

碳中和背景下煤化工碳捕集技术经济可行性研究

段晶晶（山西省能源职业学校，山西 太原 030000）

摘要：随着全球民众对气候变化问题重视程度的不断提高，碳中和逐渐成为各国发展进程中弥足珍贵的方向。作为碳排放的急需对象，煤化工由于其高排放量和排放贡献度成为碳捕集的首选之一。因此，本文探寻了在碳中和情况下煤化工碳捕集技术的经济可行性。通过碳捕集技术原理、构成分析、成本效益分析和实际案例四个角度全方位剖析了此技术运用于煤化工行业的各相关领域，由数据推论得出此技术的开发与应用可能带来的巨大经济前景，为行业决策提供依据。

关键词：碳中和背景下；煤化工碳捕集技术；经济可行性

中图分类号：X701

文献标识码：A

文章编号：1674-5167（2025）021-0058-03

Economic feasibility study of coal chemical carbon capture technology under the background of carbon neutrality

Duan Jingjing (Shanxi Energy Vocational School, Taiyuan Shanxi 030000, China)

Abstract: With the increasing attention of the global public to climate change issues, carbon neutrality has gradually become a precious direction in the development process of various countries. As an urgent target for carbon emissions, coal chemical industry has become one of the top choices for carbon capture due to its high emissions and contribution. Therefore, this article explores the economic feasibility of coal chemical carbon capture technology under carbon neutrality. This article comprehensively analyzes the application of carbon capture technology in various related fields of the coal chemical industry from four perspectives: principles, composition analysis, cost-benefit analysis, and practical cases. Based on data inference, it is concluded that the development and application of this technology may bring huge economic prospects, providing a basis for industry decision-making.

Keywords: under the background of carbon neutrality; Coal chemical carbon capture technology; Economic feasibility

面对全球气候变化的严峻形势，减排碳中和已经成为国际社会的广泛共识。煤化工产业在能源生产和化工原料供应领域发挥着至关重要的作用，同时也是碳排放的重要来源。根据统计数据，在2020年，煤化工业二氧化碳排放占全球工业的15%，作为碳排放主体，煤化工汽车冒尾气^[1]。因此，碳采集技术的发展和应用对煤化工业的可持续发展及碳减排目标的达成是至关重要的。具体而言，碳捕集技术用于从工业废气中捕获二氧化碳并封存或利用过程，以减少排放至大气，是煤化工业污染治理的一种重要手段^[2]。本文将聚焦于煤化工业碳捕集技术的经济性，研究其成本效益，排放减少以及应用中的问题与挑战。

1 煤化工碳捕集技术概述

1.1 常见碳捕集技术原理

1.1.1 燃烧前捕集

燃烧前捕集主要应用于以煤气化为基础的煤化工工艺。在煤气化过程中，煤被转化为合成气（主要成分为一氧化碳和氢气），通过变换反应将一氧化碳转化为二氧化碳和氢气，然后利用物理吸收或化学吸附等方法将二氧化碳从合成气中分离出来^[3]。例如，低温甲醇洗工艺利用低温下甲醇对二氧化碳等酸性气体

具有良好溶解性的特点，实现二氧化碳的高效捕集。该技术的优点是二氧化碳浓度高、分压大，捕集效率相对较高，且分离出的氢气可作为优质燃料或化工原料进一步利用。

1.1.2 燃烧后捕集

燃烧后捕集是对燃烧后的烟气进行二氧化碳捕集。常用的方法有化学吸收法，如采用乙醇胺（MEA）等胺类溶液作为吸收剂，二氧化碳与胺类物质发生化学反应生成氨基甲酸盐，在加热条件下氨基甲酸盐分解释放出二氧化碳，实现吸收剂的再生循环使用。此外，还有吸附法，利用固体吸附剂对二氧化碳的选择性吸附作用进行捕集^[4]。燃烧后捕集技术的优势在于可对现有煤化工装置进行改造应用，适应性强，但面临的挑战是烟气中二氧化碳浓度相对较低（一般为10%–15%），且含有其他杂质气体，增加了捕集成本。

1.1.3 富氧燃烧捕集

与此相距甚远的便是富氧燃烧捕集方式，这种方式实际上是在纯氧或高浓度氧气与循环烟气混合的氛围下对煤燃烧，因而生成的烟气主要成分即是CO₂和大量水蒸气，消除掉水蒸气之后，剩下的即是高浓度的CO₂，便易于后续的压缩和封存。这一技术方式

要突破氮气引入和二氧化碳分离问题，视二压电解的高一温烟气内部燃烧技术另需要配套空分装置制取纯氧，增加了投入和能耗。

1.2 技术发展现状与趋势

目前煤化工领域则碳捕集的技术发展确已取得长足进步。

一方面，在燃烧前捕集方面，新型吸附剂、吸收剂不断研发，捕集效率不断提高，能耗不断降低。例如，一些 MOF 材料在二氧化碳吸附表现方面已经展现出了巨大潜力。

另一方面，燃烧后捕集成本实现平稳下降，改进的胺类吸收剂配方和吸收塔设计在这方面发挥了作用。富氧燃烧技术则从空分装置节能优化和燃烧过程精细化控制方面取得突破。

在未来来看，多种碳捕集技术的集成应用将成为发展方向，整体碳捕集效率和经济性通过优势互补不断提高。与可再生能源的耦合也已成为热点，通过利用可再生能源给予碳捕集过程能量支援，从而进一步减排减费。

