聚对苯二甲酸乙二醇酯塑料基碳纳米材料的制备及应用研究进展

卢 勇，齐晶晶，徐 成，侯 侠，赵彦龙

（兰州石化职业技术大学，甘肃 兰州 730060）

摘 要：塑料因性能优异、成本低廉而被广泛应用，由此产生的资源消耗和环境污染问题日益严峻，塑料的资源化利用已成为重要议题。在各类塑料中，聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）作为一种高性能聚合物材料，凭借其优异的机械性能、化学稳定性和可加工性，已被广泛应用于包装、纺织、电子及医疗等领域。PET废料碳含量高，是制造碳纳米材料的理想原料，将其转化为碳纳米材料可拓宽回收利用路径。文章介绍利用PET废料制备石墨烯、活性炭以及碳纳米管等多种碳纳米材料的研究进展，重点阐述高温热解法、水热法和熔盐辅助法等将PET废料转化为碳材料的制备方法。研究结果为PET废料转化碳材料的研究与应用提供参考。

关键词：聚对苯二甲酸乙二醇酯；碳纳米材料；资源化利用；高温热解法；水热法；熔盐辅助法

中图分类号：TQ127.1+1；TQ323.41　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1005-3360（2026）08-0207-05

DOI：10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.036

Research Progress of Preparation and Application of Polyethylene Terephthalate Plastic-based Carbon Nanomaterials

LU Yong, QI Jingjing, XU Cheng, HOU Xia, ZHAO Yanlong

(Lanzhou Petrochemical University of Vocational Technology, Lanzhou 730060, China)

Abstract: Plastics are widely used because of their excellent performance and low cost, resulting in increasingly serious problems of resource consumption and environmental pollution. The resource utilization of plastics has become an important issue. Among all kinds of plastics, polyethylene terephthalate (PET), as a high-performance polymer material, has been widely used in packaging, textile, electronics, medical and other fields due to its excellent mechanical properties, chemical stability and processability. Waste PET plastic has high carbon content and is an ideal raw material for the manufacture of carbon nanomaterials. Converting it into carbon nanomaterials can broaden the recycling path. The paper introduces the research progress of various carbon nanomaterials, such as graphene, activated carbon, carbon nanotubes, etc., prepared from PET waste, and focuses on the preparation methods of converting PET waste into carbon materials, such as high temperature pyrolysis, hydrothermal method and molten salt assisted method. The research results provide a reference for the research and application of converting PET waste into carbon materials.

Keywords: PET; Carbon nanomaterials; Resource utilization; High temperature pyrolysis; Hydrothermal method; Molten salt assisted method

塑料的合成原料来自化石资源，加速了不可再生资源的消耗。同时，其固有稳定性使其在自然条件下难以降解，不断释放的微塑料对生物体构成重大威胁。塑料废料的资源利用已成为社会关注的重要问题。在各类塑料中，聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)是应用最广泛的聚酯塑料之一。我国PET产能占全球的60%以上，国内每年PET塑料废弃量达到约600万t。PET废料长期存在于环境中，不仅破坏环境，还影响人类和动物的健康[1-2]。PET废料的回收处置已成为科研人员关注的热点问题之一，研究人员正在探索回收或处理废塑料的技术来解决这一问题。

近年来，将塑料废料转化为碳纳米管、石墨烯、活性炭、碳纳米片、碳纤维和多孔碳等增值碳纳米材料的研究受到越来越多的关注[3-4]。这些材料在生物传感器、纳米医学、能量储存、环境修复等行业中具有应用前景[5]。

收稿日期Submitted date 2025-09-23；修回日期Revised date 2025-10-15；录用日期Accepted date 2025-11-12

