

浅谈航空复合材料无损检测技术及其进展

Brief Analysis on Non-Destructive Testing for Aero Composites and Its Development

中国空空导弹研究院 程功 肖军 李建军



程功

中国空空导弹研究院在读博士生, 硕士毕业于北京航空航天大学材料科学与工程学院, 主要研究方向为机载导弹用非金属材料的设计与应用。

随着复合材料在航空结构件上应用比例的不断提高, 为保障飞行安全, 监控复合材料结构的内部质量受到越来越广泛的关注。因此, 航空复合材料无损检测技术也越来越多地应用于航空复合材料结构成型、装配、试验、维护和使用的全过程中。

为保证航空复合材料构件能够满足使用要求, 无损检测应该贯穿于构件设计、试验以及生产的全过程。当构件变更设计参数或者经历损伤试验后, 应该再次检测和控制构件的内部质量, 确保构件的安全使用。针对复合材料构件的维护, 传统观念往往是发现问题后进行修补或者替换, 但是航空复合材料构件的使用环境具有特殊性, 这就要求必须对其进行定期测试, 对可能发生的缺陷、故障进行预测, 从而在合适的时间采取措施, 进行修补或者替换。

无损检测(Non-Destructive Testing, NDT)^[1]即采用非破坏性手段, 利用声、光、电、热、磁和射线等技术探测材料、构件内部的孔隙、夹杂、裂纹、分层等影响其使用的缺陷及其位置。目前, 航空复合材料无损检测方法主要有超声检测、射线检测等。本文结合常见缺陷类型, 论述了航空复合材料对无损检测技术的需求, 介绍了几种航空复合材料无损检测技术的现状及其应用, 并且针对航空复合材料无损检测技术的发展趋势进

行了展望。

航空复合材料与缺陷的无损检测

复合材料具有重量轻、比强度高、比刚度高、耐疲劳、可设计性等优点, 有利于航空飞行的减重, 因而获得越来越广泛的应用。纤维增强复合材料在物理性能上的各向异性、声衰减严重等特点使其在无损检测方面与传统金属材料存在区别, 如何进行复合材料内部的质量控制成为研

究热点。下面结合复合材料常见的缺陷类型,简述航空复合材料对无损检测的技术需求。

复合材料中的缺陷类型一般包括:裂纹、树脂开裂、断裂、胶接缺陷、空隙、分层、夹杂物、溢胶、脱胶、胶层超厚或超薄、纤维断裂与卷曲、贫胶、厚度偏离、磨损、划伤、树脂堆积、铺层皱折、凹坑、凸起、积瘤等。其中裂纹、断裂、空隙、分层等一般是航空复合材料构件上最主要的缺陷。航空复合材料构件常见的缺陷类型、影响及检测特点^[2]见下表。

为保证航空复合材料构件能够满足使用要求,无损检测应该贯穿于构件设计、试验以及生产的全过程。当构件变更设计参数或者经历损伤试验后,应该再次检测和控制构件的内部质量,确保构件的安全使用。针对复合材料构件的维护,传统观念往往是发现问题后进行修补或者替换,但是航空复合材料构件的使用环境具有特殊性,这就要求必须对其进行定期测试,对可能发生的缺陷、故障进行预测,从而在合适的时间采取措施,进行修补或者替换。所以航空复合材料构件在使用过程中的定期检测就显得极为重要。

上述技术需求要求无损检测设备小型化,能够不受场地、被检测构件形状等因素的限制,而且要向量化、自动化、多功能化、智能化等方向

发展。

航空复合材料无损检测技术

经过多年的发展,航空复合材料无损检测技术得到了长足的进步,用于航空复合材料构件的技术有超声检测技术、射线检测技术、红外热波检测技术等。

1 超声检测

作为目前国内外最为实用有效、应用最为广泛的无损检测技术之一,超声检测技术能够可靠地检测出复合材料构件中的分层、疏松、孔隙等大部分危害性缺陷,已经全面应用于航空领域的制造及维护过程中。

超声检测技术的优点是穿透力较大,对平面型缺陷如裂纹夹层等探伤灵敏度高,操作安全,易于实现自动化检测;缺点是不易检测形状复杂的构件,并通常需要用耦合剂充满探头和被测构件表面之间的空隙,并不适合对大型航空复合材料构件进行外场原位检测。

麦克唐纳飞机公司研制的计算机控制超声扫描和数据采集系统(AUSS)不仅能实现高分辨率的超声检测,还扩大了缺陷检测范围,能检测胶层气孔、分层和平面型气孔的不连续性,还能检测复合材料构件中线型气孔、夹杂台阶-板间隙等缺陷^[1]。北京航空制造工程研究所(625所)研制的大型复合材料结构自动化超

