

# 废弃聚酯瓶回收再利用研究进展

刘家秀<sup>a</sup> 马力<sup>b</sup>

西安工程大学 a. 服装与艺术设计学院, b. 纺织科学与工程学院, 陕西 西安 710048

**摘要:** 聚焦废弃聚酯(PET)瓶的回收再利用, 分析原料回收预处理中的杂质协同去除机制、合成工艺中的分子链修复策略及功能改性中的多尺度增强路径, 总结当前该领域的研究面临预处理组分分离不彻底、解聚纯化成本高、纺丝稳定性不足等挑战, 指出未来的研究将聚焦跨领域协同预处理技术开发、“物理-化学”协同改性体系构建以及智能响应型功能纤维制备等方向。研究为废弃PET高效回收与高值化利用提供一定的理论与技术参考。

**关键词:** 聚酯(PET)瓶; 回收; 原料处理; 合成工艺; 功能改性

中图分类号: X 705

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2025)06-0032-07

## Research progress on recycling and reuse of waste PET bottles

*Liu Jiaxiu<sup>a</sup>, Ma Li<sup>b</sup>*

a. Apparel & Art Design College, b. School of Textile Science and Engineering, Xi'an Polytechnic University,  
Xi'an 710048, Shaanxi, China

**Abstract:** Focusing on the recycling and reuse of waste polyethylene terephthalate (PET) bottles, the mechanism of simultaneous removal of impurities during the pre-treatment of raw materials, the molecular chain repair strategies in the synthesis processes, and the multi-scale enhancement pathways in functional modification were systematically analyzed. The current challenges faced in this field, such as incomplete separation of components in pre-treatment, high cost of depolymerization and purification, and insufficient spinning stability, were summarized. It was pointed out that future research will focus on the development of cross-disciplinary collaborative pre-treatment technologies, the construction of 'physical-chemical' collaborative modification systems, and the preparation of intelligent responsive functional fibers. The research can provide certain theoretical and technical references for the efficient recycling and high-value utilization of waste PET.

**Keywords:** polyethylene terephthalate (PET) bottle; recycling; raw material treatment; synthesis process; functional modification

收稿日期: 2025-04-25

作者简介: 刘家秀, 女, 1987年生, 硕士, 研究方向为智能交互设计与可持续时尚研究, 799742761@qq.com

聚酯(PET)是全球产量最高的合成聚合物之一。据统计,2023 年全球 PET 产量高达 6 500 万 t,其中约 40%用于制作饮料瓶,从而形成了庞大的废弃 PET 瓶回收体系<sup>[1]</sup>。采用回收的废弃 PET 瓶制备高附加值纤维,不仅契合“双碳”目标下循环经济发展的需求,而且能够在缓解石油基原料依赖的同时,降低纺织工业的碳排放。

PET 分子链中刚性苯环与极性酯基的共轭结构,使其具有高熔点(225~265 ℃)和高尺寸稳定性特性。然而,刚性苯环的存在也限制了分子链的运动能力,使其在加工温度范围内难以快速规整排列,因此表现出结晶速率小的特点。这直接导致加工过程中材料的结晶度偏低、晶体结构不完善,进而对材料的力学性能产生不利影响。此外,废弃 PET 瓶中混有添加剂、污染物及其他聚合物,易导致再生纤维的力学性能下降、功能趋于单一<sup>[2]</sup>。本文聚焦废弃 PET 瓶回收制备高附加值纤维的全链条技术难点,系统分析原料回收预处理中的杂质协同去除机制、合成工艺中的分子链修复策略,以及功能改性中的多尺度增强路径,旨在为废弃 PET 产品的高效回收与高值化利用提供理论与技术参考。

