

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.12.005

PBAT/PLA 共混物薄膜的辐射效应及形状记忆研究

宋伟强^{1,2}, 刘箫华^{1,2}, 王宏森², 安顺利², 程文喜^{1,2}, 程金鹏¹, 徐鸿¹, 宋宇琪¹, 雪腾飞¹, 王赛赛³

(1. 河南工业大学材料科学与工程学院, 郑州 450001; 2. 河南海瑞祥科技有限公司, 河南平顶山 467100;

3. 郑州磨料磨具磨削研究所有限公司, 郑州 450007)

摘要:以聚乳酸(PLA)接枝马来酸酐(PLA-g-MAH)作为增容剂,三烯丙基聚异氰尿酸酯(TAIC)作为辐照敏化剂,采用熔融共混法制备聚对苯二甲酸-己二酸丁二酯(PBAT)/PLA共混物,其挤出、造粒后吹制成膜,然后用聚乙烯袋密封,放入⁶⁰Co辐射场中进行 γ 射线辐照。采用傅里叶变换红外光谱、差示扫描量热、拉伸测试和形状记忆测试对共混物薄膜的性能进行了研究。结果表明,在辐照剂量为0~50 kGy范围内,对PBAT/PLA/PLA-g-MAH/TAIC(质量比为100/10/2/1.5)共混物薄膜进行适量辐照,可提高共混物薄膜的冷结晶温度,辐照使共混物薄膜中PLA组分的熔融峰分裂成一个高温熔融峰和一个低温熔融峰;辐照可提高薄膜的拉伸性能和形状记忆性能,当辐照剂量为30 kGy时,薄膜的拉伸强度、断裂伸长率、形状固定率和形状回复率均达到最大值,分别为14.9 MPa,444.0%,99.1%和97.9%,相比未辐照薄膜分别提高55.2%,46.1%,4.8%和3.9%。

关键词:聚对苯二甲酸-己二酸丁二酯;聚乳酸;辐射效应;拉伸性能;形状记忆

中图分类号: TQ323.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)12-0027-05

Study on Radiation Effects and Shape Memory of PBAT / PLA Blend Membrane

Song Weiqiang^{1,2}, Liu Xiaohua^{1,2}, Wang Hongsen², An Shunli², Cheng Wenxi^{1,2},

Cheng Jinpeng¹, Xu Hong¹, Song Yuqi¹, Xue Tengfei¹, Wang Saisai³

(1. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Hairuixiang Technology Co., Ltd., Pingdingshan 467100, China; 3. Zhengzhou Research Institute for Abrasives & Grinding Co., Ltd., Zhengzhou 450007, China)

Abstract: Poly(butylene adipate terephthalate) (PBAT) / polylactic acid (PLA) blends were prepared by melt blending method, and PLA grafted maleic anhydride (PLA-g-MAH) was added as compatibilizer and triallyl iso-cyanurate (TAIC) was used as irradiation sensitizer. After extruding and granulating, it was blown into films, then sealed with a polyethylene bag, and then placed in a ⁶⁰Co radiation field for γ -ray irradiation. The performance of the blend films were studied by Fourier transform infrared spectroscopy, differential scanning calorimetry, tensile test and shape memory test. The results show that the cold crystallization temperature of PBAT / PLA / PLA-g-MAH / TAIC (mass ratio is 100 / 10 / 2 / 1.5) blend film is increased by appropriate irradiation in the range of irradiation dose of 0–50 kGy. The melting peak of PLA component in the blend film is divided into a high-temperature melting peak and a low melting temperature peak. Irradiation can improve the tensile properties and shape memory properties of the films. When the irradiation dose is 30 kGy, the tensile strength, elongation at break, shape fixation rate and shape recovery rate of the film reach the maximum, which are 14.9 MPa, 444.0%, 99.1% and 97.9%, which are 55.2%, 46.1%, 4.8% and 3.9% higher than that of the non irradiated films, respectively.

