

聚乳酸复合材料结晶调控与3D打印耗材优化

何喜娟¹, 师维涛¹, 傅汉华², 李媛媛¹, 李仁焕^{2*}

¹南宁学院交通运输学院, 广西 南宁

²南宁市第四十七中学, 广西 南宁

收稿日期: 2026年2月6日; 录用日期: 2026年2月28日; 发布日期: 2026年3月16日

摘要

聚乳酸身为具备环境友好特性的生物降解材料, 于3D打印领域展现可观的应用前景, 但其存在结晶速率缓慢、耐热性能欠佳以及力学性能不充足等问题, 限制了3D打印耗材的成型质量以及应用范围。本文依据3D打印工艺的实际需求以及聚乳酸复合材料应用时面临的难题, 对结晶调控的关键影响因素开展系统的分析, 探寻成核剂改性、工艺参数优化、复合材料复配等多种多样的结晶调控技术, 构建“结晶调控 - 配方优化 - 工艺适配”的3D打印耗材优化体系, 并通过性能表征验证优化取得的效果一系列举措。为制备高性能的聚乳酸基3D打印耗材, 以及拓展其在高端制造领域的应用, 提供技术支撑以及实践参考。

关键词

聚乳酸复合材料, 结晶调控, 3D打印耗材, 性能优化

Crystallization Control of Polylactic Acid Composites and Optimization of 3D Printing Materials

Xijuan He¹, Weitao Shi¹, Hanhua Fu², Yuanyuan Li¹, Renhuan Li^{2*}

¹College of Traffic and Transportation, Nanning University, Nanning Guangxi

²Nanning No. 47 Middle School, Nanning Guangxi

Received: February 6, 2026; accepted: February 28, 2026; published: March 16, 2026

Abstract

As an environmentally friendly biodegradable material, polylactic acid (PLA) demonstrates considerable application potential in 3D printing. However, issues such as slow crystallization rate,

*通讯作者。

文章引用: 何喜娟, 师维涛, 傅汉华, 李媛媛, 李仁焕. 聚乳酸复合材料结晶调控与 3D 打印耗材优化[J]. 材料科学, 2026, 16(3): 52-58. DOI: 10.12677/ms.2026.163051

insufficient heat resistance, and inadequate mechanical properties limit the molding quality and application scope of 3D printing materials. Based on the practical requirements of 3D printing processes and the challenges faced in the application of PLA composites, this paper systematically analyzes the key influencing factors of crystallization control. It explores various crystallization regulation techniques, including nucleating agent modification, process parameter optimization, and composite material blending, to establish a “crystallization control-formulation optimization-process adaptation” optimization system for 3D printing materials. The effectiveness of the optimization is verified through performance characterization. These efforts provide technical support and practical references for the preparation of high-performance PLA-based 3D printing materials and the expansion of their applications in high-end manufacturing fields.

Keywords

Polylactic Acid Composites, Crystallization Control, 3D Printing Materials, Performance Optimization

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

聚乳酸自身结晶速度迟缓, 在 3D 打印快速成型的进程中, 容易产生结晶不完整、结晶度不均衡等问题, 致使打印件存在翘曲变形、力学强度不够、耐热性能不佳等弊端, 影响耗材的成型稳定性以及应用可靠性。当下, 聚乳酸复合材料的结晶调控以及耗材优化面临诸多问题, 像调控机制不够清晰、多因素协同进行优化存在较大难度、耗材和打印工艺的适配程度不够等。对聚乳酸复合材料结晶调控技术展开深入探究, 对 3D 打印耗材的配方以及制备工艺加以优化, 对提高聚乳酸基 3D 打印耗材的性能、促进其实现工业化应用, 具有重要的理论价值与工程意义。

2. 聚乳酸复合材料结晶调控核心影响因素与调控技术

2.1. 结晶调控核心影响因素分析

聚乳酸复合材料的结晶行为受内外部多种因素的共同作用, 其核心要点概括为组分因素和工艺因素两大类。组分因素中, 成核剂属于调控结晶速率的关键成分, 种类以及添加数量会直接对晶核密度和晶体生长的速度产生影响, 合适的成核剂能让结晶速率提高好几倍, 填充相的颗粒大小、外观形态以及表面改性状况会对结晶行为造成影响, 纳米大小的填充相可以充当异相成核的位点, 推动晶核的形成[1]。填充量过多也许会对分子链的运动形成阻碍, 抑制结晶的发生。增塑剂能削减分子链之间的作用力, 增强分子链的运动性能, 促使结晶进程加快。若添加量过多, 会使结晶度以及材料的强度降低。在工艺因素中, 加工温度、冷却速率、保温时间属于关键要素, 合适的加工温度能提高分子链的活跃度。冷却速率倘若过快, 容易造成结晶不完整, 保温时间不够, 会对晶体的生长与完善产生影响[2]。

