

氧化锌掺杂钛酸铋材料的制备及其 压电催化降解染料活性研究

闫 灏¹, 张吉成¹, 李金华^{1*}, 贾艳敏²

(1. 西安工业大学材料与化工学院, 陕西 西安 710021; 2. 西安邮电大学理学院, 陕西 西安 710121)

摘要:以钛酸四丁酯和硝酸铋为原料,以氢氧化钠为矿化剂,采用水热法制备出了焦绿石相的钛酸铋($\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$)复合材料压电催化剂;采用 SEM 和 XRD 表征了样品的形貌和晶相结构;以罗丹明 B(Rh B)为目标降解物,研究了所制备样品的压电催化降解性能,并对其催化机理进行了探讨。结果表明, $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 纳米材料机械振动对 Rh B 降解率达到 87.8%;当掺杂纳米 ZnO 后,对 Rh B 的降解率达到 96.9%,ZnO 的掺杂有利于提高 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 的活性。

关键词:钛酸铋;氧化锌;压电催化性能;降解率

中图分类号:TQ426

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2022)S2-103-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.S2.023

Preparation of ZnO doped bismuth titanate material and study on its activity in piezoelectric catalytic degradation of dye

YAN Hao¹, ZHANG Ji-cheng¹, LI Jin-hua^{1*}, JIA Yan-min²

(1. School of Materials Science and Chemical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;
2. School of Science, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: A pyrochlore phase bismuth titanate composite piezoelectric catalyst is prepared by means of hydrothermal method using tetrabutyl titanate and bismuth nitrate as raw materials, sodium hydroxide as mineralizer. The morphology and crystal phase structure of the sample are characterized by SEM and XRD. Taking Rhodamine B as the target degradation product, the piezoelectric catalytic degradation performance of the prepared samples are evaluated, and the catalytic mechanism is discussed. The results show that the degradation rate of Rhodamine B by $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ nanomaterials mechanical vibration is 87.8%, and reaches 96.9% when nano-ZnO materials are doped in $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ nanomaterials, indicating that the doping of ZnO is beneficial to improve the activity of $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$.

Key words: $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$; ZnO doping; piezoelectric catalytic performance; degradation rate

随着纺织业、印染业的迅速发展,水污染程度日趋严重,而废水对人类健康造成了严重威胁。近年来,半导体光催化技术在环境治理以及光照分解水制氢方面的应用受到了极大的关注^[1-3]。光催化是在一定波长光照条件下,半导体材料发生光生载流子的分离,然后光生电子和空穴再与离子或分子结合生成具有氧化性或还原性的活性自由基,这种活性自由基能将有机大分子降解为二氧化碳或其他小分子有机物以及水。在反应过程中,这种半导体材料也就是光催化剂本身不发生变化^[4],催化效率受到电子-空穴复合速率的影响。目前最主要的光催化剂 TiO_2 ,其禁带宽度为 3.2 eV,主要对应紫外光区,而太阳光中紫外光仅占 4%左右,因此, TiO_2 光催化材料对太阳能的利用效率非常低^[5]。开发新

的催化技术十分必要。

压电效应是解决上述问题的有效方法之一。1998 年 Domen 定义了机械催化是机械振动诱导的化学反应^[6],并被用于水分解等领域^[7-10]。压电纳米发电机的概念由 Wang 等^[11]的研究小组首次提出,他们利用特定取向生长的氧化锌(ZnO)纳米线(NWs)对应力的灵敏响应来实现机械能的收集,利用 ZnO 半导体性质和半导体-金属电极之间的单向电荷传递实现电能的产生和传输。在 ZnO 受压形变的一侧形成的压电电势负极使该侧处于较高的能量状态,这样电子可以穿过压电/溶液界面并触发氧化还原反应。在压电催化过程中,在机械应力下,例如搅拌或超声振动,游离电子可以分离在压电催化剂的表面上,并引发氧化/还原反应以产生活性基

