

曾庆敦 编著

复合材料的细观破坏机制与强度

21 世 纪 固 体 力 学 丛 书



科学出版社

www.sciencep.com

21 世纪固体力学丛书

复合材料的细观破坏 机制与强度

曾庆敦 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是有关复合材料细观破坏机制及强度方面的论著,是作者根据近年来所做的研究工作和参考国内外有关论著编写而成的。

本书内容共分为7章,包括:复合材料的发展历史、分类及其应用;纤维断裂和基体或界面损伤导致的单向纤维复合材料的细观应力集中;纤维和纤维束的统计拉伸强度及其实验测定;单向纤维复合材料的强度分析;正交叠层板的拉伸破坏与强度;短纤维复合材料破坏与强度;混杂纤维复合材料的拉伸破坏机制与混杂效应,主要介绍应力传递理论、剪滞理论、统计强度理论及复合材料的协同效应等。

本书可作为高等理工科学院力学、材料科学等有关专业的高年级本科生和研究生的教材,也可供力学、材料科学等专业的教师和从事复合材料研制、开发及结构设计的有关工程技术人员、科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

复合材料的细观破坏机制与强度/曾庆敦编著. —北京:科学出版社,2002
(21世纪固体力学丛书)
ISBN 7-03-010320-3

I. 复… II. 曾… III. 复合材料结构力学-研究生-教材 N. TB330.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 018808 号

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>

源海印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002年9月第 一 版 开本:720×1000 B5

2002年9月第一次印刷 印张:16

印数:1~3 000 字数:316 000

定价:28.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(兰各))

《21 世纪固体力学丛书》编委会

主 编 黄培彦

副主编 韩 强

编 委 (以姓氏笔画为序)

汤立群 陈国华 罗 毅

贺玲凤 贾乃文 曾庆敦

总 序

自从产业革命以来,在工业技术的发展中,力学曾大显身手。特别是 20 世纪中叶以来,近代力学基础性、探索性的超前研究曾对当代产业例如航空、航天工业的发展起到过主导的作用。从中固体力学取得了令人瞩目的成就。

随着知识经济和信息时代的到来,21 世纪我国经济建设将会加速发展。一大批高新技术产业和跨世纪骨干产业的形成,将会带来许多新的复杂的工程实际问题,这不仅为固体力学提供了大量的新课题,而且亦成为固体力学学科发展的新动力。固体力学既要适应生产实际的发展,面向工程实际,解决生产难题,同时亦应从工程实际中提炼出具有普遍性的问题进行系统的研究,促进各分支学科的成长,从而推动整个固体力学学科的发展。

中青年学者尤其青年学者是 21 世纪我国固体力学研究领域的主力军。目前,一大批优秀的青年学者已经成长为新一代的学科带头人,活跃在固体力学的诸多前沿研究领域。由他们联合撰写的固体力学系列专著,从各自不同的研究角度出发,反映了最新的研究成果及其发展趋势,对该学科的发展具有重要的影响和参考价值。毫无疑问,《21 世纪固体力学丛书》在这方面做了一个很好的尝试。

《21 世纪固体力学丛书》围绕固体力学的若干前沿研究领域,基于近代固体力学理论的最新研究成果,在结构的疲劳设计、概率断裂力学、复合材料强度理论、非线性力学以及新的实验测试技术等方面进行了系统的总结。该丛书不仅阐述了基本概念、基本理论、基本方法,而且有许多内容是作者们多年来卓有成效的研究成果,具有理论与应用并重的特色。丛书有助于初次涉足这一领域的学生和研究人员在较短的时间内从较高的起点上开展固体力学的研究工作。

我相信,《21 世纪固体力学丛书》的出版将会对固体力学的理论研究和工程应用发挥积极的促进作用。

高镇同

2001 年 12 月

前 言

近几十年来,复合材料已得到日益广泛的应用。过去复合材料主要应用于航空航天领域,现在已越来越多地扩展到其他领域,如建筑、造船、汽车、化工、机械、体育用品等。随着技术的成熟、成本的降低、性能的提高,复合材料的应用范围将愈来愈广。

