

## 塑料幻灭记

胡廷辉, 龙俊文, 龙毅, 刘焯赫\*

中国地质大学(北京)数理学院, 北京 100083

**摘要:** 随着现代生活水平的提高, 塑料制品已经成为我们日常生活中不可或缺的一部分。但是塑料污染已成为当下最严峻的环境问题之一, 塑料的回收利用是解决这一问题的关键。本文通过科幻故事的方式介绍了一些塑料回收的新技术, 引起大家对保护生态环境重视的同时, 并对未来塑料回收利用领域的发展进行展望。

**关键词:** 塑料降解; 化学回收; 聚对苯二甲酸乙二醇酯; 聚苯乙烯

**中图分类号:** G64; O6

## Plastic Disillusionment

Tinghui Hu, Junwen Long, Yi Long, Xuanhe Liu \*

School of Science, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China.

**Abstract:** With the improvement of modern living standards, plastic products have become an indispensable part of our daily lives. However, plastic pollution has emerged as one of the most severe environmental problems today, plastic recycling being crucial to addressing this challenge. This paper introduces new technologies in the field of plastic recycling through a science fiction narrative, aiming to raise awareness about the importance of ecological protection while also envisioning the future development of plastic recycling and utilization.

**Key Words:** Plastic degradation; Chemical recovery; Polyethylene terephthalate; Polystyrene

当塑料的浪潮席卷全球, 如同邪恶的黑暗势力在侵蚀着我们的世界。塑料制品的泛滥使用, 就像打开了潘多拉的盒子, 释放出系列的环境和社会问题。科学家们, 这些曾经的现实世界的守护者, 此刻却不得不化身为魔法世界的魔法师, 踏入这个充满奇幻与挑战的新领域。在广阔的海洋中, 在那白雪皑皑的冰川之巅, 甚至是那看似纯净的大气之中, 微塑料的幽灵正悄然蔓延, 塑料的污染也无处不在。这场塑料污染的风暴, 已经席卷了全球的每一个角落, 成为我们这个时代最棘手的环境问题。魔法师们将目光聚焦于两类典型难降解塑料——聚对苯二甲酸乙二醇酯(Polyethylene terephthalate, PET)和聚苯乙烯(Polystyrene, PS)。二者合计占塑料废弃物的30%以上, 其高稳定性和低回收率成为技术攻关的核心目标。于是, 智勇双全的他们手持化学的魔法棒, 踏上了寻找环境友好型处理方法的征程。

### 1 塑料的救赎之旅

在遥远的20世纪50至60年代, 塑料如雨后春笋般崭露头角, 大规模的生产让人们对此种神奇的材料寄予厚望。然而, 当70年代的钟声敲响, 在这个神秘的魔法世界中, 原本被视作熠熠生辉的

收稿: 2024-09-03; 录用: 2025-02-24; 网络发表: 2025-03-20

\*通讯作者, Email: liuxh@cugb.edu.cn

基金资助: 中国地质大学(北京)2024年度本科教育质量提升计划建设项目; 中国地质大学(北京)2024年大学生创新创业训练项目

宝藏——PET与PS，却不幸被一股邪恶的黑魔法所笼罩，它们化身为两只狰狞的怪兽，肆无忌惮地在这片土地上肆虐。这两只怪兽所到之处，环境遭受重创，生态平衡被打破，让这片曾经美丽的土地笼罩在黑暗之中。为了拯救这片土地，回收技术的科学家们踏上了寻找塑料回收再生之法的旅程。他们尝试了各种方法：填埋、焚烧、再生造粒(物理回收)、化学回收……可是填埋和焚烧如同凶猛的野兽，对环境造成了巨大的伤害。到了最后，物理回收和化学回收，则成为这场拯救战的主力军。

## 2 救赎：再生之路

物理回收如同一位稳健的骑士，默默地守护着我们的家园。它简单易行，效果显著，是当前企业的首选。然而，化学回收却拥有更强大的能力。它可以将废弃塑料转化为全新的材料，但这位魔法师也面临着诸多挑战，如碳密集、收益率较低等问题，让它难以施展全部魔法。

