

基于 NSGA-II 和 RSM 的天然气管净化单元多目标优化

杨凯翔, 郭超, 陈志豪, 徐梁, 刘炳成*
(青岛科技大学机电工程学院, 山东青岛 266061)

摘要:针对高含硫天然气净化装置存在的再生单元能耗高及商品气收率不足等问题, 搭建基于响应面-遗传算法的多目标协同优化模型。通过 Aspen Plus 模拟软件结合 Box-Behnken 响应面设计, 研究贫液温度、填料高度、吸收压力和溶液循环量对再生能耗的交互影响规律, 并基于非支配排序遗传算法(NSGA-II)构建 Pareto 最优解集。优化结果表明, 当贫液温度 46℃、填料高度 13.5 m、吸收压力 4.7 MPa、溶液循环量 251 m³/h 时, 再生能耗降至 3.312 GJ/t, 较传统工艺节约低压蒸气 31.2×10⁴ t/a, 按工业蒸气均价 220 元/t 计, 年节约人民币约 6 864 万元。

关键词: 气体净化; 响应曲面; 遗传算法; 能耗优化; Aspen Plus; 数值模拟

中图分类号: TQ028.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2025)S2-0449-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S2.077

Multi-objective optimization of a natural gas purification unit by NSGA-II and RSM

YANG Kai-xiang, GUO Chao, CHEN Zhi-hao, XU Liang, LIU Bing-cheng*

(College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: To mitigate the challenges, such as excessive energy consumption in the regeneration unit and inadequate product gas recovery, existed in high-sulfur natural gas purification system, a multi-objective collaborative optimization model is established, which integrating response surface methodology and genetic algorithm. Aspen Plus simulation software, coupled with a Box-Behnken response surface design, is employed to examine the interactive influences of lean liquid temperature, packing height, absorption pressure, and solution circulation rate on regeneration energy consumption. A Pareto-optimal solution set is derived through using the non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II). The optimization results reveal that under the optimal conditions including 46℃ of lean liquid temperature, 13.5 m of packing height, 4.7 MPa of absorption pressure, and 251 m³/h of solution circulation rate, the regeneration energy consumption decreases to 3.312 GJ per ton of acid gas. Compared with conventional processes, this optimization can save approximately 31.2×10⁴ tons of low-pressure steam. Given an average industrial steam price of RMB 220 per ton, the estimated annual cost savings reach approximately RMB 68.64 million.

Key words: gas purification; response surface; genetic algorithm; energy consumption optimization; Aspen Plus; numerical simulation

随着我国能源结构的稳步调整, 天然气作为一种高效、清洁、经济的化石燃料被广泛应用于化工、城市燃气等多个行业, 在我国能源体系中发挥着越来越重要的作用^[1]。“十四五”期间我国天然气消费量预计将达到 4.5×10¹¹~5×10¹¹ m³。2020 年, 全国天然气产量达到 1.925×10¹¹ m³, 预计到 2035 年国内天然气产量将达到 3.300×10¹¹ m³ 左右^[2]。原油气中除了可燃成分外, 通常还含有二氧化碳、硫化氢、有机硫产物(如硫醇)以及惰性气体等杂质, 不仅会降低天然气的质量, 还可能对后续加工设备造成腐蚀和损害^[3]。所以必须对原油气中的杂质进行处理, 使其符合最终用户需求。国家标准 GB

17820—2018《天然气》替代 GB 17820—2012《天然气》, 将一类气的总硫含量从 60 mg/m³ 降至 20 mg/m³, 并将商品天然气中硫化氢的含量限制为 6 mg/m³。尽管新的国家标准对天然气质量提出了严格规定, 但许多处理厂仍继续遵循废止的 GB 17820—2012 标准, 净化效果不达标且存在 CO₂ 过度脱除等问题, 与常规净化过程相比, 高浓度的酸性气体使净化过程更加复杂, 而且导致气体净化度和商品气产率下降, 成为一个亟待解决的难题。

