

Research progress on carbon neutrality by green resource utilization of carbon dioxide

Guoquan Lu

Chenzhou Zhongzhou Ecological Environment Technology Co., Ltd., Changsha, Hunan, 410205, China

Abstract

To actively address global climate change and achieve the “dual carbon” goals, it is essential to vigorously develop negative emission technologies, such as carbon capture, utilization, and storage (CCUS). This paper systematically analyzes the fundamental theories of carbon dioxide molecular structure characteristics and thermodynamic effects, focusing on the key technological advancements in CO₂ resource utilization both domestically and internationally. It compares and analyzes the advantages and disadvantages of different technical routes. By combining typical engineering cases, it quantitatively evaluates the emission reduction potential and environmental benefits of comprehensive CO₂ utilization, exploring a new model for carbon-energy-fertilizer coupled utilization based on energy combustion for cold emissions. The study shows that cold emission technology can significantly enhance the efficiency of low-cost CO₂ capture and collection, similar to capturing high-concentration CO₂ from chimneys in the air. This approach connects the entire chain from source reduction, process control, to end-use utilization, improving regional atmospheric quality while laying a solid foundation for achieving carbon neutrality in industrial parks and regions.

Keywords

carbon dioxide utilization; carbon neutrality; cold emission technology; source emission reduction; carbon sink

二氧化碳的绿色资源化利用实现碳中和的研究进展

卢国全

郴州中洲生态环境科技有限公司, 中国 · 湖南长沙 410205

摘 要

为积极应对全球气候变化,实现“双碳”目标,须大力发展以二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)为代表的负排放技术。本文在系统剖析二氧化碳分子结构特性、热力学效应等基础理论的基础上,重点阐述了国内外二氧化碳资源化利用的关键技术进展,对比分析不同技术路线的优劣势。结合典型工程案例,定量评估了二氧化碳综合利用的减排潜力与环境效益,探讨了基于能源燃烧实现冷排放的碳-能-肥耦合利用新模式。研究表明,冷排放技术可显著提高二氧化碳廉价捕获和收集效率,冷排放类似在空气里捕获烟囱的高浓度二氧化碳一样简单,打通源头减排、过程控制、末端利用内循环全链条,在改善区域大气环境质量的同时,为园区乃至区域实现碳中和奠定坚实基础。

关键词

二氧化碳利用; 碳中和; 冷排放技术; 源头减排; 碳汇

1 引言

随着全球气候变化加剧、极端天气事件频发,以二氧化碳为主的温室气体减排已成为国际社会的普遍共识。中国作为负责任大国,向世界庄严承诺力争 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和。这是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革,不仅对能源结构转型提出了更高要求,也对二氧化碳减排技术提出了更迫切需求。传统的提高能效、优化用能结构等减排路径虽仍大有可为,但在推进“双碳”进程中已难以为继。大力发展以二氧化碳捕集利用与封存

(CCUS) 为代表的负排放技术,构建从源头减量、过程控制到末端利用的全流程、多层次二氧化碳减排体系,方能为碳达峰、碳中和目标如期实现提供强有力的技术支撑。

2 二氧化碳物化特性与碳中和机理研究

2.1 分子沉降特性与碳循环机制

尽管二氧化碳在大气成分中的比例不足 0.1%,但其独特的物理化学性质却对地球生态环境演变产生了深远影响。二氧化碳分子量为 44.0095,在标准状况下密度为 1.98kg/m³,比空气重 52.8%。当大气中二氧化碳浓度升高时,一方面对太阳辐射的吸收和反射会随之增强,加剧温室效应;另一方面,在重力作用下大部分二氧化碳会在近地表聚集,改变局地小气候^[1]。通过工业排放及燃烧产生的二氧化碳,90%以上会在沉降过程中与海水、土壤、植被和水体发生物理化学

【作者简介】卢国全(1971-),男,中国湖南长沙人,博士,外籍双科学院院士,从事应对气候变化研究。

作用，仅有不足 10% 在大气中分布长期滞留。沉降的二氧化碳通过碳酸盐风化、生物类吸收、有机质埋藏等过程重新进入岩石圈、生物圈，形成相对稳定的碳库，实现了短期碳循环向长期碳循环的转化。

2.2 热力学效应对气候的实际影响

能源燃烧过程中释放的二氧化碳虽是温室效应的主要贡献者，但其对局地气候的直接影响有限。以燃煤电厂为例，烟气携带大量显热与潜热，通过与周围环境发生热交换引起局地温差，进而诱发小范围极端天气^[2]。高温烟气的热辐射效应是大气二氧化碳浓度升高的次生结果。依据热力学第二定律，在常压下每升高 1℃，饱和水汽压增加 7%，进而加剧水循环失衡。当前燃煤电厂对烟气显热回收利用率普遍不足 40%，大量高品位余热被“白白浪费”。多年气象观测数据显示，在全国 153 个重点城市中，城区平均气温比近郊高 1.2℃，极端高温事件发生频率是近郊的 1.6 倍，这与热岛效应加剧密切相关。

