

# 2018年先进纤维复合材料研发热点回眸

徐坚<sup>1,2,3</sup>, 聂铭歧<sup>1</sup>, 王熙大<sup>1</sup>, 季俊娜<sup>1</sup>, 王亚会<sup>1</sup>, 张红静<sup>1</sup>

1. 国家新材料产业发展战略咨询委员会天津研究院, 天津 300042

2. 中国科学院化学研究所, 北京 100190

3. 深圳大学先进低维材料基因技术研究院, 深圳 518061

**摘要** 先进纤维复合材料的产品创新研发和技术日益成熟,对国民经济的发展及国防现代化建设具有重大的意义。回顾了2018年先进纤维复合材料在成型工艺、性能优化、产品创新、成本缩减、技术转化等方面的进展,评述了先进纤维复合材料在航空航天、轨道交通、汽车、船舶和能源领域的应用。

**关键词** 纤维增强;复合材料;轻量化

纤维增强复合材料(fiber reinforced plastic, FRP)是以纤维作为增强材料,与基体材料经过缠绕、模压或拉挤等成型工艺制成的复合材料。根据增强材料的不同种类,先进纤维复合材料可分为碳纤维、芳纶纤维、超高分子量聚乙烯纤维、混杂纤维复合材料和天然纤维复合材料等。

与传统金属材料 and 合金材料相比,先进纤维复合材料质量较轻,密度约为 $1.4\sim 2.1\text{ g/cm}^3$ ,仅为钢的 $1/6\sim 1/4$ 或铝的 $1/2$ ,用于制件,可大幅降低自身重量。同时,先进纤维复合材料具有高强度、高模量的特点,耐高低温性能好,热膨胀系数和摩擦系数小<sup>[1]</sup>。此外,先进纤维复合材料还具有良好的抗疲劳特性,纤维和基体材料成型时会形成很多微小的界面,这些界面能够阻止在交变载荷下产生的裂纹进一步扩展。因此,纤维复合材料的疲劳极限可以达到静载荷的 $60\%\sim 80\%$ <sup>[2]</sup>,而大多数金属材料的疲劳极限只有静载荷的 $40\%\sim 50\%$ 。

先进复合材料的成型属于设计制造一体化,因此易于大面积整体成型,其成型工艺有20多种,目前主要使用的有手糊、缠绕、拉挤、模压、树脂传递模塑等。不

同于金属材料的成型,纤维复合材料对于不同形状和性能要求的产品需要选择不同的成型方法。

手糊成型使用手工铺陈后施压成型,模具费用低,对于品种多、产量少的制品比较适用;缠绕成型可以通过产品的受力状况调整缠绕规律,从而获得高强度制品,更易机械化生产,但是对制品形状有要求,因纤维缠绕时不能紧贴芯模表面,所以不适于具有凹表面的零部件生产;拉挤成型的工艺优点是可以生产纤维含量比较高的产品,原料耗费少,适合生产连续均匀截面的制品;模压成型属于高压成型工艺,制品内应力低、精度高、制品表面光洁且重复性好,便于批量生产。树脂传递模塑(resin transfer moulding, RTM)技术是在模具中放置预成型增强体,闭合模具,将树脂充入,加热固化后脱模<sup>[3]</sup>。RTM工艺适合制造尺寸较大、形状复杂的结构件。随着原材料、工艺的发展和成型技术的不断进步,RTM被认为是降低先进复合材料制造成本的重要技术之一,目前已广泛应用于航空、汽车等工业中。

随着人类对于先进纤维复合材料卓越性能的认知愈发深入以及成型工艺的逐渐成熟,以碳纤维、芳纶纤

收稿日期:2019-01-02;修回日期:2019-01-07

作者简介:徐坚,研究员,研究方向为智能聚合物与仿生材料、高性能与功能聚合物、高分子溶液及其分子量表征等,电子信箱:jxu@iccas.ac.cn

引用格式:徐坚,聂铭歧,王熙大,等. 2018年先进纤维复合材料研发热点回眸[J]. 科技导报, 2019, 37(1): 91-98; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.01.009