## 1 废弃 PET 瓶的化学组成与回收预处理技术

PET 是由对苯二甲酸(TPA)与乙二醇(EG)通过缩聚反应形成的线性饱和聚酯,其分子链由刚性苯环、极性酯基与柔顺亚甲基交替构成<sup>[1]</sup>。这种规整且对称的结构,赋予分子链高度的取向能力。苯环与酯基形成的共轭体系,极大地增强了分子的刚性,使其具有较高的熔点(225~265 ℃)和典型的玻璃化转变温度(67~80 ℃)<sup>[2]</sup>。固态结构的 PET 通常呈半结晶态,结晶区域由平行排列的分子链通过凹凸相嵌的方式紧密堆积而成,而无定形区域的分子链则呈无序的缠结状态。这种结晶/无定形结构使 PET 材料兼具高拉伸强度(可达铝膜级别)、优异的抗蠕变性及尺寸稳定性<sup>[3]</sup>。然而,刚性的分子链会导致 PET 结晶速率较小,加工过程中需通过双轴拉伸或添加成核剂

的方式诱导结晶,提升材料的透明度和力学各向异性<sup>[4]</sup>。

回收过程中,废弃 PET 瓶携带的添加剂和污染物会对再生纤维的性能产生显著影响:添加剂如环氧大豆油(ESBO)、醛类清除剂(如聚间二甲苯二胺)及紫外线稳定剂(如 Tinuvin 326)等在多次热加工过程中会分解出乙醛、己二酸等低分子化合物,这些低分子化合物不仅会导致 PET 的相对分子质量下降,还会在熔融纺丝时形成气孔缺陷,导致纤维拉伸强度下降且断裂伸长率出现波动<sup>[5-7]</sup>;PET 瓶体附着的聚氯乙烯(PVC)标签及乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA)瓶盖衬垫等残留物会在高温加工过程中释放出盐酸和乙酸,催化 PET 酯键水解,使 PET 的特性黏度由 0.8 dL/g 降至 0.6 dL/g 甚至更低,严重影响熔体流动稳定性和纤维结晶完整性<sup>[8]</sup>;重金属催化剂(如铈、钴)的累积会改变 PET 材料的流变行为,造成纺丝断头率增加,同时迁移至纤维表面的金属离子可能还会引发氧化降解反应,使材料的热稳定性下降<sup>[9]</sup>;回收 PET 瓶中混杂的聚烯烃[如聚乙烯(PE)瓶盖],因与 PET 的相容性差,在熔融共混时易形成界面弱结合区域,从而使纤维的耐冲击强度下降;瓶身吸附的柠檬烯等风味物质会导致纤维染色不均匀,同时还会加速光老化进程<sup>[10-11]</sup>。为缓解上述各种不利影响,工业上采取了一系列措施,如使用扩链剂(如均苯四甲酸二酐)来修复分子链断裂,或采用玻璃纤维增强及成核剂复配技术,提高 PET 的结晶速率,使再生 PET(r-PET)纤维的拉伸强度恢复至原材料的 85%~90%<sup>[12]</sup>。

废弃 PET 瓶回收过程中,原料回收预处理技术是实现高效资源再生的关键。原料回收预处理作为连接前端收集与后端高值化利用的关键环节,其技术水平直接影响资源再生效率与产品质量。当前,国内外针对废弃 PET 瓶的杂质分离、材料解聚及协同催化等核心问题,形成了物理分选、化学解聚、生物酶解等技术路径(表 1),相关研究在提高分选精度、降低能耗污染、提升单体回收率等方面取得显著进展,但仍面临复杂组分分离不彻底、高附加值产物定向转化效率低、规模化应用成本高等问题。

表 1 废弃 PET 瓶回收预处理与解聚技术

Tab. 1 Pre-treatment and depolymerization technologies for recycling of waste PET bottles

