

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.05.009

3D打印用连续纤维复合丝材分束浸渍工艺

邹东明^{1,2}, 单忠德^{1,3}, 刘丰^{1,2}, 邹爱玲^{1,2}, 刘晓军^{1,2}, 姜稀滨^{1,2}(1. 机械科学研究总院先进成形技术与装备国家重点实验室, 北京 100044; 2. 北京机科国创轻量化科学研究院有限公司, 北京 100083;
3. 南京航空航天大学, 南京 210016)

摘要: 作为复合材料中的增强相, 连续纤维在复合材料成形件受载过程中承担主要载荷。研究表明, 纤维含量的提升有利于提高复合材料成形件的力学性能, 然而高纤维含量复合材料在增材制造成形过程中由于树脂含量低、树脂浸渍效果差, 容易出现表面质量差、层间结合能力弱等现象, 严重影响成形件的成形质量与力学性能。为提高树脂浸渍程度, 对比了不同纤维含量与打印温度下的尼龙(PA)12树脂/连续芳纶纤维(CAF)复合丝材及成形件的拉伸强度, 针对高纤维含量CAF增强PA12复合丝材的制备提出了一种分束浸渍的工艺方法。研究结果表明, 树脂浸渍不充分限制了高纤维含量复合材料的拉伸强度, 对于纤维含量为57.60%的CAF增强PA12复合丝材, 采用分束浸渍工艺制备的PA12/CAF复合丝材, 最高拉伸强度可达1 337.58 MPa, 对比未采用分束浸渍工艺制备的复丝提升21%, 树脂浸渍效果得到了有效提升。

关键词: 高纤维含量; 力学性能; 3D打印; 浸渍工艺

中图分类号: TH145.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)05-0056-06

Beam Splitting Impregnation Process of Continuous Fiber Composite Wire for 3D Printing

Zou Dongming^{1,2}, Shan Zhongde^{1,3}, Liu Feng^{1,2}, Zou Ailing^{1,2}, Liu Xiaojun^{1,2}, Jiang Xibin^{1,2}(1. State Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment, China Academy of Machinery Science and Technology, Beijing 100044, China; 2. Beijing National Innovation Institute of Lightweight Co. Ltd., Beijing 100083, China;
3. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract : As a reinforcing phase in composite materials, continuous fibers bear the main load during the loading process of composite parts. Research shows that increasing the fiber content is beneficial to improving the mechanical properties of composite parts. However, due to the low resin content and poor resin impregnation effect, high fiber content composites are prone to poor surface quality and weak interlayer bonding ability during the additive manufacturing process, which seriously affect the forming quality and mechanical properties of the composite parts. In order to improve the degree of resin impregnation, the tensile strength of continuous aramid fiber (CAF) reinforced nylon (PA) 12 resin composite wires and composite parts under different fiber content and printing temperature were compared, and a beam splitting impregnation process for the preparation of high fiber content CAF reinforced PA12 composite wires was proposed. The research results show that insufficient resin impregnation limits the tensile strength of high fiber content composites. For PA12/CAF composite wires with 57.60% fiber content, the maximum tensile strength of PA12/CAF composite wires prepared using the beam splitting impregnation process can reach 1 337.58 MPa, which is up to 21% higher than that of composite wires prepared without the beam splitting impregnation process. The resin impregnation effect has been effectively improved.

Keywords: high fiber content; mechanical property; 3D printing; impregnation process

基金项目: 中国机械总院技术发展基金项目(332202Q9), 国防科技基础加强计划项目

通信作者: 单忠德, 博士, 研究员, 主要从事纤维增强复合材料增材制造研究

收稿日期: 2023-02-26

引用格式: 邹东明, 单忠德, 刘丰, 等. 3D打印用连续纤维复合丝材分束浸渍工艺[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(5): 56-61.

Zou Dongming, Shan Zhongde, Liu Feng, et al. Beam splitting impregnation process of continuous fiber composite wire for 3D printing[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(5): 56-61.

