

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.12.009

基于工艺参数在线监测的聚乳酸生物塑料注射成型机理

陈金伟^{1,2}, 郑海仪¹, 梁钊发¹, 张绮琪¹, 苏似鑫¹, 温建强¹

(1. 广东轻工职业技术学院轻工技术学院, 广州 510300; 2. 广东轻工职业技术学院广东高校高分子材料加工工程技术开发中心, 广州 510300)

摘要: 利用自主搭建的工艺参数在线监测平台系统研究了熔体压力、熔体温度及注射速度等注射成型工艺参数对聚乳酸 (PLA) 生物塑料试样拉伸强度的影响规律, 利用差示扫描量热仪和扫描电子显微镜等测试表征手段研究了不同工艺状态条件下 PLA 试样结构的变化规律, 总结了熔体压力、熔体温度、注射速度与 PLA 试样力学性能、结构之间的作用机理。结果表明, 在实验条件范围内, PLA 试样成型时存在一个最佳工艺状态, 即熔体温度 180℃、熔体压力 8 MPa、注射速度为注塑机最大注射速度的 40%, 在该状态下所成型试样的拉伸强度达到最佳; PLA 成型过程的结晶存在一个由熔体压力所引发的最佳诱导结晶应力; 对比熔体温度和熔体压力, 注射速度是影响 PLA 结晶形貌的不敏感工艺参数。

关键词: 工艺参数在线监测; 聚乳酸; 注射成型机理

中图分类号: TQ321 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)12-0050-06

Injection Molding Mechanism of PLA Bioplastics Based on Online Monitoring of Processing Parameters

Chen Jinwei^{1,2}, Zheng Haiyi¹, Liang Zhaofoa¹, Zhang Qiqi¹, Su Shixin¹, Wen Jianqiang¹

(1. College of Light Chemical Technology, Guangdong Industry Polytechnic, Guangzhou 510300, China; 2. Guangdong Polymer Material Processing Engineering Technology Development Center, Guangdong Industry Polytechnic, Guangzhou 510300, China)

Abstract : The influences of injection molding process parameters such as melt pressure, melt temperature and injection speed on the tensile strength of bioplastics such as polylactic acid (PLA) products were studied systematically based on the self built online monitoring platform of process parameters. The change rule of PLA product structure under different process conditions was studied by using DSC, SEM. The interaction mechanism between the melt pressure, melt temperature, injection speed and mechanical properties, structure of PLA products was summarized. The results show that there is an optimal processing condition for PLA products in the range of experimental conditions, that is, the melt temperature is 180℃, the melt pressure is 8 MPa, and the injection speed is 40% of maximum injection speed of injection machine, under which the tensile strength of PLA is the best. There is an optimal induced crystallization stress caused by melt pressure in the crystallization of PLA products, and the injection speed is the insensitive process parameters affecting the PLA crystal morphology comparing with the melt temperature and melt pressure.

Keywords : online monitoring of process parameters ; polylactic acid ; injection molding mechanism

随着人们对塑料污染关注度的不断提高, 科研工作者们开始将目光转向生物塑料研究, 不断扩大生物塑料的应用范围, 其中解决生物塑料难以注射成型的问题, 将成为推进生物塑料广泛应用、实现资源和环境的可持续性发展关键因素之一^[1-6]。因此作为生物塑料典型代表的聚乳酸 (PLA) 自从问世以来, 就受到了来自各行各业的关注。许多研究者

为了更好地了解生物基塑料及加速可降解塑料的应用, 对 PLA 进行了大量的研究, 如王惠娟等^[7] 研究采用无机材料、天然高分子材料或合成高分子材料对 PLA 进行增强增韧; J. H. Wu 等^[8] 通过在 PLA / 聚甲基丙烯酸甲酯中加入适量纳米级二氧化硅发现可以提高材料的模量和冲击强度; Xia Xuelian 等^[9] 通过亚麻纤维与 PLA 制备复合材料, 发现与纯的

基金项目: 广东轻工职业技术学院 2017 年科技成果培育项目 (KJPY002), 广东轻工职业技术学院 2017 年拔尖人才自选项目 (IB040103)

通讯作者: 陈金伟, 博士, 副教授, 主要从事高分子材料加工技术研究 E-mail: jinwei0914@163.com

收稿日期: 2019-10-15

引用格式: 陈金伟, 郑海仪, 梁钊发, 等. 基于工艺参数在线监测的聚乳酸生物塑料注射成型机理 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(12): 50-55.

