

综述

## 压-电-化学耦合增强策略及机理研究进展\*

贾艳敏<sup>1)†</sup> 王晓星<sup>1)</sup> 张祺昌<sup>1)</sup> 武峥<sup>2)‡</sup>

1) (西安邮电大学理学院, 西安 710121)

2) (西安工程大学环境与化学工程学院, 西安 710048)

(2022年10月31日收到; 2023年2月25日收到修改稿)

压电材料能够收集环境中存在的微小的机械能, 具有将机械信号转换为电信号的强大能力. 利用压电材料的压电效应与电化学氧化还原效应二者的耦合可以实现压-电-化学耦合. 近年来, 压-电-化学耦合在收集清洁能源和处理废水保护环境方面受到国内外研究人员的广泛关注. 本文综述了增强压-电-化学耦合的策略, 从构建异质结、负载贵金属、构筑相界、混合碳或石墨烯和调控缺陷方面出发进行了总结梳理. 从电子的运输和转移、材料相变和氧空位的角度解释不同策略中的物理机理, 并对研究前景进行了展望.

**关键词:** 压-电-化学耦合, 压电材料, 压电效应, 压电催化**PACS:** 77.65.-j, 77.90.+k, 77.84.-s, 79.60.Jv**DOI:** 10.7498/aps.72.20222078

## 1 引言

随工业化的快速发展, 化石燃料的大量使用以及工业废水的排放对生态环境造成了严重危害<sup>[1-4]</sup>. 特别是纺织行业的有机染料废水、农业废水及有毒工业废水给人类健康和生活环境带来严重问题<sup>[5-7]</sup>. 传统的废水处理方法包括物理法、化学法和生物法等. 虽然这些方法对于废水的处理均有一定效果, 但是也存费用高、易造成二次污染、周期长和占地大等问题<sup>[8,9]</sup>. 收集清洁能源和寻找有效的方法处理废水保护环境, 是解决上述问题的有效途径.

催化技术因其染料分解率高、二次污染小和成本低而受到青睐. 其中, 光催化作为一种高级氧化技术, 因其有机污染物分解率高、能耗低、并且能够实现分解水产氢和二氧化碳还原而备受关注<sup>[10-13]</sup>. 光催化主要原理是光照射到催化剂表面时, 激发产生的电子-空穴对分别与溶液中的溶解氧和氢氧根

离子反应产生活性物质 ( $\cdot\text{O}_2$  和  $\cdot\text{OH}$ ). 这些活性物质能够有效将有机污染物分解为二氧化碳、水和矿物盐等无毒无害的物质<sup>[14-16]</sup>. 然而, 太阳能利用率低、深色染料中的光渗透性差以及电子-空穴对的快速复合, 这些因素限制了光催化的实际应用<sup>[17-21]</sup>. 因此, 有必要找到一种具有可重复性, 能够在黑暗条件进行催化的方法.

除了太阳能以外, 振动能在我们的日常生活中也很常见, 如河流、噪声和汽车飞机发动机等. 一类具有压电效应的压电材料引起了科研人员的广泛关注<sup>[22-24]</sup>. 压电效应可分为正压电效应和逆压电效应. 正压电效应是指压电材料受外力变形后表面产生电荷, 是一种能够将机械能转化为电能的机制. 逆压电效应是指施加电场到压电材料极化方向上时材料本身产生形变, 是一种能够将电能转化为机械能的机制<sup>[25,26]</sup>. 利用压电材料的正压电效应, 通过超声振动的方式对分散在溶液中作为催化剂的压电材料施加应力使其产生形变, 从而让压电材

\* 国家自然科学基金 (批准号: 22179108) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [jiayanmin@xupt.edu.cn](mailto:jiayanmin@xupt.edu.cn)‡ 通信作者. E-mail: [wuzheng@xpu.edu.cn](mailto:wuzheng@xpu.edu.cn)

料产生电荷输出. 输出的电荷进一步与溶液中溶解的氧气和氢氧根离子反应生成活性物质 ( $\cdot\text{O}_2^-$  和  $\cdot\text{OH}$ ) 来降解有机染料, 这种催化方式称为压-电-化学耦合 [27–30].

近年来, 多篇综述从不同角度总结了压-电-化学耦合. Zhang 等 [31] 报道了不同材料的压-电-化学耦合和压-电-光耦合机制, 从极化、准同型相界等角度阐述压电/压-电-光催化剂性能的改性策略 [31]. Wang 等 [32] 报道了多种效应协同的催化体系, 将铁电、压电和热电效应与光催化结合从调节载流子的角度进行阐述. Pan 等 [33] 和 Wang 等 [34] 通过压电电子学和光电电子学, 介绍压-电-化学耦合增强压光催化反应策略以及其中的电荷迁移机制. Liang 等 [35] 总结了压电材料在废水处理中的应用. 然而, 很少有综述从异质结、贵金属负载、相界、混合碳或石墨烯以及缺陷方面对增强压-电-化学耦合的策略进行总结. 本综述从这 5 个方面进行了梳理和综述, 如图 1 所示.

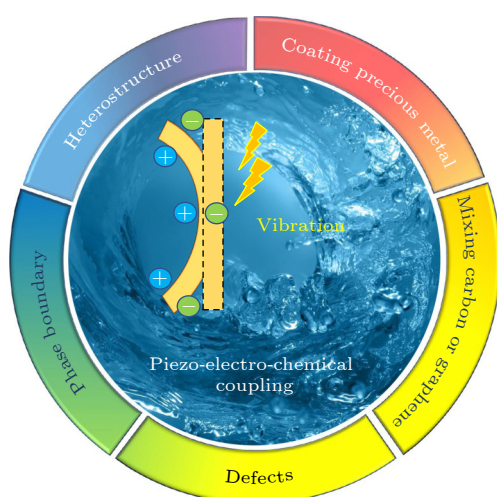


图 1 增强压-电-化学耦合 5 种策略, 异质结、贵金属负载、相界、缺陷、混合碳或石墨烯

Fig. 1. Five strategies to enhance piezo-electro-chemical coupling, including heterojunction, coating precious metal, phase boundary, defects, mixing carbon or graphene.

## 2 增强压-电-化学耦合的策略

### 2.1 构建异质结结构, 促进电子-空穴对分离

当一种窄带隙和一种宽带隙半导体具有匹配的能带结构时, 可以将这两种半导体结合成具有异质结结构的复合材料. 在这种复合材料中, 激发的电子-空穴会从一个半导体迁移到另一个半导体 [36].

这种方法的机理也称为双电荷转移或 II 型系统 [37]. II 型系统可以在不改变载体原有氧化还原能力的情况下, 大大提高电子-空穴对的分离.

通过制备具有匹配能带结构的异质结构的压电材料, 理论上有助于促进正负载流子的分离以增强压-电-化学耦合, 从而提高有机染料的降解率. Wang 等 [38] 通过水热法合成了  $\text{BiFeO}_3$  纳米片, 在超声振动 90 min 后对罗丹明 B (RhB) 有机染料的降解率 ( $D$ ) 可达 50.76%. 然而, 通过光沉积过程  $\text{CoO}_x$  纳米颗粒被覆到  $\text{BiFeO}_3$  表面获得  $\text{CoO}_x/\text{BiFeO}_3$  后的染料降解率可提升至 81.2% [38]. 利用构建异质结构这一有效策略提升压-电-化学耦合也在其他的材料体系中得到验证. 类石墨碳氮化物 ( $g\text{-C}_3\text{N}_4$ , CN) 其带隙约为 2.7 eV, 容易与  $\text{BaTiO}_3$  (BTO) 形成异质结 [39]. 本课题组通过混合煅烧法制备了  $\text{BaTiO}_3/g\text{-C}_3\text{N}_4$  (BTO/CN) [39], 其在 210 min 持续振动后对 RhB 染料的降解率可达 82%, 远高于纯  $\text{BaTiO}_3$  材料中观测到的 57% 的染料降解率 [39].

