

DOI: 10.19666/j.rlfed.202410224

基于新型化学链矿化二氧化碳工艺的火电厂碳减排效益评估

白静平¹, 吴雪怡², 马海琪¹, 尹纪峰², 李起明¹, 蔡力宏^{2,3}

(1. 国电电力大同发电有限责任公司, 山西 大同 037046;

2. 原初科技(北京)有限公司, 北京 100016;

3. 清华大学化学工程系, 北京 100084)

[摘要] 以 CO₂ 为主的温室气体排放所带来的生态、环境和社会问题正逐渐受到人们的重视。目前, 以火电厂烟气为 CO₂ 气源的固碳技术仍处于中试和工业化开发阶段, 但针对固碳过程的碳减排效益尚未有标准化的方法学及核算方法。结合某电厂建设运行的国内首套“火电厂二氧化碳化学链矿化利用碳捕集、利用与封存 (CCUS) 技术研究与示范项目”的矿化固碳路线工业化实践, 采用全生命周期 (LCA) 碳排放因子法对化学链矿化利用 CCUS 技术路径的碳减排效益进行核算及评估。该示范项目年处理 CO₂ 量为 1 364.56 t, 能够实现 708.12 t CO₂ 的净减排, 净减排率达到 52%; 将示范项目年处理量放大到 10 万吨级规模, CO₂ 净减排率可提升至 76%。研究方法具有广阔的碳减排应用前景, 可为我国实现碳中和目标提供技术支持。

[关键词] CCUS; 化学链矿化; 生命周期分析; 碳排放; 循环经济

[引用本文格式] 白静平, 吴雪怡, 马海琪, 等. 基于新型化学链矿化二氧化碳工艺的火电厂碳减排效益评估[J]. 热力发电, 2025, 54(6): 48-54. BAI Jingping, WU Xueyi, MA Haiqi, et al. Assessment of carbon emission reduction benefits in thermal power plants based on novel chemical chain mineralization carbon dioxide technology[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(6): 48-54.

Assessment of carbon emission reduction benefits in thermal power plants based on novel chemical chain mineralization carbon dioxide technology

BAI Jingping¹, WU Xueyi², MA Haiqi¹, YIN Jifeng², LI Qiming¹, CAI Lihong^{2,3}

(1. Guodian Power Datong Power Generation Co., Ltd., Datong 037046, China;

2. Yuanchu Technology (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100016, China;

3. Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The ecological, environmental, and social issues caused by greenhouse gas emissions, mainly CO₂, are receiving increasing attentions and concerns from human beings. At present, the carbon sequestration technology using flue gas from thermal power plants as CO₂ source is still in the pilot and industrial development stage, but there is no standardized methodology and accounting method for carbon reduction benefits of the carbon sequestration process. Combining the industrialization practice of the first domestic “CCUS Technology Research and Demonstration Project for Carbon Dioxide Chemical Chain Mineralization Utilization in Thermal Power Plants” constructed and operated by a power plant, the carbon emission reduction benefits of the CCUS technology pathway for chemical chain mineralization utilization were calculated and evaluated using the life cycle assessment (LCA) carbon emission factor method. The annual CO₂ processing capacity of the above demonstration project is 1 364.56 tons, which can achieve a net reduction of 708.12 tons of CO₂, reaching a net emission reduction rate of 52%. By scaling up the annual processing capacity of demonstration project to 100 000 tons, the net reduction rate of CO₂ emission in the project can be increased to 76%. The research method

收稿日期: 2024-10-17

第一作者简介: 白静平 (1984), 男, 高级工程师, 主要研究方向为“碳中和”技术, 12060516@ceic.com。

通信作者简介: 蔡力宏 (1969), 男, 博士, 主要研究方向为二氧化碳矿化技术及工业应用, cailihong2005@sina.com。

has broad prospects for carbon reduction applications and can provide technical support for China to achieve carbon neutrality goals.