芳纶纤维(AF)性能优异,具有高比强度、高比模量、耐高温、耐腐蚀等特点,以芳纶纤维作为增强相的连续纤维增强复合材料在国防军工和航空航天等领域得到了广泛的应用。在纤维增强复合材料成形技术方面,相较于传统复合材料成形技术,连续纤维增强复合材料增材制造成形技术具有高效率、自动化、材料利用率高等优势,是一项应用前景广阔的先进复合材料成形技术^[1-5]。基于熔融沉积成型技术的连续纤维复合丝材增材制造技术因其工艺稳定、成本低、效率高的特点,成为了普及度较高的一种连续纤维复合丝材增材制造成形技术。近年来,国内外众多学者对其进行了广泛的研究,发现成形过程中的打印温度、打印层间距、打印道间距以及纤维含量等均会对纤维增强复合材料的力学性能产生影响^[6-9]。

纤维作为纤维增强复合材料中的增强相,在复合材料受力时承担主要载荷。Dickson^[10], Chacon等^[11-12]研究均表明适量增加纤维体积含量能够提高复合材料的力学性能,然而过高的纤维体积含量则会降低纤维与基体之间的界面结合性能,并带来更多孔隙缺陷。何莉萍等^[13]研究了改性麻纤维含量对黄麻纤维(JF)增强聚丙烯(PP)复合材料力学性能的影响规律及相关作用机制,研究发现随着纤维含量提升,PP/JF复合材料的拉伸强度和弯曲强度均呈上升趋势,最高提升分别达到51.4%和66.1%。

笔者针对基于熔融挤出的高纤维含量连续AF增强尼龙(PA)树脂复合材料增材制造成形技术,分析了高纤维含量复合丝材在增材制造成形以及力学性能上的缺陷,并提出了一种分束浸渍的高纤维含量复丝制备方法,随后通过力学性能测试、破坏模式分析以及体式显微镜观察分析了分束浸渍对提高树脂浸渍程度的影响,验证了工艺的有效性。

1 实验部分

1.1 主要原材料

AF:泰普龙529S,线密度为1500D,烟台泰和新材料股份有限公司;

PA12:TR90,瑞士EMS公司。

1.2 主要仪器及设备

万能材料试验机:INSTRON5567型,美国英斯特朗公司;

螺杆挤出式连续纤维复合材料拉丝机:自制;

连续纤维复合材料增材制造成形原理机:自制;

体视显微镜:SZ61TR型,日本OLYMPUS公司。

1.3 丝材与构件制备

复合丝材制备的核心工艺如图3所示,连续芳纶纤维干丝通过熔融浸渍模具,在浸渍流道中由熔融PA12树脂浸渍,之后由牵引机构从复合丝材挤出模口拉出,树脂凝固后获得连续芳纶纤维增强PA12复合丝材。在模具出口直径固定的情况下,使用纤维线密度越高,获得复合丝材的纤维含量越高。

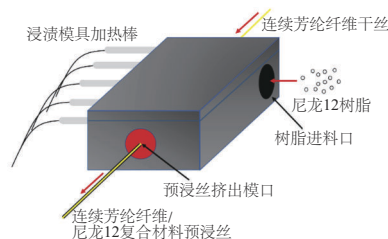


图1 复合丝材制备原理图

树脂在浸渍纤维的过程中,浸渍效果主要与浸渍时间、浸渍压力、树脂渗透率以及待浸渍纤维束的半径相关^[14-17]。在其他因素保持不变的情况下,待浸渍纤维束的半径越大,完全浸渍所需时间越长。因此提出一种高纤维含量芳纶纤维分束浸渍工艺,采用如图2所示的分束浸渍模具,将大束芳纶纤维分为若干束小纤维束在模具中熔融浸渍,模具采用楔形流道设计,可在局部提供更大的压力,利于树脂浸渍纤维。最终,在模具中充分浸渍的芳纶纤维通过模口后冷却获得连续纤维复合丝材。

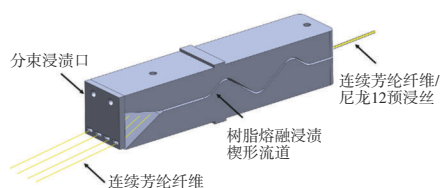


图2 分束浸渍示意图

根据是否采用分束浸渍工艺分别制备纤维规格为1500D,3000D,4500D,6000D的连续芳纶纤维增强PA树脂分束复合丝材和整束复合丝材,各规格纤维分别由1股、2股、3股、4股规格为1500D的芳纶纤维合束制成。在整束浸渍工艺中,合束后的连续纤维束直接通过浸渍模具与树脂浸渍;在分束浸渍工艺中,则将整束纤维按1500D一股分为多股纤维进入浸渍模具分别浸渍。其中各规格制丝基础

