

航空发动机复合材料叶片先进制造技术研究进展

俞锐晨, 姜金华, 朱晓锦, 张合生, 高志远*

上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444

摘要 大规模采用复合材料叶片是目前航空工业实现航空发动机更高涵道比和减重的最有效途径。以复合材料航空发动机叶片的制造技术研究进展为主题, 介绍了现阶段树脂基、金属基和陶瓷基复合材料航空发动机叶片的主流加工工艺; 重点讨论了关键制造技术的发展现状和应用情况, 包括树脂基复材叶片的预浸料/模压成型工艺和三维编织结/增强树脂传递模塑成型工艺、金属基复材叶片的模压成型、加压浇铸工艺和超塑成形/扩散连接工艺以及陶瓷基复合材料叶片的熔体渗透工艺; 探讨了航空发动机复合材料叶片的发展趋势, 并提出未来复合材料叶片关键制造技术的研究方向。

关键词 航空发动机; 叶片; 复合材料; 加工工艺; 先进制造

作为复杂薄壁曲面类部件, 航空发动机叶片是航空发动机中非常关键的一类典型零件^[1]。随着现代航空业的发展, 为了满足航空发动机日益苛刻的气动性能要求, 各种叶片的构型越来越复杂, 工况越来越恶劣, 由此, 对于航空发动机叶片的加工制造难度和工艺要求也越来越高^[2]。为了不断提高航空发动机的性能和效率, 尤其是随着发动机涵道比的进一步提高, 目前在新一代战斗机与大型民用客

机的发动机上采用的复合材料构件越来越多, 其中的一个核心部件就是复合材料叶片。由树脂基、金属基和陶瓷基等复合材料制成的复合材料叶片能够在保持甚至超过合金叶片强度和性能的基础上大幅减轻航空发动机的重量, 从而显著提升新一代航空发动机的综合性能^[3]。树脂基复合材料制造的风扇叶片^[4]、金属基复合材料制造的风扇和压气机叶片^[5]、陶瓷基复合材料制造的涡轮叶片^[6], 已经成

收稿日期: 2023-01-08; 修回日期: 2023-02-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(52175101)

作者简介: 俞锐晨, 硕士研究生, 研究方向为复合材料叶片的振动主动监控技术, 电子信箱: shuyrc99@shu.edu.cn; 高志远(通信作者), 副教授, 研究方向为智能材料感知与控制技术, 电子信箱: gaozhiyuan86@shu.edu.cn

引用格式: 俞锐晨, 姜金华, 朱晓锦, 等. 航空发动机复合材料叶片先进制造技术研究进展[J]. 科技导报, 2023, 41(5): 27-33; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2023.05.003

为当下航空发动机减重增推的关键技术手段之一。如何保障各种新型复合材料叶片的可加工性,提供高可靠的加工工艺,保证高性能的制造,是未来进一步提升航空发动机新型复合材料叶片大规模装备应用的前提。

1 复合材料航空发动机叶片的现状

20世纪60年代,英国Rolls-Royce(罗-罗)公司就已经开始对复合材料风扇叶片的研发工作,并准备应用于RB211发动机,但由于未能满足叶片刚度及韧性的要求,导致计划夭折。随着复合材料行业

的高速发展,美国General Electric(GE)公司、英国罗-罗公司、法国SNECMA公司与美国Pratt & Whitney(普惠)公司的复合材料叶片相继问世。目前,复合材料航空发动机叶片国际市场仍被上述国际巨头所垄断。

目前复合材料叶片在国际航空发动机上的主要应用如表1所示。可以看到,树脂基复合材料制造的风扇叶片、金属基复合材料制造的风扇/压气机叶片、陶瓷基复合材料制造的涡轮叶片等复合材料叶片都已经广泛应用在商业航空发动机中。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需要^[7]。

表1 复合材料航空发动机叶片

叶片类型	发动机型号	生产公司	制造工艺	复合材料类型	材料
风扇叶片	GE90	GE	预浸料/模压成型	树脂基	IM7/8551-7
风扇叶片	GE9X	GE	预浸料/模压成型	树脂基	IM7/8551-7
风扇叶片	LEAP-X	SNECMA	3D编织结/RTM成型	树脂基	IM7/PR520
风扇叶片	UltraFan	Rolls-Royce	预浸料丝束/模压成型	树脂基	IM7/M91
风扇叶片	Trent-1000和Trent-	Rolls-Royce和GKN	预浸料丝束/自动铺丝成型	树脂基	IM7/M91
出口导流叶片	XWB F119	P&W	预浸料/模压成型	树脂基	CFRP/AFR700B
出口导流叶片	PW4084和PW3168	P&W	超塑成形/扩散连接	金属基	CFRP/PR500
涡轮转子叶片	GE9X	GE	熔渗/模压成型	陶瓷基	SiC/SiC CMC

