第 54 卷第 3 期
2026 年 3 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 54，No. 3
March，2026

http://jccsoc.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20250161

综 合 评 述

钛酸钡基压电材料的压电催化研究进展

梁乾森[1]，谢　兵[1]，高文鹏[1]，刘智勇[1]，姜胜林[2]，张海波[3]

(1. 南昌航空大学动力与能源学院，南昌 330063；2. 华中科技大学集成电路学院，武汉 430074；
3. 华中科技大学材料科学与工程学院，武汉 430074)

摘　要：随着社会经济的快速发展，能源短缺和环境污染等问题日益凸显，压电催化技术得以发展。钛酸钡($BaTiO_3$)因其优异的压电性能、较低的制备成本与良好的机械稳定性，被广泛应用于压电催化领域。当前，$BaTiO_3$ 基压电材料的应用研究主要集中在降解有机污染物、分解 H_2O 制 H_2、生产 H_2O_2 以及医学应用等方面。随着研究的深入，$BaTiO_3$ 基压电材料在压电催化应用领域的研究也逐渐拓展到了 CO_2 还原、氮气(N_2)固定、重金属离子去除等新兴领域。本文围绕 $BaTiO_3$ 基压电材料，首先讨论其压电催化机理，然后介绍其能量来源。随后，将集中探讨 $BaTiO_3$ 在压电催化领域的众多应用，系统回顾其在污染物降解(如有机染料和抗生素降解)、能源制备(如 H_2O_2、H_2 制备)、CO_2 还原、固氮以及医学等多个领域的重要进展，深入分析 $BaTiO_3$ 基压电催化剂在应用中面临的挑战，并探讨潜在的优化策略，以推动其在压电催化中的进一步发展和应用。

关键词：钛酸钡；压电催化；能量来源
中图分类号：TM22+3、TB321　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2026)03–1097–20
网络出版时间：2026–02–10

在当今社会经济快速发展的背景下，能源匮乏与环境污染的问题愈加显著。1972 年，Fujishima 课题组[1]在二氧化钛(TiO_2)电极上观察到水在光照作用下分解为氢气(H_2)和氧气(O_2)的现象，这一成果标志着利用光催化作用生产氢能的研究开端。1976 年，Carey 等[2]发现,在光照条件下，纳米级 TiO_2 材料能有效地分解多氯联苯，这一发现为光催化技术在环境净化领域的应用提供了坚实的理论与实验基础。随后，众多国内外学者在光催化领域进行了大量的研究工作，并取得了重要的进展。光催化技术在解决能源危机和环境污染问题上显示出巨大潜力。尽管光催化技术具备环境友好性、操作简便性、广泛的应用范围以及能直接利用太阳能等显著优势，但其在实际应用过程中，效率受到太阳能利用率低和光生载流子分离效率低等因素的制约。因此，对新型催化技术的开发与研究显得尤为关键。

压电催化技术通过利用在搅拌、超声等外部刺激下产生的压电材料内建电场，驱动电子和空穴对沿相反方向迁移到表面[3]。这一过程形成活性反应基团，从而激发氧化还原反应，实现对污染物的高效降解及水的裂解制氢等功能。相较于光催化技术，压电催化技术可以在存在或缺少光照的环境下工作，从而摆脱了对光源的依赖性，极大拓宽了应用领域。此外，由于压电材料特有的压电效应，压电催化在机械能与电能之间的转换效率显著高于光-电能量的转换效率[4]。因此，压电催化技术被视为继光催化之后，又一能够有效应对环境和能源挑战的前沿技术。

2006 年，Wang 等[5]基于压电效应提出了压电纳米发电机的概念，为压电材料的应用开辟了新的方向。随后在 2010 年，Hong 等[6]观察到在超声波激励下，ZnO 纤维与 $BaTiO_3$ 枝晶能够实现水(H_2O)的分解，生成氢气(H_2)和氧气(O_2)，据此提出了一种基于压电效应的催化分解水的物理机制。自此，压电催化技术引起了学术界的广泛关注，研究者们开始致力于探索新型压电材料。近年来，科研人员开发的压电催化材料主要分为无机和有机 2 大类[7]。在无机压电催化剂方面，$BaTiO_3$[8]、ZnO[9–10]、

收稿日期：2025–03–11。　修订日期：2025–05–15。
基金项目：国家自然科学基金(52462018)；江西省杰出青年基金(20224ACB214007)资助。
第一作者：梁乾森(1998　)，男，硕士研究生。
通信作者：谢　兵(1983　)，男，博士，教授。

Received date: 2025–03–11.　**Revised date:** 2025–05–15.
First author: LIANG Qiansen(1998–), male, Master candidate.
E-mail: liangqs518@163.com
Correspondent author: XIE Bing(1983–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: xieb@nchu.edu.cn

$NaNbO_3$[11]、$BiFeO_3$[12]、$Bi_4Ti_3O_{12}$[13]、$PbZr_xTi_{1-x}O_3$[14–15]、MoS_2[16]等材料因其优异的压电性能而备受关注。在有机压电催化剂方面，PVDF[17]、PVDF-TrFE[18]等材料也展现出良好的研究价值。目前，无机压电催化材料的研究重点主要集中在 4 大类材料：ZnO、钙钛矿型压电材料、二维层状压电材料和铋基层状压电材料[3]。其中，钙钛矿型压电材料因其独特的 ABO_3 化学式结构(A 为一价或二价阳离子；B 为四价或五价过渡金属离子；O 为氧离子)而备受关注[19]。这类材料不仅具有优异的本征压电性能，还表现出较高的居里温度和良好的化学稳定性，使其在压电催化和其他应用领域具有广阔的应用前景[20–22]。在众多钙钛矿型压电材料中，高压电系数的 $BaTiO_3$ 成为研究热点，其 A、B 位离子分别为 Ba^{2+}和 Ti^{4+}，O^{2-}处于面心位置，Ti^{4+}与 O^{2-}配位形成$[TiO_6]^{8-}$八面体结构。这种简单的晶胞结构使 Ti^{4+}在外力作用下容易偏离$[TiO_6]^{8-}$八面体中心位置，从而产生内部极化现象[23]，这解释了 $BaTiO_3$ 优异的本征压电性能的来源。此外，$BaTiO_3$ 还具有环境友好、尺寸和形态多样化等优势，使其成为备受研究者青睐的压电催化剂[24–26]。

近年来，$BaTiO_3$ 基压电材料在环境治理、制氢和生物医学等领域的卓越应用，引发了研究者的浓厚兴趣。然而，对此类材料在压电催化领域的研究尚未有系统的梳理和介绍。因此，认为有必要对 $BaTiO_3$ 基压电材料在压电催化领域，特别是在环境治理和能源领域的研究进展进行全面的综述。本文首先解析了 $BaTiO_3$ 基压电材料的压电催化机理及其能量来源，然后，依据不同的改性优化策略，全面回顾了近年来钛酸钡基压电材料在污染物降解、制氢、过氧化氢生产以及生物医学等领域的应用研究(图 1)。最后，总结了当前研究的主要内容，并针对 $BaTiO_3$ 基压电材料在压电催化领域面临的挑战进行了深入分析，同时对其未来发展方向提出了展望，以期为该领域的进一步研究提供参考与启示。

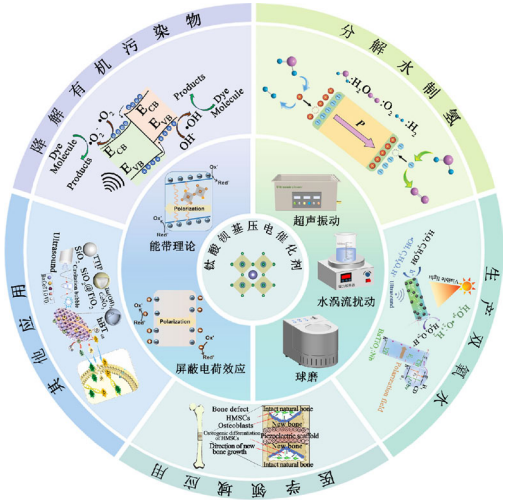
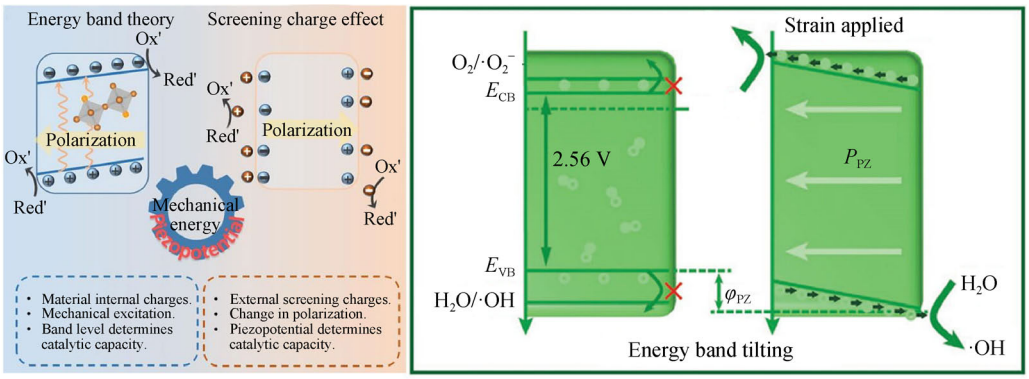


图 1 $BaTiO_3$ 基压电材料的压电催化机理、能量来源和应用领域分类示意图[27–32]

Fig. 1 A schematic diagram categorizing piezoelectric catalysis mechanism, energy sources, and application fields of $BaTiO_3$-based piezoelectric materials[27–32]

1 $BaTiO_3$ 基压电材料的压电催化机理

探讨压电催化反应的机理是压电催化研究领域的核心议题，这对于拓展其实际应用场景以及设计高效催化系统至关重要。由于压电效应与化学氧化还原反应的复杂互动，压电催化作用的基本机制仍然存在争议。目前普遍认为，能带理论和屏蔽电荷效应是解释压电催化机理的 2 大主流理论框架[27](图 2a)。



(a) (b)

图 2 (a) 压电催化作用机理的示意图[27]：能带理论(左)和屏蔽电荷效应(右)；(b) 图为在应用微观压力下，T-BTO 纳米粒子的能带倾斜以及伴随的压电催化氧化还原反应[34]

Fig. 2 (a) Schematic diagram illustrating the mechanism of piezocatalysis[27], focusing on energy band theory (left) and the screening charge effect (right); (b) Schematic illustration of band tilting in T-BTO nanoparticles under strain induced by ultrasound- driven microscopic pressure, accompanied by piezocatalytic redox reactions[34]

1.1 能带理论

受光催化的启发，结合压电电子学理论，成熟的能带理论被部分应用于压电催化中，为理解压电催化机理提供了重要的理论框架。根据能带理论，压电催化过程中活性载流子的形成机制与光催化类似：在外界能量的作用下，催化材料的价带(VB)电子被激发并跃迁至导带(CB)，同时在价带留下空穴，形成电子–空穴对，进而引发氧化还原反应[33]。然而，两者在能量来源上存在本质差异：光催化的能量来自材料吸收的光子，而压电催化的能量来自界面的机械能。能带理论的核心在于揭示压电势如何调控压电催化剂的能带结构，从而促进电荷的分离与迁移。当压电催化剂在机械应力下极化时，产生的压电势会显著影响电子态的分布，导致能带倾斜(图 2b)，从而实现能带结构的有效调控[27]。$BaTiO_3$ 在机械应变下极化时，其压电势(0.45 V)可致能带倾斜，使原本不匹配的价带(VB)和导带(CB)位置与水的氧化还原电位对齐[34]。在静态状态下，$BaTiO_3$ 的 CB 位置(–0.16 V)不足以还原氧气生成·O_2^-(–0.33 V)，而应变诱导的能带倾斜使 CB 负移超过–0.33 V，从而满足热力学要求[34]。这种压电势诱导的能带调控具有重要的催化意义：首先，它能够克服化学反应的热力学限制，为氧化还原反应的发生创造有利条件；其次，倾斜的能带结构更容易与反应物的氧化还原电位对齐，从而提供足够的能量来驱动特定的氧化还原反应[34]。然而，研究表明，压电催化剂的能带倾斜可能会因内部运动电荷的定向积累而被屏蔽[35]，这一现象强调了周期性机械应变的重要性。因此，通过超声振动等手段为压电催化剂提供周期性形变，不仅可以有效调控能带结构，还能防止能带倾斜的屏蔽效应。此外，压电势在载流子分离和迁移过程中发挥着关键作用，压电势是通过静电相互作用驱动内部电荷载流子向催化剂的 2 个相反极性表面迁移，从而启动氧化还原反应[24]。这一机制可以通过瞬态压电电流测量和原位电化学阻抗谱等实验手段进行验证，为压电势的影响提供实验依据。例如，Zhang 等[36]通过瞬态压电电流测试发现，Li 掺杂的 KNN 样品在机械振动下表现出更高的电流密度，表明压电势显著提升了电荷分离效率。此外，原位电化学阻抗谱显示，随着振动功率增加，电荷传输电阻降低，电子弛豫时间延长，进一步验证了压电势对载流子迁移的促进作用。

关于压电催化反应中活性载流子的来源，学术界仍存在一定争议。尽管能带理论认为机械能激发是活性载流子的主要来源，但近年来的研究表明，材料固有的自由电荷也可能在催化过程中发挥重要作用。例如，材料内部的缺陷结构(如氧空位、硫空位等)能够产生自由电荷[37–38]，这些电荷在压电势的驱动下可迁移至材料表面并参与催化反应。然而，目前的研究尚难以明确区分机械能激发和内部自由电荷对活性载流子贡献的相对比例。解决这一问题需要更加精细的实验设计和深入的理论研究。因此，未来的研究应重点开发更精确的表征手段，并建立更完善的理论模型，以厘清活性载流子的来源及其在压电催化中的具体作用机制。

1.2 屏蔽电荷效应

在 $BaTiO_3$ 压电材料中，机械应变诱导的极化会产生压电势，导致正负电荷定向迁移并束缚于材料的内表面。这些内部极化产生的束缚电荷会吸引外部环境中带相反电荷的离子(如 H^+、OH^-)或电子，从而在材料外表面形成屏蔽电荷[27]。当施加周期性机械应变时，极化方向随之交替变化，驱动表面屏蔽电荷发生吸附–释放循环，释放的高能电荷(如电子或质子)可参与氧化还原反应，进而驱动催化过程[39]。通过 Kelvin 探针力显微镜(KPFM)对 $BaTiO_3$ 表面电位动态观测，结果显示在居里温度(T_C=130 ℃)以上，材料由铁电相转变为顺电相，表面极化消失，但屏蔽电荷的释放导致表面电位短暂升高，随后逐渐弛豫至平衡状态[40]。冷却过程中，自发极化恢复，屏蔽电荷重新吸附，这一动态过程表明，周期性应变可维持表面电荷的非平衡态，从而持续驱动催化反应[40]。有限元模拟发现，应变工程优化的 $BaTiO_3$(压电势为 1.6 V)可同时实现 H_2 和 O_2 的高效生成，而未经优化的样品几乎无活性[41]。这进一步证明压电势需超过反应能垒方可触发水分解(1.23 V)。此外，$BaTiO_3$ 纳米颗粒在超声下的压电势分布模拟显示，压缩应变导致屏蔽电荷释放，而应变恢复时电解液中的补偿离子被吸附，形成电荷循环[42]。上述实验现象或模拟结果验证了屏蔽电荷动态吸附–释放循环过程，同时揭示了屏蔽电荷效应在压电催化反应中电荷来源的重要机制：参与反应的电荷并非完全来自材料内部的载流子，而是主要来源于外部系统(如电解液)中吸附的屏蔽电荷[24]，如水分子或 OH^- 在极化表面解离产生的电子或质子。这一机制表明，压电催化系统的开发不仅需要关注压电催化剂本身的设计，还需充分考虑电解液的影响。在压电势的作用机制上，屏蔽电荷效应与能带理论存在显著区别。能带理论强调压电势通过间接调控能带结构来

