

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.03.003

PP-g-MAH 对 PLA 性能的影响

李杨¹, 娄金分², 罗筑²

(1. 贵州理工学院材料与冶金工程学院, 贵阳 550003; 2. 国家复合改性聚合物材料工程技术研究中心, 贵阳 550014)

摘要: 采用双螺杆挤出机以熔融共混法制备了聚乳酸 (PLA) 和马来酸酐接枝聚丙烯 (PP-g-MAH) 共混物, 以傅立叶变换红外光谱 (FTIR)、热重 (TG) 分析、动态热机械分析 (DMA) 和扫描电子显微镜研究了不同 PP-g-MAH 含量对 PLA 力学性能和微观结构的影响。DMA 测试发现, 随着 PP-g-MAH 含量的增加, PLA/PP-g-MAH 共混物的损耗因子向低温区移动, 表明 PLA 与 PP-g-MAH 分子链具有良好的相容性。FTIR 分析证实了这种良好的相容性归因于 PLA 分子链羟基和酸酐基团之间的酯化反应。TG 分析研究表明, PP-g-MAH 的加入限制了 PLA 分子链的运动, 提高了共混物的耐热性, 一定程度上抑制了 PLA 的分解。PP-g-MAH 在一定程度上提高了 PLA/PP-g-MAH 共混物的力学性能, 添加质量分数 15% 的 PP-g-MAH 时, PLA/PP-g-MAH 共混物的 Iozd 缺口冲击强度和弯曲弹性模量都有所提高, 分别由纯 PLA 的 2.83 kJ/m², 2668 MPa 提高到 5.38 kJ/m², 2970 MPa, 分别提高了 90.1% 和 11.3%, 但拉伸强度却有一定程度的降低。阻隔性能实验表明, 随着 PP-g-MAH 含量的增加, 水蒸气和氧气透过系数降低。添加质量分数 20% 的 PP-g-MAH, 氧气和水蒸气的透过系数分别为 $4.5 \times 10^{-15} (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}) / (\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ 和 $1.3 \times 10^{-10} \text{ g} / (\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, 与纯 PLA 相比, 分别下降了 74.7% 和 45.1%。

关键词: 聚乳酸; 马来酸酐接枝聚丙烯; 界面; 热稳定性; 力学性能

中图分类号: TQ320.77 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)03-0014-06

Effects of PP-g-MAH on Properties of PLA

Li Yang¹, Lou Jinfen², Luo Zhu²

(1. School of Materials and Metallurgical Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, China;

2. National Engineering Research Center for Compounding and Modification of Polymeric Materials, Guiyang 550014, China)

Abstract: Poly(lactic acid) (PLA) and maleic anhydride grafted polypropylene (PP-g-MAH) blends were prepared by melt blending with twin-screw extruder. The effects of different PP-g-MAH content on the mechanical properties and microstructure of PLA were studied by FTIR, DMA, TG and SEM. DMA measurements show that the loss factors of the PLA /PP-g-MAH blends move to the low temperature region, which indicate that the PLA and PP-g-MAH molecular chains have good compatibility. FTIR confirms that this good compatibility is attributed to the esterification between hydroxyl groups and anhydride groups in PLA molecules. The TG analysis shows that the addition of PP-g-MAH limits the movement of PLA molecular chains, which improves the heat resistance of the blends, and inhibits the decomposition of PLA to some extent. PP-g-MAH improves the mechanical properties of PLA/PP-g-MAH blends to some extent. When the mass fraction of 15% PP-g-MAH is added, the Iozd notched impact strength of blend is increased from 2.83 kJ/m² of pure PLA to 5.38 kJ/m², the flexural modulus of elasticity of blend is increased from 2668 MPa of pure PLA to 2970 MPa, which increase by 90.1% and 11.3%, respectively. While the tensile strength is reduced to certain extent. The barrier performance test shows that the water vapor and oxygen permeability decrease with the increase of PP-g-MAH content. When the mass fraction of 20% PP-g-MAH is added, the transmittance coefficients of water vapor and oxygen are $4.5 \times 10^{-15} (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}) / (\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ and $1.3 \times 10^{-10} \text{ g} / (\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, which are 74.4% and 45.1% lower than pure PLA respectively.

