

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.09.026

聚苯胺纳米复合材料的制备及光电催化研究进展

贾仕奎, 闫宗莹, 朱艳, 丁镠, 付蕾, 张飞燕, 贺燕

(陕西理工大学材料科学与工程学院, 矿渣综合利用环保技术国家地方联合工程实验室, 陕西汉中 723000)

摘要: 综述了几种典型的 PANI 纳米复合材料的制备方法, 包括原位氧化法、静电自组装法、水热合成法、溶液共混法等。介绍了其在紫外光催化、可见光催化和电催化方面的应用, 并对 PANI 纳米复合材料的发展方向进行了展望。利用苯胺单体与功能性粒子进行复配制备 PANI 纳米复合材料是较为常见的途径, 静电自组装法具有好的发展前景, PANI 纳米复合材料在光电催化的应用亟需提高其催化效率和重复使用活性。

关键词: 聚苯胺; 纳米复合材料; 光催化; 电催化

中图分类号: TQ320 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)09-0150-05

Research Progress in Preparation and Photoelectrocatalysis of Polyaniline Nanocomposites

Jia Shikui, Yan Zongying, Zhu Yan, Ding Liu, Fu Lei, Zhang Feiyan, He Yan

(School of Materials Science and Engineering, National & Local Joint Engineering Laboratory for Slag Comprehensive Utilization and Environmental Technology, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China)

Abstract : Several typical preparation methods for polyaniline (PANI) nanocomposites were reviewed, including in situ oxidation method, electrostatic self-assembly method, hydrothermal synthesis method, solution blending method, etc. The applications of ultraviolet photocatalysis, visible photocatalysis and electrocatalysis of the PANI nanocomposites were introduced, and its development direction was prospected. Compounding of aniline monomers and functional particles is a relatively common strategy to prepare PANI-based nanocomposites, while the electrostatic self-assembly method has good development prospects, and PANI nanocomposites in photoelectrocatalysis application urgently needs to improve their catalytic efficiency and reuse activity.

Keywords : polyaniline ; nanocomposite ; photocatalysis ; electrocatalysis

随着工业的发展,越来越多的难降解物质进入到水环境中,对地球的污染愈发严重,也给人们的生活生产带来了严重的影响。传统的废水处理技术常常采用重力分离与过滤、吸附分离和酸碱中和等,其均存在一定的局限性,废水处理的持久性不够,或对新出现的污染物没有显著作用^[1-4]。因此,人们不断地寻找新的污染物处理技术,而光催化技术由于具有避免过多使用化学试剂和通过利用太阳能减少能源消耗的潜能,被广泛研究^[5-6]。近年来,随着半导体光催化技术的发展,利用其进行光催化降解废水和空气中的有机污染物,显示出较好的发展潜力^[7-11]。

聚苯胺 (PANI) 是一种典型的导电共轭聚合物,具有结构可控、价格相对较低、可见光响应性强、环境稳定性及可加工性能良好等特点,常与无机光催化剂复合增强对其可见光

区域的吸收,已应用在光催化、太阳能传感器等方面^[12-13]。研究发现, PANI 的 π 共轭结构和类石墨相氮化碳 ($g-C_3N_4$) 相同。因此,可以利用 $\pi-\pi$ 的相互作用将 PANI 自组装到凹凸棒土 (ATP)/ $g-C_3N_4$ 上,使其拥有较高的光催化活性^[14]。由于纳米粒子表面具有特殊的物理化学性质,较高的比表面积,因而可以应用于有机合成、光化学反应和燃料电池等方面^[15-16]。与此同时,纳米粒子与 PANI 复合后在光电磁性能方面具有强协同效应,引起了研究者的重视,如 PANI/ Fe_2O_3 磁性微粒、PANI/ 碳纳米管 (CNT)、PANI/ 氧化物等^[17-18]。针对纳米粒子改性 PANI 功能复合材料在可见光区域的反应,可通过增加电荷分离并抑制电子空穴对 (e^-/h^+) 重组,促使太阳能得到更有效的利用并提高光催化性能。研究发现,在 N 型半导体材料中,氧化锡 (SnO_2) 是一种非常重要的材

基金项目: 陕西理工大学校级科研项目 (SLG2115), 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2021JM-486)

通信作者: 贾仕奎, 博士, 副教授, 主要从事聚合物基复合材料先进成型、微观形态及性能研究

收稿日期: 2022-07-01

引用格式: 贾仕奎, 闫宗莹, 朱艳, 等. 聚苯胺纳米复合材料的制备及光电催化研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(9):150-154, 159.

