

引文格式: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 aero-engine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(13): 84-91.

航空发动机复合材料风扇叶片制造工艺应用进展*

周何^{1,2},李小兵³,张婷⁴,李小强^{1,2},李东升^{1,2},冯锦璋⁴

- (1. 北京航空航天大学,北京 100191;
2. 北京航空航天大学宁波创新研究院,宁波 315800;
3. 中航复合材料有限责任公司,北京 101300;
4. 中国航发商用航空发动机有限责任公司,上海 200241)

[摘要] 大涵道比商用涡扇发动机为了减轻重量和追求更高的涵道比,采用复合材料风扇叶片已成当今趋势。介绍了复合材料风扇叶片的发展与应用情况,总结了叶片材料应用、模具设计和主流制造工艺,包括预浸料手工铺放/热压罐固化成型工艺、预浸料自动铺丝/热压罐固化成型工艺、三维机织碳纤维增强树脂传递模塑(RTM)成型工艺。同时分别介绍了Hexcel、Snecma、罗·罗等国外公司复材叶片的模具材料选择和结构设计,并针对3种制造工艺的特点进行了对比和分析。最后总结了制造复合材料风扇叶片的关键技术,并指出复合材料风扇叶片制造技术现已朝着材料形式混杂化、制造工艺自动化与自适应化、工装材料多样化的趋势发展。

关键词:复合材料;航空发动机风扇叶片;热压罐成型工艺;树脂传递模塑(RTM);自动铺丝工艺

Application Progress on Manufacturing Technology of Composite Fan Blades for Aero-Engine

ZHOU He^{1,2}, LI Xiaobing³, ZHANG Ting⁴, LI Xiaoqiang^{1,2}, LI Dongsheng^{1,2}, FENG Jinzhang⁴

- (1. Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Ningbo Institute of Technology, Beihang University, Ningbo 315800, China;
3. AVIC Composite Corporation Ltd., Beijing 101300, China;
4. AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

[ABSTRACT] In order to reduce the weight and pursue a higher culmination ratio of large culmination ratio commercial turbofan engines, the use of composite fan blades has become the trend today. The development and application of composite fan blade are introduced, and the material application, mold design and main manufacturing process of blade are summarized, including prepreg hand lay-up/autoclave process, automatic fiber placement process/autoclave process, 3D-woven carbon fiber reinforced resin transfer molding (RTM). At the same time, the mold material selection and structural design of Hexcel, Snecma, Rolls-Royce and other foreign companies' composite fan blades are introduced respectively, and the characteristics of the three manufacturing processes are compared and analyzed. Finally, the key technologies for manufacturing composite fan blades are summarized, and it is pointed out that the manufacturing technology of composite fan blades is now developing towards the trend of mixed material forms, automation and self-adaptation of manufacturing processes, diversification of tooling materials.

Keywords: Composite materials; Aero-engine fan blades; Autoclave process; Resin transfer molding (RTM);

Automatic fiber placement process

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.13.084

* 基金项目: 国家科技重大专项(2017-VII-0011-0177)。

提高航空发动机的涵道比可提升推力、降低噪声和单位推力油耗,故近年来各类商用涡扇发动机的涵道比不断增大(图1)。大涵道比涡扇发动机的主要推力来自流经外涵道的冷空气,要满足较大的涵道比,必须采用较大尺寸的风扇。据统计,风扇段质量约占发动机总质量的30%~35%,减小风扇段质量是减小发动机整体质量和提高发动机效率的关键手段,因此采用更大、更轻的风扇叶片已成为商用涡扇发动机的发展趋势。风扇叶片的重量每减少1 kg,风扇机匣和传动系统的重量随之减少1 kg,发动机结构和飞机机身结构也分别减重0.5 kg^[1],这种减重迭代效应可使飞机整体有效减重。因此,采用复合材料风扇叶片是目前实现发动机更高涵道比和减重最有效的途径。

