

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2016.02.002

# PLA/PBAT/PLA-g-MAH可生物降解复合材料的 形态结构与性能分析

周志斌, 刘跃军, 谭海英

(湖南工业大学 包装与材料工程学院, 包装新材料与技术重点实验室, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 通过熔融共混法制备马来酸酐接枝聚乳酸 (PLA-g-MAH) 用于改善聚乳酸/聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯共混物 (PLA/PBAT) 的相容性, 并对复合材料的形态结构、力学性能和生物降解性能进行研究。SEM结果显示, 添加增容剂 PLA-g-MAH 后, PLA/PBAT 共混物两相间的界面明显变得模糊, 说明 PLA-g-MAH 对共混物有一定的增容作用; 增容剂 PLA-g-MAH 的加入, 使复合材料的拉伸强度和弯曲强度相比于纯 PLA 略有下降, 但其冲击强度有一定程度的提高, 断裂伸长率有显著提高, 比纯 PLA 的断裂伸长率提高了约 17 倍, 表现出良好的力学性能; 另外, PLA-g-MAH 的加入提高了共混物的生物降解性能。

**关键词:** 马来酸酐接枝聚乳酸; 聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯; 力学性能; 生物降解性能

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2016)02-0008-07

## Morphological Structure and Properties of PLA/PBAT/PLA-g-MAH Biodegradable Composites

ZHOU Zhibin, LIU Yuejun, TAN Haiying

(Key Laboratory of New Materials and Technology for Packaging, School of Packaging and Materials Engineering,  
Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** Poly(lactic acid)-graft-maleic anhydride (PLA-g-MAH) prepared by melt blending was used to compatibilize poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-butylene terephthalate) (PLA/PBAT) blends. The structure and properties of PLA/PBAT/PLA-g-MAH composites were investigated by fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), scanning electron microscope (SEM), universal testing machine, pendulum impact tester, differential scanning calorimeter (DSC) and the hydrolysis of alkaline solution. SEM results showed that the phase interface became blurry between PLA and PBAT in PLA/PBAT blends with compatibilizer PLA-g-MAH, indicated that the PLA-g-MAH had certain compatibilized effect on PLA/PBAT blends. The incorporation of PLA-g-MAH resulted in a slight decrease of tensile strength and flexural strength compared with pure PLA, but improved impact strength and elongation at break about 17 times compared with pure PLA with added PLA-g-MAH. Moreover, the adding of PLA-g-MAH improved the biodegradability of PLA/PBAT blend.

**Key words:** poly(lactic acid)-graft-maleic anhydride; poly(butylene adipate-co-butylene terephthalate); mechanical properties; biodegradability

收稿日期: 2015-11-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11372108), 湖南省自然科学基金资助项目 (14JJ5021), 湖南省高校创新平台开放基金资助项目 (13K098)

作者简介: 周志斌 (1989-), 男, 湖南衡阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为生物降解材料,

E-mail: 1163750946@qq.com

通信作者: 刘跃军 (1970-), 男, 湖南株洲人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事功能包装材料方面的教学与研究,

E-mail: yjliu\_2005@126.com

## 0 引言

聚乳酸 (polylactic acid, PLA) 是一种可完全生物降解的热塑性聚合物, 不仅具有可生物降解性、可再生性<sup>[1-2]</sup>及良好的成型加工性能<sup>[3]</sup>, 同时, 其力学强度、光泽度、透光度等性能与聚乙烯 (polyethylene, PE)、聚丙烯 (polypropylene, PP) 相当, 刚度、透明性与聚苯乙烯 (polystyrene, PS)、聚对苯二甲酸乙二酯 (polyethylene terephthalate, PET) 相当, 而且还具有无毒、无刺激及生物相容性和生物可吸收性好等优点<sup>[4-5]</sup>。但因 PLA 具熔体强度较低、性脆、耐热性能较差、加工范围较窄、结晶速率极慢等缺点, 限制了其应用范围<sup>[3, 6]</sup>。针对这些缺点, 目前通常采用以下几种方法对 PLA 进行改性: 共混、添加填料、化学调控、形态控制等<sup>[7-10]</sup>, 其中, 共混改性是应用最为广泛的一种方法。

聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯 (poly butylene adipate-co-butylene terephthalate, PBAT) 是一种化学合成型脂肪族-芳香族共聚酯, 是由己二酸丁二醇酯和对苯二甲酸丁二醇酯组成的共聚物, 兼具聚丙烯酸丁酯 (poly butyl acrylate, PBA) 和聚对苯二甲酸丁二醇酯 (poly butylene terephthalate, PBT) 的特性, 既有较好的延展性和断裂伸长率, 又有较好的耐热性能和抗冲击性能, 同时具优良的生物降解性能和类似于低密度聚乙烯 (low density polyethylene, LDPE) 的加工性能。目前, PBAT 是可生物降解塑料研究的焦点, 也是市场应用价值最好的生物降解塑料之一, 多用于生产农用地膜或环保垃圾袋等产品, 并可用来改善其他脂肪族聚酯的综合性能。

