

C夹层雷达罩无损检测技术

Nondestructive Testing for C-Sandwich Radome

北京航空材料研究院 郭广平



郭广平

博士、研究员, 现任北京航空材料研究院无损检测室主任, 无损检测学会常务理事, 新技术专业委员会主任, 《无损检测》、《材料工程》等杂志编委。主要从事航空复合材料, 发动机精密铸件无损检测方法的研究, 涉及光学、红外、超声、射线及工业 CT 等技术。

雷达罩结构设计检测主要包括: 复合材料层压板内部的分层缺陷检测、蒙皮与蜂窝之间的脱粘缺陷检测、CFRP 层压板内部的孔隙率检测、外来物检测、蜂窝芯质量检测、蜂窝块间发泡胶拼接质量检测、雷达罩总厚度测量、雷达罩漆层厚度检测等。此外根据雷达罩内部结构情况, 如预埋件位置等, 往往也需要借助无

损检测的手段进行检测。而上述检测使用单一的检测技术是难以实现的, 因此除常规检测技术外, 实际工作中开发了穿透法超声 C 扫描、电磁测厚仪、涂层超声测厚等新技术。本文着重介绍 C 夹层雷达罩无损检测使用的各种技术和发现的缺陷, 并探讨雷达罩服役后所需的相关无损检测技术。

损检测的手段进行检测。而上述检测使用单一的检测技术是难以实现的, 因此除常规检测技术外, 实际工作中开发了穿透法超声 C 扫描、电磁测厚仪、涂层超声测厚等新技术。本文着重介绍 C 夹层雷达罩无损检测使用的各种技术和发现的缺陷, 并探讨雷达罩服役后所需的相关无损检测技术。

雷达罩制造过程中的无损检测技术

雷达罩无损检测的要求大体可分为缺陷检测与几何尺寸测量 2 种。由于雷达罩在使用过程中承受较大载荷, 雷达罩结构的整体性检测非常重要。制造过程中若出现分层、脱粘、发泡胶质量问题、蜂窝芯缺陷、外来物等现象会严重影响飞行安全。另一种是几何尺寸测量, 包括雷达罩的壁厚测量、雷达罩表面涂层厚度测量以及雷达罩内部预埋件位置检测。

大型喷水穿透法超声 C 扫描检

测系统可用于检测雷达罩缺陷。电磁测厚仪用于雷达罩壁厚的测量, 涂层超声测厚技术则可用于雷达罩涂层厚度的测量。此外还采用射线照相技术成功检测了蜂窝拼接的发泡胶质量、玻璃钢预埋件位置。对于缺陷复检、实心玻璃钢、钻孔质量等的检测使用了常规手动脉冲反射法超声检测技术。

1 超声检测技术

对于 C 夹层而言, 中蒙皮缺陷的检测是检测中的难点。中蒙皮的分层及脱粘缺陷与中蒙皮本身的界面波无法分开, 所以无法用脉冲反射法检测中蒙皮缺陷。

经过大量试验最终认定, 穿透法超声检测技术是目前唯一可以有效检测中蒙皮缺陷的无损检测技术。超声穿透法同时能检测出内外蒙皮和蜂窝的各种常见缺陷。但穿透法需要使用机械扫描系统进行检测。雷达罩一般体积较大, 而且是曲面结构, 研制机械扫描系统有很大难度。

此外, C 夹层结构中超声信号衰减大, 对超声探伤系统的能量、灵敏度、信噪比提出了很高的要求。

针对某型号 C 夹层雷达罩的无损检测要求我们自行研制了大型穿透法超声 C 扫描系统 SM-99。该系统扫描臂长超过 6m, 占地面积约 60m², 探头最大扫描速度超过 300mm/s, 图像分辨率不低于 2mm。超声探伤仪采用德国 KK 公司的 USIP12 型, 探头采用 Matec 公司直径为 25.4cm 频率为 0.5MHz 的探头, 有效检测灵敏度约 100dB。系统实际使用效果良好, C 扫描检测图像清晰, 雷达罩局部 C 扫描图像如图 1 所示。

