

铈基催化剂的合成方法与应用研究进展

付林颖

浙江师范大学含氟新材料研究所, 浙江 金华

收稿日期: 2026年1月20日; 录用日期: 2026年2月14日; 发布日期: 2026年2月26日

摘要

二氧化铈(CeO_2)凭借其独特的萤石结构、可逆的 $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ 氧化还原循环、优异的储氧能力和丰富的表面缺陷化学,在催化领域展现出广阔的应用前景。随着纳米科技的发展,通过精准控制合成方法来调控 CeO_2 催化剂的尺寸、形貌(如纳米立方体、纳米棒、多面体及介孔结构)和暴露晶面,已成为优化其催化性能的强大工具。本文主要阐述了 CeO_2 催化剂的合成方法,如水热法、模板法、溶胶-凝胶法等,分析了各种方法的原理、优缺点,以及总结了 CeO_2 催化剂在环境与能源(CO 氧化、水煤气转换反应、固体氧化物燃料电池)、光催化和有机合成等领域的应用研究进展。

关键词

二氧化铈, 纳米形貌, 合成方法, 催化性能

Research Progress on Synthesis Methods and Applications of Cerium-Based Catalysts

Linying Fu

Institute of Advanced Fluorine-Containing Materials, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: January 20, 2026; accepted: February 14, 2026; published: February 26, 2026

Abstract

Cerium dioxide (CeO_2) exhibits broad application prospects in the field of catalysis due to its unique fluorite structure, reversible $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ redox cycle, excellent oxygen storage capacity, and abundant surface defect chemistry. With the advancement of nanotechnology, precisely controlling synthesis methods to regulate the size, morphology (e.g., nanocubes, nanorods, polyhedra, and mesoporous structures) and exposed crystal planes of CeO_2 catalysts has become a powerful tool for optimizing their catalytic performance. This paper primarily discusses synthesis methods for CeO_2 catalysts, including hydrothermal, template-assisted, and sol-gel approaches. It analyzes the principles, ad-

vantages, and disadvantages of each method while summarizing research progress on CeO₂ catalyst applications in environmental and energy fields (CO oxidation, water-gas shift reaction, solid oxide fuel cells), photocatalysis, and organic synthesis.

Keywords

Cerium Dioxide, Nanomorphology, Synthesis Methods, Catalytic Performance

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

二氧化铈(CeO₂, 俗称铈土)是稀土元素铈最稳定的氧化物, 其独特的物理化学性质使其在催化领域占据了重要的核心地位。其价值最早在汽车尾气净化三效催化剂(TWC)中被发现, 作为储氧材料(OSC)用来缓冲空燃比波动[1]。近年来, 随着纳米科学的进步, 人们认识到 CeO₂ 催化剂的性能不仅取决于其体相性质, 更与材料的纳米尺度、形貌、暴露的晶面、表面缺陷密度等密切相关[2]-[6]。不同于传统方法制备的多晶、形貌不规则的 CeO₂ 颗粒, 现代合成化学已经能够制备具有特定形状(如纳米棒、纳米立方体、纳米多面体)和介孔结构的高质量 CeO₂ 纳米催化剂。这些纳米结构暴露出不同比例的(100)、(110)和(111)等低指数晶面, 而这些晶面在表面能、原子配位、氧空位形成能以及酸碱性质上存在显著差异, 从而在根本上改变其催化行为[5] [7]-[9]。本文主要总结论述了 CeO₂ 催化剂的合成方法和在各类催化反应中的应用。

2. CeO₂ 催化剂的结构特点

二氧化铈(IV), 也常被称作氧化铈(CeO₂), 通常为萤石相结构(空间群 Fm-3m), 具有面心立方晶格(fcc)。其氧亚晶格呈简单立方排列, 铈离子则占据交替的立方晶胞中心位置。如图 1 所示, 在该结构中, 每个 Ce⁴⁺被 8 个 O²⁻配位, 而处于四面体间隙中的每个 O²⁻被邻近的 4 个 Ce⁴⁺配位[10]。这种开放的结构允许氧离子在晶格内快速迁移, 是其出色储氧能力(OSC)的结构基础。CeO₂ 的另一个关键特性是 Ce³⁺/Ce⁴⁺氧化还原对的易变性[11]。在还原气氛下, CeO₂ 能释放晶格氧形成氧空位, 同时部分 Ce⁴⁺还原为 Ce³⁺, 生成非化学计量比的 CeO_{2-x}; 在氧化气氛下, 该过程可逆。这一可逆的氧化还原过程是许多催化反应(如氧化、加氢、水煤气变换)的核心。二氧化铈独特的电子组态与稳定的晶体结构, 是其具备优异催化性能和电化学性能的关键原因。

