

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.04.009

多材料复合成型对熔丝制造模型拉伸性能的影响

王琛, 李靖瑶, 张晨赟, 于嘉浩

(南京林业大学家居与工业设计学院, 南京 210037)

摘要: 为探究多材料复合成型方法对熔丝制造(FFF)模型结构性能的影响,并将其推广应用于 3D 打印产品原型的制造中。笔者以 FFF 模型的拉伸性能为研究对象,针对哑铃型试样创新地设计了一种夹芯板式复合结构,通过 FFF 3D 打印机的自动进料系统实现了复合结构的制造。随后,筛选并分析了界面打印温度、界面打印速度和界面打印流量三个因素对 FFF 模型拉伸性能的影响,总结出优选界面打印参数。最后,基于优选界面打印参数,对单一材料成型方法和多材料复合成型方法下 FFF 模型的拉伸性能进行了对比。研究结果表明,随着界面打印温度的升高、界面打印速度的降低和界面打印流量的增大,FFF 模型的拉伸强度和拉伸弹性模量随之增大,拉伸性能逐渐增强;优选界面打印参数为:温度 230 °C、速度 60 mm/s、流量 110%;与单一材料打印的 FFF 模型相比,20%、40%和 60%复合层厚度下的 FFF 模型的拉伸强度分别提高了 37.27%、59.67%和 92.63%,拉伸弹性模量分别提高了 37.32%、62.38%和 93.24%,说明多材料复合成型方法对 FFF 模型拉伸性能的增强效果明显。

关键词: 多材料;复合成型;夹芯板;熔丝制造模型;拉伸性能

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)04-0063-06

Effects of multi-material compound moulding on tensile properties of fused filament fabrication models

WANG Chen, LI Jingyao, ZHANG Chenyun, YU Jiahao

(College of Home and Industrial, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract : In order to investigate the effects of multi-material composite moulding method on the structural properties of fused filament fabrication (FFF) models, and to promote its application in the fabrication of 3D printed product prototypes. Taking the tensile properties of the FFF model as the research object, a sandwich plate-type composite structure was innovatively designed for dumbbell-shaped specimens, and the fabrication of the composite structure was realised through the automatic material system of the FFF 3D printer. Subsequently, the effects of three factors, namely interface printing temperature, interface printing speed and interface printing flow rate, on the tensile properties of the FFF model were screened and analysed, and the preferred interface printing parameters were summarised. Finally, based on the preferred interfacial printing parameters, the tensile properties of FFF models under by single-material and multi-material composite forming methods were compared. The results show that the tensile strength and tensile elastic modulus of the FFF model increase with the increase of the interface printing temperature, the decrease of the interface printing speed and the increase of the interface printing flow rate, and resulting in the gradual enhancement of tensile properties. The preferred interface printing parameters are as follows: temperature 230 °C, speed 60 mm/s, and flow rate 110%. Compared with the FFF model printed by a single material, the tensile strength of the FFF model with 20%, 40% and 60% composite layer thicknesses increase by 37.27%, 59.67% and 92.63%, respectively, and the tensile elastic modulus increase by 37.32%, 62.38% and 93.24%, respectively, which indicates that the multi-material composite moulding method has obvious effect on the enhancement of tensile properties of the FFF model.

Keywords : multi-material ; compound moulding ; sandwich panel ; fused deposition modelling ; tensile property

熔丝制造(FFF)工艺是最常用的 3D 打印技术之一,其采用层层堆积的方式来制造产品原型,具有工艺原理简单、材料种类多、成型效率高等特点^[1]。传统的 FFF 3D 打印通常采用单一材料构建方式,即

基金项目: 教育部产学研协同育人项目(240904583024847),江苏省大学生创新训练计划项目(202410298194Y)

通信作者: 王琛,实验师,主要从事 3D 打印技术应用、逆向工程、计算机辅助产品设计等研究开发工作

收稿日期: 2025-01-27

引用格式: 王琛,李靖瑶,张晨赟,等.多材料复合成型对熔丝制造模型拉伸性能的影响[J].工程塑料应用,2025,53(4):63-68.

