

【特别策划】

碳纤维树脂基复合材料及成型工艺与应用研究进展

宋绪丁¹, 庞利沙^{1,2}

(1.长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 西安 710064;

2.武警工程大学, 西安 710086)

摘要: **目的** 碳纤维树脂基复合材料的可设计性和性能优越性使得碳纤维及其树脂基复合材料的应用范围不断拓展。文章简述了碳纤维的性能、发展和分类, 研究碳纤维树脂基复合材料的性能影响因素、成型工艺及应用领域, 探索其未来研究的发展方向。**方法** 采用文献调研法, 梳理和汇总国内外关于碳纤维树脂基复合材料的制备及应用研究, 分析国内外关于其性能影响因素、成型工艺和应用领域的研究进展。**结论** 碳纤维树脂基复合材料性能受碳纤维含量、基体和碳纤维界面结合性能等因素的影响。国内碳纤维树脂基复合材料的成型技术主要以传统成型工艺为主, 不同性能要求和结构特点的构件采用不同成型工艺。应用范围从航空航天、军工领域不断拓展至民用领域, 生产制备的高效能化和低成本化是其未来发展方向。此外, 环境问题及碳纤维的回收利用是未来碳纤维及其复合材料应用的关键问题。

关键词: 碳纤维; 树脂基复合材料; 碳纤维界面结合性能; 成型; 应用

中图分类号: TB472 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2021)14-0081-11

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.14.009

Research Advances in Molding Technology and Application of Carbon Fiber and Its Resin Matrix Composites

SONG Xu-ding¹, PANG Li-sha^{1,2}

(1.Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment under Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2.Engineering University of People's Armed Police, Xi'an 710086, China)

ABSTRACT: The designability and the performance superiority of carbon fiber resin matrix composites make the application scope of carbon fiber and its resin matrix composites expand continuously. In this paper, the properties, development and classification of carbon fiber are summarized and the influencing factors of the properties, forming process and application fields of carbon fiber resin matrix composites are studied. The research direction of carbon fiber and its resin matrix composites is put forward for the future. Through literature survey, the research on preparation and application of carbon fiber resin matrix composites are summarized, and the research progress on the influencing factors of its properties, the molding process and application field at home and abroad are analyzed. The properties of carbon fiber resin matrix composites are affected by the content of carbon fiber and the interfacial bonding properties of matrix and carbon fiber. At present, the molding technology of carbon fiber resin matrix composites in China is mainly based on the traditional molding process, and different molding processes are used for components with different performance requirements and structural characteristics. The application scope is expanding from aerospace, military industry to civil field, and the high efficiency and low cost of production and preparation is the future development direction. In addition, environmental problems and carbon fiber recycling are the key issues for the future application of carbon fiber and its composites.

KEY WORDS: carbon fiber; resin matrix composites; interfacial bonding properties of matrix and carbon fiber; molding; application

收稿日期: 2021-05-23

作者简介: 宋绪丁(1963—), 男, 陕西人, 博士, 长安大学道路施工技术与装备教育部重点实验室教授、博士生导师, 主要研究方向为复合材料和产品数字化设计与制造。

碳纤维 (Carbon Fiber, 简称 CF), 是一种含碳量在 90% 以上的比强度高、比模量高、导电性能好、耐高温、耐腐蚀的新型纤维材料。碳纤维增强树脂基复合材料是指以碳纤维为增强体, 树脂为基体的复合材料的总称。在过去 60 年, 碳纤维及其树脂基复合材料因其优异的力学性能和化学稳定性, 已广泛应用于航空航天、军工、工业和体育休闲等领域^[1-2], 是未来具有巨大发展潜力的新型战略材料。

1 碳纤维

碳纤维是一种以聚丙烯腈、沥青、粘胶等为原料, 经预氧化、碳化或石墨化等工序而制得的高性能纤维^[3]。碳纤维的密度比金属铝低, 强度比钢铁高, 具有质量轻、强度高、模量高、导电导热性好、耐高温、耐腐蚀、抗蠕变、热膨胀系数小、电磁屏蔽性好等一系列其他材料所不可替代的优良性能^[4-6]。

1.1 碳纤维的发展

碳纤维最初是在 19 世纪初爱迪生发明的电灯中作为灯丝出现, 当时的碳纤维是由棉花、竹子等经过碳化而得, 由于强度低、寿命短, 随后被钨丝取代^[7]。

20 世纪 50 年代初, 随着航空航天技术的快速发展, 对相应材料的要求从传统的高强转变为高强且质轻, 碳纤维材料又开始逐渐受到重视, 美国 Wright-Patterson 空军基地率先开始研制黏胶基碳纤维。1959 年, 美国 UCC 公司生产出低模量黏胶基碳纤维 “Thornel-25”, 从此, 碳纤维开始商品化。1961 年, 日本大阪工业试验所首次发明了聚丙烯腈 (PAN) 基碳纤维。1962 年, 日本碳公司开始生产低模量 PAN 基碳纤维 (0.5 t/月)。1963 年, 英国皇家航空研究所 (RAE) 的瓦特和约翰逊通过在热处理时施加张力的方式打通了制造高性能 PAN 基碳纤维的技术途径, 并于 1964 年由 Courtaulds Morganite, Roi-Roys 公司开始量产。1965 年, 日本群馬大学发明了沥青基碳纤维, 同年, 美国 UCC 公司通过在石墨化过程中进行牵伸的方式开始生产高模量黏胶基碳纤维^[8]。1967 年, 英国 Rolls-Royce 公司首次在喷气式发动机上采用了碳纤维增强树脂基复合材料 (Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP), 开启了碳纤维工业用商业化的时代。碳纤维的民用商业化始于 20 世纪 70 年代, 日本东丽公司最开始将碳纤维应用于鱼竿和高尔夫球杆。20 世纪 80 年代, 碳纤维技术不断改进, 主要以日本东丽公司为主, 生产的碳纤维从 T300 到 T800、T1000, 再到 M60, 性能不断提升。进入 21 世纪后, 碳纤维技术逐渐成熟, 产能规模逐渐扩大, 进而成本逐渐下降, 下游应用随之迅速扩展, 覆盖航空航天、体育休闲、油气开发、风力发电、压力容器等各个领域。

我国关于碳纤维的研究始于 20 世纪 60 年代, 中

科院长春应用化学研究所李人元先生最早开始研究, 直到 20 世纪 90 年代, 研发的主体一直是包括中科院长春应化所、山西煤化所、化学研究所 (北京) 等在内的各科研院所, 之后, 在山东、吉林等地逐渐涌现出国内第一批生产企业, 但当时年生产规模仅为几十吨, 且生产技术和产品性能均比较落后。21 世纪初至今, 我国碳纤维生产和应用技术发展迅速, 高性能碳纤维技术取得突破性进展, 并逐渐形成了以江苏、山东和吉林等地为主的碳纤维产业聚集地。

由于主要应用在航空航天领域和国防军工领域, 所以碳纤维, 尤其是高性能碳纤维, 便成为敏感的国家战略新材料。我国从 1975 年召开第一次全国碳纤维会议开始, 就将碳纤维及其复合材料纳入了国家科技攻关项目, 在政策上持续支持碳纤维产业的发展。

