

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.11.029

低成本碳纤维的研究进展与应用

琚裕波¹,李智²,柏挺²,李鑫¹,王志磊²,陈诗瑶¹

[1. 华阳集团产业技术研究总院,山西阳泉 045000; 2. 华阳纳谷(深圳)新材料科技有限公司,广东深圳 518000]

摘要: 碳纤维具有优异的力学性能,因此碳纤维及其复合材料在越来越多的行业中得到应用。然而,受限于碳纤维较高的制造成本,限制了碳纤维在风电、汽车、建筑增强材料等领域的规模化应用。近年来,世界多国对低成本碳纤维的研究付出了很多努力。碳纤维原丝制造成本是影响碳纤维制造成本的主要因素,这是目前低成本碳纤维的主要研究方向。综述了采用降低碳纤维原丝制造成本,进而降低碳纤维制造成本相关技术的研究进展,并对低成本碳纤维的应用领域现状进行了总结。

关键词: 低成本;碳纤维;复合材料;研究进展;应用领域

中图分类号: TQ536.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)11-0181-06

Research Progress and Application of Low-Cost Carbon Fiber

Ju Yubo¹, Li Zhi², Bai Ting², Li Xin¹, Wang Zhilei², Chen Shiyao¹

[1. Huayang Group Industrial Technology Research Institute, Yangquan 045000, China;

2. Huayang na Valley (Shenzhen) New Material Technology Co., Ltd., Shenzhen 518000, China]

Abstract : Carbon fiber has excellent mechanical properties, so carbon fiber and its composite materials are used in more and more industries. However, due to the high manufacturing cost of carbon fiber, the large-scale application of carbon fiber in wind power, automobiles, building strengthening and other fields is limited. In recent years, many countries in the world have made a lot of efforts to study low-cost carbon fiber. The manufacturing cost of carbon fiber is the main factor affecting the manufacturing cost of carbon fiber, which is the main research direction of low-cost carbon fiber at present. The research progress of the technology related to reducing the manufacturing cost of carbon fiber precursor fiber, thereby reducing the manufacturing cost of carbon fibers was reviewed, and the application of low cost carbon fiber was summarized.

Keywords : low cost ; carbon fiber ; composite material ; research progress ; application fields

近年来,碳纤维及其复合材料受到很多关注,在越来越多的行业中得到应用。然而,受限于碳纤维较高的制造成本,以及复合材料复杂的制造工艺,限制了碳纤维的大批量规模化应用^[1]。

自 20 世纪末开始,欧盟、美国能源部等针对相关领域的需求,组织了多所研究机构、大学和陶氏化学等系统地研究了碳纤维价格对用途的影响,最终得出结论,要扩大碳纤维在风电叶片、新能源汽车车体和建筑增强材料领域的应用,必须将其价格降低到 71.5 元/kg^[2]。2023 年以来,随着国产碳纤维产能的提升,国内碳纤维价格下降了约 30%,但是中小丝束碳纤维的价格依然高达 160 元/kg 以上^[3],远超碳纤维规模化应用所能承受的成本。开发生产成本 80 元/kg 左右的低成本碳纤维生产技术,成为目前全球碳纤维研究领域的热

点。碳纤维原丝成本在总成本中的占比高达 45%~51%,降低碳纤维原丝的生产成本成为“重中之重”^[4]。归纳起来,目前采用的主要技术途径如下。

(1)降低聚丙烯腈(PAN)基碳纤维原丝制造成本。采用纺织用 PAN 纤维替代原丝生产低成本碳纤维。纺织用 PAN 纤维的产量数十倍于 PAN 基碳纤维原丝,且价格不到 PAN 基碳纤维原丝的 1/2^[5],有望将碳纤维的成本降低 35% 左右。

(2)选用新型的碳纤维原丝基材。采用包括以聚乙烯(PE)、沥青和木质素等,可熔融加工的低价格高聚物材料制备原丝。其中 PE 价格低、来源广泛,其得碳率达到 75%~80%,是最有希望制造低成本碳纤维的原丝基材^[6],有望将碳纤维的价格降至 70 元/kg 以下。

通信作者: 琚裕波,硕士研究生,主要从事碳纤维、石墨负极材料等新材料方面的研究工作

收稿日期: 2023-10-23

引用格式: 琚裕波,李智,柏挺,等. 低成本碳纤维的研究进展与应用[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(11): 181-186.

