logger 视图	32	3.1.17 结果集 Solutions	116
2.2 独立运行模式	32	3.1.18 场景 Scenes	118
2.3 老版本 ACP 项目的迁移	34	3.1.19 视图 Views	118
2.4 Workbench 典型工作流程	34	3.1.20 铺层表 Ply Book	118
2.4.1 基本工作流程	34	3.1.21 参数 Parameters	118
2.4.2 多工况/分析类型的 工作流程	36		

3.1.22 材料库 Material Databank	121	5.4 规则使用练习	178
3.2 后处理	121	5.4.1 案例简介	178
3.2.1 失效准则	121	5.4.2 案例实现	179
3.2.2 失效模式指标	122	5.5 铺敷性分析练习	185
3.2.3 主应力和主应变	122	5.5.1 案例简介	185
3.2.4 复合材料实体单元后处理	122	5.5.2 案例实现	186
3.3 第三方软件数据交互	123	5.6 复合材料实体模型装配体练习	190
3.3.1 HDF5 复合材料 CAE 格式	123	5.6.1 案例简介	190
3.3.2 Mechanical APDL 文件格式	123	5.6.2 案例实现	191
3.3.3 Mechanical APDL 复合材料模型 的转换	124	5.7 复合材料压力容器实体建模练习	201
3.3.4 Excel 的表格数据格式	124	5.7.1 案例简介	201
3.3.5 CSV 格式	124	5.7.2 案例实现	202
3.3.6 ESAComp	125	5.8 高级复合材料实体建模练习	209
3.3.7 LS-Dyna	125	5.8.1 案例简介	209
3.3.8 BECAS	125	5.8.2 案例实现	209
第 4 章 复杂复合材料建模技术	126	5.9 复合材料搭接接头脱胶 (Debonding) 模拟	215
4.1 T 型接头建模	126	5.9.1 案例简介	215
4.2 局部加强建模	128	5.9.2 案例实现	215
4.3 铺层渐变和错层	129	第 6 章 专题技术	226
4.4 变厚度芯材	130	6.1 复合材料模型参数化	226
4.5 可制造性分析	132	6.1.1 案例简介	226
4.6 铺层表	133	6.1.2 案例实现	226
4.7 实体单元模型建立	135	6.2 分层和脱胶模拟	234
4.8 复合材料可视化	136	6.2.1 理论及技术路线	234
4.9 复合材料失效准则	137	6.2.2 应用案例	235
4.10 ACP 模块中的单元选择	137	6.3 整体结构局部细化分析—— 子模型技术	242
第 5 章 应用案例	139	6.3.1 案例简介	242
5.1 冲浪板静强度分析	139	6.3.2 案例实现	242
5.1.1 案例简介	139	6.4 复合材料转子动力学分析	250
5.1.2 案例实现	140	6.4.1 案例简介	250
5.2 采用 Edge Wise 坐标系定义螺旋结构 纤维方向	160	6.4.2 案例实现	251
5.2.1 案例简介	160	6.5 渐进损伤模拟技术	261
5.2.2 案例实现	161	6.5.1 理论及技术路线	261
5.3 T 型接头铺层定义练习	166	6.5.2 应用案例	261
5.3.1 案例简介	166	6.6 温度相关复合材料属性	266
5.3.2 案例实现	167	6.6.1 案例简介	266

6.6.2 案例实现	266	6.8.2 案例实现	275
6.7 温度、剪力和退化相关复合材料属性	271	附录 A 英美制单位与标准国际单位的 换算关系	280
6.7.1 案例简介	271	附录 B 波音 787 (梦幻飞机) 简介	282
6.7.2 案例实现	272	术语	286
6.8 ACP 模块中的脚本应用	275	参考文献	292
6.8.1 案例简介	275		

1

基础知识

本章从复合材料概论、ANSYS 软件、ACP 模块三个方面对 ANSYS 复合材料解决方案的相关内容讲解。具体如下：复合材料概论将介绍复合材料的基础知识；ANSYS 软件部分将介绍 ANSYS Workbench 仿真平台，以及 Mechanical 模块的求解功能；ACP 模块部分将介绍 ACP 模块的功能、软件安装以及学习方法。

