

# Benchmarking analysis on energy efficiency performance of temperature swing adsorption carbon capture system

Lijin CHEN<sup>1,2</sup>, Shuai DENG<sup>1,2\*</sup>, Junyao WANG<sup>3</sup>, Ruikai ZHAO<sup>1,2</sup>, Li ZHAO<sup>1</sup>, Shuangjun LI<sup>1,2</sup>, Zhihao GUO<sup>1,2</sup>

1. Key Laboratory of Efficient Utilization of Low and Medium Grade Energy (Tianjin University), Ministry of Education of China, Tianjin 300072, China

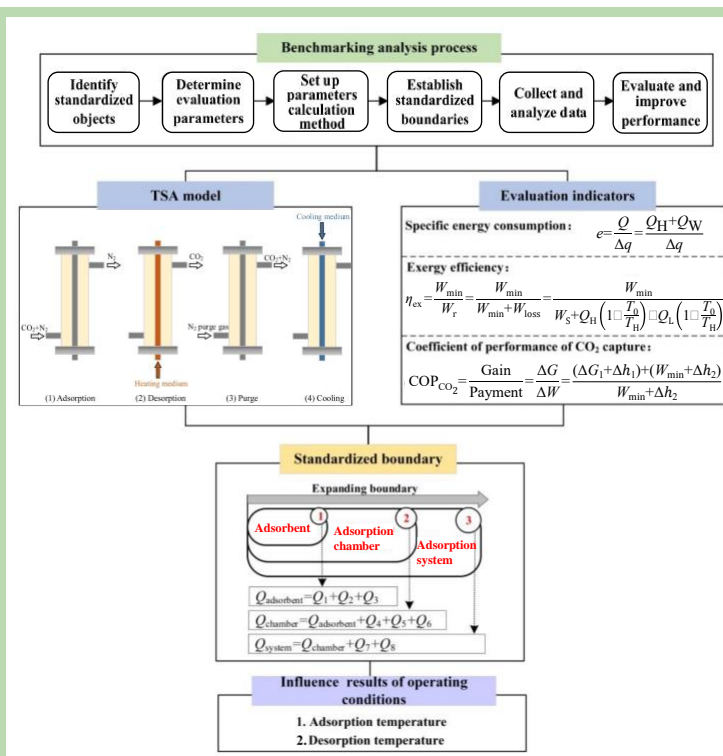
2. International Cooperation Research Centre of Carbon Capture in Ultra-low Energy-consumption, Tianjin University, Tianjin 300072, China

3. Guangdong Research Centre for Climate Change, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510006, China

**Abstract:** An accurate and reasonable energy efficiency analysis is significant to the scale-up development of carbon capture technology. It is not only a preliminary preparation to the final energy-saving proposal of carbon capture technology, but also an important data basis to sustainable performance evaluation of carbon capture process with aims on green, clean and low-carbon. Therefore, in addition to exploring the mechanism on energy conversion of carbon capture process, it is urgent to establish a benchmarking analysis methodology of energy efficiency performance which features on easy-to-operate for the demand of engineering sector, so that the performance cognition of typical capture technologies could be accumulated and compared on a reasonable and unified evaluation platform. Based on the benchmarking analysis method, the methodology of energy efficiency performance on temperature swing adsorption (TSA) is presented, including processes, parameters, model, etc. The effect of adsorption temperature and desorption temperature on the energy efficiency performance of TSA was analyzed, the feasibility of proposed method is demonstrated and quantified, and the influence of boundary changes on the evaluation results was discussed as well. The proposed method could provide a generalized guidance to the benchmarking evaluation of energy efficiency performance of carbon capture with specific case.

Based on the benchmarking analysis method, the methodology of energy efficiency performance on temperature swing adsorption (TSA) is presented, including processes, parameters, model, etc. The effect of adsorption temperature and desorption temperature on the energy efficiency performance of TSA was analyzed, the feasibility of proposed method is demonstrated and quantified, and the influence of boundary changes on the evaluation results was discussed as well. The proposed method could provide a generalized guidance to the benchmarking evaluation of energy efficiency performance of carbon capture with specific case.

**Key words:** carbon capture; temperature swing; adsorption; benchmarking analysis; energy efficiency



收稿: 2020-08-16, 修回: 2020-11-10, 网络发表: 2020-12-01; Received: 2020-08-16, Revised: 2020-11-10, Published online: 2020-12-01  
基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2017YFE0125100); 国家自然科学基金资助项目(编号: 51876134); 天津市科学技术研究计划(编号: 18YDYGHZ00090)

作者简介: 陈丽锦(1997-), 女, 四川省乐山市人, 硕士研究生, 热能工程专业, E-mail: chenlijin@tju.edu.cn; 邓帅, 通讯联系人, E-mail: sdeng@tju.edu.cn.

**引用格式:** 陈丽锦, 邓帅, 王瑶瑶, 等. 变温吸附碳捕集系统能效性能对标分析. 过程工程学报, 2021, 21(10): 1225-1235.

Chen L J, Deng S, Wang J Y, et al. Benchmarking analysis on energy efficiency performance of temperature swing adsorption carbon capture system (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2021, 21(10): 1225-1235, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.220264.

# 变温吸附碳捕集系统能效性能对标分析

陈丽锦<sup>1,2</sup>, 邓帅<sup>1,2\*</sup>, 王珺瑶<sup>3</sup>, 赵睿恺<sup>1,2</sup>, 赵力<sup>1</sup>, 李双俊<sup>1,2</sup>, 郭志昊<sup>1,2</sup>

1. 天津大学中低温热能高效利用教育部重点实验室, 天津 300072

2. 超低能耗碳捕集国际联合研究中心, 天津 300072

3. 中山大学广东省应对气候变化研究中心, 广东 广州 510006

**摘要:** 准确且合理的能耗分析对碳捕集技术规模化发展至关重要, 其既是碳捕集技术节能降耗的必要前期准备, 也是碳捕集过程开展绿色化、清洁化性能评价的重要数据基础。因此, 在对碳捕集过程的能源转换共性展开探索的同时, 迫切需要面向工程实践的需求, 形成易于操作的能效性能对标分析方法, 从而保证对类型技术的性能认知可以在合理且统一的评价平台上进行归纳与比较。本工作基于对标分析(Benchmarking Analysis)方法, 对变温吸附碳捕集(TSA)过程的能耗分析方法进行了阐述, 包括流程、参数、模型等。研究了吸附温度和解吸温度对 TSA 能效性能结果的影响, 演示并量化了该方法的可行性, 重点对边界变化对评价结果的影响进行了讨论。提出的对标分析方法对碳捕集技术的能效性能对标评估给出了较具体的指导。

**关键词:** 碳捕集; 变温; 吸附; 对标分析; 能效

**中图分类号:** X701

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-606X(2021)10-1225-11

## 1 前言

由于人类活动产生的全球温室气体排放逐渐增加, 预计2100年, 大气中的CO<sub>2</sub>含量将达到570×10<sup>-6</sup>, 可导致全球气温升高1.9℃, 海平面升高38 cm<sup>[1]</sup>。CO<sub>2</sub>被认为是气候变化的主要推动者, 而碳捕集技术作为一个必要且急切的解决方案, 可减少大气中的CO<sub>2</sub>排放, 缓解全球气候变化<sup>[2]</sup>。吸附技术因设备简单、能耗低、易实现自动化操作、不必考虑腐蚀性问题等特点而具有较大优势<sup>[3]</sup>。根据吸附剂再生方法的不同, 吸附技术主要分为两大类: 变压吸附(PSA)和变温吸附(TSA)<sup>[4]</sup>。TSA技术因其可利用低品位热能实现吸附剂再生受到广泛关注<sup>[5]</sup>。然而, 由于缺乏全面的边界划分、完善的计算方式、合理的评价指标、准确的对标能效性能分析, 导致现有TSA系统文献报道的能耗值从2.02 GJ/t到6.64 GJ/t跨度较大<sup>[6-10]</sup>, 同时当前面向TSA实验系统的研究, 也存在能耗边界鉴定不明确、能源利用效率存在诸多结果、缺乏统一性规律等问题。基于以上问题, 导致TSA的能效研究结论说服力弱、概括性差、甚至出现彼此矛盾。因此, 迫切需要一个面向TSA系统的能效性能对标分析来解决上述问题, 从而进一步优化TSA技术使其更具竞争力。