WANG Chen, LI Jingyao, ZHANG Chenyun, et al. Effects of multi-material compound moulding on tensile properties of fused filament fabrication models[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(4): 63-68.

由单一材料打印产品原型,通过该构建方式制造的产品,结构性能往往比较单一。而随着工业生产中产品性能需求的不断提升,单一材料构建方式已经无法满足实际生产,新一轮的技术发展使得FFF 3D打印从单一材料构建方式扩展到了多材料复合构建方式^[2]。

近年来,许多专家学者对3D打印中的多材料复合进行了探究。阮俊飞等^[3]将短切碳纤维(SCF)引入聚醚酰亚胺/聚醚醚酮(PEI/PEEK)共混体系中,制备出SCF/PEI/PEEK复合长丝,对由复合长丝打印的FFF制件进行了摩擦性能测试,结果表明,引入具有高耐磨性的SCF可以有效改善FFF制件的摩擦学性能。Wang等^[4]在聚乳酸(PLA)长丝表面涂覆了碳化硅(SiC)薄层,制备出PLA/SiC复合长丝,通过微波加热使得散布在PLA长丝表面的SiC迅速升温,从而促进了PLA分子链的再次扩散与缠绕。肖嘉林等^[5]以油茶壳(COS)为原料,与PLA共混制备COS/PLA长丝并制作了力学试样,通过拉伸和弯曲试验测得,COS/PLA试样的拉伸、弯曲性能均高于原PLA试样。以上研究表明,多材料复合可以有效改善FFF模型的各项性能,现有文献中的多材料复合主要是通过多种材料合成复合长丝的方法来实现的,而从FFF模型物理结构上进行多材料复合成型的研究较少。

基于以上分析,笔者提出了全新的一种多材料复合成型的3D打印方法,其能够在产品原型内部不同区域使用不同的功能材料填充打印,不再局限于某种单一材料,赋予了产品原型不同的材料性能,从而制造出传统打印技术难以实现,且满足不同功能和性能的复杂产品^[6]。这种构建方式拥有广泛的适用范围,可用于开发具有功能梯度结构、轻量化结构、柔性-刚性复合结构的产品原型。不仅激发了3D打印技术的潜力,还拓宽了3D打印的应用领域,为工业生产创造了新的发展方向。

为探究多材料复合成型方法的实际效果及其对FFF模型结构性能的影响,笔者以FFF模型的拉伸性能为研究对象,基于哑铃型试样创新性设计了一种夹芯板式复合结构,通过FFF 3D打印机的自动进料系统(AMS)实现了夹芯板式复合结构的增材制造。进一步利用单轴拉伸试验分析了界面打印温度、界面打印速度和界面打印流量三个因素对FFF模型拉伸性能的影响,总结出优选界面打印参数。

最后,基于优选界面打印参数,对单一材料成型方法和多材料复合成型方法下FFF模型的拉伸性能进行了对比分析,验证了多材料复合成型方法对FFF模型拉伸性能的提升效果显著。

1 多材料复合成型原理

受限于单喷头挤出系统,传统的FFF 3D打印机无法实现多材料复合成型的打印效果。而随着FFF 3D打印技术的不断开发,多喷头挤出系统和AMS等新技术的出现,使得多种材料可以在同一模型中复合,进而利用多种材料的性能组合来实现FFF模型整体性能的强化。笔者以哑铃型拉伸试样为例,创新性设计了一种夹芯板式复合结构,如图1所示。该结构以PLA为基体材料打印面板,中间复合层则采用碳纤维(CF)/PLA材料。就像传统的夹芯板一样,用两块PLA面板夹住一块CF/PLA芯板,借助CF/PLA材料的高强度和高刚度特性,显著提升了3D打印模型的拉伸性能,为3D打印模型的高性能复合结构的开发开辟了新方向。

