

聚乳酸/纳米粘土复合材料生物降解性能效果

方正予 丁时蒸

悉尼大学 241000

摘要: 目的: 本研究旨在评估聚乳酸/纳米粘土复合材料在不同环境条件下的生物降解性能, 方法: 将聚乳酸和聚乳酸/纳米粘土复合材料样品 (各 50 个) 在 37°C、50%湿度条件下进行为期 12 周的降解实验, 并分别模拟体内环境, 通过测量质量损失率、扫描电子显微镜(SEM)观察表面形态变化、傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 和 X 射线衍射 (XRD) 分析实验组的化学结构和结晶度变化来评估降解性能。结果: 在第 1、4、12 周时, 对照组聚乳酸的平均质量损失率分别为 $2.31 \pm 0.52\%$ 、 $8.93 \pm 1.24\%$ 和 $25.05 \pm 2.06\%$, 而实验组聚乳酸/纳米粘土复合材料的平均质量损失率分别为 $2.11 \pm 0.42\%$ 、 $7.23 \pm 1.04\%$ 和 $20.55 \pm 1.86\%$, 实验组质量损失率低于对照组, $P < 0.05$, 差异有统计学意义。而 SEM 观察显示对照组表面出现较多孔隙和裂缝, 而实验组表面相对光滑, FTIR 和 XRD 分析表明实验组材料的化学键结构发生了改变, 且纳米粘土的加入对材料的结晶结构起到了稳定作用, 降低了结晶度降低的程度。结论: 纳米粘土的加入降低了聚乳酸复合材料的降解速率, 并对材料的结晶结构起到了一定的稳定作用。

关键词: 聚乳酸; 纳米粘土; 生物降解

聚乳酸/纳米粘土复合材料作为一种新兴的可生物降解材料, 近年来在环保领域引起了广泛的关注, 随着塑料污染问题的加剧, 人们对传统石油基塑料替代品的需求愈发迫切, 聚乳酸 (PLA) 因其可再生性和良好的生物相容性正逐渐成为研究的热点, 但其相对较慢的降解速度和机械性能的限制性限制了其广泛的应用。为此研究人员开始探索通过加入纳米粘土来改善 PLA 的性能, 进而形成 PLA/纳米粘土复合材料, 这种复合材料不仅保留了 PLA 的生物降解性, 而且由于纳米粘土的存在, 大大提高了其机械强度、热稳定性和降解速率。纳米粘土的高比表面积和良好的分散性使其在 PLA 基体中形成均匀的网络结构, 从而增强了材料的物理性能, 同时纳米粘土可以作为活性催化剂, 加速酯键的水解, 从而提高复合材料的降解速度。

1. 资料与方法

1.1 一般资料

本研究选取 2023 年 1 月至 2024 年 12 月期间进行的聚乳酸/纳米粘土复合材料生物降解实验, 旨在评估该复合材料在不同环境条件下的生物降解性能。根据实验设计将复合材料样品随机分为对照组和实验组, 每组 50 个样品, 对照组样品仅采用聚乳酸材料, 而实验组样品在聚乳酸材料中混合纳米粘土。

纳入标准包括: ①使用相同来源和批次的聚乳酸, 以确保材料一致性; ②纳米粘土的含量占复合材料总重量的 5%; ③样品尺寸为标准矩形片, 长为 10cm, 宽为 10cm, 厚度为 1mm。

排除标准为: ①任一材料未通过纯度检验; ②样品表面存在明显缺陷或损坏; ③制备过程中出现故障导致样品质量不达标。

1.2 方法

对照组: 将聚乳酸样品在标准实验室条件下进行降解实

验, 实验室的环境温度控制在 37°C, 湿度为 50%, 在预设环境下将样品分别放入设定好的实验皿中, 每周记录样品的降解情况, 首先将样品置于无菌培养基中以模拟体内环境, 每隔 7 天使用电子天平测量样品质量损失, 并使用扫描电子显微镜 (SEM) 观察样品表面形态变化, 其中整个实验周期为 12 周。

实验组: 复合材料样品实验条件与对照组相同, 重点在于评估纳米粘土的加入对整体降解性能的影响, 实验组除测量质量损失和观察表面形态变化外, 实验组增加 3 项测试, 使用傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 分析降解产物的化学结构变化, 同时采用 X 射线衍射 (XRD) 技术检测材料结晶度的变化, 并且每次测量完成后, 记录变化的数据和显微观察影像, 以备后续数据分析。

1.3 评价指标

表 1 材料质量损失率

组别	样本数	平均质量损失率		
		第 1 周	第 4 周	第 12 周
对照组	50	2.31±0.52	8.93±1.24	25.05±2.06
实验组	50	2.11±0.42	7.23±1.04	20.55±1.86
T		0.231	1.781	4.561
P		0.000	0.000	0.001

