

# MOFs 材料在化工气体分离中的选择性吸附研究

陈良勇

恒光新材料（江苏）股份有限公司 江苏南通

**【摘要】**金属有机框架材料（MOFs）在化工气体分离领域具有广泛的应用潜力。由于其高比表面积、可调孔结构和优异的选择性吸附特性，MOFs 材料能够有效地分离不同种类的气体分子。本文综述了 MOFs 在气体分离中的研究进展，重点探讨了其在天然气、二氧化碳捕集以及空气分离中的应用。针对 MOFs 材料的气体吸附特性，本研究分析了不同结构对气体分子选择性的影响，并提出了优化 MOFs 材料性能的潜在路径。通过调整孔隙度、功能化改性等策略，可以提高 MOFs 的气体吸附能力和分离效率。

**【关键词】**金属有机框架；气体分离；选择性吸附；二氧化碳捕集；天然气

**【收稿日期】**2025 年 8 月 14 日

**【出刊日期】**2025 年 9 月 18 日

**【DOI】**10.12208/j.jccr.20250052

## Study on selective adsorption of MOFs materials in chemical gas separation

Liangyong Chen

Jiangsu Hengguang New Material Co., Ltd, Nantong, Jiangsu

**【Abstract】** Metal-organic framework materials (MOFs) have extensive application potential in the field of chemical gas separation. Due to their high specific surface area, adjustable pore structure, and excellent selective adsorption properties, MOFs can effectively separate different types of gas molecules. This paper reviews the research progress of MOFs in gas separation, focusing on their applications in natural gas processing, carbon dioxide capture, and air separation. Regarding the gas adsorption characteristics of MOFs, this study analyzes the influence of different structures on the selectivity of gas molecules and proposes potential paths to optimize the performance of MOFs. The gas adsorption capacity and separation efficiency of MOFs can be improved through strategies such as adjusting porosity and functional modification.

**【Keywords】** Metal-organic frameworks; Gas separation; Selective adsorption; Carbon dioxide capture; Natural gas

### 引言

金属有机框架（MOFs）作为一类新型的多功能材料，在气体分离和吸附方面展现出独特的优势。随着能源需求的增长及环境污染问题的加剧，如何高效地分离和捕集工业气体，尤其是二氧化碳和天然气，成为了全球关注的焦点。MOFs 材料因其优异的孔结构和表面性质，在多种气体分离任务中表现出色。然而，如何通过设计和调控 MOFs 材料的孔隙结构与化学性质，来实现更高效的气体分离，仍是一个亟待解决的科学和工程问题。本文将系统探讨 MOFs 材料在气体分离中的应用，并提出其在优化过程中可能面临的挑战与机遇。

### 1 MOFs 材料的结构特点与气体分离性能

金属有机框架材料（MOFs）是一类由金属离子或

金属簇与有机配体通过配位键结合而形成的高度有序的多孔材料。其独特的晶体结构和可调的孔隙特性使其在气体分离领域具有显著的优势。MOFs 的结构可以通过选择不同的金属节点和有机配体来灵活设计，从而调控其孔隙的尺寸、形状和化学环境<sup>[1]</sup>。这些特性使得 MOFs 在气体分离中的应用具有极大的潜力。其比表面积和孔容率通常较高，能够提供足够的吸附位点来容纳气体分子。MOFs 的孔结构不仅能够通过物理吸附作用与气体分子发生作用，还能通过化学吸附、静电作用等多种方式加强与目标气体的选择性吸附，进一步提高分离效率。

MOFs 材料在气体分离中的选择性吸附性能受到多个因素的影响，其中孔径和表面化学性质是关键因素。通过精确控制 MOFs 的孔径，可以实现对不同气

体分子的选择性吸附。通常,气体分子的大小与 MOFs 的孔径密切相关,孔径大小的微调能够增强某一气体分子的吸附能力。MOFs 材料的表面化学性质通过引入功能性官能团来调节,可以提高材料对特定气体的亲和性。引入氨基、羧基等官能团可以有效增强 MOFs 材料对极性气体的吸附能力,如  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  等。这些调控手段不仅有助于提升气体分离的效率,还能够拓展 MOFs 材料在复杂气体混合物中的应用范围。

MOFs 的气体分离性能在多个方面表现出色。除了孔径和表面化学性质的调节外,MOFs 还可以通过适当的金属节点和配体选择,进一步优化其气体吸附性能。选择高电负性的金属中心,如铝、铜、锌等,可以有效提高 MOFs 对  $\text{CO}_2$  等气体的吸附能力。除此之外,一些 MOFs 材料通过调控其结晶度和晶体形态,使得气体分子在其孔隙中可以形成有序的排列,从而增强了气体分离的效率。基于这些优异的性能,MOFs 在气体分离领域的应用前景被广泛看好,尤其是在天然气处理、二氧化碳捕集等领域。

