

钢铁高炉煤气燃烧前低能耗脱硫 关键影响因子研究

段晓雅^{1,2}, 林千果^{2*}, 李 飒^{1,2}, 阳 强³, 吴 倩¹

(1. 华北电力大学环境科学与工程学院, 北京 102206; 2. 华北电力大学苏州研究院, 江苏 苏州 215123;
3. 上海交通大学, 上海 200240)

摘要:针对高炉煤气羰基硫催化水解和 H₂S 吸附相结合的燃烧前脱硫工艺, 分别应用 Aspen Plus 和 Aspen Adsorption 软件进行模拟, 探究能耗的关键影响因子温度和压力对总硫脱除和能耗的影响, 识别满足减排标准的低能耗脱硫情景。结果表明, 水解压力对能耗和总硫含量变化不敏感; 吸附压力升高, 总硫含量降低, 但对能耗变化不敏感; 水解温度和吸附温度是影响脱硫和能耗的关键因素, 水解温度升高会导致总硫含量降低和能耗升高, 吸附温度升高会导致总硫含量升高和能耗降低。

关键词:高炉煤气; 脱硫; 羰基硫; H₂S; 低能耗

中图分类号: X512

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2021)S-0307-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2021.S.063

Study on key influencing factors for low energy consumption desulfurization of blast furnace gas before combustion in iron and steel plant

DUAN Xiao-ya^{1,2}, LIN Qian-guo^{2*}, LI Sa^{1,2}, YANG Qiang³, WU Qian¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Suzhou Institute of North China Electric Power University, Suzhou 215123, China; 3. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A desulfurization process for blast furnace gas before combustion, which combines the catalytic hydrolysis of carbonyl sulfur and the adsorption of hydrogen sulfide, is proposed. It is simulated respectively by Aspen Plus and Aspen Adsorption software to explore the influences of temperature and pressure on total sulfur removal and the associated energy consumption, and to identify the low energy consumption desulfurization scenario that meets the emission reduction standard. Results show that hydrolysis pressure has not sensitive impact on energy consumption and total sulfur content; When adsorption pressure increases, total sulfur content will decrease, but energy consumption will not be affected obviously; Hydrolysis temperature and adsorption temperature are the key factors affecting desulfurization and energy consumption; The higher hydrolysis temperature will lead to a decrease of total sulfur content and an increase of energy consumption, while the increase of adsorption temperature will lead to an increase of total sulfur content and a decrease of energy consumption.

Key words: blast furnace gas; desulfurization; carbonyl sulfide; hydrogen sulfide; low energy consumption

高炉煤气(BFG)是高炉炼铁过程中产生的可燃气体,可作为热风炉、加热炉、焦炉、锅炉等的燃料。但BFG中含有的无机硫(如H₂S)和有机硫[如羰基硫(COS)]经燃烧生成SO₂,排放到空气中对生态环境造成严重污染。生态环境部针对SO₂排放发布了严格的环境标准,SO₂排放浓度不得超过35 mg/Nm³[1]。部分地区对硫化物排放提出更高要求,如唐山市要求BFG配备脱H₂S设施,确保H₂S浓度≤20 mg/Nm³[2];山西省规定自2019年10月起

强制执行SO₂特别排放标准[3]。因此,钢铁行业BFG脱硫减排刻不容缓。钢铁工业在世界经济中占有重要地位[4],其快速发展的同时消耗了世界能源消耗总量的10%~15%[5],降低钢铁行业能耗、节约运营成本是重中之重。因此开发低能耗脱硫工艺、实现BFG清洁利用对钢铁行业具有积极意义。

BFG脱硫工艺可分为燃烧前脱硫(脱除H₂S、COS)和燃烧后脱硫(脱除SO₂)。若采用燃烧后脱硫,H₂S会对不锈钢、碳钢材质的输送管道、阀门产

收稿日期:2021-03-08;修回日期:2021-05-15

基金项目:源头捕集CO₂能源系统分析与集成(2016YFB0600803-02);膜分离-变压吸附协同捕集烟气低浓度CO₂工艺研究(Z181100005118017);必和必拓-北京大学碳捕集、利用与封存(钢铁行业)研究项目