一束希望之光逐渐显现在这黑暗之中。化学回收，这个被誉为魔法世界中的“光明使者”，如今被视为拯救这两只怪兽、回收“不可回收塑料”的希望所在。然而，全面禁止“洋垃圾”的入境无疑是我国一项具有深远意义的环保举措，它确实如同一道坚固的屏障，有效地阻止了国外塑料废弃物的进入。但与此同时，对于依赖这些东西作为原料的化学回收行业来说，短期内确实面临了原料供应的挑战，似乎限制了其“施展魔法”的能力。尽管如此，这并没有阻止他们前进的步伐。他们坚信，只要不断探索、不断尝试，就一定能找到更好的方法，让塑料回收之旅走得更远、更稳。

然而，在化学回收的这条探索之路上，PET和PS这两个高分子怪兽的降解难题正等着魔法师们去解决。这些高分子界的硬汉和“独立强人”，虽然有着出色的物理和化学性质，但正是这种出色的稳定性，使得它们在自然环境中难以降解，给环境带来了长期的污染隐患。

### 2.1 救赎：降解之困

高分子界中的“硬汉”就是PET，它是对苯二甲酸二甲酯和乙二醇的爱情结晶产物。这对情侣把它们的力量通过酯交换或酯化，缩聚在一起，结晶成了PET。正是如此，PET在高温下依然能够维持那份优雅与坚韧，更别提它那出类拔萃的耐氧化和抗紫外线能力了，使得它在自然环境下长久留存，却也带来了塑料堆积的困扰。

而PS，则是高分子界的“独立强人”，由苯乙烯这位“独行侠”通过自由基聚合的狂欢派对，聚集而成的庞大群体。每组都由苯环和乙烯这对舞伴组成，它们跳着欢快的共价键舞蹈，形成线性或支化的高分子链。苯环的坚韧使得PS这位佳人拥有了高硬度和脆性的独特魅力。PS同样在化学稳定性上表现出色，能够轻松抵挡各种化学物质的侵袭。然而，她也有个小小的缺点——耐氧化和耐紫外线能力稍显不足。所以，当长期沐浴在阳光下或遭遇氧化剂的挑战时，她便会略显疲态，从原本的洁白变得微微泛黄。

魔法师们为了快速拯救他们，于是，尝试了各种创新技术，以期赋予PET和PS新生命。

### 2.2 PET的魔法之旅与绿色新生

PET的高结晶度和化学稳定性使其难以消灭，其酯键的强键能导致传统水解法降解效率低下，需要引入电催化或光催化来激活反应。

魔法师们为了净化被黑暗侵蚀的PET怪兽，他们深思熟虑后决定尝试一种前所未有的方法——电解法。他们精心调制出了一种名为[N-DMBI]<sup>+</sup>的魔法粉末<sup>[1]</sup>，并巧妙地将其与盐分子结合，形成了一种独特的电化学降解药剂。当这种药剂被抛向PET分子链，在催化剂的辅助下发生了电化学氧化还原反应，被迅速解聚成气态小分子，逐渐消散在空气中，化为了无形。

然而，这并未让魔法师们感到满足。他们深知PET怪兽体内的黑暗魔法必须被彻底净化，才能让这些珍贵的结晶重新焕发生机。于是，他们再次翻阅魔法史册，寻找到了另一种神奇的技艺——水解加光催化。在其中的光催化阶段，催化剂吸收光能激发电子，在价带中留下光生空穴，由于光生空穴具有高度正电性和强氧化性，作为反应活性位点，参与氧化还原反应，同时释放氢离子。氢

离子则在反应介质中与PET降解物结合，通过一系列电子传递，促成氢气的生成<sup>[2]</sup>。如图1所示，光生空穴( $h^+$ )与氢离子协同配合，定向攻击PET分子链的酯键，显著提高了解聚效率。这个过程不仅让PET怪兽得到了净化，还产生了一系列有价值的化学品和珍贵的氢气。但是，魔法师们的探索并未止步于此。

