

引用本文: 王珍珍, 孙中华, 张致慧, 何明阳, 钱俊峰, 陈群. 形貌调控 CeO₂ 载体优化 Pt/CeO₂ 催化甲醇水蒸气重整制氢性能: 从科研到教学的一体化探索 [J]. 离子交换与吸附, 2026, 42(3): 216-223.

Citation: WANG Zhen-zhen, SUN Zhong-hua, ZHANG Zhi-hui, HE Ming-yang, QIAN Jun-feng, CHEN Qun. Morphology-Controlled CeO₂ Support for Optimizing the Performance of Pt/CeO₂ Catalyst for Methanol Steam Reforming to Produce Hydrogen: An Integrated Exploration from Research to Teaching [J]. Ion Exchange and Adsorption, 2026, 42(3): 216-223.

文章编号: 1001-5493(2026)03-0216-08

DOI: 10.16026/j.cnki.ica.2026030216

形貌调控 CeO₂ 载体优化 Pt/CeO₂ 催化甲醇水蒸气重整制氢性能: 从科研到教学的一体化探索*

王珍珍, 孙中华, 张致慧, 何明阳, 钱俊峰**, 陈群

(常州大学石油化工学院, 常州 213164)

摘要: 将前沿科研成果转化为综合性实验是科研反哺教学的重要实践。文章设计了一项以“形貌调控的 CeO₂ 载体负载 Pt 催化剂”为核心的大学生综合实验, 通过对比颗粒 (P)、棒状 (R)、立方体 (C) 和八面体 (O) 4 种不同形貌 CeO₂ 负载的 Pt 催化剂在甲醇水蒸气重整 (MSR) 反应中的性能差异, 引导学生探究载体形貌对金属-载体相互作用及催化活性的影响。实验采用分阶段、分组协作模式, 学生自主完成催化剂的合成、表征及性能评价, 系统培养材料制备、表征分析和数据处理能力。结果表明, 棒状 CeO₂ 负载的 Pt 催化剂 (Pt/CeO₂-R) 因其较强的金属-载体相互作用和较高的氧空位浓度, 展现出较优的催化性能, 具有较高的氢气生成活性和较低的 CO 选择性。该实验不仅强化了学生对多相催化中“结构-性能关系”的理论认知, 更通过科研式探究过程培养了团队协作与创新思维, 有效激发了学生对材料设计与催化研究的兴趣, 为理工科实验教学提供了可推广的案例。

关键词: CeO₂ 载体形貌调控, Pt 催化剂, 甲醇水蒸气重整, 构-效关系, 综合实验教学

中图分类号: G642 **文献标志码:** A

1 前言

将前沿科研成果转化为探究式实验教学案例, 可构建“科研-教学”互动的创新模式。设计探究性实验项目, 不仅能培养学生解决问题的能力, 还能从教学反馈中获得新的研究思路。这种科教融合的模式突破了传统实验教学“重验证、轻探究”的局限。依托真实科研情境激发学生的兴趣, 在提升专业技能的同时培养创新思维, 为人才培养提供了新的途径。

近年来, 金属-载体相互作用 (Metal-Support Interaction, MSI) 的精准调控已成为多相催化领域的研究热点^[1-2]。作为典型的稀土氧化物载体, 二氧化铈 (CeO₂) 因其独特的氧化还原特性和丰富的氧空位, 在催化领域展现出广阔的应用前

景^[3-5]。研究表明, CeO₂ 的暴露晶面、表面缺陷和形貌特征会显著影响其与活性金属的相互作用, 进而调控催化反应的活性和选择性^[6]。

在甲醇水蒸气重整 (Methanol Steam Reforming, MSR) 制氢反应中, Pt/CeO₂ 催化剂因其优异的活性和稳定性而受到广泛关注^[7]。然而, 传统的制备方法往往难以精准控制 CeO₂ 载体的形貌特征, 导致活性位点分布不均、MSI 强度不足等问题。通过形貌调控策略 (如控制暴露的晶面、构建特定的纳米结构) 来优化 Pt/CeO₂ 催化剂的界面特性, 不仅可以深化对结构-性能关系的理解, 还能为高效制氢催化剂的设计提供新的思路。

将这一前沿科研成果转化为综合性实验教

* 收稿日期: 2025-08-05

作者简介: 王珍珍 (1988—), 博士研究生, 助理研究员, 研究方向多相催化。

**通信作者: 钱俊峰, E-mail: qianjunfeng@cczu.edu.cn。

学内容具有重要的教育价值:一方面,学生可以亲身体验制备不同形貌的CeO₂载体,从而直观地理解影响纳米材料形貌控制的关键因素;另一方面,通过对不同形貌Pt/CeO₂催化剂性能差异的比较分析,培养学生建立“结构决定性能”的材料设计理念。这种以研究为驱动的教育模式,既能提升学生的实践创新能力,又能促进其对催化科学前沿的认知,为培养新时代材料化学人才提供了有效途径。