技术类别	具体技术/工艺	关键指标与效果	优势	应用
物理分选技术	光学分选+浮选+机器学习算法	PET 分选准确率超过 95%，能分离出金属、PVC 及颜料 <sup>[13]</sup>	能够高精度识别混入的杂质	工业级原料分拣
	多级逆流式沉浮分离机清洗	较常规筛选分离流程去除瓶盖/标签效率提高 3 倍，热洗系统能够降低划伤率，60~80 °C 碱液可去除超过 90% 的胶质 <sup>[14]</sup>	高效去除物理杂质，减少表面损伤	PET 片料清洗预处理
	锌基离子液体去除金属离子	吸附 Cu <sup>2+</sup> 、Fe <sup>3+</sup> 等金属离子，去除率超过 85% <sup>[15]</sup>	双重功能(催化+除杂)	预处理阶段的重金属去除
化学解聚工艺	酸性水解(H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 90 °C)	TPA 最高产率为 95% <sup>[16]</sup>	生成 TPA 且产率高	TPA 定向回收
	碱性水解(NaOH, 80 °C)	EG 回收率为 89% <sup>[17]</sup>	高效回收 EG	EG 为主的回收
	超临界水解(300 °C, 30 MPa)	反应时间为 75~95 s, TPA 回收率超过 90% <sup>[18]</sup>	全转化、低能耗、高纯度	高端再生原料生产
	甲醇醇解[Zn(OAc) <sub>2</sub> 催化, 180~280 °C, 2~4 MPa]	催化生成对苯二甲酸二甲酯(DMT, 纯度为 99.5%) 和 EG <sup>[19]</sup>	产物可直接用于聚合反应, 工业化成熟	大规模回收 PET, 制备 DMT
生物酶解方法	PET 分解酶(PET-Asp89Asn 突变体)+微波预处理	PET 水解的产率达 78%，碳足迹减少 60% <sup>[20]</sup>	低温高效、能耗低、环境友好	实验室/中试阶段 低碳回收

目前,行业已形成“物理分选除杂—化学解聚制单—聚合再生”的主流处理体系,以及生物酶解导向的低碳回收新方向。但针对多材质复合包装带来的预处理难题,亟需开发跨技术领域的协同处理工艺。如 Zheng 等<sup>[21]</sup>采用高压固相混合技术(HPT)对 PET/PE 混合废料进行均质化预处理,然后采用水热法回收 PET/PE 薄膜,首次实现了 PET/PE 薄膜材料回收与化学回收的同步进行。在 300 °C、10 MPa 条件下反应 60 min, PET 转化率约达 100%, TPA 产率为 83.0%, 纯度高达 96.1%。该研究为物理-化学协同回收开辟了新路径。

## 2 废弃 PET 瓶回收再利用的合成工艺

废弃 PET 瓶回收再利用涉及直接熔融纺丝工艺、再生单体聚合工艺及复合增强技术。

直接熔融纺丝工艺中,废弃 PET 瓶经干燥处理后即进入熔融阶段,其中,控制纺丝温度是关键。Fauza 等<sup>[22]</sup>以废弃 PET 瓶为原料制备 r-PET 纤维,并探讨了不同纺丝温度(200、210、220、230、240 °C)对回收 PET 纤维结晶度和力学性能的影响。结果表明,制备 r-PET 纤维的最佳纺丝温度为 210 °C,制得的纤维直径为 0.23 mm、结晶度为 8.9%、拉伸强

度为 70.4 MPa、断裂伸长率为 83.6%。Shen 等<sup>[7]</sup>研究指出,纺丝过程中 PET 的纺丝温度应高于其熔点(250~270 °C),同时低于热分解温度(340~410 °C),以免过量生成乙醛等挥发性副产物;较适宜的纺丝熔融温度为 275~290 °C。熔体黏度直接影响纤维成形稳定性,r-PET 的特性黏度通常为 0.5~0.8 dL/g,与原生 PET 的特性黏度(通常为 0.72~1.01 dL/g)相比略低。但 Jain 等<sup>[23]</sup>指出:调整螺杆剪切速率可补偿因解聚再聚合导致的相对分子质量的下降,螺杆转速通过剪切场影响分子链取向与缠结状态;当螺杆转速为 34~85 r/min、熔融温度为 270~280 °C 时,r-PET 纤维的断裂强度可达原生 PET 纤维的 90%~95%;纺丝速度显著影响纤维结晶度,当纺丝速度从 1500 m/min 提高至 3800 m/min 时,纤维结晶度因分子链取向诱导效应而跃升至 30% 以上,同时 r-PET 纤维的断裂强度从 2.8 cN/dtex 增至 4.5 cN/dtex,初始热分解温度由 320 °C 提高至 340 °C,耐热性提高。总体而言,直接熔融纺丝工艺直接高效,但 r-PET 偏低的特性黏度易导致纺丝工艺不稳定,可通过对纺丝温度、螺杆转速和纺丝速度的调控,优化 r-PET 纤维的性能,后续研究需重点关注这些方面。