复合材料具有高比强度、高比刚度、耐高温及力学

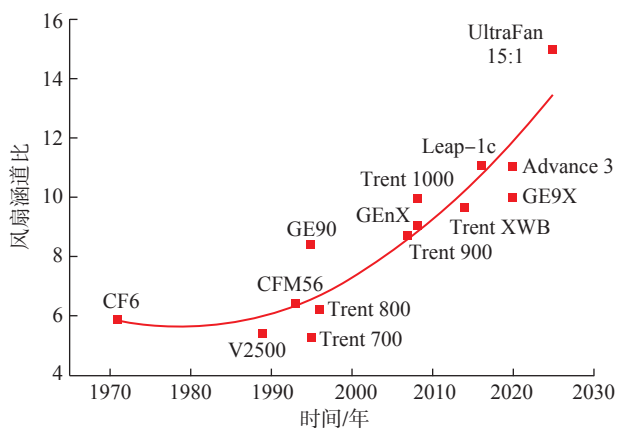


图1 商用航空发动机涵道比统计

Fig.1 Statistics of bypass ratio of commercial aero-engines

性能可设计等优点,可显著提升新一代航空涡扇发动机的综合性能。有关复合材料风扇叶片的研究可以追溯到20世纪60年代末期,罗·罗公司在RB211-22B发动机上首次尝试使用复合材料制造风扇叶片。1985年,GE公司利用“预浸料手工铺层+热压罐成型”技术制造了GE90商用涡扇发动机风扇叶片,该叶片采用了掠形大流量宽弦复合材料结构,叶片高为1.219 m,叶根宽为0.304 m,弦长为0.61 m,风扇转子直径为3242 mm,风扇叶尖速度为360~390 m/s^[2]。GE90采用了22片复合材料风扇叶片,总质量为349 kg,约占发动机总质量的8%。经过十余年的运行,GE90发动机复合材料风扇叶片已累计飞行10⁷ h以上,仅有3片复合材料风扇叶片被更换^[1];GEnX发动机应用了更高效率的低半径比的复材风扇叶片,成功实现减重159 kg;Leap-X系列发动机利用复材风扇叶片降叶片数量降至18片,直径为1.8 m,总重76 kg^[3]。各类复材叶片发动机的成功应用,证明了复合材料风扇叶片适用于要求严格的商业飞行的需要。

罗·罗及GKN公司生产的Trent-1000和Trent-XWB的改进型也使用了复合材料风扇叶片,并为罗·罗公司后续计划的Advance 3和UltraFan发动机项目风扇叶片的制造打下基础。

目前国外各发动机复合材料风扇叶片材料使用及制造工艺见表1^[2]。

本文就航空发动机复合材料叶片材料选择、铺层设计、成型工艺及其模具的设计与制造进行总结概括,同时介绍了国外公司关于发动机复合材料风扇叶片的

表1 国外各发动机复合材料风扇叶片材料使用及制造工艺^[2]

Table 1 Application and manufacturing process of composite fan blade materials for various aero-engines abroad^[2]

特点	GE90	GEnx	GE9X	Trent-1000、Trent-XWB (改进型)	Leap-X	UltraFan
制造厂商	GE	GE	GE	罗·罗及GKN	Snecma	罗·罗
叶片数量/片	22	18	16	20	18	18
材料类型	预浸料	预浸料	预浸料	预浸料	干纤维预成型体	预浸料窄丝束
纤维材料	IM7	IM7	新一代高模量碳纤+玻纤	IM7	IM7	IM7
树脂材料	8551-7 含凯芙拉微粒	8551-7 含凯芙拉微粒	新型环氧树脂	M91	PR520	M91
金属包层	钛合金	钛合金	高强度合金钢	钛合金	钛合金	高强度合金钢
铺层工艺	手工铺层	手工铺层	手工铺层	AFP (自动铺丝成型技术)	三维机织	AFP
成型方法	热压罐	热压罐	热压罐	热压罐	RTM	热压罐
对应机型	波音 777	波音 787	波音 777X	波音 787、空客 350	C919 波音 737MAX	—
客机类型	双通道	双通道	双通道	双通道	单通道	双通道

设计制造情况,为以后航空发动机复合材料风扇叶片的制备提供参考。

1 航空发动机复合材料风扇叶片材料

航空发动机叶片工作温度在 130 ℃ 以下,因此适合采用轻质、高强的碳纤维 / 环氧树脂材料。GE 公司从 1985 年开始在 GE36 上研发复合材料的风扇叶片,之后为提高叶片的抗分层性能和抗剪强度,发展了大力神 8551-7/IM7 的增韧环氧 / 石墨纤维,并在环氧树脂中加入了凯芙拉微粒^[4]。GE 公司的 GEnx 发动机风扇叶片同样采用预浸料手工铺层 + 热压罐成型,并在叶片燕尾板处使用了特氟隆耐磨垫。特氟隆耐磨垫不会跟金属一样产生磨损,也无须重复更换^[5]。GE 公司最新研制的高性能发动机 GE9X 的风扇叶片采用了先进的三维掠形设计,直径为 3.4 m,总数仅为 16 片,并采用新一代高模量碳纤维与新型环氧树脂制造,首次采用碳纤、玻纤混合增强,玻纤含量 5%~10%,且金属前缘用高强度钢取代钛合金,整体厚度薄至金属材质叶片。GE9X 发动机的风扇叶片后缘为玻璃纤维,由于玻纤破坏应变变高,叶片在断裂前能够产生一定弯曲变形,提高叶片抗撞击强度,目前已通过鸟撞测试。相比 GE90-115B, GEnx 的涵道比提高了 14%,总压比提高了 30%,耗油率比降低了 10%^[6]。

