卷烟滤嘴用聚乳酸/二氧化钛纳米复合材料的制备及性能研究

李 超,刘文杰,吉 莉,朱 宇*,杨雪超

(贵州中烟工业有限责任公司毕节卷烟厂,贵州 毕节 551700)

摘 要:以聚乳酸(PLA)为基体,纳米二氧化钛(TiO_2)为功能填料,采用熔融共混-纺丝工艺制备PLA/TiO_2纳米复合滤嘴材料,研究TiO_2含量对复合材料结构与性能的影响。结果表明:随着TiO_2含量的增加,复合材料性能整体呈先升高后略降低的趋势。当TiO_2质量分数为3%时,PT-3复合材料性能表现最优,拉伸强度为60.8 MPa,弯曲强度为94.6 MPa,结晶度为44.7%,5%失重温度为323.9 ℃。同时,PT-3样品对烟气中焦油、CO和烟碱的过滤效率分别达到51.9%、28.6%和44.8%,对甲醛、乙醛和苯的降低率分别为25.9%、22.8%和18.7%。此外,PT-3复合材料能够保持良好的环境降解性能,在90 d时质量损失率达到33.7%。引入适量的TiO_2能够通过结构增强与表面活性作用协同提升PLA滤嘴材料的力学性能、热稳定性及烟气减害能力。研究为可降解卷烟滤嘴材料的开发提供参考。

关键词:聚乳酸;二氧化钛;纳米复合材料;卷烟滤嘴;减害性能

中图分类号:TS45 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3360(2026)09-0082-05

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.09.015

Study on Preparation and Properties of Polylactic Acid/Titanium Dioxide Nanocomposites for Cigarette Filters

LI Chao, LIU Wenjie, JI Li, ZHU Yu*, YANG Xuechao

(Bijie Cigarette Factory of China Tobacco Guizhou Industrial Co. , Ltd. , Bijie 551700, China)

Abstract: Using polylactic acid (PLA) as the matrix and nano-titanium dioxide (TiO_2) as the functional filler, PLA/TiO_2 nanocomposite filter materials were prepared via a melt blending-spinning process. The effects of TiO_2 content on the structure and properties of the composites were investigated. The results showed that with increasing TiO_2 content, the overall performance of the composites first increased and then slightly decreased. At a TiO_2 mass fraction of 3%, the PT-3 composite exhibited optimal performance, with a tensile strength of 60.8 MPa, a flexural strength of 94.6 MPa, a crystallinity of 44.7%, and a 5% weight loss temperature of 323.9 ℃. Meanwhile, the PT-3 sample achieved filtration efficiencies of 51.9% for tar, 28.6% for CO, and 44.8% for nicotine in cigarette smoke, along with reduction rates of 25.9% for formaldehyde, 22.8% for acetaldehyde, and 18.7% for benzene. In addition, the PT-3 composite maintained good environmental degradability, with a mass loss of 33.7% after 90 d. The incorporation of an appropriate amount of TiO_2 could synergistically enhance the mechanical properties, thermal stability, and smoke hazard reduction capability of PLA filter materials through structural reinforcement and surface activity. The study provides a reference for the development of degradable cigarette filter materials.

Keywords: PLA; TiO_2; Nanocomposites; Cigarette filter; Harm reduction performance

卷烟滤嘴是卷烟的重要组成部分,其主要功能是降低烟气中焦油、烟碱和CO等有害成分的含量,从而在一定程度上减轻吸烟带来的健康风险[1-3]。目前,商业卷烟滤嘴多由乙酸纤维素制成,该材料属于半合成高分子,在自然环

收稿日期Submitted date 2026-01-19;修回日期Revised date 2026-02-26;录用日期Accepted date 2026-03-31

基金项目:贵州省烟草科技项目(gzzyjzbj20250012)

*联系人,m18685472626@163.com

引用本文:李超,刘文杰,吉莉,等.卷烟滤嘴用聚乳酸/二氧化钛纳米复合材料的制备及性能研究[J].塑料科技,2026,54(9):82-86.

Citation:LI C, LIU W J, JI L, et al. Study on preparation and properties of polylactic acid/titanium dioxide nanocomposites for cigarette filters [J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(9): 82-86.

