

DOI: 10.11949/0438-1157.

热泵辅助的TVSA空气捕碳系统热回收策略分析

王兆阳¹, 王魁华¹, 陈彦霖¹, 霍英杰¹, 朱莉军², 葛天舒¹⁽¹⁾ 上海交通大学制冷与低温工程研究所, 上海 200240; ⁽²⁾ 中能建(上海)成套工程有限公司, 上海 200030

摘要: 为降低直接空气碳捕集(Direct Air Capture, DAC)系统能耗,以搭载Lewatit 1065吸附剂的变温真空吸附(Temperature Vacuum Swing Adsorption, TVSA)反应器为研究对象,通过搭建一维非稳态传热传质仿真模型,对比回收吸附热和回收冷凝热策略在宽工况范围(5–45°C、25%–85%RH)内的能耗差异,拆解其构成与分析冷热供需特征。结果表明,回收冷凝热策略在大多数工况下具有更低的单位能耗,尤其在高湿工况(70%–85%RH)下表现出1.5 GJ/t以上的显著优势,回收吸附热策略仅在低湿工况(如25%RH)下表现出不高于0.65 GJ/t的能耗优势。两种策略的能耗差异是冷热供需、设备能效变化共同作用的结果。研究可为DAC系统热回收方案的场景化选型提供定量依据。

关键词: 二氧化碳捕集; 吸附; 脱附; 能耗; 热回收; 热泵

中图分类号: X 701

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-10

Heat recovery in heat pump-assisted TVSA DAC systems

WANG Zhaoyang¹, WANG Kuihua¹, CHEN Yanlin¹, HUO Yingjie¹, ZHU Lijun², GE Tianshu¹⁽¹⁾ Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; ⁽²⁾ China Energy Construction Group (Shanghai) System Engineering Company Limited, Shanghai 200030, China

Abstract: Direct Air Capture (DAC) is a pivotal negative emission technology, yet its large-scale deployment is critically constrained by intensive energy consumption, particularly the thermal demand for sorbent regeneration. To mitigate this, this study focuses on a Temperature Vacuum Swing Adsorption (TVSA) system utilizing Lewatit 1065. A comprehensive one-dimensional unsteady-state model was developed to simulate the coupled heat and mass transfer dynamics within the adsorber. The model was employed to comparatively evaluate two distinct thermal integration strategies—adsorption heat recovery and condensation heat recovery—across a broad spectrum of ambient conditions (5–45°C, 25%–85%RH). A granular energy audit was conducted to decompose the total energy consumption and analyze the supply-demand characteristics of heating and cooling. The results indicate that the condensation heat recovery strategy generally yields lower specific energy consumption than the adsorption heat recovery strategy under most operating conditions, demonstrating a significant advantage of over 1.5 GJ/t under high-humidity scenarios (70%–85%RH). Conversely, the adsorption heat recovery strategy only exhibits a marginal energy saving of no more than 0.65 GJ/t under low-humidity conditions (e.g., 25%RH). Crucially, the performance discrepancy between the two strategies is attributed to the combined effects of the dynamic heating and

收稿日期: 2026-07-16 修回日期: 2026-08-25

通信作者: 葛天舒(1982—),女,博士,教授, baby_wo@sjtu.edu.cn

第一作者: 王兆阳(2002—),男,硕士研究生, wangzy0346@sjtu.edu.cn

基金项目: 上海市科学技术委员会2025年度关键技术研发计划“新能源”项目(25DZ3000600)

引用本文: 王兆阳, 王魁华, 陈彦霖, 霍英杰, 朱莉军, 葛天舒. 热泵辅助的TVSA空气捕碳系统热回收策略分析[J]. 化工学报, XXXX, XX(XX): 1–10

Citation: WANG Zhaoyang, WANG Kuihua, CHEN Yanlin, HUO Yingjie, ZHU Lijun, GE Tianshu. Heat recovery in heat pump-assisted TVSA DAC systems[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(XX): 1–10

cooling supply-demand characteristics and the variation in the Coefficient of Performance (COP) of auxiliary equipment across the investigated range. This study elucidates the intrinsic energy coupling mechanisms within the TVSA process and provides a quantitative framework for the scenario-based selection of thermal management schemes in DAC system design.

Keywords: CO₂ capture; adsorption; desorption; energy consumption; heat recovery; heat pump

引 言

人类活动产生的温室气体排放正在导致地球温度不断上升,为了达到《巴黎协定》中2℃的气候目标,需要到2100年将大气中的二氧化碳(CO₂)浓度维持在430 - 480 ppm^[1-4]。负排放技术能够主动从大气中去除CO₂,对于抵消难以减排的碳排放以及历史性的碳排放,从而实现《巴黎协定》的温升目标至关重要。其中,直接空气碳捕集(Direct Air Capture, DAC)技术^[5-11]主要通过溶液吸收或固体吸附的方式直接从空气中捕集CO₂^[12-16],而固体吸附DAC因耗水量少、可使用低品位热的优势被广泛研究^[17-22]。

由于空气中CO₂的浓度极低(400ppm),从大气中捕集CO₂所需的能量是点源捕集的2 - 3倍,DAC技术的高能耗也成为限制其规模化与商业化应用的关键^[23-29]。目前,针对固体吸附DAC捕集能耗的优化主要从材料-装置-系统三个维度开展^[30-32]。作为系统维度能耗优化的重要手段,通过集成热回收设计高效的能源系统可以显著降低能源消耗,减少对可再生能源的依赖,并提升DAC系统的灵活性^[33-34]。

热泵作为成熟可靠的冷暖供给方案,兼具高能效与低成本优势^[35-36]。将热泵与DAC系统深度集成,可以耦合系统的冷热需求,实现系统冷热联供。在热泵辅助的DAC系统中,低品位废热被回收并用于再生阶段加热吸附剂,而根据废热的来源可分为回收吸附热和回收冷凝热。回收吸附热指回收吸附剂吸附过程放出的热量,Leonzio和Shah^[37]率先提出使用空气源热泵回收吸附阶段反应器出口空气中的吸附热,相比于无热泵工艺实现了50%以上的节能。在此基础上,Ge等^[33]提出在吸附过程中使用内冷源带走吸附热,使用水源热泵回收吸附热,并用于加热再生过程的内热源。回收冷凝热指回收气体冷凝过程放出的热量,Ji等^[38]率先提出将空调冷凝器的废热回收用于基于TVSA(Temperature Vacuum Swing Adsorption,变温真空吸附)循环的

