

引用本文: 刘智明, 孙平川. 共轭微孔聚合物的合成、制备及其在污染物处理中的应用 [J]. 离子交换与吸附, 2025, 41(2): 114-128.

Citation: LIU Zhi-ming, SUN Ping-chuan. Synthesis, Preparation, and Application of Conjugated Microporous Polymers in Contaminant Adsorption [J]. Ion Exchange and Adsorption, 2025, 41(2): 114-128.

· 综述 ·

文章编号: 1001-5493(2025)02-0114-15

DOI: 10.16026/j.cnki.ica.2025020114

共轭微孔聚合物的合成、制备及其在污染物处理中的应用*

刘智明, 孙平川**

(南开大学化学学院高分子化学研究所, 功能高分子材料教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要: 吸附法是用于污染物处理最常见的方法, 被广泛运用于空气和水资源的污染处理。作为多孔有机聚合物的典型代表, 共轭微孔聚合物 (CMPs) 由具有共轭效应的芳香基团通过共价键连接形成。CMPs 不仅将优异的孔隙特性与共轭结构完美地结合起来, 而且具有较高的稳定性和多样化的合成策略, 已被广泛应用于污染处理和能源转化等领域。文章综述了 CMPs 的合成和制备方法, 并介绍了 CMPs 在污染物处理中的应用, 特别是 CMPs 对二氧化碳和碘蒸汽等气体污染物的吸附以及水体中重金属等污染物处理的研究进展, 最后总结并概述了该领域未来的研究和发展方向。

关键词: 共轭微孔聚合物, 吸附性能, 污染物处理, 聚合后修饰, 结构-性能关系

中图分类号: O634 **文献标志码:** A

1 前言

共轭微孔聚合物 (Conjugated Microporous Polymers, CMPs) 是一种特殊的多孔有机聚合物, 具有稳定的物理化学性质^[1]和较大的比表面积^[2]。CMPs 是由共价键连接的 π -共轭结构组成的无定形三维网络结构^[3-5], 可通过对单体种类、含量以及反应溶剂等因素的调节来实现 CMPs 在结构、形貌等方面的精细调控^[6,7]。CMPs 因 π -共轭结构组成的多样性以及反应类型的多变性, 在催化^[8]、吸附与分离^[9]、化学传感^[10]及能源转化^[11]等领域有着广泛的应用。

随着人类对生活环境质量的日益重视以及工业技术的快速发展, 制药、化工、纺织工业等生产活动所产生的环境污染物愈发受到社会各界关注。以对硝基苯酚为例, 作为重要的杂环化合物中间体和染料分子^[12], 它在给人类生活带来巨大便利的同时, 其超量排放对环境的污染可能会对动植物与人体造成不可逆的影响,

如基因突变、致癌、畸形等^[13]。为实现绿色生产、防范污染物对人体及生态环境造成的影响, 需发展更高效、更丰富的污染物清除处理技术和手段。CMPs 具有较大的比表面积与孔隙率, 其共轭骨架结构可被其他官能基团进行多样化修饰而调控其吸附与分离性能, 为复杂环境下污染物的吸附和清除提供了一种有效的技术手段。

本文第一部分将综述 CMPs 的基本概念和发展历史, 第二部分综述 CMPs 的合成策略与制备方法; 第三部分综述国内外 CMPs 在气体吸附、水处理等方面的应用, 最后总结并展望该领域未来的研究和研究方向。

2 共轭微孔聚合物概述

多孔材料, 广义上指富含孔状结构的材料, 由组成基本框架结构的固定相和孔隙中储存的流动相组成^[14]。自 1756 年天然沸石被发现以来^[15], 其以较低的密度和在光、电、力学等

* 收稿日期: 2024-04-20

作者简介: 刘智明 (2000—), 硕士研究生.

**通信作者: 孙平川, E-mail: spclbh@nankai.edu.cn.

方面的优异性能, 在气体吸附分离^[16]、能量转化^[17,18]、光催化^[19,20]等方面的应用中发挥了极大的潜能。多孔结构为设计先进功能材料提供了重要方向^[21]。

国际纯粹与应用化学联合会 (IUPAC) 规定, 根据孔的大小可将多孔材料分成大孔材料 (Macroporous materials, 孔径 > 50 nm)、介孔材料 (Mesoporous materials, 孔径为 2~50 nm) 以及微孔材料 (Microporous materials, 孔径 < 2 nm)^[22]。按照孔道的有序性, 可将多孔材料划分为无序

和有序多孔材料, 其中有序多孔材料在空间结构上排列有序、孔径均一、孔道分布相对较窄。

自多孔材料被发现以来, 其骨架结构已从最初的沸石、硅酸盐无机骨架^[23,24]逐步发展为金属有机框架 (MOFs)^[25]和多孔配位聚合物 (PCPs)^[26], 如图 1 所示^[33]。随着合成反应类型的进一步丰富与完善, 许多新兴多孔材料为科研工作者所报道^[27-29]。其中, 多孔有机聚合物^[30,31]是由有机单体通过共价键形成的多孔材料, 其结构多变、功能多样^[32], 具有广阔的应用和发展前景。

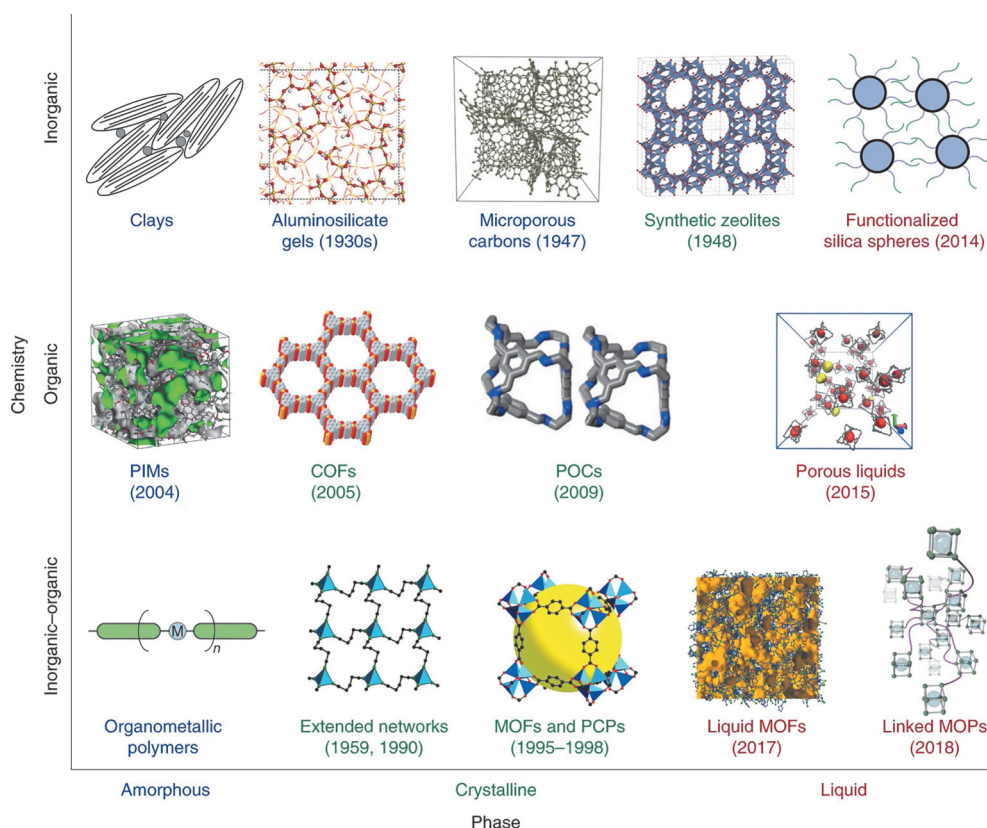


图 1 不同时期多孔材料的演变^[33]。

Figure 1 The evolution of porous materials in different times^[33].