由于复合材料具有许多独特的优点,如比强度和比刚度高、抗疲劳性能和减振性能好、结构的可设计性和工艺性好等,吸引了大批学者从事复合材料及复合材料力学等方面的研究工作。复合材料力学包括很多基本问题,例如纤维和基体之间的力的传递机制、破坏机制、损伤、断裂、强度等。弄清这些问题,对复合材料力学,乃至设计和研制新的复合材料都有帮助。目前,关于复合材料力学、复合材料细观力学已有许多很出色的论著,其中包括适合大学生或研究生学习的教材,但是,在国内外,尤其是国内还极少见到有关复合材料细观破坏机制及强度方面有特色的论著。为此,本人根据多年来在复合材料学科从事教学与科学研究的实践,写成了这本书。本书在撰写过程中重点参考了 T. W. Chou 的论著“*Microstructural Design of Fiber Composites*”,同时还参考了国内外众多优秀的论著及本人等的研究成果,以使本书尽量反映国内外这方面最新的教学与科研成果,尽量满足有关工作的实际需要。

本书适合从事复合材料的研制、开发、应用和从事复合材料力学工作的研究人员和工程技术人员阅读,也可以作为高年级本科生和研究生的教材或参考书。在本书后面列出了比较重要的参考文献目录,供读者查阅。

在本书的撰写过程中,得到了华南理工大学交通学院和科学出版社的鼓励、关心和支持,也得到全国同行们的关心和支持。本人的科研工作还得到了国家自然科学基金和多项广东省自然科学基金(960225,000391)的资助,在此,本人谨致谢意。同时,也要感谢那些在书中被引用的国内外的专家学者,由于书中编入了他们的工作成果,才使本书变得丰富多彩。

本书尽量用统一的观点,总结和阐述有关材料,有关的名词、术语及符号也尽量采用国家标准,但因国内外较少有人做过这方面的工作,很多东西无可借鉴,所以难免有不当之处,恳请读者不吝指正。

曾庆敦

2002 年 2 月于广州华南理工大学

目 录

总序

前言

第一章 绪论	1
1.1 复合材料的发展历史及其应用	1
1.2 复合材料及其分类	2
1.3 复合材料叠层结构	3
1.4 纤维增强复合材料的性能特点	4
1.5 研究复合材料强度与破坏的内容与方法	6
思考题	7
第二章 单向复合材料的细观应力集中	8
2.1 剪滞理论	8
2.2 单向复合材料的动应力集中.....	18
2.3 修正的剪滞模型.....	22
2.4 单向复合材料中的纤维和基体的应力集中.....	38
思考题	51
第三章 纤维和纤维束的统计拉伸强度	52
3.1 概率的基本知识.....	52
3.2 纤维强度分布的统计特性.....	55
3.3 纤维束强度的统计分析.....	57
3.4 单纤维强度与纤维束强度之间的相互关系.....	58
3.5 韦布尔形状参数的实验测定.....	60
思考题	63
第四章 单向纤维复合材料的纵向拉伸强度	64
4.1 材料力学半经验法.....	64
4.2 链式统计模型.....	67
4.3 裂纹扩展模型.....	73
4.4 纤维束模型与链式模型相结合的方法.....	89
4.5 随机扩大临界核统计模型.....	92
思考题	97
第五章 正交叠层板的强度与破坏	98
5.1 单向复合材料多级破坏期间的能量吸收.....	98

5.2 正交叠层板的横向开裂.....	99
5.3 横向开裂的统计分析	104
5.4 横向开裂和蒙特卡罗模拟	107
5.5 多向叠层板中的脱层	114
5.6 正交叠层板横向开裂的一种剪滞分析	118
5.7 碳/环氧正交叠层板的统计破坏强度分析.....	130
5.8 正交叠层板的最终破坏问题	140
思考题.....	150
第六章 短纤维复合材料的强度与破坏.....	151
6.1 荷载传递	151
6.2 短纤维复合材料的强度与破坏	156
6.3 短纤维复合材料的断裂行为	175
思考题.....	176
第七章 混杂复合材料的拉伸破坏机制及混杂效应.....	178
7.1 概述	178
7.2 层内混杂复合材料的应力集中	179
7.3 层间混杂叠层复合材料的应力集中	196
7.4 拉伸应力应变行为	207
7.5 强度理论	213
思考题.....	238
主要参考文献.....	239

