

高等学校试用教材

# 复合材料结构设计基础

李顺林 王兴业 主编

武汉工业大学出版社



高等学校试用教材

# 复合材料结构设计基础

李顺林 主 编  
王兴业

刘锡礼 主 审  
刘德安

武汉工业大学出版社

鄂新登字 13 号

## 内 容 提 要

本书是为高等学校复合材料专业学生编写的一本全国统编教材,可供 70 学时教学使用。

本书从大学工程类材料力学基础出发,介绍了复合材料力学、复合材料结构力学和复合材料构件设计的基本知识。全书共分 7 章,内容包括复合材料单层的刚度和强度、复合材料层合板的刚度和强度、复合材料结构分析、复合材料连接、复合材料设计的一般方法和典型产品设计。书中编入了适当的例题,并附有习题。全书在编写中,内容由浅入深,循序渐进,除作为教材外,还可供有关专业师生和工程技术人员参考。

高等学校试用教材

### 复合材料结构设计基础

◎李顺林 王兴业 主编

责任编辑 杨学忠

\*

武汉工业大学出版社出版

新华书店湖北发行所发行 各地新华书店经销

湖北省石首市第二印刷厂印刷

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:19 插页:1 字数:460 千字

1993 年 11 月第 1 版 1993 年 11 月第 1 次印刷

印数:1—2500 册

ISBN 7-5629-0806-0/TQ·86

定价:10.50 元

## 前 言

现代复合材料的发展始于二十世纪40年代。60年代初出现了先进复合材料——一种比强度、比模量高的纤维增强的复合材料,使复合材料得以更为迅速的发展。目前,复合材料作为材料学科中一支独立的新的学科分支,已得到广泛重视,正日益发展,并在许多工业部门得到广泛应用,成为当今高科技发展中新材料开发的一个重要方面。

《复合材料结构设计基础》是高等学校复合材料类专业教学指导委员会确定统编的、为复合材料专业学生使用的一本专业教材,按70学时编写。本教材包括复合材料经典层合板理论;刚度和强度的计算方法;复合材料结构元件的分析和典型产品结构设计的基本步骤和方法等内容。通过学习本教材,使学生掌握关于复合材料结构设计的基本知识。考虑到各院校对本课程要求的不同,在讲授时可以根据具体情况取舍。

目前,国内设有复合材料专业的各院校,以不同名称开设这门课程已有10余年,但内容与深度并不统一,这本统编教材吸收了各校多年的教学经验及比较成熟且能反映本课程发展前沿的内容编纂而成,希望它能为复合材料专业的学生掌握这方面的知识发挥一定作用。

根据各校复合材料专业现行的教育计划,这门课程的先修力学基础是材料力学。因此,本书在叙述时,是从学生已掌握材料力学基础知识出发,开拓复合材料力学的概念;比较传统材料结构的分析与设计,开拓复合材料结构的分析与设计,使读者掌握复合材料在力学性能和结构设计方面的特点。全书循序渐进、由浅入深,系统性较强,既便于教学又可自学,同时有些内容还具有相对独立性,便于使用时取舍。

本教材共分7章。第1、2、3、5、6章由李顺林编写,第4章由王兴业编写,第7章7.1节由王云凯编写,7.2节由肖军编写,7.3至7.5节由唐羽章编写。全书由李顺林、王兴业主编,由刘锡礼、刘德安主审。

本教材在编写过程中得到国家建材局、高等学校复合材料类专业教学指导委员会及其结构设计组的支持和指导,并对本书内容提出了许多宝贵的意见,作者谨向有关单位和个人表示衷心的感谢。由于作者水平有限,本教材的缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

## 主要符号表

$A$	面积、波幅、距离、拉梅参数、参数、系数
$A_j$	层合板的面内刚度系数
$a$	长度、距离、半径、系数
$a_j$	对称层合板的面内柔度系数、强度比值参数
$B$	宽度、距离、拉梅参数、参数、系数
$B_j$	层合板的耦合刚度系数
$b$	宽度、半径、距离、长度、系数
$C$	参数、系数
$C_j$	单层的模量分量
$c$	水分含量、支持系数、宽度、半径、比值、长度、参数、系数
$D$	抗弯(弯曲)刚度、直径、极限内力、参数、系数
$D_j$	层合板的弯曲刚度系数
$d$	距离、长度、直径
$d_j$	对称层合板的弯曲柔度系数
$E$	弹性模量、第二类椭圆积分、距离、参数、系数
$e$	单层的湿热膨胀应变、单位长、距离
$F$	应力空间中的强度参数、第一类椭圆积分、应力函数、力、极限强度、函数、参数、系数
$f$	体积力、挠度、函数、系数
$G$	剪切弹性模量、函数、参数、系数
$H$	距离、高度、力、函数、参数
$h$	厚度、高度、距离
$h_0$	单层厚度、距离
$I$	惯性矩
$J$	接头效率
$K$	应力比、系数
$k$	铺层序号、曲率、压力、剪切面数、参数、系数
$k_x, k_y, k_{xy}$	层合板的曲率和扭率、层合壳的曲率和扭率的变化量
$L$	长度、比值、算子、参数、系数
$l$	长度
$M$	质量、弯矩、力矩、参数、系数
$M_x, M_y, M_{xy}$	层合板的弯矩和扭矩
$m$	铺层角的余弦函数、单层组数、整数、参数、系数
$N$	内力、单层数、参数、系数
$N_x, N_y, N_{xy}$	层合板的面内力
$n$	铺层角的正弦函数、单层数、安全系数、整数、参数、系数
$P$	外力、函数、参数
$p$	压力、分布力、函数、参数
$p, q, r$	线性变换量
$Q$	剪力、热损耗
$Q_j$	单层的(折算)模量分量
$q$	分布载荷集度、剪流
$R$	强度比、半径、力、不变量、参数
$r$	半径、距离、参数