Keywords: poly(butylene adipate terephthalate); polylactic acid; radiation effect; tensile property; shape memory

γ 射线辐照改性是聚合物改性的重要手段,有着独特的技术优势。目前,随着人们对塑料“白色污染”的日益重视,可降解聚合物得到迅猛发展,相

应的辐射效应研究也逐渐增多。聚乳酸(PLA)是一种应用广泛的生物降解型聚合物,已有大量文献研究了 γ 射线辐照对PLA微观结构^[1-2]、热性能^[3-4]、

基金项目: 国家自然科学基金项目(52003075),河南省自然科学基金项目(172102210228)

通信作者: 宋伟强,博士,教授,主要从事生物降解塑料的应用研究

收稿日期: 2021-10-11

引用格式: 宋伟强,刘箫华,王宏森,等. PBAT/PLA共混物薄膜的辐射效应及形状记忆研究[J]. 工程塑料应用,2021,49(12): 27–31,37.

Song Weiqiang, Liu Xiaohua, Wang Hongsen, et al. Study on radiation effects and shape memory of PBAT / PLA blend membrane[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(12): 27–31, 37.

加工性能^[5-6]等的影响。PLA是一种辐射降解性聚合物,通过加入辐射敏化剂可以使其显示辐射交联的效果^[7-10],而且交联的PLA仍然能够保持良好的生物降解性^[8,11]。赵婧馨^[12]研究了采用 γ 射线在左旋PLA中建立交联和微晶双网络结构的方法,研究了三烯丙基异氰尿酸酯(TAIC)和吸收剂量对网络结构的影响以及多重形状记忆功能。

聚对苯二甲酸-己二酸丁二酯(PBAT)也是一种具有良好生物降解性能的聚合物,柔韧性和成膜性好,非常适合用于薄膜类制品的应用^[13-15],但其强度和弹性模量较低,与PLA共混可以达到性能互补^[16-17]。目前研究PLA共混材料的文章较多,但都是以PLA为主体,通过添加各种增韧剂来改善脆性,而以PBAT为主体制备形状记忆薄膜的研究相对较少。笔者将PBAT与PLA共混制成PBAT/PLA共混物薄膜,并用 γ 射线对薄膜进行辐照处理,为增进PBAT与PLA两者之间的相容性,加入聚乳酸接枝马来酸酐(PLA-g-MAH)作为增容剂,同时加入TAIC作为辐照敏化剂,研究了 γ 射线对PBAT/PLA共混物薄膜热性能和力学性能的影响,并检测了薄膜的形状记忆功能,对于生物降解塑料薄膜的形状记忆功能的研究有重要意义。

1 实验部分

1.1 主要原料

PLA:FY801,安徽丰原福泰来聚乳酸有限公司;

PBAT:TH801T,新疆蓝山屯河聚酯有限公司;

PLA-g-MAH:密度 1.21 g/cm^3 ,熔体流动速率 $>3\text{ g/(10 min)}$ (190°C , 2.16 kg),佛山佐高塑化有限公司;

TAIC:工业级,佛山市圣亿塑料化工有限公司。

1.2 主要仪器与设备

双螺杆挤出机:SHJ-36型,南京杰恩特机电公司;

注塑机:PL860/260型,无锡海天机械有限公司;

吹膜机:MF260D型,北京泽岛机械有限公司;

万能试验机:WDW-10型,济南川佰仪器设备有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:NitoletiS20型,赛默飞世尔科技有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC200F3型,耐驰科

学仪器商贸(上海)有限公司。

1.3 辐照PBAT/PLA共混物薄膜样品的制备

按照100/10/2/1.5的质量比称取PBAT, PLA, PLA-g-MAH, TAIC, 掺混均匀后,用双螺杆挤出机进行挤出、造粒,双螺杆挤出机的工艺参数如下:一区温度 167°C ,二区温度 170°C ,三区温度 172°C ,四区温度 172°C ,五区温度 170°C ,六区温度 170°C ,七区温度 169°C ,机头温度为 168°C ;喂料转速 6 r/min ,主机转速 100 r/min ;烘干后将 1 kg 粒料加入吹膜机进料口,用吹膜机吹制成膜,吹膜工艺参数如下:熔融段一区温度 175°C ,二区温度 176°C ,三区温度 178°C ,机头温度 180°C 、吹膜喷嘴温度 182°C ,螺杆转速 20 r/min ,控制鼓风速度在量程中间值附近,调整吹膜速度和卷曲速度一致,控制膜厚 0.3 mm 。保持其它材料的配比不变,调整PLA的质量份为20,30,40,50,重复上述试验制膜。将所制薄膜置于聚乙烯塑料袋中,密封后放入 ^{60}Co 源辐射场中进行辐照处理。辐照剂量率 1 kGy/h ,辐照剂量在 $0\sim 50\text{ kGy}$ 之间。

