

军队“2110工程”系列教材

飞机损伤检测

谢小荣 杨小林 编著

航空工业出版社
北京

前 言

本书是军队“2110工程”系列教材之一,根据部队新装备、新技术发展的需要,结合多年教学工作的体会和部队机务人员的要求编写。飞机损伤检测是控制飞机、发动机零部件质量的重要手段,是飞机作战、训练和任务飞行的重要安全保障,对部队战斗力的提高以及保障的时效性和经济性具有重要作用。随着航空维修手段的不断改革,飞机损伤检测愈来愈受到重视,从一定程度上说,飞机损伤检测的发展水平反映了航空维修的发展水平。

本书内容系统全面,理论与实践结合紧密,可以作为中高等院校飞机损伤检测类专业教材,也是从事飞机损伤检测工作的工程技术人员、科研人员的学习、参考资料。

全书共分8章,内容涉及磁粉检测、涡流检测、渗透检测、超声检测、射线检测以及目视检测等常用的飞机损伤检测技术的原理、方法、设备和应用等,另外还根据飞机损伤检测技术的发展情况,介绍了几种有较好应用前景的新技术。本书第1、3、7章由谢小荣编写,第2章由杨小林编写,第4、8章由江涛编写,第5章由阚继广编写,第6章由先明乐编写。全书由全国无损检测学会副理事长、博士生导师任吉林教授主审。

本书在编写和出版过程中得到了上级首长和领导机关的关心支持,在此表示由衷的感谢。

由于编者水平有限,实践经验不足,书中难免有不当之处,需要在使用中不断充实、修改和完善,热忱希望读者提出宝贵意见,以便更正。

愿本书的出版,能对部队航空维修的飞机损伤检测工作有所帮助,较好地推动我军飞机损伤检测技术的发展。

编著者

2006年3月

目 录

第1章 概论	(1)
1.1 概述	(1)
1.1.1 无损检测的定义	(1)
1.1.2 无损检测的方法	(1)
1.1.3 无损检测方法的选择原则	(2)
1.2 无损检测人员技术资格鉴定和认证	(3)
1.2.1 资格鉴定和认证工作概况	(3)
1.2.2 资格鉴定通则	(4)
1.3 无损检测在航空维修中的应用	(6)
1.3.1 老龄飞机的无损检测	(7)
1.3.2 新机新材料的无损检测	(7)
1.3.3 无损检测在飞机日历寿命研究中的作用	(8)
1.3.4 无损检测在飞机疲劳裂纹扩展监测中的作用	(8)
第2章 磁粉检测	(9)
2.1 概述	(9)
2.1.1 磁粉检测的原理	(9)
2.1.2 磁粉检测的特点	(10)
2.2 磁粉检测的物理基础	(10)
2.2.1 磁场	(10)
2.2.2 电与磁	(11)
2.2.3 材料的磁特性	(14)
2.2.4 漏磁场及影响因素	(16)
2.3 磁化与退磁	(18)
2.3.1 磁化方法	(19)
2.3.2 磁化规范	(25)
2.3.3 磁化电流	(30)
2.3.4 退磁	(34)
2.4 磁粉检测设备及其器材	(36)
2.4.1 磁粉检测设备	(36)
2.4.2 磁粉及磁悬液	(39)
2.4.3 灵敏度试片(块)	(43)
2.4.4 磁粉检测辅助器材	(45)
2.5 磁粉检测工艺	(46)

2.5.1	磁粉检测方法	(46)
2.5.2	磁粉检测工艺	(47)
2.5.3	磁痕分析	(50)
2.6	磁粉检测在航空维修中的应用	(53)
2.6.1	概况	(53)
2.6.2	航空维修中磁粉检测的特点	(53)
2.6.3	应用举例	(54)
第3章	涡流检测	(58)
3.1	概述	(58)
3.1.1	涡流检测的原理	(58)
3.1.2	涡流检测的特点	(59)
3.1.3	涡流检测的应用	(59)
3.2	涡流检测的物理基础	(60)
3.2.1	电磁感应	(60)
3.2.2	涡流	(62)
3.2.3	趋肤效应和渗透深度	(63)
3.3	涡流阻抗分析法	(64)
3.3.1	线圈的阻抗和阻抗归一化	(64)
3.3.2	有效磁导率和特征频率	(68)
3.3.3	涡流检测相似定律	(71)
3.3.4	复阻抗平面图	(71)
3.3.5	含圆柱体穿过式线圈的阻抗分析	(73)
3.3.6	放置式探头阻抗分析	(77)
3.4	涡流检测设备	(79)
3.4.1	涡流传感器	(80)
3.4.2	涡流检测仪器	(83)
3.4.3	涡流检测参考试件	(96)
3.5	涡流检测方法	(98)
3.5.1	检测规范	(98)
3.5.2	检测准备	(99)
3.5.3	检测条件的选择	(99)
3.5.4	检测结果及其处理	(102)
3.6	涡流检测在航空维修中的应用	(103)
3.6.1	某型发动机二级涡轮叶片叶背第一榫槽内裂纹的涡流探伤	(103)
3.6.2	某型飞机轮毂大固定轮缘裂纹的涡流探伤	(104)
3.6.3	波音707飞机非磁性材料紧固螺栓孔内壁裂纹的涡流探伤	(105)
第4章	渗透检测	(108)
4.1	概述	(108)
4.1.1	渗透检测的原理	(108)

