

光促进 Pd/g-C₃N₄ 催化苯乙烯加氢性能研究

肖佩荣, 张盼, 李宇豪, 王琪*, 陈亚中

(合肥工业大学化学与化工学院, 先进催化材料与反应工程安徽省重点实验室, 安徽合肥 230009)

摘要:采用化学还原法制备了载钯石墨相氮化碳催化剂(Pd/g-C₃N₄), 利用 XRD、TEM、XPS 及 PL 等对催化剂进行表征, 并以苯乙烯加氢为探针反应考察了其性能。结果表明, 载体 g-C₃N₄ 呈二维堆叠层状结构, 活性组分 Pd 在 g-C₃N₄ 表面分散均匀, 且主要以零价形式存在。PL 光谱分析表明, Pd 的负载可以促进 g-C₃N₄ 的光生电子空穴分离, 有利于丰富 Pd NPs 表面的电子云密度。当 Pd 负载质量分数为 0.5% 时催化活性最佳, 30℃ 下 2 h 转化率为 80.2%, 加入光照后转化率可达 99.6%。

关键词:钯; g-C₃N₄; 苯乙烯; 催化加氢

中图分类号:TQ032.4

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2021)12-0184-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2021.12.037

Photo promoted catalytic hydrogenation of styrene over Pd/g-C₃N₄

XIAO Pei-rong, ZHANG Pan, LI Yu-hao, WANG Qi*, CHEN Ya-zhong

(Anhui Provincial Key Laboratory of Advanced Catalytic Materials and Reaction Engineering,

School of Chemistry and Chemical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Pd/g-C₃N₄ catalysts are prepared through chemical reduction method, and their structure and morphology are characterized by X-ray diffraction (XRD) transmission electron microscope (TEM), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and photoluminescence spectroscopy (PL). The hydrogenation of styrene is used as probe reaction to investigate the performance of the catalysts. Results show that g-C₃N₄ carrier exhibits two-dimensional stacked layer structure, the active component Pd is uniformly dispersed on the surface of g-C₃N₄, and it mainly exists in the form of zero valence. PL spectrum analysis shows that Pd loading can promote the separation of photogenerated electron holes of g-C₃N₄, which is beneficial to enrich the electron cloud density on the surface of Pd NPs. When Pd loading amount is 0.5 wt%, the catalyst exhibits the best activity, over which the conversion of styrene reaches 80.2% at 30°C in 2 h, and will reach 99.6% after illumination.

Key words: palladium; g-C₃N₄; styrene; catalytic hydrogenation

金属 Pd 具有高原子利用率和良好的催化活性及选择性, 广泛应用于催化加氢反应^[1]。但 Pd 纳米粒子(Pd NPs)比表面能高、易团聚且易被氧化, 从而导致催化活性降低^[2], 因此 Pd 催化剂常被负载于 C^[3]、SiO₂^[4]、Al₂O₃^[5] 等载体上。因为使用合适的载体不仅能稳定 Pd NPs, 且金属与载体间的电子相互作用能改善 Pd NPs 的催化加氢活性。石墨相氮化碳(g-C₃N₄)是一种 2D 纳米材料, 比表面积较大, 表面有—NH₂、—NH 和吡啶官能团等^[6], 有利于分散和稳定 Pd NPs^[7]。Gong 等^[8]以 g-C₃N₄ 为载体, 通过超声还原法制备了高分散 Pd@g-C₃N₄ 催化剂, 并以喹啉氢化为探针反应, 目标产物的收率高达 100%, 远高于商业 Pd@C 的 84%。Xu 等^[9]在介孔石墨碳氮化物上负载 Pd NPs, 常温常压下选择性加氢环己酮可获得 99% 的转化率和 96% 的选择性。Pd 负载在 g-C₃N₄ 上均体现了良好的催化加氢性能。g-C₃N₄ 除了作为载体以外, 由于其具有禁带宽度较小、良好的可见光响应特性, 常被用于光催化反应中。光激发 g-C₃N₄ 产生光生电子, 传递到 Pd

