

基于金属有机框架材料构建多相催化剂的研究进展

王薇菁, 廖立, 赖雪飞, 龙沁, 谢克难

(四川大学化学工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 利用多相催化剂高效催化化学反应在能源化工、环境保护和可持续发展等方面具有重要的意义。基于金属有机框架复合材料(metal-organic frameworks, MOFs)的大比表面积、分散的活性中心和极高的孔隙率且孔结构可调等独特的结构特点, MOFs 及其衍生物已被广泛应用于多相催化领域。按照 MOFs 催化剂活性位点的来源不同, 从以下几个方面综述了近年来 MOFs 在多相催化领域的研究进展: MOFs 本身无催化作用, 仅作为催化剂载体起到携带催化剂和阻止催化剂团聚的作用; 在 MOFs 上修饰官能团后, 得到的衍生材料具有催化作用; MOFs 自身具有不饱和的活性金属节点, 促进反应进行。最后, 展望了 MOFs 在多相催化领域的发展方向和前景。希望本篇综述能够帮助研究者更进一步了解 MOFs 及其衍生材料在构建多相催化剂方面的研究进展, 为推动 MOFs 材料在多相催化方面的应用提供有意义的参考资料。

关键词: 金属有机框架材料; 多相催化; 修饰; 衍生材料

中图分类号: O641.4; TQ426 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2023)02-0155-07

引用格式: 王薇菁, 廖立, 赖雪飞, 等. 基于金属有机框架材料构建多相催化剂的研究进展[J]. 中国材料进展, 2023, 42(2): 155-161.

WANG W J, LIAO L, LAI X F, *et al.* Research Progress of Metal-Organic Frameworks in the Field of Heterogeneous Catalysis[J]. Materials China, 2023, 42(2): 155-161.

Research Progress of Metal-Organic Frameworks in the Field of Heterogeneous Catalysis

WANG Weijing, LIAO Li, LAI Xuefei, LONG Qin, XIE Kenan

(School of Chemical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: It is of great significance for energy industry, chemical industry, environmental protection and sustainable development of using heterogeneous catalysts to catalyze chemical reactions. Extensive applications of metal-organic frameworks (MOFs) and their derivatives are expanded in heterogeneous catalysis due to their large specific surface area, dispersed active centers, extremely high porosity and adjustable pore structure. According to the sources of active sites of MOFs, we summarize some relative work of MOFs in heterogeneous catalysis as follows: MOFs themselves do not have a catalytic activity, and only as a catalyst carrier; the functional groups modified in MOFs have catalytic activity; MOFs with unsaturated metal nodes have catalytic activities, and can promote the reaction. Finally, we look forward to the future research and application of MOFs in the heterogeneous catalysis. We hope this review will help researchers understand more about the research progress of MOFs materials in the heterogeneous catalysis, providing some meaningful reference.

Key words: metal-organic frameworks; heterogeneous catalysis; modification; derived materials

1 前言

金属-有机框架材料(metal-organic frameworks, MOFs)作为一类新型的无机-有机杂化多孔功能材料, 有着传统无机材料不可替代的优势, 它具有可设计的骨架结构、高比表面积、高度有序且可功能化的多孔结构等一些独特的性质^[1-6]。由于用来构筑 MOFs 的金属中心多种多样, 有机配体的结构和设计类型也千变万化, 加上金属与配体间的配位方式各异, 因而形成的 MOFs 种类也丰

收稿日期: 2021-07-06 修回日期: 2021-07-19

基金项目: 四川省科技厅重点研发计划项目(2023YFG0248); 四川大学自贡市校地科技合作研发项目(2020CDZG-13)

第一作者: 王薇菁, 女, 1995 年生, 硕士研究生

通讯作者: 廖立, 男, 1979 年生, 副教授, 硕士生导师,

Email: liaolis@scu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202105003

富多样^[2, 3, 7]。近 20 年来, MOFs 已在气体的储存与分离、传感、药物运输等诸多领域展现了潜在的应用前景, 尤其因具有特有的结构以及高分散性的活性位点等特性已引起了多相催化领域科学家们广泛的关注^[8-14]。此外, 还可以通过在已合成的 MOFs 上修饰各种官能团或者向 MOFs 的孔洞引入各种客体分子, 赋予 MOFs 电荷、极性、手性、光敏性、疏水/亲水性、立体选择性等新的特性, 大大拓展 MOFs 在能源、环境, 尤其在多相催化领域的应用^[4, 15-19]。本文主要从以下几个方面综述了 MOFs 及其衍生材料在多相催化领域的研究进展: ① MOFs 用于构建多相催化剂的优势分析; ② MOFs 作为催化剂载体的研究进展; ③ 基于 MOFs 自身的催化研究进展; ④ MOFs 衍生材料在催化领域的研究进展; ⑤ 修饰了官能团的 MOFs 在催化领域的研究进展; ⑥ 总结与展望。