2.1 多孔有机聚合物

多孔有机聚合物 (Porous Organic Polymers, POPs) 由小分子共价键连接组成, 合成 POPs 的结构单元的性质与连接方式决定了 POPs 的孔隙结构、功能用途等^[34]。通过前期分子尺度的精准设计, 可合成得到具有特定结构和功能的 POPs^[35-37]。此外, 合成 POPs 后, 也可通过后期的功能化化学改性, 采取后修饰的手段进一步提高材料的功能性^[38], 合成 POPs 的代表性反应如图 2 所示^[39]。POPs 合成反应的本质是 2 个或

多个小分子单体之间发生的反应, 因此用于小分子偶联的反应都能用于 POPs 的合成, 如 Suzuki、Sonogashira、Heck、Yamamoto 等偶联反应, 这些反应的催化剂大多数为过渡金属。除偶联反应外, 亲核取代反应、点击化学反应等也都能用于 POPs 的合成。POPs 具有诸多优点, 已被应用在生产生活实践中^[40,41]。

2.2 共轭微孔聚合物

CMPs 作为具有 π -共轭网络的微孔聚合物, 是 POPs 的一种典型代表, 其 π -共轭微孔结构是

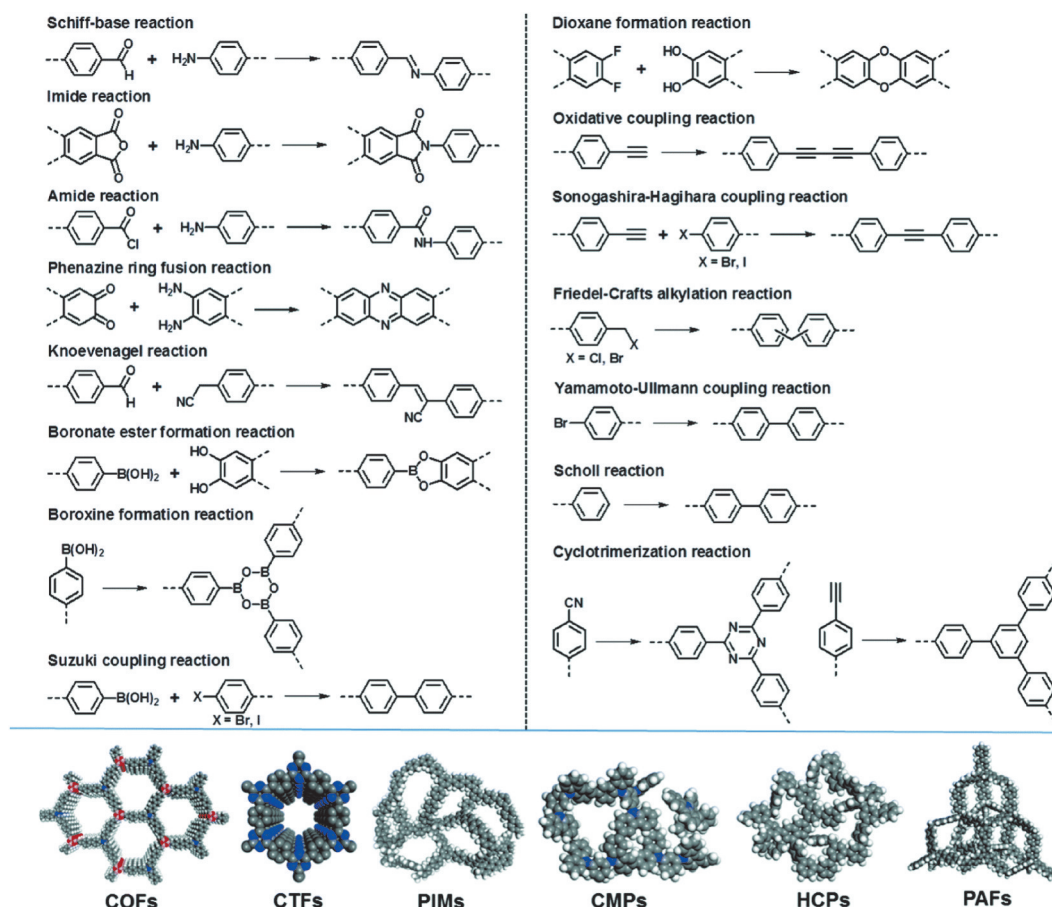


图2 已开发用于合成POPs的典型化学反应^[39].

Figure 2 Representative chemical reactions that have been developed for the synthesis of POPs^[39].

通过芳香基团之间的连接或芳香基团与双键或三键的连接而形成的。CMPs的共轭特性源自单键和饱和键在共轭网络内的无限扩展和交替连接。这种共轭性质赋予了CMPs在共轭网络内实现电子传输的能力，拓展了它们在能源领域的应用。在合成CMPs的聚合反应中，共价键的形成是一个不可逆的过程，因此大多数CMPs呈现无定形态。通过不同的聚合方法和各种结构基元的组合，可生成具有不同结构和功能的CMPs，实现其在多方面的运用^[42,50]。

2007年，Jiang等^[43]学者率先采用Sonogashira-Hagihara偶联反应，成功合成了第一个CMPs，即聚(亚芳基乙炔基)微孔网络，随后合成不同类型CMPs的研究被不断报道。Weber等^[44]发现CMPs网络具有光致发光的特性，这为CMPs在光电领域的运用提供了可能。在CMPs随后的研究中，“金属有机CMPs”的概念^[45]被提出并发展。Copper等通过引入叔丁基官能团，降低了材料分子量，合成并提出了超支链CMPs。近些

年的研究逐步拓展了CMPs在光催化^[46]、有机溶剂过滤^[47]、生物传感^[48]、可充电空气电池^[49]等方面的应用。

3 共轭微孔聚合物的结构设计与合成方法

CMPs具有孔道可调和高稳定性等特点，在众多领域表现出优异的性能^[50]。因此，从结构决定功能的角度出发，设计和合成具有特定结构和功能的CMPs至关重要。在构建拓扑网络的过程中，CMPs骨架需包含至少具有2个反应位点的结构基元，以便通过偶联反应形成多孔网络结构。结构基元按其构型可分为二连接、三连接、四连接和六连接。在自缩合或交叉偶联反应中，具有不同几何构型的结构基元可任意组合，通过形成共价键连接成具有永久纳米孔道的结构。

CMPs的一个重要特性是共轭效应。目前，各种各样的 π -共轭单元被用于构筑基本的共轭

结构, 合成CMPs所需的反应基团也多种多样, 不同的 π -共轭单元和反应类型赋予了CMPs不同的骨架结构和性能。

3.1 共轭微孔聚合物的合成方法

目前, CMPs的合成已经运用了多种反应, 主要包括金属催化和非金属催化两大类反应, 最常见的合成方法与图2的POPs合成方法相似。同样地, CMPs的结构形态可通过改变单体几何形态和掺杂不同杂原子来调整。

广泛应用于CMPs合成的Suzuki-Miyaura偶联反应, 是连接芳香环的一种有效方法。该方法利用Pd(0)作为催化剂, 在碱性条件下将芳基硼单体与卤代芳基单体偶合, 从而制得带芳香环的CMPs。Suzuki-Miyaura偶联反应的优势在于单体价格低廉、反应官能团多样、条件温和等。然而, Suzuki-Miyaura偶联反应对氧十分敏感, 可能导致单体偶联或其他副产物产生, 因此在反应过程中需采取惰性气体保护操作^[50-52]。

Sonogashira-Hagihara偶联反应是第一个被发现能制备CMPs的方法^[53]。该反应使用钯催化剂和铜助催化剂将卤代芳基与单体末端炔基连接, 是CMPs合成中收率很高的一类反应。以往的文献显示, 不同溶剂对偶联反应存在一定影响^[54]。由于在有氧条件下炔基单体会发生自偶联, 因而该反应需在无水无氧的条件下进行^[55]。

Mizoroki-Heck反应则利用钯作为催化剂, 将含有卤素的芳基或不饱和卤代烷与烯烃偶联, 形成新的碳-碳键^[56,57]。除以上提到的金属催化反应外, Yamamoto偶联反应^[58]、Schiff-base反应^[59,62]、Phenazine ring fusions反应^[60]也可用于合成制备CMPs。此外, 炔烃复分解反应^[61]、三聚成环反应^[63]、电化学聚合反应^[64]、Buchwald-Hartwig胺化反应^[65]等其他反应也可用于制备CMPs。

3.2 共轭微孔聚合物的后修饰方法

当直接合成的CMPs无法满足应用要求时, 对其进行聚合后化学修饰是进一步功能化CMPs的有效方法。CMPs的共价键提供了化学修饰所需的稳定条件, 同时可选择多种反应基元使得连接体与侧基反应基团或金属结合位点能整合进入CMPs骨架中的预定位置^[50]。后修饰的反应类型主要分为金属修饰和共价修饰2种。

Ding等^[66]制备的金属酞菁基CMPs具有大

比表面积和光照下产生单线态氧的能力, 显示具有光敏剂效果; Li等^[67]制备了一种卟啉酞菁基CMPs, 通过与石墨烯复合, 将金属元素分散在石墨烯中, 得到的复合材料具有电催化活性。

