

Pt@超支化缩水甘油复合纳米材料的制备及其催化硝基芳烃加氢性能研究

谭寰亚, 张豪跃, 邓 益, 赵燕熹, 黄 涛*

(中南民族大学化学与材料科学学院, 催化转化与能源材料化学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要:利用超支化聚缩水甘油(HPG)的溶剂选择性自组装,以 PtCl_4 作为金属前驱体,100℃油浴反应30 min,得到HPG自组装结构负载的Pt纳米材料(Pt@HPG);继而在400℃煅烧2 h,得到部分碳化的超支化缩水甘油自组装骨架限域稳定的Pt纳米颗粒(Pt@HPG-400)。用 Pt@HPG-400 作为硝基苯加氢催化剂、甲醇为溶剂、0.5 MPa H_2 压力下,室温下反应20 min,即可使硝基苯完全转化为苯胺,循环使用10次仍保持催化性能不变。 Pt@HPG-400 对其他硝基芳烃的室温高选择性加氢同样具有优异的催化性能。

关键词:超支化聚缩水甘油;Pt;复合纳米材料;硝基苯;加氢

中图分类号: O643.3;TQ323.4

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)S2-0093-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S2.017

Preparation of Pt@hyperbranched polyglycerol nanocomposite and its catalytic performance for nitroarene hydrogenation

TAN Huan-ya, ZHANG Hao-yue, DENG Yi, ZHAO Yan-xi, HUANG Tao*

(Key Laboratory of Catalysis and Energy Materials Chemistry of Ministry of Education, School of Chemistry and Materials Science, South-Central Minzu University, Wuhan 430074, China)

Abstract: Pt nanomaterials supported with HPG self-assembled structures (Pt@HPG) were obtained under oil bath at 100℃ for 30 min with PtCl_4 as the metal precursor by using supramolecular self-assembly of a hyperbranched polyglycerol (HPG) in methanol. Subsequently, stable Pt nanoparticles confined within the partially carbonized self-assembled skeletons of HPG (Pt@HPG-400) were successfully prepared by calcination at 400℃ for 2 h. With the as-prepared Pt@HPG-400 as the catalyst, nitrobenzene was completely converted to aniline at room temperature (25℃) under 0.5 MPa H_2 pressure within 20 min, and the catalytic activity remained unchanged even after 10 cycles. As the catalyst, Pt@HPG-400 also demonstrated excellent performance for the highly selective hydrogenation of other nitroarenes at room temperature.

Key words: hyperbranched polyglycerol; Pt; nanocomposite; nitrobenzene; hydrogenation

超支化聚合物呈高度支化结构,具有丰富的活性端基,表现出低粘度、溶解性好、化学反应活性高等特点,因此其广泛应用引起了人们的浓厚兴趣^[1]。与树枝状大分子相比,超支化聚合物在不同溶剂中可以发生不同的超分子自组装^[2-4],使其可以作为模板剂或添加剂用于合成纳米颗粒或功能性复合纳米材料。其在所选择的溶剂中超分子自组装,可以形成单分子胶束、囊泡、微管、多孔或空心球等各种结构^[5-6],形成三维网络和多级空腔,有利于纳米颗粒的分散和稳定;且其表面和内部丰富极性基团可以作为金属离子的配位位点,从而有效实现金属离子的原位还原和纳米粒子的限域生长与稳定^[7-10]。利用特定超支化聚合物作为模板剂或限域

稳定剂制备负载型金属纳米粒子等复合纳米材料已有一些报道。例如,利用超支化聚合物作为稳定剂及模板剂成功制备了Pd纳米颗粒、Ag纳米颗粒、单分散Rh和Pt纳米颗粒等^[11-16]。但是所制备的复合结构的稳定性仍受溶剂的影响,使其在催化领域的应用受到限制。

近年来,我们成功制备了在硝基芳烃选择性加氢中表现出良好催化活性和稳定性的超支化聚酯自组装骨架限域稳定的Ir纳米粒子^[17]。本文以二代端羟基超支化聚缩水甘油(HPG)作为原始载体,利用其在一定溶剂中的选择性自组装,实现 PtCl_4 的原位还原;然后在一定温度(400℃)下煅烧实现自组装结构的部分碳化和交联,得到部分碳化的超支

