

FeO 薄膜负载的 Pt 纳米粒子

马 腾¹, 王亚琴^{2*}

(1. 沈阳农业大学 理学院, 沈阳 110866; 2. 沈阳理工大学 环境与化工学院, 沈阳 110159)

摘 要:研究了 FeO/Pt(111)体系中 FeO 薄膜及其负载的 Pt 纳米粒子的制备和热稳定性。在 Pt(111) 表面制备出完整的单层 FeO 薄膜, 并作为载体制备 2~3 nm 粒径均一且分散均匀的纳米 Pt 粒子, 形成 Pt/FeO/Pt(111)模型催化剂。氧气气氛(1.1×10^{-6} mbar)以及不同温度的退火处理并不能有效地促进 Pt 粒子在 FeO 薄膜表面的分散, 也不利于形成全同有序的 Pt 纳米粒子阵列。单层 FeO 表面负载的 Pt 纳米粒子已能够符合相关模型催化剂研究工作的需要, 将成为下一步的工作基础。

关键词:金属材料; FeO 薄膜; Pt 纳米粒子; 模型催化剂

中图分类号: TG146.3⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2014)04-0006-07

Pt Nanoparticles Supported on FeO Thin Film

MA Teng¹, WANG Yaqin^{2*}

(1. College of Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;

2. School of Environmental and Chemical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: FeO film and supported Pt nanopartilces were prepared and their thermo-stability was also investigated in the present studies. The preparative process consisted of two steps. The atomic monolayer of FeO film was firstly grown on Pt(111) crystal surface, and then Pt nanoparticles was deposited on the FeO film in variant settings. The Pt nanoparticles supported on FeO were around 2~3 nanometer in size and dispersed evenly on the surface, forming a Pt/FeO/Pt(111) model catalyst. Treatment in 1.1×10^{-6} mbar O₂ and at different annealing temperatures could not promote the dispersion of Pt nanoparticles on FeO film effectively or did not facilitate the formation of arrays of uniform nanoparticles. The Pt nanoparticles supported on FeO thin film display potential application as a novel platinum-based catalyst.

Key words: metallic material; FeO film; Pt nanoparticle; model catalyst

现代社会的快速工业化引发了对能源的大量需求, 从而导致传统的石油、天然气等化石能源的可提供量面临枯竭。使用 H₂ 的燃料电池由于效率高, 环境污染小等特点, 是理想的动力能源方式, 有望在未来交通运输行业(汽车)取代传统的内燃式发动机。然而, 原料氢气中的微量 CO 成为影响由各种化石燃料为燃料电池提供便捷、廉价氢气的关键问题。目前在解决 CO 毒化问题的途径中, CO 优先氧化法(CO Preferential Oxidation)有较多的优势, 工

业化的前景较好。

CO 优先氧化反应的催化剂多种多样^[1], 主要是 Pt 系、Au、Ag 等贵金属纳米粒子^[2-4]或过渡金属氧化物 Co₃O₄^[5]等。在目前报道的 CO 优先氧化 Pt 基催化剂中, Fe-Pt 双金属催化剂以其低温反应活性, 选择性和稳定性引起了人们的关注^[6-10]。然而对于 Fe-Pt 催化剂的 CO 选择氧化的反应机理和过程并没有一个清晰的认识, 这可能是受到实用催化剂研究方法的限制。特别是对于 Fe-Pt 双金属催化剂的活

收稿日期: 2013-09-02

修回日期: 2014-10-23

第一作者: 马 腾, 男, 副教授, 研究方向: 表面化学与催化、纳米材料。E-mail: mateng77@126.com

*通讯作者: 王亚琴, 女, 副教授, 研究方向: 纳米材料与生物传感器。E-mail: yaqin1200@sina.com

性结构,存在着许多的争议,主要集中在 Fe 的价态是金属态还是氧化态以及 Fe、Pt 两种组分在催化剂表面的分布。争议可能是由于 Fe-Pt 双金属催化剂制备方法的差异造成的,与实际应用环境也有很大关系,并且会随着环境气氛的改变而发生变化^[11-12]。

本文以研究 Fe-Pt 催化剂上 CO 氧化反应及优先氧化机理为目的,对 FeO/Pt(111)负载的 Pt 纳米粒子模型催化剂体系(Pt/FeO/Pt(111))进行探索,主要工作集中在 Pt 纳米粒子的可控制备方面,特别是在超高真空和氧气气氛存在的条件下在 FeO 薄膜表面是否具有生成全同纳米粒子的可行性研究。

