

基于金属有机框架的电化学传感器的研究进展

龙 胜, 高恩军

辽宁科技大学化学工程学院辽宁省中俄菱镁材料精细分离技术中俄“一带一路”联合实验室, 辽宁 鞍山

收稿日期: 2025年12月15日; 录用日期: 2026年1月5日; 发布日期: 2026年1月14日

摘 要

金属有机框架(MOFs)作为一种由金属离子/簇与有机连接体自组装形成的晶态多孔材料, 凭借其极高的比表面积、可调的孔道结构及丰富的表面化学特性, 已成为构筑高性能电化学传感器的理想平台材料。本文系统综述了基于MOFs的电化学传感器的最新研究进展, 重点探讨了三大类材料体系: 原始MOFs、MOF衍生功能材料以及MOF基复合材料。通过合理的结构设计, 如构建本征导电的MOFs或将其与碳材料、金属纳米粒子等功能单元复合, 可有效克服MOFs自身导电性不足的局限, 显著提升传感器对目标分析物的响应灵敏度与选择性。这些先进的传感平台在环境监测(如重金属离子、污染物)、生物医药(如神经递质、葡萄糖、疾病标志物)及食品安全等领域的检测中展现出巨大应用潜力。尽管在材料稳定性、导电性及机理研究方面仍面临挑战, 但通过精准的分子工程与复合策略, MOF基电化学传感器在面向实际应用的灵敏、快速及多组分检测方面前景广阔。

关键词

金属有机框架材料, 电化学传感器, 复合材料, 生物传感, 环境监测

Research Progress on Electrochemical Sensors Based on Metal-Organic Frameworks

Sheng Long, Enjun Gao

Liaoning Province China-Russian Magnesium Material Fine Separation “Belt and Road” Joint Laboratory, School of Chemical Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan Liaoning

Received: December 15, 2025; accepted: January 5, 2026; published: January 14, 2026

Abstract

Metal-organic frameworks (MOFs), crystalline porous materials formed through the self-assembly of metal ions/clusters with organic linkers, have emerged as ideal platform materials for construct-

ing high-performance electrochemical sensors due to their exceptionally high specific surface area, tunable pore architecture, and rich surface chemical properties. This paper systematically reviews recent advancements in MOF-based electrochemical sensors, focusing on three major material categories: pristine MOFs, MOF-derived functional materials, and MOF-based composites. Through strategic structural design—such as constructing intrinsically conductive MOFs or integrating them with functional units like carbon materials and metal nanoparticles—the inherent conductivity limitations of MOFs can be effectively overcome, significantly enhancing sensor responsiveness and selectivity toward target analytes. These advanced sensing platforms demonstrate immense application potential in environmental monitoring (heavy metal ions, pollutants), biomedicine (neurotransmitters, glucose, disease biomarkers), and food safety detection. Despite ongoing challenges in material stability, conductivity, and mechanism studies, MOF-based electrochemical sensors hold promising prospects for sensitive, rapid, and multi-component detection in practical applications through precise molecular engineering and composite strategies.

Keywords

Metal-Organic Framework Materials, Electrochemical Sensors, Composite Materials, Biosensing, Environmental Monitoring

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

金属有机框架(MOFs)作为由金属离子/簇与有机配体通过配位自组装形成的晶态多孔材料[1], 凭借其超高比表面积(部分可达 $10,000 \text{ m}^2/\text{g}$)、高度可调的孔道结构和表面化学性质[2], 已成为化学材料领域发展最迅速的方向之一, 在气体存储、分离、催化等[3]领域展现出巨大潜力, 近年来更是在电化学传感领域引发研究热潮。MOFs 的核心价值在于其可作为理想平台用于构建高性能电化学传感器: 其巨大的比表面积和孔隙率有利于分析物的高效吸附与富集, 显著提升检测灵敏度; 其可精确设计的孔径尺寸和表面功能基团(如胺基、磷酸基)可通过尺寸排阻、静电相互作用、氢键等机制实现对待测物的高选择性识别; 而其丰富的金属节点和可功能化骨架提供了大量潜在的催化活性位点。研究者发展了三大类材料策略: 原始 MOFs、MOF 复合材料和 MOF 衍生材料。对于原始 MOFs, 研究重点集中于具有本征导电性的二维导电 MOFs (2D c-MOFs), 如 M-HHTP [4], 其扩展的 π 共轭体系可实现高效的电子传输, 无需额外导电添加剂即可直接用于修饰电极, 实现对葡萄糖、 H_2O_2 、多巴胺(DA)等目标物的高灵敏、高选择性检测。鉴于原始 MOFs 的局限性, 通过热解等后合成处理获得的 MOF 衍生材料在完美继承 MOF 前驱体高比表面积和多孔结构的同时, 彻底解决了导电性问题, 展现出卓越的电催化性能和稳定性[5]。构建 MOF 复合材料也是设计电化学传感器的主流方案, 通过引入其他功能材料产生协同效应。其中, MOF-碳材料复合(如石墨烯、碳纳米管)借助碳材料的高导电性构建快速电子传输网络, 同时保留 MOF 的吸附与选择性优势, 适用于多干扰共存生物小分子检测[6][7]; MOF-金属纳米粒子(MNPs)复合将 Au、Pt NPs 封装于 MOF 孔道或修饰于表面, 显著增强电催化活性与稳定性, 用于 H_2O_2 、重金属离子等高灵敏检测; MOF-聚合物复合(如导电聚合物、分子印迹聚合物 MIPs)则改善材料成膜性与机械强度, 引入特异性识别能力, 进一步提升传感器稳定性与抗干扰性[8]-[10]。三类复合策略通过功能互补, 有效克服了单一 MOF 的局限, 为高性能传感界面构建提供了多元路径。展望未来, 研究将趋向于设计合成新型稳定、高导电的 MOFs, 开发更精准的复合与衍生化策略以优化材料性能, 并推动传感器件向微型化、柔性可穿戴及实际复杂样