Jia Shikui, Yan Zongying, Zhu Yan, et al. Research progress in preparation and photoelectrocatalysis of polyaniline nanocomposites[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(9):150-154, 159.

料,如 SnO_2 与 PANI 复合后,二者的协同效应扩展了可见光区的光学响应,该材料可以应用在电极、导电、传感、催化和太阳能等方面^[13,19]。此外,纳米二氧化钛(TiO_2)高的表面能,可以使水发生连续的氧化还原反应,且具有良好的光催化性能和化学稳定性能,将 TiO_2 与 PANI 复合后,可以获得一种无毒且价格较低的光催化复合材料,已成功应用在污水净化领域^[20]。

PANI 和无机功能性材料复合,可以利用两种或多种材料不同的性能进行互补,为传统的单组分材料的多功能化、高性能化和智能化开发提供有效的途径。笔者主要综述了几种 PANI 纳米复合材料的典型制备方法及其在光催化、电催化等方面的应用,探讨了 PANI 纳米复合材料未来的发展方向。

1 PANI 纳米复合材料的制备

1.1 原位氧化法

原位氧化方法是一种较易操作的制备 PANI 复合材料的方法。将无机纳米粒子均匀分散在溶液中,然后加入苯胺单体及氧化剂,可制备成 PANI/无机纳米粒子复合材料。徐惠等^[21]用原位化学氧化聚合法制备出 PANI/ SnO_2 复合材料。将自制的 SnO_2 纳米粒子超声分散在 HCl 溶液中,然后加入苯胺并混合均匀,再加入过硫酸铵 (APS)/HCl,混合使溶液均匀。在室温下搅拌 24 h,抽滤、洗涤至中性,真空条件干燥后得到目标产物。

Teja 等^[22]在水性介质中利用 PANI/ TiO_2 复合材料,在可见光介导下将 CO_2 光催化还原为甲酸、甲醛和甲醇。为了获得高分散的 TiO_2 改性 PANI 催化剂,先称取适量 TiO_2 纳米颗粒加入到含有 1 mL 苯胺单体和 90 mL 的 1 mol/L HCl 的混合物中,超声处理 45 min 得到 TiO_2 -苯胺的均匀悬浮液。接着,将 100 mL 含有 2.5 g 过氧化物二硫酸铵的 1 mol/L HCl 溶液逐滴加入到 HCl-苯胺- TiO_2 混合物中,机械搅拌 4 h 后,溶液颜色从浑浊的白色变为蓝绿色,然后过滤,干燥,最终原位合成了不同含量的 PANI/ TiO_2 纳米复合材料。Wang 等^[23]研制出光催化还原硝酸盐的 PANI 复合催化材料,通过原位将磷钨酸修饰到 PANI 链上,并包裹在中空碳表面,实现了在无光照和光照条件下高效还原硝酸盐。原位改性的 PANI 链和 Z 型异质结使中空碳表面形成界面电子传输网络,不仅缩短了电子迁移距离,而且促进了载流子的分离和转移。丁艳等^[24]用原位合成法制备了不同组成比的 PANI/铁酸锌/二氧化硅 (PANI/ $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{SiO}_2$) 复合材料。将苯胺单体和 $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{SiO}_2$ 复合物按照一定比例加到盛有 0.1 mol/L HCl 溶液的三口烧瓶中,搅拌 30 min,然后将过硫酸铵 $[(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8]$ 溶解在 HCl 浓度为 0.1 mol/L 的