基金项目：兰州石化职业技术大学团队项目（绿色化工及新材料创新团队）；甘肃省高等学校创新基金项目（2025B-319）

联系人，luyong19850627@163.com

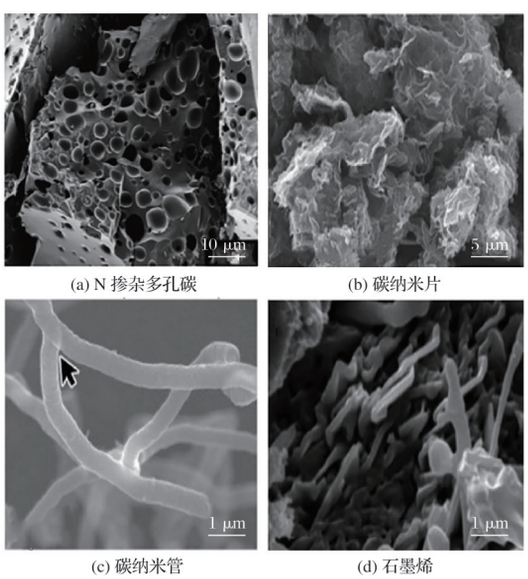
引用本文：卢勇，齐晶晶，徐成，等．聚对苯二甲酸乙二醇酯塑料基碳纳米材料的制备及应用研究进展[J]．塑料科技，2026，54(8)：207-211.

Citation：LU Y, QI J J, XU C, et al. Research progress of preparation and application of polyethylene terephthalate plastic-based carbon nanomaterials[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 207-211.

PET塑料的化学结构里包含乙烯与对苯二甲酸酯，碳含量较高，使其成为制造碳纳米材料的绝佳选择。将PET废料转化为碳纳米材料可拓宽废塑料回收路径，同时碳纳米材料在电子、储能、催化以及生物医学工程等众多领域均有广泛的应用[6-7]。本文详细介绍PET废料基碳纳米材料及其应用进展，重点阐述将PET废料转化为碳材料的最新制备方法，主要包括高温热解法、水热法和熔盐法，为研究人员开展PET废料转化为碳材料及相关应用研究提供支持。

1 PET废料基碳纳米材料及其应用进展

用PET废料可制成具有独特性能的碳材料，包括石墨烯、多孔碳、碳纳米管、碳纳米片和气凝胶等。图1为PET废料制备的纳米材料的形貌[8-11]。



(a) N掺杂多孔碳 (b) 碳纳米片

(c) 碳纳米管 (d) 石墨烯

图1 PET废料制备的纳米材料的形貌

Fig.1 Morphology of nano materials prepared by PET waste

1.1 多孔碳材料

多孔碳材料具有孔隙结构发达、比表面积大、化学稳定性强、耐酸碱腐蚀以及可循环再生等优点，可作为吸附材料应用于水体净化、空气净化及工业脱色等领域[12-13]。

碳化后的PET经活化剂活化，可得到具有高孔隙率和高比表面积的多孔碳材料。ADIBFAR等[14]报道，采用KOH、H_2SO_4、$ZnCl_2$和H_3PO_4等化学试剂进行活化，该方法成本低且易于获得PET基碳材料，该材料可用于吸附N_2、CO_2和CH_4气体。LIN等[15]在600~800 ℃下将废弃的PET瓶和活化剂KOH进行共热解，用盐酸浸泡、洗涤、干燥后得到的多孔碳作为吸附剂去除水溶液中的Cu^{2+}。结果表明，高度多孔的结构和丰富的含氧官能团增强了多孔碳对Cu^{2+}的吸附能力，该吸附过程为自发反应。800 ℃下所得的多孔碳表现出最佳性能，对Cu^{2+}的去除率达99.30%，最大吸附能力为5.85 mg/g。在多孔碳材料的耐用性测试中，前3个周期保持超过96.00%的效率，后续周期去除效率略有下降。ALABI-BABALOLA等[16]通过用热解法改变热解的时间和温度，将PET废料制备成活性炭，分别用KOH和H_2SO_4进行化学活化，该活性炭可用于吸附水溶液中的Mn^{2+}、Cr^{3+}和Co^{2+}。