4.1.2 渗透检测的特点及适用范围	(109)
4.2 渗透检测的物理基础	(109)
4.2.1 物质的分子运动	(109)
4.2.2 液体的表面张力	(110)
4.2.3 液体的润湿与展铺	(110)
4.2.4 液体的毛细管现象	(111)
4.2.5 表面活性剂及其特性	(113)
4.2.6 光激发光	(115)
4.3 渗透检测方法	(115)
4.3.1 渗透检测方法分类	(115)
4.3.2 渗透检测方法的选择	(116)
4.3.3 渗透检测方法的流程	(118)
4.3.4 几种特殊的渗透检测方法	(119)
4.3.5 缺陷显像判别	(120)
4.4 渗透检测剂及装置	(120)
4.4.1 渗透检测剂	(120)
4.4.2 渗透检测装置	(122)
4.5 渗透检测的安全与防护	(125)
4.5.1 使用非水显像剂的危害	(125)
4.5.2 紫外光的生理效应	(126)
4.5.3 渗透材料废液污染的控制	(126)
4.5.4 液体渗透材料的毒性及闪点	(127)
4.5.5 渗透检验时的保护措施	(127)
4.5.6 渗透检验作业中的辐射安全	(128)
4.6 渗透检测在航空维修中的应用	(128)
第5章 超声检测	(131)
5.1 概述	(131)
5.1.1 超声检测的优点	(131)
5.1.2 超声检测的局限性	(131)
5.2 超声检测的物理基础	(131)
5.2.1 振动与波	(131)
5.2.2 超声场的特征量	(135)
5.2.3 超声波在异质界面的传播特性	(139)
5.2.4 超声波的衰减	(142)
5.2.5 超声波的声场特性	(142)
5.3 超声检测设备	(145)
5.3.1 超声探头	(145)
5.3.2 超声检测仪	(149)
5.3.3 试块	(155)

5.3.4	仪器和探头性能及测试方法	(158)
5.4	超声检测方法及技术	(163)
5.4.1	超声检测方法概述	(163)
5.4.2	仪器与探头的选择	(168)
5.4.3	耦合与补偿	(170)
5.4.4	缺陷测定	(173)
5.5	超声检测在航空维修中的应用	(187)
5.5.1	纵波检测	(187)
5.5.2	横波检测	(190)
5.5.3	表面波检测	(191)
5.5.4	板波检测	(192)
第6章	射线检测	(194)
6.1	射线检测原理	(194)
6.1.1	射线的产生	(195)
6.1.2	射线与物质间的相互作用	(198)
6.1.3	射线的衰减	(201)
6.1.4	成像原理	(201)
6.2	射线源	(202)
6.2.1	X射线管	(202)
6.2.2	X射线机	(205)
6.3	射线胶片	(208)
6.3.1	胶片的结构	(208)
6.3.2	胶片的感光	(208)
6.3.3	胶片的分类	(211)
6.4	射线照相技术	(212)
6.4.1	检测工艺流程	(213)
6.4.2	透照布置	(214)
6.4.3	基本透照参数	(217)
6.5	射线照相的影像	(222)
6.5.1	影像质量评估	(222)
6.5.2	影像质量控制	(227)
6.5.3	影像识别分析	(232)
6.6	射线检测先进技术	(237)
6.6.1	计算机层析成像技术	(237)
6.6.2	计算机射线照相技术	(240)
6.6.3	康普顿散射层析摄影技术	(241)
6.7	射线检测在航空维修中的应用	(242)
6.7.1	所需检测设备及要求	(242)
6.7.2	检测方法要点	(243)

6.7.3 检测结果判定	(244)
6.7.4 安全防护	(245)
第7章 目视检测	(247)
7.1 目视检测的物理基础	(247)
7.1.1 光学放大成像	(247)
7.1.2 目视检测方法	(249)
7.1.3 目视检测条件	(249)
7.2 目视检测辅助设备	(250)
7.2.1 光学辅助设备	(250)
7.2.2 机械辅助设备	(252)
7.3 内窥镜	(255)
7.3.1 刚性内窥镜	(255)
7.3.2 柔性内窥镜	(256)
7.3.3 柔性视频内窥镜	(258)
7.4 目视检测在航空维修中的应用	(260)
第8章 无损检测新技术	(261)
8.1 磁记忆检测	(261)
8.1.1 磁记忆检测的原理	(261)
8.1.2 磁记忆检测仪	(262)
8.1.3 磁记忆检测在航空维修中的应用	(266)
8.2 红外检测	(268)
8.2.1 红外检测的原理	(268)
8.2.2 红外检测的方法	(269)
8.2.3 红外检测在航空维修中的应用	(270)
8.3 声振检测	(271)
8.3.1 声振检测的原理	(271)
8.3.2 声振检测的方法	(272)
8.3.3 声振检测在航空维修中的应用	(275)
8.4 声发射检测	(276)
8.4.1 声发射检测的原理	(276)
8.4.2 声发射检测的方法	(277)
8.4.3 声发射检测在航空维修中的应用	(282)
8.5 微波检测	(283)
8.5.1 微波检测的原理	(283)
8.5.2 微波检测的方法	(284)
8.5.3 微波检测在航空维修中的应用	(286)
参考文献	(287)