溶液中,用滴液漏斗缓慢滴加到三口烧瓶中(约 15 min 滴完),在 0℃下搅拌 12 h 后,抽滤,再用去离子水和酒精分别洗涤至滤液无色,在 80℃的真空干燥箱中干燥,得到 PANI/ $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{SiO}_2$ 复合物。Sharma 等^[25]为了制备 PANI/多壁碳纳米管(MWCNTs)复合材料,将樟脑磺酸(CSA)和 PANI 在氯仿溶剂中连续搅拌 48~72 h,再将 MWCNTs 溶于氯仿中超声处理 2 h,接着将这些 MWCNTs 以不同的比例分散在预先准备好的 CSA 和 PANI 的溶液中,超声处理 30 min,最后过滤并分别用蒸馏水、丙酮、乙醇和甲醇清洗,干燥,得到 PANI/MWCNTs 纳米复合材料。Shetty 等^[26]利用原位氧化还原法制备了氧化铈(CeO_2)改性 PANI 纳米复合材料。将 1 g 纳米铈颗粒放入装有 70 mL 2 mol/LHCl 的烧杯中,搅拌 10 min 得到均匀混合物,然后再加入 5 mL 苯胺,搅拌 12 h。同时,将 5 g $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 溶解在 20 mL 蒸馏水中,将其加入到上述溶液中,均匀搅拌约 20 min,接着在超声作用下搅拌 12 h。在室温下,用 HCl 过滤该溶液,用去离子水清洗并干燥。最后得到绿色 PANI/ CeO_2 复合材料粉末。

1.2 静电自组装法

静电自组装法的动力来自正负电荷间的静电作用,通过带相反电荷的单元交替沉积逐层组装多层膜,是一种构筑有机/无机多层膜的有效方法^[27-29]。Zhou 等^[30]利用静电自组装方法,将 PANI 纳米粒子掺入 TiO_2 纳米片层间,制备了三明治结构的 PANI/ TiO_2 复合物。与传统的单体插层方法相比,这种自组装三明治结构的 PANI/ TiO_2 提高了光催化性能,且层高扩大约 11 倍时可获得最佳光催化性能。同时,发现 PANI 与 TiO_2 的自组装使光吸收扩展到可见光范围,有效地抑制了光生电荷的复合。孙军等^[31]通过层层自组装合成了 PANI/聚丙烯酸(PAA)修饰石墨烯(Gr)(PANI/PAA-Gr)_n 复合薄膜,首先将石英片在去离子水中超声清洗 2 h,把石英片放在浓硫酸和过氧化氢的混合溶液中浸泡 2 h,再用去离子水清洗,最后浸泡在氨水中。以玻碳电极(GCE)为基片,将 (PANI/PAA-Gr)_n 放入质量分数为 3.95% 的氢氧化钾无水乙醇溶液中,超声振荡 5 min,冲洗后再放到乙醇溶液中超声振荡 5 min,最后浸入超纯水中超声 5 min,吹干得到空白 GCE 电极。将处理干净的石英片/GCE 电极浸入 PAA-Gr 溶液中约 20 min 后取出,用蒸馏水洗涤后吹干,再次将此基底转入 PANI 溶液中约 10 min 后取出,用蒸馏水洗涤后吹干。重复上述操作即可获得 (PANI/PAA-Gr)_n 复合薄膜。赵霞等^[32]用静电自组装方法制备 PANI/ Fe_3O_4 纳米复合材料,研究了复合材料对水体系中重金属离子的吸附、磁分离性能。结果表明,PANI/ Fe_3O_4 纳米复合材料在水溶液中基本可以稳定存在,既不溶解也无明显团聚现象,可以较好地吸附