再生单体聚合工艺的核心在于解聚产物的纯化与再聚合路径的选择。废弃 PET 经甲醇醇解生成

DMT 和 EG 后,需通过重结晶(DMT 纯度>99.99%)与多级蒸馏(EG 纯度>99.99%)去除低聚物及残留染料,此过程可使再生单体的聚合度恢复至原生 PET 的水平<sup>[24]</sup>。Liu 等<sup>[25]</sup>的研究表明,固相聚合相较于溶液聚合更适用于再生体系。在 220~240 °C 下进行固相聚合,既能避免 PET 的热降解,又能通过分子链末端活性基团的缩合反应,将 r-PET 的特性黏度从 0.65 dL/g 提高至 0.85 dL/g 以上,同时可将 r-PET 中的低聚物质量分数降低至 1.5% 以下。为改善 r-PET 的抗冲击强度和耐热性,Slezák 等<sup>[26]</sup>引入第三单体——乙烯-丁基-丙烯酸酯-甲基丙烯酸缩水甘油酯(PTW),通过破坏分子链规整性使 r-PET 的断裂伸长率由 3.0% 提高至 10.5%,制得的含 PTW(质量分数为 15%)的 r-PET 纤维,在 150 °C 下热定型 180 s 后,纤维缺口冲击强度相较于纯 r-PET 参考样提高了 5 倍,热阻则提高了 50 倍。总体而言,再生单体聚合工艺通过解聚—纯化—再聚合路径,实现 PET 分子链“再生”。通过固相聚合与第三单体改性,能够有效提升 r-PET 聚合物的性能,但解聚产物纯化过程复杂、成本较高,其大规模应用受限,开发高效、低成本的纯化技术是未来需突破的方向。

复合增强技术通过多尺度改性实现纤维功能的突破。添加碳纳米管(CNT)和石墨烯(GO)能够赋予纤维特定的功能。Kalaoglu-Altan 等<sup>[27]</sup>将 CNT 和 GO 加入纺丝液中进行共混静电纺丝,并对仅含 CNT 与含 CNT 和 GO 混合物的 PET 溶液及制备的导热聚合物纳米纤维进行对比分析,研究发现:纯 r-PET 纳米纤维的导热系数为 12.753 W/(m·K);加入质量分数分别为 0.25%、1.00% 和 5.00% 的 CNT,纳米纤维的导热系数分别提高至 34.437、38.713 和 96.957 W/(m·K);加入质量分数为 1.00% 的 CNT 和 GO 混合物、CNT 和 GO 的质量比分别为 1:1 和 1:3 时,制得的纳米纤维的导热系数分别提高至 62.230 W/(m·K) 和 47.620 W/(m·K)。此外,红外热成像数据显示,纳米材料的加入提升了 r-PET 纳米纤维的散热效率。Song 等<sup>[28]</sup>以碱溶性 PET(COPET)、碳酸钙(CaCO<sub>3</sub>)和常规 PET 为原料,再掺入 SiO<sub>2</sub> 或红外母粒,通过熔融纺丝法分别制备多孔 PET/气凝胶纤维与多孔 PET/红外纤维。研究结果显示,制备的多孔 PET/气凝胶纤维强度最