随着中国航空工业的高速发展,在航空发动机叶片制造技术上已经取得了诸多的突破,但对于研发与制造高端复合材料叶片产品,在生产成本、研制周期、材料制备、制造技术、适航经验以及适航审定上,目前与世界领先的航空巨头差距依然巨大,严重制约了国内复合材料叶片的大规模应用,降低了与国际市场竞争力。

2 复合材料航空发动机叶片的制造工艺

2.1 树脂基复合材料叶片制造工艺

树脂基复合材料叶片具有高比强度、高比模量、抗疲劳、耐腐蚀等一系列优点,在先进航空发动机上有诸多应用,是当前应用最为广泛的复合材料叶片^[8]。目前树脂基航空发动机复合材料叶片的制

造工艺主要有预浸料/热压罐成型工艺和三维编织/增强树脂传递模塑成型工艺,其中的核心技术是实现叶片厚度的纵横双向连续变化和固化的一次成型^[9-10]。

2.1.1 预浸料/热压罐成型工艺

预浸料/热压罐成型工艺需事先把预浸料下料切割成设计好的形状,然后进行预浸料的铺叠、固化成型。图1展示了GE航空发动机风扇叶片热压罐成型工艺过程。基本操作过程是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,完成所需叶片零件的固化成型。手工铺层使用的复合材料强度和刚度,已发展成熟并具有相当多的商业应用经验。

使用预浸料铺放工艺来制备预制体的难点是

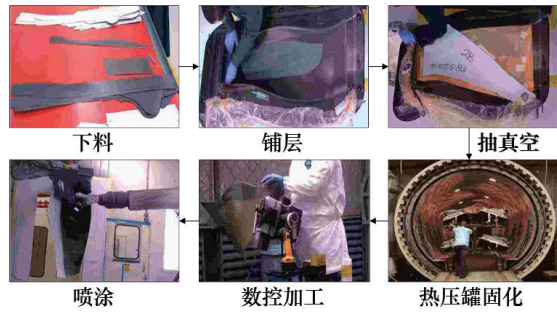


图1 GE航空发动机风扇叶片热压罐成型工艺过程

预浸料的平面-曲面变换裁切、预浸料铺贴精确定位以及预浸料层间的穿刺强化。罗-罗公司为其超扇叶片(UltraFan)设计了自动铺丝和铺带工艺并辅以三维激光测量技术保障精度^[11],如图2所示。该叶片由500层Hexcel公司生产的IM7/M91碳纤维增强高韧性环氧树脂预浸料制成。叶片预制体在自动化纤维束铺放设备上完成制备后,经过热压罐高温高压固化和精密加工处理,而后进行表面涂层处理,并在叶片前缘部位包覆钛合金保护薄片^[12-13]。机器编织目前成本较高,但因其高效、精密和自动化的特点,将成为未来的主要方法。

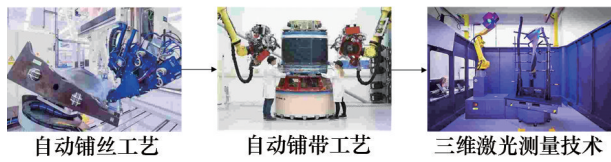


图2 超扇叶片的自动化工艺

2.1.2 三维编织结/增强树脂传递模塑成型工艺

CFM公司采用“3D WOVEN 编织结+增强树脂传递模塑(RTM)成型”制造了Leap-X系列发动机复合材料风扇叶片,其成型过程如图3所示。该叶

片解决了热压罐固化过程中出现的热变形现象,保证了其外形精度,且可以严格控制纤维体积分数^[14-16]。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可设计性。在叶片高压成型前将碳纤维织制成三维机织结构,然后对其进行切割,扭转铺放到模具里,进行RTM工艺成型。在脱模和数控精加工后安装钛合金包边,完成叶片的整体制造。RTM技术可使预制体设计和模塑成型两者独立进行,充分满足航空发动机叶片设计过程中的复杂结构要求。Snecma公司后期进行的耐久性试验表明,应用RTM技术制造叶片不仅降低了重量和成本,也加强了防鸟撞等结构性能。

