

低温甲醇洗典型异常工况尾气硫含量模拟控制及优化

葛 晓 东

(大同煤矿集团 同煤广发化学工业有限公司,山西 大同 037000)

摘 要:煤气化生产过程中,合成气中混杂有 H_2S 、 CO_2 等酸性气体,尤其是 H_2S 会造成后续工序中催化剂中毒和环境污染。低温甲醇洗是典型的依靠物理方法吸收酸性气体的净化工艺,对气体吸收具有很好的选择性。在低温条件下甲醇对 H_2S 等酸性气体具有较大的溶解度,而对合成气中的 CO 和 H_2 溶解度较小。因此低温甲醇洗技术被广泛应用于合成气的净化。但实际生产过程中,由于合成气组分含量差别或操作参数改变会使放空尾气中硫含量出现波动,对稳定生产造成一定影响,亟需对其波动原因及调控方案开展深入研究。以企业生产运行数据为基础,分析了原料煤和尾气中硫含量变化关系,利用 Aspen Plus 模拟软件对低温甲醇洗工艺流程进行了建模和全流程模拟,通过比较模拟值与实际生产值,发现吻合程度较好,获得了具有较高可靠性的模型。在模型可靠性研究的基础上,对尾气硫含量影响较大的 2 个工艺参数(即甲醇吸收塔中段甲醇回流率和 CO_2 解析塔塔顶温度)为优化对象,分析了甲醇吸收塔中段甲醇回流率、 CO_2 解析塔塔顶温度影响尾气硫含量的主要原因,及其对其他物料流股的影响。通过灵敏度分析工具,探索了进料中 H_2S 气体含量超标时 3 个典型异常进料情况下控制尾气硫含量的最佳操作条件。典型异常工况的优化条件为:1~3 号异常工况进料中 H_2S 体积分数分别为 0.52%、0.42%、0.35%,甲醇回流率分别调整为 58%、58%、59%, CO_2 解吸塔塔顶温度调整为 -57、-56、-55 $^{\circ}C$ 。

关键词: Aspen Plus; 低温甲醇洗; 灵敏度分析; 尾气硫; 模拟

中图分类号: TQ546.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2019)04-0026-07

Simulation and optimization of sulfur content of tail gas under typical abnormal operation conditions of rectisol

GE Xiaodong

(Datong Guangfa Chemical Industry Co., Ltd., Datong Coal Mine Group Co., Ltd., Datong 037000, China)

Abstract: During coal gasification, the synthesis gas usually contains a proportion of acidic gas, such as H_2S and SO_2 , especially, excessive H_2S could induce the catalyst damage and environmental pollution. The low temperature methanol has high solvent capacity for H_2S , whereas, low capacity for CO and H_2 . Thus, the rectisol process using the low temperature methanol as the adsorbing medium has been widely used in purification of synthesis gas, which is an essential purification process for major gasification plants. However, the systematic study on the tail gas control is insufficient due to the irregular variation of the gas component and operational parameters in the industrial process. The factors influencing the tail gas out of limit should be clarified, and the possible regulating scheme should be specified. Based on the data from the industry, the simulation of rectisol process was set up by using Aspen Plus software. After comparing the simulated process data of rectisol with the industrial parameters, a high reliability model was obtained. According to the reliability analysis, two process parameters, i. e., reflux rate in the middle part of methanol absorption tower, top temperature of carbon dioxide desorption tower, were found have critical influence on the sulfur content of the tail gas. Sensitivity tools were used to explore the optimal operating conditions on controlling the tail gas sulfur content at three abnormal feeding conditions. Thus, it can provide theoretical basis and data support for the actual production of the enterprise. The optimal conditions for typical abnormal working conditions are as follows: the volume fraction of H_2S in the feed of abnormal working conditions No. 1-3 is 0.52%, 0.42%, 0.35% respectively, methanol reflux rate is adjusted to be

收稿日期: 2019-03-13; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.19031301

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB060030301); 大同煤矿集团有限责任公司委托研究项目

作者简介: 葛晓东(1970—), 男, 山西大同人, 高级工程师, 硕士, 主要从事煤炭转化方面研究。E-mail: lxc@cumtb.edu.cn

引用格式: 葛晓东. 低温甲醇洗典型异常工况尾气硫含量模拟控制及优化[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(4): 26-32.

