



普通高等教育“十三五”力学规划系列教材

复合材料力学 (第二版)

陈建桥 编著



扫码关注数字教学资源



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

普通高等教育“十三五”力学规划系列教材

复合材料力学

(第二版)

陈建桥 编著

华中科技大学出版社

华中科技大学出版社

中国·武汉

内 容 简 介

本书系统介绍复合材料力学基础理论,以及相关的分析计算方法,同时兼顾力学性能的试验评价和复合材料/结构设计方法。具体内容包括:单向复合材料的刚度和强度分析,层合板的刚度和强度分析、残余应力、弯曲和屈曲,若干强度专题,复合材料的优化设计,复合材料结构的有限元分析,等等。除了针对各知识点编有精选例题,全书还配有习题和习题参考解答,以帮助学生加深对基本理论和方法的理解,亦为教学和自学提供便利。此外,为方便教学,本书还提供了课件,可用微信 APP 扫描各章章首二维码获取。

本书内容精练,注重基础,难易适中,适合用作普通高等院校力学及相关理工科专业本科生和研究生教材,也可作为相关科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

复合材料力学/陈建桥编著. —2 版. —武汉:华中科技大学出版社,2020.11
ISBN 978-7-5680-6739-3

I. ①复… II. ①陈… III. ①复合材料力学-高等学校-教材 IV. ①TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 226076 号

复合材料力学(第二版)

Fuhe Cailiao Lixue(Di-er Ban)

陈建桥 编著

策划编辑:万亚军

责任编辑:姚同梅

封面设计:刘 婷

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:武汉科源印刷设计有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:14.25

字 数:301 千字

版 次:2020 年 11 月第 2 版第 1 次印刷

定 价:39.80 元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

第二版前言

复合材料作为一种结构材料,近年来在航空航天、土木建筑、交通车辆、舰船、化工设备、医疗器械等领域得到了广泛应用。对复合材料/结构进行力学分析,并准确评价和预测其性能,是安全、合理、有效地使用复合材料的基础。

本书较系统地介绍了复合材料力学的基础理论和分析计算方法,同时兼顾力学性能和复合材料/结构的试验评价、近似分析以及优化设计方法,并简要介绍了若干重要的专题。本次修订在第一版基础上增加了复合材料结构的有限元分析(第10章),并对原书中的疏漏之处进行了完善。本书除具备注重基础、突出重点、简明实用等特点外,还融入了作者多年教学经验,适用范围较宽。全书针对各知识点编有示范性例题,并配有丰富的习题以及参考解答,以引导读者进行有针对性的练习,加深对基本理论和方法的认识,改变常见的面对具体问题难以下手的状况,提升学习效果。

本书可作为普通高等学校力学、材料、航空航天、土木、船海等专业本科生或研究生教材,也可作为相关科技人员的参考书。为了方便教学,本书配有课件,可以通过扫描二维码来获取。

本次修订由陈建桥负责,张晓生博士承担了第10章的数值计算工作。

本书得到了“华中科技大学教材建设项目”的立项资助。同时,华中科技大学出版社对本书的出版给予了莫大的支持。在多年的复合材料力学教学过程中,许多学生也给笔者提出了很好的建议。在本书的编写过程中,作者还参考了若干国内外有关复合材料或复合材料力学的文献。在此一并致谢。

陈建桥

2020年7月于武汉

目 录

第 1 章 复合材料概述	(1)
1.1 复合材料的基本概念	(1)
1.2 复合材料的种类	(2)
1.3 复合材料的构造及制法	(3)
1.4 复合材料的增强相和基体相	(7)
1.5 常用的增强纤维	(8)
1.6 常用的高分子基体材料	(10)
1.7 复合材料的性能和应用	(11)
习题	(17)
第 2 章 单向复合材料的刚度分析	(18)
2.1 正交各向异性材料的应力应变关系	(18)
2.2 单向复合材料任意方向的应力应变关系	(21)
2.3 拉-剪耦合效应	(25)
2.4 工程弹性常数及其变换	(27)
2.5 弹性常数取值范围的限制条件	(30)
2.6 单层板弹性性能的分析 and 预测	(30)
习题	(37)
第 3 章 单向复合材料的强度准则	(40)
3.1 正交各向异性材料的强度指标	(40)
3.2 强度准则	(41)
3.3 正剪切和负剪切	(47)
3.4 强度准则的选取原则	(49)
3.5 单向复合材料力学性能的试验测定	(49)
3.6 复合材料单层板强度分析的细观力学方法	(55)
3.7 短纤维复合材料的载荷传递理论	(58)
习题	(61)
第 4 章 层合板的刚度分析	(63)
4.1 薄板变形假设	(63)
4.2 层合板本构关系的推导	(64)
4.3 反对称层合板与拉-弯耦合	(66)