DAC系统,打开了将冷凝热作为DAC系统热源的新思路。

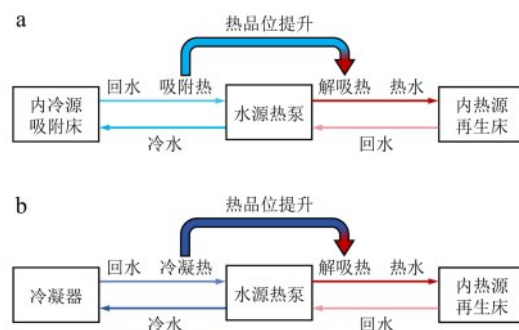


图1 两种热回收策略原理图

Fig.1 Principles of the two heat recovery strategies

注:a—回收吸附热;b—回收冷凝热

在工程应用中,捕集能耗直接影响系统的运营成本(Operating Expenditure, OPEX),也决定了系统的净碳移除能力,是影响热回收策略的选择、系统设计的重要因素。当前研究尚未形成对比两种热回收策略能耗差异及系统性分析的方法。对此,本文基于TVSA循环,在Climeworks公司提出的低压降反应器^[39]结构中搭载商业化吸附剂Lewatit 1065^[40],通过搭建仿真模型模拟两种热回收策略在宽工况范围(温度5 - 45℃、湿度25% - 85%RH)内吸附-解吸的动态过程,分析循环过程中的能耗构成和冷热匹配,阐明能耗差异产生的内在机理,为热回收策略的场景化选择提供定量依据。

1 基于TVSA循环的两种热回收策略

为比较两种热回收策略,需分别构建完整的工艺流程,以便从系统性能的角度开展评价。两种热回收策略的工艺流程如图2所示。

吸附热回收策略中,在吸附阶段风机将空气送入吸附床片层,空气中的二氧化碳和水蒸气被选择性吸附,放出吸附热,吸附床温度会逐渐升高。为抑制温升对吸附剂性能的不利影响,在吸附床流道内持续通入冷水,及时带走吸附热,从而维持床层温度稳定,提高吸附效率。

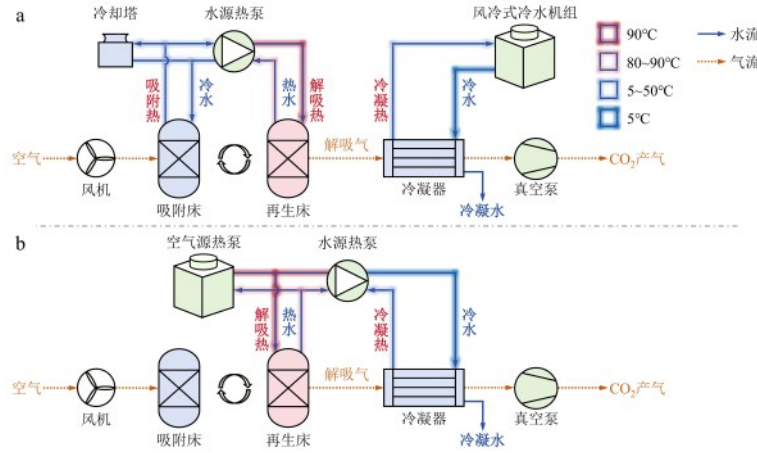


图2 TVSA工艺两种热回收策略工艺流程图

Fig.2 Process flow of the two heat recovery strategies in the TVSA cycle

注:a—回收吸附热;b—回收冷凝热

在再生阶段,在吸附床流动道内通入 90℃ 热水以提高床层温度,配合真空条件促进二氧化碳和水蒸气的解吸。解吸是吸热反应,床层温度存在下降趋势,因此需要持续提供解吸热以维持再生温度。吸附阶段的冷水回水与再生阶段的热水回水进入水源热泵,实现冷热量回收。在实际运行中,吸附热与解吸热在数量上难以完全匹配,因此通过设置冷热水箱以实现蓄冷蓄热,系统通常会剩余吸附热,多余的吸附热通过冷却塔排放至环境中。此外,再生产生的解吸气主要由二氧化碳和水蒸气组成,为降低真空泵的能耗,需要将解吸气先通入冷凝器中使水蒸气冷凝分离,获得的高纯度二氧化碳产品气便于下游利用(如生产绿色燃料),该部分冷量由风冷式冷水机组提供。

冷凝热回收策略中,吸附阶段不再对吸附床进行主动冷却,吸附过程中产生的热量由床层自身积累。进入再生阶段后,向片层内通入 90℃ 热水,配合真空条件促进二氧化碳和水蒸气的解吸。随后,解吸气进入冷凝器,其中绝大部分水蒸气冷凝为液态水,实现产品气的提纯。再生阶段的热水回水与冷凝器的冷水回水进入水源热泵,实现冷热量回收。在实际运行中,放出的冷凝热与解吸热在数量上难以完全匹配,因此通过设置冷热水箱以实现蓄冷蓄热,系统通常会缺少解吸热,这部分热量通过空气源热泵从环境中补充。

2 系统模型的建立与计算

通过构建 DAC 系统的传热传质模型的方法研

究 DAC 系统在吸附-解吸过程中的动态特性是 DAC 研究领域的热点^[40-42]。Young 等^[40]基于 TVSA 循环建立了吸附床的一维仿真模型,并与 Joss 等^[43]早期的循环模拟结果对比,二者的关键结果曲线在趋势上高度吻合,验证了模型的真实性和准确性。本文沿用了 Young 等计算传热传质的方法,分别搭建基于 TVSA 循环的两种热回收策略的系统仿真模型。

2.1 反应单元模型的建立

2.1.1 反应单元的参数 反应单元采用内部带有换热流道的低压降吸附床片层,其结构参数如表 1 所示。吸附床使用的材料及气源的物性参数如表 2 所示。

表 1 反应单元结构参数

Table 1 Structural parameters of the reactor unit

参数	数值	单位
工作尺寸(长×宽×厚)	1.6 × 1.8 × 0.015	m × m × m
换热流道数	10	/
换热管外径	7	mm
换热管内径	6.2	mm
翅片数量	600	/
翅片厚度	0.115	mm
吸附剂质量	16	kg

