

商用航空发动机复合材料风扇叶片应用与制造工艺进展

毛吉焯 张晓平

(中国航发动力股份有限公司工艺技术中心, 西安 710021)

文 摘 为了借鉴和参考国外复合材料风扇叶片的研制与发展经验,深入研究了其在商用航空发动机上的应用进展,详细论述了复合材料风扇叶片经历的从早期探索到成熟应用,再到未来展望的三个发展阶段。通过介绍国外三家航空发动机OEM厂商所采用的三种核心制造技术——即预浸料手工铺放结合热压罐固化成型工艺、3D-WOVEN结构与RTM成型工艺以及预浸料自动铺丝结合热压罐固化成型工艺,并对比分析这三种预制体制造工艺的特点。本文全面展现了复合材料风扇叶片的生产工艺、制造要点及其未来发展方向。事实表明,复合材料风扇叶片已成为现代商用航空发动机的显著特征,并且是先进航空发动机发展的必由之路。因此,国内研制单位应积极吸收国外积累的研制经验,充分利用国家发展提供的良好机遇,深入挖掘并实践更多的材料体系与工艺工程细节,以期早日实现国产复合材料风扇叶片的应用拓展,从而进一步提升我国航空发动机的性能水平。

关键词 商用航空发动机,复合材料,风扇叶片,应用进展,制造工艺

中图分类号:V263

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2025.01.001

Progress in Application Progress and Manufacturing Technology for Composite Fan Blade of Commercial Aviation Engine

MAO Jixuan ZHANG Xiaoping

(Processing Technology Center, AECC Aviation Power Co. LTD., Xi'an 710021)

Abstract In order to draw upon and refer to the experience in the development of composite fan blades abroad, the application progress of composite fan blades in commercial aviation engines is deeply studied, and the three development stages of composite fan blades from early exploration to mature application, and then to future prospects are discussed in detail. By introducing three core manufacturing technologies adopted by three overseas original equipment manufacturers (OEMs) of aviation engines—namely, the process of manual placement of prepregs combined with autoclave curing and molding, the 3D-woven structure with resin transfer molding (RTM), and the process of automated fiber placement of prepregs combined with autoclave curing and molding—this paper compares and analyzes the characteristics of these three preform manufacturing technologies. This paper comprehensively presents the production processes, manufacturing key points, and future development directions of composite fan blades. Facts show that composite fan blades have become a prominent feature of modern commercial aviation engines and are essential for the development of advanced aviation engines. Therefore, domestic research and development units should actively absorb the accumulated foreign experience in research and development, fully utilize the favorable opportunities provided by national development, and deeply explore and practice more material systems and process engineering details, aiming to achieve the early expansion of domestic applications of composite fan blades, thereby further enhancing the performance level of China's aviation engines.

Key words Commercial aircraft engine, Composites, Fan blade, Application progress, Manufacturing technology

收稿日期:2023-06-12

第一作者简介:毛吉焯,1983年出生,工程师,主要从事航空发动机科技情报研究工作。E-mail:Chinamaojixuan@163.com

0 引言

商用飞机一般分为宽体客机和窄体客机两类,它们均采用大涵道比涡扇发动机作为动力源。相较于涡喷发动机,大涵道比涡扇发动机以其低耗油率、低噪声以及广泛的用途,展现出更为显著的经济与社会效益,并对国家科技进步起到了重要的推动作用^[1]。近年来,随着现代大型商用飞机追求低碳环保、安静高效及经济省油的发展趋势,新一代商用涡扇发动机不仅要满足低污染、低噪声、低运营成本的要求,还需具备更优的性能和更高的推进效率。为实现这些目标,采用大尺寸风扇并配备轻量化风扇叶片已成为现代商用航空发动机的一个显著特征和发展趋势^[2-3]。本文拟全面展现复合材料风扇叶片的生产工艺、制造要点及其未来发展方向。

1 复合材料风扇叶片的优势

鉴于钛合金比强度高、耐腐蚀性好的特性,早期商用航空发动机上均把钛合金作为制造风扇叶片的首选材料,后因减重需要,又逐步发展出了钛合金空心叶片,但近几十年来,采用复合材料制备风扇叶片的技术逐渐成熟,已经能够满足商用飞机的适航要求,并具有如下优势。

(1)复合材料风扇叶片质量更轻,整机装配数量更少。以波音787飞机的两款竞选发动机GENx和Trent 1000为例,如图1所示,采用复合材料风扇叶片的GENx发动机其叶片数量更少、质量更轻、燃油效率更高。



图1 GENx复合材料风扇叶片(左18片)与Trent 1000钛合金风扇叶片(右20片)对比

Fig. 1 Comparison between composite fan blades of GENx (18 left) and titanium alloy fan blades of Trent 1000 (20 right)

(2)复合材料风扇叶片的噪声更低,抗颤振性能更好,出色的损伤容限能力,即使出现大的缺口也不会扩展,而钛合金叶片如果在根部出现裂纹,裂纹将会很快扩展,影响叶片的正常工作。

(3)复合材料风扇叶片的可靠性和稳定性更高。以GE90系列发动机为例,该型发动机已累计飞行超过 3×10^7 h,经历了100余次鸟撞事件,但仅有3片复合材料风扇叶片因撞击损坏而更换,足以见得复合材料风扇叶片的可靠性及稳定性所在。

基于上述优势,国际上知名的航空发动机OEM厂商都在大力研究、推广复合材料风扇叶片在商用航空发动机上的应用^[4-6]。

2 复合材料风扇叶片的应用进展

2.1 早期探索

英国罗罗公司是世界上最早开展复合材料在航空领域应用研究的企业,早在1967年就开始了CFRP(碳纤维增强复合材料)风扇叶片的研发工作,并试图在RB211型涡扇发动机上引入这种复合材料风扇叶片,见图2。

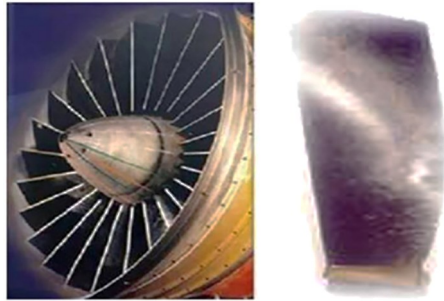


图2 RB211型涡扇发动机研制的“Hyfil”复合材料风扇叶片
Fig. 2 “Hyfil” composite fan blade developed for RB211 turbofan