对标分析(Benchmarking Analysis, 又称基准分析法)在20世纪70年代末由施乐公司首创, 后经美国生产力与质量中心进行系统化和规范化的一种科学研究方法。对标分析是一个系统的、持续性的评估过程, 通过不断

地将企业流程与世界上居领先地位的企业相比较, 以获得帮助企业改善经营绩效的信息<sup>[11]</sup>。其后, 对标分析管理开始在工程、电信、汽车、交通等其他主要行业发展并得到广泛应用。将管理学领域的对标分析应用于工程碳捕集TSA过程的能效性能分析上, 形成一套科学合理的TSA性能评价体系, 能够系统、全面地反映所要瞄准、关注的内容和对象, 涵盖影响系统总体能效水平和能源利用状态的关键因素和环节<sup>[12]</sup>。

一些学者对碳捕集领域的对标分析法也有一定的应用和扩展, 如图1所示。Jordal<sup>[13]</sup>指出在对CO<sub>2</sub>捕集循环的不同能量周期执行对标测试时需要一个清晰、一致的框架, 建立了特定的发电厂边界条件、选择了相应的计算假设以反映CO<sub>2</sub>捕集技术的发展, 但未涉及建模工具的选择和所应用的过程模型。Dinca等<sup>[14]</sup>将化学吸收法CO<sub>2</sub>捕集技术应用于燃烧前过程并对标案例(燃烧后碳捕集技术中的化学吸收过程)的结果进行了比较, 但仅是将新型方法和典型方法进行对比分析, 并未给出统一的工作框架和方法。Anantharamana等<sup>[15]</sup>给出了一种新型的对标方法来比较不同的CO<sub>2</sub>捕集技术, 同时评估将新的捕集过程单元集成到动力循环中的不同方法。其中热力学过程最大值和技术限制效率之间的差异量化了理论改进潜力, 成为捕集过程的基准。但过程中产生的差异性并未得到重视, 仅用数据量化差异来进行评估。

本工作的创新点在于面向TSA系统的能效性能, 给出了一套完整的对标分析体系, 并演示了对标分析的适

用性和可行性。首先提出了统一的 TSA 系统的对标分析过程,通过 Matlab 建立了具体的 TSA 模型和相应的评价指标;然后建立了 TSA 过程的对标边界条件,为能耗的厘清和归类提供了明确的依据和基准;最后基于 TSA 能效性能对标分析,讨论了吸附温度和解吸温度对 TSA 能效的影响,并将对标能耗值与实验能耗值进行差异性

分析评估,得到了优化和提升 TSA 能效性能的方案。同时,分析了边界变化对 TSA 能耗水平的影响。所建立的全新的、完善的面向 TSA 系统能效性能的对标分析方法,能解决当前 TSA 能效结果说服力弱、缺乏一致性问题,并能为进一步的节能降耗提供新的思路,同时能为碳捕集技术提供一定工程性指导。

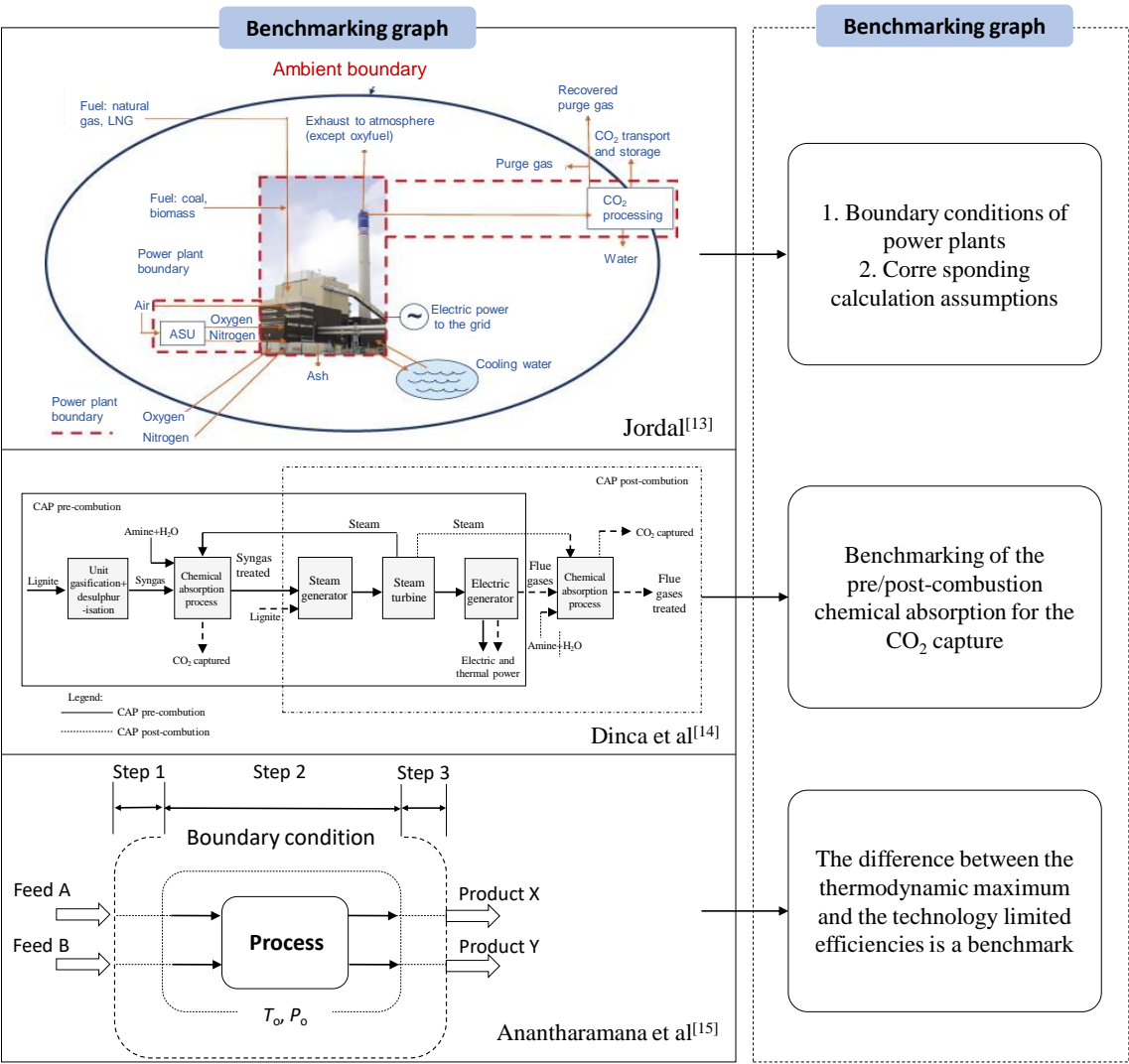


图1 碳捕集系统对标分析相关研究

Fig.1 Research on benchmarking analysis of carbon capture system

## 2 研究方法

### 2.1 对标分析过程

基于原有释义,对标分析法是将企业各项活动与从事该项活动最佳者进行比较,从而提出行动方法,以弥补自身的不足<sup>[16]</sup>。此方法是一种基于管理体系的着重于流程的研究分析方法。对标分析方法使我们能够利

