

碳中和目标下工业烟气碳捕集材料的开发与优化

刘 松

环西汀新材料（江苏）有限公司 江苏南通

【摘要】工业烟气的碳捕集技术作为实现碳中和目标的重要途径，逐渐成为全球减排领域的研究重点。为了提高捕集效率和经济性，开发与优化高效的碳捕集材料显得尤为重要。本文通过分析现有的工业烟气碳捕集材料，探讨了其在性能、稳定性、成本等方面的优缺点，并提出了针对性优化策略。通过材料的功能化改性、孔结构的优化以及多种技术的联合应用，能够有效提升捕集效果，并降低能耗。本文对工业烟气碳捕集材料的发展趋势进行了总结，并展望了未来的研究方向，旨在为实现工业碳中和目标提供科学依据。

【关键词】碳捕集材料；工业烟气；碳中和；性能优化；减排技术

【收稿日期】2025 年 8 月 17 日

【出刊日期】2025 年 9 月 20 日

【DOI】10.12208/j.jccr.20250069

Development and optimization of carbon capture materials for industrial flue gases under the carbon neutrality goal

Song Liu

Huanxiting new materials (Jiangsu) Co., Ltd., Nantong, Jiangsu

【Abstract】 Carbon capture technology for industrial flue gases, as a crucial approach to achieving carbon neutrality, has gradually become a key research focus in the global emissions reduction field. To improve capture efficiency and economic viability, the development and optimization of highly efficient carbon capture materials are particularly important. By analyzing existing carbon capture materials for industrial flue gases, this paper discusses their respective advantages and disadvantages in terms of performance, stability, cost, and proposes targeted optimization strategies. Functional modification of materials, optimization of pore structures, and the integrated application of multiple technologies can effectively enhance capture performance and reduce energy consumption. This paper summarizes the development trends of carbon capture materials for industrial flue gases and outlines future research directions, aiming to provide scientific support for achieving industrial carbon neutrality.

【Keywords】 Carbon capture materials; Industrial flue gases; Carbon neutrality; Performance optimization; Emissions reduction technology

引言

碳中和目标的提出对全球工业领域提出了巨大的挑战与机遇，尤其是在能源消耗和二氧化碳排放量较高的工业烟气处理中。工业烟气中富含二氧化碳等温室气体，其对环境的影响日益严重。开发高效、低成本的碳捕集技术显得尤为重要。碳捕集技术不仅能够有效减少二氧化碳排放，还能为工业企业的可持续发展提供支持。目前，碳捕集材料的研究已逐渐成为碳减排领域的重要突破点。为了实现更高的捕集效率及降低操作成本，如何开发和优化这些材料，成为目前研究中的关键问题。本文将重点探讨工业烟气碳捕集材料的

开发和优化策略，分析其面临的技术挑战，并提出相应的解决方案。

1 工业烟气碳捕集的现状与挑战

工业烟气是现代工业生产过程中重要的排放源，主要包含二氧化碳、氮氧化物、硫氧化物等温室气体，尤其是二氧化碳，其对气候变化的影响日益显现。随着全球气候变化问题的日益严峻，越来越多的国家和地区将碳减排目标纳入发展规划。碳捕集与封存（CCS）技术被认为是应对这一挑战的重要途径之一，能够有效减少工业排放中的二氧化碳含量^[1]。尽管碳捕集技术已有显著进展，其应用仍面临众多挑战。工业烟气的组

成成分复杂, 温度和压力的变化使得碳捕集技术的效果受到影响。现有的碳捕集系统大多高能耗, 导致经济性较差。尤其是在大规模工业应用中, 高昂的成本和低效的能源利用率, 使得碳捕集的普及面临极大的困难。捕集后的二氧化碳储存问题也是当前技术面临的又一难题。二氧化碳的安全运输与长期存储成为了科学研究亟待解决的技术瓶颈。

在工业烟气碳捕集过程中, 捕集材料的性能成为关键因素。现有的捕集材料种类繁多, 包括固体吸附剂、液体溶剂及膜分离材料等, 这些材料的性能决定了捕集效率和操作成本。现阶段, 固体吸附剂在工业应用中的应用较为广泛, 但其再生能力、循环稳定性等问题尚未得到有效解决。液体溶剂技术在某些特定条件下具备较高的捕集效率, 但其蒸发损失较大, 且再生过程需要大量能源。膜分离技术在一些实验室条件下表现出较好的分离效果, 但其大规模应用仍面临成本和工艺稳定性等问题。如何开发高效、经济、稳定的捕集材料成为当前研究的重点。