表面, 有利于丰富 Pd 表面电子云密度, 从而促进 Pd 的催化加氢反应进行。

笔者以石墨相氮化碳(g-C₃N₄)为载体, 采用化学还原法负载 Pd NPs, 以苯乙烯催化加氢反应评价催化剂的性能, 研究了不同钯负载量及光照对催化苯乙烯加氢反应的影响。

1 试剂与表征仪器

1.1 试剂

三聚氰胺(C₃H₆N₆)、盐酸(HCl)、氯化钯(PdCl₂)、硼氢化钠(NaBH₄)、氢氧化钠(NaOH)、无水乙醇(C₂H₅OH)、浓硝酸(HNO₃)、苯乙烯(C₈H₈), 均为分析纯, 国药集团化学试剂有限公司生产。

1.2 表征仪器

X'Pert Pro MPD 型 X 射线衍射仪, 荷兰帕纳科公司生产, 测试条件: CuKα 辐射源, 加速电压为 40 kV, 电流为 40 mA, 角速度为 0.02°/s, 扫描角度为 10~90°; JEM-2100F 型透射电镜, 日本电子公司生产; ESCALAB250Xi 型 X 射线光电子能谱仪, 美国

收稿日期: 2021-01-29; 修回日期: 2021-10-06

作者简介: 肖佩荣(1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向为工业催化, 1748756908@qq.com; 王琪(1978-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为工业催化, 通讯联系人, wangqi@hfut.edu.cn。

赛默飞世尔公司生产,以单色化 Al-K α 为 X 射线源,C 1s 的结合能(284.8 eV)为内标;CARY 5000 型紫外-可见近红外分光光度计,安捷伦公司生产;Perkin Elmer LS-55 型荧光分光光度计,美国珀金埃尔默公司生产。

2 实验

2.1 催化剂制备

2.1.1 g-C₃N₄ 的制备

取 5 g 三聚氰胺于坩埚中,在马弗炉中以 3℃/min 的速度升温至 550℃,并保持 4 h,将得到的黄色固体研磨成粉末,记为 g-C₃N₄。

2.1.2 Pd/g-C₃N₄ 的制备

采用化学还原法制备 Pd/g-C₃N₄ 催化剂。具体步骤为:在 25℃ 下,将 0.25 g g-C₃N₄ 加入 150 mL H₂O 中,超声分散 30 min,加入不同体积的 PdCl₂ (6 g/L) 溶液,搅拌 1 h 后,缓慢加入 0.1 mol/L NaOH 溶液,调节 pH 至 9.5,搅拌 2 h 后,迅速加入 NaBH₄ 溶液 [$n(\text{NaBH}_4) : n(\text{Pd}) = 15 : 1$],搅拌 3 h 后进行离心洗涤,于 50℃ 烘箱中干燥即可,催化剂标记为 X-Pd/g-C₃N₄,其中,X 为理论负载量。

2.2 催化剂活性评价

催化加氢反应在常压、30℃ 下进行。取 25 mg 催化剂加入 10 g 无水乙醇中,超声分散 10 min 后加入 0.5 g 苯乙烯,超声分散 10 min。反应开始前通入流量为 20 mL/min 的氢气排空反应体系中的空气,然后维持氢气反应气氛,待加热至 30℃ 后开始搅拌进行反应。可见光条件下催化加氢反应在加热至 30℃ 后,打开氙灯光源(通过 400 nm 截止型滤光片获得可见光)并搅拌进行反应。每隔 10 min 取样,样品用 0.22 μm 的微型滤头过滤后,产物组分通过气相色谱氢火焰离子化检测器检测(岛津 GC2014C,SE54 毛细柱 25 m \times 0.32 mm),由苯乙烯和乙苯的出峰面积比计算苯乙烯的转化率:

$$\text{Conv.}(\%) = \left[\frac{(A_{\text{C}_8\text{H}_8} \times F_{\text{C}_8\text{H}_8})}{(A_{\text{C}_8\text{H}_8} \times F_{\text{C}_8\text{H}_8} + A_{\text{C}_8\text{H}_{10}} \times F_{\text{C}_8\text{H}_{10}})} \right] \times 100\%$$

