

3D 打印连续碳纤维预浸丝制备及性能分析

李慧斌¹, 刘玉君¹, 汪 骥^{1,2,3}, 李 瑞¹, 刘 晓¹

(1. 大连理工大学船舶工程学院, 辽宁 大连 116024)

(2. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

(3. 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 3D 打印连续碳纤维增强热塑性树脂复合材料 (continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composites, CCFRTPCs) 因具有轻质、高强等优势被广泛应用于各个领域。在 CCFRTPCs 打印过程中, 碳纤维作为增强体, 与树脂之间的界面结合性能是影响该材料力学性能的关键因素。对连续碳纤维进行预处理, 增强纤维与树脂间的界面性能是当前研究热点。为提高 3D 打印连续碳纤维增强聚碳酸酯 (PC) 复合材料的力学性能, 首先采用不同浓度水性 PC 上浆剂对连续碳纤维原丝进行上浆预处理, 研究上浆剂浓度变化对连续碳纤维上浆量的影响规律; 然后以 PC 为基体, 分别以连续碳纤维原丝和不同上浆量预浸丝为增强体打印复合材料, 观察对比上浆前后连续碳纤维的表面形貌并分析上浆处理对复合材料界面和力学性能的影响。研究表明, 随着上浆剂浓度的增大, 连续碳纤维上浆量不断增大, 但增幅逐渐减缓。上浆后的连续碳纤维表面粗糙度增加, 内部单丝间界面结合得到改善。不同上浆量预浸丝复合材料的力学性能较纤维原丝复合材料均有所提高, 其中在本实验条件下 40% 浓度 (质量分数) 上浆剂所对应的 29.59% 上浆量为连续碳纤维最优上浆量。与纤维原丝复合材料相比, 29.59% 连续碳纤维预浸丝复合材料的弯曲强度提升了 15.82%, 弯曲模量提升了 75.58%, 拉伸强度、层间剪切强度和冲击强度分别提升了 90.9%、57.22% 和 56.45%。

关键词: 3D 打印; 碳纤维; 上浆; 力学性能; 复合材料

中图分类号: TB332; TQ327.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2023)03-0260-06

引用格式: 李慧斌, 刘玉君, 汪骥, 等. 3D 打印连续碳纤维预浸丝制备及性能分析[J]. 中国材料进展, 2023, 42(3): 260-265.

LI H B, LIU Y J, WANG J, *et al.* Preparation and Performance Analysis of 3D Printing Continuous Carbon Fiber Prepreg[J]. Materials China, 2023, 42(3): 260-265.

Preparation and Performance Analysis of 3D Printing Continuous Carbon Fiber Prepreg

LI Huibin¹, LIU Yujun¹, WANG Ji^{1,2,3}, LI Rui¹, LIU Xiao¹

(1. School of Ship Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

(2. Collaborative Innovation Center of High Tech Ship and Deep Sea Development Equipment, Shanghai 200240, China)

(3. State Key Laboratory of Industrial Equipment Structure Analysis, Dalian 116024, China)

Abstract: 3D printing continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composites (CCFRTPCs) are widely used in various fields because of their advantages of light weight and high strength. In the printing process of the composites, carbon fiber is used as the reinforcement, and the interfacial bonding between carbon fiber and resin is the key factor affecting the mechanical properties of materials. Pretreatment of continuous carbon fiber to enhance the interfacial properties between fiber and resin is a current research hotspot. In order to improve the mechanical properties of 3D printing continuous carbon fiber reinforced polycarbonate (PC) composites, firstly, different concentrations of waterborne PC sizing agent were used to size

the continuous carbon fiber precursor. And the influence of sizing agent concentration on continuous carbon fiber sizing was studied. Then, using PC as matrix, continuous carbon fiber precursor and prepreg with different sizing amount as reinforcement, the surface morphology of continuous carbon fiber before and after sizing was observed and compared, and the influence of sizing treatment on the interfacial and mechanical properties of the composite was analyzed. The results showed that with the increase of sizing agent concentration, the sizing amount of continuous carbon fiber increa-

