

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.07.027

# 民用航空复合材料液体成型技术发展趋势

罗云峰<sup>1</sup>, 刘新宇<sup>2</sup>, 刘强<sup>2</sup>, 卓鹏<sup>2</sup>

(1. 中航复合材料有限责任公司, 北京 101300; 2. 中国航空工业制造技术研究院复合材料技术中心, 北京 101300)

**摘要:** 先进复合材料因轻量化、高性能等优势,在航空领域的应用率持续提升。复合材料液体成型(LCM)技术作为低成本非热压罐技术,通过树脂浸润纤维预成型体固化成型复合材料结构,具有成本低、设计灵活等优势,其应用已从次承力结构拓展至主承力构件。本文介绍了可控大气压力树脂浸渍技术、树脂传递模塑成型、真空辅助成型技术、高纤维体积分数真空灌注成型技术等工艺在波音、空客等机型上的应用,以及庞巴迪、俄罗斯联合飞机制造公司在主承力结构的技术突破。同时分析了欧洲“明日之翼”、NASA HiCAM等项目的技术革新,介绍了干纤维自动铺放、自动加强筋成型、智能树脂注入及在线监测技术等先进技术的发展进展。研究表明,LCM正朝着高纤维体积分数、高尺寸精度、高速率制造及智能化方向发展,但其在工艺一致性、缺陷控制、标准化体系及适航验证等方面仍面临挑战,未来需在材料体系、工艺模拟、在线监测及自动化装备等方面持续突破,以支撑民用航空复合材料结构的高效、低成本与规模化制造。

**关键词:** 复合材料;飞机制造;液体成型;自动化制造;结构构件

**中图分类号:** TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)07-0234-10

## Trends in development of liquid molding technology for civil aviation composites

LUO Yunfeng<sup>1</sup>, LIU Xinyu<sup>2</sup>, LIU Qiang<sup>2</sup>, ZHUO Peng<sup>2</sup>

(1. AVIC Composite Corporation Ltd., Beijing 101300, China;

2. Composite Technology Center, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 101300, China)

**Abstract:** Advanced composite materials, owing to their advantages such as lightweight characteristics and high performance, have seen continuously increasing application in the aerospace sector. Liquid composite molding (LCM) technologies, as low-cost out-of-autoclave processes, enable the manufacturing of composite structures through resin infiltration and curing of fiber preforms, offering benefits such as reduced cost and design flexibility. Its application has expanded from secondary load-bearing structures to primary load-bearing components. The application of processes such as controlled atmospheric pressure resin infusion, resin transfer molding, vacuum assisted process and high fiber-volume vacuum infusion in aircraft platforms including Boeing and Airbus was reviewed in this paper, and technological breakthroughs achieved by Bombardier and Russian United Aircraft Corporation in primary load-bearing structures were highlighted. Technological innovations from programs such as Europe's "Wings of Tomorrow" and NASA's HiCAM were also analyzed, and recent advances in dry fiber automated placement, automated stiffener forming, intelligent resin injection and in-situ monitoring technologies were summarized. The results indicate that LCM technologies are evolving toward higher fiber volume fraction, improved dimensional accuracy, higher-rate manufacturing and increased intelligence. However, challenges remain in process consistency, defect control, standardization systems and airworthiness certification. Future developments will require continued breakthroughs in material systems, process simulation, in-situ monitoring and automated equipment in order to support efficient, low-cost and large-scale manufacturing of composite structures for civil aviation.

**Keywords:** composite; aircraft manufacturing; liquid composite molding; automated manufacturing; structural component

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2023YFB3709804)

**通信作者:** 刘新宇,工程师,研究方向为树脂基复合材料

**收稿日期:** 2026-04-19

**引用格式:** 罗云峰,刘新宇,刘强,等.民用航空复合材料液体成型技术发展趋势[J].工程塑料应用,2026,54(7):234-243.

LUO Yunfeng, LIU Xinyu, LIU Qiang, et al. Trends in development of liquid molding technology for civil aviation composites[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(7): 234-243.

先进复合材料凭借质量轻、比强度高、可设计性强及综合成本低等优势,其应用已从民用船舶、风电等领域逐步拓展至航空航天领域<sup>[1-3]</sup>,并成为衡量航空装备先进性的核心指标之一<sup>[4-5]</sup>。在民用航空领域,复合材料应用率持续攀升,当前波音B787、空客A350等机型的复合材料结构质量分数已突破50%,推动了飞机设计与制造模式的深刻变革<sup>[6]</sup>。随着复合材料在机身、机翼等主承力构件上的应用日趋成熟,低成本制造与自动化技术开发越来越受重视。而民用航空复合材料结构的经济性在很大程度上受制造成本影响,据统计其制造费用约占总成本的70%。为降低制造成本并提高生产效率,非热压罐(OOA)成型技术逐渐成为研究热点。其中,液体成型技术(LCM)凭借设备投资低、工艺适应性强等特点,在航空复合材料制造领域获得了广泛应用<sup>[7]</sup>。LCM技术通过在模腔中铺放纤维预成型体,利用树脂流动浸润纤维并固化成型<sup>[8]</sup>,相比于传统的热压罐工艺,具有成本低、设计自由度大、适用于大尺寸结构整体成型及可实现自动化生产等显著优势。近年来,树脂传递模塑成型(RTM)、树脂膜熔渗(RFI)、真空辅助树脂灌注(VARI)等低成本LCM技术快速发展,推动复合材料应用由整流罩、舱门等次承力结构,逐步向机翼盒段、机身框架等主承力结构延伸。从技术特点上来说,高效率、自动化、智能化已成为液体成型技术的主要发展趋势。本文将针对民用航空复合材料液体成型技术发展现状及趋势展开综述,并对未来的技术发展提出展望。

## 1 民用航空复合材料液体成型技术体系与典型工艺

### 1.1 真空辅助树脂灌注技术发展进展

在所有LCM技术中,VARI技术由于具备无需热压罐、树脂注射机等装备,且固化仅需半刚性模具等优势,是最具低成本应用潜力的技术之一,目前已在民用航空器上实现广泛应用。在结合新型技术应用上,VARI技术适合尺寸大、厚度大构件的整体成形<sup>[9]</sup>,在结合干纤维自动铺放技术方面具有独特优势<sup>[10-11]</sup>。

