

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.08.029

热塑性复合材料缠绕技术现状及应用趋势分析

王承刚, 余进娟, 高信康, 何杰, 任业伟, 张学锋, 刘苏芹, 张德宾, 聂丹

(余姚中国塑料城塑料研究院有限公司, 浙江宁波 315400)

摘要:介绍了热塑性复合材料缠绕技术原理,阐述了纤维缠绕成型工艺,梳理了多类型纤维缠绕设备,主要由导纱、张力控制系统、树脂分配器、浸胶器、芯轴及固结压辊组成,从材料参数、制造参数、几何参数三方面系统地分析了影响纤维缠绕技术的工艺参数,综述了热塑性复合材料缠绕技术在不同领域的应用研究进展,包括圆柱形管道、深海石油钻井立管、压力容器、火箭发动机外壳等。基于热塑性复合材料纤维缠绕技术发展现状,凭借其发展优势,提出了该技术未来系列发展新趋势。

关键词:纤维;缠绕技术;缠绕工艺;热塑性复合材料

中图分类号: TQ320.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)08-0184-05

Analysis of Current Situation and Application Filament Winding Technology of Thermoplastic Composites

Wang Chenggang, She Jinjuan, Gao Xinkang, He Jie, Ren Yewei, Zhang Xuefeng, Liu Suqin, Zhang Debin, Nie Dan

(Yuyao Plastics City of China Research Institute, Ningbo 315400, China)

Abstract : The principle of thermoplastic composite winding technology was introduced, the fiber winding forming process was expounded, and various types of fiber winding equipment were sorted out, which mainly consist of yarn guide, tension control system, resin distributor, impregnator, mandrel and consolidation press roller. The process parameters affecting fiber winding technology were systematically analyzed from three aspects: material parameters, manufacturing parameters and geometric parameters. The application and research progress of thermoplastic composite winding technology in different fields were reviewed, including cylindrical pipe, deep-sea oil drilling riser, pressure vessel, rocket engine casing and so on. Based on the development status of fiber winding technology of thermoplastic composites and its development advantages, a new series of development trends of this technology in the future were put forward.

Keywords : fiber ; winding technology ; winding process ; thermoplastic composite

复合材料主要分为两种类型:热固性复合材料和热塑性复合材料。其中,热塑性复合材料具有密度低(1.1~1.6 g/cm³)、强度高、抗冲击好、抗疲劳好、可回收、加工成型快、造价低等突出特点,属于高性能、低成本、绿色环保的新型复合材料。纤维缠绕技术早期使用热固性树脂作为制造纤维增强复合材料的选择材料。使用热固性树脂的原因之一是其相对较低的黏度有利于纤维在连续制造过程中的浸渍。然而,热固性树脂在结构复合材料中通常表现出有限的韧性(脆性破坏),该局限性在后期的研究中表明可通过使用热塑性树脂来克服^[1]。与热固性复合材料相比,热塑性复合材料拥有更高的抗冲击性能和韧性,如聚醚醚酮(PEEK)、聚苯硫醚(PPS),可以在高温潮湿的环境中保持其力学性能^[2]。相较热固性复合材料部件,热塑性复合材料部件更容易制得,允

许使用增材制造更为复杂的几何形状,具有更好的可回收性^[3],并且不需要任何额外的压后加工。此外,热塑性复合材料可以通过加热反复成型,这为纤维缠绕复合材料制造提供优势^[4],以热塑性复合材料为基体纤维缠绕技术已成为复合材料成型工艺技术研究热点。2023年,热塑性复合材料纤维缠绕制品市场份额可达160亿元以上^[5]。

随着社会对可持续性和轻量化发展关注度日益密切,纤维缠绕技术被认为是制造轴对称复合材料结构最合适的自动化制造方法^[6]。众所周知,在工业领域,复合压力容器是通过纤维缠绕工艺制造的。从20世纪下半叶开始,航空、能源和民用建筑行业经历了对更硬、更强和更轻材料的需求。这些高要求以及日益增加的复杂性和对更高效的技术和结构的需求导致热塑性复合材料的使用增加^[7]。热塑

通信作者: 王承刚, 副研究员, 主要研究方向为高分子材料成型及加工

收稿日期: 2023-07-02

引用格式: 王承刚, 余进娟, 高信康, 等. 热塑性复合材料缠绕技术现状及应用趋势分析[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(8): 184-188.