2.1.2 模型的质量和能量守恒 反应单元中各气体组分遵循质量守恒方程,如公式(1)所示。

$$-D_L \varepsilon_b \frac{\partial^2 c_i}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial z} (v c_i) + \varepsilon_t \frac{\partial c_i}{\partial t} + (1 - \varepsilon_b) \rho_p \frac{\partial q_i}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

其中, D_L 为质量扩散系数, m^2/s ; ε_b 为吸附床的孔隙率; c_i 为气侧组分 i 的摩尔浓度, mol/m^3 ; z 为距离, m ; ε_t 为反应单元的总孔隙率; t 为时间, s ; ρ_p 为吸附

表2 相关物性参数

Table 2 Related thermophysical properties

参数	数值	单位
铜换热管密度	8960	kg/m ³
铜换热管比热	386	J/(kg·°C)
铝翅片密度	2700	kg/m ³
铝翅片比热	880	J/(kg·°C)
空气的密度	1.205	kg/m ³
空气的比热	1012	J/(kg·°C)
吸附剂的密度	880	kg/m ³
吸附剂的比热	1580	J/(kg·°C)

剂的密度, kg/m³; q_i 为组分 i 的吸附量, mol/kg。

反应单元中气相、固相均遵循能量守恒, 如公式(2-3)所示。其中, 气相能量守恒考虑导热、对流以及与固相的换热; 固相能量守恒考虑导热、吸附热以及气相和壁面的换热。

$$\varepsilon_i \rho_g C_{p,g} \frac{\partial T_g}{\partial t} - \varepsilon_i \lambda_L \frac{\partial^2 T_g}{\partial z^2} + \rho_g C_{p,g} \frac{\partial (v T_g)}{\partial z} - h_{sg} (T_s - T_g) = 0 \quad (2)$$

$$(1 - \varepsilon_i) \left\{ \rho_s C_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} - \lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} - \rho_s \sum_i \left[(-\Delta H_i) \frac{\partial q_i}{\partial t} \right] \right\} - \sum_j h_{ij} (T_j - T_s) = 0 \quad (3)$$

其中, ρ_g 为气相的密度, kg/m³; $C_{p,g}$ 为气相的比热容, J/(kg·K); T_g 为气相温度, K; λ_L 为气相的导热系数, W/(m·K); h_{sg} 为固气两相的对流换热系数, W/(m²·K); T_s 为固相温度, K。 ρ_s 为固相的密度, kg/m³; $C_{p,s}$ 为固相的比热容, J/(kg·K); λ_s 为固相的导热系数, W/(m·K); ΔH_i 为第 i 吸附相的吸附热, J/mol; h_{ij} 为固相与气相或壁面的对流换热系数, W/(m²·K); T_j 为气相或壁面温度, K。

2.1.3 系统运行参数 表3展示了两种热回收策略中共同的系统运行参数。此外, 在回收吸附热策略中吸附阶段内冷的冷源温度设置为与环境温度相同。

表3 系统运行参数

Table 3 System operational parameters

参数	数值	单位
热源温度	90	°C
冷凝温度	5	°C
1个循环的吸附时间 ^[44]	60	min
1个循环的再生时间 ^[44]	90	min
吸附过程气体流量	3000	m ³ /h
吸附过程冷媒流量	1.5	m ³ /h
再生过程热媒流量	1.5	m ³ /h

2.2 换热组件的效率计算

2.2.1 水源热泵 COP (Coefficient of Performance)

与理想卡诺循环不同, 实际热泵系统运行过程中热源与热汇均呈现明显的温度滑移, 因此无法使用传统卡诺系数进行性能评价。为提高模型可靠性, 本文采用 Lorenz 循环效率模型对热泵性能进行描述。该模型基于热源与热汇的对数平均温度建立理论 COP, 并采用第二定律效率对实际不可逆损失进行修正, 从而能够较准确地反映实际热泵在不同工况下的运行性能。公式(4)为水源热泵 COP 的计算公式

$$COP_{WSHP} = \eta_{ws} \cdot \frac{T_{h,m}}{T_{h,m} - T_{c,m}} \quad (4)$$

其中, η_{ws} 为水源热泵的第二定律效率, 是实际 COP 与理论 COP 的比值, 取 0.55^[45-48]; $T_{h,m}$ 为热侧的对数平均温度, K; $T_{c,m}$ 为冷侧的对数平均温度, K。

2.2.2 空气源热泵 COP 对于空气源热泵, 冷侧热源为空气。由于空气侧流量通常较大, 且在系统级能耗模型中难以获得蒸发器出口空气温度, 本文将环境空气温度近似作为冷侧平均温度。当空气侧温度滑移不可忽略时, 则需根据空气入口、出口温度计算冷侧对数平均温度。

$$COP_{ASHP} = \eta_{AS} \cdot \frac{T_{h,m}}{T_{h,m} - T_{amb}} \quad (5)$$

其中, η_{AS} 为空气源热泵的第二定律效率, 取 0.4^[45-50]; $T_{h,m}$ 为热侧的对数平均温度, K; T_{amb} 为环境温度, K。

2.2.3 风冷式冷水机组制冷 COP 对于风冷式冷水机组, 采用修正 Carnot 方法计算风冷式冷水机组的制冷 COP。蒸发温度由冷水对数平均温度减去蒸发器换热温差确定, 冷凝温度由环境温度加上风冷冷凝器温差确定, 实际制冷 COP 通过第二定律效率对理论制冷 COP 进行修正。

$$COP_{ACFC} = \eta_{AC} \cdot \frac{T_{evap}}{T_{cond} - T_{evap}} \quad (6)$$

其中, η_{AC} 为风冷式冷水机组的第二定律效率, 取 0.4^[51]; T_{evap} 为蒸发温度, K; T_{cond} 为冷凝温度, K。

$$T_{evap} = T_{c,m} - \Delta T_{evap} \quad (7)$$

$$T_{cond} = T_{amb} + \Delta T_{cond} \quad (8)$$

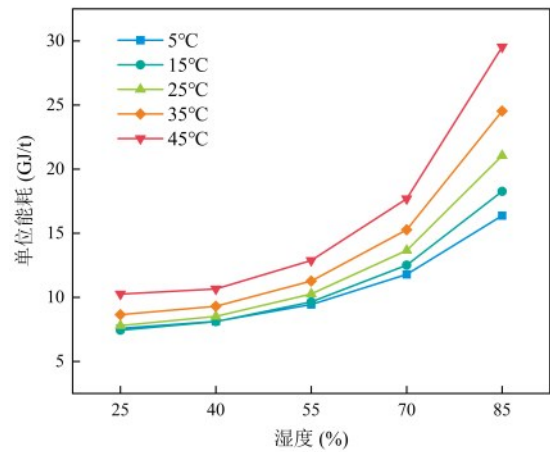
其中, $T_{c,m}$ 为冷侧的对数平均温度, K; ΔT_{evap} 为蒸发器换热温差, 取 5°C; T_{amb} 为环境温度, K; ΔT_{cond} 为冷凝器换热温差, 取 20°C^[52]。

