

航空复合材料结构修理方法

胡雨祥

凌云科技集团有限责任公司 湖北 宜昌 444100

摘要: 航空复合材料结构修理方法多种多样,每种方法都有其独特的优势和适用范围。基于此,本文简要介绍了飞机复合材料结构,分析了飞机复合材料的缺陷和检测,并针对航空复合材料结构修理方法进行了讨论,包括胶结修理、树脂注射修理、快速修理方法等方面,旨在相关领域的研究和工程实践提供参考。

关键词: 航空;复合材料;结构修理;方法

引言

随着航空工业的快速发展,复合材料因其优异的力学性能、耐腐蚀性和设计灵活性,在飞机结构中的应用日益广泛。然而,复合材料结构在使用过程中难免会受到各种损伤,如冲击、分层、脱粘等,这些损伤若不及时修复,将严重影响飞机的安全性和使用寿命。因此,研究高效、可靠的复合材料结构修理方法对于保障航空安全、降低运营成本具有重要意义。

1 飞机复合材料结构

飞机复合材料结构,作为现代航空工业中的重要组成部分,其设计、制造与应用极大地推动了飞行器的性能提升与轻量化发展。这一领域的技术革新不仅提升了飞机的燃油效率,还增强了其结构强度与耐久性,使得航空旅行更加安全、高效。飞机复合材料结构通常被称为“纤维增强塑料”,其核心在于将高强度的纤维增强材料嵌入树脂基体中,通过精确的加压加热工艺固化成一种坚固且坚硬的结构^[1]。这种结构形式充分利用了纤维的高强度特性和树脂基体的良好粘结性,实现了材料性能优化组合。纤维增强材料作为承载的组元,均匀地分布在基体中,起到增强韧性的作用;基体则连接纤维增强材料,赋予复合材料一定的形状,并保护纤维免受损伤;界面层则作为两者之间的桥梁,确保纤维与基体之间的有效结合,进一步提升复合材料的整体性能。飞机复合材料结构的发展历程可追溯至20世纪60至70年代,当时美国国家航空航天局(NASA)率先制定了航空复合材料技术发展和飞机服役计划,推动了碳纤维等高性能纤维在航空领域的应用。从最初的受力较小的复合材料结构件,如前缘、口盖、整流罩等,到如今广泛应用于机翼、尾翼和机身等主承力结构的先进复合材料,这一领域的进步令人瞩目。特别是进入21世纪后,空客A380和波音787等新一代飞机的大量使用高性能复合材料,标志着飞机复合材料技术已经迈入了一个全新的发展阶段。

展阶段。

2 飞机复合材料的缺陷和检测

2.1 复合材料的缺陷

随着飞机在复杂多变的环境中持续运行,复合材料结构不可避免地会遭遇一系列损伤挑战,这些损伤不仅影响着飞机的整体性能,更直接关系到飞行安全。首先,表面缺陷作为复合材料损伤的最直观表现,涵盖了划痕、擦伤、气泡、凹陷以及分层等多种形式。这些缺陷往往源自制造过程中的工艺控制不当、材料处理疏忽或后期维护中的意外碰撞。划痕与擦伤可能降低材料表面的光滑度,增加气动阻力,同时破坏了复合材料的整体完整性;气泡与凹陷则可能是由树脂固化不完全、层间夹杂杂质或局部受压不均导致,它们削弱了材料的承载能力,为更严重的损伤埋下隐患;而分层作为复合材料特有的损伤形式,更是由于层间界面强度不足或外力作用下层间剪切应力过大引起,直接威胁到结构的整体稳定性。其次,无论是与基础设施、其他飞行器的意外碰撞,还是飞行中遭遇的微小石子、砂砾等高速撞击,都可能导致复合材料表面或内部的局部破坏。这种冲击损伤不仅难以察觉,且可能引发内部纤维断裂、基体开裂乃至层间分层等连锁反应,显著降低结构的强度和刚度。特别是在关键承力部位,如机翼前缘、尾翼等区域,冲击损伤的危害更为显著,需引起高度重视。此外,分层缺陷作为复合材料特有的复杂损伤形式,其成因多样且影响深远。面板分层、层压板分层及蜂窝芯分层等不同类型的分层现象,均可能由制造缺陷、设计不当、环境侵蚀或外力作用等多种因素引发。分层不仅破坏了复合材料的整体性,还可能导致应力集中,加速材料的老化与破坏进程。在极端情况下,分层甚至可能引发结构失效,对飞行安全构成严重威胁。最后,慢性长期损伤是复合材料在长期使用过程中逐渐累积形成的损伤类型。这类损伤往往由材料疲劳、环境侵蚀(如潮