2 煤化工碳捕集技术成本分析

2.1 投资成本

2.1.1 设备购置与安装成本

不同的碳捕集技术其设备的购置和安装成本相差几倍。以一套处理规模为 100 万吨年二氧化碳的碳捕集装置为例（表 1），燃烧前捕集由于需要煤气化及相关变换、分离设备的改造和新增，因此投资成本比较高，约为 4-6 亿元。燃烧后捕集主要对烟气处理系统进行改造，约为 3-5 亿元。富氧燃烧捕集要配套空分装置，则投资成本最高，约为 6-8 亿元。这些成本包括了吸收塔、吸附器、压缩机、换热器等核心设备的采购费用，以及了管道、电气仪表等的安装费用。

表 1 不同碳捕集技术投资成本对比
(100 万吨 / 年二氧化碳处理规模)

碳捕集技术	投资成本（亿元）
燃烧前捕集	4-6
燃烧后捕集	3-5
富氧燃烧捕集	6-8

2.1.2 配套设施建设成本

除了核心碳捕获装置外，还需要建造许多相关设施。例如，为了运输和储存捕获的二氧化碳，需要铺设管道或使用罐车运输，这涉及管道铺设和储罐铺设的成本^[5]。如果利用地质封存来考虑地质勘探和现场建设工作，这些配套设施的建设成本也不低。以管道运输为例，每公里的建设成本约为 500 万至 1000 万元，具体取决于管道直径、材料和地形条件等因素。

2.2 运行成本

2.2.1 能耗成本

碳捕集过程需要消耗大量的能量，这是运行成本的主要组成部分。燃烧前捕集技术中，煤气化和变换反应本身能耗较高，且后续二氧化碳分离过程也需要消耗能量用于吸收剂再生或吸附剂解吸等操作。据测算，燃烧前捕集每吨二氧化碳的能耗约为 25-35GJ。燃烧后捕集技术中，胺类吸收剂的再生需要大量的蒸汽，每吨二氧化碳的能耗约为 30-40GJ^[6]。富氧燃烧捕集由于空分装置制取纯氧的能耗巨大，每吨二氧化碳的能耗可达 40-50GJ。假设能源价格为 0.3 元 / 兆焦，可计算出不同技术的能耗成本（表 2）。

表 2 不同碳捕集技术能耗成本对比（能源价格 0.3 元 / 兆焦）

碳捕集技术	每吨二氧化碳能耗 (GJ)	每吨二氧化碳能耗成本 (元)
燃烧前捕集	25-35	75-105
燃烧后捕集	30-40	90-120
富氧燃烧捕集	40-50	120-150

2.2.2 吸收剂 / 吸附剂成本

在燃烧后捕集的化学吸收法中，胺类吸收剂会有一定的损耗，需要定期补充。一般情况下，每吨二氧化碳的吸收剂消耗成本约为 10-20 元。对于吸附法，吸附剂也存在使用寿命和再生损耗问题，每吨二氧化碳的吸附剂成本约为 8-15 元。在燃烧前捕集和富氧燃烧捕集技术中，虽然没有直接的吸收剂成本，但也存在类似的用于分离二氧化碳的介质成本。

2.2.3 人工及维护成本

煤化工碳捕集装置的稳定运行高度依赖专业的人工操作与系统维护，这部分成本在整体运营开支中占据重要地位。从人工成本来看，由于装置涉及复杂的化工分离工艺、精密的仪器控制以及安全监控等环节，需要配备包括工艺工程师、设备运维人员、安全检测员等在内的专业团队。根据装置处理规模的不同，人工成本存在显著差异，中小型装置（年处理量 50 万吨以下）每年人工支出约 500 万元，而大型装置（年处理量 100 万吨以上）因人员配置更庞大，人工成本可达每年 1000 万元。这些费用不仅涵盖员工薪酬，还包括专业技能培训、安全防护设备配备等长期投入，以确保操作人员能够应对复杂工况和突发故障。在维护成本方面，碳捕集装置的核心设备如吸收塔、吸附器、压缩机等，需要定期进行检修、清洗和零部件更换，以维持其高效运行状态。例如，化学吸收法中使用的胺类吸收剂会对设备产生一定腐蚀，需定期对管道和塔体进行防腐处理；吸附法中的固体吸附剂在多次再生后性能会下降，需要按周期更换，这些操作均需消耗一定的物料和能源。此外，装置的仪表控制系统、

