

Fe促进的Pt@CeO₂催化剂用于CO₂加氢制C₁产品

王子健^{1,2}, 李雨鸥^{1,2}, 张玲玲^{1,2}, 汪 啸^{1,2}, 宋术岩^{1,2}, 张洪杰^{1,2,3}

(1. 中国科学院长春应用化学研究所稀土资源利用国家重点实验室, 长春 130022;

2. 中国科学技术大学应用化学与工程学院, 合肥 230026; 3. 清华大学化学系, 北京 100084)

摘要 在Pt@CeO₂核壳纳米球表面引入过渡金属助剂, 探究了不同过渡金属的引入对其CO₂加氢性能的影响. 研究表明, Fe物种的引入对加氢性能的提升效果最佳, 液体C₁产率达到 $6.34 \times 10^{-2} \text{ mmol} \cdot \text{g}_{\text{cat}}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. 透射电子显微镜(TEM)、X射线衍射(XRD)、X射线光电子能谱(XPS)、N₂吸附-脱附实验、CO₂程序升温脱附(CO₂-TPD)和H₂程序升温还原(H₂-TPR)等表征结果表明, Fe物种在Pt@CeO₂表面均匀分散, 且Fe的存在降低了Pt物种的电荷密度, 产生了更多的Pt²⁺物种, 提高了产物中甲醇的选择性. 此外, Fe的存在还促进了更多氧空位(O_v)的形成, 进而促进了对CO₂的吸附及后续的加氢反应, 提高了催化活性.

关键词 CO₂加氢; C₁产品; 核壳纳米球; Fe助剂

中图分类号 O643; O614

文献标志码 A

doi: 10.7503/cjcu20230480

Fe-promoted Pt@CeO₂ Catalysts for CO₂ Hydrogenation to C₁ Products

WANG Zijian^{1,2}, LI Yuou^{1,2}, ZHANG Lingling^{1,2}, WANG Xiao^{1,2*},

SONG Shuyan^{1,2*}, ZHANG Hongjie^{1,2,3*}

(1. State Key Laboratory of Rare Earth Resource Utilization, Changchun Institute of Applied Chemistry,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China;

2. School of Applied Chemistry and Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

3. Department of Chemistry, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Transition metal promoters were introduced on the surface of the Pt@CeO₂ core@shell nanospheres, and the effects of different transition metals on the CO₂ hydrogenation performance were investigated. The results show that the introduction of Fe species has the best effect on the enhancement of the hydrogenation performance, with a liquid C₁ yield of $6.34 \times 10^{-2} \text{ mmol} \cdot \text{g}_{\text{cat}}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. Transmission electron microscopy (TEM), X-ray diffraction (XRD), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), N₂ adsorption-desorption experiments, CO₂ temperature-programmed desorption (CO₂-TPD), and H₂ temperature-programmed reduction (H₂-TPR) experiments reveal that Fe promoter was dispersed on the surface of Pt@CeO₂, and Fe promoter decreases the charge density of Pt, generating more Pt²⁺ species and improving the selectivity of methanol. In addition, it also facilitates the formation of more oxygen

收稿日期: 2023-11-20. 网络首发日期: 2024-01-13.

联系人简介: 汪 啸, 男, 博士, 研究员, 主要从事稀土催化材料合成及性能调控方面的研究. E-mail: wangxiao@ciac.ac.cn

宋术岩, 男, 博士, 研究员, 主要从事纳米催化材料合成及性能调控方面的研究. E-mail: songsy@ciac.ac.cn

张洪杰, 男, 博士, 研究员, 中国科学院院士, 主要从事稀土功能材料方面的研究. E-mail: hongjie@ciac.ac.cn

基金项目: 国家科技重大项目(批准号: 2021YFB3500700)、国家自然科学基金(批准号: 22020102003, 22025506 和 22271274)和吉林省科技发展计划项目(批准号: 20230101035JC 和 20230101022JC)资助.

Supported by the National Science and Technology Major Project of China (No. 2021YFB3500700), the National Natural Science Foundation of China (Nos. 22020102003, 22025506, 22271274) and the Program of Science and Technology Development Plan of Jilin Province, China (Nos. 20230101035JC, 20230101022JC).

vacancies (O_v), which in turn facilitate the adsorption of CO_2 as well as the subsequent hydrogenation reaction, and improve the catalytic activity.

