DOI 10.15302/J-SSCAE-2023.07.002

# 面向2035年复合材料构件精确制造发展战略研究

**单忠德[1]，宋文哲[2]，范聪泽[3]，汪俊[3]**

（1. 南京航空航天大学，南京 210016；2. 南京航空航天大学材料科学与技术学院，南京 210016；
3. 南京航空航天大学机电学院，南京 210016）

**摘要：**先进复合材料具有高比强度、高比模量、可设计性好等优点，广泛应用于航空航天、轨道交通等领域的装备制造，是工业发达国家战略必争资源；保障和提升先进复合材料的供给能力，突破大型复杂复合材料构件的设计成形、加工装配、检测修复等精确制造技术，对支撑制造强国建设具有重要价值。本文总结了国内外复合材料构件精确制造技术的发展现状及趋势，从高精密数控缠绕、复合材料自动铺放、复合材料预制体成形、纤维复合材料增材制造、高性能碳纤维生产等方面梳理了复合材料构件精确制造的关键技术与装备；结合基本态势研判了制约复合材料制造技术水平提升的“卡脖子”环节，提出了我国复合材料构件制造技术与装备的发展思路与分阶段发展目标。研究建议，组织建设国家级创新机构，设立国家重大专项支持，加强学科建设和人才培养，加强国际技术交流与合作，着力推动重大科学创新和关键技术突破，为国家重大工程和装备应用提供高质量科技支撑。

**关键词：**复合材料；精确制造；高端装备；结构功能一体化

**中图分类号：**TB332　　**文献标识码：**A

# Development Strategy for Precision Manufacturing of Composite Components Facing 2035

**Shan Zhongde[1], Song Wenzhe[2], Fan Congze[3], Wang Jun[3]**

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Advanced composite materials exhibit advantages of high specific strength, high specific modulus, and excellent designability. They are widely used in aerospace, rail transit, and other fields, and are strategic resources for industrially developed countries. Ensuring and improving the supply capacity of advanced composite materials and making breakthroughs in the design and forming, processing and assembling, testing and repairing technologies of large and complex composite components are of strategic significance in strengthening China’s manufacturing sector. In this study, the current status and trends of precision manufacturing of composite components are analyzed, and the key technologies and equipment for precision manufacturing of composite components, including high-precision numerical control winding, automatic placement, preform forming, additive manufacturing, and high-performance carbon fiber production, are summarized. After specifying the key problems limiting the development of composite manufacturing technologies, we propose the development goals by 2035. Accordingly, suggestions are proposed including establishing national

**收稿日期：**2022-03-14；**修回日期：**2022-09-15

**通讯作者：**单忠德，南京航空航天大学教授，中国工程院院士，研究方向为数字化机械装备与先进成形制造技术、智能制造技术与装备；E-mail: shanzd@nuaa.edu.cn

**资助项目：**中国工程院咨询项目“面向2035的复合材料构件精确制造发展战略研究”(2021-XZ-26)；国家自然科学基金项目(51790173)

**本刊网址：**www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

innovation institutions, planning major science and technology projects, enhancing disciplines development and talent fostering, strengthening international communication and collaboration, and focusing on significant scientific innovation and technological breakthroughs, thus to provide high-quality scientific and technological support for national major projects and important model projects.

**Keywords:** composite; precision manufacturing; advanced equipment; structure-function integration

## 一、前言

高端装备是国家科技实力和竞争力的重要载体，其发展程度直接体现制造业的质量水平。在航空航天、轨道交通、能源电力等高端装备制造业中，为实现性能跃升与绿色发展，轻量化制造成为重要举措，减轻结构质量、提高结构效率是主要形式。先进复合材料因其高比强度、高比模量、良好可设计性等特点成为高端装备“减重增效”的必然选择，对高端装备制造、新能源等产业发挥了积极推动作用；复合材料的用量已是衡量制造业装备先进性的主要标志之一。

