

高等工程力学系列规划教材

# 复合材料与 粘弹性力学

张少实 庄 茁 编著  
杜善义 主审

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



高等工程力学系列规划教材

# 复合材料与粘弹性力学

张少实 庄 苗 编著

杜善义 主审



机械工业出版社

本书为“高等工程力学系列规划教材”之一，阐述了复合材料力学与粘弹性力学的基础知识。

本书分为两部分，第一部分为复合材料力学行为，包括复合材料的应力与应变关系、正交各向异性单向板的强度准则及细观力学分析、层合板的刚度与强度分析、复合材料的结构设计及有关专题等内容；第二部分为粘弹性力学行为，主要阐述聚合物的粘弹性与屈服行为、材料的非线性粘弹性力学行为和超弹性力学行为等内容。

本书既注重基础知识、基本概念的表述，又结合了学科发展和工程应用实例；既对成熟理论、技术给出了结论，又对未来发展进行了启发式的讨论。

本书可作为力学专业高年级本科生和非力学专业研究生的力学系列教材，也可作为从事复合材料和粘弹性材料的研究人员与工程师的参考书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

复合材料与粘弹性力学/张少实，庄茁编著. —北京：机械工业出版社，2005.1

高等工程力学系列规划教材

ISBN 7-111-15385-5

I. 复… II. ①张…②庄… III. ①复合材料力学-高等学校-教材②工程力学：弹性力学-高等学校-教材 IV. ①TB301②TB125

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 103634 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：季顺利 责任编辑：马军平 版式设计：霍永明

责任校对：王欣 封面设计：姚毅 责任印制：施红

北京金明盛印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·6.25 印张·240 千字

0 001 - 3000 册

定价：18.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

## 高等工程力学系列规划教材编委会

主任委员	徐秉业			
副主任委员	郭乙木	庄 茁	亢一澜	林 松
委 员	(按姓氏笔画排序)			
	计欣华	亢一澜	邓宗白	张少实
	张义同	庄 茁	朱为玄	林 松
	季顺利	肖明葵	杨伯源	武建华
	郭乙木	徐秉业	徐铭陶	陶伟明
	蒋持平	鲁 阳		
秘 书	季顺利			

# 前 言

虽然复合材料的使用历史可以追溯到远古,例如,古埃及人使用多层木板,犹太人用稻秆加强泥砖等。但作为一门科学,作为力学的一个分支,复合材料力学的兴起与发展还是近半个多世纪的事情,而先进复合材料的研究也只有二、三十年的历史。复合材料的发展历史虽然不长,但由于航天、航空等高新技术领域的迫切需求,由于材料科学以及制造技术的高度发展,使得复合材料科学的发展日新月异、突飞猛进。复合材料以其比强度高、比模量高、耐高温、抗疲劳性能好、具有可设计性等特有的优越性能,不仅广泛地应用在航天、航空、航海、原子能等领域,而且已应用到机械、化工、交通、建筑等普通工业技术领域以及人们的日常生活之中。

复合材料的研究与应用,涉及各向异性弹性力学、粘弹性力学等力学知识,涉及材料科学与材料工艺等知识。愈来愈多的科研人员与工程师们对复合材料与粘弹性力学发生了浓厚的兴趣。国内外许多高等院校也将复合材料与粘弹性力学列为相关专业本科生与研究生的必修课与选修课。面对这样的喜人形势,作者愈加坚定实现一个宿愿,那就是将多年来从事本科生与研究生复合材料力学与粘弹性力学的教学讲稿和教学经验总结、归纳、提炼,编撰成一本书,作为相关专业的教材或参考书,为复合材料的蓬勃发展推波助澜。机械工业出版社组织的高等工程力学系列规划教材编委会,为本书的编写与出版提供了莫大支持与帮助。在本书出版之际,谨向编委会的全体同仁和对本书出版给予关注与帮助的专家、学者们致以诚挚的谢意。

在本书的编写过程中,得到了杜善义院士的亲切关怀。杜院士在百忙中审阅了书稿,对本书的内容、体系、结构等诸多方面提出了极为宝贵的意见,为本书内容的科学性与先进性的把握等大方向问题起到了导引作用。在此,向杜院士致以崇高的敬意和真挚的谢意。

