

# 基于热泵技术的 CO<sub>2</sub> 捕集工艺流程 模拟与优化

时豪<sup>1</sup>, 李士宁<sup>2</sup>, 郑若飞<sup>2</sup>, 燕来东<sup>2</sup>, 刘龙<sup>1</sup>, 张林阳<sup>1\*</sup>  
(1. 青岛理工大学环境与市政工程学院, 山东 青岛 266520;  
2. 山东鲁东交通建设集团有限公司, 山东 东营 257000)

**摘要:** 采用化学吸收法捕集 CO<sub>2</sub> 存在再生能耗高的问题, 通过工艺流程的改进可有效降低再生能耗。利用 Aspen Plus 软件构建基于高温热泵技术的 CO<sub>2</sub> 捕集工艺流程, 并在此基础上结合富液分流和 MVR 热泵工艺进行模拟优化。结果表明, 使用高温热泵工艺相较于基础工艺流程再生能耗降低 34.1%; 而将高温热泵、富液分流和工艺 MVR 热泵耦合在一起, 再生能耗相较于基础工艺可降低 43.3%。

**关键词:** 二氧化碳捕集; MEA; 再生能耗; 热泵; 工艺流程优化

中图分类号: TK172

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2025)12-0215-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.12.037

## Simulation and optimization of CO<sub>2</sub> capture process based on heat pump technology

SHI Hao<sup>1</sup>, LI Shi-ning<sup>2</sup>, ZHENG Ruo-fei<sup>2</sup>, YAN Lai-dong<sup>2</sup>, LIU Long<sup>1</sup>, ZHANG Lin-yang<sup>1\*</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China;  
2. Shandong Ludong Transportation Construction Group Co., Ltd., Dongying 257000, China)

**Abstract:** CO<sub>2</sub> capture via the chemical absorption method is confronted with the high regeneration energy consumption problem, which can be effectively solved through process improvement. Aspen Plus software is utilized to construct a CO<sub>2</sub> capture process flow based on high-temperature heat pump technology, which is simulated and optimized by combining with the rich liquid splitting and MVR (Mechanical Vapor Recompression) heat pump processes. The results show that the process using the high-temperature heat pump process alone can reduce the regeneration energy consumption by 34.1% than the basic process flow. Meanwhile, the process using high-temperature heat pump, rich liquid splitting and MVR heat pump technologies together can reduce 43.3% of regeneration energy consumption compared with the basic process.

**Key words:** carbon dioxide capture; MEA; energy consumption in regeneration; heat pump; process optimization

二氧化碳的大量排放是产生温室效应的主要原因, 而对二氧化碳进行捕集是减少 CO<sub>2</sub> 排放的重要手段<sup>[1]</sup>。而且二氧化碳在页岩中的吸附能力较强, CO<sub>2</sub> 地质封存技术也为 CO<sub>2</sub> 捕集技术的发展提供了条件<sup>[2-4]</sup>。化学吸收法作为一种脱碳技术, 在国内外有着广泛的应用<sup>[5-9]</sup>。醇胺法是化学吸收法中的主要方法, 但缺点是能耗较高<sup>[10]</sup>。为解决这一问题, 有 3 种策略: 寻找能耗更低的吸收剂、改进工艺流程以及优化工艺参数<sup>[11-13]</sup>。

目前国内外对醇胺法 CO<sub>2</sub> 捕集工艺流程进行优化的手段有开发高效换热器、级间冷却、富液分流、增加 MVR 热泵、吸收式热泵技术和高温热泵技术等<sup>[14-19]</sup>。李青等<sup>[20]</sup>利用高温热泵技术为 CO<sub>2</sub> 解

吸提供热量, 分别模拟了两级正丁烷(R600)热泵和超临界 CO<sub>2</sub>(R744)循环热泵供热流程, 发现节能效果显著。而工质为 R245fa 的高温热泵在市场应用方面已经较为成熟<sup>[21]</sup>。贺龙彬等<sup>[22]</sup>研发了喷气增焓式的高温热泵, 出水温度达到 120℃, cop 值在 1.85~1.95 之间。故本文中将在基础碳捕集工艺上应用工质为 R245fa 的喷气增焓式高温热泵来为再沸器提供热量。同时, 将高温热泵与富液分流以及 MVR 技术进行耦合研究, 以探究更加节能的工艺。

