

多孔有机聚合物的制备及其 CO₂ 分离膜的研究进展

牛宏霞¹, 张新儒^{1,2*}, 王永洪^{1,2}

(1. 太原理工大学 化学与化工学院, 太原 030024;
2. 气体能源高效清洁利用山西省重点实验室, 太原 030024)

摘要: 全球气候变化背景下, 高效碳捕集技术成为应对气候危机的关键, 其中膜分离技术因运行成本低和可模块化操作的特性展现出商业化潜力。多孔有机聚合物(POPs)凭借可调控的微/介孔网络、高比表面积、良好稳定性及结构可设计性, 在气体分离领域备受关注。本文系统综述了多孔有机聚合物(包括超交联聚合物、共轭微孔聚合物、共价有机框架等)的合成策略与结构特性, 重点探讨了其在 CO₂ 分离膜中的最新研究进展。未来研究需聚焦于精准孔道设计、界面相容性调控及规模化制备技术, 以推动 POPs 在工业碳捕集中的实际应用。

关键词: 膜; 气体分离; 多孔有机聚合物; 传递过程

中图分类号: TQ028.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-8924(2025)06-0184-11

doi: 10.16159/j.cnki.issn1007-8924.2025.06.020

世界经济的快速发展推动了能源消耗量的大幅增长, 而传统化石燃料(如天然气和煤炭)自工业化以来一直是主要的能源来源, 其使用量也因此持续增加。然而, 能源生产中大量使用这些化石燃料会对环境造成不利影响, 其中温室气体排放问题尤为突出^[1]。作为最主要的温室气体之一, 二氧化碳的持续累积已成为全球气候变化的核心驱动因素^[2]。据预测, 到 2030~2052 年间, 全球气温相较工业化前水平可能上升超过 1.5 °C, 这种变化将对人类社会和生态系统构成严重威胁^[3]。在此背景下, 发展高效碳捕集技术已成为应对气候危机的战略选择。

当前 CO₂ 分离技术主要包括吸收法、吸附法、低温蒸馏法与膜分离法等。吸收法是利用液体吸收剂(如胺类溶液)吸收烟道气中的 CO₂, 再通过加热或减压解吸实现吸收剂再生^[4]。其优势在于技术成

熟度和处理效率高, 但该方法存在高能耗、强腐蚀性等缺点。吸附法是一种利用固体吸附剂表面对特定物质的吸附作用, 实现物质分离、纯化或富集的过程^[5]。该方法优势包括选择性和操作条件温和, 但因再生能耗高和成本昂贵, 从而制约了其大规模应用。低温蒸馏法基于 CO₂ 与其他气体沸点差异, 通过低温冷凝使 CO₂ 相变实现分离^[6]。该方法适用于高压高浓度 CO₂ 气体分离, 且工艺原理直观简单, 但存在能耗高、仅适用于高浓度场合、经济性差等缺点。膜分离法以膜两侧 CO₂ 气体的分压差异(即浓度梯度)为驱动力, CO₂ 优先快速通过分离膜实现与其他气体分离。相较传统技术, 膜分离技术凭借其低能耗特性以及环境友好特征, 展现出显著的商业化应用潜力, 但仍面临高性能膜材料成本、长期稳定性等挑战^[7-9]。

收稿日期: 2025-05-18; 修改稿收到日期: 2025-05-30

基金项目: 山西省基础研究计划资助项目(202403021211017, 20210302123196); 佛山市促进高校科技成果服务产业发展扶持项目(2024XCL03, 2024XCL04)

第一作者简介: 牛宏霞(1998-), 女, 山西吕梁人, 硕士研究生, 研究方向为膜分离技术。* 通讯作者, E-mail: zhangxinru@tyut.edu.cn

引用本文: 牛宏霞, 张新儒, 王永洪. 多孔有机聚合物的制备及其 CO₂ 分离膜的研究进展[J]. 膜科学与技术, 2025, 45(6): 184-194.

Citation: Niu H X, Zhang X R, Wang Y H. Advances in the preparation of porous organic polymers and their CO₂ separation membranes[J]. Membrane Science and Technology(Chinese), 2025, 45(6): 184-194.

多孔有机聚合物(POPs)是具有微孔或介孔结构的有机多孔材料,其结构可通过分子设计精准调控。由于轻质元素占比高,POPs的骨架密度显著低于传统无机多孔材料(如沸石)。通过模块化分子构筑单元(如含芳香族、杂环以及炔烃等反应单体)与精准有机反应(如 Yamamoto 偶联^[10]、Suzuki 偶联^[11]、Sonogashira-Hagihara 交叉偶联^[12]、Schiff 碱缩合^[13]以及 Friedel-Crafts 烷基化反应^[14]等)的结合,能够合成具有特定功能的 POPs 材料,使其兼具大孔隙、高比表面积和优异的化学稳定性等特性。其中,大孔隙结构为物质传输提供通道,有效提升扩散效率;高比表面积为吸附过程创造更大的接触面积;而良好的稳定性则确保材料在不同环境下维持结构和性能稳定。基于这些优势,POPs 在气体分离领域表现尤为突出,其可调控的孔道尺寸和表面化学性质能够实现对不同气体分子的高效筛分。目前在膜分离领域中应用的多孔有机聚合物包括超交联聚合物(HCPs)、共轭微孔聚合物(CMPs)、自具微孔聚合物(PIMs)、多孔芳香框架(PAFs)、共价有机框架(COFs)和共价三嗪框架(CTFs)等。

本文围绕多孔有机聚合物(POPs)在气体分离膜领域的研究,系统梳理了多孔有机聚合物的制备策略与结构特性。在此基础上,介绍了晶态与非晶态 POPs 在 CO₂ 分离膜中的研究进展,最后总结其在膜分离中应用的研究现状和未来的发展方向。

1 多孔有机聚合物的合成策略与结构特性

多孔有机聚合物材料因其可调控的孔道结构、高比表面积及功能化潜力成为研究热点。根据不同的分子设计与合成策略,这类材料形成了各具特色的结构体系:例如,超交联聚合物通过 Friedel-Crafts 烷基化反应构建三维多孔网络;共轭微孔聚合物则依靠扩展 π 共轭体系来赋予材料稳定孔道;自具微孔聚合物的固有微孔结构源于刚性扭曲分子链难以紧密堆积;多孔芳香框架借助 C-C 键连接形成超高比表面积骨架;共价有机框架利用动态共价键实现了晶型结构的精准调控;共价三嗪框架则以高氮含量的三嗪环骨架在熔融盐体系中实现了高结晶性与稳定性。