第一章 绪 论

本章简要介绍了复合材料的发展历史及其在航空航天、运输工程及土木工程等方面的应用,给出了复合材料的定义及其分类、复合材料叠层结构的制作方法以及复合材料的主要性能特点。最后简要介绍了研究复合材料强度与破坏的主要内容和研究方法。

1.1 复合材料的发展历史及其应用

近几十年来,复合材料在航天、航空、汽车、造船、化工及土建方面得到日益广泛的应用。事实上,复合材料的使用已有悠久的历史。我国古代采用黏土和稻草制成的泥砖和泥墙;古埃及人把木板进行不同排列制成多层木板;中世纪有用不同材料复合做成的弓(以木材为芯,受拉面粘有平行的纤维,受压面粘有牛角)、剑和盔甲;近代的胶合板、钢筋混凝土结构等实际上都是复合材料。而现代复合材料是从20世纪40年代开始生产玻璃纤维增强聚合物基体复合材料(玻璃钢)而发展起来的。玻璃纤维增强复合材料因刚度较低,限制了它在结构上的应用。20世纪60年代高模量碳纤维的问世,碳纤维增强环氧复合材料在F-111战术轰炸机水平安定面的研制成功,开始了复合材料在高性能航空航天结构上的应用。此后,碳纤维、芳纶纤维相继问世,并很快形成了商品化产品。先进的复合材料的出现,是科学技术上的一大突破。人们在使用材料上从过去只能为特定结构物选择材料,发展到目前已有可能为特定结构物设计材料。

玻璃纤维增强环氧树脂复合材料制作的直升飞机旋翼系统,合理利用了材料的刚度和阻尼特性,设计成了结构简单、使用和维修方便的无绞式旋翼,不仅使直升飞机的机动性和加速性都得到显著的改善,而且大大延长了其使用寿命。1986年,Burt Rutan公司及其合作者利用先进复合材料优异的比强度、比刚度及出色的韧性和弹性变形能力研制的全复合材料飞机,经受了多次暴风、雷雨的袭击;创下了不着陆环球飞行的世界记录。复合材料独特的气动弹性剪裁设计特性,使美国X-29前掠翼飞机于1987年试飞成功。纤维增强复合材料还具有不反射无线电波、微波易穿透及无磁性等特性,是一种性能良好的隐身飞机材料,1988年,美国应用复合材料研制成功了B-2隐形轰炸机。目前,几乎所有正在研制的飞机、导弹、火箭和各种航天飞行器,都已大量使用了复合材料,使用的部件有机翼、尾翼和整流罩等,约占结构总质量的20%~40%。如欧洲新型的空中巴士380,除大梁外,机身、机翼、操作纵面均采用复合材料,其用量是波音777的2倍,仅机翼就用了53t(整

个机翼为 88t)。可见,从军用飞机到民用飞机的大面积推广,说明复合材料的成熟程度有很大的提高,从损伤容限的设计、材料的选择、制造计算的工程化这几方面反映出复合材料技术有很大的提高。有人把复合材料的出现,称为航空工业自喷气发动机发明以来最大的技术革命。随着工业化生产和技术进步及复合材料价格的降低,近年来在车辆、船舶、化工、建筑及体育用具上也得到广泛的应用,已制成有自重轻、耗油省的全复合材料的汽车及用复合材料制成的自行车、快艇、球拍、钓鱼杆、撑杆跳杆、玻璃钢桥、管道、冷却塔等。

