

新形势下我国碳纤维产业发展探讨

高 奇

(中国石化集团资产经营管理有限公司巴陵石化分公司, 湖南 岳阳 414014)

摘 要: 探讨了碳纤维的生产供需、下游应用状况, 以及碳纤维及其复合材料技术研究进展、我国碳纤维产业发展面临的问题。2018 年我国碳纤维理论生产能力 26.1 kt/a, 产量 9.0 kt, 开工率 34%, 进口量(包含预浸料等) 22.0 kt, 表观消费量 31.0 kt。国内碳纤维复合材料主要应用于休闲体育领域, 占比为 52%, 而在航空航天、交通运输领域应用占比则较低。当前, 碳纤维及其复合材料技术研究主要围绕降低碳纤维生产成本, 提高碳纤维本身性能; 改善树脂体系的韧性, 提高树脂体系与碳纤维复合的界面相容性; 开拓复合材料成型新工艺, 提升应用水平。与世界先进水平相比, 我国在碳纤维产业化工艺与装备; 碳纤维复合材料设计、制造、评价能力; 基础研究与产业配套方面均严重落后。建议政府层面加强引导、政策扶持力度, 规范碳纤维行业发展; 企业层面加大产、学、研协同, 加快碳纤维及其复合材料全产业链关键技术攻关, 提升产业化发展水平; 行业组织层面加强组织协调, 搭建公共服务平台, 推动碳纤维及复合材料良好的产业生态建设。

关键词: 碳纤维 碳纤维复合材料 生产 供需 应用 研究进展 发展建议

中图分类号: TQ342+.74 文献标识码: A 文章编号: 1001-0042(2019)05-0058-06

碳纤维是一种含碳量在 95% 以上的新型材料, 既具有碳材料质轻、耐高温、耐腐蚀、耐疲劳、抗蠕变、高强度、高模量等固有本质特性, 又兼备纺织纤维的柔软可加工性, 广泛应用于航空航天、交通运输、体育休闲等领域^[1]。

碳纤维产业链核心环节很多, 包括上游原丝生产、中游碳化环节、下游复合材料及其应用等。经过五十多年的研发和突破, 我国碳纤维产业已取得一系列重大成果, 初步形成了产业化碳纤维的研发和生产平台, 逐步打破了国外技术封锁和市场垄断局面^[2]。但碳纤维产业化过程仍存在一些“卡脖子”问题亟待解决。在当前逆全球化思潮抬头的新形势下, 加快碳纤维产业的发展, 不仅可以推动石油化工、纤维纺织等传统行业的技术进步和转型升级, 而且对于保障国家重大工程以及国防科工的发展有着重要战略意义。作者探讨了国内外碳纤维的生产供需、下游应用状况, 以及碳纤维及其复合材料技术研究进展、我国碳纤维产业发展面临的问题, 并提出了发展建议。

1 碳纤维生产供需状况

从企业角度来看, 全球碳纤维企业大致可分为三个梯队: 一梯队为兼具规模和技术优势的企业, 日本东丽株式会社、日本东邦会社等为典型代表; 二梯队是在特定领域具备较强竞争力的企业, 如德国西格里集团在汽车领域竞争力较强; 三梯

队则是具备成本优势的企业, 如中国台湾台塑工业股份有限公司、土耳其阿克萨公司、韩国晓星集团等。2018 年全球碳纤维主要生产企业的生产情况见表 1。

表 1 2018 年全球碳纤维主要生产企业
Tab. 1 Global carbon fiber major producers in 2018

国家和地区	企业名称	生产能力 / (kt · a ⁻¹)
日本	日本东丽株式会社	27.1
	日本三菱丽阳株式会社	14.3
	日本东邦会社	12.6
欧洲	德国西格里集团	15.0
	土耳其阿克萨公司	3.5
	俄罗斯 UMATEX 集团	2.0
美国	美国赫氏公司	10.0
	美国氟特公司	7.0
	美国卓尔泰克公司(被东丽收购)	20.0
韩国	韩国晓星集团	2.5
中国台湾	台湾台塑工业股份有限公司	8.8
中国	中复神鹰碳纤维有限公司	6.0
	江苏恒神股份有限公司	4.65
	精功集团有限公司	3.6
	光威复合材料股份有限公司	3.1
	中安信科技有限公司	1.8
	兰州蓝星纤维有限公司	1.8
	其他	5.15
其他	3.0	
合计	154.8	