Chen Jinwei, Zheng Haiyi, Liang Zhaofoa, et al. Injection molding mechanism of PLA bioplastics based on online monitoring of processing parameters[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(12): 50-55.

PLA 相比,亚麻纤维可以显著提高材料的冲击强度和断裂伸长率;张显勇等^[10]在研究成核剂的添加对 PLA 结晶性能的影响时发现适量添加异相成核剂可提高 PLA 的结晶速率;吴景梅等^[11]研究了改性碳纤维对 PLA 结晶行为和力学性能的影响;顾书英等^[12]运用熔融挤出法制备 PLA/对苯二甲酸-己二酸-1,4-丁二醇三元共聚酯(PLA/PBAT)共混物,发现当 PBAT 质量分数在 30% 时断裂伸长率达到最大;张爱玲等^[13]研究了 PLA/聚丙烯共混物的力学性能及热学性能变化;张红娟等^[14]在最佳滑石粉添加量的基础上分别用钛酸酯、硅烷偶联剂 KH550 和十八胺对滑石粉进行改性,研究了各种表面改性剂对滑石粉填充 PLA 材料的影响。

从上述研究现状可见,目前关于 PLA 生物塑料的研究多集中通过化学或物理的手段对 PLA 材料进行改性,但是对于实际注射成型加工过程中单一 PLA 物料体系的成型机理方面研究却鲜有文献报道。而基于实际生产过程的成型机理研究对于指导 PLA 制品成型生产、扩大 PLA 的应用领域及使用量、获得较高性能的 PLA 制品同时降低 PLA 注塑制品次品率均具有重要的意义。笔者基于上述观点,通过利用在实际生产成型装备上搭建的注塑工艺参数在线监测平台较为系统地研究了主要工艺参数(熔体压力、熔体温度及注射速度)对 PLA 成型的影响规律,以期获取 PLA 的注射成型机理。

1 在线监测平台搭建与实验方案

1.1 工艺参数在线监测平台搭建

通过自主设计的安装底座将熔体压力温度在线测量系统^[15-16](与瑞士 Sensormate AG 公司合作研发)安装在用于实际生产的塑料注射成型机上,自主搭建了注射成型工艺参数监测平台。该平台通过熔体压力温度在线测量系统实现对熔体压力及熔体温度的监测,注射速度则通过注塑机自带系统实现监测,两者的结合实现对熔体压力、熔体温度及速度三种工艺参数的在线监测。该平台通过抵住注塑机喷嘴处的熔体压力温度在线测量系统,在不破坏熔体流动完整性、保持熔体实际流动情况下实现了对熔体压力和熔体温度的实际监测,弥补了注塑机注射压力及温度工艺参数均为间接测量获取的缺陷。在线流变监控装置具体构造图如图 1 所示。在测试喷嘴实际压力时,将喷嘴抵住传感器,调节不同的流变状态,开始常规的注射,这时,由于注塑机螺杆将熔融的塑料往前推动,传感器内部受到熔体

的推力而受力,此时熔体压力传感器的适配器内的小圆锥体因为熔体的推力作用充满了塑胶熔体,同时测量此时喷嘴的实际流变状态,然后通过传感器电缆将数据传到检测器上,同时温度传感器会测量此时通过喷嘴的熔体温度,并通过电热丝电缆传到显示器内,通过显示器抓取熔体压力最大值,得到注塑机的实际熔体压力及其温度(如图 2 所示)。该方法避免了以往通过注塑机间接测量方式获得数据的误差,从而使基于熔体实际温度、压力条件下的 PLA 注射成型机理研究得以实现。