1.1 复合材料概论

1.1.1 复合材料及其种类

复合材料是由两种或多种不同性质的材料用物理和化学方法在宏观尺度上组成的具有新性能的材料。一般复合材料的性能优于其组分材料的性能，并且有些性能是原来组分材料所没有的，复合材料改善了组分材料的刚度、强度、热学等性能。

人类使用复合材料的历史已经很久了。中国古代使用的土坯砖是由黏土和麦秆两种材料组成的，麦秆起增强黏土的作用。古代的宝剑是用复合浇铸技术得到的包层金属复合材料，它具有锋利、韧性好、耐腐蚀的优点。现在的胶合板、钢筋混凝土、夹布橡胶轮胎、玻璃钢等都属于复合材料。

复合材料从应用的性质可分为功能复合材料和结构复合材料两大类。功能复合材料主要具有特殊的功能。例如：导电复合材料，它是用聚合物与各种导电物质通过分散、层压或形成表面导电膜等方法构成的复合材料；烧蚀材料，它由各种无机纤维增强树脂或非金属基体构成，可用于高速飞行器头部热防护；摩阻复合材料，它是用石棉等纤维和树脂或非金属制成的有高摩擦系数的复合材料，用于航空器、汽车等运转部件的制动、控速等机构。

本书 ANSYS ACP 模块主要研究结构复合材料，它由基体材料和增强材料两种组分组成。基体用各种树脂或金属、非金属材料；增强材料采用各种纤维或颗粒等材料。其中增强材料在复合材料中起主要作用，提供强度和刚度，基本控制其性能。基体材料起配合作用，它支持和固定纤维材料，传递纤维间的载荷，保护纤维，防止磨损或腐蚀，改善复合材料的某些性能。复合材料的力学性能比一般金属材料复杂得多，主要有不均匀、不连续、各向异性等，因此逐

步发展成为复合材料特有的力学理论,称为复合材料力学,它是固体力学学科中的一个新分支。

1. 复合材料的种类

根据复合材料中增强材料的几何形状,复合材料可分为三大类:①颗粒复合材料,由颗粒增强材料和基体组成;②层合复合材料,由多种片状材料层合而成;③纤维增强复合材料,由纤维和基体组成。

本书 ACP 模块主要应用于研究纤维增强复合材料和层合复合材料构件。

(1) 颗粒复合材料。

它由悬浮在一种基体材料的一种或多种颗粒材料组成。颗粒可以是金属,也可以是非金属。

1) 非金属颗粒在非金属基体中的复合材料。最典型的例子是混凝土,它是由砂石、水泥和水粘合在一起,经化学反应而变成坚固的结构材料,如加入钢筋又做成钢筋混凝土。还有用云母粉悬浮在玻璃或塑料中形成的复合材料。

2) 金属颗粒在非金属基体中的复合材料。例如,固体火箭推进剂是由铝粉和高氯酸盐氧化剂无机微粒放在如聚氨酯的有机粘结剂中组成的,微粒约占 75%,粘结剂约占 25%。为了能有稳定的燃烧反应,复合材料必须均匀和不裂。火箭推力与燃烧表面积成比例,为增加表面积,固体推进剂制成星形或轮形内孔,并研究其内应力。

3) 非金属在金属基体中的复合材料。氧化物和碳化物微粒悬浮在金属基体中得到金属陶瓷,用于耐腐蚀的工具制造和高温应用:碳化钨在钴基体中的金属陶瓷用于高硬度零件制造,如拉丝模具;碳化铬在钴基体中的金属陶瓷有很高的耐磨性和耐腐蚀性,适用于制造阀门。

(2) 层合复合材料。

它至少由两层不同材料复合而成,其增强性能有强度、刚度、耐磨损、耐腐蚀等。层合复合材料有以下几种。

1) 双金属片。它由两种不同热膨胀系数的金属片层合而成,当温度变化时,双金属片产生弯曲变形,可用于温度测量和控制。

2) 涂覆金属。将一种金属涂覆在另一种金属上,得到优良的性能。例如用 10%的铜涂覆铝丝作为铜丝的替代物,铝丝价廉而质轻,但难于连接,导热性差;铜丝价贵而较重,但导热性好,易于连接。涂铜铝丝比纯铜丝价廉而性能好。

