

文章编号:1672-9331(2020)04-0092-08

# 燃煤含硫量对 630 MW 机组脱硫系统的 经济性影响

鄢晓忠<sup>1</sup>,李 仞<sup>1</sup>,阮 敏<sup>1</sup>,敬 佩<sup>2</sup>,  
陈绍龙<sup>3</sup>,吴爱军<sup>3</sup>,张启平<sup>3</sup>,黎 红<sup>3</sup>

(1. 长沙理工大学 能源与动力工程学院,湖南 长沙 410114;2. 中国能源建设集团湖南省电力  
设计院有限公司,湖南 长沙 410007;3. 湖南宝庆煤电有限公司,湖南 邵阳 422000)

**摘 要:** 为了更好地进行  $\text{SO}_x$  减排,提高火电机组脱硫系统的效率,降低脱硫系统的运行成本,提高火电厂的经济效益,以湖南某发电公司 630 MW 燃煤火电机组的石灰石/石灰-石膏湿法烟气脱硫系统为研究对象,按额定负荷进行了燃煤含硫量变化对系统脱硫效率、脱硫运行成本、脱硫附加收益等方面的影响的试验分析,以此研究燃煤含硫量变化对机组脱硫系统的经济性影响。研究结果表明:当燃煤含硫量在 0.6%~1.2%变化时,随着燃煤含硫量的增加,系统脱硫效率也逐渐提高;燃煤含硫量每增加 0.1%,每燃烧 1 t 煤机组脱硫系统综合效益约降低 1.62 元;但当燃煤含硫量 $\geq 4.0\%$ 时,脱硫成本将超过所获收益,是不经济的。

**关键词:** 燃煤锅炉;湿法脱硫;燃煤含硫量;脱硫成本;经济性分析

**中图分类号:** TM6

**文献标志码:** A

## Economic effect of sulfur content in fire coal on desulfurization system of 630 MW unit

YAN Xiao-zhong<sup>1</sup>,LI Ren<sup>1</sup>,RUAN Min<sup>1</sup>,JING Pei<sup>2</sup>,  
CHEN Shao-long<sup>3</sup>,WU Ai-jun<sup>3</sup>,ZHANG Qi-ping<sup>3</sup>,LI Hong<sup>3</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering,Changsha University of Science & Technology,Changsha 410114,China;

2. Hunan Energy Design Institute Co.,Ltd.,China Energy Construction Group,Changsha 410007,China;

3. Hunan Baoqing Coal Power Co.,Ltd.,Shaoyang 422000,China)

**Abstract:** In order to better reduce  $\text{SO}_x$  emission, improve the efficiency of the desulfurization system of thermal power unit, reduce the operating cost of the desulfurization system, and improve the economic benefit of thermal power plant, the limestone/lime-gypsum wet flue gas desulfurization system of a 630 MW coal-fired thermal power unit in a power generation company in Hunan was taken as the research object. The influence of change of sulfur content in fire coal on desulfurization efficiency, operating cost of desulfurization and additional income of desulfurization was tested and analyzed with the rated load, so as to study the economic effect of change of sulfur content in fire coal on desulfurization system. The research results show that when the sulfur content in fire coal changes within the range of

收稿日期:2020-08-05

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ50665)

通讯作者:鄢晓忠(1963-),男,湖南桃源人,长沙理工大学教授,主要从事燃烧理论与低质煤高效稳燃技术方面的研究。E-mail:csyanxz7206@126.com

0.6%~1.2%, with the increase of the sulfur content in fire coal, the desulfurization efficiency of the system also improves gradually. For every 0.1% increase of the sulfur content in fire coal, the comprehensive benefit of the desulfurization system is reduced by about 1.62 yuan when 1 t coal is burned out. However, when the sulfur content in fire coal is more than 4.0%, the desulfurization cost will exceed the profit, which is uneconomical.

**Key words:** coal-fired boiler; wet desulfurization; sulfur content in fire coal; desulfurization cost; economic analysis

