

多功能有机框架及其生物医学应用研究进展

卢一波, 李文莉

浙江师范大学化学与材料科学学院, 浙江 金华

收稿日期: 2025年11月30日; 录用日期: 2025年12月23日; 发布日期: 2025年12月29日

摘要

有机框架材料(Organic framework materials, OFs)凭借其结构可调、功能多样等特性,在生物医学领域展现出重要的应用潜力。本文系统梳理了金属-有机框架(MOFs)、共价有机框架(COFs)及氢键有机框架(HOFs)三类材料的结构特点,并重点评述了它们在生物医学方面的前沿应用。研究表明,通过合理的结构孔隙设计,OFs可实现高效药物负载,例如ZIF-8在抗癌药物递送中的应用;表面功能化修饰可增强其抗菌性能,如Ag-MOFs通过促进活性氧(ROS)生成以提升抗菌效果;部分OFs还可作为高灵敏度生物传感平台,例如基于COFs的荧光探针;此外,OFs在光热治疗中也显示出良好潜力,如HOFs在近红外光照射下的肿瘤消融效果。然而,OFs在走向临床转化的过程中仍面临生物相容性、体内降解行为及大规模制备等关键挑战。未来研究应聚焦于开发智能响应型OFs系统(如pH或光触发释放机制),并探索其在多模态协同治疗中的应用,以推动该类材料从基础研究向临床实践的转化。

关键词

有机框架材料, 抗菌, 生物涂料, 癌症治疗

Recent Advances of Multifunctional Organic Frameworks and Their Biomedical Applications

Yibo Lu, Wenli Li

College of Chemistry and Materials Science, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: November 30, 2025; accepted: December 23, 2025; published: December 29, 2025

Abstract

Organic framework materials (OFs) exhibit broad prospects in the biomedical field due to their tunable structure and multifunctionality. This review systematically summarizes the classification,

formation mechanisms, and synthesis strategies (such as solvothermal method and microwave-assisted method) of MOFs, COFs, and HOFs, and focuses on their innovative applications in biomedicine. Research indicates that OFs can achieve efficient drug loading through pore engineering (such as ZIF-8 delivering anticancer drugs), enhance antibacterial performance through surface functionalization (such as the ROS generation capability of Ag-MOFs), serve as high-sensitivity biosensors (such as COFs fluorescent probes), or treat cancer through photothermal effects (the application of HOFs in photothermal therapy). However, the clinical translation of OFs still faces challenges such as biocompatibility, *in vivo* degradation behavior, and large-scale preparation. Future research needs to focus on the design of intelligent responsive systems (such as pH/light-triggered release) and the development of multimodal treatment platforms to facilitate their transition from laboratory research to practical applications.

Keywords

Organic Framework Materials, Antibacterial, Biological Coatings, Cancer Treatment

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

随着材料科学的快速发展,有机框架材料(OFs)作为一类具有有序微孔结构的新型多功能材料,近年来受到广泛关注[1]-[3]。该类材料通过配位键、共价键或氢键等相互作用,将有机结构单元组装成具有规则孔道的晶态框架,主要包括金属有机框架(MOFs)、共价有机框架(COFs)和氢键有机框架(HOFs) (图1(a)~(c)) [4]-[6]。OFs 通常具有高比表面积、可调的孔径与表面化学性质,在多个领域展现出广阔的应用潜力。

OFs 的发展历程可追溯至 1989 年, Hoskins 等人[7]首次通过配位键构建 MOF 结构,开创了这一研究领域。2005 年, Yaghi 团队成功报道了首例 COF 材料,证明了全有机多孔晶体的可行性。相比之下, HOFs 的研究起步较晚,直至 2011 年才首次实现其微孔结构的确认,并被应用于乙烯/乙烷分离。随着对 OFs 生物相容性和功能可调性认识的深入,其应用范围逐步从气体储存与分离扩展至生物医学领域。

相较于传统多孔材料, OFs 的优势在于可通过引入氨基、羧基、羟基等官能团对其结构进行精准设计和功能化修饰,从而有效拓展其应用范围[8]。近年来, OFs 在生物涂层、抗菌剂和癌症治疗等生物医学方向展现出广泛的应用价值。自 2006 年首次报道 MOFs 用于药物递送以来, OFs 在药剂学中的应用不断拓展; 2012 年, COFs 被成功用作荧光探针,开启了其在生物传感中的应用; 而 HOFs 则凭借优异的生物相容性和可降解性,在药物控释和光热治疗等领域表现出显著优势。这些重要进展为 OFs 在生物医学领域的深入研究和实际应用奠定了坚实基础。

有机框架材料(OFs)的组成与性能直接决定了其应用方向。根据结构特征及其在生物医学中的具体功能, OFs 可被系统划分为载体材料和适应性材料两大类。作为一类具有高度有序多孔结构的结晶材料, OFs 能够通过精确调控孔径尺寸与纳米空间环境,实现对生物或化学分子的高效吸附与负载,因而在分子固定化领域表现出优异载体性能[9]。其结构可针对特定靶向分子进行设计,有效排除非目标分子的干扰,这一特性使 OFs 在癌症治疗等精准医学应用中展现出广阔前景。

另一方面, OFs 作为适应性材料,凭借其出色的结构稳定性和表面可修饰性,可作为保护性涂层用于维持其他材料在复杂生物环境中的结构与性能稳定性[10]。部分 OFs 还具有较高的生物相容性、可降

解性和固有的抗菌性能, 适合用作新型抗菌剂[11]。此外, 通过引入功能性分子, OFs 能够整合框架本身与功能单元的特性, 进一步拓展了其在生物医学及相关跨学科领域的应用范围。

