

聚合物基复合材料 构件失效分析基础

Failure Analysis Basics for
Polymer Matrix Composite Components

范金娟 程小全 陶春虎 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

聚合物基复合材料 构件失效分析基础

**Failure Analysis Basics for Polymer Matrix
Composite Components**

范金娟 程小全 陶春虎 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评

审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员	刘成海			
副主任委员	宋家树	蔡 锺	程洪彬	
秘书长	程洪彬			
副秘书长	邢海鹰	贺 明		
委 员	于景元	才鸿年	马伟明	王小谟
(按姓氏笔画排序)				
	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	邬江兴
	刘世参	芮筱亭	李言荣	李德仁
	李德毅	杨 伟	肖志力	吴有生
	吴宏鑫	何新贵	张信威	陈良惠
	陈冀胜	周一宇	赵万生	赵凤起
	崔尔杰	韩祖南	傅惠民	魏炳波

序 言

聚合物基复合材料具有高的比强度、比刚度,破损安全性好,可设计性强,在航空航天领域得到了广泛应用,现已成为航空航天领域使用的四大结构材料之一。由于受树脂、纤维与工艺的影响,复合材料出现缺陷的概率较大,复合材料结构特别是层合结构对实际工程中很难避免的冲击损伤比较敏感。近年来,相继发生了多起复合材料制件失效与故障,原因既涉及到复合材料制件的设计,也涉及到复合材料中的缺陷及其损伤。因此,对于工程技术人员而言,只有在把握聚合物基复合材料的缺陷、损伤类别与特征、缺陷损伤演化规律的基础上,才能对聚合物基复合材料的缺陷损伤及失效进行有效的控制。然而迄今为止,国内外尚未有系统介绍聚合物基复合材料的缺陷、损伤与失效分析的专著。

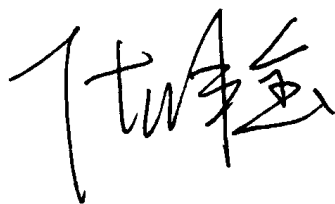
本书在简要介绍聚合物基复合材料特性与应用领域的基础上,阐述了聚合物基复合材料的缺陷与损伤的类别与特征、根源、检测方法及预防措施,系统介绍了聚合物基复合材料最基本的结构单元——复合材料层压板在静载、冲击载荷、冲击后静载及湿热环境下的损伤演化与失效行为,并给出了树脂基复合材料层压板在冲击载荷及冲击后静载作用下损伤演化与失效行为的计算机模拟技术、疲劳寿命预测模型。本书还结合工程上聚合物基复合材料的故障,给出了聚合物基复合材料失效分析方法与相关预防措施。本书虽主要针对聚合物基复合材料层压板,但其方法同样适用于其他复合材料及其结构。

本书关于聚合物基复合材料及其层压板缺陷损伤的基础性研

究,填补了国内在该研究领域的空白,有力地推动了复合材料损伤特征研究的深入化与系统化;本书关于复合材料失效分析的研究,有利于复合材料结构质量的提高和航空航天等武器装备使用安全可靠性的提高。

本书是目前国内外第一部系统介绍聚合物基复合材料缺陷、损伤与失效行为的专著,学术思想新颖,内容具体实用。它将不仅成为从事复合材料结构设计人员、生产人员与检测人员的重要参考书,也可供从事复合材料失效分析和维修人员参考。

本书的出版对提高我国聚合物基复合材料的研制、应用和维修水平具有极其重要的参考价值,对提高我国武器装备的安全可靠性有积极的促进作用。



2010 年 10 月

前 言

聚合物基复合材料又称树脂基复合材料,具有优异的性能,在航空航天领域得到了广泛应用,最大限度地采用复合材料结构,是航空航天飞行器发展的总趋势,其安全可靠使用对国防武器装备尤为重要。近年来相继发生的复合材料结构失效与故障,引起了复合材料设计、应用及维修部门对复合材料缺陷损伤问题的高度重视。

鉴于聚合物基复合材料在国防武器装备上的重要性,以及国内外对聚合物基复合材料缺陷与损伤,尤其是聚合物基复合材料工程应用中出现的缺陷、损伤的研究尚未系统地报道,本书作者在对聚合物基复合材料构件的故障分析与预防进行了大量系统研究的基础上撰写了本书。本书介绍的聚合物基复合材料层压板缺陷、损伤与失效行为的研究方法,同样也适用于其他聚合物基复合材料及其结构。

本书共分8章。第1章简要介绍了聚合物基复合材料的特性及其应用情况。第2章从工程实践角度出发,介绍了聚合物基复合材料常见缺陷与损伤的类别与特征、检测方法与预防措施。第3章主要介绍了聚合物基复合材料层压板在静载作用下的损伤演化与失效行为。第4章主要介绍了聚合物基复合材料层压板在冲击载荷与冲击后静载作用下的损伤演化与失效行为。第5章详细介绍了聚合物基复合材料层压板在湿热环境下的损伤机理、湿热环境下复合材料的性能变化与复合材料的日历寿命。第6章主要介绍了聚合物基复合材料层压板的疲劳损伤特性、损伤扩展及疲