1.4 性能测试与表征

FTIR测试:采用FTIR仪对样品进行扫描测试,扫描32次,扫描范围 $400\sim 4000\text{ cm}^{-1}$ 。

拉伸性能测试:按照GB/T 1040.1-2006,用万能试验机进行拉伸性能测试,拉伸速率 20 mm/min ,薄膜尺寸为 $25\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 0.3\text{ mm}$,每组三个样,取平均值。

热性能测试:采用DSC仪对样品进行测试,对样品进行二次升温处理,以消除热历史的影响,设置温度区间为 $25\sim 200^\circ\text{C}$,升温速率和降温速率均为 20°C/min 。

形状记忆性能测试:采用拉伸模式表征样品的形状记忆性能。试样原始尺寸为 $20\text{ mm}\times 3\text{ mm}\times 0.3\text{ mm}$ 。在 80°C 热水浴中将一定长度(L_0)的样条单轴拉伸至一定长度(L_1),在保持拉伸状态不变的情况下将样条降温至 25°C ,充分冷却后除去外力,样条回复至一定长度(L_2);将样条置于 80°C 热水浴中,试样长度又回复到一定长度(L_3)。形状固定率(R_f)和形状回复率(R_r)分别按式(1)和式(2)计算:

$$R_f = \frac{L_2 - L_1}{L_1 - L_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$R_r = \frac{L_2 - L_3}{L_2 - L_0} \times 100\% \quad (2)$$

2 结果与讨论

2.1 FTIR 分析

不同辐照剂量下 PBAT/PLA 共混物薄膜的 FTIR 谱图如图 1 所示。

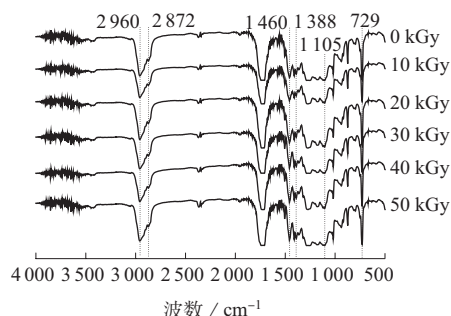


图 1 不同辐照剂量下 PBAT/PLA 共混物薄膜的 FTIR 谱图

从图 1 可以看出, 729 cm^{-1} 处的吸收峰归属于 PBAT 链中对位双取代苯环上 C—H 的面外弯曲振动, $700\sim 900\text{ cm}^{-1}$ 之间的多个吸收峰都归属于苯环的复杂振动; 1460 cm^{-1} 处的吸收峰归属于 $\text{—CH}_2\text{—}$ 的弯曲振动^[18]; 1105 cm^{-1} 和 1273 cm^{-1} 处的吸收峰归属于酯中 C—O—C 基团的伸缩振动, 1388 cm^{-1} 处的吸收峰归属于 PLA 链中 C—C 弯曲振动; $1690\sim 1772\text{ cm}^{-1}$ 处的宽峰归属于酯羰基的伸缩振动; 2960 cm^{-1} 和 2872 cm^{-1} 处的吸收峰归属于亚甲基的伸缩振动。由此可见, 不同辐照剂量下 PBAT/PLA 共混物薄膜的 FTIR 谱图没有显著的变化, 说明薄膜的化学组成没有显著变化。

2.2 热性能分析

不同剂量辐照下, PBAT/PLA (100/10) 共混物薄膜的 DSC 降温 and 二次升温曲线分别如图 2、图 3 所示, 相应的 DSC 参数数据见表 1。

从图 2 可以看出, 在降温过程中所有薄膜都出现一个显著的放热峰, 显示有冷结晶现象。结合表 1 分析可知, 未辐照薄膜的冷结晶温度为 75.8°C 。随着辐照剂量从 0 增加到 30 kGy , 冷结晶温度逐渐增加到 77.4°C , 但继续增加辐照剂量, 冷结晶温度反而下降。