异质结结构增强压-电-化学耦合归因于其高效的载流子分离机制, 机理如图 2 所示 [39]. CN 的导带电位为  $-1.12$  eV, 价带电位为  $1.58$  eV. BTO 的导带电位  $-0.72$  eV, 价带电位  $2.43$  eV. BTO/CN 异质结能带结构匹配良好使载流子在两个半导体之间有效地转移. 在超声振动过程中, 电子从 CN 的导带位置转移到 BTO 的导带位置, 空穴从 BTO 的价带位置转移到 CN 的价带位置, 阻止载流子的复合. 因此, 在催化反应过程中载流子的利用率被提高, 增强了压-电-化学耦合.

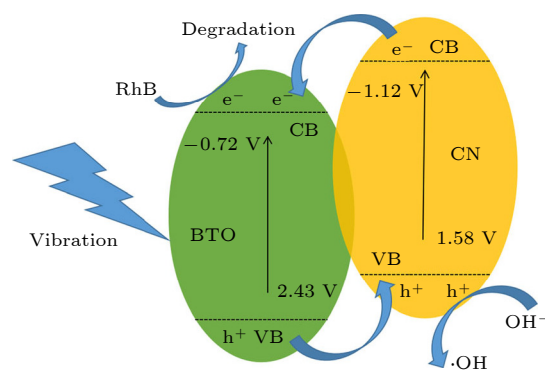


图 2 BTO/CN 异质结压-电-化学耦合的机理图 [39]

Fig. 2. Mechanism diagram for the piezo-electro-chemical coupling of BTO/CN heterostructures [39].

值得注意的是, 用来构建异质结结构的助剂材料的量并不是越多越有利, 需要对其最佳负载量进

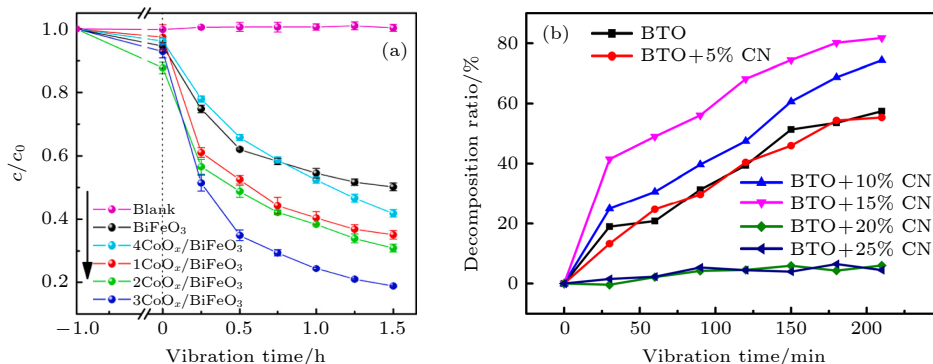


图 3 异质结材料不同含量助剂对染料的降解率的影响 (a) CoO<sub>x</sub>/BiFeO<sub>3</sub> 异质结<sup>[38]</sup>; (b) BTO/CN 异质结<sup>[39]</sup>

Fig. 3. Effect of different content of cocatalyst in heterojunction materials on dye decomposition ratio: (a) CoO<sub>x</sub>/BiFeO<sub>3</sub> heterojunction<sup>[38]</sup>; (b) BTO/CN heterojunction<sup>[39]</sup>.

行优化. Wang 等<sup>[38]</sup> 光沉积法制备的 CoO<sub>x</sub>/BiFeO<sub>3</sub> 异质结结构, 通过增加光照时间增加 BiFeO<sub>3</sub> 上 CoO<sub>x</sub> 的量. 图 3(a) 为不同光沉积时间下对应的 CoO<sub>x</sub>/BiFeO<sub>3</sub> 异质结染料降解情况<sup>[38]</sup>, 其中降解后浓度 ( $c$ ) 与初始浓度 ( $c_0$ ) 的比值越小表示染料的降解率越高. 随着光沉积时间从 1 h 增加到 4 h, 对应样品的染料降解率先增加后减小, 其中光沉积 3 h 的 CoO<sub>x</sub>/BiFeO<sub>3</sub> 的染料降解率达到最大为 81.2%<sup>[38]</sup>. 本课题组对 BTO/CN 异质结构的最佳 CN 负载量也进行了优化, 如图 3(b) 所示<sup>[39]</sup>. 当 CN 质量分数从 0 增加到 25% 时, BTO/CN 异质结构对染料的降解率先增大后减小. 在 CN 质量分数 15% 时, BTO/CN 异质结构的降解率达到最大为 82%. 一般地, 过量的助剂会导致复合材料严重团聚, 减少异质结结构的数量, 不利于压-电-化学耦合降解染料<sup>[39-41]</sup>. 因此在构建异质结结构时, 考虑匹配的能带结构的同时, 选择助剂的量也是十分重要的.

## 2.2 贵金属负载, 加速电子的运输和转移

通过贵金属和半导体之间适当的能带排列可以加速电子的运输和转移<sup>[42,43]</sup>. 因此, 理论上将贵金属负载在催化剂表面可以加速电子的运输和转移, 来增强压-电-化学耦合. Lin 等<sup>[44]</sup> 通过光化学还原 Ag<sup>+</sup>, 在退火的 BTO 纳米粉体上沉积 Ag 纳米颗粒得到 BTO-Ag. 在黑暗条件下超声振动降解甲基橙 (MO) 染料来评估催化剂的性能, 其中 BTO-Ag 的降解率为 84% 远远高于纯 BTO 的 15% 降解率<sup>[44]</sup>. Li 等<sup>[45]</sup> 以 AgNO<sub>3</sub> 为银源, 通过光沉积方法制备了 Ag/PbBiO<sub>2</sub>I 复合材料. Ag 质量分数

为 0.2% 的 Ag/PbBiO<sub>2</sub>I 降解 RhB 染料的反应速率常数  $k$  为 0.0165 min<sup>-1</sup>, 是纯 PbBiO<sub>2</sub>I 的 6.8 倍.

进一步分析当贵金属负载在压电材料表面时, 压-电-化学耦合增强的原因. 在超声振动的作用下, 压电材料表面诱导产生正负载流子分别聚集在材料的两端, 如图 4 所示<sup>[44]</sup>. Ag 负载形成的肖特基势垒驱动载流子的第二次分布, 导致电子富集在 Ag 负载上, 而空穴则富集在 BTO 上<sup>[44-46]</sup>. 具有 Ag 负载的复合材料比纯的材料具有更强的电子运输和转移能力, 使得更多的电子参与到催化反应当中, 从而增强压-电-化学耦合.

