

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.02.025

连续纤维增强热塑性复合材料 3D 打印的研究进展

毕向军¹, 田小永², 张帅¹, 刘腾飞², 张辰威¹, 周勇¹, 董青海³

(1. 航天特种材料及工艺技术研究所, 北京 100074; 2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710054; 3. 中国商飞北京民用飞机技术研究中心, 北京 102211)

摘要: 结合连续纤维增强热塑性复合材料 (CFRTPCs) 熔融沉积成型 (FDM) 工艺的最新发展情况, 将该工艺按照原材料初始状态划分为在线预浸与离线预浸两类, 并分别介绍各自使用的材料要求及关键打印设备的运行原理; 同时综述了 CFRTPCs 的 FDM 工艺改进与应用结构及潜在的应用领域。同时针对 CFRTPCs 打印产品力学性能低的缺点, 对包括工艺固有属性、材料种类等方面的原因进行了分析。最后, 提出了目前面临的问题, 为 CFRTPCs 的 3D 打印技术进一步发展提供新思路。

关键词: 3D 打印; 熔融沉积成型; 连续纤维增强热塑性复合材料; 研究进展

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)02-0138-05

Research Progress in 3D Printing Technology of Continuous Fiber Reinforced Thermoplastic Composites

Bi Xiangjun¹, Tian Xiaoyong², Zhang Shuai¹, Liu Tengfei², Zhang Chenwei¹, Zhou Yong¹, Dong Qinghai³

(1. Institute of Aerospace Special Material and Technology, Beijing 100074, China; 2. State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China; 3. Beijing Aeronautical Science & Technology Research Institute of COMAC, Beijing 102211, China)

Abstract: According to the latest development of fused deposition modeling (FDM) process for continuous fiber reinforced thermoplastic composites (CFRTPCs), the process was divided into two types according to the initial state of raw materials: on-line prepreg and off-line prepreg. Then, the material requirements and the operation principles of the key printing equipment were introduced respectively, and technology improvement, application cases and potential application fields of CFRTPCs FDM process. At the same time, aiming at the disadvantage of low mechanical properties for CFRTPCs, the reasons, including the inherent properties of the process and the kinds of materials, were analyzed. At last, some current problems were put forward, which can provide new thought for the further development of 3D printing technology of CFRTPCs.

Keywords: 3D printing; fused deposition modeling; continuous fiber reinforced thermoplastic composites; research progress

3D 打印技术又名增材制造, 是一种采用与传统的减材制造不同的加工工艺路线, 通过增加材料、逐层制造的方式, 并基于三维模型数据直接制造出与其相一致的三维物理实体的工艺方法^[1-2]。该技术省掉了传统减材工艺中辅助工装的加工过程, 利用自支撑或自制辅助支撑模具, 将复杂的三维造型转化为最终产品, 降低了生产、加工和装配的时间比重, 从而缩短了部件的开发时间、设计-研制-试验的迭代周期和试验成本; 也推动了部件的设计-制造理念从“为制造而设计”向“为设计而制造”的转变^[3]。

目前纯树脂或颗粒增强热塑性树脂打印制件的力学性能不如人意, 不过可以预见热塑性增材制造技术与纤维优

势的结合将对增材制造技术起到重要的促进作用。其中, 连续纤维增强热塑性复合材料 (CFRTPCs) 引入了连续纤维作为增强相, 可明显提高打印制件的力学性能, 以至于材料的部分性能达到或超过了航空铝的级别, 被很多学者给予厚望^[4]。熔融沉积成型 (FDM) 是 CFRTPCs 主要的 3D 打印成型技术, 笔者结合 CFRTPCs 的发展情况, 着重介绍了 CFRTPCs 的 FDM 工艺分类、应用案例、遇到的问题等方面。

1 工艺分类

参照普通的 3D 打印工艺的分类方法^[5], 确定以热塑性树脂与纤维的初始形态作为主要特征, 将 CFRTPCs 的 FDM 工艺分为在线预浸和离线预浸^[6]。

通讯作者: 毕向军, 硕士, 工程师, 从事复合材料工艺研究 E-mail: bxiangji@163.com

收稿日期: 2018-11-28

引用格式: 毕向军, 田小永, 张帅, 等. 连续纤维增强热塑性复合材料 3D 打印的研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(2): 138-142.

