

碳纤维增强树脂基复合材料的应用及展望

于海宁, 高长星, 王艳华

(威海光威复合材料股份有限公司, 山东 威海 264200)

摘要: 介绍了碳纤维增强树脂基复合材料的性能和成型工艺; 详细阐述了碳纤维增强树脂基复合材料在航空航天、医疗、轨道交通、风电、休闲体育等领域的应用现状。碳纤维增强树脂基复合材料具有高强质轻、耐高温、耐疲劳等性能, 在航空航天和轨道交通领域已从非承力构件扩展到主承力构件, 在风电领域作为风机叶片材料降低了风机负载, 提高了风能利用率, 在体育休闲领域用来制作渔杆、自行车、球拍、滑雪板等休闲体育器材, 提高了国际体育比赛的竞争力; 由于其 X 射线透过性强且与生物相容性好, 在医疗器械领域用来制作人工器官和数字影像设备配套板材。指出我国碳纤维复合材料完整的产业链已基本形成, 但在高品质和低成本化方面与国外仍存在一定差距。建议加强碳纤维基础性的应用研究, 组建碳纤维领域专业人才的研发团队, 提供专业装备的配套服务, 拓宽碳纤维增强复合材料的应用领域。

关键词: 碳纤维 复合材料 工艺 性能 应用 展望

中图分类号: TQ342+.742 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0043(2020)01-0055-05

碳纤维称之为“21 世纪新材料之王”^[1], 是国防建设不可或缺的战略材料, 作为武器装备的基础性原材料, 已成为国家“十三五”战略性新兴产业的发展重点。开展碳纤维材料的应用研究对于提高我国的综合国力, 实现材料强国的战略方针, 具有划时代的意义^[2]。

碳纤维是一种含碳质量分数在 95% 以上的特种纤维, 具有高强质轻、耐疲劳、耐腐蚀、导电导热、电磁屏蔽性等优异性能, 外形柔软, 可加工成各种织物^[3]。按照加工原料的不同, 碳纤维可分为聚丙烯腈(PAN)基碳纤维、沥青基碳纤维、粘胶基碳纤维等。市场 90% 以上的碳纤维都是以聚丙烯腈纤维为原材料, 在高温惰性的气体环境中, 经过氧化、碳化等工艺制成的无机高分子纤维^[4]。同英国、美国、日本等发达国家相比, 我国的碳纤维研发起步较晚, 但在国家政策的引导下, 已进入到快速发展阶段, 诞生了以威海光威复合材料股份有限公司、中复神鹰碳纤维有限公司、江苏恒神股份有限公司为代表的骨干企业。目前, 国产的 T300, T700, T800, M40J 级别的碳纤维性能及表观质量已达到日本东丽公司同级别产品的性能水平, 且部分产品已应用到国防军工领域; T1000 级别碳纤维已取得突破性进展, 百吨级生产线可实现投产; M55J 级别高强高模的制备技术已取得重大突破, 部分企业正在开展工程化的技术攻关及后续生产的稳定性研究。

碳纤维增强复合材料是以碳纤维为增强体, 以树脂基、陶瓷基、金属基等为基体制成的功能性材料, 其中碳纤维增强树脂基复合材料的应用较为广泛^[5]。作者主要阐述了碳纤维增强树脂基复合材料的性能优势、成型工艺及在不同领域的应用, 并针对其发展存在的问题提出了建议。

1 碳纤维增强树脂基复合材料的性能优势

同其他金属材料相比, 碳纤维增强树脂基复合材料具有一系列的性能优势^[6], 如表 1 所示。

表 1 不同材料物理性能对比

Tab. 1 Comparison of physical properties of different materials

试样	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	拉伸强度/ MPa	拉伸模量/ GPa
Q345 钢	7.8	490	206
SUS301 不锈钢	7.9	820	195
铝合金	2.8	420	72
碳纤维增强树脂基复合材料	1.6	1 800	130

密度小, 质量轻: 碳纤维增强树脂基复合材料密度仅为 $1.6 g/cm^3$, 约为钢的 1/5, 铝合金的 3/5, 用其取代金属材质可达到产品“质轻”的目标。

