

# 有机光化学在分子材料中的应用

方子璇 陈雨彤

河北工业大学化工学院 天津 300401

**【摘要】**现在高分子材料正朝着“精密改性”和“绿色制造”的方向发展。有一种有机光化学方法，它有“光子驱动精准改性”的优势，挺受关注，但也面临不少问题，比如工艺难均匀、产品性能易变差，还没法大规模生产。本文先搭建了有机光化学在分子材料应用方面的理论框架，接着仔细分析了一些问题，像因为光照不均匀，产品质量好的比例低；产品耐候性不好，能用的场景有限；成本和能源消耗太高，没法大规模推广。最后，针对性地找解决这些困境的办法。这项研究就是想给解决有机光化学“理论行得通，但产业应用难”的矛盾提供技术支持。

**【关键词】**有机光化学；高分子材料改性；光固化工艺；产业化应用

Application of Organic Photochemistry in Polymer Materials

Fang Zixuan Chen Yutong

College of Chemical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin, China 300401

**【Abstract】** Polymer materials are evolving towards "precision modification" and "green manufacturing". An organic photochemical method with the advantage of "photon-driven precision modification" has attracted considerable attention, yet faces challenges such as uneven process uniformity, variable product performance, and lack of large-scale production capabilities. This paper first establishes a theoretical framework for applying organic photochemistry in polymer materials, then analyzes key issues including low product quality due to uneven irradiation, limited weather resistance restricting practical applications, and high costs and energy consumption hindering mass production. Finally, targeted solutions are proposed to address these challenges. This research aims to provide technical support for resolving the contradiction between "theoretical feasibility and industrial application difficulties" in organic photochemistry.

**【Key words】** organic photochemistry; polymer material modification; photopolymerization process; industrial application

## 引言:

有机光化学能精准驱动分子反应，能在室温下定向调控高分子链结构。这为材料改性开辟了绿色高效的新途径，成了行业研究热点。不过，它在高分子材料领域应用有不少阻碍。光照不均匀，厚壁和异形制品反应难均匀；改性材料残留光敏剂和活性基团，户外或高温下性能易下降；高效光敏剂贵，专用设备投资大，限制了大规模产业应用。所以，本文先构建有机光化学在分子材料领域的理论体系，解释反应原理和应用价值，再分析工艺、性能、应用方面的实际困境，最后助力高分子材料改性技术实现“精准、长效、经济”升级。

## 一、有机光化学在分子材料中的理论构建

### 1.1 有机光化学反应的基本原理与机理特征

在分子材料向高性能化及功能化不断推进的进程中，因反应过程存在可控程度不佳、副产物数量较多等状况而无法很好契合精密制造要求的传统热引发改性方式，与凭借“光子精准驱动”特性成为关键技术支撑要素的有机光化学

反应形成对比。其核心原理为：高分子链中如羰基、碳-碳双键等光敏基团，在特定波长范围光（紫外线 200 - 400nm、可见光 400 - 760nm）照射下吸收相应能量，跃迁到激发单线态或三线态，随后通过氢提取反应（如 365nm 波长紫外光照射下二苯甲酮 20 分钟夺取聚丙烯  $\alpha$ -氢使聚丙烯凝胶含量达 72%）、电子转移反应（如激发后的三芳基硫鎓盐催化环氧开环聚合）、[2+2]环加成反应（聚丁二烯双键形成环丁烷结构）这三种典型机理反应，实现对分子结构有方向的调控。

### 1.2 光化学改性对分子材料性能提升的潜在价值

在包装、电子和智能材料等领域，人们对材料性能的要求越来越高。这时，光化学改性因为能“精准调节链结构”，成了突破传统材料性能限制的关键办法。先说优化材料表面性能，聚乙烯和油墨不太兼容，这一直是行业难题。用紫外光引发甲基丙烯酸甲酯接枝后，聚乙烯表面张力从 31mN/m 增加到 48mN/m，复合包装膜剥离强度提高了约 2.3 倍，解决了食品包装密封问题。再说强化力学和热性能，为满足电子封装耐高温需求，把环氧和丙烯酸酯光固化交联后，拉伸强度从 65MPa 提升到 92MPa，玻璃化转变温度提高了 33℃。最后是功能化开发，为满足智能膜材响应性要求，给聚碳酸