2.2 金属基复合材料叶片制造工艺

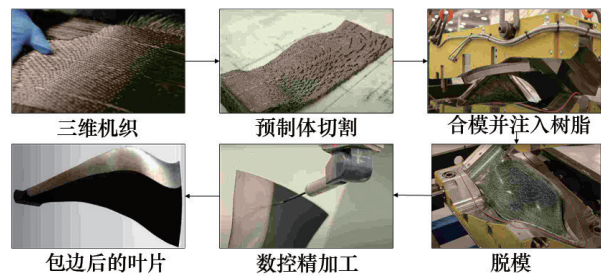


图3 Leap-X发动机复合材料风扇叶片成型工艺过程

金属基复合材料具有优于传统金属材料的比强度、比刚度和结构稳定性,可以按需设计产品性能,实现结构功能的一体化。图4展示了GE公司Al-Li合金基复材叶片的制造工艺,其预制件制备完成后有2种成型方法,分别为模压成型法和加压浇铸法^[17-18]。

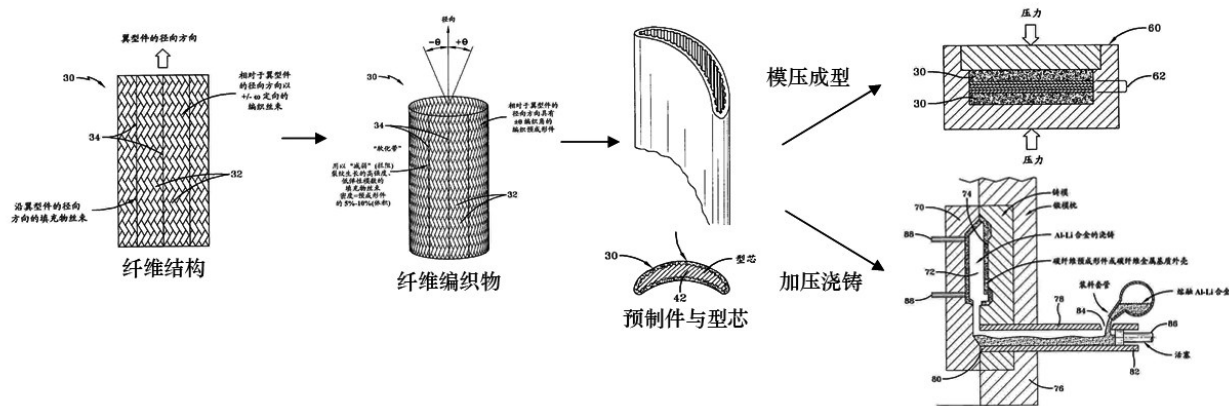


图4 金属基复材叶片的制造工艺

从PW4084发动机开始,普惠公司在风扇出口导流叶片上使用DWA公司生产的挤压态碳化硅颗粒增强变形铝合金基复合材料,并借助超塑成形/扩散连接工艺成功研制了碳化硅纤维增强钛基复合材料空心风扇叶片,如图5所示。其将预制体的两片叶身进行扩散连接形成空腔结构再加热至超塑成形状态扭转成形的工艺可使发动机结构减重

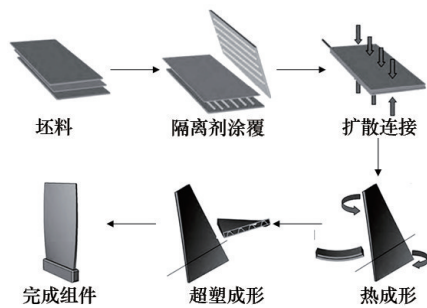


图5 超塑成形/扩散连接制造工艺

14%^[19]。罗-罗公司也成功研制出宽弦空心金属基复合材料风扇叶片。

金属基复合材料已经或将应用于压气机静子叶片、转子叶片、整体叶环等多个部位,但在航空发动机的生产制造上并未实现广泛的推广应用,这主要是因为金属基复合材料制造生产工艺复杂、制造成本高、合格率低。

2.3 陶瓷基复合材料叶片制造工艺

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,目前应用最为广泛的陶瓷基复合材料是碳纤维增韧碳化硅、碳化硅纤维增韧碳化硅^[20]。