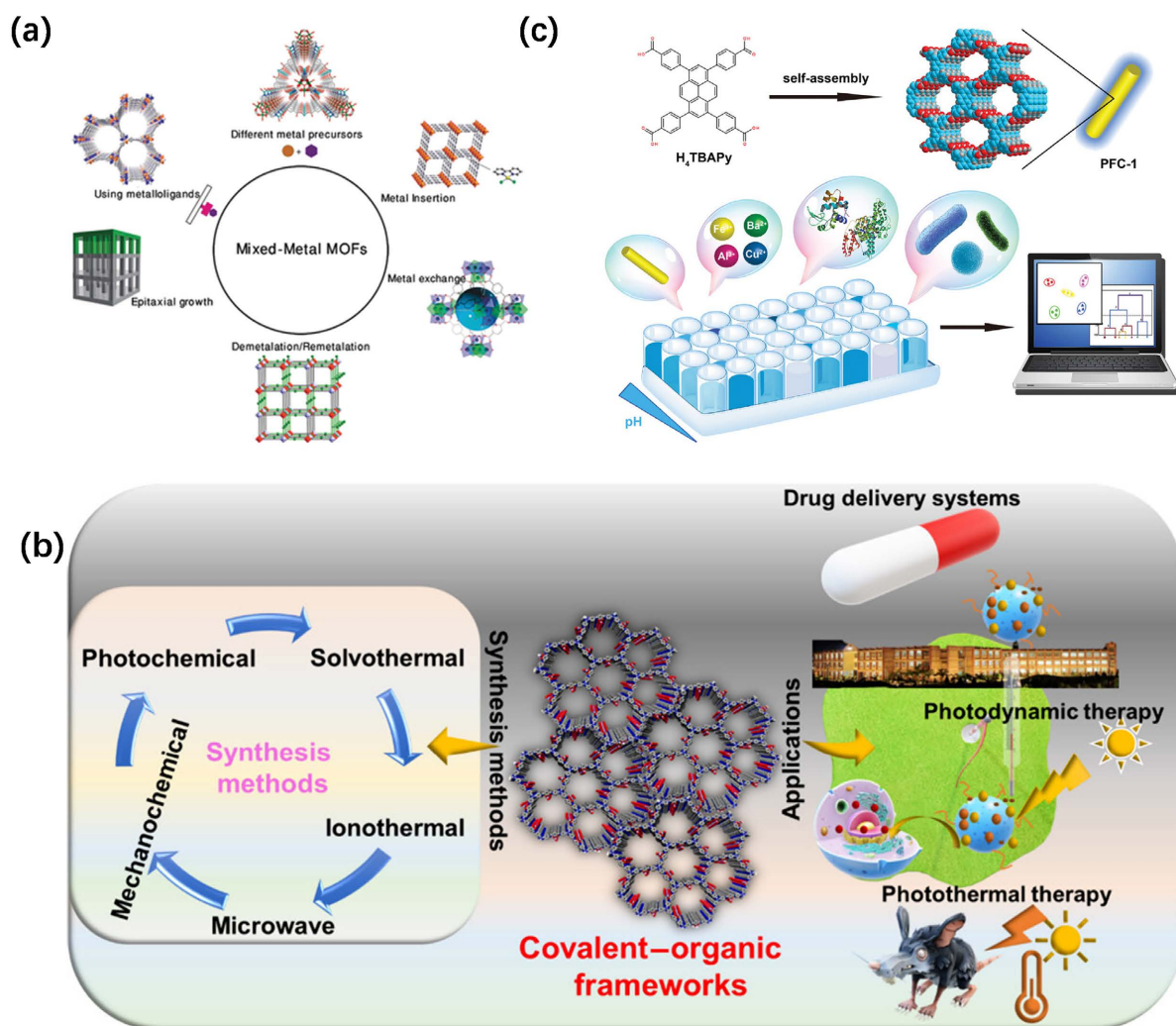


Figure 1. (a) Schematic diagram of the coordination bond structure of mixed-metal-organic frameworks (MOFs) [4]. (b) Scheme of treatment and diagnosis based on COF [5]. (c) Scheme of one-component sensor array based on HOF [6]

图 1. (a) 混合金属有机框架(MOFs)配位键结构示意图[4]。 (b) 基于 COF 的治疗和诊断方案[5]。 (c) 基于 HOF 的单组分传感器阵列方案[6]

近年来, OFs 的定向构建受到广泛研究关注, 包括 ZIF-90、UiO-66、HOF-LIFM 和 COF-300 在内的多种结构已被成功制备。除了多孔性及功能多样性之外, OFs 还表现出良好的生物降解性、优异的生物相容性和低毒性, 这些特性共同推动了其在生物医学中的应用。例如, 当用作医疗植入物等基材的涂层时, OFs 能够通过改善表面性质显著增强材料的耐腐蚀性和生物相容性, 同时保留基材的本征性能[12]。具体案例如 bio-MOF-1 涂层, 已被证明可有效提高镁合金的抗腐蚀能力并增强其生物活性(图 2(a)) [13]。

在抗菌应用中, OFs 凭借结构可调和功能性设计的优势, 为克服传统抗菌剂存在的耐药性和环境污染等问题提供了新途径(图 2(b)) [14]。例如, 含金属离子的 MOFs 可通过可控释放金属离子或诱导活性氧 (ROS) 生成以实现高效杀菌[15]。在癌症治疗方面, OFs 作为药物载体或光敏剂显示出重要潜力(图 2(c)) [15]。与传统化疗和放疗相比, 基于 OFs 的药物递送系统能够实现靶向释放与光动力治疗(PDT), 借助其

高比表面积和大孔径特性负载大量药物分子, 并通过表面功能化修饰提升药物在肿瘤部位的富集与释放效率, 从而在提高治疗效果的同时显著减轻副作用。

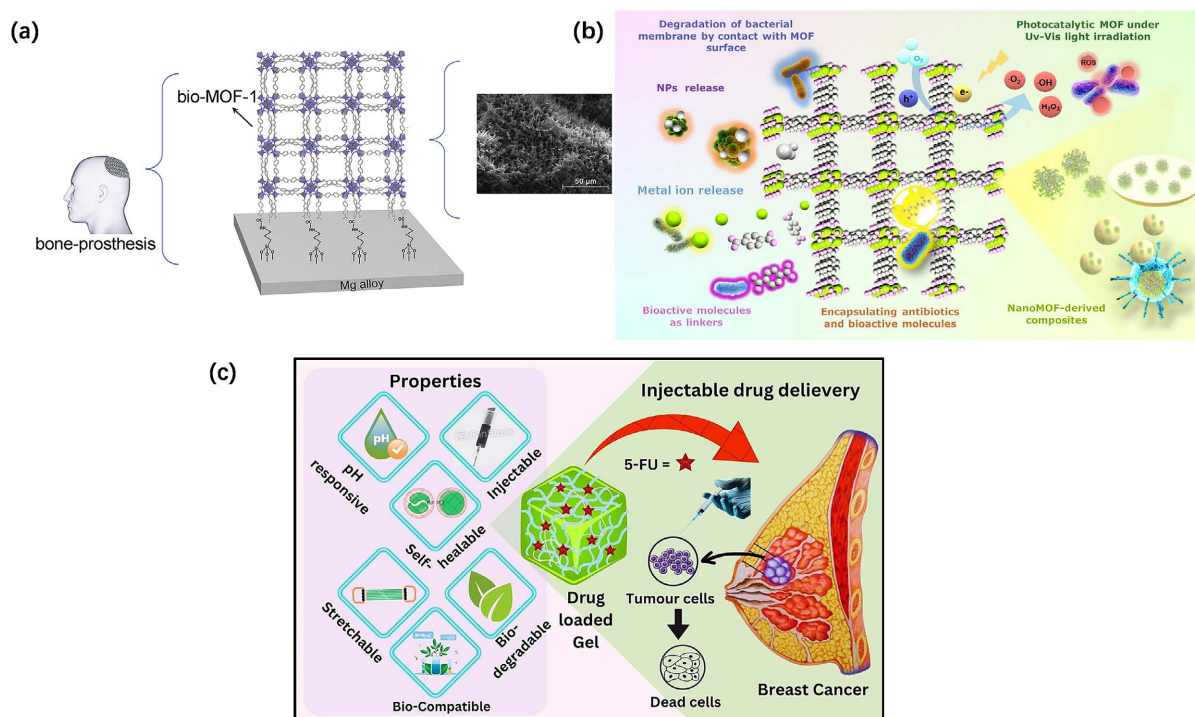


Figure 2. (a) Schematic diagram illustrating Bioactive and anti-corrosive bio-MOF-1 coating on magnesium alloy [13]. (b) The potential antibacterial mechanism of MOFs and the decisive parameters in the design and production of antibacterial MOFs were described [14]. (c) Cu-MOFs loaded anticancer drug 5-fluorouracil for cancer treatment [16]