SM-99 系统除检测分层、脱粘等缺陷外, 对于蜂窝拼接与修补、可能存在的外来物、内部结构特征都可准确显示和测量。使用 SM-99 系统后发现了多种缺陷, 如通过 C 扫描图像特殊衰减区的分析, 发现部分蜂窝固化过程中质量存在的问题; C 扫描图像显示经过静力试验, 出现了缺陷显示, 但外观质量无任何变化, 解剖及后续调查都证明该区域受到意外冲击造成损伤。

目前, 复合材料和胶结结构的弱粘接(粘接强度低, 但未脱开) 问题还是一个世界性难题, 采用应力加载的激光表面变形检测技术和超声导波技术在特定条件下有效, 但尚无通用的成熟检测手段。对于 C 夹层雷达罩, 尽管穿透法超声 C 扫描技术检测能力十分强大, 但在产品阶段该技术也很难发现弱粘接问题。而如果经过加载, 弱粘接处产生脱粘缺

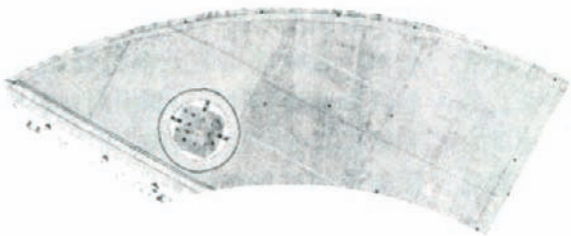


图 1 雷达罩局部 C 扫描图像

陷, 即使是紧贴型脱粘, 穿透法 C 扫描技术也十分有效。

C 夹层雷达罩采用常规超声脉冲反射法(A 扫描) 可检测内外蒙皮附近的缺陷, 多用于实心玻璃钢区检测、钻孔边的分层缺陷检测、穿透法超声 C 扫描发现缺陷后的复验等情况。在实际实施过程中, 超声 A 扫描技术往往会遇到信号识别的困难, 如近表面分层不易与脉冲分开、涂层干扰或外蒙皮孔隙衰减造成高频探头无可用回波信号、表面粗糙耦合不好、蒙皮与蜂窝之间胶膜固化形态复杂造成反射信号不稳定等问题。雷达罩检测中穿透法超声 C 扫描信号是最为稳定、可靠的, A 扫描检测时, 应根据具体情况, 结合高频检测蒙皮、低频观察中蒙皮反射信号的方式综合进行判断。

2 射线检测技术

雷达罩内蜂窝块之间部分区域采用发泡胶作粘接剂。发泡胶在室温下是固态, 雷达罩在热压罐中升温固化过程中逐渐发泡、膨胀, 最后充满蜂窝拼接缝。如果工艺控制不稳定, 发泡胶不能充分膨胀, 将直接影响粘接强度, 从而最终影响雷达罩的使用安全。我们采用射线照相的方法检测发泡胶的发泡情况。便携式射线机、工业 X 光胶片分别放置在拼接缝两侧进行照相。该检测要求射线入射方向尽量与蜂窝壁平行, 否则可能由于图像投影重叠无法准确判断发泡情况。

在实际雷达罩发泡胶胶接区的射线检查中, 曾发现过发泡胶发泡不良的问题。射线底片显示胶附着在蜂窝壁周围, 未能有效填充两块蜂窝之间的区域。对该雷达罩进行的解剖, 证实了射线检测的正确性。图 2 是在雷达罩固化过程中观察到的发泡胶发泡不良的现象。目视仅能观察表面

情况, 射线检测更能够反映内部发泡是否均匀。除检测蜂窝之间发泡胶的质量外, 射线照相技术也适用于检测预埋件位置、验证超声发现的缺陷、检测内部蜂窝结构缺陷等。上述检测技术难度不大, 但关键是要保证射线入射角度。此外现场进行射线检测要满足环保、安全等要求, 实施起来比较麻烦。