重金属离子; HNO_3 溶液可以将重金属离子从 PANI/ Fe_3O_4 纳米复合材料上解吸附,实现重复利用,而且解吸过程不会对其物理结构产生破坏。Saleh 等^[33]通过原位合成法将苯胺单体包围在 Cu 纳米球上,通过自组装获得了由 PANI 包围的 Cu 纳米球 ($\text{Cu}@\text{PANI}$),接着将 $\text{Cu}@\text{PANI}$ 纳米球沉积在 TiO_2 表面,以提高光催化制氢的活性。研究发现,三元催化效率好于单个 TiO_2 催化,且通过改变 Cu 和 PANI 的沉积顺序制备的 PANI/($\text{Cu}-\text{TiO}_2$) 和 ($\text{PANI}-\text{TiO}_2$)/Cu 复合材料相比,性能进一步得到显著提高。

1.3 水热合成法

汪建德等^[34]用水热合成方法制备出 PANI/ 三维还原氧化石墨烯 (RGO) 复合材料,将 PANI 与氧化石墨以一定质量比混合,超声混合 2 h 得到 PANI 和氧化石墨烯 (GO) 的混合溶液,再将其移到水热反应釜中,160℃ 水热反应 5 h,得到三维 PANI 复合材料。Thomas 等^[35]在不同温度下通过界面聚合和水热法合成了 PANI-MWCNTs-Ni(OH)₂ 三元复合材料。首先合成 PANI/MWCNTs,以乙醇为溶剂,将 6.0 g $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 溶解在乙醇中,再向其中加入 0.48 g PANI/MWCNTs,所得混合物在持续搅拌下加入液态氨,直到混合物的 pH 值约为 9,再把混合物转移到马弗炉中加热 3 h,然后冷却至室温,通过过滤、水洗、丙酮洗,最后在 80℃ 的烘箱中干燥,得到 MWCNTs 负载 Ni 改性 PANI 复合材料。Li 等^[36]将 PANI 溶解在 20 mL *N,N*-二甲基甲酰胺中,再加入 1 000 mg 水热法合成的 SnO_2 纳米颗粒,磁力搅拌 3 h 和超声处理 1 h,在 150℃ 下加热 12 h 以蒸发 *N,N*-二甲基甲酰胺,得到 PANI/ SnO_2 纳米复合材料。Sk 等^[37]通过改良的水热合成法制备了 Cu/ 碳化硼 (BN)@PANI 三元复合的核壳复合物。首先,将 1.5 mmol (300 mg) $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 和 625 mg 十六烷基三甲基溴化铵加入 20 mL 蒸馏水中,并超声 20 min,得到均匀溶液 A。同时,称量 PANI 与 BN,其中 PANI 的质量分数分别为 1%,2.5%,5% 和 10%,并分别分散于 10 mL 蒸馏水中再超声 20 min,得到溶液 B。然后,将溶液 B 缓慢滴入溶液 A 中,再超声处理 30 min 直至均一分散。接着,往该混合液中滴加 NaOH 调节其 pH 值为 10,缓慢冷却,再将混合液转移到聚四氟乙烯内衬高压釜中,并将 2.5 mL $\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 加入混合溶液中。最后,在高压釜中于 160℃ 下反应 15 h,再将反应物缓慢冷却到室温,接着用 4 500 r/min 的离心机分离,并用无水乙醇多次清洗提纯,将提纯后产物在 50℃ 烘箱中干燥 24 h,得到 PANI 质量分数分别为 1%,2.5%,5%,10% 的 Cu/BN@PANI 三元核壳复合物。

