Pd/Ce 催化剂耦合低温等离子体处理甲烷性能研究

孔伟杰[1*],裴鉴禄[2],任宏正[2],张　诚[2]
(1.三门核电有限公司,浙江 台州 317112; 2.中国辐射防护研究院,山西 太原 030006)

摘要:探究低温等离子体(LTP)协同 Pd/Ce 催化剂在甲烷(CH_4)降解中的应用,通过制备和表征不同催化剂(γ-Al_2O_3、Pd/Al_2O_3 和 Pd/Ce/Al_2O_3),并结合 LTP 实验,评估其在不同电压和气体流量条件下的 CH_4 转化率和 CO_2 选择性。结果表明,Pd 和 Ce 的引入显著提高了催化剂的性能,Pd/Ce/Al_2O_3 在高电压和低流量条件下表现出优异的 CH_4 转化率和 CO_2 选择性。催化剂表征结果揭示了 Pd 和 Ce 的协同作用机制,Ce 的引入促进了高氧化态 Pd 的形成,显著增强了催化剂的氧化还原能力,为 LTP 协同催化剂在低温甲烷降解中的应用提供了新的技术路径和理论依据。

关键词:低温等离子体;甲烷降解;Pd/Ce 催化剂;气态污染物
中图分类号:TQ426　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:0253-4320(2025)S2-0375-06
DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S2.065

Study on performance of Pd/Ce catalyst coupled low temperature plasma in treatment of methane

KONG Wei-jie[1*], *PEI Jian-lu*[2], *REN Hong-zheng*[2], *ZHANG Cheng*[2]
(1.Sanmen Nuclear Power Company Limited, Taizhou 317112, China;
2.China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China)

Abstract: This study investigates the performance of low-temperature plasma combined with Pd/Ce catalyst for treating with radioactive ^{14}C methane ($^{14}CH_4$). Through preparing and characterizing γ-Al_2O_3, Pd/Al_2O_3 and Pd/Ce/Al_2O_3 catalysts, and conducting methane conversion experiments in a low-temperature plasma environment, the impact of plasma voltage and gas flow rate on CH_4 conversion rate and CO_2 selectivity are systematically evaluated. The results indicate that Pd/Ce/Al_2O_3 catalyst exhibits the best methane conversion rate and CO_2 selectivity under high voltage and low flow rate conditions, significantly outperforming Pd/Al_2O_3 and γ-Al_2O_3 catalysts. The characterization results reveal the synergistic mechanism of Pd and Ce. The addition of Ce promotes the formation of high oxidation state Pd, which enhances the catalyst's redox ability greatly. The study provides a new technical approach and theoretical basis for the application of low-temperature plasma combined with Pd/Ce catalyst in degrading methane at low temperature.

Key words: low-temperature plasma; methane degradation; Pd/Ce catalyst; gaseous pollutants

甲烷(CH_4)是一种无色、无味、无刺激性的气体,也是天然气的主要成分,与其他碳氢化合物燃料相比,它是一种廉价而清洁的能源,但也是导致全球变暖的主要温室气体之一[1-2]。甲烷的处理与利用,尤其是低温燃烧(通常为 500℃)和直接转化,在过去几十年里一直是环境科学和能源领域的重要课题[3-5]。但是在更低温度下(<200℃)低浓度甲烷降解和甲烷转化方面仍然面临着技术障碍[6]。

在常压、低温等离子体(LTP)的条件下,气体或其混合物在部分电离的过程中,电子与重粒子(离子、原子、分子和自由基)的温度分布呈现出显著的非平衡特性[7]。LTP 的独特性在于它能够在接近环境温度的条件下形成自由基和激发态物质,从而实现对化学键的高效断裂,这一能力通常仅在高温燃烧环境(温度超过 1 000℃)中才能观察到[7]。LTP 条件下甲烷降解的特征在于高能电子、离子和中性物质促进的无数复杂化学反应[8]。然而,单纯使用低温等离子体处理存在甲烷转化率低、产物选择性低和能耗高等问题[9-10]。因此,低温等离子体与催化剂的协同作用成为研究的重点方向[11-15]。近期研究表明,引入 Pd 基催化剂能够显著提高 LTP 的甲烷降解性能[16-18],然而作为贵金属的 Pd 价格昂贵,且只有较高负载量(质量分数为 2%)的 Pd 基催化剂才表现出与低温等离子体的协同作用[17]。对催化剂的改性通常应用在甲烷的低温燃烧过程中[19],稀土元素 Ce 的加入能提高 Pd 催化剂燃烧甲烷的活性和热稳定性,使得燃烧过程中 PdO 烧结延迟并且让表面 Pd 保持氧化状态[20-22]。

