

# 木塑复合3D打印耗材制备研究进展\*

王 颂<sup>1</sup> 曹永建<sup>1</sup> 李兴伟<sup>1</sup> 马红霞<sup>1</sup>  
张桂花<sup>2</sup> 蔡彤彤<sup>2</sup>

(1. 广东省森林培育与保护利用重点实验室/广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520; 2. 广东生态工程职业学院, 广东 广州 510520)

**摘要** 3D 打印 (3D printing, 3DP) 起源于 20 世纪 80 年代, 是一种节材、节能的新兴增材制造技术, 其原理是分层制造、逐层叠加, 近年来受到社会的广泛关注。文章简要介绍了 3D 打印技术的分类和常用 3D 打印材料种类, 重点综述了近年来专用于 3D 打印的木塑复合材料的研究现状, 指出了目前 3D 打印用木塑复合材料存在的主要缺陷。

**关键词** 3D 打印; 木塑复合材料; 聚乳酸

中图分类号: S784 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2019) 04-0118-05

## Research Progress in Preparation of Wood-Plastic Composites Used in 3D Printing

WANG Song<sup>1</sup> CAO Yongjian<sup>1</sup> LI Xingwei<sup>1</sup> MA Hongxia<sup>1</sup>  
ZHANG Guihua<sup>2</sup> CAI Tongtong<sup>2</sup>

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization / Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China; 2. Guangdong Eco-engineering Polytechnic, Guangzhou, Guangdong 510520, China)

**Abstract** 3D printing (3DP), which originated in the 1980s, is a new additive manufacturing technology with material and energy saving. Its principle is layered manufacturing and layer-by-layer superposition, which has been widely concerned by the society in recent years. This paper briefly introduces the classification of 3D printing technology and the types of common 3D printing materials, emphatically reviews the research status of wood-plastic composites specially used for 3D printing in recent years, and points out the main defects of wood-plastic composites used for 3D printing at present.

**Key words** 3D printing; wood-plastic composites; polylactic acid

3D 打印技术是一种以物体的数字化信息为基础, 采用离散的可粘合的材料, 通过逐层堆叠积累的方式来构造三维实体的技术<sup>[1-2]</sup>。因其革命性的“大幅节省原材料”和“制造灵活性”特点, 成为推动新一轮工业革命的源动力<sup>[3-4]</sup>。其最突出优点是无需机械加工或模具, 能直接从二维图形

数据生成任何形状的三维零件, 目前在模具制造、生物工程和航空航天等领域得到广泛应用<sup>[5]</sup>, 并呈蓬勃发展态势。3D 打印的基本原理是分层制造、逐层叠加, 包括前端 3D 模型生成、中端数据处理和后端产品加工 (打印、拆除支撑、上色等) 3 个环节<sup>[6]</sup>。根据材料和沉积方法不同, 分为丝

\* 基金项目: 广东省林业科技创新项目 (2016KJCX038)、中央财政林业科技推广示范项目 ([2016] GDTK - 06 号)

第一作者: 王颂 (1990—), 女, 助理工程师, 主要从事木材防护和 3D 打印木塑材料制备研究, E-mail: wangs@sinogaf.cn。

通信作者: 曹永建 (1976—), 男, 研究员, 主要从事木材科学与技术工作, E-mail: yjcao@sinogaf.cn。

材挤出热熔成型(熔融沉积造型 FDM)、高能束烧结或熔化成型(选区激光烧结 SLS、选区激光熔化 SLM)、片/板/块材粘接或焊接成型(分层实体制造 LOM)、光固化成型(光固化立体成型 SLA)、液体喷印成型(立体喷印 3DP)五大类<sup>[1]</sup>。

3D 打印原材料要求能液化或粉末化或丝化,打印完成又能重新粘合,并具有良好的物理化学性能。目前常见的有金属、无机非金属、高分子、复合材料等<sup>[7]</sup>,前两种适用于航空航天、医学、汽车等高附加值高技术要求领域,使用门槛较高,可用于制造精密金属零件、医学植入体等<sup>[8]</sup>。高分子材料是 3D 打印领域发展最为成熟的材料,能在较低温度下熔融流动、并快速冷却重新粘结,主要有聚乳酸(PLA)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(ABS)、聚碳酸酯(PC)等。单一的高分子由于自身固有特性,存在翘曲、韧性较差等缺陷,为了弥补这些缺陷,3D 打印材料目前由单一逐渐向多元化即复合材料发展。复合材料在性能上可取长补短,弥补主体材料的固有缺陷,并可能产生协同效应,使复合材料的综合性能优于原组成材料。本文主要对近年来专用于 3D 打印的木塑复合材料的种类及研究现状进行综述,依据笔者经验,提出目前该研究领域可能存在的一些缺陷,希望能为木塑 3D 打印材料的未来发展方向提供一定的指导。