高达 2.38 cN/dtex,比表面积为 2.41 cm<sup>2</sup>/g、平均孔径为 8.91 nm。此外,隔热性能测试结果显示:多孔 PET/气凝胶纤维在室内或低光照环境下隔热效果最优;而多孔 PET/红外纤维在阳光照射条件下,温度上升幅度最大。Gao 等<sup>[29]</sup>将锌钛层状双氢氧化物(ZnTi-LDH)与脱碱木质素(DL)复合,制成 ZnTi-LDH/DL 纳米片,再经原位聚合工艺将其掺入 PET 基质中。研究表明:掺入 ZnTi-LDH/DL 纳米片后,PET 材料的原始晶体结构和二维形态得以保留,且制成的 PET 纳米复合材料热稳定性、力学性能及紫外线屏蔽性能均得以提升;当掺入的 ZnTi-LDH/DL 纳米片质量分数为 0.5% 时,PET 纳米复合材料的性能最佳,弹性模量为 436.8 MPa、断裂伸长率为 580%、对长波黑斑紫外线(UVA)辐射的阻挡效率超过 90%,在紫外线防护尤其是 UVA 阻挡方面颇具潜力。复合增强技术通过引入纳米材料赋予 r-PET 导热、隔热、抗紫外等多功能特性,拓展了 r-PET 纤维在高端领域的应用,但纳米材料的分散均匀性、界面相容性,以及复合加工工艺仍需优化,其中,绿色低碳复合工艺是未来研究的重点。

### 3 r-PET 纤维的增强改性与功能化改性

在可持续发展理念日益深化的背景下,r-PET 纤维的性能提升对 PET 高效回收利用至关重要。纤维增强改性与功能化改性作为优化 r-PET 纤维性能的关键路径,已成为研究热点。

增强改性方面,取向度调控与结晶结构设计是关键。通过优化拉伸工艺(采用多级牵伸系统与质量流量控制),r-PET 纤维沿分子链方向的取向度明显提高,当牵伸倍数从 2.35 增至 3.35 时,弹性模量可提高 37.5%,至 23.1 cN/dtex,断裂强度提升 20.7%,至 3.5 cN/dtex<sup>[30]</sup>。得益于多级牵伸系统的轴向拉伸力,r-PET 分子链沿纤维轴方向高度取向,平均取向角显著减小 83%,模量与强度提高<sup>[31]</sup>。结晶结构设计通过热处理工艺实现 r-PET 结晶度与晶粒尺寸的可控。Cot 等<sup>[32]</sup>研究表明,将二氧化钛(TiO<sub>2</sub>)纳米颗粒掺入 PET 切片后,在热处理调控结晶结构的过程中,纳米颗粒能通过

异相成核效应降低结晶活化能、提高结晶速率,同时使 r-PET 纤维的玻璃化转变温度提高,这有助于在热处理中更精准地控制结晶度与晶粒尺寸,最终提升纤维的尺寸稳定性与热力学性能。这种从分子取向到晶体结构的调控策略,能够为 r-PET 纤维突破原生材料的性能瓶颈提供切实可行的技术路径。

在功能化改性领域,研究者们通过创新工艺组合与复合体系构建,提升 r-PET 纤维环境适应性、安全性及高附加值应用潜力,并取得了显著进展。通过将“解聚—聚合—溶解”工艺与静电纺丝技术相结合,赋予材料良好的环境响应能力与服役稳定性。Ho 等<sup>[33]</sup>通过酯化反应与缩聚反应将 r-PET 转化为热塑性聚酯弹性体(TPEE, PBT-co-PTMEG),经三氟乙酸/二氯甲烷(TFA/DCM)二元溶剂体系溶解后,再通过静电纺丝技术制备取向纤维膜,能够显著提高纤维材料在不同环境介质中的形态稳定性。Woo 等<sup>[34]</sup>侧重于从单一的 PET 解聚反应中获取包括金属与连接体成分在内的金属有机框架材料,解聚过程使用由对甲苯磺酸和六水合三氯化铁组成的基于金属盐的低共熔溶剂(DES)作为溶剂和催化剂,构建多解聚产物的顺序回收工艺,证实了材料的可循环性。解聚过程中先分离 EG,再提取 TPA 及其衍生物,之后将解聚产物纯化,获得可直接用于再聚合的高纯度单体。此外,他们还就该方法对环境的影响开展了生命周期评估(LCA)。结果表明,DES 的有效催化作用及其对解聚反应副产物的最大化利用,使得该方法对环境的影响较小,且能够最大限度地发挥 PET 解聚产物的回收潜力。Chen 等<sup>[35]</sup>研究发现,提高喷丝头拉伸比和两级热定型拉伸比,能够在一定范围内促使纤维取向度和结晶度的提高。在两级热定型过程中,他们还通过降低松弛速率和热定型温度模拟非晶链的解取向,建立三维结构模型,阐释了聚集态结构与性能的关系,为通过工艺调控实现 r-PET 纤维耐高温改性提供了理论依据。Szabó 等<sup>[36]</sup>针对回收制备的 r-PET 泡沫存在熔融滴落的问题,通过复配无卤阻燃剂提升 r-PET 的阻燃性能。他们选用聚磷酸铵 Exolit AP 422(AP)、有机磷酸铝 Exolit OP 1240(OP)及含三聚氰胺聚磷酸盐 Budit 342(MPP)这 3 种阻燃