Ju Yubo, Li Zhi, Bai Ting, et al. Research progress and application of low-cost carbon fiber[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51 (11): 181-186.

1 低成本碳纤维的研究进展

1.1 纺织品级 PAN 基碳纤维

纺织品级 PAN 纤维是由 85% 以上的丙烯腈(AN)与其他第二、第三单体共聚,纺丝制备得到合成纤维。纺织级 PAN 纤维的产量大,生产成本低,大丝束制备工艺成熟^[7]。

目前纺织品级 PAN 纤维成本仅为 2~3 美元/kg,而碳纤维前驱体 PAN 原丝价格为 7~8 美元/kg。与碳纤维的专用原丝相比,纺织级 PAN 原丝的制造成本可以下降 65% 左右,相同条件下,可以将 PAN 基碳纤维的生产总成本降低 35% 左右^[8]。

纺织品级 PAN 纤维与传统 PAN 基碳纤维原丝由于共聚单体结构存在差异,如果直接以纺织品级 PAN 纤维为原料制备碳纤维,在传统预氧化过程中会导致纤维熔融,这是该技术目前存在的主要技术壁垒^[9]。

Xing 等^[10]以纺织品级 PAN 纤维为原料,通过优化改进工艺,制备出性能良好的碳纤维。其采用的纺织品级 PAN 纤维是由乙酸乙烯酯和丙烯腈按照 15:85 的质量比共聚纺丝制备。经过特殊热氧化处理工艺,在氮气气氛保护的碳化装置中,1 200 °C 条件下碳化处理,升温速率 5 °C/min,制得的碳纤维拉伸强度为 2.4 GPa、拉伸弹性模量为 195 GPa。

Zoltek 公司采用纺织级 PAN 原丝制备的低成本碳纤维,已商业化生产供给市场^[11],性能指标列于表 1。

表 1 Zoltek 公司低成本碳纤维性能

拉伸强度/ MPa	拉伸弹性模 量/GPa	断裂伸长 率/%	密度/ (g·m ⁻³)	碳质量分 数/%
3 800	242	15	1.8	95

SGL 公司利用纺织级 PAN 原丝制备的低成本碳纤维,拉伸弹性模量可达 241~262 GPa,拉伸强度可达 4 480~4 830 MPa,该碳纤维成本为 22~26.4 美元/kg,可满足航天领域应用。

1.2 通用级沥青基碳纤维

沥青基碳纤维是以煤沥青、石油沥青等为原料,经调制、纺丝、预氧化、碳化和石墨化等工艺,制备得到的碳纤维^[12]。根据力学性能差异,可分为高性能沥青基碳纤维和通用级沥青基碳纤维,前者由各向异性结构的沥青制得,拉伸强度可达 3.8 GPa,拉伸弹性模量可达 900 GPa 以上。后者由各向同性沥青制成,拉伸强度一般低于 1.0 GPa,拉伸弹性模量一般为 40 GPa 左右,主要用在性能要求不高的碳纤维复合材料上^[13]。

对于各向异性沥青基前驱体,首先要求对前驱体进行纯化处理,之后再高温石墨化处理,导致高性能沥青基碳纤维生产成本很高。而对于各向同性沥青基前驱体,具有原料廉价、工艺简单、得碳率高、无须石墨化等特点,生产成本较低^[14]。因此,各向同性沥青基碳纤维,可作为低成本高性能碳纤维的研究途径之一。

20 世纪 60 年代,日本的 Kureha 公司首次实现了沥青基

碳纤维的产业化;1978 年,中国科学院山西煤化研究所开始进行通用级沥青基碳纤维生产技术研发,于 1985 年通过了实验室鉴定验收^[15];1985 年,中国石油化工科学研究院开始研究石油沥青的纺丝技术,并在中试装置上成功制备出了纺丝沥青,其性能与国外通用级碳纤维的质量指标接近。

