

后掠大流量宽弦复合材料 风扇叶片技术综述

Sweepback and Wide-Chord Composite Fan Blade With High Volume Flow

西安航空发动机(集团)有限公司 李 杰



李 杰

高级工程师,就职于西安航空发动机(集团)有限公司外贸公司,从事外贸技术与管理工作。

风扇叶片是涡扇发动机的重要零件,涡扇发动机的性能与它的发展密切相关。初期的风扇叶片材料为钛合金,采用实心、窄弦、带阻尼凸台的结构。现在,风扇叶片在材料、结构方面已改进了许多:为了增强刚性,防止振动或颤振,提高风扇叶片的气动效率,用宽弦结构代替了窄弦、带阻尼凸台结构;为了减轻重量,用夹芯或空心结构取代了实心结

构。用碳纤维复合材料制造的风扇叶片比钛合金夹芯结构的风扇叶片轻,在抗振特别是抗颤振性能方面也优于钛合金,抗鸟击能力和低噪声指标也获得适航当局的合格批准。装有高韧环氧树脂复合材料风扇叶片的 GE90 发动机已装于波音 777 飞机,并在 1995 年投入航线运营使用。此项技术在十多年的使用时间里表现出色,无需例行的在役维护。

构:为了增大流量比,提高大推力涡扇发动机推进效率,风扇转子直径已增大到了 3242mm,风扇叶尖速度已高达 457m/s。

这些材料新、叶身长、叶弦宽、结构复杂的风扇叶片的成形工艺非常复杂,因此,风扇叶片的成形工艺始终是涡扇发动机的关键制造技术之一。

现代商用喷气飞机要求飞得更高、更快、更安静,而飞机发动机的动力和效率那怕有些许改进也会为航运业者带来竞争上的切实优势。后掠大流量宽弦复合材料风扇叶片就是应现代涡轮风扇发动机发展需要,由美国 GE 公司研发并应用于 GE90 和 GEnx 系列发动机上的一项新技术。GE 公司复合材料技术的第一个应用成果就是 GE90 的风扇叶片。

这也是一项可供中国航空工业设计研发新一代大型航空发动机借鉴的新技术。

后掠大流量宽弦复合材料风扇叶片材料和进展

在 GE90 系列发动机上,美国 GE 公司用碳纤维加强高韧性环氧树脂复合材料代替钛合金制成了当今世界上最大的风扇叶片。

这种新型宽弦复合材料风扇叶片的技术关键是其新的复合成型工艺,设计和制造这种风扇叶片是要冒很大技术风险的。为提高叶片抗分层性能和抗剪强度,美国 GE 公司发展了一种称之为大力神 8551-7 / IM7 的增韧环氧 / 石墨纤维,在环氧树脂中加入了凯芙拉微粒。与 787 飞机机翼及机身上使用复合材料的

理由一样,复合材料更轻,可降低油耗;同时还不发生腐蚀,从而节约维修费用。

为将复合材料技术作为其新一代低噪声、低成本发动机的关键技术,GE公司为此而进行了长达30多年的努力和研究。

上世纪90年代复合材料叶片技术日趋成熟,使其可用于GE90-76B发动机上。当时的3维气动模型使GE公司制成具有高流量、后掠型的宽弦风扇叶片,复合材料叶片的低密度优点使复合材料实心叶片比当时流行的空心叶片轻10%。据统计,复合材料比钛轻66%、而强度高100%。

在GE90-115B发动机的设计中采用的复合材料叶片,由400层预浸带制成,从叶根到叶尖逐渐减薄。由于叶尖边缘的复合材料有剥离趋向,因此前缘、叶尖及后缘包有钛合金条,可以使外物损伤能量得以消散。经过10年的运行及650万小时的飞行,仅有三块复合材料叶片因外物打坏而被更换下来。

GENx发动机除了使用复合材料叶片外,还在叶片燕尾板处使用了特氟隆耐磨垫,它不像金属那样会产生磨损,也不像金属那样需要重复更换。

随着风扇尺寸的加大,发动机重量也加大,但由于冷却技术、热端材料的改进以及优化的气动力载荷使核心发动机尺寸缩小。A330、波音767、波音747等飞机上使用的CF6-80C2发动机的风扇只占发动机总重的21%。而波音787-8飞机上使用的GENx-1B发动机的风扇则占到了发动机总重的33%。

