

Research on the Environmental Degradation Process and Its Influencing Factors of Microplastics

Yueyang Huang Xinyu Wang Yue Yu Meng Cui Fuping Wang*

Harbin Petroleum Institute, Harbin, Heilongjiang, 150028, China

Abstract

This study aims to explore the degradation process of microplastics in various environment and combined with low cost adsorption method, photocatalytic technology and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) comparison method of the three microplastic recycling degradation method, in-depth analysis of these technologies in the application of microplastic degradation, finally reveal the various factors affecting the influence of microplastic degradation. It is expected that the research in this paper can provide new ideas and technical means for the control of microplastic pollution, so as to reduce its negative impact on the ecological environment.

Keywords

microplastics; environmental degradation; influencing factors

微塑料环境降解过程及其影响因素研究

黄悦洋 王新宇 于越 崔猛 王福平*

哈尔滨石油学院, 中国·黑龙江 哈尔滨 150028

摘要

本研究旨在探讨微塑料在各种环境中的降解过程并结合低成本的吸附法、光催化技术和傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 对比法这三种微塑料回收降解方法, 深入分析这些技术在微塑料降解中的应用, 最终揭示影响微塑料降解的各种因素。期望论文的研究能够为微塑料污染的控制提供新的思路和技术手段, 从而减轻其对生态环境造成的负面影响。

关键词

微塑料; 环境降解; 影响因素

1 引言

随着工业化进程的加快和塑料制品的广泛使用, 微塑料污染已成为全球面临的一大环境问题。微塑料是指直径小于 mm 的塑料颗粒, 它们不仅存在于陆地生态系统中, 更是在海洋环境中大量积累, 对水生生物乃至人类健康构成了潜在威胁。由于其化学稳定性和持久性, 微塑料在自然条件下降解速度极其缓慢且这一过程中可能会释放有害物质, 进一步加剧生态风险, 由此观之, 如何有效地管理和处置微塑料成为当今科学研究的重要课题之一。

2 微塑料降解机制概述

2.1 微塑料的物理化学特性及其环境行为

作为一种由聚合物组成的细小颗粒, 微塑料独特的物

理化学性质决定了它们在自然界中的分布和迁移模式, 这些特性主要包括尺寸、形状、密度、表面电荷以及亲疏水性等。微塑料颗粒通常表现出较大的表面积与体积比, 这使得它们更容易吸附环境中的污染物 (如重金属和持久性有机污染物), 进而作为载体在生态系统中转移这些有毒物质^[1]。微塑料的密度差异导致了它们在水体中的沉浮行为各异, 较轻的微塑料可能漂浮于水面而密度较高的则倾向于沉积至水底, 这种复杂的环境行为使得微塑料在不同介质中 (如空气、土壤和水体) 的分布变得极为复杂, 同时也增加了对其进行有效管理的难度。

2.2 生物降解机制

尽管微塑料以其化学稳定性著称, 但在特定条件下它们仍然可以经历一定程度的生物降解, 生物降解涉及微生物 (如细菌、真菌) 分泌的酶对聚合物链的裂解作用。举例来讲, 某些种类海洋细菌能够降解聚乙烯 (PE) 和聚酯 (PET), 这种能力源于这些微生物能够分泌特定酶类, 后者可以攻击聚合物链中的化学键并促使聚合物分子量降低, 最终形成较小分子如二氧化碳和水。然而, 生物降解速率通常非常缓慢且受到温度、湿度、pH 值等多种环境因素的影响, 研究表明,

【作者简介】黄悦洋 (2003-), 男, 中国天津人, 从事智能化工程及可持续发展技术研究。

【通讯作者】王福平 (1982-), 男, 中国黑龙江绥化人, 硕士, 副教授, 从事提高油气采收率研究。

在温暖湿润的环境下生物降解速率会有所提升，但这一过程在大多数自然条件下依然十分有限。

2.3 化学降解途径

化学降解是指在光照、氧化剂或其他化学物质作用下微塑料发生结构变化的过程。光降解是最为重要的化学降解形式之一，在阳光照射下，紫外线能够激发微塑料中的自由基反应进而导致聚合物链断裂，形成更小的碎片，这一过程虽然不会彻底消除微塑料，但显著改变了其物理形态和化学性质。化学氧化也是一种有效的降解途径，在特定实验室条件下通过使用过氧化氢等强氧化剂来加速微塑料的降解，但这种方法在实际应用中面临着成本和安全性等方面的挑战。

2.4 物理降解机制

除了生物和化学降解外，物理作用也是影响微塑料降解的重要因素，物理降解主要包括机械磨损、温度波动以及溶解作用等。海洋环境中的波浪冲击和水流摩擦可导致微塑料颗粒表面粗糙度增加，甚至形成更小的碎片，温度的变化也能加速微塑料的老化过程，温度较高时热效应会促进聚合物内部结构的变化。值得注意的是，物理降解往往会导致微塑料粒径减小但并不会改变其化学本质，反而可能增加其在食物链中的传播风险。