针对降低酸气净化单元能耗问题, 采用单因素分析法模拟研究不同原料气条件下胺液循环量和塔板位置的调节范围, 以降低整体装置的能耗。AI-

收稿日期: 2025-03-14; 修回日期: 2025-07-15

基金项目: 国家能源集团科研项目(GJNY2030DXDM-19-12.4)

作者简介: 杨凯翔(2000-), 男, 硕士生; 刘炳成(1975-), 男, 博士, 教授, 研究方向为环保新技术与装备, 通讯联系人, bingchengL@163.com。

lagtah 等^[4]对操作参数进行了模拟和讨论,以满足较低能源成本所需的气体纯度。Rouzbahani 等^[5]使用稳态流程模拟器对天然气脱水单元进行了模拟,并基于模拟结果进行了敏感性分析,结果表明溶剂摩尔流量增加 10%可使干气露点降低 6%,且不会导致总能耗和挥发性有机化合物(VOC)排放的显著增加。郭良辉等^[6]通过 Aspen HYSY 模拟计算,重点分析了再生塔压力、胺液循环量、富胺液进塔温度对重沸器能耗的影响规律。邱奎等^[7]采用 Aspen Plus 软件对操作条件对普光净化厂脱硫装置能耗的影响规律进行研究,为节能优化提供了方向。何卉等^[8]提出将正交实验法、神经网络算法与相应曲面算法应用于工艺优化,所得最优组合方案的能耗较基础方案下降 10.9%。

如上所述,当前天然气净化工艺能耗优化研究多局限于单因素分析上,对多目标全局优化的系统研究较为匮乏^[9-10]。在现场工况中,各影响因素通常存在复杂的相互作用,单因素法存在较大的局限性^[11]。因此,本文中采用响应曲面法系统分析关键工艺参数间的交互作用对能耗的影响规律,并以天然气净化标准与富液负荷限制为约束条件,引入非支配排序遗传算法建立多目标优化模型,对 Pareto 最优解进行求取,实现再生能耗的最小化与商品气产率最大化的综合平衡,为天然气净化厂节能降耗与经济效益提升提供指导。

1 数值计算模型

1.1 净化工艺流程

天然气净化工艺流程如图 1 所示。本工艺采用分级吸收-催化水解耦合技术,具体流程如下:原料气首先经多级滤装置进行初步净化处理,有效截留固体杂质及颗粒物。净化后的原料气进入一级吸收塔,与二级吸收塔的半贫 MDEA 溶液进行逆向接触,优先选择性脱除 H₂S 及大部分 CO₂。初步净化的气体经热交换器实现余热回收后,通过预热器进一步升温,使其达到催化水解反应温度。在催化水解反应器内,羰基硫(COS)被催化水解为 CO₂ 和 H₂S。反应后的气体经过换热器降温后,进入二级吸收塔进行深度脱酸处理。一级吸收塔底产生的富液经过闪蒸塔闪蒸换热处理后,进入再生塔,与再生塔自下而上的蒸气接触,进行汽提再生。再生贫液经过冷却后送至吸收塔,完成整个系统溶液的循环。

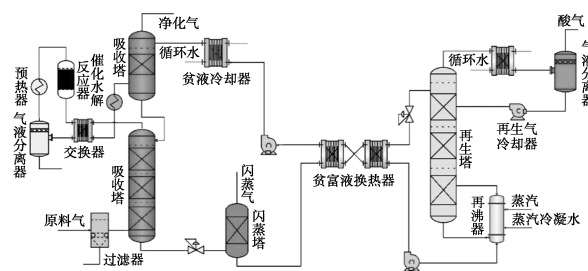


图 1 高含硫天然气净化工艺流程

1.2 模型及气源参数

研究采用 Aspen Plus 模拟软件搭建醇胺法脱酸系统模型,液相非理想性计算采用 ELECNRTL 方程,气相采用 Redlich-Kwong 方程。基准工况设定如下:原料气处理规模为 125 000 m³/h,年运行时间 8 000 h,入口压力为 4.5 MPa,温度 28℃,气源如表 1 所示。吸收塔采用基于速率模型的 RateFrac 严格计算模块,填料类型为金属板波纹规整填料,换热器模块采用 HeatX 模型,使用简捷计算方法来快速计算换热器性能。