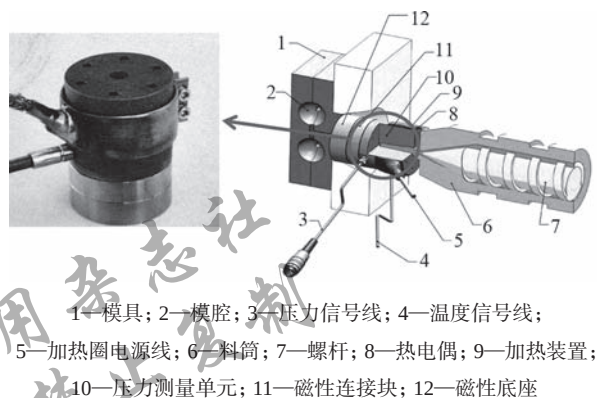


图 1 工艺参数在线监测平台搭建示意图



图 2 熔体压力温度在线测量系统监视器(左为正面、右为背面)

1.2 主要原料

PLA: 4032D, 密度 1.24 g/cm^3 , 美国 Nature works 公司。

1.3 主要仪器与设备

塑料注射成型机: SA1600/540 型, 宁波海天塑机集团有限公司;

拉伸样条模具: 定制产品, 广州现代塑料模具厂;

熔体压力温度在线测量系统: IN4000 型, 瑞士 Sensormate AG 公司;

电子万能试验机: CMT4204 型, 美斯特工业系统(中国)有限公司;

台式扫描电子显微镜(SEM): Phenom pure+ 型, 荷兰 Phenom 公司;

差示扫描量热(DSC)仪: DSC-8000 型, 美国 Perkin-Elmer 公司;

电热鼓风干燥箱: SD101-3A 型, 南通华泰实验

仪器有限公司。

1.4 实验方案

(1) 根据所选 PLA 物料确定加工工艺参数(温度、压力、速度)范围值,如表 1 所示。其中注射速度单位 % 是指注塑机最大注射速度的百分数。

表 1 工艺参数范围表

工艺参数	范围
熔体压力 / MPa	4~14
熔体温度 / °C	180~210
注射速度 / %	30~99

(2) 设计双因素(温度、压力)实验工艺状态表,结合力学性能测试数据,确定最佳的熔体温度与熔体压力参数;在最佳熔体温度与熔体压力工艺条件下,逐渐升高注射速度值进行制样,并进行力学性能测试,确定最佳注射速度。即采用先双变量后单变量的实验方法来确定 PLA 的最佳成型工艺条件。

(3) 对 PLA 注塑试样进行 DSC 分析和 SEM 微观结构表征,研究其性能与结构之间的关系,获取 PLA 注射成型机理。

1.5 测试与表征

(1) 拉伸强度测试。

拉伸强度按 GB/T 1040.2-2006 测试,拉伸速度 50 mm/min。

(2) 结晶度计算。

通过 DSC 测试 PLA 的结晶度。PLA 的结晶度(X_c)结合 DSC 曲线可以由式(1)计算得出。

$$X_c = (\Delta H_m / \Delta H_m^0) \times 100\% \quad (1)$$

式中: ΔH_m ——PLA 的熔融热焓;

ΔH_m^0 ——PLA 完全结晶熔融时的熔融热焓,取值为 93.7 J/g。

(3) SEM 观察结晶情况。

为了利用 SEM 观察结晶情况,对 PLA 拉伸试样淬断后进行了刻蚀,刻蚀条件如下:

①将试样在烘箱中充分干燥(时间和温度视试样而定);

②将试样制缺口,缺口深度占试样总厚度的 1/5;

③将试样放入液氮中,浸泡 0.5 h;

④用钳子夹住试样,钳子前端与缺口平齐,用另一钳子迅速敲断试样(在 5 s 内完成);

⑤在烘箱中烘干试样表面的水分(时间和温度视试样而定);

