

高等院校教材

复合材料力学概论

陈建桥 编著



科学出版社
www.sciencep.com

高等院校教材

复合材料力学概论

陈建桥 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以基础理论和计算方法为重点,兼顾力学性能的试验评价和复合材料/结构设计,力图使读者对先进复合材料及其力学分析有较全面的理解,为复合材料在航空航天、交通工程、土木建筑、医学等各个领域的合理应用提供基础的理论、计算和设计知识。内容包括:复合材料概述、增强纤维和基体、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、层合板的热应力、复合材料的断裂、层合板的弯曲和屈曲、复合材料的优化设计、智能复合材料的概念,以及作为附录的各向异性材料弹性理论等。

本书内容精练、简明实用。可作为高校力学及相关专业中等学时的教学用书,也可作为工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

复合材料力学概论/陈建桥编著. —北京:科学出版社,2006
(高等院校教材)

ISBN 7-03-017254-X

I. 复… II. 陈… III. 复合材料力学-高等学校-教材 IV. TB330.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 050239 号

责任编辑:资丽芳 于宏丽/责任校对:刘小梅

责任印制:张克忠/封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京彩色印装有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年8月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2006年8月第一次印刷 印张: 10

印数: 1—3 000 字数: 183 000

定价: 15.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

复合材料作为一种结构材料,近年在航空航天、土木建筑、交通、医用、体育器械等领域得到广泛应用。对复合材料力学性能的掌握,是安全、合理、有效地使用复合材料的基础。我国在20世纪80年代及90年代初期出版了若干种复合材料力学方面的书籍,也有一些从国外翻译过来的书。这些书一是出版年代较早,二是综合类的书一般内容庞杂,使人望而却步,在一定程度上制约了复合材料力学知识的传播与普及。

本书的编写原则是:①突出重点,简明实用。本书作为复合材料力学的简明教材,使读者用较少的时间掌握复合材料力学的框架知识,为进一步深入学习各专题打下一个很好的基础。②内容安排由“小”到“大”,即素材—单层板—层合板;由“基础”到“专题”,即复合材料宏观力学—细观力学分析—断裂损伤—结构设计。③兼顾基础理论和计算方法,注重分析能力和应用能力的提高。本书可作为力学及相关专业的教学用书,或工程技术人员的自学参考书。

本教材得到华中科技大学“新世纪教学改革工程”的立项资助。在编写过程中,作者参考了若干国内外有关复合材料或复合材料力学的教材。在讲授“复合材料力学”课程的过程中,作者也注意吸纳一些好的意见和建议。本书的文字及图表处理工作得到王秀琴同志的帮助。在此一并致谢。

感谢科学出版社对出版本教材给予的支持,特别要感谢资丽芳同志所做的不懈努力和对编者的一贯鼓励。限于编者水平,书中有不当之处,敬请读者批评指正。

陈建桥

2006.6.8 于武汉

目 录

前言

第一章 复合材料概述	1
1.1 复合材料基本概念	1
1.2 复合材料的种类	2
1.3 复合材料的构造及制法	4
1.4 复合材料的性能和应用	5
习题	8
Coffee break 比强度	8
第二章 增强纤维和基体	10
2.1 纤维和基体应具备的性能	10
2.2 玻璃纤维	10
2.3 碳纤维	11
2.4 芳纶纤维	12
2.5 热固性基体	12
2.6 热塑性基体	13
2.7 材料性能的比较	14
习题	15
Coffee break 非均匀各向异性	15
第三章 单向复合材料的刚度分析	17
3.1 正交各向异性材料的应力应变关系	17
3.2 单层板材料任意方向的应力应变关系	20
3.3 拉剪耦合效应	24
3.4 工程弹性常数及其变换	25
3.5 单层板弹性性能的分析 and 预测	27
习题	30
Coffee break 复合材料与轻量化	32
第四章 单向复合材料的强度	33
4.1 正交各向异性材料的强度指标	33
4.2 强度准则	34
4.3 正剪切和负剪切	38

