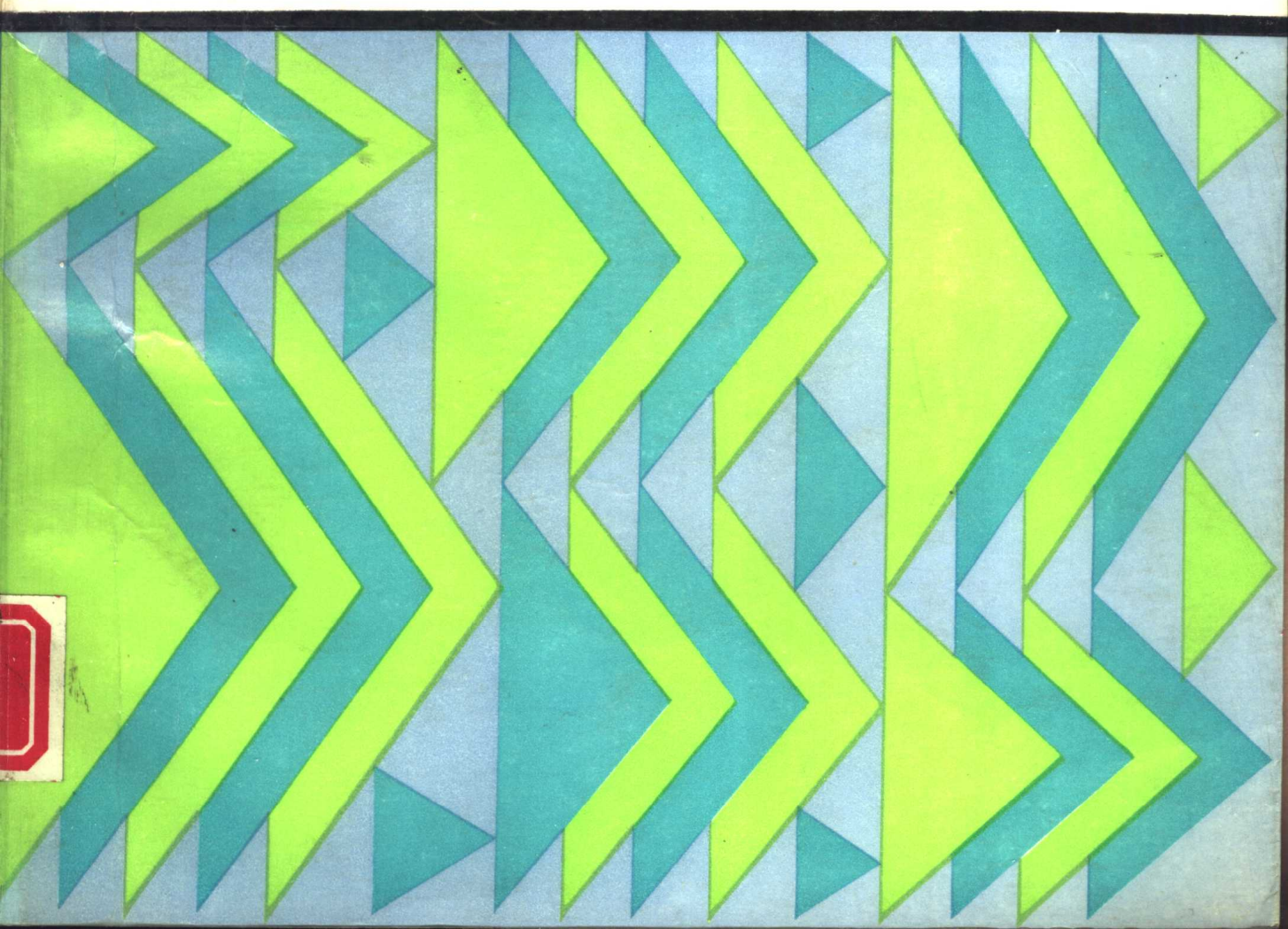


复合材料力学进展

罗祖道 王震鸣 主编

北京大学出版社



复合材料力学进展

罗祖道 王震鸣 主编

北京大学出版社

新登字(京)159号

复合材料力学进展

罗祖道 王震鸣 主编

*

北京大学出版社出版发行

(北京大学校内)

北京大学印刷厂印刷

新华书店经售

*

787×1092 毫米 16 开本 21 印张 505 千字

1992 年 8 月第一版 1992 年 8 月第一次印刷

印数: 0001—1800 册

ISBN 7-301-01752-9/O · 274

定价: 17.50 元

序 言

近二、三十年来,纤维增强复合材料由于其独特的优异性能,作为一种新型的工程结构材料在一些先进国家中已日益受到广大工程技术界的重视和应用。为了使我国的科学技术能在这一工程技术方面也得到相应的发展,中国力学学会在固体力学专业委员会中设立了复合材料力学专业组以期推动国内力学界对这一学术领域不断开拓而走向世界先进行列。复合材料力学专业组于1980年成立以来,已与中国航空学会、中国宇航学会联合组织召开了五次学术交流会议。几年来通过材料、化学和力学等各界有关学者、专家们的刻苦钻研和不懈的努力,初步取得了一些成绩。这些成绩在1986年由中国力学学会联合美国宇航学会、欧洲复合材料协会在北京成功地召开的国际复合材料与结构学术会议上得到了反映。

