



装备科技译著出版基金



ELSEVIER

新材料新能源学术专著译丛

Fatigue of Textile Composites

编织复合材料疲劳

[意]瓦尔特·卡维尔 (Valter Carvelli)

[比]斯蒂芬·V.洛莫夫(Stepan V. Lomov)

陈焱 译

编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

新材料新能源学术专著译丛

编织复合材料疲劳

Fatigue of Textile Composites

[意] 瓦尔特·卡维尔 (Valter Carvelli)

编著

[比] 斯蒂芬·V. 洛莫夫 (Stepan V. Lomov)

陈煊 译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2018-014 号

图书在版编目(CIP)数据

编织复合材料疲劳/(意)瓦尔特·卡维尔(Valter Carvelli),(比)斯蒂芬·V.洛莫夫(Stepan V. Lomov)编著;陈焯译. —北京:国防工业出版社,2019.6
(新材料新能源学术专著译丛)
书名原文:Fatigue of Textile Composites
ISBN 978-7-118-11724-0

I. ①编… II. ①瓦… ②斯… ③陈… III. ①复合材料—疲劳力学—研究
IV. ①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 093781 号

Atlas of Fatigue of Textile Composites, 1 edition.

Valter Carvelli and Stepan V. Lomov.

ISBN:9781782422815

Copyright © 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Authorized Chinese translation published by National Defense Industry Press.

《编织复合材料疲劳》陈焯译 ISBN:978-7-118-11724-0

Copyright © Elsevier Ltd. and National Defense Industry Press. All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or any information storage and retrieval system, without permission in writing from Elsevier (Singapore) Pte Ltd. Details on how to seek permission, further information about the Elsevier's permissions policies and arrangements with organizations such as the Copyright Clearance Center and the Copyright Licensing Agency, can be found at our website: www.elsevier.com/permissions.

This book and the individual contributions contained in it are protected under copyright by Elsevier Ltd. and National Defense Industry Press (other than as may be noted herein).

This edition of Fatigue of Textile Composites is published by National Defense Industry Press under arrangement with ELSEVIER LTD.

This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong, Macau and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本版由 ELSEVIER LTD. 授权国防工业出版社在中国大陆地区(不包括香港、澳门以及台湾地区)出版发行。

本版仅限在中国大陆地区(不包括香港、澳门以及台湾地区)出版及标价销售。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受民事及刑事法律之制裁。

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签,无标签者不得销售。

注意

本书涉及领域的知识和实践标准在不断变化。新的研究和经验拓展我们的理解,因此须对研究方法、专业实践或医疗方法作出调整。从业者和研究人员必须始终依靠自身经验和知识来评估和使用本书中提到的所有信息、方法、化合物或本书中描述的实验。在使用这些信息或方法时,他们应注意自身和他人的安全,包括注意他们负有专业责任的当事人的安全。在法律允许的最大范围内,爱思唯尔、译文的原文作者、原文编辑及原文内容提供者均不对因产品责任、疏忽或其他人身或财产伤害及/或损失承担责任,亦不对由于使用或操作文中提到的方法、产品、说明或思想而导致的人身或财产伤害及/或损失承担责任。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 28 插页 2 字数 514 千字

2019 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 148.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

译者序

由于认识到复合材料对结构的轻质化和模块化具有至关重要的作用,美国以及欧洲从 20 世纪 80 年代开始先后启动了复合材料在航空航天领域中的商业和技术应用计划(Technology Application to the Near-term Business Goals and Objectives of the Aerospace Industry, TANGO)、先进和低成本的机体结构计划(Advanced and Low Cost Airframe Structure, ALCAS)、先进复合材料技术计划(Advance Composite Technology)和经济可承受复合材料研究计划(Composite Affordable Initiative, CAI)等重大计划,通过这些计划的实施,极大地推动了复合材料设计水平和制造技术的进步,从而大幅提升了复合材料在航空工程结构设计中的应用,使复合材料成为一种成熟、稳定的航空材料,并与铝合金、合金钢、钛合金比肩,发展成为四大航空结构材料之一。

