

复合材料无损检测与评定

余南廷 陈积懋 编著

中国航空学会

1997.1

复合材料无损检测与评定

余南廷 陈积懋 编著

江苏工业学院图书馆
藏书章

中国航空学会

1997.1

内 容 简 介

近 20 年来,新兴的复合材料得到了广泛的应用,在航宇工业中已成为先进飞行器中必不可少的关键材料,在汽车、造船、建筑、自行车、运动器材等民用工业中也已得到大量应用。但复合材料的制造工艺使产品的机械性能不可避免地存在较大的差异,因此,应用无损检测技术保证产品质量已成为复合材料不断扩大应用的突出问题。由于复合材料的固有特点,它的无损检测与金属材料结构迥然不同,已形成了新的技术领域。

本书针对复合材料无损检测的特点,讨论了超声、射线等常规技术在复合材料工件检测中遇到的新问题和解决办法。对为适应复合材料检测而迅速发展起来的非常规技术和新技术更作了重点介绍,其中包括:声振检测和声成像、声发射、声-超声、全息照相、红外等各项技术。对它们在复合材料无损检测应用中的优点和局限性、实施方法、设备选择作了切合实际的介绍,使读者能有一个既全面而又具体的了解,以便根据实际情况,各自合理选择和运用这些检测方法。

本书在介绍检测原理时注意了物理概念的说明,避免过多的公式推导。常规技术的检测原理只就复合材料检测应用中有特殊关系的部分作了简要说明;声振、声-超声、红外等主要用于复合材料的非常规检测技术,则对其检测原理作了必要的较具体的介绍。全书的取材力求实用,适合于从事无损检测工作技术人员、工人和管理人员阅读,也可供大专院校和有关的专业人员参考。

复合材料无损检测与评定

中国航空学会

责任编辑 崔连信 温季华

1997 年 1 月第 1 版

1997 年 1 月第 1 次印刷

787×1092 mm 1/16

字数:335 千字

内部发行

定价:38.85 元

前 言

近二十多年来,先进的纤维增强复合材料在新材料结构中异军突起,获得了广泛的应用,在航空、航天等工业领域中的发展势头更为迅猛。正是由于这样的形势,尤其是复合材料结构开始在关键受力部位的应用,已向保证产品质量的无损检测技术提出了严峻的挑战,使得无损检测技术成为这一新型构件能否有效应用和继续扩大应用的关键所在。

由于纤维增强复合材料的各向异性,呈现出许多与金属材料不同的特点,在检测过程中会出现检测金属材料时不曾遇到过的特殊问题,使复合材料的无损检测逐渐形成一项不同于常规无损检测技术的新的独立分支。

国外已有较多的专著论述这个问题,但国内至今还没有出版过一本较为系统和实用的参考书。这就是我们编著这本书的出发点,希望它能在我国迅速发展这一新型材料和结构的浪潮中发挥应有的作用。

本书的编写依据是作者多年的工作实践和国内同行大量的经验总结;在编写过程中还广泛搜集了国外的有关资料,结合我国国情注意吸收行之有效的先进技术。在此基础上,力求全书的系统化和实用化。

由于近一二十年来复合材料无损检测新技术的不断涌现,以及被检构件的日趋复杂,即使是一种构件,也很难由单一的一种检测技术包揽全部检测任务;相反,经常需要用几种技术相互补充。因而,在全书的编写过程中强调了综合性和成套性,对各种技术的适用性和局限性力求作出客观的分析比较,便于读者选择和综合运用。

在各种技术的介绍中,力求物理概念清晰,避免过多的数学推导。在取材上,着重复合材料检测的特色,对常规无损检测技术的介绍务求简捷;着重技术的先进性,对有发展前景的新检测技术尽量提供具体实用的方法和数据,以求为在复合材料无损检测实践中遇到困难的工程技术人员提供行之有效的方法和启迪。

本书的编写是在我们共同讨论了整体构想、搜集素材、确定章节和内容的要点后,分工执笔撰写的。撰写过程中又多次互校、互审,讨论修改、补充,力求以最少的篇幅容纳较多的实用信息。具体分工是:第一章绪论、第三章声振检测与声成像技术、第五章声发射检测、第七章热学检测、第十章总结与前景由陈积懋执笔;第二章超声检测、第四章射线检测、第六章声-超声检测、第八章全息照相和其他光学方法、第九章其他无损检测方法由余南廷执笔。

在本书的编写过程中得到了中国航空工业总公司王惠杰的大力支持,并对全书进行了审阅;还得到了中国航天工业总公司第703研究所金周庚、蒋福棠,成都飞机工业公司朱建堂,中国航空工业总公司第625研究所宋秀荣、刘松平,上海航天局第810研究所陈金根,上海玻璃钢研究所陶恒等有关专家的大力支持,或提供宝贵素材,或对全书的编写提出宝贵意见,在此特致谢意!