2 MOFs 用于构建多相催化剂的优势

MOFs 作为新一代的晶体多孔材料, 其设计和合成工艺已经逐渐成熟, 材料的热/化学稳定性也得到了极大的提高, 为其实际应用奠定了坚实的研究基础。而在多相催化领域, MOFs 一直都是用于构建高效催化剂的首选材料之一, 促使 MOFs 成为催化领域潜在热门候选材料的原因有^[20-22]: ① MOFs 骨架中存在高度分散的催化活性位点, 并且多孔结构有利于反应底物与催化活性位点充分接触, 同时具有不饱和和配位金属中心的 MOFs 在除去配位的小分子后能够将 Lewis 酸性位点暴露出来, 催化一些基于 Lewis 酸催化的反应^[23-25]。② 构筑 MOFs 的有机配体的长度可调节性使得 MOFs 具有不同大小和形状的孔洞, 有利于参与催化的反应物质的传输, 并且使 MOFs 表现出对反应底物的尺寸选择效应^[26, 27]。③ 中心离子与具有特定官能团的配体结合后能够获得具有特定官能团的 MOFs, 也可以通过对已合成的 MOFs 进行后修饰达到功能化的目的。这些具有特定官能团的 MOFs 将会有利地扩展 MOFs 在催化领域的应用^[28, 29]。④ MOFs 用作载体制备复合材料催化剂, 一方面使复合催化剂的活性催化成分进一步得到分散, 可以有效阻止催化剂活性组分在催化反应过程中的团聚作用, 从而提高其稳定性^[30, 31], 同时 MOFs 在催化反应过程可能产生更多的不饱和配位环境, 使得催化活性中心更加暴露, 从而提升复合材料的催化活性^[32, 33]; 另一方面, 载体的特定成分和空间结构赋予催化剂辅助催化作用, 与活性中心共同产生协同效应或模板化作用, 提高多孔负载催化剂的催化性能, 对反应中催化效率的提升有着实际的意义^[34, 35]。

3 MOFs 用于催化领域的研究进展

3.1 MOFs 作为催化剂载体的研究进展

Xu 等^[36]通过改变浸渍顺序将 ZIF-8 先后浸渍于氯金酸和硝酸银溶液中, 再还原分别得到 ZIF-8 负载的 Au@Ag 和 Au@AuAg 核壳结构。活性金属纳米颗粒可均匀地镶嵌在 ZIF-8 的孔道内(如图 1 所示), 有效地防止了催化过程中活性金属颗粒团聚, 催化实验结果表明, ZIF-8 负载的复合材料可以明显提高硝基苯酚加氢反应速率。

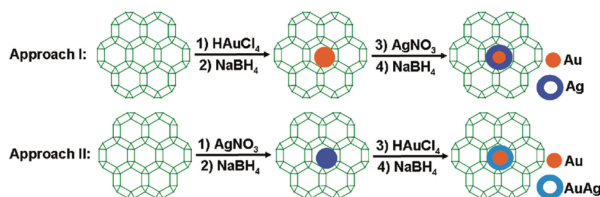


图 1 ZIF-8 负载的 Au@Ag 和 Au@AuAg 核壳结构制备过程示意图^[36]

Fig. 1 Schematic diagram of preparing ZIF-8 loaded Au@Ag and Au@AuAg^[36]

Duan 等^[37]用聚乙烯吡咯烷酮(PVP)对 Au 纳米粒子进行表面修饰, 然后在其表面原位生长 ZIF-8 晶体, 通过调控 Au 粒子数量以及反应温度可以得到单核和多核 Au@ZIF-8 纳米复合材料(图 2a 和 2b)。基于 ZIF-8 的多孔结构以及 Au 颗粒的局域表面等离子共振效应, 该材料在光催化氧化苯甲醇制备苯甲醛过程中展现出高效的催化活性。Wang 等^[38]采用氨硼烷作为还原剂将 Co 单质限域在 ZIF-67 孔道里得到 Co@ZIF-67 复合材料, 该材料对于氨硼烷水解有很好的催化效能, 其转化率(turnover frequency, TOF)为 $112.3 \text{ mol}_{\text{H}_2} \cdot \text{mol}_{\text{Co}}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, 并且反应 7 圈过后活性仍能保持在 92%(图 2c)。

Chen 课题组^[39]利用具有高比表面积及合适孔径大小的 MIL-101 为载体, 基于 MIL-101 孔内壁的亲水性和毛细作用通过双溶剂法将金属 Pd 和 Co 的前驱体引入到 MOF 孔内, 然后再利用两种前驱体不同的氧化还原电势, 采用温和的还原剂氨硼烷在室温下还原金属离子, 首次获得核-壳结构粒子限域在 MOF 孔内的纳米复合材料(Pd@Co@MIL-101)。该催化剂在温和条件下可以高效地催化氨硼烷水解制氢, MIL-101 合适孔径的限域作用以及 MIL-101 与活性金属的协同效应使该复合材料的活性超过相应的单质金属、合金及 Pd@Co 负载在孔外的催化剂。随后该课题组发现 MOFs 除了能稳定金属纳米粒子之外, 自身还具有催化活性位点, 因此他们采用同样的双溶剂法制备了 Pd@MIL-101 双功能催化剂^[40], 基于 MIL-101 的 Lewis 酸性和 Pd 纳米粒子的催化加氢特性,

