

DOI: 10.11949/0438-1157.

化学吸收法碳捕集工艺的能效优化研究

马晓迅¹, 高庆春², 崔建忠¹, 季腾辉¹, 王运凯¹, 孟钦辉¹, 潘一搏¹, 陈育葆¹, 李帅鹏¹, 王宇豪¹, 王盛哲¹, 张一博¹

(¹ 西北大学化工学院, 西北大学碳中和学院, 科技部碳氢资源清洁利用国际科技合作基地, 陕北能源先进化工利用技术教育部工程研究中心, 陕西省洁净煤转化工程技术研究中心, 陕北能源化工产业发展协同创新中心, 陕西 西安 710127; ² 北京迪威尔石油天然气技术开发有限公司, 北京 100085)

摘要: 化学吸收是最成熟的二氧化碳捕集技术, 然而, 高再生能耗制约其大规模工业应用。本研究以撬装式化学吸收碳捕集系统为研究对象, 以降低再生能耗为核心目标, 通过高效填料筛选、热泵工质优选、节能工艺耦合, 系统开展能效优化研究。首先, 实验筛选出高效填料, 建立 Aspen Plus 基准模型, 确定最优操作工况。随后, 系统研究了机械蒸汽再压缩 (MVR)、压缩式热泵、吸收塔级间冷却、烟气分流等单一节能工艺, 并进一步提出热泵-烟气分流、热泵-级间冷却、MVR-烟气分流等耦合工艺。在此基础上, 创新性地提出 MVR-压缩式热泵深度耦合工艺, 将热泵热源的解吸塔塔顶取热改为吸收塔的级间取热, 在实现级间冷却的同时为热泵提供稳定的热源。进一步, 通过系统考察, 解明了 MVR 闪蒸压力与热泵压缩比对系统能耗的协同影响。该工艺在最优工况下能耗降至 2.440 MJ/kgCO₂, 节能率达 44.6%。为工业碳捕集系统提供极具参考价值的技术优化方案。

关键词: 碳捕集; 填料; Aspen 模拟; 工艺优化; 热泵

中图分类号: TQ028.8

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-25

Research on energy efficiency optimization of carbon capture process based on chemical absorption method

MA Xiaoxun¹, GAO Qingchun², CUI Jianzhong¹, JI Tenhui¹, WANG Yunkai¹, PAN Yibo¹, CHEN Yubao¹, LI Shuaipeng¹, WANG Yuhao¹, WANG Shengzhe¹, ZHANG Yibo¹

(¹ School of Chemical Engineering, Northwest University, Carbon Neutrality College (Yulin), Northwest University, International Science & Technology Cooperation Base of MOST for Clean Utilization of Hydrocarbon Resources, Chemical Engineering Research Center of the Ministry of Education for Advanced Use Technology of Shanbei Energy, Shaanxi Research Center of Engineering Technology for Clean Coal Conversion, Collaborative Innovation Center for Development of Energy and Chemical Industry in Northern Shaanxi, Xi'an 710127, Shaanxi, China; ² Dwell Company Limited, Beijing 100085, China)

Abstract: Chemical absorption is the most mature technology for CO₂ capture. However, its large-scale industrial application is still constrained by the high energy consumption required for solvent regeneration. In this work, a skid-mounted chemical absorption carbon capture system is selected as the research object, with reduction of

收稿日期: 2026-04-16 修回日期: 2026-08-03

通信作者: 马晓迅 (1957—), 男, 教授, maxym@nwu.edu.cn

第一作者: 马晓迅 (1957—), 男, 教授, maxym@nwu.edu.cn

基金项目: 榆林市科技计划项目 (CXY-2023-ZX03)

引用本文: 马晓迅, 高庆春, 崔建忠, 季腾辉, 王运凯, 孟钦辉, 潘一搏, 陈育葆, 李帅鹏, 王宇豪, 王盛哲, 张一博. 化学吸收法碳捕集工艺的能效优化研究[J]. 化工学报, XXXX, XX(XX): 1–25

Citation: MA Xiaoxun, GAO Qingchun, CUI Jianzhong, JI Tenhui, WANG Yunkai, PAN Yibo, CHEN Yubao, LI Shuaipeng, WANG Yuhao, WANG Shengzhe, ZHANG Yibo. Research on energy efficiency optimization of carbon capture process based on chemical absorption method[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(XX): 1–25

regeneration energy consumption as the primary objective. Systematic energy-efficiency optimization is carried out through high-efficiency packing screening, heat pump working-fluid selection, and energy-saving process integration. First, high-efficiency packing is selected through experiments, and an Aspen Plus benchmark model is established to determine the optimal operating conditions. Then, several single energy-saving processes, including mechanical vapor recompression (MVR), compression heat pump, interstage cooling of the absorption tower, and flue gas splitting, are systematically investigated. Based on these results, coupled processes, such as heat pump-flue gas splitting, heat pump-interstage cooling, and MVR-flue gas splitting, are further proposed and evaluated. On this basis, an innovative MVR-compression heat pump deep-coupling process is proposed. In this process, the heat source for the heat pump is shifted from heat extraction at the top of the desorption tower to interstage heat extraction from the absorption tower. This modification provides a more stable heat source for the heat pump while simultaneously enabling interstage cooling. Furthermore, systematic analysis clarifies the synergistic effect of MVR flash pressure and heat pump compression ratio on overall system energy consumption. Under the optimal operating conditions, the energy consumption of the proposed process decreases to 2.440 MJ/kgCO₂, corresponding to an energy-saving rate of 44.6%. This study provides a valuable technical optimization scheme for industrial carbon capture systems.

Keywords: carbon capture; packing; aspen plus simulation; process optimization; heat pump

引 言

“双碳”战略是我国经济社会系统性绿色转型的顶层设计,是国家应对气候变化、推动绿色转型的核心国策。碳捕集、利用与封存(CCUS)是实现这一战略的“压舱石”,特别是高碳行业深度减排的关键兜底技术。碳捕集作为CCUS全链条的源头与前提,是捕集、运输、利用、封存四大环节中技术最复杂、成本占比最高、决定整个系统成败的核心环节。

在众多碳捕集技术中,化学吸收法因技术成熟度高、捕集效率好、适用范围广等优势,成为当前工业应用最广泛的CO₂捕集技术,尤其适用于燃煤电厂、钢铁、水泥等低浓度CO₂排放源^[1-3]。全球首个大型燃煤电厂碳捕集项目——加拿大边界大坝项目(Boundary Dam)即采用胺法吸收工艺,年捕集能力达100万吨^[4]。我国也在国能集团泰州电厂、华润电力海丰电厂等地建成多个化学吸收碳捕集示范项目,积累了丰富的工程经验^[5-6]。特别是2025年11月,全球规模最大的煤电碳捕集示范工程在华能甘肃正宁电厂正式投入运营。该示范工程采用化学吸收法,CO₂捕集规模150万吨/年,捕集率大于90%,CO₂纯度大于99.9 vol%^[7]。

然而,再生能耗高是制约化学吸收法商业化应用的瓶颈^[8]。以30 wt% MEA吸收剂为例,其再生能耗通常为3.5~4.5 GJ/tCO₂,不仅显著增加蒸汽消耗,还会造成发电效率下降和运行成本上升等问题^[9-10]。

针对这一难题,现有研究主要从三个方面展开:一是开发高性能吸收剂,如空间位阻胺、离子液体和相变吸收剂等,以改善反应性能并降低解吸热耗^[3,9-10];二是开发高效填料,强化气液传质,降低压降和设备尺寸,提升吸收/解吸设备与塔内件性能^[11-18];三是优化工艺流程,如采用富液分流^[19-20]、级间冷却^[21-24]、机械蒸汽再压缩(MVR)^[25-31]、热泵^[32-38]及其相互耦合^[31,39,40],以提升热能利用效率并降低外部能量需求。

其中,填料性能与工艺流程是影响系统能效的两个关键因素。吸收塔作为化学吸收法中实现气液接触和CO₂传质的核心设备,其填料结构直接关系到传质效率、压降、液体分布和操作稳定性。与传统散堆填料相比,规整填料通常具有更高的比表面积、更低的压降和更好的放大性能,已逐渐成为碳捕集吸收塔的主流选择^[14-17]。特别是,工艺流程优化通过重构系统内热量与物流分配,能够进一步降低再沸器负荷。例如,Krotki等^[39]通过中试实验验证了多段吸收进料、分流工艺与汽提塔内部加热等改进技术可显著降低胺法碳捕集过程的再生能耗,使再沸器热负荷降低约9%~11%。Yan等^[40]针对高浓度CO₂捕集过程提出了分段捕集节能工艺,并与机械蒸汽再压缩、级间冷却和分流解吸等技术耦合优化,实现了系统的CO₂捕集能耗降至2.60 MJ/kgCO₂,节能率达46.73%。本课题组前期在自主开发的撬装式化学吸收碳捕集装置上,以30 wt% MEA

为吸收剂,采用普通的鲍尔环填料,开展了富液分流、级间冷却及富液平行换热等节能工艺的实验研究与工艺优化。与未优化工艺相比,节能率为39.04%^[31]。自主开发的撬装式化学吸收碳捕集装置采用模块化设计,可实现100%工厂化预制和现场快速组装,具有集成度高、占地面积小、便于运输和转场等特点,多次用于山东、陕北榆林等地工厂的中试。上述研究结果表明,不同节能工艺之间存在显著的参数交互作用,仅依靠单变量分析难以获得全局最优方案。因此,多工艺耦合因有望实现优于单一技术叠加的协同节能效果,已成为低能耗碳捕集的重要研究前沿。

基于此,本文聚焦化学吸收碳捕集系统的低能耗工艺优化开展研究。以30 wt% MEA为吸收剂,结合实验筛选的高效规整填料,在撬装式化学吸收碳捕集装置中进行了CO₂吸收/解吸的实验研究,并在此基础上,利用Aspen软件进行模拟构建基准流程。在前期研究的基础上进一步考察不同填料类型对系统能耗的影响;系统分析MVR、热泵、级间冷却和烟气分流等工艺的单独作用及其耦合节能潜力,重点揭示关键操作参数之间的协同影响机制。本文旨在从“高效填料选择—节能工艺耦合—参数协同优化”三个层面,为撬装式化学吸收碳捕集系统的工程设计与工业应用提供理论依据和数据支撑。

1 实验与模型验证

1.1 实验装置与材料

本实验装置如图1所示,吸收塔与解吸塔采用相同的结构尺寸,均选用306不锈钢材质制造,塔体净高3 m,内径0.15 m。塔内均填充304不锈钢鲍尔环作为基础填料,鲍尔环填料公称直径为16 mm,填充高度为2.8 m,填料堆积密度约为 2.14×10^5 个/m³。塔径/填料直径比为9.4,该比值大于散堆填料的通用工程底限8,实验数据具有可靠的参考价值。

贫富液换热器选用316不锈钢板式换热器,设计换热面积为8 m²。鉴于MEA吸收剂具有一定的腐蚀性,富液泵与贫液泵均选用耐腐蚀性能优异的蠕动泵,以确保长期运行的稳定性。

贫液冷却器与解吸塔塔顶冷凝器均采用管壳式换热器,换热面积均为1.5 m²,以循环冷却水作为冷却介质。解吸塔底部塔釜配备电加热系统,通过

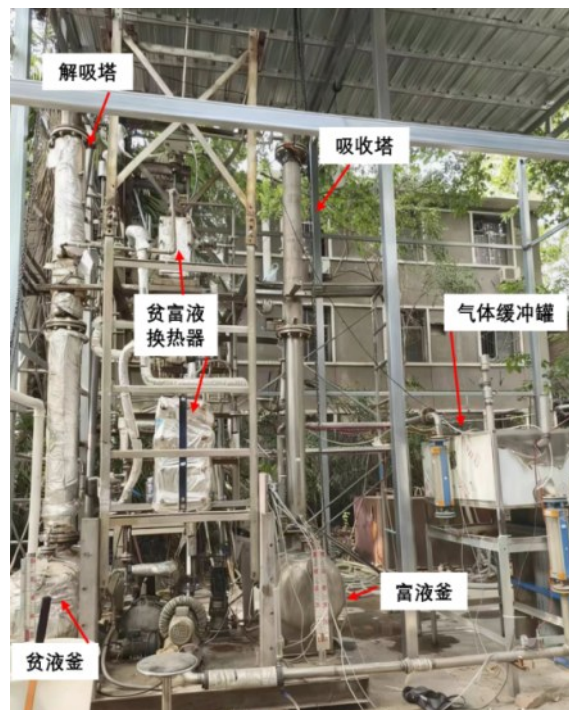


图1 撬装式化学吸收碳捕集装置

Fig. 1 Skid-mounted chemical absorption carbon capture unit

浸没式加热管对塔釜液进行加热,加热器最大功率为55 kW,并可通过调压器实现加热功率的精确调节。

此外,该系统配置了温度、流量与压力信号的实时采集模块,贫液冷却器冷却水流量可根据设定的贫液出口温度实现自动调节。具体的采集设备和精度如表1所示。

本实验所涉及的主要化学试剂详见表2。

1.2 实验流程与方法

本撬装式化学吸收碳捕集装置由吸收单元、再生单元、换热网络及溶剂循环单元等部分组成,其示意图见图2。这套装置的特点在于通过高度集成的工厂化预制,实现快速部署、质量可控与成本优化。设计大幅缩短了现场施工周期,降低了工程复杂性与投资风险;同时,紧凑的模块结构具有较强的场地适应性和可扩展性,便于在不同排放源进行示范、验证与规模化推广,为本技术的工程应用提供了灵活、高效且可靠的解决方案。

本撬装式化学吸收碳捕集装置的具体工作流程:

在吸收塔内,上升烟气与塔顶喷淋而下的吸收液进行逆流接触,CO₂被液相选择性吸收。负载CO₂的吸收液(称为富液)由塔底排出,依靠重力流至富液储罐,随后经富液泵增压输送至贫富液换热器。