作者简介:段晓雅(1993-),女,硕士生,研究方向为高炉煤气脱硫,dxy1217488246@163.com;林千果(1971-),男,博士,教授,主要研究方向为二氧化碳捕集、利用与封存技术及二氧化碳监测研究,通讯联系人,nshi@hotmail.com。

生腐蚀^[6],为 BFG 安全输送带来隐患的同时造成资源浪费。此外,BFG 的用户相对分散,燃烧后脱硫成本高、管理难度大,造成资金和人力浪费。因此,经济、环保的燃烧前脱硫成为 BFG 脱硫的首选。

关于钢铁厂燃烧前脱硫已经做了很多研究。De Oliveira 等^[7]改进了焦炉煤气 H₂S 净化过程模型,并用工业数据进行验证,结果显示该工艺 H₂S 去除效率比改进前提高了 5%,适用于含硫量较高的煤气。陈洪等^[8]介绍了重钢焦化厂净化焦炉煤气采用的真空碳酸钾法脱硫工艺,设计处理煤气量为 2 × 10⁴ m³/h,处理后煤气中的 H₂S 含量低于 200 mg/m³,脱除的 H₂S 进入制酸系统用于生产浓硫酸。但是对于 BFG 来说,仅脱除 H₂S 总硫排放仍难以达到脱硫新标准,还需要脱除 COS 等有机硫。Park 等^[9]研制了一套由快速流化床型脱硫剂和鼓泡流化床型再生器组成的连续脱硫系统,能实现同时脱除 COS 和 H₂S 的目标,并且连续运行 30 h 以上脱硫率仍高达 99.9%。魏蕾等^[10]将 COS 水解催化剂 γ-Al₂O₃ 加入 MDEA 的水溶液中,将 COS 催化水解为 H₂S 和 CO₂,生成的 H₂S 和原有的 H₂S 被 MDEA 吸收,从而实现 H₂S 和 COS 的脱除。针对有机硫和无机硫的脱除问题,有研究者提出了先水解 COS 再吸附 H₂S 的联合脱硫工艺。王为然等^[11]设计了水解-吸附串联精脱硫工艺,对来自催化裂化装置的 C₄ 烃类进行精脱硫实验,结果表明,该水解-吸附串联工艺能将 C₄ 烃类中的总硫质量浓度从 10~80 mg/m³ 降低至 1 mg/m³。

采用水解 COS、吸附 H₂S 脱硫工艺,为达到总硫含量符合最新标准,需较高的 COS 水解率和 H₂S 吸附率。提高 COS 水解率需要提高水解温度,即升高 BFG 温度。一方面,根据模拟结果,水解温度越高 COS 水解率越高;另一方面,BFG 中含有 CO₂,根据化学平衡理论,CO₂ 浓度越高 COS 平衡浓度越低^[12],越不利于 COS 水解,因此可以通过提高水解温度提高 COS 水解率。常温更有利于提高 H₂S 的吸附率。一方面,根据模拟结果,H₂S 吸附随温度升高穿透时间减少,吸附量减少;另一方面常温脱硫吸附材料损失小、能耗低、运行成本低^[13]。因此需要降低温度提高 H₂S 的去除率。综上所述,为了降低 BFG 中总硫含量,需先升温提高水解率,再降温提高吸附率。

提高水解率需升高水解温度,故能耗增多;提高 H₂S 吸附率需降低吸附温度,也使能耗增加。因此,总硫含量越低,能耗越高、成本越高,使该项技术的

应用受到限制。过去的研究多集中于总硫的脱除,忽略了总硫含量和能耗之间的平衡关系。所以,本研究针对以往研究的不足,开展 COS 水解结合 H₂S 吸附的 BFG 低能耗脱硫工艺模拟,应用软件 Aspen Plus^[14] 和 Aspen Adsorption^[15] 分别模拟 COS 水解和 H₂S 吸附工艺,研究不同温度、压力情景下的脱硫率及能耗,最终实现低能耗脱硫的目标。