Wang Chenggang, She Jinjuan, Gao Xinkang, et al. Analysis of current situation and application filament winding technology of thermoplastic composites[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(8): 184-188.

性复合材料纤维缠绕技术具有较高设计可变性,以及各种材料组合的可能性,使其非常适合满足飞机、汽车、船舶或电动的不同要求。应用纤维缠绕技术制得的碳纤维增强热塑性复合材料的质量轻、强度高,具有传动效率高、舒适性提高、减排等诸多优点^[8]。热塑性复合材料纤维缠绕技术已广泛应用于航天航空、汽车、建筑设备、包装机械等各个行业。

1 缠绕技术原理及工艺

1.1 缠绕技术原理

缠绕技术是将成股纤维束通过树脂槽浸渍树脂后,经纤维缠绕机,按照设定设计角度,将含浸有树脂的纤维束缠绕至芯轴之上^[9],如图1所示。热塑性复合材料缠绕技术中先将浸有热塑性树脂的预浸纱经加热至软化点^[10],再与芯轴接触点加热,通过压实辊加压,熔接成一整体。

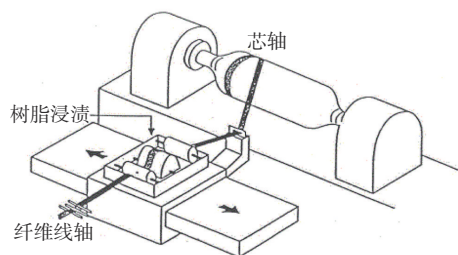


图1 纤维缠绕技术原理

1.2 缠绕成型工艺

图2为热塑性复合材料缠绕工艺示意图^[11],通过热源和压实辊进行的。纤维增强热塑性复合材料的导纱或预浸渍带由托架牵引并缠绕至旋转芯轴上,在室温或加热工况下进行固化,然后脱模,获得制品。对于圆柱体或管道的制造,如图2所示,一台简单的2轴纤维缠绕机即可满足需求^[12]。对于具有更复杂几何形状的部件的制造,例如具有半球形末端圆顶的压力容器,需要具有更多运动轴的纤维缠绕机器。纤维缠绕是一个连续的过程,在缠绕过程中不需要切断纤维增强热塑性复合材料导纱或预浸带^[13]。同时,导纱或预浸带在整个过程中通过张力控制器张紧。

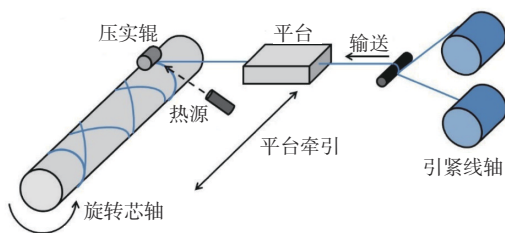


图2 热塑性复合材料纤维缠绕工艺示意图

Chen等^[14]使用热机械浸渍工艺生产连续碳纤维增强聚醚醚酮(CCF/PEEK)长丝,将PEEK颗粒熔化成纤维通过波浪形通道。当纤维通过通道时,与波浪形通道的边缘接触,从而使其浸渍更充分,探究了缠绕工艺参数对材料力学性能的影响。此外,还研究了模具的温度和拉丝速度,以提高长丝质量。结果表明,其最大拉伸强度为509.56 MPa。同样,Hu

等^[15]建立了浸渍线以获得预浸渍长丝,使用聚乳酸(PLA)作为基体,碳纤维作为支撑。在打印过程中对打印速度、喷嘴温度、层厚等参数进行了优化。在0.6 mm的层厚、60 mm/min的打印速度和215 °C的喷嘴温度下,实现了541.65 MPa的最大弯曲应力。Kishore等^[16]采用原位固结方法,利用红外加热器将前一层预热至玻璃化转变温度,以此来提高材料的力学性能和断裂性能。Ravi等^[17]使用激光预热喷嘴周围的局部区域,与标准打印工艺相比,层间强度提高了50%。Omuro等^[18]在使用碳纤维(CF)增强PLA长丝打印时,利用压力辊对打印表面施加压力。通过将纤维压在已经打印的部件上,可以最大限度地提高层的附着力,并将间隙最小化。结果表明,该材料具有很高的力学性能(拉伸强度为536 MPa,拉伸弹性模量为63.9 GPa,弯曲强度为222 MPa,弯曲弹性模量为24 GPa)。

