

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.07.028

航空发动机用树脂基复合材料发展现状与应用

赵森, 张代军

(中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 介绍了高韧性环氧树脂、耐高温高韧性双马树脂、耐高温聚酰亚胺树脂和聚芳醚酮基复合材料的发展现状, 以及在国内航空发动机风扇叶片、包容机匣、外涵机匣等典型部件的应用情况, 剖析了目前应用存在的问题, 提出了未来大涵道比和高推重比航空发动机对树脂基复合材料的发展需求, 指出目前航空发动机树脂基复合材料发展重点包括耐高温聚酰亚胺复合材料超高温化、高韧化和低成本化, 风扇叶片设计与制造的高效化与多样化, 以及航空发动机树脂基复合材料结构与多功能一体化等方向。

关键词: 航空树脂基复合材料; 航空发动机; 高温性能; 应用现状; 发展重点

中图分类号: TQ322 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)07-0198-06

Current status and applications of resin matrix composites for aero-engine

ZHAO Miao, ZHANG Daijun

(AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract : This paper introduces the development status of high-toughness epoxy resins, high-temperature-resistant high-toughness bismaleimide resins, high-temperature-resistant polyimide resin matrix composites and polyaryletherketone matrix composites. It further analyzes their application progress in typical aero-engine components such as fan blades, containment casings, and bypass duct casings both domestically and internationally. The study analyzes existing issues in current applications and proposes future development requirements for resin-based composites in next-generation high-bypass ratio and high thrust-to-weight ratio aero-engines. Key development priorities are identified, including: achieving ultra-high temperature resistance, enhanced toughness, and cost reduction for polyimide composites; improving efficiency and diversification in fan blade design and manufacturing; as well as pursuing integrated structures and multifunctional capabilities for aero-engine resin-based composites.

Keywords : aerospace resin matrix composite ; aero-engine ; high-temperature performance ; application status ; development priority

树脂基复合材料具有轻质、高强、高模量、耐疲劳和耐腐蚀等性能特点, 在先进战斗机和直升机中大量使用, 是航空装备实现轻量化结构的关键材料之一^[1-5]。除了在飞机等航空装备应用外, 树脂基复合材料在航空发动机风扇叶片、包容机匣、外涵机匣等冷端部件也开始大量应用, 已成为航空发动机提升性能的重要技术途径之一。

航空树脂基复合材料主要包括高韧性环氧树脂基复合材料、双马树脂基复合材料、耐高温聚酰亚胺树脂基复合材料。不同树脂基复合材料在航空发动机上的应用情况见表 1。高韧性环氧树脂基复合材料主要用于商用大涵道比发动机风扇叶片、包容机匣等, 耐高温高韧性双马和聚酰亚胺树脂基复合材料主要用于军用高推重比发动机外涵机匣、矢量

表 1 树脂基复合材料在航空发动机中的应用^[6-7]

Tab.1 Resin matrix composites applications in aero-engine^[6-7]

Resin matrix composites	Application components
High-temperature epoxy composites	Nacelle cowling, blades, casings, acoustic lining structure, thrust reverser, nacelle, etc.
Bismaleimide composites	
Polyimide matrix composites	Blades, outer nacelle casing, vectoring nozzle outer cowl flaps, etc.

通信作者: 张代军, 博士, 研究员, 研究方向为树脂基复合材料

收稿日期: 2025-04-30

引用格式: 赵森, 张代军. 航空发动机用树脂基复合材料发展现状与应用[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(7): 198-203.

ZHAO Miao, ZHANG Daijun. Current status and applications of resin matrix composites for aero-engine[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(7): 198-203.