2 实验部分

2.1 仪器和试剂

实验仪器: Rigaku Ultima IV型X射线衍射仪(XRD),日本理学株式会社; Hitachi HT-7700型透射电子显微镜(TEM),日本日立公司; ESCALAB 250Xi型X射线光电子能谱仪(XPS),美国赛默飞世尔科技公司; Micromeritics ASAP 2020 HD88型气体吸附仪,美国麦克公司; VERTEX 70型傅里叶红外光谱仪,德国布鲁克公司; FULI 9750型气相色谱仪,配备Tx-1色谱柱和热导检测器(TCD),浙江福立分析仪器股份有限公司; PerkinElmer Optima 8000型电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES),珀金埃尔默公司。

实验试剂: 硝酸铈六水合物(Ce(NO₃)₃·6H₂O, AR)、氢氧化钠(NaOH, AR)、十二水磷酸三钠(Na₃PO₄·12H₂O, AR),购自国药集团化学试剂有限公司; 六水合氯铂酸(H₂PtCl₆·6H₂O, AR),购自阿拉丁化学试剂有限公司。

2.2 催化剂的制备

本实验的教学采用分阶段、分组协作模式。催化剂的合成与部分表征步骤(如干燥、焙烧)可安排为课前预习或课后拓展内容,课堂核心教学单元(约4学时)集中于催化剂的还原、性能评价及数据分析环节。学生分为4个小组,每组独立制备一种形貌的CeO₂载体并负载Pt,随后完成所制备催化剂的表征与性能测试,最后各组共享数据并进行对比分析。

2.2.1 CeO₂载体的制备

(1) 颗粒CeO₂ (CeO₂-P)的合成。称取0.87 g Ce(NO₃)₃·6H₂O和0.16 g NaOH,分别溶于220 mL和20 mL去离子水中。将2种溶液混合均匀后,置于70 °C水浴中反应1 h。反应完成后,冷却至室温,离心分离产物,用去离子水洗涤至中性,

最后在70 °C烘箱中干燥过夜。

(2) 棒状CeO₂ (CeO₂-R)的合成。称取4.34 g Ce(NO₃)₃·6H₂O和48.0 g NaOH,分别溶于25 mL和175 mL去离子水中。将2种溶液混合搅拌30 min后,转移至250 mL圆底烧瓶,100 °C油浴加热回流反应24 h。后续处理同CeO₂-P。

(3) 立方体CeO₂ (CeO₂-C)的合成。称取4.34 g Ce(NO₃)₃·6H₂O和48.0 g NaOH,分别溶于25 mL和175 mL去离子水中。将2种溶液搅拌30 min后,转移至聚四氟乙烯内衬不锈钢反应釜,180 °C水热反应24 h。后续处理同CeO₂-P。

(4) 八面体CeO₂ (CeO₂-O)的合成。将0.868 mg Ce(NO₃)₃·6H₂O与3.2 mg Na₃PO₄·12H₂O溶于80 mL去离子水,室温搅拌30 min后,转移至反应釜,170 °C水热反应12 h。自然冷却后离心洗涤,70 °C烘干过夜。

2.2.2 Pt/CeO₂催化剂的制备

各组使用自制的CeO₂载体,按以下步骤制备催化剂:

(1) 配制H₂PtCl₆溶液: 量取240 μL 10 mg/mL的H₂PtCl₆·6H₂O水溶液,加入10 mL去离子水稀释;

(2) 浸渍: 向上述溶液中加入0.3 g特定形貌的CeO₂粉末,50 °C水浴搅拌至水分完全蒸发;

(3) 还原: 将干燥后的样品置于管式炉中,在H₂气氛下200 °C还原2 h。

ICP-AES分析测得Pt/CeO₂-P、Pt/CeO₂-R、Pt/CeO₂-C和Pt/CeO₂-O中Pt的负载量分别为0.28%、0.27%、0.26%和0.29%,表明不同催化剂间的Pt负载量非常接近。据此,将4种催化剂分别命名为0.3Pt/CeO₂-P、0.3Pt/CeO₂-R、0.3Pt/CeO₂-C和0.3Pt/CeO₂-O。

2.3 催化剂活性评价

MSR反应在石英管固定床连续反应装置中进行。采用双通道进样方式:一路由微量注射泵以0.035 mL/min的流速输送甲醇水溶液(甲醇与水的摩尔比为1:1)至温度保持在180 °C的汽化室,使其完全气化;另一路以20 mL/min的流速通入10% Ar/N₂混合气体作为载气,与气化后的甲醇/水蒸气混合后进入反应器,其中Ar作为内标气用于产物定量校准。反应前,将0.1 g粉末催化剂与石英砂混合稀释后装填于反应管的恒温区,在常压条件下进行测试。反应温度从

70 °C以2 °C/min的速率升温至200 °C后, 恒温反应30 h。反应产物经冷阱冷却后, 使用气相色谱仪在线分析。

依据转换频率 (Turnover Frequency, TOF) 指标评价催化体系的反应活性。TOF 值即单位时间 (小时) 内每摩尔活性金属 Pt 上生成的 H_2 摩尔数, 根据方程式 (1) 计算得到:

$$TOF = \frac{n_{H_2}}{n_{Pt}t} \quad (1)$$

式中: n_{H_2} 为生成 H_2 的摩尔量, mol; n_{Pt} 为通过 ICP-AES 实际测得的催化剂中 Pt 的摩尔量, mol; t 为反应时间, h。