GE Xiaodong. Simulation and optimization of sulfur content of tail gas under typical abnormal operation conditions of rectisol [J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(4): 26-32.



移动阅读

58%, 58%, 59%, and the temperature at the top of the CO₂ desorb tower are adjusted to be -57, -56, -55 °C.

Key words: Aspen Plus; rectisol; sensitivity analysis; tail gas sulfur; simulation

0 引言

煤气化是煤化工的基础和龙头技术^[1-3],是煤炭清洁高效利用的重要途径。煤气化后合成气中含有硫化氢等酸性气体杂质,造成后续工序中催化剂中毒和环境污染^[4-5]。低温甲醇洗是一种典型的通过物理方法吸收酸性气体的净化工艺,在大型煤气化装置中得到广泛应用^[6]。该净化工艺利用了不同气体在低温甲醇中溶解度不同的特性^[7],对 H₂S、CO₂ 有很大的溶解性^[8]。该工艺可高效吸收酸性气体杂质,净化度高,选择性好,且吸收了 H₂S、CO₂ 的富甲醇液,通过减压闪蒸、汽提、加热等方法可实现循环利用^[9-11]。目前,低温甲醇洗技术主要是鲁奇公司和林德公司的低温甲醇洗技术,两者基本原理没有根本区别,技术发展成熟^[12],适用于不同工艺条件^[13-14],已成为各大煤气化厂所必需的净化工序。然而,由于合成气组分含量差别或操作参数改变,使尾气中硫含量波动。现代大型煤化工项目均配套建设下游合成工序,亟待对酸性气体含量波动原因及调控方案开展深入研究。

Aspen Plus 具有强大的模拟功能,可精细化设计和模拟流程,广泛应用于化工等领域的流程模拟、设计及优化^[15-16]。Sadeghvaziri 等^[17]对某低温甲醇洗气体净化装置进行改进,通过 Aspen Plus 建模与分析,减少了甲醇洗涤塔的个数,降低了生产成本,同时模拟计算得到了较优的工艺操作参数。许东等^[18]采用 Aspen Plus 软件对某低温甲醇洗工艺的实际工况进行模拟,通过工艺的进一步分析和模拟优化,提出了一种简单易行的扩产改造方案。朱维强等^[19]对以生物质热解气为原料的低温甲醇洗工艺进行模拟研究,基于再生气中 H₂S 浓度低的问题,提出 2 个整改方案,经模拟分析发现可明显提高 H₂S 浓度和后续硫磺的回收效率。但鲜见实际生产中放空尾气硫含量的模拟控制及优化,本文采用 Aspen Plus 软件对低温甲醇洗工艺尾气中硫含量波动原因及控制措施进行研究,以期对煤制甲醇项目长周期稳定运行提供科学依据。

