

PdAu/Al₂O₃ 合金纳米催化剂的合成、表征及其在 4-氯硝基苯加氢中的应用

谢朝辉¹, 于洪波², 刘进军^{1*}

(1. 宁波大学 理学院, 浙江 宁波 315211; 2. 中国科学院 宁波材料技术与工程研究所, 浙江 宁波 315201)

摘要: 采用乙二醇连续还原法合成了不同摩尔比的 PdAu 合金纳米颗粒. 利用 XRD、TEM、DRIFT-IR 和紫外可见光光谱表征技术对其进行了表征. 结果表明, 纳米 Pd 种子与氯金酸钠发生置换反应, 表面元素重新排布, Pd、Au 纳米颗粒以 PdAu 合金形式存在, 且合金粒径大小可控. 将不同摩尔比的 PdAu 合金纳米颗粒采用共沉淀法负载到 Al₂O₃ 载体上, 制得 PdAu/Al₂O₃ 催化剂, 并将其应用于 4-氯硝基苯的加氢反应中. 与 Au/Al₂O₃、Pd/Al₂O₃ 催化剂(4-氯硝基苯转化率为 0 和 37.4%)相比, PdAu/Al₂O₃ 催化剂大大提高了 4-氯硝基苯加氢活性, 其中 PdAu-1/0.5/Al₂O₃ 催化剂具有最高的催化活性, 4-氯硝基苯转化率为 69.4%, 这可能归因于 PdAu 合金纳米颗粒间的协同效应和 PdAu 与 Al₂O₃ 载体间的强相互作用.

关键词: PdAu 合金纳米颗粒; 尺寸可控; 催化加氢; 4-氯硝基苯

中图分类号: O643.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2016) 04-0072-05

双金属合金纳米颗粒因其晶粒大小尺寸可控, 且兼具 2 种金属的特性, 被广泛应用于纳米材料和多相催化领域^[1-5]. 在众多纳米颗粒的研究中, 金钯双金属纳米颗粒的合成和应用一直是纳米材料催化领域的研究热点之一. 据二元合金相图^[6]可知, 金与钯能以任意摩尔比混溶, 且由于二者原子半径差别不大, 因此金、钯很容易在对方的晶面上生长, 形成特定形貌与结构的纳米晶体, 如核壳^[7-9]、哑铃^[7]和合金^[10]等结构的金钯纳米颗粒.

据文献报道^[3-5], 不同微观结构的金钯纳米颗粒作为催化剂的活性组分被广泛应用于一氧化碳的氧化、三氯乙烷加氢脱氯和醇氧化成醛等多相催化反应中, 金钯纳米颗粒催化上表现出来的独特性质归因于金属之间的协同效应^[11-12]和活性组分与金属氧化物载体之间的强相互作用^[13-16]. 据文献^[16]报道, 单金属纳米负载型催化剂受后者的影响较大, 如金负载在载体上表现出来的催化选择性会随着载体的不同而出现较大的差异; 而双金属纳米催化剂更多是金属之间的协同效应或是双

金属之间的金属与金属氧化物之间的相互作用在催化剂性能上发挥主要作用. 相对于单金属纳米颗粒, 双金属纳米颗粒在应用上的可塑性要强很多, 尤其是可以通过调控纳米颗粒的结构形貌、粒径大小等因素调节催化剂的性能, 因此双金属纳米颗粒的合成和应用具有重要意义.

本文采用乙二醇连续还原法合成了不同摩尔比的金钯纳米颗粒, 利用 XRD、TEM、红外漫反射 CO 吸附与紫外可见光光谱表征技术对其大小、结构、表面元素的分布进行了表征, 并将其负载到氧化铝载体上, 应用于 4-氯硝基苯催化加氢反应中, 探索负载不同摩尔比金钯双金属催化剂相对于负载单金属的催化剂在催化反应中的影响.

