

老旧飞机典型结构件的无损检测与剩余强度评估方法及工程应用

宋泽舒 侯学理 李鹏程

95579 部队

DOI:10.32629/etd.v6i11.17533

[摘要] 本文聚焦老旧飞机典型结构件,先阐述机翼主梁、机身隔框等结构件损伤特性与无损检测需求,需满足高检出率等四大核心要求。接着介绍超声、涡流等无损检测技术。剩余强度评估采用断裂力学理论、有限元分析及试验验证等方法。通过某型老旧运输机机翼主梁、客机机身蒙皮案例分析,展示检测与评估方法在工程中的应用,为保障老旧飞机飞行安全提供有效方案与参考依据。

[关键词] 老旧飞机; 典型结构件; 无损检测; 剩余强度评估; 工程应用

中图分类号: V267 **文献标识码:** A

Non-Destructive Testing and Residual Strength Assessment Methods for Typical Structural Components of Aging Aircraft and Their Engineering Applications

Zeshu Song Xueli Hou Pengcheng Li

Unit 95579

[Abstract] This paper focuses on typical structural components of aging aircraft. It first elaborates on the damage characteristics and non-destructive testing (NDT) requirements for components such as wing main spars and fuselage frames, which must meet four core requirements including high detection rates. Subsequently, NDT techniques such as ultrasonic and eddy current testing are introduced. Residual strength assessment employs methods including fracture mechanics theory, finite element analysis, and experimental verification. Through case studies of the wing main spar of an aging transport aircraft and the fuselage skin of a passenger aircraft, the application of detection and assessment methods in engineering is demonstrated, providing effective solutions and references for ensuring the flight safety of aging aircraft.

[Key words] Aging Aircraft; Typical Structural Components; Non-Destructive Testing; Residual Strength Assessment; Engineering Application

引言

老旧飞机在长期服役中,其典型结构件如机翼主梁、起落架接头等,因受力与环境差异出现各类损伤,威胁飞行安全。无损检测与剩余强度评估对保障飞机持续适航至关重要。准确检测结构件损伤并评估剩余强度,能为维修决策提供科学依据。本文将深入探讨老旧飞机典型结构件的损伤特性、无损检测技术、剩余强度评估方法,并通过工程应用案例分析,展示相关方法在保障飞机安全方面的实践效果。

1 老旧飞机典型结构件的损伤特性与检测需求

1.1 典型结构件类型及损伤机制

老旧飞机核心承载结构件主要有机翼主梁、机身隔框、起落架接头与尾翼支撑结构,其损伤机制因受力与服役环境不同而各异。(1)机翼主梁,作为机翼主要承力部件,长期受弯曲与剪切交变载荷,腹板与缘条连接的圆弧过渡区易产生疲劳裂纹。运输机机翼主梁疲劳试验显示,飞行起降超1.5万次后,该区域裂

纹发生率达78%,裂纹多垂直于载荷方向扩展,初始长0.5-2mm,未干预6个月内可扩展至5-8mm,致主梁承载能力降30%以上。(2)机身隔框,承担机身径向载荷、维持截面形状,在潮湿或海洋环境易电化学腐蚀形成腐蚀坑(深0.1-0.5mm),坑底因应力集中成疲劳裂纹萌生源。沿海部署军用飞机机身隔框检测表明,盐雾环境服役20年,腐蚀坑诱发裂纹比例达65%,缩短疲劳寿命。(3)起落架接头,连接起落架与机身,承受起降冲击载荷(最大达飞机自重3-5倍),受液压油与水汽侵蚀,易应力腐蚀开裂,裂纹多源于螺栓孔内壁,隐蔽性强。(4)尾翼支撑结构,承受气动与机身振动耦合作用,焊缝处易因残余应力与交变载荷叠加产生裂纹,沿焊缝熔合线扩展,初始宽0.1-0.3mm,需高精度检测。