进入 21 世纪,我国一些企业相继攻克沥青基碳纤维技术上的难题,进一步提升了沥青基碳纤维的研发水平,如辽宁诺科碳材料、陕西天策等。湖南大学开发出高性能中间相沥青碳纤维连续长丝的整套工艺及装备技术,其产品综合性能达到了美国 P120 纤维水平。2018 年,陕西天策新材料科技有限公司开发出中间相沥青基碳纤维连续纺丝技术,实现了规模约为 2 t/a 的小批量生产,且产品的拉伸强度和拉伸弹性模量分别可达 3 010 MPa 和 864 GPa^[16]。但是在质量水平和稳定性方面与国外仍存在差距,且生产规模不大。2022 年我国沥青基碳纤维市场规模约为 17 064.3 万元,其中,通用沥青基碳纤维市场规模为 11 424.3 万元,高性能沥青基碳纤维市场规模 5 640 万元。

1.3 PE 基碳纤维

PE 基碳纤维是以 PE 为原料,采用熔融纺丝法制成的复丝纤维。由于 PE 在高温下易与氧气作用发生降解,因此,需先采用热硫酸处理(磺化)PE 基原丝,通过去除非碳元素、活化和上浆,对磺化的前驱体进行碳化处理^[17]。

现如今,PE 基碳纤维的熔融纺丝技术已经很成熟,主要技术难点在于 PE 基原丝的磺化技术。美国橡树岭国家实验室从 1999 年开始研究低成本碳纤维制造技术,研究结果发现,要获得合格的 PE 基碳纤维原丝前驱体,需要硫酸维持在 96% 以上浓度进行磺化^[18]。而硫酸浓度在反应过程中不可避免地会下降。2012 年 9 月,陶氏化学联合 ORNL 和福特汽车,开始研究聚烯烃基碳纤维的制造,目标产能是 4 kg/h,约合 30 t/a,估算成本会比 PAN 基碳纤维低 20%。项目初期估计的产业化时间为 6 年左右。然而,后续的研究发现,考虑到磺化设备所需的巨额资金,与该技术计算的成本相比,投资风险过高。最终,陶氏化学于 2013 年 6 月宣布放弃了 PE 基碳纤维的开发。

2017 年,亚琛工业大学纺织技术研究所(ITA)通过对 PE 基碳纤维制造技术不同开发周期的反复研究,确定了该技术对前驱体性能的要求,以及纺丝与磺化的技术参数^[19]。该技术下的 PE 基前驱体的生产成本为 10~13.3 元/kg,而 PAN 基前驱体的生产成本为 20.7~50.4 元/kg。PE 基碳纤维的生产成本为 63.7 元/kg,与碳纤维生产成本的参考值(133.2 元/kg)相比,下降了 52%。此外,ITA 还与德国一家公司合作,建立了一家实验室规模的磺化工厂。最终制备的碳纤维拉伸强度和拉伸弹性模量分别为 1.9 GPa 和 178 GPa,得碳率约为 75%。可以满足汽车领域对碳纤维性能及价格的要求。汽车领域对纤维的性能及价格的要求列于表 2。

目前,工业化生产 PE 基碳纤维的技术还未见报道。磺化工艺是该技术的主要成本驱动因素,大量硫酸的加热和废

表2 汽车领域对碳纤维的性能及价格的要求

性能指标	数值	
	汽车工业	ITA
拉伸强度/GPa	1.73~2.80	≈1.90
拉伸弹性模量/GPa	155~190	≈178
断裂伸长率/%	>1.0	≈1.2
单丝直径/ μm	7.8~8.0	≈7.0
密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.80~2.00	≈1.95
价格(元 $\cdot\text{kg}^{-1}$)	5.0~12.0	≈9.4

弃硫酸的回收是能源密集型过程,该过程占总成本的36%^[20]。以目前该技术的进展,并未完全体现出该技术的成本优势,特别是磺化阶段的成本所占比例较高。未来该技术首先需要解决的难点是,开发工业规模的磺化设备和硫酸回收系统。

1.4 其他低成本碳纤维技术

(1) 黏胶基碳纤维。

黏胶基碳纤维是以黏胶纤维为原料,先低温热处理,再在惰性气氛中经800℃以上高温处理制得纤维材料^[21]。黏胶基碳纤维有比强度高、比模量高、密度小、柔软可编织性好、热导率小等特性,在航天工业及军工领域中有重要作用^[22]。