当今,复合材料这一新型材料及其结构在工程上的应用正处于日新月异不断发展的阶段。然而,它作为工程结构,其中还存在着不少力学问题特别是在强度、疲劳和破坏机理等方面的问题亟待于研究解决。为了使更多有志于复合材料研究的我国力学工作者、工程师以及高等院校广大的研究生、本科生更好地了解和掌握当前有关复合材料力学的动向与发展,复合材料专业组专门组织其成员,结合他们的专长和从事研究的方向分别撰写专题介绍汇编成这本《复合材料力学进展》以提供广大读者参考。本书共分十二章,其中包括复合材料及其成型工艺的简介、强度、疲劳、损伤破坏、概率微观机理、性能以及结构力学、层间应力和分层、有限元计算等各个方面。它基本上概括了这类材料及其结构的主要特点和性能。由于内容的相互联系和渗透,书中各章节之间有可能存在一些重复之处。本书可作为高等院校研究生、本科生学习复合材料力学的教学参考书,同时也可作为从事复合材料结构设计的工程技术人员参考。

最后值得提出的是,本书的出版是与中国力学学会复合材料力学专业组第一任组长周履教授的工作分不开的。周履教授是我国最早开展和指导复合材料力学研究、普及复合材料力学知识的著名学者之一。他倡导和筹建了中国力学学会复合材料力学专业组,组织和主持了多次全国复合材料学术会议和国际学术会议,对推动我国复合材料力学的研究方面,做出了一定的贡献。在此,我们谨以本书献给周履教授,祝他健康长寿。

本书承中国力学学会办公室同志的合作,并得到北京大学出版社的大力支持,对此我们深表感谢。此外,还感谢国家自然科学基金委员会对本书出版给予资助。

罗祖道 王震鸣

1988年9月

04673-6

内 容 简 介

本书介绍八十年代国内外关于复合材料力学和复合材料结构力学的研究进展情况,内容包括复合材料的力学特点、研究方法和在设计、制造、应用时所遇到的一系列力学问题。着重介绍了:复合材料的断裂、损伤、疲劳、概率微结构力学、统计强度理论、宏观力学、细观力学、混杂效应、边界效应和脱层分析等复合材料力学的问题;复合材料板壳的非线性屈曲、有限元计算和扁壳的高阶理论等复合材料结构的力学问题。内容广泛而深入,介绍了有关领域的现状、发展趋向和主要内容。本书是由中国力学学会复合材料专业组组织有专长的教授和副教授编写的,是经过集体讨论并精心修改后完成的,因此是一本高质量的学术著作。对于从事复合材料力学和复合材料结构力学的高等院校的教师、大学生和研究生,以及研究人员、设计人员等都有很大的参考价值。

目 录

序 言

第一章 复合材料及其结构的力学问题王震鸣 (1)

§ 1 引言 (1)

§ 2 复合材料及其新近进展 (2)

1. 复合材料的分类 (2)

2. 复合材料发展的回顾 (5)

3. 复合材料的新近进展 (5)

§ 3 复合材料及其结构的力学特点 (7)

1. 各向异性 (7)

2. 不均匀性和不连续性 (7)

3. 层间剪切模量较低, 层间剪切和拉伸强度甚低 (7)

4. 拉、压模量不同和拉、压强度不等 (8)

5. 几何非线性和物理非线性 (8)

6. 复杂性 (9)

§ 4 复合材料及其结构的设计问题 (9)

1. 复合材料及其结构设计的特点 (9)

2. 复合材料结构设计中的力学问题 (11)

§ 5 复合材料力学和复合材料结构力学的研究 (14)

1. 概述 (14)

2. 复合材料力学问题的研究 (16)

3. 复合材料结构力学问题的研究 (18)

4. 其他问题 (20)

参考文献 (21)

第二章 复合材料叠层板的破坏与强度范赋群 张元亿 (23)

§ 1 引言 (23)

§ 2 关于单层的宏观强度理论 (24)

§ 3 关于叠层效应 (就位强度之一, 统计断裂力学) (25)

§ 4 关于杂交效应 (就位强度之二, 随机临界核、亚临界核模型) (26)

1. 逐渐扩大随机临界核模型 (26)

2. 层间杂交效应 (27)

3. 层内杂交效应 (28)

§ 5 关于叠层强度的实用计算 (30)

§ 6 用传统强度理论的方法研究叠层板的强度 (31)

1. 线性经典叠层理论 (31)

2. 物理非线性经典叠层理论 (32)

3. 非经典叠层理论 (33)

§ 7 用统计理论研究叠层板的强度 (34)

§ 8 用应力断裂准则的方法研究有切口叠层板的强度 (36)

参考文献 (38)

第三章 复合材料细观力学应力分析和力学性能嵇 醒 贺鹏飞 (42)	
§ 1 前言	(42)
§ 2 复合材料细观力学进展	(43)
1. 复合材料的刚度	(43)
2. 复合材料的强度	(43)
§ 3 剪切滞后理论	(44)
§ 4 复合材料强度的统计理论	(48)
§ 5 混杂复合材料混杂效应的动力学分析	(48)
§ 6 椭球夹杂问题的弹性力学解	(50)
§ 7 等效夹杂法	(53)
§ 8 等效夹杂法在复合材料基体应力分析中的应用	(54)
§ 9 复合材料细观力学与扫描电镜分析	(56)
§ 10 展望	(58)
参考文献	(58)
第四章 树脂基复合材料的损伤与损伤力学沈 为 (62)	
§ 1 损伤特征	(62)
§ 2 横向裂纹的剪切迟滞分析	(65)
§ 3 横向裂纹的变分法分析	(66)
§ 4 横向裂纹的断裂力学分析	(69)
§ 5 纤维搭桥的横向裂纹的断裂分析	(72)
§ 6 边缘分层的近似能量分析	(73)
§ 7 层间裂纹的弹性分析	(75)
§ 8 纤维断裂的弹性分析	(78)
§ 9 损伤的内变量理论分析	(80)
§ 10 广义弹脆性损伤模型	(82)
§ 11 复合材料的损伤能量耗散	(87)
参考文献	(90)
第五章 纤维复合材料的疲劳性能、疲劳损伤和疲劳寿命预测薛元德 (93)	
§ 1 纤维复合材料的疲劳性能	(93)
1. $S-N$ 曲线	(93)
2. 平均应力的影响—— $S-S$ 曲线	(96)
3. 累计损伤理论	(97)
4. 多向应力的动态强度准则	(98)
5. 切口对疲劳的影响	(98)
6. 疲劳裂纹扩展速率	(99)
7. 环境影响	(100)
§ 2 纤维复合材料的疲劳损伤	(101)
1. 疲劳损伤的一般机制	(101)
2. 疲劳损伤的检测	(106)
3. 如何改进复合材料的抗疲劳性能	(107)
§ 3 疲劳寿命预测	(108)
1. 用剩余强度理论预测疲劳寿命	(108)
2. 用剩余刚度来预测疲劳寿命	(113)