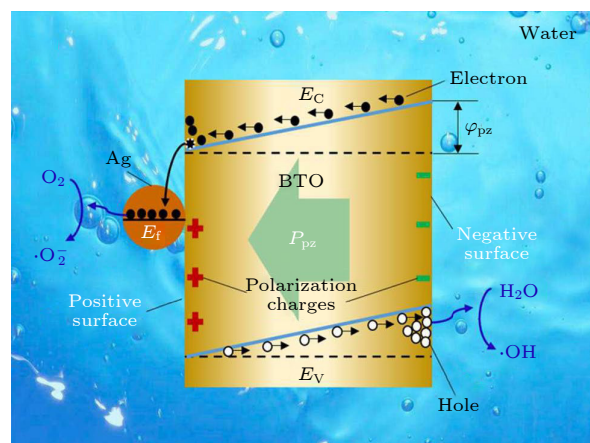


图 4 Ag 负载的 BTO 压-电-化学耦合的机理图<sup>[44]</sup>

Fig. 4. Mechanism diagram for the piezo-electro-chemical coupling of Ag-coated BTO<sup>[44]</sup>.

与构建异质结相类似的, 催化剂表面贵金属负载的量也需要进一步的优化. 随着沉积时间从 0 min 到 120 min, BTO 表面 Ag 的量逐渐增加, 但 BTO-Ag 降解 RhB 染料的反应速率常数  $k$  先增大后降低. 沉积时间为 60 min 时, BTO-Ag 复合材料的

染料降解率达到最佳,如图5所示[44].同样的,过量的助剂会导致复合材料严重团聚,影响电子的转移和运输,不利于压-电-化学耦合降解染料[39-41].

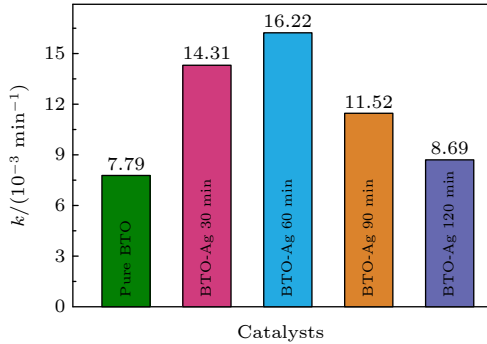


图5 不同Ag含量的BTO-Ag降解RhB染料反应速率常数 $k$ 值对比[44]

Fig. 5. Comparison of reaction rate constant  $k$  of RhB dye decomposition by BTO-Ag with different Ag content [44].

### 2.3 调控组分变化,在相界区获得增大的压电系数

在压电材料中,研究人员发现通过调控材料的组分,其在相界区会表现出超高的压电系数[47].高压电系数的材料在压-电-化学耦合降解染料过程中能表现出优异的催化性能.在 $\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{NbO}_3$  (NKN)中掺杂Li可以被视为一种有效的改性剂来扭曲钙钛矿结构[48].Li离子进入 $\text{ABO}_3$ 钙钛矿的晶格位置时,原本的正交相(O相)会向四方相(T相)的转变,同时温度逐渐向低温移动,如图6所示[48].Zhang等[48]在将Li元素引入 $(1-x)\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{NbO}_3-x\text{LiNbO}_3$ 的A位点,发现 $0.94\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{NbO}_3-0.006\text{LiNbO}_3$  ( $x = 0.006$ ,LNKN6)在室温下存在O相和T相的典型两相共存区,表现出高的压电常数 $d_{33} = 205 \text{ pC/N}$ .经过100 min的振动和搅拌,LNKN6将原本NKN 53%的降解率提高至91%.

除了NKN基材料, $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3)-x\text{PbTiO}_3$ 固溶体也具有超高的压电系数.Yuan等[49]采用两步固相反应法合成了 $(1-x)(\text{Pb}_{0.9625}\text{Sm}_{0.025})(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3)-x\text{PbTiO}_3$  ( $x = 0.25-0.33$ ,Sm-PMN- $x$ PT)陶瓷.在 $x = 0.29$ 时,材料中存在两相共存区,并在极化之后压电常数在室温下达到最大值 $d_{33} = 1150 \text{ pC/N}$ [49].将Sm-PMN-0.29PT粉末用来降解MO染料,其反应速率常数 $k$ 高达 $45.3 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ .值得注意的是,极化过的Sm-PMN-0.29PT粉末

表现出的降解性能要远高于未极化的样品.这是因为Sm-PMN-0.29PT中的极轴在合成或烧结后具有随机取向,通常需要极化处理来重新定向极轴.极化后可以保持整体定向,使更多的载流子参与染料降解从而表现出高的染料降解率[49,50].此外,在 $x = 0.25$ 的 $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ (BST)固溶体也表现出比纯BTO更高的压-电-化学耦合的催化活性[51].BTO在120℃左右经历铁电-顺电相变,通过Sr取代Ba位可以在很大范围内调节相变温度[52,53].随着增加Sr的量,顺电相趋于稳定,同时相变所需的温度逐渐降低[54].因此,研究BST在室温附近发生相变表现出强的压-电-化学耦合性能具有重要意义.Wu等[55]发现在 $x = 0.2$ 时, $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ 在室温附近(30℃)表现出强催化活性. $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ 降解MO染料的 $k$ 值约为 $25 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ,是BTO的5倍,如图7所示[55].

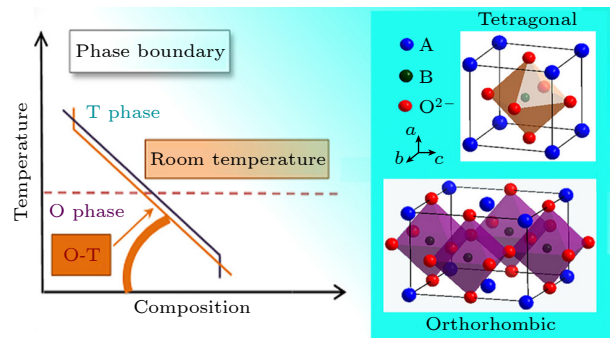


图6 通过调控组分,构建两相共存区[48]

Fig. 6. Schematic diagram of constructing two-phase coexistence zone through regulating components [48].

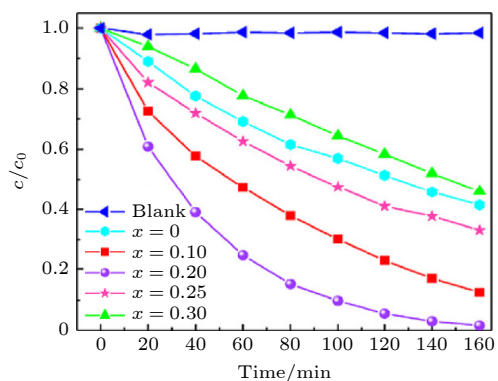


图7 不同Sr含量的 $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ 降解MO染料[55]

Fig. 7. Decomposition of MO dye by  $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$  with different Sr content [55].

通过引入掺杂元素调控催化剂的组分,使得催化剂在室温附近出现相界区获得高的压电系数,从而在增强压-电-化学耦合.

## 2.4 混合碳或石墨烯, 加速压电材料表面电子转移

碳 (C) 具有高的导电性, 在催化过程中具有较高的电子捕获和转移能力, 可以增强压-电-化学耦合. 本课题组在水热法合成的 BaTiO<sub>3</sub>/C 纳米复合材料中发现了高的压-电-化学耦合的催化活性<sup>[56]</sup>. 经过 40 min 振动后, 纯 BTO 的染料降解率为 48.4%, 而 BaTiO<sub>3</sub>/C 的染料降解率为 75.5%, 如图 8(a)所示<sup>[56]</sup>.