高强度, 高模量: 普通的 T300 系列碳纤维增强树脂基复合材料的拉伸强度可达 1 800 MPa, 约

收稿日期: 2019-06-24; 修改稿收到日期: 2019-12-09。

作者简介: 于海宁(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事碳纤维及其复合材料相关工作。E-mail: yuhn@gwefc.cn。

为铝合金的4倍,拉伸模量130 GPa,约为金属铝的2倍。

耐疲劳,寿命长:经过数百万次的循环应力疲劳试验,碳纤维增强树脂基复合材料的疲劳强度仍可达到其静强度的80%,不会产生永久变形,安全系数高、稳定性好。

耐化学腐蚀性好:在一般的碱性环境下呈惰性,对有机溶剂、酸、碱都具有良好的耐腐蚀性。

热膨胀系数小:在常温条件下,碳纤维增强树脂基复合材料的膨胀系数为负值,在200~400℃环境下,膨胀系数接近于0,材料尺寸稳定性好。

吸能减震,自润滑,耐磨损:对振动有优异的衰减功能,可以降低振动及噪声;耐磨性好,摩擦系数接近0,可以提高产品的配合顺畅度,减少部件磨损。

导电导热性优异:导电效果良好,电阻率约为 $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$;导热效果优异,不蓄热,最佳状态下导热系数可达 $1\,000 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

X射线透过性强,与生物相容性好:不会分解出小分子等有害物质,可作为外植入物替代人体的部分器官。

2 碳纤维增强树脂基复合材料的成型工艺

碳纤维具有柔软可加工性,适用于真空热压罐、模压、树脂传递模塑(RTM)、拉挤等多种成型工艺。

真空袋/热压罐成型工艺:将已完成预定铺层的碳纤维增强树脂基复合材料胚料放在专用压力容器内,再依次铺设隔离膜、透气毡、真空袋膜等,使胚料密封于容器和真空袋之间,然后在容器内施加一定的压力和温度,通过抽真空、加压升温固化成型。该工艺适用于机翼、机身、雷达等航空航天设备制作成型。

模压工艺:将已完成铺层的胚料放入金属模具的上、下模腔内,随后施加一定的压力(8~10 MPa),升温固化成型。该工艺成型快,精度高,适用于表面光滑,尺寸精度要求高的产品批量生产。

RTM成型工艺:将增强纤维织物预先在模具中形成相应的形状,再将树脂注塑于封闭的模腔中完全浸润纤维织物,然后固化成型。该工艺产品形状灵活,成型简捷,多适用于游艇、船体的设计。

拉挤成型工艺:在一定牵引力作用下,将连续

纤维束、纤维带经过树脂槽进行浸渍胶液,然后依次通过挤压模具固化成型,此过程可实现自动化控制,生产效率高,适用于生产方形、角型、工字型等截面的型材,目前在风电领域应用较多。

3 碳纤维增强树脂基复合材料的应用

碳纤维增强树脂基复合材料因具有优异的物理化学性能,以及日趋成熟的加工成型工艺,已在航天、医疗、交通、风电、体育等诸多领域得到广泛应用,促进了国民经济的发展。

3.1 航空航天领域应用

传统的飞机零部件以铝、钛合金材料为主,碳纤维增强树脂基复合材料因具有高强轻质、耐高温、耐疲劳的优势,在20世纪60年代西方发达国家就已将其应用于航空领域,主要用于制作舱门、口盖、整流罩等尺寸较小的非承受力结构;而在20世纪80年代,碳纤维增强树脂基复合材料逐渐用于制作垂尾、平尾、鸭翼等受力、尺寸较大的次承力结构件;随着自动铺放技术及热压罐成型工艺的成熟,复合材料制件逐渐向机翼、机身等受力大、尺寸大的主承力构件发展^[7]。美国AV-8B改进式军机所用碳纤维增强树脂基复合材料质量约占整机结构件质量的26%,减重约9%^[8],日本OH-1直升机机身质量的40%为碳纤维增强树脂基复合材料,我国J-20战机碳纤维增强树脂基复合材料的用量也接近20%。