影响催化反应，而屏蔽电荷效应则强调压电势的直接作用：当压电势达到或超过反应的吉布斯自由能阈值时，可直接驱动氧化还原反应[43]。研究表明，压电势的强度不仅决定了表面屏蔽电荷的密度，还影响其能量状态，从而对反应速率产生显著影响，这一发现为压电催化剂的设计提供了重要指导，开发具有高压电势的压电材料是提升催化性能的关键方向之一。

尽管屏蔽电荷效应可以解释压电势大小对反应热力学可行性的影响(类似于电催化中的起始电位)，但在解释压电催化对不同化学反应的选择性和作用能力方面仍有局限。研究表明，压电催化剂在水分解、活性氧物种生成以及 H_2O_2 生产等反应中表现出显著的选择性差异[42,44–45]，这一现象难以通过屏蔽电荷效应全面解释。此外，压电势的分布和大小在实验上难以直接测量，目前依赖于有限元分析或理论计算进行估算，但这些方法的准确性和可靠性仍需进一步验证；另一个关键问题是，屏蔽电荷效应将表面屏蔽电荷的释放和吸附视为催化反应的核心步骤。然而，在复杂的反应体系中，这些电荷的动态行为难以通过实验直接观测。因此，未来的研究需要通过更精细的实验设计(如原位表征技术)和更精确的理论计算(如第一性原理模拟)来深入探究屏蔽电荷的动态行为及其在催化反应中的作用机制。同时，还需进一步拓展屏蔽电荷理论在复杂反应体系中的应用，以全面揭示压电催化的选择性机制，从而为高性能压电催化剂的设计提供理论指导。

总的来说，能带理论和屏蔽电荷效应在压电势的核心作用、机械能输入方式以及压电势与催化活性之间的关联性等方面具有一致性，这些共同点为理解压电催化机制提供了重要基础，并显著推动了该领域的发展。然而，2 种理论在反应电荷的来源、压电势的作用机制以及反应动力学的决定因素等方面存在显著分歧[27]，这些矛盾反映了它们在解释压电催化机理时的不同侧重点。能带理论更适用于半导体材料的能带工程优化(如 $BiFeO_3$的压电势诱导导带负移[46])，而屏蔽电荷效应则为强极化材料的设计(如 $BaTiO_3$ 纳米立方体的高压电势[44])提供了理论依据。尽管 2 种理论各有侧重，但它们共同推动了高性能压电催化剂在环境修复与能源转化领域的应用。目前，关于压电催化机理的研究仍处于初级阶段，相关讨论相对有限。能带理论和屏蔽电荷效应在解释压电催化过程时都表现出一定的适用性和局限性，且均无法全面涵盖所有压电催化反应。因此，未来的研究需要通过实验与理论相结合的方式，进一步验证这 2 种机理的适用范围，并深入探究它们在不同反应体系中的具体作用机制。此外，还需要开发新的理论模型和实验方法，以弥补现有理论的不足，从而为压电催化机理的全面理解和高性能催化剂的理性设计提供更坚实的科学基础。

2 $BaTiO_3$ 基压电材料的压电催化能量来源

2.1 超声振动

压电催化的实现依赖于在压电催化剂表面施加机械应力，该应力可以提供催化反应所需的能量[3]。在实验室中，超声振动是最常用的诱导材料形变的方法，其能量传递主要通过超声空化效应实现[47]。图 3 为压电催化实验的示意图和超声空化以及由空化气泡塌陷引起的压力变化。由图 3 可见，当超声波在液体中传播时，声压以波的形式周期性变化。在声压的正相位，水分子被挤压；而在负相位，水分子被撕裂，从而形成空化气泡并促使其生长。当空化气泡生长至几十微米时会破裂，此时邻近的 $BaTiO_3$ 纳米颗粒所受到的局部冲击力高达 10^8 Pa[48]。此外，周期性变化的声压也能直接导致 $BaTiO_3$ 基压电材料发生形变，进而通过压电效应产生周期性压电势，最终在液体中生成强氧化性物质(如·OH 和·O_2^-)。超声振动不仅给样品施加高压应力，其周期性特性还可有效避免材料内部压电极化场被载流子屏蔽。当压电材料受到应力作用，会产生内建电场促进载流子分离。然而，内建电场会因载流子的

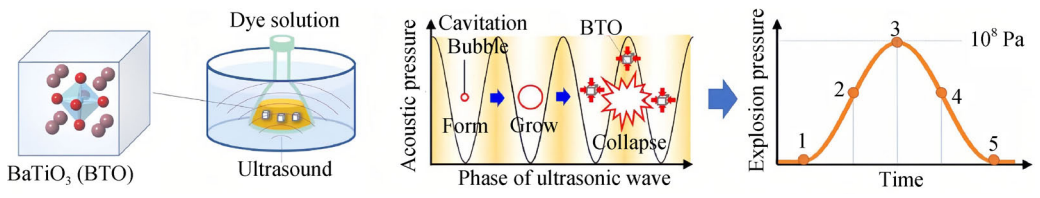


图 3 压电催化实验的示意图和超声空化以及由空化气泡塌陷引起的压力波动[48]

Fig. 3 Schematic diagram illustrating piezocatalysis experiments, ultrasonic cavitation, and pressure fluctuation resulting from implosive collapse of a cavitation bubble[48]

聚集而迅速减弱。超声振动的周期性应力能够有效抑制载流子的累积，从而确保载流子的持续分离。尽管如此，超声振动作为能量来源仍有局限：首先，声波在高频时的传播效率和能量传递效率存在阈值限制；其次，超声振动引发的热催化和声催化效应难以量化；最后，高频持续的超声波在自然界中几乎不存在。因此，探索其他类型的压电催化能量来源(如机械振动、流体流动等)对于推动压电催化的实际应用具有重要意义。

2.2　水涡流扰动

水流产生的振动作为一种新型能量来源，为压电催化研究提供了新的方向。近年来，通过机械搅拌模拟水涡流扰动的方法已被应用于 $BaTiO_3$ 基材料的压电催化研究。与传统的超声波激发方法相比，机械搅拌具有操作简单、能耗低等优势。2018 年，Zhu 等[49]成功制备了 $0.5Ba(Zr_{0.2}Ti_{0.8})O_3–0.5(Ba_{0.7}Ca_{0.3})TiO_3$ 纳米纤维，并将其应用于压电催化降解染料。研究表明，在较低搅拌速率下，纳米纤维可通过弯曲变形产生羟基自由基(·OH)和超氧自由基($\cdot O_2^-$)，从而有效降解罗丹明 B (RhB)染料(图 4a)。虽然这种方法显著降低了能量消耗，但其催化时间通常长于超声振动诱导的压电催化。2023 年，Prasanna 等[50]系统研究了搅拌方式对 $BaTiO_3$ 纳米颗粒压电催化染料降解性能的影响，特别强调了液体体积在催化活性中的关键作用。如图 4b 所示，研究将 5 mg/L 的 RhB 溶液体积划分为 3 个区域：低体积区域Ⅲ(< 10 mL)、中体积区域Ⅱ(10 到 25 mL)和高体积区域Ⅰ(> 25 mL)。结果表明，随着液体体积的减小，涡流诱导的剪切力显著增强，从而提高 RhB 的降解效率。此外，研究还发现，$BaTiO_3$ 在空气环境下的催化降解效率优于氩气环境，且催化剂负载量和搅拌速度等操作条件对催化性能具有显著影响。这些发现为利用机械搅拌的低能耗技术在环境修复中的应用提供了新见解，显示了其在催化染料降解领域的巨大潜力。

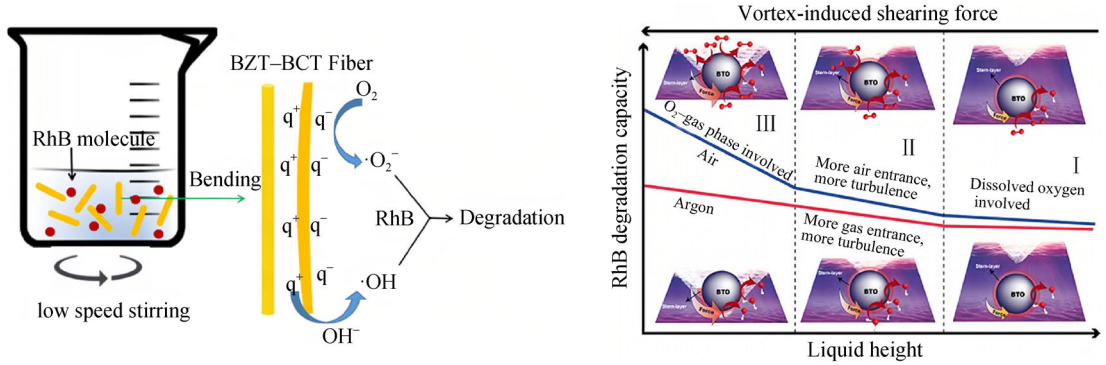


图 4　(a) 压电催化降解过程的原理图[49]；(b) 液体高度和气体存在对 BTO 在罗丹明 B 降解中压电催化活性影响的图形表示[50]

Fig. 4　(a) Schematic diagram of piezocatalytic degradation process[49]; (b) Graphical representation of effects of liquid height and gas presence on piezocatalytic activity of BTO in degradation of Rhodamine B[50]

2.3　球磨

虽然机械搅拌具备低能耗和环保的优点，但其降解过程耗时较久。近年来，球磨技术作为新型能量来源在压电催化领域崭露头角，展现出反应时间短、无需有机溶剂、常温操作、操作简便及高重现性等显著优点。2021 年，Zhou 等[51]将 $BaTiO_3$ 纳米颗粒作为压电催化剂用于球磨辅助的固态 RhB 染料降解。研究表明，在 $CuBr_2$ (0.06 mg)和 H_2O_2 (9 mg)的辅助下，固态 RhB 染料在 10 min 内的降解率达到 97.5%，30 min 内高达 99.6%。机理是通过球磨过程中 $BaTiO_3$ 纳米粒子的高度极化产生大量电荷，表现出强还原性，能够将 Cu(Ⅱ)还原为活性 Cu(Ⅰ)，后者与 H_2O_2 发生氧化还原反应生成$\cdot O_2^-$，促进染料降解。同时，Cu(Ⅰ)被氧化回 Cu(Ⅱ)，形成催化循环(图 5a)。这一反应体系只需补充固态染料和 H_2O_2 即可启动新一轮降解反应。但在多次循环测试中发现 30 分钟内的降解率显著下降，推测为催化剂失活所致。2023 年，He 等[52]进一步拓展了 $BaTiO_3$ 压电材料的应用范围，首次开发了基于球磨激励的机械催化脱羧酰化反应。通过球磨 $BaTiO_3$ 产生机械应力激励 $BaTiO_3$ 生成自由电荷，利用类似于光催化反应的单电子转移途径生成苯甲酰基自由基，实现了无溶剂、短反应时间和操作简便的 C3-酰基化反应(图 5b)。这一创新策略将机械能转化为电化学能，为有机合成提供了新思路，并展示了压电催化在绿色化学合成中的巨大潜力。

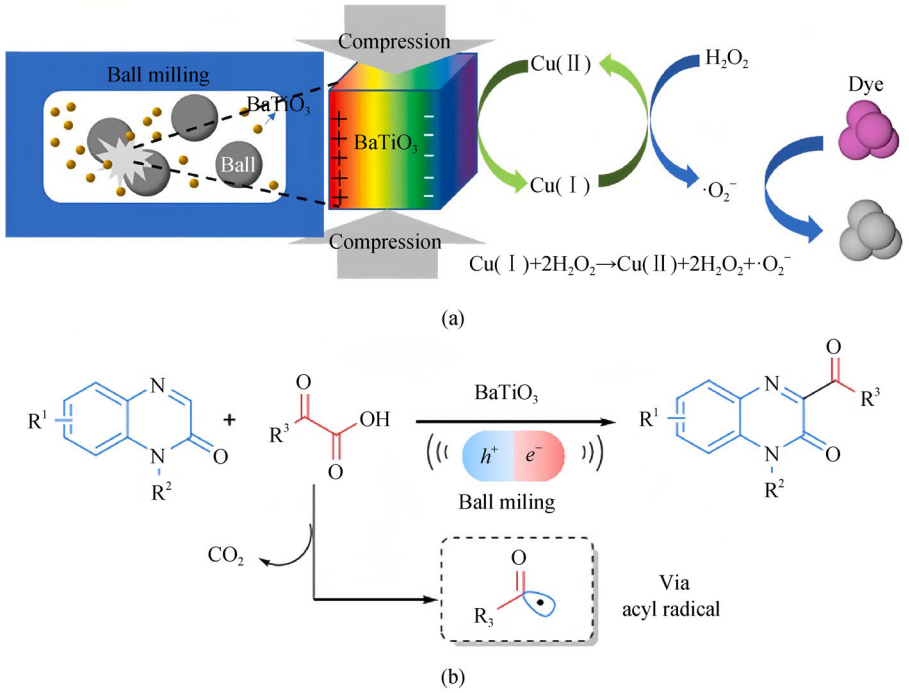


图 5 (a) 电–机械化学还原过程的拟定机制[51]；(b) 实现喹诺西啉-2(1*H*)-酮类化合物的 C3-酰基化策略以及使用压电材料的球磨法[52]

Fig. 5 (a) Proposed mechanism of electro–mechanical chemical reduction process[51]; (b) Strategy for achieving C3-acylation of quinazolin-2(1H)-one compounds using ball-milling method with piezoelectric materials[52]

3 $BaTiO_3$ 基压电材料的压电催化应用研究

3.1 $BaTiO_3$ 基压电材料的压电催化在降解有机污染物中的应用

工业排放的化工废水中含有大量具持久性和高毒性的有机污染物，这些污染物在水体中富集，并通过生物累积作用引发多种疾病，对生态环境和人类健康构成严重威胁[53–55]。$BaTiO_3$ 作为一种重要的压电材料，在降解有机污染物(如染料、药物等)方面展现了优异的压电催化性能，近年来通过多种改性策略，其催化效率得到进一步提升。

研究显示，$BaTiO_3$ 基压电材料通过不同的改性方法可以有效地降解多种有机污染物。2021 年，Lin 等[56]选择性地将银纳米颗粒沉积在 $BaTiO_3$ 纳米立方体表面，显著提升了其催化性能。研究比较了不同沉积方式对甲基橙、盐酸四环素、双酚和苯酚等有机污染物的降解效率(图 6a)。结果表明，选择性沉积银纳米颗粒的 $BaTiO_3$ 纳米立方体的压电催化活性是随机负载银纳米颗粒样品的 2 倍，且远高于纯 $BaTiO_3$ 样品，这一发现凸显了选择性沉积策略在优化催化剂性能中的重要性。2024 年，Ali 等[28]进一步研究了 $BaTiO_3$ 与 MoS_2的异质结构纳米复合材料在混合有机染料降解中的应用。实验表明，当 MoS_2含量为 1.0%(质量分数)时，复合材料对罗丹明 B 和甲基橙的降解效率分别提高了 1.84 倍和 2.80 倍，展现出优异的压电催化潜力(见图 6b 和图 6c)。2025 年，Zhou 等[57]也通过构建异质结的改性策略，研究设计了 $BaTiO_3$/g-C_3N_4(BTO/CN)异质结，用于促进催化臭氧氧化过程中阿特拉津(ATZ)降解。BTO/CN 异质结展现了更强的 O_3 亲和力和活化能力，其内部电场与界面电场协同作用有效促进了电荷分离与转移，为 O_3 激活和活性氧物种生成提供了充足的电子。实验结果显示，在 BTO/CN/O_3 体系中，ATZ 在 90 min 内去除率达到 90.1%，分别是 BTO/O_3 和 CN/O_3 体系的 3.5 倍和 1.7 倍。此外，$BaTiO_3$ 的形貌调控和协同效应也被证明对其压电催化性能具有显著提升作用。2020 年，Liu 等[58]通过两步水热法合成了 $BaTiO_3$ 纳米线(BT NWs)，其在降解甲基橙等有机染料时表现出明显增强的催化能力，在 80 min 内，降解率可达 98.17%。研究还发现，压电–光催化协同效应使 BT NWs 的降解效率分别比单独的压电催化和光催化提高了 1.28 倍和 2.24 倍(见图 6d)。在催化条件优化方面，2020 年，Wang 等[59]研究表明，催化剂浓度、染料浓度和染料类型等因素均对 $BaTiO_3$ 的催化活性有

