

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.04.029

连续纤维增强树脂基复合材料绿色化技术的研究进展

赵淼

(中国航发北京航空材料研究院,北京 100095)

摘要:连续纤维增强树脂基复合材料具有轻质、高强、性能可设计等特点,是航空装备轻量化不可或缺的重要结构材料。由于其主要采用热压罐成型技术制备,成型过程能耗高,热固性树脂回收利用难、成本高,难以满足低碳绿色发展的要求,因此开展可回收绿色复合材料、复合材料低能耗制造以及回收再利用等复合材料绿色化技术研究受到了越来越广泛的重视。笔者介绍了目前连续纤维增强复合材料绿色化技术的发展现状,并探讨了连续纤维增强复合材料绿色化技术的发展前景。

关键词:连续纤维增强树脂基复合材料;热塑性复合材料;绿色化技术;绿色复合材料;低能耗制造技术;回收再利用

中图分类号: TQ322 文献标识码: A 文章编号: 1001-3539(2024)04-0188-05

Research progress in green technologies of continuous fiber-reinforced resin matrix composites

ZHAO Miao

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

Abstract : Continuous fiber-reinforced resin matrix composite is an indispensable structural material for lightweight aeronautical equipment due to its light weight, high strength and designable performance features. Continuous fiber reinforced resin matrix composite materials are mainly prepared by autoclave molding technology. However, it is difficult to meet the requirements of low-carbon green development because of the molding process being of high energy consumption, thermoset resins is high cost and unrecyclable. Therefore, researching on recyclable green composite materials, composite materials low-energy manufacturing, as well as recycling and other composite materials green technology received increasing attentions. The development status of continuous fiber reinforced composite green technology was introduced, and their development prospects were also discussed.

Keywords : continuous fiber-reinforced resin matrix composite ; thermoplastic composite ; green technology ; green composite ; low-energy manufacturing ; recycling

连续纤维增强树脂基复合材料具有轻质、高强、性能可设计等特点,是航空装备轻量化不可或缺的重要结构材料。先进大型客机复合材料中连续纤维增强树脂基复合材料的用量超过 50%,在战斗机复合材料中其用量达到 30%,直升机复合材料中的用量更高达 75% 以上^[1-3]。目前航空装备常用的树脂基复合材料主要是连续纤维增强热固性环氧树脂材料、双马复合材料、聚酰亚胺复合材料,常用的成型方法为预浸料/热压罐成型技术^[4-6]。连续纤维增强树脂基复合材料在飞机装备上的应用,有效减轻了结构重量,为飞机装备实现高性能做出了重要的贡献。

连续纤维增强树脂基复合材料大量应用存在的主要问题之一是绿色环保问题。复合材料热压罐成型能耗高,热固

性树脂回收利用难、成本高,难以满足低碳绿色发展的要求。因此近几年树脂基复合材料绿色化技术得到高度重视,绿色复合材料、复合材料低能耗制造、热塑性复合材料以及复合材料回收再利用等技术得到快速发展。笔者简要介绍了连续纤维增强树脂基复合材料绿色化技术的发展现状,包括绿色复合材料、复合材料低能耗制造、热塑性复合材料以及复合材料回收再利用技术等,展望了连续纤维增强树脂基复合材料绿色化技术的发展趋势。

1 绿色复合材料技术

目前绿色复合材料主要指以高性能可降解连续天然植物纤维作为增强材料、可降解的生物高分子树脂作为树脂基体、通过复合制备的一类连续纤维增强树脂基复合材料。绿

通信作者: 赵淼,博士,高级工程师,研究方向为功能及复合材料

收稿日期: 2024-03-07

引用格式: 赵淼.连续纤维增强树脂基复合材料绿色化技术的研究进展[J].工程塑料应用,2024,52(4):188-192.

ZHAO Miao. Research progress in green technologies of continuous fiber-reinforced resin matrix composites[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(4): 188-192.