1 实验方法与仪器

本文的实验工作是在德国 Omicron 公司制造的一套超高真空多功能纳米探针系统上完成的。该系统正常工作时系统的基压保持在 $(1.0\sim3.0)\times10^{-10}$ mbar。系统由样品制备室、能谱分析室和显微镜室 3 个主要的真空腔体组成,腔体之间通过样品传递室实现相互隔离和联接,可在不破坏真空的情况下自由地传送样品。另外高压反应室挂接在样品制备室的一侧,并安装了自制的电子束轰击加热样品台,样品的最高处理温度可以高达 1800℃^[13]。

样品制备室装有 Pt、Fe、Si 等多种蒸镀源及大束流离子枪,可以对样品进行多种表面处理、沉积金属和氧化物薄膜或者纳米粒子。能谱分析室配备有半球型能量分析器(EA 125)和 X 射线枪、紫外光源、小束流离子枪多种激发源,以及高分辨电子能量损失谱(LK-ELS5000)。其中不同的激发源与半球型能量分析器相结合就产生不同的功能,如 X 射线光源可实现 X 射线光电子能谱(XPS),紫外光源可

实现紫外光电子能谱(UPS),小束流离子枪可以实现离子散射谱(LEIS 或 ISS)功能。显微镜室装配有扫描探针显微镜(Omicron VT Beam Deflection AFM),可以根据需要更换不同类型的探针,在扫描隧道显微镜(STM)或原子力显微镜(AFM)模式之间切换。

预处理室内的样品台的温度范围可以控制在 130~900 K,这样既可以对样品进行加热退火等操作也可以在低温条件下沉积金属来构建一些模型催化剂。能谱室样品台温度范围为 100~1050 K,显微镜室的样品处理温度为 300~1100 K。每个真空室均装配独立的蓝宝石微漏阀进气系统,引入 Ar、He、CO、O₂ 等高纯气体。气体的暴露量以 Langmuir 计算($1\text{ L}=1.33\times10^{-6}\text{ mbar}\cdot\text{s}$),由于真空规未作精确校准,不能得到绝对暴露量。

2 实验结果与讨论

2.1 完整 FeO 薄膜的制备

一些氧化物薄膜具备长程有序的结构、原子级的平整度以及体相氧化物的基本特征,比较适合在模型催化剂中作为金属纳米粒子的载体。在 Fe-Pt 双金属模型催化剂体系的研究基础上^[14],我们认为 FeO 薄膜适于作为金属 Pt 纳米粒子的衬底,并开展相关的研究工作。FeO 薄膜生长的制备方法选择经典的方法,先在 Pt(111)单晶表面沉积 1.0 原子单层(ML)的金属 Fe,然后在氧气气氛中 870~1000 K 进行退火处理。图 1 示出了在 Pt(111)表面制备的单层 FeO 薄膜,制备条件为在 1.0×10^{-6} mbar O₂ 中,890 K 直接氧化 1.0 ML 金属 Fe 单层薄膜(衬底温度为 487 K) 10 min。

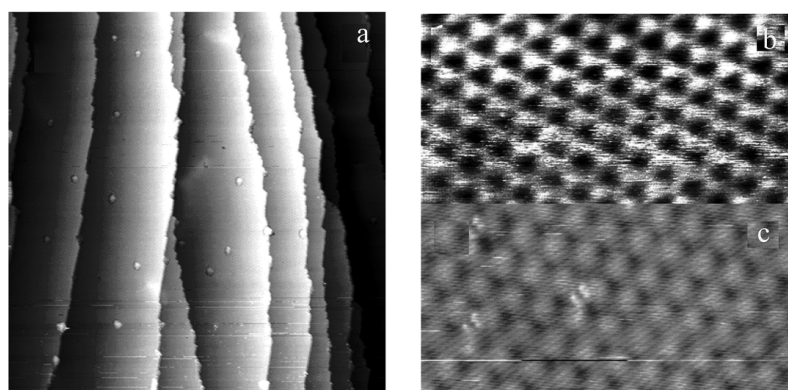


图 1 在 Pt(111)表面制备的单层 FeO 薄膜的扫描隧道显微镜图像

Fig.1 STM images of monolayer FeO film on Pt(111) prepared by direct oxidation of Fe overlayers on Pt(111)

