

流化床技术: CCS 和脱碳应用中的挑战与前景

陆 勇, 李 林, 孙镇坤, 段伦博

(东南大学 能源与环境学院 东南大学能源热转换及其过程测控教育部重点实验室, 南京 210096)

摘要: 流化床反应器 (FBR) 作为碳捕集与封存 (CCS) 及工业脱碳的核心技术, 凭借其高效传热传质、操作灵活及规模化潜力, 已成为降低工业 CO₂ 排放的关键路径。本综述系统梳理了 FBR 在燃烧前、中、后三阶段的碳捕集技术进展: 燃烧前阶段通过气化工工艺将固体燃料转化为高纯度合成气, 结合钙基吸附剂强化 CO₂ 分离效率; 燃烧中碳捕集技术聚焦富氧燃烧与化学链燃烧 (CLC), 利用流态化特性优化燃烧条件, 实现烟气中 CO₂ 浓度提升至 80% 以上; 燃烧后技术则依托钙循环 (CaL) 与碱基吸附剂循环, 通过 FBR 的连续操作实现高效吸附-再生循环。此外, 太阳能与电加热技术的创新融合进一步拓展了 FBR 的低碳应用场景——太阳能驱动的高温煅烧与钙循环耦合可减少化石燃料供热产生的 CO₂ 排放并降低 30% 的能耗, 而电加热流化床通过精准温控与快速响应特性, 为生物质气化、吸附剂再生及水泥煅烧等过程提供零碳解决方案。然而, FBR 的规模化推广仍面临多重瓶颈: 吸附剂循环稳定性不足 (如烧结导致的孔隙结构坍塌与表面钝化使得钙基材料经 10 次循环后活性下降 40%)、设备磨损与高温腐蚀 (SiC 涂层可降低 70% 磨损率但仍需优化)、高能耗 (煅烧需 900-950 °C) 及工艺集成复杂性 (如 CLC 需同步控制燃料反应器、空气反应器与载氧体循环倍率)。面向碳中和目标, 未来研究需多维度突破: ① 开发高稳定性吸附材料 (如纳米改性钙基吸附剂、金属有机框架 (MOF) 材料); ② 设计多级集成反应器 (如鼓泡-输运耦合系统) 以优化传质与热管理; ③ 结合 CFD 多尺度建模与 AI 实时控制, 提升系统动态响应能力; ④ 推动跨领域协同创新, 政策层面需完善碳定价机制、加大试点项目资助, 并通过国际合作加速技术标准化进程。通过融合可再生能源、智能控制与材料创新, FBR 技术有望在电力、水泥、钢铁等高碳行业实现深度脱碳, 为全球能源结构转型提供兼具经济性与可持续性的技术支撑。

关键词: 流化床反应器; 碳捕集与封存; 脱碳技术; 太阳能; 电加热

中图分类号: TK114 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2025)03-0001-16

Fluidized bed technology: challenges and prospects in CCS and decarbonization applications

LU Yong, LI Lin, SUN Zhengkun, DUAN Lunbo

(Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, school of energy and environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Fluidized bed reactors (FBRs), with their superior heat/mass transfer efficiency, operational flexibility, and scalability, have emerged as a cornerstone technology for carbon capture and storage (CCS) and industrial decarbonization. This review comprehensively analyzes the advancements of FBR applications across pre-, mid-, and post-combustion carbon capture stages. In pre-combustion, FBRs enable efficient fuel gasification into syngas, enhanced by calcium-based adsorbents for CO₂ separation; mid-combustion techniques, including oxy-fuel combustion and chemical looping combustion (CLC), leverage fluidization dynamics to

收稿日期: 2024-12-17; 策划编辑: 常明然; 责任编辑: 李雅楠 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.QZ24121701

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U22A20435); 东南大学科研启动基金资助项目(RF1028623358)。

作者简介: 陆 勇(1960—), 男, 江苏江阴人, 教授, 博士。E-mail: dyonglu@seu.edu.cn

通讯作者: 段伦博(1982—), 男, 山东莱芜人, 教授, 博士。E-mail: duanlunbo@seu.edu.cn

引用格式: 陆勇, 李林, 孙镇坤, 等. 流化床技术: CCS 和脱碳应用中的挑战与前景 [J]. 洁净煤技术, 2025, 31(3): 1-16.

LU Yong, LI Lin, SUN Zhengkun, et al. Fluidized bed technology: challenges and prospects in CCS and decarbonization applications [J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(3): 1-16.



achieve flue gas CO₂ concentration exceeding 80%; post-combustion capture relies on calcium looping (CaL) and alkali-based adsorbent cycles, capitalizing on FBRs' continuous operation for high-efficiency CO₂ adsorption-regeneration. Innovations integrating solar and electric heating further expand FBRs' decarbonization potential: solar-driven calcination coupled with CaL reduces CO₂ emissions from fossil fuel combustion and decreases energy consumption by 30%, while electric heating offers precise temperature control for zero-carbon processes like biomass gasification and cement calcination. However, challenges persist in scaling FBRs, including adsorbent degradation (e.g., 40% activity loss in CaO after 10 cycles resulted from the collapse of pore structure and surface passivation), equipment erosion (SiC coatings reduce wear by 70% but require optimization), high energy demands (calcination at 900-950 °C), and process integration complexities (e.g., dynamic coordination in CLC multi-reactor systems and circulation factor of oxygen carriers). To achieve carbon neutrality, future research must prioritize: 1) developing stable adsorbents (e.g., nano-modified CaO, MOFs); 2) designing multi-stage reactors (e.g., bubbling-transport coupled systems) for optimized mass/heat transfer; 3) integrating CFD multi-scale modeling with AI-driven real-time control; and 4) fostering cross-disciplinary innovations, such as plasma heating and microwave-assisted regeneration. Policy support should focus on carbon pricing mechanisms, pilot funding, and international standardization. By synergizing renewables, smart technologies, and material science, FBRs could drive deep decarbonization in power, cement, and steel industries, offering an economically viable and sustainable pathway for global energy transition.

Key words: FBRs; CCS; decarbonization technologies; solar energy; electric heating

0 引言

气候变化是全球生态系统面临的最严峻挑战之一，其影响广泛而深远，包括野火、热浪、干旱和冰盖解体等严重后果^[1,2]。为了确保本世纪末全球气温上升不超过 2 °C，在《巴黎协定》之后，多国相继宣布了碳中和目标，并试图通过清洁能源转型来实现碳净零排放目标，许多国家和地区已经提出了 2050—2060 年实现碳中和的明确指南^[1]。尽管全球一致认为控制 CO₂ 排放对于缓解气候变化至关重要，但找到经济上和实际可行的方法来减少 CO₂ 排放是目前的巨大挑战。

能源和工业部门 CO₂ 排放量占全球温室气体排放的 78.4%，特别是钢铁、水泥和燃煤等相关行业。工业部门的 CO₂ 直接排放约占全球能源相关工艺 CO₂ 排放的 25%，必须采取其他措施才能在 2050 年前将 CO₂ 排放减少 80%，以将全球温度上升控制在 2 °C 以下^[1,2]。工业单元从化石燃料能源转换为清洁电力可以大幅度脱碳。大多数对最终能源需求的长期预测显示，未来几十年工业部门的电力使用将显著增加。最近估计表明，几乎 50% 的工业能源需求可以通过电气化替代^[3]。除非工业能源使用量大幅削减，否则相当一部分工业能源需求将依赖于电气化技术或其他清洁能源技术，例如，碳捕集、利用或封存 (CCUS)、太阳能加热、生物燃料或绿色氢能。需要注意的是，通过电解水生产氢能，即绿色氢能，可以被视为一种间接的电气化形式，但在电解过程中会有能量损失^[4,5-6]。通常，直接电气化通常比通过绿色氢能的间接电气化成本更低，且排放也更少。

流化床反应器 (FBR) 技术在工业过程中，尤其是在碳捕集与封存 (CCS) 领域，扮演着关键角

色。FBR 通过固体颗粒与气体之间的相互作用，实现类似流体的状态。这种气-固相互作用对于促进热传导和化学反应至关重要。FBR 的主要优势在于其高效的热/质量传递效率和可扩展性，这使得它在多种 CCS 技术中发挥重要作用：① 燃烧前碳捕集：在此阶段，FBR 用于气化过程，转换固体燃料为合成气，并通过吸附剂提高 CO₂ 捕集效率；② 燃烧中碳捕集：FBR 在这类应用中支持富氧燃烧和化学链燃烧 (CLC)，提高燃烧效率和 CO₂ 浓度；③ 燃烧后碳捕集：通过吸附剂循环，FBR 可在燃烧后捕集 CO₂，利用钙循环 (CaL) 或其他固体吸附剂。

然而，流化床种类繁多，包括鼓泡流化床、循环流化床和喷动流化床，这些类型在 CCS 中的应用各有不同。笔者将全面探讨这些流化床类型在不同 CCS 应用中的分类和独特优势，以提供更清晰的技术应用图景。

在流化床反应器中，流化过程对于传热和传质具有关键作用。传热主要通过导热、对流和辐射进行，其中由于颗粒的剧烈混合，对流起主导作用。传质由于扩散驱动，并通过对流得到增强，这得益于流化过程持续使固体颗粒暴露于气相，从而促进了高效的质量交换^[7]。在碳捕集技术中，传质速率尤为重要，它决定了 CO₂ 被吸附到吸附剂颗粒上的速率^[7]。优化反应器内的混合对有效传热和传质至关重要，它有助于均匀温度分布，并确保吸附剂均匀暴露于富含 CO₂ 的气体，这是维持床层内一致反应动力学的必要条件^[8]。

综上所述，本综述旨在深入探讨流化床反应器在脱碳技术中的关键作用，特别关注其在 CCS 中的应用。通过提出最新应用创新及商业化放大的挑战，本综述提供潜在的解决方案并预测未来研究和发展方向。

1 FBR 的原理

FBR 在传统化学工业和电力生产过程中起着至关重要的作用, 其原理和应用广泛涉及化学加工、能源生产、材料合成和矿物加工等多个领域^[9-11]。FBR 的类型对于反应器设计和操作至关重要, 常见的类型包括鼓泡流化床、循环流化床和喷动流化床(图 1)^[12]。鼓泡流化床以较低的气体速度为特征, 形成床层内气泡来增强气固混合, 增强反应气体和固体之间的接触效率。循环流化床在较高的气体速度下运行, 固体颗粒被带出床层, 然后由分离器分离出来的固体颗粒重新返回反应器内。这种连续循环赋予了循环式流化床优良的气-固接触和传热能力。在更高的气体速度下, 床层转变为湍流状态, 伴随着剧烈的颗粒运动和强烈的混合, 这被称为快速流态化^[12]。本节将深入探讨 FBR 的基本原理、应用以及设计、配置和操作中所面临的挑战。