近年来,碳纤维增强树脂基复合材料在以安全性和经济性为目标的民用飞机中的应用也取得了一定进展。世界两大飞机制造巨头波音和空客公司,先后推出了以先进的碳纤维增强树脂基复合材料为主受力结构件的商用飞机,波音787机体的碳纤维增强树脂基复合材料用量占比高达50%,采用T800级别碳纤维增韧环氧树脂(T800S-3900-2B)制作机身和机翼,运行时可降低空气阻力,延长机体寿命,提高疲劳强度,同时节省燃油消耗。空客A-350中碳纤维增强树脂基复合材料(IMA/M21E)结构件的质量超过了53%,空客A380后机身蒙皮壁板所采用的碳纤维增强树脂基复合材料质量占20%^[9]。国内中国商用飞机有限责任公司C919客机中的中央翼、襟翼等部件均采用碳纤维增强树脂基复合材料,克服了结构复杂、外形公差等技术难关,但碳纤维增强树脂基复合材料质量仅占飞机结构总质量的12%。

在航天方面,碳纤维增强树脂基复合材料制作的洲际导弹的鼻锥和翼尖,热力学性能优异,隔热效果好,可保持航空器的气动外形,降低非制导误差;碳纤维增强树脂基复合材料制作的导弹发动机壳体在满足减重需求的前提下,提高了导弹的射程,具有质量轻、体积小、射程远等优势;碳纤维增强树脂基复合材料制作的卫星结构件,承重能力强,在减重的同时节省燃料,且在高温环境中变形量极小。

2018年,在航空航天领域碳纤维的需求量为 21 kt,比 2017 年增长 9.4%。其中商用飞机对碳纤维的需求非常大,根据波音及空客公司的官网信息,波音公司交付了 145 架采用碳纤维增强树脂基复合材料制造的 B787 飞机,比 2017 年增长了 6.6%,而空客公司交付了 93 架采用碳纤维增强树脂基复合材料制造的 A350XWB 飞机,比 2017 年 78 架增长了 19.2%^[11]。

3.2 医疗器械领域应用

碳纤维增强树脂基复合材料在医疗领域的应用基本可分为两类:一类是用于治疗、替代人体某个器官组织,修补人体病变缺陷;另一类是用于制作医疗用品、医疗器械设备及相关的配套设施。

碳纤维因化学性质稳定,不会与液体产生化学反应,也不会挥发有毒物质,并具有良好的血液相容性,可以植入人体取代部分发生病变的器官。碳纤维增强树脂基复合材料制作的人工骨、关节、韧带、腱、假肢等人体器官,可以与人体的其他组织产生共融^[11]。

医疗设备因自身的特殊性,要求设备材料满足多样化的性能要求,即在 X 射线透过性能好、频率高的前提下,尽量降低放射性物质对患者及医护人员的伤害。碳纤维 X 射线透过性好,可以完全穿透人体,并经多次转换后得到清晰的图像。部分医疗设备厂商采用碳纤维泡沫夹层结构,即使用碳纤维/环氧树脂预浸料,按照一定的铺层设计,使用金属模具热压成型方式,与泡沫进行共固化,制作了 CT 床板、DR 平板、血管造影手术床等多功能床面板^[12]。与传统的铝金属板相比,碳纤维床面板平整光滑,质轻抗压,具有高分辨率,高探测率,高转换率等优点,预计将会成为新一代数字影像设备配套板材的首选。

此外,利用碳纤维轻质高强的优势,还可以生产医疗头枕、腰板、护脚、担架等医疗设备,降低医疗器械质量,提高器械便携程度和诊断精度。

3.3 轨道交通领域应用

为实现低碳环保、节能降耗的目标,轨道交通轻量化的设计理念应运而生。与传统的镁、铝合金相比,碳纤维增强树脂基复合材料因质量轻、强度高、抗疲劳、耐腐蚀等性能成为设计首选材料。

