

原子层沉积制备 Pt/CeO₂ 催化剂及其低温 CO 氧化性能的研究

孟甜甜^{1,2}, 赵世超^{1*}, 陈朝秋¹, 梁浩杰^{1,2}, 覃勇^{1*}

(1. 中国科学院山西煤炭化学研究所, 煤转化国家重点实验室, 山西 太原 030001;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对 CeO₂ 负载 Pt 的催化体系存在 CO 氧化转化温度高等问题, 利用原子层沉积技术制备的 Pt/CeO₂ 催化剂可有效降低 CO 氧化温度, 并通过改变 Pt 的沉积循环次数和预处理条件调控 CO 氧化性能, 尤其是 H₂ 气氛预处理之后对 CO 完全氧化的温度可低至 60℃。通过 XRD、ICP、TEM、XPS、H₂-TPR 等手段对催化剂进行表征, 结果表明, Pt 高度分散在 CeO₂ 纳米棒表面, Pt 和 CeO₂ 之间具有强的金属-载体相互作用, 极大地提高了其对 CO 氧化反应的催化性能。

关键词: Pt/CeO₂; CO 氧化; 原子层沉积

中图分类号: O643.38

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2020)10-0184-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2020.10.038

Preparation of Pt/CeO₂ catalyst via atomic layer deposition and its application in oxidation of CO at low temperature

MENG Tian-tian^{1,2}, ZHAO Shi-chao^{1*}, CHEN Chao-qi¹, LIANG Hao-jie^{1,2}, QIN Yong^{1*}

(1. State Key Laboratory of Coal Conversion, Institute of Coal Chemistry of Chinese Academy of Sciences, Taiyuan 030001, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Both the catalytic oxidation of CO and the development of catalysts for oxidation of CO at low temperature are very significant for basic research and industrial applications. Pt/CeO₂ catalysts that are prepared via atomic layer deposition method can efficiently drop the temperature at which CO can be oxidized. The catalytic performance of Pt/CeO₂ can be improved effectively by tuning the cycles of Pt ALD and pretreatment conditions. Especially, the temperature for oxidation of CO can be as low as 60℃ after the catalysts are pretreated in a hydrogen atmosphere. The catalysts are characterized by XRD, ICP, TEM, XPS and H₂-TPR. It is found that Pt has been highly dispersed on the surface of CeO₂ nanorods, and there are strong interactions between Pt and CeO₂. After pretreated by hydrogen, the adsorption of CO by Pt can be enhanced, which can improve its catalytic performance for oxidation of CO.

Key words: Pt/CeO₂; oxidation of CO; atomic layer deposition

CO 催化氧化反应作为典型的多相催化反应, 在基础学科和工业应用中均受到很大关注, 特别是低温 CO 氧化在 CO 气体探测、呼吸气体净化、CO₂ 激光气体纯化等领域具有广泛地应用^[1-5]。然而, 以汽车尾气和工业废气为主的煤炭和天然气等化石燃料的不完全燃烧排放出大量有毒的 CO 气体, 对人类和环境构成了严重威胁, 因此, 对 CO 进行有效处理并探究其催化氧化机制具有重要的意义。

大量研究表明, 贵金属催化剂 (Pt、Pd、Au 等) 在 CO 催化氧化中表现出较高的活性, 尤其是 Au 和 Pt 催化剂具有较好的应用前景。然而, Au 基催化剂对于制备方法的要求较高, 在长期的反应和存储过程中容易失活, 不利于实际应用。Pt 基催化剂由于催化活性高且稳定性好, 已经得到普遍应用。影响 Pt 基催化剂催化性能的因素很多, 如催化剂的形

貌、粒径及其分布、载体、预处理条件等^[6-10]。因此, 合理地设计催化剂, 实现对其尺寸及结构形貌的高度可控, 并对其进行适当预处理, 可提高低温条件下 CO 氧化性能并揭示其催化氧化机制。

目前, 制备 Pt 基催化剂的方法包括浸渍法、胶体法、共沉淀法、沉积沉淀法、微乳法等。然而, 这些方法制备的催化剂粒子尺寸不均一、尺寸分布较宽, 且对多维度结构无法实现高度可控。因此, 构筑新型的尺寸分布均一的 Pt 基催化剂, 有效降低 CO 氧化温度, 提高其催化性能, 是探究影响 CO 催化氧化的关键。