第 1 章 概 论

1.1 概述

1.1.1 无损检测的定义

无损检测 (Non-Destructive Testing, 简称 NDT) 是一门新兴的综合性应用科学。它以不改变被检测对象的状态和使用性能为前提, 应用物理和化学理论, 对各种工程材料、零部件和产品进行有效的检验和测试, 借以评价它们的完整性、连续性、安全可靠性及力学、物理性能等。由于无损检测具有不破坏试件就可以对其进行百分之百的检测等优点, 因而在工业生产、物理研究和生物工程等领域得到重视并迅速发展。目前, 无损检测技术已在机械制造、冶金、石油化工、航空航天、电力、交通等行业获得广泛应用, 成为控制产品质量、保证设备安全运行的重要技术手段。

现代工业和科学技术的发展, 为无损检测技术的发展提供了更加完善的理论和新的物质基础, 也进一步推动了无损检测技术的应用, 并使无损检测从单纯的质量检验发展成为多用途的一门技术。无损检测主要包括以下 3 个内容。

(1) 无损探伤

发现材料或工件中的缺陷, 确定缺陷的位置、数量、大小、形状及性质。以便对装备的安全运行及产品质量作出评价, 并为产品设计、制定 (或修改) 工艺提供重要依据。

(2) 测试

测定材料的力学或物理性能 (如裂纹扩展速率、机械强度、硬度、电导率、磁性等), 检查产品的性质和状态 (如热处理状态、应力应变特性、硬化层深度、应力腐蚀等), 以及进行产品的几何度量 (如产品的几何尺寸和涂层、镀层或板厚的测量) 等。

(3) 监控

对正在运行的装备中的重要部件进行现场或动态检测, 将部件中产生缺陷的变化信息实时地提供给检测者, 从而实行现场监控, 保障装备的运行安全。

目前, 以无损检测为基础的无损评价 (Non-Destructive Evaluation, 简称 NDE) 技术应运而生。其主要内容是利用无损检测手段, 对构件的完整性、可靠性及使用性能进行综合评价。因此, 无损评价技术的出现促进了无损检测向更高层次发展。

1.1.2 无损检测的方法

无损检测技术是应用物理、电子与材料学等各门学科相互渗透和结合的产物。随着无损检测技术应用的日益广泛和伴随着其他基础科学的综合应用, 已发展了几十种无损检测方法。如按检测原理来分类, 常用的方法见表 1-1。

在表 1-1 中, 较为成熟并在工程技术中得到广泛应用的检测方法有磁粉检测、涡流检

测、渗透检测、超声检测、射线检测 5 种常规检测方法。此外，目视检测、磁记忆检测、红外检测、声振检测、声发射检测、微波检测等无损检测技术也已得到日益广泛的应用。

表 1-1 无损检测方法分类

类 别	主 要 方 法
射线法	X 射线透照法、中子射线照相法、 γ 射线照相法、X 射线光谱法、正电子湮没法、X 射线衍射法
声学法	超声法、声发射法、声振法、声阻抗法、电磁超声法、涡流超声法、声显微镜法、声全息法
电磁法	涡流法、漏磁法（磁粉法、磁场测定法、录磁法）、微波法、电阻法、电位法、巴克豪森效应法、磁声发射法、磁记忆法
机械、光学、热学法	机械测试法、光学目视法、激光全息照相干涉法、错位散斑干涉法、光弹法、光声光热法、红外法、接触测温法、热电势法、温差电法
其他	渗透法（荧光法、着色法）、渗漏法、点滴法、化学定位法、俄歇分析法、电解检测法

20 世纪 60 ~ 70 年代是无损检测技术发展的兴旺时期，各种无损检测的新方法和新技术不断出现。80 ~ 90 年代，在无损检测仪器的研制和改进方面得到了迅速发展和提高，并广泛应用于工业现场，向实用化发展。

目前，无损检测技术正向快速化、标准化、数字化、程序化和规范化的方向发展，包括高灵敏度、高可靠性、高效率的无损检测仪器和无损检测方法的发展，无损检测方法和验收标准的制定，无损检测操作步骤的程序化、实施方法的规范化、缺陷判断和评价的标准化等。另外，还要进行全国统一的人员资格培训、考核和认证。可以预见，无损检测在工业生产等各领域实现质量控制、过程监控、改进工艺和提高劳动生产率等方面都将发挥重要作用。

1.1.3 无损检测方法的选择原则

(1) 适用性

选用的无损检测方法应能适合检测对象的自然条件，如材料或产品的规格尺寸、材料性质和种类、材料冶金状态、材料表面状态、产品批量大小、加工工序要求等，应能检出要求发现的缺陷及满足验收标准要求。

例如，检测表面或近表面缺陷，对于铁磁性材料首先考虑的是采用电磁学的方法（磁粉检测或涡流检测方法），而对于非铁磁性材料则要考虑渗透检测方法（对于导电材料还可采用涡流检测方法）。但是上述方法都要求检测装置能够达到被检测面（即被检测面具有可接近性）才能实施。如果被检测面为不可接近的，如管道的内壁面、原位紧固的螺栓底部、铆钉颈部或内头、压力容器的内壁面等，则需要考虑采用超声检测方法。