“九五”期间, 将“PAN 基碳纤维国产化发展转型”作为国家攻关项目推动; “十五”期间, 设立“高性能碳纤维关键技术专题”; “十一五”“十二五”“十三五”三个五年计划期间, 大力支持碳纤维的国产化技术攻关和创新、应用领域推广和国际竞争力的提升, 使得国产碳纤维的发展取得长足的进步; “十四五”规划更是明确提出, 要发展战略性新兴产业, 包括加快壮大新材料以及航空航天等产业。经过近 60 年的自主研发攻关, 我国的碳纤维技术已经取得一定成绩。然而, 国产碳纤维与美国、日本等国家生产的碳纤维相比, 其力学性能和产品稳定性等仍然存在较大差距^[9], 碳纤维核心生产技术仍然掌握在美国、日本和欧洲少数国家手中。碳纤维行业具有代表性的境外企业主要有日本东丽 (TORAY)、日本东邦 (TOHO)、日本三菱丽阳 (MITSUBISHI)、美国赫克塞尔 (HEXCEL)、美国卓尔泰克 (ZOLTEK) 等。近几年, 国内企业在碳纤维领域不断加大投入, 研发生产实力得到大幅提升, 出现了以光威复材、中简科技、恒神股份、中复神鹰等为代表的一批企业, 碳纤维产能也逐年提升。2019 年全球碳纤维理论产能 154.9 kT, 各区域理论产能及占比见图 1, 美国、日本和中国分别占据碳纤维生产的前三甲位置^[10]。预计到 2025 年, 国产碳纤维在航空航天、能源与工业等应用领域的年消耗量将超 18 000 t, 2030 年, 国产碳纤维年消耗量将超 50 000 t, 碳纤维及其复合材料产值将超 3000 亿元。

1.2 碳纤维的分类

目前, 碳纤维可以从原丝类型、力学性能、丝束大小等方面进行分类。

按照原丝类型分为聚丙烯腈基 (PAN) 碳纤维、沥青基碳纤维、粘胶基碳纤维、酚醛基碳纤维等。以聚丙烯腈为原料生产的碳纤维, 力学性能更优异、产品稳定性更佳且工艺难度更低, 是碳纤维的主流。据中国化学纤维工业协会, PAN 基碳纤维占据市场 90%

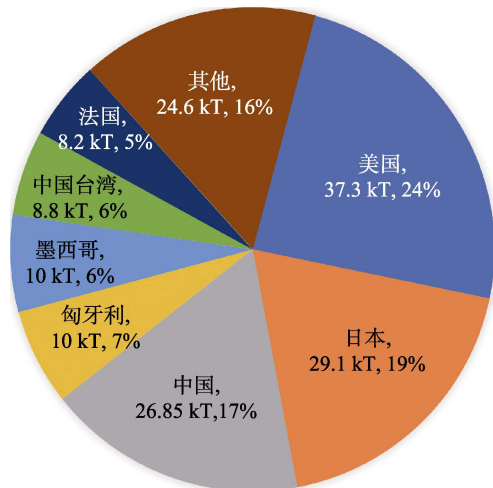


图 1 2019 年全球各区域理论产能及占比
Fig.1 Theoretical capacity and proportion by global regions in 2019

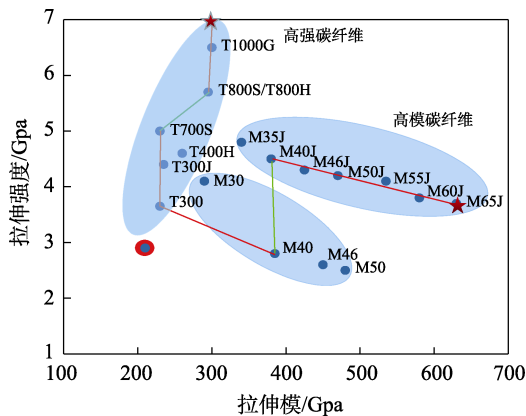


图 2 不同型号碳纤维强度、模量分布
Fig.2 Strength and modulus distribution of different types of carbon fiber

以上的份额，沥青基碳纤维占据 4% 份额，而粘胶碳纤维不足 1%^[11]。

按照力学性能分为通用型碳纤维和高性能碳纤维，其中，高性能碳纤维又分为高强型、高模型、超高强型、超高模型、高强—高模型、中强—中模型等^[12]，见图 2。目前，我国已突破 T1000 超高强碳纤维和 M65J 高强高模碳纤维核心技术，且 T1000 超高强碳纤维已投产，T1100 级碳纤维产品也已经突破工程化关键技术。

按照丝束大小可分为小丝束和大丝束碳纤维。小丝束碳纤维初期以 1K、3K、6K 为主，逐渐发展为 12K 和 24K，因其在工艺控制上要求更严格，碳化等设备造价更高，主要应用于航空航天和国防军工等高新技术领域，如飞机、导弹、火箭、卫星等，因此，小丝束碳纤维又被称为“宇航级碳纤维”；大丝束碳纤维主要以聚丙烯腈为原料，成本相对较低，主要应用于纺织、医药卫生、机电、土木建筑、交通运输和能源等工业领域，因此大丝束碳纤维又被称为“工业级碳纤维”。

表 1 碳纤维增强热塑性树脂和热固性树脂复合材料的性能及特点对比

Tab.1 Comparison of properties and characteristics of carbon fiber reinforced thermoplastic resin and thermosetting resin composites

性能特点	碳纤维增强热固性树脂复合材料	碳纤维增强热塑性树脂复合材料
成型温度	低	高
成型时间	长	短
液态粘度	低	高
力学性能	高温、高刚性等 力学性能优良	耐冲击、 抗疲劳性好

2 碳纤维增强树脂基复合材料

碳纤维作为增强体，与树脂、金属、陶瓷等基体复合，形成综合性能更加优异的复合材料^[13]。碳纤维在复合材料中承受主要载荷，弥补基体材料强度、刚度等不足的缺陷，复合材料的综合性能取决于不同类型的增强体和基体材料选择及它们的制备工艺^[14-16]。常见的碳纤维复合材料主要有碳纤维增强树脂基复合材料 (CFRP)、碳纤维增强炭基复合材料 (C/C)、碳纤维增强金属基复合材 (CFRM)、碳纤维增强陶瓷基复合材料 (CFRC) 等^[17]，其中，碳纤维增强树脂基复合材料又被称为先进复合材料，其最初主要应用于航空航天领域，随着制备技术的不断成熟，其性能不断提高，成本不断降低，应用范围也越来越广。

碳纤维增强树脂基复合材料的基体树脂分为热固性树脂和热塑性树脂。常用的热固性树脂包括环氧树脂、酚醛树脂和双马来酰亚胺树脂等，热塑性树脂包括聚醚醚酮 (PEEK)、聚醚砜 (PES) 和聚丙烯 (PP) 等。热固性树脂因其碳纤维增强复合材料的强度、刚度等静态性能更好，应用更加广泛。但是，热塑性树脂因其复合材料耐冲击性和抗疲劳性更好及成型时间更短，越来越受到关注。碳纤维增强热固性树脂和热塑性树脂复合材料的性能及工艺特点对比见表 1。

2.1 性能影响因素

碳纤维增强树脂基复合材料中的碳纤维主要有短切碳纤维和连续碳纤维两种类型。影响短切碳纤维增强树脂基复合材料机械性能的主要因素是短切碳纤维的长径比及在基体材料中的分布和取向^[18-20]。不管是短切碳纤维还是连续碳纤维，其复合材料性能均会受碳纤维含量、基体和碳纤维界面结合性能的影响。此外，成型过程中的纤维损伤、成型条件、复合材料中的孔隙率都会对复合材料机械性能产生影响^[21-22]。

