

技术专论

单轴拉伸 PLLA/PBS 共混薄膜的包装特性研究

梁晓红, 于振菲, 吴佳鑫, 赵子龙, 呼和, 王羽, 靳焜, 董同力嘎

(内蒙古农业大学, 呼和浩特市 010018)

摘要: **目的** 提高聚乳酸(PLLA)的韧性、强度及阻氧性能。**方法** 采用双螺杆挤出流延线制备单轴拉伸 PLLA/聚丁二酸丁二醇酯(PLLA/PBS)共混薄膜,用万能拉伸试验机、差示扫描量热分析仪(DSC)和透氧仪,对不同拉伸比例的 PLLA/PBS 共混薄膜的力学性能、热学性能和阻氧性进行了评估。**结果** 随着拉伸比例的增大,PLLA/PBS 共混薄膜屈服强度和弹性模量增大,断裂伸长率先增大后降低的趋势。随拉伸比例的增大,PLLA/PBS 共混薄膜结晶速率明显提高,其阻氧性也得到一定的改善。**结论** 通过单轴拉伸和与 PBS 共混提高了 PLLA 的韧性和强度,中等拉伸比例的 PLLA/PBS 共混薄膜的阻氧性相对较好。

关键词: 力学性能; 结晶性能; 阻氧性能; 共混薄膜

中图分类号: TB484.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2014)23-0052-06

Packaging Characteristics of Uniaxially Stretched PLLA/PBS Blend Film

LIANG Xiao-hong, YU Zhen-fei, WU Jia-xin, ZHAO Zi-long, HU He, WANG Yu,
JIN Ye, DONG Tungalag

(Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

ABSTRACT: Objective To improve the toughness, strength and oxygen barrier properties of poly(L-lactic acid)(PLLA). **Methods** Uniaxially stretched PLLA/poly(butylene succinate) (PLLA/PBS) blend film was prepared through twin-screw extrusion line. Universal tensile testing machine, differential scanning calorimetric analyzer and oxygen permeability test were used to evaluate the mechanical, thermal and oxygen barrier behavior of PLLA/PBS film with different draw ratios. **Results** Yield strength and Young's modulus of uniaxially stretched PLLA/PBS film were increased. But the elongations at break first increased and then decreased with the increase of the draw ratios. Crystallization rate of PLLA/PBS film increased with the increase of the draw ratios and its oxygen barrier properties were also improved. **Conclusion** By uniaxial stretching and blending with PBS, the toughness and strength of PLLA were improved, furthermore, the oxygen barrier properties of the medium stretched PLLA/PBS film were relatively good.

KEY WORDS: mechanical property; crystallization property; oxygen barrier property; blend film

L-乳酸(PLLA)是一种环境友好型脂肪族聚酯,使用可再生的植物资源所提出的淀粉原料制成,具有良好的生物降解性和生物相容性,已广泛应用到药物载体及手术缝合线等医学领域^[1-3]。纯 PLLA 的拉伸强度大于 60 MPa,拉伸模量大于 3 GPa,断裂伸长率为 3%~6%,具有良好的刚性但容易脆性断裂,其应用范围受到限制^[4]。高分子材料的力学性能、光学性能和结晶性能等通过取向会发生不同程度的变化。PLLA

收稿日期: 2014-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(51163010); 内蒙古草原英才科研基金(2011); 第四十八批国家博士后科学基金面上资助项目