将具有优异韧性的全生物降解塑料 PBAT 与 PLA 熔融共混, 可提高 PLA 的冲击强度和断裂伸长率, 改善其韧性。但由于 PLA 与 PBAT 两者相容性较差而导致共混效果不显著, 因此, 本实验采用聚乳酸接枝马来酸酐 (maleic anhydride, MAH) PLA-g-MAH 作为共混物 PLA/PBAT 的增容剂, 研究增容剂 PLA-g-MAH 的加入对 PLA/PBAT 共混物形态结构的影响, 同时分析增容剂 PLA-g-MAH 的添加质量分数对 PLA/PBAT/PLA-g-MAH 复合材料力学性能和生物降解性能的影响。

## 1 实验

### 1.1 主要原料和仪器

#### 1) 原料和试剂

PLA, 4032D, 美国 Nature Works LLC 公司生产;  
PBAT, C1200 Ecoflex, 德国 BASF 公司生产;

MAH、过氧化二异丙苯 (dicumyl peroxide, DCP)、丙酮, 均为分析纯 (AR), 天津科密欧化学试剂有限公司生产;

氢氧化钠 NaOH, 分析纯 (AR), 西陇化工股份有限公司生产;

四氢呋喃 (tetrahydrofuran, THF), 分析纯 (AR), 湖南汇虹试剂有限公司生产。

#### 2) 实验仪器

Brabender PLD-651 型双螺杆挤出机, 德国 Brabender 公司生产;

PL6000-S 型电子天平, 梅特勒-托利多公司生产;

BK-600B 型超声清洗机, 济南巴克超声波科技有限公司生产;

15-315T 四柱式平板硫化机, 郑州鑫和制造有限公司生产;

NICOLE T380 型傅立叶变换红外光谱仪 (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR), 美国赛默飞科技公司生产;

4041 型 ZKG-4048 真空干燥箱, 上海实验仪器厂有限公司生产;

SHR-10A 型高速共混机, 张家港格兰机械有限公司生产;

HTF90WE 型注塑机, 宁波海天集团股份有限公司生产;

CMT6104 型微机控制电子万能试验机, 深圳新三思材料检测有限公司生产;

501B-4 型塑料摆锤冲击试验机, 深圳万测试验设备有限公司生产;

Phenom G2 pro 型扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM), 荷兰 Phenom-world BV 公司生产;

DSC-Q20 差示扫描量热仪 (differential scanning calorimeter, DSC), 美国 TA 仪器公司生产。

### 1.2 PLA-g-MAH 的制备及表征

#### 1) 制备

采用双螺杆挤出机熔融共混制备增容剂 PLA-g-MAH, 其中, MAH、DCP 的添加质量分别为 PLA 总质量的 2% 及 0.35%。将按比例用电子天平称量好的 MAH 和 DCP 放入盛有 100 mL 丙酮的烧杯中, 并将其置于超声清洗机中震动溶解 10 min, 然后与纯 PLA 粒料均匀混合后放置于通风处待丙酮完全挥发; 再在双螺杆挤出机中熔融挤出制备接枝物 PLA-g-MAH, 其后造粒干燥备用。将挤出机各段温区 (从口模至加料口方向) 温度分别设置为 165, 175, 190, 190, 190, 180 °C, 螺杆转速设定为 45 r/min。

## 2) 成膜与表征

采用四柱式平板硫化机, 压延制备纯 PLA 薄膜及 PLA-g-MAH 薄膜, 压延工艺为: 温度 190 °C, 压力 10 MPa, 熔融时间 5 min, 保压时间 10 min; 然后采用傅立叶变换红外光谱仪对各样品膜进行表征, 扫描区间为 500~4 000 cm<sup>-1</sup>。

### 1.3 PLA/PBAT/PLA-g-MAH 的制备

将 PLA 粒料在真空干燥箱中于 80 °C 条件下干燥 12 h, 将 PBAT 粒料在真空干燥箱中于 60 °C 条件下干燥 12 h, 将 PLA-g-MAH 接枝物粒料在真空干燥箱中于 40 °C 条件下干燥 12 h; 再按表 1 所示比例在高速共混机中共混 10 min; 然后于双螺杆挤出机中共混挤出造粒, 加工条件为: 将挤出机各段温区(自口模至加料口方向)温度分别设置为 170, 175, 195, 195, 195, 180 °C, 螺杆转速为 50 r/min; 最后在真空干燥箱中于 60 °C 条件下干燥 24 h 后, 注塑标准力学样条。采用注塑机注塑成型, 注塑工艺如下: 加料段到喷嘴的温度设置为 205, 210, 210, 205 °C, 冷却时间 12 s, 保压时间 6 s, 保压压力 55 MPa, 背压压力 60 MPa, 注射速度 20 mm/s。