先进复合材料的发展和应用对实现高端装备轻量化、绿色化、智能化具有重要作用[1]。例如，复合材料用于箭体整流罩、壳体、发动机喉衬和喷管等关键部件制造，提高了航天器的轻量化水平；大量采用碳纤维复合材料的国产地铁车辆，综合节能效率提高了15%以上[2]；风力发电机叶片成为体量最大的单一复合材料产品，高性能复合材料决定了叶片综合性能[3]。随着复合材料在装备应用方面的拓展，世界复合材料产业发展迅速，如2020年碳纤维复合材料的总需求达到$1.069\times10^5$ t[4]；今后10年复合材料市场仍处于扩张期，复合年增长率将超过8%。近年来，我国复合材料行业需求量年增长率超过20%，预计2025年市场规模将超过3500亿元[5]。

得益于新一轮科技革命，复合材料技术不断突破并与先进制造技术加速融合，推动复合材料制造技术成为抢占科技产业竞争的焦点。复合材料制造技术涉及多学科交叉、多技术融合，研究内容涵盖复合材料构件设计理论及仿真，复合材料构件成形、加工、装配、检测监测以及相应的评价与修复[6]。复合材料精确制造是保障复合材料构件服役性能的关键环节，亟需突破大型复合材料构件的设计成形、加工装配、检测修复等技术[7]。工业发达国家建立了聚合物和复合工程中心、复合材料制造技术中心、国家复合材料中心等国家级研究机构，将碳纤维复合材料发展纳入国家产业发展计划[8]。在我国，“中国制造2025”“制造强国”等发展规划均将先进复合材料列为重点方向，以积极参与世界复合材料产业的竞争与合作[9]。

中国工程院咨询项目“面向2035的复合材料构件精确制造发展战略研究”，开展复合材料制造行业宏观分析和顶层设计以推动高质量发展。本文作为相关咨询项目研究成果的学术性展示，旨在分析复合材料精确制造技术发展态势，梳理关键技术与装备研究进展，提出领域发展思路、目标及针对性的举措建议，以期为复合材料制造产业发展与技术研究提供基础参考。

## 二、复合材料构件精确制造技术发展现状及趋势

### （一）复合材料构件趋于大型化、集成化、整体化

随着大型民机、重型运载火箭等装备技术的发展，复合材料构件呈现出大型化、集成化、整体化的应用趋势。大型化是复合材料构件发展的直观表现，也是主要趋势之一，如主体由轻质高强的复合材料制成的风力发电机叶片长度超过了100 m，复合材料制造的重型运载火箭推进剂贮箱的直径达到10 m[10]。

集成化、整体化的复合材料构件是航空航天运载器总体性能提升的重要支撑。一次性地制造出大型、复杂、含多个零部件的整体制件（如带梁、肋、壁板的复杂结构整体成形）是技术发展方向，可减少紧固件数量、降低装配难度、优化材料消耗、减轻结构质量，最终表现为制造成本降低与承载能力提升。例如，第四代战斗机通过结构整体性优化，将约600个复合材料零部件减少为约200个、约135 000个紧固件减少为约600个；双通道民机的机身段采用了复合材料整体化制造方案，替代的金属机身有约1500个铝合金件、40 000个铆钉等紧固件[11,12]。

### （二）复合材料制造装备趋于自动化、数字化、智能化

航空航天高端装备的快速发展对复合材料构件

制造提出了更高要求，具有自动化、数字化、智能化特征的复合材料成形装备才能适应这一趋势。当前，受限于复合材料制造技术水平，复合材料成形过程中人工干预多，复杂形状构件的自动化制造较难实现。以热压罐成形技术为例，制造过程仍以手工、半机械化为主，周期长、效率低、精度不高，制约了行业发展水平。为实现复合材料构件的精确制造，需要发展针对复合材料复杂构件的数字化成形控制系统，研发集成计算机辅助设计 / 计算机辅助制造（CAD/CAM）的大型数字化成形装备，涵盖成形设计、工艺规划、参数调控、现场监测等功能，据此解决生产过程用工密集、制造效率不高的问题。

