

# 航空发动机复合材料静子叶片研究进展

王焱林<sup>1,2</sup>, 刘天生<sup>1</sup>, 刘东<sup>2</sup>, 史鹏程<sup>2</sup>

(1. 中北大学环境与安全工程学院, 太原 030051;

2. 浙江省机器人与智能制造装备技术重点实验室, 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 宁波 315201)

**摘要:** 航空发动机静子叶片作为压气机的关键部分,对整个航空发动机的性能有着重大影响。采用轻量化纤维增强复合材料叶片,对实现减重、大推重比、高燃油效率起到关键作用。首先介绍了纤维增强树脂基复合材料叶片的设计流程和设计技术进展,然后从静子叶片预成型、成型和切削加工三方面讨论了制造工艺研究状况,并强调了前期设计在航空发动机冷端一体化发展中的重要性,最后通过对国外几种典型复合材料叶片的成功应用案例和当前设计技术以及成型工艺的发展趋势的分析,凸显了2.5D机织复合材料在未来航空发动机静子叶片发展中的地位,展望了航空发动机复合材料静子叶片的未来发展。

**关键词:** 静子叶片; 纤维增强树脂基复合材料; 预成型; 2.5D编织; 闭模成型

**中图分类号:** TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0999(2018)12-0096-06

航空发动机是大部分航空飞行器的动力来源,直接影响飞机的可靠性及经济性。航空发动机的工作原理和制造工艺不断发生变化,而轻量化始终是提升航空发动机性能的关键技术之一。据统计,风扇段质量约占发动机总质量的30%~35%,风扇叶片每减重1 kg,发动机风扇的机匣、传动系统、飞机的机翼或者机身结构重量也相应减少,这种由风扇结构减重带来的飞机整体协同减重的迭代效应对提高发动机性能至关重要<sup>[1]</sup>。纤维增强树脂基复合材料具有高比强、高比模、可设计、阻尼大、耐疲劳等优异的综合性能,是航空发动机理想的轻量化材料,被广泛应用于民用航空发动机的冷端部位(见图1)。尤其当代先进航空发动机对大推重比、低油耗和高可靠性的追求更是对高性能复合材料的扩大应用提出了迫切需求<sup>[2]</sup>。航空发动机静子叶片作为压气机的核心部件,主要作用是对气流进行梳整和扩压,提高发动机的工作效率,其工作状态直接影响发动机的总体性能及稳定性。静子叶片主要受到气动载荷的作用,其损伤多为振动破坏和疲劳破坏,而纤维增强树脂基复合材料的综合力学性能可较好地解决金属静子叶片所面临的这两个主要损伤问题。同时纤维增强树脂基复合材料的制造工艺比较成熟、成本较低。这些综合优势既可确保航空发动机结构件具

有足够的强度和刚度,又可满足航空发动机对高推重比、低耗油率和低维修成本的需要<sup>[3]</sup>。分析国外已经验证的航空发动机复合材料静子叶片的先进设计、制造和应用技术,对加快我国高性能纤维增强树脂复合材料在航空发动机部件的开发和应用具有重要的指导意义。

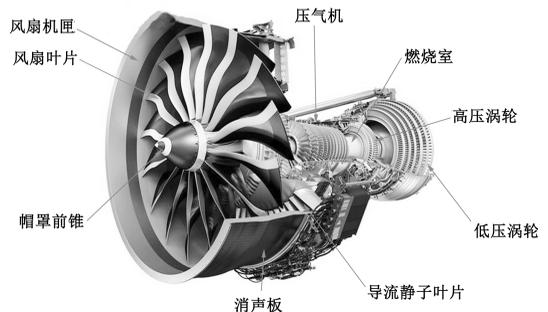


图1 纤维增强复合材料在民用航空发动机上的冷端应用  
Fig. 1 Application of fiber reinforced composite material to cold end of civil aviation engine