表 1 天然气气源参数

组分	He	N ₂	CO ₂	H ₂ S	CH ₄	C ₂ H ₆	有机硫
摩尔分数/%	0.06	0.81	6.57	5.55	86.83	0.04	340.6 mg/m ³

1.3 模型验证

为保证采用此模型与数据包进行计算的准确性,通过随机抽样获取一组现场装置运行数据进行模型验证分析。结果如表 2 所示,模拟值与实测值的 H₂S、CO₂ 含量相对误差分别为 6.25% 和 5.56%,在误差允许范围内,表明所搭建的模型可以较为准确地反映实际运行过程,满足天然气净化工艺模拟的工程精要求。

表 2 胺法脱硫过程数据包模拟结果

名称	溶液 循环量/ (m ³ ·h ⁻¹)	进料气 流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	原料气流量/ (kmol·h ⁻¹)		净化气流量/ (kmol·h ⁻¹)	
			H ₂ S	CO ₂	H ₂ S	CO ₂
KMDEA	350	125000	309.41	365.28	0.0045	20.71
现场数据	350	125000	309.41	365.28	0.0048	19.62

1.4 响应曲面设计

研究采用 Design-Expert 软件的 Box-Behnken Design 模块开展四因素三水平响应面优化实验,将贫液温度、填料高度、吸收压力、溶液循环量分别以 A、B、C、D 代替,以再生能耗(Y₁)和净化气 CO₂ 含量(Y₂)为双响应目标。按照-1,0,+1 的低中高水

进行模拟方案的设计。实验选取 5 个中心点实验,经式(1)计算需要 29 组数值计算工况,各个实验点的设计见表 3。

$$N = 2K(K - 1) + C_0 \quad (1)$$

式中, K 为因素个数; C_0 为中心点重复次数。

表 3 实验设计因素水平分布

因素	水平		
	-1	0	+1
贫液温度 $A/^\circ\text{C}$	32	40	48
填料高度 B/m	12	15.5	19
吸收压力 C/MPa	3.6	4.5	5.4
溶液循环量 $D/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	210	262	314

2 结果与分析

2.1 模型方差分析

基于表 3 所示 Box-Behnken 实验设计,通过 Aspen Plus 数值模拟计算得模拟结果数据详见表 4。运用 Design-Expert 软件内置的多元非线性回归分析模块得回归方程如式(2)所示。

表 4 BBD 工况设计及结果

Run	A	B	C	D	Y_1	Y_2
1	0	-1	-1	0	3.709	3.878
2	+1	0	-1	0	3.438	2.912
3	+1	0	+1	0	3.340	2.10
4	-1	+1	0	0	3.469	3.004
5	0	0	0	0	3.452	2.981
6	+1	+1	0	0	3.296	1.993
7	0	0	+1	+1	3.949	2.483
8	0	+1	0	-1	2.976	2.479
9	0	0	-1	+1	4.177	3.316
10	+1	0	0	+1	3.908	2.357
11	0	0	0	0	3.453	2.932
12	0	-1	0	+1	4.198	3.383
13	-1	-1	0	0	3.769	3.823
14	+1	-1	0	0	3.446	2.931
15	0	0	-1	-1	2.976	3.381
16	0	+1	+1	0	3.323	2.024
17	0	+1	-1	0	3.458	2.973
18	0	+1	0	+1	3.927	2.386
19	0	0	+1	-1	2.953	2.391
20	-1	0	0	-1	3.016	3.379
21	-1	0	+1	0	3.435	2.751