境中降解缓慢，易形成持久性微塑料污染，已成为全球最常见的城市固体废弃物之一，对生态环境造成长期影响[4-5]。因此，开发兼具良好过滤性能和可降解性的绿色滤嘴材料已成为烟草材料领域的重要研究方向。

聚乳酸(PLA)是一种来源于可再生资源的生物基可降解聚酯，具有良好的生物相容性、加工性和环境友好性，在包装材料、生物医用及可降解纤维等领域受到广泛关注[6-7]。近年来，PLA逐渐被应用于可降解过滤材料的研究，如通过静电纺丝或纤维结构调控可显著提高过滤效率，降低气流阻力[8]。然而，PLA仍存在力学强度和热稳定性相对不足、过滤性能与功能性欠缺等问题，限制其在卷烟滤嘴材料中的应用。因此，通过引入功能纳米填料构建PLA基纳米复合材料，成为改善其综合性能的重要途径。

纳米二氧化钛(TiO_2)因较高的比表面积、良好的化学稳定性及优异的光催化性能[9-10]，在空气净化、污染物降解及功能复合材料领域受到广泛关注[11-12]。研究表明，将纳米TiO_2粒子引入聚合物基体，不仅可作为异相成核剂促进聚合物结晶，还能提高材料的热稳定性和力学性能，通过吸附或光催化作用促进有机污染物的降解[13-14]。因此，将TiO_2引入PLA基体构建纳米复合材料，有望在保持材料可降解特性的同时，提升其结构性能和烟气净化能力。

因此，本研究以PLA为基体、纳米TiO_2为功能填料，采用熔融共混法制备PLA/TiO_2纳米复合滤嘴材料，系统研究TiO_2含量对材料力学性能、热性能、过滤性能、减害性能及降解行为的影响。研究旨在构建兼具良好结构性能与功能特性的PLA/TiO_2纳米复合体系，为绿色可降解卷烟滤嘴材料的开发提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

PLA，4032D，美国NatureWorks公司；纳米TiO_2，平均粒径约20 nm，分析纯，上海阿拉丁生化科技股份有限公司；无水乙醇，分析纯，国药集团化学试剂有限公司；去离子水，实验室自制。

1.2 仪器与设备

双螺杆挤出机，SHJ-20，南京杰恩特机电有限公司；单螺杆挤出纺丝机，SJ-25，青岛科盛达塑料机械有限公司；电子万能材料试验机，CMT4104，美特斯工业系统(中国)有限公司；差示扫描量热仪(DSC)，DSC 2500，美国TA仪器公司；热重分析仪(TG)，TGA 55，美国TA仪器公司；扫描电子显微镜(SEM)，SU8010，日本Hitachi公司；滤棒压降测试仪，YF-10，昆明云扬机电设备有限公司；气相色谱仪(GC)，7890B，美国安捷伦科技有限公司。

1.3 样品制备

将PLA颗粒于60 ℃真空干燥箱中干燥12 h，以去除材料中吸附水分。将纳米TiO_2粉体于80 ℃条件下干燥6 h，以消除表面水分并提高其分散性。按照TiO_2质量分数分别为0、1%、3%、5%和7%设计5组复合材料体系，分别命名为PLA、PT-1、PT-3、PT-5和PT-7。将干燥后的PLA颗粒与纳米TiO_2按比例进行预混，在高速混合机中混合10 min，使填料初步均匀附着在基体颗粒表面。随后将混合物加入双螺杆挤出机进行熔融共混挤出，挤出机各温区温度依次设定为170、175、180、185 ℃，机头温度185 ℃，螺杆转速80 r/min。在剪切作用下，纳米TiO_2在PLA熔体中实现进一步分散并形成稳定复合体系。挤出物经水冷拉条，风干，切粒。将得到的复合颗粒再次于60 ℃真空干燥8 h，备用。复合颗粒一部分采用单螺杆挤出-纺丝装置制备滤嘴用PLA/TiO_2纳米复合材料，经卷绕、切段形成卷烟滤嘴材料样品，用于过滤性能、减害性能及压缩回弹率测试。另一部分复合颗粒进一步被制备成标准塑料力学试样，用于拉伸和弯曲性能测试。