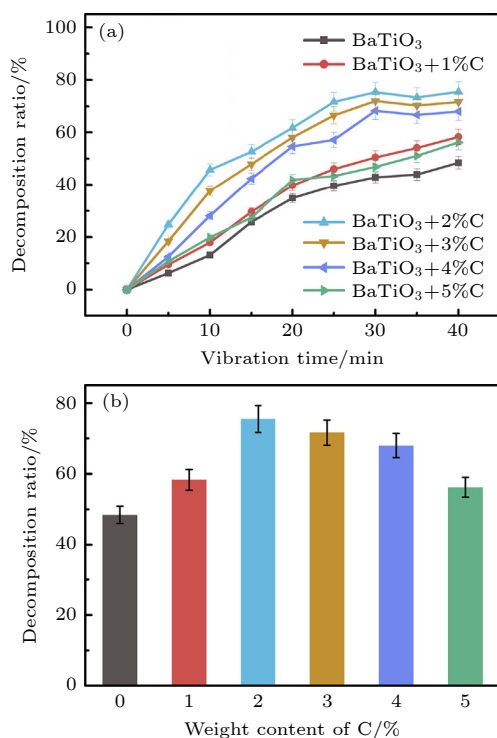


图 8 不同 C 含量对 BaTiO<sub>3</sub> 降解 RhB 染料的影响<sup>[56]</sup>  
Fig. 8. Effects of RhB dye decomposition by BaTiO<sub>3</sub> with different C content<sup>[56]</sup>.

与异质结构相类似的, 不同量的 C 对复合材料的染料降解率也有影响. 当 C 的量从 0 增加到 5% 时, BaTiO<sub>3</sub>/C 的催化性能先增加后略有下降, 图 8(b) 所示<sup>[56]</sup>. 当 C 的质量分数增加到 2% 时, BaTiO<sub>3</sub>/C 纳米复合材料压-电-化学耦合的增强可归因于 C 可以有效分离和转移负电荷. 当 C 的质量分数高于 2% 时, 压-电-化学耦合的催化活性略有下降. 这可以归因于 C 分离和转移的负电荷增多与正电荷之间的碰撞概率增加, 导致正负电荷的猝灭<sup>[4]</sup>.

BaTiO<sub>3</sub>/C 的压-电-化学耦合的催化活性增强可归结为两个方面: 一方面, C 能促进复合材料对

RhB 分子的吸附能力; 另一方面, BaTiO<sub>3</sub> 附近的适当量 C 作为负电荷转移单元, 这有助于加速负电荷转移从而抑制载流子的复合<sup>[57,58]</sup>. 图 9 为 BaTiO<sub>3</sub>/C 的压-电-化学耦合示意图<sup>[51]</sup>, 通过施加振动使材料产生正负电荷, C 会加速负电荷的转移来与溶液中的氧气发生反应产生超氧自由基, 而聚集在材料本身上的正电荷则会与溶液中的氢氧根离子发生反应产生羟基自由基.

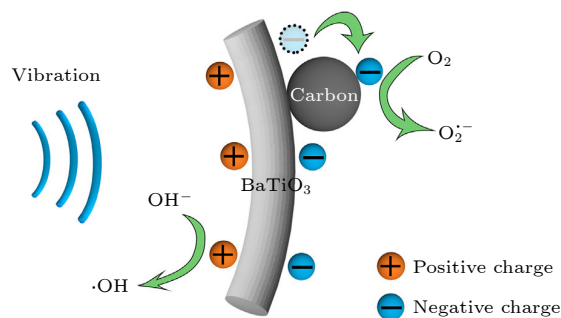


图 9 BaTiO<sub>3</sub>/C 的压-电-化学耦合示意图<sup>[56]</sup>  
Fig. 9. Mechanism diagram for the piezo-electro-chemical coupling of BaTiO<sub>3</sub>/C<sup>[56]</sup>.

石墨烯是近几年科研人员密切关注的热点二维材料. 石墨烯和纳米材料的结合可以提高材料的导电性从而增强压-电-化学耦合. Hou 等<sup>[59]</sup>将 BaTiO<sub>3</sub> 粉末与石墨烯粉末混合得到不同质量比的 BaTiO<sub>3</sub>@Graphene(BTO@rGO) 复合材料. 在超声振动下, 当 BTO 与 rGO 的质量比为 2:1 时, 样品的催化性能与其他的的质量比 (10:1, 5:1, 1:1) 的样品相比达到最佳. 质量比为 2:1 的 BTO@rGO 复合材料在降解亚甲基蓝 (MB) 染料时, 反应速率常数  $k$  值为 0.028 min<sup>-1</sup>, 是单独纯 BTO 的 14 倍. Kumar 等<sup>[60]</sup>合成了不同质量分数 rGO(0, 1%, 2%, 3%, 5%) 的 Graphene/BiVO<sub>4</sub>(rGO/BiVO<sub>4</sub>) 复合材料. 复合材料的压-电-化学耦合的催化活性在很大程度上取决于 rGO 的质量分数. 随着 rGO 质量分数的增加, 染料降解率先增加随后降低, rGO 质量分数为 2% 时 rGO/BiVO<sub>4</sub> 表现出最佳的催化活性<sup>[60]</sup>. 经过 180 min 超声振动, 与纯 BiVO<sub>4</sub> 的 19% 降解率相比, rGO 质量分数为 2% 时的 rGO/BiVO<sub>4</sub> 可以将降解率提高至 81%.

探究通过混合石墨烯增强压-电-化学耦合的原因. 当对材料施加超声振动时, BiVO<sub>4</sub> 中的极化电荷被激发产生内部电场, BiVO<sub>4</sub> 中自由电子和空穴会被吸引向相反的方向移动. 通过这种方式, 自

由电子和空穴的复合被抑制. 当 n 型的  $\text{BiVO}_4$  和 rGO 相互接触时, 电子从  $\text{BiVO}_4$  流向 rGO, 直到系统的费米能级达到平衡, 如图 10 所示<sup>[60]</sup>. 因此, 在  $\text{BiVO}_4$  和 rGO 的界面处发生带弯曲, 这有利于电子从  $\text{BiVO}_4$  转移到 rGO 上<sup>[61,62]</sup>. 同时, 由于石墨稀良好的导电性, 电子传输会被加速<sup>[63]</sup>. 这些因素有利于更多的电子从  $\text{BiVO}_4$  迁移到 rGO 表面, 促进催化反应进行.

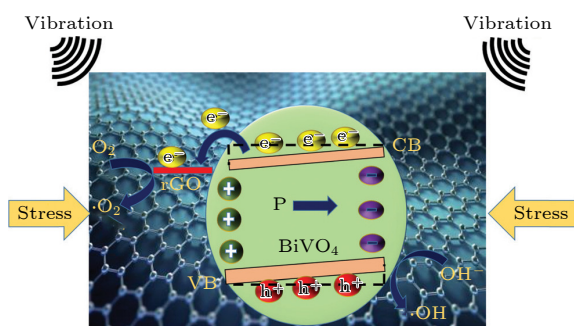


图 10 Graphene/ $\text{BiVO}_4$  的压-电-化学耦合示意图<sup>[60]</sup>

Fig. 10. Mechanism diagram for the piezo-electro-chemical coupling of graphene/ $\text{BiVO}_4$ <sup>[60]</sup>.

