

循环流化床烟气脱硫装置对电除尘器影响研究

赵旭东¹, 吴少华², 项光明¹, 马春元³

(1. 清华大学热能工程系, 北京 100084; 2. 哈尔滨工业大学能源与动力工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

3. 山东大学动力工程学院, 山东 济南 250061)

摘 要: 在一台 75 t/h 燃煤锅炉上, 设计建造了双循环流化床烟气悬浮脱硫系统, 在脱硫系统运行前后, 对配套电除尘器入口处烟气的温度、湿度、化学成份、粉尘的粒径、表观形貌和比电阻等相关特性进行了比较分析。结果显示, 在脱硫系统运行后, 可使除尘器入口处烟气的湿度增加, 温度降低, 尘粒的比电阻下降, 从而提高了系统的脱硫效率与电除尘器的除尘效率。还研究了循环流化床烟气脱硫装置对电除尘器工作稳定性和除尘效率的影响, 同时提出了应对措施。

关 键 词: 循环流化床; 烟气脱硫; 电除尘器; 干法

中图分类号: X701.3 文献标识码: A

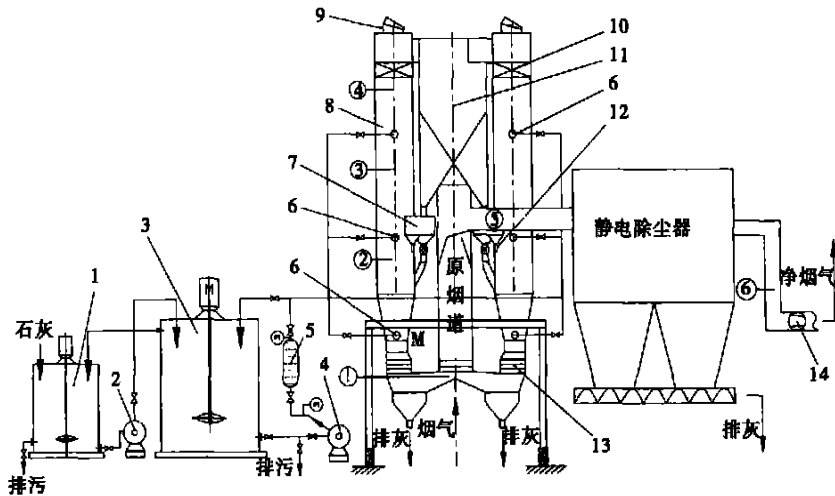
1 引 言

循环流化床烟气脱硫装置具有工艺相对简单, 脱硫效率较高, 设备安装占地面积小, 脱硫剂(石灰)与水的消耗量少, 脱硫产物比较容易处理等特点, 尤其是用于电厂老机组的脱硫改造。循环流化床烟气脱硫装置需要与电除尘器或布袋除尘器配套使用。装置投入运行后, 对电厂静电除尘器产生什么样的影响一直是用户最为关心的问题。本文着重研究了循环流化床烟气脱硫装置对电除尘器的影响和适配性。这些研究为 CFBFGD 技术的发展和工业化大规模应用提供了依据。

2 脱硫系统

双循环流化床烟气脱硫系统(DCFBS)主要由脱硫塔本体、制浆系统、控制系统和排灰系统 4 部分构成, 工艺流程简图如图 1 所示。其中脱硫塔本体包含: 文丘里流化装置、浓相悬浮脱硫反应塔、一级惯性分离装置、稀相脱硫反应塔、下排气旋风分离器(二级分离装置)及脱硫灰回送装置等。

浆液制备系统包括: 制浆罐、贮浆罐、输浆泵和过滤器等装置。脱硫剂粉料经提升机输送到制浆罐内, 经不停搅拌制成石灰原始浆液。制成的浆液在输浆泵的作用下, 经浆液宽目过滤器过滤后, 注入贮浆罐内储备。当脱硫系统运行时, 储存在贮浆罐内的浆液在螺杆泵的作用下, 经细目过滤器过滤后, 被输送至浆液喷嘴, 最终喷入脱硫塔内。