原子层沉积 (Atomic Layer Deposition, ALD) 是一种新型的薄膜/纳米粒子制备技术^[11-13], 具有独特的自限制性, 采用 ALD 可对纳米粒子的组分、负载量、尺寸及其分布进行精确控制, 在载体表面进行

收稿日期: 2019-12-26; 修回日期: 2020-08-07

作者简介: 孟甜甜 (1994-), 女, 硕士研究生, 研究方向为多相催化, ziminsheganshegan@163.com; 覃勇 (1973-), 男, 博士, 研究员, 研究方向为原子层沉积和多相催化, 通讯联系人, qinyong@sxicc.ac.cn。

超低负载,可在原子水平上控制载体表面沉积物种及其生长方式。利用 ALD 技术合成纳米结构催化剂成为近年来催化研究热点,如利用 ALD 控制金属纳米颗粒的生长,制备合金及核壳催化剂,对催化剂表面进行超薄修饰等都有相关报道^[14-16]。而且,ALD 在 CO 催化氧化反应中展现出巨大潜力和应用前景。路军岭等利用 ALD 技术构筑了单位点界面催化剂,Fe₁(OH)_x 物种以原子级形式分散在 Pt 纳米颗粒表面,实现了低温下富氢气氛中微量 CO 的完全氧化,极大地突破了现有的 PROX 催化剂工作温度高且区间窄的局限性,为氢燃料在寒冷条件下、频繁冷启动和连续运行期间避免 CO 中毒提供了一种全新途径。因此,ALD 可作为构筑适用于低温 CO 氧化催化剂的有效手段^[17]。

笔者利用 ALD 技术在 CeO₂ 纳米棒表面沉积不同循环次数的 Pt,制备粒径分布均一的 Pt/CeO₂ 催化剂,并通过对其进行不同条件的预处理以提高低温 CO 催化氧化性能,为设计新型高效的催化剂提供新思路。

1 实验部分

1.1 催化剂的制备

1.1.1 CeO₂ 纳米棒的制备

利用水热法合成 CeO₂ 纳米棒,具体步骤如下:将 52.4 g NaOH 溶解于 140 mL 去离子水中,Ce(NO₃)₃·6H₂O 溶解到 20 mL 去离子水中,然后将 NaOH 溶液缓慢滴入 Ce(NO₃)₃ 溶液中,在室温下持续搅拌 30 min,将混合溶液转移到容积为 1 000 mL 的聚四氟乙烯内衬中,再密封在不锈钢反应釜中,置于 100℃ 鼓风烘箱中保持 24 h,反应结束后降温至室温。将溶液中的固体抽滤并用去离子水洗涤至中性,并用烘箱于 60℃ 干燥 12 h,即可得到 CeO₂ 纳米棒。

1.1.2 Pt/CeO₂ 的制备

利用 ALD 将 Pt 负载在载体 CeO₂ 纳米棒表面。首先,通过超声将 1 g CeO₂ 粉末分散在 100 mL 无水乙醇中,然后取 2 mL 分散液均匀涂覆在石英玻璃片上。室温干燥后,将石英玻璃片转移到 ALD 反应器里面。ALD 过程发生在高温、密闭的腔体中。Pt 的沉积以(三甲基)甲基环戊二烯基铂(MeCpMe₃, strem chemicals, 99%)和 O₃ 为前驱体, N₂ 为载体,在 270℃ 进行沉积。MeCpMe₃ 的脉冲、憋气和抽气时间分别为 0.7、15 s 和 50 s。O₃ 的脉冲、憋气和抽气时间分别为 0.6、12 s 和 30 s。所制备的负载型

Pt 基催化剂表示为 xPt/CeO₂ (x 为 Pt 的沉积循环次数)。

1.2 催化剂表征

利用德国 Bruker 公司生产的 D8 Advance 型 X 射线衍射仪(XRD)进行催化剂的表征,实验条件为 Cu 靶 Kα 衍射源,扫描范围 2θ 为 5~90°。利用天津先权公司生产的 TP-5080 全自动多相吸附仪进行 H₂-TPD 测试,50 mg 样品放入石英管中,用 10% H₂/N₂ 吹扫直至基线平稳,然后以 10℃/min 的速率升温至 800℃,得到还原曲线。利用 JEOL-2100F 型高分辨场发射透射电子显微镜(HRTEM)表征载体形貌及其尺寸分布。利用 Talos F200X 型能谱仪得到催化剂的元素分布图。利用英国 Kratos 公司生产的 AXIS ULTRA DLD 多功能光电子能谱仪表征样品表面元素组成及其化学状态。