4.4	强度理论的选取原则·····	39
4.5	单向复合材料力学性能的实验测定·····	40
4.6	强度的细观力学分析和预测·····	45
	习题·····	46
	Coffee break 高温复合材料·····	46
第五章	层合板的刚度分析 ·····	48
5.1	基本假设·····	48
5.2	本构关系·····	49
5.3	反对称层合板与耦合效应·····	52
5.4	对称层合板·····	53
5.5	层合板的工程弹性常数·····	58
	习题·····	63
	Coffee break 瞄准沉寂的世界·····	64
第六章	层合板的强度 ·····	65
6.1	层合板的应力与强度分析·····	65
6.2	层合板的破坏形态·····	66
6.3	初始层破坏强度·····	67
6.4	最终层破坏强度·····	72
6.5	层间应力与分层破坏·····	77
	习题·····	79
第七章	层合板热应力分析 ·····	80
7.1	单层板的热膨胀系数·····	80
7.2	正交层合板(0/90)的热应力·····	81
7.3	层合板考虑热变形的本构方程·····	83
7.4	吸湿变形与热变形的相似性·····	83
	习题·····	86
	Coffee break 树脂能通电流的话?·····	86
第八章	复合材料的断裂与断裂力学 ·····	87
8.1	复合材料与断裂力学·····	87
8.2	裂纹尖端应力场·····	88
8.3	各向异性板的线弹性断裂力学·····	90
8.4	层间断裂·····	93
8.5	层间断裂韧性测量·····	95
8.6	层间疲劳裂纹扩展·····	97
8.7	层合板的其他破坏形式·····	99

习题	100
第九章 层合板的弯曲和屈曲	101
9.1 弯曲基本方程	101
9.2 简支层合板的弯曲变形	102
9.3 两对边简支板的弯曲变形	105
9.4 减小板的弯曲变形的办法	107
9.5 层合板的屈曲	108
习题	110
Coffee break 修理人体	111
第十章 复合材料的优化设计	112
10.1 材料与结构的优化设计	112
10.2 夹心梁单元模型	112
10.3 面内加载层合板的刚度设计	114
10.4 面内加载层合板的最大强度设计	117
10.5 层合板弯曲刚度设计	119
10.6 最大屈曲强度设计	121
习题	123
Coffee break 未来的复合材料	123
第十一章 智能复合材料	125
11.1 智能化的概念	125
11.2 传感技术和传感材料	126
11.3 驱动材料	126
习题	128
Coffee break 绿色复合材料	128
参考文献	129
附录 各向异性材料三维弹性理论	130
A.1 应力应变关系	130
A.2 具有一个弹性对称平面的材料	131
A.3 正交各向异性	132
A.4 横观各向同性	133
A.5 各向同性	134
A.6 正交各向异性材料的工程弹性常数	134
A.7 面外剪切变形	135
习题解答	139
索引	147

第一章 复合材料概述

1.1 复合材料基本概念

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属于复合材料,如生体材料中的骨头或牙齿,其组成成分是韧性较好的有机材料(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 material)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为了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——玻璃纤维增强树脂材料(glass fiber reinforced plastics, GFRP)。除玻璃纤维外,还有用碳纤维(carbon fiber)、硼纤维(boron fiber)、芳纶纤维(aramid fiber)与树脂复合而成的材料,分别简记为CFRP、BFRP、AFRP。纤维增强树脂材料(fiber reinforced plastics, FRP)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。基体采用各种树脂或金属、非金属材料。增强材料采用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,它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,如要求比重小,则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。为得到较高的韧性和剪切强度,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。两者粘性好,能形成较理想的界面,对于提高复合材料的刚度和强度是很重要的。表 1.1 列出几种增强纤维与基体材料的组合好坏情况。表中的 PEEK 是一种高韧性热塑性树脂。

复合材料具有非均匀(heterogeneous)、各向异性(anisotropic)等性质,比起一般金属材料,它的力学行为要复杂得多。复合材料力学是在研究复合材料的力学性能基础上发展起来的固体力学的一门新的学科分支。