Keywords: polylactic acid; maleic anhydride grafted polypropylene; interface; thermal stability; mechanical property

基金项目: 贵州省教育厅青年人才成长项目 (黔教合 LH 字 [2016]225)

通讯作者: 娄金分, 主要研究聚合物的结构与性能 E-mail: 745880700@qq.com

收稿日期: 2017-12-31

引用格式: 李杨, 娄金分, 罗筑. PP-g-MAH 对 PLA 性能的影响 [J]. 工程塑料应用, 2018, 46(3):14-19.

Li Yang, Lou Jinfen, Luo Zhu. Effects of PP-g-MAH on properties of PLA[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(3):14-19.

聚乳酸 (PLA) 是一种可生物降解的高分子材料^[1],强度高,生物相容性好,加工性能优异,广泛应用于医药、食品包装、纤维、农业、林业和电子电器等领域^[2]。但是纯 PLA 的使用成本较高、耐热性能较差、结晶速率低、加工过程易降解、韧性较差且降解速率慢等缺点限制了其进一步的应用^[3-5]。目前,聚丙烯接枝马来酸酐 (PP-g-MAH) 已成为使用较为广泛的增韧增容助剂^[6-9],同时聚丙烯 (PP) 具有高的刚性、韧性和高结晶速率等优点,这些特性使其对制备改性高性能 PLA 材料非常有用。另一方面,PP-g-MAH 与 PLA 具有一定相容性,增强了 PP-g-MAH 和 PLA 界面粘合,从而能够提高 PLA 的力学性能。文献^[10-12]研究表明,接枝产物作为组分间的增容剂与 PLA 共混可以改善 PLA 的结晶性能,提高 PLA 的耐热性能并降低吸水率,同时对以 PLA 为基体的共混体系的力学性能有一定程度的提高。而直接以接枝产物作为共混组分,来改善 PLA 的结晶性能、耐热性以及力学性能的研究鲜有报道。因此,笔者首先制备了 PP-g-MAH,进一步通过熔融共混制备 PLA/PP-g-MAH 共混物,利用 PP 的高韧性、高结晶速率等优点,同时利用 PP-g-MAH 的增容性,达到改善 PLA 韧性及阻隔性的目的。

1 实验部分

1.1 主要原料

PLA: 4032D, 重均分子量为 155 000, 美国 Nature Works 公司;

PP-g-MAH: 自制;

PP: T30S, 中国石油天然气股份有限公司;

马来酸酐 (MAH): 108-31-6, 广州市虎傲化工有限公司。

1.2 主要设备与仪器

双螺杆挤出机: SJ-45X25F 型, 上海轻工机械股份有限公司;

注塑机: CJ80MZ-NC II 型, 震德塑料机械厂有限公司;

微机控制电子万能试验机: WDW-10C 型, 上海华龙测试仪器有限公司;

傅立叶变换红外光谱 (FTIR) 仪: NEXUS 670 型, 美国 Thermo 公司;

热重 (TG) 分析仪: Q500 型, 美国 TA 公司;

扫描电子显微镜 (SEM): EVO MA25 型, 德国卡尔蔡司公司;

冲击试验仪: XQZ-II 型, 承德金建检测仪器有

限公司;

动态热机械分析 (DMA) 仪: Q800 型, 美国 TA 公司;

气体渗透仪: VAC-VI 型, 济南兰光机电技术有限公司。

1.3 试样制备

将 PLA 在 80℃ 的真空烘箱中干燥 12 h, 与一定量 PP-g-MAH 混合均匀后, 经双螺杆挤出机造粒, 从料斗到模具的挤压温度分别为 150, 155, 160, 165, 170℃ 和 185℃, 螺杆转速为 160 r/min。

挤出粒料于 80℃ 烘干, 经注塑机注塑成标准样条。注塑压力为 45~60 MPa, 注射速度为最大注射速度的 40%~70%, 各区间温度为 150~190℃, 冷却时间为 10~15 s, 然后将注塑后的样品在恒温生化箱 (温度为 23℃, 相对湿度为 80%) 中放置 24 h 以消除内应力, 待测。

