

# 航空无损检测技术发展动态及面临的挑战

耿荣生, 郑 勇

(北京航空工程技术研究中心, 北京 100076)

**摘 要:** 简要叙述了航空领域无损检测技术的最新进展及一些特殊需要解决的问题, 并就如何发展该领域的未来无损检测技术进行了探讨。

**关键词:** 无损检验; 飞机; 涡流检验; 声发射检验; 射线检验; 磁记忆检验; 综述

**中图分类号:** TG15.28; V271      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6656(2002)01-0001-05

## PROSPECTIVE VIEW ON THE APPLICATION OF NONDESTRUCTIVE TESTING IN AIR INDUSTRY AND POSSIBLE CHALLENGES

GENG Rong-sheng, ZHENG Yong

(Beijing Aeronautical Technology Research Centre, Beijing 100076, China)

**Abstract:** The up-to-date development of nondestructive testing (NDT) and its application in air industry were described. Challenges and difficulties faced by NDT personnel in the area were also discussed.

**Keywords:** Nondestructive testing; Airplane; Eddy current testing; Acoustic emission inspection; Radiographic inspection; Magnetic memory testing; Survey

无损检测 (NDT) 或无损评价 (NDE) 技术在飞机的全寿命过程中起着极其重要的作用, 它对保证飞行安全, 延长飞机寿命都具有非常重要的意义。飞机从各结构件的材料选择和比较到生产制造, 以及在使用过程中都需要无损检测技术来保证其整体性能符合要求, 满足适航性和安全性的要求。历史上许多重大飞行事故都往往同人们在无损检测中的失误或 (因技术水平不够而产生) 漏检密切相关。随着用损伤容限理论替代过去的寿命设计理论<sup>[1]</sup>, 无损检测技术在航空工业中的应用观点也发生了根本性的变化, 这就是无损检测技术应当对飞机的全寿命 (从摇篮到坟墓) 负责, 它不但应能 (在传统意义下) 检测出已经存在的缺陷, 还应能对裂纹发展规律进行预测, 以保证损伤容限理论的正确实施。损伤容限理论认为任何结构都存在缺陷 (这一假设是符合实际的), 只要这些缺陷不超过某一容许尺寸, 结构就是安全的。通常认为损伤容限理论由三个特定内容组成, 即 确定剩余强度 (允许损伤), 即在规定失效安全载荷状态下所允许的最大损伤。

了解裂纹扩展规律, 即损伤从很小尺寸 (此时检出概率 (POD) 很低) 发展到容许尺寸所经历的时间间隔。实施损伤检测, 确定能够及时检出损伤所用的方法和检测周期。容许的缺陷尺寸同材料和结构本身有关, 它一般由疲劳试验确定, 并用来决定首次检测时间和检测间隔。对任何无损检测技术的最基本也是最低要求是, 能可靠地检出达到容许尺寸的缺陷。可以说, 损伤容限理论将飞机结构设计、飞机在使用过程中的维护及无损检测融为一体。从表面上看, 仅上面第三点才同 NDT 有关, 而实际上, 这三条的每一部分都同 NDT 技术密切相关。需要强调的是, 在损伤容限理论指导下, 对 NDT 技术的要求是, 所有接近或达到容许尺寸的缺陷都能, 而且必须能被很可靠地 (至少 90%) 检出, 而能发现裂纹这句话并不需要理解为能发现多小或最小尺寸的裂纹, 相反, 它应被理解为以高可靠性检测出达到容许尺寸的缺陷。

传统观念采取的是在发现问题后进行修补 (维修或修理) 的办法, 要求在发现危及安全的缺陷后立即进行修复。而新的观念是预测并管理, 要求能对

收稿日期: 2001-11-27

可能发生的缺陷、故障进行预报,从而能在某一合适时间段内采取措施。这样才能在保证飞行安全的前提下,保障飞机的适航性以取得最大的经济效益。因此,在航空工业中,要求 NDT 技术能在飞机结构材料选型、部件生产过程、飞机使用过程及飞机延寿中发挥作用。显然,飞机从设计到交付使用,再到延寿,其不同阶段的任务和目标都不相同,与之联系的 NDT 任务和目标也必然发生变化。本文在论及航空领域无损检测技术发展情况时,重点将放在在役检测(或外场检测)技术的发展上,因为这是一个最富挑战性的研究和发展领域。

## 1 航空领域无损检测技术的特殊问题

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例行 NDT 外,有时还需对领先飞行的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。