[a. $400\times400\text{ nm}^2$, -0.685 mV , 0.042 nA ; b. $40\times20\text{ nm}^2$, -1.367 mV , 0.422 nA ; c. $40\times20\text{ nm}^2$, -2093 mV , 0.055 nA]

由图 1 可见, FeO 薄膜的质量较好, 在 $400 \times 400 \text{ nm}^2$ 的表面范围内明显的小缺陷只存在十几处(图 1 a)。不同扫描偏压下的高分辨 STM 图 (图 1 b 的扫描偏压为 -1.367 mV , 而图 1 c 的扫描偏压则为 -2093 mV) 进一步显示, 在不同的扫描条件下, 虽然 FeO 表现出不同的摩尔条纹样式但是其周期性规律是相同的, 这说明 FeO 具有规整有序的表面结构。从上述的 STM 结果可以得知, 所制备的 FeO 薄膜不仅具有原子级平整的表面, 而且表面结构也是有序的, 能够作为金属纳米粒子的载体制备模型催化剂。

2.2 FeO 薄膜的表征

FeO 与 Pt(111) 的界面形式很丰富, 对 CO 氧化反应具有较高的活性^[15-16], 所以 Pt(111) 表面 FeO 薄膜的结构形式仍需要做进一步的研究。完美的 FeO/Pt(111) 薄膜是两层结构, 最外层是 O 原子, 并且在一定条件下可能会失去部分 O 而形成 O 空位缺陷^[17-18]。

根据 XPS 的表征结果(图 2), 发现薄膜的 O/Fe 比为 1.0, 同时 Fe $2p_{3/2}$ 的结合能为 709.2 eV , O $1s$ 的结合能为 529.3 eV , 与 FeO 的基本特征相符合。

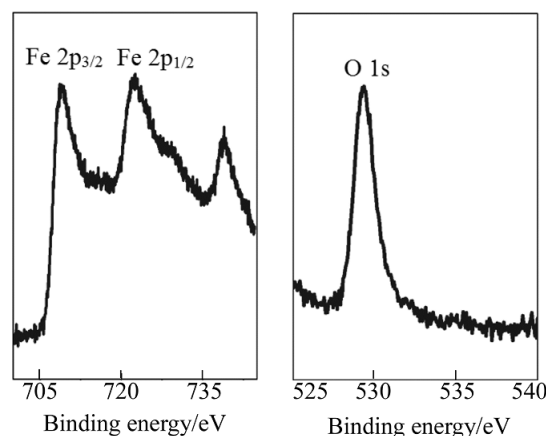


图 2 完整 FeO 薄膜的 XPS 谱图

Fig.2 XPS spectra of 1.0 ML FeO film

我们还得到了 FeO 薄膜的原子分辨图像($10 \times 6.3 \text{ nm}^2$, 700 mV , 0.50 nA), 如图 3 所示。图 3 中小的表观亮点为单个的氧原子, 排列规整有序, 显示出完美的 FeO 表面结构。但是 FeO 薄膜在摩尔条

纹的调制作用下形成了明暗相间的超结构区域, 其周期性为 2.5 nm 。这种超结构为下一步的研究工作提供了可能性。

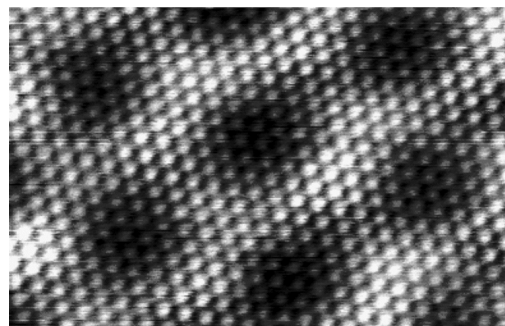


图 3 FeO 薄膜的扫描隧道显微镜原子分辨图像

Fig.3 Atomic resolution STM image of FeO film

2.3 Pt 纳米粒子的生长行为和热稳定性研究

FeO 的表面电子结构, 特别是摩尔条纹超结构可能对金属原子在其表面的落位产生重要影响^[19], 从而有可能对金属纳米粒子在 FeO 表面的成核和生长进行调制。对 FeO 负载的 Pt 纳米粒子工作的主要目的是利用 FeO 薄膜表面的模板导向作用, 考察其是否具有制备全同有序的 Pt 纳米金属粒子阵列的可能性^[19-22]。同时通过控制 Pt 源(缠绕有 Pt 丝的 W 丝)加热电流的大小, 衬底温度, 环境气氛和沉积时间研究生长过程中动力学参数对 Pt 纳米粒子制备的影响。

