

# Ag/SBA-15 材料的制备及其 CO 催化氧化性能研究

孟祥艳, 侯月强, 南方, 林枫\*  
(菏泽学院化学化工学院, 山东 菏泽 274015)

**摘要:**采用 2 种不同方法将金属 Ag 浸渍在 SBA-15 上制备 Ag/SBA-15 复合材料,通过 SEM、UV-Vis、XRD 对 Ag/SBA-15 复合材料进行表征,并对 Ag/SBA-15 进行 CO 气体催化氧化实验,评价 Ag/SBA-15 复合材料的催化性能。结果表明,去除模板剂后浸渍合成的 Ag/SBA-15 的催化性能较好,其中金属负载量为 1% 的产品催化性能最好,催化所需的温度最低,CO 转化率最高。

**关键词:**Ag/SBA-15; SBA-15; CO 催化氧化

**中图分类号:**X703

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2024)04-0152-04

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.04.029

## Preparation of Ag/SBA-15 material and its catalytic performance for oxidation of carbon monoxide

MENG Xiang-yan, HOU Yue-qiang, NAN Fang, LIN Feng\*

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Heze University, Heze 274015, China)

**Abstract:** Metal Ag is impregnated on SBA-15 via two different methods to prepare Ag/SBA-15 composite material that is then characterized by means of SEM, UV vis and XRD. CO catalytic oxidation experiment is carried out on the prepared Ag/SBA-15 to evaluate its catalytic performance. It is verified that Ag/SBA-15 prepared via impregnation after removing the template has better catalytic performance, and the material with a metal loading of 1% has the best catalytic performance, needing the lowest temperature for catalysis and delivering the highest CO conversion rate.

**Key words:** Ag/SBA-15; SBA-15; CO oxidation

SBA-15 作为一种典型的二维六方孔道结构的介孔氧化硅材料,具备均一可调的孔径、较大的比表面积和孔容、良好的热稳定性以及表面易于修饰等优点<sup>[1]</sup>,是负载纳米金属或金属氧化物颗粒的优良载体,非常有利于活性组分的分散<sup>[2]</sup>。此外,其介孔孔道的限域作用能抑制纳米颗粒团聚,增加负载型催化剂的稳定性和可循环性。因此,近年来金属负载型 SBA-15 催化剂的制备和应用一直是材料与催化科学研究领域的热点<sup>[3-4]</sup>。

目前制备负载型金属纳米催化剂的方法主要有浸渍法<sup>[5]</sup>、沉积法<sup>[6]</sup>、络合法<sup>[7]</sup>、离子交换法<sup>[8]</sup>等。负载型金属纳米催化剂的活性不仅取决于金属纳米粒子的尺寸、分散度以及载体性质,而且也极大程度上受到制备方法的影响。对 SBA-15 材料而言,由于骨架上没有可以交换的阳离子,无法采用离子交换法制备金属负载型催化剂。沉积法如化学气相沉积法、原子层沉积法等往往需要特殊的金属前驱体以及复杂的设备,过程繁琐且成本高昂,限制了其实际应用。而络合法需要在 SBA-15 表面嫁接各种和金属离子有络合作用的官能团,如  $\text{NH}_2$ <sup>[-9]</sup>、 $\text{SH}$ <sup>[-10]</sup>

等,并以此实现金属物种的负载。络合法需要首先对 SBA-15 表面进行功能化修饰,而且受到材料表面硅羟基数量的限制,金属负载量一般较低,无法实现工业化应用。目前制备金属负载型 SBA-15 材料最有前景的方法依然是传统的浸渍法,并逐渐发展出多次浸渍法<sup>[11]</sup>、浸渍沉淀法等<sup>[12]</sup>。然而浸渍法也存在一些缺点,如在干燥和焙烧过程中活性组分会发生迁移和团聚,使金属在 SBA-15 孔道内外分布不均匀,导致催化剂活性降低。因此迫切的需要对负载型催化剂的浸渍制备方法进行改进,优化所制备催化剂上活性组分的分散和催化活性。