4.4	对称层合板	(69)
4.5	层合板的主轴	(73)
4.6	准各向同性板	(73)
4.7	层合板的工程弹性常数	(74)
4.8	层合板的柔度计算	(80)
	习题	(83)
第5章	层合板的强度分析和计算方法	(85)
5.1	层合板的应力与强度分析	(85)
5.2	层合板的破坏形态	(86)
5.3	首层破坏强度	(87)
5.4	最终层破坏强度	(92)
5.5	预测层合板极限强度的其他方法	(99)
5.6	层间应力与分层破坏	(100)
	习题	(103)
第6章	层合板残余应力分析	(104)
6.1	单层板的残余热应力及热膨胀系数	(104)
6.2	层合板考虑热变形的本构方程	(105)
6.3	正交层合板的热应力和热变形	(109)
6.4	层合板残余应力计算和强度分析	(111)
6.5	吸湿变形与热变形的相似性	(115)
	习题	(120)
第7章	层合板的弯曲和屈曲	(121)
7.1	弯曲基本方程	(121)
7.2	弯曲变形求解方法	(122)
7.3	减小板的弯曲变形的的方法	(128)
7.4	层合板的屈曲	(129)
7.5	层合梁的分析计算	(133)
	习题	(135)
第8章	若干强度专题	(137)
8.1	复合材料与断裂力学	(137)
8.2	各向异性板的线弹性断裂力学	(138)
8.3	层间断裂	(143)
8.4	层间疲劳裂纹扩展	(146)
8.5	层合板的其他破坏形式	(148)
8.6	带孔层合板的应力和强度分析	(149)
8.7	复合材料的连接	(153)

习题	(155)
第 9 章 复合材料的优化设计	(156)
9.1 材料与结构的优化设计	(156)
9.2 夹心梁单元模型	(157)
9.3 面内加载层合板的刚度设计	(158)
9.4 面内加载层合板的最大强度设计	(161)
9.5 层合板弯曲刚度设计	(163)
9.6 最大屈曲强度设计	(165)
习题	(166)
第 10 章 复合材料结构的有限元分析	(167)
10.1 有限元法	(167)
10.2 复合材料结构有限元分析步骤	(167)
10.3 复合材料结构的变形和应力分析	(169)
10.4 复合材料结构强度分析	(170)
10.5 复合材料结构应力集中问题	(173)
习题	(175)
附录 A 各向异性材料三维弹性理论	(176)
A.1 应力应变关系	(176)
A.2 具有一个弹性对称平面的材料	(177)
A.3 正交各向异性	(178)
A.4 横观各向同性	(178)
A.5 各向同性	(179)
A.6 正交各向异性材料的工程弹性常数	(180)
A.7 面外剪切变形	(181)
附录 B 部分习题解答	(184)
参考文献	(219)

第 1 章 复合材料概述



本章简要介绍复合材料的定义、种类、构型和制作成型方法、性能特点,以及各种应用。本书讨论的重点是以纤维为增强体的树脂基(高分子基)复合材料。

1.1 复合材料的基本概念

复合材料是由两种或两种以上具有不同化学、物理性质的素材复合而成的一种材料。自然界中的许多材料都属于复合材料,如生体材料中的骨头和牙齿,其组成成分是韧度较高的有机材料(骨胶)与坚硬的结晶材料(磷酸钙)。又如木材,它是由基体材料(木质素)和纤维分子的链组成的。人工的复合材料(composite materials)由两种或两种以上不同性质的材料用物理或化学方法制成。制造复合材料的目的是得到原来组分材料所没有的优越性能或某些特殊性能。如骑摩托车用的防护帽就是由树脂和玻璃纤维(glass fiber)复合而成的。玻璃纤维是用玻璃制成的比人的头发还细的纤维,其直径约为 $10\ \mu\text{m}$,而强度则大大高于普通的软钢。玻璃纤维用树脂加以固化后就得到一种强度很高的复合材料——玻璃纤维增强复合材料(GFRP)。除此之外,还有用碳纤维(carbon fiber)、硼纤维(boron fiber)、聚芳酰胺纤维(aramid fiber,又名芳纶)分别与树脂复合而成的材料。纤维增强树脂基复合材料(FRP)有时简称为纤维增强复合材料,是复合材料中的典型代表,也是本书要着重讨论的对象。