$S$	剪切强度、静矩、长度、面积、力、参数
$S_{ij}$	单层的柔量分量
$s$	宽度、长度、参数
$T$	温度、单位宽力、力、电磁波透过率
$T_g$	玻璃化转变温度
$t$	厚度、温度、距离
$U$	线性组合、总变形能
$u, v, w$	坐标轴方向的位移
$V$	体积含量、体积、几何因子、速度
$W$	度宽、应变能、重力、截面模量、力、间距
$w$	离面位移、挠度、宽度
$X$	纵向强度
$x, y, z$	直角坐标
$Y$	横向强度
$Z$	形状函数
$Z_{ij}$	单层的(折算)柔量分量
$\alpha$	坐标转换角、角度、热膨胀系数、曲线坐标、比值、参数、系数
$\alpha_{ij}$	层合板的面内柔度系数
$\beta$	角度、湿膨胀系数、曲线坐标、参数
$\beta_{ij}$	层合板的耦合柔度系数
$\gamma$	剪应变、容重、角度、参数
$\Delta$	变形量、位移、增量、微小量、角度、距离
$\delta$	位移、挠度、相位角、挠曲变形、厚度、介质损耗角
$\delta_{ij}$	层合板的弯曲柔度系数
$\epsilon$	线(正)应变、介电常数
$\eta$	拉伸与剪切或弯曲与扭转之间的耦合系数、效率、厚度、坐标值、无量纲化坐标
$\theta$	铺层角、角度、周向坐标
$\theta_0$	相位角
$\lambda$	比值、拉格朗日乘子、波长、斜率、参数、系数
$\nu$	泊松比(泊松耦合系数)
$\xi$	拉伸(含面内剪切)与弯曲(含扭转)之间的耦合系数、无量纲化坐标、坐标值
$\rho$	密度、曲率半径、比值
$\sigma$	正应力
$\tau$	剪应力、湿球温度
$\phi$	角度、体积力、应力函数
$\varphi$	角度、坐标、转角、函数
$\psi$	角度
$\omega$	角度

# 目 录

1	绪论 .....	(1)
1.1	复合材料的发展简史与现状 .....	(1)
1.2	复合材料的分类 .....	(2)
1.3	复合材料及其结构设计的特点 .....	(3)
2	单层的刚度与强度 .....	(8)
2.1	单层的正轴刚度 .....	(8)
2.1.1	单层的正轴应力-应变关系 .....	(8)
2.1.2	各种复合材料的单层正轴刚度参数 .....	(10)
2.2	单层的偏轴刚度 .....	(15)
2.2.1	应力转换与应变转换公式 .....	(15)
2.2.2	单层的偏轴应力-应变关系 .....	(16)
2.2.3	单层的偏轴模量 .....	(17)
2.2.4	单层的偏轴柔量 .....	(21)
2.2.5	单层的偏轴工程弹性常数 .....	(23)
2.3	单层的强度 .....	(29)
2.3.1	单层的基本强度 .....	(29)
2.3.2	单层的失效准则 .....	(30)
2.3.3	单层的强度比方程 .....	(33)
2.4	单层的三维应力-应变关系 .....	(34)
2.4.1	单层的一般三维应力-应变关系 .....	(35)
2.4.2	单层的正轴三维应力-应变关系 .....	(36)
2.4.3	横向各向同性单层的正轴三维应力-应变关系 .....	(36)
2.4.4	单层的偏轴三维应力-应变关系 .....	(37)
2.4.5	与平面应力状态的关系 .....	(38)
2.4.6	单层的三维工程弹性常数 .....	(38)
3	层合板的刚度与强度 .....	(43)
3.1	对称层合板的面内刚度 .....	(43)
3.1.1	层合板的表示法 .....	(43)
3.1.2	面内的内力与面内应变的关系 .....	(44)
3.1.3	对称层合板的面内工程弹性常数 .....	(46)
3.1.4	面内刚度系数的计算 .....	(46)
3.1.5	几种典型对称层合板的面内刚度 .....	(47)
3.1.6	对称层合板面内刚度的转换 .....	(53)
3.2	对称层合板的弯曲刚度 .....	(60)
3.2.1	弯曲力矩-曲率关系 .....	(60)
3.2.2	对称层合板的弯曲工程弹性常数 .....	(62)
3.2.3	弯曲刚度系数的计算 .....	(63)
3.2.4	几种典型对称层合板的弯曲刚度 .....	(64)

3.2.5	对称层合板弯曲刚度的转换	(67)
3.3	一般层合板的刚度	(76)
3.3.1	内力-应变关系	(74)
3.3.2	一般层合板的工程弹性常数	(76)
3.3.3	一般层合板刚度系数的计算	(77)
3.3.4	两种非对称层合板的刚度	(79)
3.3.5	一般层合板耦合刚度的转换	(81)
3.3.6	平行移轴定理	(82)
3.4	层合板的强度	(84)
3.4.1	最上一层失效强度	(84)
3.4.2	极限强度	(86)
3.4.3	层合板的湿热效应及其对强度的影响	(89)
4	复合材料结构分析	(97)
4.1	复合材料结构分析的基本问题	(97)
4.1.1	各向异性体弹性力学基本方程	(97)
4.1.2	弹性力学问题的一般解法	(100)
4.1.3	复合材料受拉直杆分析	(101)
4.1.4	纯剪和纯弯载荷作用下的复合材料构件分析	(103)
4.2	复合材料梁	(108)
4.2.1	层合梁分析	(108)
4.2.2	复合材料薄壁梁	(115)
4.3	夹层结构分析	(120)
4.3.1	夹层板分析基础	(121)
4.3.2	蜂窝夹层结构的工程计算	(125)
4.4	复合材料板的弯曲分析	(133)
4.4.1	板弯曲控制方程	(133)
4.4.2	复合材料板弯曲的应力和应变	(138)
4.4.3	四边简支正交各向异性板弯曲的解	(138)
4.4.4	正交各向异性板弯曲问题的列维解法	(141)
4.4.5	一般层合板的弯曲分析	(142)
4.4.6	复合材料板的屈曲	(146)
4.5	复合材料壳体分析	(151)
4.5.1	薄壳的定义与基本假设	(151)
4.5.2	曲面几何基础	(151)
4.5.3	壳体上任意一点的位移	(156)
4.5.4	壳体的应变	(158)
4.5.5	壳体内力及变形与内力的关系	(161)
4.5.6	壳体的平衡方程	(163)
4.5.7	复合材料圆柱壳分析	(165)
4.5.8	层合壳薄膜理论	(168)
5	复合材料连接	(171)



5.1	复合材料连接方式	(171)
5.1.1	胶接与机械连接的比较	(171)
5.1.2	接头效率	(172)
5.2	胶接连接	(172)
5.2.1	胶接连接接头的分析	(173)
5.2.2	胶接连接设计	(176)
5.3	机械连接	(179)
5.3.1	机械连接接头的分析	(180)
5.3.2	机械连接设计	(185)
6	复合材料结构设计	(189)
6.1	概述	(189)
6.1.1	复合材料结构设计过程	(189)
6.1.2	设计条件	(190)
6.2	材料设计	(191)
6.2.1	原材料的选择与复合材料性能	(192)
6.2.2	单层性能的确定	(195)
6.2.3	复合材料层合板设计	(200)
6.3	结构设计	(208)
6.3.1	结构设计的一般原则	(208)
6.3.2	结构设计应考虑的工艺性要求	(209)
6.3.3	许用值与安全系数的确定	(210)
6.3.4	典型结构件的设计	(211)
6.3.5	各种结构形式的选择	(216)
6.3.6	结构设计应考虑的其他因素	(217)
7	复合材料典型产品设计	(220)
7.1	复合材料贮罐设计	(220)
7.1.1	概述	(220)
7.1.2	卧式贮罐设计	(221)
7.1.3	立式贮罐设计	(230)
7.2	纤维缠绕内压力容器设计	(234)
7.2.1	概述	(234)
7.2.2	网格理论	(234)
7.2.3	内压力容器筒身段的网格理论	(235)
7.2.4	封头段的网格理论	(237)
7.2.5	压力容器设计	(249)
7.3	管道设计	(252)
7.3.1	概述	(252)
7.3.2	玻璃钢管道的结构及成型工艺	(255)
7.3.3	玻璃钢管道的设计要求	(255)
7.3.4	由内压引起的周向和轴向应力	(256)
7.3.5	由土压引起的管道外压及管壁应力	(256)