将PET与磁性Fe_3O_4结合，可制备带磁性的吸附材料。CHAN等[17]以PET、二乙烯三胺和三乙烯四胺为原料，通过共沉淀法负载Fe_3O_4纳米颗粒，制得PET废料基磁性吸附材料。Cr吸附结果表明，胺基的存在使材料具有显著的Cr^{3+}吸附能力，吸附容量约780.00 mg/g。此外，该微米级颗粒状吸附剂凭借其磁性功能，可快速达到吸附平衡，在5 min内即可实现约70%的平衡吸附量。CHAN等[18]将废PET塑料与膨润土复合，同时用Fe_3O_4磁性纳米粒子浸渍塑料基质，制得PET-膨润土复合吸附剂，用于去除水中的Cs^+。结果表明，5 min内吸附量达到平衡吸附能力的60.00%，Cs^+的最大吸附容量为26.80 mg/g。此外，利用PET废瓶制备铬基金属有机框架，可应用于水体中亚甲基蓝的去除[19]。

PET废料还可用于能源存储、催化剂载体等领域，为能源转换提供成本效益高和生态友好的解决方案。UBAIDULLAH等[20]用PET废料制备ZnO@N掺杂的介孔碳纳米复合材料，将其用于电催化促进H_2O分解，进而制H_2。结果表明，所得材料具有较多的活性位点和电荷重定位，在H_2和O_2的析出反应中表现出更强的电催化性能，超过了纯ZnO纳米结构。等温线研究表明，该材料具有介孔结构(2.4~2.5 nm)，比表面积为939 m^2/g，是纯ZnO纳米颗粒的75倍。SONG等[21]利用PET废料和电镀污泥(主要含有Ni、Cu、Cr和Zn)制备镍基金属有机框架(MOF)纳米晶体材料，作为减少温室气体排放的特殊催化剂。该材料在CO_2光催化还原反应中表现出优异的催化活性，420 nm处的量子产率为1.36%，优于相似反应中的大多数催化剂。NABGAN等[22]将PET废料溶解于苯酚中，在Ni-Co/CeO_2纳米催化剂催化下，利用蒸气重整和裂化反应生产氢气和液体燃料。气相色谱-质谱分析表明，制得的$C_{12}H_{10}$、$C_{12}H_8O$和C_8H_8O组分为塑料废料回收提供解决方案。水热处理提高催化剂的活性和稳定性，在700 ℃的温度下，苯酚转化率为83.80%，H_2收率为76.00%。

从PET废料制得的多孔碳材料经活化可形成孔隙网络，可将其应用于吸附、能源存储和催化剂载体等领域。

1.2 碳纳米片

碳纳米片是由数层石墨烯堆叠而成的二维碳材料，其厚度为纳米级，平面尺寸可达微米级。碳纳米片具有高比表面积和优异的电学性能和热学性能，在能源存储、复合材料、生物医学及环境净化等领域应用广泛。

WEN等[23]通过催化碳化和KOH活化的协同过程将PET废瓶转化为多孔碳纳米片。所得纳米片为层次多孔结构，比表面积高达2 236 m^2/g，孔体积达到3.0 cm^3/g，表现出优异的电容性能，可作为超级电容器的理想电极材料。

