

# 2019年先进纤维复合材料研发热点回眸

徐坚<sup>1,2</sup>, 王亚会<sup>2</sup>, 李林洁<sup>2</sup>, 聂铭歧<sup>2</sup>, 王熙大<sup>2</sup>, 季俊娜<sup>2</sup>, 朱才镇<sup>1</sup>, 刘瑞刚<sup>3</sup>

1. 深圳大学先进低维材料基因工程研究院, 深圳 518061
2. 国家新材料产业发展战略咨询委员会天津研究院, 天津 300042
3. 中国科学院化学研究所, 北京 100190

**摘要** 高性能纤维复合材料作为典型的先进纤维复合材料, 无论在军用还是民用领域都拥有极为广泛的应用前景, 近年来已成为世界各国研究的热点和重点。通过回顾2019年全球范围内高性能纤维复合材料在新产品、新工艺以及新市场等方面取得的科技进展, 对美国、日本、欧洲和中国高性能纤维复合材料的研究重点进行了总结并分析了未来高性能纤维复合材料的发展趋势。

**关键词** 高性能纤维复合材料; 轻量化; 低成本化

高性能纤维是指具有特殊理化结构、性能及功能的化学纤维, 通常具有极高的抗拉强度和杨氏模量, 同时兼具耐高温、耐辐射、耐酸碱、抗燃等优异性能, 常见品种有碳纤维、芳纶纤维、超高分子量聚乙烯纤维、玄武岩纤维、聚苯硫醚纤维等。高性能纤维复合材料则是以高性能纤维作为增强材料, 树脂作为基体, 加工而成的复合材料, 具备质轻、高强高模、抗疲劳、耐腐蚀、易加工成型等特点, 被广泛应用于航空航天、国防军工、轨道交通、能源工业等领域<sup>[1-2]</sup>, 无论在军用还是民用领域都发挥了重大作用, 深刻影响着国家安全、社会经济、科技和人类

的生活。因此, 高性能纤维复合材料作为先进纤维复合材料中极具代表性且应用最为广泛的分支, 已成为世界各国发展高新技术、国防尖端武器装备等战略性新兴产业不可或缺的关键材料。

目前, 全球高性能纤维及复合材料优势企业主要集中在日本、美国和欧洲。日本拥有东丽、帝人以及三菱化学三大碳纤维及复合材料供应商, 不仅占据了全球碳纤维产能一半, 还垄断了高端领域用碳纤维产品的生产技术; 美国杜邦公司在芳纶市场占据主导地位, 无论是高端产品的技术水平还是低端产品的价格水平, 相比其他企业都占有绝对优

收稿日期: 2019-12-26; 修回日期: 2020-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51673117, 51973118); 广东省重点领域研发计划项目(2019B010929002, 2019B010941001); 深圳市知识创新计划项目(JCYJ20170818093832350, JCYJ20180507184711069)

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, 电子信箱: jxu@iccas.ac.cn

引用格式: 徐坚, 王亚会, 李林洁, 等. 2019年先进纤维复合材料研发热点回眸[J]. 科技导报, 2020, 38(1): 82-92. doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.01.007

势;欧洲在超高分子量聚乙烯纤维领域占有举足轻重的地位,荷兰帝斯曼公司是全球产量最高和质量最佳的超高分子量聚乙烯纤维供应商;中国已经初步实现了多种高性能纤维及复合材料的产业化生产,且具备了一定的产业规模,但是在高强度、高模量及高端领域所用高性能纤维的产业化关键技术、产品稳定性等方面与发达国家还存在较大差距。

高性能纤维是发展国防军工、航空航天等高科技产业的重要基础材料。近年来,随着高性能纤维价格的持续下降及国家节能、环保政策的推动,高性能纤维在民用领域的应用范围日益拓展,一些新兴产业如风力发电、汽车、高铁等对高性能纤维的需求日益增长,成为新的经济增长点。如今,全球高性能纤维及复合材料正朝着制造技术先进化、低成本化、材料高性能化、多功能化和应用扩大化的方向发展<sup>[3]</sup>。2019年世界各国在高性能纤维及复合材料领域的前沿技术探索、应用潜力开发等方面成果颇丰。

## 1 美国

美国是最先开展碳纤维及芳纶纤维研究的国家,拥有全球领先的高性能纤维、复合材料以及各领域复材制品产业链。目前,美国在航空航天和军工领域高性能纤维的应用具有独特优势,压力容器、风电和汽车等市场也在快速发展。碳纤维占据了美国最大的高性能纤维材料市场份额,主要应用在国防安全领域。近年来,超高分子量聚乙烯纤维也开始成为美国国防研究部门的“新宠”。

超高分子量聚乙烯纤维在已开发的纤维中密度最低、强度最高,是目前防弹性能最好的纤维,在国防军工领域有着不可替代的作用<sup>[4]</sup>。2019年9月,美国陆军研究实验室表示正在通过将超高分子量聚乙烯与氧化硅纳米粒子结合的一种新技术制备用于防弹衣的新材料,这种新材料具有更高的强度,是吸收子弹和其它弹壳撞击的理想材料。2019年11月,美国官员表示,目前美国特种部队正在对一款轻型战斗装甲进行测试,它是之前“战术突击轻型行动服(TALOS)”(图1)的项目成果之一,这

款轻型装甲是一种“轻型聚乙烯肢体防护装甲”,既强固又轻巧,比现行的标准防护装备轻了25%,这款新型的战斗装甲与现役的标准步兵防弹服(身体覆盖率19%)相比,身体覆盖率达到44%以上,能有效保护士兵的肩膀、体前侧、前臂和跨部<sup>[5]</sup>。