2.1.1 碳纤维含量

对于碳纤维含量这一影响因素而言，并不是含量越高复合材料性能就越好，存在最佳碳纤维含量，且

对不同的基体材料最佳含量不同,同一基体材料不同性能参数对应的最佳碳纤维含量也不相同。陈邑等研究了碳纤维含量对增强尼龙复合材料性能的影响,发现碳纤维/PA66的弹性模量随着纤维含量的增加而增大,抗拉强度随纤维含量的增加先增大后下降,峰值出现在纤维含量为30wt%时^[23]。王莉等研究了碳纤维含量对碳纤维/有机硅复合材料力学性能的影响,发现随着碳纤维添加量的增加,碳纤维/有机硅复合材料的拉伸强度和撕裂强度均明显提高;碳纤维添加量为4%时,碳纤维/有机硅复合材料的拉伸强度和撕裂强度均达到最大;碳纤维添加量达5%时,碳纤维/有机硅复合材料的拉伸强度和撕裂强度开始下降^[24]。王淑娟等研究了不同碳纤维掺量对碳纤维/环氧树脂复合材料机械力学性能和界面微观结构的影响,结果表明:碳纤维掺量不宜超过环氧树脂质量的1%,否则会严重影响碳纤维在环氧树脂基体中的分散性,从而影响复合材料的力学性能^[25]。

2.1.2 基体和碳纤维界面结合性能

在碳纤维复合材料中,碳纤维表面层和基体表面层相互作用的区域存在一个过渡区,叫作界面。对于给定复合材料来说,改善碳纤维和基体材料的界面结合性能可以显著提高复合材料的综合性能,而对碳纤维进行表面处理可改善其与基体材料的界面结合性。碳纤维表面处理的方法主要有表面氧化法、表面涂层法、表面沉积法和表面聚合物接枝法等^[26]。表面氧化法是碳纤维表面处理常用的方法,可以使碳纤维外表面被“刻蚀”,且在石墨结构碳原子未饱和的区域引入高浓度的羟基、羧基等活性基团,使复合材料的界面粘合强度得到有效提高。表面氧化法主要分为气相氧化法、液相氧化法、电化学氧化法和等离子体氧化法^[27],其中,液相氧化法因其操作简单、成本低,所以最为常用。不管采用什么方法对碳纤维进行表面改性处理,都会对碳纤维的强度造成一定程度的损伤,影响碳纤维的力学性能,但是,由于其对复合材料的性能提升作用更显著,所以碳纤维的表面处理仍是制备碳纤维复合材料不可或缺的一个步骤。

对应不同的基体材料,可以采用不同的表面处理方法,也可将两种或两种以上表面处理方法相结合,来达到对复合材料性能的最佳改善效果。对于碳纤维增强尼龙6(PA6)复合材料来说,经过PA6溶液浸渍上浆处理后的碳纤维表面会形成一层PA6薄膜覆盖层,大大增强了碳纤维与PA6基体的结合力,改善了碳纤维的分散性,提升了复合材料整体的强度与模量^[28]。碳纤维增强环氧树脂基复合材料,可采用硝酸氧化与超声空化相结合的方法,强化碳纤维表面的氧化和刻蚀作用,使碳纤维与树脂之间的界面结合强度得以有效提高,显著改善复合材料的力学性能^[29]。Zafer Yenier等研究了不同浓度的碳酸铵($(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$)对碳纤维表面处理的影响,以及硅烷施胶对碳纤维表

面的影响,对比了不同表面改性对碳纤维增强复合材料的拉伸强度、弯曲强度、层间剪切强度和形态性能的影响^[30]。Kiran等研究了碳纤维镀镍对复合材料力学性能的影响,与未涂覆的短碳纤维增强环氧复合材料相比,镀镍短碳纤维增强环氧复合材料表现出更好的力学性能和断裂韧性,断口在显微组织分析中表现为解理断裂^[31]。Huang Yijun采用等离子体、氨水和 HNO_3 溶液分别对纤维进行改性制备复合材料,发现用改性纤维制备的复合材料力学性能得到改善,纤维与聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)基体具有较好的相容性^[32]。

综上所述,碳纤维增强树脂基复合材料的性能主要取决于碳纤维本身的强度、基体与碳纤维界面结合强度和成型工艺等。

2.2 CFRP成型工艺

不同的成型工艺对碳纤维增强树脂基复合材料性能的影响也有显著的差异。成型工艺主要包括成型方法、成型条件、成型过程,以及成形工艺的适用范围等。传统的高分子复合材料成型工艺主要包括手糊成型、热压罐成型、拉挤成型、纤维缠绕成型和树脂传递成型(Resin Transfer Molding, RTM)等。这些传统成型工艺,从成型过程控制到成品质量,经过几十年的发展,均已成熟,且适用范围很广,同样适用于碳纤维增强树脂基复合材料的制备。

2.2.1 手糊成型

手糊成型工艺是热固性树脂基复合材料成型较早的方法之一。这种方法需事先在模具上涂抹脱模剂,之后依次涂刷含有固化剂的树脂混合物并铺贴增强纤维织物,直到达到所需厚度,涂刷和铺贴过程中要不断排除气泡,再经过固化、脱模,得到复合材料制品。

手糊成型工艺以手工操作为主,其优点是操作简单,成品不受尺寸、形状限制,因此尤其适用于生产单件或小批量产品及现场生产不方便运输的大型制品,如大型舰船的船体、飞机蒙皮的制造,大多采用这一方法^[33]。但是,由于人工操作,生产效率低,且其质量影响因素较复杂,包括操作人员技能水平、情绪波动及环境、气候变化等,所以手糊成型不适宜生产高性能产品及大批量产品。

2.2.2 热压罐成型

热压罐成型是最早用于航空结构复合材料制造的一种技术,目前仍被广泛使用。该成型工艺是在真空条件下,经升温、加压、保温、降压、降温一系列过程,使低压成型制品或预制件得到充分固化的快捷固化方法。其主体是一个卧式圆筒形罐体,为适合制件不同尺寸的要求,按罐体内空间大小可分为小型、中型和大型。热压罐的温度和压力是主要性能指标,其成型的技术要点在于控制好固化过程中温度和压

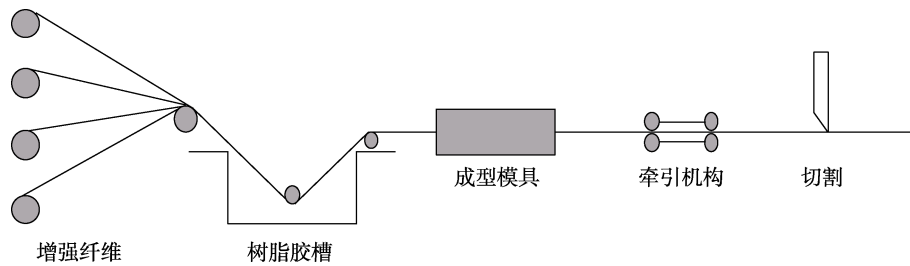


图 3 纤维增强树脂基复合材料拉挤成型工艺示意

Fig.3 Diagram of pultrusion forming process of fiber reinforced resin matrix composites

力与时间的关系。

热压罐成型工艺适用范围广，适用于各种树脂基复合材料制品，但由于其投资大，成本高，所以被大量用来制造高技术要求的航空航天和尖端设备用树脂基复合材料。

2.2.3 拉挤成型

拉挤成型工艺是一种连续生产固定界面、长宽不受限制的复合材料型材的方法，是碳纤维增强热固性树脂基复合材料的成型方法之一。拉挤成型工艺流程见图 3，将碳纤维从纱架拉出，经树脂槽浸渍树脂胶液，之后进入成型模成型固化，再由牵引装置拉出，最后由切断装置切割成所需长度。拉挤成型工艺简单、高效，拉挤线速度可达 4 m/min 以上，适合于高性能纤维增强树脂基复合材料的大规模生产。