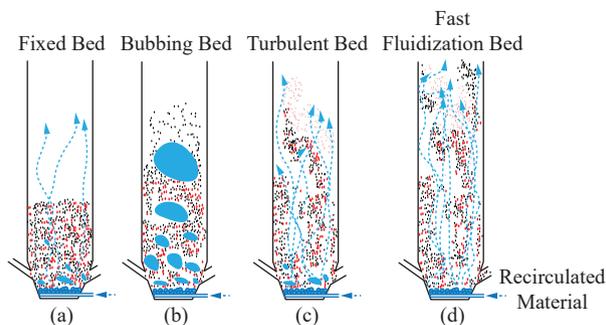


图 1 流态化的分类^[12]

Fig. 1 Classification of fluidization^[12]

1.1 流化基础和应用

流化床技术的核心在于气体与固体颗粒之间的相互作用, 这种相互作用使得固体颗粒表现出类似流体的特性^[9, 11]。当气体以一定速度通过固体颗粒床层时, 颗粒开始悬浮并像沸腾的液体一样流动, 这一现象称为流化^[9]。FBR 可以根据其操作特性和流动模式被分为鼓泡流化床、循环流化床和喷动流化床几种类型, 每种类型都有其独特的优势和应用场景^[12]。鼓泡流化床适用于温和的化学反应和传热过程, 循环流化床和喷动流化床则因其更高的传热和传质效率而通常被用于更剧烈的反应过程^[13-15]。FBR 的优势在于其操作的灵活性和高效性, 流化过程促进了高效的热交换, 有助于在反应器内维持均匀的温度条件^[13]。高效的传热对于 CO₂ 吸附剂的再生(吸热过程)至关重要, 确保吸附剂为后续的吸收循环做好充分准备^[16]。此外, 质量传递的有效性决定了 CO₂ 分子与吸附剂颗粒的接触程度及其捕集效率^[17]。

流化机制不仅促进了气固混合, 还极大地增强了传热和传质效率, 这对于工业过程中的热交换和化学反应至关重要。在流化床中, 颗粒的连续运动和混合有助于在反应器内维持均匀的温度分布, 这对于放热或吸热反应尤其重要^[13]。此外, 流化床系统能够适应不同的反应速度, 这得益于其设计, 特别是其几何形状和流化条件的调整^[12]。FBR 在工业应用中广泛性体现在其多样化的配置和灵活性^[9]。在燃烧、气化和催化等过程中, FBR 展现出了独特的优势^[11]。例如, 在生物质气化过程中, 双床系统允许在一个床层中进行燃料气化, 而在另一个床层中燃烧残余物以提供所需的热量, 从而提高了整体效率^[18]。在制药工业中, 流化床系统用于生产片剂和颗粒, 通过流化实现均匀的混合和干燥^[19]。FBR 的多功能性还体现在其在食品工业中的应用。在食品工业中, 流化床用于生产干燥食品产品以及混合和搅拌成分, 提高了产品质量和生产效率。

1.2 FBR 设计和操作的挑战

尽管 FBR 在工业过程中具有显著优势, 但其设计和操作仍面临一系列挑战^[9-11]。设备的侵蚀、结垢以及高温下材料的降解是 FBR 在碳捕集过程中面临的主要问题。这些可能导致反应器性能下降, 甚至引发安全隐患。

1) 传热与传质。流化床中的热传递涉及多种机制, 包括导热、对流和辐射。优化热交换效率的关键在于确保热量在颗粒和气体之间有效传递。例如, 通过调整床层的密度和流化气体速度, 可以增强对流传热。对流是流化床中最主要的热传递方式, 由于颗粒的剧烈混合, 热量能够迅速在床层中均匀分布。此外, 辐射传热在高温条件下变得不可忽视, 特别是当使用高温热源如等离子体时。已有实验研究验证了流化数对 CO₂ 吸附速率的影响, 提高流化数可以显著提升 CO₂ 的传质速率, 但同时需要考虑吸附剂的饱和容量和吸附动力学。吸附率和吸附容量不仅依赖于吸附剂的物理化学特性, 还受到流化床操作条件的影响。

2) 磨损问题。在流化床操作中, 磨损是不可避免的, 尤其是在高温和高流速条件下。耐磨材料与涂层技术小节详细讨论了这一问题。特别是, SiC 涂层在循环流化床中的应用已被证明可以显著降低磨损率, 文献 [20] 报告其磨损率降低了 70%, 这不仅延长了反应器的使用寿命, 还减少了维护成本。抗磨损策略包括选择合适的材料(如耐磨钢、陶瓷涂层), 设计流化床以减少颗粒与壁面的摩擦, 及采用内衬和耐磨涂层来保护关键部位。

3) 应用放大。计算流体动力学(CFD)模拟可

以预测粒子碰撞和磨损集中的区域,从而指导设计更耐用的反应器^[21]。CFD能够模拟反应器内发生的化学过程,包括CO₂在吸附剂上的吸附和再生,有助于优化反应器性能,实现最大的碳捕集效果^[22]。规模化和CCS技术的整合是FBR应用中的关键问题。从实验室到工业规模的放大是反应器设计中的一项重大挑战,建模和模拟在其中发挥不可或缺的作用。CFD模型有助于预测流体动力学和反应动力学的影响,从而揭示在小规模实验中观察到的工艺效率可能在大规模应用中发生的偏差^[23]。通过建模和模拟,可以在虚拟环境中测试多种设计方案,节

省了建造物理原型所需的时间和资源^[24]。

电加热流化床(EHFB)结合了流化床和电加热的主要优点,能够更精确地控制床层温度,并且在传统加热方法难以或无法实现的加热速率和高温下,也能实现更高效和稳定的反应。例如,感应电流可以提供快速的加热速率,从而提高系统启停效率和负荷调节响应。等离子体流由极其活跃的化学物质组成,为固体加热提供超高温源(图2)^[25]。为了充分挖掘太阳能和电加热流化床的潜力并克服现有的运行挑战,需要进一步研究和开发这种新型流化床。

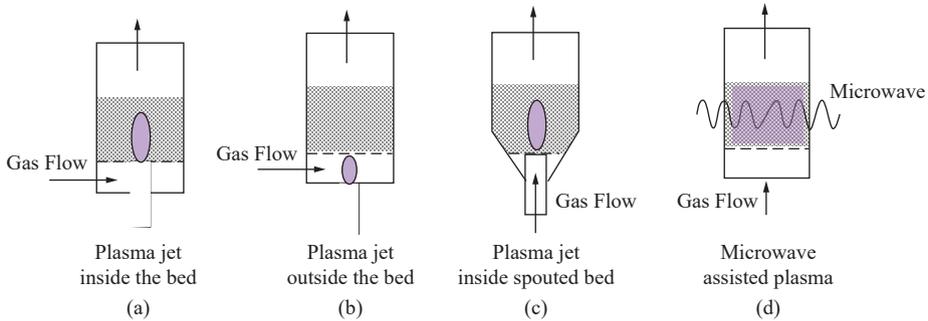


图. 等离子体加热流化床的配置^[25]

Fig. 2 Configuration of plasma heated fluidized bed^[25]

2 利用流化床反应器的 CCS 技术

2.1 燃烧前碳捕集

在 CCS 的领域中,燃烧前碳捕集技术占据了重要的位置。这一技术的核心在于 FBR 中的气化过程,它通过高温反应将固体材料转化为气体,尤其是在双流化床系统中的应用^[26]。

气化是一个关键过程。在气化过程中,CO₂捕集分为 3 个步骤:

- 将烃类物质转化为 H₂ 和 CO (合成气)
- 将 CO 转化为 CO₂ (准备捕集)
- 从气体混合物中分离出 CO₂^[27]

特别是,流化床生物质气化(FBBG)可促进可再生能源的使用^[28]。例如,对双流化床系统的研究已经评估了改进床料在气化中使用,并将其性能与其他方法进行了比较^[29]。该技术还支持连续运行,同时最小化气体泄漏,突出了其操作优势和生物质转化效率。在流化床中改进气化过程依赖于燃料与氧气之间相互作用的优化^[30]。一个化工厂的案例研究表明了流化床气化技术的实际效益和潜力,突显了其效率、稳定性和环境优势(图3)^[26]。

双流化床系统通过在 2 个独立的流化床中分别进行气化和燃烧,实现了高效的 CO₂捕集和合成气生成。在第一个流化床中,固体燃料在无氧环境下

气化,生成合成气(主要是 H₂ 和 CO),而在第二个流化床中,燃烧残余物以提供必要的热量。这种方法不仅提高了气化效率,还通过向床中添加氧化钙(CaO)来吸收 CO₂,进一步提高了合成气的质量,有助于 CO₂的富集和捕集^[31]。

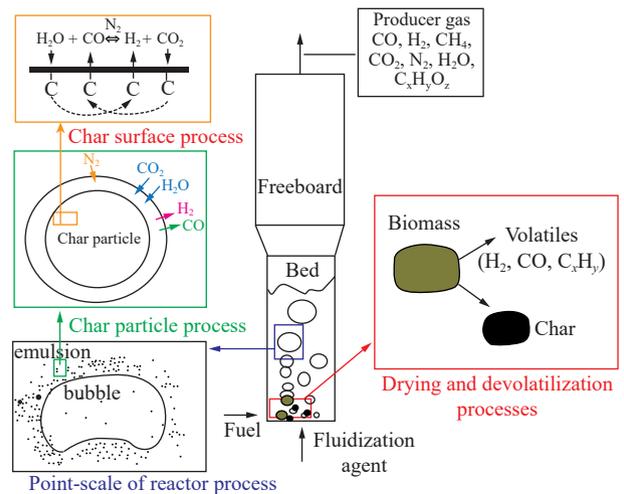


图 3 FBBG 工艺流程说明^[26]

Fig. 3 FBBG process description^[26]

尽管燃烧前 CO₂捕集具有环境和经济优势,但其商业化应用面临挑战,包括高额的经济成本,这对许多企业来说是一个重大负担^[32,33]。该过程需要对气化进行精确控制,并配备先进设备和专用材料。

2.2 燃烧中碳捕集

燃烧中碳捕集包括富氧燃烧技术和化学链燃烧技术。富氧燃烧技术利用富含氧气的气体或纯氧进行燃烧, 提高了燃烧效率, 并显著增加了烟气中 CO_2 浓度。这一 CO_2 浓度的提高简化了 CO_2 分离过程, 并降低了与其捕集相关的成本, 使得富氧燃烧对碳捕集与封存 (CCS) 技术极为有益^[34]。