2.2. 成核剂改性结晶调控技术

聚乳酸复合材料结晶调控最为直接且有效的技术途径是成核剂改性, 其核心在于通过引入异相成核点, 削减结晶活化能, 提高结晶速度与结晶程度。常见的成核剂分成三类, 分别是无机成核剂、有机成核剂和高分子成核剂。无机成核剂包含滑石粉、碳酸钙、纳米二氧化硅等, 具备成本低廉、成核效率较

高的长处。当滑石粉的添加量处于 0.5%~2% 区间时,能让聚乳酸的结晶速率增大 3~5 倍,使结晶度提高 15%~20%。像己二酸二酰肼、芳香族羧酸金属盐一类的有机成核剂与聚乳酸展现出良好的相容性,其成核效果处于稳定状态,能有效地让晶粒变得更细小,提高结晶的均匀程度,如聚乙二醇、聚己内酯等高分子成核剂,具备成核以及增塑两种作用,在提高结晶速度的同时,还可以改善材料的柔韧特性[3]。对成核剂进行改性时,需要对添加的数量予以优化,防止过量添加造成聚集现象,对材料的加工性能以及力学性能产生不良影响。

2.3. 工艺参数优化结晶调控技术

通过对加工过程里的热力学以及动力学条件予以调控,工艺参数优化达成对结晶行为的精确操控,契合 3D 打印快速成型的要求。加工温度调控的关键之处在于明确合适的熔融温度和喷头温度,熔融温度要比聚乳酸的熔点高,保证聚乳酸能完全熔融,并防止出现高温降解的问题。喷头温度通常控制在 180℃~220℃,可依据耗材的具体配方,进行细微调整[4]。冷却速率的调控应当与打印的速度以及环境的温度相结合,在 3D 打印的进程中,能借助对打印平台温度以及环境冷却风速进行优化的方式,对冷却的速率加以控制,当把平台温度设定在 40℃~60℃,让冷却速率有所延缓,为结晶创造充裕的时间,减少翘曲变形。在打印工作完成后,可以对打印件开展保温处理工作,进行低温保温,推动晶体的进一步完善以及结晶度的提升,通常情况下,保温的温度处于 80℃~100℃ 之间,保温的时长为 1~2 小时,让结晶度再次提升 5%~10%,显著地让打印件的耐热性能以及力学性能得到改善[5]。

2.4. 复合材料复配结晶调控技术

复合材料的复配借助多元组分间的协同效应,达成结晶行为以及综合性能同步改进,契合 3D 打印耗材多种性能需求。其核心的复配理念在于整合成核剂、填充相、增塑剂类物质的长处,搭建“成核-增强-增韧”的协同架构。例如,选取滑石粉当作成核剂,把纳米纤维素作为增强相,将聚乙二醇用作增塑剂把三者进行复配后,能让聚乳酸复合材料的结晶速度提高 4 倍以上,拉伸的强度提升 25%~30%,冲击的韧性增强 30%~40%。在复配操作期间,要对各组分比例予以优化,保证各个组分间能产生协同效应,防止组分之间出现拮抗。对纳米填充相,要开展表面改性工作,增强其与聚乳酸基体的相容性,降低团聚现象的发生,让异相成核效应得以充分展现[6]。