图 2. (a) 镁合金上的生物活性和防腐生物 MOF-1 涂层示意图[13]。 (b) 描述了 MOFs 的潜在抗菌机制以及抗菌 MOFs 设计和生产中的决定性参数[14]。 (c) Cu-MOFs 负载抗癌药物 5-氟尿嘧啶用于癌症治疗[16]

有机框架材料(OFs)作为一类新兴的多孔晶体材料, 具备多项独特性能: 1) 高度可调的孔道结构, 其孔径可在 0.5~10 nm 范围内精确调控, 适用于生物大分子的高效负载; 2) 极高的比表面积(通常高于 1000 m²/g), 为药物承载及生物分子识别提供了丰富的作用位点; 3) 多样化的表面化学特性, 可通过配体设计及后合成修饰引入不同官能团; 4) 良好的生物相容性, 部分 OFs (如 ZIF-8、UiO-66 等)在生理条件下可发生可控降解。这些特性使 OFs 在药物递送、生物成像及诊疗一体化等方面展现出相比传统材料的显著优势。本文系统综述了有机框架材料的分类与其在生物医学领域的应用, 分析了当前面临的挑战, 并对未来发展进行了展望。

2. 有机框架材料的分类

有机框架材料是一类具有高比表面积、明确孔道结构和可定制化学功能的新型多孔材料。最具代表性的类别包括金属有机框架(MOFs)、共价有机框架(COFs)和氢键有机框架(HOFs)(图 3(a)~(c)) [1] [8] [9]。

MOFs 由金属离子或金属簇与有机配体通过配位键自组装形成三维网状多孔结构, 其拓扑类型可根据所用金属和配体的不同呈现丰富多样性。常见金属节点包括锌(Zn)、铜(Cu)、铝(Al)等过渡金属离子, 有机配体则涵盖单齿或多齿型官能团分子。MOFs 可从以下维度进行分类: 1) 按金属中心类型, 可分为过渡金属基 MOFs 和稀土金属基 MOFs; 2) 按配体种类, 可分为含氮配体(如咪唑类) MOFs 和羧酸配体 MOFs; 3) 按孔径大小, 可分为微孔 MOFs (孔径 < 2 nm)、介孔 MOFs (2~50 nm)和大孔 MOFs (>50 nm)。

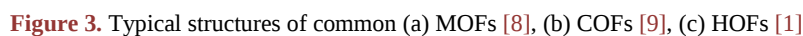


图 3. 常见的(a) MOFs [8]、(b) COFs [9]、(c) HOFs [1]的典型结构

共价有机框架(COFs)是一类由共价键连接的 π 共轭结构单元自组装形成的、具有二维拓扑结构的多孔晶态材料。其构建过程基于小分子前驱体的自下而上组装, 展现出较高的结构可调性与设计灵活性。近年来, 借助网状化学原理对 COFs 孔结构进行系统调控, 已成功实现了高达 $4210 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 的比表面积、 4.7 nm 的大孔径和 $0.17 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的超低密度[17]。与依赖配位键的 MOFs 不同, COFs 完全由有机单元通过共价键连接, 不含金属离子, 因而在有机溶剂乃至苛刻环境(如酸、碱、氧化或还原条件)中表现出优异的稳定性[18]。此外, COFs 框架中存在的氢键和 π - π 堆积作用进一步增强了结构的稳定性, 有效维持了孔道完整性。

氢键有机框架(HOFs)是由有机或金属-有机结构单元通过分子间氢键自组装形成的晶态多孔材料。与

MOFs 和 COFs 不同, HOFs 的构建主要依赖氢键而非配位键或共价键。2011 年, 研究人员首次确认了 HOFs 的微孔性质, 合成了 HOF-1 并将其成功应用于乙烯/乙烷分离[19]。尽管氢键通常弱于配位键和共价键, 但其高度可逆性赋予 HOFs 诸多独特优势, 如温和的合成条件、高结晶度、良好的溶液可加工性以及易于修复和再生[20]。HOFs 可从以下维度进行分类: 1) 按组成单元, 可分为小分子 HOFs 和大分子 HOFs; 2) 按氢键构型, 可分为线性氢键型(氢键呈线性排列)和网状氢键型(氢键形成复杂空间网络); 3) 按拓扑结构, 可分为一维(具一维孔道)、二维(层状结构)和三维(立体网络) HOFs。目前, HOFs 的相关研究仍处于发展阶段, 其在比表面积和热稳定性等方面通常低于 MOFs、COFs 及无机/杂化材料, 仍有诸多关键问题亟待解决。

3. 有机框架材料在生物医学中的应用

3.1. 生物涂层

生物涂层是

有机框架材料(OFs)在生物涂层领域展现出合成灵活性与功能可调性强等优势, 突显了其在生物医学应用中的广泛潜力, 包括药物控释、生物传感和组织工程等[21][22]。其高孔隙率和结构可定制性使 OFs 成为理想的生物相容性涂层材料, 可显著提升基材的生物学性能和耐腐蚀性。随着对生物材料要求的不断提高, 涂层的设计已不再局限于生物相容性, 还需综合考虑腐蚀防护能力及与细胞间的相互作用。MOFs 和 COFs 凭借其可功能化的结构特性, 为实现上述目标提供了良好平台。

Wu 等[23]在镁合金表面构建了由聚己内酯(PCL)和叶酸(FA)修饰的铜基 MOF (HKUST-1)复合涂层。改性后的 HKUST-1 通过氢键作用均匀分散于 PCL 基质中, 不仅提高了涂层的致密性, 还显著增强了镁合金的耐腐蚀性能(图 4)。此外, 该类 OFs 涂层还表现出基于氢键的可逆自修复能力, 能够在受损后实现结构和功能的自主恢复, 从而延长涂层的使用寿命并维持其功能完整性。