7.3.6	管道在地面敷设时的载荷和应力 .....	(259)
7.3.7	架空管的内力及变形 .....	(260)
7.3.8	温度变化的影响 .....	(261)
7.3.9	安全系数 .....	(262)
7.4	冷却塔结构设计 .....	(263)
7.4.1	概述 .....	(263)
7.4.2	玻璃钢冷却塔的设计 .....	(265)
7.4.3	结构设计 .....	(267)
7.5	地面雷达罩的结构设计 .....	(271)
7.5.1	概述 .....	(271)
7.5.2	雷达罩的结构配置与分块 .....	(275)
7.5.3	地面雷达罩结构设计要求和载荷条件 .....	(278)
7.5.4	罩体结构的内力计算 .....	(280)
7.5.5	球罩的强度和稳定性计算 .....	(283)
7.5.6	雷达罩的壁板连接、加工工艺和表面涂覆 .....	(283)
	参考文献 .....	(286)

# 1 绪 论

复合材料通常是指由高分子材料、无机非金属材料或金属材料复合而成的一种新材料。复合材料可定义为由两种或两种以上具有不同的化学或物理性质的组分材料组成的一种与组分材料性质不同的新材料,且各组分材料之间具有明显的界面。

尽管自然界中的竹、木和动物身上的血管、骨骼等都具有复合材料的特征,但一般讨论的复合材料是指由人工复合而成的这一类材料。复合材料按其用途可分为结构性应用和功能性应用两类。前者主要用于结构承力或维持结构外形,称为结构复合材料;后者用于如绝热、透波、耐腐蚀、耐磨、减振或热变形等热、声、光、电、磁的功能要求,称为功能复合材料。

如果从分子的量级来观察,几乎所有材料都可称作复合材料。但通常所讨论的复合材料是从细观的量级来判别的,即从细观来看是由两种或两种以上不同化学性质或物理性质的组分复合而成的材料。

在复合材料中至少应有两相,其中一相充分地分散于另一相之中,这种组分相称为分散相,一般起增强作用,故也称为增强相或增强材料;另一组分相称为基体相,或称基体材料。分散相与基体相之间的交接面称为界面。复合材料中的各个相具有明显的界面,即各相被界面物理地区分开。这不同于一般金属材料中的各个“相”。但是,严格地讲,复合材料中的界面并非一个几何面,而是一种不同于分散相和基体相的复杂结构,因而也称为界面相。

## 1.1 复合材料的发展简史与现状

使用复合材料由来已久,但究竟起源何时目前尚无考据。据历史记载,早在古代人们已知道把稻草掺入泥中做成的泥坯可增加强度;用多层粘合的木板代替单一木板不但可提高强度,而且还能减小由于受热、吸湿引起的变形。古代的弓是以木材为芯,在受拉面胶有平行的纤维,受压面胶上牛角复合而成的,它的性能优于其中任何一种单一材料做成的弓。脱胎漆器是古代使用复合材料的又一例证。它是在木骨和泥塑制成的底胎上逐层铺覆麻布并涂抹生漆,待漆干固后,挖去底胎,得到与底胎形状相同的漆器。在脱胎漆器中,生漆是基体材料,麻布是增强材料。

近代复合材料可从十九世纪末期出现了由纤维增强橡胶制成的轮胎和橡胶布算起,这类复合材料的增强材料曾采用过棉线、钢丝,现在已大量使用尼龙丝、玻璃纤维和芳纶等新型材料作为增强材料。

现代复合材料始于本世纪 40 年代初,美国用玻璃纤维增强塑料(我国俗称玻璃钢)制造飞机雷达天线罩,而后这种材料广泛用于航空、造船、汽车、化工、电器等国防和国民经济各部门。

目前工程上使用玻璃纤维增强塑料已相当普遍,继玻璃纤维增强塑料之后,本世纪 60 年代初出现了用比强度(强度与密度比)和比模量(模量与密度比)较高的碳纤维、硼纤维增强的复合材料,接着又出现了由许多新型纤维,如芳纶、碳化硅纤维、氧化铝纤维等增强的复合材料,这类纤维增强复合材料常称为先进复合材料,我国的先进复合材料的应用研究是从 60 年代末期开始的,最初在航空、航天部门使用。目前由于先进复合材料的价格还很昂贵,产量又不

高,现在仍主要应用于这些部门。而世界上许多工业发达国家已逐渐将碳纤维及一些高级纤维增强的复合材料应用于民用工业,如汽车工业、体育器材等。

随着科学技术的迅猛发展,复合材料的应用范围也日益广泛,纤维增强橡胶和纤维增强塑料在强度、刚度和使用温度方面往往难以满足苛刻使用条件的要求(如航空发动机的某些部件),因此,一方面研制如聚酰亚胺这一类耐高温树脂作为基体的复合材料,同时用高模量、高强度纤维与金属基体或陶瓷基体复合,以获得耐热性更好的复合材料。当前复合材料的发展方向,已从树脂基复合材料转移至金属基复合材料和陶瓷基复合材料。

除此之外,混杂复合材料也是现代复合材料的发展方向。混杂复合材料的特点在于能以一种纤维或基体的优点来弥补另一种纤维或基体的不足,以获得更加完美的材料。

## 1.2 复合材料的分类

复合材料除了上面提到过的用途分为结构型复合材料和功能型复合材料两大类之外,还有按基体材料的性质与增强材料的形状分类的两种分类法。

按照基体材料的性质分类,复合材料可分为金属基复合材料与非金属基复合材料。见图1-1。金属基复合材料目前以铝基为多。对聚合物基复合材料,用作基体的热固性树脂有环氧树脂、聚酯树脂、乙烯基树脂、聚酰亚胺等;热塑性树脂如聚丙烯、尼龙、聚碳酸酯、聚醚砜、聚醚醚酮等;酚醛树脂有热固性与热塑性两种。非碳基复合材料如石英基复合材料、混凝土基复合材料等。基体材料的作用主要是粘结、保护纤维,并传递应力。