品现场快速检测方向发展和应用。

2. MOF 的合成方法与基本结构

2.1. 合成方法

鉴于材料合成领域的重大进展和新技术的引入, 已经开发出多种 MOFs 的合成方法。然而, 每种方法的合成效率、产率不同, 得到的 MOFs 的晶体结构、形貌、尺寸、孔隙率和表面积等物理性质也不同。下面将介绍 MOFs 的常用合成方法, 这些方法各有优势和不足, 在实际应用中可根据需求选择合适的方法进行 MOFs 的合成。

2.1.1. 溶剂(水)热法

溶剂(水)热法是应用最广泛的制备 MOFs 材料的方法[11]通常在高温高压下进行, 使金属离子和有机配体在溶剂(水)中反应形成。例如, Zheng 等人[12]通过水热法合成了 $\text{Cu}_3(\text{HHTN})_2$, 该方法工艺简单, 使用方便, 结晶度和收率都较高, 因此得到广泛应用。但是由于反应时间过长, 反应进程难以控制, 不利于大规模工业化生产和应用扩展。

2.1.2. 微波辅助法

微波辅助合成法是利用微波辐射加热反应体系促进反应进行。这种方法的潜在优势包括相的高选择性, 可控的粒径分布, 易于控制的颗粒形态[13]。Babu 等人[14]使用微波辅助法实现了 MOF-205 的合成, 所制备的 MOFs 可以催化二氧化碳和环氧化物合成环碳酸盐, 但微波对吸收介质的穿透深度限制了反应器的尺寸, 进一步限制了 MOFs 的大规模生产。

2.1.3. 液相扩散法

扩散法可以在温和的反应条件下合成高质量的 MOFs 单晶, 便于材料结构的进一步分析, 但合成反应时间漫长, 产率低[15]。Zhao 等人[16]通过液相扩散法设计并构建了负载三氧化二铁的金属有机骨架($\text{FeTCPP}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ MOF)纳米颗粒。

2.2. 结构组成

MOF 的多样晶体结构赋予其丰富的功能, MOF 由金属离子或金属团簇(次级构建单元, SBU)与有机连接体(常为羧酸或含氮配体)相互连接而成[17]。与沸石和多孔碳等材料不同, MOF 具有高度可调性, 有机配体的形状与尺寸以及 SBU 的几何构型共同决定孔径与框架结构, 因此可通过选择合适的金属与配体有针对性地构筑满足特定应用需求的孔道和功能位点[18]。基于有机和金属构件的组合, 理论上可以预测并设计 MOF 结构; 结构—性质的关系研究也因此受益于 MOF 构型的规范化, 这对按需设计新型功能 MOF 至关重要。MOF 的孔壁可被功能化以生成识别位点, 例如[19]直接引入胺基或吡啶基等可选择性识别特定的小分子。多功能配体与配位位点的合理布局能够在框架上形成协同活性位点和高选择性的吸附/识别表面, 从而显著提高传感效率。不同金属离子与有机连接体中的供氧或含氮原子形成各类 SBU, SBU 以多种方式拼接生成结构多样的 MOF 体系。

3. MOF 电化学传感器的材料结构设计

3.1. 本体 MOF 传感器

金属有机框架(MOFs)按照维度划分可分为零维、一维、二维和三维。其中, 二维导电 MOFs (2D c-MOFs)融合了二维 MOF 材料的层状结构与 MOFs 的高孔隙率、结构可调性等核心优势, 并凭借独特的共轭结构或 π - π 堆叠效应赋予其本征导电性, 使其成为高性能电化学传感材料的理想选择[20]-[22]。提升原

始 MOF 电荷传输效率的直接策略是设计本征导电型 MOF 结构, 已有综述系统总结了多种此类 MOF 的实例[23]。目前已合成并应用于电催化、超级电容器等多种电化学场景的高电导率 2D c-MOF 包括 $\text{Ni}_3(\text{HITP})_2$ 、 $\text{Ni}_3(\text{HIB})_2$ 、Ni-CAT-1 和 Co-CAT-1 等[24]。值得注意的是, 这类导电 MOF 在水中表现出优异的化学稳定性, 例如 $\text{Ni}_3(\text{HIB})_2$ 和 $\text{Ni}_3(\text{HITP})_2$ 即便在强酸或强碱溶液中长时间浸泡, 仍能保持晶体结构完整性[25]。鉴于其优异的水稳定性及金属节点赋予的氧化还原活性, 2D c-MOFs 无疑是电化学传感活性材料的理想候选。MOF 传感器因其结构可调、比表面积大和易于功能化等特点, 在环境监测与生物医药等领域表现出显著的应用潜力, 尤其适用于依赖选择性吸附或金属节点氧化还原活性的检测场景。然而, 该类材料仍面临导电性弱、稳定性不足以及活性位点利用效率有限等问题。通过优化材料设计, 例如开发二维导电 MOF, 与其他材料复合改性, 例如引入碳材料或金属纳米颗粒, 以及改进界面工艺, 如原位生长技术, 可以协同提升其性能, 从而推动该类传感器从实验室研究走向实际应用。

本体 MOF 传感器在实际生活中的运用

本体 MOF 传感器凭借其高比表面积、可调孔道和可功能化位点, 在多个领域展现出应用潜力。在环境检测方面, Zhou 等人[26]将 Mn-PCN-222 MOF 沉积在 ITO 电极上, 制备的多功能传感器可同时检测多种无机离子和重金属离子。Sally 等人[27]合成的 2D Cu-MOF 修饰碳糊电极, 利用其空腔吸附作用实现了对自来水和食品中痕量 Cu^{2+} 的高选择性检测(检测限低至 10^{-11} M)。Yang 等人[28]开发的双金属 Ni/Zn-MOF 与酪氨酸酶(Tyr)复合的生物传感器, 对水中苯酚(经 Tyr 催化)表现出高灵敏度和良好稳定性。在生物医药方面, ZIF-8 被报道用于多巴胺检测(检测范围 0.05~20 μM , 检测限 19.5 μM) [29]。在食品安全方面, 虽然本体 MOF 直接应用的报道相对较少, 但其原理已被证实可行, 为后续复合材料设计奠定了基础。这些实例证明了本征导电或具有特定功能的本体 MOF 在构建高性能电化学传感器方面的直接有效性。

