

在役航空复合材料结构的无损检测技术

Nondestructive Testing Technology for Aviation Composite Component in Service

南京航空航天大学 宁宁 袁慎芳
中国飞机强度研究所 沈真 张积广



宁宁

高级工程师, 现任中国飞机强度研究所结构损伤监测技术研究室主任工程师, 曾主持多个型号飞机地面强度验证试验中的复合材料无损检测工作。主持开发了可用于在位飞机复合材料结构检测的 IUCS-II 型便携式智能超声 C 扫描系统, 并在多个型号的飞机强度验证试验中应用。现在主要从事新型飞机复合材料结构的检测方法研究和结构健康监测技术研究。

随着航空制造技术的不断发展, 复合材料以其高的比强度、比刚度及良好的抗疲劳性和耐腐蚀性获得广

复合材料结构在飞机结构中的应用比例越来越高, 应用量的增加带来了应用中损伤的增加。既要保证飞机的出勤率, 又要保证飞机的飞行安全。这意味着外场的无损检测时间不能太长, 最好是在原位进行、不拆卸, 检测速度还要快; 检测的可靠性要有保证, 超标缺陷不能漏检。

泛的应用。由于影响复合材料结构完整性的因素甚多, 许多工艺参数的微小差异都会导致其产生缺陷, 使得产品质量呈现明显的离散性, 这些缺陷严重影响构件的机械性能和完整性, 必须通过无损检测来鉴别产品的内部质量状况, 以确保产品质量, 满足设计和使用要求。在役飞机的无损检测是确保飞行安全的必要手段, 对复合材料部件尤为重要。

在役飞机复合材料部件的检测与生产制造中的检测有较大的差别, 其特点为:

(1) 在位检测, 即检测对象不动, 检测围绕检测对象来进行, 检测设备都是移动式或者便携式检测设备;

(2) 检测对象都是部件, 多为中空结构, 只能从外部进行单侧检测;

(3) 外场检测, 空中作业多, 检测工作实施不便。

航空复合材料结构类型及其缺陷

航空结构中常用的复合材料结构主要有纤维增强树脂层板结构和夹芯结构。纤维增强树脂层板结构按照材料的不同又分为碳纤维增强树脂结构 (CFRP) 和玻璃纤维增强树脂结构 (GFRP); 夹芯结构主要是蜂窝夹芯结构、泡沫夹芯结构和少量的玻璃微珠夹芯结构。

复合材料构件在使用过程中往往会由于应力或环境因素而产生损伤, 以至破坏。复合材料损伤的产生、扩展与金属结构的损伤扩展规律有比较大的差异, 往往在损伤扩展到一

定的尺度以后,会迅速扩展而导致结构失效,所以复合材料在使用过程中的检测,就显得极为重要,也越来越受到人们的重视。

1 纤维增强树脂层板结构中存在的 主要缺陷

纤维增强树脂层板结构在成型过程中往往会由于工艺原因而产生缺陷,人为操作的随机性会产生夹杂、铺层错误等缺陷;固化程控不好会产生孔隙率超标、分层、脱胶等缺陷;在制孔过程和装配中会形成孔边的分层缺陷;使用中由于受载荷、振动、湿热酸碱等环境因素的综合作用会导致初始缺陷(如分层、脱胶)的扩展和分层、脱胶、断裂等新的损伤和破坏的发生。

2 夹芯结构中存在的 主要缺陷

夹芯结构在成型过程中也会由于工艺原因而产生某些缺陷;为操作误差等会产生蜂窝芯的变形、节点脱开、因为蜂窝芯过低导致的弱粘接等缺陷,固化程控不好会导致局部的贫胶或富胶、弱粘接、发泡胶空洞等缺陷;使用中会导致初始缺陷(如弱脱胶)的扩展和脱胶、进水、蜂窝芯压塌等新的损伤和破坏的发生。泡沫夹芯结构会产生脱胶、芯子开裂等类型的缺陷。

复合材料结构外场 无损检测方法

在复合材料结构的生产过程中,为了确定其技术指标是否达到设计要求,在生产各个环节中,都会通过不同的无损检测手段来检验产品质量,以确保产品的最终质量。其中有些方法也被移植应用于外场的检测,这些方法包括目视法、敲击法、声阻法、声谐振法、超声检测技术、射线检测技术等。