复合材料由基体材料(matrix)和增强材料组成。基体材料包括各种树脂或金属、非金属材料。增强材料包括各种纤维状材料或其他材料。增强材料在复合材料中起主要作用,由它提供复合材料的刚度和强度。基体材料起配合作用,用于支持和固定纤维材料、传递纤维间的载荷、保护纤维等。基体材料也可以改善复合材料的某些性能,例如:要求密度小,可选取树脂作基体材料;要求有耐高温性能,可用陶瓷作为基体材料;为得到较高的韧度和剪切强度,一般考虑用金属作为基体材料。

复合材料的性能不仅取决于组分材料各自的性能,还依赖于基体材料与增强材料的界面性质。两者黏合性好,能形成较理想的界面,这对于提高复合材料的刚度和强度是很重要的。表 1-1 列出了几种增强纤维与基体的组合好坏情况。表中的 PEEK 即聚醚醚酮(polyether-ether-ketone)树脂,它是一种高韧度的热塑性树脂。

复合材料具有非均匀性(heterogeneity)、各向异性(anisotropy)等性质,比起一般金属材料,它的力学行为要复杂得多。复合材料力学是在复合材料的力学性能研

究基础上发展起来的固体力学的一门新的分支学科。

表 1-1 增强纤维与基体的组合

基 体		增 强 纤 维					
		玻璃	芳纶	碳	硼	碳化硅	氧化铝
热固性 树脂	不饱和聚酯树脂	⊙	△	△	△	×	×
	环氧树脂	○	⊙	⊙	⊙	△	○
	聚酰亚胺树脂	△	△	○	△	△	○
热塑性 树脂	PEEK	△	○	○	×	×	△
	泛用树脂	○	△	△	×	×	×
金属	铝	×	×	○	○	○	○
	钛	×	×	△	○	⊙	○
	镁	×	×	⊙	△	△	△

注:表中⊙表示好,○表示较好,△表示一般,×表示差。

1.2 复合材料的种类

根据复合材料中增强材料的几何形状,复合材料可分为两类:① 颗粒弥散复合材料(particle dispersed composite materials);② 纤维增强复合材料(fiber reinforced composite materials)。

颗粒弥散复合材料中最普通的例子是混凝土,它是由砂石、水和水泥混合在一起,经化学反应而形成的坚固的结构材料。金属陶瓷是使氧化物和碳化物微粒悬浮在金属基体中而得到的一种颗粒弥散复合材料,用于耐蚀工具和高温设备的制造。

纤维增强复合材料按纤维种类分为玻璃纤维增强复合材料、硼纤维增强复合材料(BFRP)、芳纶纤维增强复合材料(AFRP)、碳纤维增强复合材料(CFRP)等。各种长纤维的强度比块状的同样材料要高得多。如普通平板玻璃在几十兆帕的应力下就会破裂,而一般玻璃纤维的强度可达 3000~5000 MPa。这是因为玻璃纤维非常细,其固有的分子缺陷、表面缺陷非常少,较之块状玻璃,破坏的起始源大大减少,因而强度得到很大提高。

根据基体材料的种类,复合材料可分为三种:① 聚合物基体复合材料(polymer matrix composites,PMC);② 金属基体复合材料(metal matrix composites,MMC);③ 陶瓷基体复合材料(ceramics matrix composites,CMC)。

聚合物基体复合材料中用得较多的基体有热固性树脂(thermosetting resin)和热塑性树脂(thermoplastic resin)两类。在热固性树脂中,环氧树脂(epoxy resin)黏合力强,与纤维表面浸润性好,固化成型方便,应用最为广泛。热塑性树脂加工性能好,当加热到转变温度时会重新软化,易于制成模压复合材料,有较高的断裂韧性(fracture toughness)。其弱点是弹性模量低,耐热性能差。

金属基体复合材料中,用硼、钨、碳化硅等纤维进行强化而得到的纤维增强金属(fiber reinforced metals,FRM)具有很高的比强度、比刚度以及高温强度。陶瓷基体复合材料中,碳/碳复合材料(carbon/carbon composite materials,C/C)不仅耐热,而且耐酸、耐磨损,应用于太空船的防护及制动装置、热压机等。