利用点击化学进行修饰是常见的CMPs共价修饰手段, 如硫醇基团通常被用于苯基亚乙烯基衍生物的改性, 通过硫基点击化学实现不同微孔结构^[68]; 含有乙炔基团的CMPs可与金属锂反应, 并通过通入二氧化碳实现CMPs的羧酸官能化改性^[69]。针对CMPs功能化改性, 研究者做了不同尝试^[70-72], 实现了多种功能化CMPs的制备。

4 共轭微孔聚合物在污染物处理中的应用

吸附法作为使用最广泛的污染物处理方法, 是污染物去除的重要手段。相较于其他POPs, CMPs可通过分子水平的结构与调控、丰富的合成和后修饰手段得到大比表面积及互相贯通的孔道结构。同时, CMPs的共轭结构结合孔道特性可作为活性位点有效吸附目标气体或离子。刚性的CMPs骨架赋予了CMPs较好的热稳定性和化学稳定性, 能适应复杂外部环境, 在气体污染物、水体污染物吸附分离^[73-75]等方面都实现了较为广泛的应用。

4.1 在气体吸附方面的应用

吸附法具有较高的安全性且高效环保, 在污染物处理方面获得了广泛的应用。开发低成本、高效率、选择性强的吸附剂是吸附分离技术的重要研究方向。目前, CMPs在吸附二氧化碳、碘蒸汽等方面已有相关文献报道, CMPs的微孔结构为吸附目标气体提供了充足的空间, 而多样的后修饰方法则可进一步提高其吸附分离性能^[76]。

二氧化碳作为最常见且排放量巨大的温室气体, 其吸收与处理一直是亟待解决的问题。Xie等^[77]合成了一种铝/钴配位CMPs(图3), 其在室温常压下显示了出色的二氧化碳储存性能, 文献显示其吸附能力与MOFs相似。Yuan等^[78]合成的咪唑基CMPs具有较大的比表面积和较多的微孔结构, 对有机染料和二氧化碳具有极高的吸附效率, 应用前景广阔。

Yu等^[79]以不同比例的1,3,6,8-四溴蒽、1,3,6,

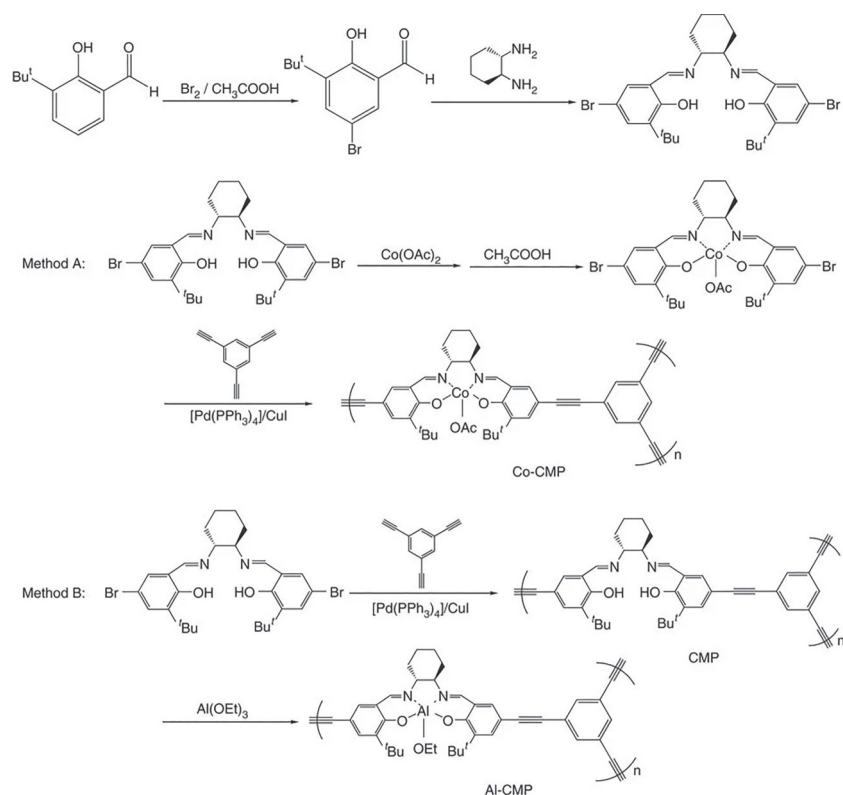


图3 Co-CMP (方法A) 与 Al-CMP (方法B) 的合成^[77].

Figure 3 Synthesis of Co-CMP (Method A) and Al-CMP (Method B)^[77].

8-四溴吡啶和1,4-苯二硼酸共聚单体为原料, 利用 Suzuki-Miyaura 偶联反应, 在固定条件下合成了一系列共聚共轭微孔聚合物 (CP-CMP 1-7), 如图4(a)所示, 合成的CMPs具有热稳定性和在常见溶剂中保持稳定的性能。不同单体比例合成的CP-CMP性能不同, 其比表面积、微孔表面积和微孔体积均存在差异。其中合成的CP-

CMP5具有最大的BET比表面积 ($2241 \text{ m}^2/\text{g}$) 和最强的二氧化碳吸附能力 (4.57 mmol/g), 结果表明, 调节共聚单体的比例是一种有效的改善微孔结构和吸附能力的方式。Chen等^[80]通过钯催化的 Sonogashira-Hagihara 交叉偶联合成了3种共轭微孔聚合物纳米管 (CMPN 1-3), 如图4(b)所示, 3种CMPN均表现出稳定的化学性质, TGA

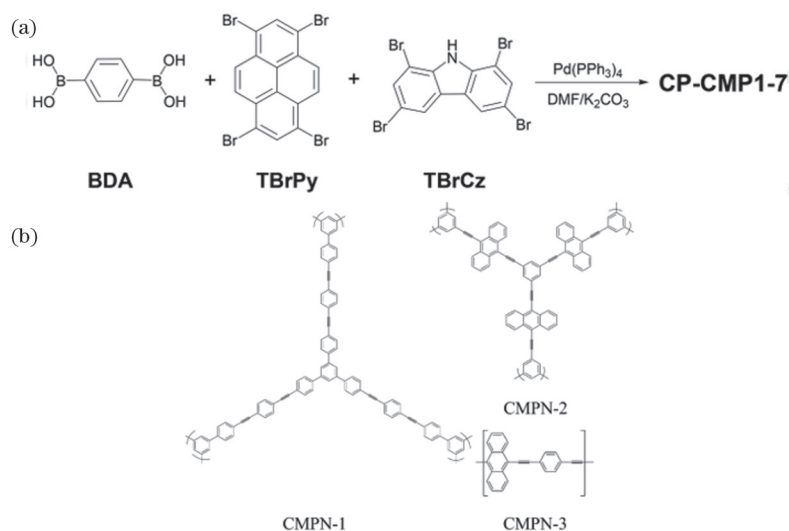


图4 (a) CP-CMP 1-7的合成方法; (b) CMPN 1-3的分子结构^[79,80].

Figure 4 (a) Method for synthesizing CP-CMP 1-7; (b) Molecular structure of CMPN 1-3^[79,80].

显示3个样品分解温度均 $>350\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而CMPN-3的热稳定性最高, 分解温度 $>400\text{ }^{\circ}\text{C}$, 电镜图像确认了存在纳米管形貌, 且管壁上带有蜂窝状孔洞结构, 合成的CMPN对二氧化碳和碘蒸汽都显示出了高效的吸附能力, 并且具有独特的几何形貌、稳定的物理化学性质、优异的孔隙率和加工性能, 可被进一步拓展运用。

复杂气体混合物中的选择性吸附能在吸附污染物的同时净化气体以供后续使用, 是经济高效的吸附分离手段。Qin等^[81]报道了一种利用钨催化的2,5-二溴噻吩-3-羧酸(DTCA)与芳香族乙炔基苯的Sonogashira-Hagihara交叉偶联反应合成CMPs的方法, 具有羧基团的CMPs显示出较高的二氧化碳吸附能力和选择性吸附能力。通过在常见的噻吩基聚合物中引入羧基团, 使其同时具有噻吩类聚合物刚性稳定的特征和羧基团对二氧化碳的选择性吸附能力。

在碘吸附方面, Yao等^[82]报道了一种以

$\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 为基体, 通过Schiff-base反应合成新型 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{@CMPs}$ (编号1-3)的方法, 与原始的CMPs (编号1-3)相比, 其对碘的吸附能力分别提升了1.5、1.1和1.3倍。Zhang等^[83]提出了一种利用CMPs吸附碘的新方法, 通过表面极性与电子密度协同效应, 实现对碘蒸汽强而可逆的捕获。如图5所示, 通过表面极性和电子密度协同作用, 可增强CMPs对碘的亲合力。该CMPs可从溶液中去除碘, 再通过萃取实现碘的回收利用。该实验证实, 可通过优化电子密度和偶极作用以增强主客体相互作用的方式提升CMPs的吸附性能, 这为设计新型吸附剂提供了新思路。Wang等^[84]通过偶联缩聚反应合成了2种新型噻吩CMPs—BTCMP-1和BTCMP-2。这2种CMPs具有优异的物理化学稳定性和极佳的二氧化碳吸附能力(50 bar和318 K时分别为6.48和2.89 g/g), 该噻吩CMPs也可用于对碘的吸附, 含噻吩基的CMPs具有吸附碘和二氧化碳的潜力。