1.2 无损检测核心需求

针对老旧飞机结构件的损伤特性,无损检测需满足“高检出率、高精度量化、非破坏性、适配复杂结构”四大核心需求。(1)高检出率:需确保对长度 ≥ 0.5 mm的表面裂纹、深度 ≥ 0.1 mm的

腐蚀坑的检出率 $\geq 95\%$,避免因漏检导致安全隐患,尤其针对起落架接头螺栓孔、机翼主梁腹板等隐蔽区域,需突破检测盲区限制。(2)高精度量化:不仅需识别缺陷存在,还需精确测量缺陷尺寸(长度、深度、宽度),误差控制在 $\pm 0.1\text{mm}$ 以内,为后续剩余强度评估提供准确数据支撑——如裂纹长度测量误差若超 0.3mm ,可能导致剩余强度计算偏差 15% 以上。(3)非破坏性:老旧飞机结构件多为不可更换的承力部件(如机翼主梁),检测过程需避免对结构造成二次损伤,传统的钻孔检测、取样检测等破坏性方法已不适用,需采用超声、涡流等非接触或弱接触检测技术^[1]。(4)适配复杂结构:飞机结构件形状复杂(如曲面、镂空、多螺栓孔),且表面可能存在涂层(如防腐涂层、隔热涂层),检测技术需适配复杂几何形态与表面状态,避免涂层干扰检测信号,确保在曲面部件(如机身框圆弧段)的检测精度。

2 老旧飞机典型结构件的无损检测技术

2.1 超声检测技术

超声检测是一项极为重要的无损检测技术,它巧妙地利用高频声波在材料中的传播特性来检测结构件内部缺陷。对于老旧飞机机翼主梁这类金属结构件而言,超声检测有着显著的优势,能够精准且有效地识别出内部诸如裂纹、气孔等各类缺陷。在实际检测操作过程中,检测人员需依据材料的特性,精心挑选合适的探头频率,一般对于金属材料,选择 $2\sim 5\text{MHz}$ 的频率较为适宜。同时,要细致地调整增益值,确保底面回波能够达到满屏的 80% 左右。随后,缓慢且有序地移动探头,此时需全神贯注地观察屏幕上缺陷回波信号的变化。一旦发现回波信号高于预先设定的报警阈值,这就表明该部位极有可能存在缺陷。

2.2 涡流检测技术

涡流检测基于电磁感应原理,是一种专门针对导电材料表面及近表面缺陷进行检测的有效手段。在老旧飞机的结构检测中,对于铝制蒙皮这类结构件,涡流检测能够发挥快速检测的作用,可及时察觉出裂纹、腐蚀等缺陷。在进行检测时,检测人员需将涡流检测仪的检测线圈精准地靠近蒙皮表面,并保持大约 $0.5\sim 1\text{mm}$ 的提离距离。当给线圈通入交变电流时,会在蒙皮表面迅速感应出涡流。倘若蒙皮存在缺陷,涡流的分布和大小就会发生改变,进而引起线圈阻抗的变化。检测仪能够敏锐地将这种变化转化为电信号,并清晰地显示在屏幕上。就像在检测某型老旧飞机机身蒙皮时,涡流检测成功发现机翼与机身连接处附近蒙皮表面存在微小裂纹。这一发现极为关键,让维修人员能够及时采取措施,避免了因裂纹扩展而引发的潜在安全隐患,保障了飞机的飞行安全^[2]。

2.3 射线检测技术

射线检测充分利用了X射线或 γ 射线强大的穿透材料的能力,来检测结构件内部隐藏的缺陷。对于老旧飞机发动机叶片这类厚壁结构件,射线检测具有独特的优势,能够清晰且准确地显示内部气孔、疏松等缺陷。在实际检测操作中,检测人员首先要将叶片稳稳地放置在专用的检测平台上,然后在叶片后方小心地放置成像板或胶片。接着,开启X射线机,并根据叶片材料厚