表 1.1 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	×	×	⊙	△	△	△
		⊙ 好	○ 较好	△ 一般	×	×	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,复合材料可分为以下两类:

- (1) 颗粒复合材料(particle dispersed composite material);
- (2) 纤维增强复合材料(fiber reinforced composite material)。

颗粒复合材料中最普通的例子是混凝土,它由砂、石、水和水泥粘合在一起经化学反应而变成坚固的结构材料。金属陶瓷是氧化物和碳化物微粒悬浮在金属基体中得到的一种颗粒复合材料,用于耐腐蚀的工具制造和高温应用。

纤维增强复合材料按纤维种类分为玻璃纤维、硼纤维、芳纶纤维、碳纤维等。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破裂,而一般玻璃纤维的强度可达 3000~5000MPa。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,大大减少了破坏的起始源,因而强度得到很大提高。

玻璃纤维是最早使用的一种增强材料,在飞行器结构中常用 E 型和 S 型两个品种。E 型玻璃纤维绝缘性能好、价格低,GFRP 复合材料的大部分用的是 E 型玻璃纤维。S 型玻璃纤维强度高、高温性能好,但价格昂贵。硼纤维是由硼蒸气在钨丝上沉积而制成的纤维,性能优良,但成本高,仅用于太空船等特殊结构。碳纤维是用各种有机纤维加热碳化而得,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、石墨化处理而制成。碳纤维制造工艺较简单,具有较好的耐

热、耐腐蚀性和很高的力学性能,成为最重要的先进纤维材料。芳纶纤维是一种有机纤维,具有比重小、弹性模量高等优点,国外牌号为 Kevlar,分三个品种:K-29 用于绳索电缆,K-49 用于复合材料制造,K-149 在航天器中有应用。

根据基体材料的种类,复合材料可分为

- (1) 聚合物基体复合材料(polymer matrix composite, PMC);
- (2) 金属基体复合材料(metal matrix composite, MMC);
- (3) 陶瓷基体复合材料(ceramics matrix composite, CMC)。

PMC 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)粘合力强,与纤维表面浸润性好,固化成型方便,应用最广泛。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。其弱点是弹性模量低,耐热性能差。

MMC 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 metal, FRM)耐热性能好,比重也较小。CMC 材料中碳/碳复合材料(carbon/carbon composite material, C/C)不仅耐热,而且耐酸、耐磨损,应用于太空船的防护材料及制动装置、热压机等。

本书主要讨论纤维增强树脂材料。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,几种金属材料、玻璃和木材的性能也一并列出。以后我们会常采用复合材料的简化表示方法,“(增强材料)/(基体)”。表 1.2 中的 GF/EP 和 CF/EP 分别表示玻璃纤维增强环氧树脂材料和碳纤维增强环氧树脂材料。

表 1.2 常用纤维和树脂的力学性能

材料	比重/(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	78	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

纤维增强复合材料的构造形式分为单层板(lamina)、层合板(laminate)和短纤维复合材料,单层板中纤维按一个方向整齐排列或由双向交织纤维平面排列,如图 1.1所示。其中纤维方向称为纵向,用“1”或“L”表示,与纤维相垂直的方向称为横向,用“2”或“T”表示,有交织纤维时含量较少的方向记为“2”,单层板厚度方向用“3”或“Z”表示。1、2、3 轴称为材料主轴(principal axis)。单层板具有非均匀和各向异性。