1 尾气硫含量分析

为探索尾气硫含量与煤气化装置原料煤中干基硫含量之间的关系,对某企业近 6 个月的尾气硫含量和原料煤干基硫含量进行分析,如图 1 所示,尾气

硫含量变化如图 2 所示。

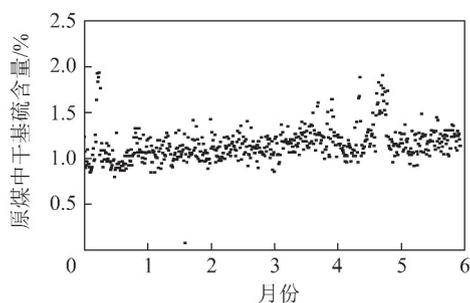


图 1 原料煤中硫含量变化

Fig. 1 Change of sulfur content in raw coal

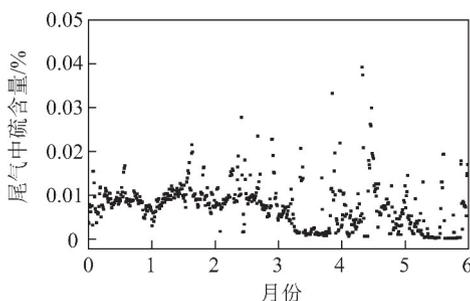


图 2 尾气中硫含量变化

Fig. 2 Change of sulfur content in tail gas

由图 1 可知,原料煤中干基硫含量基本维持在相对稳定的水平(第 5 个月下旬升高较明显除外),整体趋势略有升高,主要集中在 0.75% ~ 1.25%。说明煤气化装置工艺流程中进料煤的硫含量相对稳定。由图 2 可知,尾气中硫含量数据波动较大(第 5 个月下旬升高除外),且未发生随图 1 略微升高的趋势,即尾气硫含量与原煤干基硫含量之间不存在正相关关系。波动原因可能是由于操作参数不稳定、设备效率变化、新添加的甲醇纯度异常等造成。

为进一步研究尾气硫含量的主要影响因素,首先通过 Aspen Plus 模拟软件对低温甲醇洗工艺流程进行建模;在模型可靠的基础上,结合生产系统实际运行数据,筛选出 3 个具有典型代表性的异常进料工况进行模拟。用灵敏度分析工具对特殊工况进行分析,明晰尾气硫含量变化规律。通过优化工艺条件,确定操作调整方案。

2 低温甲醇洗流程模拟及可靠性检验

正确的物性方法选择将直接影响模拟结果的可靠性,通过对低温甲醇洗工艺流程中的物质体系进行分析^[20],可确定供选择的物性方法为 PSRK 和 RKSMHV2。应用这 2 种物性方法分别进行模拟计

算,得出 PSRK 的误差更小,因此本文选取 PSRK 物性方法对流程进行模拟和优化。低温甲醇洗工艺流程如图 3 所示。

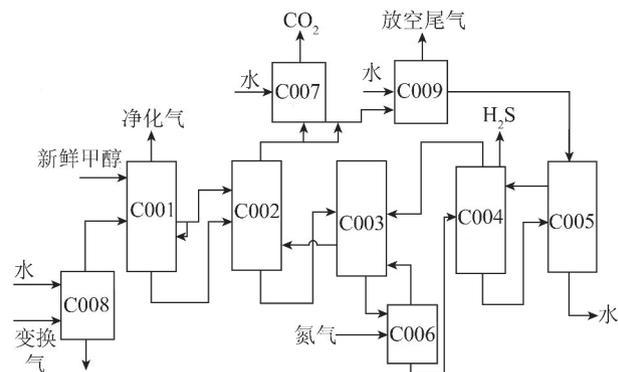


图 3 低温甲醇洗工艺流程

Fig. 3 Flowsheet of the rectisol process

低温甲醇洗工艺主要由吸收、解吸和溶剂回收三大部分组成。流程包含 9 个塔设备,分别为甲醇吸收塔(C001)、CO₂解析塔(C002)、硫化氢浓缩塔(C003)、热再生塔(C004)、甲醇脱水塔(C005)、氮气汽提塔(C006)、CO₂产品水洗塔(C007)、氨水洗塔(C008)和尾气洗涤塔(C009)。本文选取氮气汽提塔(C006)、CO₂产品水洗塔(C007)和尾气洗涤塔(C009)3个塔对模型进行分析。

2.1 氮气汽提塔

氮气汽提塔(C006)的作用是对甲醇中 CO₂ 作进一步解吸,同时提浓硫化氢,利于甲醇再生。氮气汽提塔(C006)的流程模拟如图 4 所示。模拟选择 RadFrac 塔模型,塔不设置冷凝器和再沸器,理论塔板数为 10 块,塔板类型选 Equilibrium 平衡级模型,进料方式为 Above-Stage。模块的收敛方法采用标准方法 Standard,因为塔中涉及到酸性气体的吸收,故需开启 Absorber 选项。

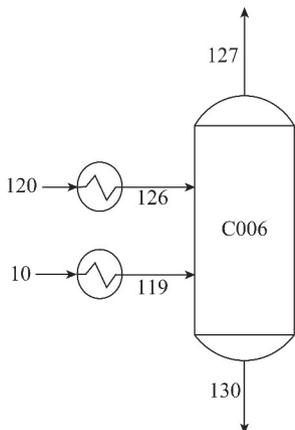


图 4 C006 流程模拟

Fig. 4 Simulation flowsheet of C006

在氮气汽提塔流程模拟中,126号进料物流是

硫化氢浓缩塔(C003)的塔釜出料120号物流加压换热后的物流,主要成分为甲醇(质量分数97.9%),还含有少量的CO₂和H₂S。119号进料物流是经过换热的新鲜氮气。经过汽提的塔顶出料(127号物流)重新返回硫化氢浓缩塔;最后130号塔釜出料物流作为热再生塔(C004)的进料物流流入第5块理论板。甲醇是其主要成分,质量分数达到99.8%。