目前，自动铺丝 / 自动铺带技术已实现数字化控制，预浸料层片裁剪、激光辅助定位铺层等环节实现了数控化，在提高预浸料裁剪、铺贴精度的同时，实质性提高了复合材料构件的制造效率和产品质量；相关产品应用到多种航空航天飞行器的结构方案，如空间载荷适配器、整流罩、推进剂贮箱，机翼、尾翼、垂尾、进气道、中央翼盒等[13]。面对复合材料构件自调节、自适应、自修复的新型应用需求，智能化在线监控技术在复合材料成形装备上展现了良好应用前景；通过采集和传输信号，实时掌握成形进程以及各种性能参数的变化过程，从而实现工艺质量的闭环反馈与在线调控。

### （三）复合材料制造技术趋于结构功能一体化、可定制化

单一材料的均质结构已无法满足飞行器防热 – 承载一体化、舰船抗爆 – 隐身 – 承载一体化等复合型功能应用需求。依托复合材料固有特征发展的制造技术朝着结构功能一体化、可定制化方向发展，结构功能一体化复合材料发展迅速。例如，结构吸波与透波复合材料在军用与民用装备领域得到大量应用；以高强玻璃纤维增强树脂基复合材料为代表的结构装甲复合材料兼具抗弹防护、结构承载、雷达吸波功能，已用于专用车辆的舱门和舱盖结构[14]、动力舱顶盖和外露部件[15]；定制化的蜂窝增强低密度树脂基防热复合材料研制成功并在载人返回舱上实现应用[16]。

着眼未来应用需求，加强多功能复合材料结构功能一体化成形技术与装备研究，解决成形过程中形性精确成形调控、性能与材料成形工艺一体化设计、多参数 / 多界面热力耦合等关键问题；重点攻关多功能集成的复合材料构件一体化设计制造、组织性能精确调控、柔性生产在线质量检测等技术，实现更高层次的复合材料构件结构功能一体化、定制化成形制造，保障重点工程和重大装备的发展需求。

## 三、复合材料构件精确制造关键技术与装备

### （一）高精密数控缠绕技术与装备

复合材料缠绕技术指将预浸带、干纤维逐层缠绕在模具表面从而成形回转复合材料壳体的工艺，具有成形效率高、综合成本低、质量一致性好等特点，是制造火箭发动机壳体、推进剂贮箱等关键装备结构的主要成形手段。美国 Entec 公司、德国 BSD 公司、美国哈珀国际公司等优势企业生产的多主轴、多运动轴联动的缠绕成形设备，通过电子张力计等传感器对成形参数进行实时监测，以生产过程的闭环控制来提高产品稳定性。目前，相关企业已研发出十一轴的大型精密数控缠绕设备，集成了 CAD/CAM、有限元分析软件，具有设计 – 制造一体化能力[17]。

南京航空航天大学、哈尔滨工业大学开发了大型四轴、六轴精密数控缠绕设备，但在工程应用方面尚未实现自主保障，综合水平与国外产品差距较大[18]。集成 CAD/CAM 软件的高精密数控缠绕设备开发，对于突破国外技术封锁、实现纤维复合材料构件高质量缠绕具有重要意义。

### （二）复合材料自动铺放技术及装备

复合材料自动铺放技术是生产大型复合材料构件的主要技术之一，集数控机床技术、CAD 软件技术于一体，具有高的精度、效率和材料利用率。复合材料自动铺放技术应用对象以大型飞机的机身、机翼、尾椎等构件制造为代表。以美国 Ingersoll 公司、西班牙 M Torres 公司、法国 Forest-Line 公司为代表的大型数控设备制造商进入了自动铺放装备制造领域，开发了双向铺丝、柔性压辊、超声固结等新工艺与装备，可实现多带铺放、多头同步铺放、高效铺放与同步切割等功能。Viper 6000 铺丝设备的最大丝束数为 32 根，最大成形直径为 8 m[19]。