1.4 性能测试及表征

拉伸强度按 GB/T 1040-2006 测试。

弯曲弹性模量按 GB/T 9341-2008 测试。

Izod 缺口冲击强度按 GB/T 1043-2008 测试, 先在万能制样机上制得 A 型缺口, 缺口深度为 2 mm。

DMA 测试: 损耗因子由动态力学数据计算而得。用注塑样条 (100 mm × 10 mm × 4 mm) 进行测试, 测试频率为 1 Hz, 升温速率为 5℃/min, 温度范围为 -10~140℃。

TG 分析: 氮气氛围, 升温速率为 5℃/min, 温度范围为 40~800℃。

SEM 分析: 将试样放于液氮中 4 h 后脆断, 对脆断后的试样断面喷金后在 SEM 下观察断面形态。

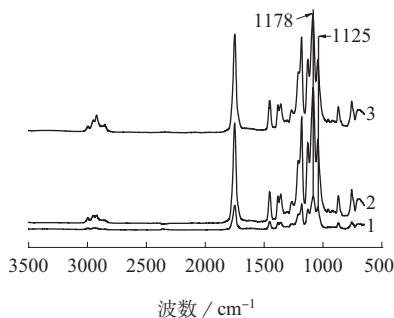
FTIR 分析: 采用热压片法经 KBr 压片后进行 FTIR 测试, 光谱范围为 400~4 000 cm⁻¹, 光谱分辨率为 2 cm⁻¹, 扫描 32 次。

氧气和水蒸气透过系数测试: 挤出粒料经 80℃ 烘干, 采用热压法, 在温度为 200℃、压力为 10 MPa、时间为 15 min 条件下将共混材料制成直径为 25 mm、厚为 1.5 mm 的圆片。每个样片选取不同的 5 个点测量厚度, 取平均值, 每组样片测试 5 个。所有样品测试前需在温度为 25℃ 和相对湿度为 50% 条件下处理 24 h。参照 ASTM D3985-2005 标准, 在 30℃ 条件下进行氧气透过系数测试; 参照 ASTM F1249-2006 标准, 在温度为 25℃、相对湿度为 50% 条件下进行水蒸气透过系数测试。

2 结果与讨论

2.1 FTIR 分析

不同 PP-g-MAH 含量下 PLA/PP-g-MAH 共混物的 FTIR 谱图如图 1 所示。



PP-g-MAH 质量分数: 1—0%; 2—10%; 3—20%

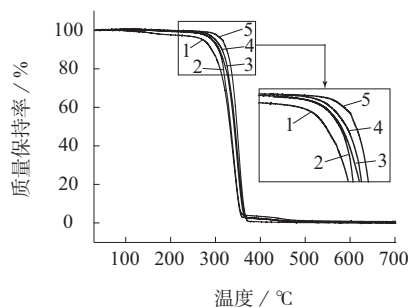
图 1 不同 PP-g-MAH 含量下 PLA/PP-g-MAH 共混物的 FTIR 谱图

PLA 的吸收谱带^[13]集中在 1758 cm^{-1} 处(羰基吸收峰)、 1127 cm^{-1} 和 1178 cm^{-1} 处(酯谱带伸缩振动吸收峰)。与 PLA 相比, PLA/PP-g-MAH 共混物在 $2923, 2854\text{ cm}^{-1}$ 处出现新的特征吸收峰,这是 PP-g-MAH 分子链的 $-\text{CH}_2-$ 的伸缩振动吸收峰。在 2951 cm^{-1} 处的特征吸收峰是 $-\text{CH}_3$ 的伸缩振动吸收峰。MAH 的酸酐基团在熔融共混条件下能够与大分子链醇羟基发生酯化反应^[14],这种分子链间的基团反应在一定程度上能够改善 PP 与 PLA 基体之间的界面相容性。随着 PP-g-MAH 含量增加, PLA/PP-g-MAH 共混物和 PLA 出现相似的吸收峰,但是同属于酯基谱带的两个振动吸收峰(1127 cm^{-1} 和 1178 cm^{-1} 处)以及羰基吸收峰(1758 cm^{-1} 处)的峰强度明显增加,这表明在实验范围内, PLA/PP-g-MAH 共混物中 PLA 与 PP-g-MAH 分子链间除了物理状态下的混合,还可能发生一定程度的酯化反应,这种酯化反应的发生能够促进分子链间的相容,进而提升 PLA/PP-g-MAH 共混物的力学性能。