美国、德国、日本在 20 世纪 90 年代已将碳纤维增强树脂基复合材料应用在轨道交通上,但仅局限于列车的导流罩、裙板、过渡钩等零部件。21 世纪碳纤维增强树脂基复合材料在轨道交通领域得到广泛的推广,法国研制的 TGV 挂车,韩国开发的 TTX 摆式列车车体^[14]均以不锈钢为骨架,用碳纤维蜂窝夹层结构制作顶盖和墙体,质量比采用铝合金材料降低 40%,并且车体的静强度、安全系数、阻燃性均符合指标要求,现已批量化生产并运营。

目前,国内碳纤维增强树脂基复合材料在轨道交通中的应用仍然是以转向架、轮架体、司机台、座椅等非主承载结构件为主,而在大型主承载力结构件方面的应用则寥寥无几。近期,中车青岛四方机车车辆股份有限公司采用模压及袋压成型工艺制作了碳纤维增强树脂基复合材料设备舱,降低了构件数目,易于拆装,提高了抗冲击性能及高温抗侵蚀性。中车长春轨道公司开发了碳纤维增强树脂基复合材料地铁壳体,整车车长 19 m,车宽 2.8 m,比金属减重约 30%,采用机械连接一体化成型技术,确保了尺寸精度和表观质量,提高了运载能力,降低了轨道损耗及噪声干扰。

2019 年 11 月底,在珠海举行的第四届中国国际复合材料科技大会上,由中车青岛四方机车车辆股份有限公司、威海光威复合材料股份有限公司等单位组建成立了“轨道交通复合材料专业委员会”,加强复合材料在轨道交通领域的研究与应用,推进相关产业的融合和发展。预计今后碳纤维增强树脂基复合材料在高铁等轨道车辆中的应用比例会越来越大。

3.4 风电领域应用

随着风电行业商业化及市场竞争的不断加剧,风机叶片正逐步向大型化、轻量化的方向发展。而对于功率 5 MW(长度 40 m)以上机型的风机叶片,玻璃纤维材质的叶片已无法满足性能需求,且叶片的质量剧增会导致生产成本提升^[14]。碳纤维具有轻质高强的特性,碳纤维增强树脂基复合材料叶片不但满足强度和刚度要求,而且可降低风机负载,提高叶片抗疲劳性能,提升风能利

用率。

传统风机叶片的制作主要采用手糊成型,操作简单,但质量及效率低下。Vestas 公司等国外风电商已开始采用先进的自动铺放技术^[15]生产风电叶片主梁。即以碳纤维为加工原材料,拉挤成型为一定厚度的碳纤维板材预制体,然后将预制体重叠铺放固定于相应的壳体模具中,与壳体、辅料采用 RTM 工艺进行一体化成型,具有效率高、成本低等特点。但中国相关叶片的复合材料技术、设备不完善,自动数字化设施相对简单,尚处于研究创新阶段。

在市场需求方面,2018 年全球新增陆上及海上风电装机容量分别为 45.4 GW 及 4.3 GW,其中中国市场新增装机总容量为 21 GW(陆上 19.3 GW 及海上 1.7 GW),占全球市场 42%,继续领跑全球风电市场;在市场供给方面,2018 年 Vestas 公司陆上风机新增装机容量高达 10.09 GW,以 22% 的全球陆上风电新增市场份额遥遥领先,已经成为全球碳纤维产业最大的用户,且增长迅猛。低风速风场和海上风电共同推进了叶片的大型化发展,进一步推动了碳纤维在风电领域持续高速增长。

3.5 体育休闲领域应用

碳纤维在体育休闲领域应用最多的是渔具行业,碳纤维增强树脂基复合材料鱼竿占市场总量 90% 以上,高强轻质、抗疲劳的特性已成为现代鱼竿行业的硬性指标。采用碳纤维增强树脂基复合材料制作自行车车架和车轮^[16],可降低车体的质量和阻力,提高安全度和舒适度;此外,碳纤维增强树脂基复合材料自身具备可设计性,可提高自行车的功能性和新颖性,满足多样化的设计要求。采用碳纤维材质制作的高端球拍在比赛中面对复杂的环境及工况,不仅满足弯曲强度的要求,具备良好的刚度和弹性,而且球拍的舒适度高,不易变形。

2018 年碳纤维在体育休闲领域的需求量为 14.3 kt,预计 2020 年将达到 16 kt,其中高尔夫球杆需求量最高占比为 27.3%,鱼竿、自行车均占 22.4%,曲棍球杆占比为 7.0%。