2 纤维缠绕设备

热塑性复合材料缠绕设备方面,缠绕方式与湿法纤维缠绕相类似^[19]。缠绕设备装置中主要由导纱、张力控制系统、树脂分配器、浸胶器、芯轴及固结压辊等部分组成^[20],如图3所示。为了表示更清楚,图中未标出加热系统和用于保持夹点温度的热风枪。在卷绕之前使用模具或成型辊,此种情况下,不需要对浸渍纤维束使用校准装置。

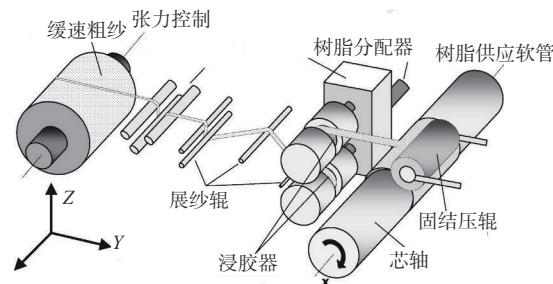


图3 纤维缠绕热塑性复合材料设备简图

Bahri等^[21]在高性能PEEK基连续纤维增强热塑性复合材料研究中,采用类似拉挤工艺的浸渍线生产连续纤维增强热塑性复合材料(C热塑性复合材料P)纤维,开发出一种预浸装置,设备简图如图4所示。它由四个主要部分组成:纤维铺展区、聚合物浸渍区、模具区和纤维缠绕区。

当前,我国已实现用数字化控制纤维缠绕设备,缠绕技术水平发展已步入成熟期。截至到目前,国内从事纤维缠绕

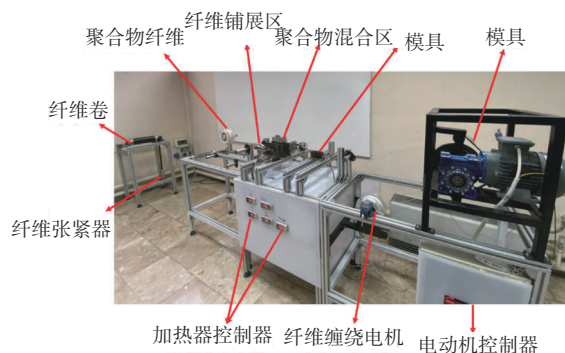


图4 纤维缠绕热塑性复合材料设备简图

设备研究和制造的单位多达30余家。哈尔滨工业大学研制的亚洲最大数控纤维缠绕机,为五轴控制、四轴联动,可替代进口设备;武汉理工大学研制了两轴、三轴、四轴、五轴、六轴控制的计算机数控缠绕机和七轴到十轴控制的缠绕机,如图5所示;哈尔滨复合材料设备开发有限公司研发出了龙门式高精度、卧式多工位、多轴纤维缠绕机;哈尔滨玻璃钢研究院、西安航天复合材料研究院等开发了环形缠绕机、球形缠绕机;连云港中通复合材料机械设备制造厂生产了定长往复式夹砂管道缠绕机等。

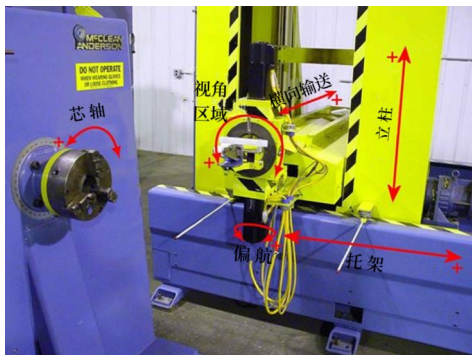
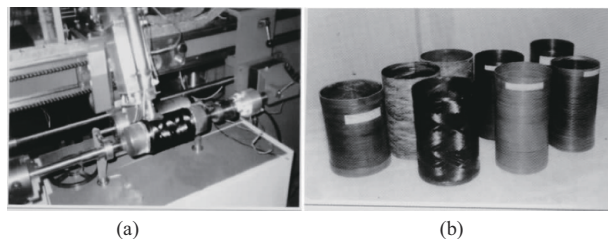