图1 战术突击轻型行动服

高性能纤维材料在美国航空航天领域经过近40年的发展,已经进入成熟应用期。美国在该领域的设计和制造经验已经非常丰富,先后成功研制出了全碳纤维/环氧复合材料机身等各种复合材料结构件,波音747中碳纤维复合材料的质量占比已高达50%。未来航空航天领域用高性能纤维及复合材料的主要发展方向为结构化、功能化材料研发以及低成本、一体化技术的开发应用<sup>[6]</sup>。2019年3月15日,美国空军研究实验室(AFRL)与阿肯色大学、迈阿密大学合作开发出3D碳纤维/环氧树脂复合材料,研制出一种定制化直接喷墨3D打印设备(图2),可用于加工航空航天领域的短纤维环氧树脂复合材料结构件,这种材料的开发为下一代多功能无人飞行器结构零件的制造提供了技术支持<sup>[7]</sup>。

除了对航空航天和军工等重点领域的研究,美国也高度重视高性能纤维及复合材料在其他领域的应用研究。2019年10月29日,OceanGate公司宣布,计划使用碳纤维和钛设计建造2种新的潜水器,以满足对深海载人潜水器日益增长的远征、研究和商业需求<sup>[8]</sup>。在汽车领域,美国通用汽车公司于2019年宣布开始在通用Sierra皮卡“GMC Sierra Denali 1500”(图3)和“GMC Sierra AT4 1500”中使

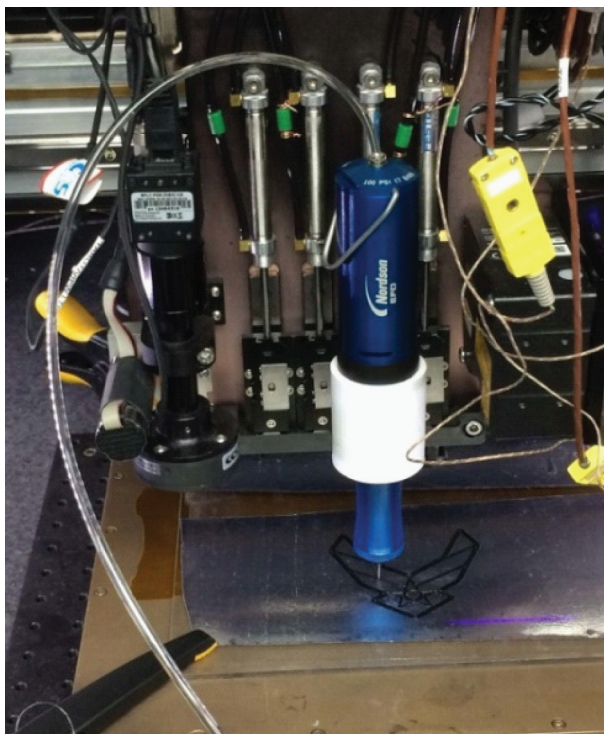


图2 3D碳纤维/环氧树脂复合材料



图3 “GMC Sierra Denali 1500”

用碳纤维车厢,该皮卡车厢(CarbonPro)由通用公司与帝人联合开发,是世界上首次将碳纤维增强热塑性塑料用于大批量生产的汽车结构部件,这款“CarbonPro”与其他皮卡车厢相比,重量减少了约25%,且具有一流的抗凹痕、耐刮擦和耐腐蚀性<sup>[9]</sup>。

在推进高性能纤维及复合材料市场化应用的同时,美国科研人员也一直致力于新结构、新功能

材料的研究。2019年6月,美国莱斯大学的Ajayan团队<sup>[10]</sup>研发了一种高介电、高导热以及耐高温芳香聚酰胺纤维增强的层状复合材料。该材料介电常数最高可达6.3,导热系数最高可达 $2.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,击穿强度可高达 $292 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$ ,杨氏模量达到11 GPa,有望应用于高温储能器件中。

高性能纤维作为复合材料的增强材料,其自身的力学性能在很大程度上影响着纤维复合材料的性能<sup>[11]</sup>,为此,美国佐治亚理工学院针对高性能碳纤维的制备进行了深入研究,其研究小组已经开发出一项新技术,可以提高碳纤维的强度和模量。2019年1月,佐治亚理工学院的Kumar团队<sup>[12]</sup>采用聚丙烯腈(PAN)纤维为原料,成功制备了质量分数超过40%的纳米微晶纤维素(CNC)碳纤维。PAN/CNC基碳纤维的拉伸强度在1.8~2.3 GPa范围内,拉伸模量在220~265 GPa范围内。

## 2 日本

日本在高性能纤维及复合材料行业的产品种类、生产技术、产品质量和系列化开发等方面均具有很强的全球竞争力,是高性能纤维产品种类最全的国家。尤其是在碳纤维领域,日本拥有全球最多的技术专利,覆盖产业链的各个环节,并且占据全球PAN基碳纤维70%以上的市场份额,在国际市场上稳居霸主地位。为保持其在高性能纤维及复合材料行业的领先优势,日本针对产业链各环节的关键材料均有研究布局<sup>[13]</sup>。

日本企业非常重视高性能纤维及复合材料相关技术的研发,从生产工艺到复合材料的应用方面均拥有大量的研发人员。2019年11月18日,东丽公司通过自身的聚合物技术和纤维技术,研制出世界上第一种具有纳米级连续孔结构的多孔碳纤维(图4),并且可以利用自身的技术确保孔隙的均匀分布以及定制多孔结构的固定尺寸,这种纤维材料结构紧密且质轻,具有优异的化学稳定性和透气性,可以用来制作先进膜材料的支撑层,实现更具有环境友好性的天然气和沼气净化、温室气体分离以及安全制氢<sup>[14]</sup>。

