# 氧化石墨烯/MOFs复合材料的 研究进展

## 李宗馨

兰州交通大学化学化工学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2025年4月30日; 录用日期: 2025年6月5日; 发布日期: 2025年6月16日

# 摘要

金属有机骨架(MOFs)是一种晶态多孔材料,具有超高的比表面积、极高的孔隙率、可变的孔径和多样的 功能位点。氧化石墨烯(GO)是石墨烯的氧化衍生物,具有独特的二维层状结构和丰富的含氧官能团,表 现出优异的亲水性、分散性和化学可修饰性。这些特性使GO成为MOFs负载的理想基底,GO与MOFs的 复合材料因其协同效应成为研究热点,MOFs的多孔性和可设计性也进一步拓展了复合材料的功能。本文 综述了GO/MOFs复合材料的制备方法(如原位生长、自组装和物理混合等)及其在CO2吸附、污水处理、 超级电容器和生物医学等领域的应用进展,并探讨了当前面临的挑战和未来发展方向。

## 关键词

氧化石墨烯(GO),金属-有机框架(MOFs),原位生长

# Advances in Graphene Oxide/MOFs Composites

## Zongxin Li

College of Chemistry and Chemical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Apr. 30<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jun. 5<sup>th</sup>, 2025; published: Jun. 16<sup>th</sup>, 2025

#### Abstract

Metal-organic skeletons (MOFs) are crystalline porous materials with ultra-high specific surface area, very high porosity, variable pore size and diverse functional sites. Graphene oxide (GO) is an oxidised derivative of graphene with a unique two-dimensional layered structure and an abundance of oxygen-containing functional groups, exhibiting excellent hydrophilicity, dispersibility and chemical modifiability. These properties make GO an ideal substrate for MOFs loading, and composites of GO and MOFs have become a research hotspot due to their synergistic effect, and the porousness and designability of MOFs further expand the functionality of the composites. This paper reviews the preparation methods of GO/MOFs composites (*in situ* growth, self-assembly, and physical mixing) and their advances in CO<sub>2</sub> adsorption, wastewater treatment, supercapacitors, and biomedicine, and discusses the current challenges and future directions.

# **Keywords**

Graphene Oxide (GO), Metal-Organic Frameworks (MOFs), In Situ Growth

Copyright © 2025 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/

CC O Open Access

# 1. 引言

氧化石墨烯(Graphene Oxide, GO)是碳的单层结构,具有蜂窝晶格形式的显著活性表面,其中碳原子为 sp<sup>2</sup>杂化,GO 已经被认为是金属 - 有机框架(MOFs)良好的生长成核位点。GO 的二维片层结构可以作为 MOFs 晶体生长的模板,有效抑制 MOFs 颗粒的团聚现象,同时其表面的含氧官能团能与 MOFs 的金属节点形成配位作用,显著增强复合材料的机械稳定性。MOFs 的规则孔结构与 GO 的层间间隙形成的分级孔隙系统,能够提高复合材料的比表面积。氧化石墨烯(GO)/金属 - 有机框架(MOFs)复合材料由于两种材料之间的协同效应而引起了广泛的关注,在气体吸附与分离[1]、水处理[2]、催化[3]、化学传感[4]和药物递送[5]等领域展现出超越单一组分的卓越性能。

# 2. 氧化石墨烯(GO)

氧化石墨烯是最常见的石墨烯衍生物之一,通过对石墨烯(GR)片层进行化学氧化处理制备得到的一种功能化纳米材料,其基本结构单元是由 sp<sup>2</sup>杂化碳原子以六元环形式规则排列而成的二维蜂窝状晶格 [6] [7]。GO 表面含有丰富的含氧官能团,如羟基(-OH)、环氧基(-O-)和羧基(-COOH),使其具有良好的亲 水性、可调控的表面化学性质和丰富的反应位点。GO 的带隙可调,具有一定的半导体特性,但由于氧化 作用,其碳骨架存在大量缺陷和 sp<sup>3</sup>杂化碳原子,导致导电性低于原始石墨烯。氧化石墨烯的形成过程涉 及三个不同的过程: (1)转化为插层化合物; (2)通过将氧化剂引入被占用的石墨通道进行氧化; (3)暴 露于水中,导致碳轴顺序的丧失[8]。第二阶段的机制是由完全扩散控制,因此是速率决定的。因为氧化 石墨烯具有不同浓度的氢氧化物和氧自由基,它们与碳形成共价键,所以碳原子层是不平坦的。图 1 描 绘了不同作者提供的各种结构模型。氧化石墨烯已被用作嵌入一系列线性有机化合物的基质材料[9]。

