

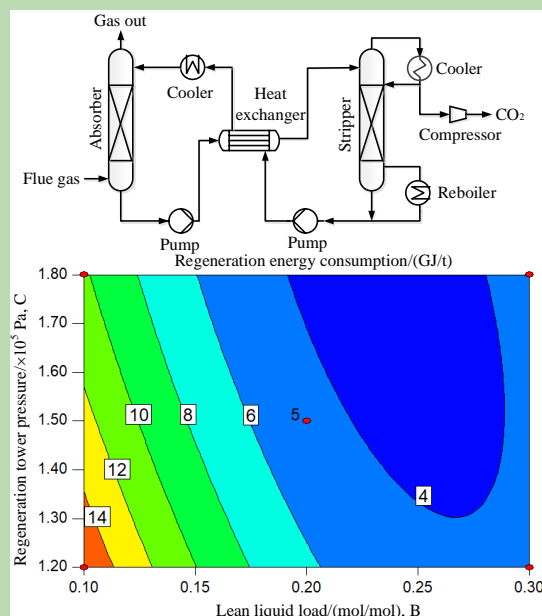
Optimization of CO₂ absorption process parameters of blast furnace gas based on response surface methodology

Jinxing ZHANG, Yang ZHANG, Zhijia HUANG*, Liping ZHU

School of Civil Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243000, China

Abstract: In the practical engineering application of carbon capture and separation of blast furnace gas in steel plant, process parameter optimization is one of the effective ways to reduce the energy consumption of carbon capture system regeneration. In order to explore the influence of the interaction between the factors of carbon capture system on the regeneration energy consumption of regeneration tower, this work takes the blast furnace gas alcoholamine solution absorption CO₂ capture system as the research object, combines Aspen Plus with response surface methodology (RSM) to study the lean liquid temperature, lean liquid load, and regeneration tower pressure on the carbon capture system regeneration energy consumption influences. The accuracy of the numerical model was verified by comparing with the experimental data in literature, on this basis, the Aspen Plus simulation data was used as a sample, and the regenerative energy consumption in the sample was used as the response value. The mathematical model was established using the response surface method to obtain the optimized parameter combination with the lowest regenerative energy consumption. The numerical simulation results showed that the lean liquid temperature, the lean liquid load, and the regeneration tower pressure all had significant effects on the regeneration energy consumption, and there was an obvious interaction effect between lean liquid load and regeneration tower pressure. The interaction between the lean liquid temperature and the lean liquid load and the lean liquid load and the pressure of the regeneration tower showed that the change of the lean liquid load and the pressure of the regeneration tower affected the energy consumption of regeneration. The response surface optimization obtained the best process parameters: the lean liquid temperature of 30°C, the lean liquid load of 0.24 mol/mol, the regeneration tower pressure of 1.80×10^5 Pa, regeneration energy consumption of 3.12 GJ/t, which was 28.4% lower than that of the benchmark experimental program.

Key words: CO₂ capture; blast furnace gas; response surface methodology; Aspen Plus; process parameters



收稿: 2020-07-30, 修回: 2020-09-08, 网络发表: 2020-11-04; Received: 2020-07-30, Revised: 2020-09-08, Published online: 2020-11-04

基金项目: 安徽省高校自然科学基金项目(编号: KJ2019ZD08)

作者简介: 张金星(1993-), 男, 安徽省阜阳市人, 硕士研究生, 供热、供燃气、通风及空调工程专业, E-mail: zjx2019@ahut.edu.cn; 黄志甲, 通讯联系人, E-mail: hzj@ahut.edu.cn.

引用格式: 张金星, 张祥, 黄志甲, 等. 基于响应曲面法的高炉煤气CO₂吸收工艺参数优化. 过程工程学报, 2021, 21(8): 985-992.

Zhang J X, Zhang Y, Huang Z J, et al. Optimization of CO₂ absorption process parameters of blast furnace gas based on response surface methodology (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2021, 21(8): 985-992, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.220245.

基于响应曲面法的高炉煤气CO₂吸收工艺参数优化

张金星, 张 样, 黄志甲*, 祝立萍

安徽工业大学建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243000

摘 要: 工艺参数优化是降低碳捕集系统再生能耗的有效途径之一。以高炉煤气醇胺溶液吸收CO₂捕集系统为研究对象, 将Aspen Plus与响应曲面法(RSM)相结合, 研究贫液温度、贫液负荷、再生塔压力对碳捕集系统再生能耗的影响。在此基础上以Aspen Plus模拟数据为样本, 并以样本中的再生能耗为响应值, 利用响应曲面法建立数学模型, 获得再生能耗最低的优化参数组合。结果表明, 贫液温度、贫液负荷、再生塔压力对再生能耗均具有显著性影响, 且贫液负荷和再生塔压力存在明显交互效应; 贫液温度和贫液负荷及贫液负荷和再生塔压力各自间的交互作用表明, 贫液负荷和再生塔压力的变化会影响再生能耗的大小; 响应曲面优化得到最佳工艺参数: 贫液温度30℃、贫液负荷0.24 mol/mol、再生塔压力1.80×10⁵ Pa、再生能耗3.12 GJ/t, 相比基准实验方案再生能耗下降28.4%。