以碳纤维、芳纶纤维、硼纤维,以及高性能玻璃纤维等为增强体的复合材料,通常称为先进复合材料,是用于飞机、火箭、卫星、飞船等航空航天飞行器的理想材料。几种常用纤维和树脂的力学性能列于表 1-2。为了对比和参考,几种金属,以及玻璃和木材的性能也一并列出。后面我们会常采用复合材料的简化表示方法:增强材料/基体。如表 1-2 中的 GF/EP 和 CF/EP 分别表示玻璃纤维增强环氧树脂复合材料(简称玻璃/环氧复合材料)和碳纤维增强环氧树脂复合材料(简称碳/环氧复合材料)。

表 1-2 材料力学性能对比

材 料	重度/(kN/m ³)	弹性模量/GPa	拉伸强度/MPa
软钢	78	210	300
结构钢	78	210	450
铬钼合金	78	210	1000
铝	27	70	150
铝合金 2024	28	73	450
聚酯(polyester)	13	2	40
环氧树脂	13	3	50
聚乙烯(热塑性) (polyethylene)	9	0.3	10
玻璃	22	75	50
木材	5	10	100
玻璃纤维	25	75	2500
碳纤维	17	230	3000
芳纶纤维(Kevlar)	14	130	2800
单向 GF/EP 材料	20	40	1200
单向 CF/EP 材料	17	140	1500

1.3 复合材料的构造及制法

纤维增强复合材料按构造形式分为单层板(lamina)复合材料、层合板(laminate)复合材料和短纤维复合材料。单层板中纤维按一个方向整齐排列或按双向

交织平面排列,如图 1-1 所示。其中纤维方向(有交织纤维时纤维含量较多的方向)称为纵向,用“1”或“L”表示;与纤维方向垂直的方向(有交织纤维时纤维含量较少的方向)称为横向,也称为基体方向,用“2”或“T”表示;单层板厚度方向用“3”或“Z”表示。1 轴、2 轴、3 轴称为材料主轴(principal axis)。单层板具有非均匀性和各向异性。

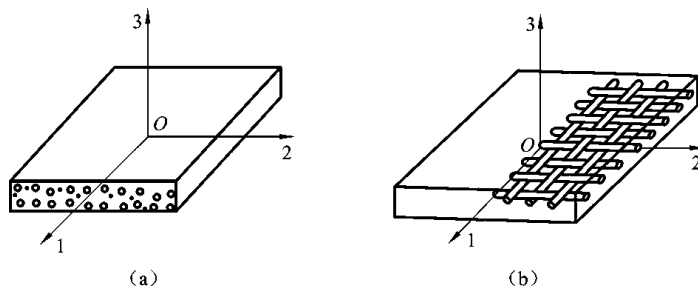


图 1-1 单层板的构造形式

(a) 单向纤维 (b) 交织纤维

层合板由单层板按规定的纤维方向和次序铺放成叠层形式,经黏合、加热固化而成。选取整体坐标系 $Oxyz$,用 θ 角表示层合板中某单层板的纤维方向。其中 θ 是单层板 1 轴与 x 轴之夹角,由 x 轴逆时针转向 1 轴时规定为正。图 1-2 所示为由四层单层板构成的层合板,自下而上 θ 依次为 $\alpha, 90^\circ, 0^\circ, -\alpha$ 。该层合板可标记为

$$\alpha/90^\circ/0^\circ/-\alpha$$

其他层合板铺层表示举例如下:

$$0^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ \text{ 或 } (0^\circ/90^\circ)_3$$

$$60^\circ/-60^\circ/0^\circ/0^\circ/-60^\circ/60^\circ \text{ 或 } (\pm 60^\circ/0^\circ)_s$$

$$0^\circ/45^\circ/0^\circ/45^\circ/45^\circ/0^\circ/45^\circ/0^\circ \text{ 或 } (0^\circ/45^\circ)_{2s}$$