# 3. 金属 - 有机框架(MOFs)

金属 - 有机骨架(MOFs)是一类特殊的多孔材料,由无机(金属离子或簇)和有机(连接体或配体)组成 (图 2)。它们通过配位键连接在一起,形成三维框架拓扑结构[10]。采用不同的金属中心和配体作为分子 结构,可以构建多种良好理化性能的 MOFs [11]。由于具有极高的比表面积、可调节的孔隙和多样的功能 位点,MOFs 已成为研究最广泛的材料之一,特别是在传感技术、催化反应、离子交换、吸附分离以及气 体存储等方面[12]。但 MOFs 材料较差的化学和热稳定性以及粉体回收困难等问题限制了其应用。因此, 将 MOFs 与其他功能材料复合可以在利用 MOFs 性能的同时改善其缺点,碳基材料(包括氧化石墨烯和碳 纳米管)被广泛用于 MOFs 的支撑,以提高 MOFs 的稳定性,并取得了良好的性能效果[13]。



**Figure 1.** The suggested framework of graphite oxides [9] 图 1. 氧化石墨烯的建议框架[9]



Figure 2. Graphical representation of MOFs [14] 图 2. MOFs 的图形表示[14]

# 4. 氧化石墨烯/金属有机框架复合材料的制备方法

## 4.1. 原位生长法

合成 GO/MOFs 复合材料的最直接方法是将 MOFs 前体与 GO 混合,这种制备方法简单又快捷。首 先将 MOFs 前驱体(金属盐或金属有机配体)与通常用于合成纯 MOFs 的相同溶剂混合,在前驱体完全溶 解后加入氧化石墨烯。加入氧化石墨烯后,进行超声波处理,触发碳基材料的剥离。然后加热混合物以 促进 MOFs 晶体的形成,从而形成复合材料[15]。在原位合成法中氧化石墨烯的缺陷和官能团可以作为 MOF 结晶的成核位点。此外,原位法能够确保氧化石墨烯薄片与 MOF 组件紧密接触,从而诱导新孔隙 的形成。Chen 等人[16]提出了一种简单可控的氨溶液原位合成 GO/ZIF-8 复合材料的方法。通过控制氧化 石墨烯的用量,可以调节 ZIF-8 的晶粒尺寸以及复合材料的结构和性能。氧化石墨烯可以作为一种结构 导向剂促进 ZIF-8 晶体的生长和稳定性。由于 GO 与 ZIF-8 之间强烈的相互作用和协同作用促进了复合 材料中新孔隙的形成,复合材料表现出比 ZIF-8 更高的 CO2吸附能力。此外,ZIF 和 GO 的协同性能为新型 GO/ZIF 复合材料的制备提供了广阔的应用前景。Wu 等人[17]首次采用一锅法合成了 MIL-88(Fe)/GO 复合材料,并将其作为催化剂用于罗丹明 B(RhB)和亚甲基蓝(MB)的降解,与原始的 MIL-88(Fe)和 GO 相 比, MIL-88(Fe)/GO 复合材料表现出更快的降解速度和更好的降解性能。

#### 4.2. 自组装法

自组装法是制备 GO/MOFs 复合材料的另一种方法,其中两个预合成组分之间的静电相互作用、氢 键和 π-π 堆叠相互作用可以促进 GO/MOFs 的自组装过程。Liang 等人[18]以 MIL-53(Fe)的正电荷和 GO 的负电荷为基础,通过静电自组装方法和热还原法制备了一系列 MIL-53(Fe)/rGO 纳米杂化体。静电自组 装工艺导致界面反应更充分,与单锅溶剂热处理制备的 D-MIL53/rGO 相比,光生电荷寿命更长。此外,发现 MIL-53(Fe)/rGO 在 0.5% rGO 时表现出更好的光催化还原 Cr (VI)的性能,而 D-MIL-53/rGO 在 5% rGO 时表现出更高的光催化还原活性。这是因为在 D-MIL-53/rGO 中,rGO 与 MIL-53 之间的界面相互作 用较差,并且 MIL-53 的存在也有助于光活性。因此,非原位自组装有利于制备更均匀的复合材料。Lin 等人[19]采用自组装方法制备了 ZIF-67/GO 纳米复合材料。MCG 是一种多相催化剂,用于激活过氧单硫酸盐 (PMS)脱色水中的酸黄(AY)。MCG 具有独特的形态和多孔结构,且足够的饱和磁化强度也使其易于从脱 色反应后的水中收集。结果表明,MCG 可连续使用,具有稳定有效的催化活性。这些特性使 MCG 成为 激活 PMS 脱色水中 AY 的有前景的催化剂。