1.2 复合材料及其分类

复合材料是两种或两种以上不同性能的材料在宏观尺度上组成的多相材料,或者更概括地说,复合材料是由两个或两个以上独立的物理相所组成的**固体材料**。

通常,将复合材料中一个比较连续的相称为**基体**,其他相则称为**增强**。玻璃钢就是以玻璃纤维为增强、某种塑料为基体的复合材料。各相材料的物理性质总称为**相物理**,各相材料的几何形状及其分布总称为**相几何**。改变相物理(如更换某一相材料)、相几何可获得各种性能(力学的、光学的、电磁学的、热学的,等等)的复合材料,以满足使用要求。

粗略地看,复合材料的性能是其各相材料的性能取长补短、共同作用的结果(某种平均作用——“混合效应”)。实际上未必如此,尤其是对有关破坏问题,还有“协同效应”。例如,某些复合材料可获得其组分单独使用时所没有的潜在性能。断裂能为 7 N/m 的玻璃纤维与断裂能为 220.5 N/m 的塑料组成的复合材料,其断裂能大约为 175 kN/m ,是其组分单独使用时的上千倍!其原因也许是两种相材料的交界面起着重要的作用。这种交界面通常称之为**界面**。界面性能是影响复合材料性能的一个重要因素,对分析破坏现象起着重要的作用,必须专门研究,如有可能,可在工艺、实验或力学模型中加以顾及。

复合材料按其性能和用途可分为:功能复合材料和结构复合材料。前者利用其某些特有的物理性能(如耐烧蚀材料、无线电波可穿透材料等),后者则是作为承力的结构材料使用的。本书仅研究后者,但就研究方法而言,两者有许多共同之处。

复合材料也可按基体或增强来分类。

(1) 按基体材料分类

- 1) 聚合物基复合材料;
- 2) 金属基复合材料;
- 3) 陶瓷基复合材料;
- 4) 橡胶基复合材料。

(2) 按增强材料分类

- 1) 纤维增强复合材料;

- 2) 短切纤维增强复合材料;
- 3) 晶须增强复合材料;
- 4) 颗粒增强复合材料;
- 5) 片状增强复合材料。

纤维增强复合材料是指连续长纤维增强复合材料(还可按纤维的方向性分为单向、双向、三向和随机方向增强复合材料),是结构用复合材料,可以是纤维或纤维束增强,也可以是织物增强。由两种或两种以上纤维共同增强同一树脂基体的复合材料则称之为**混杂纤维复合材料**。而短切纤维增强复合材料是指短纤维增强复合材料,如模压复合材料(SMC)和捏塑复合材料(DMC)。

以上说明和分类不是绝对的。例如,对于多晶体,通常视为传统材料,但也可视为复合材料。前者只是在宏观层次内进行研究;后者就需要考虑其细观结构,在细观和宏观两个层次内进行研究,且其宏观性能可通过细观理论分析得到。因此,后者比前者更深刻。例如,以橡胶颗粒去增韧聚苯乙烯,在弥散过程中,聚苯乙烯颗粒又将渗入橡胶颗粒内。这种材料可称为基体模糊的复合材料。此外,还有相互贯穿网状复合材料,它的每一相都是连续的;基体和纤维采用同一物质构成的复合材料,如碳-碳复合材料。目前还正在研制自增强分子复合材料、智能复合材料和纳米复合材料。这些复合材料都没有列入上述分类中。

复合材料中各相材料的性能一般应有明显的差别,每相材料也应有相当的份量,不宜太少,以组成性能与相材料有显著差别的复合材料。

1.3 复合材料叠层结构

纤维增强复合材料是由纤维与基体两种组分材料组成的,两者具有明显的界面。两种材料复合成的单层材料称为**单层板**,实际上就是一个结构层次。其力学性能决定于组分材料的力学、几何(形状、分布、含量等)特性和纤维/基体界面的性能。而各单层板可以用不同的方式叠合成**叠层板**,称为**叠层结构**,叠层结构是目前结构复合材料的主要形式,其力学性能取决于叠层板的力学性能和结构的几何(叠层厚度、铺叠方向、铺叠顺序等)特性。