用统一的方法论,有序地、自如地开展标准的制定工作,使标准的制定规范化、高效化、简单化<sup>[17]</sup>。基于对标分析方法,本工作面向工学领域的变温吸附碳捕集系统,形成一套针对能效性能的对标分析方法。

具体典型的对标分析过程如图2所示。

第一步确定对标对象。明确对象可使对标分析有了一定的基准标杆,本工作以变温吸附碳捕集系统能效

作为研究对象,此步骤可根据不同的研究背景条件进行更换。

第二步确定对标分析评价参数。评价参数的使用具有局限性和特定性,由此产生一定的约束性关系,本工作选用比能耗、CO<sub>2</sub>捕集性能系数(COP<sub>CO<sub>2</sub></sub>)、第二定律效率作为能效性能评价参数。

第三步建立评价参数计算方法。给出每个评价参数的计算方法和公式。

第四步建立对标边界。此步骤为对标分析的关键,边界明确后,可以在固定边界内开展所需要的对标分析研究。同时,边界的准确界定对于评价结果的合理性至

关重要,本工作将于讨论部分进行详细阐述。本工作面向变温吸附碳捕集系统,将边界划分为吸附剂、吸附腔、系统。

第五步收集和分析数据。作为量化评估的直观工具,能够明确综合优化的结果。通过对标分析过程,演示了吸附温度、解吸温度及边界变化对TSA能效性能结果的影响。

第六步性能评估及提升。作为衡量评估达到目标程度的有效手段,不断地优化才能使对标对象进入规范的有序状态。

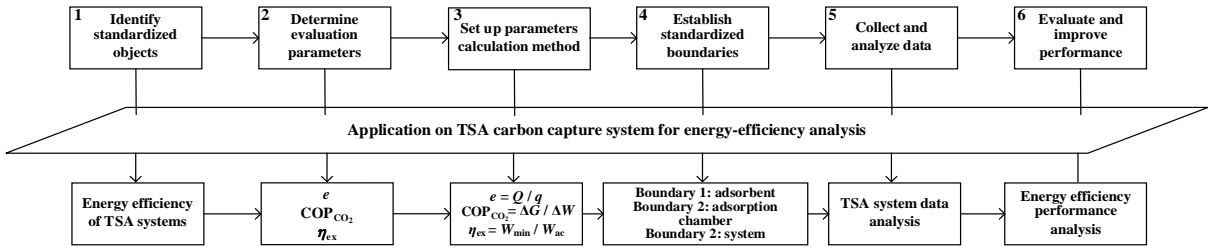


图2 对标分析过程(应用于变温吸附碳捕集系统)

Fig.2 Benchmarking analysis process (application on TSA system)

2.2 TSA 模型

在对标分析整个流程中,较为重要的环节是具体技术对应的建模和能效分析计算。本工作采用TSA技术,给出了TSA系统工作原理及四步TSA循环工作过程。

TSA利用吸附剂平衡吸附能力随温度升高而降低的特性,对混合烟气进行分离,得到纯度较高的二氧化碳气体,并进行收集。同时,TSA一般采用常温吸附、升温解吸的操作方法<sup>[18]</sup>。除吸附和脱附外,整个变温吸附操作中还包括对脱附后的吸附剂进行吹扫、冷却等辅助环节。

四步TSA循环过程如图3所示,分为吸附、解吸、吹扫、冷却四个过程。

过程1(吸附):电厂燃烧后产生的烟气,主要为CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>两种气体。N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>混合物进入吸附腔,CO<sub>2</sub>被吸附剂(沸石13X-APG)吸附,N<sub>2</sub>由腔体侧面流出。待吸附剂吸附饱和后,吸附过程结束。

过程2(解吸):采用高温导热油来满足解吸的热量需求。随着对吸附腔的加热,腔体温度不断上升,解吸过程开始。吸附的CO<sub>2</sub>被释放出来,在腔体侧面流出并收集。待CO<sub>2</sub>释放量达到最大,解吸过程结束<sup>[19]</sup>。

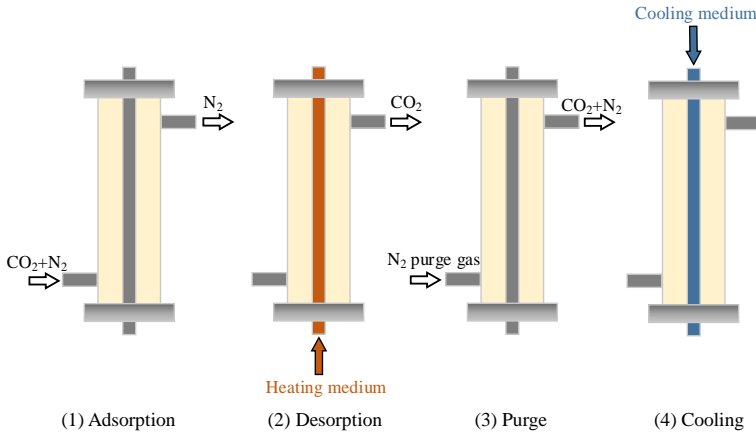


图3 四步变温吸附碳捕集过程示意图

Fig.3 Process diagram for the 4-step TSA cycle



过程 3(吹扫):解吸过程中有少量  $\text{CO}_2$  未被释放完全,为进一步清洗腔体内部,提升下一个循环的吸附效果,使用  $\text{N}_2$  吹扫腔体。

过程 4(冷却):冷却介质流入吸附腔的换热管道内,以去除吸附腔体的热量。直至腔体温度降至吸附温度,运行条件恢复,开始新的 4 步 TSA 循环。在冷却过程中,无  $\text{CO}_2$  的进入和进出。

## 2.3 性能指标

### 2.3.1 比能耗

采用比能耗作为评价碳捕集系统重要指标,可以评估碳捕集过程中的能量损失,并描述能量传递和转换之间的定量关系,能够较直观和直接地反映系统的能耗水平。 $e$  表示捕获单位  $\text{CO}_2$  所需的能量,定义为

$$e = \frac{Q}{\Delta q} = \frac{Q_H + Q_W}{\Delta q} \quad (1)$$

式中, $Q$  为总热量消耗( $\text{kJ/kg}_{\text{CO}_2}$ ), $Q_H$  为热耗( $\text{kJ/kg}_{\text{CO}_2}$ ), $Q_W$  转换为热耗的功耗( $\text{kJ/kg}_{\text{CO}_2}$ ),热和功的转换需要正确使用  $W = \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right)Q$ ,其中  $W$  为功( $\text{kJ}$ ), $Q$  为热( $\text{kJ}$ ), $T_0$  为低温热源, $T_1$  为高温热源。热力学第二定律指出,热转化为功是需要一个低温作为剩余热量的接受体,接受一部分热量。

### 2.3.2 焓效率

Zhao 等<sup>[20]</sup>应用最小分离功等作为探索碳捕集能效性能的指标,其中最小分离功( $W_{\min}$ )是理想气体混合物在等温等压条件下不发生化学反应可逆分离的能耗,只与分离温度( $T_{\text{in}}$ )、初始  $\text{CO}_2$  浓度( $y_{\text{CO}_2}$ )和  $\text{CO}_2$  回收率( $Re_{\text{CO}_2}$ )有关。焓效率( $\eta_{\text{ex}}$ )是最小分离功与实际功的比值,用于评价实际能转换的指标<sup>[21]</sup>。具体表达式如式(2)和(3)所示:

$$W_{\min} = G(T_{\text{in}}, y_{\text{CO}_2}, Re_{\text{CO}_2}) \quad (2)$$

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{W_{\min}}{W_r} = \frac{W_{\min}}{W_{\min} + W_{\text{loss}}} = \frac{W_{\min}}{W_s + Q_H \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) - Q_L \left(1 - \frac{T_0}{T_L}\right)} \quad (3)$$