## 1 模型建立及参数设置

### 1.1 条件设计

模拟了基础工艺流程模型, 该模型可用于计算

收稿日期: 2025-03-07; 修回日期: 2025-09-24

基金项目: 山东省自然科学基金青年项目(ZR2022QB046); 国家自然科学基金项目(52204039)

作者简介: 时豪(1998-), 男, 硕士生; 张林阳(1992-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为工业流程节能与碳捕集技术, 通讯联系人, linyang1412@yeah.net。

CO<sub>2</sub> 捕集系统的捕集率和再生能耗,其基础工艺流程模型如图 1 所示。

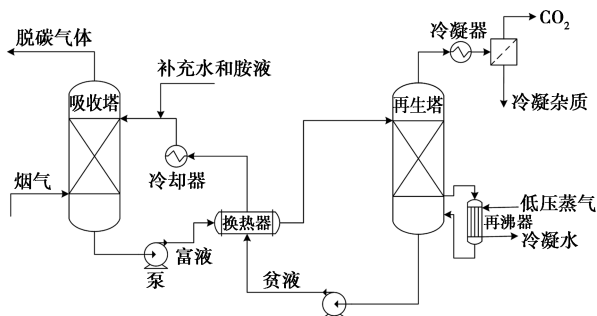


图 1 CO<sub>2</sub> 捕集基础工艺流程

该模拟的热力学模型采用 ELECNRTL 模型,动力学模型采用 Rate-based 模型,烟气组分如表 1 所示。

表 1 烟气组分参数

参数	组分	质量分数/%
组分参数	CO <sub>2</sub>	14.0
	H <sub>2</sub> O	1.0
	O <sub>2</sub>	19.5
	N <sub>2</sub>	65.5
物性参数	质量流量为 98 kg/h, $p=0.102$ MPa, $t=40$ °C	

## 1.2 工艺设备及参数

本文中所使用的吸收剂为 MEA 溶液,质量分数为 30%,主要装置的参数如表 2 所示。

表 2 捕集系统主要单元模块参数

单元模块名称	参数设置
吸收塔	类型:RadFrace 填料类型:金属 pall 填料高度:1.3 m 填料直径:180 mm
贫富液换热器	类型:HeatX 换热端差:10 °C
解吸塔	类型:RadFrace 填料类型:金属 pall 填料高度:1.3 m 填料直径:80 mm
贫液冷却器	类型:Heater 出口温度:40 °C
富液采出泵	类型:Pump 出口压力:0.3 MPa
贫液采出泵	类型:Pump 出口压力:0.3 MPa

通过对比不同溶液流量、贫液进吸收塔温度和贫富液换热器端差等因素对再生能耗的影响发现,在 CO<sub>2</sub> 捕集率为 90% 和解吸塔顶 CO<sub>2</sub> 质量分数为 97% 的条件下,基础 CO<sub>2</sub> 捕集流程的系统再生能耗最低为 3.683 GJ/t。

## 2 高温热泵捕集 CO<sub>2</sub> 工艺模拟研究

### 2.1 高温热泵模型建立及参数设定

在喷气增焓式高温热泵的模拟过程中,冷凝器中的热泵工质与解吸塔中的富液换热,蒸发器中的热泵工质与出贫富液换热器中的贫液进行换热,并利用 Aspen Plus 软件对喷气增焓式热泵系统进行模拟。

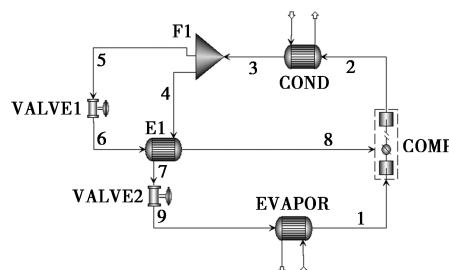


图 2 高温热泵模型

图 2 中蒸发器为 EVAPOR,冷凝器为 COND,压缩机为 COMP,经济器为 E1,分流器为 F1,辅路节流阀为 VALVE1,主路节流阀为 VALVE2。首先,工质在蒸发后从管路 1 进入压缩机压缩至中间状态。接着,补气路 8 的工质与经过一级压缩的主路 1 的工质等容混合。随后,混合后的工质再次压缩进入管路 2。接下来,工质进入冷凝器并在冷凝器中与解吸塔中的富液换热冷凝。从冷凝器出来的工质进入管路 3,再经分流器分流为主路 4 和补气路 5,之后,补气路工质经历节流降温进入管路 6,主路 4 工质与经过节流冷却的补气路 6 工质进行换热过冷进入管路 8,而补气路 6 工质与主路 4 工质进行换热蒸发后进入管路 7。接着,主路 7 工质进入膨胀阀进行绝热节流进入主路 9,最后,主路 9 工质在蒸发器中与出贫富液换热器的贫液换热蒸发。