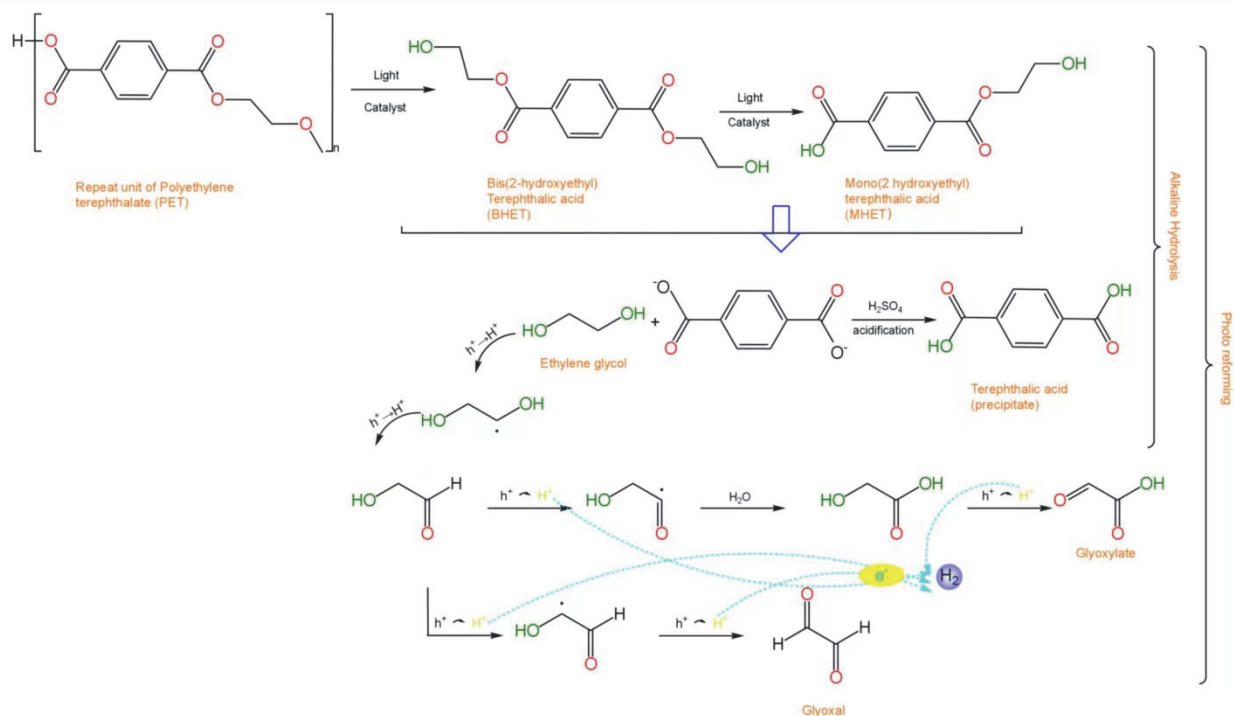


图1 PET水解、副产物萃取及析氢机理

他们继续深入研究，发现了一种更为高效的综合魔法——碱性水解结合酸碱中和。这种魔法不仅能够净化黑暗魔法，还能将乙二醇在CoNi-LDH/NF电极催化方法下转化为高附加值的甲酸/二甲醇钾等化学品(图2)和纯净的氢气<sup>[3]</sup>。这一发现让魔法师们兴奋不已，他们坚信这将为化解黑魔法危机提供更多的可能性。

