

航空发动机涡轮叶片的检测技术

孙护国 霍武军

(海军航空工程学院青岛分院, 青岛 266041)

摘要:介绍了涡轮叶片的机上孔探仪检查、清洗预处理、叶型完整性及内部组织结构完整性等先进的检测技术。

关键词:航空发动机 涡轮叶片 孔探仪检查

V2 A

Inspection Technique for Turbine Blade in Aeroengine

Sun Huguo Huo Wujun

(Naval Aeronautical Engineering Institute, Qingdao Branch, Qingdao 266041)

Abstract: The borescope inspection onboard, the cleaning before shop examination, the advanced examination technique for integrity of airfoil of turbine blades and its internal structure are introduced in the paper.

Key words: aeroengine; turbine blade; borescope inspection

1 引言

航空发动机涡轮叶片,包括导向叶片和工作叶片,是将燃气的热能转换为旋转的机械动能的重要的热端部件。基于提高推重比和单位推力的需要,涡轮前燃气温度日益提高,目前国外新型的航空燃气涡轮发动机涡轮前的温度已达到 1700K 以上。涡轮叶片在高压腐蚀性燃气的冲击下高速旋转,除承受巨大的拉应力外,还承受频率、幅值变化都很大的交变拉应力和扭转应力,此外还存在高温氧化、热腐蚀和磨损的问题。因此,涡轮叶片的工作条件非常恶劣。如何准确监测涡轮叶片的结构完整性和状态,以便及时发现并预防危害性故障,提高发动机工作安全性,是航空发动机状态监控和故障诊断专家一直关注的问题,并一直在努力寻求解决方案。此外,由于目前性能先进的航空发动机的涡轮叶片都采用了性能优异但价格十分昂贵的镍基和钴基超级合金材料以及复杂的制造工艺,如定向凝固叶片和单晶叶片,叶片的造价很高,出于经济效益的考虑,通常在维修车间采用先进的修理技术对存在缺陷和损伤的叶片进行修复,延长其使用寿命,以减少新叶

片的更换。在修理之前,对叶型和结构完整性进行精确检测,以便正确评估叶片的损伤形式和损伤程度,确定叶片的可修理度和采用何种修理技术,对叶片修复具有重要的指导意义。

2 机上孔探检查

涡轮叶片的机上孔探检查,就是利用发动机涡轮机匣壳体上的探视孔,使用孔探仪,对涡轮叶片进行可视检查。这种技术手段不必分解发动机,在飞机上就可以进行,简便快捷。孔探检查可有效发现涡轮叶片的烧熔、腐蚀、掉块、裂纹、积碳和冷却孔堵塞等损伤缺陷情况,从而有助于了解、掌握涡轮乃至整台发动机的技术状态和健康状况,完全彻底地检查出涡轮叶片部位的危及飞行安全的故障隐患,保证发动机正常可靠运转。如西北航空维修基地在对 A310 飞机的 JT9D 发动机进行视情检查和 A 级定检时,使用孔探技术多次发现高压涡轮转子叶片和导向叶片变形、烧蚀、裂纹及被外物击穿痕迹,及时进行了换发处理,避免了飞行事故的发生。

对于涡轮叶片的不同部位,孔探检查的目的也不相同。如导向叶片,主要检查叶根焊接部位是否

收稿日期:2001-12-10

第一作者简介:孙护国,讲师,1966 年出生,毕业于西北工业大学,从事航空发动机结构完整性与可靠性研究。

有裂纹以及叶身的烧蚀情况。而对于工作叶片:叶顶部位,主要检查硫化程度和磨损状况;叶身部位,检查热障涂层的剥落情况和基体的烧蚀、腐蚀情况;叶根部位,由于承受着相当大的离心力和高频振动,会因热蠕变、疲劳和材料工艺缺陷产生裂纹,因此要重点检查。