1 实验部分

1.1 主要试剂

乙二醇、丙酮、无水乙醇、4-氯硝基苯(国药集团化学试剂有限公司); 氯化钯、氯金酸钠(阿拉丁试剂有限公司); 聚乙烯吡咯烷酮(国药集团化学

收稿日期: 2016-01-11.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(11375091); 宁波市自然科学基金(2011A610171); 宁波大学学科项目(xkzw103).

第一作者: 谢朝辉(1989-), 男, 湖南永州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 纳米材料制备与多相催化. E-mail: xiezhaohui@nimte.ac.cn

*通信作者: 刘进军(1980-), 男, 山西阳泉人, 助理研究员, 主要研究方向: 非平衡统计与复杂系统. E-mail: liujinjun@nbu.edu.cn

试剂有限公司); 三氧化二铝粉末(青岛海洋化工有限公司).

1.2 表征仪器

X 射线衍射仪(D8 Advance, 德国布鲁克公司); 透射电子显微镜(TEM JEOL2100, 日本电子株式会社); 傅里叶变换红外光谱仪(Nicolet-6700, 美国赛默飞世尔科技公司); 紫外可见光光度计(Cary 100, 上海美谱达仪器有限公司).

1.3 催化剂的制备

1.3.1 Pd、Au 与 PdAu 合金纳米颗粒合成及其负载 Al₂O₃

将 0.352 mmol 氯化钯、120 mg 聚乙烯吡咯烷酮和 25 mL 乙二醇加入三口烧瓶中, 通入氮气保护, 将该混合溶液加热至 60 °C 搅拌, 当氯化钯充分溶解后加热至 90 °C, 保温 30 min, 将 Pd 溶液前驱体还原为 Pd 纳米颗粒, 反应过程中溶液由深棕色慢慢变成黑色. 继续加热至 150 °C 老化 2 h, 老化结束后, 将反应溶液冷却至室温, 得到 Pd 纳米溶胶. 该溶胶用丙酮洗涤 1 次, 乙醇洗涤 2 次, 获得 Pd 纳米颗粒, 把该纳米重新分散在乙醇中备用.

将 0.352 mmol 氯金酸钠、120 mg 聚乙烯吡咯烷酮和 25 mL 乙二醇加入三口烧瓶中, 将该混合溶液加热至 130 °C 反应 30 min, 继续加热至 150 °C 老化 2 h, 老化结束后样品冷却至室温, 得到 Au 纳米溶胶. 后处理方法与上述 Pd 纳米颗粒一致.

合成摩尔比为 1:1 的 PdAu 合金纳米颗粒, 将 0.126 mmol 氯金酸钠、10 g 乙二醇和 30 mg 聚乙烯吡咯烷酮加入玻璃瓶中, 常温搅拌溶解, 得到溶液 A. 取上述 Pd 溶胶 10 g (其中含 0.126 mmol Pd) 加入三口烧瓶中, 通入氮气保护, 常温搅拌, Pd 溶解后将溶液 A 快速注入三口烧瓶中, 升温至 130 °C, 反应 30 min 后升温至 150 °C, 老化 2 h. 其后处理方法与 Pd 纳米颗粒一致. 此外, 通过调节 Au 和 Pd 前驱体的摩尔量制备了摩尔比为 1:0.5 和 1:0.25 的 PdAu 合金纳米颗粒. 后文中将摩尔比为 1:1、1:0.5 和 1:0.25 的 PdAu 合金简称为 PdAu-1/1, PdAu-1/0.5, PdAu-1/0.25.

取 1 g 热处理(550 °C, 2 h)的 Al₂O₃(比表面积为 185 m²·g⁻¹)加入三口烧瓶中, 30 mL 上述溶解在乙醇中的 Pd 纳米颗粒(Al₂O₃ 重量的 1%)缓缓注入三口烧瓶中, 60 °C 下搅拌, 使用氮气作吹扫气将乙醇溶

剂从溶液中带走, 乙醇被吹干反应结束. 取出负载后的催化剂用乙醇离心洗涤 4 次, 去除纳米颗粒中的有机物, 洗涤后的催化剂 60 °C 烘干备用, Pd/Al₂O₃ 催化剂制备完成. Au/Al₂O₃、PdAu (1/1、1/0.5、1/0.25)/Al₂O₃ 的制备方法与上述方法一致.

