

基于优化算法的天然气管网单元能耗优化

尹晓云^{1,2*}, 李佳亿³, 文 明^{1,2}, 岳添漆^{1,2}, 游香杨^{1,2}, 董栖君^{1,2}, 黄征宇⁴, 李 杨⁵

(1. 中国石油西南油气田分公司安全环保与技术监督研究院, 四川 成都 610041;

2. 页岩气评价与开采四川省重点实验室, 四川 成都 610041;

3. 国家管网集团西南管道有限责任公司贵州省管网有限公司, 四川 成都 610000;

4. 中石油遂宁天然气净化有限公司, 四川 遂宁 610500;

5. 中国石油西南油气田川中油气矿, 四川 遂宁 629000)

摘要:针对天然气净化厂脱硫单元能耗较高的问题,对天然气净化厂脱硫单元能耗优化方法进行研究。基于 ASPEN HYSYS 软件,建立天然气净化厂脱硫单元数值模拟模型,利用现场数据验证模型的准确性。通过单因素分析确定了胺液循环量、贫胺液进料温度及原料气温度对能耗的影响最大,将其作为优化参数建立天然气净化厂脱硫单元能耗最优化模型。采用 BP 神经网络及 GA 遗传算法相结合的方法进行优化计算。结果表明,经 BP 神经网络及 GA 遗传算法相结合的算法进行优化后,胺液循环量、贫胺液进料温度及原料气温度 3 个运行参数均得到了优化,将优化后的运行参数运用于现场实际生产后,工艺总能耗由 10 614.99 kW 下降至 8 297.59 kW,能耗降低了 21.83%。

关键词:天然气脱硫;GA 遗传算法;BP 神经网络;能耗优化;HYSYS;数值模拟

中图分类号:TQ028.2

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2024)S1-0332-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S1.060

Optimization of energy consumption for natural gas desulfurization unit based on optimization algorithm

YIN Xiao-yun^{1,2*}, LI Jia-yi³, WEN Ming^{1,2}, YUE Tian-qi^{1,2}, YOU Xiang-yang^{1,2},

DONG Qi-jun^{1,2}, HUANG ZHENG-yu⁴, LI Yang⁵

(1. Safety, Environmental Protection and Technical Supervision Research Institute, PetroChina Southwest

Oilfield & Gasfield Company, Chengdu 610041, China; 2. Sichuan Provincial Key Laboratory of

Shale Gas Evaluation and Exploitation, Chengdu 610041, China; 3. Guizhou Pipeline Network Company,

PipeChina Southwest Petroleum and Gas Pipeline Company Limited, Chengdu 610000, China;

4. PetroChina Suining Natural Gas Purification Co., Ltd., Suining 610500, China;

5. Central Sichuan Oil-Gas District, PetroChina Southwest Oilfield & Gasfield Company, Suining 629000, China)

Abstract: Aiming at the high energy consumption problem at desulfurization unit in natural gas purification plant, the corresponding optimization method is studied. Based on ASPEN HYSYS software, the numerical simulation model is established for the desulfurization unit in natural gas purification plant, and the accuracy of the model is verified according to field data. Through single factor analysis, it is determined that amine circulation volume, lean amine feed temperature and feed gas temperature have the greatest impact on energy consumption. Taking these three factors as optimization parameters, the optimization model is established for energy consumption of desulfurization unit in natural gas purification plant, and the method combining BP neural network with GA genetic algorithm is utilized for optimization calculation. Results show that after optimizing by the method, three operation parameters including lean amine circulation volume, lean amine feed temperature and feed gas temperature are all optimized. After the optimized operation parameters are applied to the actual operation, total energy consumption of the process is reduced from 10 614.99 kW to 8 297.59 kW, a reduction of 21.83%. It can be seen that the parameter optimization method based on BP and GA algorithm can effectively help to reduce the energy consumption of desulfurization unit.