显著影响。通过优化这些参数可显著提高染料的降解率(图 6e)。

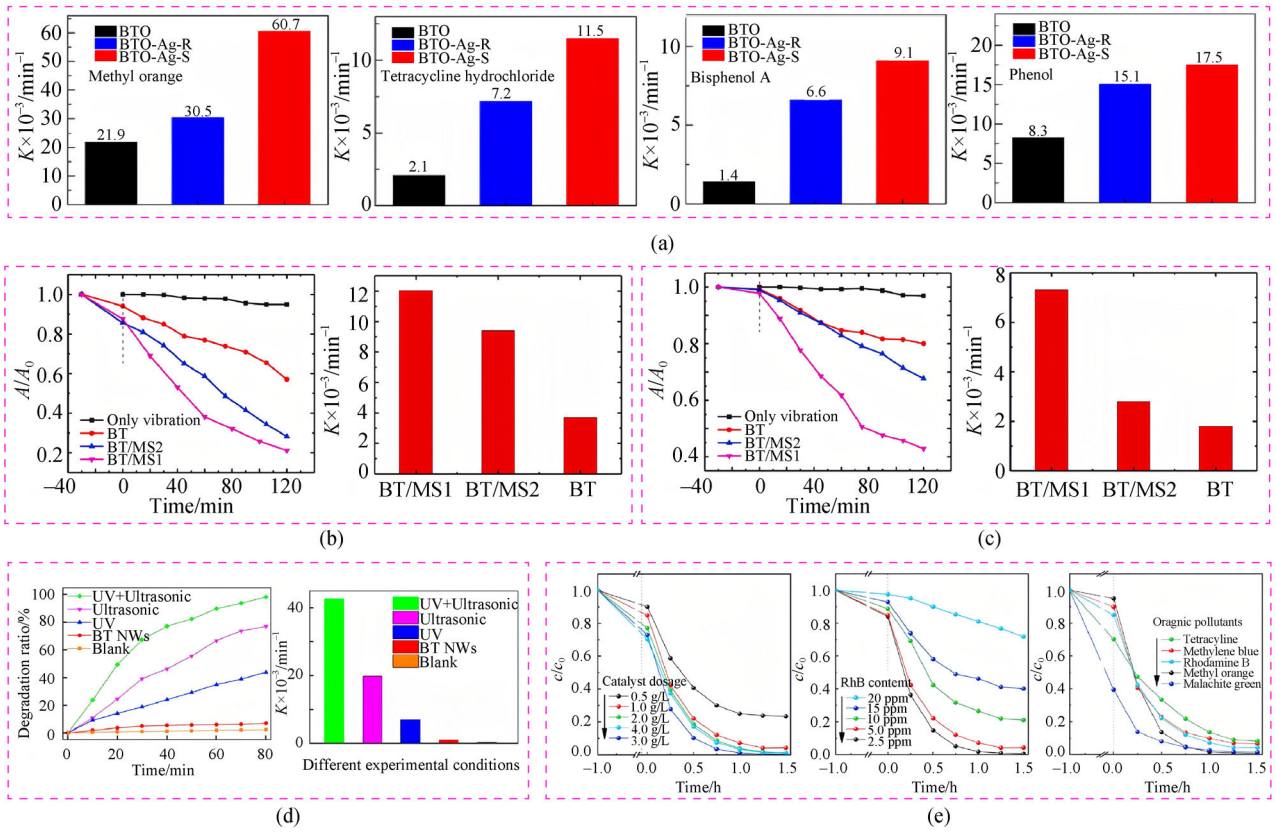


图 6　(a) 甲基橙、盐酸四环素、双酚和苯酚的降解速率常数 K[56]；(b) 罗丹明 B 的压电催化降解效率和降解速率常数[28]；(c) 甲基橙的压电催化降解效率和降解速率常数[28]；(d) 不同条件下甲基橙溶液的降解能力和速率常 K[58]；(e) 催化剂用量、RhB 含量以及染料类型对压电催化活性的影响[59]

Fig. 6　(a) Degradation rate constants K for methyl orange, tetracycline hydrochloride, bisphenol, and phenol[56]; (b) Piezocatalytic degradation efficiency and degradation rate constant for Rhodamine B[28]; (c) Piezocatalytic degradation efficiency and degradation rate constant for methyl orange[28]; (d) Degradation ability and rate constant K under different conditions for methyl orange solution[58]; (e) Effects of catalyst dosage, RhB content, and dye type on piezoelectric catalytic activity[59]

图 7 为各种钛酸钡基和非钛酸钡基压电催化剂降解罗丹明 B 的 K 值比较。由图 7 可见，$BaTiO_3$ 基压电催化剂在降解有机污染物罗丹明 B 反应中展现出较大部分现有压电催化材料更优异的性能，其性能优势主要来源于本身极强的压电效应和合理的改性策略带来的催化性能提升。相较于非 $BaTiO_3$ 基材料(如 $BiFeO_3$ 或 $ZnSnO_3$)，$BaTiO_3$ 基压电催化剂在电荷分离效率、结构稳定性及多功能协同作用方面的优势，使其在压电催化领域具有更广阔的应用潜力。

综上所述，$BaTiO_3$ 基压电材料在降解有机污染物方面展现出优异的压电催化活性和广阔的应用前景，尤其是在环境污染治理领域具有重要的研究价值和实际应用潜力，未来的研究应进一步探索其催化机理，优化材料设计和反应条件，以推动其在环境修复中的规模化应用。

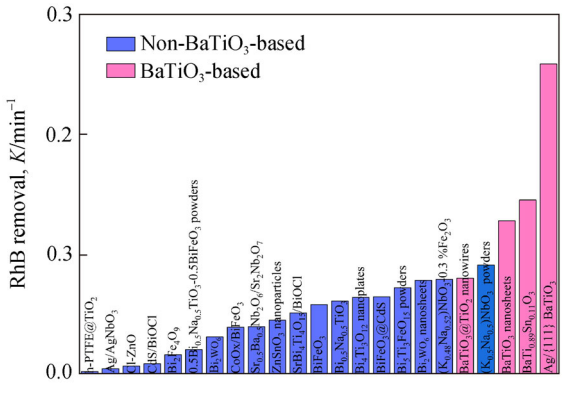


图 7　各种钛酸钡基和非钛酸钡基压电催化剂降解罗丹明 B 的 K 值比较[55,60–81]

Fig. 7　Comparison of K values for the degradation of Rhodamine B using various barium titanate-based and non-barium titanate-based piezoelectric catalysts[55,60–81]

3.2 $BaTiO_3$ 基压电材料的压电催化在分解 H_2O 制 H_2 中的应用

水分解是将水分子转化为氢气和氧气的一种关键反应。钛酸钡($BaTiO_3$)作为压电催化剂，在这一过程中展现出优异的压电催化活性和稳定性，尤其在超声波辅助的压电催化体系中，其氢气生成速率显著提升。近年来，钛酸钡基压电催化剂在水分解制氢领域受到广泛关注，并取得了重要进展。

2022 年，Zhang 等[29]报道可通过超声波耦合的钛酸钡纳米流体实现高效水分解，该体系在超声波作用下，$BaTiO_3$ 的粒径从约 400 nm 减小至 150 nm，形成稳定的纳米流体，其氢气生成速率达到 270 mmol·g^{-1}·h^{-1}，创下了当时压电驱动水分解产氢效率的最高记录，该体系在长达数天的测试中仍表现出稳定的氢气生成性能(图 8a)。此外，2023 年，Xue 等[82]通过调控 Ba : Ti 前驱体的摩尔比(1 : 1、2 : 1 和 4 : 1)，合成了具有不同结构形态和缺陷浓度的 $BaTiO_3$ 纳米线，并系统研究了其对氢气演化反应效率的影响。其中，BTO-2(Ba 与 Ti 摩尔比为 2 : 1)表现出最优的氢气演化效率(149.24 μmol·g^{-1}·h^{-1})，这归因于其高氧空位浓度(23.1%，摩尔分数)和纳米线的高长径比(20.1)，这些特性与其形态特征密切相关(图 8b)。近年来，研究者通过将压电效应引入光催化体系，进一步提升了水分解制氢的效率。2021 年，Wang 等[83]设计并构建了分层的 Z 型 $BaTiO_3$@$ZnIn_2S_4$ 异质结构，该结构结合了压电效应与 Z 型电子转移机制，展现出优异的催化产氢性能。研究表明，压电效应与空间电荷分离的协同作用显著促进了光生电荷载流子的分离，从而提升了氢气生成速率。在全光谱照射下，$BaTiO_3$@$ZnIn_2S_4$ 的电荷转移路径遵循 Z 型机制(图 8c)，这一发现为设计高效压电–光催化协同体系提供了重要参考。2024 年，Zhang 等[84]通过溶剂热法成功制备了 Bi_2MoO_6–$BaTiO_3$(BMO–BTO) Ⅰ 型异质结，并将其应用于压电催化产氢。结果表明，在超声振动条件下，最优配比的 BMO–0.1BTO 异质结的产氢速率可达 152.57 μmol·g^{-1}·h^{-1}，分别是纯 BMO (16.36 μmol·g^{-1} h^{-1})和 BTO (34.16 μmol·g^{-1}·h^{-1})的约 9.33 倍和 4.47 倍。进一步研究表明，这种显著增强的压电催化性能主要归因于异质结中建立的内建电场有效抑制了压电载流子的复合，而非压电性显著提高。2025 年，Fan 等[85]采用热处理工程调控钛酸钡(BTO)晶体相结构的策略，显著提升了其催化产氢性能。结果表明，在 43%立方相(C-BTO)与 57%四方相(T-BTO) 的最佳比例下，BTO 实现了高达 2245.1 μmol·g^{-1}·h^{-1} 的产氢速率，并能保持 25 h 的稳定性，较原始 BTO

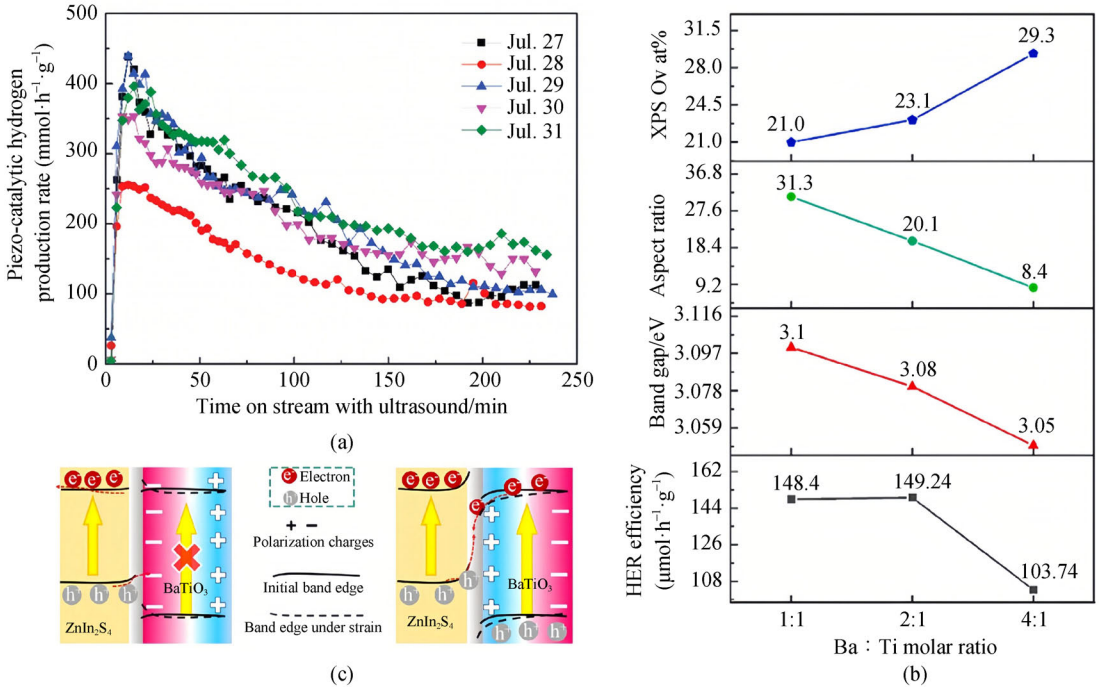


图 8 (a) 5 mg·L^{-1} BTO 用量的稳定性试验[29]；(b) BTO-1、BTO-2 和 BTO-4 的带隙、长径比和 XPS 氧空位浓度对析氢效率的影响[82]；(c) 在可见光照射(左)和全光谱照射(右)下，$BaTiO_3$@$ZnIn_2S_4$ 促进光生电子和空穴分离的压电效应示意图[83]

Fig. 8 (a) Stability tests at 5 mg·L^{-1} BTO dosage[29]; (b) Effects of bandgap, aspect ratio, and XPS oxygen vacancy concentration of BTO-1, BTO-2, and BTO-4 on hydrogen evolution efficiency[82]; (c) Schematic illustration of the piezoelectric effect facilitating separation of photogenerated electrons and holes under visible light irradiation (left) and full-spectrum light irradiation (right) in $BaTiO_3$@$ZnIn_2S_4$[83]

提升了近 10 倍。该研究系统性地探索了 $BaTiO_3$ 晶体相组成对催化性能的影响，揭示了通过晶体相工程提高光生电子–空穴分离效率的有效策略，为单一催化剂性能提升提供了新的途径。

在分解 H_2O 制 H_2 领域，$BaTiO_3$ 基压电催化剂也展现出优于多数现有材料的催化性能(图 9)。其优势主要源于以下机制：首先，$BaTiO_3$ 的强压电特性可在机械应力作用下产生内建电场，高效分离电子–空穴对，减小复合概率，从而显著提升载流子参与还原反应的效率；其次，可通过复合其他半导体形成异质结构(如 $BaTiO_3/ZnIn_2S_4/ZnTiO_3$)，进一步优化能带匹配，扩展光吸收至可见光范围，并促进界面电荷转移。此外，纳米结构设计(如纳米片、立方体形貌)可大幅增加比表面积，暴露更多活性位点，加速表面析氢动力学。相较于传统材料(如 MoS_2、Bi_2WO_6 或 SnSe)，$BaTiO_3$ 基压电催化剂在电荷分离效率、光吸收范围及界面反应动力学方面的综合优势，使其在压电/光催化制氢领域展现出更高的应用潜力。

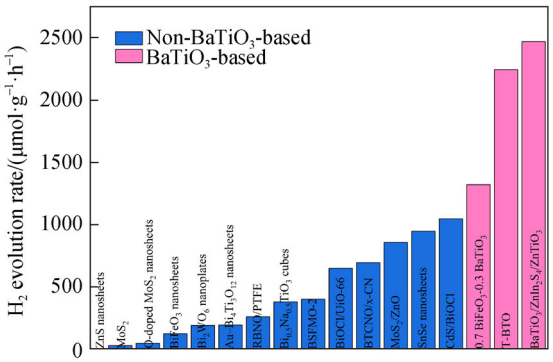


图 9　各种钛酸钡基和非钛酸钡基压电催化剂的氢气演化速率比较[4, 38, 46, 63, 85–97]

Fig. 9　Comparison of hydrogen evolution rates of various barium titanate-based and non-barium titanate-based piezoelectric catalysts[4, 38, 46, 63, 85–97]

综上所述，钛酸钡基压电催化剂在水分解制氢领域展现出巨大的应用潜力。通过优化材料形貌、调控缺陷浓度以及结合压电效应与光催化机制等改性策略，可以显著提升其催化性能。未来的研究应进一步探索压电催化与光催化的协同机制，并开发更高效、更稳定的催化体系，以推动水分解制氢技术的实际应用。

