

MIKROSTRUKTURALE MECHANIK  
UND  
DESIGN OF COMPOSITE MATERIALS

● 杨庆生

# 复合材料 细观结构力学与设计

中国铁道出版社

铁路科技图书出版基金资助出版

# 复合材料细观结构力学与设计

杨庆生

中国铁道出版社

2000年·北京

(京)新登字 063 号

## 内 容 简 介

本书阐述了复合材料细观结构力学的基本概念、基本方法和若干研究成果,阐述了复合材料细观结构设计理论和软件系统框架体系。主要内容包括:复合材料的基本特性、复合材料细观结构力学基础、复合材料的线性与非线性有效性能、复合材料的界面与界面破坏力学、复合材料的细观损伤力学及破坏过程的数值模拟方法、复合材料细观结构设计的软件系统等。

本书可做为复合材料的研究、设计和应用人员的参考书,也可做为相关专业大学生和研究生的教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

复合材料细观结构力学与设计/杨庆生. —北京:

中国铁道出版社, 2000. 3

ISBN 7-113-03540-X

I. 复… II. 杨… III. ①复合材料-结构力学 ②复合材料-结构设计  
IV. TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 64603 号

书 名:复合材料细观结构力学与设计

作 者:杨庆生

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

责任编辑:张悦

封面设计:马利

印 刷:中国铁道出版社印刷厂

开 本:850×1168 1/32 印张:8.25 字数:209千

版 本:2000年3月第1版 2000年3月第1次印刷

印 数:1~1000册

书 号:ISBN 7-113-03540-X/TU·610

定 价:28.50元

**版权所有 盗印必究**

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

Supported by the China Railway  
Science Book Publication Foundation

# **Microstructural Mechanics and Design of Composite Materials**

**Yang Qingsheng**

**China Railway Publishing House  
Beijing, 2000**

## 前 言

复合材料科学与技术的发展是 20 世纪最重要的科学成就之一,它是材料学科、固体力学和工程学科等诸学科相互结合与渗透的结晶。复合材料已经被广泛应用于航空航天、机械、船舶、土木工程以及电子、医疗、体育用品等领域。我国科学工作者和应用技术人员在复合材料的基本理论和应用技术方面也取得了举世公认的成就。复合材料从诞生之日起,其研究工作就沿着两个主要的方向进行,一是针对工程应用的复合材料宏观结构力学的研究,我国在该领域内的研究成果颇丰,也出版了许多学术专著和教材;二是针对材料性能的复合材料细观结构力学的研究,国外的同类研究开始于 60 年代,我国在 80 年代开始全面追赶并作出许多有特色和有价值的研究成果。

本书主要涉及复合材料细观力学的基本问题、基本理论和基本方法,阐述复合材料细观结构力学和设计方面的主要研究成果,其中包括作者本人在该领域内的若干探索。本书内容安排力求系统化,注意前后衔接;叙述力求简洁,具有逻辑性;数学推导详略适当,并给出原文出处和相关参考资料。

本书第 1 章用很少的篇幅介绍了复合材料的基本知识,第 2 章介绍了复合材料的基本工艺过程和基本性能,这部分内容对一个细观力学工作者来说是应该了解的,因为复合材料的性能与工艺过程有密切关系,复合材料细观力学和设计正在趋向于将工艺因素包括进来。第 3 章主要介绍复合材料细观结构的数学描述和简化模型,建立模型是细观力学的基础和关键。第 4 章以夹杂理论为核心阐述了复合材料细观力学的理论基础。第 5 章阐述了复合材料的宏观弹性性能的预测理论、方法和模型,这部分内容是细观力学较为成熟的一部分,也是细观力学中最基本的内容之一。

第6章以复合材料的弹塑性性能和蠕变性能为主,介绍了非线性性能与细观结构的关系及其研究模型。尽管金属材料的塑性细观力学已经是较为发达的学科,但复合材料的细观塑性机理要复杂得多,主要在于复合材料的各向异性、增强相的相互作用及界面相的影响等。第7章讨论复合材料的界面性能的特征和界面的力学模型。第8章介绍复合材料的细观损伤力学。由于复合材料的损伤形式多种多样,相应的力学模型和研究方法也异彩纷呈,本章讨论几种主要的细观损伤模式及其对宏观性能的影响。第9章介绍复合材料的界面破坏力学,主要以断裂力学的概念和方法讨论界面的破坏过程。这一部分内容也是第10章关于损伤过程数值模拟的理论基础。第10章介绍复合材料多模式破坏过程的数值模拟技术,利用界面断裂力学理论和有限元法数值再现复合材料的各种破坏形貌。第11章试图探索复合材料细观结构设计软件系统的框架体系,其目的是试图将各种不同的理论模型和设计方法统一于一个软件系统中,使材料设计进入一个更高的层次。