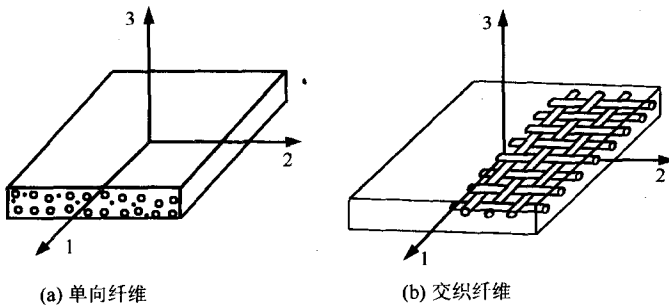


图 1.1 单层复合材料的构造形式

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,进行粘合、加热固化而成。选取整体坐标系 xyz ,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 是由四层单层板构成的层合板,纤维方向依次为 $\theta = \alpha, 0^\circ, 90^\circ, -\alpha$ 。该层合板的表记法为

$$\alpha/0/90/-\alpha$$

其他层合板铺层表示举例如下

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

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

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

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,还有短纤维复合材料的构造形式。短纤维复合材料按纤维的排列方式分为

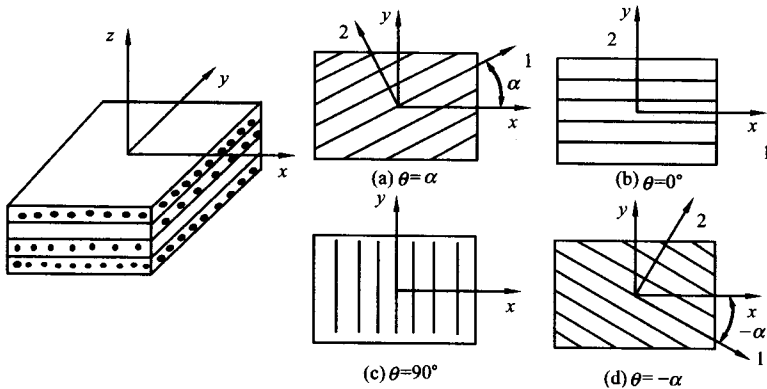


图 1.2 叠层材料构造形式举例

两类,即随机取向的短切纤维复合材料和短切纤维呈单向整齐排列的复合材料。

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。玻璃纤维/环氧树脂复合材料的典型制法是:将环氧树脂基体浸渍玻璃纤维,经烘干形成半成品材料——预浸料(prepreg)。将若干块预浸料按一定的方式叠起来送入热压机,在一定温度和压力下压制成板材。单向短纤维复合材料是将短切纤维悬浮在甘油中不停地搅动,加压迫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,然后加树脂模压成板。

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。前者是原材料的制造,各种产品再经过对原材料的加工而制成;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。

1.4 复合材料的性能和应用

纤维增强复合材料的最大优点是比强度(specific strength)高和比模量(specific modulus)高。比强度定义为“强度÷比重”,比模量的定义是“弹性模量÷比重”。比强度和比模量高说明在质量相当的情形下材料的承载能力大,刚度大(变形小)。轻而强、轻而坚的材料对于飞机和航天器特别重要。当飞机机体的质量增大时,需要大功率的发动机,因此发动机的质量及燃料质量增大,燃料存储罐变大变重,这样就需要更大功率的发动机,机体质量的变化将导致连锁反应。将比强度高的材料用于飞机,可大大减轻机体质量,节约能源,节省材料。现在军用飞机及民用飞机都较多地采用纤维增强复合材料以代替铝合金。图 1.3 是复合材料应用于飞机(AV-8V 垂直起降机)的一个例子。

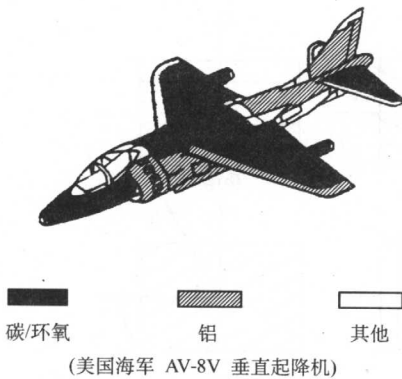


图 1.3 飞机上的复合材料
(美国海军 AV-8V 垂直起降机)