本书分为两部分,总计10章。第一部分从第1章到第7章,为复合材料力学行为,由哈尔滨工业大学张少实教授编著;第二部分从第8章到第10章,为粘弹性力学行为,由清华大学庄茁教授编著,全书由张少实教授统稿。

本书得到了哈尔滨工业大学教务部、航天学院航天科学与力学系以及清华大学教务处和航天航空学院工程力学系有关领导和同事的关心,在此,致以谢意。

作 者

## 主要符号表

$A$	横截面面积, 积分常数, 层合板拉压刚阵
$A_{ij}$	层合板拉压刚度系数
$B$	积分常数, 层合板耦合刚阵
$B_{ij}$	层合板耦合刚度系数
$C_{ij}$	刚度系数
$[C]$	刚度矩阵
$D$	层合板弯曲刚阵
$D_{ij}$	层合板弯曲刚度系数
$E$	弹性模量
$E_f, E_m$	纤维、基体的弹性模量
$E_i, E_1, E_2, E_3$	材料主方向上的弹性模量
$E_x, E_y, E_z$	$x, y, z$ 方向上的弹性模量
$E_\epsilon, U_\epsilon$	应变能
$F_x, F_y, F_z$	体积力沿 $x, y, z$ 方向分量
$F_i, F_{ij}, F_{ijk}$	Tsai—Wu 张量强度准则的强度参数
$F, H, L, M, N$	各向异性材料强度系数
$F_{12}$	影响系数
$G$	切变模量, 强度系数
$G_f, G_m$	纤维、基体的切变模量
$G_{ij}, G_{12}, G_{23}, G_{13}$	材料主方向上的切变模量
$G_{xy}, G_{yz}, G_{zx}$	$x, y, z$ 方向上的切变模量
$h$	层合板总厚度
$K$	体积弹性模量
$k$	层合板层号
$k, k_x, k_y, k_{xy}, \{k\}$	弹簧刚度系数, 曲率
$M$	复合材料弹性常数
$M_x, M_y, M_{xy}$	层合板的合力矩
$N$	层合板层数
$N_x, N_y, N_{xy}$	层合板的合力
$Q_{ij}$	单向板(铺层)材料主方向的刚度系数
$[Q]$	单向板(铺层)材料主方向的刚度矩阵

$\bar{Q}_{ij}$	单向板（铺层）非材料主方向的刚度系数
$[\bar{Q}]$	单向板（铺层）非材料主方向的刚度矩阵
$R$	强度比
$\gamma_f, \gamma_m$	纤维、基体切应变
$S$	复合材料在 1—2 面内抗剪强度
$S_{ij}$	柔度系数
$[S]$	柔度矩阵
$\bar{S}_{ij}$	单向板（铺层）非材料主方向的柔度系数
$[\bar{S}]$	单向板（铺层）非材料主方向的柔度矩阵
$t$	时间, 单向板（铺层）厚度
$T$	温度
$[T_\sigma], [T_\epsilon]$	单向板（铺层）的应力、应变转换矩阵
$u$	沿 $x$ 方向位移, 作下脚标时表示极限
$U_\sigma$	余能
$U$	应变能密度
$v$	沿 $y$ 方向位移, 体积比
$w$	沿 $z$ 方向位移, 宽度
$x, y, z$	直角坐标
$X_f, X_m$	纤维、基体强度
$X_t, X_c$	复合材料沿纤维方向的抗拉、抗压强度
$Y_t, Y_c$	复合材料沿垂直纤维方向的抗拉、抗压强度
$Z$	层合板厚度坐标
$\xi, \eta$	参数, 粘性系数
$\eta_{xy,x}, \eta_{xy,y}, \eta_{x,xy}, \eta_{y,xy}$	耦合系数
$\alpha_{11}, \alpha_{12}$	线胀系数
$\gamma, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}, \gamma_{12}, \gamma_{23}, \gamma_{31}$	切应变
$\theta$	体积应变, 角度
$\nu$	泊松比
$\nu_f, \nu_m$	纤维、基体的泊松比
$\nu_{ij}, \nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{31}$	材料主方向上的泊松比
$\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{zx}$	$x, y, z$ 方向上的泊松比
$\Delta$	增量
$\delta$	伸长率
$\sigma_b$	抗拉强度
$\bar{\sigma}$	平均应力
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	与材料主方向平行的正应力
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	与 $x, y, z$ 平行的正应力