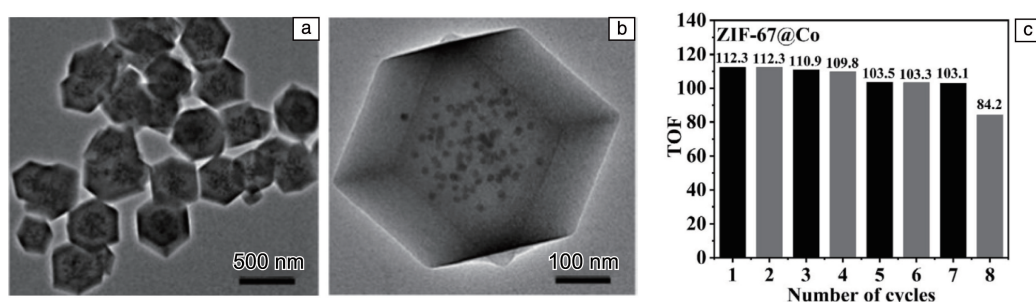


图2 多核 Au@ZIF-8 的 TEM 照片(a, b)^[37]; Co@ZIF-67 催化氨硼烷水解的循环性能(c)^[38]

Fig. 2 TEM images of (a, b) multi-core Au@ZIF-8^[37]; cycling performance of Co@ZIF-67 for catalytic hydrolysis of ammonia borane(c)^[38]

该材料能够有效地协同催化氨硼烷脱氢和硝基化合物还原这两步串联反应(图 3a), 并且催化硝基苯氢化的 TOF 达到了 $97 \text{ mol}_{\text{nitrobenzene}} \cdot \text{mol}_{\text{Pt}}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, 反应 6 圈过后其选择性仍能达到 100%(图 3b)。

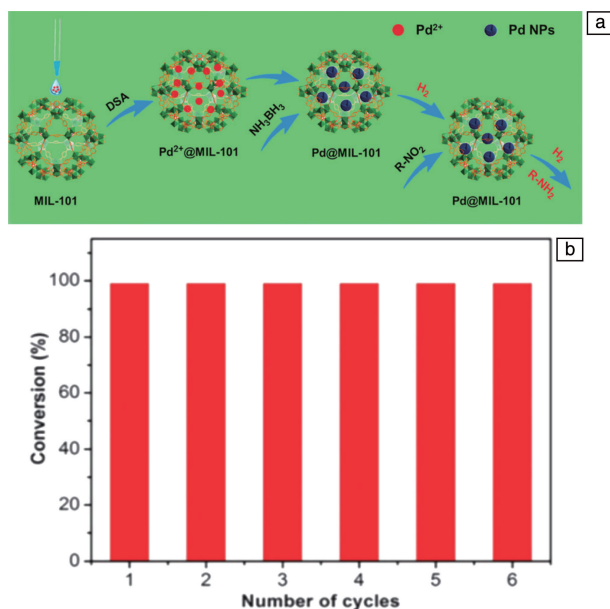


图3 Pd@MIL-101 催化氨硼烷脱氢以及硝基化合物还原两步串联反应的示意图(a); Pd@MIL-101 催化硝基苯氢化的循环性能(b)^[40]