### 1.1 老旧飞机的无损检测

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 20a(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 40~50a,可见,延寿工作对飞机有多么重要。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,而大多表面腐蚀可用目视观察。在老龄飞机无损检测方面,应注意飞机所有区域都需检测。检测以日历间隔为基础。检测间隔分为初始和重复检测间隔。腐蚀分为轻微、严重和最严重三类,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,老旧飞机无损检测向我们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,由于老龄飞机一般都已有探伤工艺,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 NDT 技术并能确定探测到容限长度裂纹的可靠性。据笔者所知,我国在某些机种上已开展了这方面的工作。

为了解决老旧飞机的无损检测问题,美国成立了老旧飞机无损检测认证中心<sup>[2]</sup>,确定对老旧飞机的主要结构件所应采用的检测方法和检测频率。我国迄今为止尚没有类似机构。尽早确定老旧飞机探伤的特殊问题,以及对所需的设备和探伤方法开展研究是十分必要的。与此同时,对老旧飞机还需能检出结构内深处的小缺陷、层状结构第二层之后的腐蚀和紧固件周围的疲劳裂纹和腐蚀。这可能是人们面临的又一个挑战。

### 1.2 新机新材料的无损检测

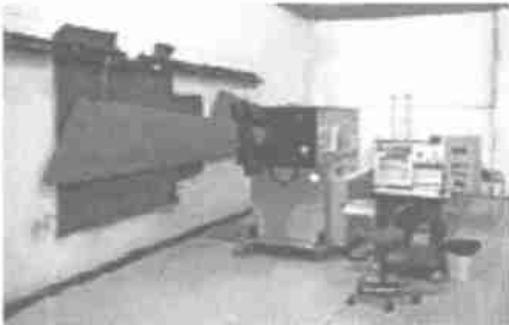
各种新型飞机都大量使用新材料,特别是铸钛合金和复合材料。如民用波音 777 飞机的尾翼和主梁部分,军用飞机(如美国的 F-15)和我国的一些直升机等都大量使用复合材料;苏-27 飞机的机尾罩轮孔和起落架轮叉使用了钛合金材料。对这两类材料用通常的检测方法,特别是常规超声波探伤方法都不很适合。对复合材料,基本要求是能大面积检测其脱粘、分层及性能退化等。因此,非接触式检测技术更能发挥作用。目前,空气耦合超声波检测、激光超声和红外热成像等技术在航空工业特别是现(外)场检测中已广泛采用。法国航空部门研制的车载式激光超声检测系统(LUIS)已用于现场检测幻影 2000 和 FALCON 飞机的复合材料(图 1)<sup>[3]</sup>。

但对多层复合材料,目前仍有许多技术问题难以解决。如图 2 的多层复合材料结构,除在生产线上可用超声 C 扫描技术检测外,目前还没有现成的适合外场的方法来检测中间 1mm 层的脱粘。

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,是另一应当重视的任务,这对民用飞机和军用飞机都同样成立。阵列涡流技术或相控超声检测技术对新机的检测都可以发挥重要作用,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



(a) 检测幻影 2000 的尾翼



(b) 检测 FALCON 飞机的方向舵

图 1 法国航空部门用于快速检测飞机复合材料缺陷的激光超声系统



图 2 多层复合材料结构示意图

上、下蒙皮厚度为 1.5 mm;中蒙皮厚度为 1 mm

上蜂窝心高度为 25 mm;下蜂窝心高度为 35 mm

寿命监测也可起到重要作用。

### 1.3 NDT在飞机日历寿命研究中的作用

日历寿命研究是另一值得重视的课题,问题的关键在于如何利用 NDT 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(AE)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<sup>[4]</sup>。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。

### 1.4 NDT在飞机疲劳裂纹扩展监测中的作用

除腐蚀外,老旧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。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,已为美国洛克希德-马丁公司用在 P-3 ORION 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(LF),再将(简单的、单参数量)两者比值 HF/LF 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 AE 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

专利。

## 2 航空领域需要更加经济有效的无损检测仪器和检测方法

航空领域无损检测的成本一般较高,特别是生产制造过程中的无损检测,这对航空领域 NDT 技术的发展并不是一件好事。因此,应当努力为航空界提供更加经济、有效的无损检测仪器和检测方法,设法研制出既能满足检测可靠性要求,又能让人们买得起的检测设备。

由于可达性好,生产线上无损检测更强调检测的自动化和高效性。例如,飞机几个舵面的复合材料,从毛坯制作到加工成形,比较有效的检测手段多为超声 C 扫描技术。由于自动化程度要求较高,设备的成本一般也较高。随着微电子技术和计算机技术的迅速发展,人们已致力于利用阵列涡流技术或相控超声检测技术,一次探测很多点来降低使用机械扫描系统的成本。