Bi Xiangjun, Tian Xiaoyong, Zhang Shuai, et al. Research progress in 3D printing technology of continuous fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(2): 138-142.

(1) 在线预浸。

在线预浸是指连续干纤维持续进入打印头内,并直接被打印头内的热塑性树脂线材熔体浸润,在线材熔体推力作用下挤出打印的一种 CFRTPCs FDM 工艺,以西安市斐帛科技公司、西安交通大学田小永课题组和日本东京理科大学 R. Matsuzaki 课题组等研究成果为代表^[7-8]。

(2) 离线预浸。

在离线预浸工艺中,打印机设置了两个独立打印头,分别是连续预浸纤维丝束和热塑性树脂线材,前者对应成型部件的内部增强部分的铺覆,后者对应部件的外形框架和内部的孔隙填充,以 Mark Forged 公司开发的产品为代表。

2 打印材料

根据上述打印工艺的分类,打印材料大致也可以分为两类:热塑性树脂线材与干纤维、预浸线材与辅助线材。热塑性树脂线材是指可以适用于普通 FDM 打印的耗材,具有高强度、低收缩率、适当的熔融温度、无毒环保、优良的流动性等优点^[9-10],可以满足制件的力学、外观和尺寸要求,同时与纤维具有良好的浸润性能,其材质包含有聚乳酸、聚丙烯、聚碳酸酯、尼龙 6、尼龙 12^[11] 和聚醚醚酮等^[12],性能要求详见表 1。干纤维材质有碳纤维、kavler 纤维、玻璃纤维、金属纤维等^[13-14]。在使用过程中两种材料的在线混合、短时预浸,树脂在线材内是否填充和对纤维丝束是否充分浸润是需要重点考察的问题;为此,热塑性树脂本身的物性及其与纤维界面的结合能力是选择两种匹配材料的关键参数,如亲水性上浆剂处理的碳纤维可与尼龙、聚乳酸等热塑树脂搭配使用。材料的搭配可以是多种树脂或多种纤维混合使用,采用各材料的优点满足制件的多功能要求。

表 1 纤维增强 3D 打印线材的基体性能要求^[18-19]

项 目	要 求
加工性能	熔体黏度低,便于流动及预浸;较高的表面能;具有适当的熔融温度,便于加工和降低残余应力;具有较高的热容;具有高热系数,利于热量传递;具有较宽的工艺窗口及较好的热稳定性
力学性能	具有较高的强度和刚度
界面性能	具有很好的界面强度

而预浸线材是一种由树脂和纤维通过“螺杆挤出机-模具成型”的方法混合、浸润而制备的一定直径的线材^[15],需满足线径精度高、表面质量光滑、浸润性好、熔融状态均一、无断纤维头和纤维毛刺及纤维体积含量较高等要求;材料的预先制备路线决定了其内部的浸润程度和力学承载能力均优于“干纤维+树脂线材”的在线预浸线材。同时线材开发过程中,往往是经过高温、高压的过程,树脂内部往往需要增加多种复合助剂配合使用,其性能要求亦如表 1 所示;纤维的原有和生产中的断丝率以及两体系材料的浸润程度等制约着线材的生产效率。目前,市场化的线材有尼龙/碳