作者简介: 梁晓红(1989—),女,蒙古族,内蒙古人,内蒙古农业大学研究生,主攻食品包装与储运。

通讯作者: 董同力嘎(1972—),男,蒙古族,内蒙古人,博士,内蒙古农业大学教授、博士生导师,主要研究方向为高分子材料、食品包装与储运。

纤维一般使用L/D比例为2~10喷丝头进行纺丝,纺丝温度一般为185~240℃^[5-6]。将拉伸比例逐渐调大,其屈服强度从60 MPa提高到了200 MPa^[7]。用螺杆挤出吹膜或螺杆挤出拉伸的方法制备PLLA薄膜,挤出吹膜的温度一般为190~200℃,吹胀比(BUR)为2:1~4:1。通过对BUR、螺杆转速、空气压和卷绕速度的调节,可以制备出不同厚度和取向程度的薄膜^[8-9]。通过机械拉伸,将PLLA片材在60~80℃范围下拉伸2~10倍,得到单轴拉伸薄膜^[10]。通过调节拉伸速度、温度和比率可改变PLLA薄膜的取向。高应变速率、低温和高拉伸倍数有助于PLLA在取向过程中的诱导结晶。在80℃时进行机械拉伸得到高度取向的PLLA薄膜^[11]。同时,在63~70℃时进行纵向拉伸,在室温环境下进行横向拉伸,也得到了较高取向度的双向拉伸薄膜^[12]。这种取向之后的PLLA薄膜具有较高的结晶度和尺寸稳定性,并且横、纵向拉伸比对结晶有序性和取向都有影响^[13]。研究双向拉伸薄膜的物理学性能发现,膜的屈服强度达到145 MPa,弹性模量达到3.8 GPa,都有很大程度的提高^[14]。

共混改性是改善PLLA脆性缺点最有效的途径之一。通过将线性低密度聚乙烯(LLDPE)与PLLA熔融共混,增加了PLLA的韧性,将PLLA的冲击强度从20 J/m提高到660 J/m^[15]。同时,添加小分子量的聚合物或柔性较好的聚合物同样可以提高PLLA的韧性,如聚乙二醇(PEG)^[16-19]、聚丙烯(PPG)^[20]、柠檬酸酯^[21-22]、聚酯聚丁二酸丁二醇酯(PBS)^[23]和Ecoflex^[24]等。同样,使用互穿网络技术,以C60或环糊精为连接节点,以PEG为网络联接高分子的网状高分子与无定形和结晶性的PLLA共混,也得到了韧性较高的PLLA膜材料^[25-27]。

实验研究通过熔融挤出流延线进行共混挤出成膜,探讨添加少量PBS和单轴拉伸成形对PLLA薄膜的力学性能、热学性能及阻氧性能的影响。

1 试验

1.1 材料与设备

材料:PLLA(A1001),购于深圳光华伟业责任有限公司;PBS(HX-Z101),购于安庆和兴化工有限公司。

设备:双螺杆挤出流延拉伸机组(PPT-3/SJ2-20-

250,广州市普同实验分析仪器有限公司);微型双螺杆注射机(SJSZ-10A,武汉市瑞鸣塑料机械制造有限公司);热压机(R-3202,武汉启恩科技发展有限责任公司);万能拉伸试验机(Xn-8750,东莞市星汇电子有限公司);差示扫描量热分析仪(DSC, Q20, TA Instruments);透氧仪(Model 8001, Illinois)。

1.2 方法

1.2.1 未拉伸PLLA/PBS共混薄膜制备

将材料PLLA按质量分数0、10%和100%与PBS混合,分别称取10 g。用双螺杆挤出机混合挤出造粒。双螺杆的温度为200℃,转速为27.5 r/min,密炼时间为10 min。挤出造粒后在热压机上热压成膜,热压温度设置为190℃,压力为20 MPa。得到的未拉伸薄膜,其拉伸比例*R*记为1。

1.2.2 单轴拉伸PLLA/PBS共混薄膜制备

将PLLA和PBS母粒在真空干燥箱中80℃干燥8 h。将干燥好的母粒注入双螺杆挤出机,螺杆组温度依次调整在180~215℃之间,挤出温度为215℃。经熔融挤出后形成铸片,通过调节移动辊和固定辊转速,在80℃下进行纵向拉伸,得到不同拉伸比例的单轴拉伸薄膜。通过公式(1)计算出拉伸比例*R*。

$$R = \frac{S_m}{S_f} \quad (1)$$

式中, S_m 为移动辊的转速; S_f 为固定辊的转速。对试样进行标记: $R=2$, $R=3$ 和 $R=4$ 。其中, R 后面的数字代表相应的拉伸倍数。

1.2.3 力学性能测试

将样品裁成哑铃状(宽10 mm,长50 mm),测定厚度,使用万能拉伸试验机以3 mm/min的拉伸速度在室温下进行拉伸测试。仪器可读出拉伸距离和拉伸力等参数,由此可计算出屈服强度、断裂伸长率和弹性模量。每组测试8个平行样。