不过这种名为“海菲尔(Hyfil)”的复合材料风扇叶片未能通过鸟撞试验,所以罗罗公司不得不在后期改用钛合金来做风扇叶片,不过成本、质量和加工难度大增^[7]。

美国GE公司对复合材料风扇叶片的研究起源可追溯到1971年的TF39发动机,但因制造技术和计算能力的不足导致计划失败。1985年,GE公司在其GE36发动机的风扇叶片上使用了一种改性的环氧树脂复合材料,但未能得到当时航空公司的青睐^[3]。

2.2 成熟应用

2.2.1 在宽体客机上的应用

随着技术的不断发展,复合材料风扇叶片的研制条件在20世纪90年代趋于成熟。1995年11月,国外最早采用复合材料风扇叶片设计的商用航空发动机GE90正式投放市场运营。其早期型号GE90-94B是为波音777宽体客机提供动力的最可靠的发动机,它比同类产品的燃油效率提高20%,有害气体排放量降低85%,噪声降低55%,维护成本降低16%,可靠性提高50%,航程增加19%;后期经过改进,又发展出GE90-115B,如图3所示,其燃油效率相比于GE90-94B又提升了20%,推力增加22%。

一台GE90发动机共有22片复合材料风扇叶片,与钛合金空心风扇叶片相比,质量轻66%,然而强度却提高了100%。每个叶片约由400层Hexcel(赫氏)公司提供的IM7/8551-7碳纤维/增韧环氧预浸料铺叠而成,前缘采用了钛合金包边保护,叶尖和后缘用



图3 GE90-115B发动机及其复合材料风扇叶片
Fig. 3 GE90-115B engine and its composite fan blade

芳纶细线缝合,榫头处粘有低摩擦因数的耐磨涂层,叶盆和叶背处均涂有聚氨酯防护漆,在手工铺放完成后将采用热压罐成型的方式进行固化^[6]。

GE公司为GE90发动机研发的复合材料风扇叶片使现代商用航空发动机的风扇叶片达到了一个全新高度,被誉为GE公司第一代复合材料风扇叶片,并在随后20多年的时间里共发展出了四代,其中,第二代用于GE90-115B,第三代用于GENx,第四代用于GE9X。

GENx是GE公司在2002年基于GE90发动机的研发基础,为波音787和波音747-8等宽体客机开发的新一代低噪声、低污染、低成本的商用涡扇发动机,如图4所示。它于2008年4月初获得了美国联邦航空管理局(FAA)的适航认证。



图4 GENx发动机
Fig. 4 GENx engine

与GE90发动机相比,GENx发动机的风扇叶片数量减少为18片,并首次在风扇机匣和某些导管上也选用了复合材料,这使得复合材料在GENx发动机上的用量进一步增大。

GE9X是GE公司在GE90-115B和GENx的基础上,最新研制出的高性能商用涡扇发动机,其风扇直径达到3.4 m,被称为目前世界上最大的涡扇发动机,如图5所示。它于2020年9月25日获得了FAA认证,是波音777X系列宽体客机的唯一动力选型,耗油率比GE90-115B低10%,比其竞争对手Trent XWB低5%。

为了增大叶片的抗鸟撞强度,GE9X的风扇叶片

采用了合金钢前缘和玻璃纤维后缘包覆,比钛合金包边的风扇叶片更薄。由于使用了先进的三维气动弯掠形设计,风扇叶片后掠更大、叶弦更宽,数量仅有16片,是目前风扇叶片数量最少的一款商用涡扇发动机,如图6所示。



图5 GE9X发动机
Fig. 5 GE9X engine



图6 GE公司三款发动机中风扇叶片的数量对比
Fig. 6 Comparison of the amount of fan blades of GE's three latest engines

此外,GE9X的风扇机匣和包容环也由复合材料制成,使得整机质量又减轻了约160 kg^[3-6,8-11]。

回顾GE公司近30年来对商用航空发动机复合材料风扇叶片的研究、应用与发展情况,不难发现如下特点:

(1)先进三维气动设计方法的采用使得复合材料风扇叶片的曲率越做越大,厚度越做越薄,叶片变得越来越尖,外形越来越弯,气动效率越来越高;

(2)单台发动机的风扇叶片数量逐渐降低,整机结构质量由此变得越来越轻;

(3)复合材料在整机的占比用量越来越大,从最初的风扇叶片逐渐向风扇机匣、包容环、导管等零组件扩大使用范围。

2.2.2 在窄体客机上的应用

在2012年法国Snecma公司为LEAP发动机设计的复合材料风扇叶片问世之前,如图7所示,复合材料风扇叶片最早仅在宽体客机上获得了商业化应用,而无法在窄体客机上推广使用,究其原因:其一,现代大型商用飞机的发展要求使得宽体客机发动机的风扇直径越做越大,大展弦比的风扇叶片对榫头和轮盘的强度提出了严苛的要求,以GE90发动机为

例,其风扇直径达到了3.14 m,叶片长1.22 m,叶尖处的弦长0.53 m,这种大型叶片如果仍采用钛合金空心叶片,减重、大叶片颤振及榫头强度都将成技术难题^[5],所以最先不得不在宽体客机上采用复合材料风扇叶片;其二,通过相同工艺生产的小尺寸复合材料风扇叶片会由于刚性过强,而弹性变形不足,导致抗外物冲击(FOD)试验的失败,所以无法在窄体客机上获得推广。



图7 LEAP发动机及其复合材料风扇叶片
Fig. 7 LEAP engine and its composite fan blade

为此,Snecma公司采用本公司的专利3D-WOVEN(三维编织)结构和RTM(树脂传递模塑)工艺成型来制造LEAP发动机的风扇叶片,其特点是在叶片模塑成型前,预先将IM7丝束的碳纤维编制成3D-WOVEN结构,形成碳纤维编织预制体,随后放入模具型腔里,再注入一种高韧性的PR520环氧树脂浸渍叶片预制体,加热固化后脱模处理得到复合材料制品。该工艺不仅能实现叶片外形的高精度成型,还大大提升了小尺寸复合材料风扇叶片的韧性与抗外物损伤性能。