然而,尽管复合材料有着诸多优点,但是在安全方面,却仍然潜藏着不少隐患,尤其是对其疲劳问题的研究亟需完善,与其在工程中的重要地位极不相称。这主要是由于复合材料层压板的各项异性、脆性和非匀质性,特别是层间性能远低于层内性能的特征,使得复合材料的疲劳性能试验方法及理论分析与金属材料有很大差别,金属材料或结构的疲劳分析与方法往往不能直接用于复合材料上。另外,复合材料构件在制造、加工和运输过程中可能会受到外部环境等因素影响,而不同程度地存在各种缺陷或损伤,这些都制约了对复合材料疲劳性能的研究。可以说,复合材料疲劳从试验方法、试验手段、研究热点和难点均与传统材料的疲劳有很大的差异。从 20 世纪 80 年代以来,短短 30 多年,日本、美国以及欧洲地区的大学和研究机构建成了众多复合材料疲劳研究实验室,并开展了大量的试验研究工作,部分研究成果已经开始在高速列车、航空航天、核电站、风电等工业领域中获得应用。我国的复合材料疲劳研究尽管起步较晚但发展迅速,目前已成为世界上研究复合材料疲劳的几个主要国家之一。

本书从理论与实践结合的角度,系统总结了疲劳领域的研究成果。全书从试验理论与方法、疲劳机理、模型预测以及工程应用四个方面展开了详细的论述。本书内容丰富,重点突出,能够为从事复合材料疲劳问题研究的科研人员

提供指导和帮助。愿本书的出版对我国复合材料疲劳研究的快速发展起到积极的推动作用。

感谢装备科技译著出版基金及国防工业出版社的编辑们对本书的大力支持,感谢西安建筑科技大学的欧阳娜副教授对本书翻译工作的指导,感谢西北工业大学李玉龙教授,空军工程大学李应红院士、程礼教授、李全通教授、陈卫副教授和金涛讲师等同仁对本书的出版提供的许多帮助,感谢我的家人对我工作的鼓励与支持。

由于译者水平有限,书中不当与疏漏之处在所难免,恳请广大读者不吝指正。

陈煊

2019年1月

前言

结构件在服役寿命期间通常会承受循环载荷的作用,这些周期性加载降低了材料的力学性能。材料在循环加载作用下性能降低的现象称为“疲劳”。由疲劳产生的初始破坏和循环加载下裂纹的扩展或将对结构完整性产生严重的影响,即使在应力幅值小于材料实际强度的情况下,也会引发结构的失效。

众所周知,疲劳是一个工程问题。过去人们对金属材料和结构已经进行了广泛而深入的研究,目前,为减轻结构重量并提高力学性能,轻型结构主要采用连续纤维增强聚脂基复合材料。这是由于复合材料各向异性的力学性能在单位密度下会比金属材料更高,并且能根据不同的应用需求进行不同的设计。各向异性特征的复合材料力学性能取决于结构增强的方式,加大了对材料特征描述的难度。因此,复合材料在不同方向上循环加载的破坏机理就变得更为复杂,而且金属材料的疲劳理论也尚未发展成熟。

过去几十年中,关于复合材料的疲劳特性研究主要集中在单向复合材料层压板。此外,自动化和计算机控制技术的发展也促进了规模化生产,制造速度不断提升,都使得复合材料预制件具有较高的生产效率和良好的可购性,极具市场竞争力。目前,用于复合材料增韧的几何编织结构都具有良好的悬垂性,且功能多样,如二维和三维纤维结构,这对于制作复杂双曲型结构件尤为重要。考虑到复合材料在结构使用中的潜在作用,以及承受长期波动载荷的服役环境(如汽车、航空航天、航海和发电等),亟需对纤维编织复合材料的疲劳耐久性进行深入了解。