Keywords CO_2 hydrogenation; C_1 product; Core@shell nanospheres; Fe promoter

近年来,随着化石燃料的大量消耗, CO_2 被不断地排放到大气中,导致了一系列严重的环境问题^[1-3].因此,采取有效手段以降低大气中 CO_2 的浓度迫在眉睫.碳捕集封存(CCS)技术和碳捕集利用(CCU)技术可高效地捕获 CO_2 ,因而备受关注^[4].CCU技术在消耗 CO_2 的同时实现了增值产品的生产,并且消除了封存过程中 CO_2 泄露的风险,因此具有更广阔的可持续应用前景. CO_2 催化转化是CCU技术中的一类重要方法^[5-8],尤其是以可再生能源生产的 H_2 作为还原剂时,通过催化 CO_2 加氢可以获得 CO ^[9]、 CH_4 ^[10]、甲酸^[11]、醇类化合物^[12,13]和碳氢化合物^[14-16]等高附加值工业产品.其中热催化 CO_2 加氢更具有实现工业应用的潜力^[17],因此开发高效的 CO_2 加氢催化剂具有重要意义.

在 CO_2 加氢获得的诸多产品中,甲酸是最具有吸引力的产物之一,其不但可作为燃料电池的氢源^[18],还广泛应用于医疗和农药生产等领域^[19,20],因此实现甲酸的高效生产具有重要意义.Sun等^[21]利用 CeO_2 负载Rh单原子(Rh-SACs/ CeO_2)催化 CO_2 加氢制甲酸,表现出优异的催化性能[转化数(TON)为221],甲酸选择性高达85%.甲醇易于运输且可以作为燃料,还可以进一步转化为其它高附加值产品,因而甲醇的生产也受到了广泛关注^[22,23].Liu等^[24]采用分解沉淀策略制备了Pt/ In_2O_3 催化剂,与 In_2O_3 相比,Pt的负载降低了 CO_2 的活化势垒及生成甲醇的活化能,并且增大了生成CO的活化能,因此该催化剂在促进甲醇生成的同时抑制了逆水煤气(RWGS)反应,进而提高了催化活性和甲醇的选择性.Zeng等^[25]利用MIL-101封装Pt单原子($Pt_1@MIL$)催化 CO_2 加氢制甲醇,Pt单原子与配位O原子间的协同作用生成 $HCOO^*$ 中间体,随后生成甲醇.这种独特的反应路径不仅降低了活化能,提高了催化活性,而且提高了甲醇的选择性.

CO_2 分子具有高度的热力学稳定性,实现高效的 CO_2 转化仍然具有挑战性.近年来,通过掺杂过渡金属来调节催化剂表面的缺陷位点及活性中心的电子结构的策略受到了广泛关注.Hu等^[26]以Ni-MOF-74为前驱体制备了碳包覆的NiFe合金纳米颗粒核壳催化剂($Ni_7Fe@C$),Fe的适量引入有利于Ni纳米粒子的分散,提高了催化剂表面碱性位点的浓度,增强了对 CO_2 和CO的吸附能力,进而提高了 CO_2 甲烷化的活性和选择性.在本团队之前的研究中^[27],在 CeO_2 表面上Pt SACs的邻近位点引入了Fe SACs,Fe原子不仅降低了Pt原子的电荷密度,促进了CO的解吸,还被Pt原子产生的活化氢激活为高效的RWGS反应位点. $Fe-Pt/CeO_2$ 在350 °C时具有优异的RWGS性能[转化频率(TOF)为43519 h^{-1}]、接近100%的CO选择性和优异的稳定性.因此,本文结合Pt基催化剂的优异性能,在 $Pt@CeO_2$ 核壳纳米球表面引入Fe助剂,并将其应用于 CO_2 加氢反应中.研究表明,Fe助剂的引入降低了Pt的电荷密度,产生了更多的 Pt^{2+} 物种;此外,Fe助剂促进了氧空位(O_v)的生成,进而促进了催化剂对 CO_2 的吸附,有助于后续的加氢反应,提高了反应活性,使液体 C_1 总产率达到 $6.34 \times 10^{-2} \text{ mmol} \cdot \text{g}_{\text{cat}}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$.