收稿日期: 2021-06-14 修回日期: 2021-09-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51979033); 大连市科技创新
基金项目 (2019J12GX021)

第一作者: 李慧斌, 男, 1995 年生, 硕士研究生

通讯作者: 汪 骥, 男, 1978 年生, 教授, 硕士生导师,

Email: wangji@dlut.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202106010

ses, but the increase rate slows down. After sizing, the surface roughness of continuous carbon fiber increases, and the interfacial bonding between internal monofilaments is improved. The results showed that the mechanical properties of the fiber prepreg composites with different sizing amount are better than those of the fiber precursor composites. In this paper, the optimal sizing amount is 29.59% corresponding to a 40% concentration of sizing agent. Compared with carbon fiber precursor composites, the flexural strength, flexural modulus, tensile strength, interlaminar shear strength and impact strength of the 29.59% prepreg composites increased by 15.82%, 75.58%, 90.9%, 57.22% and 56.45%, respectively.

Key words: 3D printing; carbon fiber; sizing; mechanical properties; composites

1 前言

碳纤维具有高比强度、高比模量、密度小、耐腐蚀、耐疲劳等优点,被广泛应用于各个领域^[1]。因具有轻质高强的特点,碳纤维常被用来作为复合材料的增强体,在众多优秀的纤维中占有重要地位。碳纤维复合材料也因具有轻质高强、抗冲击等优异性能被广泛应用于汽车制造、航空航天、体育用品、医疗、军事等领域^[2]。在众多以碳纤维为增强体的复合材料中,连续碳纤维增强热塑性树脂复合材料(continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composites, CCFRTPCs)的力学性能更加突出,加之它自身具有耐腐蚀、抗冲击等优异性能,未来有望代替钢铁进入更广阔的工业生产领域,进一步拓展复合材料的应用领域。

近年来,3D 打印技术迅猛发展,有“现代工业制造核心技术”的美誉^[3]。3D 打印 CCFRTPCs 成型工艺同传统连续碳纤维复合材料成型工艺相比,具有无模具自由制造、成型速度快、成型件尺寸精度高等众多优势,降低了复合材料加工成本,提高了复合材料成型质量。

西安交通大学田小永团队提出了共挤出式 CCFRTPCs 的 3D 打印工艺^[4],原理如图 1 所示。该工艺是将连续碳纤维与熔融的热塑性树脂基体在一个熔腔内熔融后共挤出到成型平台上,树脂冷却固化后将纤维固定到平台上。随着喷头的移动牵引,连续纤维将熔融树脂不断从熔腔内拖出固化,层层累积成型。针对这种成型方式,该团队还开发了共挤出型 FDM 3D 打印机 COMBOT 系列,并依托该系列打印机开展了打印层厚、打印温度、扫描宽度及打印速度等系列工艺参数对连续纤维增强复合材料的界面和力学性能影响的研究,系统地阐述了复合材料界面与各工艺参数间的内在联系^[5]。

美国 Markforgd 公司利用生产的 Mark Two 连续纤维 3D 打印机打印的连续纤维增强尼龙复合材料,拉伸强度与模量分别达到了 464.4 MPa 和 35.7 GPa。日本东京理工大学采用 FDM 3D 打印机打印连续碳纤维增强聚乳酸(poly-lactic acid, PLA)复合材料,当纤维含量达到 6.6%时,复合材料拉伸强度与模量分别达到了 200 MPa 与 20 GPa,与纯 PLA 材料打印试样相比分别增加了 6 倍和 4 倍^[6]。

然而,利用 3D 打印技术直接打印的连续碳纤维复合

材料,经弯曲性能测试后其失效断面出现明显分层现象,并且可以观察到纤维束未被充分浸润,纤维与树脂间的界面结合较差(图 2),这可能是导致复合材料力学性能低于预期的原因。