式中, $W_{\min}$  为碳捕集过程中的最小分离功( $\text{kJ/kg}_{\text{CO}_2}$ ), $W_r$  为实际功( $\text{kJ/kg}_{\text{CO}_2}$ ), $W_s$  为输入功( $\text{kJ/kg}_{\text{CO}_2}$ ), $W_{\text{loss}}$  是损失功( $\text{kJ/kg}_{\text{CO}_2}$ ), $Q_H$  为高温热源的热输入( $\text{kJ/kg}_{\text{CO}_2}$ ), $Q_L$  为低温热源的热输出( $\text{kJ/kg}_{\text{CO}_2}$ ), $T_L$  为低温热源温度(K), $T_H$  为高温热源的温度(K), $T_0$  为环境温度(K)。

### 2.3.3 $\text{COP}_{\text{CO}_2}$

采用  $\text{COP}_{\text{CO}_2}$  作为能源效率指标,用于评估碳捕集技术的节能水平,也可作为一个“能效天花板”指标,指导

碳捕集系统的设计<sup>[22]</sup>。其意义在于碳捕集系统的付出与收益之比。具体的物理意义是通过富集获得的  $\text{CO}_2$  所增加的化学势与碳捕集系统驱动功的比值。分子表示碳捕集过程的收益,即  $\text{CO}_2$  通过富集得到的化学势的增加,体现在  $\text{CO}_2$  气体浓度和温度的增加。分母表示付出,即碳捕集过程中需要的驱动功,驱动  $\text{CO}_2$  的化学势富集。其中  $\text{COP}_{\text{CO}_2}$  的建立,基于引入了  $\text{CO}_2$  的环境有效能量  $G$  状态,定义为:环境温度  $T_0=298.15 \text{ K}$ ,环境压力  $P=0.101325 \text{ MPa}$ ,环境中的  $\text{CO}_2$  浓度为  $0.04\%$ 。只要  $\text{CO}_2$  浓度高于这个  $G$  状态,它就处于可用状态<sup>[23]</sup>。

$$\text{COP}_{\text{CO}_2} = \frac{\text{Gain}}{\text{Payment}} = \frac{\Delta G}{\Delta W} = \frac{(\Delta G_1 + \Delta h_1) + (W_{\min} + \Delta h_2)}{W_{\min} + \Delta h_2} \quad (4)$$

式中, $\Delta G$  为增加的化学势能( $\text{kJ/kg}_{\text{CO}_2}$ ), $\Delta G_1$  为从基准态到进气态吉布斯自由能变相对值  $G_1 - G$  ( $\text{kJ/kg}_{\text{CO}_2}$ ), $\Delta h_1$  为从  $T_0, P_0$  到  $T_1, P_1$  沿着定浓度、变温变压过程的焓变相对值( $\text{kJ/kg}_{\text{CO}_2}$ ), $\Delta h_2$  为从  $T_1, P_1$  到  $T_2, P_2$  沿着定浓度、变温变压过程的焓变相对值( $\text{kJ/kg}_{\text{CO}_2}$ ), $W_{\min}$  为碳捕集过程中的最小分离功( $\text{kJ/kg}_{\text{CO}_2}$ )。

## 3 结果与讨论

以吸附量为  $5 \text{ mol/kg}$  量级的变温吸附过程为研究对象,相关的实验装置、实验方法和实验数据均源于前期研究成果<sup>[24]</sup>,本工作采用的吸附剂材料为沸石 13X-APG,金属材料(金属部件和管道部件)为不锈钢,绝热层采用聚氨酯材料。各类参数设置如表 1~3 所示。

表 1 吸附腔几何尺寸和热性能参数  
Table 1 Bed geometry and thermal performance parameters

Parameter	Value
Bed diameter/mm	80
Bed length/mm	760
Bed wall thickness/mm	2
Internal heat exchange tube diameter/mm	10
Internal heat exchange tube length/mm	1100
Bed porosity	0.565
Pipeline diameter/mm	10
Pipeline length/mm	2000
Metal material heat capacity/[J/(kg·K)]	502.48
Metal material density/( $\text{kg/m}^3$ )	8030
Thermal insulation material heat transfer coefficient/[W/( $\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )]	0.02

### 3.1 边界划分讨论

现阶段,碳捕集领域能耗水平的研究始终缺乏数据对标的规范,导致能耗数据来源、量纲和单位驳杂,数据公信力较弱。考虑到整个碳捕集系统会产生的所有热耗,包括吸附剂显热  $Q_1$ 、吸附相显热  $Q_2$ 、吸附相潜热  $Q_3$ 、气体显热  $Q_4$ 、金属部件显热  $Q_5$ 、吸附腔散热热耗  $Q_6$ 、管

表2 吸附剂物性参数	
Table 2 Physical parameters of adsorbent	
Physical parameter	Value
Adsorbent specific heat capacity/[J/(kg·K)]	920
Particle density/(kg/m <sup>3</sup> )	1099.5
CO <sub>2</sub> adsorption heat/(J/mol)	-26050
N <sub>2</sub> adsorption heat/(J/mol)	-13360
Gas constant/[J/(mol·K)]	8.314
Saturation adsorption of CO <sub>2</sub> /(mol/kg)	5.445

道部件散热热耗 $Q_7$ 、其他辅助设备热耗 $Q_8$ 。同时,边界可以逐步扩展为连续三个层次:吸附剂、吸附腔和系统,如图4所示。因此,依次按照三个不断扩大的边界,可将

表3 运行参数	
Table 3 Operating parameters	
Parameter	Value
Adsorption temperature/K	273, 280, 288
Desorption temperature/K	363, 373, 383
Adsorption pressure/MPa	0.01
Desorption pressure/MPa	0.04
Ambient temperature/K	288
Mole fraction of CO <sub>2</sub> import/%	15
CO <sub>2</sub> purity/%	90
CO <sub>2</sub> recovery/%	85

