

复合材料疲劳

[丹麦] 瑞麦施·塔尔瑞加 著

航空工业出版社

复合材料疲劳

〔丹麦〕瑞麦施·塔尔瑞加 著
杨乃宾 译 理有亲 校

航空工业出版社

1990

内 容 简 介

本书通过疲劳-寿命图、损伤连续介质力学理论和统计分析理论,对复合材料疲劳损伤-寿命关系、理论分析方法和疲劳可靠性问题作了较为系统的阐述。

全书内容分为三篇。第一篇:疲劳过程,包括全书内容详细提要,疲劳损伤机理、疲劳-寿命图和疲劳损伤模型。第二篇:疲劳损伤特征的描述,包括刚度特性的测定、描述损伤的连续介质力学方法、本构方程、剩余刚度特性和横向开裂与刚度降。第三篇:疲劳可靠性,包括强度和疲劳寿命的 Weibull 参数估计及其表达式在结构设计准则中的应用。

本书所列的试验数据以及大量参考文献很有参考价值。

本书可作为从事复合材料科学技术研究和工程应用的科技人员以及高等院校师生的参考书。同时,也可供从事航空、船舶、汽车、建筑、材料、化工等工程领域工作的人员参考使用。

复 合 材 料 疲 劳

(丹麦)瑞麦施·塔尔瑞加著
杨乃宾 译 理有亲 校

航空工业出版社出版发行

(北京和平里小关东里14号)

全国各地新华书店经售

航空工业出版社印刷厂印刷

1990年4月第1版 1990年4月第1次印刷

787×1092毫米1/16 印张: 10.875

印数: 1-1400 字数: 180千字

ISBN 7-80046-175-0/Z·045

定价: 6.50元

译 者 的 话

复合材料作为一种新型结构材料,应用愈来愈广。特别是先进复合材料在高性能结构上正从次要承力构件扩大到主要承力构件。复合材料疲劳问题早已引起了人们的关注,并进行了大量试验研究和理论分析。

《复合材料疲劳》一书是1986年由美国 TECHNOMIC 出版公司出版的专题论著。著者是丹麦理工大学教授 Ramesh Talreja 博士。R. Talreja 教授在自己研究工作基础上,参阅了大量文献资料,根据复合材料疲劳损伤机理与寿命关系的研究结果,提出了疲劳-寿命图,并采用力学与材料科学交叉学科分析方法对疲劳损伤影响因素进行了分析,最后探讨了疲劳可靠性问题。全书以拉伸疲劳为主,对复合材料疲劳作了较为系统的阐述。美国佛罗里达大学 C. T. Sun(孙昌钻)教授在《应用力学评论》(Applied Mechanics Reviews)中大力推荐此书,他认为《复合材料疲劳》一书对从事复合材料疲劳、断裂和寿命预测的研究人员和工程师是一本非常好的参考书。美国复合材料疲劳研究方面知名学者 Kenneth L. Reifsnider 教授专门为本书写了序言。

鉴于目前国内对不少复合材料词汇尚无统一译名,因此,选择译名时参阅了 GB 3961-83“纤维增强塑料术语及其定义”和有关翻译出版物。

全书序、前言、第一篇(一~四章)和第三篇(九~十章)由杨乃宾译,第二篇(五~八章)由张金民译。英汉名词对照由杨乃宾编。全文由理有亲校对。

由于时间仓促,加之水平有限,译文难免存在缺点和错误,恳请广大读者批评指正。

译者

1988年9月于北京

性

灵

变

译

力

3-

序

一种材料能否用来制作工程构件,不仅要回答材料的强度和刚度这类最基本的问题,而且还要回答在预期的使用条件下,材料可用多久的问题。这是最起码的事了。虽然早在1800年人们就注意到材料在交变载荷作用下,强度下降,随即发生破坏,即众所周知的疲劳现象,并认为这是一个基本问题。然而,要在广义上定义工程构件寿命的概念是困难的。由于多数工程构件在使用期内承受着随时间变化的载荷和环境谱的作用,因此,在150多年来,许多科学家和工程师对这个问题非常关注,并且开展了科学研究工作,这就不足为奇了。