维等先进纤维为增强体的复合材料将得到越来越多的应用。鉴于先进纤维复合材料所具备的巨大市场潜力,2018年,多家科研机构及公司纷纷涉足该领域并重点投入科研力量,不断取得技术的创新和性能的突破,纤维复合材料的应用逐步覆盖于航空航天、轨道交通、汽车、船舶、能源等诸多领域。

2018年,先进纤维复合材料的科学研究和技术攻关集中在性能优化和成本降低方面,在多种环境友好型纤维复合材料的研发上开展技术创新。同时,在纤维复合材料功能多样化方面取得了阶段性的进展,并在推进先进复合材料军民两用方面发挥了重要的作用。

本文回顾2018年先进纤维复合材料在航空航天、轨道交通、汽车、船舶和能源领域的应用,总结先进纤维复合材料在成型工艺、性能优化、产品创新、成本缩减、技术转化等方面的科技进展,并分析未来发展方向和前景。

## 1 在航空航天领域的研发与应用

飞行器的运动速度高、负载大,对其使用的材料在性能方面要求比较严格,因此,强度高、变形小、重量轻、长寿命、高效能一直是飞行器的发展方向。先进纤维复合材料凭借其高比强度和模量、抗疲劳、耐腐蚀、密度小等优异性能,在航空航天领域迅速发展。

在航天领域,先进纤维复合材料的用量在迅速扩大各种航天飞行器的重要结构件(如运载火箭和导弹壳体、航天飞机与宇宙飞船部件、卫星天线、天文望远镜等)正在越来越多地采用复合材料<sup>[4]</sup>。利用纤维复合材料的优势,设计和建造高效且轻质的结构,以便使航天器可以以更小的推力进入太空,一直是纤维复合材料应用于航天器所追求的目标。

2018年12月14日,英国维珍银河公司(Virgin Galactic)设计制造的全碳纤维复合材料飞机——“太空船2号”首次完成了载人飞至“太空边界”(图1)<sup>[5]</sup>。“太空船2号”和它的双体运输机“白骑士2号”均为全碳纤维结构,其机翼是碳纤维复合夹层结构,可以有效地减轻机身的重量。“太空船2号”的成功试飞,也意味着游客搭载体验亚轨道太空旅行将成为现实。

自20世纪60年代以来,先进纤维复合材料首先用于航天飞行器,并逐步向军用航空方面延伸,成型技术的逐步发展推动了在军机方面的大量应用。先进纤维



图1 维珍银河公司“太空船2号”

Fig. 1 "Spacecraft 2" manufactured by Virgin Galaxy

复合材料在军机方面的应用经历了:舱门、整流罩等尺寸较小的非承力结构;垂尾、平尾等次承力结构;机翼、机身等大尺寸的主承力结构件,不断创新的复合材料生产工艺推动了碳纤维复合材料在航空航天领域的应用。

通过选择纤维的类型,设计纤维的铺放角度、铺放层数等方式可以得到不同强度的制品。2018年1月,美国极光飞行科学公司(Aurora Flight Sciences)为美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)设计并制造了一款使用丝束牵引成型技术的碳纤维复合材料蒙皮的机翼。“丝束牵引”是指碳纤维的铺设方式,这种复合材料机翼摒弃了传统的纤维直线铺放模式,基于密歇根大学计算优化得出的最佳弯曲路径,将自动化纤维铺放机的铺放头以曲线方式铺放碳纤维窄带或丝束,从而使机翼蒙皮精准承受载荷。2018年9月和10月,NASA对机翼分别完成了两个阶段的测试(图2)<sup>[6]</sup>,测试结果表明,这种设计可以被动地控制机翼振动,并有效减轻阵风影响,有助于飞机平稳驾驶。

先进纤维复合材料在航天器和军用航空方面积累的经验 and 数据,推动了其在民用航空领域的应用。安全性和经济性的要求,决定了复合材料可以在民用航空领域占有一席之地。基于纤维复合材料在耐腐蚀、强度大、质量轻的优点,使用纤维复合材料替代传统铝合金件的飞机,在减轻自身重量、节约燃油消耗、减少维修成本方面有明显优势。

美国橡树岭国家实验室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)的科学家正在开发一种“智能”碳纤维复合材料(图3)<sup>[7]</sup>,这种材料具有一种新的能力——监测自