酯接上 N-异丙基丙烯酰胺后,在 32℃ 时,接触角从 85° 一下子降到 30°, 这特性让它能用于药物可控释放场景,充分体现了性能提升的价值。

### 1.3 企业应用背景下光化学工艺的优势与局限

现在国家推行“双碳”政策,提倡绿色制造,下游行业也想降本增效。在这两个背景下,有机光化学工艺产业化的好处和问题就更明显了。从好处来说,这个工艺符合绿色生产的要求。传统热引发反应得在 120-160℃ 的高温下,花 4-8 个小时才能完成。而光化学工艺在室温下,大概 1-3 个小时就能完成。比如有企业的聚丙烯生产线用了光化学工艺后,能耗降低了差不多 60%,挥发性有机化合物的排放减少了大概 95%,还能达到欧盟相关法规的要求。而且,它还能满足精密制造的需求。395nm 的紫外 LED 光源能让 UV 涂料的固化速度,从每分钟 5 米提高到每分钟 15 米,涂层厚度的偏差能控制在正负 2 微米以内,能满足高端涂层的精度要求。不过,这个工艺也有局限,限制了它的广泛应用。比如说在加工 10mm 以上的 PVC 管材时,因为光穿透得不够,管材内外层的交联度差异可能达到 25%。而且,这个工艺所需设备的初始投资,比传统热设备要高 30%-50%。高效光敏剂每千克价格在 800-1200 元,占材料成本的 5%-8%,这对中小企业和生产低附加值产品的企业来说,是个不小的门槛。

## 二、高分子材料光化学应用的现实困境

### 2.1 工艺层面困境:光照均匀性不足导致反应可控性差

在 高分子材料朝着厚壁、形状奇特、幅面宽阔等多种形态发展的情形下,光照均匀程度不够这一阻碍光化学工艺实现大规模应用且直接影响产品质量稳定性的关键难题凸显,如生产市政工程常见规格 20mm 的 PVC 给水管,采用传统紫外灯管环形照射方式,因光衰减特性,管材表层光强度达 80mW/cm<sup>2</sup> 而内层仅 22mW/cm<sup>2</sup>,致使内外层交联程度相差 32%、内层凝胶含量不足 45%,在 1.6MPa 压力测试中有 20% 成品内层开裂,不符合 GB/T 10002.1 标准规定;再如制造带有 3 处 20mm 深度凹槽的汽车 PP 异形支架时,凹槽部位因光照死角致反应转化率不到 30%,不得不增配反射镜和辅助光源,不仅使工艺时间延长 40%,还额外多消耗 25% 能源,削弱光化学工艺原本的效率优势。

### 2.2 性能层面困境:改性材料耐候性与稳定性不足

高分子材料用到户外、高温、接触溶剂等严苛场景时,光化学改性后,耐候和稳定性不足更明显。像户外 PE 遮阳板常用在建筑外墙,紫外光接枝改性后,一开始抗冲击强度提高了大概 68%。可是模拟户外用 2 年,经过 1000 小时氙灯老化测试后,残留光敏剂让分子链断了,抗冲击强度一下降了 57%,表面粉化率达到 35%,光泽度从 65% 降到 23%,不符合耐候 2000 小时的标准。还有光交联环氧树脂用于芯片封装,这对电子行业很关键,一开始玻璃化转变温度能到

158℃。但在模拟芯片工作的 120℃ 下老化 60 天后,没反应的双键热氧降解,玻璃化转变温度降到 132℃,介电常数从 3.2 升到 4.5,导致芯片信号传输延迟增加 8%,不满足电子设备可靠性标准。