1.2.4 差示扫描量热分析(DSC)测试

用DSC测定样品的热学性能,并在氮气氛围进行测试。称取5~7 mg样品,以10℃/min的升温速度从-60℃升温至190℃,在190℃恒温1 min,以10℃/min的降温速度降温至-60℃。

1.2.5 透氧性能测试

在温度为25℃、相对湿度为65%条件下进行氧气透过率测试。每组测试2个平行样,取其平均值作为

实验结果。根据公式(2)计算出氧气透过系数 O_p 。

$$O_p = \frac{O_{TR} \times D}{\Delta p}$$

式中, O_p 为氧气透过系数 ($\text{cm}^3 \cdot \text{m}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$); O_{TR} 为氧气透过率 ($\text{cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); Δp 为薄膜2侧氧气压差(Pa), Δp 为1013 MPa; D 为薄膜平均厚度(m)。

2 结果与讨论

2.1 PLLA/PBS 共混薄膜的单轴拉伸图

PLLA/PBS 共混薄膜的单轴拉伸比为1~4倍的照片见图1,可见,纯PLLA薄膜在拉伸过程中呈现出比较光滑且质地均匀的拉伸薄膜。而PBS的拉伸是比较特殊的情况,拉伸倍数为2和3倍时纯PBS薄膜表面出现条状波纹状,被拉伸与未被拉伸区域交替出现,直到拉伸倍数增大到4倍时薄膜表面的条状波纹基本消失,并形成均匀拉伸的薄膜。在PLLA中加入少量质量分数为10%的PBS时,薄膜中未出现像PBS波纹状拉伸条纹,得到光滑均匀拉伸的共混薄膜。以下的讨论中忽略了 $R=2$ 和 $R=3$ 的PBS薄膜的

性能测试。

2.2 力学性能

PLLA, PBS 和 PLLA/PBS 薄膜的应力-应变曲线见图2。通过应力-应变曲线可以计算出样品的屈服强度、断裂伸长率和弹性模量,其计算结果见表1。从图2和表1可以看出,未取向的 PLLA 薄膜 ($R=1$) 显示出较低的屈服强度和断裂伸长率,在室温下显示脆性。取向的 PLLA 显示出较高的屈服强度,其屈服强度从 58.3 MPa ($R=1$) 分别提高到 106.4 MPa ($R=2$), 113.3 MPa ($R=3$) 和 124.5 MPa ($R=4$)。而且 PLLA 的韧性也得到了改善,在未取向时 PLLA 的断裂伸长率仅为 6.6%,随着取向其拉伸率都达到了 11% 以上,大幅度提高了其韧性,其中拉伸比为 $R=3$ 的 PLLA 的断裂伸长率达到了 21.3%。PLLA 的弹性模量随着拉伸比的增加而大幅度增加, $R=4$ 时提高了近 2 倍。

在室温环境中进行拉伸时,未取向 PBS 薄膜 ($R=1$) 的断裂伸长率达到 293.6%,显示其韧性。其应变曲线显示出规律性波动状,观察其拉伸过程,其拉伸实际状况同图1所示的 PBS 薄膜的 $R=2$ 和 $R=3$ 的情景一样,被拉伸的部分和未被拉伸的部分间隔存在。经过