⑥将淬断面放入刻蚀溶液,在 30°C 下恒温 5 h(溶液配比:甲醇 33.3 mL,蒸馏水 66.7 mL,氢氧化

钠 0.1 g);

⑦取出试样在烘箱中烘干(时间和温度视试样而定)。

2 结果与讨论

2.1 力学性能测试结果

保持注射速度 30% 不变、改变熔体压力、熔体温度,获得的 PLA 试样的拉伸强度数据见表 2。

表 2 不同温度、压力条件下的 PLA 试样拉伸强度 MPa

熔体压力 / MPa	熔体温度 / °C			
	180	190	200	210
4	68.36	71.71	70.51	68.59
5	69.51	70.49	71.43	68.85
6	72.87	70.64	70.28	69.21
7	70.38	70.35	70.58	70.19
8	73.04	70.00	69.73	71.04
9	72.79	71.20	68.70	70.47
10	70.44	71.26	69.41	71.01
11	70.99	70.67	70.56	70.65
12	70.93	69.32	70.79	69.37
13	69.84	70.47	69.95	71.45
14	69.64	71.20	69.37	69.54

从表 2 可以看出,在熔体温度为 180°C、熔体压力为 8 MPa 时,PLA 拉伸试样的拉伸强度最大。在熔体温度 180°C,熔体压力 8 MPa 的情况下,逐渐增加注射速度制备拉伸试样,并测试拉伸性能,所得结果见表 3。

表 3 不同注射速度的 PLA 试样拉伸强度 MPa

项 目	注射速度 / %							
	30	40	50	60	70	80	90	99
拉伸强度	73.04	74.23	73.75	73.18	72.51	72.44	72.01	72.63

由表 3 可知,在注射速度为 40% 时,拉伸强度出现最大值,继续增加注射速度,拉伸强度开始呈现下降趋势。因此,PLA 拉伸试样最佳的成型工艺条件为熔体温度 180°C、熔体压力 8 MPa、注射速度 40%。

2.2 DSC 测试结果与分析

选取不同工艺状态下的 PLA 拉伸试样进行 DSC 测试,观察分析在不同工艺状态下 PLA 试样结晶度变化规律。工艺条件见表 4。DSC 测试曲线如图 3~图 5 所示。

表 4 DSC 测试用试样的成型工艺条件

工艺参数	数 值
熔体温度 / °C	180, 190, 200, 210
熔体压力 / MPa	4, 8, 12, 14
注射速度 / %	30, 40, 99

注:改变其中某一参数时,其它两种参数均为最佳成型工艺参数。

根据式(1)及 DSC 曲线,计算出相应的结晶度列于表 5~表 7,并同时列出其相应的熔点。

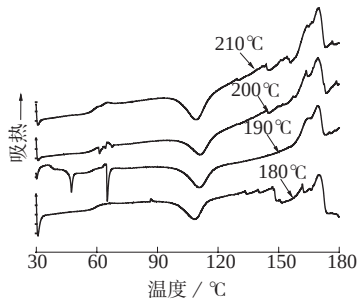


图3 不同熔体温度条件下 PLA 试样的 DSC 测试曲线

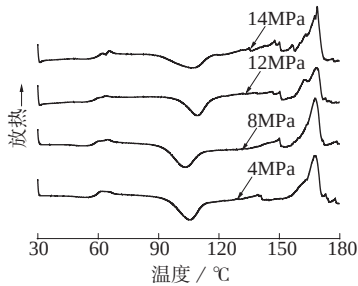


图4 不同熔体压力条件下 PLA 试样的 DSC 测试曲线

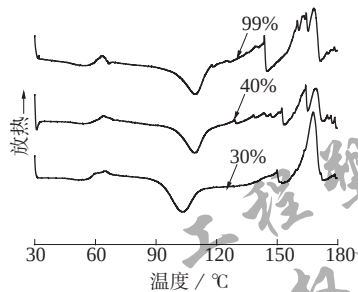


图5 不同注射速度条件下 PLA 试样的 DSC 测试曲线

表5 不同熔体温度条件下 PLA 的结晶度和熔点

项 目	熔体温度 / °C			
	180	190	200	210
结晶度 / %	11.4	10.2	9.5	8.4
熔点 / °C	170.5	169.8	169.4	169.1