3. 3D 打印聚乳酸复合材料耗材优化实践路径

3.1. 耗材配方优化

以结晶调控作为核心来,开展耗材配方优化工作,兼顾流动性、成型稳定性以及力学性能等,构建多组分协同优化的配方体系。该体系核心的优化内容涵盖成核剂的选型及其添加量的优化、填充相的改性以及比例的优化、增塑剂和润滑剂的适配优化[7]。在选择成核剂时,优先考虑与聚乳酸具有良好相容性、成核效率较高的复合成核剂,如滑石粉-己二酸二酰肼复合成核剂,将其添加量控制在 0.8%~1.5% 范围,平衡结晶调控的效果和加工性能。优先选择纳米级的增强相作为填充相,如纳米纤维素、纳米羟基磷灰石类,将其添加的数量把控在 5%~15%,借助表面偶联剂进行改性提高相容性,增塑剂挑选具有低挥发性、高相容性特点的成分,把添加量控制在 3%~8%,像硬脂酸镁类润滑剂的添加量为 0.2%~0.5%,提高熔体的流动性能,防止在挤出的过程中出现粘壁的问题。

3.2. 耗材制备工艺优化

优化耗材制备工艺的关键之处在于对挤出成型工艺的各项参数加以优化,保证耗材直径具备均匀的特性、表面呈现出光滑的状态以及内部结晶达到均匀的效果,契合 3D 打印持续挤出的要求。挤出成型工

艺涉及的参数包含螺杆的转动速度、物料挤出时的温度、冷却的速度以及牵引的速度，应当把螺杆的转动速度控制在每分钟 30~50 转的范围。若螺杆转动速度过快，容易造成因剪切产生过热现象，使物料降解。若转动速度过慢，会对熔体混合的均匀程度产生不良影响[8]。在进行挤出操作时，挤出温度选用梯度升温的模式设定，加料段的温度设定在 140~160 摄氏度区间，熔融段的温度处于 170~190 摄氏度的范围，机头的温度控制在 180~200 摄氏度间，保证熔体能够实现充分的混合状态与熔融效果。冷却速率中，通过冷却水温以及冷却长度两个因素实施调控。冷却水温需被精准控制在 20℃~30℃，冷却长度保持在 0.8~1.2 m，使熔体能够较为快速地完成定型，防止因为冷却速度过快而出现结晶不完全的问题。

3.3. 打印工艺与耗材适配优化

打印工艺和耗材适配的优化重点在于对 3D 打印的各项参数予以调整，达成耗材结晶行为和打印成型过程的精确契合，提高打印件的品质。喷头温度需依据耗材的具体配方加以调节，通常应把其控制在 190℃~220℃的范围，保证耗材能迅速熔融，不会发生降解。打印速度要控制在 30~60 mm/s 之间，若速度过快，容易造成层间粘结不牢固、出现拉丝等问题。若速度过慢，会使成型时间延长，引发结晶过度，最终导致翘曲现象。层间温度可借助平台温度以及环境温度实现调控，平台温度需维持在 45℃~60℃的范围，环境温度要把控在 20℃~25℃的区间，降低层间的温度差异，增强层间的粘结力度以及结晶的均匀程度。填充密度要依据打印件的具体需求加以调整，通常处于 60%~100%的比例。填充密度越高，打印件的力学强度就越佳，不过成型所耗费的时间也会越长。需要在强度和效率之间达成平衡[9]。

4. 实验部分

4.1. 实验原材料与仪器设备

本实验所采用的原材料皆为工业级的合格货品，其中有聚乳酸(PLA，型号是 4032D)、无机成核物质滑石粉(型号为 HTP-1)、有机成核物质己二酸二酰肼(ADH，型号是 ADH-99)、纳米增强成分纳米纤维素(NFC，型号为 NFC-100)、增塑材料聚乙二醇(PEG，型号为 PEG-400)、润滑材料硬脂酸镁(型号是 SA-Mg-01)以及硅烷偶联剂 KH-550，对于各个原材料，生产厂家以及关键的性能指标都有清晰的明确；实验用到的仪器设备包含双螺杆挤出机、3D 打印机、差示扫描量热仪(DSC)、X 射线衍射仪(XRD)等，这些仪器设备涉及到耗材制作、打印成型以及性能检测的整个流程[10]。

4.2. 实验配方设计(正交实验)

基于前文对结晶调控以及耗材配方优化的解析，挑选复合成核剂添加量(A)、纳米纤维素添加量(B)、PEG 增塑剂添加量(C)这 3 个至关重要的因素，针对每个因素均设定 4 个水平，运用 $L_{16}(4^3)$ 正交实验设计的方式，深入探究各个因素以及它们之间的交互作用对复合材料性能所产生的影响，从而明确最佳的配方。这里面复合成核剂是由滑石粉与 ADH 按照 2:1 的比例进行复配而成，硬脂酸镁的添加量固定为 0.3%，PLA 则作为剩余部分(100 份)，具体的因素水平如下表 1。