2.3.1 UHV 条件下制备的 Pt 纳米粒子

在 UHV 条件下制备 Pt 纳米粒子时, Pt 源的加热电流分别控制在 8.2 、 8.4 、 8.6 A , 衬底 FeO 薄膜的温度分别控制在 140 、 350 K , 其扫描隧道显微镜图像如图 4 所示。对 140 K 沉积的 Pt 纳米粒子(源加热电流 8.2 A , 时间 1 min), 缓慢退火到 300 K , 其形貌如图 4 a 所示。FeO 表面出现的 Pt 纳米粒子的覆盖度较低, 因此 FeO 的摩尔条纹清晰可见。继续在 473 K 退火 2 min (图 4 b), 发现 Pt 纳米粒子的数目在退火后没有发生明显的变化, 但是粒径却略有减小。这可能是由于 Pt 纳米粒子经过 473 K 退火后, 其在低温下表面吸附的残余气体脱附, 去除了对 STM 获取图像时的干扰。

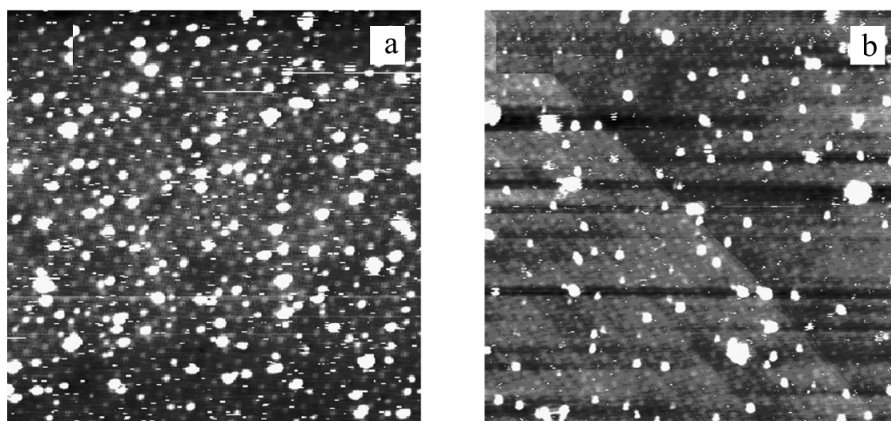


图 4 FeO 薄膜表面在 140 K 沉积的 Pt 纳米粒子并经退火处理的扫描隧道显微镜图像

[a. 退火温度为 300 K, $60 \times 60 \text{ nm}^2$; b. 退火温度为 473 K, $60 \times 60 \text{ nm}^2$]

Fig.4 STM images of Pt nanoparticles grown on FeO at 140 K and annealed

[a. 300 K, $60 \times 60 \text{ nm}^2$, 1.709 mV, 0.035 nA; b. 473 K, $60 \times 60 \text{ nm}^2$, 1.608 mV, 0.145 nA]

在 350 K 沉积 4 min Pt (源加热电流 8.4 A) 后, FeO 表面覆盖了直径为 2~3 nm 大小的纳米 Pt 粒子, 图 5 示出了在 350 K 时 FeO 薄膜上沉积 Pt 纳米粒子的 STM 图以及经傅立叶变换后得到的图像。结

果表明 Pt 纳米粒子在 FeO 表面分散得比较均匀, 并且粒径分布也比较均一。STM 图经过傅立叶变换后, 有 6 个明显的斑点(图 5 b), 说明 Pt 粒子在 FeO 的落位是有周期性的。

