

引用格式: 沈尔明, 李晓欣, 王刚, 等. 先进复合材料在国外航空发动机应用与发展[J]. 航空材料学报, 2026, 46(2): 1-12.
SHEN Erming, LI Xiaoxin, WANG Gang, et al. Application and development of advanced composite materials in foreign aeroengines[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2026, 46(2): 1-12.

先进复合材料在国外航空发动机应用与发展

沈尔明*, 李晓欣, 王刚, 陈晓龙, 胡鹏

(中国航发沈阳发动机研究所 材料工艺技术研究部, 沈阳 110015)

摘要: 先进复合材料在航空发动机中的应用已成为提高发动机性能、减轻质量、提高燃油效率的关键技术之一。本文综述先进复合材料在国外航空涡扇发动机上应用现状与发展, 重点介绍环氧树脂、聚酰亚胺等树脂基复合材料 (polymer matrix composite, PMC)、钛合金、铝合金等金属基复合材料 (metal matrix composite, MMC) 和碳化硅、氧化铝等陶瓷基复合材料 (ceramic matrix composite, CMC) 在风扇机匣、低压压气机、高压压气机、高压涡轮、低压涡轮和喷管等发动机部件的应用。通过分析国外航空发动机在树脂基、金属基和陶瓷基复合材料的应用和研发进展, 探讨其在提高推重比和耐温性能等方面的优势。同时, 还展望未来各类复合材料在航空发动机中的发展方向, 包括新型复合材料的研发、制造工艺的优化以及各类复合材料在未来航空发动机中的潜在应用和发展趋势。

关键词: 先进复合材料; 航空发动机; 树脂基复合材料; 金属基复合材料; 陶瓷基复合材料

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2025.000041

CSTR: 32420.14.j.issn.1005-5053.2025.000041

中图分类号: V258

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2026)02-0001-12

Application and development of advanced composite materials in foreign aeroengines

SHEN Erming*, LI Xiaoxin, WANG Gang, CHEN Xiaolong, HU Peng

(Materials & Processing Technology Research Department, AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: The application of advanced composite materials in aeroengines has become one of the key technologies for improving engine performance, reducing mass and enhancing fuel efficiency. This article reviews the current status and development of advanced composite materials in foreign aero-turbofan engines, with a focus on the application of polymer composite PMC materials such as epoxy resin and polyimide, metal matrix composite MMC materials such as titanium alloy and aluminum alloy, and ceramic matrix composite (CMC) such as silicon carbide and aluminum oxide in engine components such as fan casings, low-pressure compressors, high-pressure compressors, high-pressure turbines, low-pressure turbines and nozzles. By analyzing the application and research and development progress of foreign aircraft engines in matrix, metal matrix and ceramic matrix composite, this paper explores their advantages in improving thrust to mass ratio and temperature resistance performance. At the same time, this article also looks forward to the future development direction of various composite materials in aeroengines, including the research and development of new composite materials, optimization of manufacturing processes, and potential applications and development trends of various composite materials in future aeroengines.

Key words: advanced composite material; aeroengine; polymer matrix composite; metal matrix composite; ceramic matrix composite

航空发动机作为现代航空飞行器的“心脏”, 是决定飞机整体性能、安全水平和商业竞争力的核心动力装置。其综合性能不仅直接关乎飞机的飞行安全、运行可靠性和全生命周期维护成本, 更在

宏观层面深刻影响着航空公司的运营效率、民航业的经济效益乃至国家航空工业的战略地位。随着全球航空运输量的持续增长以及环境保护法规的日益严格, 航空工业正朝着更高效率、更低油耗、

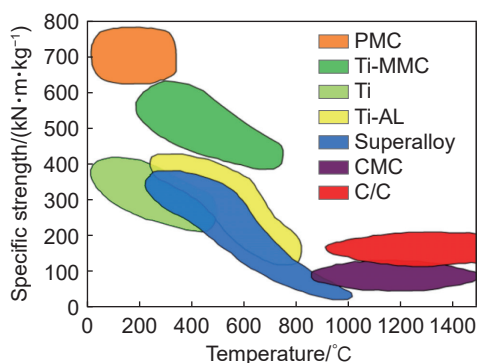


图2 复合材料和金属比强度和耐温能力

Fig. 2 Specific strength and temperature resistance of composites and metals

等特点,能够实现整体成型,在减轻结构质量的同时还能减少零件数量,进而实现整机大幅减重,提高推重比,是实现航空发动机减重设计和一体化制造的理想材料。采用树脂基复合材料制造零部件,较金属零部件可减重 20%~50%,降低成本 15% 以上^[11-12]。

2.1 环氧树脂基复合材料

2.1.1 转子叶片

转子叶片是发动机重要零件之一,它直接影响发动机的气动性能、可靠性、推重比和制造成本。转子叶片中尺寸较大的是大涵道比发动机用风扇转子叶片,该叶片在承受较高的离心载荷、气动负荷、大气温差负荷及振动交变载荷影响的同时,还要受到沙石、冰雹、飞鸟等冲击,以及大气等环境侵蚀^[13]。早期的风扇单元体为了提高空气的进气流量,增大风扇进气面积,增加风扇转子叶片的长度,但为了减少共振或颤振的风险,采用带减振凸肩的金属叶片。由于凸肩的存在,叶片增重,进而增加叶片离心负荷,同时叶身与凸肩连接处的加厚区使流道面积减少 2%,影响发动机的推力;凸肩还造成气流压力损失,降低压气机效率,增加发动机油耗,加大叶片制造难度^[14-16]。

风扇转子叶片的设计要求主要包括在软物撞击(鸟撞击等)试验后保持叶型,对高循环疲劳(硬物撞击)不敏感,在叶片脱落中对相邻叶片损伤最小,两次维修之间的平均时间间隔较长,为提高安全裕度需要完全包容,叶片具有可重复的加工性和尺寸稳定性,叶片能单独管理和维护等。为了满足以上设计要求,GEAE 公司采用碳纤维增强增韧环氧树脂复合材料制造风扇转子叶片,在降低叶片质量的同时,提高风扇进气效率,实现复合材料在大涵道比涡扇发动机转动部件上的应用^[17]。

GE90-94B 发动机风扇叶片采用 Hexcel 公司

的 8551-7 高强度增韧改性环氧树脂作为基体材料,用 IM7 碳纤维作为增强体,采用铺层工艺热压罐固化成型。为了提高叶片抗大鸟撞击的能力,将钛合金黏结在叶片边缘,这种结构在分散外物撞击能量的同时,还可以防止复合材料叶片在高速旋转时发生分层^[18-20]。