南京航空航天大学、航空工业哈尔滨飞机工业

集团有限责任公司、中国航发北京航空材料研究院等机构开展了自动铺放工艺与装备研究；然而因技术集成难度大、系统结构复杂，相关装备的工程应用水平仍有差距。开发多铺放头铺放、机器人铺放、大型 / 超大型纤维自动铺放等设备，对于突破国外技术封锁，满足大型飞机、重型运载火箭研制需求具有重要意义。

### （三）复合材料预制体成形技术及装备

复合材料预制体指通过织造工艺铺设纤维形成的三维结构骨架。基于预制体增强的复合材料构件在层间性能、抗冲击性能、抗剪切性能等方面具有优势，在航空发动机风扇叶片、高速飞行器热防护系统、飞机刹车片等关键构件上获得了广泛应用。工业发达国家在复合材料预制体成形技术方向研究起步较早，工艺和装备的自动化、数字化水平较高。美国3TEX公司、德国Herzog公司、日本京都工艺纤维大学开发的先进三维编织机，车速高于600转/min，入纬率大于1300 m/min，制备的织物尺寸最大为2.15 m×1.5 mm，纤维体积分数为35%~45%[20,21]。

国内预制体设计尚处于“设计–试验–改进”循环的初始阶段，预制体制造过程主要依靠手工或机械工具辅助的半自动化生产。中国机械科学研究总院集团有限公司、天津工业大学、南京玻璃纤维研究设计院有限公司等机构开展了相关研究工作，基于柔性导向技术的三维织造设备最大成形尺寸为1.5 m[22]。发展高精度复合材料预制体自动化成形技术与装备，突破数字化结构建模与高效成形、复材构件形性匹配与精确调控、数字化成形装备与系统实现等关键技术，对保障高端装备制造和重大工程建设需求具有重要意义。

### （四）纤维复合材料增材制造技术及装备

增材制造作为颠覆性成形技术，原材料利用率高、结构设计与制造可实现一体化，数字化、智能化特征突出，尤其适用于具有复杂结构的精密复合材料构件制造。2021年，国际市场规模为152亿美元，其中美国（占比为34.4%）、中国（占比为10.8%）占据重要份额[23]。美国Markforged公司、Arevo Labs公司、Stratasys公司分别开发了桌面级打印设备、以机器人为基础的碳纤维工业级打印设备、复合材料增材制造设备（实现了7.62 m尺寸的船体结构打印）[24]。

中国机械科学研究总院集团有限公司、西安交通大学、南京航空航天大学等机构开展了多尺度纤维增强复合材料制造工艺与装备研究。国产装备与世界先进水平的整体差距较小，但分层切片、路径规划等功能实现依赖国际开源软件。开展大尺寸、变曲率、变截面的多材料结构复合材料构件的增材制造成形技术研究，突破多材料结构设计、多工艺参数耦合调控、界面强度优化等关键技术；发展大型、超大型复合材料构件的增材制造装备，建立具有自主知识产权的软件控制与仿真平台，对实现高端装备复杂结构件的快速制造具有重要意义。

### （五）高性能碳纤维生产技术及装备

碳纤维具有高强度、高模量、低密度、耐高温、耐腐蚀等特点，是典型的军民两用产品。国际碳纤维市场由日本、美国企业主导：在小丝束碳纤维市场，日本东丽、东邦、三菱等品牌约占世界总产量的49%；在大丝束碳纤维市场，美国赫氏等品牌约占世界总量的58%[25]。尤其是日本东丽株式会社，作为世界高性能碳纤维技术研究与产业化的龙头企业，在诸多创新应用方面保持了领先地位[26]。

国内在高性能碳纤维产业化制备与部分原材料、制造装备技术研发等方向仍处于起步或攻坚阶段。相关企业受制于产业规模小、部分原材料和制造装备依赖进口，T700级、T800级、M40级碳纤维的生产成本普遍高于国际市场40%以上，产业提升空间较大。提升原材料、辅材的自主保障水平，特别是高品质碳纤维原丝、油剂、上浆剂、树脂等，制定适应市场需求、反映国产碳纤维特点的自主标准体系；加强碳纤维复合材料回收再利用技术研发，逐步提高复合材料回收利用率。

