

# 基于 MOF 和碳基材料封装金属纳米颗粒研究进展

谢传荣<sup>1</sup>, 马占松<sup>2</sup>, 王观亚<sup>3</sup>, 陈洪雷<sup>1</sup>, 刘 玉<sup>1</sup>, 姜炜坤<sup>1\*</sup>

(1. 齐鲁工业大学(山东省科学院)绿色造纸与资源循环全国重点实验室, 山东 济南 250353; 2. 山东微谱检测技术有限公司, 山东 济南 250353; 3. 山东京博石油化工有限公司, 山东 滨州 256500)

**摘要:**对 MOF 封装策略(“瓶中船”原位还原、“瓶绕船”自组装包覆等)及碳基封装技术(激光诱导石墨烯同步合成、碳纳米管限域、MOF 衍生碳等)的最新研究进展进行了系统概述,分析了限域结构对金属纳米颗粒尺寸控制、电子结构优化及界面增强的作用机制,并总结了其在能源、生物医学和环境修复等方面的最新应用途径。

**关键词:**金属纳米颗粒;封装技术;金属有机框架;碳基材料

中图分类号:TH3

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)05-0066-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.05.012

## Progress in encapsulating metal nanoparticles based on MOF and carbon-based materials

XIE Chuan-rong<sup>1</sup>, MA Zhan-song<sup>2</sup>, WANG Guan-ya<sup>3</sup>, CHEN Hong-lei<sup>1</sup>, LIU Yu<sup>1</sup>, JIANG Wei-kun<sup>1\*</sup>

(1.State Key Laboratory of Green Papermaking and Resource Recycling, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250353, China; 2.Shandong WEIPU Detection Technology Co., Ltd., Jinan 250353, China; 3.Shandong Chambroad Petrochemicals Co., Ltd., Binzhou 256500, China)

**Abstract:** This paper systematically reviews the latest research progress in MOF encapsulation strategies (such as “ship-in-a-bottle” in-situ reduction and “bottle-around-ship” self-assembled coating) and carbon-based encapsulation technologies (including laser-induced graphene synchronous synthesis, carbon nanotube confinement, and MOF-derived carbon). It analyzes the mechanisms by which confined structures regulate the size of metal nanoparticles, optimize electronic structures, and enhance interfacial interactions, and summarizes their latest application pathways in energy, biomedicine, and environmental remediation.

**Key words:** metal nanoparticles; encapsulation technology; metal-organic frameworks; carbon-based materials

纳米金属颗粒(metal nanoparticles, MNPs)通常指尺寸介于 1~100 nm 的金属材料(如 Au、Ag、Pt、Fe 等),其独特的表面效应、量子尺寸效应及等离子体共振特性,可以赋予其优异的光学、催化与磁学性能,在能源、催化、生物医学等领域备受关注<sup>[1]</sup>。然而, MNPs 易因高表面能的影响发生团聚、氧化或化学失活,严重制约实际应用。通过封装技术把 MNPs 限制在多孔材料、有机框架或者碳基载体中是应对上述瓶颈的有效办法。一方面,封装能够对颗粒的团聚起到抑制的作用,提升在环境当中的稳定性。另一方面,借助载体和 MNPs 之间所产生的协同作用,在催化体系中可以作为高效催化剂,能够对反应路径加以调控,提高反应选择性,甚至还会赋予光/热响应、靶向递送功能<sup>[2]</sup>。

近年来, MNPs 封装技术得到快速发展。从早期的物理隔离,如利用聚合物涂层,发展到无机多孔材料(分子筛、介孔碳)的限域尺寸控制,到当前 MOFs、多孔碳等先进载体的精准化、功能化封装,不仅实现了 MNPs 亚纳米级颗粒的均匀分布,更在 CO<sub>2</sub> 催化转化、高灵敏度生物传感等的应用中取得突破性进展<sup>[3]</sup>。本文中聚焦 MOF 与碳基材料封装 MNPs 的最新研究,系统梳理“瓶中船”(ship-in-bottle)、“瓶绕船”(bottle-around-ship)等合成策略及石墨烯/碳纳米管限域机制<sup>[4-5]</sup>,分析其在能源、环境、生物医学领域的性能优势,并探讨其规模化制备、长效稳定性及智能响应设计等领域存在的挑战,旨在为高性能封装纳米催化体系的开发提供理论参考与技术指引。

收稿日期:2025-07-18;修回日期:2026-03-12

基金项目:泰山学者工程项目(tsqn202507248);中国博士后科学基金面上项目(2022M721333);山东省高等学校“青创团队计划”项目(2023KJ328);齐鲁工业大学“揭榜制项目”(2024ZDZX01)

作者简介:谢传荣(2001-),男,硕士生;姜炜坤(1988-),男,博士,副教授,研究方向为生物基材料与绿色造纸,通讯联系人,weikun0709@126.com。