8类热耗严格地放进相对应的边界里。

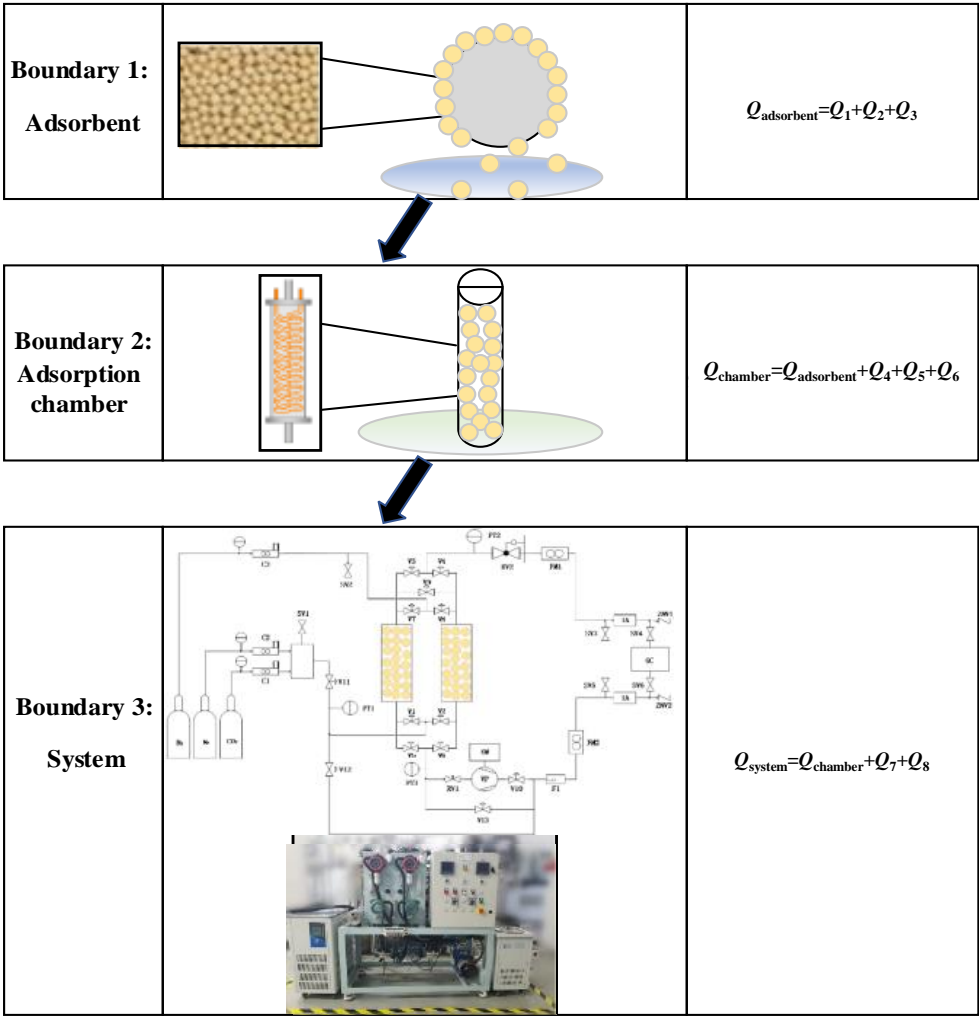


图4 TSA边界划分示意图  
Fig.4 Diagram of boundary division of TSA

明确各边界各部分能耗的具体计算方法,能够更加量化整个系统能耗水平。计算主要基于以下重要假设:TSA过程中,吸附腔内冷却介质为室温( $T_0$ );吸附剂与金属材料的物理性能稳定;吸附过程处于平衡状态;整个

循环过程是稳定的。基于本工作的TSA系统,依据划分的三类边界,表4给出了各部分能耗的计算方法。

3.2 运行条件影响

表4 各部分能耗计算方法  
Table 4 Calculation method of energy consumption of each part

Energy consumption of each part	Formula
Sensible heat of adsorbent	$Q_1 = C_{p,s} \times V \times \rho_b \times (T_H - T_L)$
Sensible heat of adsorbate (including sensible heat of gas)	$Q_2 + Q_4 = C_{p,CO_2} \times \Delta q \times (T_H - T_L)$
Latent heat of adsorbate	$Q_3 = \Delta H_{N_2} \times \Delta q_{N_2} + \Delta H_{CO_2} \times \Delta q_{CO_2}$
Sensible heat of metal parts	$Q_5 = C_{p,s} \times \rho_s \times V_w \times (T_H - T_L)$
Heat dissipation of adsorption chamber	$Q_6 = \frac{\pi L(Ti_{mfi} - Ti_{fo})t_s}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{hd_o}}$
Heat dissipation of pipeline parts	$Q_7 = C_{p,s} \times \rho_s \times V_p \times (T_{p,i} - T_{p,o})$
Heat consumption of other auxiliary	$Q_8 = \frac{W}{\left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right)}$
Energy consumption of the whole system	$e = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8}{\Delta q}$

Note:  $C_{p,s}$  is adsorbent specific heat capacity [J/(kg·K)],  $V$  is adsorption chamber volume ( $m^3$ ),  $\rho_b$  is adsorbent density ( $kg/m^3$ ),  $C_{p,CO_2}$  is adsorbate specific heat capacity [J/(kg·K)],  $\Delta q$  is the amount of  $CO_2$  capture (mol/kg),  $\Delta H_{CO_2}$  is  $CO_2$  adsorption heat (J/mol),  $\Delta H_{N_2}$  is  $N_2$  adsorption heat (J/mol),  $C_{p,s}$  is metal material specific heat capacity [J/(kg·K)],  $\rho_s$  is metal material density ( $kg/m^3$ ),  $V_w$  is metal parts volume ( $m^3$ ),  $\lambda$  is thermal conductivity (W/mK),  $h$  is convective heat transfer coefficient [W/( $m^2 \cdot K$ )],  $Ti_{mfi}$  is the average temperature of the fluid on the inner wall of the adsorption chamber (K),  $Ti_{fo}$  is ambient temperature (K), for 4-step TSA process,  $i=1,2,3,4$ ,  $d_i$ ,  $d_o$  is the inner diameter and outer diameter of the adsorption chamber (m),  $t_s$  is cycle time (s),  $V_p$  is pipeline parts volume ( $m^3$ ),  $T_{p,i}$ ,  $T_{p,o}$  is the inlet and outlet temperature of pipeline (K).

3.2.1 吸附温度

吸附温度对吸附等温线有重要影响,它控制着进气阶段吸附量的上限<sup>[25]</sup>。同时,吸附温度也是作为影响碳捕集系统能效的重要参数之一。一般来说,随吸附温度降低,吸附过程的工作容量会提高,吸附效果也会更好。考虑到烟气进气工况和环境条件,选择吸附温度为273, 280, 288 K,解吸温度为363 K, $CO_2$ 浓度为15%, $CO_2$ 吸附分压为0.01 MPa。图5为依据边界条件划分的各部分能耗随吸附温度变化关系,由图可知,随吸附温度升高,整个TSA系统的总能耗不断增加,由11 890 kJ/kg $CO_2$ 升至16 951 kJ/kg $CO_2$ 。从各部分能耗占总能耗的

占比来看,金属部件的显热 $Q_5$ 、吸附腔散热热耗 $Q_6$ 占比较高,分别约40%和20%。

将同一个TSA系统和相同运行条件下的实验能耗数值与本工作引入对标分析和边界条件的能耗数值相比,实验能耗值是通过解吸阶段导热油带入系统的热量 $Q=q_mtc\Delta T$ ,随吸附温度由273 K升到288 K,实验能耗值从8792 kJ/kg $CO_2$ 轻微降低到8457 kJ/kg $CO_2$ 。从边界条件角度来看,实验能耗值并未将吸附腔散热热耗 $Q_6$ (边界条件2)、管道部件散热热耗 $Q_7$ 和辅助部件的热耗 $Q_8$ (边界条件3)计算在总能耗之中,导致实验能耗值计算的不准确性和不统一性。

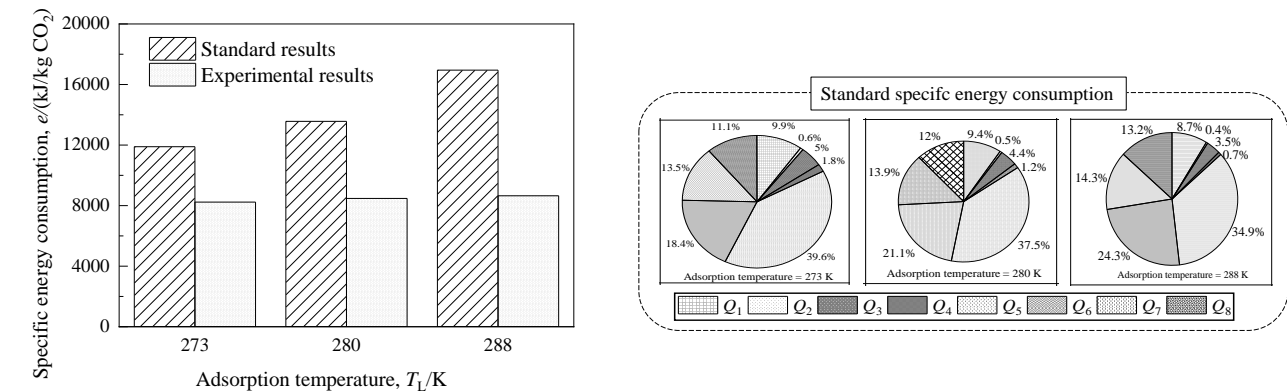


图5 各部分能耗随吸附温度变化  $T_L$ (标准值与实验值比较)

Fig.5 Energy consumption of each part changes with adsorption temperature  $T_L$  (comparison between standard results and experimental results)