总之，在考虑选用适当的无损检测方法时，必须考虑被检对象的材料特点、检测面的可接近性、检测缺陷的类型、被检件的规格尺寸以及所采用的无损检测方法的局限性等。因此，在选择无损检测方法时最重要的原则首先就是无损检测方法的适用性。

(2) 可行性

为了实施选定的无损检测方法，需要考虑所应用的检测设备、检测材料（如渗透剂、

磁粉、胶片等)以及辅助器材设施等的性能指标或技术参数是否能满足检测要求(按技术条件和验收标准要求),以及进行该项无损检测的人员是否具有相应的技术水平、经验和判断能力,其具有的技术资格是否能胜任该项检测的要求。因此,检测条件、人员条件等都是考虑无损检测方法可行性时必须注意的问题。

(3) 可靠性

为了保证所选定的无损检测方法能可靠地检出要求发现的缺陷或达到所要求的检测目的,除了对实施无损检测的人员有相应的技术水平要求外,应该对于所选用的无损检测方法建立严格的质量保证体系,确保正确地实施检测,并对检测结果作出正确的判断和评定。

这一点极其重要,因为如果所使用的检测设备和检测材料没有标准的校验手段与校验方法并以制度加以规定,会导致由于检测设备、检测材料的性能不稳定造成检测结果的重复性差;或者没有统一的标准操作程序或实施方法,也同样会使检测结果难以达到稳定和可重现性,这样的检测结果显然是不可靠的,甚至会失去检测的意义。

(4) 经济性

在保证满足检测要求的条件下,应尽量选择检测效率高、操作简便并且检测费用低的无损检测方法,力求获得最大的经济效益。

即便是同一种检测方法(例如超声检测),也应该力求在保证检测质量的前提下充分考虑到经济效益。例如,目前商品化的数字式超声波探伤仪价格一般都在3万元/台以上,而模拟式超声波探伤仪的价格则在1.5万元/台以下,如果被检测的对象要求不太高,使用模拟式超声波探伤仪就已经完全能满足检测质量要求时,显然后者将会大大减少检测投入费用。

1.2 无损检测人员技术资格鉴定和认证

无损检测技术大多采取相对测量或间接测量的方法,由无损检测人员实施检测过程和对检测结果作出判断、解释、分析、评定。在检测过程中以及判断、评定检测结果时,存在着各种干扰、影响因素,其中很重要的一个方面即是受无损检测人员主观因素的影响,这包括检测人员自身的技术水平、实践经验、理论基础、知识面以及身体条件(如视力、辨色能力、身体及精神状态、疲劳程度等)的影响。因此,为了保证无损检测技术得以正确实施,能够得到可靠、准确的检测结果,并能进行正确的判断和评价,就要求从事无损检测的人员必须具备和保持一定的技术水平和实践经验。在统一的标准或规范指引下,对无损检测人员进行定期的技术资格鉴定与技术考核,确认其是否具备相应的技术水平,就成为非常必要的了。这一点,已经得到世界各国的认同,我国自20世纪80年代起也开始把无损检测人员技术资格鉴定纳入了国家标准。

1.2.1 资格鉴定和认证工作概况

世界各国把无损检测人员技术资格鉴定按检测方法分类,并在每一类别中划分为初级(I级)、中级(II级)和高级(III级)3个等级,各有不同的技术水平要求和职责要求。

除了有国家标准的无损检测人员技术资格鉴定要求外,许多行业甚至一些大的企业还根据自身行业、企业的特点也提出了各自的无损检测人员技术资格鉴定要求。例如,国际标准化组织有ISO 9712—1999《Qualification and certification for nondestructive testing personnel》

(无损检测人员资格鉴定与认证), 美国有美国无损检测学会 (ASNT) 的无损检测人员技术资格鉴定标准, 而美国的军用标准、海军标准、航空与宇航标准、石油协会等, 甚至波音公司、原道格拉斯公司等都有适合自身行业要求的无损检测人员技术资格鉴定条例。

在我国, 有中国机械工程学会无损检测专业委员会提出并纳入国家标准的 GB/T 9445—1999《无损检测人员资格鉴定与认证》, 也有国防科技工业系统的 GJB 9712—2002《无损检测人员的资格鉴定与认证》, 航空与航天系统的《航空航天无损检测人员的资格鉴定》、锅炉压力容器行业的《锅炉压力容器无损检测人员资格鉴定考核规则》、民航系统的 MH/T 3001—1995《航空器无损检测人员技术资格鉴定规则》, 以及空军、船舶、核工业等行业相应的无损检测人员的资格鉴定与认证要求。

无损检测人员资格鉴定与认证所涉及到的无损检测方法, 在我国的国家标准中目前规定的是磁粉检测 (MT)、涡流检测 (ET)、渗透检测 (PT)、超声检测 (UT) 和射线检测 (RT) 5 项。国防科技工业系统近几年新增加了声发射检测 (AT 或 AE)、计算机层析成像检测 (CT)、全息干涉和错位散斑干涉检测、泄漏检测 (LT) 和目视检测 (VT) 等 5 种方法。欧美国家把中子射线照相检测 (NRT), 日本把应变测试等也纳入了无损检测人员资格鉴定与认证的无损检测方法项目。

1.2.2 资格鉴定通则

对无损检测人员资格鉴定与认证的要求, 不同国家、不同工业系统甚至一些大型企业, 在具体的要求上往往有各自的特点和具体要求, 但是在规定执行不同无损检测任务的无损检测人员必须具有相应的技术资格等级方面, 可以说是大同小异。下面以 GB/T 9445—1999《无损检测人员资格鉴定与认证》为例予以介绍。