2.2 CO₂产品水洗塔

CO₂产品水洗塔(C007)的主要作用是进一步脱除去往CO₂压缩机物流中的含硫气体。CO₂产品水洗塔(C007)的流程模拟如图5所示。模拟理论塔板数为14块,进料方式选为Above-Stage,塔板类型为Equilibrium平衡级模型。模块的收敛方法采用标准方法Standard,同时开启Absorber选项。

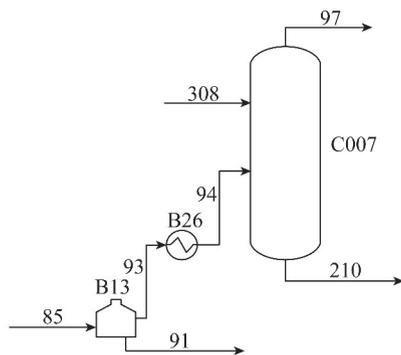


图 5 C007 流程模拟

Fig. 5 Simulation flowsheet of C007

在CO₂产品水洗塔流程模拟中,308号进料物流是脱盐水;94号进料物流是来自CO₂解析塔(C002)的塔顶气相出料(85号物流),其中的CO₂质量分数为99.6%。97号出料物流(CO₂质量分数99.1%)被送往CO₂压缩机进行CO₂收集;最后,塔釜出料即210号物流被送往尾气洗涤塔(C009)。

2.3 尾气洗涤塔

尾气洗涤塔(C009)作为放空尾气排放前的最后一个处理塔,其作用是在微压下对放空尾气做进一步处理,使尾气硫含量更低。当酸性气体达 40×10^{-6} 以下放空。尾气洗涤塔流程模拟如图6所示,理论塔板数设为14块,塔不设置冷凝器和再沸器,塔板类型选Equilibrium平衡级模型。模块的收敛方法采用标准方法Standard,开启Absorber选项。

307号进料物流为脱盐水;211号进料物流为来自CO₂产品水洗塔(C007)的210号物流;107号进料物流为CO₂和N₂的混合气。S5号出料物流(水质量分数99.6%)被送往甲醇脱水塔(C005)回用;110号出料物流为要放空的尾气。

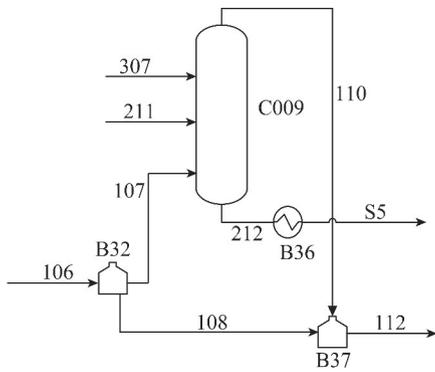


图6 C009 流程模拟

Fig. 6 Simulation flowsheet of C009

2.4 模型可靠性检验

为检验低温甲醇洗工艺模型的可靠性,将实际

运行参数与模拟数据进行比较,分析其吻合程度。通过全流程模拟,本文选取 97 号物流、110 号物流和 130 号物流进行检验,检验数据见表 1。

由表 1 可知,企业的实际运行参数与模拟结果吻合程度较好,因此模型的可靠性较高,对实际生产操作具有较好的指导作用。

3 异常工况下尾气硫含量的控制模拟

以近 6 个月的实际进料数据为基础,筛选 3 个具有典型代表性的异常进料数据(表 2),正常进料时进料中 H_2S 体积分数不超过 0.15%。对于异常进料,在全流程模拟的前提下,通过灵敏度分析工具,对异常工况下的尾气含硫量进行控制。