在 高能射线 的作用下, 聚合物形成大量活性点, 包括自由基、离子等。活性点之间相互作用会进一步引起大分子链的交联和降解。交联和降解会同时存在, 但总辐射效应取决于哪一个反应占优势。PBAT/PLA (100/10) 中有添加有 TAIC。TAIC 作为多功能团单体会促进交联反应, 分子量增加, 结晶温度升高。辐照剂量超过 30 kGy 时, TAIC 消耗殆尽, 继续辐照降解反应占优势, 分子量减小, 结晶温

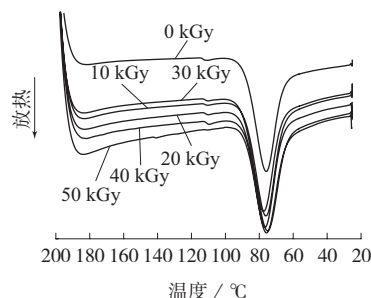


图 2 不同辐照剂量下 PBAT/PLA (100/10) 共混物薄膜的 DSC 降温曲线

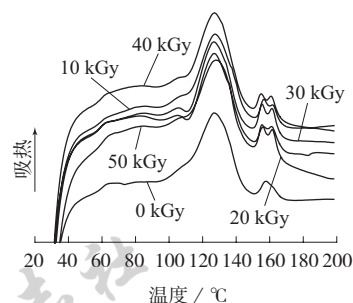


图 3 不同辐照剂量下 PBAT/PLA (100/10) 共混物薄膜的 DSC 二次升温曲线

表 1 不同辐照剂量下 PBAT/PLA (100/10)

辐照剂量 / kGy	$T_{m, \text{PBAT}}$	$T_{m1, \text{PLA}}$	$T_{m2, \text{PLA}}$	T_c
0	126.8	157.1		75.8
10	127.4	156.5	161.7	76.0
20	126.9	155.4	161.3	76.6
30	126.7	155.3	161.3	77.4
40	126.9	154.8	160.7	75.1
50	127.9	156.5	161.0	75.8

注: $T_{m, \text{PBAT}}$ 表示 PBAT 的熔融温度, $T_{m1, \text{PLA}}$, $T_{m2, \text{PLA}}$ 分别表示 PLA 的低温和高温熔融温度, T_c 表示 PBAT/PLA 共混物薄膜的冷结晶温度。

度下降。

PBAT 和 PLA 都是可以结晶的聚合物, 相对来说 PLA 分子链刚性大一些, 结晶速度慢, 而且 PBAT 含量占优势, PBAT/PLA (100/10) 共混物更多表现出 PBAT 的结晶特性。由图 3 可以看出, γ 射线辐照对 PBAT/PLA (100/10) 共混物的熔融行为有一定影响。最明显的区别就是未辐照薄膜在 157.1°C 的熔融峰在辐照后分裂为两个熔融峰。低温熔融峰 (峰值温度 127°C 左右) 归属于 PBAT 组分, 高温熔融峰归属于 PLA 组分。归属于 PLA 的熔融峰发生分裂, 分裂为两个熔融峰, 在一定程度上说明 γ 射线辐照对 PLA 的影响大于对 PBAT 的影响。原因可能在于 PLA 分子链中有次甲基, 次甲基的氢原子容易在高能射线作用下失去而形成自由基, 进而发生多种反应, 包括断链。另外, 在辐照过程中,

PLA 的交联发生在无定形区^[19],交联结构会阻滞链段运动,降温过程中冷结晶形成的晶片完整性差,熔融温度低。而对于 PLA 的晶区,高能射线对分子链的影响小,降温过程中冷结晶形成的晶片完整性好,熔融温度高。这样就造成 PLA 熔融峰发生分裂。

2.3 力学性能分析

不同辐照剂量下 PBAT/PLA (100/10) 共混物薄膜的应力-应变曲线如图 4 所示。

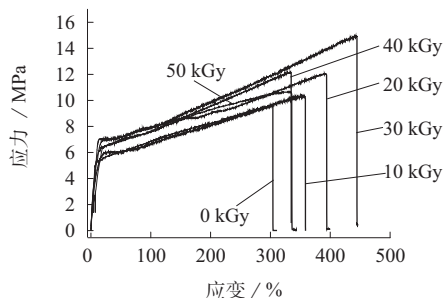


图 4 不同辐照剂量下 PBAT/PLA (100/10) 共混物薄膜的应力-应变曲线

从图 4 可以看出, γ 射线辐照会提高 PBAT/PLA (100/10) 共混物薄膜的屈服强度和屈服应变。随着辐照剂量的增加,薄膜的拉伸强度和断裂伸长率都增大,