色复合材料具有可降解回收、不会对环境造成有害污染等优点。由于以生物质为原材料合成的高分子树脂基体成本较常用普通树脂基体高 1.5~2 倍,导致绿色复合材料的生产成本偏高。此外天然植物纤维力学性能、耐热性和耐水性与碳纤维等传统增强纤维相比存在明显的差距,因此绿色复合材料的性能有待进一步提高。

由于植物纤维和碳纤维与玻璃纤维相比具有更多层次、更多尺度的微观结构,因此植物纤维增强树脂基复合材料具有更加丰富的微观和纳观尺度的界面。通过对天然植物纤维增强树脂基复合材料界面结构损伤破坏模式的优化调控,可有效提升植物纤维增强复合材料的力学性能^[7-13]。李岩等^[7]通过亚麻植物纤维增强复合材料的力学/阻燃结构的一体化优化设计,成功提升了植物纤维增强复合材料综合性能,并作为大型飞机舱内复合材料装饰结构得到示范应用。图 1 为植物纤维的多层次微观结构^[14]。

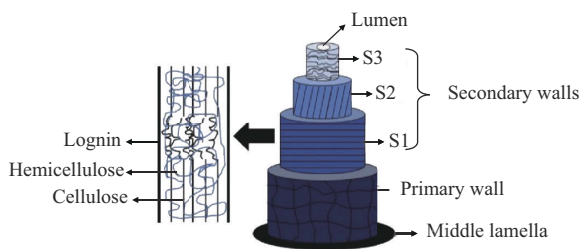


图 1 植物纤维的多层次微观结构示意图

Fig. 1 Schematic of hierarchical microstructures of elementary fibers

连续纤维增强树脂基复合材料绿色化发展的另一个重要方面是研发可降解的环氧树脂。环氧树脂基复合材料一直是航空领域应用最多的复合材料。波音公司 B-787 和空客 A-350 XWB 客机是目前树脂基复合材料用量最大的民用飞机,其机翼、中央翼盒和机身等主承载结构都应用了复合材料,分别达到结构质量的 50% 和 52%。波音公司 B-787 和空客 A-350 XWB 客机所用的复合材料主要是 120 °C 和 180 °C 固化环氧树脂基复合材料。环氧树脂基复合材料中环氧树脂一旦固化,便形成高交联密度的不溶不熔的三维网状结构,因此环氧树脂基复合材料的大量应用会带来严重环境问题。如何处理废弃环氧树脂基复合材料构件是必须解决的难题^[7]。

应用可降解的环氧树脂制备的环氧树脂基复合材料可解决废弃复合材料构件的处理难题。近年来,可降解环氧树脂的研发取得显著进展,如美国复合材料技术服务公司(CTS)成功研制了和碳纤维具有良好的浸润性的可降解生物基环氧树脂基体,采用热压罐成型工艺制备的复合材料,韧性高、层间剪切性能和抗冲击性良好,可用于制造飞机次承载构件、大型风电叶片以及汽车内饰件等^[15-16]。但可降解环氧树脂要全面替代高性能环氧树脂作为复合材料树脂基体使用,还需要进一步在降低成本、提升性能以及积累可降解

环氧树脂基复合材料的应用经验。

2 连续纤维增强树脂基复合材料低能耗制造技术

连续纤维增强树脂基复合材料低能耗制造是复合材料绿色化的重要内容。连续纤维增强树脂基复合材料构件的性能和质量与制造工艺过程密切相关。热压罐成型技术是航空复合材料结构的最主要成型技术之一,其存在的主要问题是热压罐投资大、成型过程能耗大以及成型周期长、效率低。常用的高性能树脂基复合材料包括环氧树脂基、双马复合材料和聚酰亚胺复合材料。这些常用的复合材料一般固化温度在 180 °C 以上,固化周期在 3~5 h 以上,且复合材料固化模具一般由热容量很大的钢制模具,这些导致树脂基复合材料构件在成型过程需要消耗大量的能源和制造成本。为降低树脂基复合材料的制造成本和成型过程中的能耗,以树脂传递模塑(RTM)和非热压罐成型(OoA)技术为代表的低成本低能耗成型技术不断发展^[17-18]。