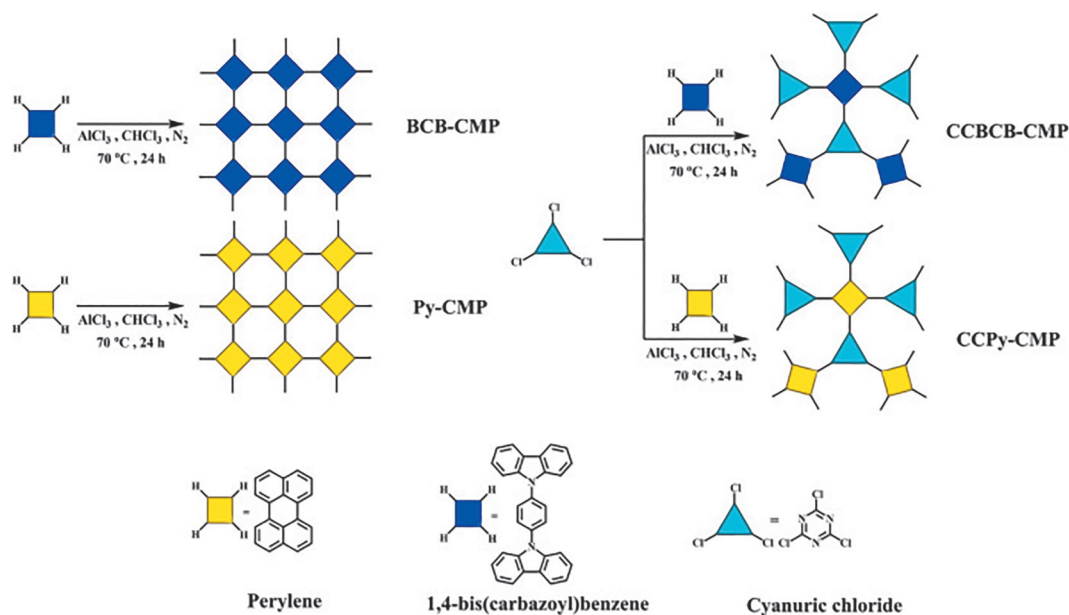


图5 CMPs合成路线示意图^[84]。

Figure 5 Schematic illustrations of the synthesis routes of CMPs^[84].

Sigen等^[85]报道了一种金属卟啉CMPs用于碘的吸附, 报道的NiP-CMPs (图6(a))是基于Yamamoto偶联反应, 将5,10,15,20-四(4-溴苯基)-卟啉连接而得到的。合成的NiP-CMP具有极高的BET比表面积, 对碘蒸汽的捕获能力达到202%, 同时能捕获溶液中的碘分子。此外, NiP-CMPs具有良好的恢复性能, 将吸附完成的

NiP-CMP放入乙醇溶液中, 其吸附的碘分子可被释放, 从而实现对材料的回收。Liao等^[86]以六(4-溴苯基)苯和芳基二胺作为单体, 利用Buchwald-Hartwig偶联反应合成了一系列CMPs (图6(b)), 由于合成的CMPs含有含氮给电子体(—NH—或—NH₂), 在孔体积较低的情况下仍具有较高的碘吸附能力, 最高吸附容量达到

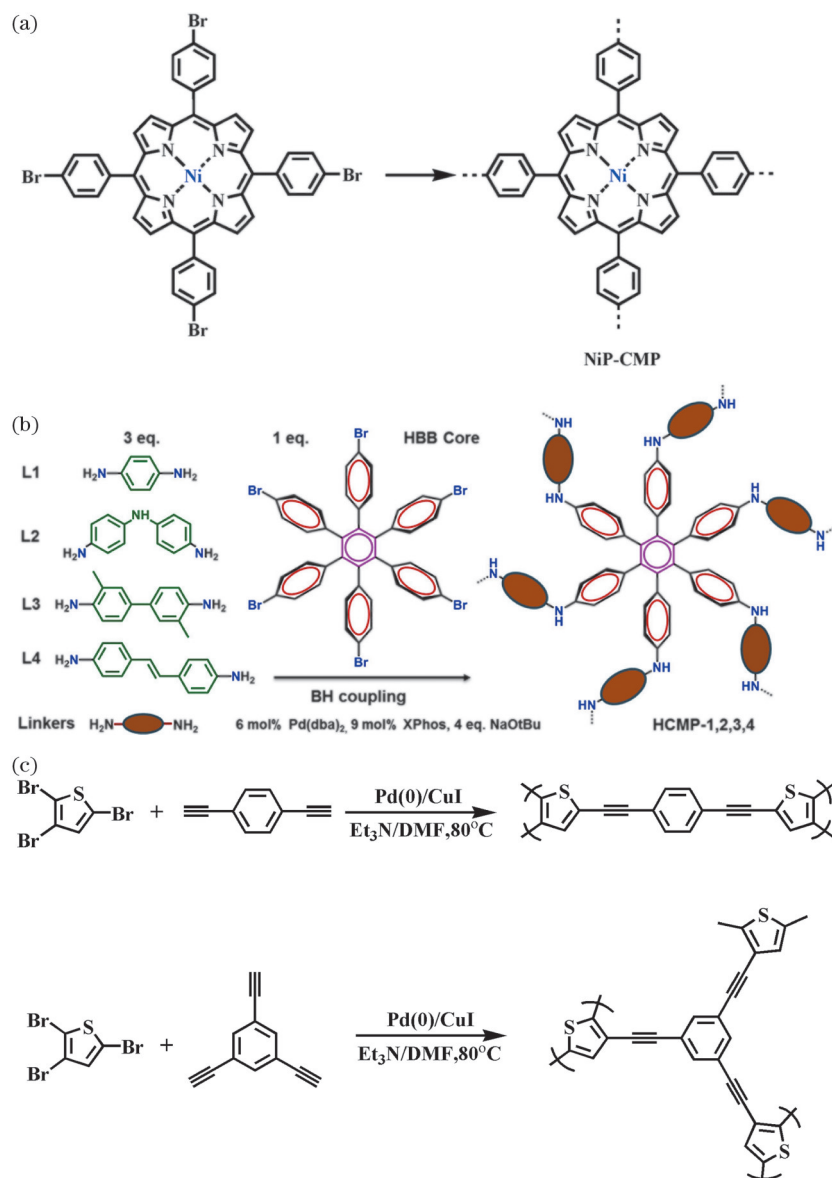


图6 (a) NiP-CMP的合成路线; (b) HCMPs微孔吸附剂的合成路线; (c) SCMP-1和SCMP-2的合成方法^[85-87].

Figure 6 (a) Synthetic route towards NiP-CMP; (b) Synthetic route to HCMPs microporous adsorbents; (c) Synthesis of SCMP-1 and SCMP-2^[85-87].

336%。后续研究证实，其中的含氮给电子体能与碘分子产生较强的相互作用，从而使CMPs在孔体积较低的情况下仍保持较高的吸附能力。

引入硫原子作为富电子载体增强吸附剂与碘的结合能力，同样是吸附碘分子的重要策略。Qian等^[87]合成了一系列噻吩基的CMPs (SCMP 1-2) (图6(c))，它是通过乙炔基苯和溴噻吩单体在钯催化下的Sonogashira-Hagihara偶联反应而得到的，合成的2个样品在SEM视野下均为大小不均一的小球，SCMP-1与SCMP-2具有大比表面积，SCMP-2比表面积最大达到855 m²/g，最高获得了222%的吸收率，为合成含硫原子的碘

元素吸附剂提供了借鉴。

针对二氧化碳和碘蒸汽的吸附已有大量文献报道，本综述将报道的CMPs合成方法、吸附能力总结在表1中。通过不同偶联反应制得的CMPs均有自身独特的优势和其他性能，在复杂使用条件下具有不同的使用效果和良好的适应性。

4.2 在水体污染物吸附方面的应用

随着生产生活方式的多样化，实现高效的水资源循环利用至关重要。水中污染物来源有重金属离子、染料分子、抗生素等^[88,89]，严重影响水质并危害人类健康。CMPs具有大比表面

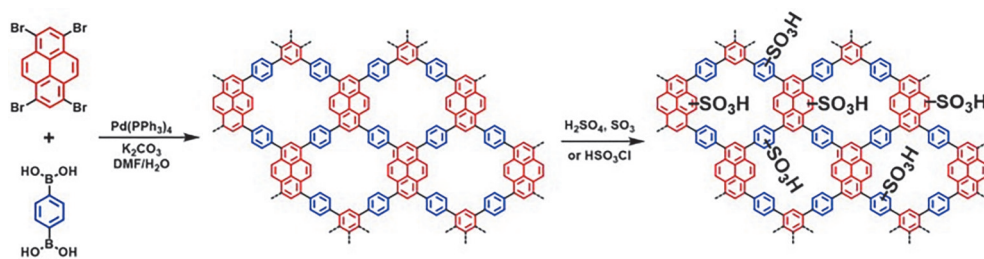
表1 先前报道的CMPs在二氧化碳和碘吸附方面的汇总.**Table 1** Summary of previous reported CMPs in CO₂ and I₂ adsorption.