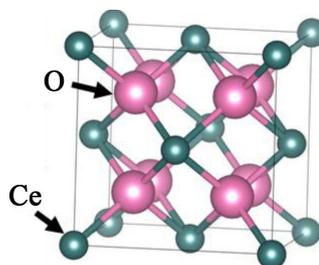


Figure 1. Atomic structure of CeO₂ single cell

图 1. 二氧化铈晶胞的原子结构

3. 铈基催化剂的合成方法

实现 CeO_2 纳米晶体的形貌可控合成是研究其构效关系和应用开发的前提。随着水热/溶剂热法、模板法、沉淀法、溶胶-凝胶法、表面活性剂辅助合成法、燃烧合成法、微波辅助合成法等自下而上化学制备技术的发展, 现已可制备出形貌、粒径分布及结晶度均可控的各类纳米结构二氧化铈催化剂[2] [12] [13]。铈基催化剂的合成方法总结如表 1 所示。

3.1. 水热/溶剂热法

这是目前制备形貌可控 CeO_2 纳米晶体和暴露特定 CeO_2 晶面最常用和有效的方法之一, 主要依靠调控晶体生长动力学来获得特定形貌, 更适用于制备单分散的纳米晶体(如纳米立方体、纳米棒、纳米八面体), 且过程简便、易于放大[14] [15]。

该方法操作过程为, 将铈盐(如 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ 、 CeCl_3)和矿化剂(如 NaOH 、 $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$)溶于水或有机溶剂, 置于高压反应釜中, 在 $100^\circ\text{C}\sim 250^\circ\text{C}$ 下反应数小时或数天[16]。通过精确调节前驱体浓度、pH 值、温度、反应时间和阴离子种类, 可以控制 CeO_2 晶核的各向异性生长, 从而获得纳米立方体、纳米棒、纳米多面体、纳米片等多种形貌。

纳米立方体通常在强碱性(如 $6\sim 9\text{ mol/L NaOH}$)和较高温度下获得, 主要暴露(100)晶面。 NO_3^- 离子被认为能选择性吸附在(100)面上, 抑制该方向的生长, 促进立方体形成。纳米棒通常以 CeCl_3 为前驱体, 在碱性条件下水热合成。 Cl^- 离子倾向于吸附在(111)面上, 抑制其生长, 导致晶体沿(110)或(100)方向优先生长, 形成主要暴露(110)和(100)晶面的棒状结构[17]。Mai 等人提出, 其形成机理可能与各向异性的 $\text{Ce}(\text{OH})_3$ 中间体有关。通过改变水热条件, 可以实现形貌的连续调控。如图 2 所示, 通过调节 pH、温度和阴离子, 可以实现从纳米粒子到纳米棒再到纳米立方体的形态转变[18]。该方法的特点是产物结晶度高, 形貌、尺寸可控, 分散性好。但需要高压设备, 产量相对较低, 成本较高。

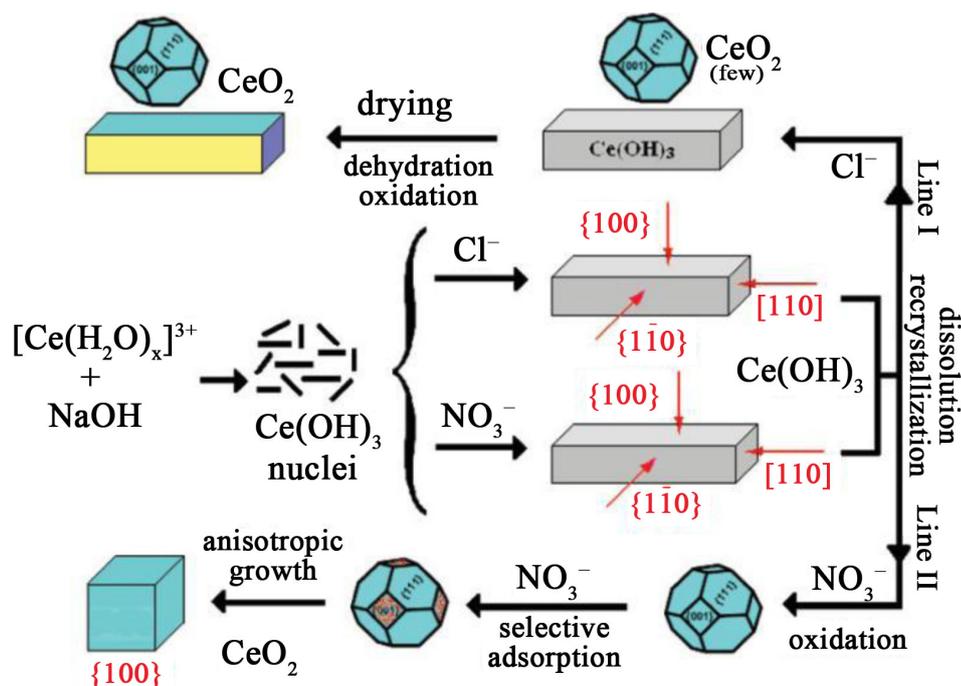


Figure 2. Schematic illustration for the conversion from nanorods to nanocubes
图 2. 纳米棒到纳米立方体的转换示意图