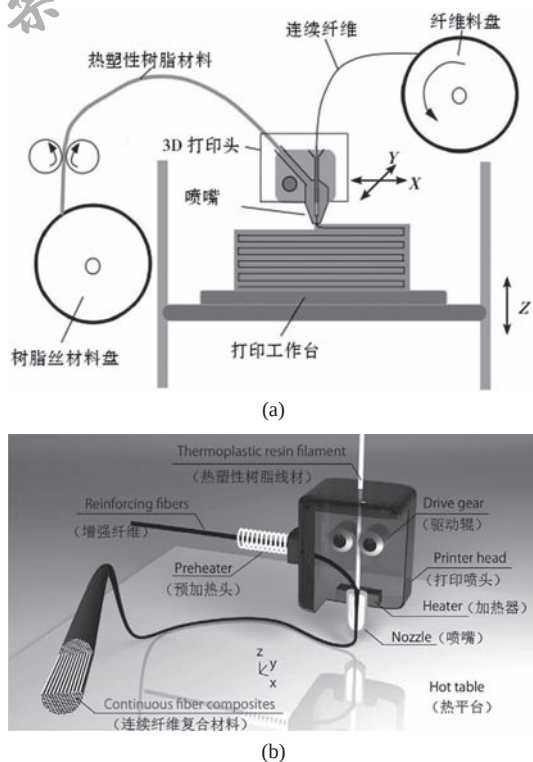
纤维(纤维质量分数约为 40%)、尼龙/玻璃纤维(纤维质量分数约为 50%)^[16]、尼龙/Kevlar 纤维^[17]等,种类很少且价格昂贵。

3 打印设备

打印机是 CFRTPCs FDM 打印工艺的主体,决定了打印工艺的技术路线和制件的内部质量、材料分布均匀度等,是打印工艺的核心设备,也体现不同打印类型的运行原理。

3.1 在线预浸设备

该设备将成熟的材料用于 3D 打印,成功地避开了线材成型带来的技术困难,同样也增加了材料的种类和类型,更利于满足不同部件的要求,但其主要缺点是短时间的纤维浸润易使丝束内部预浸效果不佳^[20]。在线预浸打印机工艺原理如图 1 所示^[7-8](图 1b 括号中的中文均为笔者添加的注释文字)。图 1 中的相关设备分别是西安交通大学和日本东京理科大学开发的打印设备,两者都采用了在线预浸的路线,在材料状态上有相似的地方。Yang Chuncheng 等^[21]采用该类设备打印了聚乳酸/碳纤维试样,发现温度和压力是决定复合材料力学性能的关键参数,界面性能和纤维含量是复合材料的关键技术指标,试样平均弯曲强度可达到 335 MPa。



a—西安交通大学开发的打印设备工艺原理图;

b—日本东京理科大学开发的打印设备工艺原理图

图 1 在线预浸打印机工艺原理图

3.2 离线预浸设备

该设备将预浸的纤维线材在一个打印头内熔融挤出,

形成致密的增强骨架;另一打印头将纯树脂填充到纤维层与纤维层之间形成良好的粘结界面;为了获得较好的外观和较高的尺寸精度,也将纯树脂用于外围框架的打印及内部空间的填充^[22];以 Mark Forged 公司的打印机为代表。

不过,该设备(如 Mark One 型号)存在一些需要关注的方面:①从工艺原理上来讲,在外层铺放树脂层占据了纤维丝束的位置,降低了制件的纤维含量和部分力学性能;②从路径设计源头来看,非开源软件 Eiger 3D 软件利用产品的三维结构特征自动计算指定部件的打印路径,导致部分区域集中出现连续纤维屈曲、承载能力降低的问题;③打印过程中,路径规划和切片算法允许在部件内进行层层切割,即打印头打印一层(圈)后向上(内)移动一次,易集中出现错层,这会带来应力集中、制件过早失效的危险。为此,增强丝束的铺覆起始位置和路径规划对于结构部件的承载能力有很大的影响^[23-24]。

随着对 3D 打印技术研究的深入,亟待提出更灵活的纤维控制轨迹的算法^[25],开发出适合特殊结构、性能更优的打印控制软件。此外,还有学者采用非热源喷头(如超声波^[26]、激光^[27])进行打印设备的设计测试,也得到较好的结果。

4 工艺改进与应用结构

复合材料的轻质化和功能一体化是先进复合材料的设计理念,通过打印工艺的改进可实现打印纤维的有序、定量控制和多功能材料的混合,以及各部分结构造型的调整,从而实现 CFRTPCs 3D 打印制件的可制造性^[28-29]。