随着孔探技术的发展和实际应用的需求,孔探仪也不断发展更新,由最初的光学棱镜及后来的光纤镜,发展到目前先进的电子成像视频内窥镜系统。如美国 WELEH ALLYN 公司的 VIDEO PROBE2000 视频成像系统。这种系统不但解决了光纤镜易折、有效探测范围小的弊端,并且能够提供高分辨率、高清晰度、广可视范围的高质量的图像。由于系统采用微机控制,自动化程度高,操纵简便,且可对图像进行数字化存储,这有利于使用高性能的计算机应用图像处理软件对检测图像重现,以进行更深层次的分析处理,从而不但能定性检查——发现缺陷部位、类别与性质,而且还能定量检查——确认缺陷的长度、深度等具体情况。随着网络通信技术的发展,也可将视频信号远距离传输,进行远程监测与故障诊断。

3 修理车间检测前的清洗预处理

涡轮叶片表面黏附有燃料燃烧后的沉积物以及涂层和基体经过高温氧化腐蚀后所产生的热蚀层,一般统称为积炭。由于积炭增加了叶片的厚度,改变了叶片间原有的燃气通道,致使涡轮效率下降;另外,热蚀层会降低叶片的机械强度;同时积炭也掩盖了叶片表面的损伤,不便于检测。因此,叶片在进行检测和修理前,要进行除积炭清洗。

积炭质地坚硬,黏附力强,尤其是热蚀层,组织结构致密、与基体金属结合力极强。因此,在保证叶片基体金属不腐蚀的前提下,清除积炭是一项较困难的工作。长期以来,各国的航空发动机维修基地都在致力研究高效和高可靠性的清洗液和清洗工艺,目前已取得相当的成果。西安航空发动机公司在从英国引进的技术的基础上,研制出四种不同成分配方、不同清除功用的清洗液和分步的清洗工艺,在某型发动机上使用,清洗效果良好。美国则推行无毒清洗技术,如用碱性清洗液和塑料丸取代氯氟烃溶剂,而一些航空公司已经采用在清理表面积附时间长、易于用水清洗不留残物的凝胶工艺(SPOPL)。SENCMA 公司在 20 世纪 80 年代开发

了氟化氢(HF)离子清理技术,后来被美国 FAA 及诸如 GE 公司等发动机制造商广泛应用,这种方法可有效地清除叶片表面的氧化物、硫化物以及氟化物,特别适用于进行叶片表面处理(如化学气相沉积)前的预先清理。用 HF 清理是在一个封闭系统中进行的,副产物为氯化钠和氟化钠,不存在污染问题。

4 叶片完整性检测

以前,通常用角规、卡尺等“硬”测量仪检测航空发动机涡轮叶片的叶身尺寸,虽然技术简单易行,但存在易受检测者人为因素影响,检测精度低、检测效率低等缺点。后来,在坐标测量机(CMM)的基础上,编制微机控制自动检测所用的应用软件,发展研制了检测涡轮叶片的叶身几何形状的坐标测量系统(CMMS),自动检测叶身的几何形状,并与标准叶型比较,自动给出偏差检测结果,来判断叶片的可用度和所需采用的修理手段。

不同的 CMMS 制造商所采用的测量方法有所不同,如美国 EDA 公司的 TFSCAN 软件系统,用 CMM 在叶身各高度区建立检测环,自动检测高度截面和整个叶身的几何形状;而德国的 ZEISS 公司的 CMMS,则采用测头恒接触叶片表面型线运动,同时不断采集数据(每个检测微小区域可采集近 1000 个数据点),以扫描检测叶身几何形状;以色列 Elor 公司的 VIDI 系统,叶片做 360°旋转,采用多个激光测量头及其控制微机同时工作,最后由平面图像合成叶片的三维立体图。

尽管各制造商的 CMMS 所采用的具体技术有所差别,但都有以下共同点:自动化程度高;检测速度快,通常一个叶片在 1min 内检测完毕;检测结果精度高;软件扩充性好,只要修改标准叶型数据库就可以适用不同型号的叶片的检测。

5 无损检测

在实际检测中,目视检查是最简单也是最常用的方法,它可发现叶片表面较明显和尺寸较大的损伤,但具有很大的人为不确定因素,检测误差较大;光学显微检查可发现叶片表面较细微的裂纹;磁粉、涡流、渗透着色等无损检测技术手段也已广泛应用到涡轮叶片的检测中。但较为先进的是用超声波和 CT 检测叶片结构完整性。

超声波和计算机辅助层析 X 射线摄影(CT)是

常用于人体内部器官组织的深层造影检查的技术手段,正像许多医学检查技术已被移植应用于航空发动机的状态监测与故障诊断一样,超声波和 CT 也被用来检测涡轮叶片的结构完整性。