3.2. 模板法合成

模板法利用具有规则孔道或结构的模板(硬模板或软模板)来引导 CeO_2 的生长,能精确控制产物的孔道结构、尺寸和形貌,是制备有序介孔或特定形貌 CeO_2 的强有力工具。

3.2.1. 硬模板法

该方法使用预先合成的具有规则孔道或结构的材料(如用二氧化硅小球、多孔氧化铝、碳纳米管等)作为模板,将铈前驱体溶液浸渍到模板孔道中,经过干燥、煅烧使前驱体分解转化为 CeO_2 ,最后用强碱(对硅模板)或高温燃烧(对碳模板)去除模板,即可得到复制模板孔道结构的 CeO_2 材料。例如,以立方相 $\text{Ia}3d$ 的 KIT-6 为模板,可合成出具有双连续螺旋孔道结构的高有序介孔 CeO_2 [19]。硬模板法的优点在于能够获得高度有序、结晶性良好、孔壁较厚、热稳定性高的介孔结构。缺点是步骤繁琐,模板去除过程可能破坏结构或引入杂质。

3.2.2. 软模板法

该方法利用表面活性剂(如 CTAB、P123、F127)在溶液中自组装形成的胶束作为模板,铈前驱体在胶束界面水解、缩合,包裹胶束形成无机-有机复合材料,经煅烧去除有机模板后得到 CeO_2 材料[20]。例如, Brezesinski 等人使用 KLE 嵌段共聚物与离子液体复合模板,首次制备出具有结晶性孔壁和双峰孔分布的介孔 CeO_2 薄膜[21]。软模板法操作相对简单,可通过选择不同的表面活性剂调节孔径。然而,由于有机模板与无机骨架间的相互作用较弱,煅烧过程中结构容易坍塌,产物的热稳定性和结晶度通常不及硬模板法产物。

3.3. 沉淀法

这是最常用、最经典的实验室和工业制备方法。通过向铈盐溶液(如 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ 、 CeCl_3 、 $\text{Ce}(\text{SO}_4)_2$)中加入沉淀剂(如 $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 、 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 、 NaOH),生成前驱体,再经洗涤、干燥、焙烧得到 CeO_2 材料。该方法操作简单,成本较低,易于放大生产。但易引入杂质,颗粒均一性和形貌控制相对较差。尿素沉淀法因尿素水解缓慢,能获得更均匀、分散性更好的纳米颗粒。

3.4. 溶胶-凝胶法

以铈醇盐或无机盐为前驱体,在温和条件下水解、缩聚形成溶胶,再经陈化形成凝胶、最后干燥、煅烧得到 CeO_2 材料。通过添加结构导向剂或控制水解速率,可以制备 CeO_2 。该法设备简单,易于进行掺杂和复合,但所得多孔结构的有序度和结晶度通常较低。Zagaynov 等人以硝酸铈为前驱体,十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)或 PEO-PPO-PEO 为模板,通过溶胶-凝胶法制备的介孔二氧化铈比表面积达 $209\sim 225\text{ m}^2/\text{g}$,孔径 $8.9\sim 10\text{ nm}$,在催化反应中表现出低起燃温度和高活性[22]。

3.5. 表面活性剂/封端剂辅助生长法

在水热合成中引入有机封端剂(如油酸、十二胺),可以选择性地吸附在特定晶面上,改变其表面能,从而调控晶体生长方向。例如,Zhang 等人发现,十二酸优先吸附在 CeO_2 的(100)晶面上,抑制该方向的生长,从而促使晶体长成立方体;当封端剂过量时,(111)和(100)方向的生长均被抑制,则形成小的截角八面体。这种方法提供了额外的形貌调控维度[23]。

3.6. 燃烧合成法

一种快速、节能的合成方法。将铈盐(通常是硝酸盐)与有机燃料(如甘氨酸、尿素、柠檬酸)溶于水,加热蒸发形成粘稠凝胶,然后在高温($300\text{ }^\circ\text{C}\sim 500\text{ }^\circ\text{C}$)下迅速燃烧,产生大量气体,得到蓬松的泡沫状或纳

米粉体。在点燃或加热下发生自蔓延燃烧，瞬间生成 CeO_2 材料[24]。该方法过程极快(几分钟)，能量效率高，产物通常为纳米级，比表面积大，且因快速冷却易形成大量缺陷和氧空位。但产物蓬松，体积密度低，可能残留未完全燃烧的碳。