1.4 性能测试与表征

力学性能测试：测试所用样品均为PLA/TiO_2复合材料制备的标准塑料试样，而非滤嘴纤维成品。拉伸性能按照GB/T 1040.2—2022进行测试，采用1A型哑铃形试样，试样总长≥170 mm，窄平行段宽10 mm，厚4 mm，测试拉伸强度、断裂伸长率及拉伸弹性模量。弯曲性能按照GB/T 9341—2008进行测试，采用标准长条试样，试样尺寸为80 mm×10 mm×4 mm，按三点弯曲方式测定弯曲强度。每组测试不少于5个平行样，结果取平均值。

DSC测试：按照GB/T 19466.3—2004进行测试。在氮气保护气氛下，升温范围为30~200 ℃，升温速率为10 ℃/min，记录样品的玻璃化转变温度(t_g)、冷结晶温度(t_c)及熔融温度(t_m)。

TG测试：按照GB/T 19466.6—2009进行测试。在氮气气氛下，由室温升温至600 ℃，升温速率为10 ℃/min，记录样品的TG曲线及相关热稳定性参数。

过滤性能测试：按照GB/T 19609—2024和ISO 4387:2019对滤嘴材料的过滤性能进行测试。采用线性吸烟机模拟吸烟条件，测定滤嘴前后烟气中焦油、CO和烟碱含量，计算过滤效率，同时测定滤嘴材料的吸阻。

减害性能测试：采用气相色谱仪测定烟气中甲醛、乙醛和苯等挥发性有机物(VOCs)的含量变化，计算其降低率。测试过程中通过吸烟机采集烟气样品，按照相关气体分析方法进行检测。

降解性能测试：样品的降解行为采用土壤降解实验进行评价。将样品埋入自然土壤环境中，在不同的降解时间段(30、60、90 d)取出样品，清洗并干燥至恒重，记录样品质量变化，计算质量损失率。

2 结果与讨论

2.1 PLA/TiO_2纳米复合材料力学性能分析

表1为PLA/TiO_2纳米复合材料的力学性能。从表1可以看出，与PLA相比，PT-1的拉伸强度从52.6 MPa提高至56.9 MPa。PT-3的拉伸强度最高，为60.8 MPa，较PLA提高15.6%。当TiO_2质量分数从0增加至3%时，拉伸弹性模

量从2.84 GPa提高至3.23 GPa，弯曲强度从81.5 MPa提高至94.6 MPa，压缩回弹率从88.4%提高至93.8%。这表明当TiO_2添加质量分数为3%时，纳米TiO_2粒子在PLA基体中分散较为均匀，能够有效承担外载并促进应力传递，从而实现强度、刚性与结构回复性能的协同提升。已有研究表明，低至中等含量的TiO_2可作为PLA的异相成核中心，改善结晶行为并提升局部结构致密性，而力学性能的提升幅度高度依赖于粒子分散状态和界面黏附水平。与此同时，纳米填料均匀分散始终是获得稳定增强效果的关键[15-17]。当TiO_2质量分数进一步增加至5%和7%时，材料力学性能开始回落，PT-5和PT-7的拉伸强度分别降至58.7 MPa和54.1 MPa，弯曲强度分别降至91.2 MPa和85.6 MPa。这说明高填料含量并未进一步强化体系，反而削弱复合材料的连续受力能力。与此同时，断裂伸长率由PLA的8.7%降至PT-7的5.1%，表明TiO_2的加入能够限制PLA分子链段运动，使材料韧性逐步降低。原因是随着TiO_2含量的增加，拉伸强度总体下降，而过高成核密度和颗粒尺寸/数量效应会诱发界面脱黏与脆性增加。同时，纳米粒子在较高添加量下易因表面能高而发生团聚，进而形成应力集中区，削弱界面载荷传递效率并导致力学性能劣化[18]。

表1 PLA/TiO_2纳米复合材料的力学性能

Tab.1 Mechanical properties of PLA/TiO_2 nanocomposites

样品	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	拉伸弹性模量/GPa	弯曲强度/MPa	压缩回弹率/%
PLA	52.6	8.7	2.84	81.5	88.4
PT-1	56.9	7.9	3.01	87.8	91.6
PT-3	60.8	7.2	3.23	94.6	93.8
PT-5	58.7	6.3	3.17	91.2	92.7
PT-7	54.1	5.1	3.08	85.6	89.7