收稿日期:2026-04-20;修回日期:2026-06-14

基金项目:国家自然科学基金项目(21273289);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CZZ20002)

作者简介:谭寰亚(2001-),男,硕士生,研究方向为纳米材料合成与应用,3438824542@qq.com;黄涛(1966-),男,博士,教授,研究方向为纳米材料与纳米催化,通讯联系人,huangt208@163.com。

化缩水甘油自组装骨架负载的金属 Pt 纳米粒子 (Pt@ HPG-400), 构筑一种新型高效的超稳定金属铂纳米催化体系, 并将其用于硝基苯及其他硝基芳烃室温下快速选择性加氢。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

PtCl₄ (纯度 99.9%, Pt 质量分数 57%), 昆明贵研新材料科技有限公司生产; 三羟甲基丙烷、四氢呋喃、缩水甘油 (C₃H₆O₂)、甲醇钾、甲醇、NaHCO₃、丙酮、硝基苯及其他芳香族硝基化合物, 国药集团上海化学试剂有限公司生产; 所有试剂均为分析纯。

FEI Talos F200X G2 场发射透射电子显微镜; SU8010 扫描电子显微镜; Bruker D8 X-射线粉末衍射仪; ESCALAB 250Xi X-射线光电电子能谱仪; Nexus 470 傅里叶红外光谱仪; GC 2010 Plus 气相色谱仪; CGF-50 mL 高压可视反应釜。

1.2 HPG 的制备

称取 5 mg 三羟甲基丙烷 (TMP) 与 6 mg 甲醇钾 (CH₃OK), 置于盛有 3 mL 四氢呋喃 (THF) 的三颈烧瓶中, 超声使混合均匀, 放入 45℃ 油浴锅中搅拌 30 min; 然后将油浴温度升至 90℃, 在 N₂ 保护下利用微量注射泵将 10 mL 的缩水甘油以 2 mL/h 的速率注入烧瓶中, 在 N₂ 保护下 90℃ 恒温反应 20 h; 自然冷却至室温, 加入适量乙醇搅拌溶解; 再加入丙酮沉降; 倾出上清液, 将沉淀置于真空干燥箱 45℃ 干燥过夜, 即得 HPG。

1.3 Pt@ HPG-400 复合纳米材料的制备

称取 17.32 mg PtCl₄, 加入盛有 5 mL 甲醇的圆底烧瓶中, 搅拌溶解; 再加入 8.4 mg NaHCO₃ 以及 5 mL 溶有 200 mg HPG 的甲醇溶液, 超声 10 min 使混合均匀。反应物摩尔比为 Pt(IV): HPG: NaHCO₃ = 1:4:2。

将烧瓶转移至 100℃ 油浴锅, 磁力搅拌反应至溶液由黄变黑后, 继续反应 30 min; 自然冷却至室温, 将反应混合溶液转移至旋转蒸发器, 45℃ 旋蒸除去溶剂, 再转移至瓷舟中放入 50℃ 烘箱内干燥, 即可得到 HPG 负载 Pt 纳米材料, 简记为 Pt@ HPG。

将装有 Pt@ HPG 的瓷舟置于管式炉内, 通 N₂ 排除空气。程序升温至 400℃, 升温速率 5℃/min, 保持 N₂ 气氛下 400℃ 煅烧 2 h; 自然冷却至室温, 取出研磨, 得黑色粉末, 即为部分碳化的 HPG 自组装结构限域的 Pt 纳米颗粒, 简记为 Pt@ HPG-400。对其进行了 X-射线衍射 (XRD)、扫描透射电子显

微镜 (STEM)、能量色散光谱仪 (EDS)、扫描电子显微镜 (SEM)、傅里叶变换红外光谱 (FT-IR) 及 X 射线光电电子能谱 (XPS) 等分析和表征。