目前,国内外已对适用于VARI技术的树脂进行了大量开发,主要为热固性树脂,包括不饱和聚酯、乙烯基酯树脂、环氧树脂等。不饱和聚酯及乙烯基酯树脂成本低,常温下黏度低,但力学性能较差,更适用于风电叶片或汽车等领域。在高性能航空复合材料领域,应用最多的为改性中高温固化环氧树脂,如比利时Syensqo公司开发的CYCOM系列环氧树脂,其注射温度覆盖常温至100℃,使用温度可达100℃以上;美国赫氏公司开发的HexFlow RTM-6树脂注射温度为70~100℃,注射黏度80~200 mPa·s,使用温度达133℃,是国外航空复合材料部件使用较多的树脂之一。

国内对适配VARI工艺的树脂也进行了许多研究。北京航空制造工程研究所<sup>[12]</sup>自主研发的BA9912三组分中温固化环氧树脂,其室温黏度<250 mPa·s,室温使用期>12 h,采用该树脂制成的复合材料使用温度在-55~82℃,基本覆盖民用航空领域冷端结构部件的使用需求;中航工业复材中心开发的3228树脂也是一种单组分中温环氧树脂体系,其注

射黏度在室温下为150 mPa·s,操作周期>8 h,储存周期长(-18℃大于1年),玻璃化转变温度>148℃,可在82℃环境下长期使用;此外,5284VARI树脂是另一种单组分高温环氧树脂体系<sup>[13]</sup>,在保证注射黏度、可操作周期以及储存周期条件下,其玻璃化转变温度大于220℃,可在133℃条件下长期使用。目前适配于VARI工艺的树脂已实现商品系列化,支撑了多数航空低成本复合材料构件的研制与生产。

除对树脂持续研发与改进之外,国内外也对VARI工艺过程优化进行了探究。相对于非航空民用产品而言,民用航空复合材料制件对VARI工艺的成形质量提出了更高的要求。传统的VARI工艺其树脂在渗透过程中,容易产生压力差较大导致厚度不均,以及制件纤维体积含量低等问题。美国波音公司在传统VARI工艺基础上,提出了可控大气压力树脂浸渍技术(CAPRI),首次采用了可控真空度的形式进行树脂渗透,在进胶口以及出胶口附近均设置了真空源,严格控制树脂的吸入和抽出过程,改善了制件厚度不均的问题。此外,在灌注前通过交替改变真空压力,对纤维预制品进行10~20次的压实循环,通过纤维与纤维束之间的互锁改变织物的压实特性,减小织物厚度,最终在设定的真空度下灌注实现了纤维体积分数的提高。

CAPRI技术的典型应用为B787的机翼活动面,包括襟副翼和扰流板等。图1为B787襟副翼加筋壁板,该构件由澳大利亚De-Havilland公司采用CAPRI技术制造。其工艺过程中使用了新型注射树脂以及由新型碳纤维束编织的无纬布材料,先对纤维铺层进行缝合并置于设备中完成预成型,随后进行树脂注射成型。由于在材料体系、工艺方法以及结构设计等方面均进行了优化,相较于传统动翼夹芯结构及热压罐工艺制造的制品,其整体制造质量得到了明显提升。



图1 B787襟副翼加筋壁板

Fig. 1 Stiffened panel of B787 outer aileron-flap

同时,CAPRI技术也存在应用局限性,由于在灌注过程中对压力差的控制,树脂在浸渍过程中的前驱力不足,灌注时间通常较长,故CAPRI技术更适用于黏度更低且工艺窗口时间较宽的树脂,且树脂在纤维中的流道也需持续优化。

此外,空客公司结合VARI工艺自主开发了真空辅助成型技术(VAP),和CAPRI以及传统VARI技术不同的是,它在真空袋和纤维预制品中增加了一种专用的微孔柔性薄膜。

该膜系统透气但不透树脂,当树脂渗透后,它将织物/树脂与真空通道分开,织物内部的空气和气体可以通过微孔溢出,因此制造出来的产品孔隙率低,纤维含量高<sup>[14]</sup>。

空客利用该技术成功研制并生产了A380襟翼及A350后压力框等复合材料构件。其中,采用该工艺制造的复合材料承压框可实现经编格栅与蒙皮的一体化成型,使用的复合材料体系同时具备优异的阻燃、低烟及低毒性能,因此无需额外设置防火层。图2所示为A350后压力框,相比传统RFI工艺制造的结构,该类构件在满足性能要求的同时实现了更轻量化的设计,较A380相关结构的RFI工艺方案减重约15%<sup>[15]</sup>。



图2 A350后压力框

Fig. 2 Rear pressure bulkhead of A350

A400M大型运输机的后货舱门同样采用真空辅助成型技术(VAP)工艺制造。如图3所示,该结构在长约7 m、宽约4 m的货舱门蒙皮内表面布置了16根长桁进行增强,实现了大型复合材料货舱门的整体化成型。与传统机械连接结构相比,该工艺显著减少了数千个连接件的使用,不仅降低了装配复杂度,还取得了明显的减重效果。



图3 A400M上货舱门

Fig. 3 Upper cargo door of A400M

同时,VAP技术也存在一定技术缺点,如其单向柔性模成本高昂,质量一致性要求高等,一旦在升温以及固化过程中产生树脂渗流等问题,将直接导致零件报废。

在传统VARI工艺基础上,中航工业复合材料技术中心

开发了高纤维体积分数真空灌注成型技术(HFVI)。该技术通过引入树脂缓冲与真空导流设计,对传统VARI依赖点式真空出口排胶的工艺模式进行了改进,取消了专用的排胶通道,实现了近“零排胶”成型。该方法不仅减少了树脂浪费,而且提高了树脂用量的可控性,从而有效降低制造成本。与此同时,HFVI工艺采用多种预制体压实措施,在树脂浸润和固化过程中保持纤维增强体的高压实状态,使制件纤维体积分数可达到56%以上,并显著改善厚度均匀性,满足 $\pm 6\%$ 的厚度公差要求。此外,通过在树脂分配介质与纤维预成型体之间设置柔性隔离层,可有效降低表面印痕缺陷,进一步提升制件表面质量,使制件整体能够接近预浸料铺层/热压罐工艺制件水平。

目前HFVI技术主要应用在飞机次承力结构制件成型上,如某型飞机的大型舱门结构,以及ARJ21(现为C909)的全尺寸升降舵结构等。图4为使用HFVI技术成型的民机襟翼典型结构件,与VARI工艺相比,其树脂用量、树脂管道长度、清洗溶剂用量均有所减少,制造成本显著降低。在襟翼典型件的厚度分区监测中,“工”型肋翻边、“工”型肋腹板及“C”型梁等较难控制区域,其厚度偏差均在6%以内,展现出更高的成型质量<sup>[16]</sup>。



图4 采用HFVI技术研制的民机襟翼典型结构件

Fig. 4 Typical structural part of civil aircraft flap developed by HFVI technology