声检测系统,有20个检测通道,具有独特的扫描跟踪技术,可实现对复合材料结构的B、C、T自动扫描检测,能够用于7500mm×6000mm的大型结构件的自动化扫描成像检测^[3]。

1997年,美国Ultran实验室^[4]利用压缩光纤作为声阻抗匹配层,成功研制出新一代空气耦合式超声换能器,解决了传统超声检测必须用液体作为声耦合介质的缺点,为外场快速检测大型构件创造了条件。美国QMI公司的空气耦合式数字超声波探伤仪,性能可与普通超声波探伤仪相比。意大利空军^[5]已将空气耦合技术用于飞机的复合材料检测中。在美国联邦航空局的资助下,衣阿华州立大学NDT中心^[6]采用空气耦合超声技术(AC-UT)对复合材料蜂窝夹层结构操纵面等部件进行现场检测,涉及空客A320、波音737、MD-80和“黑鹰”直升机等多种机型。该中心开发了由低成本软硬件构成的手动通用型空气耦合超声C扫描系统GenScan,可以兼容其它仪器(如Panametrics Epoch IV裂纹检测仪),提高了复合材料的检测效率。中国飞机强度研究所研制的IUCS-II型便携式智能超声C扫描仪基于超声脉冲反射法,超声探头采用自主研发的聚焦水囊探头,具有非常高的检测分辨率,能够定位损伤所在层,并且无需喷水耦合,可用于平

航空复合材料构件的缺陷类型、影响及检测特点

缺陷类型	对结构的影响	检测特点及建议
树脂堆积、铺层皱折、凹坑、凸起、积瘤	影响复合材料构件的外观、强度、耐久性能以及气动性能	此类缺陷一般出现在构件表面,通过目视法即可检测
贫胶、厚度偏离、磨损、划伤	损害复合材料结构的整体完整性	能够借鉴金属材料的无损检测方法
空隙、分层、夹杂物、溢胶、脱胶、胶层超厚或超薄、纤维断裂与卷曲	降低复合材料结构的物理以及机械性能	不可简单地引用金属材料的无损检测方法,需要利用复合材料构件所特有的无损检测方法,如超声、X-射线等
裂纹、树脂开裂、断裂、胶接缺陷、大于19.0mm的分层、大于19.0mm的空隙、大于0.5mm的夹杂物	对复合材料构件性能有较大影响	尽量使用定量程度较高的复合材料无损检测方法以及多功能综合检测系统,如多轴全自动超声C扫描检测系统

面、曲面及装配后的结构件的无损检测。拉线式大位移传感器扫描定位系统能够在 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,检测结果按照与实际尺寸 1:1 的显示比例实时显示输出^[7]。

激光超声检测技术利用激光束可以在空气中远距离传播的特点,无需使用耦合剂。美国 F-22 战机的复合材料结构已采用激光超声检测,法国、加拿大等国的民用航空飞机上复合材料及胶接结构也开始采用激光超声快速检测技术。该技术通过选择激光束的照射面积,可以实现大面积的快速扫描,针对大型复合材料蒙皮、壁板及金属胶接结构,单通道超声扫描速度可达 300mm/s 以上,检测结果可实现超声 B、C、T 扫描成像^[8]。