李雪芹等结合了复合材料真空热压工艺和先进预浸料拉挤工艺连续制备复合材料的特点，设计了高通量制备技术平台，通过调整平台的压力和温度，可连续制备大批量的不同工艺流程的复合材料样品^[34]。Thieleke 等研究了纤维预热温度和牵引速度等工艺参数对型材聚合性能和力学性能的影响，结果发现，牵引速度对残余低聚物含量的影响是显著的，纤维预热温度越高，所生产的玻璃纤维管材的力学性能越好^[35]。Budiyantoro, Cahyo 等采用挤出—拉挤法制备了碳纤维增强聚丙烯复合长丝，研究了熔体温度、拉挤速度、浸渍模中的针数和纤维处理对复合材料界面剪切强度（IFSS）的影响，结果表明对 IFSS 的影响顺序依次为纤维处理，拉伸速度和熔体温度，并确定了最佳工艺参数组合^[36]。

拉挤成型工艺在不断发展。美国的 Goldworthy Engineering 公司开发了一种可以连续生产曲面型材的拉挤工艺，其工作原理是将原来固定的成型模用活动的旋转模代替，便可生产出固定截面的弯曲型材。德国的 Thomas 公司，进一步开发了“半径拉挤成型”，使得生产任意半径的连续弯拉挤型材成为可能，包括螺旋形型材，使拉挤型材不再局限于一维而变成三维^[37]。

2.2.4 纤维缠绕成型

纤维缠绕成型是将碳纤维浸渍树脂胶液后，在一定张力作用下按照一定规律缠绕到芯模上，然后固化

成型、脱模成为复合材料制品的工艺方法。由于树脂胶液的流动性是保证纤维被浸透、含胶量均匀且纤维中气泡被顺利排出的必要条件，所以此成型方法适用于胶液粘度较低的树脂基体。对于成型纤维含量高的产品，需要高性能的树脂，以维持一些主要依赖于树脂的性能，如剪切强度和冲击性能。成品质量受成型过程中多种因素影响，包括碳纤维预处理、碳纤维浸胶含量、缠绕张力和缠绕速度、固化温度和固化时间。成型过程中的缠绕张力是关键技术，张力大小、各纤维束之间张力的均匀性及各纤维层之间的均匀性，都对成品质量影响极大。另外，缠绕速度应控制在一定范围内，速度过小，生产率低，速度过大，影响产品质量。

王洋等研究了影响高模量碳纤维复合材料薄壁管件性能的工艺参数，通过正交实验确定了缠绕工艺参数的大小顺序及最佳成型工艺参数组合^[38]。Tariq, Mateen 等研究了碳纤维缠绕层对纤维缠绕复合空心轴扭转特性的影响，结果表明，与环向缠绕层相比，螺旋缠绕层具有较高的硬度和抗扭转力的能力^[39]。赵明珠等研究了纤维的缠绕方式和角度对碳纤维复合材料输电杆塔的力学性能的影响，设计了纱丝螺旋缠绕结合单向布纵向缠绕的线型缠绕方式，分析纤维取向对碳纤维增强玻璃钢（GFRP）输电杆塔力学性能的影响，确定了最优纤维缠绕设计角度^[40]。

纤维缠绕成型工艺其优点是成型过程连续、一次性完成，生产效率较高，适用于大批量生产，且适用于生产圆柱体、圆筒体、球体等回转体制品，像导弹壳体、火箭发动机壳体、各种管道和压力容器等。

2.2.5 树脂传递成型

树脂传递成型（RTM）属于复合材料液体成型工艺，是在一定温度和压力下，将低粘度的树脂注入预先放置有预成型坯（碳纤维制成）的模腔中，使树脂充分浸渍纤维，然后固化、脱模而获得制品的过程，其示意图见图 4。该工艺分为碳纤维预成型坯加工和树脂注射固化两个步骤。其中，碳纤维预成型坯的加工方法主要有二维和三维编织技术、缝合技术、穿刺技术、针织技术及经编技术。通过以上预成型坯加工技术，可根据最终成品性能要求进行择相增强、局部增强及混杂增强等，充分发挥复合材料性能的可设计

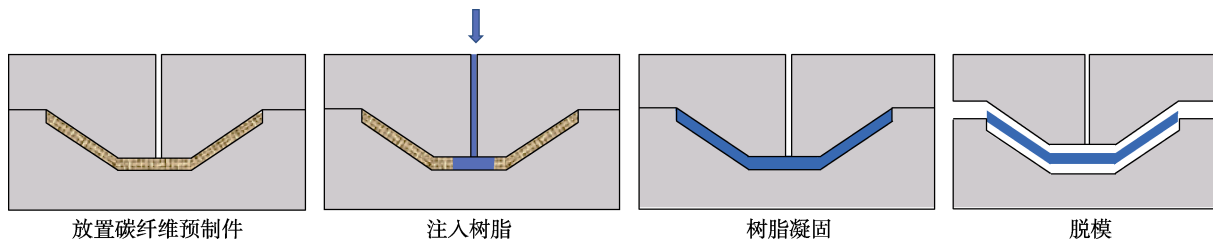


图4 纤维增强树脂基复合材料 RTM 成型工艺示意图

Fig.4 Diagram of RTM forming process of fiber reinforced resin matrix composites

性, 实现“材料设计”。树脂注射固化过程中, 为了排除模具和树脂中的气泡和水分, 增强树脂在模腔中的流动性, 发展了真空辅助成型技术, 真空辅助可以大大改善模塑过程中纤维的浸润效果, 显著减少最终制品中夹杂物和气泡, 进而提高成品力学性能。

在 RTM 成型工艺中, 影响成品性能的因素主要是树脂粘度、模具温度及注射压力。其中, 为了使树脂对纤维的浸润更充分、充模效果更好, 通常希望较低的树脂粘度, 但并不是粘度越低越好, 适宜的树脂粘度往往取决于增强纤维的特性及模具中增强纤维的含量。此外, 树脂粘度还受到模具温度的影响, 因此树脂粘度和模具温度需结合其他因素综合考虑。注射压力值也需适宜, 且会和模具温度相互影响, 因此, 需结合各种因素综合考虑。

王跃飞研究了高压树脂成型工艺 (HP-RTM) 中材料参数 (纤维渗透率) 和工艺参数 (注射流量、注射压力) 对制件孔隙率的影响, 通过工艺优化获得了合适工艺参数, 并得出孔隙率对制件力学性能的影响规律^[41]。Sun Zeyu 等通过优化的成型方法, 将 RTM 和压缩成型 (Compression Molding, CM) 进行结合, 形成压缩树脂转移成型 (Compression Resin Transfer Molding, CRTM), 进而制备高性能复合材料, 用 CRTM 制备的复合材料具有比用 RTM 和 CM 制备的复合材料优越的力学性能^[42]。

RTM 经过几十年的发展, 随着科学技术的不断创新及对成品质量要求的不断提高, 逐渐形成了多种派生技术, 包括西曼树脂浸渍技术、轻质 RTM 技术和树脂膜渗透技术, 这些技术不仅能提高产品质量, 还可降低成本。

2.2.6 3D 打印成型

随着碳纤维增强树脂基复合材料技术日益成熟, 其应用越来越广, 尤其在航空航天及军工领域的应用正呈现爆发式增长, 但制约其在其他领域应用推广的根本因素是成本问题, 因此低成本化是高性能复合材料目前发展的重要方向。而在碳纤维增强树脂基复合材料的总成本中, 原材料成本仅占约 10%, 剩余 90% 左右的成本都来自其制造过程, 因此, 碳纤维增强树脂基复合材料低成本化的核心就是发展低成本制造技术, 采用高度自动化的制造是有效方法之一。目前, 发展较成熟的技术主要有 3D 打印技术、自动纤维铺