3 雷达罩壁厚的电磁测厚技术

雷达罩体积大, 无法使用卡尺、卡钳等常规量具进行测量。我们为雷达罩壁厚测量专门研制了电磁测厚仪 EMT-01, 电磁测厚仪的发射和接收 2 个探头均为线圈, 主机设有振荡电路, 为发射探头提供交变电流, 使发射探头周围形成交变电磁场。接收探头位于该电磁场中, 从而产生交变的感生电压。当感生信号最强时, 探头之间距离最近。电磁测厚仪的输出特性如图 3 所示。

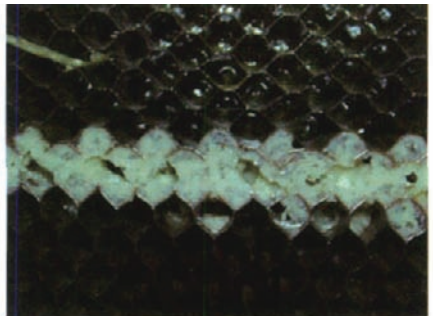


图 2 发泡胶发泡不良现象

将两个探头分别置于雷达罩的内、外表面对应点处进行测量。两探头间不需要刚性支架, 克服了传统卡尺类量具不能伸入大构件内部测量的缺点。电磁测厚仪 EMT-01 测量范围 0 ~ 80mm, 测量分辨率优于 0.1mm; 测量精度优于 ±0.3mm。

电磁测厚仪在实际使用中准确监控到雷达罩厚度的变化情况, 为改进制造工艺和设计参数提供了重要依据。该仪器也适用于其他非铁磁性结构的测量, 并已经在多种复合材料产品检测中投入使用。

4 超声涂层测厚技术

雷达罩外部涂层要满足防静电、

抗雨蚀等要求,由3种涂料依次喷涂而成,总厚度约200~300 μm 。3层材料均很薄,且喷涂在非金属粗糙表面,没有专门的仪器和方法可以直接测量。经过涂层样件超声测厚试验和解剖对比,最终采用超声脉冲反射法测量涂层厚度。测量用仪器为美国NDT公司的Novascope 3000,该设备兼有模拟波形显示和数字显示。对于雷达罩的涂层测厚,波形比较复杂,直接使用波形人工识别方法。探头用D11型,频率15MHz,耦合剂为甘油。

通过分析涂层试样的涂层回波信号特征可以确定涂层界面波位置,根据超声传播时间确定涂层厚度。此外,在厚度计算时应考虑雷达罩表面粗糙度对厚度的影响。图4是涂层样件解剖结果与超声传播时间的关系。数据显示超声回波时间与涂层厚度有良好的线性关系。因此,超声法测量雷达罩涂层的总厚度是可行的。统计分析表明,测量精度为20~30 μm 。

该方法用于实际涂层检测,为改进雷达罩的喷涂工艺提供了技术依据。同时我们也发现了涂层固化状态不同,以及材料成分的改变均可能造成回波信号的变化,造成上述超声测厚方法波形识别的困难。

