

一维钛酸盐纳米材料的制备及应用研究进展

陈炳全¹, 刘书锋², 刘峻¹, 倪成瑞¹, 曹晓雨³, 刘世凯^{1*}

¹河南工业大学材料科学与工程学院, 河南 郑州

²郑州博特硬质材料有限公司, 河南 郑州

³河南工业大学化学化工学院, 河南 郑州

收稿日期: 2026年8月3日; 录用日期: 2026年9月1日; 发布日期: 2026年9月14日

摘 要

一维钛酸盐纳米材料具有独特晶体结构、优异阳离子交换能力、良好半导体特性与高比表面积, 在光催化、电化学储能、吸附分离、传感检测等领域具备巨大应用潜力。本文梳理该类材料晶体结构特征与主流制备工艺, 重点讨论水热合成关键调控条件, 评述溶解-再结晶、层状中间体卷曲、定向附着-奥斯瓦尔德熟化等生长机理; 对比模板法、溶胶-凝胶法、熔盐法、高温固相法的优缺点与适用场景, 建立制备方法对比体系, 并从“制备-结构-性能”的关联角度展开分析。综述了一维钛酸盐纳米材料在光催化、染料敏化太阳能电池、锂/钠离子电池、催化剂载体、气体传感器领域的研究现状, 总结当前研究存在的挑战, 对后续发展方向进行展望。

关键词

一维钛酸盐纳米材料, 晶体结构, 制备策略, 应用领域, 研究进展

Research Progress on the Preparation and Applications of One-Dimensional Titanate Nanomaterials

Bingquan Chen¹, Shufeng Liu², Jun Liu¹, Chengrui Ni¹, Xiaoyu Cao³, Shikai Liu^{1*}

¹School of Materials Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou Henan

²Zhengzhou Bote Hard Materials Co., Ltd., Zhengzhou Henan

³School of Chemistry and Chemical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou Henan

Received: August 3, 2026; accepted: September 1, 2026; published: September 14, 2026

*通讯作者。

文章引用: 陈炳全, 刘书锋, 刘峻, 倪成瑞, 曹晓雨, 刘世凯. 一维钛酸盐纳米材料的制备及应用研究进展[J]. 材料科学, 2026, 16(9): 19-31. DOI: 10.12677/ms.2026.169179

Abstract

One-dimensional (1D) titanate nanomaterials, by virtue of their distinctive crystal structures, exceptional cation exchange capacity, favorable semiconducting properties, and high specific surface area, have demonstrated substantial application potential across diverse fields including photocatalysis, electrochemical energy storage, adsorption and separation, and sensing and detection. This review systematically examines the crystal structural characteristics, principal preparation strategies, and underlying growth mechanisms of these materials. Particular attention is devoted to the key regulatory factors governing hydrothermal synthesis, accompanied by a critical appraisal of multiple growth mechanism models—including dissolution-recrystallization, the rolling of layered intermediates, and the oriented attachment-Ostwald ripening cooperative mechanism. In parallel, the advantages, limitations, and applicable scopes of alternative synthetic routes, namely the template method, sol-gel method, molten salt method, and high temperature solid state method, are objectively evaluated, and a comparative evaluation framework for these preparation approaches is established. Furthermore, a synthesis-structure-performance correlation perspective is adopted to deliver a more nuanced commentary on the interrelationships among synthetic pathways, microstructural features, and functional properties. The research progress of 1D titanate nanomaterials in photocatalysis, dye sensitized solar cells, lithium/sodium ion batteries, catalyst supports, and gas sensors is comprehensively reviewed. Finally, the prevailing challenges and developmental directions in this field are summarized, and an outlook on prospective research trends is presented.

Keywords

One-Dimensional Titanate Nanomaterials, Crystal Structure, Preparation Strategies, Application Fields, Research Progress

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

纳米技术自 20 世纪中叶提出之后, 历经概念发展到技术突破。20 世纪 80 年代, 扫描隧道显微镜、原子力显微镜的问世, 为纳米材料提供关键表征手段, 推动该领域快速发展。纳米技术现已覆盖信息、装备制造、建筑、航空航天、医疗卫生、国防安全等诸多领域, 成为各国抢占高科技制高点的重要方向[1]。进入 21 世纪, 新材料是国防、生物、环境、能源与信息技术迭代升级的重要基础[2]。元器件微型化对材料尺寸提出严苛要求, 一维钛酸盐纳米材料凭借独特的结构与物化性能, 成为纳米材料领域的重要研究对象[3]。

一维钛酸盐纳米材料属于 TiO_2 衍生功能材料。1998 年 Kasuga 等人首次采用水热法以 TiO_2 为原料制备钛酸盐纳米管, 开启该方向的研究热潮[4]。该类材料具备规整一维纳米形貌、化学性质稳定, 在离子交换、多孔柱撑材料、化学传感器、光催化等方向应用前景广阔。按照化学组分, 钛酸盐分为碱金属、碱土金属、过渡金属以及稀土钛酸盐; 晶体结构主要包含钙钛矿(ATiO_3)、尖晶石(A_2TiO_4)、层状($\text{A}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$)、烧绿石($\text{A}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$)四类, 其中层状钛酸盐因开放层框架与突出的阳离子交换性能得到广泛关注[5]。2004 年石墨烯的成功剥离制备[6], 进一步带动一维、二维纳米材料研究。一维钛酸盐原料易得, 合成可重复性好, 兼具优异电学与半导体性能, 在光催化、电化学电极材料中具备很高应用价值。

近年来,一维钛酸盐纳米材料的研究取得了诸多重要进展。Liu 等[5]系统综述了层状钛酸盐及其剥离产物二维纳米片在光催化、吸附和电化学等领域的最新研究进展。Saker 等[7]全面探讨了水热合成钛酸盐纳米管的制备参数(温度、时间、碱介质浓度、酸洗和煅烧等后处理条件)对产物性能的影响,指出这些参数的微小变化会导致产物性质产生显著差异。现有研究证实一维钛酸盐在有机污染物光催化降解、染料敏化太阳能电池、锂/钠离子电池负极、气体传感、重金属离子吸附等场景表现优良。本文结合已有文献,系统总结一维钛酸盐纳米材料的晶体结构、合成工艺、构效关系及应用现状,并对未来研究趋势进行展望。

2. 一维钛酸盐纳米材料的结构特征

2.1. 纳米材料的分类与一维钛酸盐纳米材料

纳米材料是指在三维空间中至少有一维处于纳米尺度范围(1~100 nm)的材料[3]。按照空间维度划分为零维(纳米颗粒)、一维(纳米管、纳米线、纳米棒)、二维(纳米薄膜)。一维纳米材料根据形貌又可以分为纳米线(圆形截面、大长径比)、纳米管(中空管状)、纳米带(扁平矩形截面)[8]。一维钛酸盐作为 TiO_2 衍生物,可实现上述三类一维形貌的制备[9][10]。

