

# 聚对苯二甲酸丁二醇酯热解回收及经济效益分析

雷丽丽 (海南新珠江人力资源开发有限公司, 海南 洋浦 578001)

**摘要:** 聚对苯二甲酸丁二醇酯是一种全球广泛应用的塑料, 废弃PBT所带来的环境问题也变得越来越严重, 常规的机械回收方法在降级循环和质量下降方面遇到了瓶颈限制, 同时化学回收的热解技术也显示了很大的潜力。本论文针对聚对苯二甲酸丁二醇酯热解回收技术进行了深入探讨, 对其工艺原理及发展现状进行了分析并对经济效益进行了分析, 目的在于有助于有关企业对该技术经济可行性和发展潜力有一个较为全面的认识, 促进PBT有效地回收和循环再用。

**关键词:** 聚对苯二甲酸丁二醇酯; 热解; 经济性分析

**中图分类号:** TQ323.41; X783.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 008-0043-03

## Pyrolysis Recovery of Polybutylene Terephthalate and Economic Benefit Analysis

Lei Lili (China Petrochemical Hainan Refining & Chemical Co., Ltd., Yangpu Hainan 578001, China)

**Abstract:** Polybutylene terephthalate is a widely used plastic globally, and the environmental problems caused by waste PBT have become increasingly severe. Conventional mechanical recycling methods have encountered bottlenecks in downcycling and quality degradation, while pyrolysis technology for chemical recycling has shown great potential. This paper conducts an in-depth discussion on the pyrolysis recovery technology of polybutylene terephthalate, analyzes its process principles and current development status, and evaluates its economic benefits. The aim is to help relevant enterprises gain a comprehensive understanding of the technical and economic feasibility and development potential of this technology, thereby promoting the effective recycling and reuse of PBT.

**Keywords:** Polybutylene terephthalate (PTFE); Pyrolysis; Economic analysis

聚对苯二甲酸乙二酯 (PBT) 由于具有优良的物理特性与加工特性而被广泛应用于包装、纺织、电子等诸多工业中起着至关重要的作用, 但是随着 PBT 用量越来越大废弃 PBT 造成的环境问题也越来越严峻, 热解回收作为一项重要的 PBT 回收方法不仅可以有效地处理由废弃 PBT 所带来的各种环境问题而且还具有一定经济效益, 对 PBT 热解回收和经济效益进行深入研究对于推动 PBT 资源可持续利用和相关行业发展都有着十分重要的作用。

### 1 聚对苯二甲酸丁二醇酯概述

#### 1.1 PBT 的结构与性质

PBT 是以对苯二甲酸 (TPA) 和 1,4-丁二醇 (BDO) 缩聚而成的高分子材料, 由于特殊的化学成分 PBT 表现出一系列优良的物理及化学性质, 它的熔融温度一般在 225-235℃ 范围内, 该温度范围保证了在较高温度条件下仍然能够保持稳定外观的同时也具有很好的机械性能, 在纤维及包装行业得到了广泛的应用, 另外 PBT 抗化学腐蚀能力强、气体屏障性能好、透明程度高, 大大扩大了实际应用范围<sup>[1]</sup>。

#### 1.2 PBT 的应用领域

PBT 在包装行业有广泛应用, 用来制造饮料瓶和食品包装, 具有的优良气体阻隔性和高透明度可以有效地延长产品的保质期并且易于呈现商品。在纤维为主体的纺织工业当中, PBT 纤维 (也就是聚酯纤维的

一种) 得到了广泛应用, 用这种纤维制成的织物不但外表笔直, 而且有容易洗涤、快速晾干和抗褶皱等特性, 与此同时电子和电器方面 PBT 也可以用来生产绝缘材料及电容器薄膜从而发挥出优越的电气绝缘性能及机械特性。