目视检查在航空无损检测中占有重要地位。许多重要故障(如腐蚀等)是在目视发现问题后再用仪器检查的。目视检查在发动机涡轮叶片检查中也很重要。随着电荷耦合器件(CCD)技术和光纤技术的发展,用以辅助目视检测的仪器也发展很快。可以列入此类的有视频显微镜系统、激光或光纤内窥镜以及孔探仪等。建立目视检测标准和比较完整的目视检查培训制度,是摆在航空无损检测人员,特别是管理人员面前的一项迫切任务,在电子检测设备迅速发展的今天,这一点不应也不能被忽视。欧洲在这一方面作出了表率,欧洲 NDT 委员会第八小组就专门研究目视检测标准化问题。目视检测标准 EN 13018 已接近完成,目视检测设备标准 EN 13927 正在征求意见,而目视检测术语的标准 EN 1330 也已接近完成<sup>[5,6]</sup>。

## 3 航空专用检测设备迅速发展

航空工业对无损检测技术的一个重要要求是提高检测自动化程度和缩短检测时间,因此,一些适用于检测飞机不同部位的专用仪器在航空工业上具有广阔的应用前景。一个典型的例子是英国 HOCKING 公司推出的飞机轮毂涡流自动检测仪(WheelScan Mk IV 型),它无需去掉漆层,2min 内即可完成轮毂有无裂纹和腐蚀的检测。橡胶制品(轮胎)的无损检测一直是一个难题,法国 SFT 公司

研制的轮胎分层超声波检测仪可解决这一问题。

对于军用飞机的无损检测,英国采取了经专家充分论证后,直接采购市场上现成出售的仪器设备,然后由三军的 NDT 专家提供独立于仪器制造商的“智能用户”系统<sup>[7]</sup>,即将适用于各型飞机不同部位检测的专家系统固化在仪器软件中,从而方便了最终用户。有报道说,我军也基本上采用了类似做法。这应当是一种最经济、有效的办法。

近年来,航空专用无损检测设备发展十分迅速,由于这方面的内容较多,本文不再一一举例。

## 4 X 射线计算机层析技术(CT)在航空工业中的应用

X 射线计算机层析成象(CT)最先应用的领域是航空工业,它是应用一扇形薄片射线束穿过被检工件被探测器接收,工件旋转使探测器接收反映工件各角度的射线衰减信息,采集的数据经计算机重建处理,获得被检工件截面的 CT 图象<sup>[8]</sup>。工业 CT 图象具有很高的空间和密度分辨力,可视性强。

X 射线工业 CT 的最初应用是检测精密铸造的发动机空心涡轮叶片的壁厚,在工艺制定阶段,选取叶片的工艺控制截面进行高精度壁厚测量,壁厚  $> 0.2\text{mm}$  叶片的测量精度可达  $0.05\text{mm}$ ,取得了很好的效果。

高性能 X 射线工业 CT 对体积型缺陷具有很高的检测效率,在发动机转轴电子束焊缝的检测中,可以准确发现  $\phi 0.05\text{mm}$  的缩孔,对未焊透等焊接缺陷的检测可靠性极高。

X 射线工业 CT 在航空工业中的另一个重要应用是失效分析,它在飞行事故调查和事故原因分析中起重要作用。如分解和剖切失效组件并进行分析,一般会破坏失效组件形貌,造成失效原因丢失,也可能带来与真正失效原因不同的损坏。因此,需要研究非破坏的失效分析方法。工业 CT 可获得被分析失效件的高分辨力的空间分布图象,非破坏地检测其内部的几何分布和材料状况,而且可以直接解决相关的失效分析问题,或为进一步的分析工作提供重要依据。图 3 和图 4 是作者实验室获得的某型涡轮叶片和柱塞组件 CT 图象,由此可分别获得叶片(铸造)质量和柱塞组件机械卡滞的情况。

