

聚氯乙烯塑料光催化降解行为的检测研究

刘佳炜¹, 钟祥炜¹, 李颜君¹, 邹 琴^{1*}, 周 杰²

¹宜宾学院过程分析与控制四川省高校重点实验室, 四川 宜宾

²宜宾天原集团股份有限公司, 四川 宜宾

收稿日期: 2025年11月22日; 录用日期: 2025年12月19日; 发布日期: 2025年12月26日

摘要

本研究以锐钛型纳米TiO₂为光催化剂, 选取PVC保鲜膜、PVC透明软胶板、PVC收缩袋三种不同用途的PVC塑料为研究对象, 通过浸渍/浸涂法制备催化降解样品, 在40℃紫外老化箱中进行加速老化实验, 结合失重率测定、紫外可见光谱及红外光谱分析, 探究纳米TiO₂对PVC塑料的光催化降解行为。结果表明: 纳米TiO₂能显著加速PVC塑料的光降解, 其中保鲜膜在催化条件下3 d失重率达26.6%, 远高于无催化剂时的12.7%; 收缩袋的催化降解效果同样显著, 透明软胶板因材质较厚、含抗老化剂及吸光物质, 降解程度最低, 最大失重率低于4%。紫外可见光谱显示, 催化降解样品在250~400 nm紫外区反射率显著降低, 表明生成了C=C共轭双键等吸光成分; 红外光谱证实, PVC降解过程中C-Cl键、C-H键及增塑剂相关的C-O-C键发生断裂, 符合脱氯化氢的降解机理。

关键词

聚氯乙烯, 光老化, 紫外可见光谱, 红外光谱

Detection and Research on Photocatalytic Degradation Behavior of Polyvinyl Chloride Plastics

Jiawei Liu¹, Xiangwei Zhong¹, Yanjun Li¹, Qin Zou^{1*}, Jie Zhou²

¹Key Lab of Process Analysis and Control of Sichuan Universities, Yibin University, Yibin Sichuan

²Yibin Tianyuan Grp Co., Ltd., Yibin Sichuan

Received: November 22, 2025; accepted: December 19, 2025; published: December 26, 2025

Abstract

In this study, anatase-type nano-TiO₂ was used as the photocatalyst, and three types of PVC plastics

*通讯作者。

文章引用: 刘佳炜, 钟祥炜, 李颜君, 邹琴, 周杰. 聚氯乙烯塑料光催化降解行为的检测研究[J]. 化学工程与技术, 2026, 16(1): 1-7. DOI: 10.12677/hjct.2026.161001

with different applications—PVC cling film, PVC transparent soft rubber sheet, and PVC shrink film—were selected as the research objects. Catalytic degradation samples were prepared via the dipping/doctor-blading method, and accelerated aging experiments were conducted in an ultraviolet (UV) aging chamber at 40°C. Combined with weight loss rate determination, UV-Vis spectroscopy, and FT-IR spectroscopy analysis, the photocatalytic degradation behavior of PVC plastics by nano-TiO₂ was investigated. The results showed that nano-TiO₂ could significantly accelerate the photo-degradation of PVC plastics. Among them, the weight loss rate of the cling film reached 26.6% after 3 days under catalytic conditions, which was much higher than the 12.7% observed without the catalyst. The catalytic degradation effect on the shrink film was also significant. However, the transparent soft rubber sheet exhibited the lowest degradation degree (with a maximum weight loss rate of less than 4%) due to its thicker material, as well as the presence of anti-aging agents and light-absorbing substances. UV-Vis spectroscopy results indicated that the reflectance of the catalytically degraded samples decreased significantly in the UV region of 250 - 400 nm, suggesting the formation of light-absorbing components such as C=C conjugated double bonds. FT-IR spectroscopy confirmed that the C-Cl bonds, C-H bonds, and C-O-C bonds related to plasticizers in PVC were broken during the degradation process, which is consistent with the degradation mechanism of dehydrochlorination.