表 1 PLA/PBAT/PLA-g-MAH 复合材料的配方设计

Table 1 Material designation and composition of PLA/PBAT/PLA-g-MAH composites

材 料	质量分数 /%		
	PLA	PBAT	PLA-g-MAH
Pure PLA	100	0	0
DG0-PLA/PBAT/(PLA-g-MAH) <sub>0</sub>	85.0	15.0	0
DG1-PLA/PBAT/(PLA-g-MAH) <sub>1</sub>	84.2	14.8	1
DG3-PLA/PBAT/(PLA-g-MAH) <sub>3</sub>	82.4	14.6	3
DG5-PLA/PBAT/(PLA-g-MAH) <sub>5</sub>	80.7	14.3	5
DG7-PLA/PBAT/(PLA-g-MAH) <sub>7</sub>	79.1	13.9	7
DG10-PLA/PBAT/(PLA-g-MAH) <sub>10</sub>	76.5	13.5	10

### 1.4 PLA/PBAT/PLA-g-MAH 的测试与表征

力学性能测试: 采用微机控制电子万能试验机, 测试 PLA/PBAT/PLA-g-MAH 复合材料的拉伸性能和弯曲性能, 拉伸速度为 20 mm/min, 参照 GB/T 1040—1992《塑料拉伸性能试验方法》进行, 压头速率为 2 mm/min, 参照 GB/T 9341—2008《塑料 弯曲性能的测定》进行; 采用塑料摆锤冲击试验机, 测试复合材料的冲击性能, 参照 GB/T 1043.1—2008《塑料 简支梁冲击性能的测定 第 1 部分: 非仪器化冲击试验》中的方法进行。

SEM 测试: 采用扫描电子显微镜, 观察 PLA/PBAT/PLA-g-MAH 复合材料冲击断面的表面形态与复合材料薄膜水解前后的表面形态, 放大倍数为 2 000 倍。

DSC 测试: 采用差示扫描量热仪, 在 N<sub>2</sub> 保护下,

首先以 10 °C/min 的升温速率从室温升至 180 °C, 恒温 5 min, 消除热历史后, 再以 10 °C/min 的降温速率从 180 °C 降至 20 °C, 然后以 10 °C/min 的升温速率从 20 °C 升至 180 °C。结晶度可根据文献[11]中的相关公式进行计算, 公式如下:

$$X_c = \frac{\Delta H_c}{(1-\phi)\Delta H_m^0}$$

式中:  $\Delta H_c$  为 PLA/PBAT/PLA-g-MAH 复合材料的熔融结晶焓;  $\phi$  为 PLA-g-MAH 在 PLA/PBAT/PLA-g-MAH 复合材料之中的质量百分数;  $\Delta H_m^0$  为纯 PLA 的结晶熔融焓。

降解性能测试: 制取 3 cm × 3 cm 大小、厚度约为 1 mm 的正方形 PLA/PBAT/PLA-g-MAH 复合材料薄膜, 投入浓度为 1 mol/L 的 NaOH 水溶液中。每隔 2 d 将样品取出, 用无水乙醇和去离子水处理与清洗其表面, 烘干后称重。通过失重率表征样品的降解性能, 其计算公式为

$$m_t = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \times 100\%$$

式中:  $m_0$  为未经 NaOH 水溶液处理的 PLA/PBAT/PLA-g-MAH 复合材料薄膜的质量;  $m_t$  为经  $t$  时间水解后复合材料薄膜的质量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 接枝物 PLA-g-MAH 红外光谱分析

图 1 为纯 PLA 与复合材料 PLA-g-MAH 及其差减谱的红外光谱图, 其中, 曲线 a 为纯 PLA 的红外光谱, 曲线 b 为 PLA-g-MAH 的红外光谱, 曲线 c 为纯 PLA 与 PLA-g-MAH 的红外光谱的差减谱。

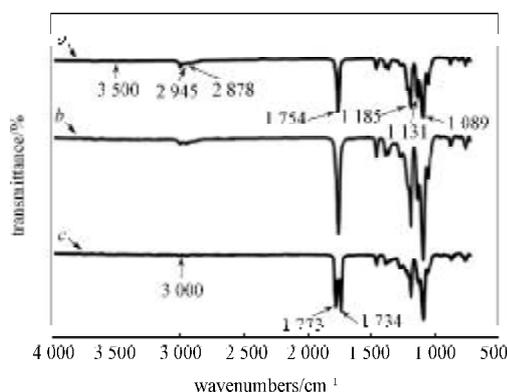


图 1 纯 PLA、PLA-g-MAH 及其差减谱的红外图谱

Fig. 1 FTIR spectra of PLA, PLA-g-MAH and the subtract of PLA and PLA-g-MAH

曲线 a 中, 酯基醚键 C—O 的特征吸收峰分别出现在 1 185, 1 131, 1 089 cm<sup>-1</sup> 处; 1 754 cm<sup>-1</sup> 处为羰基