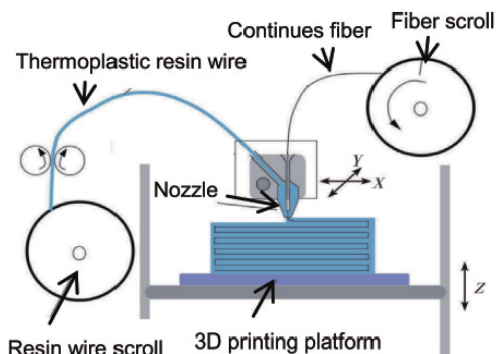


图 1 共挤出式 3D 打印连续碳纤维增强热塑性树脂复合材料工艺原理图^[4]

Fig. 1 Schematic diagram of coextrusive 3D printing process for continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composites (CCFRTPCs)^[4]

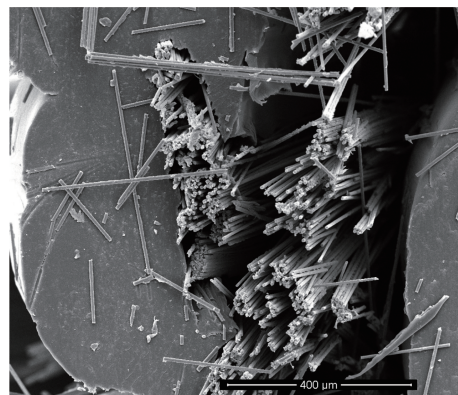


图 2 3D 打印连续碳纤维增强聚碳酸酯(CCF/PC)复合材料断面 SEM 照片

Fig. 2 Sectional SEM image of 3D printing for continuous carbon fiber reinforced polycarbonate (CCF/PC) composite

研究发现,改变 3D 打印工艺参数能在一定程度上改善纤维与树脂间的界面结合,例如减小打印层厚,增加喷嘴与平台间的沉积压力等。但这种方式无法从根本上解决树脂不能充分浸润连续纤维的问题,也未改善连续碳纤维束与树脂间浸润性差的问题^[7]。查阅相关文献后,本文采用了对连续碳纤维干丝进行上浆的预浸渍工艺,

系统研究了上浆工艺对纤维表面形貌及对 3D 打印连续碳纤维复合材料界面和力学性能的影响规律。

2 实验

2.1 连续碳纤维上浆预处理

本研究使用的是日本东丽公司生产的型号为 1K-T300-50b 的连续碳纤维。为提高连续碳纤维上浆效率,减少纤维在上浆过程中的损伤,同时使整个上浆过程自动化程度更高,减少人力成本和时间成本,亟需设计一台连续碳纤维自动化程度较高的上浆工作台。连续碳纤维在上浆过程中应做到连续稳定地预浸渍,这样可以保证整体上浆量的均匀。为此,本研究设计了连续碳纤维自动化上浆工作台(如图 3 所示),用来保证连续碳纤维上浆过程能够连续稳定进行。

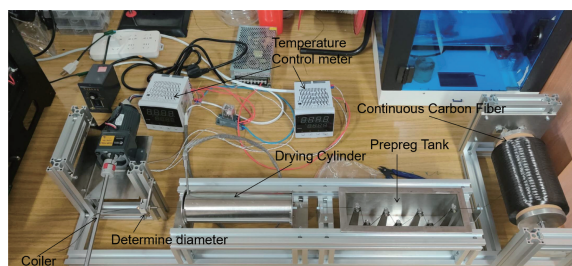


图 3 连续碳纤维自动化上浆工作台

Fig. 3 Continuous carbon fiber automatic sizing worktable

本研究采用的上浆剂是水性聚碳酸酯 (polycarbonate, PC), 主要成分为 PC 颗粒, 与 PC 丝材化学成分一致。根据“相似相容”原理, 二者在后续打印过程中亲和力和更强。以 10% 为浓度梯度, 将质量分数为 50% 的上浆剂原浆加蒸馏水分别稀释为质量分数是 20%, 30%, 40% 和 50% 的 PC 上浆剂溶液, 利用自动化上浆平台制备不同上浆量的连续碳纤维预浸丝。利用高温裂解法测定不同浓度预浸丝的上浆量, 设定马弗炉温度为 400 °C, 保温时间为 30 min, 保证预浸丝表面上浆被完全裂解, 测定裂解前后预浸丝的质量, 计算质量变化与裂解前质量之比即为预浸丝上浆量百分比, 高温裂解退浆过程如图 4 所示。