2.2 PLA/TiO_2纳米复合材料DSC分析

图1为PLA/TiO_2纳米复合材料DSC二次升温曲线，表2为PLA/TiO_2纳米复合材料DSC热性能参数。从图1和表2可以看出，与PLA相比，加入TiO_2后t_g略有升高，PT-3的t_g从60.8 ℃提高至62.1 ℃。这说明纳米TiO_2在一定程度上能够限制PLA分子链段的运动，使链段松弛过程受到抑制，从而提高体系的热稳定结构。其原因在于纳米TiO_2与PLA基体之间的界面相互作用可降低链段移动性，从而使t_g出现轻微升高或保持稳定的现象[19]。此外，随着TiO_2含量的增加，t_c从PLA的118.6 ℃降低至PT-3的112.4 ℃。这一变化表明TiO_2在体系中发挥异相成核剂的作用，在聚合物基体中能够提供大量结晶成核位点，从而降低PLA结晶所需的能垒并促进晶体形成。已有研究指出，TiO_2纳米粒子的引入能够显著提高PLA的成核密度并加快整体结晶过程，使冷结晶峰向低温方向移动，同时结晶速率显著提高[20]。然而，当TiO_2质量分数进一步增加至5%和7%时，结晶度(X_c)略有下降。原因是过量纳米粒子在基体中发生团聚，限制PLA分子链的规整排列并阻碍晶体进一步生长。类似现象在文献[21]中也有报道，即较高填料含量会扰乱聚合物链的规整结构，导致结晶行为改善幅度降低。

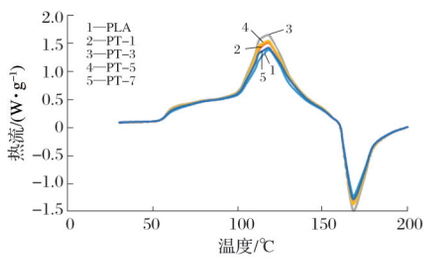


图1 PLA/TiO_2纳米复合材料DSC二次升温曲线

Fig.1 DSC secondary heating curves of PLA/TiO_2 nanocomposites

表2 PLA/TiO_2纳米复合材料DSC热性能参数

Tab.2 DSC thermal property parameters of PLA/TiO_2 nanocomposites

样品	t_g/℃	t_c/℃	t_m/℃	熔融焓(ΔH_m)/(J·g⁻¹)	X_c/%
PLA	60.8	118.6	167.9	31.4	33.7
PT-1	61.3	115.2	168.4	35.8	38.5
PT-3	62.1	112.4	168.9	41.6	44.7
PT-5	61.7	113.6	168.7	39.2	42.1
PT-7	61.4	115.9	168.3	36.5	39.1

2.3 PLA/TiO_2纳米复合材料TG分析

图2和表3分别为PLA/TiO_2纳米复合材料的TG曲线和TG参数。从图2和表3可以看出，与PLA相比，加入TiO_2后复合材料的热稳定性整体得到改善，PT-3的5%失重温度($t_{5\%}$)和最大分解速率温度(t_{max})均较PLA明显提高，说明纳米TiO_2在PLA基体中能够延缓热降解过程。其原因在于无机纳米粒子在聚合物体系中形成一定的热屏蔽和阻隔作用，从而降低热量和挥发性降解产物的扩散速率，进而提高材料的热稳定性。然而，当TiO_2含量进一步增加至较高水平时，复合材料热稳定性的提升趋势并不再持续增强，这可能与纳米粒子在基体中的团聚现象有关。过量TiO_2易在PLA基体中形成局部聚集结构，降低界面结合效率，从而削弱其对热降解过程的阻隔作用。

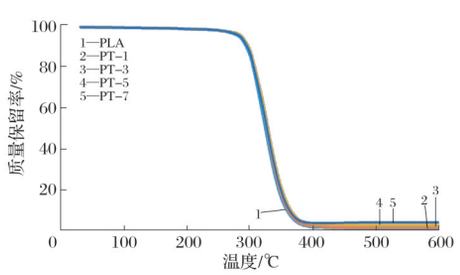


图2 PLA/TiO_2纳米复合材料的TG曲线

Fig.2 TG curves of PLA/TiO_2 nanocomposites

表3 PLA/TiO_2纳米复合材料TG参数

Tab.3 TG parameters of PLA/TiO_2 nanocomposites

样品	$t_{5\%}$/℃	$t_{10\%}$/℃	t_{max}/℃	残炭率/%
PLA	312.4	325.8	366.7	0.9
PT-1	317.6	331.5	371.3	1.6
PT-3	323.9	337.8	375.6	2.4
PT-5	320.7	334.9	373.2	3.3
PT-7	318.2	332.1	371.4	4.1