$\sigma_f$ 、 $\sigma_m$	纤维、基体中正应力
$\tau$ 、 $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{yz}$ 、 $\tau_{xz}$ 、 $\tau_{12}$ 、 $\tau_{23}$ 、 $\tau_{13}$	切应力
$\tau_f$ 、 $\tau_m$	纤维、基体中切应力
$\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ 、 $\epsilon_3$	材料主方向上的线应变
$\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y$ 、 $\epsilon_z$	$x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的线应变
$\epsilon_f$ 、 $\epsilon_m$	纤维、基体线应变
$\{\epsilon^0\}$	层合板中面应变向量
$\rho$	单位体积质量



# 目 录

## 前言

## 主要符号表

<b>第 1 章 复合材料概论</b> .....	1
1.1 复合材料的定义与分类 .....	1
1.2 复合材料的结构形式与制造方法 .....	6
1.3 复合材料的特性及分析方法 .....	8
<b>第 2 章 各向异性材料的弹性应力—应变关系</b> .....	11
2.1 引言 .....	11
2.2 各向异性材料的应力—应变关系 .....	12
2.3 正交各向异性材料的应力—应变关系 .....	15
2.4 横观各向同性材料与各向同性材料 .....	17
2.5 正交各向异性材料弹性常数的物理意义 .....	19
2.6 正交各向异性材料工程常数的取值范围 .....	22
2.7 单向板的应力—应变关系 .....	25
2.8 广义正交各向异性单向板的表观工程常数 .....	29
2.9 结论与讨论 .....	31
2.10 习题 .....	32
<b>第 3 章 正交各向异性单向板的强度准则</b> .....	34
3.1 复合材料的强度特性与强度准则概念 .....	34
3.2 最大应力强度准则与最大应变强度准则 .....	36
3.3 Tsai—Hill (蔡—希尔) 强度准则 .....	39
3.4 Tsai—Wu (蔡—吴) 张量强度准则 .....	41
3.5 单向板的强度比方程 .....	45
3.6 结论与讨论 .....	47
3.7 习题 .....	48
<b>第 4 章 单向板刚度与强度的细观力学分析</b> .....	50
4.1 引言 .....	50
4.2 用材料力学方法分析刚度 .....	51
4.3 用弹性力学能量原理分析刚度的上下限 .....	54
4.4 用弹性力学精确解法分析刚度 .....	57

4.5	用接触时的弹性力学解法分析刚度 .....	61
4.6	用半经验法预测刚度 .....	62
4.7	单向板沿纤维方向的抗拉强度 .....	63
4.8	单向板沿纤维方向的抗压强度 .....	66
4.9	单向板沿垂直纤维方向的抗拉、抗压强度与面内抗剪强度 .....	69
4.10	纤维—基体的界面 .....	71
4.11	结论与讨论 .....	72
4.12	习题 .....	73
<b>第 5 章</b>	<b>层合板的刚度与强度分析 .....</b>	<b>75</b>
5.1	引言 .....	75
5.2	层合板的标记 .....	76
5.3	经典层合板理论 .....	78
5.4	单层板的刚度 .....	83
5.5	对称层合板的刚度 .....	85
5.6	反对称层合板的刚度 .....	87
5.7	层合板刚度的坐标变换 .....	90
5.8	层合板刚度的实验验证 .....	91
5.9	层合板的强度分析 .....	97
5.10	层合板的层间应力与边缘效应 .....	104
5.11	结论与讨论 .....	107
5.12	习题 .....	108
<b>第 6 章</b>	<b>复合材料结构设计 .....</b>	<b>110</b>
6.1	复合材料结构设计的新理念 .....	110
6.2	复合材料结构设计概述 .....	111
6.3	材料设计 .....	113
6.4	层合板设计 .....	116
6.5	结论与讨论 .....	122
6.6	习题 .....	123
<b>第 7 章</b>	<b>复合材料力学的几个专题 .....</b>	<b>124</b>
7.1	纤维端部的应力与应变分布 .....	124
7.2	短纤维复合材料 .....	126
7.3	复合材料的疲劳 .....	129
7.4	结论与讨论 .....	132
7.5	习题 .....	133

