严家辉,何 松,王珺瑶,等.基于㶲生命周期分析的直接空气碳捕集技术可持续性研究 [J]. 中国环境科学, 2026,46(1):484-492.
Yan J H, He S, Wang J Y, et al. Exergy-based life cycle analysis for sustainability assessment of direct air carbon capture systems [J]. China Environmental Science, 2026,46(1):484-492.

基于㶲生命周期分析的直接空气碳捕集技术可持续性研究

严家辉[1,2],何 松[3,4],王珺瑶[1,2,4*],陈 颖[1,2],曾雪兰[3,4],田志鹏[1,2],雷励斌[1,2],刘建平[1,2] (1.广东工业大学材料与能源学院,广东 广州 510006；2.广东省功能凝聚态物质重点实验室,广东 广州 510006；3.广东工业大学环境生态工程研究院,广东 广州 510006；4.广东工业大学碳中和与绿色发展协同创新研究院,广东 广州 510006)

摘要：建立面向化学吸收法直接空气碳捕集(DAC)技术的㶲-生命周期评价框架,从能源、资源和环境多维度对其评估.结果表明,在电网和天然气供能基准情景下,系统生命周期能耗为 10.22GJ/t CO_2,运行阶段捕集热耗、CO_2 压缩和空分制氧是主要耗能环节,占比分别为 62.72%,13.41%和 8.98%.系统生命周期累积㶲耗和第二定律效率分别为 9.19GJ/t CO_2 和 10.34%,电能累积㶲耗和热能累积㶲耗分别占比 39.98%和 58.93%,材料㶲占比为 1.09%,可忽略不计.在环境效益方面,系统生命周期碳移除效率为 47.50%,捕集热耗和电耗分别贡献 53.18%和 33.43%的碳排放.若采用生物质和风电供能,系统生命周期碳移除效率可提升至 88.60%.此外,系统生命周期水耗和土地利用分别为 80kg/t CO_2 和 1465(m^2·a)/t CO_2,规模化部署时需进一步权衡.

关键词：直接空气碳捕集；负排放；热力学；㶲分析；生命周期评价
中图分类号：X38 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)01-0484-09

Exergy-based life cycle analysis for sustainability assessment of direct air carbon capture systems. YAN Jia-hui[1,2], HE Song[3,4], WANG Jun-yao[1,2,4*], CHEN Ying[1,2], ZENG Xue-lan[3,4], TIAN Zhi-peng[1,2], LEI Li-bin[1,2], LIU Jian-ping[1,2] (1.College of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China；2.Guangdong Provincial Key Laboratory of Functional Soft Condensed Matter, Guangzhou 510006, China；3.Institute of Environmental Ecology Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China；4.Collaborative Innovation Institute of Carbon Neutrality and Green Development, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China). *China Environmental Scienc*e, 2026,46(1)：484~492

Abstract：Direct air carbon capture (DAC) technology reached the stage of commercial deployment, yet its large-scale application still faced challenges of high energy consumption and resource-environmental impacts. An exergy-based life cycle assessment (ExLCA) framework for DAC systems was established, with their performance being evaluated across energy, resource, and environmental dimensions. It was shown that under grid-electricity and natural gas energy supply scenarios, the system's life cycle energy consumption was 10.22GJ/tCO_2, with thermal energy demand for capture, CO_2 compression, and oxygen production through air separation being identifiedas the dominant energy-intensive processes, which accounted for 62.72%, 13.41%, and 8.98%, respectively. The cumulative exergy consumption over the life cycle was 9.19GJ/t CO_2, with electricity and thermal energy contributing 39.98% and 58.93% to total exergy consumption, while material-related exergy was accounted for only 1.09%, which was negligible. In terms of environmental benefits, a life cycle carbon removal efficiency of 47.50% was achieved by the system, with thermal energy and electricity consumption contributing 53.18% and 33.43% to total carbon emissions. Carbon removal efficiency could be increased to 88.60% by transitioning to biomass and wind power as energy sources. Furthermore, 80kg of water and 1465(m^2·a) per ton of CO_2 removed were required by the system, highlighting the need for careful resource management in large-scale deployment.

Key words：direct air carbon capture；negative emission；thermodynamics；exergy analysis；life cycle assessment

为应对气候变化挑战,《巴黎协定》确立了将本世纪末全球平均温升控制在较工业化前水平 2℃以内,并力争实现 1.5℃的温控目标[1].联合国政府间气候变化委员会(IPCC)最新发布的第六次评估报告(AR6)显示,实现这一目标需不同程度的依赖负排放技术.其中,直接空气碳捕集技术(DAC)被列为关键负排放技术之一,在典型减排情景下,DAC 的累积减排量需在本世纪末达到 250Gt CO_2[2].国际能源署(IEA)则预测,为实现 1.5℃温控目标,本世纪下半叶全球每年需通过生物质碳捕集与封存(BECCS)和

收稿日期：2025-06-10
基金项目：国家自然科学基金青年基金(72104257);广东省自然科学基金面上项目(2024A1515012661,2023A1515240056)
* 责任作者, 副教授, wangjy@gdut.edu.cn

DAC 技术组合实现超过 50GtCO_2 的碳移除量[3].

DAC 技术[4]通过捕集装置从环境空气中直接捕获 CO_2,被捕获的 CO_2 通过进一步处理可被直接封存或利用,从而实现负排放.相较于面向燃煤电厂等大型工业点源的碳捕集技术,DAC 技术的捕集装置无需依赖排放源,可实现与碳源的解耦,使系统部署具有高度灵活性,通过与 CO_2 封存或利用设施就近耦合,可大幅降低 CO_2 运输成本,提升整体碳移除效率[5].此外,DAC 捕获的 CO_2 作为一种负排放碳源,可用于制备绿色甲醇等零碳合成燃料,在碳中和转型中具有独特的战略价值[6].