收稿日期:2025-03-10;**修回日期**:2025-07-21
作者简介:孔伟杰(1981-),男,本科,高级工程师,研究方向为核电厂设备可靠性、系统监督等,通讯联系人,kongwj@cnnp.com.cn。

本研究旨在探索低温等离子体协同 Pd/Ce 催化剂处理甲烷的可行性和应用方法。通过对催化剂的制备与表征、低温等离子体处理实验的系统研究，揭示 Pd/Ce 催化剂在低温等离子体环境中的催化机制和性能优势，为 CH_4 的高效、安全处理提供新的技术路径和理论依据。

1 材料与试剂

1.1 材料

γ-Al_2O_3 载体（购自上海卜微应用材料技术有限公司）：粒径 3~4 mm，BET 比表面积 170 m^2/g，孔隙率 0.4 cm^3/g。

1.2 仪器与试剂

$Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$、$Pd(NO_3)_2 \cdot 2H_2O$，均购自上海麦克林生化科技有限公司。

实验室自制的线筒式单介质阻挡放电反应器如图 1 所示，由绝缘介质、高压电极和低压电极组成，通过辉光放电产生活性物种来处理 CH_4。绝缘介质为一根氧化铝陶瓷管，该陶瓷管也作为气流通道。陶瓷管外侧围绕不锈钢金属网作为低压电极，不锈钢金属网的宽度即为反应器的有效放电区域。陶瓷管内装有一根直径与管共轴的不锈钢棒作为高压电极。催化剂放置于反应器内部，这种将催化剂直接置于有效放电区的形式被称为等离子体内催化（IPC）。IPC 允许催化材料有更多机会通过直接与等离子激发和等离子引发的反应产物相互作用来影响化学反应的性质[23]。

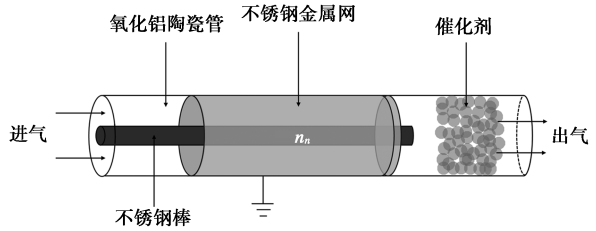


图 1 低温等离子体实验装置

2 实验方法

2.1 材料制备

首先将球形 γ-Al_2O_3 载体与 $Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ 在常温条件下等体积浸渍制备 Ce/Al_2O_3。浸渍样品在 110℃ 下干燥 12 h，然后在 500℃ 空气中煅烧 8 h，Ce 的理论质量分数为 0.5%。

为了制备 Pd/Al_2O_3 和 $Pd/Ce/Al_2O_3$ 催化剂，使用 $Pd(NO_3)_2 \cdot 2H_2O$ 在常温条件下分别等体积浸渍 Al_2O_3 和 Ce/Al_2O_3。得到的样品在 110℃ 下干燥 12 h，然后在 500℃ 马弗炉中煅烧 8 h。Ce 的理论质量分数为 0.5%，Pd 的理论质量分数为 0.5%。

2.2 分析方法

通过 CH_4 转化率（η_{CH_4}）和 CO_2 选择性（S_{CO_2}）评估低温等离子体系统的 CH_4 处理性能，计算公式如式（1）和式（2）：

$$\eta_{CH_4} = [([CH_4]_{in} - [CH_4]_{out})/[CH_4]_{in}] \times 100 \quad (1)$$

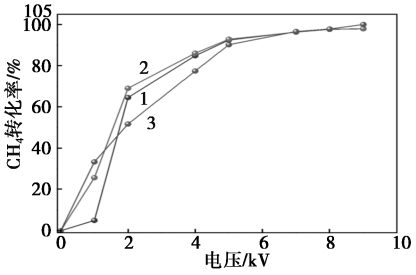
$$S_{CO_2} = [[CO_2]_{out}/([CH_4]_{in} - [CH_4]_{out})] \times 100 \quad (2)$$