图6为炯效率随吸附温度变化关系,由图可知,随吸附温度升高,炯效率呈下降趋势,由0.029降至0.022。由于整个TSA系统的最小分离功 $W_{\min}$ 基本保持不变,损失功 $W_{\text{lost}}$ 增加,炯效率减小。同时,和实验炯效率比较,对标炯效率比实验结果整体偏低,这是由于实验过程中,边界划分不明确,部分热耗损失等没有考虑完全,导致实际功 $W_r=W_{\min}+W_{\text{lost}}$ 偏小,故实验炯效率较对标数据偏高。

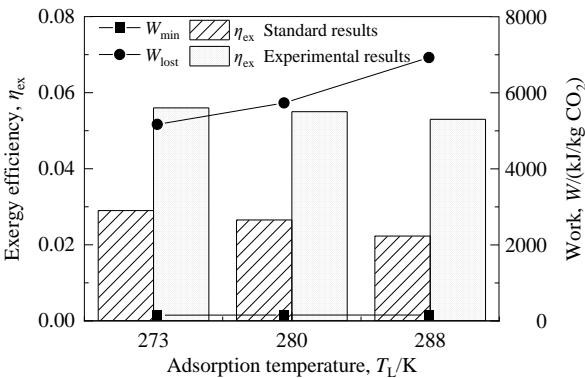


图6 炯效率随吸附温度变化 $T_L$ (标准值与实验值比较)  
Fig.6 Exergy efficiency changes with adsorption temperature  $T_L$  (comparison between standard value and experimental results)

图7为 $\text{COP}_{\text{CO}_2}$ 随吸附温度变化关系,由图可知,随吸附温度升高, $\text{COP}_{\text{CO}_2}$ 由3.3减至2.0。可以看到,降低吸附温度,可以提升 $\text{CO}_2$ 捕集性能,提高能源的利用效率,增加碳捕集系统的收益在成本中的占比。总体上看,适当地降低吸附温度,可以降低能耗,提高炯效率和 $\text{COP}_{\text{CO}_2}$ ,提高分离性能和系统效率,能效的提高表明低吸附温度更有利于系统向更加“理想化”的程度接近。

同时,在TSA系统对标数据和实验数据比较的过程中,更加印证只有根据对标分析边界条件才能得到标准、准确的能性能评价参数,更全面地去评价系统的整体情况。

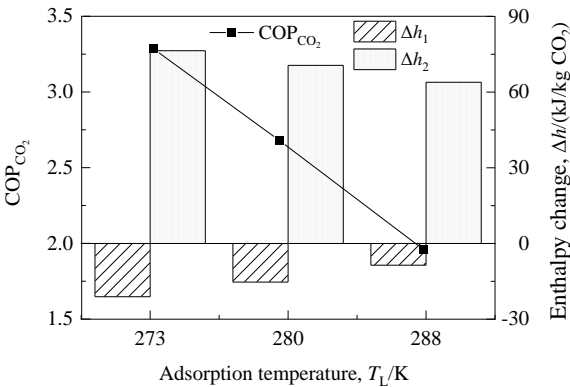


图7  $\text{COP}_{\text{CO}_2}$ 随吸附温度变化 $T_L$   
Fig.7  $\text{COP}_{\text{CO}_2}$  changes with adsorption temperature  $T_L$

3.2.2 解吸温度

解吸温度也是影响TSA过程的能效性能的因素。一般来说,TSA过程允许在相对较低的温度下解吸,防止吸附剂材料降解,提高过程的能源效率<sup>[26]</sup>。另一方面,随解吸温度升高, $\text{CO}_2$ 的吸附量降低<sup>[27]</sup>。吸附温度为288 K,解吸温度为363, 373, 383 K, $\text{CO}_2$ 浓度为15%, $\text{CO}_2$ 解吸分压为0.04 MPa。图8为依据边界条件划分的各部分能耗随解吸温度变化关系,由图可知,随解吸温度升高,整个TSA系统的总能耗不断减少,从16802 kJ/kg  $\text{CO}_2$ 减至13093 kJ/kg  $\text{CO}_2$ 。一般情况下,随解吸温度升高, $\text{CO}_2$ 量和输入烟气所需量均相应增加。因此,根据比能耗方程, $\text{CO}_2$ 捕集量在加热过程中减小。从各部分能耗占总能耗的占比来看,金属部件的显热 $Q_5$ 、吸附腔

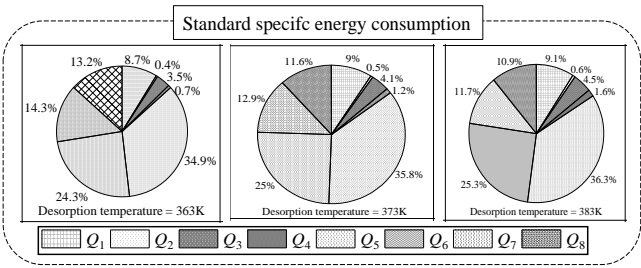
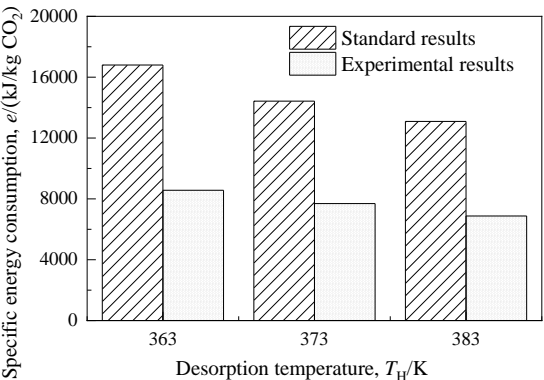


图8 各部分能耗随解吸温度变化 $T_H$ (标准值与实验值比较)  
Fig.8 Energy consumption of each part changes with desorption temperature  $T_H$  (comparison between standard results and experimental results)



散热热耗 $Q_6$ 占比较高,分别约为36%和25%。整体能耗分布情况和吸附温度变化下的能耗分布相似。

同时,将对标能耗数值和实验能耗相比较,可以看出,随解吸温度由363 K升至383 K,实验过程的能耗主要在6500~8500 kJ/kg  $\text{CO}_2$ 范围,实验总能耗较对标能耗偏低。实验过程中,仅以导热油带入系统的热量作为整个系统产生的能耗;从边界条件角度分析,边界2条件下的吸附腔散热热耗 $Q_6$ 、边界3条件下的管道部件散热热耗 $Q_7$ 和辅助部件的热耗 $Q_8$ 均未计算在实验过程的总能耗之中。而以上三类能耗值占总能耗的50%,因此能耗的对标计算至关重要。

图9为炯效率随解吸温度的变化关系,由图可知,随解吸温度升高,炯效率由0.022升至0.029。损失功 $W_{\text{lost}}$ 由6895 kJ/kg  $\text{CO}_2$ 降至5356 kJ/kg  $\text{CO}_2$ 。同样地,由于边界条件的不明确,导致损失功不完整,较标准值偏小。因此,对标炯效率要比实验炯效率整体偏低。

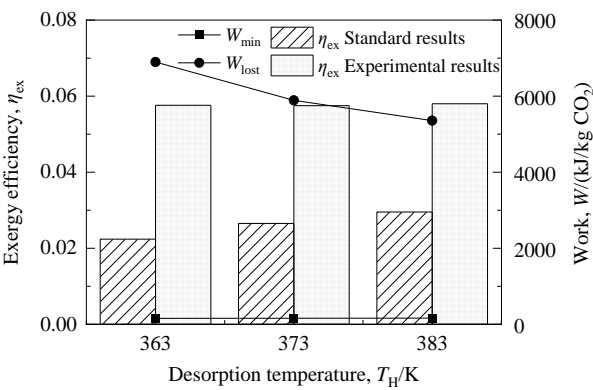


图9 炯效率随解吸温度变化 $T_{\text{H}}$ (标准值与实验值比较)  
Fig.9 Exergy efficiency changes with desorption temperature  $T_{\text{H}}$  (comparison between standard results and experimental results)