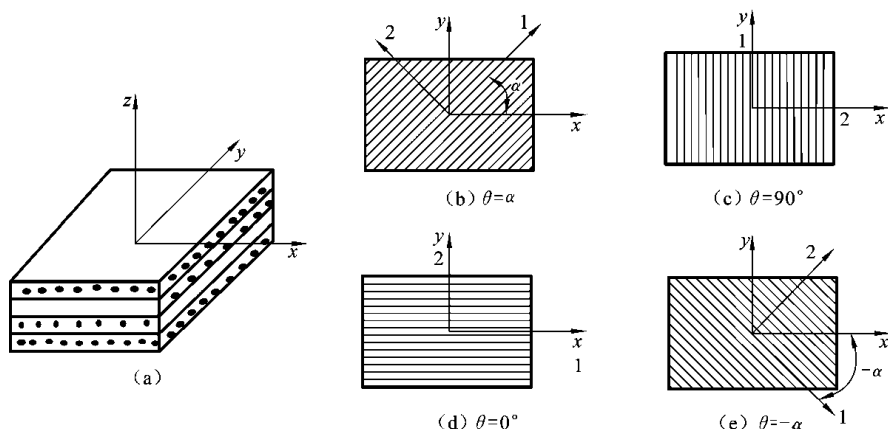


图 1-2 叠层材料构造形式举例

(a) 叠层材料 (b) 第一层 (c) 第二层 (d) 第三层 (e) 第四层

下标 s 表示铺层上下对称, $\pm$ 表示正负角交错, 下标 3、2 表示相同的单层板或子结构连着排在一起的次数。

层合板也是各向异性的非均质材料, 而且比单层板要复杂得多。

除了上面介绍的连续纤维增强复合材料外, 由于工程的需要或为了提高生产效率, 人们还开发了短纤维复合材料。短纤维复合材料按纤维的排列方式分为两类, 即随机取向的短纤维复合材料和短纤维呈单向整齐排列的复合材料, 如图 1-3 所示。

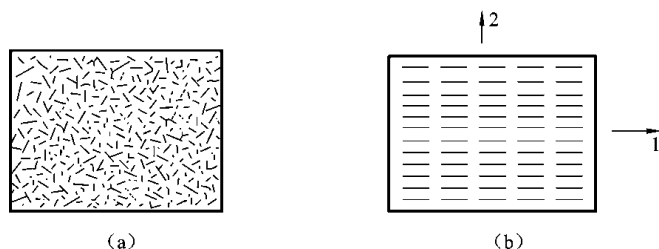


图 1-3 短纤维复合材料构造形式

(a) 随机取向 (b) 单向整齐排列

与金属材料的制造相比, 高分子基复合材料的制造有很大的不同。前者是基于原材料的制造, 经过对原材料的加工而制成各种产品。后者实际上是把复合材料的制造和产品的制造融合为一体了。

复合材料的成型方法根据纤维和基体种类的不同可以有很大的不同。使短纤维悬浮在甘油中并不停地搅动, 加压使悬浮物经过一收敛渠道(纤维走向与流向相同), 过滤掉甘油后形成定向纤维毡, 然后加树脂模压成型, 即得到单向短纤维复合材料。随机分布短纤维复合材料的成型方法是注射成型法或挤压成型法, 通过一注入口将纤维和树脂等一起挤压至模具型腔内成型。

对于连续纤维复合材料, 有以下几种典型的成型方法。

1. 手工成型(hand lay-up)

该方法是高分子基复合材料制作的基本方法, 多用于玻璃纤维/聚酯树脂复合材料产品, 如浴缸、船艇、房屋设备等的制造。其制作工艺是: 在产品底模上涂一层不粘胶或铺一层不粘布, 然后铺一层玻璃纤维布, 再用刷子或滚轮涂抹上树脂, 使其均匀渗透到玻璃纤维布中, 重复此过程直至达到产品要求厚度为止, 然后将完成铺层的制品送进固化炉固化, 最后脱模。这种方法工艺简便, 但树脂胶液中的挥发物不易消除, 会在产品中形成孔洞, 影响产品质量。

2. SMC 模压成型(compression molding of SMCs)

片状模塑料(sheet molding compound, SMC)是指经过热固性树脂浸渍后、未固化的玻璃纤维/树脂预制片。预制片纤维体积分数在 $30\% \sim 70\%$ 之间, 厚度一般在 $5 \sim 10 \text{ mm}$ 之间。SMC 模压成型法是一种两步成型法: 第一步是未固化的玻璃纤维/树脂预制片的制作; 第二步是 SMC 的压缩成型, 如图 1-4 所示。实际上, 复合材料产

品的制作无须考虑原材料的纤维和树脂,直接买进未固化的玻璃纤维/树脂预制片就行了。先将裁剪好的 SMC 片材放入预热好的模型中,逐步加热加压使预制片熔化并流动,直至充满模具型腔,再加热加压进行固化。该方法易于实现自动化,产品尺寸精度好、表面光滑、强度较高。电器产品以及汽车的复合材料产品制造多用该方法。