Leap-X 发动机风扇叶片由 Snecma 公司研制,将被应用于 C919、B737max、A320neo 等机型。叶片采用宽弦、三维气动设计,数量只有 18 片,直径为 1.8 m,总重为 76 kg,相比采用金属结构的 CFM56 发动机,Leap-X 发动机重量降低了至少约 454 kg,燃油效率提升 16%,NO_x 排放量降低 60%,噪音水平降低 10~15 dB,而可靠性持平 CFM56^[7]。叶片本身采用三维机织树脂传递模塑成型(3-DWRTM)技术,边缘采用钛合金包边。Snecma 公司于 2011 年第 1 季度完成了先进三维机织树脂传递模塑成型风扇以及复合材料机匣的 5000 循环的耐久性试验^[8]。试验表明,应用该技术制作的叶片不仅重量轻,而且结构牢固,抗鸟撞能力强,制造成本相对较低。

UltraFan 发动机的风扇直径长达 140 inch,由 500 层 Hexcel 生产的碳纤维增强的高韧性、耐冲击环氧预浸料 HexPly M91 制成,叶片数量为 18 片,可实现飞机整体减重 700 kg^[9],成为罗·罗有史以来最大的航空发动机^[10]。

近期,俄罗斯联合发动机公司 UEC 在研发 PD-35 发动机的过程中,宣布完成了使用“预浸料铺层 / 热压罐工艺”和“三维机织 / RTM”制造风扇叶片的技术开发,并在 PD-14 发动机上进行测试。使用复合材料制造的 PD-35 发动机全尺寸风扇叶片第 1 批样品预计在 2022

年完成生产^[11]。

由表 1^[2] 可知,国外商用涡扇发动机复材风扇叶片所使用的材料形式由“单一”向“混杂”转变,材料性能向“更高模量、更高韧性、更高强度”发展。

2 制造工艺

2.1 预浸料手工铺放 / 热压罐固化成型工艺

热压罐成型技术也称作真空袋 - 热压罐成型工艺,是航空航天复合材料结构制造最常用的制造工艺。其基本操作过程为:将由碳纤维浸泡至部分固化的树脂制成的预浸料叠层与其他工艺辅助材料组合在一起,形成一个真空袋组合系统,在热压罐中给予一定压力和温度,完成所需零件的固化成型^[12]。

预浸料手工铺放 / 热压罐固化成型工艺需事先把预浸料下料切割成设计好的形状,然后人工进行预浸料的铺叠,之后进行热压罐固化成型。

2.1.1 工艺流程设计

预浸料手工铺放 / 热压罐固化成型工艺的典型工艺流程如下。(1)工装和材料准备。清理模具、粘帖底层膜、下料。(2)铺层。按照预先设计好的铺层设计方案使用手工铺放。(3)抽真空。在模具指定区域内组装真空袋,然后抽真空,此步骤需要每铺固定数量铺层后重复进行。(4)热压罐固化。先进行真空度检测,然后进罐加压,按照固化工艺曲线中的速度进行升温,定时保温后降温,卸压开罐、脱模。(5)数控加工。打磨修边。(6)喷涂、金属包边等。工艺过程如图 2 所示。

值得注意的是,预浸料手工铺放的过程中,用于定位每一块预浸料铺放位置的激光投影系统和用于控制铺层尺寸和方向的自动裁布机对于预浸料铺放的尺寸与位置精度极其重要,两个系统必须协同使用,才能保证最终铺层完成并固化后的尺寸精度,是影响预浸料手工铺放工艺精度的关键要素。

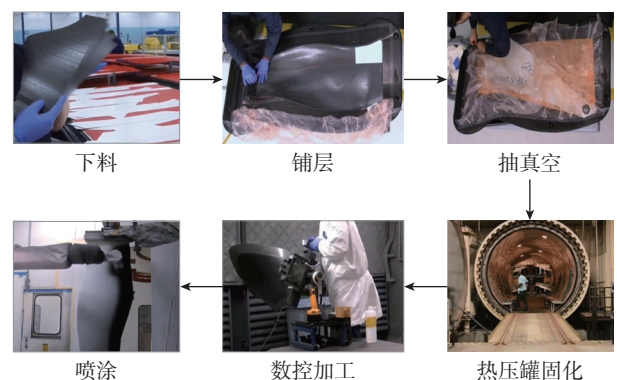


图 2 GE 航空发动机风扇叶片热压罐成型工艺过程
Fig.2 Autoclave process of GE's aero-engine fan blades

2.1.2 模具设计

用于复合材料风扇叶片的模具材料有低碳钢、铝合金、Invar 钢和树脂基碳纤维复合材料。不同模具材料的热导率和热膨胀系数分别影响零件的表面温度场分布和零件固化变形情况。