在选择单元操作模块之后,还需设定一下高温热泵中蒸发器过热度、冷凝器过冷度、主路循环工质流量、主路膨胀阀过冷度、辅路膨胀阀过热度、压缩机的等熵效率和中间补气压力系数,如表 3 所示。

### 2.2 高温热泵捕集 CO<sub>2</sub> 工艺模拟分析

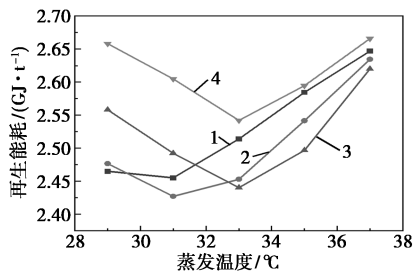
在基础工艺流程中,解吸塔再生能耗的来源主要是进入再沸器的蒸气,再生能耗为再沸器负荷与

表 3 参数设定

工况	参数	工况	参数
蒸发器过热度/℃	5	主路膨胀阀过冷度/℃	9
冷凝器过冷度/℃	5	辅路膨胀阀过热度/℃	3
蒸发器换热端差/℃	5	压缩机等熵效率	0.68
主路循环工质流量/(kg·h <sup>-1</sup> )	400	中间补气压力系数	1.2

解吸塔塔顶流出的 CO<sub>2</sub> 质量流量的比值,而在基于高温热泵技术的碳捕集工艺流程中,由于使用高温热泵的冷凝端给解吸塔供热,而高温热泵主要的耗功来自压缩机,所以本文中用压缩机的负荷代替再沸器负荷计算系统的再生能耗。

在模拟的过程中,高温热泵冷凝器与再沸器单位时间给解吸塔提供的热量应该相等,即两者的负荷应该相等,可以通过调整制冷剂的流量来调整冷凝器的负荷,使冷凝器负荷与再沸器负荷保持一致。图 3 对比了不同溶液流量(5、6、7、8 L/min)和蒸发温度(29、31、33、35、37℃)对再生能耗的影响。



1—5 L/min; 2—6 L/min; 3—7 L/min; 4—8 L/min

图 3 不同蒸发温度对再生能耗的影响

如图 3 所示,再生能耗随着蒸发温度的增加先减少后增加。而从图 4 可以看到,当溶液流量为

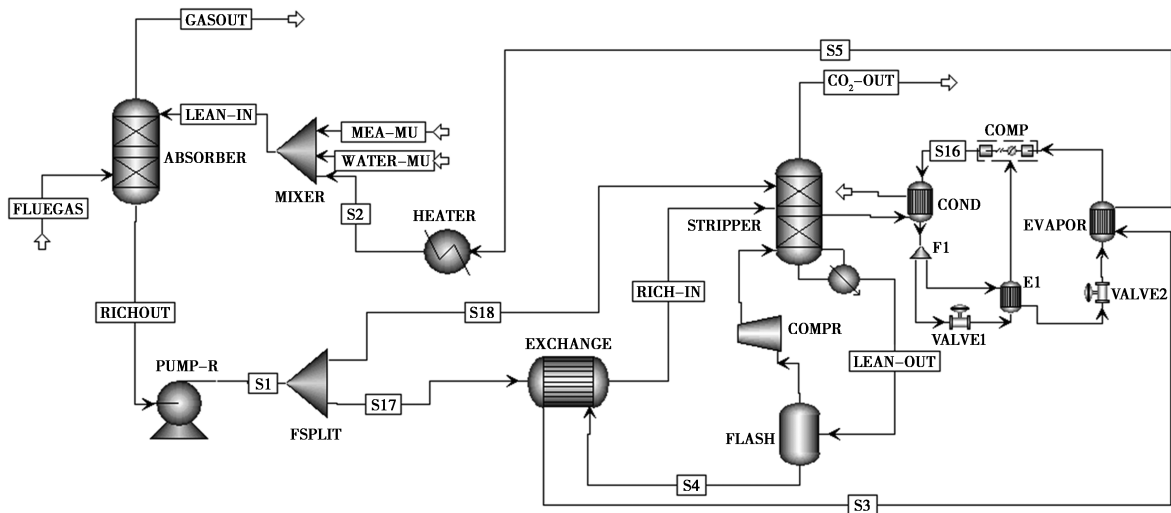
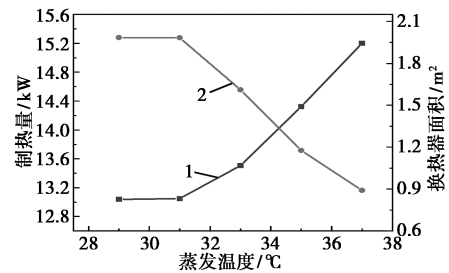