相对于钛合金叶片在受力情况下会出现裂纹扩展而威胁叶片使用安全的问题,复合材料叶片由于碳纤维的铺层结构增强强度,即使出现大缺口也不会出现裂纹快速扩展。同时大尺寸复合材料叶片受到外来物撞击时,能在弹性变形下将撞击在叶身上的能量重新分布并吸收,具有较强的抗外物打伤能力。由于树脂基复合材料具有耐腐蚀、耐疲劳等特点,复合材料叶片在使用中可以降低维护成本。另外,复合材料叶片还在抗振颤等方面优于钛合金叶片,更利于制造大涵道比发动机用大尺寸风扇转子叶片,进而达到降低飞机油耗和提高发动机效率的目的。随着树脂基复合材料在 GEAE 公司风扇转子叶片的广泛应用,兴起了全世界大涵道比发动机风扇转子叶片复材化的热潮,法国 SAFRAN 公司和英国 R&R 公司也都陆续采用树脂基复合材料制造新发动机的风扇转子叶片。

GENx 和 GE9X 发动机风扇转子叶片采用与 GE90-115B 发动机类似的 3D 后掠结构设计,GENx 发动机叶片数量减少到 18 片,GE9X 发动机则进一步将叶片数量减少为 16 片^[21-23]。

随着 GEAE 公司复合材料叶片在民用宽体客机的广泛使用,法国 SAFRAN 公司也实现了大涵道比中推力风扇叶片的复合材料制造,并成功应用于 LEAP-X 发动机。SAFRAN 公司将三维碳纤维编织成叶片的平面结构,再采用树脂传递模塑成型(resin transfer moulding, RTM)工艺制造风扇转子叶片。LEAP-X 发动机风扇转子叶片成为世界上首个通过外来物撞击试验的中小推力涡扇发动机用复合材料风扇转子叶片。三维编织复合材料具有非常优异的层间强度,能够提升叶片的损伤容限与抗外物打击能力^[24-26]。

20 世纪 60 年代,Rolls-Royce(R&R)公司设计的碳纤维复合材料风扇叶片在 Conway 发动机上得到验证。但是,将这种复合材料叶片用于 RB211 发动机风扇叶片设计时没有通过抗鸟撞试验。21 世纪以来,随着复合材料风扇转子叶片技术的发展,R&R 公司也重新开始研制碳纤维增强复合材料风扇转子叶片。该公司与 GKN 公司共同开发碳纤维风扇转子叶片用于新发动机 Ultrafan 的研发。

采用碳纤维复合材料叶片后,风扇系统预计可使得每架飞机减轻近 700 kg,相当于减轻了 7 名乘客及其

行李的质量^[27-30]。国外航空发动机用复合材料风扇转子叶片的研制及应用情况如表 1 所示^[31-33]。

表 1 国外航空发动机用复合材料风扇转子叶片^[31-33]
Table 1 Rotor blades of composite fans used in foreign aero engines^[31-33]

Aero engine	Company	Edging material	Assembling aircraft	Number of blades/piece	Diameter/cm	Blade quality/kg	Type of material	Manufacturing process	Time of first use
GE90-94B	GE	TC4	B777-200, A330	22	312	15.80	IM7/8551-7	Autoclave forming	1995
GE90-115B	GE	TC4	B777-300ER, A330	22	325	21.18	IM7/8551-7	Autoclave forming	2002
GENx	GE	TC4	B787	18	264		IM7/8551-7	Autoclave forming	2008
GE9X	GE	Steel	B777-8X/9X	16	335		IM7/8551-7	Autoclave forming	2018
LEAP-X	CFMI	TC4	C919, B737 max, A320neo	18	180	4.23	IM7/PR520	3D weave/ RTM	2016
UltraFan	R&R	TC4		18	300		IM7/M91	Autoclave forming	

2.1.2 静子叶片

大涵道比涡扇发动机外涵静子叶片是航空发动机中最大的静子叶片,静子叶片一般承受载荷较低,起到调整气流的作用。外涵导流静子数量较多,出于减重考虑和损伤后对发动机本机结构影响较小,成为世界各大发动机公司采用复合材料制造的首选结构。

Pratt & Whitney (P&W)公司已经将树脂基复合材料应用于外涵静子叶片。P&W公司采用Dow-UT公司研发的RTM工艺制造外涵静子组件,该组件包含44片静子叶片,其中每4片一组成型,再由内外环将11块4联叶片连成一体。P&W公司采用这一方法制造PW4084直径为3.04 m的外涵静子叶片环、PW4168直径为2.71 m的外涵静子叶片环。PW4084和PW4168发动机压气机采用3M公司的PR500环氧树脂基复合材料风扇静子叶片,较钛合金减重39%,成本降低38%^[34]。

2.1.3 风扇机匣

当叶片在高速旋转过程中异常脱落时,风扇机匣能阻止叶片碎片高能冲击,避免事故发生。早期发动机采用17-4PH不锈钢等高强高韧的金属材料制造风扇机匣,机匣最大质量超过300 kg。随着高性能芳纶纤维的研发,该纤维具有优异的断裂伸长率和抗冲击性能,成为新一代风扇包容机匣设计的优选材料,GEAE公司的CF6-80C2发动机最先将芳纶纤维应用于这种风扇包容结构,这种带有环氧树脂基芳纶纤维复合材料包容结构的风扇机匣在保证包容性能的同时,减重50%。GEAE公司的GE90、CF34发动机,R&R公司Trent700、BR710等发动机,P&W公司的GP7200发动机都相继采用

类似结构。

由于复合材料叶片在脱落后撞击机匣时会分裂成更小的碎片,不会像金属叶片那样产生大块坚硬且具有高穿透能量的金属薄片,从而更有利于风扇结构的包容能力。GEAE公司随后研发的GENx发动机同时采用复合材料风扇叶片和全复合材料风扇机匣,在利用复合材料减重优势的同时,包容效率提高约30%。GENx发动机采用复合材料叶片和复合材料风扇机匣后,风扇部件的质量总体降低185 kg。GENx发动机的燃油效率相应提升了15%,二氧化碳排放同时减少了15%。如果一家航空公司将机队中20架载客量为200~300人的飞机换成由GENx发动机为动力的新一代飞机,航空燃油成本将大幅降低^[35-37]。