3.7. 微波辅助合成法

利用微波加热的快速、体相加热和选择性加热特性，加速沉淀、水热或燃烧过程。该方法加热均匀，反应速率快(几分钟到几十分钟)，节能，所得产物通常粒径小、分布窄。是一种有潜力的绿色合成方法。

Table 1. Synthesis methods for cerium-based catalysts

表 1. 铈基催化剂的合成方法

合成方法	优点	缺点	适用范围	产物特征	文献
水热/溶剂热法	精确控制形貌、尺寸与结晶度；产物分散性好、晶体结构明确	合成时间长、产率低、晶体生长动力学难调控	制备高结晶度 CeO_2 纳米结构(如纳米棒、多孔空心球)	形貌均一、单分散，如多孔空心球，晶体结构规整	[17] [18]
模板法	精准调控形貌(空心、核壳等)、孔径均一；产物分散性好	需移除模板、工艺复杂、模板成本较高	制备 CeO_2 空心球、核壳结构、有序多孔材料	形貌规整(如空心球、核壳纳米结构)，孔径可控，比表面积高	[19] [21]
沉淀法	工艺简单、成核快速、成本低廉	颗粒尺寸与形貌难调控、沉淀分散性不足	制备 CeO_2 纳米颗粒(如纳米盘、微球)	纳米级氧化物粉末，催化性能优于块体颗粒	[25]
溶胶-凝胶法	颗粒尺寸与形貌可、能制备多孔功能材料	溶胶形成与老化时间长、需高温煅烧	制备 CeO_2 空心球、纳米颗粒	高比表面积、高结晶度	[22]
表面活性剂/封端剂辅助生长法	1) 精准调控颗粒尺寸与形貌；2) 提升产物比表面积与结晶度；3) 诱导特定晶面暴露或各向异性生长	1) 成本高且易残留；2) 残留剂需高温煅烧，可能破坏产物结构；3) 部分试剂难降解，环境兼容性差	制备高分散 CeO_2 纳米结构(如纳米颗粒、纳米棒、空心球、纳米立方体)；适配沉淀法、溶剂热法等多种合成体系	尺寸均一、分散性优异，部分产物具特定形貌(如多孔空心球)，表面活性位点丰富	[23]
燃烧合成法	产物比表面积大、孔体积充足	需特定燃料(如甘氨酸)	制备介孔 CeO_2 纳米材料	介孔结构，催化活性显著	[24]
微波辅助合成法	形貌可调、合成效率较高	需精准控制照射时间、批量制备难	制备 CeO_2 纳米颗粒、立方体、纳米棒	3~5 nm 纳米晶，形貌规整，催化性能稳定	[26]

4. 铈基催化剂的应用

4.1. 环境与能源应用

CeO_2 纳米催化剂凭借其独特的氧空位形成能力、 $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ 可逆氧化还原循环、氧离子/电子传输特性以及表面酸碱性，在环境和能源领域有广泛应用。

4.1.1. CO 氧化

CeO_2 在一氧化碳(CO)氧化中扮演着核心催化角色[27]。该反应对于消除工业过程(如制氢)及汽车尾

气中的有毒 CO 至关重要[28] [29]。其催化机理主要遵循马尔斯 - 范克雷维伦机制: CO 分子首先与 CeO_2 表面的晶格氧反应生成 CO_2 , 同时产生氧空位; 随后, O_2 吸附并填充这些空位, 完成催化循环[30]。因此, 表面氧空位的数量、分布和迁移能力是决定其催化性能的关键[31]。Sun 等人成功合成了具有约 20% 凹坑占有率的三个原子层厚度的超薄 CeO_2 纳米片, 该材料拥有丰富的凹坑周围 Ce 位点, 其平均配位数仅为 4.6, 形成了大量配位不饱和的活性中心。理论与实验证明, 这些特定位点能高效吸附 CO 并活化 O_2 , 显著降低反应能垒, 同时促进反应物在表面的二维扩散, 从而大幅提升 CO 氧化活性[32]。这项研究从原子层面深化了对催化活性中心作用机制的理解, 为设计高效催化剂提供了新方向。

4.1.2. 水煤气变换反应(WGSR)

水煤气变换反应是制氢等工业过程的关键步骤, 对高效催化剂需求迫切。氧化铈基贵金属催化剂因其优异性能成为研究重点。氧化铈不仅是载体, 更是活性组分。研究表明, 起催化作用的并非贵金属纳米颗粒本身, 而是与氧化铈表面强相互作用的原子级贵金属物种[33] [34]。氧化铈的晶面效应显著影响活性, 例如暴露(110)和(100)晶面的纳米棒因能最佳稳定活性中心而性能最优[35]。其作用机制主要围绕两种路径: 氧化还原机理中, 氧化铈作为储氧材料, 通过晶格氧的消耗与再生循环催化反应; 关联机理(如甲酸盐路径)中, 其表面羟基是形成关键反应中间体的活性位点。目前观点倾向于一个统一机理框架, 强调氧化铈表面(氧空位、羟基、晶格氧)与反应物的动态相互作用是高性能的核心。