金属框架式复合材料风扇叶片模具结构由型面、支撑框架和模具底板组成,其典型结构如图 3 所示^[13],制造材料为 40# 钢。基于三维设计软件的设计过程为:(1)修整风扇叶片数模的实体边缘,提取用作型面的叶片曲面;(2)基于提取曲面进行模具的型面设计;(3)激光定位孔、铺贴线等型面细节设计;(4)进行模具的支撑框架板设计,并设计散热孔与用于框架板装配的卡槽,其设计形式可参考图 4^[14]; (5)进行模具底部的垫板设计;(6)将各零件进行装配,并装配上便于运输的吊耳与吊环。

完成框架式模具的初步设计后,需要根据实际工况进行强度仿真,以及热压罐固化过程热分布仿真、热变形和叶片固化变形仿真等,得到模具的强度、刚度、热刚度、固化过程中的温度均匀性数据、受热受压应变分布情况和叶片固化变形结果等,并依据仿真结果进行模具结构的优化设计。

近年来,Hexcel 公司采用了 M61 和 M81 两种树脂基碳纤维复合材料制造复合材料风扇叶片模具 HexTOOL

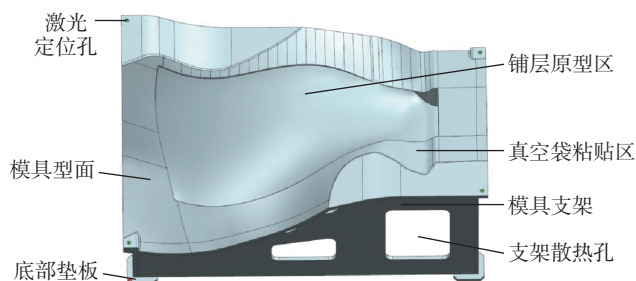


图 3 用于手工铺层的复合材料风扇叶片模具^[13]
Fig.3 Composite fan blade mold for manual layup^[13]

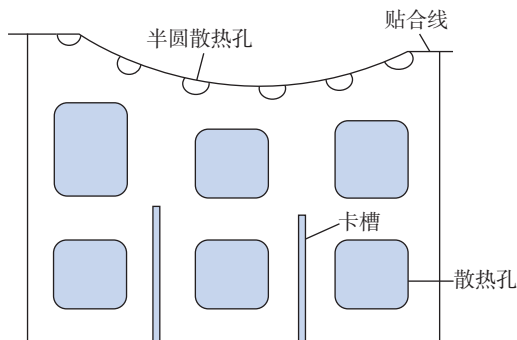


图 4 框架支撑板结构^[14]
Fig.4 Frame support plate structure^[14]

(图 5^[15])。HexTOOL 尺寸稳定性好,公差稳定性和可重复性媲美 Invar 钢模具,且气密性、热学性能优异,重量较轻。其中 HexTool M61 由标称层压纤维体积为 55% 的高强度碳纤维和树脂含量为 38% 的双马来酰亚胺树脂基体组成,材料性能呈准各向同性,适合在 180 °C 温度条件下固化的复合材料构件,能够在 500 次固化循环后仍然保持良好气密性,并且能在 -18 °C 或者更低温度下储存 12 个月,室温下储存 30 d。HexTool M81 采用的 M81 树脂基体则为环氧树脂,适合在 120~150 °C 温度条件下固化的复合材料构件,甚至在 180 °C 的温度条件下仍可以耐受数个固化周期,在 -18 °C 或者更低温度下可以储存 12 个月,室温下可以储存 14 d。目前 CFAN 公司已经采用超过 80 种 HexTOOL M61 模具生产 GE90-94、GE90-115B、GENx-1B 和 GENx-2B 的风扇叶片。较传统 Invar 钢模具,HexTOOL 减重达 75%,加热与固化效率提升了 20% 以上。

2.1.3 铺层设计

复合材料风扇叶片铺层设计的主要思路:首先进行零件曲面的前处理,然后使用专业软件初步设计铺层,再依据设计准则、应力分布情况和后续的可制造性分析迭代设计以调整铺层顺序,最后得到满足要求的叶片铺层设计。

其中,针对复合材料风扇叶片的铺层设计中的关键点主要为变曲率变厚度复杂叶片样件铺层顺序的调整。航空发动机风扇叶片的特点是曲面复杂,且曲率、厚度变化剧烈,使用常规的铺层设计方法难以实现对叶片曲面几何尺寸的精确控制,而使用 Fibersim 软件的自动填充功能则比较方便。但通过自动填充得到的铺层设计



