

飞机复合材料壁板装配变形控制技术浅析

詹建国

中航西安飞机工业集团股份有限公司 陕西 西安 710089

摘要: 文章综述了飞机复合材料壁板装配变形控制技术的最新研究与应用进展。通过深入探讨装配仿真技术、有限元分析、热校正技术及机械校正技术等关键手段,揭示复合材料壁板在装配过程中变形的成因与机理,并提出有效的变形控制策略。随着材料科学、计算力学及自动化技术的不断进步,这些技术在实际应用中展现出显著成效,为提升飞机制造质量与效率提供了有力支撑。

关键词: 飞机复合材料壁板; 装配变形控制; 应用进展

引言: 随着航空工业的快速发展,飞机复合材料壁板因其优异的性能而得到广泛应用。然而,复合材料壁板在装配过程中极易发生变形,严重影响飞机结构的整体性能和气动效率。研究并应用有效的装配变形控制技术,成为提升飞机制造质量的关键。本文旨在综述当前飞机复合材料壁板装配变形控制技术的最新研究进展与应用成果,探讨其发展趋势与挑战,为相关领域的进一步研究和应用提供参考。

1 飞机复合材料壁板概述

飞机复合材料壁板是现代航空技术中的重要组成部分,其采用先进复合材料制成,具备一系列显著优势。这些壁板不仅质量轻、强度高、刚度大,相比传统金属结构材料能减重约25%-30%,还能有效提升飞机的燃油效率和飞行性能。复合材料壁板还展现出卓越的抗疲劳、抗冲击、耐高温等特性,为飞机的安全性和耐久性提供了坚实保障。在飞机结构上,复合材料壁板广泛应用于机翼、机身等关键部位,特别是在主承力结构中的应用日益增多。其设计灵活,可根据具体需求进行定制和优化,满足复杂的力学和环境要求。例如,在机翼上,复合材料壁板常采用加筋层合板结构,以增强整体稳定性和承载能力。复合材料壁板也面临一些挑战,如结构细节设计复杂、损伤类型多样等,在设计和使用过程中,需要充分考虑这些因素,以确保壁板的性能和安全。另外,飞机复合材料壁板还具备优异的耐腐蚀性和电磁屏蔽性能,能在恶劣的飞行环境中保持结构完整,减少维护成本,同时保护飞机内部电子系统免受外界电磁干扰。面对复杂的应力分布和多变的环境条件,复合材料壁板还需经过严格的仿真分析与实验验证,以确保其在整个服役周期内都能稳定可靠地工作。

2 飞机复合材料壁板在现代航空工业中的重要性

随着航空技术的飞速发展,对飞机性能的要求日益

提高,而复合材料壁板以其独特的优势成为实现这一目标的关键材料^[1]。它不仅显著减轻飞机的整体重量,提高燃油效率,还增强飞机的结构强度和耐久性,为飞机的长距离、高速飞行提供可靠保障。在现代航空工业中,复合材料壁板广泛应用于飞机的主要承力结构,如机翼、机身等关键部位,其轻量化特性有助于提升飞机的载重能力和航程,同时降低运营成本。复合材料壁板还具备优异的抗疲劳、抗腐蚀和耐高温性能,能够在极端飞行条件下保持稳定的结构性能,从而提高了飞机的安全性和可靠性。飞机复合材料壁板在现代航空工业中的重要性不言而喻,它是推动航空技术进步、提升飞机性能、降低运营成本的关键因素之一。

3 飞机复合材料壁板装配变形原因分析

3.1 装配顺序不当导致的变形

在飞机复合材料壁板的装配过程中,合理的装配顺序是确保结构完整性和减少变形的关键。若装配顺序设计不当,如先固定了刚性较差的部分或未遵循从中心向两边、从底部向上的原则,都可能导致装配过程中应力分布不均,进而引发壁板局部或整体的变形。这种变形不仅影响壁板的尺寸精度,还可能对其承载能力和使用寿命造成不利影响。

3.2 装配应力控制不精确导致的形变问题

装配力矩是复合材料壁板连接过程中必须严格控制的重要参数。若装配力矩过小,可能导致连接不牢固,影响结构强度;而力矩过大,则可能超过材料的弹性极限,造成永久性变形甚至损伤。特别是在使用紧固件(如螺栓、铆钉)连接复合材料层合板时,由于材料各向异性,不同方向的装配力矩需求可能不同,若控制不准确,极易引起壁板的扭曲、翘曲等变形问题。