1 BFG 脱硫工艺及模拟

1.1 BFG 脱硫工艺

COS 化学性质稳定、反应活性低、极性弱^[16],常用反应条件温和、转化率高^[17]的催化水解法脱除,反应式见式(1)。BFG 中含有的 H₂O 有利于 COS 水解,水解产物 H₂S 随 BFG 组分中的 H₂S 一同在后续工艺中脱除。H₂S 属于活性硫,化学性质活泼,易于脱除,脱除方法较多。考虑到干法吸附脱硫工艺简单、不需二次加热、热损失少、能耗低^[18],适用于低气量、低含硫量的脱硫环境,并且 COS 水解后剩余的 H₂O 有利于吸附脱除 H₂S^[19]。因此,采用水解 COS 协同吸附 H₂S 的脱硫工艺来降低 BFG 中的总硫含量,工艺流程如图 1 所示。

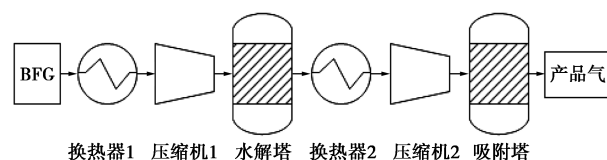
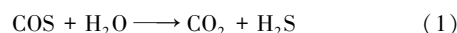


图 1 BFG 脱硫工艺流程图

BFG 经换热器和压缩机变温变压后自下而上进入水解塔,在催化剂 γ-Al₂O₃ 的催化水解作用下 COS 水解;水解后的气体经过换热器和压缩机变温变压后进入吸附塔脱除 H₂S,剩余气体从吸附塔顶部流出回收再利用。

1.2 BFG 脱硫工艺模拟

某钢铁厂 BFG 的流量 2.00 × 10⁶ L/h、温度 45℃、压力 0.11 MPa(表压,下同)。主要的气体组成为: N₂ 50.13%、CO₂ 24.10%、CO 21.11%、H₂ 3.25%、O₂ 0.08%、H₂S 0.44%、COS 0.50%。

1.2.1 COS 水解工艺模拟及参数

COS 水解工艺运用 Aspen Plus 软件进行模拟,采用 STEAM-TA 方法(自由水方法),以全混釜反应器(RCSTR)模拟 COS 在 γ-Al₂O₃ 催化作用下反应温度、压力对水解率及能耗的影响。

假定 RCSTR 反应器内为完全混合,即反应器内

部与出口物流的性质、组成相同。采用幂函数型宏观动力学方程模拟传质、传动、传热因素影响下的COS水解过程,见式(2)。

$$r_A = k_0 \exp^{-E/RT} y_{\text{COS}}^a y_{\text{H}_2\text{O}}^b \quad (2)$$

式中: k_0 为反应速率常数指前因子, $6.81 \times 10^{10} \text{ mol}/(\text{kg} \cdot \text{h})$; E 为活化能, $3.33 \times 10^4 \text{ J}/\text{mol}$; R 为理想气体常数, $8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为反应温度, K ; a 、 b 分别为COS、 H_2O 反应级数, $a = 0.66$, $b = 0.06$ ^[20]; r_A 为COS水解反应速率, $\text{mol}/(\text{kg} \cdot \text{h})$; y_{COS} 、 $y_{\text{H}_2\text{O}}$ 分别为COS和 H_2O 的瞬时摩尔百分比,%。

1.2.2 H_2S 吸附工艺模拟及参数

运用 Aspen Adsorption 软件动态模拟单塔穿透吸附过程中反应温度、压力对 H_2S 吸附的影响。

吸附塔原料气假设为理想气体,是COS水解工艺的产品气,其组分随水解条件的改变而改变。吸附床参数为塔高3.00 m,塔直径10.00 m。吸附剂参数为孔隙率0.40,堆积密度 $5.92 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

1.3 情景设计

为了更直观地体现不同温度、压力对水解和吸附过程的影响,以脱硫后产品气中总硫含量及脱硫过程中消耗的能量为指标,模拟了BFG脱硫的81种情景,情景设置如下:

水解温度设置为90、110、130 $^\circ\text{C}$,水解压力设置为0.13、0.15、0.17 MPa;吸附温度设置为20、30、40 $^\circ\text{C}$,吸附压力设置为0.19、0.21、0.23 MPa。以上数据四四组合,形成81个情景。