GE研发的熔体渗透工艺流程如图6所示^[21]。首先将陶瓷基复合材料基体加热到高温使其熔化成熔体,然后渗入增强物的预制体中,再冷却得到所需的陶瓷基复合材料叶片。

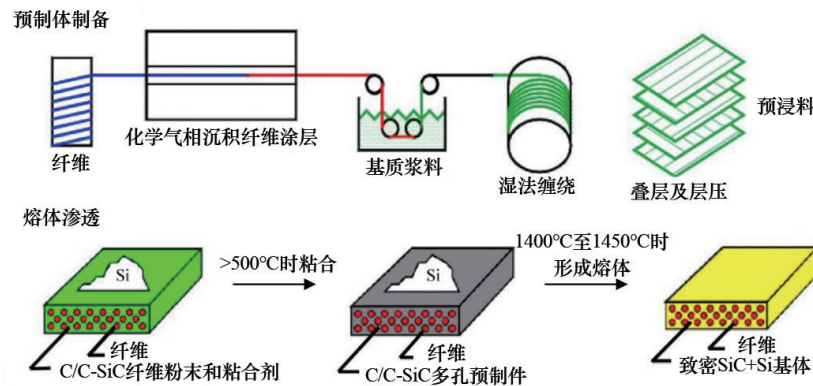


图6 熔体渗透工艺示意

CFM公司的LEAP发动机是第一款采用陶瓷基复合材料组件的商用喷气发动机,其采用18个固定式陶瓷基复合材料涡轮环。GE/Allison公司在XTC77/1上验证了空心连续碳化硅纤维增韧碳化硅陶瓷基复合材料高压涡轮静子叶片。

陶瓷基复合材料叶片具有强大的力学性能和高温性能,但是在持续的高温、高压以及低频振动作业情况下会产生疲劳、损伤等现象,可能导致增韧失效,大大减少其寿命,因此仍然需要发展高效低损伤的加工技术。

3 复合材料航空发动机叶片的发展趋势

目前,风扇叶片、压气机低压级叶片已逐步从钛合金空心叶片向复合材料叶片转变,其中民用大涵道比涡扇发动机已大量使用树脂基复合材料叶片,且复合材料的使用量在不断加大。因此,开发和应用轻质高强耐高温的复合材料成为提升航空发动机减重效率、推重比、燃油经济性的重要手段,也是目前航空发动机叶片的发展趋势。

航空发动机整机的减重效益使得叶片的设计需向更大曲率的方向发展。如图7所示,GE公司在设计同系列复合材料风扇叶片时,将单个叶片的曲率逐步增大,使得发动机能够在保证相同进气性能的同时逐步减小其叶片的数量。GE公司新一代GE9X发动机,使用的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。从GE9X使用的材料可以看出,复合材料叶片的形式有明显的从单一材料向混杂材料转变的趋势^[22]。



图7 GE航空发动机风扇叶片的发展

在叶片的设计和强度校核方面,准确性高、计算速度快的计算机模拟技术有望实现缺陷形成机理模拟及控制、固化过程、变形及控制、压力传递等仿真分析,将模拟技术应用到精确控制过程中可以大幅缩短航空发动机的设计周期^[23-24]。模拟方法可以规避传统工艺流程中的诸多缺点,从3D预制体编织设计到叶片强度分析校核整个过程中的计算部分,都可以通过仿真来实现^[25]。

在制造工艺方面,增材制造技术在单件和小批量复杂结构方面具有快速制造的优势,设计、材料和制造的一体化将是其未来发展的方向^[26]。同时,树脂传递模塑成型工艺、真空灌注成型工艺等液体成型工艺得到了较大发展,随着编织技术的进步,复合材料损伤容限和冲击韧性将不断提高。采用低温固化、低压成型技术以降低固化温度,缩短反应时间,尽可能提高其寿命也是发展大尺寸复合材料构件和复合材料的重要趋势之一^[27-28]。

在叶片健康管理方面,以罗-罗公司的Ultra-Fan发动机为代表的航空发动机生产商正在落实基于数字孪生技术的复合材料叶片全生命周期监

测系统,同时可提供修复与再制造方法^[29-31]。其主要手段是通过嵌入式传感器在线监测全生命周期的复材叶片载荷与结构损伤信息,主动感知其服役过程中的环境变化,大幅提高复合材料结构的安全可靠性。在应对叶片结构健康监测时,除传感器的嵌入之外,将压电材料等复合材料嵌入叶片从而形成感知与控制一体化的智能叶片也是未来的发展趋势^[32-34]。