Liu Shuting 等^[30]提出了新的自由悬挂三维打印方法,建立了自由悬挂打印路径,实现了无支撑下桁架结构的制备,用于制作 CFRTPCs 立体多孔结构。该方法可以制备如金字塔、Kagome、锥体、八重桁架格、圆形网格、积分变厚度机翼等点阵结构。测试结果表明,与理论几何相比,实物的平均结构误差约为 1.89%,压缩强度也比纯热塑性树脂制造的实物提高了 224%。

Hou Zhanghao 等^[31]提出了一种“板-芯”连续搭接的形式,制备了高强轻质波纹板,为制备轻质高强的“三明治”板材提供新的方法。通过实验发现,减小夹心层的层厚和夹心层边长的长度以及增加纤维的含量,都可以提高整个试样的压缩强度;当纤维体积分数从 2% 增加到 10% 时,压缩强度提高了 56%。

M. Eichenhofer 等^[32]设计了一新型的打印形式,集合了拉挤-加热挤压等模块,将热塑性材料与纤维经过多次的固结-熔融过程,可以将孔隙率降至原来的 80% 以下,制备成如图 2 所示的点阵结构。

Y. Ibrahim^[33]等使用改造过的打印设备,将 75 μm 金属线与聚乳酸材料引入到喷头内打印制备聚乳酸/金属线

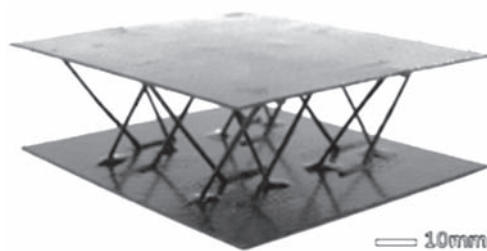


图2 具有细长晶格网络的超轻夹层芯复合材料制件,这在提高制件力学性能的同时也提高了传热性能。

K. Sugiyama 等^[34]使用改进后的 Markforged 公司的打印机及 0.4 mm 线材打印成型矩形、菱形、蜂窝状和近圆形夹心结构,利用纤维张力实现架空蒙皮区域的打印,通过三点弯曲试验表明菱形夹心结构抗弯能力最为突出。

Luan Congcong 等^[35-37]使用“1.75 mm 聚乳酸线材+干碳纤维”快速打印制成“以连续碳纤维为传感元件”的自感知智能结构件,其可通过碳纤维电阻的变化监测结构的应变和损伤情况,同时也兼具结构加固和结构健康检测的双重功能。

Zhang Haoqi 等^[38]以连续纤维增强塑料打印技术为背景,提出连续弯曲纤维铺放的概念,研究了开孔单层板单轴拉伸、开孔交叉层压板在双向拉伸及常压下的模拟情况,发现与传统的单向纤维增强复合材料相比,由连续弯曲纤维铺放方法制备的复合材料明显降低了应力集中、提高了力学性能,为关键部件的纤维铺放路径提供了指导。

此外,具备小型化的制造设备、自粘结的工作原理和可回收的热塑材料等特点的 CFRTPCs 增材制造技术在绿色制造^[39]、空间极端环境^[40]等领域也有着广阔的发展前景。

5 工艺存在问题及原因分析

虽然 CFRTPCs 打印工艺提高了 CFRTPCs 的力学承载能力以及材料的层间性能^[41],提供了打印高性能部件的可行性,但正是由于以连续纤维线材作为主要材料、打印工艺层层叠加的固有属性和小型化自粘结的运行原理导致了 CFRTPCs 打印制件存在不可忽视的问题:力学性能较低的问题。

与常用的热压罐工艺而言,CFRTPCs 打印制件具有较低的拉伸性能、压缩性能、层间性能^[18,42],如表 2 所示的连续碳纤维增强尼龙试样的测试结果。

CFRTPCs 打印制件力学性能较低的主要原因有以下几点^[16,42]:

(1) 基体的限制。

常用于 CFRTPCs 的基体材料有聚乳酸、聚丙烯、尼龙等,种类较少且力学性能相对较低,使用环境受限。

(2) 纤维含量低。

通常用于打印工艺的 CFRTPCs 纤维体积分数不超过

表 2 连续碳纤维增强尼龙 3D 打印线材试样的测试数据^[18]