图 4 高温裂解退浆过程照片

Fig. 4 Digital photos of desizing process of high temperature cracking

2.2 复合材料的制备与性能表征

采用陕西斐帛科技有限公司生产的 COMBOT-2 型连续纤维 3D 打印机, 采用表 1 所示工艺参数, 分别打印连续碳纤维原丝 (vacant continuous carbon fiber, VCCF) 增强 PC (VCCF/PC) 和连续碳纤维预浸丝 (soaked continuous carbon fiber, SCCF) 增强 PC (SCCF/PC) 复合材料测试件。

表 1 打印参数设计值

Table 1 Print parameter design value

Parameter	Temperature $T/^{\circ}\text{C}$	Velocity $V/(\text{mm}/\text{min})$	Line spacing H/mm	Layer thickness L/mm
Design value	270	120	1	0.3

采用美国热电公司生产的 Nicolet5700 型傅立叶变换红外光谱仪对水性 PC 上浆剂和预浸丝表面化学成分进行全发射分析。

采用 MTS 中国(上海)公司生产的 MTS Landmark370.10 万能材料试验机和钢研纳克检测技术有限公司(北京)生产的仪器化金属摆锤冲击试验机 NI750 分别对 VCCF/PC 复合材料及不同上浆量的 SCCF/PC 复合材料进行力学性能测试。根据 GB/T3356—2014 对复合材料进行弯曲性能测试, 每组至少 5 个有效标准件, 加载速度为 2 mm/min; 根据 GB/T1447—2016 对复合材料进行拉伸性能测试, 每组至少 5 个有效标准件, 加载速度为 2 mm/min; 根据 JC/T773—2010 和 GB/T1451—2005 分别对复合材料进行层间剪切强度和冲击强度测试, 每组至少 5 个有效标准件。所有测试标准件照片如图 5a~5d, 分别为拉伸、弯曲、层间剪切和冲击试件, 尺寸分别为 230 mm×15 mm×2 mm, 100 mm×15 mm×2 mm, 20 mm×10 mm×2 mm 和 100 mm×10 mm×10 mm。

为观察上浆前后纤维束及内部单丝的形貌变化以及连续碳纤维增强 PC 复合材料的界面性能, 分别对上浆

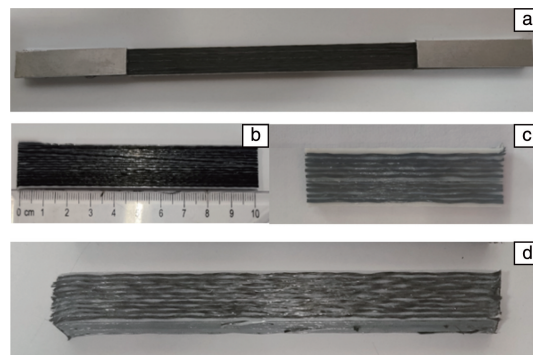


图 5 预浸丝复合材料力学性能测试标准件: (a) 拉伸测试件, (b) 弯曲测试件, (c) 层间剪切测试件, (d) 冲击测试件

Fig. 5 Standard parts for testing mechanical properties of prepreg composites: (a) tensile test piece, (b) bending test piece, (c) interlaminar shear test piece, (d) impact test piece

前后的连续碳纤维束及复合材料断裂面进行喷金。采用日本电子株式会社生产的 JSM-5610 场发射扫描电子显微镜 (SEM) 对上述喷金部分进行形貌观察。

3 结果与讨论

3.1 上浆预处理对碳纤维的影响

SCCF 与水性 PC 上浆剂的全反射傅立叶变换红外光谱如图 6 所示, 可以看出 SCCF 表面化学成分光谱图与水性 PC 原浆化学成分光谱图在整体趋势上趋于一致, 且 SCCF 的红外光谱上出现了两个强特征峰, 分别是 1260 cm^{-1} 处碳氧单键的伸缩振动和 1760 cm^{-1} 处碳氧双键伸缩振动。这些特征峰是 PC 中羰基官能团的特征峰, 伸缩振动位置与水性 PC 光谱图基本一致, 表明连续碳纤维表面已经涂覆了水性 PC 上浆剂。