22	0	-1	+1	0	3.452	3.012
23	0	-1	0	-1	2.976	3.260
24	-1	0	0	+1	4.267	3.468
25	0	0	0	0	3.421	2.955
26	0	0	0	0	3.425	2.880
27	0	0	0	0	3.449	2.899
28	+1	0	0	-1	2.967	2.632
29	-1	0	-1	0	3.752	3.991

$$Y_1 = 3.47277 - 0.064231A - 0.082546B - 0.046605C + 0.017248D + 0.001334AB + 0.000761AC - 0.000186AD + 0.000980BC - 0.000372BD - 0.000109CD + 0.000555A^2 + 0.001815B^2 + 0.000219C^2 + 0.000222D^2 \quad (2)$$

模型及各因素的显著性通过 P 值进行评价,该模型的 P 值小于 0.000 1,表明模型高度显著。同时,模型的 F 值为 376.04,进一步验证了模型的显著性。回归方程与实验数据的偏差程度通过失拟度进行衡量。本实验的二次模型失拟度为 3.76,不显著,该模型具有合理性,可用回归方程代替真实函数对实验结果进行分析和讨论。二次模型中 R^2 、 R^2_{Adj} 分别是 0.997 3、0.994 7,表明该模型具有较高的可信度。图 2 预测值与实测值线性回归图中,数据点沿对角线直线排列分布,表明预测值与实际值之间具有良好的线性关系,验证了模型的拟合效果。本次回归拟合的能耗模型合适,可用该模型来预测能耗和贫液温度、填料高度、吸收压力、溶液循环量 5 个参数之间的关系。

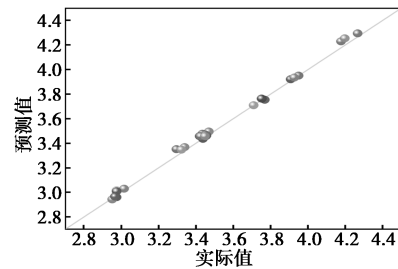


图 2 模拟条件下预测值与实测值线性回归

2.2 响应曲面交互作用分析

响应曲面图包括三维(3D)响应曲面图和二维(2D)等高线图。3D 响应曲面图以平面坐标轴表示交互作用因素,以纵坐标轴表示响应值,直观展示交互作用与响应值之间的关系。曲面形状的陡峭程度反映交互作用的强弱。2D 等高线图则是 3D 曲面图的平面投影,可直观显示交互作用的强弱范围及变化趋势。

图 3 为溶液循环量 262 m³/h、吸收压力 4.5 MPa 的条件下,贫液温度和填料高度的交互作用对能耗的影响规律。从图中可以看出,随着贫液温度和填料高度的增加,能耗呈现下降趋势,在较高的填料高度下,贫液温度对系统能耗的影响更为显著。当贫液温度不变时,填料高度的增加使能耗值逐步降低,由于 MDEA 溶液对 CO₂ 的吸收过程由物理吸收与化学吸收共同作用,其中物理吸收占据主导地位,填料高度的增加能够提供更多的传质面积和接触时间,酸气的吸收能力显著增强,吸收塔出口酸性气体浓度降低,系统能耗减少^[12-13]。当填料高度保持不变时,增加贫液温度对能耗的影响与填料高度的作用呈现相似的规律。尽管贫液温度的升高可能抑制反应的正向进行,但由于 MDEA 溶液与 H₂S 之间的反应为迅速酸碱质子转移反应,对反应温度的敏感度较低^[14]。同时,贫液温度的提升能够降低溶液黏度,减少扩散阻力,从而促进反应的进行,在这 2 种作用的相互影响下,酸气吸收力能力显著增强,能耗下降。