C=O 强的特征吸收峰; 而聚乳酸的端—OH 特征吸收峰出现在  $3\ 500\ \text{cm}^{-1}$  处; 同时, PLA 分子链上烷基振动引起的吸收峰分别出现在  $3\ 000, 2\ 995, 2\ 945, 2\ 878\ \text{cm}^{-1}$  处。曲线 *b* 中, MAH 在引发剂 DCP 的引发下以自由基的形式与 PLA 发生反应, 接枝在 PLA 的分子链上, 其分子结构的变化在红外光谱曲线 *c* 中得到了体现。曲线 *c* 中, 在  $3\ 000\ \text{cm}^{-1}$  处附近烷基 C—H 基团的特征吸收峰几乎消失, 同时酸酐的特征双吸收峰出现在  $1\ 734, 1\ 773\ \text{cm}^{-1}$  处, 这是由于体系中 CH=CH 键和 C—H 键的变化所产生的<sup>[12-13]</sup>。因此, 可以认为, MAH 与 PLA 发生了反应, 即采用熔融共混法成功制备了接枝物 PLA-g-MAH。

图 2 所示为 PLA-g-MAH 的化学反应式。

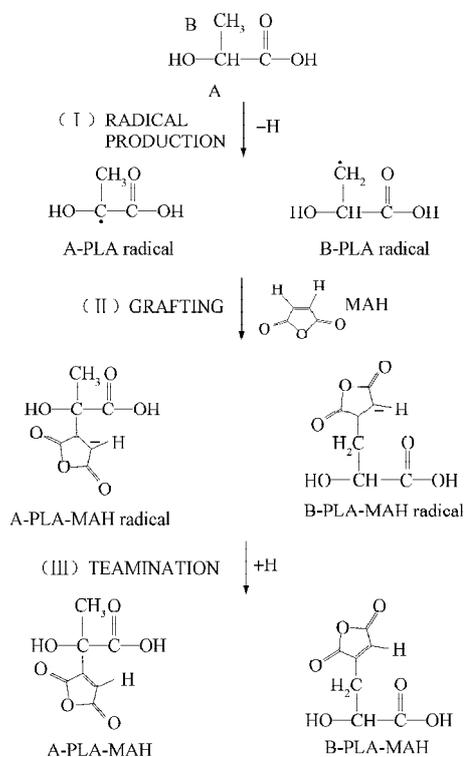


图 2 PLA-g-MAH 的化学反应式

Fig. 2 Reaction scheme for the addition of MAH to PLA

## 2.2 PLA/PBAT/PLA-g-MAH 的力学性能分析

图 3~4 分别为纯 PLA 及 PLA/PBAT/PLA-g-MAH 复合材料的拉伸强度及弯曲强度, 其分别比较了纯 PLA 及 PLA-g-MAH 添加量对 PLA/PBAT 共混物拉伸强度、弯曲强度的影响, 相关数据列于表 2 中。

由图 3 和图 4 可以得知, 加入 PLA-g-MAH 后, PLA/PBAT/PLA-g-MAH 复合材料的拉伸强度和弯曲强度虽相对于纯 PLA 存在一定程度的下降, 但相对于未添加增容剂 PLA-g-MAH 的 PLA/PBAT 共混物相比, 却随着 PLA-g-MAH 添加量的增加有微小程度的提高。这是由于添加增容剂 PLA-g-MAH 之后, 低分子量的

马来酸酐的引入在复合体系中的 PLA 和 PBAT 大分子链之间起到了润滑的作用, 减小了 PLA 与 PBAT 之间分子间的作用力, 使界面结合力有所降低。同时, 由表 2 可以得知, 随着 PLA-g-MAH 添加量的增大, 拉伸强度和弯曲强度先增大后减小, 当 PLA-g-MAH 添加质量分数为 5% 时, 拉伸强度和弯曲强度分别达最大值  $57.66, 74.85\ \text{MPa}$ 。