## 1 3D 打印用木粉塑料复合材料

木塑复合材料(Wood Plastic Composites, WPC),又称塑木复合材料,是由热塑性塑料(如聚乙烯 PE、聚丙烯 PP、聚氯乙烯 PVC、PLA 等)与木质或其他生物质纤维材料(包括木粉、竹粉、秸秆、稻壳等)和助剂复合而成的一类新型环保复合材料(GB/T29418-2012, GB/T29365-2012)。目前用于 3D 打印的木塑复合材料主要有木粉塑料复合材料、竹粉塑料复合材料和秸秆塑料复合材料 3 种。其中塑料基体主要集中在 PLA 和 PE 上,植物纤维则主要是利用木材、竹材和秸秆作为填充增强体;涉及的 3D 打印方式有 FDM、SLS 和 LOM,主要是适用于 FDM 的线材研究较多。WPC 兼具生物质纤维与塑料的特性,充分发挥了两者的优点,硬度和刚性比纯塑料更高,尺寸稳定性也有所提升,同时复合材料的防腐蚀性和防潮性明显上升、耐候性显著加强,也较易进行二

次加工,且制品具有木材质感,成本低廉<sup>[9]</sup>。用这种生物质纤维改性塑料的木塑复合材料作为 3D 打印材料,既可以一定程度缓解木材资源匮乏的压力,另一方面还能改善塑料生产带来的环保问题<sup>[10]</sup>。

由于木质纤维是最易获得且相对容易处理的植物纤维,所以对于木粉塑料复合材料的研究也开始得最早,且研究得最为全面和透彻。

### 1.1 FDM 木粉塑料复合材料

复合材料要优先满足熔融状态下的流动性和粘合性的基本要求,初期研究也是从这方面开始的。罗凯等<sup>[11]</sup>在 HDPE 中添加 30% 的 100 目木粉,共混制备成本较低的木粉塑料耗材,将其用于 FDM 快速成型,发现相邻两层的粘结效果较好,流动性和力学性能基本满足 FDM 打印要求。TAO 等<sup>[12]</sup>将 5% 的杨木粉作为增强体加入到 PLA 基体中,共混挤出得到适用于 FDM 打印的复合线材,材料粘合性较好,初始抗变形能力也有所增强。PANDEY<sup>[13]</sup>,刘晓军等<sup>[14]</sup>将天然植物纤维分别与热塑性塑料(HDPE、LDPE、PS 或 PP)熔融共混挤出成丝,显微镜观察到丝材表面比较光滑,丝材用于 FDM 打印,发现打印比较顺畅。王莹等<sup>[10]</sup>以一定粒径杨木粉和 PLA 颗粒为原料,选择了甘油作为增溶剂,通过熔融共混挤出,制备了 PLA/杨木粉复合线材,实验发现甘油能明显提升复合材料的加工流动性,界面相容性也得到有效改善,同时其拉伸强度、储能模量和热稳定性有所降低。

在木粉塑料复合材料脆性改善研究方面,赵鲲鹏等<sup>[15]</sup>以聚乳酸、杨木粉为原料,采用改进磨头的双螺杆挤出机制备新型 PLA/木粉复合 3D 打印材料。发现增韧剂 POE 能显著改善复合材料内部大量空洞的缺陷,大幅度减少空洞数量,材料的脆性得到明显改善,用于 3D 打印完全可行。

改善 FDM 木粉塑料复合线材力学性能是改性研究中最受重视的一环,通常是通过在木粉塑料混合物料中加入合适改性添加剂的方法达到提高力学性能的目的。李英杰等<sup>[16]</sup>制备得到添加不同弹性体的杨木粉/聚乳酸复合线材,再通过 FDM 技术打印成型,发现添加聚己内酯(PCL)的复合材料能获得相对较好的力学性能和增韧效果。宋庆龙<sup>[17]</sup>用熔融共混制备用于 FDM 打印的木质纤维素/聚乳酸(WPF/PLA)复合材料,发现改性