与同等推力水平但未采用复合材料风扇叶片的CFM56-7B发动机相比,LEAP发动机的风扇叶片数量减少了6片,仅为18片;同时,LEAP发动机还是继GENx之后第二款采用复合材料风扇机匣的商用涡扇发动机,这使得装配LEAP发动机的飞机每架至少可以减重450 kg,燃油效率提高16%,有害气体排放量降低60%,噪声水平降低10~15 dB,可靠性与CFM56发动机持平。与首款采用复合材料风扇叶片设计的商用发动机GE90相比,LEAP发动机的风扇直径至少缩短了1.27 m,仅有不到2 m,但却具有与之相当的抗鸟撞能力。

LEAP发动机已于2016年正式投入运营使用,并分别为中国商飞C919、美国波音737MAX、欧洲空客320neo这三款双发窄体客机提供动力^[4,12-13]。

2.3 未来进展

在历经“Hyfil”复合材料风扇叶片的失败经历之后,罗罗公司通过超塑成型和扩散连接(SPF/DB)工艺成功打造了宽弦空心的钛合金风扇叶片,为后续

的RB211系列发动机和Trent系列发动机提供了非常好的服务。然而,这项技术有一个性能上限,必须突破它才能达到未来发动机产品所需要的高性能表现。近年来,罗罗公司联合GKN公司准备在Trent XWB以后的发动机中改用复合材料风扇叶片^[3-5],Advance和UltraFan计划由此应运而生,见图8。

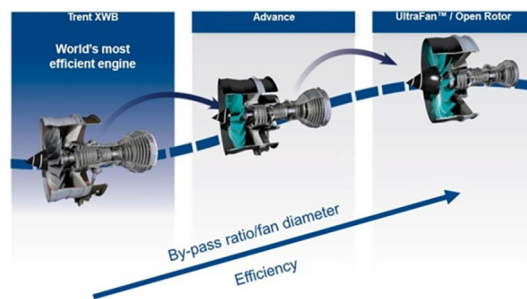


图8 罗罗公司新型发动机进化路线

Fig. 8 Evolutionary route of RR's new model engines

罗罗公司计划:第一阶段将以Trent XWB发动机为起点开发并验证全新负载构架的Advance核心机,它主要由新的高压和中压压气机、贫油燃烧室、陶瓷基复合材料封严段和先进冷却涡轮叶片等部分组成,燃油消耗和CO₂排放将比目前的Trent 700发动机降低20%;第二阶段则以Advance核心机为基础开发并验证具有颠覆性技术特征的UltraFan发动机,主要包括碳/钛(C/Ti)复合材料风扇和机匣及驱动风扇的大功率齿轮系统。其中,UltraFan发动机项目不仅有着令人震撼的性能提升,更是前所未有地实现了覆盖全推力量级的可扩展设计,其搭载的最新一代CTi复合材料风扇叶片将代替Trent系列原有的钛合金宽弦空心风扇叶片,使得发动机的质量大幅减轻,如图9所示。



图9 C/Ti复合材料风扇叶片

Fig. 9 The fan blade of C/Ti composite

据悉,C/Ti复合材料风扇叶片将具有下列特征。

(1)C/Ti复合材料风扇叶片选择IM7/M91材料体系,每个叶片约由500层碳纤维增强的高韧性、耐冲击的美国Hexcel公司HexPly®M91环氧树脂预浸料制成。

(2)使用精密机器人自动化铺设碳纤维材料,随
宇航材料工艺 <http://www.yhelgy.com> 2025年 第1期

后送入热压罐进行高温高压固化处理,成型后的叶片经精密机加工和表面涂层处理后再进行钛合金前缘包边保护,以防止腐蚀、异物和鸟撞。随后,制成的C/Ti复合材料风扇叶片将会通过计量和超声检测等方法进行检查和测量,并最终经过严格的力学性能测试。此外,Hexcel公司还为C/Ti风扇机匣提供中等模量碳纤维原材料和非热压罐树脂。

(3)C/Ti复合材料风扇叶片及复合材料机匣的采用可为每架飞机减重680 kg,相当于7名携带行李的乘客的重量。

(4)搭载C/Ti复合材料风扇叶片的UltraFan发动机的涵道比将达到15,总增压比为70,燃油消耗和污染物排放与第一代Trent 700发动机相比将下降25%以上,并能实现从111 kN到444 kN的全推力量级覆盖,预计将于2025年正式投放市场。

(5)C/Ti复合材料风扇的直径达到了3.56 m,与窄体客机机身的直径相同,如图10所示,它将取代GE9X成为世界上最大的涡扇发动机。其内含的18组复合材料风扇叶片由位于英国布里斯托尔的全自动化复合材料技术工厂制造,而当复合材料叶片和机匣完成寿命服役期,还能被完全回收,这将为环境

友好型生产设定全新标准^[14-20]。



图10 罗罗公司开发的C/Ti复合材料风扇
Fig. 10 C/Ti composite fan developed by RR

自1995年首台搭载复合材料风扇叶片的商用航空发动机GE90正式投放市场运营,到2020年配装GE公司第四代复合材料风扇叶片的GE9X获得认证,再到2025年计划服役的UltraFan发动机,这些事实说明,复合材料风扇叶片不仅能极大地提高发动机的总体性能,还具有极强的稳定性和可靠性,适用于具有严格适航要求的商业飞行的需要,利用复合材料制作风扇叶片已是大势所趋。几种复合材料风扇叶片的应用进展情况汇总如表1所示。

表1 国外复合材料风扇叶片应用进展情况汇总表^[3-4,21]

Tab. 1 Summary table of the application progress of foreign countries' composite fan blade