## 2.5 引入缺陷, 增加载流子浓度, 提升活性位点数

大多数压电催化剂的实际应用往往受到其压电极化不足、活性位点有限和能量收集面积小的限制. 缺陷工程是提高催化剂压-电-化学耦合性能的一种有效的方法<sup>[64,65]</sup>. 由于其操作方便、成本低廉, 在材料改性研究中颇受欢迎<sup>[66]</sup>.

Lee 等<sup>[67]</sup> 使用具有氧空位的自改性黑色  $\text{TiO}_{2-x}$  纳米颗粒作为起始材料, 900 °C 下在  $\text{H}_2$  气氛中合成了具有氧空位缺陷的  $\text{BaTiO}_{3-x}$  ( $\text{H}_2$ -900-BTO) 催化剂. 在降解 RhB 染料时,  $\text{H}_2$ -900-BTO 的反应速率常数  $k$  为  $0.0101 \text{ min}^{-1}$ , 是商业 BTO 纳米颗粒的 1.2 倍. 本课题组在 300 °C 下热处理纤维素纳米晶体 (CNC) 来引入氧空位缺陷<sup>[66]</sup>. 超声振动 180 min 后, CNC 和热处理 CNC 的 RhB 的降解率分别为 34.58% 和 96.65%, 如图 11 所示<sup>[66]</sup>. 在催化剂材料中不仅可以引入氧空位缺陷, 也可以引入 N 空位缺陷增强压-电-化学耦合. Fu 等<sup>[68]</sup> 采用热聚合/蚀刻法制备了具有 O 掺杂和 N 空位双重缺陷的  $\text{C}_3\text{N}_{5-x}\text{O}$ . 在 40 min 内完全降解浓度为  $20 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$  的 RhB 溶液, 反应速率常数  $k$  为  $0.0965 \text{ min}^{-1}$ . 与原始  $\text{C}_3\text{N}_5$  相比 (约为 73.5%), 双

缺陷的  $\text{C}_3\text{N}_{5-x}\text{O}$  对增强压-电-化学耦合更有效.

引入缺陷增强压-电-化学耦合性能的提高主要归因以下两个方面: 一方面, 缺陷的引入可以破坏了催化剂晶格结构的对称性, 增加了催化剂的局部极性导致催化剂的压电响应增强<sup>[69,70]</sup>; 另一方面, 氧空位缺陷可以提高正负电荷分离效率, 增加参与催化反应的电荷浓度, 提升活性位点数<sup>[66]</sup>.

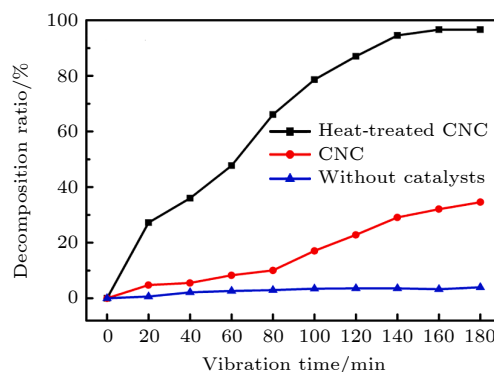


图 11 CNC 在热处理前后对 RhB 染料的降解率<sup>[66]</sup>

Fig. 11. Decomposition ratio of RhB dye by CNC before and after heat treatment<sup>[66]</sup>.

表 1 将 5 种策略进行了梳理, 对比每种策略使用前后有机染料的降解率或反应速率常数  $k$ , 可以看出这 5 种策略能够显著增强压-电-化学耦合. 此外, 不同策略之间也可以协同增强压-电-化学耦合. Zhang 等<sup>[71]</sup> 使用沉淀法将  $\text{Ag}_2\text{O}$  颗粒附着在  $\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{NbO}_3$  表面形成  $\text{Ag}_2\text{O}/\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{NbO}_3$  复合材料. 当  $x = 0.5$  时,  $\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{NbO}_3$  接近两相共存, 表现出优异的压电性能. 同时,  $\text{Ag}_2\text{O}$  是一种有效的可见光催化剂被覆在  $\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{NbO}_3$  表面形成异质结构. 在可见光和超声振动共同作用下, 与单独的  $\text{Ag}_2\text{O}$  和  $\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{NbO}_3$  相比,  $\text{Ag}_2\text{O}/\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{NbO}_3$  表现出更强的压-电-光耦合性能. Zhao 等<sup>[72]</sup> 发现在温度接近 40 °C 时,  $\text{BaTi}_{0.89}\text{Sn}_{0.11}\text{O}_3$  (BTS) 出现铁电-顺电相变, 表现出优异的压-电-化学耦合染料降解性能. 同时, 将 Ag 负载在 BTS 表面 (BTS@Ag), 测试其分解水产氢的性能. 在温度为 15 °C 超声振动下, BTS 的  $\text{H}_2$  生成率为  $141.1 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ . 在负载 Ag 后, BTS@Ag 可以进一步提高到  $360.2 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ . 当把工作温度进一步升高接近 BTS 相变温度时, BTS@Ag 的  $\text{H}_2$  生成率可达到  $401.1 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ . 多种策略协同作用可以进一步的增强压-电-化学耦合.

表 1 不同策略对有机染料降解结果汇总  
Table 1. Summary of decomposition results of organic dyes via different strategies.

策略	复合材料	助剂	增强前的降解率 $D$ 或反应速率常数 $k$	增强后的降解率 $D$ 或反应速率常数 $k$
构建异质结	$\text{CoO}_x/\text{BiFeO}_3$	$\text{CoO}$ (光沉积时间为3 h)	$D = 50.76\%$	$D = 81.2\%$ [38]
	$\text{BaTiO}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4$	$\text{g-C}_3\text{N}_4$ (质量分数为15%)	$D = 57\%$	$D = 82\%$ [39]
负载贵金属	$\text{BaTiO}_3\text{-Ag}$	$\text{Ag}$ (质量分数为2.09%)	$D = 15\%$	$D = 84\%$ [44]
	$\text{Ag}/\text{PbBiO}_2\text{I}$	$\text{Ag}$ (质量分数为0.2%)	$k = 0.0024 \text{ min}^{-1}$	$k = 0.0165 \text{ min}^{-1}$ [45]
构筑相界	$(1-x)\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{NbO}_3\text{-}x\text{LiNbO}_3$	$\text{Li}$ ( $x = 0.006$ )	$D = 53\%$	$D = 91\%$ [48]
	$(1-x)(\text{Pb}_{0.9625}\text{Sm}_{0.025})$ $(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-}x\text{PbTiO}_3$	$\text{PbTiO}_3$ ( $x = 0.29$ )		$k = 0.0453 \text{ min}^{-1}$ [49]
	$\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$	$\text{Sr}$ ( $x = 0.20$ )	$k = 0.005 \text{ min}^{-1}$	$k = 0.025 \text{ min}^{-1}$ [51]
	$0.96(\text{K}_{0.48}\text{Na}_{0.52})\text{Nb}_{0.955}\text{Sb}_{0.045}\text{O}_3\text{-}$ $0.04(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{ZrO}_3$	$0.04(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{ZrO}_3$	$k = 0.043 \text{ min}^{-1}$	$k = 0.091 \text{ min}^{-1}$ [73]
	$0.82 \text{ Ba}(\text{Ti}_{0.89}\text{Sn}_{0.11})\text{O}_3\text{-}$ $0.18(\text{Ba}_{0.7}\text{Ca}_{0.3})\text{TiO}_3$	$0.18(\text{Ba}_{0.7}\text{Ca}_{0.3})\text{TiO}_3$	$k = 0.0706 \text{ min}^{-1}$	$k = 0.0094 \text{ min}^{-1}$ [74]
混合碳	$\text{BaTiO}_3/\text{C}$	$\text{C}$ (质量分数为2%)	$D = 48.4\%$	$D = 75.5\%$ [56]
混合石墨烯	$\text{BaTiO}_3@\text{Graphene}$	$\text{Graphene}$ (质量比为2:1)	$k = 0.002 \text{ min}^{-1}$	$k = 0.028 \text{ min}^{-1}$ [59]
	$\text{Graphene}/\text{BiVO}_4$	$\text{Graphene}$ (质量分数为2%)	$D = 19\%$	$D = 81\%$ [60]
调控缺陷	$\text{BaTiO}_{3-x}$		$k = 0.0084 \text{ min}^{-1}$	$k = 0.0101 \text{ min}^{-1}$ [67]
	$\text{C}_3\text{N}_{5-x}\text{O}$		$D = 73.5\%$	$D = 99\%$ [68]
	$\text{CNC}$		$D = 34.58\%$	$D = 96.65\%$ [66]