4.1.3. 固体氧化物燃料电池(SOFC)

固体氧化物燃料电池(SOFC)是一种使用陶瓷电解质、直接将燃料化学能转化为电能的高性能装置。其核心为“三明治”结构: 氧气在阴极还原为氧离子, 穿过电解质到达阳极, 与燃料反应产生水、二氧化碳和电子, 从而输出电能[36]。之后研究聚焦于降低工作温度以促进实际应用化。在电解质材料方面, Steele 将 Gd 与氧化铈掺杂(如 $\text{Ce}_{0.9}\text{Gd}_{0.1}\text{O}_{1.95}$), 因其中温(如 500°C)下具有高离子电导率(约 $10^{-2} \text{ S cm}^{-1}$)而成为理想选择, 共掺杂(如 Gd/Sm)可进一步提升性能[37] [38]。在阳极催化剂方面, 氧化铈基复合材料因抗积碳和催化活性备受关注。Adijanto 等人采用核壳结构(如 Pd@CeO_2)能极大增强稳定性和活性, 即使金属负载量极低, 使用氢气或甲烷时也能获得高功率密度(如 $0.30 \text{ W cm}^{-2} @\text{H}_2, 973 \text{ K}$), 且高温后性能稳定[39]。这些材料进展推动了 SOFC 向高效、稳定、燃料适应性强的方向发展。

4.2. 光催化与有机合成

4.2.1. 光催化

光催化应用的效率核心受限于光生电子 - 空穴对的快速复合(纳秒级), 其速度远超过有效的界面催化反应(微秒 - 毫秒级), 导致量子效率降低[40]。因此, 抑制电荷复合是提升活性的关键。表面缺陷, 特别是氧空位, 在此过程中扮演双重角色: 既能作为捕获中心阻隔电荷复合, 又能作为活性位点促进反应物吸附与活化[41]。 CeO_2 因其特有的 $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ 氧化还原对及易于形成氧空位的特性, 成为研究这一机制的理想材料。其催化性能具有显著的晶面依赖性, 通常以(110)晶面活性为高。通过材料工程可进一步调控其性能: 金属负载(如 Au)可形成等离子体协同效应, 增强光响应; 元素掺杂(如 Y)能精细调控氧空位浓度与带隙, 但需避免过度掺杂形成复合中心; 升高温度可通过提升离子电导率来促进电荷分离[42]。这些策略共同指向通过优化表面缺陷结构来实现高效的光催化应用。

4.2.2. 有机合成

在有机合成领域, CeO_2 凭借其氧化还原特性与路易斯酸 - 碱双功能, 广泛用于醇脱水、胺氧化、炔烃选择性加氢等反应[43] [44]。负载金属(如 Au)形成的复合催化剂(包括核壳结构 Au@CeO_2)能通过界面协同效应促进 H_2 异裂, 实现高选择性转化[45]。

5. 总结与展望

本文系统综述了铈基催化剂的合成方法及其在环境与能源、光催化和有机合成等领域的应用研究进展。研究表明,通过水热法、模板法等合成手段,可以实现对 CeO₂ 纳米晶体尺寸、形貌和暴露晶面的精准控制。精细调节合成条件有助于充分发挥铈基催化剂的尺寸依赖性 or 晶面依赖性,推动其在 CO 氧化、水煤气变换反应、光催化及有机合成等工业应用中的发展。然而,纳米晶体的生长机制尚不明确,限制了设计更高性能催化剂的视野;以及如何确定决定铈基催化剂催化活性的关键性质仍具挑战。未来必须依赖和发展更强大的原位/工况表征技术,如原位环境透射电镜(ETEM)、近常压 X 射线光电子能谱(NAP-XPS)、原位 X 射线吸收谱(XAS)和振动光谱,在真实反应条件下实时追踪 CeO₂ 表面晶格氧的迁移、氧空位的形成与湮灭、活性氧物种(O₂⁻, O²⁻)的转化以及金属-载体界面的原子级重构过程。这对于建立准确的“结构-活性-稳定性”关系至关重要。