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

六水合硝酸铈[$Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$]和六水合三氯化铁($FeCl_3 \cdot 6H_2O$)均为分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;六水合硝酸钴[$Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$,分析纯],上海麦克林生化科技股份有限公司;氯亚铂酸钾(K_2PtCl_4 ,分析纯),上海拓思化学有限公司;氢氧化钠、无水乙醇和六水合硝酸镍[$Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$]均为分析纯,西陇科学股份有限公司;超纯水(电阻率 $> 18 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$)由深圳市莱克智能精密仪器有限公司LK-S01-10型实验室超纯水机制备.

FEI TECNAI G2型透射电子显微镜(TEM)和能量色散X射线光谱仪(EDX),荷兰FEI公司;Bruker D8 Advanced型粉末X射线衍射仪(XRD)和Bruker AVANCE III HD 500型核磁共振波谱仪(NMR),德国布鲁克公司;Agilent 7000D型气相色谱-质谱联用仪(GC-MS),美国安捷伦公司;Micromeritics ASAP 2020型物理吸附仪和Chemstar TPX型全自动程序升温化学吸附仪,美国康塔仪器公司;Thermo

ESCALAB 250 型 X 射线光电子能谱仪 (XPS) 和 ThermoCAP 6300 型电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP), 美国 Thermo Fisher 公司.

1.2 实验过程

1.2.1 Pt@CeO₂ 的制备 在 10 mL 去离子水中加入 1 mL 0.1 mol/L 的 Ce(NO₃)₃ 水溶液, 通入氩气鼓泡 10 min, 随后依次快速加入 1 mL 0.2 mol/L 的 NaOH 水溶液和 1 mL 0.01 mol/L 的 K₂PtCl₄ 水溶液, 于 70 °C 油浴加热 1 h, 冷却至室温后, 离心、收集样品, 将产物在 80 °C 下干燥约 12 h.

1.2.2 CeO₂ 的制备 除不添加 K₂PtCl₄ 溶液外, 制备过程与 1.2.1 节中相同.

1.2.3 1%Fe/Pt@CeO₂ 和 1%Fe/CeO₂ 的制备 称取 50 mg Pt@CeO₂ 或 CeO₂ 分散在 20 mL 无水乙醇中, 随后加入 179 μL 0.05 mol/L 的 FeCl₃ 乙醇溶液, 搅拌 30 min, 于 70 °C 油浴加热至干燥后, 置于马弗炉中于 400 °C 焙烧 4 h, 升温速率为 10 °C/min.

1.2.4 1%Co/Pt@CeO₂ 和 1%Ni/Pt@CeO₂ 的制备 除加入不同的金属盐溶液外, 制备过程与 1.2.3 节中相同.

1.2.5 催化性能测试 CO₂ 加氢性能测试在 100 mL 不锈钢反应釜中进行. 每次反应前, 催化剂在 30 mL/min 的流动 5% H₂/Ar (0.1 MPa) 气氛中, 在 300 °C (加热速率 5 °C/min) 下进行 2 h 的还原处理. 在聚四氟乙烯内衬中加入 40 mL 超纯水和 30 mg 催化剂. 密封后, 用 0.5 MPa 反应气体 (CO₂/H₂/Ar 体积比 24:72:4) 冲洗 5 次以除去反应釜内残存的空气. 随后充入 3 MPa 反应气, 升温至 200 °C, 以 700 r/min 的转速搅拌 12 h. 反应结束后用冰水浴冷却, 对液体产物用 ¹H NMR 进行检测, 对反应后气体用 GC-MS 进行检测.

2 结果与讨论

2.1 催化剂的形貌表征

对所制备的样品进行了 TEM 表征以研究其微观形貌. 由图 S1(A) 和 (B) (见本文支持信息) 可见, 制备的 Pt@CeO₂ 形貌为单分散的纳米球, 且从图 S1(C) (见本文支持信息) 中可以观察到间距为 0.312 nm 的晶格条纹, 与立方萤石相 CeO₂ 的 (111) 晶面对应. 另外, EDX 图像 [图 S1(E)~(G), 见本文支持信息] 显示 Ce 和 O 两种元素均匀分布在纳米球中, Pt 元素分布在纳米球的中心, 形貌与文献报道一致^[28], 说明了 Pt@CeO₂ 核壳结构纳米球的成功制备. 随后, 通过浸渍法在 Pt@CeO₂ 表面引入 Fe 物种, TEM 图像显示其形貌未发生改变 [图 1(A) 和 (B)], EDX 图像 [图 1(D)~(G)] 显示 Fe 元素均匀分布于整个核壳结构的表面. 电感耦合等离子体分析 (ICP) 测试结果表明 Fe 的实际含量为 1.1% (质量分数, 表 S1, 见本文支持信息).