关键词: CO₂捕集; 高炉煤气; 响应曲面法; Aspen Plus; 工艺参数

中图分类号: X701

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2021)08-0985-08

1 前 言

随着全球经济的快速发展, 对煤炭、石油及其他化石燃料资源的不断消耗, 导致大量CO₂的排放, 造成一系列社会和环境问题^[1]。钢厂作为CO₂的主要集中排放源之一, 捕集烟气中CO₂具有巨大的减排潜力。

关于CO₂捕集的研究, 虽然炼铁行业在单个源头排放的CO₂比燃煤发电厂多^[2], 但国内外学者对电厂CO₂捕集进行了大量研究, 而炼铁厂行业CO₂捕集到目前为止很少受到关注。许多研究人员认为, 针对电厂开发的CO₂捕集技术可能适用于炼铁过程, 但在实际应用中很难实现。主要是因为电厂和炼铁厂存在如下差异: (1) 尾气组分, 电厂尾气成分包括N₂, O₂, H₂O, CO₂, 其中CO₂体积浓度为10%~15%; 而炼铁过程产生的尾气成分包括N₂, CO, H₂, CO₂, 其中CO₂体积浓度为20%~23%; (2) 净化气体利用, 脱除CO₂后的炼铁尾气中含有大量可燃气体(CO, H₂), 可被重新利用作为发电厂的燃料气体; (3) 余热利用, 在钢铁工业中存在许多由于经济上的可行性而无法回收的中低温余热, 利用这些余热可以显著降低CO₂捕集过程的再生能耗。因此, 基于多边环境协定的高炉煤气CO₂捕集与分离技术在炼铁厂尾气处理方面具有广阔的发展前景^[3]。针对炼铁厂高炉煤气中CO₂捕集与分离技术, 主要以化学吸收法、物理吸附法和膜分离法为主。在化学吸收法方面, 日本的COURSE50项目、韩国浦项以及中国台湾中钢分别研究了不同化学吸收剂碳捕集系统的性能^[4,5]; 此外, 我国宝钢也提出利用钢厂特有余热作为碳捕集与分离技术的能量, 产品气

(高纯度的二氧化碳和高炉提质气)以经济方式多重利用的理念^[6]; 在物理吸附法方面, 日本的JFE公司研究了变压吸附法(PSA)技术从高炉煤气中分离和回收二氧化碳^[7]; 在膜分离法方面, 欧洲的超低CO₂炼钢项目(ULCOS)对最具有应用前景的炉顶煤气循环工艺(TGR-BF)、熔融还原工艺(HIsarna)、直接还原工艺(ULCORED)及电解还原铁工艺(ULCOWIN)等工艺中的炉顶煤气循环工艺进行了研究, 研究了三种不同类型的膜对高炉煤气中二氧化碳的回收^[8]。在以上CO₂捕集与分离技术中, 根据高炉煤气浓度较低、原料气流处于大气压下及煤气量大的条件, 采用化学吸收法因其碳捕集效果好、吸收能力强、处理风量大及工艺成熟等优点, 而在钢铁工业碳捕集上得到广泛应用。目前关于高炉煤气化学法碳捕集技术的研究主要集中在单一参数及新型吸收剂的开发对碳捕集率和再生能耗的影响^[4]。但在实际应用中化学吸收法碳捕集系统还需要考虑参数间的交互作用并进行优化。

限制CO₂化学吸收法捕集技术在CO₂集中排放源处推广的主要原因是再生塔所需能量较高。针对如何降低CO₂捕集能耗问题, 国内外学者在研发新型吸收剂、改进工艺流程和优化工艺参数这三个方面进行了一系列研究。针对新型吸收剂的研究, 一般是采用混合胺吸收剂替代单组分醇胺吸收剂^[9]; 此外, 还有一些学者利用离子液体捕集CO₂也能够显著降低碳捕集能耗^[10]。基于传统碳捕集工艺的流程改进在降低系统能耗方面, 一些学者提出了如吸收塔内部冷却工艺、贫富液分流与循环工艺、再生塔内部再热工艺等^[11-13]。优化工艺参数是

确定 CO₂ 捕集系统吸收剂后降低系统能耗的首要考虑因素^[14]，一些学者对优化 CO₂ 捕集工艺参数提出了正交试验法、神经网络算法与响应曲面法^[15-17]。其中采用正交试验法得到最优参数组合方案的能耗较基础方案下降 10.9%^[15]。其他一些参数优化方法的提出，在不同程度上反映了碳捕集系统的能耗特性^[16,17]。上述研究中，由于优化工艺参数不改变主工艺和吸收剂，而在实际生产中得到有效推广和应用。其中，采用响应曲面法相对上述优化方法是以建立连续变量曲面模型，考察影响能耗的因子及其交互作用并进行评价，确定最佳参数组合，且因实验设计合理、次数相对较少，而被运用到生物化工、机械加工、数值分析、工艺提取等众多领域。

对于优化工艺参数的研究，目前研究多集中在分析单一因素^[13,18-21](温度、压力、负荷、流量等)对碳捕集系统碳捕集率和再生能耗的影响。但单因素法存在实验次数较多、成本较高及试验并未考虑因素之间的相互影响等不足。为此本工作利用响应曲面法(Response Surface Methodology, RSM)优化碳捕集工艺参数，以降低碳捕集系统的再生能耗。鉴于贫液温度及贫液负荷通过碳捕集率影响吸收剂循环流量与富液负荷，从而改变溶液再生度及再生能耗，再生塔压力影响再沸器温度及再生能耗，再沸器温度的大小决定溶液再生的程度^[13,22]等情况。故本工作采用响应曲面法中的 Box-Behnken 设计方法考察主要影响因素(贫液温度、贫液负载率、再生塔压力)之间的交互作用对碳捕集系统再生能耗的影响，