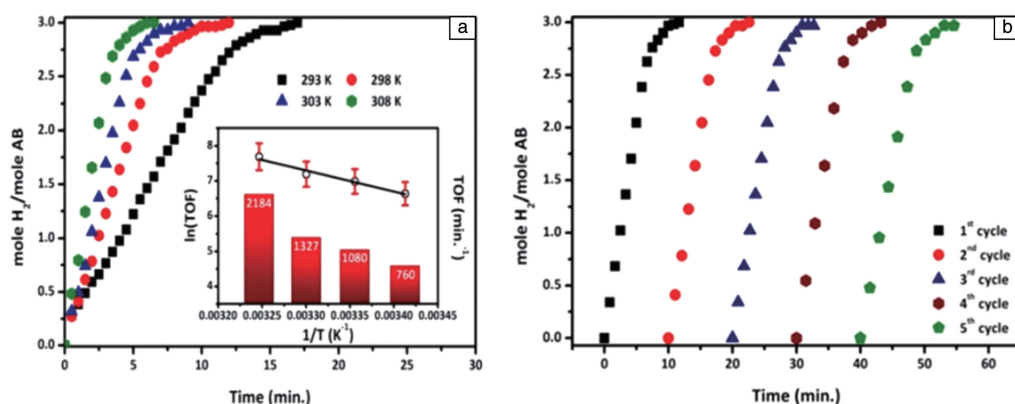
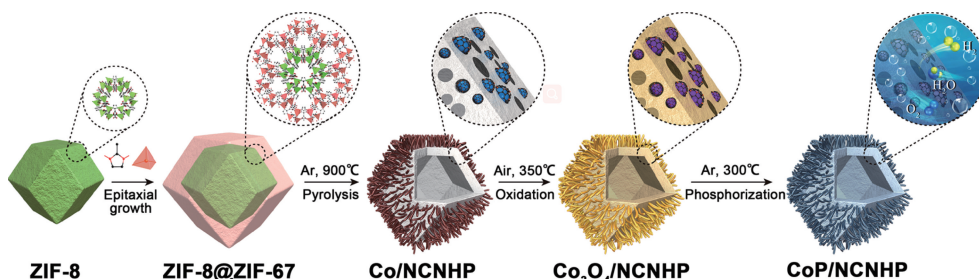
Fig. 3 Schematic diagram of Pd@MIL-101 catalysis for two-step series reaction of ammonia borane dehydrogenation and nitro compound reduction (a); cycling performance of Pd@MIL-101 catalysis for hydrogenation of nitrobenzene (b)^[40]

随后, Chen 课题组又制备了 PdAg@MIL-101 多功能催化剂^[41], 基于 MIL-101 的 Lewis 酸性、Pd 的催化加氢特性以及 Ag 对产物的选择性三者之间的协同功效, 该材料在室温下催化硝基苯和苯甲醛一锅多步反应时表现出优异的催化性能。Caner 等^[42]通过简单的方法制备了分散性好、结晶度高、尺寸小的 Pd@MIL-101 纳米复合材料, 用于催化氨硼烷醇解时表现出很好的催化活性, 并

且在可回收循环性实验中 Pd 表现出显著的抗浸出、抗烧结和抗结块等稳定性。Pd@MIL-101 催化氨硼烷醇化在循环 5 圈过后仍能保持超过 85% 的催化活性(图 4)。由已有研究结果可以总结得出, 以 MOFs 作为催化剂载体, 不仅能够分散活性金属颗粒, 防止它们在催化反应过程中团聚, 并且 MOFs 与活性金属颗粒之间的协同效应能够提高催化活性。但是 MOFs 化学稳定性不高, 用作催化剂载体时会因本身结构被破坏而使得负载型催化剂的催化性能恶化, 因此如何进一步提高 MOFs 的物理和化学稳定性是今后研究的一个重点。

3.2 MOFs 衍生材料在催化领域的研究进展

Pan 等^[43]在 ZIF-8 的外表面包覆 ZIF-67, 形成 ZIF-8@ZIF-67 核壳结构, 采用热解-氧化-磷化策略合成了新型的氮掺杂碳纳米管空心多面体包覆的 CoP/NCNHP 纳米粒子催化剂(图 5)。该催化剂在析氢反应(hydrogen evolution reaction, HER)、碱性 HER 以及析氧反应(oxygen evolution reaction, OER)时均表现出优越的催化活性和稳定性, 可归结为以下几点原因: ① CoP/NCNHP 催化剂中的 Co 和 P 具有部分正电荷和负电荷, 表明 Co—P 键具有共价键性质, 类似于氢化酶中的质子受体和氢化受体, 提高了 CoP/NCNHP 催化剂的 HER 活性; ② 催化剂表面的 Co 单质首先被部分氧化为 CoOOH, 形成的中间体 CoP/CoOOH 核壳结构是实际的活性物质, CoP 作为导电载体为活性壳层提供了有效的电子通道, 加速了整个 OER 过程; ③ CoP/NCNHP 独特纳米空心多面体具有较高的比表面积, N 原子的掺杂给碳骨架提供额外的缺陷活性位点, 可以为电催化过程提供更多的活性位点, 丰富的孔隙结构促进了 CoP/NCNHP 催化剂与电解液的接触, 促进电荷和反应物的快速传递; ④ 在电催化过程中, CoP 纳米颗粒能够有效地嵌入碳基体中, 抑制了碳基体的聚集, 提高了碳基体的稳定性; ⑤ 密度泛函理论(density functional theory, DFT)计算结果表明, NCNHP 向 CoP 的电子转移可以增加 Co d 轨道的电子态费米能级, 可以增加 H 的结合强度, 从而提高电催化性能。

图 4 Pd@MIL-101 催化氨硼烷醇化的催化性能和循环性能^[42]Fig. 4 Performance of Pd@MIL-101 catalyst for alcoholization of ammonia borane^[42]图 5 CoP/NCNHP 纳米粒子催化剂合成示意图^[43]Fig. 5 Schematic illustration of the synthesis process of CoP/NCNHP^[43]