1.4 溶液共混法

李海涛等^[38]采用共混法制备出棒状 PANI/ TiO_2 复合材

料。先称量一定的 PANI 添加到去离子水中;再称量一定质量的 TiO_2 纳米粒子加入到去离子水中,在室温下超声一定的时间;在室温条件下将两者混合后搅拌 12 h,用去离子水洗涤至中性,干燥,得到棒状 PANI/ TiO_2 复合材料。陈梓润等^[39]采用超声分散方法,制备得到剑麻纳米纤维素 (CNF)/Gr 分散液,利用共混法制备得到 PANI/CNF/Gr 复合材料,用拉曼光谱、红外光谱、X 射线衍射和扫描电子显微镜对复合材料的结构、形态进行了研究,采用恒流充放电、循环伏安法、交流阻抗等方法研究了复合材料的电化学性质。结果显示,加入石墨烯纳米片 (GPNs) 时, PANI 和 CNF 穿插于 GPNs 中,产生较多的孔洞,在一定的电流密度下,复合材料反复充放电 1 000 次,电容保持率达到 76.92%。李国安等^[40]将制备的 PANI@ 钛酸钡 (PANI@BT), PANI@ 钛酸钡 - 二维氮化硼 (PANI@BT-hBN) 分别与一定量的丙酮混合,超声分散 120 min 后,再缓慢滴加定量的聚偏二氟乙烯 (PVDF),在室温条件下搅拌 0.5 h,再加热到 60℃,搅拌 0.5 h,流延成膜后压 120 min,得到 PVDF/PANI@BT 和 PVDF/PANI@BT-hBN 两种复合材料。

2 光催化方面的应用

2.1 紫外光催化

徐惠等^[21]研究认为,相比于 SnO_2 ,在紫外光照下, PANI/ SnO_2 复合材料对萘酚绿 B 的降解率提升将近一倍,这可能是由于当 N 型 SnO_2 被 P 型 PANI 包覆时,在两者界面处形成的 P-N 结有利于光生载流子的转移,很好地抑制了光生电子、空穴的复合,并且增强了复合材料的光催化性能。杨思娴等^[29]将具有确定形态的 PANI 纳米线作为复合单元,直接分散在 SnSO_4 和 H_2SO_4 的混合溶液中,通过紫外光照射获得 PANI 纳米线 / SnO_2 纳米颗粒复合材料。对复合材料的形态和成分进行了分析,发现二者相互交织在一起且部分颗粒直接生长在纳米线上。将罗丹明 B 溶液作为污染物,研究复合材料在紫外光下的光催化性能。结果显示, PANI 纳米线可以显著提高 SnO_2 的光催化性能,光催化性能的提高与紫外光照时间有关,在最优时间下复合材料的光催化性能比纯 SnO_2 提高了 2 倍。通过对能级结构与光催化反应过程进行测试分析,认为 Z 型异质结的形成促进了光生电子 - 空穴的分离,进而增强了材料的光催化活性。Arshadnia 等^[41]发现,在 PANI/ SnFe_2O_4 / SnO_2 体系中, SnO_2 和 PANI 对染料的光催化脱色有协同作用。当 PANI/ SnFe_2O_4 / SnO_2 复合材料在紫外光下照射时, SnO_2 和 PANI 都会吸收染料的光。 SnO_2 和 PANI 在它们的界面上吸收光子,然后发生电荷分离。Rajaji 等^[42]利用共沉淀法制备了 PANI/ SnO_2 纳米复合材料,并用于光催化降解直接蓝 15 (DB15) 染料。结果发

现, PANI 的加入导致 SnO_2 晶粒尺寸减小和比表面积增加, 同时, PANI 改性的 SnO_2 的能带隙和反射率也有所降低。与未改性 SnO_2 相比, PANI/ SnO_2 纳米复合材料对 DB15 的光催化效率显著提高。这是因为该 PANI/ SnO_2 复合材料在紫外光照射后会产生电子-空穴对, 并产生大量的羟基和超氧自由基, 这些羟基和超氧自由基可迅速降解 DB15。