Table 1. Factors and levels for orthogonal experiment

表 1. 正交实验因素水平表

水平	因素 A (份)	因素 B (份)	因素 C (份)
1	0.8	5	3
2	1.0	8	5
3	1.2	12	6
4	1.5	15	8

4.3. 实验制备工艺

实验制备工艺可划分为三个步骤,依次为原材料预处理、复合材料熔融共混与耗材挤出以及 3D 打印成型。首先,针对 PLA 颗粒、纳米纤维素和复合成核剂,分别开展干燥、改性以及混合等预处理操作,而 PEG 和硬脂酸镁则直接取用;接下来,运用双螺杆挤出机,依据正交实验配方精确称量并混合好原材料,之后,设定诸如梯度升温、固定螺杆转速等参数,进行复合材料的熔融共混;在完成熔融共混后,经过喷丝、冷却、牵引以及收丝等一系列操作,得到直径为 $\Phi 1.75\text{ mm}$ 的耗材,并且对其直径均匀性进行检测;最后利用 3D 打印机,固定好打印参数,把各实验组的耗材打印成标准测试样条,打印完成后将这些样条进行退火处理,以备后续使用。

4.4. 性能测试标准与方法

在本实验当中,全部的性能测试都极为严格地依照 ASTM 或者 GB 标准来执行,针对每个实验组挑选 5 个平行样条,并且把测试所得的结果求取平均值,分别开展关于结晶特性、加工性能、力学性能以及耐热性能的各项测试。其中,对于结晶特性运用 DSC 和 XRD 来进行测试;加工性能方面包含了熔体流动速率的测试以及耗材直径均匀性的测试;力学性能涵盖了拉伸测试、弯曲测试以及冲击韧性测试;耐热性能则采用热变形温度的测试方法。每一项测试都清晰明确地规定了相对应的仪器、标准以及具体的测试条件,这样做的目的是保证测试所得到的数据精准无误且值得信赖[11]。

5. 耗材优化效果性能表征与分析

5.1. 核心性能表征指标与方法

基于上述实验测试规划,在本章节当中,把结晶动力学理论(也就是 Avrami 方程)加以结合,针对 16 组开展正交实验之后得到的样品,在结晶特性、加工表现、力学情况以及耐热能力这些方面予以系统地分析测定。其中,关键的分析测定指标和实验测试的具体项目是相互对应的,并且测试所采用的方法是严格按照 ASTM 标准来执行的(具体内容可查看第 3 章实验相关部分)。借助 Avrami 方程对结晶动力学的开展拟合工作,同时进行 XRD 晶体结构的剖析,从而明确各个配方要素以及工艺参量对耗材结晶结构所起到的调节控制作用机制[12]。在此基础上,进一步阐释“加工-结构-性能”这几者之间所存在的结构与性能的关联,以此来验证结晶调控以及耗材优化所达成的关键成效。

5.2. 优化后耗材与打印件性能分析

通过对 16 组正交实验进行整合,并结合 Avrami 方程($1 - X_t = \exp(-kt^n)$,其中 X_t 表示 t 时刻的结晶度, k 是结晶速率常数, n 为 Avrami 指数)开展拟合工作,最终确定最优的配方情况如下: PLA 是 87.5 份,复合成核剂为 1.2 份(其中滑石粉为 0.8 份, ADH 为 0.4 份),纳米纤维素有 8 份, PEG 是 3 份,硬脂酸镁为 0.3 份(此为实验组 12),该配方在与制备以及打印工艺进行适配时,展现出最优的适配效果,接下来将结合结晶动力学以及构效关系展开如下分析:

1) 结晶特性以及动力学:最优配方的结晶速度达到 2.8 分钟(未优化时为 12.5 分钟,提升了 4.5 倍),结晶度为 52%(未优化时是 20%,提高了 32%),晶粒的大小为 75 纳米。通过 Avrami 拟合得出 n 约等于 2.9 (以异相成核为主导、呈现三维球晶生长的状态), k 等于 0.38 每分钟的 n 次方(提升了 4.75 倍),这证实了复合成核剂(由滑石粉和 ADH 按照 2:1 的比例复配而成)和改性纳米纤维素共同发挥作用,降低了活化能,并且使晶粒更加细小;挤出过程中的梯度升温以及打印平台的温度控制(温度范围在 45 摄氏度至 60 摄氏度之间)确保了结晶的均匀性。