Key words: CCUS; chemical chain mineralization; life cycle analysis; carbon emissions; circular economy

IPCC 发布的《全球 1.5 °C 增暖特别报告》建议将全球气温上升限制在 1.5 °C 以内, 实现这一目标迫切需要国际社会迅速采取大规模减排措施^[1]。碳捕集、利用与封存 (CCUS) 技术是一种将 CO₂ 从排放源中分离出来, 然后进行利用或封存的技术过程。与碳捕集与封存 (CCS) 相比, 强调将捕获的 CO₂ 加以利用并创造经济价值^[2]。CCUS 技术一方面可以减少化石燃料燃烧和其他工业过程中 CO₂ 排放, 另一方面能够提供多种途径来封存或将捕获的 CO₂ 加以利用^[3]。在各种 CCUS 工艺路线中, 矿化固碳技术正逐渐成为主流技术之一。《中国能源展望 2060》(2024 年版) 指出, 在我国 CCUS 业务路径的发展规模中, 矿化利用技术将提供 30%~40% 的减排规模^[4]。

国内外学者在碳减排效益分析方面取得了一定成果, 主要包括碳排放测算、分解、影响因素研究等。目前, 研究主要集中在工业行业, 但已逐步扩展到农业、交通运输业等领域。未来需进一步完善和统一方法体系, 以提高研究的实用性和准确性。目前, 针对矿化固碳技术的碳减排效果并未建立统一的方法学和评价标准, 根据《温室气体-产品碳足迹-量化要求及指南》ISO14067: 2018, 碳足迹的计量可以作为直观并量化展示减排效果的工具^[5]。本研究以国内某电厂进行的化学链矿化工业试验为基础 (化学链矿化是指通过循环物质的反应与再生, 将 CO₂ 通过化学反应转化成稳定的矿物质或化合物的过程), 并基于排放因子法^[6]对工业实验数据进行评估计算, 量化矿化固碳技术在实际应用中的减排效果。该研究结果以期在未来在更大规模上的应用提供理论计算基础和工程指导。

1 碳减排效益评估方法与数据范围

本评估计算基于国内某电厂年处理 1 000 t CO₂ 的化学链间接矿化示范项目, 工艺流程如图 1 所示。处理流程主要包括溶矿工段和矿化工段。溶矿工段是将矿化原料电石渣 (主要成分为 Ca(OH)₂) 和循环介质溶液 (主要成分为 NH₄Cl) 在浸取反应器内混合, 从而实现 Ca²⁺ 的提取。反应方程式如下:



其中电石渣不溶物固体经沉降过滤得到粗品滤饼 (主要成分为 CaCO₃、SiO₂ 等), 粗品滤饼作为副产品送至电厂脱硫池作为脱硫剂使用, 过滤清液 (矿化液) 和火电厂经脱硫脱硝后的烟气均送至矿化工段的矿化反应器中。烟气中 CO₂ 与矿化液混合发生矿化反应, 生成 CaCO₃ 沉淀, 同时实现循环介质氯化铵溶液的再生, 反应方程式如下:



其中生成的微米级 CaCO₃ 颗粒经沉降过滤后得到碳酸钙产品。过滤清液 (主要成分为 NH₄Cl 水溶液) 返回溶矿工段循环使用, 碳酸钙产品送出界区, 脱除 CO₂ 后的烟气送出界区外返回电厂烟气管道。

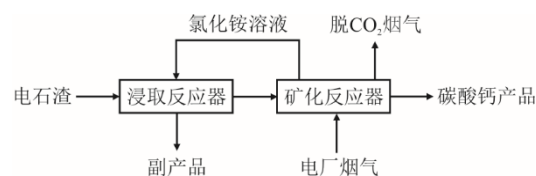


图 1 电厂化学链矿化 CO₂ 工艺流程
Fig.1 Process flow diagram of chemical chain mineralization CO₂ in power plant

针对电厂的矿化固碳技术碳足迹的核算范围包括原料生产、原料运输、生产过程中的能源消耗。因矿化产品下游应用对产品的含水率要求不同, 故不考虑矿化产品烘干过程能源消耗造成的碳排放^[7]。

1.1 研究方法

本项目碳减排效益评估测算范围的示意如图 2 所示。首先, 基于排放因子法对测算范围内各个活动数据涉及的碳排放量进行单独计算, 基于 ISO 14064 标准体系所述, 测算范围不包含项目建设期间的碳排放; 然后, 将项目实际利用的 CO₂ 量减掉各活动产生的碳排放总量数据, 得到项目本身的净碳减排效益。