由于仅检测到 H_2 、CO 和 CO_2 这3种产物, 因此CO的选择性 $S_{CO}(\%)$ 可通过下式计算:

$$S_{CO}(\%) = \frac{n_{CO}}{n_{CO} + n_{CO_2}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: n_{CO} 为生成CO的摩尔量, mol; n_{CO_2} 为生

成的 CO_2 的摩尔量, mol。

3 结果与讨论

3.1 催化性能评价

本研究系统评价了不同形貌 CeO_2 负载 Pt 催化剂在 70~200 °C 温度范围内的 MSR 性能。如图 1(a) 所示, 纯 CeO_2 载体表现出较低的催化活性, 其中 CeO_2 -O 几乎无活性。然而, 负载 Pt 后催化性能显著提升, 且呈现明显的形貌依赖性 (图 1(b))。在系列催化剂中, Pt/ CeO_2 -R 展现出优异的综合性能: 其催化活性起始温度低至 80 °C, 且在 200 °C 时 TOF 值达到 52620 h^{-1} , 分别是 Pt/ CeO_2 -P、Pt/ CeO_2 -C 和 Pt/ CeO_2 -O 的 12 倍、6 倍和 60 倍, 性能显著优于文献报道的催化剂^[8-9]。值得注意的是, 该催化剂在温度 ≤ 170 °C 时未检测到 CO 副产物的生成, 即使在 180 °C 时 CO 选择性也仅为 3%。

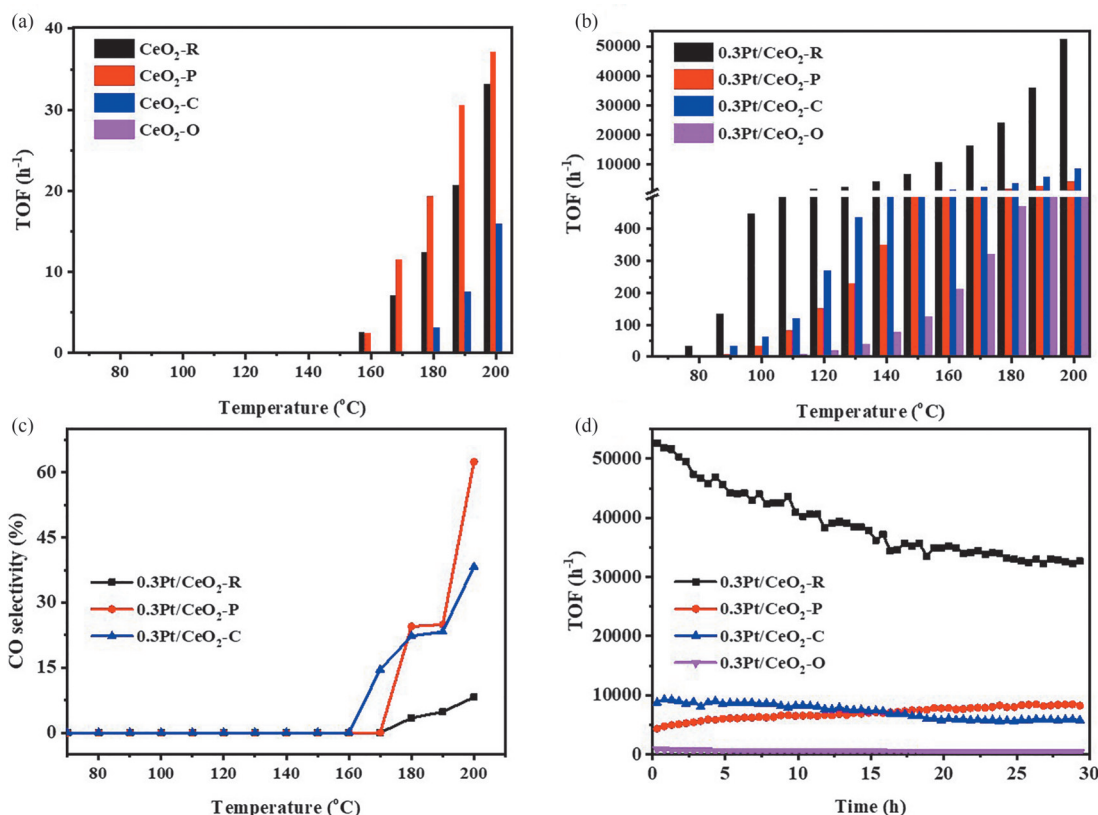


图1 不同形貌 CeO_2 载体 (a) 和 Pt/ CeO_2 催化剂 (b) 的温度依赖活性, Pt/ CeO_2 催化剂的 CO 选择性 (c) 和稳定性 (d)。

Figure 1 Temperature-dependent activity of CeO_2 supports (a) and Pt/ CeO_2 catalysts (b) with varied morphologies, CO selectivity (c) and stability (d) of Pt/ CeO_2 catalysts.

