

飞机复合材料损伤检查及维修技术应用探究

王昊

北京航空有限责任公司, 北京 100621

摘要： 随着现代航空工业的发展，传统材料已经无法满足飞机对轻量化和高性能的需求，为解决飞机复合材料在使用过程中可能出现的损伤问题。本文探讨了复合材料损伤的检查技术，包括感官检测和超声检测技术，分析了复合材料的维修技术，具体涉及胶接修理技术、机械连接修理技术和复合材料补片修理技术。通过上述措施，实现了对复合材料损伤的有效检查和维修，以此为相关人员提供实践参考。

关键词： 飞机复合材料；损伤检查；维修技术

Exploration of Damage Inspection and Maintenance Technology Application of Aircraft Composite Materials

Wang Hao

Beijing Airlines Co., Ltd. Beijing 100621

Abstract： With the development of modern aviation industry, traditional materials can no longer meet the demand for lightweight and high-performance in aircraft. To solve the problem of damage that may occur in the use of composite materials in aircraft. This article explores the inspection techniques for damage in composite materials, including sensory and ultrasonic testing techniques, and analyzes the repair techniques for composite materials, specifically involving adhesive repair techniques, mechanical connection repair techniques, and composite patch repair techniques. Through the above measures, effective inspection and repair of composite material damage have been achieved, providing practical reference for relevant personnel.

Keywords： aircraft composite materials; damage inspection; maintenance technology

前言

随着航空工业的快速发展，飞机复合材料的应用日益广泛，这些材料因其优异的强度重量比、耐腐蚀性和设计灵活性，逐渐成为现代飞机制造的首选。然而复合材料的复杂结构和多样化特性也对其损伤检查与维修技术提出了更高要求，传统的金属材料检测方法在复合材料上并不总是适用，因此开发和应用新型检测技术显得尤为重要。

一、飞机复合材料损伤检查技术

（一）感官检测

飞机复合材料损伤检查中的感官检测是一种基础且重要的技术，主要依赖检查人员的观察能力和经验，检查人员需要在良好的光线条件下进行目视检查，这通常是在自然光或人工光源下进行，以确保能够清晰地观察到复合材料表面的细节。在检查过程中，检查人员应仔细观察材料表面，寻找任何可能的损伤迹象，如凹坑、划痕、裂纹、变色等。为了提高检测的准确性，检查人员可以使用放大镜等光学工具，这些工具能够放大材料表面的微小细节，使得细微的损伤更容易被发现。检查人员应特别注意复合材料的边缘和接缝处，因为这些地方更容易受到应力集中和环境因素的影响，从而产生损伤。

在进行感官检测时，检查人员还可以用手轻轻触摸材料表面，以感知任何不平整或异常的地方。通过触觉，检查人员可以发现一些目视检查可能遗漏的细微凹凸或粗糙感。此外检查人员可以轻轻敲击材料表面，听取声音的变化。不同的声音可能表明材料内部存在分层或空洞等问题。检查过程中检查人员应保持高度的专注力，并具备丰富的经验和知识，以便正确识别和判断损伤的类型和严重程度。对于一些不易识别的损伤，如细小裂纹或微小凹坑，检查人员可以在不同的角度和光线下反复观察，以确保不遗漏任何潜在的问题^[1]。

检查人员应注意复合材料表面的颜色变化，颜色的变化可能是由于材料老化、化学反应或环境影响造成的，这些变化可能预示着材料性能的下降或即将出现的损伤，检查人员还需注意材料表面的光泽度变化，因为光泽度的变化可能是材料内部结构发生

作者简介：王昊（1986.05-），男，汉族，北京人，本科，工程师，从事飞机维修研究。

变化的信号。此外检查人员应详细记录每一次检查的结果，包括发现的任何损伤的类型、位置和严重程度，这些记录不仅有助于后续的维修和维护工作，还能为未来的检查提供参考。

（二）超声检测技术

超声检测技术在飞机复合材料损伤检查中应用广泛，主要利用超声波在材料中的传播特性来识别和评估损伤，首先准备工作包括选择合适的超声检测设备和探头，常用的超声频率范围为1到10 MHz，其中5 MHz 探头常用于复合材料检测，因为它在检测分层和小空洞时具有较好的分辨率。探头选择还需考虑材料的厚度和预期的损伤类型。接触式超声检测通常使用耦合剂（如水或油）来促进超声波在探头与复合材料之间的传输，操作时将探头紧密接触复合材料表面，并使用耦合剂填充探头和材料之间的间隙。确保耦合剂均匀分布，以避免信号衰减或失真。在扫描过程中，探头以恒定速度移动，通常为每秒5到10毫米，以确保数据的准确性和完整性，超声波发射后，遇到材料内部的缺陷（如分层或空洞）会产生反射、折射或散射。接收器捕获这些反射信号，并将其转换为电信号，显示在A扫描、B扫描或C扫描图像上。A扫描提供单点的深度信息，B扫描显示二维截面图像，而C扫描则提供平面图像，显示缺陷的大小和位置^[2]。