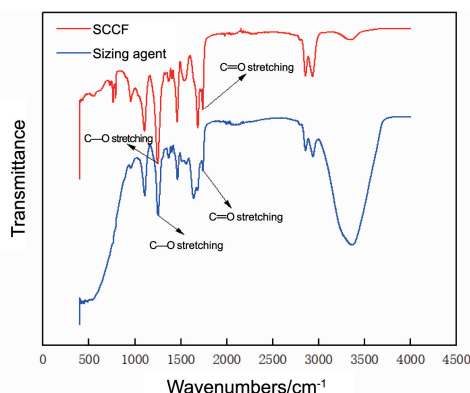


图6 连续纤维预浸丝 (SCCF) 与聚碳酸酯上浆剂的全反射傅立叶变换红外光谱

Fig. 6 Total reflection Fourier transform infrared spectrogram of SCCF and PC sizing agent

图 7 为上浆前后连续碳纤维的微观形貌。图 7a 和 7b 为上浆处理前的 VCCF, 集束性较差, 十分松散, 纤维束内部单丝呈现根根独立的状态, 且单丝表面有很多纵向沟壑。图 7c 和 7d 为上浆后的 SCCF, 表面浆液膜包裹均匀, 纤维集束性更强, SCCF 束表面仍存在一定深度的纵向沟壑。在 3D 打印 SCCF 复合材料的过程中, SCCF 与 PC 熔融共挤出形成纤维与树脂结合界面时, SCCF 束外表面的沟壑与 PC 间形成机械啮合。根据“相似相容”原理, 预浸丝束表面的浆液过渡层与 PC 形成化学键结合, 在这两种界面结合的复合作用下 SCCF 与 PC 基体间的界面结合比 VCCF 与 PC 基体间的界面结合更强, 有利于提高连续碳纤维增强 PC 复合材料的力学性能^[8]。由图 7d 观察发现, SCCF 丝束内部纤维单丝间界面结合非常优异, 在水性 PC 浆液的作用下, 原本松散的纤维单丝被紧紧地集束在一起。不同于图 7b 中纤维单丝表面众多纵

向沟壑, SCCF 内部单丝上并未观察到纵向沟壑, 原本单丝表面的纵向沟壑已被上浆剂完全覆盖并且在单丝的外表面也形成了均匀的外包裹过渡层, 这有利于纤维束内单丝与单丝间结合界面中产生化学键结合。通过图 7d 观察可以发现, 单丝外表面的树脂过渡层表面有一定的粗糙度, 有利于在单丝与单丝界面结合中产生机械啮合^[5]。在这两种结合作用的复合作用下, SCCF 内部单丝间的界面结合将得到极大提高, 有利于放大连续碳纤维作为增强体的能力, 提高连续碳纤维复合材料的力学性能。

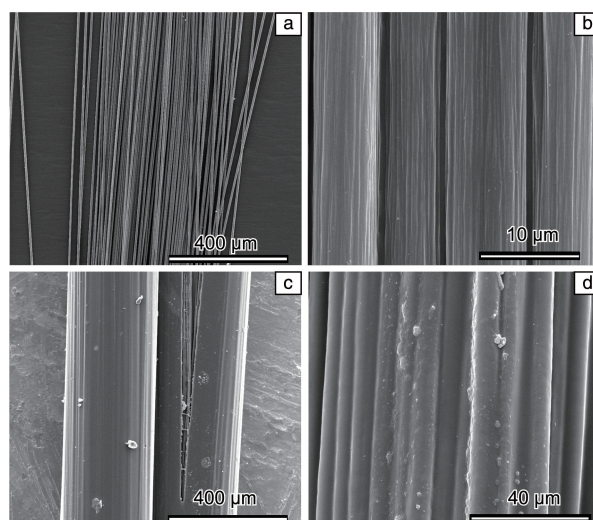


图7 上浆前(a, b)和上浆后(c, d)的连续碳纤维表面 SEM 照片

Fig. 7 SEM images of continuous carbon fiber before sizing (a, b) and after sizing (c, d)

