

## CO<sub>2</sub> 吸附捕集技术研究综述

方嘉<sup>1,2</sup>, 许汐龙<sup>1\*</sup>, 衣程程<sup>1</sup>, 王柯鉴<sup>1</sup>, 田维<sup>1</sup>, 左子农<sup>1</sup>, 韩伟强<sup>1</sup>, 韩志强<sup>1\*</sup>

(1. 西华大学汽车与交通学院, 四川 成都 610039; 2. 动力机械与工程教育部重点实验室, 上海交通大学, 上海 200240)

**摘要:** 随着全球气候变化问题引起广泛关注, CO<sub>2</sub> 的减排成为全球共同的挑战, 我国提出了“碳达峰, 碳中和”的目标。CO<sub>2</sub> 捕集技术作为一种重要的 CO<sub>2</sub> 减排方法, 近年来受到了越来越多的关注, 在多个领域和行业中实现了应用, 其中吸附法的应用最为广泛。本文对 CO<sub>2</sub> 吸附捕集技术的吸附原理、应用领域、应用条件、应用方法以及具备的优势和挑战进行综述, 分析不同行业 CO<sub>2</sub> 排放的原理、排放的温度、压力以及气体组分, 并对比不同行业热门吸附剂的优缺点, 为进一步研究和开发 CO<sub>2</sub> 吸附捕集技术提供参考。

**关键词:** CO<sub>2</sub> 吸附捕集技术; 应用领域; 应用条件; 应用方法

中图分类号: TQ116.3 文献标志码: A 文章编号: 1673-159X(2024)02-0059-11

doi:10.12198/j.issn.1673-159X.5192

### A Review of CO<sub>2</sub> Adsorption and Capture Technologies

FANG Jia<sup>1,2</sup>, XU Xilong<sup>1\*</sup>, YI Chengcheng<sup>1</sup>, WANG Kejian<sup>1</sup>, TIAN Wei<sup>1</sup>,  
ZUO Zinong<sup>1</sup>, HAN Weiqiang<sup>1</sup>, HAN Zhiqiang<sup>1\*</sup>

(1. School of Automobile and Transportation, Xihua University, Chengdu 610039 China;

2. Key Laboratory of Power Machinery and Engineering of Ministry of Education, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240 China)

**Abstract:** Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emission reduction has become a common global challenge as the global climate change issue has attracted widespread attention. China has put forward the goal of "carbon peak, carbon neutral". CO<sub>2</sub> capture technology, as an important CO<sub>2</sub> reduction method, has received more and more attention in recent years, and has been applied in a number of fields and industries, among which the adsorption method is the most widely used. A number of industries utilize the adsorption method to capture CO<sub>2</sub>. The advantages of adsorption principle, application fields, application conditions, application methods, and the advantages of CO<sub>2</sub> capture technology have been discussed. Adsorption principle, application field, application conditions, application method, advantages and challenges of CO<sub>2</sub> adsorption and

收稿日期: 2023-08-01

基金项目: 四川省科技计划资助(2023YFG0202, 2022NSFSC0196); 动力机械与工程教育部重点实验室开放基金(202202)。

第一作者: 方嘉(1987—)男, 副教授, 博士, 主要研究方向为发动机排放后处理。

ORCID: 0000-0001-6843-3791 E-mail: 531495648@qq.com

\* 通信作者: 许汐龙(2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为发动机排放后处理。

ORCID: 0009-0003-6209-8912 E-mail: 1239708846@qq.com

韩志强(1982—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为柴油机新概念燃烧基础理论及相关领域的研究。

ORCID: 0000-0003-0306-6446 E-mail: 8312862@qq.com

引用格式: 方嘉, 许汐龙, 衣程程, 等. CO<sub>2</sub> 吸附捕集技术研究综述[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2024, 43(2): 59-69.

FANG Jia, XU Xilong, YI Chengcheng, et al. A Review of CO<sub>2</sub> Adsorption and Capture Technologies[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2024, 43(2): 59-69.

capture technology are reviewed in this review. This paper analyzes the principle of CO<sub>2</sub> emission in different industries, emission temperature, pressure, and gas components, and compares the advantages and disadvantages of popular adsorbents in different industries. This research can provide references for the further research and development of the application of CO<sub>2</sub> adsorption and capture technology.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> adsorption and capture technology; application field; application condition; application method

近年来,全球气候变化引发的问题日益严峻,CO<sub>2</sub>的排放成为全球范围内共同面临的挑战。作为主要的温室气体之一,CO<sub>2</sub>对地球的气候和生态系统稳定性具有重要影响。为了减少CO<sub>2</sub>的排放量,各国积极寻找和开发创新的技术手段,CO<sub>2</sub>吸附捕集技术备受关注,并被认为是一种有效的解决方案。

CO<sub>2</sub>吸附捕集技术的原理是利用特定的吸附剂将CO<sub>2</sub>从气流中捕集并与其他气体分离。通过调节工艺条件,如温度和压力等,吸附剂能够在特定的环境中选择性地吸附CO<sub>2</sub>分子,而其他气体则可以通过改变工艺条件或选择合适的分离方法进行释放。这种技术的关键在于选择合适的吸附剂和优化工艺参数,以提高捕集效率和降低能耗。

CO<sub>2</sub>吸附捕集技术在多个领域具有广泛的应用,工业排放是其中重要的应用领域之一。大型工厂和化工厂等工业设施的CO<sub>2</sub>排放量巨大,而CO<sub>2</sub>吸附捕集技术能够有效地减少这些工业源的排放。燃煤电厂也是重要的应用领域之一,通过捕集燃烧过程中产生的CO<sub>2</sub>可以减少火力发电厂对环境的影响,并减少温室气体的排放。除此之外,CO<sub>2</sub>吸附捕集技术还可应用于石油天然气处理、食品饮料生产、汽车工业、航空航天工业等领域,为实现可持续发展做出贡献。图1为主要行业CO<sub>2</sub>排放占比。

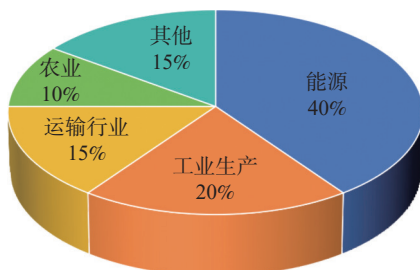


图1 主要行业CO<sub>2</sub>排放占比

Fig. 1 Percentage of CO<sub>2</sub> emissions from major industries

尽管CO<sub>2</sub>吸附捕集技术具有许多优势,如高效性、灵活性强和已有的技术基础,但该技术也面临一些挑战。一方面,吸附剂的选择和优化是关键问题,需要寻找具有高吸附容量和选择性的材料;另一方面,能源消耗和捕集后CO<sub>2</sub>的后处理也是仍待解决的难题。

本文对CO<sub>2</sub>吸附捕集技术的应用进行深入探讨,包括其原理、应用领域、应用条件、应用方法、国内外前沿技术所具备的优势和挑战等,为进一步研究和开发CO<sub>2</sub>吸附捕集技术提供参考,并推动CO<sub>2</sub>减排工作,为全球气候变化问题的解决贡献力量。