2.2. 钛酸盐的晶体结构与分类

钛酸盐的晶体结构主要包含钙钛矿结构、尖晶石结构、层状结构和烧绿石结构等,其中层状钛酸盐是该领域的研究重点[5]。现有研究认为一维钛酸盐微观结构起源于层状碱金属钛酸盐的酸洗改性,保留原有层状骨架[8],基本结构单元为 TiO_6 八面体,通过共边、共顶点连接形成锯齿状片层;金属阳离子居于层间位置,通式可写作 $\text{A}_2\text{O} \cdot n\text{TiO}_2$ 或 $\text{A} \cdot \text{TiO}_2$ (A 代表 Na、K、Ba、Ca 等金属)[11]。以钠的钛酸盐为例,其结构具有多样性,包括 $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ 、 $\text{Na}_2\text{Ti}_4\text{O}_9$ 和 $\text{Na}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$ 等多种形式[12]。图 1 为 $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ 层状晶体结构,开放层间通道允许外来阳离子插入,为离子交换与一维纳米结构构筑奠定结构基础。

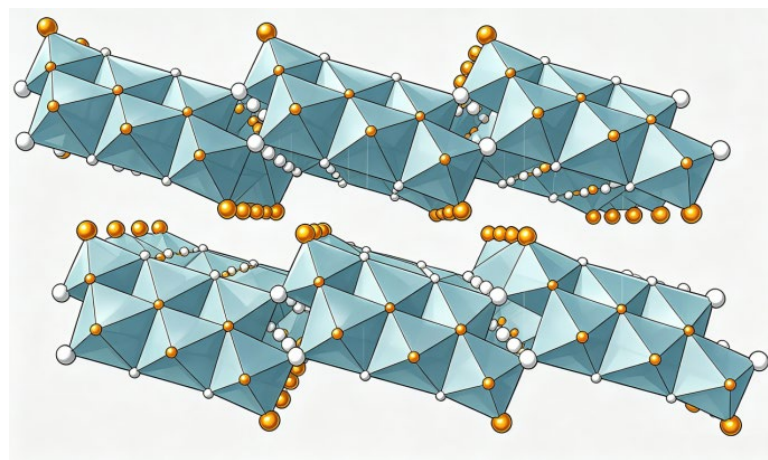


Figure 1. Layered crystal structure of $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$
图 1. $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ 的层状晶体结构

3. 一维钛酸盐纳米材料的制备方法

3.1. 水热法

水热法是合成一维钛酸盐纳米材料使用最广泛、技术最成熟的手段[9][12][13]。在密闭高压反应釜

内,前驱物在高温高压水溶液中溶解、成核生长,得到目标晶粒。水热法主要优势如下[14]-[16]:(1)可合成部分其他方法难以得到的特殊物相,密闭体系能够调控氧化还原气氛;(2)反应温度相对较低,可制备低温同质异构体;(3)液相传质效率高,化学反应速率快;(4)促进氧化物低温脱溶以及有序-无序结构转变。

该工艺一般以 TiO_2 粉体为原料,在强碱性水溶液条件下反应[13]。碱浓度、反应温度、保温时间、前驱物种类,以及后续酸洗、煅烧后处理,都会显著改变产物晶相与形貌[7] [9]。典型流程:将 TiO_2 粉体分散于 NaOH 溶液,搅拌后转入水热釜热处理,通过工艺参数调控实现产物形貌与晶相调控。

生长机理:水热条件下一维钛酸盐的生成是多阶段、多机制耦合的复杂过程,学界尚未形成完全统一的认识,不同机理分别在反应不同阶段占据主导,主流模型总结如下。

(1) 溶解-再结晶模型(Dissolution-Recrystallization Model)

该模型提出较早,认可度较高[8] [12]。强碱高温环境中 TiO_2 颗粒破碎, OH^- 进攻破坏 Ti-O-Ti 键,生成可溶性钛酸根离子团簇;当溶液内钛酸根离子达到过饱和,重新成核析出层状 $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ 晶体[14] [17]。该模型可以解释碱浓度、温度对产物的影响:碱度或温度不足, TiO_2 溶解程度不够,无法生成一维产物;碱度过高,钛酸盐溶解度偏大,同样抑制晶核析出。但该模型仅解释 TiO_2 向层状纳米片的转变,不能说明纳米片卷曲形成纳米管,以及纳米带、纳米线之间的形貌演化。

(2) 层状中间体卷曲模型(Rolling/Wrapping Model)

该模型在溶解-再结晶基础上解释钛酸盐纳米管的形成[8] [13]。水热先生成 $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ 层状纳米片中间体;酸洗过程中层间 Na^+ 被 H^+ 置换,水分子同步嵌入,层间距扩大,片层发生剥离;超薄纳米片为降低表面能沿特定晶向卷曲,最终形成多壁开口纳米管。TEM 观察到纳米片-纳米管中间态可佐证该机理,同时解释酸洗对于纳米管形成的必要性。但有研究发现不经酸洗的钠相钛酸盐同样可以得到纳米管,说明卷曲驱动力除离子交换外,还包含片层边缘应力与表面能最小化效应。

(3) 定向附着-奥斯瓦尔德熟化协同模型(OA-OR Cooperative Model)

该模型主要用于阐释水热后期纳米管向纳米线、纳米带的形貌转变。水热保温中后期,已生成钛酸盐纳米晶依靠定向附着,沿特定晶向对齐融合,实现一维方向快速生长;同时奥斯瓦尔德熟化持续发生,小晶粒溶解、大晶粒长大,产物长径比增加,管径分布变窄。升温只会加速该转变过程,不改变反应路径,该机理可以解释依靠反应时间调控纳米管、纳米带、纳米线选择性制备的实验现象。

(4) 生长-分裂-包裹-增厚通用模型(Growth-Split-Wrap-Thicken Model)

Bavykin 等[18] [19]基于多种形貌的系统观测提出普适机理: $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ 中间体先一维生长,纵向分裂得到薄纳米带;纳米带卷曲包裹生成纳米管,最后管壁增厚实现结构稳定。该模型把不同形貌视作同一反应路径上不同动力学中间态,温度、碱浓度、反应时间本质上改变动力学条件,推动形貌之间相互转化。该模型普适性较强,但多来源于现象归纳,缺少原位表征的直接证据。