3.3　$BaTiO_3$ 基压电材料的压电催化在产 H_2O_2 中的应用

过氧化氢(H_2O_2)作为一种高效强氧化剂和消毒剂，广泛应用于杀菌消毒、造纸漂白、纺织加工和废水处理等领域[98]。此外，H_2O_2 还是一种富含能量的载体，具有可储存、水溶性好等特点，可用于过氧化物燃料电池供电[99]。然而，目前，工业上主要通过蒽醌氧化法生产 H_2O_2，该方法存在工艺复杂、能耗高、环境污染严重等问题[100]。因此，开发安全、经济且可持续的 H_2O_2 合成方法具有重要意义。近年来，压电催化技术作为一种新兴的 H_2O_2 合成途径，受到了广泛关注。

2022 年，Zhou 等[30]通过水热法合成了 Nb 掺杂的钛酸钡($BaTiO_3$:Nb)，并利用碳量子点(CDs)对其进行修饰(图 10a)。研究表明，$BaTiO_3$:Nb/C 在可见光和超声波的协同作用下，H_2O_2 生成速率高达 1360 μmol·g^{-1}·h^{-1}(图 10b)。CDs 的引入不仅增强了催化剂对可见光的吸收，还促进了电子向 $BaTiO_3$:Nb 导带的注入。同时，压电极化产生的电场有效促进了电子迁移，抑制了光生电子–空穴对的复合，从而显著提升了 H_2O_2 的生成效率。此外，研究还比较了不同形貌的钛酸钡催化剂(纳米棒状与球形)的催化性能，发现纳米棒状结构具有更优异的压电催化活性。构建异质结是提升催化性能的传统策略，其优势在于拓宽光吸收范围并抑制电子–空穴复合。2021 年，Zhou 等[101]首次报道了碘掺杂的 $BiVO_4/BaTiO_3$ 异质结构，并在其表面负载了银(Ag)或铜(Cu)纳米颗粒(图 10c)。该设计不仅改善了材料的光电性能，还为提高反应活性提供了新平台。研究表明，压电–光催化效应与等离子体共振效应的耦合显著增强了活性氧(ROS)的生成效率。在压电–光催化条件下，·OH 和·O_2^-自由基的生成速率远高于单一的光催化和声催化反应(图 10d)，揭示了耦合机制在提升催化活性方面的有效性。研究还阐明了压电极化场在促进光生载流子分离和转移中的机制，为理解机械应变对催化反应的影响提供了理论依据。2025 年，Gao 等[60]开发设计和制备了一种基于晶面高暴露的钛酸钡($BaTiO_3$)单晶微米片的新型压电催化剂，与传统纳米级 $BaTiO_3$ 相比，这种“类电容器”的微米片展现出显著提升的 H_2O_2 产率，在超声作用下达到 521 μmol·g^{-1}·h^{-1}，通过在微米片表面沉积银量子点的优化改性，Ag/$BaTiO_3$ 微米片的 H_2O_2 产率可提高至 1088 μmol·g^{-1}·h^{-1}，优于现有钙钛矿型压电催化剂，优异的压电性能和银量子点增强的载流子迁移能力是实现高效压电催化的主要原因。

近年来，通过调控钙钛矿材料的相结构来优化其压电性能已成为提高压电催化活性的重要策略。

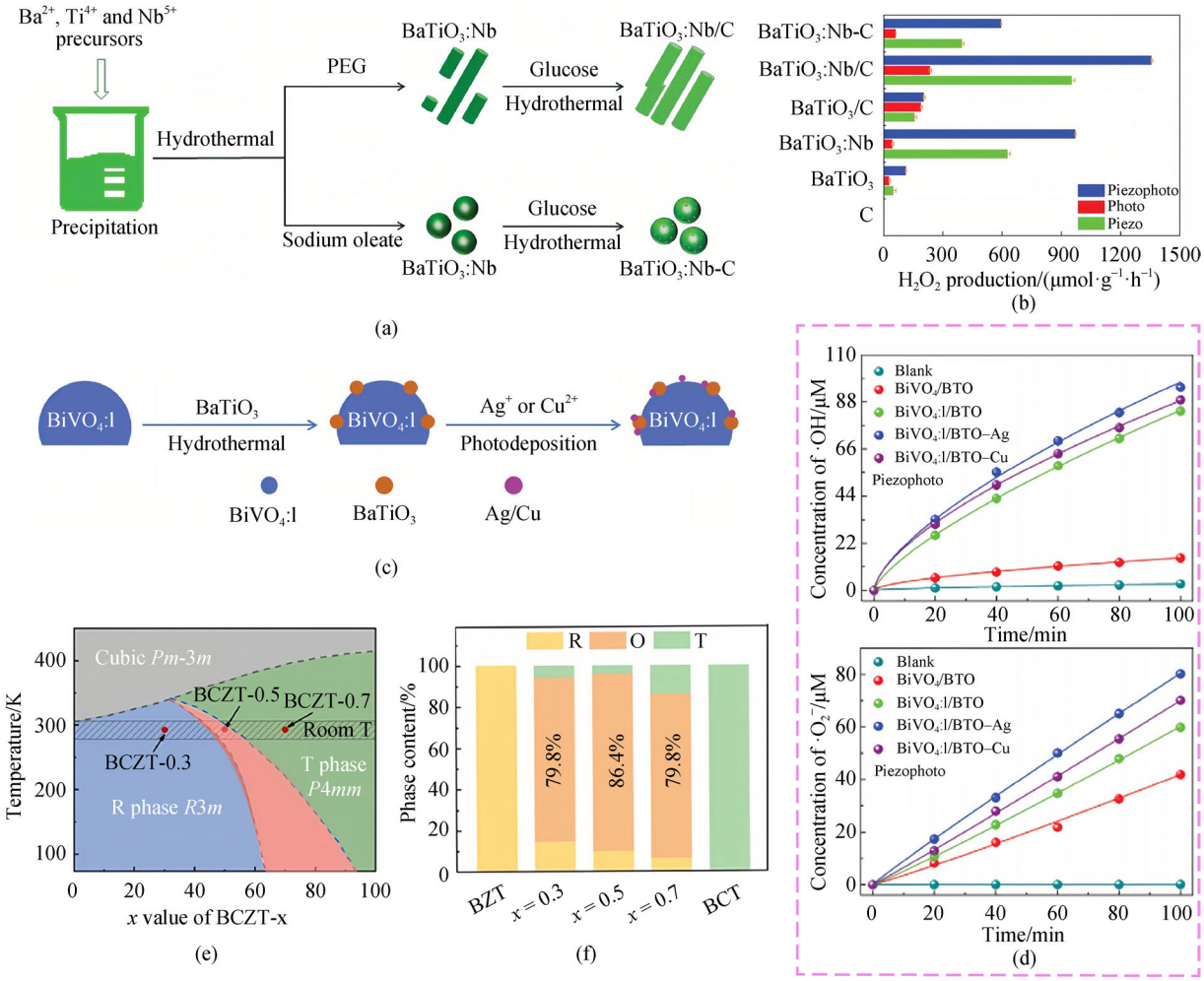


图 10 (a) 碳量子点修饰的不同形貌 $BaTiO_3$:Nb 的制备工艺[30]；(b) 在压电催化、光和压电–光催化反应中，各种催化剂的 H_2O_2 生产速率比较[30]；(c) 通过水热和光沉积方法的联合应用，说明 $BiVO_4$:I/BTO-Ag 和 $BiVO_4$:I/BTO-Cu 的形成过程[101]；(d) 在紫外–可见光和超声辐射下，不同催化剂上生成的·OH 和·O_2^-自由基的数量[101]；(e) BCZT-x 的相图[102]；(f) 催化剂的相对相含量[102]

Fig. 10 (a) Preparation process of different morphologies of $BaTiO_3$:Nb modified with carbon quantum dots[30]; (b) Comparison of H_2O_2 production rates using various catalysts in piezocatalytic, photocatalytic, and piezo-photocatalytic reactions[30]; (c) Formation process of $BiVO_4$:I/BTO-Ag and $BiVO_4$:I/BTO-Cu illustrated through the combined application of hydrothermal and photodeposition methods[101]; (d) Quantities of ·OH and ·O_2^- radicals generated on different catalysts under UV-visible light and ultrasonic radiation[101]; (e) Phase diagram of BCZT-x[102]; f) Relative phase content of the catalysts[102]

2022 年，Wang 等[102]开发了一系列以 BaCaZrTi 为基础的无铅钙钛矿氧化物(BCZT-x)，通过调节成分比例[(1–x)$Ba(Zr_{0.2}Ti_{0.8})O_3$–$x(Ba_{0.7}Ca_{0.3})TiO_3$]，形成了具有不同晶相的固溶体(图 10e)，成功构建了 T、R 和 O 相共存的准同型相界(MPB)。在超声波辐射下，最优配比的 $0.5Ba(Zr_{0.2}Ti_{0.8})O_3$–$0.5(Ba_{0.7}Ca_{0.3})TiO_3$压电催化剂的 H_2O_2生成速率达到 692 μmol·g^{-1}·h^{-1}，分别是 $Ba_{0.7}Ca_{0.3}TiO_3$、$BaZr_{0.2}Ti_{0.8}O_3$ 和 $BaTiO_3$ 的 3.3 倍、4.1 倍和 8.7 倍。研究结果表明，通过引入中间正交相，BCZT-x 固溶体在室温下形成了多晶相共存结构(图 10f)，显著降低了极化旋转的能量势垒，从而大幅提升了压电性能。

图 11 为各种钛酸钡基和非钛酸钡基压电催化剂的 H_2O_2 生产率的比较。由图 11 可见，$BaTiO_3$ 基压电催化剂在双氧水生产领域中也展现出优于部分非 $BaTiO_3$ 基材料的性能，其优势源于多方面的协同机制。首先，$BaTiO_3$ 的强压电特性可在机械应力诱导内建电场，高效分离电子–空穴对，提升电子参与 2 电子氧还原反应($2e^-$ ORR)的效率，从而直接增大 H_2O_2的生成速率。其次，合适的改性策略显著提升催化性能(如异质结构设计 $BaTiO_3$/g-C_3N_4 通过能带匹配实现载流子的定向迁移，结合 g-C_3N_4 的可见光

响应性，进一步优化界面电荷转移与光催化活性)。相较于非 $BaTiO_3$ 基材料(如 $BiFeO_3$ 或 $g\text{-}C_3N_4$)，$BaTiO_3$ 基催化剂在电荷分离效率、界面协同效应及结构可调控性方面的综合优势，使其成为高效、可持续生产 H_2O_2的理想材料。

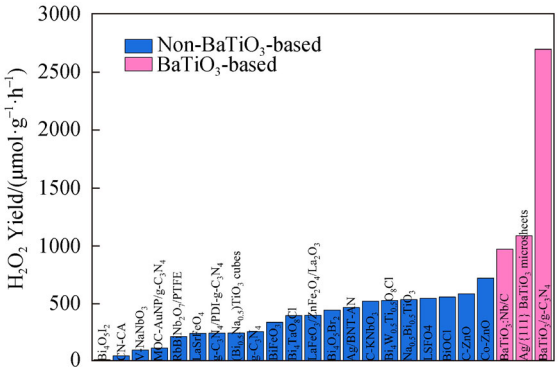


图 11　各种钛酸钡基和非钛酸钡基压电催化剂的 H_2O_2 生产率的比较[30, 60, 86, 94, 103–120]

Fig. 11　Comparison of H_2O_2 production rates of various Barium Titanate-based and non-Barium Titanate-based piezoelectric catalysts[30, 60, 86, 94, 103–120]

综上所述，压电催化技术在 H_2O_2生产领域展现出巨大的潜力。通过材料改性、异质结构构建以及相结构调控等策略，可以显著提升其压电催化性能。未来的研究应进一步探索压电催化与其他催化机制的协同效应，并开发更高效、更稳定的催化体系，以推动 H_2O_2 绿色合成技术的实际应用。

3.4　$BaTiO_3$ 基压电材料的压电催化在医学领域中的应用

新兴的纳米医学通过利用纳米材料或纳米技术优化治疗效果并减轻副作用，在过去几十年中取得了显著进展[121–123]。在医学领域，具有生物相容性的压电材料能够作为智能生物材料，通过机械刺激调控其与细胞及生物过程的相互作用，从而实现特定的治疗效果。这种基于压电催化的医学应用被称为压电催化医学(PCM)[124]。作为纳米催化医学的一个重要分支[125]，PCM 的核心机制依赖于高效且生物相容的高级氧化过程。机械能可以触发压电纳米材料与化学物质(如氧气和水分子)之间的相互作用，催化生成活性氧(ROS)等活性物质，进而通过氧化还原反应治疗多种疾病，这一创新策略为疾病治疗提供了新的思路和方法，展示了压电材料在生物医学领域的广阔应用前景。

在此背景下，基于压电催化效应的压电催化医学(PCM)材料因其优异的催化性能、高组织渗透性和良好的生物相容性而受到广泛关注。作为一种新兴的肿瘤治疗策略，压电催化药物能够以低成本有效根除肿瘤并抑制其复发，同时具有副作用少的优势，展现出巨大的临床应用潜力[124]。2024 年，Gong 等[126]首次将低剂量化疗药物与增强的声动力疗法(SDT)相结合，利用 $BaTiO_3$ 纳米颗粒作为声敏化剂治疗人类肿瘤类器官。研究表明，超声波激活的 $BaTiO_3$ 纳米颗粒能够生成活性氧(ROS)，诱导肿瘤细胞氧化损伤，从而实现对肿瘤细胞的有效杀伤(图 12a)。这一研究不仅为肿瘤治疗提供了新的研究方向，还为开发个性化治疗方案奠定了重要基础。同年，Li 等[127]报道了超声诱导的压电效应在油酸(OA)包覆的钛酸钡(OA@$BaTiO_3$)中生成碳中心自由基(·R)的现象。研究发现，超声激发的 OA@$BaTiO_3$ 能够产生高反应性的·R，表明其在缺氧肿瘤治疗中的潜力。机制研究表明，酸洗后的 OA@$BaTiO_3$ 不再生成·R(图 12b)，这与活性油酸分子的去除密切相关。这一发现揭示了 OA 不仅是传统的包覆剂，还可作为·R 的前体。此外，体外实验证实，PEG 修饰的 OA@$BaTiO_3$ 在缺氧环境下对 MCF-7 细胞表现出显著的细胞毒性(图 12c)。体内实验进一步验证了其在 4T1 肿瘤模型中的抗肿瘤效果(图 12d)，展示了超声诱导的·R 和·OH 级联反应在肿瘤治疗中的应用潜力。这一研究不仅为开发新型自由基诱导剂提供了新思路，还为材料合成后处理提供了新的视角，推动了压电催化医学在肿瘤治疗领域的进一步发展。

在脊髓损伤(SCI)的急性期，通过清除活性氧(ROS)来减轻炎症反应，已被证明是一种有效的策略，能够缓解继发性损伤并促进运动功能恢复。2024 年，You 等[128]提出了一种利用原位压电催化技术的氢气治疗方法，用于缓解急性脊髓损伤中的炎症反应。研究团队合成了金纳米粒子修饰的钛酸钡纳米复合材料(Au@BT)，该材料在超声辐射下能够持续生成 H_2，从而有效清除有毒 ROS 并减轻氧化应激。结果表明，Au@BT 结合超声(US)治疗显著抑制了炎症细胞的活化(图 13a)，并降低了促炎因子(如 IL-1β 和 IL-6)的水平(图 13b)，从而促进神经细胞的存活和运动功能的恢复。此外，录组分析进一步揭示了该治疗的分子机制：Au@BT+US 治疗能够下调促凋亡基因(如 Caspase-3 和 FOS)的表达，同时上调抗凋亡基因(如 Bcl2 和 BCL2L1)的表达，并激活 PI3K-Akt 信号通路(图 13c)。这些发现表明，Au@BT 通过调节炎症反应和抑制细胞凋亡，在促进神经修