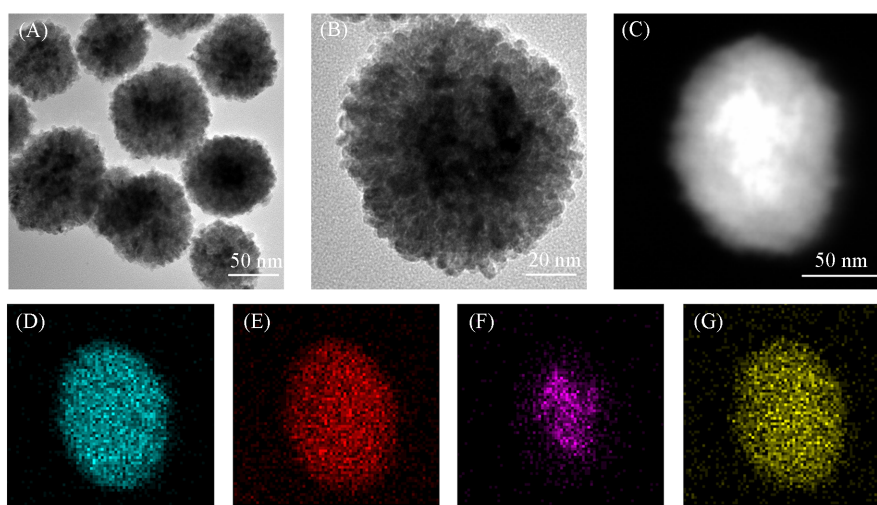


Fig. 1 TEM(A, B), STEM(C) images of 1%Fe/Pt@CeO₂ and corresponding EDX mapping of Ce(D), O(E), Pt(F) and Fe(G) in 1%Fe/Pt@CeO₂

2.2 催化剂的结构表征

利用XRD对催化剂的物相结构进行了研究. 在Pt@CeO₂的XRD谱图[图2(A)]中出现了立方萤石相CeO₂(JCPDF#34-0394)的衍射峰和Pt(111)晶面的衍射峰, 进一步证明了Pt@CeO₂核壳结构纳米球的成功制备^[23]. 值得注意的是, 在1%Fe/Pt@CeO₂的XRD谱图中没有观察到Fe物种的特征衍射峰, 结合其EDX图像, 说明Fe物种粒径较小且在Pt@CeO₂表面高度分散.

利用XPS对催化剂中Fe和Pt元素的价态进行分析[图2(B)和(C)]. 710.9和714.0 eV处的特征峰分别对应1%Fe/Pt@CeO₂中Fe²⁺和Fe³⁺两种氧化态[图2(B)]^[29,30], 与1%Fe/CeO₂相比结合能向较低的一侧偏移, 说明1%Fe/Pt@CeO₂中Fe的电荷密度增加. 如图2(C)所示, 在Pt@CeO₂中, 结合能在70.8和72.5 eV处的Pt_{4f_{7/2}}特征峰分别归属于Pt⁰和Pt²⁺物种; Pt⁰和Pt²⁺物种的Pt_{4f_{5/2}}特征峰分别位于74.3和75.8 eV^[31]. 1%Fe/Pt@CeO₂中Pt_{4f}的拟合峰向结合能高的一侧偏移, 说明引入Fe助剂后Pt的电荷密度降低.