SAHRAGARD等[24]在800 ℃、氮气氛围下，热解PET废瓶，制备碳纳米颗粒，将其与膨润土复合得到碳-膨润土

纳米复合材料，用于Cr^{3+}的吸附研究。结果表明，Cr^{3+}去除的最大效率为46.17%，吸附能力为16.5 mg/L。

1.3 碳纳米管

碳纳米管是由碳原子构成的纳米级管状结构，具有高长径比和优异的力学、电学和热学性能，在电子领域、复合材料和能源领域有较好的应用前景。

KIM 等[25]通过喷涂将氧化石墨烯/单壁碳纳米管(SWCNTs)复合材料沉积在PET基板上，制成柔性超级电容器。未弯曲时，PET超级电容器的最高电容为42.2 F/g。然而，在弯曲180°条件下，经500次循环后，由于还原氧化石墨烯/SWCNTs复合膜的表面电阻升高，电容略有下降至34.9 F/g。在弯曲30°条件下，经3 000次充放电循环后，电容仅下降约25%，显示出较高的耐用性。此外，电解液在固化过程中起到黏结剂的作用，可提高器件在不同弯曲条件下的机械完整性和稳定性。DU 等[26]通过喷雾涂层技术制备SWCNTs和酸处理的SWCNTs PET电极。与原始的SWCNTs电极相比，酸处理SWCNTs电极显示出增强的电化学性能。在1 000次恒定电流充放电循环后，其含量略微下降至63.0 F/g，弯曲到30°。折叠500次、1 000次循环后的电容值仍保持在63.0 F/g，显示出强大的灵活性和高稳定性。结果表明，酸处理SWCNTs薄膜在可穿戴和柔性器件方面具有巨大的应用潜力。

1.4 石墨烯

石墨烯是单层碳原子排列成六角形晶格的碳材料，具有优异的电学、热学和力学性能。通过化学剥离从PET废料中提取的石墨烯片可用于超级电容器和净化等领域。

FOULADI 等[27]以PET废瓶和木屑为原料，通过两步流态化共热解法，先在惰性气体氛围下得到石墨，再采用微波辅助液相剥离法制备石墨烯纳米片。该材料可用作吸附剂，从水溶液中去除有机染料罗丹明B和孔雀石绿。

1.5 其他碳材料

PET废料制得的其他碳材料，如碳纤维[28]、碳气凝胶[29-30]、碳点[31]等，可在航空航天、汽车工业、储能装置、催化领域、超级电容器以及传感技术中得到应用[32-36]。

ZHOU 等[37]将PET废瓶转化为疏水纤维碳纳米材料，为制造具有显著光学性能和导电性的碳基纳米材料提供一个多功能平台，利用该碳纳米材料制备耐用的应变传感器，通过拉伸应变试验评价聚二甲基硅氧烷/纤维碳纳米材料传感器的稳定性和耐久性。该传感器封装有纤维碳纳米材料聚集体并对应变周期产生一致的响应，可在近40 min内保持灵敏度。低频应变下的传感稳定性优于高频应变下的传感稳定性，表明纤维碳纳米材料聚集体在机械传感器技术中具有潜在的应用价值。HU 等[31]通过空气氧化和H_2O_2辅助水热处理将PET废料制成具有独特发光特性的荧光碳点，这些碳点通过独特的猝灭效应表现出对Fe^{3+}的高度选择性检测能力，这对创建响应性碳点/Fe^{3+}传感器至关重要。对电子转移过程的详细研究支持提出的“开-关-开”传感机制。制备的碳点富含氧基团，可用于在真实水样和人类尿液中准确检测出Fe^{3+}和焦磷酸盐阴离子。

2 PET废料基碳纳米材料的制备方法

2.1 高温热解法

采用无溶剂技术在高温、加压、惰性气体保护、催化剂等限制条件下诱导热解，可将聚合物转化为碳。

EL ESSAWY 等[38]在800 ℃的密封环境中利用自生压力对PET废料热解100 min，获得纳米结构碳材料。在PET废弃物与催化剂的热解过程中，良好的密封性至关重要，可确保反应物与催化剂的充分接触，从而促进碳纳米结构的生长。SALAMA 等[39]采用催化热解法，以PET废料和聚丙烯(PP)废瓶、饮料瓶和酸奶杯为原料制备比表面积为54.872 m^2/g的碳纳米管、比表面积为54.807 m^2/g的弹球和比表面积为52.325 m^2/g的石墨烯材料，该材料具有较高的价值和稳定的比表面积。同样，KOGOLEV 等[40]通过激光辅助燃烧将废弃PET升级为纳米材料，得到的废PET基石墨烯材料具有较高的机械稳定性，表面电导率为10.4 Ω/m^2。