3.3 材料自身特性对装配变形的影响

飞机复合材料壁板,作为现代航空工业的关键组

件,其设计往往追求大尺寸以优化结构效率,然而这一特点也伴随着刚性相对减弱的挑战。在装配阶段,壁板庞大的体积使得其极易受到自身重力的牵拉,导致在不均匀支撑的情况下发生弯曲或扭曲变形,复合材料层合板在复杂的制造流程中,如固化、冷却等过程中,可能累积内部应力,这些应力在装配过程中随着外部约束的解除而逐渐释放,加剧了壁板的形状不稳定性,甚至引发意想不到的变形模式。

3.4 制造偏差与装配过程中的强迫装配损伤问题

制造偏差是复合材料壁板装配中不可忽视的因素之一。由于复合材料成型工艺复杂,难以完全避免尺寸偏差、形状偏差等问题。这些制造偏差在装配过程中可能导致装配困难,甚至需要采取强迫装配的方式来完成,强迫装配往往会引发壁板的局部损伤或过度变形,严重影响其结构完整性和使用性能^[2]。

4 飞机复合材料壁板装配变形控制技术研究

4.1 装配仿真技术

装配仿真技术是现代飞机复合材料壁板装配过程中的一项重要辅助工具。该技术利用计算机模拟软件,对壁板的装配过程进行精确模拟,包括装配顺序、装配力矩、支撑方式等各个环节。通过仿真,可以预先评估装配过程中可能出现的变形情况,从而提前制定应对策略。装配仿真技术不仅可以大大减少实际装配中的试错成本,还能显著提高装配效率和质量。在仿真过程中,工程师可以调整和优化装配参数,如定位点的布局、装配力矩的大小等,以确保壁板在装配后能够达到预期的尺寸精度和形状要求。装配仿真技术还可以与有限元分析(FEA)相结合,对壁板在装配过程中的应力分布、变形模式等进行深入研究。有限元分析技术能够模拟壁板在不同工况下的受力情况,预测其变形趋势,为变形控制提供科学依据。

4.2 在线调控技术

在线调控技术是一种实时、动态的装配变形控制技术。在装配过程中,通过安装传感器和监测设备,实时采集壁板的变形数据,并传输给控制系统。控制系统根据预设的变形控制模型和算法,对装配参数进行实时调整,以实现壁板变形的在线控制。在线调控技术能够迅速响应装配过程中的变化,及时纠正偏差,确保壁板在装配过程中始终保持稳定的形状和尺寸。例如,在采用多点定位技术进行壁板装配时,可以通过在线调控技术实时监测各定位点的位移情况,并根据监测结果调整定位柱的伸出长度或施加力的大小,以保持壁板的整体形状和尺寸精度。这种实时反馈和动态调整的方式大大

提高了装配的准确性和可靠性。

4.3 多点定位技术

多点定位技术是一种有效的壁板装配变形控制技术。该技术通过在壁板的多个关键点上设置定位柱或夹具,实现对壁板位置的精确控制和固定。多点定位技术能够均匀分布装配应力,减少因单点定位引起的局部变形问题,通过合理布局定位点并优化定位参数(如定位柱的伸出长度、施加力的大小等),可以进一步提高壁板的形状稳定性和尺寸精度。在实际应用中,多点定位技术需要结合壁板的尺寸、形状、材料特性以及装配要求等因素进行综合考虑。例如,在大型飞机复合材料壁板的装配过程中,需要设置足够的定位点以确保壁板的整体刚度;同时还需要考虑定位柱与壁板之间的接触面积和摩擦系数等因素以避免对壁板表面造成损伤,为了确保多点定位技术的有效性,还需要在装配前进行充分的模拟试验和验证工作以确定最佳的定位方案和参数设置。

4.4 逼近调整技术

逼近调整技术是一种基于经验和实践的装配变形控制方法。在装配过程中,技术人员根据壁板的实际变形情况,通过微调装配参数(如装配顺序、装配力矩等)或采用局部修复措施(如填充、打磨等)来逐步逼近预期的尺寸精度和形状要求^[3]。逼近调整技术需要技术人员具备丰富的经验和敏锐的洞察力以准确判断变形趋势并采取相应的调整措施。逼近调整技术也存在一定的局限性,由于需要依靠技术人员的经验和技能水平进行手动调整,因此难以保证每次调整都能达到最佳效果;调整过程可能需要多次反复尝试和调整才能最终实现预期目标。因此在实际应用中需要结合其他变形控制技术(如多点定位技术、在线调控技术等)进行综合考虑和协同作用以提高装配效率和质量。