## 2 MOFs 在二氧化碳捕集中的应用研究

二氧化碳捕集是应对全球气候变化问题的重要技术之一。随着二氧化碳浓度的不断增加,如何有效捕集并减少大气中的二氧化碳成为全球亟待解决的重大课题。MOFs 材料因其高比表面积和可调的孔结构,在二氧化碳捕集方面展现出了独特的优势。MOFs 材料在二氧化碳的吸附过程中,能够通过孔隙大小、表面化学性质以及金属中心的选择来实现对二氧化碳分子的高选择性吸附。MOFs 的孔结构可以在不同的温度和压力条件下变化,使其在二氧化碳的捕集和释放过程中具有高度的可控性。

针对二氧化碳捕集,MOFs 材料的一个重要研究方向是提高其在低压下的吸附性能。传统的二氧化碳捕集方法,如化学吸收法和物理吸附法,通常需要高压条件,这不仅增加了操作的难度和成本,而且也降低了捕集过程的效率。研究人员通过优化 MOFs 的结构,探索其在常温常压下的二氧化碳吸附性能,取得了显著的进展。通过改变 MOFs 的金属节点或有机配体,增强其对  $\text{CO}_2$  的吸附能力,已成为当前二氧化碳捕集研究的一个热点。通过引入氮、氧等元素的含氮官能团,能显著提高 MOFs 对  $\text{CO}_2$  的吸附能力,使得其在低压环境下依然能保持较高的吸附性能。

除了提高低压吸附性能,MOFs 在二氧化碳捕集中的另一研究方向是提升其吸附容量和循环稳定性。二氧化碳捕集过程通常伴随着气体的吸附与释放,因此

MOFs 材料需要具备较高的吸附容量和良好的循环稳定性<sup>[2-6]</sup>。在实际应用中,MOFs 材料的吸附容量和循环性能可能受到孔隙结构、表面化学性质及其稳定性等因素的影响。通过对 MOFs 进行功能化改性,可以有效提高其循环稳定性。某些金属有机框架材料通过引入强烈的化学吸附功能,增强了二氧化碳与材料的相互作用,从而提高了其吸附性能和循环稳定性。MOFs 的功能化改性还可以有效降低二氧化碳捕集的能耗,进一步提升其在实际应用中的经济性。

## 3 MOFs 在天然气分离中的应用进展

天然气主要成分是甲烷( $\text{CH}_4$ ),但天然气中的其他杂质如二氧化碳、硫化氢等也存在较高浓度,这些杂质不仅降低了天然气的热值,还会对气体运输和使用设备造成腐蚀。天然气的净化和分离成为天然气利用中的关键技术。MOFs 作为一种新型的气体分离材料,凭借其高比表面积、可调孔隙特性以及良好的选择性吸附性能,在天然气分离中得到了广泛关注。研究表明,MOFs 材料具有优异的选择性吸附性能,能够有效分离天然气中的甲烷和二氧化碳、氮气等杂质。通过合理设计 MOFs 的孔结构和功能化改性,可以使其在不同气体的分离中表现出较高的选择性和效率。

对于天然气的分离,MOFs 的孔径调控是一个至关重要的因素。天然气中的甲烷分子较小,而二氧化碳和氮气等分子则较大,MOFs 材料的孔径设计需结合分子筛效应,确保对甲烷的选择性吸附同时对二氧化碳、氮气等杂质气体具有较高的吸附能力。为了优化 MOFs 在天然气分离中的性能,研究人员通过引入不同的金属节点和有机配体来调节材料的孔隙度及表面化学性质,显著提高了材料对甲烷和杂质气体的分离效率。MOFs 材料的选择性吸附能力不仅与其孔径有关,还与金属节点的电负性、配体的功能性等因素密切相关。

MOFs 在天然气分离中的另一研究进展是其稳定性和长期使用性能的提升。由于天然气分离过程中通常需要在较高的温度和压力下进行操作,因此 MOFs 材料的热稳定性和化学稳定性成为决定其应用效果的重要因素<sup>[7]</sup>。通过优化 MOFs 材料的合成方法和设计策略,研究人员成功提高了其稳定性,延长了其在天然气分离过程中的使用寿命。进一步的研究表明,某些 MOFs 材料在高温和高压环境下依然能够保持较高的吸附性能,并且具有较好的抗污染性。MOFs 在天然气净化中的应用前景广阔。