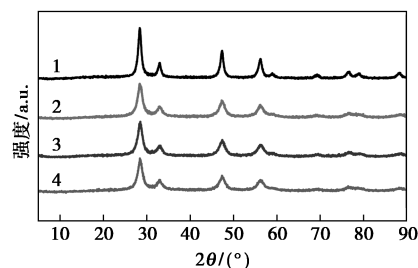
1.3 催化剂评价

利用微型常压固定床进行性能评价,称取 40 mg 催化剂和 360 mg 40~60 目的石英砂混合均匀后装入内径为 6 mm 的石英管中,催化剂两端用石英棉固定。在 10% H₂/N₂ 气氛下,150℃ 预处理 0.5 h,然后降温至 -20℃,再将反应气路切换为 0.5% CO+0.5% O₂+99% He 测试其催化性能。反应温度逐渐升高,直至可使 CO 完全转化,并稳定 30 min。利用气相色谱(Agilent-7820A 型,色谱柱为 TDX-1,检测器为 TCD 检测器)定时在线分析出口气体中 CO、O₂、CO₂ 的含量。

2 结果与讨论

2.1 XRD 表征

CeO₂ 纳米棒载体和 Pt/CeO₂ 催化剂的 XRD 谱图如图 1 所示。由图 1 中可以看出,谱图中出现了 CeO₂ {111} 的特征衍射峰(JCPDS No.43-1002)。对比 CeO₂ 和 xPt/CeO₂ (x=1,7,15) 的 XRD 谱图,xPt/CeO₂ 催化剂的图谱几乎与 CeO₂ 载体一致,没有发现明显的 Pt 或 PtO_x 的衍射峰,证明 Pt 的负载量较低,且 Pt 高度分散在 CeO₂ 纳米棒载体表面。