<b>第 8 章 聚合物的粘弹性与屈服行为</b> .....	134
8.1 引言 .....	134
8.2 聚合物的粘弹性行为 .....	135
8.3 拉普拉斯变换的应用 .....	140
8.4 聚合物的屈服与应变软化和硬化行为 .....	144
8.5 结论与讨论 .....	147
8.6 习题 .....	150
<b>第 9 章 材料的非线性粘弹性行为</b> .....	152
9.1 非线性应变蠕变 .....	152
9.2 非线性应力松弛 .....	153
9.3 工程应用实例 .....	154
9.4 非线性粘弹性构件设计方法 .....	158
9.5 梁弯曲与轴扭转的蠕变问题 .....	160
9.6 结论与讨论 .....	162
9.7 习题 .....	163
<b>第 10 章 材料的超弹性力学行为</b> .....	165
10.1 橡胶材料 .....	165
10.2 超弹性材料的本构关系 .....	168
10.3 橡胶大变形和小变形的力学行为 .....	170
10.4 常用橡胶材料的本构关系 .....	173
10.5 试验拟合超弹性本构模型系数 .....	178
10.6 结论与讨论 .....	180
10.7 习题 .....	181
<b>附录</b> .....	183
附录 A 拉普拉斯变换简表 .....	183
附录 B 张量标记 .....	185
<b>参考文献</b> .....	187

# 第 1 章 复合材料概论

## 1.1 复合材料的定义与分类

### 1.1.1 复合材料的定义

复合材料 (Composite materilas) 是由两种或两种以上异质、异性、异形的材料, 在宏观尺度上复合而成的一种完全不同于其组成材料的新型材料。复合材料的定义包括如下四个含义:

(1) 它包含两种或两种以上物理上不同并可用机械方法分离的材料。

(2) 它可以通过将几种分离的材料混合在一起而制成。混合的方法是, 人为控制下将一种材料分散在其他材料之中, 使其达到最佳性能。

(3) 复合后的性能优于各单独的组成材料, 并在某些方面可能具有组成材料所没有的独特性能。

(4) 通过选取不同的组成材料、改变组成材料的含量与分布等微结构参数, 可以改变复合材料的性能, 即材料性能具有可设计性并拥有最大的设计自由度。

复合材料的组成材料称为组分材料。组分材料分为两部分: 一部分为增强体 (Reinforced body), 承担结构的各种工作载荷; 另一部分为基体 (Matrix), 起到粘结增强体予以赋形并传递应力和增韧的作用。增强体分为:

(1) 纤维 (Fibre)。包括连续纤维、短切纤维、晶须。

(2) 颗粒。包括微米颗粒与纳米颗粒。

(3) 片材。包括人工晶片与天然片状物等。

基体主要分为:

(1) 有机聚合物。

(2) 金属。

(3) 陶瓷。

(4) 水泥。

(5) 碳 (石墨) 等。

复合材料具有组分材料所没有的全新性能, 可以用双金属条 (Bimetallic strip) 这一简单的例子来说明。两个不同的金属条, 它们的线胀系数是不同的。当这两个金属条在各自分开情况下加热, 它们仍然是平直的, 只是膨胀变形的程度不同而已。可是当把这两个金属条焊合成一体, 这时再加热, 那么双金属条就

会向线胀系数小的一侧弯曲。可见，复合后的双金属条却具有受热弯曲的新性质。

构造出的复合材料，能改善的性能主要有：

- 强度      · 刚度      · 疲劳寿命      · 耐高温性      · 耐腐蚀性      · 耐磨性
- 吸水性      · 重量      · 抗震性      · 导热性      · 绝热性      · 隔声性

当然，上述各种性能不可能同时都有所改善，工程实际中也不存在这样的要求。

### 1.1.2 复合材料的分类

复合材料的种类繁多，按性能的优劣程度可分为：

(1) 常用复合材料 (Common composite materials)。例如，玻璃/环氧树脂复合材料等。

(2) 先进复合材料 (Advanced composite materials)。例如，以碳、芳纶、硼等纤维和晶须等高性能增强体与耐高温的高聚物、金属、陶瓷和碳 (石墨) 等基体复合的复合材料。