3 能耗计算结果

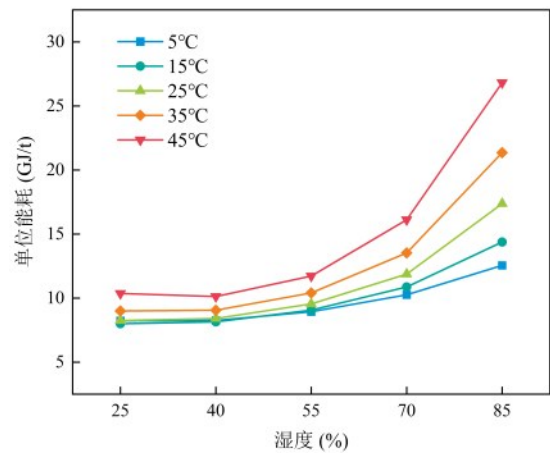
在两种热回收策略中,回收吸附热策略因吸附阶段采用内冷主动冷却,在相同条件下的单位产量高于回收冷凝热策略。例如,当25℃、40%RH时,回收吸附热策略的循环产量为0.0215kg/kg,而回收冷凝热策略为0.0193kg/kg。无法直接比较二者运行总能耗,因此使用单位能耗(生产单位质量的纯CO₂对应的能耗)衡量两种策略的能耗差异。使用搭建的仿真模型,分别计算两种热回收策略在宽工况范围(温度5-45℃、湿度25%-85%RH)内的单位能耗,得出两种策略随环境温度、湿度的变化规律如图3所示。当环境温度由5℃提高至45℃时,两种策略的单位能耗均呈上升趋势,且湿度越高趋势越显著。当环境湿度由25%RH上升至85%RH时,两种策略的单位能耗同样呈上升趋势,且温度越高趋势越显著。两种策略在高温高湿区(25-45℃、55%-85%RH)的单位能耗随环境温度和湿度变化剧烈,而在温度较低(5-25℃)或湿度较小(25%-55%RH)时单位能耗受环境温度和湿度变化的影响较小。

为比较两种策略在宽工况范围内单位能耗的优劣,在不同工况参数下分别计算出回收吸附热策略和回收冷凝热策略单位能耗的差值,如图4所示。

由图4中各区域的数值及颜色分布(代表回收吸附热策略和回收冷凝热策略单位能耗差值的大小,差值为正表示回收吸附热策略的单位能耗更高,差值为负表示回收冷凝热策略的单位能耗更高,颜色越深表示差值越大)可见,两种策略在单位能耗上的优劣呈现出显著的温湿度耦合特征。在较高的环境湿度(70%-85%RH)下,相比回收吸附热策略,回收冷凝热策略在单位能耗上具有显著优势,在不同的温度条件下均能将单位能耗降低1.5 GJ/t以上。当环境湿度降低至40%-55%RH时,回收冷凝热策略的单位能耗在大多数温度条件下仍具有优势,且当温度较高时该优势更显著。当环境湿度低至40%RH时,回收吸附热策略才在5-15℃的低温条件下表现出较小的单位能耗优势。当环境湿度低至25%RH时,回收吸附热策略在5-45℃的温度范围内能表现出0.110-0.649 GJ/t单位能耗优势。总体来说,回收冷凝热策略在大多数工况下均表现出更低的单位能耗,而回收吸附热策略在部



(a) 回收吸附热策略在变工况下的单位能耗



(b) 回收冷凝热策略在变工况下的单位能耗

图3 两种热回收策略在变工况下的单位能耗

Fig.3 Specific energy consumption of the two strategies under varying operating conditions

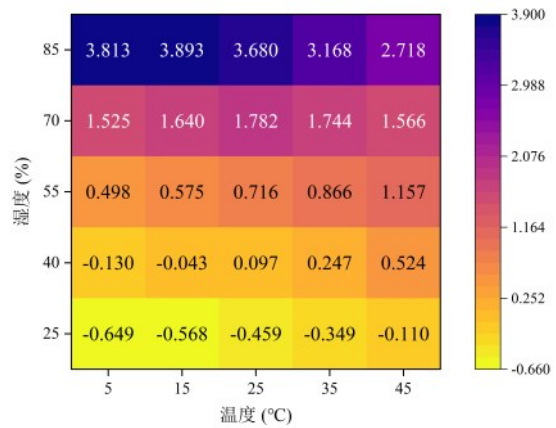


图4 两种热回收策略在各工况下的单位能耗差(GJ/t)

Fig.4 Relative specific energy consumption of the two strategies across operating conditions (GJ/t)

分低温低湿工况(5 - 45℃、25%RH或5 - 15℃、40%RH)下的单位能耗更低。

4 能耗拆解与分析

上一章对比了两种热回收策略在宽工况范围内单位能耗的优劣。然而,要阐明能耗差异产生的内在机理,还需要拆解系统的能耗构成,分析各能耗组成的变化。图5以25℃、40%RH为例,展示了

两种策略的能耗构成。在回收吸附热策略中,水源热泵、风冷式冷水机组、冷却塔的电耗用于匹配系统的冷热需求,而回收冷凝热策略中仅有水源热泵和空气源热泵参与了系统冷热需求的匹配。此外,在两种策略中均包含风机、真空泵的电耗,它们分别用于提供吹气、抽气的机械能。储热、管路热损失和循环水泵等能耗因在两种策略中未表现出明显差异或占比较小而未列入计算。