2.2 TG 分析

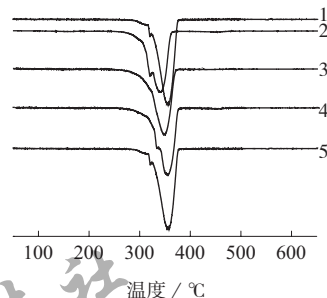
不同 PP-g-MAH 含量下 PLA/PP-g-MAH 共混物的 TG 和 DTG 曲线如图 2 所示。

从图 2 可以看出,纯 PLA 的热降解主要发生在 $280 \sim 500^\circ\text{C}$ 范围内,在此温度范围时,烷基氧容易断裂生成氧自由基中心和碳自由基中心,随后酰氧键断裂,烷基氧断裂生成的碳自由基与酰氧键断裂生成的碳自由基发生终止反应,生成小分子物质,造成降解。在实验温度范围内,不同 PP-g-MAH 含量的 PLA/PP-g-MAH 共混物的 TG 曲线都呈现出两



温度 / $^\circ\text{C}$

(a)



(b)

PP-g-MAH 质量分数: 1—0%; 2—5%; 3—10%; 4—15%; 5—20%
a—TG 曲线; b—DTG 曲线

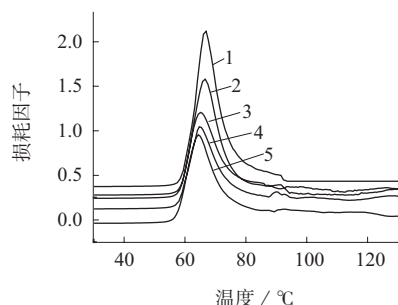
图 2 不同 PP-g-MAH 含量下 PLA/PP-g-MAH 共混物的 TG 和 DTG 曲线

级降解: 第一阶段的失重($250 \sim 330^\circ\text{C}$)为 PLA 热分解过程,第二阶段($330 \sim 400^\circ\text{C}$)主要归因于 PP-g-MAH。随着 PP-g-MAH 含量的增加,共混物的起始、终止温度向高温区移动,表明 PP-g-MAH 的加入提高了 PLA 的热稳定性。这是因为,一方面, PP-g-MAH 自身具有一定的结晶度及耐热性,能够吸收一定的热量以热能的形式储存在共混体系中;另一方面, PLA 与 PP-g-MAH 基团间发生相互反应使缠结点浓度增加,在一定程度上增加了热能向外扩散的途径,从而在一定程度上阻碍了烷基氧断裂,使 PLA/PP-g-MAH 共混物的热稳定性比 PLA 有所提高。这与 FTIR 谱图的分析结果一致。

2.3 损耗因子分析

PLA/PP-g-MAH 共混物的损耗因子曲线如图 3 所示,对应的损耗因子峰值温度列于表 1。

一般而言,损耗因子的峰值温度对应材料的玻璃化转变温度(T_g),在未添加增容剂的二元共混体系中,其损耗因子在随时间的变化曲线中会出现两个峰值,分别对应于二者的 T_g 。添加了增容剂之后,分散相的分散性改善,界面间的作用力增强,颗粒间的粘结程度提高,体系的相容性得到显著改善。但是绝对的共混均相体系实际相当于无规共聚物,只有一个 T_g ,在损耗因子曲线中只有一个峰值,所以



PP-g-MAH 质量分数: 1—0%; 2—5%; 3—10%; 4—15%; 5—20%

图 3 不同 PP-g-MAH 含量下 PLA/PP-g-MAH 共混物的损耗因子曲线

表 1 不同 PP-g-MAH 含量下 PLA/PP-g-MAH 共混物的损耗因子峰值温度

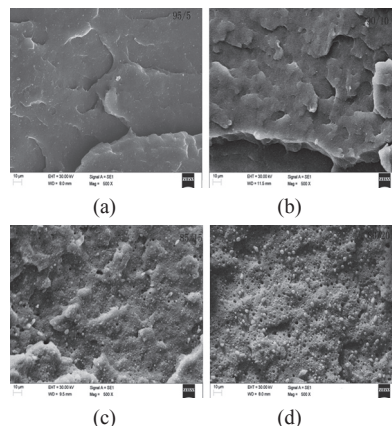
项目	PP-g-MAH 质量分数 / %				
	0	5	10	15	20
损耗因子峰值温度 / °C	67.86	66.4	65.7	64.8	63.8