表1 参数采集设备与精度

Table 1 Parameter acquisition equipment and accuracy

采集参数	设备	精度	厂商
吸收塔与解吸塔温度	TCP-400多路温度测录仪	±0.2%	慧谱仪器(中山)有限公司
液相压力	YB80 A精密数字压力表	0.4级	无锡浦光仪表有限公司
气相压力	YB80 A精密数字压力表	0.4级	无锡浦光仪表有限公司
气体浓度	Erantex 气体分析仪	0.01%	逸云天电子有限公司
气体流量	CMF9000 数显气体流量计	±1.5%FS	重庆安丰固自动化科技有限公司
液体流量	LWY 型智能涡轮流量	0.5级	山东洛克森自动化技术有限公司
压差	CHXIENS 压差表	0.1级	广州旭准工业设备有限公司

表2 实验所用主要化学试剂

Table 2 The main chemical reagents used in the experiment

名称	纯度	厂商
MEA	99.5 wt%	山东金悦源新材料有限公司
氢氧化钠标准液	0.1004 mol/L	广东福来生物科技有限公司
浓盐酸	12 mol/L	广东福来生物科技有限公司
酚酞	10 g/L	成都云鸿科技发展有限公司
甲基橙	1 g/L	成都云鸿科技发展有限公司
无水乙醇	1 mol/L	成都云鸿科技发展有限公司
硅胶	分析纯	环潮威鸿祥有限公司
CO ₂ 气体	99.89vol%	西安腾龙化工有限公司
N ₂ 气体	99.99vol%	西安腾龙化工有限公司
标准气	15.00vol% CO ₂ 、68.08vol% N ₂ 、16.92vol% O ₂	济宁协力特种气体限公司

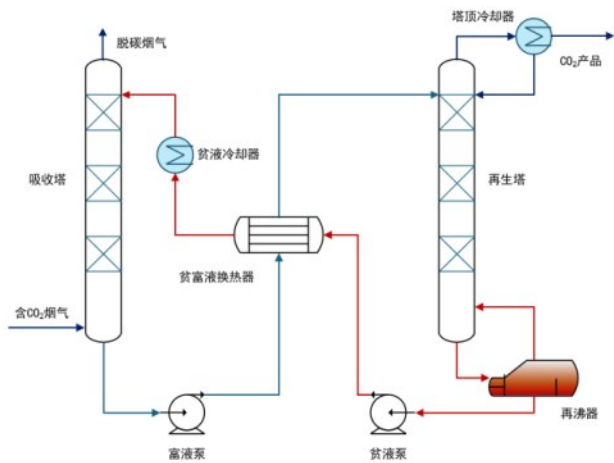


图2 撬装式化学吸收碳捕集流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of skid-mounted chemical absorption carbon capture process

在此处,富液被来自解吸塔底部的高温贫液(解吸后的吸收液)预热,之后由解吸塔顶部进入。

在解吸塔内,富液沿塔向下流动,与塔底再沸器产生的上升蒸汽逆流接触,发生解吸反应,CO₂从液相中解吸出来,随上升蒸汽从塔顶排出,先进入塔顶冷凝器进行冷却冷凝,随后进入气液分离罐进行分离。其中,冷凝下来的吸收剂与水的混合液相

由分离罐底部排出,并通过回流管线返回解吸塔顶部参与循环;不凝的CO₂气体则从分离罐顶部逸出,经流量计计量后放空。解吸后的贫液自解吸塔底排出,再经贫液泵增压输送至贫富液换热器。在换热器中,高温贫液与来自吸收塔的低温富液进行热交换,之后进入贫液冷却器进一步降温至40℃后由吸收塔顶部重新进入吸收塔,与塔底上升的模拟烟气再次进行逆流接触,实现吸收剂的循环利用。至此,吸收剂完成一次完整的“吸收-解吸”工艺循环。

实验采用空气与纯CO₂按特定体积比例混合,模拟典型燃煤电厂烟气CO₂的浓度15 vol %,实验过程中,保持模拟烟气的进料流量恒定为30 m³/h,通过调节吸收剂的循环流量来系统改变液气比(L/G),操作压力为常压。实验以90%碳捕集率为目标,考察不同操作条件下达到该捕集率所需的能耗。

1.3 系统能耗计算

在化学吸收法碳捕集系统中,再生能耗是评价工艺性能的核心指标,定义为解吸单位质量CO₂所需消耗的热量,单位为MJ/kgCO₂。

再生能耗主要由三部分构成:将富液加热至再

生温度所需的显热(Q_{sens})、 CO_2 解吸所需的反应热(Q_{reac})以及产生汽提蒸汽所需的汽化潜热(Q_{strip})^[41,42]。总再生能耗可表示为:

$$Q_{total} = Q_{sens} + Q_{reac} + Q_{strip} \quad \#(1)$$

各部分热量的计算公式如下:

(1) 显热

$$Q_{sens} = \frac{m_{rich} \times c_p \times (T_{reb} - T_{in})}{m_{\text{CO}_2}} \quad \#(2)$$

式中, m_{rich} 为富液质量流量(kg/h), c_p 为富液比热容(kJ/(kg·°C)), T_{reb} 为再生温度(°C), T_{in} 为富液进塔温度(°C), m_{CO_2} 为 CO_2 解吸速率(kg/h)。

(2) 反应热

$$Q_{reac} = \frac{\Delta H_{\text{CO}_2}}{M_c} \quad \#(3)$$

式中, ΔH_{CO_2} 为 CO_2 反应焓值, 单位 kJ/mol, M_c 为 CO_2 的气体摩尔质量, 单位为 g/mol。

(3) 汽化潜热

$$Q_{strip} = \frac{m_{steam} \times \Delta H_{vap}}{m_{\text{CO}_2}} \quad \#(4)$$

式中, m_{steam} 为汽提蒸汽流量(kg/h), ΔH_{vap} 为水的汽化潜热(kJ/kg)。

在 Aspen Plus 模拟中, 再生能耗可直接通过再沸器热负荷计算:

$$Q_{total} = \frac{Q_{reboiler} + Q_e}{m_{\text{CO}_2}} \times 3.6 \quad \#(5)$$

式中, $Q_{reboiler}$ 为再沸器负荷(kW), Q_e 为其他用电设备

2 填料性能的实验测试与模型构建验证

2.1 研究方法和技术路线

本研究采用“实验测定-模拟构建-相互验证”相结合的研究方法, 旨在高效、准确地评价填料性能并建立可靠的预测模型。具体的技术路线如图3所示。



图3 技术路线图

Fig. 3 Technical roadmap

首先, 在实验装置上, 对每种填料在基准液气比(L/G)工况下进行实验, 获取系统达到稳态时完整的物料与能量平衡数据(包括温度、压力、流量、浓度及再沸器负荷等)。基于上述基准实验数据, 利用 Aspen Plus 软件建立严格的稳态流程模拟模型。模型能准确反映系统的物流与能流结构, 并通过初步计算确保在基准点处能复现关键实验结果。

利用已构建的模型, 系统改变操作参数, 模拟

预测不同工况下的系统性能。随后, 开展相应的验证实验, 获取多组不同液气比下的实验数据, 并与模拟预测结果进行对比分析, 进而对模型中的关键传质参数进行拟合优化, 使模型的预测输出与全工况实验数据高度吻合, 从而获得一个经过高精度校核的、可靠的预测模型。此校核后的模型, 可作为后续全流程工艺优化的可靠计算工具。

本研究使用了湖北云发石化设备有限公司制

造的散堆鲍尔环、西安道特石化工程有限公司湖北分公司制造 250Y 规整填料和 XDC150S 新型导向板波纹规整填料等三种填料(如图4所示)。散堆鲍尔环填料的比表面积为 $362 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 、空隙率 $0.949 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。250Y 规整填料为金属孔板波纹结构,比表面积约 $250 \text{ m}^2/\text{m}^3$,波纹倾角 45° ,其交叉通道可促进气液横向混合,减少壁流与沟流,从而在较高通量下保持低压降和高传质效率。XDC150S 为新近开发的新

型导向板波纹规整填料,是在常规板波纹填料的基础上增设导向孔与三维交错流道:导向孔开口向上,对液体形成定向强制导流,促进局部再分布与界面更新;左右相邻列及上下两行导向孔相互错开,形成无重叠、有序交错的三维流道,有效抑制径向壁流与放大效应,优化流场结构,从结构层面保障传质界面持续更新与流动稳定性。



图4 三种填料的实物图

Fig. 4 Photographs of three types of packing

2.2 不同填料的性能对比实验研究

在相同的实验策略(调节再沸器功率将 CO_2 捕集率控制在 90%)和相同的填料装填高度下,对常

用的散堆鲍尔环填料、常用的 250Y 规整填料以及新型规整填料 XDC150S 进行了实验测试,并将三者进行了对比分析,实验结果如图5和图6所示。

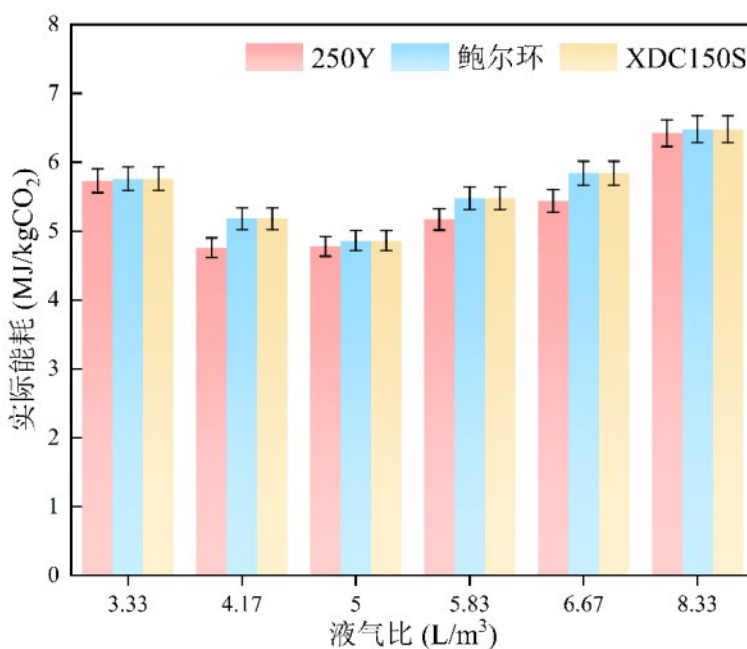


图5 三种填料的再生能耗随液气比的变化

Fig. 5 Variation of regeneration energy consumption with liquid-gas ratio for three types of packing

由图5、6分别可见,三种填料的最低再生能耗由高到低依次为:鲍尔环(4.86 MJ/kgCO_2)> 250Y 规整填料(4.76 MJ/kgCO_2)> XDC150S 新型规整填料

(4.63 MJ/kgCO_2),其中 250Y 和 XDC150S 较鲍尔环分别降低约 2.1% 和 4.7%,证实了高效规整填料的节能优势;压降由高到低同样为鲍尔环(182.56 Pa/

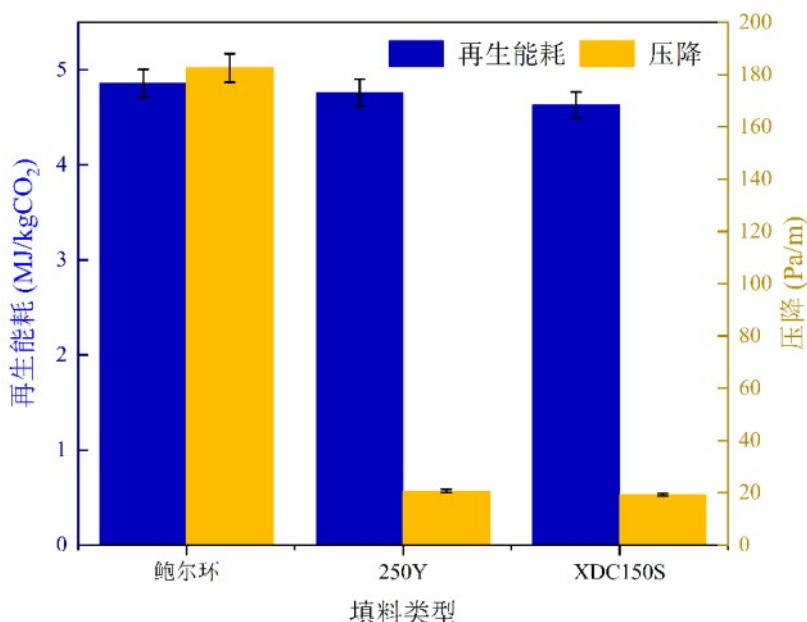


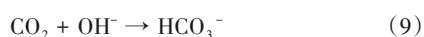
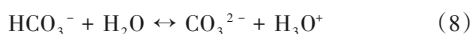
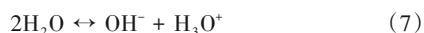
图6 三种填料在最优性能点下的能耗与压降对比图

Fig. 6 Comparison of energy consumption and pressure drop of three types of packing at the optimal performance point

m)>250Y(20.66 Pa/m)>XDC150S(19.24 Pa/m),低压降意味着更低的鼓风机能耗、更宽的操作窗口及小型化设计潜力。综合考虑XDC150S新型规整填料的最低再生能耗与极低压降带来的运行优势,选定其及对应最优操作点(L/G=5.00 L/m³)作为后续工艺模拟与优化的基础。

2.3 基于Aspen Plus的流程模型构建与模型校核

2.3.1 模拟模型构建与参数设置 针对MEA-H₂O-CO₂强非理想电解质体系,本文采用ELECNRTL物性方法。该模型通过耦合长程离子相互作用与短程局部组成作用,可精准计算体系内MEA⁺、MEACOO⁻、HCO₃⁻、CO₃²⁻等离子平衡、气液相平衡及热力学参数,能够准确表征胺法CO₂化学吸收过程的热力学特性,是保障模拟物料平衡与能量平衡精度的核心基础。相关反应方程如式(6)~(12)所示。



本文基于膜理论,采用速率法建模,分别建立气、液两相的质量平衡与能量平衡方程,耦合化学反应动力学与组分扩散过程,同时考虑体系非理想性及塔内传质、传热阻力。模型引入持液量、压降、