情景1~情景3:水解温度、压力分别为90 $^\circ\text{C}$ 、0.13 MPa;吸附温度为20 $^\circ\text{C}$,吸附压力分别为0.19、0.21、0.23 MPa。

情景4~情景6:水解温度、压力分别为90 $^\circ\text{C}$ 、0.15 MPa;吸附温度为30 $^\circ\text{C}$,吸附压力分别为0.19、0.21、0.23 MPa。

情景7~情景9:水解温度、压力分别为90 $^\circ\text{C}$ 、0.17 MPa;吸附温度为40 $^\circ\text{C}$,吸附压力分别为0.19、0.21、0.23 MPa。

情景10~情景18:水解温度为90 $^\circ\text{C}$,压力为0.15 MPa;吸附温度、压力同情景1~情景9。

情景19~情景27:水解温度为90 $^\circ\text{C}$,压力为0.17 MPa;吸附温度、压力同情景1~情景9。

情景28~情景54:水解温度为110 $^\circ\text{C}$,水解压力、吸附温度、吸附压力同情景1~情景27。

情景55~情景81:水解温度为130 $^\circ\text{C}$,水解压力、吸附温度、吸附压力同情景1~情景27。

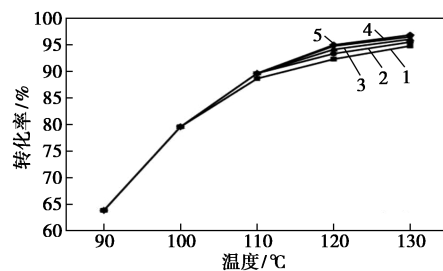
其中,情景1~情景3反映了吸附压力对脱硫能

耗及总硫含量的影响;情景1、情景4、情景7反映了吸附温度对脱硫能耗及总硫含量的影响;情景1、情景10、情景19反映了水解压力对脱硫能耗及总硫含量的影响;情景1、情景28、情景55反映了水解温度对脱硫能耗及总硫含量的影响。

2 结果与讨论

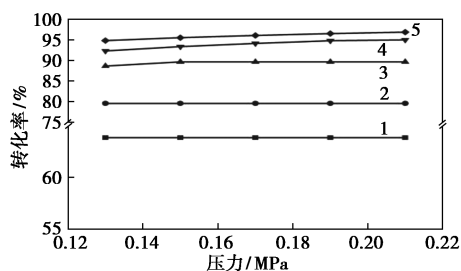
2.1 温度、压力对COS水解过程的影响

从图2(a)可以看出,在同一压力下,随着反应温度升高,COS转化率大幅度增加,因为反应温度升高,催化剂活性增强,水解反应速率加快;同时,随着反应温度升高,硫在催化剂毛细孔中的凝结被抑制,水蒸气更易到达反应位,加快水解速率^[21]。从图2(b)可以看出,不同温度下,COS水解转化率随压力升高变化趋势不同。在温度低于100 $^\circ\text{C}$ 时,转化率不随压力升高而改变;温度高于110 $^\circ\text{C}$ 时,随着压力增加,COS水解转化率小幅增长直至趋于平缓。水解反应温度越低,水解转化率受压力的影响越小,越早达到最大值。转化率随压力升高而增大是因为COS水解反应在300 $^\circ\text{C}$ 以下视为不可逆反应^[22],故在等体积容器中,升高压力,气体浓度升高,反应速率加快,COS水解转化率升高。从图2可以看出,温度变化对COS水解率的影响程度远大于压力的影响,因此在BFG脱硫过程中优选升高水解温度降低总硫含量。



1—0.13 MPa; 2—0.15 MPa; 3—0.17 MPa;
4—0.19 MPa; 5—0.21 MPa

(a) 温度对COS水解转化率的影响



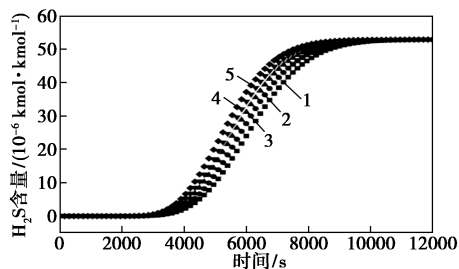
1—90 $^\circ\text{C}$; 2—100 $^\circ\text{C}$; 3—110 $^\circ\text{C}$; 4—120 $^\circ\text{C}$; 5—130 $^\circ\text{C}$