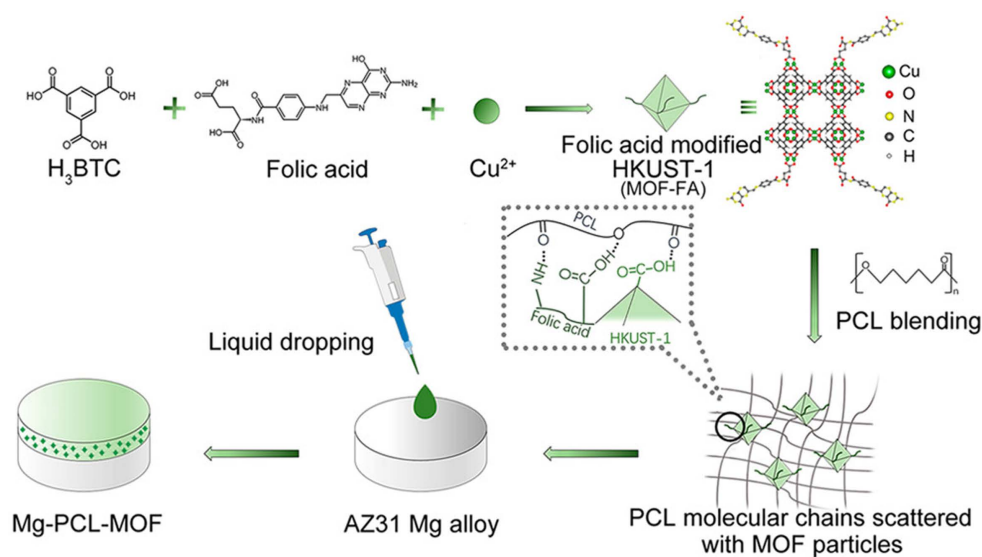


Figure 4. Schematic illustration of the fabrication of the composite coating composed of folic acid (FA)-modified Cu-based MOF and polycaprolactone on AZ31 Mg alloy [23]

图 4. 在 AZ31 Mg 合金上制备由叶酸(FA)改性铜基 MOF 和聚己内酯组成的复合涂层的示意图 [23]

在药物递送领域, 金属有机框架(MOFs)和共价有机框架(COFs)凭借其可调的孔径结构和极高的比表

面积, 成为极具潜力的药物载体平台。通过合理设计框架结构或调控化学微环境, 可实现药物释放动力学的精确调控。例如, 通过调整 MOFs 的孔径尺寸和表面性质, 可达成药物的缓释、控释及靶向递送, 从而提高药物治疗效果并降低系统毒性[24]。Wang 等[25]在隐形眼镜表面构建了 ZIF-8 涂层, 并负载广谱抗菌药左氧氟沙星, 实现了高载药量与自调节释放, 有效克服了传统滴眼液生物利用度低和易诱导细菌耐药性的临床局限。尽管 MOFs 在药物递送涂层方面已取得显著进展, 仍面临诸如提升功能性与生物相容性等挑战。未来可通过开发响应温度、pH 或光照等外界刺激的智能涂层系统, 进一步推动药物精准释放的实现。

3.2. 抗菌应用

随着对抗菌材料需求的日益增长, 有机框架材料(包括 MOFs、COFs 和 HOFs)在抗菌领域中的应用受到广泛关注[26]。以 MOFs 为例, 通过在其骨架中引入具有抗菌功能的金属离子(如银、锌、铜等)或功能性有机配体, 可显著增强其抗菌性能。MOFs 结构的可调节性允许通过改变合成参数以实现性能优化, 从而更精准地设计抗菌材料。Xie 等[27]开发了一种负载银纳米颗粒(AgNPs)的 MOF 纳米系统(AgNPs@MOFs), 该系统表现出增强的可见光响应性与载流子分离效率(图 5(a))。AgNPs@MOFs 通过多重协同机制(包括金属离子释放、活性氧生成及物理接触破坏)对耐药菌表现出高效杀灭效果, 并有效抑制细菌耐药性的产生。

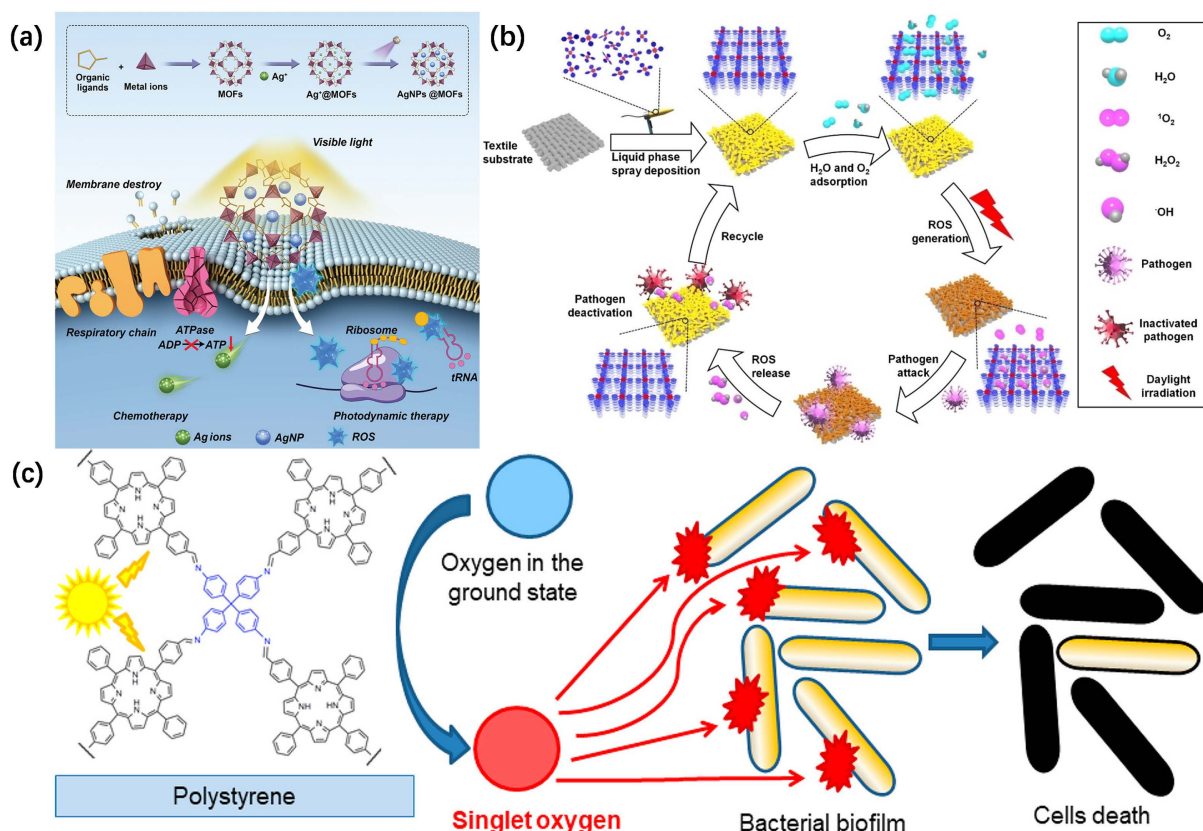


Figure 5. (a) Schematic diagram of AgNPs@MOFs nanosystems with drug-resistant bacteria killing ability through enhanced photodynamic therapy synergistic with chemotherapy [27]. (b) Schematic diagram of sterilization process of COFs [28]. (c) Schematic of the preparation of HOF coatings on textiles and their self-cleaning process against pathogens [31]