吸附物	结构单体	合成方法	BET比表面积	吸附能力	其他特性	来源
二氧化碳	铝/钴配位手性吡咯烷、1,3,5-三乙炔基苯	Sonogashira-Hagihara 偶联	铜配位:798 m ² /g 钴配位:965 m ² /g	铜配位:76.5 mg/g 钴配位:79.3 mg/g	具有环氧丙烷(PO)转化为碳酸丙烯酯(PC)的催化活性	[77]
	3,3',6,6'-四溴-N,N'-联吡啶	Suzuki-Miyaura 偶联、Yamamoto 偶联等	最高达到1085 m ² /g	最高达到47.6 cm ³ /g	对染料分子有较好的吸附能力	[78]
	1,4-苯二硼酸与1,3,6,8-四溴蒽和1,3,6,8-四溴吡啶	Suzuki-Miyaura 偶联	最高可达2241 m ² /g	最高达到4.57 mmol/g	可实现对氢气的有效吸附	[79]
	1,3,5-三(4-溴苯基)苯与1,4-二乙炔基苯	Sonogashira-Hagihara 偶联	最高可达1368 m ² /g	最高达到73.4 mg/g	同时可实现对碘元素的吸附	[80]
	2,5-二溴噻吩-3-羧酸和芳香族乙炔苯	Sonogashira-Hagihara 偶联	最高可达911 m ² /g	最高达到94 mg/g	在混合气体中对二氧化碳可进行选择性吸附	[81]
碘	θ -Al ₂ O ₃ , 各种苯胺和芳香醛	Schiff 反应	最高可达744 m ² /g	最高达到424%	可实现多次循环吸附	[82]
	三嗪、吡啶和茈萘类化合物	Friedel-Crafts 反应	最高可达632.8 m ² /g	11.56 %/(m ² /g) (每单位BET比表面积)	提供一种简单的方法实现协同效应,增强碘吸附	[83]
	5,10,15,20-四(4-溴苯基)-卟啉	Yamamoto 偶联	最高可达2600 m ² /g	最高达到326 mg/g	可实现碘蒸汽的可逆吸附	[85]
碘	六(4-溴苯基)苯和芳基二胺	Buchwald-Hartwig 偶联	最高可达430 m ² /g	最高可达3.16 g/g	可实现碘释放和二氧化碳的捕获	[86]
	乙炔基苯和溴噻吩	Sonogashira-Hagihara 偶联	最高达到855 m ² /g	最高达到184 mg/g	吸收值可与MOFs和COFs相当	[87]

积、良好的物理和化学稳定性以及结构可调节等优点,是废水处理和资源回收利用领域的理想吸附剂。

王顺^[50]和Zhao等^[88]合成了含有苯和茈萘的CMPs,进一步对其磺酸化处理得到CPTP,提升了CPTP在水相中的分散性。结果显示,合成

的阴离子型CPTP的BET比表面积达到391.3 m²/g,对阳离子染料的吸附性能良好,阳离子染料与CMPs之间的静电相互作用以及CMPs的多孔特性使其具有优异的吸附性能,如图7所示。磺酸化处理为设计具有其他性能的CMPs并对其进行修饰提供了新的思路。

**图7** 磺化聚噻吩并[3,4-c]吡咯-4,6-二酮(PTP)的合成路线^[88].**Figure 7** The synthetic route of sulfonated-PTP^[88].

Wang等^[90]以4,7-二溴苯并[c][1,2,5]噻二唑和炔基单体为构建单元,通过Sonogashira-Hagihara交叉偶联反应合成了2种含有双杂原子的CMPs (CMPSNs),能有效去除水中的抗生素。该团队以四环素为模型抗生素,研究了CMPSNs对四环素的吸附性能,CMPSN-1和CMPSN-2的BET比表面积分别为105 m²/g和56 m²/g。CMPSNs中的芳香族网络增强了CMPSN与四环素之间的相互作用,CMPSN-2最大吸附量达到43.89 mg/g,后续吸附-解析循环

实验表明样品具有良好的重复性能。

Liu等^[91]通过后修饰手段合成了一种基于咪啉的离子共轭微孔聚合物(图8),其可对离子染料进行快速吸附分离。通过1,3,5-三乙炔苯与2,5-二溴咪啉交叉偶联反应合成了含CMP-PM的咪啉,利用阳离子修饰进一步制备了CMP-PM-ME。结果显示,阳离子修饰后的CMP-PM-ME对阴离子染料的吸附性能高于未阳离子化的CMP-PM,其对刚果红的最大吸附量达到了400 mg/g,可实现阴离子染料快速和有效分离。

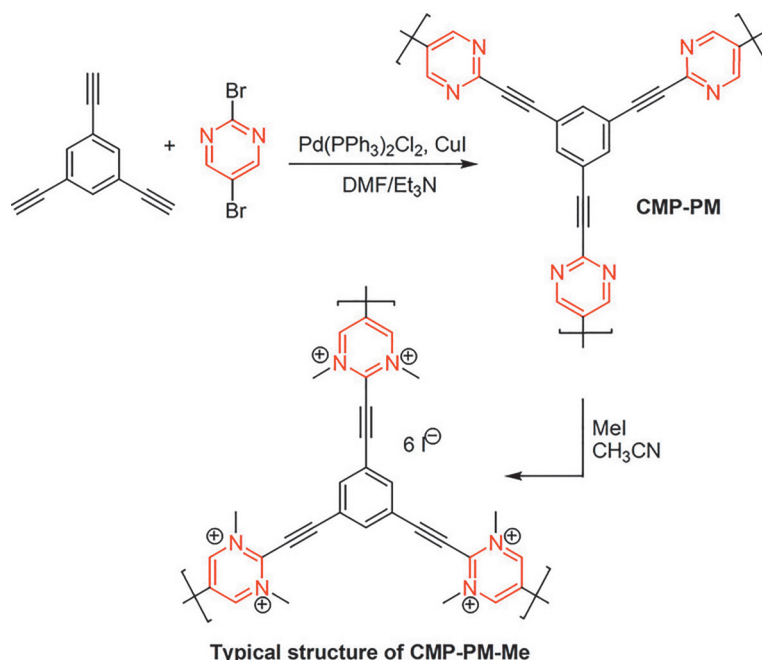


图8 离子共轭微孔聚合物(ICMPs)的合成路线^[91]。

Figure 8 The synthesis route of ICMPs^[91].