图10为 $\text{COP}_{\text{CO}_2}$ 随解吸温度变化关系,由图可知,随吸附温度升高, $\text{COP}_{\text{CO}_2}$ 从1.9略降低至1.8。可以看出,吸附温度通过影响 $\Delta h_2$ 和最小分离功 $W_{\text{min}}$ 来改变

$\text{COP}_{\text{CO}_2}$ ,通过驱动功,提高原始气体浓度,促进气体的化学势能变化。总体来说,通过适当地提高解吸温度,可以降低能耗和提高炯效率,但另一方面 $\text{COP}_{\text{CO}_2}$ 会相对降低,因此需要更加平衡考虑解吸温度的选取。一般来说,TSA过程采用逆向低温解吸 $\text{CO}_2$ <sup>[28]</sup>。同时,无论哪种运行参数和条件等的变化都需要明确边界条件,在此对标分析的基础上,对能效的评价才是合理且公平的。

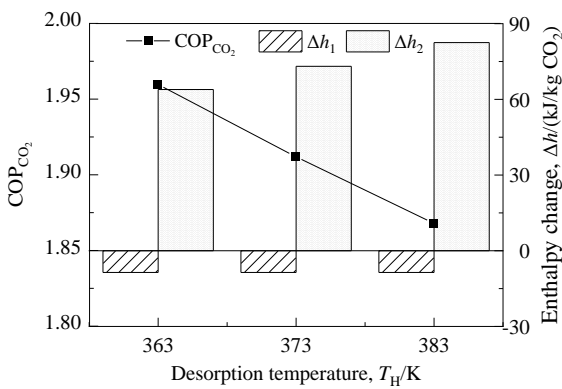


图10  $\text{COP}_{\text{CO}_2}$ 随解吸温度变化 $T_{\text{H}}$   
Fig.10  $\text{COP}_{\text{CO}_2}$  changes with desorption temperature  $T_{\text{H}}$

3.3 边界分析

本工作面向TSA系统的能效性能,展开了对标分析。其中最为重要的就是通过对标分析,所建立的边界条件会极大影响能效评估。表5和图11给出了在吸附温度分别为273, 280, 288 K,解吸温度为363 K的条件下;解吸温度在363, 373, 383 K,吸附温度在288 K的条件下,依次扩大边界,所带来的能耗变化。边界1:吸附剂,所包含的能耗为吸附过程中吸附剂/吸附相所产生的热耗。边界2:吸附腔,不仅包含了边界1吸附剂部分产生的热耗,同时需要加上腔内气体金属部件、吸附腔等产生的热耗。边界3:系统,在包含了边界2的所有热耗的基础上,还要考虑管道、辅助设备产生的热耗。若要考虑整个循环系统的能耗,则需要包含 $Q_1$ 到 $Q_8$ 的所有能耗值,否则会导致能耗的不完整性,使得能耗值偏

表5 边界划分对能效性能的影响

Table 5 The influence of boundary demarcation on energy efficiency performance

	Condition 1	Condition 2	Condition 3	Condition 4	Condition 5	Condition 6
	$T_{\text{L}}=273 \text{ K}, T_{\text{H}}=363 \text{ K}$	$T_{\text{L}}=280 \text{ K}, T_{\text{H}}=363 \text{ K}$	$T_{\text{L}}=288 \text{ K}, T_{\text{H}}=363 \text{ K}$	$T_{\text{H}}=363 \text{ K}, T_{\text{L}}=288 \text{ K}$	$T_{\text{H}}=373 \text{ K}, T_{\text{L}}=288 \text{ K}$	$T_{\text{H}}=383 \text{ K}, T_{\text{L}}=288 \text{ K}$
e-B1/(kJ/kg)	1848.1	1937.1	2136.8	2136.8	1958.3	1862.1
e-B2/(kJ/kg)	8963.1	10056.4	12284.1	12284.1	10890.4	10129.7
e-B3/(kJ/kg)	11890.6	13564.9	16951.5	16951.5	27272.9	25085.1
$\eta_{\text{ex}}$	0.029	0.027	0.022	0.022	0.027	0.029
$\text{COP}_{\text{CO}_2}$	3.2	2.6	1.9	1.9	1.9	1.8

Note: e-B1 refers to the specific energy consumption under boundary 1 (adsorbent) condition, e-B2 refers to the specific energy consumption under boundary 2 (adsorption chamber) condition, e-B3 refers to the specific energy consumption under boundary 3 (system) condition.

小,同时焓效率、 $COP_{CO_2}$ 也会相应地偏高。同时,在计算吸附腔部分的能耗时,只需考虑 $Q_1$ 到 $Q_6$ 的能耗,若多计算的能耗,则会导致能耗值偏大,焓效率、 $COP_{CO_2}$ 也会相应地偏低。边界的变化,是在不同尺寸级别中,对能耗进行全面的整合,从而获得对应边界的能效数值。为了提高TSA系统的效率,可以依次降低吸附剂、吸附腔和吸附系统三个层次的能耗。为了不断优化和提升TSA系统能效性能,在吸附剂边界条件1下,可以设计制备一

种新型的吸附剂,具有较低的热再生要求,实现高效的脱附热化学反应;在吸附腔边界条件2下,可以加强吸附腔的传热传质,对吸附腔的结构、换热器和空气通道进行设计;在系统边界条件3下,对管道等热损失较高的部件进行保温绝热处理等。通过边界的划分来量化节能降耗的途径,从而更加直观地进行能效性能的提高和完善。

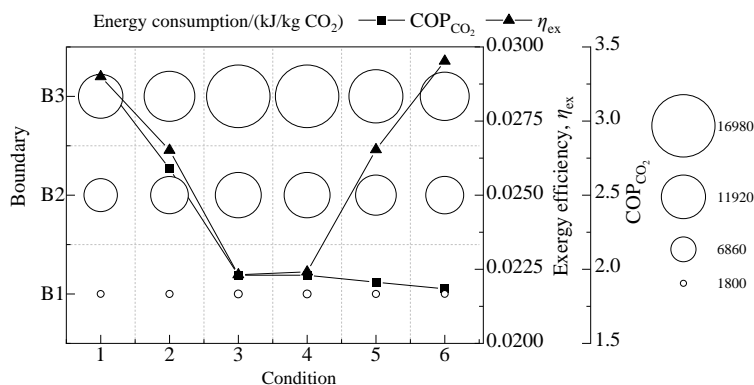


图 11 边界变化对能效性能的影响

Fig.11 The influence of boundary variation on energy efficiency performance

## 4 结 论

本工作面向变温吸附碳捕集系统能效性能进行了对标分析,给出了对标过程、评价指标、参数模型、边界条件等,并考察了吸附温度和解吸温度对TSA能效性能结果的影响,得到以下结论:

(1) 对标分析过程是一套合理且全面地解决TSA系统能效结论说服力弱、概括性差等问题的评价流程。该对标过程是通过确定对标对象、确定对标分析评价参数、建立评价参数计算方法、建立对标边界、收集和分析数据、性能评估及提升这六步来得到较为准确合理的能效性能结果。采用比能耗、焓效率、 $COP_{CO_2}$ 三个评价性能指标来量化总体能效水平和能源利用状态;其中,建立合理的对标边界(吸附剂、吸附腔、系统)为对标分析过程中最为重要的步骤。