1.4 催化加氢实验

将 Pt@ HPG-400 应用于硝基苯的催化加氢实验。在聚四氟乙烯内衬不锈钢反应釜中依次加入 10 mL 甲醇、1.0 mmol 硝基苯和 3 mg Pt@ HPG-400。通入 H₂ 至 0.5 MPa; 室温 (25℃) 下反应 20 min。停止反应, 用注射器吸取 1 mL 反应混合物, 0.22 μm 微孔滤膜过滤, 滤液进行气相色谱 (GC) 分析。色谱柱为 Wonda Cap (30 m×0.25 mm×0.25 μm), 进样量为 100 L, 柱温为 50℃, 检测器温度 240℃, 气化室温度 240℃, 升温速率 10℃/min。

保持其他条件不变, 考察溶剂、用量、时间及氢气压力对 Pt@ HPG-400 催化性能的影响。

催化剂循环测试: 反应完毕取 1 mL 反应混合物进行 GC 测试, 再向体系中加入 1 mmol 硝基苯与 1 mL 甲醇, 通入 H₂ 排除空气后继续通入 H₂ 至 0.5 MPa, 室温下反应 20 min。停止反应, 再次吸取 1 mL 反应混合物进行 GC 检测。如此反复。

2 结果与讨论

2.1 STEM 和 SEM 表征

图 1(a)、(b) 分别为所制备的 Pt@ HPG-400 的 STEM 和 SEM 照片。从图 1(a) 可以观察到大量的金属 Pt 纳米颗粒, 平均粒径为 (3.79±0.05) nm, 分散性良好; 图 1(b) 的 SEM 观察显示 Pt@ HPG-400 呈现类似海绵状结构。这是由于 HPG 在甲醇中形成的自组装结构经过煅烧后发生部分碳化和交联, 最终形成了具有海绵状多孔道结构的稳定骨架, 使原位生成的 Pt 纳米颗粒得到较好地分散和稳定。

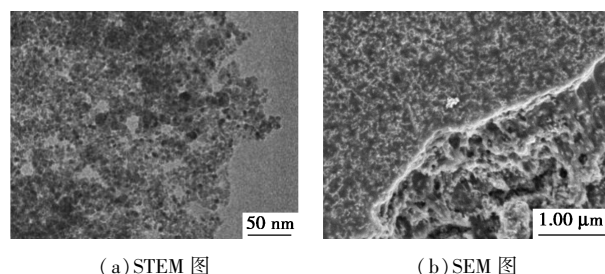
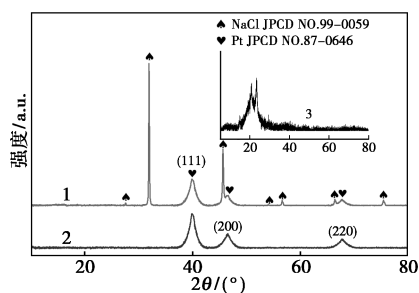


图 1 Pt@ HPG-400 的 STEM 和 SEM 图

2.2 XRD 分析

图 2 为 HPG 及所制备的 Pt@ HPG-400 水洗后的 XRD 图谱。从 XRD 图谱可以看出, HPG 在 21°处有两宽峰。这是由于 HPG 是一种高度支化的聚合物, 没有明显的结晶态, 在 XRD 图谱中呈现宽

峰的状态,且出峰位靠前。Pt@ HPG-400 的 XRD 图谱观察到两组明显的衍射峰,未观察到对应于 HPG 的衍射峰。位于 39.9、46.5、67.6° 处的宽峰分别对应了 Pt 的 (111)、(200)、(220) 晶面 (Pt 标准卡片 JCPDS NO. 87—0646),表明 Pt@ HPG-400 中存在大量单质 Pt,峰形较宽说明其颗粒粒径较小;另一组位于 27.5、31.7、45.5、54.1、56.5、66.3、75.8° 的较强尖锐衍射峰,与 NaCl 的标准 XRD 数据相吻合 (标准卡片 JCPDS NO.99—0059),分别对应于 NaCl 的 (111)、(200)、(220)、(311)、(222)、(400)、(420) 晶面。Pt@ HPG-400 水洗后的样品只观察到 Pt 的衍射峰,NaCl 的衍射峰消失。这是由于煅烧后 HPG 发生部分碳化交联,因而 HPG 峰消失;同时,在制备过程中加入了碳酸氢钠,在金属前驱体被还原后,游离的 Cl^- 与 Na^+ 结合产生了 NaCl,样品经水洗后 NaCl 被洗涤去除。