Jiang 课题组^[44]将 ZIF-8 在不同温度下碳化, 然后通过与尿素混合的方式进行氮掺杂, 接着通过浸渍法制备了 Pd/NPC-ZIF-8。因具有较强的疏水性、较大的比表面积及分散良好且富电子的 Pd 纳米粒子, 该纳米复合材料催化性能优异, 反应 3 圈过后其选择性和转化率仍能保持 95% 以上。该课题组^[45]基于 ZIF-8 和 ZIF-67, 通过控制 Zn-Co 比合成双金属 MOFs (BMZIFs-*n*), 在 N₂ 气氛下热解得到 Co 和 N 掺杂多孔碳 CNCo-*n*, 再与三苯基膦混合后经高温退火掺杂 P, 得到的电化学催化剂 P-CNC-20 具有优异的氧还原反应催化性能, 特别值得一提的是, 相对于对照催化剂 Pt/C, P-CNC-20 催化剂具有更优的稳定性和耐受甲醇的能力。2015 年以来, Li 课题组^[46-49]选择 ZIF-67 等一系列的 Co 中心离子和含氮配体组装的 MOFs 作为模板进行直接煅烧, 制备了氮掺杂的石墨碳包裹的 Co 纳米颗粒多孔复合材料 (Co@C-N), 并将制得的材料应用到醇氧化、醇氧化酯化、氧化酰胺化以及转移氢反应等一系列多相液相氧化或还原反应中, 都取得了非常理想的催化性能。Mabayoje 等^[50]以含磷的有机配体 Ni(II)PCM-101 为前驱体, 在不需要外源磷源的情况下制备了金属磷化 Ni₂P 催化剂, 有效地控制了金属磷化物的结构以及形貌, 该化合物在 HER 中作为电催化剂表现

出超高的催化活性, 在电位为 120 mV 时电流密度能够达到 -10 mA/cm²。对由 MOFs 衍生的催化材料更加容易控制形貌, 使材料在化学条件和物理条件比较苛刻的情况下仍能催化反应进行。MOFs 衍生材料表现出突出的催化优势, 是一种重要的候选催化材料。

3.3 MOFs 自身作为催化剂的研究进展

有些 MOFs 中的金属中心除了与有机配体配位外, 还配位了各种溶剂小分子 (如水、2-甲基甲酰胺等), 这些分子很容易在真空干燥、加热等过程中移去, 暴露出的不饱和配位中心往往具有 Lewis 酸性, 使得 MOFs 可以充当 Lewis 酸催化剂。Long 等^[51]发现基于 Mn 的 MOFs 多孔结构能够暴露更多的酸性位点, 并且也能以类沸石的方式具有尺寸或者形状选择性, 催化苯甲醛的硅氰化反应时表现出良好的催化活性和选择性, 在 25 °C 的条件下反应 1 h 产率能达到 80%, 而无催化剂条件下反应 6 h 产率仅能达到 8%, 表明该材料是一种效果好的 Lewis 酸催化剂。Kaskel 等^[52]通过活化 MIL-101(Cr) 中的不饱和配位中心 Cr (III), 以它为 Lewis 酸性位点来催化苯甲醛的硅氰化反应, 40 °C 下反应 3 h 的产率已超过 98%, 催化活性远超过贵金属催化剂 Pt/C, 并且还具有极好的循环稳定性。Aryanejad 等^[53]采用席夫碱作为有机配体、金属

Mn 作为中心离子合成了 UoB-4 (图 6a), 从热重曲线及 N_2 吸脱附曲线 (图 6c 和 6d) 分析可知, UoB-4 具有高热稳定性、大的比表面积, 因而可作为一种稳定、可循环利用的多相催化剂催化 Hantzsch 反应合成 1-4 二氢吡啶和醇的氧化, 表现出极好的催化活性, 并且经过多次循环后催化性能没有明显的下降, 5 圈过后对醇的氧化率仍达到 85% (图 6b)。工业上处理组成复杂且有毒的费托合成废水 (FTW) 一直是一个难题, 采用氧化法降解废水中的有机物是目前一种相对比较先进的处理方法^[54, 55]。

Hao 等^[56] 制备的 MIL-88A (Fe) @ MIL-88B (Fe) 光催化剂能够高效地催化 FTW 中的有机物臭氧化, 达到降低污染的效果。近几年铁基金属 MOFs 在光催化和污染物降解中有广泛的应用, 例如, ZnO/MIL-100 (Fe)^[57]、 TiO_2 /MIL-88B (Fe)^[58]、GO/MIL-88A (Fe)^[59]、g- C_3N_4 /MIL-88A (Fe)^[60]。以 MOFs 自身作为催化剂一般是以其金属节点作为催化活性中心, 因此应用范围比较有限。合成活性中心较多的 MOFs 并探究催化机理, 扩大其应用范围是今后的研究重点。