3.2. MOF 衍生物传感器

尽管金属有机框架(MOFs)凭借高比表面积、可调孔道及可功能化位点等优势在传感领域展现出巨大潜力, 但其本征导电性不足与结构稳定性欠佳的缺陷, 严重制约了直接应用[30] [31]。通过热解策略将 MOFs 前驱体转化为衍生物(如多孔碳、金属/金属氧化物纳米复合材料), 既能有效克服上述缺陷, 又能保留 MOFs 高比表面积与多孔结构的固有优势, 成为提升其传感性能的关键途径[32]-[34]。热解法制备的衍生物主要分为直接热解与激光诱导加热(LIH)两类, 热解法制备的衍生物主要分为直接热解与激光诱导加热(LIH)两类[35]。例如, Zhao 等人[36]通过调控热解温度处理 MIL-88B(Fe)与三聚氰胺的混合物, 发现产物形貌随温度变化从菜花状慢慢演变为全碳纳米管结构, 这一转变直接显著影响了其电化学性能, 凸显了参数调控的重要性。另一类激光诱导加热(LIH)则是新兴的超快合成技术, 利用高能激光束在纳秒级的时间内将 MOF 局部瞬时加热至超高温(>2000 K), 随后以 $>10^{10}$ K/s 的速率骤降冷却[37]-[39]。这种极端升降温的过程能创造出具有非平衡结构、丰富缺陷及高稳定性的衍生物, 同时支持微区精确加工, 为微型器件制造提供了新思路[40], 其超快特性还能诱导形成传统热解难以实现的特殊晶相或缺陷结构, 进一步拓展了衍生物的功能调控空间。MOF 衍生物传感器通过热解或液相转化等方式, 有效弥补了原始 MOF 材料导电性弱和稳定性不足的缺点。这类传感器在生物医药无酶检测、环境痕量污染物分析及食品安全监控等领域表现出高灵敏度、高稳定性和良好的抗干扰能力。不过, 其制备过程较为复杂、结构精细调控难度大、成本较高等问题依然存在。未来可通过优化工艺、建立参数模型, 改进材料设计如部分碳化或构建核壳结构, 并结合分子印迹、微型化加工等应用创新, 协同推动此类传感器从实验室走向实际应用。

MOF 衍生物传感器在实际生活中的运用

MOF 衍生物传感器通过热解或 LIH 转化, 克服了本体 MOF 导电性和稳定性问题, 在多个检测领域

表现优异。在生物医药检测方面, ZIF-67 (钴基 MOF) 及其热解衍生物 $\text{Co}_3\text{O}_4@\text{C}$ 因其类过氧化物酶活性, 被广泛用于无酶葡萄糖传感器, 检测限低至 $0.1\ \mu\text{M}$ [41]。Cu-hemin MOF 与还原氧化石墨烯(rGO)复合的热解衍生物, 利用 rGO 增强导电性, 实现了对 H_2O_2 的超痕量检测(检测限 $0.019\ \mu\text{M}$) [42]。在环境检测方面, Co-TMC4R-BDC/GCE 衍生物传感器被用于检测汞离子(检测范围 $0.75\sim 18\ \mu\text{M}$, 检测限 $0.018\ \mu\text{M}$) [43]。在食品安全方面, $\text{Cu}@\text{Cu}_2\text{O}/\text{BNPC}/\text{GCE}$ (推测为 MOF 衍生材料) 传感器用于检测日落黄(检测范围 $0.01\sim 8\ \mu\text{M}$, 检测限 $0.0024\ \mu\text{M}$) [44], Ce-MOF/ERGO/GCE (可能为衍生复合材料) 用于检测双酚 A (检测范围 $3\sim 10\ \mu\text{M}$, 检测限 $0.0019\ \mu\text{M}$) [45]。这些成功案例充分验证了通过热解或 LIH 策略制备 MOF 衍生物是提升传感性能的有效途径。