(b) 压力对COS水解转化率的影响

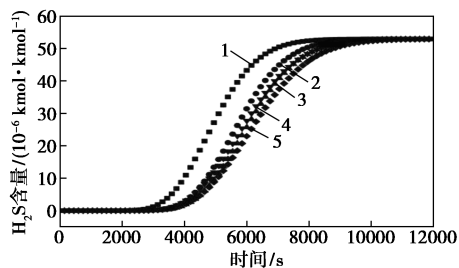
图2 温度、压力对COS水解转化率的影响

2.2 温度、压力对 H₂S 吸附的影响

如图 3(a) 所示,随着气体入口温度升高, H₂S 吸附速率加快,从而强化了吸附动力学,因此穿透时间缩短,但由于 H₂S 吸附过程受动力学影响较小,入口温度对 H₂S 吸附穿透时间的影响也较小^[23]。图 3(b) 为 20℃ 时不同入口压力下的 H₂S 吸附穿透曲线,从图中可以看出,随着入口压力升高,穿透时间增加,捕集率增大,同时更换吸附剂频率降低,有利于 H₂S 以及 BFG 脱硫工艺的顺利进行。相比于温度对 H₂S 吸附穿透曲线的影响,压力的影响效果更显著,因此在工程实践中可以通过提高气体入口压力,从而提高 H₂S 的捕集率和穿透时间。



1—20℃; 2—40℃; 3—60℃; 4—80℃; 5—100℃
(a) 入口温度对 H₂S 穿透曲线的影响

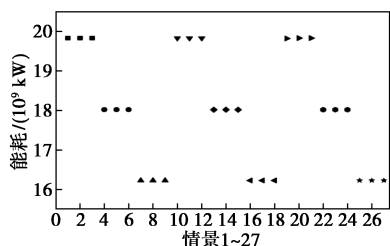


1—0.17 MPa; 2—0.19 MPa; 3—0.21 MPa;
4—0.23 MPa; 5—0.25 MPa
(b) 入口压力对 H₂S 穿透曲线的影响

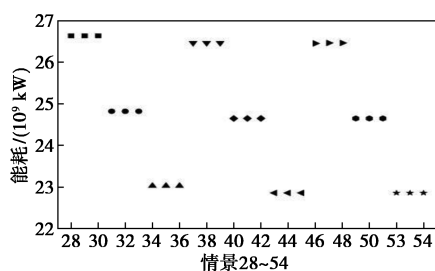
图 3 入口温度、压力对 H₂S 穿透曲线的影响

2.3 温度、压力对能耗的影响

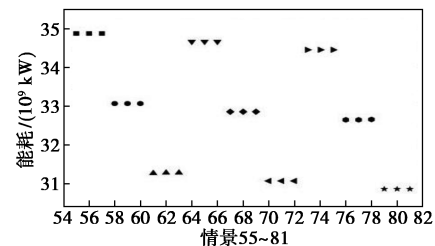
脱硫过程中消耗的能量主要由 COS 水解前 BFG 温度、压力变化和 COS 水解后 H₂S 吸附前气体温度、压力变化消耗的能量组成。图 4 为 81 个情景的能耗图,图中每 3 个情景用相同形状的图形表示。