作者在从事该领域的研究工作过程中,一直得到我的研究生导师陈浩然教授和唐立民教授的悉心指导,得到了博士后期间的合作导师杨卫教授、余寿文教授和黄克智院士的热心指导。在本书的撰写过程中,也得到了诸位先生的热情鼓励和支持,在此向他们表示由衷的感谢。

在本书的撰写过程中,得到了北方交通大学校领导的热情支持和鼓励;得到了土木建筑工程学院夏禾院长、陈峰和许兆义副院长的大力支持;得到了高玉臣教授、章梓茂教授等的热情鼓励和指导,在此谨向他们表示由衷的感谢。

作者还要衷心感谢铁路科技图书出版基金的大力资助和中国铁道出版社的支持和大量周到细致的工作。

由于本学科正在发展中,书中难免有不当之处,恳请读者批评指正,作者不胜感激。

作 者

1999.8

## 主要符号

$A, B, A', B'$	应变、应力集中因子
$C, C_{ijkl}, D, D_{ijkl}$	复合材料的有效弹性和柔度矩阵、系数
$C', D'$	组分材料的弹性和柔度矩阵
$L, L_{ijkl}, M, M_{ijkl}$	复合材料的有效弹性和柔度矩阵、系数
$L', M'$	组分材料的弹性和柔度矩阵
$S, S_{ijkl}$	Eshelby 四阶张量
$\varepsilon^*, \bar{\varepsilon}^*$	特征应变, 等效特征应变
$k_0, \mu_0, k_1, \mu_1$	基体和夹杂物的体积和剪切模量
$E_{11}, E_{22}$	纵向(轴向)和横向杨氏模量
$k, \mu_{12}, \nu_{12}$	体积模量, 轴向剪切模量, 泊松比
$E^m, E^f, \nu^m, \nu^f$	基体和纤维的杨氏模量, 泊松比
$E, E_c$	有效杨氏模量
$\Omega, S$	夹杂(物)及其边界
$v_0(v_m), v_1(v_f)$	基体和增强相(纤维)的体分比
$n, n_1, n_2, n_3$	法向量
$u, u_1, u_2, u_3$	位移
$\sigma^0, \varepsilon^0$	均匀应力与均匀应变
$\bar{\sigma}, \bar{\varepsilon}$	有效应力和有效应变
$\sigma^{(r)}, \varepsilon^{(r)}$	局部应力和应变场
$\varepsilon^p$	非弹性应变
$W_p$	塑性功
$s_{ij}$	偏应力张量
$e_{ij}$	偏应变张量

$\omega$	蠕变损伤因子
$t$	时间
$u_n, u_t$	界面的法向和切向位移
$K_n, K_t$	界面的法向和切向刚度
$[u_i]$	界面的跳跃位移
$b, b_i$	界面的滑移位移(位错密度)
$\alpha, \beta$	Dundurs 参数
$\epsilon$	应力振荡指数, 体积应变
$G, K, K_I, K_{II}$	能量释放率和应力强度因子
$\Gamma, \Gamma_1, \Gamma_2$	界面和材料 1, 2 的断裂能
$\Psi$	荷载相角(混合度)
$\mu_i, \tau_0$	界面剪切模量, 剪切屈服应力
$\tau_i, \tau_m$	界面和基体剪应力
$\delta$	无效长度, 特征长度(界面分离功)
$c$	裂纹长度
$l/d$	纤维的长径比
$r_f, r_m$	单胞的纤维和基体的半径
$U$	应变能
$l_{cr}$	荷载传递长度
$l_d$	界面脱粘长度
$l_c$	界面滑移长度
$K^\infty$	远场应力强度因子