根据《基于项目的温室气体减排量评估技术规范 通用要求》(GB/T 33760—2017), 上述过程涉及的净碳减排效益计算公式为:

$$C_{jp} = C_{sc} + C_{ys} + C_{ny} - C_{ly} \quad (3)$$

式中: C_{jp} 为净碳减排效益; C_{sc} 为原料生产过程碳排放总量; C_{ys} 为原料运输过程中碳排放总量; C_{ny}

为能源消耗所带来的碳排放总量, C_{ly} 为过程中碳的净利用量。

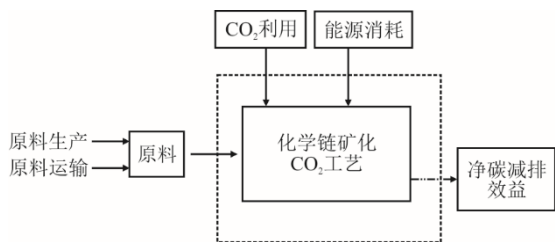


图2 电厂化学链矿化 CO₂ 工艺的测算范围

Fig.2 Calculation range of the chemical chain mineralization CO₂ process

其中原料生产过程碳排放总量 C_{sc} 按照式(4)计算:

$$C_{sc} = \sum_{i=1}^n E_{sc,i} F_{sc,i} \quad (4)$$

式中: C_{sc} 为原料生产过程中碳排放总量, kg; $E_{sc,i}$ 为原料生产阶段第 i 种原料总用量, kg; $F_{sc,i}$ 为第 i 种原料的碳排放因子, kg/kg。

原料运输过程碳排放量 C_{ys} 按照式(5)计算:

$$C_{ys} = \sum_{i=1}^n E_{ys,i} F_{ys,i} \quad (5)$$

式中: C_{ys} 为原料运输过程中碳排放总量, kg; $E_{ys,i}$ 为原料运输阶段第 i 种原料的总运输距离, km; $F_{ys,i}$ 为第 i 种原料运输的碳排放因子, 即将 1 kg 原料运输 1 km 产生的 CO₂, kg/(kg·km)。

能源消耗过程碳排放量 C_{ny} 按照式(6)计算:

$$C_{ny} = \sum_{i=1}^n E_{ny,i} F_{ny,i} \quad (6)$$

式中: C_{ny} 为能源消耗所带来的碳排放总量, kg; $E_{ny,i}$ 为生产阶段中第 i 种能源的总消耗量, kW·h 或 m³ (标准工况下) 或 t; $F_{ny,i}$ 为第 i 种能源消耗的碳排放因子, kg/(kW·h) 或 kg/m³ 或 kg/t。

过程中碳的净利用量 C_{ly} 按照式(7)计算:

$$C_{ly} = M_{ly} \eta_{ly} \quad (7)$$

式中: C_{ly} 为过程中碳的净利用量, kg; M_{ly} 为处理的 CO₂ 的总量, t; η_{ly} 为 CO₂ 的净回收利用率, %。

项目的净减排率 η_p 按照式(8)计算:

$$\eta_p = \frac{|C_{jp}|}{C_{ly}} \times 100\% \quad (8)$$

1.2 数据范围

本模型的构建是基于国内某电厂“化学链矿化火电厂二氧化碳捕集利用技术工业试验”(以下简称化学链矿化工业试验)装置运行 8 000 h 的实际

生产物料和能源消耗数据, 以及物料在生产和运输过程中产生的碳排放数据。这些数据反映了项目的实际运行情况, 为模型提供了可靠的数据基础, 确保了碳减排效益计算的准确性和实用性。

2 碳减排效益计算过程与结果

2.1 原料生产过程的碳排放总量 C_{sc}

化学链矿化工业试验, 采用电石渣为矿化原料, 利用氯化铵为循环助剂, 提取出电石渣中的钙, 并与电厂烟气中的 CO₂ 反应生成稳定的碳酸钙从而实现碳的减排利用。所需的原料为电石渣与氯化铵。其中电石渣主要来自电石生产乙炔过程所产生的固废, 我国每年约生产 4 000 万吨电石渣, 大部分都处于积累性堆放, 占用土地并对环境带来负面影响^[8-9]。因此作为对固废的再利用, 使用电石渣不会引起额外的碳排放。氯化铵作为化学链矿化工业试验的循环介质, 虽然在反应过程不会被消耗, 但在固液分离等工艺操作过程中会产生一些损失, 而目前的化学链矿化工业试验未设立氯化铵回收系统。氯化铵作为一种化学工业产品, 其生产过程必然会直接或间接导致温室气体的排放。因此, 原料生产过程中的碳排放需将其考虑在内, 其碳排放因子约为每生产 1 t 氯化铵将排放 1.18 t CO₂^[10]。

化学链矿化工业试验的原料消耗见表 1。项目每年需要消耗 3 247.65 t 电石渣, 并额外补充 184.22 t 氯化铵, 项目每年因原料生产过程产生的碳排放为 217.38 t。