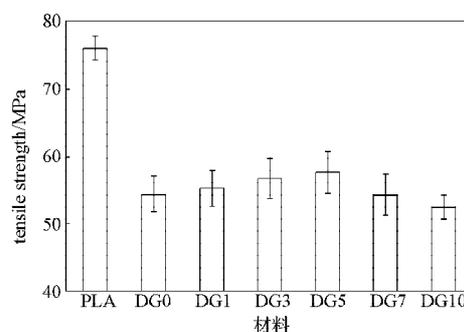


图 3 纯 PLA 及 PLA/PBAT/PLA-g-MAH 的拉伸强度

Fig. 3 Tensile strength of pure PLA and PLA/PBAT/PLA-g-MAH composites

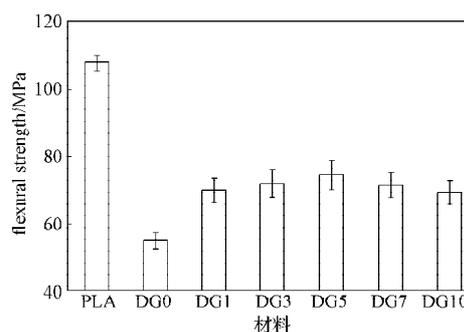


图 4 纯 PLA 及 PLA/PBAT/PLA-g-MAH 的弯曲强度

Fig. 4 Flexural strength of pure PLA and PLA/PBAT/PLA-g-MAH composites

图 5~6 分别为纯 PLA 及 PLA/PBAT/PLA-g-MAH 复合材料的冲击强度及断裂伸长率, 其分别比较了纯 PLA 及 PLA-g-MAH 添加量对 PLA/PBAT 共混物冲击强度及断裂伸长率的影响, 其相关数据列于表 2 中。由图 5 和图 6 可知, 随着 PLA-g-MAH 的加入, PLA/PBAT/PLA-g-MAH 复合材料的冲击强度显著提高, 这是由于增容剂 PLA-g-MAH 的加入, 低分子量马来酸酐的引入加大了 PLA 与 PBAT 大分子之间的距离, 致使复合体系中 PLA 与 PBAT 分子链段的运动能力增强, 所以在受到外力冲击时, 分子链段能通过运动吸收更多的冲击能量, 进而使冲击作用减缓, 所以 PLA/PBAT 共混材料的冲击韧性在添加增容剂 PLA-g-MAH 之后得到进一步提高。同时, 当 PLA-g-MAH 的添加质量分数为 5% 时, 复合材料的冲击强度达到最大值  $6.15\ \text{kJ/m}^2$ 。另外, 对比分析图 3~6 和表 2 可以得知, 当 PLA-g-MAH 的添加质量分数为 10%

时, PLA/PBAT/PLA-g-MAH复合材料的力学性能均有所下降,这是由于增容剂PLA-g-MAH加入过多时,相容性反而变差,复合体系相当于三相共混体系,这样导致PLA/PBAT/PLA-g-MAH复合材料的综合力学性能反而降低。综上所述,增容剂PLA-g-MAH的引入不仅提高了PLA/PBAT共混材料的拉伸强度和弯曲强度,而且其韧性也有明显的改善。

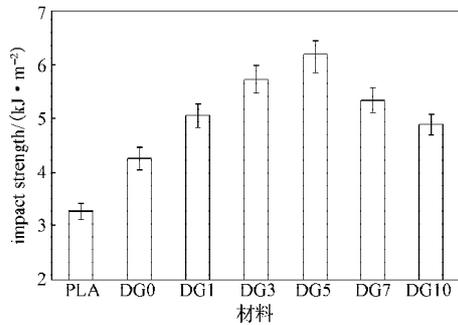


图5 纯PLA及PLA/PBAT/PLA-g-MAH的冲击强度

Fig. 5 Impact strength of pure PLA and PLA/PBAT/PLA-g-MAH composites

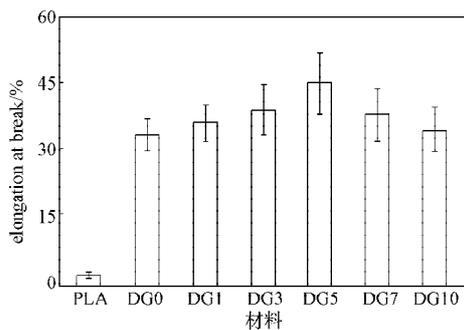


图6 纯PLA及PLA/PBAT/PLA-g-MAH的断裂伸长率

Fig. 6 Elongation at break of pure PLA and PLA-g-MAH composites

表2 纯PLA及PLA/PBAT/PLA-g-MAH的力学性能

Table 2 Mechanical properties of pure PLA and PLA/PBAT/PLA-g-MAH composites

材料	拉伸强度 / MPa	弯曲强度 / MPa	冲击强度 / (kJ·m <sup>-2</sup> )	断裂伸长率 / %
PLA	76.26 ± 1.76	107.81 ± 2.47	3.26 ± 0.16	2.46 ± 0.41
DG0	54.45 ± 2.56	55.25 ± 2.34	4.25 ± 0.21	34.62 ± 3.76
DG1	55.35 ± 2.78	70.23 ± 3.56	5.05 ± 0.24	37.24 ± 4.19
DG3	56.72 ± 2.98	72.23 ± 3.87	5.73 ± 0.28	40.31 ± 5.68
DG5	57.66 ± 3.07	74.85 ± 4.15	6.15 ± 0.31	46.51 ± 6.91
DG7	54.41 ± 2.89	71.78 ± 3.64	5.32 ± 0.25	39.31 ± 6.09
DG10	52.57 ± 1.87	69.59 ± 3.26	4.88 ± 0.19	35.85 ± 5.14