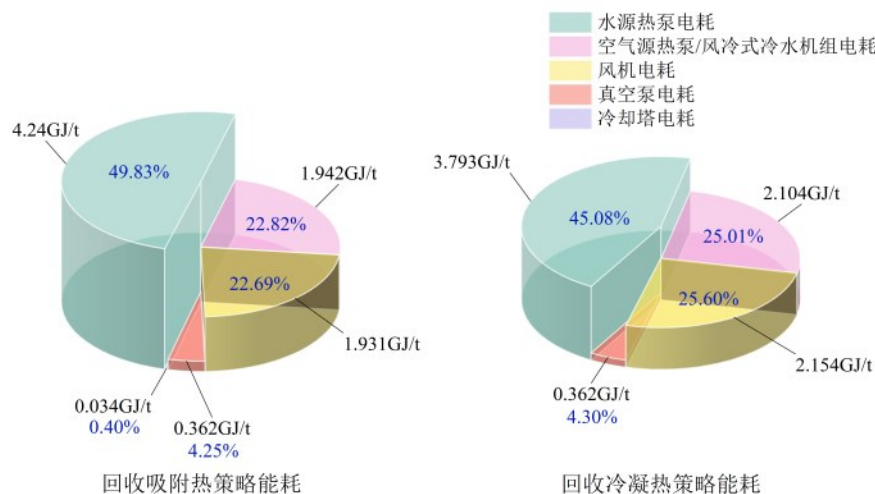


图5 两种热回收策略的能耗构成

Fig.5 Energy consumption breakdown of the two heat recovery strategies

4.1 冷热需求与匹配

在两种策略中,为匹配系统的冷热需求而产生的能耗均占系统总能耗的70%以上,但二者的冷热需求和匹配过程完全不同,表4展示了25℃、40%RH下两种策略的冷热需求。其中,吸附阶段内冷需求体现了单位产量CO₂所对应的吸附热,主要由CO₂和水的吸附放热产生。再生阶段内热需求体现了单位产量CO₂所对应的解吸热,除CO₂和水的解吸热外,还包含加热反应单元的显热。产气冷凝冷量需求体现了单位产量CO₂所对应的冷凝热,由水蒸气的冷凝热和解吸气的显热构成。

在回收吸附热策略中,系统的冷热需求由吸附阶段内冷需求、再生阶段内热需求、产气冷凝冷需

求三部分组成。水源热泵将吸附阶段内冷需求与再生阶段的内热需求匹配,按照表5中该工况下COP的计算值,回收的吸附热可完全覆盖解吸热需求,水源热泵电耗4.24 GJ/t。剩余7.2%的吸附热由高效比率的冷却塔散失到环境中,电耗仅0.034 GJ/t。此外,产气冷凝冷量由风冷式冷水机组独立供应,不参与水源热泵冷热量的匹配,风冷式冷水机组电耗1.942 GJ/t。

在回收冷凝热策略中,系统的冷热需求仅由再生阶段内热需求和产气冷凝冷需求两部分组成。水源热泵将产气冷凝冷需求与再生阶段的内热需求匹配,按照表5中该工况下COP的计算值,回收的冷凝热仅能满足65.46%的解吸热需求,电耗3.793 GJ/t。解吸热缺口由空气源热泵补充,以实现系统冷热量的平衡,电耗2.104 GJ/t。

4.2 能耗差异成因

4.2.1 能耗差随湿度变化规律成因 参考上节中25℃、40%RH下两种策略的冷热需求,系统冷热需求的相对大小存在一定的规律。由于在TVSA循环中吸附与解吸的量始终相等,因此即使在不同工况

表4 两种热回收策略冷热需求对比(GJ/t)

Table 4 Comparison of thermal demand and supply (GJ/t)

能量需求类型	回收吸附热策略	回收冷凝热策略
吸附阶段内冷	9.478	/
再生阶段内热	13.034	13.63
产气冷凝冷量	4.715	5.129

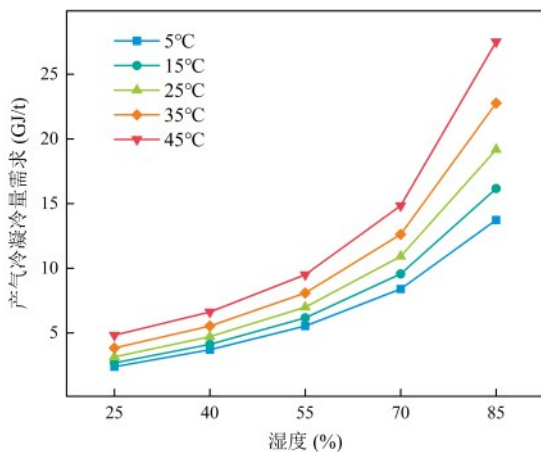
表5 设备的能效比(25℃、40%RH)

Table 5 Coefficient of performance of the devices

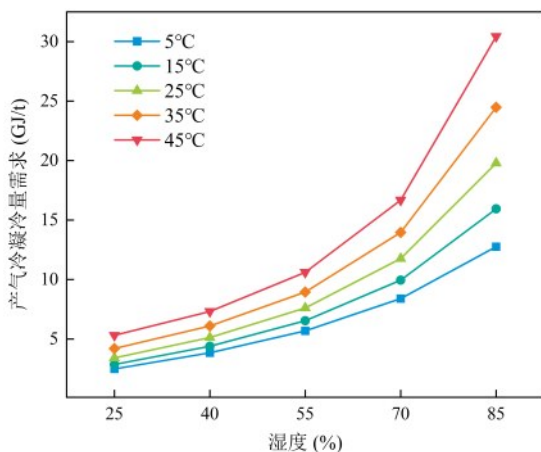
回收吸附热策略	水源热泵 COP	3.074
	风冷式冷水机组制冷 COP	2.428
	冷却塔能效比	20
回收冷凝热策略	水源热泵 COP	2.352
	空气源热泵 COP	2.238

下回收吸附热策略也能实现吸附阶段内冷和再生阶段内热的基本平衡,冷凝热在该策略中被视为不利因素。而对于回收冷凝热策略,再生阶段内热需求一定远大于产气冷凝冷量需求,因此冷凝热的增加对该策略更有利。图6分别展示了两种策略在不同工况下的产气冷凝冷量需求。

由图6可见,两种策略的产气冷凝冷量需求随工况的变化呈现出几乎相同的变化规律。在任一



(a) 回收吸附热策略在变工况下的产气冷凝冷量需求



(b) 回收冷凝热策略在变工况下的产气冷凝冷量需求

图6 两种热回收策略在变工况下的产气冷凝冷量需求

Fig.6 Cooling demand for gas production condensation under two heat recovery strategies across operating conditions