3.3. MOF 复合材料传感器

MOF 复合材料易于制备且便于与多种功能材料耦合, 这为弥补原始 MOF 在生物传感应用中存在的不足提供了重要途径[46]。为提高稳定性、电导率与催化活性, 研究者常将碳基载体、金属纳米颗粒、酶、量子点与高分子通过共价键合、表面吸附、孔内封装或共沉淀等策略与 MOF 整合, 制备功能化复合材料[47]。许多用于生物传感的 MOF 复合体系在苛刻环境(如强酸或强碱)下仍表现出良好的结构稳定性和导电性能。由于原始 MOF 的电化学活性表面有限, 这可能制约其在电化学生物传感中的应用; 通过合理设计的复合材料可以显著暴露并增大电化学活性位点, 使传感材料对电解质离子更敏感, 从而提升检测灵敏度[48]。碳材料(如石墨烯、碳纳米管(CNTs)、碳黑)是提升 MOF 导电性的核心功能组分, 其与 MOF 的复合可有效弥补纯 MOF 本征导电性不足的缺陷。其中, MOF/碳纳米管复合材料(如 Mn-BDC@多壁碳纳米管(MWCNT) [49], Ce-MOF/CNT [50], Ni-MOF/MWCNT [51]等, 过 CNTs 的高导电网络增强电子转移效率, 广泛应用于抗坏血酸、多巴胺等小分子的电化学检测; MOF/氧化石墨烯(GO)复合材料则利用石墨烯优异的导电性、大比表面积及电催化活性, 在 H_2O_2 、多巴胺等目标物检测中展现出高灵敏度[52]-[54]。为进一步强化催化性能, 将金属纳米颗粒(MNPs, 如 Au、Pt、Pd NPs)引入 MOF 孔隙或修饰于其表面, 可构建 MOF/金属纳米粒子复合材料(如 $\text{Au}@\text{MOF}-5$ 、 $\text{Ag}@\text{ZIF}-67$ 等)。金属纳米颗粒不仅能显著提升复合材料的导电性, 其表面活性位点还可与 MOF 的催化中心协同作用, 进一步增强电催化活性[55] [56]。然而, 传统电化学传感器常将功能材料滴涂于刚性电极(如玻碳电极)表面, 存在界面结合力弱、稳定性差、柔性不足等局限, 难以满足可穿戴设备等新兴应用场景需求。为此, Liu [57]等人提出“原位生长”策略: 通过让金属离子(Ni^{2+} 、 Co^{2+})与有机配体(2-甲基咪唑)在柔性碳布(CC)表面直接配位反应并结晶, 原位生长出超薄 Ni/Co-MOF 纳米片, 形成独立的柔性电极(NiCo-MOF/CC)。该策略无需粘结剂, 既增强了材料与基底的结合稳定性, 又完整保留了碳布固有的柔韧性, 为构建高性能柔性传感器提供了新路径。这些复合材料通过协同效应, 实现了比单一 MOF 更优异的灵敏度、选择性和稳定性。增强 MOF 基材料中电荷传输的另一种常见策略是设计基于 MOF 的由活性金属有机框架(MOF)和其他导电材料(如碳材料或导电聚合物)组成的复合材料。MOF 复合材料传感器通过多组分协同效应, 在环境、生物医药、食品安全及柔性器件领域展现出高灵敏度、高选择性、多功能集成等优势, 尤其适用于复杂基质下的多目标物检测和柔性可穿戴场景。然而, 其制备复杂性、成本、长期稳定性及规模化难题仍需通过界面工程、低成本材料替代、智能识别元件设计等策略突破, 以推动其从实验室向实际应用的转化。

MOF 复合材料传感器在实际生活中的运用

MOF 复合材料通过其内部组分间的协同作用, 在电化学传感领域表现出显著的应用潜力, 已在环境监测、食品安全和生物医药等关键领域得到成功验证。这种材料的核心价值在于通过精心的结构设计, 有效提升了传感器的多项性能指标, 如灵敏度、选择性、稳定性和可扩展性。在环境检测方面 MOF 复合材料表现优异。例如, GCE/rGO-DUT4 复合材料构建的传感器对氯霉素表现出宽线性响应范围($1\sim 200\ \mu\text{M}$)

和较低的检测限(0.077 μM) [58]。类似地, PCE/Fe(BPY)-rGO 复合材料传感器为硝基呋喃类物质的检测提供了有效的解决方案(线性范围: 0.6~60 μM , 检测限: 0.77 μM) [59]。在食品安全方面 MOF 复合材料的设计实现了对多目标物的高灵敏检测。SUN 等人开发的 AuNPs/Zr-MOF/石墨烯三元复合传感器, 能够同时测定色素添加剂日落黄和苏丹红, 二者均获得了宽达三个数量级的线性范围(分别为 0.1~1000 μM 和 0.1~800 μM)与统一的低检测限(0.1 μM) [60]。Chen 团队的工作则聚焦于痕量有害物, 其制备的 AuNPs 修饰 Cu-MOF 传感器对亚硝酸盐的检测限低至 82 nM, 线性范围跨越五个数量级(0.1~10,000 μM), 凸显了极高的灵敏度[61]。在生物医药方面 MOF 的多功能特性得到了充分发挥。AuNPs/Cu-MOF 复合材料被巧妙设计为兼具信号放大(负载 AuNPs)与生物识别元件固载的双功能平台, 从而实现了对癌胚抗原(CEA)的高灵敏度检测[62]。此外, 以 UiO-66 为代表的 Zr-MOF, 凭借其优异的稳定性与可修饰表面, 成为固定核酸适配体的理想载体, 有效增强了对靶标癌细胞的特异性识别能力[63]。这些来自不同领域的应用实例充分证明, MOF 复合材料的设计策略能够有效提升电化学传感器的综合性能, 包括灵敏度、选择性、稳定性和适应性, 展现了该策略在不同检测场景中的广泛适用性和重要价值。

3.4. 三种 MOF 电化学传感器材料设计的横向对比分析

为更清楚地展现基于原始 MOF、MOF 衍生物以及 MOF 复合材料这三类传感器的性能区别与设计思路, 表 1 从材料特性、主要优势、关键性能指标、适用领域及当前挑战等多个角度进行了系统性的对比分析。这三类技术路径均需在稳定性、导电性与活性位点暴露三者之间取得有效平衡。

Table 1. Comparative analysis of materials for three types of MOF-based electrochemical sensors
表 1. 三种 MOF 电化学传感器材料对比分析

类型	本体 MOF 电化学传感器	MOF 衍生物电化学传感器	MOF 复合材料电化学传感器
材料本质	原始 MOF 材料	MOF 前驱体经热解转化的衍生物	MOF 与功能材料通过复合形成的多功能材料
核心设计策略	利用 MOF 固有结构与金属节点 redox 活性。	通过热解克服本体 MOF 导电性不足与稳定性缺陷, 保留多孔优势	多组分协同效应, 暴露活性位点, 适配柔性场景
导电性	多数绝缘体, 导电性差	良好(源于石墨化碳或金属相)	优异(依赖于导电基质如石墨烯、CNT 的连续网络)
化学稳定性	通常较差	极佳	取决于 MOF 组分和界面
活性位点特性	金属节点、配体缺陷为活性中心, 但易被包裹、暴露不充分	热解诱导丰富缺陷晶相, 活性位点密度高	协同暴露活性位点
适用检测场景	重金属离子、无机离子、小分子标志物、基础研究	无酶小分子检测、环境痕量污染物、非法添加剂、微型化器件	多污染物同时检测、生物小分子、生物大分子、多种添加剂、柔性可穿戴
主要缺点	本征导电性不足、稳定性受限、活性位点暴露不充分、机械强度弱	制备复杂、结构有序性可能丧失、活性位点易团聚、功能基团丢失	制备复杂、成本高、长期稳定性隐患
核心挑战	导电性与稳定性协同优化、活性位点高效暴露、复杂基质干扰抑制、规模化制备	制备流程标准化、结构有序性与功能保留平衡、活性位点分散、成本控制	协同效应精准调控、规模化生产、长期稳定性
未来优化方向	开发新型 2D c-MOFs、缺陷工程、原位生长柔性电极	低温热解衍生策略、部分碳化保留识别单元、核壳结构抑制团聚	界面工程强化、低成本材料替代、智能识别元件