此前,由于黏胶基碳纤维原丝生产过程污染大、工艺复杂、性价比低等缺点,使其应用范围受到限制。近年来,随着黏胶新溶剂、新工艺及新品种的开发,同时由于航天材料所必须具备的质轻、质纯、低热导率、高断裂伸长等要求,黏胶基碳纤维仍然具有不可替代的地位^[23]。目前,美国、俄罗斯、白俄罗斯等国都有百吨级的生产规模。

(2) 木质素基碳纤维。

木质素基碳纤维是以木质素为主要原料而制备的碳纤维材料,制备过程为木质素预处理、纺丝液调制、纺丝、预氧化、碳化等步骤^[24]。木质素基碳纤维与PAN基碳纤维相比,具有来源广泛、成本低廉、环保等优势,同时具备更强的理化特性等优势^[25]。木质素含有大量的芳香竖苯环结构,使得制成碳纤维时能够更好地保持原有的丝状结构,获得更大的拉伸强度^[26]。与传统的PAN基碳纤维相比,木质素基碳纤维在原料、成本、环保乃至性能方面都具备一定优势,是未来制备低成本碳纤维的首选^[27]。目前报道已商业化的木质素基碳纤维,拉伸强度可达到1.07 GPa,拉伸弹性模量可达83 GPa。

目前,木质素基碳纤维规模化制造技术的难点在于,满足碳纤维制备要求的高纯度、高分子量和高碳含量木质素原料的供应体系尚未形成。此外,木质素自身纺丝成型极其困难,通常只能制得直径较粗、取向较低的木质素原丝^[28]。

瑞典的Innventia公司制备木质素基碳纤维的商业化生产线已在实施中,原料使用100%的亚硫酸盐浆木质素,拟建1.6 t/a的低成本木质素基碳纤维装置^[29]。美国ORNL国家试验室与GrafTech公司合作开发的木质素基碳纤维生产工厂也在建设中,设计产能为6 250 t/a,生产的低成本碳纤维的计划成本为9.28美元/kg^[30]。

2 低成本碳纤维的应用领域现状

2.1 风电领域的应用

风电叶片是国内碳纤维的主要应用领域,未来发展空间广阔^[31]。碳纤维的应用可使风电叶片在长度增加的同时,质量更轻,进而降低对涡轮和塔架组件强度的要求,节约其他部件成本,从而降低碳纤维较高的生产成本。且由于碳纤维叶片更薄、更长、更细,还能提高风能转化效率,提高叶片动能的输出效率^[32]。由于碳纤维价格比较高,碳纤维只应用到叶片的一些关键部位。目前大丝束碳纤维已经部分应用于叶片梁帽、叶根、蒙皮全表面,未来碳纤维及其复合材料在风电叶片领域必将广泛使用。表3为碳纤维复合材料在风电叶片的具体应用。

表3 碳纤维复合材料在风电叶片的具体应用

应用部位	应用效果
主梁帽	使叶片的质量明显降低,并且提升叶片的刚度
蒙皮表面	提高叶片抗压和抗拉的能力,缓解环境对叶片的腐蚀 ①提升根部材料的断裂强度和承接强度,降低根部螺栓的压力
叶根部分	②使螺栓数量增多,巩固叶片与轮毂链接处的性能,提升静态强度和疲劳强度
防雷系统	叶片前后缘经过特殊设计,使叶片高效避免雷击,保障叶片相关性能 ①降低质量,降低轮毂上的负载
靠近叶尖部分	②通过相关方法和措施,可以使叶片振动方向和强度得到保证

目前碳纤维在风电行业使用渗透率约在25%,随着渗透率的逐步提升,叠加全球风电装机量高速增长^[33]。到2025年,预计全球风电行业碳纤维复合材料市场空间预计将达20.7亿美元,对应约140亿元人民币的市场规模。表4为2021~2025年全球风电行业用碳纤维复材市场空间估计。

表4 2021~2025年全球风电行业用碳纤维复材市场空间估计

项目	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年
全球风电新增装机量/GW	92.5	100.6	102.4	105.7	119.4
风电相关碳纤维复材用量/t	50 800	58 967.08	66 691.28	80 313.93	103 684.1
渗透率/%	25	27	30	35	40
碳纤维复材单位价格/(美元 $\cdot\text{kg}^{-1}$)	21.1	21	20.5	20	20
全球风电用碳纤维复材市场空间/亿美元	10.7	12.4	13.7	16.1	20.7