图2 机翼在最高载荷压力下的弯曲测试

Fig. 2 Bending test of wing under maximum load pressure



图3 新一代纤维复合材料可对结构破坏实现自感并发出警告

Fig. 3 Next-generation fiber-reinforced composites may self-sense and issue warnings about structural threats

身结构良好与否的能力,通过使用一种“卷对卷”工艺,用半导体碳化硅纳米粒子涂覆导电碳纤维。这种“智能”碳纤维复合材料用于飞机机翼,如果风暴湍流导致机翼弯曲、涂层纤维的连接性被破坏、材料中的电阻改变,电信号反馈到计算机后会发出机翼已承受过大压力得警告,并提示及时检查,2018年10月,该研究成果发表在美国化学学会期刊《Applied Materials & Interfaces》上<sup>[8]</sup>,并申请了制造自感碳纤维复合材料的专利。

瑞士苏黎世联邦理工学院 Masania 等<sup>[9]</sup>展示了一种新型纤维增强型聚合物结构,使用三维打印的方式,利用热致变液晶聚合物自组装成液晶向列区,生成一种具有分层结构、几何形状复杂的可回收轻质制品,其刚度、韧性等机械性能可以与高性能轻质材料相提并论,并有望通过三维打印工具路径控制与聚合物的定向自组装相结合,制备出结构更复杂的航空器件。

目前,航空技术已经向开采太空资源、太空旅行、

移民火星等其他阶段发展,更深入的星际探索,需要研发自组装、自修复等新型的智能材料来实现<sup>[10]</sup>,实现这些目标需要有自控制、自适应和自修复行为的航天器,“智能”碳纤维复合材料的研发成功,代表着人类向开发智能化材料的目标又迈进一步。

此外,纤维复合材料技术逐渐向更广、更深方向发展,制造技术从热压罐成型工艺到树脂转移模塑成型(RTM),由此衍生出真空导入模塑工艺(vacuum infusion molding process, VIMP)和柔性辅助RTM,制品形状从单一的平面、小尺寸逐步向复杂化、大尺寸的方向发展。

## 2 在轨道交通领域的研发与应用

高速运行一直是轨道交通追求的主题,其高速运行车辆主要包括高铁列车、磁悬浮列车、地铁、市区单轨等,安全、舒适、环保、便捷成为人们对轨道交通的基本需求。先进复合材料具有质量轻、强度高、耐腐蚀、可阻燃、易于设计等优点,在现代轨道交通中正在逐步取代传统的不锈钢等金属材料。应用趋势从集便器、盥洗台等内饰件、车内设备等非承重部件,逐渐向车体、构架等承重件扩散。例如,装饰板采用铝合金叠合一层纤维复合材料,可以满足力学性能(如减重)的同时,提高耐腐蚀性。

传统车体材料与纤维复合材料相比于传统车体材料,其性能具有明显优势(表1)<sup>[11]</sup>,针对轻量化和安全性的要求,铝合金、碳纤维、玻璃纤维复合材料及其他低密度、高比强度和模量的复合材料已成为轨道交通材料的首选。

目前,轨道车辆应用的车体结构材料主要包括不锈钢、碳钢和铝合金,速度的不断提高加大了震动、冲击、阻力、噪音等问题。传统的单组份结构材料难以充分解决以上问题,具有轻量化、高强度、高耐候的纤维复合材料,利用航空航天领域设计制造蜂窝夹层、功能层等成熟技术,可以为车体的设计制造提供基础材料及解决以上问题的可能途径。

复合材料在轨道交通方面的应用方向转向了承重件,例如驾驶室的开发,2018年,北京交通大学 Gong 等<sup>[12]</sup>设计和开发了一款碳纤维增强复合材料板材,以其高强度、高模量、良好的力学性能等性能优势取代铝合金应用于地铁驾驶室,可减轻地铁驾驶室约30%的重量。

表1 传统车体材料与纤维复合材料的性能对比

Table 1 Performance comparison between traditional car body materials and fiber composites