表 1 实际值与模拟值对比

Table 1 Comparison of actual data and simulation results

项目	97 号物流		110 号物流		130 号物流	
	实际值	模拟值	实际值	模拟值	实际值	模拟值
温度/ $^{\circ}C$	20.63	20.50	17.65	17.80	28.40	28.50
压力/MPa	0.215	0.215	0.120	0.120	0.225	0.225
摩尔流量/ $(kmol \cdot h^{-1})$	1 734	1 733	1 906	1 904	14 013	13 998
质量流量/ $(kg \cdot h^{-1})$	75 437	75 444	76 971	76 988	448 342	448 617
H_2 含量/%	0	0	0	0	0	0
CO 含量/%	0.5	0.3	0	0	0	0
N_2 含量/%	0.1	0.1	13.7	13.5	0	0
AR 含量/%	0	0	0	0	0	0
MeOH 含量/%	0	0	0	0	99.3	99.8
CO_2 含量/%	98.9	99.1	85.5	85.7	0.2	0.1
H_2S 含量/%	0	0.1	0	0	0.1	0.1
HCN 含量/%	0	0	0	0	0	0
H_2O 含量/%	0.5	0.5	0.8	0.8	0.3	0

表 2 3 个异常进料气体组分

Table 2 Components of three abnormal feeding

工况	体积分数/%					
	CO_2	N_2	CH_4	CO	H_2	H_2S
1	32.84	1.41	0.15	21.18	43.90	0.52
2	33.00	1.39	0.25	21.09	43.84	0.42
3	31.58	1.43	0.12	19.54	46.99	0.35

根据低温甲醇洗工艺模拟和实际操作经验,确立了灵敏度分析的自变量和因变量。自变量甲醇吸收塔(C001)中段回流到下段的甲醇回流率对应因变量放空尾气硫含量;自变量 CO_2 解析塔(C002)塔顶温度对应因变量放空尾气硫含量。

3.1 1 号工况

生产实际操作中,通过改变阀门开度来控制甲

醇的回流率,改变 CO_2 解析塔塔顶进料物流温度来改变塔顶温度。在 1 号异常进料工况下,灵敏度分析结果如图 7 所示。

由图 7(a)可知,放空尾气中的硫含量随着甲醇回流率的增加先下降后上升。尾气中硫含量下降的原因是甲醇回流率增大,返回甲醇吸收塔中的甲醇量增加,塔中含硫气体进一步脱除。甲醇回流率超过某一固定值时,尾气硫含量由最小值开始增大,原因是回流率进一步增大,导致去往 CO_2 解析塔(C002)中的甲醇量不足,C002 塔脱除含硫气体的效果减弱,使得放空尾气中的硫含量增加。因此,1 号异常工况下,甲醇回流率为 58% 时,放空尾气中的硫含量最低。

由图 7(b)可知,放空尾气硫含量随着 CO_2 解析塔塔顶温度的下降先显著下降,而后趋势变缓并有

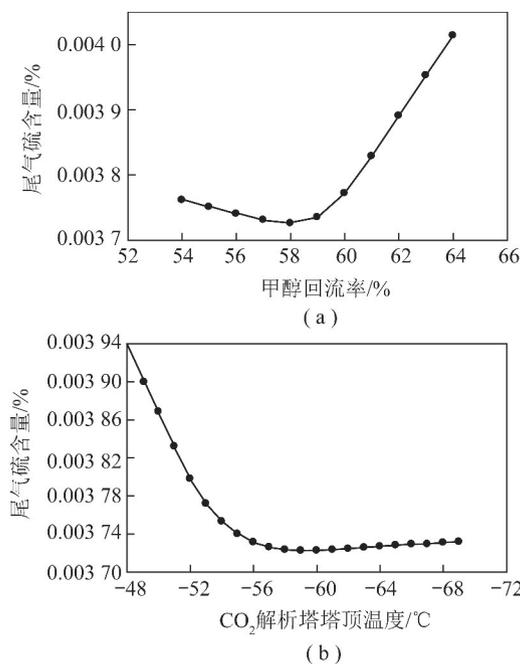


图7 1号工况甲醇回流率和CO₂解析塔塔顶温度灵敏度分析

Fig. 7 Sensitivity analysis of the rate of methanol and the top temperature of carbon dioxide desorption tower in No. 1 working condition