现在还没有做到从疲劳现象本质出发,对疲劳进行恰如其分的描述。目前对疲劳行为的描述,主要还是依靠描述常用材料疲劳行为的经验。现在,对常用材料的疲劳行为是借助断裂力学和有关方程式,从经验和现象方面进行描述的。近年来,复合材料技术的发展为科学家和工程师开辟了新的领域。复合材料的应用正在迅速扩大,特别是在高性能结构上,如在飞机和其他飞行器上得到了应用。对由于疲劳而可能引起强度和寿命下降的构件,应用复合材料确实是会带来很多好处的。然而,对复合材料要注意疲劳这个问题也至关重要。必须避免复合材料结构在长期使用条件下发生破坏,但目前还不能完全做到,因为对复合材料结构疲劳还不能进行可靠的预测。预测还有待进一步认识和量化。

对复合材料这确实是一项需要进行的工作。按照基本特性,复合材料总是非均质的,而且往往是各向异性的。引起复合材料强度下降的疲劳过程通常相当复杂,包括了多种损伤形式的损伤累积。这些损伤形式可以进行多种组合,产生多种破坏形式。因此,重要的是对复合材料的研究,采用交叉学科的研究方法,即把对疲劳过程中起积极作用的物理机理的完整的、正确的认识,同与这些损伤的共同作用有关的力学精确表达式结合在一起进行研究。

本书独特之处,在于对复合材料的疲劳课题采用交叉学科的方法进行研究。本书开头对不同类型复合材料疲劳过程的物理机理的描述与讨论进行了论述。重点针对纤维复合材料,特别是聚合物、玻璃和陶瓷等基体体系纤维复合材料。建立增强材料、基体和界面所起作用的基本方程式。疲劳过程对性能的影响,特别是对刚度特性的影响讨论得相当详细。对于损伤,本书采用连续介质力学的方法进行描述,把损伤特点具体化为材料的材料响应函数,如一组内部向量应力场变量。进一步推导了给定损伤状态下复合材料小变形行为的各向同性本构方程。同时,利用推导出的剩余弹性特性,例如带有损伤情况下的刚度,同试验数据进行比较,说明损伤特性描述的正确性。尽管这个方法对剩余强度和寿命没有进行明确的讨论,却为这方面工作打下了坚实的理论基础。最后,这本书注意到了疲劳可靠性问题,特别是 Weibull 参数的建立及其表达式在复合材料结构设计准则中的应用。在可靠性分析中建议采用强度下降模型。

本书可在广泛的领域内使用。设计师和其他负责复合材料结构制造的人员会发现,本

书对复合材料疲劳的实质做了有价值的概括,并且可以从正文及参考注解中找到所关心的问题、所涉及到的范围和有用的解答提示。学习复合材料的学生将会发现本书对复合材料广泛领域内的大量信息进行了概括,并且可以从本书著者 R. Talreja 的经验和实践中得到启迪。总之,本书对所研究的复合材料疲劳领域是一个重要的贡献。全书对复合材料疲劳书写仔细、认真,注解详尽,资料重要部分引用文献严格。

美国弗吉尼亚州大学理工学院
工程科学和力学系
雷诺金属研究室 教授
Kenneth L. Reifsnider

前 言

这本研究专题论文集,汇总了著者 1979~1984 年间在复合材料疲劳方面完成的研究工作。

研究工作受到丹麦技术大学固体力学系和 Riso 国家实验室冶金分部两个单位研究工作的影响。这两方面的影响启发了著者采用力学与材料科学相结合的交叉学科研究方法。研究工作进一步得到了美国弗吉尼亚州大学理工学院材料特性响应研究室多方支持,特别是研究室主任 K. L. Reifsnider 教授的具体指导。与 K. L. Reifsnider 教授的长期合作和友谊,使著者受益匪浅。

著者对丹麦技术大学固体力学系主任 Frithiof Niordsor 教授给予的鼓励、支持和帮助表示感谢。著者特别感谢 Riso 国家实验室冶金分部主任 Techn Niels Hansen 与其他研究人员在五年多共事期间给予的启发和一贯支持。

感谢 P. Lemming, E. Dam Ravn, K. Fries Weihe 和 R. Zetterlund 的合作和娴熟的技术帮助。同时对 Bente Andersen 和 Lizzie Brane 秘书工作做得认真、细致表示感谢。