RTM 工艺过程主要包括制备纤维预成形体,然后将纤维预成形体铺放入模具内,将模具闭合后进行树脂注射,最后树脂固化成型得到复合材料制件。RTM 是一种闭模成型工艺,树脂在模腔中浸润增强体,是一种低成本、高质量的半机械化纤维/树脂浸润方法。其优点是能够制造高纤维体积含量的大型复杂构型的零件,制造过程能耗低、成本低。

经过 30 年的发展和技术积累,RTM 技术已经日趋成熟。在航空复合材料构件成型中得到广泛应用,如 A380 飞机复合材料球面框,波音 787 飞机尾翼、舵面蒙皮等都采用 RTM 成型技术。图 2 为国内采用 RTM 制造的航空发动机压气机机匣和大型飞机垂直尾翼梁。



图 2 RTM 技术制造的发动机压气机机匣和飞机垂尾梁

Fig. 2 Aero-engine compressor casing and aircraft vertical tail spar made of RTM technology

OoA 成型工艺实际是一种和热压罐成型技术相似的真空成型技术,主要难点是降低成型过程中形成的孔隙含量。相关研究表明,采用半浸润的预浸料将干纤维作为排气体的通道,能够有效提高气体渗透性,降低复合材料的孔隙含量。采用 T800/607 半浸润预浸料,在真空压力下制备了五种不同厚度的复合材料单向板,超声 CT 扫描无损检测结果表明,不同厚度的复合材料单向板,均未发现分层、疏松和气泡等缺陷^[19]。OoA 成型和热压罐成型制备的 T700/3228 复合材料的力学性能比较表明见表 1,通过优化 OoA 成型工艺参数,OoA 成型的复合材料同样具有和热压罐成型工艺同样优异的力学性能^[20]。

OoA 工艺成型的复合材料已开始在航空领域得到应用,特别是中小型全复合材料通用飞机,都采用了 OoA 成型复

表1 T700/3228 复合材料 OoA 和热压罐成型力学性能比较^[20]Tab. 1 Comparison of OoA and autoclave molding mechanical properties of T700/3228 composites^[20]

Forming method	Tensile strength/MPa	Bending strength/MPa	Tensile elastic modulus/GPa	Bending elastic modulus/GPa	Compressive strength/MPa	Interlayer shear strength/MPa	Compressive modulus/GPa	Porosity/%
Autoclave molding	2 013	1 648	125	120	1 189	93	120	0.39
OoA molding	1 923	1 432	120	120	983	78	115	2.3
Retention rate/%	95.5	86.9	96	100	82.7	83.9	95.8	—

合材料,如美国西锐公司 SR 20,SR 22 系列飞机采用 Toray 公司 7781/2510 和 T700/2510 OoA 复合材料,庞巴迪研制的全复合材料飞机里尔 85 采用了 Cytec 公司的 IM7/CYCOM5320—1 OoA 复合材料^[21]。图 3 为国内采用 OoA 技术制备的翼展长度达到 18 米的大型无人机机翼壁板。