以上四种机理并不互相排斥,分别对应水热反应不同阶段。目前多数机理推断依靠非原位 TEM 表征,缺少液相原位电镜、原位 XRD 的全过程追踪;不同 TiO_2 前驱体(锐钛矿、金红石、P25 混相)晶面对成核生长的定量影响仍然缺乏系统研究。未来结合原位表征与分子动力学模拟,有望建立从化学键断裂到一维形貌生成的完整定量模型。

3.2. 模板法

模板法是获得有序纳米结构最为有效的方法之一,主要用于合成纳米管[2] [15]。该方法通过预先制备具有特定形貌和孔径的模板,然后在模板的孔隙或表面沉积目标材料,最后去除模板获得具有模板形貌的纳米结构。但模板法制备工艺复杂,所得纳米管管径大、管壁厚、比表面积小,且纳米管孔径受模

板孔径和形貌的限制。Zhang 等[20]采用软硬模板辅助的溶胶 - 凝胶工艺合成了具有介孔结构的铈钛酸盐，通过调控模板尺寸和前驱体比例可实现对产物微观结构的精确控制。

3.3. 溶胶 - 凝胶法

溶胶 - 凝胶法是一种湿化学合成方法。其步骤为：选择需要制备的金属化合物，将其溶解于适当溶剂中，经过溶胶和凝胶过程固化，再经低温热处理得到纳米材料[4] [16]。溶胶 - 凝胶法制备的钛酸盐粉末成分均匀、产物粒径小。Gheorghe 等[21]采用非常规溶胶 - 凝胶法，以四氯化钛(TiCl₄)和氢氧化钠(NaOH)为前驱体，结合 160℃ 水热陈化 24 小时，成功合成了具有片状和线状形貌的钛酸钠颗粒，获得了 Na₂Ti_nO_{2n+1} (n = 3 和 6)混合相，晶粒尺寸约为 22 nm。但该方法原料成本高，反应过程可能释放毒性气体，对健康和环境造成危害，且产量低，不适用于工业化生产。

3.4. 熔盐法

熔盐法是一种低温合成和形貌可控的方法。该方法使用熔融盐作为反应物的溶剂，使不同反应物在分子水平上混合，确保最终产物结构均匀。熔盐的作用是降低反应温度、提高反应速率和混合物均匀性、控制颗粒尺寸和形貌。与固相反应相比，熔盐法可获得更好的化学均匀性和更细的颗粒。该方法操作简单，制备出的样品物相均匀，可通过调节熔盐种类和用量、反应时间和温度来调控产物形貌。Cheng 等[22]通过水热与熔盐煅烧相结合的方法合成了钛酸钠 - 钛酸钾复合光催化剂，在煅烧过程中添加低熔点硝酸盐有效降低了煅烧温度，所得复合样品在可见光范围内表现出优于商用 P25 的光催化性能。田壮采用熔盐法制备了稀土掺杂的一维钛酸盐纳米结构，研究了其发光特性。

3.5. 高温固相法

高温固相法是出现较早的材料合成方法，也是较为经典的合成方法。该方法通过对原料均匀混合、研磨搅拌，必要时压块，最后高温烧结得到样品。其优点是制备工艺简单、原料选择范围广、合成成本低、可工业化生产。缺点是反应温度高、时间长、能耗高、样品颗粒粗大且形貌不规则、均匀性较差、研磨过程中晶形易受破坏、原料浪费多。Usman 等[23]通过 DFT 指导的通量法合成了一系列具有纤铁矿结构的层状钛酸盐，为高温固相法的优化提供了理论指导。Sravanthi 等[24]采用高温固相反应法合成了铅钛酸盐陶瓷复合材料，系统研究了 CeO₂ 掺杂对材料结构和性能的影响。

3.6. 不同制备方法的对比分析

为便于研究者根据实际需求选择适宜的制备策略，表 1 汇总 5 种主流制备方法的各项指标，方便研究者结合实际需求选择合成路线。

Table 1. Comparison of different preparation methods for one-dimensional titanate nanomaterials
表 1. 一维钛酸盐纳米材料不同制备方法的对比

对比维度	水热法	模板法	溶胶 - 凝胶法	熔盐法	高温固相法
操作复杂度	简单	复杂	中等	简单	简单
反应温度	中等(100~250℃)	因模板而异	低温至中等	中等至高温	高温(>900℃)
产物形貌控制	良好	优异(受模板限制)	良好	良好	较差
比表面积	大	小	中等	中等	小
产物均匀性	良好	良好	优异	优异	较差
原料成本	低廉	中等	高	中等	低廉

续表

环境友好性	良好	良好	较差(毒性气体)	良好	良好
规模化潜力	高	低	低	中等	高
主要优点	成本低、产物均一、 适合大规模生产	结构有序性好	成分均匀、粒 径小	形貌可控、 物相均匀	工艺简单、可工 业化
主要缺点	参数敏感、形貌调控 难度大	工艺复杂、管径 受限	成本高、有毒、 产量低	熔盐去除 繁琐	温度高、颗粒粗大

3.7. 制备方法对微观结构的深层影响与“制备 - 结构 - 性能”关联

前文从工艺角度对比了不同制备方法的优劣。然而，真正决定材料应用价值的，是其微观结构。本节将从“制备 - 结构 - 性能”关联的视角，剖析不同合成路径如何塑造材料的“结构基因”，并最终影响其应用表现。

(1) **水热法**：低温强碱条件的“溶解 - 再结晶”过程，产物存在大量氧空位、 Ti^{3+} 缺陷，且保留了层状结构与高比表面积。这种“高缺陷 - 高比表面”的结构特征，使其在光催化(缺陷拓宽光吸收)和吸附(层间离子交换)领域优势显著。然而，低结晶度也意味着在高温应用中稳定性不足。

(2) **模板法**：通过物理限域实现形貌高度有序，但模板去除过程易引入杂质，且产物管径大、比表面积小。其价值在于为定向传输器件(如染料敏化电池光阳极、传感器阵列)提供有序通道，但牺牲了表面活性位点。

(3) **溶胶 - 凝胶法**：前驱体在分子水平混合，产物化学均匀性极高，适合多组分掺杂。但低温热处理导致产物多为非晶或低结晶度相，制约了其载流子迁移率，更适用于对均匀性有极致要求的前驱体制备或薄膜器件，一般需要结合水热或者高温后处理提升结晶性。

(4) **熔盐法**：熔融盐提供的液相环境能有效促进晶体各向异性生长，产物结晶度高，缺陷少，循环稳定性好，但比表面积有所下降；若熔盐清洗不完全，残留碱金属离子会干扰表面性质。适用于对循环寿命要求高的催化或储能场景。