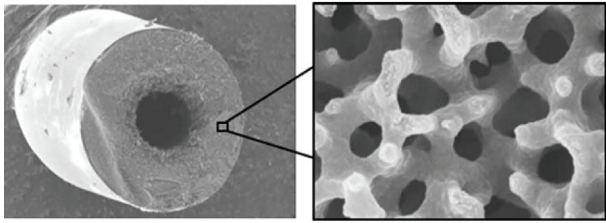


图4 纳米级连续孔结构的多孔碳纤维结构图

2019年日本领先碳纤维供应商在新型纤维预浸料的开发上取得了先进的研究成果。2019年3月4日,帝人公司宣布研发出了一种新型碳纤维增强双马来酰亚胺树脂(BMI)预浸料,这种预浸料具有高达280℃的玻璃化转变温度,以及较高的冲击后抗压强度和较小的线性热膨胀系数,是日本首个兼具高耐热性和高耐冲击性的BMI预浸料,为航空航天发动机零部件的生产提供了新的思路<sup>[15]</sup>。

东丽公司成功研发出新型航空用碳纤维增强塑料(CFRP)预浸料<sup>[16]</sup>和高端汽车和赛车用新型预浸树脂系统“东丽TC346”<sup>[17]</sup>。其中,新型CFRP预浸料适用于真空成型技术,与传统预浸料使用热压罐成型技术相比,能够显著降低制造成本。“东丽TC346”具有优异的机械性能和表面光泽度,是目前性能最高的产品,可以制成各种重量和纤维的单向胶带或织物,广泛应用于赛车变速箱、悬架、机翼和防撞结构。

日本帝人公司是全球第一家量产汽车用碳纤维的企业,多年来也一直在加快该领域的研究。2019年3月6日,帝人汽车复合材料专业集团开发出了一种多材料复合材料汽车门概念,这款多材料侧门模块(图5)由碳纤片状模塑料(SMC)、玻璃纤维SMC和单向玻璃纤维增强塑料(GFRP)制成,具有高强度、低重量、优异的耐热性和减震性、卓越的设计自由度以及能够实现深拉伸等优点。帝人计划于2025年推出商用门模块,争取成为多材料汽车零部件的全球供应商<sup>[18]</sup>。

日本对现有建筑物的大规模翻新和屋顶的扩建/翻新新材料也进行了深入研究<sup>[19]</sup>。2019年10月9日,日本大成建设(Taisei)开发了一种超轻型碳纤维复合材料(CFRP)结构部件—T-CFRP梁(图6)。该T-CFRP梁重量仅为钢架的1/5,并且可以

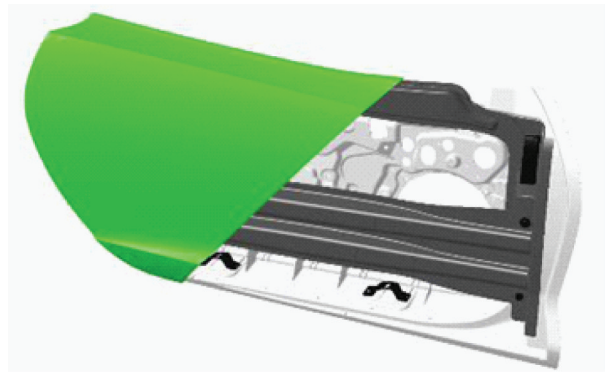


图5 多材料复合汽车侧门模块原型

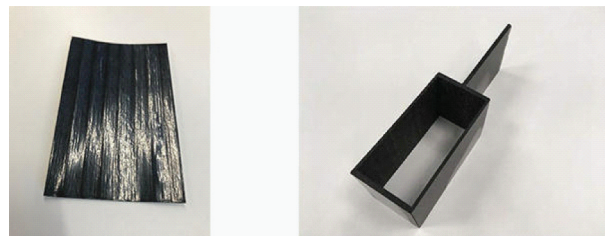


图6 T-CFRP梁的结构件模型

根据建筑物的应用自由设计构件的刚度、强度和形状。这项技术的开发将应对不断增长的建筑用轻量化构件的需求<sup>[20]</sup>。

此外,日本在推进高性能纤维及复合材料相关技术、追求产品市场效益的同时,为了节省能源,减轻环境负担,也越来越重视纤维材料的回收再利用研究。日本汽车制造商协会于2019年下半年开始有关如何回收燃料电池汽车中使用的碳纤维增强塑料的基础研究<sup>[21]</sup>,这项研究旨在通过探索阻燃碳纤维的燃烧机理,为将来报废汽车做准备。2019年9月24日,日本经济产业省与法国政府、欧洲空客发布了关于飞机碳纤维再利用等环保领域的合作战略。日本经济产业省将在碳纤维企业及相关学校的协助下,共同构建碳纤维回收并以低成本再利用的生产机制<sup>[22]</sup>。

### 3 欧洲

欧洲汇聚了德国西格里集团(SGL)、比利时索尔维集团(Solvay)、荷兰皇家帝斯曼集团(DSM)等多家高性能纤维及复合材料领域的突出企业以及英国国家复合材料中心(NCC)、德国航空航天研究

试验院(DLR)等科研院所。近年来,轻量化趋势大力推动了高性能纤维复合材料在汽车工程、航空航天、建筑等行业的发展<sup>[7]</sup>。2019年,欧洲在高性能纤维及复合材料的车用、船用等多领域应用进行了深入研究。