比相界面积、传质系数等流体动力学关联式,充分纳入塔内流体力学效应,相比传统平衡模型更贴合实际工况,预测精度更高^[43,44]。各核心单元模块配置如下:

吸收塔与再生塔:均采用RadFrac严格多级分离模块。吸收塔设置两段填料结构,预留后续工艺优化接口;再生塔配套塔顶冷凝器,蒸汽冷凝后回流塔内,不凝的高浓度CO₂作为产品采出。

贫富液换热器:采用HeatX模块并启用严格计算模式,依据换热面积与传热系数核算换热效率,精准模拟板式换热器的热量回收过程。

流体输送设备:贫富液泵选用Pump模块,循环风机选用Compr模块,匹配实际输送工况。

冷却单元:贫液冷却器与再生塔顶冷凝器均采用Heater模块。贫液冷却器设于吸收塔进料前端,设定出口温度40℃,以水为冷却介质,自动核算冷却热负荷;再生塔顶冷凝器设定液体出口温度30℃,冷凝回收塔顶水蒸气,热负荷由模型直接输出。

辅助单元:通过Mixer与FSplit模块完成工艺流的混合与分流。

各模型具体输入参数如表3所示。

为复现实验中CO₂捕集率的主动调控逻辑,本文在模型中加入设计规定对关键参数进行闭环控制:以净化气中CO₂浓度为被控变量,对应90 vol% CO₂捕集率为控制目标,选取再生塔再沸器热负荷

表3 模型关键输入参数

Table 3 Key input parameters of the mode

参数类别	参数名称	数值与来源 / 参数设置	备注
固定输入参数 (依据装置)	吸收塔内径	0.15 m	装置实际尺寸
	吸收塔填料段总高	3.0 m	分为上下两段,上段 1.28m,下段 1.72m
	再生塔内径	0.15 m	装置实际尺寸
	再生塔填料段高度	3.0m	装置实际尺寸
	烟气流量	30 Nm ³ /h	实验设定
基准工况输入参数 (依据实验数据)	烟气 CO ₂ 浓度	15 vol%	实验配气浓度
	贫液循环量	100~250 L/h	实验设定
	贫液 MEA 浓度	30 wt%	实验配制浓度
	贫液进塔温度	40 °C	实验控制值
校准 / 设定参数	换热器参数	根据基准工况物流温位数据校准	确保换热匹配实验
	贫液冷却器	出口温度设定为 40 °C	模拟实际控制
	蒸汽冷凝器	出口温度设定为 30 °C	模拟实际冷却效果

为操纵变量。模型可通过自动迭代、动态调整再沸器热负荷,使出口气体中 CO₂ 浓度稳定达到设定目标,同步输出对应工况下的再生能耗,完全匹配

实际实验的调控逻辑与操作机制。模拟流程图见图7。

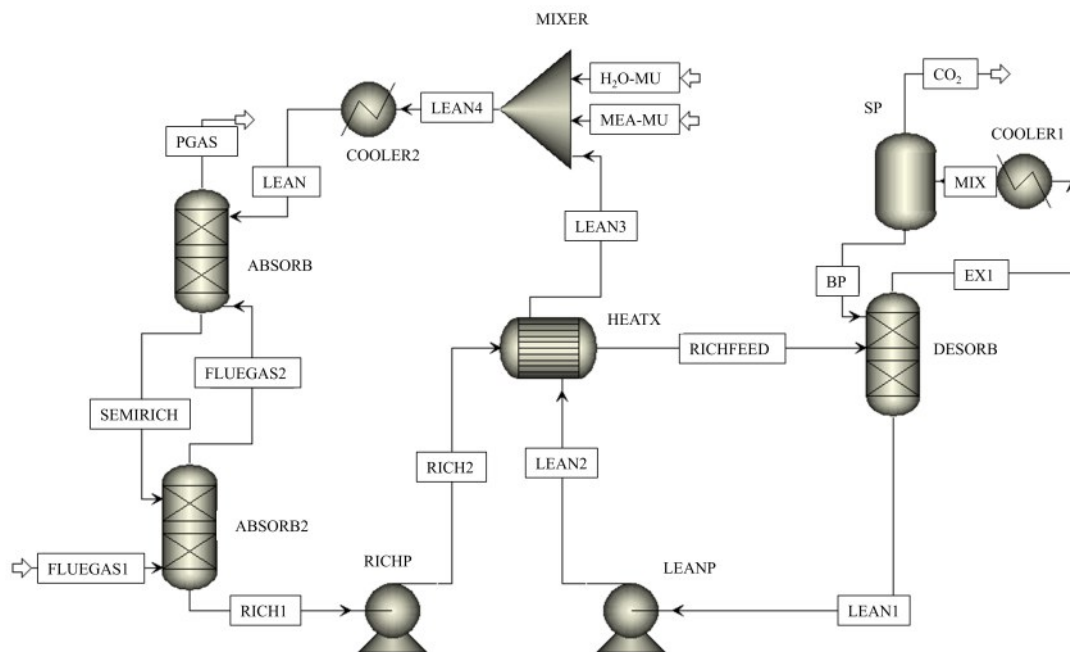


图7 撬装式化学吸收碳捕集工艺 Aspen 模拟流程图

Fig. 7 Aspen simulation flowchart of skid-mounted chemical absorption carbon capture process

2.3.2 模型预测性能的量化评估 为客观、全面地评价校准后模型的预测精度,本研究采用以下三个统计指标对再生能耗(MJ/kg CO₂)的预测误差进行分析:

1. 平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE): 计算所有工况下模拟值与实验值之差的绝对值的平均值。它反映预测误差的平均幅度,单位与原始

数据相同,直观易懂。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_{i, \text{sim}} - y_{i, \text{exp}}| \quad (13)$$

其中, n 为数据点数量, $y_{i, \text{sim}}$ 和 $y_{i, \text{exp}}$ 分别为第 i 个工况的模拟值与实验值。

2. 均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE): 计算预测误差平方和的平均值的平方根。由于平方项放大了较大误差的影响, $RMSE$ 对预测中的异

常值(过大或过小的误差)更为敏感,能更好地揭示模型预测的稳定性。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{i,exp} - y_{i,sim})^2} \quad \#(14)$$

3. 决定系数 (Coefficient of Determination, R^2): 衡量模型预测值与实验值之间的线性相关程度, 表征模型对数据变化趋势的解释能力。其值越接近 1, 说明模拟曲线与实验数据点的趋势吻合度越高。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{i,exp} - y_{i,sim})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{i,exp} - \bar{y}_{exp})^2} \quad \#(15)$$

其中, $\bar{y}_{exp}$ 为实验值的平均值。

2.3.3 基于鲍尔环填料的多参数模型验证 如图 8 所示, 为全面评估所建模型对碳捕集系统关键工艺参数的预测能力, 首先对吸收塔轴向温度分布、富液 CO_2 担载量及塔顶出口 CO_2 浓度三个关键参数进

行了实验与模拟对比验证。所选验证填料为鲍尔环。

由图 8(a)可见, 模型能够较好地捕捉吸收塔内温度沿程变化的整体趋势, 在距塔顶约 0.7 m 处温度随 CO_2 吸收反应的放热而迅速上升至峰值, 随后因传质推动力减弱而趋于平缓, 模型预测值与实验值在各高度节点上的偏差均在 5°C 以内。图 8(b)表明, 模型对富液 CO_2 担载量的预测值与实验值在不同液气比下均吻合良好, 准确反映了担载量随液气比增加而逐渐降低的操作规律。图 8(c)显示, 模型对吸收塔塔顶出口 CO_2 浓度的预测在各液气比下均与实验值保持较好的一致性。综合上述三种参数的验证结果表明, 模型的基本假设与物性方法选取合理, 为后续其它填料的相关参数的模型预测奠定了可靠基础。

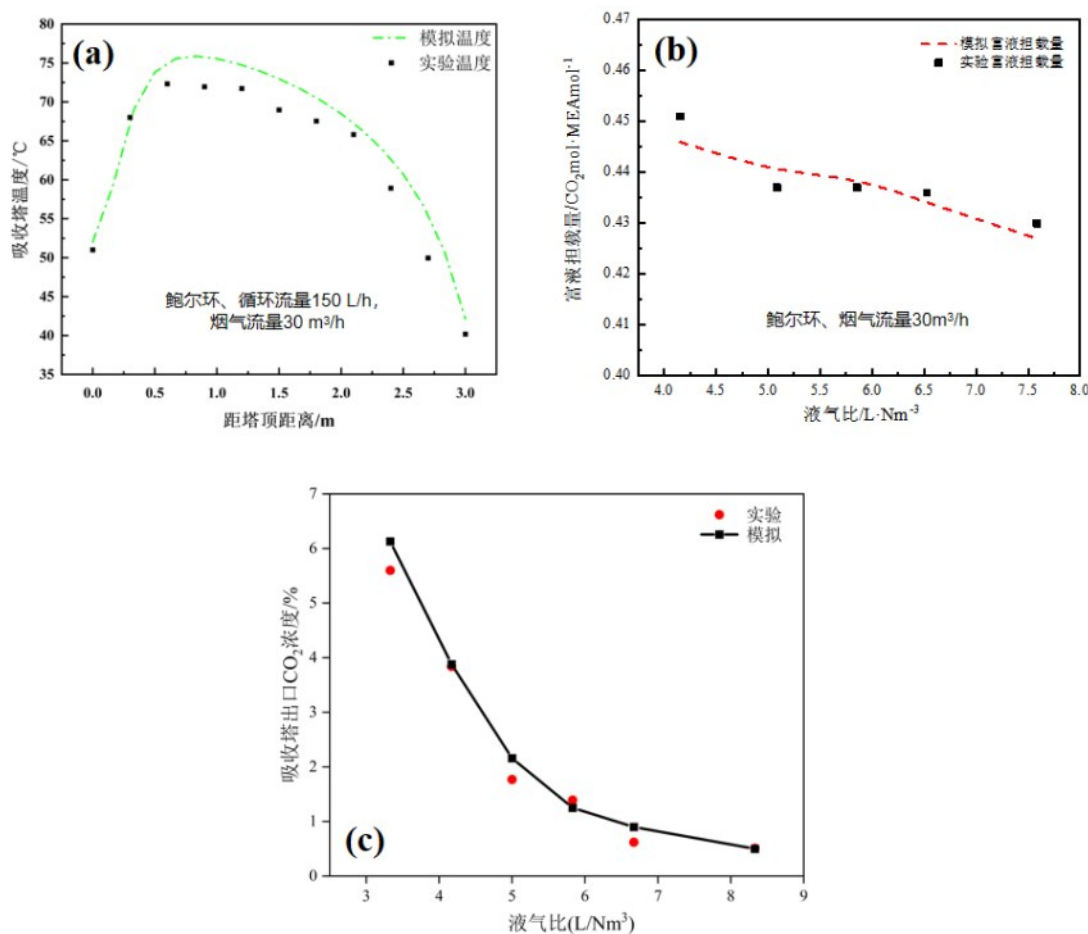


图8 吸收塔关键工艺参数实验与模拟对比

Fig. 8 Comparison of experimental and simulated key process parameters in the absorber

2.3.4 不同填料下捕集率与再生能耗对比分析如图9所示,模拟捕集率被严格控制在89.4%附近的一个极窄范围内,反映了模型设计规定的理想化目标;而实验捕集率则围绕90%目标呈现更明显的波动(87.96%~93.97%)。这一差异主要源于三个方面的因素:其一,模型的设计规定可实现理想的瞬时精确控制,而实验中的电加热功率调节存在固有滞后性,导致控制精度受限;其二,实验中流量、温度及气体分析仪等仪表的瞬时读数波动会传递至捕集率计算值,引入随机测量误差;其三,尽管在绝对数值上存在一定偏移,但模型预测的捕集率在宽泛的液气比范围内保持稳定的特性与实验结果趋势一致,表明模型能够合理反映系统的运行规律与变化趋势。

如图9与表4所示,模型在校准后对能耗的预测达到了很高的精度。模型预测的能耗曲线与实验数据点高度吻合,决定系数 R^2 均大于0.99,表明模型精准捕捉并复现了能耗随液气比变化的“U型曲线”趋势;同时,模型准确预测了各填料最低能耗点出现的液气比位置,平均绝对误差MAE值均低于0.15 MJ/kgCO₂(相对误差约<3%),均方根误差RMSE值略高于MAE但仍在同一量级,表明平均预测偏差很小且数据中不存在极端离群点,模型预测稳定可靠。

综合精度评估:如表4所示,对于XDC150S和250Y填料,MAE和RMSE极低(~0.05 MJ/kgCO₂), R^2 接近1,证明预测精度极高。对于鲍尔环,MAE和RMSE略高, R^2 稍低,但仍属良好,其误差略增可能与散堆填料在较高液气比下流场更为复杂、模拟中采用的均一化传质参数简化有关。

经过校准和验证,建立的Aspen Plus模型在多个方面都表现出良好的准确性和可靠性。首先,校准后的模型能够很好地预测为达到目标捕集率所需的再生能耗,预测误差在工程分析和工艺优化可以接受的范围内。其次,模型对不同填料传质性能的判断能力也得到了验证,它预测的能耗值准确反映了三种填料的性能优劣顺序:XDC150S>250Y>鲍尔环,这与实验结果完全吻合。因此,该模型已经成为一个可靠的模拟平台,可以用来高效、低成本地研究操作参数调整和流程改变对系统性能的影响,为后续工艺优化研究打下了坚实的基础。

2.3.5 两种规整填料模拟能耗差异的统计学检验为定量评估XDC150S与250Y两种规整填料在不同

循环流量下模拟能耗差异的显著性,采用配对样本t检验进行分析。配对设计可消除循环流量这一主要变异来源的干扰,更灵敏地检测填料类型对能耗的影响。各工况下两种填料的模拟能耗及差值如表5所示。

分析结果表明,在所有考察的循环流量工况下,XDC150S的模拟能耗均低于250Y,平均差值为0.063 MJ/kg CO₂,差值范围为0.01~0.11 MJ/kg。配对样本t检验的统计量为 $t=4.46$ (自由度 $df=5$),对应的p值为0.0066($p<0.01$),表明两种填料的模拟能耗差异具有显著统计学意义。