X 射线工业 CT 检测费用昂贵,这是制约其在航空工业广泛应用的瓶颈。同时,由于现阶段可实用的工业 CT 系统大多采用完全数据重建,可检工

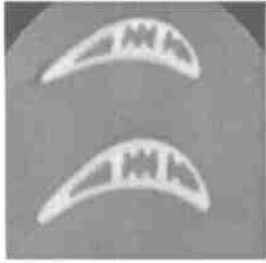


图3 某型涡轮叶片典型  
型面的CT图象



图4 柱塞组件机械卡滞  
的CT分析图象

件的几何尺寸受到限制。目前,正处在初期研制阶段的倾斜入射、非完全扫描重建的CT系统为检测大面积的工件提供了可能。

## 5 磁记忆检测技术在航空工业中应用前景

磁记忆检测技术是近十几年才迅速发展起来的一种新技术<sup>[9]</sup>,主要基于铁磁体的磁弹性效应和漏磁场的不可逆效应。在地磁场的作用下,金属构件中缺陷和夹杂物最集中的地方会出现磁畴钉扎点并在表面出现漏磁场。在应力集中区域内,该磁场的切向分量  $H_p(X)$  具有最大值,而法向分量  $H_p(Y)$  改变符号(过零点)。因此,应力集中线可根据  $H_p(Y)$  值的符号变化进行判断,而应力集中程度可根据  $H_p(X)$  值的大小或  $H_p(Y)$  的变化率来计算。这样,通过对磁场的检测,即可对构件的应力状态和应力集中区域作出判断,从而达到早期诊断的目的。由于无需人为地向被检对象施加磁化场,所以它具有磁力检测(如磁粉检测、漏磁检测等)无法比拟的优点,特别适用于现场或外场检测。

磁记忆检测技术具有极其广阔的应用前景,特别是对那些按均匀受力假设设计,事先并不知道在使用过程中可能会出现应力集中区域的构件(管道、压力容器)而言,磁记忆检测技术更具有特殊意义。

现在飞机主承力构件已按损伤容限理论来设计,而不是按传统的安全寿命法设计。由于去除了不必要的冗余设计,节省了材料,损伤容限设计在保证飞机安全飞行的基础上能大大提高飞机的作战性能。但是,这一新的设计思想对飞机主承力构件的状态监测提出了很高的要求,特别是要求能对早期损伤进行检测和跟踪监测。常规无损检测技术(超声、射线、涡流、磁粉和渗透检测等)只能检测已存在并具有一定尺寸的裂纹。同它们相比,金属磁记忆检测技术的最大优势是可实施故障的早期诊断。它不但可检测出已有的一定尺寸的裂纹等,而且还能

在这些缺陷产生之前,或裂纹尚在萌生的早期阶段,诊断出将要产生这些缺陷的危险区域。对新机而言,利用金属磁记忆诊断技术可以检测飞机主承力结构件内、外表面的应力分布状态,以达到早期诊断的目的,并能对未来该型飞机的无损检测提出指导意见。因此,充分应用磁记忆检测技术,一方面将会极大地保证飞机和武器装备的安全性和可靠性,另一方面也会对新机和新装备未来结构设计的改进提供必要的数据和信息反馈。

## 6 结论

无损检测技术对航空工业具有极其重要的作用,各种最先进的无损检测技术,其首先应用的领域基本都是航空工业。可以毫不夸张地说,航空工业的安危系于无损检测。因此,了解航空工业对无损检测技术的需求,为航空界提供经济、有效和高可靠性的无损检测仪器和检测方法,是该领域无损检测工作者面临的真正挑战。

## 参考文献:

- [1] Goranson UG. Damage tolerance: facts and fiction[A]. 17<sup>th</sup> Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue[C]. Stockholm, Sweden: 1993.
- [2] Roach D, Hamon K, Jones C, et al. Aircraft inspection validation experiments and the use of NDI validation samples[J]. Materials Evaluation, 1995, 53(7): 803 - 807.
- [3] P éillon O, Dupuis J.P. Laser ultrasonic: from the lab to the industry[A]. Proc of 15<sup>th</sup> WCNDT[M/CD]. Rome: 2000. 310.
- [4] Geng RS. Corrosion-related acoustic emission and its identification[A]. Proc of 10<sup>th</sup> APCNDT[M/CD]. Brisbane, Australia: 2001. 1143.
- [5] Macro CH. European standard for visual testing-general principles paper [A]. Proc of 15<sup>th</sup> WCNDT [M/CD]. Rome: 2000. 276.
- [6] Armitt T. The requirement for training of visual test personnel[A]. Proc of 15<sup>th</sup> WCNDT[M/CD]. Rome: 2000. 006.
- [7] Tipler G. Delivery of NDT in the UK military[A]. Proc of 10<sup>th</sup> APCNDT [M/CD]. Brisbane, Australia: 2001. 895.
- [8] AD - A286276, X-ray Computed Tomography Standards [S].
- [9] 任吉林,林俊明,等. 金属磁记忆检测技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.