

浅谈 CFM56-7B 发动机风扇叶片损伤的修理和配平

徐伟军

北京航空有限责任公司

DOI:10.12238/etd.v6i3.14411

[摘要] 风扇叶片作为航空发动机的重要组成部分,其损伤与维修对飞机运行安全和运营成本具有重要影响。本文针对CFM56-7B发动机风扇叶片关键区域的划痕损伤问题,结合波音维修手册AMM和实际案例,分析了划痕产生的原因、损伤容限标准、打磨修理工艺及静态/动态配平方法。通过无损检测(NDT)、材料去除仿真与疲劳寿命评估,验证了修理后叶片的可靠性,旨在保障发动机的安全运行。

[关键词] CFM56-7B; 风扇叶片; 划痕损伤; 叶片修理; 疲劳寿命

中图分类号: S219.031 **文献标识码:** A

A Brief Discussion on the Repair and Balancing of Fan Blade Damage in CFM56-7B Engine

Weijun Xu

Beijing Airlines Co., Ltd.

[Abstract] Fan blades, as an important component of aircraft engines, have a significant impact on the safety and operating costs of aircraft due to their damage and maintenance. This article focuses on the issue of scratch damage in key areas of the fan blades of the CFM56-7B engine. Based on the Boeing Maintenance Manual AMM and practical cases, the causes of scratches, damage tolerance standards, polishing repair processes, and static/dynamic balancing methods are analyzed. The reliability of the repaired blades was verified through non-destructive testing (NDT), material removal simulation, and fatigue life assessment, providing reference for daily maintenance and engineering of the engine's flight path.

[Key words] CFM56-7B; Fan blades; Scratch damage; Blade repair; life

引言

风扇叶片的制造成本高昂,一片新的CFM56-7B发动机风扇叶片价格高达84280美元。当修复成本低于新叶片的70%时,进行叶片修复便具有显著的经济性,而且大部分的损伤情况都属于可修复范畴。及时开展叶片修复工作,不仅能够消除潜在的安全隐患,避免因叶片故障导致的飞行事故,还能有效避免因叶片更换而带来的高额经济支出。

据不完全统计,风扇叶片维修成本在发动机维护总成本中占比约32%。同时,每千次航班延误中,约18%是由风扇故障所导致。因此,实现高效的风扇叶片维修,对于保障航班的正常率、降低发动机全生命周期成本,具有重要的工程实践价值与经济意义,能够为航空公司带来可观的经济效益和运营稳定性。

1 损伤类型与评估标准

1.1 风扇叶片结构与功能特性

CFM56-7B发动机的风扇叶片采用钛合金(Ti-6Al-4V)整体锻造而成,这种材料具有高强度、低密度等优良特性,能够满足叶片在复杂工况下的使用要求。叶片的翼型采用超临界设计,弦长380mm,叶尖切线速度可达480m/s。在发动机工作时,风扇叶

片的气动功能贡献了发动机推力的70%,同时,它还需承受约30000N的离心力,工作条件十分苛刻。

叶根部分采用枞树形榫槽连接方式,这种连接结构能够有效传递叶片所承受的巨大载荷。为了进一步提高榫齿表面的耐磨性,榫齿表面经过渗氮处理,使其表面硬度增加,从而延长叶根的使用寿命。

1.2 风扇叶片的损伤类型

发动机风扇叶片在长期使用过程中,损伤类型呈现多样化。其中,“缺口”和“凹坑”是最为常见的损伤形式,占总损伤类型的大约71%。在这些损伤类型中,缺口损伤对风扇叶片的疲劳性能影响尤为显著,是最主要的损伤类型。除了缺口和凹坑,叶片还可能出现刻痕、撕裂、弯曲变形以及不可确定损伤等情况。例如,某航司的风扇叶片因跑道碎屑撞击,在前缘出现了深度为0.3mm的划痕,这就属于典型的线性划痕损伤。

对于风扇关键区域的划痕,从位置上可分为以下几类:前缘属于高应力区,在发动机工作时,此处承受着较大的气流冲击和应力作用;叶盆/叶背为气动敏感区,其表面状况直接影响叶片的气动性能;阻尼凸台则是接触疲劳区,长期的接触摩擦容易导