1 目视法

目视检查法是使用最广泛、最直接的无损检测方法。主要借助放大镜和内窥镜观测结构表面和内部可

达区域的表面,观察明显的结构变形、变色、断裂、螺钉松动等结构异常。它可以检查表面划伤、裂纹、起皱、起皱、凹痕等缺陷;尤其对透光的玻璃钢产品,可用透射光检查出内部的某些缺陷和定位,如夹杂、气泡、搭接的部位和宽度、蜂窝芯的位置和状态、镶嵌件的位置等。

2 敲击法

敲击检测是胶接结构的最快捷和有效的检测方法之一,被广泛地应用于蜂窝夹芯结构、板板胶接结构的外场检测,检测速度快,准确性高。敲击检测分为:硬币敲击(Coin Tapping);专用工具敲击,如空中客车公司推荐的敲击工具PN98A57103013;自动敲击检测工具,如日本三井公司生产的电子敲击检测仪WP-632。

3 声阻法

声阻仪是专为复合材料板-板胶接结构件与蜂窝结构件的整体性检测发展起来的便携式检测仪器。声阻法就是利用声阻仪,通过蜂窝胶接结构粘接良好区域与粘接缺陷区的表面机械阻抗有明显差异这一特点来实现检测的,主要用于检测铝制单蒙皮和蒙皮加垫板的蜂窝胶接结构的板芯分离缺陷检测。它能检测结构件的脱粘缺陷,不能检测机械贴紧缺陷。声阻法被国内的西飞公司生产中粘接质量检测和美国波音公司飞机蜂窝部件的外场检测广泛采用。此方法操作简单,效果良好,能满足设计和使用要求。

4 声谐振法

声谐振法是利用胶接检测仪,通过声波传播特性的测试实现对胶接结构的无损检测。适用于检测曲率半径在500mm以上的金属蜂窝胶接结构,能检测单侧蒙皮和带垫板的金属蜂窝结构的脱粘缺陷。该方法被国内外的多家制造企业和航空公司作为外场检测的手段和规范。

5 超声检测技术

超声检测法是无损检测最主要的手段之一,主要包括脉冲反射法、穿透法、反射板法等,它们各有特点,可根据材料结构的不同选用合适的检测方法。

超声检测技术,特别是超声C扫描,由于显示直观、检测速度快,已成为飞行器零件等大型复合材料构件普遍采用的检测技术。由于大型超声C扫描系统需要喷水耦合,且多数为超声穿透法检测,只能在大的检测实验室进行。而使用中的飞机复合材料部件多为中空结构,超声穿透法对其无能为力。因而外场的复合材料超声检测多数为传统的人工超声波A扫描检测。

人工超声波A扫描检测可以逐点覆盖检测结构件的所有检测面,设备简单,实施方便;缺点是检测可靠性低,主要取决于检测者的技术水平和敬业精神。

6 射线检测技术

对于复合材料结构而言,射线检测仍然是最直接、最有效的无损检测技术之一,特别适合于检测纤维增强层板结构中的孔隙和夹杂等体积型缺陷和夹芯结构中的芯子变形、开裂、发泡胶发泡不足以及镶嵌物位置异常等缺陷的检测。射线检测对垂直于材料表面的裂纹也具有较高的检测灵敏度和可靠性,但对复合材料结构中的分层缺陷不敏感。该方法被国内外的军方和多家航空公司作为外场检测的手段和规范。

复合材料结构外场无损检测 新技术、新方法

1 外场在位检测的便携式超声C扫描系统

IUCS-II型便携式智能超声C扫描仪由中国飞机强度研究所研制,是国内研制的唯一可用于外场飞机复合材料结构检测的设备。该设备基于超声脉冲反射法,一代产品以CTS-23A超声探伤仪为平台研制



开发,外加定位系统、专用数据采集和处理软件笔记本电脑等部分组成。外接真空吸盘装置,可检测立面、顶面等状态的复合材料。超声探头采用自主研发的聚焦水囊探头,具有很高的检测分辨率,可以定位损伤所处的层;且无需喷水耦合,可用于平面、曲面及装配后结构件的检测。拉线式大位移传感器扫描定位系统可在 800mm/s 的探头运动速度下实现缺陷的精确定位。针对不同的材料和结构形式,可按需要进行回波距离方式和回波幅度方式成像,检测结果实时按照与实际尺寸 1:1 的显示比例显示输出。正研发中的二代升级产品,基于工业控制计算机和数字超声卡的平台,实现数字超声仪和计算机的高度集成,实现产品数字化,缩小产品体积,更便于外场使用。