## 1.2 树脂转移成型技术发展进展

RTM技术起源于20世纪40年代末,是LCM技术中发展最早的技术之一。由于RTM为闭模成形工艺,具备尺寸精度高、可重复性好、可适应性好(可结合预制体缝合、Z-Pin以及三维预制体等)<sup>[17]</sup>以及环境友好等优点。

对于RTM工艺而言,对树脂的工艺性要求基本与VARI工艺一致,目前已商品化的液体成形工艺树脂基本上都能满足RTM以及VARI工艺的需求,因此国外对两种工艺树脂的组分和牌号没有严格区分。但RTM工艺由于其特殊性,相较于VARI工艺来讲,其树脂种类的使用范围更宽。在航空领域中,除环氧树脂以外,双马来酰胺或聚酰亚胺树脂已在RTM技术中得到了应用。国外常见的RTM树脂牌号,除在VARI工艺中提到的一些以外,还有MY720、LSU940、PR系列环氧树脂,以及XU292X、5250-4-RTM等双马来酰胺树

脂。其中,双马来酰胺树脂的玻璃化转变温度均可达到250℃以上,有效扩展了RTM制件在航空构件领域的应用<sup>[18-19]</sup>。

目前,RTM技术在民用航空制件上已得到了多数应用。早期空客A320使用的复合材料应用大多局限于次级结构。第一架A320于1987年投入使用,其具有10个复合材料扰流板,这些扰流板由碳纤维预浸料手工铺贴后层压制成。但随着目前市场对单通道客机的需求量持续提高,A320产量需求也随之增加,其扰流板制造也需要从手工组装转移到“高度自动化、高质量的制造过程”。Spirit AeroSystems公司于2021年8月向空客公司交付了第一批使用RTM技术生产的新A320扰流板,如图5所示。其采用欧洲Teijin提供的碳纤维非卷曲物(NCF)和Hexcel的玻璃纤维平纹织物制备预成型体,采用Hexcel RTM6单组分环氧树脂后,扰流板构件可在约5 h内完成注射和固化成型。得益于工艺流程的优化,制造成本较传统工艺降低30%以上,同时实现了更高的生产效率和制造经济性<sup>[20]</sup>。



图5 A320扰流板

Fig. 5 Spoiler of A320

空客复合材料技术中心采用干纤维预成型和RTM技术研制了A350的复合材料窗框。该纤维预成型体采用干纤维自动铺缝技术制备(纤维变角度牵引铺缝技术),通过精确控制干纤维的牵引与铺放路径,实现单层内纤维取向的连续变化,从而优化复合材料结构件的整体强度与刚度分布。该技术在变截面及复杂曲面构件的预成型制造方面具有明显优势,但受工艺与装备限制,较难应用于大尺寸构件的成型。

奥地利Alplex公司采用Hexcel RTM6-2双组分树脂体系,采用高压RTM(HP-RTM)技术成型了A350门框,通过自动化生产系统,整个成型周期约为4 h,零件成本降低30%,生产效率达到500~1 000个/年。除上述典型构件外,RTM工艺还被应用于空客A380机翼副翼梁以及机身窗框等结构件的制造,进一步验证了该工艺在航空复合材料承载结构中的工程适用性<sup>[21]</sup>。

现如今,RTM结合三维机织/编织技术也成为国内外学者的研究焦点之一,两种技术均可实现高度自动化,可以保证制件的质量一致性<sup>[22]</sup>。三维预制体由于其特殊性,更适用于高韧性的树脂基体。Cytec公司开发的PR520以及赫氏公

司开发的RTM230ST均为高性能增韧环氧树脂的代表,均要求在(160±5)℃下注射,需要采用RTM成形平台加热或模具自加热的形式进行树脂注射。其中PR520树脂和三维编织/机织预制体系已广泛应用于民用航空发动机领域,实现应用最早的是美国GE公司生产的GEnx发动机包容机匣,采用了二维三轴编织物作为增强体,通过RTM成形得到全复合材料包容机匣,相较于金属结构,全台发动机可减重约160 kg。机织结构/RTM体系应用最早且最成熟的案例为CFM国际公司生产的LEAP-X发动机风扇叶片及风扇包容机匣,如图6所示,其材料体系为IM7/PR520,目前已在波音737max、空客A320neo等单通道客机以及国产飞机C919上实现装机和运营。采用该技术的LEAP发动机与采用金属方案的CFM56发动机相比,在维持可靠性基础上,质量降低了453.6 kg(1 000 lb)以上,燃油效率提高16%,NO<sub>x</sub>排放量降低60%,噪音水平降低10~15 dB,在窄体干线民用航空发动机领域具备绝对竞争力<sup>[23-24]</sup>。



图6 LEAP-X发动机

Fig. 6 LEAP-X engine

### 1.3 树脂膜熔渗技术发展

RFI技术源于20世纪40年代的MACRO法,为开发低成本的复合材料成形技术,国内外研究机构对RFI技术进行了大量研究。RFI工艺的特点是将树脂膜与纤维预制体预先布置在成形封装系统内,树脂在升温过程中熔融渗透纤维,与复合材料铺层工艺相似,无需外界的树脂导入及人为操作,因此没有注射窗口的要求。但树脂需在室温条件下成膜,且在特定温度能够保持一定时间的低黏度状态(黏度区间和预制体结构、厚度等密切相关)。此外,由于树脂均为树脂膜,在成形前应提前计算好纤维与树脂的含量,纤维与树脂也应具有良好的匹配性<sup>[25]</sup>。

适用于RFI工艺的树脂也均为热固性树脂,包括不饱和树脂、环氧树脂、双马来酰胺树脂等。在航空领域RFI环氧树脂和双马来酰胺树脂应用最为广泛。国外常见的RFI树脂牌号有HexPly®M36、HexPly®M18、Cytec-5250等,其中,HexPly®M36、HexPly®M18基体均为环氧树脂,其玻璃化转变温度均在200℃左右。国内具有代表性的RFI专用树脂为5228RFI以及QY9512,均为中航工业复材中心研制。5228RFI树脂为环氧树脂体系,固化温度为180℃,目前已在