# 目 录

<b>第 1 章 复合材料概论</b> .....	1
§ 1.1 复合材料的定义 .....	1
§ 1.2 复合材料的种类和特点 .....	3
§ 1.3 复合材料力学与设计 .....	5
参考文献.....	6
<b>第 2 章 复合材料的基本工艺与性质</b> .....	7
§ 2.1 增强物的种类及基本性能 .....	7
§ 2.2 树脂基复合材料 .....	9
§ 2.3 金属基复合材料.....	10
§ 2.4 陶瓷基复合材料.....	12
§ 2.5 复合材料性能的检测.....	15
参考文献 .....	16
<b>第 3 章 复合材料细观结构的数学描述与简化模型</b> .....	17
§ 3.1 统计均匀假设与均匀边界条件.....	17
§ 3.2 随机细观结构.....	19
§ 3.3 周期性均匀细观结构.....	21
§ 3.4 细观结构的局部涨落.....	23
参考文献 .....	25
<b>第 4 章 复合材料细观力学基础</b> .....	26
§ 4.1 各向异性材料的本构方程.....	26
§ 4.2 特征应变问题.....	29
§ 4.3 Eshelby 关于椭球夹杂的解答 .....	31
§ 4.4 一个夹杂物引起的应力场——等效夹杂法.....	40
§ 4.5 夹杂外的弹性场.....	42
§ 4.6 夹杂问题的能量计算.....	46

参考文献 .....	47
<b>第 5 章 复合材料的有效弹性性能 .....</b>	<b>49</b>
§ 5.1 有效性能的定义 .....	49
§ 5.2 自洽模型与广义自洽模型 .....	52
§ 5.3 Mori - Tanaka 模型 .....	57
§ 5.4 自洽有限元法与 M - T 有限元法 .....	62
§ 5.5 微分介质法 .....	68
§ 5.6 变分法 .....	70
§ 5.7 涂层夹杂物问题与混合夹杂物问题 .....	75
参考文献 .....	81
<b>第 6 章 复合材料的非线性性能 .....</b>	<b>84</b>
§ 6.1 引    言 .....	84
§ 6.2 一般关系式 .....	86
§ 6.3 连续纤维复合材料的弹塑性性能 .....	89
§ 6.4 单向短纤维复合材料的弹塑性性能 .....	96
§ 6.5 复合材料的常温蠕变性能 .....	99
§ 6.6 复合材料的高温蠕变分析 .....	103
§ 6.7 界面性能对非线性性能的影响 .....	105
参考文献 .....	112
<b>第 7 章 复合材料界面力学 .....</b>	<b>116</b>
§ 7.1 界面与界面层的形成机理 .....	116
§ 7.2 界面的应力传递、剪滞模型 .....	117
§ 7.3 界面层的应力传递分析 .....	123
§ 7.4 界面性能的特征与测试方法 .....	128
§ 7.5 界面(层)的力学模型 .....	132
参考文献 .....	135
<b>第 8 章 复合材料细观损伤力学 .....</b>	<b>138</b>
§ 8.1 复合材料的细观损伤机理 .....	138
§ 8.2 以纤维拉断为主要破坏模式的细观强度理论 .....	140
§ 8.3 短纤维复合材料中的基体裂纹 .....	143

§ 8.4	纤维桥联问题的夹杂模型 .....	151
§ 8.5	界面的失效与滑移 .....	157
§ 8.6	基体开裂问题的 ACK 方法 .....	161
§ 8.7	基体开裂问题的应力强度因子法 .....	174
	参考文献 .....	181
<b>第 9 章</b>	<b>复合材料界面破坏力学</b> .....	<b>184</b>
§ 9.1	界面断裂力学—裂纹尖端弹性场 .....	184
§ 9.2	界面断裂能 .....	188
§ 9.3	界面裂纹扩展路径的选择 .....	193
§ 9.4	基于界面控制的增强增韧机理 .....	196
	参考文献 .....	202
<b>第 10 章</b>	<b>复合材料损伤的数值模拟</b> .....	<b>204</b>
§ 10.1	复合材料细观计算力学 .....	204
§ 10.2	单型应力强度因子的有限元计算 .....	206
§ 10.3	网格动态重新划分策略 .....	209
§ 10.4	双材料界面断裂过程的数值模拟 .....	212
§ 10.5	单向应力作用下复合材料细观损伤过程 模拟 .....	214
§ 10.6	远场 K 作用下复合材料破坏构型的数值 再现 .....	223
	参考文献 .....	228
<b>第 11 章</b>	<b>复合材料细观力学设计原理及其 CAD 系统</b> .....	<b>230</b>
§ 11.1	概 述 .....	230
§ 11.2	复合材料细观结构的力学设计 .....	231
§ 11.3	细观结构参数的定性设计 .....	233
§ 11.4	优化设计的途径 .....	236
§ 11.5	材料细观力学设计的软件系统 .....	238
	参考文献 .....	242
<b>索 引</b>	.....	<b>243</b>