### 2.3 PLA/PBAT/PLA-g-MAH的外观形貌分析

多相体系的性能与相之间的界面相互作用及分散相的分散形态密切相关<sup>[13]</sup>。图7所示为复合材料PLA/PBAT/PLA-g-MAH冲击断面的表面形态。

对比分析图7a~f可知,添加增容剂PLA-g-MAH增容后的PLA/PBAT/PLA-g-MAH复合材料与未添加

增容剂的PLA/PBAT共混材料相比较,不仅其分散相PBAT颗粒粒径的尺寸大小有明显减小,并且增容剂的加入使PLA/PBAT/PLA-g-MAH复合材料冲击断面的分散相与基体相之间的界面变得模糊。这不仅说明了PLA-g-MAH中的酸酐基团与PBAT中的端羟基发生了较强的相互作用,致使PLA与PBAT之间的界面黏结力得到提高,而且PLA与PBAT之间发生了酯交换反应,形成了PLA-g-PBAT接枝共聚物,使得PBAT粒子分散到了PLA基体之中,进而使得PLA与PBAT两相之间的相容性提高,这样就使得PLA/PBAT/PLA-g-MAH复合材料的拉伸强度和弯曲强度稍微增大。同时可以发现,PBAT粒子主要分布在样品的应力集中区域附近,这些区域容易使周围基体产生裂纹-剪切带<sup>[14]</sup>,因此在受到外力冲击时,屈服变形能够吸收更多的冲击能量,进而提高了复合材料的韧性。

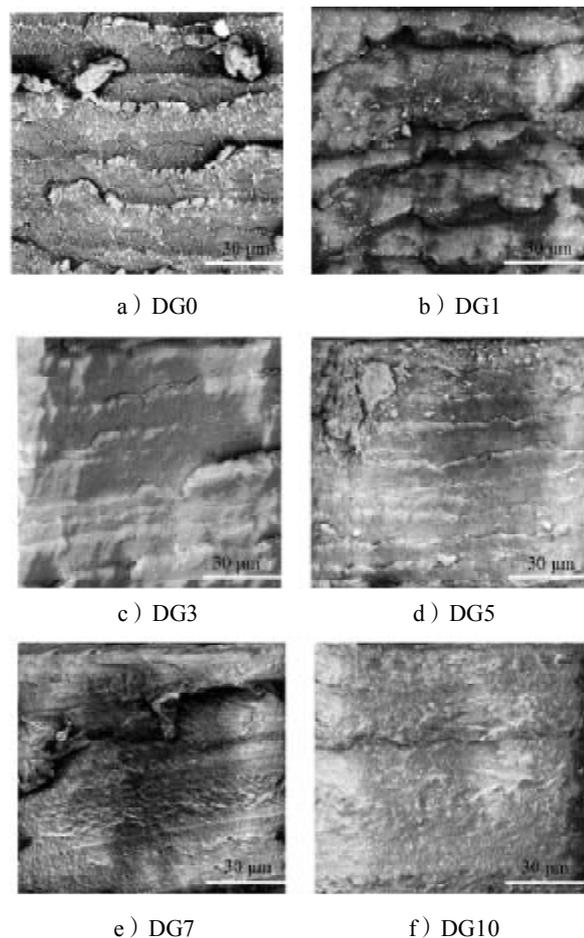


图7 PLA/PBAT/PLA-g-MAH冲击断面的SEM照片

Fig. 7 SEM photographs of PLA/PBAT/PLA-g-MAH composites on impact cross section

### 2.4 PLA/PBAT/PLA-g-MAH的降解性能分析

图8所示为PLA/PBAT/PLA-g-MAH复合材料薄膜的水解降解性能及其与结晶度的关系。由图8可

知, 复合材料薄膜的失重率随时间增长而不断增加, PLA-g-MAH 含量越高, 复合材料薄膜的曲线斜率越大, 这说明 PLA-g-MAH 含量越高的复合材料薄膜, 其降解能力越强。这可能是因为: 一方面, 增容剂 PLA-g-MAH 含量高的薄膜含有的低分子量马来酸酐增多, 增强了复合材料薄膜分子链段的运动能力, 分子链活性增强, 亲水性更强; 另一方面, 复合材料薄膜的主链规整度遭到破坏, 有利于水分子渗透进入聚合物内部结构, 从而使得降解速率有所加快<sup>[15]</sup>。另外, 生物降解材料的生物降解性能与其结晶度有关<sup>[16]</sup>。由图 8b 可知, 随着增容剂 PLA-g-MAH 含量的增加, 复合材料的结晶度先升高后降低, 但其薄膜的失重率逐渐增大。