发动机型号	制造厂商	装机机型	客机类型	叶片数量	商用时间	材料类型	纤维材料	树脂材料	包边材料	材料厂商	铺层工艺	成型方法
GE90	美国GE	波音777系列	宽体	22	1995年	预浸料	IM7	8551-7 (含凯芙拉微粒)	钛合金	Hexcel	手工铺层	热压罐
GENx	美国GE	波音787系列和波音747-8	宽体	18	2008年	预浸料	IM7	8551-7 (含凯芙拉微粒)	钛合金	Hexcel	手工铺层	热压罐
GE9X	美国GE	波音777X	宽体	16	2020年	预浸料	新一代高模量碳纤维和玻璃纤维	新型环氧树脂(牌号待研究)	高强度合金钢	Hexcel	手工铺层	热压罐
LEAP	法国Snecma	商飞C919、波音737MAX、空客320neo	窄体	18	2016年	碳纤维预制体	IM7	PR520	钛合金	索尔维	三维编织	RTM
UltraFan	英国罗罗	待研究	待研究	18	预计2025年	预浸料丝束	IM7	M91	钛合金	Hexcel	自动铺丝	热压罐

3 复合材料风扇叶片的三种制造工艺

市场份额凭借的是优良的产品,而优良的产品则源自优秀的设计和先进的制造工艺。目前国际上主流的航空发动机制造厂商主要采用三种制造工艺来生产商用航空发动机的复合材料风扇叶片,分别是:采用预浸料手工铺放+热压罐固化成型工艺的美国GE公司、采用3D-WOVEN结构+RTM成型工艺制造LEAP发动机复合材料风扇叶片的法国Snecma公司以及采用预浸料自动铺丝+热压罐固化成型工艺制造未来UltraFan发动机的英国罗罗公司。

3.1 预浸料手工铺放+热压罐固化成型工艺

3.1.1 工艺流程

通过预浸料手工铺放+热压罐固化成型工艺制造复合材料风扇叶片的典型工艺流程如图11所示。

(1)工装和材料准备。清理模具、粘贴底膜,并根据铺层设计获得各铺层的二维尺寸信息、铺放角度及顺序等参数,再导入自动裁布机,剪裁出待铺放的各层预浸料。

(2)手工铺层及真空压实。该阶段是复合材料风扇叶片预制体制造的关键步骤,主要是将各层预

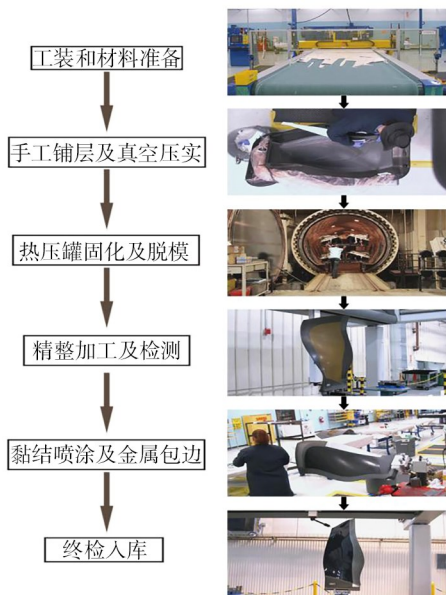


图11 GE公司复合材料风扇叶片预浸料手工铺放+热压罐固化成型工艺流程图

Fig. 11 Process flowchart of manual laying + hot autoclave of composite fan blade prepreg for GE company

浸料按照预先设计的铺层顺序与空间位置使用手工一层层地铺贴在模具上,每铺一定数量的铺层后还要利用真空袋系统抽真空压实,然后反复进行。

(3)热压罐固化及脱模。将模具连同真空带装的预制品放入热压罐加热加压,按照固化工艺曲线进行升温,保温及降温处理,卸压后开罐,脱袋、脱模,获得复合材料风扇叶片制品。

(4)精整加工及检测。主要进行打磨、修边及数控等精密加工,以提高叶片精度并减小表面粗糙度,随后进行三坐标检测,确保形状及尺寸满足设计要求。

(5)黏结喷涂及金属包边。黏结蒙皮、防磨条并喷涂保护漆层,完成金属包边等后处理。

(6)终检入库。对成品叶片做最终三坐标检测及性能检测,合格后入库。

3.1.2 新型模具

模具在复合材料构件成型过程中起着非常重要的作用,它确定了构件的几何边界,并且影响着构件的表面形态和内部质量,因而要求模具材料具有较高的强度、硬度以及形位精度。对于常规的复合材料零件,通常都采用成本较低的普通钢材材质模具。由于复合材料风扇叶片大弯扭、变截面的结构特点,为了保证成型精度,GE公司最新采用了复合材料材质加工的模具替代金属成型模具,例如,GE90、GENx等型号的复合材料风扇叶片均采用了Hexcel公司的HexTOOL®复合材料材质的模具。与之前的金属模具相比,HexTOOL®模具高效轻量,易修易改,减重可达75%,还能使加热与固化

效率提升20%以上,见图12。



图12 Hexcel公司复合材料模具HexTOOL®

Fig. 12 HexTOOL® composite mould from Hexcel

3.1.3 铺层设计

铺层设计是复合材料风扇叶片成型的关键技术之一,对叶片成型精度及内部应力的分布起着决定性作用。手工铺放方式就是将数百层预浸料一层层地铺放堆叠在模具上,铺层设计的目的是要合理地设计这些单层预浸料的尺寸、铺放方向及排列顺序,而这些都被国外发动机公司视为商业机密,仅在一些专利中有所提及,例如,在GE公司的一份专利中^[22],曾介绍了两种铺层排列顺序,如图13-图14所示。