本书重点研究了纤维编织复合材料的疲劳力学性能,通过介绍几种不同的观点,回顾现有的不同尺度层面上的研究方法,概述了疲劳力学性能相关领域的最新进展,并探讨了二维和三维纤维编织复合材料的试验测量、断口观察和数值预测。最后介绍了编织复合材料在特殊环境结构中的应用情况。

本书分为四部分,分别从宏观、细观和微观的不同层面上,整合了人们对纤维编织复合材料疲劳性能的认识。

第一部分综述了复合材料疲劳力学性能研究的一些基本理论,为编织复合材料的研究提供理论框架。该部分汇总了在工程领域中相对于金属材料而言的一些常用概念,尤其是具有各向异性特征的复合材料层压板在疲劳方面的一

些重要概念。此外,这部分还包括试验测试方法和许多现有的大型试验数据库。

第二部分提出了研究纤维增强复合材料疲劳特性的必要基础,即纤维本身的力学行为和单向纤维增强复合材料的力学行为。前者主要介绍纤维本身的疲劳性能,这对于研究复合材料的疲劳性能至关重要,而后者在复合材料的建模和设计中都是一个必要的输入参数。

第三部分收集了二维和三维的玻璃纤维和碳纤维增强复合材料的疲劳力学性能的试验数据,其中,重点分析了试验加载条件、环境因素以及宏、微观尺度对材料损伤发展的影响,同时也探讨了三维编织结构对材料疲劳力学性能的影响,并将其与二维的层压板结构进行了比较。另外,该部分还介绍了有关编织复合材料疲劳力学性能建模的最新研究成果。尽管对复合材料层压板已有一些成熟的研究方法,但在如何建立细观模型上仍然存在着争论,还需进一步商榷。这些章节中所提到的方法仅代表编者的个人观点,但对该领域的研究仍不失为一种较客观的评述。

第四部分概述了编织复合材料在实际工程中的多种应用,在这些应用中,疲劳都被作为一种重要的设计标准,尤其在航空航天、汽车、风能和建筑工程的应用中,重点阐述了编织复合材料的疲劳寿命预测和损伤失效分析。本书在这一部分着重强调了建模、测试和细观损伤监测三者协同作用的设计方法。

目前,随着复合材料在工程结构中的广泛应用和快速发展,对复合材料疲劳性能的研究显得尤为迫切。本书拟填补该领域的出版空白,为今后的研究提供参考。

V. Carvelli

意大利米兰理工大学

S. V. Lomov

比利时鲁汶大学

目 录

第一部分 概念和方法

第 1 章 复合材料耐久性研究的概念框架

1.1	引言与背景	003
1.2	材料的耐久性基础	004
1.2.1	恒时加载	004
1.2.2	时变加载	005
1.3	疲劳耐久性的概念框架	006
1.3.1	疲劳寿命图	007
1.3.2	单向纤维增强复合材料疲劳的概念解释	012
1.3.3	基本疲劳寿命图的变化	015
1.4	将标准疲劳寿命图扩展到层压板和其他纤维编织结构	019
1.5	疲劳寿命预测模型	022
1.5.1	统计变量	022
1.5.2	建立失效机制的动力学模型	022
1.6	结语	023
	参考文献	023

第 2 章 复合材料高周循环疲劳建模的循环跳跃概念

2.1	简介	026
2.2	什么是唯象残余刚度模型?	027
2.3	循环跳跃概念	029
2.3.1	典型残余刚度模型的选择	029
2.3.2	采用固定周期跳跃法分析剩余刚度的半解析模型	030
2.3.3	自适应周期跳跃概念	038
2.4	循环周次跳跃概念的有限元方法	039
2.4.1	背景	039

2.4.2	局部循环跳跃 NJUMP1 的测定	040
2.4.3	整体周期跳跃值 NJUMP 的确定	040
2.4.4	结果讨论	043
2.5	结 论	046
2.6	未来发展趋势及面临的挑战	047
	参考文献	047