#### 4.3. 物理混合法

物理混合是合成 GO/MOFs 纳米复合材料的一种快速实用的技术。为了制备复合材料,首先提前制备 MOFs 和 GO,然后直接结合。Haroon 等人[20]在低温下制备了 Ni-MOF@rGO 复合材料,并通过物理 混合方法将 Ni-MOF 与还原氧化石墨烯连接。Ni-MOF-rGO 复合材料或 Ni-BDC/rGO@300 的容量为 385 mAg<sup>-1</sup>(100 mAg<sup>-1</sup>),在 400 次充放电循环中保持其一致性,与原始 MOF 相比,其速率和循环稳定性显著提高,原始 MOF 在 250 次循环中退化到 272 mAg<sup>-1</sup>。Ni-BDC/rGO@300 复合材料在 1 Ag<sup>-1</sup>时的容量为 205 mAhg<sup>-1</sup>,而原始 Ni-MOF 的容量为 113 mAhg<sup>-1</sup>,在高电流下速率显著提高。

#### 4.4. 水热/溶剂热法

水热/溶剂热法在合成途径中的唯一区别是所用溶剂的种类,可以是水(热液)或非水(溶剂热)。Ahmed Malik 等人[21]利用溶剂热技术有效地制备了 Ce-MOF 和 GO@CeMOF,并利用煅烧技术从 Ce-MOF 和 GO@CeMOF 制备了 CeO<sub>2</sub>。利用上述催化剂对析氧反应(OER)作为潜在的电催化剂进行了研究,氧化石 墨烯层的出现增加了体系的整体导电性,并为催化反应提供了更大的表面积和有效活性位点,GO@CeMOF 具有比 Ce-MOF 更高的催化活性。Fallatah 等[22]采用溶剂热合成法制备了 ZIF-67@GO 复 合材料。为了有效地从水生环境中去除汞(Hg<sup>2+</sup>), ZIF-67@GO 作为吸附剂进行了测试。根据吸附数据,在 50 mL 的 20 ppm 汞(Hg<sup>2+</sup>)溶液中使用 10 mg 复合材料,最高去除率为 91.1%。

#### 4.5. 其他方法

Bian 等人[23]介绍了以皮克林乳液为原料合成 Cu<sub>3</sub>(BTC)<sub>2</sub>/GO 的方法。氧化石墨烯是一种很有前途的

皮克林乳液稳定剂,为 Cu<sub>3</sub>(BTC)<sub>2</sub>/GO 纳米颗粒的原位生长提供了更大的界面面积。在模拟高湿烟气中,加入适量的 GO 后,Cu<sub>3</sub>(BTC)<sub>2</sub>/GO 表现出良好的 CO<sub>2</sub>吸附性能。皮克林乳液法为制备 Zr-MOF/GO 复合材料提供了一种简便的方法。在这里,我们尝试总结几种常用的 GO/MOF 复合材料的制备方法对复合材料结构和性能的影响及其优缺点(表 1)。

Table 1. Effect of preparation methods of GO/MOF composites on the structure and properties of composites and their advantages