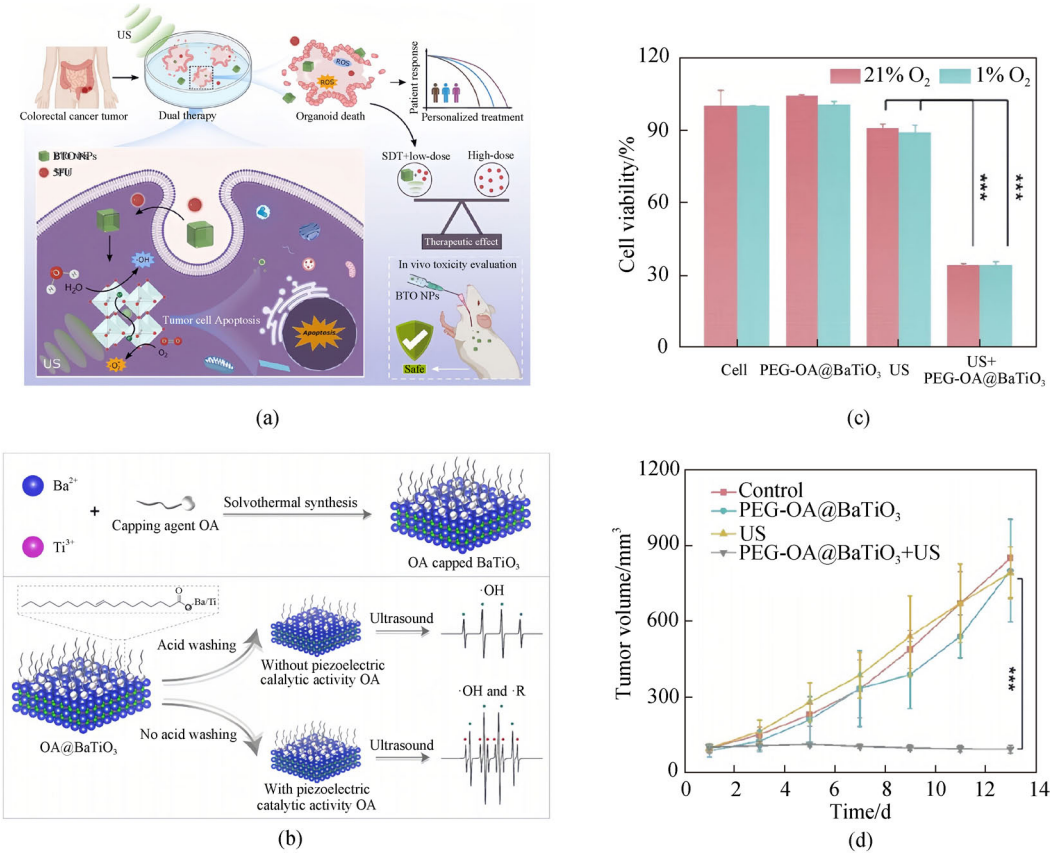


图 12 (a) 基于 BTO NPs 的声动力学治疗示意图[126]；(b) OA@$BaTiO_3$ 的合成示意图以及酸洗前后 OA@$BaTiO_3$ 的压电催化效果[127]；(c) 不同氧环境处理后 MCF-7 细胞的细胞活力[127]；(d) 肿瘤体积变化[127]

Fig. 12 (a) Schematic illustration of sonodynamic therapy using BTO nanoparticles (NPs) to enhance personalized treatment for tumor organoids[126]; (b) Schematic diagram illustrating synthesis of OA@$BaTiO_3$ and different piezoelectric catalytic effects observed with and without post-treatment acid cleaning[127]; (c) Cell viability of MCF-7 cells after various treatments[127]; (d) Variations in tumor volumes[127]

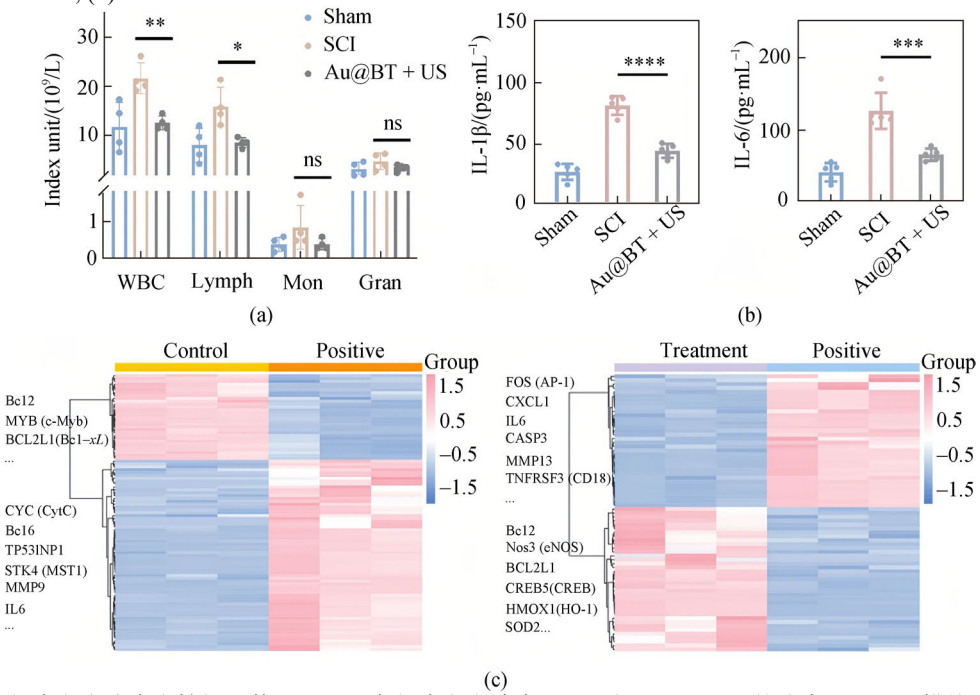


图 13 (a) 不同组大鼠血液中炎性细胞数[128]；(b) 各组大鼠血清中 IL-1β(左)和 IL-6(右)的浓度[128]；(c) 描绘不同对照组的代表性 DEGs 的热图；粉红色，上调；蓝色，下调[128]

Fig. 13 (a) Number of inflammatory cells in blood of different groups of rats[128]; (b) Concentrations of IL-1β(left) and IL-6 (right) in serum of each group of rats[128]; (c) Heatmap depicting representative differentially expressed genes (DEGs) in different control groups; pink indicates upregulation, blue indicates downregulation[128]

复方面具有显著潜力，该研究不仅为急性脊髓损伤的治疗提供了新的思路，还展示了压电催化医学在神经修复领域的广阔应用前景。

承重区的临界尺寸骨缺损是骨科手术中的一大临床挑战。2023 年，Riaz 等[31]提出了一种创新的解决方案，结合电子束熔化和场辅助烧结技术，成功制备了具有承重能力的 Ti_6Al_4V-$BaTiO_3$压电骨支架。该支架能够在患者行走时将机械应力转化为电信号，刺激骨细胞活性，从而促进临界尺寸骨缺损的愈合(图 14a)。这种设计不仅展现了优异的压电特性和机械性能，还为骨组织再生与愈合提供了新的途径，具有重要的临床应用潜力。此外，由于皮肤伤口易受细菌感染，伤口愈合一直是医学领域亟待解决的难题。2023 年，Liu 等[129]开发了一种基于超声触发的压电复合水凝胶，用于促进细菌感染伤口的愈合(图 14b)。该水凝胶掺入 $BaTiO_3$ 纳米颗粒，通过超声振动产生的内建电场快速生成活性氧(ROS)，表现出显著的抗菌效果。相比传统光动力治疗，该方法具有更好的软组织穿透能力，并避免了光敏剂可能引起的皮肤光毒性。此外，水凝胶由 *N*-[三(羟基甲基)甲基]丙烯酰胺(THM)、*N*-(3-氨丙基)甲基丙烯酰胺盐酸盐(APMH)和氧化透明质酸(OHA)组成，展现出出色的自愈合和生物黏附性能，能够加速全层皮肤伤口的愈合。体内实验显示，BT-Gel + US 组的伤口愈合效果最佳(图 14c)，进一步证实了超声触发的压电效应在促进伤口愈合中的重要作用，特别是在深部感染治疗中展现了良好的应用前景。

综上所述，压电催化为肿瘤治疗、脊髓损伤治疗、骨缺损修复和伤口愈合提供了新的治疗策略，展示了压电材料在生物医学领域的广阔应用潜力。未来研究应进一步优化材料性能，并探索其在更多临床场景中的应用价值。

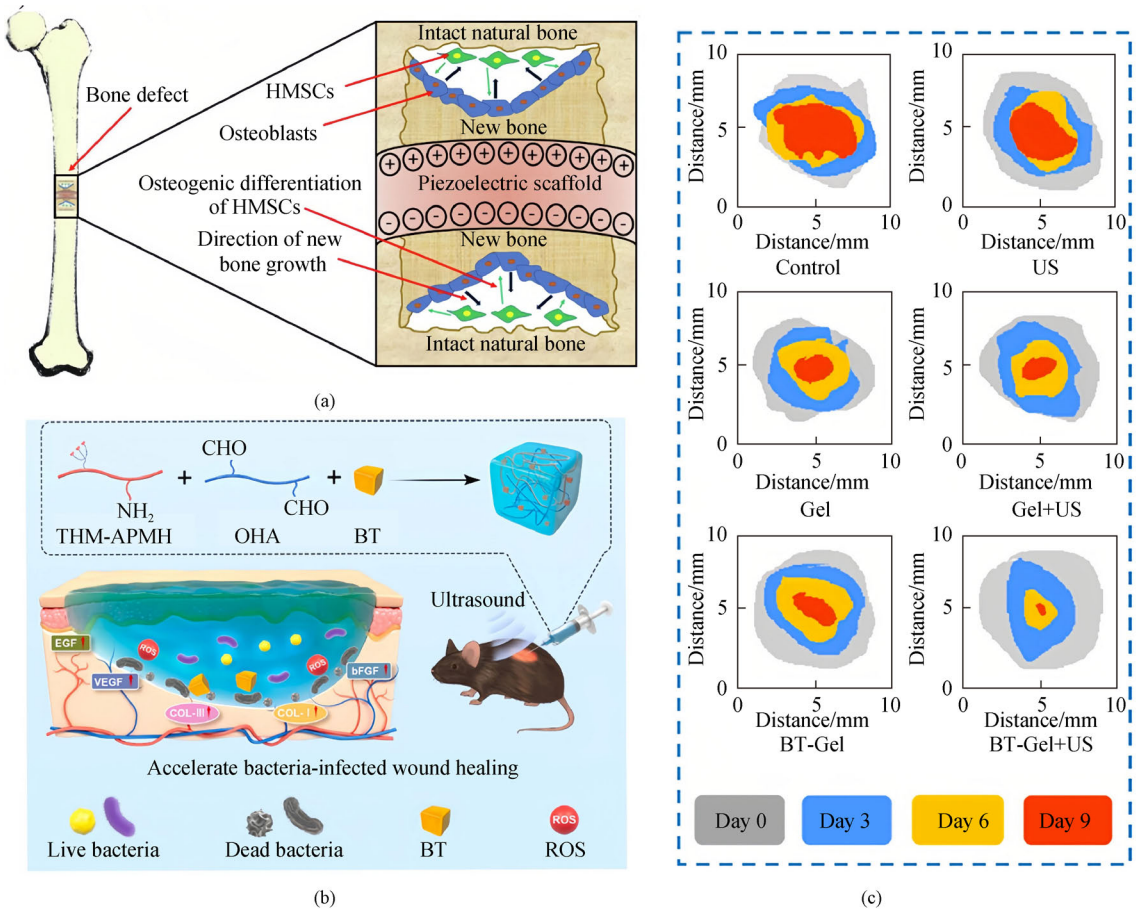


图 14　(a) 压电支架创造的仿生微环境促进临界尺寸骨缺损修复的图示[31]；(b) BT-OHA/THM-APMH 水凝胶制备及其与 US 触发的压电催化疗法在修复感染伤口中的协同作用示意图[129]；(c) 9 d 期间伤口闭合迹线的示意图[129]

Fig. 14　(a) Illustration of a biomimetic microenvironment created by a piezoelectric scaffold facilitating repair of critical-size bone defects[31]; (b) Schematic illustration of preparation of BT-OHA/THM-APMH hydrogel and its synergistic effect with ultrasound-triggered piezocatalytic therapy for repairing infected wounds[129]; (c) Schematic representation of wound closure progression over a period of 9 d[129]

3.5 $BaTiO_3$ 基压电材料的压电催化在其他方面的应用

随着压电催化研究的深入，$BaTiO_3$ 基压电材料的应用领域已从传统的环境修复和能源转化拓展至 CO_2还原、N_2固定、重金属离子去除以及杀菌抗菌等多个领域。在当前碳中和经济的背景下，开发绿色可再生能源相关催化技术成为研究热点，这些技术不仅能够将过量排放的 CO_2转化为高附加值燃料，还为长期储能提供了可行的途径。

2023 年，Wang 等[130]提出了一种基于 355 nm 脉冲激光(PL)触发的 $BaTiO_3$ 四方纳米立方体压电–光催化 CO_2还原新方法。如图 15a 所示，实验在圆柱形石英管中进行，通过 2.7 W 功率的紫外脉冲激光照射，使潮湿的 CO_2气体与 0.2 g $BaTiO_3$ 压电催化剂接触并发生催化反应，最终采用排水气体收集法收集反应产物。研究表明，PL 产生的瞬时光压(图 15b)不仅诱导形成了强内建电场，有效抑制了光生载流子的复合，还通过弯曲 $BaTiO_3$ 的能带结构促进了光生载流子的分离，从而实现了高效的 CO_2还原。该方法在连续催化系统中实现了 52.9 $mmol·g^{-1}·h^{-1}$的CO生成速率，显著高于汞灯照射下的 0.159 $\mu mol·g^{-1}·h^{-1}$。这一结果表明，PL 诱导的压电效应与特定光波长的协同作用显著提升了催化性能，展示了 PL 在压电催化反应中的广阔应用前景，该研究不仅为 CO_2还原提供了新的技术路径，还揭示了脉冲激光在压电催化中的独特优势，为未来开发高效、可持续的催化体系提供了重要参考。

氮(N_2)还原反应(NRR)是合成氨(NH_3)的关键过程，而氨是农业和工业中不可或缺的重要化学品。2023 年，Yuan 等[131]系统研究了缺陷与压电场在压电–光催化 NRR 中的协同作用，为高效氨合成提供了新的思路。研究表明，氧空位(OVs)的引入显著增强了 $BaTiO_3$ 的压电极化，OVs 改变了局部偶极状态，促进了光生载流子的分离，提升了氮还原反应的活性。此外，OVs 相邻的 Ti^{3+}位点利用其未配对的 d 轨道电子，促进了 N_2的化学吸附和活化(图 15c)，并通过 d–π 反馈机制进一步降低了反应限速步骤的能量势垒。结果表明，BTO-OV2 在光与超声共同作用下的 NH_3生成速率达到 106.7 $\mu mol·g^{-1}·h^{-1}$，显著优于以往报道的压电催化剂。这一发现不仅揭示了缺陷工程在优化压电材料性能中的重要作用，还强调了压电场与缺陷协同效应对氮气固定的关键影响，