3 基于高效填料的工艺优化模拟与耦合研究

3.1 关键操作参数的灵敏度分析与优化

为系统探寻降低再生能耗的工艺路径,对贫富液换热器最小温差($\Delta T_{\min}$)及吸收塔贫液进口温度(T_{lean})这两个关键操作参数进行全面的灵敏度分析。这些分析均基于前述确定的基础模型展开,旨在独立、清晰地揭示每个参数在不同操作负荷下的影响规律,并最终通过综合比较确定全局最优参数组合。分析结果如表6和表7所示。

在优化过程中,再生能耗随换热器窄点温差 $\Delta T_{\min}$ 的减小而降低,同时随贫液进口温度 T_{lean} 的降低而降低,前者通过提升热回收率减少再沸器负荷,后者通过增强CO₂吸收推动力降低对贫液再生深度的要求。然而, $\Delta T_{\min}$ 过小会导致换热面积急剧增加、设备投资不经济,而 T_{lean} 过低则受冷却介质温度与传热温差限制。综合节能效果与工程可行性,选择 $\Delta T_{\min}=15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (对应换热面积约0.53 m²)和 $T_{\text{lean}}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (冷却水可实现)作为基准。在此基准下,循环流量150 L/h时系统取得最优再生能耗;任一固定 $\Delta T_{\min}$ 或 T_{lean} 条件下,能耗均随流量呈现先降后升的U型趋势,印证了最优液气比的存在。

3.2 烟气分流工艺:分流比优化及节能效果分析

烟气分流是一种通过优化吸收塔内温度分布来增强CO₂吸收效果、提高富液担载量,从而降低解吸能耗的工艺。该工艺的核心在于,将原始烟气分成两股:一股仍从吸收塔最底部进入,以维持塔底必需的传质推动力;另一股则从吸收塔中部的某个理论板处引入,如图10所示。通过调整分流比(进入中部的烟气占总烟气的比例)与中部进料位置,

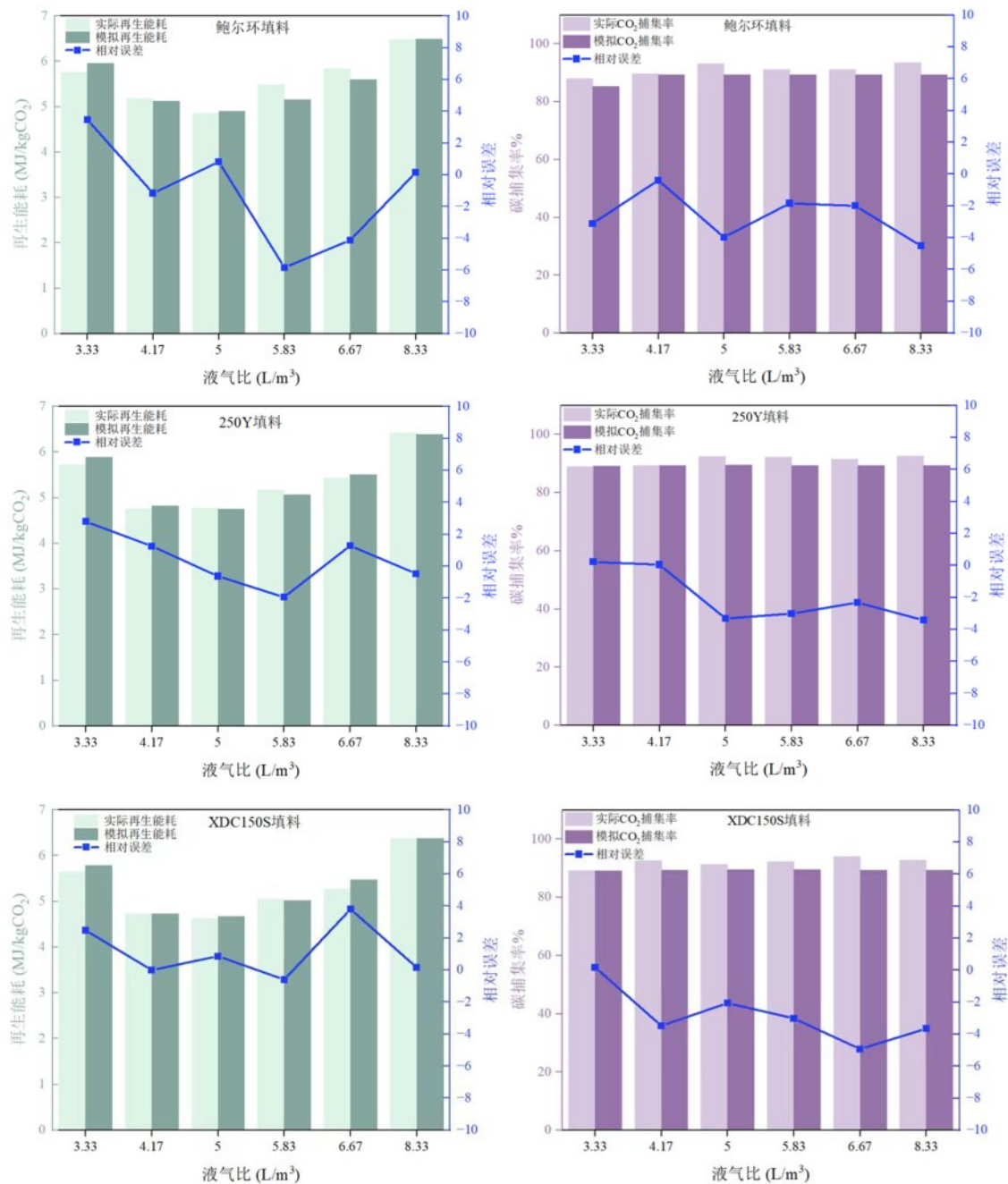


图9 使用不同填料的再生能耗、CO₂捕集率的实验值与模拟值对比

Fig. 9 Comparison of experimental and simulation values for regeneration energy consumption and CO₂ capture efficiency using different packings

表4 能耗预测误差统计分析				
Table 4 Statistical analysis of energy consumption prediction errors				
填料类型	平均绝对误差 (MAE)	均方根误差 (RMSE)	决定系数 (R ²)	精度评价
XDC150S	0.05 MJ/kg	0.07 MJ/kg	0.997	预测精度极高
250Y	0.04 MJ/kg	0.05 MJ/kg	0.999	预测精度极高
鲍尔环	0.15 MJ/kg	0.20 MJ/kg	0.992	预测精度良好

可以主动调控塔内放热反应区域的分布,缓解传统单点进料造成的塔底温度过高问题,使全塔温度曲线更趋平缓、更接近理想吸收温度,最终降低为达到相同捕集率所需的溶液再生能耗。

为系统评估烟气分流的作用,基于基准模型(能耗4.408 MJ/kgCO₂),在化工模拟软件中建立了烟气分流流程,并利用灵敏度分析工具对分流比(0.1~0.9)和进料位置(从塔顶第1~24块理论板)进

表5 两种填料在各循环流量下的模拟能耗差值

Table 5 Difference in simulated energy consumption between the two fillers at various cycle flow rates

循环流量(L/h)	XDC150S 能耗 (MJ/kg CO ₂)	250Y 能耗 (MJ/kg CO ₂)	差值 (MJ/kg CO ₂)
100	5.78	5.89	0.11
125	4.73	4.82	0.09
150	4.67	4.75	0.08
175	5.02	5.07	0.05
200	5.47	5.51	0.04
250	6.38	6.39	0.01

表6 不同循环流量与换热器温差下的再生能耗 (MJ/kgCO₂)Table 6 Regeneration energy consumption (MJ/kg CO₂) under different circulating flow rates and heat exchanger temperature differences

循环流量(L/h)	换热器温差/°C		
	20	15	10
100	5.926	5.869	5.796
125	4.664	4.615	4.542
150	4.533	4.506	4.436
175	4.892	4.856	4.829
200	5.364	5.324	5.295
250	6.233	6.179	6.140

行了全参数空间的模拟寻优,结果如图11所示。

模拟优化结果表明,烟气分流工艺存在明确的全局最优操作点:当分流比为0.8、进料位置为下吸

表7 不同循环流量与贫液进口温度下的再生能耗 (MJ/kgCO₂)Table 7 Regeneration energy consumption (MJ/kgCO₂) under different circulating flow rates and lean solution inlet temperatures

循环流量 (L/h)	进吸收塔贫液温度/°C				
	30	35	40	45	50
100	5.963	5.996	6.028	6.059	6.092
125	5.736	5.769	5.801	5.832	5.865
150	4.602	4.632	4.646	4.660	4.675
175	4.965	4.993	5.017	5.038	5.060
200	5.359	5.446	5.496	5.533	5.566
250	6.542	6.465	6.412	6.480	6.564

收塔第2块理论板时,系统再生能耗最低可达4.210 MJ/kgCO₂,较基准模型降低4.5%。在优化规律上,对于任意固定进料位置,能耗随分流比增大呈先降后升趋势,最优分流比区间为0.7~0.8;适度分流可有效平抑塔底温峰,但分流过大会过度稀释塔底CO₂浓度,导致吸收推动力不足。对于任意固定分流比,能耗随进料位置下移亦呈先降后升趋势,最佳进料区域位于塔中上部(约第1~10块理论板),在此区域进料可将低温烟气精准注入反应放热核心区,实现最佳温度调控。综合而言,烟气分流是一种高效、低成本的节能工艺,其优化方案不仅验证了通过流程内部调控温度场降低能耗的可行性,也为后续与其他节能工艺的耦合奠定了坚实基础。

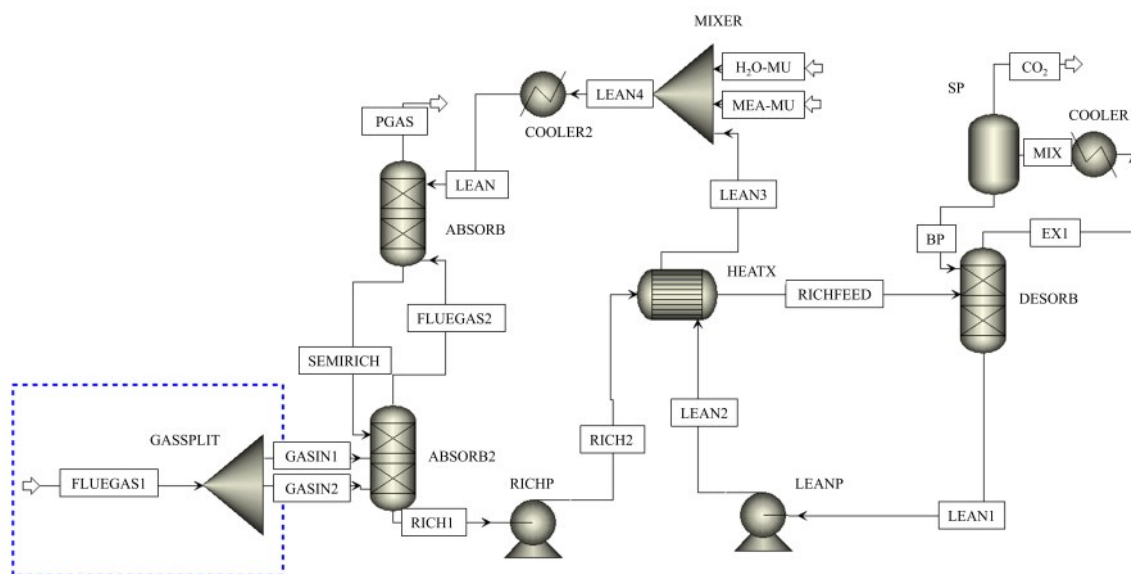


图10 烟气分流工艺流程模拟图

Fig. 10 Simulation flow diagram of the flue gas splitting process

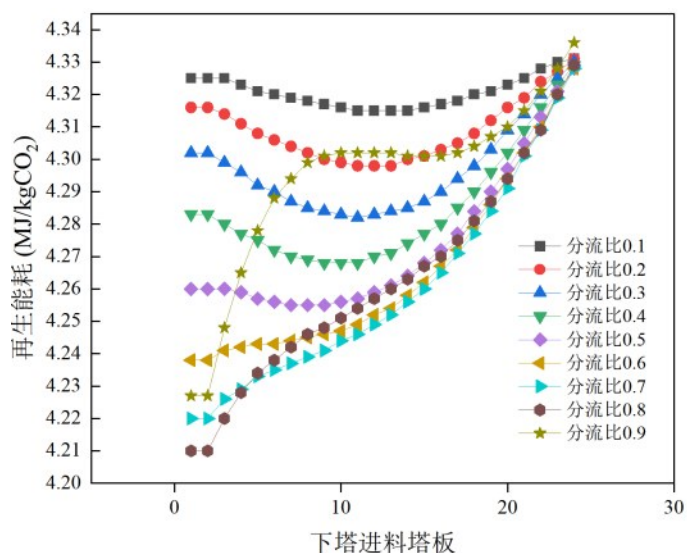


图 11 分流比及进料位置对再生能耗的协同影响

Fig. 11 Synergistic effect of split ratio and feed location on regeneration energy consumption

3.3 吸收塔级间冷却工艺的模拟与优化

级间冷却工艺是一种通过在吸收塔中部设置取热侧线,主动移走集中反应热,从而优化塔内温度分布、强化传质过程的节能技术。其核心流程如图 12 所示,从吸收塔特定位置抽出液相物流,通过

外部冷却器将其冷却至设定温度后,再返回至塔内。本节基于参数优化后的基准模型,系统研究了该工艺的取热位置、冷却温度及其对全塔温度场与系统能耗的影响,并对优化机理进行了深入分析。