收稿日期: 2019-02-15; 修改稿收到日期: 2019-07-12。

作者简介: 高奇(1973—), 男, 高级经济师, 从事企业党建和政策研究等工作。E-mail: gaoq. blsh@ sinopec. com。

2018 年全球碳纤维理论生产能力 154.8 kt/a。其中,日本东丽株式会社、德国西格里集团、美国卓尔泰克公司(已被东丽收购)、日本三菱丽阳株式会社、日本东邦会社 5 家企业合计生产能力 89 kt/a,占全球总产能的 57%。日本东丽株式会社是全球碳纤维生产第一大公司,生产能力达到 27.1 kt/a(不含美国卓尔泰克公司产能)。

我国碳纤维生产企业有近 30 家,2018 年理论生产能力 26.1 kt/a,见表 2。其中,产能千吨以上的企业有 7 家,分别是中复神鹰碳纤维有限公司、江苏恒神股份有限公司、精功集团有限公司、光威复合材料股份有限公司、中安信科技有限公司、兰州蓝星纤维有限公司、山西钢科碳材料有限公司,合计生产能力 22.05 kt/a,约占国内总产能的 84%。

表 2 2018 年我国碳纤维主要生产企业
Tab. 2 China carbon fiber major producers in 2018

企业名称	生产能力/(kt·a ⁻¹)
中复神鹰碳纤维有限公司	6.00
江苏恒神股份有限公司	4.65
精功集团有限公司	3.50
光威复合材料股份有限公司	3.10
中安信科技有限公司	1.80
兰州蓝星纤维有限公司	1.80
山西钢科碳材料有限公司	1.20
中国石油吉林石化公司	0.60
吉林方大江城碳纤维有限公司	0.55
中国石化上海石化分公司	0.50
河南永煤碳纤维有限公司	0.50
其他	1.90
合计	26.10

2018 年国内碳纤维产量约 9.0 kt,开工率约为 34%,低于全球 60%的开工率,主要原因一是优秀企业老生产线因经济效益较低而停产,二是有些企业的生产线水平较低,不能长期稳定运行;纯碳纤维进口 3.48 kt,同比增长 13%,但进口若包括碳纤维预浸料、碳纤维布等,则进口量为 22 kt,同比增长 36.8%。这说明我国碳纤维下游消费以进口预浸料加工为主。

表 3 2014—2018 年国内碳纤维供需情况
Tab. 3 China carbon fiber supply and demand situation over 2014—2018

年份	产量/kt	进口量/kt	进口量(包含预浸料)/kt	表观消费量/kt
2014 年	2.0	1.665	12.8	14.8
2015 年	2.5	1.766	14.4	16.9
2016 年	3.6	2.781	16.0	19.6
2017 年	7.4	3.075	16.1	23.5
2018 年	9.0	3.477	22.0	31.0

基于近年来碳纤维需求旺盛,碳纤维正处于从“贵族材料”向“平民化材料”转变,价格逐年降低等原因,预计 2019—2025 年,我国碳纤维消费需求年均增速将保持在 15% 以上。

2 碳纤维下游应用状况

碳纤维一般不单独使用,而是和树脂、金属、陶瓷等制成复合材料满足下游应用,其中树脂基碳纤维复合材料使用量最大,占碳纤维复合材料市场份额的 90% 以上^[3]。环氧树脂、乙烯基酯树脂、酚醛树脂、不饱和聚酯树脂等热固性树脂,以及聚丙烯、聚酰胺、聚四氟乙烯等热塑性树脂均可用于制备树脂基碳纤维复合材料。

从全球碳纤维复合材料下游应用来看,航空航天、体育休闲和工业应用是碳纤维复合材料应用的 3 个主要领域,但与全球碳纤维复合材料应用不同的是,国内碳纤维复合材料主要应用于休闲体育领域,占比为 52%,而在航空航天、交通运输领域应用占比则较低。碳纤维生产技术和装备水平低,产业化生产工艺不成熟是导致国内碳纤维应用领域集中在低端市场的主要原因。

