

# 改性碳酸钙增韧增强聚乳酸复合材料的制备及性能研究

李新芳, 官燕燕, 张莉琼, 李永桂, 赵素芬\*, 王子扬, 淮亚红

(中山火炬职业技术学院, 广东 中山 528436)

**摘要:** 研究选用铝酸酯偶联剂改性碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ ), 然后以聚乳酸(PLA)为基体, 通过熔融共混法制备 PLA/ $\text{CaCO}_3$  复合材料, 研究铝酸酯偶联剂质量分数和  $\text{CaCO}_3$  粒径对 PLA/ $\text{CaCO}_3$  复合材料性能的影响。再以改性  $\text{CaCO}_3$  和聚乙二醇(PEG)对 PLA 进行复合改性, 研究 PLA/ $\text{CaCO}_3$ /PEG 复合材料的力学性能、光学性能和结晶性能。结果表明: 当铝酸酯偶联剂质量分数为  $\text{CaCO}_3$  质量的 2.5%、 $\text{CaCO}_3$  粒径为 1  $\mu\text{m}$ 、PLA 和  $\text{CaCO}_3$  质量比为 90:10 时, PLA/ $\text{CaCO}_3$  复合材料的断裂伸长率和拉伸强度比纯 PLA 提高 85.4% 和 11.1%, 透光率在 71% 以上。进一步在 PLA 基体中加入改性  $\text{CaCO}_3$  和 PEG 可有效改善 PLA/ $\text{CaCO}_3$ /PEG 复合材料的界面相容性与韧性。当 PLA、 $\text{CaCO}_3$ 、PEG 的质量比为 82:10:8 时, PLA/ $\text{CaCO}_3$ /PEG 复合材料的断裂伸长率为 20.1%, 拉伸强度为 65.8 MPa, 比纯 PLA 分别提高 390% 和 23.5%, 透光率在 74% 左右。同时, 添加改性  $\text{CaCO}_3$  与 PEG 后, PLA/ $\text{CaCO}_3$ /PEG 复合材料中 PLA 组分的玻璃化转变温度( $t_g$ )和冷结晶温度( $t_c$ )均出现明显的低温偏移现象,  $t_g$  比纯 PLA 降低 1.3  $^\circ\text{C}$ ,  $t_c$  降低 12.3  $^\circ\text{C}$ , 熔融焓增加, 比纯 PLA 提高 20%。这一结果充分说明改性  $\text{CaCO}_3$  与 PEG 协同提高了 PLA 的结晶能力, 又通过优化界面相容性减少加工能耗, 为高性能 PLA 基复合材料的设计与制备提供了依据。

**关键词:** 聚乳酸; 改性碳酸钙; 聚乙二醇; 增韧; 生物降解

中图分类号: TB33

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)01-0133-05

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.01.025

## Study on Preparation and Properties of Modified Calcium Carbonate Toughened and Reinforced Polylactic Acid Composites

LI Xinfang, GUAN Yanyan, ZHANG Liqiong, LI Yonggui, ZHAO Sufen\*, WANG Ziyang, HUAI Yahong  
(Zhongshan Torch Polytechnic, Zhongshan 528436, China)

**Abstract:** In the study, calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) was surface-treated with an aluminate coupling agent, after which polylactic acid (PLA)-based PLA/ $\text{CaCO}_3$  composites were prepared by melt compounding. The effect of aluminate content and  $\text{CaCO}_3$  particle size on composite performance was systematically evaluated. Subsequently, a co-modification system combining the treated  $\text{CaCO}_3$  and polyethylene glycol (PEG) was introduced into PLA, and the mechanical, optical and crystallization behaviors of PLA/ $\text{CaCO}_3$ /PEG ternary composites were investigated. The results show that, at an aluminate dosage of 2.5% (relative to  $\text{CaCO}_3$ ), a  $\text{CaCO}_3$  particle size of 1  $\mu\text{m}$  and a mass ratio of PLA and  $\text{CaCO}_3$  90 : 10, the PLA/ $\text{CaCO}_3$  composite exhibits an 85.4% increase in elongation at break and an 11.1% increase in tensile strength compared with pure PLA, while maintaining a light transmittance above 71%. Further incorporation of both modified  $\text{CaCO}_3$  and PEG markedly improves interfacial compatibility and toughness. With a mass ratio of PLA,  $\text{CaCO}_3$  and PEG of 82 : 10 : 8, the ternary composite attains an elongation at break of 20.1% and a tensile strength of 65.8 MPa, which was respectively improved by 390% and 23.5% compared with pure PLA, together with a light transmittance of 74%. Simultaneously, the glass transition temperature ( $t_g$ ) and cold crystallization temperature ( $t_c$ ) of the PLA phase shift to lower values.  $t_g$