4. 结论与展望

金属有机框架(MOF)因其可调的孔道结构与可设计的表面化学性质, 已成为电化学传感领域极具前景的核心材料, 常被用作功能组分的基体或模板。本文系统综述 MOF 在电化学传感中的设计策略与最新进展, 聚焦原始 MOF、MOF 衍生功能材料及 MOF 基复合材料三类体系。这些电化学传感器在环境监测、生物医学诊断和食品安全分析等领域展现出高灵敏度、高选择性和抗干扰性等卓越性能。尽管前景广阔, 该领域在材料稳定性、机理研究和实际应用验证方面仍面临挑战。未来应着重开发兼具导电性和稳定性的新型 MOF 材料。通过引入氮、硫、磷等杂原子, 可增强金属与配体间的结合作用, 结合二维共轭结构提升导电性能; 构建“刚柔并济”的互穿网络, 有助于缓冲柔性器件在弯折时的应力; 引入动态共价键则能使材料具备自修复功能(修复效率 > 90%), 从而在严苛条件下保持结构完整。机理研究需结合实时原位表征与人工智能预测方法。可搭建微流控-电化学-超分辨荧光联用平台, 实时追踪目标物在 MOF 孔道内的扩散行为; 利用冷冻电镜断层扫描技术, 解析 MOF 与金属纳米粒子复合结构的三维动态变化; 并借助图神经网络模型, 基于大规模数据预测“MOF 结构-目标物-性能”之间的构效关系(误差 < 15%), 实现传感器的定向设计。在实际验证方面, 应推动材料制备的规模化与标准化。发展高效环保的水相超声合成工艺(如 ZIF-67 产率 > 90%)和低成本卷对卷印刷技术(成本降低 50%), 并与第三方机构合作, 在河水、血清、食品等多类实际样品中开展系统验证, 建立包含上百种样本的数据库, 明确传感器的抗干扰边界(加标回收率 > 85%)。从发展趋势看, 微型化方面可发展集成“样品净化-信号检测”的微流控芯片, 结合 MOF 分子印迹技术与柔性电极, 实现 5 分钟内快速检测; 柔性可穿戴设备可采用生物可降解 MOF 与液态金属复合电极, 并集成摩擦纳米发电机实现自供电; 现场检测则可通过智能手机 APP 读取传感信号, 支持农药残留、重金属等污染物的即时筛查。总体而言, 未来研究应聚焦于开发新型稳定导电 MOF 材料, 结合原位表征与理论计算深入理解其识别机制, 推动 MOF 电化学传感器向微型化、柔性可穿戴和现场快速检测方向进一步发展。

参考文献

- [1] Long, J.R. and Yaghi, O.M. (2009) The Pervasive Chemistry of Metal-Organic Frameworks. *Chemical Society Reviews*, **38**, 1213-1214. <https://doi.org/10.1039/b903811f>
- [2] Yuan, S., Feng, L., Wang, K., Pang, J., Bosch, M., Lollar, C., et al. (2018) Stable Metal-Organic Frameworks: Design, Synthesis, and Applications. *Advanced Materials*, **30**, Article ID: 1704303. <https://doi.org/10.1002/adma.201704303>
- [3] Fan, W., Wang, X., Xu, B., Wang, Y., Liu, D., Zhang, M., et al. (2018) Amino-Functionalized MOFs with High Physicochemical Stability for Efficient Gas Storage/Separation, Dye Adsorption and Catalytic Performance. *Journal of Materials Chemistry A*, **6**, 24486-24495. <https://doi.org/10.1039/c8ta07839d>
- [4] Yang, M., Zhu, R., Chen, X., Tan, J., Yang, C. and Meng, Z. (2025) Structure and Electrical Transport Properties of Metal Cate-Cholate Frameworks: The Metal Center Matters. *Chinese Journal of Chemistry*, **44**, 311-318. <https://doi.org/10.1002/cjoc.70362>
- [5] Xing, Y., Chen, X. and Zhao, H. (2024) Hydroxylase-Like Biomimetic Nanozyme Synthesized via a Urea-Mediated MOF Pyrolytic Reconstruction Strategy for Non-“o-Phenol Hydroxyl”-Dependent Dopamine Electrochemical Sensing. *Analytical Chemistry*, **96**, 6037-6044. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.4c00564>
- [6] Song, J., Huang, M., Lin, X., Li, S.F.Y., Jiang, N., Liu, Y., et al. (2022) Novel Fe-Based Metal-Organic Framework (MOF) Modified Carbon Nanofiber as a Highly Selective and Sensitive Electrochemical Sensor for Tetracycline Detection. *Chemical Engineering Journal*, **427**, Article ID: 130913. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130913>
- [7] Gao, L. and Gao, E. (2021) Metal-Organic Frameworks for Electrochemical Sensors of Neurotransmitters. *Coordination Chemistry Reviews*, **434**, 213784. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.213784>
- [8] Sharma, A., Singh, A., Gupta, V., Sundramoorthy, A.K. and Arya, S. (2023) Involvement of Metal Organic Frameworks in Wearable Electrochemical Sensor for Efficient Performance. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, **38**, e00200. <https://doi.org/10.1016/j.teac.2023.e00200>
- [9] Ahmed, M.M., Bai, J., Kong, L., Du, J., Azat, S. and Xu, Q. (2025) Recent Advances in MOF-Modified Electrochemical Sensor for Point-of-Care Detecting Cardiac Biomarkers. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **189**, Article ID: 118277.