2.1.4 声衬

为了降低航空发动机的噪声,世界各航空发动机公司都开发了复合声衬,已经应用在JT3D、CFM56系列、GE90、PW4084、Trent800等现役大涵道比涡扇发动机上,并应用在涡扇发动机的风扇机匣、中介机匣、短舱、反推装置和燃烧室外壁,收到很好的降低噪声效果,可有效吸收风扇叶片旋转、燃烧噪声。

JT3D发动机在不改变发动机主流道结构的前提下,通过在进气道内壁布置降噪声衬的方式降低发动机的前向噪声。该声衬的外侧表面选用0.5 mm厚的铝合金薄板,加工消音群孔,孔径 $\phi 1.6$ mm,面板穿孔率达32%,内侧表面则为玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料,芯材采用的是NOMEX纸蜂窝,蒙皮和芯材采用胶黏剂胶接而成^[38]。

CFM56-3发动机的消音结构采用Kevlar芳纶

纤维增强环氧树脂复合材料层压板制造。V2500 发动机短舱内采用复合材料消音板,并研制具有 Nomex 蜂窝材料夹芯结构的消声衬板。GEnx 发动机的前风扇机匣内有整体式的降噪结构,同样采用复合材料面板的 Nomex 蜂窝材料夹芯结构。

2.1.5 风扇帽罩

风扇帽罩安装在航空发动机的最前端,承受载荷较小,采用复合材料可以减重和简化防冰结构。R&R 公司 RB211 发动机、P&W 公司 PW1000G、PW4000 发动机都采用树脂基复合材料制造风扇帽罩前锥。美国 P&W 公司首先在 JT9D 发动机上使用玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料制备风扇帽罩前锥。为了进一步提高抗冲击性能,采用芳纤增强环氧树脂复合材料制备 JT9D-TR4 发动机风扇帽罩前锥^[39]。

2.1.6 反推装置

树脂基复合材料在反推装置上也具有较多的应用部位,国外厂商已经在反推装置壳体、阻流门和叶栅等部位大规模使用树脂基复合材料,由于工作温度较低,大多采用碳纤维增强环氧树脂基复合材料制造^[40]。

2.2 聚酰亚胺基复合材料

2.2.1 外涵机匣

聚酰亚胺树脂是一类耐高温树脂,聚酰亚胺基复合材料在发动机上应用最广泛的结构是外涵机匣。BR710、BR715 和 Pearl-15 等航空发动机的外涵机匣均采用聚酰亚胺基复合材料^[41]。

外涵机匣的设计要求主要包括满足使用温度范围、最大工作压力、最大弯曲刚度、最大工作载荷,具有耐介质老化、热氧化稳定性和抗腐蚀能力,满足连接处载荷要求、发动机轴卡滞载荷要求、核心机维修要求,潮湿条件下能够完成最大发动机温度循环,连接处强度高于紧固件,能够抵抗制造工作中工具或吊链掉落的冲击力,在不弯曲变形条件下能承受一定的压力裕度等。

2.2.2 高压压气机静子叶片衬套

为了避免喘振的发生,高压压气机的静子叶片需要设计成可旋转结构。采用可调节角度叶片安装结构可以减少发动机在飞机高速机动飞行中出现喘振停车。为了减少叶片角度调节时的摩擦阻力,在静子叶片与机匣和内环块之间需要加装衬套零件保证叶片扭转时的金属间对磨损耗。

高压压气机可调叶片衬套装配在高压压气机机匣上,对可调叶片转动起到自润滑作用。衬套材料在高温下要满足自润滑和适中的耐磨损性,不能

磨损叶片与机匣。聚酰亚胺具有高温自润滑性,填充石墨的聚酰亚胺具有更高的耐温稳定性和更好的润滑性能,以及与金属材料相近的热膨胀匹配性,制备出的衬套零件具有良好的高温尺寸稳定性、较低的摩擦因数和耐老化性能。由于聚酰亚胺优异的力学性能,欧美航空发动机公司广泛应用多种成分和多种结构的聚酰亚胺复合材料衬套,虽然单个衬套的零件尺寸较小、质量较轻,但单台发动机的衬套用量达到几百件,相比于铜合金衬套也能够达到较好的减重效果^[42]。

2.3 热塑性复合材料

热塑性复合材料一直在发动机上有所应用,CFM56 系列发动机采用短切玻璃纤维增强聚酰亚胺 Ultem2410 制造中介机匣用作防护盖板,采用聚醚醚酮(PEEK)制造外涵静子叶片减振零件。PW2000 和 PW4000 发动机的风扇外涵静子叶片的内外环和低压压气机的内环采用注射成形的 Ultem 系列材料^[43]。

为了减轻发动机质量,国外发动机公司大量采用各种树脂基复合材料代替钛合金制造发动机用零件,材料比重从 4.4 降低到 1.6 左右,提高发动机的推重比,但受到树脂材料耐温能力的限制,树脂基复合材料主要应用在低温零件中,其中环氧树脂基复合材料主要用于帽罩前锥、进气机匣、风扇转子叶片、风扇静子叶片、声衬等短期耐温不超过 150 °C 的零件。聚酰亚胺基复合材料主要用于高压压气机静子叶片衬套、油气封严座和外涵机匣等耐温超过 150 °C 但不高于 400 °C 的零件。热塑性复合材料主要用于制造受力较小、耐温较低的非重要零件,用于降低发动机的整体制造成本。

3 金属基复合材料

金属基复合材料与树脂基复合材料相比,具有良好的韧性、不吸潮和耐高温等特点;与陶瓷基复合材料相比,具有优良的韧性和抗冲击性。金属基复合材料是唯一具有固有延展性的强基体复合材料,在航空发动机上应用最多的主要是钛基、铝基和镍基复合材料。金属基复合材料具有高比强度和高比模量,尤其是纤维增强的金属基复合材料在其纤维方向上具有很高的强度和模量,还具有良好的导电性和导热性、热膨胀系数小、耐磨损、尺寸稳定性高、易于加工和二次成形的特点,能够提高发动机中温段和高温段部件的屈服强度、疲劳寿命、拉压强度、高温蠕变性能,并减少构件的质量,