湿、渗水)等多种因素共同作用而成。疲劳裂纹作为其中最典型的代表,其产生与扩展是一个复杂而缓慢的过程,但一旦达到临界状态,将迅速导致结构失效。

2.2 损伤检测

在飞机复合材料的维护与保障体系中,损伤检测作为确保飞行安全的关键环节,其技术与方法的先进性与准确性直接关乎着飞机的整体性能与寿命。其中,目视检测作为最基础且直观的检测方法,是任何复合材料损伤检测流程中的第一步。它依赖于检测人员的专业训练与敏锐观察力,通过肉眼或辅以手电筒、放大镜等工具,对复合材料表面进行细致检查,以识别裂纹、刮伤、划痕、摩擦痕迹等显而易见的损伤^[2]。目视检测虽然简单,但其重要性不容小觑,因为许多初期损伤往往只表现为细微的表面变化,却能迅速扩展成为严重的结构问题。接着,敲击法检测作为一种辅助手段,通过敲击复合材料表面并仔细聆听反馈声音的变化,来判断材料内部是否存在损伤。这种方法虽然依赖于检测人员的经验判断,但在某些情况下,如检测难以直接观察到的内部结构时,却能发挥独特的作用。敲击声音的变化能够间接反映材料内部的完整性,为进一步的检测提供有价值的线索。然而,对于更为隐蔽或复杂的损伤,如脱胶、分层、气孔等,就需要借助更为先进的无损检测技术了。超声波检测便是其中之一,它利用超声波在材料中传播时遇到损伤会发生能量衰减的特性,通过接收并分析反射回来的超声波信号,来准确判断损伤的位置和程度。超声波检测以其穿透力强、灵敏度高、非接触式测量等优势,在复合材料缺陷检测中占据了重要地位。特别是在脱胶、分层等内部缺陷的检测中,超声波检测更是展现出了无可比拟的优势。此外,红外照相检测作为另一种先进的无损检测技术,也在复合材料损伤检测中得到了广泛应用。该技术基于物体热辐射的原理,通过捕捉并分析复合材料表面红外辐射的变化,来判断材料内部是否存在缺陷。当复合材料内部存在缺陷时,其表面的红外辐射会发生变异,这种变异被红外相机捕捉并转化为温度图像,从而直观地显示出缺陷的位置和程度。

3 航空复合材料结构修理方法

3.1 胶结修理

胶结修理是复合材料结构修理中最常用的方法之一。根据损伤情况,可分为胶结贴补和胶结挖补两种形式。

3.1.1 胶结贴补

在复合材料结构的日常维护中,表面损伤如划痕、擦伤及轻微分层等是较为常见的现象。针对这类损伤,胶结贴补技术以其操作简便、快捷高效的特点成为了首

选方案。具体而言,该技术首先要求对损伤区域进行精确评估,确定损伤的范围和深度,以确保修补工作的针对性。随后,根据损伤情况选择合适的复合材料补片,这些补片通常具有与原始结构相似的材料特性和力学性能。在清洁并处理损伤表面后,将补片精确对位并粘贴于损伤部位,随后通过施加适当的压力或采用夹具固定,以确保补片与基材之间的紧密接触。最后,根据所选胶粘剂的固化要求,进行加热或自然固化处理,使修补材料与基材形成牢固的结合。胶结贴补技术不仅能够有效恢复结构的表面完整性和美观性,还能在一定程度上提升结构的强度和刚度,尤其适用于外场修理和快速响应场景。

3.1.2 胶结挖补

当复合材料结构遭受冲击损伤或出现严重分层时,单纯的表面修复已难以满足恢复结构完整性和力学性能的需求。此时,胶结挖补技术便成为了更为有效的解决方案。该技术首先要求精确评估损伤区域的大小和形状,并据此设计挖补方案。在挖补过程中,需使用专用工具和设备将损伤区域及其周围的材料精确挖除,形成一个具有锥度或阶梯状边缘的孔洞^[3]。这一步骤不仅要求操作精细,还需严格控制挖补尺寸和形状,以确保修补材料与基材之间的良好匹配。随后,根据挖补孔洞的形状和尺寸选择合适的复合材料补片进行填充。补片的选择需考虑其材料特性、厚度、层数及与基材的相容性等因素。在填充补片前,还需对挖补孔洞进行清洁和表面处理,以提高胶粘剂的附着力和修补效果。补片填充完成后,同样需施加适当的压力或采用夹具进行固定,并进行固化处理。胶结挖补技术通过彻底清除损伤区域并填充高性能的复合材料补片,能够最大限度地恢复结构的强度和刚度,甚至在某些情况下还能实现结构的强化。然而,该技术操作复杂、耗时较长且对工艺要求较高,因此在实际应用中需严格控制各个环节的质量。