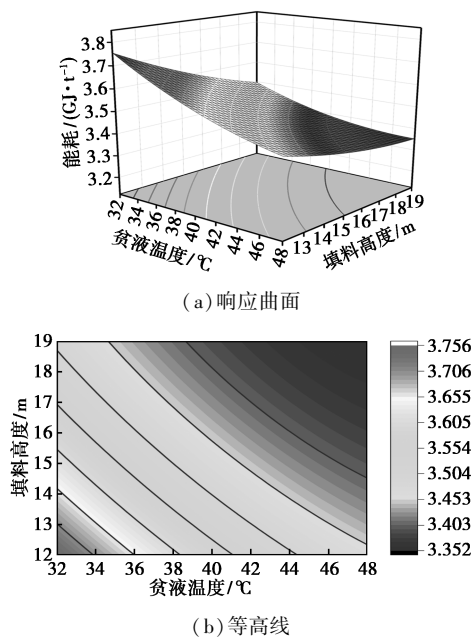


图 3 贫液温度与填料高度对再生能耗的响应曲面与等高线

图 4 为溶液循环量 262 m³/h、吸收压力 4.5 MPa 的条件下,贫液温度和溶液循环量的交互作用对能耗的影响规律。随着贫液温度的升高和溶液循环量的降低,再生能耗呈现下降趋势,曲面整体呈现左后上角较高右前下角较低的趋势。当贫液温度保持不变时,随着溶液循环量的增多,吸收塔的负荷增加,进入再生塔进行酸气脱除的溶液增多,显著提高再

生塔的热负荷和能耗^[15]。循环量的增加会降低单次循环中溶液吸收的酸气量,导致吸收效率下降与泵送能耗增大^[16]。

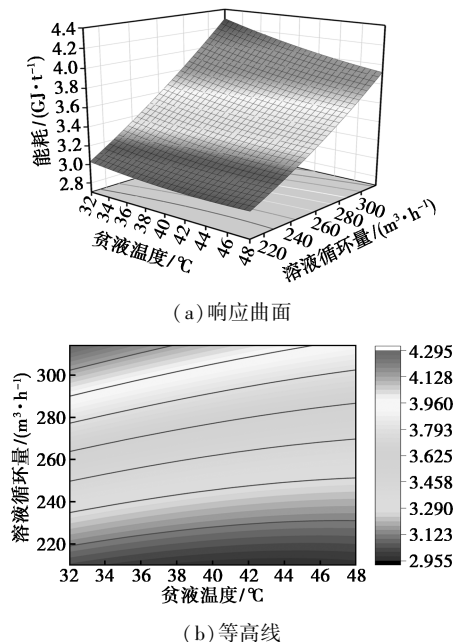


图 4 贫液温度与溶液循环量对再生能耗的响应曲面与等高线

由图 5 可知,填料高度和吸收压力的交互作用对再生能耗具有显著的影响,表现出左高右低的曲面趋势,即随着填料高度和吸收压力的增加再生能耗逐渐降低。在吸收压力不变的条件下,随着填料高度的增加吸收效率增大,系统在相同吸收目标下

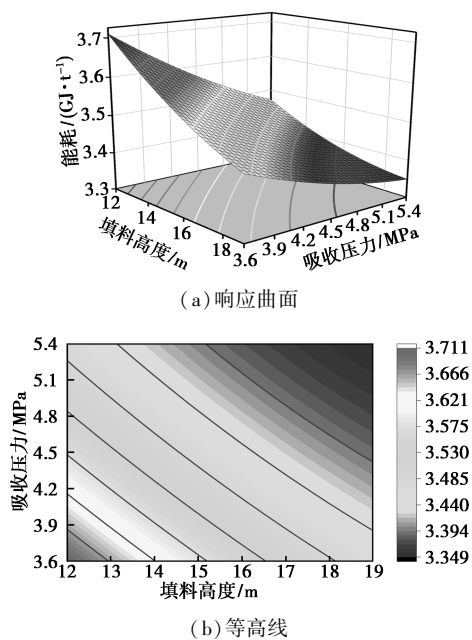


图 5 填料高度与吸收压力对再生能耗的响应曲面与等高线

对溶液循环量的需求减少,其现象可以解释为溶液循环量的增大导致更多的贫液需要加热和再生,增加了再沸器的负荷,溶液泵和冷却水系统的能耗也随之增加,进一步加剧了总能耗^[17],导致再生塔所需的热量输入减少,再生能耗降低^[18]。