提高发动机推重比^[44]。

3.1 钛基复合材料

20世纪90年代初,在The Integrated High Performance Turbine Technology Program(IHPTET)研究计划下,AADC公司设计碳化硅纤维增强钛基复合材料,用于制造XTC-16系列核心机的第3级和第4级压气机整体叶环,不仅能够满足所有性能要求,还使整台发动机的造价节省5万美元,被誉为航空发动机设计的革命性突破。IHPTET研究计划第2阶段高压压气机采用高温钛合金Ti1100的整体叶环,将压气机的耐热温度提高到700~800℃,结构质量减轻50%,提高阻燃性能。R&R公司制备的整体叶环采用SiC/Ti复合材料后叶环减重37%,工作温度提高10%,转速提高15%。

德国宇航中心开发了磁控溅射沉积法制备SiC/Ti复合材料工艺,制备空心叶片和叶环试验件,并进行缩比叶环试验件的超转破坏试验,完成低循环疲劳旋转试验。SNECMA公司采用基体涂覆纤维工艺制造碳化硅纤维增强Ti-MMC压气机整体叶环插件^[45-46]。

3.2 铝基复合材料

国外对纤维增强铝基复合材料及构件的研制起步较早,出现了纤维增强发动机风扇(转子)叶片和颗粒增强铝基复合材料风扇出口导流(静子)叶片两种发动机风扇叶片。纤维增强铝基复合材料存在明显的各向异性,沿纤维方向具有优异的强度、模量和抗疲劳性能,但韧性差,与纤维垂直方向的力学性能相对较低。美国P&W公司将碳纤维增强铝复合材料用于研制JT8D一级风扇叶片,并通过验证。

英国R&R公司于2000年提出了铝基复合材料在航空发动机上潜在的应用部位是压气机前几级风扇导流结构,主要包括环形垫板、风扇叶片、静子叶片、压气机机匣等。DWA公司采用热挤压方法研制成功6092/SiC/17.5p空心片状型材,制成风扇出口导流叶片,已相继应用于PW4084、4090、4098系列发动机;截至2001年,该叶片生产已超过10000片。装有该叶片的发动机已用于B777飞机,P&W公司也将该叶片用于推力达400000N级的所有发动机。采用该叶片替代树脂基复合材料,可将侵蚀速率减小到原来的1/7,并大大增强对外来物(如冰雹)的抗击伤能力;同时服役寿命提高3倍,减少维护和修理费用。根据估算,自1996年到2001年已实现节约费用超过1亿美元。但现有的颗粒增强铝基复合材料抗高应力疲劳能

力较差,目前尚不能应用于转子叶片^[47-51]。

3.3 镍基复合材料

发动机高温叶片和机匣间采用带润滑功能的耐高温材料制造衬套零件,有利于高温下叶片调节角度。由于传统的石墨、聚四氟乙烯、MoS₂等单一组分的固体润滑材料使用的温度范围有限,在温度高于400℃时逐步失去润滑作用。因此,美国NASA格林研究中心开发出一系列宽温域镍基自润滑复合材料,材料牌号包括PS200、PS300、PS304、PS400、PM212、PM300和PM304等。这些复合材料以Ag/BaF₂-CaF₂共晶为润滑相,在室温至650℃范围内具有较低的摩擦因数^[52-60]。

目前,金属基复合材料压气机静子叶片、转子叶片、整体叶环、盘、轴、机匣、尾部结构和作动杆等零部件已经开展试验验证。金属基复合材料在航空发动机上有广泛的应用前景,国外研究较早,尽管有少量产品已成功用于发动机上,但多数金属基复合材料至今仍属于实验验证阶段,还未广泛实际应用,尤其转子部件,主要原因是目前金属基复合材料制备工艺复杂、成本昂贵、界面稳定性难以控制、性能波动大、稳定性相对较低、缺乏实用经验等^[61]。

4 陶瓷基复合材料

陶瓷基复合材料具有陶瓷耐高温和氧化的特性,同时通过纤维增韧提高材料抗裂性,可满足热端部件在高温条件下的使用要求,已经成为航空燃气涡轮发动机热端部件最有应用前景的材料。陶瓷基复合材料密度约为2.3 g/cm³,仅为传统高温合金的1/3~1/4,耐高温能力可达1350℃,代替传统高温合金在减轻结构质量的同时,还能减少高温零件所需的冷却气流,提高发动机性能、降低油耗、减少污染物排放^[62-63]。

4.1 碳化硅基复合材料

4.1.1 涡轮工作叶片

熔渗工艺制造的SiC/SiC复合材料低压涡轮工作叶片已经在发动机上进行运转试验,部分叶片表面喷涂环境障涂层。GEAE公司的验证发动机在模拟大推力发动机运行压力下进行了500次耐久循环。在耐久测试结束后,发现SiC/SiC叶片完全承受住高压测试。这种叶片无需冷却,而且质量仅仅是镍合金叶片的1/3。

4.1.2 涡轮导向叶片

2008年,Herakles公司设计和制造用于CMC

低压涡轮导向叶片(Cerasedp A40C材料)。GE9X发动机的高压涡轮1、2级导向叶片也采用CMC制造,目前已经得到批产使用。

NASA研究中心开发一种带有环境障涂层的SiC/SiC涡轮导向叶片。该导向叶片放置于高压燃气试验台测试,包括50h的静态测试和102次热循环测试(每2min),环境温度从940~1440℃到900~1050℃范围进行高低温循环,环境障涂层表面温度达到1300℃。GEAE公司采用料浆浇注法熔体渗透制备SiC_f/SiC复合材料涡轮导向器叶片,在高压燃气试验台进行测试,先在1315℃测试6h后,继续在1352~482℃区间内进行100次热循环测试(每2min),测试结果满足要求^[64-67]。

4.1.3 涡轮外环扇形块

2016年,CFM公司Leap-X发动机的陶瓷基复合材料高压涡轮外环采用预浸料-熔渗工艺制造,每台发动机使用18个涡轮外环块,外环流道面制备环境障涂层。Hyper-Therm公司研制的SiC/SiC复合材料涡轮外环在R&R公司的Advance及Ultra-fan等新型发动机中开展应用验证。GEAE公司的GE9X发动机上高压涡轮1级机匣外环采用SiC/SiC复合材料制造^[68-69]。