表6 不同熔体压力条件下 PLA 的结晶度和熔点

项 目	熔体压力 / MPa			
	4	8	12	14
结晶度 / %	9.0	11.4	8.6	7.9
熔点 / °C	167.7	167.8	168.6	168.8

表7 不同注射速度条件下 PLA 的结晶度和熔点

项 目	注射速度 / %		
	30	40	99
结晶度 / %	10.8	11.4	10.3
熔点 / °C	167.8	169.3	168.2

结合图3~图5与表5~表7进行分析,结果如下:

(1) 结合图3和表5可知,熔体压力8 MPa下结晶度随着熔体温度的升高呈降低趋势,而表2中熔体压力8 MPa下拉伸强度随着熔体温度升高也大致呈降低趋势(210℃除外)。

(2) 结合图4和表6可知,随着熔体压力的增大,

PLA 的结晶度呈现先上升后下降的趋势;在最佳成型压力8 MPa条件下结晶度出现最大值,一般情况下结晶度的提高有利于材料强度和刚性的增加,从而使拉伸强度得到提高,基本符合力学性能测试的结果。众所周知,随着注射压力的增大,进入模腔中的熔体越多,注塑成品密度越大,同时,由于熔体在流动过程中的剪切作用,为结晶提供了条件,促进了结晶的生成,剪切作用的增强和熔体压力的提高会加速结晶过程,在最佳的压力条件下,PLA 的结晶度最大。但是当熔体压力超过一定值时却会导致结晶度的下降,说明存在一个最佳诱导结晶的应力值。

(3) 结合图5和表7可知,随着注射速度的增大,PLA 的结晶度呈先上升后下降趋势。在注射速度为40%时出现相对较大的结晶度,与力学性能测试结果所呈现的先上升后下降的趋势相符。说明PLA 成型存在一个较佳的成型速度。

(4) 从结晶度与熔点之间的关系看,PLA 材料结晶度的高低对其熔点影响不大。结晶度和物质本身的结构有关,也和外界环境有关,而熔点只跟材料的本身性质有关。

2.3 SEM 测试结果与讨论

根据力学性能的测试结果及分析,按照规律从中抽取样本进行SEM测试,观察分析在不同工艺状态下时PLA 的结晶形貌,具体的抽取结果列于表8。不同工艺状态下的SEM照片如图6~图8所示。

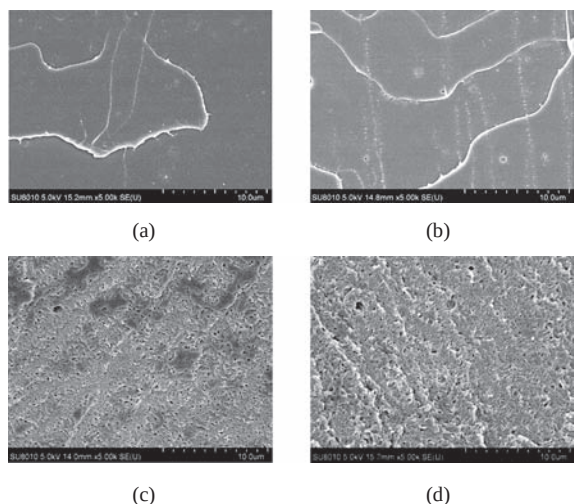
表8 SEM 测试用试样的成型工艺条件

工艺参数	数 值
熔体温度 / °C	180, 190, 200, 210
熔体压力 / MPa	4, 8, 12, 14
注射速度 / %	30, 40, 60, 99