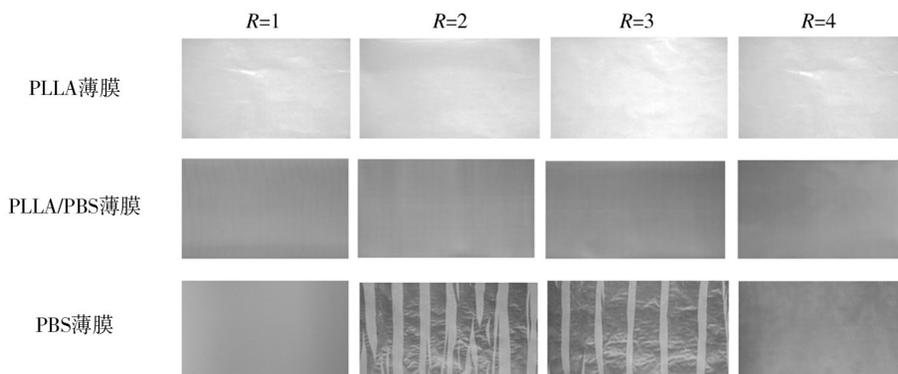


图1 PLLA/PBS 共混薄膜的单轴拉伸照片

Fig.1 Uniaxially stretched photograph of PLLA/PBS blend film

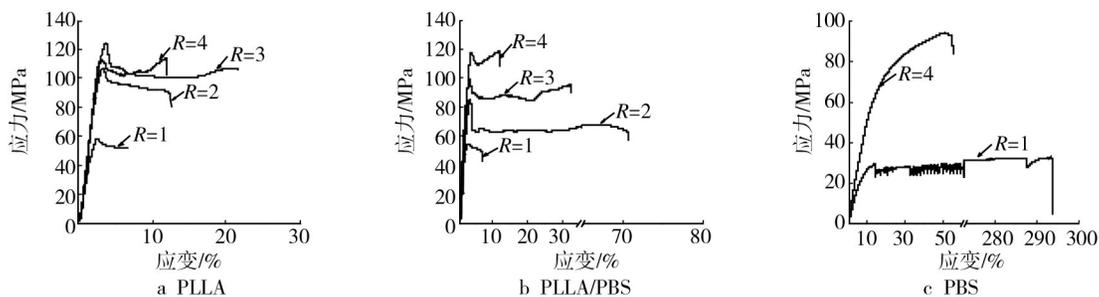


图2 薄膜应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves of the films

表1 PLLA/PBS共混薄膜力学性能

Tab.1 Mechanical properties of PLLA/PBS blend film

拉伸比R	屈服强度/MPa	断裂伸长率/%	弹性模量/MPa	
	1	58.3 ± 1.9	6.6 ± 0.6	2715.6 ± 66.1
PLLA	2	106.4 ± 5.6	12.4 ± 2.2	4191.4 ± 74.7
	3	113.3 ± 2.4	21.3 ± 5.2	4309.0 ± 255.5
	4	124.5 ± 2.3	11.7 ± 1.2	4706.7 ± 202.5
	1	54.8 ± 3.2	5.2 ± 1.3	2041.1 ± 110.6
PLLA /PBS	2	86.4 ± 3.2	70.7 ± 2.2	3083.2 ± 68.2
	3	100.1 ± 2.7	32.8 ± 3.3	3857.0 ± 108.7
	4	117.8 ± 2.2	11.8 ± 1.0	4231.9 ± 158.8
	1	28.9 ± 1.1	293.6 ± 2.2	382.5 ± 4.5
PBS	4	94.0 ± 1.3	55.9 ± 2.1	643.2 ± 5.2

取向后,拉伸比达到PBS(R=4)时应变减小到55.9%,也显示出较好的韧性,而且其屈服强度从28.9 MPa(R=1)提高到94.0 MPa(R=2),弹性模量从382.5 MPa增加到643.2 MPa。

PLLA/PBS共混薄膜的屈服强度和弹性模量随着拉伸倍数的增大而增大,其断裂伸长率也得到了改善。添加少量PBS时,PLLA的屈服强度和弹性模量相比纯PLLA都减弱了许多,而断裂伸长率大幅度增加,当R=2时其应变达到了70.7%,相比PLLA,PLLA/PBS的屈服强度和杨氏模量降低了许多,显示出较好的柔韧性。这主要是因为高拉伸倍数下材料会发生较大的塑性形变,从而促使材料内部的分子链或链段发生取向排列,使得薄膜沿拉伸方向的强度和韧性显著提高。PLLA/PBS拉伸后断裂伸长率呈先上升又下降趋势。这是因为分子链、链段的伸直程度会随着拉伸

比例的增大而提高,因而拉伸比例小的试样的分子链、链段再次伸直形变的程度大。由于拉伸比例大的试样的分子链或链段伸直程度小,因而拉伸过程中再次伸直形变的程度减小。

2.3 热学性能

PLLA、PBS和PLLA/PBS薄膜的DSC升温曲线见图3,其相关的热学参数见表2。对于纯PLLA薄膜来说,随着拉伸比例的增大,玻璃化转变温度(T_g)从64.1 °C增加到69.6 °C,其冷结晶温度随着取向的增加逐渐降低,并且在高拉伸倍数时非常接近 T_g ,说明PLLA在低温区域开始结晶。而且冷结晶峰的面积也随着拉伸比的增加而减小,说明在拉伸取向过程中PLLA得到了取向结晶。