2 射线检测

射线法具有检测结果直观、形象、可靠等优点。不过,射线法对薄板复合材料构件的分层缺陷以及扁平型气孔几乎是无法检测的。

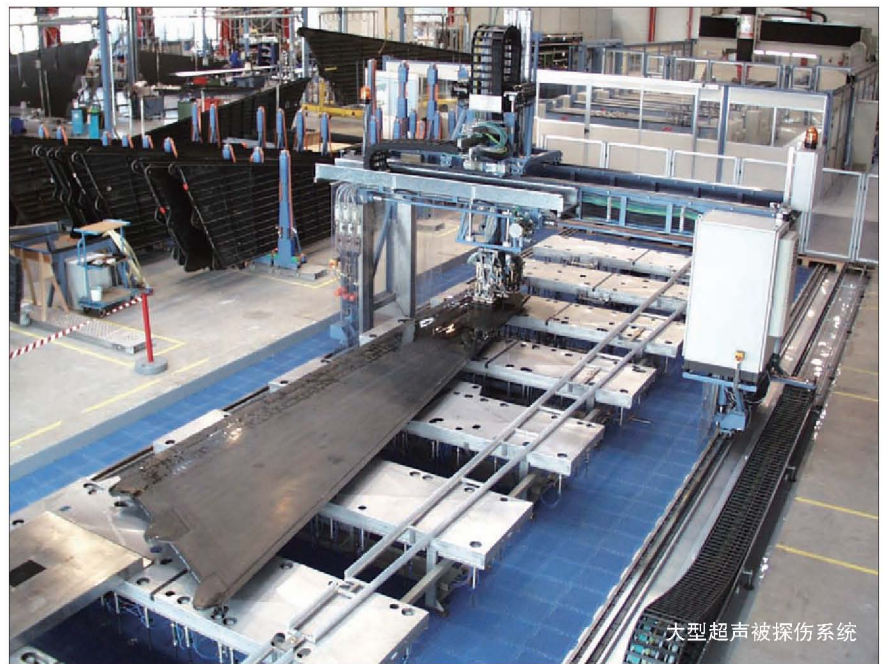
F-111 水平安定面复合材料构件使用射线方法检测了叠层蒙皮及蜂窝芯子的内部缺陷^[1]。肖军等^[2]利用射线法检出了空空导弹轻质树脂基复合材料舵翼面蒙皮中 0.2mm 的孔隙及裂纹。陈伯火等^[9]利用 X 射线照相法检测火箭发动机固体药柱内部气孔,可以检测出直径大于 3mm 的气孔,满足了对气孔缺陷检测的设计指标。射线法已应用于复合材料蒙皮的粘结检验,并且在飞机发动机结构的分层检验中,可检出 0.15mm 的分层间隙^[4]。

3 红外热波检测

红外热波检测具有非接触、快速、检测面积大、直观、准确和成本较低等特点,适合现场、外场以及在役检测,通常作为超声和射线等检测技术的补充手段;其缺点包括:检测灵敏度随缺陷所处深度的增加而

迅速下降,热传导会使缺陷边缘的热图显示扩大和模糊、清晰度变差、解释温度记录曲线困难,以及易受环境空气流动影响等等。

针对航空复合材料,红外热波无损检测主要用于飞机多层复合材料受单点撞击后的层析探伤、厚度测量以及裂纹检测等方面。受单点撞击后的碳纤维增强多层复合材料试件表面无明显可见损伤,脉冲加热后,应用红外无损检测技术可得到一组热图,不同时间的热图能够显现不同深度层的损伤状况,并且各层损伤消耗沿该层纤维方向扩展。俄罗斯研究者^[10]使用 UK-10II 型快速热像仪可以检测出塑料-金属-塑料胶接结构中 10mm × 10mm 的粘脱。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及分层类损伤^[7]。



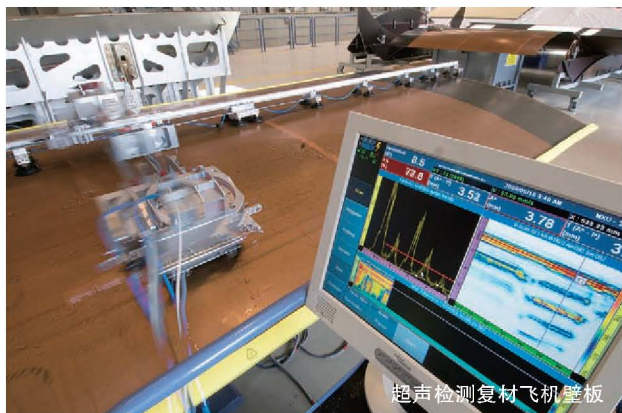
4 微波检测

作为一种高频电磁波,微波的特点是波长短、频率高、频带宽,其波长在 1mm~1000mm 之间,频率通常为 300MHz~300GHz。微波在复合材料

中穿透能力强、衰减小,可以克服其它检测方法的不足,如超声波在复合材料中衰减大、难以检测内部较深部位的缺陷,射线对平面型缺陷检测灵敏度低等,微波检测对复合材料结构中的孔洞、疏松、基体开裂、分层和脱粘等缺陷具有较高的灵敏性。

1967 年,美国空军燃烧控制工程实验室使用频率为 9.6GHz(X-波段)和 35GHz(Ka 波段)的微波,利用反射法对塑料薄片厚度进行测量,精度可达 0.125mm。该实验室对环氧树脂样品进行扫描,能够检测出直径为 1.02mm~5.8mm 的缺陷;扫描纤维缠绕增强塑料,能够检测到内部面积小至直径 1.2mm、分别在厚度 2.5mm~50mm 的塑料与 4.0mm~75mm 的橡胶衬垫之间的脱粘;利用穿透法测定微波的能量变化能够检测到 0.02mg/cm³ 的密度变化^[11]。上世纪 70 年代以来,美国 AD 报告和 NASA 报告大量介绍了大型固体火箭发动