3) 夹层玻璃。这是为了用一种材料包含另一种材料。普通玻璃透光性好但易脆裂,聚乙烯醇缩丁醛塑料韧性好但易被划损,夹层玻璃是两层玻璃夹包一层聚乙烯醇缩丁醛塑料,具有良好的性能。

(3) 纤维增强复合材料。

各种长纤维比块状的同样材料的强度高得多。例如,普通平板玻璃在几十兆帕的应力下就会破裂,而商用玻璃纤维的强度可达 3000MPa~5000MPa,实验室研制的玻璃纤维强度已接近 7000MPa,这是因为纤维与块状玻璃的结构不同,纤维内部缺陷和位错比块状材料少得多。

纤维增强复合材料按纤维种类分为玻璃纤维(其增强复合材料俗称玻璃钢)、硼纤维、碳纤维、碳化硅纤维、氧化铝纤维和芳纶纤维等。

纤维增强复合材料按基体材料可分为各种树脂基体、各种金属基体、陶瓷基体和碳(石墨)基体几种。

纤维增强复合材料按纤维形状、尺寸可分为连续纤维、短纤维、纤维布增强复合材料等。

(4) 以上两种或三种混合的增强复合材料。

例如, 两种或更多种纤维增强一种基体的复合材料。玻璃纤维与碳纤维增强树脂称为混杂纤维复合材料, 这已在很多工程中得到广泛应用。

2. 几种常用纤维

(1) 玻璃纤维。

它是最早使用的一种增强材料, 在飞行器结构中常用 E 型玻璃和 S 型玻璃两个品种。玻璃纤维的直径为 $5\sim 20\mu\text{m}$, 它强度高、延伸率较大, 可制成织物; 但弹性模量较低, 约为 $7\times 10^4\text{MPa}$, 与铝接近。一般硅酸盐玻璃纤维可用到 450°C , 石英和高硅氧玻璃纤维可耐 1000°C 以上高温。玻璃纤维的线膨胀系数约为 $4.8\times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ 。玻璃纤维由拉丝炉拉出单丝, 集束成原丝, 经纺丝加工成无捻纱、各种纤维布、带、绳等。

(2) 硼纤维。

它是由硼蒸气在钨丝上沉积而制成的纤维 (属复相材料, 钨丝为芯, 表面为硼)。由于钨丝直径较大, 硼纤维不能做成织物, 成本较高。20 世纪 60 年代初硼纤维由美国研制成功并应用于某些飞行器。

(3) 碳纤维。

它是用各种有机纤维经加热碳化制成。主要以聚丙烯腈或沥青为原料, 纤维经加热氧化、碳化、石墨化处理而制成。碳纤维可分为高强度、高模量、极高模量等几种, 后两种需经 $2500^\circ\text{C}\sim 3000^\circ\text{C}$ 石墨化处理, 又称为石墨纤维。由于碳纤维制造工艺较简单, 价格比硼纤维偏移得多, 因此成为最重要的先进纤维材料。其密度比玻璃纤维小, 模量比玻璃纤维高好几倍。因此碳纤维增强复合材料已应用于宇航、航空等工业部门。碳纤维的应力—应变关系为一条直线, 纤维断裂前是弹性体, 高模量碳纤维的最大延伸率为 0.35%, 高强度碳纤维的延伸率可达 1.5%。碳纤维的直径一般为 $6\sim 10\mu\text{m}$ 。碳纤维的热膨胀系数与其他纤维不同, 具有各向异性, 沿纤维方向 $\alpha_1=(-0.7\sim 0.9)\times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$, 而垂直于纤维方向 $\alpha_2=(22\sim 32)\times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ 。

(4) 芳纶纤维。

它是新的有机纤维, 属聚芳酰胺, 国外牌号为 Kevlar。有三种产品: K-29 用于绳索电缆; K-49 用于复合材料制造; K-149 强度更高, 可用于航天容器等。芳纶纤维性能优良, 单丝强度可达 3850MPa , 比玻璃纤维约高 45%; 弹性模量介于玻璃纤维和硼纤维之间, 为碳纤维的一半; 热膨胀系数沿纤维方向 $\alpha_1=-2\times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$, 而垂直于纤维方向 $\alpha_2=5\times 10^{-6}$ 。