2.3 自然碳汇调节能力与人工碳汇构建

就地球系统碳循环过程而言，海洋与陆地生态系统是最大的天然碳汇。据估算，海洋碳储量高达 3.8 万亿 t，通过溶解吸收作用每年可固定大气中 8% 左右的碳排放；森林、草地、湿地等陆地生态系统碳储量达 2.4 万亿 t，通过光合作用每年可吸收近 30% 的碳排放。然而，随着化石能源消费加速、土地利用方式改变，陆地生态系统由净碳汇逐渐转变为净碳源，全球变暖背景下海洋碳汇功能也日渐式微。人

工强化碳汇是应对气候变化的重要途径。通过造林植树、退耕还林（草）等生态修复工程，增加森林面积和植被碳储量；采取免耕、秸秆还田等措施，提高土壤固碳能力；利用废弃盐碱地培育能源植物，实现碳汇开发与生态改善双赢。此外，发展智慧农业，采用温室大棚二氧化碳施肥技术，可使蔬菜、水果等作物单产提高 30% 以上。

3 二氧化碳资源化利用技术创新与应用

3.1 冷排放技术体系与绝氧热解－悬浮燃烧系统

冷排放技术以固废中的可燃物为原料，通过绝氧热解将其转化为燃气和含碳固体燃料，进而采用富氧燃烧技术实现污染物超低排放和燃料热值最大化利用^[3]。其核心装置“绝氧热解-悬浮燃烧系统”集碳氢分离、焦油回收、高温脱硫脱氮等功能于一体，可使烟气中 SO₂、NO_x 排放浓度降至 10mg/m³ 以下，二噁英类污染物降至 0.01TEQng/m³ 以下，各项指标均优于国内超低排放限值。与传统固废焚烧技术相比，前端 50% 以上的时间是无氧阶段，后端气态催化燃烧时才消耗氧气，冷排放系统的热效率可提高 20 个百分点以上，污染物减排效果尤为显著。其原理在于，燃烧环境从还原性转为氧化性，抑制了 NO_x、二噁英等污染物的生成。此外，由于燃烧温度达 950-1000℃，有机污染物被彻底分解，燃烧炉渣率不足 3%。同时，烟气在急冷过程中迅速由 1000℃ 降至 200℃ 以下，可最大限度削减烟气中的显热排放。图 1 示意了冷排放技术的工艺流程。