图 5. (a) 通过增强的光动力学疗法与化疗协同作用, 具有耐药细菌杀灭能力的 AgNPs@MOFs 纳米系统示意图[27]。(b) COFs 灭菌过程示意图[28]。(c) 纺织品上 HOF 涂层的制备及其针对病原体的自清洁过程示意图[31]

在 COFs 的研究中, 研究人员利用其高度有序的孔道结构和可功能化特点, 开发了多种新型抗菌材料。研究表明, 部分功能化 COFs 不仅能高效吸附细菌, 还可通过可控释放抗菌活性成分抑制微生物生长。Hynek 等人[28]通过 Schiff 碱反应合成了基于卟啉的共价有机框架材料, 该材料在可见光照射下可产生单线态氧($^1\text{O}_2$), 对铜绿假单胞菌和粪肠球菌生物膜表现出显著的抗菌活性(图 5(b))。此外, COFs 还可作为载体负载抗菌剂, 实现靶向递送与释放, 从而提升抗菌效率; 或作为光敏剂, 通过光热效应杀灭细菌。Zhang 等人[29]通过 2,4,6-三甲酰基间苯三酚(TFP)与 3,6-二氨基吡啶(DAA)的 Schiff 碱缩合反应, 构建了一种具有多重活性位点的吡啶基 COF 光敏剂, 在短时间(10 分钟)光照下对革兰阴性菌和阳性菌均表现出高效抗菌活性。

作为一种新兴有机框架材料, HOFs 的抗菌性能也日益受到关注。HOFs 主要依赖氢键自组装形成, 兼具优异的可调性与稳定性。通过将抗菌组分嵌入 HOF 框架, 可有效提升其抗菌活性, 同时氢键作用有助于实现抗菌成分的稳定负载与缓释, 延长作用时间。Liu 等人[30]提出了一种将功能性物质整合进阴离子型 HOF 结构的策略。以 PFC-33 为例, 该 HOF 在框架中整合了卟啉光敏剂作为多孔骨架, 并引入商用杀菌剂作为抗衡离子。骨架与离子之间的永久孔道和静电相互作用, 使材料能够在多种生理环境中响应性释放杀菌组分, 展现出光动力与化学杀菌的协同抗菌效应。部分功能化 HOFs 在体外对多种细菌表现出良好抑制效果, 显示出在生物医学领域的应用潜力。在纺织领域, HOFs 与纤维复合可赋予织物持久抗菌性能。Wang 等[31]采用液相喷涂沉积技术(LPSD)在纺织品表面制备了一系列光活性 HOF 涂层(图 5(c))。这些可溶液加工的多孔涂层可自发吸附空气中的氧气并转化为活性氧(ROS), 在光照下实现 ROS 的生成与储存, 从而快速杀灭高传染性病原体。

与传统抗生素不同, OFs 的抗菌机制不仅源于其所负载或释放的抗菌化学成分, 更与其独特的结构特性密切相关。深入研究结构-性能关系, 将为新型抗菌材料的设计提供重要理论依据。尽管如 Ag-MOFs 和 Cu-MOFs 等 OFs 在抗菌应用中表现出色(如通过金属离子缓释和 ROS 生成实现杀菌), 其实际应用仍面临诸多挑战: 例如部分 MOFs 在潮湿或生理环境中结构稳定性较差, 导致活性成分过早释放; 含重金属(如 Ag^+ 、 Cu^{2+})的 MOFs 可能对正常细胞产生毒性, 需通过表面修饰以降低生物副作用; 长期使用单一抗菌机制的 OFs 可能诱发细菌耐药性, 需开发多机制协同的抗菌体系[27]。总体而言, OFs 在抗菌领域的研究方兴未艾, 凭借其可调的结构与多样的功能化策略, 这些材料在抑制细菌生长和降低感染风险方面展现出广阔前景。

3.3. 癌症治疗

随着癌症治疗需求的不断提升, 有机框架材料(OFs)作为一种新兴功能材料, 在药物递送、肿瘤成像与光热治疗等领域展现出重要的应用潜力[32]。OFs 在癌症治疗中最突出的应用之一是作为药物递送载体。凭借高比表面积和可调的孔径结构, OFs 能够高效负载抗癌药物, 显著提升药物的生物利用度和靶向性。通过在 MOFs 和 COFs 表面修饰靶向配体, 可实现药物在癌细胞处的特异性识别与释放。Ghosh 等[33]设计了一种生物相容性介孔 MOF (MIL-101)作为线粒体靶向药物载体, 成功将伊立替康定向递送至线粒体, 选择性抑制线粒体拓扑异构酶 1 (Top1mt), 并探究了其抗癌机制。针对乳腺癌[34]和肺癌[35]等特定癌症类型, 研究人员已开发出多种靶向型 OFs 载药系统, 在提高治疗效果的同时显著降低了对正常细胞的毒性。Hassan 等[36]评估了多种 COFs 作为药物载体的性能, 其中负载紫杉醇的 COF-3 在抑制卵巢癌细胞增殖方面效果最为显著, 为卵巢癌治疗提供了新思路。

OFs 高度有序的结构和良好的化学稳定性也使其在肿瘤成像中具备广泛应用价值[37]。MOFs 和 COFs 可作为成像探针, 通过嵌入荧光染料或金属纳米颗粒实现肿瘤细胞的高灵敏度检测。Skorjanc 等[38]合成了基于 β -酮胺的荧光 COFs, 用于肿瘤细胞缺氧状态成像。荧光显微镜分析表明, 该材料可有效区分缺氧

条件与常氧条件下培养的 HeLa 细胞。通过调控孔道结构和表面功能化, OFs 能够实现对生物分子的高选择性识别, 研究人员正积极探索其在荧光成像与磁共振成像(MRI)中的应用[39] (图 6(a))。OFs 与荧光探针或造影剂结合可大幅增强成像信号, 提高早期肿瘤检出率。Kong 等[40]利用发光咪唑配体构建了绿色发光 Zr(IV)-MOF(BUT-88), 并进一步制备了荧光纳米探针 drDNA-BUT-88, 首次实现了双肿瘤标志物的活细胞成像, 显著提高了癌症早期诊断的准确性(图 6(b))。Liu 等[41]开发了一种基于锌卟啉 COF 的 pH 响应纳米平台($\text{MnO}_2/\text{ZnCOF}@\text{Au}&\text{BSA}$), 用于增强肿瘤荧光成像。该体系在 $\text{pH} = 7.4$ 时处于荧光“关闭”状态, 而在 $\text{pH} = 5.5$ 时锌卟啉单元分散并显示强烈荧光(“开启”状态), BSA 包覆的金纳米颗粒通过金属增强荧光效应将体内荧光信号强度提升约 3.0 倍(图 6(c))。