图 5 复材风扇叶片复合材料模具 HexTOOL^[15]
Fig.5 Composite mold of HexTOOL for composite fan blades^[15]

为由大到小的铺层排列顺序,会导致铺层递减形成的树脂淤积全部集中在叶片单侧曲面上,造成应力集中及剥离分层等一系列问题^[16]。故需要对铺层顺序调整优化,即导出铺层设计信息,得到铺层高度原始排序,然后根据复合材料铺层的设计准则要求,在 Fibersim 中的铺层秩序管理器中进行顺序调整,具体排序效果见图 6。

叶片榫头部分一般为燕尾型设计,榫头的端面为对称结构,但叶身跟榫头部分厚度变化很大,且榫头部分为递减铺层最多、最集中的区域,故此处的铺层设计为难点之一,其模型截面如图 7 所示^[17]。康永强等^[18]针对榫头部分的铺层设计建立了插入层的结构、数量分配和顺序,并确定了插入层在榫头中的分布位置,为叶片整体铺层设计提供了思路。

2.1.4 固化工艺

航空发动机的风扇叶片厚度变化较大,在固化过程中有复合材料受热不均匀的现象,且固化过程中产生的残余应力会导致复合材料结构件发生变形,影响零件的成型精度。故需要在设计固化工艺时,进行固化过程的仿真,根据仿真结果对模具和固化工艺曲线进行参数优化和调整。

针对复合材料风扇叶片固化过程中产生残余应力导致的变形,英国 LMAT 公司近年来深入研究和分析了影响复合材料风扇叶片榫头部分变形程度的关键因素以进行精确的固化工艺仿真,进而优化固化工艺和模具

补偿设计。LMAT 公司研究影响变形程度的关键因素为平面方向和厚度方向间的热膨胀系数差异、模具和制件间的相互作用、不同升温速率和固化过程的变化(凝胶化和玻璃化时间)、成型压力、固化放热、纤维褶皱、固化收缩^[19]。

2.2 三维机织碳纤维增强树脂传递模塑(RTM)成型工艺

如果通过相同的预浸料铺层工艺研制小尺寸复材风扇叶片,则会由于叶片刚性过强无法产生足够的弹性变形,进而无法通过抗外物冲击试验(简称 FOD 试验)。直到 2012 年,Snecma 公司与 Albany Engineered Composites 公司合作发展了三维机织技术,于是 GE 公司与 Snecma 公司合资创办的 CFM 公司采用“3D WOVEN 机织结构+RTM 工艺成型”制造的 Leap-X 系列发动机复合材料风扇叶片问世,解决了这个技术问题,同时避免了叶片在热压罐固化过程中出现的热变形现象,保证了其外形精度^[20],且可以严格控制纤维体积分数,并保证叶片拥有良好的表面质量^[7]。

RTM 工艺的技术优势在于将碳纤维预成型体的设计与树脂的模塑过程分离,可以充分发挥铺层材料的设计性,适用于航空发动机风扇叶片这类复杂结构件的整体成型。

用于制造航空发动机复合材料风扇叶片的 RTM 工艺首先需要进行预制体的机织。目前航空发动机复合材料风扇叶片的预制体制备工艺有预浸料铺层工艺、三维编织工艺(3D Braiding)和三维机织工艺(3D Weaving),其中的核心技术是如何实现风扇叶片厚度的连续变化和固化的一次成型^[21]。Leap-X 发动机复合材料风扇叶片采用三维机织-RTM 工艺,其成型过程如