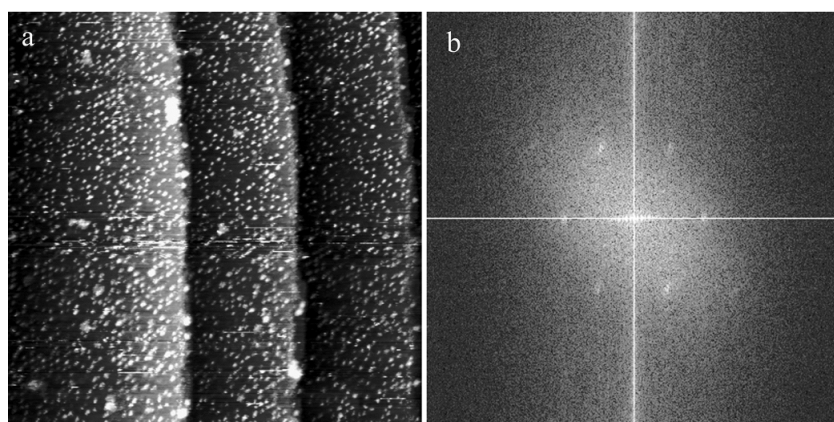


图 5 FeO 薄膜表面在 350 K 沉积的 Pt 纳米粒子的扫描隧道显微镜图像

[a. STM 图像, $200 \times 200 \text{ nm}^2$; b. 图 a 经傅立叶变换后得到的图像]

Fig.5 STM Images of Pt nanoparticles on FeO film at 350 K

[a. STM image, $200 \times 200 \text{ nm}^2$, -0.040 mV, 1.028 nA; b. Fourier filtering form of a]

进一步研究了在 FeO 表面上制备高覆盖度 Pt 纳米粒子的方法。图 6 示出了 FeO 薄膜在 350 K 沉积不同覆盖度的 Pt 纳米粒子后的表面形貌图。在源加热电流为 8.2 A 时沉积 Pt 3 min (图 6 a), FeO 薄

膜表面的 Pt 纳米粒子不是非常均匀。提高源加热电流至 8.6 A 后再沉积 Pt 10 min (图 6 b、c), Pt 粒子已覆盖满整个 FeO 薄膜表面, Pt 纳米的粒径大小保持均一, 但与较低覆盖度下相比, 有明显的增大。

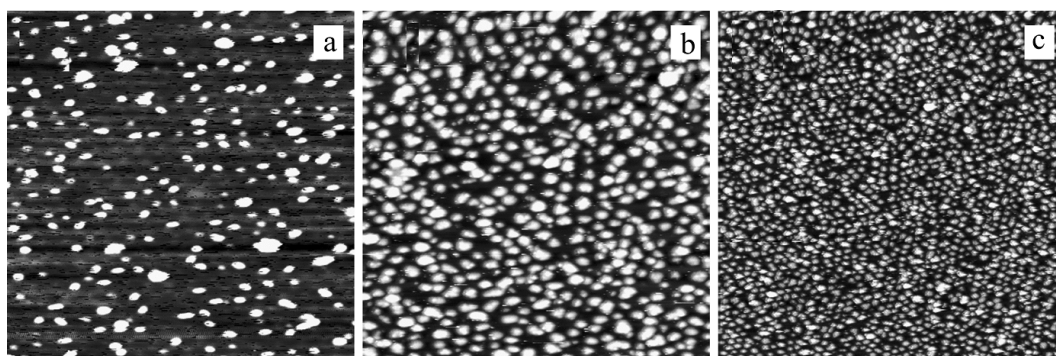


图 6 FeO 薄膜在 350 K 沉积 Pt 纳米粒子后的扫描隧道显微镜图像

Fig.6 STM images of Pt nanoparticles on FeO film at 350 K

(a. 3 min@8.2 A, $40 \times 40 \text{ nm}^2$, 0.857 mV, 0.132 nA; b. 10 min@8.6 A, $50 \times 50 \text{ nm}^2$, -1.0 mV, 0.056 nA; c. 10 min@8.6 A, $100 \times 100 \text{ nm}^2$, -1.0 mV, 0.056 nA)

对比 Pt 纳米粒子在 140 K、350 K 两种衬底温度下在 FeO 薄膜表面的生长行为, 可以发现在 140 K 的衬底温度下制备的 Pt 纳米粒子不是非常均匀, 而在 350 K 的衬底温度下, 可以在 FeO 表面上制备粒径大小均一且高度分散的 Pt 纳米粒子。但是, 目前为止仍不能在 FeO 薄膜表面制备全同的 Pt 纳米粒子。然而根据文献[19-20]报道, FeO 薄膜在低温下沉积 Au、Pd 等金属纳米粒子能够得到较好的结果。我们在低温下 140 K 的实验结果可能因为样品制备室中残余气体在样品表面吸附并影响 Pt 原子在表面的落位造成的。