各种材料的比强度示于图 1.4。从图中知,一般金属材料难以跨越的“4”的栏杆(比强度 = $4 \times 10^4 \text{m}$)被纤维增强树脂材料轻易地跨过了。从该图还看出木材的比强度较高,与镁相同,仍不失为一种较好的材料。

复合材料的另一特点是可自由设计。复合材料的性能除了决定于纤维和基体材料本身的性能外,还决定于纤维的含量和铺设方式,因此根据载荷条件和结构构件的形状,将复合材料内的纤维设计成适当含量并合理铺设,可以有效地发挥材料的作用。如受内压作用的薄壁圆筒,其圆周方向的应力

设为 σ_θ , 轴向应力设为 σ_L , 见图 1.5。由轴线方向的平衡条件得

$$\sigma_L \cdot 2\pi r \delta = \pi r^2 p_0$$

$$\sigma_L = \frac{rp_0}{2\delta}$$

式中 p_0 是内压力, r 和 δ 分别是圆筒的半径和壁厚。再由圆周方向的平衡条件可得

$$\sigma_\theta \cdot 2\delta L = 2rLp_0$$

$$\sigma_\theta = \frac{rp_0}{\delta}$$

L 是圆筒的长度, 所以周向应力等于轴向应力的两倍。若圆筒材料为各向同性材

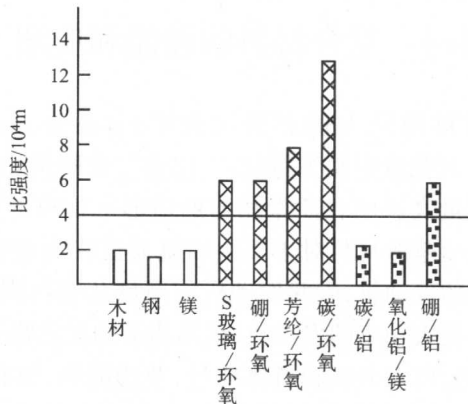


图 1.4 各种材料的比强度

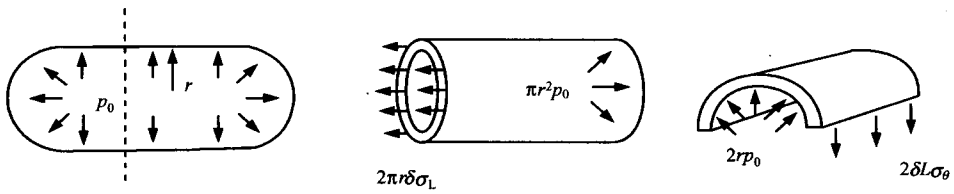


图 1.5 圆筒形压力容器

料,随内压力的增大,圆筒壁上将出现沿轴线的裂纹而导致破坏。如采用 FRP 材料,利用其各向异性的性质,将圆周方向的强度设计为轴线方向强度的二倍,可最大限度地发挥材料的作用。

纤维增强树脂复合材料一般具有强烈的各向异性。表 1.3 是几种 FRP 材料的纵向和横向力学性能。从表中看出,CFRP 材料的横向拉伸强度是纵向拉伸强度的 1/20,横向弹性模量也仅为纵向弹性模量的 1/14,横向力学性能差是 FRP 材料的缺点。各向异性在一些情况下给材料的选择带来麻烦,但如前所述,利用 FRP 材料的各向异性,可以进行材料设计以满足一些特殊的要求。

表 1.3 单层 FRP 材料的力学性能

材 料	比重/(kN/m^3)	弹性模量/GPa	拉伸强度/MPa
GFRP	20	L 方向	42
		T 方向	5
		交织纤维	21
CFRP	16	L 方向	140
		T 方向	10
AFRP	14	L 方向	70

复合材料尽管还存在成本较高、机械连接性能差等困难,由于性能优良,其应用领域十分广阔。除了飞机外,复合材料还广泛应用于航天、船舶、建筑、兵器、化学工程、车辆、体育器械、医疗等领域。碳纤维/树脂材料的应用例子列于表 1.4。