2.2 可见光催化

Ma 等^[28]进行了可见光照射下罗丹明 B 的光催化降解对比实验, 分别对比分析了 PANI/ SnO_2 , SnO_2 和 HCl 共掺杂的 PANI/ SnO_2 (HCl-PANI/ SnO_2)、以水为反应介质的硅钨酸 (SiW_{12}) 掺杂 PANI/ SnO_2 (SiW_{12} -PANI/ SnO_2 -w) 和以乙醇为反应介质的 SiW_{12} 掺杂 PANI/ SnO_2 (SiW_{12} -PANI/ SnO_2 -e) 复合材料的光催化效果。结果发现, 当 SiW_{12} : 苯胺单体: SnO_2 质量比为 6:1:1 时, 制备的 SiW_{12} -PANI/ SnO_2 -e 复合光催化剂对罗丹明 B 的催化效果最好, 在光照 60 min 后, 罗丹明 B 的降解率达到 90% 以上; 而 PANI/ SnO_2 和 HCl-PANI/ SnO_2 对罗丹明 B 的降解率分别仅为 46% 和 76%。这是因为 SiW_{12} 的加入有利于苯胺单体在 SnO_2 表面聚合, 从而提高了 SiW_{12} -PANI/ SnO_2 三元复合物的光吸收表面积; 同时, SiW_{12} 是一种典型的电子受体材料, 它能有效加速该三元复合物的电子迁移和抑制电子-空穴对的结合。Karpuraranjith 等^[43]利用壳聚糖作为生物模板制备了不同浓度的 SnO_2 (CS-SnO_2), 再将 0.5 mol/L 和 0.75 mol/L 的 CS-SnO_2 分别加入到 PANI 中, 制备出 CS-SnO_2 改性 PANI 复合材料, 并分别命名为 BSP-0.50 和 BSP-0.75。在光照射下, 研究了 BSP-0.50 和 BSP-0.75 纳米复合材料对染料亚甲基蓝 (MB) 和活性黄 15 (RY-15) 的催化降解行为。结果发现, BSP-0.75 较 BSP-0.5 有更好的热稳定性和孔隙率。在没有 BSP-0.50 和 BSP-0.75 的情况下, MB 和 RY-15 染料分子的浓度没有明显变化, 表明这两种染料不容易被阳光直接照射而降解。而当 BSP-0.75 分别加入到 MB 和 RY-15 染料溶液中, 在阳光下照射下其染料的降解率分别达到 91.36% 和 96.68%。

3 电催化方面的应用

赵媛媛等^[44]利用 PANI 膜对钛/氧化铅 (Ti/PbO_2) 电极进行改性, 采用两步电沉积法成功制备出 PANI/ Ti/PbO_2 电极。采用扫描电子显微镜、X 射线衍射分析、线性伏安扫描法及交流阻抗法对制备的材料进行了表征, 以甲基橙作为目标污染物, 研究了 PANI 的沉积时间和电极性能之间的关系, 并且探讨了 PANI/ Ti/PbO_2 电极对罗丹明 B 和 4-硝基苯酚降解性能的影响。结果表明, PANI 的引入未影响活性层 PbO_2 的晶相结构和形貌特征, 显著提高了电极的析氧电位, PANI/ Ti/PbO_2 的析氧电位可达 3.43 V。当 PANI 聚合时间

为 30 min 时, 电极 PANI/ Ti/PbO_2 的电化学性能和电催化降解效果最佳。

针对 CO_2 电催化还原制备乙醇的稳定性和可选择性研究, Yang 等^[45]利用电化学活化工艺制备了 PANI/ CuBi_2O_4 复合催化剂, 该催化剂在 CO_2 电催化还原制备乙醇过程中展示出高的法拉第效率。进一步研究发现, 这种电化学活化工艺制备的 PANI/ CuBi_2O_4 在催化过程中的团聚行为减弱, 而表现出高的稳定性和催化持久性。叶小爱等^[46]在玻碳电极上用静电吸附、电聚合、恒电位还原的方法, 制备 RGO@PANI 复合膜。以此为基础, 在复合膜上负载上具有高电催化活性的二氧化锰 (MnO_2), 形成 MnO_2 /RGO@PANI 复合修饰电极。采用扫描电子显微镜表征了复合膜的形貌, 研究了 RGO@PANI 电聚合圈数、电还原时间、GO 浓度及 pH 值等对电化学活性和电催化活性的影响。结果表明, 该电极具有较低的检测电位和较高的电化学响应性。Munusamy 等^[47]利用 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 、聚吡咯 (PPy) 和 PANI 制备了 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ -PANI-PPy 杂化材料, 并利用该杂化材料改性玻碳电极 (GCE), 研究了 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ -PANI-PPy 杂化材料的光催化活性以及改性 GCE 的电化学敏感性。结果发现, $\text{g-C}_3\text{N}_4$ -PANI-PPy 杂化材料对有机染料 MB 表现出很好的光催化活性, 这归因于该杂化材料拥有高的比表面积和表面电子迁移率。同时, 该杂化材料改性的 GCE 对甲苯咪唑药物的检测有较好的敏感度, 这是由于改性 GCE 具有明显的层状结构和电化学循环过程中的电子给体-受体行为所致。