稳定性测试 (200 °C/30 h) 显示, 虽然 Pt/ CeO_2 -R 初期活性有所下降, 但仍保持良好稳定性。这些结果不仅证实 Pt/ CeO_2 -R 是高效的 MSR

催化剂, 更揭示了载体形貌工程对优化催化剂性能的重要作用, 为设计高性能催化材料提供了新思路。

3.2 结构与表征

通过多种表征手段系统探究了不同形貌 CeO₂ 负载 Pt 催化剂的结构特性。图 2(a)~(d) 为不同形貌 CeO₂ 的 TEM 图, 结果显示已成功制备出形貌均一的 CeO₂ 纳米晶。高分辨透射电子显微镜 (HRTEM) 图 (图 2(e)~(h)) 进一步揭示了各 CeO₂ 载体的晶面取向特征: CeO₂-P 和 CeO₂-O 主

要暴露 (111) 晶面, CeO₂-C 以 (100) 晶面为主, 而 CeO₂-R 则同时存在 (110) 和 (111) 晶面。值得注意的是, 负载 Pt 后的催化剂 (图 2(i)~(l)) 仍保持 CeO₂ 载体的原有形貌, 表明 Pt 的负载及 200 °C 氢气还原处理未导致载体结构的改变。同时图片中未观察到明显的 Pt 纳米颗粒或团簇, 表明 Pt 在载体表面呈高度分散状态。

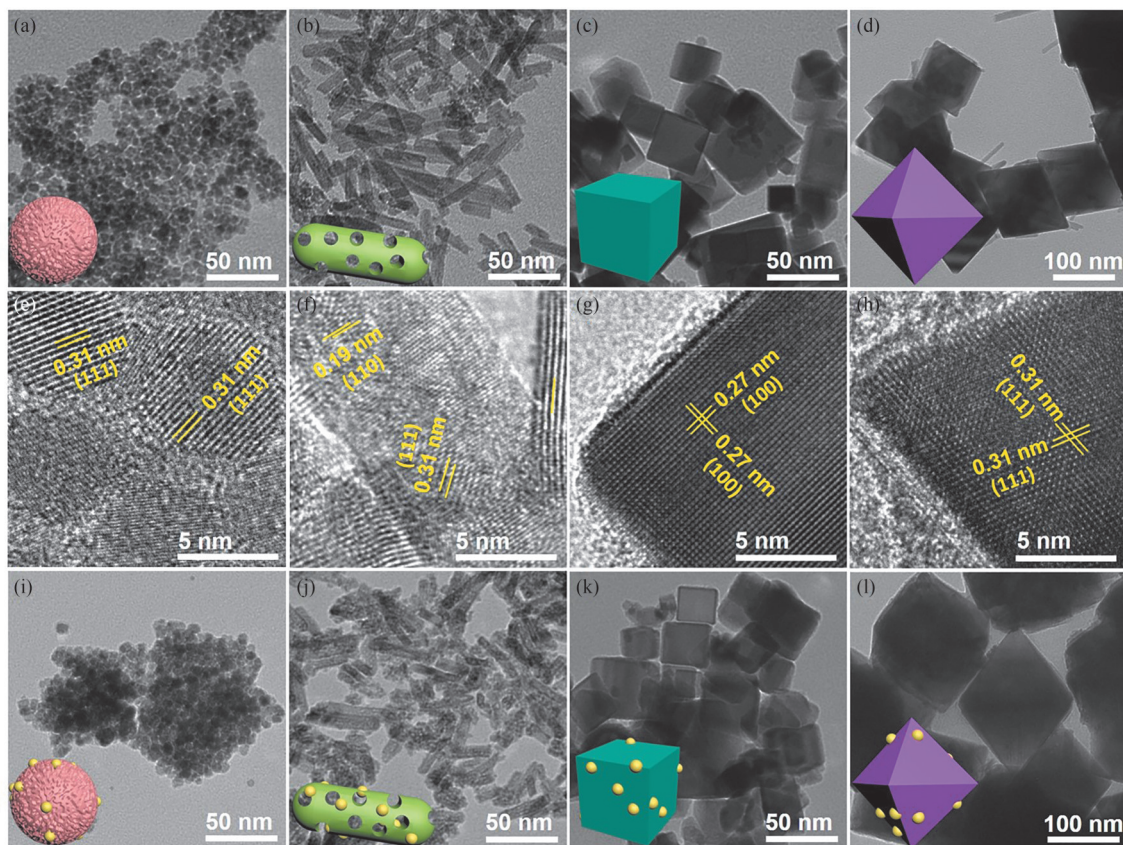


图2 CeO₂-P (a)、CeO₂-R (b)、CeO₂-C (c)、CeO₂-O (d) 的 TEM 图, CeO₂-P (e)、CeO₂-R (f)、CeO₂-C (g)、CeO₂-O (h) 的 HRTEM 图, Pt/CeO₂-P (i)、Pt/CeO₂-R (j)、Pt/CeO₂-C (k)、Pt/CeO₂-O (l) 的 TEM 图。

Figure 2 TEM images of CeO₂-P (a), CeO₂-R (b), CeO₂-C (c), and CeO₂-O (d); HRTEM images of CeO₂-P (e), CeO₂-R (f), CeO₂-C (g), and CeO₂-O (h); TEM images of Pt/CeO₂-P (i), Pt/CeO₂-R (j), Pt/CeO₂-C (k), and Pt/CeO₂-O (l).