注:改变其中某一参数时,其它两种参数均为最佳成型工艺参数。

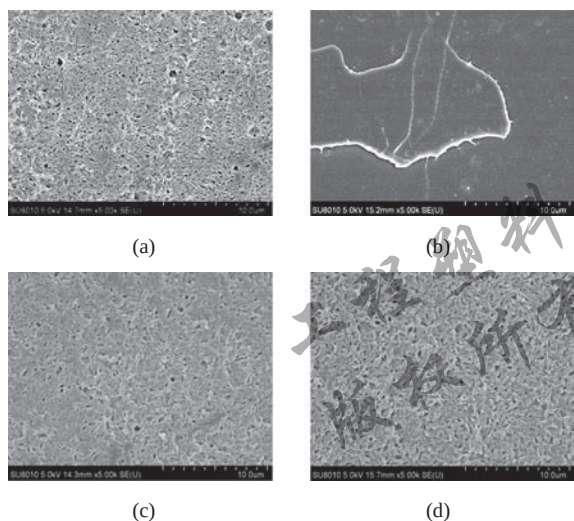
分析图6~图8的SEM照片可以得出以下结论:

(1) 由图6可知,在熔体压力和注射速度保持不变的情况下,在熔体温度为180~190℃时,SEM照片显示刻蚀后表面孔洞较少,呈现较为完善的结晶形貌(非晶相蚀除后的孔洞少或观察不到,下同),而升高熔体温度后开始出现较多非晶孔洞,说明更多非晶相被蚀除。通过力学性能的分析可以得知,熔体压力8 MPa下PLA 的拉伸强度在熔体温度180℃时相对最高。综合分析可以得出,一般情况下PLA 的结晶度越高,力学性能越优异。当熔体温度为180℃时,PLA 在成型加工后的结晶较为完善,结晶度高。当熔体温度逐渐升高时,PLA 的流动性



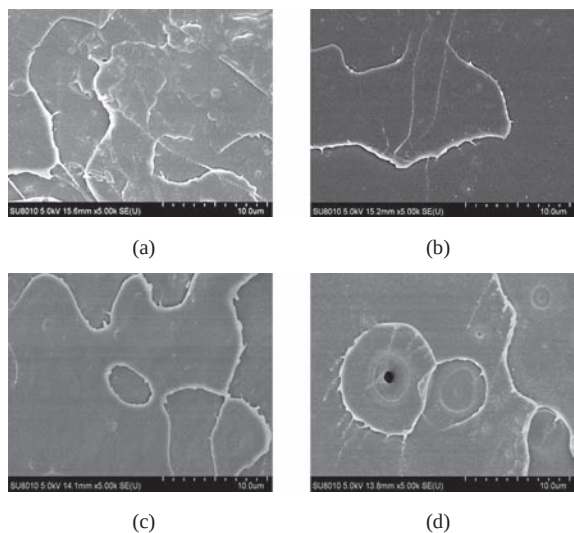
熔体温度: a—180℃; b—190℃; c—200℃; d—210℃

图6 不同熔体温度下 PLA 试样的 SEM 照片 (5000 倍)



熔体压力: a—4 MPa; b—8 MPa; c—12 MPa; d—14 MPa

图7 不同熔体压力下 PLA 试样的 SEM 照片 (5000 倍)



注射速度: a—30%; b—40%; c—60%; d—99%

图8 不同注射速度下 PLA 试样的 SEM 照片 (5000 倍)

增大,同时,由于螺杆的往复运动,使得物料与料筒间的摩擦增大,料流温度升高,由于 PLA 对温度敏感,过高的温度可能会使分子间作用力减少,分子间解缠容易,同时,过高的温度可能会导致 PLA 部分降解,因此在熔体温度较高时,会有较多的非晶相产生。SEM 所表征的结晶形貌与 DSC 测试的结晶度变化趋势一致。