在工程实践层面,近年来 DAC 逐渐由实验室研究向产业化发展.其中,基于 KOH 溶液的化学吸收法 DAC 技术已具备较高的技术成熟度(TRL 6~7).然而,尽管吸收法 DAC 的技术可行性已经得到验证,其规模化应用仍面临高能耗、高成本、环境影响不确定和缺乏政策支持等方面的挑战[7].Keith 等[8]研究显示,吸收法 DAC 捕集能耗约 8.1GJ/tCO_2,其中再生热耗为 5.25GJ/tCO_2.美国国家能源技术实验室评估表明,以天然气供热的吸收法 DAC 技术净温室气体排放为−0.39kg CO_2−eq/kgCO_2[9].Fasihi 等[10]研究显示,吸收法 DAC 成本在 2030~2050 年间由于商业化及大规模实施后,可由 211 欧元/t CO_2 降至 89 欧元/t CO_2.

近年来,生命周期评价(LCA)与㶲分析相结合的综合性研究方法在能源系统评估领域得到了关注.该方法以㶲为理论工具,将能源、环境和可持续发展相结合,进而评估能源系统的综合性能.Szargut 教授[11]提出的累积㶲消耗(CExC)理论将非能源资源纳入评价体系.之后,Stougie 等[12]进一步提出总累积㶲损失(TCExL)概念,系统考虑了生命周期内的㶲损失.Cornelissen[13]等建立了㶲生命周期评价方法,并将其应用于电力生产系统的可持续性评估,该方法现已被广泛应用于制氢[14-15]、垃圾焚烧发电[16]、风力发电[17]和生物质发电[18]等领域的可持续评估.本研究基于㶲生命周期评价框架,从能源、环境和资源消耗角度对对吸收法 DAC 技术开展系统性评估,支撑其在碳中和路径中的部署和应用.

1　方法

1.1　系统描述

本研究以 Carbon Engineering 公司采用的化学吸收法 DAC 系统为研究对象,该技术以 KOH 溶液为吸收剂,实现空气中 CO_2 的直接分离.如图 1 所示,该系统由两个循环构成,在第一个循环中,空气在风扇作用下进入空气接触器,空气中 CO_2 与 KOH 溶液充分接触反应生成 K_2CO_3 溶液.

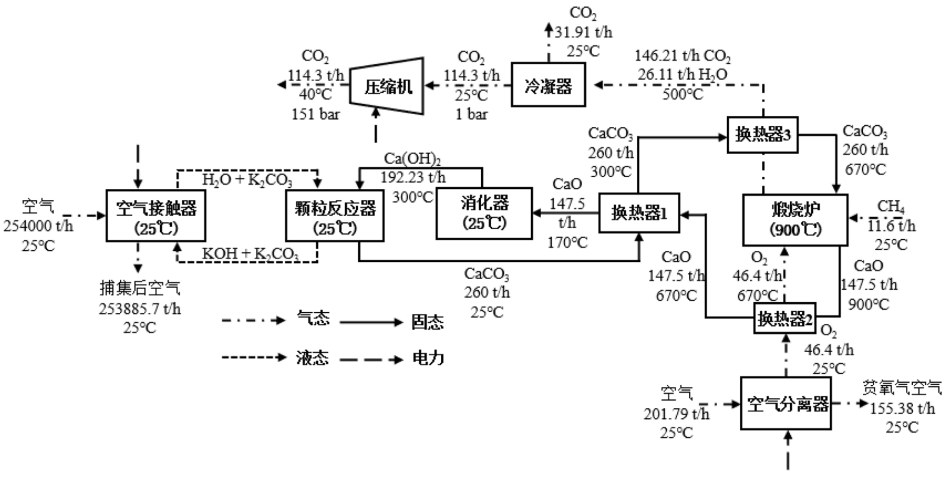


图 1　吸收法 DAC 系统流程[20]

Fig.1　Schematic diagram of DAC system by absorption method

$$CO_2+2KOH=K_2CO_3+H_2O \quad -95.8\ kJ/mol$$

反应生成的 K_2CO_3 溶液被泵送至颗粒反应器,与 $Ca(OH)_2$ 溶液反应生成再生的 KOH 溶液和 $CaCO_3$ 沉淀.

$$K_2CO_3+Ca(OH)_2=CaCO_3+2KOH \quad -5.8\ kJ/mol$$

在第二个循环过程中,$CaCO_3$ 在 900℃的煅烧炉中进行热解,释放高纯度 CO_2,煅烧所需热量由天然气与纯氧燃烧提供,氧气由空气分离装置(ASU)制取.

$$CaCO_3=CaO+CO_2 \quad 178.3\ kJ/mol$$

煅烧分解产生 CaO 进入消化器,与水反应生成 $Ca(OH)_2$ 完成系统循环.

$$CaO+H_2O=Ca(OH)_2 \quad -63.9\ kJ/mol$$

该 DAC 系统的捕集规模为 1Mt CO_2/a,经该系统捕集得到的 CO_2,由压缩机压缩至 151bar,经管道运输并地质封存,系统的基本技术参数如表 1 所示.

表 1 吸收法 DAC 系统运行基本技术参数[8,19]

Table 1 Basic technical parameters for the operation of absorption DAC system

技术参数	数值	单位
碳捕集效率	75	%
CO_2 年移除量	1	Mt
空气进气量	254000	t/h
DAC 系统寿命	20	a
吸收剂回收率	99.9	%
泵效率	82	%
风扇效率	70	%
进气口面积	4000	m^2
进气速度	1.6	m/s
传质系数	0.0015	m/s
运行时长	31536000	s/a

本研究对吸收法 DAC 系统的热力学分析做出以下假设:

(1)换热器的换热效率为 100%.

(2)ASU 从空气中分离获得的氧气纯度为 100%.

(3)$CaCO_3$ 分解率为 100%.

(4)CO_2 在空气中的质量分数为 0.06%.

(5)环境状态参数为:T_0=298.15K,P_0=1.01325bar.

1.2 生命周期分析

1.2.1 热力学分析 DAC 系统能量输入包括热能和电能,在系统运行过程中部分能量以热能形式散失,CO_2 为系统产品输出,系统能量平衡方程如下所示:

$$Q_{热}+Q_{电}=Q_{损失}+Q_{输出}+\Delta E_{其它} \quad (1)$$

式中:$Q_{热}$为系统热能输入,GJ/h;$Q_{电}$为系统电能输入,GJ/h;$Q_{损失}$为系统内部的能量损失;$Q_{输出}$为系统产品输出能量;$\Delta E_{其它}$为其他能量形式,如动能、势能变化.