随着共混体系相容性的改善,共混体系中两相的 T_g 会相互靠近,有形成一个 T_g 的趋势^[14]。笔者所用的 PP 的 T_g 为 -35°C 左右。由图 3 可以看出,在测试范围内不同 PP-g-MAH 含量下 PLA/PP-g-MAH 共混物表现出一个损耗因子峰值,对应于 PLA 的 T_g ,并且损耗因子峰值随 PP-g-MAH 含量的逐渐增加逐渐向低温区移动,即向低温区 PP-g-MAH 的 T_g 移动。添加 20% 的 PP-g-MAH 后,与纯 PLA 相比,PLA/PP-g-MAH 共混物的 T_g 下降了 4.06°C ,表明 PLA 的 T_g 随着 PP-g-MAH 含量的增加而下降。当 PP-g-MAH 质量分数分别为 0%, 5%, 10%, 15%, 20% 时, T_g 分别为 $67.86, 66.4, 65.7, 64.8, 63.8^{\circ}\text{C}$, 表明加入的 PP-g-MAH 与 PLA 基体具有较好的相容性,并且产生了部分增塑作用,导致 PLA 分子链段在相对较低温度下能够运动。这与 FTIR 谱图的分析结果一致。

2.4 SEM 分析

不同 PP-g-MAH 含量下 PLA/PP-g-MAH 共混物的 SEM 照片如图 4 所示。

由图 4a 可以看出,当 PP-g-MAH 质量分数为 5% 时,PP-g-MAH 分散在 PLA 基体中,PLA 与 PP-g-MAH 之间的两相模糊。这表明 PLA 和 PP-g-MAH 在一定程度上具有一定的相容性,这种相容性源于酸酐基团与 PLA 分子链羟基的酯化反应。由图 4b 可以看出,当 PP-g-MAH 含量为 10% 时,增加 PP-g-MAH 的用量后,由于分子链基团间的酯化反应和分子链缠结产生了较好的相容性,出现了特殊的结构,这种界面清晰的断口表明 PLA/PP-g-MAH 共混物开始出现脆性断裂。值得注意的是,



PP-g-MAH 质量分数: a—5%; b—10%; c—15%; d—20%

图 4 不同 PP-g-MAH 含量下 PLA/PP-g-MAH 共混物的 SEM 照片

当 PP-g-MAH 质量分数为 15% 时,可以看到 PP-g-MAH 颗粒从 PLA 基体中脱下时留下了大量的微孔 (见图 4c)。这表明 PP-g-MAH 质量分数达到 15% 后,分子链间基团的反应趋于饱和,二元共混体系开始出现相分离;当 PP-g-MAH 质量分数为 20% 时,可以清晰地看到大量微孔的存在 (见图 4d),在此添加量下,共混体系的相分离越发明显。但是另一方面微孔的尺寸极小,表明分散相 PP-g-MAH 能够均匀分散于 PLA 基体中,这种良好的分散性得益于 PLA 与 PP-g-MAH 较好的相容性,这与共混材料的损耗因子峰值分析结果一致。但是相分离的出现势必导致力学性能下降。

2.5 力学性能分析

不同 PP-g-MAH 含量下 PLA/PP-g-MAH 共混物力学性能测试结果列于表 2。

表 2 不同 PP-g-MAH 含量下 PLA/PP-g-MAH 共混物的力学性能测试结果

PP-g-MAH 质量分数 / %	Izod 缺口冲击强度 / ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$)	弯曲弹性模量 / MPa	拉伸强度 / MPa
0	2.83	2 668	45.34
5	3.72	2 789	43.56
10	4.35	2 834	39.75
15	5.38	2 970	36.61
20	4.2	2 734	33.23