为了对纤维增强叠层材料进行力学分析,了解其制作过程是非常必要的。增强纤维有多种形式,如单丝、无捻粗纱、线纱,以及它们的织物、短切纤维毡、晶须等。受力较明确和效率较高者是单丝或无捻粗纱按预定方式排列的增强形式。纤维增强树脂基复合材料的制作,主要有干法和湿法两种形式。

1. 干法

先将纤维排成 $(1\sim3)\times10^{-2}\text{m}$ 的平行纤维带,再通过黏性液态树脂,将此树脂浸渍的平行纤维带稍加温,使树脂处于半熔阶段,而制成所谓的**预浸带**(样子就像市场上包装重物箱、商品箱用的玻璃纤维增强蜡封带),预浸带是制作叠层板材的

中间半成品。当然,也可以制成更宽些的预浸带。将预浸带切成所需长度,沿一个方向铺成一个单层,在此单层上,又沿某个设计方向铺设第二单层,如此铺设下去,直到所需层数(可至上百层)为止,这样便形成了叠层板的初形。此操作称为铺层。将初形置入热压罐里慢慢加热并抽出残留的气泡和挥发物。随着温度的增加,树脂会重新软化、流动,直到形成聚合物分子的交联链而开始固化。对于环氧树脂,此阶段的温度约为 135°C ,压力约为 590kPa ,历时约 1h ;然后再增加温度至 177°C 并保持 $1\sim 2\text{h}$,以完成固化;最后降至室温,便完成了叠层板的制作。因为大部分交联链是在最高温度下形成的,故将最高温度定为固化温度。固化温度下的叠层板可视为处于无应力自然状态。

2. 湿法

在湿法制作过程中,不经过中间半成品预浸带阶段,而是直接将树脂浸渍的纤维一层层地绕成所需要的结构形状,然后整体固化。例如火箭的叠层筒体。

叠层板是若干单层板以不同方向铺叠而成的。如果各单层板均以同一方向进行铺叠则称为**单向叠层板**;以不同方向进行铺叠则称为**多向叠层板**。若各单层板的铺叠方向相对于叠层板的几何中面是镜面对称的,也就是说,从中面向上或向下观察各单层的铺设方向,铺设顺序是相同的,这样的叠层板则称为**对称叠层板**(几何和物理特性以几何中面为对称面的叠层板)。若各单层板的铺叠方向相对于叠层板的几何中面是镜面反对称的,则称为**反对称叠层板**。若各单层板均是以顺纤维和垂直于纤维方向进行铺设的叠层板则称为**正交叠层板**。若面内刚度特性可近似用两个等效工程常数表示的叠层板则称为**准各向同性叠层板**。若在几何中面一侧正、负铺设角铺层数相等的叠层板则称为**均衡叠层板**。

为了充分利用材料和减轻质量,可用两块薄的叠层做面板,中间的芯部材料采用轻质填料或蜂窝结构。这种材料称为**夹层(芯)复合材料**。

1.4 纤维增强复合材料的性能特点

纤维增强复合材料是制作复合材料结构件的主要材料。高强度、高模量纤维是理想的承载体。就纤维本身而言,通常仅能承受拉伸荷载。纤维与基体复合后,基体提供了一个连续的介质,既保持了纤维的铺设方向,又从结构上保证了纤维的荷载传递,还能使纤维承受压缩和剪切荷载。此外,基体在纤维间起着分散和传递荷载的作用,也提高了纤维沿纤维方向的承载能力。总之,复合材料可以克服其组分材料的弱点,发挥其综合性能。

复合材料的优越性,在于它能实现设计材料的要求。由于复合材料是**两层次材料**(即从力学的观点来看,需要在细观和宏观两个层次内进行理论分析的材料。这是复合材料与传统材料关键性的区别,传统材料通常只需要在宏观层次内进行理论分析),它的宏观性能可根据人们的需要通过细观性能来设计,因此可以充分发