按用途可分为：

(1) 结构复合材料。主要用于承力与次承力构件的材料。

(2) 功能复合材料。实现具有某种功能的复合材料，如导电材料、导磁材料、导热材料、屏蔽材料等。

结构复合材料，按基体材料来分类，如图 1-1 所示。

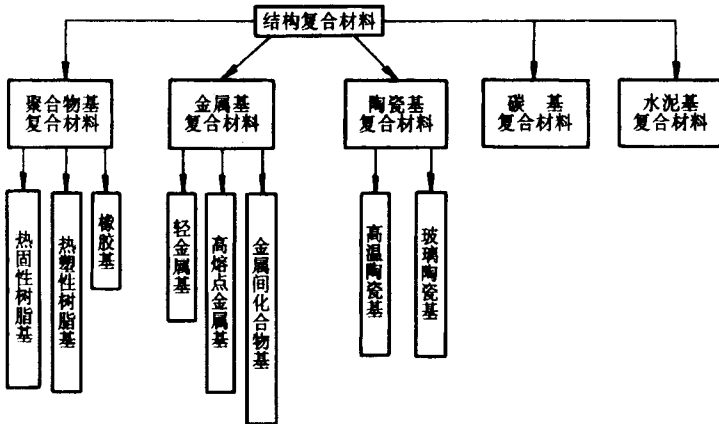


图 1-1 结构复合材料按不同基体分类

结构复合材料，按增强体材料来分类，如图 1-2 所示。

### 1.1.3 几种常用纤维

1. 玻璃纤维 (Glass fibre)

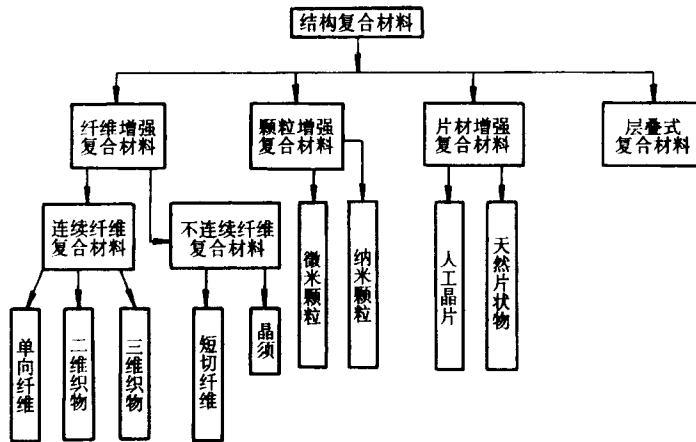


图 1-2 结构复合材料按不同增强体形式分类

玻璃纤维有三个品种，E 玻璃、C 玻璃与 S 玻璃。E 玻璃是最常用的一种，具有优良的延展性、电性能和抗老化性能，具有较高的强度与刚度。C 玻璃具有比 E 玻璃更好的抗化学腐蚀性能，但其成本较高，强度较低。S 玻璃具有更高的模量与更好的耐高温性能，但价格昂贵。

总的说来，玻璃纤维直径  $5 \sim 10 \mu\text{m}$ ，强度较高，伸长率大，可制成织物，但弹性模量较低，约为  $7 \times 10^4 \text{MPa}$ ，与铝接近。一般硅酸盐玻璃能耐  $450^\circ\text{C}$  的高温，石英和高硅氧玻璃纤维可耐  $1000^\circ\text{C}$  以上的高温。

## 2. 碳纤维 (Carbon fibre)

碳纤维是用各种有机纤维加热碳化而成。主要以聚丙烯腈 (PAN) 纤维或沥青为原料，经纤维加热氧化、碳化、石墨化处理而成。碳纤维可分为高强度、高模量、极高模量等几种，后两种需经  $2500 \sim 3000^\circ\text{C}$  石墨化处理，又称为石墨纤维。由于碳纤维制造工艺较简单，价格较便宜，因而是最重要的先进纤维材料。其密度小于玻璃纤维，模量却比玻璃纤维高好几倍。碳纤维的直径为  $6 \sim 10 \mu\text{m}$ ，应力—应变关系为一直线，纤维断裂前是弹性体。高模量碳纤维的弹性模量为  $200 \text{GPa}$  以上，最高可达  $920 \text{GPa}$ ，最大伸长率为  $0.35\%$ ；抗拉强度可达  $3.5 \text{GPa}$  以上。碳纤维的线胀系数具有各向异性，沿纤维方向  $\alpha_{11} = -0.7 \times 10^{-6} \sim -0.9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，而垂直纤维方向  $\alpha_{12} = 22 \times 10^{-6} \sim 32 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