4.1.4 密封片

P&W公司选取3种不同的材料体系进行CMC复合材料密封片的考核验证,即S200(SiC/SiCN)、Cerasedp A410和Sepcarbinox A500,其中A410和A500密封片采用多层编制结构和自愈陶瓷基体,A410采用二代SiC纤维作为增强体。在地面持久试车过程中,A500密封片累计经过11161个战术飞行周期,即5000h发动机飞行时间,其中包括176h加力飞行时间,这远远高于现在金属密封片全寿命周期的4300个战术飞行周期。在地面试车后,A410和A500密封片均没有产生分层和磨损,而S200密封片在地面试车后便出现表面分层。后续的剩余强度分析测试表明,A410密封片强度几乎没有下降,A500密封片仅有6%的强度下降,A500密封片安装在飞机上进行飞行试验验证。飞行累计1000h没有出现损伤。因此,A500密封片被美国空军认为是经历飞行试验考核最成功的CMC构件^[70-73]。

4.1.5 尾喷口混合器

SNECMA公司设计和制备一种用于CFM56-5C发动机的CMC混合器。该混合器由Cerasedp A40C材料制备,相比镍基高温合金减重30%,2007年进行地面试车,经过700次发动机循环测试,该

混合器未出现损伤^[74]。

4.1.6 燃烧室

法国SNECMA公司积极开发SiC_f/SiC燃烧室火焰筒。该公司研制的SiC_f/SiC燃烧室衬套已经通过180h发动机测试(600次循环,最大状态100h);研制的火焰稳定器也已通过1180℃、143h的测试^[75-80]。

GEAE公司的GE9X发动机采用第三代TAPS燃烧室,其内外火焰筒均由SiC_f/SiC制成,火焰筒采用CMC后,不仅质量轻,而且可减少冷却火焰筒的空气量,使进入混合器的空气量更多,形成贫油燃烧,其污染物排放量远低于2020年后生效的航空环境保护委员会CAEP/8环保标准规定的要求。除了火焰筒,CMC还用于GE9X高压涡轮1、2级导流叶片与1级机匣内衬环,GE9X成为世界上目前采用CMC零组件最多的商用发动机^[81-84]。

4.2 氧化铝基复合材料

Boeing公司采用由Nextel-610氧化铝纤维增强硅酸铝基复合材料制造发动机喷管及尾锥部件,其中喷管与发动机连接部分的直径为1.6m,尾锥部件的长度为2.3m。这些组件针对R&R公司的Trent 1000发动机设计,并在Boeing 787客机上进行飞行测试。

R&R公司也在推进陶瓷基复合材料在发动机尾喷管中的应用。Nextel-610氧化铝纤维增强硅酸铝基复合材料制成发动机混合喷管。制造的缩比件提供给NASA Glenn研究中心进行性能测试,技术水平达到TRL-4级^[85-89]。

陶瓷基复合材料是目前复合材料应用领域比较热的材料之一,由于陶瓷基复合材料密度远低于高温合金,甚至低于高温合金密度的1/3,减重潜力较大,因而是国外航空发动机行业最近30年来大力发展的复合材料。目前陶瓷基复合材料主要应用于航空发动机800~1200℃之间耐高温零件上,包括涡轮导向叶片、涡轮外环扇形块、密封片、尾喷口混合器、燃烧室、混合器喷管等静子零件,以及涡轮工作叶片等转动零件,并有逐步全面替代高温合金的发展趋势,主要应用情况见表2。

5 结束语

材料是航空发动机重要的物质基础,先进航空发动机的跨代发展得益于先进材料的技术进步和发展。材料性能的提升是实现航空发动机涡轮前温度、单位推力、推重比、耗油率、可靠性和使用寿命

表2 国外陶瓷基复合材料应用情况
Table 2 CMCs used in foreign aero-engines

Classification	Part	Composite/Process
Medium temperature and medium load	Nozzle (CFM 56)	SiC _f /SiC CVI (Herakles)
High temperature medium load	Turbine outer ring (LEAP-X)	SiC _f /SiC MI (GE)
	Combustion chamber, high pressure turbine first and second stage guide vanes (GE9X), combustion chamber (Solar Turbine)	SiC _f /SiC MI (GE) SiC _f /SiC CVI (Dopunt, ACI); SiC _f /SiC CVI+MI (Goodrich); SiC _f /SiC MI (GE); Ox/Ox+FGI (COI)
High temperature high load	Static and rotating parts (Adaptive Cycle Engine)	SiC _f /SiC MI (GE)

命等主要技术指标的重要基础,航空发动机设计和制造的先进性很大程度上取决于航空材料和工艺的技术发展。每一代发动机所用的材料也体现该时代材料发展的特点,未来航空发动机的发展将更加依赖新材料的发展。

航空发动机经过70多年的发展,推重比、单位推力等指标得到了大幅提高,并沿着高可靠性、低成本等方向发展。提升推重比、单位推力等指标的重要途径之一是降低发动机质量。在满足结构强度和发动机性能的同时,采用各种复合材料的轻质材料是航空发动机发展的必经之路。

未来大推力涡扇发动机仍是航空发动机的主要动力形式,使用空间和速域范围不断扩展,对新材料的需求不断提升。发动机空域速域的拓展,使进口温度和沿程温度逐步提高。航空发动机飞行包线拓展,不断追求更高性能,对新材料的要求也不断提高。从发动机典型冷端部件和热端部件使用温度看,呈现冷端部件热端化、热端部件高温化的特点。尤其是热端部件对陶瓷基复合材料的温度需求已达到1300℃,冷端部件对树脂基复合材料温度需求也达到400℃以上。因此,未来航空发动机的发展对耐高温材料的需求尤为迫切,也面临极大的挑战。

随着航空发动机综合性能的不断提高,在满足大推力、低油耗、高推重比的同时还要具备抗鸟击、防结冰和自检测等多种功能,而复合材料想要扩大应用范围,也需要向着功能化、智能化方向发展。

针对复合材料各向异性和工艺强关联的特点,加强设计制造一体化研制,充分发挥材料具有可设计性的特点,实现精细化设计和最优化应用。同时建立经济性理念,通过优化材料设计、发展新型低成本制造技术、材料回收技术等,开展成本工程建设,支撑航空发动机经济性工作,降低材料和制造成本。

先进跨代材料的应用是发动机跨代发展的标

志。复合材料由早期的仿制为主已逐步发展为自主研发,在促进材料体系的标准化、系列化、通用化发展的同时,增强自主保障能力,加大自主创新力度,以未来先进航空发动机研发需求为牵引,提前布局材料研制基础,实现材料先行发展,支撑航空发动机超越领先。

参考文献:

- [1] WISNIEWSKI C, VAN TREUREN K. Novel unmanned aircraft system propeller design —part 1: using an unloaded tip to reduce power requirements and lower generated sound levels for propellers designed for minimum induced drag[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2023, 145(2): 021026.
- [2] BLACK S. Digital design, RTM update aircraft propeller[J]. *High Performance Composites*, 2010, 18(4): 46-48.
- [3] BARARI B, SIMACEK P, YARLAGADDA S, et al. Prediction of process-induced void formation in anisotropic fiber-reinforced autoclave composite parts[J]. *International Journal of Material Forming*, 2020, 13: 143-158.
- [4] 刘大响. 一代新材料, 一代新型发动机: 航空发动机的发展趋势及其对材料的需求[J]. *材料工程*, 2017, 45(10): 1-5.
LIU D X. One generation of new material, one generation of new type engine: development trend of aero-engine and its requirements for materials[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2017, 45(10): 1-5.
- [5] 陈光. 航空发动机结构设计分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
CHEN G. Structural design analysis of aero-engine[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2006.
- [6] 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 X G, QI X X, HAO Y. Investigation of high bypass ratio turbofan engine development[J]. *Aero-*

- engine, 2013, 39(6): 1-5.
- [7] SAJAN S, SELVARAJ D P V. A review on polymer matrix composite materials and their applications[J]. *Materials Today*, 2021, 47: 5493-5498.
- [8] 陈光. 大涵道比涡扇发动机的发展[J]. *航空动力*, 2019(3): 56-61.
CHEN G. The development of civil high-bypass turbofans[J]. *Aerospace Power*, 2019(3): 56-61.
- [9] 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 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.
- [10] 陈祥宝. 聚合物基复合材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
CHEN X B. Handbook of polymer matrix composites[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [11] SOORI M. Advanced composite materials and structures [J]. *Journal of Materials and Engineering Structures*, 2023(4): 1-23.
- [12] DOMINY J. Structural composites in civil gas turbine aero engines[J]. *Composites Manufacturing*, 1994, 5(2): 69-72.
- [13] 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, 56(21): 50-56.
LIU W W. Research progress on key manufacturing technology of aeroengine blades[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 56(21): 50-56.
- [14] WILLIS W, GENEVER-WATLING D. The application of QCSEE technology to V/STOL[C]//V/STOL Conference. Palo Alto: AIAA, 1977.
- [15] 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.
ZHU Q C, CHEN Y, XIAO J G Y. Study on laminate design method of composite fan blade[J]. *Aeroengine*, 2018, 44(3): 49-54.
- [16] 朱启晨, 陈勇. 复合材料宽弦风扇叶片模态仿真分析[J]. *航空发动机*, 2019, 45(1): 28-32.
ZHU Q C, CHEN Y. Modal simulation analysis of a composite wide-chord fan blade[J]. *Aeroengine*, 2019, 45(1): 28-32.
- [17] 肖贾光毅, 陈勇, 欧阳华, 等. 复合材料风扇叶片-机匣碰摩振动的数值模拟[J]. *航空动力学报*, 2019, 34(5): 997-1009.
XIAO J G Y, CHEN Y, OUYANG H, et al. Numerical investigation of composite fan blade vibration characteristics due to blade-casing rub[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2019, 34(5): 997-1009.
- [18] HORIBE K, KAWAHIRA K, SAKAI J, et al. Development of GE90-115B turb of an engine[J]. *IHI Engineering Review*, 2004, 37(1): 1-8.
- [19] YONETANIG. The history of the ETOPS and the airline's approach[J]. *Aviation Technology*, 2002(12): 23-29.
- [20] 陈光. 用于波音 777 的 GE90 发动机研制、设计特点[J]. *民航经济与技术*, 1995(3): 38-42.
CHEN G. Design features of GE90[J]. *Civil Aviation Economics & Technology*, 1995(3): 38-42.
- [21] 陈大光. GENx 发动机的研发过程值得注意[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2008, 21(2): 8-10.
CHEN D G. Worth considering development process of GENx engine[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2008, 21(2): 8-10.
- [22] 成磊. 聚焦 GENx 发动机 [J]. *航空维修与工程*, 2012(3): 22.
CHENG L. Focus on GENx[J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2012(3): 22.
- [23] 陈光. GE9X 的发展与设计特点 [J]. *航空动力*, 2018(3): 37-40.
CHEN G. Development and design features of GE9X[J]. *Aerospace Power*, 2018(3): 37-40.
- [24] ROCHESTER M. Snecma N H and partner AEC create resin-transfer engine blade process[J]. *Aviation Week & Space Technology*, 2012(9): 74-77.
- [25] 赵继红, 刘建军, 谭燕. LEAP-1A 发动机当前主要技术问题及应对措施[J]. *航空维修与工程*, 2025(5): 20-24.
ZHAO J H, LIU J J, TAN Y. Current major technical issues and countermeasures for LEAP-1A engine[J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2025(5): 20-24.
- [26] 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.
LI J, JU Y B. Advanced technology analysis of LEAP-X engine and tech-X engine[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2013, 56(10): 56-59.
- [27] 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 X Y. The development and the future of Ultra-Fan[J]. *Aerospace Power*, 2018(5): 21-25.
- [28] 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.
YU R C, JIANG J H, ZHU X J, et al. Research progress of advanced manufacturing technology for aero-engine composite blades[J]. *Science & Technology Review*, 2023, 41(5): 27-33.
- [29] 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 Z Y, SU Z Y, WEI R. Development and thinking of