根据GWEC的数据,截至2020年底我国海上风电装机量为998.99万kW。预计至2025年,我国海上风电装机量可达4 468.99万kW。假设碳纤维复合材料的质量占主梁总质量的60%,预计到2025年,我国风电领域对碳纤维复合材料的需求量将达6.06万t,市场规模可达到12亿美元。我国2021~2023在风电领域需求量及2023~2025在风电领域需求量预估数据列于表5。

表5 我国碳纤维 2021 年~2022 年在风电领域需求量及 2023 年~2025 年需求量测算

项目		2021 年	2022 年	2023 年	2024 年	2025 年
陆上风电	新增风电装机量/GW	46.51	51.16	56.28	61.90	68.10
	平均单机容量/MW	2.79	3.00	3.22	3.46	3.71
	单叶片质量/t	9.00	9.45	9.64	9.83	10.03
	主梁结构质量占叶片质量的比例/%	50	50	50	50	50
	单叶片碳纤维质量占比/%	60	60	60	60	60
	碳纤维风机渗透率/%	20	23	26	29	32
	陆上风电碳纤维需求量/万 t	2.70	3.34	3.94	4.60	5.30
海上风电	新增风电装机量/GW	3.49	4.71	6.35	8.57	11.57
	平均单机容量/MW	5.38	5.91	6.49	7.13	7.83
	单叶片质量/t	10.00	10.50	11.03	11.58	12.16
	主梁结构质量占叶片质量的比例/%	50	50	50	50	50
	单叶片碳纤维质量所占比例/%	60	60	60	60	60
	碳纤维风机渗透率/%	35	38	41	44	47
	海上风电碳纤维需求量/万 t	0.20	0.29	0.40	0.55	0.76
合计	风电碳纤维总需求量/万 t	2.90	3.62	4.34	5.15	6.06

风电用大丝束碳纤维成本为 12 万元/t,制成复合材料成本则需 18 万元/t,是玻纤织物价格的 12 倍。当前碳纤维主要用于替换原先主梁中的单轴向玻纤布,替换后叶片可有效减轻质量 20%,但制造成本增加 82%。随着低成本碳纤维生产技术的发展,碳纤维复合材料在风电领域的渗透率将进一步提升^[34]。

2.2 汽车领域的应用

碳纤维应用在汽车领域主要是减轻质量。由于环保要求,全球正在大力推广节能减排,制定的汽车油耗标准愈来愈严格,采用碳纤维复合材料部分代替金属材料,是实现汽车轻量化最有效的办法^[35]。汽车制造采用碳纤维复合材料可以使汽车质量降低 40% 以上,据了解,汽车结构减重 10%,可节约燃油 7%。

通过碳纤维的使用降低汽车质量,有效地降低汽车油耗和污染物排放,汽车轻量化同时也是新能源汽车提高续航里程最有效的途径之一^[37]。在等刚度或等强度下,碳纤维复合材料可比钢、镁铝合金减重很多,同时碳纤维的安全性能、抗疲劳性能更优异,此外碳纤维复合材料结构的整体成型、设计性更强。表 6 为碳纤维在汽车上的应用实例。

2021 年汽车市场对碳纤维的需求为 9.5 kt,预计 2023

表6 碳纤维在汽车上的应用实例

公司	车型	部位
通用 GM	C8	发动机饰盖
通用 GM	载重汽车	传动轴
宝马	I3, I8	车厢主体的座舱
宝马	Z-9, Z-22	车身
宝马	M3	顶盖和车身
日产	Shyline GT-R	外装(后备箱车盖)
丰田	MARK II	内装
雅马哈	SRC 新概念跑车	底盘
大众	2 L 车	车身等
法国 SP	Boxster S	发动机罩盖
Daimler	Dodge Viper	挡板支架系统
SGL Carbon AG	Porsche AG	碳纤维-陶瓷制动盘
福特	野马 Shelby GT350R	轮毂