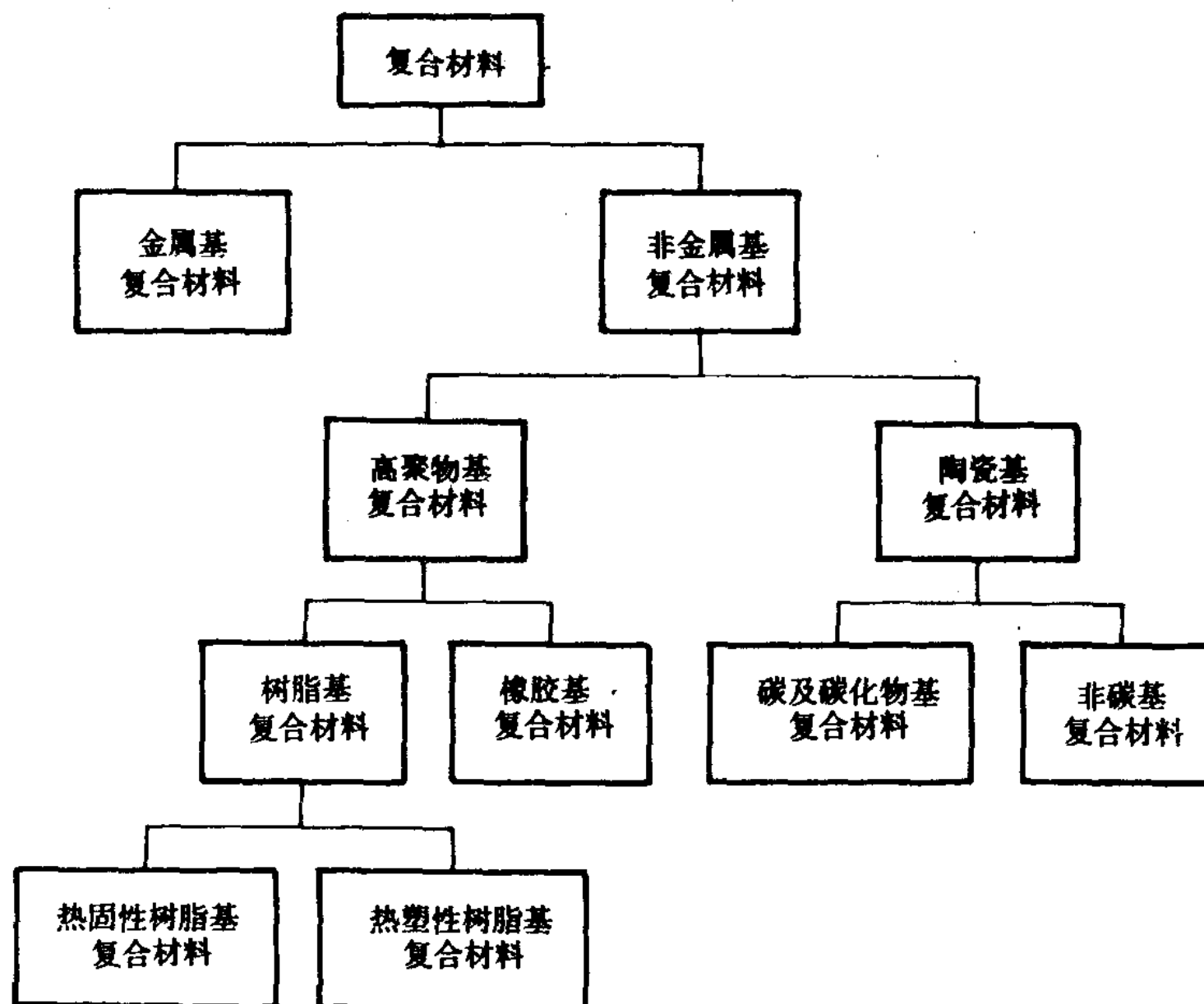


图 1-1 复合材料按基体性质分类

按照增强材料的形状分类,复合材料可分为颗粒增强复合材料与纤维增强复合材料。见图1-2。

颗粒增强复合材料包括颗粒强化与弥散强化两类复合材料。



颗粒增强复合材料的颗粒直径范围为  $1\sim 50\mu\text{m}$ , 颗粒体积含量为  $25\%\sim 70\%$ , 增强颗粒之间的距离一般大于  $1\mu\text{m}$ 。颗粒的作用是, 由于颗粒本身的刚硬阻止基体变形而起到增强作用。