收稿日期 Submitted date 2025-03-17; 修回日期 Revised date 2025-04-25; 录用日期 Accepted date 2025-05-19

基金项目: 广东省普通高校创新团队项目(2023KCXTD084); 广东省普通高校重点领域专项项目(2022ZDZX3084、2023ZDZX3096、2023ZDZX3098、2023ZDZX4132); 中山市社会公益科技研究重大项目(2022B2001、2024B2017)

\*联系人, 610230508@qq.com

引用本文: 李新芳, 官燕燕, 张莉琼, 等. 改性碳酸钙增韧增强聚乳酸复合材料的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2026, 54(1): 133-137.

Citation: LI X F, GUAN Y Y, ZHANG L Q, et al. Study on preparation and properties of modified calcium carbonate toughened and reinforced polylactic acid composites[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(1): 133-137.

decreases by 1.3 °C and  $t_{cc}$  by 12.3 °C, while the melting enthalpy rises by 20% relative to pure PLA. These findings demonstrate that the combined use of modified  $\text{CaCO}_3$  and PEG synergistically accelerates PLA crystallization and reduces processing energy consumption through optimized interfacial adhesion, providing a practical route for designing high-performance PLA-based composites.

**Keywords:** Polylactic acid; Modified calcium carbonate; Polyethylene glycol; Toughening; Biodegradation

聚乳酸(PLA)作为一种极具潜力的生物可降解材料,在包装、医疗、纺织等众多领域备受瞩目<sup>[1-3]</sup>。然而,PLA材料在实际应用中面临着性能瓶颈与成本制约两大难题,严重限制其大规模推广与高端化应用<sup>[4-5]</sup>。一方面,PLA自身的断裂伸长率较低等机械性能短板使其在诸如承受频繁弯折、拉伸等动态应力的场景下,尚不能完全满足实际使用需求;另一方面,其相对较高的制造成本使其在对成本把控要求严苛的一次性用品、快消包装等领域中的竞争力大打折扣<sup>[6-8]</sup>。

碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ )因成本低、来源广,成为改善PLA性能的热门填料。但PLA与 $\text{CaCO}_3$ 直接共混存在界面不相容问题,致使材料综合性能不佳。通过物理复合改性手段可显著改善PLA的机械特性<sup>[9-11]</sup>,然而对其光学性能尚未进行深入研究。基于此,提升PLA共混体系的界面相容性<sup>[12-13]</sup>并保持其光学透明性<sup>[14-15]</sup>,已成为实现PLA高效增韧的核心研究课题。

为此,本实验选用铝酸酯偶联剂对 $\text{CaCO}_3$ 进行表面改性,调控PLA与改性 $\text{CaCO}_3$ 的质量比,再加入相溶剂聚乙二醇(PEG)提高其界面相容性,深入研究PLA/ $\text{CaCO}_3$ /PEG复合材料的力学性能、光学性能和结晶性能,为高性能PLA基复合材料的制备提供依据。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

PLA, 4032D, 美国 Natureworks 公司;  $\text{CaCO}_3$ , 粒径为 1~10  $\mu\text{m}$ , 上海亮江钛白化工制品有限公司; 铝酸酯偶联剂, 分析纯, 中山市科昌化工仪器有限公司; PEG, 分析纯, 天津市大茂化学试剂厂; 聚乙烯蜡、硬脂酸, 分析纯, 中山市科昌化工仪器有限公司。