## 1 封装策略与技术进展

### 1.1 金属有机框架(MOFs)封装策略

金属有机框架(metal-organic frameworks, MOFs)是由金属离子/团簇与有机配体自组装形成的多孔材料,兼具高比表面积、结构可调性和无机-有机杂化特性。将金属纳米颗粒封装于 MOFs 中,可防止其聚集氧化,提升稳定性;通过调控 MOFs 化学环境优化电子结构,增强催化活性与选择性。在药物递送和传感领域,封装还能实现可控释放<sup>[6]</sup>。

#### 1.1.1 预先制备 MOFs 后封装金属纳米颗粒

预先制备 MOFs 后封装金属纳米颗粒的机理主要是基于“瓶中船”策略。首先通过溶剂热法、水热法或室温结晶法等制备具有特定孔隙结构的 MOFs (如 MIL-101、UiO-66 等)。通过调节有机配体长度或引入结构缺陷,可精确调控 MOFs 的孔径(微孔或介孔),以满足目标金属前驱体的尺寸需求<sup>[5]</sup>。将预先合成的 MOFs 浸渍于金属盐溶液(比如  $\text{H}_2\text{PtCl}_6$ 、 $\text{HAuCl}_4$ )中,利用 MOFs 的高比表面积和孔隙吸附能力,使金属前驱体通过扩散进入孔隙。在 MOFs 限域环境下,通过化学还原(如  $\text{NaBH}_4$ 、乙二

醇)、热还原或光还原等方法,将金属前驱体转化为零价金属纳米颗粒。MOFs 的孔隙结构可以限制纳米颗粒的生长方向,防止团聚。

例如, Lukato 等<sup>[7]</sup>使用简单的前驱体浸渍方法将分散好的 MOF 加入金属前驱体( $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )和稳定剂(如 1,8-二氮杂双环[5.4.0]十一烯或聚醚酰亚胺),形成均匀的混合溶液,使用还原剂(如  $\text{NaBH}_4$  或  $\text{H}_2$ )将金属前驱体还原为 Au NPs,干燥后得到 4%  $\text{Au@DBU-MOF1}$  或 4%  $\text{Au}(\text{H}_2)\text{@MOF1}$ 。该方法通过前驱体原位限域还原机制,使 AuNPs 精准锚定于 MOF 孔道内部,能够有效抑制金属纳米粒子的迁移团聚和活性组分流失。Borah 等<sup>[8]</sup>使用 2,5-二巯基-1,4-苯二甲酸( $\text{H}_2\text{DMBD}$ )和  $\text{ZrCl}_4$  在 DMF(二甲基甲酰胺)溶液中反应,经过一系列处理后得到  $\text{Zr-DMBD}$ 。如图 1 所示<sup>[8]</sup>,将  $\text{Zr-DMBD}$  与  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  溶液在 pH 为 2 的条件下反应,经过处理后得到  $\text{Bi@Zr-DMBD}$ 。使用  $\text{NaBH}_4$  还原  $\text{Bi@Zr-DMBD}$  中的  $\text{Bi}^{3+}$ ,得到嵌入  $\text{Zr-DMBD}$  框架中的 Bi 纳米颗粒( $\text{BiNP@Zr-DMBD}$ )。电化学测试表明, $\text{BiNP@Zr-DMBD-1}$  在  $\text{CO}_2$  电还原体系中表现出卓越性能,于  $25 \text{ mA/cm}^2$  电流密度下实现 488% 的法拉第效率。