参考文献

- [1] Montini, T., Melchionna, M., Monai, M. and Fornasiero, P. (2016) Fundamentals and Catalytic Applications of CeO₂-Based Materials. *Chemical Reviews*, **116**, 5987-6041. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00603>
- [2] Zhang, Y., Zhou, Y., Sun, D., Nie, Y., Wu, D., Ban, L., *et al.* (2025) CeO₂-Based Functional Materials: Advancing Photo and Electro-Driven Catalysis for Environmental Remediation and Energy Conversion. *Coordination Chemistry Reviews*, **527**, Article 216395. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.216395>
- [3] Zhang, X., Li, R., Zhang, B., Tu, J., Li, R., Huang, L., *et al.* (2025) Pt Loading onto CeO₂ and Cu-Doped CeO₂ Catalysts for Improving Hydrogen Production by Solar Photo-Thermochemical Water Splitting. *International Journal of Hydrogen Energy*, **151**, Article 150209. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.150209>
- [4] Seong, G., Yoko, A., Tomai, T., Naka, T., Wang, H., Frenkel, A.I., *et al.* (2024) Effect of Exposed Facets and Oxidation State of CeO₂ Nanoparticles on CO₂ Adsorption and Desorption. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **12**, 7532-7540. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c01322>
- [5] Trovarelli, A. and Llorca, J. (2017) Ceria Catalysts at Nanoscale: How Do Crystal Shapes Shape Catalysis? *ACS Catalysis*, **7**, 4716-4735. <https://doi.org/10.1021/acscatal.7b01246>
- [6] Wang, Y. and Wöll, C. (2017) IR Spectroscopic Investigations of Chemical and Photochemical Reactions on Metal Oxides: Bridging the Materials Gap. *Chemical Society Reviews*, **46**, 1875-1932. <https://doi.org/10.1039/c6cs00914j>
- [7] Fan, Y., Lu, B., Han, Z., Luo, C. and Zhang, L. (2025) Morphology Effects of CeO₂ on the Performance of Cao-Cu/CeO₂ for Integrated CO₂ Capture and Conversion to CO. *Separation and Purification Technology*, **354**, Article 129294. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129294>
- [8] Periasamy, P.A., Saravanakumar, B., Johnson William, J., Karthikeyan, N. and Vadivel, S. (2024) Breaking Barriers of CeO₂ in Energy Storage: Hydrothermal Energized Preparation of Mesoporous Carbon Added CeO₂ Nanohybrids as Supercapacitor Electrodes. *Electrochimica Acta*, **507**, Article 145144. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.145144>
- [9] Wu, R., Cheng, L., Ma, C., Yuan, Z. and Song, J. (2024) Enhancing the Sensing Performance of WO_{2.72} toward *N*-Butanol via Loading CeO₂ Nanoparticles. *Journal of Materials Chemistry A*, **12**, 21156-21164. <https://doi.org/10.1039/d4ta02736a>
- [10] Yan, Y., Wu, Y., Wu, Y., Weng, Z., Liu, S., Liu, Z., *et al.* (2024) Recent Advances of CeO₂-Based Composite Materials for Photocatalytic Applications. *ChemSusChem*, **17**, e202301778. <https://doi.org/10.1002/cssc.202301778>
- [11] Sayle, T.X.T., Parker, S.C. and Catlow, C.R.A. (1994) The Role of Oxygen Vacancies on Ceria Surfaces in the Oxidation of Carbon Monoxide. *Surface Science*, **316**, 329-336. [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(94\)91225-4](https://doi.org/10.1016/0039-6028(94)91225-4)
- [12] Yang, F., Hu, P., Yang, F., Hua, X., Chen, B., Gao, L., *et al.* (2023) Photocatalytic Applications and Modification Methods of Two-Dimensional Nanomaterials: A Review. *Tungsten*, **6**, 77-113. <https://doi.org/10.1007/s42864-023-00229-x>
- [13] Yuan, H., Mei, J., Gong, Y., Zhong, D. and Lu, T. (2023) Cobalt-Based Heterogeneous Catalysts for Photocatalytic Carbon Dioxide Reduction. *Tungsten*, **6**, 410-421. <https://doi.org/10.1007/s42864-023-00208-2>
- [14] Xu, B., Zhang, Q., Yuan, S., Zhang, M. and Ohno, T. (2015) Morphology Control and Photocatalytic Characterization of Yttrium-Doped Hedgehog-Like CeO₂. *Applied Catalysis B: Environmental*, **164**, 120-127. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.07.045>
- [15] Wu, K., Sun, L. and Yan, C. (2016) Recent Progress in Well-Controlled Synthesis of Ceria-Based Nanocatalysts towards Enhanced Catalytic Performance. *Advanced Energy Materials*, **6**, Article 1600501.