## 1 纤维复合材料静子叶片的设计技术

传统金属叶片的结构设计分析方法经过多年发展,已具备完整且成熟的体系,相对而言,复合材料叶片的结构设计技术在多个方面有待提高。

收稿日期: 2018-08-03

本文作者还有祝颖丹<sup>2</sup>和陈明达<sup>2\*</sup>。

基金项目:“十三五”装备预研中科院联合基金(6141A01141602);中国科学院科技服务网络计划

作者简介:王焱林(1992-),男,硕士研究生,主要从事复合材料力学与结构设计方面的研究。

通讯作者:陈明达(1973-),男,高级工程师,主要从事碳纤维复合材料轻量化技术开发、纤维复合材料构件成型的设备与纤维复合材料构件装备的研发等方面的研究,chenmingda@nimte.ac.cn。

静子叶片复合材料的结构设计是整个设计流程的第一步,好的设计能够减少制造缺陷甚至缩短制造流程,因此需要考虑各个方面:从材料与工艺的选择到预成型结构的选择、变截面过渡区与转角区设计、剪裁、连接设计再到成型工艺与装配的误差补偿甚至是结构功能化的应用(防雷、防静电、防腐等)等。在结构设计中,为了结构的整体稳定性,一般在铺层设计中最常用的是 $0^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$ 、 $90^\circ$ 四种对称铺层。Tsai<sup>[4]</sup>提出新的铺层设计方案,开发出了非皱纹织物,从而实现了非均衡、非对称铺层的[0/25]双铺层结构,有效减少了内应力。但是,目前设计大多还停留在传统金属材料的设计思维层面,对复合材料的各向异性等优缺点或者结合其他材料的共同设计开发考虑不多。复合材料在静子叶片的应用不是简单的材料替代,而是为充分突出复合材料的优势选择叶片的特定结构,确定构件的形状和质量,调配组分材料的比例,开发合适的构件成型工艺等。这些都需要开展大量的实验研究,使材料和构件在同一工艺操作过程中达到整体优化<sup>[5]</sup>。

进行结构力学分析时需要大量的材料参数。材料参数一般通过制作大量标准件进行力学实验获取。随着有限元分析和复合材料理论的发展,诸多学者<sup>[6-8]</sup>在复合材料性能参数预测研究上取得了很好的进展。例如,应用较广泛的多尺度有限元分析方法首先在微观尺度上根据纤维的分布特征建立微观有限元分析模型,嵌入周期性边界条件,输入组分参数和材料参数计算出纱线的参数;然后根据经纱和纬纱的编织方式建立纱线的代表性体积单元(RVE)微观有限元分析模型;随后将微观有限元模型分析出的纱线参数转移到复合材料的RVE模型中,模拟应力应变行为和渐进损伤过程。

静子叶片的强度设计主要是满足荷载的要求,在结构设计和多尺度建模预测材料性能的基础上进行。在强度设计中可以简化叶片计算模型,比如忽略在重力作用下发生的变形。静子叶片是根部和头部两端机械固定的,可以将叶片看作两端固定的静定梁等。选取叶片各截面重心连线为空间曲线,以局部机械固定荷载为边界条件,选取叶片上的空气动力为关键荷载,计算叶片上空气动力引起的弯曲应力。根据计算结果进行平板强度分析、连接强度分析和损伤容限分析并和结构设计值对比。

根据叶片的实际工况建立流固耦合模型并添加载荷和边界条件进行叶片的整体性分析。静子叶片流固耦合分析主要通过有限元分析软件 ANSYS 中的 workbench 平台建立瞬态固体模型和流体模型,然后分别对 CFX 和 transient structural 两个分析模块根据工况设置特征参数,最后通过 system coupling 模块建立数据传递进行交互计算来模拟计算静子叶片的工况<sup>[9]</sup>。通过对静子叶片进行双向流固耦合模拟计算,在叶片表面气动力收敛的情况下,根据计算所得的气动力值与叶片形变的关系,建立该进气角度下稳定时激振力的表达式,最后通过调整静子叶片进气角,可获得不同进气角下平板叶片振动响应的变化规律。

气动性良好的叶型是保证压气机稳定性的关键。静子叶片结构的优化具有很重要的实用价值,能够在高负荷压气机环境下有效延迟静子叶片角区分离。优化设计主要分为拓扑优化和尺寸优化,通过拓扑优化来剔除应力集中区域,这对于全新的结构设计是非常关键的;通过尺寸优化可以针对性地寻求变截面参数,在降低重量的同时提高安装便捷性。1983年 Sanger 通过在流场问题计算中结合数值最优算法来设计控制扩散叶型,这是叶片优化设计的首次应用<sup>[10]</sup>。