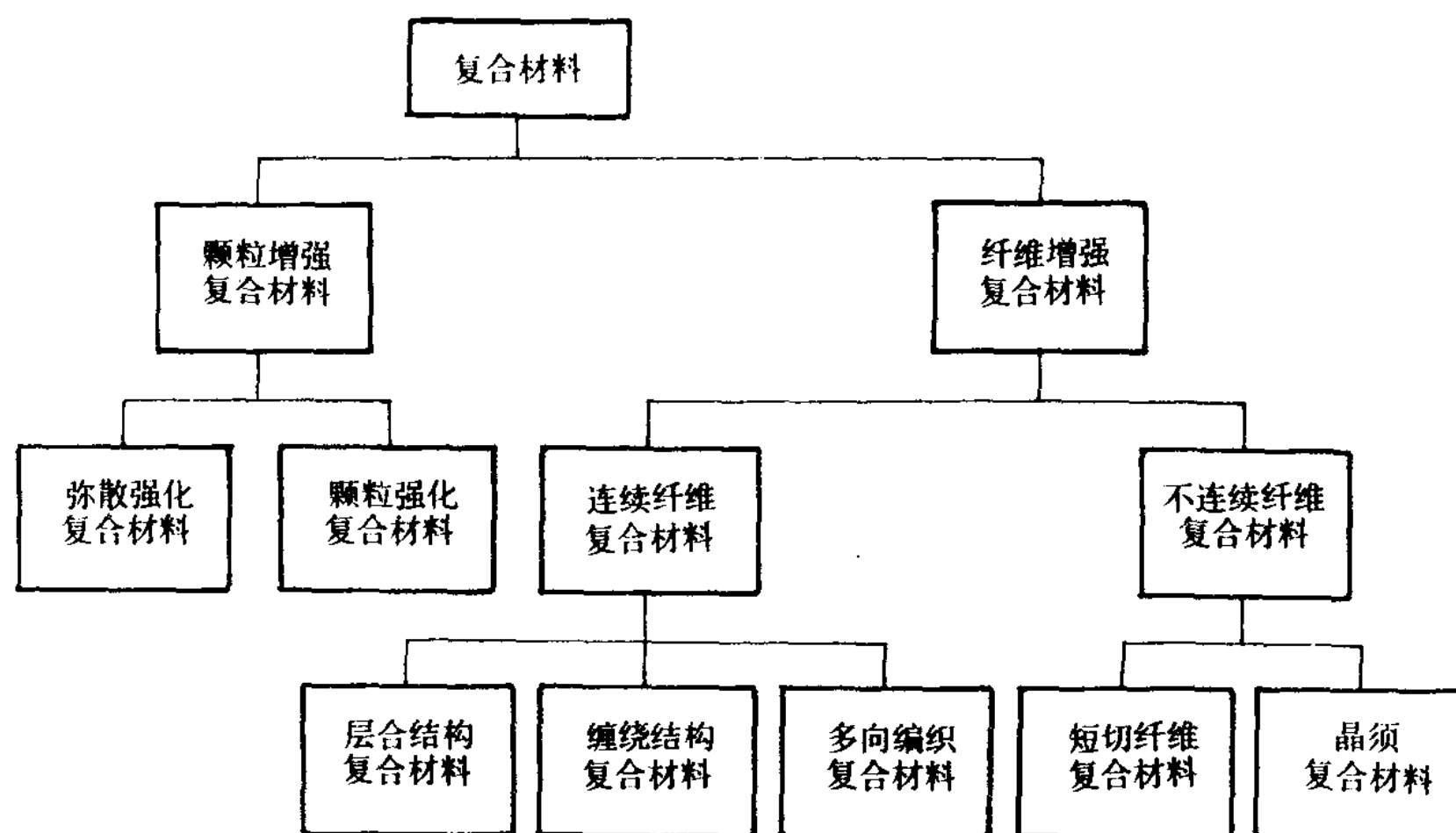


图 1-2 复合材料按增强材料形状分类

弥散强化复合材料的颗粒直径范围为  $0.01\sim 0.1\mu\text{m}$ , 颗粒体积含量为  $1\%\sim 15\%$ 。这样数量级的颗粒的作用是阻止基体材料的位错运动而起到增强作用。

纤维增强复合材料有连续纤维增强复合材料和不连续纤维增强复合材料。在复合材料中, 增强纤维的长度相对于复合材料的总体尺度而言, 同一量级的为长纤维, 小于这一量级的为短纤维。具有长纤维的复合材料称为连续纤维增强复合材料, 具有短纤维的复合材料称为不连续纤维增强复合材料。

不连续纤维增强复合材料又有晶须增强和短纤维增强两种。晶须增强复合材料中的晶须, 其直径相当于晶体大小, 长度是直径的数百倍, 且呈须状。

连续纤维增强复合材料一般均制成层合结构、缠绕结构或多向编织结构。层合结构复合材料是由无纬布或纤维织物铺叠而成。缠绕结构复合材料是由纤维粗纱缠绕或纤维织物带按一定的缠绕规律卷绕而成。三维多向编织复合材料是一种新型结构的复合材料, 它是由纤维在三维多方向编织而成的连续纤维增强复合材料, 可以克服前两种复合材料层间强度低的缺点。

复合材料中的纤维由于比块状材料的内部缺陷要少得多, 所以纤维具有较高的强度而成为主要承载材料, 由此起到了增强基体的作用。

本书研究的主要对象为连续纤维增强复合材料构成的结构, 基体为树脂, 这类复合材料简称为纤维增强塑料(FRP)。本书今后提及的复合材料, 如未另加注明, 均指这类纤维增强塑料, 且为层合结构。

### 1.3 复合材料及其结构设计的特点

#### 1.3.1 比强度、比模量高

纤维增强塑料是由高强度、脆性、低密度的纤维材料与低强度、低模量、低密度、韧性较好的树脂基体所组成。几种常用材料和纤维增强复合材料的比强度、比模量比较见图 1-3。

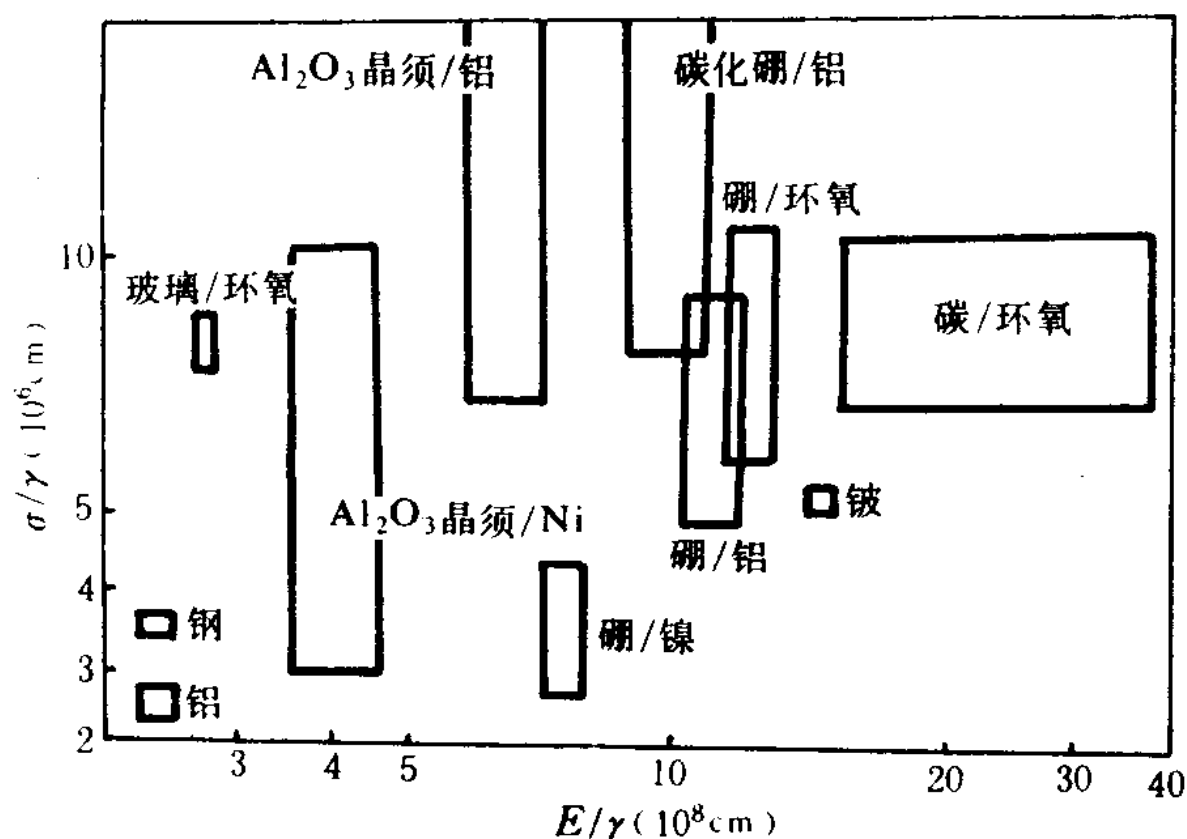


图 1-3 几种常用材料和纤维增强复合材料比强度、比模量的比较

由图可知,复合材料除了玻璃纤维增强塑料的比模量较低外,其他的比强度、比模量一般都比较高。

纤维增强塑料之所以具有相当高的比强度,一是由于组成这种复合材料的组分材料密度都较低;二是由于纤维具有很小的直径,其内部缺陷要比块状形式的材料少得多,所以强度较高。如块状玻璃的拉伸强度为 40~100MPa,而玻璃纤维的拉伸强度可达 4000MPa,约为块状玻璃拉伸强度的 40~100 倍。