3.2 树脂注射修理

树脂注射修理的基本原理在于利用树脂材料的流动性和固化特性,通过精确控制的注入过程,将低粘度树脂引入损伤区域,从而填充裂纹、分层等缺陷,恢复结构的完整性和力学性能。整个修复过程大致可以分为损伤评估、钻孔定位、树脂注入、固化处理及效果评估等几个关键步骤。第一,对损伤区域进行细致的评估是树脂注射修理的前提,通过无损检测技术如超声波扫描、红外热成像等,精确确定损伤的位置、形状和大小,为后续的钻孔定位和树脂注入提供准确依据。第二,根据损伤评估结果,在损伤区域周围精心布置钻孔位置,这

些钻孔需精确控制其深度、间距和角度,以确保树脂能够顺利进入并充分填充损伤区域。钻孔完成后,需对孔道进行清洁和干燥处理,以去除杂质和水分,提高树脂与基材的粘接强度。第三,进入树脂注入阶段,此阶段需严格控制树脂的注入量和注入速度,以避免过量注入导致树脂溢出或注入不足影响修复效果。同时,还需根据树脂的固化特性选择合适的固化条件,如温度、压力和时间等,以确保树脂能够充分固化并与基材形成牢固的结合。第四,在树脂注入并固化后,需对修复效果进行全面评估,这包括检查树脂是否完全填充损伤区域、修复后的结构是否满足力学性能要求以及是否存在潜在的二次损伤等。评估结果将直接反映树脂注射修理技术的有效性和可靠性。然而,树脂注射修理技术也面临一些挑战,如树脂的注入量和固化条件需严格控制,否则可能影响修复效果甚至导致新的损伤。此外,对于复杂结构的内部损伤修复,钻孔定位和树脂注入过程可能较为困难且耗时较长。因此,在实际应用中需充分考虑这些因素并采取相应的措施加以解决。

3.3 快速修理方法

随着科技的不断进步,一系列创新的快速修理技术应运而生,如微波修复、电子束固化、光固化和激光自动化修理等,这些技术不仅极大地缩短了修理周期,还提高了修复质量和效率,为航空器的快速恢复运营提供了有力保障。

3.3.1 微波修复

微波修复技术是一种利用微波的制热效应来加速修补材料固化过程的创新方法。在微波场中,修补材料中的极性分子会吸收微波能量并转化为热能,从而使修补材料在短时间内达到固化所需的温度条件。这种方法特别适用于大面积和复杂结构的快速修复,因为它能够均匀、快速地加热整个修补区域,避免了传统加热方式中可能出现的温度梯度问题^[4]。此外,微波修复还能有效减少能源消耗和减少对环境的影响,是一种环保且高效的修理技术。然而,需要注意的是,微波修复技术对修补材料的微波吸收性能和热稳定性有一定要求,因此在应用前需进行充分的材料性能测试和工艺优化。

3.3.2 电子束固化

电子束固化技术则是通过高能量电子束直接作用于

修补材料表面,使目标分子在电子束的碰撞下释放能量并迅速固化,这种技术具有固化速度快、温度低、模具成本低等显著优点。电子束固化的过程几乎在瞬间完成,大大缩短了修理周期。同时,由于电子束固化过程中产生的热量较少,因此对修补材料及其周围结构的热影响也较小。并且,由于无需传统加热设备,电子束固化还降低了模具成本和生产成本。但电子束固化技术对设备和操作环境的要求较高,需要专门的电子束发生器和安全防护措施。

3.3.3 光固化

光固化技术则是利用紫外光照射修补材料表面,引发光敏剂发生化学反应并促使修补材料快速固化的过程。这种技术操作简单、效率高,特别适用于空间狭窄或难以触及的内部损伤修复。光固化设备通常体积小、重量轻,便于携带和操作。同时,光固化过程无需加热,不会对修补材料及其周围结构造成热损伤。此外,光固化技术还具有固化速度快、固化程度高、环保无污染等优点。但是,光固化技术对修补材料的光敏性和紫外光透过性有一定要求,且在某些情况下可能需要多次照射才能达到理想的固化效果。

结语

综上所述,传统的胶结修理和树脂注射修理技术以其成熟性和可靠性在航空维修领域占据重要地位;而新兴的微波修复、电子束固化、光固化和激光自动化修理等快速修理技术则以其高效性、精确性和灵活性展现出巨大的应用潜力。随着科技的不断进步和创新,这些快速修理技术有望在未来得到更广泛的应用和推广,为航空复合材料结构的快速恢复和高效运营提供有力支持。

参考文献

- [1]汤海龙,雷社昌.基于某型飞机整流罩的复合材料修理技术研究[J].高科技纤维与应用,2022,4,(03):57-61.
- [2]魏士礼,赵艳秦.民用飞机复合材料翼盒蒙皮损伤外补修理[J].机械工程师,2022,(04):82-84+87.
- [3]宣善勇.复合材料修理飞机金属结构技术的应用进展[J].化工新型材料,2020,48,(11):227-229.
- [4]大鹏.浅谈直升机复合材料结构修理方法与验证技术研究.2019:25-26.