2019年4月7日,英国利物浦公司(Briggs Automotive Company, BAC)正式推出“Mono R”跑车(图7)。“Mono R”是世界上第一款在每个车身面板中都完全采用石墨烯增强碳纤维的量产车<sup>[23]</sup>,石墨烯增强了纤维的结构特性,使面板更坚固、更轻,具有更好的机械和热性能,也使得“Mono R”具有更高性能。



图7 完全采用石墨烯增强碳纤维做车身面板的“Mono R”

2019年11月,法国科纺勒集团(Chomar)为瑞典古斯塔夫斯堡(Arcona Yachts)的巡洋舰435型号和465型号开发了碳纤维增强材料<sup>[24]</sup>。Chomar为了在浇灌过程中获得更好的渗透性,深入研究了高性能C-PLY™的最佳结构,开发出的高性能C-PLY™碳纤维非卷曲织物(NCF),使其具有更高的机械性能和与多种树脂的相容性,而且可以实现更优的成本效益。Chomar用于巡洋舰的船体和甲板的灌注技术将高达70%的碳纤维掺入层压板中,可带来结构设计优势、优质的表面质量及整体零件成本的缩减。

德国西格里(SGL)集团作为全球领先的碳素石墨材料及相关制品的制造商,是欧洲唯一一个在世界碳纤维市场占据主要份额的企业。2019年,SGL为寻求更多的业务发展方式,扩大碳纤维复合材料在更多领域中的作用。2019年4月30日,SGL与上海蔚来汽车有限公司(NIO)合作,共同研制电

动汽车碳纤维增强型塑料电池外壳原型,该电池外壳比传统铝或钢制电池外壳轻40%,具有高刚性且比铝的热导率低200倍,能够更好地保护电池本体不受外界冷热的影响。除此以外,复合材料还赋予电池外壳优异的气密性、防水性和耐腐蚀性<sup>[25]</sup>。

慕尼黑工业大学(TUM)团队与SGL的专家合作开发了一种超回路列车(Hyperloop)胶囊舱的优化模型(图8),该模型使用了SGL的预浸碳纤维编织材料,通过设计和材料优化,胶囊舱结构重约5.6 kg,与6.1 kg的前一型号相比轻了约10%。此外,不同于以前的塑料解决方案,此次运输舱的外壳衬板也完全由碳纤维材料制成,将其重量从1.5 kg减少到仅0.7 kg。该模型在2019年7月21日举办的第四届超回路列车(Hyperloop)竞赛中,以463 km/h的速度为其研发团队获得冠军<sup>[26]</sup>。



图8 慕尼黑工业大学的超回路列车

欧盟早在2000年制定的里斯本战略中就把可持续发展作为重要政策来实施。如今,在欧洲,可持续发展的概念早已深入人心。2019年,欧洲企业在纤维复合材料的回收再利用方面也有新的成果面世。英国ELG Carbon Fibre公司是实现再生碳纤维商业化运作的公司,拥有世界上第一个也是世界上最大的碳纤维回收厂。2019年12月4日,ELG为助力英力士队参赛美洲杯帆船赛,利用制造比赛船只时产生的废料,将其再加工成非织造碳纤维毡,进一步用来制成了两个固定船身的运输托架,这种回收材料性能良好,可直接用于现有工艺,充分表明碳纤维复合材料可以进行回收再利用,减

轻环境负担<sup>[27]</sup>。2019年12月10日,ELG和英国哈德斯菲尔德大学铁路研究所(University of Huddersfield's Institute for Railway Research)联合研究并发布了世界首个碳纤维复合轨道转向架,称为“CAFIBO”(图9)。该新型转向架完全由剩余和回收的碳纤维材料制成,比常规转向架轻,并具有更优异的垂直和横向刚度。在铁路车辆中使用这种新型转向架可以减少轨道磨损、降低基础设施维护成本、提高可靠性和运营可用性以及节约能源,减缓全球变暖<sup>[28]</sup>。



图9 碳纤维轨道转向架

在高性能纤维材料的“新蓝海”——玄武岩纤维方面,欧洲企业已经在技术和产能上开始了相关布局<sup>[29]</sup>。俄罗斯的 Anisoprint 公司于2019年6月推出了一种用于连续纤维3D打印技术的新型玄武岩纤维复合材料(CBF),用这种材料打印的零件,强度是塑料的30倍、铝的2倍,比重也更轻<sup>[30]</sup>。德国 Lipex Engineering GmbH 公司在俄罗斯投资5000万欧元,开始建立玄武岩纤维生产线,以满足玄武岩纤维快速增长的市场需求<sup>[31]</sup>。

除了在车用、船用领域取得的研究进展以外,欧洲也在重点关注航空航天等领域。2019年5月2日,德国西格里公司(SGL)与英国国家复合材料中心(National Composite Center, NCC)达成合作协议,双方将针对航空、交通运输和油气等领域的市场需求,共同开发下一代复合材料生产技术,提升一级和二级结构件中复合材料的使用率。目前,双方已经利用NCC位于英国布里斯托的实验设备开展碳纤维织物(包括无卷曲布等)先进加工工艺的项目研发,下一步将利用SGL集团所提供的碳纤维无卷曲布生产出复合材料机翼样件<sup>[32]</sup>。2019年12月3日,SGL与Solvay达成一项联合开发协议。该

协议计划将基于大丝束中模量(IM)碳纤维的首个用于商业航空的复合材料推向市场,这些材料将基于SGL的IM碳纤维和Solvay的主结构件树脂系统,帮助满足降低成本和二氧化碳排放量的需求,并改善下一代商用飞机的生产工艺和燃油效率<sup>[33]</sup>。