其中，η_{CH_4} 为降解甲烷的比例，%；S_{CO_2} 则表明降解甲烷中生成二氧化碳的比例，%；$[CH_4]_{in}$ 为进气中甲烷的体积分数，%；$[CH_4]_{out}$ 为出气中甲烷的体积分数，%；$[CO_2]_{out}$ 为出气中二氧化碳的体积分数，%。

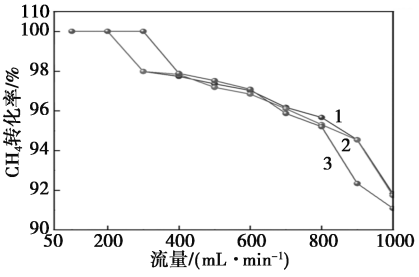
3 结果与讨论

3.1 低温等离子体处理 CH_4 实验结果

图 2（a）为不同催化剂在不同电压条件下的 CH_4 转化率，随着电压从 1 kV 增加到 10 kV，3 种催化剂的 CH_4 转化率均显著提高。这表明，在高电压下，低温等离子体中的活性物种浓度增加，从而促进了 CH_4 的转化。Pd/Al_2O_3 和 $Pd/Ce/Al_2O_3$ 在较低电压（1~2 kV）下，较 γ-Al_2O_3 均表现出较高的 CH_4 转化率，表明 Pd 基的引入增加了 CH_4 的转化率，而 $Pd/Ce/Al_2O_3$ 催化剂在较高电压（≥8 kV）下显示出更优的转化性能。这可能与 Pd 和 Ce 的催化特性及其对等离子体活性物种的促进作用有关。



（a）不同电压条件下



（b）不同流量条件下

1—γ-Al_2O_3；2—Pd/Al_2O_3；3—$Pd/Ce/Al_2O_3$

图 2 CH_4 转化率

图 2(b)为不同催化剂在不同流量条件下的 CH_4 转化率,在低流量(≤200 mL/min)条件下,Pd/Ce/Al_2O_3 催化剂表现出最高的 CH_4 转化率,而 Pd/Al_2O_3 和 γ-Al_2O_3 的转化率相对较低。表明 Ce 的引入增强了催化剂的催化活性。然而,随着流量增加,3 种催化剂的转化率差异逐渐减小,特别是在高流量(≥800 mL/min)条件下,3 种催化剂的 CH_4 转化率接近。

图 3(a)为不同催化剂在不同电压条件下的 CO_2 选择性。随着电压的增加,3 种催化剂的 CO_2 选择性均显著增加,表明增加电压可以提升催化剂的 CO_2 选择性。Pd/Ce/Al_2O_3 和 Pd/Al_2O_3 催化剂在较低电压(1 kV)下即表现出较高的 CO_2 选择性。在 2 kV 以上时,Pd/Ce/Al_2O_3 的 CO_2 选择性明显高于 Pd/Al_2O_3,表明 Ce 和 Pd 的引入增加了 CO_2 选择性。

图 3(b)展示了不同催化剂在低温等离子体处理甲烷过程中,气体流量对 CO_2 选择性的影响。随着流量从 0 增加到 1 000 mL/min,3 种催化剂的 CO_2 选择性均有所下降,这表明较高的气体流量减少了反应物在等离子体中的停留时间,从而降低了完全氧化的程度。在低流量(≤200 mL/min)条件下,Pd/Ce/Al_2O_3 催化剂表现出最高的 CO_2 选择性,并在整个流量范围内保持在较高水平。Pd/Al_2O_3 催化剂的 CO_2 选择性随着流量增加略微下降,但仍维持在 90%以上。而 γ-Al_2O_3 的 CO_2 选择性则明显受到流量的影响,随着流量增加而显著下降,特别是在高流量(≥800 mL/min)条件下,CO_2 选择性降至 60%以下。进一步表明 Ce 和 Pd 的引入极大的增加了催化剂的 CO_2 选择性。