### 2.3 应用层面困境:规模化生产成本高、能耗大、兼容性差

在制造业特别看重“降低成本、提高效率”的情况下,光化学工艺大规模推广遇到了问题,限制了它产业化普及。成本方面,一家年产 1 万吨 PP 改性的企业算了算,三芳基硫鎓盐光敏剂(每千克 1100 元)成本是传统 AIBN 引发剂(每千克 80 元)的 6 倍,材料成本占比达 7.5%。设备投资上,紫外 LED 设备要花 1200 万元,是传统热风烘箱(520 万元)的 2.3 倍,而且投资回收要 5 年,这对中小企业来说负担太重。能耗方面,拿食品包装 PE 薄膜的 UV 固化生产线来说,每吨产品能耗 320 度电,比传统热拉伸工艺多 52%。要是工业电价每度 0.6 元,年产 10 万吨的企业每年得多花 660 万元。兼容性上,很多设备只能适用一种形态,像建材企业得分别配不同设备,设备闲置率大概 30%,每年光折旧成本就多 80 万元。而且光化学单元加到传统挤出生产线里,反应时间和挤出速度不匹配,生产线速度从 30 米每分钟降到 18 米每分钟,产能下降 40%,影响经济效益。

## 三、突破困境的实践路径

### 3.1 工艺突破:高效光引发剂设计与精准光源控制

解决因光照不均匀产生的反应可控性难题重点在于摒弃“依赖固定光照条件”的老旧思路,通过“从分子角度提升引发效率与在设备层面制定专属光照方案”相互配合的策略达成从“被动适应”向“主动调控”的关键转变。传统光引发剂如二苯甲酮只在 254-313nm 紫外光范围内产生响应且摩尔消光系数仅为  $3.4 \times 10^3 \text{ L}/(\text{mol} \cdot \text{cm})$ 、引发效率不高,对 20mm 的 PVC 市政给水管改性时需高强度光照才发生反应,致管材内外层光强差达 58mW/cm<sup>2</sup>、交联度差异为 32%、水压测试合格率仅 80%。而“硫杂蒽酮-叔胺”这种复合引发剂经分子结构调整将响应波长拓展到 385-405nm 可见光范围、摩尔消光系数升高到  $1.2 \times 10^4 \text{ L}/(\text{mol} \cdot \text{cm})$ (是传统体系 3.5 倍),仅用 50mW/cm<sup>2</sup> 光照就能将管材内外层交联度差异降低到 8%、合格率提升到 98%。光源控制环节的突破在于“制定适配不同材料形态的定制化光照”,传统紫外灯管光强分布固定,加工 1.8m 宽的 PE 包装膜时横向光强波动达 5%、接枝率差异有 11%、印刷油墨脱落率为 22%,PP 异形支架凹槽因光照死角反应转化率仅 30%,而 128 路自适应 LED 阵列通过独立驱动芯片,将横向光强波动控制在  $\pm 2\%$ ,PE 膜接枝率差异缩至 3%,油墨脱落率低于 5%,返工成本降 82%;针对异形件,3D 扫描生成定制光源路径,凹槽转化率提至 75%,无需额外添加设备且能耗减少 18%,解决汽车零部件

件手工补涂面临的难题。

### 3.2 性能突破：开发耐候性优良的高分子光固化体系

有机光化学改性有个关键问题，就是“短期内性能提高”和“长期稳定性”不平衡。传统改性材料虽能很快达标，但残留的光敏剂和活性基团容易降解，在户外、高温这些恶劣环境下就不行了。针对这个难题，要从“构建防护机制”和“优化网络结构”两方面建立能长久稳定的光固化体系。就拿户外建材来说，传统 PE 遮阳板经过 1000 小时氙灯老化试验后，残留光敏剂让分子链断裂，抗冲击强度大概只剩 43%，表面粉化率达到 35%，根本满足不了 2000 小时的耐候要求。而“硅氧烷改性丙烯酸酯 + HALS”体系不一样，硅氧烷迁移形成一层大约 50nm 厚的致密 SiO<sub>2</sub> 保护层，能挡住紫外线和氧气，同时 HALS 能捕获自由基，有这双重保护，老化后抗冲击强度保留率能到 85%，粉化率降到 5%，光泽度能维持在 58% 以上。另外，电子封装方面，传统光交联环氧树脂在 120℃ 环境下老化 60 天后，玻璃化转变温度从 158℃ 降到 132℃，介电常数升高到 4.5，芯片信号延迟增加 8%。而“环氧 - 异氰酸酯”互穿网络体系（分析发现它的交联密度提高了 40%）老化后，玻璃化转变温度只降到 145℃，介电常数稳定在 3.3 - 3.4，信号延迟只增加 1.5%，完全能满足 5G 芯片使用需求。