表 4 国内碳纤维复合材料下游应用领域

Tab. 4 Down-stream application field of China carbon fiber composite

应用领域	应用实例	所占比例/%
体育休闲	高尔夫球棒、羽毛球拍、钓鱼竿、自行车	52
能源	风电叶片	16
土木建筑	桥梁增强、建筑材料	6
工业应用	压力容器	6
交通运输	汽车、船舶	3
电子电气	笔记本、电视机、LED 显示屏	2
电力电缆	电缆芯	2
机械	管、集装箱	3
其他	钻井平台、医疗器械	3
航空航天	飞机、卫星	3
其他		4

未来,我国航空航天、新能源汽车领域对碳纤维复合材料需求巨大,不管是国产大型客机 C919,还是插电式混合动力汽车等都对碳纤维复合材料有很大需求,但碳纤维复合材料的高端产能目前在国内仍属空白,碳纤维发展的瓶颈亟待攻克。

3 碳纤维及其复合材料技术研究进展

碳纤维及其复合材料性能的提高,生产成本

的降低,既与碳纤维本身有关,也与树脂体系及其复合材料成型工艺有关,是一项非常系统的工程。当前研究主要围绕以下几方面展开:

(1) 降低碳纤维生产成本,提高碳纤维本身性能。碳纤维的制备包括前驱体制备、预氧化、碳化及表面处理等工艺过程。其中,前驱体的制备占碳纤维生产成本的50%以上^[4]。因此,开发低成本、高性能的前驱体被认为是降低碳纤维生产成本的最有效途径之一。目前已实现工业化的碳纤维前驱体主要为粘胶基、沥青基和聚丙烯腈(PAN)基。粘胶基前驱体最早用于制备碳纤维原丝,但粘胶纤维的实际碳收率较低,在30%以下;各向同性沥青基前驱体原料廉价、碳收率在80%以上,生产工艺简单,生产成本较低,但其力学性能较低;中间相沥青前驱体由于对沥青纯度有极其苛刻的要求,必须进行纯化处理,因而成本较高;PAN基前驱体碳收率比粘胶基前驱体高,生产流程、溶剂回收、三废处理也较简单,但原料价格仍然较高。为开拓廉价质优的前驱体替代材料,众多研究者展开了大量研究,如以聚烯烃^[5]、木质素^[6]、芳香族聚合物^[7]、生物质^[8-10]等为原碳纤维前驱体,但这些前驱体仍然存在碳收率低或者生产成本低、力学性能差等问题。值得关注的是, Yang J等^[11-12]以廉价的无灰煤作为前驱体,通过低温溶剂分离和薄层蒸发法调控其相对分子质量分布和氧含量,制备了各向同性沥青,该沥青碳化所制备的碳纤维拉伸强度达到1100 MPa,具有巨大的市场潜能。

碳纤维难以兼顾强度和弹性模量,这成为开发的焦点之一。碳纤维石墨化采用超高温使碳纤维内部由乱层石墨片层结构形成规整的三维石墨晶体结构,是制备高模量或高强高模碳纤维的关键工艺,其技术的核心在于石墨化装置对碳纤维进行超高温热处理的高效性及石墨化工艺对纤维结构择优演变的有效控制^[13]。国内外研究者对碳纤维石墨化设备进行了广泛研究,研制了不同加热方式的石墨化炉,如塔姆式电阻炉^[14]、感应炉^[15]、射频炉^[16]、等离子炉^[17]等。其中,塔姆式电阻炉、射频炉均已产业化,国内外普遍应用(日本东丽株式会社采用射频炉制备高强高模碳纤维)。但这几种石墨化炉均采用间接加热技术,存在热效率低、能耗高、石墨化炉寿命短、热处理温度受限的缺点,影响了碳纤维石墨化过程中结构的择优演变。针对间接加热技术的缺点,激

光隧道炉^[18-19]、连续石墨化炉^[20]等直接加热技术石墨化炉被研制。这类石墨化炉克服高温限制且高效高质量、节能环保是未来的发展趋势。

在石墨化工艺方面,国内外研学者也进行了大量研究,发现温度场的分布对碳纤维结构的择优演变十分重要^[21];控制热处理时间可以在保证石墨纤维质量的前提下有效降低能源消耗^[22];施加一定的牵伸力可以改善碳纤维的微观结构,提高拉伸强度和模量^[23];硼原子催化剂对碳纤维石墨化过程有很强的促进作用,可降低纤维热膨胀系数,提高其抗氧化性能^[24-25]。