2.4 PLA/TiO_2纳米复合滤嘴材料过滤性能分析

表4为PLA/TiO_2纳米复合滤嘴材料的过滤性能。从表4可以看出，随着TiO_2含量的增加，滤嘴材料的过滤效率呈现出先上升后略有下降的趋势。PT-3样品表现出最佳综合过滤性能，与PLA相比，焦油过滤效率从41.6%提高至51.9%，CO过滤效率从22.4%提升至28.6%，烟碱过滤效率从36.8%提高至44.8%。该结果表明适量纳米TiO_2粒子的引入能够显著提高滤嘴材料对烟气有害成分的去除能力。原因是纳米TiO_2具有较大的比表面积和丰富的表面活性位点，可增强对烟气中有机组分的吸附作用，同时在滤嘴内部形成更加复杂的孔道结构，延长烟气在滤嘴中的停留时间并提高颗粒捕集效率[22]。然而，当TiO_2质量分数进一步增加至5%和7%时，过滤性能略有下降。PT-7的焦油过滤效率下降至47.2%，这一现象可能与纳米粒子在高含量条件下易发生团聚有关。过量TiO_2在PLA基体中形成局部聚集结构，不仅会降低有效比表面积，还可能导致滤嘴内部孔结构不均匀，从而削弱其对烟气颗粒和有机组分的捕集能力。此外，随着TiO_2含量的增加，滤嘴材料的吸阻从895 Pa提升至1 126 Pa，说明纳米填料的引入使材料内部孔道结构更加复杂，气流通过时的阻力逐渐增大[23]。

表4 PLA/TiO_2纳米复合滤嘴材料的过滤性能

Tab.4 Filtration performance of PLA/TiO_2 nanocomposite filter material

样品	焦油过滤效率/%	CO过滤效率/%	烟碱过滤效率/%	吸阻/Pa
PLA	41.6	22.4	36.8	895
PT-1	45.8	24.7	39.6	940
PT-3	51.9	28.6	44.8	1 015
PT-5	50.6	27.9	43.9	1 068
PT-7	47.2	26.1	41.2	1 126

2.5 PLA/TiO_2纳米复合滤嘴材料减害性能分析

表5为PLA/TiO_2纳米复合滤嘴材料的减害性能。从表5可以看出，随着TiO_2含量的增加，甲醛、乙醛及苯等有害物的降低率呈现出先上升后略有下降的变化趋势，PT-3样品表现出最佳减害效果。甲醛降低率从PLA的12.6%提高至PT-3的25.9%，乙醛降低率从10.8%提升至22.8%，苯降低率从8.4%提高至18.7%，表明引入适量的TiO_2能够显著增强滤嘴材料对烟气中VOCs的去除能力。原因是TiO_2纳米粒子具有较大的比表面积及丰富的表面活性位点，能够通过吸附与光催化氧化协同作用促进有机污染物的降解。在光照或空气环境下，TiO_2可产生羟基自由基(·OH)和超氧自由基($\cdot O_2^-$)，这些高活性物种能够将醛类和芳香烃等有机污染物进一步氧化为CO_2和H_2O，从而实现有害物质的降解或转化[24-25]。然而，当TiO_2质量分数进一步提高至5%和7%时，各类有害物降低率略有下降，PT-7的甲醛和乙醛降低率分别降至21.6%和18.9%。其原因在于纳米粒子在高含量条件下易发生团聚现象，降低粒子有效比表面积并减少可参与反应的活性位点。此外，较高填料含量还可能导致滤嘴内部结构不均匀，影响烟气在材料内部的扩散与接触效率。

表5 PLA/TiO_2纳米复合滤嘴材料的减害性能

Tab.5 Harm reduction performance of PLA/TiO_2 nanocomposite filter material 单位：%

样品	甲醛降低率	乙醛降低率	苯降低率	总有害物降低率
PLA	12.6	10.8	8.4	10.6
PT-1	18.7	16.5	12.9	16.0
PT-3	25.9	22.8	18.7	22.5
PT-5	24.3	21.1	17.5	21.0
PT-7	21.6	18.9	15.8	18.8