3. Reifsnider 的预测疲劳寿命的工程方法	(117)
参考文献	(118)
第六章 复合材料的断裂力学	毛天祥(120)
§1 均匀各向异性材料的线性弹性断裂理论	(121)
§2 复合材料层板缺口强度的简化模型及半经验公式	(125)
1. WEK 断裂模型	(125)
2. WN 断裂模型	(128)
3. Karlak 断裂模型	(133)
4. PWG 断裂模型	(135)
5. Mar-Lin (ML) 断裂准则	(138)
6. 损伤区模型 (DZM)	(139)
7. Poe 和 Sova(PS) 断裂模型	(143)
8. 小结	(146)
参考文献	(147)
第七章 概率微结构理论	顾震隆(149)
§1 为什么要建立离散非均匀随机的微结构分析模型	(149)
§2 建立离散非均匀随机的微结构分析模型的技术途径	(152)
1. 含有微结构的连续介质模型	(152)
2. 经典统计力学的一些有关基本概念	(153)
3. 概率微结构理论的技术途径	(155)
§3 变形理论	(158)
1. 位移	(158)
2. 变形	(163)
3. 位移空间和泛函分析	(164)
4. 随机变形过程	(166)
5. 弹性变形过程	(168)
6. 稳态变形的波桑过程	(168)
7. 瞬时过渡变形过程	(169)
§4 应力理论	(170)
§5 概率微结构的材料算子	(171)
1. 微观单元的材料算子	(172)
2. 中介结构的材料算子	(173)
§6 控制方程式和介质的响应关系	(173)
§7 概率微结构理论解决实际问题的步骤	(175)
1. 不同的实际问题	(175)
2. 微观单元的划分	(175)
3. 位移场的测定	(176)
4. 应变的计算	(176)
5. 微观单元内部的变换算子 ${}^{\alpha}A(t)$ 的确定	(176)
6. 微观单元界面的变换算子 ${}^{\alpha\beta}B^{-1}(t)$ 的建立	(177)
7. 组合 ${}^{\alpha}A^{-1}(t)$ 和 ${}^{\alpha\beta}B^{-1}(t)$ 成为 ${}^{\alpha}M^{-1}(t)$	(177)
8. 变形过程的描述和分析	(178)
9. 从微观单元的材料算子求出宏观材料的材料算子	(178)
参考文献	(178)

第八章 复合材料层合结构的层间应力与分层问题	李思简(179)
§1 前言	(179)
§2 复合材料层合结构的自由边缘效应问题与层间应力分析	(180)
1. 层合板的直线自由边缘效应问题	(180)
2. 圆柱形层合壳体的层间应力分析	(184)
3. 层合板曲线自由边缘效应问题	(187)
4. 环境(温度、湿度)对层间应力的影响	(188)
5. 关于层间应力问题的求解方法	(191)
6. 复合材料层合结构自由边缘层间应力的奇异性问题	(194)
§3 复合材料层合结构的分层问题	(197)
1. 复合材料层板分层的起始、扩展特性与判据的研究	(198)
2. 分层屈曲与扩展	(200)
3. 抑制分层的研究	(201)
参考文献	(202)
第九章 复合材料叠层板分析	周 履 董万林 黄小清 范业立(206)
前言	(206)
§1 求解方法	(206)
1. 双傅里叶级数解法	(206)
2. 广义双傅里叶级数解法	(207)
3. 里兹法	(207)
4. 伽辽金法	(207)
5. 有限元法	(208)
6. 有限层法	(209)
7. 加权残数法	(209)
8. 摄动法	(210)
9. 动态松弛法	(211)
§2 弯曲问题	(212)
1. 叠层板的小挠度弯曲	(212)
2. 叠层板的大挠度弯曲	(214)
3. 考虑横向剪切变形影响的弯曲问题	(214)
§3 振动问题	(215)
1. 叠层板的小挠度自由振动	(215)
2. 叠层板的大幅自由振动	(216)
3. 横向剪切和转动惯量对自由振动的影响	(216)
4. 初始几何缺陷对自由振动的影响	(217)
§4 屈曲和后屈曲问题	(217)
1. 叠层板的屈曲	(217)
2. 横向剪切变形对屈曲的影响	(218)
3. 物理非线性对屈曲的影响	(219)
4. 叠层圆柱曲板的屈曲	(219)
5. 叠层板的后屈曲	(220)
6. 叠层圆柱曲板的后屈曲	(220)
§5 双模量问题	(220)
1. 双模量材料的力学模型	(220)
2. 双模量复合材料叠层板的弯曲问题	(221)