年,对碳纤维的需求量将达到约 1.05 万 t,到 2025 年将达到约 1.5 万 t,对应贡献了全球需求增量的 9.3% 和 6.2%(以 2020 年为基准)。轻量化下的节能降低成本,以及绿色环保价值将进一步推动碳纤维在汽车领域的应用趋势。图 1 为汽车行业对碳纤维需求趋势。

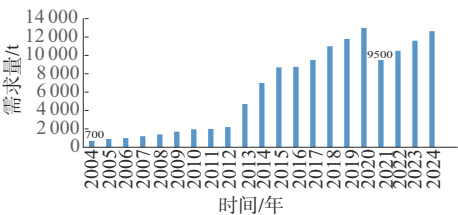


图1 汽车行业对碳纤维需求趋势

2.3 建筑领域的应用

在土木建材领域,水泥具有脆性大、拉伸强度低等缺点。碳纤维具有高强度、高模量、密度小、耐腐蚀、无毒无害等特点,利用碳纤维的特性,用混凝土或水泥做基体,进而制成碳纤维增强复合材料^[38]。目前,已形成建筑及桥梁结构的补强、艺术型建筑的主体结构、建筑机械、新建大跨/空间结构、管道补强 5 大应用热点。

上述应用市场中,有 85% 左右的碳纤维用于建筑及桥梁结构的加固补强^[39]。在城市更新的大背景下,相关部委在多项文件中提到结构加固的重要性。现阶段基础设施加固材料领域,以上海悍马为代表的国产品牌正在快速崛起,并被国内外市场广泛认可。目前,国内结构加固市场正在快速增长,增速达到每年 20% 以上。

2021 年 12 月,国内首座承载千吨级碳纤维斜拉索车行桥——聊城徒骇河大桥挂索仪式举行。大桥全长 388 m,最大承载力超过 1 kt,首次采用碳纤维复合材料斜拉索,目前是国内工程应用的规格和承载力最大的碳纤维索,大桥建成后将成为世界上最大跨度碳纤维斜拉索桥。该项目由中国建筑集团第八工程局承建,采用中复神鹰提供的碳纤维。聊城徒骇河大桥的成功建成具有里程碑意义,为碳纤维在建筑

领域的成果应用开辟了新思路和新市场。

2021年全球建筑领域,对碳纤维的需求量约为4.2 kt,预计至2025年可达6.1 kt。全球建筑领域碳纤维需求趋势如图2所示。

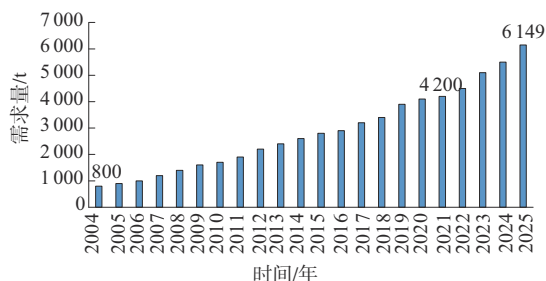


图2 建筑领域碳纤维需求趋势

2.4 其他领域

(1)混配模成型领域。

相比传统的玻璃纤维,碳纤维的浸润性受其丝束大小的影响较大^[40],进而影响了碳纤维该有的力学性能优势。混配模成型是一种工艺,通过将塑料与短切碳纤维混配并造粒,然后由应用单位做注射成型,进而得到短切碳纤维增强塑料。短切碳纤维增强塑料的力学性能远超一般塑料,并且成本及规模成型便利性远低于连续纤维增强塑料,近年来在无人机行业的应用增长迅速。

从事短切碳纤维增强塑料的企业通常是改性塑料企业,比如SABIC、深圳沃特、金发科技等^[41]。2021年混配模成型领域对碳纤维的需求量约为1万 t,估计至2025年可达1.55万 t,该行业对碳纤维的需求趋势如图3所示。