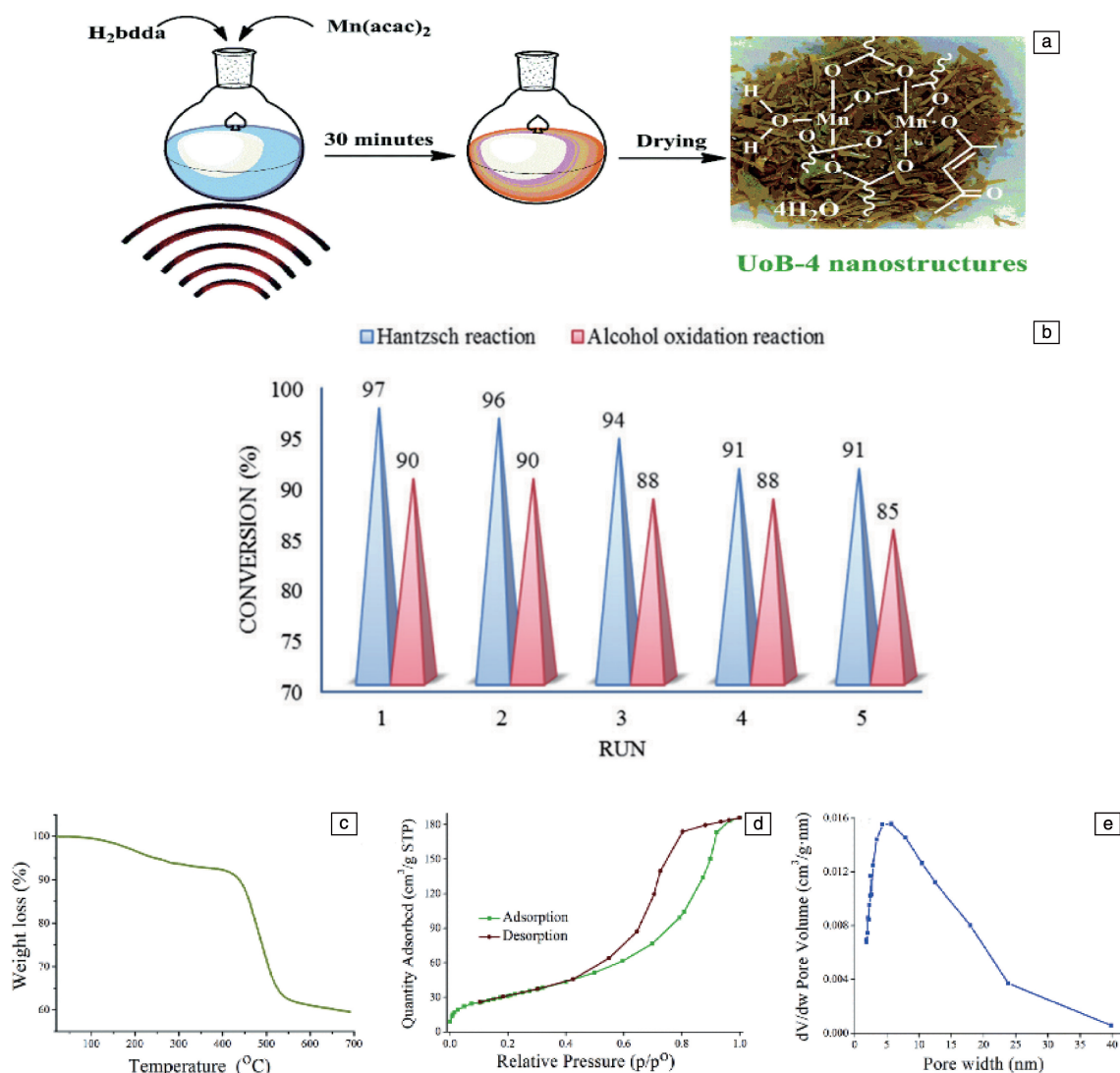


图6 制备 UoB-4 的过程示意图(a), UoB-4 催化 Hantzsch 反应和醇氧化的循环性能(b), UoB-4 热重分析 (thermogravimetric analysis, TGA) 曲线(c), UoB-4 N_2 吸脱附曲线(d), UoB-4 孔径分布图(e)^[54]

Fig. 6 Schematic diagram of preparing UoB-4 (a), cycling performance of UoB-4 catalysis for Hantzsch reaction and alcohol oxidation (b), TGA curve (c), N_2 adsorption-desorption isotherms (d), pore width distribution of UoB-4 nanostructures (e)^[54]