图 5 基于高温热泵与 2 种节能技术的 CO<sub>2</sub> 捕集工艺流程模型

6 L/min 时,随着蒸发温度的增加,制热量增加,而贫富液换热器面积则随之减小。



1—制热量; 2—换热器面积

图 4 不同蒸发温度对制热量和贫富液换热器面积的影响

这是因为在蒸发温度较低时,蒸发端提供的热量不变,随着蒸发温度的增大,压缩机功率下降,再生能耗下降。但当蒸发温度较大时,为了确保进吸收塔贫液温度不低于 40℃,需要减少贫富液换热器的面积,减少换热器的换热量,提高贫富液换热器的贫液出口温度,这也降低了进解吸塔富液温度,需要再沸器提供更多的热量,使得高温热泵蒸发端提供的热量更多,压缩机功率上升。当蒸发温度为 31℃、溶液流量为 6 L/min 时,再生能耗最小,为 2.427 GJ/t,较基础工艺流程减少 34.1%。

### 3 高温热泵与 2 种节能工艺模拟分析

#### 3.1 工艺系统建模

图 5 为基于高温热泵、富液分流和级间冷却技术的 CO<sub>2</sub> 捕集工艺流程模型图,以该模型为研究对象,可分析高温热泵、富液分流和 MVR 热泵对再生能耗的影响。

该模型可用于研究不同闪蒸压力、冷热富液分流比例和蒸发温度对再生能耗的影响,其中闪蒸压力、冷热富液分流比和蒸发温度的变化如表 4 所示。

表 4 富液分流工艺影响因素参数范围

参数名称	参数范围
闪蒸压力	30~90 kPa
冷热富液分流比例	0.05:0.95~0.25:0.75
蒸发温度	29~37℃

### 3.2 参数优化分析

从图 6 可以看到,随着闪蒸压力增大,闪蒸温度增大,再生能耗先减小后增大,当闪蒸压力为 50 kPa 时,再生能耗最低,为 2.207 GJ/t。在相同蒸发温度和闪蒸压力下,再生能耗比只使用高温热泵和 MVR 热泵工艺时略高,这是因为在使用富液分流工艺后,冷富液进解吸塔的温度较低,需要外部提供更多的热量,导致再生能耗增加。

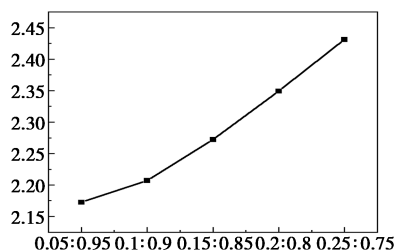
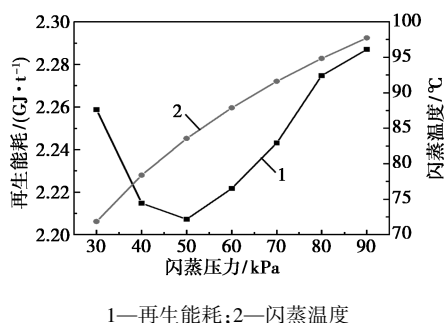


图 6 不同闪蒸压力对再生能耗的影响

从图 7 可以看到,随着冷热富液分流比例的增加,再生能耗增大,在冷热富液分流比例为 0.05:0.95 时,再生能耗最低,为 2.173 GJ/tCO<sub>2</sub>。