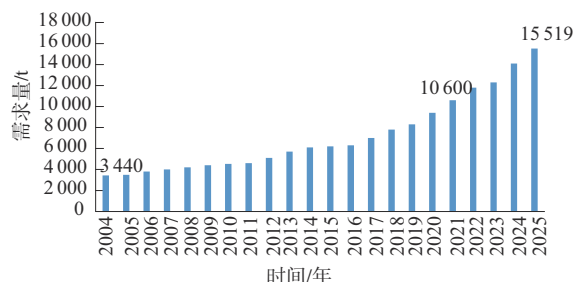


图3 混配模成型领域对碳纤维的需求趋势

(2)船舶应用领域。

目前船舶领域对碳纤维的需求主要是:竞赛类船舶、超豪华游艇、高速客船及军事用途的船舶^[42]。近几年,除了竞赛类船舶,电动水翼船、水上出租车、高速客轮纷纷采用碳纤维复合材料,形成新的增长热点。

2021年5月,Candela推出了一款电动水翼水上出租车取代柴油动力渡轮。Candela报告说,通过使用碳纤维复合材料,P12电动水翼水上出租车每名乘客消耗的能源比家用汽车少,与内燃机船相比,运行成本低90%。2021年11月,港航集团建造的国内首艘总长超过40 m全碳纤维结构高速客轮“海珠湾”号,在南沙小虎岛造船基地码头顺利下水。

2021年全球船舶领域对碳纤维的需求量约为1.5 kt,预

计至2025年可达2.2 kt。全球船舶领域碳纤维需求趋势如图4所示。

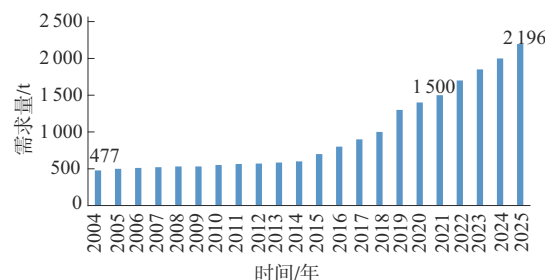


图4 船舶领域对碳纤维需求趋势

3 结论与展望

随着全球环保意识的不断增强,科学技术的不断提高,各行各业对材料的要求越来越高。碳纤维因其优异的理化性能,受到越来越多行业的青睐。目前,风电叶片、新能源汽车、建筑加强等领域对碳纤维的需求量很大,同时这些领域对碳纤维的模量、强度等性能的要求相对较低,为低成本碳纤维的发展提供了机遇。目前,低成本碳纤维的制造技术尚处于攻坚阶段,相信随着低成本碳纤维市场的需求量越来越大,低成本碳纤维的工业化制造技术将很快迎来突破。

参考文献

- [1] 罗益锋. 高科技纤维与应用, 2022, 47(1): 11–20.
Luo Yifeng. Hi-Tech Fiber and Application, 2022, 47(1): 11–20.
- [2] 牟书香, 等. 纺织导报, 2022(5): 44–50.
Mou Shuxiang, et al. China Textile Leader, 2022(5): 44–50.
- [3] 靳高岭. 高科技纤维与应用, 2021, 46(3): 11–14.
Jin Gaoling. Hi-Tech Fiber and Application, 2021(3): 11–14.
- [4] Choia I D, et al. Carbon, 2019, 142: 610–649.
- [5] Lee H, et al. e-Polymers, 2014, 14(3): 217–224.
- [6] Younker J M, et al. J Am Chem Soc, 2013, 135: 6130–6141.
- [7] Bhika H, et al. Materialstoday, 2022, 31: 223–231.
- [8] Spalding M A, et al. Department of Energy, 2014. DOI: 10.2172/1150721.
- [9] Hiremath N, et al. Composites Part B: Engineering, 2020, 198 (10): 108–156.
- [10] Xing Jin, et al. Polymer Degradation and Stability, 2021. DOI: 10.1016/j.polymdgradstab.2021.109536.
- [11] Group R P. Reinforced Plastics, 2013, 57(5): 16. DOI: 10.1016/S0034-3617(13)70147-4.
- [12] 刘金港, 等. 化工新型材料, 2023, 51(7): 1–10.
Liu Jingang, et al. New Chemical Materials, 2023, 51(7): 1–10.
- [13] 李子晗. 新型工业化, 2022, 12(8): 174–177.
Li Zihan. New Industrialization, 2022, 12(8): 174–177.
- [14] Yang J, et al. Mater Sci, 2017, 52: 1165–1171.
- [15] 张媛媛, 等. 当代化工, 2023, 52(2): 457–460.
Zhang Yuanyuan, et al. Contemporary Chemical Industry, 2023, 52(2): 457–460.
- [16] Chen Ling, et al. Carbon, 2016, 103: 421–424.