3. 双模量复合材料叠层板的动力问题和屈曲问题	(222)
结束语	(223)
参考文献	(223)
第十章 有限元法在复合材料层压结构分析中的应用	章 林 罗祖道(231)
§ 1 复合材料层压板壳结构的有限元分析	(231)
1. 基于位移法的复合材料层压板、壳单元	(231)
2. 基于杂交应力法的复合材料层压板、壳单元	(243)
§ 2 复合材料层压结构中层间应力的有限元分析	(249)
参考文献	(255)
第十一章 复合材料圆柱壳稳定性理论的进展	周承倜(261)
§ 1 关于复合材料圆柱壳稳定性理论的综述	(262)
§ 2 关于圆柱壳的几何非线性和物理非线性问题	(265)
§ 3 圆柱壳非线性失稳的基本方程式和解	(272)
§ 4 横向剪切对于叠层圆柱壳的非线性屈曲的影响	(276)
§ 5 前屈曲变形对不同边界条件下的柱壳屈曲的影响	(286)
1. 前屈曲变形	(286)
2. 屈曲方程式	(288)
3. 屈曲方程的求解	(289)
4. 数值结果讨论	(289)
§ 6 壳体非线性屈曲研究的展望	(292)
参考文献	(292)
第十二章 复合材料多层扁壳的高阶理论	王震鸣(296)
§ 1 引言	(296)
§ 2 基本方程	(298)
1. 位移表达式	(298)
2. 应变位移关系	(298)
3. 本构关系	(300)
4. 广义内力、广义刚度和广义载荷	(301)
5. 能量表达式	(303)
6. 基本方程	(304)
7. 讨论	(311)
§ 3 常见的复合材料板壳高阶理论	(314)
1. 用于多层厚板小挠度静力学问题的 LCW 高阶理论	(314)
2. 以 5 个广义位移作为未知量的 Reddy 型高阶扁壳理论	(315)
参考文献	(323)

第一章 复合材料及其结构的力学问题

王 震 鸣

(中国科学院力学研究所)

§1 引 言

本章将讨论复合材料及其结构在设计、制造和应用过程中的一系列力学问题,其中包括工艺力学、工程力学、实验力学和计算力学等问题;它们分属复合材料力学和复合材料结构力学的范畴。

复合材料力学和复合材料结构力学是固体力学的一个新的学科分支。复合材料力学包括复合材料的微观力学和宏观力学,它研究复合材料的微观和宏观力学特性,包括刚度特性、强度特性、破坏机理、断裂、损伤、疲劳、冲击和环境影响等力学问题。而复合材料结构力学则研究复合材料宏观结构的应力分析、变形、稳定和振动等力学问题。但在许多场合,人们常统一称为复合材料力学,将上述两个方面的内容概括作广义的理解。

由于复合材料具有一系列的力学特点,它的力学问题比均匀、连续、线弹性和各向同性的材料复杂得多。如要深入研究复合材料及其结构的力学问题,我们必需对复合材料及其结构的力学特点有明确和深刻的了解。要提高复合材料及其结构的性能,充分发挥它们的优点,克服其缺点,也必需对复合材料及其结构在设计、制造、使用 and 维修过程中所出现的一系列力学问题,作全面和深入的研究。显然,对这些问题的研究,将有很大的实用价值;同时也有重要的理论意义。

复合材料是由两种或两种以上的单一材料,用物理的或化学的方法经人工复合而成的一种多相固体材料。其微观构造和复合机理一般是非常复杂的,其中存在着不少力学问题。复合材料在微观构造上是一种不均匀的材料,各组分材料之间具有明显的界面(或界面层),在界面上存在着力的相互作用,这就产生了界面力学问题。复合材料不但能保留其组分材料的主要优点,克服或减少它们的缺点,还可产生组分材料所没有的一些优异性能;当然也存在着一些弱点,不是一切都好。材料复合得好坏不同对复合材料的素质和性能是有很大差别的,因此,需要对复合材料的复合机理和优化问题作深入的研究。

生物材料例如竹、木、草、骨头、牙齿、心脏、肌肉、皮毛和贝壳等,都是天然的复合材料。它们都具有很复杂的微观构造和复合材料的所有特点,是高度优化了的且是自然界中的生物界长期演变和进化而成的。它们的构造和复合机理可以给人们很多深刻的启示,并有助于研究和创造性能优异种类繁多的复合材料及其结构(产品),以满足人们多方面的需要。复合材料尤其是先进复合材料是现代科学的产物,它有巨大的生命力和极其广阔的发展前景。

因为复合材料是由人工复合而成的,故材料本身及其结构(产品)的质量和性能,都与制造工艺密切有关。在制造过程中,除了涉及物理和化学问题外,还大量涉及力学问题,这就是工艺力学问题。显然,对这些问题的研究可提高结构复合材料和复合材料结构(产品)的性能。此外,复合材料及其结构的性能又是由设计来确定和实现的,故设计得当与否对成品

或产品的质量和性能是有很大影响的,因此它存在着设计的优化问题。而要进行优化设计,就必需对复合材料及其结构的优缺点和力学特点有全面深入的了解,并对其力学问题作广泛、深入和切合实际的研究。

根据复合材料这一特定的固体材料,在研究它的力学问题时,必须采用固体力学的理论和实验相结合的方法,宏观力学和微观力学相结合的方法,这就涉及到固体力学中的各种基本理论、实验力学和计算力学等一系列学科分支。复合材料的本构关系是多种多样而且非常复杂的。复合材料力学涉及到线性和非线性弹性力学、粘弹性力学、塑性力学、各向异性板壳理论、连续介质力学和离散介质力学等,因此需要在考虑复合材料及其结构的力学特点的基础上发展固体力学。例如复合材料的微观构造有若干个层次,理论和实验研究也应有若干个层次。研究复合材料及其结构的性能、本构关系和各种力学问题,都离不开实验力学而这些实验工作需要采用最新方法并向微观的尺度发展。此外,复合材料及其结构所涉及的材料参数、几何参数和环境因素很多,问题非常复杂,只有采用大型高速计算机通过数值计算才能取得结果以满足设计的需要,因此需要发展计算力学。