材料	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	拉伸强度/MPa	比强度/(MPa·g <sup>-1</sup> ·cm <sup>3</sup> )	拉伸模量/GPa	比模量/(GPa·g <sup>-1</sup> ·cm <sup>3</sup> )
碳钢(Q345)	7.8	490	63	206	26
不锈钢(SUS301)	7.9	820	105	195	25
铝合金	2.8	420	151.5	72	25.9
碳纤维复合材料	1.6	1760	1100	130	81
玻璃纤维复合材料	2.0	1245	623	48	24.1
芳纶纤维复合材料	1.4	1373	981	78.4	56

在中国,先进复合材料应用于轨道交通方面已取得了一定的成绩。2018年9月,中国新一代全碳纤维复合材料地铁车体全球发布(图4)<sup>[13]</sup>,采用碳纤维增强复合材料技术,与钢、铝合金等传统金属材料相比,新一代碳纤维地铁车辆的车体、司机室、设备舱分别减重30%以上,转向架构架减重40%,整车减重13%。



图4 中车四方新一代碳纤维地铁车辆“CETROVO”

Fig. 4 New generation of carbon fiber subway vehicles called CETROVO produced by CRRC

除用于高铁的车体、车顶、驾驶室、车饰以外,纤维复合材料还用于传统木质枕木和横梁的替代。2018年10月,Austrak(澳大利亚布里斯班)、Laing O'Rourke(英国达特福德)和University of Southern Queensland(澳大利亚南昆士兰大学)合作开发出一种基于纤维增强聚合物复合材料的轨道枕木和横梁技术,取代了铁轨现有的易翘曲和腐烂的木材枕木和横梁,实现了将技术向产业的转换。

纤维复合材料已经越来越多地进入轨道交通领域,由于轨道交通在追求轻质的同时,必须同时保证材料的安全性,阻燃性是首要条件。因此,满足阻燃要求的材料体系是复合材料在轨道交通领域实现应用的关键之一。

### 3 在汽车工业领域的研发与应用

轻量化是贯穿汽车发展史的一项基础性技术,代表了世界汽车技术的发展趋势。汽车轻量化对于提高汽车动力性能、降低燃料耗量及排气污染均有益处,而这些正是新能源汽车亟待解决的问题,轻量化对发展节能减排、绿色环保的新能源汽车意义重大。

实现汽车轻量化的3个重要途径是车身结构的优化设计、成型连接技术的革新以及应用材料轻量化<sup>[14]</sup>。选择适合的高强度轻质材料是实现轻量化的重要手段,先进纤维复合材料以其优异的性能成为最佳选择。不同种类的纤维复合材料性能各具优势(表2),并在汽车车身、内饰、外饰、各种零部件、安全装置等生产制造中各尽所长、各司其用。

碳纤维以其优异的性能和最广泛的应用,引得各汽车制造商争相投入资本、占领先机。德国巴伐利亚机械制造厂股份公司(简称宝马公司)是实现碳纤维复合材料在汽车领域应用的先驱,率先开启了车身、内饰及外饰等全方位的应用模式。德国奔驰汽车公司、日本丰田汽车公司、韩国现代汽车公司等多家汽车制造商步伐紧跟,多家品牌汽车企业纷纷推出“碳纤维汽车”。

依托国家战略布局及政策扶持,国产汽车制造商也开始发力,北京长城华冠旗下的新能源汽车品牌前途汽车开发出电动跑车前途K50(图5),全车采用29个碳纤维复合材料外覆盖件,总重量仅为46.7 kg,比传统钢板材料减重40%以上,比铝合金材料减重20%以上。2018年12月12日,前途汽车公司与美国Mullen Tech公司签订合作协议,计划由Mullen Tech公司对前途K50在北美进行认证、组织及独家销售。碳纤维复合材料在汽车上的实际应用也标志着“碳车时代”即将到来。

为满足汽车领域的更高需求,科研人员也在探索纤维复合材料更强的性能。2018年8月,韩国科学技术

表2 汽车领域常用纤维复合材料性能特点及应用范围

Table 2 Performance characteristics and application range of common fiber composites in automobile field