1.2.2.1 无损检测人员技术资格等级的划分及职责

无损检测 I 级 (初级): 被认证为 I 级的无损检测人员有资格按无损检测作业指导书在 II 级或 III 级人员的监督下进行无损检测操作。I 级人员应能调整设备、进行检测、记录检测结果, 将检测结果按书面标准分级并报告结果, 但不负责检测方法或检测技术的选择, 也不负责检测结果的评定。

无损检测 II 级 (中级): 被认证为 II 级的无损检测人员有资格按所制定或经认可的无损检测技术, 执行和指导无损检测工作。II 级人员应能选用检测技术、调整和校准设备; 按现行法规、标准、规范解释并评定检测结果; 落实适合 I 级人员负担的全部任务, 并检查他们是否正确地执行; 编写与无损检测规范相适应的无损检测工艺规程、无损检测作业指导书、整理和报告无损检测结果。II 级人员还应熟悉所选用的无损检测方法的适用范围和局限性; 应能履行对实习人员和无损检测 I 级人员进行在职培训和指导的职责。

无损检测 III 级 (高级): 被认证为 III 级的无损检测人员应能对检测装备和检测人员的工作全面负责; 制定检测技术和工艺规程; 解释法规、标准、规范和规程; 指定需用的特殊检测方法、检测技术和规程; 应能按现有的法规、标准和规范解释并评定检测结果; 应对所用的材料、产品和制造工艺有足够的实用基础知识, 以便选择检测方法, 制定检测技术, 并能在没有现成标准的情况下, 协助有关部门确定验收标准; 应一般地熟悉其他无损检测方法, 并具有培训 I 级和 II 级人员的能力。

1.2.2.2 考试

资格鉴定考试包括通用考试和专门考试, 其内容应广泛地包含该无损检测方法在一个或

多个专业工业部门中的应用。

对于Ⅰ和Ⅱ级，通用考试和专门考试均应包括笔试和实际操作考试。对于Ⅲ级，除通用的笔试外，专门考试应由两种考试组成，分别称为“专门（部门）”考试和“专门（规程）”考试，但不要求实际操作考试。

有效期：从证书及证卡上所指明的证书颁发日期开始，有效期最长为5年。

延期：在第一个有效期到达后，如果该持证人员符合标准中所规定的条件，则可提出申请并经国家认证机构或经授权的资格鉴定机构批准延长一个相同期限的有效期。

重新认证：当第二个有效期满，或者至少每隔10年，持证人员需要重新认证（符合标准规定的延期条件并经过简化考试合格，可再延长一个有效期）或者申请新的认证。

（1）Ⅰ级和Ⅱ级人员的考试

a. 通用考试内容

Ⅰ级和Ⅱ级人员通用考试内容包括：考查报考人员对无损检测的基础知识，对所报考的无损检测方法的基本原理、应用技术，对一般检测对象的实际检测能力，对常用无损检测方法、质量等级分类与评定标准以及安全防护的理解和熟悉程度等。

通用考试中的实践能力部分包括：考查报考人员对仪器设备的操作能力，分析所得到的检测信息以及正确解释检测结果的能力；考查报考人员对保证检测结果可靠性及有效性的能力；考查报考人员对一般检测对象的检测及质量等级评定的能力。

b. 工业部门考试内容

Ⅰ级和Ⅱ级人员工业部门考试包括：补充考查报考人员对特殊要求的工业产品与对象的无损检测知识和技能；考查特殊要求的无损检测的基础知识和应用技术；考查特殊产品和对象的实际检测能力以及专用标准、规范和等级评定方法等。

工业部门考试中的实践能力考试包括：考查报考人员对有特殊要求检测的专用仪器的操作能力；根据专用标准、技术和工艺要求进行检测的能力；按照专用的验收标准，评定检测结果和进行质量等级分类的能力等。

c. 总评

通用考试和工业部门考试的总评应分开进行。若通用考试成绩合格并取得证书，则在其他工业部门应给予承认，免于对通用知识和技能的重复考试。

报考人员的每一门考试成绩均应按百分制进行评分。笔试和操作考试的成绩均应在70分以上。

各种考试成绩总评，应由各方面的权重系数的总和来确定。Ⅰ级和Ⅱ级人员总评时的权重系数可按表1-2确定。

表1-2 Ⅰ级和Ⅱ级人员总评时的权重系数

等级	通用考试		工业部门考试	
	笔试	实践考试	笔试	实践考试
Ⅰ	0.4	0.6	0.4	0.6
Ⅱ	0.5	0.5	0.5	0.5

权重系数的总和，在通用考试和工业部门考试中必须分别等于1.0。总评时报考人员的得分至少应在80分以上，才能定为合格。

（2）Ⅲ级人员的考试

Ⅲ级报考人员的考试主要采用笔试形式,此外还要对报考人员进行技术资格验证和技术能力口试。

a. 通用考试内容

(a) 基础知识。包括有关基本规则、常用材料、材料强度、产品制造工艺及缺陷的性质和产生机理等。

(b) 方法知识。包括所考核的无损检测方法、有关法规标准和技术规范解释等。

(c) 实践能力。要求能对一般的检测对象编制无损检测工艺及技术说明书。

b. 工业部门考试内容

(a) 该工业部门所要求的Ⅱ级人员基础知识以及与无损检测《方法知识考试参考题集》水准相当的试题(包括该工业部门所应用的特殊材料和特殊产品的制造工艺,缺陷的性质和产生机理,所报考的无损检测方法对该工业部门检测对象的专用规范、标准、法规和专用检测仪器、方法、技术和工艺等)。