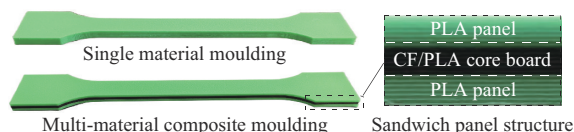


图1 多材料复合成型原理图

Fig. 1 Multi-material composite moulding schematic diagram

2 实验部分

2.1 主要原材料

3D打印丝:PLA长丝(直径1.75 mm,绿色),CF/PLA长丝(直径1.75 mm,黑色),深圳拓竹科技有限公司。其中,CF/PLA长丝主要由短切CF(纤维长度75 μm ,质量分数5%)和PLA通过熔融共混、挤出拉丝工艺制备^[7]。

2.2 主要仪器及设备

万能力学试验机:AG-X,量程20 kN,日本岛津株式会社;

3D打印机:X1-C,深圳拓竹科技有限公司;

工业显微镜:CL-MA-48M,广州科乐默仪器有限公司。

2.3 试样制备

参考GB/T 1040.2-2006中规定的1A哑铃型试样,通过Solid Works软件设计图2所示的实验试样(总厚度为4.0 mm)。为实现夹芯板式复合结构的设计效果,在进行切片设置时使用拓竹Studio软件中的涂色功能,对哑铃型试样厚度方向上的中间区域

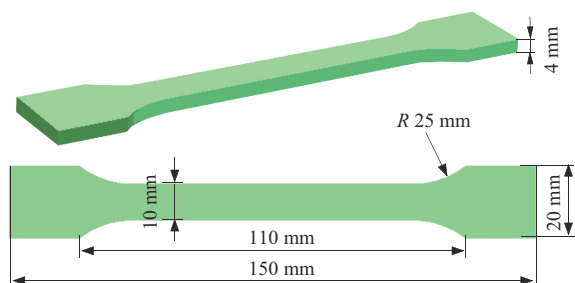


图2 哑铃型试样

Fig. 2 Dumbbell-shaped specimen

进行了材质区分处理。即将试样的顶部、底部面板部分(厚度均为 1.2 mm)设置为 PLA 材料,打印温度设置为 210 °C;中间复合层(厚度为 1.6 mm)设置为 CF/PLA 材料,打印温度设置为 220 °C。为保证哑铃型试样各层结构的一致性,试样的顶部、底部面板和中间复合层均采用实心填充(填充率 100%),填充图案为直线,填充方向与哑铃型试样的长边方向平行^[8]。其余通用切片参数设置见表 1,随后使用 3D 打印机制造试样。

表 1 通用切片参数

Tab. 1 General slice parameters

Slice parameters	Value
Infill rate/%	100
Layer height/mm	0.2
Printing speed/(mm·s ⁻¹)	80
Flow rate/%	100

夹芯板式复合结构的增材制造是通过 AMS 系统实现的,其原理主要基于智能化物料管理和自动化控制技术。AMS 系统通常由磁体传感器、单片机(MCU)控制系统、长丝输送装置和电源等部分组成(如图 3 所示),这些部分共同协作,实现了长丝的自动识别、切换和供应。具体工作步骤如下:(1)长丝识别与加载:AMS 系统通过磁体传感器识别长丝的材质、颜色和规格等信息,并根据打印任务的需求,自动选择并加载相应的长丝;(2)长丝切换与输送:

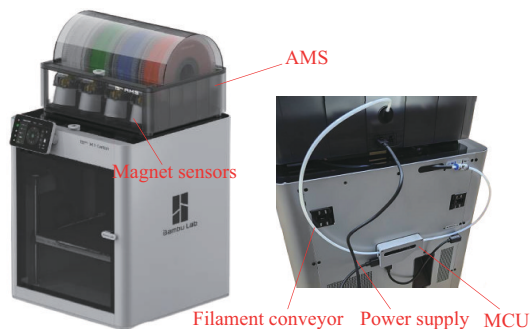


图3 自动进料系统

Fig. 3 Automatic material system

在打印过程中,根据切片设置要求,当需要更换长丝时,AMS 系统会自动将当前长丝撤回,并快速切换到下一根长丝。此时,新切换的长丝通过输送装置被精确地输送到喷嘴,整个切换过程迅速且准确,无须人工干预,大大提高了打印效率。