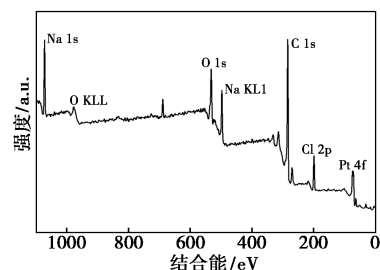
1—Pt@ HPG-400(未水洗);2—Pt@ HPG-400 水洗后;3—HPG

图 2 Pt@ HPG-400 的 XRD 谱图

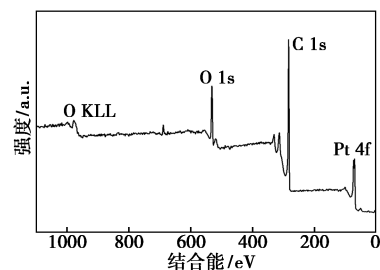
2.3 XPS 分析

图 3(a)、(b)分别为 Pt@ HPG-400 水洗前后的 XPS 全谱分析。可以看出,水洗前后 Pt@ HPG-400 中均存在 Pt、C 和 O 元素。此外,水洗前在 1 075 eV 和 500 eV 处分别出现 Na 1s 轨道和 KLL 俄歇峰,水洗后这些峰消失;同时,水洗前 201 eV 处对应 Cl 2p 轨道峰在水洗后消失。这些结果进一步证明所制备的 Pt@ HPG-400 样品中产生了 NaCl,经水洗 NaCl 基本被洗除。图 3(c)~(e)分别为 Pt@ HPG-400 水洗后样品对应 Pt、C 和 O 的 XPS 谱图。如图 3(c)所示,Pt 4f_{5/2} 和 Pt 4f_{7/2} 的 XPS 峰分别位于 74.3 eV 和 70.8 eV,与金属 Pt 的标准结合能 (74.25、70.9 eV)^[18] 基本一致,证实 Pt@ HPG-400 中金属纳米颗粒为单质 Pt。C 1s 的 XPS 除 284.8 eV 峰外,在 283.7、286.0 eV 和 287.8 eV 处分别对应于 C=C、C—O 与 C=O,进一步说明在 Pt@ HPG-400 制备过程中发生了部分碳化,聚合物裂解形成了 C=C 键,部分醚键发生了羰基化,同时仍保留了部

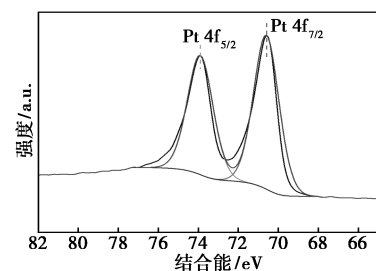
分 C—O 键,如图 3(d);O 1s 在 531.2、533.0、534.4 eV 的 XPS 峰分别对应于 O—Pt 及 C—O 和 C=O [图 3(e)],进一步说明 Pt@ HPG-400 中 HPG 的部分碳化特征。