辐照剂量为 0 kGy 时,薄膜的拉伸强度为 9.6 MPa,断裂伸长率为 304.0%;辐照剂量为 10 kGy 时,拉伸强度为 10.4 MPa,断裂伸长率为 358.4%;辐照剂量为 20 kGy 时,拉伸强度为 12.1 MPa,断裂伸长率为 394.0%;辐照剂量为 30 kGy 时,拉伸强度为 14.9 MPa,断裂伸长率为 444.0%,此时拉伸强度和断裂伸长率均达到最大值,相比未辐照薄膜分别提高 55.2% 和 46.1%,薄膜的力学性能最佳;再增加辐照剂量,拉伸强度和断裂伸长率随之下降,辐照剂量为 40 kGy 时,拉伸强度为 12.3 MPa,断裂伸长率为 334.7%;辐照剂量为 50 kGy 时,拉伸强度为 10.6 MPa,断裂伸长率为 335.0%。

在研究辐照剂量范围内, PBAT/PLA (100/10) 共混物薄膜的拉伸强度和断裂伸长率均出现极值的原因,可能在于 TAIC 作为多功能团单体会促进辐照交联反应,当 TAIC 全部参与交联反应后继续辐照会使辐照降解反应占优势,造成力学性能下降。

进一步研究辐照剂量为 30 kGy 时, PLA 含量对 PBAT/PLA 共混物薄膜的拉伸强度和断裂伸长率的影响,结果如图 5 所示。

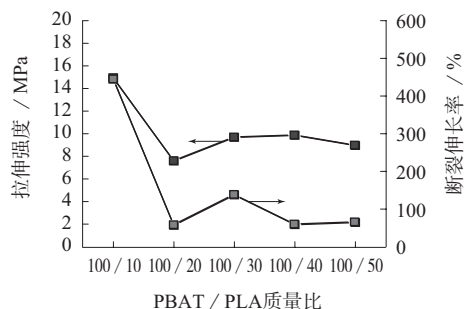


图 5 不同 PLA 含量下 PBAT/PLA 共混物薄膜的拉伸强度和断裂伸长率 (辐照剂量 30 kGy)

从图 5 可以看出,在辐照剂量 30 kGy 条件下, PBAT/PLA=100/10 时, PBAT/PLA 共混物薄膜的拉伸强度为 14.9 MPa,断裂伸长率为 444%; PBAT/PLA=100/20 时,拉伸强度为 7.57 MPa,断裂伸长率为 56.5%; PBAT/PLA=100/30 时,拉伸强度为 9.67 MPa,断裂伸长率为 137.2%; PBAT/PLA=100/40 时,拉伸强度为 9.85 MPa,断裂伸长率为 58.39%; PBAT/PLA=100/50 时,拉伸强度为 8.95 MPa,断裂伸长率为 64.1%。随着 PLA 含量的增加, PBAT/PLA 共混物薄膜的拉伸强度和断裂伸长率总体呈下降趋势。原因在于, PLA 是一种辐照降解性聚合物,当辐照剂量和 TAIC 用相同量时,由于 PLA 的辐照降解,其含量的增加会降低共混物的力学性能。

2.4 形状记忆性能分析

不同辐照剂量下 PBAT/PLA (100/10) 共混物薄膜的形状固定率和形状回复率如图 6 所示。

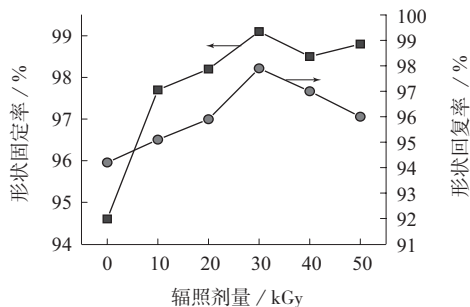


图 6 不同辐照剂量下 PBAT/PLA (100/10) 共混物薄膜的形状固定率和形状恢复率

从图 6 可看出,未经辐照的 PBAT/PLA (100/10) 共混物薄膜的形状固定率和形状回复率分别为 94.6% 和 94.2%,辐照后薄膜的形状固定率和形状回复率增大。当辐照剂量为 10 kGy 时,薄膜的形状固定率为 97.7%,形状回复率为 95.1%;辐照剂量为 20 kGy 时,薄膜的形状固定率为 98.2%,形状回复率为 95.9%;辐照剂量为 30 kGy 时,薄膜的形状