对碳捕集系统工艺参数进行优化并得到最佳条件。

2 数值计算模型

2.1 流程简介

典型的醇胺溶液吸收 CO₂ 的流程如图 1 所示。该工艺系统的主要设备包括风机、吸收塔、再生塔、再沸器、输送泵和各种换热器等。工艺流程：(1) 煤气流程：高炉煤气经风机由吸收塔底部输送到吸收塔。在吸收塔中，高炉煤气中的 CO₂ 与吸收塔内自上而下喷淋的醇胺溶液进行逆流接触，并进行气液两相的传热传质，使得醇胺溶液与 CO₂ 发生化学反应，吸收煤气中的 CO₂，被吸收了 CO₂ 的净化煤气由塔顶上部离开。(2) 吸收剂流程：在吸收塔内，自上而下的醇胺溶液吸收了自下而上煤气中大量的 CO₂ 变成富液。富液经富液泵送到贫富液热交换器进行换热升温，升温后的富液由再生塔顶部送入再生塔。在再生塔中，富液与塔底再沸器产生自下而上的蒸汽进行逆流接触，在温度和压力的作用下，使富液中吸收的 CO₂ 与醇胺溶液发生解吸分离，富液中的 CO₂ 浓度降低，此时的溶液称为贫液。贫液经贫液泵送到贫富液热交换器进行换热降温后，再经贫液冷凝器进一步降温重新返回吸收塔，完成醇胺溶液捕集 CO₂ 循环吸收。(3) CO₂ 流程：在再生塔解吸出来的 CO₂ 经冷凝器将溶液蒸汽冷凝回流后，得到较高纯度的 CO₂，经干燥压缩后存储以便后续利用。

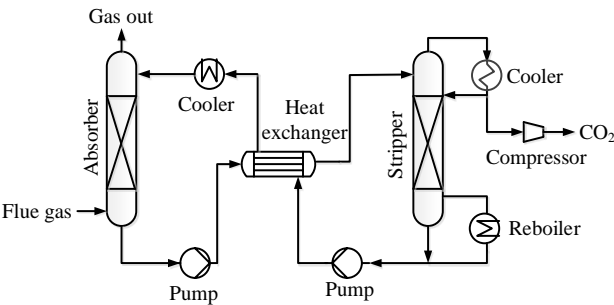


图 1 醇胺溶液捕集高炉煤气 CO₂ 工艺流程
Fig.1 Process flow of blast furnace gas CO₂ capture by alcohol amine solution

2.2 模型及气源参数

本工作采用 Aspen Plus 软件自带的专用胺数据包模拟醇胺溶液脱碳过程，将 CO₂、N₂、CO 和 H₂ 气体设置为亨利组分，用亨利定律进行计算，具体气源参数如表 1 所示。吸收塔和再生塔选择 RateFrac 模块，吸收塔和再生塔填料层高度 6.1 m，塔径 0.43 m，填料类型为 IMTP，理论塔板数 20 级，再生塔回流比为 0.5。对于单乙醇胺 MEA-CO₂-H₂O 体系反应动力学，采用基于 Rate-Based

的非平衡模型进行计算。

2.3 数据分析方法

表 1 高炉煤气参数
Table 1 Blast furnace gas parameters

Temperature /℃	Pressure /kPa	CO mole fraction /%	CO ₂ mole fraction /%	N ₂ mole fraction /%	H ₂ mole fraction /%
40	101.3	25	20	51	4

(1) 碳捕集率

碳捕集率又称吸收率,表示被溶液吸收 CO₂ 的质量与进气中 CO₂ 总量之比。吸收率的大小用来判断对 CO₂ 处理的程度。碳捕集率计算式如式(1)所示:

$$\eta_{\text{CO}_2} = \frac{F_1 C_1 - F_2 C_2}{F_1 C_1} \times 100\% \tag{1}$$

式中, η_{CO_2} 为 CO₂ 的捕集率(%), F_1, F_2 为吸收塔煤气进出口流量(kg/h), C_1, C_2 分别为吸收塔进出口煤气中 CO₂ 浓度(kg/kg)。

(2) 溶液负荷

溶液 CO₂ 负荷是指溶液中 CO₂ 物质的量与 MEA 物质的量之比。溶液负荷的大小用来判断对 CO₂ 吸收的程度。溶液负荷计算式如式(2)所示:

$$\alpha_{\text{CO}_2} = \frac{n_{\text{CO}_2} + n_{\text{HCO}_3^-} + n_{\text{CO}_3^{2-}} + n_{\text{MEACOO}^-}}{n_{\text{MEA}} + n_{\text{MEACOO}^-} + n_{\text{MEAH}^+}} \tag{2}$$

式中, α_{CO_2} 为溶液 CO₂ 负荷, $n_{\text{CO}_2}, n_{\text{HCO}_3^-}, n_{\text{CO}_3^{2-}}, n_{\text{MEACOO}^-}, n_{\text{MEA}}, n_{\text{MEAH}^+}$ 分别为 MEA 水溶液中各组分的物质的量(mol)。