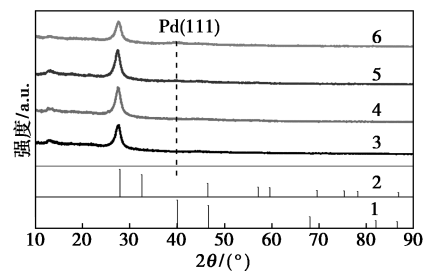
式中: $A_{\text{C}_8\text{H}_8}$ 为反应物苯乙烯的峰面积; $F_{\text{C}_8\text{H}_8}$ 为反应物苯乙烯的校正因子; $A_{\text{C}_8\text{H}_{10}}$ 为产物乙苯的峰面积; $F_{\text{C}_8\text{H}_{10}}$ 为产物乙苯的校正因子。

3 结果与讨论

3.1 X 射线衍射 (XRD) 分析

不同钯负载量催化剂的 XRD 谱图如图 1 所示。由图 1 中可以看出,在 27.4° 出现 1 个较强的衍射峰,对应石墨材料 g-C₃N₄ 的(002)晶面,反映了共

轭芳香系统的层间堆叠结构^[10],表明通过热解的方法成功制备出类石墨相结构的 g-C₃N₄ 材料。负载钯以后,载体 g-C₃N₄ 的特征峰并无明显变化,当负载质量分数达到 0.75% 时,在 40.1° 处出现了 1 个很弱的对应于 Pd(111) 晶面的衍射峰,表明 Pd 粒子晶化程度增加,尺寸增大。

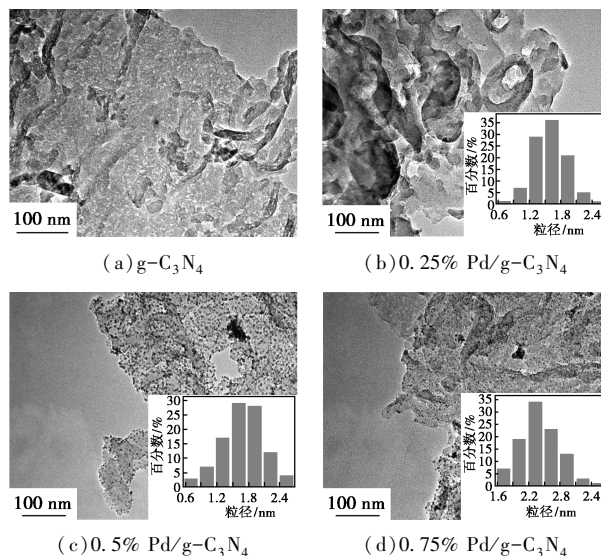


1—Pd (PDF#46-1043); 2—g-C₃N₄ (PDF#50-1512);
3—g-C₃N₄; 4—0.25% Pd/g-C₃N₄;
5—0.5% Pd/g-C₃N₄; 6—0.75% Pd/g-C₃N₄

图 1 不同钯负载量催化剂的 XRD 图

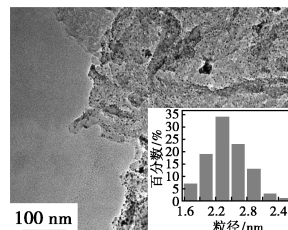
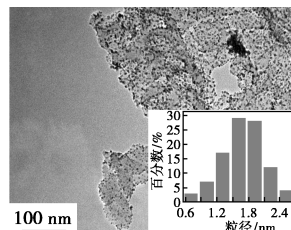
3.2 透射电子显微镜 (TEM) 分析