₹ I.	GO/MOF	复合材料的制备。	方法对复合材料结构机	叫性能的影响及具忧缺点	

	原位生长	自组装	物理混合	水热/溶剂热
比表面积	高(100~1500 m <sup>2</sup> /g)	较高(300~1000 m <sup>2</sup> /g)	低(<300 m <sup>2</sup> /g)	高(500~2000 m <sup>2</sup> /g)
孔径分布	以微孔/介孔为主, 分布均匀	介孔为主,有序度高	分布宽,易出现大孔	微孔 - 介孔连续分布
界面结合	强(共价/离子键)	非共价键(可逆)	弱(机械混合)	强(化学键)
典型形貌	核壳结构、均匀分散的 纳米颗粒	有序多孔框架、薄膜或球形	不规则团聚体	晶体纳米棒/片、多孔球
优点	可以使 MOF 均匀地分散 在 GO 表面,并且 MOF 与 GO 之间的相互作用力 强且不易被破坏	孔径可调,有序度高, 制备无需复杂设备	制备工艺简单, 只需简单混合即可	操作简单易于控制 在密闭空间内反应
缺点	不利于控制 MOF 的 尺寸和生长方向	模板去除可能破坏结构, 稳定性较低	GO 和 MOF 的结合 并不均匀	对反应容器要求高, 安全性差,不能直观 观察反应
优势应用	催化、能源存储、 气体吸附	药物缓释、污染物吸附、 光学器件	低成本填料、 涂料/涂层、 预处理吸附剂	催化、能源、重金属吸附

# 5. 氧化石墨烯/MOFs 复合材料的应用

## 5.1. CO2 吸附

工业化和城市化的快速发展极大地加剧了二氧化碳的释放,为了捕获二氧化碳,基于金属-有机框架 的复合材料受到越来越多的关注。在上述几种方法中 CO2吸附应该优先选择:水热/溶剂热法(高微孔率、 高稳定性)或原位生长法(界面优化、高选择性)制备复合材料。在 GO/MOF 复合材料的第一篇报道中,2009 年 Banddose 等人将偶联脲修饰的氧化石墨烯与含 Cu 的 MOF (HKUST-1)制备了 GO/MOF 复合材料。在 30℃下,复合材料对 CO2的吸附量为 4.23 mmol/g<sup>-1</sup>,吸附量约为母体 MOF 的 2 倍。吸附容量的增加是 由于石墨烯片与 HKUST-1 网络之间形成了新的孔隙,大大增加了孔隙率,使复合材料能够通过物理吸附 捕获更多的 CO2。对于大多数基于吸附的应用,微孔和介孔结构的结合是有利的,因为微孔提供更高的 吸附容量,而介孔促进气体扩散。构成复合材料的两种材料之间的界面引入了额外的孔隙,这可以进一 步提高气体吸附能力[24]。Zhao 等人[25]将 MOF-801 作为主要材料,通过掺杂少量的氧化石墨烯,显著 提高了对二氧化碳的吸附能力。对该材料进行了分子动力学模拟,研究了其吸附机理,并分析了二氧化 碳吸附位点的分布。对合成材料的性能分析表明,添加少量的氧化石墨烯改变了 MOF-801 对二氧化碳的 吸附能力,增加了对二氧化碳的吸附位点。结果表明,最高吸附量 MOF-801/GO (2.0%)分别为 3.00 mmol/g (298 K, 1 bar)和 3.75 mmol/g (273 K, 1 bar),比 MOF-801 高 42%和 19%。经过 10 次吸附和解吸循环后, 复合材料的饱和吸附能力保持稳定。因此,MOF-801/氧化石墨烯复合材料可以作为二氧化碳的潜在吸附 剂。Gebremariam 等人[26]研究了通过杂交和颗粒化材料制备的 MIL-101(Cr)/氧化石墨烯复合材料的二氧 化碳吸附性能。在氧化石墨烯负荷为 6%的情况下,粉混合吸附剂在 298 K 和 1 bar 时的二氧化碳吸附能 力比母体 MOFs 高 55%,其二氧化碳选择性提高了 48%。这些研究表明,用适量的氧化石墨烯掺杂 MOFs 可以显著提高二氧化碳的吸附性能。