(5) **高温固相法**：高温扩散得到高结晶度、高致密度产物；但高温导致晶粒极易粗化，一维形貌难以维持，研磨引入机械缺陷，比表积极低。该方法产物不适合吸附、光催化等依赖高比表面的场景，多用于陶瓷基结构或功能器件。

综上，各类合成方法均存在结构 - 性能之间的权衡，不存在通用最优工艺。材料选择应当从目标性能出发，反向匹配微观结构，再确定制备方案；部分场景可采用复合工艺(如水热 - 熔盐联用)兼顾多项性能。所以，研究者的核心任务是“以目标性能需求为导向，反向选择能赋予目标结构特征的制备路径”。理解这一关联逻辑，是合理设计材料和优化性能的关键。

4. 一维钛酸盐纳米材料的性能与应用

一维钛酸盐凭借特殊微观结构，在多个功能领域展现应用潜力，如图 2 所示。

4.1. 光催化

(1) **工作原理**：当入射光子能量大于半导体禁带宽度(E_g)时，价带电子被激发跃迁至导带，同时在价带留下具有强氧化性的空穴(h^+)。光生载流子迁移至材料表面后，空穴可直接氧化有机污染物或与表面吸附的 $\text{H}_2\text{O}/\text{OH}^-$ 反应生成羟基自由基($\cdot\text{OH}$)，导带电子则与 O_2 反应生成超氧自由基($\cdot\text{O}_2^-$)，这些活性物种可将各类有机污染物彻底矿化为 CO_2 和 H_2O 。一维钛酸盐优势体现在：高比表面积提供大量活性位点；一

维通道加快光生电子输运,降低载流子复合;水热产物的氧空位、 Ti^{3+} 缺陷在禁带引入中间能级,拓展可见光响应。

(2) 关键性能指标: 降解率(特定时间内目标污染物的去除百分比)、表观反应速率常数 k (min^{-1} , 通常遵循准一级动力学)、量子效率(QE, 即参与反应的电子数与吸收光子数之比)、循环稳定性(多次循环后的活性保留率)以及可见光响应能力。在与商业化基准材料对比时, Degussa P25 (锐钛矿/金红石混相 TiO_2 纳米颗粒, 比表面积约 $50 \text{ m}^2/\text{g}$)是最常用的参照标准。



Figure 2. Main characteristics and application fields of one-dimensional titanate nanomaterials
图 2. 一维钛酸盐纳米材料的主要特性及应用领域

(3) 研究实例与性能对比: 近年来, 一维碱金属六钛酸盐(如 $\text{K}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$ 、 $\text{Na}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$)因其高化学稳定性和独特的离子交换性能, 在污染物降解、 H_2 生产和 CO_2 还原等领域受到广泛关注[25]。在性能对比方面, 部分一维钛酸盐纳米结构的光催化活性可达到甚至超过商用 P25: 自组装 $\text{H}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ 纳米管阵列对罗丹明 B (RhB) 的光分解速率常数与 P25 相当或更高; 钛酸盐纳米线对结晶紫(Crystal Violet, CV)的降解在 $\text{pH} = 3$ 、紫外光照 35 min 条件下可达 100%, 活性显著高于同条件下的 TiO_2 纳米颗粒和纳米管[26]。Cheng 等[22]通过水热-熔盐联用制备的钛酸钠-钛酸钾复合光催化剂, 在可见光范围内的催化性能也优于商用 P25。钙钛矿型钛酸盐(如 SrTiO_3)及其复合材料在光催化全分解水领域也取得了重要进展, 通过掺杂或构建异质结可实现可见光响应。

(4) 面临挑战: ① 光生载流子复合严重, 量子效率偏低; ② 纯相钛酸盐带隙宽, 仅能利用紫外光; 缺陷改性虽拓宽吸收, 也会成为复合中心; ③ 层状结构长期反应易坍塌相变, 循环稳定性不足; ④ 粉末催化剂水处理体系回收困难。

(5) 改进策略: ① 构建异质结, 与窄带隙半导体、贵金属复合, 促进载流子分离; ② 缺陷工程, 可控引入适量氧空位/ Ti^{3+} , 平衡光吸收与载流子复合; ③ 优化形貌, 制备高长径比单晶一维结构或者三维阵列; ④ 固载化处理, 将催化剂负载于基底, 解决粉末回收难题。

4.2. 染料敏化太阳能电池

(1) 工作原理: 染料敏化太阳能电池(DSSC)主要由镀有透明导电膜(FTO/ITO)的玻璃基底、染料敏化的半导体光阳极、电解质和对电极四部分组成。其工作原理为: 太阳光照射时, 染料分子吸收光子由基态(S)跃迁至激发态(S^*), 激发态染料将电子注入半导体薄膜的导带; 注入的电子经半导体网络传输至导电基底, 通过外电路流向对电极形成电流; 失去电子的氧化态染料(S^+)由电解质中的氧化还原电对(通常为 I^-/I_3^-)还原再生, I^- 被氧化为 I_3^- , I_3^- 在对电极得到电子被还原为 I^- , 完成循环。一维钛酸盐用作光阳极的优势: 高比表面积提升染料吸附量; 一维通道加速电子传输, 降低晶界复合。

(2) 关键性能指标: 光电转换效率(PCE, %)、开路电压(V_{oc} , V)、短路电流密度(J_{sc} , mA/cm^2)、填充因子(FF)、电子扩散长度(L_n , μm)和电子寿命(τ_n , ms)。商业化 DSSC 光阳极的主流材料是 TiO_2 纳米颗粒(P25 或自合成锐钛矿纳米晶), 其典型 PCE 在标准 AM 1.5G 光照下为 7%~12%。

(3) 研究实例与性能对比: O'Regan 和 Grätzel 于 1991 年首次采用 TiO_2 纳米晶薄膜作为光阳极, 实现了 7.1%~7.9%的能量转换效率[27], 奠定了 DSSC 的技术基础。一维钛酸盐纳米管、纳米线光阳极表现出更优异的电子收集能力, 电子扩散长度显著优于颗粒膜。溶胶-凝胶制备一维钛酸盐电极相比传统颗粒电极, 光电转换效率提升约 15%。但一维钛酸盐比表面积不及纳米颗粒, 多数报道光电转换效率集中在 5%~8%, 尚未全面超越颗粒体系; 其优势体现在厚膜器件与柔性器件, 厚膜条件下依旧可以维持高效电子收集。

(4) 面临挑战: ① 比表面积不足导致染料负载量低于纳米颗粒体系, 限制了光捕获和 J_{sc} ; ② 纳米管/纳米线阵列的制备工艺复杂、大面积均匀性差, 难以与低成本卷对卷制造兼容; ③ 一维结构与电解质的接触面积相对较小, I_3^- 在管内的扩散传质可能成为限速步骤; ④ 层状钛酸盐在碘基电解质中长期化学稳定性有待验证。