项 目	测量值 ¹⁾ ($V_f=27\%$)	归一化处理数据 ²⁾ ($V_f=15\%$)
拉伸弹性模量 / GPa	62.5	46.9
拉伸强度 / MPa	968	726.0
弯曲弹性模量 / GPa	41.6	31.2
弯曲强度 / MPa	485	363.8
剪切弹性模量 / GPa	2.26	1.7
剪切强度 / MPa	31.16	23.4

注: 1) 实际测试的值, 其中试样由 Mark One 打印机制备, 试样孔隙率为 9%, $V_f=27\%$ 表示纤维体积分数为 27%; 2) 表示经归一化处理成纤维体积分数为 15% 时的数值。

50%, 低于常用热固性复合材料的 55%~65% 的要求, 制件的承载能力受限。

(3) 工艺问题。

打印铺放过程实际是在低压或无压状态下的热塑性树脂受热熔融—冷却固结的过程^[30], 没有经过压实—排气—重塑阶段, 致使内部掺杂了很多气体或杂质, 制约了性能的提高。针对此问题, P. Parandoush 等^[27]提出使用激光辅助连续纤维增材制造, 利用激光熔融单向聚丙烯/玻璃纤维和双向聚丙烯/玻璃纤维预浸带并用压辊给材料加压, 经扫描电子显微镜观测发现表面的气孔和沟槽很少, 也证明了压力对于消除孔隙的重要性; 不过该方法制备的试样的拉伸弹性模量较模压件、冲压件低约 50%。M. Eichenhofer 等^[32]使用“拉—挤”的方法, 有效降低了丝束内部的孔隙率(降低了 80% 以上), 提高了材料本身的力学性能, 并制备了高性能的点阵结构。

(4) 较差的界面浸润性能。

大分子热塑性树脂在纤维束内的迁移能力和浸润性能明显低于小分子热固性树脂单体; 同时不同热塑性树脂对纤维的界面浸润性能各异, 也出现了层间性能对纤维种类的依赖性。M. A. Caminero 等^[42]研究表明纤维与基材之间的界面结合能力将影响 CFRTPCs 打印制件的层间性能; 如尼龙在 Kevlar 纤维表面的润湿不良会导致界面区域出现气孔, 从而使 CFRTPCs 界面结合能力降低, 经测试, 层间剪切强度明显低于相应的尼龙/碳纤维打印制件。Li Nanya 等^[43]用水基上浆剂对纤维进行界面处理, 可以将聚乳酸/碳纤维复合材料打印试样的弯曲强度从 59 MPa 提高到 156 MPa、拉伸强度从 80 MPa 提高至 91 MPa。Liu Tengfei 等^[44]测试比较了上浆剂处理和未处理的碳纤维增强尼龙 6 试样, 发现与未处理的试样相比, 处理后的试样层间剪切强度提高了 42.2%; 同时也验证了过高的打印成型压力虽能形成较强的界面性能, 但会造成断裂性能和弯曲强度下降, 不利于复合材料制件整体力学性能的改善。

6 结语

CFRTPCs FDM 打印工艺是自动铺放过程的变种^[45],

有着与自动铺放的诸多优势和衍生特点, 引起了多国学者的广泛研究, 并在方法、材料、设备、应用等方面取得了较多的研究成果。但是, 该工艺存在力学性能低、材料成本高等诸多公认的缺陷以及明显的设备局限, 需要与常规的减材制造技术、编织技术相结合, 互为补充相互促进。如何将这种新型打印工艺的“设计理念—模型—结构”自动化制造和“低成本与绿色制造”概念相结合、如何将打印工艺与高性能产品相联系、如何在非高代价发展的条件下妥善处理制造成本、产品价格与市场价格的关系, 这些仍然是未来 CFRTPCs FDM 打印技术的发展落脚点和新领域开拓的问题。