温度下,当环境湿度由25%RH上升至85%RH时,产气冷凝冷量需求均呈上升趋势,这种趋势在湿度 $\geq 55\%$ RH时尤为显著。这使得在高湿工况下回收吸附热策略中风冷式冷水机组的负荷大大提高,而回收冷凝热策略的冷热需求趋向平衡,导致回收冷凝热策略的单位能耗随湿度上升有更优异的表现,验证了图4中同一温度下能耗差值随湿度上升而迅速提高的规律。

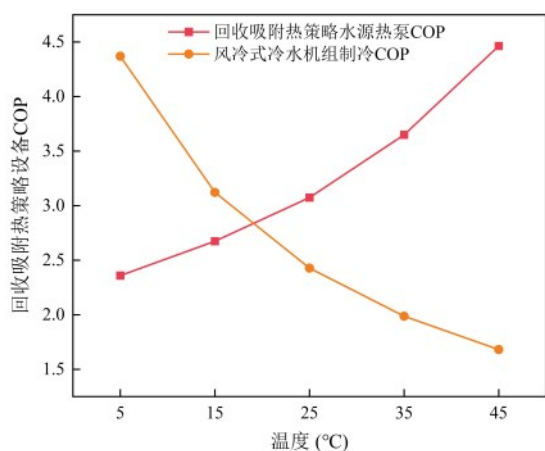
4.2.2 能耗差随温度变化规律成因 两种策略在同一湿度下的能耗差随温度的变化主要受设备COP的影响。在回收吸附热策略中,水源热泵冷侧出水温度始终与环境温度相等,使得水源热泵的换热温差随环境温度变化明显,图7展示了回收吸附热策略中水源热泵的COP随温度的变化规律,当温度由5℃提高至45℃时,水源热泵的COP提高了近1倍。而回收冷凝热策略中水源热泵冷侧出水温度始终等于冷凝温度,使得在所有工况下水源热泵的COP均稳定在2.352附近,这导致了两种策略的能耗差随环境温度提高有减小的趋势。

与水源热泵不同,回收吸附热策略中风冷式冷水机组需从环境中补冷以满足产气冷凝冷量需求。因此当环境温度提高时,风冷式冷水机组的换热温差逐渐增大,制冷COP减小。同时,回收冷凝热策略中空气源热泵从环境中补热以满足再生阶段内热需求,当环境温度提高时换热温差逐渐缩小,COP逐渐提高。以上两种影响共同使两种策略的能耗差随环境温度的提高有增大的趋势。

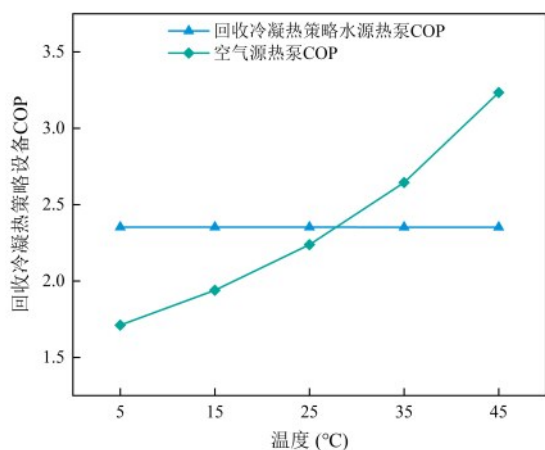
结合图4中两种策略的单位能耗表现出的差异,可以分析出能耗差随温度变化的成因:在高温高湿工况(温度 $\geq 25^\circ\text{C}$ 且湿度 $\geq 70\%$ RH)下,吸附剂吸附的水和 CO_2 的摩尔比最高,此时单位产量 CO_2 所对应的吸附热最高,回收吸附热策略水源热泵COP的提升占主导,能耗差随着环境温度的提高而减小。而在其它区域内,环境温度升高而导致的风冷式冷水机组制冷COP降低以及空气源热泵的COP提高占主导,能耗差随环境温度的提高而逐渐增大。

5 结论

本文针对热泵辅助的TVSA直接空气碳捕集系统,以Lewatit 1065吸附剂及低压降反应器为对象,通过一维非稳态传热传质模型,对比了回收吸附热与回收冷凝热两种策略在宽工况(温度5 - 45℃、湿



(a) 回收吸附热策略设备 COP 随温度的变化



(b) 回收冷凝热策略设备 COP 随温度的变化

图7 两种热回收策略设备 COP 随温度的变化

Fig.7 Variation of equipment COP with temperature for two heat recovery strategies

度 25% - 85%RH)下的性能差异。发现两种策略单位能耗均随温湿度升高呈上升趋势,但回收冷凝热策略在绝大多数工况下表现更优,仅当处于低温低湿(如温度 $\leq 15^{\circ}\text{C}$ 且湿度 $\leq 40\%\text{RH}$)区间时,回收吸附热策略才具能耗优势。

回收吸附热策略和回收冷凝热策略的能耗差异主要源于冷热供需匹配特性及设备能效变化。回收吸附热策略中吸附热可基本覆盖解吸热需求,但需风冷式冷水机组独立承担产气冷凝负荷,高湿工况下制冷电耗剧增。而回收冷凝热策略由于冷凝热量少,存在解吸热缺口需空气源热泵补热,随着环境湿度增加,可回收冷凝热显著上升,有效缓解解热失衡。此外,环境温度的提高虽能使回收吸附热策略中水源热泵 COP 提高,但也会降低风冷式冷水机组能效,同时回收冷凝热策略中空气源热泵

COP 提高,这些因素在不同温湿度区间的主导作用共同决定了能耗差随温度的变化规律。研究比较了两种热回收策略在不同工况下的能耗表现,从能耗构成方面剖析两种策略的具体差异,阐明了能耗差异产生的内在机理,为 DAC 系统热回收方案的场景化选型提供了定量依据。

需要指出,本文虽通过引入 Lorenz 循环效率模型、第二定律效率等方法尽可能提升换热组件效率计算的可靠性,但仍存在一定的局限性。在实际工程条件下,换热组件的效率可能受冷热两侧的温度波动、低温高湿工况下的结霜等因素影响,导致两种热回收策略的能耗差异随设备性能发生变化。因此,在参考本研究进行 DAC 系统热回收方案的选型时,应重点关注上述因素可能带来的影响。