Yang等^[92]将氟原子引入CMPs中,显示出较好的吸附效果,如图9所示,全氟共轭微孔聚合物PFCMP-0的比表面积达到901 m²/g,对Pb(II)和As(V)具有较强的吸附能力,PFCMP-0的吸附性能来源于孔隙以及PFCMP-0中氟原子与金属阳离子之间的相互作用。后续研究显示,加入2 mol/L HCl搅拌可实现解析,使CMPs用于重新吸附,多次循环后仍具有良好的吸附容量。

Yang等^[93]提出了从海水中高效提取铀的策略。他们通过Sonogashira-Hagihara偶联将二溴海因和1,3,5-三乙炔基苯交叉偶联后通过点击化学进行官能化改性,获得了带有正电荷的CMPs (CMP-O、CMP-C和CMP-OC),3种带正电荷的

CMPs对铀具有高效吸附能力,CMP-OC的最大吸附量达到197.6 mg/g。结果显示,由于CMP-OC具有羧基和脲,展现出了对铀更强的亲和能力。Zhang等^[94]提出了一种简单且适应性强的后修饰功能化策略,通过1,3,5-三乙炔基苯聚合得到微孔网络,利用共轭骨架中的二炔单元,将铀酰离子的配体酰胺脲引入网络中,显示出了极高的吸附效率和吸附容量(达到450 mg/g)。DFT理论计算显示,铀和酰胺脲的配位作用提升了吸附能力。

水体污染物种类多样,CMPs刚性稳定的结构使其具有化学稳定性,结合共轭结构单元可实现对染料、抗生素、放射性污染物等的高效吸附,在水污染处理方面有广阔的应用前景。

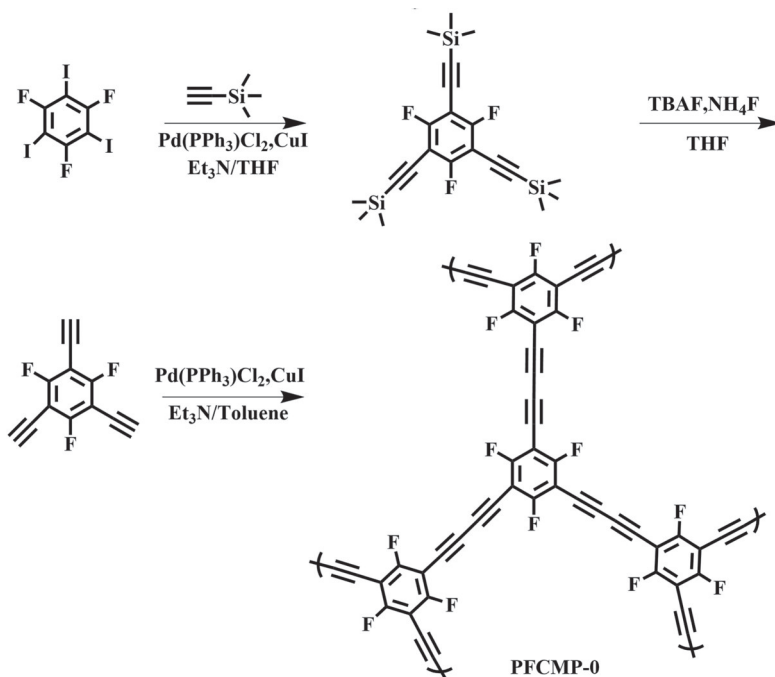


图9 全氟共轭微孔聚合物 (PFCMP-0) 的合成路线^[92].

Figure 9 The synthesis route of PFCMP-0^[92].

5 总结与展望

本文综述了CMPs的发展历史,介绍了合成CMPs的主要方法和后修饰手段,总结了制备功能性CMPs的方法。另外,基于CMPs较大的比表面积和多样化的合成手段,介绍了CMPs在污染物处理中的典型应用,特别是在气体吸附中CMPs对温室气体二氧化碳和碘蒸汽的吸附,以及在水处理中CMPs对重金属离子、染料分子等的吸附分离效果和研究进展。从目前的CMPs研究进展来看,未来进一步发展CMPs新材料的研究工作需更加关注以下几个方面:

(1) 发展更高效和可靠的结构-性能关系预测方法,降低试错成本、提高筛选效率。现行的CMPs开发策略仍是基于以过往经验为主的半经验式开发,充分利用人工智能技术可辅助研究人员快速、有效地筛选合适的CMPs结构,获得更具独特功能和高吸附效率的CMPs合成策略。依靠人工智能对合成过程做逆向分析也可辅助科研人员分析合成过程的产率、难度、效果等,降低时间消耗成本,为更高效地开发新型CMPs提供新思路、新方法。

(2) 发展Sonogashira-Hagihara偶联反应结合点击化学等后修饰手段以得到高污染物吸附性

能的CMPs。Sonogashira-Hagihara偶联反应收率高、易操作且可与多官能团兼容。同时,通过控制单体以调节孔径大小和孔结构性质,结合点击化学等后修饰手段,可实现复杂结构的定制合成,为特定环境下的选择性吸附提供可行方案。

(3) 面向市场的CMPs需实现规模化可控的生产,从小试到中试甚至批量生产,需不断优化合成工艺与反应路径。多步反应虽能制得性能良好、结构丰富的CMPs,但应用于大规模生产会因搅拌不均等多方面问题导致产品均一性不好,因此,发展低成本、流程简单、加工性好的CMPs是大规模连续生产的关键。

(4) 开发绿色生产的CMPs合成策略。目前CMPs合成方法大多基于各类偶联反应,多采用金属催化。金属催化反应下催化剂成本高昂且会留下金属残留物,需发展非金属催化的多孔网络的高效合成方法以实现CMPs的环境友好型生产。

(5) 开发多种吸附方式协同吸附的方式。吸附作用可分为物理吸附、化学吸附,如何在开发新型CMPs时进一步考虑物理吸附和化学吸附的协同作用,达到更优异的吸附效果,也是未来研究需关注的重点。

参考文献

- 1 Bao L, Sun H, Zhu Z, et al. Synthesis and properties of tubular-shape conjugated microporous polymers with high purity[J]. *Materials Letters*, **2016**, 178: 5-9.
- 2 Vilela F, Zhang K, Antonietti M. Conjugated porous polymers for energy applications[J]. *Energy & Environmental Science*, **2012**, 5(7): 7819-7832.
- 3 Gu C, Huang N, Gao J, et al. Controlled synthesis of conjugated microporous polymer films: Versatile platforms for highly sensitive and label-free chemo-and biosensing[J]. *Angewandte-Chemie International Edition*, **2014**, 126(19): 4950-4955.
- 4 Zhao W, Jiao Y, Li J, et al. One-pot synthesis of conjugated microporous polymers loaded with superfine nanopalladium and their micropore-confinement effect on heterogeneously catalytic reduction[J]. *Journal of Catalysis*, **2019**, 378: 42-50.
- 5 Zhou Y B, Zhan Z P. Conjugated microporous polymers for heterogeneous catalysis[J]. *Chemistry-An Asian Journal*, **2018**, 13(1): 9-19.
- 6 Wang J, Wang G, Wang W, et al. Hydrophobic conjugated microporous polymer as a novel adsorbent for removal of volatile organic compounds[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, **2014**, 2(34): 14028-14037.
- 7 Feng N, Wu S, Song D, et al. Conjugated microporous polymer foams with excellent thermal insulation performance in a humid environment[J]. *RSC Advances*, **2021**, 11(23): 13957-13963.
- 8 Chen L, Yang Y, Guo Z, et al. Highly efficient activation of molecular oxygen with nanoporous metalloporphyrin frameworks in heterogeneous systems[J]. *Advanced Materials*, **2011**, 23(28): 3149-3154.
- 9 Jiang J X, Su F, Niu H, et al. Conjugated microporous poly(phenylene butadiynylene)s[J]. *Chemical Communications*, **2008**(4): 486-488.
- 10 Liu X, Xu Y, Jiang D. Conjugated microporous polymers as molecular sensing devices: Microporous architecture enables rapid response and enhances sensitivity in fluorescence-on and fluorescence-off sensing[J]. *Journal of the American Chemical Society*, **2012**, 134(21): 8738-8741.
- 11 Chen L, Yang Y, Guo Z, et al. Highly efficient activation of molecular oxygen with nanoporous metalloporphyrin frameworks in heterogeneous systems[J]. *Advanced Materials*, **2011**, 23(28): 3149-3154.
- 12 Doherty S, Knight J G, Backhouse T, et al. Highly efficient aqueous phase reduction of nitroarenes catalyzed by phosphine-decorated polymer immobilized ionic liquid stabilized PdNPs[J]. *Catalysis Science & Technology*, **2018**, 8(5): 1454-1467.
- 13 Cheng N, Hu Q, Guo Y, et al. Efficient and selective removal of dyes using imidazolium-based supramolecular gels[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **2015**, 7(19): 10258-10265.
- 14 姜姗. 荧光共价有机聚合物的制备、结构调控及性能研究[D]. 长春:吉林大学, **2021**.
- 15 刘培生. 多孔材料引论[M]. 北京:清华大学出版社有限公司, **2004**.
- 16 He H, Li W, Zhong M, et al. Reversible CO₂ capture with porous polymers using the humidity swing[J]. *Energy & Environmental Science*, **2013**, 6(2): 488-493.
- 17 Li Y, Fu Z Y, Su B L. Hierarchically structured porous materials for energy conversion and storage[J]. *Advanced Functional Materials*, **2012**, 22(22): 4634-4667.
- 18 Tang J, Yang M, Yu F, et al. 1-Octadecanol@ hierarchical porous polymer composite as a novel shape-stability phase change material for latent heat thermal energy storage[J]. *Applied Energy*, **2017**, 187: 514-522.
- 19 Chen L, Yang Y, Jiang D. CMPs as scaffolds for constructing porous catalytic frameworks: A built-in heterogeneous catalyst with high activity and selectivity based on nanoporous metalloporphyrin polymers[J]. *Journal of the American Chemical Society*, **2010**, 132(26): 9138-9143.
- 20 Zhao W, Jiao Y, Li J, et al. One-pot synthesis of conjugated microporous polymers loaded with superfine nanopalladium and their micropore-confinement effect on heterogeneously catalytic reduction[J]. *Journal of Catalysis*, **2019**, 378: 42-50.
- 21 王为. 共价有机多孔聚合物——多孔材料领域的新星[J]. *化学学报*, **2015**, 73(6): 461-462.
- 22 Dawson R, Cooper A I, Adams D J. Nanoporous organic polymer networks[J]. *Progress in Polymer Science*, **2012**, 37(4): 530-563.
- 23 Bailey S E, Olin T J, Bricka R M, et al. A review of potentially low-cost sorbents for heavy metals[J]. *Water*