对我的夫人和两个孩子的感谢是无法用语言来表达的,他们的爱是在不平坦的研究道路上增添力量的源泉。

Ramesh Talreja

Lyngby. 1985 年 1 月

目 录

| | |
|---------|-----|
| 序..... | V |
| 前言..... | VII |

第一篇 疲劳过程

| | |
|---|----|
| 第一章 疲劳损伤机理——导论..... | 3 |
| 1.1 疲劳过程..... | 3 |
| 1.2 疲劳损伤特征的描述..... | 7 |
| 1.3 疲劳可靠性..... | 15 |
| 1.4 结论..... | 18 |
| 参考文献..... | 19 |
| 第二章 复合材料疲劳——损伤机理和疲劳-寿命图..... | 22 |
| 2.1 单向复合材料疲劳损伤机理..... | 22 |
| 2.1.1 沿纤维方向载荷作用下的疲劳损伤机理(正轴疲劳损伤机理)..... | 23 |
| 2.1.2 疲劳-寿命图..... | 23 |
| 2.1.3 复合材料刚度对疲劳-寿命图的影响..... | 25 |
| 2.1.4 偏斜纤维方向载荷作用下的疲劳损伤机理(偏轴疲劳损伤机理)..... | 28 |
| 2.2 斜交层压板损伤机理..... | 30 |
| 2.3 正交层压板损伤机理..... | 31 |
| 2.4 其他层压板损伤机理..... | 32 |
| 2.5 疲劳比和疲劳极限..... | 33 |
| 2.6 结论..... | 34 |
| 参考文献..... | 35 |
| 第三章 复合材料疲劳损伤模型..... | 36 |
| 3.1 损伤机理..... | 36 |
| 3.1.1 基体损伤机理..... | 36 |
| 3.1.2 纤维损伤机理..... | 38 |
| 3.1.3 界面损伤机理..... | 39 |
| 3.2 疲劳-寿命图..... | 39 |
| 3.2.1 聚合物基复合材料疲劳-寿命图..... | 40 |
| 3.2.2 玻璃和玻璃-陶瓷基复合材料疲劳-寿命图..... | 44 |
| 3.3 损伤模型..... | 48 |
| 3.3.1 纤维损伤模型..... | 48 |
| 3.3.2 基体和界面损伤模型..... | 49 |
| 3.4 结论..... | 50 |
| 参考文献..... | 51 |

| | |
|-----------------------------|----|
| 第四章 解释复合材料疲劳损伤机理的基本构思 | 53 |
| 结论 | 62 |
| 参考文献 | 62 |