(b) 对该工业部门的特殊检测对象能编制无损检测工艺和技术说明书。

c. 总评

通用考试和工业部门考试的总评应分开进行。若通用考试成绩合格并取得证书,则在其他工业部门应给予承认,免于对通用知识和技能的重复考试。

报考人员的每一门考试成绩均应按百分制进行评分。笔试成绩均应在70分以上。没有Ⅱ级证书者的操作技能考试不合格时,则该报考人员的实践能力考试成绩按不合格(即70分以下)处理。

各种考试成绩的总评,应由各方面的权重系数的总和来确定。

Ⅲ级人员总评时的权重系数可按表1-3确定。

表 1-3 Ⅲ级人员总评时的权重系数

通用考试			工业部门考试	
基础知识	方法知识	实践能力	基础知识及方法知识	实践能力
0.35	0.35	0.30	0.60	0.40

权重系数的总和在通用考试和工业部门考试中必须分别等于1.0。总评时,报考人员的评分至少应在80分以上,才能作为合格。口试中若发现报考人员的技术资格和技术能力有疑问,由考试委员会评议后提出书面处理意见。

(3) 补考和重考

在通用考试和工业部门考试的两门或三门考试(指Ⅰ级、Ⅱ级人员的“基础知识及方法知识”和“实践能力”两门考试,Ⅲ级人员通用考试中的“基础知识”、“方法知识”和“实践能力”三门考试;Ⅲ级人员工业部门考试中的“基础知识及方法知识”和“实践能力”两门考试)中,成绩均在70分以上,但总评成绩达不到80分(不合格)时,则对成绩低于80分的部分在1年内允许补考。若补考后仍达不到总评合格成绩,则全部考试项目均要重考。

1.3 无损检测在航空维修中的应用

无损检测作为航空维修的一种手段伴随着航空维修的发展而发展,已成为控制飞机、发

动机零件的质量,保证飞机安全飞行的重要手段。不仅如此,它已从单纯的检测发展到对飞机、发动机零件的安全使用寿命进行评价。随着航空维修手段的不断提高,无损检测愈来愈得到重视,从一定程度上说,无损检测的发展水平反映了航空维修的发展水平。

在飞机使用过程中,无损检测的主要任务是保证飞机的结构完整性。除按无损检测手册规定的内容对指定区域进行检测外,有时还要在特殊情况下对飞机的一些特殊部位和区域进行检测。日常大量的检测工作是由受过培训并取得资格认证的技术人员来执行,这些人一般属于熟练操作人员,而不是无损检测专家。因此,所制定的检测程序、工艺及判据标准都应简单、明确。

1.3.1 老龄飞机的无损检测

外场无损检测目前有几类问题最引人关注。

首先是老龄飞机的无损检测。如何改进检测能力,支持老龄飞机延寿(在超过原先设计的使用寿命后仍能安全飞行)是一个十分重要的问题。通常把日历寿命超过20年的飞机都作为老龄飞机来对待,而不少飞机,特别是民用飞机的预期使用寿命可高达40~50年,可见,延寿工作对飞机非常重要。由于腐蚀损伤和积累疲劳损伤的作用,老龄飞机发生故障的概率明显增加,因此,对老龄飞机应当执行与过去不同的维修和检测方案,着重解决腐蚀控制和腐蚀监测问题。一般使用低频涡流技术检测诸如桁条下方或铆接件下层板的腐蚀,而大多数表面腐蚀可用目视观察。

老龄飞机无损检测应注意以下几个方面。

- (a) 飞机所有区域都要检测。
- (b) 检测以日历间隔为基础。
- (c) 检测间隔分为初始和重复检测间隔。
- (d) 腐蚀分为轻微、严重和最严重3类,确认后应采取不同措施。

虽然上述各项已为航空界广泛接受,但腐蚀监测问题至今并未真正解决,因此,老龄飞机无损检测提出的第一个挑战是发展一种行之有效的腐蚀监控方法。

其次,由于老龄飞机的无损检测一般都已制定了相应的探伤工艺,关键在于应对每一机型重新制定一个“附加检测文件”,在原有探伤工艺中补充一些检测项目,以发现一些不可预见的疲劳损伤。这就要求我们能确认每种飞机的主要结构件(其失效会导致灾难性事故),然后再确认其检测方法和步骤。确认检测方法时要求能使用最灵敏的检测技术并能确定探测到容限长度裂纹的可靠性。我国在某些机种上已开展了这方面的工作。

1.3.2 新机新材料的无损检测

各种新型飞机都大量使用新材料,特别是钛合金和复合材料。如民用飞机波音777的尾翼和主梁部分、军用飞机F-15和我国的一些直升机等都大量使用复合材料;苏-27飞机的机尾罩轮孔和起落架轮使用了钛合金材料。对这两类材料用通常的检测方法,特别是常规超声波探伤方法都不很适合。对复合材料而言,检测的基本要求是能大面积检测其脱黏、分层及性能退化等,因此,非接触式检测技术更能发挥作用。目前,空气耦合超声波检测、激光超声和红外热成像等技术在航空工业特别是现(外)场检测中已广泛采用。