符号说明

- $C_{p,g}$ —— 气相的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
- $C_{p,s}$ —— 固相的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
- COP_{ACFC} —— 风冷式冷水机组制冷的性能系数
- COP_{ASHP} —— 空气源热泵的性能系数
- COP_{WSHP} —— 水源热泵的性能系数
- c_i —— 气体组分的摩尔浓度, mol/m^3
- D_L —— 气体分子的质量扩散系数, m^2/s
- ΔH_i —— 吸附相的吸附热, J/mol
- h_j —— 固相与气相或壁面的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- $h_{g,s}$ —— 固气两相的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- q_i —— 组分的吸附量, mol/kg
- T_{amb} —— 环境温度, K
- T_{cond} —— 冷凝温度, K
- $T_{c,m}$ —— 冷侧的对数平均温度, K
- T_{evap} —— 蒸发温度, K
- T_g —— 气相的温度, K
- $T_{h,m}$ —— 热侧的对数平均温度, K
- T_j —— 气相或壁面的温度, K
- T_s —— 固相的温度, K
- ΔT_{cond} —— 冷凝器换热温差, K
- ΔT_{evap} —— 蒸发器换热温差, K
- t —— 时间, s
- v —— 气体的流速, m/s
- z —— 距离, m
- ε_b —— 吸附床的孔隙率
- ε_i —— 反应单元的总孔隙率
- η_{AC} —— 风冷式冷水机组的第二定律效率
- η_{AS} —— 空气源热泵的第二定律效率
- η_{WS} —— 水源热泵的第二定律效率

λ_L ——气相的导热系数, W/(m·K)

λ_s ——固相的导热系数, W/(m·K)

ρ_g ——气相的密度, kg/m³

ρ_p ——吸附剂的密度, kg/m³

ρ_s ——固相的密度, kg/m³

参考文献

- [1] Fuss S, Canadell J G, Peters G P, et al. Betting on negative emissions[J]. *Nature Climate Change*, 2014, **4**(10): 850–853.
- [2] Wei Y M, Chen K Y, Kang J N, et al. Policy and management of carbon peaking and carbon neutrality: A literature review[J]. *Engineering*, 2022, **14**: 52–63.
- [3] Bui M, Adjiman C S, Bardow A, et al. Carbon capture and storage (CCS): the way forward[J]. *Energy & Environmental Science*, 2018, **11**(5): 1062–1176.
- [4] Eisenberger P M, Cohen R W, Chichilnisky G, et al. Global warming and carbon-negative technology: prospects for a lower-cost route to a lower-risk atmosphere[J]. *Energy & Environment*, 2009, **20**(6): 973–984.
- [5] Lackner K, Zioc H J, Grimes P. Carbon dioxide extraction from air: Is it an option?[C], 1999.
- [6] Shi X Y, Xiao H, Azarabadi H, et al. Sorbents for the direct capture of CO₂ from ambient air[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, **59**(18): 6984–7006.
- [7] Lackner K S. A guide to CO₂ sequestration[J]. *Science*, 2003, **300** (5626): 1677–1678.
- [8] Asibor J O, Clough P T, Ali Nabavi S, et al. Assessment of optimal conditions for the performance of greenhouse gas removal methods [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **294**: 113039.
- [9] McQueen N, Gomes K V, McCormick C, et al. A review of direct air capture (DAC): scaling up commercial technologies and innovating for the future[J]. *Progress in Energy*, 2021, **3**(3): 032001.
- [10] Breyer C, Fasihi M, Bajamundi C, et al. Direct air capture of CO₂: a key technology for ambitious climate change mitigation[J]. *Joule*, 2019, **3**(9): 2053–2057.
- [11] Sutherland B R. Pricing CO₂ direct air capture[J]. *Joule*, 2019, **3** (7): 1571–1573.
- [12] Fasihi M, Efimova O, Breyer C. Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **224**: 957–980.
- [13] Keith D W, Holmes G, St Angelo D, et al. A process for capturing CO₂ from the atmosphere[J]. *Joule*, 2018, **2**(8): 1573–1594.
- [14] 张杰, 郭伟, 张博, 等. 空气中直接捕集 CO₂ 技术研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2021, **27**(2): 57–68.
Zhang J, Guo W, Zhang B, et al. Research progress on direct capture of CO₂ from air[J]. *Clean Coal Technology*, 2021, **27**(2): 57–68.
- [15] Mahmoudkhani M, Keith D W. Low-energy sodium hydroxide recovery for CO₂ capture from atmospheric air: Thermodynamic analysis[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2009, **3**(4): 376–384.
- [16] Kumar A, Madden D G, Lusi M, et al. Direct air capture of CO₂ by physisorbent materials[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2015, **54**(48): 14372–14377.
- [17] Zhu X C, Ge T S, Yang F, et al. Design of steam-assisted temperature vacuum-swing adsorption processes for efficient CO₂ capture from ambient air[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, **137**: 110651.
- [18] 向小凤, 邵亚茹, 高荣泽, 等. 直接空气捕集二氧化碳技术研究进展[J]. *环境工程*, 2025, **43**(5): 178–191.
Xiang X F, Shao Y R, Gao R Z, et al. Research progress of direct air capture technology for CO₂[J]. *Environmental Engineering*, 2025, **43**(5): 178–191.
- [19] 孔祥如, 张肖阳, 孙鹏翔, 等. 直接空气捕集固体多孔材料的研究进展[J]. *化工进展*, 2023, **42**(3): 1471–1483.
Kong X R, Zhang X Y, Sun P X, et al. Research progress of solid porous materials for direct CO₂ capture from air[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2023, **42**(3): 1471–1483.
- [20] Zhang Z Q, Ding Q, Cui J Y, et al. High and selective capture of low-concentration CO₂ with an anion-functionalized ultramicroporous metal-organic framework[J]. *Science China Materials*, 2021, **64**(3): 691–697.
- [21] Choi S, Drese J H, Eisenberger P M, et al. Application of amine-tethered solid sorbents for direct CO₂ capture from the ambient air [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(6): 2420–2427.
- [22] DeSantis D, Mason J A, James B D, et al. Techno-economic analysis of metal-organic frameworks for hydrogen and natural gas storage[J]. *Energy & Fuels*, 2017, **31**(2): 2024–2032.
- [23] Haertel C J J, McNutt M, Ozkan M, et al. The promise of scalable direct air capture[J]. *Chem*, 2021, **7**(11): 2831–2834.
- [24] House K Z, Baclig A C, Ranjan M, et al. Economic and energetic analysis of capturing CO₂ from ambient air[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, **108**(51): 20428–20433.
- [25] 郑家乐, 王魁华, 陈彦霖, 等. 基于 sTVSA 的直接空气捕集系统模拟分析[J]. *低碳化学与化工*, 2025, **50**(12): 104–109.
Zheng J L, Wang K H, Chen Y L, et al. Simulation analysis of direct air capture system based on sTVSA[J]. *Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering*, 2025, **50**(12): 104–109.
- [26] Lee S Y, Park S J. A review on solid adsorbents for carbon dioxide capture[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2015, **23**: 1–11.
- [27] Wang X X, Song C S. Carbon capture from flue gas and the atmosphere: a perspective[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2020, **8**: 560849.
- [28] Azarabadi H, Lackner K S. A sorbent-focused techno-economic analysis of direct air capture[J]. *Applied Energy*, 2019, **250**: 959–975.
- [29] Buijs W. Direct air capture of CO₂ with an amine resin: a molecular modeling study of the deactivation mechanism by CO₂ [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, **58**(32): 14705–14708.
- [30] Zhu X C, Ge T S, Wu J Y, et al. Large-scale applications and challenges of adsorption-based carbon capture technologies[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, **66**(22): 2861–2877.
- [31] 廖昌建, 张可伟, 王晶, 等. 直接空气捕集二氧化碳技术研究进展[J]. *化工进展*, 2024, **43**(4): 2031–2048.
Liao C J, Zhang K W, Wang J, et al. Progress on direct air capture of carbon dioxide[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2024, **43**(4): 2031–2048.

