

复合材料在新一代商用发动机上的应用与发展

Application and Development of Composite Materials for New Generation of Civil Aircraft Engines

李杰 / 西安航空动力股份有限公司

摘要: GE公司率先在新一代商用发动机GE90上应用了复合材料并取得了成功, 随后在GENx发动机和LEAP-X发动机上应用了更多的复合材料, 在NASA N+3先进发动机项目中复合材料的应用将达到一个新的水平。本文就复合材料在新一代商用发动机上的应用与发展作一概括性介绍, 供业界相关人士参考。

关键词: 复合材料; 陶瓷基; NASA N+3先进发动机; 应用与发展

Keywords: composite materials; ceramic matrix; NASA N+3 advanced reference engine; application and development

0 引言

近年来, 复合材料相关技术发展很快, 价格也大幅降低, 为其在新一代商用发动机上的应用奠定了基础。

1 在新一代商用发动机上的应用与发展

复合材料在现代航空发动机上的应用量日益增多, GE公司在此领域处于领先地位。

1.1 GE90发动机的复合材料风扇叶片

在GE90系列发动机上, 美国GE公司用碳纤维增强高韧性环氧树脂复合材料代替钛合金制成了世界上最大的发动机风扇叶片。用碳纤维复合材料制造的风扇叶片比钛合金夹心结构的风扇叶片轻, 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。装有高韧环氧复合材料风扇叶片的GE90发动机已装于波音777飞机, 并于1995年投入航线运营。此项技术在使用中表现

出色, 无需例行的在翼维护。

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。

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。

1.2 GENx 发动机上的应用与发展

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发动机GENx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), 在进一步降低了风扇重量的同时叶片运转效率也更高。

新一代GENx发动机的前风扇机匣

(图1)也采用了复合材料, 这是第1次将复合材料用于大型发动机机匣。复合材料机匣包容性能及强度均优于金属机匣, 且该机匣比金属机匣轻154kg, 可使一架飞机质量减轻363kg, 而且不会被腐蚀、易于维护。GENx发动机复合材料的用量超过600kg, 约占发动机重量的13%, 是GE90的2倍。

目前, 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款GE民用发动机。

1.3 在LEAP-X发动机上的应用与发展

LEAP-X发动机由CFM国际公司研制。早在2008年, CFM国际公司预测波音和空客公司将在2012年分别推出波音737和A320的后继机型, 并实施更换发动机的计划, 进而将LEAP-X发动机的取证时间定为2016年。由于中国C919大飞机选择LEAP-X1C发动机作



图1 GEnx复合材料风扇和复合材料风扇机匣(左)



图2 三维编织树脂模传递成型复合材料风扇叶片(右)



图3 陶瓷基复合材料低压涡轮导向器叶片

为唯一指定外方发动机,空客公司宣布选择LEAP-X1A发动机作为A320neo的动力,波音宣布选择LEAP-X1B作为波音737MAX的动力,为其展示了十分美妙的市场前景。

1) LEAP-X发动机的风扇叶片

LEAP-X的涵道比约为10~11,是目前CFM56发动机的两倍,可以有效地降低噪声并提高推进效率。LEAP-X的风扇叶片为先进碳纤维复合材料风扇叶片,数量只有18片,直径为1.8m,总重为76kg,而且空气动力性能大幅优化。为了大幅度减重,LEAP-X发动机的风扇叶片边缘将采用钛合金,叶片本身是采用三维编织树脂模传递成型技术(3-DW RTM)制造的复合材料风扇叶片。这项革新型技术制造出了免维护、耐久性极高的风扇叶片(图2)。

LEAP-X发动机的风扇叶片总重为76kg,而CFM56系列发动机的24个1.5m叶片总重118kg。试验结果表明,应用该技术制作的叶片不仅重量轻,而且结构牢固,抗大体积鸟撞击能力强,制造成本却相对较低。

2) LEAP-X发动机的风扇机匣

与GEnx相同,LEAP-X发动机的风扇机匣也采用了复合材料。2011年1月,CFM国际公司宣布完成了发动机叶片飞出包容性试验。试验时使一片或数

片叶片断裂,验证发动机风扇机匣的包容性,之后继续运转一段时间,模拟安全着陆的过程。2011年第一季度还完成了先进三维编织树脂模传递成型风扇以及复合材料机匣的5000循环的耐久性试验。