CO 气体是一种常见的有毒空气污染物,主要来源于汽车尾气、工业废气排放以及矿物质燃料燃烧等,对人和环境造成了严重威胁。目前将 CO 低温催化氧化为无毒的  $\text{CO}_2$  是消除 CO 最有效的一种方式,在 CO 气体探测器、呼吸用气体净化装置、环境保护领域都有重要的应用前景<sup>[13]</sup>。此外,CO 催化氧化作为最简单且最具代表性的模型反应,常被用于探测新型催化剂的活性或反应机理。迄今为止,研究最多的 CO 氧化催化剂是负载型贵金属催

收稿日期:2023-06-09;修回日期:2024-02-01

基金项目:山东省自然科学基金面上项目(ZR2022MB136)

作者简介:孟祥艳(1984-),女,硕士,实验师,研究方向为多孔纳米材料的制备及应用, mengxiangyan@hezeu.edu.cn; 林枫(1985-),男,博士,副教授,研究方向为功能纳米材料,通讯联系人, linfeng@hezeu.edu.cn。

化剂,如 Au、Pt、Pd、Rh<sup>[14-17]</sup>。然而,贵金属的高成本及稳定性差限制了其实际应用,从而刺激了对非贵金属催化剂的更多研究<sup>[18-19]</sup>,其中 Ag<sub>2</sub>O 因其活性和稳定性良好、价格低廉且容易获得等特点成为贵金属的优良替代品。

笔者主要研究一种复合材料的制备以及它的催化性能,将 SBA-15 作为载体,采用 2 种不同的浸渍方法将不同量的金属 Ag 负载到 SBA-15 上,得到 Ag/SBA-15。通过 XRD、扫描电镜、紫外对 Ag/SBA-15 进行表征,用管式炉气体催化装置来模拟汽车尾气中 CO 的催化反应,研究不同 Ag/SBA-15 材料对 CO 氧化的催化效果。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器及试剂

85-2 数显恒温磁力搅拌器,常州市江南实验仪器厂生产;SHZ-C 水浴恒温振荡器,上海博讯医疗生物仪器股份有限公司生产;H3-18K 台式高速离心机,湖南可成设备有限公司生产;TU-1900 紫外-可见分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司生产;G300 场发射扫描电子显微镜,德国蔡司公司生产;D8 Advance 型 X 射线衍射仪,德国布鲁克公司生产;3020 氮气吸附-脱附仪,美国麦克仪器公司生产。

聚乙氧基聚丙氧基聚乙氧基三嵌段共聚物(EO<sub>20</sub>PO<sub>70</sub>EO<sub>20</sub>,P123)(分析纯),美国 Aldrich 公司生产;正硅酸四乙酯(TEOS)(分析纯),上海麦克林公司生产;硝酸银、盐酸(分析纯),烟台远东精细化工有限公司生产。

### 1.2 催化剂的制备

#### 1.2.1 SBA-15 的制备

将 2.3 g 模板剂 P123 溶解于 40 mL 蒸馏水中,加入浓盐酸 3.8 mL,在 40℃ 下搅拌至完全溶解,往混合液中加入 TEOS 5 mL,保持 40℃ 搅拌 24 h;之后将混合液转移至反应釜中 100℃ 晶化 72 h;冷却后,过滤分离得白色粉末,用水洗涤后烘干,得到未除模板剂的 SBA-15 样品。取部分烘干后样品放入马弗炉中于 500℃ 下煅烧 6 h 去除模板剂,标记为 SBA-15 cal 样品。

#### 1.2.2 Ag/SBA-15 材料

分别取 0.001 6、0.004 8、0.008 g 的 AgNO<sub>3</sub> 于烧杯中,加入少量蒸馏水和 0.1 g SBA-15 粉末,置于搅拌器上搅拌 10 h,直接将烧杯放入烘箱中在 80℃ 下烘干。取出样品冷却后,放在马弗炉内高温煅烧得到 Ag 负载量分别为 1%、3%、5% 的 Ag/

SBA-15 催化剂,依次标记为 SBA-15-1%、SBA-15-3%、SBA-15-5%。采用同样的方法对 SBA-15 cal 进行负载,得到 Ag 负载量为 1%、3%、5% 的 Ag/SBA-15 cal 催化剂,依次标记为 SBA-15 cal-1%、SBA-15 cal-3%、SBA-15 cal-5%。