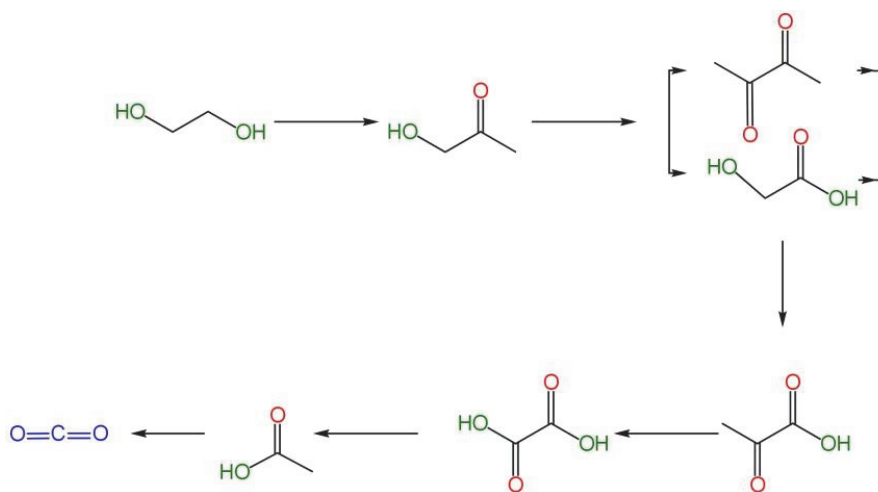


图2 乙二醇电催化氧化过程中的反应路径

在成功净化一部分PET怪兽后，魔法师们开始思考如何直接净化那些更为狡猾的PET塑料幽灵。他们再次进入魔法空间，埋头苦干，不断尝试将不同的技艺结合起来又拆分排序。最终，他们研制出了时空加热(Spatiotemporal Heating, STH)转化法，这一强大的魔法终于让他们可以与塑料幽灵进行正面对决。

他们采用了电气化STH热解魔法，这一方法无需魔法粉末催化，在碳加热器层施加脉冲电流，产生的热量传导到底部的碳反应器层和底层的PET，形成垂直分布的空间温度梯度(图3)。再对层状多孔反应器中的PET释放加热脉冲，产生周期性高温，犹如炽热的火焰般包裹着PET，迅速瓦解了其体内连接单体的C—O键。神奇的是，这一过程让43%的塑料幽灵重新变回了纯净的PET单体<sup>[4]</sup>。这不仅是一场精彩又迅速的战斗，更是一场对自然和科技的双重赞美。

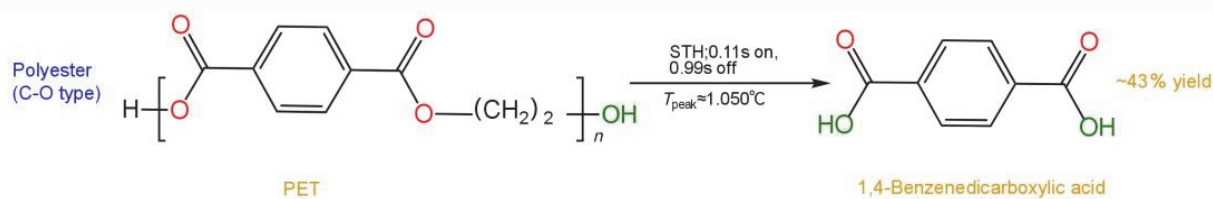


图3 PET通过STH对其单体的解聚反应

令人更加欣喜的是，STH系统中的碳加热器可以使用再生电力供电。这一创新举措不仅展示了魔法师们对自然的敬畏之心，也体现了他们对科技的深刻理解和运用。通过这一方法，塑料废物的熔化得以借助再生能源的力量，实现了对自然的尊重与科技的完美结合。因此这些魔法师们在魔法世界名声大噪，他们用自己的智慧和勇气为整个魔法世界带来了希望和光明。

### 2.3 降解PS的铀酰光魔法与冰晶之力

在魔法的深邃领域中，魔法师们共同面对另一个前所未有的挑战——那些被黑暗魔法附身的PS怪兽，它们如同顽疾一般破坏着魔法世界的平衡。这些分子链结构密集且缺少活性官能团的怪兽的顽固与难以驯服，让魔法师们陷入了深深的思考。