## 四、我国复合材料构件精确制造发展思路和目标

### （一）发展思路

复合材料产业发展迅速，技术创新不断涌现，市场竞争较为激烈，工业发达国家在复合材料制造技术与装备领域占据着领先地位。国产复合材料制造技术的成熟度、工艺多样性均有不足，制品合

格率、质量一致性亟待提升，而高端复合材料制造装备依赖进口的格局并未打破。近年来，涉及航空航天、国防军工应用的复合材料制造装备国际贸易控制加严，导致国内复合材料产品的国际市场供应难度进一步增加。为克服高端复合材料制造行业潜在的“卡脖子”风险，需全面加强复合材料构件精确制造领域的基础研发、自主创新和产业发展（见图1）。

按照国家制造业转型升级总体部署，追求“创新驱动、应用牵引、基础提升、融合发展”，面向关键领域、重大工程以及市场化的应用需求，在高精密数控缠绕、自动铺放、预制体成形、增材制造、碳纤维生产等核心技术方向寻求突破；同时筑牢基础研究能力，加速推动复合材料制造技术的高质量发展。为建立覆盖基础研究、关键技术、装备研制、成果转化、产业化的复合材料制造全链条发展体系，可重点开展：① 组织建设先进复合材料制造技术与装备国家级实验室及制造业创新中心，论证设立先进复合材料精确制造技术国家级重大项目，以创新机构和关键资源保障快速突破；② 加强复合材料制造相关的学科建设和人才培养，继续保持国际间的技术交流和产业合作，确立产业可持续发展的良好基础和环境；③ 瞄准国防科技前沿问题、关键核心技术、装备研制生产中的“卡脖子”环节，培育一批复合材料制造重点科研项目，带动科学创新和技术突破，为高效转化研究成果提供便捷渠道。

### （二）2035 年发展目标

面向高端装备的复杂使役条件、苛刻质量约束，复合材料构件的大型化、整体化、结构功能一体化发展趋势，高性能、高精度、高效率、低成本的复杂构件一体化成形制造技术与装备成为主攻方向。尽管在国家重点研发计划、国家科技重大专项等渠道的支持下，复合材料精确制造技术水平稳步提升，六轴数控缠绕、柔性导向三维织造等关键

图1　面向2035年的复合材料构件精确制造技术发展要素

核心技术与装备获得工程应用，但面向国防科技现代化、经济社会高质量发展需求，先进复合材料的成形加工、装配检测等高端装备仍需创新突破。完善复合材料行业全产业链布局，实现完全自主可控；提升复合材料构件设计理论与仿真软件、纤维复合材料增材制造、高性能碳纤维生产等核心技术水平；掌握大尺寸预制体数字化成形技术与装备，实现复合材料大型喉衬（直径≥1000 mm）、扩张段（直径≥2000 mm）等标志性产品制造。

到2025年，对标国际先进复合材料制造技术与装备，在基础研究、应用基础研究方面取得原创性突破，基本实现复合材料成形、加工、装配、检测等关键核心技术与装备的自主可控，培育一批复合材料精确制造领域的“专精特新”企业。

到2030年，建成高校、科研院所、企业深度融合的复合材料构件精确制造研发体系，自主开发的高性能纤维、高质量复合材料构件可满足航空航天、国防军工、轨道交通等领域的高端装备制造需求，培育多家复合材料制造领域的龙头企业。

到2035年，自主研发的高端复合材料精确制造技术与装备达到国际先进水平，自主创新研发体系进入世界前列，形成产业链结构完整、具有国际市场竞争力的复合材料制造产业集群。