2.6 PLA/TiO_2纳米复合材料降解行为分析

图3为PLA/TiO_2纳米复合材料的质量损失率。从图3可以看出，随着降解时间的延长，各样品的质量损失率均持续增加，表现出典型的可降解PLA材料降解特征。PLA在30、60、90 d时的质量损失率分别约为6.8%、14.6%和23.5%。而加入TiO_2后复合材料的降解速率整体提高，PT-3样品在90 d时的质量损失率达到33.7%，明显高于PLA。这表明适量TiO_2纳米粒子的引入能够促进PLA的降解过程。原因是TiO_2具有一定的光催化活性和表面活性位点，在环境条件下能够促进自由基的产生，从而加速聚合物链的断裂与氧化降解。此外，纳米TiO_2的引入还可能提高材料的亲水性，使水分更容易渗入材料内部，从而促进PLA的水解降解过程[26-27]。然而，当TiO_2质量分数进一步增加至5%和7%时，降解速率略有降低，PT-7在90 d时的质量损失率约为29.4%，低于PT-3。这可能与高含量纳米粒子在PLA基体中的团聚有关，团聚结构会降低材料内部的有效界面面积，在一定程度上阻碍水分和微生物向材料内部扩散，从而减缓降解过程。

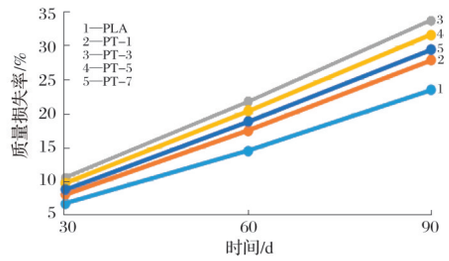


图3 PLA/TiO_2纳米复合材料的质量损失率

Fig.3 Mass loss rate of PLA/TiO_2 nanocomposites

3 结论

以PLA为基体，纳米TiO_2为功能填料，采用熔融共混法制备PLA/TiO_2纳米复合滤嘴材料，系统研究TiO_2含量对复合材料力学性能、热性能、过滤性能、减害性能及降解行为的影响。结果表明：适量TiO_2的引入能够显著改善PLA的综合性能。其中，当TiO_2质量分数为3%时，复合材料表现出最佳综合性能，拉伸强度为60.8 MPa，弯曲强度为94.6 MPa，压缩回弹率为93.8%。这说明纳米TiO_2在该含量下能够在PLA基体中均匀分散并有效增强材料结构稳定性。同时，DSC和TG结果表明，TiO_2具有异相成核和热稳定增强作用，可促进PLA结晶并提高材料热稳定性。在应用性能方面，PT-3样品对烟气中焦油、CO和烟碱的过滤效率分别提高至51.9%、28.6%和44.8%。同时，对甲醛、乙醛和苯等有害物表现出较好的降低效果。此外，TiO_2的引入还能在一定程度上促进PLA材料的降解，其中PT-3在90 d时的质量损失率达到33.7%。

参考文献

[1] 周雯. 卷烟主流烟气中重金属及其他有毒有害物质的脱除[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.

[2] 孙晓萌, 金哲雄. 植物多酚降低吸烟烟气毒性作用的研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2002, 18(1): 51-54.

[3] 孙志伟. 卷烟滤嘴中烟气流动以及颗粒有害成分过滤截留的CFD模拟研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.

[4] NITSCHKE T, BOUR A, BERGQUIST M, et al. Smokers' behaviour and the toxicity of cigarette filters to aquatic life: A multidisciplinary study[J]. Microplastics and Nanoplastics, 2023, 3(1): 1.

[5] 杨良, 吴迪, 杨晓红, 等. 卷烟包装材料及滤嘴的生物降解性能研究[J]. 重庆环境科学, 2003(7): 26-28.

[6] 李凡, 王莎, 刘巍峰, 等. 聚乳酸(PLA)生物降解的研究进展[J]. 微生物学报, 2008, 48(2): 262-268.

[7] 李杨洋. PLA/PBAT基复合薄膜的制备及性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2025.

[8] LIN M G, SHEN J L, QIAN Q N, et al. Fabrication of poly(lactic acid)@TiO_2 electrospun membrane decorated with metal-organic frameworks for efficient air filtration and bacteriostasis[J]. Polymers, 2024, 16(7): 889.