1.3.2 4-氯硝基苯加氢催化反应

取上述制得的催化剂 0.1 g、4-氯硝基苯 2 g 和乙醇 25 g 加入三口烧瓶中, 45 °C 搅拌条件下进行加氢反应, 反应时间 2 h, 反应过程中通入 H₂ 作为还原剂.

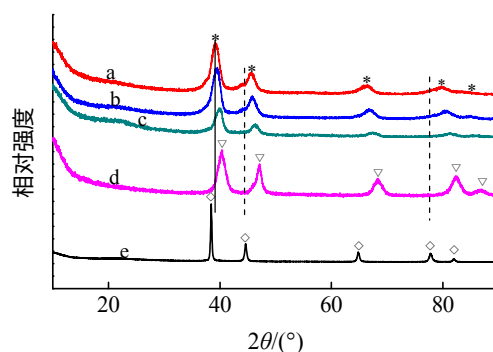
1.3.3 CO 红外漫反射探针反应

采用傅里叶变换红外光谱仪来测试 CO 红外漫反射探针反应. 将上述催化剂置于样品池中压平, 通 Ar 气吹扫 30 min, 气体流速为 20 mL·min⁻¹, 待完成后采集背景光谱图, 并保存背景, 之后通入 CO 气体吹扫 30 min 进行红外漫反射探针实验, 气体流速保持为 20 mL·min⁻¹. 系统再次通 Ar 气将样品池中未吸附在金属颗粒表面的 CO 气体吹出, 直至 CO 气体完全排除, 同时记录光谱图.

2 结果与讨论

2.1 催化剂表征

图 1 是纳米颗粒的 XRD 图谱, 其中 a 是 PdAu-1/1 的 XRD 图谱, 其主峰与 Pd_{0.9}Au_{1.1} 的标准 XRD 图谱相吻合, 说明形成了合金结构. 但在该合金中, 可观察到在 2θ=44.392°和 77.58°的峰与 Au 的标准图谱相吻合, 说明在 PdAu-1/1 样品中形成了团簇 Au. 随着 Au 含量的减小(PdAu 合金比例增加), XRD 衍射峰逐渐向 Pd 峰偏移, 说明随着 Pd/Au 原子摩尔比增加, 形成 Pd_xAu_y (x>y) 合金纳米颗粒. b 和 c 中未观察到 2θ 处 Au 的特征衍射峰,



a 为 PdAu-1/1, b 为 PdAu-1/0.5, c 为 PdAu-1/0.25, d 为 Pd, e 为 Au(▽是 Pd 的 fcc 面心立方结构; ◇是 Au 的 fcc 面心立方结构)

图 1 纳米颗粒的 XRD 图谱

说明 Au 原子全部形成合金。

在制备过程中, PdAu 合金纳米颗粒的形成分 2 个步骤: (1) Pd 种子的制备. (2) PdAu 合金纳米颗粒的制备. 在步骤(1)中, PdAu 合金纳米颗粒的形成分为 2 个过程: (i)低温下 Pd 与 Au 的置换反应, 如以下的化学反应:



3 个 Pd 原子置换 2 个 Au 原子^[17]; (ii)高温下 Pd 与 Au 的置换反应和乙二醇还原反应同时发生, 随着温度的升高, 置换反应的速率加快, 同时 Pd^{2+} 与 Au^{3+} 不断地被乙二醇还原, 从而形成合金结构. 这与 XRD 结果相吻合.