㶲是热力学中衡量能量可用性指标,定义为系统从当前状态变化到与参考环境达到热力学平衡时所做的最大有用功[21],它不仅反映能量的数量,更体现能量的品质.对于吸收法DAC 系统,只考虑物流的物理㶲(E^{ph}_x)和化学㶲(E^{ch}_x)[22].

$$E_x^{Sys}=E_x^{Ph}+E_x^{Ch} \quad (2)$$

系统中化学反应对环境温度的最大作功能力定义为[23]:

$$\Delta E=\Delta G(1-\eta_c)+\Delta H\cdot\eta_c \quad (3)$$

式中: ΔE 为物质的做功能力, kJ/mol;ΔG 为体系吉布斯自由能,kJ/mol;η_c 为卡诺循环效率,%;ΔH 为化学反应焓变,kJ/mol.

系统中任一工质状态点㶲的计算公式为:

$$E_x=q_m[(h_m-h_0)-T_0(s_m-s_0)] \quad (4)$$

式中:q_m 为该点的质量流量,t/h;T_0 为参考环境温度,取 298.15K;h_m、h_0 分别为该点在当前温度和环境温度下的焓,kJ/kg;s、s_0 分别为该点在当前温度和环境温度下的熵,kJ/(kg·K).

㶲在实际过程中会发生不可避免的贬值,造成㶲损失.在稳态下,系统的㶲平衡可表示为:

$$E_{x,loss}=E_{x,in}-E_{x,out} \quad (5)$$

式中: $E_{x,in}$ 为系统㶲输入流,$E_{x,out}$ 为系统㶲输出流,$E_{x,loss}$ 为系统㶲损.

1.2.2 生命周期分析 LCA 是一种标准化的环境评价工具,其核心在于系统量化产品/工艺全生命周期,涵盖原材料获取、生产加工、运输分销、使用维护到最终处置的资源消耗与环境排放,识别环境影响在不同阶段和不同种类之间的转移情况[24].本研究遵循 ISO14040/14044 的 LCA 分析框架,包括目的与范围定义、清单分析、影响评价和结果解释 4 个步骤[25],所分析的环境影响类别包括全球变暖潜值(GWP)、一次能源消耗(PED)、水资源消耗(WU)和土地利用(LU).4 种环境指标的方法学描述均来自 efootprint 软件,其中 GWP、LU 的方法学名称分别为 IPCC2013、CML2001;PED、WU 的方法学可由 efootprint 软件通过相应的因子表得到,PED 的因子表中包括风能、天然气、太阳能、硬煤等一次能源,WU 的因子表中包括湖水、河水、地下水等水资源.

如图 2 所示,本研究以从空气中捕集并封存 1t CO_2,即从空气中移除 1t CO_2 为功能单位(FU),采用从“摇篮到坟墓”的系统边界,并将吸收法 DAC 生命周期划分为上游、运行和下游阶段.其中上游阶段包括能源开采、材料制备、DAC 工厂基础建设,运行阶段包括 CO_2 捕集、压缩和运输,下游阶段包括废物处理、CO_2 封存和工厂退役.所研究的吸收法 DAC 系统考虑了不同种类的热能和电力输入类型,热能类型包括甲烷和生物质能,电力包括煤电、电网、光伏、风电.

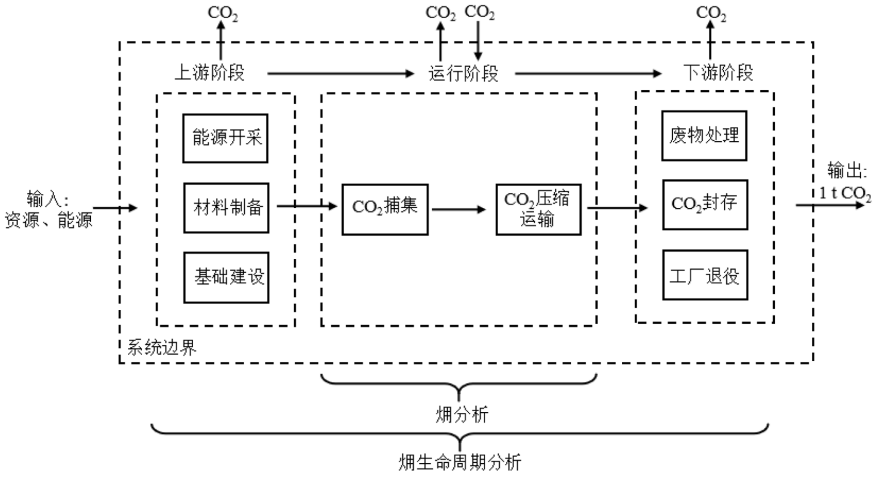


图 2　吸收法 DAC 系统生命周期分析系统边界

Fig.2　Absorption DAC system life cycle analysis system boundary

吸收法 DAC 系统全生命周期输入输出清单如表 2 所示,其中系统设备基于 Carbon Engineering 公司 DAC 工厂的实际数据[19],运行能耗由热力模型获得,背景数据来自 Ecoinvent 数据库.背景数据选取优先采用中国地区数据,若数据缺失,则选用全球平均值替代.

1.2.3　生命周期分析　生命周期分析(ELCA)方法有机整合了㶲分析和生命周期评价方法,实现了对系统资源和能源消耗的统一量化,有效解决了传统方法中不同资源和能源类型难以比较的调整,其中累积㶲消耗(CExC)的计算以自然界存在的资源为基准,体现了生命周期分析的思想[14].本研究中㶲分析和㶲生命周期分析的系统边界如图 2 所示.㶲生命周期分析中,采用单位累积㶲消耗值,使系统不同资源输入类型统一转化成累积㶲消耗,并对吸收法 DAC 系统各个生命周期阶段进行累积㶲分析. 㶲生命周期分析涉及的输入输出物质与能量的单位累积㶲消耗值如表 3 所示.生命周期总资源累积消耗量 $E_{C,t}$ 的计算如下:

$$E_{C,t}=\sum_i\sum_j E_{\mathrm{Ce},j}n_{i,j} \tag{6}$$

式中:i 表示各个生命周期阶段;j 表示资源消耗类型;$E_{\mathrm{Ce},j}$ 为资源 j 的单位累㶲积消耗量;$n_{i,j}$ 为阶段资源 i 的消耗量.