喷管外调节片、包容机匣、静子叶片等。

笔者主要介绍高韧性环氧树脂、耐高温高韧性双马树脂、耐高温聚酰亚胺树脂、聚芳醚酮基复合材料的发展现状,以及在航空发动机风扇叶片、包容机匣、外涵机匣的典型应用,并对航空发动机用树脂基复合材料的发展趋势和未来的发展重点进行了展望。

1 航空树脂基复合材料发展现状

1.1 碳纤维增强环氧树脂基复合材料

环氧树脂基复合材料是航空中应用最为广泛的树脂基复合材料^[8-11],国内经过30多年的发展,预浸料/热压罐成型的环氧树脂基复合材料从第一代中等韧性[冲击后压缩强度

(CAI)为170~250 MPa]环氧树脂基复合材料,发展到第二代高韧性(CAI为250~315 MPa)、第三代超高韧性(CAI在315 MPa以上)环氧树脂基复合材料,并且成功应用于各类飞机、发动机、导弹、运载火箭等^[12-19],表2所示为国内外部分预浸料/热压罐成型的环氧树脂基复合材料的力学性能。

除了预浸料/热压罐成型外,国内还发展了低黏度化、层间和核壳粒子增韧技术,研发了工艺性能优异的液体成型树脂体系,以及匹配的定型剂材料,建立了相应的液体成型环氧复合材料和工艺标准,在飞机、航空发动机、风电叶片、舰船等领域大量应用,表3为国内外部分液体成型环氧树脂基复合材料的基本性能^[20-22]。

表2 预浸料/热压成型的环氧树脂基复合材料的力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of prepreg/hot-press formed epoxy resin-based composites

Material Grade	Tensile strength /MPa	Tensile elastic modulus/GPa	Interlayer shear strength/MPa	Compression after impact (CAI) /MPa
G814NT/3233	670	57	59	
G803PV/3234	756	69	68	
CCF300/5228A	1 589	131	103	280
CCF800H/AC531	2 632	161	105	330
TG800/603B	2 810	163	105	310
TG700S/G602A	2 450	132	98	200
CCF800H/EC120A	2 592	160	107	328
IM7/M91	2 980	165	110	350
T800S/3900	3 006	148	97	283

表3 部分液体成型环氧树脂基复合材料基本性能

Tab. 3 Basic properties of liquid molding epoxy resin-based composites

Material Grade	Tensile strength /MPa	Interlayer shear strength /MPa	Glass transition temperature(T_g)/°C	Injection temperature /°C
G827/3266RTM	1 639	85	131	40~50
U-3160/3228RTM	1 744	85	145	40~50
U-3160/5284 RTM	1 626	94	220	60~80
U-8190/AC520	2 260	107	217	60~80
U7192/QY8911-IV	1 980	98	231	110~120
U-8130/EC150R	2 149	113	225	80~90
T650-3K-8HS /PR520	945		161	90~100
T650-6K-5HS/CYCOM 890 RTM	866	72	191	80

1.2 碳纤维增强双马来酰亚胺复合材料

耐高温高韧性双马来酰亚胺复合材料是另一类航空发动机常用的树脂基复合材料^[23-30]。在20世纪80年代,国内外针对三代战斗机等航空装备发展的需求,开展了耐高温高韧性双马来酰亚胺树脂配方体系及其复合材料的研制,陆续开发出众多商品化牌号的双马来酰亚胺树脂基体及其复合材料(见表4),并在先进战斗机上批量应用。20世纪90年代后推广扩展到航空发动机应用。

1.3 碳纤维增强聚酰亚胺复合材料

军用高推重比航空发动机性能的提升主要通过提高涡轮进口温度和提高整机减重效率来实现,这对相应部件的耐热性和减重效率提出了更高的要求。军用高推重比航空发动机冷端部件的服役温度一般在260℃以上,高推重比发动机更是达到350℃以上,这要求树脂基复合材料具有高的耐

热性。目前满足军用高推重比航空发动机冷端部件应用要求的主要是聚酰亚胺复合材料。

国内外对聚酰亚胺复合材料树脂的研究已基本形成涵盖第一、二、三代的聚酰亚胺复合材料体系,见表5,主要包括降冰片烯二酸酐(NA)封端和苯乙炔苯酞(PEPA)封端两类体系,涉及液态成型工艺和热压成型工艺,长期使用温度300~380℃,满足航空发动机、导弹等装备应用要求,也开展了第四代聚酰亚胺复合材料的探索研究^[24-30]。

1.4 碳纤维增强聚芳醚酮复合材料

高性能热塑性复合材料的研究始于20世纪80年代末,聚芳醚酮类树脂[包括聚醚醚酮(PEEK)、聚醚酮酮和聚芳醚酮等]在综合性能方面表现卓越。英国Victrex公司推动PEEK工业化,其连续使用温度最高可达240℃^[33-39]。国内吉林大学在1990年取得首个PEEK合成专利并建立PEEK