## 1 CO<sub>2</sub>吸附捕集技术的原理及方法

### 1.1 吸附捕集技术原理

CO<sub>2</sub>吸附捕集技术是一种将CO<sub>2</sub>从烟气或气体混合物中分离的技术,其基于吸附剂对CO<sub>2</sub>分子的选择性吸附,使CO<sub>2</sub>从气流中捕集出来。CO<sub>2</sub>吸附捕集技术的基本原理包括化学吸附、物理吸附、扩散等。化学吸附:某些吸附剂可以通过化学反应将CO<sub>2</sub>分子固定在其表面<sup>[1]</sup>。这种吸附机制主要依赖于吸附剂表面的化学反应活性基团,如氨基团(-NH<sub>2</sub>)或羧酸基团(-COOH),这些基团可以与CO<sub>2</sub>发生化学键的形成。化学吸附通常具有较高的吸附容量和选择性。物理吸附:物理吸附是指CO<sub>2</sub>分子与吸附剂之间的物理相互作用,包括范德华力和表面张力等<sup>[2]</sup>。这种吸附机制与CO<sub>2</sub>分子和吸附剂表面的非化学相互作用有关。物理吸附通常在相对较低的温度下发生,并且吸附剂之间的相互作用较弱。扩散:是指CO<sub>2</sub>分子在吸附剂孔隙中的运动过程。吸附剂的孔隙结构和分子尺寸决定了CO<sub>2</sub>分子的扩散速率和能力。

综合以上吸附机制,吸附剂可以通过化学吸附、物理吸附和扩散等过程与CO<sub>2</sub>分子相互作用,

从而有效地吸附和固定 CO<sub>2</sub> 分子。这些吸附机制为 CO<sub>2</sub> 捕获和储存技术提供了重要的理论基础。

CO<sub>2</sub> 吸附捕集技术一般经历吸附剂选择、吸附、吸附剂解吸与再生 3 个过程<sup>[3]</sup>。吸附剂选择过程: CO<sub>2</sub> 吸附捕集技术使用特定吸附剂, 这些吸附剂对 CO<sub>2</sub> 分子具有较高的选择性, 吸附剂的选择性是指其能够更好地吸附 CO<sub>2</sub> 而不吸附其他气体成分, 常见的吸附剂包括活性炭、分子筛和金属有机框架等<sup>[4]</sup>。吸附过程: 在 CO<sub>2</sub> 吸附捕集过程中, 吸附剂被暴露在 CO<sub>2</sub> 所在的烟气或气体混合物中, 由于吸附剂的吸附选择性, 吸附剂上的 CO<sub>2</sub> 分子被吸附并留在其中, 其他气体成分则通过吸附剂不被吸附而继续流动。吸附剂解吸与再生过程: 当吸附剂达到一定饱和度时, 需要对其进行再生以释放吸附的 CO<sub>2</sub> 分子, 吸附剂的再生过程通常包括升温 and/or 降压等操作, 以改变吸附剂中的温度和压力条件, 从而促使吸附剂中的 CO<sub>2</sub> 分子解吸并

进行回收。当 CO<sub>2</sub> 分子被吸附并从吸附剂中释放出来, 可以将其回收并进一步利用或储存, 回收的 CO<sub>2</sub> 可以用于碳封存, 即将其安全地储存起来, 避免其进入大气。

CO<sub>2</sub> 吸附捕集技术的实际操作涉及吸附剂的循环使用、吸附剂选择性的调节和吸附-解吸条件的优化等方面<sup>[5]</sup>。通过不断改进吸附剂性能、工艺等可以提高 CO<sub>2</sub> 吸附捕集技术的效率和经济性, 为减少温室气体排放做出贡献。

## 1.2 吸附方法

为了提高吸附效率, 常采用改变压力的策略。常用的吸附方法主要有 3 种<sup>[6]</sup>: 变温吸附 (temperature swing adsorption, TSA)、变压吸附 (pressure swing adsorption, PSA)、真空变压吸附 (vacuum pressure swing adsorption, VPSA)。图 2 为上述 3 种吸附法的流程图, 表 1 为 3 种吸附方法的优缺点对比。

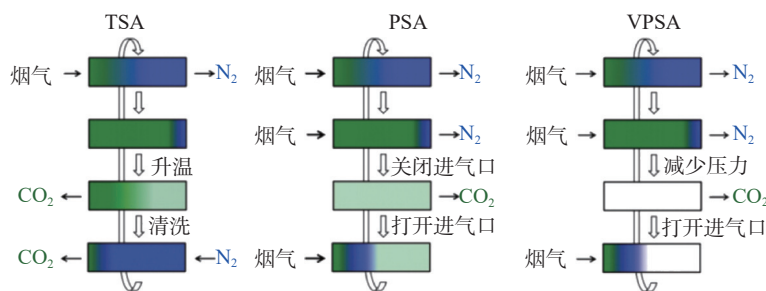


图 2 TSA、PSA、VPSA 过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of TSA, PSA and VPSA processes

表 1 3 种常用吸附方法的优缺点对比

Tab. 1 Comparison of advantages and disadvantages of three commonly used adsorption methods

吸附方法	优点	缺点
TSA	能耗相对较低, 对能源的利用效率高 在吸附和解吸过程中, 可通过调节温度来控制吸附剂的活性 TSA 技术对高炉煤气中 CO <sub>2</sub> 的吸附选择性好	对吸附剂的选择性、性能和稳定性要求较高 TSA 技术流程相对较复杂, 需要更高级的控制系统 对于大规模应用而言, TSA 技术的设备和操作成本可能较高
PSA	简单、成熟且可靠的技术, 广泛应用于工业中 对高炉煤气中的 CO <sub>2</sub> 具有高度选择性, 吸附效率高 PSA 需要的压力变化范围相对较小, 对设备的要求相对较低, 操作相对简单	需要大量的压缩空气, 能耗较高 通过产生压力变化来实现吸附与解吸过程, 循环时间较长 PSA 技术对 CO <sub>2</sub> 的吸附能力较低, 可能需要补充其他技术以提高吸附效果
VPSA	能耗相对较低, 对能源的利用效率高 在吸附和解吸过程中, 可通过调节温度来控制吸附剂的活性 VPSA 技术对高炉煤气中 CO <sub>2</sub> 的吸附选择性好	对真空系统要求较高, 设备成本较高 VPSA 循环时间较长, 有可能影响产能 VPSA 技术需要对吸附剂进行再生, 可能需要较大的气流量和能耗

这 3 种吸附方法都是通过调节吸附剂的温度和/或压力来控制 CO<sub>2</sub> 吸附和解吸的过程, 它们利用吸附剂对 CO<sub>2</sub> 分子在不同温度和压力条件下选

择性吸附和解吸的特性, 实现对 CO<sub>2</sub> 的捕集和回收。

这些吸附方法可以根据实际需求和应用场景

的不同,灵活地调节温度和压力来实现  $\text{CO}_2$  的捕集和回收。它们在  $\text{CO}_2$  吸附捕集技术中发挥重要作用,并对该技术的效率和经济性起到关键影响。

## 2 $\text{CO}_2$ 吸附捕集技术在工业生产中的应用

工业生产是  $\text{CO}_2$  排放的主要来源之一,为了减少工业活动对气候变化的负面影响,  $\text{CO}_2$  捕集技术被广泛应用于工业生产过程中,以降低  $\text{CO}_2$  排放量。钢铁行业是工业生产中  $\text{CO}_2$  排放最多的行业之一。据文献 [7]: 2020 年中国粗钢产量达到 10.65 亿 t, 以 56.7% 粗钢占比位居全球第一; 同时, 我国钢铁行业年  $\text{CO}_2$  排放量大, 占全国碳排放总量的 16% 以上, 为碳排放量最高的非电行业; 另外, 我国废钢利用率不足, 短流程电炉炼钢占比仅为 10%, 而全球电炉钢平均占比为 33%, 这从根本上造成国内钢铁行业  $\text{CO}_2$  排放强度居高不下; 据测算, 2030 年我国钢铁行业  $\text{CO}_2$  减排需求为  $2 \times 10^6 \sim 5 \times 10^6$  t/a, 2060 年减排需求为  $9 \times 10^7 \sim 1.1 \times 10^8$  t/a。我国钢铁以“高炉-转炉”长流程生产工艺为主(约占总体的 90%), 长流程工艺复杂, 排放节点更多, 物料来源更广, 经初步测算其  $\text{CO}_2$  排放量约为 1.7~2.5 t<sup>[8]</sup>, 其中高炉煤气是最大的碳排放源, 约占钢铁厂排放总量的 69%<sup>[9]</sup>, 因此对高炉煤气的  $\text{CO}_2$  捕集具有重要意义。图 3 为高炉煤气的  $\text{CO}_2$  流动图。