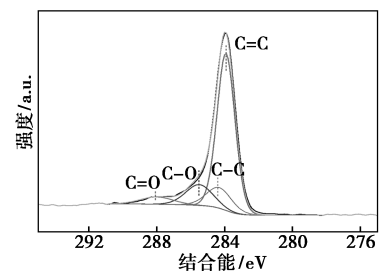
(a) Pt@ HPG-400(水洗前)全谱



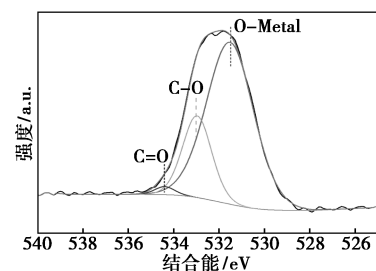
(b) Pt@ HPG-400(水洗后)全谱



(c) Pt 4f



(d) C 1s



(e) O 1s

图 3 Pt@ HPG-400 的 XPS 图谱

2.4 Pt@HPG-400 催化硝基苯加氢

2.4.1 溶剂的影响

研究发现,所制备的 Pt@HPG-400 样品水洗前后表现出同样的催化性能。未水洗的样品中的 NaCl 对其催化性能无影响。为此,上述实验条件下均使用未水洗 Pt@HPG-400 样品催化硝基苯加氢。在不同溶剂中 Pt@HPG-400 催化硝基苯加氢反应 20 min,结果如表 1。在甲醇中,反应转化率和选择性均达到 100%;在乙醇或异丙醇中,转化率 100%,选择性 90% 以上;而以正丁醇、四氢呋喃或乙酸乙酯为溶剂时,硝基苯转化率和苯胺选择性均较低。从溶剂介电常数可知,质子溶剂的极性越大越有利于硝基苯的加氢。这是由于极性质子溶剂有利于氢气的吸附与解离以及硝基苯的吸附和产物苯胺的脱附,而非质子溶剂不利于氢气和硝基苯的吸附。因此,该反应体系最佳溶剂为甲醇。

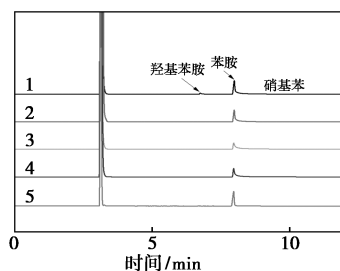
表 1 不同溶剂中 Pt@HPG-400 催化硝基苯加氢结果

序号	溶剂	介电常数	转化率/%	选择性/%
1	甲醇	32.60	100.0	100.0
2	乙醇	24.30	100.0	93.4
3	异丙醇	18.30	100.0	98.3
4	正丁醇	17.10	33.3	50.0
5	四氢呋喃	7.58	33.7	58.0
6	乙酸乙酯	6.02	14.6	52.9

反应条件:3 mg 催化剂,1 mmol 硝基苯,10 mL 溶剂,0.5 MPa 氢压,25℃ 反应 20 min。

2.4.2 催化剂用量的影响

该表 Pt@HPG-400 的用量,硝基苯加氢反应产物的 GC 曲线如图 4 所示,相关数据见表 2。结果表明,1 mg Pt@HPG-400 催化剂即可在常温下 20 min 实现硝基苯的完全转化,但由于催化剂的量偏少,只得到 92% 的苯胺,存在少量羟基苯胺中间体。当 Pt@HPG-400 用量增加到 3 mg 时,苯胺选择性达



1—1 mg;2—2 mg;3—3 mg;4—4 mg;5—5 mg

图 4 催化剂不同用量下产物的 GC 谱图

表 2 Pt@HPG-400 用量对硝基苯加氢的影响

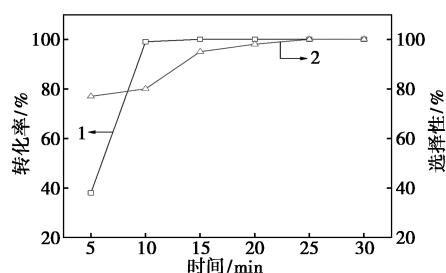
催化剂用量/mg	转化率/%	选择性/%
1	100	92
2	100	98
3	100	100
4	100	100
5	100	100

反应条件:1 mmol 硝基苯,10 mL 甲醇,0.5 MPa 氢压,25℃ 反应 20 min。

到 100%。继续增加 Pt@HPG-400 用量对反应无影响。可见,在上实验条件下只需 3 mg Pt@HPG-400 即可实现硝基苯的完全转化及 100% 苯胺选择性。

2.4.3 反应时间的影响

不同反应时间下 Pt@HPG-400 催化硝基苯加氢产物 GC 分析结果如图 5 所示。反应 5 min 时,38% 硝基苯发生转化,苯胺选择性 77%;反应 5 ~ 10 min,转化率快速增加;反应进行到 15 min 时,硝基苯完全转化,且产物选择性达到 95%。反应 5 ~ 15 min 期间,由于反应时间较短,羟基苯胺中间体未能及时转化为苯胺。反应进行 20 min,反应转化率和产物选择性均达到 100%。因此,在常温及 0.5 MPa 氢气压力下,Pt@HPG-400 催化硝基苯加氢的最适宜反应时间为 20 min。