流化床富氧燃烧技术具有燃料灵活性、适中的操作温度, 是一种改造成本低, 极具规模化应用潜力的 CCUS 技术^[35, 36]。气固流态化的具体优势在于其可以提供均匀的温度分布和优化的燃烧条件, 从而提高 CO_2 浓度, 减少氮氧化物等污染物的排放。国内外开展循环流化床富氧燃烧研究已接近 30 年。总体来说, 现有研究主要集中在在中试规模及以下尺度, 而全世界仅有一套工业规模示范装置。

在中试尺度研究方面, 美国阿尔斯通公司于 2004 年在 3 MW_{th} 循环流化床装置上进行了富氧燃烧的初步验证。2012 年, 加拿大能源技术研究中心 CanmetENERGY 报道了 0.8 MW_{th} 循环流化床富氧燃烧试验研究成果, 烟气干基 CO_2 浓度达 85% 以

上。2011 年, 国内的东南大学建立了国际首台温烟气循环的 50 kW_{th} 循环流化床热态实验装置, 随后与美国 B&W 公司合作建成 2.5 MW_{th} 循环流化床煤燃烧中试系统, 开展高效换热技术研发。2014 年, 中国科学院工程热物理研究所建成 1 MW_{th} 循环流化床富氧燃烧试验平台, 系统开展了宽氧浓度富氧燃烧试验研究。此外, 韩国和芬兰等国家也陆续进行了兆瓦级中试研究。

工业示范方面, 2012 年, 西班牙 CIUDEN 技术研发中心和 Foster Wheeler 公司率先建成世界首套 30 MW_{th} 循环流化床富氧燃烧工业示范电站 (图 4)^[37], 开展了循环流化床富氧燃烧技术可行性、经济可行性和环境效益, 包括对氧气生产成本、 CO_2 捕集、储存和操作效率变化等经济因素的分析。富氧条件下污染物的排放浓度相比空气气氛明显降低, 烟气中干基 CO_2 浓度达到了 80%。目前, 东南大学与新疆生产建设兵团能源集团合作, 在国家重点研发计划资助下正在开展 45 MW_{th} 循环流化床富氧燃烧工业示范, 该装置建成将成为国际最大、国内首台循环流化床富氧燃烧工业装置。



图 4 CIUDEN CO_2 捕集与运输技术示意^[37]

Fig. 4 Diagram of CO_2 capture and transport technology in CIUDEN^[37]

中试试验和工业规模的示范已经证实了富氧燃烧技术在高效 CO_2 捕集方面的潜力, 以及与传统碳捕集方法的优势。将富氧燃烧技术扩展到更广泛应用场景面临着显著的挑战, 例如高氧浓度运行时锅炉的燃烧组织和高效热量转移、宽负荷条件下的操作灵活性、较高的投资和运营成本等, 这些对技术的广泛应用均构成挑战。

化学链燃烧 (CLC) 技术是一种创新的环保化

石燃料燃烧方法^[38]。CLC 技术是利用金属氧化物作为氧气载体, 在 2 个反应器之间循环, 促进燃烧而不直接暴露于空气, 简化了 CO_2 的捕集。气固流态化在 CLC 中发挥了关键作用, 通过提供高效的固体颗粒循环和均匀的燃烧条件, 提高了燃料转换效率和 CO_2 捕集效果。

20 世纪 50 年代, LEWIS 和 GILLILAND 提出用金属氧化物作为载氧体与燃料进行化学反应从而制

取纯的 CO_2 [39, 40]; 1987年, ISHIDA 和金红光首次提出了利用化学链燃烧技术实现 CO_2 捕集 [41, 42]; 随后, CLC 技术在欧洲获得了重要的发展, 包括在欧洲 GRACE 项目下建立的 $10 \text{ kW}_{\text{th}}$ [43], 以及全球范围内扩展到 1 至 3 MW_{th} 装置 [44, 45]。2008年, 瑞典查尔姆斯科技大学的 LYNGFELT [46-48] 和中国东南大学沈来宏等 [49] 同时报道了固体燃料化学链燃烧的实验结果。目前, 国内外已经完成了 4 个兆瓦级固体燃料化学链燃烧中试示范装置。德国达姆施塔特大学在 2014 年成功建立了当时世界上最大的 CLC 试验装置, 容量为 1 MW_{th} (图 5) [50]。该项目主要关注在试验装置上使用钛铁矿和煤的操作和优化, 包括开发模型以增强过程的可扩展性和效率。他们的研究突出了 CLC 作为电力生产中高效 CO_2 捕集技术具有应用潜力。随后, 法国阿尔斯通公司的 3 MW_{th} 装置以及我国 3 MW_{th} 和 5 MW_{th} 固体燃料化学链燃烧装置依次建立, 标志着固体燃料化学链燃烧逐步向工业化进程的迈进。值得注意的是, 在国家重点研发计划与欧盟 H2020 的国际合作项目等资助下, 2023 年, 清华大学和东方锅炉建成了热输入功率为 $2 \sim 5 \text{ MW}_{\text{th}}$ 的化学链燃烧全流程热态示范系统, 该平台是目前世界上最大的全流程化学链燃烧示范系统 (图 6)。在 2024 年 3 月, 国际上首次成功实现了 5 MW_{th} 化学链燃烧系统自热连续运行, 该装置在生产蒸汽的同时, 能够捕集高纯度 CO , 并大幅降低碳捕集的能耗与成本。烟气中 CO_2 浓度可达 90% 浓度以上, 自热稳定运行约 60 h, 褐煤和石油焦的化学链燃烧 CO_2 捕集效率分别达到 95% 和 75%, 突破化学链燃烧自热示范瓶颈, 研究成果在国际同行中具有引领效果 [51], CLC 技术的重要发展历程如图 7 所示。

尽管 CLC 技术在不同规模装置上已成功示范, 但是该技术的商业化应用仍然面临多重挑战, 包括管理互联流化床系统的动态、多源固体燃料带来的运行难题 (包含载氧体与煤灰分离和焦炭进入空气反应器等), 以及提高燃料转化效率等 [52]。尽管 CLC 与传统碳捕集方法相比具有优势, 但由于 CLC 技术的成熟度尚不完善, 其长期操作稳定性和整体可行性仍需进行全面评估 [53]。

2.3 燃烧后碳捕集

流化床燃烧后碳捕集技术主要依赖于碱性和钙基吸附剂的吸附-脱附循环过程 [54-56]。这些技术通过吸附和再生 2 个主要阶段实现碳捕集, 在吸附阶段, 吸附剂与 CO_2 发生化学反应, 形成稳定的化合物; 在再生阶段, 通过加热或降低压力使这些化合物分解, 释放出纯净的 CO , 供进一步利用或储存。

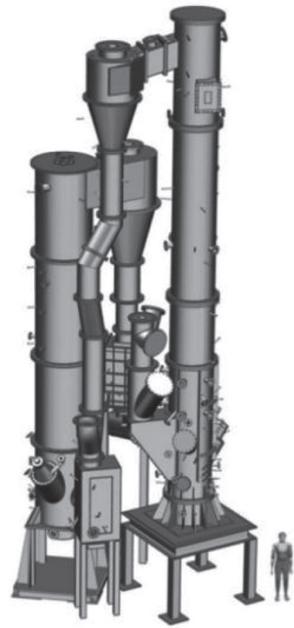


图 5 TUD 1 MW_{th} CLC 模块化中试装置示意 [50]

Fig. 5 Schematic diagram of a 1 MW_{th} CLC modular pilot plant in TUD [50]

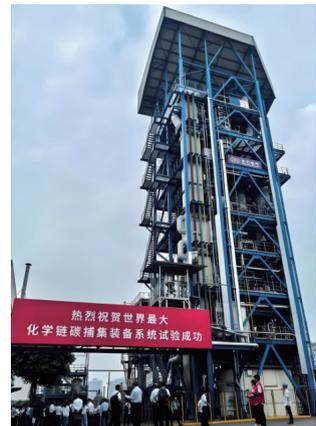


图 6 中国 5 MW_{th} 化学链燃烧装置示意

Fig. 6 Diagram of 5 MW_{th} CLC pilot plant in China

2.3.1 气固流态化吸附技术

FBRs 在碳捕集过程中使用固体吸附剂具有独特的优势, 特别是当使用碱性固体吸附剂捕集 CO_2 时 [54]。FBRs 的固有特性, 如高质量和热传递率、均匀的温度分布、可扩展性和操作灵活性, 使其非常适合于高效且经济可行的碳捕集。此外, FBRs 在碱性固体循环捕集 CO_2 方面的优势包括对吸附剂颗粒的多功能性、连续操作、较低的操作成本和与吸附剂再生相关的能耗 (图 8) [55]。

碱金属吸附剂, 如钾和钠, 特别是在低温下更为有效 [54]。钙循环 (CaL) 涉及石灰石等材料与 CO_2 反应, 形成稳定的碳酸钙 (CaCO_3)。与在较低温度下运行的碱性吸附剂循环不同, CaL 在较高的温度 ($600 \sim 900 \text{ }^\circ\text{C}$) 煅烧释放 CO , 从而实现吸附