1- 制浆装置; 2- 输浆泵; 3- 贮浆罐; 4- 螺杆泵; 5- 过滤器; 6- 喷嘴; 7- 回料装置; 8- 脱硫塔; 9- 入孔; 10- 一级分离器; 11- 下排气分离器; 12- 落灰口; 13 调节风门; 14- 引风机

图 1 14 000 m³/h DCFBS 脱硫系统示意图

收稿日期: 2004-12-30; 修订日期: 2005-04-20

作者简介: 赵旭东(1970-), 男, 辽宁丹东人, 清华大学博士研究生。

75 t/h 的煤粉炉锅炉型号: BZWB 75/5.3-M, 配套除尘装置为电除尘器。锅炉烟气排放量为 127 983~141 357 m³/h; 锅炉出口烟尘温度 150~170℃; 计算燃料消耗量为 10 876.5 kg/h; 原锅炉二氧化硫排放浓度约为 3 000 mg/m³。

电厂 1 号 75 t/h 锅炉配置的静电除尘器型号为: FAA 2×45M-56-90-A2, 各项参数见表 1。

表 1 静电除尘器结构和运行参数

流通面积/m ²	50.4	烟气流速/m·s ⁻¹	0.741
电场数/个	2	收尘总面积/m ²	2 268
极间距/mm	400	设备漏风率/%	3
通道数/个	14	除尘效率/%	98.5
电场长度/mm	2×4 500	设备阻力/Pa	294

3 实验条件

实验过程中, 先将脱硫剂在制浆罐内制成浓度为 10%~20% 的浆液, 充分搅拌、消化后, 喷入脱硫

塔内。为了便于分析, 本实验的典型工况是指: 进料 Ca/S=1.3, 过饱和温度 ΔT=13℃, 脱硫塔内浓度 C=750 g/m³, 烟气速度 v=5.0 m/s, 浆液浓度 C=10%。电厂用煤的工业分析结果见表 2。

表 2 煤的工业分析结果(分析基)

煤样	水分/%	灰分/%	挥发份/%	固定碳/%	含硫量/%	低位发热量/kJ·kg ⁻¹	高位发热量/kJ·kg ⁻¹
1	1.0	22.4	15.4	61.2	2.16	24 744.4	25 114.9
2	0.5	26.6	21.2	51.7	3.28	25 013.3	25 506.3

本实验采用了生石灰作为钙基脱硫剂。生石灰粉产于山东诸城, 细度为 0.125 mm; 脱硫剂和锅炉飞灰的化学分析见表 3。其中飞灰中 SO₃ 含量为 0.31%。表 4 为飞灰和生石灰粒径分析结果。

表 3 生石灰和飞灰的化学分析

	SO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	LOSS
生石灰/%	5.28	1.62	0.31	74.16	4.87	0.29	0.62	12.34
飞灰/%	47.03	31.51	5.68	2.05	0.96	0.35	0.21	11.76

表 4 飞灰和生石灰粒径分析

生石灰粉	粒径尺寸/μm	<2.89	2.89~5.79	5.79~11.28	11.28~16.64	16.64~23.34	23.34~31.06	31.06~74	>74
	重量百分比/%		19.39	32.24	27.53	7.61	4.66	1.88	4.53
飞灰	粒径尺寸/μm	<3.30	3.30~6.60	6.60~12.9	12.9~19.0	19.0~26.7	26.7~35.5	35.5~74	>74
	重量百分比/%		7.45	18.43	22.50	11.84	10.70	4.34	11.31

4 脱硫系统对电除尘器(ESP)的影响分析

脱硫装置投运后将会影响电除尘器入口处烟气的温度、湿度、含尘浓度以及烟气中粉尘的粒径分布和比电阻等烟尘特性^[1]。另外, 在干法、半干法烟气脱硫系统中, 静电除尘器也会产生一定的脱硫效果, 对此很多科技人员进行了相关研究^[2]。分析认为, 如果脱硫装置的脱硫效率为 85%, 电除尘器的脱硫效率为 15%, 则电除尘器对整个脱硫系统的贡献率仅为 2.25%, 所以本文认为静电除尘器的脱硫效果可以忽略不计, 这一点与布袋除尘器有所不同。