第二篇 疲劳损伤特征

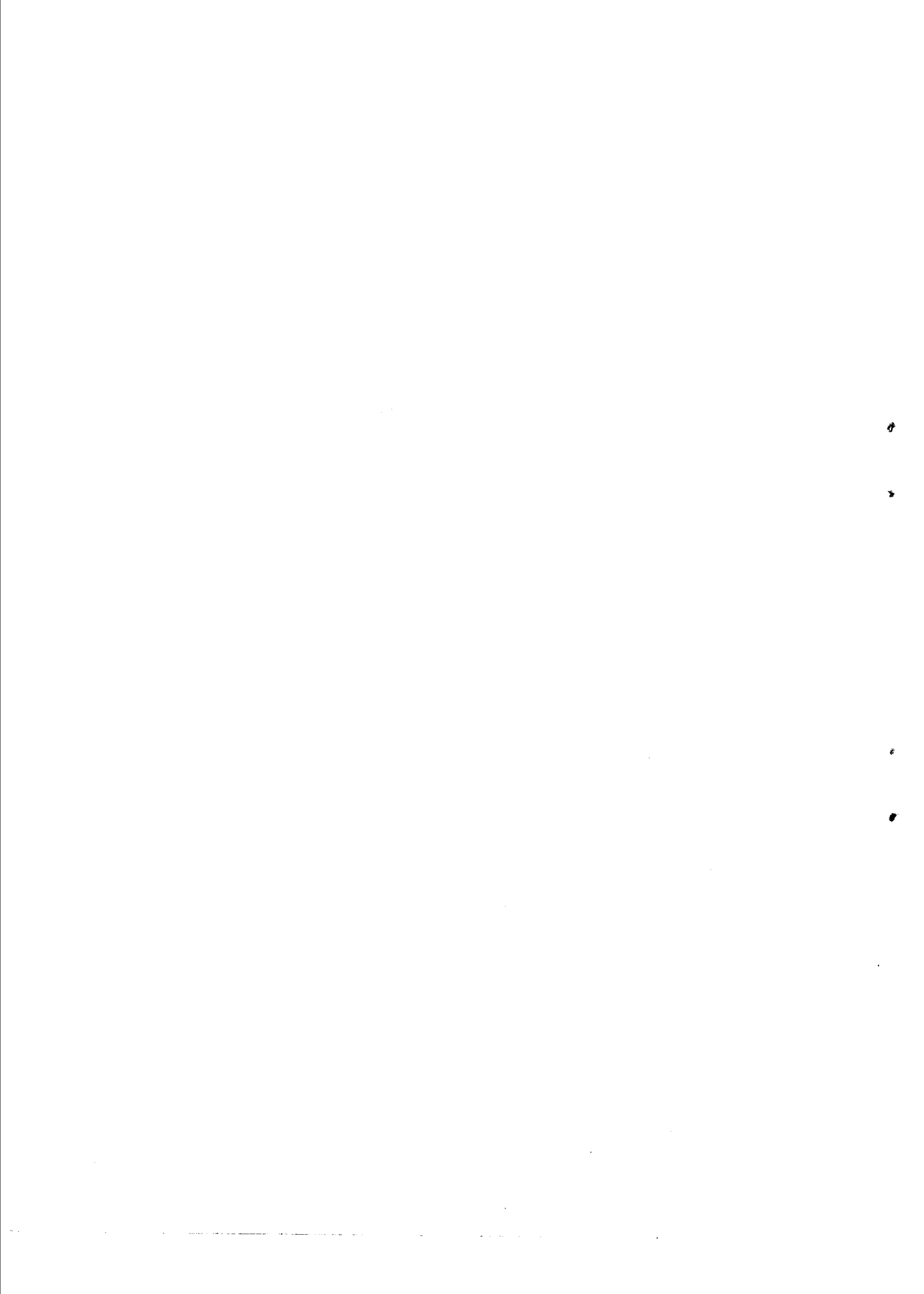
| | |
|-------------------------------------|-----|
| 第五章 带疲劳损伤的复合材料的刚度 | 67 |
| 5.1 材料与试件 | 68 |
| 5.2 试验过程 | 68 |
| 5.3 弹性常数的测定方法 | 70 |
| 5.3.1 纵向弹性模量 E_{11} | 70 |
| 5.3.2 主泊松比 ν_{12} | 70 |
| 5.3.3 剪切模量 G_{12} | 71 |
| 5.3.4 次泊松比 ν_{21} | 71 |
| 5.4 结果与讨论 | 72 |
| 5.5 对层压板的推广 | 73 |
| 5.6 结论 | 74 |
| 参考文献 | 74 |
| 第六章 描述复合材料损伤的连续介质力学方法 | 75 |
| 6.1 损伤标量场表征 | 76 |
| 标量场表征 | 78 |
| 6.2 本构方程 | 79 |
| 6.2.1 材料的对称性 | 81 |
| 6.2.2 横观各向同性材料 | 81 |
| 6.2.3 正交异性材料 | 85 |
| 6.2.4 多向量场 | 88 |
| 6.2.5 正交异性材料中的两种损伤场 | 90 |
| 6.3 剩余弹性特性 | 92 |
| 6.4 讨论 | 96 |
| 参考文献 | 97 |
| 附录 A: 横观各向同性材料的 Helmholtz 自由能 | 99 |
| 附录 B: 正交异性材料的 Helmholtz 自由能 | 101 |
| 第七章 含裂纹的复合材料层压板剩余刚度特性 | 102 |
| 7.1 含裂纹的层压板的弹性响应 | 103 |
| 7.2 剩余刚度特性 | 105 |
| 7.3 刚度降的预估 | 117 |
| 参考文献 | 110 |
| 第八章 复合材料层压板中横向开裂与刚度降 | 111 |
| 8.1 横向开裂对应力-应变响应的影响 | 112 |
| 8.2 刚度-横向开裂的关系 | 115 |
| 8.3 弹性模量的预估 | 119 |

| | |
|----------------------|-----|
| 8.3.1 玻璃/环氧层压板 | 120 |
| 8.3.2 石墨/环氧层压板 | 123 |
| 8.4 结论 | 127 |
| 参考文献 | 128 |

