

• 科技评述:2025年诺贝尔奖评述 •
DOI: 10.3724/BNSFC-2025-0115

分子建筑:2025年诺贝尔化学奖 “金属—有机框架材料的开发”

李 斌 钱国栋*

浙江大学 材料科学与工程学院,杭州 310058

[摘 要] 2025年诺贝尔化学奖授予Susumu Kitagawa、Richard Robson和Omar M. Yaghi三位科学家,以表彰他们在“金属—有机框架材料的开发”方面做出的开创性贡献。凭借在分子尺度的结构可设计、功能可定制等优势,这类材料在气体存储与分离、碳捕获、沙漠集水、分子传感和多相催化等领域展现出广阔应用前景。

[关键词] 2025诺贝尔化学;金属—有机框架材料;多孔材料;配位聚合物;分子建筑

2025年10月8日,瑞典皇家科学院将诺贝尔化学奖授予日本科学家Susumu Kitagawa、澳大利亚科学家Richard Robson和美国科学家Omar M. Yaghi,以表彰他们在金属—有机框架材料(Metal-Organic Frameworks, MOFs)领域的开创性贡献。MOF材料是一种人工定制的“分子建筑”,由金属离子或金属簇充当“节点”,通过有机配体作为“梁柱”相互连接,构成规则有序的多孔晶体结构(图1A)。研究人员可以选择不同的金属离子和有机分子,搭建出具有不同性能的MOF材料,实现分子层面的空间设计,成为化学与材料学科发展的关键里程碑。

MOF材料的发展脉络最早可追溯至18世纪初发现的颜料“普鲁士蓝”,作为首个过渡金属配合物实例,它是最早被人类发现的MOF材料雏形。1913年诺贝尔化学奖得主Alfred Werner建立了配位化学理论,首次从分子层面揭示了金属离子与配体间的键合本质,开启了利用金属—配体键合作用设计晶体网络的可能性。在此启发下,20世纪50年代具有配位网络结构的“霍夫曼包合物”(Hofmann Clathrates)等晶体材料得以被发现,促进了配位聚合物(Coordination Polymers)研究的逐步兴起。然而,早期开发的这些配位晶体大多为致密结构,缺乏具备实用价值的多孔性质^[1]。

1989年,Richard Robson教授灵光乍现,用铜离子和四面体的甲基四苯腈,成功搭建出具有金刚石型拓扑的三维晶体结构,不仅具有较大的内部空腔,还展现出离子交换特性^[2]。Robson进一步创新性提出“节点”“桥联配体”等重要概念,将有机配体的几何基元“嫁接”至无机晶体的网络构筑,提出通过几何形状搭建可预测配位网络结构的“分子建筑”思路,为配位网络材料领域构建起一套具有普适性的初期理论体系。

然而,Robson的结构相当不稳定,很多化学家认为它们毫无用途,但这启发了Susumu Kitagawa和Omar M. Yaghi等科学家的研究兴趣。在1992至2003年间,他们各自独立地取得了一系列突破性的发现。1992年,Kitagawa发现亚铜中心与吡嗪构成的二维多孔配位聚合物可容纳丙酮分子,但脱除客体后无法保持多孔性。直到1997年,Kitagawa证明了利用钴离子和4,4'-联吡啶构筑的三维框架结构,可以吸收和释放甲烷、氮气和氧气,随后发展并提出了“柔性多孔晶体”概念^[3],颠覆传统的气体吸附理论。

与此同时,1995年Yaghi报道了两种不同的二维配位结构,首次提出了“金属—有机框架(MOF)”术语,并在*Nature*杂志报道了采用带电有机配体构筑的MOF-1,展示了客体分子的可逆交换,正式宣告了MOF概念的诞

收稿日期:2025-10-17; 修回日期:2025-10-18

* 通信作者,Email:gdqian@zju.edu.cn

引用格式: 李斌,钱国栋. 分子建筑:2025年诺贝尔化学奖“金属—有机框架材料的开发”. 中国科学基金,2025,39(5):788–790.

Li B, Qian GD. Molecular architecture: The 2025 Nobel Prize in chemistry for “the development of metal–organic frameworks”. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2025, 39(5): 788–790. (in Chinese)