- <https://doi.org/10.1016/j.trac.2025.118277>
- [10] Mohan, B., Kumar, S., Xi, H., Ma, S., Tao, Z., Xing, T., *et al.* (2022) Fabricated Metal-Organic Frameworks (MOFs) as Luminescent and Electrochemical Biosensors for Cancer Biomarkers Detection. *Biosensors and Bioelectronics*, **197**, Article ID: 113738. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2021.113738>
 - [11] 王胜, 张胜全. 金属-有机框架材料 ZIF-8 的合成机理研究[J]. 甘肃冶金, 2016, 38(6): 44-48.
 - [12] Meng, Z. and Mirica, K.A. (2020) Two-Dimensional D- π Conjugated Metal-Organic Framework Based on Hexahydroxytrinitrophenylene. *Nano Research*, **14**, 369-375. <https://doi.org/10.1007/s12274-020-2874-x>
 - [13] 蔡放, 苏晓昀, 黄伟平, 等. 铅基金属有机框架的合成与应用研究进展[J]. 化学试剂, 2025, 47(11): 32-41.
 - [14] Babu, R., Roshan, R., Kathalikkattil, A.C., Kim, D.W. and Park, D. (2016) Rapid, Microwave-Assisted Synthesis of Cubic, Three-Dimensional, Highly Porous MOF-205 for Room Temperature CO₂ Fixation via Cyclic Carbonate Synthesis. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **8**, 33723-33731. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b12458>
 - [15] 党璐童, 康永锋. 金属有机框架材料合成方法研究进展[J]. 化工新型材料, 2020, 48(10): 15-19, 24.
 - [16] Zhao, Y., Wang, J., Cai, X., Ding, P., Lv, H. and Pei, R. (2020) Metal-Organic Frameworks with Enhanced Photodynamic Therapy: Synthesis, Erythrocyte Membrane Camouflage, and Aptamer-Targeted Aggregation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**, 23697-23706. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c04363>
 - [17] Liu, X., Li, H., Xu, N., Guo, Y., Zhang, X. and Wang, X. (2024) Rational Design of Co(II)-Pyridine-Decorated Reduced Phosphomolybdate Photocatalysts for Efficient Aniline Oxidation under Mild Conditions. *Chinese Journal of Chemistry*, **42**, 2970-2978. <https://doi.org/10.1002/cjoc.202400642>
 - [18] 胡文明, 马倩, 何勇强, 刘洪波, 刘军强, 夏笑虹. 自生长镍基 MOF 材料的结构调控及其电化学性能[J]. 无机化学学报, 2020, 36(3): 485-493.
 - [19] 付毓璋, 熊传溪. 双金属 MOF 基复合结构材料及其超级电容器性能[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(3): 495-501.
 - [20] Zheng, K., Pan, J., Yu, Z., Yi, C. and Li, M. (2024) A Smartphone-Assisted Electrochemiluminescent Detection of miRNA-21 *in Situ* Using Ru(bpy)₃²⁺@MOF. *Talanta*, **268**, Article ID: 125310. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2023.125310>
 - [21] Xie, L.S., Skorupskii, G. and Dincă, M. (2020) Electrically Conductive Metal-Organic Frameworks. *Chemical Reviews*, **120**, 8536-8580. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00766>
 - [22] Lu, S., Hummel, M., Kang, S. and Gu, Z. (2020) Selective Voltammetric Determination of Nitrite Using Cobalt Phthalocyanine Modified on Multiwalled Carbon Nanotubes. *Journal of The Electrochemical Society*, **167**, Article ID: 046515. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab7982>
 - [23] Liang, M., Liu, Y., Lu, S., Wang, Y., Gao, C., Fan, K., *et al.* (2024) Two-Dimensional Conductive MOFs toward Electrochemical Sensors for Environmental Pollutants. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **177**, Article ID: 117800. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117800>
 - [24] Jiang, Y., Oh, I., Joo, S.H., Buyukcakir, O., Chen, X., Lee, S.H., *et al.* (2019) Partial Oxidation-Induced Electrical Conductivity and Paramagnetism in a Ni(II) Tetraaza[14]Annulene-Linked Metal Organic Framework. *Journal of the American Chemical Society*, **141**, 16884-16893. <https://doi.org/10.1021/jacs.9b08601>
 - [25] Mähringer, A., Jakowetz, A.C., Rotter, J.M., Bohn, B.J., Stolarczyk, J.K., Feldmann, J., *et al.* (2019) Oriented Thin Films of Electroactive Triphenylene Catecholate-Based Two-Dimensional Metal-Organic Frameworks. *ACS Nano*, **13**, 6711-6719. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b01137>
 - [26] Zhou, Z., Mukherjee, S., Hou, S., Li, W., Elsner, M. and Fischer, R.A. (2021) Porphyrinic MOF Film for Multifaceted Electrochemical Sensing. *Angewandte Chemie International Edition*, **60**, 20551-20557. <https://doi.org/10.1002/anie.202107860>
 - [27] Wen, Y., Li, R., Liu, J., Zhang, X., Wang, P., Zhang, X., *et al.* (2020) Promotion Effect of Zn on 2D Bimetallic NiZn Metal Organic Framework Nanosheets for Tyrosinase Immobilization and Ultrasensitive Detection of Phenol. *Analytica Chimica Acta*, **1127**, 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2020.06.062>
 - [28] Yan, S., Deng, D., Zhang, L. and Lv, Y. (2019) Fluorescence Nano Metal Organic Frameworks Modulated by Encapsulation for Construction of Versatile Biosensor. *Talanta*, **201**, 96-103. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.03.107>
 - [29] Nie, M., Lu, S., Lei, D., Yang, C. and Zhao, Z. (2017) Rapid Synthesis of ZIF-8 Nanocrystals for Electrochemical Detection of Dopamine. *Journal of the Electrochemical Society*, **164**, H952-H957. <https://doi.org/10.1149/2.1521713jes>
 - [30] Bashir, A., Malik, L.A., Ahad, S., Manzoor, T., Bhat, M.A., Dar, G.N., *et al.* (2018) Removal of Heavy Metal Ions from Aqueous System by Ion-Exchange and Biosorption Methods. *Environmental Chemistry Letters*, **17**, 729-754. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-00828-y>
 - [31] Abbasi, A. and Ghassemi, H. (2026) Investigation of a Novel Hybrid-Absorber Wave Energy Converter Combining Linear (Raft-Type) and Point (Wavestar) Absorbers for Improved Power Extraction. *Journal of Cleaner Production*, **538**, Article ID: 147284. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.147284>