挥材料的潜力。现阶段使用的复合材料主要有下列 6 项性能特点。

1. 比强度、比模量高

比强度是复合材料拉伸强度与密度之比,**比模量**是模量与密度之比。这两个数据愈大,似乎可以说明材料既轻且**强度**和**刚度**愈高,其实这种说法是不全面的,这两个数据只不过是说明了沿纤维方向受拉的优越性而已,如有偏离纤维方向的力存在,这两个数据就不能说明问题了。因为在偏离纤维方向,这种材料的性能是很差的。因此在多向受力的情况下,为了发挥复合材料的优越性,纤维不能沿单一方向铺设。

就上述这两个数据而言,碳纤维 T300/环氧 5208 的比强度是铝的 6.3 倍,比刚度是铝的 4.16 倍。目前在航空工业中使用的结构复合材料,主要还是利用它的高比刚度,例如用来制作飞机的尾翼和安定面等。至于比强度,由于现阶段材料的强度数据较为分散,兼之使用经验还不充分,因此用复合材料做飞机结构的主要受力件还有些顾虑。必须进一步改进材料工艺,通过提高制作水平、积累经验并提高强度分析的理论水平,以期更有效地发挥复合材料的优越性。

2. 抗疲劳性能好

复合材料的疲劳破坏机制与金属等均匀材料完全不同。金属材料往往出现单一的疲劳主裂纹,主裂纹控制着最终的疲劳破坏。而复合材料往往在高应力区出现大量的损伤(如界面脱胶、基体开裂、层间脱层和纤维断裂等),并与材料种类、铺层方式、疲劳荷载类型有关,破坏机制较复杂。单向复合材料一般具有较好的拉-拉疲劳性能,且有明显的破坏预兆。至于其他形式的材料,也可期望做出好的材料设计,以承受各种类型的破裂荷载。

3. 减振性能好

结构的固有频率,除与结构的形状有关外,还与材料的比模量的平方根成正比。由于复合材料的比刚度大,故其自振频率甚高,可避免早期共振。此外,复合材料还具吸振能力强、振动阻尼(内摩擦)大的特点,一旦激起振动,衰减也快。由实验得知,轻金属合金梁需 9s 才停止振动,而同样尺寸的碳纤维复合材料梁只需 2.5s 就停止了振动。

4. 抗高、低温性能好和膨胀系数小

目前,人们可以根据不同的工作环境,选择抗高、低温性能良好和膨胀系数小的复合材料。例如,用碳纤维/环氧制成的飞行器,在太空飞行时,向阳面与背阳面有着 260℃ 的温差,它仍可保持形状不变。此类材料也是制造太空飞行用的光学望远镜、空间站、太阳能集光板和各种航天兵器的良好材料。此外,复合材料是一种很好的烧蚀材料,已被成功地用于洲际导弹和飞船外壳。一般铝合金在 400℃ 时,弹性模量将大幅度下降并接近于零,强度也显著下降。而碳纤维/钛合金复合材料在此温度下强度与刚度基本上保持不变。复合材料还具有较高的低温强度、低温韧性和较好的低温疲劳性能。

5. 破损安全性好

复合材料本身是**多度静不定结构**,可以多通道受载,其中个别纤维断裂(只要不超过一定的限度)仍能安全使用,或安全使用一定期限。这种安全地承受一定损伤的能力称为破损安全性。复合材料具有较好的破损安全性。

6. 成型工艺好

复合材料易于成型为各种复杂的零部件,并且可以一次成型,从而减少加工工序和节省原材料。此外,复合材料还有许多其他的独特性能。例如,可按最优方式设计材料、制造工艺简单、加工消耗量少。某些复合材料还有其他一些特殊的优越性能,如抗腐蚀、耐磨损、抗冲击,以及具有所要求的电绝缘性、电磁波穿透性、导热性、隔热性、耐高低温性等。由于复合材料具有上述种种优越性能,故用传统材料无法解决的问题,现在有可能用复合材料来实现,因此,复合材料愈来愈被人们所重视。

复合材料虽有很多优越性,但作为一种新型材料,仍然存在许多问题和缺点。最主要的还是对这种新型材料的认识尚不深刻,其中包括新材料的研制、质量检验与控制、大规模生产、材料数据、加工性能、经济效益、环境保护、理论水平及长期积累起来的工程经验等。