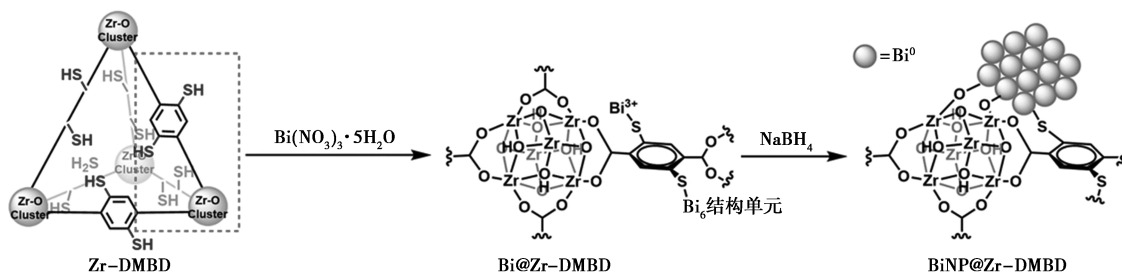


图 1 Zr-DMBD 转化为  $\text{BiNP@Zr-DMBD}$  的化学转化示意图

#### 1.1.2 先合成金属纳米颗粒再封装在 MOFs 中

“瓶绕船”(bottle-around-ship)策略的基本原理是在预先合成的金属纳米颗粒四周促使 MOFs 生长起来,以此达成对金属纳米颗粒的封装目的。此方法需先借助化学还原法、溶胶-凝胶法这类技术手段,制备尺寸以及形貌均可控的金属纳米颗粒。在整个合成进程当中,也需添加表面修饰剂,如聚乙烯吡咯烷酮 PVP,来防止颗粒团聚情况,保证金属纳米颗粒具备良好的分散性以及稳定性<sup>[9]</sup>。之后,把经过修饰处理后的金属纳米颗粒同 MOFs 的前驱体,像是金属盐还有有机配体等,混合到反应溶剂里面。凭借物理吸附或者化学键合的作用,金属纳米颗粒会和 MOFs 的前驱体产生相互作用,进而使其能够在反应体系当中均匀地分散开来。在适宜的

反应条件下,MOFs 的框架结构会逐步生长起来并且将金属纳米颗粒包裹住。金属纳米颗粒充当着成核中心的角色,指引着 MOFs 的生长方向,由此便实现了金属纳米颗粒在 MOFs 内部的封装。

近年来,“瓶绕船”策略因简单、高效、环境友好的特点,逐渐成为制备高性能纳米复合材料的前沿技术。通过利用分子间的静电作用、配位作用或化学键合,自组装方法能够在温和条件下实现纳米颗粒的精准定位与功能化封装。Hu 等<sup>[10]</sup>以抗坏血酸还原制得 PVP 包覆的 Pd 胶体( $\sim 3 \text{ nm}$ ),随后在溶液中使  $\text{FeSO}_4$  与  $\text{H}_3\text{BTC}$  室温自组装形成 MIL-100(Fe)壳层,得到核壳结构  $\text{Pd@MIL-100(Fe)}$ 。部分去除 PVP 后制得  $\text{Pd}_{\text{np}}\text{@MIL-100(Fe)}$ 。该材料中 Pd 颗粒封装均匀且孔道开放,可在可见光下催化硝

基芳烃与苯甲醇一锅合成仲胺。部分去除 PVP 增强了 MOF 到 Pd 的电荷转移,显著提升催化性能,且循环稳定性优异。

## 1.2 碳材料封装策略

封装金属纳米颗粒的碳材料是一类通过将金属纳米颗粒与碳基材料结合而形成的一类高性能复合材料。碳材料凭借独特的物理化学性质,不仅能够有效防止金属颗粒的团聚和氧化,还可增强复合材料的导电性、稳定性和功能多样性。

### 1.2.1 石墨烯封装金属纳米颗粒

石墨烯(graphene)是由单层碳原子以  $sp^2$  杂化轨道紧密排列形成的二维蜂窝状结构晶体,是构成石墨、碳纳米管和富勒烯等碳材料的基本单元,厚度仅为 0.335 nm,是目前已知最薄且机械强度最高的材料之一。

Daffan 等<sup>[11]</sup>提出一种新型激光诱导石墨烯(LIG),通过单步光诱导固态反应,首次提出光诱导固态单步法石墨烯封装金属纳米颗粒策略,如图 2 所示<sup>[11]</sup>,通过低功率激光辐照金属盐与酚醛树脂的混合前驱体,同步生成多孔石墨烯和 MNPs。在热解过程中,激光诱导酚醛树脂热解时,释放的还原性气体( $H_2$ 、 $CO$ )和高温( $>2000\text{ K}$ )形成局部碳热还原环境,即使在大气中也能高效还原金属离子(如  $Ni^{2+} \rightarrow Ni^0$ ),突破传统需惰性气氛的限制。

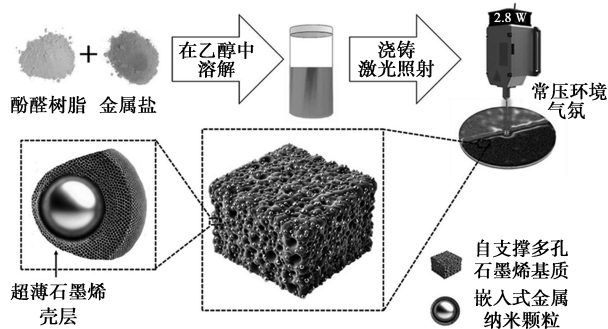


图 2 制备 MNP-LIG 复合材料的一步合成工艺示意图

石墨烯也可通过化学修饰(如掺杂 N、S 原子)或构建多孔结构将 MNPs 封装起来,可提升保护核心金属的性能,提升传感、催化等性能。Yan 等<sup>[12]</sup>提出了“链甲”结构的传感材料设计理念,通过氮掺杂石墨烯封装钴镍纳米颗粒( $CoNi@NGs$ ),实现了金属核心与外部环境的物理隔离,有效防止金属硫化物的形成和腐蚀。这种结构不仅保护了金属纳米颗粒在恶劣条件下的稳定性,还显著提升了抗硫中毒性能。Zheng 等<sup>[13]</sup>通过一步热解法合成了碳掺杂