# CONTENTS

<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	1
§ 1.1 Definition of Composites .....	1
§ 1.2 Classification of Composites .....	3
§ 1.3 Micromechanics and Microstructural Design .....	5
References .....	6
<b>Chapter 2 Process and Character of Composites</b> .....	7
§ 2.1 Kinds and Properties of Reinforcements .....	7
§ 2.2 Resin Matrix Composites .....	9
§ 2.3 Metal Matrix Composites .....	10
§ 2.4 Ceramic Matrix Composites .....	12
§ 2.5 Detective Technologies of Composites .....	15
References .....	16
<b>Chapter 3 Description and Model for Microstructures of Composites</b> .....	17
§ 3.1 Statistical Homogeneity and Homogeneous Boundary Conditions .....	17
§ 3.2 Random Microstructures .....	19
§ 3.3 Homogeneous Microstructures .....	21
§ 3.4 Local Fluctuation of Microstructures .....	23
References .....	25
<b>Chapter 4 Micromechanics for Composites</b> .....	26
§ 4.1 Constitutive Equation for Anisotropic Elasticity .....	26
§ 4.2 Eigenstrain Problem .....	29
§ 4.3 Eshelby's Solution for an Ellipsoidal Inclusion .....	31
§ 4.4 Stress Fields Induced by an Inhomogeneity – Equivalent Inclusion Principle .....	40
§ 4.5 Elastic Field outside an Ellipsoidal Inclusion .....	42

§ 4.6 Energy Consideration of Inclusion Problem	46
References	47
<b>Chapter 5 Effective Elastic Properties of Composites</b>	<b>49</b>
§ 5.1 Definition of Effective Properties	49
§ 5.2 Self – Consistent Model and Generalized Self – Consistent Model	52
§ 5.3 Mori – Tanaka Model	57
§ 5.4 Self – Consistent FEM and Mori – Tanaka FEM	62
§ 5.5 Differential Medium Method	68
§ 5.6 Variational Method	70
§ 5.7 Coating and Hybrid Inclusion Problems	75
References	81
<b>Chapter 6 Effective Nonlinear Properties of Composites</b>	<b>84</b>
§ 6.1 Introduction	84
§ 6.2 General Relations	86
§ 6.3 Elastoplastic Properties of Continuous Fiber Composites	89
§ 6.4 Elastoplastic Properties of Unidirectional Short Fiber Composites	96
§ 6.5 Creep of Composites at Room Temperature	99
§ 6.6 Creep of Composites at Elevated Temperature	103
§ 6.7 Effect of Interfacial Properties on Nonlinear Behavior of Composites	105
References	112
<b>Chapter 7 Interfacial Mechanics of Composites</b>	<b>116</b>
§ 7.1 Forming Mechanism of Interface and Interlayer	116
§ 7.2 Stress Transfer Theory of Interface – Shear Lag Model	117
§ 7.3 Stress Transfer Theory of Interlayer	123
§ 7.4 Characterization and Measurement of Interfacial	

Properties .....	128
§ 7.5 Mechanical Models for Interfaces and Interlayers .....	132
References .....	135
<b>Chapter 8 Micro-Damage Mechanics of Composites .....</b>	<b>138</b>
§ 8.1 Damage Mechanism of Microstructures for Composites .....	138
§ 8.2 Microscopic Strength Theories .....	140
§ 8.3 Matrix Cracking in Short Fiber Composites .....	143
§ 8.4 Inclusion Model for Fiber Bridging Problem .....	151
§ 8.5 Failure and Sliding of Interface .....	157
§ 8.6 ACK Method for Matrix Cracking .....	161
§ 8.7 Stress Intensive Factor of Matrix Cracking .....	174
References .....	181
<b>Chapter 9 Interfacial Failure Mechanics for Composites .....</b>	<b>184</b>
§ 9.1 Interfacial Fracture Mechanics – Crack Tip Fields .....	184
§ 9.2 Interfacial Fracture Energy .....	188
§ 9.3 Selection of Cracking Paths .....	193
§ 9.4 Toughening Mechanism Based on Interfacial Control .....	196
References .....	202
<b>Chapter 10 Numerical Simulation of Damage Process for     Composites .....</b>	<b>204</b>
§ 10.1 Computational Micromechanics for Composites .....	204
§ 10.2 Finite,Element Calculation of Single Mode Stress Intensity Factor .....	206
§ 10.3 A Remeshing Strategy .....	209
§ 10.4 Numerical Simulation of Cracking for Bimaterial Interface .....	212
§ 10.5 Numerical Simulation of Damage for Composites – Uniaxial Tension .....	214