Keywords

Polyvinyl Chloride, Photoaging, IR Spectroscopy, UV-Vis Spectroscopy

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

中国是亚洲最大的农业塑料生产国和使用国，年消费量约为 520 万吨，其中包括 300 万吨薄膜，在塑料带来诸多好处的同时，我们也在承受着塑料污染所带来的诸多危害[1][2]。聚氯乙烯(PVC)因低成本、易加工和优良的化学稳定性而在各个领域得到广泛应用。PVC 大多都是一次性用品，用完废弃就成为垃圾，造成严重的环境污染。TiO₂ 低成本、无毒、对降解塑料具有光催化活性，且光催化作用持久，化学性质稳定，无二次污染等优点，现已被广泛应用于污水处理、空气净化、抗菌防霉等领域[3][4]。

本论文主要研究以纳米 TiO₂ 为催化剂降解 PVC 塑料，并对其性能进行性能分析；以市面上常用的 PVC 塑料为研究对象，选取不同用途的三种 PVC 塑料，对试样进行处理；对比加入 TiO₂ 催化剂与未加入催化剂样品的降解效果；先后将 PVC 塑料放入恒温 40°C 紫外光老化箱中进行光照，光照不同时间，光照完计算失重率，并对塑料进行紫外可见光谱及红外光谱分析，紫外光谱分析初步分析判断其中有无的化学键的产生，红外光谱分析其具体的结构变化，判断降解效果以及探究其降解行为。

2. 实验

2.1. 样品处理

本实验选用试样分别为 PVC 保鲜膜、厚度 0.01 mm、编号 a；PVC 透明软胶板、厚度 0.2 mm、编号 b；PVC 收缩袋、厚度 0.01 mm、编号 c；TiO₂ 为锐钛型、粒径 5~10 nm、福建坤彩材料有限公司。分别将样品裁剪成 10 × 10 cm 方形，样品 b 裁剪成 8 × 8 cm 方形，记录外观并称重。

取一定量的塑料样品，均匀放置在紫外老化箱中；另外配制质量浓度 2% 纳米 TiO₂ 悬浊液，将样品

浸没于悬浊液中后再均匀放置在老化试验箱中；光源为紫外灯(型号：ZW20S19W、波长：254 nm)，温度设置为40℃，老化时间3~9 d，并记录老化前后质量，计算失重率。

2.2. 仪器与设备

紫外线老化试验箱，ST-WK08B，易仕特仪器有限公司；紫外可见分光光度计，Lambda 650，PE公司；红外光谱仪，IRAFFINITY-IS，日本岛津公司；数控加热磁力搅拌器，MS7-H550，大龙兴创实验仪器股份有限公司。

2.3. 性能表征

用紫外可见光谱(积分球)对老化前后样品进行表征，测定样品反射率R%，设置扫描范围250~500 nm，采样间隔1 nm，扫描速度为266.75 nm/min，夹缝宽度为2 nm，白板校准基线，选取样品大小为5×5 cm放入固定支架直接进行反射率测试。用红外光谱分析老化前后不同种类塑料的结构变化情况，参数设置分辨率为5 cm⁻¹，扫描次数为8，光谱扫描范围4000~600 cm⁻¹。

3. 结果讨论

3.1. 失重率

图1是三种PVC样品分别在未加催化剂和添加催化剂情况下光老化后的失重率变化图。由图1可以看出，样品a在紫外光条件下，3 d的失重率就已经达到了12.7%，随着老化时间的增加，失重率持续上升；对比加入催化剂和未加催化剂的样品，加入纳米TiO₂催化剂的失重率仅用3 d就可达到了26.6%，表明加入催化剂明显加速其降解效率。