### 1.2 仪器与设备

高速混合机, SYH-100, 常州市倍成干燥设备工程有限公司; 双螺杆挤出机, TES-65, 江苏南京诺达挤出装备有限公司; 流延挤出机, XH-432-25, 锡华机械科技(东莞)有限公司; 差示扫描量热仪(DSC), DSC-Q25, 美国 TA 公司; 鼓风干燥箱, DHG-9030A; 电子拉力试验机, GBH-2, 广州标记包装设备有限公司; 透光率/雾度测定仪, SGW-810, 广州标记包装设备有限公司。

### 1.3 样品制备

首先将 PLA 粒料置于恒温干燥箱内, 在 80 °C 恒温环境中处理 8 h, 以去除水分。随后, 将预处理后的 PLA 与  $\text{CaCO}_3$ 、PEG 等添加剂按预定质量比放入高速混料装置进

行充分混合。混合均匀的物料通过双螺杆挤出机进行熔融共混。机筒温度梯度设置为: 一区 155 °C、二区 170 °C、三区 175 °C、四区 180 °C、五区 185 °C。模头温度控制在 180 °C, 螺杆运转速率维持在 150 r/min。挤出样品经水冷系统快速冷却后切粒成型。所得母粒通过流延成型工艺加工成厚度约 200  $\mu\text{m}$  的复合材料, 将复合材料放入恒温干燥箱, 在 80 °C 条件下进行 12 h 的热处理, 以消除内应力。

### 1.4 性能测试与表征

**力学性能测试:** 按照 GB/T 1040.3—2006, 将复合材料裁取成 150 mm×15 mm 的矩形试样。在电子试验机上设置夹距为 100 mm, 以(100±10) mm/min 的恒定速率进行拉伸试验, 测定试样的断裂伸长率和拉伸强度, 实验环境温度为(25±2) °C。

**透明性能测试:** 按照 GB/T 2410—2008, 将复合材料裁取成 50 mm×50 mm 的方形试样。采用透光率/雾度测定仪, 测量试样的透光率, 实验环境温度为(25±2) °C。

**DSC 测试:** 按照 JY/T 0589.3—2020, 称取 5~8 mg 复合材料置于标准铝坩埚中。初始温度扫描范围为 25~200 °C, 升温速率控制在 10 °C/min; 达到 200 °C 后恒温保持 3 min 以消除材料热历史; 随后以相同速率降温至 25 °C, 维持 2 min; 最后再以 10 °C/min 的速率升温至 200 °C 完成测试。整个测试过程在氮气保护气氛下进行, 气体流速保持 50 mL/min。

## 2 结果与讨论

### 2.1 $\text{CaCO}_3$ 质量分数对 PLA/ $\text{CaCO}_3$ 复合材料力学性能和光学性能的影响

综合性能和成本考虑, 先以 5  $\mu\text{m}$  的超细  $\text{CaCO}_3$  作为填料, PLA、 $\text{CaCO}_3$  质量比为 100:0、90:10、80:20 和 70:30。 $\text{CaCO}_3$  的加入降低了体系的流动性, 所以加入质量分数为 1.0% 的聚乙烯蜡作为润滑剂。选定的表面改性剂为铝酸酯偶联剂, 其质量分数为  $\text{CaCO}_3$  质量的 2%。

图 1 为  $\text{CaCO}_3$  质量分数对 PLA/ $\text{CaCO}_3$  复合材料性能的影响。从图 1a 可以看出, 随着  $\text{CaCO}_3$  质量分数的增加, 复合材料的断裂伸长率和拉伸强度先上升后下降, 其结果与文献[16]保持一致。当 PLA/ $\text{CaCO}_3$  质量比为 90:10 时, 材料表现出最优的力学性能, 相比纯 PLA, 断裂伸长率提高 12.2%, 拉伸强度提高 3.0%, 说明改性  $\text{CaCO}_3$  的加入可以提高 PLA 的力学性能。但随着  $\text{CaCO}_3$  质量分数的增加, PLA/ $\text{CaCO}_3$  复合材料的力学性能下降。这是由于大量粉