在过去的几十年里,为开发并制造出能够用于航天器中关键尺寸器件的尺寸超稳定结构的材料,研究人员进行了大量的研究,并发展出了碳纤维增强聚合物材料。但由于水分的侵入和释放而导致的尺寸不稳定仍然是基质的基本弱点,这限制了复合材料的许多应用。英国萨里大学 Silva 等<sup>[34]</sup>通过开发一种空间可限定的物理表面势垒来应对这一挑战,这种势垒与复合材料的力学性能相融合,从而成为复合材料本身的一部分。所得到的纤维增强复合材料具有机械完整性和优于底层复合材料的强度,同时保持不透水和排气。

此外,欧洲科研人员在高性能纤维基础研究方面也取得了成果。2019年12月13日,德国拜罗伊特大学高分子化学和聚合物研究所 Greiner<sup>[35]</sup>团队在《Science》发表了《High strength in combination with high toughness in robust and sustainable polymeric materials》的研究文章,通过改进分子交联,克服了人造纤维材料强度和韧性的冲突,制造出多纤维 PAN 纱线,韧性高达 $(137\pm 21)$  J/g、拉伸强度为 $(1236\pm 40)$  MPa。

## 4 中国

近年来,中国在高性能纤维及复合材料行业关键技术、产业化、设备与市场应用等方面取得了突破性发展,正逐步发展成为高性能纤维及复合材料的生产和消费大国。目前,中国高性能纤维及复合材料领域品种较全,少数品种如超高分子量聚乙烯、间位芳纶、玄武岩和聚酰亚胺纤维的生产规模已达到国际水平。

国内碳纤维的研究主要集中于T系列,即高强度型碳纤维,目前国内生产的T300级碳纤维性能已与国际水平同步,T700级碳纤维已实现规模化生产和高性能结构材料的规模应用,T800级碳纤维

2016年才刚刚投产,而日本早在1986年就已经实现了T1000级碳纤维的生产。以中复神鹰碳纤维有限责任公司为首的国内碳纤维企业一直在努力提升国产碳纤维技术。2019年10月29日,由中复神鹰牵头,东华大学和江苏新鹰游机械有限公司共同承担的“QZ6026(T1000级)超高强度碳纤维百吨级工程化关键技术”顺利通过了技术鉴定,率先在国内实现了干喷湿纺T1000级超高强度碳纤维工程化,将来可以为更多的国产先进武器和设备提供高性能纤维材料<sup>[36]</sup>。

目前,中国碳纤维复合材料的应用市场多集中在体育休闲为主的中低端领域,随着国内碳纤维及复合材料生产技术的不断突破,碳纤维复合材料的应用领域也在不断拓展。2019年12月13日,世界上首条全线路采用碳纤维复合芯导线的特高压工程在内蒙古正式并网投运,该工程线路全长14.6 km,全部采用中国自主研发的碳纤维复合芯导线,与传统的钢芯导线相比,碳纤维复合芯导线具有重量轻、强度高、安全性好、导体导电率高、传输损失小等优点。该线路的投运不仅可以节约能源,降低运行成本还可以每年增加132万kW/h的输送电量,以缓解用电紧张问题<sup>[37]</sup>。

在汽车领域,2019年3月20日,中国首辆采用氢能碳纤维车身的乘用车在“中国光谷”研制成功(图10),该车搭载全球领先技术的氢燃料电池堆,续航里程可达1000km以上,全身采用碳纤维材料,使车身结构更轻更强韧、汽车更加轻量化。该车预计于2020年在中国一线城市推广<sup>[38]</sup>。



图10 碳纤维车身

近年来,无人机系统使用越来越广泛,已发展成为航空工业最具活力的发展领域。碳纤维复合材料在无人机领域的应用也成为了高性能纤维复合材料发展的新亮点。2019年12月6日,威海光威复合材料股份有限公司向航空工业直升机设计研究所交付了首架AV500B/C无人机(图11),该无人机的蒙皮(蜂窝和泡沫夹层结构件)、整体油箱承力结构、尾梁整体结构和层压件、封闭腔型结构件等零件,采用了大量由光威复材自主研发的碳纤维复合材料,极大地提高了无人机巡航能力和机动灵活性。该系列无人机主要应用于军用市场,也可通过改装用于其他民用领域,具有巨大的市场潜力<sup>[39]</sup>。



图11 AV500无人直升机

为进一步拓展国产碳纤维复合材料在更多高端、关键领域的应用,提升高品质碳纤维产品的国产化能力至关重要,尤其是目前应用范围最广的PAN基碳纤维,国内生产技术还存在诸多问题,碳纤维品质提升仍需要进行工艺流程细化和优化。中国科研人员针对这些问题做了深入的研究和分析。在聚合方面,应该推动连续聚合工艺的应用,目前国内PAN碳纤维生产厂家多采用间歇或半连续的聚合工艺为主。事实上,对于任何工艺过程而言,连续过程无疑是更加稳定并且易于控制的,有利于提高PAN基碳纤维原丝纺丝溶液的稳定性,最终提高PAN基碳纤维的品质,降低其各种性能指标的离散系数(CV值)<sup>[40-42]</sup>;在PAN基碳纤维原丝制备过程中,合理的凝固条件可以调控PAN纺丝溶液的相分离过程,进而控制原丝中微缺的形成,有利于提高碳纤维的品质。PAN原丝制备过程中,干燥致密化过程是另一个可以调控原丝中微缺

陷结构的重要步骤。合理的张力、温湿度可以有效使 PAN 分子链塑化,促进 PAN 基碳纤维原丝在相分离过程中所形成的微孔结构融合,降低 PAN 原丝中的微缺陷,提高原丝性能,并最终提高 PAN 基碳纤维的品质。