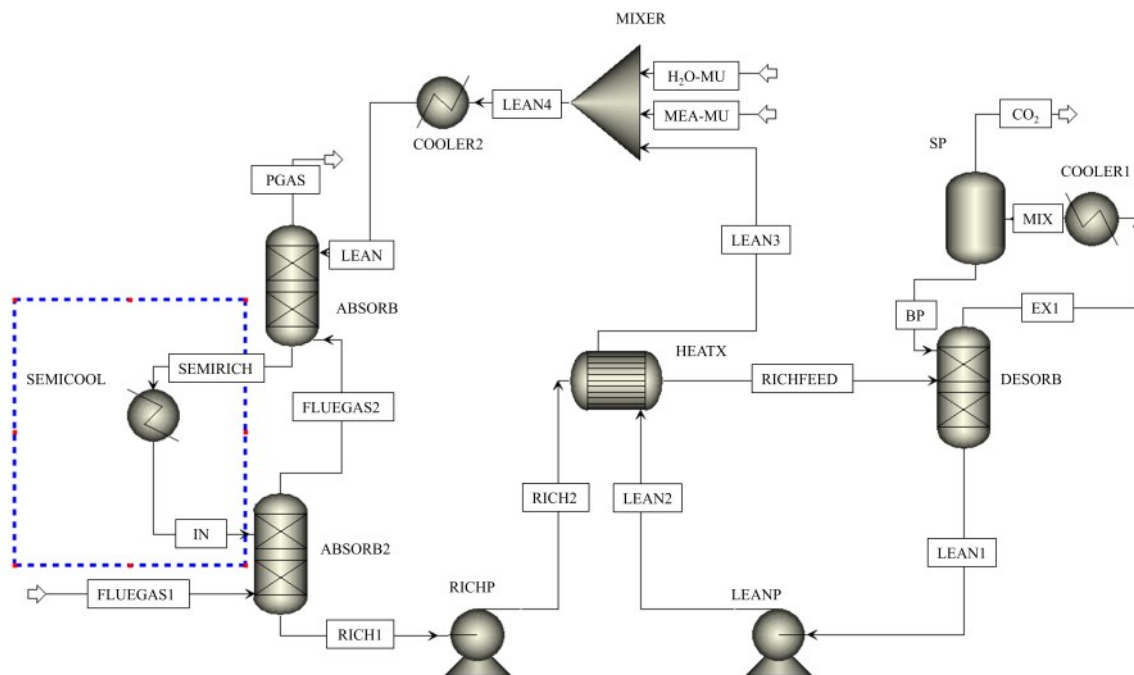


图 12 级间冷却工艺流程模拟图

Fig. 12 Simulated process flow diagram of the inter-stage cooling process

确定级间冷却的最优取热位置,首先对基准模型(能耗 4.408 MJ/kg)进行温度剖面分析,发现在距塔底约 1.28 m 处出现最高温度 77.13°C,如图 13 所

示。此峰值是反应放热与移热不平衡的结果,高温会降低 CO₂ 溶解度并加速溶剂降解。在此位置设置级间冷却后,对冷却终温(35°C~70°C)进行优化,结

果表明再生能耗随冷却温度降低呈先降后升趋势, 40°C 时达最低值 4.165 MJ/kgCO₂ (较基准降低 5.5%), 如图 14 所示。进一步降温会导致能耗回升, 原因是反应速率可能减慢且操作稳定性变差。图 12 的温度分布对比显示, 优化工况在取热点处降温近 20°C, 全塔温度更有利于 CO₂ 吸收, 从而提升了吸收效率。

3.4 MVR 工艺的模拟与优化

MVR 工艺是一种通过回收低品位热, 并将其提

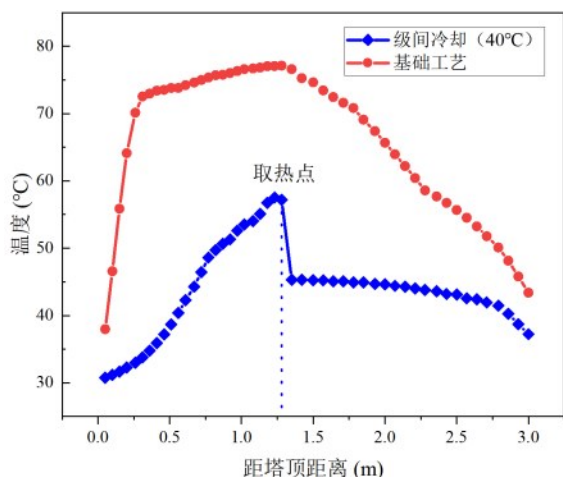


图 13 级间冷却前后塔内温度分布

Fig. 13 Temperature distribution in the absorption column before and after interstage cooling

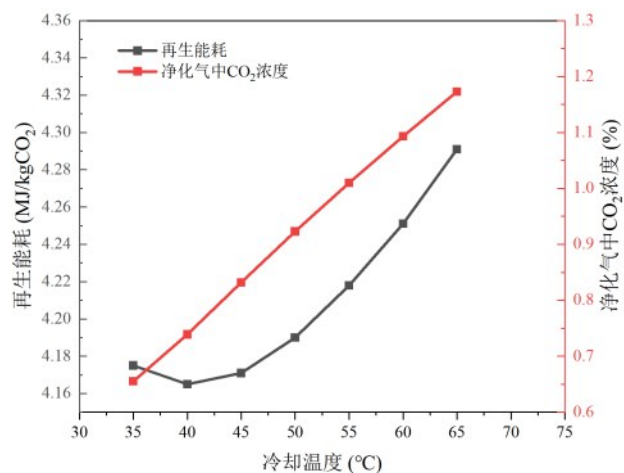


图 14 再生能耗及出口 CO₂ 浓度随冷却温度的变化

Fig. 14 Variation of regeneration energy consumption and outlet CO₂ concentration with cooling temperature

升品位后回用, 从而大幅降低过程热耗的节能技术。本节将其应用于碳捕集系统, 旨在回收再生塔出口贫液所携带的显热与潜热, 通过能量品位的提升实现系统再生能耗的降低。MVR 工艺的核心在于利用电能驱动压缩机做功, 将低温低压蒸汽压缩至更高的温度和压力, 使其热焓得以在过程中重新利用。在本研究中, 针对 MEA 碳捕集工艺特性, 设计了如图 15 所示的集成流程。

如图 16 所示, MVR 工艺中, 再沸器负荷随闪蒸

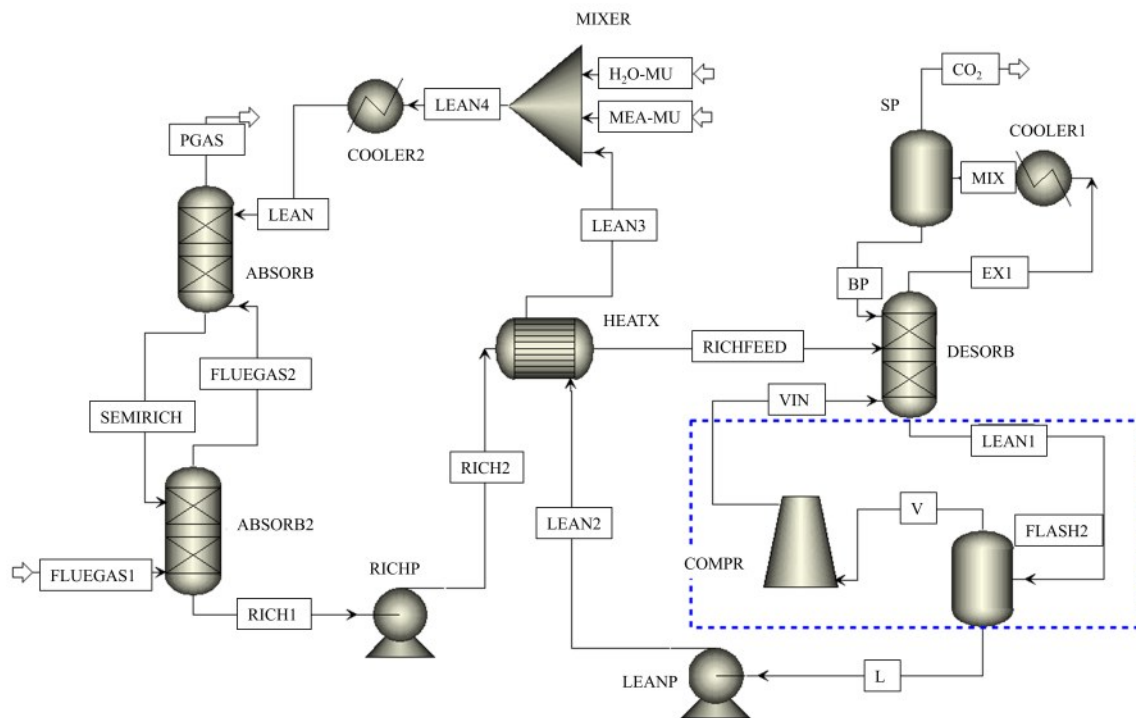


图 15 MVR 工艺流程模拟图

Fig. 15 Simulated process flow diagram of the MVR process

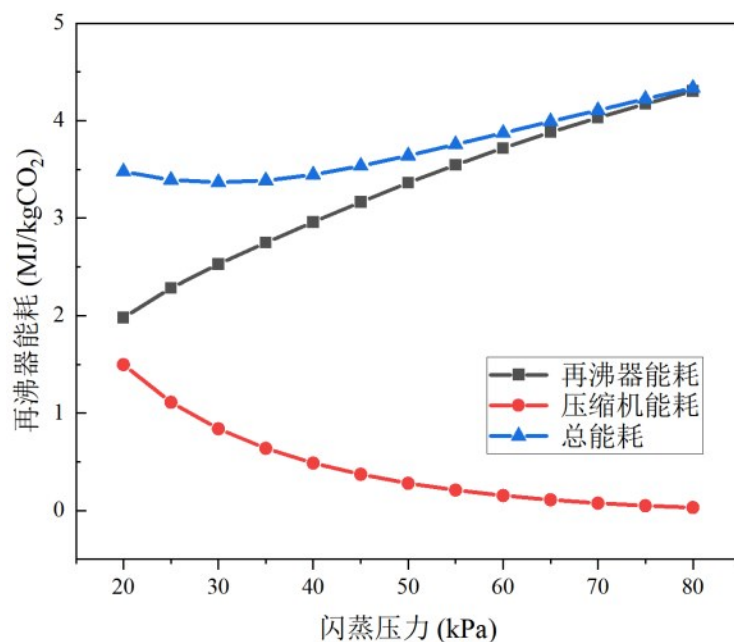


图 16 MVR工艺能耗构成随闪蒸压力的变化

Fig. 16 Variation in energy consumption breakdown of the MVR process with flash pressure

压力升高而单调递增,压缩机负荷则单调递减,两者权衡使系统总能耗呈先降后升的U型曲线。在闪蒸压力 30 kPa 时达到最佳平衡点,总能耗最低为 3.368 MJ/kgCO₂,较基准模型降低 23.6%,节能效果显著。

3.5 压缩式热泵工艺的模拟与工质优选

在探索了内部流程改造与蒸汽直接再压缩路径后,本节转向基于逆卡诺循环的外部能量提升技

术——压缩式热泵工艺。该工艺的核心机理在于通过输入少量高品位电能,将低温热源的热量送至更高温位,工艺流程如图 17 所示。在本研究中,低温热源来自解吸塔塔顶蒸汽冷凝释放的大量潜热,利用压缩式热泵将这部分热量回收,经品位提升后重新用作塔底再沸器的供热,从而实现系统内部热量的循环利用,减少外部能源的输入。

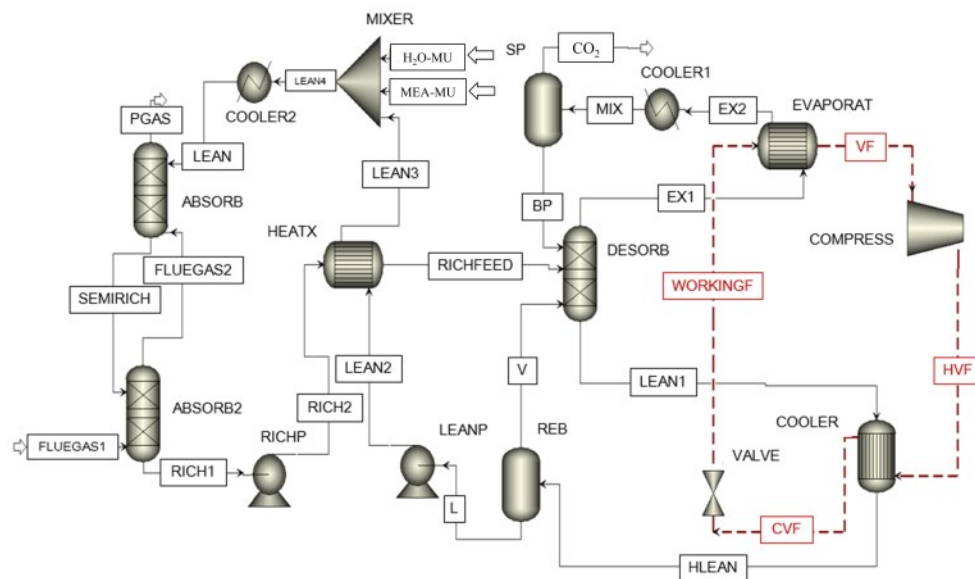


图 17 集成热泵的碳捕集系统工艺流程模拟图

Fig. 17 Simulated process flow diagram of the carbon capture system with integrated heat pump

热泵工质的选择是决定该工艺成败与效能的核心,需兼顾环保性(ODP、GWP)、热力学匹配性(临界温度高于冷凝温度、饱和压力适中)及安全性等因素。基于上述标准,本研究初选了 R600、

R123、R141b、R245ca、R245fa 及 R1233zd(E)六种代表性工质,其热物性与环保参数如表 8 所示。通过 Aspen Plus 计算获得各工质的饱和蒸汽压随温度的变化趋势,如图 18 所示。

表 8 候选热泵工质热物性与环保参数表

工质	CAS	标准沸点/℃	临界温度/℃	临界压力/Mpa	ODP	GWP
R600	106-97-8	-0.5	152	3.8	0	20
R123	306-83-2	17.82	183.68	3.66	0.02	90
R141b	1717-00-6	32.05	204.35	4.21	0.086	700
R245ca	679-86-7	25.13	174.4	3.93	0	720
R245fa	460-73-1	15.14	154	3.65	0	820
R1233zd(E)	102687-65-0	19	165.6	3.57	0	1