此外,碳纤维增强树脂基复合材料高尔夫球杆、滑雪板、撑杆等体育用品^[17]也已得到运动员的普遍青睐。现代国际体育比赛不但是成绩高低的较量,更是国家技术实力的竞争,预计具有高性能优势的碳纤维增强树脂基复合材料将在体育竞

技领域扮演重要角色,价值也会越来越大。

4 展望

“一代材料,一代装备”,碳纤维增强树脂基复合材料作为先进技术的发展和支撑,其产业化水平已成为衡量一个国家经济发展、科技进步、综合国力的重要标志^[18]。为使我国尽快进入材料强国的行列,巩固国际上的军事地位,开展新材料的推广应用,具有重要的战略意义^[19]。我国从 20 世纪 80 年代开始进行碳纤维的开发与研究,虽然取得了很大的进步,但前期受制于国外技术、设备的封锁,核心竞争力仍处于劣势。

目前,我国碳纤维复合材料完整的产业链已基本形成,但与国外发达国家相比,在高性能碳纤维复合材料的高品质及低成本化方面仍存在一定差距,整体应用技术及产业相关的配套系统尚未健全^[20]。碳纤维增强树脂基复合材料的发展需要国家、企业的共同努力与支持:加强碳纤维领域专业人才的培养和引进力度,组织并创建研发团队,提供专业装备的配套设施服务,鼓励参与项目研发设计,降低生产成本,提高产品质量;加大对国产碳纤维企业的扶持力度,提升企业的自主创新能力,扩大国产纤维的推广、宣传力度,尽快实现国家装备材料的国产化;加强碳纤维基础性的应用研究,扩大碳纤维市场的开发力度;拓宽碳纤维增强树脂基复合材料的应用领域,重点推进碳纤维增强树脂基复合材料在工业领域、建筑工程、海洋领域的开发及应用。

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): 2-7.
- [2] 彭鹤轩. 碳纤维复合材料的应用和展望[J]. 现代盐化工, 2018, 45(5): 24-25.
- [3] 钱伯章. 国内外碳纤维应用领域、市场需求以及碳纤维产能的进展[J]. 高科技纤维与应用, 2009(5): 38-42.
- [4] 陈蓉蓉, 王莘蔚. 聚丙烯腈基(PAN)碳纤维的性能、应用及相关标准[J]. 中国纤检, 2010(11): 75-79.
- [5] 严璞, 陈燕. 碳纤维技术发展趋势及应用[J]. 合成材料老化与应用, 2018(5): 134-138.
- [6] 张新元, 何碧霞, 李建利, 等. 高性能碳纤维的性能及其应用[J]. 棉纺织技术, 2011(4): 65-68.
- [7] 汤旭, 李征, 孙程阳. 先进复合材料在航空航天领域的应用[J]. 中国高新技术企业, 2016(13): 39-42.
- [8] 刘强. 碳纤维复合材料在航空航天领域的应用[J]. 科技与企业, 2015(22): 221-221.

- [9] 沈军, 谢怀勤. 先进复合材料在航空航天领域的研发与应用[J]. 材料科学与工艺, 2008(5): 737-740.
- [10] 林刚. 2018 全球碳纤维复合材料市场报告[J]. 纺织科学研究, 2019(7): 52-71.
- [11] 罗益锋. 高科技纤维在医疗领域正发挥着越来越重要的作用[J]. 高科技纤维与应用, 2012(37): 1-8.
- [12] 王云平, 吴蔚, 芮文庭. 复合材料床面板在医用影像检测设备中的应用[J]. 中国医疗器械杂志, 2015(3): 190-191.
- [13] 康兴东. 韩国摆式列车复合材料车体的探究及思考[J]. 国外铁道车辆, 2017(6): 12-16.
- [14] 罗永康, 李炜, 胡红, 等. 碳纤维复合材料在风力发电机叶片中的应用[J]. 电网与清洁能源, 2008(11): 54-57.
- [15] 柴红梅, 袁凌, 李颖, 等. 复合材料风电叶片先进制造技术研究现状[J]. 玻璃钢/复合材料, 2019(2): 102-106.
- [16] 陶浩, 段红杰, 杨向东. 碳纤维自行车车架的研制与开发[J]. 玻璃钢/复合材料, 1997(4): 18-20.
- [17] 盛夏. 碳材料在体育器材中的应用[J]. 塑料工业, 2018(7): 125-128.
- [18] 余黎明. 我国碳纤维行业现状和发展趋势分析[J]. 新材料产业, 2011(6): 13-21.
- [19] 彭孟娜, 马建伟. 碳纤维及其在汽车轻量化中的应用[J]. 合成纤维工业, 2018, 41(1): 53-57.
- [20] 高奇. 新形势下我国碳纤维产业发展研讨[J]. 合成纤维工业, 2019, 42(5): 1-5.