体的存在会限制PLA分子链段运动,使CaCO<sub>3</sub>与PLA界面的结合力较弱,导致PLA/CaCO<sub>3</sub>复合材料的力学性能下降。由于CaCO<sub>3</sub>是白色粉末,在没有添加界面相容剂时,复合材料的界面相容性比较差。从图1b可以看出,随着CaCO<sub>3</sub>质量分数的增加,透光率急剧下降,当PLA、CaCO<sub>3</sub>质量比为90:10时,PLA/CaCO<sub>3</sub>复合材料的透光率为70.3%。从界面相容和性能方面考虑,确定PLA、CaCO<sub>3</sub>的质量比为90:10。

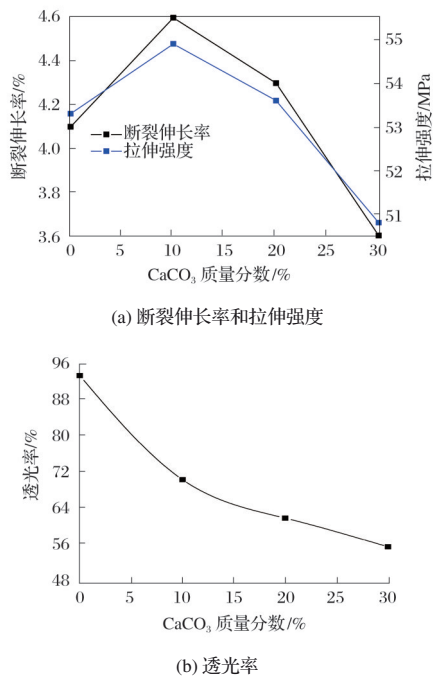


图1 CaCO<sub>3</sub>质量分数对PLA/CaCO<sub>3</sub>复合材料性能的影响  
Fig.1 Effect of CaCO<sub>3</sub> mass fraction on properties of PLA/CaCO<sub>3</sub> composites

## 2.2 铝酸酯偶联剂质量分数对PLA/CaCO<sub>3</sub>复合材料力学性能和光学性能的影响

选定的表面改性剂为铝酸酯偶联剂,并添加质量分数为1.0%的硬脂酸来配合铝酸酯偶联剂使用。铝酸酯偶联剂的质量分数为1.0%、1.5%、2.0%、2.5%、3.0%(以CaCO<sub>3</sub>的质量计算),PLA、CaCO<sub>3</sub>的质量比为90:10,CaCO<sub>3</sub>粒径为5 μm。

图2为铝酸酯质量分数对PLA/CaCO<sub>3</sub>复合材料性能的影响。从图2a可以看出,铝酸酯偶联剂的质量分数为2.5%时,相比纯PLA,复合材料的断裂伸长率提高19.5%,拉伸强度提高4.5%,改性效果较好。偶联剂添加量过低不能使CaCO<sub>3</sub>和PLA基体树脂充分偶联;添加量过高,则产生过盈效果,过量的偶联剂起不到偶联效果,相反还增加复合材料的生产成本。从图2b可以看出,铝酸酯偶联剂的质量分数为2.0%~3.0%时,复合材料的透光率保持在70%左右。

图3为铝酸酯偶联剂改性前后CaCO<sub>3</sub>对水的亲疏性。从图3可以看出,铝酸酯偶联剂改性前后CaCO<sub>3</sub>的表面特

性发生了显著转变。未改性的CaCO<sub>3</sub>表现出典型的亲水特性,由于颗粒密度大于水,在静置后迅速沉降于容器底部。经表面改性处理后,CaCO<sub>3</sub>的表面能显著降低,呈现出明显的疏水特性。这种疏水性使改性后的CaCO<sub>3</sub>能够稳定地悬浮于水相表面,即使在机械搅拌作用下仍保持稳定的漂浮状态,改性效果较好,可提升PLA/CaCO<sub>3</sub>复合材料的界面相容性<sup>[4]</sup>。