表 1.4 CFRP 的用例

领 域	CFRP 特性	用 例
工业 产业	惯性小,尺寸稳定,耐磨损 振动衰减快,低噪声 摩擦小,耐磨损	(a)纺织机械零部件 (b)复印机,自动绘图机 (c)轴承,齿轮

续表

领域	CFRP 特性	用 例
车辆	轻量,耐疲劳,低噪声	比赛用车,高速车
体育器械	比强度高,比模量高,振动衰减快,质轻	防护帽,钓鱼竿,网球拍,滑雪板,帆板,自行车,摩托车
航空航天	比强度高,比模量高,质轻	飞机,火箭,卫星,宇宙船
医疗	高功能,质轻 耐久性,与生体相容性	(a)轮椅,假肢 (b)人造骨头
海洋等	比强度高,比模量高 导电性能	(a)压力容器,电缆槽 (b)天线,电子产品
能源	比强度高,比模量高,耐腐蚀	飞轮,风车

习 题

- 1.1 玻璃纤维的强度为何比块状玻璃高得多?
- 1.2 比强度高的材料有何好处? 举例说明。
- 1.3 钢筋混凝土中的钢筋与混凝土各起什么作用?
- 1.4 三合板是由薄木板相互垂直叠放粘接而成,与单层木板相比,三合板有什么优点?
- 1.5 什么是各向异性?
- 1.6 用复合材料制作的体育器械利用了复合材料的哪些性能?
- 1.7 软钢的强度为 400MPa,比重是 76kN/m³,单向 AFRP 的强度是 1300MPa,比重是 14kN/m³,这两种材料的比强度各是多少?
- 1.8 说说生体材料和工业材料有什么不同。

Coffee break

比强度

设一杆件(或绳索)比重为 γ ,截面积和长度分别为 A 和 l ,由房屋天顶自然垂下,则危险截面上的最大应力求得为 $\sigma = \gamma A l / A = \gamma l$ 。随杆件变长,应力增大,到达其临界破坏应力 σ_c 时,杆件将沿危险截面断开。此时的临界长度 $l_c = \sigma_c / \gamma$,式子右端就是比强度的定义。因此,比强度的量纲是长度,其物理意义可解释为:材料在自重作用下能自然垂下的最大长度。

材料的比强度,可以通过测定其临界长度的方法来确定。如夹起一根乌冬面,在最大长度为 4.3m 时断开,则乌冬面的比强度为 4.3m。对豆腐进行类似的实验

比较困难,经过合理想像,推测其比强度约为 10cm 。钢铁的比强度为 18km ,若要测定其临界长度,需要利用高空飞行的飞机才有可能。对于钢铁材料,其压缩强度和拉伸强度相同,由地面堆砌的材料高度达到 18km 时,最下端截面将发生破坏。因此由钢铁材料建造的房屋的理论最大高度是 18km 。

第二章 增强纤维和基体

2.1 纤维和基体应具备的性能

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) 在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) 各纤维的机械性能差别不大;
- (4) 在加工制造过程中,有稳定的机械性能和再现性能;
- (5) 纤维横截面积均一。

将纤维放在一起形成不了复合材料以及所要求的材料性能,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,纤维增强树脂复合材料又称纤维增强塑料(fiber reinforced plastics, FRP)。树脂基体应具备以下性质:

- (1) 能将纤维粘合在一起;
- (2) 将载荷传送给纤维;
- (3) 在某种程度上阻止裂纹横穿过纤维;
- (4) 在加工处理过程中,保护纤维表面,使其不受伤害;
- (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,一般将短于 50mm 的纤维称为短纤维,长度大于 50mm 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。

2.2 玻璃纤维

玻璃纤维(glass fibers)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 型(electrical)和 S 型(silica)。其中 E 型玻璃纤维有很好的电绝缘性能,具有满意的强度和刚度值,其产量占有所有玻璃纤维总产量的 90% 以上。S 型玻璃是新开发的高强度、高刚度纤维,其力学性能、热稳定性以及耐腐