工艺参数见表1。增材制造基础工艺参数见表2。

表1 CAF/PA12复合丝材制丝工艺参数

项目	参数
拉丝速度/(mm·s ⁻¹)	5
浸渍温度/℃	260
模口直径/mm	1.2
复合丝材张力/N	12.5
浸渍压强/MPa	0.2
分束股数	2/3/4
纤维质量含量/%	24.41, 30.12, 44.71, 57.60

表2 CAF/PA12复合丝材打印工艺参数

项目	参数
打印速度/(mm·s ⁻¹)	3
打印温度/℃	265/270/275/280/285/290
打印喷嘴直径/mm	1.5
打印层间高度/mm	0.7
打印道间距/mm	1.1
热床温度/℃	70
样件规格/mm	250×12.5×2

1.4 性能检测

复合丝材拉伸强度测试参照GB/T3362-2017, 复丝长度取200 mm, 加载速率为2 mm/min。打印样件拉伸强度测试参照GB/T3354-2014, 样件尺寸为长250 mm, 宽12.5 mm, 高2 mm, 加载速率为2 mm/min。

2 结果与讨论

2.1 整束复丝成形构件性能表征

(1) 整束复丝成形构件拉伸性能表征。

使用纤维规格为1500D, 3000D, 4500D, 6000D的芳纶纤维制备了纤维含量分别为24.41%, 30.12%, 44.71%, 57.60%的整束复合丝材, 在不同的打印温度下打印拉伸试样并进行拉伸试验, 结果如图3所示, 发现高纤维含量拉伸样件的力学性能较低纤维含量拉伸样件优异, 当纤维含量为57.60%, 打印温度在290℃时样件的拉伸强度最高, 可达到716.33 MPa。

观察各组拉伸强度变化趋势可以发现: 随着打印温度的提高, 高纤维含量拉伸样件的拉伸强度有

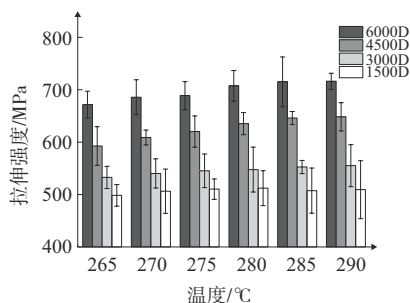


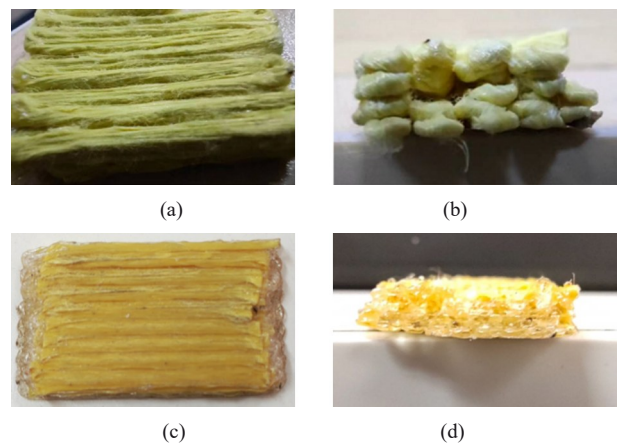
图3 打印温度对不同纤维含量拉伸试样拉伸强度影响

所提高, 当打印温度为290℃, 纤维含量为57.60%时试样的拉伸强度为716.33 MPa, 较同纤维含量, 打印温度为265℃时的试样拉伸强度提升约6.1%。分析原因为: 复合丝材除了制丝过程在浸渍模具中会加热熔融以外, 打印成形过程中丝材在打印头中的熔融腔室内会二次熔融, 而打印成形过程中的加热熔融会对复合丝材的树脂浸渍起到正向作用。因此提高打印温度时, PA树脂的流动性提高, 复合丝材的树脂浸渍程度相对提高, 试样的拉伸强度随之增强。当温度超过285℃时, 此时二次熔融浸渍的效果不再明显, 在实际打印过程中, 过高的温度会导致材料焦糊, 影响试样的力学性能。