表 1 化学链矿化工业试验原料生产过程的碳排放
Tab.1 The CO₂ emissions from production of raw materials for chemical chain mineralization industrial test

原料类别	年用量/t	排放因子/(t·t ⁻¹)	碳排放量/t
电石渣	3 247.65	0	0
氯化铵	184.22	1.18	217.38
总计			217.38

2.2 原料运输过程的碳排放总量 C_{ys}

在化学链矿化工业试验期间, 电石渣和氯化铵均在电厂所在地采购, 并采用公路运输的方式运送至生产车间, 平均运输距离约为 50 km。碳排放因子选择山西省重型货车的道路交通 CO₂ 排放因子, 即运输 1 t 物料 1 km 将产生 0.000 049 t CO₂ 的排放^[11], 具体见表 2, 原料运输过程产生的碳排放为 8.41 t。

表 2 化学链矿化工业试验原料运输过程的碳排放
Tab.2 The CO₂ emissions from transportation of raw materials for chemical chain mineralization industrial test

原料类别	年用量/t	距离/km	排放因子/ ($\times 10^{-5} \cdot t \cdot (t \cdot km)^{-1}$)	碳排放量/t
电石渣	3 247.65	50	4.9	7.96
氯化铵	184.22	50	4.9	0.45
总计				8.41

2.3 能源消耗过程的碳排放总量 C_{ny}

在化学链矿化工业试验运行期间, 主要耗能介

质包括电、生产水和仪表风。依据实际检测数据(表 3), 装置全年用电 751.87 MW·h, 用水 818.74 t, 仪表风 13 645.60 m³ (标准工况下), 依据国家电网平均碳强度, 每使用 1 MW·h 将产生 0.570 3 t CO₂ 的排放^[12]。用水及仪表风的使用则按照国家标准使用标准煤系数进行折算^[13-14]。在整个化学链矿化工业试验运行期间, 使用能源所带来的碳排放量为 430.65 t。

表 3 化学链矿化工业试验能源消耗过程的碳排放
Tab.3 The CO₂ emissions from energy consume process of chemical chain mineralization industrial test

能源类别	年用量	标准煤系数	排放因子	碳排放量/t
电	751.87 MW·h		0.570 3 t/(MW·h)	428.79
水	818.74 t/m ³	0.000 257 1 t/t	0.000 630 0 t/t	0.52
仪表风	13 645.60 t/m ³ (标准状况)	0.000 040 0 t/m ³	0.000 098 4 t/m ³	1.34
总计				430.65

2.4 项目过程中净利用 C_{ly}

表 4 为化学链矿化工业试验期间所获得的平均运行监测数据。CO₂ 净回收利用率按式(9)计算:

$$L = \frac{F_{in} \times C_{in} - F_{out} \times C_{out}}{F_{in} \times C_{in}} \times 100\% \quad (9)$$

式中: L 为 CO₂ 净回收利用率, %; F_{in} 为入口烟气流量, m³/h; C_{in} 为入口烟气 CO₂ 体积分数, %; F_{out} 为出口烟气流量, m³/h; C_{out} 为出口烟气 CO₂ 体积分数, %。

试验运行负荷可实现年处理 1 480 t CO₂, CO₂ 的净回收利用率为 92.2%, 实现净 CO₂ 利用量 C_{ly} 为 1 364.56 t。

表 4 化学链矿化 CO₂ 工艺过程监测数据及碳利用量
Tab.4 The monitoring data and carbon utilization quantity during chemical chain mineralization CO₂ process

项目	数值
入口烟气流量 (标准状况下) / (m ³ ·h ⁻¹)	1 036
出口烟气流量 (标准状况下) / (m ³ ·h ⁻¹)	878.17
入口烟气 CO ₂ 体积分数/%	9.92
出口烟气 CO ₂ 体积分数/%	0.92
CO ₂ 捕集流量/(t·h ⁻¹)	0.18
年可利用量/t	1 480
CO ₂ 净回收利用率/%	92.20
碳利用量/t	1 364.56

2.5 计算结果及效益分析

根据碳减排效益评估的范围与计算方法, 对化学链矿化工业试验的各个活动数据产生的排放进

行了详细评估和计算, 具体见表 5。由表 5 可见: 在各个活动数据中, 过程中能源消耗占碳排放总量的比值最高, 达到了 65.60%, 这是基于项目所使用的能源形式以及能源所对应的排放因子计算得到的, 清洁低碳能源占比越高则碳排放量越低; 其次是原料的生产, 占总碳排放量的 33.11%。根据净碳减排效益的计算公式(式(3)及式(8)), 化学链矿化工业试验项目的净减排率为 52%。