成型工艺特点

GE90-115B发动机的新型弯曲前缘后掠大流量宽弦复合材料叶片的风扇叶高1.1m,弦长0.61m,风扇转子直径3242mm,风扇叶尖速度达360~390m/s。

这种新型风扇叶片的复合成型工艺包括:新的复合工艺造型、先进的传感器和数据采集系统、数据-信息转换技术、压缩成型工艺、高压固化工艺和模拟处理用的小尺度模型等。

叶片是以数百层经树脂浸渍的预浸纱布带从叶根向叶尖以渐薄的方式进行缠绕模压成形而成,模压成形法制造树脂基复合材料风扇叶片的具体工艺过程如下:

首先,用模板法或冲模法截取各个铺层,由于每个铺层的尺寸大小不一,用计算机放样技术来确定它的尺寸。

其后,将不同铺层以一定顺序装在模具上,按给定工艺参数进行固化。

然后,脱模并在脱模后对叶片进行加工、去毛刺、修整和钻孔,按顺序在叶片前缘铺上胶膜、丝网并装配完金属保护板后,再在一定工艺条件下加热、加压固化。

最后脱模修整后,对叶片表面进行吹砂处理,打底漆,并涂上0.2~0.25mm厚的聚氨酯涂料,待其干燥固化后,即得到带有前缘保护的实心复合材料叶片。

新的工艺技术使风扇叶片纤维中既无皱纹也无空洞。由于复合材料的尖部边缘有剥离趋向,叶片前缘、叶片后缘及叶尖都包有钛合金条,可以使外物损伤能量得以消散。

新型风扇叶片的优越性

GE公司研发的新型弯曲前缘后掠大流量宽弦复合材料风扇叶片使现代涡轮风扇发动机的风扇叶片达到了一个新的水平。应用新复合材料技术使GE90系列发动机更轻、燃油效率更高,风扇叶片在服役中的表现优异,运转效率更高、噪声更低。

用碳纤维复合材料制造的风扇叶片比钛合金夹芯结构的风扇叶片轻,在抗振特别是抗颤振性能方面也

优于钛合金,抗鸟击能力和低噪声指标也获得适航当局的合格批准。装有高韧环氧树脂复合材料风扇叶片的GE90发动机已装于波音777飞机,并在1995年投入航线运营使用。此项技术在十多年的使用时间里表现出色,无需例行的在役维护。



新型弯曲前缘后掠式大尺寸风扇有许多优势,如可设计较低的风扇转速、减轻风扇重量和改进气动特性等,从而提高了发动机的涵道比,降低了噪声。同时弯曲前缘后掠式宽弦风扇叶片结构可使外来物通过风扇叶片的离心作用而被甩入风扇涵道,防止其进入低压压气机,增强了发动机的抗外物损伤能力。这也是弯曲前缘后掠式宽弦风扇叶片结构广泛应用于新型大型涡扇发动机上的主要原因。

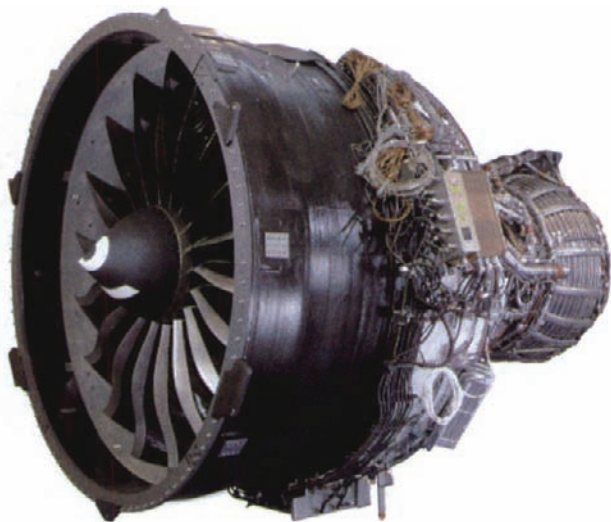
除GE公司的GE90和GENx发动机外,各新型发动机如发动机联盟(由GE和P&W携手组成)研制的GP7200发动机和英国R·R公司研制的TRENT900和TRENT1000发动机的风扇叶片虽然材料各异,但形状都是弯曲前缘后掠式宽弦结构。