采用 TEM 表征了 PdAu 合金纳米颗粒的形貌与粒径分布(图 2). 从图 2(a)中可看出, Pd 纳米颗粒为立方八面体结构, 与文献[18]报道的结果相吻合, Pd 颗粒大小均匀, 粒径为 5.2~6.3 nm. 图 2(b)、(c)和(d)是不同 PdAu 摩尔比的 TEM 图, 可以看出随着 Au 摩尔量的减少, PdAu 颗粒粒径也随之减小, 说明可通过调节 PdAu 比例来调控纳米颗粒尺寸大小. 此外, 可观察到 PdAu 纳米合金为八面体结构, 说明 Pd 原子与 Au 原子之间的置换反应是有序发生的, 处于立方八面体每个顶点的 Pd 原子最先跟

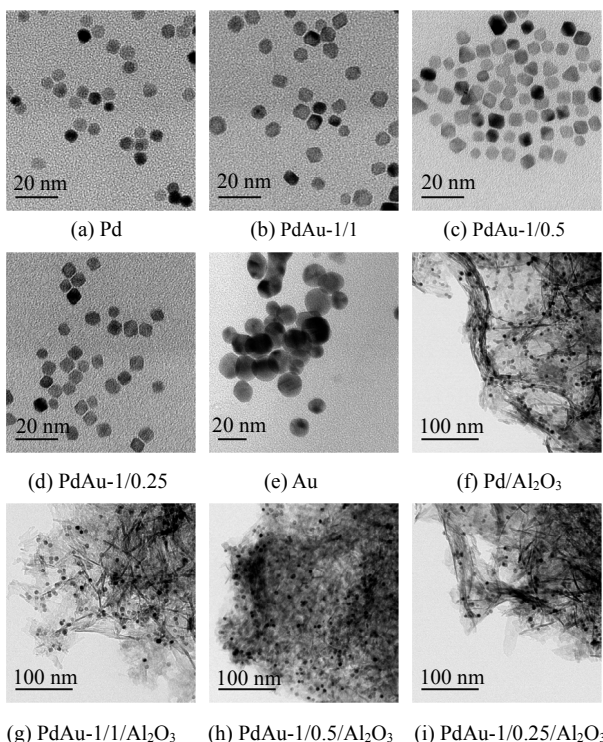
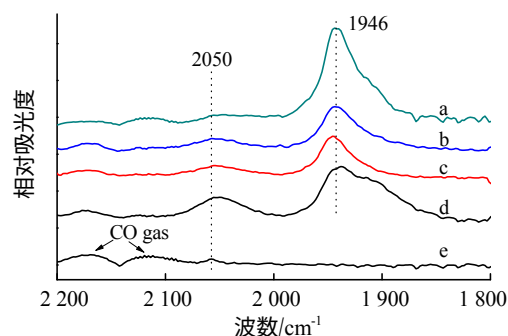


图 2 纳米颗粒及其负载在 Al_2O_3 载体后的 TEM 图谱

Au 离子发生置换反应, 随着反应的进行, 新形成的 Au 与 Pd 原子在原来 Pd 颗粒的位置重新有序生长, 从而使得生成的合金纳米颗粒保持了完美的立方体结构. 同时, 从图 2(e)可看出, 其呈球形, 这也充分说明在合金制备过程中 Au 原子完全参与了反应. 图 2(f-i)分别为 $\text{Pd}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{PdAu-1/1}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{PdAu-1/0.5}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{PdAu-1/0.25}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化剂的 TEM 图. 从图 2 可以看出, 纳米颗粒均匀分布在 Al_2O_3 载体上, 且无团聚发生, 颗粒尺寸基本保持不变, 与负载前纳米颗粒尺寸相同.

图 3 是负载型催化剂的 CO 吸附的红外漫反射谱图. 图 3(a)是 CO 在 $\text{Pd}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化剂上的红外图谱, 1946 cm^{-1} 处的特征峰是 CO 在 Pd 晶面的吸附峰^[19]. 图 3(b)是 $\text{PdAu-1/0.25}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化剂上的红外图谱, 从图 3 可以看出, 除明显可观测到 1946 cm^{-1} 特征峰外, 在 2050 cm^{-1} 处可观察到微弱的吸附峰, 该峰为 CO 在 Au 晶面上的吸附峰^[20], 同时, 这与 CO 在 Au 上的吸附结果相吻合(图 3(e)). 随着 Au 含量的增加, 2050 cm^{-1} 处的红外吸收峰逐渐增强. 其中, 与 CO 在 $\text{Au}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化剂上的吸附峰相比, $\text{PdAu-1/1}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化剂上 2050 cm^{-1} 处的吸附峰大大增强, 表明 CO 与 Au 的吸附作用由弱吸附变成了 PdAu 合金纳米颗粒中的强吸附作用, 充分说明 PdAu 合金中 Pd 原子和 Au 原子之间有较强的协同作用, 从而改变了 Au 对 CO 的吸附能力, 这也进一步证明在合金制备过程中 Au 原子与 Pd 原子之间发生了置换反应.