2.4 性能测试

参考 GB/T 1040.2-2006 中规定的拉伸试验方法,使用万能力学试验机对哑铃型试样进行拉伸性能测试,试验在准静态加载状态下进行,加载速度设置为 2 mm/min^[9]。

3 界面打印参数对 FFF 模型拉伸性能的影响

多材料复合成型的难点在于其异质材料界面间的黏结作用,由于异质材料的熔点、分子极性和融化后的黏度不同,导致了异质材料在接触界面间的流动和黏结效果不同。在选材时,应尽量选择分子极性相似、融化后黏度相近的材料,进而有利于异质材料分子链间的扩散和交联,提高界面黏结性能和打印成功率。此外,界面打印参数也是影响异质材料界面黏结作用的重要因素,选择界面打印温度、界面打印速度和界面打印流量为研究对象,通过单轴拉伸试验探究了界面打印参数对 FFF 模型拉伸性能的影响。本试验采用的哑铃型试样为夹芯板式复合结构,其中复合层厚度占 FFF 模型总厚度的 40%。

3.1 界面打印温度对 FFF 模型拉伸性能的影响

在界面打印速度为 60 mm/s、界面打印流量为 110% 的条件下,设置界面打印温度分别为 210, 220, 230 °C,对不同界面打印温度下 FFF 模型的拉伸性能进行了测试,结果如图 4 所示。由图 4 可见,随着界面打印温度的升高,FFF 模型的拉伸强度和拉伸弹性模量不断增大。这是由于 FFF 模型具有层层堆积的特点,异质材料的界面黏结质量是影响

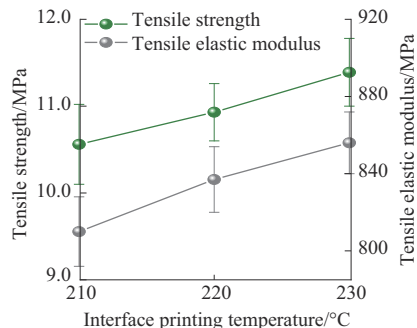


图4 界面打印温度对 FFF 模型拉伸性能的影响

Fig. 4 Effect of interface printing temperature on tensile properties of FFF models

FFF模型拉伸性能的直接因素。界面打印温度的升高,一方面使得异质材料(PLA和CF/PLA)在界面上的分子运动加快,促进了界面上分子链的扩散和缠绕,提高了异质材料的界面黏结性能^[10];另一方面,随着界面打印温度的升高,PLA和CF/PLA材料的分子间距离增大,材料黏度降低,流动性增强,有利于异质材料在界面上的流动与铺展,进一步提高了异质材料的界面黏结性能,从而提高了FFF模型的拉伸强度和拉伸弹性模量^[11]。因此,提高界面打印温度可以有效提高FFF模型的拉伸性能。

3.2 界面打印速度对FFF模型拉伸性能的影响

在界面打印温度为230℃、界面打印流量为110%的条件下,设置界面打印速度分别为60, 80, 100 mm/s,对不同界面打印速度下FFF模型的拉伸性能进行测试,结果如图5所示。由图5可见,随着界面打印速度的提高,FFF模型的拉伸强度和拉伸弹性模量减小。这是由于当界面打印速度过快时,熔融长丝的挤出量无法满足实际的填充量,导致挤出不足的问题,此时从喷嘴中流出的部分长丝被牵拉成细线,造成FFF模型内部孔隙的形成,而孔隙作为FFF模型整体结构的薄弱点,在承受载荷时容易产生应力集中,导致模型的破坏^[12]。此外,由于打印速度过快,FFF打印机中热床和喷嘴的振动增大,导致打印精度下降,加剧了模型内部孔隙的形成,从而影响了异质材料的界面黏结性能,降低了FFF模型的拉伸强度和拉伸弹性模量^[13]。因此,降低界面打印速度可以有效提高FFF模型的拉伸性能。