未拉伸PLLA薄膜(R=1)表现出极慢的结晶速度,并且在升温过程中结晶很少,而拉伸PLLA在升温过程中更容易结晶。PBS薄膜的 T_g 在-34 °C左右,放大

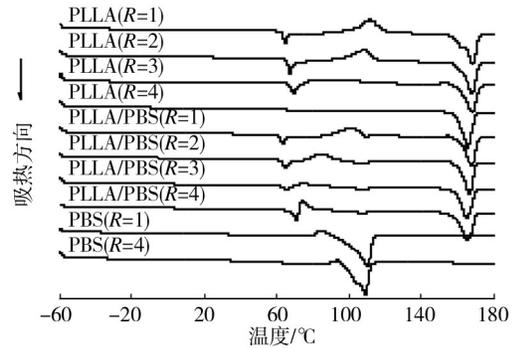


图3 PLLA/PBS薄膜的DSC曲线

Fig.3 DSC curve of PLLA/PBS blend film

表2 PLLA/PBS共混薄膜的DSC特征参数

Tab.2 DSC characteristic parameters of PLLA/PBS blend film

拉伸比R		玻璃化转变温度	冷结晶温度	冷结晶温度	熔融温度	熔融温度
		T_g (PLLA)/°C	T_c (PBS)/°C	T_c (PLLA)/°C	T_m (PBS)/°C	T_m (PLLA)/°C
PLLA	1	64.1	—	111.8	—	168.6
	2	66.7	—	109.0	—	168.2
	3	69.6	—	101.8	—	168.3
	4	67.5	—	—	—	165.7
PLLA /PBS	1	62.8	—	101.7	110.2	167.9
	2	64.0	—	85.8	109.3	166.8
	3	64.7	—	76.0	108.5	165.0
	4	70.6	—	74.6	108.4	165.5
PBS	1	—	85.1	—	110.4	—
	4	—	93.7	—	109.4	—

后在图中看不到明显的吸热过程变化,未拉伸PBS薄膜($R=1$)的重结晶峰和熔融峰分别出现在85℃和110℃左右,当拉伸倍数 $R=4$ 时重结晶峰明显变小,对于PBS来说在升温过程中没有看到明显的冷结晶峰,说明在制备过程中PBS得到了充分的结晶。

对于PLLA/PBS薄膜,其玻璃化转变温度和冷结晶峰的变化与PLLA薄膜的变化趋势相似。随拉伸比的增大, T_g 从62.8℃增加到70.6℃,其冷结晶温度从101.7℃降到74.6℃,说明取向后PLLA/PBS更容易结晶。从图3中可以看到,在升温过程中有2个吸热峰出现,109℃附近有1个吸热峰,在165℃附近还出现1个吸热峰,认定前者为PBS熔融峰,后者为PLLA熔融峰。说明随着拉伸比例的增加,分子链的取向度提高,PLLA结晶度得到了大幅度提高。

2.4 氧气透过性

用氧气透过系数(O_p)来对材料的阻氧性进行评估,见表3。从表3可以看到,PLLA/PBS薄膜的氧气透过系数都表现出先减小后增大的趋势。

表3 PLLA/PBS共混薄膜的氧气透过系数
Tab.3 Oxygen permeability of PLLA/PBS blend film

拉伸比 R	氧气透过系数 $O_p(\times 10^{-12})/(\text{cm}^3 \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1})$		
	PLLA	PLLA/PBS	PBS
1	2.13 ± 0.06	2.05 ± 0.04	0.14 ± 0.03
2	1.92 ± 0.06	1.77 ± 0.01	—
3	2.04 ± 0.06	1.81 ± 0.03	—
4	2.69 ± 0.03	2.16 ± 0.01	2.55 ± 0.02