Key words: natural gas desulfurization; GA genetic algorithm; BP neural network; energy consumption optimization; HYSYS; numerical simulation

近年来,随着我国双碳战略的实施,环境保护受到高度重视。天然气作为一种清洁能源,其开发利用规模不断扩大。从井口采出的天然气,需经过天

然气净化厂脱硫、脱碳、脱水后才能供下游用户使用。2018 年发布的 GB 17820—2018《天然气》^[1]对管输天然气气质组分提出了更高的要求:总硫质量

收稿日期:2024-01-31;修回日期:2024-04-22

基金项目:中国石油西南油气田公司科研项目“天然气净化厂能源管控技术研究”(20230307-07);中国石油西南油气田公司科研项目“气田典型耗能设备优化级能源管控模型研究”(20220307-09)

作者简介:尹晓云(1995-),女,博士,在站博士后,主要从事气田节能低碳、天然气净化、油气集输多相流等方面的研究工作,通讯联系人,13541088440, yinxy0122@163.com。

浓度要求从 200 mg/m^3 降低为 20 mg/m^3 , H_2S 质量浓度要求从 20 mg/m^3 降低为 6 mg/m^3 。为满足更严格的净化要求,天然气净化厂的运行能耗也将随之上升。

目前,国内外学者对天然气脱硫工艺能耗规律进行了大量研究。李奇等^[2]基于 HYSYS 软件建模研究了原料气中 H_2S 含量、醇胺吸收剂 MDEA 浓度对脱硫装置能耗的影响。郭良辉等^[3]通过 HYSYS 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。商剑锋等^[4]研究发现 MDEA 溶液循环量是影响脱酸气装置综合能耗的主要因素。肖荣鸽等^[5]通过正交试验多因素分析法,对天然气 DEA 脱硫工艺参数进行优化,使工艺总能耗降低约 26%。目前对天然气脱硫工艺能耗优化的研究主要集中在敏感性分析^[6-12]上,对脱硫单元能耗影响因素进行多因素优化的研究较少。由于现场实际运行过程中影响天然气脱硫单元能耗的因素较多且可能存在相互影响,通过单因素分析进行的参数优化存在局限性。因此,本文以西

南地区某天然气净化厂为研究对象,基于 ASPEN HYSYS 软件建立天然气净化厂脱硫单元数值模拟模型,通过单因素分析找出影响脱硫单元能耗的关键参数,在此基础上,以满足净化气质要求为约束条件,建立脱硫系统能耗最优化模型,采用 BP 神经网络与 GA 遗传算法相结合的方法进行优化求解。研究结果可为天然气净化厂节能降耗提供理论指导。

1 天然气脱硫单元 HYSYS 模型

HYSYS 软件是世界著名油气加工模拟软件工程有限公司开发的大型专家系统软件,具有操作界面良好、智能化程度高、操作便捷等优点^[13-14]。因此,本文利用 HYSYS 模拟软件建立某天然气净化厂脱硫单元工艺模型。

1.1 天然气脱硫工艺流程

某天然气净化厂脱硫单元的工艺流程图如图 1 所示。该脱硫单元采用 MDEA 溶液脱除原料气中的酸性气体,整个工艺流程主要由酸气吸收部分、MDEA 溶液再生部分及溶液循环 3 部分组成。

