

碳纤维复合材料研究进展及其应用

刘文静¹, 杨国荣², 赵晓曼^{1,3,*}

(1. 绍兴文理学院, 浙江 绍兴 312000; 2. 中纺院(浙江)技术研究院有限公司, 浙江 绍兴 312000;

3. 浙江省清洁染整技术研究重点实验室, 浙江 绍兴 312000)

摘要:碳纤维材料兼具碳材料的固有优势和纺织纤维的柔韧性, 还可以与金属、树脂、陶瓷等材料结合, 制作成纤维复合材料。高性能碳纤维及其复合材料具有低密度、高强度、高模量、抗冲击、抗疲劳、耐高温、耐腐蚀等优异性能。碳纤维及其复合材料凭借其独有的优势, 已经广泛应用于多个行业。综述碳纤维及其复合材料在新能源、航空航天、能源开发、交通运输、家居等领域的研究进展及应用, 并总结了碳纤维复合材料在使用过程中存在的问题。

关键词:碳纤维; 复合材料; 高性能; 高模量; 新能源; 轻量化

中图分类号: TQ 342

文献标志码: A

文章编号: 1673-0356(2023)07-0001-04

全球范围内的能源结构调整促生了新能源产业, 近十余年来, 我国新能源产业的发展速度惊人。碳纤维材料是近些年应用范围较广的一种新型材料, 已经在新能源、航空航天、能源开发、交通运输、电力工程、家居等领域取得了良好的应用效果^[1-2]。

碳纤维材料作为一种高性能无机纤维材料, 最初因为价格较高主要应用于国防和航天等高科技领域, 是航空航天、国防领域的核心材料。如今, 由于生产工艺改良和技术的提升, 其价格已经十分亲民, 加之其独特的材质属性, 逐渐渗透至很多行业。以国内碳纤维零部件制造商智上新材料科技为例, 2019—2022 这3年针对新能源产业领域的销售比例不断上升, 光伏用耐高温碳纤维载板、碳纤维复合材料电动汽车零部件等产品已从样品阶段转向大规模批量化运作。在绿色发展的号召下, 一大批企业在积极通过设备升级、技术创新、产能优化等手段实现节能减排。

通过对文献的研究, 对碳纤维复合材料的工艺、分类及优点有了全新的认知, 总结了近年来碳纤维复合材料在新能源、航空航天、能源开发、交通运输、电力工程、家居等领域的应用及局限性。

1 碳纤维及其复合材料

碳纤维材料是指含碳量高于90%的无机高分子纤维

材料, 兼具碳材料的固有优势和纺织纤维的柔韧性。碳纤维材料还可以与金属、树脂、陶瓷等材料结合, 制作成纤维复合材料。

碳纤维材料可以通过编制铺层碳纤维材料束加工, 也可与其他纤维材料混合后加工成复合材料, 主要工艺见表1。

表1 碳纤维材料加工工艺

工艺名称	工艺类型	特点
成型工艺	缠绕、挤压、手糊、树脂、模压	决定了材料表面的光滑程度和纹理, 直接影响视觉效果
织造工艺	针织、编织、梭织	影响材料表面的肌理效果、强力及各向异性
着色工艺	喷涂、与染色纱线混合编织	影响材料的肌理效果、着色效果、耐用性

碳纤维复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)是以树脂、陶瓷、金属等为基体, 以碳纤维为增强体, 复合而成的结构材料, 是目前世界上最先进的复合材料之一, 因其具有质轻、高强、耐腐、耐高温等优势^[3-4], 被广泛应用于新能源、航空航天、交通运输等领域。按照基体材料的不同, 将碳纤维复合材料分为五类, 其主要特点及应用见表2。

目前, 碳纤维复合材料以树脂基碳纤维复合材料为主, 占据市场近90%的份额。航空航天和风力发电领域为树脂基碳纤维复合材料最大需求端, 需求占比达50%。在航空航天领域, 树脂基碳纤维复合材料常用于制造民用飞机发动机罩、副翼、阻力板以及舱门等, 能够达到减重效果。