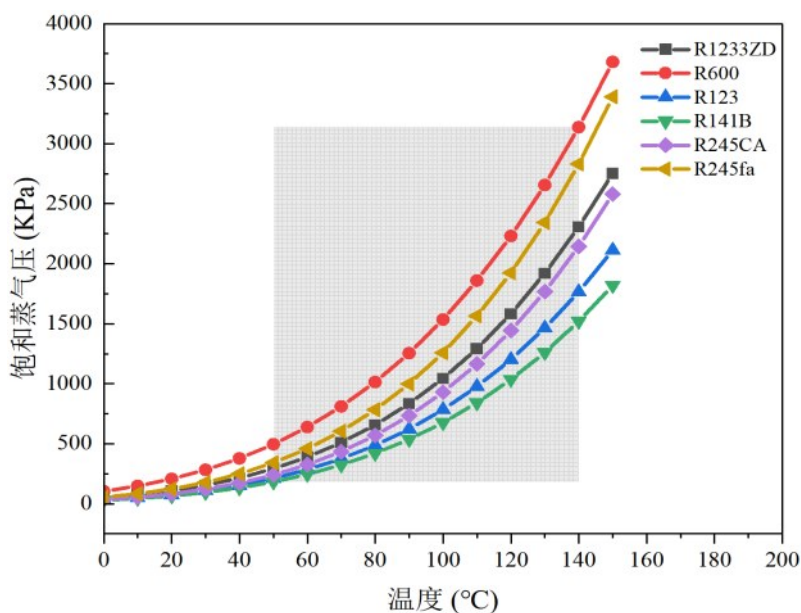


图 18 候选工质饱和蒸汽压-温度曲线

Fig. 18 Saturation vapor pressure versus temperature curves for candidate working fluids

为评估热泵集成工艺的能效,本研究采用两个核心指标:系统总再生能耗与热泵性能系数(Coefficient of Performance, COP)。

COP是衡量热泵系统能量转换效率的核心指标,定义为系统制热量与输入功的比值。在本研究的模拟中,COP通过以下公式计算:

$$COP = \frac{Q_{cond}}{W_{comp}} \quad (16)$$

式中, Q_{cond} 为工质在冷凝器的放热量(即热泵制热功率, kW·h), W_{comp} 为压缩机消耗的轴功率(kW·h)。COP值越高,表明电能转化为可用热能的效率越高。

系统总再生能耗是衡量集成工艺经济性的综

合指标,它包含了热泵的电耗和再沸器的补充热耗。其计算公式为:

$$E_{total} = \frac{W_{comp} + Q_{reboiler}}{m_{CO_2}} \times 3.6 \quad (17)$$

式中, E_{total} 为系统总再生能耗(MJ/kgCO₂), $Q_{reboiler}$ 为再沸器热负荷(kW·h), m_{CO_2} 为解吸出的二氧化碳质量(kg/h)。该指标用于与基准工艺(4.408 MJ/kgCO₂)进行直接对比,以计算节能率。

在本研究的模型框架下,对六种工质的系统性能分别进行了模拟与分析。图 19 展示了各工质的压缩比、供热温度和 COP 之间的关系。

压缩比是主要的调节变量,它的变化会同时影响供热温度、系统 COP 和对外供热量,三者共同作

用决定系统的能耗表现。首先,所有工质的供热温度均随压缩比升高而近似线性上升,这是由压缩过程的基本热力学原理决定的,即对工质做功提升其压力和焓值,最终体现为冷凝温度的升高。其次,系统COP值则随着压缩比增加呈现一致的单调下降趋势,其内在机理是:压缩机功耗随压缩比呈超线性增长,而对外供热量的增长相对缓慢,导致COP持续降低。

不同工质因热力学性质的差异,性能变化幅度各不相同。对比供热量数据,R245ca在压缩比4.6时即可提供3.61 kW的热量,而R123在相同压缩比下仅提供2.54 kW,表明R245ca的携热能力更强,这是其实现更低系统能耗的根本原因。值得注意的是,R141b在相对较低的压缩比(4.4)下即能达到114.86°C的供热温度,且其COP值普遍高于其他工质,但其最终系统能耗并非最低,说明高COP与低系统能耗在复杂集成系统中并不总是等同,还需考虑与碳捕集流程的热匹配度。此外,R1233zd(E)与R245ca的数据曲线表明,在达到满足工艺要求的供热温度(107°C)后,继续增加压缩比对供热量的提升效益逐渐减弱,而对COP的损害效应持续存在,从热力学角度证实了最优操作点存在的必然性。通过上述性能曲线可以确定各工质的最优操作区间,也能解释不同工质最终能耗差异的原因。以R245ca为例,该工质在较低的压缩比下就能提供充足的热负荷,此时热泵COP仍维持在较高水平,从而在满足再生需求的同时避免了因压缩比过高带来的能耗增加。

由图20可知,各工质在最佳工况下的节能效果差异明显,取决于工质热力学性质与系统温升需求的匹配程度。单从能耗角度而言,R245ca热力学性能最优,但综合考虑环保性、安全性(不可燃、压力适中)及系统综合表现,R1233zd(E)(ODP=0、GWP<1)是更合适的选择。因此,本研究采用R1233zd(E)为热泵工质,其最优工况为压缩比4.2、供热温度107°C,此时COP=2.86,再生能耗3.51 MJ/kgCO₂(较基准降低20.36%),对应冷凝压力约1.2 MPa,低于设备承压上限(2.2 MPa),安全裕度充足。后续耦合工艺优化研究均基于此优选工质及工况。

3.6 压缩式热泵与吸收强化工艺的耦合模拟

在前述单一节能工艺优化的基础上,进一步研究压缩式热泵与吸收强化工艺的耦合。烟气分流与级间冷却作为两种吸收过程强化手段,均通过优

化吸收塔内气液分布与温度场来提升CO₂捕集效率、降低再生负荷。在此,将热泵分别与这两种吸收强化工艺进行耦合,探究多技术组合的节能潜力,两种耦合工艺的流程模拟如图21和图22所示。热泵-烟气分流耦合工艺固定烟气分流最优工况(分流比0.8,第8块理论板进料),热泵工质选用R1233zd(E),以压缩比为变量考察其对系统能耗的影响。热泵-级间冷却耦合工艺则固定级间冷却最优工况(取热点高度1.28 m,冷却终温40°C),同样以压缩比为变量进行模拟。

图23的模拟结果表明,在压缩比4.2~6.0范围内,热泵-烟气分流耦合工艺与热泵-级间冷却耦合均在压缩比4.2时能耗最低,其中热泵-烟气分流耦合工艺能耗最低为3.371 MJ/kgCO₂,较基准(4.408 MJ/kgCO₂)节能23.53%,热泵-级间冷却耦合工艺能耗最低为3.358 MJ/kgCO₂,较基准节能23.82%,效果略优于前者,因为级间冷却直接移除反应热、降低富液温度和再生热负荷,所削减热量可更高效地转化为热泵供热需求的降低。

3.7 MVR-烟气分流耦合工艺模拟

为进一步探索以MVR为核心的耦合潜力,研究了MVR与烟气分流的耦合工艺。模拟中,烟气分流单元保持其最优设置(分流比0.8,第8块理论板进料),以MVR单元的闪蒸压力作为关键变量在20 kPa至80 kPa范围内进行优化。耦合系统的流程模型见图24,模拟结果如图25所示。

模拟结果表明,MVR-烟气分流耦合工艺在闪蒸压力30 kPa时达到最优,系统能耗为3.252 MJ/kgCO₂,较单一MVR工艺(3.368 MJ/kg CO₂)额外节能0.116 MJ/kgCO₂,总节能率达26.23%。该耦合工艺的节能效果源于两种机制的独立叠加:烟气分流通过优化吸收塔内气液分布与传质推动力,提升了富液CO₂负载量,降低了再生热负荷需求;MVR则将闪蒸产生的低压蒸汽压缩升温后直接用于解吸,替代了部分再沸器热负荷。

3.8 MVR-压缩式热泵深度耦合工艺

同样,在单一节能工艺基础上,研究了将MVR与热泵深度耦合。根据两者能量互补特性进行系统整合。传统热泵以解吸塔顶低温蒸汽为热源,但MVR工艺会进一步降低塔顶蒸汽的温度与品位,难以满足热泵蒸发需求。为此,本耦合工艺将热泵热源的解吸塔塔顶取热改为吸收塔的级间取热,实现双重优化:一方面,级间抽取的富液温度更高、更稳

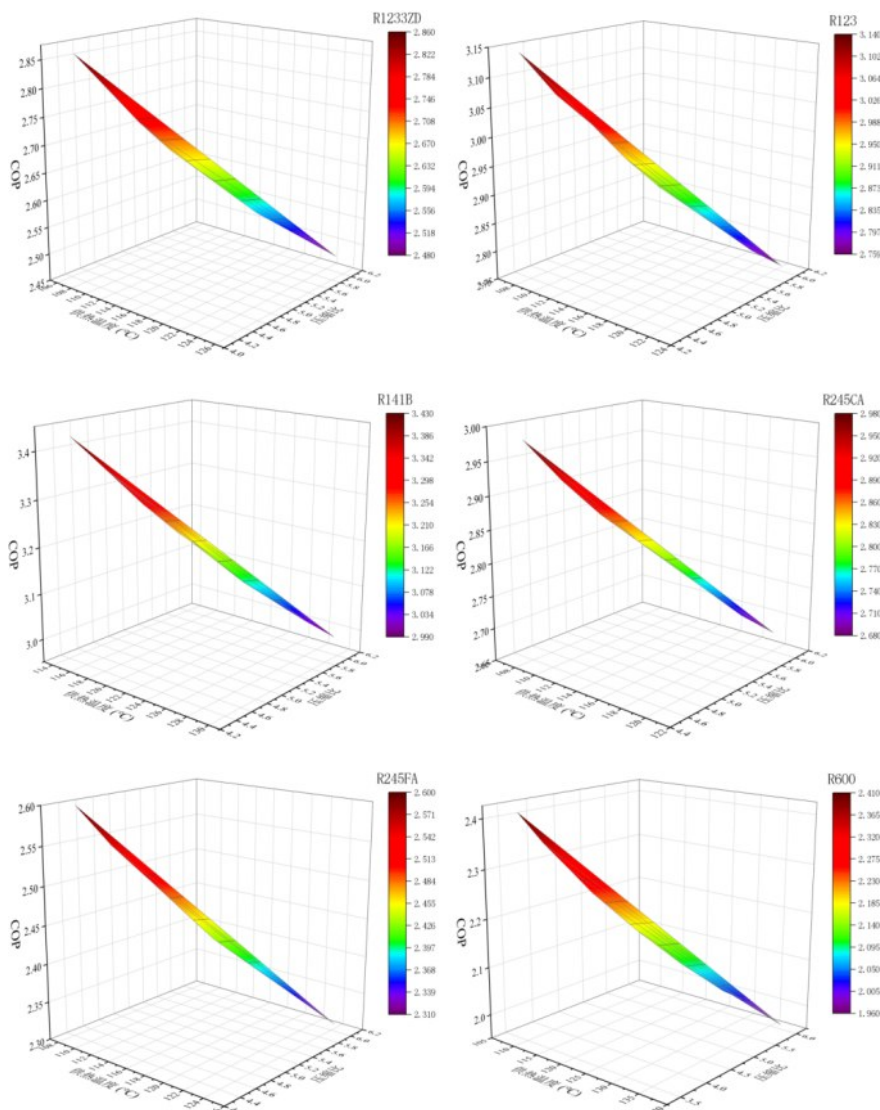


图19 工质系统COP随压缩比及供热温度变化的三维曲面图

Fig. 19 3D surface plot of system COP as a function of compression ratio and heating temperature

定,可提升热泵循环效率;另一方面,抽取的富液在工质蒸发器中放热冷却后返回吸收塔,同步实现了级间冷却效果,形成“一取双效”的工艺强化。最终构建的MVR-热泵耦合流程如图26所示。

耦合系统的性能受MVR闪蒸压力与热泵压缩比的共同影响。为确定最优操作区间,本研究对两个参数的不同组合进行了系统分析,得到系统总能耗的变化结果,如图27和图28所示。模拟结果表明,当MVR闪蒸压力为30 kPa、热泵压缩比为4.2时,系统总能耗最低,为2.440 MJ/kgCO₂,较基准工艺(4.408 MJ/kgCO₂)节能44.6%,显著优于单一MVR(节能23.6%)和单一热泵(节能20.1%)。在最优工况下,闪蒸压力主导能耗的U型曲线,而压缩比变化

对总能耗影响平缓,表明耦合构型操作稳定性良好。能耗的大幅降低源于合理的分工协同:MVR回收贫液显热提供基础汽提蒸汽,热泵回收吸收塔内反应热作为热泵工质的蒸发热源,两者共同大幅削减了再沸器的热负荷。

3.9 初步经济性分析

为了对节能效果最佳的深度耦合工艺的经济可行性进行评估,本研究采用Aspen Process Economic Analyzer(APEA)对基础工艺进行了详细的设备投资与运行成本估算,并以此为基础推算深度耦合工艺的经济性指标。经济性分析的基础数据均由APEA直接导出。装置设计年运行时间为8000小时。表9列出了基础工艺与深度耦合工艺的