表 5 化学链矿化 CO₂ 工艺碳减排效益
Tab.5 The CO₂ emission reduction benefit of chemical chain mineralization CO₂ process

排放源	影响因素	CO ₂ 排放量/t	占比/%
原料生产	原料种类、生产工艺	217.38	33.11
原料运输	运输距离、运输方式	8.41	1.28
能源消耗	能源种类、排放因子	430.65	65.60
工艺减排	工艺效率、烟气性质	1 364.56	
总计		-708.12	

3 10 万吨级化学链矿化工艺碳减排效益评估

为进一步验证化学链矿化工艺在万吨级工业化应用方面的潜力, 基于前述千吨级工业试验碳减排效益分析结果, 以年处理量为 10 万吨级化学链矿化工艺作为参考标准进行碳减排效益预测。

3.1 10 万吨级化学链矿化工艺模型

通过对 10 万吨级化学链矿化工艺模型的布局

和物料平衡计算,预测了工艺过程中原辅材料和公用工程的消耗量,具体见表6。这些数据反映了整个工艺运行过程中的资源和能源需求,并作为基础数据用于分析工艺的碳足迹、资源效率,以及可能的环境影响。

表6 大规模化学链矿化 CO₂ 工艺工程消耗
Tab.6 Engineering consumptions for large scale chemical chain mineralization CO₂ process

类别	数值
电石渣用量/(t·a ⁻¹)	23 800
氯化铵用量/(t·a ⁻¹)	4 000
用电量/(MW·h·a ⁻¹)	59 200
水用量/(t·a ⁻¹)	60 000
仪表风用量(标准状况下)/(m ³ ·a ⁻¹)	1 000 000

3.2 10万吨级化学链矿化工艺碳减排效益评估

在10万吨级化学链矿化工艺模型中,考虑未来的电力能源结构可能发生转变,尤其是绿色能源比例的增加^[15]。因此在计算中引入了一个假设条件,即50%的电力需求由绿色能源(如太阳能)来满足。目前光伏电力的碳排放因子为0.054 t/(MW·h),使用不同电力能源消耗所带来的碳排放采用式(4)分别计算。表7展示了10万吨级化学链矿化CO₂工艺的碳减排效益的详细数据。结果表明,能源消耗依然是整个工艺的碳排放大户,占整个工艺总碳排放量的76.21%,原料生产碳排放排在其后,占整个工艺总碳排放量的21.14%。依据净碳减排效益的计算公式(式(3)及式(8)),10万吨级化学链矿化工艺可以实现76%的净减排率。

表7 大规模化学链矿化 CO₂ 工艺碳减排效益
Tab.7 The CO₂ emission reduction benefit of large scale chemical chain mineralization CO₂ process

排放源	影响因素	CO ₂ 排放量/t	占比/%
原料生产	原料种类、生产工艺	4 720.00	21.14
原料运输	运输距离、运输方式	592.90	2.65
能源消耗	能源种类、排放因子	17 017.23	76.21
工艺减排	工艺效率、烟气性质	92 200.00	
总计		-69 869.87	

4 碳减排效益的影响因素

根据化学链矿化工业试验及10万吨级化学链矿化工艺碳减排效益的评估,碳减排效益影响的因素主要为过程的工艺减排能力、能源消耗、原料生产和原料运输。影响工艺碳减排能力的主要因素为

工艺效率、烟气性质,影响能源消耗碳减排能力的主要因素为能源种类和低碳能源的比例,影响原料的碳减排能力的主要因素为原料的种类、生产工艺及运输距离。

4.1 烟气性质

烟气中CO₂的体积分数对工艺碳减排的能力影响较大^[16]。表8列举了矿化不同体积分数CO₂烟气所需的气体压缩机的轴功率及矿化1 t CO₂所需要的用电量。由表8可见,烟气中CO₂体积分数越高,所需气体压缩机的功率越小,矿化1 t CO₂所需要的用电量越少。这是由于在相同CO₂处理量下,CO₂体积分数较低时需要增加风量,这不仅增加了能源的消耗还会降低烟气中CO₂的净回收利用率。

表8 烟气中 CO₂ 体积分数对用电量的影响
Tab.8 The influence of CO₂ volume fraction in flue gas on electricity consumption