第三篇 疲劳可靠性

| | |
|---------------------------------------|-----|
| 第九章 复合材料强度和疲劳寿命数据的 Weibull 参数估计 | 132 |
| 9.1 Weibull 参数的估计 | 133 |
| 9.1.1 矩量估计 | 133 |
| 9.1.2 最大似然估计 | 136 |
| 9.1.3 标准化变量估计 | 137 |
| 9.2 随机样本估计 | 139 |
| 9.2.1 矩量估计 | 139 |
| 9.2.2 最大似然估计 | 142 |
| 9.2.3 标准化变量估计 | 143 |
| 9.3 复合材料强度和疲劳寿命数据的估计 | 146 |
| 9.4 结论 | 148 |
| 参考文献 | 149 |
| 第十章 静载荷和疲劳载荷作用下复合材料结构的设计准则 | 150 |
| 10.1 静载荷作用 | 150 |
| 10.1.1 材料响应 | 150 |
| 10.1.2 设计准则 | 153 |
| 10.1.3 以刚度下降作为设计准则 | 153 |
| 10.1.4 可靠性分析说明 | 155 |
| 10.2 疲劳载荷作用 | 155 |
| 10.2.1 疲劳损伤 | 155 |
| 10.2.2 疲劳可靠性 | 156 |
| I 阶段 | 156 |
| II 阶段 | 158 |
| 参考文献 | 159 |
| 英汉名词对照 | 160 |

第一篇 疲劳过程



第一章 疲劳损伤机理——导论

本专题论文集对评估疲劳载荷作用下纤维增强复合材料特性进行了分析，并提出了预测方法。文集汇集了著者1979~1984年在这方面的工作成果。

虽然纤维增强概念并不是什么新的概念，甚至在几千年以前制砖工人对此就已相当熟知（见Hashin^[10]），但是最近几十年，由于先进技术对材料性能提出了更高的要求，而常用的材料又不能满足这些要求，从而促使人们对复合材料的兴趣迅速增加。

随着复合材料制造技术水平的提高，其刚度、强度和断裂韧性等材料力学特性正在不断地改善。然而，要想充分发挥作为先进材料的复合材料的潜力，就必须解决其在长期机械载荷作用下的力学性能的评估方法。评估方法的研究需要分析机械载荷作用下材料性能下降的基本机理，同时还需要与恰当的材料模型研究结合在一起进行。本书介绍了著者朝这个目标所做的努力。

近年来，对复合材料在长期机械载荷作用下力学行为的研究异常活跃。以此为专题或部分以此为专题的学术讨论会就是最好的证明^[11~15]。学术讨论会和综合文献资料所发表的许多研究报告，反复阐明了复合材料中损伤的复杂本质。人们越来越认识到对复合材料损伤的分析，必须采用将损伤的物理特性与固体力学相结合的边缘学科的综合分析方法。事实上，目前对这种现象的本质的研究工作已经归入“损伤力学”学科，并愈来愈受到重视。希望著者目前所做的工作能对这个学科做出一点贡献。

1.1 疲劳过程

近年来，已有许多文献阐述了复合材料损伤机理研究的发展状况^[16~19]。著者在近期的研究工作中^[1,2]，根据一些损伤机理图，即疲劳-寿命图，对如何进行复合材料疲劳特性的评估提出了一个系统的指导性方案。疲劳-寿命图具有与众所周知的由Ashby建立的断裂机理图^[20]相同的性质。在文献^[3]中，著者综述了对复合材料疲劳损伤的基本认识，并讨论了疲劳-寿命图在对疲劳损伤进行全面综合分析中所起的

作用。

图1-1表明了单向复合材料在沿纤维方向拉伸载荷作用下,疲劳损伤的理想化示意图^[1]。与其对应的疲劳-寿命图如图1-2所示。图1-2给出了最大施加应变与对数疲劳破坏循环数的曲线关系。以复合材料破坏应变为中心线的分散带,对应于纤维断裂和由其引起的界面脱胶。从这个水平分散带延伸到代表疲劳极限的水平线之间的斜分散带,对应于基体开裂和界面剪切破坏。这里的疲劳极限是由达到 10^6 循环时,基体裂纹不扩展与扩展临界状态所对应的应变确定的。