- [32] 余斌鹏, 谈磊, 王鼎, 等. 直接空气捕集 CO₂ 典型工艺与关键装置开发进展[J]. 煤炭学报, 2024, **49**(10): 4203–4221.
Yu B P, Tan L, Wang D, et al. Development of typical processes and key devices for direct air CO₂ capture[J]. Journal of China Coal Society, 2024, **49**(10): 4203–4221.
- [33] Ge B Y, Zhang M, Hu B, et al. Innovative process integrating high temperature heat pump and direct air capture[J]. Applied Energy, 2024, **355**: 122229.
- [34] Sabatino F, Grimm A, Gallucci F, et al. A comparative energy and costs assessment and optimization for direct air capture technologies[J]. Joule, 2021, **5**(8): 2047–2076.
- [35] Jouhara H, Khordehghah N, Almahmoud S, et al. Waste heat recovery technologies and applications[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2018, **6**: 268–289.
- [36] Yan H Z, Zhang C, Shao Z, et al. The underestimated role of the heat pump in achieving China's goal of carbon neutrality by 2060[J]. Engineering, 2023, **23**: 13–18.
- [37] Leonzio G, Shah N. Innovative process integrating air source heat pumps and direct air capture processes[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2022, **61**(35): 13221–13230.
- [38] Ji Y, Liu W, Yong J Y, et al. Solar-assisted temperature vacuum swing adsorption for direct air capture: Effect of relative humidity[J]. Applied Energy, 2023, **348**: 121493.
- [39] 赵俊德, 周爱国, 陈彦霖, 等. 吸附法 CO₂ 直接空气捕集技术能耗现状[J]. 化工学报, 2025, **76**(4): 1375–1390.
Zhao J D, Zhou A G, Chen Y L, et al. Current status of energy consumption of adsorption CO₂ direct air capture[J]. CIESC Journal, 2025, **76**(4): 1375–1390.
- [40] Young J, García-Díez E, García S, et al. The impact of binary water – CO₂ isotherm models on the optimal performance of sorbent-based direct air capture processes[J]. Energy & Environmental Science, 2021, **14**(10): 5377–5394.
- [41] Wurzbacher J A, Gebald C, Brunner S, et al. Heat and mass transfer of temperature – vacuum swing desorption for CO₂ capture from air[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, **283**: 1329–1338.
- [42] Sinha A, Darunte L A, Jones C W, et al. Correction to "Systems design and economic analysis of direct air capture of CO₂ through temperature vacuum swing adsorption using MIL-101(Cr)-PEI-800 and mmen-Mg₂(dobpdc) MOF adsorbents"[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, **59**(1): 503–505.
- [43] Joss L, Gazzani M, Hefti M, et al. Temperature swing adsorption for the recovery of the heavy component: an equilibrium-based shortcut model[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2015, **54**(11): 3027–3038.
- [44] 赵俊德, 郑家乐, 周爱国, 等. CO₂ 直接空气捕集用 TVSA 与 S-TVSA 循环的实验研究[J]. 低碳化学与化工, 2025, **50**(7): 109–117.
Zhao J D, Zheng J L, Zhou A G, et al. Experimental study on TVSA and S-TVSA cycles for CO₂ direct air capture[J]. Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering, 2025, **50**(7): 109–117.
- [45] Schlosser F, Jesper M, Vogelsang J, et al. Large-scale heat pumps: Applications, performance, economic feasibility and industrial integration[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, **133**: 110219.
- [46] Zevenhoven R, Arnas Ö. The effect of air humidity on the exergy efficiency of domestic heat pumps[J]. Energy Conversion and Management, 2020, **221**: 113054.
- [47] Bruelisauer M, Meggers F, Leibundgut H. Choosing heat sinks for cooling in tropical climates[J]. Frontiers of Architectural Research, 2013, **2**(3): 292–300.
- [48] Akau R L, Schoenhals R J. The second law efficiency of a heat pump system[J]. Energy, 1980, **5**(8/9): 853–863.
- [49] 许琦, 张希, 张兴伟, 等. 空气源复叠式热泵系统性能的模拟分析[J]. 制冷技术, 2023, **43**(2): 1–7.
Xu Q, Zhang X, Zhang X W, et al. Simulation analysis of performance of air-source cascade heat pump system[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2023, **43**(2): 1–7.
- [50] 樊超超, 晏刚, 鱼剑琳. 一种新型空气源高温热泵的热力学分析[J]. 工程热物理学报, 2020, **41**(1): 83–88.
Fan C C, Yan G, Yu J L. Thermodynamic analysis of a modified air source high temperature heat pump[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, **41**(1): 83–88.
- [51] Yu F W, Chan K T, Sit R K Y, et al. Review of standards for energy performance of chiller systems serving commercial buildings[J]. Energy Procedia, 2014, **61**: 2778–2782.
- [52] Yu F W, Chan K T, Sit R K Y, et al. Energy simulation of sustainable air-cooled chiller system for commercial buildings under climate change[J]. Energy and Buildings, 2013, **64**: 162–171.