图5 六轴纤维缠绕系统示意图

多种类型的纤维缠绕机问世,为航空、航天等装备和核工业设备提供了高精度的纤维缠绕机^[22],同时也为工业生产提供了通用型纤维缠绕机,为民用事项了完整纤维缠绕生产线^[23]。Azarov等^[24]利用热塑性复合材料缠绕机开发了一种小型未命名飞行器,获得了比现有车架更小的车架质量。Goh等^[25]研究了夹层芯板的压痕和吸声性能。图6所示分别为热塑性复合材料缠绕设备和碳纤维缠绕PEEK筒制品。

近年,我国纤维缠绕技术发展迅速,金发科技股份有限公司、中广核俊尔新材料有限公司、南京航天晨光股份有限公司、浙江胜钢新材料有限公司、广州励进管道科技有限公司等企业均推出热塑性复合材料预浸带在挤出的热塑性内衬管上进行缠绕的生产线。天华化工机械及自动化研究设计院有限公司探究出的大口径弯管三层PE热缠绕技术完全解决了生产效率低、涂层厚度不均匀、机械化程度不高等缺陷问题,达到直管3PE防腐性能的检测标准^[26]。张伟超等^[27]通过优化绝热层缠绕成型工艺方案和和设备方案,实现了固体发动机绝热层缠绕成型。但由于缠绕设备研究相较国外起步稍晚,整体自动化、产业化、创新化水平与国际先进技术相比,还存在一定差距,主要以进口为主,特别是大型的数控碳



(a) (b)

a—缠绕设备;b—筒制品

图6 热塑性复合材料缠绕设备及筒形制品

纤维缠绕机。德国EHA Bolenz and Schafer公司、美国Mcclean Anderson^[28]等公司研制的纤维缠绕设备研发目前处于世界前列。裴升东团队成功研发CR1500大型碳纤维缠绕机,该缠绕机采用五轴联动,较大程度地改善了设备的各项参数控制性能。

3 影响纤维缠绕技术工艺参数

纤维缠绕被认为是一种由纤维和基体材料制备纤维增强复合材料结构的直接制造方法。缠绕技术工艺参数对纤维缠绕复合材料性能的影响,在产品性能设计和制造初就需仔细考虑。纤维缠绕复合材料的力学性能是由质量参数(纤维体积分数、孔隙率和一定载荷条件下的力学性能)表征的,这些质量参数最终是三组主要工艺参数的函数^[29],包括材料参数(如纤维和树脂性能、铺层或堆叠顺序)、制造参数(如纤维张力、树脂温度、纤维束数、缠绕回路数、缠绕速度)、几何参数(纤维轮廓路径、缠绕方式、缠绕角度和芯轴尺寸)。此外,这些主要工艺参数决定了其它衍生或次要参数,如层厚和光纤带宽(后者的要求由芯轴直径和缠绕角决定),可以被视为附加设计参数^[30]。因此,了解纤维缠绕工艺参数是非常重要的,以便生产可靠地满足或超过产品设计规格的纤维增强复合材料结构,而不过度依赖经验方法。

只有在工程应用中验证了工艺参数对复合材料质量的显著影响,才能证明纤维缠绕工艺的研究和控制是合理的。例如,复合材料压力容器的强度受纤维缠绕结构的壁厚、空隙含量和纤维体积分数值的影响很大,而这些都是由纤维缠绕的主要工艺参数(如堆叠顺序、缠绕方式和缠绕张力)决定的。因此,许多学者研究了纤维张力^[29]、缠绕模式和速度^[30]、缠绕角度^[31]等特定缠绕工艺参数对压力容器、管道等缠绕复合材料部件物理力学性能的影响^[32]。然而,管道和压力结构中的纤维缠绕质量也受到其它因素的影响,例如缠绕后纤维沿着芯轴的运动(例如纤维滑动),这些因素很难使用主要工艺参数(例如纤维张力)进行控制,并且可能导致产品性能降低或纤维带宽的高度可变性^[33]。例如,在湿纤维缠绕过程中,过度的纤维张力会增加对交织结构下层的施加压力,这可能会导致纤维向内迁移、压实及树脂流出,导致最终(固化)复合材料纤维的张力降低^[34]。