略微上升。原因是CO₂解析塔(C002)的塔顶温度越低,越有利于气体的吸收溶解,从而导致去往尾气洗涤塔(C009)的气体中硫含量降低。放空尾气硫含量变缓并略微上升,是因为C002塔顶出料分流一部分被送往尾气洗涤塔,塔顶温度降低的同时因溶解度变化使塔顶出料中CO₂含量降低;同时尾气中CO₂含量较高,达85%左右,CO₂量减少亦会间接导致尾气中硫含量升高。另一方面,温度降低过度时,CO₂大幅降低,从而导致回收的CO₂不足。结合图7(b)曲线斜率变化,温度低于-57℃时,温度对尾气硫含量的影响减弱,根据企业对CO₂产量的要求,可确定最佳塔顶温度为-57℃。

综合分析甲醇回流率和CO₂解析塔塔顶温度对放空尾气硫含量的影响,可确定1号异常工况下,甲醇吸收塔(C001)中段甲醇回流率58%,CO₂解析塔(C002)的塔顶温度调-57℃为最佳操作参数。

3.2 2号工况

2号异常进料工况下,灵敏度分析结果如图8所示。

由图8(a)可知,与1号异常进料工况类似,甲醇吸收塔(C001)中段甲醇回流率增大时,根据吸收塔的工作原理,液体流量增加,能够进一步吸收C001塔中的含硫气体,塔釜出料富甲醇含硫量增加,放空尾气硫含量降低;又因甲醇回流率的改变会

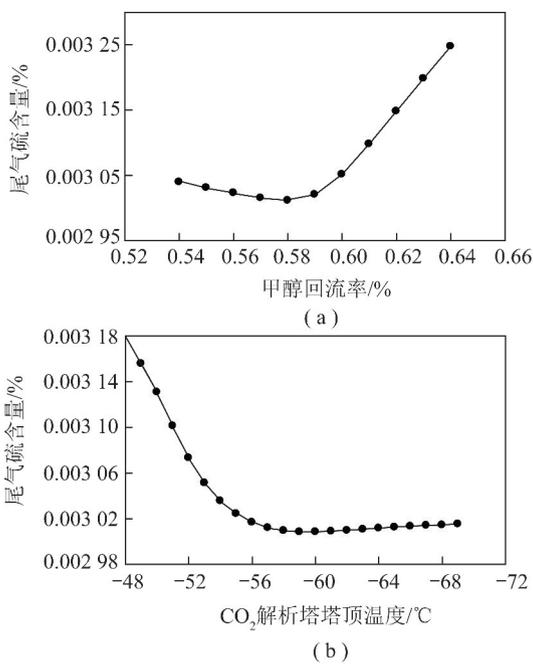


图8 2号工况甲醇回流率和CO₂解析塔塔顶温度灵敏度分析

Fig. 8 Sensitivity analysis of the rate of methanol and the top temperature of carbon dioxide desorption tower in No. 2 working condition

影响去往CO₂解析塔的甲醇量,为防止去往CO₂解析塔中的甲醇量不足而导致放空尾气硫含量进一步升高,甲醇回流率调整应适当。由图8(b)可知,CO₂解析塔(C002)的塔顶温度降低时,含硫气体在溶剂中的溶解度增大,从而降低尾气硫含量,但温度过度降低,会导致大量CO₂吸收,降低经济效益,结合CO₂产量要求和温度改变对尾气硫含量影响的程度,温度不宜过低。因此可确定2号异常工况下,甲醇吸收塔中段甲醇回流率58%,CO₂解析塔的塔顶温度-56℃为最佳操作参数。

3.3 3号工况

3号异常进料工况下,灵敏度分析结果如图9所示。

考虑到放空尾气硫含量和去往CO₂解析塔中的甲醇量,甲醇回流率调整应适当。考虑CO₂产量要求和温度改变对尾气硫含量的影响,CO₂解析塔塔顶温度不宜过低。将以上分析与图9相结合,可确定3号异常工况下,甲醇吸收塔(C001)中段甲醇回流率59%,CO₂解析塔(C002)的塔顶温度-55℃为最佳操作参数。