除了技术问题外, 政策法规和经济激励机制的缺失也是工业烟气碳捕集面临的重大挑战之一。虽然许多国家已出台相应的碳排放政策, 但针对碳捕集技术的投资补贴和激励政策仍不完善, 这限制了企业对碳捕集技术的投资与应用。同时, 缺乏成熟的碳交易市场和二氧化碳价格机制, 使得企业在没有直接经济利益的情况下难以积极参与碳捕集项目。政府在推动碳捕集技术的商业化过程中, 需要加大政策支持力度, 优化碳定价机制, 从而为碳捕集技术的普及和应用提供保障。

2 碳捕集材料的性能优化途径

碳捕集材料的性能优化是提升碳捕集效率和降低运营成本的关键。现阶段, 最广泛应用的碳捕集材料包括吸附剂、溶剂和膜材料等。每种材料的优化途径不同, 需要根据其特性进行个性化改进。对于吸附剂而言, 优化的方向主要包括提高其吸附容量、增加其再生能力、提高选择性及改善热稳定性。近年来, 许多研究集中于开发功能化吸附剂, 例如通过化学修饰、掺杂金属元素等手段提高吸附剂对二氧化碳的选择性与吸附容量。吸附剂的表面性质和孔结构对其性能也有着重要影响。通过调控吸附剂的孔径分布和表面化学性质, 可以在一定程度上提升其捕集效果。

溶剂类碳捕集材料的优化路径则主要集中在减少能量消耗和提高吸附/解吸的循环稳定性。传统的溶剂大多采用胺类溶液, 这些溶剂虽然具有较好的捕集效

果, 但在再生过程中需要消耗大量热能^[2]。为了解决这一问题, 近年来研究者提出了多种低能耗溶剂替代方案, 例如采用有机胺溶剂、离子液体及混合溶剂等。溶剂的吸收速率、再生温度和耐腐蚀性能也是优化的关键方向。通过改善溶剂的分子结构和液相性质, 能够降低其挥发性和腐蚀性, 从而延长其使用寿命, 降低运行成本。

膜材料的优化则主要集中在提升膜的渗透性、选择性及耐久性。膜分离技术作为一种较为新颖的碳捕集方式, 具有较低的能耗和较高的分离效率。然而, 目前膜材料仍存在一些问题, 例如膜孔径分布不均、机械强度不足、膜污染问题较为严重等。为了解决这些问题, 研究者通过调整膜材料的化学成分、优化膜的结构和形态, 提高膜的机械稳定性与抗污染性能。同时, 结合纳米技术及复合材料的开发, 能够显著提高膜的选择性与分离效率, 从而实现更高效的二氧化碳捕集。

在实际应用中, 碳捕集材料的优化不仅仅是提高其性能, 还包括降低成本和提高系统的适应性。材料的批量生产技术和应用工艺也需要同步改进。随着材料科学与工程技术的进步, 未来碳捕集材料的性能优化将不仅依赖于单一的材料提升, 而是通过多材料、跨学科技术的协同作用, 实现碳捕集技术的全面提升。

3 创新技术在碳捕集材料中的应用

近年来, 随着科技的快速发展, 一些创新技术在碳捕集材料的研发中取得了显著进展。纳米技术、智能材料、3D 打印技术等新兴技术为碳捕集材料的研发提供了全新的视角和思路。纳米技术的应用使得碳捕集材料在表面修饰、孔结构设计等方面得到了极大的改善。纳米颗粒由于其较大的比表面积和独特的物理化学性质, 能够显著提升碳捕集材料的吸附容量和选择性。通过纳米材料的功能化改性, 可以实现更高效的二氧化碳吸附和更低能耗的再生过程, 尤其在高温高湿等复杂环境下, 具有较好的应用前景。

智能材料作为另一种创新性技术, 其在碳捕集中的应用前景也十分广阔。智能材料的核心特点在于能够响应外部环境变化, 如温度、湿度、pH 值等, 从而实现捕集过程的自调节。基于温度或 pH 变化的智能材料, 可以在不同操作条件下自动调节其吸附性能, 极大地提高碳捕集的效率 and 灵活性^[3-7]。智能材料的自修复功能也能延长捕集材料的使用寿命, 降低维护成本。3D 打印技术在碳捕集材料中的应用也逐渐得到了重视。3D 打印技术能够精准地控制材料的微观结构, 通过打印出具有特定孔径、表面性质的材料, 从而实现更高效