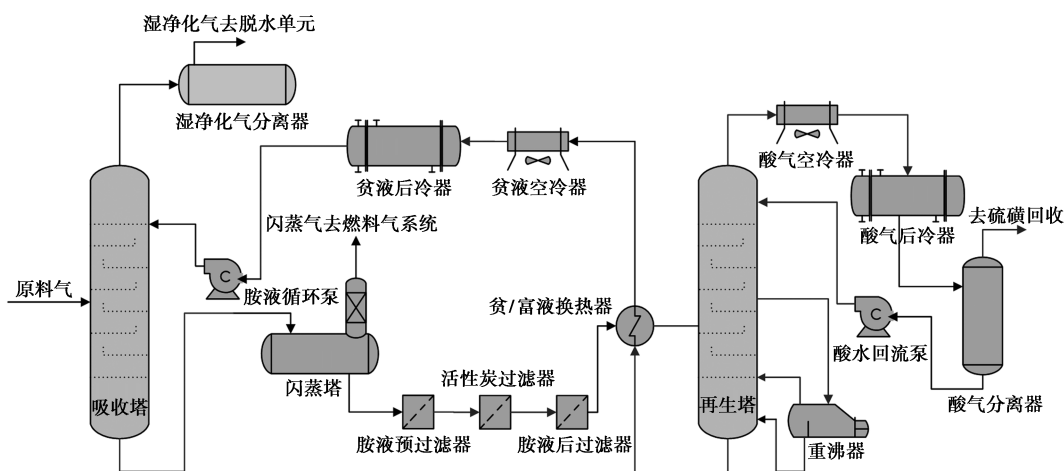


图 1 天然气净化厂脱硫单元工艺流程

原料气从底部进入吸收塔,与从吸收塔顶部自上而下流动的 MDEA 贫液逆流接触,脱除 H_2S 和 CO_2 的湿净化气从吸收塔顶部流出,经湿净化气分离器分液后流向脱水单元进行脱水处理,吸收了酸性气体的 MDEA 富液从吸收塔底部流出,经调节阀降压去闪蒸罐,闪蒸出溶解在溶液中的绝大部分烃类气体和部分酸性气体,闪蒸气在闪蒸气吸收塔内自下而上流动与来自胺液循环泵的一小股自上而下流动的贫液逆流接触,脱除闪蒸气中的酸性气体,然后经调压阀降压后用作燃料气。闪蒸后的 MDEA 富液从闪蒸罐底部流出,经过滤器过滤后,经

贫富液换热器与来自再生塔底部的热贫液换热升温后进入再生塔上部。在再生塔内, MDEA 富液自上而下流动,与再生塔自下而上流动的蒸汽接触,解析出溶解在 MDEA 富液中的 H_2S 和 CO_2 气体。MDEA 贫液从再生塔底部流出,经贫/富液换热器换热降温后由冷却器冷却。冷却后的贫液经贫液循环泵升压后绝大部分送至吸收塔上部,另一小股送至闪蒸气吸收塔上部,完成整个系统溶液的循环。从再生塔顶部出来的酸气由冷却器冷却后进入酸气分离罐分液,酸气从罐顶部流出,送至下游硫磺回收单元,酸性冷凝水则由酸水回流泵增压后送至再生塔顶部。

1.2 原料气性质及运行工况

西南地区某天然气净化厂单套脱硫装置实际处理能力为 $(220 \sim 280) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 原料气进气压力为 5.6~6.7 MPa, 原料气组分及各组分含量见表 1。脱硫脱碳后的天然气的质量指标符合《天然气》(GB 17820—2018)中一类气标准, 其中 H_2S 质量浓度 $\leq 6 \text{ mg}/\text{m}^3$, CO_2 摩尔分数 $\leq 3\%$ [1]。

表 1 原料气组分含量

组分	CH_4	C_2H_6	H_2S	CO_2	N_2	He
含量/mol%	96.349	0.130	0.679	2.118	0.694	0.012

1.3 天然气净化厂脱硫单元 HYSYS 模型

基于 HYSYS 软件, 选用酸性气体-化学溶剂物性包 [15] 来模拟天然气净化厂 MDEA 法脱硫工艺。该物性包主要用于模拟酸性气体与化学溶剂之间的相互作用, 以及它们之间的反应机制和动力学数据。因此在模拟天然气脱硫过程时, 可以更准确地描述气体与溶剂之间的相互作用, 从而获得更准确的模拟结果。利用 HYSYS 软件建立的天然气净化厂脱硫单元模拟流程如图 2 所示。脱硫单元 HYSYS 模型参数设置如表 2 所示。