(2) 改善树脂体系的韧性,提高树脂体系与碳纤维复合的界面相容性。碳纤维复合材料具有各向异性的结构特点,在垂直纤维方向的性能较差,而增加树脂体系的韧性可提高复合材料的横向拉伸强度,从而提高复合材料抗损伤性能及应力水平。目前研究较多的树脂体系增韧技术有橡胶弹性体增韧、热致性液晶高分子增韧、热塑性树脂增韧、超支化聚合物(HBP)增韧和纳米粒子增韧等^[26-29]。然而,应用橡胶弹性体或热塑性树脂虽可实现环氧树脂增韧,但同时牺牲了体系的模量、耐热性能、拉伸性能等;用热致液晶高分子改性树脂,韧性提高的同时,力学性能和耐热性虽没有大的损失,但原料价格较贵,树脂很难与它很好相容,且加工成型难度较大;纳米粒子具有较高的表面能和特殊的尺寸效应,增韧效果显著,但纳米颗粒分散性不好,极易团聚。在增韧的同时降低对材料其他性能的负面影响、降低成本、协同增韧是未来树脂体系增韧的发展方向。

碳纤维与树脂体系间的界面相容性是充分发挥碳纤维力学性能优势,制备高性能复合材料的核心问题。目前,改善树脂体系与碳纤维复合的界面相容性的研究主要从两方面着手:一是对碳纤维进行表面改性。由于碳纤维极性低,不利于树脂的粘附,所以需对碳纤维进行表面氧化改性,以增加其表面的羟基、醛基、羧基的数量,提高极性以便于和树脂粘附^[30-34]。但改性在提高碳纤维表面性能的同时,会以损失纤维自身的性能作为代价;二是通过更改树脂与固化剂的配方,提高树脂体系固化后的极性,或者令其更容易与碳纤维表面基团反应。也有相关研究通过在树脂中加入富勒烯、碳纳米管等增加其与碳纤维的相容性、致密程度等以提高性能。

(3) 开拓复合材料成型新工艺,提升应用水

平。成型工艺是实现原材料由半成品到成品的加工手段。原材料的特性和成品的预期性能决定了成型工艺的类型。目前,碳纤维复合材料的成型工艺主要有缠绕成型、高温模压成型、真空热压罐成型、液态成型、挤压成型等。其中,除缠绕成型工艺(即将浸有树脂的纤维束按一定规律缠绕在一个旋转的芯模上,然后固化、脱模成为复合材料制品,主要用于制造筒形或球形碳纤维制品等)可以直接使用碳纤维外,其余工艺均需先将碳纤维制成中间材料,再与树脂复合成制品。几种常见的中间材料有碳纤维布、预浸料、片状模压料(SMC)和短纤,其中预浸料是最主流的中间材料,约占树脂基碳纤维消费总量的55%。碳纤维布一般采用树脂传递模塑(RTM)成型;预浸料采用高温模压成型、真空热压罐成型等;SMC主要采用与非饱和聚酯树脂等模压成型;而短纤或长纤适合用与热塑性树脂挤压成型。

除了上述几种工艺外,近年真空导入、3iTech感应加热等成型工艺发展迅速。真空导入成型工艺是一种大尺寸复合材料制件的液体模塑成型技术,是目前大型风电叶片制造所普遍采取的一种成型工艺^[35],即通过真空产生的压力把树脂通过预铺的管路压入铺设好的纤维层中,让树脂浸润增强材料,最后充满整个模具,固化成制品的过程。3iTech感应加热成型是一种将感应器集成在模具中的新型感应加热工艺,可以在20~400℃的温度下加工碳纤维材料,利用热传导的原理通过温度感应器来加热模具表面,可用于批量化制备小型零部件。

4 我国碳纤维产业发展面临的问题

我国碳纤维复合材料起步于20世纪60年代,但发展较为缓慢,与世界先进水平相比,我国在碳纤维产业化工艺与装备;碳纤维复合材料设计、制造、评价能力;基础研究与产业配套方面均严重落后^[36]。