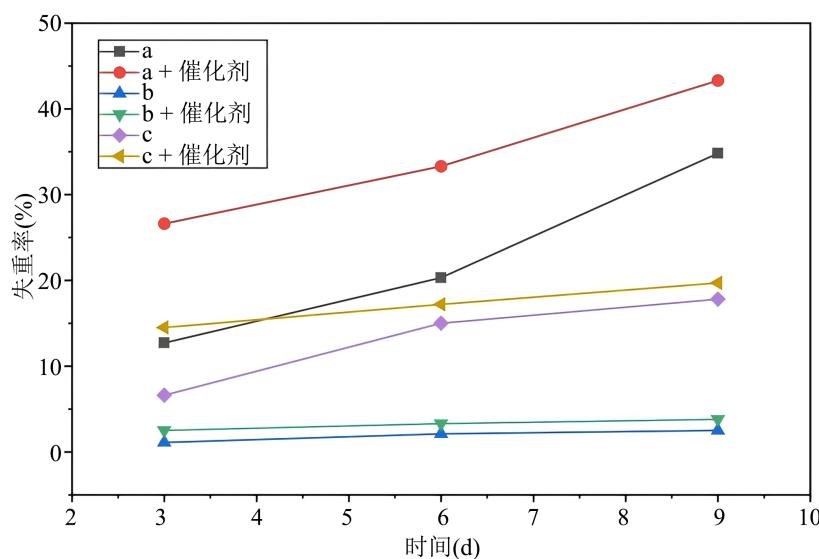


Figure 1. Weight loss changes of the three samples after UV aging

图1. 三种样品紫外线老化后的失重率变化

对于未添加催化剂的样品b，在紫外光照射下，3 d、6 d和9 d的失重率几乎相同，且均低于4%，这表明在这些条件下其降解程度变化不大。而加入纳米TiO₂催化剂后，3 d、6 d和9 d的试样失重率在相同条件下略有提高。样品b的材质较厚，相比保鲜膜更为硬质，且材料本身具有较好的耐老化性能，样品中的抗老化剂使其在经过一系列紫外老化处理后效果并不显著。

对于样品 c，在紫外条件下，未添加催化剂的样品在 3 d 光老化后的失重率达到 6.6%，并且随着时间延长，其失重率逐渐增加。加入纳米 TiO_2 催化剂的试样在老化降解后，3 d 的失重率即出现明显变化，且在相同时间内，加入催化剂的样品失重率显著高于未加催化剂的样品，这表明光催化剂对其降解效果具有显著影响。

3.2. 紫外可见光谱分析

图 2、图 3 分别是样品 a、b 和 c 原样、未加催化剂老化和加入催化剂老化后的紫外光谱图，图中加催化剂的样品在时间符号前标注有 c。

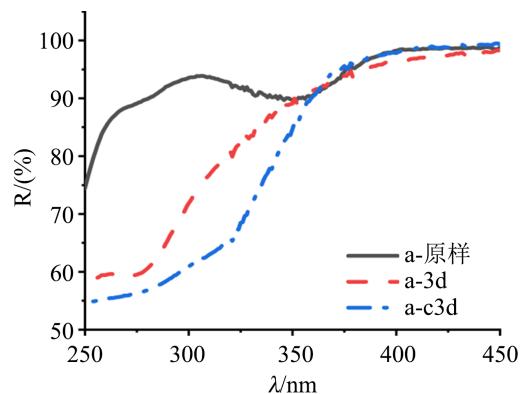


Figure 2. UV-Vis spectra of sample a before and after aging
图 2. 样品 a 老化前后紫外可见光谱图