§ 10.6 Numerical Simulation of Damage for Composites –	
Far Field K .....	223
References .....	228
<b>Chapter 11 CAD System for Micromechanical Design of</b>	
<b>Composites</b> .....	230
§ 11.1 General .....	230
§ 11.2 Basic Theory on Micromechanical Design for	
Composites .....	231
§ 11.3 Qualitative Design for Microstructural Parameters .....	233
§ 11.4 Optimal Design for Microstructure .....	236
§ 11.5 Software System for Micromechanical Design for	
Composites .....	238
References .....	242
 INDEX .....	 243

# 第 1 章 复合材料概论

本章主要介绍复合材料的基本知识,包括复合材料的定义、种类和发展过程,最后扼要说明复合材料力学和设计的基本内容。

## § 1.1 复合材料的定义

由两种或两种以上的单一材料复合而成的材料,称为复合材料。这样定义的复合材料是非常广泛的,例如,加入植物秸秆的泥土和钢筋混凝土等可以看做复合材料,用高级纤维增强的聚合物、金属和陶瓷等也是复合材料。还有的复合材料是由同一种物质但以不同形态存在的材料组成的,如碳/碳复合材料等。复合材料不同于化合物和合金材料,它们的区别在于复合材料中的组分材料始终作为独立形态的单一材料而存在,而没有明显的化学反应。

复合材料不是几种材料的简单组合,它的性能比其组分材料更优越,并可显示出一些新的性能。

复合材料的历史可追溯到久远的古代,用泥土和稻草混合砌成的泥墙早在古埃及时代就开始应用。近代的胶合板和钢筋混凝土材料也有百年历史。但以树脂基复合材料为先驱的现代复合材料是在 20 世纪 30 年代诞生的,并在 40 年代前期的第二次世界大战中得以应用。从此以后,军事上的应用和军备竞赛一直是复合材料发展的主要动力,并逐渐向民用方向发展。随着冷战的结束和世界形势走向缓和,复合材料正在迅速地应用于各民用工业领域。现在各种类型的复合材料已广泛应用于工业、工程领域和日常生活中。复合材料的发展历史再次证明了人类制造材料和应用材料的进步是与人类社会的文明进步共同发展的。图 1.1 说明了人类应用材料的演变历史和复合材料在现代社会中的作用<sup>[1]</sup>。



在科技革命的今天,复合材料是作为这一重大历史变革之物质基础和支柱的主要材料之一。

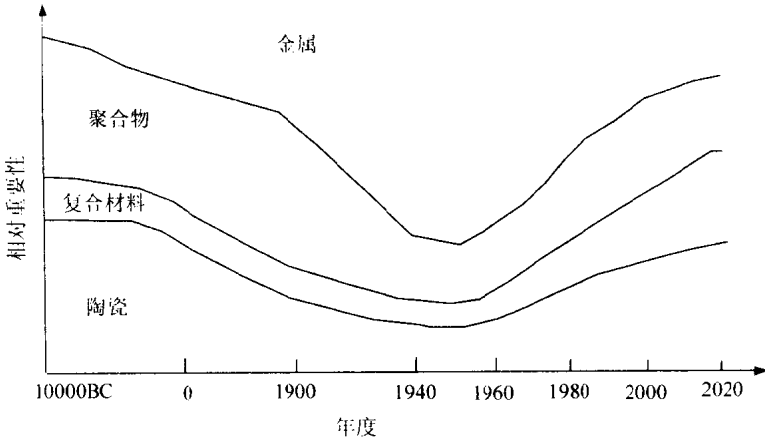


图 1.1 材料的演化历史

现在,以各种先进纤维和各种高性能基体制造的复合材料已经广泛应用于工业领域和人们的日常生活中。在航空航天领域,以各种复合材料制造的结构部件已经占到整个结构的相当比例。例如,航天飞行器和卫星的主要部件采用高性能金属基复合材料,玻璃和碳纤维复合材料应用于飞机的机翼等部件。全复合材料飞机已经投入应用多年,并显示出良好的力学和物理性能。在交通运输和汽车工业上,有复合材料铁路客车、汽车车体、各种船舶及其部件等。体育器械和娱乐工具方面也是复合材料的一个重要应用领域。在工业设备和化工、管道等方面也有大量的应用。

近年来,一个异军突起的应用领域是在土木工程和建筑结构方面,复合材料除了直接用于建造桥梁、房屋结构及其部件外,还在旧有大型结构的加固和翻新中显示出巨大的应用前景和优势。特别是在对地震和各种破坏造成的桥梁和建筑结构的加固翻新,以及沿海的强腐蚀环境下的结构建造中,复合材料已经成为首选