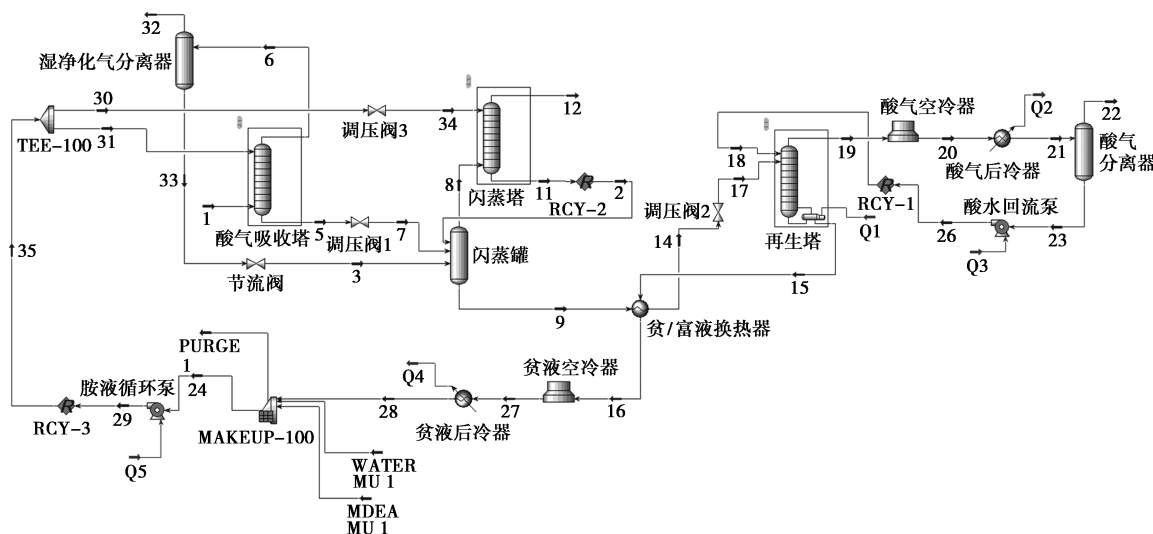


图 2 天然气净化厂脱硫单元 HYSYS 模型

表 2 脱硫单元 HYSYS 模型参数设置

设置参数	设定值
原料气流量/ $(\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	240
原料气压力/kPa	6 200
原料气温度/ $^{\circ}\text{C}$	27.23
吸收塔塔板数/块	7
再生塔塔板数/块	11
再生塔顶部压力/kPa	180
再生塔底部压力/kPa	192
闪蒸塔压力/kPa	780
重沸器温度/ $^{\circ}\text{C}$	121.6
MDEA 溶液质量浓度/%	46.1

表 3 实际运行值与 HYSYS 模拟计算值的对比

运行参数	实际运行值	模拟计算值	相对误差/%
原料气流量/ $(\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	240	240	0
原料气进气压力/kPa	6 200	6 200	0
原料气进气温度/ $^{\circ}\text{C}$	27.23	27.23	0
净化气流量/ $(\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	238.16	237.57	0.25
净化气压力/kPa	6 190	6 190	0
净化气温度/ $^{\circ}\text{C}$	36.29	33.08	8.8
净化气 H_2S 含量/ $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	4.89	5	2.25
净化气 CO_2 含量/mol%	1.7	1.8	5.88

1.4 模型验证

为验证脱硫单元 HYSYS 模拟模型的可靠性, 随机选取一组现场实际运行数据输入已建立的模型中进行模拟计算, 并将所得结果与实际值进行对比, 结果如表 3 所示。

通过对比可知, 各运行参数现场实际值与模拟计算值的相对误差均在 $\pm 10\%$ 以内, 表明所构建的 HYSYS 脱硫单元模拟模型能够较为准确的模拟现场天然气脱硫单元运行过程, 能够用于天然气净化厂脱硫单元的稳态工况模拟。