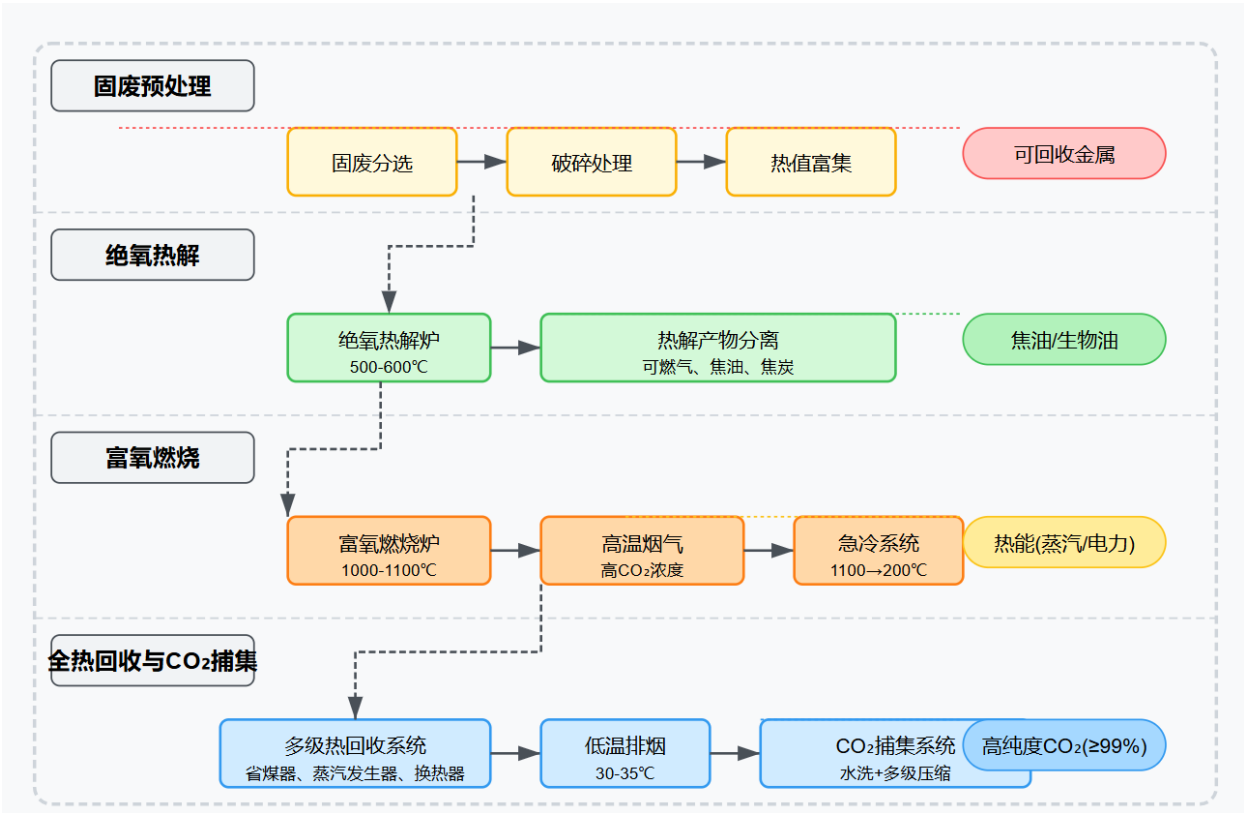


图 1 冷排放技术工艺流程图

3.2 梯度热回收与全热利用技术

冷排放技术的另一突出优势在于实现了对不同品位余热的梯度回收与利用。系统设计了由省煤器（过热器）入炉空气冷交换预热系统、冷水补水反向换热系统，饱和蒸汽发生器、冷凝式换热器、溴化锂制冷机等部件串联而成的多级热回收子系统，可将 1000℃以上的高温烟气梯次降温至 30℃左右，使排烟温度接近环境温度，热污染得到最大限度控制。其中，950-1000℃烟气首先通过省煤器产生 600℃高温蒸汽，推动汽轮机发电；600-1000℃烟气进入饱和蒸汽发生器，产生 350℃饱和蒸汽；300-600℃烟气则进入冷凝式换热器，加热供暖循环水；80-300℃低温烟气最后被溴化锂吸收式制冷机组回收利用，制取 7℃冷冻水。与单一发电模式相比，冷排放系统的热电比可从 1：5 提升至 1：8，吨垃圾综合利用效率显著提高。

3.3 二氧化碳捕获与转化技术进展

在高温常压下实现高浓度二氧化碳的捕集一直是个世界性难题，能耗高、成本高是制约规模化推广应用的瓶颈。得益于独特的冷排放工艺，二氧化碳捕集可以在烟气温度降至 35℃以下时进行，采用水洗 + 多级压缩的组合工艺，既可满足捕集率达 90% 以上的要求，也可使电耗降低至 200kWh/t 以下。在二氧化碳转化利用方面，通过发展基于离子液体电催化、金属有机骨架材料吸附、光催化加氢、生物酶催化、矿化碳封存等新工艺、新材料，极大拓展了二氧化碳化工利用途径，提高了转化效率。如采用 MOF 材料催化转化制备碳酸酯的收率可达 96% 以上，远高于常规均相催化剂水平。

3.4 碳 – 能 – 肥三联产与智慧农业碳汇强化

在冷排放技术支撑下，二氧化碳捕集制成干冰、热电联产、燃烧灰渣高值化利用可一体化设计，实现碳 – 能 – 肥三联产^[4]。其中，高浓度富集的二氧化碳可直接供应园区内智能温室，取代化肥，实现农业增产与碳排放“双控”。温室大棚二氧化碳施用可使蔬菜、水果产量提高

30% ~ 50%，品质显著改善。与此同时，燃烧灰渣中的氮、磷、钾等营养物质可通过生物浸出、化学活化等方式加以富集提取，制成生物碳基复合肥。在设施农业中推广应用，可实现有机替代、减量施肥，进而提升土壤团粒结构稳定性，增强其抗旱保墒能力。

4 工程应用示范与综合效益评估

4.1 典型工程案例分析与环境效益量化

冷排放技术自提出以来，已在生活垃圾处理、园区固废资源化利用等领域开展了多个百吨级示范工程。以江西某循环经济产业园为例，项目配套建设了日处理 600t 生活垃圾的分布式能源系统，采用“绝氧热解 + 悬浮燃烧 + 梯级热回收 + 二氧化碳捕集”组合工艺路线，最大限度实现了固废源头减量化、过程减排与末端增汇耦合。系统投运后，燃烧炉排烟温度稳定在 30-35℃，烟气黑度始终保持在林格曼 1 级以下；二噁英排放浓度为 0.0023ngTEQ/m³，是国标限值的 1/40；各主要污染物排放浓度均降至国标限值的 10% 以下。项目年处理生活垃圾 22 万 t，年产蒸汽 40 万 t，可满足园区企业 90% 的供热需求。此外，项目配套建成二氧化碳液化深冷捕集装置，年回收利用二氧化碳 12 万 t，可新增干冰产能 8.6 万 t、液态二氧化碳产能 3400t、食用级液态二氧化碳 1000t，综合利用率达 90% 以上。表 1 汇总了项目的主要环境效益。