1.2.4　评价指标　基于上述研究方法,本研究采用单位碳捕集能耗(q_{re})、热力学第二定律效率(η_{ex})、生命周期能耗($Q_{\text{生命周期}}$)、生命周期净碳移除效率($\eta_{\mathrm{CO2,removal}}$)累积㶲(CExC)对吸收法 DAC 技术进行系统性评价,各类评价指标定义如式(6)~(11).

表 2　系统生命周期清单

Table 2　System life cycle inventory

环节	阶段	类型	数量	单位	来源
上游阶段	基础建设	空气接触器	3.88×10^{-7}	Item(s)	[19]
		硝化器	3.88×10^{-8}	Item(s)	
		颗粒反应器	3.88×10^{-8}	Item(s)	
		煅烧炉	3.88×10^{-8}	Item(s)	
		空气分离器	3.88×10^{-8}	Item(s)	
		冷凝器	3.88×10^{-8}	Item(s)	
		换热器	1.16×10^{-7}	Item(s)	
		压缩机	3.88×10^{-8}	Item(s)	
		运输(货运)	1.88×10^{-4}	t·km	
		运输(管道)	300	t·km	
		海上油气井	2.05×10^{-5}	m	
		陆地油气井	2.05×10^{-5}	m	
	能源开采	天然气/生物质开采	5.08	GJ	
	吸收剂制备	1mol/L KOH	2.8	kg	
运行阶段	CO_2 捕集	电耗	217.05	kW·h	热力学模型
		热耗	5.08	GJ	
	CO_2 压缩	电耗	174.12	kW·h	
下游阶段	废物处理	石灰石残渣	0.26	t	[19]
		垃圾焚烧	0.0052	t	
	CO_2 封存	泵功	7	kW·h	热力学模型
	工厂退役	设定此阶段的环境影响为基础建设的 10%			[26]
输出	/	CO_2	1	t	

吸收法 DAC 系统的单位碳捕集能耗 q_{re} 定义如下:

$$q_{\mathrm{re}}=\frac{Q+W}{m_{\mathrm{CO_2}}} \tag{7}$$

式中: q_{re} 为从空气中捕集 1t CO_2 的系统能耗,MJ/t;Q

和 W 分别为捕集 1t CO_2 系统运行阶段的热耗和电耗,MJ;m_{CO_2} 为系统 CO_2 捕集量,t/h.

表 3 不同资源单位累积㶲消耗值[13,27-28]

Table 3 Cumulativeexergy consumption values for different resource

资源类型	单位累积㶲消耗
煤电	12.37(MJ/(kW·h))
电网	9.23(MJ/(kW·h))
风电	0.02(MJ/(kW·h))
天然气	53.24(MJ/kg)
生物质	17.49(MJ/kg)
铝	250.19(MJ/kg)
铁	32.2(MJ/kg)
铜	67(MJ/kg)
锌	196(MJ/kg)
水泥	7.7(MJ/kg)
聚氯乙烯	32.5(MJ/kg)
水	0.05(MJ/kg)

可逆过程最小分离功 W_{min} 与实际过程的系统输入的有效能之间的比值即为热力学第二定律效率(η_{ex}),可由下式计算得到.

$$\eta_{ex}=\frac{W_{min,CO_2}}{E_{in,tot}} \tag{8}$$

式中: $W_{min,CO2}$ 为 CO_2 最小分离功,GJ;$E_{in,tot}$ 为系统运行阶段㶲输入,GJ.

系统生命周期能耗 $Q_{生命周期}$包括上游阶段、运行阶段及下游阶段的一次能源消耗总量,定义如下:

$$Q_{生命周期}=Q_{上游}+Q_{运行}+Q_{下游} \tag{9}$$

式中: $Q_{上游}$为系统上游阶段一次能源消耗量,MJ;$Q_{运行}$为系统运行阶段一次能源消耗量,MJ;$Q_{下游}$为系统下游阶段一次能源消耗量,MJ.

为量化吸收法 DAC 系统生命周期过程的负排放特性,基于 Jonge 等[29]提出的方法计算系统生命周期的 CO_2 净移除效率($\eta_{CO2,removal}$),计算公式如式(10)所示.当 $\eta_{CO2,removal}$ 大于 0 时,表明系统从空气中的 CO_2 移除量大于生命周期过程的排放量.

$$\eta_{CO_2,removal}=\frac{m_{CO_2,removal}-cc_{CO_2,emission}}{m_{CO_2,removal}} \tag{10}$$

式中: m_{CO2} 为系统从空气中捕集的 CO_2 量,t; $CC_{CO2,emission}$ 为 DAC 系统上游、运行和下游过程阶段的间接温室气体排放量,t.

累积㶲是指从自然资源到所研究的过程系统中的单元所经历的一系列簇状过程所消耗的一次㶲累积值.定义累积㶲消耗效率,为系统所有输出输入物料流与能量流累积㶲消耗总和的比值.

$$\eta_{CExC}=\frac{(\sum_i O_i)_{CExC}}{(\sum_i I_j)_{CExC}}=\frac{(O_{useful\ products})_{CExC}}{(I_{energy}+I_{materials})_{CExC}} \tag{11}$$

式中: $(O_{useful\ products})_{CExC}$ 为输出产物的累积㶲消耗总量;$(I_{energy}+I_{materials})_{CExC}$ 为投入能量、物料的累积㶲消耗总量;I 和 O 分别代表输入与输出.

2 结果与讨论

2.1 热力学分析结果

系统能耗分析结果如图 3 所示,吸收法 DAC 系统的单位碳捕集能耗为 6.49GJ/t CO_2,其中 CO_2 捕集过程能耗为 5.86GJ/t CO_2,捕集后压缩能耗为 0.63GJ/t CO_2,捕集热耗和电耗分别占比 78.29%和 21.71%.在热能消耗中,煅烧炉中 $CaCO_3$ 分解过程是主要耗能环节,占总热量输入的 80.97%,其次是硝化器和换热等过程的热损失,系统供热环节通过换热器将煅烧炉中 CaO、CO_2 等高温产物的余热对 $CaCO_3$ 和 O_2 进行预热,形成了热量回收循环构建,从而降低了热损失.系统电耗主要来自泵功、风扇、空分制氧以及 CO_2 压缩,电能分别为 0.11GJ/t CO_2、0.25GJ/t CO_2、0.42GJ/t CO_2 和 0.63GJ/t CO_2,由机械损失造成的电能损失为 0.41GJ/t CO_2.