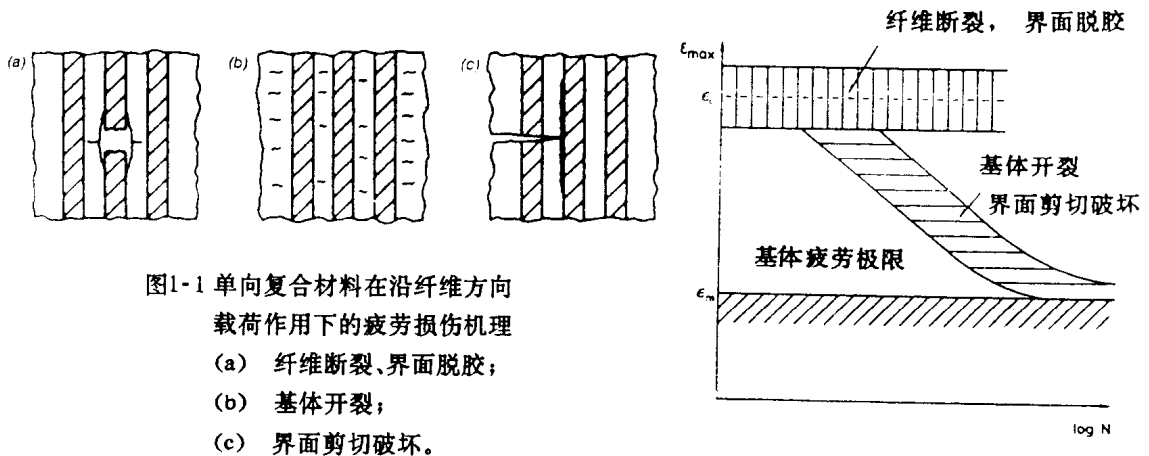


图1-1 单向复合材料在沿纤维方向
载荷作用下的疲劳损伤机理
(a) 纤维断裂、界面脱胶;
(b) 基体开裂;
(c) 界面剪切破坏。

图1-2 单向复合材料在沿纤维方向
载荷作用下的疲劳-寿命图

根据上述疲劳损伤机理假设,与纤维断裂相对应的分散带可取为一个水平分散带,即假设在疲劳过程中材料强度并不下降。若从损伤带扩展的角度进行解释,即认为这种损伤从疲劳寿命起始阶段直到最终破坏是不扩展的。疲劳损伤扩展是用斜分散带表示的。与其对应的主要损伤形式是基体开裂和界面剪切破坏。在低应变水平下,基体开裂是唯一起作用的疲劳损伤机理。把超过 10^6 循环仍能保持基体裂纹不扩展的最高应变水平取为疲劳极限(应变)。

应该强调说明的是,这里介绍的应用疲劳-寿命图来表示和分析损伤机理,在很大程度上还是一个初步尝试。建立在更为定量的模型基础上的图解分析,还需要研究一些由变化速率控制的参量。但是,对此目前还未进行充分的研究。

在本章文献^[1],即本书第二章中,首先根据一些试验数据证明了疲劳-寿命图在评估单向复合材料疲劳性能时的实用性。在疲劳-寿命图中,纤维刚度是解释各种损伤机理相互作用的一个参量。特别是对高模量石墨/环氧复合材料,在疲劳过程中很

少出现疲劳损伤这一点，至今未得到圆满的解释，而根据疲劳-寿命图，可以预料这正是纤维刚度因素起作用的结果。

在第二章中还讨论了单向复合材料在偏轴载荷作用下的疲劳问题。把混合型基体开裂看作起决定作用的疲劳损伤机理，叙述了疲劳-寿命图的演变，并通过图1-3解释了这种演变。疲劳极限随偏轴角的变化可以用Hashin和Rotem^[21]给出的数据进行解释。图1-4和图1-5表明，在对称角铺层板中，由于相邻层对基体开裂所产生的影响，疲劳极限将会提高。图中的试验数据取自Rotem和Hashin的报告^[22]。