芳纶纤维的制造工艺与碳纤维和玻璃纤维都不同, 它采用液晶纺丝工艺。液晶在宏观上属液体, 微观上有晶体性质。芳纶纤维的聚对苯撑对苯二甲酰胺 (PPTA) 在溶液中呈一定取向状态, 为一维有序紧密排列, 它在外界剪切力作用下, 易沿力方向取向而成纤维。纺丝采用干喷湿纺工艺: 采用高浓度、高温 PPTA 液晶溶液在较高喷丝速度下喷丝进入低温凝固液浴, 经纺丝管形成丝束, 绕到绕丝辊上, 经洗涤, 在张力下于热辊上干燥, 最后在惰性气体中高温处理得芳纶纤维。

(5) 碳化硅纤维及氧化铝纤维。

它们属于陶瓷纤维。碳化硅纤维有两种形式, 一种是采用与硼纤维相似的工艺, 在钨丝上沉积碳化硅 (SiC) 形成复相纤维; 另一种是 20 世纪 70 年代日本研制的连续碳化硅纤维, 它用二甲基二氯硅烷经聚合纺丝成有机硅纤维, 再高温处理转换成单相碳化硅纤维。碳化硅纤维具有抗氧化、耐腐蚀和耐高温等优点, 它与金属相容性好, 可制成金属基复合材料, 用它增

强的陶瓷基复合材料制成的发动机，工作温度可达 1200℃ 以上。

氧化铝纤维的制法有多种，其一是采用三乙基铝、三丙基铝、三丁基铝等原料制造聚铝氧烷，加入添加剂调成粘液喷丝，形成 $\phi 100\mu\text{m}$ 的纤维，再经 1200℃ 加热制成氧化铝纤维。

各种主要纤维材料的基本性能列在表 1-1 中，某些性能数据供参考，表中还列出钢、铝、钛等金属丝的性能供对比用。

表 1-1 各种主要纤维材料与金属丝基本性能

材料		直径/ μm	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	相对 密度 γ	拉伸强度 $\sigma_b/10\text{MPa}$	模量 $E/10^5\text{MPa}$	热膨胀 系数 $\alpha/10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$	伸长率 $\delta/\%$	比强度 (σ_b/γ) /10MPa	比模量 (E/γ) /10 ⁵ MPa
玻璃 纤维	E	10	700	2.55	350	0.74	5	4.8	137	0.29
	S	10	840	2.49	490	0.84	2.9	5.7	197	0.34
硼纤维		100	2300	2.65	350	4.1	4.5	0.5~0.8	132	1.55
		140		2.49	364				146	1.65
碳纤维	普通		3650	1.75	250~300				143~171	
	高强	6			350~700	2.25~2.28			200~400	1.29~1.30
	高模	6			240~350	3.5~5.8	-0.6	1.5~2.4	137~200	2.0~2.34
	极高模	6			75~250	4.60~6.70	-1.4	0.5~0.7	43~143	2.63~2.83
芳纶 纤维	K-49 III	10	1.47	283	1.34	-3.6	2.5	193	0.91	
	K-49 IV	10		304	0.85		4.0	207	0.58	
碳化 硅纤 维	复相	100	2690	3.28	254	4.3	3.8	77.4	1.31	
	单相	8~12		2.8	250~450	1.8~3.0		89~161	0.64~1.1	
氧化铝纤维			2080	3.7	138~172	3.79		37~46	1.02	
钢丝			1350	7.8	42	2.1	11~17	5.4	0.27	
铝丝			660	2.7	63	0.74	22	23	0.27	
钛丝				4.7	196	1.17	9	41.7	0.25	

3. 几种常用基体

(1) 树脂基体。

它分为热固性树脂和热塑性树脂两大类。热固性树脂常用的有环氧、酚醛和不饱和树脂等，它们最早应用于复合材料。环氧树脂应用最广泛，其主要优点是粘结力强，与增强纤维表面浸润性好，固化收缩小，有较高耐热性，固化成型方便。酚醛树脂耐高温性好，吸水性小，电绝缘性好，价格低廉。聚酯树脂工艺性好，可室温固化，价格低廉，但固化时收缩大，耐热性低。它们固化后都不能软化。