- composite fan blades[J]. *Science and Technology & Innovation*, 2020(13): 34-37.
- [30] 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, 62(13): 84-91.
- 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, 62(13): 84-91.
- [31] 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.
- LI J, LIU Y F, NI H J, et al. Application progress and development trend of resin matrix composites for aero engine[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2022, 50(6): 49-60.
- [32] 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, 54(15): 58-62.
- LIU Q, ZHAO L, HUANG F. Present conditions and development of composite fan blades of high bypass ratio commercial jet engines[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014, 54(15): 58-62.
- [33] 毛吉烜, 张晓平. 商用航空发动机复合材料风扇叶片应用与制造工艺进展[J]. *宇航材料工艺*, 2025, 55(1): 1-11.
- MAO J X, ZHANG X P. Progress in application progress and manufacturing technology for composite fan blade of commercial aviation engine[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2025, 55(1): 1-11.
- [34] RED C. Aviation outlook: composites in commercial aircraft jet engines[J]. *High Performance Composites*, 2008(9): 63-94.
- [35] ADAMCZAK A D, SPRIGGS A A, FITCH D M, et al. Blistering in carbon fiber filled fluorinated polyimide composites [J]. *Polymer Composites*, 2011, 32(2): 185-192.
- [36] JAMES P, SEAN B. 商用发动机制造商加大新一代发动机 MRO 网络建设[J]. *航空维修与工程*, 2025(5): 36-41.
- JAMES P, SEAN B. Commercial engine manufacturers increase the construction of new-generation engine MRO networks[J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2025(5): 36-41.
- [37] 杨杰. GEnx-2B 发动机空气信号管路断裂问题浅析[J]. *航空维修与工程*, 2022(9): 97-99.
- YANG J. Analysis on pneumatic signal pipeline fracture for GEnx-2B engine[J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2022(9): 97-99.
- [38] KRUCKENBERG T M, PATON R. Resin transfer moulding for aerospace structures[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1998.
- [39] 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, 39(2): 91-93.
- SHEN E M, WANG Z H, TENG B Q, et al. Applications of continuous fiber reinforced composite materials in civil aeroengines[J]. *Aeroengine*, 2013, 39(2): 91-93.
- [40] CASTANIÉ B, BOUVET C, GINOT M. Review of composite sandwich structure in aeronautic applications[J]. *Composites Part C*, 2020, 1: 100004.
- [41] 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.
- MA X Q, SU Z T. Application progress of polymer matrix composites in civil turbofan aeroengine[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2020, 48(10): 48-59.
- [42] 王婧, 廉一龙, 韩秀峰. 航空发动机用聚酰亚胺复合材料研究与应用[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(15): 85-91.
- WANG J, LIAN Y L, HAN X F. Research and application of polyimide composites for aeroengine[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(15): 85-91.
- [43] 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, 51(4): 32-37.
- LIANG C H. Application of fiber reinforced resin matrix composite parts in aviation turbofan engine[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2008, 51(4): 32-37.
- [44] RAMANATHAN A, KRISHNAN P K, MURALIRAJA R. A review on the production of metal matrix composites through stir casting-furnace design, properties, challenges, and research opportunities[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 42: 213-245.
- [45] POOJA K, TARANNUM N, CHAUDHARY P. Metal matrix composites: revolutionary materials for shaping the future[J]. *Discover Materials*, 2025, 5(1): 35.
- [46] ZHANG G Q, LI S X, QU H T, et al. Preparation and mechanical properties of ceramic fiber reinforced titanium-based hybrid laminated composite[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022(12): 1-11.
- [47] SINGH A K, SONI S, RANA R S. A critical review on synthesis of aluminum metallic composites through stir casting: challenges and opportunities[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2020, 22(10): 2000322.
- [48] ZHENG Y Z, WANG J D, LIU X R, et al. Laser additive manufacturing of ceramic reinforced titanium matrix composites: a review of microstructure, properties, auxiliary processes, and simulations[J]. *Composites Part A*, 2024, 177: 107941.
- [49] 梁春华. 连续纤维增强的金属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*, 2009,

- 52(15): 32-35.
- LIANG C H. Application of continuous fiber reinforced metal matrix composite component on turbofan aero-engine[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2009, 52(15): 32-35.
- [50] BHARATHI P, KUMAR T S. Mechanical characteristics and wear behaviour of Al/SiC and Al/SiC/B₄C hybrid metal matrix composites fabricated through powder metallurgy route[J]. *Silicon*, 2023, 15(10): 4259-4275.
- [51] SEIKH Z, SEKH M, MANDAL G, et al. Metal matrix composites processed through powder metallurgy: a brief overview[J]. *Journal of the Institution of Engineers*, 2025, 106(1): 771-778.
- [52] SERGI A, KHAN R H U, IRUKUVARGHULA S, et al. Development of Ni-base metal matrix composites by powder metallurgy hot isostatic pressing for space applications[J]. *Advanced Powder Technology*, 2022, 33(2): 103411.
- [53] ZAMANI N A B N, IQBAL A A, NURUZZAMAN D M. Tribo-mechanical characterisation of self-lubricating aluminium based hybrid metal matrix composite fabricated *via* powder metallurgy[J]. *Materialia*, 2020, 14: 100936.
- [54] PARVEEN A, CHAUHAN N R, SUHAIB M. Influence of process parameters and reinforcements on aluminum hybrid composites developed by powder metallurgy process[J]. *Physics of Metals and Metallography*, 2021, 122(10): 1007-1013.
- [55] NAYAK K C, RANE K K, DATE P P, et al. Synthesis of an aluminum alloy metal matrix composite using powder metallurgy: role of sintering parameters[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(17): 8843.
- [56] 李文生, 范祥娟, 杨军, 等. Ni₃Al 基高温自润滑复合涂层的制备和摩擦学性能[J]. *摩擦学学报*, 2018, 38(6): 626-634.
- LI W S, FAN X J, YANG J, et al. Preparation and tribological properties of Ni₃Al matrix self-lubricating composite coating[J]. *Tribology*, 2018, 38(6): 626-634.
- [57] MÁRA V, MICHALCOVÁ L, KADLEC M, et al. The effect of long-time moisture exposure and low temperatures on mechanical behavior of open-hole CFRP laminate[J]. *Polymer Composites*, 2021, 42(7): 3603-3618.
- [58] DELLACORTE C, FELLEINSTEIN J A. The effect of compositional tailoring on the thermal expansion and tribological properties of PS300: a solid lubricant composite coating[J]. *Tribology Transactions*, 1997, 40(4): 639-642.
- [59] ZHU S Y, CHENG J, QIAO Z H, et al. High temperature solid-lubricating materials: a review[J]. *Tribology International*, 2019, 133: 206-223.
- [60] OUYANG J H, LI Y F, ZHANG Y Z, et al. High-temperature solid lubricants and self-lubricating composites: a critical review[J]. *Lubricants*, 2022, 10(8): 177-236.
- [61] LV J, LUO K, LU H, et al. Achieving high strength and ductility in selective laser melting Ti-6Al-4V alloy by laser shock peening[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 899: 163335.
- [62] 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.
- YANG J H, DONG Y F, YANG R, et al. Research progress of ceramic matrix composites for aero engines[J]. *Aviation Power*, 2021(5): 56-59.
- [63] 姚改成, 郭双全, 黄璇璇, 等. 陶瓷基复合材料在欧美军民航空发动机上的发展[J]. *航空维修与工程*, 2018(10): 37-40.
- YAO G C, GUO S Q, HUANG X X, et al. Development of ceramic matrix composites in aero-engine[J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2018(10): 37-40.
- [64] WANG P R, LIU F Q, WANG H, et al. A review of third generation SiC fibers and SiC_f/SiC composites[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(12): 2743-2750.
- [65] ZHOU W, ZHANG Y T, LI Y, et al. *In-situ* synthesis of ternary layered Y₃Si₂C₂ ceramic on silicon carbide fiber for enhanced electromagnetic wave absorption[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(2): 1908-1915.
- [66] AN Q L, CHEN J, MING W W, et al. Machining of SiC ceramic matrix composites: a review[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(4): 540-567.
- [67] NASLAIN R, CHRISTIN F. SiC-matrix composite materials for advanced jet engines[J]. *MRS Bulletin*, 2003, 28(9): 654-658.
- [68] OHNABE H, MASAKI S, ONOZUKA M, et al. Potential application of ceramic matrix composites to aero-engine components[J]. *Composites Part A*, 1999, 30(4): 489-496.
- [69] KARADIMAS G, SALONITIS K, KARADIMAS G, et al. Ceramic matrix composites for aero engine applications: a review[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(5): 3017.
- [70] 高铁, 洪智亮, 杨娟. 商用航空发动机陶瓷基复合材料部件的研发应用及展望[J]. *航空制造技术*, 2014, 57(6): 14-21.
- GAO T, HONG Z L, YANG J. Application and prospect of ceramic matrix composite components for commercial aircraft engine[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014, 57(6): 14-21.
- [71] LIU Q M, HUANG S Z, HE A J. Application requirements and challenges of CMC-SiC composites on aero-engine[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2019, 47(2): 1-10.