未拉伸PLLA薄膜($R=1$)的 O_p 为 $2.13 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \cdot \text{m}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$,2倍拉伸PLLA薄膜($R=2$)的 O_p 为 $1.92 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \cdot \text{m}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$,可以看出,2倍拉伸薄膜的氧气透过性明显优于未拉伸PLLA薄膜($R=1$)。对于PLLA/PBS薄膜,2倍拉伸PLLA/PBS薄膜($R=2$)的 O_p 值为 $1.77 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \cdot \text{m}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$,明显低于未拉伸PLLA/PBS共混薄膜($R=1$),说明2倍拉伸PLLA/PBS共混薄膜的阻氧性比较高。从表3还可以看到,PLLA/PBS共混薄膜的阻氧性能比PLLA薄膜好。未拉伸PBS薄膜($R=1$)的 O_p 值为 $0.14 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \cdot \text{m}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$,可以得知,PBS薄膜的阻氧性比PLLA薄膜好。试验结果表明,PLLA中加入少量的PBS进行单轴拉伸可以有效地提高PLLA/PBS共混薄膜的阻氧性能,这是因为在拉

伸过程中分子链段的取向和结晶可以提高材料的阻氧性能,然而在拉伸过程中出现了结晶区域缺陷等原因导致阻氧性降低。

3 结语

单轴拉伸可以有效提高PLLA/PBS共混薄膜的力学性能和结晶性。其中,拉伸倍数为2时PLLA/PBS共混薄膜的阻氧性能较好。通过加入少量阻氧性,能较好地进行PBS和PLLA/PBS共混,薄膜的阻氧性得到提高。

参考文献:

- [1] ZHU K J, LIN X, YANG S L. Preparation, Characterization, and Properties of Polylactide (PLA)-poly (Ethylene Glycol) (PEG) Copolymers: a Potential Drug Carrier[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1990, 39(1): 1—9.
- [2] BERGSMA J E, BOS R R M, ROZEMA F R, et al. Biocompatibility of Intraosseously Implanted Predegraded Poly (Lactide): an Animal Study[J]. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 1996, 7(1): 1—7.
- [3] FAMBRI L, PEGORETTI A, FENNER R, et al. Biodegradable Fibers of Poly (L-lactic Acid) Produced by Melt Spinning[J]. Polymer, 1997, 38(1): 79—85.
- [4] 李文涛,唐颂超.生物降解高分子材料[J].上海塑料,2002(1):3—8.
LI Wen-tao, TANG Song-chao. Biodegradable Polymer Materials[J]. Shanghai Plastics, 2002(1): 3—8.
- [5] FARRINGTON D W, DAVIES J L, BLACKBURN R S. Biodegradable and Sustainable Fibers[M]. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2005.
- [6] AGRAWAL A K, BHALLA R. Advances in the Production of Poly(Lactic Acid) Fibers. A Review[J]. Macromol Sci, Part C: Polym Rev, 2003, 43: 479—503.
- [7] SCHMACK G, TANDLER B, VOGEL R, et al. Biodegradable Fibers of Poly (L-lactide) Produced by High-speed Melt Spinning and Spin Drawing[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1999, 73(14): 2785—2797.
- [8] SODERGARD A, SELIN J F, NIEMI M, et al. Processable Poly (Hydroxy Acids): US, 6,559,244[P]. 2003-05-06.
- [9] TWEED E C, STEPHENS H M, RIEGERT T E. Polylactic Acid Blown Film and Method of Manufacturing Same: US Patent Application 2006/0045940A1[P]. 2006.
- [10] KAWASHIMA N, OGAWA S, OBUCHI S, et al. Applications