### 3.3 应用突破：绿色节能工艺与模块化生产体系构建

有机光化学技术难从实验室走向大规模产业应用的关键在于“成本过高、能耗难减、设备不匹配”这三重限制形成的闭环。传统 UV 固化工艺依靠持续高强度光照致单位能耗达 320kWh/t，远超传统热改性工艺的 210kWh/t，且高效光敏剂大多只能使用一次，如三芳基硫鎓盐单价 1100 元/kg、成本占比 7.5%，致中小型企业难以承受，同时专用设备适配性差，薄膜生产线无法加工管材、异形件需单独定制设备，像某建材企业为生产薄膜、管材、异形件三类产品配备 3 台专用设备，设备闲置率达 30%、每年平均折旧成本超 150 万元，进一步压缩利润空间。若打破此困境，须从“工艺方面降低成本和节约能源”与“设备方面实现模块化兼容”两方面同时入手，使技术在经济合理性和场景适配性上形成优势。传统 UV 固化全过程保持高功率光照，而“光 - 热

协同引发”技术通过精确调整光照时间顺序，仅在反应起始提供紫外光引发自由基产生，后续利用聚合反应每千克材料约 800kJ 热量维持链增长、无需额外加热，将 PE 薄膜 UV 固化生产线单位能耗从 320kWh/t 降至 220kWh/t，不仅低于传统 UV 工艺，还比传统热拉伸工艺低 4.8%，按某年产 10 万吨 PE 薄膜企业规模及工业电价 0.6 元/kWh 计算，每年平均节省电费 60 万元，同时减少约 480 吨碳排放（按火电煤耗 300g/kWh、碳排放系数 0.67tCO<sub>2</sub>/MWh 计算）。针对光敏剂成本问题，“聚酰亚胺基可回收光敏剂”通过分子结构设计，反应结束后利用 N, N - 二甲基甲酰胺（DMF）溶剂萃取回收，回收率超 85%，且经 3 次循环使用引发效率仍保持初始值 90%、无明显降低，使光敏剂成本占比从 7.5% 压缩到 3.2%、每吨改性材料成本降低 43 元，兼顾经济与环保。在设备兼容性方面，核心解决办法是“模块化设计 + 标准化接口”，“多功能光化学模块单元”采用拆分式设计，将光源组件（可更换紫外灯管阵列或 LED 阵列）、反应腔模具（可替换薄膜专用平模、管材专用环模、异形件专用定制模）、传动系统（可调节速度的辊筒或输送带）设计成独立模块，通过快速插拔接口实现组合和切换。

## 四、结语

这篇文章主要探讨了有机光化学在材料领域的应用。首先我们搭建了一个理论框架去分析光子驱动反应原理，看看它对提升高分子材料性能有什么特别的作用，接着看看它能不能用于大部分企业的实际生产。紧接着我们观察一下有机光化学在实际应用到企业中遇到的问题，比如光照不均匀，产品良品率低；材料耐候性差，应用场景受限；成本太高，没法大规模生产这些已经出现的问题。在文章的最后针对我们发现的这些问题提出解决高效的办法，如采用高效光引发剂、耐候性好的光固化体系和绿色模块化生产模式，还进一步举例去证明这些方法的可行性。这项研究为有机光化学产业化提供了有效方案，推动技术从理论走向应用。

## 参考文献

- [1]熊传溪, 胡晋昌, 赵方鸣, 等. 有机光化学在材料中的应用[J]. 国外建材科技, 1996. DOI: CNKI: SUN: GWJK.0.1996-01-008.
- [2]章谏正, 任杰, 刘艺帆, 等. "巯基-烯/炔"点击反应在有机材料合成中的应用[J]. 粘接, 2021. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5922.2021.02.014.
- [3]潘晓岚. 光化学在有机合成中的应用[J]. 湖州师范学院学报, 1991(5).
- [4]蔡浩然, 姚夏奕, 曹宇超, 等. 光电化学在有机合成中的应用[J]. 大学化学, 2023, 38(1): 129-140. DOI: 10.3866/PKU.DXHX202202021.

作者简介: 方子璇(2004—), 女, 河北沧州人, 本科三年级在读, 研究方向为高分子材料与工程。