复合材料比强度、比模量高可以减轻构件的质量,这对于航空、航天部门来说

尤为重要。由于减轻了飞行器的质量,可以增加航程、或提高有效载荷,或缩小飞行器的尺寸。因此,复合材料在飞机上使用量已作为当代飞机先进性的指标之一。减轻构件质量对于其他部门,如造船、汽车、建筑、化工等部门也是很重要的,因为许多结构物的性能,如运输结构物的运输效率、固定结构物的经济效益等。都与构件质量有密切关系。

### 1.3.2 复合材料结构设计的特点

(1) 复合材料既是一种材料又是一种结构。复合材料就其本质来说是一个结构物。因为纤维增强塑料是由纤维和树脂两种组分材料复合而成的,两者之间有明显的界面,所以,实际上是一种结构。层合板是由纤维与基体所组成的单层(又名铺层)以不同方向层合而成的层合结构复合材料,所以它是一种层合结构形式,如图 1-4 所示。如果所有单层都处于同一方向,则称为单向层合板(简称单向板);如果单层按不同方向构成层合板,则称为多向层合板(简称多向板)。通常的层合板是由无纬单层(又称单向层)或经纬交织单层(又称双向层),构成,如图 1-5 所示。由无纬单层构成的单向层合板通常称为单向复合材料。

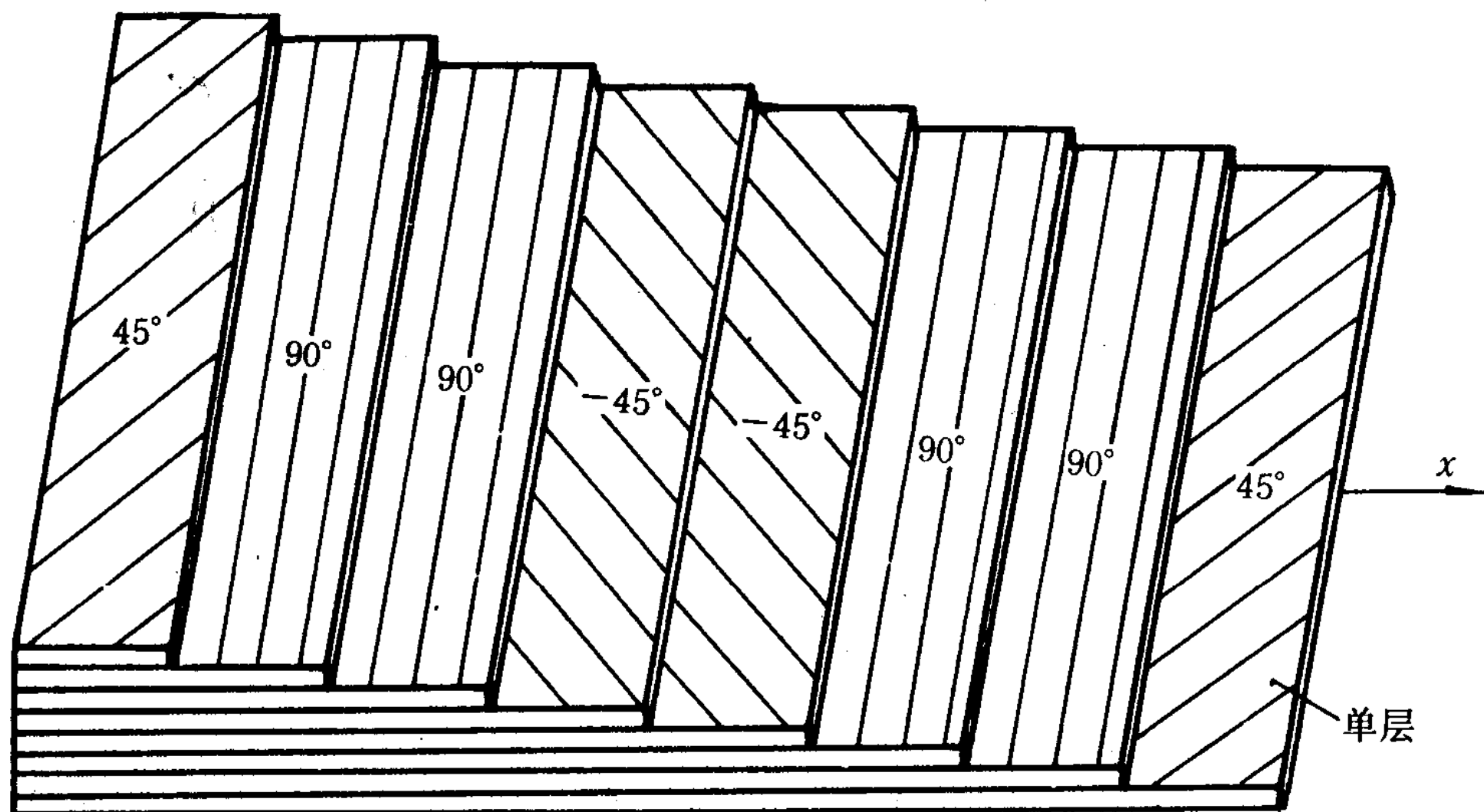


图 1-4 层合结构复合材料

实际工程中,绝大多数复合材料及其结构件是一次完成的,根据产品的形状制做相应的模具,将无纬纤维布或织物按设计要求逐层铺放在模具中;各层可先行浸胶处理,也可逐层铺放后涂胶,然后加温(或常温)、加压(或不加压)固化制成产品。层合板有时是平面,有时也可能是曲面,它是复合材料结构件的基本单元,而单层又是层合板的基本单元。

本书首先分析单层的刚度与强度,然后分析层合板的刚度与强度,再分析复合材料结构件的刚度与强度;在此基础上,讨论单层设计、层合板设计与结构设计。本书第2~3章单层与层合板的分析属于复合材料力学的研究内容,第4章复合材料结构件的分析属于复合材料结构力学的研究范围。第5~7章属于复合材料结构设计的讨论内容,而其中的单层与层合板设计又称材料设计。