第3章 纤维增强复合材料的疲劳试验方法与标准

3.1	简介	049
3.2	AFNOR:法国国家标准化组织(法国标准化协会)	051
3.2.1	基本原则和弯曲试验	051
3.2.2	三点弯曲和四点弯曲疲劳试验	052
3.2.3	正交平面弯曲试验	052
3.2.4	屈曲试验	053
3.3	ISO:国际标准化组织	053
3.3.1	ISO 13003:2003:循环载荷条件下疲劳性能的测量	053
3.4	JIS:日本工业标准	054
3.4.1	JIS K 7082-93:碳纤维增强复合材料完全反向平面弯曲 疲劳试验方法	054
3.4.2	JIS K 7083-93:碳纤维增强复合材料在恒定拉伸-拉伸 载荷幅值作用下的疲劳试验方法	055
3.5	ASTM:美国材料与测试协会	056
3.5.1	ASTM D6115-97(2011):单向纤维增强聚合物基复合 材料的 I 型疲劳分层扩展标准试验方法	056
3.5.2	ASTM D6873 / D6873M-08:聚合物基复合材料层压板 支板疲劳试验标准	056
3.5.3	ASTM D3479 / D3479M-12:聚合物基复合材料拉伸疲 劳的标准试验方法	058
3.5.4	ASTM D7615/D7615 -11:聚合物基复合材料层压板开 孔疲劳响应的标准	058
3.5.5	ASTM C394/ c394m-13:夹芯层压板剪切疲劳的标准 试验方法	058
3.5.6	ASTM D6856 / D6856M-03(2008):织物增强的“编织” 复合材料试验标准指南	058
3.6	讨论	059

参考文献	060
------------	-----

第4章 复合材料疲劳分析数据库

4.1 简介	063
4.2 FACT 数据库	064
4.3 OptiDat 数据库	065
4.4 SNL / MSU / DOE 数据库	067
4.5 总结	068
参考文献	069

第二部分 微观疲劳

第5章 对碳、玻璃和其他纤维的疲劳分析

5.1 纤维疲劳引言	073
5.1.1 单纤维疲劳行为分析的重要性	073
5.1.2 有关纤维疲劳特性的可靠数据:一个挑战	074
5.1.3 疲劳强度的概念	075
5.2 表征纤维疲劳性能的试验方法	075
5.2.1 单纤维试验	075
5.2.2 纤维束的试验	076
5.3 玻璃纤维疲劳分析	077
5.4 碳纤维疲劳分析	079
5.5 其他类型纤维的疲劳分析	081
5.5.1 天然纤维	081
5.5.2 芳纶纤维	083
5.5.3 其他类型的纤维	083
5.6 纤维和纤维束的疲劳强度模型	085
5.7 环境因素对疲劳的影响	086
5.7.1 环境影响:真空	086
5.7.2 湿度	086
5.7.3 温度	086
5.8 结论和未来面临的挑战	087
参考文献	088

第6章 单向层压板的多轴疲劳:一种自上而下的试验的方法

6.1 引言	092
6.2 自下而上的策略与自上而下的方法	094
6.3 与失效模式相关的疲劳模型	095
6.3.1 材料定义、试验设置及参数识别	099
6.3.2 试验模型的验证	106
6.4 应用	108
6.5 结论和展望	109
参考文献	110

第7章 单向层压板在多轴疲劳载荷作用下的裂纹萌生模型

7.1 引言	113
7.2 疲劳失效的特点	115
7.3 局部应力计算	117
7.4 验证	118
7.5 恒定寿命图	126
7.6 结论	127
参考文献	128