限于编著者的水平,书中一定会有不少缺点和错误,恳请读者不吝指正。

作者

1996年3月

目 录

第一章 绪 论	(1)
一、引言	(1)
二、复合材料可靠性分析特点	(1)
1. 材料的静强度分布	(1)
2. 材料的疲劳强度分布与破坏	(2)
三、常见缺陷和对检测的要求	(2)
1. 制造监视	(2)
2. 使用鉴定	(3)
3. 损伤评定	(3)
4. 维护和修理	(3)
5. 研究和试验	(4)
四、缺陷与强度	(4)
1. 缺陷的危害性	(4)
2. 复合材料的强度与结构完整性	(4)
五、无损检测与无损评定	(5)
1. 对无损评定的要求	(5)
2. 无损检测技术的应用	(6)
六、验收标准	(8)
1. 对分离缺陷的要求	(8)
2. 对群集状缺陷的要求	(8)
第二章 超声检测	(9)
一、复合材料的超声检测方法	(9)
1. 超声 C 扫描	(9)
2. 超声频谱法	(10)
3. 漏兰姆波检测	(13)
二、计算机辅助的超声检测技术	(16)
1. 计算机辅助的超声检测系统	(16)
2. 图形识别技术	(17)
3. 特征扫描技术	(19)
三、复合材料几种典型缺陷的检测	(24)
1. 分层的检测	(24)
2. 气孔含量的检测	(24)
3. 疲劳破坏的检测	(26)
4. 冲击破坏的检测	(29)
5. 湿气降解的检测	(29)

6. 疏松的检测	(31)
四、超声检测的实际应用	(32)
1. 超声扫描系统的一般应用	(32)
2. 计算机辅助的超声伪彩色成像	(34)
3. 自动化超声扫描系统	(36)
五、超声检测评述	(38)
第三章 声振检测与声成像技术	(39)
一、概述	(39)
二、综合方法	(39)
1. 频率和阻尼的检测技术	(40)
2. 用测量自然频率和阻尼的方法确定损伤	(41)
三、局部方法	(43)
1. 单点激振	(43)
2. 在每一测试点激励	(45)
3. 几种常用声振检测仪器比较	(60)
四、声成像技术	(63)
1. 检测方法	(64)
2. 应用	(65)
第四章 射线检测	(67)
一、复合材料 X 射线检测原理和设备	(67)
1. 检测原理	(67)
2. X 射线机和胶片	(68)
二、复合材料的 X 射线检测	(72)
1. 传统 X 射线检测	(72)
2. X 射线显微照相术	(73)
3. 立体射线照相术	(75)
4. 使用不能透射的添加剂	(76)
5. 复合材料检测中的几个问题	(78)
三、计算机技术的应用	(81)
1. 计算机辅助的 X 射线照相术	(81)
2. 以计算机为基础的射线图像自动增强技术	(82)
3. X 射线计算机辅助断层成像技术(CT)	(84)
四、中子射线照相术	(86)
五、射线检测的应用实例	(87)
1. 玻璃钢-复合材料构件检测	(87)
2. 树脂含量测定	(88)
3. 玻璃纤维含量测定	(89)
4. 分层增长测定	(92)