钠纳米颗粒封装在石墨碳壳中的核壳结构( $Co@NC$ ),有效防止了金属纳米颗粒的团聚,同时增强了电子转移效率,并且发现在  $800^\circ\text{C}$  优化温度下,碳和钴原子在界面处的互扩散现象,这种互扩散掺杂显著提升了催化剂的双功能氧还原反应(ORR)和氧进化反应(OER)活性。作为一种非贵金属催化剂, $Co@NC-800$ (在  $800^\circ\text{C}$  优化温度下的  $Co@NC$ )降低了对贵金属(如铂和钌)的依赖,可用于可充电新空气电池、其他能源存储和转换设备。

### 1.2.2 碳纳米管封装金属纳米颗粒

碳纳米管(CNTs)是由石墨烯片层卷曲形成的中空管体,分为单壁和多壁 2 类。凭借独特的几何结构和高导热、高导电、高强度等优异物化特性,在催化、储能、传感器等领域具有广阔应用前景<sup>[14]</sup>。作为金属纳米颗粒的理想载体,CNTs 的大表面积与中空结构不仅能提升金属颗粒的分散性,还能通过限域效应抑制颗粒生长;化学稳定性还可保护金属颗粒免受氧化腐蚀,延长催化剂寿命。在具体应用中,Shang 等<sup>[15]</sup>设计了一种氮掺杂碳封装的三金属  $CoNiFe$  碳纳米管杂化材料( $NC@CoNiFe/CNTs$ ),用于锂硫电池隔膜改性。该结构整合了 CNTs 的物理限域、氮掺杂碳的化学吸附以及  $CoNiFe$  合金的催化活性,构建了“物理限制-化学吸附-催化转化”协同机制,有效抑制多硫化锂穿梭并加速氧化还原动力学。类似设计也被用于催化领域,Majumdar 等<sup>[16]</sup>开发了氮掺杂碳纳米管封装的  $Ru-Co_2Ni$  纳米合金( $Ru-Co_2Ni@NCNT$ ),利用碳纳米管的限域效应引入压缩应变,调控合金电子结构。密度泛函理论(DFT)计算表明,应变显著降低了 Co 和 Ni 位点的氢吸附自由能( $\Delta G^*H$ ),使其接近理想值( $\approx 0\text{ eV}$ ),从而优化析氢反应(HER)动力学。这一应变工程策略通过调节活性位点的电子环境,为高效催化剂设计提供了新思路。

### 1.2.3 MOF 衍生碳封装金属纳米颗粒

在纳米多孔碳材料的制备过程中,采用金属-有机框架(MOFs)作为牺牲模板是一种颇具创新意义并且行之有效的策略。经过对前体材料加以煅烧,能够顺利制备出所需要的纳米多孔碳材料,并能够对 MOFs 孔隙率进行精准调控<sup>[17]</sup>。碳材料拥有优异的导电特性,这为它们在电子器件等相关领域的应用提供了可能;碳材料也具备相当出色的催化活性,在化学反应的催化进程里有着不容忽视的作用;除此之外,碳材料良好的热化学稳定性进一步拓展了它们的应用范畴,提高了实际应用价值。

研究者们通过将MOF与碳纳米管结合,开发出了一种兼具高导电性和高孔隙率的MOF衍生碳材料,为电化学传感器的设计提供了新的思路。例如,Bodkhe等<sup>[18]</sup>开发了一种基于铜苯三羧酸盐金属-有机框架(CuBTC-MOF)的复合材料,通过引入银纳米颗粒(AgNPs)和单壁碳纳米管(SWNTs),显著提升了材料的导电性和活性位点数量。与此同时,Li等<sup>[19]</sup>采用两步热解策略,以ZIF-8为前驱体,成功制备了氮掺杂碳纳米管封装的镍纳米颗粒(Ni@N-CNTs)。该结构不仅保护了镍纳米颗粒免受酸性电解液的电化学腐蚀,还通过氮掺杂和多孔结构显著提升了材料的电催化活性和导电性。基于此,该研究团队构建了一个能够同时检测 $\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{Hg}^{2+}$ 的电化学传感平台,检测限均达到了33.3 ng/L,远低于已报道的传感平台。