- [72] HU J Y, LIU C D, YE F, et al. A review on high-performance SiC_f/SiC composites prepared by PIP process[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 33: 7216-7235.
- [73] PADTURE N P. Advanced structural ceramics in aerospace propulsion[J]. *Nature Materials*, 2016, 15(8): 804-809.
- [74] 张岩, 戴淑波. GE 的陶瓷基复合材料发展概述[J]. *航空动力*, 2019(3): 62-64.
ZHANG Y, DAI S B. Overview of GE's ceramic matrix composites development[J]. *Aviation Power*, 2019(3): 62-64.
- [75] 王鸣, 董志国, 张晓越, 等. 连续纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料在航空发动机上的应用[J]. *航空制造技术*, 2014, 57(6): 10-13.
WANG M, DONG Z G, ZHANG X Y, et al. Application of continuous fiber reinforced ceramic matrix composites in aeroengine[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014, 57(6): 10-13.
- [76] 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.
YANG R, QI Z, YANG J H, et al. Research progress in oxide/oxide ceramic matrix composites and processing technologies[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2018, 46(12): 1-9.
- [77] 焦健, 孙世杰, 焦春荣. SiC_f/SiC 复合材料涡轮导向叶片研究进展[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(8): 4342-4354.
JIAO J, SUN S J, JIAO C R. Research progress on SiC_f/SiC composite turbine guide vanes[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(8): 4342-4354.
- [78] 李龙彪. 陶瓷基复合材料在航空发动机应用与适航符合性验证研究进展[J]. *复合材料学报*, 2025, 42(1): 53-86.
LI L B. Research progress on application and airworthiness compliance validation of ceramic-matrix composites in aeroengines[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, 42(1): 53-86.
- [79] SINHA P K. Composite materials and structures[M]. Kharagpur: Composite Centre of Excellence, AR & DB, Department of Aerospace Engineering I. I. T. Kharagpur, 2006.
- [80] KIM T T, MALL S, ZAWADA L P. Fatigue behavior of hi-nicalon type-STM/BN/SiC ceramic matrix composites in a combustion environment[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2011, 8(2): 261-272.
- [81] 焦健, 齐哲, 吕晓旭, 等. 航空发动机用陶瓷基复合材料及制造技术[J]. *航空动力*, 2019(5): 17-21.
JIAO J, QI Z, LV X X, et al. Ceramic matrix composites for aero engines and manufacturing technology[J]. *Aviation Power*, 2019(5): 17-21.
- [82] WANG X L, GAO X D, ZHANG Z H, et al. Advances in modifications and high-temperature applications of silicon carbide ceramic matrix composites in aerospace: a focused review[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, 41(9): 4671-4688.
- [83] XING Z Z, YOU X, OUYANG H Y, et al. Porous and lightweight continuous SiC fiber reinforced Si₃N₄-SiC composites for wide frequency electromagnetic wave absorption[J]. *Composites Part B*, 2025, 300: 112497.
- [84] HE R J, ZHOU N P, ZHANG K Q, et al. Progress and challenges towards additive manufacturing of SiC ceramic[J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2021, 10(4): 637-674.
- [85] ZHANG K Q, WEI K, CHEN J X, et al. Stereolithography additive manufacturing of multi-ceramic triangle structures with tunable thermal expansion[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, 41(4): 2796-2806.
- [86] BINNER J, PORTER M, BAKER B, et al. Selection, processing, properties and applications of ultra-high temperature ceramic matrix composites, UHTCMCs — a review[J]. *International Materials Reviews*, 2020, 65(7): 389-444.
- [87] XU T T, CHENG S, JIN L Z, et al. High-temperature flexural strength of SiC ceramics prepared by additive manufacturing[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2020, 17(2): 438-448.
- [88] ZHANG J M, CAI F Y, JIN X H, et al. Progress in research and application of continuous fiber reinforced ceramic matrix composites[J]. *Journal of Ceramics*, 2023, 4(44): 195-207.
- [89] MO C, XIANG Y, LI Y K, et al. Polymer impregnation and pyrolysis process for the preparation of Al₂O₃/Al₂O₃ composites: a preliminary study[J]. *Ceramics International*, 2025, 51(3): 3750-3758.

收稿日期: 2025-03-14; 录用日期: 2025-06-20

通讯作者: 沈尔明(1977—), 男, 高级工程师, 研究方向为航空发动机设计选材, 联系地址: 辽宁省沈阳市 428 信箱(110015), E-mail: summoon945@126.com

(本文责编: 高磊)