3.2 上浆预处理对纤维上浆量的影响

将 4 种在不同浓度 PC 上浆剂中上浆后的 SCCF, 每种取 3 组样本, 采用高温裂解法测定不同上浆剂浓度下连续碳纤维的上浆量, 结果如图 8 所示。由图 8 可知, 20%, 30%, 40% 和 50% 浓度上浆剂对应的连续碳纤维上

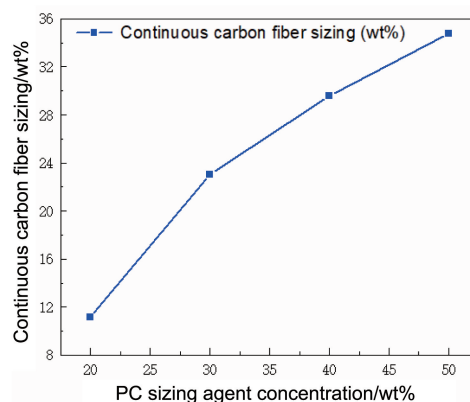


图8 SCCF 上浆量与上浆剂浓度的关系

Fig. 8 Relationship between sizing amount of SCCF and sizing agent concentration

浆量分别为 11.15%, 23.05%, 29.59% 和 34.78%。随着 PC 上浆剂浓度的提高, 连续碳纤维上浆量逐渐增加, 且增幅逐渐减缓。这是因为随着上浆剂溶液浓度的增大, 上浆剂逐渐变得粘稠, 流动性变差, 加上 1K-T300-50b 连续碳纤维束内单丝过多, 因此导致纤维束内部浸润效果变差, 上浆剂更多地附着在连续纤维外表面, 形成较厚的包覆膜, 但连续纤维外面积是有限的, 故而连续碳纤维上浆量虽有增加, 但增速减缓。

3.3 上浆预处理对复合材料的力学性能的影响

将不同上浆量的 SCCF/PC 复合材料的力学性能与 VCCF/PC 复合材料进行测试对比, 结果如图 9 所示。可以看出 SCCF/PC 复合材料的弯曲强度、弯曲模量、拉伸强度、层间剪切强度及冲击强度均随着碳纤维上浆量的提高先增大后减小, 均在上浆量为 29.59% 时达到最大值。

29.59% SCCF/PC 复合材料较 VCCF/PC 的平均弯曲强度由 170 提升到 196.86 MPa, 增幅 15.82%; 平均弯曲模量由 11.3 提升到 19.84 GPa, 增幅 75.58%; 平均拉伸强度由 177 提升到 337.91 MPa, 增幅 90.9%; 平均层间剪切强度由 26.67 提升到 41.93 MPa, 增幅 57.22%; 平均冲击强度由 62 提升到 97 kJ/m², 增幅 56.45%。综上, 采用上浆剂预浸渍的方式能够在一定程度上加强连续纤维束内部单丝间的界面结合以及预浸丝纤维束与 PC 基体间的界面结合, 使得载荷能够更高效地由 PC 基体转移到连续碳纤维上, 更好地发挥连续碳纤维增强体的作用。连续碳纤维上浆量与其复合材料的力学性能关系表明, 上浆量并不是越高越好, 连续纤维束内部良好的浸渍才是提高纤维性能的关键, 在本文研究条件下, 29.59% 为连续碳纤维预浸渍的最优上浆量。