#### 5.2. 污水处理

染料被称为主要的水污染物,使用吸附剂是去除水中和废水中染料最有效的方法之一。结合 MOF 的高表面积、孔隙度、化学可调性和 GO 的致密有序层来构建 GO/MOF 复合材料可以被认为是一种有效的脱除染料的吸附剂。在上述几种方法中污水处理应该优先选择:水热/溶剂热法(强化学吸附、重金属/染料高效去除)或原位生长法(催化-吸附协同、易回收)制备复合材料。Firouzjaei 等人[27]合成了新型 GO-Cu-MOF 作为水处理染料的吸附剂。各种分析结果表明,与 Cu-MOF 相比,氧化石墨烯在 Cu-MOF 结构中的剥离作用提高了 GO-Cu-MOF 的吸附能力。与 Cu-MOF 纳米颗粒相比,GO-Cu-MOF 具有更强的表面积、孔径、负电荷和高活性基团,其染料去除率提高了 20%。在 25、45 和 65℃的最大吸附容量从 Cu-MOF 的 106、117 和 142 mg/g 增加到 GO-Cu-MOF 的 173、251 和 262 mg/g。根据 MD 模拟计算得到的GO-Cu-MOF 和 Cu-MOF 的吸附能(-323 (kCal/mol)和-119 (kCal/mol)证实了 GO-Cu-MOF 的吸附能力增强。Hoseinzadeh 等人[28]研究了纳米复合材料 ZIF-8@GO(ZG)及其与官能团(3-氨基丙基三甲氧基硅烷)ZIF-8@GO@APTES(ZGA)的表面改性,以去除污染物。结果表明,ZGA 是去除阴离子和酸性污染物的有效吸附剂,在 pH = 2.2 条件下具有较好的性能。ZGA 纳米复合材料对 Ab92 的污染物去除机理受染料与吸附剂分子之间的静电吸引、氢键、π-π 堆叠作用的控制。根据阴离子污染物去除的结果,它符合朗格缪尔等温线(R<sup>2</sup> = 0.999)和为二级动力学(R<sup>2</sup> = 0.999),ZGA 纳米复合材料的吸附能力为 371.8 mg/g。

#### 5.3. 超级电容器

超级电容器(SCs)具有广泛的功率容量、优异的安全性和稳定的可循环性,是一种具有广阔前景的电能存储(EES)设备。在上述几种方法中超级电容器应该优先选择:水热/溶剂热法(高能量密度)或原位生长法(高功率密度)制备复合材料。Li 等人[29]通过简单的超声技术制备了 2D/2D NiCo-MOF/GO(NCMG)混合纳米片。二维 NiCo-MOF 是通过超声波处理产生的,超声波处理也使氧化石墨烯在其表面均匀分散。氧化石墨烯纳米片均匀分布在 NiCo-MOF 最上层表面,形成导电网络。因此,这有效地抑制了 NiCo-MOF 纳米片的聚集,并提高了它们的电子导电性。研究结果表明,NCMG-10 具有优异的倍率性能和高达 413.61 Cg<sup>-1</sup> 和 0.5 Ag<sup>-1</sup> 的高比容量。组装的 NCMG-10/AC 非对称超级电容器(ASC)具有良好的循环稳定性和 36.83 Whkg<sup>-1</sup>的极端能量密度。与原始 MOF 相比,NCMG 复合材料具有更好的倍率能力、更长的循环寿命和更大的比电容。Ibrahim 等人[30]直接制造了分层的 Ni-MOF/GO/GNP 电极,将其安装在对称的硬币 和袋状电池中,并使用 2.0 M 醋酸钾作为电解质,从而合成了超级电容器。

# 5.4. 其他应用

此外,GO/MOF 复合材料还应用于储气、生物医学、传感器、催化等领域。Lee 等人[31]报道了石墨 烯基氧化石墨烯/MOF 复合水凝胶的第一个例子,在 Zn<sup>2+</sup>存在下形成 MOF-偶氮苯功能化氧化石墨烯水凝 胶(MOF-A-GO),并将其应用于化学传感器中,用于检测三硝基甲苯(TNT)分子。MOF-A-GO 复合水凝胶 形成后,与配体相比,配合物表现出明显的荧光增强和更长的寿命。Zhang 等人[32]利用简单的一步法成 功地组装了丝胶/壳聚糖/Ag@MOF-GO (CS/SS/Ag@MOF-GO)纳米复合材料。该复合物溶血率为 3.9%, 细胞存活率为 131.2%,具有良好的生物相容性。体外细胞迁移实验和小鼠体内评价表明并证实该复合材

料能促进伤口愈合和再上皮化。

## 6. 总结与展望

MOF 和 GO 作为两种"神奇"材料,因其具有比表面积大、官能团充足、易于改性等特点,已成为 研究热点,广泛应用于气体吸附、传感器、污水处理、电催化等领域,并取得了令人满意的效果。因此进 一步探索了将两种材料复合的方法,包括原位合成、水热/溶剂热法、物理混合法、自组装法,以及它们 在各个领域的应用研究。