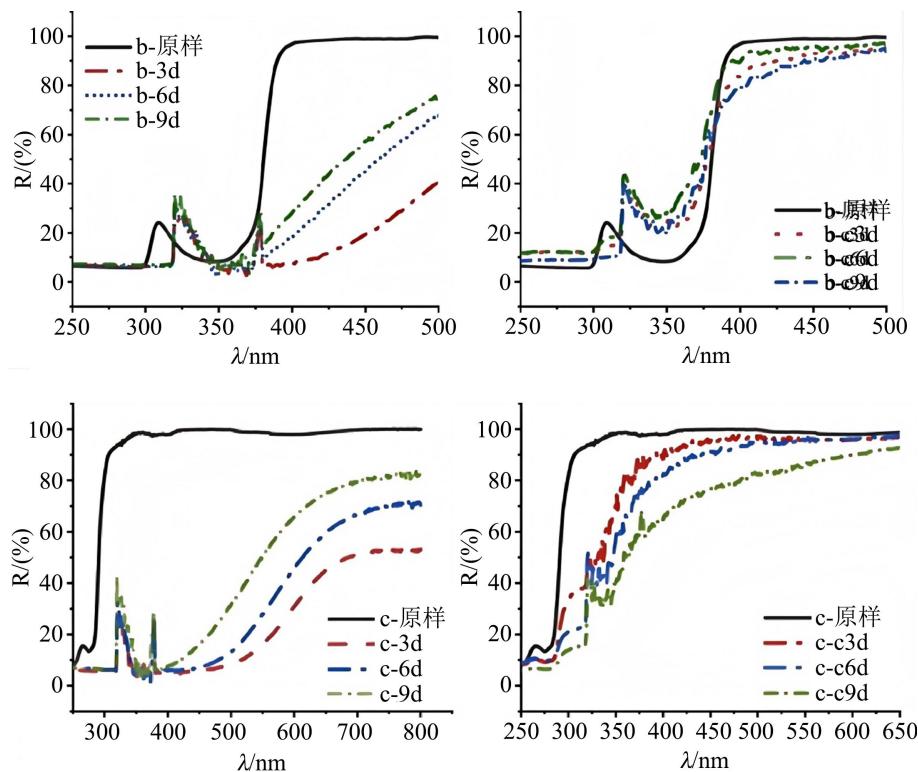


Figure 3. UV-Vis spectra of samples b and c before and after aging
图 3. 样品 b 和 c 老化前后紫外可见光谱图

从图2中可以看出, PVC保鲜膜(样品a)的原始未老化样品R%几乎维持在90%左右, 呈现出相对平缓的曲线, 这表明在紫外可见光范围内, 光线几乎全部被反射, 未被吸收, 也说明原样不存在能吸收紫外光如含 π 键结构的基团。而老化样品在250~400 nm区间内反射率显著降低, 显示出紫外光的吸收现象, 尤其是加入催化剂的老化样品, 其吸收更为明显。表明样品在光辐照后发生了降解, 生成了C=C等基团, 这些含 π 键的结构易于吸收紫外光, 从而导致反射率进一步减小。

图3中为PVC透明软胶板(样品b)和PVC收缩袋(样品c)老化前后的紫外可见光谱图, 样品b原样在400~500 nm区间内反射率为100%, 而在250~400 nm的紫外光区, 反射率骤然下降, 表明样品中本身存在着吸光物质。从图3中可以看出, b样品分别老化3 d、6 d和9 d后与原样反射率在250~400 nm区域接近, 400 nm以上可见光区域反射率下降是因为样品在辐照后颜色发生变化引起的; 加入催化剂的b~c 3 d、b~c 6 d和b~c 9 d与原样反射率在整个紫外可见区域均接近; 表明样品b都很少发生断链从而产生更多的双键, 这与失重率测试结果一致。但从图中可以看出, 样品中存在一种在310 nm吸光较弱的吸光物质, 这也是阻止软胶板样品被降解的原因之一。

从图3可以看出样品c原样在300~800 nm区间, 反射率在100%左右, 并未吸收光, 250~300 nm区间呈大幅度下降趋势, 而接近275 nm附近其样品有一个峰值, 表明原样中含有吸光基团, 这与塑化剂等添加剂相关。老化样品与原样相比, 未加催化剂的老化样品c-3 d、c-6 d、c-9 d反射率从可见光区域反射率就开始降低, 这与样品老化后颜色变深有关; 紫外区域反射率出现波峰, 意味着有吸光较弱的物质; 加入催化剂的老化样品c-c 3 d、c-c 6 d、c-c 9 d, 可见光区并没有大幅降低, 300~400 nm区域开始变化, 并且随着时间增加反射率降低, 表明降解程度在增加, 这与其失重率变化一致。

3.3. 红外光谱分析

图4是样品a、b、c原样的红外光谱图; 样品a红外光谱图的特征吸收峰分别在2928 cm⁻¹, 2826 cm⁻¹, 1729 cm⁻¹, 1426 cm⁻¹, 1330 cm⁻¹, 1254 cm⁻¹, 1174 cm⁻¹, 959 cm⁻¹, 829 cm⁻¹, 691 cm⁻¹等处。其中2928 cm⁻¹与2826 cm⁻¹处为甲基-CH₃和亚甲基-CH₂的伸缩振动吸收; 1426 cm⁻¹处为-C-C-骨架的伸缩振动或C-H的弯曲伸缩振动, 1330 cm⁻¹处为-CH₂, 1254 cm⁻¹和1174 cm⁻¹处峰较为复杂, 根据PVC塑料生产中常见的添加剂, 推断为C-O-C键醚类或酯类, 959 cm⁻¹处为烯烃的C-H振动, 829 cm⁻¹和691 cm⁻¹处为C-Cl键的吸收峰。而1729 cm⁻¹有强吸收峰, 来自增塑剂邻苯二甲酸酯DEHP(或DEHA)的振动吸收[5]。样品b、样品c与样品a相似, 样品b中仅有741 cm⁻¹处也为C-Cl键, 样品c中1581 cm⁻¹处C=O键。从样品碳基的强度, 说明样品a、b、c均含有增塑剂, 且含量不同, 这与张妍等[6]研究一致。