多种航空机身结构件上得到验证。QY9512树脂基体为双马来酰胺树脂,耐高温性好,具有较好的成膜性,性能稳定<sup>[26]</sup>。

在RFI技术的应用方面,复合材料加筋壁板结构是各类机型应用最广泛的结构形式。美国国家航天局(NASA)以发展新一代高速运输机机身和机翼为牵引,组织实施了先进复合材料技术(ACT)研究计划。ACT计划开展了缝合整体成形复合材料技术研究,研究发现加筋壁板结构中,缝合/RFI技术是结构可行且成本最可控的成形方式。依靠ACT计划研制的先进缝合设备,波音公司也采用了相同技术研制了尺寸为13.5 m×2.7 m的半翼展机翼壁板,由于在厚度方向上缝合纤维的引入,其抗损伤能力得到大幅提高,冲击后压缩强度(CAI)提高两倍以上,Ⅰ型层间断裂韧性( $G_{Ic}$ )提高10倍,Ⅱ型层间断裂韧性( $G_{IIc}$ )提高25%。此外,采用该方法制备的机翼相较于传统铝合金结构成本下降20%,减重25%以上。

同时,波音B787的尾翼、副翼、襟翼、扰流板以及大部分地板横梁等部件也采用RFI技术,使用HexFlow RTM6树脂和三维机织碳纤维织物,性能接近预浸料/热压罐工艺制品<sup>[27-28]</sup>。A380机身压力框采用RFI工艺制造。该构件尺寸约为6.2 m×5.5 m×1.6 m,属于大型穹形整体结构,传统热压罐手工铺层工艺存在制造效率低、工时消耗大的问题。

为此,采用SAERTEX双轴向NCF织物铺层,并利用聚甲基丙酰亚胺泡沫填充帽型加强筋形成整体预成型体,随后在阳模上采用CYCOM 977-2树脂膜完成浸渍与固化,实现了大型复杂复合材料后压力框的一体化制造<sup>[29]</sup>,整体制造成本降低50%。相关研究结果表明,使用NCF液体成型工艺的制品CAI值相较于预浸料层合板更高,冲击后损伤程度更小<sup>[30]</sup>。

鉴于RFI技术在大尺寸壁板结构整体成形方面的优势,国内多家研究机构自20世纪90年代起对RFI技术展开了研究。中航工业复材中心除开发了RFI专用树脂外,在制造工艺方面,突破了多项RFI在航空结构上应用的关键技术,建立了新的RFI工艺树脂流动模型,降低了工艺对树脂黏度的依赖,解决了复杂结构中树脂渗透的问题。此外,提出了RFI工艺树脂量控制方法,解决了预制品及结构不同厚度区域树脂含量不均的问题,实现了RFI树脂含量的参数化控制。

#### 1.4 技术特点总结

LCM工艺以其独特的优势广泛应用于航空制造领域,且多年来技术不断革新,形成了VARI(CAPRI、VAP、HFVI)、RTM以及RFI等工艺体系。表1对常见民用航空次承力结构部件复合材料LCM工艺进行了对比<sup>[31-33]</sup>。

表1 民用航空次承力结构部件复合材料LCM工艺对比

Tab.1 Comparison of LCM processes for composite structures of civil aviation secondary load-bearing components<sup>[31-33]</sup>

| Item                            | CAPRI                                   | VAP                                                | HFVI                              | RTM/HP-RTM                                               | RFI                                                   |
|---------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Resin injection/pressure        | Controlled vacuum-assisted infusion     | Vacuum-assisted resin infiltration                 | High-fiber-volume vacuum infusion | Resin injected into closed mould under vacuum/pressure   | Resin film impregnated under vacuum and heat          |
| Pressure level                  | Vacuum                                  | Vacuum                                             | Vacuum                            | 0.2–1 MPa (HP-RTM: 6–10 MPa)                             | Vacuum+autoclave pressure                             |
| Typical resin viscosity/(mPa·s) | 15–250                                  | 15–250                                             | Low viscosity                     | 100–500                                                  | ~100–1 000                                            |
| Typical fiber volume fraction/% | 55–58                                   | 53–56                                              | ≥56                               | 55–65                                                    | ≥60                                                   |
| Typical applications            | Fairings, skins, stiffened panels       | Large aerostructures                               | Complex hollow structures         | Primary aircraft structures, frames, ribs                | Aircraft skins, panels, stiffeners                    |
| Representative components       | B787 movable trailing edge              | A400M rear cargo door, B787 rear pressure bulkhead | Wing ribs, sealed cavities        | A320 spoilers, A350 door frames/ribs                     | A380 rear pressure bulkhead, B787 fuselage stiffeners |
| Advantages                      | Good fiber distribution, stable quality | Low porosity, good surface finish                  | High fiber volume, fewer defects  | High dimensional accuracy, suitable for large composites | Excellent mechanical properties                       |
| Limitations                     | Long cycle time                         | Complex process control                            | Sensitive to resin viscosity      | High tooling cost                                        | High manufacturing cost                               |

综合来看,不同液体成型工艺各具特点。其中,VARI类工艺(CAPRI、VAP、HFVI)更适用于大尺寸、低成本整体结构制造,在设备投入与大型化制造方面具有优势;RTM工艺则更适用于尺寸精度要求高、批量化程度高的复杂构件;RFI工艺兼具较高纤维体积分数与良好结构性能,但仍需依赖热压罐等设备,成本优势相对有限。未来航空液体成型技术的发展趋势并非单一工艺替代,而是根据结构尺寸、性能需求

与产能目标形成多工艺协同应用体系。

## 2 液体成型技术在民机大型主承力结构中的研究与应用进展

### 2.1 C系列飞机外翼盒段液体成型技术

加拿大庞巴迪公司在C系列飞机(现为空客A220)研制过程中广泛采用了树脂灌注(RI)技术。该工艺利用真空辅助树脂流动完成干纤维预制品浸渍,并结合热压罐压力提高

层间压实效果和结构致密性,从而降低孔隙率并提升件性能。C系列飞机复合材料用量约占结构质量的46%,主要用于机身中段、尾翼、尾锥及机翼等部位,其中机翼是复合材料应用最为集中的结构之一。

其中,庞巴迪贝尔法斯特工厂采用RI工艺制造了外翼盒段,如图7所示。制造过程中,首先完成蒙皮、长桁及翼梁等NCF预制体铺放,随后将其转移至模具内,在热压罐环境下完成树脂灌注与固化成型。热压罐提供的外部压力不仅能够提高预制体压实程度,还可促进树脂在大尺寸复杂结构中的均匀浸润,从而有效控制孔隙缺陷并提高纤维体积分数。



图7 RI技术成型的外翼盒段

Fig. 7 The outer wing box section formed by RI technology

由于融合了液体成型工艺成本优势与热压罐固化质量优势,RI技术兼具整体化制造能力和复杂曲面成型能力,特别适用于大型航空复合材料主承力结构。与此同时,复合材料优异的比强度、耐腐蚀性及抗疲劳性能使其在机翼等关键承载部件中的应用具有显著优势,不仅能够降低结构质量和燃油消耗,还可减少服役期间的维护与检测需求,从而提升飞机全寿命周期经济性<sup>[34]</sup>。