1.1 超交联聚合物

超交联聚合物(HCPs)是通过 Friedel-Crafts 烷基化反应将芳香族小分子单元(如苯、甲苯)或线

型芳香族聚合物(如聚苯乙烯)形成三维聚合物网络^[15]。其独特的多孔结构源于反应过程中高度交联的支化结构,这种结构能有效阻止聚合物链段的紧密堆积。HCPs 主要通过三种方法制备:1) 基于聚合物前体的后交联法:该方法是先合成含有高反应活性芳香族的线性聚合物前体(如聚苯乙烯、聚芳醚酮等)。之后,在催化剂和交联剂下,利用 Friedel-Crafts 烷基化反应,使聚合物前体中的官能团之间发生交联反应,从而形成三维的超交联结构。2) 基于小分子单体的一步自缩聚法:该方法是以前苯、甲苯等小分子单体为原料,在 Friedel-Crafts 烷基化反应的驱动下,这些小分子单体能够一步发生自缩聚反应,直接形成超交联聚合物。3) 基于外交联剂的刚性单体编织法:该方法是使刚性的芳香族单体与外交联剂(如二氯甲烷、二甲醇缩甲醛)在 Friedel-Crafts 烷基化反应条件下进行反应。将各个芳香族单体连接起来,形成高度交联的聚合物网络^[16]。需要注意的是,上述所有方法均依赖强酸性催化剂(如 FeCl₃、AlCl₃)驱动 Friedel-Crafts 烷基化反应。此类催化剂通过降低反应活化能,促进交联结构的形成。Liu 等^[17]以无水 AlCl₃ 或 FeCl₃ 为路易斯酸催化剂,采用苯、联苯及 1,3,5-三苯基苯为共缩合刚性芳基,结合交联剂 1,3,5-三(溴甲基)苯和 1,3,5-三(溴甲基)-2,4,6-三甲苯,通过无模板的 Friedel-Crafts 烷基化反应成功构建了一系列多孔超交联聚合物材料。其合成的聚合物孔结构主要以微孔为主,比表面积高达 1 783 m²/g。

1.2 共轭微孔聚合物

共轭微孔聚合物(CMPs)是由刚性芳香族结构单元通过扩展 π 共轭体系构建而成。这种独特的结构设计策略不仅形成了稳定的孔道结构,还赋予了材料永久性微孔特性^[18]。CMPs 的合成主要遵循以下三个设计原则:1) 共轭单体的选择。CMPs 的构筑基础是含有大 π 共轭体系的结构单元,例如,含有苯环、萘环、蒽环等共轭芳烃的单体,这类单体不仅能提供丰富的 π 电子云,还可通过共轭效应构建扩展的刚性骨架。2) 交联官能团的引入。常见的可用于连接的官能团包括卤原子(如溴、氯)、炔基、氨基、醛基等,它们可以通过不同的化学反应,如 Sonogashira-Hagihara 交叉偶联、Yamamoto 偶联、Schiff 碱缩合等,实现单体之间的有效连接。3) 聚合条件的优化。选择合适的聚合反应是合成关键,反应条件需温和可控,能够精准调控网络拓扑结构,

最终获得具有预期结构和性能的聚合物。Ding 等^[19]采用四氨基金属酞菁 $[\text{MPc}(\text{NH}_2)_4]$ 在溶剂热条件(DMAc, 150 °C, 72 h)下与对苯二甲醛通过席夫碱反应,制备了四种亚胺连接的 MPc-CMPs (M=Co, Ni, Cu, Zn)。由于 MPc(NH₂)₄ 中存在不对称的异构体,MPc-CMPs 无法形成规则的堆叠结构,因而呈现无定形态。

1.3 自具微孔聚合物

自具微孔聚合物(PIMs)作为多孔有机聚合物的重要分支,其制备依赖于具有刚性扭曲空间构型的结构单元。这类特殊结构单元因分子链刚性高、空间位阻大,在堆积时难以紧密排列,从而在聚合物内部形成大量固有微孔。其中以螺环结构为典型代表的功能单元在 PIMs 构筑中展现出显著优势,形成的微孔尺寸一般处于超微孔范围(小于 0.7 nm),赋予了 PIMs 优异的气体分离性能和吸附性能。Budd 等^[20]介绍了两种自具微孔聚合物 PIM-1 和 PIM-7, PIM-1 是由单体 5,5',6,6'-四羟基-3,3,3',3'-四甲基-1,1'-螺旋联吡啶和四氟对苯二腈通过双芳香亲核取代合成的,其结构特点在于分子中含有一 CN 基团,该基团的存在显著增强了材料对 CO₂ 的亲合力。与之相比, PIM-7 的分子结构中的芳香族骨架赋予材料显著的优势——极化性,这一特性能够有效增强聚合物与气体分子间的范德华力。Swaidan 等^[21]制备了偕胺肟功能化的 PIM-1 (AO-PIM-1)。AO-PIM-1 中存在的分子间氢键网络产生了刚性微观结构。偕胺肟部分在其中发挥着关键作用,其主要功能是固化聚合物基质。偕胺肟基团中含有大量的电负性和电正性中心,这些中心能够促进分子间氢键的广泛形成,进而使多孔结构向更细的超微孔倾斜。

1.4 多孔芳香框架

多孔芳香框架(PAFs)是由芳香族结构单元(如四苯基甲烷)通过 C-C 键连接而成,形成刚性的三维骨架结构^[22]。这种独特的结构赋予了 PAFs 一系列优异的性能,如超高的比表面积和较强的热化学稳定性。PAFs 合成通常依赖于不可逆的共价偶联反应,典型方法包括 Suzuki 偶联、Yamamoto 偶联等。在此过程中,含苯环的反应性单体通过共价键形成线形、三角形或四面体构型的刚性结构单元^[23],这些反应的选择性直接影响结构单元的几何构型,这些单元作为骨架支撑点和连接节点,其空间排布方式与连接拓扑直接决定了材料的孔隙结构和

三维网络。Ben 等^[24]首次选用四(4-溴苯基)甲烷作为四面体构建单元,通过镍(0)催化的 Yamamoto 型 Ullmann 交叉偶联反应合成 PAF-1。PAF-1 的比表面积高达 5 600 m²/g, PAF-1 出色的热稳定性与超高比表面积的结合,为多孔材料设计提供了新思路。

1.5 共价有机框架

共价有机框架(COFs)是以有机分子(如芳香醛、胺等)作为基本单元,通过动态共价键[如亚胺键(C=N)、碳氮键(C-N)及碳碳双键(C=C)等]有序连接而成的具有晶型的有机多孔材料^[25]。此类强共价键使 COFs 在温和条件下表现出优异的化学稳定性。其中亚胺键连接的 COFs 因合成可控性高而被广泛研究。亚胺键不仅作为刚性骨架的支撑,其极性特性还可调控材料的气体吸附选择性。COFs 的合成需通过动态共价化学实现,以席夫碱反应为例,其酸碱催化条件直接影响亚胺键的形成与断裂速率,该反应速率与结晶动力学的匹配需严格调控(如溶剂、温度、催化剂选择),否则将导致形成无定形产物。Ding 等^[26]采用溶剂热合成方法,以均苯三甲醛与 1,4-苯二胺为单体,在 1,4-二氧六环/乙酸的混合溶剂中反应,成功制备了一种新型 COF 材料(COF-LZU1)。COF-LZU1 具有二维层状堆叠结构,其层间固有配位位点为金属离子锚定提供了结构基础。

1.6 共价三嗪框架

共价三嗪框架(CTFs)是一种以三嗪结构单元(芳香族 C=N 键)为骨架的多孔有机材料,具有高氮含量和优异的物理化学稳定性^[27]。其合成通常是在 400 °C 的熔融 ZnCl₂ 体系中,该环境能够满足结晶性多孔三嗪结构形成的所有必要条件^[28]。反应机理涉及三个核心方面:首先,基于强路易斯酸碱作用,芳香腈单体在熔融盐介质中具有良好溶解性,从而形成均相反应体系;其次, ZnCl₂ 作为高效催化剂促进三聚化反应,在此温度下反应具有足够的可逆性,实现对材料结构的动态调控;最后,所用的芳香族和杂环腈类化合物热分解起始温度(通常 > 400 °C)显著高于反应温度,主要分解途径为 C-H 键断裂及后续脱氢反应,确保反应过程中单体结构的完整性。Kuhn 等^[28]采用芳香族腈类化合物[包括 1,4-二氰基苯(DCB)、4,4'-二氰基联苯(DCBP)、2,6-二氰基甲苯(DCT)等],通过离子热合成策略,在熔融 ZnCl₂ 中引发动态三聚反应,成功制备出高孔隙率的三嗪基共价框架材料(CTF-1)。