后的 WPF/PLA 与未改性的相比, 杨氏模量增加 10.2%, 拉伸强度提高 35.7%, 断裂伸长率提高 76.4%, 且断面上孔洞明显减少, 结晶能力有所改善。董倩倩等<sup>[18]</sup>以 PLA 为基体、化学改性松木粉 (PWF) 为增强材料, 添加少量纳米二氧化硅 (nano-SiO<sub>2</sub>), 通过熔融挤出制备了适用于 FDM 打印的木粉塑料复合材料, 发现当 SiO<sub>2</sub> 用量为 5%, PWF 用量为 15% 时, 材料的各项力学性能均提高了 50% 以上, 且具有良好的打印性能。

木粉塑料复合材料的热稳定性也是改性研究的一项重要内容, 一般而言, 木粉或改性木粉的加入一定程度上会提高复合材料的热稳定性。余贞梅<sup>[19]</sup>以乙酰化改性木粉作为填料, 通过单螺杆挤出法制备乙酰化木粉/PP-LLDPE 复合线材, 发现乙酰化木粉提高了复合材料的热变形温度, 且线材打印效果较好。陆文君等<sup>[20]</sup>以 EVA 为相容剂、EBS 为分散剂, 熔融共混制备了 PLA/WP 复合材料, 结果表明, 木粉的加入一方面有利于提高 PLA 的热稳定性、结晶温度和结晶焓, 另一方面可以提高 PLA 的断裂强度, 但断裂伸长率有所降低。

### 1.2 SLS 木粉塑料复合材料

东北林业大学郭艳玲团队首次提出应用木粉塑料复合材料进行 SLS 快速原型制造<sup>[21]</sup>, 扩展了 SLS 材料的范围。SLS 木粉塑料复合材料存在黏结较难, 成型强度较低等共性问题<sup>[22]</sup>, 所以需要对其进行一定的改性处理, 或者寻求恰当的后处理方式以改善这一缺陷, 在这两方面, 郭艳玲团队都做了大量且全面的研究工作。

首先是改性处理方面: 郭艳玲团队成功制备桉木、杨木、松木和红木等不同树种的 SLS 复合材料, 主要改性方式是通过加入相容剂等改性剂提高复合材料的黏结性, 并一定程度上改善复合材料的力学性能。例如郭艳玲<sup>[23]</sup>, 姜凯译等<sup>[24]</sup>以桉木木粉和 PES 为主要原料, 开发了一种低成本、高性能、低污染的桉木/PES 粉末复合材料, 并确定了复合粉末的最优 SLS 烧结工艺。张慧等<sup>[25]</sup>以松木粉和聚砜醚树脂 PES 为原料, 在最佳工艺参数条件制得 SLS 木塑制件, 研究了制件的后处理加工、机械加工和连接组装方式, 其可加工性和力学性能满足特定实用需求。姜凯译等<sup>[26]</sup>开发了一种高价值的红木/PES 复合材料, 采用 SLS 打印技术, 用于定制生产具有红木外观及手感的复杂

结构包装产品, 并获得了概念展示模型。辛宗生等<sup>[27]</sup>通过加入马来酸酐 (MAH) 相容剂, 发现木粉和 PP 之间的相互作用得到增强, 二者界面处的机械锚合作用也受到了影响, 这都提高了复合材料的力学性能。另外其他研究团队如方静等<sup>[28]</sup>通过 SLS 技术制备了碳纳米管/木塑复合制件, 发现当碳纳米管 (CNT) 含量为 0.1% 时, 与未加入 CNT 的制件相比, 拉伸强度增大 128.7%, 弯曲强度增大 76.3%, 弯曲模量增大 227.9%。

其二是寻求恰当的后处理方式。研究初期, 郭艳玲<sup>[23]</sup>, 姜凯译等<sup>[24]</sup>团队通过抛光、渗蜡等后处理工艺, 发现 SLS 原型件力学性能有较大提高, 表面光洁度也得到很大改善。后期他们团队还找到了性能改善更大的其他后处理方式, 比如孙宇<sup>[29]</sup>、陈晖等<sup>[30]</sup>以木塑 SLS 打印件为基材, 先进行渗蜡、渗树脂处理, 再用银氨溶液活化处理, 最后使用化学镀铜的后处理方式使模型表面金属化; 随后的电化学去毛刺实验验证了镀铜制件用于电化学工具电极制作的可行性, 扩展了复合材料 SLS 的应用领域。