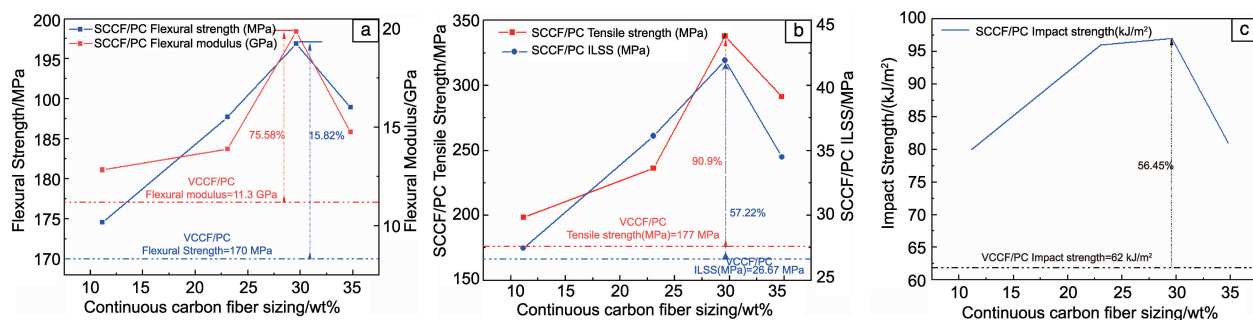


图 9 SCCF/PC 复合材料弯曲强度及模量(a)、拉伸强度及层间剪切强度(b)以及冲击强度(c)与上浆量的关系

Fig. 9 Relationship between flexural strength and modulus (a), tensile strength and interlaminar shear strength (b) and impact strength (c) of SCCF/PC composites and sizing amount

3.4 上浆预处理对复合材料界面的影响

VCCF/PC 与 SCCF/PC 复合材料弯曲断裂面的 SEM 照片如图 10 所示。图 10a 和 10b 为 VCCF/PC 复合材料弯曲断裂面形貌, 可以看出 VCCF/PC 复合材料测试件在承受弯曲载荷断裂后层与层之间出现了很明显的分层现象, 断面可观察到 VCCF 纤维束形态分散, 虽有少部分树脂浸润到纤维束内部, 但纤维束与树脂基体以及纤维束内部单丝间的界面结合仍然较差, 造成这种情况的原因一方面是喷嘴与平台间的沉积压力较小, 导致层间结合不强; 另一方面是树脂与 VCCF 在喷嘴内互相浸渍的时间太短。这两方面均会导致 VCCF 未能被 PC 基体很好地浸润, 影响复合材料的界面性能, 造成 VCCF/PC 复合材料实际力学性能低于理论。图 10c 和 10d 为 SCCF/PC 复合材料弯曲断裂面形貌, 可以看出 SCCF/PC 复合材料测试件断面整齐, 无分层现象, 纤维预浸丝束内单丝间界面结合良好, 树脂基体与 SCCF 束间界面结合紧密, 这种良好的界面结合使得测试件在承受载荷时, 力能够

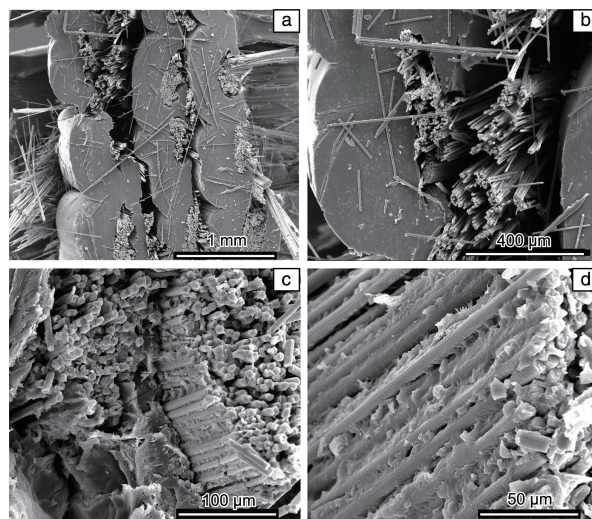


图 10 VCCF/PC 复合材料(a, b)和 SCCF/PC 复合材料(c, d)弯曲断裂面 SEM 照片

Fig. 10 SEM images of bending fracture surface of VCCF/PC composites (a, b) and SCCF/PC composites (c, d)