收稿日期:2022-03-10;修回日期:2022-04-21

基金项目:国家自然科学基金(21902123)

作者简介:闫灏(1996-),男,硕士生,研究方向为纳米材料合成, YyHh1alalala@163.com;李金华(1979-),女,博士,副教授,研究方向为功能性纳米材料的合成,通讯联系人, lijhua09@163.com。

团,导致水污染物降解^[12-16]。目前可利用的压电催化材料很少,例如 NiO、Co₃O₄、Fe₃O₄ 和 CuMO₂ (M=Al、Fe、Ga)等,但它们的能量转化效率非常低,这在很大程度上限制了机械催化的应用范围,因此如何提高能量转换效率成为关键问题。压电效应能够将机械能转换为电能,转换效率在 35%~60% 之间^[17-19],所以压电效应作为一种废水处理方法值得探究。

Bi₂Ti₂O₇ 是 Bi-Ti-O 体系中一种重要的化合物,属于典型的铋基半导体材料,晶体结构为焦绿石结构,近几年在光催化领域有一定研究。但由于其禁带宽度(2.95 eV)较大,在可见光照射下具有较弱的光催化活性^[20]。Bi₂Ti₂O₇ 是否具有铁电性引起了人们的关注,不同研究者对 Bi₂Ti₂O₇ 铁电性研究有不一样的结论,因此探究其是否具有压电效应很有必要。然而焦绿石相的 Bi₂Ti₂O₇ 在压电催化方面的研究甚少,所以本文重点研究了水热法制备的 Bi₂Ti₂O₇ 压电效应,期待获得更好的压电催化材料。

1 实验过程

1.1 Bi₂Ti₂O₇ 的制备

以五水合硝酸铋[Bi(NO₃)₃·5H₂O]和钛酸四丁酯(C₁₆H₃₆O₄Ti)为反应物,按照化学计量比为 1:1 称重,然后先将 Bi(NO₃)₃·5H₂O 加入去离子水中充分搅拌,再加入 20 mL 无水乙醇中混合均匀备用。在剧烈搅拌的情况下,将钛酸四丁酯醇溶液用胶头滴管逐滴加入到制备好的 Bi(NO₃)₃·5H₂O 溶液中;用 5 mol/L 的 NaOH 溶液调 pH,得到澄清的前驱体溶液,搅拌 30 min 混合均匀;将此悬浮液转移到容积为 100 mL 的具有聚四氟乙烯内衬的水热釜中加热,加热温度为 220℃,保温时间 20 h;待反应完成后,冷却至室温,取出样品,用去离子水洗涤数次,120℃ 下烘干得到 Bi₂Ti₂O₇ 粉末。

1.2 Bi₂Ti₂O₇/ZnO 的制备

将醋酸锌[(CH₃COO)₂Zn]与柠檬酸(C₆H₈O₇)按摩尔比 20:1 加入 50 mL 去离子水中搅拌,同时缓慢加入一定量的无水乙醇,在搅拌的同时缓慢滴加 5 mol/L 的 NaOH 溶液,调节溶液的 pH,将反应后的溶液超声处理 30 min;将获得的悬浮液移入容积为 100 mL 的水热反应釜中,置于干燥箱中设置 140℃ 下密封反应 24 h,反应完成后用离心机分离出最终沉淀,并用去离子水和无水乙醇洗涤数次,最后在室

温下干燥、研磨获得 ZnO 样品。

Bi₂Ti₂O₇/ZnO 复合材料是在制备 Bi₂Ti₂O₇ 的过程中调节 pH 步骤之后按 Bi:Zn 摩尔比 10:1 加入 ZnO 样品,混合均匀后进行水热反应,制备出 Bi₂Ti₂O₇/ZnO 复合材料。

1.3 表征

采用布鲁克 AXS 有限公司生产的布鲁克 D2 PHASER Gen2 X-射线衍射(XRD)对所制得样品进行物相结构的分析;采用 FEI Electron Optics B. V 公司生产的 Quanta FEG400 扫描电镜测量样品的形态结构。