4.5 有限元分析技术

在飞机复合材料壁板装配变形控制技术领域,有限元分析技术(Finite Element Analysis, FEA)发挥着不可或缺的作用。通过这种方式,有限元分析能够模拟壁板在不同装配条件下的应力分布、变形模式以及材料特性对变形的影响,为制定精确的变形控制策略提供科学依据。在飞机复合材料壁板的装配过程中,由于材料的多层复合结构和各向异性特性,其变形行为往往非常复杂。传统的实验方法难以全面捕捉这些变形细节,而有限元分析技术则能够通过精确的模拟和计算,揭示壁板在不同装配阶段的变形规律和机制。这不仅有助于工程师更好地理解壁板的力学行为,还能指导他们优化装配工艺和参数设置,以最小化变形风险。有限元分析技术

还具有高度的灵活性和可扩展性,通过调整模型参数和边界条件,工程师可以模拟不同的装配方案、支撑结构以及紧固方式等对壁板变形的影响,从而选出最优的装配方案,有限元分析还可以与实验数据相结合,通过对比分析来验证模型的准确性和可靠性,进一步提升变形控制的精度和效果。

5 飞机复合材料壁板装配变形校正技术研究

5.1 热校正技术

热校正技术是一种利用材料热胀冷缩原理来校正飞机复合材料壁板装配变形的有效方法。该技术通过加热壁板至一定温度,使材料内部应力重新分布,并在外部约束或自然冷却过程中实现形状的恢复和调整。热校正技术具有操作灵活、校正效果显著的优点,尤其适用于大面积、复杂形状的复合材料壁板。在实际应用中,热校正技术需根据壁板的材料成分、厚度、变形程度及所需校正的形状等因素,精确控制加热温度、加热时间以及冷却方式等参数。过高的加热温度可能导致材料性能退化甚至烧损,而过低的温度则可能无法达到预期的校正效果。热校正技术的关键在于精确控制加热过程,确保在不损害材料性能的前提下实现变形的有效校正。热校正技术还需注意对加热设备的选择和维护。采用高效、均匀的加热源,如红外辐射加热器或热空气循环系统等,可以提高加热效率和校正质量,定期对加热设备进行清洁和检查,确保其正常运行和安全性,也是热校正技术应用中不可忽视的重要环节。

5.2 机械校正技术

机械校正技术则是通过施加外部机械力来直接改变飞机复合材料壁板的形状,以达到校正装配变形的目的。机械校正技术通常包括手工校正和机械压力校正两种方式,手工校正主要依赖技术人员的经验和技能水平,通过手动施加压力或敲击等方式对壁板进行形状调整。虽然手工校正具有灵活性和适应性强的优点,但其校正精度和效率相对较低,且对技术人员的技能要求较高^[4]。相比之下,机械压力校正则采用专门的校正设备,如液压机、压力机等,对壁板施加精确控制的压力来实现形状的校正。机械压力校正具有校正精度高、效率快的优点,可以大大提高校正质量和生产效率,机械压力

校正也需要注意控制校正力的大小和方向,避免对壁板造成过度损伤或引入新的应力集中问题。在机械校正技术的应用过程中,还需注意对校正后的壁板进行充分的检查和测试,以确保其形状精度和性能要求满足设计要求,对于校正过程中产生的残余应力和变形等问题,也需要采取相应的措施进行后续处理和优化,以确保壁板的长期稳定性和可靠性。

5.3 飞机复合材料壁板装配的综合校正技术

飞机复合材料壁板装配中,工装保型技术至关重要。工装夹具提供稳定支撑与精确定位,预防并校正变形。其刚性与精度确保壁板在装配全程中保持预定形状,适应材料特性与工艺要求。针对易变形材料,夹具采用柔软接触面;对精确装配部位,则设计精密定位锁紧机构。该技术结合热校正与机械校正,形成综合校正体系:初期预定位,过程适时调整,最终检查确认。这种体系确保壁板装配精度与性能达标,提升飞机制造质量。

结束语

飞机复合材料壁板装配变形控制技术的研究与应用已取得显著进展,但仍面临诸多挑战。未来,随着材料性能的不断优化、计算模型的日益完善以及智能化装配技术的发展,有理由相信,复合材料壁板的装配变形控制将更加精准高效。这将为航空工业的持续发展注入新的活力,推动飞机设计与制造迈向更高水平。

参考文献

- [1]张秋月,安鲁陵,岳烜德,等.基于遗传算法的飞机复合材料结构装配压紧力大小与布局的优化[J].复合材料学报,2019,36(6):1546-1557.
- [2]刘镇阳,翟雨农,李东升.飞机复合材料壁板装配变形控制技术研究与应用进展[J].航空制造技术,2022,65(18):46-54+78.
- [3]李东升,杨应科,翟雨农.民用飞机复合材料机身壁板装配协调形性调控技术研究[J].复合材料学报,2022,39(09):4310-4318.
- [4]黎雪婷,安鲁陵,岳烜德.飞机复合材料壁板装配中临时紧固件数量与布局优化方法[J].复合材料学报,2022,39(08):4102-4116.