劳累积损伤理论与疲劳寿命预测模型。第7章主要介绍了复合材料制件失效分析的技术与方法及目前复合材料制件失效的主要原因。第8章具体给出了几个聚合物基复合材料制件的工程应用失效案例。

本书第1章由陶春虎撰稿,第2章由范金娟撰稿,第3章、第4章由范金娟和程小全撰稿,第5章由范金娟和陈新文撰稿,第6章由程小全撰稿,第7章与第8章由范金娟、陶春虎撰稿。全书由陶春虎、范金娟统稿。

本书是集体智慧的结晶,凝聚着几十名科研人员长达5年多的研究成果。我国著名复合材料专家赵稼祥研究员和杨乃宾教授对本书内容进行了审阅,并对一些内容提出了具体的修改意见。中国航空工业集团公司失效分析中心赵旭、姜涛、李春光、侯学勤等人在聚合物基复合材料制件的分析技术方法及案例分析中付出了辛勤的劳动。作者向为本书出版作出贡献的所有科技工作者致以衷心的感谢。愿本书的出版能对我国复合材料结构的设计、制造、检测、维修和使用安全可靠性的提高起到积极的推动作用。

由于作者水平的限制以及国内外相关资料的欠缺,本书的缺点在所难免,恳请读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 复合材料定义和分类	1
1.2 聚合物基复合材料的特性	4
1.3 聚合物基复合材料的应用	7
1.4 复合材料层压板	10
1.5 复合材料失效分析	13
参考文献	14
第 2 章 聚合物基复合材料常见缺陷和损伤	15
2.1 缺陷与损伤的基本类型和特征	16
2.1.1 常见缺陷	16
2.1.2 常见损伤	22
2.1.3 常见缺陷与损伤的来源	28
2.2 缺陷与损伤的无损检测技术	30
2.2.1 目视检测	30
2.2.2 敲击法检测	31
2.2.3 超声检测	32
2.2.4 射线检测	35
2.2.5 声发射检测	36
2.2.6 全息干涉检测	38
2.2.7 无损检测新技术的发展	39
2.2.8 无损检测方法的选择	41
2.3 缺陷与损伤的破坏检测技术	43
2.4 缺陷与损伤的预防	45

2.4.1	工艺	45
2.4.2	设计与工艺结合	49
	参考文献	51
第3章	复合材料层压板静载作用下的失效行为	52
3.1	拉伸失效行为	52
3.1.1	拉伸载荷—位移曲线	52
3.1.2	拉伸强度与模量	52
3.1.3	拉伸失效特征	54
3.2	压缩失效行为	59
3.2.1	压缩载荷—位移曲线	59
3.2.2	压缩强度与模量	60
3.2.3	压缩失效特征	61
3.3	弯曲失效行为	65
3.3.1	弯曲载荷—位移曲线	65
3.3.2	弯曲强度与模量	65
3.3.3	弯曲失效特征	66
3.4	剪切失效行为	68
3.4.1	剪切载荷—位移曲线	68
3.4.2	剪切强度与模量	69
3.4.3	剪切失效特征	70
3.5	失效行为的影响因素	72
	参考文献	74
第4章	复合材料层压板冲击载荷下的损伤演化与失效	75
4.1	层压板在不同应变率下的失效	75
4.1.1	高应变率试验	75
4.1.2	不同铺层层压板的应变率响应	77
4.2	低速冲击损伤演化	84
4.2.1	低速冲击试验	84
4.2.2	低速冲击载荷历程	86

4.2.3	不同冲击能量产生的损伤形貌	88
4.2.4	冲击损伤演化模拟	90
4.3	高速冲击损伤演化	102
4.3.1	高速冲击试验方法	102
4.3.2	高速冲击损伤及其扩展	103
4.4	含损伤层压板在静载作用下的失效	105
4.4.1	拉伸	105
4.4.2	压缩	108
	参考文献	113
第 5 章	复合材料层压板在湿热环境下损伤演化与失效	115
5.1	湿热老化分析方法	115
5.2	湿热环境下损伤与失效机理	124
5.2.1	物理变化	124
5.2.2	化学变化	129
5.3	湿热环境对材料性能的影响	131
5.4	典型树脂基复合材料湿热环境下的损伤与失效	135
5.5	复合材料构件的日历寿命	140
	参考文献	142
第 6 章	复合材料的疲劳损伤与失效	144
6.1	复合材料层压板的疲劳特性	145
6.1.1	层压板的疲劳损伤机理	145
6.1.2	层压板疲劳性能影响因素	149
6.2	含损伤复合材料层压板的疲劳损伤与失效	152
6.2.1	含孔层压板的疲劳损伤扩展与失效	152
6.2.2	含低速冲击损伤层压板的疲劳扩展与失效	155
6.3	复合材料层压板疲劳累积损伤理论	157
6.4	复合材料层压板疲劳寿命累积损伤估算方法	159
6.4.1	Miner 累积损伤理论	159
6.4.2	相对 Miner 累积损伤理论	159