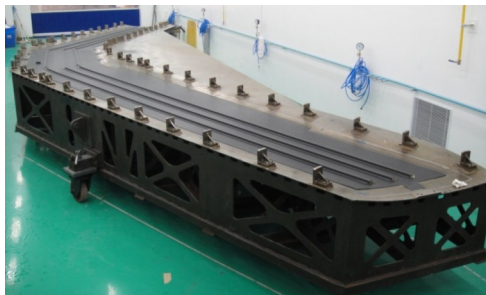


图3 OoA 工艺成型的大型无人机复合材料机翼壁板

Fig. 3 Wing panel made of OoA composites for large unmanned aerial vehicle

3 连续纤维增强先进热塑性复合材料技术

目前航空领域应用的环氧树脂、双马和聚酰亚胺等热固性复合材料,存在难以回收和不可降解等缺点。为克服热固性树脂基复合材料难回收的问题,开始重视易回收先进热塑性复合材料的研发。目前常用的先进热塑性复合材料树脂基体包括:聚醚醚酮(PEEK)系列、聚醚酰亚胺(PEI)、聚苯硫醚(PPS)。这些高性能热塑性树脂基体具有高耐热性、耐介质、耐蠕变、耐腐蚀、耐辐照、优异的抗冲击性和抗疲劳性、阻燃和电绝缘性好等特点^[22],特别是 PEEK 长期使用温度高、耐介质性能优异,成为未来有望在飞机主承力结构,如机翼机身等应用的先进热塑性树脂基体。

连续纤维增强先进热塑性复合材料研究开始于上世纪 70 年代,主要采用热压成型技术制备。由于热塑性树脂熔融黏度大、熔融温度高,导致高性能热塑性复合材料及其构件成型质量差、成本高,难以成型大型复杂构件等,阻碍了高性能热塑性复合材料的发展和应用。随着复合材料大功率激光加热自动铺放装备的发展,为高性能热塑性复合材料快速高效低成本制造带来了新的发展机遇,高性能热塑性复合材料预浸料、自动铺放原位固结成型和焊接技术是当前连续纤维增强高性能热塑性复合材料的研究热点。

自动铺放原位固结成型的热塑性复合材料,其内部质量和热塑性复合材料预浸料的质量有密切关系。热塑性复合材料预浸料中存在的缺陷会影响最终复合材料构件的内部质量。目前熔融浸渍、料浆浸渍和流化态浸渍法是先进热塑

性复合材料预浸料的主要制造方法^[23-27]。

热塑性复合材料自动铺放(AFP)原位固结技术是热塑性复合材料制造技术的重点发展方向。采用 AFP 原位固结技术制备热塑性复合材料不需要使用热压罐等设备,避免了需要使用热压罐对制件尺寸的限制,因此采用 AFP 原位固结技术可以制备飞机整体壁板、大梁、长桁、机身段、进气道等大型复合材料构件。图 4 为 AFP 原位固结成型过程示意图^[28]。由于高性能热塑性树脂一般熔融温度较高,因此为了能够快速加热使高性能热塑性树脂基体熔融,AFP 原位固结技术需要应用高效激光加热铺放设备。

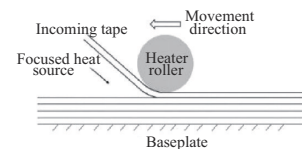


图4 AFP 原位固结成型过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of AFP in-situ consolidation forming process

连续纤维增强高性能热塑性复合材料的另外一个特点是可以高效焊接连接,常用的焊接方法有超声波焊接、电阻焊接、感应焊接技术。超声波焊接的突出优点是周期短,是一种适合批量生产应用的焊接方法。连续纤维增强热塑性复合材料的可焊接性使其具有制造大尺寸、结构复杂的飞机复合材料部件的潜力。图 5 为采用自动铺放技术制造蒙皮,然后通过焊接加筋结构得到的 CF/PEKK 热塑性复合材料机身双曲率加筋壁板^[29]。

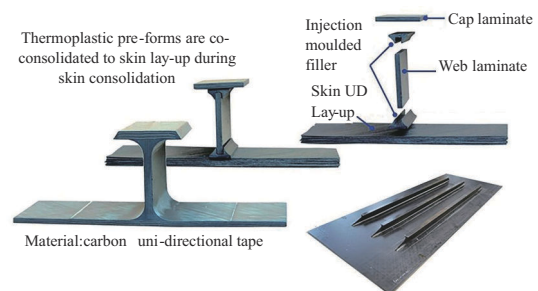


图5 Fokker 公司研发的 CF/PEKK 热塑性复合材料机身壁板

Fig. 5 CF/PEKK thermoplastic composite fuselage panel manufactured by Fokker

4 连续纤维增强树脂基复合材料的回收再利用技术

随着碳纤维大规模产业化生产,连续碳纤维增强树脂基复合材料的应用领域和规模不断扩大,在制造和使用过程产生的复合材料废弃物处理则成为难题。常用的连续碳纤维增强树脂基复合材料主要由碳纤维和热固性树脂复合而成,