雷达罩的在役无损检测技术

考虑到检测成本与工作效率,目

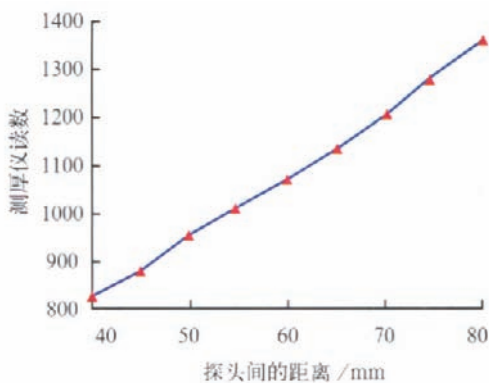


图3 EMT-01 电磁测厚仪输出特性曲线

视与敲击是复合材料最常用的检测方法。较大面积的脱粘缺陷可通过目视发现,特别是当蒙皮较薄时。如果脱粘缺陷存在间隙,手工敲击或采用“啄木鸟”等便携仪器可以确认该类缺陷。使用超声脉冲反射法可对缺陷进一步准确定量。对于外蒙皮分层缺陷,采用5MHz高频聚焦水膜探头具有较好分辨率。对于外蒙皮分层,采用1MHz接触法低频头、观察中蒙皮反射信号强度往往有更好的检测效果。实际检测中,雷达罩涂层及外蒙皮孔隙的严重程度都可能造成超声信号的衰减,影响检测效果。此外,如果蜂窝高度较小,低频探头的中蒙皮回波信号可能与始波无法清晰分开。

当脱粘缺陷属于紧贴型脱粘时,手工敲击、啄木鸟敲击仪都无能为力。试验证明,此时用超声穿透C扫描检测技术可以准确发现并定量脱粘缺陷的大小。解剖试验证明穿透法超声C扫描对紧贴性脱粘缺陷的定位、定量十分准确。但由于场地和设备的限制,在现场往往难以实施有效的穿透法检测。

资料显示,对于大型预警机雷达罩,美国和欧洲都使用了激光错位散斑(Laser Shearography)技术作为预警机雷达罩维护检测手段。激光错位散斑技术实质上是测量表面离面位移的光学干涉技术。通过真空吸附罩对雷达罩表面抽真空,如果蒙皮下存在脱粘缺陷,则会产生比正常部位大的异常离面位移。从原理上讲,错位散斑的方法对紧贴型脱粘也是有效的。

利用德国Dantech公司Q800型激光错位散斑系统,配套使用简易真空加载装置对雷达罩人工缺陷样件进行了检测试

验。在30MPa的压差条件下,可显示出1.5mm厚CGRP蒙皮下的25mm \times 25mm尺寸的脱粘缺陷以及12.5mm \times 12.5mm的蒙皮内部分层缺陷。据此可以推断,激光散斑检测技术对于脱粘缺陷的检测是有效的。从加载与表面变形关系分析,对于较大面积的脱粘缺陷,检测深度可能达到中蒙皮。

结束语

针对C夹层雷达罩的无损检测中遇到的问题,开发了大型喷水穿透法超声C扫描检测系统SM-99、电磁测厚仪EMT-01新设备、应用了超声涂层测厚方法等新技术,满足了雷达罩制造过程的检测需要。在上述方法实施过程中发现了多种制造缺陷和问题,检测结果为改进制造工艺提供了重要技术支持。研究中得到如下结论:

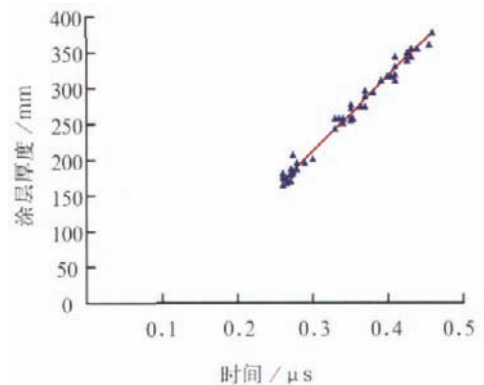


图4 超声脉冲传播时间与涂层厚度的关系

(1) 雷达罩的检测需求是多方面的,需要超声、电磁、射线等多种手段进行检测;

(2) 在制造阶段,穿透法超声C扫描技术是检测中蒙皮类缺陷可靠的检测手段之一;

(3) 制造阶段的弱粘缺陷检测是一个需要进一步解决的难题;

(4) 紧贴型脱粘缺陷用目视或敲击方法检测不可靠,采用真空加载的激光错位散斑检测技术有望解决该类问题。

(责编 微凉)