4 纤维缠绕技术的应用

纤维缠绕技术已被用于制造轴对称形状的结构应用^[35],如传动轴、管道、压力容器、储罐、杆、桅杆、导弹外壳、火箭发动机外壳和飞机机身。利用热塑性复合材料缠绕技术,美国研制出航天部件,荷兰、法国研发出风力发电机叶片,欧洲复合材料研发中心制造出应用于航空航天的发动机等^[36]。由于纤维缠绕设备的数控机床(CNC)和自动化的快速发展,纤维缠绕的应用范围已经扩大到包括某些非轴对称几何形状^[37]。国内目前有华东理工大学、武汉理工大学、哈尔滨工业大学、北京航天工艺研究所、西安航天复合材料研究所、哈尔滨玻璃钢研究院等高校院所,正在进行热塑性复合材料缠绕技术机理研究。

4.1 圆柱形管道

纤维缠绕管由于其连续和交织的纤维增强结构,表现出独特的力学性能^[38]。此外,管道的力学性能受工艺参数的影响,如缠绕角度和图案^[31]。缠绕图案的不同组合可与预浸带一起应用,以创建复合管道结构。在通过纤维缠绕的管道制造中所涉及的相对高的自动化程度允许以相对高的生产速度生产高纤维体积分数的管道,特别是连续纤维缠绕有利于大批量生产,如图7所示。在这个过程中,管道通常是通过圆柱形复合材料生产,该复合材料部件向前传输并在生产线末端坍塌,然后回到芯轴的起点^[39]。复合材料部件和保护层材料通常有聚乙烯、聚丙烯、尼龙;增强材料通常有碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维等。以这种方式,可以产生准无限长的连续管道。

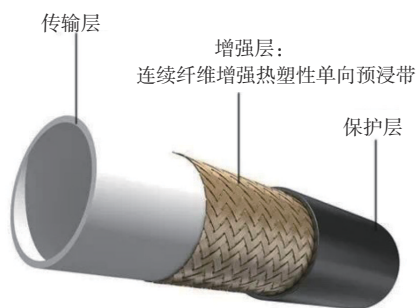


图7 复合管连续纤维缠绕基本组成示例

4.2 深海石油钻井立管

纤维缠绕结构在海上油气平台上的应用引起了许多部件的关注,其中之一就是钻井隔水管^[40]。此外,Spencer复合材料公司成功开发了一种采用金属-复合材料界面(MCI)技术的纤维缠绕钻隔管设计,并将其安装在Heidrun张力腿平台上^[41]。一般来说,纤维缠绕复合材料可以显著减轻海上石油钻井隔水管的质量,并可以在更大的水深下增加作业量。与钢立管相比,纤维绕钻立管的质量更轻,比强度更高,因此承受的轴向力和弯矩更小^[42]。此外,纤维缠绕复合材料具有优异的耐腐蚀性^[43]。

4.3 压力容器

纤维缠绕压力容器在航天和交通运输领域的许多应用中得到了广泛的认可^[44],据估计,世界每年的产量约为数10万件^[45]。此外,汽车行业对低额定天然气压力容器(35 Pa)和更高额定压力(70 MPa)容器的需求也在不断增加,用于氢气和压缩天然气的储存。纤维缠绕压力容器在其他领域的一些例子现有:潜水员用的水肺罐^[46]、医疗和航空用的氧气瓶^[47]、呼吸装置等。用纤维缠绕法制造压力容器的示意图见图8。

4.4 火箭发动机外壳

碳纤维增强聚合物制成的纤维缠绕复合材料结构已广泛应用于许多航空航天部件^[48],如火箭发动机外壳、飞行器系统、发射筒,因为与类似的金属结构相比,具有高比刚度和强度,可以显著减轻质量并提高燃油效率。事实上,结构复

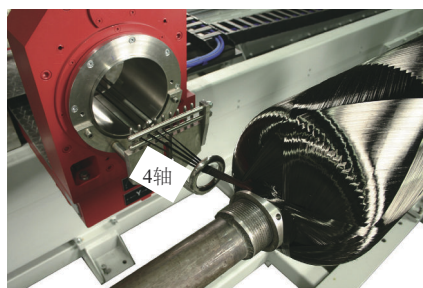


图8 压力罐纤维缠绕

合材料最早的应用之一是以纤维缠绕的火箭发动机外壳的形式出现的^[49],从2011年的北极星A2项目开始,尽管纤维缠绕已经被用于制造轴对称的航空部件外壳设计,但纤维缠绕的火箭外壳在穹顶区域可以表现出复杂的几何形状和材料特性,如图9所示^[50]。因此,在纤维缠绕的火箭发动机壳体中,精确的制造控制对于保持缠绕角和层厚偏差在规范范围内,获得理想的力学性能至关重要^[51]。