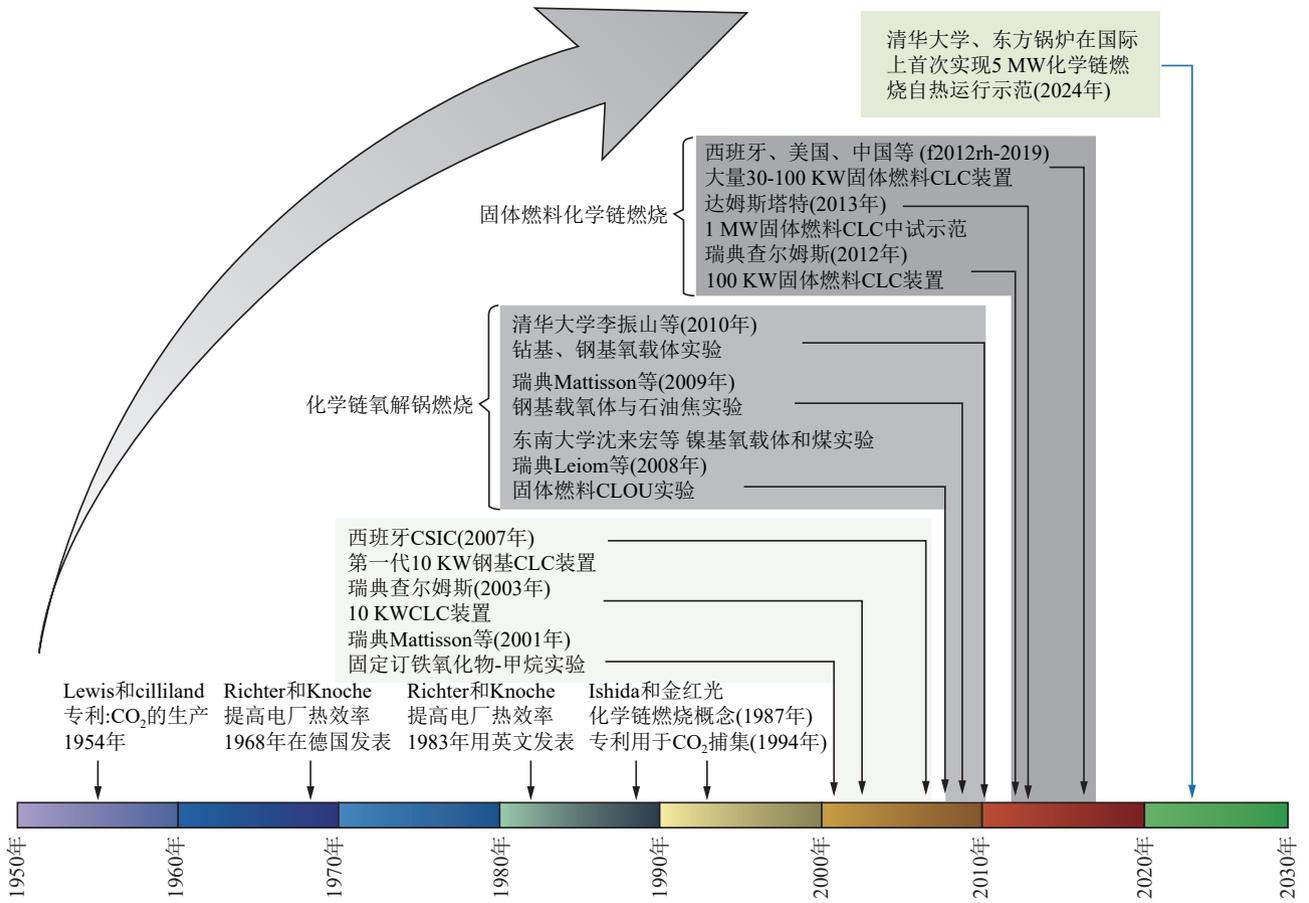


图 7 CLC 技术的发展历程^[51]

Fig. 7 Development of CLC technology^[51]

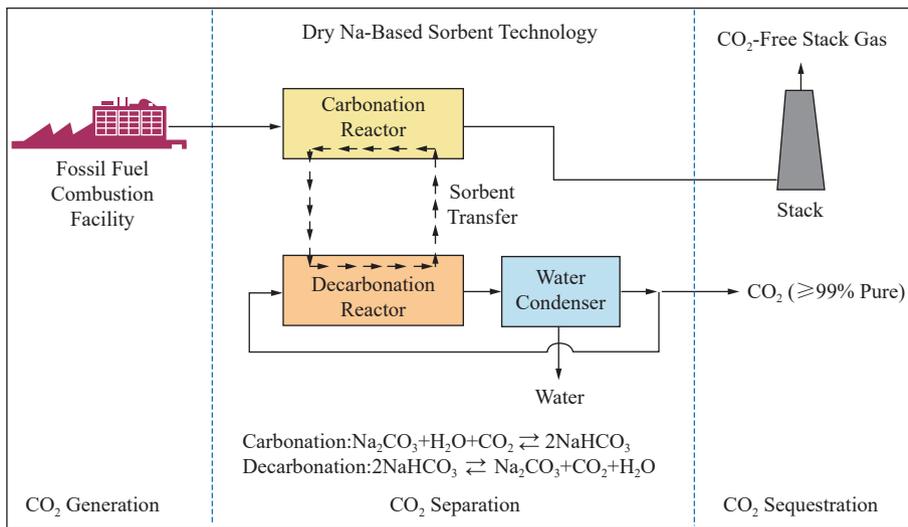


图 8 多级吸附剂系统与热再生^[55]

Fig. 8 Multistage adsorbent system and thermal regeneration^[55]

剂再生。李振山等^[57]利用微型流化床热重分析 (MFB-TGA) 方法测定了固态胺类吸附剂对 CO₂ 的快速吸附动力学, 实现了流化床反应器中具有相似传质传热特性的固态胺吸附剂在流化状态下的实时重量测量。分析数据发现固态胺类吸附剂在初始阶段对 CO₂ 吸附速率较快, 在初始快速阶段之后,

第二个较慢的阶段发生, 导致吸附速率变慢。马吉亮等^[58]设计了一台鼓泡-输运耦合型流化床, 通过对吸附剂的循环流率、停留时间等参数的高效调控, 有效扩大了吸附剂脱碳反应的温度区间, 提升了钠基吸附剂的实用价值与适用范围。董伟^[59]等系统地研究了硅藻土、介孔 SiO₂、ZrO₂、TiO₂ 和 γ-

Al_2O_3 等多孔材料为载体的负载型钠基吸附剂吸附性能特性,其 Na_2CO_3 负载量在 20% 时吸附反应速率最快,转化率接近 100%。余帆等^[60] 结合溶胶-凝胶法和超临界干燥法制备了钠基-胺基复合型固体吸附剂,有效提升了吸附剂的吸附速率和吸附容量。

爱丁堡大学率先开发了一种集成钠循环过程进行 CO_2 捕集,同时将捕集的 CO_2 与可再生氢气合成天然气 (SNG) 再利用^[61]。这一创新方法不仅实现了 CO_2 的封存,还将其转化为有价值的燃料,从而提升了整个过程的可持续性。这项研究从实验室规模扩展到示范规模,旨在验证该集成系统的可行性和优势。由欧盟支持的 ZEPHYR 项目专注于推进碳酸钠循环技术,以有效捕集工业废气中的 CO_2 ^[62]。该项目建立了一个试验工厂,展示了基于钠的吸附剂在高温 CO_2 捕集中的高效性。预计 ZEPHYR 的结果将显著降低与 CO_2 捕集相关的能源成本,并突出碳酸钠循环过程的商业可行性。

尽管取得了显著成功,碱金属吸附剂仍面临一些技术和经济挑战,主要问题在于吸附剂可能很快达到吸收饱和,需要频繁再生,这会增加操作成本。目前,研究者正在探索创新方案,如高效换热器和新反应器设计,集成的鼓泡-快速 FBRs^[63,64]。利用低品位热源进行吸附剂再生,并利用太阳能等替代能源策略,可能有助于降低操作成本和能耗^[65,66]。

在吸附剂配方、过程集成和规模化方面的进展,将对这些技术的商业化和广泛应用起到至关重要的推动作用^[67]。

钙循环 (CaL) 技术因其成本低、可持续性强以及对环境影响相对较少,而成为一种有效的 CO_2 捕集固体吸附剂方法。CaL 技术的经济性源于使用广泛可用的材料 (如石灰石) 和简单的制备方法^[68]。FBRs 特别适合这一过程,因为其固有的操作特性与 CaL 过程高度契合。CaL 技术的经济优势主要来自于其高效的 CO_2 捕集能力和优越的循环性能、可重复使用的材料、能源互补耦合的经济利益以及稳健的循环稳定性^[69]。

在欧盟地平线计划支持下, CaOLing 项目旨在展示钙循环在 1.7 MW_{th} 试验装置上的有效性 (图 9)^[70]。该项目专注于优化燃烧发电厂烟气中的 CO_2 捕集,成功证明钙循环能够从工业规模排放源中捕集 CO_2 。通过解决规模扩大中的技术和经济挑战, CaOLing 项目为未来在电力生产领域的商业应用奠定了基础。CLEANKER 项目作为地平线 2020 倡议的一部分,旨在推动水泥行业的变革^[71]。其主要目标是展示一种创新的钙循环 (CaL) 技术,并将其直接与水泥厂集成,从而捕集超过 90% 的 CO_2 排放。该集成方案充分利用了水泥生产与钙循环过程之间的协同效应,展示了如何高效捕集水泥窑排放中的 CO_2 并且能够很好适应现有水泥

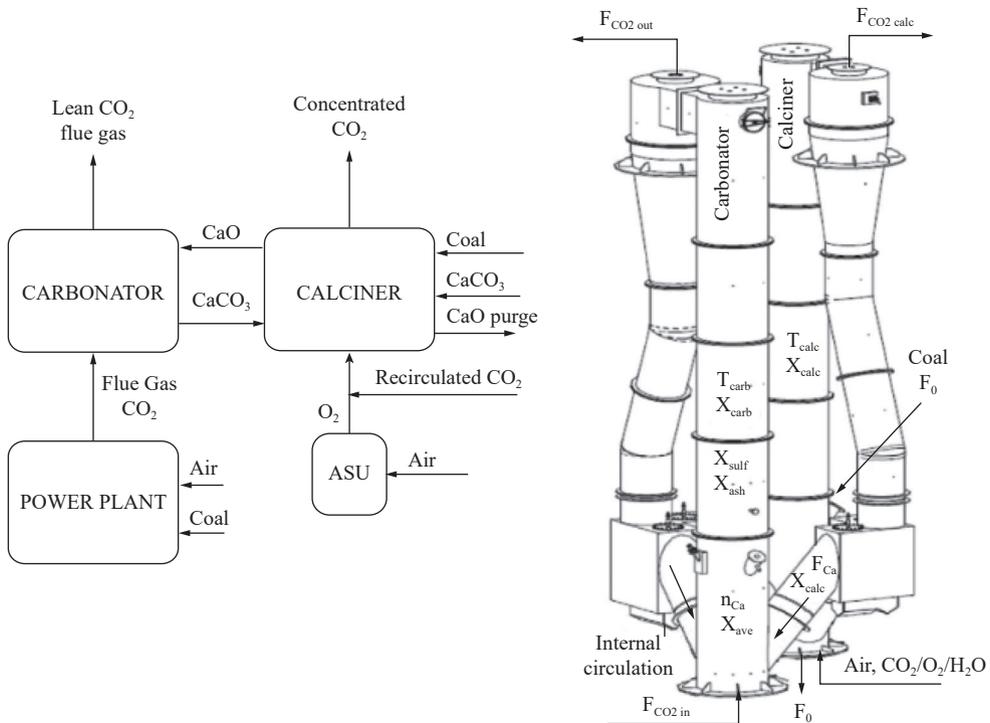


图 9 “la Pereda” 碳捕集中试工厂钙循环设施示意^[70]

Fig. 9 Schematic diagram of calcium cycle facility in carbon capture pilot plant in “la Pereda”^[70]