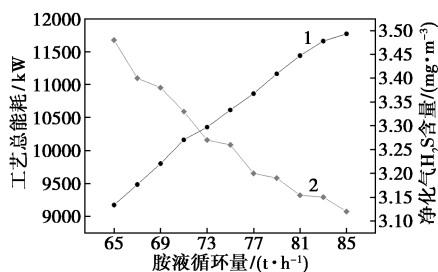
2 天然气脱硫单元能耗优化

2.1 单因素分析

天然气净化厂脱硫单元的能耗主要由重沸器热负荷、循环泵负荷及各冷却器热负荷组成,将重沸器热负荷、循环泵负荷及各冷却器热负荷之和定义为工艺总能耗^[5,16],定量分析吸收塔压力、胺液循环量、贫胺液进料温度、原料气温度等因素对工艺总能耗和净化气中 H₂S 含量的影响,为下一步选择优化参数建立能耗优化模型提供参考。

2.1.1 胺液循环量

将其他参数保持为表 2 的默认设置,改变胺液循环量在 65~80 t/h 范围内变化,胺液循环量对工艺总能耗和净化效果的影响如图 3 所示。随着胺液循环量的增大,工艺总能耗逐步上升,而净化气中 H₂S 含量则呈下降趋势,所有工况下净化气中 H₂S 含量均满足《天然气》(GB 17820—2018)中 H₂S 含量 < 6 mg/m³ 的要求。表明增大胺液循环量有助于提高净化效果,但会导致能耗增大。胺液循环量每增加 1 t/h,工艺总能耗约增加 130 kW。

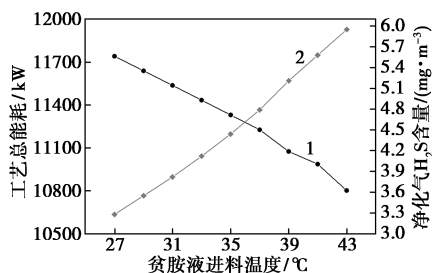


1—工艺总能耗;2—净化气 H₂S 含量

图 3 胺液循环量对能耗和净化效果的影响

2.1.2 贫胺液进料温度

将其他参数保持为表 2 的默认设置,改变贫胺液进料温度在 27~43℃ 范围内变化,贫胺液进料温度对工艺总能耗和净化效果的影响如图 4 所示。



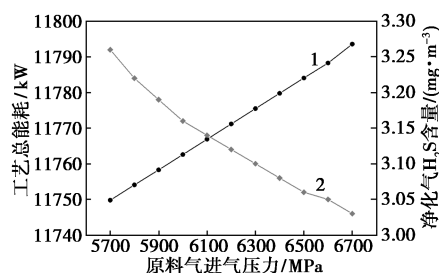
1—工艺总能耗;2—净化气 H₂S 含量

图 4 贫胺液进料温度对能耗和净化效果的影响

随着贫胺液进料温度的升高,工艺总能耗有所下降,而净化气中 H₂S 含量逐渐上升,这是因为升高贫胺液进料温度导致了贫液后冷器负荷有所降低,但较高的温度不利于吸收塔内吸收反应的进行。温度每上升 1℃,工艺总能耗约下降 59 kW。

2.1.3 原料气进气压力

将其他参数保持为表 2 的默认设置,改变原料气进气压力在 5 700~6 700 kPa 范围内变化,原料气进气压力对工艺总能耗和净化效果的影响如图 5 所示。



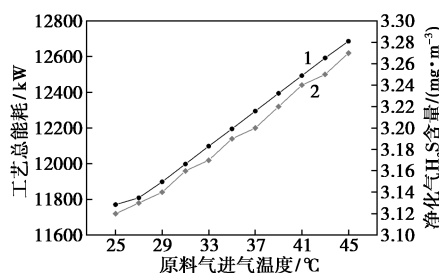
1—工艺总能耗;2—净化气 H₂S 含量

图 5 原料气进气压力对能耗和净化效果的影响

随着原料气进气压力增大,工艺总能耗逐步上升,而净化气中 H₂S 含量则逐步下降。表明增大原料气进气压力有利于促进酸性气体的吸收,但会让能耗有所增加。原料气压力每增加 100 kPa,工艺总能耗约上升 4.38 kW。