的二氧化碳捕集。通过将 3D 打印技术与传统材料相结合,研究人员能够快速设计和优化碳捕集材料的形态,解决了传统制造方法在大规模生产中可能遇到的技术瓶颈。3D 打印技术还可以定制化生产适应不同工业环境的碳捕集设备,提高整体系统的适用性。

物联网、大数据和人工智能等现代信息技术的应用正在为碳捕集技术的优化提供强大的支持。通过智能传感器和数据监测平台,能够实时收集并分析碳捕集系统中的各项数据,包括材料的运行状态、捕集效率、气体流量、温湿度等关键参数。这些数据将为碳捕集过程中的优化提供精确依据。大数据技术通过对大量历史数据的存储与分析,可以揭示潜在的性能瓶颈,帮助预测系统的故障风险,并提供优化决策建议。人工智能算法则能根据实时监测数据进行自适应调整,通过智能预测和控制优化捕集过程中的各项操作,提升系统的自动化程度,并实现能效管理。

4 碳捕集材料的发展趋势与未来方向

碳中和目标的提出为碳捕集技术及其材料的研发带来了前所未有的发展契机。未来,碳捕集材料的创新将不仅仅依赖于提高单一性能,而是更加注重多功能化的融合。即使在同一材料中同时实现高效的二氧化碳捕集能力、低能耗的再生过程和优秀的抗污染性能^[8]。为了实现这一目标,研究人员将集中在材料的复合改性上,通过调整材料的化学组成、孔结构、表面特性等多方面因素,使其能够在不同的操作条件下提供更高效率的捕集效果。多功能材料还能够有效减少二氧化碳捕集过程中的能耗,提高系统的经济性和稳定性。通过这类技术创新,未来碳捕集材料将具备更广泛的应用前景,并推动大规模碳减排技术的商业化发展。

未来碳捕集材料的优化将更加注重绿色环保和可持续性。随着环境保护法规的日益严格,未来碳捕集材料的开发将朝着环保、低污染方向发展。采用可回收、可降解的材料,减少生产过程中的能源消耗和环境影响,成为未来材料研发的重要趋势。绿色化学方法和可再生资源的利用也将成为未来研究的重点。未来的碳捕集材料将会向着更广泛的应用领域扩展,特别是在低碳工业、能源转换、废气治理等方面的应用。为了使碳捕集技术能够大规模应用于工业生产,未来的研究

还需要解决与材料性能、工艺稳定性以及设备运行的相关问题。随着碳中和目标的推进,碳捕集材料的商业化应用将逐渐加速,而技术突破和政策支持将共同推动其发展,实现全球碳减排目标的达成。

5 结语

碳中和目标的实现离不开高效、经济的碳捕集技术的支持。随着碳捕集材料的不断创新与优化,未来将能够更好地应对工业烟气中的二氧化碳排放问题。通过多功能化材料的研发,提升捕集效率、降低能耗并提高材料稳定性,碳捕集技术有望在大规模工业应用中发挥更大作用。然而,技术突破仍需解决成本、性能稳定性及大规模推广等挑战。未来,结合先进的材料科学与信息技术,碳捕集领域必将迎来更加广阔的发展空间,推动全球碳减排目标的实现。

参考文献

- [1] 李琮,李珏,彭若飞,等. 钢铁工业烟气 MEA 脱碳工艺及过程模拟[J].当代化工,2025,54(06):1488-1493+1498.
- [2] 何依芯,陈海平,王勇,等. 吸附法碳捕集技术研究进展[J].化工机械,2025,52(03):373-380.
- [3] 姚宁. 基于专利分析的工业烟气脱硝技术发展态势研究[J].化工管理,2025,(16):98-100+109.
- [4] 郭春花. 碳捕集纤维:从工业废气到绿色材料的蜕变之路[J].纺织服装周刊,2025,(16):25.
- [5] 刘权升. 工业烟气捕集二氧化碳的超重力技术中试研究[J].山东化工,2025,54(06):239-241+244.
- [6] 刘展均. 基于 MEA 碳捕集过程的溶剂降解模型研究[J].石油与天然气化工,2024,53(05):67-76.
- [7] 高宁博,王明晨,杨天华,等. 有机燃料燃烧烟气的二氧化碳捕集技术研究[J].洁净煤技术,2024,30(S2):562-572.
- [8] 王文博. 富氧/烟气再循环对锅炉热效率及二氧化碳捕集的影响研究[J].化工设计,2024,34(02):42-45+2.

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