## 2.2 MC-21飞机机翼液体成型技术

俄罗斯联合飞机制造公司(UAMC)研发的MC-21客机机体结构设计采用了近40%的复合材料。为提高竞争力,UAMC联合相关制造商与材料供应商,结合VARI工艺,针对MC-21的翼梁、壁板蒙皮、中央翼盒等主承力构件开发了干纤维液态成型技术,其中使用该技术制造的翼盒原型件孔隙率达到了0.3%,纤维体积分数达60%以上,是ADFP/液体成形工艺的标志性成果<sup>[4,35]</sup>。图8a为采用该技术成型的MC-21飞机机翼。

MC-21是大型民用飞机历史上首次采用液体成型工艺生产机翼主承力构件,掀起了新一轮复合材料制造工艺的变革。图8b为MC-21机翼翼梁干纤维铺放过程图,图8c为翼梁VARI液体成型过程。

## 2.3 技术特点总结

民用航空复合材料液体成型工艺凭借成本低、效率高、成型精度优及制品性能与预浸料/热压罐工艺相当等优势,推动了液体成型复合材料在民机结构中的应用从非、次级承力件逐步拓展至主承力构件。通过结合自动化技术,LCM工艺可实现在更大结构、更高纤维体积分数含量构件上的应用。此类技术突破不仅显著减轻构件质量、提升抗腐蚀与抗疲劳性能,还通过整体化成型减少连接件,推动复合材料在

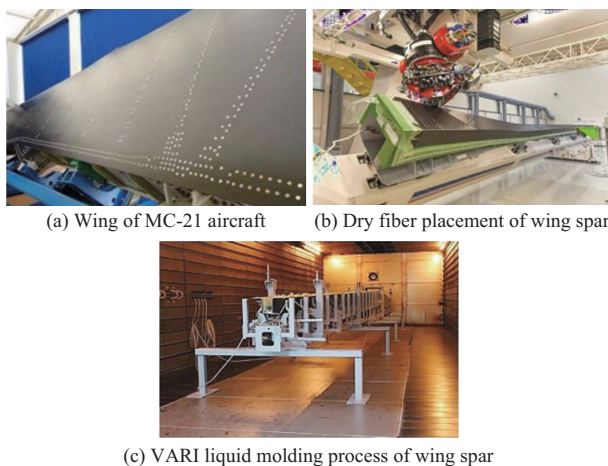


图8 MC-21飞机机翼及翼梁成型过程

Fig. 8 Wing of MC-21 aircraft and forming process of wing spar

民机结构中质量占比从15%提升至50%以上,实现了从非承力件到主承力件的关键转变。

## 3 液体成型技术的高效率制造与智能化发展趋势

### 3.1 干纤维自动铺放与预成型技术

英国国家复合材料中心(NCC)和Spirit AeroSystems公司合作,共同研制了17 m长演示机机翼下蒙皮,之后装配在新单通道商用飞机A320上。该蒙皮采用ADFP技术,最大弦长3.3 m,尖端宽1.1 m。Spirit公司承担该项目的模具研制,NCC完成壁板制造和装配工作。据NCC官网报道<sup>[36]</sup>,其为新机翼研制了一套龙门式机器人高效铺丝系统,称为超高速率铺层工作站(UHRDC),该系统使用Güdel、Coriolis和英国制造商Loop Technology提供的自动化技术,由两座7 m高、13 m宽的桥架组成,沿26 m的轨道运行,在铺设时可将两个机械臂定位在0.2 mm的精度范围以内。随后在20 m长的工作台上使用自动超声波刀将碳纤维织物切割成固定形状,然后技术人员可以选择两个不同的处理系统,用于将NCF织物装载到蒙皮模具中。第一个系统称为FibreFORM,由密集的吸盘(270个)阵列组成,吸盘阵列将拾取和放置切割的NCF层,如图9a所示。第二个系统称为FibreROLL,将纤维布层滚动到滚筒上,然后展开到模具上,如图9b所示<sup>[37]</sup>。

此外,英国GKN Aerospace公司采用ADFP技术为WOT计划交付了第一架固定后缘(FTE)。据GKN官网报道<sup>[38]</sup>,该

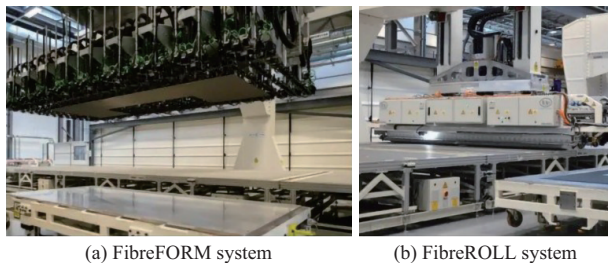


图9 FibreFORM和FibreROLL系统

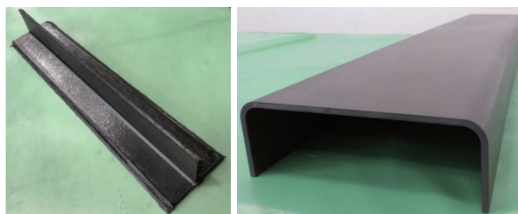
Fig. 9 FibreFORM and FibreROLL system

技术采用干纤维铺放与RTM工艺结合取代传统预浸料模压工艺从而实现大幅减重,减少了1/3左右的生产步骤并显著降低能耗。通过LCM技术实现的FTE组装自动化将在质量、可重复性和组装时间方面表现出显著优势,以满足高速机翼制造的要求<sup>[38-39]</sup>。

诺斯罗普·格鲁曼公司开发了自动化加强筋成型(ASF)技术。据SAMPE会议报道<sup>[40]</sup>,其使用干NCF,通过渐进滚压成型模式实现逐层铺放与原位固结,利用材料输送头和压实模块实现NCF的自动铺放,可成型Omega、T、C、Z等复杂截面,且无需中间压实步骤。图10a展示了用于生产热固性长桁的自动加强筋成型机。



(a) Automated stiffener forming machine for producing thermosetting stringers



(b) T-shaped stringer preforms made of 4-axis NCF (c) C-beam display parts

图10 自动加强筋成型机、四轴NCF制成的T形件和C型梁展示件

Fig. 10 Automated stiffener forming machine, T-shaped stringer preforms made of 4-axis NCF and C-beam display parts

ASF工艺可被描述为一种“渐进式辊压成型”方法,用于层压和压实飞机的结构零件,如桁条、框和机翼梁。机器将干燥的NCF材料从材料辊直接铺放到成型模具上,并可以按需求将多种不同面密度和方向的NCF分配到相应的模具位置。随着材料的分配,辊子和其他压实部件将材料成型并压实成零件的几何形状。