4 展望

开发和应用轻质高强耐高温的复合材料是提升航空发动机减重效率、推重比、燃油经济性的重要手段,也是航空发动机叶片未来的发展趋势。参考国外复合材料叶片的技术发展现状,国内在航空发动机复合材料叶片的研制上需进一步提升设计、材料、制造、试验技术水平及工程化能力。

1) 健全复合材料体系。目前国外航空发动机复合材料叶片所使用的材料向混杂的方向发展,从而拥有更强的材料性能,国内也需要针对叶片所处的冷端、热端等不同位置建立复合材料体系,整合现有制造资源和能力,解决制造规范不统一,技术储备、设备能力不均衡的问题,实现产品生命周期数据的集成、共享与优化配置,并尽快启动航空发动机复合材料叶片的相关标准修订与制定工作。

2) 制造工艺自动化、数字化。国外的先进自动化工艺能够大大减少人为操作导致的偏差,从而提高生产的稳定性。中国航空制造业要实现弯道超车,势必要将数字化技术融入复合材料设计、制造、加工、检测、服役全过程,从而提升复合材料制造水平,缩小与先进制造技术的差距。

3) 提升技术创新与研发能力。以增材制造技术为代表的一体化高效成型颠覆性技术,在未来有望能够推动中国先进航空发动机复合材料叶片的快速研制,进一步缩小中国与欧美先进叶片制造的技术差距。但目前,这些先进技术还存在诸多严重缺陷,需要进一步开展预研与技术积累。

参考文献 (References)

- [1] Zhang S H, Cheng M, Song H W, et al. Research progress on precision forming technology for complex curved surface components in aerospace[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 52(1): 1-11.
- [2] Huang Y, Li S C, Xiao G J, et al. Research progress of aero-engine blade materials and anti-fatigue grinding technology[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2021, 41(4): 17-35.
- [3] 杨瑞, 齐哲, 杨金华, 等. 氧化物/氧化物陶瓷基复合材料及其制备工艺研究进展[J]. *材料工程*, 2018, 46(12): 1-9.
- [4] 李军, 刘燕峰, 倪洪江, 等. 航空发动机用树脂基复合材料应用进展与发展趋势[J]. *材料工程*, 2022, 50(6): 49-60.
- [5] Bochenek K, Basista M. Advances in processing of NiAl intermetallic alloys and composites for high temperature aerospace applications[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2015, 79: 136-146.
- [6] Boyle R J, Gnanaselvam P, Parikh A H, et al. Design of stress constrained SiC/SiC ceramic matrix composite turbine blades[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the ASME*, 2021, 143(5), doi: 10.1115/1.4049776.
- [7] Zhou H, Li X B, Zhang T, et al. Application progress on manufacturing technology of composite fan blades for aero-engine[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2022, 65(13): 84-91.
- [8] 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.
- [9] Ge J R, Liu Z F, Qiao J W, et al. Research progress on molding processes of fiber preforms and performances simulation of composites for aeronautical complex structures [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2022, 65(16): 14-30.
- [10] Guan L X, Li J L, Jiao Y N, et al. Review of 3D woven preforms for the composite blades of aero engine[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(4): 748-759.
- [11] 韦鑫, 荆云娟, 杨明杰, 等. 航空发动机风扇叶片预成型体研发现状及趋势[J]. *棉纺织技术*, 2020, 48(8): 81-84.
- [12] Gao J, Wu Z B, Kong Y, et al. Design and bird-strike resistance performance research of civil aircraft tail leading edge using different auxiliary spars[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(8): 237-246.
- [13] Mol Kavitha S, Salem S C, Sadiq A. Crashworthiness Enhancement of aluminum alloy used for leading edges of wing and empennage structures[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2022, 35(6), doi: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001477.
- [14] Trofimov A, Le-Pavic J, Ravey C, et al. Multi-scale modeling of distortion in the non-flat 3D woven composite part manufactured using resin transfer molding[J]. *Composites Part A—Applied Science and Manufacturing*, 2021, 140: 106145.
- [15] Xiao Y, Xu J B, Wang M, et al. Multiscale model of the rtm process: From mesoscale anisotropic permeability of woven structures to macroscale resin impregnation[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2021, 60(22): 8269-8279.
- [16] Zhu C, Wu N, Zhang Y F, et al. Tensile properties and failure mechanism of three-dimensional angle interlocking woven layup composites under tensile loading[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(7): 3167-3177.
- [17] Kirby G H. Formation of ceramic matrix composite used for gas turbine Engine, involves introducing carbon yielding resin into open pore channels, heating melt infiltrated and melt extracted preform to produce elemental carbon and heating: 2018194690[P/OL]. [2022-12-01]. <https://www.webofscience.com/wos/alldb/full-record/DIIDW:201855484V>.
- [18] Manicke P S, Walker B E, Ronk W R. Producing ceramic composite structure, useful as article including blade for gas turbine engine assembly, comprises providing reinforcing material and precursor slurry composition, impregnating the material with the composition, and drying: 2011150663[P/OL]. [2022-12-01]. <https://www.webofscience.com/wos/alldb/full-record/DIIDW:2011H201-41>.
- [19] 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.
- [20] 杨金华, 董禹飞, 杨瑞, 等. 航空发动机用陶瓷基复合材料研究进展[J]. *航空动力*, 2021(5): 56-59.
- [21] Luo X, Xu Y L, Guo X J, et al. Research progress of ceramic matrix composites turbine rotors for turbine engines[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(1): 230-240.
- [22] 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.
- [23] Dhimole V K, Chen Y, Serrao P, et al. A design feasibility