3 低成本吸附法的应用与发展

3.1 吸附法基本原理及其在微塑料治理中的应用

吸附法依赖于吸附剂与污染物之间的物理或化学相互作用，主要通过选择合适的吸附材料来实现对微塑料的有效捕获与去除，吸附过程主要涉及吸附剂表面与微塑料颗粒之间的范德华力、静电吸引或化学键合等作用力^[2]。在实际应用中，吸附法不仅适用于水体中的微塑料净化，也可以扩展到空气和土壤污染治理领域。例如，在海洋环境中，利用改性活性炭、磁性纳米粒子等材料作为吸附剂可以有效去除水中的微塑料颗粒，减少其对生态系统的影响。

3.2 不同改性材料和技术对吸附效果的影响

近年来，科研人员致力于开发新型改性材料以提高吸附法的效率，即物理或化学方法对吸附剂进行改性以显著改善其对微塑料的吸附性能，比如通过表面官能团的引入来增强吸附剂与微塑料之间的相互作用，从而提高吸附容量。研究指出，利用聚多巴胺修饰的石墨烯氧化物（GO-PDA）作为吸附剂，能够在较宽的 pH 范围内高效吸附微塑料且易于分离回收^[3]。不仅如此，磁性改性材料凭借易分离的特点在微塑料去除方面也得到了广泛关注，磁性 Fe₃O₄ 纳米颗粒经过表面功能化处理后，既可以有效吸附微塑料又能通过外部磁场快速回收。

3.3 纳米过滤技术与絮凝剂的选择及其操作参数优化

纳米过滤技术利用纳米级别的孔隙结构实现了对微塑料颗粒的高效截留。纳米过滤膜材料的选择至关重要，常见的有聚醚砜（PES）、聚酰胺（PA）等高分子材料，这些材

料具有良好的机械强度和化学稳定性。絮凝剂的合理使用也可以提高纳米过滤的效率，絮凝剂能够使分散状态的微塑料聚集形成较大颗粒以便过滤去除，比如阳离子型聚合物絮凝剂与带负电荷的微塑料颗粒之间存在强烈的静电吸引力，有助于形成稳定的絮体结构。通过优化絮凝剂的种类、浓度以及 pH 值等操作参数，纳米过滤技术可以显著提高微塑料的去除率。

4 光催化技术在微塑料降解中的作用

4.1 光催化技术的基础知识及其在微塑料降解中的应用

光催化技术是一种环境友好型技术，近年来被广泛应用于有机污染物的降解研究中，该技术的核心在于利用半导体材料在光照条件下的催化活性进而促进污染物的分解。在光催化过程中，半导体材料吸收光子能量后产生电子-空穴对，电子从价带跃迁到导带，同时在价带留下空穴，这些产生的电子和空穴能够与吸附在催化剂表面的氧气和水分子反应，生成具有强氧化能力的活性氧物种（ROS），如羟基自由基（·OH）和超氧阴离子自由基（O₂⁻），ROS 能够有效地氧化降解有机污染物，将其转化如二氧化碳（CO₂）和水（H₂O）等无害的小分子^[4]。在微塑料降解领域，光催化技术展现出了巨大的应用潜力，传统的微塑料降解方法如生物降解和化学降解等往往存在效率低下、成本高昂等问题，而光催化技术则凭借高效、环保的特点脱颖而出，特别是在处理难以生物降解的微塑料时，光催化技术的优势更为明显。例如，使用二氧化钛（TiO₂）作为光催化剂时，在紫外光照射下可以显著提高聚乙烯（PE）和聚氯乙烯（PVC）等微塑料的降解速率。

4.2 光催化技术处理微塑料的效果及局限性

尽管光催化技术在理论上能够高效降解微塑料，但实际应用中仍存在一些挑战。半导体材料的选择和制备是决定光催化效率的关键因素，常用的半导体材料如 TiO₂ 和 ZnO 等，其光吸收范围主要集中在紫外光区，而自然光源中紫外线的比例较低进而限制了这些材料的应用范围。另外，光催化剂在水中的分散性和稳定性也直接影响着光催化效果，比如 TiO₂ 纳米粒子容易团聚，导致光生载流子的复合概率增加，催化活性也随之下降。为了克服这些局限性，研究人员进行了大量的探索与尝试，比如在半导体材料中掺杂金属离子或非金属元素以拓宽材料的光响应范围，使其在可见光甚至近红外光下也能发挥作用，或者构建异质结构来分离光生电子-空穴对，提高光催化效率。