烟气 CO ₂ 体积分数/%	气体压缩机入口压力/kPa	气体压缩机出口压力/kPa	压缩机轴功率/kW	矿化 1 t CO ₂ 用电量/(kW·h)
98	110	280	4.29	249.3
90	110	280	4.67	252.3
80	110	280	5.25	257.0
70	110	280	6.00	263.0
60	110	280	7.00	271.0
50	110	280	8.40	282.2
40	110	280	10.50	299.0
30	110	280	14.00	327.0
20	110	280	21.00	383.0
12	110	280	35.00	495.0
10	110	280	42.00	551.1

根据式(3)的计算,年处理1 000 t不同体积分数CO₂烟气的用电量和净碳减排效益随CO₂体积分数的变化曲线如图3所示。

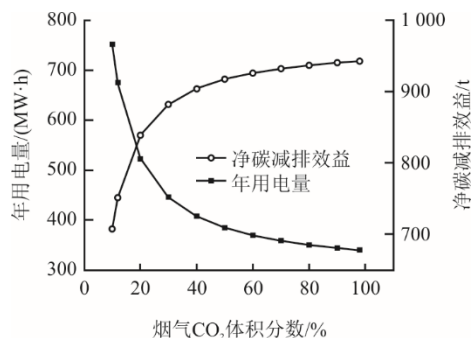


图3 烟气 CO₂ 体积分数的影响
Fig.3 The influence of CO₂ volume fraction in flue gas

由图3可知,当处理的烟气中CO₂体积分数较低时,年用电量明显高于CO₂体积分数高时的年用电量,净碳减排效益明显低于CO₂体积分数高时的净碳减排效益。通过对烟气进行提纯净化可以提高CO₂的体积分数对净碳减排效益有利,但提纯过程本身会增加新的能耗或物耗。因此实际的工艺过程是否需要CO₂进行提纯净化需要综合考虑工艺、设备的工程化难度以及对项目净碳减排效益的影响程度。

4.2 原料

原料对工艺碳减排能力的影响主要包含原料的类型、原料自身的生产工艺所带来的碳排放以及原料自生产工厂运输至项目目的地车间所带来的运输过程碳排放。对因原料自身生产带来的碳排放应择优选择生产同品质原料碳排放较低的生产企业,以降低原料端带来的范围三碳排放^[17];另外原料距离项目工艺车间的运输距离也是不容忽视的一个重要环节^[18],图4为原料运输距离对净碳减排效益的影响。从图4中可以看出,随着运输距离的增加,净碳减排效益明显呈下降趋势。因此应尽可能选择距离工艺装置较近的原料供应地,以减少运输过程中产生的碳排放。此外各厂家电石渣中活性组分含量的高低也会影响电石渣的用量,影响电石渣的运输和过程能耗,从而间接影响碳排放量。

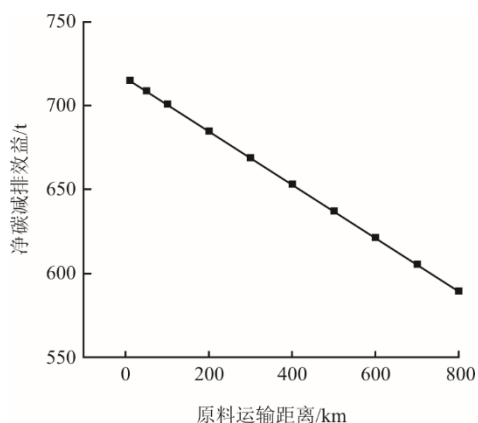


图4 原料运输距离的影响

Fig.4 The influence of raw material transportation distance

4.3 能源消耗

在我国,随着可再生能源的快速发展,电网中的绿色电力(即来自太阳能、风能等可再生能源电力)占比在逐年增加^[19]。如果在项目中较多地使用这些绿色电力代替基于化石燃料燃烧的传统电力,可以进一步减少因能源使用带来的碳排放,从而提

升整体的减排效益。图5为使用不同的电力碳排放因子计算得到的净碳减排效益。由图5可知,电力的碳排放因子与碳减排效益之间存在线性关系。即碳排放因子越低,电力生产过程中的碳排放越少。因此,为提高项目整体的碳减排效益,应优先考虑使用低碳或无碳类型的电力。随着我国绿色电力技术的不断进步、成本的不断降低^[20-21],使用绿色电力将成为提升项目碳减排效益的重要手段。