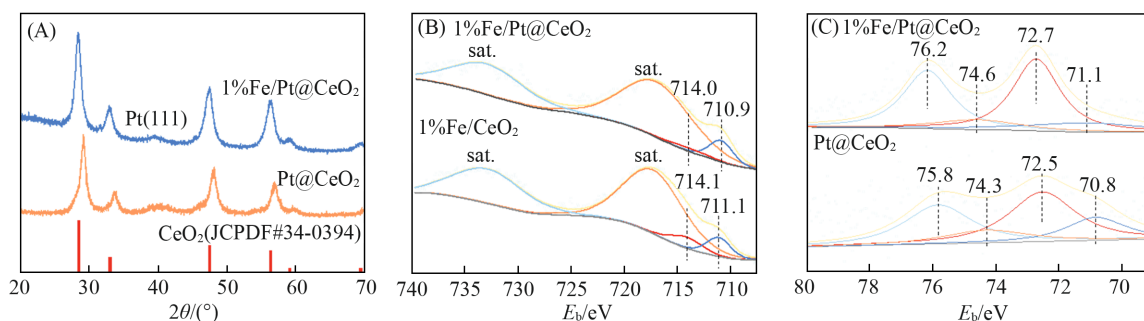


Fig. 2 XRD patterns(A), XPS Fe_{2p} spectra(B) and XPS Pt_{4f} spectra(C) of Pt@CeO₂ and 1%Fe/Pt@CeO₂

利用氮气吸附-脱附等温线研究了催化剂的比表面积. 如图3所示, Pt@CeO₂和1%Fe/Pt@CeO₂具有相似的II类吸附-脱附等温线. 采用Brunauer-Emmet-Teller(BET)法计算得到Pt@CeO₂的BET比表面积为44.53 m²/g, 而1%Fe/Pt@CeO₂的BET比表面积下降到42.80 m²/g(表S2, 见本文支持信息), 其原因可能是Fe的引入堵塞了Pt@CeO₂的部分孔道.

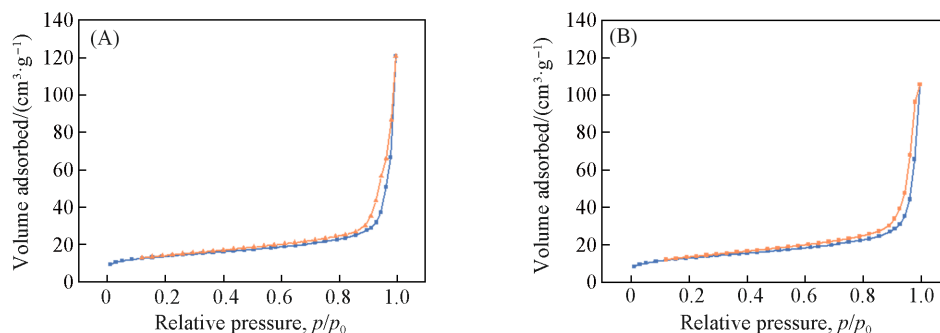


Fig. 3 N₂ adsorption-desorption isotherms of Pt@CeO₂(A) and 1%Fe/Pt@CeO₂(B)

2.3 催化加氢性能

在高压反应釜中对催化剂的CO₂加氢性能进行了测试. 如图4(A)所示, CeO₂对CO₂催化加氢活性很低, 引入Fe物种后, 催化活性相差不大且只有少量甲酸生成. 而Pt@CeO₂的CO₂催化加氢活性相较于CeO₂有大幅提升, 并且在产物中同时有甲酸和甲醇. 在Pt@CeO₂表面引入Fe助剂进一步提升了催化活性, 同时提高了甲酸和甲醇的产率, 液体C₁产物总产率达到了6.34×10⁻² mmol·g⁻¹·h⁻¹. 反应后气体的检测结果显示没有气体产物生成. 随后在200 °C下研究了反应时间对加氢产物的影响[图4(B)]. 随着反应时间的延长, 甲酸的产量略有下降, 甲醇的产量不断提高, 表明延长反应时间有利于CO₂深度加氢生成甲醇. 研究了反应温度对1%Fe/Pt@CeO₂催化剂CO₂加氢性能的影响[图4(C)], 当反应时间为12 h时, 温度的提高有利于甲醇的生成. 此外, 进一步研究了引入其它过渡金属(Co和Ni)的Pt@CeO₂对CO₂加氢制液体C₁产物催化性能的影响[图4(D)], 发现Fe助剂对催化活性的提升最明显, 获得了最高的液体C₁总产率.