表 4 部分预浸料/热压罐成型双马来酰亚胺复合材料性能^[27]

Tab. 4 Mechanical performance of prepreg/hot-press formed bismaleimide resin matrix composites ^[27]				
Material Grade	Tensile strength /MPa	Tensile elastic modulus/GPa	Interlayer shear strength/MPa	CAI/MPa
T300/QY8911-I	1 548	135	114	156
ZT7H/5429	2 635	145	115	285
CCF800H/AC631	2 847	171	106	331
ZM40 J/HT-280	2 125	234	90	
CCF800H/EC-240A	2 790	167	110	240
CCF800H/EC-280A	2 690	166	113	164
CCF800H/EC-230R	2 210	152	110	158
TG800/802	2 600	165	102	150
MT300/803	1 800	135	108	130
IM7/F655	2 730	161	130	243
IM7/5250-4	2 897	169	139	214

表 5 部分聚酰亚胺复合材料的耐热性能^[31-32]

Tab. 5 Thermal resistance properties of polyimide composites ^[31-32]				
Generation	Material grade	$T_g/^{\circ}\text{C}$	Thermal decomposition temperature/ $^{\circ}\text{C}$ ($T_{d5\%}$)	Process characteristics
First-generation polyimide composites	PMR-15/AS4	330	485	Hot-press molding, relatively poor formability
	BMP316/T300	330	490	
	KH304/T300	330	469	
Second-generation polyimide composites	PMR-II-50/AS4	370	525	Hot-press molding, relatively good formability
	PETI-375	375	530	
	AC729RTM/CCF800	423	545	
	KH370/TG800	407	534	RTM molding, good formability
	EC350R/CCF800	430	550	
	AC721/CCF800	435	543	
Third-generation polyimide composites	AFR-700B	400	535	Hot-press molding, relatively good formability
	AFRPE-4	410	540	
	AC732/CCF800	455	556	
	EC380A/CCF800	445	545	
	KH450/TG800	450	560	Hot-press molding, average formability
Fourth-generation polyimide composites	AC741/CCF800	≥ 600	≥ 600	Hot-press molding, poor formability

小规模生产线,北京航空材料研究院开展了碳纤维增强 PEEK 热塑性复合材料的研究工作,实现碳纤维增强 PEEK 热塑性复合材料起落架护板在某型歼击机装机考核。但树脂合成技术、预浸料及复合材料工艺技术瓶颈,阻碍了进一步工程化应用研究。近年来,国内相关单位开展了高性能热塑性预浸料、热塑性复合材料自动铺丝铺带/缠绕/热压/拉挤/焊接等装备及工艺的基础研究工作^[40-46],探索了自动铺放、缠绕、焊接等成型制造关键技术,开发出成型装备原理样机,研制了相关高性能热塑性复合材料构件,实现了高性能热塑性树脂及其预浸料制备技术的突破,但整体仍然处于技术积累阶段,距实际应用还存在一定的差距。不同碳纤维增强聚芳醚酮复合材料的典型性能见表 6。

2 树脂基复合材料在航空发动机中的典型应用

2.1 航空发动机复合材料风扇转子叶片

20 世纪 90 年代,随着高韧性环氧树脂复合材料及其制造技术的不断发展,以及在各类飞机应用经验的积累,航空发动机复合材料风扇叶片的研制条件趋于成熟,通用电气(GE)公司开始了树脂基复合材料风扇叶片的研制。1995 年 GE 公司成功研制了 GE90-94B 商用大涵道比航空发动机风扇叶片

并正式批量应用,后续又研制了 GE90-115B 商用大涵道比航空发动机的复合材料风扇叶片^[47-48],如图 1 所示。



图 1 航空发动机的复合材料风扇叶片^[38]
Fig. 1 Composite fan blades for aero-engines^[38]

国内针对商用大涵道比航空发动机的需求,采用 3D 机织/树脂传递模塑(RTM)工艺和预浸料/热压工艺,开展了树脂基复合材料风扇转子叶片的应用技术研究,通过突破高韧性 RTM 环氧树脂技术、叶片 3D 机织结构制备技术及复合材料叶片 RTM 成型和热压制备技术等关键技术,成功研制了树脂基复合材料风扇转子叶片,并实现在 CJ-1000A 商用大涵道比航空发动机上的考核应用。