(a) 情景 1~27 能量消耗图



(b) 情景 28~54 能量消耗图



(c) 情景 55~81 能量消耗图

图 4 不同情景的能量消耗

将能耗图分为 3 部分,分别为 COS 水解温度为 90℃ [图 4(a)]、水解温度为 110℃ [图 4(b)]、水解温度为 130℃ [图 4(c)]。由图 4 可知, COS 水解温度越高,能耗越高,在总能耗中起决定性作用。每张图又根据水解压力、吸附温度、吸附压力不同分为 27 个情景。其中,其他条件相同、吸附压力不同时,能量消耗变化较小(如情景 1、2、3 等),因为相对于 BFG 升温耗能来说,升压耗能较小,故压力变化引起的能耗变化对总能耗影响较小;当其他条件相同、吸附温度不同时,吸附温度越高,能耗越小(如情景 1、4、7 等),因为吸附温度越高,水解和吸附工艺之间温差越小,故而能耗减少;当其他条件相同、水解压力增大时,能量消耗略有下降,但总体差别不大(如情景 1、10、19 等),因为当水解压力越大,水解和吸附工艺之间压差越小,故能耗越小。综上所述,影响 BFG 脱硫能耗的主要因素为水解温度,其次为水解和吸附过程的温差。为减少能耗,可通过降低水解温度以及水解工艺和吸附工艺的温差实现。

2.4 温度、压力对总硫含量的影响

脱硫后 BFG 中总硫含量主要由 COS 水解率和 H₂S 吸附率决定。图 5 为 81 个情景的总硫含量图,图中每 3 个情景用相同形状的图形表示。

由图 5 可知,当其他条件不变,吸附压力增大时,总含硫量降低(如情景 1、2、3 等),因为压力升高, H₂S 突破时间增长,吸附率增大,故总硫降低;当其他条件不变、吸附温度升高,总含硫量增大(如情景 1、4、7 等),因为 H₂S 吸附过程随温度升高突破时间缩短,吸附率降低;当其他条件不变、水解压力

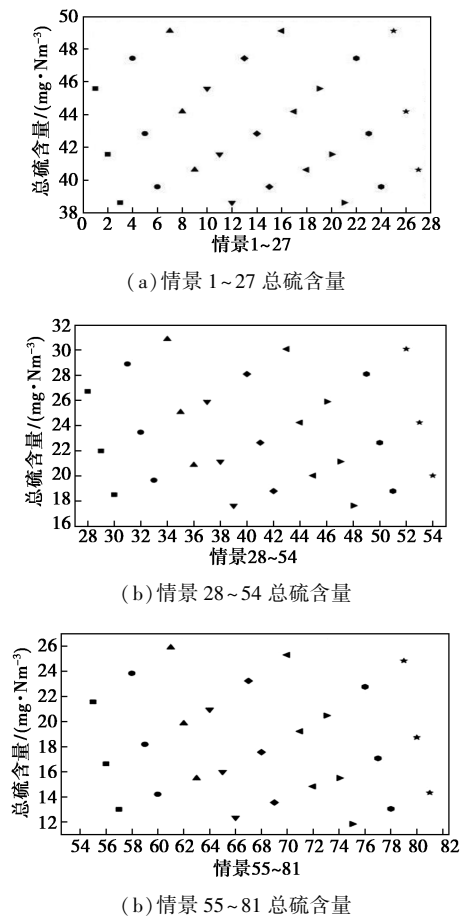


图5 不同情景的总硫含量

和水解温度分别增大时,总硫含量均下降(如情景1、10、19和情景1、28、55等),因为在水解过程中水解率随压力、温度增大而增大,故总硫含量下降,但水解压力增大,总硫含量变化不大。综上所述,吸附压力、水解温度增高均会减小总硫含量。

从图4、图5可以看出,当其他条件不变、吸附压力增大时(如情景1、2、3等),能耗相差不大,但总硫含量降低;当其他条件不变、水解压力增大时(如情景1、10、19等),能耗和总硫含量均略有下降,但变化幅度较小,可忽略其影响;当其他条件不变、吸附温度升高时(如情景1、4、7等),能耗减少、总硫含量增加;当其他条件不变、水解温度升高(如情景1、28、55等),能耗大幅增加,总硫含量降低。因此水解温度(吸附温度)升高会导致总硫含量降低(升高)和能耗升高(降低)。情景1~27能耗较低,但总硫含量超过减排目标;情景28~54能耗适中,且部分情景总硫含量符合减排标准;情景55~81能耗较高,部分总硫含量符合减排标准。故情景28~54中部分情景符合低能耗脱硫目标,分别为情景36、情景45和情景54,工艺条件均为:水解温度