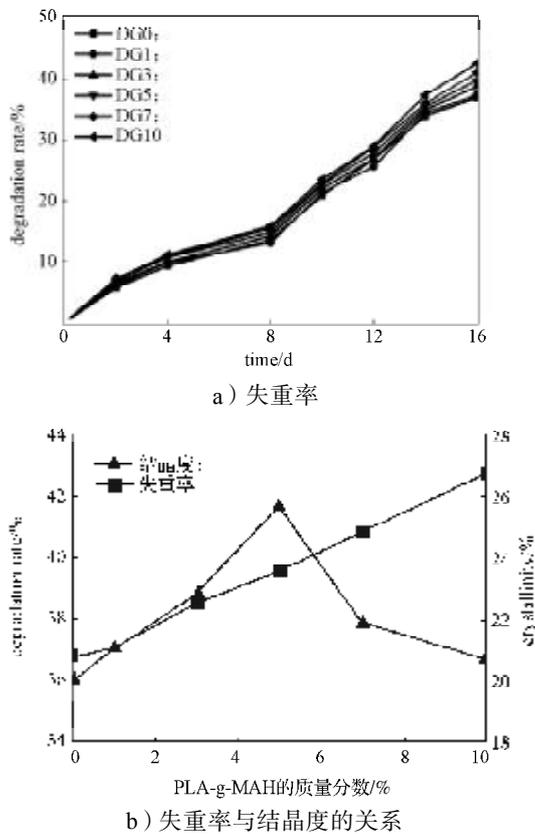


图8 PLA/PBAT/PLA-g-MAH的失重率及其与结晶度关系

Fig. 8 The degradation rate and relationship between degradation rate and crystallinity of PLA/PBAT/PLA-g-MAH composites film

图 9 为 PLA/PBAT/PLA-g-MAH 复合材料薄膜在降解前采用扫描电镜放大 2 000 倍后观察得到的表面形貌, 图 10 为经 NaOH 水溶液水解 16 d 后复合材料薄膜的表面形貌 SEM 照片。

对比图 9~10 水解前后薄膜表面的 SEM 照片可知: 未经水解的复合材料薄膜表面光滑规整, 没有褶皱, 也未出现孔洞与裂缝; 而经水解后的复合材料薄膜表面出现了孔洞, 同时表面出现粗糙褶皱, 并且随

着增容剂 PLA-g-MAH 含量的增加, 复合材料薄膜被溶液侵蚀更为严重, 表面的孔洞增多且孔径变大, 当 PLA-g-MAH 添加质量分数达到 7% 时, 薄膜表面出现了裂缝。

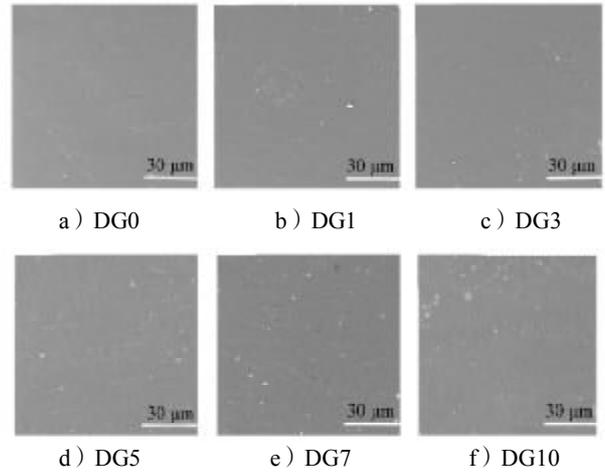


图9 PLA/PBAT/PLA-g-MAH水解前的SEM照片

Fig. 9 SEM photographs of PLA/PBAT/PLA-g-MAH composites film before hydrolysis

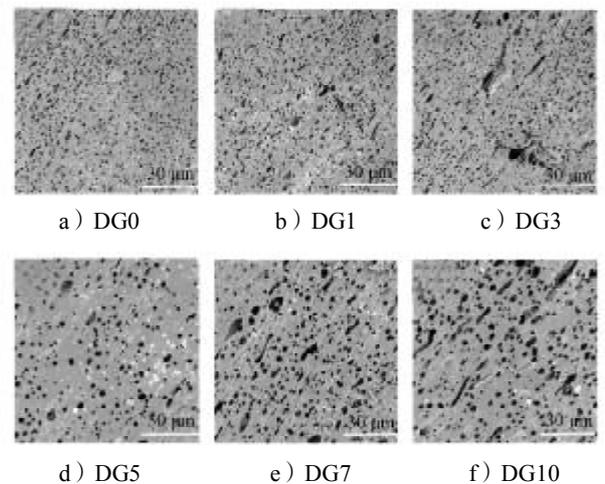


图10 PLA/PBAT/PLA-g-MAH水解后的SEM照片

Fig. 10 SEM photographs of PLA/PBAT/PLA-g-MAH composites film after hydrolysis

### 3 结论

通过具有优异韧性和延伸性能 (断裂伸长率 > 500%) 的 PBAT 与 PLA 熔融共混, 当未添加增容剂 PLA-g-MAH 时, 因 PLA 与 PBAT 两者相容性不好, 而导致 PLA/PBAT 共混物的综合力学性能表现不佳。然而, 当以添加质量分数 5% 的 PLA-g-MAH 对共混物 PLA/PBAT 进行增容之后, 其拉伸强度、弯曲强度和冲击强度均达到了最大值, 分别为 57.66 MPa、74.85 MPa 和 6.15 kJ/m<sup>2</sup>, 其断裂伸长率为 46.51%, 比纯 PLA 的断裂伸长率提高了约 17 倍, 综合力学性能得到显