纤维复合材料	性能特点	应用
碳纤维复合材料	轻量化、高强度、高模量、导电、导热、耐高温、耐腐蚀、耐冲击、可设计性强、可复合性强等	车身、底盘、轮毂、车顶、车门、制动盘、引擎盖、尾翼、中控台、装饰条、仪表盘、传动轴、座椅、尾扰流板、后视镜外壳、悬挂臂、遮阳罩、侧护板、低位踏板、燃料电池反应堆框架等
玻璃纤维复合材料	轻量化、高强度、绝热、隔音、防水、易着色、成型方便等	车身、保险杠、车顶、发动机罩、隔音板、内饰件等
天然纤维复合材料	轻量化、高强度、高刚度、环境友好、可再生等	车门、座椅骨架、座椅扶手、仪表盘、发动机罩、侧面碰撞保护用附近、底盘部件等
合成纤维复合材料	轻量化、高强度、色牢度、透气、阻燃、吸湿、耐起球、防静电等	汽车内饰、座椅面料、安全带、安全气囊等



图5 前途K50电动跑车外观

Fig. 5 Exterior view of the Qiantu K50 electric sports car

研究院高级复合材料研究所的Jang等<sup>[15]</sup>开发了一种以原位可聚合对苯二甲酸丁二酯低聚体为基体制备导电热塑性碳纤维复合材料的新工艺,在制备过程中加入有利于提高导电性的多壁碳纳米管和有利于提高导热性的石墨烯纳米片(GNPs),这种复合材料有潜力应用于汽车外板、发动机缸体或其他需要导电特性的机械零件。全球范围内对汽车轻量化的重视程度和开发热度持续走高,先进纤维复合材料作为重要的材料支撑,除注重纤维复合材料的性能提升外,原材料成本的降低、热塑性预浸料的量产、高效高质高精度的快速成型技术、零件结构铺层设计方法的优化等也是目前亟待重点研究的关键技术。

#### 4 在船舶工业领域的研发与应用

纤维复合材料应用于造船业因具有优异的抗腐蚀

能力和减重降耗等环保优势而备受重视,已成为一类重要的船用材料。早期因材料制备水平和加工工艺的限制,纤维复合材料仅应用于扫雷艇等小型快艇、船舶,如今,已在大中型船舶及军舰上得到使用。目前,船舶业所使用的纤维复合材料多为玻璃纤维复合材料、碳纤维复合材料及芳纶纤维复合材料,可应用于船壳、桅杆、烟囱、舱壁、甲板、设备底座、管道系统、螺旋桨、推进器和推进轴系等。

传统军舰螺旋桨材料多为镍铝铜合金,这种材料不但成本高昂、工艺复杂,性能也有较大缺陷,不但在服役时间较长的条件下容易产生裂纹,而且因声学阻尼性较差而产生噪声。相比之下,碳纤维复合材料具有良好的声、磁、电性能,透波、透声性好,无磁性等性能优势,不但能有效减轻船体振动,降低噪声,还可达到航行提速的效果。法国大型的热塑性及热固性复合材料零件模具设计制造商Loiretech公司与法国国防采购局(French Defense Procurement Agency, DGA)、Mecafrance公司、法国海军集团(Naval Group)开展合作项目,利用环氧碳纤维热固性复合材料开发和生产船用螺旋桨,并于2018年3月完成初次试航(图6)<sup>[16]</sup>,实验证明,该螺旋桨可减少噪声影响并降低约15%的能耗。

近年来,材料领域的可持续发展引起世界各国的关注,天然纤维复合材料应运而生。2018年,低成本可再生的天然纤维复合材料的研究发展也取得了部分成果,有望向未来的造船业中渗透。2018年6月,Bozkurt等<sup>[17]</sup>发表了一项关于玄武岩纤维与玻璃纤维混合增强环氧树脂复合材料减振性能研究,证明了玄武岩纤维复合材料在海洋结构件中具有潜在的应用价值;2018



图6 Loiretech公司利用环氧碳纤维热固性复合材料生产的船用螺旋桨

Fig. 6 Loiretech's marine propellers made from epoxy carbon fiber thermoset composites