110℃,吸附温度40℃,吸附压力0.23 MPa(水解压力对总硫含量和能耗影响不敏感,不予考虑)。

3 结论

BFG燃烧前脱硫采用的COS水解协同H₂S吸附工艺因先升温后降温存在能耗高的问题,为了识别该工艺满足减排标准的低能耗脱硫情景,探究能耗的关键影响因子温度和压力对于总硫脱除和能耗的影响,应用Aspen Plus和Aspen Adsorption软件分别进行COS水解和H₂S吸附的模拟。结果表明:

(1)水解压力对能耗和总硫含量变化不敏感;吸附压力升高,总硫含量降低,但对能耗变化不敏感。

(2)水解温度和吸附温度是影响脱硫和能耗的关键,水解温度升高会导致总硫含量降低和能耗升高,吸附温度升高会导致总硫含量升高和能耗降低。

针对钢铁厂BFG低能耗脱硫的模拟研究,为BFG的低能耗和低成本燃烧前脱硫实践提供指导,模拟结果对工程实践操作条件的选择以及催化水解剂、吸附剂的制备具有直接指导作用,所采用的模拟方法也为未来高CO₂浓度情景下BFG低能耗脱硫模拟提供了参考。

参考文献

- [1] 生态环境部等五部委联合印发《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》[J].中国环境监察,2019,(5):4.
- [2] 周明灿.粗煤气中多组分复杂有机硫转化为硫化氢的技术探讨[J].化工设计,2020,30(1):10-12.
- [3] 赵颖睿.氧化锌常温脱硫过程中水的作用机理及碳掺杂氧化锌脱硫剂的构建[D].太原:太原理工大学,2019.
- [4] Lu B, Chen G, Chen D, et al. An energy intensity optimization model for production system in iron and steel industry [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 100: 285-295.
- [5] Chen D, Lu B, Dai F Q, et al. Variations on billet gas consumption intensity of reheating furnace in different production states [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 129: 1058-1067.
- [6] 李志峰, 张宁国, 王瑞真. 高炉煤气管道防腐研究 [J]. 莱钢科技, 2010, (4): 46-48, 51.
- [7] De Oliveira C L, De Vasconcelos S F, De Farias N G W, et al. Improving H₂S removal in the coke oven gas purification process [J]. Separation and Purification Technology, 2021, 257; DOI: 10.1016/j.seppur.2020.117862.
- [8] 陈洪, 宋英方. 真空碳酸钾脱硫工艺的实践及优化 [J]. 燃料与化工, 2011, 42(6): 52-53.
- [9] Park Y C, Jo S H, Ryu H J, et al. Simultaneous removal of H₂S and COS using Zn-based solid sorbents in the bench-scale continuous hot gas desulfurization system integrated with a coal gasifier [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2012, 29(12): 1812-1816.

(下转第314页)

4.2 应急措施

首先,通过定期清理凝结水入口过滤器和缓冲罐液位计引压管中的蜡状物,保证凝结水泵和液位计发挥作用;其次,根据多甲基苯的溶解性特点,在缓冲罐、压缩机吸入管线等位置配备洗油(以二甲苯为主要成分)注入管线,定期将管线、除沫网上的蜡状物清洗干净;再次,为保证装置的连续运行,在凝结水泵入口管线上以带压开孔的方式设置临时排放线,用于紧急情况下将缓冲罐内的水现场排放。

通过以上调整及管控措施,蜡状物明显减少,装置可维持稳定运行。

5 结论

催化剂上积碳过多、反应温度偏低、反应压力偏高、反应器空速偏大等原因造成催化剂活性不足,进而引起多甲基苯随反应气被带出,在反应气压缩机入口遇冷结晶产生蜡状物,威胁反应气压缩机的稳定运行。通过调整反应温度、压力、催化剂积碳等反应参数,控制压缩机入口反应气温度不高于 40℃,定期清理液位计引压管和凝结水泵入口过滤器等可以有效避免反应气压缩机停车。这些运行经验及处置方法对国内多套 MTO 装置解决类似带蜡问题、促