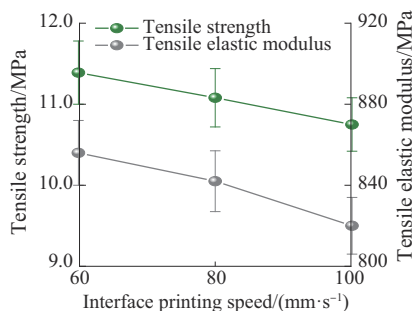


图5 界面打印速度对FFF模型拉伸性能的影响

Fig. 5 Effect of interface printing speed on tensile properties of FFF models

3.3 界面打印流量对FFF模型拉伸性能的影响

在界面打印温度为230℃、界面打印速度为60 mm/s的条件下,设置界面打印流量分别为90%, 100%, 110%,对不同界面打印流量下的FFF模型的拉伸性能进行测试,测试结果如图6所示。由图6

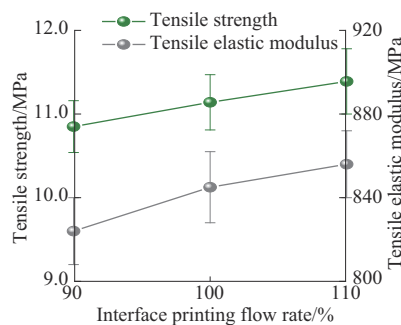


图6 界面打印流量对FFF模型拉伸性能的影响

Fig. 6 Effect of interface printing flow rate on tensile properties of FFF models

可见,随着界面打印流量的增大,FFF模型的拉伸强度和拉伸弹性模量随之增大。打印流量表示了单位时间内熔融长丝的挤出量,由于从喷嘴中流出的熔融长丝截面形状近似为椭圆,其与竖向异质长丝的黏结界面上通常存在结合颈,而结合颈位置容易形成孔隙^[14]。随着打印流量的增大,从喷嘴中流出的熔融长丝量增加,在喷嘴挤出压力的作用下,熔融长丝在黏结界面上产生了流动和平铺,填补了孔隙,提高了异质材料的界面黏结性能,从而提高了FFF模型的拉伸强度和拉伸弹性模量。因此,提高界面打印流量可以有效提高FFF模型的拉伸性能。

4 多材料复合成型对FFF模型拉伸性能提升效果

为分析多材料复合成型方法对FFF模型拉伸性能的提升效果,对单一材料成型方法和多材料复合成型方法制造的FFF模型的拉伸强度和拉伸弹性模量进行了测试。其中,单一材料成型方法的基体材料为PLA,多材料复合成型方法的基体材料为PLA、复合材料为CF/PLA,两种材料的界面打印参数设置为:温度230℃、速度60 mm/s、流量110%。为进一步分析复合层厚度对FFF模型拉伸性能的影响,设计了三档(20%, 40%, 60%)复合层厚度。其中,20%, 40%, 60%分别表示了复合层厚度与FFF模型总厚度的比值。

图7为多材料复合成型对FFF模型拉伸性能提升效果,表2为单一材料和多材料复合成型方法制造的FFF模型的拉伸性能对比。从图7和表2中可见,与单一材料打印的FFF模型相比,20%, 40%, 60%复合层厚下的FFF模型的拉伸强度分别提高了37.27%, 59.67%, 92.63%,拉伸弹性模量分别提高了37.32%, 62.38%, 93.24%,说明了多材料复合成型方法赋予了FFF模型来自CF/PLA长丝的高强度和高刚度特性,显著提升了FFF模型的拉伸性能,且随着

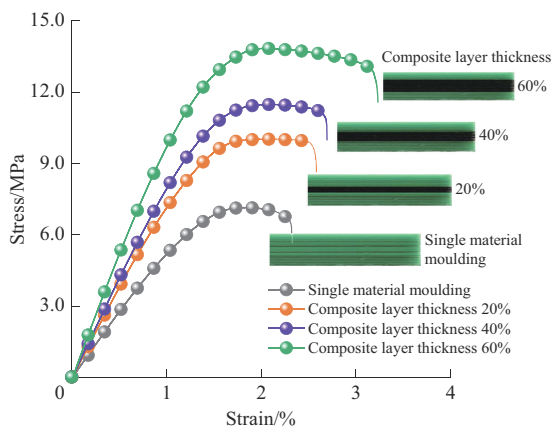


图7 多材料复合成型对FFF模型拉伸性能提升效果

Fig. 7 Enhancement effect of multi-material composite moulding on tensile properties of FFF models