在技术适配过程中,针对不同厂商(如Saertex、Hexcel、Teijin)的单向(UD)、双轴、三轴、四轴NCF,因其缝合线类型、密度及纱线成分存在差异,格鲁曼公司团队对加热技术与辊压压实工艺进行了优化。由于许多NCF结构中含有黏合剂,加热系统依据NCF中纱线/黏合剂的活化温度精准控温,像含黏合剂的NCF可降低加工温度;辊压过程通过多组成型滚轮组合来压实预成型件,防止纤维屈曲或褶皱。双轴NCF易贴合复杂轮廓,四轴NCF则需控制热量穿透制件厚度以便于成型。团队成员通过平板压实试验研究了温度与压力对预成型件固结质量的影响,且制件经冷却后释压可避免预成型件松散现象。加强筋预成型环节成功制造出0.6 m

长T型桁条和1.5 m长C型梁等部件,其厚度能稳定控制在设计值附近,这些预成型件均可与RTM工艺兼容,如图10b、图10c所示。

### 3.2 智能树脂注入与快速固化技术

同上所述,在研制17 m长演示机机翼下蒙皮过程中,Spirit开发了一套智能树脂注入系统(IRIS),该系统包括蒙皮—长桁一体式成型工装和严格的工艺温度程序。该系统的核心是位于模具表面附近的嵌入式工具加热技术,该技术使用位于模具表面的低压电阻加热来提供快速精确的温度控制。模具包括一个内模线(IML)加热盖以及一个半柔性、可重复使用的真空袋,如图11所示。由于该系统中多个加热场可以单独监测和控制,可使每个区域在树脂注入和固化周期中都能在目标温度下运行,实现零件的每个区域都根据尺寸和体积提供不同的热量输入。



图11 机翼下蒙皮IML加热盖

Fig. 11 IML heating cover for wing lower skin

COFRARE 2020项目是欧洲“洁净天空2”计划的一部分,旨在开发用于支线飞机复合板机身的碳纤维复合框架制造工艺。项目采用RTM成型工艺,使用Shikibo公司的Ziplus技术生产适合树脂注射的纤维预制体来制造机身框架,计划将其集成到机身演示器中。据相关行业报道<sup>[41]</sup>,在RTM成型制造过程中,项目采用比利时Synthesites公司开发的在线监测系统,分为液态树脂流动检测(OptiFlow)以及固化监测(OptiMold)系统,结合专用传感器网络,对树脂注射过程中的温度、压力、树脂流动状态以及玻璃化转变温度( $T_g$ )进行全流程监测,如图12所示,实现了对RTM成型过程的实时动态优化。其中,通过传感器测量的树脂温度与电阻率数据实时计算的 $T_g$ ,其精度与差示扫描量热法测试固化层合板所得 $T_g$ 数据相当。因此,通过实时追踪树脂固化过程中的 $T_g$ 变化,系统可精准判断固化终点,在达到目标 $T_g$ 值时自动停止升温,将原本的固化周期缩短50%,大大节约能源与时间成本,同时确保最终产品的性能要求。

### 3.3 高速率航空复合材料制造发展动向

为推动民用航空复合材料液体成型技术向更高效、更低成本方向发展,全球多个重要项目正开展深入研究并取得显著进展,其中具有代表性的项目包括欧洲“明日之翼”计划、NASA的HiCAM项目,并以液体成形技术作为提升产能、降低复合材料成本的核心技术之一。

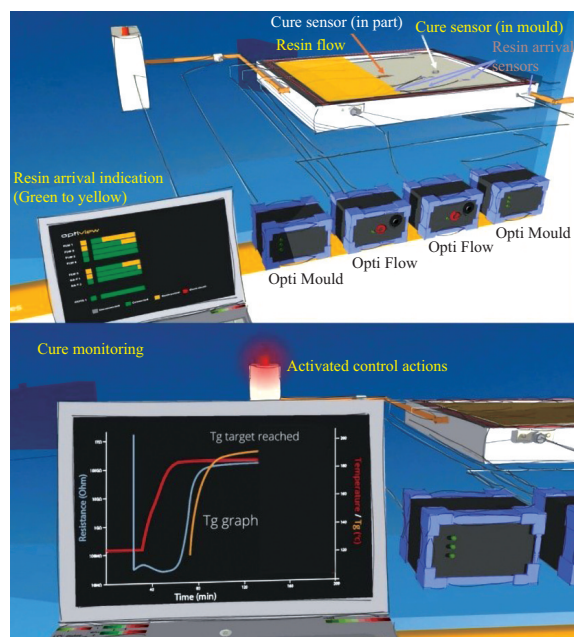


图12 Synthesites的在线监测系统

Fig. 12 Online monitoring system of Synthesites

2019年,空客启动了“明日之翼”项目,旨在研发面向下一代单通道客机的高效率、低成本复合材料机翼制造技术,为未来民机机翼结构的规模化生产提供技术支撑,重点突破复合材料LCM工艺的工业化应用。据行业和空客公司官网报道<sup>[42-43]</sup>,项目目标主要包括提升产能效率:提升机翼制造速度(每月60~100架),超越热压罐工艺的产能极限;降低成本:通过一体化成型减少部件数量和紧固件的使用,降低设备投资和组装成本;技术验证:验证干纤维树脂灌注(如VARI、RTM)在复杂曲面结构中的可行性,代替传统的热压罐工艺。

美国国家航空航天局(NASA)提出的高速复合材料飞机制造(HiCAM)项目考虑了多种材料和制造技术,据国际复合材料会议JEC、ITHEC与NASA官网报道<sup>[44-47]</sup>,其计划产量提升至每月80架次。其中,HiCAM建立了三个制造概念:下一代热固性材料、树脂灌注复合材料和热塑性复合材料。项目所设立的奖项将支持这些概念的小规模评估和开发,包括材料加工、装配技术、检查和结构性能方面的技术试验。在项目的这一阶段完成后,HiCAM将选择一种制造方案进行进一步开发,并将在2028年之前对机身或机翼部件进行全面演示。NASA总共计划向HiCAM投资1.84亿美元,其他合作伙伴预计将出资1.36亿美元,总运营预算为3.2亿美元。

### 3.4 液体成型技术未来发展趋势

民用航空复合材料液体成型技术在发展中呈现出显著的技术革新特点:通过干纤维自动铺放技术实现织物精准裁剪与层叠,搭配智能树脂注入系统的嵌入式加热与分区控温技术,使复杂曲面构件的树脂灌注效率提升且固化周期大幅缩短;借助自动化加强筋成型工艺的渐进滚压模式,可对干态NCF进行逐层铺放与原位固结,实现复杂截面加强筋的