(5) 改进策略: ① 一维/纳米颗粒复合光阳极以增加比表面积和染料吸附量, 兼顾传输效率与吸附容量; ② 通过 TiCl_4 后处理或超薄 Al_2O_3 包覆钝化表面缺陷态, 抑制电荷复合; ③ 开发新型钴基、铜基电解质, 减少对一维结构内部传质的依赖; ④ 通过水热法直接在 FTO 上生长垂直排列的钛酸盐纳米线阵列, 消除颗粒间晶界, 最大化电子收集效率。

4.3. 锂/钠离子电池负极材料

(1) 工作原理: 在锂离子电池(LIB)中, 负极材料在充电时嵌入 Li^+ 、放电时脱嵌 Li^+ , 其工作电位和比容量直接决定电池的能量密度与安全性。钛酸盐负极通过 $\text{Ti}^{4+}/\text{Ti}^{3+}$ 氧化还原对实现 Li^+ 的可逆嵌入/脱嵌, 典型代表为尖晶石型 $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (LTO), 其嵌锂电位平台约 1.55 V vs. Li^+/Li , 嵌锂过程为 $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12} + 3\text{Li}^+ + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Li}_7\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, 体积变化几乎为零(“零应变”材料)。在钠离子电池(SIB)中, 层状 $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ 是最具代表性的钛酸盐负极, 其平均储钠电位约 0.3 V vs. Na^+/Na , 为目前已知钛酸盐中最低, 理论上可嵌入 2 个 Na^+ 生成 $\text{Na}_4\text{Ti}_3\text{O}_7$, 对应理论容量约 177 mAh/g。一维结构缩短离子扩散距离, 构建连续导电通路, 缓冲嵌脱过程体积变化, 改善倍率与循环性能[28] [29]。

(2) 关键性能指标: 可逆比容量(mAh/g)、工作电位平台(V)、倍率性能(不同电流密度下的容量保持率)、循环寿命(次)、首圈库仑效率(ICE, 入后层状结构的%)和体积变化率(%)。商业化 LIB 负极以石墨为主(理论容量 372 mAh/g, 工作电位~0.1 V vs. Li^+/Li), LTO 是第二大商业化负极材料; SIB 商业化负极以硬碳为主(可逆容量 300~372 mAh/g, 工作电位~0.1 V vs. Na^+/Na)。

(3) 研究实例与性能对比: 在锂离子电池领域, Nurhaliza 等[30]综述了钛酸锂及其杂质掺杂作为负极材料的性能, 指出 LTO 因其高稳定性和优异安全性成为极具前景的负极材料。LTO 的理论容量为 175 mAh/g, 显著低于石墨的 372 mAh/g, 且 1.55 V 的高工作电位导致全电池输出电压降低、能量密度受限; 但 LTO 的“零应变”特性使其循环寿命远超石墨(可达万次以上), 且高电位避免了锂枝晶析出, 安全性优异, 在快充和长寿命场景(如电动巴士、储能电站)中已实现商业化应用(如东芝 SCiB 电池)。一维钛酸盐纳米结构(如 LTO 纳米线/纳米管)通过缩短 Li^+ 扩散路径, 可在保持 LTO 安全性的同时提升倍率性能。

在钠离子电池领域, $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ 因其低储钠电位(0.3 V vs. Na^+/Na)、大层间距(~0.84 nm, 有利于 Na^+ 快速嵌入)和稳定的层状结构, 被认为是很有前景的 SIB 负极材料[31]。Xia 等[32]报道的单层钛酸钠纳米带表现出优异的电化学活性和结构完整性, 一维单晶结构有效缩短了 Na^+ 扩散距离。Chen 等[33]综述了钠钛酸盐负极在实际 SIB 中的机遇与挑战。然而, 与硬碳相比, $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ 的实际可逆容量通常在 100~200 mAh/g 范围, 低于硬碳的 300~372 mAh/g; 且 $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ 的电子电导率低(~ 10^{-13} S/cm), 首圈库仑效率偏低(通常 < 70%), Na^+ 嵌入后层状结构的稳定性也面临考验。在固态电池领域, 钛酸盐因其良好的稳定性和环境友好性成为研究热点[34], 钙钛矿型和尖晶石型钛酸盐在固态电解质中也表现出优异的离子传导性能[35]。

(4) 面临挑战: ① 比容量偏低: 无论是 LTO (175 mAh/g) 还是 $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ (~177 mAh/g 理论值), 均显著低于碳基负极, 限制了全电池能量密度; ② 电子电导率低: 钛酸盐本征电导率通常在 10^{-13} ~ 10^{-9} S/cm 量级, 严重制约高倍率性能; ③ 首圈库仑效率低: 层状钛酸盐表面的不可逆反应和 SEI 膜形成消耗大量活性 Na^+/Li^+ ; ④ $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ 的低电位(0.3 V)虽有利于能量密度, 但接近钠析出电位, 在大电流快充下存在析钠安全隐患。

(5) 改进策略: ① 纳米化与一维结构设计, 缩短离子扩散路径; ② 碳复合/包覆, 构建导电网络; ③ 掺杂改性, 优化电子结构; ④ 预钠化/预锂化补偿首次不可逆容量; ⑤ 调控物相或者构筑异质结, 平衡容量与循环稳定性。

4.4. 催化剂载体

(1) 工作原理: 催化剂载体的核心功能包括: 分散和稳定活性金属纳米颗粒、防止其团聚长大、提供反应物吸附和活化的界面位点、以及在某些情况下通过金属-载体强相互作用(SMSI)调控活性金属的电子态和催化性能。一维钛酸盐优势: 高比表面积提供锚定位点; 层状材料依靠离子交换实现活性组分高度分散; 一维孔道有利于反应物和产物的传质扩散。

(2) 关键性能指标: 金属负载量(wt%)、金属颗粒平均尺寸(nm)及分布均匀性、比表面积(m^2/g)、催化转化率(%)、选择性(%)、turnover frequency (TOF, s^{-1})和循环稳定性。常用的商业化催化剂载体包括 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (比表面积 100~300 m^2/g)、活性炭(500~1500 m^2/g)和 SiO_2 。

(3) 研究实例与性能对比: Idakiev 等[36]采用溶胶-凝胶法制备了均匀负载纳米金(Au)的钛酸盐纳米材料, 用于低温水煤气变换反应(WGS), 催化效果显著增强。钛酸盐载体与贵金属之间存在 SMSI 效应, 还原条件下 Ti^{3+} 位点协同金属活性中心, 氧化还原类反应性能优于惰性 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 载体。水热钛酸盐纳米管比表面积可达 200~400 m^2/g , 依靠离子交换还可以实现单原子级金属分散。