### 1.3 催化剂的表征

样品的粉末 X 射线衍射表征在 Bruker 公司生产的 D8 Advance 型 X 射线粉末衍射(XRD)仪上进行,CuK $\alpha$  射线( $\lambda = 0.154\ 18\ \text{nm}$ ),工作电流为 40 mA,电压为 40 kV,扫描范围为  $20^\circ \leq 2\theta \leq 90^\circ$ ,扫描速度为  $1^\circ/\text{min}$ ;样品的形貌采用德国蔡司公司生产的 G300 场发射扫描电子显微镜(SEM)进行表征,加速电压为 1 kV。

### 1.4 CO 催化氧化

CO 氧化反应在常压固定床反应器上进行,将 25 mg 催化剂固定在石英管中,用热电偶监测并控制催化床的反应温度,反应气体由 1% CO、20% O<sub>2</sub> 和平衡气 N<sub>2</sub> 气组成,气体流速为 30 mL/min。用红外气体成分分析仪(Gasboard-3100)对出口气体进行在线分析,检测 CO 转化率的变化情况,并记录 CO 完全转化时的温度。

## 2 结果与分析

### 2.1 XRD 分析

SBA-15 cal 的小角度的 XRD 图如图 1 所示。从图 1 中可以看出,SBA-15 cal 在  $1.3^\circ < 2\theta < 1.4^\circ$  时衍射峰峰值比较高,而在  $1.5^\circ < 2\theta < 1.7^\circ$  时衍射峰峰值相对较小。3 个大小不同的衍射峰分别对应于 SBA-15 构造的(100)、(110)、(200)晶面,表明 SBA-15 在其介孔结构上有序程度比较高、晶型比较好。

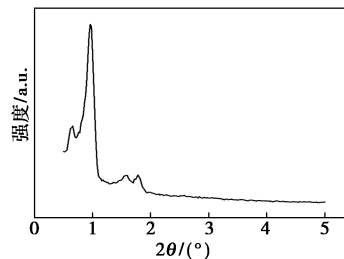
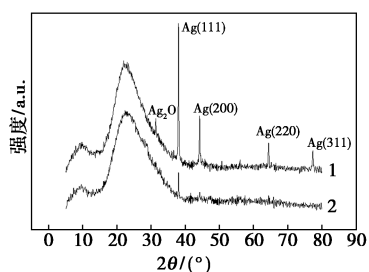


图 1 SBA-15 的 XRD 衍射图

Ag/SBA-15-3% 复合材料的 XRD 分析结果如图 2 所示。由图 2 中可以清晰地看到,煅烧前后样品在  $15^\circ \sim 40^\circ$  之间都存在 1 个非常宽的衍射峰,归属于材料中的 SiO<sub>2</sub>。煅烧前浸渍的样品,  $35^\circ < 2\theta < 80^\circ$  存在 4 个较强的衍射峰,依次是(111)、(200)、(220)、(311)晶面,对应的角度分别是  $38.1^\circ$ 、 $44.2^\circ$ 、

64.4、77.3°。这几个峰是单质 Ag 的衍射峰,说明在材料中有大量金属 Ag 单质物种存在。此外,在 32° 附近出现了 1 个归属于 Ag<sub>2</sub>O 的小衍射峰,说明所制备的 Ag/SBA-15 材料有部分 Ag<sub>2</sub>O 颗粒的存在。煅烧后浸渍制备的样品仅在 38.1° 附近出现 1 个明显的衍射峰,然而该样品中 Ag 的质量分数也在 3%,表明煅烧后浸渍制备的样品中单质 Ag 颗粒的尺寸非常小,以至于无法在 XRD 中体现出来。经过对比可以明显地发现,煅烧前浸渍的样品属于单质 Ag 的 XRD 衍射峰比煅烧后浸渍的峰较强,证明煅烧前浸渍得到的 Ag 物种的迁移团聚比较严重,形成了较大的金属 Ag 颗粒。