5. 中子射线检测应用	(94)
6. 飞机制造业中复合材料的射线检测	(96)
六、X 射线照相术评估	(97)
第五章 声发射检测	(98)
一、概述	(98)
二、声发射检测的简要原理	(98)
三、复合材料的声发射	(99)
1. 声发射模拟信号的时域及其表征	(99)
2. 复合材料中的声发射源	(100)
3. 波的传播状况	(101)
4. 复合材料声发射源或缺陷的定位	(103)
5. 凯塞效应与费利西蒂比	(103)
6. 声发射数据中的显著性因素	(104)
7. 外来声发射源	(105)
四、检测的方法与程序	(105)
1. 噪声的控制与抑制	(105)
2. 现场校准	(106)
3. 检测的控制与校核	(106)
4. 源的表征	(107)
5. 检测技术	(108)
6. 检测程序设计	(108)
7. 接收或拒收规范	(109)
8. 对比样件	(109)
五、复合材料检测的声发射系统	(110)
1. 声发射传感器	(110)
2. 前置放大器	(112)
3. 次级放大器与滤波器	(113)
4. 信号表征和显示装置	(113)
5. 设备的选择	(115)
六、复合材料声发射检测应用实例	(116)
1. 复合材料构件声发射特性试验	(116)
2. 纤维增强塑料固化过程的声发射检测	(121)
3. 玻璃钢撑竿的声发射检测	(122)
七、声发射检测评估	(124)
第六章 声-超声检测	(126)
一、概述	(126)
1. 声-超声——一种新的检测方法	(126)
2. 应力波因子	(126)

1) 应力波因子的基本概念	(126)
2) 应力波因子与声发射的比较	(127)
3) 应力波传递的其他参数	(128)
二、应力波因子检测方法	(128)
1. 应力波因子的可重复性	(129)
2. 影响波形的各种因素	(129)
3. 检测程序	(129)
1) 固定的检测条件	(130)
2) 检测变量	(130)
3) 仪器设定的最佳化	(131)
4) 检测结果	(131)
三、应力波因子检测技术分析及其应用	(133)
1. 微孔含量和铺层取向对应力波因子的影响	(133)
2. 固化压力对应力波因子的影响	(133)
3. 应力波因子与强度的关系	(134)
4. 应力波因子值的量化	(135)
1) 利用频谱分析法量化 SWF 值	(135)
2) 试件破坏时频谱均方根值与层合板刚度间的相关关系	(136)
3) 计算频谱各项矩所用的计算机编码	(138)
四、声-超声检测技术评论	(138)
第七章 热学检测	(141)
一、概述	(141)
二、热图检测方法	(141)
1. 各种检测方法简介	(141)
2. 红外检测	(142)
1) 黑体辐射	(143)
2) 检测的实施	(145)
3) 检测设备	(147)
4) 参量选择	(148)
3. 振动热图检测	(149)
1) 振动热图法机理	(150)
2) 振动热图法检测结果	(151)
4. 热图检测应用分析	(152)
三、热图检测应用实例	(152)
1. C-5 飞机止裂安全条板检测	(152)
2. 碳纤维环氧复合材料疲劳试验	(154)
3. 层板复合结构的缺陷检测	(155)
4. 复合材料的振动热图法检测	(156)
5. 表面污染的检测	(157)

四、热学检测评述	(159)
第八章 全息照相和其他光学方法	(160)
一、全息照相概述	(160)
二、全息照相干涉测量术基本原理	(160)
三、复合材料检测	(160)
1. 复合材料检测中应考虑的问题	(160)
2. 全息照相干涉测量方法	(161)
3. 加载方法	(162)
4. 缺陷条纹形成机理	(164)
5. 图像处理	(164)
四、检测装置	(165)
1. 离轴型全息照相	(165)
2. 脉冲全息照相	(166)
3. 电视全息照相	(168)
五、其他光学检测技术	(168)
1. 散斑干涉计量术	(168)
2. 云纹测量术	(170)
六、全息照相检测应用	(172)
1. 飞机雷达罩锥体检测	(172)
2. 碳纤维复合材料结构检测	(173)
3. 普·惠公司的检测应用	(175)
4. 宇航公司的检测应用	(176)
七、全息照相检测评述	(177)
第九章 其他无损检测方法	(179)
一、涡流检测	(179)
1. 概述	(179)
2. 纤维断裂的检测	(179)
1) 探头设计	(180)
2) 探头的制作	(181)
3) 检测方法	(182)
3. 纤维体积比值和铺层顺序的检测	(182)
1) 纤维体积比值检测	(182)
2) 铺层顺序检测	(183)
4. 裂纹和纤维侵蚀的检测	(184)
二、微波检测	(184)
1. 检测原理	(184)
2. 检测方法	(185)
1) 反射法测量	(185)

2)交叉偏振分量的测定	(186)
3)开口谐振器	(188)
三、电阻法检测	(189)
1. 概述	(189)
2. 检测方法	(190)
1)纵向和横向电导率	(190)
2)电阻率与温度的关系	(191)
3)横向电阻率与厚度的关系	(191)
4)渗流电导率	(191)
四、核磁共振检测	(192)
1. 试件	(193)
2. 检测方法	(193)
3. 检测结果	(194)
4. 核磁共振检测评述	(194)
第十章 总结与前景	(196)
一、检测方法的比较与评述	(196)
二、检测方法的选择	(197)
三、检测技术的研究和展望	(200)