(2) 整束复丝成形构件缺陷分析。

分析纤维含量分别为57.60%和24.41%的打印试样的表面形貌, 如图4所示。图4a、图4c分别为高纤维含量样件与低纤维含量样件的成形表面, 通过对比可以发现, 相比低纤维含量的复合材料增材制造样件, 高纤维含量复合丝材增材制造样件的表面树脂含量较少, 甚至出现树脂无法完全包裹纤维导致纤维裸露的情况。图4b、图4d分别为高纤维含量样件与低纤维含量样件的层、道间结合情况, 对比可以发现由于树脂含量低, 复合丝材增材制造成形过程中的层间与道间结合能力下降, 构件成形质量较差, 表面较粗糙; 当纤维含量降低时, 由于树脂量增大, 样件的表面基本被树脂覆盖, 成形表面较光滑, 在试样的两边出现成形过程中由喷头挤压复合丝材形成的树脂富集区, 试样的层、道间结合效果也较好, 成形质量较好。

分析原因: 树脂浸渍纤维主要分为轴向浸渍与径向浸渍两部分, 而高纤维含量复合丝材树脂浸渍



a, b—纤维含量57.60%(俯视、侧视); c, d—纤维含量24.41%(俯视、侧视)

图4 高纤维含量连续纤维增强复合材料增材制造成形缺陷

程度低的主要原因为树脂径向浸渍效果差。如图5所示,复合丝材容易形成外缘树脂包裹,内部未浸渍干纤维束集中分布的结构。在高纤维含量复合丝材增材制造过程中,由于复合丝材与打印喷头、已成型表面、打印平台等发生刚蹭,熔融外缘树脂完整性被破坏,内部干纤维失去约束,发生了如图4所示的干纤维裸露、层道间结合能力差等问题。

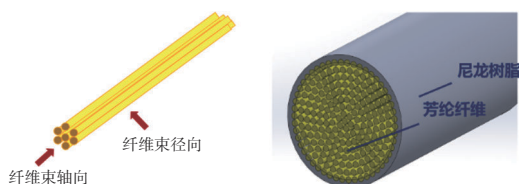


图5 高纤维含量复合丝材树脂浸渍示意图

2.2 分束浸渍对复合丝材性能影响

(1) 复合丝材拉伸性能分析。

使用纤维规格为6000D,4500D和3000D的芳纶纤维分别制备了纤维质量含量为57.60%,44.71%和30.12%的整束复合丝材和分束复合丝材。图6为分束浸渍工艺对不同纤维含量复合丝材拉伸强度的影响。从图6可以看出,随着复合丝材纤维含量的提高,整束复合丝材拉伸强度从889.70 MPa提升至1 105.44 MPa,提升约24.25%;分束复合丝材拉伸强度从921.34 MPa提升至1 337.58 MPa,提升约45.18%。

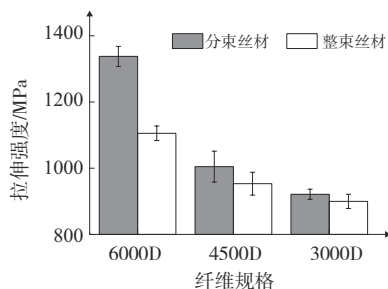
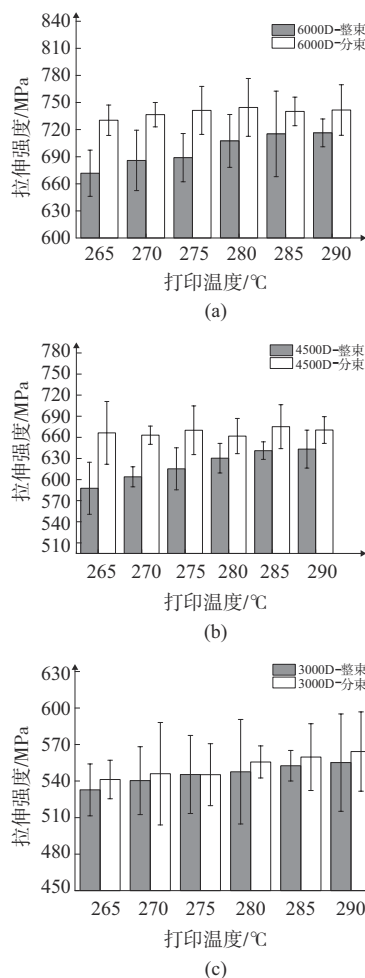