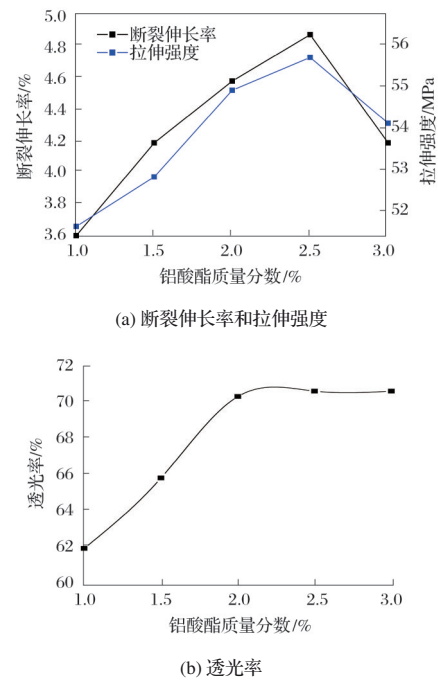


图2 铝酸酯质量分数对PLA/CaCO<sub>3</sub>复合材料性能的影响  
Fig.2 Effect of aluminate mass fraction on properties of PLA/CaCO<sub>3</sub> composites

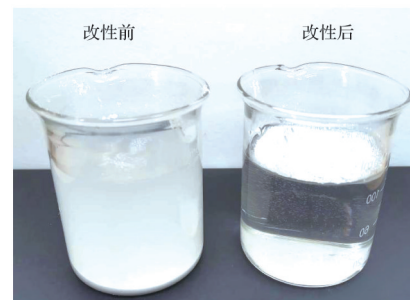
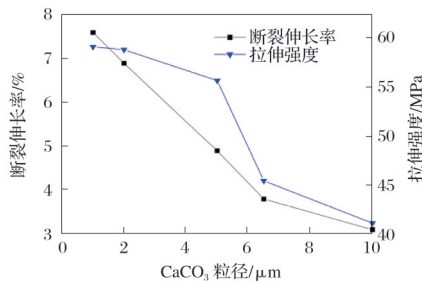


图3 铝酸酯偶联剂改性前后CaCO<sub>3</sub>对水的亲疏性  
Fig.3 Hydrophilicity and hydrophobicity of CaCO<sub>3</sub> before and after modification with aluminate coupling agent

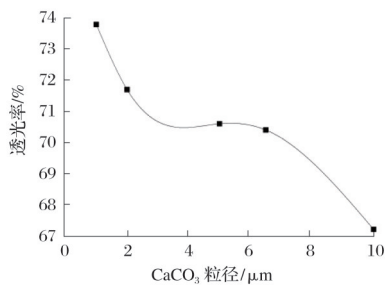
## 2.3 CaCO<sub>3</sub>粒径对PLA/CaCO<sub>3</sub>复合材料力学性能和光学性能的影响

选用1~10 μm CaCO<sub>3</sub>添加到PLA中(PLA、CaCO<sub>3</sub>质量比为90:10),铝酸酯偶联剂的质量分数为CaCO<sub>3</sub>质量的2.5%,CaCO<sub>3</sub>粒径分别为1.0、2.0、5.0、6.5、10.0 μm。图4为CaCO<sub>3</sub>粒径对PLA/CaCO<sub>3</sub>复合材料性能的影响。从图4可以看出,CaCO<sub>3</sub>的粒径越小,复合材料的断裂伸长率、拉伸强度和透光率越好,尤其是粒径为1~2 μm时,性能较好。CaCO<sub>3</sub>的粒径为1 μm时,相比纯PLA,复合材料的断