4 结 语

MOFs 材料因具有高比表面积、可设计的结构、可调

节的孔结构、封闭空间的纳米孔结构以及可暴露的活性位点等特性, 在多相催化领域有极好的应用潜力, 研究人员已经进行了广泛的探索且取得了重要成果。总

结相关文献,可得出以下结论:①将 MOFs 与石墨烯衍生物、MXene 等材料进行适当的结合可提高其催化性能、热稳定性、化学稳定性和吸附容量;②以 MOFs 为前驱体制备单原子催化剂是目前的一个研究热点,也是多相催化研究的一个重要方向;③迫切需要建立和完善关于 MOFs 在催化领域的理论计算体系以及催化机理研究,以此来提高催化能力;④目前对 MOFs 基催化剂仅能小批量实验室生产,是未来应用的一个主要障碍。因此,进一步深入探讨基于 MOFs 材料的多相催化剂的催化机理是其理论研究的重点,开发可规模化生产且成本低、热稳定性好且物理化学稳定性高的 MOFs 催化剂是其应用研究的一个热点。

参考文献 References

- [1] PENG H, RAYA J, RICHARD F, *et al.* *Angewandte Chemie*[J], 2020, 132(44): 19770–19777.
- [2] XIE L S, SKORUPSKII G, DINCA M. *Chemical Reviews*[J], 2020, 120(16): 8536–8580.
- [3] ZHANG Y D, SHAO R, XU W, *et al.* *Chemical Engineering Journal* [J], 2021, 419(46): 129576–129588.
- [4] RAJASREE S S, LI X L, DERIA P. *Communications Chemistry*[J], 2021, 4(1): 47–61.
- [5] KIM H R, YOON T U, KIM S I, *et al.* *RSC Advances*[J], 2017, 7(3): 1266–1270.
- [6] 王隆杰, 范鸿川, 秦渝, 等. *高等学校化学学报*[J], 2021, 42(4): 1167–1176.
WANG L J, FAN H C, QIN Y, *et al.* *Chemical Journal in Chinese Universities*[J], 2021, 42(4): 1167–1176.
- [7] MAYA F, CABELLO C P, FRIZZARIN R M, *et al.* *Trends in Analytical Chemistry*[J], 2017, 90: 142–152.
- [8] WAN Y J, WAN J Q, ZHAO J R, *et al.* *Chemosphere*[J], 2020, 254: 126798–126811.
- [9] YU J M, XIE L H, LI J R, *et al.* *Chemical Reviews*[J], 2017, 117(14): 9674–9754.
- [10] ALISTAIR M C, RUSSELL E M, PATRICIA H, *et al.* *Angewandte Chemie International Edition*[J], 2010, 49(36): 6260–6266.
- [11] ESPALLARGAS G M, CORONADO E. *Chemical Society Reviews*[J], 2018, 47: 533–557.
- [12] SUN D, TANG Y G, YE D, *et al.* *ACS Applied Materials & Interfaces* [J], 2017, 9(6): 5254–5262.
- [13] WANG Z H, CHEN Q W. *ChemistrySelect*[J], 2018, 3(4): 1108–1112.
- [14] 文桂林, 李莹, 李庆润, 等. *安全、健康和环境*[J], 2021, 21(3): 7–13.
WEN G L, LI Y, LI Q R, *et al.* *Safety Health & Environment*[J], 2021, 21(3): 7–13.
- [15] YAN C H, ZHANG Y L, DA Z L, *et al.* *ChemistrySelect*[J], 2019, 4(45): 13182–13190.
- [16] ZHANG Y L, GUAN W, SONG H Y, *et al.* *Microporous and Mesoporous Materials*[J], 2020, 305: 110328–110340.
- [17] CHEN J J, GAO H J, LI Z H, *et al.* *Chinese Chemical Letters*[J], 2020, 6: 1398–1401.
- [18] ZHOU Y H, ZHANG Z Y, PATRICK M, *et al.* *Dalton Transactions* [J], 2019, 48(23): 8044–8048.
- [19] ZHAO X X, LI J Z, LI X, *et al.* *Chinese Journal of Catalysis*[J], 2021, 42(6): 872–903.
- [20] LIU C, YAO J L, HU J P, *et al.* *Materials Horizons*[J], 2020, 7: 3176–3186.
- [21] HAN W L, HUANG X S, LU G X, *et al.* *Catalysis Surveys from Asia* [J], 2019, 23: 64–89.
- [22] IQBAL B, SALEEM M, ARSHAD S N, *et al.* *Chemistry: A European Journal*[J], 2019, 25(44): 10490–10498.
- [23] ALCAIZ J J, GIELISSE R, LAGO A B, *et al.* *Catalysis Science & Technology*[J], 2013, 3(9): 2311–2318.
- [24] YU D Y, WU M H, HU Q, *et al.* *Journal of Hazardous Materials*[J], 2018, 367: 456–464.
- [25] XU Y P, WANG Z Q, TAN H Z, *et al.* *Catalysis Science & Technology*[J], 2020, 10(6): 1699–1707.
- [26] JU Z F, YAN S C, YUAN D Q. *Chemistry of Materials*[J], 2016, 28: 2000–2010.
- [27] CIRUJANO F G, LUZ I, SOUKRI M, *et al.* *Angewandte Chemie International Edition*[J], 2017, 56(43): 13302–13306.
- [28] LILLERUD K P, OLSBYE U, TILSET M. *Topics in Catalysis*[J], 2010, 53(14): 859–868.
- [29] XIAO B, HOU H W, FAN Y T. *Journal of Organometallic Chemistry* [J], 2007, 692(10): 2014–2020.
- [30] YANG C P, HE L, HUANG C Z, *et al.* *Talanta*[J], 2020, 221: 121498–121505.
- [31] TAO X M, YUAN X J, HUANG L. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*[J], 2020, 610: 125745–125753.
- [32] DANG M, NGUYEN T, NGUYEN L, *et al.* *New Journal of Chemistry* [J], 2020, 44(34): 14529–14536.
- [33] XIAO Y, GUO B B, ZHANG J, *et al.* *Dalton Transactions*[J], 2020, 49(17): 5730–5736.
- [34] NISA M U, CHEN Y, LI X, *et al.* *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*[J], 2020, 107: 44–53.
- [35] ZHENG F Q, ZHANG Z W, DONG X, *et al.* *Journal of Colloid and Interface Science*[J], 2019, 555: 541–547.
- [36] JIANG H L, AKITA T, ISHIDA T, *et al.* *Journal of the American Chemical Society*[J], 2011, 133(5): 1304–1306.
- [37] CHEN L Y, YAN P, WANG H, *et al.* *Chemical Communications*[J], 2014, 50(63): 8651–8656.
- [38] WANG W J, LIANG M W, JIANG Y, *et al.* *Materials Letters*[J], 2021, 293: 129702–129706.
- [39] CHEN Y Z, XU Q, YU S, *et al.* *Small*[J], 2015, 22: 1–9.
- [40] YANG Q H, CHEN Y Z, WANG Z Y, *et al.* *Chemical Communications*[J], 2015, 51(52): 10419–10422.