热塑性树脂有聚乙烯、聚苯乙烯、聚酰胺（又称尼龙）、聚碳酸酯、聚丙烯树脂等。它们加热到转变温度时会重新软化，易于制成模压复合材料。

几种常用树脂性能列于表 1-2 中, 供参考和比较。

表 1-2 几种树脂的性能

序号	名称	相对密度 γ	拉伸强度 $\sigma_b/10\text{MPa}$	伸长率 $\delta/\%$	模量 $/10^3\text{MPa}$	抗压强度 $/\text{MPa}$	抗弯强度 $/\text{MPa}$
1	环氧	1.1~1.3	60~95	5	3~4	90~110	100
2	酚醛	1.3	42~64	1.5~2.0	3.2	88~110	78~120
3	聚酯	1.1~1.4	42~71	5	2.1~4.5	92~190	60~120
4	聚酰胺 PA	1.1	70	60	2.8	90	100
5	聚乙烯		23	60	8.4	20~25	25~29
6	聚丙烯 PP	0.9	35~40	200	1.4	56	42~56
7	聚苯乙烯 PS		59	2.0	2.8	98	77
8	聚碳酸酯 PC	1.2	63	60~100	2.2	70	100

(2) 金属基体。

它主要用于耐高温或其他特殊需要的场合, 具有耐 300℃ 以上高温、表面抗侵蚀、导电导热不透气等优点。基体材料有铝、铝合金、镍、钛合金、镁、铜等, 目前应用较多的是铝, 一般有碳纤维铝基、氧化铝晶须镍基、硼纤维铝基、碳化硅纤维钛基等复合材料。

(3) 陶瓷基体。

它耐高温、化学稳定性好, 具有高模量和高抗压强度, 但有脆性, 耐冲击性差, 为此用纤维增强制成的复合材料, 可改善抗冲击性并已试用于发动机部分零件。纤维增强陶瓷基复合材料, 例如单向碳纤维增强无定形二氧化硅复合材料, 碳纤维含量 50%, 室温弯曲模量为 $1.55 \times 10^5 \text{MPa}$, 800℃ 时为 $1.05 \times 10^5 \text{MPa}$ 。还有多向碳纤维增强无定形石英复合材料, 耐高温, 可供远程火箭头锥作烧蚀材料。

(4) 碳素基体。

它主要用于碳纤维增强碳基体复合材料, 这种材料又称碳/碳复合材料。以纤维和基体的不同分为三种: 碳纤维增强碳、石墨纤维增强碳、石墨纤维增强石墨。

1.1.2 复合材料的基本构造形式

如前所述, 本书只讨论纤维增强复合材料, 它一般可分为以下几种构造形式。

1. 单层复合材料 (又称单层板)

单层复合材料中, 纤维按一个方向整齐排列或由双向交织纤维平面排列 (有时是曲面, 例如在壳体中), 其中纤维方向称为纵向, 用“1”表示; 垂直于纤维方向 (有时有交织纤维, 含量较少或一样多) 称为横向, 用“2”表示; 沿单层材料厚度方向用“3”表示, 1、2、3 轴称为材料主轴。单层复合材料是不均匀材料, 虽然纤维和基体可能都是各向同性材料, 但由于纤维排列有方向性, 或交织纤维在两个方向含量不同, 因此单层材料一般是各向异性的。

单层板中纤维起增强和主要承载作用, 基体起支撑纤维、保护纤维, 并在纤维间起分配和传递载荷作用, 载荷传递的机理是在基体中产生剪应力, 通常把单层材料的应力—应变关系看作是线弹性的。

2. 叠层复合材料（又称层合板）

叠层材料由上述单层板按照规定的纤维方向和次序，铺放成叠层形式并进行粘合，经加热固化处理而成。层合板由多层单层板构成，各层单层板的纤维方向一般不同。每层的纤维方向与叠层材料总坐标轴 $x-y$ 方向不一定相同，我们用 θ 角（1 轴与 x 轴夹角，由 x 轴逆时针方向到 1 轴的夹角为正）表示。如四层单层材料组成的层合板，为了表明铺设方式可用下列顺序表示法： $\alpha/0^\circ/90^\circ/\alpha$ 。

其他层合板铺层表示举例如下：

$60^\circ/-60^\circ/0^\circ/0^\circ/-60^\circ/60^\circ$ ，可表示为 $(\pm 60^\circ/0^\circ)_s$ ，这里 s 表示对称，“ \pm ”号表示两层正负角交错。