钢铁工业的烟道气主要来源于燃料燃烧和冶炼过程, 主要成分包括  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{SO}_2$ 、氮氧化物、挥发性有机物 (volatile organic compound VOCs) 和颗粒物等。钢铁工业的冶炼过程通常在高温下进行, 因此钢铁工业的烟道气温度较高, 达到数百摄氏度甚至更高。钢铁工业的烟道气中可能含有一些特殊的污染物, 如重金属元素、氯化物、氟化物等, 这些污染物是由于炼铁和炼钢过程中使用的原料和添加剂造成的。中国钢铁厂烟气或煤气中的  $\text{CO}_2$  主要为中等体积分数, 其  $\text{CO}_2$  主要来源于石灰石(碳酸根)和煤, 主要排放源包括石灰窑尾气、焦炉煤气、烧结烟气、高炉煤气、转炉煤气等。

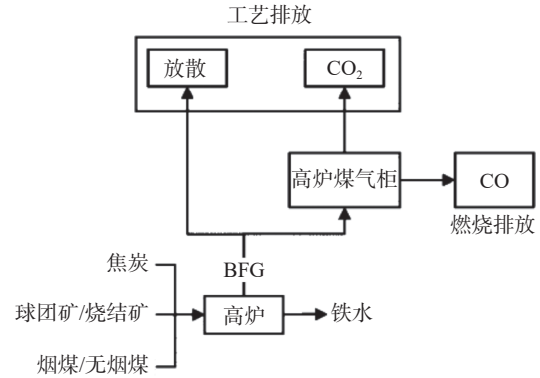


图 3 高炉煤气的  $\text{CO}_2$  流动图<sup>[10]</sup>

Fig. 3  $\text{CO}_2$  flow diagram of blast furnace gas<sup>[10]</sup>

目前, 国内外对钢铁厂中  $\text{CO}_2$  吸附捕集技术的研究如下: Kumar 等<sup>[11]</sup> 将磁铁矿 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) 和铁 ( $\text{Fe}$ ) 的混合物作为炼铁行业的  $\text{CO}_2$  吸附剂, 混合物与  $\text{CO}_2$  反应形成菱铁矿 ( $\text{FeCO}_3$ ), 反应混合物在  $200\text{ }^\circ\text{C}$  和  $1\text{ MPa}$   $\text{CO}_2$  压力下 3 h 的捕获能力为  $7.98\text{ mmol}$ , 通过在气流下  $350\text{ }^\circ\text{C}$  加热菱铁矿, 磁铁矿得以完全再生; Zhao 等<sup>[12]</sup> 通过变温吸附从燃烧后的烟气中捕获  $\text{CO}_2$ , 在 4 种典型吸附剂材料中选出  $\text{Mg-MOF-74}$  和 13X 沸石两种性能最好的吸附剂, 其中  $\text{Mg-MOF-74}$  在纯度、生产率、比热能消耗和二次律效率 4 个指标上表现良好, 13X 沸石在选择性、回收率、最小分离工作和捕集成本 4 个指标方面表现出色。目前, 钢铁行业中  $\text{CO}_2$  吸附剂普遍存在成本高、吸附容量有限以及再生困难等问题, 一些吸附剂材料的再生需要消耗大量能源, 甚至逆转了减少排放目标的初衷。表 2 是钢铁行业热门吸附剂优缺点对比。

在钢铁行业,  $\text{CO}_2$  捕集主要应用于炼铁和炼钢过程中的高炉煤气、炉渣中的  $\text{CO}_2$ 。具体的捕集方法是将  $\text{CO}_2$  与吸附剂接触, 通过化学吸收或物理吸附的方式将  $\text{CO}_2$  吸附到吸附剂表面, 然后通过升温或改变压力等条件进行脱附, 使吸附剂再生并将  $\text{CO}_2$  释放出来。目前, 钢铁行业常用的  $\text{CO}_2$  捕集吸附剂主要是氨基碳酸盐 (amines) 类化合物<sup>[13]</sup> 以及固体吸附剂, 如活性炭、金属有机骨架材料 (metal organic framework, MOF)<sup>[14]</sup>、沸石等。这些吸附剂具有良好的  $\text{CO}_2$  吸附性能, 可以与  $\text{CO}_2$  发生化学、物理反应, 并在特定条件下将其吸附和脱附。尽管这些吸附剂在  $\text{CO}_2$  捕集中具有较高的效率和成熟的技术应用, 但也存在一些挑战,

表 2 钢铁行业热门吸附剂优缺点对比

Tab. 2 Comparison of advantages and disadvantages of popular adsorbents in the steel industry

吸附剂	优点	缺点
磁铁矿(Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )和铁(Fe)的混合物	丰富的资源:磁铁矿和铁是地球上丰富的资源,相对较易获取和加工 高吸附容量:磁铁矿和铁可以通过化学反应与CO <sub>2</sub> 发生氟化反应,形成稳定的碳酸铁产物,具有较高的CO <sub>2</sub> 吸附容量 低成本:由于磁铁矿和铁资源广泛且相对便宜,使用混合物作为吸附剂可能具有较低的成本	反应动力学:磁铁矿和铁与CO <sub>2</sub> 发生氟化反应的速率较慢,可能需要较高的温度和压力条件才能达到一定的吸附效果 可逆性问题:CO <sub>2</sub> 吸附后的碳酸铁产物可能难以完全再生,需要经过高温处理等复杂的反应条件才能释放吸附的CO <sub>2</sub> 并恢复吸附剂的活性 操作复杂性:CO <sub>2</sub> 吸附和再生过程涉及到高温和高压条件,需要特殊的处理和控制系统,操作复杂性相对较高
Mg-MOF-74	高吸附容量:Mg-MOF-74具有高度可调节的孔隙结构,提供大量的吸附位点,使其具有较高的CO <sub>2</sub> 吸附容量 高度选择性:Mg-MOF-74具有特定的结构和孔隙调节能力,可实现对CO <sub>2</sub> 的高度选择性吸附,降低了其他气体的干扰 可再生性:Mg-MOF-74可通过加热或减压等方法使其释放已吸附的CO <sub>2</sub> ,并恢复吸附剂的活性,具有较好的再生性 经济性:Mg-MOF-74可通过合成工艺进行大规模制备,并具有较低的制备成本和较好的稳定性	湿度敏感性:Mg-MOF-74对湿度较敏感,当环境湿度较高时,可能会降低其CO <sub>2</sub> 的吸附能力 动力学限制:Mg-MOF-74吸附CO <sub>2</sub> 的速率相对较慢,需要较长的吸附时间来实现充分吸附 操作条件:为了实现高效的CO <sub>2</sub> 吸附和再生,可能需要进行温度升降、压力调节等特殊操作,增加了操作复杂性和能源消耗
13X沸石	高吸附容量:13X沸石具有大量的微孔和介孔结构,提供了较大的比表面积和孔隙,从而使其具有较高的CO <sub>2</sub> 吸附容量 强吸附性能:13X沸石对CO <sub>2</sub> 具有较强的选择性吸附能力,能够有效地吸附CO <sub>2</sub> ,减少CO <sub>2</sub> 排放 可再生性:13X沸石可以通过加热等方法使其释放已吸附的CO <sub>2</sub> ,并恢复吸附剂的活性,具有较好的再生性能 工业应用广泛:13X沸石作为一种常见的吸附剂,在许多工业领域已得到广泛应用,具备良好的工业可行性和经济性	湿度敏感性:13X沸石对湿度较敏感,当环境湿度较高时,其CO <sub>2</sub> 吸附能力可能会受到影响 沸石失活:在高温和高湿度环境下,13X沸石可能会发生结构破坏或失活,从而导致吸附性能下降 限制的温度范围:13X沸石对温度较为敏感,其吸附性能在较高温度和较低温度条件下可能会减弱 空间占用:由于13X沸石颗粒较大,需要相对较大的设备容积和空间来容纳吸附剂床,增加了设备成本和占地面积