放技术 (Automatic Tow Placing, ATP) 及在自动纤维铺放技术基础上发展的超声波快速固结成型和激光固结成型等。其中, 碳纤维增强树脂基复合材料 3D 打印技术随着 3D 打印技术的蓬勃发展, 逐渐成为国内外学者研究的热点。

3D 打印技术, 又称为增材制造技术, 是一种由数字化控制系统控制, 采用逐层打印的方式来构造三维材料实体的智能制造技术, 该成型技术工艺简单, 可制造复杂形状构件, 且不需要模具, 可以有效降低复合材料的生产成本^[43]。但单纯以聚合物为原材料打印成型的构件, 普遍强度、刚度等较低, 力学性能欠佳, 因此限制了 3D 打印产品的应用范围。碳纤维增强 3D 打印复合材料为 3D 打印技术的发展提供了新的思路, 大大拓展了 3D 打印产品的应用范围。3D 打印碳纤维增强树脂基复合材料的成品质量与性能, 不仅受到打印过程中的装备温度、打印速度、层高等工艺条件的影响, 还与复合材料本身参数、材料直径、喷头直径等有关, 综合各方面因素合理选择工艺参数是实现高效高精 3D 打印系统的基础。

张帆等针对碳纤维长纤复合材料连续性与各向异性的特点, 研究了连续碳纤维 3D 打印的系统构成与工艺模型, 分析了三维成型过程中不同工艺参数与成型结果间的影响关系, 包括材料直径与喷头直径的关系; 3D 打印成型温度、加热区域与成型结果间影响关系; 连续碳纤维复合材料 3D 打印成型过程及控制参数中层高与打印速度的关系, 通过 3D 打印实验验证理论分析的正确性^[44]。Hao Dou 等研究层高、挤压宽度、打印温度、打印速度等工艺参数对 3D 打印复合材料拉伸力学性能的影响, 结果表明: 连续碳纤维增强复合材料的拉伸力学性能随着层高和挤压宽度的增加而逐渐降低, 拉伸力学性能随印刷温度的升高而升高, 随印刷速度的升高而降低^[45]。Nanya Li 等为了解决由于印刷路径设计的局限性, 而导致不能沿碳纤维复合材料零件的载荷传递路径进行打印这个问题, 考虑了连续碳纤维增强复合材料的负载传输路径和各向异性特性, 提出了一种新型的连续碳纤维增强尼龙复合材料三维打印方法, 设计了印刷工艺的印刷路径^[46]。

2.3 CFRP 应用领域

碳纤维增强树脂基复合材料因其具有较高的比

强度、比模量,抗疲劳、耐腐蚀及抗蠕变性能优异,密度小,热膨胀系数小,整体性能好等一系列优点而被广泛应用于航空航天、军工、机械、化工、建筑、海洋工程、生物医学及体育休闲等多个领域。随着科学技术不断发展,碳纤维及其复合材料的制备及应用技术也将随之发生一次又一次的飞跃,碳纤维的研发和生产将进入更高的阶段,随着性能的提升和成本的降低,其应用范围将越来越广。

2.3.1 航空航天领域

在碳纤维增强树脂基复合材料中,应用最广泛的是碳纤维/环氧树脂复合材料,其最先被开发用于飞机结构制造。目前,军用飞机上复合材料用量已达到结构质量的 30%左右,占到机体表面积 的 80%。将碳纤维/环氧树脂复合材料应用于战机的机身、主机翼、垂尾翼、平尾翼及蒙皮等重要部位,既能减轻机身质量,又可以提高抗疲劳和耐腐蚀性能。在民用飞机上,碳纤维/环氧复合材料也得到快速发展,波音推出的 787 飞机,复合材料用量占到其结构质量的 50%^[47],而空客的 A-350 飞机为了与波音-787 飞机竞争,将复合材料用量提升到了 52%。碳纤维复合材料在民用飞机上的用途不仅是作为飞机制造的基础材料更重要的是作为结构件。以波音 787 为例,碳纤维复合材料用作装饰件的占比为 30%,用作结构件的占比为 70%,其使用涉及整个机身、机翼、垂尾、舱门等重要结构^[48]。

碳纤维复合材料作为耐高温、耐摩擦的材料,在高速导弹上的应用也越来越多,如导弹的弹头、弹体及其发动机壳体等需承受高温的部位,尤其是在弹头顶部、发动机喷管及其耐烧蚀部件等重要防热结构的部件,更是大量采用了碳纤维复合材料,如美国的三叉戟导弹、战斧式巡航导弹和法国的阿里安娜 2 型火箭等,均将碳纤维复合材料广泛应用在火箭的整流罩、发动机喷管、喉衬、燃烧室和排气锥体等部位,运载火箭质量因此大大减轻^[11]。我国在多种型号的大型运载火箭中广泛采用了碳纤维复合材料,且其应用范围已经由最初的简单零部件、装饰部件、次承力件发展到大型部件、复杂部件和主承力结构件,我国新一代洲际弹道导弹东风-41 和巨浪-2 的导弹壳体都采用了国产碳纤维生产的复合材料,翼龙 1D 全机身黑色部分材质就是碳纤维树脂复合材料^[17]。

2.3.2 其他领域

碳纤维复合材料最初应用于航空航天及军工等高新技术领域,主要是由于其成本高,而航空航天及军工领域则相对更追求性能最大化。对于其他行业则不同,必须考虑成本问题。随着碳纤维技术的不断提升,其成本也逐渐下降,应用范围也在不断拓展。

1) 工业机器人领域。随着智能制造技术的不断发展,机器人的功能和性能不断改善和提高,其应用

领域也从最初的机械行业不断拓展到电子、物流、化工等领域中。复合材料在工业机器人领域的应用,可以在保证其强度和刚度的同时减轻质量,从而提高工作效率,降低成本。自从 2005 年,德国库卡机器人公司推出了第一批碳纤维复合材料码垛机器人以来,碳纤维复合材料在工业机器人中的应用越来越广泛。我国对碳纤维复合材料机械臂的研究晚于欧美等发达国家,但随着国内市场的扩大和政策的支持,不断涌现出一批深耕于碳纤维机械臂领域的企业,促进了国内碳纤维复合材料机械臂的发展。目前,挪恩复材成功为中国电子科技集团某研究所开发出碳纤维六轴关节机械臂,已应用于生产线^[49]。

2) 汽车领域。碳纤维复合材料在汽车上应用的主要目的是在保证性能的同时减轻车身质量,从而降低能耗。由于热固性基体比热塑性基体的强度高,所以汽车的承力结构大多采用碳纤维增强热固性树脂复合材料,如车身面板、车轮、传动轴、结构件、发动机部件、保险杠和悬架系统等主要由环氧基碳纤维复合材料组成^[50],而承受负载不高的部件则采用碳纤维增强热塑性树脂复合材料,如汽车悬架系统的弹簧元件是由 PEEK 和聚碳酸酯(PC)基碳纤维复合材料制成的^[51]。此外,碳纤维复合材料还可用于保险杠结构后面的特殊碰撞元件、赛车座椅、挡泥板等更多部位,保障安全性的同时提升舒适性^[52]。

3) 风能领域。随着全球不断出现能源危机和环境问题,清洁能源越来越受到世界各国重视,风能是重要清洁能源之一。风电叶片的形状、尺寸、质量、刚度和稳定性等都会对其发电效率产生影响,碳纤维复合材料因其高比刚度、比强度、高稳定性等特性广泛应用于风能领域^[53]。