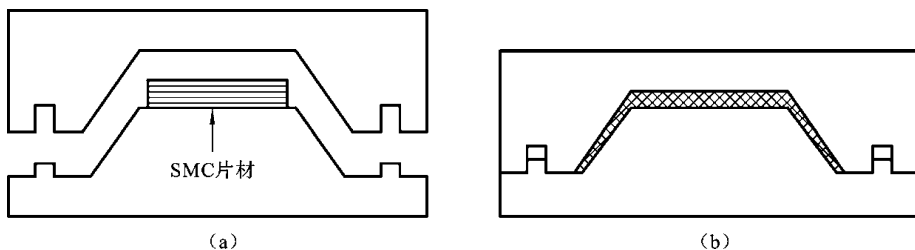


图 1-4 SMC 模压成型示意图

(a) 将 SMC 预制片放入模具型腔 (b) 在压力机中加压加热后

3. 真空热压成型(autoclave molding, hot press molding)

该方法是一种用于先进长纤维复合材料的成型法。先将单层连续纤维浸渍树脂溶液,经过一定烘干处理,形成略带黏性的半成品材料——预浸料(prepreg)。然后利用加热加压釜(autoclave)或热压机,经过铺层、真空包装、抽真空、加热加压,使产品固化成型。预浸料制作过程如图 1-5 所示。采用真空热压成型法时,将预浸料制作和复合材料成型分开完成,这样制成的复合材料产品尺寸稳定、性能优异,宇航业的复合材料产品制造多采用该方法。未固化的碳/树脂等片材可以在纤维生产厂家购买。直接购进预制片或预浸料进行产品设计和制造,具有生产效率高、设计自由度大、材料浪费少、产品质量稳定等优点。

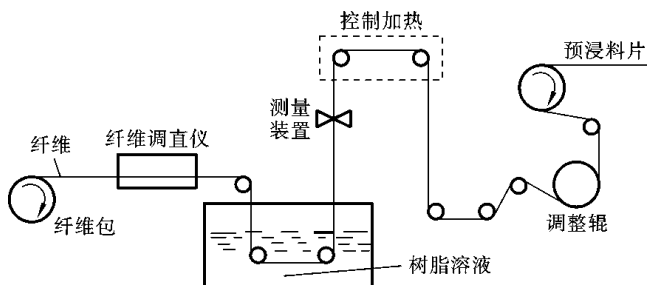


图 1-5 单层预浸料制作示意图

4. 树脂传递模塑(resin transfer molding, RTM)

该方法也称注塑成型法,其工艺步骤是:首先将增强纤维的预成型片材铺设在模型中,然后给模型加压,使其按产品形状预成型,随后将树脂注入,最后加热固化。该方法成本低,产品尺寸稳定,质量高,多用于长纤维复合材料制品的成型,

适应多种热固化树脂和热塑性树脂材料,也可用于二维或三维编织复合材料制品的成型。

5. 连续缠绕(filament winding)成型

该方法是一种制造筒状复合材料制品的成型法,图 1-6 是其示意图。经过树脂浸渍后的连续纤维,通过纤维输出梭子送出,随着梭子的移动和转筒(芯模)的旋转,将纤维连续缠绕到转筒上,直至达到要求的厚度,然后进行常温固化或加热固化。纤维缠绕角度可以由转筒的旋转速度和梭子的移动速度来调节。连续缠绕成型法应用广泛,火箭发动机壳体、雷达罩、直升机部件,以及石油化工领域中的各种压力容器、储罐和管道等,都是采用该方法制造的。

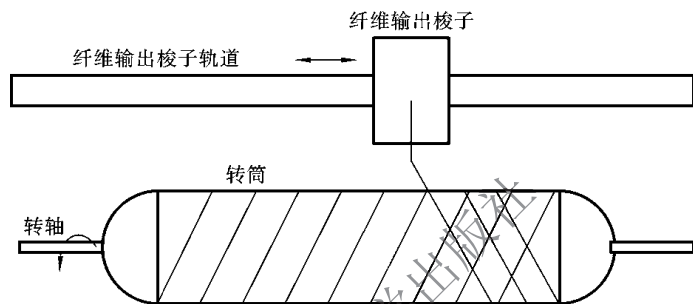


图 1-6 连续缠绕成型示意图

1.4 复合材料的增强相和基体相

在纤维复合材料中,纤维具有很高的强度和刚度,是增强相。从几何分布来看,增强相是非连续相,而基体是连续相。复合材料的综合性能与组分材料的性能、分布以及相互作用等因素相关。工程复合材料中的增强纤维通常是玻璃纤维、碳纤维和芳纶纤维,它们应具备的性质如下:① 沿纤维方向有很高的弹性模量;② 沿纤维方向拉伸强度很大;③ 各纤维的力学性能差别不大;④ 在加工制造过程中,有稳定的力学性能和再现性能;⑤ 纤维横截面积均一。