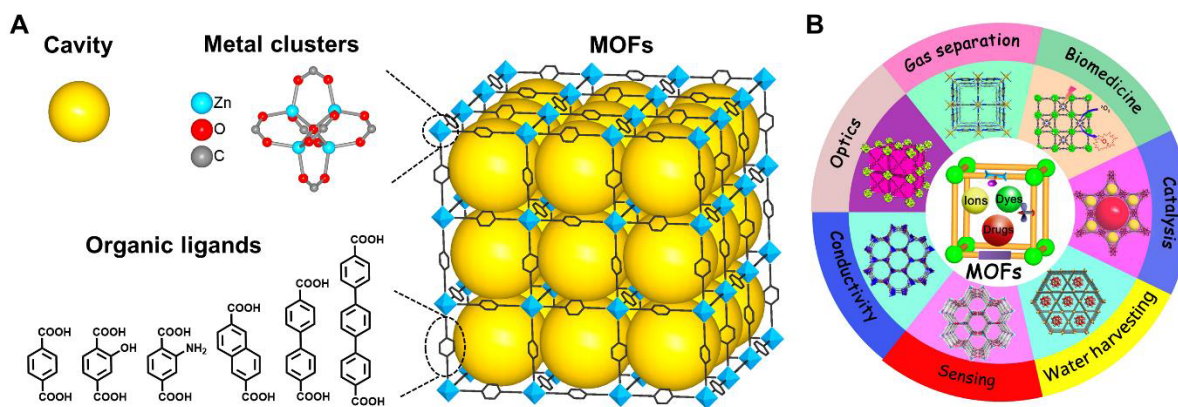


图1 A. MOF材料的分子建筑与结构调控;B. 潜在应用示意图(图片来源:Advanced Materials官网)

Fig.1 A. Molecular Architecture and Structural Regulation of MOF Materials; B. Potential Application Diagram (Image Source: Official Website of Advanced Materials)

生^[4]。面对框架不稳定的质疑,Yaghi引入更加刚性的多核金属簇作为“次级构建单元”(Secondary Building Units,SBUs),以替代单个金属离子作为MOF框架的节点,点亮了“分子建筑”的世界之门。1999年,Yaghi以 $\text{Zn}_4\text{O}(\text{COO})_6$ 八面体SBU为节点和对苯二甲酸为配体,构筑出MOF发展中的里程碑式经典材料MOF-5^[5]。该材料的立方晶体结构在300℃下仍保持稳定,比表面积高达2900 m²/g,意味着几克MOF-5就拥有一个足球场大的比表面积,开辟了多孔材料研究的新时代。2002年前后,Yaghi系统提出了“网格化学”(Reticular Chemistry)理论,建立起“金属节点—有机配体”的模块化组装规则,让化学家得以像“搭积木”般精准定制材料的结构与性能。从18世纪普鲁士蓝的偶然发现,到20世纪配位聚合物的发展,再到21世纪MOF材料的精准分子建筑,化学家们完成了一场跨越三百年的科学接力,这份坚守与突破最终在2025年以诺贝尔化学奖的荣誉迎来加冕。

MOF材料的获奖绝非偶然,其科学价值体现在“方法论”与“应用性”的双重突破。区别于传统材料研发依赖经验试错,MOF材料凭借“金属节点—有机配体”的模块化组装逻辑,实现了功能材料在分子层面的按需设计与精准构筑,推动了化学研究从“偶然发现”走向“理性设计”的新阶段。MOF材料近年来已成为解决能源、环境等全球性难题的关键利器(图1B)。在气体存储与分离领域,陈邦林教授等人实现了甲烷/氢气高效储存和低碳烃分离,为清洁能源规模化存储与化工节能分离提供了解决方案^[6];在碳捕获领域,George K. H. Shimizu团队研发的CALF-20材料能从潮湿烟道气中高效捕获CO₂,且已与巴斯夫公司合作推进商业化落地^[7];Yaghi团队利用MOF材料探索了从沙漠干旱空气中高效制取淡水,为全球30亿缺水人口提供清洁淡水供应的解决思路^[8]。正如诺贝尔化学奖委员会主席Heiner Linke所言:

MOF材料具有巨大的潜力,为实现具有新功能的定制化材料带来了前所未有的机遇。

聚焦国内MOF材料研究,中国学者在配位聚合物发展早期、MOF材料发展过程和应用等方面均作出了重要贡献。例如,在20世纪末期,以著名无机化学家游效曾院士、陈小明院士、卜显和院士为代表的一批国内科学家在早期的配位聚合物发展和合成方面取得了显著进展。在21世纪初,陈小明院士团队率先报道了具有SOD拓扑结构的金属多氮唑框架(Metal Azolate Framework,MAF)新材料,该材料现已成为国际上研究最为广泛的代表性MOF材料之一^[9]。钱国栋教授与陈邦林教授合作开创了MOF光子功能材料的研究领域^[10]。经过二十多年发展,中国科学家围绕气体吸附与分离、能源储存与转化、分子传感、环境净化、多相催化等国家重大需求领域,取得了一系列具有国际影响力的标志性成果,极大推动了MOF领域的发展。国内MOF研究无论是基础理论、结构创新,还是性能突破、工程应用和产业化进展,如今均已跻身全球先进水平行列。尽管如此,我国在MOF相关的颠覆性原创理论和概念首创等方面仍有不小差距,尚需学术界进一步努力突破。此外,MOF研究另一挑战在于如何将科学突破走向规模化和产业化,目前仍面临着材料大规模绿色制备难、成本高、传质效率低和成型加工难等核心技术与工程化难题,亟需努力突破以跨越从“样品”到“产品”、从“克”到“吨”的巨大鸿沟与挑战。