1—Ag/SBA-15-3%;2—Ag/SBA-15 cal-3%

图 2 Ag/SBA-15 复合材料的 XRD 衍射图

### 2.2 扫描电镜分析(SEM)

SBA-15、Ag/SBA-15-3%、Ag/SBA-15 cal-3% 的 SEM 图如图 3 所示。

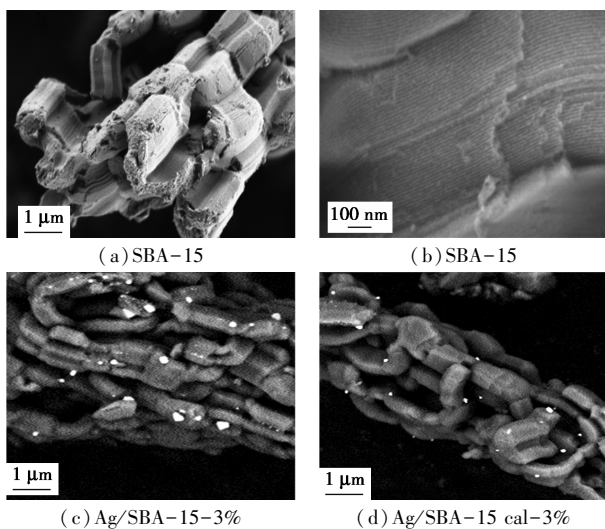


图 3 SBA-15、Ag/SBA-15-3%、Ag/SBA-15 cal-3% 的 SEM 图

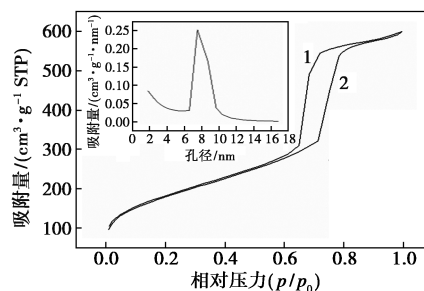
从图 3(a)、图 3(b) 中看出,SBA-15 介孔分子筛主要呈现短棒状的形貌,而且短棒之间互相堆积成一个较大的颗粒。从高分辨的 SEM 图中可以看到,SBA-15 材料具有非常规整的孔道结构,并且沿棒状长度方向形成规则的直孔孔道紧密排列。结果

表明所合成的 SBA-15 材料结构有序度高,具有开放的介孔孔道,与 XRD 谱图的表征结果一致。

从图 3(c) 中可以看出,掺杂金属后对原来 SBA-15 材料形貌并未改变,在 SBA-15 材料的颗粒上可以看到一些纳米颗粒的出现。可以通过图片中衬度的不同分辨材料中不同的材质,SBA-15 颗粒颜色比较暗,而其表面存在一些颜色非常明亮的纳米颗粒,说明附着在 SBA-15 材料表面上的纳米颗粒与 SBA-15 的材质不同,可能是 Ag 颗粒。表明在银浸渍时,银物种在焙烧过程中会发生迁移和团聚,会形成大的 Ag 纳米颗粒,附着在材料外部,无法进入孔道内。从图 3(d) 中可以看出,对 3% Ag/SBA-15 cal 进行背散射电子 SEM 表征,同样发现 SBA-15 表面附着一些 Ag 纳米颗粒,但相对较少,颗粒较小。说明除去模板剂的 SBA-15 在对银进行浸渍时,银物种或者氧化银颗粒更容易进入材料孔道内部。

### 2.3 N<sub>2</sub> 吸附-脱附分析

SBA-15 cal 的氮气吸附-脱附等温线和孔径分布曲线如图 4 所示,相关结构参数如表 1 所示。



1—N<sub>2</sub> 脱附曲线;2—N<sub>2</sub> 吸附曲线

图 4 SBA-15 cal 氮气吸附-脱附曲线和孔径分布图

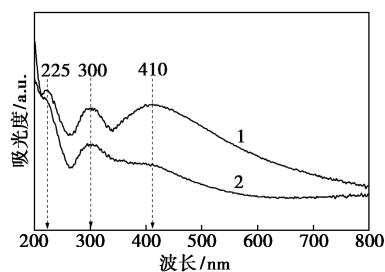
表 1 SBA-15 cal 相关结构参数

| 样品     | 比表面积/(m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> ) | 孔容/(cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> ) | 平均孔径/nm |
|--------|---|--|---------|
| SBA-15 | 643.879                                 | 0.719                                  | 7.49    |

从图 4 中可以看出,SBA-15 cal 的氮气吸脱附等温曲线没有重合,呈现出 IV 型,在 0.7 < p/p<sub>0</sub> < 0.8 时,脱附曲线呈现出滞后的现象,表明样品中 SBA-15 cal 中有有序介孔存在,样品的比表面积用 BET 方程计算,样品的孔径分布曲线用 BJH 获得。滞后环的大小显示出制备的 SBA-15 孔径的大小。SEM 电镜表征图也验证了这一结构特点。孔径分布曲线中可以看出,SBA-15 cal 的孔径范围是 6~9 nm,进一步说明材料中存在介孔结构。从表 1 中可以看出,样品的比表面积为 643.879 m<sup>2</sup>/g,孔容为 0.719 cm<sup>3</sup>/g,平均孔径为 7.49 nm。