氧化石墨烯和 MOF 复合材料已经被探索了几十年,但其固有的缺陷极大地限制了它们的潜力和实际应用。为提高 GO/MOF 复合材料的稳定性,需要强化界面相互作用。通过共价键交联策略,在 GO 和 MOF 之间构建稳定的化学键,可显著提升复合材料的机械强度和耐溶剂性。在优化复合材料结构与性能方面,可以通过缺陷工程和杂原子掺杂可进一步优化材料性能。例如,在 GO/MOF 中引入氮、硫等杂原子,不仅能调节电子结构,还能创造更多活性位点,从而提升催化或吸附性能。实现 GO/MOF 复合材料的规模化制备需要解决工艺、成本等关键问题。当前 GO/MOF 复合材料研究仍面临诸多挑战。在稳定性方面,过度的交联虽然能提高稳定性,但会导致比表面积和活性位点的显著下降。在性能优化方面,多组分界面的精确调控仍存在困难,现有的表征手段难以揭示界面相互作用机制。在应用方面,现有 GO/MOF 复合材料在极端条件下的稳定性仍显不足。未来突破方向应聚焦于以下几个领域:智能响应型 GO/MOF 复合材料的开发;跨学科融合创新;绿色制造工艺的开发。随着研究的不断深入和技术的持续进步,GO/MOF 复合材料的快速发展预示着这种新型功能材料的广阔前景。

# 参考文献

- [1] Roohollahi, H., Zeinalzadeh, H. and Kazemian, H. (2022) Recent Advances in Adsorption and Separation of Methane and Carbon Dioxide Greenhouse Gases Using Metal-Organic Framework-Based Composites. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61, 10555-10586. <u>https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c00664</u>
- [2] Jun, B., Al-Hamadani, Y.A.J., Son, A., Park, C.M., Jang, M., Jang, A., et al. (2020) Applications of Metal-Organic Framework Based Membranes in Water Purification: A Review. Separation and Purification Technology, 247, Article 116947. <u>https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116947</u>
- [3] Alamgholiloo, H., Rostamnia, S., Zhang, K., Lee, T.H., Lee, Y., Varma, R.S., *et al.* (2020) Boosting Aerobic Oxidation of Alcohols via Synergistic Effect between TEMPO and a Composite Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Cu-BDC/GO Nanocatalyst. *ACS Omega*, 5, 5182-5191. <u>https://doi.org/10.1021/acsomega.9b04209</u>
- [4] Chang, Y., Lou, J., Yang, L., Liu, M., Xia, N. and Liu, L. (2022) Design and Application of Electrochemical Sensors with Metal-Organic Frameworks as the Electrode Materials or Signal Tags. *Nanomaterials*, 12, Article 3248. <u>https://doi.org/10.3390/nano12183248</u>
- [5] Sontakke, A.D., Tiwari, S. and Purkait, M.K. (2023) A Comprehensive Review on Graphene Oxide-Based Nanocarriers: Synthesis, Functionalization and Biomedical Applications. *FlatChem*, 38, Article 100484. <u>https://doi.org/10.1016/j.flatc.2023.100484</u>
- [6] Yola, B.B., Karaman, C., Özcan, N., Atar, N., Polat, İ. and Yola, M.L. (2022) Electrochemical Tau Protein Immunosensor Based on MnS/GO/PANI and Magnetite-Incorporated Gold Nanoparticles. *Electroanalysis*, 34, 1519-1528. <u>https://doi.org/10.1002/elan.202200159</u>
- [7] Karaman, C., Karaman, O., Yola, B.B., Ülker, İ., Atar, N. and Yola, M.L. (2021) A Novel Electrochemical Aflatoxin B1 Immunosensor Based on Gold Nanoparticle-Decorated Porous Graphene Nanoribbon and Ag Nanocube-Incorporated MoS<sub>2</sub> Nanosheets. *New Journal of Chemistry*, **45**, 11222-11233. <u>https://doi.org/10.1039/d1nj02293h</u>
- [8] Karthikeyan, K., Mariappan, V., Kalidoss, P., Anish, R., Sarafoji, P., Venkatanageswara Reddy, J., et al. (2022) Preparation and Thermal Characterization of Capric-Myristic Acid Binary Eutectic Mixture with Silver-Antimony Tin Oxide and Silver-Graphane Nanoplatelets Hybrid-Nanoparticles as Phase Change Material for Building Applications. *Materials Letters*, **328**, Article 133086. <u>https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.133086</u>
- [9] Zhao, W., Gebhardt, J., Späth, F., Gotterbarm, K., Gleichweit, C., Steinrück, H., et al. (2015) Reversible Hydrogenation of Graphene on Ni(111)—Synthesis of "Graphone". Chemistry—A European Journal, 21, 3347-3358. <u>https://doi.org/10.1002/chem.201404938</u>