(3) 再生能耗

再生能耗为再沸器内吸收剂再生消耗的能量与再生塔塔顶解吸出的 CO₂ 质量流量之比。再生能耗计算式如式(3)所示:

$$q_{\text{re}} = \frac{Q_{\text{re}}}{10^3 G_{\text{CO}_2}} \tag{3}$$

式中, q_{re} 为回收单位质量的 CO₂ 的再生能耗(GJ/t), Q_{re} 为再沸器热负荷(GJ/h), G_{CO_2} 为单位时间再生的 CO₂ 的流量(kg/h)。

2.4 模型验证

为了验证本工作模型计算结果的正确性,将基准实验工况为 MEA 质量浓度 30%, 贫液负荷为 0.324 mol/mol 的模拟结果与其他学者的研究结果进行对比,如表 2 所示。可以看出,本工作模拟结果与文献数据相差不大,且再生能耗之间的误差均在 9% 以内,小于最大允许误差 15%^[23,24],证明了高炉煤气碳捕集模拟过程的正确性和可靠性。

2.5 响应曲面设计

采用 Design-Expert 8.0.6.1 软件中心组合设计(Box-Behnken Design, BBD)研究各影响因素之间的交互作用及其显著性,得出多元二次回归方程来拟合影响因素与响应值之间的函数关系,通过对回归方程的分析寻求最优工艺参数,来减少试验规模(试验次数)、缩短试验周期和避免试验盲目性,获得理想的试验结果以及得

出科学的结论。

本实验选取完全二次回归模型,在保持解吸塔的进料位置、回流比、理论塔板数不变的基础上,以贫液温度(A)、贫液负荷(B)及再生塔压力(C)为影响因素,再生能耗(Y_p)为响应值。计算工况采用 3 因素 3 水平的方法进行设计,影响因素设计结果如表 3 所示。

表 2 模拟结果与文献数据对比
Table 2 Comparison of simulation results and literature data

Project	Exp. ^[19]	Exp. ^[20]	This work
CO ₂ content of flue gas/%	20%	20.1%	20%
Carbon capture rate/%	90%	88.3%	85.6%
MEA mass fraction/%	30%	30%	30%
Rich liquid load/(mol/mol)	0.487	0.488	0.470
Lean liquid load/(mol/mol)	0.328	0.233	0.324
Regeneration energy consumption/(GJ/t)	4.01	4.09	4.36

表 3 影响因素编码及水平
Table 3 Influencing factor coding and level

Factor	Code	Level		
		-1	0	1
Lean liquid temperature/℃	A	30	40	50
Lean liquid load/(mol/mol)	B	0.1	0.2	0.3
Regeneration tower pressure/ $\times 10^5$ Pa	C	1.2	1.5	1.8

3 结果与分析

3.1 模型的方差分析

基于 3 因子 3 水平设计 17 种实验方案,在 2.2 节所述的模型的基础上,保持吸收工艺参数一致并进行模拟计算,得到各种实验方案的模拟结果如表 4 所示。

表 4 中的模型计算结果为 Aspen Plus 模拟计算值,回归结果为基于响应曲面法预测模型的预测计算值。对模拟结果用 Design Expert 进行多元回归拟合分析,建立目标函数再生能耗(Y_p)与贫液温度(A)、贫液负荷(B)、再生塔压力(C)的二次项多项式回归方程,如式(4)所示,且响应曲面所得到的回归方程显著性参数如表 5 所示。

$$Y_p = 4.68 + 0.17X_1 - 4.13X_2 - 1.3X_3 + 0.35X_1X_2 + 0.045X_1X_3 + 1.41X_2X_3 + 0.087X_1^2 + 3.84X_2^2 + 0.4X_3^2 \tag{4}$$

回归模型一般通过 F 检验值对应的显著水平 P 值来反映模型和各影响因素自变量对响应值显著性的影响。由表 5 可知回归模型的 F 检验值为 364.22,对应显著水平 P 值(Prob> F)<0.0001,即响应值与二次多项回归方程具有极高的显著性,拟合良好,模型有效,其中 B, C, AB, BC, B², C² 参数的 P 值<0.05,表明贫液负荷、再生塔压力、贫液温度和贫液负荷及贫液负荷和再生塔压力交互

表4 模型计算模拟结果与回归结果比较					
Table 4 Comparison of model calculation simulation results and regression results					
Number	A	B	C	$Y_p/(GJ/t)$	
				Actual	Predition
1	30	0.1	1.5	12.75	12.82
2	40	0.2	1.5	4.59	4.68
3	50	0.1	1.5	12.16	12.47
4	30	0.3	1.5	4.17	3.86
5	50	0.3	1.5	4.98	4.91
6	40	0.2	1.5	4.59	4.68
7	30	0.2	1.2	6.03	6.25
8	40	0.2	1.5	4.59	4.68
9	50	0.2	1.2	6.52	6.5
10	30	0.2	1.8	3.54	3.56
11	50	0.2	1.8	4.21	4
12	40	0.1	1.2	15.95	15.66
13	40	0.2	1.5	4.59	4.68
14	40	0.3	1.2	4.49	4.58
15	40	0.1	1.8	10.34	10.25
16	40	0.3	1.8	4.52	4.81
17	40	0.2	1.5	4.59	4.68