展望未来,MOF材料发展正站在变革时代的门槛上,凭借对分子空间结构的精确构建,它将开启为特定功能量身定制材料的全新时代。MOF材料如今正逐渐从实验室走向产业,将在储氢、碳捕集、传感、沙漠集水和能源转化等绿色科技领域展现巨大潜力。未来通过与人工智能的交叉融合,必将大幅加速MOF材料的创新

与应用进程。这次诺贝尔化学奖的授予不仅是对三位科学家科学成就的肯定,更是以MOF材料为钥匙,打开了未来攻克能源和环境等全球性挑战的一扇大门。

参 考 文 献

- [1] Kinoshita Y, Matsubara I, Saito Y. The crystal structure of bis (succinonitrilo)copper(I) nitrate. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 1959, 32(7): 741—747.
- [2] Hoskins BF, Robson R. Infinite polymeric frameworks consisting of three dimensionally linked rod-like segments. *Journal of the American Chemical Society*, 1989, 111(15): 5962—5964.
- [3] Kondo M, Yoshitomi T, Matsuzaka H, et al. Three-dimensional framework with channeling cavities for small molecules: $\{[M_2(4,4'\text{-bpy})_3(\text{NO}_3)_4] \cdot x\text{H}_2\text{O}\}_n$ (M = Co, Ni, Zn). *Angewandte Chemie International Edition in English*, 1997, 36(16): 1725—1727.
- [4] Yaghi OM, Li H. Hydrothermal synthesis of a metal-organic framework containing large rectangular channels. *Journal of the American Chemical Society*, 1995, 117(41): 10401—10402.
- [5] Li HL, Eddaoudi M, O’Keeffe M, et al. Design and synthesis of an exceptionally stable and highly porous metal-organic framework. *Nature*, 1999, 402(6759): 276—279.
- [6] Cui XL, Chen KJ, Xing HB, et al. Pore chemistry and size control in hybrid porous materials for acetylene capture from ethylene. *Science*, 2016, 353(6295): 141—144.
- [7] Lin JB, Nguyen TTT, Vaidhyanathan R, et al. A scalable metal-organic framework as a durable physisorbent for carbon dioxide capture. *Science*, 2021, 374(6574): 1464—1469.
- [8] Kim H, Yang S, Rao SR, et al. Water harvesting from air with metal-organic frameworks powered by natural sunlight. *Science*, 2017, 356(6336): 430—434.
- [9] Huang XC, Lin YY, Zhang JP, et al. Ligand-directed strategy for zeolite-type metal-organic frameworks: zinc(II) imidazolates with unusual zeolitic topologies. *Angewandte Chemie (International Ed)*, 2006, 45(10): 1557—1559.
- [10] Cui YJ, Zhang J, He HJ, et al. Photonic functional metal-organic frameworks. *Chemical Society Reviews*, 2018, 47(15): 5740—5785.

Molecular Architecture: The 2025 Nobel Prize in Chemistry for “The Development of Metal–Organic Frameworks”

Bin Li Guodong Qian*

School of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

Abstract The 2025 Nobel Prize in Chemistry was awarded to Susumu Kitagawa, Richard Robson, and Omar M. Yaghi in recognition of their outstanding contributions to “the development of metal–organic frameworks (MOFs)”. Thanks to the precisely designable molecular structures and functions, this Nobel Prize offers new opportunities in the broad fields of gas storage and separation, CO₂ capture, atmospheric water harvesting, molecular sensing, heterogeneous catalysis et al.

Keywords The 2025 Nobel Prize in Chemistry; metal–organic frameworks; porous materials; coordination polymers; molecular architecture

钱国栋 浙江大学材料科学与工程学院教授, 博士生导师, 浙江省特级专家。主持国家自然科学基金青年科学基金项目(A类)、重点国际(地区)合作研究项目、重点项目、区域联合基金等项目。研究方向为金属—有机框架微孔功能晶体材料及其在生物与环境传感、气体吸附与分离、光子功能等领域应用研究。

李 斌 浙江大学材料科学与工程学院研究员, 博士生导师。研究方向为金属—有机框架微孔晶体材料在气体存储与分离、碳捕获、空气集水等领域的应用基础研究。

(责任编辑 张 强)

* Corresponding Author, Email: gdqian@zju.edu.cn