具有不溶不熔的特性,回收再利用非常困难,已经成为了阻碍复合材料发展的瓶颈问题。采用掩埋或者焚烧碳纤维复合材料废弃物是最简单的处理方法,处理成本也低,但会造成环境污染和资源浪费,因此发展碳纤维复合材料的回收再利用技术,对于环境保护、节能减排、可持续发展具有重要意义^[30-39]。连续纤维增强树脂基复合材料回收再利用技术主要包括机械粉碎回收法、热解法、超临界流体法和定向解聚法四大类。

(1)机械粉碎回收法。

机械粉碎回收法主要是将连续碳纤维增强树脂基复合材料通过机械力破碎成为尺寸或长度不同的树脂颗粒和短切纤维,回收得到的树脂颗粒和短切纤维可以作为填充回收料再生应用。机械粉碎回收法技术简单,但无法得到连续碳纤维,碳纤维的再利用效果差。

(2)热解法。

热解法是在空气或惰性气体环境中加热使碳纤维复合材料中的树脂基体发生热分解,形成小分子气体逸出,从而实现碳纤维的回收。热解法只能实现碳纤维的回收,并且如果是在空气中热解,回收得到的碳纤维力学性能会有明显的降低。但是如果在惰性气体环境中进行热解,可以得到力学性能基本保持不变的碳纤维。目前通过热解工艺优化基本实现了热解过程“零能耗”^[37-39]。

(3)超临界流体法。

超临界流体对复合材料树脂基体具有很强的溶解能力,超临界流体法利用这种溶解能力将碳纤维复合材料中的树脂基体分解,从而实现碳纤维回收。超临界流体法对碳纤维的力学性能影响很小,并具有原料廉价、回收过程无污染等优点。缺点是回收过程需在高温高压进行,回收设备造价昂贵,回收工艺参数控制难等,要实现规模化回收尚存在许多问题。

(4)定向解聚法。

定向解聚法是通过特定的溶剂、温度和压力将高分子特定的键位打开,形成长链单体或者树脂原材料,同时实现树脂基体和碳纤维的回收再利用。定向解聚法是真正意义上实现循环经济的好方法,其缺点是对于不同的树脂基体需要选择不同溶剂和回收工艺参数,通用性相对较差。目前连续纤维增强树脂基复合材料定向解聚法回收再利用研究仍处于实验室阶段。

国外早在20世纪初就开始碳纤维增强树脂基复合材料回收再利用技术的开发,目前日本的碳纤维主要生产厂商东丽、东邦Tenax、三菱丽阳和日本碳纤维再生工业公司都成功开发了热解法回收技术和相关设备,以及回收碳纤维的再利用技术,实现了碳纤维增强树脂基复合材料工业化回收再利用。

国内上海交通大学研制了树脂基复合材料纤维规模化连续回收处理装置,如图6所示。首先通过高温无氧气体发生器制取高温无氧气体对处理容器中的纤维增强复合材料

废料进行无氧加热,使复合材料的树脂基体在高温无氧环境下裂解产生可燃气体。采用闭路循环技术,利用树脂分解产生的可燃气体对气体发生器和处理容器进行加热,显著降低了设备的运行成本,实现了真正意义上的“零排放”。处理后得到的碳纤维力学性能保持率达到85%以上。



图6 树脂基复合材料纤维规模化连续处理回收装置

Fig. 6 Large-scale continuous processing and recycling device for resin matrix composites fiber