收稿日期: 2023-03-30; 修回日期: 2023-04-10

基金项目: 浙江省公益技术研究计划项目(LGJ21E030001); 浙江省大学生科技创新活动计划项目(2022R432A019)

第一作者: 刘文静(1998—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为碳纤维复合材料。

* 通信作者: 赵晓曼, 讲师, 博士, 主要研究方向为功能纺织材料, E-mail: wxzhxm09@163.com。

表2 碳纤维复合材料的分类

分 类	特 点	应 用
树脂基复合材料(CFRP)	比重小、刚性好、强度高、耐湿热	航空航天材料、宇宙飞行器外表面隔热层以及火箭喷嘴、建筑补强、交通运输等
碳/碳复合材料(C/C)	低密度、耐烧蚀、抗热震、高导热、低膨胀、抗磨损性能优异	高速动车滑板、导弹弹头、固体火箭发动机喷嘴、航天飞机、人工骨髓等
金属基复合材料(CFRM)	比强度高、比模量高、优异的疲劳强度	航天航空、汽车、电子封装等
陶瓷基复合材料(CFRC)	改善韧性,提高机械冲击、热冲击	航空发动机热结构部件、飞行器热防护系统、制动系统以及核结构部件等
橡胶基复合材料(CFRR)	改善抗疲劳性,提高使用寿命	航空航天、轻结构建筑、油料运输管等

树脂基碳纤维复合材料(CFRP)又分为热塑性树脂(TP)和热固性树脂(TS)2种。具有生产成本低、尺寸稳定性好、耐老化、刚度高等优势。我国热固性树脂生产工艺已发展成熟,在树脂基碳纤维复合材料制备中应用较多。

2 碳纤维及其复合材料的应用

2.1 碳纤维复合材料应用于风电叶片

风电作为可再生能源的重要组成部分,在现代能源体系转型中发挥着重要作用^[5]。

传统风机叶片的材料为帆布、木材或金属,随着经济进步和时代发展,新型复合材料渐渐被应用到了风机叶片的制造中,常用的有玻璃纤维增强复合材料、碳纤维增强聚合物等。增强复合材料由增强纤维和基体两部分组成,通常用热固性塑料或热塑性材料制成基体,这些材料模量低、强度低,但具有很好的弹塑性和粘弹性,有很强的应变能力,纤维填充直径较小的材料,一般小于 $10\ \mu\text{m}$ ^[6-7],缺陷相对较小,坚硬但脆弱,容易腐蚀、损坏和破裂。

叶片的长度一般与风机的功率成正比,为了增加功率就要增加叶片的长度,但是叶片的质量会随着长度增加^[8]。其次,为了保证叶片尖端在强风中不接触塔架,在制造过程中使用了高强度和刚性的材料。这样,所用的材料在需要减轻叶片重量的同时,还要有较高的强度和刚性,碳纤维复合材料刚好满足。

碳纤维复合材料制作的叶片,可以使叶片承受较大的荷载,从而减轻叶片的重量^[9],同时加入碳纤维材料的叶片刚度大大提升,降低风电叶片触碰塔架的风险。其次,碳纤维复合材料的高模和高强,可以有效提

高风力发电的效率。当气温在零摄氏度以下时,若空气中有雨、霜、雾、雪等水汽团,物体的表面就会出现结冰的现象^[10]。用导电性较好碳纤维材料来制作风电叶片蒙皮层,并将加热电缆安装在主轴的滑环上,不仅能消除叶片表面的冰,还可以提高设备的发电效率^[11-12]。

2.2 高模量碳纤维复合材料在航空航天中的应用

卫星技术的发展对提高国民经济及强大国防具有重要意义^[13-14]。卫星结构的材料性能是体现卫星技术强弱的主要方面。

在传统材料中,铝合金材料由于热膨胀系数较高易产生热变形,钛合金材料的比刚度和比强度较低,玻璃纤维复合材料比刚度较低,芳纶复合材料比模量较低,在应用方面均受到一定限制。碳纤维具有密度小、强度高、模量高、热膨胀系数非常低,可制成热膨胀系数几乎为零的高模量碳纤维复合材料,在昼夜温差极大的太空环境中有着很好的适用性^[15]。