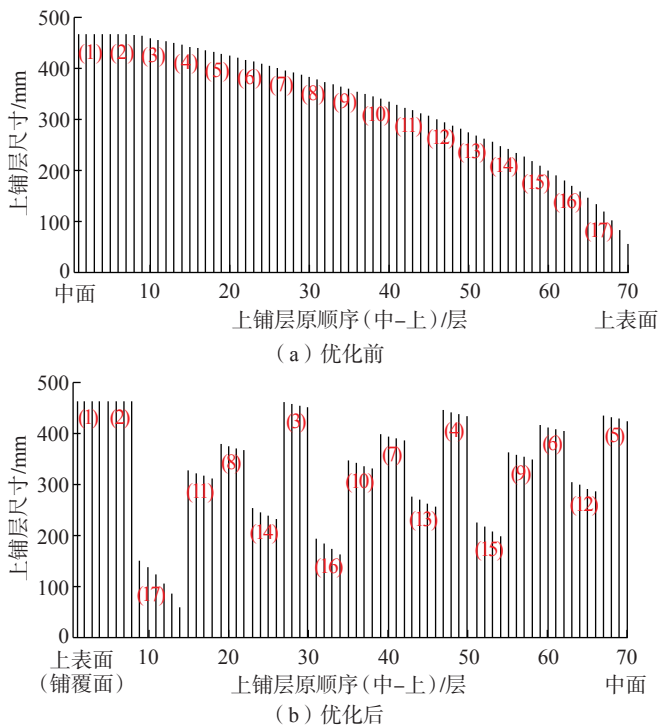


图 6 叶片铺层顺序优化示意图

Fig.6 Schematic diagram of the optimization of leaf layers' sequence

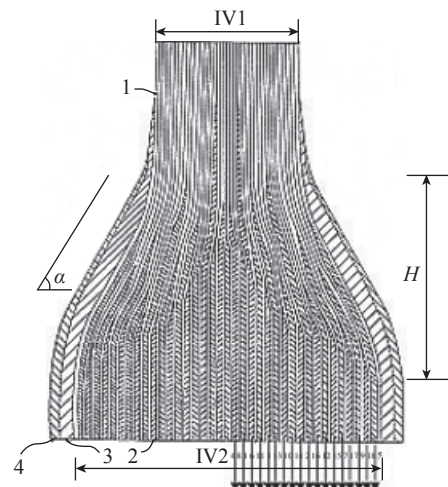


图 7 GE 公司叶片榫头铺层专利^[17]

Fig.7 GE's patent for fan blades' dovetail layout^[17]

图 8 所示。首先进行预制体的三维机织;然后对其进行切割,扭转铺放到模具里,进行 RTM 工艺成型;脱模后安装钛合金包边,完成叶片的整体制造。Snecma 公司委托 Albany Engineered Composites 公司完成三维机织预制体的制备(图 9)和整个复合材料风扇叶片的制造。其使用的 3D WOVEN /RTM 技术制备叶片过程的特点是叶片高压成型前将碳纤维织造成三维机织结构,然后注入树脂。

对于复合材料风扇叶片,由于其外形非常复杂,RTM 模具上下模的工艺分离面设计、注射口、排气口、密封方式的设计是模具设计的难点。

Snecma 公司使用的 RTM 模具和工艺过程如图 10 所示。可以看到,其使用的模具为上下模的分体式模具,侧面装有便于吊装的吊耳和定位孔,周边带有一体式的管路用于抽真空或者液体加热保温。

2.3 预浸料自动铺丝 / 热压罐固化成型工艺

预浸料自动铺丝 / 热压罐成型工艺与手工铺放 / 热压罐成型工艺的流程相似,其区别主要在于前者使用了自动铺丝成型技术(Automated fiber placement, AFP)。

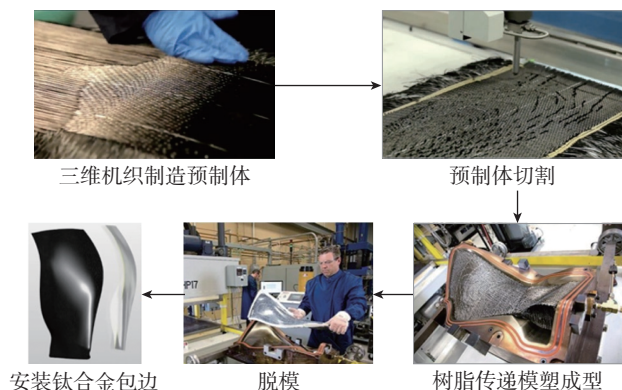


图 8 Leap-X 发动机风扇叶片制造过程
Fig.8 Leap-X aero-engine fan blade manufacturing process



图 9 Leap-X 发动机风扇叶片三维机织过程
Fig.9 3D weaving process of Leap-X aero-engine fan blades

2.3.1 模具设计

值得注意的是,用于自动铺丝的框架式模具的型面需要与铺丝机协同配合,进行铺丝机专用定位孔设计,并预留余量区避免铺丝头与模具型面发生干涉,设计可参考图 11 中罗·罗公司的 UltraFan 复合材料发动机风扇叶片工装模具。

2.3.2 铺层设计

手工铺层使用的是整块的预浸料坯料,而自动铺丝则使用的是预浸丝束,由数千根未捻的纤维丝构成,由树脂预浸,宽度一般为 3.18~25.4 mm,厚度为 0.1~0.3 mm^[7],实际铺放时会在曲边边缘形成锯齿状边界,故需在后期进行修剪和机加工。在 Fibersim 软件中进行复合材料风扇叶片自动铺丝铺层设计的流程与手工铺层相同,但需要在软件层合板设置中选择 AFP 设备,并在材料库中选择所需预浸丝束材料。

3 制造工艺对比分析

3.1 三维机织和手工铺层

三维机织复合材料的性能相比于传统层压板显示出的优点有^[22]:(1)可以低成本地制造出例如发动机风扇叶片这类复杂形状的净尺寸预制体;(2)可以针对特定力学要求定制每个部位、不同方向的力学特性;(3)具有更高的耐分层性、抗冲击性、耐冲击损伤性和抗层间断裂性;(4)对于材料的切口等缺陷不太敏感。