机的微波无损检测,主要有驻波干涉法、反射法和散射法。驻波法一般用于测厚;反射法可以发现固体推进剂内深 600mm 处直径 25mm 的气孔缺陷^[11]。



超声检测复合材料飞机壁板

综上所述,虽然用于航空复合材料的无损检测技术有多种,但每种技术都有其特定的应用范围和优缺点,单一方法难以实现对所有类型缺陷的检测,通常需要多种方法相结合。

航空复合材料无损检测技术发展展望

1 由定性检测向定量检测转化

为了提高定量检测的能力,美国、英国等发达国家开始大力发展和研究各种成像技术、信号处理技术以及分析计算缺陷的新方法。以超声检测技术为例,英国超声波科学有限公司(USL)为英国宇航系统公司提供的17轴全自动超声C扫描检测系统能够在0.5m/s的扫描线速度下,检测出复合材料约4mm×4mm的制造缺陷,并且拥有最高可达2μm的分辨率,最高可重复性亦可达5μm,能够准确标注缺陷位置,提高了定量检测缺陷的能力以及定量分析的精度。

国内的研究机构在定量检测方面,也取得了一定成果。北京航空制造工程研究所利用超声自动化检测技术,对典型RTM复合材料结构冲击损伤进行了检测,通过直观的图像方式,再现了被检测复合材料结构内部缺陷的详细分布和整个结构的内部质量情况,进而得到缺陷的量化分布情况,能够进行缺陷量化评估[3]。

2 设备的自动化水平进一步提高

自动化检测技术比手工操作能够提供更好的重复性和结果的一致

性,可减少随机误差和人为误差的概率,降低对检测人员操作技术熟练程度的要求,还能实现复杂并且全面的检测,迅速处理检测数据,从而大大提高工作效率。

作为具有更高效率和适应性的自动化超声扫描系统,麦克唐纳飞机公司的AUSS检测系统,可以在扫描某个零件的同时绘制前一个零件的数据图,而操作者还可以在视频终端评估数据的某些细节,从而大大提高效率。检测F-15飞机水平尾翼扭矩盒的蒙皮-蜂窝芯部位所需工时已从手工检测的72小时缩短到不超过2小时^[1]。欧洲Airbus公司已将128通道的超声自动扫描技术用于大型复合材料壁板的快速无损检测,从而显著提高检测效率^[8]。USL公司的全自动超声C扫描检测系统配备了高速、复杂曲面跟踪系统,具有高自动化、高强度、高机械精度等特点,最高扫描速率高达1m/s,能够实现对航空复合材料构件快速有效的检测。UltraPAC公司的超声C扫描成像系统装备了由高性能数控电机驱动的多轴、多自由度、高速(可达0.5m/s)、高精度(可达0.05mm位置精度)的水槽扫描系统。

北京航空制造工程研究所成功开发了不同系列的复合材料超声自动化扫描检测系统,如用于平面类复合材料结构的MUI-20E超声自动化无损检测系统,采用超声反射法,一次最大扫描面积可达1500mm×1500mm,具有极佳的信噪比,可实现复合材料结构的A、B、C、T自动扫描检测;用于非曲面类复合材料结构的MUI-21超声自动化无损检测系统,采用超声穿透法和反射法,一次最大扫描面积可达

4000mm×2500mm,具有很好的同步扫描技术,能够实现复合材料结构的B、C、T自动扫描检测;此外,还有CUS-22超声自适应检测设备、CUS-2F复合材料缠绕超声自动检测设备^[9]。

3 多功能综合检测系统的发展

无论哪种无损检测方法,都有其特点,同时也存在着各自的不足,不管哪种方法都不是万能的。为了更准确、可靠地全面检测与评价材料与产品的质量与性能,除了不断改进常规无损检测仪器与器材的性能外,还应该重视由多种方法组成的多功能综合检测系统的研究开发。

Sonic Bondmaster粘接质量检验器综合了声阻法、谐振法、导波法以及声-超声法,扩大了检测范围,使检测性能大大提高。其中声阻法主要用来检测脱粘、内芯变形以及材料构件内部深度超过6.3mm的缺陷,小机械阻抗探头能够检测弯曲表面;谐振法一般用来检测板-板粘接、纤维编织和蜂窝结构材料中的分层和脱粘,并能够确定缺陷的位置和深度;导波法用于扫描更深的脱粘,包括内芯变形以及石墨环氧材料的内部损伤;声-超声法用于检测蜂窝结构^[12]。

结束语

随着航空飞行器越来越多地使用复合材料,更加丰富的检测手段将被使用,检测的能力和范围也将进一步扩大。无损检测将不再局限于制造过程和地面维修,还能够提供实时的结构安全监测信息,同时,软件可以利用数据综合技术来处理从传感器发来的信息,给出实时的检测报告,从而最大程度地保证复合材料结构的安全使用。

本文有参考文献12篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 侧卫)