随着不少新型飞机的引入,研制出能在交货和将来维修时都能有效实施大面积检测的无损检测方法,是一项应当引起重视的任务,这对民用飞机和军用飞机都同样重要。阵列涡流

技术或相控超声检测技术对新机的检测可以发挥重要作用,特别是阵列涡流技术对于检测涡轮叶片根部裂纹具有极佳的应用前景。全波形记录也是一种重要方法,存储的超声波波形可以用于扫查后分析,它对飞机重要部件的全寿命监测可起到重要作用。

1.3.3 无损检测在飞机日历寿命研究中的作用

日历寿命研究是一个值得重视的课题,问题的关键在于如何利用无损检测技术帮助确定日历损伤、提出腐蚀控制方案并科学地决定日历寿命。

飞机的寿命分为飞行小时寿命、起落次数和日历寿命。由于飞机结构受环境腐蚀的问题日益严重,不少飞机往往在其飞行小时寿命远未达到的情况下,因关键结构腐蚀而提前退役或引起严重事故。因此,日历寿命一直是人们极为关心的问题,这方面的研究资料也十分丰富,主要包括加速腐蚀试验技术、建立腐蚀当量关系以及研究在腐蚀环境下飞机结构腐蚀损伤和疲劳寿命变化规律等。总之,人们常常根据结构腐蚀的变化规律和腐蚀速率等数据来推断其日历寿命,或提出腐蚀控制方案以延长飞机的日历寿命。如同疲劳寿命与疲劳损伤有关一样,日历寿命也同日历损伤有关,因此,为研究日历寿命,首先必须研究日历损伤。人们对腐蚀程度的检测通常是利用超声或涡流测厚的原理,根据材料厚度的变化来确定腐蚀的严重程度和量级,但这些方法对早期腐蚀几乎无能为力。声发射技术在腐蚀早期预报方面可以发挥作用。有报道说,已经利用声发射的波形识别技术有效识别了腐蚀萌生阶段产生的声发射信号,但总体上讲,迄今为止人们仍没有建立一套比较系统的确定日历损伤的方法,因而也就缺少有效的确定日历寿命的科学依据。科学地确定日历寿命,对腐蚀状况进行监测、对结构的日历损伤程度进行检测至关重要,它能对腐蚀程度、腐蚀损伤及发展趋势进行监测,从而为确定日历寿命提供科学依据。从目前发展情况看,除超声和涡流检测方法外,红外热成像技术和声发射监测技术都有可能在这一领域发挥重要作用。因此,加强该领域无损检测技术的研究十分重要。

1.3.4 无损检测在飞机疲劳裂纹扩展监测中的作用

除腐蚀外,老龄飞机面临的另一主要问题是疲劳裂纹,这里有一个如何检测和监测的问题。疲劳裂纹扩展是一个动态过程,能对这一过程进行监测的有声发射等技术。国外特别是美国航空部门及空军都在加紧研制机载声发射监测系统,但该技术存在的问题在于飞行过程中的高背景噪声使现有技术很难实用化。美国 Dunegan 工程咨询公司研制了一种能在高背景噪声下检测疲劳裂纹扩展声发射信号的仪器 AESMART2001,已被美国洛克希德·马丁公司用在 P-30RION 飞机上。其基本设想是,由于疲劳裂纹的扩展发生在板平面内,它产生的 AE 信号应以频率较高的扩展波为主,因此,该公司采取的办法是先捕捉 AE 波形,即用宽带 AE 传感器接收 AE 信号,然后并不是直接对波形进行存储或分析,而是使接收到的 AE 信号经过两路中心频率不同的带通滤波器,一路获得扩展波分量(HF),另一路获得低频弯曲波分量(LH),再将简单的、单参数量的两个分量的比值 HF/LH 作为诊断(判据)参数。采用这一方法可极大压缩疲劳试验过程中的声发射信号数据量,因为它虽然使用了宽带传感器捕捉该信号,但由于仪器处理的是两个模拟量的比值,所需的处理速度很低,对存储量也基本没有太高要求。Dunegan 工程咨询公司声称,这种仪器已为美国航空公司和美国空军解决了很多实际问题,并获得了专利。

第2章 磁粉检测

2.1 概述

美国人霍克于1922年首先提出了磁粉检测方法的设想。在对钢制工件进行切削时，他发现被磨削下来的细铁屑经常聚集在工件上的裂纹区域，于是他提出了利用该现象来对工件表面裂纹进行检验的设想，但由于受到当时磁化技术和磁粉的限制，在一段时期内霍克的设想没有付诸实践。

1929年，福雷斯特用铁屑作为检查材料，对钻探用的钢管进行直流周向磁化磁粉检测，但因铁屑质量不好致使试验未获成功。

1930年，瓦茨第一次成功地用磁粉检测检查焊缝质量。

20世纪50年代初，苏联学者瑞加德罗在大量试验的基础上制定了在世界上有广泛影响的磁化规范，并首创鉴定磁粉质量的磁性称量法和酒精沉淀法，对磁粉检测的研究和发展作出了卓越的贡献。