## 4 MOFs 材料性能优化与未来研究方向

尽管 MOFs 材料在气体分离领域表现出优异的性质

能,但其在实际应用中的表现仍面临一些挑战,尤其是在大规模应用时。为了提高 MOFs 材料的性能,研究人员在多个方面进行了深入研究。通过优化 MOFs 的合成工艺,提高其比表面积和孔容率,已经成为提升气体分离性能的一个有效途径。通过调整合成条件,如温度、溶剂、反应时间等,可以精确控制 MOFs 的晶体结构,从而提高其对气体分子的吸附能力。金属中心和有机配体的选择也对 MOFs 的性能起到至关重要的作用。通过合理选择金属节点和配体,可以使 MOFs 材料在不同的气体分离任务中展现出优异的选择性吸附性能。

MOFs 材料在高温、高压以及潮湿等苛刻环境下的稳定性问题,限制了其在实际工业应用中的广泛使用。其孔隙结构在这些环境条件下容易发生塌陷或变形,从而导致气体分离效率显著下降。为了提升 MOFs 的热稳定性与化学稳定性,研究人员采取了多种创新策略。通过功能化改性,尤其是引入具有较强热稳定性和化学稳定性的配体或金属节点,能够有效增强 MOFs 材料的耐高温和耐腐蚀能力。某些金属如铝和镁等具有较强的热稳定性,可作为金属节点提高材料的抗高温性能。一些 MOFs 通过复合改性方法,与其他耐高温的材料如二氧化硅、活性炭等结合,形成复合结构,从而提高其热稳定性和机械强度,进一步增强了在极端环境条件下的使用寿命和可靠性。这些优化措施为 MOFs 材料在复杂环境下的应用奠定了基础。

尽管 MOFs 材料在气体分离领域展示了巨大的潜力,但要实现其在工业上的大规模应用,仍面临诸多挑战。其中,MOFs 的高合成成本是制约其商业化的重要因素。当前大部分 MOFs 的合成过程涉及昂贵的金属离子和有机配体,且反应条件复杂,导致生产成本较高。为了降低成本,研究人员正在开发更为简便且低成本的合成路线,例如采用水相合成法、低温合成技术等新型方法。MOFs 在长期使用中的稳定性也是一个亟待解决的问题<sup>[8]</sup>。许多 MOFs 在高温、高压或潮湿环境下容易失去稳定性,影响其循环使用性能。通过对材料结构的优化以及引入更多的功能化配体,可以显著提升其稳定性。规模化生产方面,如何实现 MOFs 的大批量合成并保持一致的质量,仍需进一步的工艺改进。随着

这些技术难题的逐步攻克,MOFs 材料有望在气体分离及其他领域发挥更为广泛的应用。

## 5 结语

金属有机框架材料(MOFs)在气体分离领域展示了巨大的潜力,其优异的选择性吸附性能和可调孔结构使其在二氧化碳捕集、天然气净化等方面具有重要应用价值。然而,要实现 MOFs 在工业中的大规模应用,还需解决合成成本、长期稳定性和规模化生产等一系列技术难题。通过创新的合成方法、功能化改性以及生产工艺的优化,MOFs 材料的应用前景仍然广阔。随着相关技术的不断进步,MOFs 材料在气体分离和其他环保领域的贡献将愈加重要,未来有望成为解决全球能源与环境问题的重要技术之一。

## 参考文献

- [1] 邢婧.惰性气体在金属有机框架材料中的吸附和分离的分子模拟研究[D].北京化工大学,2025.
- [2] 田雨卿.铝铁双金属有机框架的制备、改性及其气体吸附分离性能研究[D].北京化工大学,2025.
- [3] 贺美晋.非选择性缺陷的金属有机框架膜用于高效气体分离[J].石油炼制与化工,2025,56(03):89.
- [4] 王雪莉,杨卫亚,张会成,等.金属有机框架(MOF)基混合基质膜界面改性方法及其气体分离性能[J].化工进展,2025,44(02):928-940.
- [5] 刘茜,赵孔孔,纪德强,等.柔性金属有机框架的结构调控及其气体分离应用研究进展[J/OL].化工新型材料,1-7[2025-08-02].
- [6] 张鹏.微孔金属有机框架的构筑及其二氧化碳分离性能研究[D].中北大学,2024.
- [7] 杜雪碧.含铈 MOFs 混合基质膜的制备及其 CO<sub>2</sub> 分离性能研究[D].中国科学技术大学,2024.
- [8] 王馨悦.金属有机框架材料的合成与气体吸附分离研究[D].中国科学技术大学,2024.

**版权声明:** ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**OPEN ACCESS**