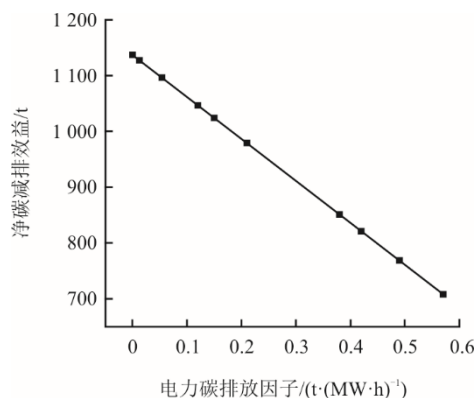


图5 电力碳排放因子的影响

Fig.5 The influence of electricity carbon emission factor

5 结论与讨论

结合某电厂建设运行的国内首套“火电厂二氧化碳化学链矿化利用CCUS技术研究与示范项目”的矿化固碳路线工业化实践,对化学链矿化利用CCUS技术路径的碳减排效益进行了详细评估和核算,综合整个示范项目全生命周期的碳排放计算,该示范项目年处理量为1364.56 t CO₂,能够实现708.12 t CO₂的净减排,达到52%的净减排率,将示范项目年处理量放大到10万吨级,项目CO₂的净减排率可提升至76%。

影响碳减排效益的主要因素包括过程的工艺减排能力、能源消耗、原料生产和原料运输。影响工艺碳减排能力的主要因素为工艺效率、烟气性质,必要的烟气预处理以及适宜的CO₂体积分数需要综合考虑工艺、设备的工程化难度以及对项目净碳减排效益的影响程度;影响能源消耗碳减排能力的主要因素为能源种类和低碳能源的比例,为了提高项目整体的碳减排效益,应优先考虑使用低碳或无碳类型的电力;影响原料碳减排能力的主要因素为原料的种类、生产工艺及运输距离,应优先选择生产同品质原料碳排放较低的生产企业,以降低原料端带来的范围三碳排放,并且应尽可能选择距