(1) 碳纤维产业化工艺与装备核心技术仍未本质突破

经过10余年的探索,虽然我国碳纤维产业化已初具规模,初步实现了国产T300级和T700级碳纤维规模化生产,T800级、M40J级碳纤维的工程化生产,但产业化工艺与装置核心技术仍未本质突破。主要表现在:原丝水平落后,绝大多数碳纤维企业采用的是二甲基砷原丝技术,质量尚

未过关,其他原丝技术发展相对滞后;碳纤维性能不高、产品稳定性差,产能利用率不到30%,且仅能应用于体育休闲等低端领域,航空航天等高端领域则应用较少;碳纤维设备生产技术几乎被国外垄断,且严格限制对我国出口,如碳化炉、石墨化炉等关键设备研发滞后。

(2) 碳纤维复合材料设计、制造、评价能力薄弱

碳纤维复合材料设计、制造、评价是碳纤维应用的基础,制约着碳纤维产业的发展。目前,国内碳纤维复合材料的设计、制造、评价水平较为薄弱,主要表现在:未真正掌握复合材料连接、疲劳耐久性、损伤容限、稳定性等具体设计技术和要领;设计的规范、手册,以及设计分析软件等缺乏;成型工艺、模具技术、无损检测、制造设备等制造技术发展落后,如日本、德国、美国等少数发达国家已掌握70~75 g/m²标准的碳纤维预浸料生产技术,而我国还不能生产低于80 g/m²的碳纤维预浸料,高端碳纤维预浸料主要依靠进口;碳纤维复合材料设备完全由美国公司垄断,如自动铺丝机、层合固化装备等。整体上,我国碳纤维复合材料设计、制造、评价尚处于起步阶段。

(3) 基础研究与产业配套不到位

与国外相比,国内碳纤维及其复合材料的许多基础理论和工程实际问题未获解决,基础理论方面如分子、原子水平上的碳纤维结构演变,复合材料的加工损伤形成机制等;工程实践方面如PAN的工程控制、复合材料许应值与结构设计许应值的确定原则、复合材料大面积整体成型等基础科学问题尚未探明。除了碳纤维自身原因外,国内相关配套产业不到位也严重制约了碳纤维产业发展,表现在:由于原料PAN原液杂质含量较高,导致碳纤维在生产过程中易产生毛丝缠结,甚至发生断丝,造成碳纤维性能不稳定,离散系数较大;环氧树脂等热固性树脂基体韧性较差,造成碳纤维复合材料较低的抗冲击损伤能力,特别是在制造或使用中遭受意外冲击时,其内部易出现不易观测到的分层损伤等。

5 发展建议

碳纤维及复合材料作为一种国民经济和国防建设不可或缺的战略新材料,其核心技术要不来、买不来、讨不来,尤其是在当前发达国家对中国日益趋严的出口管制形势下,依托政府、企业、

行业组织的力量,将政府与产业界、顶层设计与企业实践紧密结合起来,大力加强自主创新,整合各方面资源,才能把创新主动权、发展主动权牢牢掌握在自己手中。

(1) 政府层面,应加强引导、政策扶持力度,规范碳纤维行业发展。一是制定碳纤维行业准入标准,如产能、能耗、物耗、环保、安全等规范要求,防止低水平重复建设。二是积极推动企业间跨行业、跨区域联合重组,促进碳纤维上下游产业集聚、协调发展,实现资源优化配置,提高产业链的竞争优势。三是组织制定和完善碳纤维及其复合材料的产品标准、测试方式标准和工程应用设计规范。

(2) 企业层面,应加大产、学、研协同,加快碳纤维上下游全产业链关键技术攻关,提升产业化发展水平。一是优化工程实验和工程化条件,解决碳纤维性能不高、生产不稳定的问题;二是提高碳化炉、石墨化炉、恒张力收丝装置等大型关键设备自主化水平;三是加快预浸料、树脂体系的配套研究,实现碳纤维复合材料低成本、高质量发展。

(3) 行业组织层面,应加强组织协调,调动行业组织成员积极性,搭建行业内专家技术服务、科技成果转化、技术引进合作和人员培训等公共服务平台,如第三方公共检测评价平台、复合材料共享数据库平台等,促进产业链信息与技术交流共享,推动碳纤维及复合材料良好的产业生态建设。