1—CeO₂; 2—1Pt/CeO₂; 3—7Pt/CeO₂; 4—15Pt/CeO₂

图 1 载体和催化剂的 XRD 图谱

2.2 TEM 和 EDS 表征

利用 TEM 分析所制备的 CeO₂ 纳米棒、Pt/CeO₂ 催化剂的形貌及元素分析结果如图 2 所示。

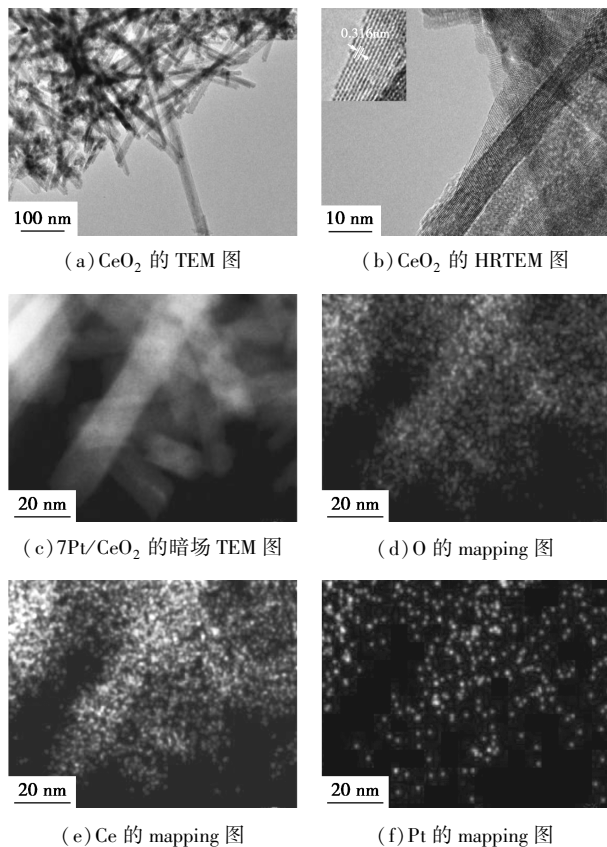


图 2 CeO₂ 的 TEM 图、7Pt/CeO₂ 的 TEM 以及相应的元素扫描图谱

由图 2(a) 中可以看出, CeO₂ 纳米棒直径约为 20 nm, 平均长度为 300 nm, 且长径比均一。由图 2(b) 中可以看出, CeO₂ 的晶面间距为 0.316 nm, 对应 CeO₂ 的 {111} 晶面, 与 XRD 结果相符合。为了进一步说明 Pt 的分布情况, 利用 HRTEM 和 EDS 对 7Pt/CeO₂ 催化剂的元素分布进行进一步分析。由图 2(c) 中可以看出, 在 CeO₂ 纳米棒表面很难观察到 Pt, 但从图 2(f) 中可以非常清楚地观察到 Pt 的元素分布, 进一步证明 Pt 粒径非常小, 且高度分散在 CeO₂ 纳米棒表面, 该结果与 XRD 结果一致且相互对应。

2.3 ICP 表征

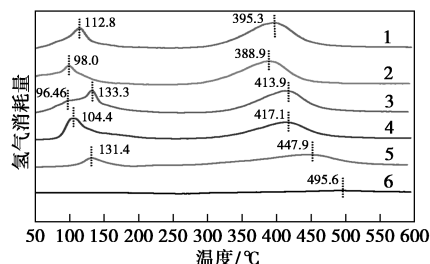
利用电感耦合等离子体-原子发射光谱 (ICP-OES) 测试得到 7Pt/CeO₂ 催化剂的 Pt 负载量如表 1 所示。由表 1 中可以看出, 7Pt/CeO₂ 催化剂的 Pt 负载量为 2.66%, 说明 Pt 成功负载在 CeO₂ 表面, 结合 XRD 和 TEM 分析, 更进一步证明 Pt 高度分散在 CeO₂ 载体表面。

表 1 不同 Pt 循环次数催化剂的负载量

催化剂	1Pt/CeO ₂	7Pt/CeO ₂	15Pt/CeO ₂
w(Pt)/%	0.626	2.66	6.13

2.4 H₂-TPR 表征

对 xPt/CeO₂ 进行 H₂-TPR 表征分析, 结果如图 3 所示。



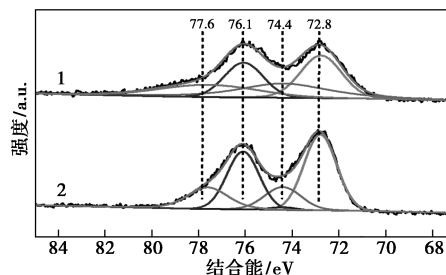
1—15Pt/CeO₂; 2—10Pt/CeO₂; 3—7Pt/CeO₂; 4—3Pt/CeO₂; 5—1Pt/CeO₂; 6—CeO₂

图 3 xPt/CeO₂ 的 H₂-TPR 图谱

由图 3 中可以看出, 在 100~150℃ 主要为 Pt 的还原峰, 400~450℃ 之间主要为 CeO₂ 的还原峰, 而载体 CeO₂ 的还原峰为 500℃ 左右, 因此在 CeO₂ 表面负载 Pt 之后, CeO₂ 的还原温度降低。随着 Pt 沉积次数的增加, CeO₂ 还原温度逐渐降低, 这是由于氢溢流效应所导致的, 该结果说明金属 Pt 和载体 CeO₂ 之间具有强的相互作用。

2.5 XPS 表征

为了分析不同预处理方式对催化剂电子状态的影响, 对于 7Pt/CeO₂ 进行 2 种预处理: 在空气中 300℃ 直接煅烧处理 4 h; 在空气中 300℃ 煅烧 4 h, 然后在 10% H₂/N₂ 气氛中 150℃ 处理 0.5 h, 结果如图 4 所示。由图 4 中可以看出, 7Pt/CeO₂ 在空气中 300℃ 煅烧处理之后, Pt⁴⁺ 占比约为 46.8%, 继续用 10% H₂/N₂ 气氛处理后, Pt⁴⁺ 的比例减小至 29.1%。



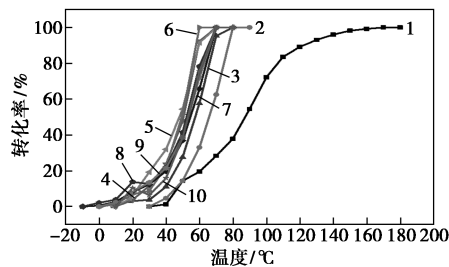
1—7Pt/CeO₂ under air calcination; 2—7Pt/CeO₂ under air calcination and H₂ reduced