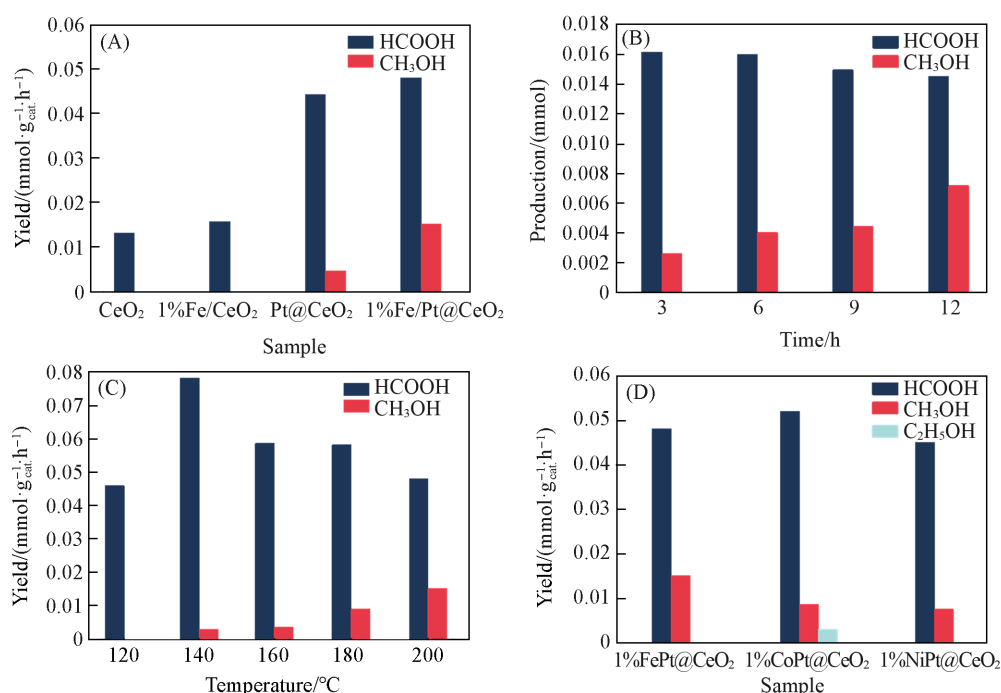


Fig. 4 Comparison of catalytic performance of various catalysts(A), catalytic performance of 1%Fe/Pt@CeO₂ under different time at 200 °C(B), catalytic performance of 1%Fe/Pt@CeO₂ at different temperature at 3 MPa for 12 h(C) and catalytic performance of Pt@CeO₂ loaded with different metals(D)

2.4 反应机理研究

利用CO₂程序升温脱附(CO₂-TPD)研究了催化剂对CO₂的吸附强度. 如图5(A)所示, 100~300 °C和300~600 °C出现的两个脱附峰分别对应于弱碱性位点和中等碱性位点上CO₂的脱附. 其中, 中等碱性位点与催化剂中的O_v有关, 与弱碱性位点相比, O_v对CO₂的吸附更强, 更有助于后续的加氢反应^[32]. 在300~600 °C内, 1%Fe/Pt@CeO₂对CO₂的吸附量为3.55 μmol/g(表S3, 见本文支持信息), 高于Pt@CeO₂对CO₂的吸附量(2.74 μmol/g), 说明1%Fe/Pt@CeO₂中具有更多的O_v, 促进了对CO₂的吸附, 从而提高了CO₂加氢反应活性.

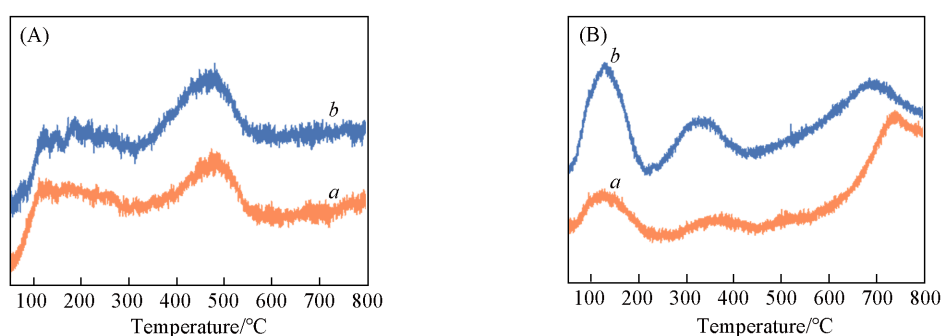


Fig. 5 CO₂-TPD(A) and H₂-TPR(B) profiles of Pt@CeO₂(a) and 1%Fe/Pt@CeO₂(b)