由于静子叶片的优化设计过程涉及多个学科,如气动、强度、振动、结构、工艺、材料以及传热等,且学科之间存在相互影响的因素,国内外的学者们对航空发动机叶片的多学科设计优化问题进行了深入研究。Arizona 州立大学的 Talya 等<sup>[11,12]</sup>对涡轮叶片进行了多学科相结合的优化设计研究。吴立强等<sup>[13]</sup>基于气动、结构、强度和寿命以及优化算法等进行耦合计算,对单级实心涡轮转子叶片进行多学科设计优化。周正贵等<sup>[14,15]</sup>采用单纯形法对压气机二维叶型气动优化设计做了大量研究工作,优化后的叶片性能得到了有效的改善;并且采用遗传算法对超声速二维叶型成功进行了优化设计,开发出并行遗传算法优化平台,可同时对风扇/压气机的二维叶型、子午面、安装角、积叠线等几何参数实现优化设计。但是目前针对静子叶片优化设计的研究报道不多。

我国在航空复合材料设计方面尚存在很多不足,例如材料设计所需要的航空发动机高性能复合材料纤维-树脂体系及其工艺适用性,高性能复合材

料材料许用值、结构设计值的合理确定,相关许用值数据库的建立等相对落后。

## 2 纤维复合材料静子叶片制造工艺

纤维复合材料静子叶片的研发涉及先进复合材料与先进制造工艺,主要包括预成型、成型和切削加工工艺等。

### 2.1 纤维复合材料静子叶片预成型工艺

在叶片成型前需要将纤维加工成预成型体,纤维复合材料静子叶片预成型工艺主要包括预浸料铺放工艺和编织工艺。

#### 2.1.1 预浸料预成型

对于预浸料铺放工艺来说,主要难点在于预浸料裁切时平面到曲面的变换和铺贴时的精确定位以及强化层间结合的方法。国外普遍采用自动裁床结合分层切片法进行变换裁切优化,通过激光放样实现精确定位铺贴,采用专用缝纫设备进行层间强化。以 GE90-115B 发动机的预浸料层合结构风扇叶片成型工艺为例,该叶片是从叶根向叶尖用数百层的预浸料布带以逐渐变薄的方式缠绕模压而成的<sup>[16]</sup>。该叶片模压成型的工艺过程为:首先用计算机制图放样,然后采用模板法裁出各个尺寸的铺层;再将裁好的预浸料铺层按顺序铺装模具上,按照工艺参数固化,成型后进行后期细节加工以满足装配要求;最后针对层合复合材料叶片的前缘、后缘以及叶尖易剥离的部位装配钛合金保护条。

在预浸料铺放技术方面,近年来欧洲自动铺放技术发展极为迅速,并形成了自动铺丝的旋转切割与预浸纱快速续接,以及自动铺带的双头两步法与多带同步铺放两大技术特色。如 Rolls-Royce 公司的 TRENT 系列发动机复合材料风扇叶片的预制体就采用自动铺放技术实现了自动化生产。由于复合材料构件力学性能与纤维方向密切相关,且发动机静子叶片面型复杂,不仅需从构件结构承载设计来考虑,还应从铺放的工艺性角度对曲面进行可铺性分析。国内许多学者针对自动铺层技术已做了大量的研究,邵冠军<sup>[17]</sup>按构件主应力的方向和大小根据等距线和等分点原理,规划出了铺丝轨迹。李燕元等<sup>[18]</sup>主要针对曲面铺丝进行了研究,基于管道曲面广义螺旋线的铺丝路径生成算法和埃尔米特插值算法提出了一种铺丝路径的局部修改算法。卢敏等<sup>[19,20]</sup>