进一步通过 N₂ 吸附-脱附测试系统分析了不同形貌 CeO₂ 纳米晶的结构性质。如图 3 所示, CeO₂-P 呈现典型的 IV 型等温线特征并伴有 H2 型滞后环, 表明其具有墨水瓶型孔为主的介孔结构, 孔径分布相对集中; CeO₂-R 虽然同样呈现 IV 型等温线特征, 但其 H1 型滞后环特征证实了高度有序的圆柱形介孔结构的存在; 相比之下, CeO₂-C 和 CeO₂-O 则表现出具有 H3 型滞后环的 IV 型等温线, 反映了颗粒堆积形成的狭缝状介孔结构特征。BET 比表面积测试结果显示, CeO₂-P 和 CeO₂-R 具有显著更高的比表面积 (分别为

133 m²/g 和 156 m²/g) 和孔体积 (分别为 0.112 cm³/g 和 0.424 cm³/g), 而 CeO₂-C 和 CeO₂-O 的比表面积分别为 24 m²/g 和 8 m²/g, 结构性质较差。值得注意的是, 催化活性测试数据与 BET 比表面积未呈现直接相关性, 这一现象表明比表面积并非影响催化活性的决定性因素。

采用 XRD 对不同形貌 CeO₂ 及其负载 Pt 催化剂的晶相结构进行了表征。如图 4 所示, 所有样品在 2 θ =28.5°、33.1°、47.5°、56.3°、59.1°、69.4°、76.7° 和 79.1° 处均出现明显的衍射峰, 这些峰位与标准卡片 JCPDS 43-1002 完美匹配, 分

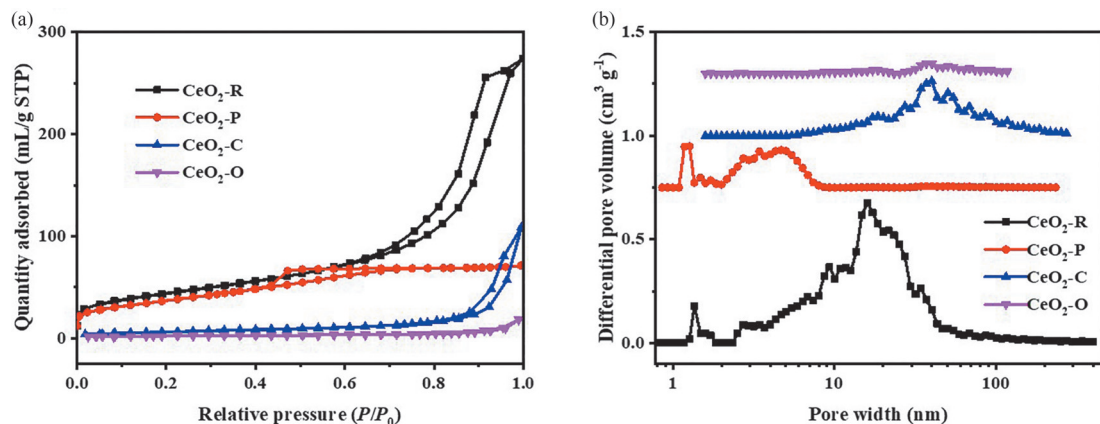


图3 不同形貌CeO₂的N₂吸附-脱附等温线(a)及对应孔径分布曲线(b)。

Figure 3 Nitrogen adsorption-desorption isotherms (a) and corresponding pore size distribution curves (b) of CeO₂ with different morphologies.

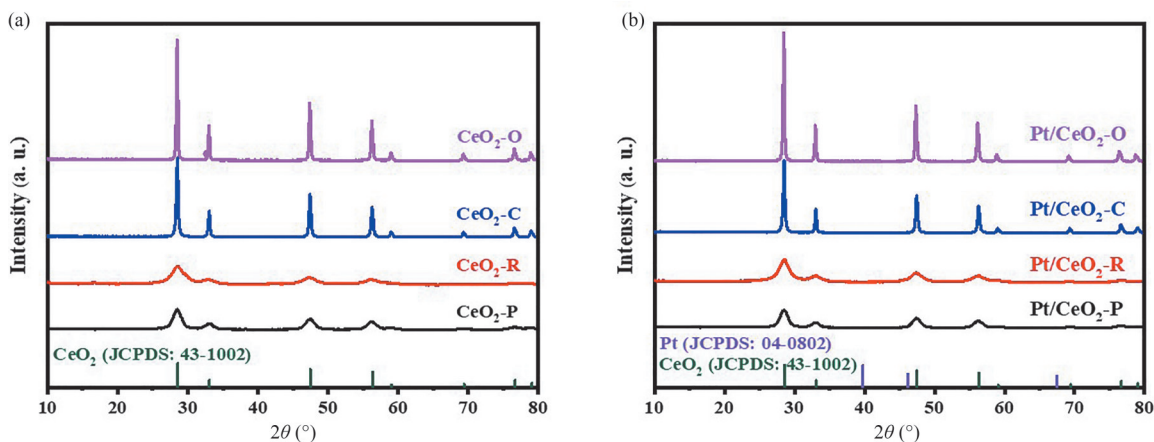


图4 不同形貌CeO₂ (a)、不同载体形貌Pt/CeO₂催化剂 (b) 的XRD谱图。

Figure 4 XRD patterns of CeO₂ with different morphologies (a), and Pt/CeO₂ catalysts with different support morphologies (b).