第一章 绪 论

一. 引言

高强度、高模量、脆性的增强剂均匀地与低强度、低模量、韧性的基体相结合而组成的纤维增强型复合材料,由于它能发挥材料的综合优良性能,以其高的比强度和比模量以及良好的抗疲劳性和成形工艺性而在航空航天工业中获得了大量应用,并在某些关键部位代替了金属材料。在汽车、造船、建筑工业和桥梁、自行车、体育用品等民用工业领域也已崭露头角。

但是,复合材料也存在着明显和严重的缺点。它们通常是以交错叠层的形式构成整体来承受使用载荷的。高的比强度和比模量是用复杂而高价的三维编织技术来达到的,从而构成了复合材料的各向异性。而最使人望而生畏的缺点是它那极为复杂的损伤与破坏模式以及难以制订的验收标准。从产品检测的角度看,由于生产过程中制造工艺的特殊性,各种影响工件质量的、相互作用的众多参量很难精确控制,换句话说,要达到期望的精确控制往往因花费过大,而失去了实用价值。正是由于复合材料的各向异性和制造工艺条件的不可避免的差异性,造成了材料质量上的离散性,许多工艺参量虽然变化不大,在制成品的外观上也无明显不同,却能对工件的机械性能产生很大的影响。抽样或随炉试件的破坏检测往往不能代表该批制成品的整体质量水平。因而,在工件的高比强度和高比模量甚为重要的场合,必须在使用以前,应用无损检测与无损评定技术,在不损害工件使用性能的前提下,确定其是否已达到特定的工程设计要求。在另一方面,在航空航天工业应用中,先进复合材料的强度裕量性能不断缩小已是必然的趋势,这就对复合材料工件的质量保证和使用可靠性提出了严格的要求,对无损检测与评定技术提出了新的挑战,已成为复合材料能否得到广泛应用的关键。

二、复合材料可靠性分析特点

复合材料与金属材料相比具有不少特点,在进行可靠分析和剩余寿命的评估时必须认真加以考虑,下面扼要地论述了这些特点。

1. 材料的静强度分布

1) 分布规律的描述

在特定的场合,不论使用金属结构或是复合材料结构,其外载分布总是相同的,但材料的内在强度分布则有显著差异。

通常,金属材料的强度用正态分布来描述;复合材料是一种多组分结构,具有多层次的强度分布。

纤维单丝强度常用正态分布或韦伯分布来描述,一般认为采用韦伯分布较好。

树脂基体强度常用正态分布描述。

单向复合材料的强度分布和多向层合板的强度分布显然更为复杂,究竟用哪种分布规律来描述为好,至今尚无定论。作者推荐的是,前者用正态分布,后者用韦伯分布。

2) 离散度

美国军用手册“MIL-HDBK-5D”规定航空与航天飞行器结构所用金属材料机械性能的离散度一般不超过 3%~8%。可以认为合格金属材料离散度的数量级应保证在 10% 以内;复合材料工件

机械性能的离散度与制造工艺等因素有关,严格按工艺规程制作的工件,其离散度的数量级仍可达10%~20%,远比金属材料的大。

2. 材料的疲劳强度分布与破坏

1) 分布规律的描述

金属材料的疲劳寿命通常是由裂缝的扩展来确定的,一般认为采用韦伯分布描述较好;而复合材料的疲劳破坏过程并非只是裂缝扩展一种形式而是包含着裂缝、分层、空穴、脱粘等多种因素的损伤过程,所以采用何种分布描述为好尚待进一步研究。

2) 疲劳破坏

金属材料对拉-拉疲劳敏感,所以主要在受拉区进行抗疲劳或抗断裂设计,无损检测与无损评定的主要任务是适时检出生长中的裂缝,结合断裂力学知识,即可进行工件的可靠性分析,预测其寿命;复合材料的拉-拉疲劳特性良好,对压-压疲劳敏感,存在着多种破坏模式,它的疲劳断裂机理尚待深入研究。

现代飞行器结构设计思想不断发展,已从单纯的静强度设计和安全寿命设计发展到破损安全和损伤容限设计。损伤容限设计是建立在可靠性分析和质量无损评定的基础上的。复合材料可靠性分析方面的复杂性恰恰又给质量无损评定带来了新的难题。