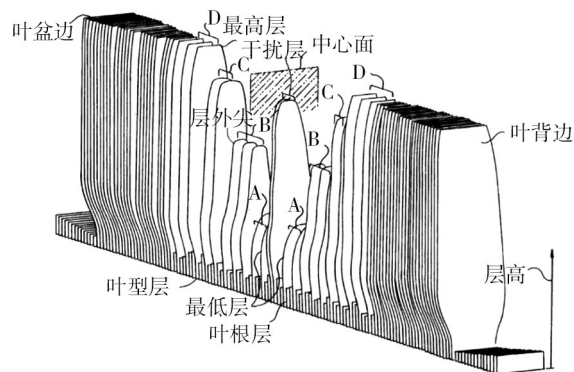


图13 GE公司专利中描述的一种铺层实施示例

Fig. 13 An embodiment of lay-up described in the GE's patent

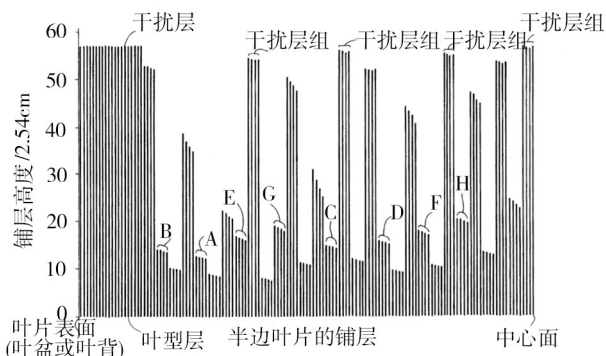


图14 GE公司专利中描述的另一种铺层实施示例

Fig. 14 Another embodiment of lay-up described in the GE's patent

在图 13 中,按照用途将铺层分为叶型层、叶根层和干扰层,其中,叶型层按照从低到高的顺序,从中心面向叶盆、叶背两边排列,如图中的 A、B、C、D 组;铺层成组化,每组至少两层,同组同高。叶根层穿插于叶型层之间,用于成型厚度极厚的叶根部分,层高小于叶型层,但根据所处位置,其层高会有所变化。干扰层用于消除层外尖处可能形成的剪切面,层高介于最低层与最高层之间,在本图例中被置于中心面两侧。

图 14 展示的是一种比图 13 更优选的铺层排列顺序,主要给出了叶型层从中心面到叶盆或叶背半边叶片的铺层情况,首选 4 层为一组,最低层组至最高层组依次为 A、B、C、D、E、F、G、H 组,但本图例中未按层高顺序排列,而是一种混排形式。在本图例中,干扰层要高于叶型层且穿插其中。

总之,复合材料风扇叶片的铺层设计不仅要综合考量结构、强度、失效影响、可制造性等因素,更需要通过大量的实验验证与分析,迭代优化调整铺层厚度、角度及顺序等参数,最终得到满足要求的叶片铺层方法,还可以借助 Laminate Tools、Sysply、Fibersim 等专业软件进行铺层设计。

在模具上每铺放一定数量的铺层后,还需要组装真空袋,然后抽真空压实,此步骤需要反复进行。另外,激光投影系统和自动裁布机是两个非常重要的系统,会影响手工铺放的精度及铺层尺寸,是此工艺的关键要素。

3.1.4 固化工艺

在模具上完成预浸料的铺放工作标志着复合材料风扇叶片预制体制造完毕,之后需要将预制体连同整个模具装进热压罐,按照设定的温度压力曲线进行加热加压固化处理,待温度冷却下来后,从热压罐中取出固化后的叶片。其中,固化温度、压力和时间是固化工艺过程中的关键工艺参数,需要开展大量的工艺试验或者工艺过程仿真,对固化工艺曲线进行参数优化与调整,最终获得最优参数设定。其次,由于风扇叶片具有大弯扭特性,非常不便于脱模,往往会造成脱模困难,参考 GE 公司公布的复合材料风扇叶片资料,可以将叶根底部的挡板拆掉后,从叶根处脱模就能有效避免因根部较厚造成整个叶片被卡在模具中的脱模困难现象。

叶片成功脱模后还需要通过数控加工精整修边、喷涂防腐耐磨涂层和环境涂层,最终进行钛合金包边加工处理^[6,21,23]。

3.2 3D-WOVEN 结构+RTM 成型工艺

2012 年,法国 Snecma 公司采用“3D-WOVEN 结构+RTM 成型工艺”为 Leap 发动机制造的复合材料

风扇叶片解决了之前复合材料风扇叶片无法在窄体客机上应用的技术难题。

3.2.1 工艺流程

通过 3D-WOVEN+RTM 工艺制备复合材料风扇叶片的技术特点是先将碳纤维丝束织造成三维编织结构,然后采用 RTM 工艺注入树脂。其优势在于将碳纤维预制体的设计与树脂的模塑过程分离,这样可以充分发挥铺层材料的可设计性,适合于制造各种复杂形状,该项工艺的流程如图 15 所示。

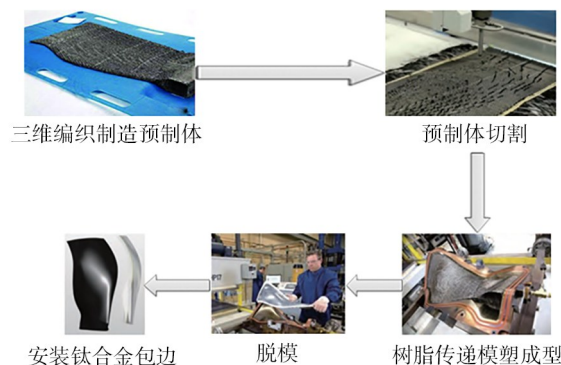


图 15 3D-WOVEN+RTM 技术制备复合材料风扇叶片工艺流程
Fig. 15 Process flow of 3D-WOVEN+RTM technology for preparing composite fan blades

(1) 利用三维编织技术先将碳纤维丝束织造成所需结构形状的预制体。

(2) 对预制体进行切割,扭转铺放到模具里。

(3) 利用 RTM 工艺注入热固性树脂浸渍预制体,加热模具,激活树脂,实现固化成型。

(4) 固化后进行冷却、脱模、机加、喷涂、安装钛合金包边等工序,完成复合材料风扇叶片的制造^[21]。

3.2.2 三维编织预制体

与 GE 公司二维预浸料手工铺层形成的复合材料风扇叶片预制体不同,Snecma 公司采用编织方法织造的立体织物为三维编织物。该公司曾在了一项专利中介绍了一种风扇叶片三维编织预制体的结构,如图 16 所示。