不同负载量 Pd/g-C₃N₄ 催化剂的 TEM 表征结果如图 2 所示。由图 2(a) 中可以看出,g-C₃N₄ 呈堆叠的二维层状结构,并有轻微聚集。由图 2(b)~图 2(d) 中可以看出,负载 Pd 以后,Pd NPs 在 g-C₃N₄ 表面分布均匀,且 g-C₃N₄ 的形貌并没有改变,说明负载 Pd NPs 并不影响 g-C₃N₄ 本身的形貌。对催化剂中 Pd NPs 的粒径统计分析,随着负载量增加,钯粒子平均粒径分别为 1.63、1.74、2.42 nm。由图 2(e) 中可以看出,高分辨透射电子显微镜显示 Pd NPs 的晶格间距为 0.22 nm,对应于金属 Pd(111) 晶面,与 XRD 数据吻合。由图 2(f)~图 2(h) 中可以看出,催化剂中 C、N、Pd 的元素分布较均匀,表明 Pd 负载比较均匀。



(a) g-C₃N₄

(b) 0.25% Pd/g-C₃N₄



(c) 0.5% Pd/g-C₃N₄

(d) 0.75% Pd/g-C₃N₄

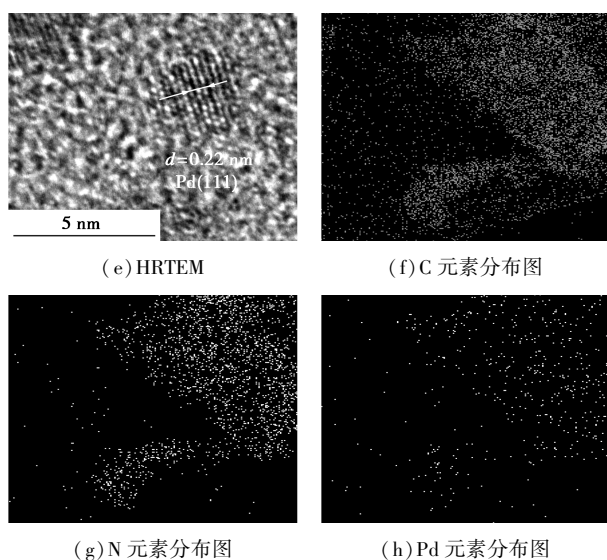
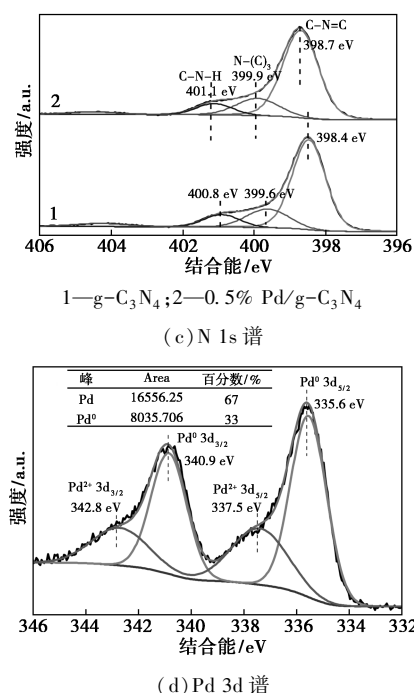
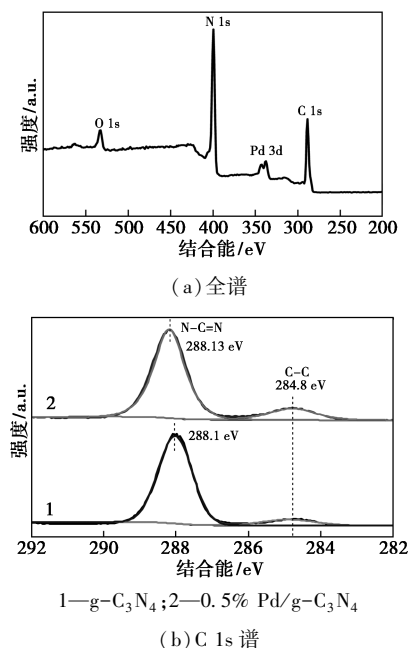