度和密度,精准地调节管电压、管电流和曝光时间。X射线穿透叶片后,会在成像板或胶片上形成不同灰度的影像。通过观片灯仔细观察这些影像,就可以准确判断叶片内部是否存在缺陷。如今,数字成像技术也得到广泛应用,它能够直接将X射线信号转化为数字图像,再借助计算机软件进行细致的分析处理,使得判断缺陷的类型、大小和位置变得更加方便快捷,大大提高了检测效率和准确性。

2.4 磁粉检测技术

磁粉检测主要适用于铁磁性材料部件表面及近表面缺陷的检测。在老旧飞机的结构检测中,对于起落架这类铁磁性结构件,磁粉检测能够有效地发现表面裂纹等缺陷。在进行检测之前,检测人员需要先对起落架表面进行认真的打磨处理,仔细去除氧化皮、锈蚀等杂质,确保表面粗糙度达到 $Ra12.5\mu\text{m}$ 以下。之后,采用干粉法或湿粉法将磁粉均匀地喷洒或喷涂在起落架表面。接着,使用磁轭式磁粉探伤机对起落架进行磁化,磁化电流要根据部件的尺寸和材料来合理确定。在磁场的作用下,如果起落架表面或近表面存在裂纹等缺陷,就会产生漏磁场,吸附磁粉形成磁痕。通过仔细观察磁痕的形状、大小和分布情况,就可以准确判断缺陷的具体情况。

2.5 渗透检测技术

渗透检测是一种专门针对非松孔性材料表面开口缺陷进行检测的有效方法。在老旧飞机的结构检测中,对于机身对接焊缝这类结构件,渗透检测能够有效地发现表面裂纹、气孔等缺陷。在进行检测时,检测人员首先要将焊缝表面用砂纸仔细打磨,使其表面平整光滑,然后再用丙酮将表面清洗干净,彻底去除油污和杂质。接着,将红色渗透剂均匀地喷涂在焊缝表面,并保持 $15\sim 20$ 分钟,让渗透剂能够充分渗入缺陷中。之后,用清洗剂将表面多余的渗透剂清洗干净,待表面完全干燥后,喷涂白色显像剂。显像剂会将缺陷中的渗透剂吸附出来,在白色背景下形成红色显示痕迹。通过仔细观察这些痕迹的形状和走向,就可以准确判断焊缝是否存在缺陷。

3 老旧飞机典型结构件的剩余强度评估方法

剩余强度评估是在无损检测发现缺陷的基础上,确定含缺陷结构在给定载荷下的承载能力,判断其是否满足飞行安全要求。常用的剩余强度评估方法包括断裂力学理论、有限元分析及试验验证等。

3.1 断裂力学理论

断裂力学理论基于线弹性断裂力学(LEFM)或弹塑性断裂力学(EPFM),通过计算应力强度因子(SIF)来评估含裂纹结构的剩余强度。对于老旧飞机机翼主梁等含裂纹结构件,首先需确定裂纹的几何形状、尺寸及位置,然后根据材料的断裂韧性(KIC或JIC),计算裂纹尖端的应力强度因子。当应力强度因子达到材料的断裂韧性时,裂纹将发生失稳扩展,导致结构破坏。因此,剩余强度评估需确保在给定载荷下,应力强度因子小于材料的断裂韧性^[3]。例如,对于某型老旧飞机机翼主梁,通过断裂力学理论计算发现,在极限载荷作用下,主梁上已检测到的裂纹

应力强度因子接近材料的断裂韧度,需对该主梁进行加固处理或更换。

3.2 有限元分析

有限元分析是一种数值模拟方法,通过建立含缺陷结构件的有限元模型,模拟其在给定载荷下的应力、应变分布,评估其剩余强度。对于老旧飞机机身蒙皮等复杂结构件,有限元分析可考虑材料的非线性、几何非线性等因素,更准确地预测结构的剩余强度。例如,在评估某型老旧飞机机身蒙皮上已检测到的腐蚀损伤剩余强度时,建立含腐蚀坑的有限元模型,模拟其在气动载荷作用下的应力分布,发现腐蚀坑周围存在应力集中现象,但整体应力水平未超过材料的屈服强度,表明该蒙皮在短期内仍可继续使用,但需加强监测。