致损伤。在损伤形式方面,有线性划痕,表现为细长的线状损伤;点状凹坑,呈现为小而深的凹陷;还有复合型损伤,即多种损伤形式同时出现在叶片上。

1.3 损伤容限标准

判断风扇叶片损伤是否可接受,主要依据AMM(波音维修手册)的相关规定。手册中明确了深度限值,通常情况下,叶片划痕深度需 $\leq 0.5\text{mm}$;长度限值方面,如划痕长度 $\leq 10\text{mm}$ 时,在一定条件下可进行修理。当划痕深度超过规定限值时,根据AMM72-21-11的要求,需更换叶片,以确保发动机的安全运行^[1]。

2 修理工艺和方法

2.1 可修理性判定

判定损伤的风扇叶片是否能够进行修理,必须严格依据制造厂商的维修手册。通过精确测量损伤参数值,如划痕的深度、长度、位置等,与原始设备制造商维修手册中的要求进行细致对比,只有当损伤尺寸完全满足手册要求时,才具备修理的可能性。在实际工作中,应不断加强修理容限的研究,通过大量的数据积累和分析,进一步明确不同损伤程度下叶片的可修理性,从而提升维修的经济性和安全性。

2.2 修理前准备

2.2.1 损伤检测

(1) 无损检测:采用先进的无损检测设备,如荧光渗透探伤(FPI)和超声波探伤,对叶片进行全面细致的检查。荧光渗透探伤能够有效检测叶片表面的开口缺陷,通过在叶片表面涂抹含有荧光剂的渗透液,使其渗入缺陷中,然后清洗表面多余的渗透液,再涂抹显像剂,缺陷处的荧光剂会在紫外线照射下发出明亮的荧光,从而清晰地显示出缺陷的位置和形状。超声波探伤则主要用于检测叶片内部的缺陷,利用超声波在材料中的传播特性,当遇到缺陷时,超声波会发生反射、折射和散射,通过接收和分析这些信号,可判断缺陷的位置、大小和性质。通过这两种无损检测方法,能够全面检查叶片表面及内部是否存在裂纹、磨损、腐蚀等损伤,并准确标记损伤位置及程度,为后续的修理工作提供可靠依据。

(2) 划痕定位和测量:运用高精度的测量设备,对叶片的几何尺寸,如叶型、弦长、扭角等进行精确测量,并与标准参数进行详细对比。通过三维扫描技术,可获取叶片的精确外形数据,再与原始叶型数据进行比对分析,从而确定叶片的变形量,精确标记划痕位置及损伤轮廓。例如,使用CMM测量机,能够实现对叶片尺寸的高精度测量,其测量精度可达 $\pm 0.01\text{mm}$,确保了测量结果的准确性。

2.2.2 清洁处理

在进行损伤修复之前,必须对叶片进行彻底的清洁处理。首先,采用高压空气吹扫叶片表面,利用高压空气的强大冲击力,将叶片表面的灰尘、油污等杂质清除掉。对于一些顽固污渍,配合使用溶剂,如乙醇、丙酮等进行擦拭。乙醇和丙酮具有良好的溶解性,能够有效溶解油污等有机污渍。在清洁过程中,要确保修理区域无杂质残留,为后续的损伤检测和修复工作创造良

好的条件。

2.3 损伤修复工艺

2.3.1 表面损伤修复

(1) 轻微磨损/腐蚀:对于叶片表面的轻微磨损或腐蚀情况,使用砂纸(800-1200目)沿叶片流线方向均匀打磨。打磨时要注意力度和方向的控制,严禁横向操作,因为横向打磨容易产生新的划痕,进一步损伤叶片表面。打磨去除损伤层后,及时涂抹防腐涂层,如环氧树脂。环氧树脂具有良好的耐腐蚀性和附着力,能够在叶片表面形成一层坚固的保护膜,有效防止叶片进一步腐蚀。