4.1 对粉尘物理化学特性的影响

脱硫装置运行前后电除尘器入口飞灰的化学成份变化如表 5 所示。

表 5 脱硫前后 ESP 入口粉尘的化学分析结果

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	LOSS
脱硫前/%	47.03	31.51	5.68	2.05	0.96	0.31	0.35	0.21	11.76
脱硫后/%	26.11	17.62	2.62	22.19	2.13	15.26	0.15	0.23	13.27

由表 5 可以看出, 脱硫装置运行后, 飞灰的成份发生了很大变化, 钙和硫的百分含量明显升高, 导致粉尘的比电阻增加。

电除尘器入口粉尘的粒径分布如表 6 所示, 将粒径分析结果与脱硫装置未运行时, 锅炉排出的飞灰相比较(见表 4), 可以发现电除尘器入口粉尘颗粒变细。分析表明, 经过脱硫塔后, 烟气温度降低, 含湿量增加, 较多吸附水的存在使得粉尘的粘性增加, 从而微细粒子团聚成为较大颗粒, 颗粒的增大对于各种除尘器的除尘效率都是有利的。但是对于 DCFB 脱硫系统由于下排气外分离装置的存在, 大颗粒都被预分离, 使进入电除尘器入口粉尘颗粒变细,

在静电除尘器中, 荷电尘粒的驱进速度(ω)与其粒径有关, 一般情况下, 驱进速度与粒径大小成正比。因

此颗粒的粒径变小, 电除尘器的除尘效率下降。

表 6 脱硫装置运行后电除尘器入口粉尘的粒径分布

粒径尺寸/ μm	< 3.30	3.30~6.60	6.60~12.9	12.9~19.0	19.0~26.7	26.7~35.5	35.5~74	> 74
重量百分比/%	16.71	29.05	23.98	8.15	6.69	2.82	5.44	7.16

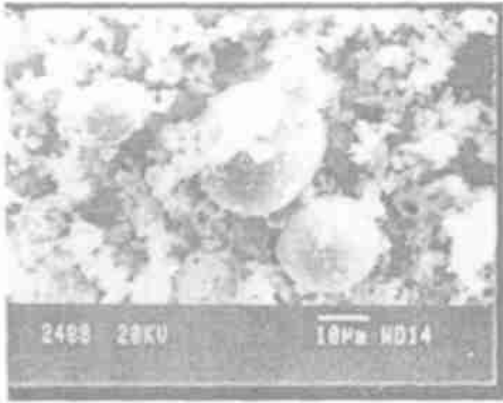


图 2 电除尘器入口飞灰 SEM 分析

电除尘器入口飞灰 SEM 分析见图 2, 可以看出进入电除尘器的颗粒表面由于沉淀物的存在, 变得粗糙。能谱分析表明, 飞灰表面的附着物钙的含量比较高, 说明是喷出的石灰浆脱硫剂包裹在飞灰的表面。

4.2 对烟气性质的影响

一般循环流化床烟气脱硫的脱硫塔内浓度达 $600 \sim 1\,000 \text{ g/m}^3$, 使电除尘器的入口浓度大大增加, 从而加大了电除尘器的工作负荷^[3-4]。另外, 随着气体含尘量的增加, 荷电尘粒所形成的空间荷电将会增大, 抑制电晕放电, 导致除尘效率下降, 严重时可产生电晕闭塞现象。而加入预除尘器后可使电除尘器入口处的烟气浓度大大降低, 从而减轻了电除尘器的工作负荷。实测表明, 不超过脱硫装置运行前的 1.4 倍。因此在 DCFBS 投入运行后, 电除尘器入口处的烟尘浓度并没有因为塔内烟尘浓度升高而增加很多。DCFBS 运行后烟气性质的变化如表 7 所示。

表 7 脱硫前后 ESP 入口烟气性质的变化

工况	烟气温 度/ $^{\circ}\text{C}$	烟气相对 湿度/%	烟尘入口 浓度/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	烟气加热 温度/ $^{\circ}\text{C}$	烟气加热 相对湿度/%
未安装 DCFBS	150~170	3~6	15~25	150~170	3~6
安装 DCFBS	65~75	60~70	25~35	85~95	15~25