4 结语

制备 PANI 纳米复合材料的方法包括原位氧化法、静电自组装法、水热合成法及溶液共混法等, PANI 纳米复合材料已应用在光催化、电催化等方面, 具有比较广阔的应用前景。但是目前取得的研究成果对改善 PANI 纳米复合材料的性能有一定的局限, 因此可以根据 PANI 纳米复合材料应用领域的不同, 在原子、分子结构上研究 PANI 纳米复合材料合成的条件, 探究其制备方法, 开发新的合成方法, 进而提高 PANI 纳米复合材料的性能。应更多地关注 PANI 纳米复合材料的应用, 使其更好地为我国的经济、社会发展服务。在 PANI 纳米复合材料合成方面, 应更加关注绿色环保、高效、低价等新合成方法的推广, 注重高性能 PANI 纳米复合材料的合成。在紫外光催化研究方面, 加强对新型光催化剂的开发和研究, 以实现无污染、绿色、高效光催化剂的合成; 在可见光催化方面, 需要提高光催化效率, 进而大大提高处理污水的效率。在电催化方面, 需要不断拓展 PANI 导电能力提升的研究, 特别是与高导电金属粒子复配, 如制备 PANI 复配金属有机框架纳米复合材料, 以获得具有电子导电性和

高电催化活性的 PANI 纳米复合材料,拓宽 PANI 在电化能源等领域的潜在应用。在设计和合成新型导电复合材料的同时,应加强高性能导电复合材料的合成方法,降低合成成本,开展有机导电材料的大面积制备技术和性能稳定性研究。