1—再生能耗;2—闪蒸温度

图 7 不同冷热富液分流比例对再生能耗的影响

由图 8 可知,随着蒸发温度的增大,再生能耗先减小后增大,当蒸发温度为 33℃ 时,再生能耗最小,为 2.088 GJ/t,相较于基础工艺流程再生能耗降低 43.3%。对比图 3 和图 8 可以看到,在使用富液分流和 MVR 热泵技术后,最佳蒸发温度增大;而冷凝温度不变,蒸发温度增大,热泵压缩机做功减小,进

而再生能耗减小。

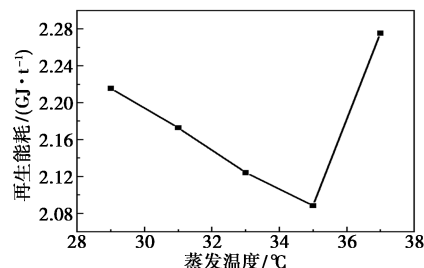


图 8 不同蒸发温度对再生能耗的影响

## 4 结论

构建了基于高温热泵技术的 CO<sub>2</sub> 捕集工艺流程,并在此基础上结合富液分流和 MVR 热泵技术,分析了蒸发温度、冷热富液分流比例和闪蒸压力等参数对再生能耗的影响,结论如下。

(1) 在基于高温热泵技术的 CO<sub>2</sub> 捕集工艺流程中,当溶液流量为 6 L/min、蒸发温度为 31℃ 时,再生能耗最低,为 2.427 GJ/tCO<sub>2</sub>,节能 34.1%。

(2) 在高温热泵、富液分流和 MVR 热泵整合工艺中,当闪蒸压力为 50 kPa、冷热富液比例为 0.05:0.95 且蒸发温度为 35℃ 时,再生能耗最低,为 2.118 GJ/tCO<sub>2</sub>,节能 43.3%。

## 参考文献

- [1] 蒋聪,高歌,江伍凤,等.醇胺溶液催化法碳捕集的能耗评估及动力学分析[J].动力工程学报,2024,44(6):956-963.
- [2] Qin X J, Singh H, Cai J C. Sorption characteristics in coal and shale: A review for enhanced methane recovery [J]. Capillarity, 2022,5(1):1-11.
- [3] Bekeshov D, Ashimov S, Wang Y W, et al. Understanding gas-enhanced methane recovery in graphene nanoslits via molecular simulations[J]. Capillarity, 2023,6(1):1-12.
- [4] Xia X Z, Jiao X H, Li J Q, et al. Gas adsorption behavior in shale reservoirs: Insights from molecular scale [J]. Capillarity, 2024,13(3):68-72.
- [5] 陈家伟,杨柳,李新令,等.MAP-DMSO-PMDETA 三元相变吸收剂的 CO<sub>2</sub> 捕集性能[J].化工环保,2024,44(2):213-220.
- [6] 刁保圣,顾欣,冯琰磊.大规模二氧化碳捕集及综合利用示范[J].锅炉技术,2021,52(6):76-80.
- [7] 顾永正,王天堃,黄艳,等.燃煤电厂二氧化碳捕集利用与封存技术及工程应用[J].洁净煤技术,2023,29(4):98-108.
- [8] Reddy S, Yonkoski J, Rode H, et al. Fluor's econamine FG plus SM completes test program at Uniper's Wilhelmshaven coal power plant [J]. Energy Procedia, 2017,114:5816-5825.
- [9] Oh S, Yun S, Kim J. Process integration and design for maximizing energy efficiency of a coal-fired power plant integrated with amine-based CO<sub>2</sub> capture process [J]. Applied Energy, 2018,216:311-322.

(下转第 228 页)

投资,经济效益十分可观。以皂化废渣和  $\text{CO}_2$  为主要耗材,铵盐循环利用,就可以得到高纯 PCC 和轻质  $\text{MgO}$ ,同时实现皂化废渣的资源化、无害化、减量化,减碳化,可节省石灰石矿山的开采,保护生态环境,并达到“一箭三雕”的效果。

(2) 采用高镁的普通氢氧化钙进行皂化反应时,过剩系数大,产生的废渣数量多,镁元素需要回收,回收工艺复杂,投资较大,但回收轻质氧化镁的产值也很大。采用纯度较高的高比表面积氢氧化钙时,过剩系数小,产生的废渣数量少,镁元素无需回收,回收工艺简单,投资小。