(2) 由图 7 可知,在熔体温度和注射速度保持不变的情况下,熔体压力为 8 MPa 时 PLA 试样刻蚀面规整,出现非晶相孔洞最少。当熔体压力逐渐升高时,非晶相被刻蚀的孔洞开始逐渐增多,说明 PLA 试样的结晶度开始下降。其原因在于,注塑过程中 PLA 由于受到熔体快速流动过程中的应力从而产生诱导结晶,在应力的作用下,聚合物沿熔体流动方向发生取向,在拉伸以及剪切作用的情况下,大分子沿受力方向(取向应力)形成有序的排列,诱发了晶核的生长,结晶度高。但当压力过高时,分子链被过大的取向应力破坏,直接导致不能结晶或结晶度降低。由此可见熔体压力所形成的剪切及拉伸在一定程度上可以诱导 PLA 结晶,但是存在一个临界剪切值,当超过这个值时,剪切作用将不再诱导结晶,因此随着熔体压力不断增大,所能观察到的结晶形貌越来越不明显。

(3) 由图 8 可知,在熔体压力为 8 MPa、熔体温度为 180℃的条件下,30%~99% 的注射速度范围内均未观察到非晶相刻蚀后留下的孔洞,说明在最佳压力温度保持不变的条件下,PLA 的结晶形貌没有发现明显变化,即其结晶情况较为稳定。对比表 5~表 7 以及图 6~图 8,可以看出与熔体温度和熔体压力相比,注射速度是 PLA 结晶的不敏感影响因素,注射速度的变化没有造成结晶形貌的明显变化,而熔体压力影响最为明显,其次是熔体温度。

4 结论

基于工艺参数在线监测条件,研究了不同工艺参数(压力、温度、速度)对 PLA 注射成型拉伸试样力学性能的影响,并利用 DSC 和 SEM 等研究了不同工艺参数条件下 PLA 试样结构的变化规律,总结了熔体压力、熔体温度、注射速度与 PLA 试样力学性能、结构之间的作用机理,得出以下结论:

(1) PLA 注射成型存在一个最佳工艺状态。通过对成型的标准拉伸试样进行拉伸强度测试发现,PLA 拉伸试样最佳成型条件为熔体温度 180℃,熔体压力 8 MPa,注射速度 40%。

(2) PLA 成型存在一个最佳的熔体压力,从而形成一个最佳临界诱导结晶取向应力。SEM 测试结果发现在熔体压力等于 8 MPa 时 PLA 结晶形貌最为完善。熔体压力小于或大于 8 MPa 都会出现较多的非晶相,相应的结晶度降低。说明取向力的作用在一定程度上能够诱导 PLA 的结晶,但是当超过临界值时,将不起诱导作用。

(3) 注射速度是影响 PLA 结晶的不敏感工艺参数。在不同温度、压力、速度的 SEM 照片中,注射速度的变化范围内 PLA 结晶形貌没有发生明显变化,而对于熔体温度和熔体压力只能在较小范围内观察到较为完善的结晶形貌。说明在温度、压力工艺条件下 PLA 的结晶成型窗口较窄,PLA 的结晶对温度和压力较为敏感,而对注射速度不敏感。