2 多孔有机聚合物在CO₂分离膜中的研究进展

在CO₂捕集与分离领域,传统无机多孔材料如沸石,主要通过高度有序的孔隙结构和可调表面化学(如官能团修饰)实现CO₂选择性吸附。但吸附性能通常较低,且生产成本较高。Anbealagan等^[29]将硅烷偶联剂(APTES)改性的沸石(NH₂-RHO)掺入聚砜(PSf)基质制备混合基质膜(MMMs)。含2%(质量分数)NH₂-RHO的MMMs相较于纯PSf膜,其理想CO₂/CH₄选择性显著提高45%。这归因于APTES改性增强了沸石与PSf基质的界面相容性,减少了界面缺陷。活性炭是以微孔物理吸附为主,具有低成本、高比表面积和工业成熟度优势,但对湿度敏感且吸附选择性较低。Gunasakaran等^[30]将活性炭(AC)掺入聚砜(PSf)基质中制备MMMs。在0.2 MPa压力下,MMMs-AC的CO₂渗透速率为4.46 GPU[1 GPU=7.5×10⁻¹⁰ cm³(STP)/(cm²·s·Pa)],CO₂/CH₄选择性仅为1.086。这表明AC的微孔虽提供一定分子筛分效应,但其表面缺陷和易团聚问题严重限制了选择性提升。金属有机框架(MOFs)具有超高比表面积、结构多样性和部分存在可提升选择性的暴露金属位点等优势,但商业化面临合成复杂、成本高、条件苛刻及稳定性挑战。Zhang等^[31]报道了原位合成的双金属Zn/Ni-ZIF-8纳米颗粒,其暴露的双金属位点通过 π 络合机制对CO₂产生不对称吸附,促进了CO₂快速传递。制备的Zn/Ni-ZIF-8聚醚嵌段聚酰胺混合基质膜达到最佳CO₂渗透率[408 Barrer, 1 Barrer=7.5×10⁻¹⁴ cm³(STP)·cm/(cm²·s·Pa)]和CO₂/N₂选择性(51.8)。

相较之下,多孔有机聚合物(POPs)展现出显著优势,包括高孔隙度、结构多样性、合成成本相对较低以及优异的物理化学稳定性。根据骨架结构的有序性差异,POPs主要分为晶态与非晶态两大类。晶态多孔有机聚合物(如共价有机框架和共价三嗪框架)通过精准拓扑设计形成长程有序的规则孔道,具有较窄的孔径分布和精确筛分效应;而非晶态多孔有机聚合物(如共轭微孔聚合物、多孔芳香框架、超交联聚合物和自具微孔聚合物)以无序交联网络为特征,兼具制备工艺简便、孔道结构灵活可调的优势。尽管两者在孔道有序性和孔径分布等物理特

性上差异显著,但均可通过官能团调控和结构优化等手段,在混合基质膜气体分离领域展现出独特潜力。

2.1 晶态多孔有机聚合物材料在分离膜中的应用及性能优化

晶态多孔有机聚合物通过特定有序组装形成高度规整的纳米级孔道。其有序的孔道有利于气体分子快速扩散,同时基于拓扑设计的孔径精准调控可实现分子尺寸筛分效应,从而实现高效气体分离。规则晶态结构和表面官能团的均匀分布可抑制填料在聚合物基质中的团聚,确保填料以单分散或小聚集形式存在,从而维持膜的连续性和传递效率。

共价有机框架(COFs)因其高比表面积,为分子吸附提供了理想空间。通过在合成过程或后合成阶段引入氨基、羧基等官能团,可有效调控对气体分子的亲和性。且COFs规整有序的孔道结构可赋予膜更优异的气体分离性能。二维COFs以层状或纳米片结构为核心,通过超薄化与表面化学修饰协同提升气体分离性能。Guo等^[32]在胺类单体和醛类单体的席夫碱缩合反应过程中,通过控制连接体缺陷,在COF纳米片表面原位构建了高密度氨基官能团。随后,将这些COF纳米片组装成COF膜。该膜中的氨基官能团作为可与CO₂发生可逆反应的活性位点,使得COF膜在加湿条件下表现出优异CO₂渗透速率(300 GPU)和CO₂/N₂的选择性(80)。Zeng等^[33]提出了一种新型聚合物功能化的COF层状膜。通过将聚乙烯亚胺(PEI)聚合物接枝到COF骨架的羧酸基团上,制备了具有高密度羧酸基团的COF纳米片(cCOF),并将其组装成膜。PEI的引入提供了丰富的氨基,显著增强了对CO₂分子的亲和性。同时,PEI的接枝有效填补了纳米片之间的结构缺陷,从而使cCOF膜的最佳CO₂渗透率提高至1 004 GPU。Cao等^[34]通过在COF-LZU1中引入聚乙烯胺(PVAm)基团或片段,制备了结构相似但表面不同的COFs(COF_L、COF_M和COF_P),如图1所示,之后又将改性的COFs与PVAm基质混合制备混合基质膜。COF_P膜在2.0 MPa下的最佳CO₂渗透率高达957 GPU,这归因于尺寸为0.932 nm的富含氨基的通道,促进了CO₂的优先传递。三维COFs则依托立体孔道网络与界面工程优化气体分离性能。Liu等^[35]成功合成了一种COF空心微球,该微球的外表面与内壁均经过聚乙二醇单甲醚(mPEG)进行改性处理。随后将功能化

COF 空心微球负载于 Pebax 聚合物中,成功制备混合基质膜(MMMs)。所制备的 Pebax-PEG200@COF 展现出了优异的性能,其 CO₂/CH₄ 选择性和 CO₂ 渗透性分别达到了 33 和 944 Barrer。该结构优势体现在:其内部空腔可显著降低气体传输阻力,使 CO₂ 渗透性获得突破性提升。同时,PEG 修饰有效增强了 CO₂ 在纳米通道界面处的特

异性吸附。Cheng 等^[36]通过聚乙烯亚胺(PEI)对三维结构的 COF-300 进行功能化修饰,并将其分散至 Pebax 聚合物基质中,制备混合基质膜。COF-300 表面末端的一CHO 和 -NH₂ 基团分别允许 COF-300 和 PEI 链之间形成共价键和氢键。PEI 中丰富的氨基通过在界面处形成氢键来提高聚合物-填料的亲和力。