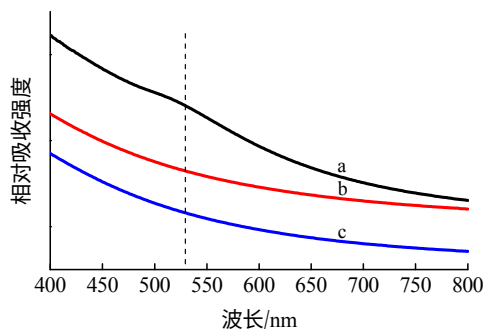


a 为 $\text{Pd}/\text{Al}_2\text{O}_3$, b 为 $\text{PdAu-1/0.25}/\text{Al}_2\text{O}_3$, c 为 $\text{PdAu-1/0.5}/\text{Al}_2\text{O}_3$, d 为 $\text{PdAu-1/1}/\text{Al}_2\text{O}_3$, e 为 $\text{Au}/\text{Al}_2\text{O}_3$

图 3 催化剂红外漫反射 CO 吸附图

为了进一步证实纳米颗粒表面的元素组成成分, 对不同摩尔比的 PdAu 合金纳米颗粒进行了紫外可见吸收光谱的表征, 如图 4 所示. 从图 4 可知,

当 PdAu 摩尔比为 1:1 时, 表面有 Au 的 530 nm 的可见光吸收峰^[21], 然而 Pd 与 PdAu 合金在 400~800 nm 无紫外特征吸收峰, 说明 PdAu-1/1 表面有暴露的 Au 团簇. 随着 PdAu 摩尔比的增大, 530 nm 处的紫外可见特征吸收峰消失, 说明 PdAu-1/0.5 和 PdAu-1/0.25 合金纳米颗粒中无 Au 团簇, 主要以 PdAu 合金形式存在, 这与 XRD 结果相吻合.



a 为 PdAu-1/1, b 为 PdAu-1/0.5, c 为 PdAu-1/0.25

图4 不同摩尔比 PdAu 合金纳米颗粒紫外可见吸收光谱

2.2 催化反应评价

表 1 为不同催化剂在 4-氯硝基苯加氢反应中的性能评价结果. 从表 1 可知, Pd/Al₂O₃ 催化剂 4-氯硝基苯转化率为 37.4%, 对氯苯胺的选择性为 36.6%, 但是副产物较多(21.1%). Au/Al₂O₃ 催化剂的 4-氯硝基苯转化率几乎为零. 与 Pd/Al₂O₃ 催化剂对比, PdAu/Al₂O₃ 催化剂的原料转化率大大提升, 从 37.4%增加到 57.8%(PdAu-1/1/Al₂O₃), 69.4%(PdAu-1/0.5/Al₂O₃), 49.8%(PdAu-1/0.25/Al₂O₃). 同时, 副产物选择性也大大降低, 从 21.1%降低到 10.7%(PdAu-1/1/Al₂O₃), 10.1%(PdAu-1/0.5/Al₂O₃), 3.3%(PdAu-1/0.25/Al₂O₃). 由于纳米 Au 对反应几乎无贡献(表 1 中转化率为 0.42%), 而 PdAu-1/1 表面含有 Au 团簇, 因此使得 PdAu-1/1/Al₂O₃ 催化剂 4-氯硝基苯的转化率(57.8%)比 PdAu-1/0.5/Al₂O₃ 催

表 1 不同催化剂的性能评价

催化剂	转化率/%	选择性/%			
	4-氯硝基苯	对氯苯胺	苯胺	其他	
Pd/Al ₂ O ₃	37.4	36.6	42.3	21.1	
Au/Al ₂ O ₃	0.42	100	0	0	
PdAu-1/1/Al ₂ O ₃	57.8	40	49.3	10.7	
PdAu-1/0.5/Al ₂ O ₃	69.4	35.95	53.95	10.1	
PdAu-1/0.25/Al ₂ O ₃	49.8	37	59.7	3.3	

注: 活性组分与 Al₂O₃ 的质量比为 1%.