三、常见缺陷和对检测的要求

复合材料工件的材料状态随其制造加工工艺和使用过程中的承载状况而变化,复合材料工件各点上的组分又可能存在不同程度的差别,利用分割取样进行破坏分析的方法同样不能提供准确的信息。在质量要求较高的航宇复合材料制造过程中,虽然有严格的控制,但复合材料由于其固有的不均匀性质、不可避免的制造误差以及对使用损伤与环境破坏的敏感性,仍然会给无损检测提出严格的要求。迫在眉睫的任务是,至少能用无损检测技术来证实材料和制造工艺是一致的、高质量的,这些检测要求可规纳为以下五个主要领域:

- (1) 制造监视;
- (2) 使用鉴定;
- (3) 损伤评定;
- (4) 维护与修理;
- (5) 研究与试验。

下文将对这些要求逐一进行讨论。从讨论中可以看出,无损检测技术不仅应当能够检测和表征离散的缺陷,还应当能够定量地表征固有的材料性质。

1. 制造监视

在纤维、基体和单层卷材的最初准备阶段,用不同的化学和物理抽样试验进行监视。无损检测方法通常用于已经完成固化周期的复合材料叠层。在这一阶段,叠层或粘接结构件所要求的无损检测项目包括:

- (1) 固化程度;
- (2) 疏松和气孔含量;
- (3) 纤维/基体比;
- (4) 粘接质量。

通过无损检测,应当证实复合材料制品能满足化学、微结构组织以及物理和机械特性方面的要求。

2. 使用鉴定

准备投入使用的叠层和工件,要求通过无损检测来确定是否存在某些重要的制造误差和离散缺陷,它们通常包括:

- (1)分层与层间空隙;
- (2)叠层不正;
- (3)外来夹杂;
- (4)纤维隆起;
- (5)基体密集;
- (6)纤维和树脂开裂;
- (7)纤维断裂;
- (8)脱粘。

检测上述的不完整性是必要的,但并不总是作为衡量是否拒收的标准。上述缺陷的相对重要性将根据含有缺陷的工件使用的方式来决定。有关“缺陷的危害性”的问题将在下文中讨论。

3. 损伤评定

使用条件 and 环境影响有可能急剧地降低复合材料工件的整体性和强度。运输和准备使用期间也可能造成损伤。机械损伤和材质降解包括:

- (1)水气浸入;
- (2)蠕变;
- (3)腐蚀和化学侵蚀;
- (4)振动和疲劳;
- (5)热循环和过热;
- (6)烧蚀和磨损;
- (7)静应力过载;
- (8)碰撞和冲击。

突发的碰撞或暴露在火中引起的损伤多半是明显的,但损伤的程度和对性能的影响则不容易判定;化学侵蚀或树脂软化疲劳引起的材质降解,以及微裂缝等缺陷通常都难以发现,这些问题都需要通过先进的无损检测技术来解决。

4. 维护和修理

在许多应用中,如果复合材料工件在运输和使用期间有了损伤,经过修理再重新使用肯定是很实用价值的办法,但在此场合下,要求应用无损评定方法确定下列各点:

- (1)现有的整体性状态;
- (2)损伤或材质降解的严重性;
- (3)修理的可能性;
- (4)修理的完善性。

需要有无损检测方法来监视现有复合材料工件的状态;如发现损伤,需要用无损检测方法来确定损伤的程度以及修理的可能性;完成修理工件后,还需要用无损评定技术来鉴定它的整体性和机械性能。

5. 研究和试验

复合材料作为一门新兴的学科,需要不断进行研究和发 展。在新型复合材料的研究和试验中,无损检测技术具有重要的作用,其主要功能是:

- (1)检测试验样件;
- (2)监视试验进程;
- (3)分析试验结果。

借助无损检测技术,可以监视复合材料最重要的缺陷——分层和裂缝的扩展。在试验以前,重要的是检测试验样件的材料性能和状态是否与预定的要求相符。

新的设计设想的正确性和工件的整体性通常要通过验证试验来证实,验证试验中包含着用无损检测技术就地监视应力的特征。上述试验和研究要求先进的无损评定技术定量地表征材料对试验载荷的响应。试验结果的分析工作必须以无损检测所获得的数据作为依据。

四、缺陷与强度

1. 缺陷的危害性

对于上节所列的各种常见缺陷,从使用复合材料工件的角度来看,需要考虑的基本问题是:

(1)哪些缺陷对工件性能有危害或者有潜在的危害,并且是可以利用现有的无损检测技术检测的?