高温热解法反应过程简单，无须外加压力设备和化学品，能耗低。但是，碳化过程难以精确控制，高温热解可能导致材料结构不均匀。

2.2 水热法

水热法因操作简单、成本低廉、易于规模化等优点，已成为以PET废料为原料合成纳米材料的主要途径。

EL ESSAWY 等[11]采用水热法对PET废瓶进行热分解，制备石墨烯。将使用过的PET瓶与水混合，置于密封的50 mL不锈钢反应器中，以8 ℃/min的速度加热至800 ℃，保温1 h。采用此方法获得的石墨烯有助于环境的可持续性，可规模化生产，适用于多种应用领域。

在高温高压条件下将PET废料水解，可生成对苯二甲酸，进而转化为具有独特纳米结构、性能可调的MOFs[41]。

AL-ENIZI 等[42]利用PET衍生的苯-1,4-二羧酸，通过一锅水热法合成浅绿色的Ni-MOF晶体，在氮气氛围中进一步碳化，得到NiO_x@氮掺杂碳。该材料作为一种有前景的吸附剂，可在多种水处理场景中高效去除染料，能够为水污染治理提供可持续的解决方案。

水热法在纳米材料合成方面具有显著优势，制备出的产物均匀性好，纯度高，形态丰富。但该方法也存在不足，比如在高温高压的环境下进行反应，反应过程难以实时调控，对设备的要求较为严苛，同时还存在一定的安全隐患。

2.3 熔盐辅助法

熔盐是熔点高于200 ℃、加热至一定温度后熔化成液态的盐类混合物，包括硅酸盐、卤化物、硝酸盐、磷酸盐和碳酸盐。当熔融成液态时，熔盐的纯离子性质有助于在颗粒中迅速分散热量，促进催化转化[43]。

WEI 等[44]采用NaCl熔盐处理PET废瓶，将其转化为碳材料。将PET片与100 g的NaCl和1 g的金属氧化物前

体(Fe_2O_3+NiO)混合，在Al_2O_3坩埚中加热至900 ℃，加热1 h，然后用去离子水处理得到纳米结构的核壳复合材料。该材料可用作高性能吸附剂，从水溶液中去除晶体紫染料、甲基橙和苏丹明B。KAMALI等[45]使用KCl、$MgCl_2$、$ZnCl_2$、NaCl、KF和NaF等熔盐，在空气中加热至1 300 ℃条件下对PET的结构和形态演变进行研究。PET废料被转化为具有不同特征的碳材料，包括石墨烯状纳米片和多孔纳米结构。这些材料具有不同的电导率，具体取决于所使用的熔盐的类型。研究表明，熔化和蒸发点以及盐的阳离子大小对碳产物的形态和结晶水平产生重大影响，PET衍生碳的特征可通过调节碳产物的形态和结晶水平来体现。以NaF、KF和NaCl为介质制备的碳材料的结晶度和石墨化度均显著高于以$ZnCl_2$、$MgCl_2$和KCl为介质制备的碳材料。

熔盐可营造液态环境，大幅促进反应物分子扩散，显著加快化学反应进程。精准调控熔盐体系参数能够有效精细控制碳纳米材料的形貌与尺寸，合成高结晶度、均匀分散的优质材料。熔盐可回收循环利用，能够降低制备成本。但是熔盐法通常需要高温反应，增加能耗与成本。高温下熔盐腐蚀性强，设备需要特殊材质，进一步提高成本。反应后熔盐可能有残留，影响材料纯度和性能，需要后续处理，增加制备复杂性与成本。

2.4 其他方法

采用超声辅助法[46]和电弧放电法[10]可以将PET废料转化为碳纳米材料。这些制造技术有助于减少PET废料，生产具有定制性能的碳材料，增强其在不同领域的适用性。ALHOKBANY等[47]采用一种智能方法合成具有优异成本效益的N掺杂$NiCo_2O_4$碳复合材料，该方法通过双金属Ni/Co-MOF将废弃PET重新利用，用于储能应用。也有研究人员通过溶剂热辅助制备以$Zn(NO_3)_2$•$6H_2O$和废弃PET塑料衍生的1,4-苯二甲酸为前驱体，将其与二甲酰胺和三乙胺混合，制备ZnO@氮掺杂的介孔碳纳米复合材料[48]。