2.3 NSGA-II 多目标优化

将选取的优化参数输入到响应曲面中,以再生能耗与净化气中 CO₂ 含量作为响应值进行拟合得到公式所示目标函数。利用 MATLAB 搭建基于 NSGA-II 的多目标优化模型,在满足净化气气质达标与富液负荷限制的前提下,利用 NSGA-II 遗传算法寻找最优操作参数以及对应的最小能耗,实现再生能耗最低与商品气产率最大的多目标优化。

$$\min f_1(x) = F_1(x) + F_2(x) + F_3(x) \quad (3)$$

$$F_1(x) = 3.47277 - 0.064231x_1 - 0.082546x_2 - 0.046605x_3 + 0.017248x_4 \quad (4)$$

$$F_2(x) = 0.001334x_1x_2 + 0.000761x_1x_3 - 0.000186x_1x_4 + 0.000980x_2x_3 - 0.000372x_2x_4 - 0.000109x_3x_4 \quad (5)$$

$$F_3(x) = 0.000555x_1^2 + 0.001815x_2^2 + 0.000219x_3^2 + 0.000022x_4^2 \quad (6)$$

$$f_2(x) = 8.72038 - 0.05077x_1 + 0.019779x_2 - 0.124416x_3 + 0.009371x_4 - 0.001055x_1x_2 + 0.001497x_1x_3 - 0.000219x_1x_4 - 0.000650x_2x_3 - 0.000296x_2x_4 + 0.000084x_3x_4 \quad (7)$$

式中, $f_1(x)$ 为能耗,GJ/t; $f_2(x)$ 为净化气出口 CO₂ 摩尔分数,%; x_1 为贫液温度,°C; x_2 为填料高度,m; x_3 为吸收压力,MPa; x_4 为溶液循环量,m³/h。

为避免陷入局部最优,提高寻找最优解的精确度,需要适当确定种群规模以及交叉和变异操作^[19]。将种群规模设为 200,交叉概率和变异概率分别设定为 0.8 和 0.2,最大迭代次数为 400 次。在多目标优化过程中,进行多次运行,当所有 Pareto 前沿都一致时优化收敛,从而获得完整的非支配解^[20]。经过 200 次迭代后 Pareto 前沿基本稳定,将富液负荷与净化气标准限值之外的数据去除,所得 Pareto 前沿如图 6 所示。

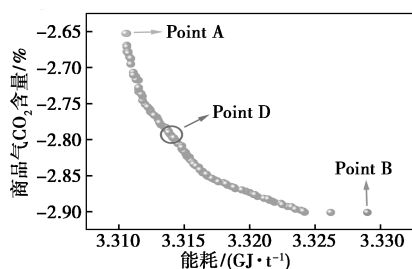


图 6 Pareto 前沿图

由图 6 可知,商品气中 CO₂ 含量的增加将直接导致能耗上升。在优化过程中,若以商品气产量为目标,则最优解对应 B 点;若以能耗最小化为目标,则最优解为 A 点。在实际运行中,难以同时达到这 2 个最优值。基于两者之间的权衡,选取 D 点作为帕累托边界上的最优解,优化结果如表 5 所示。

表 5 操作参数优化结果

参数	值
溶液循环量/(m ³ ·h ⁻¹)	251
贫液温度/°C	46
吸收压力/MPa	4.7
填料高度/m	13.5
H ₂ S 脱除率/%	100
净化气出口 CO ₂ 含量/%	2.8
再生能耗/(GJ·t ⁻¹)	3.32

以 150°C 低压蒸气作为加热介质,优化前,1 m³/h MDEA 溶剂约需消耗 200 kg/h 低压蒸气,对应的蒸气消耗量为 68 t/h。优化后,蒸气消耗量降至 29 t/h,实现年节约低压蒸气 31.2×10⁴ t,按工业蒸气均价 220 元/t 计,年节约人民币约 6 864 万元。

