

介绍了涡轮叶片的清洗、无损检测、叶型完整性检测等预处理,以及包括表面损伤修理、叶顶修复、热静压、喷丸强化及涂层修复等在内的先进修理技术。

航空发动机涡轮叶片修理技术

Repair Technologies for Blades of Aero-engine Turbine

◎孙护国 霍武军 / 海军航空工程学院青岛分院

涡轮叶片的工作条件非常恶劣,因此在性能先进的航空发动机上,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高温合金材料以及复杂的制造工艺,例如,定向凝固叶片和单晶叶片。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,减少更换叶片,可获得可观的经济收益。为了有效提高航空发动机的工作可靠性和经济性,涡轮叶片先进的修理技术日益受到发动机用户和修理单位的重视,并获得了广泛的应用。

修理前的处理与检测

涡轮叶片在实施修理工艺之前进行必要的预处理和检测,以清除其表面的附着杂质;对叶片损伤形式和损伤程度做出评估,从而确定叶片的可修理度和采用的修理技术手段。

1. 清洗

由于涡轮叶片表面黏附有燃料燃烧后的沉积物以及涂层和(或)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。积炭致使涡轮效率下降,热蚀层会降低叶片的机械强度和叶片表面处理的工艺效果,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,要清除积炭。

积炭质地坚硬,黏附力强,因此,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表明清洗效果良好。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)。SNECMA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,而且不污染环境。

2. 无损检测

在修理前,使用先进的检测仪器对叶片的叶型完整性和内部结构进行检测,以评估磨损、烧熔、腐蚀、掉块、裂纹、积炭和散热孔堵塞等损伤缺陷情况,从而指导叶片的具体修理工艺。

对于涡轮叶片的不同部位,无损检测的侧重点也不相同。如导向叶片,主要检查叶根焊接部位是否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,检查热障涂层的退化情况和基本

的烧蚀、腐蚀情况;叶根部位,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。

目视检查是最简单也是最常用的方法,可发现叶片表面较明显和尺寸较大的损伤,淘汰不具有修理意义的叶片。但这种方法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、涡流等无损检测技术手段也已广泛应用于涡轮叶的检测中,较为先进的是用超声波和CT检测叶片结构完整性。

早在20世纪80年代初,美国SONOSCAN公司就已开发激光扫描声显微镜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组成。

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度。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^{-3} mm级的裂纹。

3.叶型的精确检测

目前,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),可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CMMS制造商所采用的测量方法有所不同,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1分钟内检测完毕;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。

叶片修理技术

采用先进的叶片修理技术,修复叶片表面以及内部的缺陷,恢复甚至增强其原有的性能等,这都将大大降低发动机的寿命周期费用,有效提高其经济性。目前国内外在涡轮叶片修理中所应用的工艺和技术主要有以下几种。

1.表面损伤的修理

如果经检验,叶片表面的微小裂纹或者由烧蚀、腐蚀所导致的缺陷尺度在允许修理范围内,则对其进行修补。目前先进的修补方法有以下几种。

一是活化扩散愈合法,这是美国GE公司开发的一种以钎焊为基础的发动机热端部件延寿手段。其原理及工艺特点是借助低熔点焊接合金把高温合金粉末“注入”裂纹中,通过液相烧结使焊接合金同时向高温合金粉末和基体金属中扩散,从而使裂纹得到愈合。具体工艺是,把由叶片基体材料成分相同的高温合金粉末以及钎焊黏结剂、低熔点活化扩散焊接合金(通常含有铬、铝、钽及钴,并添加2.4%的硼以降低熔点)所组成的裂纹修补材料制成浆料,用气压制灌注器填入裂纹中。在真空或惰性气体中(如氩

气),叶片被分段加热至 1205°C 并保持30分钟,在液相烧结过程中,焊接合金熔化并使基体合金粉末“铸造”成裂纹形状与基体金属融合。用这种工艺可修理大约1.30mm宽的裂纹和不大于1.50mm的缺陷。活化扩散愈合法的显微金相检验表明,基体金属与修理后获得的金属都具有均匀的材质并有相近的物理性质。用于修补的混合物的组分、比例很重要,对修补的质量有决定性作用,其配方由维护手册中给出或由试验所得。

另外一种方法是激光熔覆,是利用一定功率密度的激光束照射(扫描)覆于裂纹、缺陷处的合金粉末,使之完全融化,而基材金属表层微熔,冷凝后在基材表面形成一个低稀释度的包覆层,从而弥合裂纹及缺陷。激光熔覆的熔化主要发生在外加的纯金属或合金中,基材表层微熔的目的是使之与外加金属达到冶金结合,以增强包覆层与基材的结合力,并防止其他元素与包覆元素相互扩散而改变包覆层的成分和性能。激光熔覆所获得的包覆层组织细小,一般无气孔和空穴。

2.叶顶的修复

对于叶片受损(主要是磨损、腐蚀和硫化)的顶部,可用等离子电弧焊及钨极惰性气体保护焊来修复,即先堆焊上合适的材料,再磨削到所要求的叶片高度。钴基合金抗热腐蚀性能好,是一种合适的堆焊材料。美国GE公司采用René142合金作为叶尖修复材料,采用堆焊法之前先将叶片在氮气中加热至高温以避免微裂纹的产生。经验表明, René142合金结合此工艺修复的叶片具有良好的结构完整性。除焊修外,低压等离子喷涂MerAlY涂层,已成功地用于修复叶片的顶部了,涂层厚度为2.03mm。