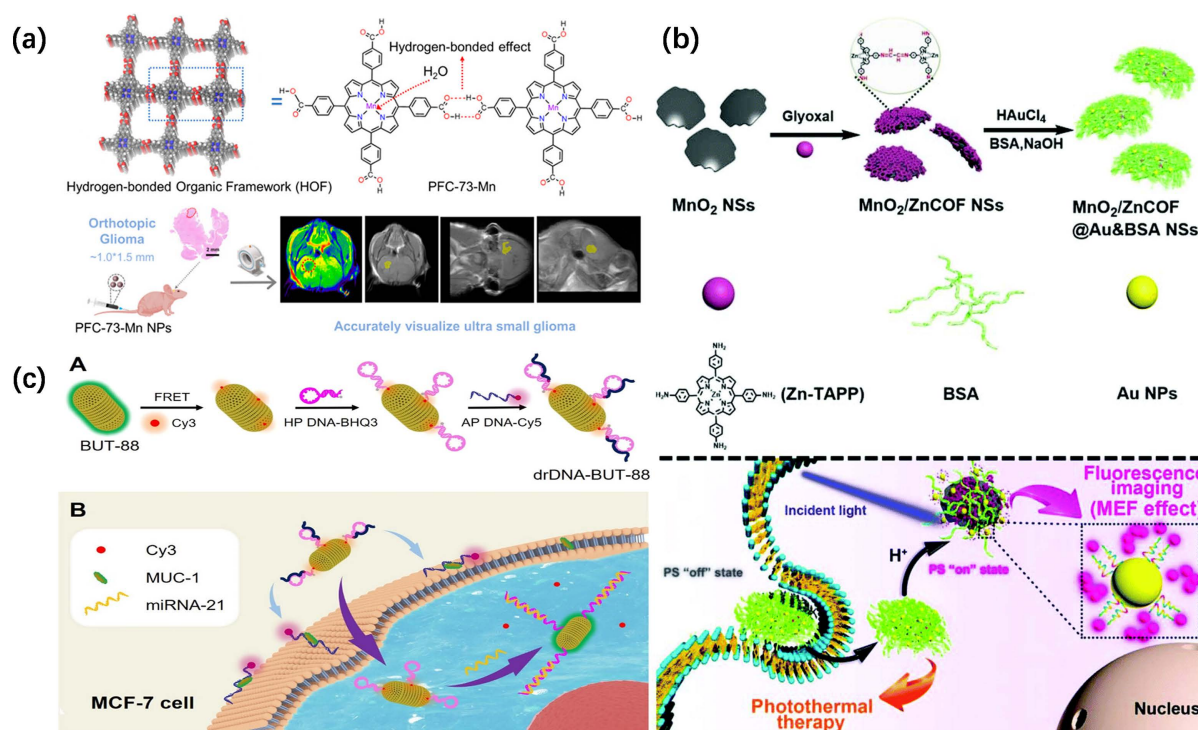


Figure 6. (a) Illustration of the MRI diagnosis of cancers based on PFC-73-Mn NPs [39]. (b) Schematic illustration of fabrication of the drDNA-BUT-88 probe and simultaneous specific recognition of membrane MUC-1 and cytoplasmic miRNA-21 in MCF-7 cells [40]. (c) Preparation of $\text{MnO}_2/\text{ZnCOF}@\text{Au}&\text{BSA}$ NSs and schematic illustration of FL-enhanced imaging by pH-induced dissociation behaviour and PTT [41]

图 6. (a) 基于 PFC-73-Mn NPs 的癌症 MRI 诊断示意图[39]。 (b) drDNA-BUT-88 探针的制备示意图, 以及 MCF-7 细胞中膜 MUC-1 和细胞质 miRNA-21 的同时特异性识别[40]。 (c) $\text{MnO}_2/\text{ZnCOF}@\text{Au}&\text{BSA}$ NSs 的制备以及 pH 诱导的解离行为和 PTT 对 FL 增强成像的示意图[41]

光热疗法(PTT)是一种新兴的肿瘤治疗策略, 通过利用光热试剂在特定波长光照下将光能转化为热能, 诱导肿瘤局部升温从而杀死癌细胞。有机框架材料(OFs)凭借其可调控的结构和优异的光学性能[42][43], 在 PTT 中展现出显著的应用潜力。例如, 通过将金属纳米颗粒等光热组分掺杂至 MOFs 或 COFs 的孔道中, 可构建高效光热转化体系, 在光照下实现局部释热并对肿瘤细胞产生选择性杀伤。与传统光热材料相比, HOFs 因其优异的生物可降解性和较高的生物安全性, 在降低系统毒性及副作用方面表现出明显优势。

在药物递送方面, 与临床已较为成熟的脂质体(如负载阿霉素的 Doxil®)相比, MOFs 不仅具备更高的载药量, 还可通过孔道工程设计实现 pH 响应等智能释放行为。然而, MOFs 的体内降解机制仍不够明

确, 其临床转化进程相对滞后。尽管 COFs 的光热转换效率(可超过 30%, 高于聚吡咯等聚合物)表现突出, 但其合成过程复杂、规模化制备难度较大, 限制了实际应用。

总体而言, 有机框架材料(MOFs、COFs、HOFs)在癌症治疗中显示出巨大的发展潜力。通过合理的结构设计与功能化修饰, 这些材料不仅可提升药物的靶向性与生物相容性, 还有望实现化疗、光热治疗及成像等多种功能的协同整合, 为构建高效、低毒的多模式治疗平台提供基础。

4. 结论与展望

有机框架材料(包括 MOFs、COFs 和 HOFs)凭借其结构可调、比表面积高和功能多样等特性, 在生物医学领域展现出广阔的应用前景。从材料性能来看, MOFs 具有良好的化学稳定性和高负载能力, 在药物递送与生物成像方面优势显著; COFs 以其高度有序的共价骨架和优异的机械性能, 适用于构建高灵敏度生物传感器及高效抗菌材料; 而 HOFs 则因合成条件温和、生物相容性良好, 在生物涂层及对安全性要求较高的应用场景中具有独特潜力。

在具体应用层面, 有机框架材料已在生物涂层、抗菌剂、生物检测及癌症治疗等多个方向实现创新突破。研究表明, 该类材料不仅能够提升生物涂层的耐腐蚀性与功能性, 还展现出卓越的抗菌性能、高灵敏度的检测能力, 以及高效的药物负载与靶向释放性能。随着对材料构效关系、生物相容性及体内代谢机制的深入探索, 有机框架材料有望推动现有生物医学技术的升级, 并为开发诊疗一体化的新一代系统提供关键材料基础。