3 结论

为降低高含硫天然气净化单元能耗并提高商品气产率,利用 Aspen Plus 软件与响应曲面(RSM)相结合的方法,研究了工艺流程参数的交互作用对再生能耗的影响规律,利用 NSGA-II 遗传算法建立天然气净化单元优化模型,进行多目标优化,得出以下主要结论。

(1)所建立的 Aspen Plus 模型的模拟结果与现场运行值之间的相对误差不超过 7%,满足工艺应用的需求,可以用于工艺模拟分析。

(2)结果表明模型能够有效描述多因素交互作用对净化效率和能耗的影响规律。研究发现,贫液温度与填料高度、吸收压力、溶液循环量的耦合效应显著影响净化性能,其中贫液温度与溶液循环量的交互作用对再生能耗的影响较为显著。

(3)当 MDEA 贫液温度为 46°C、填料高度为 13.5 m、吸收压力为 4.7 MPa、溶液循环量为 251 m³/h 时,系统能耗最低且商品气产率最大化。优化后的操作参数显著降低了再沸器功率,使蒸气消耗量降至 29 t/h,每年节约低压蒸气 31.2×10⁴ t,折合人民币约 6 864 万元,显著提高了净化工艺的经济性。

参考文献

- [1] 郝向南,张浩.城市燃气管道泄漏监测系统设计与实现[J].科技与创新,2025,(3):69-71,75.
- [2] 郝婕,徐文满,田瑛.从“底气不足”到“气象万千”——中国天然气工业改革开放 40 年回顾与展望[J].国际石油经济,2019,27(3):60-66.
- [3] 张昆宇.长输天然气管道腐蚀的形成与防腐保护措施[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(1):31-33.
- [4] Al-lagtah N M A, Al-habsi S, Onaizi S A. Optimization and performance improvement of Lekhwaier natural gas sweetening plant using Aspen HYSYS[J]. J Nat Gas Sci Eng, 2015, 26: 367-381.
- [5] Rouzbahani A N, Bahmani M, Shariati J, et al. Simulation, optimization, and sensitivity analysis of a natural gas dehydration unit[J]. J Nat Gas Sci Eng, 2014, 21: 159-169.
- [6] 郭良辉,王艺,徐源,等.天然气净化厂重沸器能耗规律分析[J].工程热物理学报,2022,43(2):425-430.
- [7] 邱奎,安鹏飞,杨馥宁,等.高含硫天然气脱硫操作条件对能耗影响的模拟研究[J].石油学报:石油加工,2012,28(6):978-985.
- [8] 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.
- [9] Abd A A, Naji S Z, Barifcani A. Comprehensive evaluation and sensitivity analysis of regeneration energy for acid gas removal plant using single and activated-methyl diethanolamine solvents[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2020, 28(6): 1684-1693.
- [10] Zarezadeh F, Vatani A, Palizdar A, et al. Simulation and optimization of sweetening and dehydration processes in the pretreatment unit of a mini-scale natural gas liquefaction plant[J]. Int J Greenh Gas Control, 2022, 118: 103669.
- [11] 郭土,孙东,杨秀丽,等.胜利油田注汽系统用能现状[J].当代化工,2019,48(10):2370-2373,2381.
- [12] 魏青,张振涛,王瑞祥,等.醇胺法碳捕集技术的研究进展[J].环境工程技术学报,2025,15(1):90-99.
- [13] 唐俊丽.合成氨工艺脱碳方法评述[J].化学工程师,2011,25(12):34-36.
- [14] 梁平,宋冬寒,文明,等.基于 ProMax 的高含硫天然气脱硫装置模拟与优化[J].现代化工,2019,39(7):202-206,208.
- [15] 姜鹏.醇胺法脱碳工艺模拟与装置运行研究[D].大连:大连理工大学,2019.
- [16] 范秦楚,阮玉蛟,周军.碳达峰碳中和目标下国内天然气净化厂运行现状与展望[J].石油与天然气化工,2023,52(1):25-31,39.
- [17] 葛怀栋.海上平台伴生气脱酸工艺技术改进和评价[J].石油石化节能与计量,2025,15(1):1-5.
- [18] 李焱芳,刘元昊,曹红强,等.适合高含硫天然气的脱硫脱碳工艺研究[J].化学与生物工程,2023,40(7):65-68.
- [19] 丰雪艳.变电站环境下巡检机器人的路径规划方法研究[D].淮南:安徽理工大学,2024.
- [20] Li M Q, Yang S X, Liu X H. Bi-goal evolution for many-objective optimization problems[J]. Artificial Intelligence, 2015, 228: 45-65. ■
- [15] 王驰中,范军毅,陈衡,等.基于城市污泥高效利用的干燥热解及处理一体化系统性能分析[J].洁净煤技术,2024,30(S2):494-500.
- [16] 胡亮,于海龙,郑和,等.撬装式高温等离子体气化熔融设备处理油基钻屑技术研究[J].现代化工,2023,43(11):61-65.
- [17] 高亚丽,田丽娜,崔东旭,等.基于 Aspen Plus 的典型林业生物质气化制氢过程模拟研究[J].新能源科技,2024,5(4):17-25.
- [18] 冯东征,何选明,柯萍,等.稻秆与褐煤共热解转化效能研究[J].煤炭转化,2019,42(1):15-21.
- [19] Gong Z, Du A, Wang Z, et al. Analysis on integrated thermal treatment of oil sludge by Aspen Plus[J]. Waste Management, 2019, 87: 512-524.
- [20] 彭涛.含油污泥干化热解一体化技术及设备[D].常州:常州大学,2021.
- [21] 秦利鹏,吴少基,王智瑾,等.基于 Aspen Plus 的污泥干化-热解耦合工艺模拟及放大实验[J].生物质化学工程,2023,57(2):12-20.
- [22] 王超.生物质快速热解制油工艺分析及油品改质实验研究[D].天津:天津大学,2014.
- [23] 宋新南,徐惠斌,房仁军,等.基于 Aspen Plus 的生物质燃烧 NO_x 生成模拟[J].环境科学学报,2009,29(8):1696-1700.
- [24] 王学斌,周澳,杨明辉,等.燃煤电厂 200 t/d 生活垃圾无氧热解耦合协同处置优化[J].煤炭学报,2022,47(11):3897-3905. ■