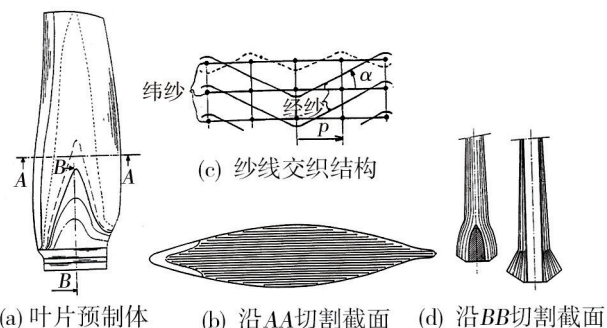


图 16 Snecma 公司复合材料风扇叶片预制体基本结构
Fig. 16 The basic structure of composite fan blade perform from Snecma

图16(a)是叶片预制体的整体轮廓,其结构特点为:叶片从叶根经叶身到叶尖扭角逐渐增大,厚度逐渐减小,叶片边缘薄,叶身与叶根之间厚度突变;图16(b)是沿图16(a)中AA线切割而成的一个叶型截面,可以看出经包边的叶型呈梭形;图16(c)介绍了叶片预制体的基本编织结构,其中的任一根经纱不但和本层的纬纱交织,还与上下相邻的两层经纱交织,形成角连锁结构;图16(d)为沿图16(a)中BB线切割的纵截面,展示了厚度较厚的叶根部分,并在专利中介绍了叶根厚度变厚的基本原理,可以采用先把叶根处的织物分两层织造,织造完成后,再在叶根处进行填充,以满足叶根的厚度要求,从而增强该部分的拉伸强度^[24-25]。

3.2.3 RTM成型工艺

RTM是一种复合材料液体模塑成型技术,具体工艺流程为:把经三维编织后的叶片预制体预先放置在模具型腔里,随后封闭夹紧模具,模腔最好抽真空处理,然后通过一定的压力将低黏度的热固性树脂注入模腔,待完全浸渍叶片预制体之后,加热模具,激活热固性树脂的固化机制,固化成型后冷却、脱模,最终得到复合材料叶片制品,其成型示意图如图17所示。

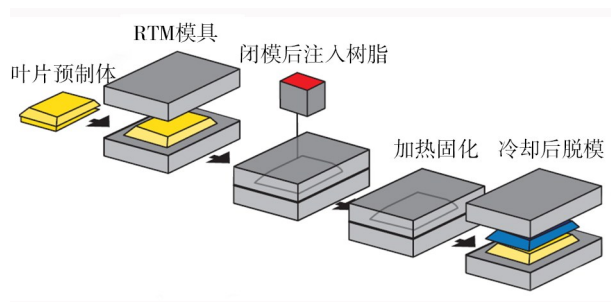


图17 RTM成型工艺示意图

Fig. 17 Schematic diagram for RTM process

RTM成型工艺特别适合大尺寸、高质量、形状复杂的复合材料构件成型,能制造出具有良好表面的高精度复杂产品,具有如下特点:

- (1)RTM工艺工序少、成本低、其制品公差小、尺寸精确、孔隙率低($<1\%$),修边及打磨量少;
- (2)RTM工艺属于闭模操作,能减少操作者与有害物质的接触,成型过程中挥发性成分少,环境污染小;
- (3)RTM工艺具有良好的综合经济效益,生产线可实现自动化,生产效率高、废品率低,设备投资低于模压、热压罐成型等工艺。

在采用RTM工艺成型复合材料构件的过程中,合理的模具设计可以保证产品的质量和精度;树脂基体的设计及改性会直接影响到产品的力学性能;成型工艺参数的设定可以提高生产效率并减少不合

格品率;计算机辅助设计可有效模拟成型过程并对构件的力学性能进行预判,减少不合理设计造成的浪费和污染^[26-28]。

经RTM工艺成型后,还要进行打磨修边及喷涂处理,最后安装钛合金包边,从而完成复合材料风扇叶片的整体制造。

3.3 预浸料自动铺丝+热压罐固化成型工艺

文献[4,21]报道,GKN公司曾为GE90的复合材料风扇叶片开发过自动铺丝(AFP)设备,但由于技术成熟度的问题而搁浅,GE公司仍采用激光定位辅助+手工铺叠技术进行叶片预制体的生产。随着AFP技术的进步,罗罗公司在研制新一代大涵道比涡扇发动机UltraFan的复合材料风扇叶片时就采用了GKN公司最新型的AFP设备和自动铺丝成型技术,实现了复合材料风扇叶片预制体的自动化成型,既有效减少了人为操作导致的偏差,又提高了生产效率和稳定性,如图18所示。



图18 罗罗公司复合材料风扇叶片及机匣自动铺放设备

Fig. 18 AFP equipments for manufacturing RR's composite fan blade and case

自动铺丝技术是先进复合材料自动化成型技术之一,它通过铺丝头输送由树脂预浸的丝束,再利用热压辊软化,将预浸料丝束压实铺覆于模具型面上,形成预制体。铺放时,模具型面需要与自动铺丝机协同配合并预留余量区避免二者发生干涉。其中,铺丝头的铺放温度、压力以及铺放速率是影响预浸料丝束铺放质量的关键工艺参数^[29]。

3.4 预制体制造工艺特点对比分析

预制体作为复合材料成型过程中的一个中间产品,属于复合材料的增强材料,其结构和制造工艺的成熟度影响着复合材料的最终性能,是复合材料风扇叶片制造的关键核心技术之一^[30]。由之前讨论可知,国外三家公司分别采用了手工铺层、三维编织和自动铺丝三种不同的生产工艺进行叶片预制体的制造成型。其中,手工铺层是复合材料风扇叶片最早、最成熟、最普遍的铺放方式,并已经过了多年的商业化生产制造,充分验证了手工铺层工艺的稳定性及可靠性。三维编织结构更适用于窄体客机用的小尺寸风扇叶片,其优异的抗分层扩展能力在鸟撞时可

以保持足够的韧性,防止叶片断裂造成的二次损伤。而自动铺丝的优势主要在于工艺流程的自动化、高

效化与精密化,是未来复合材料制造技术的发展趋势。三种预制体成型工艺的特点对比见表2。

表2 三种预制体成型工艺特点对比分析表^[21]

Tab. 2 Comparison and analysis table of the characteristics of three prepregs forming processes