在实际检测中，信号分析是关键步骤，通过分析回波信号的幅度、相位和到达时间，可以确定缺陷的位置和性质，通常反射信号的幅度减小或出现异常峰值，表明材料内部存在缺陷。对于分层缺陷，信号会在缺陷边界处产生明显的反射，而空洞则可能导致信号完全消失。为了提高检测的可靠性和准确性，数据处理软件可以进行进一步分析。软件可以自动识别和标记可能的缺陷区域，并计算缺陷的尺寸和深度。

非接触式超声检测，如激光超声检测，适用于不规则表面或高温环境，激光超声利用激光脉冲激发超声波，无需耦合剂，避免了接触式方法的局限。激光脉冲频率通常设置在1到10 kHz 范围内，以确保足够的信号强度，检测过程中激光束扫描材料表面，产生的超声波在材料中传播，遇到缺陷时同样会产生反射和散射，接收端使用激光干涉仪捕获返回信号，进行分析和成像。在操作中，激光超声检测的精度依赖于激光脉冲的能量和接收器的灵敏度，通常情况下激光能量设置在10到100 mJ 范围内，以提供足够的信号强度而不损伤材料。接收器的灵敏度需要足以检测到微弱的回波信号，尤其是在检测深层缺陷时。

超声检测技术在复合材料损伤检查中具有高效、精确的特点，通过合理选择设备和参数，结合先进的数据处理技术，可以有效地识别和评估复合材料中的各种损伤类型。

二、飞机复合材料维修技术

（一）胶接修理技术

飞机复合材料的胶接修理技术是一种精细的维修方法，能够有效恢复受损结构的强度和刚度，首先对损伤区域进行彻底清理是至关重要的。使用细砂纸或专用磨具去除损伤区域的松散纤维和杂质，确保表面光滑且没有残留物。清理后的表面应达到一定

的粗糙度以增强胶粘剂的附着力，通常建议表面粗糙度在3–5微米之间。

选择合适的航空胶粘剂是修理成功的关键，常用的胶粘剂包括环氧树脂类，这类胶粘剂具有优异的强度和耐久性，在使用前应根据制造商的说明对胶粘剂进行混合和准备，确保其在适宜的温度和湿度条件下应用。通常胶粘剂的混合比例为树脂与固化剂的重量比2:1，混合后的胶粘剂应在30分钟内使用完毕，以免影响粘接性能。将准备好的胶粘剂均匀涂覆在清理后的损伤区域和补片的接触面上，涂层厚度应控制在0.2至0.5毫米之间，以确保粘接强度和固化效果。然后将补片精确地贴合在损伤区域上，确保没有气泡和皱褶。可以使用滚压工具从中心向外轻轻滚压补片，以排出多余的胶粘剂和气泡^[3]。

固化过程是胶接修理的关键步骤之一，通常使用热压固化的方法，通过专用的加热毯或红外加热设备对粘接区域进行加热，使胶粘剂达到完全固化。固化温度一般设定在60至80摄氏度，固化时间为2至4小时，具体参数应根据胶粘剂的特性和制造商的建议进行调整。在固化过程中保持均匀的压力（通常为0.2至0.4兆帕）以确保补片与基体的紧密结合。

最后进行质量检查以确保修理效果，检查补片的粘接牢固性和表面光洁度，确保没有气泡、裂纹或分层现象。可以通过超声波检测或其他非破坏性检测方法确认修理质量，这种胶接修理技术不仅有效，而且在操作过程中充分考虑了材料特性和环境因素，确保了修理的可靠性和长效性。

（二）机械连接修理技术

飞机复合材料的机械连接修理技术是一项复杂而精细的工艺，旨在通过安装机械连接件来修复损伤，首先需要对损伤区域进行详细评估，以确定最佳的修复方案。假设在飞机的起落架舱门出现了一条长约150毫米的裂缝，且裂缝宽度达到3毫米，传统的胶接方法已无法提供足够的强度，此时可以考虑采用机械连接修理技术。

在开始修复之前，必须准备适合复合材料的专用工具和材料，需要使用高精度钻头以避免对复合材料的纤维结构造成过多损伤。选择直径6毫米的碳化钨钻头，以确保钻孔的精度和光滑度。钻孔时采用低转速（约500转/分钟）和恒定的进给速度（约0.05毫米/转），以减少热量积聚和纤维撕裂。在损伤区域的两端以及沿裂缝每隔50毫米的位置钻孔，确保每个孔的中心距裂缝边缘至少15毫米，以防止新的损伤。在钻孔过程中使用真空吸尘设备清除钻屑，保持工作区域干净，并避免粉尘对操作人员的健康影响。