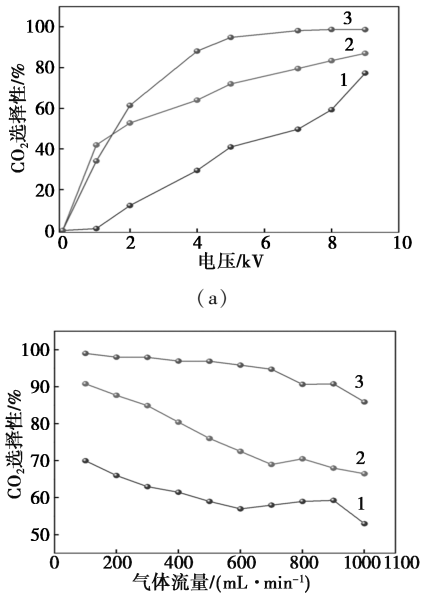


图 3　催化剂在不同电压及不同流量条件下的 CO_2 选择性

3.2　催化剂表征结果

3 种催化剂材料的表面积测试结果如表 1 所示,γ-Al_2O_3 具有最高的比表面积,为 210.74 m^2/g,引入 Pd 后,催化剂比表面积略有降低,这是由于 Pd 颗粒堵塞或覆盖了 γ-Al_2O_3 载体的部分孔结构。进一步引入 Ce 后材料的比表面积降低至 187.949 m^2/g,亦是由于载体的孔结构被浸渍物进一步堵塞和覆盖所致。在平均孔径指标上,加入 Pd 后平均孔径基本没有变化,但进一步引入 Ce 后材料的平均孔径增加至 9.605 nm,这也表明 CeO_2 的引入会导致载体孔结构尤其是小直径孔结构的堵塞,因此造成平均孔径向高值转移。

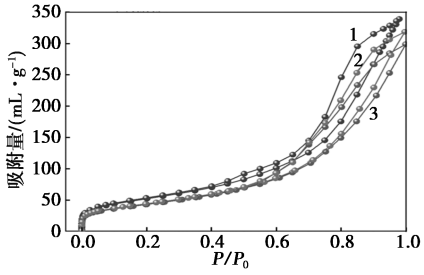
表 1　3 种催化剂的比表面积测试结果

	γ-Al_2O_3	Pd/Al_2O_3	Pd/Ce/Al_2O_3
表面积/($m^2\cdot g^{-1}$)	210.740	204.914	187.949
平均孔径/nm	7.812	7.815	9.605
孔容/($cm^3\cdot g^{-1}$)	0.551	0.539	0.545

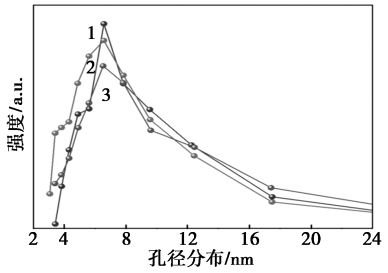
γ-Al_2O_3 作为催化剂载体具有良好的物理性能,尽管负载 Pd 和 Ce 后比表面积有所减小,但孔径的增大和孔体积的相对稳定确保了良好的传质性能和活性物种的生成。结合低温等离子体的实验,这些特征使得 Pd/Ce/Al_2O_3 在高电压和低流量条件下表现出优异的 CH_4 转化率和 CO_2 选择性。

图 4(a)中的氮气吸脱附等温线显示了 Pd/Ce/Al_2O_3 催化剂在不同相对压力(P/P_0)下的氮气吸附和脱附行为。根据 IUPAC 分类[24],该等温线呈现典型的Ⅳ型特征,具有明显的滞后环,表明该催化剂具有介孔结构。在低相对压力区间(P/P_0<0.1),吸附量随相对压力的增加而缓慢增加,这通常与单层吸附有关,表明催化剂表面存在大量微孔。在中等相对压力区间(0.1<P/P_0<0.8),吸附量迅速增加,这与多层吸附和毛细凝聚有关,表明催化剂中存在大量的介孔结构。在高相对压力区间(P/P_0>0.8),吸附量显著增加,并出现滞后环。这种滞后环通常归因于孔结构的毛细凝聚和孔口效应,进一步确认了催化剂的介孔特性。图 4(b)为不同催化剂的孔径分布曲线。在大约 7 nm 处,存在一个明显的峰