图 2 不同负载量 Pd/g-C₃N₄ 催化剂的 TEM 图

3.3 X 射线光电能谱(XPS)分析

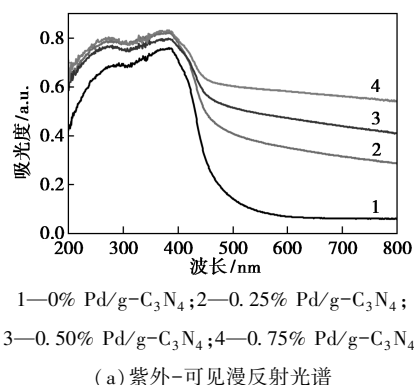
Pd/g-C₃N₄ 催化剂的 XPS 表征结果如图 3 所示。从图 3(a)中可以看出,0.5% Pd/g-C₃N₄ 催化剂中检测出 C、N、O、Pd 元素。以 C 1s 电子结合能 ($E_b = 284.8 \text{ eV}$) 为内标进行校正。从图 3(b)中可以看出,288.1 eV 对应于 g-C₃N₄ 中 sp³ 杂化 N—C=N 的 C。负载 Pd NPs 后,N—C=N 和 C—C 的结合能无明显变化,说明 C 和 Pd 原子之间的相互作用不显著^[11]。从图 3(c)中可以看出,N 1s 谱图中 398.4 eV 属于吡啶氮(C—N=C),399.6 eV 属于三级氮 N—(C)₃,400.8 eV 属于氨基中的氮(C—N—H)。相比于 g-C₃N₄,0.5% Pd/g-C₃N₄ 的 N 1s 的结合能向高结合能移动了 0.3 eV,说明 N 原子的能量密度降低^[12],也证明 Pd NPs 与 g-C₃N₄ 中的 N



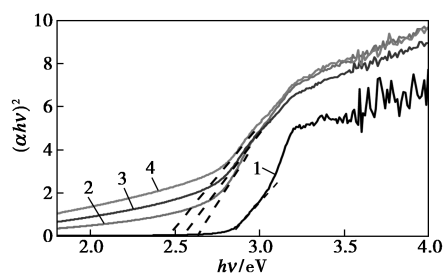
存在着较强的相互作用。如从图 3(d)中可以看出, Pd 3d 的 XPS 能谱可得到 Pd⁰ 和 Pd²⁺ 的能谱峰,其中 Pd⁰ 的质量分数约为 67%,说明 0.5% Pd/g-C₃N₄ 中的 Pd 主要以零价形式存在。

3.4 紫外-可见漫反射吸收光谱(UV-Vis DRS)分析

催化剂的 UV-Vis DRS 谱图及其禁带宽度如图 4 所示。从图 4(a)中可以看出,g-C₃N₄ 在可见光区域的吸收较低,表明 g-C₃N₄ 对可见光的响应较弱。对于 Pd/g-C₃N₄,随着 Pd 负载量的增加,可见光区吸收强度不断增加。由于 Pd NPs 存在表面等离子体共振(SPR)效应,可以增大催化剂对可见光的吸收强度,表明 Pd 的负载有利于产生更多的热电子和空穴^[13],可通过吸收更多的可见光来提高太阳光的利用率^[14]。用 K-M 方程计算出不同负载量催化剂的禁带宽度,如图 4(b)所示。由图 4(b)中可以看出,g-C₃N₄ 的带隙为 2.78 eV,负载钯之后,催化剂的带隙随着钯负载量增大而逐渐减小,光



(a) 紫外-可见漫反射光谱



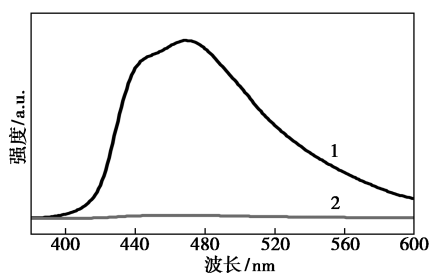
1—2.78 eV; 2—2.64 eV; 3—2.55 eV; 4—2.49 eV
(b) 禁带宽度