图 4 7Pt/CeO₂ 进行不同预处理之后 Pt 4f 的 XPS 图谱

表明 7Pt/CeO₂ 经过还原气氛处理后, Pt 的氧化程度降低, 有利于增强对 CO 的吸附, 从而提高其催化 CO 氧化性能。

2.6 催化剂性能评价

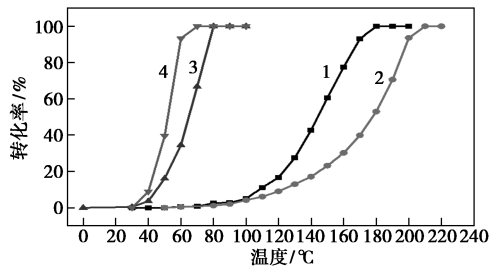
催化剂的性能评价结果如图 5 所示。由图 5 (a) 中可以看出, 对于 x Pt/CeO₂ 催化剂, 随着 Pt 沉积次数的增加, 其 CO 氧化性能呈现火山型趋势, 当 Pt 的沉积次数小于 7 时, 其催化性能随 Pt 质量分数的增加而增加; 当 Pt 的沉积次数大于 7 时, 其催化性能随 Pt 沉积次数的增加而稍有下降; Pt 的沉积循



1—1Pt/CeO₂; 2—2Pt/CeO₂; 3—3Pt/CeO₂; 4—5Pt/CeO₂;
5—6Pt/CeO₂; 6—7Pt/CeO₂; 7—8Pt/CeO₂; 8—10Pt/CeO₂;
9—12Pt/CeO₂; 10—15Pt/CeO₂

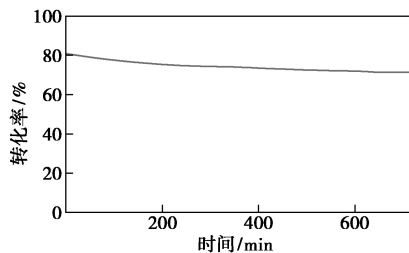
(a) x Pt/CeO₂ 催化 CO 氧化性能比较

注: 测试条件: 40 mg 催化剂, 150 °C, 10% H₂/N₂ 预处理 0.5 h 后降温至 -20 °C, 然后升温进行性能测试, 所采用的气体为 0.5% CO+0.5% O₂+99% He。



1— x Pt/CeO₂ 直接进行测试; 2— x Pt/CeO₂ 在空气中 300 °C 煅烧 3 h; 3— x Pt/CeO₂ 在 10% H₂/N₂ 气氛中 150 °C 处理 0.5 h;
4— x Pt/CeO₂ 先在空气中 300 °C 煅烧 3 h, 后在 10% H₂/N₂ 气氛中 150 °C 处理 0.5 h

(b) 7Pt/CeO₂ 在不同预处理条件下的催化性能



(c) 7Pt/CeO₂ 的稳定性测试

注: 反应温度为 50 °C。

环为 7 时, 其催化性能最好, 当温度升到 60 °C 时, CO 即可完全转化, 结合其负载量可得 7Pt/CeO₂ 的 TOF 值为 0.28 min⁻¹。而且, 由图 5 (b) 中可以看出, 对于 7Pt/CeO₂, 相比不预处理或者进行 O₂ 预处理, H₂ 预处理之后的催化性能明显提高。由图 5 (c) 中可以看出, 在 50 °C 测试 7Pt/CeO₂ 的稳定性, 连续测试 720 min, CO 转化率由 81.3% 降低到 71.5%, 稳定性良好。与文献 [18-20] 中的报道相比, 所制备的 x Pt/CeO₂ 催化剂的 CO 氧化性能优异。