由表 2 可以看出,添加 15% 的 PP-g-MAH 时,PLA/PP-g-MAH 共混物的 Izod 缺口冲击强度和弯曲弹性模量分别由纯 PLA 的 2.83 kJ/m^2 , $2 668 \text{ MPa}$ 提高到 5.38 kJ/m^2 , $2 970 \text{ MPa}$,分别提高了 90.1%, 11.3%, 韧性明显增强,同时拉伸强度随着 PP-g-MAH 质量分数的增加逐渐降低。然而,继续增加 PP-g-MAH 的含量为 20% 时,共混物的拉伸强度、缺口冲击强度和弯曲弹性模量都开始降

低。这是因为当 PP-g-MAH 含量较小 (小于 10%) 时,由于分子量间基团反应和相似相容产生的较好的相容性,使 PLA 分子链与 PP-g-MAH 分子链达到一定程度的相容,同时 PP-g-MAH 具有一定的结晶度,两方面共同作用使共混体系的冲击强度随 PP-g-MAH 含量的增加而逐步提高,但是拉伸强度变化不太明显。但是高添加量 (大于 15%) 条件下,作为二元共混体系,PLA 和 PP-g-MAH 之间高界面自由能导致的相分离现象会开始出现,从而造成力学性能下降。共混体系韧性提高的同时弯曲弹性模量大幅下降,共混体系表现出脆性断裂。这与 SEM 的分析结果一致。

2.6 阻隔性能测试

不同 PP-g-MAH 含量下 PLA/PP-g-MAH 共混物的氧气、水蒸气透过系数曲线如图 5 所示。

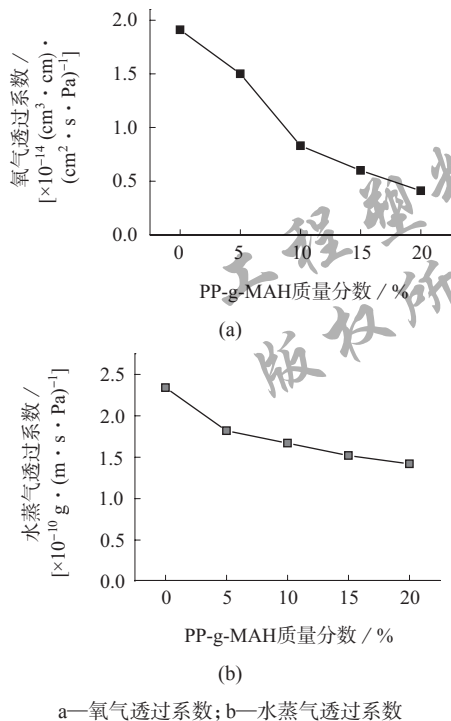


图 5 不同 PP-g-MAH 含量下 PLA/PP-g-MAH 共混物的氧气和水蒸气透过系数曲线

由图 5 可以看出,随着 PP-g-MAH 含量的增加,PLA/PP-g-MAH 共混物的氧气和水蒸气透过系数均逐渐降低。当 PP-g-MAH 的质量分数为 20% 时,PLA/PP-g-MAH 共混物的氧气和水蒸气透过系数都达到最小值,分别为 $4.50 \times 10^{-15} (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}) / (\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ 和 $1.30 \times 10^{-10} \text{ g} / (\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$,与纯 PLA 的氧气透过系数 $[1.78 \times 10^{-14} (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}) / (\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})]$ 和水蒸气透过系数 $[2.37 \times 10^{-10} \text{ g} / (\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})]$ 相比,分别下降 74.7% 和 45.1%。这是因为一方面 PP-g-

MAH 与 PLA 分子链间的基团反应使 PLA 的自由体积减小,同时 PP-g-MAH 具有一定的结晶度,规整的分子链排列作为气体传输的屏障,促使氧气透过系数和水蒸气透过系数降低^[15]。另一方面,PP-g-MAH 与 PLA 分子链间的基团反应改变了分子链结构,分子链结构影响了气体的溶解度和扩散参数^[16]。这些因素共同导致了 PLA/PP-g-MAH 共混材料的氧气透过系数和水蒸气透过系数大幅度降低。