图4 不同催化剂的紫外-可见漫反射光谱及禁带宽度

响应能力增强^[15]。

3.5 光致发光谱 (PL) 分析

g-C₃N₄ 是良好的半导体,与纳米粒子之间存在着 Mott-Schottky 效应^[16],g-C₃N₄ 与 0.5% Pd/C₃N₄ 催化剂的光致发光谱如图 5 所示。从图 5 中可以看出,在外界光源的激发下,纯 g-C₃N₄ 的荧光强度很大,说明 g-C₃N₄ 自身的电子空穴复合率高^[17],负载 Pd NPs 之后,催化剂的荧光强度显著降低,据文献^[18]中报道,Pd NPs 与 g-C₃N₄ 之间形成的肖特基势垒也可以抑制光生电子-空穴对的复合,说明负载 Pd NPs 之后,促进了 g-C₃N₄ 表面电子空穴的分离,也间接证实电子由 g-C₃N₄ 向 Pd NPs 迁移,丰富了 Pd NPs 表面的电子云密度。



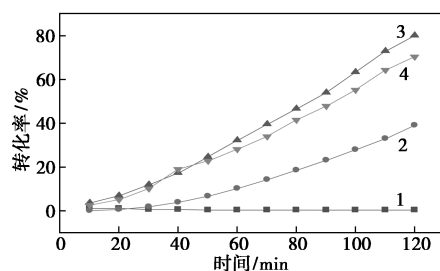
1—g-C₃N₄; 2—0.5% Pd/C₃N₄

图5 g-C₃N₄ 与 0.5% Pd/C₃N₄ 催化剂的光致发光谱

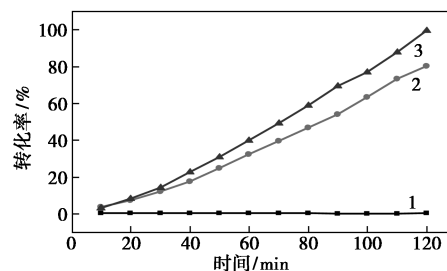
3.6 性能评价

催化剂的活性评价结果如图 6 所示。

由图 6(a)中可以看出,g-C₃N₄ 几乎无活性,负载钯之后催化活性明显提高,说明在该反应中 Pd 是活性组分。当钯负载量从 0.25% 增加到 0.5% 时,苯乙烯的转化率也近似成倍数增加,通过 TEM 表征可知,这 2 种催化剂中 Pd 粒径比较接近,表明 2 种催化剂中 Pd 的活性比较接近。当 Pd 负载量增加到 0.75% 时,催化剂活性反而下降,表明 Pd NPs



1—g-C₃N₄; 2—0.25% Pd/g-C₃N₄;
3—0.50% Pd/g-C₃N₄; 4—0.75% Pd/g-C₃N₄
(a) 不同钯负载量(无光照)



1—g-C₃N₄+光照; 2—0.5% Pd/g-C₃N₄+无光照;
3—0.5% Pd/g-C₃N₄+光照
(b) 不同光照条件

图6 催化剂的活性评价结果

在苯乙烯催化加氢反应中存在一个最佳粒径。由图 6(b)中可以看出,g-C₃N₄ 几乎无催化活性,0.5% Pd/g-C₃N₄ 催化剂在增加可见光照后,苯乙烯的转化率从 80.2% 增加到 99.6%。从 UV-Vis DRS 和 PL 表征结果表明,Pd 的负载不仅减小了带隙,拓宽了对可见光的响应,还显著降低了光生电子和空穴的复合速率,促进了 Pd 表面电子云密度增加,从而提高了催化活性。由此提出的反应机理如图 7 所示。由于 Pd NPs 与半导体间存在 Mott-Schottky 效应,通过可见光激发使 C₃N₄ 表面的电子和空穴分离,电子由 g-C₃N₄ 表面转移到 Pd NPs 表面,丰富其电子云密度,从而提高了催化加氢活性。