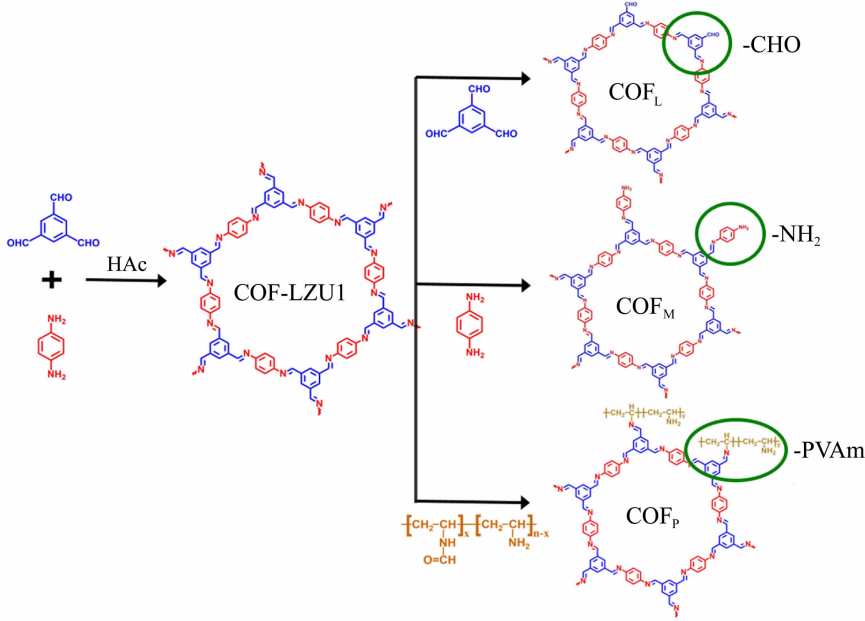


图 1 COF_L、COF_M 和 COF_P 的合成过程^[34]

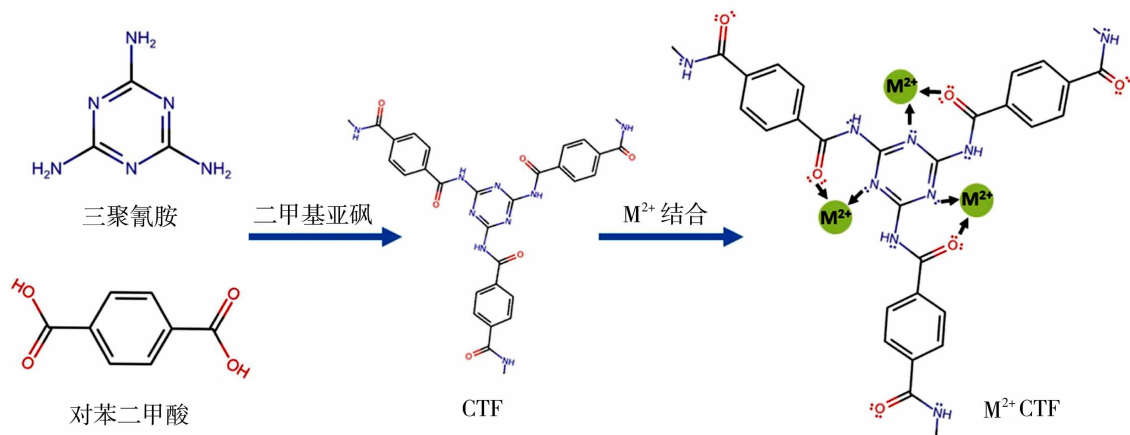
Fig. 1 Synthesis process of COF_L, COF_M and COF_P^[34]

共价三嗪框架(CTFs)骨架中富含的氮位点能与 CO₂ 分子发生特异性相互作用,提供化学吸附能力;其微孔结构可通过尺寸筛分效应,依据气体分子(如 CO₂ 与 N₂)动力学直径的差异实现选择性分离。因此,通过调控其孔径分布与化学环境,结合筛分机制与化学吸附的协同效应,可显著提升膜对目标气体的分离性能。Dey 等^[37]将多孔填料共价三嗪框架 CTF-1 添加到聚砜(PSf)中形成混合基质膜(MMMs)。其中 CTFs 孔径主要分布在 5、6 和 12 Å(1 Å=10⁻¹⁰ m),微孔的存在可以对气体分子起到筛分作用。与纯 PSf 膜相比,添加 24%(质量分数)CTF-1 的 MMMs 膜的最高 CO₂ 渗透性为 12.7 Barrer。相比之下,Bügel 等^[38]以三聚氰胺和联苯为单体,通过 Friedel-Crafts 烷基化反应合成了 CTF-联苯,并将其作为多孔填料制备 CTF/Matrimid MMMs。当添加 16%(质量分数)CTF-联苯时,CO₂ 渗透性最优提高到 15.1 Barrer,其性能提升源于联苯基团拓展的 π 共轭体系增强了 CO₂

吸附能力。Mashhadikhan 等^[39]通过合成 Fe²⁺、Cu²⁺ 和 Zn²⁺ 掺杂的 M²⁺CTFs,如图 2 所示,并将其掺入聚酰亚胺(PI)基质中,制备了具有高气体分离性能的 MMMs。当 M²⁺CTFs 负载量仅为 0.4%(质量分数)时,膜的 CO₂/N₂ 选择性超过了 Robeson 2008 上限。这归因于高度多孔的 CTFs 中亲核氮位点和富电子杂环的存在,以及作为固定位点活性载体的过渡金属离子,分别通过与 CO₂ 分子的 π-π 堆积相互作用和 π 络合作用共同提高了对 CO₂ 分子的亲和力,促进其在膜中的传递。

2.2 非晶态多孔有机聚合物材料在分离膜中的应用及性能优化

非晶态多孔有机聚合物的分子链的随机排布,为功能化基团的引入创造了有利条件。通过化学接枝等改性手段,可实现功能基团(如氨基和磺酸基等)在材料表面或孔道内部的修饰,促进气体快速传递。非晶态结构在与聚合物基质共混时,可通过溶液浇铸、旋涂等常规成膜技术均匀分散,避免了晶态

图 2 功能化 CTFs 的合成路线^[39]Fig. 2 The synthesis route for the functionalized CTFs^[39]

材料(如 COFs)因晶体生长不均导致的膜制备复杂性,且合成原料易得、步骤少,可降低膜材料的生产成本。

共轭微孔聚合物(CMPs)因其孔径可调控特性,在气体分离领域具有显著的优势。其优异的热/化学稳定性与可加工性,使其能够在苛刻的工业气体分离条件下保持膜的结构完整性和长期分离性能。Lindemann 等^[40]采用表面锚定金属有机框架(SURMOF)作为牺牲性衬底,通过点击化学反应使含叠氮基团与炔基单体逐步层叠生长,成功构建了独立式 CMP 纳米膜。将 CMP 膜转移到聚丙烯腈/聚二甲基硅氧烷(PAN/PDMS)基底上制备薄膜复合膜(TFC),能够连续覆盖直径达 50 μm 的孔,气体渗透实验表明 CMP 膜对动力学直径较小的气体具有明显的分子筛分作用。

超交联聚合物(HCPs)可通过优化合成条件实现对孔结构的精准调控。这种可定制的孔隙结构使其能够针对特定的目标气体进行分离,优化膜的筛分性能。Yang 等^[41]使用不同类型的氟化苯基醇 2,3,5,6-四氟-1,4-苯二甲醇(F-OH-1)和 4,4'-辛氟-苯二甲醇(F-OH-2)对致密聚苯乙烯(PS)膜进行氟化和交联,得到氟化 HCP 膜(F-M_{PS}-1 和 F-M_{PS}-2)。该膜表面积可达 523 m²/g,具有 1.1~1.3 nm 的微孔和~0.6 nm 的超微孔,展现出 797 Barrer 的理想 CO₂ 渗透性和 28.5 的 CO₂/N₂ 选择性。

自具微孔聚合物(PIMs)由于具有相对稳定的化学结构,其分子链上规整排列的官能团可通过氢键、范德华力与其他聚合物相容性良好。在制备膜时,PIM-1 能均匀地分散在基质中,有效避免了相分离现象的发生。Song 等^[42]以二氯对二甲苯为原