1—转化率;2—选择性

图 5 反应时间对 Pt@HPG-400 催化性能的影响

2.4.4 反应压力的影响

不同压力下 Pt@HPG-400 催化硝基苯加氢反应产物的转化率和选择性分布曲线如图 6 所示。结果表明,0.1 MPa H_2 压力时,转化率即达 100%,苯胺选择性达 93%。可见,即便在常压下加氢即可使硝基苯完全转化,其选择性未达到 100% 是由于 H_2 的量过少,导致中间体未能完全转化为苯胺。随着氢压的增大,产物选择性进一步增加。当体系压力增加到 0.5 MPa 时,反应转化率和选择性均达到 100%。继续增大反应体系氢气压力,转化率和选择

性无影响。即 Pt@ HPG-400 催化硝基苯加氢反应体系的最佳氢气压力为 0.5 MPa。

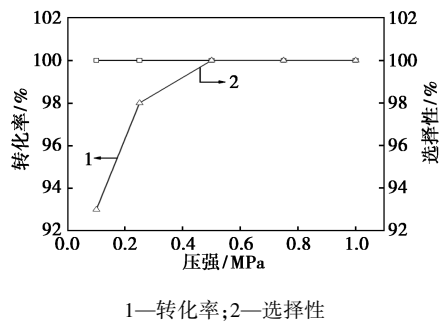


图 6 压力对 Pt@ HPG-400 催化性能的影响

2.4.5 催化剂循环使用效果

硝基苯加氢过程中 Pt@ HPG-400 催化剂重复使用效果如表 3。结果显示,1 mmol 硝基苯的催化加氢,3 mg Pt@ HPG-400 循环使用 10 次催化性能基本不变,硝基苯转化率和苯胺选择性仍保持 99% 以上。由此可见,Pt@ HPG-400 对硝基苯在室温下的快速加氢不仅保持极高的催化活性,而且具有良好的稳定性和可重复使用性。

表 3 催化剂循环使用效果

循环次数	转化率/%	选择性/%
1	100	100
2	100	100
3	100	100
4	100	100
5	100	100
6	100	100
7	100	100
8	100	100
9	99	100
10	99	99

反应条件:3 mg Pt@ HPG-400,10 mL 甲醇,1.0 mmol 硝基苯,0.5 MPa H₂ 压,25℃ 反应 20 min。

2.4.6 其他硝基芳烃的催化加氢效果

将 Pt@ HPG-400 应用于其他硝基芳烃的催化加氢,结果如表 4。3 mg 催化剂在 0.5 MPa 的 H₂ 压力下,25℃ 反应 20~40 min 即可将大多数硝基芳烃完全转化为相应的芳胺类化合物。其中,卤素以及吸电子基取代的硝基苯衍生物均在 20 min 内完全转化及 99% 以上芳胺选择性;对烯基及炔基取代的硝基苯衍生物的催化加氢,30 min 实现完全转化及 100% 选择性,且只对硝基进行选择性的加氢,很好地

保留了烯基与炔基。其他类型硝基苯衍生物及其他硝基芳烃也均能在 30~40 min 完全转化为相应的芳胺类化合物。由此可见,催化剂 Pt@ HPG-400 在温和条件下对于硝基苯及其衍生物以及其他硝基芳烃都有着极高的催化加氢性能。