化剂的转化率(69.4%)更低. 对于 PdAu-1/0.5/Al₂O₃ 和 PdAu-1/0.25/Al₂O₃ 催化剂, PdAu-1/0.5/Al₂O₃ 催化剂的活性更强, 这可能是由于 PdAu-1/0.5/Al₂O₃ 催化剂金属原子之间的协同作用以及金属和载体之间的相互作用更强.

3 结论

通过乙二醇连续还原法, 以聚乙烯吡咯烷酮为保护剂成功制备了 PdAu 合金纳米颗粒. XRD、TEM 和 FTIR 结果表明, Pd 与 Au 形成了合金结构的纳米颗粒, 颗粒大小分布均匀, 粒径可控. 同时, XRD 和 FTIR 也表明, Pd 原子与 Au 前驱体发生了置换反应, 最终颗粒形成 PdAu 合金, 从而改变了 4-氯硝基苯加氢的转化率和选择性. 与单独的 Pd/Al₂O₃(37.4%)和 Au/Al₂O₃ 催化剂相比, PdAu 合金催化剂大大提高了 4-氯硝基苯的转化率, 并显著降低了副反应的发生, 其中 PdAu-1/0.5/Al₂O₃ 催化剂具有最高的 4-氯硝基苯转化率(69.4%), 这可能归因于金属间的协同作用和金属与载体间的相互作用.

参考文献:

- [1] 周颖, 陈立宇, 李映伟. 纳米多相催化材料在常温反应中的应用[J]. 化工进展, 2015, 34(10):3530-3539.
- [2] SU R, TIRUVALAM R, HE Q, et al. Promotion of phenol photodecomposition over TiO₂ using Au, Pd, and Au-Pd nanoparticles[J]. ACS Nano, 2012, 6(7):6284-6292.
- [3] XU J, WHITE T, LI P, et al. Biphasic Pd-Au alloy catalyst for low-temperature CO oxidation[J]. J Am Chem Soc, 2010, 132(30):10398-10406.
- [4] HECK K N, NUTT M O, ALVAREZ P, et al. Deactivation resistance of Pd/Au nanoparticle catalysts for water-phase hydrodechlorination[J]. J Catal, 2009, 267(2):97-104.
- [5] DIMITRATOS N, LOPEZ-SANCHEZ J A, MEENAKSHISUNDARAM S, et al. Selective formation of lactate by oxidation of 1,2-propanediol using gold palladium alloy supported nanoparticles[J]. Green Chem, 2009, 11(8):1209-1216.
- [6] OKAMOTO H, MASSALSKI T B. Alloy phase diagrams [EB/OL]. [2015-12-10]. <http://products.asminternational.org/hbk/index.jsp>.
- [7] LIM B, KOBAYASHI H, YU T, et al. Synthesis of Pd-Au bimetallic nanocrystals via controlled overgrowth [J]. J Am Chem Soc, 2010, 132(8):2506-2507.