- ity study of a turbine blade disc interface (dovetail) made by four-directional braided ceramic matrix composite (SiC/SiC)[J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2022, 23(1): 66–76.
- [24] Xiang R J, Pan Z Z, Ouyang H, et al. A study of the vibration and lay-up optimization of rotating crossply laminated nanocomposite blades[J]. *Composite Structures*, 2020, 235: 111775.
- [25] 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.
- [26] Li D C, Lu Z L, Tian X Y, et al. Additive manufacturing—Revolutionary technology for leading aerospace manufacturing[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(4): 525387.
- [27] 唐天姿, 刘宁, 郭亚林. 中低温固化环氧复合材料研究进展[J]. *航天制造技术*, 2021(3): 73–78.
- [28] 许皓, 欧秋仁, 张帅, 等. 低温固化非热压罐成型树脂及其复合材料性能[J]. *宇航材料工艺*, 2021, 51(1): 50–54.
- [29] Ghorbani H, Khameneifar F. Construction of damage-free digital twin of damaged aero-engine blades for repair volume generation in remanufacturing[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2022, 77: 102335.
- [30] Miller D, Kemnitz R, Grandhi R, et al. Toward digital twin development for additively manufactured turbine blades with experimental and analytical methods[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2022, 65(8): 227.
- [31] Zhou Y, Xing T, Song Y, et al. Digital-twin-driven geometric optimization of centrifugal impeller with free-form blades for five-axis flank milling[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 58(suppl 1): 22–35.
- [32] Chen Y, Jin L, Tang X, et al. Dynamic response of a composite fan blade excited instantaneously by multiple mfc actuators[J]. *Aerospace*, 2022, 9(6): 301.
- [33] Zhang F L, Li L, Fan Y, et al. Dual-connected synchronized switch damping for vibration control of bladed disks in aero-engines[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(4): 1478.
- [34] Zhou B, Ke H W, Chen X, et al. Aero-engine blade vibration suppression method based on piezoelectric shunt damping technique[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(1): 209–215.

Research progress of advanced manufacturing technology for aero-engine composite blades

YU Ruichen, JIANG Jinhua, ZHU Xiaojin, ZHANG Hesheng, GAO Zhiyuan*

School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract Large-scale adoption of composite blades is the most effective way to achieve ultra-high bypass ratio and low weight of aero-engine in the aerospace industry. The research progress in the manufacturing technology for resin matrix, metal matrix, and ceramic matrix composite blades is discussed in this paper. The development and application situation of the common processing technology and key manufacturing technology of aero-engine composite blades are reviewed in detail, including prepreg/molding process and three-dimensional braided/reinforced resin transfer molding process of resin matrix composite blades, molding process, pressure casting process and superplastic forming/diffusion bonding process of metal matrix composite blades, and melt infiltration process of ceramic matrix composite blades. Finally, the trend of aero-engine composite blades is discussed and the research direction to further develop key manufacturing technology of composite blades is summarized.

Keywords aero-engine; blade; composite material; processing technology; advanced manufacturing ●



(责任编辑 卫夏雯)