## 2 封装纳米金属颗粒的应用

封装金属纳米颗粒体系凭借独特的限域稳定性与功能协同性,已突破传统催化材料的性能瓶颈,在能源、环境及生物医学等领域展现出应用潜力。

### 2.1 能源储存与转换

#### 2.1.1 $\text{CO}_2$ 的催化转换应用

作为全球气候安全的核心挑战, $\text{CO}_2$ 减排亟需创新方案。通过催化技术将 $\text{CO}_2$ 转化为燃料及化学品,可构建“碳循环经济”,减少大气 $\text{CO}_2$ 并推动工业低碳化转型<sup>[20]</sup>。封装于MOF或碳基质中的金属纳米颗粒催化剂,凭借限域结构调控微环境、增强传质及抑制烧结,能同步提升 $\text{CO}_2$ 加氢反应的活性、选择性与稳定性。

在反向水气变换(RWGS)反应中,Li等<sup>[21]</sup>以Zr-MOF( $\text{UiO}-66-\text{NH}_2$ )为载体,嵌入碳量子点(CDs)并锚定Pt纳米颗粒,制得Pt/30-CDs/Zr-MOF光热催化剂。在 $300^\circ\text{C}$ 、 $1.2\text{ W}/\text{cm}^2$ 光照下, $\text{CO}_2$ 转化率12.24%、CO选择性高于99%、产率 $22.52\text{ mmol}/(\text{g}\cdot\text{h})$ ,反应温度较传统工艺降低40%、能耗节约35%。García-Zaragoza等<sup>[22]</sup>通过热解ZIF-67获得碳包覆Co纳米颗粒( $\text{Co}@C$ ),再负载Pd构建CoPd/ $\text{Co}@C$ 磁性催化剂。在磁感应加热下, $\text{CO}_2$ 转化率达71.1%(较 $\text{Co}@C$ 提升16.4%),合成气选择性大于99%,CO生产效率达 $478.5\text{ mL}/\text{kWh}$ ,能效提升40%。 $\text{CO}_2$ 加氢制甲醇方面,Velisoju等<sup>[23]</sup>在ZIF-8上合成高分散Cu纳米颗粒,制得CuNPs@Zn-MOF限域催化剂(平均粒径14 nm),甲醇选择性大于90%,产率为商用Cu-Zn-Al催化剂的2倍,150 h

稳定性测试活性衰减小于5%。Xie等<sup>[24]</sup>以EDTA修饰的UiO-66封装AuCu双金属,制备AuCu@UiO-66-EDTA催化剂,在 $250^\circ\text{C}$ 、3.0 MPa下甲醇时空产率达 $3.34\text{ g}_{\text{MeOH}}/(\text{g}_{\text{metal}}\cdot\text{h})$ 。上述研究通过限域结构与电子环境调控,显著提升了 $\text{CO}_2$ 加氢催化性能,为碳循环利用提供了新思路。

#### 2.1.2 锂/钠离子电池应用

金属有机框架(MOF)与碳基材料封装金属纳米颗粒技术通过多级限域结构与界面功能化设计,为高稳定性锂/钠离子电池电极提供了可能。例如,Seo等<sup>[25]</sup>设计了一种三维导电基体材料,实现了闭孔结构多孔碳微球内封装 $\text{Ag}_2\text{Se}$ 纳米晶的设计。与 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 正极组装的全电池表现出卓越的循环稳定性与高倍率性能,凸显实际应用潜力。此外,Yao等<sup>[26]</sup>通过 $\text{NH}_2\text{-MIL-125}(\text{Ti})$ 基金属有机框架与 $\text{CS}_2$ 的化学气相反应,成功合成氮硫共掺杂碳包覆 $\text{TiS}_2$ 复合材料( $\text{TiS}_2@\text{NSC}$ )。该电极在2、5 A/g电流密度下循环1 000次后,分别保持418、392 mAh/g的高可逆容量,展现出显著倍率性能优势。

### 2.2 生物医学与传感

MOF与碳基材料协同封装金属纳米颗粒技术可以显著提升材料的生物传感性能。Liu等<sup>[27]</sup>将金纳米簇(AuNCs)与L-抗坏血酸氧化酶共固定于Ce-WUiO-66框架内,形成级联探针。MOF封装诱导AuNCs产生聚集诱导发射增强(AIEE)效应,使检测灵敏度提升近2个数量级,目标物检测限达 $10^{-8}\text{ mol}/\text{L}$ 。Yi等<sup>[28]</sup>开发的钴掺杂碳点/卟啉基MOF纳米酶(Co-CD/PMOF)兼具过氧化物酶模拟活性与荧光特性,所构建的化学发光/荧光(CL/FL)双模式免疫传感器实现了黄曲霉毒素B1(AFB1)的高精度检测,交叉验证可靠性提升超30%。