图5是样品a、b和c分别老化3 d、6 d、9 d样品的红外光谱图。从图中可以看出老化后样品a-3 d、a-6 d、a-9 d在2928 cm⁻¹处C-H键峰强度减弱, 1426 cm⁻¹与1330 cm⁻¹处其-C-C-骨架的伸缩振动或-CH₃的伸缩振动键峰强度均降低, 表明其中的C-H键断裂。在691 cm⁻¹和829 cm⁻¹下为C-Cl键, 各试样其峰强度均低于原样, 但峰强度不同, 表明着C-Cl键均发生不同程度的断裂, 由图可以看出, 随着时间的增大, 峰强度减弱程度越大, 即其峰强度越小, C-Cl键的断裂对应其光降解机理, 为脱氯化氢反应[6]。在1251 cm⁻¹、1174 cm⁻¹及1729 cm⁻¹范围为其中增塑剂的C-O-C键及酯羰基键, 在辐照后, 其吸收峰强度均减弱, 这表明光照也造成了此键的断裂。

对比样品b老化3 d、6 d、9 d的红外光谱图, 发现不同时间老化后的光谱图未发生明显的变化, 741 cm⁻¹处其C-Cl键的峰强度降低, 但也十分微小; 1426 cm⁻¹处为C=C双键, 可能是其中含有的单体产生降解断键, 1380 cm⁻¹处也相对减弱; 这与紫外光谱及失重率测试均吻合。另外1650 cm⁻¹及其附近的峰相对复杂, 可能是PVC中含有各自醛、酮、酯等物质。PVC降解标准可以以C-Cl键来判断, 断键越多, 说明降解越多。

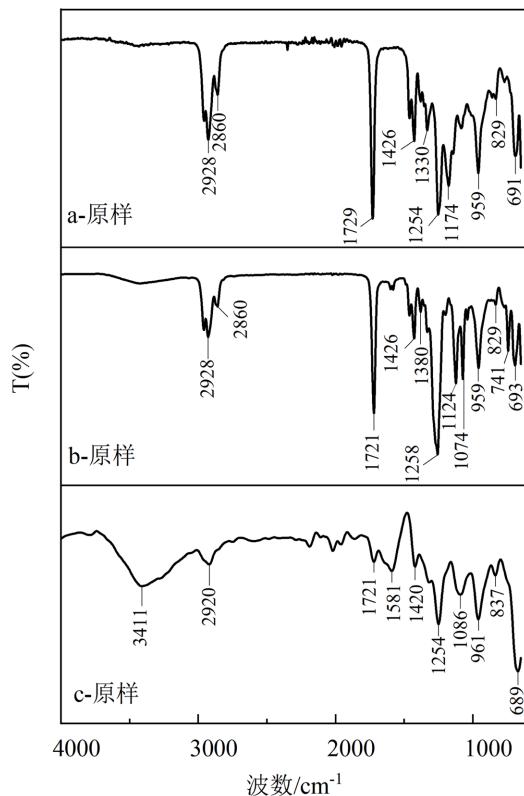


Figure 4. Infrared absorption spectra of original samples a, b, and c
图 4. 原样 a、b、c 的红外吸收光谱图