料,经 Friedel-Crafts 烷基化反应制备多孔聚合物(PP)。并在 PP 表面共价接枝 PIM-1 低聚物(oPIM-1),添加到 Matrimid 中制备混合基质膜。所制备的 PP@oPIM-1/Matrimid 膜的 CO₂ 渗透性为 17.4 Barrer,CO₂/N₂ 选择性为 46.7,分别比纯 Matrimid 膜提高了 104.7%和 51.1%。由于位于 oPIM-1 链两端和骨架上的活性苯环可参与共价交联反应,在 PP@oPIM-1 表面形成了稳定的三维网络。oPIM-1 与基质的聚合物链在两相之间形成了坚固的交织结构,这有利于形成良好的界面相容性,提高气体分离性能。王晓楠等^[43]以吡咯与 4,4'-联苯二甲醛为原料,通过芳香亲电取代反应制备卟啉基多孔有机框架(Por-POF),并将其分散在固有微孔聚合物(PIM-1)中,制备 Por-POF/PIM-1 混合基质膜。添加质量分数为 12%的 Por-POF,膜的 CO₂ 渗透性为 6 840.2 Barrer,CO₂/N₂ 选择性为 42.1,分别比纯 PIM-1 膜提高了 157%和 64%。Por-POF 的纯有机性质增强了与 PIM-1 基质的相互作用,形成良好的界面相容性;其孔壁上富集的氮对 CO₂ 具有较强吸附作用,进而提升了气体分离性能。赵红永等^[44]通过水解、置换等作用在 PIM-1 膜中引入 Zn²⁺ 离子,再将改性后的 PIM-1 膜浸泡在 2-甲基咪唑的甲醇溶液中,于室温下在膜表面生长 ZIF-8 选择层,经硅橡胶填补缺陷后得到 pZIF-8@PIM-1 膜。与 PIM-1 纯膜相比,pZIF-8@PIM-1 膜的 CO₂/N₂ 扩散选择性及溶解选择性都有所提高。这是由于多价金属离子交联及 ZIF-8 选择层对 CO₂/N₂ 的筛分作用使扩散选择性提升,ZIF-8 中含氮有机杂环与 CO₂ 之间的 Lewis 酸碱作用及 2-甲基咪唑环上静电势对 CO₂ 的亲合作用使溶解选

择性提升,二者共同促进了 CO₂ 分离性能的提高。

多孔芳香框架(PAFs)中引入特定的官能团可增强与聚合物基质的相容性并提高膜的气体分离性能。Zhang 等^[45]通过一种烷基胺官能化策略,将氨基基团固定在 PAF-1 骨架中,成功制备 PAF-1-CH₂NH₂ 材料。之后通过酰胺化反应将 PAF-1-CH₂NH₂ 与 cPIM 交联,得到了具有优异的 CO₂ 渗透性(10 790 Barrer)和高 CO₂/N₂ 选择性(43)的 PAF-1-CH₂NH₂-cPIM-1 均质膜,如图 3 所示。PAF-1-CH₂NH₂ 和 PAF-1-NH₂ 的 CO₂ 吸附曲线说明烷基胺比苯胺具有更高的 CO₂ 吸附亲和力。

因此,PAF-1-CH₂NH₂-cPIM-1 均质膜的性能优于 PAF-1 和 PAF-1-NH₂ 对应的膜。Zhang 等^[46]创新性地构建杂化单体策略,以二苯基结构单元构筑三维多孔网络骨架,并通过引入二苯胺功能单体在网络中引入碱性氮活性位点,成功制备了新型多孔芳香骨架材料(PAF-45DPA),并将其掺入聚砜中制备不对称中空纤维膜。与纯 PSf 相比,PAF-45DPA/PSf 的 CO₂ 渗透率提高了约 3 倍。这归因于联苯的刚性结构为 PAF-45DPA 提供了高孔隙度,二苯胺的碱性为 PAF-45DPA 提供了对 CO₂ 分子较强的亲和力。

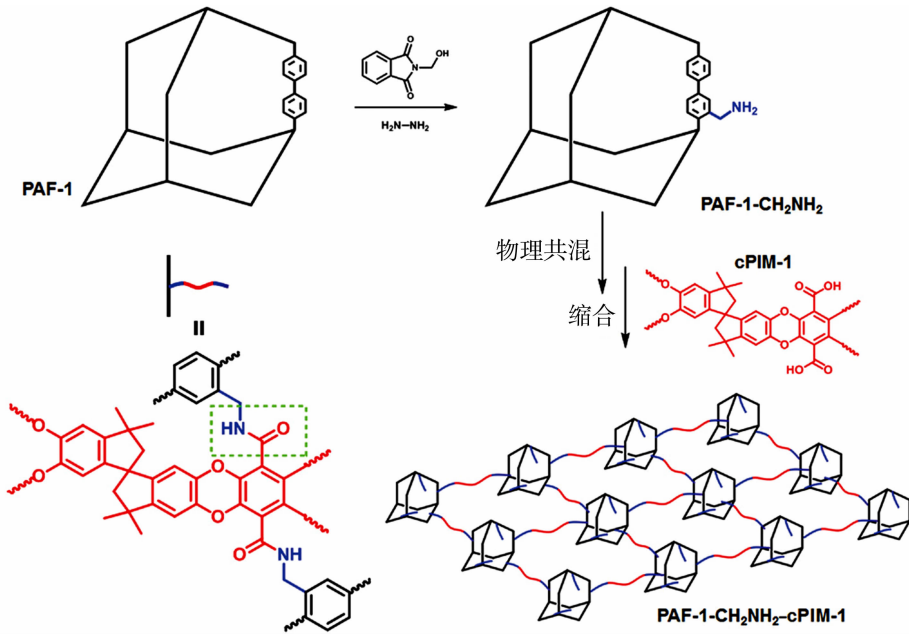


图 3 PAF-1-CH₂NH₂-cPIM-1 MMMs 的合成路线^[45]

Fig. 3 Synthesis route for the PAF-1-CH₂NH₂-cPIM-1 MMMs^[45]

其他无定形多孔有机聚合物在混合基质膜领域用于气体分离的研究也非常多。Wang 等^[47]选择三烯基 POP (TPFC)及其两种不同胺改性的 TPFC-CH₂NH₂ 和 TPFC-CH₂PEI 作为填料,制备了一系列新型的 PIM-1 基混合基质膜。所制备的 MMMs 最优 CO₂ 渗透性达到 7 730 Barrer,且 CO₂/N₂ 和 CO₂/CH₄ 的分离性能都超越了 2008 年 Robeson 上限。这因为胺改性 POPs 填料中大量的氨基可提供特定的运输链,促进 CO₂ 的渗透。此外,POP 填料间通过 π - π 相互作用形成的强亲和力,确保了其在聚合物基质中的均匀分散。Lee 等^[48]通过将功能化多孔聚合物(PBP-x)掺入聚酰亚胺(6FDA-DAM)聚合物基质中,成功地制备了无缺陷的混合

基质膜。PBP-DETA 与 PBP-SO₃H 填料的加入显著提高了 CO₂/N₂ 选择性。这归因于 PBP 材料的高孔隙体积特性,其在保留孔隙结构的同时,还可通过合成后修饰引入氨基与磺酸基团。Yang 等^[49]以二氯-对二甲苯(*p*-DCX)为原料,在无水 FeCl₃ 催化下,通过一锅法 Friedel-Crafts 烷基化反应合成了多孔聚合物(PP)。随后,他们对 PP 进行氨基接枝修饰,分别引入二乙烯三胺(DETA)和二甲基乙胺(menm)基团,得到功能化多孔聚合物 PP-DETA 和 PP-menm,并将其作为填料制备混合基质膜。掺杂 PP-DETA 和 PP-menm 的 MMMs 在 CO₂ 渗透性和 CO₂/CH₄ 选择性上均有显著提升。这是由于氨基的引入不仅增强了填料与 CO₂ 的亲水性,还