$45^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/45^\circ$ ，还可表示为 $(45^\circ/90^\circ/0^\circ)_s$ ，这里 s 表示铺层上下对称。

层合板也是各向异性的不均匀材料，但比单层板复杂得多，因此对它进行力学分析计算将更加复杂化。叠层材料可以根据结构元件的受载要求，设计各单层材料的铺层方向和顺序。

3. 短纤维复合材料

以上两种构造形式一般是连续纤维增强的复合材料，但是由于工程的需要以及为了提高生产效率，还有短纤维复合材料的构造形式。这里又分为两种：①随机取向的短切纤维复合材料，由基体与短纤维搅拌均匀模压而成的单层复合材料；②单向短纤维复合材料，复合材料中短切纤维呈单向整齐排列，它具有正交各向异性。

1.1.3 复合材料的制造方法

由于用不同纤维和不同基体制造复合材料的方法差别很大，这里介绍几种典型复合材料制造的例子。

1. 玻璃纤维环氧复合材料

将环氧树脂浸渍玻璃纤维经烘干形成半成品材料——预浸料，再通过不同成型方法得到各种制品，其中有手糊方法、喷射成型方法、缠绕方法、层压方法等。例如层压成型方法是若干层浸胶布层叠起来送入热压机，在一定温度和压力下压制板材。缠绕方法是经浸胶的连续玻璃纤维布带按一定规律缠绕到芯模上，然后用热压罐法固化制成一定形状的制品。其优点是按设计要求可得到等强度结构，工艺能够实现机械化、自动化，产品质量好。

2. 碳纤维增强环氧复合材料

将碳纤维排整齐，通过滚轮进入环氧树脂溶液池中，浸渍后经加热装置烘干成半成品——预浸料片，按设计要求裁成不同角度的单层板，铺设成多层复合板，经热压机在一定温度和压力下压成层合板材。

3. 碳纤维增强金属基复合材料

一般制造方法有扩散结合法、熔融金属渗透法、连续铸造法、等离子喷涂法等。例如，扩散结合法是在高温下，加静压力将金属箔或薄片与碳纤维束交替重叠，加热加压成复合材料；等离子喷涂法是在惰性气体保护下，等离子弧向排列整齐纤维束喷射熔融金属微粒，金属粒子与纤维结合紧密，纤维与基体界面接触好（并无化学反应）而制成金属基复合材料。

4. 单向短纤维复合材料

将短切纤维悬浮在甘油中不断搅拌，加压迫使悬浮物经过一个收敛渠道，纤维走向与流向相同，将含纤维液膜沉积到一细眼筛上，快速过滤去掉甘油，这样形成了定向纤维毡，然后

再加树脂并模压成单向短纤维复合材料板。

1.1.4 复合材料的力学分析方法

对于复合材料的力学分析和研究大致可分为材料力学和结构力学两大部分，习惯上把复合材料的材料力学部分称为复合材料力学，而把复合材料结构（如板、壳结构）的力学部分称为复合材料结构力学，有时这两部分也统称为复合材料力学。复合材料的材料力学部分按采用力学模型的精细程度可分为细观力学和宏观力学两部分。下面分别说明这三种力学分析方法的基本特点。

1. 细观力学

它从细观角度分析组分材料之间的相互作用来研究复合材料的物理力学性能。它以纤维和基体为基本单元，把纤维和基体分别看成是各向同性的均匀材料，根据材料纤维的几何形状和布置形式、纤维和基体的力学性能、纤维和基体之间的相互作用（有时应考虑纤维和基体之间界面的作用）等条件，来分析复合材料的宏观物理力学性能。这种分析方法比较精细但相当复杂，目前还只能分析单层材料在简单应力状态下的一些基本力学性质，例如材料主轴方向的弹性常数及强度。此外，由于实际复合材料纤维形状、尺寸不完全规则和排列不完全均匀，制造工艺上的差异和材料内部存在空隙、缺陷等，细观力学分析方法还不能完全考虑材料的实际状况，需进一步研究。以细观力学分析复合材料性质，在复合材料力学的学科范围内是不可缺少的重要组成部分，它对研究材料的破坏机理、提高复合材料性能、进行复合材料和结构设计将起到很大作用。