如吸附剂的选择性、能源消耗、吸附剂的再生成本等;因此,展望CO<sub>2</sub>吸附剂在钢铁生产中的未来发展,可以预见有以下3个方向。创新材料研发:随着科技的不断发展,新型的CO<sub>2</sub>吸附剂材料可能被研发出来,具有更高的吸附效率、容量和稳定性。这些创新材料可以减少吸附剂的使用量、操作频率和再生能耗,进一步降低钢铁生产过程中的碳排放。有效能源利用:在CO<sub>2</sub>吸附剂的再生过程中能源消耗是一个重要问题,未来可以期待通过能源优化、新技术的引入等方式降低再生过程中的能源消耗,提高能源利用率。完善循环经济模式:随着对可持续发展意识的增强,未来CO<sub>2</sub>吸附剂的应用可能更加强调循环经济理念,吸附剂的再生和废弃物处理等环节将更加注重资源的回收和再利用,减少对环境的负面影响,进一步实现钢铁生产的可持续性。

总之,CO<sub>2</sub>吸附剂在钢铁生产中的应用有望得到进一步的创新和发展,以实现更加环保和可持续发展的钢铁生产模式。同时,行业、技术和政策的共同努力将推动CO<sub>2</sub>吸附剂在未来的广泛应用和推广。

### 3 CO<sub>2</sub> 捕集技术在能源生产中的应用

CO<sub>2</sub>捕集技术在能源生产中被广泛应用,在火力发电厂中CO<sub>2</sub>捕集技术可以用于捕集燃烧过程中产生的CO<sub>2</sub>。将燃烧产生的废气通过吸收剂(如氨水或胺类溶液)吸收其中的CO<sub>2</sub>,形成富集的CO<sub>2</sub>溶液,随后通过加热和减压等方法将CO<sub>2</sub>从溶液中分离出来,以便进行储存或其他后续利用。

CO<sub>2</sub>捕集技术在能源生产中具有巨大的潜力,可以帮助减少CO<sub>2</sub>的排放并应对气候变化。然而,需要指出的是CO<sub>2</sub>捕集技术仍处于发展阶段,并面临着成本高昂以及储存和使用CO<sub>2</sub>所带来的挑战。在能源生产行业中,目前燃煤发电厂是CO<sub>2</sub>排放占比最多、捕集技术使用最多的行业。随着当今社会的快速发展,居民和企业对电能的需求与日俱增,必然导致电力企业加大电能量来满足市场的需求。电力工业主要是基于化石燃料资源的分支,是人为CO<sub>2</sub>排放到地球大气中的主要来源<sup>[15]</sup>。燃煤发电厂是最常见的发电方式之一,也面临着环境污染和CO<sub>2</sub>排放的挑战<sup>[16]</sup>。在

中国的 CO<sub>2</sub> 排放组成中,能源领域碳排放占比最高,其中电力行业占能源领域碳排放的 40% 以上,火电机组是最主要的 CO<sub>2</sub> 排放源,因此实现“双碳”目标,能源领域是主战场,电力行业是排头兵<sup>[17]</sup>。全球电力生产稳步增长,以煤炭为主的火力发电占绝对比重,天然气、可再生能源(水能除外)发电占比呈上升态势<sup>[18]</sup>。

燃煤发电厂 CO<sub>2</sub> 的排放源包括燃料燃烧排放、脱硫过程排放、电厂外购入电排放。其中化石燃料包括发电燃煤、锅炉辅助燃烧(启动及稳燃)所用燃料油、厂区办公用车及生产用车所耗燃油<sup>[19]</sup>。具体来说,CO<sub>2</sub> 排放主要发生在以下几个环节。燃烧过程:在燃煤电厂中燃烧煤炭,通过氧化反应产生热能,驱动蒸汽发电机发电。在这个过程中,煤炭中的碳与氧气结合生成 CO<sub>2</sub>,同时也可能产生少量的一氧化碳和氮氧化物。脱硫过程:为了减少煤炭燃烧过程中产生的二氧化硫排放,燃煤电厂通常进行脱硫处理。常见的脱硫方法是利用石灰石或其他化学吸收剂来吸收废气中的二氧化硫。然而,这个过程会消耗大量的能源,由于能源消耗的增加,间接使 CO<sub>2</sub> 排放量也相应增加。除了上述环节,燃煤电厂还涉及其他辅助系统和工作环节,例如燃料储存和输送、废气处理以及固体废弃物处理等,这些环节也可能对 CO<sub>2</sub> 排放产生影响。然而,燃煤燃烧过程仍然是燃煤电厂中最主要的 CO<sub>2</sub> 排放环节,燃烧后 CO<sub>2</sub> 排放占总废气的 15%~40%,温度达到 200~400 °C,除 CO<sub>2</sub> 以外还有一氧化碳、氮氧化物、硫氧化物、颗粒物等。图 4 显示燃煤电厂 CO<sub>2</sub> 的排放源。

目前,国内外对燃煤发电厂中 CO<sub>2</sub> 的吸附捕集技术的研究如下:Siriruang 等<sup>[21]</sup>认为使用粉煤灰作为固体吸附材料通过表面吸附和碳酸化反应捕集 CO<sub>2</sub> 是一种经济可行的减少 CO<sub>2</sub> 的技术,即混凝土的矿物掺合料后利用粉煤灰作为新型 CO<sub>2</sub> 吸附剂;Snider 等<sup>[22]</sup>利用 Y 沸石膜材料吸附燃烧后的 CO<sub>2</sub>,Y 沸石膜材料的渗透性和选择性能够高性价比地捕获 CO<sub>2</sub>;Ji 等<sup>[23]</sup>研究了一种新型的 KOH 活化生物衍生活性炭(bamboo-based activated carbon impregnated with potassium hydroxide, BBC-KOH),BBC-KOH 在 25 °C 具有优异的吸附能力

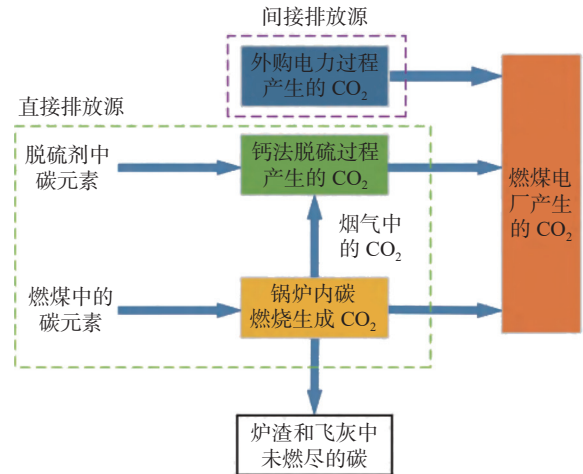


图 4 燃煤电厂 CO<sub>2</sub> 的排放源<sup>[20]</sup>

Fig. 4 Sources of CO<sub>2</sub> emissions from coal-fired power plants<sup>[20]</sup>