### 2.3 环境修复

封装纳米金属颗粒在环境修复中具有广阔的应用前景,可通过提高纳米颗粒的稳定性、分散性及反应活性,从而提升污染物去除效率。在2价铁[Fe(II)]活化氧化技术领域,Liu等<sup>[29]</sup>开发了零价铁封装多孔碳复合材料(ZVI@PC),将零价铁限域于生物质衍生碳壳中,实现Fe(II)可控释放。该材料在污染场地原位激活过硫酸盐产生羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ ),高效氧化剧毒As(III)为低毒性As(V)(转化率>98%),同时Fe(III)水解形成水铁矿稳定固定As(V)(固定率为92.3%),显著提升了土壤和地下水中砷的解毒效率。

### 3 结论与展望

对金属纳米颗粒在 MOF 和碳基材料中的合成策略进行了综述,为封装金属纳米颗粒的技术进步与应用发展提供了参考。当前,纳米金属颗粒封装方法已经取得了显著的进展,但仍存在一些挑战。

(1) 当前许多方法(如反胶束法、模板辅助法)过度依赖复杂的合成步骤,难以规模化生产。开发高效、低成本的封装工艺,探索连续化生产路径是未来发展的重要方向。

(2) 单一封装材料的功能有限,需结合多组分(如无机-有机杂化壳层)、多尺度结构(如分级孔道)和界面工程(如异质结设计),实现催化活性、选择性与稳定性的协同提升。

(3) 现有研究多聚焦短期性能,需系统考察封装材料在高温、高压或极端反应条件下的长期稳定性及循环寿命,推动实际工业应用。

(4) 如何开发环境友好型封装材料(如生物基聚合物)和低能耗合成工艺,减少有毒试剂使用,是绿色化学发展的必然要求。此外,借助机器学习与多尺度模拟,预测封装结构对材料性能的影响,加速新材料开发与优化也是 AI 时代赋予的新要求。

综上,未来研究需进一步融合材料科学、化学工程与计算技术,突破现有技术瓶颈,推动纳米金属颗粒封装技术从实验室迈向工业应用,为能源转化、环境修复及生物医学等领域提供更高效、耐用的催化解决方案。

### 参考文献

- [1] Saleh T A. Nanomaterials: Classification, properties, and environmental toxicities [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2020, 20: 101067.
- [2] Pach A, Szot A, Fitzner K, *et al.* Opportunities and challenges in the synthesis of noble metal nanoparticles via the chemical route in microreactor systems [J]. *Micromachines*, 2024, 15(9): 1119.
- [3] Gao C, Lyu F, Yin Y. Encapsulated metal nanoparticles for catalysis [J]. *Chemical Reviews*, 2020, 121(2): 834–881.
- [4] Li X, Zeng Z, Zeng G, *et al.* A “bottle-around-ship” like method synthesized yolk-shell  $\text{Ag}_3\text{PO}_4@ \text{MIL-53}(\text{Fe})$  Z-scheme photocatalysts for enhanced tetracycline removal [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2020, 561: 501–511.
- [5] Ke Y, Fan Z, Mao J. In situ confined encapsulation of ultrafine  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  nanoclusters in N/S co-doped graphene-based membranes for continuous chemical conversion [J]. *RSC Advances*, 2024, 14(40): 29464–29471.
- [6] Zheng G, Pastoriza-Santos I, Pérez-Juste J, *et al.* Plasmonic metal-organic frameworks [J]. *Smart Mat*, 2021, 2(4): 446–465.
- [7] Lukato S, Wójcik M, Krogul-Sobczak A, *et al.* Enhancing the green synthesis of glycerol carbonate: Carboxylation of glycerol with  $\text{CO}_2$  catalyzed by metal nanoparticles encapsulated in cerium metal-organic frameworks [J]. *Nanomaterials*, 2024, 14(8): 650.
- [8] Borah P, Mcleod N, Gupta N K, *et al.* Incarcerating bismuth nanoparticles into a thiol-laced metal-organic framework for electro and photocatalysis [J]. *Materials Horizons*, 2025, 12(4): 1290–1302.
- [9] Qin Y, Hao M, Wang J, *et al.* Rational design of a core-shell structured plasmonic  $\text{Au}@ \text{MIL-100}(\text{Fe})$  nanocomposite for efficient photocatalysis [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(51): 56930–56937.