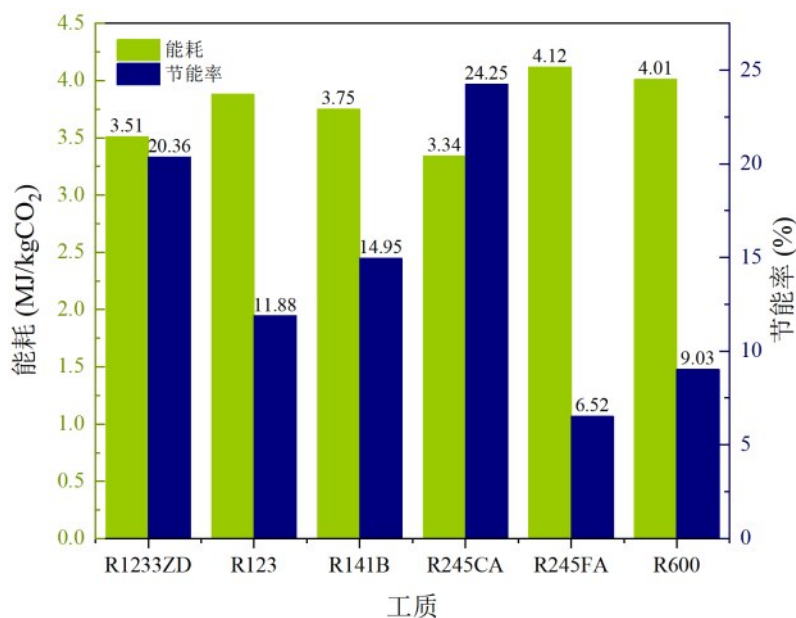


图20 不同热泵工质最佳工况下的系统再生能耗与节能率对比

Fig. 20 Comparison of system regeneration energy consumption and energy saving rate for different heat pump working fluids at their respective optimal conditions

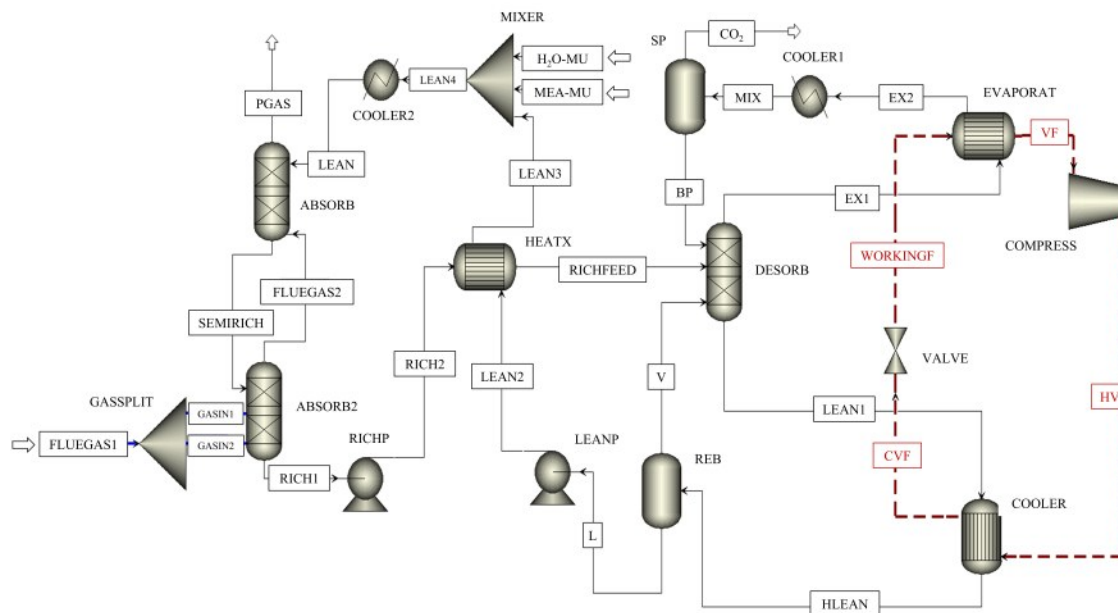


图21 热泵-烟气分流耦合工艺流程图

Fig. 21 Flow sheet of heat pump coupled with flue gas splitting process

主要经济性对比数据。

由表9可知,深度耦合工艺虽新增设备投资约101.5万元,但其年公用工程成本由27.77万元降至16.65万元,年节约11.12万元,降幅达40.0%,投资回收期约为9.13年,表明该工艺在设备寿命期内可完全收回新增投资,并产生经济效益。

上述分析表明,深度耦合工艺不仅在技术层面实现了44.6%的节能率,在经济层面同样具备可行

性。考虑到本分析基于撬装式中试装置规模,若放大至工业级应用,固定成本将进一步摊薄,经济优势将更加显著。因此,本研究所开发的MVR-热泵深度耦合工艺具有良好的工业推广前景。

4 结论

针对化学吸收法碳捕集系统再生能耗高的问

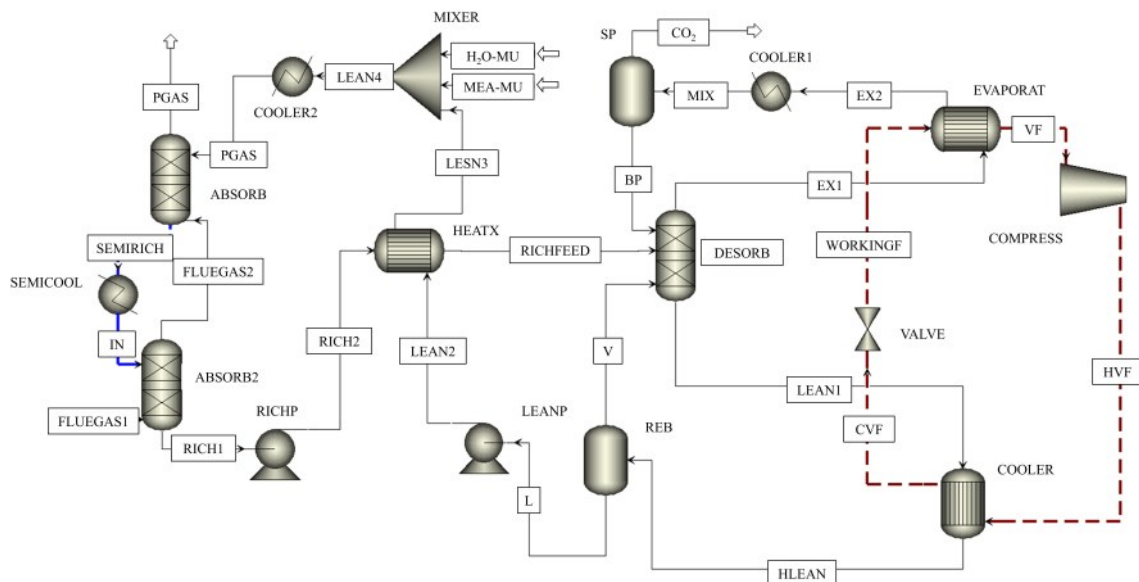


图 22 热泵-级间冷却耦合工艺流程图

Fig. 22 Flow sheet of heat pump coupled with intercooling process

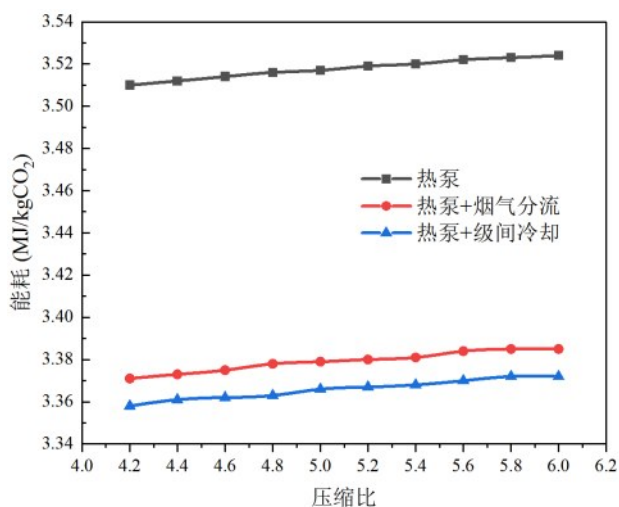


图 23 热泵及热泵-吸收强化耦合工艺系统能耗随压缩比变化对比图

Fig. 23 Comparison of system energy consumption of heat pump and heat pump-absorption-enhanced coupled processes as a function of compression ratio

题,本文通过实验研究与流程模拟相结合的方法,通过高效填料筛选、基准模型校核及多工艺耦合优化,显著提升了撬装式碳捕集系统的能效,主要研究结论如下:

(1)实验与模拟研究表明,XDC150S在最优液气比 5.00 L/m^3 下的能耗分别降至 4.63 MJ/kgCO_2 和 4.67 MJ/kgCO_2 ,实验压降降至 20 Pa/m 左右。在模型验证方面,首先基于鲍尔环填料的实验数据,对吸收塔轴向温度分布、富液 CO_2 担载量及塔顶出口 CO_2

浓度三个关键参数进行了实验与模拟的对比,结果表明模型预测值与实验值在各工况下均吻合良好,验证了模型对塔内温度场、液相负载及出口气相组成等关键工艺参数的预测可靠性。在此基础上,进一步对三种填料在不同液气比工况下的再生能耗与捕集率进行了多工况校核,结果表明,XDC150S的能耗预测平均绝对误差低于 0.05 MJ/kgCO_2 , $R^2 > 0.99$,准确复现了能耗的U型曲线。校核后的模型可作为后续工艺优化与耦合研究的高精度模拟工具。

(2)在系统的参数优化与工艺耦合研究中,通过Aspen Plus灵敏度分析确定了基准工艺的最优操作区间下的基准再生能耗为 4.408 MJ/kgCO_2 。在单一节能工艺优化中,烟气分流的最低再生能耗为 4.210 MJ/kg CO_2 ,节能率4.49%;级间冷却的最低再生能耗为 4.165 MJ/kgCO_2 ,节能率5.51%;压缩式热泵(压缩比4.2、工质R1233zd(E))的再生能耗为 3.510 MJ/kgCO_2 ,节能率20.36%;MVR的最低再生能耗为 3.368 MJ/kgCO_2 ,节能率23.60%。

(3)在耦合工艺优化中,热泵-烟气分流、热泵-级间冷却和MVR-烟气分流三种耦合方案的再生能耗分别降至 3.371 、 3.358 和 3.252 MJ/kgCO_2 ,节能率分别达23.53%、23.82%和26.23%。在此基础上,本研究创新性地提出MVR-热泵深度耦合工艺,以吸收塔级间半富液作为热泵驱动热源,同步完成级间冷却与热泵供热,使系统再生能耗降至 2.440 MJ/

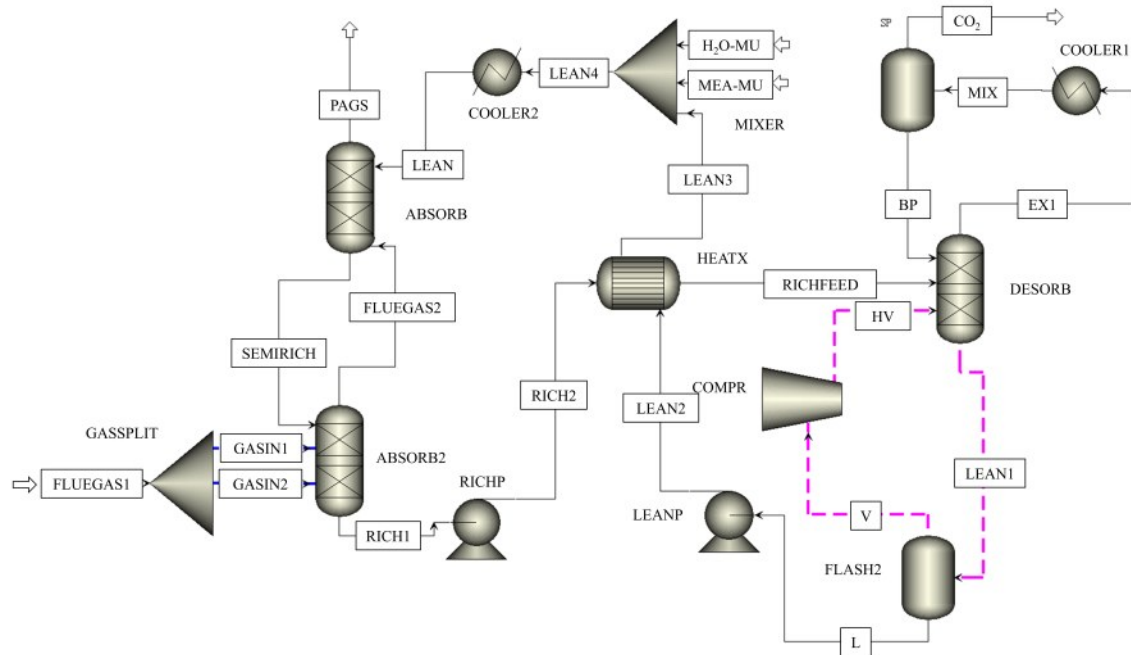


图 24 MVR-烟气分流并列耦合工艺 Aspen Plus 流程模拟图

Fig. 24 Aspen Plus flow sheet of MVR coupled with flue gas splitting process

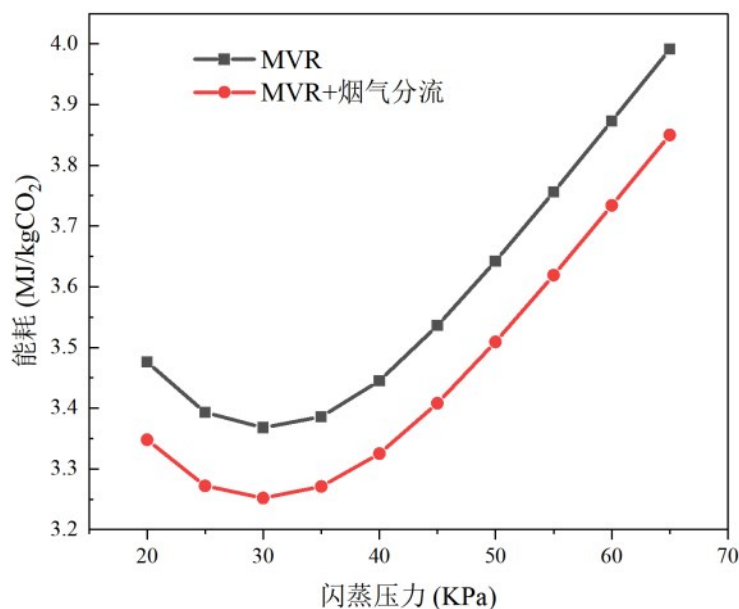


图 25 MVR 及其与烟气分流耦合工艺系统能耗随闪蒸压力变化对比图

Fig. 25 Comparison of system energy consumption versus flash pressure for the standalone MVR process and the integrated MVR-flue gas splitting process

kgCO₂, 节能率达 44.6%。

好的经济可行性与工业应用潜力。

(4)初步经济性分析表明,根据 APEA 的估算,深度耦合工艺虽然新增设备投资约 101.51 万元,但年公用工程成本由 27.77 万元降至 16.65 万元,年净收益约为 11.12 万元,投资回收期约为 9.13 年。之后的持续运行将产生经济收益。因此,本研究所开发的深度耦合工艺不仅具有节能效果,而且具备较