作用、贫液负荷的平方和再生塔压力的平方效应对再生能耗的影响具有显著性;其他参数的 P 值 >0.05 ,表明其他因素对再生能耗的影响不显著。

模型的复相关系数 $R^2=0.9979$,校正决定系数 R_{Adj}^2 为0.9951,模型信噪比(Adeq Precision, S/N)为60.557 >4 ,表明该模型99.51%的响应值变化可以被解释,仅有总变异的不到1%不能用该模型来解释,预测决定系数 R_{Pred}^2 和校正决定系数 R_{Adj}^2 分别为0.9659,0.9951,二者相差仅为0.0292 <0.2 ,CV(变异系数)=3.93% $<10\%$,表明该模型的分辨力、拟合精度较高,误差较小,用该二次回归模型可预测及优化分析预处理的运行条件。

其中CV表征试验数据的离散程度,其值越小则说明测试数据之间的差异越小,数据的精确性越高。变异系数(CV)=标准偏差/平均值 $\times 100\%$ 。

图2为再生能耗的预测值与实验值的拟合图,相关系数 $R^2=0.9972$,斜率0.9969,都基本接近于1,且相对平均偏差(AARD)为0.0249,可以看出预测值基本落在实验数据点周围,它们基本分布在直线 $y=x$ 上,说明该模型的预测性能良好,进一步表明了该模型可替代实际值进行优化分析。

3.2 响应曲面交互作用分析

响应曲面3D图为响应值与各影响因素所构成的三维空间拟合曲面图,通过观察曲面的倾斜度确定两者对响应值的影响程度,表明各因素变量间的相互作用。本工作在以上响应曲面函数和回归方程方差分析的基础

表5 响应曲面优化设计回归方程方差分析						
Table 5 Response surface optimization design regression equation variance analysis						
Source	SS	DF	MS	F-value	P-value	Significance
Model	222.58	9	24.73	364.22	<0.0001	***
A	0.24	1	0.24	35.1	0.1033	
B	136.46	1	136.46	2009.65	<0.0001	***
C	13.47	1	13.47	198.35	<0.0001	**
AB	0.49	1	0.49	7.22	0.0313	**
AC	8.1×10^{-3}	1	8.1×10^{-3}	0.12	0.7399	
BC	7.95	1	7.95	117.12	<0.0001	***
A ²	0.032	1	0.032	0.47	0.5130	
B ²	62.01	1	60.01	913.19	<0.0001	***
C ²	0.67	1	0.67	9.80	0.0166	**
Residual	0.48	7	0.068	—	—	
Cor. total	223.05	16	—	—	—	
$R^2=0.9979$ $R_{Pred}^2=0.9659$ $R_{Adj}^2=0.9951$ Adeq Precision=60.557						

Note: *** is extremely significant ($P<0.001$), ** is highly significant ($P<0.01$), * is significant ($P<0.05$).

上利用 Design Expert 绘制了贫液温度、贫液负荷、再生塔压力与再生能耗之间的曲面关系图,其中任意一幅图都表示三个因素中一个取零水平时,另外两个因素相互作用对再生能耗的影响。响应曲面等高线图的形状可反映各因素变量间交互效应的强弱,若形状为圆形,则表示两个因素变量的交互作用不显著;若为椭圆形,则表示交互作用显著。

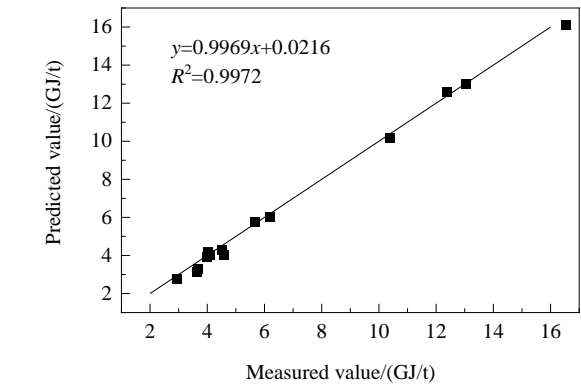


图2 再生能耗的预测值和实测值的线性回归分析
Fig.2 Linear regression analysis of predicted and measured values of renewable energy consumption

图3为再生塔压力为 1.50×10^5 Pa时,贫液温度和贫液负荷的交互作用对再生能耗的影响。其中图3(a)中等高线上的数值为再生能耗,以下图4(a)和5(a)等高线上数值均是如此。由图3可以看出,当贫液温度为30~50℃,贫液负荷为0.21~0.3 mol/mol时,再生能耗最低,经济效益最佳。当贫液温度为30℃时,随贫液负荷增

加,再生能耗缓慢下降;贫液温度为50℃时,随贫液负荷增加,再生能耗呈下降趋势,但下降趋势没贫液温度为30℃变化明显。贫液温度不变时,增大贫液负荷,贫液吸收CO₂的含量会逐渐减少,且随着贫液负荷的进一步增大,贫液几乎不吸收CO₂,脱碳反应趋于停止,再生能

耗趋势变缓。产生这种现象的主要原因是贫液负荷小即贫液内CO₂含量较少,在吸收塔内吸收效果会增大,从而导致CO₂产量增大,再生能耗上升^[21]。通过曲面的倾斜程度可知,贫液温度和贫液负荷之间的交互作用对再生能耗的影响较大,与模型分析结果一致。