表 4 Pt@ HPG-400 催化其他硝基芳烃加氢

序号	反应底物	产物	时间/ min	转化 率/%	选择 性/%
1	<chem>CC1=CC=C(C=C1)[N+](=O)[O-]</chem>	<chem>CC1=CC=C(C=C1)N</chem>	20	100	>99
2	<chem>c1ccccc1[N+](=O)[O-]</chem>	<chem>c1ccccc1N</chem>	20	100	>99
3	<chem>Cc1ccc(cc1)[N+](=O)[O-]</chem>	<chem>Cc1ccc(cc1)N</chem>	20	100	>99
4	<chem>O=[N+]([O-])c1ccc(cc1)</chem>	<chem>Nc1ccc(cc1)</chem>	20	100	>99
5	<chem>Clc1ccccc1[N+](=O)[O-]</chem>	<chem>Clc1ccccc1N</chem>	20	100	>99
6	<chem>Clc1ccc(cc1)[N+](=O)[O-]</chem>	<chem>Clc1ccc(cc1)N</chem>	20	100	>99
7	<chem>Clc1ccc(cc1)[N+](=O)[O-]</chem>	<chem>Clc1ccc(cc1)N</chem>	20	100	>99
8	<chem>BrC1=CC=C(C=C1)[N+](=O)[O-]</chem>	<chem>BrC1=CC=C(C=C1)N</chem>	20	100	>99
9	<chem>Fc1ccc(cc1)[N+](=O)[O-]</chem>	<chem>Fc1ccc(cc1)N</chem>	20	100	>99
10	<chem>Ic1ccc(cc1)[N+](=O)[O-]</chem>	<chem>Ic1ccc(cc1)N</chem>	30	100	>99
11	<chem>Nc1ccccc1[N+](=O)[O-]</chem>	<chem>Nc1ccccc1N</chem>	20	100	>99
12	<chem>Oc1ccc(cc1)[N+](=O)[O-]</chem>	<chem>Oc1ccc(cc1)N</chem>	30	100	>99
13	<chem>OCC1=CC=C(C=C1)[N+](=O)[O-]</chem>	<chem>OCC1=CC=C(C=C1)N</chem>	30	99	>99
14	<chem>CC(=O)C1=CC=C(C=C1)[N+](=O)[O-]</chem>	<chem>CC(=O)C1=CC=C(C=C1)N</chem>	30	100	>99
15	<chem>N#Cc1ccc(cc1)[N+](=O)[O-]</chem>	<chem>N#Cc1ccc(cc1)N</chem>	30	100	>99
16	<chem>CC(=O)C1=CC=C(C=C1)[N+](=O)[O-]</chem>	<chem>CC(=O)C1=CC=C(C=C1)N</chem>	30	100	>99
17	<chem>C=CC1=CC=C(C=C1)[N+](=O)[O-]</chem>	<chem>C=CC1=CC=C(C=C1)N</chem>	30	100	>99
18	<chem>[O-][N+](=O)c1ccc(cc1)[N+](=O)[O-]</chem>	<chem>Nc1ccc(cc1)N</chem>	30	100	>99
19	<chem>C#Cc1ccc(cc1)[N+](=O)[O-]</chem>	<chem>C#Cc1ccc(cc1)N</chem>	40	100	>99
20	<chem>Nc1cccc(c1)[N+](=O)[O-]</chem>	<chem>Nc1cccc(c1)N</chem>	30	100	>99
21	<chem>[O-][N+](=O)c1ccc2ccccc2c1</chem>	<chem>Nc1ccc2ccccc2c1</chem>	40	100	>99

反应条件:3 mg Pt@ HPG-400;10 mL 甲醇;1 mmol 反应底物;0.5 MPa H₂ 压力;25℃。

3 结论

利用一种二代超支化聚缩水甘油(HPG)在甲醇中的超分子自组装,以 PtCl_4 作为金属前驱体,在适量 NaHCO_3 存在下,100℃油浴反应30 min,得到HPG自组装结构负载的金属Pt纳米颗粒(Pt@HPG);继而在400℃煅烧2 h,得到部分碳化的超支化缩水甘油自组装骨架限域稳定的Pt纳米颗粒(Pt@HPG-400)。所制备的 Pt@HPG-400 呈现海绵状多孔结构,Pt纳米颗粒均匀地分散在载体孔道中,平均粒径为3.79 nm。将 Pt@HPG-400 应用于不同硝基芳烃的选择性加氢,以3 mg Pt@HPG-400 作为催化剂,0.5 MPa H_2 压力下,1 mmol 硝基苯在甲醇中室温下加氢反应20 min即可完全转化为苯胺,且 Pt@HPG-400 在反应体系中循环使用10次催化性能保持不变,表现出极高的催化活性、极高的选择性、良好的稳定性和可重复使用性;并且,在室温下 Pt@HPG-400 对硝基苯衍生物等其他芳香族硝基化合物的选择性加氢均表现出优异的催化性能。