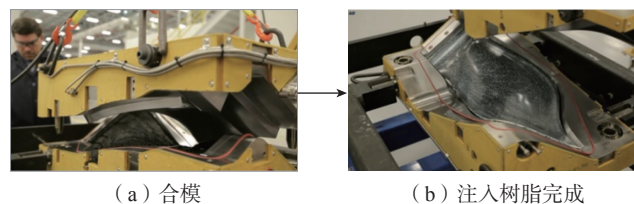


图 10 Snecma 公司的复合材料风扇叶片 RTM 工艺
Fig.10 Snecma's composite fan blade RTM process

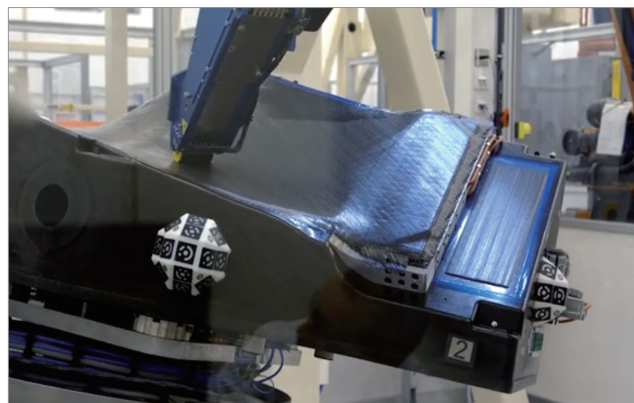


图 11 UltraFan 复合材料风扇叶片自动化铺丝
Fig.11 AFP of UltraFan composite fan blades

对于单通道风扇叶片,三维机织结构优异的抗分层扩展能力可以使这类小叶片在鸟撞引起的弯扭大变形中保持足够的刚度和韧性,不会由于局部鸟撞载荷恶化而发生断裂。但双通道风扇叶片由于其尺寸较大,榫头部分厚度变化大,增大了三维机织中打纬的难度和纱线磨损,而且手工铺层复合材料的刚度和强度普遍高于三维机织复合材料,故一般采用铺层工艺而非机织。美国GE公司目前制造复合材料风扇叶片均使用手工铺层工艺,并成功进行了多年商用生产制造,验证了该工艺的稳定性 and 可靠性。手工铺层工艺和三维机织工艺的特点对比见表2。

3.2 手工铺层和自动铺丝

手工铺层的优势在于技术的成熟度与成功的商用经验,而自动铺丝的优势主要在于工艺流程的自动化、高效化、精密化。手工铺层工艺和自动铺丝工艺的特点对比见表3。

4 结论

参考国外制造复材风扇叶片的技术发展现状,国内在商用大涵道比涡扇发动机风扇叶片的研制上需要攻克以下难点:复杂型面大尺寸叶片高精度成型高效传热长寿命模具设计及制造技术、复杂气动外形风扇叶片铺层设计技术,以及复合材料风扇叶片预制体三维机织技术、纤维自动铺放技术、无损检测与质量控制技术。

并有以下3点制造技术发展趋势。

(1)材料形式混杂化。GE9X使用的GE第四代混杂材料风扇叶片叶身主区域为碳纤/树脂基,金属包层覆盖在叶尖、后缘,后缘为碳纤、玻纤混合增强/树脂基,内部为碳纤,外部为玻纤。由此可以看出,目前国外商用涡扇发动机复材风扇叶片所使用的材料形式由“单一”向“混杂”转变,新一代的材料性能拥有更高模量、更高韧性、更高强度,国内也需要研究适用于航空发动机风扇叶片的复合材料,建立基于国内碳纤维材料的复合材料高韧性材料体系。

(2)制造工艺自动化、自适应化。复合材料风扇叶片结构外形为双曲面,曲率变化大,厚度变化剧烈,且存在大扭转、变截面区域,使用传统手工操作进行铺层,可能出现难以预测的铺叠偏差,进而影响叶片整体外形。如Snecma公司在Leap-X风扇叶片上使用的三维机织技术与罗·罗公司在UltraFan上采用的机器人自动铺丝铺丝技术,均使用自动化成形技术以提高生产稳定性,减少人为操作导致的偏差,同时机械臂的柔性应用空间与三维机织技术的可设计性大大提高了制造工艺的自适应性,可用于其他复杂外形复合材料构件预成型体的制造,有效提高生产效率,降低制造成本。