(4) 面临挑战: ① 热稳定性不足: 层状钛酸盐在高温还原或反应条件下(>500°C)易发生结构坍塌和

向 TiO_2 的相转变, 导致比表面积急剧下降和金属颗粒团聚。② 机械强度有限; 一维纳米结构在高压成型或长期反应中易破碎, 影响固定床反应器中的压降和传质。③ 酸性条件下的稳定性差; 钛酸盐在强酸性反应介质中可能发生层间阳离子淋滤, 层状骨架容易被破坏; ④ 规模化制备成本高。高比表面积钛酸盐纳米管的规模化制备成本仍显著高于商用 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 等。

(5) 改进策略: ① Si、Zr 等元素掺杂复合氧化物, 提升热稳定性; ② 涂覆于蜂窝陶瓷、金属泡沫, 制备结构化催化剂; ③ 硅烷、磷酸化表面改性提升酸碱稳定性; ④ 利用离子交换与缺陷锚定开发钛酸盐基单原子催化剂。

4.5. 气体传感器

(1) 工作原理: 电阻型半导体传感器依靠表面气体吸附-氧化还原反应改变载流子浓度, 实现电阻信号响应。 n 型钛酸盐接触还原性气体释放电子, 电阻下降; 接触氧化性气体电阻升高。一维钛酸盐优势: 高比表面积提供了丰富的气体吸附和反应位点; 一维结构的高长径比有利于电子在整个颗粒内的连续传输, 减少晶界势垒对载流子的散射; 纳米尺寸效应使得 Debye 长度与材料尺寸可比, 整个颗粒体相均可参与气体响应, 从而获得更高的灵敏度。

(2) 关键性能指标: 灵敏度($S = R_{\text{air}}/R_{\text{gas}}$ 或 $R_{\text{gas}}/R_{\text{air}}$)、响应/恢复时间(s)、最低检测限(LOD, ppm 或 ppb 级)、选择性(对目标气体与干扰气体的响应比值)、长期稳定性和工作温度($^{\circ}\text{C}$)。商业化气体传感器主流材料包括 SnO_2 、 ZnO 和 WO_3 等金属氧化物, 其中 SnO_2 是应用最广泛的 CO 和可燃气体传感材料。

(3) 研究实例与性能对比: 一维钛酸盐纳米材料可用于检测 H_2 、CO、 O_2 等多种气体, 氢气检测最低检出限可达 $0.05 \mu\text{L/L}$ (即 50 ppb), 性能媲美部分商用 SnO_2 氢气传感器(通常 LOD 为 1~10 ppm)。Ramanavičius 等[37]综述了基于钛氧化物的气体传感器研究进展, 指出钛基氧化物材料在气体传感领域具有广阔的应用前景。钛酸盐基半导体金属氧化物在气体传感应用中表现出优异的灵敏度和选择性[38], 特别是钙钛矿型钛酸盐(如 SrTiO_3 、 BaTiO_3)通过掺杂调控可实现对特定气体的高选择性响应。钛酸盐化学稳定性、抗中毒性能优于部分传统氧化物; 但现有研究大多停留在实验室原型, 器件一致性、长期漂移距离商用 SnO_2 器件仍有差距。

(4) 面临挑战: ① 灵敏度与选择性的平衡; 纯相钛酸盐对多种气体均有响应, 选择性不足, 难以在复杂气氛中精准识别目标气体。② 工作温度偏高; 多数钛酸盐传感器仍需在 $200\sim 400^{\circ}\text{C}$ 下工作, 功耗较大, 限制了在无线传感节点中的应用。③ 长期稳定性差; 纳米结构在长期高温工作中可能发生晶粒长大和结构退化, 导致基线漂移明显。④ 湿度干扰大。环境湿度对钛酸盐表面氧吸附和气体反应的干扰尚未得到有效解决。

(5) 改进策略: ① 过渡金属、稀土、贵金属掺杂调变表面催化活性; ② 构建 $p\text{-}n$ 、 $n\text{-}n$ 异质结, 优化灵敏度与选择性; ③ 紫外光激活替代热激发, 实现低温/室温传感; ④ 表面修饰降低湿度干扰。

4.6. 吸附材料

(1) 工作原理: 一维层状钛酸盐吸附包含离子交换与表面配位两种机制: ① 离子交换吸附; 层状钛酸盐的层间阳离子(Na^+ 、 H^+)可与溶液中的重金属离子(如 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Cs^+)或放射性核素(如 U(VI) 、 Sr^{2+})发生可逆交换, 将目标离子固定于层间或表面位点。② 表面配位吸附。钛酸盐表面丰富的羟基($-\text{OH}$)和氧空位可与金属离子形成表面配合物, 实现物理吸附与化学吸附的协同。层状结构的大层间距($0.7\sim 0.9 \text{ nm}$)便于水合金属离子进入, 高比表面积保障充足吸附位点。

(2) 关键性能指标: 最大吸附容量(q_m , mg/g , 通常由 Langmuir 模型拟合)、吸附速率(达到平衡的时间, min)、分配系数(K_d , mL/g)、吸附选择性(对目标离子与共存离子的吸附量比值)、再生性能(多次

吸附-脱附循环后的容量保留率)和适用 pH 范围。商业化吸附剂包括活性炭(对有机物吸附容量高但对金属离子选择性差)、离子交换树脂(选择性好但成本高、易受有机物污染)和沸石(成本低但吸附容量有限)。

(3) 研究实例与性能对比: 水热钛酸盐纳米管对重金属、放射性离子吸附效果突出[39]。周育智等[40]系统研究了钛酸盐基吸附材料的制备及其对水中铀和钍的吸附行为,通过功能化修饰的钛酸盐纳米片对 U(VI)表现出高效提取能力。层状钛酸盐的开放层状结构使其在吸附领域具有独特的结构优势。对比活性炭,钛酸盐对重金属离子选择性更高;对比离子交换树脂,其耐辐照、成本更低,适合放射性废水处理。文献报道钛酸盐纳米管对 Pb^{2+} 吸附容量可达数百 mg/g ,对 Cs^+ 的吸附也表现出优异的选择性,这得益于层间 Na^+ 与 Cs^+ 之间高效的离子交换以及 Cs^+ 在层间的稳定固定。但粉末钛酸盐成型困难,柱吸附工艺压降大、粉体流失严重。