近净尺寸成型;依托在线监测系统对树脂流动状态、固化温度及玻璃化转变温度的在线监测追踪,实时优化工艺参数并精准判断固化终点,以降低能耗与时间成本。构件大型化、整体化及快速低成本制造、材料体系的逐渐完善、绿色材料的持续发展<sup>[48]</sup>将是未来复合材料液体成型工艺的主要发展方向。

## 4 结语与展望

民用航空复合材料液体成型技术凭借成本低、效率高、成型精度高及制品性能接近预浸料/热压罐工艺的优势,已从早期应用于扰流板等非、次级承力构件,发展到如今机身压力隔框、机翼主承力梁等关键承力部件的规模化制造。从当前国际民机复合材料制造发展路径来看,液体成型技术已不再仅作为热压罐工艺的低成本替代方案,而是逐步演变为面向大型整体化、自动化与高节拍制造的新一代核心复合材料制造技术。特别是在干纤维自动铺放、在线监测与数字化制造快速发展的背景下,LCM工艺未来有望在单通道客机机翼、机身壁板等主承力结构中实现更大规模应用。但与此同时,其在工艺一致性、缺陷控制与适航认证方面仍需长期工程验证,这也是未来航空复合材料液体成型技术实现产业化突破的关键所在。

(1)树脂流动与固化过程受织物结构、温度场、真空度及树脂黏度等多因素耦合影响,极易出现局部干斑、气泡及孔隙等缺陷,导致性能波动,成型一致性与缺陷控制难度高,限制了其在安全要求高的主承力结构中的推广。

(2)过程可重复性与标准化体系尚未建立,不同厂商、设备及材料体系间缺乏统一的工艺窗口与质量评价标准,制约了跨平台批量化制造。

(3)虽然干纤维自动铺放、在线树脂注入与固化监测已在示范件中应用,但系统集成复杂、成本高昂、精度控制仍不足,尚难实现稳定量产。

(4)产业链支撑与工程验证周期较长,从材料开发、设备调试到结构验证需跨学科协同,周期长、投入大,阻碍了其在新一代民机中的快速转化。

因此,未来LCM技术亟需在树脂体系优化、流动固化模拟、智能监测控制、标准化体系建设与自动化装备集成等方面持续突破,实现从实验室级验证向工程化、产业化阶段的跨越,为民用航空复合材料的高效、可靠、低成本制造奠定基础。

## 参考文献

- [1] 宁莉,等.复合材料科学与工程,2020(5):123-128.  
NING Li, et al. Composites Science and Engineering, 2020(5): 123-128.
- [2] 贺福,等.高科技纤维与应用,2007,32(6):5-8,17.  
HE Fu, et al. Hi-Tech Fiber & Application, 2007, 32(6):5-8, 17.
- [3] 李桦楠,等.科技和产业,2022,22(4):71-77.  
LI Huanan, et al. Science Technology and Industry, 2022, 22(4): 71-77.

- [4] 马志阳,等.航空制造技术,2021,64(11):24-30.  
MA Zhiyang, et al. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(11):24-30.
- [5] 杜善义.先进复合材料与航空航天[C]//复合材料技术与应用可持续发展工程科技论坛,2006:5-18.  
DU Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[C]//Forum on Sustainable Development Engineering Science and Technology of Composite Materials Technology and Application. 2006:1-12.
- [6] 马立敏,等.复合材料学报,2015,32(2):317-322.  
MA Limin, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(2): 317-322.
- [7] 郭俊刚,等.宇航材料工艺,2022,52(2):85-91.  
GUO Jungang, et al. Aerospace Materials & Technology, 2022, 52 (2):85-91.
- [8] 谢富原.先进复合材料制造技术[M].北京:航空工业出版社, 2017.  
XIE Fuyuan. Advanced composites manufacturing technology[M]. Beijing:Aviation Industry Press, 2017.
- [9] 陈秋云,等.合成纤维,2025,54(1):40-46.  
CHEN Qiuyun, et al. Synthetic Fiber in China, 2025, 54(1):40-46.
- [10] 聂玉强,等.材料开发与应用,2023,38(4):19-26.  
NIE Yuqiang, et al. Development and Application of Materials, 2023, 38(4):19-26.
- [11] 王显峰,等.航空制造技术,2022,65(16):64-77.  
WANG Xianfeng, et al. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(16):64-77.
- [12] 李小兵,等.热固性树脂,2006,21(1):4-7.  
LI Xiaobing, et al. Thermosetting Resin, 2006, 21(1):4-7.
- [13] 崔郁,等.南京大学学报(自然科学版),2009,45(2):292-296.  
CUI Yu, et al. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2009, 45(2):292-296.
- [14] 吴志恩.航空制造技术,2013,56(13):32-35.  
WU Zhien. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56 (13):32-35.
- [15] 杜洪雨,等.大型民用飞机复合材料承压框结构及工艺发展 [C]//第17届全国复合材料学术会议,2012:37-41.  
DU Hongyu, et al. Structure & process methods development of composite aft pressure bulkhead for large civil aircraft[C]// Proceedings of the 17th National Conference on Composite Materials (Sub-Forum on Composite Materials Manufacturing Technology and Equipment), Chinese Society of Aeronautics and Astronautics. Avic Shenyang Aircraft Corporation Civil Aircraft Co., LTD, 2012:37-41.
- [16] 刘强,等.航空制造技术,2013,56(22):80-83.  
LIU Qiang, et al. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(22):80-83.
- [17] 李先阳,等.复合材料科学与工程,2023(11):116-121.  
LI Xianyang, et al. Composites Science and Engineering, 2023 (11):116-121.
- [18] 吴伟萍,等.纤维复合材料,2022,39(2):91-94.  
WU Weiping, et al. Fiber Composites, 2022, 39(2):91-94.
- [19] 于德润,等.纤维复合材料,2021,38(3):94-98.  
YU Derun, et al. Fiber Composites, 2021, 38(3):94-98.
- [20] 罗云烽,等.纤维复合材料,2023,40(2):96-102.  
LUO Yunfeng, et al. Fiber Composites, 2023, 40(2):96-102.
- [21] 李培旭,等.玻璃钢/复合材料,2016(8):99-104.  
LI Peixu, et al. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2016(8): 99-104.
- [22] 单忠德,等.机械工程学报,2023,59(20):64-79.  
SHAN Zhongde, et al. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(20):64-79.
- [23] 张超,等.航空学报,2024,45(2):1-18.  
ZHANG Chao, et al. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(2):1-18.
- [24] 李军,等.材料工程,2022,50(6):49-60.  
LI Jun, et al. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(6):49-60.
- [25] 马永强,等.飞机设计,2022,42(5):66-68.  
MA Yongqiang, et al. Aircraft Design, 2022, 42(5):66-68.
- [26] 陈蔚,等.航空材料学报,2014,34(6):54-61.  
CHEN Wei, et al. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(6): 54-61.
- [27] 吴志恩.波音787的复合材料构件生产[J].航空制造技术,2008, 51(15):92-94.  
WU Zhien. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51 (15):92-94.
- [28] 周雷敏,等.高科技纤维与应用,2013,38(2):57-61.  
ZHOU Leimin, et al. Hi-Tech Fiber & Application, 2013, 38(2): 57-61.
- [29] 胡培,等.航空制造技术,2009,52(15):46-49.  
HU Pei, et al. Application of PMI sandwich structure on A380 pressure bulkhead[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(15):46-49.
- [30] 李俊斌,等.科技创新与应用,2020,10(7):109-110.  
LI Junbin, et al. Technology Innovation and Application, 2020, 10 (7):109-110.
- [31] HINDERSMANN A. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 126. DOI: 10.1016/j.compositesa. 2019. 105583.
- [32] VAN OOSTEROM S, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 125. DOI: 10.1016/j.compositesa. 2019.105528.
- [33] 复合材料液体成型在航空领域的应用[EB/OL].[2022-03-18]. <https://www.boscfrp.com/news/1515.html>.  
Application of Composite Liquid Molding in Aviation Field[EB/ OL].[2022-03-18]. <https://www.boscfrp.com/news/1515.html>.
- [34] 高丹.科技视界,2012,2(31):199-200.  
GAO Dan. Reasons for the successful propulsion of Bombardier