- [10] Hu L, Liu H, Li Z. Rational design of core-shell structured  $\text{Pd}@ \text{MIL-100}(\text{Fe})$  for efficient visible light-initiated syntheses of secondary amines from nitro aromatics and benzyl alcohols [J]. *ACS Catalysis*, 2025, 15(3): 2262–2269.
- [11] Daffan G, Bahuguna G, Kothuru A, *et al.* Universal light-induced solid-state single-step approach for the in-situ synthesis of porous graphene-embedded nanoparticles [J]. *Carbon*, 2025, 235: 120077.
- [12] Yan Y, Li S, Jiang L, *et al.* Anti-sulfur poisoning electrochemical sensor for sulfur ions based on nitrogen-doped graphene-encapsulated cobalt-nickel nanoparticles [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2025, 424: 136868.
- [13] Zheng H, Lin L, Chen Z, *et al.* Carbon doped cobalt nanoparticles encapsulated in graphitic carbon shells: Efficient bifunctional oxygen electrocatalysts for ultrastable Zn-air batteries [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2025, 686: 624–633.
- [14] 闫江毅, 丁一汇, 李凤亭. 碳纳米管功能化改性的研究进展 [J]. *低碳化学与化工*, 2024, 49(10): 1–10, 19.
- [15] Shang J, Ma C, Zhang C, *et al.* Nitrogen-doped carbon encapsulated trimetallic CoNiFe alloy nanoparticles decorated carbon nanotube hybrid composites modified separator for lithium-sulfur batteries [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 82: 110552.
- [16] Majumdar A, Tran K D, Prabhakaran S, *et al.* Strain engineering of Ru- $\text{Co}_2\text{Ni}$  nanoalloy encapsulated with carbon nanotubes for efficient anion and proton exchange membrane water electrolysis [J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(23): 2420517.
- [17] 高梦磊, 王凤武. MOFs 衍生材料的研究进展 [J]. *云南化工*, 2023, 50(8): 6–9.
- [18] Bodkhe G A, More M S, Umar A, *et al.* Enhanced detection of heavy metal ions using Ag nanoparticles and single-walled carbon nanotubes within Cu-based metal-organic frameworks [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(3): 113024.
- [19] Li J, Chen L, Qiao Y, *et al.* MOF-derived N-doped carbon nanotube-confined Ni nanoparticles for the simultaneous electrochemical detection of  $\text{Cu}^{2+}$  and  $\text{Hg}^{2+}$  with high sensitivity and stability [J]. *Molecules*, 2025, 30(5): 1078.
- [20] 张文龙. 二氧化碳加氢制甲醇的研究进展 [J]. *化工设计通讯*, 2024, 50(6): 96–98.
- [21] Li H, Xiao Z, Hao R, *et al.* Encapsulating carbon quantum dots by Zr-MOF-supported Pt nanoparticles for enhanced photothermal RWGS reaction [J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 365: 132637.
- [22] García-Zaragoza A, Del Río-Rodríguez J L, Cerezo-Navarrete C, *et al.* Pd-enhanced carbon-encapsulated Co nanoparticles for efficient reverse water-gas shift under magnetic induction heating [J]. *ACS Catalysis*, 2025, 15(11): 9489–9502.