3.3 试验验证

试验验证是通过实际加载试验,直接测量含缺陷结构件的剩余强度。对于老旧飞机起落架等关键结构件,试验验证是确保剩余强度评估准确性的重要手段。试验时,需根据结构件的实际使用情况,设计合理的加载方案和测量系统,模拟其在飞行过程中的受力状态。通过测量结构件在加载过程中的变形、应变等参数,确定其剩余强度。例如,在某型老旧飞机起落架剩余强度试验中,采用液压加载系统对起落架进行逐级加载,同时使用应变片测量起落架关键部位的应变,当应变达到材料的屈服应变时,认为起落架达到剩余强度极限,试验结果表明该起落架剩余强度满足飞行安全要求。

4 工程应用案例分析

4.1 案例一:某型老旧运输机机翼主梁剩余强度评估

某型老旧运输机在服役多年后,机翼主梁出现疲劳裂纹。采用超声检测技术对主梁进行全面检测,发现主梁下翼面存在多条长度不等的疲劳裂纹。基于断裂力学理论,计算裂纹尖端的应力强度因子,发现部分裂纹的应力强度因子接近材料的断裂韧度。为确保飞行安全,采用有限元分析进一步评估主梁的剩余强度,模拟结果显示在极限载荷作用下,主梁整体应力水平未超过材料的屈服强度,但裂纹尖端存在局部应力集中现象。综合考虑断裂力学和有限元分析结果,决定对该主梁进行加固处理,在裂

纹部位粘贴复合材料补片。加固后再次进行无损检测和剩余强度评估,结果表明主梁剩余强度满足飞行安全要求,该运输机得以继续服役^[4]。

4.2 案例二:某型老旧客机机身蒙皮腐蚀损伤评估

某型老旧客机在长期服役过程中,机身蒙皮出现腐蚀损伤。采用涡流检测和渗透检测技术对蒙皮进行全面检测,发现多处区域存在腐蚀坑。基于有限元分析,建立含腐蚀坑的机身蒙皮有限元模型,模拟其在气动载荷作用下的应力分布。分析结果显示,腐蚀坑周围存在应力集中现象,但整体应力水平未超过材料的屈服强度。为进一步验证剩余强度评估结果,选取部分腐蚀损伤严重的蒙皮进行试验验证,采用液压加载系统对蒙皮进行逐级加载,同时使用应变片测量蒙皮关键部位的应变。试验结果表明,在给定载荷下,蒙皮未发生破坏,剩余强度满足飞行安全要求。根据评估结果,决定对该客机机身蒙皮进行防腐处理和局部修复,延长其使用寿命。

5 结束语

老旧飞机典型结构件的无损检测与剩余强度评估是一项复杂且关键的工作。本文详细介绍了针对不同结构件特点的无损检测技术,以及多种剩余强度评估方法,并通过实际工程案例验证了这些方法的有效性。在实际应用中,需根据具体情况选择合适的方法组合。未来,随着技术的不断发展,应进一步提升检测精度与评估准确性,以更好地保障老旧飞机的飞行安全,延长其使用寿命,为航空事业的稳定发展提供坚实支持。

[参考文献]

- [1]孔德栓. 复合材料夹芯飞机结构的制造缺陷收集和修理[J]. 科学技术创新, 2020, (06): 27-28.
- [2]陈涛, 李晴, 边永丰, 等. 民用飞机金属结构件无损检测用试块的设计及质量控制[J]. 物理测试, 2025, 43(4): 22-27.
- [3]孔磊. 飞机结构件表面电镀无损检测技术研究[J]. 电镀与环保, 2020, 40(3): 107-108.
- [4]张朝晖, 齐静, 胡树峰. 飞机螺铆结构远场涡流检测技术[J]. 航空维修与工程, 2025(4): 51-54.