由于磁粉检测显示缺陷直观，灵敏度高，检查速度快且成本低廉，因而广泛地应用于板材、型材、管材、锻造毛坯等原材料和半成品的检查，也可用于钢锻件、铸钢件加工过程中的工序间检查和终加工检查，还可以用于飞机、火车、拖拉机等运输工具的维修和大修，以及压力容器、石油储罐、锅炉等重要设备和机械的定期检查。

磁粉检测已发展成为无损检测5大常规技术之一，被广泛地应用于机械制造、化工、电力、造船、航空、航天等工业部门重要承力结构及零部件的表面及近表面质量检验。

2.1.1 磁粉检测的原理

由铁磁性材料制造的零件被磁化后，当表面或近表面存在缺陷（裂纹、气孔或夹杂物）且其延伸方向与磁场方向垂直或呈较大角度时，由于缺陷内部介质是空气或非金属夹杂物，相比于零件基体材料，其磁导率小、磁阻大，因此，磁感应线通过缺陷时往往发生弯曲，逸出零件表面形成可检测的漏磁场，如图2-1所示。此时将磁粉或磁悬液施加到零件表面，在缺陷处的磁粉就会被漏磁场磁化，形成N极、S极，并沿着漏磁场的磁感应线方向排列堆积起来，吸附在缺陷处形成磁痕，从而显示出缺陷的位置、形状和大小。

通常漏磁场的宽度要比缺陷的实际宽度大数倍乃至数十倍，所以缺陷处的磁痕要比实际的缺陷宽很多，进行磁粉检测时很容易观察出来。

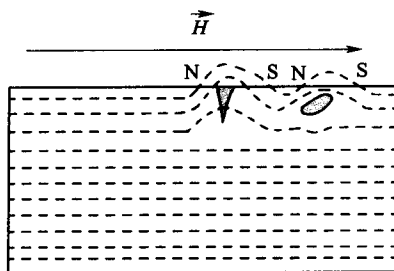


图2-1 工件表面漏磁场

2.1.2 磁粉检测的特点

磁粉检测作为一项较为成熟的无损检测技术,主要利用缺陷处的漏磁场对磁粉的吸引来显示材料表面及近表面的缺陷。其技术特点在实际应用中既有其优势,同时也存在着局限性。

2.1.2.1 磁粉检测的优点

(a) 显示直观。由于磁粉直接附着在缺陷位置上形成磁痕,能直观地显示缺陷的形状、位置、大小。

(b) 检测灵敏度高。可检测的最小缺陷宽度可达 $0.1\mu\text{m}$,能发现深度为 $10\mu\text{m}$ 的微裂纹。

(c) 适应性好。不受工件大小和几何形状的限制,可使用多种磁化方法对工件的各个部位进行检测;可采用不同的检测设备,以适应各种环境现场作业的需要。

(d) 检测效率高、成本低。磁粉检测设备结构简单,操作方便,检测速度快且费用低廉。

2.1.2.2 磁粉检测的局限性

(a) 只能适用于检测铁磁性材料,如碳钢、合金结构钢等,不适用于非铁磁性材料,如铜、铝、镁、钛和奥氏体不锈钢以及用奥氏体钢焊条焊接的钢板焊缝。

(b) 只能用于检测工件表面及近表面缺陷,不能检出埋藏较深的内部缺陷。可检测的皮下缺陷的埋藏深度与采用的检测方法、磁化电流频率与种类以及缺陷特性有关。可检测的内部缺陷埋藏深度一般在 $1\sim 2\text{mm}$ 范围内,对于较大的缺陷,检测深度可达 10mm 。

(c) 能用于检测与磁场方向夹角较大的缺陷,对延伸方向与磁场方向垂直的缺陷检测灵敏度最大。

(d) 难以对缺陷的深度进行定量测量。

(e) 通常用目视法检查和辨别磁痕,缺陷判别和解释需要一定的理论基础和工作经验。

磁粉检测对工件表面及近表面的缺陷检测灵敏度最高,随着缺陷埋藏深度的增加,其检测灵敏度迅速降低。磁粉检测仅局限于对铁磁性材料的表面和近表面缺陷进行检测,所以在现代工业中经常遇到的奥氏体不锈钢、铝镁合金制品等不能应用磁粉检测来检查其存在的缺陷,而只能使用其他的检测方法(如渗透检测、射线检测等方法)进行检测。

2.2 磁粉检测的物理基础

2.2.1 磁场

磁体能够吸引铁质物体,说明磁体周围存在一个功能场,这个功能场被称为磁场。磁场是一种看不见摸不着的特殊物质,它的强弱和方向常用磁力线来进行描述。

磁力线是用来描述磁场中各处磁场强度和方向的曲线。磁力线密集处,对应的磁场较强,磁力线稀疏处,对应的磁场较弱;磁力线上任意一点的切线方向表示该点磁场方向。假定磁力线由磁体的 N 极出发,从 S 极进入磁体,并在磁体内由 S 极通向 N 极,组成闭合的曲线。这些曲线总是各自闭合,互不相交。

为了定量描述磁场的强弱,把垂直通过某一截面磁力线的条数称为磁通量,用 Φ 表示,单位为韦伯(Wb)。在真空或空气中,垂直通过单位面积的磁力线条数被称为磁场强度,用 H 表示,单位为安/米(A/m)。