早在 20 世纪 80 年代初,美国 SONOSCAN 公司就已开发以激光扫描超声显微镜为代表的超声检测技术,用于叶片的实时光成像检测。后来,美国 NUCON 检测设备公司又研制了检测大型发动机转子及转子叶片完整性和内部裂纹的 NIPSCAN 系统,此系统由超声波传感器夹具、超声波裂纹探测器和一个计算机系统构成。

目前 CT 已经成为适用于测量涡轮叶片壁厚和内部裂纹的主要技术方法。一台 CT 机由 X 辐射源和专用计算机组成。检测时,辐射源以扇形释放光子,通过被检叶片后被探测器采集,其光子量和密度被综合后,产生一幅二维层析 X 光照片,即物体的截面图,从中分析叶片内部组织结构,得出裂纹的准确位置及尺寸。连续拍摄物体的二维扫描可生成数字化三维扫描图,用于检测整个叶片的缺陷,还可检测空心叶片冷却通道的情况。CT 可探测到 10^{-2} mm 级的裂纹。

6 结束语

涡轮叶片的孔探检查不需分解发动机,由用户

根据维护手册规定或视情实施,简便易行。多年的使用实践表明,孔探检查可及时有效地预先发现涡轮叶片危害性故障,在保障发动机航线安全性方面发挥了重要作用,并且在一定程度上也推进了航空发动机由定期维护向视情维护的发展。

涡轮叶片的叶型和结构完整性的精确检测,需在修理车间发动机分解状态下进行,且设备价格较贵,检测工艺复杂,专业要求很高,因此叶片的精确检测由具有一定资质的专业公司来进行,目前一般由发动机的制造公司负责,在有效提高叶片的修理质量的同时,还可根据损伤及缺陷情况改进叶片结构、材料与制造工艺,提高叶片的使用寿命和可靠性。

目前,在我国航空发动机涡轮叶片的机上孔探检查已广泛使用,但修理车间的精确检测技术应用不多,这与我国目前采用的发动机叶片材料并不十分昂贵有关。但随着新型高性能的发动机研制生产,先进的涡轮叶片材料和制造工艺也将采用,这会使涡轮叶片的造价大幅增加,相应地对叶片的修理也将提出更高的要求,因此对于国产航空发动机来说,涡轮叶片精确检测技术也有着非常广阔的应用前景。

参考文献(略)

(上接第 22 页)求叶尖端面必须有某种程度的厚度,其传感器的输出是随着叶尖形状、安装状态、环境温度等变化,因此需事先校准。这种间隙测量方法传感器体积小、重量轻、响应速度快、价格较低,并可测出每片叶片的叶尖间隙,较适于在定型机和试验机的风扇和压气机的间隙测量。但是,电涡流法也有其不足,如传感器耐热性能较差(无冷却,200~400℃左右),使用环境受到了很大限制。电容法弥补了电涡流法在使用温度上的不足,除具有与电涡流法相似的特点外,电容传感器具有高温工作能力,探头使用温度可达到 1350℃,成为目前涡轮间隙测量的一种有效手段。目前已被 RR、GE、PW、BMW-RR、ABB、NASA 等大量用于航空发动机涡轮间隙测量。但电容法使用通道的可比造价较高,并且目前只能从国外引进。

5 建议

(1) 在进行航空发动机间隙测量时,除测量设

备的合理选择外,根据经验,遇到更多的是工程问题。因此在设计具体测试方案时,要仔细分析研究,对各方面影响因素进行全面而充分的考虑。国外在间隙测量研究方面,通过多年的研制和大量试验,已基本解决了测量仪器问题。在高难度间隙测量的应用上,如高压涡轮间隙测量,应尽量考虑利用国际上现有的先进技术和测试手段,而把主要精力放在解决工程应用上,以推进我国航空技术的快速发展。

(2) 目前进行的间隙测量都是在部件试验上进行的,整机试车中径向间隙测量还不曾做过。尽管整机试车中间隙测量的难度将更大,试验安排也更加困难,但在可能的情况下利用成熟的设备和先进的技术进行压气机和高压涡轮应用场合的整机间隙测量更具有意义。

参考文献(略)