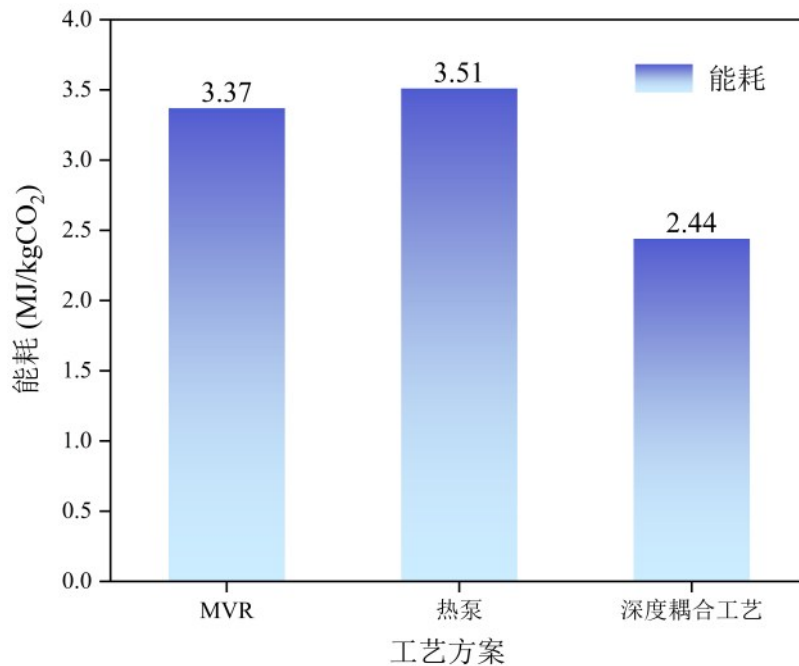


图28 三种工艺方案最优能耗对比

Fig. 28 Comparison of optimal energy consumption among three process schemes

表9 基础工艺与深度耦合工艺经济性对比

Table 9 Economic comparison between the baseline process and the deep-coupled process

对比项目	基础工艺	耦合工艺
再生能耗(MJ/kg CO ₂)	4.408	2.440
设备费用(元)	905788	1920891
总资本投资(元)	13033269	14048374
年公用工程成本(元/年)	277723	166532
年运行成本(元/年)	9032262	8921071
新增投资(元)	—	1015105
年净收益(元/年)	—	111191
投资回收期	—	9.13年

参考文献

- [1] Khan U, Ogbaga C C, Abiodun O O, et al. Assessing absorption-based CO₂ capture: Research progress and techno-economic assessment overview[J]. Carbon Capture Science & Technology, 2023, **8**: 100125.
- [2] 吴其荣, 陈斌, 龚睿杰, 等. 烟气CO₂捕集塔内流动特性模拟与优化[J]. 化学反应工程与工艺, 2024, **40**(2): 135-141.
Wu Q R, Chen B, Gong R J, et al. Simulation and optimization of flow characteristics in flue gas CO₂ capture tower[J]. Chemical Reaction Engineering and Technology, 2024, **40**(2): 135-141.
- [3] 方梦祥, 王涛, 张翼, 等. 烟气二氧化碳化学吸收技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2023.
Fang M X, Wang T, Zhang Y. Flue gas CO₂ chemical absorption technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2023.
- [4] 刘思雨. CO₂-咸水-岩石相互作用对储层孔隙度的影响研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2024.

Liu S Y. The study on the impact of CO₂-brine-rock interaction on reservoir porosity[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2024.

- [5] 施其能, 刘海玉, 张良, 等. 燃煤电厂碳捕集工艺优化进展: 化工侧和热工侧[J]. 洁净煤技术, 2026, **32**(1): 92-112.
Shi Q N, Liu H Y, Zhang L, et al. Advance in carbon capture process optimization for coal-fired power plants: chemical and thermal aspects[J]. Clean Coal Technology, 2026, **32**(1): 92-112.
- [6] 桑树勋, 刘世奇, 郑司建, 等. 全流程煤基CCUS研究进展与前瞻[J]. 煤田地质与勘探, 2026, **54**(1): 1-22.
Sang S X, Liu S Q, Zheng S J, et al. Research progress and prospects of full flowsheet coal-based CCUS[J]. Coal Geology & Exploration, 2026, **54**(1): 1-22.
- [7] 正宁县人民政府. 华能甘肃正宁电厂完成全球规模最大煤电碳捕集示范工程[EB/OL]. (2025-11-26)[2026-04-15]. https://www.zninfo.gov.cn/zwgk/zfbmxxgk/xzbm/smjbm/fdzdgknr119/zdxm19/content_9370.
Zhengning County People's Government. Huaneng Gansu Zhengning power plant completes world's largest coal-fired power carbon capture demonstration project[EB/OL]. (2025-11-26)[2026-04-15]. https://www.zninfo.gov.cn/zwgk/zfbmxxgk/xzbm/smjbm/fdzdgknr119/zdxm19/content_9370.
- [8] Kumar Y, Santhi V M, Sangwai J. Experimental and COSMO-RS modelling into CO₂ absorption performance using MEA/DEA-based nanoformulations for post-combustion carbon capture[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, **525**: 170273.
- [9] Luo Y M, Lu S J, Liu L, et al. Mechanistic study and performance enhancement of CO₂ absorption using DEHA as a viscosity modifier in biphasic solvent systems[J]. Carbon Capture Science & Technology, 2025, **15**: 100392.
- [10] 刘洋. 3D打印新型金属规整填料的实验与CFD模拟研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2019.
Liu Y. Experimental and CFD simulation of 3D printing new

- metal structured packing[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2019.
- [11] Duan J Y, Zhu J M, Lu S J, et al. Influence of EtOH and n-PrOH on the CO₂ absorption and phase separation of amine-functionalized ionic liquid phase separation system[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, **515**: 163670.
- [12] 李梦圆. LLC新型低压降填料流体力学和传质性能研究及CFD计算[D]. 北京: 北京化工大学, 2024.
- Li M Y. Experimental study and CFD calculation of hydrodynamics and mass transfer performance for LLC packings [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2024.
- [13] Zhang X, Fu K Y, Liang Z W, et al. Experimental studies of regeneration heat duty for CO₂ desorption from diethylenetriamine (DETA) solution in a stripper column packed with Dixon ring random packing[J]. Fuel, 2014, **136**: 261–267.
- [14] 王欣. 高效塔填料及塔内件设计要点[J]. 聚氯乙烯, 1998, **26** (1): 51–56.
- Wang X. Design points of packing and internals of high efficiency tower[J]. Polyvinyl Chloride, 1998, **26**(1): 51–56.
- [15] Teng Y X, Wu C T, Xu L, et al. Experimental study on the performance of natural gas distillation column with low helium content using random packing and structured packing[J]. Separation and Purification Technology, 2026, **382**: 135888.
- [16] 高碧霞, 李好管. 新型规整填料及填料塔内件[J]. 化学工业与工程技术, 2000(5): 18–20.
- Gao B X, Li H G. New type regular filler and inner parts of packing tower[J]. Journal of Chemical Industry & Engineering, 2000(5): 18–20.
- [17] Bessou V, Rouzineau D, Prévost M, et al. Performance characteristics of a new structured packing[J]. Chemical Engineering Science, 2010, **65**(16): 4855–4865.
- [18] Yu J W, Wang S J. Development of a novel process for aqueous ammonia based CO₂ capture[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015, **39**: 129–138.
- [19] Cousins A, Wardhaugh L T, Feron P H M. Preliminary analysis of process flow sheet modifications for energy efficient CO₂ capture from flue gases using chemical absorption[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2011, **89**(8): 1237–1251.
- [20] Ishaq H, Ali U, Sher F, et al. Process analysis of improved process modifications for ammonia-based post-combustion CO₂ capture [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, **9**(1): 104928.
- [21] Le Moullec Y, Neveux T, Al Azki A, et al. Process modifications for solvent-based post combustion CO₂ capture[J]. Energy Procedia, 2014, **63**: 1470–1477.
- [22] Oh S Y, Binns M, Cho H, et al. Energy minimization of MEA-based CO₂ capture process[J]. Applied Energy, 2016, **169**: 353–362.
- [23] Cousins A, Wardhaugh L T, Feron P H M. A survey of process flow sheet modifications for energy efficient CO₂ capture from flue gases using chemical absorption[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011, **5**(4): 605–619.
- [24] Ahn H, Luberti M, Liu Z Y, et al. Process configuration studies of the amine capture process for coal-fired power plants[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2013, **16**: 29–40.
- [25] Li T C, Yang C N, Tantikhajorngosol P, et al. Comparative desorption energy consumption of post-combustion CO₂ capture integrated with mechanical vapor recompression technology[J]. Separation and Purification Technology, 2022, **294**: 121202.
- [26] Liu L B, Wang S Q, Niu H W, et al. Process and integration optimization of post-combustion CO₂ capture system in a coal power plant[J]. Energy Procedia, 2018, **154**: 86–93.
- [27] Cremona R, De Lena E, Conversano A, et al. Techno-economic assessment of high temperature heat pumps integrated in MEA-based post-combustion CO₂ capture for cement plant[J]. Carbon Capture Science & Technology, 2025, **25**: 100477.
- [28] 姜一帆. 热泵技术集成在MEA碳捕集中节能模拟研究[J]. 中外能源, 2025, **30**(5): 96–100.
- Jiang Y F. Simulation study on energy saving by integrating heat pump technology in MEA carbon capture[J]. Sino-Global Energy, 2025, **30**(5): 96–100.
- [29] Le Quoc Nguyen H, Wong D S. Integration of rich and lean vapor recompression configurations for aqueous ammonia-based CO₂ capture process[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2021, **169**: 86–96.
- [30] da Cunha Rocha Devesa de Miranda T, Figueiredo F R, de Souza T A, et al. Eco-efficiency analysis and intensification of cryogenic extractive distillation process for separating CO₂ - C₂H₆ azeotrope through vapor recompression strategy[J]. Chemical Engineering and Processing – Process Intensification, 2024, **196**: 109636.
- [31] 孟钦辉, 陈斌, 季腾辉, 等. 烟气CO₂吸收捕集中试实验及工艺优化[J]. 化工进展, 2026, **45**(3): 1788–1798.
- Meng Q H, Chen B, Ji T H, et al. Pilot scale experiment and process optimization of CO₂ absorption and capture in flue gas[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2026, **45**(3): 1788–1798.
- [32] 常健, 刘硕, 宋航, 等. 烟气余热过程中不同热泵的综合性能对比分析[J]. 区域供热, 2025(5): 143–151.
- Chang J, Liu S, Song H, et al. Comparative analysis of comprehensive performance of different heat pumps in flue gas waste heat process[J]. District Heating, 2025(5): 143–151.
- [33] Singh Rawat S, Gomes Fonseca F, Serrano M I R. Innovative high temperature heat pump concepts for an economic decarbonization of a carbon capture unit[J]. Carbon Capture Science & Technology, 2025, **17**: 100517.
- [34] 郭立良, 郝艳茹, 杨烨. 高温热泵在燃气电厂余热利用中的应用研究[J]. 区域供热, 2025(6): 31–38.
- Guo L L, Hao Y R, Yang Y. Study on application of high temperature heat pump in waste heat utilization of gas-fired power plant[J]. District Heating, 2025(6): 31–38.
- [35] 吴楷. 机械压缩型开路循环系统热泵蒸发技术及节能分析(一)[J]. 北京节能, 1992(4): 18–20.
- Wu K. Heat pump evaporation technology and energy saving analysis of mechanical compression open-circuit circulation system (I)[J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 1992(4): 18–20.
- [37] 刘然. 新型吸收式热泵工质的耦合热泵系统仿真研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2025.
- Liu R. Simulation study on coupled heat pump system with new absorption heat pump working medium[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2025.
- [38] 邓世丰, 张浩远, 郭辉, 等. 压缩式热泵回收燃气锅炉烟气余热的实验研究[J]. 动力工程学报, 2025, **45**(7): 1144–1152.
- Deng S F, Zhang H Y, Guo H, et al. Experimental research on the

- recovery of waste heat from gas-fired boiler flue gas using a compression heat pump[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2025, **45**(7): 1144–1152.
- [39] Krótki A, Więclaw Solny L, Stec M, et al. Experimental results of advanced technological modifications for a CO₂ capture process using amine scrubbing[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2020, **96**: 103014.
- [40] Yan Z Y, Cheng Z J, Xiang J L, et al. Coupling optimization of energy-saving technology for segmented capture process of high CO₂ concentration gas capture system[J]. Separation and Purification Technology, 2026, **382**: 136029.
- [41] Cousins A, Cottrell A, Lawson A, et al. Model verification and evaluation of the rich-split process modification at an Australian-based post combustion CO₂ capture pilot plant[J]. Greenhouse Gases: Science and Technology, 2012, **2**(5): 329–345.
- [42] Oexmann J, Kather A. Minimising the regeneration heat duty of post-combustion CO₂ capture by wet chemical absorption: The misguided focus on low heat of absorption solvents[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2010, **4**(1): 36–43.
- [43] Hüser N, Schmitz O, Kenig E Y. A comparative study of different amine-based solvents for CO₂-capture using the rate-based approach[J]. Chemical Engineering Science, 2017, **157**: 221–231.
- [44] Afkhamipour M, Mofarahi M. Comparison of rate-based and equilibrium-stage models of a packed column for post-combustion CO₂ capture using 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) solution[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2013, **15**: 186–199.