烟气脱硫时, 脱硫塔内大都采用喷水降温, 以确保脱硫效率, 致使经过塔后的烟气含湿量提高。含

湿量的提高对于电除尘器是有利的, 水蒸气对于空气的去游离作用, 使得电除尘器在高压下稳定运行, 且由于湿度的增大微细粉尘凝聚增加, 提高了除尘效率; 但如果电除尘器保温性能不好, 致使烟气温度降至露点以下, 加之一定量 SO_2 和 SO_3 的存在, 易对除尘器电极系统及壳体造成腐蚀。

实测表明: DCFBS 投入运行后, 脱硫塔出口烟气湿度增大。为了保证装置的脱硫效率, 在烟气进入除尘器之前, 需要对其进行加热处理。加热方式有两种: 一种是利用简单的热交换器加热烟气; 另一种可以将一部分热烟气混入净化后的烟气中, 从而提高烟气温度, 降低相对湿度。本套 DCFBS 采用烟气混合加热方法, 实测表明, 引入烟气加热法应用于 DCFBS, 当脱硫塔脱硫效率为 90% 时, 系统脱硫效率为 82%, 仍然满足 SO_2 排放标准。

装置投入运行后, 由于烟气湿度的增加, 会使静电除尘器的运行电压、电流升高, 略高于额定值。通过将电除尘器的自动电压调节运行方式转换为定压调节运行方式, 可以使电除尘器稳定运行。脱硫装置对静电除尘器运行参数的影响见表 8。从表 7 与表 8 的烟尘排放浓度对比中, 可以得到 DCFBS 脱硫装置运行期间, 电除尘器的除尘效率比未安装 DCFBS 装置时提高 1%~2%。而且对电除尘器内部的检测也发现, 极板未出现腐蚀、粘壁现象, 未对电除尘器产生不利影响。

表 8 脱硫装置对 ESP 运行参数的影响

工况	1 电场电压 /kV	2 电场电压 /kV	烟尘排放 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	电场电压 额定值/kV
未安装 DCFBS	45	40	380~420	75
安装 DCFBS	78~82	74~76	190~230	75

4.3 对粉尘比电阻的影响

粉尘比电阻是影响电除尘器的重要参数, 比电阻决定了粉尘层离子导电率的大小, 对电除尘器的影响极大。经过脱硫塔后, 烟气温度降低, 体积相对减小, 湿度增加, 粉尘比电阻降低, 致使粉尘附着在

集尘板上的静电力减小, 容易造成二次扬尘, 降低电除尘效率。比电阻过大时, 尘粒在极板上会发生反电晕现象。一般认为, 尘粒的比电阻值在 $10^4 \sim 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 是最适合普通电除尘器^[9]。

当 DCFBS 投入运行时, 同样会对影响尘粒的比电阻造成影响。研究表明, 当烟气温度较低时, 由于烟气中的水分和脱硫剂离子表面吸附, 因而导电主要是沿着尘粒表面所吸附的水分和化学膜进行的; 当温度较高时, 导电主要通过粉尘本体内部的电子和离子进行。

将现场采集的电除尘器入口飞灰拿到实验室进行比电阻测试, 一般在实验室控制条件下测量的比电阻略高于现场实测值。在实验室比电阻测试采用 DR-2 型高压飞灰比电阻测试仪测量, 测量结果见表 9。

表 9 脱硫前后 ESP 入口飞灰比电阻变化

脱硫剂	喷浆方式	温度点 / °C	比电阻 / $\Omega \cdot \text{cm}$
石灰浆	三层喷浆	90	1.2×10^8
石灰浆	单层喷浆	90	2.0×10^9
电石渣	三层喷浆	90	9.7×10^9
无	未喷	170	3.3×10^{11}

由表 9 可以看出, 在 DCFBS 投入运行后, 烟尘尘粒的比电阻明显降低。单层喷浆时, 尘粒的比电阻高于多层喷浆方式, 这是由于多层喷浆时, 喷水量较多, 烟气湿度大。相同工况下, 采用电石渣作为脱硫剂时, 飞灰的比电阻高。