表2 单一材料和多材料复合成型方法制造的FFF模型的拉伸性能对比
Tab. 2 Comparison of tensile properties of FFF models manufactured by single material and multi-material composite molding methods

Printing method	Tensile strength/MPa	Tensile elastic modulus/MPa
Single material moulding	7.19	528.57
Multi-material composite moulding layer thickness 20%	9.87	725.82
Multi-material composite moulding layer thickness 40%	11.48	858.32
Multi-material composite moulding layer thickness 60%	13.85	1 021.43

复合增强层厚的增大,FFF模型的拉伸强度和拉伸弹性模量随之增大,拉伸性能逐渐增强。

使用工业显微镜对拉伸试验后的FFF模型的表面细节进行观察,如图8所示。由图8可见,在拉伸载荷方向上,FFF模型的表面覆盖了少量银纹,而银纹是模型宏观断裂的先兆^[15]。银纹一般由银纹微纤组成,伴随着银纹中分子链的断裂,银纹微纤形成了触发模型破坏的裂缝与孔隙,并最终导致了模型的断裂。图8中,多材料复合成型方法制造的FFF模型表面银纹明显少于单一材料成型方法制造的FFF模型,进一步验证了上述结论,即多材料复合成型方法显著增强了FFF模型的拉伸性能。

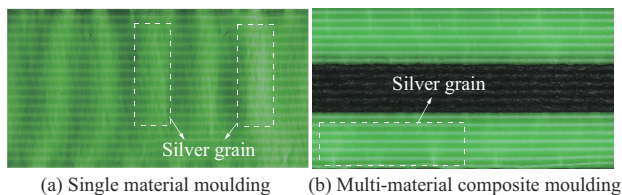


图8 不同FFF模型的表面细节放大图

Fig. 8 Enlarged view of surface detail of different FFF models

5 结论

(1)以FFF模型的拉伸性能为研究对象,针对哑铃型试样创新性设计了夹芯板式复合结构,通过

FFF 3D打印机的AMS系统实现了夹芯板式复合结构的制造。

(2)选择界面打印温度、界面打印速度和界面打印流量为研究对象,探究了界面打印参数对FFF模型拉伸性能的影响。结果表明,随着界面打印温度的升高、界面打印速度的降低和界面打印流量的增加,FFF模型的拉伸强度和拉伸弹性模量增大,拉伸性能逐渐增强;优选界面打印参数为:界面打印温度 230 °C、界面打印速度 60 mm/s、界面打印流量 110%。

(3)基于优选界面打印参数,对单一材料打印方法和多材料复合成型方法下的FFF模型拉伸性能进行了对比,结果表明:与单一材料打印的FFF模型相比,20%,40%,60%复合层厚下的FFF模型的拉伸强度分别提高了37.27%,59.67%,92.63%,拉伸弹性模量分别提高了37.32%,62.38%,93.24%,说明多材料复合成型方法对FFF模型拉伸性能的增强效果明显。

参考文献

- [1] 李彬,陆恒,顾海,等.熔融沉积成型工艺参数及数控加工后处理对表面精度的影响[J].机床与液压,2020,48(9):79-82.
LI Bin, LU Heng, GU Hai, et al. Influence of process parameters of fused deposition modeling and NC machining post-processing on surface accuracy[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(9): 79-82.
- [2] 严春晖,战丽,任永新,等.热处理工艺对增材制造PEEK/CGF力学性能影响[J].工程塑料应用,2023,51(3):52-57.
YAN Chunhui, ZHAN Li, REN Yongxin, et al. Effect of heat treatment process on mechanical properties of PEEK/CGF by additive manufacturing[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(3): 52-57.
- [3] 阮俊飞,裴先强,车清论,等.3D打印SCF/PEI/PEEK复合材料的摩擦学性能[J].摩擦学学报,2025,45(1):1-20.
RUAN Junfei, PEI Xianqiang, CHE Qinglun, et al. Triboelectric properties of 3D printed SCF/PEI/PEEK composites[J]. Tribology, 2025, 45(1): 1-20.
- [4] WANG Y Q, LIU Z G, GU H W, et al. Improved mechanical properties of 3D-printed SiC/PLA composite parts by microwave heating[J]. Journal of Materials Research, 2019, 34(20): 3 412 - 3 419.
- [5] 肖嘉林,李知远,蔡雨浓,等.改性油茶壳粉增强聚乳酸3D打印材料性能研究[J].塑料科技,2023,51(3):18-22.
XIAO Jialin, LI Zhiyuan, CAI Yunong, et al. Properties of modified camellia oleifera shell powder reinforced polylactic acid 3D printing materials[J]. Plastics Science and Technology, 2023, 51(3): 18-22.