值,表明该孔径范围内的孔体积最大。这可能有利于反应物和产物的传质,提高催化剂的催化性能。孔径分布曲线较宽,表明催化剂中存在多种尺寸的孔结构,这种多孔结构有助于提高催化剂的比表面积和反应活性。



(a)

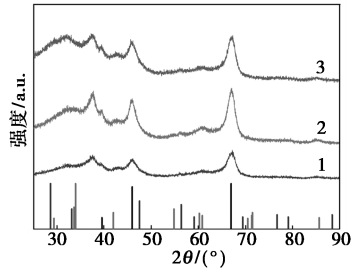


(b)

1—γ-Al_2O_3;2—Pd/Al_2O_3;3—$Pd/Ce/Al_2O_3$

图 4 催化剂的氮气吸脱附和孔径分析图像

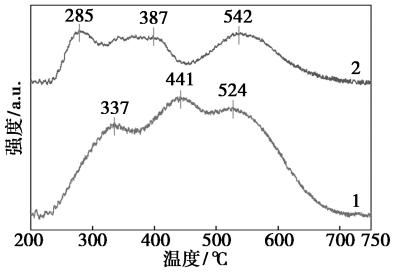
图 5 展示了 Pd/Al_2O_3 和 $Pd/Ce/Al_2O_3$ 催化剂的 X 射线衍射(XRD)图谱,从图中可以看出在相应位置表现出了 γ-Al_2O_3 载体(JCPDS—ICDD 卡号 00—010—0425)特征峰。比较不同催化剂的 XRD 谱图发现,在负载 Pd 和 Ce 后,γ-Al_2O_3 载体上均没有出现新的特征峰,表明负载制备工艺基本没有破坏催化剂原有的微观结构。



1—γ-Al_2O_3;2—Pd/Al_2O_3;3—$Pd/Ce/Al_2O_3$

图 5 催化剂的 XRD 谱图

图 6 中展示了 Pd/Al_2O_3 和 $Pd/Ce/Al_2O_3$ 催化剂的氢气程序升温还原(H_2-TPR)结果。通过 H_2-TPR 测试,可以观察到不同催化剂的还原行为和还原温度特征峰。对于 Pd/Al_2O_3 催化剂,在 337、441℃和 524℃处分别出现了 3 个还原峰。这些峰表示 PdO 在不同温度下的还原行为,峰值温度越低,表明还原性越强,337℃处的还原峰通常归因于 PdO 的还原。441℃和 524℃的还原峰表明存在较难还原的 PdO 物种或与载体相互作用较强的 PdO。对于 $Pd/Ce/Al_2O_3$ 催化剂,在 285、387℃和 542℃处出现了 3 个还原峰。相较于 Pd/Al_2O_3 催化剂,$Pd/Ce/Al_2O_3$ 催化剂的还原峰出现的温度更低,尤其是第一个还原峰在 285℃处,这表明 CeO_2 的引入增强了 PdO 的还原性。此外,387℃和 542℃处的还原峰可能与 CeO_2 和 PdO 的相互作用有关,表现出不同的还原行为。综合来看,H_2-TPR 图像进一步验证了 Pd 和 Ce 在催化剂中的存在及其对催化剂还原特性的影响。$Pd/Ce/Al_2O_3$ 催化剂在较低温度下的还原峰表明 CeO_2 的引入降低了 PdO 的还原温度,增强了催化剂的氧化还原能力,从而提高了 CH_4 转化率和 CO_2 选择性。Pd/Al_2O_3 催化剂在较高温度下的还原峰表明其还原性较弱,在较低电压下的性能不如 $Pd/Ce/Al_2O_3$。



1—Pd/Al_2O_3;2—$Pd/Ce/Al_2O_3$

图 6 催化剂的 H_2-TPR 表征图像

图 7 为 $Pd/Ce/Al_2O_3$ 催化剂高分辨透射电子显微镜(HRTEM)图像,图中标注了不同晶面的晶格条纹,进一步确认了 Pd、PdO、CeO_2、Ce 和 Al_2O_3 的存在。γ-Al_2O_3 作为载体,提供了一个支持框架。Pd 和 PdO 颗粒均匀分布在催化剂表面,显示出良好的分散性,Pd 和 PdO 的存在表明 Pd 在氧化状态和金属状态之间的转换可能对催化性能有重要影响。CeO_2 和 Ce 颗粒也分布在催化剂表面,可能与 Pd 和