5 傅里叶变换红外光谱（FTIR）在微塑料识别中的应用

5.1 FTIR 技术在微塑料检测中的重要性及其工作原理

作为一种强大的分析工具，傅里叶变换红外光谱（FTIR）技术在微塑料的检测与鉴定中扮演着至关重要的角色，

FTIR 通过测量样品对不同波长红外光的吸收情况来产生特有的光谱指纹,从而实现物质成分的定性定量分析。对于微塑料而言,FTIR 技术能够提供详细的化学信息,帮助研究人员准确鉴别微塑料的类型及其老化程度。FTIR 的工作原理基于分子振动理论,当样品暴露于红外辐射时分子内部的原子会发生振动,吸收特定频率的红外光,这些吸收峰对应于分子中特定化学键的振动模式,最终形成独一无二的光谱特征,通过与已知的标准光谱库进行比对,研究人员可以快速准确地识别样品中的微塑料种类。FTIR 还可以用于监测微塑料在不同环境条件下发生的化学变化,如表面官能团的改变或聚合物链的断裂,这对于理解微塑料在自然环境中的降解过程至关重要。

5.2 FRA 结合 FTIR 技术在提高检测效率方面的优势

传统的 FTIR 技术在处理大量样品或复杂混合物时存在一定的局限性,针对这些限制,研究人员将焦平面阵列(FRA)技术与 FTIR 相结合,大幅提升了检测效率和精度。FRA 是一种高灵敏度的探测器,能够同时收集整个光谱区域内的信息,这意味着它可以一次测量记录多个光谱而无需逐点扫描^[5]。FRA 结合 FTIR 技术特别适用于海底沉积物等复杂基质中微塑料的快速筛查,沉积物中含有大量的有机物和其他杂质,传统的 FTIR 分析需要繁琐的前处理步骤而 FRA 的引入简化了这一过程。此外,FRA 技术还允许进行原位测量,减少了样品处理带来的误差。

6 微塑料降解的影响因素

6.1 环境条件的影响

环境条件对微塑料降解过程具有显著影响,具体来说,温度、pH 值、光照强度以及微生物群落组成等因素都会影响降解速率和效果。温度的升高通常会加速化学反应速率进而加快微塑料的降解速度,然而温度过高也可能导致微塑料的物理性质发生变化,如软化或熔化,影响其结构完整性和降解效率。pH 值的变化会影响微塑料表面的电荷状态,影响其与降解剂之间的相互作用,在碱性条件下某些聚合物更容易发生水解反应,而在酸性环境中则可能促进其他类型的化学反应。光照,特别是紫外线(UV),是光催化降解微塑料的关键因素之一,UV 光能够激发半导体材料表面的电子跃迁,产生具有强氧化能力的活性氧物种(ROS)进而加速微塑料的降解。微生物多样性及其活性直接影响着降解速率,在富含微生物的环境中(如湿地或富含有机质的土壤),

微生物降解作用更为显著,不同类型的微生物对特定聚合物也有着不同的降解能力^[6],因此微生物群落的结构和功能对于降解过程同样重要。

6.2 微塑料特性的影响

微塑料本身的特性(如类型、尺寸、化学组成和表面特性等)也显著影响其降解过程。微塑料的类型决定了其降解的难易程度,不同类型的聚合物具有不同的化学结构和稳定性,聚乙烯(PE)和聚丙烯(PP)等非极性聚合物相对较难降解,而聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)等极性聚合物则更容易被分解。微塑料颗粒的大小主要影响降解速率,一般而言,尺寸越小的颗粒,表面积与体积比越大,因而能够接触更多的降解剂,降解速率也就越快,但是尺寸过小的微塑料颗粒也可能因为扩散限制而难以被完全降解。微塑料的化学成分会影响其降解行为,增塑剂、稳定剂等其他添加剂可能阻碍降解过程,或在降解过程中释放出来,形成新的环境问题。微塑料的表面特性也会影响其与降解剂的相互作用,亲水性较强的微塑料更容易与水中的降解剂接触进而加快降解速率。

6.3 技术应用的影响

在使用吸附法去除微塑料时,吸附剂的选择、操作条件(如 pH 值、温度、搅拌速度等)以及吸附时间都会影响最终的吸附效果。在光催化技术中,光催化剂的种类、粒径、比表面积以及是否经过改性都会影响其催化活性。在使用 FTIR 技术进行微塑料识别时,样品的预处理方式、测试条件(如光谱分辨率、扫描次数等)以及数据分析方法都会影响最终的结果准确性。

参考文献

- [1] 郝正卿,贾亚婷,侯彬,等.环境中微塑料检测和降解研究进展[J].现代化工,2024,44(8):27-31.
- [2] 周丽,Yasmine Abdelkrim,姜志国,等.微塑料:生物效应、分析和降解方法综述[J].化学进展,2022(9):1935-1946.
- [3] 孙文潇,杨帆,侯梦宗,等.环境中的微塑料污染及降解[J].中国塑料,2023,37(11):117-126.
- [4] 陈启晴,杨守业,Henner Hollert,等.微塑料污染的水生生态毒性与载体作用[J].生态毒理学报,2018(1):16-30.
- [5] 马思睿,李舒行,郭学涛.微塑料的老化特性、机制及其对污染物吸附影响的研究进展[J].中国环境科学,2020(9):3992-4003.
- [6] 包振宗,侯艳艳.微塑料降解的主要技术及影响因素[J].环境污染与防治,2024,46(5):728-733.