3) 陶瓷基复合材料在LEAP-X发动机上的应用

LEAP-X发动机的高压涡轮喷嘴和罩环的材料使用了陶瓷基复合材料(CMC),使得LEAP-X发动机的高压涡轮的效率 and 耐久性大幅提高,而重量明显降低,还应用了经过验证的涡轮导向器新结构,以及新的气动设计技术和减震叶片。

LEAP-X发动机的低压涡轮采用了新一代三维气动设计。低压涡轮转子叶片材料使用了先进的耐高温、重量轻的钛铝金属间化合物材料。低压涡轮导向器叶片材料为陶瓷基复合材料,其质量仅为传统材料的1/2甚至更轻,但可以耐1200℃以上的高温,并且不需要冷却,易于加工。图3是陶瓷基复合材料低压涡轮导向器叶片。

1.4 复合材料和NASA N+3先进发动机

在NASA N+3先进发动机项目中,GE公司对将于2030~2035年投入运营的高效安静小型商用飞机所需的发动机进行了预研。

在NASA N+3先进发动机项目中,除整体碳纤维风扇导向器/前机匣、复合材料风扇叶片和复合材料风扇机匣外,复合材料的应用还包含:复合材料附件机匣、新一代陶瓷基复合材料燃烧室、新一代陶瓷基复合材料高压涡轮导向器叶片、新一代陶瓷基复合材料高压涡轮叶片、新一代陶瓷基复合材料有围低压涡轮叶片、陶瓷基复合材料高压涡轮支撑罩环和整流罩等,以及全复合材料整体发动机短舱。图4显示了NASA N+3先进发动机项目中先进新材料应用情况。

2 其他应用与发展

2.1 普惠金属基复合材料风扇叶片

金属基复合材料具有优于传统金属材料的比强度、比刚度、耐高温和结构稳定性。金属基复合材料的基体材料不同,其使用温度也不同。钛基、钛铝化合物基和高温合金基复合材料耐温能力较高,成为很有希望的航空发动机中温(650~1000℃)部件材料。由碳化硅纤维增强的钛基复合材料大都能显著提高钛合金的刚度和强度,改善钛合金的耐温能力,可在816℃下强度和刚度保持不变,而密度有的仅为镍基合金的1/2,因而采用这些材料取代现有合金,可大大减轻发动机部件的重量。目前,钛基复合材料已经或将

被应用于压气机静子叶片、转子叶片、整体叶环、盘、轴、机匣、尾部结构和作动杆等零部件上。

普惠公司正在研制的复合材料风扇叶片是一种新型的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%。

2.2 复合材料风扇导向器和前机匣

复合材料风扇导向器和前机匣的研究已取得了实质性进展，在欧盟的环保型航空发动机(VITAL)项目中，沃尔沃对碳纤维风扇导向器和前机匣进行了研究并开发出了实物原型，该实物原型在2009年巴黎航展上进行了展示(图5)。

2.3 陶瓷基复合材料在其他热端部件上的应用

目前，耐高温性能较好的陶瓷基复合材料技术已成为航空发动机制造的一个发展趋势。如何运用陶瓷基复合材料提高航空发动机的结构效率并降低成本，是航空发动机制造面临的主要技术难题之一。采用高强度、高弹性的纤维

与基体复合，则是提高陶瓷韧性和可靠性的一个有效的方法。纤维能阻止裂纹的扩展，从而得到有优良韧性的纤维增强陶瓷基复合材料。

陶瓷基复合材料在发动机热端部件上应用的关键技术有：具有高温稳定性的先进碳化硅纤维、新的纤维涂层、生产高密度复合材料的制造工艺和防止性能退化的环境涂层等。

航空发动机热端部件中使用的陶瓷基复合材料一般是碳化硅纤维增强的碳化硅基材料。与常规镍基合金相比，其密度只有后者的1/4~1/3，可承受温度高出后者110~220℃。

陶瓷基复合材料在发动机燃烧室火焰筒上的应用研究起步较早。早在20世纪90年代，GE公司和普惠公司的使能推进材料(EPM)项目就已使用陶瓷基复合材料制备燃烧室衬套，该衬套在1200℃环境下工作可以超过10000小时。美国综合高性能涡轮发动机技术计划用碳化硅基复合材料制备的火焰筒，已在XTE65/2验证机中被验证：在目标油气比下，燃烧室温度分布系数低，具有更高的性能，可耐温2700°F(1480℃)。

20世纪80年代，法国斯奈克玛公司采用复合材料进行外调节片的研制，先后在M53-2和M88-2发动机上进行试验。经过10余年的努力，于1996年进入

批量生产，这是陶瓷基复合材料在此领域首次得到的实际应用。

3 关键技术概述

3.1 复合材料后掠大流量宽弦风扇叶片

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。与波音787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公司为此进行了长达30多年的努力和研究。