- [6] 邹梨花,朱捷讯,姚明,等. 3D打印参数对PLA/CF电磁屏蔽复合材料性能影响[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(12):67-73.
ZOU Lihua, ZHU Jiexun, YAO Ming, et al. Influence of 3D printing parameters on performance of electromagnetic shielding composites[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(12): 67-73.
- [7] 夏法锋,张红哲,李洋. 基于3D打印技术制备CF-PLA纤维及性能研究[J]. 塑料工业, 2023, 51(8):152-157.
XIA Fafeng, ZHANG Hongzhe, LI Yang. Preparation and performance study of CF-PLA fibers based on 3D printing[J]. China Plastics Industry, 2023, 51(8):152-157.
- [8] 王林. 填充路径对FDM制造ABS力学性能的影响[J]. 塑料, 2022, 51(5):108-113.
WANG Lin. Effect of raster angle on the mechanical properties of FDM fabricated ABS[J]. Plastics, 2022, 51(5):108-113.
- [9] 付建军. ABS塑料的3D打印工艺优化研究[J]. 合成材料老化与应用, 2021, 50(3):40-42.
FU Jianjun. Study on 3D printing process optimization of ABS plastics[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2021, 50(3): 40-42.
- [10] 于小健,钱善华,董淑宏,等. 3D打印速度对PLA制件表面质量和力学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(6):61-66.
YU Xiaojian, QIAN Shanhua, DONG Shuhong, et al. Effect of 3D printing speed on the surface quality and mechanical properties of PLA parts[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(6): 61-66.
- [11] 王铎,沈振辉,杨拴强. 外力压缩作用下FDM构件力学性能影响因素分析[J]. 武夷学院学报, 2021, 40(12):57-63.
WANG Duo, SHEN Zhenhui, YANG Shuanqiang. Analysis of factors influencing mechanical properties of FDM members under external compression[J]. Journal of Wuyi University, 2021, 40(12):57-63.
- [12] 张春蕊,鞠锦勇. 不同填充率下FDM 3D打印预制品建模及力学性能分析[J]. 中国塑料, 2020, 34(6):66-72.
ZHANG Chunrui, JU Jinyong. Modeling and mechanical performance analysis of FDM 3D printed preforms with different filling rates[J]. China Plastics, 2020, 34(6):66-72.
- [13] 田国强,吴凯,高森森,等. FDM工艺参数对CF/PETG制件尺寸精度的影响[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(8):104-109, 116.
TIAN Guoqiang, WU Kai, GAO Sensen, et al. Effect of FDM process parameters on dimensional accuracy of CF/PETG parts[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(8):104-109, 116.
- [14] 冯丹艳. 基于FDM技术3D打印典型零件的力学性能和质量研究[J]. 装备制造技术, 2022(2):50-52, 56.
FENG Danyan. Equipment Manufacturing Technology, 2022(2): 50-52, 56.
- [15] 李华雄,王晖,刘璇. 响应面法优化PLA材料3D打印试件力学性能[J]. 塑料科技, 2024, 52(10):130-135.
LI Huaxiong, WANG Hui, LIU Xuan. Response surface methodology to optimize mechanical properties of 3D printed specimens made of PLA materials[J]. Plastics Science and Technology, 2024, 52(10):130-135.