## 五、我国复合材料构件精确制造发展建议

### （一）建设先进复合材料制造技术与装备国家级创新研发机构

建议布局先进复合材料制造技术与装备国家级实验室。凝练重大战略需求，开展仿生复合材料、超材料 / 结构等前瞻性基础研究与技术探索，促进复合材料学科发展。围绕复合材料的制造工艺原理、制造过程控制、固化机理、缺陷形成机理等相关基础理论展开研究，提出重大科学技术问题，承担复合材料领域国家科技项目的组织实施。把握复合材料的材料结构一体化、结构功能一体化、设计制造一体化、检测预测一体化发展趋势，开展战略技术、前沿技术、关键共性技术研发，抢占未来产业发展制高点。梳理复合材料产业发展共性需求，发挥行业性辐射带动作用，推动科技成果转化与拓展应用。

建议组织建设先进复合材料制造技术与装备国家技术创新中心、国家制造业创新中心。针对复合材料领域前沿技术集成攻关和工程转化需求，快速形成核心技术体系和重大产品装备。建设复合材料制造技术与装备创新中心、工程实验室，开展复合材料预制体编织、复合材料增材制造、复合材料构件铺放 / 缠绕成形等核心技术攻关以及关键工艺试验研究，重大装备样机及其关键部件研制，高新技术产业化的技术开发。建成高校、科研院所、企业深度融合的创新研发体系，培育梯队结构合理、行业水平领先的复合材料技术创新团队。构建“产学研”长效合作机制，形成应用研究成果向工程技术转化的有效渠道，增强复合材料技术创新能力的平台支撑作用。

### （二）复合材料制造技术与装备列入国际合作重点领域与项目指南

建议组织建设复合材料制造技术与装备国际合作联合实验室，承担复合材料制造技术国际前沿或重大背景科研任务，持续产出具有科学和技术价值、体现原始创新的学术成果。吸引并汇聚国际创新力量和资源，在先进纤维复合材料多材料构件数字化制造、可调控超材料、生物组织与器官替代材料等前沿技术方向开展探索。发挥国际科技合作对人才培养的促进作用，培育引领学科发展、具有国际视野的学术领军人才。推动纤维复合材料增材制造、复合材料预制体数字化编织等技术方向的快速突破，提升复合材料制造技术与装备的国际竞争力。

建议发布复合材料制造技术与装备方面的国际合作及交流重点项目指南，积极利用世界科技资源，推动复合材料制造领域的战略型对外合作。提炼高精度、高效率、低成本的复合材料构件制造需求，支持我国科研人员参与国际大型科学研究计划，利用国际大型科学设施开展复合材料制造技术的国际合作研究。吸引国际高水平研究人员参与先进复合材料构件制造过程中的多机器人协同控制、工艺参数人工智能算法生成、机器视觉质量检测等前沿和创新研究，逐步由单一项目合作拓展至“项目–人才–基地”合作方式。

### （三）设立复合材料制造技术与装备国家重点研发计划专项或重点支持方向

面向科技前沿、面向经济主战场、面向重大需求，突出航空航天、轨道交通、汽车工业等重要领

域，梳理复合材料“卡脖子”技术清单，开展复合材料制造技术与装备的战略性、基础性、前瞻性重大科学问题，重大共性关键技术和产品研发，实施跨部门、跨行业、跨区域的研发布局与协同创新。通过国家重点研发计划专项等重点项目支持，培育一系列复合材料制造技术方向的核心专利，提高全行业尤其是重点企业的自主创新能力。

着力突破复合材料三维编织、复合材料增材制造、复合材料无损加工等关键核心技术，尽快研制大型构件均匀化快速灌注、低频振动制孔、低损伤编织、大尺寸增材制造、自动化填隙、高精度损伤检测与成像等数字化制造装备。通过复合材料构件数字化制造装备的规模化应用，解决批量、快速、柔性、低成本等行业瓶颈难题，为经济社会、重点装备发展提供持续性支撑。聚焦提升复合材料产业的国际市场竞争力，驱动关键共性技术研发，保障关联产业自主发展。