6 结语

我国碳纤维产业经多年努力,已初步形成碳纤维生产、碳纤维复合材料成型、下游应用等完整产业链,基本满足体育休闲等民用领域的应用需求。但是高性能碳纤维及复合材料在高品质、高效率与低成本技术,产品设计与应用技术等方面相比国外还有较大差距,在国防军工、航空航天、汽车、轨道交通等领域,尚未形成成熟完善的整体应用技术方案和产业配套体系,碳纤维及复合材料的规模化应用仍任重道远。

参 考 文 献

[1] 齐颖. 碳纤维及其复合材料发展现状[J]. 新材料产业, 2017(12): 2-6.
 [2] 中华人民共和国工业和信息化部. 加快推进碳纤维行业发展行动计划[Z]. 2013-10-22.
 [3] 沈协人,朱本松,赵家森. 我国碳纤维生产现状及对策探

讨[J]. 产业用纺织品,1990(4): 1-5.
 [4] BAKER D A, RIALS T G. Recent advances in low-cost carbon fiber manufacture from lignin[J]. Journal of Applied Polymer Science 2013, 130(2): 713-728.
 [5] WARREN C D, PAULAUSKA F L, EBERLE C C, et al. Lower cost carbon fiber Precursors[C]. Proceedings of the 17th Annual International Conference on Composites/Nano Engineering. Hawaii, USA 2009.
 [6] COMPERE A L, GRIFFITH W L, JR LEITTE C F, et al. Low cost carbon fiber from renewable resources[J]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2001: 576-8424.
 [7] PRAUCHNER M J, PASS V M D, OTANI C, et al. Eucalyptus tar pitch pretreatment for carbon materials processing[J]. Journal of Applied Polymer Science 2004, 91(3): 1604-1611.
 [8] PRAUCHNER M J, PASS V M D, OTANI S, et al. Biopitch-based general purpose carbon fibers: Processing and properties[J]. Carbon 2005, 43(3): 591-597.
 [9] QIAO W M, HUDA M, SONG Y, et al. Carbon fibers and films based on biomass resins[J]. Energy and Fuels 2005, 19(6): 2576-2582.
 [10] MA X J, ZHAO G J. Preparation of carbon fibers from liquefied wood[J]. Wood Science and Technology 2010, 44(1): 3-11.
 [11] YANG J, NAKABAYASHI K, MIYAWAKI J, et al. Preparation of isotropic pitch-based carbon fiber using Hyper-coal through co-carbonation with ethylene bottom oil[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 2016, 34: 397-404.
 [12] YANG J, NAKABAYASHI K, MIYAWAKI J, et al. Preparation of pitch based carbon fibers using Hyper-coal as a raw material[J]. Carbon 2016, 106: 28-36.
 [13] 张政和,杨卫民,谭晶,等. 碳纤维石墨化技术研究进展[J]. 化工进展 2019, 38(3): 1434-1442.
 [14] 贺福. 碳纤维及石墨纤维[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 7-14.
 [15] 张蓬洲. 高频加热装置连续化制备石墨纤维的研究[J]. 新型炭材料 2002, 17(3): 52-55.
 [16] MICHAEL J R. Graphitization process: US3656904 [P]. 1972-04-18.
 [17] 王浩静,刘颖,周立公,等. 一种生产石墨化碳纤维的方法及其专用装置: CN117002020C [P]. 2003-02-06.
 [18] 谭晶,杨卫民,黎三洋,等. 激光隧道炉碳纤维超高温石墨化处理[J]. 炭素技术 2016, 35(6): 47-50.
 [19] 杨卫民,姚良博,丁玉梅. 光隧道炉光束微积分聚焦方法及装置: CN2014105451017 [P]. 2015-04-01.
 [20] 松回至康. 碳纤维连续石墨化炉: CN106458595A [P]. 2017-02-22.
 [21] 张永刚,钱鑫,王雪飞. 低温石墨化对碳纤维性能的影响[J]. 高科技纤维与应用 2016, 41(2): 28-31.
 [22] 王宇,张博文,徐樛华. PAN 基碳纤维高温环境下成分结构的温度场效应[J]. 化工新型材料,2015, 43(10): 101-103.
 [23] 韩赞. PAN 基高强高模碳纤维的制备与表征[D]. 北京. 北