#### 1.3 PBT 废弃物的现状

PBT 在各个领域的使用越来越广泛, 产生的垃圾也在锐减, 废料主要来自包装、纺织品和电子电器的报废件, 这些材料很难被自然界分解, 大量丢弃的 PBT 既占用了宝贵的国土资源, 也对土壤和水域构成了威胁, 所以有效地收集并处理这些 PBT 已经成为当前环境保护的一个重要课题。

### 2 聚对苯二甲酸丁二醇酯热解回收技术

#### 2.1 热解回收的原理

PBT 热解回收技术主要利用热化学分解特性, 在无氧或缺氧环境下, 将 PBT 加热至特定温度区间 (一般为 380-550℃), 使 PBT 的大分子链发生断裂, 分解为低分子质量的物质。

热解过程主要通过主链解聚反应生成单体对苯二甲酸丁二醇酯 (BHBT) 及部分低聚物, 同时会伴随侧链断裂和环化等副反应, 释放出少量气体及焦炭。通过调控温度、加热速率、反应时间等热解条件, 可调整热解产物的成分与分布, 从而实现目标产品的最大化生产。

## 2.2 热解工艺类型

### 2.2.1 传统热解工艺

传统热解方法是 PBT 回收中最原始、最基础的技术,采用间歇式反应容器,无需催化剂,仅依靠热能分解 PBT。该过程首先对废弃 PBT 进行初步加工,清除表面污垢及其他附着的聚合物,然后将其破碎为适当大小的颗粒,以增大比表面积、促进热能传导。随后,将破碎后的 PBT 材料放入间歇式反应器内,关闭容器并排出空气,创造低氧环境。接着,通过加热设备将容器内温度升至预定范围,并维持足够时间以完成化学分解。化学反应结束后,切断热源,待反应容器冷却至常温,收集热分解产物并进行下一步分离精炼工作<sup>[2]</sup>。

传统热解工艺具有设备投入少、无需繁琐控制系统等优点,适用于小规模试验或小型生产场景,但也存在明显局限性。其一,热传递不均、生产效率低下。受间歇式反应器结构限制,加热时热量主要依靠器壁向物料内部传导,导致物料内外温差大、温度分布不均,部分 PBT 材料热解不彻底,残留大量未分解聚合物,而部分材料则因局部温度过高出现过热解现象,产生大量焦炭及气体,严重影响产品品质和目标产品产率。其二,间歇式操作具有断续性,每个热解过程都需经历进料、升温、反应、降温、出料等步骤,生产周期长,无法实现大规模连续生产,且随着生产规模扩大,生产成本会大幅提高,难以满足工业化大规模回收需求。

### 2.2.2 催化热解工艺

催化热解工艺是在传统热解基础上发展而来的高效热解技术,核心改进是在热解过程中加入特定催化剂,通过催化剂优化热解反应。催化剂的主要作用包括:一是降低热解反应的活化能,使反应更易进行,从而有效降低能源消耗和生产能耗成本;二是加速 PBT 分子链断裂,提高热解反应速率,缩短反应时间,提升生产效率;三是具备选择性,可优先促进 PBT 分子链解聚,抑制侧链断裂、环化等副反应,改善热解产物组成与分布,提高目标产物收率及纯度,减少气态、焦炭等副产物生成,降低后续分离提纯的难度与费用<sup>[3]</sup>。

当前,PBT 催化热解中常用的催化剂主要分为两类:一类是金属氧化物催化剂,如氧化锌、氧化钙、氧化镁、氧化铝等,这类催化剂来源广泛、成本低廉、制备流程简便,能有效降低热解反应温度,增强解聚过程的选择性;另一类是分子筛催化剂,如 ZSM-5、Y 型分子筛等,其孔道结构特殊、比表面积大、催化活性强、选择性高,可更精确地调控热解产物,进一

步提高单体收率,但分子筛催化剂制备过程复杂、费用昂贵,在一定程度上制约了其大规模应用。与传统热解工艺相比,催化热解工艺更具优越性,既解决了传统工艺热解效率低、产品品质差等问题,又降低了能耗及生产成本,更适用于工业化大规模回收,是 PBT 热解回收技术的研究重点和发展趋势。