(3)工装材料多样化。在复合材料构件的制造中,模具是决定构件质量、成本和周期的重要因素。为了保持复合材料构件高温固化时模具型面的稳定性、传热速

表2 手工铺层工艺和三维机织工艺特点对比

Table 2 Comparison of the characteristics of manual layup process and 3D weaving process

工艺特点	手工铺层	三维机织
设计过程	使用传统的复材铺层设计方式进行逐层的铺层设计,对形状复杂零件的设计较为困难	可以针对特定力学要求定制每个部位、不同方向的力学特性
铺层方式	使用人力逐层地进行铺层,过程耗时长但成本较低	使用三维机织机进行预制体的机织,编制速度缓慢且昂贵
材料性能	更高的刚度和强度	更高的耐分层性、抗冲击性、耐冲击损伤性和抗层间断裂性
技术成熟度	多年来各个型号商用航空发动机的应用验证了该工艺的稳定性 and 可靠性	虽成功应用于Leap-X发动机,但大型三维机织复合材料结构的机械性能尚未得到广泛研究,且用于确定强度和疲劳性能的预测模型还未得到开发

表3 手工铺层工艺和自动铺丝工艺特点对比

Table 3 Comparison of the characteristics of manual layup process and automated fiber placement

工艺特点	手工铺层	自动铺丝
材料尺寸	使用自动裁布机提前将预浸料裁剪到设计的形状和尺寸	铺丝头自带丝束剪裁装置,自动裁剪预浸丝束
定位方式	铺层定位依据激光投影系统和肉眼判定	铺丝机自带摄像头,并通过识别靶标球位置和姿态实现定位
压实方式	铺层需要手动压实	铺丝头压辊铺丝成型
铺层过程	每铺一定层数需要抽真空压实处理	铺丝头自带加热软化装置,无须反复抽真空压实处理
操作方式	依靠人力劳动	机械臂操控

度和温度均匀性,框架式殷钢模具是复杂外形复合材料构件模具的首选。而金属模具往往重量重、制造周期长且成本高,不适用于小批量的试制阶段。参考 Hexcel 公司使用复合材料生产的 HexTOOL 模具,跟金属模具相比重量显著减轻,且提高了加热固化的效率。在研究叶片制造技术的同时,也需要探究新型的模具材料,提高叶片制造的效率同时降低成本。

由以上趋势可以看出,随着制造技术与信息技术的发展,复合材料风扇叶片的制造工艺整体正朝着自动化、高效率、高性能、高精度、高可靠性的方向发展。

参考文献

- [1] 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,2014,57(15):58-62.
- [2] 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.
- [3] 李杰,巨亚斌. LEAP-X 发动机和 Tech-X 发动机先进技术分析[J].航空制造技术,2013,56(10):56-59.
- [4] 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,2008,34(4):54-55.
- [5] 李杰.后掠大流量宽弦复合材料风扇叶片技术综述[J].航空制造技术,2009,52(17):49-51.
- [6] 陈光. GE9X 的发展与设计特点[J].航空动力,2018(3):37-40.
- [7] 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,2019,36(4):68-72.
- [8] 李杰. LEAP-X 发动机的创新性技术[J].航空科学技术,2011,22(4):12-14.
- [9] 马绪强,苏正涛.民用航空发动机树脂基复合材料应用进展[J].材料工程,2020,48(10):48-59.
- [10] GUY N. Work on composite fan blades for rolls UltraFan demonstrator begins[J]. Aviation Week, 2011, 2(11): 10-12.
- [11] ARKHIPOV A N. UEC creates parts from composites for the PD-35 engine[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 768: 176842.
- [12] 刘卫平.民用飞机复合材料结构制造技术[M].上海:上海交通大学出版社,2016.
- [13] 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.
- [14] 范喜祥.飞机用复合材料成型模具逆向建模与制造工艺研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [15] THOMAS G P. Applications of HexTool quasi-isotropic prepreg[J]. Azo Material, 2013, 11(19):85-95.
- [16] 朱启晨,陈勇,肖贾光毅.复合材料风扇叶片铺层设计方法研究[J].航空发动机,2018,44(3):49-54.
- [17] EVANS C R, FUHRMAN B J, JONES J D, et al. Foreign object damage resistant composite blade and manufacture: US5375978[P]. 1994-12-27.
- [18] 康永强,陈勇.复合材料风扇叶片榫头铺层设计及加工制造[J].合成纤维,2020,49(1):44-51.
- [19] PATIL A S, MOHEIMANI R, DALIR H. Thermomechanical analysis of composite plates curing process using ANSYS composite cure simulation[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2019, 14: 100419.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] MOURITZ A P, BANNISTER M K, FALZON P J, et al. Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1999, 30(12): 1445-1461.

通讯作者: 李小强,副教授,博士生导师,研究方向为材料先进成形工艺与装备、现代航空制造工艺与装备。

(责编 七七)