别对应面心立方萤石结构CeO₂的(111)、(200)、(220)、(311)、(222)、(400)、(331)和(420)晶面(空间群Fm-3m)^[10]。这一结果表明成功制备了CeO₂载体,且后续Pt负载及还原处理未破坏载体的晶体结构。值得注意的是,Pt/CeO₂催化剂的XRD谱图(图4(b))中未检测到金属Pt或Pt氧化物的特征衍射峰。结合TEM表征结果(图2)中未观察到Pt纳米颗粒,表明Pt物种以高度分散状态存在于载体表面。

采用CO漫反射傅里叶变换红外光谱(DRIFTS)进一步评估了Pt在不同形貌CeO₂载体上的分散状态。如图5所示,所有Pt/CeO₂催化剂在2090~2100 cm⁻¹范围内均呈现出明显的特征吸收峰,该峰可归属为CO在Pt^{δ+}单原子上的线性吸附(Pt^{δ+}-CO)^[11]。在1950~1800 cm⁻¹范围内未观察到桥式CO的特征峰(Pt₂-CO),这一结果

与XRD、TEM观察相互验证,证实所有催化剂中Pt均以单原子分散形式存在,未生成任何团簇或纳米颗粒^[12]。进一步分析发现,Pt^{δ+}-CO特征峰的波数位置呈现显著的形貌依赖性:Pt/CeO₂-R(2117 cm⁻¹)>Pt/CeO₂-C(2108 cm⁻¹)>Pt/CeO₂-P(2106 cm⁻¹)>Pt/CeO₂-O(2098 cm⁻¹)。根据金属-载体电子转移理论^[13-14],这一顺序直接反映了Pt电子密度的变化趋势:Pt/CeO₂-O(最高)>Pt/CeO₂-P>Pt/CeO₂-C>Pt/CeO₂-R(最低)。

通过XPS进一步分析了催化剂中Pt物种的化学状态。如图6(a)所示,所有样品的Pt 4f XPS谱图均可解卷积为2个特征峰,其结合能分别位于72~73 eV(4f_{7/2})和75~76 eV(4f_{5/2})^[15]。值得注意的是,在所有样品中均未检测到零价Pt的特征峰,这一结果与CO-DRIFTS测试中观察到的Pt^{δ+}-CO特征峰以及TEM未观察到Pt纳

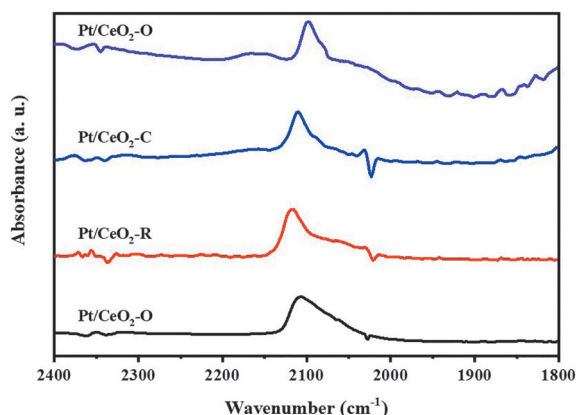


图5 不同载体形貌 Pt/CeO₂ 催化剂的 CO-DRIFTS 图。

Figure 5 DRIFTS of CO chemisorption of Pt/CeO₂ catalysts with different support morphologies.

注:图中出现的负向吸收峰源于数据处理过程中的背景扣除,不影响对特征吸附峰的定性分析。

米颗粒的结果相互印证,充分证实 Pt 以单原子分散的氧化态形式存在。进一步分析发现, Pt 4f_{7/2} 结合能呈现明显的形貌依赖性: Pt/CeO₂-R (73.0 eV) > Pt/CeO₂-C (72.6 eV) > Pt/CeO₂-P (72.4 eV) > Pt/CeO₂-O (72.2 eV)。这表明 Pt/CeO₂-R 中 Pt 与载体间的电子相互作用最强,电子从 Pt

向 CeO₂-R 载体的转移最为显著。这一结合能变化趋势与催化活性顺序 (TOF 值) 完全一致,特别是 Pt/CeO₂-R 最高的结合能位移与其最优的催化性能 (TOF=52620 h⁻¹) 直接相关,从电子结构层面揭示了催化活性差异的本质原因。

图 6(b) 展示了 Pt/CeO₂ 催化剂中 Ce 3d 的 XPS 谱图。通过高分辨率 XPS 分析, Ce 3d 轨道可解卷积为 4 组自旋轨道双峰 (U/V 系列), 分别对应不同的铈氧化态: U^{'''}/V^{'''} (916.4/898.0 eV)、U^{''}/V^{''} (906.7/888.1 eV)、U/V (900.5/882.0 eV) 归属于 Ce⁴⁺ (3d¹⁰4f⁰) 的 3d_{3/2}/3d_{5/2} 能级, 而 U[']/V['] (903.0/884.7 eV) 则明确归属于 Ce³⁺ (3d¹⁰4f¹) 物种^[16]。定量分析显示, 各催化剂中 Ce³⁺ 的相对含量存在显著差异: Pt/CeO₂-R (23%) > Pt/CeO₂-C (20%) > Pt/CeO₂-P (18%) > Pt/CeO₂-O (13%) (表 1)。这一变化趋势与 Pt 4f XPS 结果 (Pt/CeO₂-R 具有最高结合能) 完美吻合, 证实 Pt/CeO₂-R 中发生了最显著的 Pt→CeO₂ 电子转移^[17]。更重要的是, Ce³⁺ 含量顺序与催化活性 (TOF 值) 呈正相关, 表明载体中 Ce³⁺ 作为电子陷阱中心, 通过调控 Pt 活性位点的电子密度, 直接影响催化性能。