参考文献

- [1] Mohan, B., Singh, G., Gupta, R.K., Sharma, P.K., Solovev, A.A., Pombeiro, A.J.L., *et al.* (2024) Hydrogen-Bonded Organic Frameworks (HOFs): Multifunctional Material on Analytical Monitoring. *Trac-Trends in Analytical Chemistry*, **170**, Article 117436. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117436>
- [2] Cao, J.P., Tang, G. and Yan, F. (2024) Applications of Emerging Metal and Covalent Organic Frameworks in Perovskite Photovoltaics: Materials and Devices. *Advanced Energy Materials*, **14**, Article 2304027. <https://doi.org/10.1002/aenm.202304027>
- [3] Yang, Y., Sun, Z.Y., Wu, Y.W., Liang, Z.W., Li, F.K., Zhu, M., *et al.* (2024) Porous Organic Framework Materials (MOF, COF, and HOF) as the Multifunctional Separator for Rechargeable Lithium Metal Batteries. *Small*, **20**, e2401457. <https://doi.org/10.1002/sml.202401457>
- [4] Masoomi, M.Y., Morsali, A., Dhakshinamoorthy, A. and Garcia, H. (2019) Mixed-Metal MOFs: Unique Opportunities in Metal-Organic Framework (MOF) Functionality and Design. *Angewandte Chemie International Edition*, **58**, 15188-15205. <https://doi.org/10.1002/anie.201902229>
- [5] Kaur, H., Siwal, S.S., Saini, R.V. and Thakur, V.K. (2024) Covalent-Organic Framework-Based Materials in Theranostic Applications: Insights into Their Advantages and Challenges. *ACS Omega*, **9**, 6235-6252. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c08456>
- [6] Jiang, M., Yan, X., Wang, Y., Pu, F., Liu, H., Li, Y., *et al.* (2023) One-Component Artificial Gustatory System Based on Hydrogen-Bond Organic Framework for Discrimination of Versatile Analytes. *Advanced Functional Materials*, **33**, Article 2300091. <https://doi.org/10.1002/adfm.202300091>
- [7] Ding, M., Liu, W. and Gref, R. (2022) Nanoscale MOFs: From Synthesis to Drug Delivery and Theranostics Applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*, **190**, Article 114496. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2022.114496>
- [8] Wang, Y., Yan, J., Wen, N., Xiong, H., Cai, S., He, Q., *et al.* (2020) Metal-Organic Frameworks for Stimuli-Responsive Drug Delivery. *Biomaterials*, **230**, Article 119619. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2019.119619>
- [9] Huang, Y., Hao, X., Ma, S., Wang, R. and Wang, Y. (2022) Covalent Organic Framework-Based Porous Materials for Harmful Gas Purification. *Chemosphere*, **291**, Article 132795. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132795>
- [10] Zhou, C.L., Pan, M.F., Li, S.J., Sun, Y.X., *et al.* (2022) Metal Organic Frameworks (MOFs) as Multifunctional Nano-platform for Anticorrosion Surfaces and Coatings. *Advances in Colloid and Interface Science*, **305**, Article 102707. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102707>
- [11] Ding, L., Shi, M., Xu, Y., Yu, E., Zhang, Y., Li, J., *et al.* (2025) Covalent Organic Framework: A Rising Star in Antibacterial Agents. *Advanced Functional Materials*, **35**, Article 2411237. <https://doi.org/10.1002/adfm.202411237>

- [12] Honarvar Nazari, M., Zhang, Y., Mahmoodi, A., Xu, G., Yu, J., Wu, J., *et al.* (2022) Nanocomposite Organic Coatings for Corrosion Protection of Metals: A Review of Recent Advances. *Progress in Organic Coatings*, **162**, Article 106573. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106573>
- [13] Liu, W., Yan, Z., Zhang, Z., Zhang, Y., Cai, G. and Li, Z. (2019) Bioactive and Anti-Corrosive Bio-MOF-1 Coating on Magnesium Alloy for Bone Repair Application. *Journal of Alloys and Compounds*, **788**, 705-711. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.02.281>
- [14] Pettinari, C., Pettinari, R., Di Nicola, C., Tombesi, A., Scuri, S. and Marchetti, F. (2021) Antimicrobial MOFs. *Coordination Chemistry Reviews*, **446**, Article 214121. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.214121>
- [15] Zhu, L., Huo, A., Chen, Y., Bai, X., Cao, C., Zheng, Y., *et al.* (2023) A ROS Reservoir Based on a Polyoxometalate and Metal-Organic Framework Hybrid for Efficient Bacteria Eradication and Wound Healing. *Chemical Engineering Journal*, **476**, Article 146613. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.146613>
- [16] Pandya, I., Kumar, S., Aswal, V.K., El Seoud, O., Assiri, M.A. and Malek, N. (2024) Metal Organic Framework-Based Polymeric Hydrogel: A Promising Drug Delivery Vehicle for the Treatment of Breast Cancer. *International Journal of Pharmaceutics*, **658**, Article 124206. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2024.124206>
- [17] Diercks, C.S. and Yaghi, O.M. (2017) The Atom, the Molecule, and the Covalent Organic Framework. *Science*, **355**, eaal1585. <https://doi.org/10.1126/science.aal1585>
- [18] Abuzeid, H.R., EL-Mahdy, A.F.M. and Kuo, S. (2021) Covalent Organic Frameworks: Design Principles, Synthetic Strategies, and Diverse Applications. *Giant*, **6**, Article 100054. <https://doi.org/10.1016/j.giant.2021.100054>
- [19] He, Y.B. and Chen, B.L. (2011) A Microporous Hydrogen-Bonded Organic Framework for Highly Selective C₂H₂/C₂H₄ Separation at Ambient Temperature. *Journal of the American Chemical Society*, **133**, 14570-14573. <https://doi.org/10.1021/ja2066016>
- [20] Wang, B., Lin, R., Zhang, Z., Xiang, S. and Chen, B. (2020) Hydrogen-Bonded Organic Frameworks as a Tunable Platform for Functional Materials. *Journal of the American Chemical Society*, **142**, 14399-14416. <https://doi.org/10.1021/jacs.0c06473>
- [21] Chen, W., Liu, M., Yang, H., Nezamzadeh-Ejehieh, A., Lu, C., Pan, Y., *et al.* (2023) Recent Advances of Fe(III)/Fe(II)-MPNs in Biomedical Applications. *Pharmaceutics*, **15**, Article 1323. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15051323>
- [22] Guo, X., Zhou, L., Liu, X., Tan, G., Yuan, F., Nezamzadeh-Ejehieh, A., *et al.* (2023) Fluorescence Detection Platform of Metal-Organic Frameworks for Biomarkers. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, **229**, Article 113455. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2023.113455>
- [23] Zheng, Q., Li, J., Yuan, W., Liu, X., Tan, L., Zheng, Y., *et al.* (2019) Metal-Organic Frameworks Incorporated Polycaprolactone Film for Enhanced Corrosion Resistance and Biocompatibility of Mg Alloy. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **7**, 18114-18124. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b05196>
- [24] Rao, C., Liao, D., Pan, Y., Zhong, Y., Zhang, W., Ouyang, Q., *et al.* (2022) Novel Formulations of Metal-Organic Frameworks for Controlled Drug Delivery. *Expert Opinion on Drug Delivery*, **19**, 1183-1202. <https://doi.org/10.1080/17425247.2022.2064450>
- [25] Shao, Y., Suo, H., Wang, S., Peng, Y., Chu, X., Long, Z., *et al.* (2024) A Facile Method to Construct ZIF-8 MOFs on Contact Lens for High Antibiotics Loading and Self-Defensive Release. *Chemical Engineering Journal*, **481**, Article 148576. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.148576>
- [26] Hu, W., Ouyang, Q., Jiang, C., Huang, S., Alireza, N., Guo, D., *et al.* (2024) Biomedical Metal-Organic Framework Materials on Antimicrobial Therapy: Perspectives and Challenges. *Materials Today Chemistry*, **41**, Article 102300. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2024.102300>
- [27] Xie, W., Chen, J., Cheng, X., Feng, H., Zhang, X., Zhu, Z., *et al.* (2023) Multi-Mechanism Antibacterial Strategies Enabled by Synergistic Activity of Metal-Organic Framework-Based Nanosystem for Infected Tissue Regeneration. *Small*, **19**, Article 2205941. <https://doi.org/10.1002/smll.202205941>
- [28] Hynek, J., Zelenka, J., Rathouský, J., Kubát, P., Ruml, T., Demel, J., *et al.* (2018) Designing Porphyrinic Covalent Organic Frameworks for the Photodynamic Inactivation of Bacteria. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **10**, 8527-8535. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b19835>
- [29] Zhang, C., Guo, J., Zou, X., Guo, S., Guo, Y., Shi, R., *et al.* (2021) Acridine-Based Covalent Organic Framework Photosensitizer with Broad-Spectrum Light Absorption for Antibacterial Photocatalytic Therapy. *Advanced Healthcare Materials*, **10**, Article 2100775. <https://doi.org/10.1002/adhm.202100775>
- [30] Liu, B., Pan, X., Nie, D., Hu, X., Liu, E. and Liu, T. (2022) Ionic Hydrogen-Bonded Organic Frameworks for Ion-Responsive Antimicrobial Membranes. *Advanced Materials*, **34**, Article 2202280. <https://doi.org/10.1002/adma.202202280>
- [31] Wang, Y., Ma, K., Bai, J., Xu, T., Han, W., Wang, C., *et al.* (2022) Chemically Engineered Porous Molecular Coatings as Reactive Oxygen Species Generators and Reservoirs for Long-Lasting Self-Cleaning Textiles. *Angewandte Chemie*