DAC 系统㶲平衡表和㶲损情况如表 4 所示.系统运行阶段的输入㶲为 6.48GJ/tCO_2,其中热㶲和电㶲输入分别为 5.07GJ/tCO_2 和 1.41GJ/tCO_2,系统整体热力学第二定律效率为 10.34%,表明能量利用效率存在显著提升空间.从㶲损分布来开,煅烧工序是系统最主要的㶲损环节,其㶲损占比高达 62.82%,这主要源于煅烧炉操作温度(900℃)与环境温度之间的巨大温差导致的热力学不可逆性.其次是硝化反应过程,由于 CaO 与 H_2O 反应的温度可达 300℃,其㶲耗散为 0.6GJ/tCO_2,占比 9.26%.空气接触器、空分装置和压缩机等电驱动设备,㶲损失只与设备本身机械效率相关,㶲损较小.

当换热器换热效率和碳酸钙分解率降低至 90%时,系统捕集能耗将增大 3%和 8%,相应的㶲效率会降低约 0.1 和 0.44 个百分点.

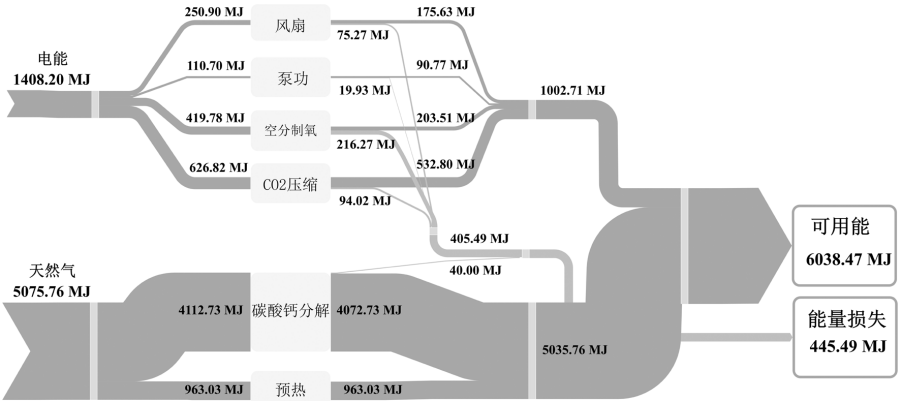


图 3　吸收法 DAC 系统能流

Fig.3　Absorption DAC system energy flow diagram

表 4　吸收法 DAC 系统捕集阶段㶲平衡

Table 4　Exergy balance for the capture phase of the absorption DAC system

项目	类别	消耗(GJ)	占比(%)
㶲输入	甲烷	5.07	78.24
	电能	1.41	21.76
㶲输出	CO_2 空分	0.67	10.34
㶲损	空气接触器	0.10	1.47
	硝化器	0.60	9.26
	PH1	0.16	2.47
	PH2	0.08	1.23
	PH3	0.07	1.08
	冷凝器	0.42	6.48
	煅烧炉	4.07	62.82
	空气分离器	0.22	3.4
	压缩机	0.09	1.45
热力学第二效率			10.34

2.2　生命周期分析结果

2.2.1　净碳移除效率　如图 4 所示,以天然气供热为基础,对比分析了煤电、电网、光伏及风电等 4 种电力供应情景下吸收法 DAC 系统的生命周期净碳移除效率.结果表明,不同电力情景下吸收法 DAC 的净碳移除效率呈现显著差异,其中煤电、电网、风电和光伏分别为 8.70%、47.50%、62.00%和 63.30%.吸收法 DAC 系统的 GHG 排放主要来源于运行阶段的能源消耗,其中运行热耗排放 280kg CO_2−eq/tCO_2,主要来自天然气燃烧,在 4 种电力能源情境下的占比分别为 30.67%、53.33%、73.68%和 76.20%,对系统净碳移除效率具有决定性影响.运行电耗温室其它(GHG)排放则随电力来源不同呈显著差异,在电网、煤电、风电和光伏情景下,分别为 556.86,175.52,33.48 和 20.55kg CO_2−eq/tCO_2,表明采用清洁电力可大幅降低电耗相关排放,从而提高系统净碳排放效率.此外,CO_2 封存及系统退役等下游阶段的 GHG 排放在 4 种电力能源情景中的总占比均低于 2%,对 GHG 碳排放贡献度较小.

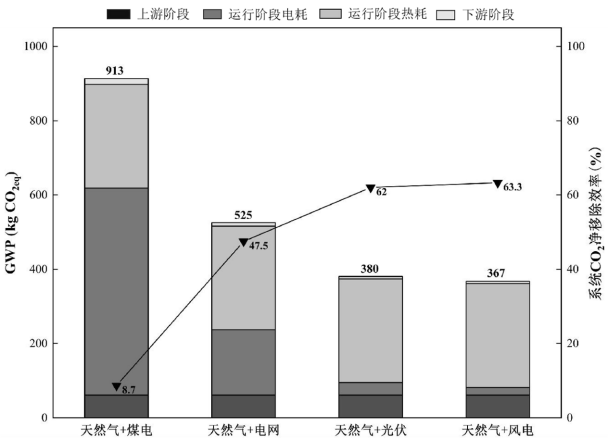


图 4　天然气能源情景下不同电力参数系统 GWP 值及净碳移除效率

Fig.4　GWP values and net carbon removal efficiency of systems with different electricity parameters under natural gas energy scenarios

为研究热能供应对吸收法 DAC 系统净碳移除率的影响,选取生物质代替天然气作为系统热源进行分析.如图 5 所示,以生物质能供热为基础,所有的情景都能够实现负排放.其中,煤电、电网、光伏及风电的 CO_2 净移除效率分别为 34.00%、72.80%、87.30%和 88.60%,较天然气供热情景均有显著提升.生物质能燃烧时可视为 CO_2 净零排放,其温室气体排放主要来自于上游阶段的生物质加工运输环节能源开采过程,为 35.44kg CO_2−eq/tCO_2,在 4 种电力情景中的占比

范围在 5.37%~31.01%之间.捕集电耗阶段的温室气体排放占比相较于天然气供能情景有所提高,分别为84.37%、64.53%、26.36%、18.02%.在光伏和风电电力能源情境中,上游阶段的温室气体排放占比分别为69.24%、77.14%,其中基础建设中的管道铺设对系统净碳移除效率的影响最大,可通过就近封存来缩短 CO_2 管道运输距离从而降低此阶段的影响,材料制备过程对系统净碳移除效率的影响不大.