表6 碳纤维增强聚芳醚酮热塑性预浸料的性能
Tab.6 Performance of carbon fiber reinforced polyaryletherketone thermoplastic prepreg

Mechanical performance	SYT55C/EC-PAEK	TC1225 LM PAEK standard modulus carbon	APC-2 PEEK intermediate modulus carbon	AC8201/CCF800
Resin mass fraction/%	36	34	34	36
Tensile strength 0°/MPa	2 636	2 410	2 900	2 334
Tensile modulus 0°/GPa	156	135	172	152
Tensile strength 90°/MPa	74.2	86	60	62.1
Tensile modulus 90°/GPa	8.75	10	10	8.33
Compression strength 0°/MPa	1 053	1 300	1 310	1 149
Compression modulus 0°/GPa	139	124	152	133
Interlaminar shear strength/MPa	110	96		110
In-plane shear strength/MPa	160	152	179	156
In-plane shear modulus/GPa	4.40	4.3	5.5	4.71
Compression after impact strength 6.67 J/mm impact energy/MPa	375	310	366	333

2.2 航空发动机复合材料外涵机匣

最早在航空发动机外涵机匣中得到应用的树脂基复合材料为NA封端聚酰亚胺PMR-15复合材料。采用碳纤维增强的PMR-15聚酰亚胺复合材料研制的BR710-RR和M88-2航空发动机外涵机匣已经得到应用,图2为研制的发动机外涵机匣^[48-49]。

国内耐高温聚酰亚胺树脂及其复合材料研究起步于上世纪90年代,目前已基本形成涵盖第一、二、三代的聚酰亚

胺复合材料体系,主要包括NA封端和PEPA封端两类体系,涉及热压成型工艺和液态成型工艺。采用T300碳纤维增强的第一代NA封端聚酰亚胺复合材料(耐温能力在280℃左右)和预浸料/热压罐成型工艺研制的聚酰亚胺复合材料外涵机匣在三代高性能航空发动机上实现批量应用。

针对军用高推重比航空发动机更高耐温的要求,国内成功研制了可在350℃以上使用的RTM液态成型EC-350R和预浸料/热压罐成型EC-380A聚酰亚胺树脂基体,以及T800碳纤维增强液态成型和热压成型聚酰亚胺复合材料外涵机匣,并在新一代高推重比航空发动机上装机应用。

2.3 航空发动机复合材料包容机匣

航空发动机风扇包容机匣主要有三种结构形式:(1)全金属包容机匣,主要材料为钢,铝合金或钛合金;(2)金属与复合材料组合包容机匣,主要材料有铝合金或钛合金内壁,铝蜂窝芯和Kevlar芳纶纤维织物,芳纶纤维织物层提供主要包容性;(3)全复合材料包容机匣,主要材料为碳纤维增强高温环氧树脂基复合材料。表7为发动机风扇机匣选材及使用情况。



图2 发动机复合材料外涵机匣^[48-49]
Fig.2 Composite material outer casings of engines^[48-49]

表7 发动机风扇包容机匣特点和使用情况
Tab.7 Characteristics and applications of engine fan containment casings

Fan containment casing	Engine models	Features
High-strength structural steel	CFM56-5B, Trent500, CF6-6	Good containment effect, widely used in early engines, with the disadvantages of high density and large mass
Aluminum alloy/titanium alloy structure	CFM56-7B(Al), Trent1000(Ti), Trent900(Ti), TrentXWB(Ti)	Compared with high-strength structural steel containment casings, it has lighter mass and compact structure, but the processing difficulty of large-size aluminum (titanium) alloy containment casings is high
Filament-wound reinforced composite structure	Trent700, Trent800, CF6-80C2, GP7200, GE90, PW2000, PW4000, PW4084	Compared with metal containment casings, it has lower cost, lighter mass, and better containment effect
All-composite structure	Leap-X, GEnx	Formed by two-dimensional three-directional braided fabric winding or three-dimensional braiding, with lighter mass, it is the development direction of future engine containment casings