参考文献

- [1] 冯春梅, 等. 3D 打印成型工艺及技术 [M]. 南京: 南京师范大学出版社, 2016.
Feng Chunmei, et al. 3D printing process and technology[D]. Nanjing: Nanjing Normal University Press, 2016.
- [2] 于天淼, 等. 工程塑料应用, 2018, 46(4):139–144.
Yu Tianmiao, et al. Engineering Plastics Application, 2018, 46(4):139–144.
- [3] Thompson M K, et al. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2016, 65:737–760.
- [4] Loye L J, et al. J Mater Res, 2014, 29(17):1 893–1 898.
- [5] 张学军, 等. 材料工程, 2016, 44(2):122–128.
Zhang Xuejun, et al. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(2):122–128.
- [6] Goh G D, et al. Materials and Design, 2018, 137:79–89.
- [7] 田小永, 等. 航空制造技术, 2016(15):26–31.
Tian Xiaoyong, et al. Aeronautical Manufacturing Gechnology, 2016(15):26–31.
- [8] Matsuzaki R, et al. Scientific Reports, 2016, 6:1–7.
- [9] 闵玉勤, 等. 粘接, 2015(1):36–41.
Min Yuqin, et al. Adhesion in China, 2015(1):36–41.
- [10] 魏欣, 等. 化学推进剂与高分子材料, 2016, 14(6):26–30.
Wei Xin, et al. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2016, 14(6):26–30.
- [11] Liao Guangxin, et al. Materials and Design, 2018, 139:283–292.
- [12] Yuan Shangqin, et al. Progress in Polymer Science, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2018.11.001>.
- [13] Baumann M Sc F, et al. Procedia CIRP, 2017, 66:323–328.
- [14] Hamidi A, et al. Composite Structures, 2019, 210:250–261.
- [15] 肖建华. 塑料工业, 2016, 44(6):46–48.
Xiao Jianhua. China Plastics Industry, 2016, 44(6):46–48.
- [16] Justo J, et al. Composite Structures, 2018, 185:537–548.
- [17] Dickson A N, et al. Additive Manufacturing, 2017, 16:146–152.
- [18] Blok L G, et al. Additive Manufacturing, 2018, 22:176–186.
- [19] 张胜, 等. 中国塑料, 2016, 30(1):7–14.
Zhang Sheng, et al. China Plastics, 2016, 30(1):7–14.
- [20] Tian Xiaoyong, et al. Composites: Part A, 2016, 88:198–205.

- [21] Yang Chuncheng, et al. Rapid Prototyping Journal, 2017, 23(1):209-215.
- [22] Miguel A C, et al. Additive Manufacturing, 2018, 22:157-164.
- [23] Melenka G W, et al. Composite Structures, 2016, 153:866-875.
- [24] Frketic J, et al. Additive Manufacturing, 2017, 14:69-86.
- [25] Dong Guoying, et al. Procedia Manufacturing, 2018, 26:774-781.
- [26] Guo Hongqi, et al. Composite Structures, 2019, 208:180-188.
- [27] Parandoush P, et al. Materials & Design, 2017, 131:186-195.
- [28] 田小永,等.航空制造技术,2017(10):34-39.
Tian Xiaoyong, et al. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(10):34-39.
- [29] 李涤尘,等.电加工与模具,2012(1):20-22.
Li Dichen, et al. Electromachining & Mould, 2012(1):20-22.
- [30] Liu Shuting, et al. Materials and Design, 2018, 137:235-244.
- [31] Hou Zhanghao, et al. Composite Structures, 2018, 184:1 005-1 010.
- [32] Eichenhofer M, et al. Composites Science and Technology, 2018, 164:248-259.
- [33] Ibrahim Y, et al. Manufacturing Letters, 2018, 16:49-51.
- [34] Sugiyama K, et al. Composites Part A, 2018, 113:114-121.
- [35] Luan Congcong, et al. Carbon, 2018, 140:100-111.
- [36] Yao Xinhua, et al. Materials and Design, 2017, 114:424-432.
- [37] 栾丛丛,等.浙江大学学报:工学版,2017,51(9):1 808-1 814.
Luan Congcong, et al. Journal of Zhejiang University:Engineering Science, 2017, 51(9):1 808-1 814.
- [38] Zhang Haoqi, et al. Composites Part B, 2018, 151:256-264.
- [39] Tian Xiaoyong, et al. Journal of Cleaner Production, 2017, 142:1609-1618.
- [40] 田小永,等.载人航天,2016,22(4):471-476.
Tian Xiaoyong, et al. Manned Spaceflight, 2016, 22(4):471-476.
- [41] Damodaran V, et al. Materials and Design, 2018, 157:60-73.
- [42] Caminero M A, et al. Polymer Testing, 2018, 68:415-423.
- [43] Li Nanya, et al. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 238:218-225.
- [44] Liu Tengfei, et al. Composites Part A, 2018, 114:368-376.
- [45] 阿米特·班德亚伯德耶,等.3D打印技术与应用[M].北京:机械工业出版社,2017:36.
Bandyopadhyay A, et al. Additive manufacturing[D]. Beijing:China Machine Press, 2017:36.