3 结论

废塑料被广泛应用的同时，由此造成的环境污染问题日益严峻。将PET废料回收并制备成碳纳米材料，所得材料凭借其特殊性能在吸附、能量转换和光催化等领域展现出良好的应用前景。这些材料通过碳捕获与储存功能有效减少温室气体排放，提升资源利用效率。将PET废料转化为高价值碳材料，为循环经济模式提供实践范例。尽管PET废料的升级改造与应用研究已取得显著进展，但仍面临诸多挑战。当前研究必须重点突破转化效率提升、产品性能优化及材料稳定性保障等关键技术瓶颈，以实现环境保护目标。

参考文献

[1] KYE H, KIM J, JU S, et al. Microplastics in water systems: A review of their impacts on the environment and their potential hazards[J]. Heliyon, 2023, 9(3): e14359.

[2] KIBRIA M G, MASUK N I, SAFAYET R, et al. Plastic waste: Challenges and opportunities to mitigate pollution and effective management[J]. International Journal of Environmental Research, 2023, 17(1): 20.

[3] CHEN J L, WU J, SHERRELL P C, et al. How to build a microplastics-free environment: Strategies for microplastics degradation and plastics recycling[J]. Advanced Science, 2022, 9(6): 2103764.

[4] CHI L, OMAR SHAIKH M. Upcycling plastic waste into valuable carbon nanomaterials[J]. ChemNanoMat, 2024, 10(11): e202400409.

[5] SELVARAJ S, CHAUHAN A, VERMA R, et al. Multifunctional biomedical applications of MXene-based hydrogels: A review[J]. Inorganic Chemistry Communications, 2024, 164: 112457.

[6] ZHANG H Y, YANG K, TAO Y J, et al. Biomass directional pyrolysis based on element economy to produce high-quality fuels, chemicals, carbon materials: A review[J]. Biotechnology Advances, 2023, 69: 108262.

[7] GUPTA B, MALVIYA R, SRIDHAR S B, et al. Polyethylene terephthalate derived nanostructured plastic material for water treatment: Trends and advancement[J]. Next Materials, 2025, 8: 100599.

[8] SONG C Y, ZHANG B Y, HAO L, et al. Converting poly(ethylene terephthalate) waste into N-doped porous carbon as CO_2 adsorbent and solar steam generator[J]. Green Energy & Environment, 2022, 7(3): 411-422.

[9] WEN Y L, KIERZEK K, CHEN X C, et al. Mass production of hierarchically porous carbon nanosheets by carbonizing "real-world" mixed waste plastics toward excellent-performance supercapacitors[J]. Waste Management, 2019, 87: 691-700.

[10] JOSEPH BERKMANS A, JAGANNATHAM M, PRIYANKA S, et al. Synthesis of branched, nano channeled, ultrafine and nano carbon tubes from PET wastes using the arc discharge method[J]. Waste Management, 2014, 34(11): 2139-2145.

[11] EL ESSAWY N A, ALI S M, FARAG H A, et al. Green synthesis of graphene from recycled PET bottle wastes for use in the adsorption of dyes in aqueous solution[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 145: 57-68.

[12] PARK G, PHULE A D, ELKAEE S, et al. Conversion of PET bottles into carbonaceous adsorbents for Pb(II) removal from aqueous solutions via KOH activation[J]. Journal of Water Process Engineering, 2024, 66: 106092.

[13] JANI Y. Adsorption: A cost-effective wastewater treatment technology for removal of conventional and emerging organic contaminants[J]. Springer, Cham, 2022, 17-33.

[14] ADIBFAR M, KAGHAZCHI T, ASASIAN N, et al. Conversion of poly (ethylene terephthalate) waste into activated carbon: Chemical activation and characterization[J]. Chemical Engineering & Technology, 2014, 37(6): 979-986.

[15] LIN J Y, SHI J R, LIU F C, et al. Sustainable conversion of waste PET into porous activated carbon for efficient Cu^{2+} elimination from aqueous solution[J]. ACS Omega, 2025, 10(15): 14994-15008.