- Research*, **1999**, 33(11): 2469-2479.
- 24 Egeblad K, Christensen C H, Kustova M, et al. Templating mesoporous zeolites[J]. *Chemistry of Materials*, **2007**, 20(3): 946-960.
- 25 Khan N A, Hasan Z, Jhung S H. Adsorptive removal of hazardous materials using metal-organic frameworks (MOFs): A review[J]. *Journal of Hazardous Materials*, **2013**, 244: 444-456.
- 26 Kadota K, Duong N T, Nishiyama Y, et al. Synthesis of porous coordination polymers using carbon dioxide as a direct source[J]. *Chemical Communications*, **2019**, 55(63): 9283-9286.
- 27 Ben T, Ren H, Ma S, et al. Targeted synthesis of a porous aromatic framework with high stability and exceptionally high surface area[J]. *Angewandte-Chemie International Edition*, **2009**, 48(50): 9457-9468.
- 28 Ding S Y, Wang W. Covalent organic frameworks (COFs): From design to applications[J]. *Chemical Society Reviews*, **2013**, 42(2): 548-568.
- 29 Holst J R, Trewin A, Cooper A I. Porous organic molecule[J]. *Nature Chemistry*, **2010**, 2(11): 915.
- 30 Jin Y, Zhu Y, Zhang W. Development of organic porous materials through Schiff-base chemistry[J]. *CrystEngComm*, **2013**, 15(8): 1484-1499.
- 31 Thomas A, Kuhn P, Weber J, et al. Porous polymers: Enabling solutions for energy applications[J]. *Macromolecular Rapid Communications*, **2009**, 30(4/5): 221-236.
- 32 Wu D, Xu F, Sun B, et al. Design and preparation of porous polymers[J]. *Chemical Reviews*, **2012**, 112(7): 3959-4015.
- 33 Bennett T D, Coudert F, James S L, et al. The changing state of porous materials[J]. *Nature Materials*, **2021**, 20(9): 1179-1187.
- 34 程中桦. 含氮多孔有机聚合物的制备及其吸附与催化性能研究[D]. 上海: 东华大学, **2022**.
- 35 Pandey P, Katsoulidis A P, Eryazici I, et al. Imine-linked microporous polymer organic frameworks [J]. *Chemistry of Materials*, **2010**, 22(17): 4974-4979.
- 36 Liu Q, Tang Z, Wu M, et al. Design, preparation and application of conjugated microporous polymers [J]. *Polymer International*, **2014**, 63(3): 381-392.
- 37 Yu S, Mahmood J, Noh H J, et al. Direct synthesis of a covalent triazinebased framework from aromatic amides [J]. *Angewandte-Chemie International Edition*, **2018**, 57(28): 8438-8442.
- 38 孟宪宇. 噻唑[5,4-d]噻唑多孔有机聚合物的设计合成及二氧化碳环加成催化研究[D]. 长春: 吉林大学, **2022**.
- 39 Yang D, Tao Y, Ding X, et al. Porous organic polymers for electrocatalysis [J]. *Chemical Society Reviews*, **2022**, 51(2): 761-791.
- 40 Tan L, Tan B. Hypercrosslinked porous polymer materials: Design, synthesis, and applications[J]. *Chemical Society Reviews*, **2017**, 46(11): 3322-3356.
- 41 Zhang T, Xing G, Chen W, et al. Porous organic polymers: A promising platform for efficient photocatalysis[J]. *Materials Chemistry Frontiers*, **2020**, 4(2): 332-353.
- 42 Xu Y, Jin S, Xu H, et al. Conjugated microporous polymers: design, synthesis and application[J]. *Chemical Society Reviews*, **2013**(42): 8012-8031.
- 43 Jiang J, Su F, Trewin A, et al. Conjugated microporous poly(aryleneethynylene) networks[J]. *Angewandte Chemie-International Edition*, **2007**, 46(45): 8574-8578.
- 44 Weber J, Thomas A. Toward stable interfaces in conjugated polymers: Microporous poly(p-phenylene) and poly(phenyleneethynylene) based on a spirobifluorene building block[J]. *Journal of the American Chemical Society*, **2008**, 130(20): 6334-6335.
- 45 Jiang J, Wang C, Laybourn A, et al. Metal-organic conjugated microporous polymers[J]. *Angewandte-Chemie-International Edition*, **2011**, 50(5): 1072-1075.
- 46 Sprick R S, Jiang J X, Bonillo B, et al. Tunable organic photocatalysts for visible-light-driven hydrogen evolution [J]. *Journal of the American Chemical Society*, **2015**, 137(9): 3265-3270.
- 47 Liang B, Wang H, Shi X, et al. Microporous membranes comprising conjugated polymers with rigid backbones enable ultrafast organic-solvent nanofiltration[J]. *Nature Chemistry*, **2018**, 10(9): 961-967.
- 48 Cui L, Yu S, Gao W, et al. Tetraphenylthene-based conjugated microporous polymer for aggregation-induced electrochemiluminescence[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **2020**, 12(7): 7966-7973.

- 49 Zhong L, Fang Z, Shu C, et al. Redox donor-acceptor conjugated microporous polymers as ultralong-lived organic anodes for rechargeable air batteries[J]. *Angewandte Chemie-International Edition*, **2021**, 60(18):10164-10171.
- 50 王顺. 含氮共轭微孔聚合物的合成与性能研究[D]. 长春:吉林大学, **2021**.
- 51 Lee J M, Cooper A I. Advances in conjugated microporous polymers[J]. *Chemical Reviews*, **2020**, 120(4): 2171-2214.
- 52 Liu Q, Tang Z, Wu M, et al. Design, preparation and application of conjugated microporous polymers[J]. *Polymer International*, **2014**, 63(3): 381-392.
- 53 Doucet H, Hierso J C. Palladium-based catalytic systems for the synthesis of conjugated enynes by sonogashira reactions and related alkynylations[J]. *Angewandte-Chemie International Edition*, **2007**, 46(6): 834-871.
- 54 Dawson R, Laybourn A, Khimyak Y Z, et al. High surface area conjugated microporous polymers: the importance of reaction solvent choice[J]. *Macromolecules*, **2010**, 43(20): 8524-8530.
- 55 Thorand S, Krause N. Improved procedures for the palladium-catalyzed coupling of terminal alkynes with aryl bromides (sonogashira coupling) [J]. *Journal of Organic Chemistry*, **1998**, 63(23): 8551-8553.
- 56 Sun L, Liang Z, Yu J, et al. Luminescent microporous organic polymers containing the 1,3,5-tri(4-ethenylphenyl) benzene unit constructed by heck coupling reaction[J]. *Polymer Chemistry*, **2013**, 4(6): 1932-1938.
- 57 Sun L, Zou Y, Liang Z, et al. A one-pot synthetic strategy via tandem suzuki-heck reactions for the construction of luminescent microporous organic polymers[J]. *Polymer Chemistry*, **2014**, 5(2): 471-478.
- 58 Schmidt J, Werner M, Thomas A. Conjugated microporous polymer networks via yamamoto polymerization[J]. *Macromolecules*, **2009**, 42(13): 4426-4429.
- 59 Ding S Y, Wang W. Covalent organic frameworks (COFs): From design to applications[J]. *Chemical Society Reviews*, **2013**, 42(2): 548-568.
- 60 Kou Y, Xu Y, Guo Z, et al. Supercapacitive energy storage and electric power supply using an aza-fused π -conjugated microporous framework[J]. *Angewandte Chemie-International Edition*, **2011**, 50(37): 8753-8757.
- 61 Lu G, Yang H, Zhu Y, et al. Synthesis of a conjugated porous Co(II) porphyrinylene-ethynylene framework through alkyne metathesis and its catalytic activity study. [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, **2015**, 3: 4954-4959.
- 62 Rabbani M G, Sekizkardes A K, El-Kadri O M, et al. Pyrene-directed growth of nanoporous benzimidazole-linked nanofibers and their application to selective CO₂ capture and separation. [J]. *Journal of Materials Chemistry*, **2012**, 22: 25409-25417.
- 63 Yuan S, Dorney B, White D, et al. Microporous polyphenylenes with tunable pore size for hydrogen storage[J]. *Chemical Communications*, **2010**, 46(25): 4547-4549.
- 64 Gu C, Chen Y, Zhang Z, et al. Electrochemical route to fabricate film-like conjugated microporous polymers and application for organic electronics. [J]. *Advanced Materials*, **2013**, 25: 3443-3448.
- 65 Liao Y, Wang H, Zhu M, et al. Efficient supercapacitor energy storage using conjugated microporous polymer networks synthesized from buchwald-hartwig coupling. [J]. *Advanced Materials*, **2018**, 30: 1705710.
- 66 Ding X, Han B. Metallophthalocyanine-based conjugated microporous polymers as highly efficient photosensitizers for singlet oxygen generation[J]. *Angewandte Chemie-International Edition*, **2015**, 54(22): 6536-6539.
- 67 Li Y, Tao X, Wei J, et al. Metal Phthalocyanine-porphyrin-based conjugated microporous polymer-derived bifunctional electrocatalysts for Zn-air batteries[J]. *Chemistry-An Asian Journal*, **2020**, 15(13): 1970-1975.
- 68 Kiskan B, Weber J. Versatile postmodification of conjugated microporous polymers using thiol-yne chemistry[J]. *ACS Macro Letters*, **2012**, 1(1): 37-40.
- 69 Urakami H, Zhang K, Vilela F. Modification of conjugated microporous poly-benzothiadiazole for photosensitized singlet oxygen generation in water. *Chemical Communications* **2013**, 49(23): 2353-2355.
- 70 Zhou W, Yang L, Zhou F, et al. Salen-based conjugated microporous polymers for efficient oxygen evolution reaction[J]. *Chemistry-A European Journal*, **2020**, 26(34): 7720-7726.
- 71 Wisser F M, Duguet M, Perrinet Q, et al. Molecular porous photosystems tailored for long-term photocatalytic CO₂ reduction[J]. *Angewandte Chemie-International Edition*, **2020**, 59(13): 5116-5122.
- 72 Monerde C, Navarro R, Iglesias M, et al. Fluorine-phenanthroimidazole porous organic polymer: Efficient