定向解聚法是目前树脂基复合材料回收再利用的研究热点。在加热条件下,环氧树脂在醇溶剂(乙二醇、丙二醇)中与其发生动态键交换反应(反应温度为140~200℃),树脂降解为低聚物并完全溶解于醇溶剂中^[31]。醇解回收在常压及较低温度下进行,方法更简单、条件更温和,是比较有前景的定向解聚法。进一步研究表明,将醇解回收低聚物作为反应物与环氧树脂原材料混合制备的再利用环氧树脂。当低聚物质量分数为10%~30%时,再利用环氧树脂的力学、热学性能与原环氧树脂相当,尤其是低聚物质量分数为20%时,再利用环氧树脂在保证强度不变的同时,断裂伸长率提高50%。

5 结语

随着连续纤维增强树脂基复合材料的快速发展和大量应用,以及环境保护要求的不断提高,连续纤维增强树脂基复合材料绿色化发展成为时代的必然趋势。

(1)基于天然可再生资源制备绿色复合材料是当前连续纤维增强树脂基复合材料发展的热点之一,其发展方向是进一步降低生物质树脂的成本,提高力学性能、耐高温和耐候耐介质性能,并积累应用经验,实现高性能和高端领域应用。

(2)预浸料/热压罐成型技术能够保证成型制备的连续纤维增强树脂基复合材料的高性能和高质量,是目前航空复合材料构件最主要成型技术,其缺点是设备高投入、工艺过程高能耗,因此迫切需要扩大RTM和OoA等低成本低能耗成型技术的应用,实现连续纤维增强树脂基复合材料的低能耗制造并不断降低制造成本。

(3)先进热塑性复合材料不但具有优异的力学性能,而且具有可二次成型和废料易回收特点,满足当前环境保护和资源再利用等绿色化发展的大趋势。先进热塑性复合材料在航空装备主承力结构等的大量应用,必须真正突破原位铺

放成型技术。

(4)回收再利用技术是连续纤维增强树脂基复合材料持续发展的关键之一,目前应该以高温热解法为主,实现碳纤维的高效回收,解决碳纤维复合材料废弃物对环境的污染。未来应发展定向解聚法回收技术,实现复合材料高效全面回收再利用。