(2) 浅层裂纹:当叶片出现浅层裂纹时,可采用手工研磨或激光加工的方法去除裂纹。手工研磨时,使用专门的研磨工具,小心地将裂纹部位磨除,然后加工出V型坡口,以便后续焊接。激光加工则利用高能量密度的激光束,精确地去除裂纹,同时对周围材料的热影响较小。选用与叶片材料匹配的焊丝,如对于钛合金叶片,使用ERTi-6Al-4V焊丝进行氩弧焊补焊。氩弧焊具有电弧稳定、焊缝质量高、热影响区小等优点,能够保证补焊后的焊缝强度和密封性。补焊完成后,对焊缝进行打磨至平滑,使其与叶片表面平齐,恢复叶片的原有外形。

2.3.2 结构损伤修复

(1) 局部变形:根据叶片局部变形的程度,选择合适的校形方法。若变形程度较小,可采用热校形方法。热校形时,需精确控制加热温度,以铝合金叶片为例,加热温度需 $\leq 350^\circ\text{C}$,避免温度过高导致叶片材料性能下降。在缓慢加热过程中,叶片内部的应力逐渐释放,然后缓慢冷却,使叶片恢复到原有形状。对于变形程度较大的情况,则采用机械校形方法。使用专用夹具,逐步施加压力,对叶片进行校形。在校形过程中,要实时监测叶片的变形情况,确保校形效果。校准后,为消除校形过程中产生的残余应力,需进行应力消除处理,如采用去应力退火工艺,将叶片加热到一定温度并保温一段时间,然后缓慢冷却。

(2) 叶片断裂:当叶片发生断裂时,若断裂位置靠近叶根,可采用榫头更换工艺。首先,将损坏的榫头部分小心地去除,然后加工新的榫头,并与叶片主体进行连接。连接方式可采用焊接或机械连接,确保连接强度。若断裂发生在叶身部位,需对修复的可行性进行全面评估。评估内容包括断裂位置、断裂程度、叶片材料特性等。若修复难度过大或修复后无法保证叶片的性能和可靠性,则需考虑整体更换叶片。

2.4 修复后处理

2.4.1 表面处理

对修复后的叶片进行手工抛光,去除修复过程中留下的加工痕迹,使叶片表面更加光滑。手工抛光后,再次进行无损检测,确认修复区域无新的缺陷产生。若检测结果正常,则对叶片实施喷丸强化处理。喷丸强化是利用高速弹丸撞击叶片表面,使表面产生塑性变形,形成一定厚度的强化层,从而提高叶片的疲劳强度。喷丸过程中,要严格控制弹丸的材质、尺寸、喷射速度和喷射角度等参数,确保喷丸效果的一致性。

2.4.2 涂层恢复

恢复原厂的聚氨酯涂层, 聚氨酯涂层具有良好的防腐性能, 能够有效保护叶片免受外界环境的侵蚀。在叶根部位, 喷涂抗磨涂层及干膜润滑层。抗磨涂层能够提高叶根部位的耐磨性, 减少叶根与榫槽之间的磨损; 干膜润滑层则可降低摩擦系数, 进一步提高叶根的使用寿命, 从而延长叶片的整体服役寿命。

2.4.3 补焊区域进行时效处理

对于补焊区域, 进行时效处理以消除焊接应力, 恢复材料的力学性能。以钛合金叶片为例, 在550℃保温2小时, 通过高温时效处理, 使补焊区域的组织和性能更加均匀稳定, 提高叶片的可靠性^[2]。

3 修理后评估与装机验证

3.1 静态检测

3.1.1 尺寸公差

修理后的叶片叶型偏差需 $\leq \pm 0.1\text{mm}$, 这一标准参考了GEP/N338-XXX标准。通过高精度的测量设备, 如三坐标测量仪, 对叶片的叶型进行测量, 确保叶型尺寸符合要求。若叶型偏差过大, 将影响叶片的气动性能, 导致发动机推力下降、油耗增加等问题。