则是运用了投影原理,对在自由曲面构件上的主应力分布进行了优化设计,解决了进行多层变角度铺丝的算法问题。

#### 2.1.2 编织预成型

对于编织结构的预成型体叶片,近几年来 2.5 维机织复合材料在航空航天领域应用较多。2.5 维机织作为三维编织的特殊形式,在厚度方向上层与层之间也存在着纤维的相互勾嵌搭接,相比二维结构层间性能显著提高,具有较好的抗冲击能力。相比三维编织来说,2.5 维编织克服了三维编织异形结构困难的缺点,能够编织多样结构,生产周期较短,容易制备异形构件。在机械生产方面,只需要对传统的织布机进行改造升级就可以进行 2.5 维织物织造。国内外学者也对 2.5 维机织复合材料的细观几何结构<sup>[21-23]</sup>、力学性能<sup>[24-26]</sup>、成型工艺<sup>[27-29]</sup> 等多方面进行了研究。CFM 公司利用该编织技术制备了 LEAP-X 发动机风扇叶片的预制体。

### 2.2 纤维复合材料静子叶片成型工艺

在叶片结构成型方面,主要采用真空热压罐成型工艺和闭模成型工艺。热压罐成型工艺涉及一系列的理化过程,其中预浸料的热膨胀、树脂流动梯度、树脂的固化收缩、表面温度分布、模具和构件不同的热效应等,都是影响产品固化变形的显著因素,并不同程度地影响着构件残余应力的水平。由于航空发动机叶片结构形式复杂,常规的热压罐成型技术无法充分保证成型后零部件的尺寸精度。目前对于纤维增强树脂基复合材料叶片,主流的成型技术是闭模成型,例如树脂传递模塑成型、树脂薄膜渗透成型、真空辅助成型等。闭模成型技术可实现零件较高精度成型,叶片成型的质量比较一致,能够满足航空发动机对叶片极高的质量要求。例如 Snecma 公司利用树脂传递模塑闭模成型工艺技术制造了 LEAP-X 航空发动机叶片。然而闭模成型常规用的是金属模具,金属模具的热膨胀系数与复合材料零件的热膨胀系数相差较大。为了减少热膨胀系数不匹配的影响,提高零件最终的尺寸精度,可采用复合材料材质的成型模具替代金属成型模具,例如美国通用电气航空发动机公司制备出的高涵道比商用超大推力涡扇发动机 GE90-94、GE90-115B、GENx-1B、GENx-2B 等复合材料风扇叶片<sup>[30]</sup>。

不论是真空热压罐成型工艺还是闭模成型工

艺,都避免不了加热的过程,传统的加热都是由外向内加热,热能从部件的厚度方向来传递的。对于叶片榫头和连接部分,成型中在加热和降温过程都存在热应力梯度,导致构件弯曲变形的问题。为解决这个问题,最近几年又出现了新的加热成型方法——微波加热<sup>[31,32]</sup>,热能通过电磁相对均匀而迅速地转移到待加热部件上,这样不仅能通过针对性加热更好地控制固化过程,也缩短了固化周期。但是该技术会形成一个冷模具和一个热部件的问题,控制好模具温度成了该成型技术的关键点。

### 2.3 纤维复合材料静子叶片切削加工工艺

大部分构件在闭模成型中都留有一定的裕度进行后期加工,目前针对纤维复合材料的切削加工工艺主要是水射流加工、激光加工、电火花加工以及超声加工等<sup>[33]</sup>。水射流具有强大的冲击力,容易造成材料的撕裂和表面崩口;而激光加工对构件造成的热效应很难避免;电火花加工的效果较好但是加工效率偏低;超声加工对刀具的要求较高,需要对刀具的磨损进行精确补偿并且也要控制材料的崩边问题。

叶片锥形需要精密切除工艺以实现装配所需的精度。现有航空发动机压气机静子叶片和机匣连接主要有直接固定和间接固定两种形式<sup>[34]</sup>,因此只要机匣和叶片不是一体化成型都需要针对性的细部加工。纤维增强复合材料是二相或者多相结构,硬度高、强度大,且力学性能大部分呈现的是各向异性,因此机械加工条件比较复杂<sup>[35]</sup>,在切削加工过程中极易引起毛刺和分层、刀具磨损严重、产生残余应力等问题。静子叶片需要后期加工的部位主要是叶身、叶片边缘和榫头连接处。叶身主要是叶身表面的抛光,抛光度直接会影响叶片与空气的摩擦阻力和气动性能。叶片边缘的加工难度在于叶片边缘较薄,在加工过程中很容易造成材料撕裂和表面崩口,后期加工难度很大。此外,静子叶片尺寸较小,随之带来的是静子叶片榫头及叶片与机匣联接部位的细部结构较多,对加工工艺提出了更高的要求<sup>[36]</sup>。切削加工的精度对静子叶片的整体精度和性能有重要影响,目前针对纤维复合材料的切削加工尚不成熟,特别是表面精细的磨抛工艺和余量精确切除工艺。