- microwave synthesis and photocatalytic activity[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **2019**, 11(3): 3459-3465.
- 73 Zeng W, Zhang Y, Zhao X, et al. One-pot synthesis of conjugated microporous polymers based on extended molecular graphenes for hydrogen storage[J]. *Polymer*, **2019**, 174: 96-100.
- 74 Dai D, Yang J, Zou Y C, et al. Macrocyclic arenes-based conjugated macrocycle polymers for highly selective CO₂ capture and iodine adsorption[J]. *Angewandte Chemie-International Edition*, **2021**, 133(16): 9049-9057.
- 75 Sheng X, Shi H, Yang L, et al. Rationally designed conjugated microporous polymers for contaminants adsorption [J]. *Science of the Total Environment*, **2021**, 750: 141683.
- 76 Dawson R, Adams D J, Cooper A I. Chemical tuning of CO₂ sorption in robust nanoporous organic polymers[J]. *Chemical Science*, **2011**, 2(6): 1173-1177.
- 77 Xie Y, Wang T T, Liu X H, et al. Capture and conversion of CO₂ at ambient conditions by a conjugated microporous polymer[J]. *Nature Communications*, **2013**, 4(1): 1-7.
- 78 Yuan Y, Huang H, Chen L, et al. N, N'-bicarbazole: A versatile building block toward the construction of conjugated porous polymers for CO₂ capture and dyes adsorption[J]. *Macromolecules*, **2017**, 50(13): 4993-5003.
- 79 Yu M , Wang X , Yang X , et al. Conjugated microporous copolymer networks with enhanced gas adsorption[J]. *Polymer Chemistry*, **2015**, 6(17): 3217-3223.
- 80 Chen Y, Sun H, Yang R, et al. Synthesis of conjugated microporous polymer nanotubes with large surface areas as absorbents for iodine and CO₂ uptake[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, **2015**, 3(1):87-91.
- 81 Qin L, Xu G J, Yao C, et al. Thiophene-based conjugated microporous polymers: preparation, porosity, exceptional carbon dioxide absorption and selectivity[J]. *Polymer Chemistry*, **2016**, 7(28): 4599-4602.
- 82 Yao C, Yu T, Xu Y. Synthesis of conjugated microporous polymers based on θ -Al₂O₃ substrate for enhanced iodine capture[J]. *Materials Letters*, **2020**, 280: 128588.
- 83 Zhang Y, Yi D, Tu P, et al. Boosting radioactive iodine capture of microporous polymers through strengthened host-guest interaction[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, **2021**, 321: 111148.
- 84 Wang L, Xie W, Xu G, et al. Synthesis of thiophene-based conjugated microporous polymers for high iodine and carbon dioxide capture[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, **2022**, 33(2): 584-590.
- 85 Sigen A, Zhang Y, Li Z, et al. Highly efficient and reversible iodine capture using a metalloporphyrin-based conjugated microporous polymer[J]. *Chemical Communications*, **2014**, 50(62): 8495-8498.
- 86 Liao Y, Weber J, Mills B M, et al. Highly efficient and reversible iodine capture in hexaphenylbenzene-based conjugated microporous polymers[J]. *Macromolecules*, **2016**, 49(17): 6322-6333.
- 87 Qian X, Zhu Z, Sun H, et al. Capture and reversible storage of volatile iodine by novel conjugated microporous polymers containing thiophene units[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **2016**, 8(32): 21063-21069.
- 88 Zhao W, Jiao Y, Gao R, et al. Sulfonate-grafted conjugated microporous polymers for fast removal of cationic dyes from water[J]. *Chemical Engineering Journal*, **2020**, 391: 123591.
- 89 Mu P, Sun H, Zhu Z, et al. Synthesis and properties of nitrogen-containing conjugated microporous polymers[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, **2016**, 301(4): 451-456.
- 90 Wang F, Ren F, Wu P, et al. Hierarchical porous spherical-shaped conjugated microporous polymers for the efficient removal of antibiotics from water[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, **2017**, 5(22): 11348-11356.
- 91 Liu Y, Cui Y, Zhang C, et al. Post-cationic modification of a pyrimidine-based conjugated microporous polymer for enhancing the removal performance of anionic dyes in water[J]. *Chemistry-A European Journal*, **2018**, 24(29): 7480-7488.
- 92 Yang R X, Wang T T, Deng W Q. Extraordinary capability for water treatment achieved by a perfluorous conjugated microporous polymer[J]. *Scientific Reports*, **2015**, 5: 10155.
- 93 Yang S, Cao Y, Wang T, et al. Positively charged conjugated microporous polymers with antibiofouling activity for ultrafast and highly selective uranium extraction from seawater[J]. *Environmental Research*, **2020**, 183:109214.
- 94 Zhang L, Pu N, Yu B, et al. Skeleton engineering of homocoupled conjugated microporous polymers for highly efficient uranium capture via synergistic coordination[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **2020**, 12(3): 3688-3696.

Synthesis, Preparation, and Application of Conjugated Microporous Polymers in Contaminant Adsorption

LIU Zhi-ming, SUN Ping-chuan*

(Key Laboratory of Function Polymer Materials, Ministry of Education, Institute of Polymer Chemistry, College of Chemistry, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract Adsorption is the most common method used for contaminant management and is widely applied in the management of air and water pollution. As a typical representative of porous organic polymers, conjugated microporous polymers (CMPs) are formed by bonding of aromatic groups with conjugation effect. CMPs not only exhibit excellent pore properties with extended conjugation system, but also have high stability and diversified synthesizing strategies, which have been widely used in energy conversion and pollution adsorption. This paper reviews the synthesis and preparation methods of CMPs, and introduces the application of CMPs in pollutant treatment, discusses the progress of adsorption studies of gaseous pollutants on carbon dioxide and iodine vapors as well as the progress of studies on pollutants such as heavy metals in the water body, and finally summarizes and proposes the direction of the subsequent research in this field.

Keywords Conjugated microporous polymers, Adsorption performance, Pollutant disposal, Functional group modification, Structure-performance relationship

* **Corresponding author:** SUN Ping-chuan, E-mail: spelbh@nankai.edu.cn.