(2) TSA系统能耗的精准计算,需要建立在边界划分基础上。三个依次扩大的边界对应着相应能耗的依次增加,边界1(吸附剂)下的能耗由吸附剂显热 $Q_1$ ,吸附相显热 $Q_2$ ,吸附相潜热 $Q_3$ 组成;边界2(吸附腔)下的能耗由边界1下的能耗再加上气体显热 $Q_4$ ,金属部件显热 $Q_5$ ,吸附腔散热热耗 $Q_6$ 组成;边界3(系统)下的能耗由边界2下的能耗再加上管道部件散热热耗 $Q_7$ ,其他辅助设备热耗 $Q_8$ 组成。通过边界范围划分从而保证能耗的完

整性和正确性。其中, $Q_5$ ,  $Q_6$ ,  $Q_7$ 占总能耗60%,在TSA系统能耗计算中不容忽视。

(3) 与TSA系统实验能效水平相比较,本工作提及的基于对标分析过程的总能耗值偏高,焓效率、 $COP_{CO_2}$ 相应地偏低,这是因为对标分析需要考虑更为全面且系统的能耗值。可以通过降低吸附温度、适度提高解吸温度、制备新型的吸附剂、加强吸附腔的传热传质等方案来优化和提升TSA能效性能。

## 参考文献

- [1] Caleb S, Hessami M. A study of methods of carbon dioxide capture and sequestration: the sustainability of a photosynthetic bioreactor approach [J]. Energy Conversion Management, 2005, 46 (3): 403–420.
- [2] Ben-Mansour R, Qasem N A A. An efficient temperature swing adsorption (TSA) process for separating  $CO_2$  from  $CO_2/N_2$  mixture using Mg-MOF-74 [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 156: 10–24.
- [3] 梁辉, 刘振, 王璐, 等. 13X-APG沸石真空变压变温耦合工艺吸附捕集烟道气中 $CO_2$  [J]. 过程工程学报, 2010, 10(2): 249–255.  
Liang H, Liu Z, Wang L, et al. Capture of  $CO_2$  from flue gases by a combined process of vacuum and temperature swing adsorption using 13X-APG zeolite [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2010, 10(2): 249–255.
- [4] Jiang N, Shen Y, Liu B, et al.  $CO_2$  capture from dry flue gas by means of VPSA, TSA and TVSA [J]. Journal of  $CO_2$  Utilization, 2020, 35: 153–168.

- [5] He J N, Deng S, Zhao L, et al. A numerical analysis on energy-efficiency performance of temperature swing adsorption for CO<sub>2</sub> capture [J]. *Energy Procedia*, 2017, 142: 3200–3207.
- [6] Merel J, Clausse M, Meunier F. Experimental investigation on CO<sub>2</sub> post-combustion capture by indirect thermal swing adsorption using 13X and 5A zeolites [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2008, 47: 209–215.
- [7] Hefti M, Joss L, Bjelobrk Z, et al. On the potential of phase-change adsorbents for CO<sub>2</sub> capture by temperature swing adsorption [J]. *Faraday Discussions*, 2016, 192: 153–179.
- [8] Ntiamoah A, Ling J, Xiao P, et al. CO<sub>2</sub> capture by temperature swing adsorption: use of hot CO<sub>2</sub>-rich gas for regeneration [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, 55(3): 703–713.
- [9] Fatemeh H, Reza S. Mathematical modeling of rapid temperature swing adsorption: the role of influencing parameters [J]. *Separation and Purification Technology*, 2017, 183: 181–193.
- [10] Ishibashi M, Ota H, Akutsu N, et al. Technology for removing carbon dioxide from power plant flue gas by the physical adsorption method [J]. *Energy Conversion and Management*, 1996, 37: 929–933.
- [11] 于益文, 黄海滨, 肖田野. 标杆分析法的引进与应用研究 [J]. *广东科技*, 2013, 2: 39–42.  
Yu Y W, Huang H B, Xiao T Y. Research on the introduction and application of benchmarking [J]. *Guangdong Science and Technology*, 2013, 2: 39–42.
- [12] 熊华文, 周伏秋, 刘静茹. 浅议能效对标指标体系的构建与应用 [J]. *研究与探讨*, 2008, 30(11): 27–31.  
Xiong H W, Zhou F Q, Liu J R. A brief discussion on the construction and application of energy efficiency benchmarking index system [J]. *Research and Approach*, 2008, 30(11): 27–31.
- [13] Jordal K. Benchmarking of power cycles with CO<sub>2</sub> capture—the impact of the selected framework [J]. *International Journal of Green Gas Control*, 2008, 2: 468–477.
- [14] Dinca C, Nela S. Benchmarking of the pre/post-combustion chemical absorption for the CO<sub>2</sub> capture [J]. *Journal of the Energy Institute*, 2018, 91: 445–456.
- [15] Anantharamana R, Jordal K, Gundersen T. CO<sub>2</sub> capture processes: novel approach to benchmarking and evaluation of improvement potentials [J]. *Energy Procedia*, 2013, 37: 2536–2543.
- [16] Wikipedia. Benchmarking analysis [EB/OL]. <https://encyclopedia.thefreedictionary.com/benchmarking>. 2020.
- [17] 麦绿波. 标准学—标准的科学理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2019: 48–50.  
Mai L B. *Standardology: science theory of standard* [M]. Beijing: Science Press, 2019: 48–50.
- [18] 刘博文, 邓帅, 李双俊, 等. 变温吸附碳捕集系统能效性能实验研究 [J]. *化工学报*, 2020, 71(S1): 382–390.  
Liu B W, Deng S, Li S J, et al. Experimental investigation on energy-efficiency performance of temperature swing adsorption system for CO<sub>2</sub> capture [J]. *CIESC Journal*, 2020, 71(S1): 382–390.
- [19] 赵睿恺, 邓帅, 赵力, 等. 热力学碳泵循环构建: 以变温吸附碳捕集为例 [J]. *工程热物理学报*, 2017, 38(7): 1531–1538.  
Zhao R K, Deng S, Zhao L, et al. Construction of thermodynamic carbon capture pump cycle: a case study on temperature swing adsorption for CO<sub>2</sub> capture [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(7): 1531–1538.
- [20] Zhao R K, Deng S, Liu Y N, et al. Carbon pump: fundamental theory and applications [J]. *Energy*, 2017, 119: 1131–1143.
- [21] Zhao R K, Deng S, Zhao L, et al. Performance analysis of temperature swing adsorption for CO<sub>2</sub> capture using thermodynamic properties of adsorbed phase [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 123: 205–215.
- [22] Xu Y F, Deng S, Zhao L, et al. Application of the thermodynamic cycle to assess the energy efficiency of amine-based absorption of carbon capture [J]. *Energies*, 2019, 12: 2504.
- [23] Morris D R, Szargut J. Standard chemical exergy of some elements and compounds on the planet earth [J]. *Energy*, 1986, 11: 733–755.
- [24] Liu B W, Lian Y H, Li S J, et al. Experimental investigation on separation and energy-efficiency performance of temperature swing adsorption system for CO<sub>2</sub> capture [J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 227: 115670.
- [25] Zhao R K, Zhao L, Wang S, et al. Solar-assisted pressure-temperature swing adsorption for CO<sub>2</sub> capture: effect of adsorbent materials [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 185: 494–504.
- [26] Yang M W, Chen N C, Huang C H, et al. Temperature swing adsorption process for CO<sub>2</sub> capture using polyaniline solid sorbent [J]. *Energy Procedia*, 2014, 63: 2351–2358.
- [27] 何俊南, 王珺瑶, 邓帅, 等. 碳捕集能效分析研究进展: 理论模型、评价工具和发展趋势 [J]. *化工进展*, 2017, 36: 406–415.  
He J N, Wang J Y, Deng S, et al. Research progress on energy-efficiency analysis of carbon capture: theoretical model, evaluation tool and developing trend [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, 36: 406–415.
- [28] Zhao R K, Liu L C, Zhao L, et al. Techno-economic analysis of carbon capture from a coal-fired power plant integrating solar-assisted pressure-temperature swing adsorption (PTSA) [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 214: 440–451.