2.2.2 环境影响 图 6 显示了不同供能情景下吸收法 DAC 技术的生命周期环境影响,包括 GWP、PED、WU 和 LU.在 GWP 方面,煤电和天然气供能情景的环境影响最为显著,为 913kg CO_2-eq/tCO_2,当采用低碳能源替代后系统 GWP 值显著降,其中生物质和风电能源情景下的 GWP 最低,为 114kg CO_2-eq/tCO_2. PED 分析表明,系统一次能源消耗主要集中在上游阶段和运行阶段热耗,在煤电与天然气能源情景下分别占 36.45%和 35.36%.其中,风电与生物质组合的一次能源消耗最低,而煤电与天然气组合的能耗最高.在水资源消耗方面,4 种能源情境中煤电、光伏、风电的整体水资源消耗水平基本一致,在 80kg/t CO_2 左右,而采用电网电力时,系统水耗增加到 420kg/t CO_2,主要是由于电网电力为火电、水电等混合电力的平均电力数据;通过对系统各阶段水耗分析情况可知,上游阶段的吸收剂生产过程是主要贡献环节,其次是基础建设过程中聚氯乙烯材料的生产以及生物质生长过程的用水需求,而运行阶段和下游阶段除电网情景外影响均相对较小.

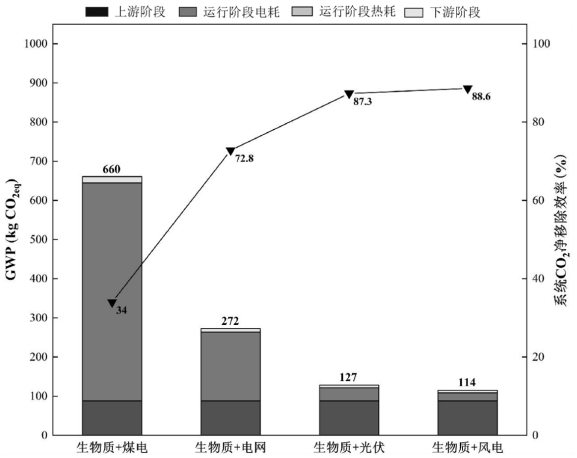


图 5 生物质能源情景下不同电力参数的系统 GWP 值及净碳移除效率

Fig.5 GWP values and net carbon removal efficiency of systems with different electricity parameters under biomass energy scenarios

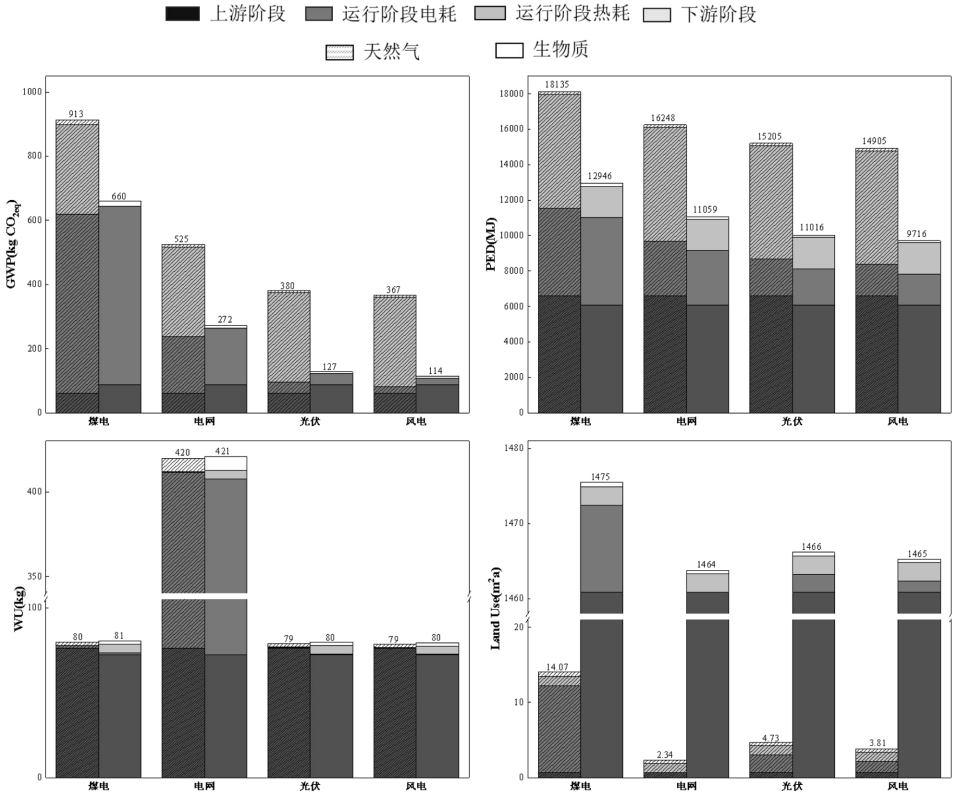


图 6 不同能源类型下吸收法 DAC 系统环境影响结果

Fig.6 Environmental impact results of absorption DAC systems with different energy scenarios

土地利用分析显示,在天然气能源情景中土地利用平均值为 6.24m^2a,主要来自于运行阶段能耗的贡献,而在生物质情景中土地利用平均值为 1467.5m^2a,生物质生长过程的土地利用是主要影响因素,占比超过 90%,其他环节的影响可忽略不计.两种能源情景对土地利用所产生的较大差异,体现出可再生能源带来的不利影响.