厂, 最大限度减少对水泥生产工艺的干扰。此外, 该项目强调回收石灰在钙循环过程中的潜力, 使其能够再用于水泥制造, 从而提高可持续性并降低环境影响^[71]。

CaL 技术面临的主要挑战之一是吸附剂的降解, 即基于钙的吸附剂在经历多次碳化和煅烧循环后失去反应性^[20]。这一问题不仅影响了 CO₂ 捕集效率, 还由于需要频繁更换吸附剂而增加了操作成本。此外, 吸附剂再生过程中的能源消耗也不可忽视; 煅烧过程中所需的高温 (约 900 ~ 950 °C) 会消耗大量能源, 从而降低整体过程的效率并提高成本。将 CaL 系统与现有工业设施 (如发电厂或水泥厂) 集成也面临一系列挑战, 包括与现有工艺的兼容性、空间限制以及将技术从实验规模扩展到大规模商业化运营的困难^[20]。

2.3.2 气液流态化吸收技术

气液流态化吸收技术在 CCS 中主要应用于湿法工艺, 如胺液洗涤和氨水吸收。这些技术通过在流化床中增强气液接触来提高 CO₂ 的吸收效率。流化床的应用能够生成微气泡, 优化液滴分布, 从而显著增加气液界面的接触面积, 提高吸收速率。浙江大学开发的流化床吸收塔展示了这种技术的优势, 通过精细控制流化条件, 实现了高效 CO₂ 吸收^[62]。

2.3.3 气液固三相流态化技术

气液固三相流态化技术为 CCS 提供了新的途径, 催化湿法氧化 (CWAO) 是其中的一项新兴技术。这项技术通过在流化床中引入催化剂, 实现 CO₂ 的高效去除。日本三菱重工的中试数据显示, 采用这种方法可以达到超过 90% 的 CO₂ 去除率^[63]。这种三相流态化方法不仅提高了反应速率, 还增强了系统的灵活性和适应性。

2.4 混合和新兴技术

结合燃烧前、燃烧中和燃烧后捕集的综合方法, 形成一种全面的 CCS 策略, 在 FBR 中展现出巨大的潜力^[33]。在燃烧前阶段, 气化技术在 FBR 中得到应用, 特别是双床系统, 用于高效生产合成气^[26]。这种方法通过高温反应, 将固体燃料转化为氢气和一氧化碳, 并使用像 CaO 这样的吸附剂提高 CO₂ 的捕集和富集效率^[72]。在 FBR 的 CCS 研究创新包括开发改性吸附剂以提高 CO₂ 捕集效率^[33], 以及设计新的反应器装置, 如集成鼓泡-输送式 FBR, 以优化吸附剂循环过程^[63, 64]。此外, 诸如 CaOLing 项目等工业示范, 展示了 CaL 技术在 1.7 MW_{th} 中试规模上的有效性, 证明了 CaL 可以从工业规模的排放源捕集 CO₂^[70]。然而, 工业可行性和运营挑战仍需解决, 包括吸附剂的失活、能耗高

以及工艺整合的复杂性^[20]。未来的研究应聚焦于提高吸附剂的循环稳定性、降低再生能耗, 以及优化 FBR 中的反应条件, 以推动这些技术的商业化和广泛应用。

3 太阳能和电加热流化床技术

3.1 太阳能辅助 FBR 技术

太阳能作为一种清洁且可再生的能源, 正日益成为全球能源结构中的重要组成部分。FBRs 作为集中太阳能热能 (CST) 技术的核心组件, 利用太阳辐射通过一系列太阳跟踪镜 (定日镜) 进行聚焦, 将太阳光转化为高温热源^[73-75]。在 FBRs 中, 这一过程通过定日镜将太阳光反射并集中到 FBRs 中, 使颗粒物加热到高温状态。这种高温热能可以用于发电、工业过程加热或化学过程、及太阳能储存^[75]。FBRs 的设计使得颗粒物在流化状态下能够迅速进行热交换, 从而实现高效的热能吸收和传递^[76]。太阳能辅助 FBR 技术是实现太阳能规模化利用和热量传递及工业过程的重要技术之一。目前, CST 技术的研究主要集中在热能储存及其与发电系统的集成。

大容量材料的热能储存 (TES) 是 CST 系统实现经济可持续性的关键因素之一^[77-79]。在基于熔盐储能的发电系统中, 熔盐既是传热工质也是储能材料, 熔盐将吸收的太阳能储存起来并通过换热器传递给水产生高温水蒸气推动蒸汽轮机进行发电。熔盐混合物因其良好的热容和稳定性被广泛用作 HTF 和 TES 介质。然而, 熔盐储能系统也存在着明显的缺点。一方面, 熔盐在大约 560 °C 会发生分解和降解, 因此储能系统的工作温度一般不能超过其降解温度, 这也导致了系统整体电力循环效率的下降^[77]。为克服这一限制, 研究者们提出了使用颗粒状固体作为 HTF 和 TES 介质的新方案。这些颗粒材料能够承受超过 1000 °C 的高温, 并支持热化学能储存 (TCES) 过程。TCES 通过驱动吸热反应生成有价值的能量载体, 这些能量载体在释放时不需要维持高温, 从而实现了长期储存。

在 FBRs 中, 太阳能煅烧与钙循环 (CaL) 的集成是实现高效热能利用和 CO₂ 捕集的关键。特别是在基于化学反应的钙循环系统中, CaCO₃ 或石灰石颗粒在太阳能煅烧炉中分解为 CO₂ 和 CaO, 这一步骤由聚光太阳能设备提供能量。CO₂ 和 CaO 经过热交换器回收热量后分别储存, 待需要时进行碳酸化反应释放能量 (图 10)^[80]。此技术通过使用颗粒材料, 可以克服熔盐储能的高温限制, 提升了 CSP 系统的发电效率。

在太阳能驱动的工业过程中, 煅烧和气化是典

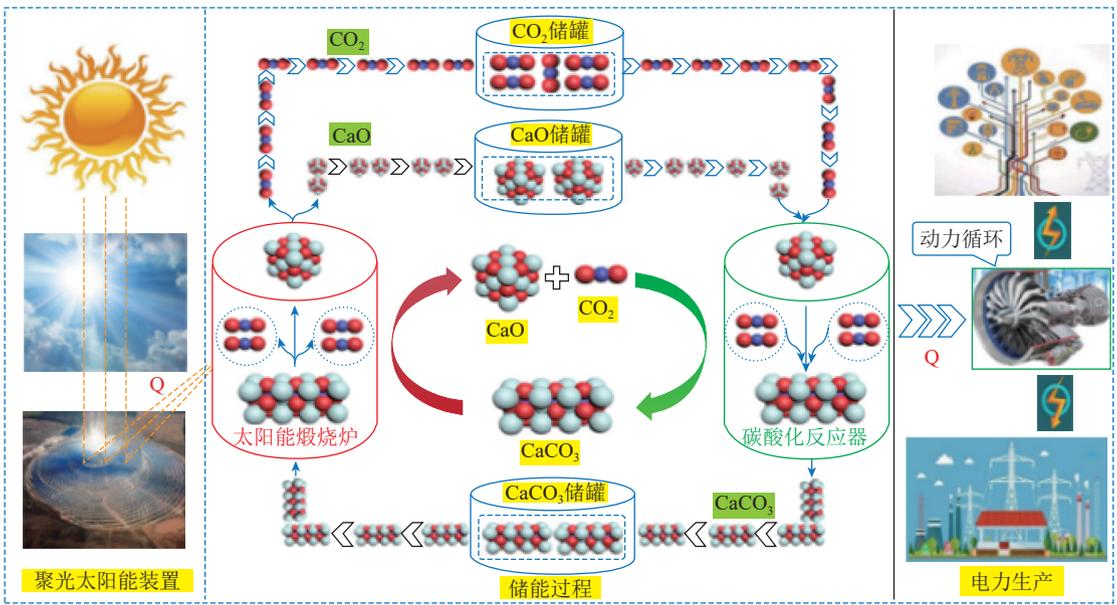


图 10 CSP-CaL 集成发电系统示意图^[80]

Fig. 10 Schematic diagram of CSP-CaL integrated power generation system^[80]

型的应用。例如，煅烧过程中，太阳能提供的高温热能能使原料分解，生成所需的产品。在水泥生产中（图 11），太阳能可以用于煅烧石灰石，从而生成水泥熟料。在气化过程中，太阳能提供的高温热能能使原料转化为合成气，进而可进一步用于生产化学品或燃料^[81]。这一过程的太阳能驱动不仅减少了化石燃料的消耗，还显著降低了 CO₂ 排放。

3.2 电加热流化床

当清洁电力作为流化床技术的热源应用于工业过程中时，能够显著降低工业部门的碳排放。电加热流化床（EHFB）的优势包括更高的能源效率、更严格的工艺控制和更好的生产力。EHFB 技术在工

业脱碳和 CCS 领域具有广泛的应用潜力。然而，由于电力成本高，以及对流化床中电能传递原理的理解尚不充分，目前 EHFB 在工业应用中较少。根据加热原理的不同，电加热流化床可以分为焦耳加热、感应加热和微波加热等。不同电加热原理的对比列于表 1，热量通过电加热源传递到流化床的各种不同的原理如图 12 所示。

EHFBs 通过电能直接驱动流态化过程，其核心优势在于精准温控与低碳排放。这些反应器的精确控制和高温能力使它们成为包括干燥、涂层、铸造、造粒、化学合成、热解、气化和生物质以及废物处理在内的广泛工业过程的重要装备^[86]。EHFBs