(1.50 mmol/g),与使用单乙醇胺和聚乙烯亚胺/二氧化硅的太阳能辅助燃煤电厂系统相比,使用 BBC-KOH 的系统碳排放强度、平准化电力成本和 CO<sub>2</sub> 去除成本等表现最佳,BBC-KOH 可能是一种潜在的碳捕获解决方案,具有低成本、低再生温度和出色的吸附能力;Halliday 等<sup>[24]</sup>利用熔融金属氧化物进行高温 CO<sub>2</sub> 捕获,同时去除其他酸性气体,结果表明熔融吸附剂在 CO<sub>2</sub> 捕获方面的性能优于最先进的胺基系统。目前,燃煤电厂的 CO<sub>2</sub> 吸附剂依然面对制造和使用成本过高的问题,与此同时再生能源消耗过大、废物处理成本过高也是燃煤电厂吸附剂必须克服的难题。表 3 是当前热门燃煤电厂吸附剂优缺点的对比。

燃煤电厂的 CO<sub>2</sub> 吸附捕集技术相对成熟,拥有非常丰富的吸附材料。如何在不同环境下将不同吸附剂的效能更好地发挥出来,以及吸附剂的解吸和再生成本等是需要持续研究的课题。未来的研发将注重提高 CO<sub>2</sub> 吸附剂的效率,使其能更高效地捕集和吸附燃煤电厂排放的 CO<sub>2</sub>。新型吸附剂材料的研发和优化将会推动吸附效率的提升,从而减少 CO<sub>2</sub> 排放。未来的发展将致力于降低能源消耗,新的再生技术和工艺改进将改善能源效率,减少再生过程中的能耗和碳排放。因此,仍然需要持续的研发和创新才能推动 CO<sub>2</sub> 捕集技术的进一步发展和应用。通过不断改进和优化吸附材料和吸附技术,可以提高吸附效率,降低成本,为其他行业提供吸附 CO<sub>2</sub> 的技术参考。

表 3 热门燃煤电厂吸附剂优缺点的对比

Tab. 3 Comparison of advantages and disadvantages of adsorbents in popular coal-fired power plants

吸附剂	优点	缺点
粉煤灰	<p>资源利用: 粉煤灰是燃煤后产生的副产品, 使用它作为固体吸附材料可以实现对资源的有效利用, 减少环境污染和废弃物的产生</p> <p>经济性: 相对于传统的吸附材料, 粉煤灰通常具有较低的成本, 能够降低电厂的运营成本</p> <p>吸附能力<sup>[25]</sup>: 粉煤灰具有较大的表面积和孔隙结构, 可以提供大量活性吸附位点, 从燃煤烟气中去除有害的污染物, 如二氧化硫、氮氧化物、重金属等</p> <p>稳定性: 粉煤灰由于经历了燃烧过程, 在高温条件下经历了结晶、矿化等反应, 具有较好的化学和热稳定性, 能够在燃煤电厂的工作环境中长时间稳定运行</p>	<p>储存和处理: 粉煤灰的收集、储存和处理需要一定的空间和设施, 对电厂的管理和运营提出了一定要求</p> <p>物化性质: 粉煤灰中可能含有一定量的无害或有害成分, 如碳粒、重金属等, 需要进行合理的分离和处理, 避免对环境 and 人体造成污染和健康风险</p> <p>吸附效果: 粉煤灰作为固体吸附材料的吸附效果可能受到煤种、燃烧工艺等因素的影响, 需要进行实验和调整以达到较好的吸附效果</p> <p>再生和循环利用: 粉煤灰在使用过程中会逐渐饱和而失效, 需要进行再生或替换, 同时也需要思考如何实现其循环利用, 以减少资源消耗和废弃物排放</p>
BBC-KOH	<p>吸附性能优异: BBC-KOH具有良好的孔隙结构和表面活性, 能够高效吸附燃煤烟气中的污染物, 如二氧化硫、氮氧化物等。它具有较大的比表面积和高度发达的微孔结构, 提供了充足的吸附位点, 具有良好的吸附能力</p> <p>高吸附选择性: BBC-KOH对不同污染物具有选择性吸附的特性, 能够有针对性地去特定的污染物, 从而提高了吸附效率和净化效果</p> <p>热稳定性和再生能力: BBC-KOH可以在高温条件下工作, 具有较好的热稳定性, 不易燃烧或分解, 因此可以循环使用。它可以通过热解或其他再生方法进行再生, 回收吸附能力, 减少废弃物的产生和处理成本</p> <p>环境友好: BBC-KOH是一种活性炭基础材料, 不含重金属和有害成分, 对环境的影响较小。同时, 其使用可以有效减少燃煤电厂的大气污染物排放, 改善空气质量</p>	<p>成本较高: 相对于传统吸附材料, BBC-KOH的制备成本较高, 这可能会对燃煤电厂的运营成本产生一定影响</p> <p>比表面积退化: BBC-KOH在使用过程中会逐渐发生吸附位点饱和和外部区域质量传递过程, 导致比表面积退化, 从而影响其吸附性能</p> <p>饱和和再生周期: BBC-KOH吸附容量有限, 需要定期更换或再生, 以保证其吸附效能。饱和和再生周期的控制需要精确的管理和操作</p> <p>蒸汽带走效应: BBC-KOH在使用过程中, 由于烟气中的水蒸气存在, 可能导致蒸汽带走效应的发生, 降低吸附效率</p>
熔融金属氧化物	<p>高温稳定性: 熔融金属氧化物具有较高的熔点和热稳定性, 能够在高温环境下保持良好的物理和化学性质。这使得它能够在燃煤电厂的高温烟气中进行吸附, 并且有较长的使用寿命</p> <p>高吸附能力: 熔融金属氧化物具有较大的比表面积和孔隙结构, 提供了丰富的吸附位点, 能够有效吸附燃煤烟气中的污染物, 如二氧化硫、氮氧化物等。它的高吸附能力可以提供较高的污染物去除效率</p> <p>连续排放设备: 熔融金属氧化物可以设计为一种连续排放设备, 即烟气通过吸附床时, 材料在一侧吸附污染物, 另一侧释放干净的烟气。这使得它可以实现烟气的同时净化, 无需停机和更换吸附材料</p> <p>循环再生能力: 熔融金属氧化物可以通过加热或其他方法进行再生, 将吸附的污染物释放出来, 回收吸附能力, 减少废弃物的产生和处理成本</p>	<p>高能耗: 熔融金属氧化物需要高温才能实现吸附和再生, 这需要大量的能源消耗, 增加了成本 and 环境影响</p> <p>复杂的处理过程: 熔融金属氧化物需要通过循环流化床或其他设备进行吸附和再生过程, 这需要复杂的工艺和设备, 并且对操作人员的要求较高</p> <p>有毒性或危险性: 某些熔融金属氧化物可能含有有毒金属元素, 如锂、钾等。它们的处理和回收可能存在一定的风险和困难</p> <p>再生效率的限制: 熔融金属氧化物的二氧化碳吸附性能会随着使用次数的增加而衰减, 需要经常进行再生或更换, 这会增加维护成本 and 操作复杂性</p>
胺基吸附剂 <sup>[26]</sup>	<p>高吸附选择性<sup>[27]</sup>: 胺基系统作为固体吸附材料可以具有较高的吸附选择性, 可以有选择性地吸附燃煤烟气中特定的污染物, 如二氧化硫、二氧化碳等。这可以提高吸附效率和净化效果</p> <p>脱硫效率高: 胺基系统可以有效地去除燃煤烟气中的二氧化硫, 达到较高的脱硫效率。是一种可行的烟气脱硫技术之一</p> <p>技术成熟<sup>[28]</sup>: 胺基系统作为固体吸附材料, 其技术已经相对成熟, 已经在一些燃煤电厂中得到应用, 并具有一定的工程实践和经验积累</p> <p>再生能力<sup>[29]</sup>: 胺基系统可以通过适当的方法进行再生, 将吸附的污染物释放出来, 回收吸附能力, 减少废弃物的产生 and 处理成本</p>	<p>强腐蚀性: 胺基系统一般需要与酸性烟气相接触以达到脱硫效果, 但同时也会导致胺基系统的强腐蚀性, 对设备材料提出较高要求, 增加系统的维护和运行成本</p> <p>能耗较高: 使用胺基系统进行固体吸附需要一定的能源消耗, 如循环泵的能耗、再生设备的能耗等, 这对燃煤电厂的运营成本产生影响</p> <p>废物处理问题: 胺基系统在脱硫过程中会产生废液或废渣, 需要进行适当的处理和排放, 增加了废物管理的难度和成本</p> <p>系统复杂性: 胺基系统的运行和控制相对较为复杂, 需要严格的操作和管理, 尤其是对胺基溶液的补充、循环和再生等过程需要精细的控制</p>