单单将纤维放在一起形成不了复合材料,得不到所要求的材料性能,需要有基体材料的配合。最广泛用于工程实际的复合材料是树脂基复合材料,即纤维增强树脂基复合材料。树脂基体应具备以下性质:① 能将纤维黏合在一起;② 能将载荷传递给纤维;③ 在某种程度上能阻止裂纹横穿纤维;④ 在加工处理过程中,能保护纤维表面,使其不被破坏;⑤ 与纤维的化学相容性以及热相容性较好。

纤维的长短对复合材料的性能会产生较大影响。一般将长度小于 50 mm 的纤维称为短纤维,长度大于 50 mm 的纤维称为长纤维或连续纤维。本书重点研究长纤维增强复合材料的力学性能。

1.5 常用的增强纤维

1. 玻璃纤维

玻璃纤维是最早开发出来的用于高分子基复合材料的纤维。玻璃纤维主要有两类,即 E(electrical)型和 S(silica)型。其中 E 型玻璃纤维有很好的电绝缘性能,具有令人满意的强度和刚度。其产量占有玻璃纤维总产量的 90% 以上。S 型玻璃纤维是新开发的高强度、高刚度纤维。其力学性能、热稳定性以及耐蚀性等综合性能都很好,但这种材料的制造成本很高,价格是 E 型玻璃纤维的 5 倍。S 型玻璃纤维多用于航空航天结构。

除了上述两种类型的玻璃纤维之外,还有耐酸的 C 型玻璃纤维、耐碱的 A-R 型玻璃纤维(多用于增强水泥混凝土),以及低成本的 S-2 型玻璃纤维。

玻璃纤维的直径范围为 $3\sim 25\ \mu\text{m}$ 。一般 $10\ \mu\text{m}$ 以下的纤维多用于制作印制电路板的基板、玻璃纤维布。 $10\ \mu\text{m}$ 以上的纤维多用于制作玻璃纤维增强高分子基复合材料。常用玻璃纤维的物理性质见表 1-3。多数玻璃纤维的拉伸极限应变接近于 4%。

表 1-3 常用玻璃纤维的物理性质(室温)

类 型	密度/(g/cm^3)	弹性模量/GPa	拉伸强度/GPa	线膨胀系数/($\times 10^{-6}\ \text{K}^{-1}$)
C 型	2.52	68.9	3.3	6.3
E 型	2.58	72.3	3.4	5.4
S-2 型	2.46	86.9	4.9	1.6
A-R 型	2.70	73.1	3.2	6.5

2. 碳纤维

碳纤维分为两大类。一类是以合成纤维作为原材料,经过氧化稳定、碳化或石墨化处理而制成的。合成纤维主要有 人造纤维和聚丙烯腈(polyacrylonitrile, PAN)基有机纤维两种,前者刚度和强度较低,因此,聚丙烯腈基有机纤维在市场上占领先地位。另一类是利用石化工业的副产品沥青(pitch),经过熔化抽丝、氧化稳定、碳化或石墨化处理而制成的沥青基碳纤维。

聚丙烯腈基碳纤维的直径一般是 $5\sim 8\ \mu\text{m}$,沥青基碳纤维的直径一般是 $6\sim 12\ \mu\text{m}$ 。碳纤维的拉伸极限应变较小,一般在 1%~2% 以内。表 1-4 所示是几种碳纤维的物理性质,其中线膨胀系数是沿纤维轴向的值,在室温下多为负值或接近于零。

碳纤维制造工艺较简单,具有较好的耐热、耐蚀性和优良的力学性能,已成为最重要的先进纤维材料。

表 1-4 几种碳纤维的物理性质(室温)

类 型		密度/ (g/cm ³)	弹性模量/ GPa	拉伸强度/ GPa	线膨胀系数/ (×10 ⁻⁶ K ⁻¹)
PAN 基 碳纤维商品名 (厂家)	AS4(Hexcel)	1.79	221	3.93	—
	HTA(Tenax)	1.77	238	3.95	-0.10
	T300(Toray)	1.76	230	3.53	-0.41
	T800H(Toray)	1.81	294	5.49	-0.56
沥青基 碳纤维商品名 (厂家)	P-55S(BP-Amoco)	2.0	380	1.9	-1.37
	P-100(BP-Amoco)	2.16	760	2.4	-1.48
	K135 (Mitsubishi Kasei)	2.10	540	2.6	—
	YS-60 (Nippon graphite fiber)	2.12	590	3.5	—