### （四）复合材料制造技术与装备列入重大基础研究计划项目和重点支持方向

建议发布复合材料制造技术重大研究计划基金项目指南，瞄准科学前沿，激励科学突破，提高原始创新能力。加强复合材料原创研究导向的机制设计和资助安排，鼓励创制储氢、超导、可变构相关的新概念、新构思、新方法、新工具，抢占科学制高点，增强自主创新能力。建议复合材料制造技术与装备列入重大研究计划支持方向，构建大尺寸复合材料构件跨尺度设计理论体系，突破材料 – 构件 – 功能协调优化设计技术，探明多目标、多参数建模方法以及形性精确调控机制，揭示复合材料构件宏微观结构变形演化规律与失效机理。

建议设立复合材料制造技术与装备联合基金，引导并聚合社会资源，充分支持复合材料基础研究。以“政产学研用”合作方式，协调并推动复合材料制造技术方向的科研资源与智力投入。构建复合材料精确制造基础研究发展体系和创新人才培养体系，培养适应产业发展需求的创新型人才，提升复合材料基础研究的原始创新能力和可持续发展水平。

### （五）加强产业政策引导，扶持复合材料企业创新发展

发挥制度优势，加强复合材料产业的政策引导。鼓励复合材料制造技术方向的资本投入，合理增加基础科学、产业共性技术、“卡脖子”关键技术的公共研发投入，支持龙头企业加大研发投入，实现关键产品尤其是高端产品的自主保障。提升高性能复合材料的自主保障能力，填补高端品种空白，满足国防装备研制需求。凝聚机械、软件、电子、自动化等学科的优势研究力量，合力解决高端复合材料制造装备的瓶颈难题，形成大尺寸、超大尺寸复合材料构件成形装备；建立具有国际先进水平的全天候复合材料构件成形和加工生产线，促进“技术 – 装备 – 应用”三位一体发展。

发挥市场在资源配置中的重要作用，扶持并激励复合材料企业创新发展。尽快完善高性能复合材料全产业链，优化项目实施水平，推动国产复合材料在重点行业与领域的高水平应用。积极扶持产业链上的中小企业，规范市场监督与竞争机制，为创新型中小企业提供良好的发展环境，激发创新创业活力。建立社会化的复合材料技术研发服务平台，健全知识产权保护和监督机制，为相关企业创新研发提供高水平的社会化科技服务。

**参考文献**


[1] 陈祥宝. 先进复合材料技术导论 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2017.
Chen X B. Introduction of advanced composite technology [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2017.

[2] 朱美芳, 朱波. 纤维复合材料 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
Zhu M F, Zhu B. Fiber composite [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.

[3] Upadhyayula V K K, Gadhamshetty V, Athanassiadis D, et al. Wind turbine blades using recycled carbon fibers: An environmental assessment [J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(2): 1267–1277.

[4] Brown K R, Harrell T M, Skrzypczak L, et al. Carbon fibers derived from commodity polymers: A review [J]. Carbon, 2022, 196: 422–439.

[5] 钱伯章. 碳纤维复合材料市场向好 [J]. 合成纤维, 2019, 48(5): 20.
Qian B Z. The market of carbon fiber composite materials is improving [J]. Synthetic Fiber in China, 2019, 48(5): 20.

[6] Kulkarni P, Mali K D, Singh S. An overview of the formation of fibre waviness and its effect on the mechanical performance of fibre reinforced polymer composites [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020, 137: 1–12.

[7] Li Y, Xiao Y, Yu L, et al. A review on the tooling technologies for composites manufacturing of aerospace structures: Materials, structures and processes [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2022, 154: 1–12.

[8] 李仲平, 冯志海, 徐樑华, 等. 我国高性能纤维及其复合材料发

展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 28–36.
Li Z P, Feng Z H, Xu L H, et al. Development strategies for China's high-performance fibers and their composites [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 28–36.

[9] 谢曼, 干勇, 王慧. 面向2035的新材料强国战略研究 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 1–9.
Xie M, Gan Y, Wang H. Research on new material power strategy by 2035 [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 1–9.