利用H₂程序升温还原(H₂-TPR)表征研究了催化剂的还原性质及氧空位的形成. 如图5(B)所示, 在约150 °C和350 °C出现的还原峰可分别归属于Pt和CeO₂界面Pt-O-Ce位点和CeO₂表面O原子的还原^[33]. 1%Fe/Pt@CeO₂中Pt-O-Ce位点的还原峰强度明显变大, 说明1%Fe/Pt@CeO₂中存在更多的Pt-O-Ce位点, 结合XPS表征说明Fe的引入使得1%Fe/Pt@CeO₂形成了更多的Pt²⁺物种. 文献[25]报道Pt²⁺在催化CO₂加氢反应中产生了HCOO*中间体进而生成了甲醇, 因此推断1%Fe/Pt@CeO₂中Pt²⁺的增多促进了甲醇的生成. 此外, 在约350 °C时, 1%Fe/Pt@CeO₂的还原峰向低温偏移且峰强度增大, 这说明Fe的引入促进了CeO₂表面O原子的还原^[34], 进而形成了更多的O_v, 这与CO₂-TPD结果一致.

3 结 论

在Pt@CeO₂核壳结构纳米球表面引入Fe助剂并用于催化CO₂加氢反应,探究了Fe助剂的引入对催化活性的影响.研究表明,Fe物种的引入提高了催化活性,获得了更高的液体C₁产率(6.34×10⁻² mmol·g_{cat}⁻¹·h⁻¹).XPS,CO₂-TPD和H₂-TPR等表征证明Fe物种的引入降低了Pt物种的电荷密度,使催化剂中Pt²⁺的比例增加,提高了产物中甲醇的选择性.此外,Fe物种有助于氧空位的生成,促进了对CO₂的吸附,有助于后续的加氢反应,提高了催化活性.本文利用过渡金属助剂对核壳结构催化剂进行改性有效提高了催化性能,为利用不同金属助剂制备高性能的CO₂加氢催化剂提供了一个新的思路.

支持信息见 <http://www.cjcu.jlu.edu.cn/CN/10.7503/20230480>.