## 3. 高强有机纤维 (Organic fibre with high strength)

高强、高模量有机纤维通过两种途径获得。一是由分子设计并借助相应的合成方法制备具有刚棒状分子链的聚合物。例如，聚芳酰胺、聚芳脂和芳杂环类聚合物，经过干湿法液晶纺丝法制成分子高度取向的纤维。另一途径是合成超高分子量的柔性链聚合物，如聚乙烯。聚芳酰胺的性能以 Kevlar49 (杜邦公司生产)

为例,其抗拉强度为 2.8GPa,弹性模量为 104GPa。虽然比不上碳纤维,但由于其密度仅为  $1.45\text{g/cm}^3$ ,比碳纤维 ( $1.8\sim 1.9\text{g/cm}^3$ ) 低,因而其比强度与比模量高。超高分子聚乙烯纤维,抗拉强度为 4.4GPa,弹性模量为 157GPa,密度为  $0.97\text{g/cm}^3$ ,但其耐温性较差,影响了它的应用。最近开发的芳杂环类的聚对苯撑双恶唑纤维,其抗拉强度高达 5.3GPa,弹性模量为 250GPa,密度为  $1.58\text{g/cm}^3$ ,可耐  $600^\circ\text{C}$  的高温,很具吸引力。

#### 4. 无机纤维 (Inorganic fibre)

无机纤维的特点是熔点高,特别适合与金属基、陶瓷基或碳基形成复合材料。硼纤维是借助化学气相沉积 (CVD) 方法,形成直径为  $50\sim 315\mu\text{m}$  的连续单丝。其抗拉强度为 3.5GPa,弹性模量为 400GPa,密度为  $2.5\text{g/cm}^3$ 。由于硼纤维价格昂贵而限制了应用,取而代之的是碳化硅纤维,它也是采用 CVD 法生产,但其芯材已由钨丝改为碳丝,形成直径为  $100\sim 150\mu\text{m}$  的单丝,其抗拉强度为 3.4GPa,弹性模量为 400GPa,密度为  $3.1\text{g/cm}^3$ 。另一种碳化硅纤维是用有机体的先驱纤维烧制而成。这种纤维直径仅为  $10\sim 15\mu\text{m}$ ,抗拉强度为  $2.5\sim 2.9\text{GPa}$ ,弹性模量为 190GPa,密度为  $2.55\text{g/cm}^3$ 。无机纤维类还有氧化铝纤维、氮化硅纤维等。

各种纤维增强材料的抗拉强度和弹性模量如图 1-3 所示。

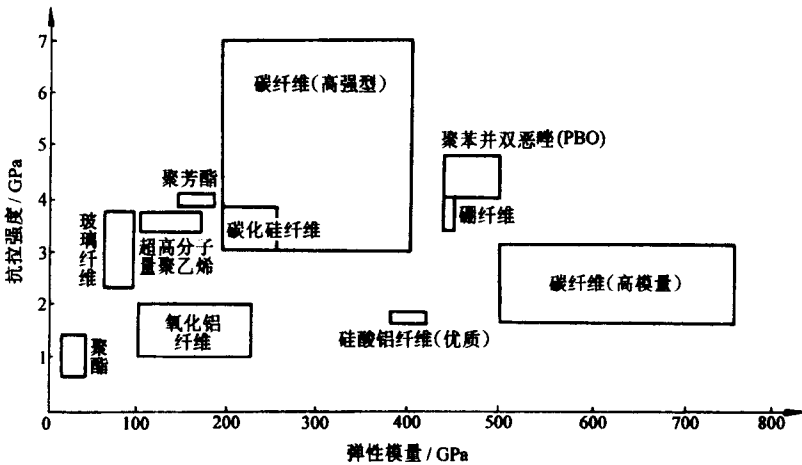


图 1-3 各种纤维增强体的抗拉强度和弹性模量

#### 1.1.4 几种常用基体

##### 1. 树脂基体 (Resin matrix)

分为热固性与热塑性两大类。对于热固性树脂 (Thermosetting resin) 常用的有环氧树脂 (Epoxy resin)、酚醛树脂 (Phenolic resin) 和不饱和聚酯树脂 (Polyester resin) 等,它们最先应用于复合材料。环氧树脂应用得最广泛,其主

要优点是粘结力强，与纤维表面浸润性好，固化收缩小，有较高耐热性，固化成型方便等。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，但固化时收缩大，耐热性差。热固性树脂固化后均不能软化。