图6 分束浸渍工艺对不同纤维含量复合丝材拉伸强度的影响

对比每一种相同芳纶纤维规格的复合丝材拉伸强度可以发现,采用分束浸渍方法制备的分束复丝拉伸强度均高于未采用分束浸渍方法制备的整束复丝的拉伸强度,因此采用分束浸渍工艺对复合丝材的拉伸强度有明显影响。且当纤维含量为30.12%时,分束浸渍工艺对拉伸强度的提升仅为2.41%,而当纤维含量提升至57.60%时,分束浸渍工艺对拉伸强度的提升可达21.00%。因此认为随着纤维含量的提升,分束浸渍工艺对复合丝材拉伸强度的增强效果也随之提升。

分别使用整束浸渍复合丝材与分束浸渍复合丝材在不同打印温度下打印拉伸试样并进行拉伸强度对比,见图7所示。由图7可以看出,与复合丝材拉伸强度对比实验结果类似,分束浸渍工艺能够在一定程度上提高成形件的力学性能,当纤维含量为57.60%,打印温度为280℃时,试样的拉伸强度最大,为744.58 MPa。且成形件的纤维含量越高,分束浸渍工艺对试样拉伸强度的提升就越明显,当纤维含量为44.71%,打印温度为265℃时,分束浸渍工艺对试样拉伸强度的提升效果最好,此时试样的拉伸强度较未采用分束浸渍工艺提升约13.29%。



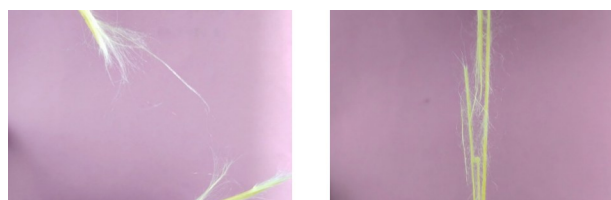
纤维规格:a—6000D;b—4500D;c—3000D

图7 打印温度及分束浸渍工艺对不同纤维含量成形件拉伸强度影响

(2) 复合丝材形貌表征。

分别观察纤维含量为57.60%的整束浸渍复合丝材与分束浸渍复合丝材的拉伸破坏宏观断面发现,高纤维含量复合丝材在浸渍过程中确实存在浸渍不充分的现象。在浸渍过程中,由于纤维束线密

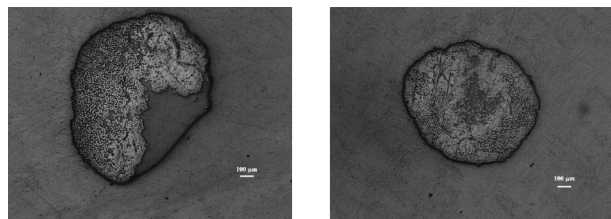
度高,熔融树脂难以完全浸渍纤维束内部,复合丝材易形成外缘树脂浸渍,内部为干纤维束的结构。因此在拉伸破坏时,整束复合丝材断面呈现离散的“絮状”干纤维分布。采用分束浸渍工艺时,由于多束纤维同步进行熔融浸渍并通过模口收束合成复合丝材,浸渍时纤维束线密度降低,浸渍效率提高,且内部多束纤维均外缘包裹树脂,因此复合丝材并未像单束纤维浸渍一样呈现离散的“絮状”干纤维分布,而是形成类似于多束纤维劈裂的破坏模式。因此认为采用分束浸渍工艺时复合丝材内部有树脂填充,浸渍效果得到提升。



(a) (b)
a—整束复合丝材;b—分束复合丝材

图8 复合丝材拉伸破坏宏观断面

进一步观察复合丝材截面的显微镜照片可以发现,整束复合丝材的树脂浸渍程度低,在制丝过程中复丝内部充满大量且集中的未浸渍干纤维。且复丝内部纤维束截面整体呈凹形,这是因为在通过模口时,复丝受到径向挤压,干纤维丝在内部滑动。整束复丝由于浸渍程度低、未浸渍干纤维多,因此内部纤维排布在受到外力时容易变形,纤维束向周边挤压最终呈现凹形的截面轮廓;分束浸渍的内部不存在大片、集中的未浸渍区域,虽然纤维束中心部分仍未充分浸渍,但在复丝受到模具出口挤压时由于内部树脂含量高,可以保持内部纤维排布相对稳定,因此变形程度较小。