### 3 总结和展望

压-电-化学耦合在降解有机污染物方面已经取得了大量的研究. 本工作从以下 5 个方面总结了增强压-电-化学耦合的策略并分析了其中的物理机制. 构建异质结结构, 促进电子-空穴对分离; 负载贵金属, 加速电子的运输和转移; 调控组分变化, 在相界区获得增大的压电系数. 混合碳或混合石墨烯, 加速压电材料表面电子转移; 调控缺陷, 增加载流子浓度, 提升活性位点数.

通过这 5 种策略可以显著优化和增强压-电-化学耦合, 但是其物理机制和实际应仍然需要进一步完善. 未来可以从以下 3 个方面进一步探索和研究.

1) 压-电-化学耦合的物理机制尚有待完善. 压-电-化学耦合是将力信号(机械信号)转化为电信号并进一步参与化学反应. 然而其中间的力-电转换过程除了源自催化剂材料的压电效应, 在理论上也有可能源自催化剂的挠曲电效应或摩擦生电效应 [75,76]. 对于压电化学耦合实验现象的解释目前包括压电催化、挠曲电催化和摩擦催化, 未来需要

对其具体的起源进行深入研究和系统甄别. 此外, 目前尚未对压电化学耦合的中间过程(如载流子的产生与迁移过程)进行详细的理论与实验研究. 在光-电-化学耦合过程, 李灿等 [77] 采用表面光电电压谱直接观测到载流子的产生和迁移, 未来如何采用类似方法对压-电-化学耦合的载流子迁移进行系统分析, 将可能有助于解释压-电-化学耦合的物理机制.

2) 压-电-化学耦合在能源领域的应用还需要进一步探索.  $\text{H}_2$  这种极佳的清洁能源, 可以通过压-电-化学耦合从分解水中获得. 然而在分解水的过程中需要加入牺牲剂, 只能生成  $\text{H}_2$  或  $\text{O}_2$  中的一种. 对于压-电-化学耦合全解水还需要进一步研究. 开发可行的将温室气体  $\text{CO}_2$  转化为碳氢燃料的新方法迫在眉睫. 利用压-电-化学耦合, 人们可以捕获环境中存在的大量低频振动能并将其转化为化学能, 将  $\text{CO}_2$  转化为  $\text{CH}_3$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}$  等燃料. 然而, 针对  $\text{CO}_2$  还原产物的定向调控以及  $\text{CO}_2$  转化率还需进一步研究和探索.

3) 压-电-化学耦合在医疗领域的应用需要进一步探索. 施剑林等 [78] 将压-电-化学耦合应用到生

物医学领域, 将其称为“压电医学”. 压-电-化学耦合可以被用来治疗肿瘤细胞. 未来结合 B 超来实现诊断与治疗一体化值得进一步探索. 此外, 将压电材料与口腔护理相结合, 利用刷牙过程中牙刷产生的振动, 可以实现压-电-化学耦合的牙齿美白<sup>[79]</sup>. 在压电医学方面, 催化剂的生物安全性、生物兼容性、安全用量和渗透性等需要进一步细化.