- <https://doi.org/10.1002/aenm.201600501>
- [16] Das, H.T., T, E.B., Dutta, S., Das, N., Das, P., Mondal, A., *et al.* (2022) Recent Trend of CeO₂-Based Nanocomposites Electrode in Supercapacitor: A Review on Energy Storage Applications. *Journal of Energy Storage*, **50**, Article 104643. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104643>
- [17] Li, C., Sun, Y., Djerdj, I., Voepel, P., Sack, C., Weller, T., *et al.* (2017) Shape-Controlled CeO₂ Nanoparticles: Stability and Activity in the Catalyzed HCL Oxidation Reaction. *ACS Catalysis*, **7**, 6453-6463. <https://doi.org/10.1021/acscatal.7b01618>
- [18] Wu, Q., Zhang, F., Xiao, P., Tao, H., Wang, X., Hu, Z., *et al.* (2008) Great Influence of Anions for Controllable Synthesis of CeO₂ Nanostructures: From Nanorods to Nanocubes. *The Journal of Physical Chemistry C*, **112**, 17076-17080. <https://doi.org/10.1021/jp804140e>
- [19] Roggenbuck, J., Schäfer, H., Tsoncheva, T., Minchev, C., Hanss, J. and Tiemann, M. (2007) Mesoporous CeO₂: Synthesis by Nanocasting, Characterisation and Catalytic Properties. *Microporous and Mesoporous Materials*, **101**, 335-341. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2006.11.029>
- [20] Wang, Z. and Yu, R. (2018) Hollow Micro/Nanostructured Ceria-Based Materials: Synthetic Strategies and Versatile Applications. *Advanced Materials*, **31**, Article 1800592. <https://doi.org/10.1002/adma.201800592>
- [21] Brezesinski, T., Erpen, C., Imura, K. and Smarsly, B. (2005) Mesostructured Crystalline Ceria with a Bimodal Pore System Using Block Copolymers and Ionic Liquids as Rational Templates. *Chemistry of Materials*, **17**, 1683-1690. <https://doi.org/10.1021/cm0479180>
- [22] Zagaynov, I.V. and Kutsev, S.V. (2013) Formation of Mesoporous Nanocrystalline Ceria from Cerium Nitrate, Acetate or Acetylacetonate. *Applied Nanoscience*, **4**, 339-345. <https://doi.org/10.1007/s13204-013-0210-4>
- [23] Zhang, J., Ohara, S., Umetsu, M., Naka, T., Hatakeyama, Y. and Adschiri, T. (2007) Colloidal Ceria Nanocrystals: A Tailor-Made Crystal Morphology in Supercritical Water. *Advanced Materials*, **19**, 203-206. <https://doi.org/10.1002/adma.200600964>
- [24] Thiébaud, B. (2011) Flame Spray Pyrolysis: A Unique Facility for the Production of Nanopowders. *Platinum Metals Review*, **55**, 149-151. <https://doi.org/10.1595/147106711x567680>
- [25] Cheng, Z., Wang, X., Li, T., Gao, S., Gao, D., Guo, Q., *et al.* (2024) Facile Synthesis of Nano CeO₂/Sepiolite Composite as Visible-Light-Driven Photocatalyst for Rapid Tetracycline Removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **12**, Article 112829. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112829>
- [26] Sivakumari, G., Rajarajan, M. and Senthilvelan, S. (2023) Microwave-Assisted Synthesis and Characterization of Activated Carbon-Zirconium-Incorporated CeO₂ Nanocomposites for Photocatalytic and Antimicrobial Activity. *Research on Chemical Intermediates*, **49**, 3539-3561. <https://doi.org/10.1007/s11164-023-04968-x>
- [27] Suzuki, K. and Sinha A.K. (2006) Novel Mesoporous Cerium Oxide for Air Purification Material. *Studies in Surface Science and Catalysis*, **162**, 385-391. [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(06\)80931-6](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(06)80931-6)
- [28] Piumetti, M., Andana, T., Bensaid, S., Russo, N., Fino, D. and Pirone, R. (2016) Study on the CO Oxidation over Ceria-Based Nanocatalysts. *Nanoscale Research Letters*, **11**, Article No. 165. <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1375-z>
- [29] Piumetti, M., Bensaid, S., Fino, D. and Russo, N. (2016) Nanostructured Ceria-Zirconia Catalysts for CO Oxidation: Study on Surface Properties and Reactivity. *Applied Catalysis B: Environmental*, **197**, 35-46. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.02.023>
- [30] Wu, Z., Li, M. and Overbury, S.H. (2012) On the Structure Dependence of CO Oxidation over CeO₂ Nanocrystals with Well-Defined Surface Planes. *Journal of Catalysis*, **285**, 61-73. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2011.09.011>
- [31] Campbell, C.T. and Peden, C.H.F. (2005) Oxygen Vacancies and Catalysis on Ceria Surfaces. *Science*, **309**, 713-714. <https://doi.org/10.1126/science.1113955>
- [32] Sun, Y., Liu, Q., Gao, S., Cheng, H., Lei, F., Sun, Z., *et al.* (2013) Pits Confined in Ultrathin Cerium(IV) Oxide for Studying Catalytic Centers in Carbon Monoxide Oxidation. *Nature Communications*, **4**, Article No. 2899. <https://doi.org/10.1038/ncomms3899>
- [33] Bhosale, T.S., Sahoo, S., Chen, Y., Aderibigbe, A., Bamonte, S., Posada, L.F., *et al.* (2025) Mesoporous Cu/Zn-Ceria-Based Catalysts for Low-Temperature Water Gas Shift Reaction: A Promising Path to Clean Hydrogen Production. *Chemical Engineering Journal*, **525**, Article 169868. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.169868>
- [34] Sun, X., Li, X., Xie, Z., Yuan, C., Wang, D., Zhang, Q., *et al.* (2024) Strong Metal-Support Interactions between Highly Dispersed Cu⁺ Species and Ceria via Mix-MOF Pyrolysis toward Promoted Water-Gas Shift Reaction. *Journal of Energy Chemistry*, **91**, 475-483. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.12.046>
- [35] Zhu, Y., Chen, C., Cheng, P., Ma, J., Yang, W., Yang, W., *et al.* (2022) Recent Advances in Hydrothermal Synthesis of Facet-Controlled CeO₂-Based Nanomaterials. *Dalton Transactions*, **51**, 6506-6518. <https://doi.org/10.1039/d2dt00269h>
- [36] Fan, L., Wang, C., Chen, M. and Zhu, B. (2013) Recent Development of Ceria-Based (Nano)Composite Materials for