在 PAN 基碳纤维的结构与性能相关性研究方面<sup>[43-45]</sup>,科研人员发现对于模量大于 350 GPa 的 PAN 基碳纤维,石墨化程度的提高对模量的提高关系不大,而主要来源于碳纤维中石墨晶体中的石墨片层的规则排列和石墨晶体的尺寸增长以及石墨晶体取向度的增大;对于 PAN 基碳纤维的强度而言,石墨晶体之间相互纠缠和石墨片层之间的缺点则可以有效使碳纤维在牵伸过程中应力的分散,从而提高碳纤维的强度。此外,碳纤维中的任何缺陷结构,包括微孔、皮芯结构等均导致碳纤维性能降低,理想的 PAN 基碳纤维结构应均匀,尽量减少皮芯结构等缺陷。

除了在碳纤维领域取得了重要研究进展外,国内在其他高性能纤维及复合材料方面的研究也取得了很多关键技术的突破。2019年3月29日,四川省玻纤集团有限公司联合四川大学、西南科技大学共同研发出了连续玄武岩纤维单元池窑生产技术,投产运营了中国具有完全自主知识产权的第一条年产 8000 t 连续玄武岩纤维池窑拉丝中试生产线。该生产线已经成功生产出 9~17  $\mu\text{m}$  多个规格连续玄武岩纤维,相比传统坩埚法工艺降低了 20% 以上的生产成本,为国内连续玄武岩纤维的发展奠定了技术基础<sup>[46]</sup>。2019年11月23日,由内蒙古石墨烯材料研究院与清华大学共同研发的国产化对位芳纶,经过 3 个多月的调试运行,顺利建成了年产 100 t 的对位芳纶生产线,成功打破了国外对芳纶技术垄断,加速推进了国内对位芳纶的产业化进程<sup>[47]</sup>。

芳纶纳米纤维(aramid nanofibers, ANFs)作为近年来开发的一种新型纳米高分子材料,兼具对位芳纶纤维(PPTA)和高分子纳米纤维的双重优势,可解决芳纶纤维存在的表面光滑惰性强、复合界面强度弱等问题。但是传统 ANFs 的制备方法存在周期长(7 d)、反应浓度低(0.2%)、反应效率低等问

题,严重困扰着 ANFs 规模化应用与发展。陕西科技大学张美云<sup>[48]</sup>团队为解决这一问题,利用原纤化/超声/质子供体耦合去质子化法制备 ANFs,使得 ANFs 制备周期从传统的 7 d 缩短至 4 h,制备的 ANFs 具有小的直径及尺度分布( $10.7\pm 1.0$ ) nm,同时也探究了高浓度 ANFs 的制备,在 12 h 内即可制得 4.0% 的高浓 ANFs,成膜具有优异的机械性能与热稳定性,本研究提出的 ANFs 高效制备方法工艺简单、性能优异,有望进一步推动其规模化生产与产业化应用。

中国高性能纤维及复合材料的研究起步较晚,且产、学、研、用脱节,在高端领域自主创新能力与发达国家相比存在明显差距。但随着在政策支持与科技创新方面的持续投入,中国高性能纤维及复合材料关键技术的自主研发与产业化将实现联动突破,有望逐步打破国外技术垄断,实现高端领域先进纤维材料的国产化。

## 5 结论

高性能纤维复合材料在航空航天、轨道交通、汽车、建筑、风能、船舶等领域具有广阔的发展前景。2019年世界各国在高性能纤维复合材料领域的研究方面成果颇丰。美国重点研发出了军工以及航空航天领域用功能性先进纤维新材料;日本三大碳纤维供应商在纤维原材料、纤维预浸料到复合材料制品整个产业链都取得了突破性的研究进展;欧洲主要在车用和船用高性能纤维材料领域进行了深入研究;中国主要集中于高性能纤维复合材料的关键技术突破与市场化应用。同时,在全球能源危机和环境污染问题日趋严峻的情况下,各国纷纷开展了对废弃纤维复合材料回收再利用的研究,并取得了一定的成果。

随着高性能纤维复合材料研究的不断深入与应用领域的不断拓展,其市场需求将呈现快速发展的趋势。世界各国都将抓住这一市场机遇,以创新驱动高性能纤维复合材料的可持续发展。未来高性能纤维及复合材料产业发展方向主要包括:围绕汽车、高铁等应用领域设计研发结构功能一体化产

品;发展低成本技术、一体化成型技术以及智能化加工体系;绿色化推动高性能纤维产品的生产、开发、应用以及循环回收等。

目前,中国高性能纤维复合材料产业正处于发展的关键阶段,为了满足高性能纤维复合材料国内战略安全以及日益增长的市场需求,国家重点支持国防军工等高端领域用先进纤维复合材料的技术研究,加强行业宏观引导、推动纤维行业绿色协调发展,中国有望到2025年成为高性能纤维复合材料产业强国。