4) 建筑领域。碳纤维树脂基复合材料因其比刚度和比强度高、耐腐蚀、抗疲劳,已开始应用于建筑行业,如钢筋混凝土结构中的钢筋逐渐被连续碳纤维树脂基复合材料所取代。目前,世界上第一个碳纤维混凝土建筑——Cube 实验楼已经完成。此外,碳纤维树脂基复合材料还可应用于木构架古建筑的保护。木构架古建筑的保护设计需要遵循遗产保护的原则,在保护其结构的同时不改变其形貌,碳纤维树脂基复合材料因为质轻高强,只需要运用较少的材料就能起到很好的加固效果,同时,又不过多增加建筑本身负荷。由于碳纤维树脂基复合材料这些优良的特性,使其在木构架古建筑保护中大量应用^[54]。

5) 生物医学领域。在生物医学领域,碳纤维树脂基复合材料的应用也在不断深入。比如,脑外科手术中,用来固定患者头部的支架一般采用金属制造,但是金属本身不易被 X 射线穿透,会干扰脑部血管造影,影响医生的诊断,碳纤维树脂基复合材料制造的头部固定支架很好地解决了这一问题。此外,有研究通过碳纤维复合人工颅骨板急性期生物相容性证

实,碳纤维复合材料是一种对机体无毒性和不良反应的理想生物材料,其性能已经达到临床要求^[55-56]。

3 未来研究的重点方向

碳纤维及其树脂基复合材料作为战略性新型材料,由于其优越的性能和可设计性使得其应用范围不断拓展,也必将是人们研究的热点,未来研究重点可从以下几方面进行。

1) 碳纤维原丝的研究。选择不同的聚合物原丝来研发更高强度、更高模量的碳纤维,并研究其拉丝工艺方法和碳化工艺,生产出更小丝束碳纤维。这方面我国与国外还有较大差距,是迫切需要发展的关键战略技术,需要研究并形成核心关键技术和知识产权。

2) 碳纤维树脂基复合材料的研究。一方面可针对树脂基体材料的改性增韧及耐湿热性进行研究,另一方面研究碳纤维树脂基复合材料设计理论、成型工艺方法及其机械加工工艺方法等。同时,也要研究碳纤维复合材料带来的环境问题和回收再利用问题。

3) 设计理论方面主要研究碳纤维含量及长度对复合材料性能的影响,如用连续碳纤维、短碳纤维及碳纤维粉末3种形式增强复合材料性能的机理;研究碳纤维在基体中铺设结构、铺设张力、编制铺设方法等对复合材料的拉伸强度和撕裂强度的影响规律;树脂基体与碳纤维的浸润机理;基体和碳纤维结合界面的增强机理与增强方法;碳纤维表面处理的理论与方法等。

4) 成型工艺方法主要在传统的成型方法的基础上,研究新的成型方法,3D打印技术制备碳纤维树脂基复合材料已经成为研究的热点。未来在热敏树脂3D打印中实时布设连续纤维的超声波快速固结成型和激光固结成型也会成为新的制备方法,成为研究和探索的热点。在成型方法确定的情况下,研究成型合适的工艺参数和工艺参数的优化,特别是要关注孔隙率对制件力学性能的影响,发展真空辅助成型技术等。

5) 机械加工工艺方法主要研究加工过程中复合材料力学性能和热学性能对加工表面质量的影响^[57];如何在机械加工中避免产生纤维撕裂、分层和断裂现象,这些现象会严重降低工件的静强度和疲劳强度,降低疲劳寿命。

6) 环境问题及碳纤维的回收再利用问题是未来碳纤维及其复合材料应用的关键问题,已引起人们的高度关注。由于应用范围越来越广,产量逐渐增大,碳纤维增强树脂基复合材料对有效回收利用技术的依赖性增高。目前大多数回收利用都集中在碳纤维增强树脂材料加工工艺的废料上,且回收废旧复合材料部件的需求日益增加,这样,将会促进碳纤维复合材料生产的低成本化^[58]。此外,生产制备的高效能化可

以减少废旧复合材料部件的产生,缓解由此产生的环境问题。因此,亟待探索研究碳纤维回收再利用的途径和方法,真正做到保护环境和循环再利用。

4 结语

碳纤维及其树脂基复合材料技术经过几十年的发展历程,其优势已经充分体现。碳纤维树脂基复合材料是应用最广泛的碳纤维复合材料,影响其性能的重要因素是碳纤维与树脂基体的界面微观结构和界面结合强度,可通过碳纤维表面改性改善碳纤维与基体界面结合性,进而提高复合材料性能。

目前,国内碳纤维树脂基复合材料的成型技术主要以传统成型工艺为主。单件或小批量产品以及不方便运输的大型制品适宜采用手糊成型;热压罐成型因成本较高适宜生产高技术要求的航空航天和尖端设备用树脂基复合材料;拉挤成型适宜生产固定截面、长宽不受限制的复合材料型材;一些回转体形状复合材料构件可通过纤维缠绕成型制备;RTM可生产精度要求较高、结构复杂的复合材料构件;3D打印技术因无需模具、成型快速,可制造复杂形状构件。

制备技术的发展,促进了碳纤维树脂基复合材料应用范围从航空航天、军工领域不断拓展至民用领域。虽然国产碳纤维技术和发达国家相比还有较大差距,但随着科研力量的不断投入和国家政策的不断支持,我国在碳纤维生产以及复合材料制备工艺领域将实现新的突破,其应用范围也将不断拓展,随之而来的是碳纤维及其复合材料需求量的持续增长。

未来,碳纤维树脂基复合材料的制备将朝着高效能化和低成本化的方向发展,其性能将转向高性能化、结构功能一体化、智能化方向。研究重点可从几方面进行,包括碳纤维原丝的深入研究,树脂基体性能的提高,碳纤维树脂基复合材料设计理论、成型工艺方法及其机械加工工艺方法等。此外,随着需求量和用量的不断增长,随之而来的环境问题及碳纤维的回收利用将会成为未来碳纤维及其复合材料应用的关键问题。

参考文献:

- [1] MINUS M, KUMAR S. The Processing, Properties, and Structure of Carbon Fibers[J]. JOM, 2005, 57(2): 52-58.
- [2] 赵宗桂. 碳纤维及其复合材料的发展与应用[J]. 石化技术与应用, 2002, 20(4): 273-276.
ZHAO Zong-gui. Development and Application of Carbon Fiber and Its Composites [J]. Petrochemical Technology and Application, 2002, 20(4): 273-276.
- [3] 魏化震, 李恒春, 张玉龙. 复合材料技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.
WEI Hua-zhen, LI Heng-chun, ZHANG Yu-long. Tech-