综上所述,对于异常工况进料(进料中H₂S体积分数超过0.15%),通过研究甲醇吸收塔(C001)中段甲醇回流率和CO₂解析塔(C002)的塔顶温度这2个对尾气硫含量影响较大的参数,利用Aspen

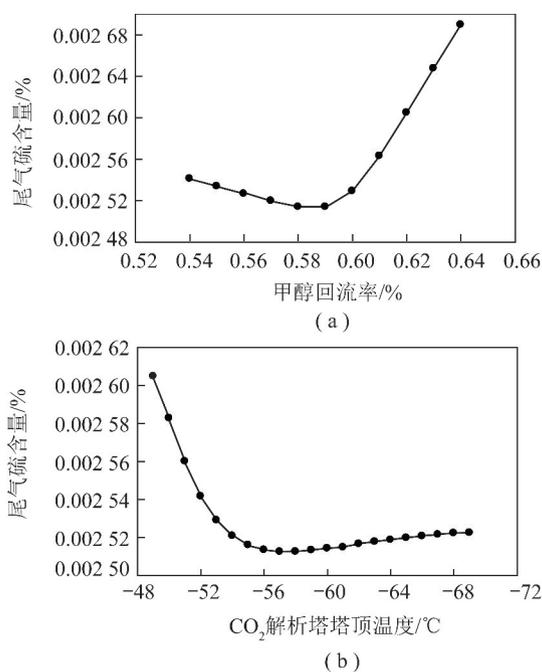


图9 3号工况甲醇回流率和CO₂解析塔塔顶温度灵敏度分析

Fig. 9 Sensitivity analysis of the rate of methanol and the top temperature of carbon dioxide desorption tower in No. 3 working condition

Plus 模拟软件的灵敏度分析工具,可调整甲醇回流率和CO₂解析塔的塔顶温度,使尾气硫含量得到有效控制,获得最佳操作参数。

4 结 论

1)利用 Aspen Plus 模拟软件对低温甲醇洗工艺进行了全流程模拟,得到了可靠的模型。

2)根据企业运行数据,在模型可靠性研究的基础上对3个典型的异常进料工况进行了尾气硫含量的控制,确定了最佳操作参数。典型异常工况的优化条件:1号异常工况(进料中H₂S体积分数0.52%),甲醇回流率调为58%,CO₂解析塔塔顶温度调整为-57°C;2号异常工况(进料中H₂S体积分数0.42%),甲醇回流率调为58%,CO₂解析塔塔顶温度调整为-56°C;3号异常工况(进料中H₂S体积分数0.35%),甲醇回流率调为59%,CO₂解析塔塔顶温度调整为-55°C。

参考文献 (References):

[1] 房倚天,王志青,李俊国,等.多段分级转化流化床煤气化技术研究开发进展[J].煤炭转化,2018,41(3):1-11.
FANG Yitian, WANG Zhiqing, LI Junguo, et al. Research and development progress in multi-stage conversion fluidized bed coal gasification technology[J]. Coal Conversion, 2018, 41