- C series aircraft[J]. Science & Technology Vision, 2012, 2(31): 199–200.
- [35] 蒋诗才,包建文,张连旺,等. 液体成型树脂基复合材料及其工艺研究进展[J]. 航空制造技术, 2021, 64(5):70–81, 102.  
JIANG Shicai, et al. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(5):70–81, 102.
- [36] Wing of Tomorrow: 17-metre integrated wing skin infusion case study[EB/OL]. [2023-11-13]. <https://www.nccuk.com/insight-impact/wing-of-tomorrow-case-study/>.
- [37] 杨超凡. 机翼下蒙皮的液体树脂灌注[EB/OL].[2023-09-18]. [https://www.sohu.com/a/721443578\\_121124360](https://www.sohu.com/a/721443578_121124360).  
YANG Chaofan. Liquid resin infusion of the lower skin of the wing[EB/OL].[2023-09-18]. [https://www.sohu.com/a/721443578\\_121124360](https://www.sohu.com/a/721443578_121124360).
- [38] GKN Aerospace. GKN Aerospace delivers the first fixed trailing edge for Airbus Wing of Tomorrow programme[EB/OL].[2021-09-22]. <https://www.gknaerospace.com/news-insights/news/gkn-aerospace-delivers-the-first-fixed-trailing-edge-for-airbus-wing-of-tomorrow-programme/>.
- [39] Aernnova composites, leader in composites R&D[EB/OL].[2024-06-24]. <https://www.compositesworld.com/articles/aernnova-composites-leader-in-composites-rd-sessionid=>.
- [40] REIFSNYDER J, BENSON K, NYMAN N, et al. Automated ply-by-ply lamination and in situ consolidation of dry carbon fiber non-crimp fabrics for high-rate aircraft manufacturing of structural aircraft components[C]//SAMPE 2024. May 20-23, 2024. NASAMPE, 2024. DOI:10.33599/nasampe/s.24.0190.
- [41] Advancing thermoplastic composites and RTM for Clean Sky 2 in Spain[EB/OL]. [2020-01-21]. <https://www.compositesworld.com/articles/advancing-thermoplastic-composites-and-rtm-for-clean-sky-2-in-spain-sessionid=>.
- [42] New technology hub to accelerate next-generation Airbus wings[EB/OL]. [2023-07-04]. <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2023-07-new-technology-hub-to-accelerate-next-generation-airbus-wings>.
- [43] BEN S. Airbus completes first Wing of Tomorrow prototype wing[EB/OL]. [2021-09-23]. <https://www.aerospacetestinginternational.com/news/structural-testing/airbus-completes-first-wing-of-tomorrow-prototype.html>.
- [44] YOUNG R D. Hi-rate composite aircraft manufacturing (HiCAM) project overview[R]. NASA, 2022.
- [45] JIM B. NASA. HiCAM 2025 Spring Review[EB/OL]. [2025-5-13]. <https://www.nasa.gov/directorates/armd/aavp/hicam/composite-aircraft-2025/>.
- [46] YOUNG R. HiCAM: Hi-rate composite aircraft manufacturing technologies[C]//JEC World 2025. Paris, France, 2025.
- [47] RANDY W, Michel V T, Rick Y. Technology Development for Hi-Rate Composite Aircraft Manufacturing (HiCAM) [C]//ITHEC 2024. Bremen, Germany.
- [48] 赵华坤,等. 材料工程, 2024, 52(5):46–56.  
ZHAO Huakun, et al. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(5):46–56.

## (上接第 233 页)

- [66] 刘高尚,等. 表面技术, 2021, 50(4):62–69.  
LIU Gaoshang, et al. Surface Technology, 2021, 50(4):62–69.
- [67] ZHAO D Y, et al. Polymer Composites, 2024, 45(8):7 164–7 177.
- [68] 范佳成. 聚醚酰亚胺基超声电机摩擦材料的制备方法及其性能研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2023.  
FAN Jiacheng. Research on preparation and properties of polyetherimide friction materials for ultrasonic motor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023.
- [69] ZHANG Y Y, et al. Composites Science and Technology, 2021, 216. DOI:10.1016/j.compscitech.2021.109044.
- [70] LI Y, et al. Polymer Engineering & Science, 2022, 62(8):2 446–2 458.
- [71] QI Z T, et al. Tribology International, 2022, 170. DOI:10.1016/j.triboint.2022.107516.
- [72] LI J, et al. Surface and Interface Analysis, 2025, 57(1):98–107.
- [73] 胡海霞,等. 机械工程材料, 2024, 48(9):74–80.  
HU Haixia, et al. Materials for Mechanical Engineering, 2024, 48(9):74–80.
- [74] 徐浩添. 碳纤维改性聚氨酯丙烯酸酯的摩擦性能研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2025.  
XU Haotian. Study on carbon fiber modified polyurethane acrylate tribological properties[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2025.