## 2.4 催化剂的 UV-Vis 光谱分析

煅烧前后浸渍催化剂的紫外-可见吸收光谱 (UV-Vis) 如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 煅烧前浸渍的催化剂在 225、300、410 nm 时出现比较显著的吸收峰。其中 225 nm 附近的吸收峰是由于高分散的 Ag 物种的  $4d^{10} - 4d^95s^1$  之间的电子转移, 300 nm 左右的吸收峰归属于 Ag 团簇物种的吸收峰, 而 410 nm 附近的吸收峰属于金属 Ag 的等离子体振动吸收峰。煅烧后浸渍所制备样品的 UV-Vis 图谱与煅烧前浸渍制备样品的图谱存在很大不同, 410 nm 左右的吸收峰强度很低。表明 2 个样品中 Ag 物种的存在状态有明显的区别。

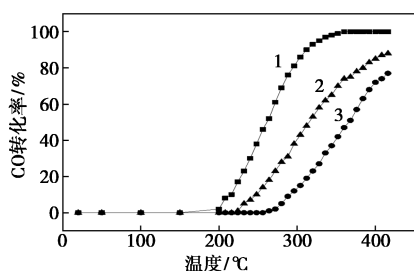


1—Ag/SBA-15-1%; 2—Ag/SBA-15 cal-1%

图 5 产品的紫外-可见吸收图谱

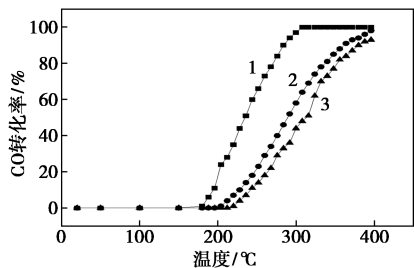
## 2.5 CO 催化氧化性能表征

2 种方法的得到的催化剂在不同的 Ag 负载量下催化 CO 氧化的效果对比图如图 6 所示。



1—Ag/SBA-15-1%; 2—Ag/SBA-15-3%; 3—Ag/SBA-15-5%

(a) Ag/SBA-15



1—Ag/SBA-15 cal-1%; 2—Ag/SBA-15 cal-1%;

3—Ag/SBA-15 cal-1%

(b) Ag/SBA-15 cal

图 6 Ag/SBA-15 和 Ag/SBA-15 cal 的 CO 催化氧化性能

从图 6 中可以看出, 煅烧前浸渍得到的催化剂 Ag/SBA-15 在金属负载量 1% 时, CO 氧化在 200°C 下反应开始进行, 340°C 反应完全; 负载量为 3% 时, CO 氧化在 220°C 下反应开始进行, 400°C 时转化率达到 88%; 负载量为 5% 时, CO 氧化在 260°C 时反应才开始进行, 400°C 时转化率只有 80%。煅烧后浸渍得到的催化剂 Ag/SBA-15 cal 在金属负载量 1% 时, CO 氧化 180°C 下反应就开始进行, 290°C 反应完全; 负载量为 3% 的样品在 200°C 附近开始氧化, 400°C 附近反应完全; 负载量 5% 的样品在 210°C 附近开始转化, 400°C 时转化量接近 90%。因此, 煅烧后浸渍得到的催化剂 Ag/SBA-15 cal 对 CO 氧化的催化性能更好, 相比之下 CO 转化率较高, 反应所需温度更低。当金属 Ag 负载量为 1% 时催化剂的催化效果最好, 随金属 Ag 负载量的增加, 催化性能变差。

## 3 结论

在 SBA-15 上负载金属 Ag 得到 Ag/SBA-15 材料, 并对复合材料进行研究。通过实验分析发现, 去除模板剂后浸渍得到的催化剂 Ag/SBA-15 cal 的催化性能优于去除模板剂前浸渍得到的催化剂 Ag/SBA-15。其中 1% 的金属负载量下, Ag/SBA-15 的催化性能最好, 随金属负载量的增加, CO 氧化催化性能变差。