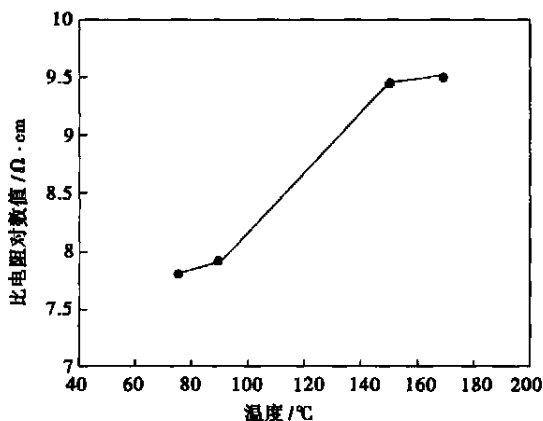


图 3 脱硫飞灰比电阻曲线

安装 DCFBS 后的飞灰比电阻曲线见图 3, 由图可见, 当温度低于 150°C 时, 飞灰的比电阻变化较大, 当温度高于 150°C , 比电阻变化趋势较小。

通过对以上实验结果进行分析, 一方面因为烟

气中 SO_3 可以使飞灰比电阻降低, 当烟气脱硫后, SO_3 的含量大大减少, 将导致比电阻升高。同时研究表明, 高钙灰的比电阻高; 另一方面, 采用半干法烟气脱硫后, 由于烟气的湿度增加较大, 使比电阻大大降低, 在低温时这种变化尤为明显。综合作用的结果, 飞灰比电阻下降, 电除尘器的效率升高。

5 结 论

循环流化床烟气脱硫系统, 由于脱硫塔内脱硫剂和水的喷入以及高浓度的灰循环, 引起烟尘性质的变化, 给脱硫塔后的电除尘器设置带来了一定的影响。

(1) 实测结果表明, 脱硫系统运行后, 在 90°C 温度点, 飞灰比电阻为 $1.2 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$, 与系统投运前相比, 飞灰比电阻下降, 同时烟气湿度加大, 电除尘器除尘效率升高。

(2) 循环流化床烟气脱硫的脱硫塔内浓度达 $600 \sim 1\,000 \text{ mg}/\text{m}^3$, 粉尘浓度的增加一方面导致无法满足日益严格的环境保护标准。另一方面随着粉尘浓度的增大, 使电除尘器二次电流减小, 导致除尘效率降低, 严重时会导致电晕闭塞现象。因此要求在脱硫塔出口和二级除尘器入口间预设一预除尘器, 以降低粉尘浓度, 使粉尘达标排放同时, 对二级除尘器可以起到一定的保护作用。

(3) 装置投入运行后, 由于烟气湿度的增加, 会使静电除尘器的运行电压、电流升高, 略高于额定值。通过将电除尘器的自动电压调节运行方式转换为定压调节运行方式, 可以使电除尘器稳定运行。

参 考 文 献:

- [1] 薛建明, 马国骏. LIFAC 脱硫工艺后静电除尘器性能的研究 [A]. 第八届全国大气环境学术会议论文集 [C]. 昆明: 中国环境科学学会大气环境分会, 2000. 499—505.
- [2] 胡满银. 干法脱硫对电除尘器性能的影响 [J]. 电力情报, 1996 (2): 42—45.
- [3] 岑可法, 倪明江. 气固分离理论及技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1999.
- [4] 钟 华. 旋转喷雾干法脱硫/静电除尘器特性研究 [A]. 国家七五科技攻关环境保护项目论文集 [C]. 北京: 科学出版社, 1993. 508—514.
- [5] 李雄浩. 干法脱硫工艺技术分析 [A]. 2001 年全国烟气脱硫成套技术应用实例分析及学术研讨会论文集 [C]. 成都: 中国环境科学学会, 2001. 109—112.
- [6] 金国森. 除尘设备设计 [M]. 上海: 上海科学出版社, 1985.