于是魔法师们共同发现了一种名为“铀酰光催化”的神奇技艺。他们巧妙地利用这种技艺，将一束460 nm的蓝光射向那些被黑暗魔法侵蚀的PS怪兽。在光芒的照耀下，怪兽们仿佛被点燃了一般，分解速度急剧加快，它们在光芒中逐渐消散，化为无形。原来是，这种铀酰光魔法中的“铀238”魔法元素对光的吸收波段与460 nm的蓝光完全契合<sup>[5]</sup>。如图4所示，在此波段的蓝光照耀下，产生了激发态 $^*UO_2^{2+}$ ，直接活化了PS身上的不同位点， $^*UO_2^{2+}$ 通过氢原子转移(Hydrogen Atom Transfer, HAT)过程抢夺到了PS身上的氢自由基，便开始不断削弱它们的黑暗魔法。在SET途径下，经过多次 $\beta$ 断裂且与氧气配合，PS怪兽最终被净化转化为人类所使用的苯甲酸，PS怪兽终于被清除。

然而，魔法师们深知这些PS怪兽曾是魔法世界的宝贵资源，不应被轻易抛弃。于是，他们继续深入探索，终于发现了另一种强大的魔法——冰晶界冷冻法。在施展这种魔法时，魔法师们将PS怪兽置于寒冷的冰晶界中。随着温度的骤降，冰晶的排杂效应将怪兽体内的微塑料浓缩到晶间过冷的液态水中。在这狭小的空间里，怪兽们感受到了前所未有的压力，引发了自激发敏化，形成了高活性的三线态 $3PS^*$ 魔法能量<sup>[6]</sup>。如图5所示，这种能量进一步激活了晶间水中的元素，产生了更为强大的力量。在冷冻魔法的加持下，微塑料怪兽被迅速降解，化为纯净的魔法元素。这一发现让魔法师们欣喜若狂，他们终于找到了净化PS怪兽的方法，让这些怪兽得以重获新生。

随着对黑暗魔法的不断研究和探索，魔法师们逐渐掌握了更多净化怪兽的技艺。他们互相学习、互相借鉴，用自己的智慧和勇气为魔法世界带来了希望和光明。而那些曾经肆虐的PS怪兽，也在魔法师们的妙手下化为了守护魔法世界的力量，共同维护着这个世界的和谐与平衡。