## 参考文献

- [1] Dai X Q, Chen L, Li Z Y, Li X, Wang J F, Hu X, Zhao L H, Jia Y M, Sun S X, Wu Y, He Y M 2021 *J. Colloid Interface Sci.* **603** 220
- [2] Zhang W H, Wang X J, Zhang Y C, Bochove B, Mäkilä E, Seppälä J, Xu W Y, Willför S, Xu C L 2020 *Sep. Purif. Technol.* **242** 116523
- [3] Oliveira L V, Bennici S, Josien L, Limousy L, Bizeto M A, Camilo F F 2020 *Carbohydr. Polym.* **230** 115621
- [4] Wang S S, Wu Z, Chen J, Ma J P, Ying J S, Cui S C, Yu S G, Hu Y M, Zhao J H, Jia Y M 2019 *Ceram. Int.* **45** 11703
- [5] Muraro P C L, Mortari S R, Vizzotto B S, Chuy G, Dos Santos C, Brum L F W, da Silva W L 2020 *Sci. Rep.* **10** 1
- [6] Roy J S, Dugas G, Morency S, Messaddeq Y 2020 *Physica E: Low Dimens. Syst. Nanostruct.* **120** 114114
- [7] Van Tran C, La D D, Hoai P N T, Ninh H D, Hong P N T, Vu T H T, Nadda A K, Nguyen X C, Nguyen D D, Ngo H H 2021 *J. Hazard. Mater.* **420** 126636
- [8] Li D D, Wang L L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 034212 (in Chinese) [李冬冬, 王丽莉 2012 物理学报 **61** 034212]
- [9] Wu W, Yin X, Dai B Y, Kou J H, Ni Y, Lu C H 2020 *Appl. Surf. Sci.* **517** 146119
- [10] Lei H, Zhang H H, Zou Y, Dong X P, Jia Y M, Wang F F 2019 *J. Alloys Compd.* **809** 151840
- [11] Tong J B, Huang Q, Zhang X D, Zhang C S, Zhao Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 047801 (in Chinese) [佟建波, 黄茜, 张晓丹, 张存善, 赵颖 2012 物理学报 **61** 047801]
- [12] Moghaddas S, Elahi B, Javanbakht V, 2020 *J. Alloys Compd.* **821** 153519
- [13] Zhao J, Hu H F, Zeng Y P, Cheng C P 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 158104 (in Chinese) [赵娟, 胡慧芳, 曾亚萍, 程彩萍 2013 物理学报 **62** 158104]
- [14] Cha B J, Woo T G, Han S W, Saqlain S, Seo H O, Cho H K, Jee Y K, Kim Y D 2018 *Catalysts* **8** 500
- [15] Ni M, Leung M, Leung D, Sumathy K 2007 *Renew. Sust. Energ. Rev.* **11** 401
- [16] Xu X L, Xiao L B, Jia Y M, Hong Y T, Ma J P, Wu Z 2018 *J. Electron. Mater.* **47** 536
- [17] Ma J P, Chen L, Wu Z, Chen J, Jia Y M, Hu Y M 2019 *Ceram. Int.* **45** 11934
- [18] Yu D F, Liu Z H, Zhang J M, Li S, Zhao Z C, Zhu L F, Liu W S, Lin Y H, Liu H, Zhang Z T 2019 *Nano Energy* **58** 695
- [19] Ma J P, Wu Z, Luo W S, Zheng Y Q, Jia Y M, Wang L, Huang H T 2018 *Ceram. Int.* **44** 21835
- [20] Li Z B, Wang X, Fan S W 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 157102 (in Chinese) [李宗宝, 王霞, 樊帅伟 2014 物理学报 **63** 157102]
- [21] You H L, Ma X X, Wu Z, Fei L F, Chen X Q, Yang J, Liu Y S, Jia Y M, Li H M, Wang F F, Huang H T 2018 *Nano Energy* **52** 351
- [22] Wu Y L, Ma Y L, Zheng H Y, Ramakrishna S 2021 *Materials & Design* **211** 110164
- [23] Hooper T E, Roscow J I, Mathieson A, Khanbareh H, Goetzee-Barral A J, Bell A J 2021 *J. Eur. Ceram. Soc.* **41** 6115
- [24] Hong K S, Xu H F, Konishi H, Li X C 2010 *J. Phys. Chem. Lett.* **1** 997
- [25] Feng Z Y, Tan O K, Zhu W G, Jia Y M, Luo H S 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 142910
- [26] Li F, Zhang S J, Xu Z 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 217703 (in Chinese) [李飞, 张树君, 徐卓 2020 物理学报 **69** 217703]
- [27] Hong K S, Xu H F, Konishi H, Li X C 2012 *J. Phys. Chem. C* **116** 13045
- [28] Sun Q W, Xue G L, Zhou X F, Luo H, Zhou K C, Zhang D 2021 *T. Nonferr. Metal. Soc.* **31** 17 (in Chinese) [孙奇薇, 薛国梁, 周学凡, 罗行, 周科朝, 张斗 2021 中国有色金属学报 **31** 17]
- [29] Hong Y T, Ma J P, Wu Z, Ying S J, You H L, Jia Y M 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 107702 (in Chinese) [洪元婷, 马江平, 武峥, 应静诗, 尤慧琳, 贾艳敏 2018 物理学报 **67** 107702]
- [30] Fu D, Endo M, Taniguchi H, Taniyama T, Itoh M 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 252907
- [31] Tu S C, Guo Y X, Zhang Y H, Hu C, Zhang T R, Ma T Y, Huang H W 2020 *Adv. Funct. Mater.* **30** 2005158
- [32] Wang M Y, Wang B, Huang F, Lin Z Q 2019 *Angew. Chem., Int. Ed.* **58** 7526
- [33] Pan L, Sun S C, Chen Y, Wang P H, Wang J Y, Zhang X W, Zou J J, Wang Z L 2020 *Adv. Energy Mater.* **10** 2000214
- [34] Wang X D, Rohrer G S, Li H X, 2018 *MRS Bull.* **43** 946
- [35] Liang Z, Yan C F, Rtimi S, Bandara J, 2019 *Appl. Catal. B-environ.* **241** 256
- [36] Liu W, Wang M L, Xu C X, Chen S F 2012 *Chem. Eng. J.* **209** 386
- [37] Yan Y X, Yang H, Yi Z, Xian T, Li R S, Wang X X 2019 *Desalin. Water Treat.* **170** 349
- [38] Wang L K, Wang J F, Ye C Y, Wang K Q, Zhao C R, Wu Y, He Y M 2021 *Ultrason. Sonochem.* **80** 105813
- [39] Zheng Y Q, Jia Y M, Li H M, Wu Z, Dong X P 2020 *J. Mater. Sci.* **55** 14787
- [40] Li L, She X J, Yi J J, Pan L, Xia K X, Wei W, Zhu X W, Chen Z G, Xu H, Li H M 2019 *Appl. Surf. Sci.* **469** 933
- [41] Xing P X, Zhang W Q, Chen L, Dai X Q, Zhang J L, Zhao L H, He Y M 2020 *Sustain. Energy Fuels* **4** 1112
- [42] Jakob M, Levanon H, Kamat P V 2003 *Nano Lett.* **3** 353
- [43] Subramanian V, Wolf E E, Kamat P V 2003 *J. Phys. Chem. B* **107** 7479
- [44] Lin E Z, Wu J, Qin N, Yuan B W, Bao D H 2018 *Catal. Sci. Technol.* **8** 4788
- [45] Li Z Y, Zhang Q L, Wang L K, Yang J Y, Wu Y, He Y M 2021 *Ultrason. Sonochem.* **78** 105729
- [46] Lin E Z, Kang Z H, Wu J, Huang R, Qin N, Bao D H 2021 *Appl. Catal. B* **285** 119823
- [47] Zhao T L, Bokov A A, Wu J, Wang H, Wang C M, Yu Y, Wang C L, Zeng K Y, Ye Z G, Dong, S X 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1807920
- [48] Zhang A, Liu Z Y, Xie B, Lu J S, Guo K, Ke S M, Shu L L, Fan H Q 2020 *Appl. Catal. B* **279** 119353
- [49] Yuan B W, Wu J, Qin N, Lin E Z, Kang Z H, Bao D H 2019 *Appl. Mater. Today* **17** 183
- [50] Wu J G, Wu T 2020 *ACS Appl. Mater.* **12** 52231
- [51] Pham Thi T P, Yan Z, Nick G, Hamideh K, Nguyen Phuc H D, Xuefan Z, Dou Z, Kechao Z, Steve D, Chris B 2020 *iScience* **23** 101095
- [52] Kapat K, Shubhra Q T, Zhou M, Leeuwenburgh S 2020 *Adv. Funct. Mater.* **30** 1909045