(4) 面临挑战: ① 选择性仍需提升:在复杂水质(高盐度、共存离子丰富)中,钛酸盐对目标离子的选择性可能受到 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等共存离子的竞争抑制。② 再生与循环过程结构易受损:吸附饱和后的钛酸盐需要强酸或络合剂洗脱,多次循环后层状结构可能发生部分坍塌,导致容量衰减。③ 成型困难:一维纳米粉末难以直接工程应用,成型过程(如造粒、包覆)往往导致比表面积和吸附容量显著下降。④ 有机污染物吸附能力有限。钛酸盐对重金属离子吸附优异,但对非离子型有机污染物(如药物、内分泌干扰物)的吸附能力弱于活性炭。

(5) 改进策略: ① 接枝偕胺肟、巯基等官能团,提升特定离子选择性;② 与 Fe_3O_4 磁性颗粒复合,实现磁分离回收;③ 制备气凝胶、薄膜成型材料,兼顾比表面积与机械强度;④ 复合活性炭、生物炭,协同去除重金属与有机污染物。

5. 结论与展望

一维钛酸盐纳米材料因其独特的层状结构、优异的离子交换能力、半导体特性及高比表面积,在光催化、电化学储能、吸附分离、传感检测领域拥有广阔前景。本文从“制备-结构-性能”关联视角,系统评述了不同合成路径对材料微观结构及最终性能的决定性影响。水热法凭借其经济性和结构可调性成为主流,熔盐法、溶胶-凝胶法等则各具特色,适用于不同性能需求的应用场景。在应用层面,一维钛酸盐在光催化、储能、吸附和传感等领域均表现突出,但其商业化进程仍受制于性能的进一步提升和规模化制备技术的突破。

展望未来,该领域的研究可从以下方向深入:

(1) 精准形貌与结构调控: 发展更加精确的合成策略,实现对纳米管直径、管壁厚度、纳米线长径比等结构参数的原子级精确控制。

(2) 多功能复合材料设计: 通过与其他功能材料(如碳材料、导电聚合物)的协同复合,构建具有“1+1>2”效应的新型功能材料体系,拓展应用领域并提升性能。

(3) 机理研究深化: 结合原位表征技术和理论计算,深入理解一维钛酸盐纳米材料的晶体生长、离子交换、光催化反应微观机制。

(4) 规模化制备与应用: 开发低成本、高重复性、环境友好的规模化制备工艺,推动一维钛酸盐纳米材料从实验室研究走向实际工程应用。

(5) 新应用领域拓展: 积极探索一维钛酸盐纳米材料在生物医学(药物递送、组织工程)、新型污染物治理和能源转换(光电催化 CO_2 还原)等新兴领域的应用。

伴随着纳米技术和材料科学的持续发展,一维钛酸盐纳米材料必将在解决能源危机和环境污染等全球性挑战中发挥更大作用。

基金项目

河南工业大学本科生科研训练项目(KYXL2025106); 河南工业大学专创融合特色课程项目(2024ZCRH-10)。

参考文献

- [1] 钟蕾. 一维钛酸纳米材料的制备、表面修饰与物性研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [2] 周瑞发, 韩雅芳, 陈祥宝. 纳米材料技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [3] 张立德, 牟季美. 纳米材料和纳米结构[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [4] Kasuga, T., Hiramatsu, M., Hoson, A., Sekino, T. and Niihara, K. (1998) Formation of Titanium Oxide Nanotube. *Langmuir*, **14**, 3160-3163. <https://doi.org/10.1021/la9713816>
- [5] Liu, T., Miao, L., Yao, F., Zhang, W., Zhao, W., Yang, D., *et al.* (2024) Structure, Properties, Preparation, and Application of Layered Titanates. *Inorganic Chemistry*, **63**, 1-26. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.3c03075>
- [6] Novoselov, K.S., Geim, A.K., Morozov, S.V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S.V., *et al.* (2004) Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science*, **306**, 666-669. <https://doi.org/10.1126/science.1102896>
- [7] Saker, R., Shammout, H., Regdon, G. and Sovány, T. (2024) An Overview of Hydrothermally Synthesized Titanate Nanotubes: The Factors Affecting Preparation and Their Promising Pharmaceutical Applications. *Pharmaceutics*, **16**, Article 635. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics16050635>
- [8] Yao, B.D., Chan, Y.F., Zhang, X.Y., Zhang, W.F., Yang, Z.Y. and Wang, N. (2003) Formation Mechanism of TiO₂ Nanotubes. *Applied Physics Letters*, **82**, 281-283. <https://doi.org/10.1063/1.1537518>
- [9] 王竹梅, 李月明, 杨小静, 等. 钛酸盐纳米管的水热合成及晶型研究[J]. 无机化学学报, 2007(2): 225-230.
- [10] 李云飞, 韦志仁, 罗小平. 钛酸盐纳米管的研究及应用进展[J]. 材料导报, 2008(4): 50-52+61.
- [11] 王晓慧, 汪信. 钛酸盐纳米材料的晶体结构特性的研究[J]. 仪器仪表学报, 1996(S1): 404-406.
- [12] 王美丽, 宋功保, 李健, 等. 水热法制备钛酸盐纳米管的研究进展[J]. 材料导报, 2006(S2): 121-123+129.
- [13] 罗小平. 纳米 TiO₂ 及其钛酸盐的水热制备与光电性能研究[D]: [硕士学位论文]. 河北大学, 2008.
- [14] 龚强, 江志东, 田峰, 等. 水热条件下钛酸钠盐纳米晶须与纳米管的选择制备[J]. 材料科学与工程学报, 2007(1): 43-47+78.
- [15] Suzuki, Y., Pavasupree, S., Yoshikawa, S. and Kawahata, R. (2005) Natural Rutile-Derived Titanate Nanofibers Prepared by Direct Hydrothermal Processing. *Journal of Materials Research*, **20**, 1063-1070. <https://doi.org/10.1557/jmr.2005.0135>
- [16] Menzel, R., Peiró, A.M., Durrant, J.R. and Shaffer, M.S.P. (2006) Impact of Hydrothermal Processing Conditions on High Aspect Ratio Titanate Nanostructures. *Chemistry of Materials*, **18**, 6059-6068. <https://doi.org/10.1021/cm0617211>
- [17] 郝彦忠, 韩文涛. 钛酸盐纳米管的制备及光电性能研究[J]. 物理化学学报, 2006(2): 221-225.
- [18] Bavykin, D.V., Parmon, V.N., Lapkin, A.A. and Walsh, F.C. (2004) The Effect of Hydrothermal Conditions on the Mesoporous Structure of TiO₂ Nanotubes. *Journal of Materials Chemistry*, **14**, 3370-3377. <https://doi.org/10.1039/b406378c>
- [19] Wu, D., Liu, J., Zhao, X., Li, A., Chen, Y. and Ming, N. (2006) Sequence of Events for the Formation of Titanate Nanotubes, Nanofibers, Nanowires, and Nanobelts. *Chemistry of Materials*, **18**, 547-553. <https://doi.org/10.1021/cm0519075>
- [20] Zhang, W., Tao, Y. and Li, C. (2018) Effects of PEG4000 Template on Sol-Gel Synthesis of Porous Cerium Titanate Photocatalyst. *Solid State Sciences*, **78**, 16-21. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2018.02.007>
- [21] Gheorghe, F., Dumitrescu, C.R., Gheorghe, P., Deák Habil, G. and Ting, S.S. (2023) One Step Sol-Gel Synthesis and Morphostructural Characterization of Sodium Titanate Particles. *E3S Web of Conferences*, **437**, Article 03011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343703011>
- [22] Cheng, Y., Li, C., Hamukwaya, S.L., Huang, G. and Zhao, Z. (2023) Synthesis of Composite Titanate Photocatalyst via Molten Salt Processing and Its Enhanced Photocatalytic Properties. *Nanomaterials*, **13**, Article 2944. <https://doi.org/10.3390/nano13222944>
- [23] Usman, M., Christian, M., Smith, M.D., Besmann, T. and zur Loye, H. (2023) DFT-Guided Flux Synthesis of a Family of Layered Titanates Crystallizing in the Lepidocrocite Structure Type. *Solid State Sciences*, **139**, Article 107161. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2023.107161>