通过构建传递通道促进了 CO₂ 的快速扩散。Wang 等^[50]以三聚氰胺和对苯二甲醛为单体,通过席夫碱反应合成席夫碱网络聚合物 SNW-1,随后采用表面后改性策略,将聚乙烯胺(PVAm)通过共价链接枝至 SNW-1 表面,制得功能化材料 SNW-P。进一步将 SNW-P 作为填料分散至 PVAm 基质中,制备混合基质膜(MMMs)。当原料气压力为 0.2 MPa 时,PVAm/SNW-P_{4H} MMMs 的 CO₂ 渗透速率达到 3 092 GPU,CO₂/N₂ 选择性为 184。这一性能提升归因于 SNW-P 表面富集的氨基与 CO₂ 的特异性相互作用,同时 PVAm 与填料间的强界面结

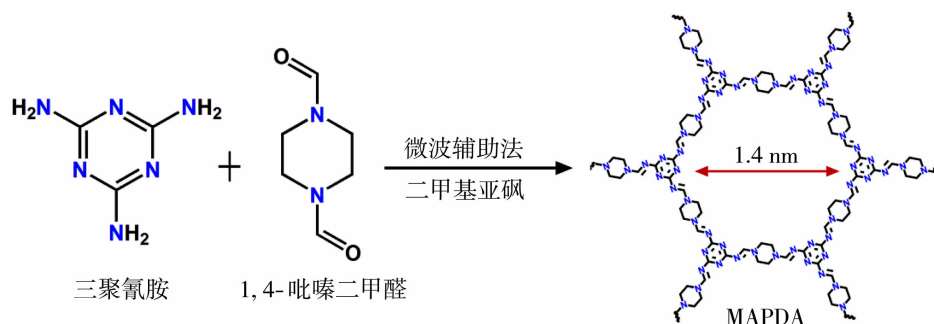


图 4 MAPDA POF 的合成路线和可能的结构^[51]

Fig. 4 Synthesis route and the most likely structure for MAPDA POF^[51]

3 结论与展望

多孔有机聚合物(POPs)凭借其可设计性、高稳定性和优异的气体分离性能,成为膜分离领域的研究热点。晶态材料(如 COFs、CTFs)通过有序孔道实现分子筛分效应,结合功能基团对 CO₂ 的亲水性,在混合基质膜中表现出高选择性与渗透性,部分性能已突破 Robeson 上限;非晶态材料(如 HCPs、PAFs 等)则通过无序孔道与表面修饰增强 CO₂ 吸附-扩散协同效应,同时兼容多种聚合物基质,赋予膜材料优异的稳定性和可加工性。

然而,当前研究仍面临材料规模化制备工艺复杂、膜结构缺陷控制困难等挑战。未来研究需聚焦于以下方面:1) 规模化制备工艺优化:针对现有溶剂热法和离子热法依赖高温高压反应釜,存在批次产量低、能耗高以及反应时间长等问题,可发展微波辅助合成、机械化学合成等绿色制备技术。同时,POPs 本身可利用众多易得且价格低廉的单体以及简便的合成路径进行构筑的优势,开发适用于 POPs 的连续化、高通量成膜工艺,解决大面积均匀无缺陷膜制备的难题。2) 膜结构精准调控策略:PIMs 等非晶

合减少了非选择性缺陷,实现了渗透性与选择性的协同增强。Yu 等^[51]以一个三角形的三聚氰胺(MA)单体和一个线性的 1,4-吡嗪二甲醛(PDA)单体通过微波辅助方法反应合成多孔有机框架材料(MAPDA),如图 4 所示。将其作为纳米填料与 PIM-1 共混制备 MAPDA/PIM-1 MMMs。与 PIM-1 相比,制备的 MAPDA/PIM-1 膜有较高的 CO₂ 渗透性(7 861.9 Barrer)。这是由于小粒径的 MAPDA 可有效减少膜内缺陷,材料的高孔隙率则为气体传输提供了选择性自由通道,进一步提高了气体分离性能。

POPs 存在固有的链段堆积不均匀性,导致孔径分布较宽,存在非选择性缺陷。COFs 等晶态 POPs 在成膜过程中易出现晶界、错位、晶粒尺寸不均等问题。针对上述非晶态材料孔径分布宽以及晶态材料晶界缺陷等问题,可利用模板导向合成技术或先进的表征手段指导合成。因此,POPs 有望在能源、环境等领域实现更广泛的应用,为“碳中和”目标提供关键技术支撑。

参考文献:

- [1] Ullah S, Bustam M A, Al-Sehemi A G, *et al.* Influence of post-synthetic graphene oxide (GO) functionalization on the selective CO₂/CH₄ adsorption behavior of MOF-200 at different temperatures; an experimental and adsorption isotherms study[J]. *Micropor Mesopor Mat*, 2020, 296: 110002.
- [2] Saqib S, Rafiq S, Muhammad N, *et al.* Perylene based novel mixed matrix membranes with enhanced selective pure and mixed gases (CO₂, CH₄, and N₂) separation [J]. *J Nat Gas Sci Eng*, 2020, 73: 103072.
- [3] Brescini M, Antomarioni S, Ciarapica F E, *et al.* Techno-economic and environmental assessment of carbon