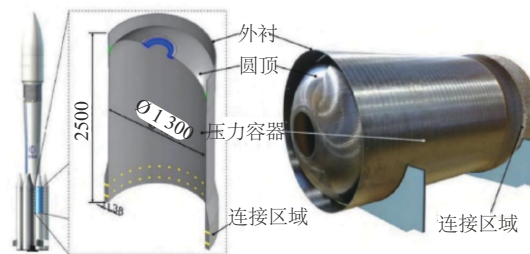


图9 纤维缠绕的火箭发动机壳体

5 展望

国内外研究已不仅仅聚焦在形状简单的复合材料部件上,还越来越趋向于复杂零件的制造,关注过程控制中的关键工。为了充分发挥热塑性复合材料缠绕技术的潜力,需要对复杂复合材料部件的制造开展进一步研究,以适应新型材料系统的使用。随着新型纺织结构的发展需求,薄层复合材料和新型树脂可有效结合起来,显著改善复合材料力学性能并使复合材料部件实现轻量化。机器人技术的进步也使得制造形状更复杂的部件成为可能。Sorrentino等^[52]利用纤维缠绕制造了非轴对称的直升机“叉”(连接直升机叶片与旋翼的结构部件)。Jonathan等^[53]使用纤维增强复合材料制作了3D纤维骨架。未来在纤维缠绕技术中采用可生物降解纤维有待进一步研究,使其普遍适用于湿式纤维缠绕工艺。多轴纤维缠绕技术将大规模应用在建筑和结构领域。

计算机辅助系统的迅速发展,引得复合材料结构的纤维缠绕实现数控缠绕机自动化进程加快,目前,国内有多家企业和科研院所已在研发纤维缠绕热塑性复合材料专用生产线,探究智能化复合材料制造,同时,在热塑性复合材料纤维缠绕方面也积极进行有效探索。我国纤维缠绕技术、装备及产业未来的发展趋势主要呈现以下四个方面:

- (1)生产装备功能化、专业化、自动化;
- (2)配套数字化应用智能软件功能更全面、更高效;
- (3)缠绕成型工艺复合化、构件大型多样化、制品功能一

体化;