§ 2 复合材料及其新近进展

为了研究复合材料及其结构的力学问题,需要对复合材料及其新近进展尤其是力学特性方面有一定的了解。

复合材料及其结构(产品),与金属材料及其结构(产品)相比,在生产过程中可大大降低能源消耗,减少材料消耗和装配工作量,大幅度地减少腐蚀损失和磨耗,缩短生产周期;而又能减轻结构重量,提高结构(产品)性能,延长使用寿命等,从而有巨大的经济效益。因此,复合材料是很有发展前途的新型材料,它既是高技术的产品又是发展高技术的支柱。

1. 复合材料的分类

(1) 按用途分类

复合材料按其用途可以分为功能复合材料和结构复合材料两类。利用复合材料的物理、化学和生物学的功能作为主要用途的,称之为功能复合材料。利用复合材料的各种优良力学性能,例如比强度高、比刚度大和抗疲劳性能好等优点而用于制造受力结构的,称之为结构复合材料。有些结构复合材料还同时具有某些良好的功能,例如,电磁波的穿透性、耐酸性和耐碱性、与血液和生物组织的相容性等非力学功能,以及耐磨、坚硬、隔振等力学功能。耐烧蚀复合材料具有热化学的、隔热的、耐气流冲刷和一定强度等功能。并非所有利用复合材料力学性能的材料都是结构复合材料或是良好的结构复合材料,例如利用复合材料的硬度和耐磨性等力学特性为主的复合材料,就不属于结构复合材料。结构复合材料当然存在着一系列重要的力学问题,但是功能复合材料在制造和使用过程中,也存在着不少力学问题,它们影响产品的质量和使用寿命而不可忽视。结构复合材料由基体和增强材料所组成。增强材料分散在基体之中以增强基体,而基体材料将增强材料粘结成一个整体使成为复合材料并产生多种优异的性能。

(2) 按增强材料的形状分类

复合材料按其增强材料的形状可以分为粒子增强复合材料、薄片增强复合材料和纤维增

强复合材料等三类。在粒子增强复合材料中，基体起比较主要的承载作用。比基体坚硬的增强微粒，均匀地分散在基体之中，用以增强基体抗位错的能力，因而提高材料的强度和刚度，但增加了其脆性程度。这种复合材料在宏观上可认为是均匀各向同性的，但在微观构造上是不均匀的；同时，由于缺陷和微裂纹的存在，还具有一定程度的不连续性，这不同于金属和工程塑料，尤其在强度方面。薄片增强复合材料在宏观上是横观各向同性的，在微观上也是不均匀的，并具有一定程度的不连续性。由于它的力学性能往往不如纤维增强复合材料，故很少用作结构材料。纤维增强复合材料由增强纤维和基体组成。纤维比较均匀地分散在基体之中，它沿纤维方向增强基体，起最主要的承载作用。基体把纤维粘结成一个整体，保持纤维间的相对位置，使纤维能协同作用，保持纤维免受化学腐蚀和机械损伤，以减小环境的不利影响，还能传递和承受剪应力，并在垂直纤维的方向上承受拉、压应力作用等。

(3) 按纤维的长短分类

复合材料按其纤维的长短可以分为短纤维增强复合材料和连续纤维增强复合材料两类，它们具有不同的特点和用途。短纤维增强复合材料又可分为单向短纤维增强复合材料和杂乱短纤维增强复合材料两种。杂乱短纤维增强复合材料又分为在面内随机分布和在空间随机分布两种。片状模塑料（SMC）中的短纤维在平面内杂乱分布，在宏观上是横观各向同性的。模压成型的短纤维复合材料零部件，纤维在基体中杂乱分布，在宏观上是准各向同性的。挤压注射成型的短纤维复合材料零部件，具有一定程度且不规则的各向异性。这是由于在固化前呈粘性流体状态的短纤维增强塑料，从模具的一端或几个孔口流至模具内从而充填全部空间的成型过程中造成的。这种各向异性是相当复杂的。单向短纤维增强复合材料在纤维方向的力学性能，要比杂乱短纤维复合材料好得多；但在承受剪切和横向拉、压性能方面，就差得很多了。杂乱短纤维增强复合材料比之工程塑料，许多力学性能大有改善，因此很有发展前途。它的力学问题除了和长纤维复合材料有共同点之外，还有不少自己的特点，特别有关断裂、疲劳、损伤等微观力学问题是非常复杂的。它既不同于均匀各向同性材料，又不同于连续纤维增强的复合材料，目前国际上对这些问题的研究，正日益广泛和深入。

连续纤维增强复合材料在纤维方向具有很高的强度和模量；但在剪切强度和模量方面，在垂直于纤维方向的拉、压强度和模量方面，就远不如三维杂乱短纤维增强复合材料，且常发生横向开裂和脱层问题。连续纤维复合材料又分为单向、叠层和编织复合材料等形式，各有其特点和最适用的情况，它们的力学问题既有共同点也有明显的差别。