[16] ALABI-BABALOLA O, ARANSIOLA E, ASUQUO E, et al. Production of highly efficient activated carbons for wastewater treatment from post-consumer PET plastic bottle waste[J]. ChemPlusChem, 2024, 89(5): e202300484.

[17] CHAN K, ZINCHENKO A. Conversion of waste bottle PET to magnetic microparticles adsorbent for dye-simulated wastewater treatment[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, 10 (3): 108055.

[18] CHAN K, ZINCHENKO A. Functional upcycling of waste PET plastic to the hybrid magnetic microparticles adsorbent for cesium removal[J]. Chemosphere, 2024, 354: 141725.

[19] CRUZ M G ADA, ONWUMERE J N, CHEN J H, et al. Solvent-free synthesis of photoluminescent carbon nanoparticles from lignin-derived monomers as feedstock[J]. Green Chemistry Letters and Reviews, 2023, 16: 2196031.

[20] UBAIDULLAH M, AL-ENIZI A M, SHAIKH S, et al. Waste PET plastic derived ZnO@NMC nanocomposite via MOF-5 construction for hydrogen and oxygen evolution reactions[J]. Journal of King Saud University-Science, 2020, 32(4): 2397-2405.

[21] SONG K N, QIU X Q, HAN B, et al. Efficient upcycling electroplating sludge and waste PET into Ni-MOF nanocrystals for the effective photoreduction of CO_2[J]. Environmental Science: Nano, 2021, 8(2): 390-398.

[22] NABGAN W, NABGAN B, TUAN ABDULLAH T A, et al. Production of hydrogen and valuable fuels from polyethylene terephthalate waste dissolved in phenol reforming and cracking reactions via Ni-Co/CeO_2 nano-catalyst[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2021, 154: 105018.

[23] WEN Y L, KIERZEK K, MIN J K, et al. Porous carbon nanosheet with high surface area derived from waste poly(ethylene terephthalate) for supercapacitor applications[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137(5): 48338.

[24] SAHRAGARD S, NAGHIZADEH A, MORTAVAZI S. Facile conversion and eco-friendly carbon-bentonite nano sheets synthesis from waste PET bottles and application in Cr^{6+} removal from aqueous solution[J]. Environmental Technology, 2025, 46(24): 4915-4931.

[25] KIM B C, JEONG H T, RAJ C J, et al. Electrochemical performance of flexible poly(ethylene terephthalate) (PET) supercapacitor based on reduced graphene oxide (rGO)/single-wall carbon nanotubes (SWNTs) [J]. Synthetic Metals, 2015, 207: 116-121.

[26] DU J F, KIM Y R, JEONG H T. Flexible polyethylene terephthalate (PET) electrodes based on single-walled carbon nanotubes (SWCNTs) for supercapacitor application[J]. Composite Interfaces, 2017, 24(1): 99-109.

[27] FOULADI M, KAVOUSI HEIDARI M, TAVAKOLI O, et al. Green approach for fabrication of high-quality graphene nanosheet from the waste of PET bottle plastic and wood sawdust by co-pyrolysis technology for dye adsorption from aqueous solution[J]. Chemical Papers, 2024, 78(11): 6371-6393.

[28] 刘丹, 范云洁, 王慧敏, 等. 基于废弃PET的高值化功能性多孔碳材料及其应用进展[J]. 化工进展, 2023, 42(2): 969-984.

[29] LE D K, LEUNG R I H, ER A S R, et al. Applications of functionalized polyethylene terephthalate aerogels from plastic bottle waste[J]. Waste Management, 2019, 100: 296-305.

[30] ROY S, MAJI P K, GOH K L. Sustainable design of flexible 3D aerogel from waste PET bottle for wastewater treatment to energy harvesting device[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 413: 127409.

[31] HU Y P, GAO Z J, YANG J, et al. Environmentally benign conversion of waste polyethylene terephthalate to fluorescent carbon dots for "on-off-on" sensing of ferric and pyrophosphate ions[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 538: 481-488.