- [10] Kalmutzki, M.J., Hanikel, N. and Yaghi, O.M. (2018) Secondary Building Units as the Turning Point in the Development of the Reticular Chemistry of MOFs. *Science Advances*, **4**, eaat9180. <u>https://doi.org/10.1126/sciadv.aat9180</u>
- [11] Xing, X., Fu, Z., Zhang, N., Yu, X., Wang, M. and Guo, G. (2019) High Proton Conduction in an Excellent Water-Stable Gadolinium Metal-Organic Framework. *Chemical Communications*, 55, 1241-1244. <u>https://doi.org/10.1039/c8cc08700h</u>
- [12] Aslam, M.K., Shah, S.S.A., Li, S. and Chen, C. (2018) Kinetically Controlled Synthesis of MOF Nanostructures: Single-Holed Hollow Core-Shell ZnCoS@Co<sub>9</sub>S<sub>8</sub>/NC for Ultra-High Performance Lithium-Ion Batteries. *Journal of Materials Chemistry A*, 6, 14083-14090. <u>https://doi.org/10.1039/c8ta04676j</u>
- [13] Wang, R., Zhang, P., Zhan, T., Yu, X., Wen, Y., Liu, X., et al. (2020) In Situ Growth of ZIF-67 on Ultrathin Coal Layered Double Hydroxide Nanosheets for Electrochemical Sensing toward Naphthol Isomers. Journal of Colloid and Interface Science, 576, 313-321. <u>https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.05.042</u>
- [14] Jiang, D., Chen, M., Wang, H., Zeng, G., Huang, D., Cheng, M., et al. (2019) The Application of Different Typological and Structural MOFs-Based Materials for the Dyes Adsorption. *Coordination Chemistry Reviews*, 380, 471-483. https://doi.org/10.1016/j.ccr.2018.11.002
- [15] Petit, C. and Bandosz, T.J. (2015) Engineering the Surface of a New Class of Adsorbents: Metal-Organic Framework/Graphite Oxide Composites. *Journal of Colloid and Interface Science*, 447, 139-151. <u>https://doi.org/10.1016/j.jcis.2014.08.026</u>
- [16] Chen, B., Zhu, Y. and Xia, Y. (2015) Controlled in Situ Synthesis of Graphene Oxide/Zeolitic Imidazolate Framework Composites with Enhanced CO<sub>2</sub> Uptake Capacity. RSC Advances, 5, 30464-30471. <u>https://doi.org/10.1039/c5ra01183c</u>
- [17] Wu, Y., Luo, H. and Wang, H. (2014) Synthesis of Iron(III)-Based Metal-Organic Framework/Graphene Oxide Composites with Increased Photocatalytic Performance for Dye Degradation. RSC Advances, 4, 40435-40438. https://doi.org/10.1039/c4ra07566h
- [18] Liang, R., Shen, L., Jing, F., Qin, N. and Wu, L. (2015) Preparation of MIL-53(Fe)-Reduced Graphene Oxide Nanocomposites by a Simple Self-Assembly Strategy for Increasing Interfacial Contact: Efficient Visible-Light Photocatalysts. ACS Applied Materials & Interfaces, 7, 9507-9515. <u>https://doi.org/10.1021/acsami.5b00682</u>
- [19] Andrew Lin, K., Hsu, F. and Lee, W. (2015) Magnetic Cobalt-Graphene Nanocomposite Derived from Self-Assembly of MOFs with Graphene Oxide as an Activator for Peroxymonosulfate. *Journal of Materials Chemistry A*, 3, 9480-9490. <u>https://doi.org/10.1039/c4ta06516f</u>
- [20] Haroon, H., Wahid, M. and Majid, K. (2022) Structure-Activity Relationships of a Ni-MOF, a Ni-MOF-rGO, and Pyrolyzed Ni/c@rGO Structures for Sodium- Ion Batteries. *ChemistrySelect*, 7, e202202011. https://doi.org/10.1002/slct.202202011
- [21] Ahmed Malik, W.M., Afaq, S., Mahmood, A., Niu, L., Yousaf ur Rehman, M., Ibrahim, M., et al. (2022) A Facile Synthesis of CeO2 from the GO@Ce-MOF Precursor and Its Efficient Performance in the Oxygen Evolution Reaction. Frontiers in Chemistry, 10, Article 996560. <u>https://doi.org/10.3389/fchem.2022.996560</u>
- [22] Fallatah, A.M., Shah, H.U.R., Ahmad, K., et al. (2022) Rational Synthesis and Characterization of Highly Water Stable MOF@GO Composite for Efficient Removal of Mercury (Hg<sup>2+</sup>) from Water. Heliyon, 8, e10936. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10936
- [23] Bian, Z., Xu, J., Zhang, S., Zhu, X., Liu, H. and Hu, J. (2015) Interfacial Growth of Metal Organic Framework/Graphite Oxide Composites through Pickering Emulsion and Their CO<sub>2</sub> Capture Performance in the Presence of Humidity. *Langmuir*, **31**, 7410-7417. <u>https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.5b01171</u>
- [24] Pokhrel, J., Bhoria, N., Anastasiou, S., Tsoufis, T., Gournis, D., Romanos, G., et al. (2018) CO<sub>2</sub> Adsorption Behavior of Amine-Functionalized ZIF-8, Graphene Oxide, and ZIF-8/Graphene Oxide Composites under Dry and Wet Conditions. *Microporous and Mesoporous Materials*, 267, 53-67. <u>https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.03.012</u>
- [25] Zhao, G., Xu, W., Wen, C., Wang, Y., Zhu, Z., Cui, P., et al. (2025) Optimizing Doped Graphene Oxide in MOF-801 to Enhance CO2 Adsorption Capacity and CO2/N2 Separation Performance. Separation and Purification Technology, 361, Article 131408. <u>https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.131408</u>
- [26] Gebremariam, S.K., Mathai Varghese, A., Reddy, K.S.K., Fowad AlWahedi, Y., Dumée, L.F. and Karanikolos, G.N. (2023) Polymer-Aided Microstructuring of Moisture-Stable GO-Hybridized MOFs for Carbon Dioxide Capture. *Chemical Engineering Journal*, 473, Article 145286. <u>https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.145286</u>
- [27] Dadashi Firouzjaei, M., Akbari Afkhami, F., Rabbani Esfahani, M., Turner, C.H. and Nejati, S. (2020) Experimental and Molecular Dynamics Study on Dye Removal from Water by a Graphene Oxide-Copper-Metal Organic Framework Nanocomposite. *Journal of Water Process Engineering*, **34**, Article 101180. <u>https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101180</u>
- [28] Hoseinzadeh, H., Hayati, B., Shahmoradi Ghaheh, F., Seifpanahi-Shabani, K. and Mahmoodi, N.M. (2021) Development of Room Temperature Synthesized and Functionalized Metal-Organic Framework/Graphene Oxide Composite and Pollutant Adsorption Ability. *Materials Research Bulletin*, 142, Article 111408. https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2021.111408