- capture solutions in maritime transportation[J]. *Ocean Eng*, 2025, 330: 121252.
- [4] Wang M, Rahimi M, Kumar A, *et al.* Flue gas CO₂ capture via electrochemically mediated amine regeneration: system design and performance[J]. *Appl Energy*, 2019, 255: 113879.
- [5] Abd A A, Naji S Z, Hashim A S, *et al.* Carbon dioxide removal through physical adsorption using carbonaceous and non-carbonaceous adsorbents: a review [J]. *J Environ Chem Eng*, 2020, 8(5): 104142.
- [6] Berstad D, Skaugen G, Roussanaly S, *et al.* CO₂ capture from IGCC by low-temperature synthesis gas separation [J]. *Energies*, 2022, 15(2): 515.
- [7] Olabi A G, Alami A H, Ayoub M, *et al.* Membrane-based carbon capture: recent progress, challenges, and their role in achieving the sustainable development goals [J]. *Chemosphere*, 2023, 320: 137996.
- [8] Douna I, Farrukh S, Hussain A, *et al.* Experimental investigation of polysulfone modified cellulose acetate membrane for CO₂/H₂ gas separation [J]. *Korean J Chem Eng*, 2022, 39(1): 189-197.
- [9] Sreenath S, Sam A A. Hybrid membrane-cryogenic CO₂ capture technologies: a mini-review[J]. *Front Energy Res*, 2023, 11: 1167024.
- [10] Rahman M F, Fujisawa I, Haraguchi N, *et al.* Synthesis of cinchona urea polymers using Yamamoto coupling and their application to asymmetric reaction [J]. *Chirality*, 2023, 35(3): 178-188.
- [11] Wang X G, Li J Y, Wang L Q, *et al.* Palladium/*N*-heterocyclic carbene-decorated covalent organic framework for Suzuki-Miyaura and Mizoroki-Heck cross-coupling[J]. *J Org Chem*, 2025, 90(19): 6532-6537.
- [12] Teng X H, Cheng Y Q, Xia Z Z, *et al.* Conjugated microporous polymer for solid-phase extraction of neonicotinoid insecticides from environmental water samples[J]. *J Chromatogr A*, 2024, 30: 1731.
- [13] Arun T R, Kumar H P, Kamalesu S. Exploring the utilization of Schiff base metal complexes in biological settings: a review[J]. *Inorg Chem Commun*, 2024, 170: 113251.
- [14] Sharma V, Sahoo A, Sharma Y, *et al.* Synthesis of nanoporous hypercrosslinked polyaniline (HCPANI) for gas sorption and electrochemical supercapacitor applications[J]. *Rsc Adv*, 2015, 5(57): 45749-45754.
- [15] Raza S, Nazeer S, Abid A, *et al.* Recent research progress in the synthesis, characterization and applications of hyper cross-linked polymer[J]. *J Polym Res*, 2023, 30: 415.
- [16] Tan L X, Tan B. Hypercrosslinked porous polymer materials: design, synthesis, and applications [J]. *Chem Soc Rev*, 2017, 46: 3322-3356.
- [17] Liu G L, Wang Y X, Shen C J, *et al.* A facile synthesis of microporous organic polymers for efficient gas storage and separation[J]. *J Mater Chem A*, 2015, 3(6): 3051-3058.
- [18] 王玉冰, 陈杰, 延卫, 等. 共轭微孔聚合物的制备与应用[J]. *化学进展*, 2021, 33(5): 838-854.
- [19] Ding X S, Han B H. Metallophthalocyanine-based conjugated microporous polymers as highly efficient photosensitizers for singlet oxygen generation [J]. *Angew Chem Int Edit*, 2015, 54(22): 6536-6539.
- [20] Budd P M, Msayib K J, Tattershall C E, *et al.* Gas separation membranes from polymers of intrinsic microporosity[J]. *J Membr Sci*, 2005, 251(1/2): 263-269.
- [21] Swaidan R, Ghanem B S, Litwiller E, *et al.* Pure and mixed-gas CO₂/CH₄ separation properties of PIM-1 and an amidoxime-functionalized PIM-1 [J]. *J Membr Sci*, 2014, 457: 95-102.
- [22] Tian Y Y, Zhu G S. Porous Aromatic Frameworks (PAFs)[J]. *Chem Rev*, 2020, 120(16): 8934-8986.
- [23] Zhang L, Sun J S, Sun F X, *et al.* Facile synthesis of ultrastable porous aromatic frameworks by suzuki-miyaura coupling reaction for adsorption removal of organic dyes[J]. *Chem-Eur J*, 2019, 25(15): 3903-3908.
- [24] Ben T, Ren H, Ma S Q, *et al.* Targeted synthesis of a porous aromatic framework with high stability and exceptionally high surface area [J]. *Angew Chem Int Edit*, 2009, 48(50): 9457-9460.
- [25] 张信聪, 吴结宇, 彭莲莲, 等. 共价有机框架材料合成与应用研究进展[J]. *材料化学前沿*, 2019, 7(3): 44-52.
- [26] Ding S Y, Gao J, Wang Q, *et al.* Construction of covalent organic framework for catalysis: Pd/COF-LZU1 in suzuki-miyaura coupling reaction [J]. *J Am Chem Soc*, 2011, 133(49): 19816-19822.
- [27] Liu M Y, Guo L P, Jin S B, *et al.* Covalent triazine frameworks: synthesis and applications [J]. *J Mater Chem A*, 2019, 7(10): 5153-5172.
- [28] Kuhn P, Antonietti M, Thomas A. Porous, covalent triazine-based frameworks prepared by ionothermal synthesis[J]. *Angew Chem Int Edit*, 2008, 47(18): 3450-3453.
- [29] Anbealagan L D, Ng T Y S, Chew T L, *et al.* Modified

- zeolite/polysulfone mixed matrix membrane for enhanced CO₂/CH₄ separation[J]. *Membranes*, 2021, 11(8):630.
- [30] Gunasakaran A, Jafa J, Saalah S, *et al.* Activated carbon and halloysite nanotubes membrane for CO₂ and CH₄ separation [J]. *Mater Sci Eng*, 2021, 1142: 012012.
- [31] Zhang X R, Zhang T, Wang Y H, *et al.* Mixed-matrix membranes based on Zn/Ni-ZIF-8-PEBA for high performance CO₂ separation[J]. *J Membr Sci*, 2018, 560: 38-46.
- [32] Guo Z Y, Wu H, Chen Y, *et al.* Missing-linker defects in covalent organic framework membranes for efficient CO₂ separation[J]. *Angew Chem Int Edit*, 2022, 61(41): 10466-10474.
- [33] Zeng S C, Liang X, Zhao M G, *et al.* Ultrathin PEI-functionalized carboxyl covalent organic framework membranes for efficient CO₂/N₂ separation [J]. *J Membr Sci*, 2024, 698: 122590.
- [34] Cao X C, Xu H Q, Dong S L, *et al.* Preparation of high-performance and pressure-resistant mixed matrix membranes for CO₂/H₂ separation by modifying COF surfaces with the groups or segments of the polymer matrix[J]. *J Membr Sci*, 2020, 601: 117882.
- [35] Liu Y T, Wu H, Wu S Q, *et al.* Multifunctional covalent organic framework (COF)-based mixed matrix membranes for enhanced CO₂ separation[J]. *J Membr Sci*, 2021, 618: 118693.
- [36] Cheng Y D, Zhai L Z, Ying Y P, *et al.* Highly efficient CO₂ capture by mixed matrix membranes containing three-dimensional covalent organic framework fillers[J]. *J Mater Chem A*, 2019, 7(9): 4549-4560.
- [37] Dey S, Bügel S, Sorribas S, *et al.* Synthesis and characterization of covalent triazine framework CTF-1@ polysulfone mixed matrix membranes and their gas separation studies[J]. *Front Chem*, 2019, 7: 693.
- [38] Bügel S, Hoang Q D, Spiess A, *et al.* Biphenyl-based covalent triazine framework/matrimid (r) mixed-matrix membranes for CO₂/CH₄ separation[J]. *Membranes*, 2021, 11(10): 795.
- [39] Mashhadikhan S, Sanaeepur H, Amooghin A E, *et al.* Synthesis of metal-doped covalent triazine frameworks: Incorporation into 6FDA-Durene polyimide for CO₂ separation through mixed matrix membranes [J]. *J Environ Chem Eng*, 2024, 12(5): 113965.
- [40] Lindemann P, Tsotsalas M, Shishatskiy S, *et al.* Preparation of freestanding conjugated microporous polymer nanomembranes for gas separation[J]. *Chem Mater*, 2014, 26(24): 7189-7193.
- [41] Yang Z Z, Guo W, Chen H, *et al.* Benchmark CO₂ separation achieved by highly fluorinated nanoporous molecular sieve membranes from nonporous precursor via in situ cross-linking[J]. *J Membr Sci*, 2021, 638: 119698.
- [42] Song S Q, Li H, Li J D, *et al.* Enhancing interfacial compatibility of porous organic polymer-filled mixed-matrix membranes using covalent grafted PIM-1 network[J]. *Sep Purif Technol*, 2025, 354: 129442.
- [43] 王晓楠, 倪飞, 李海壮, 等. 构建界面兼容的 PorPOF/PIM-1 混合基质膜用于 CO₂/N₂ 高效分离[J]. *膜科学与技术*, 2024, 44(4): 170-177.
- [44] 赵红永, 赵晨阳, 丁晓莉, 等. ZIF-8 改性自具微孔聚合物膜的制备及其对 CO₂ 的分离性能[J]. *天津工业大学学报*, 2024, 43(4): 1-6.
- [45] Zhang P P, Zhang C, Wang L, *et al.* Basic alkylamine functionalized PAF-1 hybrid membrane with high compatibility for superior CO₂ separation from flue gas [J]. *Adv Funct Mater*, 2023, 33(4): 202210091.
- [46] Zhang S H, Li J L, Liu J, *et al.* Mixed monomer derived porous aromatic frameworks with superior membrane performance for CO₂ capture[J]. *J Membr Sci*, 2021, 632: 119372.
- [47] Wang C H, Guo F Y, Li H, *et al.* Porous organic polymer as fillers for fabrication of defect-free PIM-1 based mixed matrix membranes with facilitating CO₂-transfer chain[J]. *J Membr Sci*, 2018, 564: 115-122.
- [48] Lee Y, Chuah C Y, Lee J, *et al.* Effective functionalization of porous polymer fillers to enhance CO₂/N₂ separation performance of mixed-matrix membranes[J]. *J Membr Sci*, 2022, 647: 120309.
- [49] Yang Y Q, Chuah C Y, Nie L N, *et al.* Enhancing the mechanical strength and CO₂/CH₄ separation performance of polymeric membranes by incorporating amine-appended porous polymers [J]. *J Membr Sci*, 2019, 569: 149-156.
- [50] Wang W F, Yuan Y, Shi F, *et al.* Enhancing dispersibility of nanofiller via polymer-modification for preparation of mixed matrix membrane with high CO₂ separation performance[J]. *J Membr Sci*, 2023, 683: 121791.
- [51] Yu G L, Li Y Q, Wang Z Y, *et al.* Mixed matrix membranes derived from nanoscale porous organic frameworks for permeable and selective CO₂ separation [J]. *J Membr Sci*, 2019, 591: 117343.