高效地由树脂基体转移到预浸丝纤维增强体上, 发挥碳纤维增强体的作用, 从而提高复合材料的承载能力^[9]。同时观察到断面纤维与树脂基体结合处既存在纤维断裂又存在纤维拔出所留下的小孔, 这种纤维拔出的断裂形式有利于消耗测试件断裂时的断裂能, 起到了阻碍裂纹扩展的作用, 防止材料发生脆性断裂, 提高复合材料的承载能力。

通过对比 VCCF/PC 与 SCCF/PC 复合材料弯曲断裂面形貌可以得出, 对连续碳纤维进行上浆预浸渍处理能够提高 PC 基体对碳纤维的浸润能力。根据“相似相容”原理, 引入的水性 PC 上浆剂与 PC 树脂基体间的亲和力更强, 有利于预浸丝与树脂间更好地结合, 从而提高复合材料中纤维与基体间的界面结合, 从而提高复合材料的力学性能。

4 结 论

采用水性聚碳酸酯(PC)上浆剂对连续碳纤维进行上浆预浸渍处理能够提高树脂对纤维的浸润性, 同时上浆剂固化后能够增加纤维表面粗糙度, 有利于纤维与树脂间的机械啮合。随着上浆剂浓度的提高, 碳纤维上浆量不断增大但增幅减缓。连续碳纤维预浸丝(SCCF)增强复合材料的力学性能较连续碳纤维原丝(VCCF)增强复合材料普遍提高, 弯曲强度、弯曲模量、拉伸强度、层间剪切强度及冲击强度等力学性能均随着纤维上浆量提高而先增大后减小, 力学性能测试表明, 29.59%为连续碳纤维最优上浆量。VCCF/PC 与 SCCF/PC 复合材料弯曲断裂面形貌照片显示, 对连续碳纤维进行上浆预浸渍处理能够提高 PC 基体对碳纤维的浸润能力, 根据“相似相容”原理, 引入的水性 PC 上浆剂与 PC 树脂基体间的亲和力更强, 有利于预浸丝与树脂间更好地结合, 从而使复合材料中纤维与基体间的界面结合得到提高, 从而提高了复合材料的力学性能。

参考文献 References

[1] 郭领军, 李贺军, 李克智. 兵器材料科学与工程[J], 2003(6):

50-53.

GUO L J, LI H J, LI K Z. Ordnance Material Science and Engineering [J], 2003(6): 50-53.

[2] 明越科, 段玉岗, 王奔, 等. 航空制造技术[J], 2019, 62(4): 34-38.

MING Y K, DUAN Y G, WANG B, *et al.* Aeronautical Manufacturing Technology[J], 2019, 62(4): 34-38.

[3] 宋星. 基于 3D 打印技术的夹层结构纤维增强复合材料制备及性能研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2019.

SONG X. Preparation and Properties of Sandwich Fiber Reinforced Composites Based on 3D Printing[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2019.

[4] 张曼玉, 刘腾飞, 田小永, 等. 中国材料进展[J], 2020, 39(5): 349-355.

ZHANG M Y, LIU T F, TIAN X Y, *et al.* Materials China[J], 2020, 39(5): 349-355.

[5] 刘腾飞, 田小永, 朱伟军, 等. 机械工程学报[J], 2019, 55(7): 128-134.

LIU T F, TIAN X Y, ZHU W J, *et al.* Journal of Mechanical Engineering[J], 2019, 55(7): 128-134.

[6] TIAN X Y, LIU T F, YANG C, *et al.* Composites Part A: Applied Science and Manufacturing[J], 2016, 88: 198-205.

[7] 张肖男. 短纤维增强复合材料打印装置及工艺研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2019.

ZHANG X N. Study on Printing Device and Technology of Short Fiber Reinforced Composite Material[D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology, 2019.

[8] 陈同海, 贾明印, 杨彦峰, 等. 当代化工[J], 2013, 42(11): 1558-1561.

CHEN T H, JIA M Y, YANG Y F, *et al.* Contemporary Chemical Industry[J], 2013, 42(11): 1558-1561.

[9] MOHIT S, SHANGLIN G, EDITH M, *et al.* Composites Science and Technology[J], 2014, 102: 35-50.

(编辑 吴 锐)