- [41] CHEN Y Z, ZOU Y X, WANG H W, *et al.* ACS Catalysis[J], 2015, 5(4): 2062–2069.
- [42] CANER N, YURDERI M, BULUT A, *et al.* New Journal of Chemistry [J], 2020, 44(29): 12435–12440.
- [43] PAN Y, SUN K A, LIU S J, *et al.* Journal of the American Chemical Society[J], 2018, 140(7): 2610–2618.
- [44] CHEN Y Z, CAI G R, WANG Y N, *et al.* Green Chemistry[J], 2016, 18(5): 1212–1219.
- [45] CHEN Y Z, WANG C M, WU Z Y, *et al.* Advanced Materials[J], 2015, 27(34): 5009–5016.
- [46] ZHONG W, LIU H L, BAI C H, *et al.* ACS Catalysis[J], 2015, 5(3): 1850–1856.
- [47] LONG J L, ZHOU Y, LI Y W. Chemical Communications[J], 2015, 51(12): 2331–2335.
- [48] BAI C H, LI A Q, YAO X F, *et al.* Green Chemistry[J], 2016, 18(4): 1061–1069.
- [49] BAI C H, YAO X F, LI Y W. ACS Catalysis[J], 2015, 5(2): 884–891.
- [50] MABAYOJE O, DUNNING S G, KAWASHIMA K, *et al.* ACS Applied Energy Materials[J], 2020, 3(1): 176–183.
- [51] HORIKE S, DINCA M, TAMAKI K, *et al.* Journal of the American Chemical Society[J], 2008, 130(18): 25854–25855.
- [52] HENSCHKE A, GEDRICH K, KRAEHNERT R, *et al.* Chemical Communications[J], 2008, 12: 4192–4194.
- [53] ARYANEJAD S, BAGHERZADE G, MOUDI M. New Journal of Chemistry[J], 2020, 44(4): 1508–1517.
- [54] BABUPONNUSAMI A, MUTHUKUMAR K. Journal of Environmental Chemical Engineering[J], 2014, 2(1): 557–572.
- [55] YU D Y, LI L B, WU M H, *et al.* Applied Catalysis B: Environmental[J], 2019, 251: 66–75.
- [56] LIAO X Y, WANG F, WANG Y Z, *et al.* Applied Surface Science [J], 2020, 509: 145378–145389.
- [57] AHMAD M, CHEN S, YE F, *et al.* Applied Catalysis B: Environmental[J], 2018, 245: 428–438.
- [58] YUANG R, YUE C L, QIU J L, *et al.* Applied Catalysis B: Environmental[J], 2019, 251: 229–239.
- [59] LIU N, HUANG W Y, ZHANG X D, *et al.* Applied Catalysis B: Environmental[J], 2018, 221: 119–128.
- [60] SHAO Z W, ZHANG D F, LI H, *et al.* Separation & Purification Technology[J], 2019, 220: 16–24.

(编辑 惠 琼)