- [24] Naga Sravanthi, M., Sudagar, J. and Selva Kumar, A. (2023) Effect of CeO₂ Doped Zirconium Titanate with Various Temperatures by Solid-State Reaction Method. *Materials Science Forum*, **1107**, 93-104. <https://doi.org/10.4028/p-7oyoml>
- [25] Wang, Q., Yang, X., Jing, Z., Liu, H., Tang, P., Zhu, H., *et al.* (2024) Recent Advances in One-Dimensional Alkali-Metal Hexatitanate Photocatalysts for Environmental Remediation and Solar Fuel Production. *Journal of Materials Science & Technology*, **202**, 201-239. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2024.02.071>
- [26] Rashad, S., Zaki, A.H. and Farghali, A.A. (2019) Morphological Effect of Titanate Nanostructures on the Photocatalytic Degradation of Crystal Violet. *Nanomaterials and Nanotechnology*, **9**, Article No. 10. <https://doi.org/10.1177/1847980418821778>
- [27] O'Regan, B. and Grätzel, M. (1991) A Low-Cost, High-Efficiency Solar Cell Based on Dye-Sensitized Colloidal TiO₂ Films. *Nature*, **353**, 737-740. <https://doi.org/10.1038/353737a0>
- [28] 张海林, 韩相明, 王焕新, 等. 一维纳米材料在锂离子蓄电池中的应用进展[J]. 电源技术, 2008(1): 63-66.
- [29] Aghamohammadi, H. and Khazaeli, A. (2024) Recent Advances in the Development of the MXenes/Ti-Based Nanocomposite Anode Materials for Li-Ion Batteries: A Review Study. *Journal of Energy Storage*, **101**, Article 113851. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113851>
- [30] Nurhaliza, E., Idris, M.A., Mahmed, N., *et al.* (2024) Review on Performance of Lithium Titanate and Its Impurities Dopant as a Lithium-Ion Battery Anode. *International Journal of Nanoelectronics and Materials*, **17**, 402-415. <https://doi.org/10.58915/ijneam.v17i3.1155>
- [31] Dong, J., Jiang, Y., Wang, R., Wei, Q., An, Q. and Zhang, X. (2024) Review and Prospects on the Low-Voltage Na₂Ti₃O₇ Anode Materials for Sodium-Ion Batteries. *Journal of Energy Chemistry*, **88**, 446-460. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.09.039>
- [32] Xia, Q., Liang, Y., Cooper, E.R., Ko, C., Hu, Z., Li, W., *et al.* (2024) Monolayer Sodium Titanate Nanobelts as a Highly Efficient Anode Material for Sodium-Ion Batteries. *Advanced Energy Materials*, **14**, Article 2400929. <https://doi.org/10.1002/aenm.202400929>
- [33] Chen, F., Li, H., Qiao, X., Wang, R., Hu, C., Chen, T., *et al.* (2024) The Chance of Sodium Titanate Anode for the Practical Sodium-Ion Batteries. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **72**, 226-244. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2024.05.022>
- [34] Chen, Q.X., Cheng, X.Z., Wang, F.P. and Yi, T. (2026) Application of Titanates in Batteries with Solid-State Electrolytes. *Journal of Energy Storage*, **141**, Article 119218. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.119218>
- [35] Joy, R. and Haridas, S. (2024) Polyaniline Enfolded Titanate Perovskite: A Promising Material for Supercapacitor Applications. *Polymer Bulletin*, **81**, 2129-2142. <https://doi.org/10.1007/s00289-023-04810-9>
- [36] Idakiev, V., Yuan, Z.-Y., Tabakova, T. and Su, B. (2005) Titanium Oxide Nanotubes as Supports of Nano-Sized Gold Catalysts for Low Temperature Water-Gas Shift Reaction. *Applied Catalysis A: General*, **281**, 149-155. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2004.11.021>
- [37] Ramanavicius, S., Jagminas, A. and Ramanavicius, A. (2022) Gas Sensors Based on Titanium Oxides (Review). *Coatings*, **12**, Article ID: 699. <https://doi.org/10.3390/coatings12050699>
- [38] Harito, C., Khalil, M., Nurdwijayanto, L., Septiani, N.L.W., Abrori, S.A., Putra, B.R., *et al.* (2024) Facet-Controlled Growth and Soft-Chemical Exfoliation of Two-Dimensional Titanium Dioxide Nanosheets. *Nanoscale Advances*, **6**, 4325-4345. <https://doi.org/10.1039/d4na00442f>
- [39] Chen, W.D., Xu, Y., Liu, J., Cao, H., Li, Y., Ren, X., *et al.* (2023) Recent Developments in Ti-Based Nanocatalysts for Electrochemical Nitrate-to-Ammonia Conversion. *Inorganic Chemistry Frontiers*, **10**, 4901-4917. <https://doi.org/10.1039/d3qi00732d>
- [40] Zhou, Y.Z., Li, Y., Wang, X., Liu, D.X. and Liu, D. (2020) Preparation of Amidoxime Functionalized Titanate Nanosheets for Efficient Extraction of Uranium from Aqueous Solution. *Journal of Solid State Chemistry*, **290**, Article ID: 121562. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2020.121562>