1.4 压电催化活性实验

为了研究合成的 Bi₂Ti₂O₇ 和 Bi₂Ti₂O₇/ZnO 的压电催化特性,进行了压电催化降解 Rh B 染料实验。

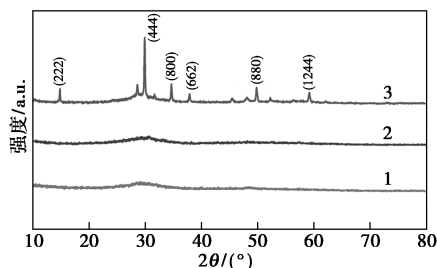
取 50 mL 质量浓度为 5 mg/L 的 Rh B 溶液,加入 50 mg Bi₂Ti₂O₇(Bi₂Ti₂O₇/ZnO)样品,在黑暗处搅拌 30 min 以达到吸附-脱附平衡,再转移到超声波清洗机(40 kHz,120 W)中进行压电催化反应。保持超声波清洗机内温度始终在 45℃ 以下,用黑色遮光罩覆盖在超声波清洗机的顶部,隔绝任何光线,以排除光催化的干扰。为了观察 Rh B 的褪色情况,每间隔 20 min 取 3 mL 溶液,高速离心后取上清液,用紫外-可见分光光度计测定 Rh B 溶液的降解浓度。

2 结果与讨论

2.1 晶相结构分析

图 1 为在不同水热温度合成的 Bi₂Ti₂O₇ 样品的 XRD 图谱。从图 1 可以看出,特征峰在 140、180℃ 下未出现,原因为温度低不能完全进行合成反应,没有产生主要物相,多数产物是以未定形态的形式存在的;而在 220℃ 下,可以清晰地看到在 2θ 为 14.88°、29.96°、34.74°、38.10°、49.96° 和 59.35° 处的 6 个特征衍射峰对应(222)、(444)、(800)、(662)、(880)、(1244)晶面,与 Bi₂Ti₂O₇ 的标准卡片(JCPDS, No.32-0118)十分吻合,且峰强高,实验证明,220℃ 下水热合成法所制备的样品主要为焦绿石相 Bi₂Ti₂O₇ 材料;但存在少许强度较低的杂峰,通过对比标准 PDF 卡片,分析认为杂质是制备过程中出现的微量 TiO₂。220℃ 的(444)面衍射峰所对应的衍射角 2θ 为 30.09°,对应的半峰宽为 0.149 rad,根据 Scherrer 公式,计算出它们的晶粒尺寸为 54.82 nm。

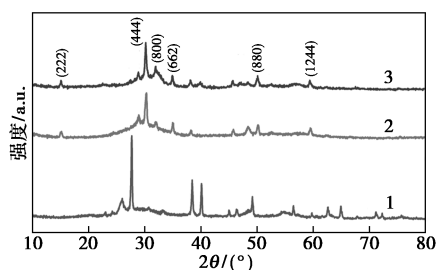
结果表明,制备焦绿石结构的 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 材料晶相需要在 220°C 高温下进行水热反应才能达到最好效果。



1— 140°C ; 2— 180°C ; 3— 220°C

图1 不同水热温度下合成 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 材料的 XRD 图

图2为以 NaOH 作为矿化剂、在不同 pH 下进行水热合成反应所得 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 粉体的 XRD 图谱。可以看出矿化剂浓度对合成焦绿石相 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 材料产生了一定影响,在 NaOH 的用量较小时 (pH 4), 焦绿石相的 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 主相已经形成,有少量杂质;当 pH 8 时,样品主要是焦绿石相的 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 材料,几乎没有杂质峰;pH 12 时,产物主要以 Bi_2O_3 和 TiO_2 形式存在。其原因可能是强碱性水热介质中存在大量的羟基,羟基不仅占据了基元表面氧离子的位置,而且可以渗入内部形成缺陷,这种缺陷可以看成是原基内部的氧离子必须带负电荷才能与质子结合的缺陷,当这些缺陷达到一定量时,原基向内坍塌,使反应产物在强碱性水热介质中呈无定形态^[21]。综上所述,在弱碱 (pH 8) 条件下, $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 晶粒尺寸更大,杂质更少,因此制备焦绿石相的 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 的效果更好。