### 1.3 LOM 木粉塑料复合材料

对于适用 LOM 打印的木粉塑料复合材料, 赵辉等<sup>[31]</sup>首次提出, 并发明了一种基于木粉塑料复合材料的新型 LOM 快速成型方法, 通过激光切割技术结合超声波, 选取适当参数利用超声波焊接 PE/木粉复合材料薄片, 在高频振荡下通过材料原子间的相互扩散实现固态连接, 且成型件具有较好外观效果。

## 2 3D 打印用竹粉塑料复合材料

关于竹粉塑料复合材料的研究目前还相对较少, 且相对较多研究集中在改善耗材的熔融流动性, 从而实现 3D 打印; 对耗材力学性能提升的研究还处于起步阶段, 其他方面的改性研究尚未见报道。蔡羨<sup>[32]</sup>等人对竹粉塑料耗材的制备及实现打印方面进行了有益的探索, 他们通过优化增塑剂和润滑剂, 确定配方为 PLA: 竹粉: 聚乙二醇: 合成植物酯=100:40:3:3, 复合制备了适于 FDM 打印的线材, 所制耗材虽力学强度有所下降, 但影响打印的关键因素流动性已有所提高, 最终得到的打印制件质量和外观均能满足应用需求。刘晓帅等<sup>[33]</sup>在蔡羨等人的研究基础上, 加入了合适比例的相容剂 PCL 和增韧剂马来酸酐共聚物, 制备



的竹粉塑料耗材不仅满足 3D 打印的工艺要求，该材料在力学性能方面也有所提升。与国内同类材料相比，该新型材料的拉伸强度提升了 40%，冲击强度提升了 30%。

对于适用于 SLS 打印的竹粉塑料耗材研究，目前还只发现东北林业大学的赵德金等人进行了初步探究，当然也不排除有企业已经掌握了技术，只是没有形成文献资料。赵德金<sup>[34]</sup>等将废竹料与 PA 物理混合，制备了一种适合 SLS 打印的竹塑复合材料，其拉伸强度达 8.3MPa，较之本塑复合材料激光烧结拉伸强度有了较大提高。

### 3 3D 打印用秸秆塑料复合材料

关于秸秆塑料复合材料的研究尚处于起步阶段，初期研究焦点是实现耗材的正常打印，其中余贞梅<sup>[19]</sup>以质量比为 65:35 的低密度聚乙烯（LLDPE）和聚丙烯（PP）为基体，优化得到作为增强填料的改性玉米秸秆，和作为助剂的云母粉、聚乙烯蜡的最佳添加量，通过单螺杆挤出法成功制备疏水性的改性玉米秸秆 / 聚烯烃木塑复合线材，测试结果表明，改性玉米秸秆含量为 10%~30% 的木塑复合线材满足 3D 打印的流动性和力学性能要求。覃杨华<sup>[35]</sup>也对秸秆塑料复合材料的制备进行了研究，采用经处理的玉米秸秆与 PLA 为主要原料，加以合适辅料，利用氢氧化钠对秸秆进行预处理，再通过  $\gamma$ -甲基丙烯酰氧基丙基三甲氧基硅烷（KH570）对其改性，得到适于 FDM 打印的玉米秸秆粉 / PLA 最优制备工艺。

在实现顺畅打印的基础上，复合材料的力学性能和抗老化性能的提升也开始涉及。毕永豹等<sup>[36]</sup>以 PLA 和麦秸粉为原料，研究了不同相容剂对于复合材料力学性能的影响，研究发现，硅烷偶联剂 KH550 的添加提高了复合材料的力学性能，当添加量为 8% 时冲击强度达到 12.90 KJ/m<sup>2</sup>，且对冲击强度的效果更加显著；马来酸酐接枝聚丙烯相容剂 MAPP 含量为 1% 时，弯曲强度与冲击强度达最大值。毕永豹等<sup>[37]</sup>在原有研究基础上，制备了紫外光吸收剂改性的 PLA / 麦秸粉复合材料，研究了紫外光吸收剂 UV531 对复合材料抗老化性能的影响。发现 UV531 可改善复合材料颜色变化、提高其力学强度保持率、减小裂纹的长度与宽度、降低材料被氧化的程度。