ANSYS Mechanical 可以建立复合材料细观模型，进行相关的研究，但本书对这方面不做探讨。

2. 宏观力学

它从材料是均匀的假定出发，只从复合材料的平均表现性能检验组分材料的作用来研究复合材料的宏观力学性能。它把单层复合材料看成均匀的各向异性材料，不考虑纤维和基体的具体区别，用其平均力学性能表示单层材料的刚度、强度特性，可以较容易地分析单层和叠层材料的各种力学性质，所得结果较符合实际。

宏观力学的基础是预知单层材料的宏观力学性能，如弹性常数、强度等，这些数据来自实验测定或细观力学分析。由于实验测定方法较简便可靠，工程应用往往采用它。在复合材料力学学科范围内，宏观力学占很大比重。

ANSYS ACP 模块，即本书的核心内容即面向复合材料宏观力学应用。

3. 复合材料结构力学

它从更粗略的角度来分析复合材料结构的力学性能，把叠层材料作为分析问题的起点，叠层复合材料的力学性能可由上述宏观力学方法求出，或者可用实验方法直接求出。它借助现有均匀各向同性材料结构力学的分析方法，对各种形状的结构元件（如板、壳）进行力学分析，其中有层合板和壳结构的弯曲、屈曲与振动问题，以及疲劳、断裂、损伤、开孔强度等问题。

ANSYS Mechanical 可以进行复合材料结构力学维度的相关研究。

总之，复合材料的力学理论作为固体力学的一个新的学科分支，是近几十年来发展形成的，它涉及根据复合材料的制造工艺、性能测试和结构设计等进行力学分析。随着新复合材料的不断发展和广泛应用，复合材料力学理论也将不断发展。

1.1.5 复合材料的力学性能

1. 纤维增强复合材料的主要力学性能

复合材料与常规金属材料相比具有优良的力学性能，不同的纤维和基体材料组成的复合材料的性能也很不相同。表 1-3 列出几种目前较成熟的复合材料的主要力学性能，为了对比，表中还列出几种常用金属材料性能数据。

表 1-3 几种复合材料的力学性能

材料	相对密度 γ	纵向拉伸强度 $\sigma_b/10\text{MPa}$	纵向拉伸模量 $E/10^5\text{MPa}$	比强度 (σ_b/γ) /10MPa	比模量 (E/γ) /10 ⁵ MPa
玻璃/环氧	1.80	137	0.45	76.1	0.25
高强碳/环氧	1.50	133	1.55	88.7	1.03
高模碳/环氧	1.69	63.6	3.02	37.6	1.79
K-49/环氧	1.38	131	0.78	94.9	0.57
铝合金	2.71	29.6	0.70	10.9	0.26
钛合金	4.43	10.6	1.13	23.9	0.26
钢(高强)	7.83	134	2.05	17.1	0.26

主要的力学性能比较常常采用比强度和比模量值，它们表示在重量相当的情形下材料的承载能力和刚度，其值愈大，表示性能愈好。但是这两个值是根据材料受单向拉伸时的强度和伸长确定的，实际上结构受载条件和破坏形式是多种多样的，这时的力学性能不能完全用比强度和比模量来衡量，因此这两个值只是粗略的定性性能指标。

玻璃纤维增强复合材料的特点是比强度高、耐腐蚀、电绝缘、易制造、成本低，很早就开始应用，现在其应用还很广泛，缺点是比模量较低。

碳纤维复合材料有很高的比强度和比模量，耐高温、耐疲劳、热稳定性好，但成本较高，现已逐步扩大应用，已成为主要的先进复合材料。

芳纶纤维增强复合材料是一种新的复合材料，它有较强的比强度和比模量，成本比玻璃钢高，但比碳纤维复合材料低，正发展成较广泛应用的材料。

现在已制成各种混杂纤维增强复合材料，它具有比单一复合材料更好的力学性能，并已在各种工程中广泛应用。

2. 复合材料的优点

(1) 比强度高。尤其是高强度碳纤维、芳纶纤维复合材料。

(2) 比模量高。除玻璃纤维环氧复合材料外，其余复合材料的比模量都比金属高很多，特别是高模量碳纤维复合材料。

(3) 材料具有可设计性。这是复合材料与金属材料的很大不同点，复合材料的性能除了取决于纤维和基体材料本身的性能外，还取决于纤维的含量和铺设方式。因此，我们可以根据载荷条件和结构构件形状，将复合材料内纤维设计成适当含量并合理铺设，以使用最少的材料满足设计要求，最有效地发挥材料的作用。