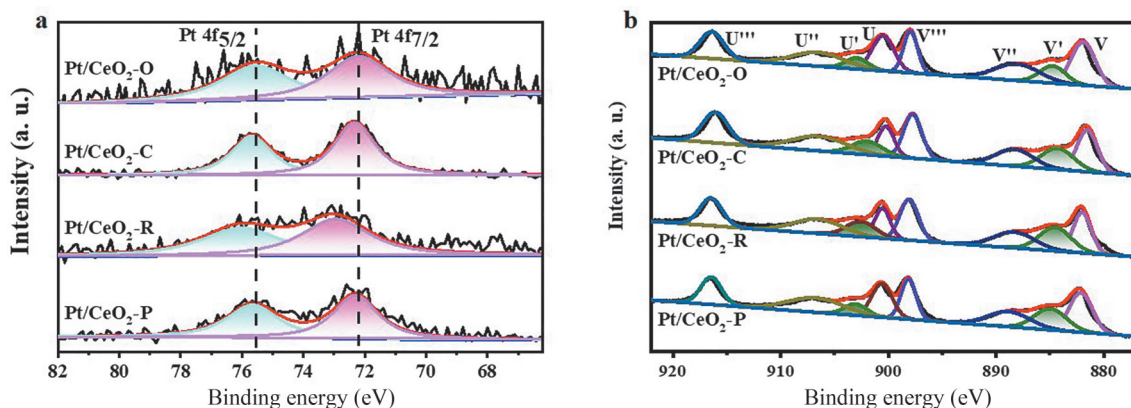


图6 Pt/CeO₂ 中高分辨率 Pt 4f (a) 和 Ce 3d (b) 的 XPS 谱图。

Figure 6 High-resolution Pt 4f (a) and Ce 3d (b) XPS spectra in Pt/CeO₂ catalysts.

4 结 论

本研究通过制备不同形貌 CeO₂ 载体 (棒状 CeO₂-R、颗粒 CeO₂-P、立方体 CeO₂-C 和八面体 CeO₂-O), 成功构建了具有不同 MSI 强度的 Pt/CeO₂ 催化剂, 并深入探究了其在 MSR 制氢反应中的性能差异。综合 TEM、CO-DRIFTS 和 XPS 等表征结果表明, CeO₂-R 负载的 Pt 催化剂表现出最强的 Pt-CeO₂ 相互作用, 这使其在 200 °C 时展现出最高的产氢活性

(TOF=52620 h⁻¹), 分别是 CeO₂-P、CeO₂-C 和 CeO₂-O 负载催化剂的 12 倍、6 倍和 60 倍。本工作不仅揭示了载体形貌通过暴露晶面调控 MSI 强度的现象, 还开发了适用于本科实验教学的模块化催化剂制备与表征方案, 将科研成果转化为包含“形貌控制-结构表征-性能测试”的递进式教学案例, 有效提升了学生的创新实践能力。该研究为开发高效甲醇制氢催化剂和培养材料化学领域复合型人才提供了双重借鉴。

表1 Pt/CeO₂ 催化剂中 Ce 3d XPS 谱图分峰拟合峰面积。Table 1 Deconvoluted peak areas of Ce 3d XPS spectra for Pt/CeO₂ catalysts.

峰面积	Pt/CeO ₂ -P	Pt/CeO ₂ -R	Pt/CeO ₂ -C	Pt/CeO ₂ -O
$A_{U''}$	37639	40495	54769	48448
$A_{U''}$	50684	44583	54120	51699
$A_{U'}$	16539	28731	28067	18516
A_U	45107	30710	34215	58031
$A_{V''}$	40937	50302	57261	45676
$A_{V''}$	40159	41075	42661	53665
$A_{V'}$	43652	47726	47245	33102
A_V	59142	48279	59826	77473
A'/A	0.18	0.23	0.20	0.13