2.3.2 O_2 气氛下制备的 Pt 纳米粒子

文献[23-24]报道, 氧气气氛能够促进 Pt 在铁的氧化物表面的扩散, 形成粒径均一且分散度高的 Pt 纳米粒子。我们研究了氧气气氛对 FeO 负载的 Pt 纳米粒子的生长行为和热稳定性的影响。图 7 为氧气气氛中 550 K 生长的 Pt 纳米粒子的 STM 图。在氧气气氛中制备 Pt 纳米粒子时, O_2 分压为 $1.1 \times 10^{-6} \text{ mbar}$, Pt 源的加热电流为 8.4 A, 衬底温度为 550 K。沉积 Pt 2 min 后, FeO 薄膜表面出现 Pt 纳米粒子, 尽管在表面分散均匀, 但是其形状不规则。这说明 $1.1 \times 10^{-6} \text{ mbar O}_2$ 并不能进一步有效地提高 FeO 表面 Pt 纳米粒子粒径的均一性和表面分散度。

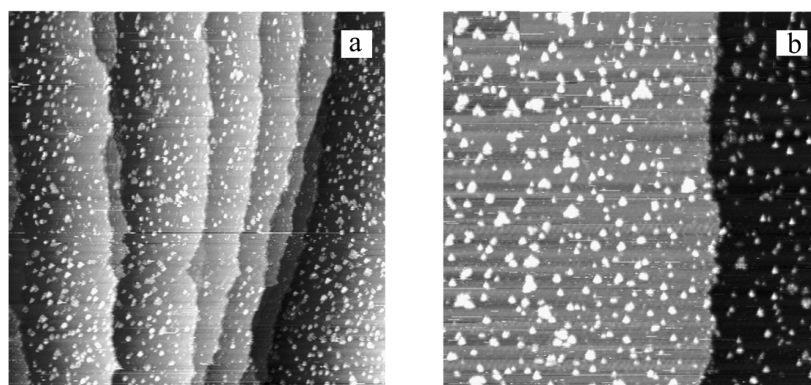


图 7 在 $1.1 \times 10^{-6} \text{ mbar}$ 氧气气氛中 550 K 生长的 Pt 纳米粒子的扫描隧道显微镜图像

Fig.7 STM images of Pt nanoparticles grown in $1 \times 10^{-6} \text{ O}_2$ at 550 K

[a. $400 \times 400 \text{ nm}^2$, -1970 mV, 0.044 nA; b. $200 \times 200 \text{ nm}^2$, -874 mV, 0.044 nA]

为了研究氧气气氛条件下 Pt 纳米粒子的形貌变化和热稳定性, FeO 薄膜表面的 Pt 纳米粒子(UHV 条件下 8.2 A 3 min+8.6 A 10 min)在 $1.1 \times 10^{-6} \text{ O}_2$ 中被退火到不同温度, STM 的研究结果如图 8 所示。样

品在氧气气氛中经 750 K 退火 5 min 后, 负载的 Pt 纳米粒子的粒径已经有明显的增大, 主要分布在 4~5 nm, 但在 FeO 表面仍保持均匀地分散。在氧气气氛中的退火温度进一步升高到 850 K 并且保持 5

min 后, 6~8 nm 较大的 Pt 纳米粒子在表面的数目明显增多, 同时 Pt 的覆盖度减少。

上述实验结果表明 1.1×10^{-6} O₂ 气氛并不能有效

地促进 Pt 纳米粒子在 FeO 薄膜表面的分散并形成全同的纳米粒子。

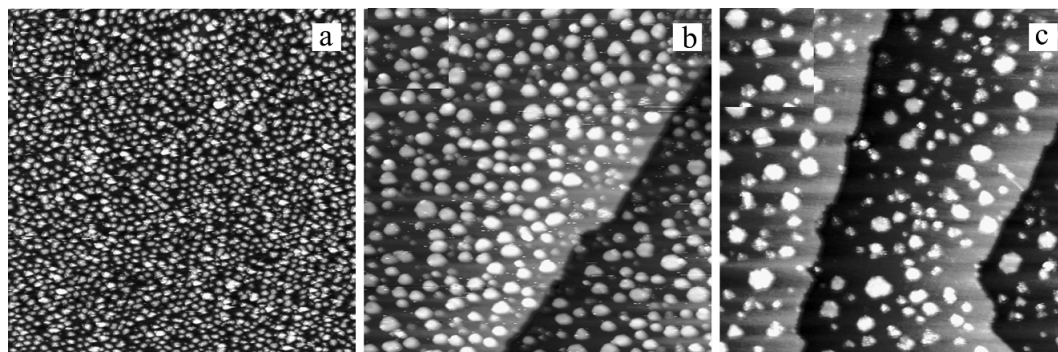


图 8 纳米粒子在氧气气氛中的形貌变化(扫描隧道显微镜图像大小均为 $100 \times 100 \text{ nm}^2$)