(a) (b)
a—整束复合丝材;b—分束复合丝材

图9 复合丝材显微镜照片

3 结论

针对高纤维含量复合丝材增材制造成形缺陷,分析了树脂浸渍程度对复合丝材质量的影响,提出了一种分束浸渍的复合丝材制备工艺,并得出了如

下结论:

(1) 在制备高纤维含量复合丝材时,由于单束纤维线密度增大、浸渍半径提高、树脂浸渍难度随之提高,易导致树脂浸渍不充分,影响复合材料的拉伸强度。

(2) 采用分束浸渍工艺会将单束大纤维分为若干束小纤维浸渍,能够稳定纤维束在复合丝材内部的排布、在复合丝材内部孔隙填充更多树脂,提高树脂的浸渍程度。

(3) 分束浸渍工艺对树脂浸渍程度的增强效果随着纤维含量增加而提升,采用分束浸渍工艺获得的复合丝材最高拉伸强度可达到1 337.58 MPa,较未采用分束浸渍工艺制备的复合丝材提升约为21.00%,采用分束浸渍工艺获得的复合材料增材制造成形件拉伸强度最高提升可达到13.29%。

参考文献

- [1] 秦若森,孙守政,韩振宇,等.3D打印连续纤维增强热塑性复合材料成型质量的研究进展[J].材料导报,2022,36(17):200-208.
Qin Ruosen, Sun Shouzheng, Han Zhenyu, et al. 3D printing for continuous fiber-reinforced thermoplastic composites: a review on molding quality[J]. Materials Reports, 2022, 36(17):200-208.
- [2] 於琳涛,聂祥樊,罗楚养.基于熔融沉积成型的连续纤维增强复合材料3D打印研究进展[J].航空兵器:1-14[2023-03-03]. DOI: 10.12312/ISSN.1673-5048.2022.0217.
Yu Lintao, Nie Xiangfan, Luo Chuyang. Progress in 3D printing of continuous fiber reinforced composites based on fused deposition modeling[J]. Aero Weaponry: 1-14[2023-03-03]. DOI: 10.12312/ISSN.1673-5048.2022.0217.
- [3] Luo M A, Tian X A, Shang J A, et al. Impregnation and interlayer bonding behaviours of 3D-printed continuous carbon-fiber-reinforced poly-ether-ether-ketone composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 121:130-138.
- [4] Kishore V, Ajinjeru C, Nycz A, et al. Infrared preheating to improve interlayer strength of big area additive manufacturing (BAAM) components[J]. Additive Manufacturing, 2016, 14:7-12.
- [5] Karamooz Ravari M R, Kadkhodaei M, Badrossamay M, et al. Numerical investigation on mechanical properties of cellular lattice structures fabricated by fused deposition modeling[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2014, 88. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2014.08.009.
- [6] 黄基,刘家豪,张凌鹤,等.连续丝材增强复合材料增材制造研究进展[J].机械设计与制造工程,2022,51(4):7-20.
Huang Ji, Liu Jiahao, Zhang Linghe, et al. Research progress on continuous filament reinforced composite additive manufacturing [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2022, 51(4): 7-20.
- [7] 陈向明,姚辽军,果立成,等.3D打印连续纤维增强复合材料研究现状综述[J].航空学报,2021,42(10):167-191.