### 参考文献(References)

- [1] 孙晓婷, 郭亚. 高性能纤维的性能及应用[J]. 成都纺织高等专科学校学报, 2017, 34(2): 216-219.
- [2] 郭云竹. 高性能纤维及其复合材料的研究与应用[J]. 纤维复合材料, 2017(1): 7-10.
- [3] 罗益锋. 新形势下高性能纤维与复合材料的主攻方向与新进展[J]. 高科技纤维与应用, 2019(5): 1-22.
- [4] 肖文莹, 郭万涛, 李想. 超高分子量聚乙烯纤维增强防弹复合材料研究进展[J]. 材料开发与应用, 2019(2): 131-138.
- [5] Keller J. SOCOM is field testing lightweight body armor originally developed for its 'iron man' suit[EB/OL]. [2019-12-25]. <https://www.military.com/daily-news/2019/11/13/socom-field-testing-lightweight-body-armor-originally-developed-its-iron-man-suit.html>.
- [6] 尚金龙, 李思海, 陈贻明. 纤维增强塑料在航空航天领域中的应用[J]. 塑料工业, 2019(1): 148-151.
- [7] Lindner D. AFRL, university partners make a push in printable composites [EB/OL]. [2019-12-25]. <https://www.wpafb.af.mil/News/Article-Display/Article/1787657/afri-university-partners-make-a-push-in-printable-composites/>.
- [8] Rush S. OceanGate to build two new submersibles for deep ocean exploration, research and commercial operations to titanic depths and beyond[EB/OL]. [2019-12-25]. <https://www.oceangate.com/news-and-media/press-releases.html>.
- [9] General Motors Company. GMC CarbonPro™ delivers innovation and durability where it counts[EB/OL]. [2019-12-25]. <https://www.gmc.com/gmc-life/news/carbonpro-delivers-innovation-durability#carbonpro>.
- [10] Rahman M M, Puthirath A B, Adumbukulath A, et al. Fiber reinforced layered dielectric nanocomposite[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(28): 1900056.
- [11] 刘越. 碳纤维增强复合材料性能影响因素的探讨[J]. 高科技纤维与应用, 2003, 28(2): 29-33.
- [12] Chang H, Luo J, Liu H C, et al. Carbon fibers from polyacrylonitrile/cellulose nanocrystal nanocomposite fibers [J]. Carbon, 2019, doi: 10.1016/j.carbon.2019.01.045.
- [13] 赵永霞, 祝丽娟. 世界纺织版图与产业发展新格局(一)——日本篇(上)[J]. 纺织导报, 2019(4): 35-38.
- [14] Toray Industries, Inc. Toray Creates World's First Porous Carbon Fiber with Continuous Pore Structure New material could benefit environment by enhancing performance of advanced gas separation membranes [EB/OL]. [2019-12-25]. <https://www.toray.com/news/environment/detail.html?key=32652CBCD6A7B976492584B6000742-C3>.
- [15] Teijin Limited. Teijin develops highly heat-and impact-resistant prepreg as carbon fiber intermediate material for aerospace applications[EB/OL]. [2019-12-25]. [https://www.teijin.co.jp/news/2019/20190304\\_5224.html](https://www.teijin.co.jp/news/2019/20190304_5224.html).
- [16] 東レ株式会社. 航空機向け真空圧成形プリプレグを開発 - オートクレーブを使用しない実物大部材成形で高品質を実証 - [EB/OL]. [2019-12-25]. <https://cs2.toray.co.jp/news/toray/newsrrs01.nsf/0/B83FB49704A7C-552492583DF002827DF>.
- [17] Toray Advanced Composites. Toray announce new superior structural resin system for high-end motorsport market[EB/OL]. [2019-12-25]. <https://www.toraytac.com/company/news/2019/11/13/Toray-Announce-New-Superior-Structural-Resin-System-for-High-End-Motorsport-Market>.
- [18] Teijin Limited. Teijin develops extra-light automotive side-door module made of advanced multi-material composites[EB/OL]. [2019-12-25]. [https://www.teijin.com/news/2019/20190306\\_2559.html](https://www.teijin.com/news/2019/20190306_2559.html).
- [19] 王庄林, 柳河敬田, 吉田修. 日本安全住宅建筑技术动向[J]. 住宅与房地产, 2017(2): 62-69.
- [20] 大成建設株式会社. 炭素繊維強化プラスチック部材「T-CFRP Beam (FR)」を開発・適用[EB/OL]. [2019-12-25]. [https://www.taisei.co.jp/about\\_us/wn/2019/19100-9\\_4805.html](https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2019/19100-9_4805.html).
- [21] 豊田章. 自工会、CFRP適正処理研究を開始炭素繊維の燃焼メカニズム把握[EB/OL]. [2019-12-25]. <https://www.netdenjd.com/articles/-/183446>.