2.3　生命周期评价结果

基于电网及天然气供能情景的㶲生命周期分析结果如图 7 所示.系统㶲输入来自电能、热能以及材料的累积投入,分别占比 39.98%、58.93%和 1.09%.在系统累积㶲消耗方面,运行阶段热耗和运行阶段电耗是系统累积㶲消耗的主要环节,分别占总累积㶲输入的 58.93%和 39.98%.材料累积㶲消耗来自于上游阶段系统的基础建设和材料制备,占总累积㶲输入 1.09%,其中材料制备包括 KOH 和 $Ca(OH)_2$ 的生产,累积㶲消耗分别为 27.9MJ/t CO_2、21.3MJ/t CO_2.下游阶段 CO_2 封存的电能累积㶲消耗占总累积㶲输入的 0.70%,这三个阶段对系统总累积㶲消耗影响较小.

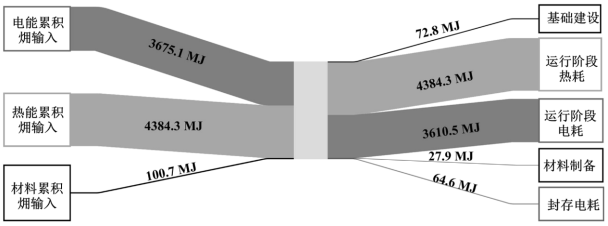


图 7　吸收法 DAC 系统累积㶲流图

Fig.7　Cumulative exergy flow diagram of absorption DAC system

图 8 展示了天然气和电网能源情景下吸收法 DAC 系统在不同系统边界下的能耗与㶲耗特征.当仅考虑运行阶段时,系统的能耗和㶲耗分别为 6.49GJ/tCO_2 和 6.48GJ/tCO_2,热力学第二定律效率为 10.34%.而当采用生命周期系统边界时,由于材料和能源在生产环节的能、质转换损失以及在上下游阶段产生的能源和资源投入,系统生命周期能耗和累积㶲耗分别显著增加至 10.22GJ/tCO_2 和 9.19GJ/tCO_2,系统累积㶲效率为 7.29%.以上对比研究显示,当以生命周期为研究边界时系统能耗和㶲耗显著提升,采用传统能量分析方法可能显著低估了 DAC 系统的资源和能源负外部性.

图 9 进一步对比了代表性能源情景下的㶲生命周期分析结果.在所有情景中,煤电和天然气情景的生命周期累积㶲耗最高,为 10.44GJ/tCO_2,累积㶲效率为 6.42%,风电和生物质情景的累积㶲耗最低,为 5.21GJ/tCO_2,煤电和天然气情景下降了 50%,累积㶲效率达到 12.85%,其中运行阶段电能累积㶲耗仅为 0.01GJ/tCO_2,下游阶段的累积㶲耗可忽略不计.在 4 种能源情境中,风电情景的累积㶲显著下降,主要原因是在电力生产过程中无燃料投入,且风机生产、建设及运输等阶段的而累积㶲耗较低.

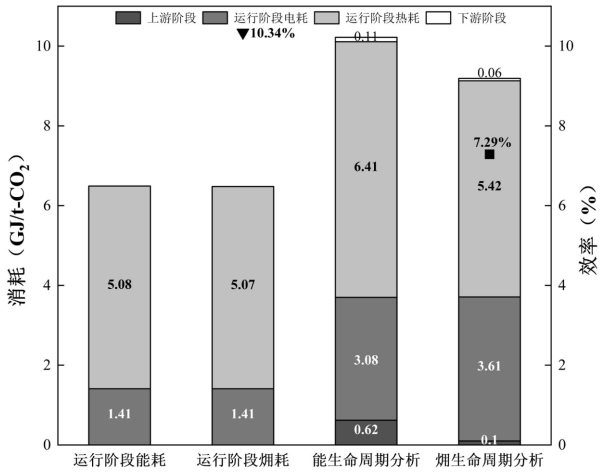


图 8　天然气和电网能源情景中吸收法 DAC 不同系统边界下的能耗和㶲耗

Fig.8　System boundary−dependent energy and exergy analysis of absorption−based direct DAC in natural gas and grid−powered scenarios

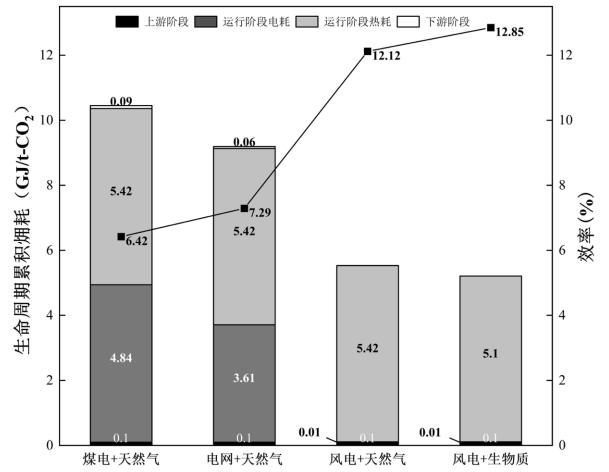


图 9　不同能源情景下吸收法 DAC 系统㶲生命周期结果

Fig.9　Exergy−driven life cycle impacts of DAC systems using chemical absorption: a multi−energy scenario analysis

3　结论

3.1　典型吸收法 DAC 系统运的单位碳捕集能耗和

㶲耗分别为 6.49GJ/t CO_2 和 6.48GJ/t CO_2,系统热力学第二定律效率为 10.34%,其中捕集电耗占比 12.05%,捕集热耗占比 78.29%,压缩电耗占比 9.66%,碳酸钙煅烧过程㶲损占比最大,为 62.82%,是制约系统能效水平的关键环节.

3.2 在不同供能情景下,吸收法 DAC 系统的生命周期碳移除效率有显著差异,其中电网和天然气情景为 47.50%,而在煤电和天然气情景下,系统生命周期碳移除效率降至最低值,仅为 8.70%,采用可再生能源替代可有效提高系统碳移除效率,在风电和生物质情景下,系统碳移除效率最高可达到 88.60%.在 DAC 部署前期,需要从生命周期角度考虑系统净碳移除效率、能效水平和环境效益,并作为评价系统是否可持续的依据.在系统建设及运行时,优先使用低碳或可再生材料并耦合可再生能源使 DAC 工厂实现负排放,以提高工厂可持续性及环境效益.本研究中㶲生命周期评价使用静态的清单数据,在时间和空间维度上具有一定的局限性,在未来的工作中可考虑 DAC 系统的动态行为,对随时间变化的系统参数、背景数据、环境影响等进行动态建模,可提高评价结果准确性和科学性的同时可预测 DAC 系统的发展结果.