我国目前也正致力于开发复合材料叶片,但与发达国家存在较大的差距,例如预浸料铺层过程中

材料利用率较低,特别是 $30^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$ 、 $60^\circ$ 铺层时的边角处耗用量非常大;对于编织结构复合材料叶片,纤维自动化编织技术不够成熟,还存在许多编织技术难题,特别是变截面编织技术以及编织精度偏低。由于编织结构比较密实,对固化成型工艺和固化变形控制技术要求较高。

近年来,随着增材制造技术的迅速发展,叶片成型工艺也不断在进步。2017 TCT 亚洲展上,国内华曙高科展示了 3D 打印技术在发动机静子、转子叶片上的应用,为发动机盘轴叶片的整体设计优化提供了充分的技术论证,突破了航空涡喷发动机的整体制造技术瓶颈,也为下一步纤维复合材料发动机一体成型奠定了一定的技术基础。

### 3 航空发动机纤维复合材料叶片应用进展

航空巨头美国通用电气公司和普拉特·惠特尼公司、法国的斯奈克玛公司、英国的罗尔斯·罗伊斯公司和德国的 MTU 公司都在复合材料方面开展了大量的研发工作<sup>[37]</sup>。纤维增强树脂基复合材料在航空发动机静子叶片的首次应用可以追溯到 20 世纪 60 年代初期,英国罗尔斯·罗伊斯公司成功地生产出了航空发动机纤维增强树脂基复合材料静子叶片,证明了在航空发动机结构布局不改变的情况下,靠材料的创新应用大幅度地提高航空发动机综合性能的方案是可行的<sup>[38]</sup>。

很多著名航空发动机(如 GE90、GE<sub>nx</sub>、PW4084 和 PW4168)的叶片都采用了预浸料铺层的方式。以 GE90 为例,该发动机采用的每片复合材料风扇叶片均由 400 层的 IM7/8551-7 碳纤维/增韧环氧预浸料制成,22 片风扇叶片总重占发动机总质量的 8% 左右。与钛合金空心叶片相比,该叶片在质量轻了 66% 的同时强度提高了将近一倍。普·惠公司的 PW4084 和 PW4168 发动机中的风扇静子叶片采用了 3M 公司的 PR500 环氧树脂基层合复合材料,较钛合金空心叶片相比质量减轻了 38%,成本降低了 39%,起到了良好的减重效果<sup>[39]</sup>。为了提高热稳定性,普·惠公司在 F119 发动机压气机静子叶片采用了 PMR15 聚酰亚胺树脂基复合材料。在新一代的 F136 发动机和 F119 发动机改进中,压气机采用了耐温能力比 PMR15 聚酰亚胺树脂基复合材料高 55 °C 的 AFR700B 高温树脂基复合材料静子叶片。但是预浸料铺层成形的复合材料

叶片缺点在于损伤容限有限,叶片层间结合力较弱,只能依靠材料体系中的树脂来达到增韧的目的<sup>[40]</sup>。

为了克制预浸料铺层成形叶片的分层问题,发展出了编织结构叶片。CFM公司和Snecma公司都采用三维编织-RTM技术制造了复合材料风扇叶片。该类复合材料叶片重量轻、噪音小,具有较长的安全寿命和良好的抗疲劳性能,并且使用过程中维护成本低。据对比分析,Snecma公司的LEAP-X航空发动机采用三维编织-RTM技术制造的复合材料风扇叶片与同等推力水平金属结构的CFM56航空发动机相比重量降低了半吨左右,燃油效率提高了约16%,并且噪音量下降了15 dB左右<sup>[41]</sup>。同时Snecma公司也做了与GE90同级别的抗鸟撞试验,实验结果显示,LEAP-X发动机的复合材料叶片相关韧性性能不低于GE90发动机IM7/8551-7及IM7/M91预浸料成型的复合材料叶片的韧性性能。该发动机在2013年年初进行LEAP-X全尺寸整机试验,随后进行飞行试验,并在2016年取得适航证。正是由于LEAP-X发动机优越的性能,中国商飞C919、B737max、A320neo这三种双发单通道旅客机都同时选中了该款发动机。