参 考 文 献

- [1] Goepfert A., Czaun M., Jones J. P., Prakash G. K. S., Olah G. A., *Chem. Soc. Rev.*, **2014**, 43(23), 7995—8048
- [2] Jiang F., Liu B., Geng S., Xu Y., Liu X., *Catal. Sci. Technol.*, **2018**, 8(16), 4097—4107
- [3] Liu L., Wu X., Wang F., Zhang L., Wang X., Song S., Zhang H., *Chem. Eur. J.*, **2023**, 29(49), e202300583
- [4] Atsbha T. A., Yoon T., Seongho P., Lee C. J., *J. CO₂ Util.*, **2021**, 44, 101413
- [5] Su J., Liu Y., Song Y., Huang L., Guo W., Cao X., Dou Y., Cheng L., Li G., Hu Q., Ye R., *SmartMat*, **2022**, 3(1), 35—53
- [6] Sun Z., Yin H., Liu K., Cheng S., Li G. K., Kawi S., Zhao H., Jia G., Yin Z., *SmartMat*, **2022**, 3(1), 68—83
- [7] Zhang D., Li Y., Li Y., Zhan S., *SmartMat*, **2022**, 3(3), 417—446
- [8] Wang Q., Zheng X., Wu J., Wang Y., Wang D., Li Y., *Small Struct.*, **2022**, 3(9), 2200059
- [9] Wang Y., Chen J., Chen L., Li Y., *ACS Catal.*, **2023**, 13(6), 3735—3742
- [10] Zhang Z., Yu Z., Feng K., Yan B., *Appl. Catal. B*, **2022**, 317, 121800
- [11] Zhang J., Fan L., Zhao F., Fu Y., Lu J. Q., Zhang Z., Teng B., Huang W., *Chemcatchem*, **2020**, 12(21), 5540—5547
- [12] Song L., Wang H., Wang S., Qu Z., *Appl. Catal. B*, **2023**, 322, 122137
- [13] Wang L., Wang L., Zhang J., Liu X., Wang H., Zhang W., Yang Q., Ma J., Dong X., Yoo S. J., Kim J. G., Meng X., Xiao F. S., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2018**, 57(21), 6104—6108
- [14] Aitbekova A., Goodman E. D., Wu L., Boubnov A., Hoffman A. S., Genc A., Cheng H., Casalena L., Bare S. R., Cargnello M., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2019**, 58(48), 17451—17457
- [15] Chen J., Han S. J., Park H. G., Nasriddinov K., Zhang C., Jun K. W., Kim S. K., *Appl. Catal. B*, **2023**, 325, 122370
- [16] Wei J., Yao R., Ge Q., Wen Z., Ji X., Fang C., Zhang J., Xu H., Sun J., *ACS Catal.*, **2018**, 8(11), 9958—9967
- [17] Zhang Z., Yang Z., Liu L., Wang Y., Kawi S., *Adv. Energy Mater.*, **2023**, 13(42), 2301852
- [18] Zhong H., Iguchi M., Chatterjee M., Himeda Y., Xu Q., Kawanami H., *Adv. Sustain. Syst.*, **2018**, 2(2), 1700161
- [19] Hao C., Wang S., Li M., Kang L., Ma X., *Catal. Today*, **2011**, 160(1), 184—190
- [20] Gunasekar G. H., Park K., Jung K. D., Yoon S., *Inorg. Chem. Front.*, **2016**, 3(7), 882—895
- [21] Wu B., Yu X., Huang M., Zhong L., Sun Y., *Chin. J. Chem. Eng.*, **2022**, 43, 62—69
- [22] Nielsen M., Alberico E., Baumann W., Drexler H. J., Junge H., Gladiali S., Beller M., *Nature*, **2013**, 495(7439), 85—89
- [23] Chen Y., Choi S., Thompson L. T., *ACS Catal.*, **2015**, 5(3), 1717—1725
- [24] Sun K., Rui N., Zhang Z., Su Z., Ge Q., Liu C. J., *Green Chem.*, **2020**, 22(15), 5059—5066
- [25] Chen Y., Li H., Zhao W., Zhang W., Li J., Li W., Zheng X., Yan W., Zhang W., Zhu J., Si R., Zeng J., *Nat. Commun.*, **2019**, 10, 1885
- [26] Li Y. T., Zhou L., Cui W. G., Li, Z. F., Li W., Hu T. L., *J. CO₂ Util.*, **2022**, 62, 102093
- [27] Wang H., Bootharaju M. S., Kim J. H., Wang Y., Wang K., Zhao M., Zhang R., Xu J., Hyeon T., Wang X., Song S., Zhang H., *J. Am. Chem. Soc.*, **2023**, 145(4), 2264—2270
- [28] Wang X., Liu D., Song S., Zhang H., *J. Am. Chem. Soc.*, **2013**, 135(42), 15864—15872
- [29] Li S., Song X., Kuai X., Zhu W., Tian K., Li X., Chen M., Chou S., Zhao, J., Gao L., *J. Mater. Chem. A*, **2019**, 7(24), 14656—14669
- [30] Xia J., Zhao H., Huang B., Xu L., Luo M., Wang J., Luo F., Du Y., Yan C. H., *Adv. Funct. Mater.*, **2020**, 30(9), 1908367
- [31] Shen D., Li Z., Shan J., Yu G., Wang X., Zhang Y., Liu C., Lyu S., Li J., Li L., *Appl. Catal. B*, **2022**, 318, 121809
- [32] Zhang R., Wang X., Wang K., Wang H., Liu L., Wu X., Geng B., Chu X., Song S., Zhang H., *Adv. Energy Mater.*, **2023**, 13(12), 2203806
- [33] Li W., Gan J., Liu Y., Zou Y., Zhang S. Qu Y., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2023**, 62(37), e202305661
- [34] Kim G., Shin S., Choi Y., Kim J., Kim G., Kim K. J., Lee H., *J. Am. Chem. Soc. Au*, **2022**, 2(5), 1115—1122

(Ed.: X, K, N, M)