GE公司在CF6-80C2发动机上首次采用金属与复合材料组合包容机匣,随后在GE90发动机上继续采用了金属与复合材料组合包容机匣结构。普惠公司的PW4084发动机和罗尔斯·罗伊斯公司的Trent 700和Trent 800发动机也采

用了这种金属与复合材料组合的包容机匣结构。
1992年美国航空航天局(NASA)牵头开始了全复合材料风扇包容机匣的研究,经过多年包容理论模型、材料和结构的实验验证研究,于2007年在GE公司的GEnx发动机上得

到应用^[50]。GENx 发动机复合材料风扇包容机匣如图 3a 所示。

2005 年,美国 A&P 技术公司使用碳纤维二维三轴编织物作为增强材料制备全复合材料风扇包容机匣,进一步提高了复合材料机匣结构强度和抗冲击性能,能够有效地抵抗层间分层,将损伤限制在局部的区域,并且可以有效节省成本。与国内 C919 大型客机配套的 LEAP-X 发动机同样采用 2.5D 编织结构的复合材料风扇包容机匣。LEAP-X 发动机复合材料风扇包容机匣前期由赛峰公司研制,最终由美国 Albany 工程复合材料公司制造。图 3b 为 LEAP-X 发动机复合材料风扇包容机匣。

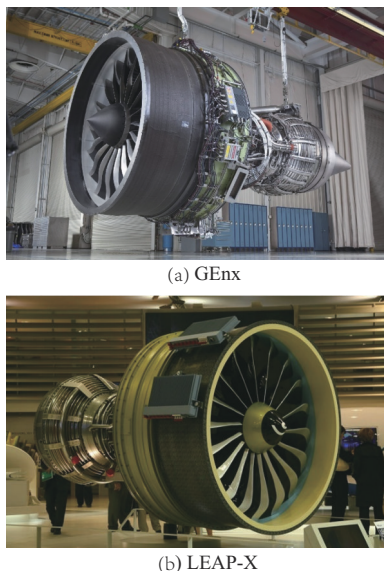


图3 复合材料风扇包容机匣^[50]

Fig. 3 Composite fan containment casing^[50]

3 航空发动机树脂基复合材料发展重点

虽然树脂基复合材料在航空发动机风扇转子叶片、包容机匣、外涵机匣等得到应用,有效减轻了结构重量,为航空发动机性能的提升发挥了重要的作用,但在应用中还存在一些问题。

目前商用大涵道比航空发动机风扇转子叶片要求提升抗高速冲击性能和气动效率,需要进一步发展气动/结构一体化设计方法,提高树脂基复合材料韧性,优化风扇叶片的气动外形和增强纤维的铺层等。军用高推重比航空发动机外涵机匣要求更高的使用温度和更长的使用寿命,需要进一步发展耐高温聚酰亚胺树脂基体,优化聚酰亚胺复合材料的综合性能。树脂基复合材料包容机匣存在包容机理不清、包容性能和试验验证能力不足等问题,需要开展复合材料抗高速冲击基础理论研究,建立航空发动机复合材料包容机匣设计和考核验证技术体系。此外,树脂基复合材料在航空发动机应用还存在成本过高影响规模应用的问题。

目前航空发动机树脂基复合材料发展重点主要体现在以下三个方面:

(1)耐高温聚酰亚胺复合材料超高温化、高韧化和低成

本化。通过聚酰亚胺树脂基体的分子结构设计,及配方优化研究,提高聚酰亚胺树脂及其复合材料的耐高温性能和抗热氧化性能,研制可在 400 °C 以上长期使用的聚酰亚胺复合材料,以满足未来对高温树脂基复合材料耐高温寿命的需求;通过提高聚酰亚胺复合材料的韧性性能,进而提高其结构的抗冲击、抗疲劳性能,有助于增强发动机结构的耐久性能和结构稳定性,从而延长维修周期,提高结构使用寿命;通过开展聚酰亚胺复合材料的低成本制造技术研究,包括 RTM 成型工艺、真空辅助树脂灌注(VARI)树脂膜熔渗(RFI)工艺等,降低聚酰亚胺复合材料的综合制造成本,拓展聚酰亚胺复合材料的应用范围。