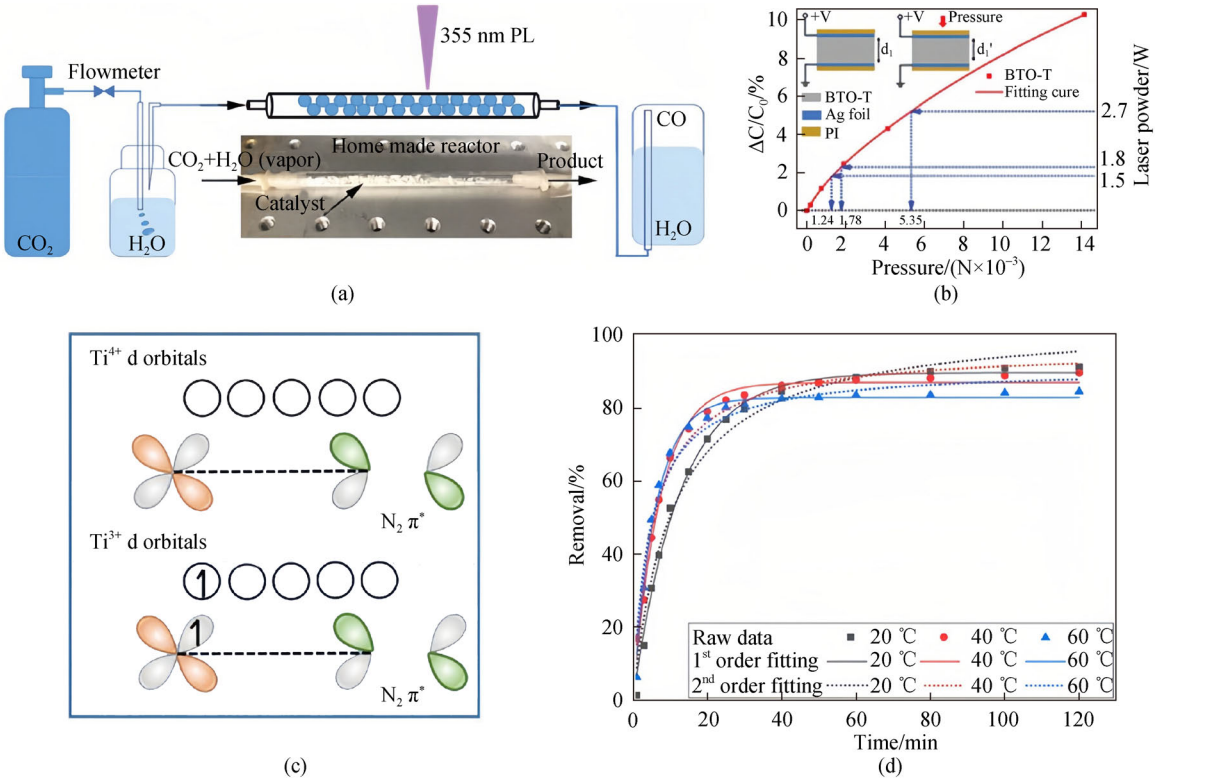


图 15 (a) 连续激光催化反应系统[130]；(b) 基于 BTO-T 电介质层的电容式触觉传感器的灵敏度曲线和不同激光功率下的相应压力[130]；(c) d–π 反馈捐赠机制的示意图[131]；(d) 不同温度下的准一阶和准二阶模型[132]

Fig. 15 (a) Continuous laser catalytic reaction system[130]; (b) Sensitivity curves of capacitive tactile sensors based on the BTO-T dielectric layer and the corresponding pressures at different laser powers[130]; (c) Schematic of the d–π back-donation mechanism[131]; (d) Pseudo-first-order and pseudo-second-order models at different temperatures[132]

该研究为设计高效的压电–光催化系统提供了新的理论依据和技术路径，展示了缺陷调控与压电效应结合在氮气固定领域的巨大潜力。未来的研究可进一步探索其他缺陷类型及其与压电场的协同机制，以推动压电催化技术在氨合成及其他相关领域的实际应用。

饮用水中的重金属污染，尤其是六价铬离子[Cr(Ⅵ)]污染，已成为全球关注的健康环境问题。2024 年，Mahmood 等[132]利用 $BaTiO_3$ (BTO)纳米颗粒作为压电催化剂，成功实现了水中 Cr(Ⅵ)的高效去除。研究团队通过优化水热法合成参数(包括水热温度、反应时间和前体浓度)，制备了纯四方相 BTO，其 Cr(Ⅵ)去除率高达 96%(图 15d)。Cr(Ⅵ)的去除主要通过吸附和压电催化还原实现，分别占 15%和 85%。动力学分析表明，该反应符合伪一级反应动力学模型，热力学研究显示，在 20 ℃和 20 mg/L 浓度下反应自发性最强。研究确定了最佳去除条件为 20 ℃和 17.32 mg/L 浓度，并揭示了温度和浓度对 Cr(Ⅵ)去除效率的显著影响，反应的活化能为 14.90 kJ/mol。该研究为 Cr(Ⅵ)污染水体的治理提供了高效、低能耗的解决方案，揭示了压电催化在重金属去除领域的潜力。未来研究可探索 BTO 纳米颗粒在实际水体中的应用性能，并优化其规模化制备工艺，以推动技术的实际应用。

压电催化技术在抗菌领域的应用近年来取得了显著进展。2023 年，Wei 等[32]通过缺陷工程和空心结构设计，成功制备了一种高效钛酸钡($BaTiO_3$)纳米颗粒，显著提高了压电催化抗菌治疗的效率。研究团队首先在二氧化硅(SiO_2)基体上沉积二氧化钛(TiO_2)层，再将其转化为 $BaTiO_3$ 层，并通过去除 SiO_2 核心制备出不同铈(Ce)含量的空心 $BaTiO_3$ 纳米颗粒。实验结果表明，Ce 含量为 4%(质量分数)的空心 $BaTiO_3$ (hBT_{Ce}-4)表现出最佳的抗菌效果(图 16a)。机制研究表明，空心结构显著增强了材料的压电响应，其压电系数提高了约 2.6 倍。同时，Ce 掺杂不仅改善了材料的极化性能，还促进了氧空位的形成和电子/空穴对的分离，从而降低了 hBT_{Ce} NPs 的能带隙(图 16b)。在超声波作用下，hBT_{Ce} NPs 能够产生强压电电流和大量活性氧(ROS)，有效破坏浮游细菌和生物膜(图 16c)。这些结果表明，Ce 调控的

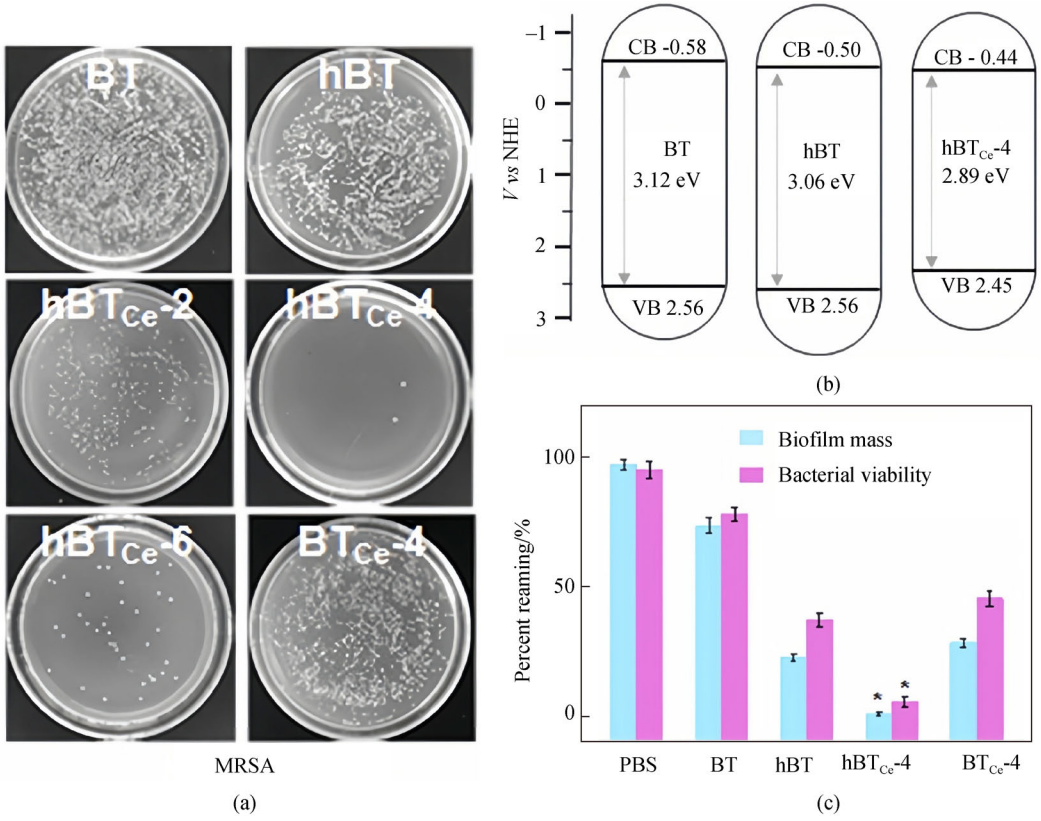


图 16　(a) 用于在不同处理后计数活 MRSA 的琼脂板图像[32]；(b) BT、hBT 和 hBT_{Ce}-4 NPs 的固有能带结构示意图[32]；(c) 残留生物膜百分比和细菌存活率[32]

Fig. 16　(a) Agar plate images for counting viable MRSA after different treatments[32]; (b) Schematic illustration of intrinsic band structure of BT, hBT, and hBT_{Ce}-4 NPs[32]; (c) Percentum residual biofilms and bacterial survival rates[32]

缺陷工程与空心结构的结合显著提升了材料的压电性能和压电催化抗菌效率。该研究为开发新型抗菌材料提供了重要的理论基础，展示了其在非抗生素治疗细菌感染领域的广阔应用前景。未来的研究可以进一步优化材料设计，并探索其在复杂生物环境中的实际应用性能，以推动压电催化抗菌技术的临床转化。

4 结论与展望

$BaTiO_3$ 作为一种压电催化剂，因其安全性高、制备成本低、稳定性好、环境友好等优点，在多个领域得到广泛研究。本文系统综述了 $BaTiO_3$ 基压电材料的催化机理、能量来源及其在压电催化领域的最新研究进展。目前，$BaTiO_3$ 基压电材料的应用研究主要集中在有机污染物降解、水分解制氢、过氧化氢合成以及生物医学等领域。然而，大部分研究仍处于实验室阶段，尚未实现规模化应用。尽管 $BaTiO_3$ 基压电材料在各领域展现出优异的压电催化性能，但其实际应用仍面临诸多挑战。首先，$BaTiO_3$ 在实际应用中表现出载流子浓度低和复合速率快的问题，限制了其催化效率。其次，当前对 $BaTiO_3$ 压电催化机制的理解不够深入。虽然能带理论和屏蔽电荷效应常用于解释其压电催化机理，但仍无法全面解释所有催化现象。研究表明 $BaTiO_3$ 的压电效应能够促进反应物转化，但具体的反应路径和中间体形成机制仍需深入研究。此外，$BaTiO_3$ 基压电催化材料在实际应用中的稳定性和可重复使用性也是亟待解决的问题。针对上述挑战，未来的研究可从以下几个方面展开：

1) 新材料体系的开发与改性策略优化：突破传统改性策略框架，探索基于机器学习的组分设计方法，开发具有梯度压电特性的压电催化复合结构。通过耦合等离子体共振效应与压电响应，构建光–压电双驱动催化系统，实现载流子生成与分离的协同增效。MXene 等二维材料的界面工程可能为构建高效电荷转移通道提供新思路。

2) 催化机制的深入研究：建立多尺度表征技术联用平台，结合原位透射电子显微镜与超快光谱技术，实时追踪压电势诱导的界面电荷动力学过程。发展动态密度泛函理论计算方法，以阐明应力–电势–催化活性间的非线性耦合机制，尤其是瞬态中间态的形成规律与转化路径。

3) 实际应用的拓展与优化：将 $BaTiO_3$ 基压电催化剂应用于更复杂的实际环境体系，如工业废水处理，评估其在实际应用中的表现和局限性，推动压电催化技术的工业化应用。此外，探索具有自修复能力的材料设计，以提高长期稳定性和可回收性，避免 2 次污染。

参考文献:

[1] FUJISHIMA A, HONDA K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode[J]. Nature, 1972, 238(5358): 37–38.

[2] CAREY J H, LAWRENCE J, TOSINE H M. Photodechlorination of PCB's in the presence of titanium dioxide in aqueous suspensions[J]. Bull Environ Contam Toxicol, 1976, 16: 697–701.

[3] TU S C, GUO Y X, ZHANG Y H, et al. Piezocatalysis and piezo-photocatalysis: Catalysts classification and modification strategy, reaction mechanism, and practical application[J]. Adv Funct Mater, 2020, 30(48): 2005158.

[4] XU X L, XIAO L B, WU Z, et al. Harvesting vibration energy to piezo-catalytically generate hydrogen through Bi_2WO_6 layered-perovskite[J]. Nano Energy, 2020, 78: 105351.

[5] WANG Z L, SONG J H. Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays[J]. Science, 2006, 312(5771): 242–246.

[6] HONG K S, XU H F, KONISHI H, et al. Direct water splitting through vibrating piezoelectric microfibers in water[J]. J Phys Chem Lett, 2010, 1(6): 997–1002.

[7] ZHOU W, SHI H P, GAO Y M, et al. Engineering strategies to enhance the piezoelectric catalytic performance of inorganic fibers in water treatment and energy regeneration[J]. Appl Catal A Gen, 2024, 683: 119847.

[8] CHEN J W, PAL A, CHEN B H, et al. Shape-tunable $BaTiO_3$ crystals presenting facet-dependent optical and piezoelectric properties[J]. Small, 2023, 19(9): 2205920.

[9] CAO S A, ZOU H J, JIANG B, et al. Incorporation of ZnO encapsulated MoS_2 to fabricate flexible piezoelectric nanogenerator and sensor[J]. Nano Energy, 2022, 102: 107635.

[10] CONSONNI V, LORD A M. Polarity in ZnO nanowires: A critical issue for piezotronic and piezoelectric devices[J]. Nano Energy, 2021, 83: 105789.

[11] REZNITCHENKO L A, TURIK A V, KUZNETSOVA E M, et al. Piezoelectricity in $NaNbO_3$ ceramics[J]. J Phys Condens Matter, 2001, 13(17): 3875–3881.

[12] WANG W, TANG X G, JIANG Y P, et al. Phase evolution, dielectric, ferroelectric, and piezoelectric properties of $Bi(Mg_{0.5}Hf_{0.5})O_3$-modified $BiFeO_3$–$BaTiO_3$[J]. Mater Today Chem, 2022, 24: 100825.

[13] TANG Q, WU J, CHEN X Z, et al. Tuning oxygen vacancies in $Bi_4Ti_3O_{12}$ nanosheets to boost piezo-photocatalytic activity[J]. Nano Energy, 2023, 108: 108202.

[14] LIU L J, YANG B, LV R, et al. Enhanced unipolar electrical fatigue resistance and related mechanism in grain-oriented $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$–$Pb(Zr, Ti)O_3$ piezoceramics[J]. J Mater Sci Technol, 2023, 145: 40–47.

[15] ZHAO C H, HOU D, CHUNG C C, et al. Deconvolved intrinsic and extrinsic contributions to electrostrain in high performance, Nb-doped $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ piezoceramics ($0.50 \leqslant x \leqslant 0.56$)[J]. Acta Mater, 2018, 158: 369–38.

[16] CHOI W, KIM J, LEE E, et al. Asymmetric 2D MoS_2 for Scalable and High-Performance Piezoelectric Sensors[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2021, 13(11): 13596–13603.

[17] LU L J, DING W Q, LIU J Q, et al. Flexible PVDF based piezoelectric nanogenerators[J]. Nano Energy, 2020, 78: 105251.