(上接第 130 页)

- [2] 袁海兵.硅酮耐刮擦剂对车用 PP 复合材料性能的影响[J].工程塑料应用,2017,45(9):120-122.
Yuan Haibing. Effect of silicone anti-scratch agent on properties of polypropylene composites of automobile[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(9):120-122.
- [3] 朱春州,袁海兵,郝源增.高分子树脂对聚丙烯复合材料耐刮擦性能的影响[J].合成材料老化与应用,2017,46(6):17-22.
Zhu Chunzhou, Yuan Haibing, Hao Yuanzeng. Effect of polymer resin on the scratch resistance of polypropylene composites[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2017, 46(6):17-22.
- [4] 程鑫桥,王云发,黎海洋,等.红外光谱法定量分析羊毛/腈纶混合物纤维含量[J].毛纺科技,2016,44(3):19-23.
Cheng Xinqiao, Wang Yunfa, Li Haiyang, et al. Quantitative analysis of blended fibers of wool and acrylic by infrared spectroscopy[J]. Wool Textile Journal, 2016, 44(3):19-23.
- [5] 李茂华,庞承焕,宋翠翠.红外光谱法对 PC/ABS 材料共混比例进行半定量[J].广州化学,2018,43(2):41-45.
Li Maohua, Pang Chenghuan, Song Cuicui. Quantitative test of PC/ABS ratio using infrared ray[J]. Guangzhou Chemistry, 2018, 43(2):41-45.
- [6] 王秀芬,李静,马芳,等.基于红外光谱技术对不同产区枸杞子的分析[J].医药导报,2018,37(6):721-726.
Wang Xiufen, Li Jing, Ma Fang, et al. Analysis of Fructus Lycii from different planting areas based on infrared spectroscopy[J]. Herald of Medicine, 2018, 37(6):721-726.
- [7] 王琦玲,赵勃,杜赏,等.工艺条件对超高黏度增强聚丙烯材料性能的影响[J].上海塑料,2017(4):37-41.
Wang Qiling, Zhao Bo, Du Shang, et al. Influences of process conditions on properties of ultra high viscosity polypropylene material[J]. Shanghai Plastics, 2017(4):37-41.
- [8] 姚挺,田璐.注塑工艺对连续玻纤增强 PA66 材料外观质量的影响[J].化工设计通讯,2016,42(5):89.
Yao Ting, Tian Lu. Effect of injection molding process on the appearance quality of continuous glass fiber reinforced PA66 material[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2016, 42(5):89.
- [9] 周海,李飞,李荣群,等.注塑工艺对长玻纤增强聚丙烯材料性能及外观的影响研究[J].塑料工业,2018,46(5):85-88.
Zhou Hai, Li Fei, Li Rongqun, et al. Research on effect of injection molding process on the properties and appearance of long glass fiber reinforced polypropylene[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(5):85-88.
- [10] 韩卫荣,王欣,王志刚,等.聚丙烯 C—H 弯曲振动二维红外光谱研究[J].包装工程,2015(21):7-10,27.
Han Weirong, Wang Xin, Wang Zhigang, et al. Two-dimensional infrared spectroscopy study of polypropylene C—H bending vibration[J]. Packaging Engineering, 2015(21):7-10,27.