6.5	复合材料层压板剩余刚度模型	160
6.5.1	无孔板疲劳损伤模型	160
6.5.2	含孔层压板疲劳损伤模型	163
6.6	复合材料层压板疲劳模量模型	164
6.6.1	单向层压板疲劳寿命模型	164
6.6.2	多向层压板疲劳寿命分析	168
	参考文献	170
第7章	复合材料制件的失效分析技术与方法	172
7.1	复合材料失效分析程序	172
7.2	常用的失效分析方法	178
7.2.1	清洗方法	178
7.2.2	目视检查	178
7.2.3	无损检测	179
7.2.4	材料特性	180
7.2.5	力学性能测试	183
7.2.6	断口观察	184
7.2.7	应力分析	185
7.3	复合材料构件失效原因	186
7.3.1	结构工艺性	186
7.3.2	协调变形与突发载荷	187
7.3.3	弱结合的使用与评估	187
7.3.4	复合材料构件验收	188
7.3.5	使用与维护	188
7.3.6	沟通与合作	189
7.3.7	对复合材料失效的认识不够	189
	参考文献	190
第8章	复合材料制件典型失效案例分析	192
8.1	飞机进气道调节板壁板前缘断裂分析	192
8.2	飞机平尾后缘断裂分析	194

8.3	直升机涵道尾桨叶鼓包变形分析	196
8.4	蜂窝结构件脱粘失效	202
8.5	大型复合材料件表面涂层系统有限元分析	208
	参考文献	217

Contents

Chapter1	Introduction	1
1.1	Definition and classification of composites	1
1.2	Characteristics of polymer matrix composites	4
1.3	Application of polymer matrix composites	7
1.4	Composite laminate	10
1.5	Failure analysis of composites	13
	References	14
Chapter2	Common defects and damage of polymer matrix composite	15
2.1	Basic class and characteristics of defects and damage	16
2.1.1	Common defects	16
2.1.2	Common damage	22
2.1.3	Causes of common defects and damage	28
2.2	Non destructive testing of defects and damage	30
2.2.1	Visual testing	30
2.2.2	Coin-tap testing	31
2.2.3	Ultrasonic testing	32
2.2.4	Radiographic testing	35
2.2.5	Acoustic emission testing	36
2.2.6	Holography testing	38
2.2.7	Future of non destructive testing	39
2.2.8	Selection of non destructive testing	41
2.3	Destructive testing of defects and damage	43
2.4	Prevention of defects and damage	45

2. 4. 1	Technology	45
2. 4. 2	Combination of design and technology	49
	References	51
Chapter3 Failure of composite laminates under static load		
		52
3. 1	Tensile failure behavior	52
3. 1. 1	Tensile loading-displacement curve	52
3. 1. 2	Tensile strength and module	52
3. 1. 3	Characteristics of tensile failure	54
3. 2	Compression failure behavior	59
3. 2. 1	Compression loading-displacement curve	59
3. 2. 2	Compression strength and module	60
3. 2. 3	Characteristic of compression failure	61
3. 3	Bending failure behavior	65
3. 3. 1	Bending loading-displacement curve	65
3. 3. 2	Bending strength and module	65
3. 3. 3	Characteristic of bending failure	66
3. 4	Shearing failure behavior	68
3. 4. 1	Shearing loading-displacement curve	68
3. 4. 2	Shearing strength and module	69
3. 4. 3	Characteristic of shearing failure	70
3. 5	Effect factors of failure behavior	72
	References	74
Chapter4 Damage and failure of composite laminates under impact load		
		75
4. 1	Failure of composite laminates under different strain rates	75
4. 1. 1	High strain rate tests	75
4. 1. 1	Strain rate response of composite laminates	77
4. 2	Damage propagation under low velocity impact	84
4. 2. 1	Low velocity impact tests	84
4. 2. 2	Load course of low velocity impact	86

4. 2. 3	Damage characteristics under different impact energy	88
4. 2. 4	Simulation of impact damage propagation	90
4. 3	Damage propagation under high velocity impact	102
4. 3. 1	High velocity impact tests	102
4. 3. 2	Damage and propagation under high velocity impact load	103
4. 4	Failure of laminates with impact damage under static load	105
4. 4. 1	High velocity impact tests	105
4. 4. 2	High velocity impact tests	108
References		113

Chapter5 Damage and failure of composite laminates under hygrothermal environment

5. 1	Analysis method of hygrothermal aging	115
5. 2	Damage and failure mechanism under hygrothermal environment	123
5. 2. 1	Physical change	124
5. 2. 2	Chemical change	129
5. 3	Effects of hygrothermal environment on material properties	131
5. 4	Damage and failure of polymer matrix composites under hygrothermal environment	135
5. 5	Calendar life of composite components	140
References		142

Chapter6 Fatigue damage and failure of composites

6. 1	Fatigue characteristics of composite laminates	145
6. 1. 1	Fatigue damage mechanism of laminates	145
6. 1. 2	Effect factors of laminates fatigue	149
6. 2	Fatigue damage and failure of composite laminates with damage	152
6. 2. 1	Fatigue damage propagation and failure of laminates with	