

复合材料力学

沈观林

清华大学出版社

TB301

S39

复合材料力学

沈 观 林

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 提 要

本书系统全面地阐明复合材料力学的基本理论基础,并介绍若干专题。内容包括复合材料概论,各向异性弹性力学基础,单层复合材料宏观力学分析和细观力学分析,复合材料力学性能实验测定,层合板刚度和强度的宏观力学分析、湿热效应,层合平板的弯曲、屈曲和振动以及复合材料力学的若干专题。书中附有习题和教学实验指导。

本书可供理工科大学工程力学、材料、机械、汽车、化工、航空航天、土建等专业大学生学习复合材料力学课程使用,也可供从事复合材料研究和使用的有关科技工作者学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

复合材料力学/沈观林编著. —北京:清华大学出版社,1995
ISBN 7-302-02007-8

I. 复… II. 沈… III. 复合材料力学 IV. TB301

中国版本图书馆CIP数据核字(95)第19124号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编100084)

印刷者:北京人民文学印刷厂

发行者:新华书店总店北京科技发行所

开本:850×1168 1/32 印张:11 字数:286千字

版次:1996年2月第1版 1996年2月第1次印刷

书号:ISBN 7-302-02007-8/O·167

印数:0001—3000

定价:9.00元

前 言

复合材料是一类新型材料,其强度高、刚度大、重量轻,并具有抗疲劳、减振、耐高温、可设计等优点,近 30 年来在航空、航天、能源、交通、建筑、机械、生物医学和体育运动等部门日益得到广泛的应用,可以预言,21 世纪将进入复合材料的时代。随着复合材料的开发和应用,复合材料力学已初步形成学科体系并处于蓬勃发展的阶段。国内外不少高等院校已将“复合材料力学”列为各类工程专业大学生的选修课。

作者 1982 年春开始给工程力学系本科生开设了选修课。并与张如一、潘真微编写了《复合材料力学》讲义上、下册。后来作者又执笔编写了《复合材料力学》讲义及补充讲义,先后给工程专业和材料专业及机械、化工、土建等专业本科生开设必修课或选修课十余次。今在参考国内外复合材料力学书籍和技术资料以及总结多年来教学经验的基础上编写了本《复合材料力学》教材,全面系统地阐述了复合材料细观和宏观力学的基本原理及分析方法,并在各专题方面提出初步研究成果及发展方向。书中还编入“教学实验指导书”和“习题”。可供高等院校复合材料力学课程教学使用和有关科技人员自学参考。限于作者水平和经验,书中定有错误之处,敬请读者批评指正。

沈观林

1994. 9. 30

目 录

前言	1
第 1 章 复合材料概论	1
1.1 复合材料的种类	1
1.2 复合材料的构造及制法	10
1.3 复合材料的力学分析方法	13
1.4 复合材料的力学性能	15
1.5 复合材料的各种应用	18
第 2 章 各向异性弹性力学基础	28
2.1 各向异性弹性力学基本方程	28
2.2 各向异性弹性体的应力应变关系	30
2.3 正交各向异性材料的工程弹性常数	40
第 3 章 单层复合材料的宏观力学分析	48
3.1 平面应力下单层复合材料的应力应变关系	48
3.2 单层材料任意方向的应力应变关系	51
3.3 单层复合材料的强度	59
3.4 正交各向异性单层材料的强度理论	63
3.5 正交各向异性单层材料的不变量性质	72
第 4 章 单层复合材料的细观力学分析	77
4.1 引言	77
4.2 刚度的材料力学分析方法	80
4.3 强度的材料力学分析方法	93
4.4 短纤维复合材料的力学分析	103
4.5 热膨胀的力学分析	112

4.6	刚度的弹性力学分析方法	115
第5章	复合材料力学性能的实验测定	127
5.1	纤维和基体性能的测定	127
5.2	单层板基本力学性能的实验测定	130
5.3	其他力学性能实验	142
第6章	层合板刚度的宏观力学分析	149
6.1	引言	149
6.2	层合板的刚度和柔度	151
6.3	几种典型层合板的刚度计算	161
6.4	层合板刚度的理论和实验比较	173
第7章	层合板强度的宏观力学分析	184
7.1	层合板强度概述	184
7.2	层合板的应力分析	186
7.3	层合板的强度分析	189
7.4	层合板的层间应力分析	199
第8章	湿热效应	207
8.1	单层板的湿热变形	207
8.2	考虑湿热变形的单层板应力应变关系	209
8.3	考虑湿热变形的层合板刚度关系	211
8.4	考虑湿热变形的层合板应力和强度分析	213
第9章	层合平板的弯曲、屈曲与振动	223
9.1	引言	223
9.2	层合平板的弯曲	224
9.3	层合平板的屈曲	236
9.4	层合平板的振动	246
9.5	层合板中耦合影响的简单讨论	252
第10章	复合材料力学的若干专题	253
10.1	混杂复合材料及力学分析	253