(2)哪些缺陷同样可以检测到,但对复合材料工件承受载荷的能力方面并没有什么危害,因而是可以忽略的?

(3)哪些存在于复合材料工件内的缺陷组织是至今尚不能用现有的无损检测技术进行辨认或表征的? 这些缺陷在使用中会逐渐扩展,最终将损害复合材料的性能。由制造过程引起的这类缺陷称为先天性的缺陷,包括固有的界面连接不良;此外,还有由热应力、环境或蠕变引起的材料性质或界面状态的降解。

根据现有的大量实践经验,从对复合材料工件强度影响较为明显、且在制造工艺和使用中较易出现的角度来考虑,一般要求检测的主要缺陷是内部材料的分离和气孔。它们包括:

- (1)分层;
- (2)气孔;
- (3)气孔含量;
- (4)疏松;
- (5)纤维与树脂界面分离;
- (6)层间裂缝;
- (7)越层裂缝或其他裂缝。

小的气孔和疏松的存在将影响构件的承载能力。局部裂缝、分层、界面分离和较大的气孔意味着严重的局部损害,当存在残余应力、缺口效应和截面减少效应时,其影响更为严重。

气孔含量是指内部包含的微型密集空隙(通常呈球形,直径为 $5\sim 20\mu\text{m}$)的含量,存在于纤维的丝间、束间和层间。气孔含量和层间剪切强度之间的典型关系说明,强度随气孔含量的增加而迅速下降(图 1.1)。纤维增强复合材料中的气孔含量在 4% 以下时,气孔含量每增加 1%,层间剪切强度通常会下降 5%~10%,甚至可以达到 20%。所以,即使是较为次要的工件,气孔含量也不能超过 2%。

2. 复合材料的强度与结构完整性

众所周知,无损检测与质量控制的任务是,保证工程结构(工件)满足一定工程任务的各项技术性能的要求以及预期的使用寿命。因而,设计某一工件时,首先要掌握该工件的强度、模量、疲劳寿

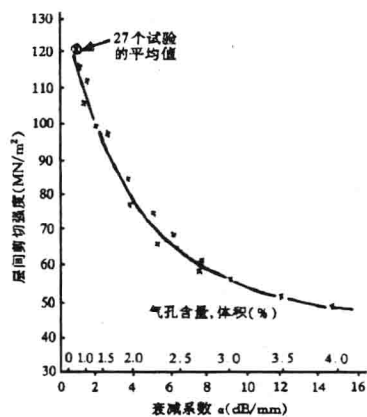


图 1.1 气孔含量与层间剪切强度的关系

命等数据,这些数据都是以一定的力学试验为基础的。实际使用的工件如果只是几何形状、外观状态等与设计要求相符,那还是不够的,重要的是,诸如强度、结构完整性等质量性能都应比试验件的性能好。只有这样,该工件才能满足使用要求而不会出现意外损坏,才达到了工件的质量保证。

高性能的金属结构通常相对地说是由不存在可以检测到的缺陷的良好材料制成的;现代金属构件的强度和寿命往往取决于裂缝或“类裂缝”的集结和扩展,破损常起源于裂缝开始成为可以辨认的缺陷的时候。因此,无损检测方法可以以检测生长中的裂缝和定位为基础,它的严重性可以用断裂力学的方法来确定,进而可以预测构件的寿命。

然而,复合材料由于其内部构造的复杂性,其破坏机理迄今还未被人们所掌握,因此,至少目前还不清楚某些缺陷是怎样发展起来并导致工件的宏观破坏。例如,没有明显缺陷的试件却往往在强度试验中仍然呈现出强度的不足;而把肉眼看来具有相同的试件试验到破坏时,又能证明破坏实际上并非由这些缺陷所决定,它们的实际破坏应力往往有很大的差异。所以,人们可以设想,复合材料结构中还有着某种没有搞清楚的,然而重要的缺陷形式。

较之金属材料构件,人们还没有能找出哪一种缺陷对复合材料构件是致命的,迄今尚未找到一种单一的破坏模式可以用来预测它的寿命,正在研究的是应用多重模式来描述它的多模破坏过程。