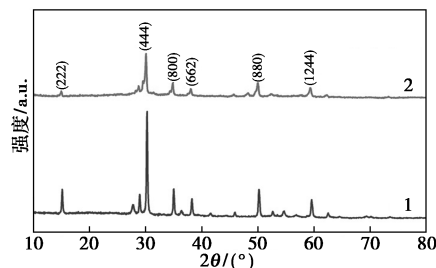


1—pH=12; 2—pH=8; 3—pH=4

图2 不同 pH 下合成 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 材料的 XRD 图

图3中的1和2分别为采用水热合成法所制备 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 样品和 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7/\text{ZnO}$ 样品的 XRD 图谱。从图3中可以看出,掺杂 ZnO 之后的样品和未掺杂样品的出峰位置一致,均与标准 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 的图谱相

吻合,可以确定合成的产物主要为 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$,说明 ZnO 复合后并不影响 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 的晶相结构,因为 ZnO 含量低、分散广、衍射峰强度微弱。



1— $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$; 2— $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7/\text{ZnO}$

图3 水热法制备的 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 及 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7/\text{ZnO}$ 复合材料的 XRD 图

2.2 形貌分析

图4为水热法制备的 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 样品 SEM 照片。根据图像分析,所制备的 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 呈球状颗粒,分布较均匀,平均粒径约为 100 nm 。

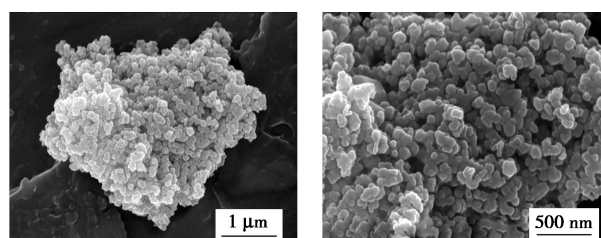
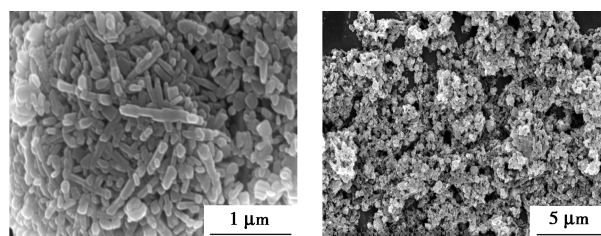


图4 水热法制备的 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 样品 SEM 图

图5是水热合成法制备的 ZnO 和 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7/\text{ZnO}$ 样品 SEM 图。从图5可以看出, ZnO 为棒状颗粒,整体分布较为均匀,其平均粒径大约在 100 nm 左右; $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7/\text{ZnO}$ 复合材料平均粒径在 100 nm 左右,可以清楚地看到棒状的 ZnO 纳米颗粒分散在主体 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 颗粒表面上。



(a) ZnO 样品

(b) $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7/\text{ZnO}$ 样品

图5 水热合成法制备的 ZnO 样品及 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7/\text{ZnO}$ 样品 SEM 照片

2.3 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 粉体和 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7/\text{ZnO}$ 粉体的压电催化性能

量取 50 mL 浓度为 5 mg/L 的 Rh B 溶液放入烧

杯中,加入 50 mg 的 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 纳米颗粒;每隔 20 min 取一次样,经离心后取上清液,利用紫外-可见分光光度计对降解后的 Rh B 进行分析,从而判断其降解情况。