(上接第 448 页)

- [6] Zhao Z, Situmorang A Y, An P, et al. Hydrogen production from catalytic steam reforming of bio-oils: A critical review[J]. Chemical Engineering & Technology, 2020, 43(4): 625-640.
- [7] Gao N, Li J, Quan C, et al. Product property and environmental risk assessment of heavy metals during pyrolysis of oily sludge with fly ash additive[J]. Fuel, 2020, 266: 117090.
- [8] Zhao Y, Yang Z, Niu J, et al. Systematical analysis of sludge treatment and disposal technologies for carbon footprint reduction[J]. Journal of Environmental Sciences, 2023, 128(6): 224-249.
- [9] 岳勇,刘鹏,王蓉沙,等.油田含油污泥与芦苇共热解实验研究[J].油气田环境保护,2012,22(1):7-9,60.
- [10] 黄永福.普通小球藻和盐生杜氏藻的快速热解特性研究[D].武汉:华中科技大学,2013.
- [11] 房佩文,巩志强,张曼,等.热解温度对微藻基生物质热解焦性质的影响[J].洁净煤技术,2020,26(S1):139-146.
- [12] Wang X, Zhao B, Yang X. Co-pyrolysis of microalgae and sewage sludge: Biocrude assessment and char yield prediction[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 117: 326-334.
- [13] Hasan M M, Rasul M G, Jahirul M I, et al. Modeling and process simulation of waste macadamia nutshell pyrolysis using Aspen Plus software[J]. Energy Reports, 2022, 8: 429-437.
- [14] 吴徐磊,于海龙,张世锋,等.油基岩屑高温等离子体气化过程数值模拟研究[J].现代化工,2024,44(2):227-232.