接下来选择合适的机械连接件，此案例中使用直径为6毫米的钛合金螺栓，因其具有高强度和耐腐蚀性，螺栓的长度应根据复合材料的厚度和需要连接的加强片厚度来确定，通常为复合材料厚度的2.5倍。在安装螺栓前必须在孔内涂抹防腐涂层，以延长修复结构的使用寿命，涂层厚度应控制在0.05毫米左右，以确保螺栓能够顺利安装。然后将预先准备好的碳纤维加强片放置在裂缝上方，确保所有钻孔完全对齐。使用扭矩扳手以精确控制螺栓的紧固力，避免因过度紧固而引起复合材料的局部损坏，每个螺

栓的紧固力应控制在20牛米，以提供足够的夹紧力，同时避免损坏复合材料的层合结构，安装完成后用专用的密封剂对螺栓头部进行密封，以防止水分渗入。

在完成所有机械连接件的安装后，进行最终的结构检查，确保加强片与原结构紧密贴合，没有明显的间隙或翘曲现象，修复后的结构不仅恢复了原有的承载能力，还增强了抗疲劳性能。这种机械连接修理技术被广泛应用于飞机的关键部位，如机翼和尾翼等，尤其是在承受较大载荷的区域，通过精确的操作和严格的工艺控制，可以有效延长复合材料结构的使用寿命，保证飞机的安全性和可靠性。

（三）复合材料补片修理技术

预浸料补片修理技术是最常用的方法之一，此技术使用预先浸渍了树脂的纤维材料作为补片。修理的第一步是对损伤区域进行精确的测量和评估，以确定损伤的范围和深度，假设在某次飞行中，飞机机翼遭受了鸟击，导致一个面积为30平方厘米、深度为3毫米的损伤，根据损伤的形状和尺寸，裁剪出相应大小的预浸料补片。通常补片的边缘应超出损伤区域至少2厘米，以确保足够的粘接面积。接下来对损伤部位进行表面处理，这包括使用砂纸或磨床去除表面的油漆和杂质，并用丙酮等溶剂清洗干净。表面处理的目的是确保补片与基材之间的良好粘接，然后将裁剪好的预浸料补片覆盖在损伤区域上，使用热压罐设备进行固化处理，通常需要在120℃的温度下维持至少2小时，并施加0.5 MPa的压力。这一过程确保树脂充分固化，从而使补片与基材形成坚固的整体。

另一种方法是真空辅助成型补片技术，在某次维修中，飞机机身出现了一处面积为50平方厘米的凹坑，使用真空袋将补片材料紧密贴合在损伤区域，真空袋的作用是通过抽真空，使补片材料紧密贴合在基材表面，消除空气和气泡，从而提高粘接质量。随后在真空环境下进行树脂的浸润和固化，通常固化过程在90℃

至100℃的温度下进行，持续时间为3至4小时。这种方法的优势在于能够在较低的温度和压力条件下实现高质量的修复。

在一个具体案例中，某飞机的机翼由于遭受外物撞击，产生了一处直径为15厘米的凹坑，维修团队选择了预浸料补片修理技术，首先损伤区域被清理并打磨至露出纤维层，然后裁剪出直径为20厘米的圆形预浸料补片。为了保证补片的粘接强度，使用热压罐在130℃的环境下固化3小时，同时施加0.6 MPa的压力。经过固化后补片与机翼基材之间的粘接强度达到35 MPa，完全满足飞行安全的要求。在整个修理过程中，关键在于严格控制温度、压力和时间，以确保树脂的充分固化和补片的粘接强度，此外修理后的区域通常还需要进行后续的表面涂装，以恢复飞机的外观和防护性能。这些步骤确保了修理后的复合材料结构能够承受飞行中的各种应力和环境因素。

复合材料补片修理技术通过精确的测量、裁剪、表面处理和固化工艺，实现了对飞机复合材料结构的有效修复，通过实际案例可以看出，这些技术在实际应用中不仅提高了修理的效率，还显著增强了修理部位的结构强度和耐久性。

三、结束语

综上所述，复合材料在航空领域的广泛应用对损伤检查和维修技术提出了新的挑战和机遇。通过对各种先进检测和维修技术的探讨，能够更全面地掌握复合材料的特性及其在实际应用中的表现，这不仅有助于提高航空器的安全性和可靠性，还能显著降低运营成本，延长飞机的服役周期。未来，随着技术的不断进步，智能化和自动化检测手段的引入将进一步提升复合材料检查和维修的效率与精确度。持续的研究与创新将为航空工业的发展提供坚实的技术保障，确保其在全球竞争中保持领先地位。

参考文献

- [1] 胡昊, 冯蕴雯, 陈俊宇. 基于EMA3D的民用飞机复合材料雷击电流分析[J]. 航空工程进展, 1-11.
- [2] 徐林, 刘传军, 赵崇书. 复合材料在民用飞机应用与发展趋势[J]. 复合材料科学与工程, 2024, (09): 98-104.
- [3] 张德伟, 卫伟, 张聘. 基于实测数据的飞机复合材料构件外形调控[J]. 复合材料科学与工程, 2024, (09): 57-66.