进装置稳定运行有较好的借鉴意义,同时也促使 MTO 催化剂工业加强研发,以开发出性能更加优越的 MTO 催化剂。

参考文献

- [1] 黄格省,胡杰,李锦山,等.我国煤制烯烃技术发展现状与趋势分析[J].化工进展,2020,39(10):3699-3974.
- [2] 张世杰,吴秀章,关丰忠,等.甲醇制烯烃工业装置水系统问题分析及解决方案探讨[J].化工进展,2017,36(1):553-559.
- [3] 石胜启,吴凤鸣.甲醇制烯烃技术工业化进展[J].现代化工,2016,36(4):38-41.
- [4] 崔普选.煤基甲醇制烯烃工艺技术发展现状[J].现代化工,2020,40(4):5-9.
- [5] 王有和,吴成成,刘忠文,等.甲醇制烯烃反应工艺、反应机理及其动力学研究进展[J].工业催化,2018,26(1):13-21.
- [6] 吴秀章.基于工业装置探究甲醇制烯烃反应机理[J].石化技术与应用,2013,31(5):363-369.
- [7] Li J Z, Wei Y X, Chen J R, et al. Observation of heptamethylbenzeniumcation over SAPO-type molecular sieve DNL-6 real MTO conversion condition[J]. Journal of the American Chemical Society, 2012, 134:836-839.
- [8] Bos A N, Tromp P J, Akse H N. Conversion of methanol to lower olefins kinetic modeling, reactor simulation, and selection[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1995, 34:3808-3816.
- [9] 胡浩,叶丽萍,应卫勇,等.甲醇制烯烃反应机理动力学研究进展[J].工业催化,2008,16(3):18-23. ■
- [10] 魏蕾,王荷芳,王延吉,等. γ - Al_2O_3 的添加对 MDEA 溶液脱除 COS 效果的影响[J].分子催化,2006,20(5):461-463.
- [11] 王为然,周广林,周红军,等.炼油厂碳四精脱硫工业侧线实验[J].现代化工,2011,31(6):69-73.
- [12] 刘玉凤,杨利芳,焦倩.煤气脱硫工艺的发展现状[J].广州化工,2020,48(10):24-25,60.
- [13] Plaza M G, Durán I, Querejeta N, et al. Experimental and simulation study of adsorption in postcombustion conditions using a microporous biochar. 1. CO_2 and N_2 adsorption[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, 55(11):3097-3112.
- [14] Sun Z, Liu J P, Sun Z Q. Synergistic decarbonization and desulfurization of blast furnace gas via a novel magnesium-molybdenum looping process [J]. Fuel, 2020, 279; DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118418.
- [15] Bundit K, Thongchai S, Niwat P, et al. Optimization of a six-step pressure swing adsorption process for biogas separation on a commercial scale [J]. Applied Sciences, 2020, 10(14); DOI: 10.3390/app10144692.
- [16] 李宝成,时越,吴维杰.钢铁行业高炉煤气深度脱硫技术探究[J].冶金管理,2020,(11):26-27.
- [17] 郑璇,李逢玲,王生荣,等.利用焦炉煤气组合脱硫技术实现烟气 SO_2 达标排放[J].煤化工,2020,48(3):9-13.
- [18] González F A J G, Orazi V, Jasen P, et al. Adsorption of carbonyl sulfide on Pt-doped vacancy-defected SWCNT: A DFT study [J]. Applied Surface Science, 2020, 525; DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.146331.
- [19] Liu J F, Liu Y C, Xue L, et al. Oxygen poisoning mechanism of catalytic hydrolysis of OCS over Al_2O_3 at room temperature [J]. Acta Physico Chimica Sinica, 2007, 23(7):997-1002.
- [20] 李建伟,方小丽,李玉.r-906 催化剂上羰基硫水解反应宏观动力学[J].小氮肥设计技术,1996,(3):1-4.
- [21] 夏尚文,杨国举,刘坤,等.二硫化碳和羰基硫水解反应及催化剂研究进展[J].山东化工,2020,49(2):80-81,86.
- [22] 李建伟. γ - Al_2O_3 催化剂上羰基硫水解反应本征及宏观动力学研究[J].化学反应工程与工艺,1993,9(1):108-113.
- [23] Rozita H, Ali M R, Jafar T D, et al. Study of the Rod-Like and spherical nano-ZnO morphology on H_2S removal from natural gas [J]. Applied Surface Science, 2010, 257(2):434-439. ■

(上接第 311 页)