在新型大推力涡轮风扇发动机上应用该项新技术,为新一代宽体和大型飞机的用户所带来的是更高的

效率、更低的运营成本、更大的收益、同时继续保持高水平的安全性和可靠性。

在新一代发动机 GEnx 上的发展

新型弯曲前缘后掠大流量宽弦复合材料风扇叶片技术在 GE 公司的新一代涡轮风扇上获得了进一步的发展。与 GE90 发动机相比,新一代 GEnx 涡轮风扇发动机的风扇叶片数更少(GE90-115B 有 22 片风扇叶片,而 GEnx 的风扇叶片数为 18 个),进一步降低了风扇的重量同时叶片运转效率也更高。由于降低了



GEnx 发动机

滑过风扇叶片的空气阻力,因而发动机的噪声也更低。GEnx 在叶片燕尾板处还使用了特氟隆耐磨垫。

由于复合材料风扇叶片可以减重,GE 公司要求 GEnx 发动机的风扇机匣也采用复合材料,但早期试用单缠绕的复合材料机匣的强度不够高,后改用复合材料纤维编织法制成的编织品,在编织品中心铺上第三编织层使强度问题得以解决。机匣采用这种 3/10 英寸(0.76cm)厚的三轴编织物与二维编织物混编的编织物技术制成。编织采用了自动化工艺。

复合材料风扇机匣源于 GE 在

波音 787 的前身“音速巡航者”的开发工作,采用了 100 多块壁板进行冲击试验以验证设计;试验表明,复合材料风扇机匣对外物的抗打伤能力超过了铝机匣。

作为世界上唯一采用复合材料风扇机匣和风扇叶片的涡轮风扇喷气发动机,GEnx 的耐久性更高,重量更轻,使用成本更低,其噪声水平优于目前投入使用的任何一型 GE 民用发动机。另外,GEnx 还采用了一种新型燃烧室,通过提高点火前的油气混合效率,大幅降低了氮氧化物(NO_x)的排放水平。

GEnx 是 GE 公司最可靠、最畅销的宽体飞机发动机 CF6 系列的新一代后继型涡轮风扇发动机,与 CF6 发动机相比,GEnx 极大地改善了油耗和有效载荷性能,现已被正在研制的 3 种新型宽体飞机选作动力装置,目前订单数已超过 800 台。

GEnx 发动机的成功很大程度上归功于其技术品质,以及波音 777 飞机使用的 GE90 发动机在全球的出色表现。正是在这个 GE90 发动机的衍生型发动机上,GE 公司将复合材料技术推向了极致。

金属基复合材料风扇叶片

美国 P&W 公司在复合材料风扇叶片的研究上走了一条与 GE 公司不同的道路,他们正在研制的一种新型复合材料风扇叶片即连续碳化硅纤维增强的钛基复合材料风扇叶片。碳化硅纤维增强的钛基复合材料可使风扇叶片的强度提高 50%,硬度也比普通的钛合金更高。

碳化硅纤维增强钛基复合材料

空心叶片是一种用超塑成形/扩散连接工艺制成的风扇叶片,其重量轻、刚性好、耐撞击破坏强度高,可使发动机的风扇级再减重约 14%。

金属基复合材料风扇叶片的制造过程如下:

首先将碳化硅纤维(SCS-6)和钛合金(Ti-6Al-4V)制成钛面板,经 X 射线、超声波、金相和尺寸检查合格后将它加工成楔形板,再用超塑成形/扩散连接工艺将它制成成形板。

然后对成形板进行尺寸和无损检测,以确保金属基复合材料有效连接和成形、内部无缺陷、表面无裂纹、增强纤维无任何变化,并保证蒙皮与芯板的连接缝、扩散连接面的连接质量。

再将检查合格的成形板,按风扇叶片尺寸要求制成叠板组件,用超塑成形/扩散连接工艺成形。

叶片蒙皮厚度从根部到叶尖递减。蒙皮的制造方法是将单向排列的 SCS-6 纤维与钛交织成织物(用钛箔控制纤维间隔)按照厚度要求确定蒙皮层数,最后在热等静压罐内扩散结合。

结束语

后掠大流量宽弦复合材料风扇叶片是由美国 GE 公司研发并成功应用于 GE90 和 GEnx 系列发动机上的一项新技术。这是完全可供中国航空工业相关人员在设计研发新一代大型航空发动机时借鉴的。本文仅就后掠大流量宽弦复合材料风扇叶片的材料和工艺进行了简单扼要的介绍和分析,挂一漏万在所难免。期望对航空业界相关人士能有所启迪。

当今航空制造技术日新月异,希望中国在不远的将来有一天能将该技术应用到自己的新一代涡轮风扇发动机上。

(责编 侧卫)