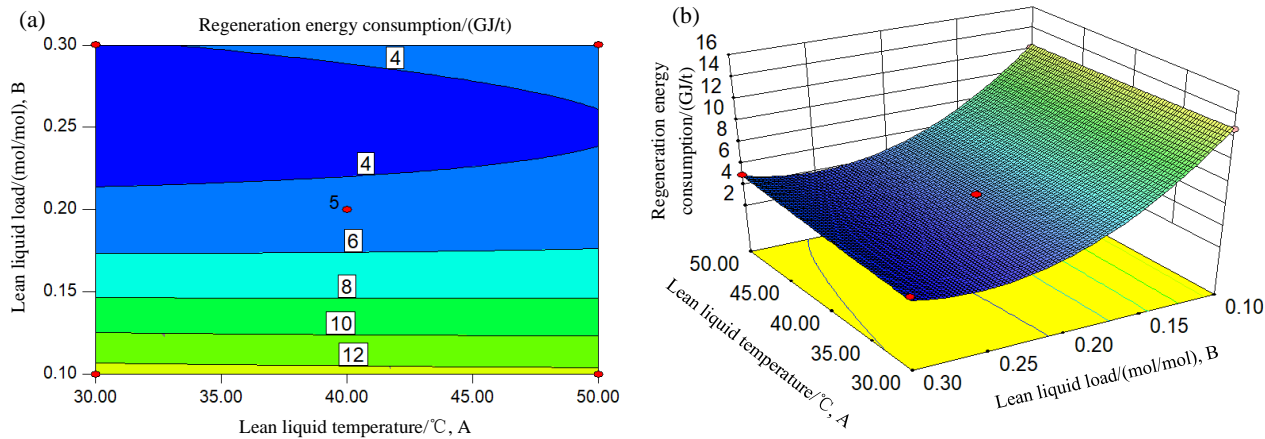


图3 贫液温度和贫液负荷对再生能耗的等高线(a)与响应曲面(b)
Fig.3 Contours (a) and response surface (b) of lean liquid temperature and lean liquid load on regeneration energy consumption

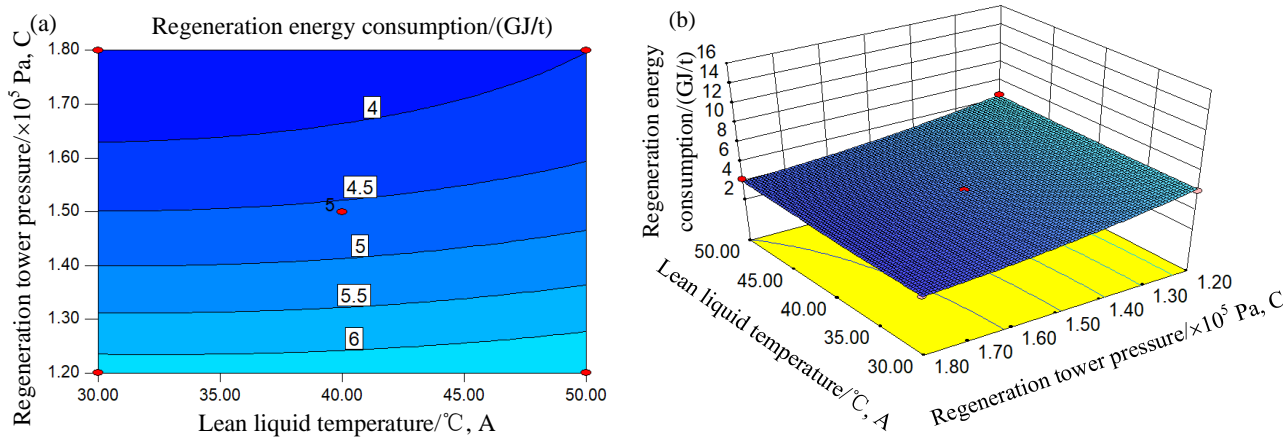


图4 贫液温度和再生塔压力对再生能耗的等高线(a)与响应曲面(b)
Fig.4 Contours (a) and response surface (b) of lean liquid temperature and regeneration tower pressure on regeneration energy consumption

图4为当贫液负荷为0.20 mol/mol时,贫液温度和再生塔压力的交互作用对再生能耗的影响。由图4可以看出,当贫液温度为30~50℃,再生塔压力为1.63×10⁵~1.80×10⁵ Pa时,再生能耗最低,经济效益最佳。当贫液温度为30℃时,随着再生塔压力的增加,再生能耗呈降低趋势;贫液温度为50℃时,随着再生塔压力的增加,再生能耗呈下降趋势,但下降趋势比贫液温度为30℃变化明显。当再生塔压力较高时,再沸器的温度升高,再生能耗降低^[13,22]。通过曲面的倾斜程度可知,贫液温度和再生塔压力之间的交互作用对再生能耗的影响不明显,

与模型分析结果一致。

图5为当贫液温度为40℃时,贫液负荷和再生塔压力的交互作用对再生能耗的影响。由图5可以看出,当贫液负荷为0.19~0.29 mol/mol,再生塔压力为1.30×10⁵~1.80×10⁵ Pa时,再生能耗最低,经济效益最佳。当贫液负荷为0.10 mol/mol时,随着再生塔压力的增加,再生能耗缓慢降低;贫液负荷为0.30 mol/mol时,随着贫液负荷的增加,再生能耗未发生明显变化。当贫液负荷不变时,增大再生塔压力,会导致再沸器的温度增加,再生能耗会随再沸器温度的升高而降低。通过曲面的倾斜程