- [22] 日本经济新闻. 炭素纖維、再利用で連携日仏、航空機向け技術開発[EB/OL]. [2019-12-25]. <https://www.nikkei.com/article/DGKKZO50112700T20C19A9NN1000/>
- [23] Briggs Automotive Company. Introducing Mono R—Higher-performance, lighter, more advanced GEN2 Mono[EB/OL]. [2019-12-25]. <http://www.bac-mono.com/news.php?newsID=186>.
- [24] Chomarat. Le renfort carbone C-PLY™ de Chomarat équipe les yachts hautes performances de course-croisière d'Arcona Yachts[EB/OL]. [2019-12-25]. <https://chomarat.com/le-renfort-carbone-c-ply-de-chomarat-equipe-les-yachts-hautes-performances-de-course-croisiere-darcona-yachts>.
- [25] Schludi C. Carbon fiber-based battery enclosures support electromobility[EB/OL]. [2019-12-25]. <https://www.sglcarbon.com/en/for-a-smarter-world/carbon-fiber-based-battery-enclosures-support-electromobility/>.
- [26] Pütz A. The winning team of the hyperloop competition counts on carbon fiber reinforced plastic[EB/OL]. [2019-12-25]. <https://www.sglcarbon.com/en/company/press/press-information/press-report/the-winning-team-of-the-hyperloop-competition-counts-on-carbon-fiber-reinforced-plastic>.
- [27] ELG Carbon Fibre. Britannia boat cradles manufactured with ELG recycled carbon fiber[EB/OL]. [2019-12-25]. <https://www.compositesworld.com/news/britannia-boat-cradles-manufactured-with-elg-recycled-carbon-fiber>.
- [28] Davison K. World's first carbon fibre rail bogie unveiled at 'Unlocking Innovation' rail conference at the University of Huddersfield[EB/OL]. [2019-12-25]. <http://www.elgcf.com/news/worlds-first-carbon-fibre-rail-bogie-unveiled-at-unlocking-innovation-rail-conference-at-the-university-of-huddersfield>.
- [29] 曹海琳, 晏义伍, 岳利培, 等. 高性能纤维技术丛书: 玄武岩纤维[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- [30] Anisoprint. 俄罗斯 Anisoprint: 中国需要复合纤维 3D 打印技术[EB/OL]. [2019-12-25]. <http://www.mw35.com/Article/NewsItem/84559>.
- [31] Mason H. Lipex Engineering to build basalt fiber production plant in Russia[EB/OL]. [2019-12-25]. <https://www.compositesworld.com/news/lipex-engineering-to-build-basalt-fiber-production-plant-in-russia>.
- [32] SGL Carbon. SGL Carbon enters into partnership with the UK's National Composites Centre[EB/OL]. [2019-12-25]. <https://www.sglcarbon.com/en/company/press/press-information/press-report/sgl-carbon-enters-into-partnership-with-the-uks-national-composites-centre/>
- [33] SGL Carbon. SGL Carbon and Solvay collaborate to develop highly-competitive advanced carbon fiber composites for aerospace primary structures[EB/OL]. [2019-12-25]. <https://www.sglcarbon.com/en/company/press/press-information/press-report/sgl-carbon-and-solvay-collaborate-to-develop-highly-competitive-advanced-carbon-fiber-composites-for/>.
- [34] Anguita J V, Smith C T G, Stute T, et al. Dimensionally and environmentally ultra-stable polymer composites reinforced with carbon fibres[J]. *Nature Materials*, 2019, doi: 10.1038/s41563-019-0565-3.
- [35] Liao X, Dulle M, Silva J M S, et al. High strength in combination with high toughness in robust and sustainable polymeric materials[J]. *Science*, 2019, 366(6471): 1376-1379.
- [36] 中复神鹰. 中复神鹰 T1000 级超高强度碳纤维工程化关键技术通过鉴定[EB/OL]. [2019-12-25]. [http://www.zfsycf.com.cn/news\\_content.php?articleid=432](http://www.zfsycf.com.cn/news_content.php?articleid=432).
- [37] 彭源. 世界首条碳纤维复合导线特高压工程正式带负荷运行[EB/OL]. [2019-12-25]. [http://www.xinhuanet.com/fortune/2019-12/13/c\\_1125344246.htm](http://www.xinhuanet.com/fortune/2019-12/13/c_1125344246.htm).
- [38] 裴道彰, 徐金波. 中国首辆氢能碳纤维车身乘用车武汉诞生[EB/OL]. [2019-12-25]. <http://www.chinanews.com/cj/2019/03-20/8785619.shtml>.
- [39] 光威复材. 光威复材向航空工业直升机所交付 AV500 无人机[EB/OL]. [2019-12-25]. <http://www.chinacompositesexpo.com/cn/news-detail-246-8938.html>.
- [40] 刘瑞刚, 徐坚, 国产高性能聚丙烯腈基碳纤维制备技术研究进展[J]. *科技导报*, 2018, 36(19): 32-42.
- [41] 徐坚, 刘瑞刚, 高性能纤维基本科学原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018.
- [42] 张泽, 徐卫军, 康宏亮, 等. 高性能聚丙烯腈基碳纤维制备技术几点思考[J]. *纺织学报*, 2019, 40(12): 152-161.
- [43] Lu J S, Li W W, Kang H L, et al. Microstructure and properties of polyacrylonitrile based carbon fibers[J]. *Polymer Testing*, 2020, 81: 106267.
- [44] Li W W, Kang H L, Xu J, et al. Effects of ultra-high temperature treatment on the microstructure of carbon fibers[J]. *Chinese Journal of Polymer Science*, 2017, doi: 10.1007/s10118-017-1922-9
- [45] Li W W, Kang H L, Xu J, et al. Microstructures of high-strength high-modulus carbon fibers and high-modulus carbon fibers[J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2018, 49(3): 380-388.

- [46] 陈曦. 投资 35 亿元的玄武岩纤维产业化基地落户德阳罗江[EB/OL]. [2019-12-25]. <http://sc.people.com.cn/n2/2019/0329/c379469-32793001.html>.
- [47] 江苏化工网. 内蒙古国产化对位芳纶生产线顺利投产[EB/OL]. [2019-12-25]. [http://jschemnet.cn/news\\_detail.asp?id=186069](http://jschemnet.cn/news_detail.asp?id=186069).
- [48] Yang B, Wang L, Zhang M, et al. Timesaving, high-efficiency approaches to fabricate aramid nanofibers[J]. ACS Nano, 2019, 13(7): 7886-7897.

## Hot topics of advanced fiber reinforced composites in 2019

XU Jian<sup>1,2</sup>, WANG Yahui<sup>2</sup>, LI Linhao<sup>2</sup>, NIE Mingqi<sup>2</sup>, WANG Xida<sup>2</sup>, JI Junna<sup>2</sup>, ZHU Caizhen<sup>1</sup>, LIU Ruigang<sup>3</sup>

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

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

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

**Abstract** As a typical dual-use material, advanced fiber reinforced composites have drawn attention around the world in recent years due to their wide range of application prospects. By reviewing the progress on new products, new processing and new markets of advanced fiber-reinforced composites in the world in 2019, hot research topics of advanced fiber composite materials in the United States, Japan, Europe and China are summarized and the development trends of advanced fiber composite materials in the future are prospected.

**Keywords** advanced fiber reinforced composites; lightweight; cost down ●



(责任编辑 卫夏雯)