图 6 为不同振动时间、 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 和 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7/\text{ZnO}$ 复合材料光电催化降解 Rh B 溶液的紫外-可见光吸收谱。随着振动时间增加,Rh B 染料溶液逐渐被催化剂降解,由图 6(a)可知,Rh B 的最大吸收峰 554 nm 处峰强随着振动时间变长而减弱,Rh B 溶液的颜色由最初鲜艳的玫瑰红色渐变为浅红直至最终接近于无色。在振动时间为 140 min 时, $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 材料对 5 mg/L Rh B 溶液降解率为 87.8%。由图 6(b)可知,当以 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7/\text{ZnO}$ 材料作为催化剂时,554 nm 处峰强下降幅度更大,在 120 min 后 Rh B 降解率为 96.9%。通过对比可知,ZnO 的加入,可能导致在光电催化过程中产生的羟基自由基($\cdot\text{OH}$)和超氧自由基($\cdot\text{O}_2^-$)增多,因此掺杂 ZnO 的 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 复合材料的光电催化性能更好,表现为降解时间更短、降解率更高。

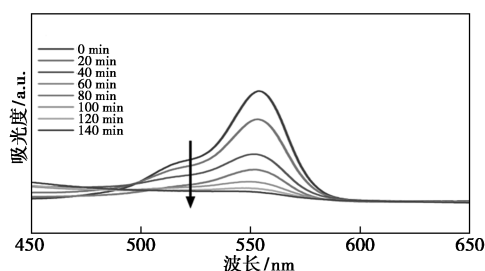
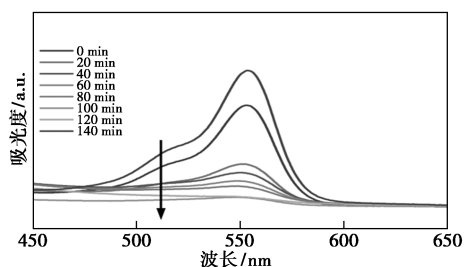
(a) $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ (b) $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7/\text{ZnO}$

图 6 不同振动时间下 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 和 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7/\text{ZnO}$ 对 Rh B 溶液光电催化降解性分析

2.4 降解率对比

为了探究提高 Rh B 溶液降解率的原因,做了对照实验,见图 7。从图 7 中可以看出,随振动时间的增加, $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 对 Rh B 的降解效率达到 80% 以上,而 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7/\text{ZnO}$ 对 Rh B 的催化降解效率达到 90% 以上。说明 ZnO 的加入大大提高了 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 对

Rh B 的降解效率。

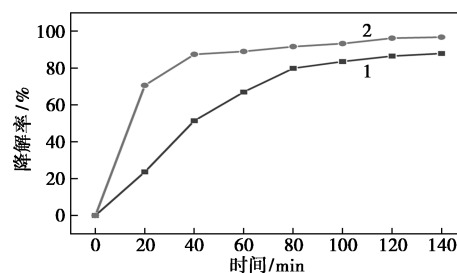
1— $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$; 2— $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7/\text{ZnO}$

图 7 不同材料作为催化剂时 Rh B 溶液的降解效率对比

3 机械振动催化降解染料的机理

振动催化的能量来源于振动,通过施加振动使得材料内部发生形变。压电效应产生正负电荷,其中负电荷能与溶解氧反应产生 $\cdot\text{O}_2^-$,则正电荷会与氢氧根(OH^-)生成具有氧化作用的 $\cdot\text{OH}$,这种具有氧化性的 $\cdot\text{OH}$ 和 $\cdot\text{O}_2^-$ 最终能使染料降解。本研究表明,在加入 ZnO 后 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 性能明显提升,由于超声波对 ZnO 纳米片产生的随机应力,ZnO 纳米片的压电电位也会随机增加或降低,氧空位束缚的自由电子可以通过交替的内置压电场向纳米 ZnO 的表面移动,电子不断地聚集在 ZnO 纳米棒的表面,参与有机污染物的催化降解^[22]。