10.2	金属基复合材料	269
10.3	陶瓷基复合材料	272
10.4	复合材料的疲劳	276
10.5	复合材料的损伤和断裂	282
10.6	复合材料的蠕变	294
10.7	复合材料的连接	300
10.8	横向剪切的影响	312
	习题	327
	复合材料力学教学实验指导书	334
	参考文献	343

第 1 章 复合材料概论

1.1 复合材料的种类

1.1.1 基本概念

复合材料是由两种或多种不同性质的材料用物理或化学方法制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,复合材料可能改善组分材料的刚度、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粘土和稻草(或麦秆)两种材料组成的,稻草起增强粘土的作用。古代的宝剑也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。现在复合材料已广泛应用于各种工程和日常生活,例如胶合板、钢筋混凝土、夹布橡胶轮胎、玻璃钢等。

复合材料从应用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,它是由各种无机纤维增强树脂或金属、非金属基体构成,可用于飞行器头部热防护;摩阻复合材料,它用石棉等纤维和树脂或非金属制成有高摩擦系数的复合材料,应用于航空、汽车等运转部分制动控速转向等机构。

我们主要研究结构用复合材料,复合材料由基体材料和增强材料两种组分组成,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,其中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,基本控制其力学性能。基体材料起配合使用,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、各向异性、不连续等,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。

1.1.2 复合材料的种类

根据复合材料中增强材料的几何形状,复合材料可分为三大类:

- (1) 颗粒复合材料,由颗粒增强材料和基体组成。
- (2) 纤维增强复合材料,由纤维和基体组成。
- (3) 层合复合材料,由多种片状材料层合组成。

我们主要讨论纤维增强复合材料,对其他两种只作简单介绍。

1. 颗粒复合材料

它由悬浮在一种基体材料内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。最普通的例子是混凝土,它由砂、石用水和水泥粘合在一起经化学反应而变成坚强的结构材料。还有如云母粉悬浮在玻璃或塑料中形成的复合材料。

(2) 金属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那样的无机微粒放在如聚胺脂的有机粘结剂中组成的,微粒约占75%,粘结剂占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,并研究其内应力问题。

(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,如金属拉丝模具;碳化铬在钴基体中的金属陶瓷有很高的耐腐蚀性和耐磨性,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、耐腐蚀、耐磨损等。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) 涂复金属。将一种金属涂复在另一种金属上,得到优良的性能,例如用10%的铜涂复铝丝作为铜丝的替代物,铝丝价廉而质轻,但难于连接,导热性较差;铜丝价贵而较重但导热性好,易于连接,涂铜铝丝比铜丝价廉而性能好。

(3) 夹层玻璃。用一种材料保护另一种材料。普通玻璃,透光但易脆裂,聚乙烯醇缩丁醛塑料韧性好但易被划损,安全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

首先,各种长纤维比块状的同样材料强度高得多。例如普通平板玻璃在几十兆帕的应力下破裂,而商用玻璃纤维的强度可达3000~5000MPa,实验室研究的玻璃纤维强度已接近7000MPa,这是由于纤维与块状玻璃具体结构不同,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为玻璃钢)、硼纤维、碳纤维、芳纶纤维等。

纤维增强复合材料按基体材料可分为树脂基体、金属基体、陶瓷基体和碳基体几种。

纤维增强复合材料按纤维形状可分为连续纤维增强复合材

料、短纤维增强复合材料、纤维布增强复合材料等。

1.1.3 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，玻璃纤维直径 $5\sim 20\mu\text{m}$ ，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能耐 1000°C 以上。玻璃纤维线膨胀系数约为 $4.8\times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ 。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。

2. 硼纤维

它是由硼蒸汽在钨丝上沉积而制成纤维(属复相材料，钨丝为芯，表面为硼)，由于钨丝直径较大，硼纤维不能作成织物，成本较高，60年代初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，价格比硼纤维便宜得多，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，高模量碳纤维最大延伸率为 0.35% ，高强度碳纤维延伸率可达 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它纤维不同，具各向异性，沿纤维方向 $\alpha_1 = -0.7\times 10^{-6}\sim 0.9\times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ ，而垂直于纤维方向 $\alpha_2 = +22\times 10^{-6}\sim 32\times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ 。

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,比玻璃纤维高约 45%,弹性模量介于玻璃纤维和硼纤维之间,为碳纤维的一半。热膨胀系数纤维方向 $\alpha_1 = -2 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$,横向 $\alpha_2 = 5 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$,与碳纤维接近。

芳纶纤维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,液晶在宏观上属流液体,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,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工艺,在钨丝上沉积碳化硅(SiC)形成复相纤维;另一种是 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,再高温处理转化成单相碳化硅纤维。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 $\alpha/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	伸长率 $\delta/\%$	比强度 (σ_b/γ) / 10MPa	比模量 (E/γ) / 10^5MPa
玻 璃 纤 维	E	700	2.55	350	0.74	5	4.8	137	0.29
	S	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	4.1			146	1.65
碳 纤 维	普通		1.75	250~300					
	高强		1.75	350~700	2.25~2.28			143~171	1.29~1.30
	高模	3650	1.75	240~350	3.5~5.8	-0.6	1.5~2.4	80~143	2.0~2.34
	极高模		1.75	75~250	4.60~6.70	-1.4	0.5~0.7	43~143	2.63~3.83
芳 纶 纤 维	49Ⅲ		1.47	283	1.34	-3.6	2.5	193	0.91
	49Ⅳ			304	0.85		4.0	207	0.58
碳 化 硅 纤 维	100	2690	3.28	254	4.3	3.8		77.4	1.31
	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