系统紧凑小巧,能精确定位损伤的水平面位置、大小及埋深,适用于在复杂环境下工作。可检测复合材料加筋板结构的分层、脱胶、疏松、气孔及蜂窝夹层结构的贫胶、富胶、弱粘接等缺陷。主要应用于碳纤维和玻璃纤维的层板、加筋板结构及蜂窝结构的在位检测。

2 X 射线非胶片成像技术

X 射线非胶片成像技术是近年来无损检测技术发展最快的专业之一,超小型、电池供电的 X 射线机、射线计算机照相(Computer Radiography, CR)成像技术、数字式辐射成像技术(Digital

Radiation, DR)等逐渐由实验室走向实际应用。

用可以反复使用的 CR 成像板(IP 板)来代替传统的胶片,用 CR 扫描仪可快捷获取到结构内部信息的数字影像,省去了暗

室处理的过程、时间和费用;由于 IP 板具有高灵敏度,因而只需要很少的曝光时间,提高了检测效率。

系统由射线机、IP 板、PCS 扫描设备和计算机系统组成。

DR 成像系统是一种可以在外场应用的 X 射线实时成像系统,被美国军方应用于在役飞机的复合材料结构无损检测,尤其是蜂窝结构的进水检测。它可以直接在计算机上成像,没有中间环节。而且系统组成简单轻巧,灵敏度高,曝光时间短,检测效率高,适合外场作业。

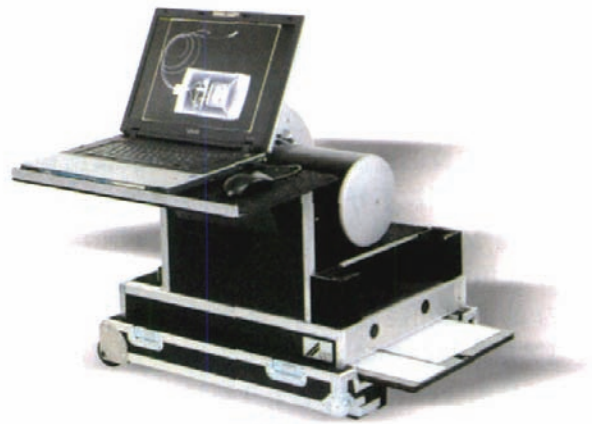
电池供电的脉冲式射线机是射线照相技术发展的另一个新产品,重量只有 12 lb,约 5.5kg 的脉冲式的辐射 X 射线,辐射总量不大(可满足 CR 和 DR 成像所需),但穿透力却足够强(270kV),是外场无损检测 X 射线数字成像检测的好搭档。

3 红外热成像技术

红外热成像是利用热像仪以热图的方式非接触地测定被检工件表面的温度分布及等温线轮廓的技术。可于检测层板结构中存在的分层、冲击损伤、脱粘和夹芯结构中的板芯脱粘、进水等缺陷。由于其非接触、成片快速检测、可应用于外场和原位检测等优点,近年来受到广泛关注。

根据热激励方式的不同,分为脉冲加热法、调制加热法和超声波激励加热法。其中,美国红外热波检测(TWI)公司的脉冲闪光红外热成像检测系统已经被美国军方等应用于在役飞机的检测,主要检测蜂窝结构的进水、脱粘和层板结构的冲击损伤和分层类损伤。

红外热成像检测技术也被空中客车公司作为其 A300 系列飞机的检测方法之一,它的热激励不仅包括恒温箱、红外灯、热空气枪、电弧灯等热激发方式,还包括冷空气枪、低温流体、冰箱等冷却方式。检测的损伤类型有层板的分层、脱胶和夹杂,夹芯结构的脱胶和液体渗入,金属胶接件的脱胶和腐蚀等。



CR 成像系统

结束语

复合材料结构在飞机结构中的应用比例越来越高,应用量的增加带来了应用中损伤的增加。既要保证飞机的出勤率,又要保证飞机的飞行安全。这意味着外场的无损检测时间不能太长,最好是在原位进行、不拆卸,检测速度还要快;检测的可靠性要有保证,超标缺陷不能漏检。上述许多先进的检测手段在国外已经应用多年,在我国仍然是新事物,需要进一步学习国外复合材料无损检测的先进技术,提高我国复合材料结构的无损检测水平。

(责编 依然)