$$A' = A_{U'} + A_{V'}; A = A_{U''} + A_{U''} + A_{U'} + A_U + A_{V''} + A_{V''} + A_{V'} + A_V$$

参考文献

- Wang T R, Hu J Y, Ouyang R H, et al. Nature of metal-support interaction for metal catalysts on oxide supports [J]. *Science*, **2024**, 386: 915-920.
- Meng H, Shen T Y, Yin Z M, et al. Embedded-type Cu nanoparticle with largely enhanced catalytic activity and stability toward methanol steam reforming [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, **2025**, 64(33): e202506458.
- Guan X S, Wang X K, Zhang X C, et al. Boosting CO₂ fixation into dimethyl carbonate via multiple active sites constituted by V_{O-Ce-O} vacancy clusters on single-unit-cell CeO₂ nano-sheets [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, **2025**, 137(33): e202423958.
- Fu H, Lian H L. Optimizing low-temperature CO₂ methanation with aluminum-doped Ni/CeO₂ catalysts: Insights into reaction pathway adjustments and strong metal-support interactions [J]. *Chemical Engineering Journal*, **2024**, 489: 151021.
- Pan F P, Xiang X M, Du Z C, et al. Integrating photocatalysis and thermocatalysis to enable efficient CO₂ reforming of methane on Pt supported CeO₂ with Zn doping and atomic layer deposited MgO overcoating [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, **2020**, 260: 118189.
- Sun S Z, Sun H M, Guan S L, et al. Integrated CO₂ capture and methanation on Ru/CeO₂-MgO combined materials: Morphology effect from CeO₂ support [J]. *Fuel*, **2022**, 317: 123420.
- Chen L N, Hou K P, Liu Y S, et al. Efficient hydrogen production from methanol using a single-site Pt₁/CeO₂ catalyst [J]. *Journal of the American Chemical Society*, **2019**, 141: 17995-17999.
- Huang F, Deng Y C, Chen Y L, et al. Atomically dispersed Pd on nanodiamond/graphene hybrid for selective hydrogenation of acetylene [J]. *Journal of the American Chemical Society*, **2018**, 140: 13142-13146.
- Nielsen M, Alberico E, Baumann W, et al. Low-temperature aqueous-phase methanol dehydrogenation to hydrogen and carbon dioxide [J]. *Nature*, **2013**, 495: 85-89.
- Wang L, Lin S, Qian J, et al. Synergistic activation of CO₂ and H₂ by Ru-Oxygen vacancy pairs over porous CeO₂ for efficient formic acid synthesis [J]. *Fuel*, **2026**, 421: 139058.
- Ding K L, Gulec A, Johnson A M, et al. Identification of active sites in CO oxidation and water-gas shift over supported Pt catalysts [J]. *Science*, **2015**, 350(6257): 189-192.
- Mojet R L, Kappers M J, Miller J T, et al. Metal-support interactions in supported platinum catalysts: zeolites and amorphous supports [J]. *Studies in Surface Science and Catalysis*, **1996**, 101: 1165-1174.
- Han A J, Zhang J, Sun W M, et al. Isolating contiguous Pt atoms and forming Pt-Zn intermetallic nanoparticles to regulate selectivity in 4-nitrophenylacetylene hydrogenation [J]. *Nature Communications*, **2019**, 10: 3787.
- Ma Y F, Chi B L, Liu W, et al. Tailoring of the proximity of platinum single atoms on CeO₂ using phosphorus boosts the hydrogenation activity [J]. *ACS Catalysis*, **2019**, 9: 8404-8412.
- He X H, He Q, Deng Y C, et al. A versatile route to fabricate single atom catalysts with high chemoselectivity and

- regioselectivity in hydrogenation [J]. *Nature Communications*, **2019**, 10: 3663.
- 16 Liu B, Li C M, Zhang G Q, et al. Oxygen vacancy promoting dimethyl carbonate synthesis from CO₂ and methanol over Zr-doped CeO₂ nanorods [J]. *ACS Catalysis*, **2018**, 8: 10446-10456.
 - 17 Daelman N, Capdevila-Cortada M, López N. Dynamic charge and oxidation state of Pt/CeO₂ single-atom catalysts [J]. *Nature Materials*, **2019**, 18: 1044-1050.

Morphology-Controlled CeO₂ Support for Optimizing the Performance of Pt/CeO₂ Catalyst for Methanol Steam Reforming to Produce Hydrogen: An Integrated Exploration from Research to Teaching

WANG Zhen-zhen, SUN Zhong-hua, ZHANG Zhi-hui, HE Ming-yang, QIAN Jun-feng*, CHEN Qun
(School of Petrochemical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract Translating cutting-edge scientific research achievements into comprehensive teaching experiments is an important practice of research feeding back to teaching. This study designed an undergraduate-level comprehensive experiment focused on “Pt catalyst supported on morphology-controlled CeO₂ support”, where students investigated the effect of CeO₂ support morphology (particles (P), rods (R), cubes (C), and octahedrons (O)) on metal-support interactions and catalytic performance in methanol steam reforming (MSR). The experiment adopted a collaborative group-learning mode, where students independently completed the synthesis, characterization, and performance evaluation of catalysts, systematically improved skills in material preparation, characterization analysis, and data processing. Results demonstrated that the Pt catalyst supported on rod-shaped CeO₂ (Pt/CeO₂-R) exhibited superior catalytic performance due to its strong metal-carrier interaction and high oxygen vacancy concentration, with high hydrogen production activity and low CO selectivity. This experiment not only strengthened students’ theoretical understanding of the “structure-performance relationship” in heterogeneous catalysis, but also cultivated team collaboration and innovative thinking through research-driven inquiry, furthermore effectively stimulated students’ interest in material design and catalytic research, and provided a scalable case for experimental teaching in science and engineering.

Keywords CeO₂ morphology modulation, Pt catalysts, Methanol steam reforming, Structure-activity relationship, Comprehensive experiment teaching

* Corresponding author: QIAN Jun-feng, E-mail: qianjunfeng@cczu.edu.cn.