[18] PI Z Y, ZHANG J W, WEN C Y, et al. Flexible piezoelectric nanogenerator made of poly(vinylidenefluoride-co-trifluoroethylene) (PVDF–TrFE) thin film[J]. Nano Energy, 2014, 7: 33–41.
[19] HAO J G, LI W, ZHAI J W, et al. Progress in high-strain perovskite piezoelectric ceramics[J]. Mater Sci Eng R Rep, 2019, 135: 1–57.
[20] YUAN B W, WU J, QIN N, et al. Enhanced piezocatalytic performance of (Ba, Sr)TiO_3 nanowires to degrade organic pollutants[J]. ACS Appl Nano Mater, 2018, 1(9): 5119–5127.
[21] YUAN B W, WU J, QIN N, et al. Sm-doped Pb($Mg_{1/3}Nb_{2/3}$)$O_{3-x}PbTiO_3$ piezocatalyst: Exploring the relationship between piezoelectric property and piezocatalytic activity[J]. Appl Mater Today, 2019, 17: 183–192.
[22] LIU D M, SONG Y W, XIN Z J, et al. High-piezocatalytic performance of eco-friendly ($Bi_{1/2}Na_{1/2}$)TiO_3-based nanofibers by electrospinning[J]. Nano Energy, 2019, 65: 104024.
[23] YAO Y D, JIA Y M, ZHANG Q C, et al. Piezoelectric $BaTiO_3$ with the milling treatment for highly efficient piezocatalysis under vibration[J]. J Alloys Compd, 2022, 905: 164234.
[24] DOMINGO N. Understanding piezocatalysis, pyrocatalysis and ferrocatalysis[J]. Front Nanotechnol, 2024, 6: 1320503.
[25] ACOSTA M, NOVAK N, ROJAS V, et al. $BaTiO_3$-based piezoelectrics: Fundamentals, current status, and perspectives[J]. Appl Phys Rev, 2017, 4(4): 041305.
[26] PARK K I, XU S, LIU Y, et al. Piezoelectric $BaTiO_3$ thin film nanogenerator on plastic substrates[J]. Nano Lett, 2010, 10(12): 4939–4943.
[27] WANG K, HAN C, LI J Q, et al. The mechanism of piezocatalysis: Energy band theory or screening charge effect?[J]. Angew Chem Int Ed, 2022, 61(6): e202110429.
[28] ALI M, SINGH R, KUMARI R, et al. Enhanced piezocatalytic degradation of mixed organic dyes using $BaTiO_3$–MoS_2 heterostructure nanocomposites: A mechanistic investigation[J]. Mater Sci Semicond Process, 2024, 178: 108454.
[29] ZHANG Y, KHANBAREH H, DUNN S, et al. High efficiency water splitting using ultrasound coupled to a $BaTiO_3$ nanofluid[J]. Adv Sci, 2022, 9(9): e2105248.
[30] ZHOU X F, YAN F, LYUBARTSEV A, et al. Efficient production of solar hydrogen peroxide using piezoelectric polarization and photoinduced charge transfer of nanopiezoelectrics sensitized by carbon quantum dots[J]. Adv Sci, 2022, 9(18): e2105792.
[31] RIAZ A, POLLEY C, LUND H, et al. A novel approach to fabricate load-bearing Ti_6Al_4V-Barium titanate piezoelectric bone scaffolds by coupling electron beam melting and field-assisted sintering[J]. Mater Des, 2023, 225: 111428.
[32] WEI J W, XIA J, LIU X, et al. Hollow-structured $BaTiO_3$ nanoparticles with cerium-regulated defect engineering to promote piezocatalytic antibacterial treatment[J]. Appl Catal B Environ, 2023, 328: 122520.
[33] DAI J, FAN Z H, XIE H, et al. Versatile $BiFeO_3$ shining in piezocatalysis: From materials engineering to diverse applications[J]. J Adv Ceram, 2025, 14(3): 9221046.
[34] ZHU P, CHEN Y, SHI J L. Piezocatalytic tumor therapy by ultrasound-triggered and $BaTiO_3$-mediated piezoelectricity[J]. Adv Mater, 2020, 32(29): e2001976.
[35] SHI J, STARR M B, WANG X D. Band structure engineering at heterojunction interfaces *via* the piezotronic effect[J]. Adv Mater, 2012, 24(34): 4683–4691.
[36] ZHANG A, LIU Z Y, XIE B, et al. Vibration catalysis of eco-friendly $Na_{0.5}K_{0.5}NbO_3$-based piezoelectric: An efficient phase boundary catalyst[J]. Appl Catal B Environ, 2020, 279: 119353.
[37] WANG P L, LI X Y, FAN S Y, et al. Impact of oxygen vacancy occupancy on piezo-catalytic activity of $BaTiO_3$ nanobelt[J]. Appl Catal B Environ, 2020, 279: 119340.
[38] LI S, ZHAO Z C, YU D F, et al. Few-layer transition metal dichalcogenides (MoS_2, WS_2, and WSe_2) for water splitting and degradation of organic pollutants: Understanding the piezocatalytic effect[J]. Nano Energy, 2019, 66: 104083.
[39] JIANG T, WANG Y H, CAI C, et al. Piezocatalysis for water treatment: Mechanisms, recent advances, and future prospects[J]. Environ Sci Ecotechnol, 2025, 23: 100495.
[40] KALININ S V, BONNELL D A. Screening phenomena on oxide surfaces and its implications for local electrostatic and transport measurements[J]. Nano Lett, 2004, 4(4): 555–560.
[41] SU R, WANG Z P, ZHU L N, et al. Strain-engineered nano-ferroelectrics for high-efficiency piezocatalytic overall water splitting[J]. Angew Chem Int Ed, 2021, 60(29): 16019–16026.
[42] WANG Y, WEN X R, JIA Y M, et al. Piezo-catalysis for nondestructive tooth whitening[J]. Nat Commun, 2020, 11(1): 1328.
[43] WU Y Y, GAO Z R, JIAO S L, et al. Piezo-photo coupling effect and extended optical absorption of piezoelectric-based hybrids for efficient bisphenol A degradation[J]. Chem Eng J, 2023, 452: 139456.
[44] SU R, ALEX HSAIN H, WU M, et al. Nano-ferroelectric for high efficiency overall water splitting under ultrasonic vibration[J]. Angew Chem Int Ed, 2019, 58(42): 15076–15081.
[45] MIAO Y, TIAN W R, HAN J, et al. Oxygen vacancy-induced hydroxyl dipole reorientation in hydroxyapatite for enhanced piezocatalytic activity[J]. Nano Energy, 2022, 100: 107473.
[46] YOU H L, WU Z, ZHANG L H, et al. Harvesting the vibration energy of $BiFeO_3$ nanosheets for hydrogen evolution[J]. Angew Chem Int Ed, 2019, 58(34): 11779–11784.
[47] FLINT E B, SUSLICK K S. The temperature of cavitation[J]. Science, 1991, 253(5026): 1397–1399.
[48] WU J, XU Q, LIN E Z, et al. Insights into the role of ferroelectric polarization in piezocatalysis of nanocrystalline $BaTiO_3$[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2018, 10(21): 17842–17849.
[49] ZHU R J, XU Y H, BAI Q, et al. Direct degradation of dyes by piezoelectric fibers through scavenging low frequency vibration[J]. Chem Phys Lett, 2018, 702: 26–31.
[50] PRASANNA G, NGUYEN H P, DUNN S, et al. Impact of stirring regime on piezocatalytic dye degradation using $BaTiO_3$ nanoparticles[J]. Nano Energy, 2023, 116: 108794.
[51] ZHOU S Z, HAO J Y, ZHOU M J, et al. Combination of piezoelectric additives and ball milling for high-efficiency degradation of organic dye in solid state[J]. Appl Catal A Gen, 2022, 629: 118406.
[52] HE Y, WANG G F, HU W B, et al. Piezocatalyzed decarboxylative acylation of quinoxalin-2(1H)-ones using ball milling[J]. ACS Sustainable Chem Eng, 2023, 11(3): 910–920.
[53] YUAN Z W, GUO M Q, SHI Q, et al. Preparation and piezoelectric assisted photocatalytic degradation of $BaTiO_3$/$SrTiO_3$ nanocomposites[J]. Ceram Int, 2024, 50(19): 34890–34900.
[54] ZHUANG W, ZHENG Y, XIANG J Y, et al. Enhanced Hydraulic-driven piezoelectric ozonation performance by CNTs/$BaTiO_3$ nanocatalyst for Ibuprofen removal[J]. Chem Eng J, 2023, 454: 139928.
[55] LIU Q, ZHAI D, XIAO Z D, et al. Piezo-photoelectronic coupling effect of $BaTiO_3$@TiO_2 nanowires for highly concentrated dye degradation[J]. Nano Energy, 2022, 92: 106702
[56] LIN E Z, KANG Z H, WU J, et al. $BaTiO_3$ nanocubes/cuboids with selectively deposited Ag nanoparticles: Efficient piezocatalytic degradation and mechanism[J]. Appl Catal B Environ, 2021, 285: 119823.
[57] ZHOU J X, CHEN W R, CHEN Q, et al. Construction of $BaTiO_3$/g-C_3N_4 heterojunction for promoting atrazine degradation of hydraulic-driven piezocatalytic ozonation[J]. Appl Catal B Environ,

2025, 362: 124702.

[58] LIU X F, XIAO L Y, ZHANG Y, et al. Significantly enhanced piezo-photocatalytic capability in $BaTiO_3$ nanowires for degrading organic dye[J]. J Materiomics, 2020, 6(2): 256–262.

[59] WANG K Q, LI B X, ZHAO C R, et al. A novel NiO/$BaTiO_3$ heterojunction for piezocatalytic water purification under ultrasonic vibration[J]. Ultrason Sonochem, 2023, 92: 106285.

[60] GAO W P, XIE B, MA C Q, et al. Ultrahigh piezocatalytic performance based on the micron-scale $BaTiO_3$ single crystal sheets with{111}highly exposed polar facets[J]. Chem Eng J, 2025, 506: 160084.

[61] ZHENG Y, WU X Y, ZHANG Y C, et al. Highly efficient harvesting of vibration energy for complex wastewater purification using $Bi_5Ti_3FeO_{15}$ with controlled oxygen vacancies[J]. Chem Eng J, 2023, 453: 139919.

[62] LIAO J Y, LV X, ZHENG J C, et al. Constructing the relationship between microstructure and piezocatalysis in (K, Na)NbO_3 lead-free piezocatalyst[J]. Mater Today Commun, 2023, 37: 107564.

[63] HAO P Y, CAO Y L, NING X E, et al. Rational design of CdS/BiOCl S-scheme heterojunction for effective boosting piezocatalytic H_2 evolution and pollutants degradation performances[J]. J Colloid Interface Sci, 2023, 639: 343–354.

[64] SUN X X, LI R C, YANG Z W, et al. Modulating polarization rotation to stimulate the high piezocatalytic activity of (K, Na)NbO_3 lead-free piezoelectric materials[J]. Appl Catal B Environ, 2022, 313: 121471.

[65] LONG J J, REN T T, HAN J, et al. Heterostructured $BiFeO_3$@CdS nanofibers with enhanced piezoelectric response for efficient piezocatalytic degradation of organic pollutants[J]. Sep Purif Technol, 2022, 290: 120861.

[66] LIU Z, ZHENG Y, ZHANG S, et al. (1–x)$Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO_{3-x}BiFeO_3$ solid solutions with enhanced piezocatalytic dye degradation[J]. Sep Purif Technol, 2022, 290: 120831.

[67] LI S, ZHAO Z C, LIU M S, et al. Remarkably enhanced photocatalytic performance of Au/$AgNbO_3$ heterostructures by coupling piezotronic with plasmonic effects[J]. Nano Energy, 2022, 95: 107031.

[68] KANG Z H, LIN E Z, QIN N, et al. Bismuth vacancy-mediated quantum dot precipitation to trigger efficient piezocatalytic activity of Bi_2WO_6 nanosheets[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2022, 14(9): 11375–11387.

[69] JIA P W, LI Y L, ZHENG Z S, et al. Achieving excellent photocatalytic degradation of pollutants by flower-like $SrBi_4Ti_4O_{15}$/BiOCl heterojunction: The promotion of piezoelectric effect[J]. Sep Purif Technol, 2022, 299: 121769.

[70] JHANG S R, LIN H Y, LIAO Y S, et al. Local dipole enhancement of space-charge piezophototronic catalysts of core–shell polytetrafluoroethylene@TiO_2 nanospheres[J]. Nano Energy, 2022, 102: 107619.

[71] DU Y M, LU T, LI X N, et al. High-efficient piezocatalytic hydrogen evolution by centrosymmetric $Bi_2Fe_4O_9$ nanoplates[J]. Nano Energy, 2022, 104: 107919.

[72] ZHAO Q, XIAO H Y, HUANGFU G, et al. Highly-efficient piezocatalytic performance of nanocrystalline $BaTi_{0.89}Sn_{0.11}O_3$ catalyst with T_C near room temperature[J]. Nano Energy, 2021, 85: 106028.

[73] YU C Y, TAN M X, LI Y, et al. Ultrahigh piezocatalytic capability in eco-friendly $BaTiO_3$ nanosheets promoted by 2D morphology engineering[J]. J Colloid Interface Sci, 2021, 596: 288–296.

[74] WANG L K, WANG J F, YE C Y, et al. Photodeposition of CoO_x nanoparticles on $BiFeO_3$ nanodisk for efficiently piezocatalytic degradation of rhodamine B by utilizing ultrasonic vibration energy[J]. Ultrason Sonochem, 2021, 80: 105813.

[75] KANG Z H, LIN E Z, QIN N, et al. Effect of oxygen vacancies and crystal symmetry on piezocatalytic properties of Bi_2WO_6 ferroelectric nanosheets for wastewater decontamination[J]. Environ Sci: Nano, 2021, 8(5): 1376–1388.

[76] DAI J, SHAO N N, ZHANG S W, et al. Enhanced piezocatalytic activity of $Sr_{0.5}Ba_{0.5}Nb_2O_6$ nanostructures by engineering surface oxygen vacancies and self-generated heterojunctions[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2021, 13(6): 7259–7267.

[77] ZHAO Z C, WEI L Y, LI S, et al. Exclusive enhancement of catalytic activity in $Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO_3$ nanostructures: New insights into the design of efficient piezocatalysts and piezo-photocatalysts[J]. J Mater Chem A, 2020, 8(32): 16238–16245.

[78] YUAN J, HUANG X Y, ZHANG L L, et al. Tuning piezoelectric field for optimizing the coupling effect of piezo-photocatalysis[J]. Appl Catal B Environ, 2020, 278: 119291.

[79] WU J, QIN N, LIN E Z, et al. Synthesis of $Bi_4Ti_3O_{12}$ decussated nanoplates with enhanced piezocatalytic activity[J]. Nanoscale, 2019, 11(44): 21128–21136.

[80] BISWAS A, SAHA S, JANA N R. $ZnSnO_3$ nanoparticle-based piezocatalysts for ultrasound-assisted degradation of organic pollutants[J]. ACS Appl Nano Mater, 2019, 2(2): 1120–1128.

[81] MUSHTAQ F, CHEN X Z, HOOP M, et al. Piezoelectrically enhanced photocatalysis with $BiFeO_3$ nanostructures for efficient water remediation[J]. iScience, 2018, 4: 236–246.

[82] XUE K L, JIANG Y, MOFARAH S S, et al. Composition-driven morphological evolution of $BaTiO_3$ nanowires for efficient piezocatalytic hydrogen production[J]. Chemosphere, 2023, 338: 139337.

[83] WANG P L, FAN S Y, LI X Y, et al. Piezotronic effect and hierarchical Z-scheme heterostructure stimulated photocatalytic H_2 evolution integrated with C–N coupling of benzylamine[J]. Nano Energy, 2021, 89: 106349.

[84] ZHANG K L, SUN X D, WANG H T, et al. Interfacial engineering of Bi_2MoO_6-$BaTiO_3$ Type-I heterojunction promotes cocatalyst-free piezocatalytic H_2 production[J]. Nano Energy, 2024, 121: 109206.

[85] FAN J F, SONG Z L, TAN B T, et al. Enhanced hydrogen production *via* piezo-photocatalytic water splitting using $BaTiO_3$ crystal phase engineering[J]. J Solid State Chem, 2025, 345: 125251.

[86] MA Y L, WANG B, ZHONG Y Z, et al. Bifunctional $RbBiNb_2O_7$/poly(tetrafluoroethylene) for high-efficiency piezocatalytic hydrogen and hydrogen peroxide production from pure water[J]. Chem Eng J, 2022, 446: 136958.