年11月,曼彻斯特大学研究人员发布消息称研发出世界首个石墨烯增强黄麻纤维复合材料,是一种高性能且环保的天然复合材料,可替代船舶业等主要制造领域所需的合成材料。

随着船舶技术的发展,对纤维增强复合材料的应用需求越来越广泛,性能要求也越来越高。然而,各种先进纤维复合材料在船舶业中的应用也亦存在一些弊端。例如,玻璃纤维复合材料模量较低,抗变形能力差;碳纤维复合材料模量高,但成本较高;天然纤维的亲水性较强与树脂基体界面结合不佳导致天然纤维复合材料力学性能离散系数偏大,吸水率偏高。针对以上各种材料的发展瓶颈努力攻关,不断开发新工艺,降低材料成本,克服和消除材料性能弊端,研发与创新先进纤维复合材料,开启船舶发展的“绿色造船”时代。

## 5 在能源领域的研发与应用

21世纪以来,风能、潮汐、太阳能等可再生能源成为能源领域的重点发展方向。风力发电是其中一种极为重要的绿色能源,叶片是发电设备风电涡轮机的关键部件之一。要确保叶片在极端风载下稳定运行,具有20年以上的寿命,且能经受1亿次以上的疲劳次数,则叶片的选材必须符合轻量化、高强度、高刚度等要求<sup>[18]</sup>,因此,高强高模、低密度、可设计性强的碳纤维等先进纤维复合材料成为商业级叶片主体材料的重要选择之一。

近年来,大型化、储能化已经成为世界风电技术发

展的趋势。2018年3月,丹麦艾尔姆风能叶片制品公司(LM Windpower)为德国Merkur海上风电公司完成66台叶片长73.5 m、功率为6 MW的海上风力涡轮机组的安装(图7)<sup>[19]</sup>,Merkur公司由此成为德国最大的海上风力发电厂之一。目前,艾尔姆风能叶片制品公司生产出迄今为止世界最长的风力叶片,长达88.4 m。2018年3月,该公司宣布即将开发107 m长叶片,并用于目前最大功率的Haliad-X(12 MW)海上风力涡轮机。



图7 LM公司安装完成的海上风电机组

Fig. 7 LM company installed offshore wind turbines

同时,中国风电产业也处于快速发展的态势,在2018北京国际风能大会暨展览会现场,东方电气风电有限公司(简称东方风电)获得了中国质量认证中心颁发的10 MW海上风力发电机组国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)设计认证证书,目前为止,东方风电成为中国首家、全球第二家取得10 MW等级大型海上风力发电机组IEC设计认证证书的整机制造商。

复合材料除了在能源领域实现广泛应用外,也开始在燃料电池、超级电容器等储能装置得到应用。具备功率密度高、循环寿命长、工作温限宽、免维护、绿色环保等特点的超级电容器是一种兼具电容器快速充放电的特性和电池的储能特性的新型储能装置<sup>[20-22]</sup>,近年来,纤维复合材料广泛应用于工业控制、轨道交通、电子产品、新能源汽车、通信及国防科技等领域,其电极材料是超级电容器的核心部分<sup>[23]</sup>。碳纳米纤维因其比表面积大、耐腐蚀、制备简单等优异性能在众多材料中脱颖而出,开发了多种不同基体的碳纤维复合材料。2018年,美国橡树岭国家实验室的Muralidharan等<sup>[24]</sup>研发了一种碳纳米管增强结构复合超级电容器,在不锈钢网上生长致密排列的碳纳米管制备增强电极,与凯夫拉尔纤维或玻璃纤维垫层叠置于环氧电解液中得到

的储能复合材料,机械强度大于 85 MPa,接近商业复合材料的强度,能量密度高达 3000 W·h/kg,约为普通锂电池的 20 倍(锂电池能量密度 $\geq 150$  W·h/kg)。

在能源问题备受关注的今天,风电设备中超高压输电碳纤维芯电缆和超级电容器的发展及下游应用的扩宽,都标志着先进纤维复合材料在能源领域的应用愈发深入,先进纤维复合材料的聚焦和突破已成为影响产业技术进步的关键因素之一。

## 6 结论

2018 年先进纤维复合材料的研究取得了重要进展,尤其是在航空航天、轨道交通、汽车、船舶、能源领域,带动了传统材料产业的技术提升和产品的更新换代,引领了下游应用科技的进步。同时,先进纤维复合材料也在建筑、医疗、体育等领域发展迅速,充分体现“军民两用”“军民融合”的发展趋势。