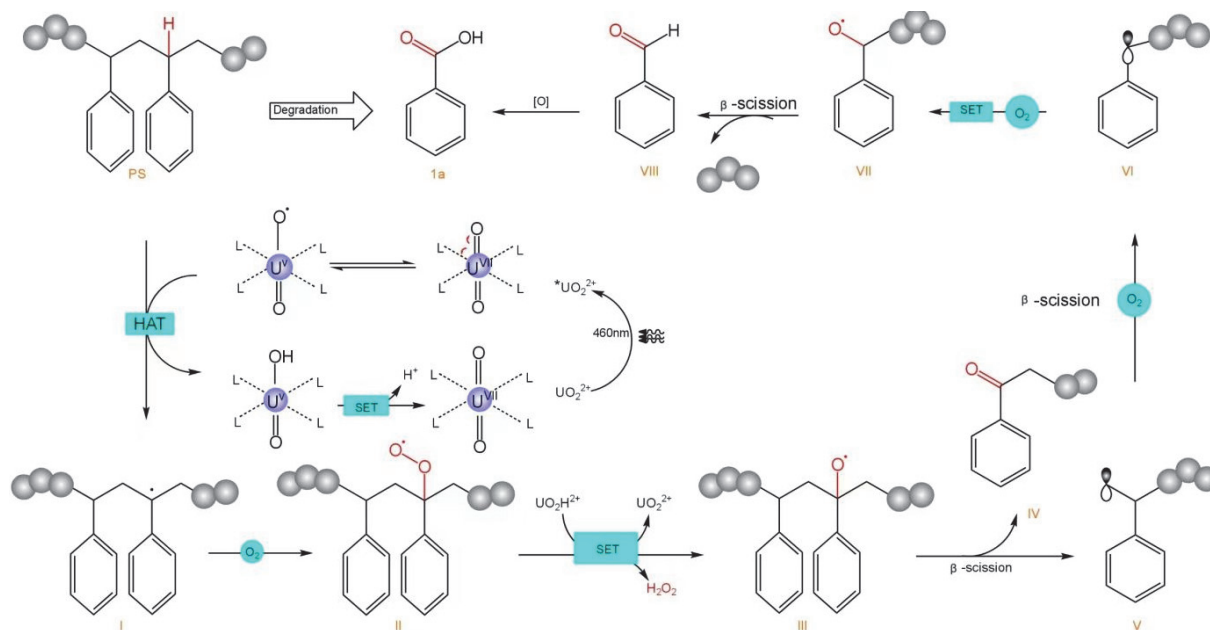


图4 PS通过铀酰光催化剂降解过程

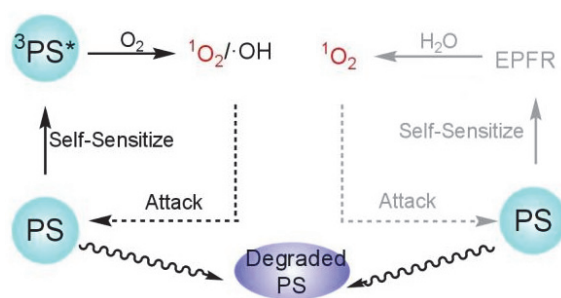


图5 冰晶界过冷液态水中的加速降解技术过程

### 3 驱散黑暗，点亮未来

魔法师们利用具有碳碳单键骨架的聚合物，并通过引入二氧杂硼烷功能基团利用其复分解反应成功培育出了一种名为Vitrimer的新型“超分子”精灵<sup>[7]</sup>。这种精灵能够转化为各种塑料制品，不仅因为其通过氧杂硼烷的复分解反应实现了交联点的快速转换而展现出卓越的再加工性能，在不损失原有优异特性的情况下还实现多次循环使用，实验表明，经过5次加工，其性能损耗低于10%，具备极高的溶剂耐受性和卓越的抗蠕变性能。由于这些特性，传统塑料在高应力和复杂化学环境中的稳定性大幅提升，极大地拓展了其应用广度和使用寿命。Vitrimer的出现不仅为高性能塑料的再生利用提供了新的路径，还为开发更加环保、可持续的材料开辟了新的前景，使得黑暗力量大大削弱。

同时，魔法师们凭借强大的化学魔法，施展独特的咒语，将两只怪兽的邪恶力量一层层剥去，最终彻底消失得无影无踪。取而代之的是一片片新生的绿色，仿佛春天的使者在荒芜的土地上洒下生命的种子，化学回收不仅消灭了这两只怪兽，还为地球的未来点燃了希望的火炬，开启了无尽可能的希望之门。

### 参 考 文 献

[1] 靳爱民. 石油炼制与化工, 2023, 54 (10), 57.

- [2] Thiloka, E. E. M. N.; Senanayake, P. S.; Xu, P.; Wang, H. Y. *J. Environ. Chem. Eng.* **2023**, *11* (6), 111429.
- [3] 赵彤彤, 王嫣, 秦时月, 徐亮, 栗振华. *大学化学*, **2024**, *39* (3), 308.
- [4] Qi, D.; Lele, A.D.; Zhao, X. P.; Li, S. K.; Cheng, S. C.; Wang, Y. Q.; Cui, M. J.; Guo, M.; Brozena, A. H.; Lin, Y.; *et al. Nature* **2023**, *616* (7957), 488.
- [5] 孟娇龙, 周怡琳, 李道季, 姜雪峰. *Sci. Bull.* **2023**, *68* (14), 1522.
- [6] Tian, C.; Lv, J. X.; Zhang, W. C.; Wang, H.; Chao, J.; Chai, L. Y.; Lin, Z. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2022**, *134* (31), e202206947.
- [7] Röttger, M.; Domenech, T.; van der Weegen, R.; Breuillac, A.; Nicolay, R.; Leibler, L. *Science* **2017**, *356* (6333), 62.