2.2 表面形态变化

通过扫描电子显微镜 (SEM) 对样品进行观察, 记录了各组在 12 周后的表面形态变化。

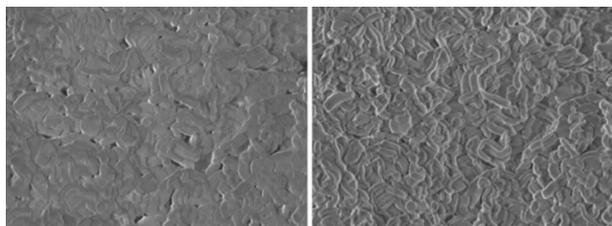


图 1 对照组与实验组电子显微镜 (SEM) 图

对照组: 表面明显凹凸不平, 出现较多孔隙和裂缝。

实验组: 表面相对光滑, 孔隙和裂缝较对照组明显减少。

2.3 化学结构和结晶度变化

材料质量损失率: 通过使用电子天平测量样品的质量损失来量化材料在 1、4、12 周实验周期中的降解速率。

表面形态变化: 利用扫描电子显微镜 (SEM) 观察样品表面微观结构的变化, 以评估材料降解过程中表面形态的演变。

1.4 统计学方法

采用 spss20.0 软件对数据进行整理分析, 计量资料采用 $(\bar{x} \pm s)$ 进行表示, 行 t 检验, 计数资料采用%进行表示, 行 χ^2 检验, $P < 0.05$, 差异有统计学意义。

2. 结果

2.1 材料质量损失率

如表 1 所示, 展示了在 12 周实验周期内, 对照组和实验组样品的平均质量损失, 实验组的聚乳酸/纳米粘土复合材料在整个实验周期内的质量损失率低于对照组, $P < 0.05$, 差异有统计学意义。

实验组的傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 分析和 X 射线衍射 (XRD) 结果如下:

化学结构变化: 随着降解的进行, 出现了特征吸收峰的减少和位移, 表明材料化学键结构发生改变。

结晶度变化: 结晶度数据表明纳米粘土的加入对材料的结晶结构起到了稳定作用, 12 周后结晶度降低程度较小。

3. 讨论

生物降解是生态系统健康和可持续发展的关键因素, 它通过微生物将复杂有机物质分解为简单的无机物, 从而减少环境中的废弃物累积, 降低对自然生态的压力, 这一过程对于维持土壤健康和净化水体至关重要, 因为它能将潜在有害

物质转化为无害的化合物,避免生态系统中的毒性积累,此外生物降解亦有助于减少温室气体排放,因为有些废弃物在自然降解中会释放比经过生物降解更具破坏性的化合物,对实现资源的循环利用和建立可再生经济具有重要意义。因此,促进生物降解技术和材料的发展,不仅能改善环境质量,还能创造一个更加可持续的发展环境。

在本研究中通过对聚乳酸/纳米粘土复合材料在不同环境条件下的降解性能进行系统研究,我们观察到实验组与对照组在材料降解速率、表面形态及化学和结晶结构变化上存在显著差异^[1]。

首先,实验组的质量损失率在各个实验时间点都低于对照组,其主要是由于纳米粘土在材料基体中形成的物理屏障作用,纳米粘土的加入增强了材料的结构完整性,通过与聚乳酸形成复合材料提升了材料的机械性能和耐降解性能^[2]。在材料降解过程中聚乳酸链段被水解打断,而纳米粘土可以通过抑制水分和降解酶的渗透,延缓了整体降解的进程^[3],故纳米粘土的引入降低了复合材料的生物降解速率,从而减少了质量损失。

其次,扫描电子显微镜下实验组样品表面较为光滑,孔隙和裂缝明显少于对照组,表明纳米粘土不仅在宏观上增强了材料的物理耐久性^[4],也在微观结构上起到了稳定作用,纳米粘土的高比表面积和层状结构可以有效地分散在聚乳酸基体中,阻碍细菌和酶的侵入,减少了微孔和裂缝的形成,这种微观增强作用也进一步确认了纳米填料在提高复合材料耐降解性能中的重要性,同时表面形态的改进亦说明复合材料在实际应用中具有更好的耐久性和长期稳定性^[5]。

最后,通过傅里叶变换红外光谱(FTIR)和X射线衍射(XRD)分析,我们发现纳米粘土的加入影响了材料的化学结构和结晶度。在降解过程中实验组的特征吸收峰减少和位

移反映了聚乳酸链与纳米粘土之间的相互作用,导致化学键结构更加稳定,此外XRD结果显示纳米粘土对结晶结构有稳定作用,结晶度降低的幅度较小,表明材料的结晶区相较无机填料的影响保持了一定的稳定性^[6],其不仅改善了材料的刚性和耐久性,还为材料在生物降解中的应用提供结构支撑,从而扩大复合材料的实用性和可靠性。

4.小结

综上所述,纳米粘土的加入可以有效调控聚乳酸的降解速率和方式,这为开发可控降解的生物医用材料提供了新的思路。

参考文献:

- [1]李鑫榕,梁诗滢,胥菲菲,等.新型生物可降解材料聚乳酸的研究进展[J].广州化工,2024,52(22):10-12.
- [2]Xue Y, Zhao D, Dong L, et al. Facile synthesis of novel soy protein-based flame retardant and its effects on the flame retardancy and biodegradation of polylactic acid[J]. Polymer Degradation and Stability, 2025, 231111093-111093.
- [3]孙文涛,龚佳荣,刘新宇,等.聚脲接枝二氧化钛抗菌剂改性聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯/聚乳酸生物降解保鲜膜的制备与性能[J/OL]. 高分子材料科学与工程, 1-14[2024-12-04].
- [4]吉雷波,华振,孙华.纳米粘土在轮胎胎圈胶中的应用[J].轮胎工业,2024,44(11):683-685.
- [5]杨绍哲,吴蓉,张远康,等.生物可降解聚(乳酸-碳酸酯)材料研究进展[J/OL]. 高分子材料科学与工程, 1-8[2024-12-04].
- [6]张伟清.纤维与纳米粘土改性石灰土劈裂强度特性研究[J].广东土木与建筑,2023,30(07):115-118.