离工艺装置较近的原料供应地,以减少运输过程中产生的碳排放。

【参考文献】

- [1] 苏勃, 高学杰, 效存德. IPCC《全球 1.5 °C 增暖特别报告》冰冻圈变化及其影响解读[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(4): 395-404.
SU Bo, GAO Xuejie, XIAO Cunde. Interpretation of IPCC SR1.5 on cryosphere change and its impacts[J]. Climate Change Research, 2019, 15(4): 395-404.
- [2] 谢和平, 谢凌志, 王昱飞, 等. 全球二氧化碳减排不应是 CCS, 应是 CCU[J]. 工程科学与技术, 2012, 44(4): 1-5.
XIE Heping, XIE Lingzhi, WANG Yufei, et al. CCU: a more feasible and economic strategy than CCS for reducing CO₂ emissions[J]. Engineering Science and Technology, 2012, 44(4): 1-5.
- [3] IEA. Net zero by 2050: a roadmap for the global energy sector[EB/OL]. (2021-05-18)[2025-01-20]. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050#>.
- [4] 中国石化集团经济技术研究院有限公司. 中国能源展望 2060[M]. 2024 版. 北京: 中国石化出版社, 2023: 23-26.
Sinopec Economic and Technical Research Institute Co., Ltd. China's energy outlook 2060[M]. 2024 ed. Beijing: Petrochemical Press, 2023: 23-26.
- [5] 张贤, 杨晓亮, 鲁玺, 等. 中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2023)[R/OL]. (2023-07-16) [2024-09-11]. <https://www.docin.com/p-4492064609.html>.
ZHANG Xian, YANG Xiaoliang, LU Xi, et al. Annual report on carbon capture, utilization, and storage (CCUS) in China (2023)[R/OL]. (2023-07-16)[2024-09-11]. <https://www.docin.com/p-4492064609.html>.
- [6] JAMSRANJAV B. IPCC TFI side-event COP22 methodology report[R/OL]. (2016-08-29)[2024-09-11]. <https://www.ipcc.ch/working-group/tfi/>.
- [7] 梁佳正, 卢乐民, 梁逸昊, 等. 碳酸钙在造纸行业中的应用及发展趋势[J]. 纸和造纸, 2022, 41(5): 23-29.
LIANG Jiazheng, LU Yuemin, LIANG Yihao, et al. Application and development trend of calcium carbonate in paper industry[J]. Paper and Paper Making, 2022, 41(5): 23-29.
- [8] WANG H, XU W, SHARIF M, et al. Resource utilization of solid waste carbide slag: a brief review of application technologies in various scenes[J]. Waste Disposal & Sustainable Energy, 2022, 4(1): 1-15.
- [9] GONG X Z, ZHANG T, ZHANG J Q, et al. Recycling and utilization of calcium carbide slag-current status and new opportunities[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 159: 112133.
- [10] City of Winnipeg. Emission factors in kg CO₂-equivalent per unit[R/OL]. (2022-01-28) [2024-09-11]. https://www.winnipeg.ca/finance/findata/matmgt/documents/2012/682-2012/682-2012_Appendix_H-WSTP_South_End_Plant_Process_Selection_Report/Appendix7.pdf.
- [11] 吕晨, 张哲, 陈徐梅, 等. 中国分省道路交通二氧化碳排放因子[J]. 中国环境科学, 2021, 41(7): 3122-3130.
LYU Chen, ZHANG Zhe, CHEN Xumei, et al. Study on CO₂ emission factors of road transport in Chinese provinces[J]. China Environmental Science, 2021, 41(7): 3122-3130.
- [12] 中华人民共和国生态环境部办公厅. 关于做好 2023—2025 年发电行业企业温室气体排放报告管理有关工作的通知[R/OL]. (2023-02-07)[2024-09-11]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk06/202302/t20230207_1015569.html.
Office of the Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Notice on doing a good job in the management of greenhouse gas emission reports for enterprises in the power generation industry from 2023 to 2025[[R/OL]. (2023-02-07)[2024-09-11]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk06/202302/t20230207_1015569.html.
- [13] 综合能耗计算通则: GB/T 2589—2020[S]. 北京: 国家标准化管理委员会, 2020: 7.
General rules for calculation of the comprehensive energy consumption: GB/T 2589—2020[S]. Beijing: Standardization Administration of the People's Republic of China, 2020: 7.
- [14] WANG Y S, HUANG J C, FANG S M. Sustainability assessment of natural capital based on the 3D ecological footprint model: a case study of the Shennongjia national park pilot[J]. Sustainability, 2019, 11(4): 956.
- [15] 李航祺, 柴梅. 新型绿色能源的发展趋势和重点方向[J]. 张江科技评论, 2024(2): 32-35.
LI Hangqi, CHAI Mei. Development trends and key directions of new green energy[J]. Zhangjiang Technology Review, 2024(2): 32-35.
- [16] 秦波涛, 冯乐乐, 邵旭. 粉煤灰矿化电厂烟气 CO₂ 技术及关键科学问题[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 1161-1173.
QIN Botao, FENG Lele, SHAO Xu. Mineralization of CO₂ from power plant flue gas by fly ash: technology and key scientific issues[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 1161-1173.
- [17] 谈多娇, 胡志鹏. 碳排放核算与碳绩效评价——以“范围三”为研究对象[J]. 财会月刊, 2022(13): 78-81.
TAN Duoqiao, HU Zhipeng. Carbon emission accounting and carbon performance evaluation: a study of “scope three”[J]. Finance and Accounting Monthly, 2022(13): 78-81.
- [18] 韩泉城, 刘星雨, 孙浩, 等. 山东省交通运输碳排放测算及影响因素[J]. 科技和产业, 2024, 24(14): 260-265.
HAN Quancheng, LIU Xingyu, SUN Hao, et al. Calculation and influencing factors of carbon emissions from transportation in Shandong Province[J]. Science Technology and Industry, 2024, 24(14): 260-265.
- [19] 舟舟. 中国绿色电力行业发展概况[J]. 中外能源, 2024, 29(3): 76.
ZHOU Dan. Overview of the development of China's green power industry[J]. Sino-Global Energy, 2024, 29(3): 76.
- [20] 何耿生, 曾金灿, 朱浩骏, 等. 电网平均碳排放因子统计核算方法综述[J]. 环境影响评价, 2024, 46(4): 64-70.
HE Gengsheng, ZENG Jincan, ZHU Haojun, et al. Summary of statistical accounting methods for average carbon emission factors of power grid[J]. Environmental Impact Assessment, 2024, 46(4): 64-70.
- [21] 李庆博. 数字赋能: 构建绿色低碳的新型电力系统[J]. 数字经济, 2024(8): 44-49.
LI Qingbo. Digital empowerment: building a new green and low carbon power system[J]. Digital Economy, 2024(8): 44-49.

(责任编辑 邓玲惠)