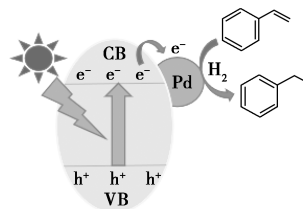


图7 可见光促进苯乙烯催化加氢反应机理

4 结论

制备了 Pd/g-C₃N₄ 催化剂,并考察钯负载量和光照在催化苯乙烯加氢反应中的促进作用。采用 g-C₃N₄ 负载的 Pd NPs 在催化剂表面分散度较好,

其中 Pd 负载量为 0.5% 时催化活性最佳, 30℃ 下 2 h 转化率为 80.2%, 加入光照后转化率可达 99.6%。这是由于在可见光激发下, 促进了 g-C₃N₄ 表面电子和空穴的分离, 电子由 g-C₃N₄ 向 Pd NPs 迁移, 增加了 Pd NPs 表面电子云密度, 进而促进了 Pd 催化剂的加氢活性。

参考文献

- [1] Kim K D, Pokhrell S, Wang Z, *et al.* Tailoring high-performance Pd catalysts for chemoselective hydrogenation Reactions via optimizing the parameters of the double-flame spray pyrolysis [J]. *ACS Catalysis*, 2016, 6(4): 2372-2381.
 - [2] 刘元勋, 杨汉, 陈倡, 等. 超分子水凝胶软反应器制备钯纳米催化剂的研究 [J]. *现代化工*, 2020, 40(12): 97-100, 106.
 - [3] Santos J L, Megías S C, Ivanova S, *et al.* Functionalized biochars as supports for Pd/C catalysts for efficient hydrogen production from formic acid [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2021, 282: 0926-3373.
 - [4] Kwon J S, Baek J H, Lee H S, *et al.* The effect of support pretreatment with ammonia on Pd/SiO₂ Catalyst [J]. *Materials Science Forum*, 2018, 922: 125-129.
 - [5] Byun M Y, Kim J S, Baek J H, *et al.* Liquid-phase hydrogenation of maleic acid over Pd/Al₂O₃ catalysts prepared via deposition-precipitation method [J]. *Energies*, 2019, 12(2): 284-291.
 - [6] 钟秦粤, 陈晶龙, 张文康, 等. Fe₃O₄/g-C₃N₄ 活化过硫酸盐降解罗丹明 B 的研究 [J]. *现代化工*, 2020, 40(7): 95-99, 104.
 - [7] Chen X, Zhang L, Zhang B, *et al.* Highly selective hydrogenation of furfural to furfuryl alcohol over Pt nanoparticles supported on g-C₃N₄ nanosheets catalysts in water [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 28558-28570.
 - [8] Gong Y T, Zhang P F, Xu X, *et al.* A novel catalyst Pd@omp-g-C₃N₄ for highly chemoselective hydrogenation of; Quinoline under mild conditions [J]. *Journal of Catalysis*, 2013, 297(1): 272-280.
 - [9] Xu X, Li Y, Gong Y, *et al.* Synthesis of palladium nanoparticles supported on mesoporous N-doped carbon and their catalytic ability for biofuel upgrade [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2012, 134(41): 16987-16990.
 - [10] Chen Z P, Pronkin S, Feller T P, *et al.* Merging single-atom-dispersed silver and carbon nitride to a joint electronic system via copolymerization with silver tricyanomethanide [J]. *ACS Nano*, 2016, 10(3): 3166-3175.
 - [11] Chou Y J, Ku H C, Cheng C C, *et al.* Palladium nanoparticles supported on nanosheet-like graphitic carbon nitride for catalytic transfer hydrogenation reaction [J]. *Catalysis Science & Technology*, 2020, 10: 7883-7893.
 - [12] Kamiya K, Kamai R, Hashimoto K, *et al.* Platinum-modified covalent triazine frameworks hybridized with carbon nanoparticles as methanol-tolerant oxygen reduction electrocatalysts [J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 1-6.
 - [13] Liu Z, Hou W, Pavaskar P, *et al.* Plasmon resonant enhancement of photocatalytic water splitting under visible illumination [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(3): 1111-1116.