- [53] Dawson J A, Sinclair D C, Harding J H, Freeman C L 2014 *Chem. Mater.* **26** 6104
- [54] Reaney I, Colla E, Setter N 1994 *Jpn. J. Appl. Phys.* **33** 3984
- [55] Wu J, Qin N, Lin E Z, Kang Z H, Bao D H 2021 *Mater. Today Energy* **21** 100732
- [56] Chen L, Jia Y M, Zhao J H, Ma J P, Wu Z, Yuan G L, Cui X Z 2021 *J. Colloid Interface Sci.* **586** 758
- [57] Li X, Lin H M, Chen X, Niu H, Zhang T, Liu J Y, Qu F Y 2015 *New J. Chem.* **39** 7863
- [58] Yao W, Shen C, Lu Y 2013 *Compos. Sci. Technol.* **87** 8
- [59] Hou T, Cao F, Li M L, Wang J L, Lv L L 2020 *J. Environ. Sci. Eng.* **8** 84
- [60] Kumar M, Singh G, Vaish R 2021 *Mater. Adv* **2** 4093
- [61] Bai S L, Sun L X, Sun J H, Han J Y, Zhang K W, Li Q Q, Luo R X, Li D Q, Chen A 2021 *J. Colloid Interface Sci.* **587** 183
- [62] Zhao Z C, Wei L Y, Li S, Zhu L F, Su Y P, Liu Y, Bu Y B, Lin Y H, Liu W S, Zhang Z T 2020 *J. Mater. Chem. A* **8** 16238
- [63] Prakash J, Prasad U, Alexander R, Bahadur J, Dasgupta K, Kannan A N M 2019 *Langmuir* **35** 14492
- [64] Miao Y, Tian W R, Han J, Li N J, Chen D Y, Xu Q F, Lu J M 2022 *Nano Energy* **100** 107473
- [65] Zhou X F, Shen B, Zhai J W, Hedin N 2021 *Adv. Funct. Mater.* **31** 2009594
- [66] Guan J F, Jia Y M, Chang T, Ruan L J, Xu T S, Zhang Z, Yuan G L, Wu Z, Zhu G Q 2022 *Sep. Purif. Technol.* **286** 120450
- [67] Ji M, Kim J H, Ryu C H, Lee Y I 2022 *Nano Energy* **95** 106993
- [68] Fu C, Wu T, Sun G W, Yin G F, Wang C, Ran G X, Song Q J 2023 *Appl. Catal. B* **323** 122196
- [69] Khanbabaee B, Mehner E, Richter C, Hanzig J, Zschornak M, Pietsch U, Stöcker H, Leisegang T, Meyer D C, Gorfman S 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 222901
- [70] Kang Z H, Lin E Z, Qin N, Wu J, Yuan B W, Bao D H 2021 *Environ. Sci. :Nano* **8** 1376
- [71] Zhang D F, Su C H, Li H, Pu X P, Geng Y L 2020 *J. Phys. Chem. Solids* **139** 109326
- [72] Zhao Q, Xiao H Y, Geng H F, Zheng Z P, Wang J S, Wang F F, Guo Y P 2021 *Nano Energy* **85** 106028
- [73] Sun X X, Li R C, Yang Z W, Zhang N, Wu C, Li J H, Chen Y L, Chen Q, Zhang J, Yan H J, Lv X, Wu J G 2022 *Appl. Catal. B* **313** 121471
- [74] Li J H, Wei X W, Sun X X, Li R C, Wu C, Liao J Y, Zhang T, Wu J G 2022 *ACS Appl. Mater. Inter.* **14** 46765
- [75] Liu Z, Wen X R, Wang Y, Jia Y M, Wang F F, Yuan G L, Wang Y J 2022 *Adv. Mater. Technol.* **7** 2101484
- [76] Ruan L J, Jia Y M, Guan J F, Xue B, Huang S H, Wang Z H, Fu Y H, Wu Z 2022 *J. Clean. Prod.* **345** 131060
- [77] Wang S Y, Gao Y Y, Miao S, Liu T F, Mu L C, Li R G, Li R G, Fan F T, Li C 2017 *J. Am. Chem. Soc.* **139** 11771
- [78] Chen S, Zhu P, Mao L J, Wu W C, Lin H, Xu D L, Lu X Y, Shi J L 2023 *Adv. Mater.* 2208256
- [79] Wang Y, Wen X R, Jia Y M, Huang M, Wang F F, Zhang X H, Bai Y Y, Yuan G L, Wang Y J 2020 *Nat. Commun.* **11** 1328

## REVIEW

# Research progress in enhancement strategies and mechanisms of piezo-electro-chemical coupling\*

Jia Yan-Min<sup>1)†</sup> Wang Xiao-Xing<sup>1)</sup> Zhang Qi-Chang<sup>1)</sup> Wu Zheng<sup>2)‡</sup><sup>1)</sup> (School of Science, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)<sup>2)</sup> (School of Environmental and Chemical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710048, China)

( Received 31 October 2022; revised manuscript received 25 February 2023 )

## Abstract

Piezoelectric materials can harvest tiny mechanical energy existing in the environment, and have strong ability to convert mechanical signals into electrical signals. Piezo-electro-chemical coupling can be realized via combining piezoelectric effect of piezoelectric materials with electrochemical redox effect. In recent years, piezo-electro-chemical coupling has attracted a lot of attention from researchers in harvesting vibration energy to treat dye wastewater. The piezoelectric catalyst material dispersed in solution is deformed by ultrasonic vibrations. Owing to the piezoelectric effect and spontaneous polarization effects, positive and negative charges are generated at both ends of the catalyst, which can further react with dissolved oxygen and hydroxide ions in the solution to generate superoxide and hydroxyl radicals ( $\cdot\text{O}_2^-$  and  $\cdot\text{OH}$ ) for decomposing organic dyes. However, ordinary piezoelectric catalytic materials are often difficult to meet people's pursuit of efficient treatment of organic dyes. Researchers have conducted a lot of researches on piezo-electro-chemical coupling, mainly focusing on the following two aspects: 1) the modification of piezoelectric catalysts to achieve extended carrier lifetime, accelerate carrier separation and high piezoelectric coefficients, and 2) the combination of piezo-electro-chemical coupling with photocatalysis to suppress photogenerated carrier recombination to obtain high synergistic catalytic performance. In this work, the following five strategies to enhance the piezo-electro-chemical coupling via modifying piezoelectric catalyst materials are introduced. The heterojunction structure is constructed to promote the separation of electron-hole pairs. The precious metal is coated on the surface of the catalyst to accelerate the transport and transfer of electrons. The catalyst composition is regulated and controlled to obtain an increased piezoelectric coefficient at the phase boundary. Carbon or graphene are mixed in the catalyst to accelerate the electron transfer on the surface of piezoelectric material. The number of active sites increases through introducing defects into the catalyst to increase the concentration of carriers. The physical mechanisms of five different strategies are described from the perspectives of electron transport and transfer, phase transition, and oxygen vacancies. In addition, the prospects for piezo-electro-chemical coupling in energy and biomedical applications such as hydrogen production, carbon dioxide reduction, tumor therapy and tooth whitening are presented.

**Keywords:** piezo-electro-chemical coupling, piezoelectric materials, piezoelectric effect, piezocatalysis**PACS:** 77.65.-j, 77.90.+k, 77.84.-s, 79.60.Jv**DOI:** 10.7498/aps.72.20222078

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 22179108).

† Corresponding author. E-mail: [jiayammin@xupt.edu.cn](mailto:jiayammin@xupt.edu.cn)‡ Corresponding author. E-mail: [wuzheng@xpu.edu.cn](mailto:wuzheng@xpu.edu.cn)



## 压-电-化学耦合增强策略及机理研究进展

贾艳敏 王晓星 张祺昌 武峥

### Research progress in enhancement strategies and mechanisms of piezo-electro-chemical coupling

Jia Yan-Min Wang Xiao-Xing Zhang Qi-Chang Wu Zheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 087701 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20222078

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222078>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

AgNbO<sub>3</sub>压电纳米材料压-电-化学耦合研究

Piezo-electrochemical coupling of AgNbO<sub>3</sub> piezoelectric nanomaterials

物理学报. 2018, 67(10): 107702 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180287>

磁致伸缩/压电层叠复合材料磁电效应分析

Magnetolectric effect analysis of magnetostrictive/piezoelectric laminated composites

物理学报. 2018, 67(7): 077702 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172307>

高性能铌酸钾钠基无铅陶瓷的压电和电卡性能

Piezoelectric and electrocaloric properties of high performance potassium sodium niobate-based lead-free ceramics

物理学报. 2020, 69(21): 217705 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200540>

新型二维压电声子晶体板带隙可调性研究

Tunable bandgaps in novel two-dimensional piezoelectric phononic crystal slab

物理学报. 2018, 67(21): 214208 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180611>

基于导电原子力显微镜的单根Ga<sub>N</sub>纳米带光调控力电耦合性能

Optically modulated electromechanical coupling properties of single Ga<sub>N</sub> nanobelt based on conductive atomic force microscopy

物理学报. 2019, 68(23): 237304 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191097>

压电材料双曲壳热弹耦合作用下的混沌运动

Chaotic motion of piezoelectric material hyperbolic shell under thermoelastic coupling

物理学报. 2019, 68(1): 010501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181714>