由碳纤维和环氧树脂结合而成的复合材料因质量低、坚硬和强度高而成为先进的材料。因为航天器每减少 $1\ \text{kg}$ 重量,运载火箭就可以减少 $500\ \text{kg}$ 。因此,先进的复合材料优先用于航空和航天工业。

2.3 碳纤维增强复合材料在海上平台钢结构修复中的应用

海上平台是高出海面且具有水平台面的一种桁架构筑物,用于生产作业或其他活动。由于恶劣的海洋环境,如台风、温差、腐蚀、氧化、部件老化等因素的影响,平台钢结构存在各种缺陷和损伤,尤其是长期服役问题愈加明显^[16]。钢结构的各种损伤很大程度上影响了海上平台的稳定性,进而影响海上作业的安全性和进展。如果安全起见定期将钢结构全部换新,不但会造成资源浪费还会导致停工停产。传统上会使用焊接、铆接、螺栓连接等方式来进行修复,为了减轻腐蚀会采用阴极保护法,这些方法的使用因海上建筑条件而受到限制^[17-18]。

立管是海上作业中的关键部件,因为它们将泥浆线处的井口延伸到地面。立管在其生命周期内会受到外部腐蚀和机械损坏,需要进行维修以确保安全作业。传统的维修技术包括焊接或用螺栓固定到立管外表面的外部钢夹。在钢夹的安装过程中存在许多挑战,承重复合修复套管等替代解决方案提供了一个有吸引力的选择,因为它们相对便宜、重量轻、不需要焊接并且

易于安装^[19]。

碳纤维复合材料强化胜利油田的2个海上平台的钢结构的可行性,验证了其有效性^[20]。作为技术修复管道的一种新形式,CFRP具有低成本、不间断、不焊接的优势,能够有效降低安全风险、提高生产效率。

2.4 碳纤维复合材料在汽车轻量化中的应用

随着经济的发展,汽车工业的规模越来越大,对汽车的需求也越来越多。传统汽车选用金属作为主要生产材料,这种材料会导致车身质量不断提高,不利于汽车安全行驶。碳纤维增强塑料(CFRP)以其密度低、抗冲击性好、吸能、减震、粘弹性好等特点应用于汽车零部件的制造,结合CAE对汽车结构进行优化,提高驾驶员的安全性。该材料在汽车生产领域的应用,可以达到降低油耗和排放的目的^[21]。

碳纤维增强聚合物与以钢为主要制造材料相比,可使汽车总重量减轻50%以上,与铝镁合金结构相比,减轻30%以上,有利于提高节能、加速和制动性能。此外,CFRP的刚度和吸能也高于常规碳纤维增强高分子材料,冲击性能是钢的6~7倍,铝的3~4倍,进一步保证汽车驾驶过程的安全性。为了提高驾驶员的舒适性,复合材料的振动阻尼可以有效地提高车辆的噪声、振动和声学振动粗糙度(NVH)性能。复合材料高集成度的优点使其自由成型,可大大减少汽车零部件的数量,有利于降低汽车质量和生产成本。树脂基碳纤维增强聚合物(CFRP)作为核心材料已广泛应用于汽车工业,为实现汽车轻量化奠定了坚实的基础^[22]。

2.5 碳纤维复合材料在轨道交通车辆转向架的应用

轨道交通在我国经济发展和基础设施建设中起着重要的作用,影响着公共交通的发展^[23]。车辆转向架的主要功能是用于连接车厢和轮轴,实现车辆的无滑动转向,是高速铁路列车的核心结构和关键技术环节。传统轨道交通车辆转向架主要采用金属焊接工艺,在长期高负荷、高强度条件下,由于外力作用,会出现焊接处断裂的现象。由于碳纤维复合材料的强度和弹性比传统情况下使用的钢材或铝合金要好得多,密度也更低,所以更适用于轨道交通领域,提高车辆转向架的整体结构强度,可有效替代传统的金属材料^[24]。