[9] 朱鸿睿, 徐慧民, 黄陈金, 等. 光电催化析氧和CO_2还原反应催化剂的研究进展[J]. 催化学报, 2024, 62(7): 53-107.

[10] 张亚强. 用阳离子表面活性剂对纳米二氧化钛(TiO_2)表面改性及其对天然橡胶(NR)纳米复合材料性能影响的研究[J]. 橡胶参考资料, 2023(2): 14-20.

[11] 王伟, 贺昭和, 张毅, 等. 纳米二氧化钛在环境空气净化领域的应用[C]//2016中国环境科学学会学术年会论文集(第三卷). 海口: 中国环境科学学会, 2016.

[12] 饶培文, 戴建斌, 彭小晋, 等. 浅析纳米二氧化钛光催化降解效率的影响因素[J]. 佛山陶瓷, 2023, 33(1): 82-85.

[13] DEGHICHE A, HADDAOUI N, ZERRIOUH A, et al. Effect of the stearic acid-modified TiO_2 on PLA nanocomposites: Morphological and thermal properties at the microscopic scale[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(6): 106541.

[14] SLIMEN H, OCHIAI T, NAKATA K, et al. Photocatalytic decomposition of cigarette smoke using a TiO_2-impregnated titanium mesh filter[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(1): 587-590.

[15] GRZĄBKA-ZASADZIŃSKA A, PIĄTEK A, KLAPISZEWSKI Ł, et al. Structure and properties of polylactide composites with TiO_2-lignin hybrid fillers[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024, 25(8): 4398.

[16] HUSSAIN M, KHAN S M, SHAFIQ M, et al. A review on PLA-based biodegradable materials for biomedical applications[J]. Giant, 2024, 18: 100261.

[17] RAHMAN M M, KHAN K H, PARVEZ M M H, et al. Polymer nanocomposites with optimized nanoparticle dispersion and enhanced functionalities for industrial applications[J]. Processes, 2025, 13(4): 994.

[18] ALI H, ALI S, ALI K, et al. Impact of the nanoparticle incorporation in enhancing mechanical properties of polymers[J]. Results in Engineering, 2025, 27: 106151.

[19] 周毛毛, 蒋阳, 谢于辉, 等. 纳米二氧化钛的制备、改性及其在聚合物基复合材料中的应用研究进展[J]. 复合材料学报, 2022, 39(5): 2089-2105.

[20] KASEEM M, HAMAD K, REHMAN ZUR. Review of recent advances in polylactic acid/TiO_2 composites[J]. Materials, 2019, 12(22): 3659.

[21] AKSHAYKRANTH A, JAYARAMBABU N, RAO T V, et al. Structural, thermal, optical, mechanical, and antibacterial properties of PLA/nanoclay/TiO_2 nanocomposite films[J]. Letters in Applied NanoBioScience, 2023, 12: 70.

[22] NAYAK J K, BEHERA L, JALI B R. TiO_2 strengthened PLA nanocomposites: A prospective material for packaging application[J]. Journal of Molecular Structure, 2024, 1316: 138892.

[23] CHANKLOM P, KREETACHAT T, CHOTIGAWIN R, et al. Photocatalytic oxidation of PLA/TiO_2-composite films for indoor air purification[J]. ACS Omega, 2021, 6(16): 10629-10636.

[24] DAS G S, RAJU K S, DHIMAN N, et al. Removal of anthropogenic toxic gaseous compounds from indoor using biomass-based graphene aerogels[J]. ACS Engineering Au, 2024, 4(3): 325-332.

[25] HAGHIGHI P, HAGHIGHAT F. TiO_2-based photocatalytic oxidation process for indoor air VOCs removal: A comprehensive review[J]. Building and Environment, 2024, 249: 111108.

[26] HUA M Y, WANG S Y, CHENG M, et al. The application of TiO_2@UiO-66-$(OH)_2$ composites for the photocatalytic degradation of gaseous formaldehyde under visible light[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2025, 464: 116328.

[27] ANTUNES A, POPELKA A, ALJAROD O, et al. Effects of rutile-TiO_2 nanoparticles on accelerated weathering degradation of poly(lactic acid)[J]. Polymers, 2020, 12(5): 1096.