热塑性树脂 (Thermoplastic resin) 有聚乙烯、聚苯乙烯、聚酰胺 (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，易于制造模压复合材料。

几种常用树脂材料的性能，见表 1-1。

表 1-1 几种常用树脂的性能

序号	名称	相对密度 $\gamma$	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	伸长率 $\delta$ (%)	弹性模量 $E$ / ( $\times 10^3$ MPa)	抗压强度 /MPa	抗弯强度/ MPa
1	环氧树脂	1.15	85	5	3.2	110	130
2	酚醛树脂	1.3	42~64	1.5~2.0	3.2	88~110	78~120
3	聚酯树脂	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	77	100

## 2. 金属基体 (Metallic matrix)

金属基体主要用于耐高温或其他特殊需要场合的复合材料，具有耐 300℃ 以上高温，表面抗浸蚀，导电导热，不透气等优点。金属基体材料有铝、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 (Ceramic matrix)

陶瓷基体耐高温，化学稳定性好，具有高模量和高抗压强度。其脆性，耐冲击性差，故用纤维增强制成陶瓷基复合材料，可改善抗冲击性，并已试用于制造发动机部分零件。陶瓷基体材料包括陶瓷、玻璃和玻璃陶瓷。

## 4. 碳素基体 (Carbon matrix)

碳素基体主要用于碳纤维增强碳基体复合材料，这种材料称碳/碳复合材料。随纤维与基体的不同它分为三种：碳纤维增强碳、石墨纤维 (Graphite fibre) 增强碳、石墨纤维增强石墨。碳/碳复合材料是耐温最高的材料，其强度随温度升高而增加，在 2500℃ 左右达到最大值。同时，它具有良好的抗烧蚀性能和抗热震性能。碳/碳复合材料目前主要用于导弹头部的再入热防护、固体发动机喷管



和飞机刹车片等。

本书主要讨论纤维增强复合材料。

## 1.2 复合材料的结构形式与制造方法

### 1.2.1 复合材料的基本结构形式

对于纤维增强复合材料，基本结构形式为：

#### 1. 单向板（铺层）（Unidirectional lamina）

如图 1-4 所示，单向板中纤维按一个方向整齐排列或由双向编织纤维平面排布（有时是曲面，如在壳体中）。通常纤维方向称为纵向，用“1”表示，垂直于纤维方向（有时有交织纤维，含量较少）称为横向，用“2”表示，沿单向板厚度方向用“3”表示。1, 2, 3 轴称为材料主轴。

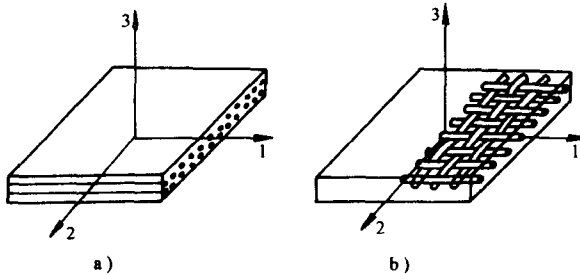


图 1-4 单向板结构形成

a) 单向纤维 b) 交织纤维

单向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。单向板是非均匀材料，虽然纤维与基体分别都可能是各向同性材料，但由于纤维排布有方向性，因而单向板一般是各向异性的。

#### 2. 层合板（叠层复合材料）（Laminate）

层合板是一叠单向板，各单向板的材料主方向定向不同，如图 1-5 所示。通常层合板的各个铺层是用与单向板相同的基体材料粘合起来的。层合的主要目的是设计与方向有关的材料强度和刚度，以满足结构元件的承载要求。层合板是惟一能适用于这样目的的，它可以按照需要来确定每一层的材料主方向。例如，十层层合板中

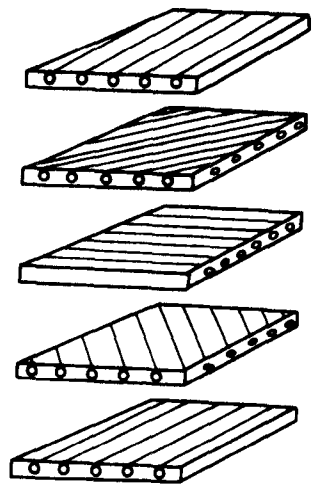


图 1-5 层合板结构形式