随着纤维复合材料产业的高速发展,废弃的复合材料的回收问题日渐突出,有效回收和循环利用成为复合材料产业实现可持续发展需要重点关注的问题,这对全球既是机遇也是挑战。对此,各国针对纤维增强复合材料回收利用纷纷投入科研支持或出台相关政策,现已取得一些科研和产业转化成果,但是仍在不断创新与产业化尝试的探索中。

复合材料领域发展应当遵循“应用牵引材料技术发展”“有所为,有所不为”“国计民生,量大面广”以及“发挥优势,占领制高点”的发展原则,重点发展具有共性、关键性、集成性、带动性的高性能纤维增强复合材料高技术,围绕产业化关键技术研发攻关,开展“跨学科合作”、交叉融合的“兵团作战”,服务于国民经济的需求,实现高性能/超高性能纤维复合材料各创新环节紧密衔接。重点支撑国家重大重点工程,军民融合,以工程示范应用为牵引,引领纤维与复合材料高端技术的发展和升级换代,创造规模技术和经济价值,建立起具有自主知识产权、完善的战略性新兴产业体系。

展望未来,到 2025 年,中国将构筑完整的复合材料设计、制造、评价-应用产业链,达到 3 万~5 万 t 国产碳纤维增强复合材料的制造能力,尤其在高速交通、能源资源、先进制造、体育休闲、航天航空、国防装备等领域与世界技术水平和应用能力完全同步,在国际市场上具备竞争能力。

## 参考文献(Reference)

- [1] 孙振起, 吴安如. 先进复合材料在飞机结构中的应用[J]. 材料导报, 2015, 29(11): 61-64.  
Sun Zhenqi, Wu Anru. Application of advanced composite materials in aircraft structures[J]. Materials Review, 2015, 29(11): 61-64.
- [2] 高禹, 李晨浩, 高博闻, 等. 先进聚合物基复合材料疲劳性能测试与分析方法的研究现状[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2018, 35(1): 1-8.  
Gao Yu, Li Haochen, Gao Bowen, et al. Research status in fatigue performance test and analysis for advanced polymer matrix composites[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2018, 35(1): 1-8.
- [3] 阎龙, 史耀耀, 段继豪. 先进树脂基复合材料制造技术综述[J]. 航空制造技术, 2011, 375(3): 55-58.  
Yan Long, Shi Yaoyao, Duan Jihao. Review of manufacturing technology for advanced resin-matrix composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 375(3): 55-58.
- [4] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.  
Du Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2007, 24(1): 1-12.
- [5] VSS Unity takes to the skies for her first spaceflight[EB/OL]. [2018-12-20]. <https://www.image.net/previewAsset/631613731/false/virgingalactic/575082540>.
- [6] Armstrong Flight Research Center. Experimental wing verified during loads testing[EB/OL]. [2018-12-25]. [https://www.nasa.gov/centers/armstrong/features/PAT\\_Experimental\\_Wing\\_Verified\\_During\\_Loads\\_Testing.html](https://www.nasa.gov/centers/armstrong/features/PAT_Experimental_Wing_Verified_During_Loads_Testing.html).
- [7] National Laboratory. Self-sensing materials are here[EB/OL]. [2018-12-25]. <https://www.ornl.gov/news/self-sensing-materials-are-here>.
- [8] Bowland C C, Nguyen N A, Naskar A K. Roll-to-roll processing of silicon carbide nanoparticle-deposited carbon fiber for multifunctional composites[J]. Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(31): 26576-26585.
- [9] Gantenbein S, Masania K, Woigk W, et al. Three-dimensional printing of hierarchical liquid-crystal-polymer structures[J]. Nature, 2018, 561(7722): 226.
- [10] Levchenko I, Bazaka K, Belmonte T, et al. Advanced materials for next-generation Spacecraft[J]. Advanced Materials, 2018: 1802201.
- [11] 丁叁叁, 田爱琴, 王建军, 等. 高速列车组碳纤维复合材料应用研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2015, 36(增刊1): 1-8.  
Ding Sansan, Tian Ai-qin, Wang Jianjun, et al. Study on application of carbon fiber composite material for high speed train [J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2015, 36