### 2.2.3 超临界流体热解工艺

超临界流体热解工艺是一种创新的 PBT 热解回收技术,利用超临界流体独特的物理化学属性推动 PBT 的有效分解。超临界流体是指物质达到或超过其临界温度与压力时的状态,此时既无普通液体的高粘度,也无普通气体的低扩散性,反而具有低粘度、高扩散能力、强溶解能力和渗透力等特点,能够与 PBT 原材料充分交互并快速渗透至材料内部,加速 PBT 分子链断裂,进而提高热裂解反应速率和产物选择性。

超临界水具有极强的溶解与反应活性,可有效断裂 PBT 分子链上的酯键,促进解聚反应进行。且超临界水热解 PBT 的反应条件温和、反应时间短,能在短时间内实现 PBT 的高效降解,热解产物主要为 BHBT 单体及少量低聚物,副产物少,产品易于分离回收。此外,超临界状态下的二氧化碳无毒无臭、不易燃烧、环境友好,其临界温度和临界压力较低,易达到超临界状态,主要用作溶剂和传热介质,可实现热量均匀传递和物质充分混合,从而加快热解反应速率、提高产品纯度。

但超临界二氧化碳的溶解能力相对较差,在促进 PBT 热解方面效果略逊于超临界水。超临界流体热解工艺凭借反应速度快、目标产物选择性高、副产物少、环境友好等优势,能有效解决传统热解及催化热解存在的部分难题,但也存在一定局限性:一是设备投资大,需配备耐受高压高温的特殊反应器;二是超临界流体的制备与调控体系复杂,运行难度大;三是目前该技术仍处于实验室研究与中试阶段,尚未实现工业化广泛应用;四是尽管前景广阔,但仍需进一步完善技术细节<sup>[4]</sup>。

## 2.3 热解产物的分离与提纯

PBT 热解产物通常为包含 BHBT、低聚物、气体及焦炭的复杂混合物,必须经过分离提纯才能获得高纯度目标产品。对于液态产品,首先采用蒸馏法依据各组分沸点差异进行初步分离,划分出不同沸点范围的组分,实现 BHBT 与其他低聚物的初步分离;随后通过结晶、萃取等方法进一步提纯 BHBT,提高其纯度。对于气体产物,可采用变压吸附、膜分离等气体分离技术,回收有利用价值的气体成分(如二氧化碳),用于工业生产或储存。焦炭则可经进一步加工,用作

能源回收等工业用途。

## 2.4 热解回收技术的发展现状与趋势

当前, PBT 热解回收技术已取得长足进步, 但仍面临一定挑战。一方面, 热解工艺效率及产物选择性有待进一步提升, 以降低成本、提高经济效益; 另一方面, 热解产物的分离提纯过程相对繁琐, 亟需研发更高效、低成本分离技术。未来, PBT 热解回收技术将朝着绿色、高效、智能的方向发展。在绿色化方面, 将研制更环保的热解工艺及催化剂, 降低环境影响, 在高效化方面, 将优化热解工艺参数, 提高热解反应速率和产物产率, 在智能化方面, 将采用先进传感器及自动化控制技术, 实现热解过程的精确控制与优化<sup>[5]</sup>。

## 3 聚对苯二甲酸丁二醇酯热解回收的经济效益分析

### 3.1 成本分析

废弃 PBT 的热解回收成本受其来源、采集方式及预处理水平影响。构建高效的收集网络可降低收集成本, 不同来源的 PBT 质量存在差异, 其预处理成本(如清洗、破碎、烘烤等)也会影响原料总成本。热解回收设备投入较大, 包括热解反应器、加热系统、气体处理设备及产物分离提纯设备等。不同热解工艺所需装置不同, 投资成本差异显著。虽然先进装备的初始资金投入较高, 但凭借其更高的生产效率和产品质量, 从长远来看可有效降低单位产品制造成本。