## 4 发展与展望

材料是 3D 打印的核心基础之一，同时也是目前制约 3D 打印技术发展与推广的瓶颈。目前国内 3D 打印用木塑耗材的研究主要集中在木塑复合线材的制备和改性上。线材成型技术流程已有成熟路线，改性研究的焦点则是以木塑界面相容性的提高、复合材料力学性能提升和脆性得到改善三方面为主。木塑复合材料作为 3D 打印材料还有一些瓶颈问题需要突破：一是复合材料的稳定打印性能有待提升，急需解决打印不顺畅的问题。二是复合材料品种较少，功能比较单一，研究主要集中在 PLA 与木材、竹材纤维的复合，秸秆、稻壳、麦苗等其他生物质纤维与 PLA 的复合还较为少见。三是缺少木塑 3D 打印材料方面的实施标准，建立并完善技术标准体系，行业内实行统一的质量标准，确保材料的稳定和可靠，也是木塑 3D 打印行业亟待解决的问题。预计未来可能的发展方向主要有四个方面：一是大范围大体量地引进废弃塑料作为生产原材料，可节约成本且一定程度解决废弃塑料污染问题；二是扩展植物纤维品种和来源，引进稻壳、麦苗等其他植物纤维，回收废弃家具、废弃农林边角料等；三是提高耗材中植物纤维含量，开发高含量植物纤维同时保持良好性能的木塑 3D 打印耗材；四是木塑耗材的功能性开发，开发阻燃、防霉、防虫、抗紫外光降解甚或多功能的可打印木塑耗材。

3D 打印用木塑复合材料的应用拓宽了 3D 打印耗材领域，由塑料为主向绿色材料发展，是一种低成本、可降解的环境友好型材料，将之与 3D 打印结合具有较好的市场应用前景。目前采用各种天然纤维用于木塑复合材料原料的研究呈增长趋势，这种复合材料可充分利用木材加工剩余物、废旧回收木竹材及家具、农业剩余物秸秆稻壳等和各种废弃塑料，既可以保护有限的木材资源，同时缓解难降解性塑料对环境的影响，尤其是聚乳酸基生物质复合材料，两种主要原料都是可生物降解的绿色环保材料，吻合当前“低碳环保”理念。3D 打印木塑复合材料凭借其优势具有潜在的发展空间，复合材料的阻燃、防霉、耐候等功能性的发展会不断拓展其应用，木塑复合材料已在工艺品、手机壳、复合门窗、建筑等方面得到应用，深受市场欢迎。当前我国尚未出台专门针