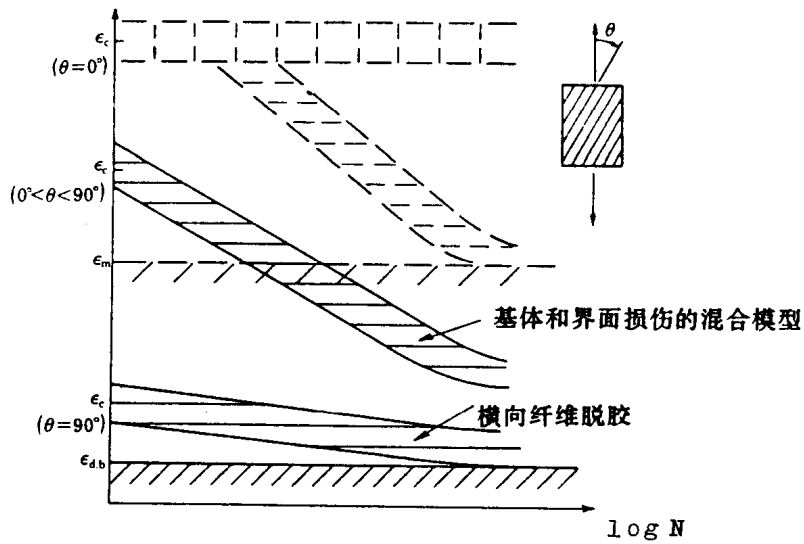


图1-3 单向复合材料偏轴疲劳的疲劳-寿命图
(虚线表示正轴疲劳-寿命图)

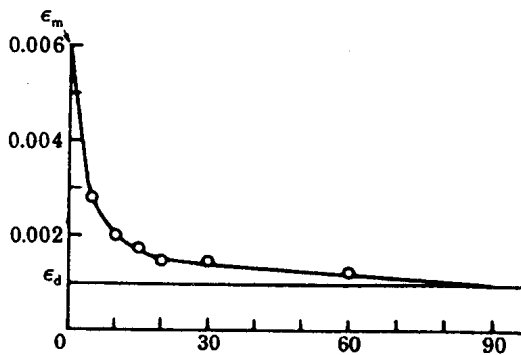


图1-4 单向复合材料疲劳极限随偏轴角变化图

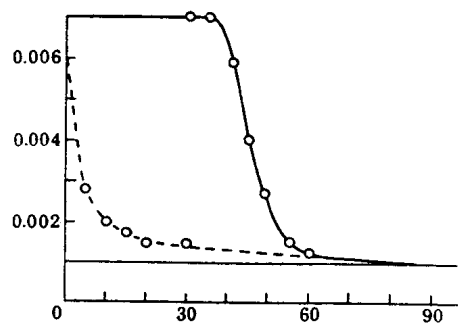


图1-5 对称角铺层板疲劳极限随纤维之间夹角的变化图
(虚线表示单向复合材料疲劳极限随偏轴角的变化图)

第二章紧接着也对正交层压板疲劳-寿命图进行了讨论。在正交层压板中,假设纵向层内纤维断裂损伤如同单向复合材料疲劳损伤一样是不扩展的损伤,而把横向层基体沿纤维开裂(横向纤维脱胶)以及随后发生的纵向层和横向层之间的分层看作是疲劳损伤的扩展机理。最后,分析了由 0° 、 45° 和 90° 层构成的层压板,并且发现其疲劳-寿命图与正交层压板具有同样的疲劳极限上限和下限。

第二章还提出了用应变表示的疲劳比的概念。疲劳比的定义是疲劳极限应变与静态断裂应变之比。这个比值对评定复合材料疲劳特性是一个非常有用的指标。这一章还给出了多种环氧基复合材料疲劳极限的典型值,供设计师使用参考。同时也讨论了基体特性在复合材料抗疲劳方面的作用。

在第三章^[2],把第二章给出的分析结果推广到象玻璃和玻璃-陶瓷基一类的脆性基体单向复合材料。在这一章中分别考虑了基体、纤维和界面的损伤机理,并从塑性基体和脆性基体两个角度讨论了它们之间的相对重要性,给出了脆性基体复合材料承受沿纤维方向载荷作用下的疲劳-寿命图。

图1-6说明了脆性基体复合材料疲劳-寿命图随纤维体积分含量的变化。纤维体积分含量按特征值 V_1 和 V_2 分为三个范围。 V_1 代表一个极限值,若低于这个值,只有应变达到基体本身的破坏应变时,基体才开始发生开裂; V_2 是另一个极限值,若超过这个值,基体开裂完全被纤维所抑制。图1-6所给图形表明了每个范围对应的疲劳-寿命图的典型特征。在第一范围内, $V_f < V_1$,强度下降受到纤维和基体的破坏应变的限制,并且不受纤维体积分含量影响。在第二个范围内, $V_1 < V_f < V_2$,引起基体多向开裂的起始应变 ϵ_{muc} 由纤维体积分含量确定,因而限制了强度下降的范围。在第三个范围内, $V_f < V_2$,不存在强度下降。