2.1.4 原料气进气温度

将其他参数保持为表 2 的默认设置,改变原料气进气温度在 25~45℃ 范围内变化,原料气进气温度对工艺总能耗和净化效果的影响如图 6 所示。



1—工艺总能耗;2—净化气 H₂S 含量

图 6 原料气进气温度对能耗和净化效果的影响

随着原料气进气温度的升高,工艺总能耗与净化气中 H₂S 含量均呈上升趋势。原料气进气温度每上升 1℃,工艺总能耗约上升 46 kW。

2.2 脱硫单元能耗优化模型

在实际过程中,各因素之间可能存在相互影响,

因此单因素分析往往难以找到最优参数组合。BP 神经网络是一种多层前馈神经网络,广泛用于建立各种非线性预测模型;GA 遗传算法具有较强的全局搜索能力,可以有效地克服局部最优解的局限,提高优化结果的可靠性^[17]。本文采用 BP 神经网络模型,建立优化参数与工艺总能耗之间的非线性映射关系,再基于 GA 遗传算法进行寻优计算,从而达到优化运行参数、降低能耗的目的。

根据上文的单因素分析结果,以贫胺液循环量、贫胺液进料温度及原料气入口温度 3 个因素为变量,建立脱硫单元能耗优化模型,如式(1)~式(3)所示。

$$f(x_1, x_2, x_3)_{\min} = E_1 + E_2 + E_3 \quad (1)$$

$$\text{s. t. } l \leq g(x_1, x_2, x_3) \leq u \quad (2)$$

$$z \leq 6 \quad (3)$$

式中, $f(x_1, x_2, x_3)$ 为工艺总能耗,kW; E_1 为贫液循环泵和酸水回流泵总负荷,kW; E_2 为重沸器负荷,kW; E_3 为各冷却器总负荷,kW; x_1 为贫胺液循环量,t/h; x_2 为贫胺液进料温度,℃; x_3 为原料气入口温度,℃; z 为净化气中 H₂S 含量,mg/m³; $g(x_1, x_2, x_3)$ 为约束条件, l 为各关键变量的最小值, u 为各关键变量的最大值。约束条件如表 4 所示。

表 4 约束条件

约束类型	变量	约束条件
不等式约束	贫胺液循环量/(t·h ⁻¹)	60~90
	贫胺液进料温度/℃	20~45
	原料气入口温度/℃	20~50
	净化气 H ₂ S 含量/(mg·m ⁻³)	≤6.0

2.3 基于 BP 神经网络和 GA 遗传算法的脱硫单元能耗优化

将 100 组随机生成的优化操作参数输入到建立的 HYSYS 模拟模型中进行计算,利用 BP 神经网络对所得数据进行训练及预测,得到贫胺液循环量、贫胺液进料温度及原料气入口温度这 3 个操作参数与工艺总能耗之间的非线性映射关系。在满足净化气气质达标的前提下,利用 GA 遗传算法寻找最优操作参数及相对应的最优能耗。整个优化流程图如图 7 所示。

利用 MATLAB 软件中的神经网络工具箱建立 BP 神经网络预测模型,将选取的优化参数(贫胺液循环量、贫胺液进料温度及原料气温度)作为 BP 神经网络的输入层变量,将工艺总能耗和净化气中