[10] 周娥, 刘凯, 王晓勇, 等. 大型固体火箭发动机碳纤维缠绕壳体超声波C扫描检测技术应用 [J]. 航天制造技术, 2018 (5): 59–61.
Zhou E, Liu K, Wang X Y, et al. Application of ultrasonic C-scanning technology for carbon fiber winding shell of large rocket motor [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2018 (5): 59–61.

[11] 俞建勇, 胡吉勇, 李毓陵. 高性能纤维制品成形技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
Yu J Y, Hu J Y, Li Y L. Forming technology of textiles with high performance fibers [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2017.

[12] van Grootel A, Chang J, Wardle B L, et al. Manufacturing variability drives significant environmental and economic impact: The case of carbon fiber reinforced polymer composites in the aerospace industry [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 261: 1–12.

[13] Abidin N M Z, Sultan M T H, Hua L S, et al. A brief review of computational analysis and experimental models of composite materials for aerospace applications [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2019, 38(23–24): 1031–1039.

[14] 孙晋良. 纤维新材料 [M]. 上海: 上海大学出版社, 2007.
Sun J L. New fiber material [M]. Shanghai: Shanghai University Press, 2007.

[15] 杜善义. 复合材料及其结构的力学、设计、应用和评价 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000.
Du S Y. Mechanics, design, application and evaluation of composite materials and their structures [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2000.

[16] Boon Y D, Joshi S C, Bhudolia S K, et al. Recent advances on the design automation for performance-optimized fiber reinforced polymer composite components [J]. Journal of Composites Science, 2020, 4(2): 1–15.

[17] Boon Y D, Joshi S C, Bhudolia S K. Review: Filament winding and automated fiber placement with in situ consolidation for fiber reinforced thermoplastic polymer composites [J]. Polymers, 2021, 13(12): 1–29.

[18] 张红卫, 韦健, 黄胜德, 等. 碳纤维缠绕复合材料成型工艺浅析 [J]. 石油化工技术与经济, 2021, 37(3): 30–34.
Zhang H W, Wei J, Huang S D, et al. Anslysis on the forming process of carbon fiber wound composite material [J]. Techno-Economics in Petrochemicals, 2021, 37(3): 30–34.

[19] 曹忠亮, 郭登科, 林国军, 等. 碳纤维复合材料自动铺放关键技术的现状与发展趋势 [J]. 材料导报, 2021, 35(21): 21185–21194.
Cao Z L, Guo D K, Lin G J, et al. Current situation and development trend of key technologies for automated placement of carbon fiber composites [J]. Materials Reports, 2021, 35(21): 21185–21194.

[20] Carvelli V, Pazmino J, Lomov S V, et al. Quasi-static and fatigue tensile behavior of a 3D rotary braided carbon/epoxy composite [J]. Journal of Composite Materials, 2013, 47(25): 3195–3209.

[21] He C W, Ge J R, Zhang B B, et al. A hierarchical multiscale model for the elastic-plastic damage behavior of 3D braided composites at high temperature [J]. Composites Science and Technology, 2020, 196: 1–12.

[22] 单忠德, 刘阳, 范聪泽, 等. 复合材料预制体成形制造工艺与装备研究 [J]. 中国机械工程, 2021, 32(23): 2774–2784.
Shan Z D, Liu Y, Fan C Z, et al. Research on forming manufacturing technology and equipment of composite preforms [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(23): 2774–2784.

[23] 王磊, 卢秉恒. 我国增材制造技术与产业发展研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(4): 202–211.
Wang L, Lu B H. Development of additive manufacturing technology and industry in China [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(4): 202–211.

[24] Zhuo P, Li S G, Ashcroft I A, et al. Material extrusion additive manufacturing of continuous fibre reinforced polymer matrix composites: A review and outlook [J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 224: 1–12.

[25] 靳高岭. 我国碳纤维产业现状及发展前景 [J]. 高科技纤维与应用, 2021, 46(3): 11–14.
Jin G L. The Status quo and development prospect of carbon fiber industry in China [J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2021, 46(3): 11–14.

[26] Zhang J, Chevali V S, Wang H, et al. Current status of carbon fibre and carbon fibre composites recycling [J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 193: 1–15.