裂伸长率和拉伸强度分别提高 85.4% 和 11.1%，透光率在 71% 以上。这是因为  $\text{CaCO}_3$  作为一种刚性填料，其粒径尺寸与比表面积成反比。随着粒径的减小，填料的比表面积显著增大，导致界面张力增加，从而扩大了与 PLA 基体之间的界面接触面积。这种界面效应促使 PLA 分子链段与填料表面发生物理缠结，形成三维网络结构。当材料受到外力作用时，这种独特的结构能够诱导基体产生多重银纹，有效耗散机械能，同时形成广泛的塑性变形区域。这种协同作用机制使复合材料同时实现了增强和增韧的效果，断裂伸长率和拉伸强度在一定范围内同步提高<sup>[4]</sup>。



(a) 断裂伸长率和拉伸强度



(b) 透光率

图 4  $\text{CaCO}_3$  粒径对 PLA/ $\text{CaCO}_3$  复合材料性能的影响

Fig.4 Effect of  $\text{CaCO}_3$  particle size on properties of PLA/ $\text{CaCO}_3$  composites

#### 2.4 PEG 质量分数对 PLA/ $\text{CaCO}_3$ /PEG 复合材料力学性能和光学性能的影响

作为生物相容性优异的聚合物改性剂，PEG 因其独特的分子结构特征而表现出良好的界面润湿性能和黏附特性。研究表明，PEG 分子链中的醚键( $-\text{O}-$ )能够与 PLA 的酯基( $-\text{COO}-$ )形成氢键作用，同时其柔性链段可有效降低界面能，从而显著改善 PLA 基复合材料的界面相容性<sup>[17-19]</sup>。选用 PEG 为相容剂，加入 PLA/ $\text{CaCO}_3$  复合材料中，PEG 的质量分数分别为 2.0%、4.0%、6.0%、8.0% 和 10.0%。

表 1 为 PLA/ $\text{CaCO}_3$ /PEG 复合材料力学性能和透明性能数据。从表 1 可以看出，PEG 的加入提高了 PLA/ $\text{CaCO}_3$ /PEG 复合材料的断裂伸长率和拉伸强度，而透光率变化不大。当 PEG 质量分数为 8% 时，PLA/ $\text{CaCO}_3$ /PEG 复合材料的断裂伸长率和拉伸强度均达到最大值，断裂伸长率为 20.1%，拉伸强度为 65.8 MPa，比纯 PLA 分别提高 390% 和

23.5%，而透光率保持在 74% 左右。这可能是 PEG 加入 PLA/ $\text{CaCO}_3$  基体后，复合材料中的 PEG 发挥了增塑作用，既减少了聚合物分子链的相互作用力，还降低了 PLA- $\text{CaCO}_3$  相的界面张力，使  $\text{CaCO}_3$  在 PLA 中分散均匀， $\text{CaCO}_3$  的粒径趋向减小，与 PLA 基体在界面处的黏结增强，PLA- $\text{CaCO}_3$  两相之间的相容性得到改善，最终提高其断裂伸长率和拉伸强度。当 PEG 质量分数为 10% 时，PLA/ $\text{CaCO}_3$ /PEG 复合材料表面出现少量麻点，如图 5 所示。这说明 PLA- $\text{CaCO}_3$  两相之间混合不均匀，导致性能下降<sup>[20]</sup>。通过表 1 的数据分析，选用 PEG 质量分数为 8%。

表 1 PLA/ $\text{CaCO}_3$ /PEG 复合材料力学性能和透明性能数据

Tab.1 Mechanical properties and transparency data of PLA/ $\text{CaCO}_3$ /PEG composites

PLA/ $\text{CaCO}_3$ 、 PEG 质量比	断裂伸长率/%	拉伸强度/MPa	透光率/%
90:10:0	7.6	59.2	73.8
88:10:2	11.7	58.9	73.3
86:10:4	15.9	59.0	73.1
84:10:6	17.6	62.5	73.6
82:10:8	20.1	65.8	74.1
80:10:10	18.9	63.4	73.4