## 4 总结与展望

航空工业的迅速发展无疑对轻量化复合材料静子叶片提出了更高的要求:一方面,高稳定性和减重仍然是压气机研制所追求的目标;另一方面,新颖的结构设计和应用是对先进复合材料潜力的进一步挖掘。目前编织结构复合材料叶片是主要发展方向之一,对编织结构复合材料叶片的设计、制造以及性能均需进一步深入研究。同时,新颖的结构一体化设计和3D打印技术将会推动先进复合材料叶片的创新发展,一体化的生产、精细化的尺寸可避免传统设计和装配中的瓶颈。

### 参考文献

[1] 刘璐璐. 二维三轴编织带缠绕碳纤维复合材料机匣包容性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.

[2] 杨贵铭. 浅析航空发动机关键技术[C]//航空发动机设计、制造与应用技术研讨会. 贵州: 2013.

[3] 沈尔明, 王志宏, 滕佰秋, 等. 连续纤维增强复合材料在民用航空发动机上的应用[J]. 航空发动机, 2013, 7(2): 90-94.

[4] 罗益锋. 国外碳纤维复合材料产业开发动向[C]//第十八届国际复合材料大会(18th ICCM). 韩国济州岛: 2011.

[5] 陈巍. 先进航空发动机树脂基复合材料技术现状与发展趋势[J]. 航空制造技术, 2016(5): 68-72.

[6] Lu Z X, Zhou Y, Yang Z Y, et al. Multi-scale finite element analysis of 2.5D woven fabric composites under on-axis and off-axis tension [J]. Computational Materials Science, 2013, 79: 485-494.

[7] Zhong Y, Le Q N T, Kureemun U, et al. Prediction of the mechanical behavior of flax polypropylene composites based on multi-scale finite element analysis[J]. J Mater Sci, 2017, 52: 4957-4967.

[8] 杨强, 解维华, 孟松鹤, 等. 复合材料多尺度分析方法与典型元件拉伸损伤模拟[J]. 复合材料学报, 2015, 32(3): 617-624.

[9] 王浩. 叶片流固耦合振动分析方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.

[10] Sanger N L. The use of optimization techniques to design controlled diffusion compressor blading[J]. ASME J Eng Power, 1983, 105: 256-265.

[11] Talya S, Jha R, Chattopadhyay A, et al. Development of multidisciplinary optimization procedure for gas turbine blade design[C]//Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 2006.

[12] S S Talya, J N Rajadas, A Chattopadhyay. Multidisciplinary optimization for gas turbine airfoil design[J]. Inverse Problems in Engineering, 2000, 8(3): 283-308.

[13] 吴立强, 尹泽勇, 蔡显新. 航空发动机涡轮叶片的多学科设计优化[J]. 航空动力学报, 2005, 20(5): 795-801.

[14] 周正贵. 压气机/风扇叶片自动优化设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 5-7.

[15] 迟雪, 周正贵. 高负荷超音压气机转子叶片优化设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.

[16] 李杰. GE公司复合材料风扇叶片的发展和工艺[J]. 航空工艺技术, 2008(4).

[17] 邵冠军. 自动铺丝束CAD/CAE/CAM技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.

[18] 李燕元, 王小平, 王志国, 等. 管道曲面构件自动铺丝路径规划[J]. 宇航材料工艺, 2010, 40(5): 27-32.

[19] 卢敏, 周来水, 安鲁陵, 等. 开曲面构件的多层铺丝路径生成算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(6): 735-738.

[20] 卢敏, 周来水, 王小平. 一种基于投影法的铺丝路径优化生成算法[J]. 中国机械工程, 2011, 22(16): 1993-1996.