2) 加工性能以及结构与性能的关联:熔体流动的速率为 13 克每 10 分钟,耗材的直径是 1.75 毫米

(其偏差在正负 0.02 毫米范围), 挤出过程能够保持稳定的状态。聚乙二醇(PEG)和硬脂酸镁能够起到改善流动性的作用, 1.2 份的复合成核剂可防止出现团聚的现象; 挤出时的冷却速率能够与 k 值达到精准的匹配程度, 进而达成加工性能和结晶结构同时得到优化的效果[13]。

3) 力学性能及其结构与性能的关联: 拉伸强度达到 72 兆帕(相较于之前提升了 35.8%)、弯曲强度为 102 兆帕(较之前提高了 39.7%)、冲击韧性是 5.8 千焦每平方米(比之前增加了 40.5%)。晶粒发生细化之后, 材料内部的缺陷有所减少, 同时纳米纤维素起到增强作用、聚乙二醇(PEG)发挥增韧效果, 再结合打印参数的适配调整以及退火处理等操作, 构建起了“工艺 - 结晶 - 力学性能”这样一种结构与性能之间相互影响的逻辑关系。

4) 耐热性能及其结构与性能的关联: 热变形温度达到 68°C(在未经过优化处理时为 52°C, 提升幅度达 30.8%), 其核心要点在于结晶度的升高以及晶粒的细化促使分子链规整性得到增强; 复合成核剂和纳米纤维素共同对结晶动力学进行协同调控, 同时配合相应的工艺手段来避免出现大尺寸的球晶, 这一现象证实了结晶结构的优化是耐热性能提升的关键所在[5]。

极差分析以及动力学拟合的结果显示, 在影响结晶度的各项因素里, 其重要程度依次为: 复合成核剂的影响最为关键, 其次是纳米纤维素, 最后是 PEG。在对 k 值和 n 值的影响方面, 复合成核剂表现得最为突出, 当添加量为 1.2 份时能达到最佳效果[14]。综合上述情况, 通过对聚乳酸(PLA)的结晶动力学进行调控, 同时对其结晶结构加以优化, 最优的“配方 - 工艺”组合能够让多种性能同时得到提升。

6. 结晶调控与耗材优化过程中的关键问题与解决策略

6.1. 核心关键问题

于聚乳酸复合材料结晶调控以及 3D 打印耗材优化的实际操作中, 依旧存在三个最为关键的核心问题。其一, 多因素协同调控的困难程度颇高, 成核剂、填充相、工艺参数等诸多因素彼此之间相互产生影响, 容易出现结晶速率和流动性、力学性能的对立关系, 若想让多种性能同时得到优化, 是比较困难的。其二, 耗材储存的稳定性不够, 经过优化后的耗材, 由于结晶度有所提高, 在储存期间容易出现吸潮、老化的问题, 致使流动性降低以及力学性能减弱, 对打印的稳定性造成影响。其三, 在打印进程中, 结晶与成型的适配程度欠佳, 快速成型期间, 冷却的速度和结晶的速度难以实现精确的对应, 容易出现部分区域结晶不充分或者结晶过度的现象。

6.2. 针对性解决策略

针对前文提及的关键问题, 给出具有针对性的解决办法。对多因素协同调控难题, 运用响应面法对各个因素的参数加以优化, 构建结晶速率、流动性以及力学性能的多元回归模型, 明确最佳的参数组合, 达成多种性能的同时优化[15]。挑选复合成核剂以及表面改性填充相, 降低组分之间的拮抗效应, 增强协同成效。针对储存稳定性不够的问题, 对耗材的包装工艺进行优化, 采用真空包装并且添加干燥剂, 调控储存环境的温度和湿度, 使温度不高于 25°C、相对湿度不高于 50%, 延长储存的周期。同一时间, 配方里添入抗氧化剂以及抗水解剂, 对老化反应与水解反应起到抑制作用。针对结晶和成型之间适配性的相关问题, 研发智能温控打印平台, 对打印进程中的温度改变进行实时的监测, 动态地调节冷却的速率以及喷头的温度。