热解过程需要大量能源供暖, 能源费用在总成本中占比较大, 主要取决于热解工艺类型、反应温度及能源价格等因素。常规热解过程能耗较高, 而催化热解或超临界流体热解可通过优化反应条件降低能耗; 采用可再生能源替代传统化石能源, 既能降本增效, 又能减少环境影响。

另外热解回收还需专业人员来操作、监控及维护设备, 劳动力成本占总成本, 自动化技术发展大环境下设备的自动化程度越来越高, 能够减少操作人员的数量, 从而降低了劳动力的成本, 对员工的专业培训提高了他们的操作技能与工作效率的同时还可以进一步降低成本。还有催化剂的成本, 设备的维护和折旧, 还有环保处理的成本, 催化剂的成本主要是由种类, 数量, 价格等因素决定的, 虽然高效的催化剂价格不菲, 但是可以使反应效率得到明显的提高, 产物的选择性也会得到改善, 长时间地应用就可以有效地减少整体成本, 设备维护和折旧费用是确保设备正常运转和更新换代所需开支, 将环保处理费用应用于处理热解后废弃物并保证达到环保要求。

### 3.2 收益分析

PBT 热解回收主要副产品 BHBT 等可回收化学品

价值很高, 高纯度 BHBT 可以做为 PBT 生产原料, 替代一部分原材料以减少生产成本, 热解产物低聚物和珍贵气体成分可以直接销售或者深加工以增加收入, 产品的收入受到产品质量、产量和市场价格的影响, 伴随着市场上对于可持续材料要求越来越高再生 PBT 原料价格预计将会上涨, 这也将带动该项目的效益。

尽管 PBT 热解回收的环境效益难以用金钱直接衡量, 但从长期来看, 可有效减轻环境污染, 降低企业的环境风险, 能减少自然环境中废弃 PBT 的累积, 降低土壤、水源及空气中的污染物含量, 与传统处理方法相比, 还可减少温室气体排放。企业参与 PBT 热解回收, 既符合环保政策要求, 又能改善社会形象, 有望获得政府补贴或优惠政策, 间接增加利润。同时, PBT 热解回收实现了资源循环利用, 降低了对原生资源的开采和依赖程度, 尤其减少了对石油等原生资源的依赖, 对保障国家能源安全具有重要意义。对企业而言, 这不仅能降低原生资源价格波动带来的经营风险, 而且在原生资源价格上涨时, 资源节约所带来的效益将更加显著。

## 4 结论

聚对苯二甲酸丁二醇酯(PBT)热解回收技术是解决废弃 PBT 环境问题、实现资源循环利用的重要途径, 具有广阔的发展前景和潜在经济价值。尽管该技术在实际应用中面临一定挑战, 但可通过优化工艺参数、降低生产成本、提升产品质量与产量等方式提高经济效益。企业在考虑投资建设 PBT 热解回收项目时, 需全面评估项目的经济效益, 结合自身实际情况理性选择热解工艺与装备, 强化成本控制与市场开拓, 最终实现经济效益与环境效益的共赢。

### 参考文献:

- [1] 张智健, 侯耀华, 王霖. 聚对苯二甲酸丁二醇酯材料的热解燃烧特性研究 [J]. 塑料科技, 2025, 53(06): 20-26.
- [2] 王国华, 张桂菊, 葛文豪等. 基于专利分析聚己二酸对苯二甲酸丁二醇酯技术发展态势 [J]. 合成纤维工业, 2023(06): 61-67.
- [3] 卜和安, 刘世军, 吴文洋, 等. PBT 工程塑料改性的研究现状及应用进展 [J]. 塑料科技, 2023(02): 109-113.
- [4] 罗小松, 黄金保, 吴雷. 聚对苯二甲酸丁二醇酯二聚体热降解机理的理论研究 [J]. 燃料化学学报(中英文), 2023(03): 388-404.
- [5] 陈亚杰, 李冰, 孙玲敏. 聚对苯二甲酸丁二醇酯生产工艺开车过程简析 [J]. 河南化工, 2023, 40(12): 38-40.