[32] PAWAR A A, KIM A, KIM H. Synthesis and performance evaluation of plastic waste aerogel as sustainable and reusable oil absorbent[J]. Environmental Pollution, 2021, 288: 117717.

[33] ISTIROKHATUN T, SIAHAAN S E, GONZALES R R, et al. An overview of the utilization of PET plastic bottle waste for membrane fabrication[J]. Jurnal Presipitasi, 2025, 20(1): 15-37.

[34] LIU J M, OUYANG X E, ZHANG Y T, et al. Research progress on chemical depolymerization and upcycling of PET waste plastics[J]. Chinese Science Bulletin, 2025, 70(18): 2878-2891.

[35] NGUYEN L T, BAI T L, ZHAO B L, et al. Upcycling polyethylene terephthalate (PET) plastic waste into multifunctional aerogel-inspired materials[J]. Construction and Building Materials, 2025, 493: 143161.

[36] SELVAKUMAR D, SONU K P, RAMADOSS G, et al. Heterostructures of polyaniline and Ce-ZnO nanomaterial coated flexible PET thin films for LPG gas sensing at standard environment[J]. Chemosphere, 2023, 314: 137492.

[37] ZHOU X, DENG J R, YANG R, et al. Facile preparation and characterization of fibrous carbon nanomaterial from waste polyethylene terephthalate[J]. Waste Management, 2020, 107: 172-181.

[38] EL ESSAWY N A, KONSOWA A H, ELNOUBY M, et al. A novel one-step synthesis for carbon-based nanomaterials from polyethylene terephthalate (PET) bottles waste[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2017, 67(3): 358-370.

[39] SALAMA E, MOHAMED S, SAMY M, et al. Catalytic fabrication of graphene, carbon spheres, and carbon nanotubes from plastic waste[J]. RSC Advances, 2024, 14(3): 1977-1983.

[40] KOGOLEV D, SEMYONOV O, METALNIKOVA N, et al. Waste PET upcycling to conductive carbon-based composite through laser-assisted carbonization of UiO-66[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2023, 11 (3): 1108-1115.

[41] CRUZ M G ADA, ONWUMERE J N, CHEN J H, et al. Solvent-free synthesis of photoluminescent carbon nanoparticles from lignin-derived monomers as feedstock[J]. Green Chemistry Letters and Reviews, 2023, 16(1): 2196031.

[42] AL-ENIZI A M, UBAIDULLAH M, AHMED J, et al. Synthesis of NiO_x@NPC composite for high-performance supercapacitor via waste PET plastic-derived Ni-MOF[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 183: 107655.

[43] SHEN Y F, YUAN X Z. Research advancement in molten salt-mediated thermochemical upcycling of biomass waste[J]. Green Chemistry, 2023, 25(6): 2087-2108.

[44] WEI S H, KAMALI A R. Green conversion of waste PET into magnetic $Ni_{0.4}Fe_{2.6}O_4$/(Fe, Ni)@carbon nanostructure for adsorption and separation of dyes from aqueous media[J]. Chemosphere, 2023, 342: 140172.

[45] KAMALI A R, YANG J G. Effect of molten salts on the structure, morphology and electrical conductivity of PET-derived carbon nanostructures[J]. Polymer Degradation and Stability, 2020, 177: 109184.

[46] WEI S H, KAMALI A R. Dual-step air-thermal treatment for facile conversion of PET into porous carbon particles with enhanced dye adsorption performance[J]. Diamond and Related Materials, 2020, 107: 107914.

[47] ALHOKBANY N, AHMED J, UBAIDULLAH M, et al. Cost-effective synthesis of $NiCo_2O_4$@nitrogen-doped carbon nanocomposite using waste PET plastics for high-performance supercapacitor[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2020, 31(19): 16701-16707.

[48] MALLAKPOUR S, BEHRANVAND V. Recycled PET/MWCNT-ZnO quantum dot nanocomposites: Adsorption of Cd(II) ion, morphology, thermal and electrical conductivity properties[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 313: 873-881.