图 5 PLA/ $\text{CaCO}_3$  复合材料的表面性能

Fig.5 Surface properties of PLA/ $\text{CaCO}_3$  composites

#### 2.5 PLA/ $\text{CaCO}_3$ /PEG 复合材料的结晶性能研究

表 2 为 PLA/ $\text{CaCO}_3$ /PEG 复合材料的 DSC 参数。从表 2 可以看出，在 PLA 基体中添加  $\text{CaCO}_3$  和 PEG 后，PLA/ $\text{CaCO}_3$ /PEG 复合材料中 PLA 组分的玻璃化转变温度( $t_g$ )向低温方向移动，比纯 PLA 降低 1.3 °C，说明 PEG 的加入改善了 PLA- $\text{CaCO}_3$  的界面相容性。熔点( $t_m$ )变化幅度不大。冷结晶温度( $t_{cc}$ )从纯 PLA 的 120.8 °C 显著降低至 108.5 °C，降低 12.3 °C。熔融焓( $\Delta H_m$ )从 15.5 J/g 提升至 18.6 J/g，提高 20%，表明  $\text{CaCO}_3$  和 PEG 的协同作用能够有效促进 PLA 分子链的运动能力，降低 PLA 分子链的结晶活化能，使分子链在较低的温度下就能够开始结晶。这一现象与文献<sup>[21-23]</sup>的研究结果一致。在实际加工过程中，添加  $\text{CaCO}_3$  的 PLA 材料可以在相对较低的温度下进行成型，从而降低加工成本和能耗，同时也有利于提高生产效率。

表2 PLA/CaCO<sub>3</sub>/PEG复合材料的DSC参数  
Tab.2 DSC parameters of PLA/CaCO<sub>3</sub>/PEG composites

PLA、CaCO <sub>3</sub> 、 PEG质量比	$t_g/^\circ\text{C}$	$t_{cc}/^\circ\text{C}$	$t_m/^\circ\text{C}$	$\Delta H_m/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$
100:0:0	60.5	120.8	154.7	15.5
90:10:0	60.3	110.3	154.2	17.9
82:10:8	59.2	108.5	154.3	18.6

### 3 结论

选用PEG为界面相容剂,CaCO<sub>3</sub>为增塑增强材料,与PLA基体复合,研究PLA基复合材料的力学性能、透光性能和结晶性能。

选用铝酸酯偶联剂对CaCO<sub>3</sub>进行改性,研究铝酸酯偶联剂质量分数和CaCO<sub>3</sub>粒径对PLA/CaCO<sub>3</sub>复合材料性能的影响,表明铝酸酯偶联剂质量分数为CaCO<sub>3</sub>质量的2.5%、CaCO<sub>3</sub>粒径为1 μm、PLA和CaCO<sub>3</sub>的质量比为90:10时,PLA/CaCO<sub>3</sub>复合材料的断裂伸长率和拉伸强度比纯PLA分别提高85.4%和11.1%,透光率在71%以上。

在PLA中加入改性CaCO<sub>3</sub>和PEG提高了PLA/CaCO<sub>3</sub>/PEG复合材料的力学性能,材料中PLA、CaCO<sub>3</sub>、PEG的最佳质量比为82:10:8时,PLA/CaCO<sub>3</sub>/PEG复合材料的断裂伸长率增至20.1%,拉伸强度增至65.8 MPa,比纯PLA分别提高390%和23.5%,而透光率保持在74%左右。当PEG质量分数较高时(10%),PLA/CaCO<sub>3</sub>/PEG复合材料表面出现少量麻点,PLA-CaCO<sub>3</sub>两相之间混合不均匀,导致性能下降。

在PLA中添加改性CaCO<sub>3</sub>和PEG后,PLA/CaCO<sub>3</sub>/PEG复合材料中PLA组分的 $t_g$ 和 $t_{cc}$ 均出现明显的低温偏移现象, $t_g$ 比纯PLA降低1.3 °C, $t_{cc}$ 降低12.3 °C,熔融焓增加,比纯PLA提高20%,表明改性CaCO<sub>3</sub>与PEG协同提高了PLA的结晶能力,PEG改善了PLA-CaCO<sub>3</sub>的界面相容性。