20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。GE公司根据三维气动模型制成具有高流量、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%。

GENx发动机除了使用复合材料叶

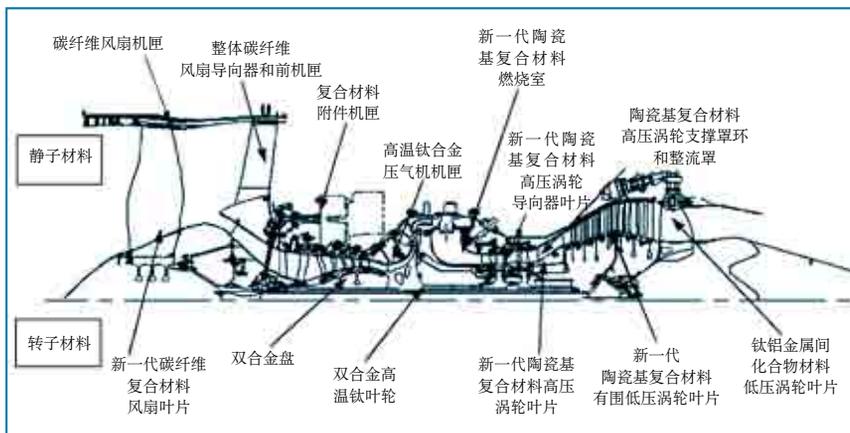


图4 NASA N+3先进发动机项目中先进新材料应用情况(左)

图5 Volvo研制的复合材料风扇导向器和前机匣(右)

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耗,也不像金属那样需要重复更换。

3.2 复合材料风扇机匣

复合材料风扇机匣源于GE为波音787的前身“音速巡航者”的研发工作,采用了100多块壁板进行冲击试验以验证设计结果。试验表明,复合材料风扇机匣对外物的抗打击能力超过了铝机匣。

自20世纪90年代起,GE公司开始着手研究全复合材料风扇机匣,结果表明,碳纤维编织结构增强树脂基复合材料比铝合金具有更好的抗裂纹扩展能力,因此GE公司重点开发了碳纤维编织结构增强树脂基复合材料的风扇机匣,所用材料为TORAYCA的T700碳纤维和CYCOM的PR520环氧树脂。

由于复合材料风扇叶片可以减重,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0.76cm(3/10in)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。图6是GENx发动机复合材料风扇机匣和复合材料纤维编织示意图。



图6 GENx复合材料风扇机匣和复合材料纤维编织图

用这种成型工艺制造风扇包容机匣有以下几个优点:首先,预成型体芯模的制造成本和运输费用降低;其次,

用较小型号的编织机能够制造较大尺寸的风扇包容机匣预成型体,降低了成本;第三,原材料的利用率和生产效率提高;第四,树脂模传递成型的风扇包容机匣尺寸精度高、表面质量好。

3.3 三维编织树脂模传递成型技术

LEAP-X的风扇叶片为采用三维编织树脂模传递成型技术制造的复合材料风扇叶片。三维编织复合材料作为复合材料的一个领域,是以三维整体织物作为增强体的复合材料,是20世纪80年代发展起来的一种新型织物复合材料。随着纤维复合材料编织技术的不断发展,编织复合材料以其优异的性能逐渐显示出较强的竞争力。图7为三维编织树脂模传递成型风扇叶片的三维编织示意图。

树脂模传递成型(RTM, Resin Transfer Molding)工艺是指在模具的型腔里预先铺放增强材料,合模后,在一定的温度和压力下将树脂注入模具,浸渍织物增强体并固化,最后脱模得到制品的一种工艺。树脂模传递成型工艺是综合性能最好的一种成型工艺。和其他传统复合材料生产技术相比,树脂模传递成型有许多优点:能够制造高质量、高精度、低孔隙率、高纤维含量的复杂复合材料构件,是成型三维整体编织构件的有效方法。三维编织树脂模传递成型技术融合了树脂模传递成型与三维编织各自的特点,

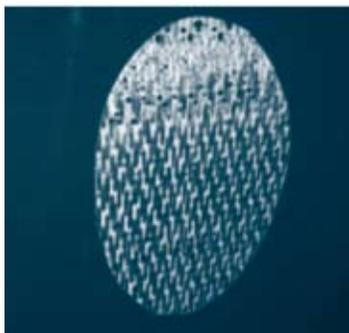


图7 风扇叶片的三维编织示意图(左)