- [8] ZHANG K, XIANG Y J, WU X C, et al. Enhanced optical responses of Au@Pd core/shell nanobars[J]. *Langmuir*, 2009, 25(2):1162-1168.
- [9] ZHU C, ZENG J, TAO J, et al. Kinetically controlled overgrowth of Ag or Au on Pd nanocrystal seeds: From hybrid dimers to nonconcentric and concentric bimetallic nanocrystals[J]. *J Am Chem Soc*, 2012, 134(38):15822-15831.
- [10] DING Y, FAN F R, TIAN Z Q, et al. Atomic structure of Au-Pd bimetallic alloyed nanoparticles[J]. *J Am Chem Soc*, 2010, 132(35):12480-12486.
- [11] ZHAI Y M, ZHAI J F, DONG S J. Temperature-dependent synthesis of CoPt hollow nanoparticles: From "Nanochain" to "Nanoring"[J]. *Chem Commun*, 2010, 46(9):1500-1502.
- [12] CHEN X B, NARAYANAN R, BURDA C, et al. Chemistry and properties of nanocrystals of different shapes[J]. *Chem Rev*, 2005, 105(4):1025-1102.
- [13] TAUSTER S J. Strong metal-support interactions[J]. *Acc Chem Res*, 1987, 20(11):389-394.
- [14] MOLINER M, SERNA P, CANTIN A, et al. Synthesis of the Ti-silicate form of BEC polymorph of beta-zeolite assisted by molecular modeling[J]. *J Phys Chem C*, 2008, 112(49):19547-19554.
- [15] LIU X Y, LIU M H, LUO Y C, et al. Strong metal-support interactions between gold nano-particles and ZnO nanorods in CO oxidation[J]. *J Am Chem Soc*, 2012, 134(24):10251-10258.
- [16] WANG X D, PERRET N, DELGADO J J, et al. Reducible support effects in the gas phase hydrogenation of p-chloronitrobenzene over gold[J]. *J Phys Chem C*, 2013, 117(2):994-1005.
- [17] SUN Y G, XIA Y N. Shape-controlled synthesis of gold and silver nanoparticles[J]. *Science*, 2002, 298(5601):2176-2179.
- [18] XIONG Y J, CHEN J Y, WILEY B, et al. Understanding the role of oxidative etching in the polyol synthesis of Pd nanoparticles with uniform shape and size[J]. *J Am Chem Soc*, 2005, 127(20):7332-7333.
- [19] ZHANG P P, HU Y B, LI B H, et al. Kinetically stabilized Pd@Pt core-shell octahedral nanoparticles with thin Pt layers for enhanced catalytic hydrogenation performance[J]. *ACS Catal*, 2015, 5(2):1335-1343.
- [20] BULUSHEV D A, BELOSHAPKIN S, PLYUSNIN P E, et al. Vapour phase formic acid decomposition over PdAu/c-Al₂O₃ catalysts: Effect of composition of metallic particles[J]. *J Catal*, 2013, 299:171-180.
- [21] JOHNSON S R, RVANS S D, MAHON S W, et al. Alkanethiol molecules containing an aromatic moiety self-assembled onto gold clusters[J]. *Langmuir*, 1997, 13(1):51-57.

Synthesis, Characterization and Catalytic Activity of PdAu/Al₂O₃ for p-Chloronitrobenzene Hydrogenation

XIE Zhao-hui¹, YU Hong-bo², LIU Jin-jun^{1*}

(¹ Faculty of Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

² Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315211, China)

Abstract: PdAu alloy nanoparticles with different molar ratio have been synthesized via sequential reduction method using glycol as the reductant. The results of XRD, TEM, DRIFT-IR and UV-visible spectra indicate that Au in sodium tetrachloroaurate (NaAuCl₄) is partially replaced by Pd, resulting with the rearrangement of the surface atoms, thus the nanoparticles of Pd and Au are generated in the form of PdAu alloy with controllable particle size. PdAu/Al₂O₃ catalyst is prepared using the co-precipitation method and applied for p-chloronitrobenzene (p-CNB) hydrogenation with H₂. Compared with Au/Al₂O₃ (the conversion of p-CNB being 0) and Pd/Al₂O₃ (the conversion of p-CNB being 37.4%) catalysts, the catalytic performance of PdAu/Al₂O₃ catalyst is significantly improved, where PdAu-1/0.5/Al₂O₃ exhibits the best catalytic performance with the highest conversion of p-CNB being 69.4%, which is probably attributed to the synergistic effect among PdAu nanoparticles and strong interaction between PdAu and Al₂O₃ support.

Key words: PdAu nano-alloy particle; size controlled; catalytic hydrogenation; p-chloronitrobenzene

(责任编辑 史小丽)