## 参考文献

- [1] Zhao D Y, Feng J L, Huo Q S, *et al.* Triblock copolymer syntheses of mesoporous silica with periodic 50 to 300 angstrom pores [J]. *Science*, 1998, 279: 548-552.
- [2] Srinivas D, Saikia L. Functionalized SBA-15 and its catalytic applications in selective organic transformations [J]. *Catalysis Surveys from Asia*, 2008, 12(2): 114-130.
- [3] 张志, 袁红. 有序介孔分子筛 SBA-15 的改性研究进展 [J]. *应用化工*, 2019, 48(12): 3032-3036.
- [4] 朱玉镇, 沈健. 后合成法改性 SBA-15 的研究进展 [J]. *天然气化工 (C1 化学与化工)*, 2014, 39(12): 67-70.
- [5] Abdullah N, Ainirazali N, Chong C C, *et al.* Influence of impregnation assisted methods of Ni/SBA-15 for production of hydrogen via dry reforming of methane [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(36): 18426-18439.
- [6] Bragança L F F P G, Ojeda M, Fierro J L G, *et al.* Bimetallic Co-Fe nanocrystals deposited on SBA-15 and HMS mesoporous silicas as catalysts for Fischer-Tropsch synthesis [J]. *Applied Catalysis A: General*, 2012, 423(7): 146-153.

(下转第 163 页)