第三部分 不同编织复合材料的疲劳特性与建模

第8章 不同类型和不同环境条件下承受疲劳载荷作用的二维编织复合材料

8.1 引言	133
8.2 应力比效应	137
8.2.1 $S-N$ 曲线	137
8.2.2 疲劳数据应力比相关的可视化	138
8.2.3 各向异性 CFL 图	139
8.2.4 试验和理论 CFL 图	141
8.3 温度效应	142
8.3.1 在不同温度下的 $S-N$ 曲线	142
8.3.2 $S-N$ 曲线的温度相关性	144
8.3.3 不同温度下的各向异性 CFL 图	145

8.4	单向/交叉层压板和碳纤维编织复合材料的 $S-N$ 曲线之间的比较	147
8.5	纤维取向效应	148
8.5.1	室温下的离轴 $S-N$ 曲线	148
8.5.2	在室温下正态离轴 $S-N$ 曲线	149
8.5.3	高温下的离轴 $S-N$ 曲线	150
8.5.4	频率的影响	153
8.6	温度效应建模	154
8.6.1	温度相关的各向异性 CFL 图	154
8.6.2	静态强度的温度相关性	155
8.6.3	参考 $S-N$ 曲线的温度相关性	156
8.7	R 比变化的影响	160
8.7.1	变 R 比对疲劳寿命的影响	161
8.7.2	Palmgren-Miner 假设	162
8.8	结语	163
8.8.1	应力比的影响	163
8.8.2	温度的影响	163
8.8.3	温度和 R 比相关性的建模(轴向疲劳)	164
8.8.4	纤维取向的影响	164
8.8.5	变应力比的影响	164
8.8.6	未来趋势	165
	致谢	165
	参考文献	165

第9章 二维编织复合材料的疲劳响应和损伤演化

9.1	简介	170
9.2	试验方案	172
9.3	静态载荷作用下的缺口灵敏度	173
9.4	材料对循环载荷的响应	174
9.5	循环载荷作用下的损伤演化	179
9.5.1	普通材料的宏观损伤演化	180
9.5.2	材料的微观损伤演化	181
9.5.3	含孔的微观损伤演化	184
9.6	裂纹密度曲线	189
9.7	结论	191

参考文献	192
------------	-----

第 10 章 3D 编织复合材料的疲劳损伤演化

10.1 引言	196
10.2 疲劳试验细节	198
10.3 单层非卷曲 3D 正交编织 E 玻璃/环氧树脂复合材料	198
10.3.1 材质特性和准静态特性	198
10.3.2 疲劳寿命	201
10.3.3 损伤的观察和演化	204
10.3.4 疲劳后力学性能	207
10.4 3D 旋转编织碳/环氧复合材料	209
10.4.1 材料特性和准静态特性	209
10.4.2 疲劳寿命	211
10.4.3 损伤观察和演化	212
10.4.4 疲劳后力学性能	214
10.5 非卷曲针织碳/环氧树脂复合材料	215
10.5.1 材料特性和准静态特性	215
10.5.2 疲劳寿命	217
10.5.3 损伤的观察和演化	218
10.5.4 疲劳后力学性能	221
10.6 结论	222
10.7 未来的挑战	223
致谢	223
参考文献	223

第 11 章 三维编织增强复合材料的疲劳性能

11.1 引言	226
11.2 三维编织复合材料的疲劳性能	228
11.3 针织复合材料的疲劳性能	230
11.4 z-锚固编织复合材料的疲劳性能	235
11.5 z-销型复合材料的疲劳性能	235
11.6 总结	239
参考文献	239

第 12 章 非卷曲编织复合材料的疲劳

12.1 引言	246
12.2 NCF 复合材料	246
12.2.1 NCF	246
12.2.2 NCFs 的结构特性	248
12.2.3 NCF 复合材料的力学性能	249
12.3 NCF 复合材料的疲劳	250
12.3.1 疲劳寿命	252
12.3.2 刚度降低	254
12.3.3 损伤发展	256
12.3.4 NCF 的影响参数	258
12.4 总结	260
参考文献	261