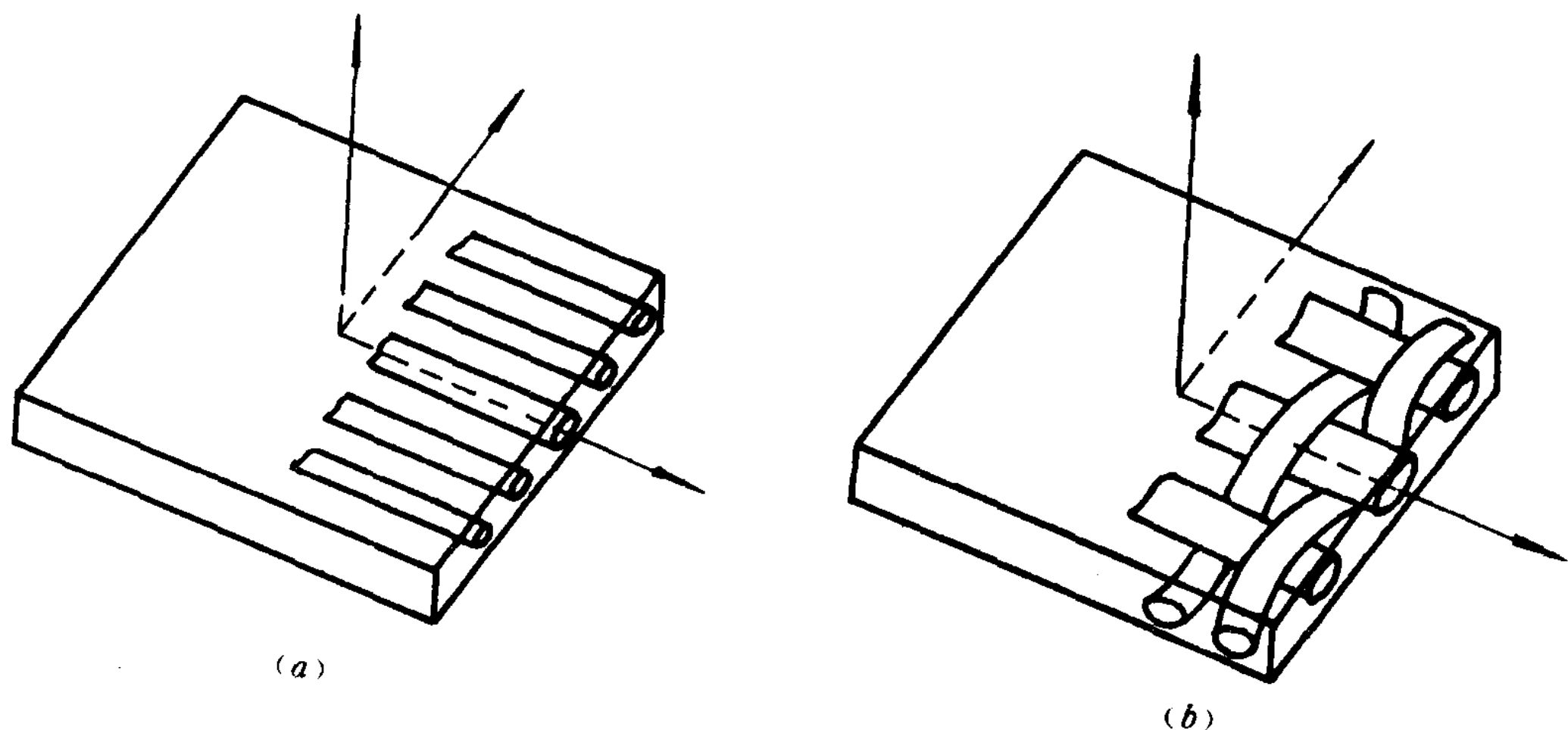


图 1-5 单层的种类  
(a) 无纬单层; (b) 经纬交织单层

(2) 复合材料具有可设计性。复合材料的组分材料和铺层方向可以按照设计要求进行选择。选择不同的基体材料与增强材料以及它们的含量比,和选择不同的铺层方向与构成形式,可以构成不同性能的复合材料。当然,这种组合不是简单的混合,不仅组分材料有其自己的固有特性,而且组分材料之间要彼此相容(包括物理、化学、力学等方面),使其真正复合成一个整体,成为一种新材料。本书着重阐述复合材料力学性能的可设计性。比如,受内压的圆柱形薄壁容器,其纵向截面上的应力为横向截面上应力的两倍,因此,可以用2:1的经纬纤维缠绕,使环向强度为轴向强度的两倍,从而获得具有相同强度储备的结构。再如,受扭的圆管,为了提高扭转刚度,可以用1:1的经纬交织布沿管轴45°方向铺设。这些在通常金属材料的结构设计中是很难办到的。因此,复合材料不仅给设计人员提供了一种比强度、比模量高的材料,而且给设计人员提供了一种由设计人员在一定范围内可随意设计的材料。

(3) 复合材料结构设计包含材料设计。常规的结构设计中,材料是直接选择的,即在材料部门提供的有确定性能数据的各种材料中选择结构中所用的材料牌号与规格。而在复合材料的结构设计中,材料是由结构设计者根据设计条件(如性能要求、载荷情况、环境条件等)自行设计的。正如前述,复合材料结构往往是材料与结构一次形成的,且材料也具有可设计性。因此,复合材料结构设计是包含材料设计在内的一种新的结构设计,它比常规的金属材料结构设

计要复杂。但是在复合材料结构设计时,可以从材料与结构两方面考虑,以满足各种设计要求,尤其是复合材料的可设计性,可使复合材料结构达到更为完满的目的。

### 1.3.3 复合材料力学性能的特点

(1) 各向异性性能。连续纤维增强复合材料是由各个单层层合而成的。每一个单层在其面内具有两个互相垂直的弹性对称面,对称面的垂直方向为材料弹性主方向。图 1-4 及以后的所有图中,用平行线条示意单层方向,且均指两材料弹性主方向中模量较大的一个主方向。将这一方向称为纵向(用字母  $L$  表示)与其垂直的另一主方向称为横向(用字母  $T$  表示)。