- 2022,64;503-510.
- [38] Wang Y, Zhang Y, Liu Z, *et al.* Layered double hydroxide nanosheets with multiple vacancies obtained by dry exfoliation as highly efficient oxygen evolution electrocatalysts [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2017, 56(21):5867-5871.
- [39] Anantharaj S, Karthick K, Kundu S. Evolution of layered double hydroxides (LDH) as high performance water oxidation electrocatalysts: A review with insights on structure, activity and mechanism [J]. *Materials Today Energy*, 2017, 6:1-26.
- [40] Cui K, Fan J, Li S, *et al.* Facile synthesis and electrochemical performances of three dimensional  $\text{Ni}_3\text{S}_2$  as bifunctional electrode for overall water splitting [J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2021, 263:114875.
- [41] Jia L, Du G, Han D, *et al.*  $\text{Ni}_3\text{S}_2$ /Cu-NiCo-LDH heterostructure nanosheet arrays on Ni foam for electrocatalytic overall water splitting [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2021, 9(48):2763.
- [42] Yan J, Chen L, Liang X.  $\text{Co}_9\text{S}_8$  nanowires@NiCo-LDH nanosheets arrays on nickel foams towards efficient overall water splitting [J]. *Science Bulletin*, 2019, 64(3):158-165.
- [43] Peng T, Yi H, Sun P, *et al.* In situ growth of binder-free CNTs@NiCo-S nanosheets core/shell hybrids on Ni mesh for high energy density asymmetric supercapacitors [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2016, 4(22):8888-8897.
- [44] Mohamed S G, Attia S Y, Allam N K. One-step, calcination-free synthesis of zinc cobaltite nanospheres for high-performance supercapacitors [J]. *Materials Today Energy*, 2017, 4:97-104.
- [45] Lu W, Liu M, Miao L, *et al.* Nitrogen-containing ultramicroporous carbon nanospheres for high performance supercapacitor electrodes [J]. *Electrochimica Acta*, 2016, 205:132-141.
- [46] Li Z, Zhang L, Chen X, *et al.* Three-dimensional graphene-like porous carbon nanosheets derived from molecular precursor for high-performance supercapacitor application [J]. *Electrochimica Acta*, 2019, 296:8-17.
- [47] Yu J, Ma F X, Du Y, *et al.* In situ growth of Sn-doped  $\text{Ni}_3\text{S}_2$  nanosheets on Ni foam as high-performance electrocatalyst for hydrogen evolution reaction [J]. *Chem Electro Chem*, 2017, 4(3):594-600.
- [48] Peng L, Shen J, Zhang L, *et al.* Graphitized carbon-coated vanadium carbide nanobosages modified by nickel with enhanced electrocatalytic activity for hydrogen evolution in both acid and alkaline solutions [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, 5(44):23028-23034.
- [49] Yuan F, Wei J, Qin G, *et al.* Carbon cloth supported hierarchical core-shell  $\text{NiCo}_2\text{S}_4$ @CoNi-LDH nanoarrays as catalysts for efficient oxygen evolution reaction in alkaline solution [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 830:154658.
- [50] Liu M, Jiao Y, Zhan S, *et al.*  $\text{Ni}_3\text{S}_2$  nanowires supported on Ni foam as efficient bifunctional electrocatalyst for urea-assisted electrolytic hydrogen production [J]. *Catalysis Today*, 2020, 355:596-601.
- [51] Liu S, Zhu J, Sun M, *et al.* Promoting the hydrogen evolution reaction through oxygen vacancies and phase transformation engineering on layered double hydroxide nanosheets [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(5):2490-2497.
- [52] Shabangoli Y, Rahmanifar M S, El-Kady M F, *et al.* An integrated electrochemical device based on earth-abundant metals for both energy storage and conversion [J]. *Energy Storage Materials*, 2018, 11:282-293.
- [53] Que R, Liu S, Yang Y, *et al.* Core-shell structure  $\text{Co}_3\text{O}_4$ @NiCo-LDH was used as a high efficiency catalyst for overall water splitting [J]. *Materials Letters*, 2021, 288:129364.
- [54] Yang H, Zhou Z, Yu H, *et al.* Alkali treatment of layered double hydroxide nanosheets as highly efficient bifunctional electrocatalysts for overall water splitting [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 636:11-20. ■
- .....
- (上接第 155 页)
- [7] Jia Y, Allothman A Z, Liang R, *et al.* Immobilization of (tartrate-salen) Mn(III) polymer complexes into SBA-15 for catalytic asymmetric epoxidation of alkenes [J]. *Molecular Catalysis*, 2020, 495:111146-111156.
- [8] Yamazaki H, Hasegawa H, Tanaka C, *et al.* Al ion-exchanged USY in FCC catalyst for high LPG yield [J]. *Catalysis Communications*, 2021, 159:106354-106356.
- [9] 陈颖, 韩书宇, 梁宇宁, 等.  $\text{Co-NH}_2$ -SBA-15 的制备及其脱硫性能研究 [J]. *燃料化学学报*, 2018, 46(6):754-761.
- [10] Gao J S, Lu Y, Zhang X Y, *et al.* Elucidating the electrostatic interaction of sulfonic acid functionalized SBA-15 for ciprofloxacin adsorption [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 349(15):224-229.
- [11] Yang C, Liu P, Ho Y, *et al.* Highly dispersed metal nanoparticles in functionalized SBA-15 [J]. *Chemistry of Materials*, 2003, 15(1):275-280.
- [12] Zhu H G, Liang C D, Yan W F, *et al.* Preparation of highly active silica-supported Au catalysts for CO oxidation by a solution-based technique [J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2006, 110(22):10842-10848.
- [13] 张静静, 孙杰, 李吉刚, 等. 用于 CO 低温氧化负载型纳米金催化剂研究进展 [J]. *材料导报 A:综述篇*, 2017, 31(1):136-142.
- [14] Liu X, Wang A, Li L, *et al.* Structural changes of Au Cu bimetallic catalysts in CO oxidation: In situ XRD, EPR, XANES, and FT-IR characterizations [J]. *Journal of Catalysis*, 2011, 278(2):288-296.
- [15] Wang H, Liu C. Preparation and characterization of SBA-15 supported Pd catalyst for CO oxidation [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2011, 106(3):672-680.
- [16] Yang C, Wang Z, Zhou X, *et al.* A mesoporous Pt-SBA-15 nano architecture with catalytic functions on oxidation of CO [J]. *Journal of Porous Materials*, 2010, 18(1):31-35.
- [17] Grass M E, Joo S H, Zhang Y, *et al.* Colloidally synthesized monodisperse Rh nanoparticles supported on SBA-15 for size and pretreatment-dependent studies of CO oxidation [J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2009, 113(20):8616-8623.
- [18] Zhou S, Yang X W, Shen Y B, *et al.* Dual transition metal doped germanium clusters for catalysis of CO oxidation [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 806(25):698-704.
- [19] Zhou Y, Liu X Y, Wang K, *et al.* Porous Cu-Mn-O catalysts fabricated by spray pyrolysis method for efficient CO oxidation [J]. *Results In Physics*, 2019, 12:1893-1900. ■