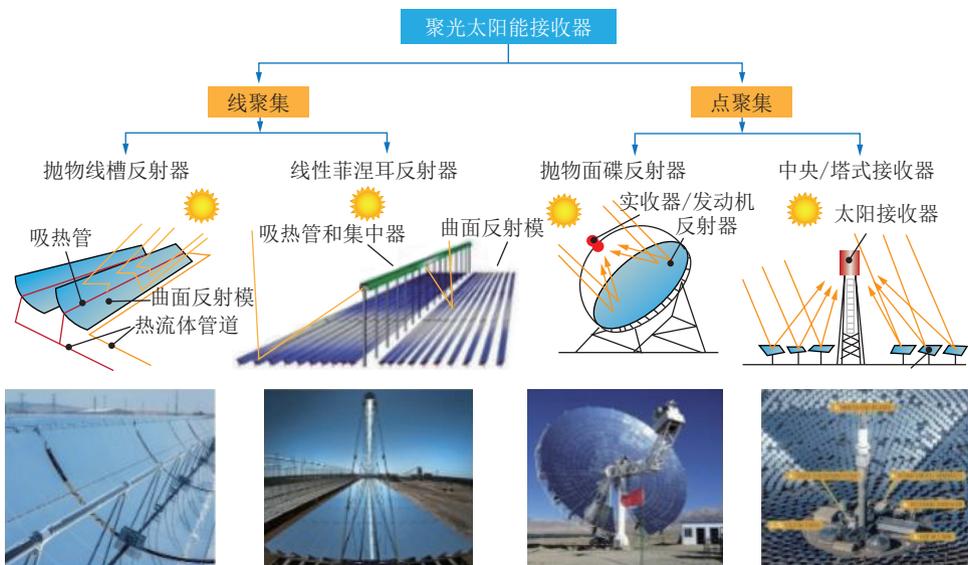


图 11 聚光太阳能接收器类型

Fig. 11 Concentrating solar receiver type

表 1 电加热原理对比

Table 1 Comparison of Electric Heating Principles

| 加热方式 | 效率 (%) | 适用场景 | 局限性 |
|------|--------|------------------|---------------------------------|
| 焦耳加热 | 70-85 | 导电材料处理 (石墨提纯) | 温度分布不均, 床料需导电 ^[82] |
| 感应加热 | 80-90 | 快速吸附剂再生 | 仅适用于磁性材料, 设备成本高 ^[83] |
| 微波加热 | 60-75 | 生物质热解 | 穿透深度有限, 需介电材料 ^[84] |

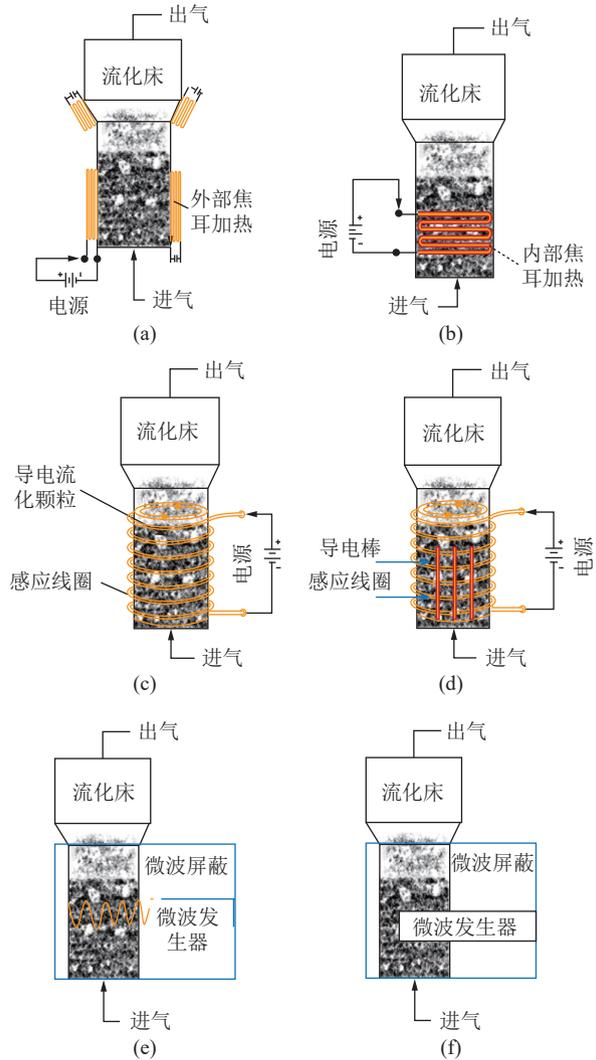


图 12 流化床电加热原理示意图^[85]

Fig. 12 Schematic diagram of fluidized bed electric heating principle

还可以实现紧凑、易于操作且安全, 因此成为小规模或便携式应用的潜理想选择^[87]。借助于材料的电磁特性、介电特性和红外吸收特性等, 与其它加热方法相比, 允许更有效地将热量传递到床层。例如, 电加热流化床经常用于生物质的气化, 如木屑或农业废物。电加热反应器提供的高温和受控环境

允许生物质高效转化为气态燃料, 这种燃料可以用来发电或作为生产化学品和其他材料的原料。

EHFB 在 CO₂ 捕集方面有显著的应用潜力。例如, Jacob 等研究表明, 通过电阻加热的旋转窑, CO₂ 排放比燃煤窑减少 78%^[88]。此外, SAMANI 等评估了电加热鼓泡流化床在钙循环中的应用, 发现每年生产一百万吨水泥熟料需要 85 MWh 的电能, 保持了产品质量^[89]。尽管如此, EHFB 也面临挑战。随着绿色电力的发展, EHFB 具有巨大潜力, 但受制于电力成本、材料特性要求、设备复杂性和安全问题等^[85]。因此, 进一步的开发和研究是必要的。

3.3 集成太阳能-电加热系统

太阳能与电加热的互补组合为先进工业过程展示了显著的优势。辐射加热与电加热的协同作用, 可以优化热能的传递效率^[90-92]。例如, 直接辐射的流化床自热反应器 (DIFBAR) 通过集中太阳辐射和电加热相结合, 实现了高效的热交换和能量回收^[85]。该反应器设计中, 流化床材料通过内部循环将反应后的固体颗粒的感热传递给上升的颗粒悬浮液, 从而实现连续的热化学过程^[85]。集成系统的实例还包括水泥生产和化学链燃烧过程。在水泥生产中, 通过电加热流化床气窑可以显著减少 CO₂ 排放^[78]。例如, JACOB 和 TOKHEIM 的研究表明, 采用电加热流化床气窑与传统煤炭气窑相比, CO₂ 排放量可减少 78%^[93]。芬兰 VTT 技术研究中心的研究进一步证明, 使用电加热的钙循环法在水泥煅烧过程中, CO₂ 浓度可达 98%, 煅烧度达到 88%~98%, 同时减少了 50% 的 CO₂ 排放^[94]。类似地, 钙循环中的煅烧过程也可以通过电加热的流化床气窑实现, 这不仅提高了反应效率, 还确保了所需 CO₂ 气流的生成, 满足流化床操作的需求^[90]。

同时, 集成太阳能-电加热系统在经济性和环境影响方面具有显著优势。首先, 这种集成系统能够减少对化石燃料的依赖, 降低温室气体排放, 有助于减缓全球变暖。其次, 通过优化太阳能和电加热的协同作用, 集成系统能够提高能源利用效率, 降低能源成本。此外, 集成系统的设计灵活性使其能够适应不同的工业过程和能源需求, 增强了其在各种应用中的适用性。随着技术的进步和成本的降低, 集成太阳能-电加热系统有望在未来的能源结构中发挥更加重要的作用。

3.4 环境和经济影响

通过混合系统实现的减排、投资回报的成本效益与可扩展性以及大规模工业部署的可行性, 成为当前集中式太阳能热能 (CST) 技术研究的重要方

向^[78]。混合系统结合了太阳能与电加热的优势，不仅显著减少了温室气体排放，还提升了系统的整体效率和灵活性^[77]。这种系统不仅有助于减缓全球变暖，还能够降低能源成本，提高工业过程竞争力。

集成太阳能-电加热系统在环境和经济上呈现出显著优势。通过减少对化石燃料的依赖，系统降低了温室气体排放，助力缓解全球变暖。经济上，初期投资虽然较高，但通过与热能储存的集成和可再生能源的结合，提高了长期运营的经济性。此外，DIFBAR等设计的热效率可达90%，增强了系统的投资回报率^[85]。大规模工业部署的案例，如意大利Magaldi公司的试验装置，显示了该技术的实用性和可靠性^[95]。未来的研究应继续优化这些技术，以促进更广泛的应用和降低成本，助力全球能源结构的绿色转型和可持续发展。

4 结论和展望

本综述旨在探讨FBRs在CCS及脱碳过程中的应用进展、挑战与未来前景。通过对FBRs在CO₂捕集中的关键技术进行深入分析，提出了未来研究方向的建议。

4.1 关键发现总结

FBRs在碳CCS和脱碳领域展现出显著的优势。其多功能性使其在气化、富氧燃烧、CLC及后燃烧技术等多种CO₂捕集方法中发挥重要作用。这些技术虽然在商业化过程中面临诸多挑战，但通过扩大规模，它们能够带来显著的环境和经济效益。利用模块化准则和多尺度建模，可以减少对大量实验的依赖，同时提升对过程的理解，尤其是在技术开发的初期阶段。这些对于推进基于FBR的CO₂捕集技术实现商业推广至关重要。

FBRs应用在CO₂捕集技术方面具有诸多优势，但也同时面临诸多挑战。在追求净零排放的背景下，许多工业过程的电气化改造成为关键。笔者回顾了过去七十年电加热流化床的发展，主要加热原理包括焦耳加热、感应加热、电磁辐射、等离子体加热和气体预热。应根据目标工业过程的目的和要求选择适当的加热原理。

太阳能和电加热集成在增强FBRs系统可靠性和效率方面发挥重要作用。通过太阳能和电气化集成，FBRs不仅提高了系统的可靠性，还提升了效率。EHFBs在食品加工（如干燥）、工业材料加工（如涂层）、造粒、热处理及高纯石墨、碳化钙和多晶硅等工业材料生产中具有广泛应用潜力。此外，EHFBs还可用于CO₂减排、生物质气化、能源存储甚至太空探索。研究表明，许多以化石燃料为

动力的流化床操作可以被EHFBs替代，具有操作简便、安全性高、体积紧凑、效率更高、加热更具针对性、温度快速调节、温度控制更好以及操作灵活性更强的诸多优势。

4.2 未来研究方向

为了进一步推进FBR技术的发展和应，未来的研究需要聚焦于以下几个关键领域：

1) 政策支持和材料创新。通过政策支持和资金投入，如资助新型吸附剂和载体的开发，可以推动材料创新，提高吸附性能。例如，开发基于金属有机框架或纳米结构的吸附剂，这些材料因其高比表面积和选择性吸附能力而备受关注。将碳排放成本纳入经济体系，有助于平衡碳捕集技术的成本与环境效益，从而推动其市场化进程。此外，政府应支持建立和资助试点项目，通过政策支持和资金投入，降低企业在采用新技术时的风险。

2) 新型反应器设计。提出能够提高碳捕集效率的新型反应器设计，比如多级流化床或集成式反应器。多级流化床可以优化气体和固体的接触时间和反应条件，提高CO₂吸附和脱附的效率。集成式反应器通过结合不同的反应步骤，如吸附、再生和产品纯化，可以减少能耗和提高系统的整体性能。东南大学的试点项目表明，采用这种设计可以在实验室条件下将CO₂捕集效率提高20%，这为工业应用提供了新的思路。