固定率为 99.1%,形状回复率为 97.9%,此时形状固定率和形状回复率均达到最大值,相比未辐照薄膜分别提高 4.8% 和 3.9%,薄膜的形状记忆性能最佳;继续增加辐照剂量,薄膜的形状固定率和形状回复率逐渐下降,辐照剂量为 40 kGy 时,薄膜的形状固定率为 98.5%,形状回复率为 97.0%;辐照剂量为 50 kGy 时,薄膜的形状固定率 98.8%,形状回复率达到 96.0%。说明辐照剂量为 30 kGy 时薄膜的形状记忆性能最佳。

3 结论

不同剂量辐照后,PBAT/PLA(100/10)共混物薄膜的 FTIR 谱图没有明显变化,但对薄膜的热性能和拉伸性能都有影响,尤其是对拉伸性能影响明显。适量辐照会提高薄膜的冷结晶温度,辐照会使 PLA 组分的熔融峰发生分裂,分裂成两个熔融峰,分别低于和高于未辐照薄膜的熔融温度。当辐照剂量为 30 kGy 时,薄膜的冷结晶温度提升 1.6℃;拉伸强度和断裂伸长率均达到最大值,分别为 14.9 MPa 和 444.0%,相比未辐照薄膜分别提高 55.2% 和 46.1%;形状记忆性能最佳,形状固定率为 99.1%,形状回复率达到 97.9%,相比未辐照薄膜分别提高 4.8% 和 3.9%。辐照剂量为 30 kGy 时,随着 PLA 含量的增加,薄膜的拉伸强度和断裂伸长率总体呈下降趋势。

参考文献

- [1] 陈金周,于伟东,田青亮,等. γ 辐射左旋聚乳酸的力学稳定性[J]. 工程塑料应用,2008,36(11):23-27.
Chen Jinzhou, Yu Weidong, Tian Qingliang, et al. Mechanical stability of γ -radiation PLLA[J]. Engineering Plastics Application, 2008,36(11):23-27.
- [2] Ashraf S S, Frounchi M, Dadbin S. Gamma irradiated electroconductive polylactic acid / polyaniline nanofibers[J]. Synthetic Metals, 2020, 259. doi:10.1016/j.synthmet.2019.116204.
- [3] Alsabbagh A, Abu Saleem R, Almasri R, et al. Effects of gamma irradiation on 3D-printed polylactic acid (PLA) and high-density polyethylene (HDPE)[J]. Polymer Bulletin, 2021, 78(9):4931-4945.
- [4] Aouat T, Kaci M, Lopez-Cuesta J M, et al. The effect of gamma-irradiation on morphology and properties of melt-spun poly(lactic acid)/cellulose fibers[J]. Polymer Degradation and Stability, 2019, 160:14-23.
- [5] Hachana N, Wongwanchai T, Chaochanchaikul K, et al. Influence of crosslinking agent and chain extender on properties of gamma-irradiated PLA[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2017, 25(2):323-333.
- [6] Madera-Santana T J, Meléndrez R, González-García G, et al. Effect of gamma irradiation on physicochemical properties of commercial poly(lactic acid) clamshell for food packaging[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2016, 123:6-13.
- [7] Nagasawa N, Kaneda A, Kanazawa S, et al. Application of poly(lactic acid)modified by radiation crosslinking[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B:Beam Interactions with Materials and Atoms, 2005, 236(1-4):611-616.
- [8] Lin H Y, Tsai S Y, Yu H T, et al. Degradation of polylactic acid by irradiation[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2018, 26(1):122-131.
- [9] Jin F, Hyon S H, Iwata H, et al. Crosslinking of poly(L-lactide) by γ -irradiation[J]. Macromolecular rapid communications, 2002, 23(15):909-912.
- [10] Kodali M, Wis A A, Ozkoc G. The mechanical, thermal and morphological properties of γ -irradiated PLA / TAIC and PLA / OvPOSS[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2018, 153:214-225.
- [11] Quynh T M, Mitomo H, Nagasawa N, et al. Properties of crosslinked polylactides (PLLA & PDLA) by radiation and its biodegradability[J]. European Polymer Journal, 2007, 43(5):1779-1785.
- [12] 赵婧馨. 聚乳酸网络结构构筑及其形状记忆性能研究[D]. 北京:中国科学院大学,2020.
Zhao Jingxin. Fabrications of networks in PLLA and improvements of shape memory properties[D]. Beijing:University of Chinese Academy of Sciences,2020.
- [13] 尚晓煜,刘晓南,谢锦辉,等. PLA/PBAT 复合材料研究进展[J]. 工程塑料应用,2021,49(6):157-164.
Shang Xiaoyu, Liu Xiaonan, Xie Jinhui, et al. Advance in research of polylactic acid / poly(butyleneadipate-co-terephthalate) composites[J]. Engineering Plastics Application, 2021,49(6):157-164.
- [14] Scaffaro R, Maio A, Gammino M, et al. Effect of an organoclay on the photochemical transformations of a PBAT / PLA blend and morpho-chemical features of crosslinked networks[J]. Polymer Degradation and Stability, 2021, 187. doi:10.1016/j.polyimdegstab.2021.109549.
- [15] Zhang Ye, Jia Shiling, Pan Hongwei, et al. Effect of glycidyl methacrylate-grafted poly (ethylene octene) on the compatibility in PLA / PBAT blends and films[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2021, 38(8):1746-1755.
- [16] Chen J, Rong C, Lin T, et al. Stable co-continuous PLA / PBAT blends compatibilized by interfacial stereocomplex crystallites:Toward full biodegradable polymer blends with simultaneously enhanced mechanical properties and crystallization rates[J]. Macromolecules, 2021, 54(6):2852-2861.
- [17] Zhou Yikai, Qiu Shuo, Waterhouse G I N, et al. Enhancing the