Application and prospect of carbon fiber reinforced resin-based composites

YU Haining, GAO Changxing, WANG Yanhua

(Weihai Guangwei Composite Materials Co., Ltd., Weihai 264200)

Abstract: The properties and forming processes of carbon fiber reinforced resin-based composites were introduced. And their application status was described in details in the fields of aerospace, medical treatment, rail transit, wind power, leisure sports, etc. Carbon fiber reinforced resin-based composites have been widely used to produce not only non load-bearing components but also main load-bearing components in the field of aerospace and rail transit, to fabricate fan blades in order to reduce the load of fans and improve the utilization ratio of wind energy in the field of wind power, to make fishing rods, bicycles, rackets, skis and other leisure sports equipments which improve the competitiveness of international sports competitions in the field of sports and leisure due to their high strength, light weight, high temperature resistance and fatigue resistance, and also to make artificial organs and supporting plates for digital imaging equipment in the field of medical devices due to their high X-ray transmission and good biocompatibility. It was pointed out that China's carbon fiber composite industry chain has basically formed, but there is still a certain gap between China and other countries in terms of high quality and low cost. It was suggested that the application field of carbon fiber reinforced resin-based composites should be expanded by strengthening the basic application research of carbon fiber, forming the research and development team of professionals in the field of carbon fiber and providing supporting services of professional equipments.

Key words: carbon fiber; composite; process; properties; application; prospect

◀国内外动态▶

日本 2019 年 11 月份的化纤生产与库存概况

日本化纤协会 2019 年 12 月 25 日《新闻稿》发表了日本 2019 年 11 月份的化学纤维生产与库存概况。其内容如下:

(1) 生产动向

化学纤维生产量为 60 614 t, 同比下降 10.3%。其中, 合成纤维生产量为 48 622 t, 同比下降 12.6%。从主要品种看, 锦纶长丝为 5 630 t, 同比下降 16.8%; 腈纶短纤维为 8 187 t, 同比下降 14.1%; 涤纶长丝为 9 205 t, 同比下降 7.7%; 涤纶短纤维为 4 879 t, 同比下降 12.4%。

(2) 库存动向

化学纤维库存(生产量)为 91 647 t, 环比下降 2.2%, 同比增长 6.9%。其中, 合成纤维库存 73 207 t, 环比下降

2.3%, 同比增长 11.3%。从主要品种看, 锦纶长丝 11 535 t, 环比下降 3.0%; 腈纶短纤维 13 403 t, 环比下降 2.4%; 涤纶长丝 9 850 t, 环比下降 3.2%; 涤纶短纤维 13 952 t, 环比下降 9.2%。(通讯员 王德诚)

全球首个 2 200 kt/a PTA 装置 在中国浙江投产

新凤鸣集团旗下的浙江独山能源有限公司于 2019 年 12 月 13 日宣布, 在中国浙江省平湖市独山港经济开发区的 2 200 kt/a 的精对苯二甲酸(PTA)装置投产, 这是世界上最大的单系列装置。它基于 BP 公司的最新技术, 由惠生工程公司设计。2017 年 6 月, 惠生工程公司获得了基础和详细设计合同。

目前, 惠生公司正在参与独山能源公司于 2018 年 10 月授予的 PTA 二期项目。第二阶段的设计工作已接近完成。(通讯员 钱伯章)