(4) 按纤维性能的高低分类

复合材料按其纤维性能的高低可以分为高级（先进）复合材料和工程复合材料。以碳纤维、硼纤维、Kevlar 纤维、碳化硅纤维、聚乙烯纤维和晶须等高级纤维增强的复合材料，称为高级（先进）复合材料。玻璃纤维增强塑料（玻璃钢）、玻璃纤维或钢纤维（细钢丝）增强水泥等与先进复合材料相比，价格比较便宜，某些性能（例如比刚度）较差，但是在工程上用量很大，称为工程复合材料。现在出现一种碳纤维增强混凝土，由于重量轻强度高，已开始被用来取代建筑物外墙面用的一般混凝土。它是用沥青基碳纤维来增强混凝土的，比玻璃纤维或 Kevlar 纤维增强的混凝土性能要好，它质轻而强度要高出普通混凝土的三倍。虽价格较贵，但在建筑中的应用却较多。此外，碳纤维既耐热又能抗强碱，因而更为耐用。由于这些好性能，价格问题也就不那么计较了。在建筑中使用的碳纤维增强混凝土，一般只含有体积百分比约为 2 %（或略多些）的碳纤维；只要纤维分布得均匀，就可明显提高材料的拉

伸强度、延伸率和刚度等力学特性，有利于减轻结构重量和改善抗地震的能力。

最高级纤维在全世界的用量每年仅几吨至几十吨(有的纤维用量很少)。Kevlar 纤维加上性能较低的碳纤维，其用量约为数千吨，再加上高强度的玻璃纤维，总用量已接近 1 万吨，并以 20% 左右的高速度持续增长。全世界玻璃钢的用量约为数十万吨，也以很高的增长率在发展。所以上述分类并不意味着工程复合材料不重要；但要解决性能指标非常严格和苛刻的主要结构（例如航空、航天和分离核燃料的高速离心机等）的设计问题，只有采用高级复合材料才能实现，这时工程复合材料就无能为力了。就力学角度来说，这两类复合材料存在着许多共同的力学问题；但由于两者力学特性的差别很大，它们也存在着各自不同的力学问题。

(5) 按纤维和基体是否单一或混杂来分类

在复合材料中，若仅仅采用一种纤维和基体材料，则称为单一复合材料；若采用两种或两种以上的纤维和基体材料，则称为混杂 (hybrid) 复合材料，注意力主要集中于纤维方面。叠层复合材料的纤维混杂形式可以分为按层混杂和层内混杂两种。在按层混杂复合材料中，每层只采用一种纤维和基体，而不同层次则可采用不同的纤维和基体，也可采用金属薄片；但在层内混杂复合材料中，任何层片都含有两种或多种纤维。此外，我们还可以采用兼有上述两种混杂形式的超混杂复合材料以充分发挥复合材料的优点。混杂复合材料可出现混杂效应。若出现了单一复合材料所没有的优良性能，则此效应称为正混杂效应；若出现了单一复合材料所没有的明显缺点，则称为负混杂效应。一般说来，混杂复合材料在其主要方面获得正混杂效应的同时常在次要方面出现负混杂效应；故在作结构设计时应权衡利弊得失以便正确地使用混杂复合材料。

采用混杂复合材料有多种目的，例如将价格贵、模量高而断裂应变小的碳纤维层片和价格较低、模量较小而断裂应变较大的玻璃纤维层片或 Kevlar 纤维层片叠合而成的复合材料，它相对于碳纤维复合材料而言，能明显降低造价且显著提高抗冲击和断裂的性能，而材料的刚度则有所下降；相对于玻璃钢而言，可明显提高刚度，增大断裂功，而材料的价格则有所上升和断裂应变由于受碳纤维的影响而降低。Kevlar 纤维增强复合材料具有许多优点(比重小，拉伸强度高，模量比玻璃纤维大一倍等)，但沿纤维方向的压缩强度很低是其最大弱点。如将它和碳纤维或玻璃纤维混杂制成复合材料，就可明显地提高压缩强度。要增大混杂复合材料的弯曲刚度，可将模量大的复合材料层片铺设在远离中心处；要设计成先软而后硬的非线性板状弹簧，可将延伸率较大模量较低的玻璃纤维复合材料层片铺设在外层，碳纤维复合材料层片铺设在内层。这些都属于按层混杂复合材料。层内混杂复合材料是将碳纤维分散在玻璃纤维或 Kevlar 纤维之中，由于它们的断裂应变很不相同，在断裂时纤维和基体的界面以及基体的大部分破坏，消耗大量能量，因而大大提高了断裂能并改善其抗冲击的性能。在混杂复合材料中，低延伸率纤维断裂后，裂纹的横向扩展受到了高延伸率纤维的阻止，因而提高了低延伸率纤维的平均断裂应变。总的来说混杂效应确是一个值得研究的问题。然而并非在任何情况下混杂复合材料都可以出现明显的正混杂效应，如低延伸率的纤维比例过大，就难于期望提高它的断裂应变。应该说混杂复合材料很重要，涉及的问题很多，混杂效应只不过是其中的一个方面，过分强调是不合适的。对混杂复合材料进行更多和更深入的研究以发掘其潜力，还是十分需要的。