4.2 经济效益重构与商业模式创新

从商业运营角度看，基于冷排放技术的固废处置与循环利用项目在多方面实现了经济效益重构。热值有效利用率大幅提升，吨垃圾焚烧热值达到同行业的 1.3-1.5 倍，边际效益凸显；污染减排成本大幅降低，吨垃圾二氧化碳当量减排成本不足 150 元，较传统 CCS 技术降低 60% 以上；末端产品实现了多样化、高值化，吨垃圾净利润可达 800 元以上，是传统焚烧发电模式的 3 倍，且通过二氧化碳捕集利用可获得可观的碳减排收益。

表 1 江西某循环经济产业园生活垃圾冷排放项目的环境效益

指标	单位	数值
年处理生活垃圾	万吨	22
年产蒸汽	万吨	40
替代化石能源	万吨标准煤	9.6
二氧化碳回收总量	万吨	12
其中：干冰产量	万吨	8.6
液态二氧化碳产量	吨	3400
食品级液 CO ₂ 产量	吨	1000
二氧化碳综合利用率	%	90
NO _x 平均排放浓度	mg/m ³	9.6
SO ₂ 平均排放浓度	mg/m ³	8.2
颗粒物平均排放浓度	mg/m ³	1.9
二噁英平均排放浓度	ngTEQ/m ³	0.0023

4.3 技术推广价值与产业化路径探索

随着垃圾分类、“无废城市”建设力度不断加大，城市生活垃圾、餐厨垃圾、建筑垃圾等的资源化利用市场需求持续攀升。与此同时，钢铁、建材、化工等高耗能行业的节能减排与绿色转型也迫在眉睫。预计到2025年，我国大中型工业园区将达1500个左右，固废综合利用潜在市场空间超过8000亿元。以冷排放为核心的固废协同处置与多联产技术，可显著降低园区一次能源消耗强度，提高污染协同治理水平，对节能、减排、固废资源化利用、区域碳平衡等均具有积极意义。在沿海发达地区及资源型城市，通过推广冷排放与二氧化碳捕集利用技术，构建与区域资源禀赋相匹配的固废协同处置新模式，将在碳达峰、碳中和目标实现进程中发挥重要作用^[8]。

4.4 碳中和实践中的政策支持与全球合作机制

目前，发达国家普遍将CCUS上升至国家战略，从政策、市场、金融等方面加大扶持力度，抢占产业发展制高点。美国修订完善了45Q税收抵免政策，为CCUS项目提供长达12年的财税优惠；欧盟将CCUS纳入“创新基金”支持范畴，设立了总额100亿欧元的专项资金，重点支持高耗能行业的CCUS改造；澳大利亚、日本、加拿大等国家也制定了专门的CCUS发展规划，部署了一批示范工程。为推动CCUS产业高质量发展，中国应加快构建包容审慎的政策环境，设立CCUS研发专项，加强关键核心技术攻关；制定CCUS

产业发展路线图，开展重大示范工程建设，加快形成产业集群；强化产业链上下游企业、科研机构、金融机构的协同创新，打造全产业链创新联盟；积极融入全球CCUS产业合作网络，在技术引进、项目投资、能力建设等方面开展务实合作，共同推进全球碳中和事业发展。

5 结语

应对气候变化、推进碳减排已成为各国的共识和自觉行动。发展以二氧化碳捕集利用与封存为代表的负排放技术，是实现碳中和目标的关键抓手。本文通过对比分析国内外二氧化碳减排利用的技术现状，重点剖析了冷排放技术的创新特征及其带来的环境效益、经济效益，展望了在“双碳”目标引领下的发展前景。

参考文献

- [1] 姚炜珊,侯雅磊,魏国强,张声森,杨希贤,邓丽芳,许仕博.二氧化碳资源化利用研究进展[J].新能源进展,2024,12(2):182-192.
- [2] 韩依飏.二氧化碳的绿色资源化利用实现碳中和的研究进展[J].当代化工,2023,52(4):973-976.
- [3] 鲁佩芳,阮少军.双碳目标下二氧化碳催化转化技术研究进展[J].中国资源综合利用,2024,42(1):100-102.
- [4] 王建行,赵颖颖,李佳慧,袁俊生.二氧化碳的捕集、固定与利用的研究进展[J].无机盐工业,2020,52(4):12-17.
- [5] 王秀鑫.二氧化碳催化转化的研究进展[J].山东化工,2021,50(15):82-83+90.