- [32] Karnitz, O., Gurgel, L.V.A., de Melo, J.C.P., Botaro, V.R., Melo, T.M.S., de Freitas Gil, R.P., *et al.* (2007) Adsorption of Heavy Metal Ion from Aqueous Single Metal Solution by Chemically Modified Sugarcane Bagasse. *Bioresource Technology*, **98**, 1291-1297. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.05.013>
- [33] Malik, L.A., Bashir, A., Qureashi, A. and Pandith, A.H. (2019) Detection and Removal of Heavy Metal Ions: A Review. *Environmental Chemistry Letters*, **17**, 1495-1521. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00891-z>
- [34] Krstić, V., Urošević, T. and Pešovski, B. (2018) A Review on Adsorbents for Treatment of Water and Wastewaters Containing Copper Ions. *Chemical Engineering Science*, **192**, 273-287. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.07.022>
- [35] Wang, F., Gao, Y., Liu, S., Yi, X., Wang, C. and Fu, H. (2023) Fabrication Strategies of Metal-Organic Frameworks Derivatives for Catalytic Aqueous Pollutants Elimination. *Chemical Engineering Journal*, **463**, Article ID: 142466. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142466>
- [36] Zhao, C., Meng, L., Chu, H., Wang, J., Wang, T., Ma, Y., *et al.* (2023) Ultrafast Degradation of Emerging Organic Pollutants via Activation of Peroxymonosulfate over Fe₃C/Fe@N-C-X: Singlet Oxygen Evolution and Electron-Transfer Mechanisms. *Applied Catalysis B: Environmental*, **321**, Article ID: 122034. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2022.122034>
- [37] Wang, F., Wang, C. and Yi, S. (2024) Rational Design and Synthesis of Metal-Organic Frameworks Derivatives: A Perspective on Emerging Techniques. *Chemical Engineering Journal*, **495**, Article ID: 153398. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.153398>
- [38] Xu, X., Zhou, T., Bing, Y., Wang, X., Jiang, H., Song, Z., *et al.* (2024) Visual and Gravimetric CO₂ Sensing at High Humidity Levels Enabled by MOF-804 Cofunctionalized with Ionic Liquid and M-Cresol Purple. *Advanced Functional Materials*, **35**, Article ID: 2414141. <https://doi.org/10.1002/adfm.202414141>
- [39] Hu, H., Li, Q., Li, L., Teng, X., Feng, Z., Zhang, Y., *et al.* (2020) Laser Irradiation of Electrode Materials for Energy Storage and Conversion. *Matter*, **3**, 95-126. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2020.05.001>
- [40] Guo, S., Zhao, Y., Yuan, H., Wang, C., Jiang, H. and Cheng, G.J. (2020) Ultrafast Laser Manufacture of Stable, Efficient Ultrafine Noble Metal Catalysts Mediated with MOF Derived High Density Defective Metal Oxides. *Small*, **16**, Article ID: 2000749. <https://doi.org/10.1002/sml.202000749>
- [41] Sun, S., Tang, Y., Wu, C. and Wan, C. (2020) Phytic Acid Functionalized ZIF-67 Decorated Graphene Nanosheets with Remarkably Boosted Electrochemical Sensing Performance. *Analytica Chimica Acta*, **1107**, 55-62. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2020.02.014>
- [42] Wang, L., Yang, H., He, J., Zhang, Y., Yu, J. and Song, Y. (2016) Cu-Hemin Metal-Organic-Frameworks/Chitosan-Reduced Graphene Oxide Nanocomposites with Peroxidase-Like Bioactivity for Electrochemical Sensing. *Electrochimica Acta*, **213**, 691-697. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.07.162>
- [43] Wang, F., Liu, C., Yang, J., Xu, H., Pei, W. and Ma, J. (2022) A Sulfur-Containing Capsule-Based Metal-Organic Electrochemical Sensor for Super-Sensitive Capture and Detection of Multiple Heavy-Metal Ions. *Chemical Engineering Journal*, **438**, Article ID: 135639. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135639>
- [44] Yang, F., Wang, J., Yin, K. and Pang, H. (2022) An Electrochemical Sensor for Sunset Yellow Detection Based on Cu@Cu₂O-BNPC Formed by Modified Porous Carbon. *ACS Omega*, **7**, 32068-32077. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03319>
- [45] Wang, X., Shi, Y., Shan, J., Zhou, H. and Li, M. (2020) Electrochemical Sensor for Determination of Bisphenol a Based on MOF-Reduced Graphene Oxide Composites Coupled with Cetyltrimethylammonium Bromide Signal Amplification. *Ionics*, **26**, 3135-3146. <https://doi.org/10.1007/s11581-019-03260-6>
- [46] Kirchon, A., Feng, L., Drake, H.F., Joseph, E.A. and Zhou, H. (2018) From Fundamentals to Applications: A Toolbox for Robust and Multifunctional MOF Materials. *Chemical Society Reviews*, **47**, 8611-8638. <https://doi.org/10.1039/c8cs00688a>
- [47] Lin, C., Xu, K., Zheng, R. and Zheng, Y. (2019) Immobilization of Amidase into a Magnetic Hierarchically Porous Metal-Organic Framework for Efficient Biocatalysis. *Chemical Communications*, **55**, 5697-5700. <https://doi.org/10.1039/c9cc02038a>
- [48] Khosroshahi, N., Karimi, M., Taghvaei, T. and Safarifar, V. (2021) Ultrasound-Assisted Synthesis of CoFe₂O₄/Ce-Uio-66 Nanocomposite for Photocatalytic Aerobic Oxidation of Aliphatic Alcohols. *Materials Today Chemistry*, **22**, Article ID: 100582. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2021.100582>
- [49] Verma, C., Rasheed, T., Anwar, M.T. and Quraishi, M.A. (2023) From Metal-Organic Frameworks (MOFs) to Metal-Doped MOFs (MDMOFs): Current and Future Scenarios in Environmental Catalysis and Remediation Applications. *Microchemical Journal*, **192**, Article ID: 108954. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.108954>
- [50] Jiang, Y., Liu, H., Tan, X., Guo, L., Zhang, J., Liu, S., *et al.* (2017) Monoclinic ZIF-8 Nanosheet-Derived 2D Carbon Nanosheets as Sulfur Immobilizer for High-Performance Lithium Sulfur Batteries. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **9**, 25239-25249. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b04432>