- nology of Composites[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2017.
- [4] CHRISTENSEN R M. Properties of Carbon Fibers[J]. *Journal of the Mechanics & Physics of Solids*, 1994, 42(4): 681-695.
- [5] CHAND S. Review: Carbon Fibers for Composites[J]. *Journal of Materials Science*, 2000, 35(6): 1303-1313.
- [6] 李克智, 王闯, 李贺军, 等. 碳纤维增强水泥基复合材料的发展与研究[J]. *材料导报*, 2006, 20(5): 85-88.
LI Ke-zhi, WANG Chuang, LI He-jun, et al. Development and Research of Carbon Fiber Reinforced Cement Matrix Composites[J]. *Materials Review*, 2006, 20(5): 85-88
- [7] 徐昌华. 碳纤维及其复合材料的发展和概况[C]//中国电子学会生产技术委员会工程塑料应用第四届委员会. *工程塑料优选论文集*. 北京: 中国电子学会电子制造与封装技术分会, 1993.
XU Chang-hua. Development and Application of Carbon Fiber and Its Composites[C]//The 4th Committee of Engineering Plastics Application of Production Technology Committee of China Institute of Electronics. *Engineering Plastics Optimization Papers*. Beijing: Electronic Manufacturing & Packaging Technology Branch of Chinese Institute of Electronics, 1993.
- [8] 高波, 徐自立. 碳纤维及其复合材料的发展和概况[J]. *机电产品开发与创新*, 2010, 23(4): 37-39.
GAO Bo, XU Zhi-li. Development and Application of Carbon Fiber and Its Composites[J]. *Development & Innovation of Machinery & Electrical Products*, 2010, 23(4): 37-39.
- [9] 王铭辉. 碳纤维复合材料在航空航天领域的应用研究[J]. *现代商贸工业*, 2019(8): 191-193.
WANG Ming-hui. Research on The Application of Carbon Fiber Composites in Aerospace Field[J]. *Modern Business Trade Industry*, 2019(8): 191-193.
- [10] 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.
QI Ying. Development of Carbon Fiber and Its Composites[J]. *Advanced Materials Industry*, 2017(12): 2-6.
- [11] 李奇辉, 刘向阳, 房晓斌. 碳纤维复合材料的应用现状及我国碳纤维工业的发展方向[J]. *价值工程*, 2016, 35(17): 113-115.
LI Qi-hui, LIU Xiang-yang, FANG Xiao-bin. Application Status of Carbon Fiber Composites and Development Direction of Carbon Fiber Industry in China [J]. *Value Engineering*, 2016, 35(17): 113-115.
- [12] 唐见茂. 高性能纤维及复合材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
TANG Jian-mao. *High Performance Fiber and Composite Materials*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.
- [13] BAYRAKTAR E. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering[J]. *Composites Materials and Technologies*, 2015(12): 1-3.
- [14] KHAYAL S, ELMARDI O M. Literature Review on Imperfection of Composite Laminated Plates[J]. *Journal of Microscopy & Ultrastructure*, 2017, 5(3): 119-122.
- [15] LYNCH C T, KERSHAW J P. *Metal Matrix Composites*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [16] KISER J D, DAVID K E, DAVIES C, et al. *Updating Composite Materials Handbook-17 Volume 5, Ceramic Matrix Composites*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2017.
- [17] 樊星. 碳纤维复合材料的应用现状与发展趋势[J]. *化学工业*, 2019, 37(4): 12-16.
FAN Xing. Application Status and Development Trend of Carbon Fiber Composites[J]. *Chemical Industry*, 2019, 37(4): 12-16.
- [18] VAUTARD S, OZCAN S, POLAND L, et al. Influence of Thermal History on the Mechanical Properties of Carbon Fiber-acrylate Composites Cured by Electron Beam and Thermal Processes[J]. *Composites Part A Applied Science & Manufacturing*, 2013, 45: 162-172.
- [19] TEZCAN J, OZCAN S, GURUNG B, et al. Measurement and Analytical Validation of Interfacial Bond Strength of PAN-fiber-reinforced Carbon Matrix Composites[J]. *Journal of Materials Science*, 2008, 43(5): 1612-1618.
- [20] TEKINALP H L, KUNC V, VELEZ-GARCIA G M, et al. Highly Oriented Carbon Fiber-polymer Composites via Additive Manufacturing[J]. *Composites Science & Technology*, 2014, 105(12): 144-150.
- [21] HINE P J, DAVIDSON N, DUCKETT R A, et al. Measuring the Fibre Orientation and Modelling the Elastic Properties of Injection-moulded Long-glass-fibre-reinforced Nylon[J]. *Composites Science & Technology*, 1995, 53(2): 125-131.
- [22] BIJSTERBOSCH H, GAYMANS R J. Polyamide 6—long Glass Fiber Injection Moldings[J]. *Polymer Composites*, 1995, 16(5): 363-369.
- [23] 陈邑, 黄珍媛, 刘颖, 等. 碳纤维含量对增强尼龙复合材料性能的影响[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2019(9): 64-68.
CHEN Yi, HUANG Zhen-yuan, LIU Ying, et al. Effect of Carbon Fiber Content on Properties of Reinforced Nylon Composites[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2019(9): 64-68.
- [24] 王莉, 黄应军, 周柏青, 等. 改性碳纤维/有机硅复合材料的制备及力学性能研究[J]. *化工新型材料*, 2019, 47(12): 50-53.
WANG Li, HUANG Ying-jun, ZHOU Bai-qing, et al. Preparation and Mechanical Properties of Modified Carbon Fiber/Silicone Composites[J]. *New Chemical Materials*, 2019, 47(12): 50-53.
- [25] 王淑娟. 碳纤维/环氧树脂复合材料的制备及性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
WANG Shu-juan. Preparation and Properties of Carbon Fiber/Epoxy Resin Composites[D]. Changchun: Jilin

- University, 2013.
- [26] 张爱玲, 郭婷婷, 刘骥驰. 碳纤维表面改性方法及研究进展[J]. 化工新型材料, 2016, 44(10): 1-2.
ZHANG Ai-ling, GUO Ting-ting, LIU Ji-chi. Surface Modification Methods and Research Progress of Carbon Fiber[J]. New Chemical Materials, 2016, 44(10): 1-2.
- [27] WRIGHT W. The Carbon Fibre/epoxy Resin Interfaces-A Review[J]. Composite Polymers, 1990, 3(5): 360-401.
- [28] 刘旭, 徐海, 徐立新, 等. 改性碳纤维增强尼龙 6 复合材料的制备及性能[J]. 材料工程, 2021, 49(4): 128-134.
LIU Xu, XU Hai, XU Li-xin, et al. Modification of Preparation and Properties of Carbon Fiber Reinforced Nylon 6 Composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(4): 128-134.
- [29] 易增博. 碳纤维增强环氧树脂基复合材料的制备及力学性能研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
YI Zeng-bo. Preparation and Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Resin Matrix Composites[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2015.
- [30] YENIER Z, ALTAY L, SARIKANAT M. Effect of Surface Modification of Carbon Fibers on Properties of Carbon/epoxy Composites[J]. Progress in Artificial Intelligence, 2020, 9(1): 110-118.
- [31] NIKPUR K, CHEN Y F, KARDOS J L. Fracture Toughness of Unidirectional Short-fiber Reinforced Epoxy Composites[J]. Composites Science & Technology, 1990, 38(2): 175-191.
- [32] HUANG Yi-jun. Effect of Surface Treatment on Surface Characteristics of Carbon Fibers and Interfacial Bonding of PMMA Resin Composites[J]. Composite Interfaces, 2019, 26(8): 679-686.
- [33] SOUTIS C. Fibre Reinforced Composites in Aircraft Construction[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2005, 41(2): 143-151.
- [34] 李雪芹, 郭双喜, 李斌太. 连续纤维增强树脂基复合材料的高通量制备技术平台设计[J]. 复合材料科学与工程, 2020(2): 48-53.
LI Xue-qin, GUO Shuang-xi, LI Bin-tai. Design of High Throughput Technology Platform for Fabrication of Continuous Fiber Reinforced Resin Matrix Composites[J]. Composites Science and Engineering, 2020(2): 48-53.
- [35] THIELEKE P, BONTEN C. Influence of the Fiber Preheating in In-situ pultrusion of Continuous Fiber-reinforced Thermoplastic Profiles[C]. Mallorca: FRACTURE AND DAMAGE MECHANICS: Theory, Simulation and Experiment. 2020.
- [36] BUDIYANTORO C, ROCHARDJO H, NUGROHO G. Effects of Processing Variables of Extrusion-pultrusion Method on the Impregnation Quality of Thermoplastic Composite Filaments[J]. Polymers, 2020, 12(12): 2833.
- [37] 唐见茂. 高性能纤维及复合材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
TANG Jian-mao. High Performance Fiber and Composite Materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.
- [38] 王洋, 刘洪新, 陈维强, 等. 高模量碳纤维复合材料薄壁管件成型工艺优化研究[J]. 宇航材料工艺, 2017, 47(2): 56-59.
WANG Yang, LIU Hong-xin, CHEN Wei-qiang, et al. Research on Forming Process Optimization of High-modulus Carbon Fiber Composites Thin-walled Pipe Fit[J]. Aerospace Materials & Technology, 2017, 47(2): 56-59.
- [39] TARIQ M, NISAR S, SHAH A, et al. Effect of Carbon Fiber Winding Layer on Torsional Characteristics of Filament Wound Composite Shafts[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences & Engineering, 2018, 40(4): 198.
- [40] 赵明珠, 张磊, 张东英, 等. 缠绕角对碳纤维增强复合材料输电杆塔力学性能的影响[J]. 中国塑料, 2019, 33(5): 67-72.
ZHAO Ming-zhu, ZHANG Lei, ZHANG Dong-ying, et al. Influence of Winding Angle on Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Composite Transmission Tower[J]. China Plastics, 2019, 33(5): 67-72.
- [41] 王跃飞. 碳纤维增强复合材料 HP-RTM 成型工艺及孔隙控制研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
WANG Yue-fei. Study on HP-RTM Process and Pore Control of Carbon Fiber Reinforced Composites[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [42] SUN Z, XIAO J, TAO L, et al. Preparation of High-Performance Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Composites by Compression Resin Transfer Molding[J]. Materials, 2019, 12(1): 13.
- [43] 于天淼, 高华兵, 王宝铭, 等. 碳纤维增强热塑性复合材料成型工艺的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(4): 139-144.
YU Tian-miao, GAO Hua-bing, WANG Bao-ming, et al. Research Progress on Forming Process of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(4): 139-144.
- [44] 张帆, 谭跃刚, 马国锋, 等. 连续碳纤维复合材料 3D 打印的成型工艺研究[J]. 机械设计与制造, 2019(7): 96-98.
ZHANG Fan, TAN Yue-gang, MA Guo-feng, et al. Research on 3D Printing Process of Continuous Carbon Fiber Composites[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(7): 96-98.
- [45] DOU H, CHENG Y, YE W, et al. Effect of Process Parameters on Tensile Mechanical Properties of 3D Printing Continuous Carbon Fiber-Reinforced PLA Composites[J]. Materials, 2020, 13(17): 3850.
- [46] LI Nan-ya Li, LINK G, WANG Ting, et al. Path-designed 3D Printing for Topological Optimized Continuous Carbon Fibre Reinforced Composite Structures[J]. Composites Part B, Engineering, 2020, 182: 107612.
- [47] LAURENZI S, MARCHETTI M. Advanced Composite Materials by Resin Transfer Molding for Aerospace Ap-