参考文献

- [1] MAZUMDAR S K. Composite manufacturing: Materials product and process engineering[M]. LLC, USA: CRC Press, 2002.
- [2] BAILLIE C. Green composites: Polymer composites and the environment[M]. Cambridge, England: Woodhead Publishing Ltd & CRC Press LLC, 2004.
- [3] LEGAULT M. Composites Technology, 2013, 171. DOI: 10.1177/07316844211058708.
- [4] 陈祥宝,等.中国材料进展,2009,28(6):2-12.
CHEN Xiangbao, et al. Materials China, 2009, 28(6):2-12.
- [5] 布斯诺.面向制造与装配的产品设计[M].北京:机械工业出版社,1999.
GEOFFREY B. Product design for manufacture and assembly[M]. Beijing: China Machine Press, 1999.
- [6] 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.
- [7] 李岩,等.固体力学学报,2017,38(3):215-243.
LI Yan, et al. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2017, 38(3): 215-243.
- [8] 李岩,等.力学季刊,2022,43(4):731-750.
LI Yan, et al. Chinese Quarterly of Mechanics, 2022, 43(4): 731-750.
- [9] 马豪,等.材料工程,2015,43(10):14-19.
MA Hao, et al. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(10): 14-19.
- [10] 罗业,等.材料工程,2010(4):51-54.
LUO Ye, et al. Journal of Materials Engineering, 2010(4):51-54.
- [11] 袁卫可,等.航空材料学报,2022,42(2):41-46.
YUAN Weike, et al. Journal of Aeronautical Materials, 2022, 42(2):41-46.
- [12] SORRENTINO L, et al. Materials, 2022, 15. DOI: 10.3390/ma15228173.
- [13] SIENKIEWICZ N, et al. Polymers, 2022, 14. DOI: 10.3390/polym14020265.
- [14] ZHANG Z S, et al. Composites Science and Technology, 2020, 194. DOI:10.1016/j.compscitech.2020.108151.
- [15] 杨萍.玻璃钢,2013(4):42-46.
YANG Ping. Fiber Reinforced Plastics, 2013(4):42-46.
- [16] 李岩,等.固体力学学报,2010,31(6):613-630.
LI Yan, et al. Chinese journal of solid mechanics, 2010, 31(6): 613-630.
- [17] EKUASE OA, et al. Journal of Composites Science. 2022, 6. DOI: 10.3390/jcs6060172.
- [18] 唐见茂.航天器环境工程,2014,31(6):577-583.
TANG Jianmao. Spacecraft Environment Engineering, 2014, 31(6):577-583.
- [19] 周宇,等.宇航材料工艺,2017,47(3):57-60.
ZHOU Yu, et al. Aerospace Materials & Technology, 2017, 47(3): 57-60.
- [20] 许皓,等.宇航材料工艺,2021,51(1):50-54.
XU Hao, et al. Aerospace Materials & Technology, 2021, 51(1): 50-54.
- [21] 曾小苗,等.纤维复合材料,2016,33(2):11-14.
ZENG Xiaomiao, et al. Fiber Composites, 2016, 33(2):11-14.
- [22] 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.
- [23] REN F, YU Y, CAO M H, et al. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2017, 36(21):1 554-1 563.
- [24] 屈李端,等.航空制造技术,2020,63(5):87-92.
QU Liduan, et al. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(5):87-92.
- [25] 张凤翻,等.制备预浸料的JFY-1静电粉末预浸机及其制备工艺[J].航空制造工程,1995(9):19-20.
ZHANG Fengfan, et al. Aeronautical Manufacturing Engineering, 1995(9):19-20.
- [26] ASAI T, et al. Method of manufacturing continuous fiber-reinforced thermoplastic prepregs:US5529652A[P]. 1996-06-25.
- [27] OLIVIER R, et al. Method for producing carbon fiber resin composition:US8012289B2[P]. 2011-09-06.
- [28] 刘媛媛.国际航空,2023(7):67-72.
LIU Yuanyuan. International Aviation, 2023(7):67-72.
- [29] 罗云烽,等.航空制造技术,2021,64(16):93-102.
LUO Yunfeng, et al. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(16):93-102.
- [30] 安乐,等.复合材料学报,2023,40(5):2 575-2 586.
AN Le, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(5): 2 575-2 586.
- [31] TIAN Zishang, et al. New Carbon Mater, 2022, 37(6): 1 021 - 1 045.
- [32] LIU Tuan, et al. Macromol Rapid Commun, 2022, 43. DOI: 10.1002/marc.202200538.
- [33] 阮芳涛,等.纺织学报,2019,40(6):153-158.
RUAN Fangtao, et al. Journal of Textile Research, 2019, 40(6): 152-157.
- [34] 李丽英,等.化工新型材料,2021,49(9):20-22.
LI Liying, et al. New Chemical Materials, 2021, 49(9):20-22.
- [35] 陈瑞哲,等.化工学报,2023,74(3):981-994.
CHEN Ruizhe, et al. CIESC Journal, 2023, 74(3):981-994.
- [36] XING Mingfei, et al. Composites Part B:Engineering, 2021, 224. DOI:10.1016/j.compositesb.2021.109230.
- [37] 韩克清,等.中国材料进展,2012,31(10):30-36.
HAN Keqing, et al. Materials China, 2012, 31(10):30-36.
- [38] 唐见茂.航天器环境工程,2015,32(5):457-463.
TANG Jianmao. Spacecraft Environment Engineering, 2015, 32(5):457-463.
- [39] 付善龙,等.化工新型材料,2023,51(9):134-138.
FU Shanlong, et al. New Chemical Materials, 2023, 51(9): 134-138.