[a. 新制备的 Pt 纳米粒子; b. 750 K 退火; c. 850 K 退火]

Fig.8 The morphological changes of Pt nanoparticles in 1.1×10^{-6} O₂ (The size of all STM images is $100 \times 100 \text{ nm}^2$)

[a. Freshly prepared, -1.0 mV, 0.056 nA; b. 750 K treating, -0.699 mV, 0.032 nA; c. 850 K treating, 1.709 mV, 0.030 nA]

3 结论

(1) 在 1.0×10^{-6} mbar O₂ 中 890 K 直接氧化 1.0 ML Fe/Pt(111) (487 K 沉积) 10 min 制备出完整的单层 FeO 薄膜, 并具有规整的表面结构。

(2) FeO 薄膜在 350 K 沉积 4 min Pt (源加热电流 8.4 A) 后, 表面覆盖了 2~3 nm 均一粒径且分散均匀的纳米 Pt 粒子, 制备出了 Pt/FeO/Pt(111) 模型催化剂。 1.1×10^{-6} mbar O₂ 气氛以及不同温度的退火处理并不能有效地促进 Pt 粒子在 FeO 薄膜表面的分散, 无法形成全同有序的 Pt 纳米粒子阵列。

参考文献:

- [1] 陈礼敏. 炭材料负载的银、铂基催化剂上一氧化碳选择氧化反应的研究[D]. 大连: 中国科学院大连化学物理研究所, 2007.
- [2] Oh S H, Sinkevitch R M. Carbon monoxide removal from hydrogen-rich fuel cell feedstreams by selective catalytic oxidation[J]. Journal of Catalysis, 1993, 142(1): 254-262.
- [3] Haruta M, Yamada N, Kobayashi T, et al. Gold catalysts prepared by coprecipitation for low-temperature oxidation of hydrogen and of carbon monoxide[J]. Journal of Catalysis, 1989, 115(2): 301-309.
- [4] Qu Z, Cheng M, Shi C, et al. Low-temperature selective oxidation of CO in H₂-rich gases over Ag/SiO₂ catalysts [J]. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 2005, 239(1): 22-31.
- [5] Xie X, Li Y, Liu Z Q, et al. Low-temperature oxidation of CO catalysed by Co₃O₄ nanorods[J]. Nature, 2009, 458(7239): 746-749.
- [6] Sirijaruphan A, Goodwin J G, Rice R W. Effect of Fe promotion on the surface reaction parameters of Pt/[gamma]-Al₂O₃ for the selective oxidation of CO[J]. Journal of Catalysis, 2004, 224(2): 304-313.
- [7] Liu X, Korotkikh O, Farrauto R. Selective catalytic oxidation of CO in H₂: structural study of Fe oxide-promoted Pt/alumina catalyst[J]. Applied Catalysis A: General, 2002, 226(1): 293-303.
- [8] Maeda N, Matsushima T, Uchida H, et al. Performance of Pt-Fe/mordenite monolithic catalysts for preferential oxidation of carbon monoxide in a reformat gas for PEFCs[J]. Applied Catalysis A: General, 2008, 341(1/2): 93-97.
- [9] Watanabe M, Uchida H, Ohkubo K, et al. Hydrogen purification for fuel cells: selective oxidation of carbon monoxide on Pt-Fe/zeolite catalysts[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2003, 46(3): 595-600.
- [10] 唐晓兰, 张保才, 李勇, 等. 用于 CO 选择氧化反应的新型 Pt-Fe/Al₂O₃ 催化剂[J]. 催化学报, 2005, 26(1): 1-3. Tang X, Zhang B, Li Y, et al. Novel Pt-Fe/Al₂O₃ catalyst for CO selective oxidation[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2005, 26(1): 1-3.
- [11] Tao F, Grass M E, Zhang Y, et al. Reaction-driven