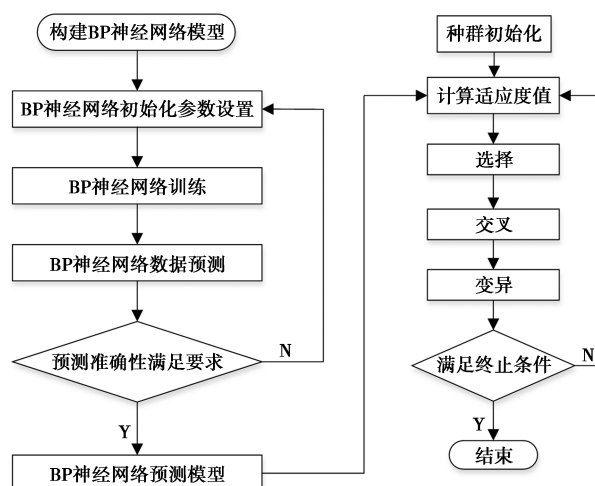


图 7 基于 BP 和 GA 的脱硫单元能耗优化流程

H₂S 含量作为输出量。随机选取 95 组 HYSYS 软件模拟计算产生的数据,进行神经网络训练,再用剩下的 5 组数据进行验证。将 HYSYS 模拟计算得到的工艺总能耗和净化气 H₂S 含量值看作实际值,与 BP 神经网络的预测结果进行对比,得到的结果如表 5 所示。

表 5 实际运行值与模型预测值的对比

胺液循环量/(t·h ⁻¹)	贫胺液进料温度/℃	原料气入口温度/℃	净化气 H ₂ S 含量/(mg·m ⁻³)		工艺总能耗/kW	
			实际值	预测值	实际值	预测值
72	22	23	2.86	2.89	10 137.25	10 032.00
63	34	37	4.96	5.09	8 829.66	8 856.46
68	29	31	3.77	3.98	9 593.17	9 497.93
88	32	31	4.05	4.20	11 959.56	11 859.84
90	31	50	4.14	4.15	12 928.51	13 005.58

由表 5 可知,净化气 H₂S 含量的预测误差最大约为 5.56%,工艺总能耗的预测误差最大约为 1%,所训练出的 BP 神经网络能耗预测模型预测准确性较高,为下一步实现 GA 遗传算法优化天然气脱硫单元工艺总能耗奠定了基础。

根据所建立的能耗优化模型及 BP 神经网络能耗预测模型,利用 GA 遗传算法对天然气净化厂脱硫单元能耗进行优化。在 MATLAB 遗传算法工具箱中进行参数设置:选择 BP 神经网络预测模型为适应度函数,种群规模设定为 50,交叉因子设定为 0.8,变异因子设定为 0.2,最大迭代次数设置为 100 次。遗传算法迭代过程如图 8 所示。当迭代次数为 51 次时,适应度值达到最小值,此时的工艺总能耗

为 8 147.81 kW。

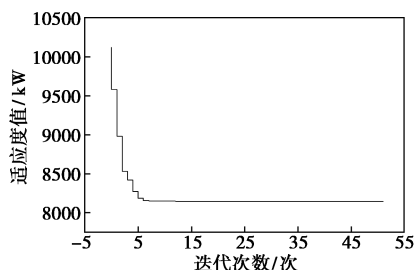


图 8 GA 遗传算法优化过程

优化前后运行参数及工艺总能耗数据如表 6 所示。由表 6 可知,优化后工艺总能耗较优化前下降了 23.24%,此时对应的贫胺液循环量为 60 t/h,贫胺液进料温度为 20℃,原料气入口温度为 20℃。

表 6 优化前后运行参数及工艺总能耗对比

状态	贫胺液循环量/ (t·h ⁻¹)	贫胺液进料 温度/℃	原料气入口 温度/℃	工艺总能耗/ kW
优化前	75	25	27.23	10 614.99
优化后	60	20	20.00	8 147.81

为验证进行参数优化后实际的节能降耗效果,将通过 GA 遗传算法得到的优化参数运用到该天然气净化厂脱硫单元实际生产过程中,其连续运行 30d 的工艺总能耗平均值为 8 297.59 kW,与优化前相比降低了 21.83%。