(3) 皂化废渣减量化的关键技术在于采用高比表面积氢氧化钙取代普通氢氧化钙来减少皂化反应的过剩系数,并严格控制其中镁、铁、铝、硅等元素含量,从源头上减少皂化废渣数量,达到降低皂化废渣处理成本和投资的目的。

(4) 在“双碳”新时代,这类兼具环境效益、社会

效益和经济效益的循环经济项目,值得重视与推广,对其他行业的皂化废渣也具有借鉴意义。

### 参考文献

- [1] 本刊.一种环氧氯丙烷皂化废浆综合利用新技术[J].无机盐工业,2020,52(12):118.
- [2] 颜鑫,魏义兰.含钙镁废渣综合利用的现状 & 展望[J].无机盐工业,2022,54(1):7-11.
- [3] 颜鑫,刘海路,马媛媛,等.以电石渣为原料生产食品级轻质碳酸钙的绿色新工艺[J].现代化工,2019,39(2):199-201.
- [4] 颜鑫,刘海路,刘保林,等.绿色纳米碳酸钙生产关键技术与机理研究[J].无机盐工业,2025,57(1):71-76.
- [5] 颜鑫,李斌,刘保林,等.电石渣生产绿色微细轻质(纳米)碳酸钙的新工艺研究[J].纸和造纸,2024,43(1):18-21.
- [6] 颜鑫,刘保林,刘奕,等.一种对置式偶数喷嘴复合碳化生产纳米碳酸钙的装置及方法:CN 2023103733179[P].2023-07-05.
- [7] 颜鑫,卢云峰,马媛媛,等.氯化钙-氨水体系生产纳米碳酸钙的复合碳化机理研究[J].无机盐工业,2019,51(7):77-80.
- [8] 颜鑫,卢云峰.轻质系列碳酸钙关键技术[M].北京:化学工业出版社,2016:38.■
- [9] 颜鑫,卢云峰.轻质系列碳酸钙关键技术[M].北京:化学工业出版社,2016:38.■
- [10] 贺鹏,郑伯红,龚凯.醇胺法碳捕集再生能耗影响因素研究[J].现代化工,2016,36(9):171-174.
- [11] 张金星,张祥,黄志甲,等.基于响应曲面法的高炉煤气  $\text{CO}_2$  吸收工艺参数优化[J].过程工程学报,2021,21(8):985-992.
- [12] Jung W, Lee J. Kinetic modeling of Polyamine-based Water-Lean solvents for  $\text{CO}_2$  capture; Reverse temperature dependence of the overall mass transfer coefficient[J]. Chemical Engineering Science, 2022,249:117355.
- [13] 陆诗建,高丽娟,王家凤,等.烟气  $\text{CO}_2$  捕集热能梯级利用节能工艺耦合优化[J].化工进展,2020,39(2):728-737.
- [14] 郭李恒,丁玉栋,廖强,等.基于蒸汽压缩-分流的电厂烟气  $\text{CO}_2$  捕集过程模拟优化[J].动力工程学报,2021,41(7):565-571.
- [15] 林海周,裴爱国,方梦祥.燃煤电厂烟气二氧化碳胺法捕集工艺改进研究进展[J].化工进展,2018,37(12):4874-4886.
- [16] 赵红涛,王树民.燃煤烟气胺法脱碳 MVR 再生系统关键参数及能耗分析[J].化工进展,2020,39(S1):256-262.
- [17] Li K, Cousins A, Yu H, et al. Systematic study of aqueous monoethanolamine-based  $\text{CO}_2$  capture process: Model development and process improvement[J]. Energy Science & Engineering, 2016, 4(1):23-39.
- [18] Yu J, Wang S. Development of a novel process for aqueous ammonia based  $\text{CO}_2$  capture[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015, 39:129-138.
- [19] Liu W, Huang Y, Zhang X J, et al. Steam-assisted temperature swing adsorption for carbon capture integrated with heat pump[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 49:103749.
- [20] 李青,余云松,姜钧,等.基于热泵技术的化学吸收法二氧化碳捕集系统[J].高校化学工程学报,2010,24(1):29-34.
- [21] 吴锋明,李帅旗,何世辉,等.大温升蒸汽压缩式热泵系统优化研究进展[J].化工进展,2024,43(3):1178-1198.
- [22] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [23] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [24] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [25] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [26] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [27] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [28] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [29] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [30] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [31] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [32] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [33] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [34] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [35] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [36] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [37] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [38] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [39] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [40] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [41] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [42] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [43] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [44] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [45] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [46] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [47] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [48] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [49] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [50] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [51] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [52] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [53] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [54] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [55] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [56] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [57] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [58] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [59] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [60] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [61] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [62] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [63] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [64] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [65] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [66] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [67] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [68] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [69] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [70] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [71] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [72] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [73] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [74] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [75] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [76] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [77] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [78] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [79] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [80] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [81] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [82] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [83] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [84] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [85] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [86] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [87] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [88] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [89] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [90] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [91] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [92] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [93] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [94] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [95] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [96] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [97] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [98] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [99] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [100] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■