- [17] 钱伯章. 国外塑料, 2012, 30(5):64.
Qian Bozhang. Foreign Plastics, 2012, 30(5):64.
- [18] De Palmenae A, et al. 国际纺织导报, 2018, 46(9):6-9.
De Palmenae A, et al. Melliand China, 2018, 46(9):6-9.
- [19] Chen J, et al. Current Eye Research, 2009, 34(3):184.
- [20] Yoo S H, et al. Carbon, 2017, 118:106-113.
- [21] 梁燕, 等. 化纤与纺织技术, 2022, 51(5):10-12.
Liang Yan, et al. Chemical Fiber and Textile Technology, 2022, 51(5):10-12.
- [22] 张晓阳. 化肥设计, 2017, 55(4):1-3.
Zhang Xiaoyang. Chemical Fertilizer Design, 2017, 55(4):1-3.
- [23] 王宏球. 国际纺织导报, 2017, 45(6):4.
Wang Hongqiu. Melliand China, 2017, 45(6):4.
- [24] 周乐, 等. 化工新型材料, 2021, 49(11):7-10.
Zhou Le, et al. New Chemical Materials, 2021, 49(11):7-10.
- [25] Ogale A A, et al. Appl Polym Sci, 2016, 133:5-17.
- [26] 刘盼生. 木质素基碳纤维前驱体的制备及碳纤维的性能检测 [D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2021.
Liu Pansheng. Preparation of lignin-based carbon fiber precursors and properties detection of carbon fiber [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2021.
- [27] Ragauskas A J, et al. Science, 2014, 344(6 185):709-719.
- [28] Yadav R, et al. Composites Part B: Engineering, 2023, 255(15): 110-123.
- [29] Fang W, et al. Green Chem, 2017, 19:1 794-1 827.
- [30] Vinod A, et al. Heliyon, 2023, 3(9):613-614.
- [31] 林刚. 纺织科学研究, 2023(5):16-35.
Liu Gang. Textile Science Research, 2023(5):16-35.
- [32] 刘姝瑞, 等. 纺织科学与工程学报, 2023, 40(1):80-89.
Liu Shurui, et al. Journal of Textile Science and Engineering, 2023, 40(1):80-89.
- [33] 夏云峰. 风能, 2022(10):24-32.
Xia Yunfeng. Wind Energy, 2022(10):24-32.
- [34] Zhang Jin, et al. Composites Part B: Engineering, 2023, 250(1). DOI:10.1016/j.gr.2023.110463.
- [35] 刘畅. 产业创新研究, 2023(4):111-113.
Liu Chang. Industrial Innovation Research, 2023(4):111-113.
- [36] Kim J, et al. Materials & Design, 2021(6). DOI: 10.1016/j.matdes.2021.109682.
- [37] 韩善灵, 等. 复合材料科学与工程, [2023-11-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1683.TU.20230515.1736.008.html>.
Han Shanling, et al. Composites Science and Engineering, [2023-11-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1683.TU.20230515.1736.008.html>.
- [38] 王思月, 等. 化工新型材料, 2023, 51(8):1-7.
Wang Siyue, et al. New Chemical Materials, 2023, 51(8):1-7.
- [39] 朱彬, 等. 中国机械工程, 2021, 32(24):2 975-2 980.
Zhu Bin, et al. China Mechanical Engineering, 2021, 32(24): 2 975-2 980.
- [40] 罗锐祺, 等. 材料导报, 2021, 35(S2):558-563.
Luo Ruiqi, et al. Materials Reports, 2021, 35(S2):558-563.
- [41] 刘惠. 碳纤维增强树脂基复合材料力学-导电性能协同提升 [D]. 济南: 山东大学, 2022.
Liu Hui. Synergistic improvement of mechanical-conductive properties of carbon fiber reinforced resin matrix composites [D]. Jinan: Shandong University, 2022.
- [42] 周骐, 等. 纤维复合材料, 2021, 90(4):90-94.
Zhou Qi, et al. Fiber Composites, 2021, 90(4):90-94.