(下转第 75 页)

- 膜研制[J].膜科学与技术,2024,44(6):18-25.
- [3] Luo H, Guo Y, Wang Z. Prediction of the optimum conditions for hydraulic cleaning process of typical organic foulants on the membrane surface[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 610(1): 12011.
- [4] Horseman T, Yin Y, Christie K S, *et al.* Wetting, scaling, and fouling in membrane distillation: State-of-the-art insights on fundamental mechanisms and mitigation strategies[J]. ACS ES&T Engineering, 2021, 1(1): 117-140.
- [5] Wu X, Han H, Zhang H, *et al.* Intelligent warning of membrane fouling based on robust deep neural network[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2022, 24(1): 276-293.
- [6] Niu C, Li X, Dai R, *et al.* Artificial intelligence-incorporated membrane fouling prediction for membrane-based processes in the past 20 years: A critical review[J]. Water Research, 2022, 216: 118299.
- [7] Janiesch C, Zschech P, Heinrich K. Machine learning and deep learning[J]. Electronic Markets, 2021, 31(3): 685-695.
- [8] Zhu M, Wang J, Yang X, *et al.* A review of the application of machine learning in water quality evaluation[J]. Eco-Environment & Health, 2022, 1(2): 107-116.
- [9] Jiang T, Gradus J L, Rosellini A J. Supervised machine learning: A brief primer[J]. Behavior Therapy, 2020, 51(5): 675-687.
- [10] Bagheri M, Akbari A, Mirbagheri S A. Advanced control of membrane fouling in filtration systems using artificial intelligence and machine learning techniques: A critical review[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, 123: 229-252.
- [11] Koch M, Duigou T, Faulon J. Reinforcement learning for bioretrosynthesis[J]. ACS Synthetic Biology, 2020, 9(1): 157-168.
- [12] Abuwatfa W H, ALSawafah N, Darwish N, *et al.* A review on membrane fouling prediction using artificial neural networks (ANNs)[J]. Membranes, 2023, 13(7): 685.
- [13] 杨文浩, 郑明德, 黎恒. 基于金枪鱼群算法优化 BP 神经网络的出水 COD 浓度预测[J]. 工业控制计算机, 2025, 38(3): 123-125.
- [14] 江心宁, 朱玉昕, 陶翠翠, 等. 改性超滤膜技术在水处理中的应用研究进展[J]. 化学通报, 2023, 86(9): 1091-1096.
- [15] 张扬天, 黄一, 韩昌道, 等. NBs-GO 膜的渗透性能及其对染料截留性能[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(4): 1112-1120.
- [16] Ibrahim S, Abdul Wahab N. Improved artificial neural network training based on response surface methodology for membrane flux prediction[J]. Membranes, 2022, 12(8): 726.
- [17] Gao H, Zhong S, Zhang W, *et al.* Revolutionizing membrane design using machine Learning-Bayesian optimization[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(4): 2572-2581.
- [18] Wang C, Wang L, Yu H, *et al.* Machine learning for layer-by-layer nanofiltration membrane performance prediction and polymer candidate exploration[J]. Chemosphere, 2024, 350: 140999.
- [19] Gao H, Zhong S, Dangayach R, *et al.* Understanding and designing a high-performance ultrafiltration membrane using machine learning[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(46): 17831-17840.
- [20] Zhu Y, Wang Y, Zhu E, *et al.* Predicting membrane fouling of submerged membrane bioreactor wastewater treatment plants using machine learning[J]. Environmental Science & Technology, 2025, 59(20): 10010-10021.
- [21] Park S, Baek S, Pyo J, *et al.* Deep neural networks for modeling fouling growth and flux decline during NF/RO membrane filtration[J]. Journal of Membrane Science, 2019, 587: 117164.
- [22] 李宗浩. 超声强化膜过滤纯化苹果皮多酚机理研究及机器学习预测[D]. 长春: 吉林大学, 2024.
- [23] Shim J, Park S, Cho K H. Deep learning model for simulating influence of natural organic matter in nanofiltration[J]. Water Research, 2021, 197: 117070.
- [24] 李博文. 基于人工神经网络的膜改性工艺优化及膜性能预测研究[D]. 金华: 浙江师范大学, 2023.
- [25] 李万意, 刘文昭, 陈清. 基于响应曲面法设计和优化纳滤膜清洗方案研究[J]. 数字印刷, 2021, (6): 80-88.
- [26] Elsayed A, Li Z, Khan K, *et al.* Predicting membrane cleaning effectiveness in a full-scale water treatment plant using an artificial neural network model[J]. Journal of Water Process Engineering, 2024, 66: 105932.
- [27] Zhao B, Chen H, Gao D, *et al.* Cleaning decision model of MBR membrane based on bandelet neural network optimized by improved bat algorithm[J]. Applied Soft Computing, 2020, 91: 106211.
- [28] 匡科, 孙伟, 董嘉豪, 等. 城镇净水厂 A2OA-MBR 工艺关键膜污染组分识别及清洗[J]. 膜科学与技术, 2025, 45(2): 162-172.
- [29] Guo Y, Wang Z, Ma Y, *et al.* A new composite model of the membrane cleaning for predicting the fouling resistance in the hydraulic cleaning process[J]. Journal of Membrane Science, 2020, 602: 117957. ■
- (上接第 70 页)
- [23] Velisoju V K, Cerrillo J L, Ahmad R, *et al.* Copper nanoparticles encapsulated in zeolitic imidazolate framework-8 as a stable and selective CO<sub>2</sub> hydrogenation catalyst[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 2045.
- [24] Xie G, Bai X, Niu Y, *et al.* Highly dispersed AuCu nanoparticles confined in Zr-MOFs for efficient methanol synthesis from CO<sub>2</sub> hydrogenation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16(51): 70626-70633.
- [25] Seo H Y, Kim Y B, Senthamaraikannan T G, *et al.* Novel lithiophilic silver selenide nanocrystals within porous carbon microsphere: Tailoring pore structures for enhanced lithium metal battery anodes[J]. ACS Nano, 2025, 19(6): 6152-6164.
- [26] Yao T, Wang H, Ji X, *et al.* Encapsulation of titanium disulfide into MOF-derived N, S-doped carbon nanotablets toward suppressed shuttle effect and enhanced sodium storage performance[J]. Small, 2024, 20(26): 2311126.
- [27] Liu X, Chen J, Xia F, *et al.* Biphasic interface templated synthesis of wrinkled MOFs for the construction of cascade sensing platform based on the encapsulated gold nanoclusters and enzymes[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2025, 680: 528-536.
- [28] Yi Z, Xiao S, Kang X, *et al.* Bifunctional MOF-encapsulated cobalt-doped carbon dots nanozyme-powered chemiluminescence/fluorescence dual-mode detection of aflatoxin B1[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16(13): 16494-16504.
- [29] Liu K, Li F, Zhu Z, *et al.* Nanoconfined Fe(II) releaser for long-term arsenic immobilization and its sustainability assessment[J]. Water Research, 2024, 260: 121954. ■