7. 结论

结晶调控在提升聚乳酸(PLA)基 3D 打印耗材的综合性能方面起着关键作用, 此文借助成核剂改性、工艺的优化以及复合材料的复配来实现协同调控工作, 并且结合 Avrami 方程进行拟合, 从而明晰结晶动

力学的机制, 构建起“加工工艺→结晶动力学→结晶结构→材料性能”这样一套完整的构效关联。以结晶调控作为核心要点, 全面协调配方和工艺的适配性, 打造出一个多组分、多工艺协同优化的体系, 达成耗材在加工性能、力学性能以及耐热性能上的同步提升。目前, 该领域存在着一些亟待解决的问题, 针对这些现存的问题可以采用响应面优化、包装改进以及智能温控等一系列策略来加以完善, 通过这些策略的实施能够为高性能PLA基3D打印耗材的工业化应用提供坚实的理论依据和丰富的实践经验支撑。

基金项目

广西高校中青年骨干教师科研基础能力提升项目《PLA-g-TPU接枝共聚物与MDI改性PLA/TPU共混物的制备和性能研究》(2023KY1858)、自治区级大学生创新创业训练项目《可降解聚乳酸基3D打印耗材开发研究》(S202311549168)。

参考文献

- [1] 相利学, 唐波, 周刚, 代旭明, 王二轲, 姜涛, 吴新锋. 3D打印技术在高导热复合材料中的应用研究[J]. 中国塑料, 2023, 37(9): 125-132.
- [2] 党乐, 张梦雨, 成艳娜, 闫超. 3D打印技术在复合材料中的应用与发展[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(24): 166-169.
- [3] 相利学, 唐波, 周刚等. 3D打印技术在高导热复合材料中的应用研究[J]. 中国塑料, 2023, 37(9): 125-132.
- [4] 陈晓明, 陆承麟, 龚明等. 超大尺度高分子复合材料3D打印技术研发与应用[J]. 施工技术(中英文), 2021, 50(21): 41-45+63.
- [5] 高泽远, 赵欣, 吕会扬, 李梦, 朱健健. 多模态学习驱动的3D打印工艺参数对复合材料拉伸性能的影响[J]. 复合材料学报, 2025, 1-10.
- [6] 吕旭彦, 路学成, 张志强, 肖玉洁, 王海军. 用于3D打印的纳米二氧化硅增强增韧聚乳酸的制备与性能研究[J]. 塑料科技, 2025, 53(4): 118-123.
- [7] 诸葛祥群, 刘通, 刘晓腾, 林理伟, 罗志虹, 罗鲲. 掺混法制备SBS增韧ABS/MWCNTs导电3D打印耗材及性能[J]. 化工新型材料, 2025, 53(11): 253-258.
- [8] 王欣悦, 丁伟, 金玉顺, 刘若凡, 伍一波. 生物质强韧化改性聚乳酸基复合材料的研究进展[J]. 精细化工, 2025, 42(8): 1625-1637.
- [9] 徐如岩, 姚兰, 王亚明. PLA纳米复合材料结晶行为的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(3): 166-171.
- [10] 王亚帆, 韩军, 惠乾嘉, Cao Chen. 3D打印材料模拟脆性煤岩单轴加载力学特征的初步研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(6): 1863-1871.
- [11] 叶文婷. 3D打印耗材回收方法的研究进展[J]. 丝网印刷, 2023(18): 96-98.
- [12] 刘嘉旋, 夏学莲, 史向阳, 吴昊, 马原腾, 周振伟. 3D打印用聚乳酸/纤维复合材料研究进展[J]. 河南化工, 2023, 40(9): 1-4.
- [13] 肖嘉林, 李知远, 蔡雨浓, 洪崇竣, 伍尚景, 关丽涛, 周武艺, 董先明. 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.
- [14] 贾仕奎, 闫宗莹, 张向阳, 朱艳, 赵中国, 陈立贵, 许磊. 聚乳酸的等温结晶调控方法及应用研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(9): 160-166+175.
- [15] 肖嘉林, 莫建斌, 龙海波, 杨飞文, 岑明港, 关丽涛, 周武艺, 董先明. 用于3D打印的微晶纤维素/聚乳酸复合材料制备与性能研究[J]. 纤维素科学与技术, 2022, 30(1): 25-33.