(2)树脂基复合材料高韧化、风扇叶片结构设计的高效化,风扇叶片制造技术多样化。通过发展复合材料风扇叶片气动/结构一体化设计方法,提高树脂基复合材料韧性,优化风扇叶片的气动外形和增强纤维的铺层,优化复合材料风扇叶片的气动和承载效率,提升风扇叶片的综合性能。通过进一步提高树脂基体及其复合材料的韧性,改善叶片的抗外物冲击性能,增加叶片的耐久性和使用安全性;根据叶片不同的服役条件和对叶片结构刚度的不同要求,发展优化的铺层/热压或 3D 机织/RTM 制造工艺,降低树脂基复合材料风扇叶片的制造成本。

(3)航空发动机树脂基复合材料结构承载/抗冲击等多功能一体化。通过开展复合材料抗高速冲击基础理论研究,建立航空发动机复合材料包容机匣设计技术体系,通过复合材料包容机匣结构-功能一体化设计,降低结构重量,提高包容机匣的包容性能和结构效率;通过提高树脂基体及其复合材料的韧性,提升复合材料包容机匣的耐久性和使用安全性。根据军用航空发动机对隐身、防除冰等的要求,开展结构隐身、结构防除冰等多功能一体化复合材料研制,以满足军用航空发动机的需求。

4 结语

先进树脂基复合材料的应用是航空发动机提升性能的重要途径之一,航空发动机发展对树脂基复合材料的要求越来越高。为满足航空发动机发展的需求,需要重点发展耐 400 °C 以上聚酰亚胺复合材料及其外涵机匣制造技术、超高韧性复合材料及其风扇叶片制造技术、结构抗冲击和隐身等多功能一体化复合材料技术等,以新一代树脂基复合材料技术支撑新一代军民航空发动机的发展。

参考文献

- [1] 颜鸣皋,等.航空制造技术,2003,46(12):19-25.
YAN Minggao, et al. Aeronautical Manufacturing Technology, 2003, 46(12):19-25.
- [2] 陈祥宝. 航空材料学报,2000,20(1):46-54.
CHEN Xiangbao. Journal of Aeronautical Materials, 2000, 20(1): 46-54.
- [3] 陈祥宝. 聚合物基复合材料手册[M]. 北京:北京化学工业出版社,2004.
CHEN Xiangbao. Handbook of Polymer Matrix Composites[M]. Beijing:Beijing Chemical Industry Press,2004.