4 结论

采用水热法制备了 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 和 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7/\text{ZnO}$ 纳米颗粒,XRD 分析结果表明,ZnO 的加入并未改变本体的晶型结构。振动催化降解 Rh B 染料实验证明,纳米 ZnO 材料的掺杂提高了 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 材料的压电催化能力,染料的降解率由 87.8% 提高到 96.9%,有效降解了 Rh B,在 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7/\text{ZnO}$ 复合材料中压电催化性能提高可以归因于电荷的有效分离和转移。这项作为未来利用天然振动将 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7/\text{ZnO}$ 复合材料应用于压电催化领域提供了新的机会。

参考文献

- [1] Linsebigler A L, Lu G, Yates J T. Photocatalysis on TiO_2 surfaces: Principles, mechanisms, and selected results [J]. Chem Rev, 1995, 95: 735-758.
- [2] Tryk D A, Fujishima A, Honda K. Recent topics in photoelectrochemistry: Achievements and future prospects [J]. Electrochim Acta,

- 2000,45;2363-2376.
- [3] Zhao J, Yang X D. Photocatalytic oxidation for indoor air purification: A literature review [J]. *Building and Environment*, 2003,38(5):645-654.
- [4] 赵娟,胡慧芳,曾亚萍,等.花状硫化铜级次纳米结构的制备及可见光催化活性研究[J].*物理学报*,2013,62(15):467-473.
- [5] 李宗宝,王霞,樊帅伟.Cu/N表面沉积共掺杂TiO₂光催化剂作用机理的理论研究[J].*物理学报*,2014,63(15):353-359.
- [6] Chen C, Ma W, Zhao J. Semiconductor-mediated photodegradation of pollutants under visible-light irradiation [J]. *Chemical Society Reviews*, 2010,39(11):4206-4219.
- [7] Behnajady M A, Modirshahla N, Hamzavi R. Kinetic study on photocatalytic degradation of CI acid yellow 23 by ZnO photocatalyst [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 133(1-3):226-232.
- [8] Domen K, Kondo J N, Hara M, et al. Photo- and mechano-catalytic overall water splitting reactions to form hydrogen and oxygen on heterogeneous catalysts [J]. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 2000,73(6):1307-1331.
- [9] He X, Aizenberg M, Kuksenok O, et al. Synthetic homeostatic materials with chemo-mechano-chemical self-regulation [J]. *Nature*, 2012,487:214-218.
- [10] Hickenboth C R, Moore J S, White S R, et al. Biasing reaction pathways with mechanical force [J]. *Nature*, 2007,446:423-427.
- [11] Wang Z L, Song J. Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays [J]. *Science*, 2006,312,242-246.
- [12] Lin J H, Tsao Y H, Wu M H, et al. Single- and few-layers MoS₂ nanocomposite as piezo-catalyst in dark and self-powered active sensor [J]. *Nano Energy*, 2017,31:575-581.
- [13] Lv W, Kong L, Lan S, et al. Enhancement effect in the piezoelectric degradation of organic pollutants by piezo-Fenton process [J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2017, 92(1):152-156.
- [14] Li J, Cai L, Shang J, et al. Giant enhancement of internal electric field boosting bulk charge separation for photocatalysis [J]. *Advanced Materials*, 2016,28(21):4059-4064.
- [15] Li H, Sang Y, Chang S, et al. Enhanced ferroelectric-nanocrystal-based hybrid photocatalysis by ultrasonic-wave-generated piezophototronic effect [J]. *Nano Letters*, 2015,15(4):2372-2379.
- [16] Xue X, Zang W, Deng P, et al. Piezo-potential enhanced photocatalytic degradation of organic dye using ZnO nanowires [J]. *Nano Energy*, 2015,13:414-422.