- International Edition*, **61**, e202115956. <https://doi.org/10.1002/anie.202115956>
- [32] Yu, J.L. and Bai, Z. (2025) Recent Advances in Zn-MOFs and Their Derivatives for Cancer Therapeutic Applications; Application and Prospect of Cu-Based Metal-Organic Frameworks in Tumor Therapy. *Journal of Molecular Structure*, **321**, Article 139984.
 - [33] Ghosh, A., Ghosh, A., Bhattacharyya, A., Mitra, R., Das, B.B. and Bhaumik, A. (2023) Mitochondrial Topoisomerase 1 Targeted Anticancer Therapy Using Irinotecan Encapsulated Mesoporous MIL-101(Fe) Synthesized via a Vapour Assisted Method. *Dalton Transactions*, **53**, 3010-3019. <https://doi.org/10.1039/d3dt03654e>
 - [34] Ma, J., Chen, Z., Diao, Y., Ye, M., Liu, X., Cui, S., *et al.* (2024) Current and Promising Applications of UiO-Based MOFs in Breast Cancer Therapy. *Reactive and Functional Polymers*, **200**, Article 105918. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2024.105918>
 - [35] Deng, Y., Guo, M., Zhou, L., Huang, Y., Srivastava, S., Kumar, A., *et al.* (2024) Prospects, Advances and Biological Applications of MOF-Based Platform for the Treatment of Lung Cancer. *Biomaterials Science*, **12**, 3725-3744. <https://doi.org/10.1039/d4bm00488d>
 - [36] Hassan, A., Roy, S., Das, A., Wahed, S.A., Bairagi, A., Mondal, S., *et al.* (2024) Covalent Organic Frameworks as Potential Drug Carriers and Chemotherapeutic Agents for Ovarian Cancers. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, **10**, 4227-4236. <https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.4c00351>
 - [37] Yang, H., Liao, D., Cai, Z., Zhang, Y., Nezamzadeh-Ejhieh, A., Zheng, M., *et al.* (2023) Current Status of Fe-Based MOFs in Biomedical Applications. *RSC Medicinal Chemistry*, **14**, 2473-2495. <https://doi.org/10.1039/d3md00416c>
 - [38] Skorjanc, T., Shetty, D., Kumar, S., Makuc, D., Mali, G., Volavšek, J., *et al.* (2023) Nitroreductase-Sensitive Fluorescent Covalent Organic Framework for Tumor Hypoxia Imaging in Cells. *Chemical Communications*, **59**, 5753-5756. <https://doi.org/10.1039/d3cc01110k>
 - [39] Ouyang, S., Chen, C., Lin, P., Wu, W., Chen, G., Li, P., *et al.* (2023) Hydrogen-Bonded Organic Frameworks Chelated Manganese for Precise Magnetic Resonance Imaging Diagnosis of Cancers. *Nano Letters*, **23**, 8628-8636. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.3c02466>
 - [40] Kong, X., Ji, X., He, T., Xie, L., Zhang, Y., Lv, H., *et al.* (2020) A Green-Emission Metal-Organic Framework-Based Nanoprobe for Imaging Dual Tumor Biomarkers in Living Cells. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**, 35375-35384. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c10038>
 - [41] Liu, Y., Zhang, Y., Li, X., Gao, X., Niu, X., Wang, W., *et al.* (2019) Fluorescence-Enhanced Covalent Organic Framework Nanosystem for Tumor Imaging and Photothermal Therapy. *Nanoscale*, **11**, 10429-10438. <https://doi.org/10.1039/c9nr02140j>
 - [42] Singh, N., Won, M., An, J., Yoon, C., Kim, D., Joong Lee, S., *et al.* (2024) Advances in Covalent Organic Frameworks for Cancer Phototherapy. *Coordination Chemistry Reviews*, **506**, Article 215720. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.215720>
 - [43] Zeng, Y., Liao, D., Kong, X., Huang, Q., Zhong, M., Liu, J., *et al.* (2023) Current Status and Prospect of ZIF-Based Materials for Breast Cancer Treatment. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, **232**, Article 113612. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2023.113612>