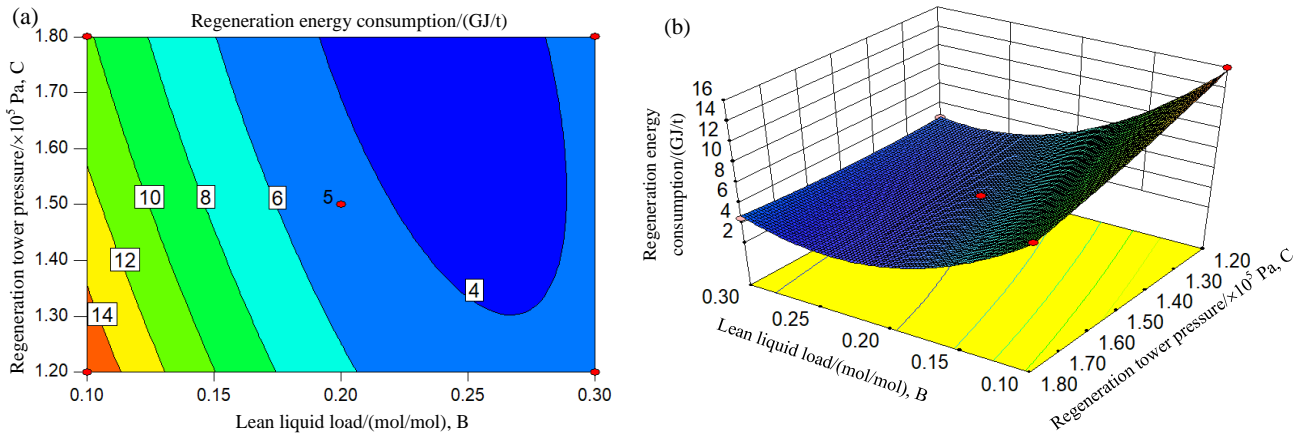


图5 贫液负荷和再生塔压力对再生能耗的等高线(a)与响应曲面(b)

Fig.5 Contours (a) and response surface (b) of lean liquid load and regeneration tower pressure on regeneration energy consumption

度可知,贫液负荷和再生塔压力的交互作用对再生能耗影响较大,与模型分析结果一致。

从图3~5可以看出,图5(a)的椭圆比图3(a)和图4(a)的更扁平,图5(b)的曲面坡度较大,图3(b)次之、图4(b)的曲面坡度较为平缓,说明BC间的交互作用比AB、AC间的更显著。结合表5可知,各因素之间的交互作用对再生能耗的影响排序为BC>AB>AC。

3.3 验证优化工艺参数

利用统计学软件Design Expert中的Optimization功能寻得最优工艺参数组合为贫液温度30℃、贫液负荷0.24 mol/mol、再生塔压力 1.80×10^5 Pa、再生能耗2.94 GJ/t,其合意性为0.933。根据优化的工艺参数,采用Aspen Plus进行再生能耗模拟实验,结果显示在优化工艺参数的操作条件下,再生能耗为3.12 GJ/t。实验值略高于预测值,但二者相对误差仅为6.12%,进一步说明RSM优化预测模型的可靠性,且相比于2.4节所述基准方案的再生能耗4.36 GJ/t,优化后的再生能耗下降28.4%,可见优化碳捕集系统工艺参数能对降低系统能耗提供一定参考意义。

4 结论

为降低高炉煤气碳捕集能耗,利用Aspen Plus软件与响应曲面法(RSM)相结合的方法,研究了工艺流程参数对碳捕集能耗的影响规律,进而得到最优参数组合,主要研究结论如下。

(1) 贫液温度(A)、贫液负荷(B)及再生塔压力(C)对碳捕集系统的再生能耗均有影响,B、C对再生能耗的影响最大,A的影响次之,且BC之间存在明显的交互效应。

(2) 由AB之间交互作用分析可知,贫液负荷越小对

CO₂吸收效果越好,但会导致再生能耗增大;BC之间的交互作用结果显示,适当的增加再生塔压力会降低再生能耗。

(3) 当贫液温度为30℃、贫液负荷为0.24 mol/mol、再生塔压力为 1.80×10^5 Pa是最优参数组合,碳捕集再生能耗为3.12 GJ/t,相比基准方案的4.36 GJ/t,下降28.4%。