3) 技术和经济挑战。讨论从实验室到工业规模的关键技术挑战和解决方案。技术层面，FBR在流体力学复杂性、反应动力学以及热质传递方面面临诸多挑战。例如，在钙循环过程中，氧化剂的反应性随着碳化/煅烧循环次数的增加而下降，需不断补充新鲜吸收剂并处理废弃物。因此，需采用多学科交叉的研究方法，包括先进的CFD建模、创新的反应器设计和新材料工程，以优化气体分布器和固体循环系统，确保流化均匀并减少反应器中的死区。此外，规模化过程中反应速率匹配、物料传递和热管理等问题也需通过详细的缩放定律理解和解决。

经济方面，FBR技术的规模化需要大量的资本投入，包括建设大型反应器、采购氧化剂和吸收剂，以及将这些系统与现有发电设施集成。此外，操作成本如能源惩罚也构成了显著的经济挑战。为降低这些成本，材料科学的创新至关重要，以延长吸收剂和氧化剂的使用寿命。同时，优化反应器设计以减少能耗也是必不可少的。进行全面的技术经济评估（TEA）和生命周期分析（LCA），结合实际操作数据，能够识别成本降低的机会，并将FBR的经济可行性与其他CCS技术进行比较。这种

评估不仅提供了成本效益的全面理解,还为 FBR 技术的未来发展和实施提供了指导。

4) 跨学科合作和智能技术应用。未来的 FBR 技术发展将需要更多跨学科的合作,特别是 AI 在流化床模拟中的应用。AI 可以用于优化反应器操作参数,通过机器学习算法预测和优化反应条件,提高反应器的性能和效率。例如, AI 辅助的 CFD 模拟可以实时调整流化床的操作条件,预测可能的堵塞或磨损问题,实现精确的过程控制。此外,智能材料的设计和合成将成为一项重要的研究方向,借助 AI 和大数据分析,可以加速新型高效吸附剂的开发,增强对复杂反应体系的理解。

总之, FBRs 在 CCS 和脱碳过程中具有显著的优势,应用前景广阔,但其规模化推广需要克服技术复杂性和经济障碍。通过太阳能和电气化的集成,进一步提升了系统的可靠性和效率。未来的研究应继续聚焦于材料创新、反应器设计优化以及经济可行性的深入评估,以确保 FBR 技术能够在实际应用中实现高效、经济和可持续的碳捕集。

参考文献 (References) :

- [1] YORO K O, DARAMOLA M O. CO₂ emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect[M]//Advances in carbon capture. Amsterdam: Elsevier, 2020: 3-28.
- [2] STOCKER T. Climate change 2013—the physical science basis working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [3] ROELOFSEN O, SOMERS K, SPEELMAN E, et al. Plugging in: What electrification can do for industry[J]. McKinsey & Company, 2020, 28.
- [4] WUEBBLES D J, JAIN A K. Concerns about climate change and the role of fossil fuel use[J]. *Fuel Processing Technology*, 2001, 71(1-3): 99-119.
- [5] HUISMANS M. Electrification—Analysis; Tracking Report [R]. Paris: International Energy Agency (IEA), 20. Available online: <https://www.iea.org/reports/electrification>.
- [6] WEI M, MCMILLAN C A, DE LA RUE DU CAN S. Electrification of industry: Potential, challenges and outlook[J]. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 2019, 6(4): 140-148.
- [7] CHAITANYA D, ABDELGHAFOUR Z, SCHALK C, et al. Review on reactor configurations for adsorption-based CO₂ capture[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2021, 60(10): 3779-3798.
- [8] RAGANATI F, MICCIO F, AMMENDOLA P. Adsorption of carbon dioxide for post-combustion capture: A review[J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(16): 12845-12868.
- [9] OKA S. Fluidized bed combustion[M]. Boca Raton: CRC Press, 200.
- [10] LECKNER B. Fluidized bed combustion: Mixing and pollutant limitation[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1998, 24(1): 31-61.
- [11] COCCO R, CHEW J W. 50 years of geldart classification[J]. *Powder Technology*, 20, 428: 118861.
- [12] KWAWUK M, LI J. Fluidization regimes[J]. *Powder technology*, 1996, 87(3): 193-20.
- [13] KIM S D, KANG Y. Heat and mass transfer in three-phase fluidized-bed reactors: An overview[J]. *Chemical Engineering Science*, 1997, 52(21-22): 3639-3660.
- [14] CHEN J C, GRACE J R, GOLRIZ M R. Heat transfer in fluidized beds: Design methods[J]. *Powder Technology*, 2005, 150(2): 123-1.
- [15] HOU B L, TANG H L, ZHANG H Y, et al. Experimental and theoretical investigation of mass transfer in a circulating fluidized bed[J]. *Chemical Engineering Science*, 201, 102: 354-364.
- [16] MCDONOUGH J R, LAW R, REAY D A, et al. Intensified carbon capture using adsorption: Heat transfer challenges and potential solutions[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2018, 8: 17-30.
- [17] DHOKE C, ZAABOUT A, CLOETE S, et al. Demonstration of the novel swing adsorption reactor cluster concept in a multistage fluidized bed with heat-transfer surfaces for postcombustion CO₂ capture[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020, 59(51): 22281-22291.
- [18] TEZER Ö, KARABAĞ N, ATAKAN Ö, et al. Biomass gasification for sustainable energy production: A review[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 20, 47(34): 15419-154.
- [19] MÖRL L, HEINRICH S, PEGLOW M. Chapter 2 Fluidized bed spray granulation[M]//Granulation. Amsterdam: Elsevier, 2007: 21-188.
- [20] BARKER R. The reactivity of calcium oxide towards carbon dioxide and its use for energy storage[J]. *Journal of Applied Chemistry and Biotechnology*, 1974, 24(4-5): 221-227.
- [21] BLASER P J, CORINA G. Validation and application of computational modeling to reduce erosion in a circulating fluidized bed boiler[J]. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 201, 10(1). <https://doi.org/10.1515/1542-6580.3001>.
- [22] ZIMMERMANN S, TAGHIPOUR F. CFD modeling of the hydrodynamics and reaction kinetics of FCC fluidized-bed reactors[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2005, 44(26): 9818-9827.
- [23] SATTARI F, TAHMASEBPOOR M, VALVERDE J M, et al. Modelling of a fluidized bed carbonator reactor for post-combustion CO₂ capture considering bed hydrodynamics and sorbent characteristics[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 406: 12676.
- [24] SINGH R I, BRINK A, HUPA M. CFD modeling to study fluidized bed combustion and gasification[J]. *Applied Thermal Engineering*, 201, 52(2): 585-614.
- [25] FLAMANT G. Plasma fluidized and spouted bed reactors: An overview[J]. *Pure and Applied Chemistry*, 1994, 66(6): 1231-1238.

- [26] GÓMEZ-BAREA A, LECKNER B. Modeling of biomass gasification in fluidized bed[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2010, 36(4): 444–509.
- [27] JANSEN D, GAZZANI M, MANZOLINI G, et al. Pre-combustion CO₂ capture[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 40: 167–187.
- [28] CHENG Y P, THOW Z, WANG C H. Biomass gasification with CO₂ in a fluidized bed[J]. *Powder Technology*, 2016, 296: 87–101.
- [29] VIRGINIE M, ADÁNEZ J, COURSON C, et al. Effect of Fe–olivine on the tar content during biomass gasification in a dual fluidized bed[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 201, 121: 214–.
- [30] PUIG-ARNAVAT M, BRUNO J C, CORONAS A. Review and analysis of biomass gasification models[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(9): 2841–2851.
- [31] MISHRA S, UPADHYAY R K. Review on biomass gasification: Gasifiers, gasifying mediums, and operational parameters[J]. *Materials Science for Energy Technologies*, 2021, 4: 329–340.
- [32] OLABI A G, OBAIDEEN K, ELSAID K, et al. Assessment of the pre-combustion carbon capture contribution into sustainable development goals SDGs using novel indicators[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 153: 111710.
- [33] BUHRE B J P, ELLIOTT L K, SHENG C D, et al. Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2005, 31(4): 283–307.
- [34] DUAN L B, LI L. Oxygen-carrier-aided combustion technology for solid-fuel conversion in fluidized bed[M]. Springer Nature, 20.
- [35] LIU Q W, ZHONG W Q, YU A B, et al. Co-firing of coal and biomass under pressurized oxy-fuel combustion mode in a 10 kWth fluidized bed: Nitrogen and sulfur pollutants[J]. *Chemical Engineering Journal*, 20, 450: 138401.
- [36] VASUDEVAN S, FAROOQ S, KARIMI I A, et al. Energy penalty estimates for CO₂ capture: Comparison between fuel types and capture-combustion modes[J]. *Energy*, 2016, 103: 709–714.
- [37] LUPION M, ALVAREZ I, OTERO P, et al. 30 MWth CIUDEN oxy-cfb boiler - first experiences[J]. *Energy Procedia*, 201, 37: 6179–6188.
- [38] CHIU P C, KU Y. Chemical looping process: A novel technology for inherent CO₂ capture[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 201, 12(6): 1421–14.
- [39] LEWIS W K, GILLILAND E R. Production of pure carbon dioxide: U. S. Patent , 665, 972[P]. 1954-1-1.
- [40] LEWIS W K, GILLILAND E R, Sweeney M P. Gasification of carbon-Metal oxides in a fluidized powder bed[J]. *Chemical Engineering Progress*, 1951, 47(5): 251–256.
- [41] ISHIDA M, JIN H G. A new advanced power-generation system using chemical-looping combustion[J]. *Energy*, 1994, 19(4): 415–4.
- [42] ISHIDA M, JIN H G. A novel combustor based on chemical-looping reactions and its reaction kinetics[J]. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 1994, 27(3): 296–301.
- [43] LYNGFELT A, KRONBERGER B, ADANEZ J, et al. The grace project Development of oxygen carrier particles for chemical-looping combustion. Design and operation of a 10 kW chemical-looping combustor[M]//Greenhouse gas control technologies 7. Amsterdam: Elsevier, 2005: 115–1.
- [44] STRÖHLE J, ORTH M, EPPLE B. Design and operation of a 1MWth chemical looping plant[J]. *Applied Energy*, 2014, 113: 1490–1495.
- [45] DI GIULIANO A, CAPONE S, ANATONE M, et al. Chemical looping combustion and gasification: A review and a focus on European research projects[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 20, 61(39): 14403–144.
- [46] BERGUERAND N, LYNGFELT A. Design and operation of a 10kWth chemical-looping combustor for solid fuels–Testing with South African coal[J]. *Fuel*, 2008, 87(12): 2713–2726.
- [47] BERGUERAND N, LYNGFELT A. The use of petroleum coke as fuel in a 10kW th chemical-looping combustor[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2007, 2(2): 169–179.
- [48] SHEN L, WU J, XIAO J. Developments on chemical looping combustion of biomass[C]. 2nd U. S. -China Symposium on CO₂ Emissions Control Science & Technology, Hangzhou, China, 2008.
- [49] BERGUERAND N, LYNGFELT A, MATTISSON T, et al. Chemical looping combustion of solid fuels in a 10 kW_{th} Unit[J]. *Oil & Gas Science and Technology – Revue D’IFP Energies Nouvelles*, 66(2): 181–191.
- [50] KIM H R, WANG D W, ZENG L, et al. Coal direct chemical looping combustion process: Design and operation of a 25-kWth sub-pilot unit[J]. *Fuel*, 201, 108: 370–384.
- [51] 李振山, 李维成, 刘海洋, 等. 中国化学链燃烧技术研发进展与展望 [J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(18): 7200–7220.
- LI Zhenshan, LI Weicheng, LIU Haiyang, et al. Development and prospect of chemical looping combustion technology in China[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(18): 7200–7220.
- [52] CZAKIERT T, KRZYWANSKI J, ZYLKA A, et al. Chemical looping combustion: A brief overview[J]. *Energies*, 20, 15(4): 156.
- [53] PELTOLA P, ALOBAID F, TYNJÄLÄ T, et al. Overview of fluidized bed reactor modeling for chemical looping combustion: Status and research needs[J]. *Energy & Fuels*, 20, 36(17): 9385–9409.
- [54] WON Y, KIM J Y, PARK Y C, et al. Post-combustion CO₂ capture process in a circulated fluidized bed reactor using 200 kg potassium-based sorbent: The optimization of regeneration condition[J]. *Energy*, 2020, 208: 118188.
- [55] BOONPRASOP S, GIDASPOW D, CHALERMINSUWAN B, et al. CO₂ capture in a multistage CFB; Part I: Number of stages[J]. *AIChE Journal*, 2017, 63(12): 5267–5279.
- [56] ZHAO C S, ZHAO C W, CHEN X. Low-temperature solid carbon dioxide carriers[M]. Calcium and chemical looping technology for power generation and carbon dioxide (CO₂) capture. Amsterdam: Elsevier, 2015: 409–438.
- [57] WANG S H, LI Y, LI Z S. Fast adsorption kinetics of CO₂ on solid amine sorbent measured using microfluidized bed thermogravimetric analysis[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*,