(3):1-11.
[2] 岑可法.煤炭高效清洁低碳利用研究进展[J].科技导报,2018,36(10):66-74.
CEN Kefa, Research progress and outlook for efficient, clean and low-carbon coal utilization[J]. Science & Technology Review, 2018, 36(10):66-74.
[3] 赵锦波,王玉庆.煤气化技术的现状及发展趋势[J].石油化工,2014,43(2):125-131.
ZHAO Jinbo, WANG Yuqing. Present situation and development tendency of coal gasification technology[J]. Petrochemical Technology, 2014, 43(2):125-131.
[4] 刘华群.低温甲醇洗PSRK热力学方程改进与换热网络优化[D].天津:天津大学,2016.
[5] 赵姝婧.低压特殊原料气低温甲醇洗工艺模拟[D].大连:大连理工大学,2017.
[6] 刘文.低温甲醇洗单元应用膨胀机方案的论证及分析[J].洁净煤技术,2018,24(3):123-129.
LIU Wen. Analysis and demonstration of expander application in rectisol unit[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(3):123-129.
[7] 赵文星,王建成,王辉,等.低温甲醇洗吸收塔热力学模型和过程模拟研究[J].天然气化工(C1化学与化工),2017,42(3):86-92.
ZHAO Wenxing, WANG Jiancheng, WANG Hui, et al. Thermodynamic model and process simulation of absorbing tower for gas purification by rectisol method[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2017, 42(3):86-92.
[8] 郭欣,李金来,李士雨,等.低温甲醇洗吸收塔的计算机模拟[J].煤炭转化,2013,36(1):89-92.
GUO Xin, LI Jinlai, LI Shiyu, et al. Computer simulation of rectisol absorption column[J]. Coal Conversion, 2013, 36(1):89-92.
[9] 何杰,沈益,李美玲,等.低温甲醇洗PSRK热力学方程改进与全流程模拟[J].化学工程,2017,45(3):69-74.
HE Jie, SHEN Yi, LI Meiling, et al. The revised PSRK thermodynamic equation and whole process simulation of rectisol[J]. Chemical Engineering (China), 2017, 45(3):69-74.
[10] 冀淑军.低温甲醇洗工艺优化探讨[J].煤化工,2017,45(6):20-23.
JI Shujun. Discussion on the rectisol process optimization[J]. Coal Chemical Industry, 2017, 45(6):20-23.
[11] 王亚亚,梁生荣,王智杰.低温甲醇洗酸性气体吸收塔模拟分析[J].现代化工,2014,34(10):157-161.
WANG Yaya, LIANG Shengrong, WANG Zhijie. Simulation and optimization of methanol absorber in rectisol process[J]. Modern Chemical Industry, 2014, 34(10):157-161.
[12] 赵鹏飞,李水弟,王立志.低温甲醇洗技术及其在煤化工中的应用[J].化工进展,2012,31(11):2442-2448.
ZHAO Pengfei, LI Shuidi, WANG Lizhi. Rectisol technology and its application in coal chemical industry[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012, 31(11):2442-2448.
[13] 尹爱存,贺兰云.两种低温甲醇洗工艺对比[J].天然气化工(C1化学与化工),2011,36(4):53-55.
YIN Aicun, HE Lanyun. Comparison of two rectisol processes[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2011, 36(4):53-55.

- [14] 石晓林,李东风. 低温甲醇洗技术净化工艺及研究进展[J]. 煤炭与化工,2016,39(11):21-25.
SHI Xiaolin, LI Dongfeng. Scrubbing process and research progress of rectisol washing technology[J]. Coal and Chemical Industry, 2016, 39(11): 21-25.
- [15] 罗伟,陈隆,崔豫泓. 基于 Aspen Plus 煤粉工业锅炉系统建模与分析[J]. 洁净煤技术,2015,21(6):91-94.
LUO Wei, CHEN Long, CUI Yuhong. Modeling and analysis of industrial pulverized coal boiler based on Aspen Plus[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(6): 91-94.
- [16] 刘传亮,朱志劼,范雪飞,等. 煤基多联产中两种煤气化工艺的模拟与性能比较[J]. 洁净煤技术,2014,20(2):64-68.
LIU Chuanliang, ZHU Zhijie, FAN Xuefei, et al. Simulation and performance comparison of two kinds of coal gasification process in coal based ploy-generation[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(2): 64-68.
- [17] SADEGHVAZIRI R, AMOVIC M, LJUNGGREN R, et al. A medium-scale 50 MW fuel biomass gasification based Bio-SNG plant; a developed gas cleaning process[J]. Energies, 2015, (8): 5287-5302.
- [18] 许东,李燕,管凤宝,等. 低温甲醇洗工艺的模拟及扩产改造的研究[J]. 现代化工,2019,39(2):215-221.
XU Dong, LI Yan, GUAN Fengbao, et al. Simulation and expansion of a revamped rectisol process[J]. Modern Chemical Industry, 2019, 39(2): 215-221.
- [19] 朱维强,吴慧雄,金孟笛,等. 提高再生气中 H₂S 浓度的方案研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版),2018,45(4):25-29.
ZHU Weiqiang, WU Huixiong, JIN Mengdi, et al. Solution method for increasing the concentration of H₂S in regeneration gas[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2018, 45(4): 25-29.
- [20] 孙兰义. 化工过程模拟实训——Aspen Plus 教程[M]. 2版. 北京:化学工业出版社,2017:21-51.