- plications[J]. *Composites and their properties*. 2012
- [48] 硅酸盐通报. 碳纤维及其复合材料[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(11): 3728.
Bulletin of Ceramics. Carbon Fiber and Its Composites[J]. *Bulletin of Ceramics*, 2020, 39(11): 3728.
- [49] LAN Xiang, ZHAO Xiao-yu. Application of Carbon Fiber Composite Materials in the Field of Industrial Robots[C]. Shanghai: Robotics, Intelligent Control and Artificial Intelligence, 2019.
- [50] ADELI H. Artificial Intelligence in Structural Engineering[J]. *Engineering Analysis*, 1986, 3(3): 154-160.
- [51] DEBORAH D L, CHUNG D. Carbon Fiber Composites[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012.
- [52] FRIEDRICH K. Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites for Future Automotive Applications[C]. Beijing: AIP Publishing LLC, 2016.
- [53] 王冰佳, 黄强, 呼慧. 复合材料及碳纤维在风力机叶片中的应用现状[J]. *电站系统工程*, 2019, 35(3): 43-45.
WANG Bing-jia, HUANG Qiang, HU Hui. Application Status of Composite Material and Carbon Fiber in Wind Turbine Blade[J]. *Power System Engineering*, 2019, 35(3): 43-45.
- [54] 别治明, 鲁艳蕊. 木构架古建筑保护设计中碳纤维复合材料的应用[J]. *塑料科技*, 2020, 48(7): 137-140.
BIE Zhi-ming, LU Yan-rui. Application of Carbon Fiber Composites in the Protection Design of Ancient Buildings with Wooden Frames[J]. *Plastics Science and Technology*, 2020, 48(7): 137-140.
- [55] 魏杰, 李利军, 彭芳辰. 热固性乙烯基酯树脂基碳纤维复合材料骨内固定物的生物安全性研究[J]. *中华临床医师杂志(电子版)*, 2012, 6(4): 907-911.
WEI Jie, LI Li-jun, PENG Fang-chen. Study on the Biological Safety of Thermosetting Vinyl Ester Resin Based Carbon Fiber Composites[J]. *Chinese Journal of Clinicians (Electronic Edition)*, 2012, 6(4): 907-911.
- [56] 张梦杰, 周春鹏, 陈华辉, 等. 碳纤维复合材料人工颅骨板急性期生物相容性的研究[J]. *中国临床神经外科杂志*, 2019, 24(6): 356-360.
ZHANG Meng-jie, ZHOU Chun-peng, CHEN Hua-hui, et al. Study on the Biocompatibility of Carbon Fiber Composite Artificial Cranial Plate in Acute Phase[J]. *Chinese Journal of Clinical Neurosurgery*, 2019, 24(6): 356-360.
- [57] 姜飞龙, 张国朋, 许佩敏, 等. 不锈钢纤维力学性能及表面形貌的影响研究[J]. *中国铸造装备与技术*, 2021, 56(2): 44-48.
JIANG Fei-long, ZHANG Guo-peng, XU Pei-min et al. Study on the Influence of Mechanical Properties and Surface Morphology for Stainless Steel Fiber[J]. *China Foundry Machinery & Technology*, 2021, 56(2): 44-48.
- [58] 宁翠娟. 碳纤维巨头对话[J]. *纺织科学研究*, 2018(3): 50-52.
NING Cui-juan. Dialogue with Carbon Fiber Giants[J]. *Textile Science Research*, 2018(3): 50-52.

(上接第 80 页)

- [8] ARJOVSKY M, CHINTALA S, BOTTOU L E O. Wasserstein Generative Adversarial Networks[C]. Sydney: the 34th International Conference on Machine Learning, 2017.
- [9] GULRAJANI I, AHMED F, ARJOVSKY M, et al. Improved Training of Wasserstein GANs[C]. Long Beach: the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems, 2017.
- [10] MAO X, LI Q, XIE H, et al. Least Squares Generative Adversarial Networks[C]. Long Beach: 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2017.
- [11] ZHANG H, GOODFELLOW I, METAXAS D, et al. Self-attention Generative Adversarial Networks[C]. Long Beach: the 36th International Conference on Machine Learning, 2019.
- [12] BROCK A, DONAHUE J, SIMONYAN K. Large Scale GAN Training for High Fidelity Natural Image Synthesis[C]. New Orleans: International Conference on Learning Representations, 2019.
- [13] ISOLA P, ZHU J, ZHOU T, et al. Image-to-image Translation with Conditional Adversarial Networks[C]. Hawaii: the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2017.
- [14] ZHU J, PARK T, ISOLA P, et al. Unpaired Image-to-image Translation Using Cycle-Consistent Adversarial Networks 2017[C]. Long Beach: 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2017.
- [15] CHOI Y, CHOI M, KIM M, et al. Stargan: Unified Generative Adversarial Networks for Multi-domain Image-to-image Translation[C]. Salt Lake: the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018.
- [16] STREIJL R C, WINKLER S, HANDS D S. Mean Opinion Score (Mos) Revisited: Methods and Applications, Limitations and Alternatives[J]. *Multimedia Systems*, 2016, 22(2): 213-227.