- [29] Li, S., Shi, C., Pan, Y. and Wang, Y. (2021) 2D/2D NiCo-MOFs/GO Hybrid Nanosheets for High-Performance Asymmetrical Supercapacitor. *Diamond and Related Materials*, **115**, Article 108358. https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108358
- [30] Ibrahim, I., Zheng, S., Foo, C.Y., Huang, N.M. and Lim, H.N. (2021) Hierarchical Nickel-Based Metal-Organic Framework/Graphene Oxide Incorporated Graphene Nanoplatelet Electrode with Exceptional Cycling Stability for Coin Cell and Pouch Cell Supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, 43, Article 103304. https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103304
- [31] Lee, J.H., Kang, S., Jaworski, J., Kwon, K., Seo, M.L., Lee, J.Y., et al. (2011) Fluorescent Composite Hydrogels of Metal-Organic Frameworks and Functionalized Graphene Oxide. Chemistry—A European Journal, 18, 765-769. https://doi.org/10.1002/chem.201102603
- [32] Zhang, M., Wang, D., Ji, N., Lee, S., Wang, G., Zheng, Y., et al. (2021) Bioinspired Design of Sericin/Chitosan/ Ag@MOF/GO Hydrogels for Efficiently Combating Resistant Bacteria, Rapid Hemostasis, and Wound Healing. Polymers, 13, Article 2812. <u>https://doi.org/10.3390/polym13162812</u>