- Chen Xiangming, Yao Liaojun, Guo Licheng, et al. 3D printed continuous fiber-reinforced composite: State of the art and perspectives[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(10): 167–191.
- [8] 田小永,张亚园,刘腾飞,等.连续碳纤维增强尼龙复合材料预浸丝制备与3D打印性能研究[J].*航空制造技术*, 2021, 64(15):24–33.
- Tian Xiaoyong, Zhang Yayuan, Liu Tengfei, et al. Prepreg preparation and 3D printing of continuous carbon fiber reinforced nylon composite[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2021, 64(15):24–33.
- [9] 华泽天,薛平,贾明印,等.粉末浸渍法制备连续纤维增强热塑性复合材料研究进展[J].*塑料科技*, 2022, 50(10):118–122.
- Hua Zetian, Xue Ping, Jia Mingyin, et al. Research progress of continuous fiber reinforced thermoplastic composites prepared by powder impregnation[J]. *Plastics Science and Technology*, 2022, 50(10):118–122.
- [10] Dickson A N, Barry J N, McDonnell K A, et al. Fabrication of continuous carbon, glass, Kevlar fiber reinforced composites using additive manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2017, 16:146–152.
- [11] Chacon J M, Caminero M A, Nunez P J, et al. Additive manufacturing of continuous fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: Effects of process parameters on mechanical properties[J]. *Composites Science and Technology*, 2019, 181. DOI:10.1016/j.compositesb.2015.06.013.
- [12] Caminero M A, Chacon J M, Garciamoreno I, et al. Impact damage resistance of 3D printed continuous fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 148:93–103.
- [13] 何莉萍,刘龙镇,苏胜培,等.纤维含量对黄麻纤维增强树脂基复合材料力学与热性能的影响[J].*复合材料学报*:1-10[2023-01-05]. DOI:10.13801/j.cnki.fhclxb.20220802.001.
- He Liping, Liu Longzhen, Su Shengpei, et al. Effects of fiber addition on the mechanical and thermal properties of jute fiber reinforced resin composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*: 1-10 [2023-01-05]. DOI:10.13801/j.cnki.fhclxb.20220802.001.
- [14] 袁满,何亚东,李锐,等.连续纤维增强热塑性复合材料熔融浸渍模型[J].*塑料科技*, 2019, 47(7):12–17.
- Yuan Man, He Yadong, Li Rui, et al. Melt impregnation model of continuous fiber reinforced thermoplastic composites[J]. *Plastics Science and Technology*, 2019, 47(7):12–17.
- [15] 唐可,信春玲,张聪,等.连续纤维增强聚丙烯复合材料的熔融浸渍理论模型与表征[J].*北京化工大学学报:自然科学版*, 2015, 42(4):44–49.
- Tang Ke, Xin Chunling, Zhang Cong, et al. The impregnation model and characterization of continuous fiber reinforced polypropylene composites[J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science*, 2015, 42(4):44–49.
- [16] 段梦思.微突起阵列辅助开纤的连续碳纤维增强热塑性预浸料制备工艺研究[D].镇江:江苏大学,2020. DOI:10.27170/d.cnki.gjsuu.2020.000022.
- Duan Mengsi. Study on preparation process of continuous carbon fiber reinforced thermoplastic prepreg with microprotrusion array aided fiber spreading[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020. DOI:10.27170/d.cnki.gjsuu.2020.000022.
- [17] Springer G S. Manufacturing thermoplastic matrix composites. [J]. *Manufacturing Thermoplastic Matrix Composites*, 1987, 21: 1 017. DOI: 10.1177/002199838702101103.

(上接第28页)

- [20] 宿延涛,封宇,勾阳飞,等.磁性TBP萃淋树脂的制备及吸附铀的性能测试[J].*湿法冶金*, 2019, 38(2):110–114.
- Su Yantao, Feng Yu, Gou Yangfei, et al. Preparation of magnetic TBP extract resin and performance test of adsorbed uranium[J]. *Hydrometallurgy*, 2019, 38(2):110–114.
- [21] 崔红敏.离子液体萃淋树脂的制备及在稀土等金属分离中的应用[D].北京:中国科学院大学,2013.
- Cui Hongmin. Preparation of ionic liquid levetrel resins their application rare earths or other metals separation[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [22] 周峻平.三种苯乙烯二乙烯苯系离子交换树脂对铀酰离子吸附行为研究[D].南昌:东华理工大学,2019.
- Zhou Junping. Study on adsorption behavior of uranyl ions by three styrene divinylbenzene ion exchange resins[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2019.
- [23] 魏笑峰.汽车尾气催化剂中贵金属Pt, Pd, Rh的分析研究[D].福州:福州大学,2006.
- Wei Xiaofeng. Analysis of precious metals Pt, Pd and Rh in automobile exhaust catalysts[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2006.