3.3 吸收法 DAC 系统的生命周期累积㶲消耗由电能累积㶲、热能累积㶲和材料累积㶲三部分组成,在煤电/电网和天然气供能情景下,系统生命周期累积㶲耗为 10.44GJ/tCO_2,累积㶲效率分别为 6.42%,7.29%.当采用低碳能源替代时,可显著降低系统生命周期累积㶲消耗,风电和生物质情景下系统累积效率最高为 12.85%.㶲生命周期分析方法能够有效整合和量化系统生命周期阶段不同品质能源和资源消耗,为 DAC 系统可持续性提供依据.

参考文献:

[1] Uuited Nations Framework Conventionon Climate Change. Nationally determined contributions under the Paris Agreement: Synthesis report by the secretariat [R]. UNFCCC, 2023.

[2] Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2023: Synthesis report [R]. Geneva, Switzerland, IPCC, 2023.

[3] Net Zero Roadmap: A global pathway to keep the 1.5°C goal in reach-2023update [R]. Paris, France: International Energy Agency, 2023.

[4] Lackner K, Ziock H J, Grimes P. Carbon dioxide extraction from air: is it an option? [Z]. Los Alamos National Laboratory, 1999.

[5] Mcqueenn, Psarras P, Pilorge H, et al. Cost analysis of direct air capture and sequestration coupled to low-carbon thermal energy in the united States [J]. Environmental Science & Technology, 2022,56 (10):6285-6296.

[6] Jiang L, Liu W, Wang R Q, et al. Sorption direct air capture with CO_2 utilization [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2023, 95:101069.

[7] 王珺瑶,何 松,严家辉,等.直接空气碳捕集技术生命周期评价的研究进展及挑战 [J]. 煤炭学报, 2023,48(7):2748-2759.
Wang J Y, He S, Yan J H, et al. Research progress and challenges of life cycle assessment on direct air carbon capture technology [J]. Journal of China Coal Society, 2023,48(7):2748-2759.

[8] Keith W D, Holmes G, Angelo S, et al. A process for capturing CO_2 from the atmosphere [J]. Joule, 2018, 2(8):1573-1594.

[9] Skone T J. Life cycle greenhouse gas analysis of direct air capture systems [R]. U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory (NETL), 2021.

[10] Fasihi M, Efimova O, Beyer C. Techno-economic assessment of CO_2 direct air capture plants [J]. Journal of Clean Production, 2019,224: 957-980.

[11] Szargut J. Application of exergy in the analysis of cumulative energy consumption [J]. Energy, 1986,11(8):733-743.

[12] Stougie L, Kooi H J V D. Possibilities and consequences of the total cumulative exergy loss method in improving the sustainability of power generation [J]. Energy Conversion and Management, 2016,107:60-66.

[13] Cornelissen R L. Thermodynamics and sustainable development; the use of exergy analysis and the reduction of irreversibility [Z]. Universiteit Twente, 1997.

[14] Mörsdorf J G, Valverde J I, Morosuk T, et al. Exergetic life cycle assessment for green hydrogen production [J]. Energy, 2024,299:131553.

[15] Li Q, Song G, Xiao J, et al. Exergetic life cycle assessment of hydrogen production from biomass staged-gasification [J]. Energy, 2020,190:116416.

[16] Rocco M V, Colombo E. Exergy life cycle assessment of a waste-to-energy plant [J]. Energy Procedia, 2016,104:562-567.

[17] Wall G. Life cycle exergy analysis of renewable energy systems [J]. The Open Renewable Energy Journal, 2011,4(1):72-77.

[18] Stougie L, Tsalidis G A, Kooi H J V D, et al. Environmental and exergetic sustainability assessment of power generation from biomass [J]. Renewable Energy, 2018,128:520-528.

[19] Kavya M, Stefan P, Sumukha D, et al. Understanding environmental trade-offs and resource demand of direct air capture technologies through comparative life-cycle assessment [J]. Nature Energy, 2021, 6(11):1035-1044.

[20] Ryan L I, Henning S. Thermodynamic loss analysis of a liquid-sorbent direct air carbon capture plant [J]. Cell Reports Physical Science, 2022,3(3):100791.

[21] Szargut J, Morris D R, Stewart F R. Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes [J]. Choice Reviews Online, 1989,26(5):26-2722.

[22] Bejan A, Tsatsaronis G, Moran M J. Thermal design and optimization [M]. John Wiley & Sons, 1995,1(4):33-4516.

[23] 金红光,王宝群.化学能梯级利用机理探讨 [J]. 工程热物理学报, 2004,(2):181-184.
Jin H G, Wang B Q. Principle of cascading utilization of chemical energy [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004,(2):181-184.

[24] 邓南圣,王小兵.生命周期评价 [M]. 北京:化学工业出版社, 2003.
Deng N S, Wang X B.Life cycle assessment [M]. Beijing: Chemical Idustry Press, 2003.

[25] ISO 14040:2006 Environmental management-life cycle assessment-principles and framework [S].

[26] Odeh N A, Cockerill T T. Life cycle analysis of UK coal fired power plants [J]. Energy Conversion and Management, 2008,49(2):212-220.

[27] 杨 凯,陶 炜,肖 军.生物质气化费托合成航空煤油的生命周期㶲分析 [J]. 发电设备, 2018,32(4):246-252.
Yang K, Tao W, Xiao J. Exergeticlife cycle assessment of jet fuel from biomass gasification and fischer-tropsch synthesis [J]. Power Equipment, 2018,32(4):246-252.

[28] Szargut J, Morris D R. Cumulative exergy consumption and cumulative degree of perfection of chemical processes [J]. International Journal of Energy Research, 1987,11(2):245-261.

[29] Jonge M M J D, Daemen J, Lorlaux J M, et al. Life cycle carbon efficiency of Direct Air Capture systems with strong hydroxide sorbents [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2019,80:25-31.

作者简介: 严家辉(2000-),男,安徽六安人,广东工业大学硕士研究生,主要从事直接空气碳捕集的可持续性评估.yjh18063011847@163.com.