泵阀等辅助设备也需要定期校准和维护，避免因设备故障导致捕集效率下降或停机。综合来看，每年的维护成本通常占装置总投资的3%~5%，以一套投资6亿元的燃烧前捕集装置为例，年维护成本约为1800万~3000万元。这部分开支虽为持续性投入，但能有效延长设备使用寿命，保障装置长期稳定运行，从而间接降低因故障停机造成的经济损失。

3 煤化工碳捕集技术效益分析

3.1 环境效益

实施碳捕获技术，煤化工企业可以显著减少二氧化碳排放，有利于缓解全球气候变化。例如，当一家年碳排放量为500万吨的煤化工企业通过利用碳捕获技术排放80%的碳时，每年超过400万吨的碳排放能力，相当于种植了约2.2亿棵树。它在改善生态环境、保护生物多样性等方面也有许多积极的环境效益^[7]。

3.2 经济效益

3.2.1 碳交易收益

在全球碳市场逐步完善的背景下，煤化工企业同通过碳捕集减排的二氧化碳在碳市场上有望收益。以欧洲为例，2021年，欧洲碳排量市场平均碳价约为50欧元/吨CO₂。若我国碳市场价格可以达30元/吨CO₂，煤化工企业年减排400万吨二氧化碳，每年即可在减排收益的基础上开展碳交易收益1.2亿元。随着碳价的上升，该碳交易收入也会随之增加。

3.2.2 政策补贴

为了更好推广碳捕集技术，许多国家和地区还实践了各种政策补贴。比如，一些我国地方政府对二氧化碳捕集项目给予资金补贴，一般每吨二氧化碳捕集量补贴10~30元。这也为煤化工企业带来了另一种经济效益，减轻了碳捕集技术应用成本。

3.2.3 副产品利用收益

此外，一些技术还可以产生经济副产品。例如，分离出的氢气可以作为清洁能源卖或用于化工合成，其市场价值较高。以氢气价格每立方米2元计，如果每年产生副氢100000000m³，那么销售氢气的收益将达到2亿元。

4 实际案例分析

4.1 案例企业概况

首先，本文选择国内某大型煤化工企业作为案例。煤化工企业主要包括煤制甲醇和煤制烯烃两大类，它们的年排放二氧化碳约800万吨。该企业为响应国家碳中和政策，决定实施一项碳捕集项目。在技术评估和经济分析后，最终选择了燃烧后捕获技术，并建设了一套处理规模为300万t/a二氧化碳的捕集装置^[8]。

4.2 项目投资与运行成本

总投资：12亿元。设备购置与安装成本：8亿元，配套设施建设：4亿元。运行成本：每吨二氧化碳能耗35GJ，能源价格0.3元/MJ，约3亿元。吸收剂：0.3亿元、人工及维护：0.8亿元，年总运行成本约为4.1亿元。

4.3 项目效益

项目投产后每年捕获300万吨二氧化碳，使企业二氧化碳排放量减少约37.5%。从经济角度来看，碳市场每吨35元的碳价格，年碳排放交易收益可达1.05亿元。当地政府对企业每吨二氧化碳补贴20元，年补贴收入6000万元。通过回收部分二氧化碳资源生产干冰和无关产品，年收入为2000万元。综上所述，该项目年总收入1.85亿元。根据成本效益分析，该项目的投资回收期约为8年，不考虑资金的时间价值。

5 结论

在碳中和背景下，煤化工碳捕集技术是一种具有一定经济可行性的途径。尽管当前碳捕集技术的投资和运行成本巨大，是以环境效益、碳交易收益、政策补贴和副产品利用收益等多方面的综合效益来进行弥补差额的，可随着技术不断进步和大规模应用效应的显现，碳捕集普及运用会越来越具有经济可行性。在未来的工作中应当重点加大研发创新力度，降低能耗和设备成本，完善碳市场机制，合理升值市碳价，加大对碳捕集技术应用方面的支持，推动煤化工碳捕集技术的广泛应用，为人类实现全球碳中和目标努力着。同时，还应该进一步深入考察碳捕集技术与煤化工产业生动融合发展的模式，探索更多的二氧化碳资源利用的途径，与环境双赢握手。

参考文献：

- [1] 全翠芝,张惠,刘洪斌,等.能源化工基地碳捕集利用与封存技术优化研究[J].粘接,2024,51(05):125-128+136.
- [2] 邹才能,李士祥,熊波,等.碳中和“超级能源系统”内涵、路径及意义——以鄂尔多斯盆地为例[J].石油勘探与开发,2024,51(04):924-936.
- [3] 顾永正.煤基能源碳捕集利用与封存技术研究进展[J].现代化工,2023,43(09):38-41+46.
- [4] 陈鲁园,李健,闫龙,等.“碳达峰、碳中和”目标下榆林煤化工产业高质量发展路径[J].化学工程与装备,2023,(05):211-212+208.
- [5] 宋欣珂,张九天,王灿.碳捕集、利用与封存技术商业模式分析[J].中国环境管理,2022,14(01):38-47.
- [6] 梁锋.碳中和目标下碳捕集、利用与封存(CCUS)技术的发展[J].能源化工,2021,42(05):19-26.