参考文献

- [1] 李孝红,袁明龙,郝建原,等.生物降解聚合物的研究和产业化进展及展望[J].高分子通报,2008(8):109-121.
Li Xiaohong, Yuan Minglong, Hao Jianyuan, et al. Progress and prospects on the academic research and industrial application of biodegradable polymers[J]. Chinese Polymer Bulletin, 2008(8):109-121.
- [2] 李旭娟,李忠明.聚乳酸结晶的研究进展[J].中国塑料,2006,20(10):6-12.
Li Xujuan, Li Zhongming. Research advances in poly(lactic acid) crystallization[J]. China Plastics, 2006, 20(10):6-12.
- [3] 王启明.生物基聚酯 PTT 与 PDT 的发展概况[J].高分子通报,2013(10):129-135.
Wang Qiming. From PTT to PDT, development of biological based polyester[J]. Chinese Polymer Bulletin, 2013(10):129-135.
- [4] 冯立栋,高战团,边新超,等.不同初始条件下聚乳酸的等温结晶动力学[J].功能高分子学报,2009,22(2):142-147.
Feng Lidong, Gao Zhantuan, Bian Xinchao, et al. Isothermal crystallization kinetics of polylactic acid from different initial states[J]. Journal of Functional Polymers, 2009, 22(2):142-147.
- [5] 卓仁禧,尹超,吴颖楠,等.聚乳酸眼科植入材料的制备及其降解性能[J].应用化学,1997,14(2):102-104.
Zhuo Renxi, Yin Chao, Wu Yingnan, et al. Synthesis and degradation behavior of poly(DL-lactide) for ophthalmic application[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 1997, 14(2):102-104.
- [6] 刘广军.聚乳酸(PLA)结晶过程影响因素研究进展[J].广州化工,2016,44(3):28-31.
Liu Guangjun. Research progress on poly lactic acid (PLA) crystallization factors[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2016, 44(3):28-31.
- [7] 王惠娟,杨丽娟.聚乳酸复合材料的研究进展[J].合成树脂基塑料,2017,34(6):88-92.
Wang Huijuan, Yang Lijuan. Research progress of PLA composites[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2017, 34(6):88-92.
- [8] Wu J H, Kuo M C, Chen C W. Physical properties and crystallization behavior of poly (lactic acid) / poly(methyl methacrylate) / silica composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(32):78-83.
- [9] Xia Xuelian, Liu Wentao, Zhou Liyong, et al. Study on flax fiber toughened poly (lactic acid) composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(38):67-74.
- [10] 张显勇,王忠,付蕾,等.成核剂的添加对可降解材料聚乳酸结晶性能影响的研究进展[J].化工新型塑料,2018,46(11):230-233.
Zhang Xianrong, Wang Zhong, Fu lei, et al. Research progress on influence of nucleating agent on crystallization of degradable PLA[J]. New Chemical Materials, 2018, 46(11):230-233.
- [11] 吴景梅,韩言松,王小军.改性碳纤维对聚乳酸结晶行为和力学性能的影响[J].塑料工业,2018,46(10):107-110.
Wu Jingmei, Han Yansong, Wang Xiaojun. Effect of modified carbon fiber on crystallization behaviors and mechanical properties of poly(lactic acid)[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(10):107-110.
- [12] 顾书英,詹辉,任杰.聚乳酸/PBAT 共混物的制备及其性能研究[J].中国塑料,2006,20(10):39-42.
Gu Shuying, Zhan Hui, Ren Jie. Preparation and properties of poly(lactic acid)/PBAT blend[J]. China Plastics, 2006, 20(10):39-42.
- [13] 张爱玲,刘琪芳,王松,等.聚乳酸/聚丙烯的共混改性及热学和力学性能[J].沈阳工业大学学报,2019,41(2):159-163.
Zhang Ailing, Liu Qifang, Wang Song, et al. Blending modification and thermal and mechanical properties of polylactic acid / polypropylene[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2019, 41(2):159-163.
- [14] 张红娟,郑红娟,孙正谦.表面处理剂对滑石粉改性聚乳酸的影响[J].化工新型材料,2019,47(2):207-210.
Zhang Hongjuan, Zheng Hongjuan, Sun Zhengqian. Influence of surface treating agent on polylactic acid modified by talc powder[J]. New Chemical Materials, 2019, 47(2):207-210.
- [15] 陈金伟,杨铃,王玫瑰,等.全电动注射机注射压力荷重元标定新方法[J].塑料科技,2015,43(11):78-81.
Chen Jinwei, Yang Ling, Wang Meigui, et al. A new method of calibrating injection pressure load cell of all-electric injection molding machine[J]. Plastics Science and Technology, 2015, 43(11):78-81.
- [16] 陈金伟,杨铃,杨崇岭,等.全电动注塑机注塑压力在线测量新方法[J].工程塑料应用,2013,41(9):73-77.
Chen Jinwei, Yang Ling, Yang Chongling, et al. A new method of online measuring injection pressure of all-electric injection machine[J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(9):73-77.