- 京化工大学, 2011.
- [24] GREENE M L, SCHWARTZ R W, TRELEAVEN J W. Short residence time graphitization of mesophase pitch-based carbon fibers[J]. *Carbon*, 2002, 40(8): 1217 - 1226.
- [25] XU S H, ZHANG F Y, LIU S H, et al. Catalytic graphitization of Mo-B-doped polyacrylonitrile (PAN)-based carbon fibers [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2010, 17(4): 703 - 707.
- [26] OZTURK A, KAYNAK C, TINCER T. Effects of liquid rubber modification on the behaviour of epoxy resin [J]. *European Polymer Journal*, 2001, 37(12): 2353 - 2363.
- [27] 蒋玉梅, 陆绍荣, 龚永洋. 联苯型液晶聚氨酯增韧改性环氧树脂的制备与性能 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2009, 25(9): 150 - 153.
- [28] MIMURA K, ITO H, FUJIOKA H. Improvement of thermal and mechanical properties by control of morphologies in PES-modified epoxy resins [J]. *Polymer*, 2000, 41(12): 4451 - 4459.
- [29] 罗凯, 苏琳, 刘俊华, 等. 超支化聚酯增韧改性环氧树脂 [J]. *热固性树脂* 2005, 20(1): 5 - 8.
- [30] PARK J M, WANG Z J, KWON D J, et al. Optimum dispersion conditions and interfacial modification of carbon fiber and CNT-phenolic composites by atmospheric pressure plasma treatment [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43(5): 2272 - 2278.
- [31] NAKAMURA K, SATO Y, TAKASE T. Analysis of oxidation behavior of vapor-grown carbon fiber (VGCF) under dry air [J]. *Materials Letters* 2016, 180(10): 302 - 304.
- [32] PAMULA E, ROUXHET P G. Bulk and surface chemical functionalities of type III PAN-based carbon fibres [J]. *Carbon*, 2003, 41(10): 1905 - 1915.
- [33] GAO B, ZHANG R, HE M, et al. Effect of a multiscale reinforcement by carbon fiber surface treatment with graphene oxide/carbon nanotubes on the mechanical properties of reinforced carbon/carbon composites [J]. *Composites Part A: Applied Science & Manufacturing* 2016, 90(11): 433 - 440.
- [34] WANG C, LI J, SUN S, et al. Electrophoretic deposition of graphene oxide on continuous carbon fibers for reinforcement of both tensile and interfacial strength [J]. *Composites Science & Technology* 2016, 135(10): 46 - 53.
- [35] 郝志勇. 真空导入工艺在风电叶片领域的应用与研究 [J]. *天津科技* 2011, 38(3): 28 - 30.
- [36] 戎光道. 我国碳纤维产业发展现状及建议 [J]. *合成纤维工业*, 2013, 36(2): 41 - 45.

Discussion on development of China carbon fiber industry under new situation

GAO Qi

(*Baling Petrochemical Company, SINOPEC Assets Management Corporation, Yueyang 414014*)

Abstract: The production, supply and demand and downstream application of carbon fibers were discussed, as were the research progress of carbon fibers and their composites technology and the problems in the development of carbon fibers industry in China. China's theoretical carbon fiber production capacity was 26.1 kt/a, the output 9.0 kt, the operating rate 34%, the import (including prepreg) 22.0 kt, and the apparent consumption 31.0 kt in 2018. Carbon fiber composites were mainly used in leisure sports in China, accounting for 52%, while they were less used in aerospace and transportation. The technological research of carbon fibers and their composites has been mainly focused on reducing the production cost of carbon fiber, improving the performance of carbon fiber and the toughness of resin system, enhancing the interfacial compatibility between resin system and carbon fiber composite, and raising the application level through developing new forming technology of composite materials. Compared with the advanced level in the world, China lags behind in carbon fiber industrialization process and equipment, carbon fiber composite design, manufacturing and evaluation, basic research and industrial supporting. It was suggested that the government should strengthen the guidance and policy support to standardize the development of carbon fiber industry; the enterprise should enhance the cooperation of production, learning and research and accelerate the key technology research of carbon fiber and its composite material industry chain, and raise the level of industrialization development; and the industry organization should strengthen the organization and coordination, build a public service platform, and promote a good industrial ecological construction of carbon fibers and composite materials.

Key words: carbon fiber; carbon fiber composite material; production; supply and demand; application; research progress; development advice