(上接第 218 页)

- [10] 贺鹏,郑伯红,龚凯.醇胺法碳捕集再生能耗影响因素研究[J].现代化工,2016,36(9):171-174.
- [11] 张金星,张祥,黄志甲,等.基于响应曲面法的高炉煤气  $\text{CO}_2$  吸收工艺参数优化[J].过程工程学报,2021,21(8):985-992.
- [12] Jung W, Lee J. Kinetic modeling of Polyamine-based Water-Lean solvents for  $\text{CO}_2$  capture; Reverse temperature dependence of the overall mass transfer coefficient[J]. Chemical Engineering Science, 2022,249:117355.
- [13] 陆诗建,高丽娟,王家凤,等.烟气  $\text{CO}_2$  捕集热能梯级利用节能工艺耦合优化[J].化工进展,2020,39(2):728-737.
- [14] 郭李恒,丁玉栋,廖强,等.基于蒸汽压缩-分流的电厂烟气  $\text{CO}_2$  捕集过程模拟优化[J].动力工程学报,2021,41(7):565-571.
- [15] 林海周,裴爱国,方梦祥.燃煤电厂烟气二氧化碳胺法捕集工艺改进研究进展[J].化工进展,2018,37(12):4874-4886.
- [16] 赵红涛,王树民.燃煤烟气胺法脱碳 MVR 再生系统关键参数及

(上接第 223 页)

- [11] 李守磊,徐国鹏,程建朝,等.超临界锅炉省煤器旁路复合热水再循环提升 SCR 入口烟温技术应用研究[J].山东电力技术,2022,49(5):76-80.
- [12] 王憧北.应用热水再循环技术实现宽负荷脱硝[J].锅炉技术,2018,49(4):71-75.
- [13] 徐嘉叶,朱晓磊,李剑宁,等.全负荷脱硝技术的应用与分析[J].动力工程学报,2020,40(7):580-585,604.
- [14] 蒋蓬勃.超超临界深度调峰机组锅炉全时段脱硝技术研究[J].电站系统工程,2023,39(1):77-80,84.
- [15] 邹祥波,席剑飞,伍宇鹏.省煤器分级在提升 700 MW 燃煤机组 SCR 脱硝系统投运率的应用研究与实践[J].锅炉技术,2020,51(1):65-69.
- [16] 靖长财.锅炉省煤器分级改造技术分析和效果[J].锅炉技术,

- 2016,47(1):70-73.
- [17] 龚明焯.锅炉省煤器分级改造技术研究[J].科学技术创新,2020,(2):186-187.
- [18] 关键,项群扬,沈利,等.省煤器给水旁路提升 SCR 进口烟温应用研究[J].中国电力,2017,50(9):116-120,128.
- [19] Aguilar-Romero M, Camposeco R, Castillo S, et al. Acidity, surface species, and catalytic activity study on  $\text{V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3/\text{TiO}_2$  nanotube catalysts for selective NO reduction by  $\text{NH}_3$ [J]. Fuel, 2017, 198:123-133.
- [20] Chai Y, Zhang G, He H, et al. Theoretical study of the catalytic activity and anti- $\text{SO}_2$  poisoning of a  $\text{MoO}_3/\text{V}_2\text{O}_5$  selective catalytic reduction catalyst[J]. ACS Omega, 2020, 5(42):26978-26985.
- [21] 肖志前,吉硕.低负荷下给水温度对 SCR 及锅炉热效率的影响[J].广东电力,2015,28(9):22-27.■