 - [14] Wang P, Huang B, Dai Y, *et al.* Plasmonic photocatalysts: Harvesting visible light with noble metal nanoparticles [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2012, 14(28): 9813.
 - [15] 杨权成, 弓志明, 毛艳宇, 等. g-C₃N₄/煤系高岭土复合材料的制备及可见光催化氧化 As(III) 的研究 [J]. *现代化工*, 2020, 40(12): 101-106.
 - [16] Su H, Zhang K X, Zhang B, *et al.* Activating cobalt nanoparticles via the Mott-Schottky effect in nitrogen-rich carbon shells for base-free aerobic oxidation of alcohols to esters [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2017, 139(2): 811-818.
 - [17] Wang Y, Wang X, Markus A, *et al.* Polymeric graphitic carbon nitride as a heterogeneous organocatalyst: From photochemistry to multipurpose catalysis to sustainable chemistry [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2012, 51(1): 68-8.
 - [18] Ong W J, Tan L L, Yun H N, *et al.* Graphitic carbon nitride (g-C₃N₄)-based photocatalysts for artificial photosynthesis and environmental remediation: Are we a step closer to achieving sustainability? [J]. *Chemical Reviews*, 2016, 116(12): 7159-7329. ■
- (上接第 183 页)
- [2] 何应付, 周锡生, 李敏, 等. 特低渗透油藏注 CO₂ 驱油注入方式研究 [J]. *石油天然气学报*, 2010, 32(6): 131-134.
 - [3] 罗懿. 超低渗透油藏 CO₂ 驱提高采收率技术研究与应用 [J]. *石油化工腐蚀与防护*, 2016, 33(2): 5-10.
 - [4] Zhang L, Pu C, Cui S, *et al.* Experimental study on a new type of water shutoff agent used in fractured low permeability reservoir [J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2017, 139(1): 012907.1-012907.9.
 - [5] 柏明星, 贺凯, 段永伟, 等. CO₂ 在能源开发中的应用进展 [J]. *现代化工*, 2018, 38(1): 26-29, 31.
 - [6] 李德祥. CO₂ 驱过程中渗漏和气窜机制及化学控制方法研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
 - [7] 杨昌华, 王庆, 董俊艳, 等. 高温高盐油藏 CO₂ 驱泡沫封堵体系研究与应用 [J]. *石油钻采工艺*, 2012, 34(5): 95-97.
 - [8] 高云丛, 赵密福, 王建波, 等. 特低渗油藏 CO₂ 非混相驱生产特征与气窜规律 [J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(1): 79-85.
 - [9] Le V Q, Nguyen Q P, Sanders A. A novel foam concept with CO₂ dissolved surfactants [C]. *SPE 113370*, 2008.
 - [10] 章杨, 张亮, 陈百炼, 等. 高温高压 CO₂ 泡沫性能评价及实验方法研究 [J]. *高校化学工程学报*, 2014, 28(3): 535-541.
 - [11] 胡永乐, 郝明强, 陈国利, 等. 中国 CO₂ 驱油与埋存技术及实践 [J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(4): 716-727.
 - [12] Enick R M, Olsen D, Ammer J, *et al.* Mobility and conformance control for CO₂ EOR via thickeners, foams, and gels-A literature review of 40 years of research and pilot tests [R]. *SPE 154122*, 2012.
 - [13] Li D X, Ren S R, Zhang P F, *et al.* CO₂-sensitive and self-enhanced foams for mobility control during CO₂ injection for improved oil recovery and geo-storage [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2017, 120: 113-120.
 - [14] 陈楠, 王治红, 刘友权, 等. 温度压力下起泡剂的起泡性和泡沫稳定性研究 [J]. *石油与天然气化工*, 2017, 46(5): 65-68.
 - [15] 周明, 赵金洲, 刘建勋, 等. 磺酸盐型 Gemini 表面活性剂合成研究进展 [J]. *应用化学*, 2011, 28(8): 855-863.
 - [16] 郭东红, 沈文敏, 杨晓鹏, 等. 耐酸耐高温泡沫剂的研制及在超稠油蒸汽吞吐上的应用 [J]. *现代化工*, 2020, 40(10): 175-177.
 - [17] 刘德生, 陈小榆, 周承富. 温度对泡沫稳定性的影响 [J]. *钻井液与完井液*, 2006, 23(4): 10-12, 86. ■