1.1.4 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、酚醛和不饱和聚酯树脂等，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。

几种常用树脂的性能列于表 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 σ_b /MPa	伸长率 δ /%	模量 E / 10^3 MPa	抗压强度/MPa	抗弯强度/MPa
1	环氧	~1.15	~85	5	3.2	~110	~130
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	77	100

2. 金属基体

它们主要用于耐高温或其他特殊需要场合，具有耐 300 C 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。几种纤维增强金属基复合材料的性能列于表 1-3 中。

表 1-3 几种纤维增强金属基复合材料性能

序号	纤维名称	金属基体	抗拉强度 /MPa	拉伸模量 /10 ³ MPa	线膨胀系数 /10 ⁻⁶ °C ⁻¹	其他
1	石墨	纯铝基	680	178		$V_f=32\%$
			650	147		$V_f=35\%$
2	石墨	铝镁基	680	195		$V_f=31\%$
3	石墨	铜镍基	560(400°C)	/		$V_f=$ 30%~50%
4	石墨	镍基	800~830	240~310		$V_f=50\%$
5	α -Al ₂ O ₃ 晶须	镍基	48~38	/		$V_f=$ 20%~21%
6	涂 SiC 硼纤维	钛合金 (温度 70°C)	965	286	1.39	纤维方向 0°
			965	254	/	15°
			689	215	/	45°
			455	206	1.75	90°
7	SiC	钛合金	979	250	泊松比 μ_{12} 0.28	方向 0°
			930	240	0.28	15°
			779	220	0.35	30°
			738	210	0.35	45°
			656	190	0.25	90°
8	碳纤维 T300	201 铝合金	1050	148		$V_f=40\%$
9	硼纤维 (W)	6061 铝合金	1400	239		$V_f=50\%$
10	SiC(W)	6061 铝合金	1510	232		$V_f=50\%$

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°C 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。此外还有石墨纤维增强硅酸盐复合材料,碳纤维增强碳化硅或氮化硅复合材料,碳化硅纤维增强氮化硅复合材料,碳化硅晶须增强含有 Y_2C_3 (碳化钇)的多晶四方相氧化锆复合材料(SiC 晶须/ Y-TZP)和 SiC/SiC 复合材料。

几种纤维(或晶须)增强陶瓷复合材料的力学性能列于表 1-4 中,供参考。

表 1-4 几种纤维(晶须)增强陶瓷基复合材料的力学性能

序号	纤维(晶须)	基体	弯曲强度 /MPa	断裂韧性 /MPa $\text{m}^{1/2}$	其他
1	碳纤维	全云母微 晶玻璃	480	1.1	CPMC $V_f=5.56\%$
2	SiC 晶须	Si_3N_4	770	5.14	$V_f=0$
			855	8.79	10%
			890	7.84	20%
			621	6.23	30%
3	SiC 晶须	TZP 多晶四方相 氧化锆	1060	10.4	$V_f=0$
			800	11.7	10%
			780	12.6	15%
			640	13.1	20%
			560	13.8	25%
4	SiC 纤维	SiC	320	/	相对密度 2.4
			300	/	2.3

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。以纤维和基体不同有三种:碳纤维增强碳,石墨纤维增强碳,石墨纤维增强石墨。碳/碳复合材料 C-CA 和 C-CE 采用碳布叠层化学气相沉积、石墨化处理制成,其中 CA 和 CE 是碳纤维分别用聚丙烯腈基氧化法和催化法生产的,国产 C/C 复合材料的力学性能见表 1-5。化学蒸气沉积法是用碳氢化合物气体如甲烷、乙炔等在 1000~1100℃ 进行分解,在三维碳纤维织物、碳毡或碳纤维缠绕件的结构空隙中进行沉积,碳细粉渗透到整个结构,形成致密的碳/碳复合材料:

表 1-5 两种国产碳/碳复合材料的性能

材料	抗拉强度/ MPa	抗压强度/ MPa	拉伸模量/ GPa	拉伸断裂应变/ %	拉弯强度/ MPa	抗弯模量/ GPa	剪切强度/ MPa	冲击韧性/ J/cm ²	相对密度 γ	线膨胀系数/ 10 ⁻⁶ ℃ ⁻¹
C-CA	149	138	52.4	0.40	107	39	7.88	2.12	1.67	0.36~0.37
C-CE	122	97	45.3	0.35	69.7	31.8	5.27	1.80	1.57	0.18~0.20

1.2 复合材料的构造及制法

1.2.1 复合材料的基本构造形式

如前所述,我们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)

如图 1-1 所示,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