- [17] Zhang J, Wu Z, Jia Y, et al. Piezoelectric bimorph cantilever for vibration-producing-hydrogen [J]. *Sensors*, 2013,13(1):367-374.
- [18] Wu Z, Ma K, Cao Y, et al. Strong secondary piezoelectric effect in ferroelectric 0.7 Pb (Mg_{1/3}Nb_{2/3}) O₃-0.3 PbTiO₃ crystal [J]. *Applied Physics Letters*, 2013,103(11):112904.
- [19] Wu J M, Chang W E, Chang Y T, et al. Piezo-catalytic effect on the enhancement of the ultra-high degradation activity in the dark by single- and few-layers MoS₂ nanoflowers [J]. *Advanced Materials*, 2016,28(19):3718-3725.
- [20] Yordanov S P, Carapanov C P, Ivanov I S, et al. Dielectric properties of the ferroelectric Bi₂Ti₃O₉ ceramics [J]. *Ferroelectrics*, 1998,209(1):541-552.
- [21] 夏傲,苗鸿雁,李永强.水热合成钛酸铋纳米粉体的研究[J].*电子元件与材料*,2005,24(11):16-18.
- [22] Bai Y, Zhao J, Lv Z, et al. Enhanced piezocatalytic performance of ZnO nanosheet microspheres by enriching the surface oxygen vacancies [J]. *Journal of Materials Science*, 2020, 55(29):14112-14124. ■
- (上接第102页)
- [11] 李晓东,高攀,焦飞,等.盐胁迫下水稻根系细菌群落多样性研究[J].*西南农业学报*,2021,34(5):971-976.
- [12] Zhang K, Shi Y, Cui X, et al. Salinity is a key determinant for soil microbial communities in a desert ecosystem [J]. *mSystems*, 2019,4(1):1-11.
- [13] Bhowmik A, Kukul S S, Saha D, et al. Potential indicators of soil health degradation in different land use-based ecosystems in the Shiwaliks of northwestern India [J]. *Sustainability*, 2019,11(14):1-17.
- [14] 程立娟,周启星.野生观赏植物长药八宝对石油烃污染土壤的修复研究[J].*环境科学学报*,2014,34(4):980-986.
- [15] 吴蔓莉,袁婧,李炜,等.石油污染土壤的微生物修复及土壤微生物活性变化[J].*应用与环境生物学报*,2016,22(5):878-883.
- [16] Bassin J P, Kleerebezem R, Muyzer G, et al. Effect of different salt adaptation strategies on the microbial diversity, activity, and settling of nitrifying sludge in sequencing batch reactors [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2012,93(3):1281-1294.
- [17] Lefebvre O, Moletta R. Treatment of organic pollution in industrial saline wastewater: A literature review [J]. *Water Research*, 2006,40(20):3671-3682.
- [18] Muhammad S, Müller T, Joergensen R G. Relationships between soil biological and other soil properties in saline and alkaline arable soils from the Pakistani Punjab [J]. *Journal of Arid Environments*, 2007,72(4):448-457.
- [19] Riis V, Kleinstuber S, Babel W. Influence of high salinities on the degradation of diesel fuel by bacterial consortia [J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 2003,49(11):713-721.
- [20] Tejada-Agredano M C, Gallego S, Vila J, et al. Influence of the sunflower rhizosphere on the biodegradation of PAHs in soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013,57:830-840.
- [21] 李兴海,吕杰,马媛,等.石油污染土壤自然老化过程中微生物菌群及功能基因变化规律[J].*新疆大学学报(自然科学版)*, 2021,38(4):472-480.
- [22] Wei L, Ge T, Zhu Z K, et al. Paddy soils have a much higher microbial biomass content than upland soils: A review of the origin, mechanisms, and drivers [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2022,326:107798.
- [23] Zhao S, Liu J J, Banerjee S, et al. Soil pH is equally important as salinity in shaping bacterial communities in saline soils under halophytic vegetation [J]. *Scientific Reports*, 2018,8(1):1-11. ■