3 结论

(1) 熔融挤出共混条件下,PLA 分子链羟基与 PP-g-MAH 的酸酐基团之间产生酯化反应,极大地改善了共混体系的相容性。

(2) PP-g-MAH 自身结晶度能够在一定程度上提升 PLA/PP-g-MAH 共混物的热稳定性。PP-g-MAH 质量分数大于 10% 后,PLA 与 PP-g-MAH 基团间的反应趋于饱和,开始出现相分离,PP-g-MAH 质量分数大于 20% 后,相分离现象明显。

(3) PP-g-MAH 的加入,能提高 PLA/PP-g-MAH 共混物的韧性,但是 PLA 与 PP-g-MAH 分子的缠结增加,导致分子之间的距离减小和自由体积之间的相互作用。因此,提高 PLA/PP-g-MAH 共混物的韧性,而拉伸强度降低。相比于纯 PLA,添加质量分数 15% 的 PP-g-MAH,PLA/PP-g-MAH 共混物的 Izod 缺口冲击强度和弯曲弹性模量都有所提高,分别由纯 PLA 的 2.83 kJ/m²,2668 MPa 提高到 5.38 kJ/m²,2970 MPa,分别提高了 90.1% 和 11.3%,但拉伸强度却有一定程度的降低。

(4) 阻隔性能实验表明,随着 PP-g-MAH 含量的增加,由于结晶度的增加和分子链间的反应造成自由体积的减小,氧气和水蒸气透过系数降低。添加 20% 的 PP-g-MAH 时,氧气和水蒸气透过系数分别为 $4.50 \times 10^{-15} (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}) / (\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ 和 $1.30 \times 10^{-10} \text{ g} / (\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$,与纯 PLA 相比,分别下降 74.7% 和 45.1%。

参考文献

- [1] 郑霞,李新功,吴义强,等. 竹纤维/聚乳酸可生物降解复合材料自然降解性能[J]. 复合材料学报,2014,31(2):362-367.
Zheng Xia, Li Xingong, Wu Yiqiang, et al. Natural degradation properties of bamboo fibers/poly(lactic acid) biodegradable composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(2):362-367.
- [2] Othman N, Xu Cuiling, Mehrkhodavandi P, et al. Thermorheological and mechanical behavior of polylactide and its enantiomeric diblock copolymers and blends[J]. Polymer, 2012, 53(12):2443-2452.
- [3] Battagazzore D, Bocchini S, Alongi J, et al. Cellulose extracted