#### 4 CO<sub>2</sub> 吸附捕集技术在交通领域的应用

交通领域的 CO<sub>2</sub> 排放约占全球排放总量的 27%，随着汽车生产量和保有量的急剧增加，其中有 12% 的 CO<sub>2</sub> 来自汽车的尾气排放<sup>[30]</sup>。CO<sub>2</sub> 吸附捕集技术在交通领域的应用主要集中在减少车辆尾气排放产生的 CO<sub>2</sub> 并抑制气候变化的影响，通过使用吸附技术捕捉和分离尾气中的 CO<sub>2</sub>，从而减少温室气体排放。CO<sub>2</sub> 吸附捕集技术可以与燃料生产和利用过程结合使用，一种方法是通过在燃料制造过程中捕集 CO<sub>2</sub>，并将其储存或利用于其他用途，如合成可再生燃料，另一种方法是将吸附剂直接与燃料供应系统结合使用，以减少燃烧过程中排放的 CO<sub>2</sub> 量。CO<sub>2</sub> 吸附捕集技术在交通领域的应用有望减少交通活动对气候变化的负面影响，为构建低碳交通系统和可持续发展做出贡献。交通领域中尤其是传统汽车行业的 CO<sub>2</sub> 排放是我国温室气体重点排放源之一，图 5 是近年来机动车温室效应污染物排放分担率。

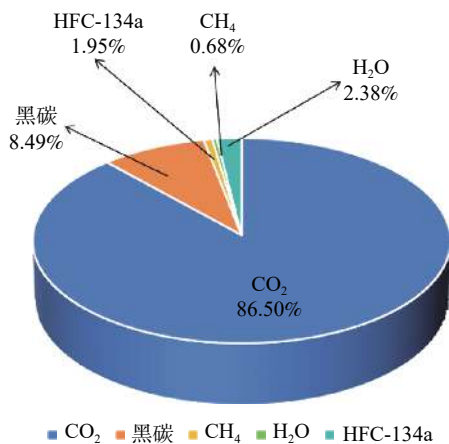


图 5 机动车温室效应污染物排放分担率<sup>[31]</sup>

Fig. 5 Greenhouse effect pollutant emission share of motor vehicles<sup>[31]</sup>

汽车行业是我国的重要支柱产业，是最主要的交通运输工具，也是我国 CO<sub>2</sub> 重点排放源之一。2019 年，全国汽车 CO<sub>2</sub> 排放量为  $9.52 \times 10^8$  t，其中乘用车、商用车分别占 38.5%、61.5%<sup>[32]</sup>。从车型看，出租车、公交车、微型客车、小型客车、中型客车、大型客车、微型货车、轻型货车、中型货车、重型货车分别占 1.3%、0.5%、0.3%、38.2%、1.1%、3.0%、0.01%、13.6%、2.2% 和 39.7%；从燃料种类

看，汽油、柴油、其他燃料（天然气、醇类燃料等）分别占 42.8%、52.5%、4.7%<sup>[33]</sup>。由此可见，汽油和柴油的燃烧是汽车 CO<sub>2</sub> 排放的主要来源，应作为传统汽车 CO<sub>2</sub> 排放控制的重点方向<sup>[31]</sup>。

汽车 CO<sub>2</sub> 产生的主要原理是燃烧所导致的化学反应。当汽车燃料（例如汽油、柴油或天然气）发生燃烧时，碳和氢元素与氧气结合产生 CO<sub>2</sub> 和水蒸气。汽车废气的组分和温度会根据不同的引擎类型、燃料和工况而有所变化。一般来说，汽车废气的主要成分包括以下几种：氮气，是空气的主要成分，约占废气比例的 78%；氧气，是空气中的重要成分，在废气中的含量通常较低；CO<sub>2</sub>，是燃烧过程中产生的主要废气组分，通常占比为 10%~20%；一氧化碳，是不完全燃烧时产生的有害气体，但现代车辆中废气处理系统通常能够将其减少到较低的水平；水蒸气，由于燃烧过程中氢元素的存在，废气中会含有一定量的水蒸气。另外，废气中还可能含有一些挥发性有机化合物（volatile organic compounds, VOCs）、氮氧化物（nitrogen oxides, NO<sub>x</sub>）、颗粒物（particulate matter, PM）等<sup>[34]</sup>。因此，汽车行业对于 CO<sub>2</sub> 的吸附捕集技术的应用条件中除了温度组分以外，还需要考虑其他组分如水蒸气等对吸附剂的干扰。废气的温度则会因为引擎工作状态、驾驶方式和时间的不同而有所变化，通常情况下废气温度在排气管内可以达到 200~800 ℃。

Kumar 等<sup>[35]</sup> 对化学溶剂进行了实验，研究从多污染物柴油机尾气中捕获 CO<sub>2</sub> 的效率，捕获的 CO<sub>2</sub> 来自 3 种伯胺溶剂，即单乙醇胺（monoethanolamine MEA）、二甲基乙醇胺（dimethylethanolamine DMEA）和冷冻氨，实验结果表明在相同环境条件下使用吸收剂 MEA、DMEA 和冷冻氨的捕获效率分别为 90.95%、57.66% 和 80.08%。Özhan 等<sup>[36]</sup> 探讨了使用从椰子壳中获得的活性炭来捕获 CI 发动机排气中的 CO<sub>2</sub> 的可能性，椰子壳基活性炭的表面结构特征和物理化学性质确定了其作为 CO<sub>2</sub> 潜在的吸附剂。Sharma 等<sup>[37]</sup> 尝试使用变温吸附从内燃机排气中捕获 CO<sub>2</sub>，提出将车载 CO<sub>2</sub> 捕获和储存单元与内燃机集成。该技术可应用于各种内燃机或斯特林发动机，并有针对性地应用于交

通领域。目前,运用于汽车尾气的 CO<sub>2</sub> 吸附剂远不如工业生产和能源领域成熟,特定环境下吸附的性能、吸附热稳定性、吸附选择性、再生成本等问

题还没有得到解决,这也是汽车尾气吸附剂必须克服的困难和挑战。表4是当前 CO<sub>2</sub> 潜在吸附剂的优缺点对比。

表4 CO<sub>2</sub> 潜在吸附剂优缺点对比Tab. 4 Comparison of advantages and disadvantages of potential CO<sub>2</sub> adsorbents