剂,通过膨胀-炭化协同机制构建复合阻燃体系。研究发现,OP 与 MPP 的质量比为 15:5 时,制备的试样表现出优异的阻燃性能,5 块试样均能在点火后 5 s 内自熄。进一步地,Bai 等<sup>[37]</sup>采用溶剂热法将废旧 PET 瓶催化转化为钴金属有机框架纳米棒(Co-MOF),并构建了兼具光热-光催化功能的 Co-MOF/碳纳米管(CNT)复合太阳能蒸发器,实现了废水净化与淡水生产的协同作业。研究结果显示,在 1 kW/m<sup>2</sup> 光照下,废水的蒸发速率达 2.25 kg/(m<sup>2</sup>·h),其中的四环素降解率为 93.1%,户外装置日淡水产量达 4.5 kg/m<sup>2</sup>。该方法不仅提高了 r-PET 纤维在复杂环境中服役性能的稳定性,而且通过绿色工艺与循环经济理念的结合,为废弃 PET 瓶的高值化利用开辟了新路径。

## 4 结束语

当前,废弃 PET 瓶回收制备 r-PET 纤维的研究已在预处理技术、合成工艺及功能改性等方面取得显著进展。具体而言:通过物理分选与化学解聚的协同作用,能够有效提升杂质去除效率;在纤维制备环节,可通过直接熔融纺丝或先将再生单体聚合再进行静电纺丝的方式实现;复合增强技术则能够赋予纤维导热、隔热等多种功能特性。然而,目前该领域的研究也面临诸多挑战,如:预处理阶段复杂组分的分离不够彻底、解聚产物的纯化成本高;合成工艺中 r-PET 特性黏度偏低,导致纺丝稳定性不足;功能化改性过程中纳米材料的分散均匀性较差,且与基体的界面相容性较差;规模化应用中低碳工艺与成本控制之间存在矛盾。鉴于此,未来研究可围绕下述几个方面展开:

(1) 聚焦跨领域协同回收预处理技术的开发,通过整合物理分选、化学催化与生物酶解技术,构建“智能识别—精准分离—协同净化”一体化处理体系;

(2) 构建“物理-化学”协同改性体系,提升再生纤维在极端环境下的应用性能;