成型工艺	工艺设计	铺层方式	操作方式	预制体性能	技术成熟度
手工铺层	采用复合材料设计软件进行逐层设计,获得各铺层的二维信息参数,导入自动裁布机,剪裁出待铺放的各层预浸料	在模具上手工逐层进行铺叠,并需要真空压实处理;利用激光投影系统定位和肉眼判断	依靠人力劳动	更高的刚度和强度	最早、最成熟的铺放方式,并经过多年来成功的商业化应用
三维编织	针对各部位的特定力学要求,开展定制设计;利用织造方法编织成型	使用三维编织机进行预制体的自动定位与编织	利用编织机器	更好的韧性,更高的耐分层性、抗冲击性和损伤容限	成功应用于LEAP系列发动机
自动铺丝	待研究	使用热压辊软化压实丝束,自动铺覆于模具型面上;铺丝机自带摄像头,能通过识别靶标球位置和姿态实现定位	机械臂操控	预计会有更好的质量、精度与性能	待验证

4 结语

复合材料风扇叶片在降低航空发动机结构质量、提升燃油经济性及保障飞行安全方面展现出了显著优势,其在商用航空发动机上的应用已成为一种发展趋势。国外经过长期的积累与发展,已在多种型号的商用涡扇发动机上实现了成熟而广泛的应用,并持续朝着材料性能更优、设计结构更佳、制造成本更低、自动化程度更高的方向迈进。相比之下,国内尚未有实装涡扇发动机采用复合材料风扇叶片的报道,仅在研的CJ-1000A型发动机据传采用了与LEAP发动机同级别的复合材料风扇叶片技术,并预计于2027年投入使用,但具体细节仍处于严格保密状态。

随着我国自主设计的大型商用飞机C919于2022年9月29日取证成功,未来,国产大飞机C919对商用涡扇发动机的需求将为我国复合材料风扇叶片制造工艺的发展带来前所未有的机遇。为此,特提出以下思考建议。

(1)美国《航空周刊》在创刊百年之际评选出了未来20~40年内较有前景的18项航空航天技术,其中“超高涵道比发动机”预示着未来的商用涡扇发动机或将趋于更大规模,或者采用开式转子发动机,而这两种发动机目前均选用了复合材料风扇叶片。发动机规模越大,采用复合材料风扇叶片的优势就越明显。此外,“复合材料结构的制造”预示着未来将有更高效的方法大幅降低复合材料结构的制造成本和时间。这些预示表明,至少在接下来的20~30年内,复合材料风扇叶片的技术与应用前景将更加广阔。

(2)商用涡扇发动机的复合材料风扇叶片是部件级的关键核心技术。与国外相比,我国在这一领

域尚处于起步阶段,需多方共同努力推进产业升级和技术改造。若CJ-1000A能在2027年成功配飞国产大飞机C919,我国在窄体客机用复合材料风扇叶片方面与国外差距将缩短至11年,但届时其可用性、性能及耐用性仍有待时间检验。而在宽体客机用复合材料风扇叶片方面,国外早在1995年已实现商业化应用,而国内尚无此方面的公开报道,因此存在30年以上的差距。我们应正视差距,找不足,明方向,补短板。

(3)需求与型号牵引是新型航空发动机顺利研制的前提。目前,需求和型号均已具备,国家层面应更加重视相关技术基础科学与工程化应用研究,同时加大研发投入,推动工业制造技术发展,为复合材料风扇叶片研制提供稳定且长期的方向指引、资金支持 and 项目立项。在坚持自主研发的基础上,大力发展协同创新,鼓励各研制单位充分利用国家发展机遇和社会优质资源,集中优势力量突破关键技术及核心技术制造能力。当前,尤其应掌握解决窄体客机应用复合材料风扇叶片难题的“3D-WOVEN结构+RTM成型工艺”及其相关材料体系,推动和拓展国产复合材料风扇叶片的早日应用,最终提升我国航空发动机的性能水平。

参考文献

[1] 沈锡钢,齐晓雪,郝勇. 大涵道比涡扇发动机发展研究[J]. 航空发动机,2013,39(6):1-5.
 SHEN Xigang, QI Xiaoxue, HAO Yong. Investigation of high bypass ratio turbofan engine development[J]. Aeroengine, 2013, 39(6):1-5.
 [2] 陈迎春. 商用飞机研发的灵魂[J]. 大飞机,2014(3):45-47.
 CHEN Yingchun. The spirit of development for commercial aircraft[J]. Jetliner, 2014(3):45-47.

[3] 马子于, 苏震宇, 魏然. 复合材料风扇叶片的发展与思考[J]. 科技与创新, 2020(13): 34-37.

MA Ziyu, SU Zhenyu, WEI Ran. Development and thinking about composite fan blade [J]. Science and Technology & Innovation, 2020(13): 34-37.

[4] 刘强, 赵龙, 黄峰. 商用大涵道比发动机复合材料风扇叶片应用现状与展望[J]. 航空制造技术, 2014(15): 58-62.

LIU Qiang, ZHAO Long, HUANG Feng. Present conditions and development of composite fan blades of high bypass ratio commercial jet engines [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(15): 58-62.

[5] 陈光. 大涵道比涡扇发动机风扇叶片的变迁[J]. 航空动力, 2018(5): 26-30.

CHEN Guang. Changes of fan blades of high-bypass-ratio turbofans[J]. Aerospace Power, 2018(5): 26-30.

[6] 朱启晨. 复合材料风扇叶片的铺层设计及有限元分析技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018: 1-9.

ZHU Qichen. Research on the Ply Design and Finite Element Analysis of Composite Fan Blade [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018: 1-9.

[7] 周宏. 英国碳纤维技术早期发展史研究[J]. 合成纤维, 2017(5): 15-21.

ZHOU Hong. The review of UK research history for high performance carbon fiber [J]. Synthetic Fiber in China, 2017(5): 15-21.

[8] 王晓亮, 刘志真, 纪双英, 等. 商用航空发动机先进复合材料风扇叶片研究进展[J]. 新材料产业, 2010(11): 36-41.

WANG Xiaoliang, LIU Zhizhen, JI Shuangying, et al. Research on the progress of advanced composite fan blade for commercial aeroengine [J]. Advanced Materials Industry, 2010(11): 36-41.