[87] DING B F, ZUO K T, ZHANG L, et al. Constructing a novel double Z-type junction $BaTiO_3$/ZnIn2S4/$ZnTiO_3$ by a new chemical reaction for antibiotics degradation, H_2 production, and CO_2 reduction[J]. J Environ Chem Eng, 2024, 12(6): 114594.

[88] SUN Y H, LI X N, VIJAYAKUMAR A, et al. Hydrogen generation and degradation of organic dyes by new piezocatalytic 0.7$BiFeO_3$–0.3$BaTiO_3$ nanoparticles with proper band alignment[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2021, 13(9): 11050–11057.

[89] LI S, ZHAO Z C, LI J B, et al. Mechanically induced highly efficient hydrogen evolution from water over piezoelectric SnSe nanosheets[J]. Small, 2022, 18(29): e2202507.

[90] OSKOEI A, KHALEGHI M, SHEIBANI S. Modification of MoS_2/ZnO nanocomposite for efficient photocatalytic degradation of water pollutants and hydrogen evolution[J]. J Water Process Eng, 2025, 71: 107404.

[91] BAI J W, XIANG J M, CHEN C H, et al. Piezoelectric-effect-enhanced photocatalytic performance in Cr/Nb modified $Bi_4Ti_3O_{12}$/g-C_3N_4 Z-scheme system[J]. Chem Eng J, 2023, 456: 141095.

[92] QIU X J, XIE J, NING X E, et al. Enhancing the piezocatalytic

performance for H_2 evolution by constructing BiOCl/UiO-66 heterostructure[J]. Appl Surf Sci, 2024, 670: 160694.

[93] GUO R S, JIN L H, ZHANG X Y, et al. Bimetal doping enhanced polarization electric field in $BiFeO_3$ for piezocatalytic U(VI) reduction and hydrogen production[J]. Appl Catal B Environ, 2025, 367: 125113.

[94] LIU D M, SUN X R, TAN L N, et al. High-performance piezocatalytic hydrogen evolution by $(Bi_{0.5}Na_{0.5})TiO_3$ cubes decorated with cocatalysts[J]. Ceram Int, 2023, 49(12): 20343–20350.

[95] LEI R, GAO F, YUAN J, et al. Free layer-dependent piezoelectricity of oxygen-doped MoS_2 for the enhanced piezocatalytic hydrogen evolution from pure water[J]. Appl Surf Sci, 2022, 576: 151851.

[96] FENG W H, YUAN J, ZHANG L L, et al. Atomically thin ZnS nanosheets: Facile synthesis and superior piezocatalytic H_2 production from pure H_2O[J]. Appl Catal B Environ, 2020, 277: 119250.

[97] LEI R, FU X Z, CHEN N X, et al. Cocatalyst engineering to weaken the charge screening effect over Au–$Bi_4Ti_3O_{12}$ for piezocatalytic pure water splitting[J]. Catal Sci Technol, 2022, 12(24): 7361–7368.

[98] OKA K, NISHIDE H, WINTHER-JENSEN B. Copolymer of phenylene and thiophene toward a visible-light-driven photocatalytic oxygen reduction to hydrogen peroxide[J]. Adv Sci, 2021, 8(5): 2003077.

[99] FUKUZUMI S. Production of liquid solar fuels and their use in fuel cells[J]. Joule, 2017, 1(4): 689–738.

[100] CAMPOS-MARTIN J M, BLANCO-BRIEVA G, FIERRO J L G. Hydrogen Peroxide Synthesis: An Outlook beyond the Anthraquinone Process[J]. Angew Chem Int Ed, 2006, 45(42): 6962–6984.

[101] ZHOU X F, SHEN B, ZHAI J W, et al. Reactive oxygenated species generated on iodide-doped $BiVO_4$/$BaTiO_3$ heterostructures with Ag/Cu nanoparticles by coupled piezophototronic effect and plasmonic excitation[J]. Adv Funct Mater, 2021, 31(13): 2009594.

[102] WANG K, ZHANG M Q, LI D G, et al. Ternary BaCaZrTi perovskite oxide piezocatalysts dancing for efficient hydrogen peroxide generation[J]. Nano Energy, 2022, 98: 107251.

[103] ZHAO Z W, CHEN R X, LING Q, et al. Enhanced H_2O_2 production *via* Piezo-photocatalysis using $BaTiO_3$/g-C_3N_4 S-scheme heterojunction[J]. J Environ Chem Eng, 2025, 13(2): 115575.

[104] ZENG H, YU C Y, LIU C B, et al. Boost piezocatalytic H_2O_2 production in $BiFeO_3$ by defect engineering enabled dual-channel reaction[J]. Mater Today Energy, 2024, 39: 101475.

[105] RAN M X, DU B B, LIU W Y, et al. Dynamic defects boost *in situ* H_2O_2 piezocatalysis for water cleanup[J]. P Natl Acad Sci Usa, 2024, 121(9): e2317435121.

[106] LIANG B C, ZHU X T, YU H M, et al. Efficient piezocatalytic properties of $Na_{0.5}Bi_{0.5}TiO_3$ nanoparticles for dye degradation and hydrogen peroxide production[J]. J Adv Dielect, 2025, 15(1): 2450006.

[107] ZHANG Y, LIN Y Z, LI R F, et al. Enhanced piezo-catalytic H_2O_2 production over $Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO_3$ *via* piezoelectricity enhancement and surface engineering[J]. Chem Eng J, 2023, 465: 143043.

[108] WEN Y Y, LIU W, WANG P F, et al. Interface interaction enhanced piezo-catalytic hydrogen peroxide generation *via* one-electron water oxidation[J]. Adv Funct Mater, 2023, 33(50): 2308084.

[109] WANG P L, FAN S Y, LI X Y, et al. Modulating the molecular structure of graphitic carbon nitride for identifying the impact of the piezoelectric effect on photocatalytic H_2O_2 production[J]. ACS Catal, 2023, 13(14): 9515–9523.

[110] WANG K, SHU Z, ZHOU J, et al. Enhancing piezocatalytic H_2O_2 production through morphology control of graphitic carbon nitride[J]. J Colloid Interface Sci, 2023, 648: 242–250.

[111] WANG C Y, HU C, CHEN F, et al. Polar layered bismuth-rich oxyhalide piezoelectrics $Bi_4O_5X_2$ (X=Br, I): Efficient piezocatalytic pure water splitting and interlayer anion-dependent activity[J]. Adv Funct Mater, 2023, 33(29): 2301144.

[112] TU S C, WANG Y Q, HUANG H W, et al. Band shifting triggered ·OH evolution and charge separation enhanced H_2O_2 generation in piezo-photocatalysis of Silleń-Aurivillius-structured $Bi_4W_{0.5}Ti_{0.5}O_8Cl$[J]. Chem Eng J, 2023, 465: 142777.

[113] FU M, LUO J H, SHI B, et al. Promoting piezocatalytic H_2O_2 production in pure water by loading metal-organic cage-modified gold nanoparticles on graphitic carbon nitride[J]. Angew Chem Int Ed, 2024, 63(2): e202316346.

[114] FANG L P, WANG K, HAN C, et al. Comparative investigation of piezocatalysts composed of La, Sr and Co (Fe) complex oxides in Ruddlesden-Popper type or simple single perovskites for efficient hydrogen peroxide generation[J]. Chem Eng J, 2023, 461: 141866.

[115] ZHANG L X, WANG K, JIA Y Q, et al. Self-assembled $LaFeO_3$/$ZnFe_2O_4$/La_2O_3 ultracompact hybrids with enhanced piezo-phototronic effect for oxygen activation in ambient conditions[J]. Adv Funct Mater, 2022, 32(45): 2205121.

[116] TANG R D, GONG D X, ZHOU Y Y, et al. Unique g-C_3N_4/PDI-g-C_3N_4 homojunction with synergistic piezo-photocatalytic effect for aquatic contaminant control and H_2O_2 generation under visible light[J]. Appl Catal B Environ, 2022, 303: 120929.

[117] LI Y K, LI L, LIU F Y, et al. Robust route to H_2O_2 and H_2 *via* intermediate water splitting enabled by capitalizing on minimum vanadium-doped piezocatalysts[J]. Nano Res, 2022, 15(9): 7986–7993

[118] HE J Q, GAO F, WANG H W, et al. C-Doped $KNbO_3$ single crystals for enhanced piezocatalytic intermediate water splitting[J]. Environ Sci: Nano, 2022, 9(6): 1952–1960.

[119] BANOO M, ROY R S, BHAKAR M, et al. Bi_4TaO_8Cl as a new class of layered perovskite oxyhalide materials for piezopotential driven efficient seawater splitting[J]. Nano Lett, 2022, 22(22): 8867–8874.

[120] SHAO D K, ZHANG D L, SUN D S, et al. Oxygen reduction reaction for generating H_2O_2 through a piezo-catalytic process over bismuth oxychloride[J]. Chemsuschem, 2018, 11(3): 527–531.

[121] DONG S M, DONG Y S, JIA T, et al. GSH-depleted nanozymes with hyperthermia-enhanced dual enzyme-mimic activities for tumor nanocatalytic therapy[J]. Adv Mater, 2020, 32(42): e2002439.

[122] SONG G S, CHENG L, CHAO Y, et al. Emerging nanotechnology and advanced materials for cancer radiation therapy[J]. Adv Mater, 2017, 29(32): 1700996.

[123] FAN W P, HUANG P, CHEN X Y. Overcoming the Achilles' heel of photodynamic therapy[J]. Chem Soc Rev, 2016, 45(23): 6488–6519.

[124] CHEN S, ZHU P, MAO L J, et al. Piezocatalytic medicine: An emerging frontier using piezoelectric materials for biomedical applications[J]. Adv Mater, 2023, 35(25): e2208256.

[125] YANG B W, CHEN Y, SHI J L. Nanocatalytic medicine[J]. Adv Mater, 2019, 31(39): 1901778

[126] GONG Z Y, MAO Y Q, LIU Y C, et al. Sono-promoted piezocatalysis and low-dose drug penetration for personalized therapy *via* tumor organoids[J]. J Colloid Interface Sci, 2024, 675: 192–206.

[127] LI Y, ZHANG Q Q, SUN Z, et al. Unexpected emergence of carbon-centered radicals from piezoelectric effect in oleic acid-capped $BaTiO_3$[J]. ACS Nano, 2024, 18(13): 9645–9655.

[128] YOU Y L, JIANG J J, ZHENG G, et al. *In situ* piezoelectric-catalytic anti-inflammation promotes the rehabilitation of acute spinal cord injury in synergy[J]. Adv Mater, 2024, 36(18): e2311429.

[129] LIU D, LI L, SHI B L, et al. Ultrasound-triggered piezocatalytic composite hydrogels for promoting bacterial-infected wound healing[J]. Bioact Mater, 2022, 24: 96–111.

[130] WANG Y J, LI X, CHEN Y K, et al. Pulsed-laser-triggered piezoelectric photocatalytic CO_2 reduction over tetragonal $BaTiO_3$ nanocubes[J]. Adv Mater, 2023, 35(45): e2305257.
[131] YUAN J, FENG W H, ZHANG Y F, et al. Unraveling synergistic effect of defects and piezoelectric field in breakthrough piezo-photocatalytic N_2 reduction[J]. Adv Mater, 2024, 36(5): 2303845.
[132] MAHMOOD P H, AMIRI O, SAJADI S M. $BaTiO_3$ Nanoparticles for highly efficient piezocatalytic reduction of toxic hexavalent chromium: Synthesis, optimization, and kinetic study[J]. J Hazard Mater Adv, 2024, 16: 100468.

Development on Piezoelectric Catalysis of Barium Titanate-Based Materials

LIANG Qiansen[1], *XIE Bing*[1], *GAO Wenpeng*[1], *LIU Zhiyong*[1], *JIANG Shenglin*[2], *ZHANG Haibo*[3]
(1. School of Power and Energy, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China; 2. School of Integrated Circuits, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Extended Abstract

With the rapid development of socio-economic structures, energy shortages and environmental pollution increasingly emerge as global challenges, creating opportunities for the advancement of piezoelectric catalytic technology. Barium titanate ($BaTiO_3$) is extensively utilized in piezoelectric catalysis due to its low cost, robust mechanical stability, and exceptional piezoelectric properties. The existing research on $BaTiO_3$-based piezoelectric materials primarily concentrates on their application in the degradation of organic pollutants, water decomposition for hydrogen production, hydrogen peroxide synthesis, and various medical applications. As research deepens, the scope of $BaTiO_3$-based piezoelectric materials in piezoelectric catalysis expands to some areas such as CO_2 reduction, nitrogen (N_2) fixation, and heavy metal ion removal. This review focuses on $BaTiO_3$-based piezoelectric materials, initially detailing their piezoelectric catalytic mechanisms and briefly outlining their energy sources. This review also represents some applications of $BaTiO_3$ in piezoelectric catalysis, highlighting significant advancements in diverse areas such as pollutant degradation (*i.e.*, organic dyes and antibiotics), energy production (*i.e.*, hydrogen peroxide and hydrogen), CO_2 reduction, nitrogen fixation, and medical applications. Furthermore, this review critically examines some challenges faced by $BaTiO_3$-based piezoelectric catalysts in practical applications and discusses potential optimization strategies to facilitate their development and application in the field of piezoelectric catalysis.

Summary and prospects $BaTiO_3$ is widely investigated as a piezoelectric catalyst due to its high safety, low preparation cost, stability, and environmental friendliness. This review provides a comprehensive review of the catalytic mechanisms of $BaTiO_3$-based piezoelectric materials, their energy sources, and recent advancements in the field of piezoelectric catalysis. The existing research into the applications of $BaTiO_3$-based materials primarily focuses on organic pollutant degradation, hydrogen production *via* water splitting, hydrogen peroxide synthesis, and biomedical uses. However, most studies remain in lab-scale and do not deal with industrial applications. The practical applications of $BaTiO_3$-based materials face some challenges despite having superior piezoelectric catalytic performance in various fields. Firstly, in practical applications, $BaTiO_3$ suffers from a low carrier concentration and a rapid recombination rate, restricting its catalytic efficiency. Secondly, there is a lack of comprehensive understanding of the piezoelectric catalytic mechanisms of $BaTiO_3$. The band theory and shielding charge effects are used to explain these mechanisms, but they do not fully elucidate all catalytic phenomena. The existing research shows that the piezoelectric effect of $BaTiO_3$ can enhance reactant conversion. However, the specific reaction pathways and intermediate formation mechanisms require a further investigation. In addition, the stability and reusability of $BaTiO_3$-based piezoelectric catalytic materials in practical applications need a urgent attention. To address these challenges, future research should focus on the following aspects:

1) Development of new material systems and optimization of modification strategies: Moving beyond conventional modification frameworks and exploring composition design methods utilizing machine learning can develop composite structures with gradient piezoelectric characteristics. A photopiezoelectric dual-drive catalytic system can be created to achieve a synergistic enhancement in carrier generation and separation *via* coupling plasmon resonance effects with piezoelectric responses. Interface engineering of two-dimensional materials, such as MXene, can offer new insights for constructing efficient charge transfer channels.

2) In-depth study of catalytic mechanisms: A multi-scale characterization platform is established *via* integrating in-situ transmission electron microscopy with ultrafast spectroscopy to monitor interfacial charge dynamics induced by piezoelectric potentials in real-time. Dynamic density functional theory (DFT) calculation methods are developed to elucidate the nonlinear coupling mechanisms among stress, potential, and catalytic activity, especially focusing on the formation and conversion pathways of transient intermediate states.

3) Expansion and optimization of practical applications: $BaTiO_3$-based piezoelectric catalysts in more complex real-world environmental systems, such as industrial wastewater treatment, are implemented to assess their performance and limitations, thereby promoting the industrial application of piezoelectric catalysis technology. In addition, material designs with self-healing capabilities are also explored to enhance long-term stability and recyclability, preventing secondary pollution.

Keywords barium titanate; piezoelectric catalysis; energy source