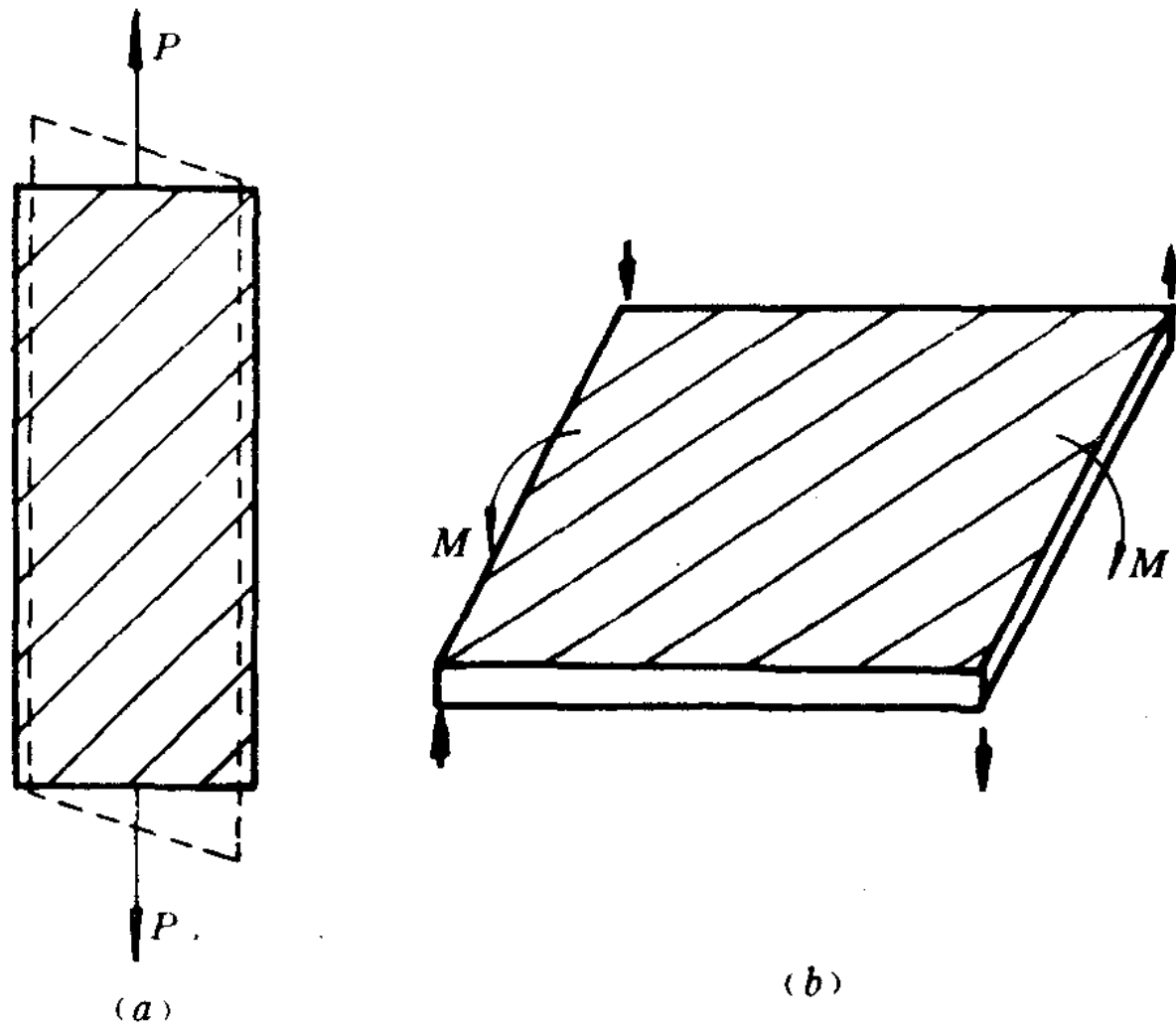


图 1-6 耦合变形的示例

将这一方向称为纵向(用字母  $L$  表示)与其垂直的另一主方向称为横向(用字母  $T$  表示)。

在通常的各向同性材料中,表达材料弹性性能独立的工程弹性常数有两个,即弹性模量  $E$  和泊松比  $\nu$ (或剪切弹性模量  $G$ )。而对于复合材料中的每个单层,表达材料弹性性能的独立的工程弹性常数有四个:纵向弹性模量  $E_L$ 、横向弹性模量  $E_T$ 、纵向泊松比  $\nu_L$ (或横向泊松比  $\nu_T$ )、面内剪切弹性模量  $G_{LT}$ 。除此之外,当加载方向与材料弹性主方向不一致时,拉伸应力会引起剪切变形[如图 1-6(a)所示],剪应力会引起拉伸变形,这种现象分别称为拉剪耦合和剪拉耦合。另外,弯曲力矩会引起扭转变形[如图 1-6(b)所示],扭转力矩会引起弯曲变形,这种现象分别称为弯扭耦合和扭弯耦合。这都是各向同性材料所没有的耦合现象。

在通常的各向同性材料中,表达材料性能的强度指标只有一个。如果是塑性材料,一般用屈服极限  $\sigma_s$ (或条件屈服极限  $\sigma_{0.2}$ );如果是脆性材料,一般用强度极限  $\sigma_b$ 。至于剪切屈服极限  $\tau_s$ ,一般与拉伸屈服极限  $\sigma_s$  存在一定的关系,  $\tau_s = (0.5 \sim 0.6)\sigma_s$ ,所以  $\tau_s$  不是独立的强度指标。对于上述复合材料中的每个单层,通常有五个强度指标,称为基本强度。即纵向拉伸强度  $X_L$ 、纵向压缩强度  $X_c$ 、横向拉伸强度  $Y_L$ 、横向压缩强度  $Y_c$ 、面内剪切强度  $S$ 。由于复合材料强度指标的增加,使判断各种受力状态下强度的理论也较各向同性材料复杂。

(2) 非均质性。按照复合材料定义,纤维增强复合材料是由纤维与基体两相材料组成的,因而是非均质的。如果分析的对象是比纤维直径大得多的范围,即所谓宏观范围,则可以将每个单层看作是均质的。但是,对于实际由各个单层层合而成的层合板,由于各个单层可以按不同方向铺设,所以多向层合板也是非均质的。由于这种非均质性,对层合结构的弹性与强度分析必须建立在分析各个单层的弹性与强度的基础上,也即建立在宏观的层合理论上。

综合复合材料各向异性和非均质性的特点,层合结构复合材料在一种外力作用下,除了引起本身的基本变形外,还可能引起其他基本变形,即所谓耦合变形。一般情况下,在一种外力作用下有时可以引起四种基本变形(详见第 3 章)。这种力学性能的复杂性在通常的金属材料中是没有的。

另外,非均质性还将构成复合材料力学性能的其他一些特异性。例如,单层方向的变化引



起层合板力学性能的变化不能凭主观推测。如图 1-4 所示的层合板,若将中间的  $90^\circ$  层变成  $\pm 45^\circ$  层,似乎应使  $0^\circ$  方向(即  $x$  方向)的刚度提高;然而,在  $0^\circ$  方向所表现出来的刚度,实际上是降低了(详见第 3 章)。再如,在双向层合板的某种特定条件下会出现负的泊松比,即一个方向的拉伸引起垂直于该方向的材料伸长(详见第 3 章)。

(3) 层间强度低。一般情况下,纤维增强复合材料的层间剪切强度和层间拉伸强度分别低于基体的剪切强度和拉伸强度,这是由于界面的作用所致。因此在层间应力作用下很容易引起层合板分层破坏,从而导致复合材料结构的破坏,这是影响复合材料在某些结构物上使用的重要因素。因此,在结构设计时,应尽量减小层间应力,或采取某些构造措施,以避免层间分层破坏。

限于本书的内容,对于纤维增强复合材料的其他一些特点,在此就不再赘述了。