JT8D、JT9D发动机叶片上用于密封的篦齿损伤后,也用上述的堆焊修复方法。在磨剩的残根上堆焊,可用等离子电弧焊、电子束焊或达波法惰性气体保护焊等焊接方法。

当用焊接方法修补叶片时,若叶片后缘或顶部的冷却孔被堵塞或在孔边产

生了裂纹,可以先将孔焊死,再用高能电子束或激光束钻孔。

3.热静压

热静压是将叶片保持在 $1000\sim 1200^{\circ}\text{C}$ 温度和 $100\sim 200\text{MPa}$ 压力的热等压条件下,可用于以下目的修复:

消除焊后存在于金属中的内应力;

冶金成分退化修复,涡轮叶片在工作过程中会沿晶界出现脆生相,将降低叶片的塑性和强度,热静压固溶处理可有效恢复叶片结构的退化情况;

低循环疲劳的修复;

蠕变损坏的修复。

热静压可恢复叶片原有的强度极限和延伸率,延长蠕变断裂寿命。

4.喷丸强化

喷丸是以高速弹丸流撞击受喷工件表面,在受喷材料的再结晶温度下进行的一种冷加工方法。叶片喷丸强化可提高抗疲劳和抗应力腐蚀性能。它是利用高速弹丸在撞击叶片时,叶片表面迅速伸长,而引起表层材料在一定深度范围内的塑性流动(塑性变形)。变形层的深度取决于弹丸撞击程度和工件材料的力学性能,通常变形层深度可达 $0.12\text{mm}\sim 0.75\text{mm}$ 。改变喷丸参数,也可以得到合适的变层深度。当喷丸引起叶片表层材料塑性变形时,与表层相邻的次表层材料也将由于表层变形而变形。但与表层相比较,次表层的变形程度较小,未达到该材料屈服点而保持弹性变形状态,因此,表层与次表层的这种不均匀塑性变形,能引起材料受喷后的残余应力场(即应力分布)的改变。试验表明,喷丸后表层呈现残余压缩应力,而在一定深度的次表层则为拉伸应力。表层的残余压缩应力可比次表层的拉伸应力高达数倍。这种残余应力分布模式很有利于疲劳强度和抗应力腐蚀性能的提高。

叶根处的喷丸尤为重要,通过残余压力场,增加表面残余压应力,使表面实际承受的交变拉应力水平降低,提高抗疲劳性能,避免裂纹的生成。

5.涂层修复

许多性能先进的航空发动机涡轮

以定性与定量相结合的方法,统计分析近十年国内外民用航空安全信息,得出现代运输机起落架系统的故障率及其影响、故障类型及其分布,深入分析了多发故障特性及其原因。

现代民用运输机起落架系统使用故障特性

Landing Gear System Malfunction of Modern Civil Transport Aircraft

◎ 段维祥 / 中国民航飞行学院

飞机起落架系统的故障特性是评价使用可靠性,寻找影响因素与薄弱环节,进而改进设计、制造、检验与使用的重要依据。现代运输机空地循环周期缩短,寿命期内地面运动距离增长,起落架结构受动载,系统工作处于复杂环境,因此使用故障较多。本文定性与定量分析主要运输机型起落架系统的故障率、

故障类型、分布、影响及多发原因。

起落架系统故障率及其影响

无故障性是衡量可靠性的参照,故障率与故障流参数则是无故障性的重要指标。起落架系统故障率相对飞机总故障,故障流参数则相对飞行时间或起落架次数,一般用相对起落架次数计算。起落架

系统的故障绝大多数是起飞、着陆、飞行前后机组与维修人员发现的问题。其中少数故障直接影响飞行安全导致重要事件:冲出跑道、中断起飞、严重损伤、收不上与接地收起等重要事件则可能导致事故征候或事故;影响航班正点则为不正常飞行,未导致不正常飞行与重要事件的则为一般故障。从中国民航四川省航

叶片已应用涂层技术提高其抗氧化、抗腐蚀、耐磨、耐高温性能以及涡轮的气动效率,但叶片在使用过程中涂层会不同程度地缺损,因此,在叶片修理时都要对防护涂层进行修复,一般都要将原涂层剥落,重新涂覆新的涂层。另外,原没有涂层的涡轮叶片,也可以在叶片基体表面涂覆防护涂层,以提高叶片的工作可靠性和使用寿命。目前,涡轮叶片所应用的涂层种类主要有抗氧化耐腐蚀涂层、MCrAlY 金属基陶瓷热障涂层、耐磨涂层(主要用于叶冠和叶根)、封严涂层等,所采用的涂层制备工艺主要有以下几种。

扩散渗金属法:将某种防腐蚀金属的化学成分在高温下从填充物中释放,转移到部件上并扩散到里面,形成部件

防腐的致密层。

热喷涂工艺:采用气体、液体燃料或电弧、等离子弧作热源,将金属、合金、金属陶瓷、氧化物、碳化物等喷涂材料加热到熔融或半熔融状态,通过高速气流使其雾化、喷射沉积到工件表面而形成附着牢固的表层的方法。

物理沉积工艺及化学相沉积工艺:通过金属或化学成分的蒸气相迁移到基体金属表面。此工艺受到工装设备的限制,应用较少。

结束语

由于涡轮叶片工作环境恶劣、合金材料价格贵,其机械状态检测和修理受到航空动力界更多的重视。多年的实践表明,先进的修理技术在航空发动机渦

轮叶片的维修中的广泛应用,在很大程度上有效提高了发动机的航线工作可靠性,降低了全寿命费用。当然,采用何种检测技术及修理工艺,也要充分考虑维修的经济性,因此,工艺复杂的维修技术一般只用于合金材料昂贵、制造工艺难度大的叶片。

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,但叶片的先进的修理技术应用不多,这与我国自己制造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,也将采用先进的涡轮叶片材料和制造工艺,这会使涡轮叶片的造价大幅增加。因此,对于国产航空发动机来说,涡轮叶片精确检测与先进修理技术也有着非常广阔的应用前景。 □