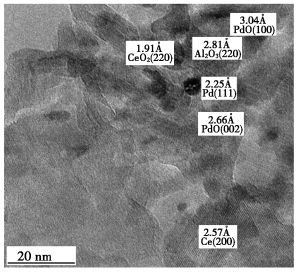
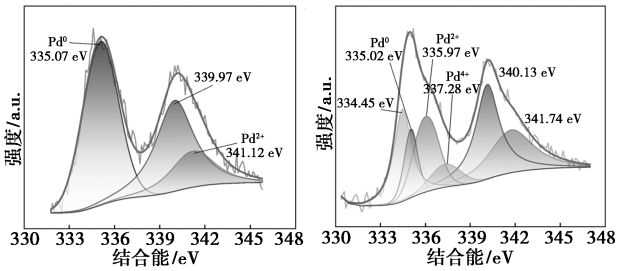


图 7 $Pd/Ce/Al_2O_3$ 催化剂 HRTEM 图

PdO 颗粒相互作用,CeO_2 和 Ce 的存在有助于催化剂在氧化还原反应中的稳定性和活性。

图 8 是 Pd/Al_2O_3 和 $Pd/Ce/Al_2O_3$ 催化剂的 X 射线光电子能谱(XPS)图谱。对于 Pd/Al_2O_3,其中 Pd^0 的 Pd $3d_{5/2}$峰在 335.07 eV,Pd $3d_{3/2}$峰在 339.97 eV,这表明催化剂中存在金属态的钯。Pd^{2+} 的 Pd $3d_{5/2}$峰在图谱中没有寻找到,这可能是由于 Pd^{2+} 含量较低导致 Pd $3d_{5/2}$ 峰不明显。Pd $3d_{3/2}$ 峰在 341.12 eV,表明催化剂中存在 Pd 的 +2 价氧化态,根据 TEM 的结果分析为 PdO。对于 $Pd/Ce/Al_2O_3$ 催化剂的 XPS 图谱,除了 Pd^0 和 Pd^{2+},Pd^{4+} 的 Pd $3d_{5/2}$峰在 337.28 eV,这表明存在 Pd 的+4 价氧化态,可能是 PdO_2。334.45 eV 的峰可能是由于某种低价态的 Pd,或者是由于样品表面某种特殊配位环境导致的[25-26]。



(a)Pd/Al_2O_3 催化剂　　(b)$Pd/Ce/Al_2O_3$ 催化剂

图 8　XPS 图谱

Pd^0 的结合能在两个样品中基本一致,表明金属态的 Pd 在两种催化剂中存在。Ce 的存在抑制了 Pd^0 的形成,而 PdO 在燃烧过程中的活性高于 Pd^0,这也可能是导致 $Pd/Ce/Al_2O_3$ 催化剂活性更高的原因,因为 Pd^0 在反应过程中的活性较低[21]。Pd^{4+} 仅在 $Pd/Ce/Al_2O_3$ 中出现,表明 Ce 的引入可能促进了 Pd 的高氧化态的形成。通过对比 Pd/Al_2O_3 和 $Pd/Ce/Al_2O_3$ 催化剂的 XPS 图谱,可以看出 Ce 的引入对 Pd 的化学环境产生了显著影响,特别是促进了 Pd^{4+}的形成。使得催化剂在较低电压下即可表现出较高的 CH_4 转化率和 CO_2 选择性。在高电压和低流量条件下,CeO_2 的氧空位和氧化还原特性进一步增强了催化剂的完全氧化能力,几乎完全消除了 CO 生成,使得 CO_2 选择性接近 100%。这种变化可能反映了催化剂表面化学环境的调整以及潜在的催化性能的提升。进一步的量化分析和模拟试验研究将有助于深入理解这种协同效应及其对催化剂性能的影响。