3 结论

利用原子层沉积技术制备不同循环次数的 Pt/CeO₂ 催化剂, 并进行不同气氛条件的预处理, 测试其对 CO 氧化的催化性能。结果表明, Pt 高度分散在 CeO₂ 表面, 金属 Pt 和载体 CeO₂ 之间存在较强的相互作用, 从而可显著提高 Pt/CeO₂ 的催化性能, 其中 7Pt/CeO₂ 的催化性能最佳, 在 60 °C 的低温条件下即可实现对 CO 的完全转化。而且, 对于 7Pt/CeO₂, H₂ 预处理的催化性能明显优于 O₂ 预处理或者不进行预处理, 证明 Pt 的电子状态对 Pt/CeO₂ 的催化性能有较大影响。

参考文献

- [1] Lin J, Wang A, Qiao B, *et al.* Remarkable performance of Ir₁/FeO_x single-atom catalyst in water gas shift reaction [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2013, 135: 15314-15317.
- [2] Freund H J, Meijer G, Scheffler M, *et al.* CO oxidation as a prototypical reaction for heterogeneous processes [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2011, 3: 10064-10094.
- [3] Xu H, Fu Q, Yao Y, *et al.* Highly active Pt-Fe bicomponent catalysts for CO oxidation in the presence and absence of H₂ [J]. *Energy and Environmental Science*, 2012, 5(4): 6313-6320.
- [4] Ma Z, Yin H, Dai S. Performance of Au/M_xO_y/TiO₂ Catalysts in water-gas shift reaction [J]. *Catalysis Letters*, 2010, 136: 83-91.
- [5] Xie X, Li Y, Liu ZQ, *et al.* Low-temperature oxidation of CO catalysed by Co₃O₄ nanorods [J]. *Nature*, 2009, 458(7239): 746-749.
- [6] Qiao B, Wang A, Yang X, *et al.* Single-atom catalysis of CO oxidation using Pt₁/FeO_x [J]. *Nature Chemistry*, 2011, 3(8): 634-641.
- [7] An N, Li S, Duchesne P N, *et al.* Size effects of platinum colloid particles on the structure and CO oxidation properties of supported Pt/Fe₂O₃ catalysts [J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2013, 117(41): 21254-21262.
- [8] Liu X Y, Wang A, Zhang T, *et al.* Catalysis by gold: New insights into the support effect [J]. *Nano Today*, 2013, 8(4): 403-416.
- [9] An K, Alayoglu S, Musselwhite N, *et al.* Enhanced CO oxidation rates at the interface of mesoporous oxides and Pt nanoparticles [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2013, 135(44): 16689-16696.

图 5 催化剂性能评价结果

(下转第 192 页)

- [9] Wu S Y, Ladan R B, Zhang J, *et al.* Strain sensors with adjustable sensitivity by tailoring the microstructure of graphene aerogel/PDMS nanocomposites [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8: 24853–24861.
- [10] Wang Y, Yang R, Shi Z, *et al.* Super-elastic graphene ripples for flexible strain sensors [J]. *ACS Nano*, 2011, 5: 3645–3650.
- [11] Gong S, Cheng W. One-dimensional nanomaterials for soft electronics [J]. *Advanced Electronic Materials*, 2017, 3(3): 1600314.
- [12] Amjadi M, Pichitpajongkit A, Lee S, *et al.* Highly stretchable and sensitive strain sensor based on silver nanowire-elastomer nanocomposite [J]. *ACS Nano*, 2014, 8: 5154–5163.
- [13] Roh E, Hwang B U, Kim D, *et al.* Stretchable, transparent, ultrasensitive, and patchable strain sensor for human-machine interfaces comprising a nanohybrid of carbon nanotubes and conductive elastomers [J]. *ACS Nano*, 2015, 9(6): 6252–6261.
- [14] Jin H, Dong Y, Huan L, *et al.* Mn₃O₄/RGO/SWCNT hybrid film for all-solid-state flexible supercapacitor with high energy density [J]. *Electrochimica Acta*, 2018, 283: 174–182.
- [15] Wang Y, Wang L, Yang T, *et al.* Wearable and highly sensitive graphene strain sensors for human motion monitoring [J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24: 4666–4670.
- [16] Liu X, Tang C, Du X, *et al.* A highly sensitive graphene woven fabric strain sensor for wearable wireless musical instruments [J]. *Materials Horizons*, 2017, 4: 477–486.
- [17] Kim J Y, Ji S, Jung S, *et al.* 3D printable composite dough for stretchable, ultrasensitive and body-patchable strain sensors [J]. *Nanoscale*, 2017, 9: 11035–11046.
- [18] Xiao X, Yuan L, Zhong J, *et al.* High-strain sensors based on znO nanowire/polystyrene hybridized flexible films [J]. *Advanced Materials*, 2011, 23: 5440–5444.
- [19] Lin Z, Lou C, Pan Y, *et al.* Conductive fabrics made of polypropylene/multi-walled carbon nanotube coated polyester yarns: Mechanical properties and electromagnetic interference shielding effectiveness [J]. *Composite Science and Technology*, 2017, 141: 74–82.
- [20] Li X, Hu H, Hua T, *et al.* Wearable strain sensing textile based on one-dimensional stretchable and weavable yarn sensors [J]. *Nano Research*, 2018, 11(11): 5799–5811.
- [21] Liu Z, Mo F, Li H, *et al.* Advances in flexible and wearable energy-storage textiles [J]. *Small Methods*, 2018, 2: 1800124.
- [22] Du D, Li P, Ouyang J. Graphene coated nonwoven fabrics as wearable sensors [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, 4: 3224–3230.
- [23] Yin B, Wen Y, Hong T, *et al.* Highly stretchable ultrasensitive, and wearable strain sensors based on facilely prepared reduced graphene oxide woven fabrics in an ethanol flame [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9: 32054–32064.
- [24] Yuan W, Zhou Q Q, Li Y R, *et al.* Small and light strain sensors based on graphene coated human hairs [J]. *Nanoscale*, 2015, 7: 6361–6365.
- [25] Guang M C, Meng Y Y, Jun J P, *et al.* Large-scale production of highly stretchable CNT/cotton/spandex composite yarn for wearable applications [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 38: 32726–32735.
- [26] Zhao J, Pei S, Ren W, *et al.* Efficient preparation of large-area graphene oxide sheets for transparent conductive films [J]. *ACS Nano*, 2010, 4: 5245–5252. ■