3 结论

基于 HYSYS 软件,建立了天然气净化厂脱硫单元数值模拟模型,基于 HYSYS 脱硫单元模型,对影响脱硫单元能耗的运行参数进行了定量分析,建立了天然气净化厂脱硫单元能耗最优化模型,采用 BP 神经网络和 GA 遗传算法相结合的方法对脱硫单元能耗进行了优化,得到了以下主要结论:

(1) 所建立 HYSYS 模型模拟结果与现场实际运行参数之间的相对误差均在 10% 以内,满足工程应用的要求,能够用于天然气净化厂脱硫单元的能耗优化分析。

(2) 通过影响因素分析可知,对天然气净化厂脱硫单元能耗影响较大的因素为贫胺液循环量、贫胺液进料温度及原料气温度,以上述 3 个关键因素为自变量,建立了脱硫单元能耗最优化模型。

(3) 通过 BP 神经网络和 GA 遗传算法相结合的能耗优化法,使得脱硫单元的运行参数得到了优化,优化前现场实际运行工艺总能耗为 10 614.99 kW,

优化后现场实际运行工艺总能耗为 8 297.59 kW,能耗降低了 21.83%。

参考文献

- [1] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会.GB 17820—2018 天然气[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [2] 李奇,姬忠礼,段西欢,等.基于 HYSYS 建模的含硫天然气净化装置能耗分析[J].油气储运,2011,30(12):941-944.
- [3] 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.
- [4] 商剑峰,邱敏,姬忠礼.高含硫天然气脱酸气装置提效降耗优化[J].天然气工业,2019,39(2):102-110.
- [5] 肖荣鸽,庄琦,王梦霞,等.基于正交试验的天然气脱硫工艺优化[J].天然气化工(C1 化学与化工),2021,46(5):129-134.
- [6] 卫浪,蒲红宇,向辉,等.基于二次回归正交组合设计的 MDEA 脱硫工艺参数优选[J].天然气化工(C1 化学与化工),2020,45(3):75-79.
- [7] 吴鹏斌,曹文全,周家伟,等.高含硫天然气净化装置运行能耗分析[J].天然气化工(C1 化学与化工),2021,46(6):91-96.
- [8] Jassim M S.Sensitivity analyses and optimization of a gas sweetening plant for hydrogen sulfide and carbon dioxide capture using methyl-diethanolamine solutions[J].Journal of Natural Gas Science & Engineering,2016,36(A):175-183.
- [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] 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.
- [11] Zarezadeh F, Vatani A, Palizdar A, et al. Simulation and optimization of sweetening and dehydration processes in the pre-treatment unit of a mini-scale natural gas liquefaction plant[J].International Journal of Greenhouse Gas Control,2022,118:103669.
- [12] 王剑琨,张媛媛,唐建峰,等.天然气脱碳胺液再生能耗分析[J].天然气化工(C1 化学与化工),2022,47(1):109-114.
- [13] 喻靖.HYSYS 在三甘醇脱水工艺中的模拟计算[J].石油化工应用,2017,36(10):146-149.
- [14] Muhammad A,Gadelhak Y.Correlating the additional amine sweetening cost to acid gases load in natural gas using Aspen Hysys[J].Journal of Natural Gas Science and Engineering,2014,17:119-130.
- [15] 梁平,卢海东,张哲,等.长庆油田某天然气净化厂实现 GB 17820—2018 达标工艺方案研究[J].石油与天然气化工,2020,49(1):1-7.
- [16] Al-Amri A,Zahid U.Design modification of acid gas cleaning units for an enhanced performance in natural gas processing[J].Energy & Fuels,2020,34(2):2545-2552.
- [17] 周军,肖瑶,孙建华,等.储气库地面脱水系统能耗优化方法比选[J].天然气化工(C1 化学与化工),2022,47(2):129-136.■