结果,添加 PVP 质量分数达到 PSU 质量的 50% 时,所得 PSU/PVP 复合多孔纳米纤维膜的形貌较好,孔隙率达到 86.3%,对 MB 的吸附率达到 114.3 mg/g,综合性能最佳。

参考文献

- [1] Yang Dongxue, Li Lingfeng, Chen Binling, et al. Functionalized chitosan electrospun nanofiber membranes for heavy-metal removal[J]. *Polymer*, 2019, 163:74–85.
- [2] Li Tianjiao, Li Yan, Wang Hengguo, et al. Electrospun carbon nanofiber decorated with Co-Ni alloy nanoparticles as a bifunctional electrocatalyst for Zn-Ir battery[J]. *Materials Letters*, 2020, 275. doi:10.1016/j.matlet.2020.128135.
- [3] Song Guocheng, Luo Kaiju, Yu Junrong, et al. High performance ultrafiltration composite membranes based on nanofibrous substrate with PDA coating and TAPS-NA immobilization[J]. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 2019, 58(7):1–14.
- [4] Miao Lei, Liu Guojun, Wang Jiandong. Ag-nanoparticle-bearing poly(vinylidene fluoride) nanofiber mats as Janus filters for catalysis and separation[J]. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(7):7397–7404.
- [5] Kumar R, Rai B, Kumar G. A simple approach for the synthesis of cellulose nanofiber reinforced chitosan / PVP bio nanocomposite film for packaging[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2019, 27(12):2963–2973.
- [6] Das S. Flexible nanogenerator from electrospun PVDF-polycarbazole nanofiber membranes for human motion energy-harvesting device applications[J]. *ACS Biomaterials Science and Engineering*, 2021, 7(4):1673–1685.
- [7] Persano L, Camposeo A, Tekmen C, et al. Industrial upscaling of electrospinning and applications of polymer nanofibers: A review[J]. *Macromolecular Materials & Engineering*, 2013, 298(5):504–520.
- [8] Ellison C J, Phatak A, Giles D W, et al. Melt blown nanofibers: Fiber diameter distributions and onset of fiber breakup[J]. *Polymer*, 2007, 48(11):3306–3316.
- [9] Qian Jiangang, Zhang Jiaxiang, Li Shuqing, et al. Study on laser cladding NiAl / Al₂O₃ coating on magnesium alloy[J]. *Rare Metal Materials & Engineering*, 2013, 42(3):466–469.
- [10] Tai M J Y, Perumal V, Gopinath S C B, et al. Laser-scribed graphene nanofiber decorated with oil palm lignin capped silver nanoparticles: A green biosensor[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1). doi:10.1038/s41598-021-85039-2.
- [11] Medeiros E S, Glenn G M, Klamczynski A P, et al. Solution blow spinning: A new method to produce micro-and nanofibers from polymer solutions[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, 113(4):2322–2330.
- [12] 宋国城,胡祖明,于俊荣,等. 溶液喷射纺丝制备 PES-C/PES-CB 复合纳米纤维膜[J]. *工程塑料应用*, 2019, 47(3):31–36. Song Guocheng, Hu Zuming, Yu Junrong, et al. Preparation of PES-C/PES-CB composite nanofibrous membranes via solution-blowing[J]. *Engineering Plastics Application*, 2019, 47(3):31–36.