3. 芳纶纤维

芳纶纤维是一种有机合成纤维。与纺纱工业中常用的尼龙纤维和聚酯纤维等有机合成纤维不同,芳纶纤维有很高的比强度和比刚度,有很好的热稳定性,不易燃烧,因此,芳纶纤维增强复合材料多用于制造航空航天设备、船舶、军事装备(防弹衣等)、刹车片、高性能绳索等。Kevlar 是美国杜邦公司生产的芳纶纤维的商品名,该产品用途广泛。其中 K-29 用于绳索电缆,K-49 用于复合材料制造,K-149 用于航天器。此外,还有德国 AKZO 公司的 Twaron,日本 Teijin 公司的 Technora 等也是常见的芳纶纤维产品。芳纶纤维的直径约为 12 μm。表 1-5 给出了部分芳纶纤维的物理性质。与玻璃纤维和碳纤维相比,芳纶纤维密度最小,拉伸极限应变较大。

表 1-5 芳纶纤维的物理性质

类 别	密度/(g/cm ³)	弹性模量/GPa	拉伸强度/GPa	伸长率(%)
K-29	1.44	60	3.0	3.6
K-49	1.45	130	3.4	2.5
K-149	1.47	160	2.4	1.5
Twaron	1.44	60	2.6	3.0
Technora	1.39	73	3.4	4.6

4. 硼纤维

硼纤维通常指以钨丝作加热载体、用化学气相沉积(CVD)硼的方法得到的、直径为 100~200 μm 的连续单丝。硼是共价键结合材料,其比模量(specific modulus)大约是一般工程材料(钢、铝、镁等)的 6 倍。硼纤维主要用于金属基复合材料的制

备,其中最重要与最成熟的是硼纤维增强铝基复合材料,用于飞机发动机叶片和航天领域。硼/环氧复合材料也用于制造飞机机身、水平尾翼等。

1.6 常用的高分子基体材料

1. 热固性树脂(thermosetting resin)

纤维增强复合材料按基体材料的不同,可分为热固性复合材料和热塑性复合材料。热固性基体材料的特点是生产加工时,会发生不可逆固化过程,而热塑性基体材料遇热时变软、冷却时变硬这个过程是可逆的。

热固性树脂材料主要有不饱和聚酯树脂(unsaturated polyester resin, PE)、环氧树脂(epoxy resin, EP)、固化型聚酰亚胺树脂(addition polyimide resin, API)以及双马来酰亚胺(bismaleimide, BMI)树脂。

环氧树脂有较好的力学性能、电气性能、耐蚀性等性能,与聚酯树脂相比,环氧树脂成型时收缩较小,还可以以半固化的状态保存,因此,广泛用于先进的热固性复合材料的制造。不饱和聚酯树脂在玻璃纤维增强复合材料中用得较多,固化型聚酰亚胺树脂和双马来酰亚胺树脂是比较耐高温($\sim 300^{\circ}\text{C}$)的热固性基体材料。一般热固性基体材料在常温下呈液体状态,黏度低,对纤维束的浸渍性能好。这类材料通过化学结合状态的变化而发生固化,其过程是不可逆的。表 1-6 给出了热固性基体材料的力学性能和物理性质。

表 1-6 热固性基体材料的力学性能和物理性质

材料	密度/ (g/cm^3)	弹性模量/ GPa	拉伸强度/ MPa	伸长率(%)	玻璃化迁移温度/ $^{\circ}\text{C}$
PE	1.2	2.8~3.5	50~80	2~5	80
EP	1.1~1.5	3.0~5.0	60~80	2~5	150~200
API	1.3	3.9	38.6	1.5	340
BMI	1.2~1.3	4.1~4.8	41~82	1.3~2.3	230~290

2. 热塑性树脂(thermoplastic resin)

热塑性基体材料的成型是通过树脂的熔融、流动、冷却、固化等物理状态的变化来实现的,其变化是可逆的。热塑性材料有很多种,如有机玻璃(polymethyl methacrylate, PMMA)、尼龙、塑料薄膜等。热塑性材料的特点是耐冲击、断裂韧性高,但强度和刚度较低,在高性能复合材料中,热塑性复合材料所占比例较小。

表 1-7 所示是两种热塑性基体材料的物理性质。聚醚醚酮(PEEK)树脂的刚度和强度与环氧树脂相近,而冲击韧度和断裂韧性比环氧树脂要高很多,但聚醚醚酮树脂的成型过程较复杂,成本也高些。聚醚酰亚胺(polyether imide, PEI)树脂是在聚