(3) 探索智能响应型功能纤维(如温敏、光催化自清洁纤维)的制备路径,拓展其在高端纺织、医疗防护及新能源领域的应用。



期刊采编平台

中国知网下载

## 参考文献

- [ 1 ] MURINGAYIL JOSEPH T, AZAT S, AHMADI Z, et al. Polyethylene terephthalate (PET) recycling: a review [J]. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2024, 9: 100673.
- [ 2 ] BAROT A A, PANCHAL T M, PATEL A, et al. Polyester the workhorse of polymers: a review from synthesis to recycling[J]. *Archives of Applied Science Research*, 2019, 11(2): 1-19.
- [ 3 ] ZHANG P, CHEN L, GUO Y, et al. “Hetero-furan unit” drives a spontaneous leaf-vein bioinspired multiscale design for ultra-robust, lightweight, and recyclable polymers [J]. *Macromolecules*, 2023, 56(21): 8823-8833.
- [ 4 ] BILLON N. Strain induced crystallization of PET under biaxial conditions: from laboratory tests to injection stretch-blow molding [J]. *Polymer*, 2023, 277: 125953.
- [ 5 ] DATTILO S, GUGLIUZZO C, MIRABELLA E F, et al. Characterization of VOCs and additives in Italian PET bottles and studies on potential functional aldehydes scavengers [J]. *European Food Research and Technology*, 2022, 248(5): 1407-1420.
- [ 6 ] GUO Z Q, WU J, WANG J H. Chemical degradation and recycling of polyethylene terephthalate (PET): a review [J]. *RSC Sustainability*, 2025, 3(5): 2111-2133.
- [ 7 ] SHEN X N, HED Y, ANNFINSEN S, et al. Investigating polyethylene terephthalate beverage packaging: impact of recycled content on acetaldehyde, benzene, and other contaminants [J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2025, 33(5): 2362-2370.
- [ 8 ] SANTOMASI G, TODARO F, PETRELLA A, et al. Mechanical recycling of PET multi-layer post-consumer packaging: effects of impurity content[J]. *Recycling*, 2024, 9(5): 93.
- [ 9 ] PETOUSIS M, MICHAILEDIS N, SALTAS V, et al. Mechanical and electrical properties of polyethylene terephthalate glycol/antimony tin oxide nanocomposites in material extrusion 3D printing [J]. *Nanomaterials*, 2024, 14(9): 761.
- [ 10 ] BALOYI R B, GBADEYAN O J, SITHOLE B, et al. Recent advances in recycling technologies for waste textile fabrics: a review[J]. *Textile Research Journal*, 2024, 94(3/4): 508-529.
- [ 11 ] KHARGHANIAN M, PERCHICOT R, IRUSTA S, et al. Manufacture and rheological behavior of all recycled PET/PP microfibrillar blends[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2023, 63(6): 1702-1715.
- [ 12 ] KARL C W, ARSTAD B, SHAMSUYEVA M, et al. Upgrading and enhancement of recycled polyethylene terephthalate with chain extenders: in-depth material characterization[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2024, 63(28): 12277-12287.
- [ 13 ] CHOI J, LIM B, YOO Y. Advancing plastic waste classification and recycling efficiency: integrating image sensors and deep learning algorithms [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(18): 10224.
- [ 14 ] BEZERAJ E, DEBRIE S, ARRAEZ F J, et al. State-of-the-art of industrial PET mechanical recycling: technologies, impact of contamination and guidelines for decision-making[J]. *RSC Sustainability*, 2025, 3(5): 1996-2047.
- [ 15 ] MURUGAN A, VISWANATHAN V, RAVIKUMAR D, et al. Zinc catalysts: unlocking the sustainable transformation of post-consumer PET waste through chemical recycling [J]. *Asian Journal of Chemistry*, 2023, 35(10): 2301-2311.
- [ 16 ] ISLAM M S, ISLAM Z, HASAN R, et al. Acidic hydrolysis of recycled polyethylene terephthalate plastic for the production of its monomer terephthalic acid[J]. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 2023, 39(1): 12-25.
- [ 17 ] TEKE S, SAUD S, BHATTARAI R M, et al. Optimization of PET depolymerization for enhanced terephthalic acid recovery from commercial PET and post consumer PET-bottles via low-temperature alkaline hydrolysis[J]. *Chemosphere*, 2024, 365: 143391.
- [ 18 ] PEREIRA P, SLEAR W, TESTA A, et al. Fast hydrolysis for chemical recycling of polyethylene terephthalate (PET)[J]. *RSC Sustainability*, 2024, 2(5): 1508-1514.
- [ 19 ] HOFMANN M, SUNDERMEIER J, ALBERTI C, et al.