- (Suppl 1): 1–8.
- [12] Gong M, Sun S, Li Q. Carbon fiber reinforced composite materials for self-supporting subway train cab[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol: IOP Publishing, 2018, 436(1): 012007.
- [13] 中车四方股份公司新闻中心. 我国新一代碳纤维地铁车辆问世[EB/OL]. [2018–12–25]. <http://www.crrgc.cc/sfgf/g7217/s4940/t296042.aspx>.  
CRRC. A new generation of carbon fiber metro vehicles in China[EB/OL]. [2018–12–25]. <http://www.crrgc.cc/sfgf/g7217/s4940/t296042.aspx>.
- [14] 付京京. 汽车轻量化技术的发展现状及其实施途径分析[J]. 信息系统工程, 2016(7): 79.  
Fu Jingjing. Development status of automotive lightweight technology and analysis of implementation ways[J]. China CIO News, 2016(7): 79.
- [15] Jang J, Park H C, Lee H S, et al. Electrically and thermally conductive carbon fibre fabric reinforced polymer composites based on nanocarbons and an in-situ polymerizable cyclic oligoester[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 7659.
- [16] Composite blades innovation at Loiretech[EB/OL]. [2018–12–25]. [https://www.loiretech.fr/sites/default/files/webmaster/Innovation/fabheli\\_hd.jpg](https://www.loiretech.fr/sites/default/files/webmaster/Innovation/fabheli_hd.jpg).
- [17] Bozkurt Ö Y, Erkiş A, Bozkurt Y T. Influence of basalt fiber hybridization on the vibration-damping properties of glass fiber reinforced epoxy laminates[J]. Materials Research Express, 2018, 6(1): 015301.
- [18] 李倩. 浅谈风电叶片碳纤维复合材料应用[J]. 黑龙江科技信息, 2015(9): 91.  
Li Qian. Application of carbon fiber composite materials for wind power blades[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2015(9): 91.
- [19] GE connects financing and turbine technology to its flagship onshore wind project in Sub-Saharan Africa[EB/OL]. [2018–12–25]. [Africahttps://www.ge.com/renewableenergy/newsroom/press-releases](https://www.ge.com/renewableenergy/newsroom/press-releases).
- [20] Chen S, He S, Hou H. Electrospinning technology for applications in supercapacitors[J]. Current Organic Chemistry, 2013, 17(13): 1402–1410.
- [21] 孙立, 杨颖, 江艳. 晶态纳米碳基材料的制备与电容储能应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.  
Sun Li, Yang Ying, Jiang Yan. Preparation of crystalline carbon-based nanomaterials and application of capacitance energy storage[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [22] Zhang L L, Zhao X S. Carbon-based materials as supercapacitor electrodes[J]. Chemical Society Reviews, 2009, 38(9): 2520–2531.
- [23] Zheng J P, Huang J, Jow T R. The limitations of energy density for electrochemical capacitors[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1997, 144(6): 2026–2031.
- [24] Muralidharan N, Teblum E, Westover A S, et al. Carbon nanotube reinforced structural composite supercapacitor[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 17662.

## Hot topics of advanced fiber-reinforced composites in 2018

XU Jian<sup>1,2,3</sup>, NIE Mingqi<sup>1</sup>, WANG Xida<sup>1</sup>, JI Junna<sup>1</sup>, WANG Yahui<sup>1</sup>, ZHANG Hongjing<sup>1</sup>

1. Tianjin Institute, National Advisory Committee on New Materials Industry Development Strategy, Tianjin 300042, China

2. Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

3. Low-dimensional Materials Genome Initiative, Shenzhen University, Shenzhen 518061, China

**Abstract** The advanced fiber reinforced composites in 2018 in terms of molding process, performance optimization, product innovation, cost reduction, technology conversion, etc. are reviewed, and the applications of advanced fiber reinforced composites in aerospace, rail transit, automotive, marine and energy fields are addressed. Some problems to be solved and the future development are proposed for innovation and R&D of advanced fiber composites and maturity of technology.

**Keywords** fiber reinforced; composite; lightweight ●



(责任编辑 卫夏雯)