疲劳-寿命图的正确性在第三章也可以看到。由于制造工艺困难,脆性基体复合材料疲劳试验数据是很有限的。可能获得的石墨纤维增强玻璃弯曲疲劳试验数据都利用上了。可以发现疲劳-寿命图的一般特征由这些数据得到了证实。

第四章^[3]综述了对复合材料疲劳损伤机理研究的发展过程。同时强调了第二章和第三章提出的疲劳-寿命图在给出解释疲劳损伤机理概念框图方面的作用。

在结束本篇时,需要强调指出第二~四章所进行的工作是试图综合考虑建立一个疲劳过程的完整图形,该图形与单独损伤机理作用相联系。这一系列研究工作的成果之一是对复合材料疲劳特性的极限做出了解释。正如Kelly在文献^[3]中对复合材料原理的评述所指出的那样,虽然疲劳-寿命图不能提供寿命预测,但疲劳-寿命图为

寿命预估模型打下了理论基础。

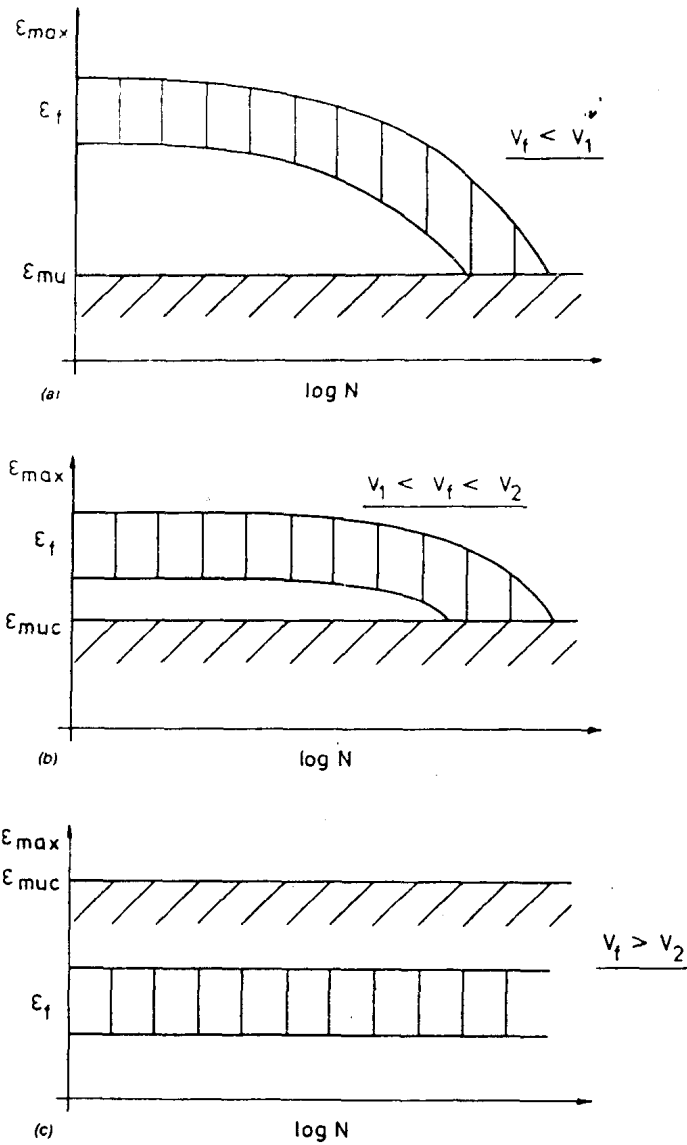


图1-6 脆性基体复合材料三个纤维体
积含量范围的疲劳-寿命图

1.2 疲劳损伤特征的描述

本节讨论复合材料疲劳损伤状态的描述方法及其与所有力学响应的关系。重点是复合材料刚度与内部损伤之间的关系。本书第五~八章^[4~7]将详细讨论这方面的内容。