吸附剂	优点	缺点
胺类溶剂	<p>高吸附能力: 胺类溶剂具有较高的CO<sub>2</sub>吸附能力,可以有效地从汽车尾气中吸附CO<sub>2</sub></p> <p>高选择性: 胺类溶剂在吸附CO<sub>2</sub>时具有较高的选择性,能够选择性地吸附CO<sub>2</sub>而不吸附其他气体成分</p> <p>再生性: 胺类溶剂可以通过吸附后的热解或其他方法进行再生,将吸附的CO<sub>2</sub>释放出来,并可以循环使用</p>	<p>能耗较高: 胺类溶剂再生过程中需要耗费能量,因此整个吸附-再生过程可能导致能源消耗</p> <p>脱附温度较高: 胺类溶剂在再生过程中需要较高的脱附温度才能释放吸附的CO<sub>2</sub>,这可能需要额外的能源投入</p> <p>耐久性有限: 胺类溶剂的吸附性能会随着吸附-再生循环的进行而逐渐降低,其耐久性相对有限</p>
活性炭	<p>高吸附能力: 活性炭具有很高的吸附能力,可以有效地吸附CO<sub>2</sub>等有害物质,使其从尾气中去除</p> <p>广泛应用: 活性炭是一种常见的吸附剂,在工业领域和环境治理中应用广泛,具备成熟的技术和工艺</p> <p>经济性: 相对于其他吸附剂,活性炭的成本通常较低,且具备较长的使用寿命</p>	<p>选择性较低: 活性炭对CO<sub>2</sub>和其他气体成分的选择性较低,可能无法有效地区分和吸附目标气体</p> <p>饱和后再生困难: 当活性炭饱和和吸附了大量的CO<sub>2</sub>后,再生或回收这些CO<sub>2</sub>比较困难,可能需要额外的处理步骤</p> <p>高压降: 活性炭会对尾气系统产生一定的阻力,导致尾气排放流受限或增加发动机负担</p>
MOF	<p>高吸附能力: MOF材料具有高度可调的孔隙结构和表面积,可提供大量的吸附位置,从而实现高效吸附CO<sub>2</sub>的能力</p> <p>高选择性: MOF材料的结构可以进行精确设计,使其具备针对特定分子的选择性吸附能力,可以选择性地吸附CO<sub>2</sub>而不吸附其他气体成分</p> <p>可再生性: MOF材料可以通过适当的方法进行再生,将吸附的CO<sub>2</sub>进行释放,并可以循环使用</p>	<p>合成复杂性: MOF材料的合成过程相对复杂,需要精确控制反应条件和纯度,因此生产成本较高</p> <p>结构稳定性: 部分MOF材料的结构相对不稳定,在实际应用中可能受到湿度、温度等因素的影响而导致性能衰退或失效</p> <p>扩大规模困难: 目前MOF材料的大规模制备仍面临技术挑战,难以满足汽车尾气处理的大规模应用需求</p>

与工业和能源领域相比,汽车行业的 CO<sub>2</sub> 吸附捕集技术还不成熟,虽然能够选择的吸附剂有很多,但是具体到不同车型、不同条件下的 CO<sub>2</sub> 吸附研究还很少。在燃油车仍占汽车行业大比例的当前阶段,对汽车尾气 CO<sub>2</sub> 吸附捕集技术的研究是一条很好的解决途径,找到合适的吸附剂,将吸附剂的效能发挥出来是需要持续研究的课题,同时可以参考其他领域的 CO<sub>2</sub> 吸附捕集技术,为汽车行业的研究提供参考。

未来将致力于提高吸附剂的吸附效率,以更有效地捕获和吸附汽车尾气中的 CO<sub>2</sub>。再生是 CO<sub>2</sub> 吸附剂技术的一个重要环节,为了实现吸附剂的可持续使用,需要开发可再生的吸附剂,高效地释放和回收吸附的 CO<sub>2</sub>。汽车尾气除了 CO<sub>2</sub> 外,还包含其他有害气体和颗粒物。在吸附剂技术的基础上,可以考虑将吸附剂与其他废气净化技术(如催化转化、颗粒物捕集等)相结合,以实现更全面的尾气净化效果。尽管 CO<sub>2</sub> 吸附剂技术在汽车尾气处理中具有潜力,但面临着一些挑战,如成本、体

积、耐久性等;因此,未来的研发和改进需要聚焦解决这些问题,以实现在汽车工业应用中的可行性和可持续性。

## 5 结束语

本文对 CO<sub>2</sub> 吸附捕集技术的原理、应用领域、应用条件、应用方法、国内外前沿技术所具备的优势和挑战进行了综述,列举了不同行业 CO<sub>2</sub> 吸附剂的优缺点,为未来 CO<sub>2</sub> 吸附捕集技术的研究奠定基础。

CO<sub>2</sub> 吸附捕集技术广泛应用于电力行业、工业过程、交通等领域。在电力行业,该技术可用于煤炭和天然气发电厂,减少 CO<sub>2</sub> 排放。在工业过程中,CO<sub>2</sub> 吸附捕集技术可以应用于炼油、钢铁、水泥等行业,降低工业过程的碳排放。CO<sub>2</sub> 吸附捕集技术具有很高的减排潜力和灵活性。它可以与其他碳减排技术相结合,如氢能和电动化交通。此外,不断提高吸附剂的选择性和吸附容量,改进吸附工艺和降低成本,也将进一步促进该技术的推广

和应用。CO<sub>2</sub> 吸附捕集技术作为一项关键的温室气体减排技术,具有巨大的潜力和前景,通过不断地研究和创新,可以进一步推动 CO<sub>2</sub> 吸附捕集技术的发展。

虽然 CO<sub>2</sub> 吸附捕集技术在减排领域具有重要意义,但仍面临一些挑战,如吸附剂的稳定性和再生成本、大规模应用的经济可行性等。未来的发展方向包括研发更具选择性、高效和经济的吸附剂,提高吸附过程的能效,并降低系统建设和运营成本。

### 参 考 文 献

- [1] PATEL H A, BYUN J, YAVUZ C T. Carbon dioxide capture adsorbents: Chemistry and methods[J]. *ChemSusChem*, 2017, 10(7): 1303 – 1317.
- [2] ALI ABD A, NAJI S Z, HASHIM A S, et al. Carbon dioxide removal through physical adsorption using carbonaceous and non-carbonaceous adsorbents: A review[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, 8(5): 104142.
- [3] SHARMA H, DHIR A. Capture of carbon dioxide using solid carbonaceous and non-carbonaceous adsorbents: A review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2021, 19(2): 851 – 873.
- [4] LUO J P, ZHANG J A, YIN N, et al. An experimental strategy for evaluating the energy performance of metal - organic framework-based carbon dioxide adsorbents[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 442: 136210.
- [5] JI G Z, YANG H, MEMON M Z, et al. Recent advances on kinetics of carbon dioxide capture using solid sorbents at elevated temperatures[J]. *Applied Energy*, 2020, 267: 114874.
- [6] SUMIDA K, ROGOW D L, MASON J A, et al. Carbon dioxide capture in metal-organic frameworks[J]. *Chemical Reviews*, 2012, 112(2): 724 – 781.
- [7] 雷英杰. 中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021)发布 建议开展大规模 CCUS 示范与产业化集群建设 [J]. *环境经济*, 2021(16): 40 – 42.
- LEI Y J. China's carbon dioxide capture, utilization and storage (CCUS) annual report (2021) is released, suggesting large-scale CCUS demonstration and industrialization cluster construction[J]. *Environmental Economics*, 2021(16): 40 – 42.
- [8] 吉立鹏, 吴礼云, 陈俊锋, 等. 钢铁企业石灰窑二氧化碳减排研究与实践应用 [J]. *冶金能源*, 2021, 40(4): 3 – 6.
- JIL P, WU L Y, CHEN J F, et al. Research and practical application of carbon dioxide emission reduction of lime kiln in iron and steel enterprises[J]. *Metallurgical Energy*, 2021, 40(4): 3 – 6.
- [9] 杨正山. 钢铁高炉煤气的二氧化碳捕集技术研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2019.
- YANG Z S. Research on carbon dioxide capture technology of iron and steel blast furnace gas [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2019.
- [10] 王睿琦, 杜宪伟. 长流程钢铁企业废水零排放实践与探讨[J]. *山东冶金*, 2022, 44(3): 61 – 65.
- WANG R Q, DU X W. Practice and discussion on zero discharge of waste water in long-process iron and steel enterprises[J]. *Shandong Metallurgy*, 2022, 44(3): 61 – 65.
- [11] KUMAR S, DROZD V, DURYGIN A, et al. Capturing CO<sub>2</sub> emissions in the iron industries using a magnetite-iron mixture[J]. *Energy Technology*, 2016, 4(5): 560 – 564.
- [12] ZHAO R K, LIU L C, ZHAO L, et al. A comprehensive performance evaluation of temperature swing adsorption for post-combustion carbon dioxide capture[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 114: 109285.
- [13] HU X E, LIU L, LUO X, et al. A review of N-functionalized solid adsorbents for post-combustion CO<sub>2</sub> capture[J]. *Applied Energy*, 2020, 260: 114244.
- [14] LIN J B, NGUYEN T T T, VAIDHYANATHAN R, et al. A scalable metal-organic framework as a durable physisorbent for carbon dioxide capture[J]. *Science*, 2021, 374(6574): 1464 – 1469.
- [15] HAMOUDA A S, ELDIEN M S, ABADIR M F. Carbon dioxide capture by ammonium hydroxide solution and its possible application in cement industry[J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2020, 11(4): 1061 – 1067.
- [16] ZAICHENKO V M, SHTERENBERG V Y. Capture of CO<sub>2</sub> at thermal power stations as one of the main trends towards reducing anthropogenic carbon dioxide emissions[J]. *Thermal Engineering*, 2019, 66(6): 440 –