1.5 研究复合材料强度与破坏的内容与方法

为了能够充分开发和利用纤维复合材料的潜在性能,正确地进行材料设计,首先应该了解复合材料的破坏机制及其影响因素。复合材料的**强度和破坏**,与组分、界面及其随机缺陷密切相关,尚无确切的力学模型和相应的协同律。纤维与基体复合,通常具有所谓的**复合效应**。复合材料的**复合效应**包括**混合效应**(如有效模量和湿热膨胀系数等的各种**混合律**)与**协同效应**。对于强度问题,往往是协同效应起作用。纤维及复合材料的强度本身就不是材料常数,而是具有**就位性**(*in situ property*)——不同部位、不同场合其表现不同,并可发挥其潜在性能的作用。由于匹配、工艺不同,界面和基体也可严重影响复合材料的宏观强度性能。**界面剥离**(脱粘)、**基体破坏**、**层间脱层**等这些局部损伤都是影响复合材料结构过早失效、破坏的因素,这些因素的交错存在使其破坏过程较长而复杂。目前,关于这些问题的研究在国内外已有许多文献报道,但尚无较为统一的**力学分析模型**和相应的**强度破坏准则**。

研究复合材料的强度和破坏,可以分为**细观强度分析**和**宏观强度分析**两大部分。根据相材料的强度性能从理论上导出复合材料的基本强度参数(主要是沿轴强度),是目前细观强度分析的中心问题。这一问题的研究,只能凭借**细观力学**,最有效的仍是**细观随机(统计)理论**,也可结合断裂力学方法进行研究。对复合材料细观应力重新分布的计算多采用**剪切滞后分析**(shear-lag analysis)、**有限单元法**、**弹塑**

性力学等,对其强度和断裂(或破坏过程)的研究几乎都基于**统计断裂模型**(如**链式统计模型**、**随机扩大临界核统计模型**等)。复合材料的宏观强度理论是沿着材料力学中的**强度理论**的基本思路,经修改扩充而形成的。其基本出发点是物体中一点的强度由该点的应力状态(或应变状态)所确定。目前常用的强度理论有**最大应力理论**、**最大应变理论**、**Tsai-Hill 理论**、**Tsai-Wu 张量理论**等,主要涉及**失效判据**和**强度指标**两大问题。本书着重讨论复合材料的细观应力重新分布及其统计破坏问题。

思 考 题

- 1.1 何谓复合材料?
- 1.2 何谓材料力学? 何谓高等材料力学? 何谓复合材料力学?
- 1.3 复合材料有哪些优越性?
- 1.4 研究复合材料的强度和破坏,可以分为哪几个部分? 各部分主要涉及哪些问题? 各采用哪些主要方法进行解决?

第二章 单向复合材料的细观应力集中

本章的主要任务是研究单向纤维增强复合材料在纵向拉伸荷载作用下由纤维断裂、基体破坏或纤维/基体界面损伤所导致的细观应力重新分布问题。对于大多数树脂基复合材料,由于基体的拉伸模量相对较小,因此,此类问题宜采用剪滞假定进行研究。也就是只考虑纤维横截面上的拉力(应力),不考虑基体拉力,即认为基体所承受的应力很小,可以忽略不计。本章主要介绍了Hedgepeth的剪滞理论、动应力集中问题、各种修正的简化剪滞模型、基体破坏或纤维/基体界面损伤对应力集中的影响、计及基体拉力的剪滞分析等。最后,简要介绍了有关上述问题的国内外研究进展。