[9] 宋超. 航空发动机复合材料叶片设计及成形技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014: 1-5.

SONG Chao. Research on Design and Manufacture for Composites Blade in Aircraft Turbin [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014: 1-5.

[10] 陈光. GE9X的发展与设计特点[J]. 航空动力, 2018(3): 37-40.

CHEN Guang. Development and design features of GE9X [J]. Aerospace Power, 2018(3): 37-40.

[11] 何龙江, 弓升. 世界三大航空发动机制造商民机动力发展布局研究[J]. 航空动力, 2020(5): 9-12.

HE Longjiang, GONG Sheng. Research on the development of civil aero engines of the big three [J]. Aerospace Power, 2020(5): 9-12.

[12] 李晓涵. PA-6干铺丝-RTM成型工艺及增韧机理研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019: 1-4.

LI Xiaohan. The Research of Molding Process and Toughening Mechanisms of PA-6 Dry Fiber Placement-RTM [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and

Astronautics, 2019: 1-4.

[13] 刘强, 赵龙, 黄峰, 等. 机织复合材料风扇叶片成型技术研究[J]. 纤维复合材料, 2019(4): 68-71.

LIU Qiang, ZHAO Long, HUANG Feng, et al. Molding process of woven composite fan blades [J]. Fiber Composites, 2019(4): 68-71.

[14] 王翔宇. 罗罗公司超扇发动机发展态势分析[J]. 航空动力, 2018(5): 21-25.

WANG Xiangyu. The development and the future of ultrafan [J]. Aerospace Power, 2018(5): 21-25.

[15] www.rolls-royce.com. Rolls-Royce to create composite technology hub in bristol [EB/OL]. <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2015/pr-180315-rr-composite-technology-hub-in-bristol.aspx>, 2015-03-18/2023-05-05.

[16] www.compositesworld.com. Aeroengine composites, part2: CFRPs expand [EB/OL]. [Compositesworld.com/articles/aeroengine-composites-part-2-cfrps-expand](https://www.compositesworld.com/articles/aeroengine-composites-part-2-cfrps-expand), 2015-08-31/2023-05-05.

[17] www.rolls-royce.com. Step inside our factory of the future [EB/OL]. <https://www.rolls-royce.com/media/our-stories/discover/2020/step-inside-our-factory-of-the-future.aspx>, 2020-01-09/2023-05-05.

[18] www.rolls-royce.com. Rolls-Royce shares next generation engine designs [EB/OL]. <https://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/article/rolls-royce-next-generation-engine-designs-022814/>, 2014-02-28/2023-05-05.

[19] www.rolls-royce.com. Rolls-Royce tests composite fan systems for advance and Ultra Fan™ at John C. Stennis Space Center [EB/OL]. <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2014/010914-rolls-royce-tests-composite-fan-systems.aspx>, 2014-09-01/2023-05-05.

[20] Michael GUBISCH. Rolls-Royce tests composite fan in Derby [EB/OL]. [Flightglobal.com/engines/rolls-royce-tests-composite-fan-in-derby-131540.articles](https://www.flightglobal.com/engines/rolls-royce-tests-composite-fan-in-derby-131540.articles), 2019-02-26/2023-05-05.

[21] 周何, 李小兵, 张婷, 等. 航空发动机复合材料风扇叶片制造工艺应用进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(13): 84-91.

ZHOU He, LI Xiaobing, ZHANG Ting, et al. Application progress on manufacturing technology of composite fan blades for aeroengine [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(13): 84-91.

[22] EVANS C R, FUHRMAN B J, JONES J D, et al. Foreign object damage resistant composite blade and manufacture [P]. U. S. Patent 5 375 978, 1994-12-27.

[23] 康永强. 复合材料风扇叶片榫头铺层设计及分析验证[D]. 上海: 上海交通大学, 2020: 1-7.

KANG Yongqiang. Laminate Design and Anslysis of Composite Fan Blade Doetail [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020: 1-7.

[24] 关留祥,李嘉禄,焦亚男,等. 航空发动机复合材料叶片用3D机织预制体研究进展[J]. 复合材料学报,2018,35(4):748-759.

GUAN Liuxiang, LI Jialu, JIAO Yanan, et al. Review of 3D woven preforms for the composite blades of aeroengine [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(4): 748-759.

[25] 关留祥. 发动机叶片用2.5D织物变形性能研究及预制体设计[D]. 天津:天津工业大学,2020:1-12.

GUAN Liuxiang. Research on Torsional Properties of 2.5D Carbon Fiber Fabric Used in Blade and Design for Preforms [D]. Tianjing: Tiangong University, 2020: 1-12.

[26] 刘嘉,周蕾,罗文东,等. 复合材料成型技术研究现状[J]. 橡塑技术与装备,2022,48(8):27-30.

LIU Jia, ZHOU Lei, LUO Wendong, et al. Research status of composite material forming technology [J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2022, 48(8): 27-30.

[27] 熊绍海,袁翔,江嘉吉. 三维编织复合材料的发展现状与展望[J]. 直升机技术,2020(1):50-56.

XIONG Shaohai, YUAN Xiang, JIANG Jiaji. Development and prospect of 3D braided structural composites [J]. Helicopter Technique, 2020(1): 50-56.

[28] 吴伟萍,王威力. 树脂基复合材料RTM工艺的研究进展[J]. 纤维复合材料,2022(2):91-94.

WU Weiping, WANG Weili. Research progress of RTM for resin matrix composites [J]. Fiber Composites, 2022(2): 91-94.

[29] 黄新杰,肖军,赵聪,等. 自动铺丝成型工艺参数优化[J]. 玻璃纤维,2015(6):20-26.

HUANG Xinjie, XIAO Jun, ZHAO Cong, et al. Process parameter optimization for automatic fiber placement [J]. Fiber Glass, 2015(6): 20-26.

[30] 韦鑫,荆云娟,杨明杰,等. 航空发动机风扇叶片预制体研发现状及趋势[J]. 棉纺织技术,2020,48(8):81-84.

WEI Xin, JING Yunjuan, YANG Mingjie, et al. Development status and trend of aeroengine fan blade preform [J]. Cotton Textile Technology, 2020, 48(8):81-84.