图8 三维编织树脂模传递成型风扇叶片的内部结构(右)

从而使制品具有更加优异的性能。以RTM工艺制作的三维整体编织复合材料,可大幅度提高层间剪切强度和整体损伤容限,使复合材料成为主承力构件之一。图8为三维编织树脂模传递成型风扇叶片的内部结构。

3.4 陶瓷基复合材料涡轮转子叶片

涡轮叶片工作在燃烧室出口,是发动机中承受热冲击最严重的零件,其耐高温能力直接决定着高性能发动机推重比的提升。陶瓷基复合材料密度低、耐高温,对减轻涡轮叶片重量和降低涡轮叶片冷气量意义重大。目前,多家国际研究机构已成功运用陶瓷基复合材料制备出耐高温的涡轮叶片。

陶瓷基复合材料是以陶瓷为基体与各种纤维复合的一类复合材料。陶瓷基体可为氮化硅、碳化硅等高温结构陶瓷。作为发动机重要零件之一,涡轮叶片工作在燃烧室出口,是发动机中承受热冲击最严重的零件,其耐高温能力直接决定着高性能发动机推重比的提升。

国际普遍认为,碳化硅陶瓷基复合材料(CMC-SiC)是发动机高温结构材料的技术制高点之一,可反映一个国家先进航空航天器和先进武器装备的设计和制造能力。由于技术难度高、耗资大,目前只有法国、美国等少数国家掌握了连续纤维增韧碳化硅陶瓷基复合材料的产业化技术。

美国空军未来能力及其航空关键技术分析

Analysis on Future Capability of US Air Force and Aeronautic Critical Technology

王传胜 / 中国航空工业发展研究中心

摘要: 从整体角度介绍了美国空军未来能力需求, 并简要分析了美国空军未来的航空关键技术。

关键词: 关键技术; 未来能力; 自主技术; 机载激光

Keywords: critical technology; future capability; autonomous technology; airborne laser

0 引言

作为世界上最强大的空中力量, 美国空军对空中优势的掌控已达数十年, 然而随着未来威胁类型的复杂多变和作战模式的多样化, 现有的航空武器装备与技术已不能满足美国空军的需求。

要满足美空军新的能力需求, 还要考虑经济低迷导致美国政府未来可能大幅削减军费开支等限制, 使得美国空军不得不认真审视其未来能力以及发展相应的未来航空关键技术。

1 美国空军未来能力

为适应新时期的作战需求变化, 美国空军数年前就提出了转型计划等战略性文件。这些文件指出, 美国空军要实现从“基于威胁”向“基于能力”的转变; 要实现全球警戒、全球到达和全

4 结束语

复合材料所具有的非比寻常的特性和技术的日臻成熟为其在新一代商用发动机上的应用奠定了基础。

复合材料作为一种新型材料和新结构, 在运用到航空发动机制造时, 需要进行大量工艺、材料试验, 这样才能保证航空发动机的安全性和可靠性。美国、俄罗斯等在将复合材料运用到航空发动机的过程中积累了丰富的经验, 具有很高的技术水平, 形成了较为完备的工业技术体系。

AST

参考文献

[1] 李杰. GE公司复合材料风扇叶片的发展和工艺[J]. 航空发动机, 2008(4).

[2] 李杰. 后掠大流量宽弦复合材料风扇叶片综述[J]. 航空制造技术, 2009(17).

[3] 闫国志, 李杰. 首款国产大飞机发动机技术特点及其市场前景浅析[J]. 航空制造技术, 2010(14).

[4] 李杰. LEAP-X发动机的创新性技术[J]. 航空科学技术, 2011(4).

[5] Cook D. Development of composite materials for the next generation of civil aircraft engines[J]. The Engine Yearbook, 2010.

[6] 李杰. 后掠大流量宽弦复合材料风扇叶片的发展与创新[J]. 航空动力技术, 2010(2).

[7] 汪星明, 邢誉峰. 三维编织复合

材料研究进展[J]. 航空学报, 2010(5).

[8] 蔡天舒. 三维编织复合材料及RTM工艺进展[C]. 第十七届玻璃钢/复合材料学术年会, 2008.

[9] 纪双英, 王晋, 邢军, 益小苏, 袁学仁. 国外航空发动机风扇包容机匣研究进展[J]. 航空制造技术, 2010(14).

[10] 文生琼, 何爱杰. 陶瓷基复合材料在航空发动机热端部件上的应用[J]. 航空制造技术, 2009(S).

作者简介

李杰, 高级工程师, 从事外贸技术与管理工作。