- and Commercial Products[M]. Wiley-VCH Verlag GmbH, 2002:251—274.
- [11] LEE J K, LEE K H, JIN B S. Structure Development and Biodegradability of Uniaxially Stretched Poly (L-lactide)[J]. European Polymer Journal, 2001, 37:907—914.
- [12] GRUBER P R, KOLSTAD J J, RYAN C M, et al. Melt-stable Amorphous Lactide Polymer Film and Process for Manufacturing Thereof:US,5484881[P]. 1996.
- [13] OU X, CAKMAK M. X-ray Studies of Structural Development during Sequential and Simultaneous Biaxial of Polylactic Acid Film[C]// ANTEC. 2003, 2003:1701—1705.
- [14] 翁云宣. 聚乳酸合成、生产、加工及应用研究综述[J]. 塑料工业, 2007, 35(6):69—73.
- WENG Yun-xuan. Review of Study of Synthesis, Production, Process and Application of PLA[J]. China Plastics Industry, 2007, 35(6):69—73.
- [15] ANDERSON K S, LIM S H, HILLMYER M A. Toughening of Polylactide by Melt Blending with Linear Low-density Polyethylene[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2003, 89:3757—3768.
- [16] KULINSKI Z, PIORKOWSKA E. Crystallization, Structure and Properties of Plasticized Poly (l-lactide) [J]. Polymer, 2005, 46:10290—10300.
- [17] NIJENHUIS A J, COLSTEE E, GRIJPMAN D W, et al. High Molecular Weight Poly(l-lactide) and Poly(Ethylene Oxide) Blends: Thermal Characterization and Physical Properties[J]. Polymer, 1996, 37:5849—5857.
- [18] SONG Y, WANG D, WANG X, et al. A Method for Simultaneously Improving the Flame Retardancy and Toughness of PLA [J]. Polymers for Advanced Technologies, 2011, 22 (12) : 2295—2301.
- [19] HASSOUNA F, RAQUEZ J, ADDIEGO F, et al. New Approach on the Development of Plasticized Polylactide (PLA): Grafting of Poly(Ethylene Glycol) (PEG) via Reactive Extrusion[J]. European Polymer Journal, 2011, 47:2134—2144.
- [20] PIORKOWSKA E, KULINSKI Z, GALESKI A, et al. Plasticization of Semicrystalline Poly (L-lactide) with Poly (Propylene Glycol)[J]. Polymer, 2006, 47:7178—7188.
- [21] BAIARDO M, FRISONI G, SCANDOLA M, et al. Thermal and Mechanical Properties of Plasticized Poly(L-lactic Acid) [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2003, 90: 1731—1738.
- [22] LJUNGBERG N, WESSLEN B. Tributyl Citrate Oligomers as Plasticizers for Poly (Lactic Acid) : Thermo-mechanical Film Properties and Aging[J]. Polymer, 2003, 44(25):7679—7688.
- [23] SHIBATA M, INOUE Y, MIYOSHI M. Mechanical Properties, Morphology, and Crystallization Behavior of Blends of Poly (l-lactide) with Poly (Butylene Succinate-co-l-lactate) and Poly (Butylene Succinate)[J]. Polymer, 2006, 47:3557—3564.
- [24] JIANG L, WOLCOTT M P, ZHANG J. Study of Biodegradable Polylactide/Poly (Butylene Adipate-co-terephthalate) Blends [J]. Biomacromolecules, 2006, 7:199—207.
- [25] KAI W, ZHAO L, ZHU B, et al. Enforcing Effect of Double-fullerene End-capped Poly (Ethylene Oxide) on Mechanical Properties of Poly(L-lactic Acid)[J]. Macromolecular Rapid Communications, 2006, 27:109—113.
- [26] KAI W, ZHAO L, ZHU B, et al. Mechanical Properties of Blends of Double-fullerene End-capped Poly (Ethylene Oxide) and Poly (L-lactic Acid)[J]. Macromolecular Chemistry Physics, 2006, 207(8):746—754.
- [27] DONG T G, JIN Y, GUO X, et al. Improving the Toughness of Poly(L-lactic Acid) by Interpenetrating Network Structure[J]. Advanced Materials Research, 2011, 239—242:1919—1922.

(上接第32页)

- Technology (Natural Science Edition), 2010, 33(3):44—46.
- [15] 朱冰莲, 方敏. 数字信号处理(第2版)[M]. 北京:电子工业出版社, 2014.
- ZHU Bing-lian, FANG Min. Digital Signal Processing (2nd Edition)[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2014.
- [16] 何子述, 夏威, 程婷, 等. 现代数字信号处理及其应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2009.
- HE Zi-shu, XIA Wei, CHENG Ting, et al. Modern Digital Signal Processing and Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [17] 丁微波, 耿靓, 范瑾. 包装测试数据采集问题刍议[J]. 包装工程, 2010, 31(13):54—59.
- DING Wei-bo, GENG Liang, FAN Jin. Discussion on Issues of Data Acquisition of Packing Test[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(13):54—59.
- [18] SAITO K, HASEGAWA K. Foundation and Applications of Transport Package[M]. Tokyo: Saiwaishobo, 2008.
- [19] Introduction of OROS [DB/OL] (2014-10-01). <http://www.oros.com/3889-multi-channel-analyzers.html>.