- [51] Zhao, M., Wang, Y., Ma, Q., Huang, Y., Zhang, X., Ping, J., *et al.* (2015) Ultrathin 2D Metal-Organic Framework Nanosheets. *Advanced Materials*, **27**, 7372-7378. <https://doi.org/10.1002/adma.201503648>
- [52] Cliffe, M.J., Castillo-Martínez, E., Wu, Y., Lee, J., Forse, A.C., Firth, F.C.N., *et al.* (2017) Metal-Organic Nanosheets Formed via Defect-Mediated Transformation of a Hafnium Metal-organic Framework. *Journal of the American Chemical Society*, **139**, 5397-5404. <https://doi.org/10.1021/jacs.7b00106>
- [53] Ding, Y., Chen, Y., Zhang, X., Chen, L., Dong, Z., Jiang, H., *et al.* (2017) Controlled Intercalation and Chemical Exfoliation of Layered Metal-Organic Frameworks Using a Chemically Labile Intercalating Agent. *Journal of the American Chemical Society*, **139**, 9136-9139. <https://doi.org/10.1021/jacs.7b04829>
- [54] Wang, X., Chi, C., Zhang, K., Qian, Y., Gupta, K.M., Kang, Z., *et al.* (2017) Reversed Thermo-Switchable Molecular Sieving Membranes Composed of Two-Dimensional Metal-Organic Nanosheets for Gas Separation. *Nature Communications*, **8**, Article No. 14460. <https://doi.org/10.1038/ncomms14460>
- [55] Nagatomi, H., Yanai, N., Yamada, T., Shiraishi, K. and Kimizuka, N. (2018) Synthesis and Electric Properties of a Two-dimensional Metal-Organic Framework Based on Phthalocyanine. *Chemistry—A European Journal*, **24**, 1806-1810. <https://doi.org/10.1002/chem.201705530>
- [56] Park, J., Hincley, A.C., Huang, Z., Feng, D., Yakovenko, A.A., Lee, M., *et al.* (2018) Synthetic Routes for a 2D Semiconductive Copper Hexahydroxybenzene Metal-Organic Framework. *Journal of the American Chemical Society*, **140**, 14533-14537. <https://doi.org/10.1021/jacs.8b06666>
- [57] Liu, X., Guo, J., Wang, Y., Wang, A., Yu, X. and Ding, L. (2023) A Flexible Electrochemical Sensor for Paracetamol Based on Porous Honeycomb-Like NiCo-MOF Nanosheets. *Rare Metals*, **42**, 3311-3317. <https://doi.org/10.1007/s12598-023-02349-2>
- [58] Rafi, J., Rajan, A. and Neppolian, B. (2023) Enhanced Electrocatalytic Performance of Aluminium Metal-Organic Framework Towards the Detection of Broad-Spectrum Chloramphenicol Antibiotic. *Electrochimica Acta*, **446**, Article ID: 142079. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.142079>
- [59] Liu, X., Huang, S., Hsieh, Y., Lu, S., Wang, H., Wang, C., *et al.* (2023) Detection of Nitrofurazone with Metal-Organic Frameworks and Reduced Graphene Oxide Composites: Insights from Molecular Dynamics Simulations. *Microchimica Acta*, **190**, Article No. 246. <https://doi.org/10.1007/s00604-023-05829-5>
- [60] Sun, R., Lv, R., Li, Y., Du, T., Chen, L., Zhang, Y., *et al.* (2023) Simple and Sensitive Electrochemical Detection of Sunset Yellow and Sudan I in Food Based on AuNPs/Zr-MOF-Graphene. *Food Control*, **145**, Article ID: 109491. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109491>
- [61] Chen, H., Yang, T., Liu, F. and Li, W. (2019) Electrodeposition of Gold Nanoparticles on Cu-Based Metal-Organic Framework for the Electrochemical Detection of Nitrite. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **286**, 401-407. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.10.036>
- [62] Bai, R., Zhang, K., Li, D., Zhang, X., Liu, T., Liu, Y., *et al.* (2017) Preparation of Carcinoembryonic Antigen Immunosensor Based on Au Nanoparticles Loaded-Metal-Organic Frameworks. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, **45**, 48-55. [https://doi.org/10.1016/s1872-2040\(16\)60988-x](https://doi.org/10.1016/s1872-2040(16)60988-x)
- [63] Li, Y., Hu, M., Huang, X., Wang, M., He, L., Song, Y., *et al.* (2020) Multicomponent Zirconium-Based Metal-Organic Frameworks for Impedimetric Aptasensing of Living Cancer Cells. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **306**, Article ID: 127608. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.127608>