本书所介绍的各种无损检测方法,虽然不可能鉴别各种复合材料构件的所有缺陷,但都具有某些发现缺陷和确定缺陷位置的能力。但是,要了解这些缺陷与构件的强度或寿命之间的关系却十分困难,在弄清这些缺陷的含义方面的研究已成为国际上众所瞩目的难题。比发现缺陷重要得多的事情是知道缺陷的危害程度以便预测工件的破坏或其强度并进而预测工件的寿命。为达到这一目的,仅仅检测出缺陷和缺陷的位置是不够的,而需要定量地检测出工件的强度,评价复合材料结构的完整性。这是先进的复合材料发展对无损检测工作者提出的新的艰巨的任务,也是当前无损检测技术从缺陷探伤向工件结构强度和完整性无损评定发展的巨大动力。

总之,复合材料的无损检测和无损评定技术,针对的是下列两项任务:

第一项任务是不仅要求用无损检测技术表征离散的宏观缺陷,还必须研究这些缺陷的危害程度,研究主要缺陷的发展规律,进而研究导致宏观破坏的机理;

第二项任务是研究发展无损检测技术,直接测定工件的强度和结构完整性,表征工件的内在结构性能,进而对其使用可靠性和剩余寿命进行无损评定。

五、无损检测与无损评定

1. 对无损评定的要求

为了适应以先进复合材料为代表的新材料、新结构、新工艺的迅猛发展,国外无损检测技术已由 NDT(nondestructive testing 无损检测)经 NDI(nondestructive inspection 无损试验)而发展到 NDE(nondestructive evaluation 无损评定)阶段,完成了由一般检测技术向高技术过渡的历程。无损评定意味着在目标、范围、学术内容和最终结果上都较无损检测或无损试验有了巨大的扩展。在它的定义中包含了三项新的必不可少的重要概念,即:

定量的无损检测的概念;

评定在材料或工件中缺陷危险性的概念;

预测由于缺陷存在所形成的剩余使用寿命的概念。

在检测工序上,由事后检测扩展到了工件生产过程中的检测和使用中的检测,改被动为主动,为复合材料新结构的应用创造了更大的经济效益。

这就使一些传统观念发生了变化。

过去,在制造过程中如能严格控制工艺参量就能生产出优质的产品。新材料、新结构的出现,使单纯依靠这一措施,即使不是不可能的话,也是费用上很不经济的。

再有,过去如能进行有效的管理,就能保证产品的质量,而现在在使用新材料、新工艺之后,单凭管理就显得很不够了,还必须依靠先进的无损评定技术。

这当然并不是说,有了无损检测技术就可以放松工艺控制与质量管理,恰恰相反的是,先进的无损评定技术可以促进甚至直接参与工艺控制和质量管理的。

在考虑无损检测方法的应用时,必须考虑到复合材料与金属材料间存在的甚大差异。通常,纤维增强复合材料具有较差的导电性、低的导热率、高的声衰减以及在机械和物理性质上显著的各向异性,对作为无损检测主要手段的物理波的传播,起着与金属材料完全不同的作用。

这些决定了复合材料无损检测与评定不能简单地沿用金属材料无损检测的方法,必须作为一门独立的多学科技术进行研究与发展的。为了研究和发展复合材料无损评定技术,它的定量无损检测技术研究必须与其破坏机理研究和可靠性研究很好地结合起来。这一问题解决了,能在两个方面促进复合材料的应用:首先,具有有关结构缺陷的信息,能通过不同的处理和制造技术来减小这些缺陷的危害程度;其次,掌握这种结构缺陷的信息和与之相关联的破坏机理,可以预测工件的安全使用期,并利用在安全期内及时地进行质量的无损评定或对缺陷扩展的监视来延长实际使用寿命。

针对上节提出的有关复合材料无损检测与评定的两大任务,先进的复合材料无损检测评定技术的发展主要涉及下列两方面的定量表征:

离散的缺陷或损伤以及它们的危害性;

强度或结构整体性等工件的综合力学性能。

2. 无损检测技术的应用

对复合材料进行无损评定,通常是首先要能够无损地检测出复合材料及其构件中种类繁多的离散缺陷及其结构的不完整。然而,从保证使用可靠性的角度,检测的目标则在于测出工件的强度的不足,以及影响工件整体性的材质的超差。

现将用于这两类检测的主要无损检测技术分述于下:

(1)缺陷检测的常用无损检测技术有:

超声检测(见本书第二章);

声振检测与声成像技术(见本书第三章);

射线检测——X射线与中子射线(见本书第四章);

目视与光学检测——全息照相和其他光学方法(见本书第八章);

热学检测(见本书第七章)。

涡流检测、微波检测、电阻法检测、核磁共振检测等(见本书第九章)。

(2)强度和整体性检测的常用无损检测技术有:

强度检测仪与振动热图测量(见本书第三、第七章);

超声多参数——衰减、速度和散射测量(见本书第二章);

X射线层析技术(见本书第四章);

声发射检测(见本书第五章);

声-超声检测(见本书第六章)。

为便于读者选取检测方法,表1.1列出了各种无损检测技术的适用性与局限性。各该项技术的简要原理、检测方法、检测设备及应用实例,请读者参阅本书有关各章。

表 1.1 各种无损检测技术的适用性与局限性

方法	种类	原理	适用范围	主要局限	本书章次
超声	超声回波 (垂直入射)	测定反 射回波	气孔、疏松、分层、裂缝、 基体变化、外来夹杂缺陷的 检测	缺陷的取向是关键,但要 求取向与声束垂直,对层合 结构多数的缺陷是适用的 水浸法或喷水技术的应用 会引起构件边缘进口处的 损坏	第二章
	超声穿透	测定声 束的衰减	气孔、分层、外来夹杂的 检测,孔隙率测定		
	超声 C 扫描	C 扫描显示	气孔、分层、外来夹杂的 快速检测		
	超声背 散射	测定反 向散射	测定纵向裂缝、纤维及铺 层质量		
	超声频 谱分析	分析反 射频谱	能定量检测分层、脱粘、 气孔、富脂与贫脂、固化不 合格	除上述限制外,目前还不 是实时的	
声振与 声成像	声阻测量 与谐振技术	测量声阻抗 与谐振频率的 变化	大的气孔、分层、脱粘缺 陷的检测,厚度测量	灵敏度较低,对一些特殊 形式的缺陷检测有困难 手工操作	第三章
	振动测量	测量振型 或声调	气孔、分层和粘接整体性	灵敏度低	
	声成像技术	测量声波 的干涉或成像	能形象地显示气化、分层 等缺陷	除需水浸外,无主要限 制,但基本上仍是实验室技 术	
射线	X 射线	测量对射 线的吸收	气孔、疏松、越层裂缝、富 脂与贫脂缺陷检测,可有限 制地测量纤维体积比和纤 维质量 尤适应于测量金属夹杂	缺陷的取向是关键,要求 与射线平行,不适于分层等 缺陷的检测 解释困难	第四章
	中子射线	测量对中 子射线的吸 收	纤维不正、外来夹杂检 测,对纤维排列和体积比有 较 X 射线高的灵敏度	除缺陷取向的限制外,中 子源费用昂贵,且对人体有 害	
光学	激光全息 照相	测量因加 载引起的表 面变形	近表面脱粘、分层、夹杂 等缺陷的检测	由于精度随振动干扰严 重下降,基本上仍是实验室 技术	第八章
表面 渗透	着色	利用渗透 现象	测量与表面连通的 分层、裂缝等缺陷	使用不方便,渗透剂可能 导致材料变质	第四章
	射线不透 明液体	增加缺陷 部位的射线 透度比	增加与表面连通的 分层、裂缝等缺陷检测 的灵敏度		
热学 检测	温度测量	测量因缺 陷引起的热 性能变化	近表面气孔、分层、脱 粘、夹杂缺陷的测量	对环境(温度、气流)极 为敏感,因而灵敏度低	第七章
	热成像技术				
	振动热图	测量振动 引起的热性 能变化	尤适用于无体积裂 缝与分层等贴紧缺陷 的测量		
应力波 检测	声发射	测量受载 产生的声发 射	缺陷的动态监视 工件的强度和整 体性的测定	设备贵而较复杂	第五章
	声-超声 检测	测量应力 波的传输	测量微孔含量和铺 层取向等缺陷 工件强度的测量和 对固化压力的监视	正在发展中的技术,尚不 成熟,解释困难	第六章
其他 方法	涡流检测	测涡流特 性的变化	测量导电纤维的缺陷及 铺层	限于碳/环氧复合材料	第九章
	微波检测	测对微波 的吸收与反 射	测气孔、分层、脱粘等缺 陷	设备贵而较复杂	