(6) 按基体材料分类

按基体材料一般可以分为聚合物基体复合材料、金属基体复合材料、陶瓷基体复合材料和碳基体复合材料等四类。其中聚合物基体复合材料的应用最广,其生产工艺也比较成熟,且一般说来价格比较便宜,不过使用温度较低。常用的树脂基体其使用温度在 $120\sim 150^{\circ}\text{C}$ 以下,有的还达不到 100°C 。即使可以用于较高温度的聚酰亚胺,虽其使用温度能达 $300\sim 350^{\circ}\text{C}$,但在 260°C 时性能已有明显下降,且价格较贵。由于工程上的迫切需要,提高复合材料的使用温度是一个非常重要的问题,而其关键在于基体。金属基体复合材料(其基体包括铝合金、镁合金和钛合金等)则兼有金属的优点,如耐高温(400°C)、耐腐蚀、导电、耐潮湿和不透气等,还有较高的剪切强度和横向拉伸强度;但因制造工艺复杂,价格昂贵,其力学问题也很复杂。它是高技术中不可缺少的一种新型材料,因直接关系到国防和科技尖端领域,国外对这类材料的工艺和关键问题保密甚严,故需要我国独立自主地进行研制。陶瓷基体复合材料是在陶瓷中加入延伸率较大、韧性较好的增强纤维复合而成。这类材料可耐很高的温度且抗腐蚀性好。陶瓷材料本身坚硬、模量较高且可耐高温;但它性脆,断裂应变很小,抗拉、抗冲击载荷以及热冲击的性能都很差,故加入延伸率较大的增强纤维后可明显改善其断裂韧性等性能。其力学特性和强度问题与树脂基或金属基复合材料明显不同。还有碳/碳复合材料,以碳纤维编织材料作为增强材料以增强基体,其制造工艺比较复杂,它主要用于承受极高温度的烧蚀材料,是一种功能材料;但也有复杂的力学问题。

2. 复合材料发展的回顾^①

在60年代,发展和使用的复合材料有玻璃/环氧、石墨/环氧和硼/环氧;当时研究了微观力学、各向异性行为和设计准则等。在70年代,出现和使用的有Kevlar纤维、氧化铝纤维、金属基复合材料、碳/碳复合材料、增韧的环氧树脂和高温树脂等;并研究了持久性,发展了数据库,探讨了环境影响、耐用性、缺陷的影响和破坏模式等。在80年代,出现和使用的有碳化硅纤维、聚乙烯纤维、高延伸率的石墨纤维、陶瓷基体复合材料以及热塑性基体、三向纤维编织形式和缝纫工艺等;并对制造成型工艺、增韧机理、损伤容限、层间问题、微观破坏力学、高温性能、无损评价、界面问题和新的结构思想等都作了广泛和深入的研究,进展很大。这许多方面的研究进展,必将对复合材料及其结构的推广应用起很重要的作用。

3. 复合材料的新近进展

下面着重介绍纤维和树脂基体材料方面的新近进展。

(1) 纤维方面^②

目前日本已投产具有 4.9GPa (500kg/mm^2)以上的超高强度碳纤维,例如T-1000的强度高达 7.06GPa (720kg/mm^2)。帝人公司已制成强度为 6.08GPa (620kg/mm^2)的沥青基碳纤维。强度为 3.43GPa (350kg/mm^2),弹性模量为 785GPa (80t/mm^2)的材料,非常适用于航空和航天结构,如已制成的强度为 $2.35\sim 3.92\text{GPa}$ ($240\sim 400\text{kg/mm}^2$),延伸率为 $2.0\sim 3.15\%$ 的沥青基中强高延伸率碳纤维,可用作飞机的主要结构部件。近几年碳纤维的拉

^① 引自 Hahn, H.T. 教授在 1987 年 6 月在中国科学院力学研究所访问时所作的学术报告。

^② 引用了“罗益锋, 复合材料及其增强纤维的新进展与发展趋势, 第四届全国复合材料学术会议论文(散发本), 1986 年”一文中的部分内容。

伸强度成倍地增加,并且还将再提高50%以上,这是一个重大的进展。

美国新生产的 Kevlar149 纤维,其强度达 4.14GPa (422kg/mm^2),经过表面处理改善了纤维和树脂的粘结性,用于空间容器可减重50%,且在潮湿环境下具有比玻璃纤维要好的介电性能。

日本研制成一种钨芯硼纤维,其比重为2.6,强度为 6.1GPa (620kg/mm^2),比现有的硼纤维强度要高30%。硼纤维复合材料具有很高的压缩强度,可制成硼/铝复合材料,但价格很贵,且生产成本难于明显下降,影响它的推广应用。

碳化硅纤维既可用于金属基复合材料,也可用于树脂基复合材料,在形态上有连续纤维和晶须两类。连续纤维又分为两种,一种是 CVD 碳化硅纤维,是直径为 $140\mu\text{m}$ 的含异种芯材的复合型单丝,其制造工艺和硼纤维相似,因而和硼纤维一样,价格较贵,直径太粗就不易制成形状复杂的复合材料产品。与硼纤维相比,碳化硅纤维在成本上具有明显的潜力。另一种是连续的碳化硅纤维,它是用纺丝法制造的,其强度为 $1.96\text{—}4.22\text{GPa}$ ($200\text{—}450\text{kg/mm}^2$),模量为 $176\text{—}294\text{GPa}$ ($18\text{—}30\text{t/mm}^2$)。

超高强度超高模量的聚乙烯纤维,其特点是它的密度只有 0.96g/cm^3 ,是常见纤维中最轻的一种。因此这类纤维的比强度高于芳纶纤维、碳纤维、硼纤维和玻璃纤维,且其抗水性、耐化学腐蚀性、抗紫外线辐射、生物相容性和能量吸收性等也都很突出。由于它的原材料来源很广泛,因而在船舶、医学、体育用品、头盔、飞机和汽车部件等方面都能得到应用。但缺点是使用温度较低,抗蠕变的性能和粘结性能较差,成本也较高,故在一定程度上妨碍了它的推广应用。

(2) 树脂基体方面

(a) 热固性树脂。日本正在开发三种适用于碳纤维的高强度环氧树脂,即高交联环氧、耐热环氧和憎水性环氧;同时还在发展具有较好的热稳定性和工艺性的聚酰亚胺树脂 (PI) 和一种共聚改性的聚喹恶啉树脂 (PPQ)。还有聚苯并咪唑 (PBI),它原系热塑性树脂,但在高温下发生 N-N 键交联后,成为热固性树脂,具有良好的耐热性。