3.1.2 动平衡测试

模拟发动机实际运行工况, 对叶片进行动平衡测试。在测试过程中, 通过添加配重块或打磨修正的方式, 确保叶片的不平衡量 $\leq 0.5\text{g}\cdot\text{mm}/\text{kg}$ 。不平衡的叶片在高速旋转时会产生振动, 不仅会影响发动机的性能和寿命, 还可能引发飞机的振动, 影响飞行安全。

3.2 动态性能验证

3.2.1 台架试验

在发动机台架上进行模拟试验, 模拟最大转速(5380rpm)下, 监测叶片的振动值, 要求振动值 $\leq 4\text{mil}$ 。同时, 实时监测叶片的振动频率、温度分布等参数, 确保叶片在高转速下运行状态稳定。通过台架试验, 能够全面检验修理后叶片在实际工况下的性能表现, 及时发现潜在问题并进行改进。

3.2.2 装机前计算配平

风扇叶片的不正确配平是N1振动值的主要来源之一。风扇叶片不平衡有两种反馈模式, 一种发生在60-75N1%过渡阶段, 另一种发生在90-100N1%的起飞阶段。叶片安装排序的计算可通过在MyCFM官网下载最新版的配平专用软件BLAMAPv4.3.2来实现(下载步骤可参考图3和图4所示)。使用该软件能够确保叶片不平衡的配平结果满足AMM的要求。在进行叶片更换时, 推荐更换相对180度的成对叶片, 这样能够更好地保证配平效果。不过, 在保证配平结果的情况下, 也可以更换单独的叶片。同时, 建议

被更换的风扇叶片与备用叶片的力矩重量差小于200cm.g, 以减少因叶片重量差异导致的不平衡。对于未经过静平衡配平的风扇叶片组, 安装后可接受的最终不平衡结果应小于600cm.g。

3.2.3 航线监控

叶片装机后, 在前50循环内, 密切监控EGT(排气温度)裕度与振动趋势。通过飞机上的机载振动监控(AVM)系统, 持续监控发动机的振动程度, 并将振动值实时发送至CDS(驾驶舱显示系统)。一旦发现振动值或EGT裕度出现异常变化, 及时进行检查和处理, 确保发动机在飞行过程中的安全稳定运行。

4 案例分析与讨论

某航班的CFM56-7B发动机风扇叶片在关键区域出现了划痕, 划痕长度为8mm, 深度为0.4mm。维修人员依据上述修理工艺和方法对叶片进行了修理。修理后, 经过1500循环的跟踪监测, 发现叶片无裂纹扩展现象, 表明修理效果良好。从经济性角度来看, 此次单次修理成本为2200美元, 而更换一片新叶片的成本为84280美元, 修理成本仅为更换成本的2.6%, 节省了97%的费用, 充分体现了叶片修理的经济性优势。

5 结论

通过对CFM56-7B发动机风扇叶片关键区域划痕损伤的研究, 得出以下结论:

(1) 规范化的打磨工艺, 包括严格控制打磨方向、分阶段去除材料以及对过渡区的圆滑处理等, 能够有效恢复叶片的性能, 确保叶片在修复后满足气动和结构要求。

(2) 在叶片修理过程中, 结合无损检测技术对叶片进行全面检测, 并在装机后通过动态监控系统对叶片的运行状态进行持续跟踪, 能够确保叶片的长期可靠性, 保障发动机的安全稳定运行。

(3) 为提高修理工作的一致性和效率, 建议开发自动化打磨设备。自动化打磨设备能够精确控制打磨参数, 减少人为因素对修理质量的影响, 提高叶片修理的整体水平^[3]。

[参考文献]

[1] 万煜玮. 风扇叶片外物损伤后的疲劳性能预测方法研究[D]. 江苏: 南京航空航天大学, 2018.

[2] 李鹏涛. 航空发动机叶片损伤及其修复技术与展望[J]. 航空学报, 2024, 45(15): 140-167.

[3] 程亚茹. 航空发动机叶片表面损伤与检测研究进展[J]. 航空发动机, 2024, 50(02): 32-44.

作者简介:

徐伟军(1978--), 男, 汉族, 山西太原人, 本科, 工程师, 从事飞机适航工程技术研究。