参考文献

- [1] 严红燕, 罗超, 胡晓军, 等. CO₂在钢铁工业资源利用现状 [J]. 有色金属科学与工程, 2018, 9(6): 26-30.
Yan H Y, Luo C, Hu X J, et al. Utilization status of CO₂ in iron and steel industries [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2018, 9(6): 26-30.
- [2] Gielen D. CO₂ removal in the iron and steel industry [J]. Energy conversion and management, 2003, 44(7): 1027-1037.
- [3] Zhu T Y, Xu W Q, Shao M P. CO₂ emission in China's iron and steel industry [M]//Cavaliere P. Ironmaking and Steelmaking Processes: Greenhouse Emissions, Control, and Reduction. Cham; Springer International Publishing. 2016: 341-354.
- [4] Goto K, Okabe H, Chowdhury F A, et al. Development of novel absorbents for CO₂ capture from blast furnace gas [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011, 5(5): 1214-1219.
- [5] Rhee C H, Kim J Y, Han K, et al. Process analysis for ammonia-based CO₂ capture in ironmaking industry [J]. Energy Procedia, 2011, 4: 1486-1493.
- [6] 宋清诗, 张永杰, 陈国军. 高炉煤气碳捕获技术浅析 [J]. 宝钢技术, 2017, (3): 53-58.
Song Q S, Zhang Y J, Chen G J. Analysis of carbon capture technology for blast furnace gas [J]. Baosteel Technology, 2017, (3): 53-58.
- [7] Haraoka T, Mogi Y, Saima H. PSA system for the recovery of carbon dioxide from blast furnace gas in steel works the influence of operation conditions on CO₂ separation [J]. Kagaku Kogaku Ronbunshu, 2013, 39(5): 439-444.
- [8] Lie J A, Vassbotn T, Hgg M B, et al. Optimization of a membrane process for CO₂ capture in the steelmaking industry [J].

- International Journal of Greenhouse Gas Control, 2007, 1(3): 309–317.
- [9] Tobiesen F A, Svendsen H F, Mejdell T. Modeling of blast furnace CO₂ capture using amine absorbents [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46(23): 7811–7819.
- [10] Wappel D, Grondal G, Kalb R, et al. Ionic liquids for post-combustion CO₂ absorption [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2010, 4(3): 486–494.
- [11] Mouillec Y L, Neveux T, Azki A A, et al. Process modifications for solvent-based post combustion CO₂ capture [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2014, 31: 96–112.
- [12] Mouillec Y L, Kanniche M. Screening of flowsheet modifications for an efficient monoethanolamine (MEA) based post-combustion CO₂ capture [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011, 5(4): 727–740.
- [13] 李小飞, 王淑娟, 陈昌和. 胺法脱碳系统流程改进及优化模拟 [J]. 化工学报, 2013, 64(10): 3750–3759.
Li X F, Wang S J, Chen C H. Modification of process and optimization for CO₂ capture systems using amine solution [J]. CIESC Journal, 2013, 64(10): 3750–3759.
- [14] Salkuyeh Y K, Mofarahi M. Reduction of CO₂ capture plant energy requirement by selecting a suitable solvent and analyzing the operating parameters [J]. International Journal of Energy Research, 2013, 37(8): 973–981.
- [15] 何卉, 方梦祥, 王涛, 等. 燃煤烟气化学吸收碳捕集系统分析与优化 [J]. 化工进展, 2018, 37(6): 2406–2412.
He H, Fang M X, Wang T, et al. Analysis and optimization of post-combustion CO₂ capture system based on chemical absorption [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(6): 2406–2412.
- [16] 揭超, 赵东亚, 李兆敏, 等. 基于神经网络的电厂烟气二氧化碳捕集过程建模 [J]. 计算机与应用化学, 2015, 32(6): 757–760.
Jie C, Zhao D Y, Li Z M, et al. Neural network based process modeling of carbon dioxide capture for power plant flue gas [J]. Computers and Applied Chemistry, 2015, 32(6): 757–760.
- [17] 邓骥, 刘红, 陈海涛, 等. 基于RSM的天然气脱硫脱碳装置适应性建模及分析 [J]. 石油与天然气化工, 2014, 43(6): 595–601.
- Deng J, Liu H, Chen H T, et al. Establishment and analysis for adaptive model of natural gas desulfurization and decarburization facilities based on RSM [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2014, 43(6): 595–601.
- [18] 张亚萍, 刘建周, 季芹芹, 等. 醇胺法捕集燃煤烟气CO₂工艺模拟及优化 [J]. 化工进展, 2013, (4): 215–220.
Zhang Y P, Liu J Z, Ji Q Q, et al. Process simulation and optimization of flue gas CO₂ capture by the alkanolamine solutions [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2013, (4): 215–220.
- [19] Luo X, Liu S, Gao H, et al. An improved fast screening method for single and blended amine-based solvents for post-combustion CO₂ capture [J]. Separation and Purification Technology, 2016, 169: 279–288.
- [20] Choi J, Cho H, Yun S, et al. Process design and optimization of MEA-based CO₂ capture processes for non-power industries [J]. Energy, 2019, 185: 971–980.
- [21] 赵东亚, 揭超, 李兆敏. 醇胺法碳捕集工艺解吸塔能耗分析 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(6): 150–155.
Zhao D Y, Jie C, Li Z M. Energy consumption analysis of desorption column in amine-based CO₂ capture process [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(6): 150–155.
- [22] 刘文毅, 唐宝强, 徐钢, 等. 大规模碳捕集电站贫液CO₂负载率优化研究 [J]. 动力工程学报, 2015, 35(1): 76–82.
Liu W Y, Tang B Q, Xu G, et al. Optimization on lean solvent CO₂ loading in coal-fired power plants with large-scale CO₂ capture [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(1): 76–82.
- [23] 魏舒婷, 钱付平, 程家磊, 等. 蜂窝状空气滤清器的流场分析及结构优化 [J]. 过程工程学报, 2019, 19(2): 271–278.
Wei S T, Qian F P, Cheng J L, et al. Flow field analysis and structure optimization of honeycomb air filter [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2019, 19(2): 271–278.
- [24] Kim J Y, Han K, Chun H D. CO₂ absorption with low concentration ammonia liquor [J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 757–762.