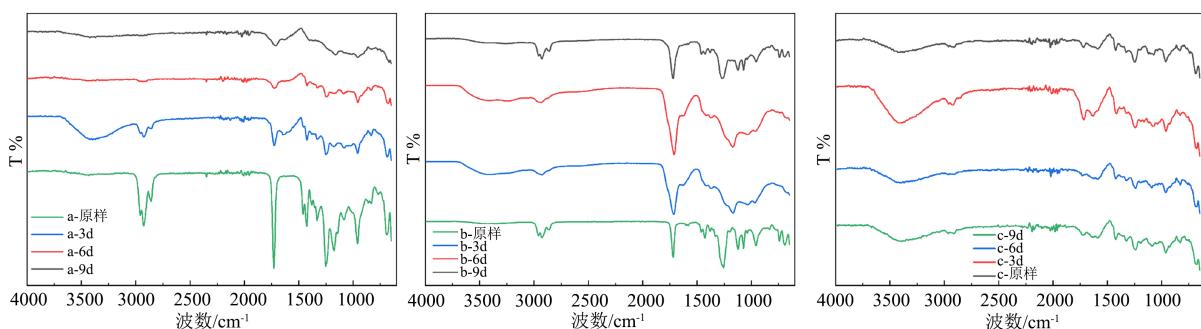


Figure 5. Infrared spectra of samples a, b, and c before and after aging
图 5. 样品 a、b、c 老化前后的红外光谱图

从样品 c 光老化 3 d、6 d、9 d 样品的红外光谱图中可以看出随着降解时间的增加， 691 cm^{-1} 处的峰在逐渐减弱， 1426 cm^{-1} 与 1380 cm^{-1} 处的 C-H 键也在减弱，说明 C-Cl 键以及 C-H 键在不断发生断裂，这表明发生 PVC 在发生脱氯化氢反应，表面发生降解，且程度越来越大。

4. 结论

本研究通过失重率测试、紫外可见光谱及红外光谱分析，研究了纳米 TiO_2 对三种不同 PVC 塑料的光催化降解行为，得出以下主要结论：

纳米 TiO_2 对 PVC 塑料的光降解具有显著的催化加速作用，且催化效果与 PVC 材料类型密切相关。其中，PVC 保鲜膜和 PVC 收缩袋的催化降解效果显著，在相同紫外老化条件下，加入催化剂后的失重率

显著高于未加催化剂样品，且随老化时间延长降解程度持续加深；而 PVC 透明软胶板因厚度较大、材质硬质化、含抗老化剂及 310 nm 处的弱吸光物质，其降解过程受抑制，有无催化剂条件下的失重率和结构变化均不显著。

紫外可见光谱中 250~400 nm 区域反射率的降低，表明降解过程中生成了 C=C 共轭双键等不饱和结构；红外光谱分析表明，降解核心反应为脱氯化氢反应，表现为 C-Cl 键吸收峰强度减弱，同时 C-H 键、增塑剂中的 C-O-C 键及酯羰基键也发生不同程度断裂，进一步证明了纳米 TiO₂ 对 PVC 化学结构的破坏作用。

基金项目

宜宾学院校级本科工程项目(409-XZX202405)。

参考文献

- [1] 刘明宇, 郑旭, 强丽媛, 等. 1994-2020 年中国农用薄膜使用量变化与农膜微塑料污染现状分析[J]. 生态环境学报, 2023, 32(11): 2050-2061.
- [2] Ahmad, M., Li, J., Wang, P., Hozzein, W.N. and Li, W. (2020) Environmental Perspectives of Microplastic Pollution in the Aquatic Environment: A Review. *Marine Life Science & Technology*, **2**, 414-430. <https://doi.org/10.1007/s42995-020-00056-w>
- [3] Zhao, J. and Yang, X. (2003) Photocatalytic Oxidation for Indoor Air Purification: A Literature Review. *Building and Environment*, **38**, 645-654. [https://doi.org/10.1016/s0360-1323\(02\)00212-3](https://doi.org/10.1016/s0360-1323(02)00212-3)
- [4] 刘明浩, 宋武林, 卢照, 等. 纳米二氧化钛固相载体研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(9): 9108-911.
- [5] 陈华才. 红外光谱法快速鉴别 PE 和 PVC 保鲜膜[J]. 中国计量学院学报, 2005(4): 299-301.
- [6] 张妍. 可光降解 PVC 复合薄膜的制备及降解性能研究[D]: [硕士学位论文]. 海口: 海南师范大学, 2021.