- Low Temperature Ceramic Fuel Cells and Electrolyte-Free Fuel Cells. *Journal of Power Sources*, **234**, 154-174. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.01.138>
- [37] Steele, B. (2000) Appraisal of Ce₁-YGd_yO_{2-y/2} Electrolytes for IT-SOFC Operation at 500°C. *Solid State Ionics*, **129**, 95-110. [https://doi.org/10.1016/s0167-2738\(99\)00319-7](https://doi.org/10.1016/s0167-2738(99)00319-7)
- [38] Wang, F., Chen, S. and Cheng, S. (2004) Gd³⁺ and Sm³⁺ Co-Doped Ceria Based Electrolytes for Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cells. *Electrochemistry Communications*, **6**, 743-746. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2004.05.017>
- [39] Adijanto, L., Sampath, A., Yu, A.S., Cargnello, M., Fornasiero, P., Gorte, R.J., *et al.* (2013) Synthesis and Stability of Pd@CeO₂ Core-Shell Catalyst Films in Solid Oxide Fuel Cell Anodes. *ACS Catalysis*, **3**, 1801-1809. <https://doi.org/10.1021/cs4004112>
- [40] Zhu, C., He, Q., Wang, W., Du, F., Yang, F., Chen, C., *et al.* (2022) S-Scheme Photocatalysis Induced by ZnIn₂S₄ Nanoribbons-Anchored Hierarchical CeO₂ Hollow Spheres for Boosted Hydrogen Evolution. *Journal of Colloid and Interface Science*, **620**, 253-262. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.04.024>
- [41] Shen, C., Chen, Y., Xu, X., Li, X., Wen, X., Liu, Z., *et al.* (2021) Efficient Photocatalytic H₂ Evolution and Cr(VI) Reduction under Visible Light Using a Novel Z-Scheme SnIn₄S₈/CeO₂ Heterojunction Photocatalysts. *Journal of Hazardous Materials*, **416**, Article 126217. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126217>
- [42] Liu, Z., Zhuang, Y., Dong, L., Mu, H., Li, D., Zhang, F., *et al.* (2023) Enhancement Mechanism of Photocatalytic Hydrogen Production Activity of CeO₂/CdS by Morphology Regulation. *ACS Applied Energy Materials*, **6**, 7722-7736. <https://doi.org/10.1021/acsaem.3c01255>
- [43] Jia, H., Zhu, X., Jiang, R. and Wang, J. (2017) Aerosol-Sprayed Gold/Ceria Photocatalyst with Superior Plasmonic Hot Electron-Enabled Visible-Light Activity. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **9**, 2560-2571. <https://doi.org/10.1021/acsaami.6b15184>
- [44] Li, B., Zhang, B., Nie, S., Shao, L. and Hu, L. (2017) Optimization of Plasmon-Induced Photocatalysis in Electrospun Au/CeO₂ Hybrid Nanofibers for Selective Oxidation of Benzyl Alcohol. *Journal of Catalysis*, **348**, 256-264. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2016.12.025>
- [45] Mitsudome, T., Yamamoto, M., Maeno, Z., Mizugaki, T., Jitsukawa, K. and Kaneda, K. (2015) One-Step Synthesis of Core-Gold/Shell-Ceria Nanomaterial and Its Catalysis for Highly Selective Semihydrogenation of Alkynes. *Journal of the American Chemical Society*, **137**, 13452-13455. <https://doi.org/10.1021/jacs.5b07521>