对3D打印用木塑复合材料性能检测的统一标准,应尽快制订这些标准以指导生产。

今后随着植物纤维/塑料复合材料的研究不断发展、相关标准的建立与完善,其在3D打印中的应用也会越来越广泛,成为3D打印的一个越来越重要的分支材料。

### 参考文献

- [1] 中国机械工程学会. 3D打印: 打印未来[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2013: 3-5.
- [2] 吴怀宇. 3D打印: 三维智能数字化创造[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017: 12-15.
- [3] BERMAN B. 3D printing: the new industrial revolution[J]. Business Horizons, 2012, 55(2): 155-162.
- [4] GIBSON I, ROSEN D, STUCKEN B. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing [M]. New York: Springer, 2015: 193-198.
- [5] WOHLERS T, CAMPBELL I, DIEGEL O, et al. Wohlers report 2018[EB/OL]. (2018-03-27) <https://wohlers-associates.com/order/>.
- [6] 王灿才. 3D打印的发展现状分析[J]. 丝网印刷, 2012 (9): 37-41.
- [7] 张胜, 徐艳松, 孙姗姗, 等. 3D打印材料的研究及发展现状[J]. 中国塑料, 2016, 30(1): 7-14.
- [8] 陈光霞, 曾晓雁, 王泽, 等. 选择性激光熔化快速成型工艺研究[J]. 机床与液压, 2010, 38(1): 1-3.
- [9] 李东方, 李黎, 李健章. 木塑复合材料概述[J]. 林业机械与木工设备, 2013, 41(7): 7-15.
- [10] 王莹, 梁硕, 孙百威, 等. 聚乳酸/木粉3D打印复合材料的制备与性能研究[J]. 塑料科技, 2017, 45(10): 80-85.
- [11] 罗凯, 赵辉, 郭艳玲, 等. PE/木粉复合材料的FDM快速成型原理和实验[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(10): 126-128.
- [12] TAO Y, WANG H L, LI Z L. Development and application of wood flour-filled polylactic acid composite filament for 3D printing[J]. Materials, 2017, 10(4): 339.
- [13] PANDEY K. Natural fibre composites for 3D printing[D]. Helsinki: Arcada University of Applied Sciences, 2015.
- [14] 刘晓军, SHALKAR Y, 李飞, 等. 纤维增强复合材料3D打印研究进展[J]. 塑料, 2017, 46(6): 61-66.
- [15] 赵鲲鹏, 巴子钰, 张庆法, 等. 新型木塑3D打印材料聚乳酸/木粉复合材料的非等温结晶动力学[J]. 塑料科技, 2017, 45(12): 76-80.
- [16] 李英杰, 许民, 郭蕊, 等. 杨木粉/聚乳酸3D打印复合材料的性能研究及工艺分析[J]. 森林工程, 2018, 34(3): 39-45.
- [17] 宋庆龙. 改性木质纤维素/聚乳酸复合材料性能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
- [18] 董倩倩, 李凯夫, 董先明, 等. 3D打印用聚乳酸/松木粉/纳米二氧化硅木塑复合材料性能研究[J]. 塑料科技, 2019, 47(1): 85-80.
- [19] 余贞梅. 木粉、玉米秸秆改性聚烯烃基木塑复合3D打印材料[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [20] 陆文君, 孙君, 石世宏. 聚乳酸基木塑3D打印材料性能研究[J]. 合成技术及应用, 2018, 33(3): 10-12.
- [21] 方小林, 郭艳玲, 辛宗生. 基于木粉的快速成型工艺精度研究[J]. 林业机械与木工机械, 2008, 36(3): 29-33.
- [22] 张慧, 郭艳玲, 姜凯译, 等. 松木粉聚醚砜树脂复合材料的选择性激光烧结成型工艺参数优化[J]. 东北林业大学学报, 2015, 43 (8): 98-100;108.
- [23] 郭艳玲, 王璞璇, 姜凯译, 等. 桉木/PES复合粉末选择性激光烧结实验与渗蜡后处理[C]//[编者不详]. 第十四届中国科协年会第11分会场: 低成本、高性能复合材料发展论坛论文集.[出版单位不详], 2012.
- [24] 姜凯译. 木塑复合材料选择性激光烧结实验与后处理研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
- [25] 张慧. 激光烧结的木塑制件力学性能及可加工性研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
- [26] 姜凯译, 郭艳玲, 张慧, 等. 木质基复合材料3D打印高端定制包装结构研究[J]. 包装工程, 2018, 39(17): 61-65.
- [27] 辛宗生, 郭艳玲. 基于SLS快速成形的木塑材料性能的研究[J]. 黑龙江工程学院学报, 2015, 29(2): 41-45.
- [28] 方静, 张云鹤, 刘烁, 等. 选择性激光烧结碳纳米管/木塑复合材料力学性能研究[J]. 塑料工业, 2017, 45(9): 82-86;102.
- [29] 孙宇. 木塑SLS制件的化学镀铜工艺及其应用研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
- [30] 陈晖, 孙宇, 李健, 等. 木塑复合材料化学镀铜及其性能[J]. 电镀与涂饰, 2016, 35(16): 850-853.
- [31] 赵辉, 刘芬芬, 王天琪, 等. 基于超声波焊接的木塑复合材料分层实体制造技术[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(19): 6279-6280;6323.
- [32] 蔡羨. 面向熔融沉积成型的竹塑材料及工艺的关键技术研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2015.
- [33] 刘晓帅, 赵大旭, 吴强, 等. 竹塑复合3D打印材料研制与性能表征[J]. 竹子学报, 2017, 36(3): 19-24.
- [34] 赵德金, 郭艳玲, 宋文龙, 等. 竹粉/共聚酯胺激光烧结复合材料的制备与成形特性[J]. 东北林业大学学报;2015, 43(6): 107-115.
- [35] 覃杨华. 玉米秸秆作为3D打印材料的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
- [36] 毕永豹, 杨兆哲, 许民. 3D打印PLA/麦秸粉复合材料的力学性能优化[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(4): 27-28.
- [37] 毕永豹, 杨兆哲, 许民, 等. 熔融沉积成型PLA/麦秸粉复合材料的抗老化性能[J]. 合成树脂及塑料, 2017, 34(6): 34-38;42.