2.6 碳纤维在家居灯具上的应用

家居灯具是人们日常生活中的必不可少的,有几千年的发展历史。家居灯具使用的材料包括早期的纱葛和纸张、羊皮和后期采用的陶瓷、玉石、玻璃等材料。

现在,家居灯具使用的材料极丰富,受新工艺和新科技成果的影响,家居灯具的作用已经不单是照明,灯具对家居空间环境的影响也成为人们选择家居灯具的重要考虑因素^[25]。

家居灯具是家居生活中必不可少的,不仅要实现照明功能,还需要满足人们对光环境的视觉和心理审美需求,实现功能和审美的统一^[26]。碳纤维材料作为一种可塑性较强且富有质感的材料,已经在很多行业中应用,取得了较好的效果。将其应用于家居灯具设计,符合未来的家居灯具设计和发展趋势^[27]。

3 碳纤维复合材料在使用中存在的问题

2019年,全球碳纤维产量近1800万t,但碳纤维复合材料的使用寿命非常有限,最高30年,当达到理论寿命时便需要回收^[28]。碳纤维复合材料的应用领域不断扩大,需求不断增加,随之而来的废弃物也逐年增加,不仅污染环境,还造成了巨大的资源浪费^[29]。碳纤维环氧复合材料应用广泛,其废弃物回收也是非常重要的一个环节,由于环氧树脂的固化反应是不可逆的,降解过程是碳纤维回收的一个挑战^[30-31]。需要回收的碳纤维和碳纤维复合材料主要有两种,一种是碳纤维产品生产过程中产生的废料或不合格产品,另一种是已经达到使用寿命的碳纤维复合材料,回收碳纤维具有重要的经济意义^[32]。

需要回收的碳纤维具有独特的形状,重塑产生的碳纤维产品可以重复用于汽车、风力、娱乐体育和桥梁建设等领域,也在很大程度上降低了碳纤维复合材料产品的生产成本。但是,我国现有的回收方法和回收技术比其他国家还存在一定的差距,因此有必要开发工业规模回收碳纤维复合材料的技术。我国碳纤维复合材料回收技术的研发起步较晚,复合材料废弃物回收的分类标准也未健全,分离清洁、无损的碳纤维仍是一大挑战。

4 结束语

碳纤维及其复合材料因其优异的性能,在很多领域都得到了广泛的应用,尤其是在新能源和航空航天领域,当然在其他领域的应用也逐渐被发现并有所研究,同时也存在很多问题,最直观的便是回收问题,这与现在的绿色环保宗旨相违背,因此也是我们应该多加关注的问题。

参考文献:

- [1] 严瑛,陈燕. 碳纤维技术发展趋势及应用[J]. 合成材料老化与应用,2018,47(5):134-138.
- [2] 李晨. 碳纤维增强热塑性树脂复合材料的应用推广探讨[J]. 现代工业经济和信息化,2022,12(9):91-92.
- [3] 张元,李建利,张新元,等. 碳纤维织物的特点及应用[J]. 棉纺织技术,2014,42(5):74-77.
- [4] VAN DE WERKEN N, TEKINALP H, KHANBOLOUKI P, et al. Additively manufactured carbon fiber-reinforced composites; State of the art and perspective[J]. Additive Manufacturing, 2020(31):100962.
- [5] 牟书香,文景波,徐俊,等. 碳纤维在风电叶片中的应用进展[J]. 纺织导报,2022(5):44-46.
- [6] 熊皓,王学花,张纯琛,等. 复合材料及碳纤维在风电叶片中的应用现状[J]. 科技风,2020(31):179-180.
- [7] 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.
- [8] 孙瑞,李春,丁勤卫,等. 大型风力机叶片模态性能及振动分析[J]. 热能动力工程,2018,33(10):113-118.
- [9] FORINTOS N, CZIGANY T. Multifunctional application of carbon fiber reinforced polymer composites: Electrical properties of the reinforcing carbon fibers-A short review [J]. Composites Part B: Engineering, 2019(162):331-343.
- [10] 具有碳纤维强化主横梁盖的风力涡轮机转子叶片部件的制造方法[J]. 高科技纤维与应用,2016,41(1):80.
- [11] 孙鹏文,侯战华,岳彩宾. 复合纤维风力机叶片铺层厚度与铺层顺序优化[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2015,34(4):288-292.
- [12] 岳彩宾. 基于遗传算法的复合纤维风力机叶片结构铺层优化与应用[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学,2015.
- [13] 王浩攀,高令飞,李学林. 碳纤维材料在我国卫星制造领域的应用及国产化需求[J]. 化工新型材料,2020,48(9):20-23.
- [14] GAO T, LI C, WANG Y, et al. Carbon fiber reinforced polymer in drilling: From damage mechanisms to suppression[J]. Composite Structures, 2022,286:115232.
- [15] 杨燕宁,张亮儒,董经经,等. 高模量碳纤维复合材料在卫星结构上的应用[J]. 高科技纤维与应用,2022,47(4):11-15.
- [16] 陆智斐. 土建领域中的纤维复合材料应用现状及前景展望[J]. 合成材料老化与应用,2022,51(4):118-120.
- [17] 刘灿. 碳纤维布和角钢加固的混凝土柱抗震性能研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2021,52(3):515-520.
- [18] 杨宝山,吴敏,谭勇,等. 碳纤维增强复合材料在海上平台钢结构修复中的应用[J]. 合成纤维工业,2022,45(5):17-21.
- [19] ALEXANDER C, OCHOA O O. Extending onshore pipeline repair to offshore steel risers with carbon-fiber reinforced composites[J]. Composite Structures, 2010,92(2):499-507.
- [20] 黄志忠. 碳纤维增强材料在建筑工程中的应用[J]. 建材与装饰,2019(1):2.
- [21] 曹思琳. 基于碳纤维复合材料的新能源汽车前车门轻量化设计研究[J]. 粘接,2022,49(7):69-72.
- [22] 孙少杰. 碳纤维复合材料(CFRP)在汽车轻量化中的应用[J]. 粘接,2022,49(7):76-79.
- [23] 王昕敏. 轨道交通车辆转向架零部件应用碳纤维复合材料替代金属材料研究[J]. 合成材料老化与应用,2022,51(4):115-117.
- [24] 袁代标. 碳纤维复合材料在轨道交通车辆转向架上的应用[J]. 合成材料老化与应用,2021,50(5):68-69.
- [25] 李宁. 碳纤维材料在家居灯具设计中的应用研究[J]. 光源与照明,2022(9):22-24.
- [26] 赵晓青. 碳纤维复合材料回收再利用的现状分析[J]. 新材料与新技术,2020,46(10):30-31.
- [27] 王翔宇. 碳纤维材料在家居灯具设计中的应用研究[D]. 大连:大连工业大学,2018.
- [28] WANG B, MA S, YAN S, et al. Readily recyclable carbon fiber reinforced composites based on degradable thermosets: a review[J]. Green Chemistry, 2019, 21(21):5781-5796.
- [29] 胡炜杰,钟明建,杨营,等. 碳纤维复合材料的回收与再利用技术[J]. 材料导报,2021,35(Z2):627-633.
- [30] 杜晓渊,程小全,王志勇,等. 碳纤维复合材料回收与再利用技术进展[J]. 高分子材料科学与工程,2020,36(8):182-190.
- [31] 阮芳涛,施建,徐珍珍,等. 碳纤维增强树脂基复合材料的回收及其再利用研究进展[J]. 纺织学报,2019,40(6):153-158.
- [32] 张亚东. 碳纤维复合材料的回收与再利用技术研究[J]. 广东化工,2022,49(10):26-27.