### 参考文献

- 曾永攀. 可生物降解材料对聚乳酸的增韧改性研究进展[J]. 塑料科技, 2024, 52(9): 153-160.
- YANG X, WEI F Q, WANG Z N, et al. High-reactive silica nanosheets as compatibilizers for immiscible PLLA/PBAT polymer blends[J]. Composites Science and Technology, 2023, 236: 109979.
- WU Y T, GAO X, WU J, et al. Biodegradable polylactic acid and its composites: Characteristics, processing, and sustainable applications in sports[J]. Polymers, 2023, 15(14): 3096.
- 刘逸涵, 边俊甲, 潘宏伟, 等. 铝酸酯改性碳酸钙提高聚乳酸的韧性和生物降解性[J]. 塑料科技, 2020, 48(5): 60-65.
- LI X R, LIN Y, LIU M L, et al. Compatibilization of poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends using epoxy-functionalized graphene oxide as a reactive compatibilizer[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 139(24): 53477.
- 张琼. 纳米蒙脱石改性聚乳酸/聚己内酯复合材料的制备与性能研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(1): 80-83.
- ZHANG L, WANG H, CHEN Y, et al. Recent advances in compatibilization strategies for immiscible polymer blends using bio-based nanomaterials[J]. Industrial Crops and Products, 2024, 210: 118881.
- KIM D Y, LEE J B, LEE D Y. Selective localization of nanofiller on mechanical properties of poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) nanocomposites via the surface energy and melt blending technique[J]. Macromolecules, 2022, 55(8): 3287-3300.
- 颜干才, 杜年军, 丁昭源. PLA/nano-CaCO<sub>3</sub>复合材料的制备与性能[J]. 现代塑料加工应用, 2023(1): 36-39.
- 刘哲坤. PBAT-淀粉可降解塑料的改性技术与性能研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2023.
- 王晓茹. 纳米碳酸钙/聚乳酸复合材料的制备及性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2021.
- 黎晓杰, 成晓琼, 段书谦, 等. 改性水滑石调控聚乳酸-马来酸酐接枝聚丙烯复合材料及其性能[J]. 复合材料学报, 2022, 39(12): 5711-5726.
- 李新芳, 熊立贵, 赵素芬, 等. 协同增容增韧聚乳酸生物降解薄膜的制备及性能研究[J]. 包装工程, 2025, 46(3): 33-40.
- 戎晨艳. 聚乳酸纳米复合材料的制备、结构设计与性能研究[D]. 杭州: 杭州师范大学, 2022.
- 涂志刚, 苏小强, 张凌涛, 等. 共混改性型PLA透明增韧的研究进展[J]. 现代塑料加工应用, 2021(5): 59-63.
- 秦莹莹. 聚乳酸基纳米复合材料的制备及在食品包装的应用研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2020.
- 曲玉婷, 王立梅, 齐斌. 聚乙二醇对聚乳酸/淀粉纳米晶复合材料性能的影响[J]. 中国塑料, 2022(8): 56-61.
- LI Y, WANG J, LIU Y, et al. PEGylated poly(lactic acid) nanoparticles for the delivery of docetaxel: Preparation, characterization, and in vitro release studies[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2016, 497(1/2): 28-38.
- 郭建伟. PLA/PEG复合材料性能及增塑机理的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- 蔡小琳. 小分子反应性增容PLA/PBS共混物结构和性能研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020.
- WANG X, ZHANG Y, LI J. Enhanced crystallization kinetics of poly(lactic acid) composites induced by synergistic effect of nano-CaCO<sub>3</sub> and PEG[J]. Polymer Testing, 2022, 112: 107628.
- CHEN L, LIU H, WANG S. Effect of surface-modified calcium carbonate on crystallization behavior of poly(lactic acid)/poly(ethylene glycol) blends[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 138(15): 50215.
- LI Y, ZHANG K. Crystallization and mechanical properties of poly(lactic acid)/calcium carbonate composites plasticized by polyethylene glycol[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020, 134: 105902.