2.1 剪滞理论

2.1.1 概述

单向纤维增强复合材料的纵向拉伸,其破坏往往始于某些“弱”纤维(带缺陷纤维)。当一根或数根纤维断裂而形成裂纹后,在其周围产生局部应力扰动,邻近纤维与基体受此扰动而造成**应力集中**,这些应力集中的大小和影响范围对研究复合材料的力学行为是十分重要的,也是复合材料统计破坏理论的重要参数。近几十年来,对这个问题的研究从不同角度一直在进行着,但难于得到精确解。因复合材料的边缘或缺口附近会出现分层、脱胶、纤维伸缩和摩擦等复杂现象,现有的3D有限元的计算能力也仅能处理纤维含量极少的情形。用含裂纹的均匀各向异性等效体来替换复合材料的宏观方法,也很难应用,因为这种等效是有条件的,在裂纹附近不具备这个条件。较合理的是采用剪切滞后(shear-lag)分析来计算**应力重新分布**。

基于简化假定的剪切滞后方法(简称**剪滞方法**),通常可以较好地揭示相当复杂问题的物理现象。剪滞方法是建立一种计及影响断裂的主要因素简化模型来分析复合材料的断裂性能。它类似于结构工程师解决复杂结构力学问题所应用的方法。并不试图详细求解三维应力分布,而是考虑结构的主要特点,构造一个数学模型,用来计算结构对荷载的响应。

剪滞分析的突出优点是大大简化了分析,但这又往往仅能给断裂现象提供一个定性的描述。它的成功应用在于对试验现象的观察和同实验数据的比较。即使

如此,它为发展新材料、解释实验数据以及为设计损伤容限更好的结构提供方向性的指导等方面仍是有益的。

Hedgepeth(1961)首次采用剪滞方法处理单向复合材料的单根纤维断裂问题,并将此方法进行推广,研究了基体的塑性效应和界面脱胶条件。这种方法的主要假定是

- 1) 所有位移是平行于纤维的。
- 2) 纤维只受拉力作用。
- 3) 基体仅传递剪力,不承受拉力。

下面首先给出单根纤维断裂模型,以说明剪滞方法的基本原理和单向复合材料应力重新分布的性质。然后介绍多根纤维断裂问题的详细求解。

2.1.2 单根纤维的断裂

图 2.1 所示为含有 3 根等间距平行排列的纤维,其中间的那根已发生断裂的分析模型。此模型也可看作为由 3 层单向层板同方向叠合而成的单向叠层板,其中间层已发生断裂的情形。根据对称性,仅需考虑模型的一半即可。纤维编号用 $n=1, 2$ 表示。画出微段受力图(见图 2.2),列出其力的平衡方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{dp_1(x)}{dx} + \tau_1(x) &= 0 \\ \frac{dp_2(x)}{dx} - \tau_1(x) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

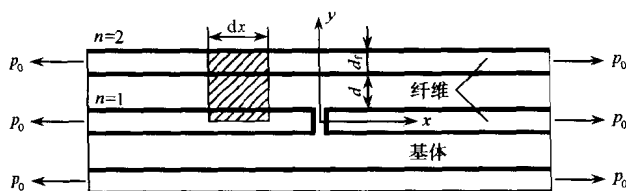


图 2.1 单根纤维断裂的剪滞分析模型

式中, $p_1(x)$ 和 $p_2(x)$ 表示单位厚度的纤维轴向拉力; $\tau_1(x)$ 为基体切应力。令第 n 号纤维的位移为 $u_n(x)$, 于是有

$$\left. \begin{aligned} p_n(x) &= E_f d_f \frac{du_n(x)}{dx}, \quad n = 1, 2 \\ \tau_1(x) &= \frac{G_m}{d} [u_2(x) - u_1(x)] \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

式中, E_f 和 d_f 分别为纤维弹性模量和直径(或单层厚度); d 为纤维间距; G_m 为基体切变模量。引进下列无量纲参数:

$$\xi = x/d_f, \quad \alpha = E_f d_f / (G_m d) \quad (2.3)$$

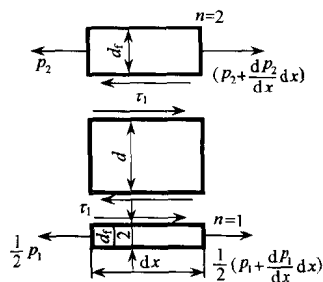


图 2.2 微段受力图