著提高。同时,增容剂 PLA-g-MAH 的加入,也提高了 PLA/PBAT 共混物的生物降解性能。

#### 参考文献:

- [1] GUPTA B, REVAGADE N, HILBORN J. Poly(Lactic Acid) Fiber: An Overview[J]. Progress in Polymer Science, 2007, 32(4): 455-482.
- [2] RAHUL M R, AMOL V J, DOUGLAS E H. Poly(Lactic Acid) Modifications[J]. Progress in Polymer Science, 2010, 35(3): 338-356.
- [3] GARLOTTA D. A Literature Review of Poly(Lactic Acid) [J]. Journal of Polymers and the Environment, 2001, 9 (2): 63-84.
- [4] IKADA Y, TSUJI H. Biodegradable Polyesters for Medical and Ecological Applications[J]. Macromolecular Rapid Communications, 2000, 21(3): 117-132.
- [5] 董丽婷,马桃林,罗 桥. 石墨烯/氧化石墨烯-聚乳酸的制备与表征[J]. 包装学报, 2015, 7(1): 23-29.  
DONG Liting, MA Taolin, LUO Qiao. Preparation and Characterization of Graphene/PLA and Graphene Oxide/PLA[J]. Packaging Journal, 2015, 7(1): 23-29.
- [6] 任 杰. 生物可降解聚乳酸材料的制备、改性、加工与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 39.  
REN Jie. The Preparation, Modification, Processing and Application of Biodegradable Poly(Lactic Acid)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 39.
- [7] LIU H, ZHANG J. Research Progress in Toughening Modification of Poly(Lactic Acid)[J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2011, 49(15): 1051-1083.
- [8] JIANG L, WOLCOTT M P, ZHANG J. Study of Biodegradable Polylactide/Poly(Butylene-Adipate-co-Terephthalate) Blends[J]. Biomacromolecules, 2006, 7(1): 199-207.
- [9] AL-ITRY R, LAMNAWAR K, MAAZOUZ A. Rheological, Morphological, and Interfacial Properties of Compatibilized PLA/PBAT Blends[J]. Rheologica Acta, 2014, 53(7): 501-517.
- [10] SAHAS R, CHEN X L, COUGHLIN E B, et al. Toughening Semi Crystalline Poly(Lactic Acid) by Morphology Alteration[J]. Polymer, 2011, 52(19): 4184-4188.
- [11] YEH J T, TSOU C H, HUANG C Y, et al. Compatible and Crystallization Properties of Poly(Lactic Acid)/Poly(Butylene Adipate-co-Terephthalate) Blends[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 116(2): 680-687.
- [12] 于人同,方显力,张云灿,等. 反应挤出法制备马来酸酐接枝聚乳酸[J]. 高分子材料科学与工程, 2009, 25(3): 85-88.  
YU Rentong, FANG Xianli, ZHANG Yuncao, et al. Preparation and Properties of PLA Grafted with Maleic Anhydride Through Reactive Extrusion[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2009, 25(3): 85-88.
- [13] 蒋文柔,包睿莹,刘正英,等. PLA-g-MAH 增容改性 PLA/PETG 共混物的结构与性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2013, 29(3): 107-110.  
JIANG Wenrou, BAO Ruiying, LIU Zhengying, et al. Structure and Properties of PLA/PETG Blends Compatibilized by PLA-g-MAH[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2013, 29(3): 107-110.
- [14] 林 杉. 聚乳酸/聚(己二酸-对苯二甲酸丁二酯)共混物材料的制备与性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2012.  
LIN Shan. Preparation and Properties of Biodegradable Pol(Lactic Acid)/Poly(Butylene Adipate-co-Terephthalate) Blends[D]. Taiyuan: North University of China, 2012.
- [15] UMARE S S, CHANDURE A S, PANDEY R A. Synthesis, Characterization and Biodegradable Studies of 1,3-Propanediol Based Polyesters[J]. Polymer Degradation and Stability, 2007, 92(3): 464-479.
- [16] TAO J, SONG C J, CAO M F, et al. Thermal Properties and Degradability of Poly(Propylene Carbonate)/Poly( $\beta$ -Hydroxybutyrate-co- $\beta$ -Hydroxyvalerate)(PPC/PHBV) Blends[J]. Polymer Degradation and Stability, 2009, 94 (4): 575-583.

(责任编辑:徐海燕)