(下转第 52 页)

- 件信息公开的公众需求研究[J]. 情报理论与实践, 2020, 43(5): 9-16.
- [5] 孙曙光. 基于 QFD 的加工中心可用性保障技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [6] 尤临临, 汪颖. 基于知识图谱的用户需求研究文献分析[J]. 人类工效学, 2019, 25(3): 72-77.
- [7] ZADRY H. R., RAHMAYANTI D., SUSANTI L., et al. Identification of design requirements for ergonomic long spinal board using quality function deployment[J]. Procedia Manufacturing, 2015, 3: 4673-4680.
- [8] 魏莎. 基于用户行为分析的光照调节系统设计[J]. 中国新技术新产品, 2022(12): 14-16.
- [9] 谢莹庆, 曹炳尧, 熊义龙. 基于文本挖掘增强的画像系统设计及实现[J]. 工业控制计算机, 2022, 35(10): 91-94.
- [10] 李飞. 全渠道客户旅程体验图——基于用户画像、客户体验图和客户旅程图的整合研究[J]. 技术经济, 2019, 38(5): 46-56.
- [11] 刘大帅, 张杰, 徐伟杰, 等. 集成模糊 Kano 模型和余弦相似度的顾客需求满意度测评[J]. 包装工程, 2022, 43(14): 166-171.
- [12] 代宇婷, 韩少华. 基于 Kano-QFD 模型的医用防护服及其处理仓设计[J]. 设计, 2022, 35(5): 66-69.
- [13] AFSHAN, NIKHAT S, P N. Integration of Kano's model into quality function deployment: A Review[J]. IUP Journal of Operations Management, 2013, 12(2): 48-56.
- [14] 樊磊磊. 基于 QFD 的产品设计方法研究及其应用[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2015.

Research on the Design of Protective Clothing for Outdoor Use Based on the Kano-QFD Model

YAN Xiaoyan, CHEN Xiaopeng, WANG Lingli, HUANG Zhaoqi, ZHANG Jiamin
(College of Fashion Design, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 451191, China)

Abstract: In order to effectively obtain the functional requirements of travelers' protective clothing for the purpose of determining the critical design requirements of clothing, so as to improve the satisfaction of travel users, this study investigates the behavioural paths of travelers by establishing user profiles and drawing user journey maps, analyses the needs of travelers, categories functional requirements according to the Kano model, quantifies and calculates the importance of user requirements; combined with the QFD model of quality function configuration, the design requirements of protective clothing for travelers are obtained, their importance weights are determined, and critical design requirements are ranked. The results of the study show that the three most important user requirements are: antimicrobial and barrier properties, reliability and ease of washing, which are the key elements of protective clothing. By combining the Kano model with the QFD model, the design of protective clothing can be effectively informed by the user's needs.

Key words: Kano-QFD model; outdoors protection; user needs; user journey map

(上接第 4 页)

Research Progress and Application of Carbon Fiber Composites

LIU Wenjing¹, YANG Guorong², ZHAO Xiaoman^{1,3,*}

(1. Shaoxing University, Shaoxing 312000, China;

2. China Textile Academy (Zhejiang) Technology Research Institute Co., LTD., Shaoxing 312000, China;

3. Key Laboratory of Clean Dyeing and Finishing Technology of Zhejiang Province, Shaoxing 312000, China)

Abstract: Carbon fiber has both the inherent advantages of carbon materials and the flexibility of textile fibers. It can also be combined with metal, resin, ceramic and other materials to produce fiber-based composites. High performance carbon fiber and its composites have many excellent performances such as low density, high strength, high modulus, impact resistance, fatigue resistance, high temperature resistance, corrosion resistance and other excellent properties. Carbon fiber and its composites have been widely used in many industries by virtue of their unique advantages. In this paper, the research progress and application of carbon fiber and its composites in new energy, aerospace, energy development, transportation, household and other fields are reviewed. And the problems of carbon fiber composites in application were summarized.

Key words: carbon fiber; composite material; high performance; high modulus; new energy; lightweight