- restructuring of Rh-Pd and Pt-Pd core-shell nanoparticles[J]. Science, 2008, 322(5903): 932-934.
- [12] Nolte P, Stierle A, Jin-Phillipp N Y, et al. Shape changes of supported Rh nanoparticles during oxidation and reduction cycles[J]. Science, 2008, 321(5896): 1654-1658.
- [13] 马腾. 谭大力, 傅强, 等. 一种超高真空表面分析系统中的电子束加热器: 中国, CN20082021862[P]. 2008-09-03.
- [14] Ma T, Fu Q, Su H Y, et al. Reversible structural modulation of Fe-Pt bimetallic surfaces and its effect on reactivity[J]. Chem Phys Chem, 2009, 10(7): 1013-1016.
- [15] Sun Y N, Qin Z H, Lewandowski M, et al. When an encapsulating oxide layer promotes reaction on noble metals: dewetting and in situ formation of an "inverted" FeO_x/Pt catalyst[J]. Catalysis Letters, 2008, 126(1/2): 31-35.
- [16] 姚运喜. 界面效应对表面反应活性影响的研究[D]. 大连: 中国科学院大连化学物理研究所, 2008.
- [17] Huang W, Ranke W. Autocatalytic partial reduction of $\text{FeO}(111)$ and $\text{Fe}_3\text{O}_4(111)$ films by atomic hydrogen[J]. Surface Science, 2006, 600(4): 793-802.
- [18] Merte L R, Knudsen J, Grabow L C, et al. Correlating STM contrast and atomic-scale structure by chemical modification: Vacancy dislocation loops on $\text{FeO}/\text{Pt}(111)$ [J]. Surface Science, 2009, 603(2): 15-18.
- [19] Nilius N, Rienks E D L, Rust H P, et al. Self-organization of gold atoms on a polar $\text{FeO}(111)$ surface[J]. Physical Review Letters, 2005, 95(6): 066101.
- [20] Lin X, Nilius N. Self-assembly of MgPc molecules on polar FeO thin films[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2008, 112(39): 15325-15328.
- [21] N'Diaye A T, Bleikamp S, Feibelman P J, et al. Two-dimensional Ir cluster lattice on a graphene moire on $\text{Ir}(111)$ [J]. Physical Review Letters, 2006, 97(21): 5501-5504.
- [22] Degen S, Becker C, Wandelt K. Thin alumina films on $\text{Ni}_3\text{Al}(111)$: A template for nanostructured Pd cluster growth[J]. Faraday Discussions, 2004, 125: 343-356.
- [23] Lebedeva O E, Chiou W A, Sachtler W M H. Metal migration from zeolites onto iron oxide: An alternative to hydrogen spillover[J]. Journal of Catalysis, 1999, 188(2): 365-374.
- [24] Liu H Y, Chiou W A, Frohlich G, et al. Platinum migration out of zeolites onto iron oxide: an alternative to H spillover[J]. Topics in Catalysis, 2000, 10(1): 49-57.

《贵金属》征订启事

《贵金属》季刊, 大 16 开, 每期约 90 页, 每期 15 元, 全年 60 元, 海外订户全年 40 美元 (均含邮费)。可按以下 2 种方式订阅 (详见《贵金属》编辑部网站“公告通知”及“联系我们”栏目):

- 银行汇款: 开户银行: 云南省工行营业部; 户名: 昆明贵金属研究所; 账号: 2502 0103 0902 0106 938。
- 邮局汇款: 650106, 昆明市高新技术开发区科技路 988 号 贵金属编辑部 (收)

欢迎国内外相关专业的专家、学者、科研人员、大专院校师生以及科研院所和企业单位赐稿、订阅。

《贵金属》订阅回执 (此表长期有效, 可复制或自行编制)

年份	单价/(元/本)	全年 4 期价格/元	联系人	
现刊订阅	15.00	60.00	电话 (手机)	
2010-	15.00	60.00	E-mail	
1980~2009	25.00	100.00	邮政地址/邮编	
增刊	200.00		汇款金额	
		订刊内容: _____ 年 _____ 期 ~ _____ 期	汇款方式: 银行 ☐ / 邮局 ☐	

联系电话/传真: 0871-68328632

投稿/联系邮箱: bjba@ipm.com.cn 或 gjsz@chinajournal.net.cn

《贵金属》编辑部网站: <http://www.j-preciousmetals.com> 或 <http://journal.ipm.com.cn>