参考文献

- [1] 张冬梅. 可回收 TiO₂ 及 ZnO 纳米复合光催化剂的制备及其光催化降解性能的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
Zhang Dongmei. Synthesis and photocatalytic degradation performance of recyclable TiO₂ and ZnO nanocomposite photocatalysts[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2021.
- [2] Khan M I, et al. *Ceramics International*, 2021, 47(11):15 801–15 806.
- [3] 王立坤, 等. *硅酸盐学报*, 2018, 46(4):590–597.
Wang Likun, et al. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 46(4):590–597.
- [4] Salini N G. *Emergent Materials*, 2022, 5:369–379.
- [5] Teng Y H, et al. *Advances in Polymer Technology*, 2020, 2020. DOI:10.1155/2020/8730852.
- [6] Sambaza S S. *ACS Omega*, 2020, 5(46):29 642–29 656.
- [7] Tolaymat T M, et al. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(5):999–1 006.
- [8] Jiang W J, et al. *Small*, 2016, 12(32):4 370–4 378.
- [9] Neelgund G M. *Applied Catalysis B:Environmental*, 2016, 187:357–366.
- [10] Liu L, et al. *Applied Catalysis B:Environmental*, 2017, 201:92–104.
- [11] Li J, et al. *Polymer*, 2006, 47(21):7 361–7 367.
- [12] Mehmood C T, et al. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(4). DOI:10.1016/j.jece.2021.105470.
- [13] Li Y J, et al. *Materials Letter*, 2015, 140:192–195.
- [14] Yu C F, et al. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, 104(6):317–325.
- [15] Karim M R, et al. *Synthetic Metals*, 2005, 151(2):131–135.
- [16] Tai H L, et al. *Journal of Materials Science & Technology*, 2010, 26(7):605–613.
- [17] Rajput R B. *Environmental Advances*, 2021, 5. DOI:10.1016/j.envadv.2021.100081.
- [18] Patil S S, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, 132(5). DOI:10.1002/app.41401.
- [19] Fujishima A, et al. *Nature*, 1972, 238(5 358):37–38.
- [20] Errahmani K B, et al. *Catalysts*, 2021, 11(3). DOI:10.3390/catal11030402.
- [21] 徐惠, 等. *高分子材料科学与工程*, 2012, 28(4):133–136.
Xu Hui, et al. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2012, 28(4):133–136.
- [22] Teja K P, et al. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2022, 47:6 591–6 603.
- [23] Wang S, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 430. DOI:10.1016/j.cej.2021.133175.
- [24] 丁艳, 等. *中国科学: 化学*, 2015, 45(2):202–210.
Ding Yan, et al. *SCIENTIA SINICA Chimica*, 2015, 45(2):202–210.
- [25] Sharma A K, et al. *Materialstoday Proceedings*, 2021, 38:1 259–1 262.
- [26] Shetty K, et al. *Materialstoday Proceedings*, 2020, 27:2 158–2 163.
- [27] 王璐, 等. *无机化学学报*, 2019, 35(2):271–276.
Wang Lu, et al. *Chinese Journal of Inorganic Chemistry*, 2019, 35(2):271–276.
- [28] Ma H Y, et al. *Materials Letters*, 2016, 168:103–106.
- [29] 杨思娴, 等. *高等学校化学学报*, 2021, 42(6):1 942–1 951.
Yang Sixian, et al. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2021, 42(6):1 942–1 951.
- [30] Zhou T, et al. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2019, 125:123–130.
- [31] 孙军, 等. *高等学校化学学报*, 2015, 36(3):581–588.
Sun Jun, et al. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2015, 36(3):581–588.
- [32] 赵霞, 等. *吉林大学学报: 理学版*, 2015, 53(5):1 034–1 038.
Zhao Xia, et al. *Journal of Jilin University:Science Edition*, 2015, 53(5):1 034–1 038.
- [33] Saleh M R, et al. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(9):6 011–6 028.
- [34] 汪建德, 等. *物理化学学报*, 2015, 31(1):90–98.
Wang Jiande, et al. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2015, 31(1):90–98.
- [35] Thomas L, et al. *Diamond and Related Materials*, 2020, 106. DOI:10.1016/j.diamond.2020.107853.
- [36] Li J, et al. *Separation and Purification Technology*, 2018, 201:120–129.
- [37] Sk S, et al. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(54):27 394–27 408.
- [38] 李海涛, 等. *人工晶体学报*, 2018, 47(4):739–743.
Li Haitao, et al. *Journal of Synthetic Crystals*, 2018, 47(4):739–743.
- [39] 陈梓润, 等. *高分子材料科学与工程*, 2017, 33(7):76–80, 87.
Chen Zirun, et al. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2017, 33(7):76–80, 87.
- [40] 李国安, 等. *工程塑料应用*, 2022, 50(5):15–20.
Li Guoan, et al. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(5):15–20.

- (上接第 154 页)

- [41] Arshadnia I, et al. Surfaces and Interfaces, 2017, 8:91–96.
- [42] Rajaji U, et al. Ceramics International, 2021, 47(20):29 225–29 231.
- [43] Karpuraranjith M, et al. Polymer Degradation and Stability, 2016, 133:108–118.
- [44] 赵媛媛, 等. 化工进展, 2019, 38(12):5 478–5 486.
Zhao Yuanyuan, et al. Chemical Industry and Engineering Prog-
- [45] Yang Y, et al. Catalysis Science & Technology, 2021, 11:5 908–5 916.
- [46] 叶小爱, 等. 分析测试学报, 2018, 37(1):39–44.
Ye Xiaoi, et al. Journal of Instrumental Analysis, 2018, 37(1):39–44.
- [47] Munusamy S, et al. Synthetic Metals, 2021, 272. DOI:10.1016/j.synthmet.2020.116669.