循环流化床烟气脱硫装置对电除尘器影响研究 = A Study of the Influence of the Flue Gas Desulfurizer of a Circulating Fluidized Bed on an Electrostatic Precipitator [刊, 汉] / ZHAO Xu-dong, XIANG Guang-ming (Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084), WU Shao-hua (Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 377 ~ 380

The flue gas suspension desulfurization system of a double circulating fluidized bed was designed and constructed for a 75 t/h coal-fired boiler. Prior to and after the operation of the desulfurization system a comparison analysis of the related characteristics at the inlet of an electrostatic precipitator was conducted. Such characteristics include flue gas temperature, humidity, chemical composition, dust particle diameter, outward appearance and specific resistance, etc. It has been found that after the operation of the desulfurization system the humidity of the flue gas at the inlet of the electrostatic precipitator has increased while its temperature and dust particle specific resistivity decreased, thus enhancing the system desulfurization efficiency and the dust removal efficiency of the electrostatic precipitator. Also investigated was the impact of the flue gas desulfurizer of the circulating fluidized bed on the operation stability and dust removal efficiency of the electrostatic precipitator. Meanwhile, several countermeasures for operation improvement are also proposed. **Key words:** flue gas desulfurization of a circulating fluidized bed, electrostatic precipitator, dry method of desulfurization

镁离子法测定除雾器出口烟气携带液滴量方法 = The Use of Magnesium Ion Method for the Determination of Droplet Quantity Entrained by Flue Gas at the Outlet of a Demister [刊, 汉] / LI Sen, ZHAO Qu-lan, XU Tong-mo, et al (Energy & Power Engineering Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 381 ~ 383

Based on the technological features of the desulfurization by wet limestone-gypsum method the authors have revealed through a study that Mg^{2+} concentration in slurry is equal to the concentration of Mg^{2+} in the droplet entrained by the flue gas at a demister outlet. On the basis of this conclusion a constant speed sampling was performed at the demister outlet with 5m³ of flue gas being extracted. On the basis of a determination of the Mg^{2+} concentration in a micro-fiber filter wash liquid in the sampling system, in a sampling-tube wash solution and in a blank micro-fiber filter wash liquid, as well as the slurry density in an absorption tower and the concentration of Mg^{2+} in an absorption-slurry filtering liquid, calculated was the liquid droplet quantity entrained by the flue gas at the demister outlet. **Key words:** magnesium ion, demister, liquid droplet, constant speed sampling

亚硫酸钠循环法烟气脱硫工艺实验研究 = Experimental Study of Wet Flue Gas Desulfurization by Using a Sodium Sulfite Circulation Method [刊, 汉] / JIANG Li-qiao (Thermal Science and Energy Engineering Department, China National University of Science & Technology, Hefei, China, Post Code: 230026), ZHAO Dai-qing, CHEN En-jian (Guangzhou Institute of Energy Conversion under the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, China, Post Code: 510070) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 384 ~ 386, 401

With the wet flue gas desulfurizer based on a sodium sulfite circulation method (processing capacity 1800 m³/h) serving as an object of experimentation a detailed study was conducted of the impact of several factors on the desulfurization efficiency. Such factors include: pH value of absorption liquid, liquid/gas ratio, the initial composition of the absorption liquid and the initial concentration of a desulfurizing agent, etc. Furthermore, the regeneration process of the desulfurizing agent and the desulfurizing characteristics of the regenerated clean liquid were also studied. The results of the study indicate that the pH value of the absorption liquid can decide the state of sulfur element in a solution, thereby influencing the desulfurization efficiency. When pH is greater than 6, the desulfurization efficiency will be high and only change mildly with an increase in pH value. When pH is less than 6, the desulfurization efficiency will drastically decrease with a decrease in pH value. Under the present technological process it is possible to maintain a relatively high desulfurization efficiency (η greater than 90%) at a relatively low liquid-gas ratio ($L/G = 0.25 \sim 1.25 \text{ L/m}^3$). Under equivalent conditions, as compared with NaOH and Na₂CO₃, the desulfurization capacity of Na₂SO₃ is slightly lower. When the concentration of the absorption liquid Na₂CO₃ is within the range of 5% - 10% the desulfurization efficiency will be greater than 90%. The regeneration reaction process of the desulfurizer can be completed very rapidly. The desulfurization effi-