美国发展双马来酰亚胺树脂 (PBMI) 作为先进复合材料用的树脂,它具有很高的交联度,刚性很好但性脆,其断裂伸长只有 $1\text{—}2\%$;同时不熔化也无溶剂可以溶解,它可长期在 $150\text{—}200^\circ\text{C}$ 的范围下使用。还出现一种新型的双腈半互穿网络高聚物 (半 IPN),它兼有热固性和热塑性树脂的优点,在较苛刻的环境条件下仍有良好的刚度和韧性;因此在航天用的复合材料中,它是一种有潜力的树脂基体。IPN 的热塑性组分,则用聚醚砜 (PES)、聚碳酸酯和其他脂类的共聚物 (CoPES)。由这两种高聚物与二腈基双酚 A (2-CBA) 构成的半 IPN,适合用作宇航结构材料。CoPES/IPN 树脂复合材料,比环氧树脂复合材料的室温力学性能好,而高温性能则相当,在拉伸强度和韧性等方面,这种树脂也较好,因此很有发展前途。

热固性树脂作为基体的纤维增强复合材料,在推广应用时将会遇到损伤容限、脱层和成本等问题。故在克服这些障碍方面,用热塑性树脂作为基体就具有较大的潜力。

(b) 热塑性树脂。一些新的耐高温的热塑性树脂已商品化了。而且发展了一种新的成型方法 (薄膜叠层法),它以纤维无纬布或织物与树脂薄膜交替叠层,然后加热加压使之熔合而成叠层板。采用热塑性树脂例如尼龙 6、聚苯硫醚 (PPS)、聚醚醚酮 (PEEK)、丙烯腈/苯乙烯共聚物 (AS) 和聚醚砜等有许多优点,虽然热塑性树脂的压制温度较高 ($250\text{—}380^\circ\text{C}$),

所需的压力较大 (4.9—8.8MPa), 而环氧仅为 180℃ 和 0.6MPa, 但它们加热和冷却的周期可大大缩短, 这对提高工效和节省能源从而降低成本是有利的。热塑性树脂的断裂伸长明显大于环氧树脂, 故用热塑性树脂作基体的叠层板, 其断裂韧性与抗冲击性能明显高于环氧树脂基的叠层板。此外, 热塑性聚酰亚胺树脂 K 聚合物, 其耐温性、韧性和强度均优于目前通用的环氧树脂。现在树脂体系的韧性已有了很大的提高, 预计还将提高数倍, 使性能变得更好。用 PEEK 作为基体的碳纤维复合材料, 连续工作温度可高达 250℃, 这对于耐温性能要求较高的航空和航天等高新技术领域来说, 是很理想的, 难怪各国对这种热塑性树脂如此重视了。

§ 3 复合材料及其结构的力学特点

1. 各向异性

纤维增强复合材料在弹性常数、热膨胀系数和材料强度等方面具有明显的各向异性性质。通过铺层设计制成的复合材料叠层结构, 可能出现各种形式和各种程度的各向异性。各向异性这一特性将使复合材料及其结构的力学问题复杂化, 其中尤以各向异性又是各点坐标的函数最为复杂和困难。对于正交各向异性和横观各向同性的力学问题, 相对于各向同性的情况只是比较复杂但没有太大的困难。相反地各向异性也可作为一种优点在设计时加以利用。因为结构的形式、加载方式、边界条件和使用要求的不同, 结构在不同方向对强度和刚度的要求也往往不同, 故如采用合理的铺层可在不同的方向分别满足设计要求, 使结构设计得更合理, 能明显地减轻重量和更好地发挥结构的效能。这当然需要精心地设计、计算和试验才能达到。显然, 复合材料在强度和刚度方面的各向异性将会使断裂、疲劳、损伤和强度理论等复杂化, 也使复合材料结构的应力分析、变形、稳定和振动等问题复杂化。

2. 不均匀性和不连续性

复合材料的单向层片是由纤维和基体组成的, 它在微观构造上是不均匀的。有时材料的不均匀性是坐标的函数, 这就更复杂了。叠层复合材料除了层片之内存在着这种不均匀性外, 由于铺层材料和铺层方向的不同, 沿厚度方向又增加了一重不均匀性, 这就是呈层性。短纤维三向杂乱增强的复合材料, 即使在宏观上可以近似地看成是均匀各向同性的材料, 在微观上还是存在着明显的不均匀性, 而且不同的微观层次和尺度, 可出现不同程度的不均匀性。材料的不均匀性可使微观的应力和应变不均匀, 材料就可能在应力最大或强度最低或最为薄弱的局部发生破坏。在复合材料中存在着纤维断裂、基体开裂、界面结合不善、脱层和空隙等现象, 随着应力水平的提高和环境的影响, 裂纹和损伤不断扩展而使那些局部发生位移、应力和应变的不连续, 因而使连续介质力学的原理和方法不能完全适用。不均匀性尤其是不连续性, 再加上各向异性等因素, 使得局部的应力集中和应变集中问题变得非常复杂, 使基于连续介质微观力学的强度和刚度分析产生明显的误差。再说由于这种不均匀性和不连续性是不规则的和随机分布的, 因此它还需用统计理论和概率论的方法进行分析, 来发展统计强度理论和概率微结构力学。不均匀性和不连续性对强度的影响要比对刚度的影响更大, 这是因为应力和强度是由局部的量决定的; 而刚度和弹性模量则是纤维和基体的平均表现, 是由整体的量决定的。故刚度可以采用有效刚度和有效模量的概念, 而强度问题却因为许多因素还弄不清