449.

[17] 张彬, 靳阿妮, 吉朝阳, 等. 火力发电厂二氧化碳在线监测方案对比研究[J]. *能源与节能*, 2022(12): 164 – 167.

ZHANG B, JIN A N, JI Z Y, et al. Comparison of carbon dioxide on-line monitoring schemes in thermal power plants[J]. *Energy and Conservation*, 2022(12): 164 – 167.

[18] 孙红杰. 能源系统转型对减缓气候变化设定目标的响应及模拟分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.

SUN H J. Response and simulation analysis of energy system transformation to the target of mitigating climate change[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.

[19] 索新良, 王鹏辉. 火力发电厂碳排放测算方法和减排措施研究[J]. *能源环境保护*, 2017, 31(2): 17 – 19.

SUO X L, WANG P H. Research on calculation method of carbon emission and emission reduction measures in thermal power plant[J]. *Energy Environmental Protection*, 2017, 31(2): 17 – 19.

[20] 王萍萍, 赵永椿, 张军营, 等. 双碳目标下燃煤电厂碳计量方法研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2022, 28(10): 170 – 183.

WANG P P, ZHAO Y C, ZHANG J Y, et al. Research progress on carbon measurement methods of coal-fired power plants under the background of carbon neutrality[J]. *Clean Coal Technology*, 2022, 28(10): 170 – 183.

[21] SIRIRUANG C, TOOCHINDA P, JULNIPITAWONG P, et al. CO<sub>2</sub> capture using fly ash from coal fired power plant and applications of CO<sub>2</sub>-captured fly ash as a mineral admixture for concrete[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 170: 70 – 78.

[22] SNIDER M T, VERWEIJ H. Gas sorption studies on Zeolite Y membrane materials for post-combustion CO<sub>2</sub> capture in coal-fired plants[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2014, 192: 3 – 7.

[23] JI Y, ZHANG C, ZHANG X J, et al. A high adsorption capacity bamboo biochar for CO<sub>2</sub> capture for low temperature heat utilization[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 293: 121131.

[24] HALLIDAY C, HATTON T A. The potential of molten metal oxide sorbents for carbon capture at high temperature: Conceptual design[J]. *Applied Energy*, 2020, 280: 116016.

[25] CHEN H C, KHALILI N. Fly-ash-modified calcium-based sorbents tailored to CO<sub>2</sub> capture[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017, 56(7): 1888 – 1894.

[26] DUAN X, SONG G, LU G, et al. Chemisorption and regeneration of amine-based CO<sub>2</sub> sorbents in direct air capture[J]. *Materials Today Sustainability*, 2023, 23: 100453.

[27] BAI F T, LIU X, SANI S, et al. Amine functionalized mesocellular silica foam as highly efficient sorbents for CO<sub>2</sub> capture[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 299: 121539.

[28] OHS B, KRÖDEL M, WESSLING M. Adsorption of carbon dioxide on solid amine-functionalized sorbents: A dual kinetic model[J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 204: 13 – 20.

[29] YAUMI A L, ABU BAKAR M Z, HAMEED B H. Reusable nitrogen-doped mesoporous carbon adsorbent for carbon dioxide adsorption in fixed-bed[J]. *Energy*, 2017, 138: 776 – 784.

[30] 董尧清, 郭一君. 二氧化碳排放与中国发动机工业的任务[J]. *现代车用动力*, 2008(1): 6 – 10.

DONG Y Q, GUO Y J. Carbon dioxide emissions and tasks confront with Chinese engine industry[J]. *Modern Vehicle Power*, 2008(1): 6 – 10.

[31] 何立强. 中国机动车温室效应污染物排放清单及其削减潜力研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2014.

HE L Q. Study on emission list of greenhouse pollutants from motor vehicles in China and its reduction potential[D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2014.

[32] 郝宇, 张宗勇, 廖华. 中国能源“新常态”: “十三五”及 2030 年能源经济展望[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2016, 18(2): 1 – 7.

HAO Y, ZHANG Z Y, LIAO H. China's energy “new normal”: The forecasts for energy economy during the “13th five-year plan” and by 2030[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2016, 18(2): 1 – 7.

(下转第 106 页)

11: 620912.

[30] LIU K, ZHAO X K, GU J, et al. Effects of 12C6+ heavy ion beam irradiation on the p53 signaling pathway in HepG2 liver cancer cells[J]. *Acta Biochimica et Biophysica Sinica*, 2017, 49(11): 989 – 998.

[31] GRETEN T F, EGGERT T. Cellular senescence associated immune responses in liver cancer[J]. *Hepatic Oncology*, 2017, 4(4): 123 – 127.

[32] LI C Z, CHEN J, LI Y S, et al. 6-Phosphogluconolactonase promotes hepatocellular carcinogenesis by activating pentose phosphate pathway[J]. *Frontiers in Cell and Development Biology*, 2021, 9: 753196.

[33] MOON H, RO S W. MAPK/ERK signaling pathway in hepatocellular carcinoma[J]. *Cancers (Basel)*, 2021, 13(12): 3026.

(编校: 叶超)

(上接第 69 页)

[33] 黄志辉, 纪亮, 尹洁, 等. 中国道路交通二氧化碳排放达峰路径研究[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(2): 385 – 393.

HUANG Z H, JI L, YIN J, et al. Peak pathway of China's Road traffic carbon emissions[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(2): 385 – 393.

[34] 李思寰. 汽车企业尾气减排机制选择及策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.

LI S H. Research on mechanism selection and strategy of exhaust emission reduction in automobile enterprises[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.

[35] KUMAR P, RATHOD V, PARWANI A K. Ex-

perimental investigation on performance of absorbents for carbon dioxide capture from diesel engine exhaust[J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2021, 40(5): 13651.1 – 13651.9.

[36] ÖZHAN A, ŞAHİN Ö, KÜÇÜK M M, et al. Preparation and characterization of activated carbon from pine cone by microwave-induced ZnCl<sub>2</sub> activation and its effects on the adsorption of methylene blue[J]. *Cellulose*, 2014, 21(4): 2457 – 2467.

[37] SHARMA S, MARÉCHAL F. Carbon dioxide capture from internal combustion engine exhaust using temperature swing adsorption[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2019, 7: 143.

(编校: 夏书林)