- [13] Sinha-Ray S, Zhang Y, Yarin A L, et al. Solution blowing of soy protein fibers[J]. *Biomacromolecules*, 2011, 12(6):2357–2363.
- [14] 李超,于俊荣,王彦,等. 溶液喷射法制备间位芳纶纳米纤维的研究[J]. *功能材料*, 2016, 47(10):10218–10224. Li Chao, Yu Junrong, Wang Yan, et al. The research on PMIA nanofibers via solution blow spinning[J]. *Journal of Functional Materials*, 2016, 47(10):10218–10224.
- [15] 张晓辉,李治明,尹学琼,等. 聚苯乙烯微纳米纤维膜的液喷纺丝制备工艺研究[J]. *纺织导报*, 2017(5):68–72. Zhang Xiaohui, Li Zhiming, Yin Xueqiong, et al. An investigation on polystyrene nanofiber membrane prepared by solution blow spinning[J]. *China Textile Leader*, 2017(5):68–72.
- [16] Jang W G, Jeon K S, Byun H S. The preparation of porous polyamide-imide nanofiber membrane by using electrospinning for MF application[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2013, 51(25–27):5283–5288.
- [17] Yu Bai, Huang Zhenghong, Yu Xiaoliang, et al. Graphene oxide-embedded porous carbon nanofiber webs by electrospinning for capacitive deionization[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2014, 444:153–158.
- [18] Qian Mengxia, Yang Fangfang, Li Nan, et al. A novel biodegradable porous graphitic carbon nitride / poly(lactic acid) fiber photocatalyst for efficient elimination of carbamazepine under solar irradiation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 414. doi:10.1016/j.cej.2021.128845.
- [19] Song Guocheng, Li Jing, Zhu Jing, et al. Preparation and characterization of ternary poly(arylene ether sulfone) nanofibrous membranes via solution-blowing with phthalein group in the main chain[J]. *Current Nanoscience*, 2018, 14:463–473.
- [20] 宋国城. 酚酞聚醚砜纳米纤维复合膜的构筑及亲水改性研究[D]. 上海: 东华大学, 2019. Song Guocheng. Study on the construction and hydrophilic modification of Phenolphthalein poly(ether sulfone) composite nanofibrous membranes[D]. Shanghai: Donghua University, 2019.
- Gu Long, Lan Jianwu, Shi Kun, et al. Synthesis and characterization of poly(terephthalic acid-co-adipic acid-co-butylene glycol)[J]. *Engineering Plastics Application*, 2016, 44(10):32–35, 61.
- [19] Wang Wenshou, Ping Peng, Chen Xuesi, et al. Polylactide-based polyurethane and its shape-memory behavior[J]. *European Polymer Journal*, 2006, 42(6):1240–1249.

(上接第 31 页)

properties of PBAT / PLA composites with novel phosphorus-based ionic liquid compatibilizers[J]. *Materials Today Communications*, 2021, 27. doi:10.1016/j.mtcomm.2021.102407.

- [18] 古隆,兰建武,石坤,等. 对苯二甲酸/己二酸/丁二醇共聚酯的合成与表征[J]. *工程塑料应用*, 2016, 44(10):32–35, 61.