参考文献

- [1] Caminade A, Yan D, Smith D K. Dendrimers and hyperbranched polymers[J]. Chemical Society Reviews, 2015, 44: 3870–3873.
- [2] Zhang D, Xu Z, Li J, *et al.* Self-assembly of amido-ended hyperbranched polyester films with a highly ordered dendritic structure[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(18): 16375–16383.
- [3] Li S, Li J, Chen S, *et al.* Hybrid self-assembly and fractal dimension dependence of a carboxyl-ended hyperbranched polyester/ferrocene complex[J]. Materials Chemistry and Physics, 2013, 142(2/3): 513–520.
- [4] Tao W, Liu Y, Jiang B, *et al.* A linear-hyperbranched supermolecular amphiphile and its self-assembly into vesicles with great ductility[J]. The Journal of the American Chemical Society, 2012, 134: 762–764.
- [5] Yan D, Gao C, Frey H. Hyperbranched Polymers: Synthesis, properties, and applications[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
- [6] Zheng Y, Li S, Weng Z, *et al.* Hyperbranched polymers: Advances from synthesis to applications[J]. Chemical Society Reviews, 2015, 44: 4091–4130.
- [7] Yu B, Jiang X, Yin J. Responsive hybrid nanosheets of hyperbranched poly(ether amine) as a 2D-platform for metal nanoparticles[J]. Chemical Communications, 2013, 49(6): 603–605.
- [8] Kalbasi R J, Zamani F. Synthesis and characterization of Ni nanoparticles incorporated into hyperbranched polyamidoamine-polyvinylamine/SBA-15 catalyst for simple reduction of nitro aromatic compounds[J]. RSC Advances, 2014, 4: 7444–7453.
- [9] Ding X, Xu R, Liu H, *et al.* Hyperbranched polymer-assisted hydrothermal in situ synthesis of submicrometer silver tubes[J]. Crystal Growth & Design, 2008, 8(8): 2982–2985.
- [10] Irfan M, Seiler M. Encapsulation using hyperbranched polymers: From research and technologies to emerging applications[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2010, 49: 1169–1196.
- [11] Zhang D, Huo W, Wang J, *et al.* Synthesis of allyl-ended hyperbranched organic silicone resin by halloysite-supported platinum catalyst[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 126: 1580–1584.
- [12] Zhang D, Wang J, Cheng X, *et al.* Synthesis of heterogeneous shape controllable nano-hyperbranched polymer/Pt(0) catalyst with high catalytic activity in hydrosilylation[J]. Macromolecular Research, 2012, 20(6): 549–551.
- [13] Schlotterbeck U, Aymonier C, Thomann R, *et al.* Shape-selective synthesis of palladium nanoparticles stabilized by highly branched amphiphilic polymers[J]. Advanced Functional Materials, 2004, 14(10): 999–1004.
- [14] Zhang Y, Peng H, Huang W, *et al.* Hyperbranched poly(amidoamine) as the stabilizer and reductant to prepare colloid silver nanoparticles in situ and their antibacterial activity[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2008, 112(7): 2330–2336.
- [15] Rybak B M, Ornatska M, Bergman K N, *et al.* Formation of silver nanoparticles at the air-water interface mediated by a monolayer of functionalized hyperbranched molecules[J]. Langmuir, 2006, 22(3): 1027–1037.
- [16] Huang W, Kuhn J N, Tsung C K, *et al.* Dendrimer templated synthesis of one nanometer Rh and Pt particles supported on mesoporous silica: Catalytic activity for ethylene and pyrrole hydrogenation[J]. Nano Letters, 2008, 8(7): 2027–2034.
- [17] Zhang M, Zhang Q, Lu Y, *et al.* Iridium nanoparticles confined within partially carbonized hyperbranched polymers for selective hydrogenation of nitroarenes at room temperature[J]. ACS Applied Nano Materials, 2021, 4(12): 13995–14003.
- [18] Moulder J F, Stickle W F, Sobol P E, *et al.* Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy[M]. Eden Prairie MN: Perkin-Elmer Corporation, 1992. ■