第 13 章 编织复合材料层压板的疲劳模型

13.1 引言	265
13.2 疲劳模型的分类	267
13.3 疲劳模型和寿命预测方法的综述	269
13.3.1 疲劳寿命模型	269
13.3.2 预测剩余刚度/强度的唯象模型	270
13.3.3 力学渐进损伤模型	271
13.4 现有疲劳模型的工业应用挑战	272
13.4.1 纵向刚度以外弹性性能的降低	273
13.4.2 变幅加载	279
13.4.3 模型参数的复杂识别	280
13.4.4 环境条件和预损伤的影响	282
13.5 疲劳损伤多尺度模型的可行性	283
13.5.1 编织复合材料的介观尺度建模	283
13.5.2 微观力学疲劳失效准则的定义	285
13.5.3 元分层和层间分层	285
13.6 结论	286
13.7 未来的趋势和挑战	287
13.8 未来发展趋势和建议的来源	287
参考文献	287

第 14 章 编织复合材料单胞模型的高周疲劳性能

14.1 简介:编复合材料单胞模型高周疲劳的一般方法	294
14.2 编织复合材料的疲劳模型	296
14.2.1 介观有限元模型和准静态载荷分析	297
14.2.2 微观疲劳分析	299
14.2.3 实施	305
14.3 编织复合材料的疲劳建模实例	307
14.3.1 材料和输入数据	307
14.3.2 结果	308
14.4 结论	311
致谢	311
参考文献	311

第四部分 应 用

第 15 章 航空应用中碳纤维编织复合材料的疲劳试验和在线检测

15.1 引言	317
15.2 材料和方法	319
15.3 静态特性	320
15.3.1 试验结果	321
15.3.2 介观尺度建模	323
15.4 疲劳特征	325
15.4.1 拉伸-拉伸疲劳	326
15.4.2 剪切为主的疲劳	331
15.4.3 弯曲疲劳	334
15.5 结论	340
15.6 未来的趋势和挑战	340
参考文献	341

第 16 章 汽车行业使用的编织复合材料

16.1 引言	343
16.2 车用复合材料轻量化设计	345
16.2.1 方法和挑战	345

16.2.2	要求	346
16.2.3	多维材料和混合设计	348
16.3	车用编织复合材料部件的生产	350
16.3.1	预成型编织体	350
16.3.2	混合结构的制造	352
16.4	汽车系列产品的疲劳问题	354
16.5	多维材料的疲劳问题	355
16.6	结论	357
	参考文献	357

第 17 章 用于风能工程的编织复合材料的疲劳寿命

17.1	引言	361
17.1.1	基本材料	362
17.1.2	疲劳损伤	362
17.2	基本材料	363
17.2.1	基本知识	363
17.2.2	纤维	364
17.2.3	浆纱	365
17.2.4	基体	366
17.3	编织物结构	368
17.3.1	编织物结构	368
17.3.2	复合材料结构	369
17.4	疲劳方法	371
17.4.1	结构上的疲劳载荷	371
17.4.2	均布加载	372
17.4.3	应力比和加载顺序	373
17.4.4	疲劳力学性能测试	374
17.4.5	应力循环曲线	376
17.4.6	疲劳设计方面	377
17.4.7	恒定寿命图	378
17.4.8	损伤累积	380
17.5	编织物的疲劳特性	381
17.5.1	总体趋势	381
17.5.2	试验研究	382
17.5.3	损伤研究	383

17.5.4 损伤顺序	387
17.6 叶片设计概念	389
17.7 风能工程中复合材料未来面临的挑战	391
参考文献	392

第 18 章 建筑工程:胶粘编织复合材料的疲劳寿命预测

18.1 引言	394
18.2 FRP 编织复合结构部件在土木工程中的应用	400
18.3 胶接接头的试验研究和建模	405
18.4 疲劳寿命的建模与预测	414
18.4.1 经典的疲劳寿命预测	414
18.4.2 基于断裂力学的疲劳寿命预测	418
18.5 结论	427
参考文献	428