- Zinc ( II ) acetate catalyzed depolymerization of poly(ethylene terephthalate) [ J ]. *ChemistrySelect*, 2020, 5(32): 10010-10014.
- [20] GUO B Y, LOPEZ-LORENZO X, FANG Y, et al. Fast depolymerization of PET bottle mediated by microwave pre-treatment and an engineered PETase [ J ]. *ChemSusChem*, 2023, 16(18): e202300742.
- [21] ZHENG Q X, SUGA Y, SU Y, et al. Simultaneous material and chemical recycling of waste PET/PE multi-layer films under hydrothermal conditions [ J ]. *Angewandte Chemie (International Edition)*, 2024, 63(44): e202410888.
- [22] FAUZA A N, QALBINA F, NURDIN H, et al. The influence of processing temperature on the mechanical properties of recycled PET fibers [ J ]. *Teknomekanik*, 2023, 6(1): 21-28.
- [23] JAIN V, LI X, JACOB K I, et al. Effect of strain rate and temperature on the crystallization behavior of amorphous poly(ethylene terephthalate) fibers during superdrawing [ J ]. *The Journal of the Textile Institute*, 2025, 116(4): 560-574.
- [24] MUANGMEESRI S, BADDIGAM K R, NAVARE K, et al. Recycling of polyesters by organocatalyzed methanolysis depolymerization; environmental sustainability evaluated by life cycle assessment [ J ]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2024, 12(10): 4114-4120.
- [25] LIU X Q, KONG W, TAN S Q, et al. Preparation of recycled polyethylene terephthalate pellets, and bottles formed therefrom; US20240141133 [ P ]. 2024-05-02.
- [26] SLEZÁK E, RONKAY F, BOCZ K. Development of an engineering material with increased impact strength and heat resistance from recycled PET [ J ]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2023, 31(12): 5296-5308.
- [27] KALAOGLU-ALTAN O I, KARAGÜZEL KAYAOĞLU B, TRABZON L. Enhancing the material properties of recycled poly(ethylene terephthalate) nanofibers through carbon nanotube and carbon nanotube; graphene incorporation [ J ]. *Polymer Engineering & Science*, 2025, 65(3): 1070-1080.
- [28] SONG R C, ZHAO Y J, PAN R N, et al. Study on preparation of porous fiber *via* melt spinning and comparison of modification schemes [ J ]. *The Journal of the Textile Institute*, 2025, 116: 1-14.
- [29] GAO Y, GUI H G, XU J L, et al. ZnTi layered double hydroxide/dealkaline lignin 2D/2D nanosheets for ultraviolet shielding poly(ethylene terephthalate) nanocomposites [ J ]. *Reactive and Functional Polymers*, 2025, 212: 106249.
- [30] 高峰, 孙燕琳, 肖顺立, 等. 不同牵伸倍率下聚酯复合纤维的微观结构与性能 [ J ]. *纺织学报*, 2022, 43(8): 34-39.
- [31] EMBABI M, KWEON M S, CHEN Z L, et al. Tunable tensile properties of polypropylene and polyethylene terephthalate fibrillar blends through micro-/nanolayered extrusion technology [ J ]. *Polymers*, 2020, 12(11): 2585.
- [32] COT M, MIJAS G, PRIETO-FUENTES R, et al. The influence of titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) particle size and crystalline form on the microstructure and UV protection factor of polyester substrates [ J ]. *Polymers*, 2024, 16(4): 475.
- [33] HO J H, KUO K C, LO T Y, et al. Upcycling fabrics: valorization of recycled polyethylene terephthalate (rPET) plastic waste into thermoplastic polyester elastomers (TPEE) for fiber spinning [ J ]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2024, 6(1): 552-560.
- [34] WOO Y E, BAIK K, JEONG S, et al. A sustainable framework for advancing circular practices for polyethylene terephthalate textiles: optimized recycling of depolymerization byproducts and LCA validation [ J ]. *RSC Advances*, 2025, 15(10): 7354-7364.
- [35] CHEN S C, ZHANG K, PEI L C, et al. Effect of drawing and heat-setting process on aggregate structure of poly(ethylene terephthalate) industrial fiber in large-scale spinning production [ J ]. *Journal of Polymer Science*, 2024, 62(17): 3929-3946.
- [36] SZABÓ V A, JAKAB S K, KOVÁCS A, et al. Use of hybrid flame retardants in chemically foamed rPET blends [ J ]. *Crystals*, 2025, 15(1): 80.
- [37] BAI H Y, HE P P, HAO L, et al. Waste-treating-waste: upcycling discarded polyester into metal-organic framework nanorod for synergistic interfacial solar evaporation and sulfate-based advanced oxidation process [ J ]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 456: 140994.