(上接第 187 页)

- [10] Zhao K, Tang H, Qiao B, *et al.* High activity of Au/ γ -Fe₂O₃ for CO oxidation; Effect of support crystal phase in catalyst design [J]. *ACS Catalysis*, 2015, 5(6): 3528–3539.
- [11] George S M. Atomic layer deposition; An overview [J]. *Chemical Reviews*, 2010, 110(1): 111–131.
- [12] Gao Z, Dong M, Wang G, *et al.* Multiply confined nickel nanocatalysts produced by atomic layer deposition for hydrogenation reactions [J]. *Angewandte Chemie-International Edition*, 2015, 54(31): 9006–9010.
- [13] Zhang B, Qin Y. Interface tailoring of heterogeneous catalysts by atomic layer deposition [J]. *ACS Catalysis*, 2018, 8(11): 10064–10081.
- [14] Enterkin J A, Sethapun W, Elam J W, *et al.* Propane oxidation over Pt/SrTiO₃ nanocuboids [J]. *ACS Catalysis*, 2011, 1(6): 629–635.
- [15] Lu J, Fu B, Kung M C, *et al.* Coking- and sintering-resistant palladium catalysts achieved through atomic layer deposition [J]. *Science*, 2012, 335(6073): 1205–1208.
- [16] Johansson A C, Larsen J V, Verheijen M A, *et al.* Electrocatalytic activity of atomic layer deposited Pt-Ru catalysts onto N-doped carbon nanotubes [J]. *Journal of Catalysis*, 2014, 311: 481–486.
- [17] Cao L, Liu W, Luo Q, *et al.* Atomically dispersed iron hydroxide anchored on Pt for preferential oxidation of CO in H₂ [J]. *Nature*, 2019, 565(7741): 631–635.
- [18] Ye Xuxu, Wang Hengwei, Lin Yue, *et al.* Insight of the stability and activity of platinum atoms on ceria [J]. *Nano Research*, 2019, 12(6): 1401–1409.
- [19] Nie Lei, Mei Donghai, Xiong Haifeng, *et al.* Activation of surface lattice oxygen in single-atom Pt/CeO₂ for low-temperature CO oxidation [J]. *Science*, 2017, 358: 1419–1423.
- [20] Xavier Isidro Pereira-Hernandez, Andrew Delariva, Valery Muravev, *et al.* Tuning Pt-CeO₂ interactions by high-temperature vapor-phase synthesis for improved reducibility of lattice oxygen [J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 1358–1367. ■