(4)机器人技术广泛化、普遍化。

纤维缠绕热塑性复合材料技术和装备发展方向更加趋向精细化、数字化和智能化,其制品也向着功能化、高性能及低成本方向发展。

参考文献

- [1] Dhinakaran V, et al. *Materials & Design*, 2020, 27(1):812–815.
- [2] Cao Z, et al. *Materials*, 2020, 13(1):41–47.
- [3] 张晓军,等. 推进技术, 2023, 43(2):10–20.
Zhang Xiaojun, et al. *Journal of Propulsion*, 2023, 43(2):10–20.
- [4] Ahn S, et al. *Trends and Prospects in Fibre Composites*, 2021, 11(21). DOI:10.3390/app.10266.
- [5] Daniel K, et al. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 14(1): 972–981.
- [6] 张红卫,等. 石油化工技术与经济, 2021, 37(3):30–34.
Zhang Hongwei, et al. *Technology & Economics in Petrochemicals*, 2021, 37(3):30–34.
- [7] Ma Q, et al. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2021, 235(19): 4 254–4 272.
- [8] 廖国峰,等. 化工新型材料, 2021, 49(8):101–106.
Liao Guofeng, et al. *New Chemical Materials*, 2021, 49(8): 101–106.
- [9] Chen S J, et al. *Composite Structures*, 2021, 276(11):1 015–1 024.
- [10] Bellini C, et al. *Materials and Manufacturing Processes*, 2022, 37(5):559–567.
- [11] Gonzalez H, et al. *Comprehensive Composite Materials II*, 2018, 14:556–577.
- [12] Bhudolia S, et al. *Advanced Composites for Marine Engineering*, 2015, 8(13):337–343.
- [13] Komuraiah A, et al. *Mechanics of Composite Materials*, 2014, 50(3):359–376.
- [14] Chen Y, et al. *Composite Structures*, 2021, 281(1). DOI:10.1016/j.compstruct.2021.114975.
- [15] Hu Q, et al. *Journal Materials Science*, 2018, 53(11):1 887–1 898.
- [16] Kishore V, et al. *Additive Manufacturing*, 2017, 14(1):7–12.
- [17] Ravi A K, et al. *Journal of Manufacturing Processes*, 2016, 24(1): 179–185.
- [18] Omuro R, et al. *Additive Manufacturing*, 2018, 8(1):20–25.
- [19] Ma Quanjin, et al. *Polymers and Polymer Composites*, 2020, 28(7):462–472.
- [20] Andrianov, et al. *Journal of Energy Storage*, 2022, 14(5):1 066–1 074.
- [21] Bahri B, et al. *Composites Science and Technology*, 2023, 167(13):107–119.
- [22] Ma Q, et al. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 46(3): 1 645–1 651.
- [23] Li S, et al. *Composite Structures*, 2020, 232(15):11–16.
- [24] Azarov A V, et al. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 169(2): 157–163.
- [25] Goh G D, et al. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2022, 24(17):1 206–1 215.
- [26] 屈磊,等. 生产实践, 2019, 7(32):119–124.
Qu Lei, et al. *Production Practice*, 2019, 7(32):119–124.
- [27] 张伟超等. 复合材料科学与工程, 2023(13):79–86.
Zhang Weichao, et al. *Composites Science and Engineering*, 2023(13):79–86.
- [28] Frketic J, et al. *Additive Manufacturing*, 2017, 14(17):69–86.
- [29] 曹学文. 碳纤维复合材料缠绕成型工艺参数影响规律及优化研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2022.
Cao Xuewen. *Research on the influence and optimization of winding molding process parameters of carbon fiber composite materials*[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2022.
- [30] Kara M, et al. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2019, 19(4):1 181–1 186.
- [31] Ma Quanjin, et al. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2019, 24(23):1 067–1 089.
- [32] Farhood N H, et al. *Emerging Materials Research*, 2021, 10(5): 206–217.
- [33] Bakar M S, et al. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(1):654–666.
- [34] Hopmann C, et al. *Polymer Engineering and Science*, 2021, 61(5): 1 353–1 367.
- [35] Quanjin M, et al. *Composites Science and Technology*, 2018, 5(12):1 668–1 676.
- [36] Andrianov A, et al. *Polymer*, 2022, 14(5). DOI: 10.3390/polym.4051066.
- [37] Arhant, et al. *Composite Structures*, 2019, 212(15):535–546.
- [38] Dhinakaran, et al. *Material Today: Proceedings*, 2020, 27(2): 812–815.
- [39] 黄泽升,等. 现代纺织技术, 2023, 31(2):230–243.
Huang Zesheng, et al. *Advanced Textile Technology*, 2023, 31(2): 230–243.
- [40] Sobrinho, et al. *Composites Science and Technology*, 2011, 14(3): 287–298.
- [41] Erik V R, et al. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 243(15): 93–110.
- [42] Wang X L, et al. *International Journal of Hydrogen storage Energy*, 2022, 47(13):8 382–8 408.
- [43] Stabla P, et al. *Composite Structures*, 2022, 292(15). DOI: 10.1016/j.compstruct. 2022. 115644.
- [44] Vande W N, et al. *Additive Manufacturing*, 2020, 31(1). DOI: 10.1016/j.addma. 2020. 101634.
- [45] Bai C, et al. *Polymer Composites*, 2021, 42(10):5 035–5 050.
- [46] Weerts R A, et al. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2021, 40(15):594–605.
- [47] Alves M P, et al. *Polymer Composites*, 2022, 15(14):51–52.
- [48] Sankar R, et al. *Journal of the Japanese Design Engineering Society*, 2015, 5(5):102–128.
- [49] Ma Quanjin et al. *Forces in Mechanics*, 2023, 10(1). DOI:10.1016/j.finmec. 100170.
- [50] Aleksander B, et al. *Composite Structures*, 2022, 304(1). DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.116337.
- [51] Collombet F, et al. *Mechanics Industry*, 2019, 20(8):8–12.
- [52] Sorrentino L, et al. *Composite Structures*, 2019, 220(11):699–707.
- [53] Jonathan H, et al. *Composite Structures*, 2021, 268(15):113–124.