Advances in the preparation of porous organic polymers and their CO₂ separation membranes

NIU Hongxia¹, ZHANG Xinru^{1,2}, WANG Yonghong^{1,2}

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Shanxi Key Laboratory of Gas Energy Efficient and Clean Utilization, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In the context of global climate change, efficient carbon capture technologies have become key to address the climate crisis, among which membrane separation technologies have shown potential for commercialization due to their low operating costs and modular operation properties. Porous organic polymers (POPs) have attracted much attention in the field of gas separation due to their tunable micro/mesoporous network, high specific surface area, good stability and structural designability. In this paper, the synthesis strategies and structural properties of the main types of POPs (including hyper crosslinked polymers, conjugated microporous polymers, covalent organic frameworks, etc.) with a focus on their recent research progress in CO₂ separation membranes were systematically reviewed. Future research needs to focus on precise pore design, interfacial compatibility modulation and scale-up preparation techniques to promote the practical application of POPs in industrial carbon capture.

Key words: membrane; gas separation; porous organic polymers; transfer processes

【三十而立,再启新程】2025 膜产业发展大会暨中国膜工业协会 30 周年成果展在京举办

2025 年 10 月 19 日,2025 膜产业发展大会暨中国膜工业协会 30 周年成果展在北京隆重开幕。来自政府部门、科研院所及涉膜企业的领导、专家、代表齐聚一堂,共同回顾中国膜产业三十年发展成就,探讨新形势下膜技术推动绿色低碳转型的路径与前景。

中国石油和化学工业联合会党委书记、会长李云鹏,原化工部副部长、中国石油和化学工业联合会原会长李勇武,中国工程院院士高从塔,中国工程院院士侯立安,中国石油和化学工业联合会副会长兼秘书长赵俊贵,中国科学院大连化学物理研究所研究员邓麦村,国家发改委环资司原二级巡视员、北京科技大学兼职教授杨尚宝,国务院发展研究中心研究员王瑞民,中国膜工业协会理事长郑根江等领导、专家出席本次大会。

大会由中国膜工业协会副会长兼秘书长王继文主持,王秘书长指出,三十年来,我国膜产业实现了从技术引进到自主创新的历史性跨越,目前膜产业产值已突破 5000 亿元,膜科技论文、专利申请及产业规模均跃居全球前列,中国已成为全球膜技术创新的重要推动者和市场规模最大的国家之一。

中国石油和化学工业联合会党委书记、会长李云鹏在致辞中强调,膜产业已形成完整的创新链与产业链,在服务国家水安全、工业减排降碳、能源转型等方面发挥了关键作用。他提出,未来膜产业应坚持创新驱动,加大基础研究和原始创新投入;聚焦绿色低碳,拓展膜技术在工业废水处理、氢能制备、二氧化碳捕集等领域的深度应用;推动跨界融合,构建协同发展的产业生态;深化国际合作,提升中国膜工业的全球竞争力。

中国工程院院士高从塔在致辞中指出,当前全球科技革命与产业变革深入发展,膜技术正朝着功能化、智能化、集成化方向演进。面对绿色可持续发展的时代要求,膜产业需加强材料创新、过程强化与多技术融合,把握新机遇、应对新挑战。

中国科学院大连化学物理研究所研究员邓麦村也对膜产业发展提出三点建议:一是坚持创新驱动,提高研发能力。二是深化产业融合,构建现代化融合体系。三是拓展应用范围,服务国家重大战略。

在本次大会上,举行了 2025 年度“中国膜工业协会科学技术奖”颁奖仪式,共有 33 个项目获奖,其中“高性能空气净化膜材料、技术及装备”“锂电固废用高性能双极膜及资源化处理技术”“PEM 电解水制氢膜电极与电解槽”等 8 项成果获一等奖,另有 25 项成果获二等奖,充分展现了我国膜科技在基础研究、产品开发与工程应用等方面的综合实力。

随后,国务院发展研究中心市场经济研究所研究员王瑞民,中国石油和化学工业联合会副会长兼秘书长赵俊贵,北京化工大学教授李群生,石油和化学工业规划院副院长郑宝山,中国膜工业协会理事长郑根江,中国标准化研究院资环研究分院主任白岩,以及多个领域的 5 家领军企业做了精彩的大会报告。其中郑根江理事长的报告“中国膜产业‘十五五’发展规划纲要总体思路”,对“十五五”期间膜行业主要发展方向及重点、主要任务及保障措施等进行了详细阐述。

大会的对话环节,邀请到了中国科学院大连化学物理研究所研究员邓麦村,国家发展改革委环资司原二级巡视员杨尚宝,海南立昇净水科技实业有限公司董事长陈良刚,沃顿科技股份有限公司董事长蔡志奇等行业见证者,他们围绕“行业情怀、时代价值、传承未来”展开了深入对话。

今年恰逢中国膜工业协会成立 30 周年,大会同期举办了“中国膜工业协会 30 周年成果展”,集中展示行业三十年发展成就,系统展示了我国膜材料、膜组件、膜系统集成及在能源、化工、环保、生物医药等领域的创新成果与应用案例。

三十而立,再启新程。中国膜工业协会将继续凝聚行业力量,推动膜科技与产业在绿色低碳、融合创新中实现更高质量发展,为构建现代化产业体系、实现国家战略目标贡献膜行业智慧与力量。

中国膜工业协会公众号