(4) 制造工艺简单，成本较低。复合材料构件一般不需要很多复杂的机械加工设备，生

产工序较少,它可以制造形状复杂的薄壁结构,消耗材料和工时较少。

(5) 某些复合材料热稳定性好。如碳纤维和芳纶纤维具有负的热膨胀系数,因此,当与具有正热膨胀系数的基体材料适当组合时,可制成热膨胀系数极小的复合材料,当环境温度变化时,结构只有极小的热应力和热变形。

(6) 高温性能好。通常铝合金可用于 $200^{\circ}\text{C}\sim 250^{\circ}\text{C}$, 温度更高时其弹性模量和强度将降低很多。而碳纤维增强铝复合材料能在 400°C 下长期工作,力学性能稳定;碳纤维增强陶瓷复合材料能在 $1200^{\circ}\text{C}\sim 1400^{\circ}\text{C}$ 下工作;碳/碳复合材料能承受近 3000°C 的高温。

此外,各种复合材料还具有不同的优良性能,如抗疲劳性、抗冲击性、透电磁波性、减振阻尼性和耐腐蚀性等。

3. 复合材料的缺点

(1) 材料各向异性严重。垂直于纤维方向的性能主要取决于基体材料的性能和基体与纤维间的结合能力。一般垂直于纤维方向的力学性能较低,特别是层间剪切强度很低。

(2) 材料性能分散度较大,质量控制和检测比较困难,但随着加工工艺的改进和检测技术的发展,材料质量可提高。性能分散性在逐渐减小。

(3) 材料成本较高。目前硼纤维复合材料最贵,碳纤维复合材料比金属成本较高,玻璃纤维复合材料成本较低。

(4) 有些复合材料韧性较差,机械连接较困难。

以上缺点除各向异性是固有的外,有些可以设法改进,提高性能,降低成本。总之,复合材料的优点远多于缺点,因此具有广泛的使用领域和巨大的发展前景。

1.1.6 复合材料的各种应用

20 世纪 40 年代初,由于航空工业和其他工业的需要,在设计和制造高性能复合材料方面有很大的进展。玻璃钢最早于 1942 年在美国生产并应用于军用飞机雷达天线罩,它必须承受飞行时的空气动力载荷,耐气候变化,在使用温度范围内制品尺寸稳定,同时特别要求能透过雷达波。铝材可满足强度要求,但不能透过雷达波,陶瓷材料则相反,而玻璃纤维复合材料两方面都能满足要求,因此在飞机制造方面得到应用。后来又逐步应用于其他方面,由于玻璃钢弹性模量不够高,不能满足飞行器刚度的高要求,20 世纪 60 年代美、英等国先后研制成硼纤维、碳纤维、石墨纤维、芳纶纤维等增强的先进复合材料,并很快在航空航天领域得到应用。

我国从 20 世纪 50 年代以来发展了复合材料工业并开展各种应用,下面分几方面介绍复合材料在国内外的应用情况。

1. 航空航天工程中的应用

航空方面,国内外已应用于飞机机身、机翼、驾驶舱、螺旋桨、雷达罩、机翼表面整流装置、直升机旋翼桨叶等。其中除单一复合材料外,还大量应用混杂复合材料,如碳纤维和玻璃纤维混杂复合材料、碳纤维和芳纶纤维复合材料等。例如,1981 年美国 Leav Fan 飞机公司制成全复合材料飞机,空载重量 1816kg,航速 640km/h,飞行高度 12000m,高空飞行 3680km,所用燃料降低 80%。

航天方面,要将航天飞行器送入地球轨道,必须超越第一宇宙速度 7.91km/s 。按牛顿第二定律,物体得到的加速度与所受的力成正比,与其质量成反比,即既要增加火箭发动机的推力又要减轻飞行器结构的重量,而减重必须用先进复合材料。国外的航天飞机,硼/铝复合材料