4　结论

本研究致力于探索 LTP 协同 Pd/Ce 催化剂处理 CH_4 的可行性和实际效果。通过系统的实验和表征分析,得到以下主要结论。

(1)低温等离子体与催化剂的协同作用显著提高了甲烷的转化率和 CO_2 选择性,在 LTP 条件下,Pd/Al_2O_3 和 $Pd/Ce/Al_2O_3$ 催化剂的甲烷转化率和 CO_2 选择性均显著高于纯 $\gamma-Al_2O_3$ 催化剂。Pd/Al_2O_3 在较低电压下(1~2 kV)表现出较高的甲烷转化率,而 $Pd/Ce/Al_2O_3$ 在较高电压下(≥8 kV)显示出更优的转化性能和 CO_2 选择性。

(2)Pd 和 Ce 的引入显著提高了催化剂在较低电压下的甲烷转化率,但随着电压的增加,$Pd/Ce/Al_2O_3$ 催化剂表现出更高的 CO_2 选择性,这可能是由于 CeO_2 的引入增强了催化剂的完全氧化能力,减少了中间产物 CO 的生成。H_2-TPR 结果显示,$Pd/Ce/Al_2O_3$ 催化剂在较低温度下的还原峰表明 CeO_2 的引入降低了 PdO 的还原温度,增强了催化剂的氧化还原能力。

(3)催化剂表征揭示了 Pd 和 Ce 的协同作用机制,XRD 和 TEM 分析表明,Pd 和 Ce 均成功负载在 $\gamma-Al_2O_3$ 载体上,且在催化剂表面分布均匀。BET 结果显示,尽管负载 Pd 和 Ce 后比表面积有所减小,但孔径的增大和孔体积的相对稳定确保了良好的传质性能和活性物种的生成。XPS 结果表明,Ce 的引入促进了 Pd 的高氧化态形成(Pd^{4+}),增强了催化剂在低电压下的甲烷转化率和 CO_2 选择性。

$Pd/Ce/Al_2O_3$ 催化剂在 LTP 条件下的优异表现,特别是在高电压和低流量条件下表现出的高 CH_4 转化率和高 CO_2 选择性,显示出其在甲烷安全降解处理中的潜力。本研究为 LTP 协同催化剂在低温甲烷降解中的应用提供了新的技术路径和理论依据,未来的研究可以进一步优化催化剂配方和反应条件,以实现更高效、更经济的甲烷处理。

参考文献

[1] Demarty M,Bastien J.GHG emissions from hydroelectric reservoirs in tropical and equatorial regions:Review of 20 years of CH_4 emission measurements[J].Energy Policy,2011,39(7):4197-4206.

[2] 胡志军,袁杰,陈斌,等.新污染物二氯甲烷废气排放标准与治理技术的进展[J].环境科技,2025,38(2):73-78.

[3] Gelin P,Primet M.Complete oxidation of methane at low temperature over noble metal based catalysts:A review[J].Applied Catalysis B:Environmental,2002,39(1):1-37.

[4] He L,Fan Y,Bellettre J,*et al*.A review on catalytic methane combustion at low temperatures:Catalysts,mechanisms,reaction conditions and reactor designs[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2020,119:109589.