[21] 李静, 杨彩云. 2.5D芳纶机织物的结构设计与织造[J]. 产业用纺织品, 2013(6): 5-8.

[22] 蒋云, 朱建勋, 张建钟, 等. 2.5维编织结构纤维体积分量的数值计算[J]. 纤维复合材料, 2003, 20(2): 7-8.

[23] 王新峰. 机织复合材料多尺度渐进损伤研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.

[24] 董伟锋, 肖军, 李勇, 等. 2.5维编织复合材料弹性性能的理论研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(5): 659-663.

[25] 刘兆麟. 2.5维编织复合材料的细观结构与弹性性能[J]. 纤维复合材料, 2011(3): 3-6.

[26] 季乐, 周光明, 王新峰, 等. 基于Puck准则的2.5D机织复合材料压缩性能研究[J]. 航空计算技术, 2016, 46(1): 23-26.

[27] 刘浩龙. 2.5维机织风扇静子叶片/机匣连接结构静强度分析方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.

- [28] 涂冰怡, 赵明, 商体松, 等. 航空发动机先进结构与关键制造技术[J]. 航空制造技术, 2014, 451(7): 53-56.
- [29] Ferreira Luz F, Amico S C, De L C A, et al. Applying computational analysis in studies of resin transfer moulding[C]//Defect and Diffusion Forum. 2012: 158-163.
- [30] 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(S): 58-62.
- [31] 文友谊, 文琼华, 李帆, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料微波固化技术[J]. 航空制造技术, 2015, 58(S1): 61-64.
- [32] 马仁利, 常新龙, 廖英强, 等. 微波固化碳纤维/环氧树脂复合材料 NOL 环及其力学性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2016, 32(3): 96-101.
- [33] 刘维伟. 航空发动机叶片关键制造技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2016(21): 50-56.
- [34] 徐明. 层合复合材料风扇机匣与叶片连接结构强度分析方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [35] 张忠伟, 魏莲珍, 徐莹. 大直径 C/C 开口弹性密封环的加工技术[J]. 航空制造技术, 2013, 434(14): 57-60.
- [36] 李存尧. 不同材料的静子叶片与机匣典型连接方案的分析评估[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [37] 张和善. 复合材料与未来航空发动机[J]. 航空制造工程, 1995, 9(7): 6-8.
- [38] 梁春华. 纤维增强树脂基复合材料部件在航空涡扇发动机上的应用[J]. 航空制造技术, 2008(4): 32-37.
- [39] 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.
- [40] Naeem M, Singh R, Probert D. Implications of engine deterioration for a high-pressure turbine-blade's low-cycle fatigue (LCF) life-consumption[J]. International Journal of Fatigue, 1999, 21(8): 831-847.
- [41] 李杰. LEAP-X 发动机的创新性技术[J]. 航空科学技术, 2011(4): 12-14.

## RESEARCH PROGRESS OF AEROENGINE COMPOSITE STATOR BLADES

WANG Yi-lin<sup>1,2</sup>, LIU Tian-sheng<sup>1</sup>, LIU Dong<sup>2</sup>, SHI Peng-cheng<sup>2</sup>

(1. College of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Robotics and Intelligent Manufacturing Equipment Technology, Ningbo Institute of Material Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China)

**Abstract:** As a core component of compressor, the stator blades have decisive influence on the performance of aeroengine. Adopting fiber reinforced plastic composites in lightweight engine fabrication plays a key role in realizing weight reduction, large thrust-to-weight ratio and high fuel efficiency. This paper mainly presents the designing process and technical progress of fiber reinforced resin-based composite blades, and then reviews the related research on the manufacturing process of stator blades from three aspects: pre-forming, forming and cutting. In addition, underlining the importance of prophase design in the integrated development of aero-engine cold-end. Finally, by analyzing the successful foreign application of typical composite blades and according to the development trend of current design technology and molding process, the paper highlights the visible position of 2.5D woven composites in the development of aerospace engine stator blades in the future, and prospects for the future development of aero-engine composite stator blades.

**Key words:** stator vanes; fiber reinforced plastic composites; 2.5D braiding; pre-forming; closed molding