- [4] 益小苏,等.工程塑料应用,2009,37(10):72–76.
YI Xiaosu, et al. Engineering Plastics Application, 2009, 37(10): 72–76.
- [5] 陈绍杰.航空学报,2008,29(3):605–610.
CHEN Shaojie. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 605–610.
- [6] 李杰.航空发动机,2008,34(4):54–55.
LI Jie. Aeroengine, 2008, 34(4): 54–55.
- [7] 李杰.航空制造技术,2009,17:49–51.
LI Jie. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, (17): 49–51.
- [8] XU X, et al. Thin-Walled Structures. 2025, 209. DOI: 10.1016/j.tws.2024.112899.
- [9] ZHANG H, et al. Macromolecules. 2017, 50:3 934–3 943.
- [10] ALSHEHRI A H, et al. Journal of Engineering Research. 2024. DOI:10.1016/j.jer.2024.07.017.
- [11] BALUCH A, et al. Journal of Composite Materials. 2016, 50: 2 017–2 024.
- [12] 甘顺昌,等.工程塑料应用,2025,53(1):44–49.
GAN Shunchang, et al. Engineering Plastics Application, 2025, 53(1): 44–49.
- [13] 张晖,等.兵器材料科学与工程,2010,33(03):41–43.
ZHANG Hui, et al. Ordnance Material Science and Engineering, 2010, 33(03): 41–43.
- [14] 蔡昊,等.玻璃钢/复合材料,2015(7):5–11.
CAI Hao, et al. Composites Science and Engineering, 2015(7): 5–11.
- [15] 包建文,等.科技导报,2018,36(19):52–63.
BAO Jianwen, et al. Science & Technology Review, 2018, 36(19): 52–63.
- [16] FERNÁNDEZ-Francos X, et al. Journal of Polymer Science Part A Polymer Chemistry, 2013, 52(1):61–75.
- [17] ZHU L, et al. Bulletin-Korean Chemical Society, 2012, 33(33): 2 513–2 516.
- [18] 益小苏,等.科技导报,2008,26(6):84–92.
YI Xiaosu, et al. Science & Technology Review, 2008, 26(6): 84–92.
- [19] IREDALE R J, et al. Modern advances in bismaleimide resin technology: A 21st century perspective on the chemistry of addition polyimides[J]. Progress in Polymer Science, 2016, 69:1–12.
- [20] BROCKS T, et al. Materials Research-Ibero-American Journal of Materials. 2013, 16:1 175–1 182.
- [21] KAYNAK C, KAS Y. Polymers & Polymer Composites. 2006, 14: 55–64.
- [22] MORELLE X, et al. Mechanics of Time-Dependent Materials. 2017, 21:419–454.
- [23] 梁国正,等.双马来酰亚胺树脂[M].北京:化学工业出版社,1997.3.
LIANG Guozheng. Bismaleimide Resin[M]. Beijing: Beijing Chemical Industry Press, 1997.3.
- [24] YAO Y, et al. Journal of Applied Polymer Science. 2005, 97(2): 443–448.
- [25] 刘生鹏,等.绝缘材料,2006,39(4):29–32.
LIU Shengpeng, et al. Insulating Materials, 2006, 39(4): 29–32.
- [26] 王汝敏,等.粘接,2005,26(5):11–13.
WANG Rumin, et al. Adhesion, 2005, 26(5): 11–13.
- [27] 张思,等.科技导报,2016,34(8):31–34.
ZHANG Si, et al. Science & Technology Review, 2016, 34(8): 31–34.
- [28] Zhang Y, et al. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2012, 31(13):915–923.
- [29] LEE M, et al. Journal of Advanced Materials, 2005, 37(1):3–8.
- [30] WANG S, et al. Materials & Design, 2017(115):213–23.
- [31] 陈祥宝,等.复合材料学报,1998,15(1):7–13.
CHEN Xiangbao, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 1998, 15(1): 7–13.
- [32] 杨士勇,等.宇航材料工艺,2000(1):1–6.
YANG Shiyong, et al. Aerospace Materials & Technology, 2000(1): 1–6.
- [33] ANDREA D, et al. Polymer Composites, 2011, 32(2):185–192.
- [34] SERAFINI T, et al. ASTM special technical publications[C]. 1982:5–19. DOI:10.1520/stp29349 s.
- [35] XING T, et al. Polymer International, 2015, 64 (12): 1 715–1 721.
- [36] ZENG H, et al. High Performance Polymers, 2013, 25 (4): 454–463.
- [37] CONNELL J, et al. High Performance Polymers, 2003, 15(4): 375–394.
- [38] GEORGE Marsh. Reinforced Plastics, 2006, 50(11):26–29.
- [39] 晁聪聪,等.航空材料学报,2025,45(3):1–18.
CHAO Congcong, et al. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(3): 1–18.
- [40] 周冰洁,等.航空制造技术,2020,63(7):86–90.
ZHOU Bingjie, et al. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(7): 86–90.
- [41] 王清清,等.材料工程,2023,51(5):174–182.
WANG Qingqing, et al. Journal of Materials Engineering, 2023, 51(5): 174–182.
- [42] 邢宇,等.材料工程,2022,50(8):70–81.
XING Yu, et al. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(8): 70–81.
- [43] 刘明伟,等.航空材料学报,2022,42(5):52–70.
LIU Mingwei, et al. Journal of Aeronautical Materials, 2022, 42(5): 52–70.
- [44] 肇研,等.材料工程,2020,48(8):49–61.
ZHAO Yan, et al. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(8): 49–61.
- [45] 霍红宇,等.材料工程,2025,53(3):44–53.
HUO Hongyu, et al. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(3): 44–53.
- [46] 叶璐,等.航空材料学报,2025,45(3):19–31.
YE Lu, et al. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(3): 19–31.
- [47] ROBERTS G, et al. Composite Structure, 2018, 204:12–22.
- [48] JOHNSON M, et al. AIAA Journal of Propulsion and Power, 2019, 36(2):345–356.
- [49] SMITH J, et al. Journal of Aerospace Engineering, 2020, 34(5): 789–801.
- [50] MARSH G. Reinforced Plastics, 2012, 56(6):32–35.