- 2020, 59(15): 6855–6866.
- [58] MA J L, ZHONG J, BAO X B, et al. Continuous CO₂ capture performance of K₂CO₃/Al₂O₃ sorbents in a novel two-stage integrated bubbling-transport fluidized reactor[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 404: 126465.
- [59] DONG W, CHEN X P, WU Y, et al. Carbonation characteristics of dry sodium-based sorbents for CO₂ Capture[J]. *Energy & Fuels*, 201, 26(9): 6040-6046.
- [60] YU F, WU Y, ZHANG W J, et al. A novel aerogel sodium-based sorbent for low temperature CO₂ capture[J]. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2016, 6(4): 561–57.
- [61] COWNDEN R, MULLEN D, LUCQUIAUD M. Towards net-zero compatible hydrogen from steam reformation—Techno-economic analysis of process design options[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 20, 48(39): 14591-14607.
- [62] ARIAS B, DIEGO M E, MÉNDEZ A, et al. Operating experience in la pereda 1.7 MWth calcium looping pilot[J]. *Energy Procedia*, 2017, 114: 149–157.
- [63] WU Y, DAI Y, XIE W Y, et al. System integration for combined heat and power (CHP) plants with post-combustion CO₂ capture[J]. *Energy Conversion and Management*, 20, 258: 115508.
- [64] LIVELY R P, CHANCE R R, KOROS W J. Enabling low-cost CO₂ capture *via* heat integration[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2010, 49(16): 7550–756.
- [65] KHOSRAVI S, HOSSAINPOUR S, FARAJOLLAHI H, et al. Integration of a coal fired power plant with calcium looping CO₂ capture and concentrated solar power generation: Energy, exergy and economic analysis[J]. *Energy*, 20, 240: 122466.
- [66] LI H L, YAN J Y, CAMPANA P E. Feasibility of integrating solar energy into a power plant with amine-based chemical absorption for CO₂ capture[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 201, 9: 272-280.
- [67] ERANS M, MANOVIC V, ANTHONY E J. Calcium looping sorbents for CO₂ capture[J]. *Applied Energy*, 2016, 180: 722–74.
- [68] VALVERDE J M. Ca-based synthetic materials with enhanced CO₂ capture efficiency[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 201, 1(3): 447-468.
- [69] HANAK D P, ANTHONY E J, MANOVIC V. A review of developments in pilot-plant testing and modelling of calcium looping process for CO₂ capture from power generation systems[J]. *Energy & Environmental Science*, 2015, 8(8): 2199–2249.
- [70] ARIAS B, DIEGO M E, ABANADES J C, et al. Demonstration of steady state CO₂ capture in a 1.7MWth calcium looping pilot[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 201, 18: 237-245.
- [71] FANTINI M, SPINELLI M, MAGLI F, et al. Calcium Looping technology demonstration in industrial environment: The CLEANER project and status of the CLEANER pilot plant[J]. *E3S Web of Conferences*, 2020, 197: 08006.
- [72] MÜLLER S, THEISS L, FLEIß B, et al. Dual fluidized bed based technologies for carbon dioxide reduction: Example hot metal production[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2021, 11(1): 159–168.
- [73] 胡丹, 温鹏, 任腊春. 新能源大基地 100 MW 塔式光热项目聚光集热场研究 [J]. *能源与节能*, 2023(9): 26–31.
- HU Dan, WEN Peng, REN Lachun. Solar power concentrating field of 100 MW tower-type CSP project in new energy base[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2023(9): 26–31.
- [74] 雷威道, 帅争峰, 张卓群, 等. 塔式太阳能光热发电系统原理综述 [J]. *水电与新能源*, 20, 37(12): 10-1.
- LEI Xiandao, SHUAI Zhengfeng, ZHANG Zhuoqun, et al. Introduction of the tower-type solar thermal power generation system[J]. *Hydropower and New Energy*, 20, 37(12): 10-1.
- [75] 吕彩霞. 定日镜参数对塔式太阳能聚光集热系统性能的影响 [J]. *节能*, 20, 42(5): 34-37.
- LYU Caixia. Effect of heliostat parameters on performance of tower solar concentrating heat collection system[J]. *Energy Conservation*, 20, 42(5): 34-37.
- [76] SALATINO P, AMMENDOLA P, BARESCHINO P, et al. Improving the thermal performance of fluidized beds for concentrated solar power and thermal energy storage[J]. *Powder Technology*, 2016, 290: 97–101.
- [77] LIU J R, XUAN Y M, TENG L, et al. Design and application of a novel direct light-driven thermogravimetric analyzer[J]. *Solar Energy*, 20, 253: 554-56.
- [78] TENG L, XUAN Y M, DA Y, et al. Direct solar-driven reduction of greenhouse gases into hydrocarbon fuels incorporating thermochemical energy storage *via* modified calcium looping[J]. *Chemical Engineering Journal*, 20, 440: 135955.
- [79] LIU J R, XUAN Y M, TENG L, et al. Direct solar-driven calcination kinetics for Ca-looping thermochemical energy storage[J]. *Chemical Engineering Science*, 2024, 285: 119549.
- [80] PUIG-ARNAVAT M, TORA E A, BRUNO J C, et al. State of the art on reactor designs for solar gasification of carbonaceous feedstock[J]. *Solar Energy*, 201, 97: 67-84.
- [81] WALKER J, HALLIDAY D. RESNICK R. Halliday and Resnick Fundamentals of Physics [M]. John Wiley & Sons, 2018.
- [82] Silicon Melting. Inductotherm Corp. <https://www.inductotherm.com/applications/induction-silicon-melting/> (accessed 2023-05-02).
- [83] HAMZEHLIOUA S, SHABANIAN J, LATIFI M, et al. Effect of microwave heating on the performance of catalytic oxidation of n-butane in a gas-solid fluidized bed reactor[J]. *Chemical Engineering Science*, 2018, 192: 1177–1188.
- [84] FELLOWS, P. J. 20 - Dielectric, ohmic and infrared heating. In: Fellows PJ, editor *Food Processing Technology (Third Edition)* [M]. Woodhead Publishing; 2009, 581-609.
- [85] AHMED I, DUCHESNE M, TAN Y, et al. Electrically Heated Fluidized Beds—A Review[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2024, 63(10): 4205–4235.
- [86] IDAKIEV V, BÜCK A, TSOTSAS E, et al. Inductive heating of a cylindrical fluidized bed[J]. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 2016, 51(6): 627–638.
- [87] SYBIR A V, FEDOROV S S, HUBYNSKYI SM. et al. Thermal purification of natural graphite by means of high-speed heating[J]. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 2020(3): 178–18.

- [88] LIU J P, SONG R, NASREEN S, et al. Analysis of the complementary property of solar energy and thermal power based on coupling model[J]. *Nature environment & pollution technology*, 2019, 18(5): 1675–1681.
- [89] JACOB R M, TOKHEIM L A. Electrified calciner concept for CO₂ capture in pyro-processing of a dry process cement plant[J]. *Energy*, 20, 268: 12667.
- [90] SAMANI N A. Calcination in an electrically heated bubbling fluidized bed applied in calcium looping[D]. University of South-Eastern Norway, 2020.
- [91] ROSALES-PÉREZ J F, VILLARRUEL-JARAMILLO A, ROMERO-RAMOS J A, et al. Hybrid system of photovoltaic and solar thermal technologies for industrial process heat[J]. *Energies*, 20, 16(5): 2220.
- [92] PADULA S, TROIANO M, TREGAMBI C, et al. Directly irradiated fluidized bed autothermal reactor (DIFBAR): Hydrodynamics, thermal behaviour and preliminary reactive tests[J]. *Fuel*, 20, 346: 128.
- [93] SAMETI M, SYRON E. 100% renewable industrial decarbonization: Optimal integration of solar heat and photovoltaics[J]. *Smart Energy*, 20, 8: 100087.
- [94] KATAJISTO O. Cement pre-calcination with electricity and carbon dioxide sequestration[J]. <https://www.decarbonate.fi/wp-content/uploads/2022/05/2022-05-17-Betonitutkimusseminaari.20>.
- [95] TREGAMBI C, BEVILACQUA C, TROIANO M, et al. A novel autothermal fluidized bed reactor for concentrated solar thermal applications[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 398: 12570.