- from rice husk as filler for poly(lactic acid):Preparation and characterization[J]. Cellulose, 2014, 21(3):1-9.
- [4] Hung C Y, Wang C C, Chen C Y. Enhanced the thermal stability and crystallinity of polylactic acid (PLA) by incorporated reactive PS-b-PMMA-b-PGMA and PS-b-PGMA block copolymers as chain extenders[J]. Polymer, 2013, 54(7):1 860-1 866.
- [5] 袁理, 李芬芬, 康睿玲, 等. 增韧聚乳酸复合材料的研究[J]. 中国塑料, 2017, 31(1):7-12.
- Yuan Li, Li Fenfen, Kang Ruiling, et al. Progress in toughening modification of poly(lactic acid)[J]. Chinese Plastics, 2017, 31(1):7-12.
- [6] 王昊, 金静. 膨胀阻燃聚丙烯及其协同力学改性的研究进展[J]. 高分子通报, 2015(7):17-24.
- Wang Hao, Jin Jing. Research progress of intumescent flame retardant polypropylene and its mechanical modification[J]. Polymer Bulletin, 2015(7):17-24.
- [7] 金静, 王昊, 舒中俊, 等. 两种马来酸酐接枝物对膨胀阻燃聚丙烯增韧共混复合体系性能的影响[J]. 材料研究学报, 2017, 31(3):219-225.
- Jin Jing, Wang Hao, Shu Zhongjun, et al. Effect of two maleic anhydride grafted polymers as modifier on intumescent flame retardancy and mechanical property of polypropylene based composites[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2017, 31(3):219-225.
- [8] 刘晶如, 胡方明, 俞强. 聚丙烯接枝马来酸酐改性纳米 ZnO / 聚丙烯复合材料的成核结晶行为及力学性能[J]. 复合材料学报, 2017, 34(7):1 526-1 532.
- Liu Jingru, Hu Fangming, Yu Qiang. Nucleation and crystallization and mechanical properties of nano-ZnO / polypropylene composites modified by maleic anhydride grafted polypropylene[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2017, 34(7):1 526-1 532.
- [9] Wang Yuhai, Shen Hao, Li Gu, et al. Effect of interfacial interaction on the crystallization mechanical properties of PP / nano-CaCO₃ composites modified by compatibilizers[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 113(3):1 584-1 592.
- [10] 杨继年, 丁国新, 高俊珊, 等. PP-g-MAH 改性 PLA / HGB 复合材料的制备与性能研究[J]. 化工新型材料, 2014, 48(8):170-172.
- Yang Jinian, Ding Guoxin, Gao Junshan, et al. Fabrication and properties of PLA / HGB composites modified with PP-g-MAH[J]. New Chemical Materials, 2014, 48(8):170-172.
- [11] 王青松, 王向东, 刘伟, 等. 聚乳酸 / 聚丙烯共混体系的制备及其发泡行为研究[J]. 中国塑料, 2013, 27(2):80-85.
- Wang Qingsong, Wang Xiangdong, Liu Wei, et al. Study on preparation of poly(lactic acid) / polypropylene blends and its foaming behavior[J]. China Plastics, 2013, 27(2):80-85.
- [12] 张留进, 陈广义, 魏志勇, 等. 不同增容剂对 POE 增韧聚乳酸性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2012, 28(6):57-60.
- Zhang Liujin, Chen Guangyi, Wei Zhiyong, et al. Effect of different compatibilizers on the property of PLA / POE composites[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2012, 28(6):57-60.
- [13] 赵彩云, 徐艳, 王潮霞. 聚氨酯-聚乳酸共混物的制备及性能[J]. 复合材料学报, 2017, 34(3):2 030-2 037.
- Zhao Caiyun, Xu Yan, Wang Chaoxia. Preparation and properties of thermoplastic polyurethane-poly(lactic acid) blends[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2017, 34(3):2 030-2 037.
- [14] 赵健. 聚乳酸水蒸气阻隔性的研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2011.
- Zhao Jian. Study on the water vapor barrier of polylactic or poly(lactic acid)[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2011.
- [15] 魏海英, 郭红革. 聚乳酸薄膜材料的阻隔性研究进展[J]. 包装工程, 2017, 38(7):23-27.
- Wei Haiying, Guo Hongge. Research progress of barrier properties of polylactic acid film[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(7):23-27.
- [16] 李玉. 聚乳酸基纳米复合材料制备及结构与性能的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2012.
- Li Yu. Polylactic acid nano composite material preparation and study on its structure and properties[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2012.

优惠销售中国工程塑料复合材料技术研讨会《论文集》及论文集光盘

中国合成树脂供销协会加工与应用分会为了配合 2000 ~ 2017 年先后召开的中国工程塑料复合材料技术研讨会, 共编辑、出版了 18 本《论文集》。其内容涉及工程塑料及通用塑料的合成与改性、加工、应用、测试、模具、设备新技术, 以及文献综述、评论等, 突出了我国工程塑料行业发展规划、热点分析。现尚有部分《论文集》, 以及应广大读者要求加工制作的论文集光盘, 现以优惠价格 (含邮费) 销售, 欢迎订阅。

1. 2004 ~ 2017 年中国工程塑料复合材料技术研讨会《论文集》, 优惠价 400 元 / 套。

2. 2000 ~ 2017 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集光盘, 优惠价 300 元 / 盘。本光盘除收录 2000 ~ 2017 年 18 本《论文集》的全部内容外, 还包括约 3 300 人次的会议代表通讯录。

邮局汇款

收款地址: 山东济南市天桥区田庄东路 3 号

收款单位: 《工程塑料应用》杂志社

邮 编: 250031

电 话: (0531)85878223 85878057 85878278

传 真: (0531)85947355

银行汇款

户 名: 山东非金属材料研究所

开户银行: 济南市工商银行经十一路支行

帐 号: 1602001229014425546

网上订购: <http://www.epa1973.com>