[5] Zhang Y, Chu W, Cao W, *et al*. Thermocatalytic decomposition of methane: A review on carbon-based catalysts [J]. ACS Omega, 2023, 8(32): 28945-28967.
[6] Cai C, Zhang X, Wu M, *et al*. Roles and opportunities for microbial anaerobic oxidation of methane in natural and engineered systems [J]. Energy & Environmental Science, 2023, 14(9): 4803-4830.
[7] Keudell A von, Gathen V S der. Foundations of low-temperature plasma physics—an introduction [J]. Plasma Sources Science and Technology, IOP Publishing, 2017, 26(11): 113001.
[8] Tu X, Whitehead J C, Nozaki T. Plasma Catalysis: Fundamentals and Applications [M]. Cham: Springer International Publishing, 2019.
[9] Marques R, Da Costa S, DA Costa P. Plasma-assisted catalytic oxidation of methane: On the influence of plasma energy deposition and feed composition [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2008, 82(1): 50-57.
[10] Nozaki T, Hattori A, OkazakiI K. Partial oxidation of methane using a microscale non-equilibrium plasma reactor [J]. Chemical Engineering Science, 2004, 98(4): 607-616.
[11] Baylet A, Marecot P, Duprez D, *et al*. Synergetic effect of plasma/catalysis hybrid system for CH_4 removal [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2012, 113/114: 31-36.
[12] Broer S, Hammer T. Selective catalytic reduction of nitrogen oxides by combining a non-thermal plasma and a V_2O_5-WO_3/TiO_2 catalyst [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2000, 28(2): 101-111.
[13] Ogata A, Einaga H, Kabashima H, *et al*. Effective combination of nonthermal plasma and catalysts for decomposition of benzene in air [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2003, 46(1): 87-95.
[14] Van Durme J, Dewulf J, Leys C, *et al*. Combining non-thermal plasma with heterogeneous catalysis in waste gas treatment: A review [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2008, 78(3): 324-333.
[15] Abedi K, Ghorbani-Shahna F, Jaleh B, *et al*. Enhanced performance of non-thermal plasma coupled with TiO_2/GAC for decomposition of chlorinated organic compounds: Influence of a hydrogen-rich substance [J]. Journal of Environmental Health Science and Engineering, 2014, 12(1): 119.
[16] Da Costa P, Marques R, Da Costa S. Plasma catalytic oxidation of methane on alumina-supported noble metal catalysts [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2008, 84(1): 214-222.
[17] Lee H, Lee D H, Song Y H, *et al*. Synergistic effect of non-thermal plasma-catalysis hybrid system on methane complete oxidation over Pd-based catalysts [J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 259: 761-770.
[18] Yao S, Chen Z, Weng S, *et al*. Mechanism of CO_2-formation promotion by Au in plasma-catalytic oxidation of CH_4 over Au/γ-Al_2O_3 at room temperature [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 373: 698-704.
[19] Yue B, Zhou R, Wang Y, *et al*. Effect of rare earths (La, Pr, Nd, Sm and Y) on the methane combustion over Pd/Ce-Zr/Al_2O_3 catalysts [J]. Applied Catalysis A: General, 2005, 295(1): 31-39.
[20] Xiao L, Sun K, Xu X, *et al*. Low-temperature catalytic combustion of methane over Pd/CeO_2 prepared by deposition-precipitation method [J]. Catalysis Communications, 2005, 6(12): 796-801.
[21] Fan X, Wang F, Zhu T, *et al*. Effects of Ce on catalytic combustion of methane over Pd-Pt/Al_2O_3 catalyst [J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(3): 507-511.
[22] Colussi S, Trovarelli A, Groppi G, *et al*. The effect of CeO_2 on the dynamics of Pd-PdO transformation over Pd/Al_2O_3 combustion catalysts [J]. Catalysis Communications, 2007, 8(8): 1263-1266.
[23] Hinde P, Demidyuk V, Gkelios A, *et al*. Plasma catalysis: A review of the interdisciplinary challenges faced: Rrealising the potential of plasma catalysis on a commercial scale [J]. Johnson Matthey Technology Review, 2020, 64(2): 138-147.
[24] Kuhn H J, Braslavsky S E, Schmidt R. Chemical actinometry (IUPAC Technical Report) [J]. Pure and Applied Chemistry, De Gruyter, 2004, 76(12): 2105-2146.
[25] Zhang Y, Yang J, Ge R, *et al*. The effect of coordination environment on the activity and selectivity of single-atom catalysts [J]. Coordination Chemistry Reviews, 2022, 461: 214493.
[26] Li S, Liu J, Yin Z, *et al*. Impact of the coordination environment on atomically dispersed Pt catalysts for oxygen reduction reaction [J]. ACS Catalysis, American Chemical Society, 2020, 10(1): 907-913.■

中化高纤首次参与 EcoVadis 评级斩获银牌

近日，中化高纤首次参与 EcoVadis 企业社会责任评级，以 73 分的综合得分摘得银牌，在全球 10 万余家参评企业中位列前 15%。

EcoVadis 是全球权威的企业可持续发展评级平台。评级报告显示，中化高纤在环境、劳工与人权、商业道德和可持续采购四大维度均表现优异，其中环境和劳工与人权两项得分超过全球 75% 的参评企业，充分展现出其在绿色运营、社会责任等方面的卓越实践。

近年来，中化高纤将可持续发展理念深度融入企业日常经营，围绕“全产业链”“全家族”“全生命周期”的产品运营理念，以绿色化、智能化、数字化研发为支撑，持续强化企业可持续竞争力，向着“全球领先的高性能纤维材料供应商”目标稳步迈进。 （中化高纤）