过高的燃煤含硫量会严重影响火电机组的安全经济运行。童家麟等<sup>[1]</sup>通过数值模拟得出掺烧高硫煤将加剧炉内高温腐蚀、锅炉结渣的结论。吕朝晖等<sup>[2]</sup>、郝宏生<sup>[3]</sup>通过试验指出随着煤种含硫量的升高,煤场存煤自燃概率加大、磨煤机等设备能耗增加、烟气中  $\text{SO}_x$  增加、脱硫成本增高。近年来电煤供不应求,为了满足发电要求,电厂放宽了购煤标准。燃煤来源因采购供应渠道复杂而多种多样,硫分变化极不稳定。此外,电厂为了降低购煤成本而采购一定的高硫煤进行掺烧,导致部分适应性较低的脱硫系统无法稳定运行,烟气脱硫效率达不到要求,脱硫成本增高。为此,周玲妹等<sup>[4]</sup>、Koralegedara 等<sup>[5]</sup>、卢晗等<sup>[6]</sup>通过燃煤煤质对比、燃煤成分分析及燃煤含硫量的危害研究,寻找脱硫系统安全经济运行的方法。但是,上述大多数研究主要侧重于阐述高硫煤对电厂安全性的影响,未对其经济性进行综合分析。现阶段国内外对脱硫系统经济性的研究主要包括构建模糊数学脱硫经济评价体系、分析脱硫系统的运行成本。如刘敏等<sup>[7]</sup>、许丹等<sup>[8]</sup>、Warych 等<sup>[9]</sup>开发了脱硫系统优化控制模型,基于原烟气  $\text{SO}_2$  浓度、烟气体积流量及最低脱硫效率确定了脱硫系统最佳的经济运行参数。蔡毅等<sup>[10]</sup>基于燃煤  $\text{SO}_2$  产生及脱除过程中系统平准化运行成本最低的原则,提出了脱硫系统运行状态选择策略模型。牛拥军等<sup>[11]</sup>、刘军等<sup>[12]</sup>通过分析浆液循环泵组合方式、浆液 pH 值、吸收塔液位对脱硫效率的影响,确定了最佳浆液循环泵组合和浆液 pH 值。张建生<sup>[13]</sup>通过试验调整运行参数,控制炉外脱硫塔入口  $\text{SO}_2$  的质量浓度,选取最佳运行参数,使脱硫经济性最佳。曹洋等<sup>[14]</sup>、李元等<sup>[15]</sup>、殷风光等<sup>[16]</sup>及宋艳杰等<sup>[17]</sup>对吸收塔烟气温度、浆液 pH 值、钙硫比、液气比、石灰石品质、烟气流速等影响脱硫效

率的关键因素进行分析,提出合理控制要求,为脱硫系统的经济高效运行提供了可靠依据。此类研究侧重于环保安全或经济效益方面的分析,使一些脱硫技术得到了优化,经济效益得到了一定的提升,但也存在着不足,主要表现为:基本上都是对烟温、浆液 pH 值等比较直观的变化条件进行分析,未从根本的燃煤含硫量变化方面综合讨论脱硫的经济性问题。

因此,为了更好地进行  $\text{SO}_x$  减排,合理规划煤炭采购,提高火电机组脱硫系统的效率,降低脱硫系统运行成本,提高火电厂的经济效益,本研究以石灰石/石灰-石膏湿法进行尾部烟气脱硫的国内某 630 MW 超临界燃煤火电机组为研究对象,进行燃煤含硫量对脱硫系统经济性的影响研究。

## 1 锅炉设备及脱硫系统

湖南某发电公司  $2 \times 630$  MW 燃煤火电机组使用的是东方锅炉(集团)股份有限公司生产的 DG-1900/25.4-II8 型超临界参数变压直流锅炉。该锅炉采用单炉膛,“W”形火焰燃烧,一次中间再热。尾部采用双烟道结构,挡板调节再热气温,固态排渣,平衡通风。锅炉的主要设计参数如表 1 所示。锅炉设计燃用煤种含硫量为 1.58%,低位发热量为 19 040 kJ/kg。

锅炉烟气脱硫系统采用石灰石/石灰-石膏湿法脱硫工艺,按照一炉一塔设计,对两台锅炉的全部烟气进行脱硫,脱硫效率  $\geq 99.11\%$ 。不设置 GGH、增压风机和旁路烟道,烟气脱硫系统如图 1 所示。吸收塔主要技术指标为:单座吸收塔处理烟气流 2 054 988  $\text{Nm}^3/\text{h}$  (6%  $\text{O}_2$ , 干态),烟气温度 115  $^\circ\text{C}$ ,  $\text{SO}_2$  浓度 3 929.19  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  (6%  $\text{O}_2$ , 干态),浆液循环量 45 000  $\text{m}^3/\text{h}$ ,吸收塔浆池容积

3 375 m<sup>3</sup>,氧化空气量 19 000 Nm<sup>3</sup>/h(湿态),石灰石消耗量(CaO 含量 50%)13.7 t/h,石膏粉(含水率 10%)产量 24 t/h,工艺耗水量 110 t/h(含管道冲洗水)。

表 1 锅炉主要设计参数

Table 1 Main design parameters of the boiler

工况	过热蒸汽流量/ (t·h <sup>-1</sup> )	过热蒸汽压力/ MPa	过热蒸汽温度/℃	再热蒸汽流量/ (t·h <sup>-1</sup> )	再热蒸汽进、出口 压力/MPa	再热蒸汽进、出口 温度/℃	给水温度/ ℃	锅炉效率 (按低位发热值)/%	排烟温度 (未修正)/℃
锅炉最大出力	1 900.0	25.40	571±5	1 613.5	4.61/4.42	318.9/569	282.4	90.80	120.3
锅炉额定出力	1 811.3	25.29	571±5	1 534.5	4.38/4.20	314.7/569	279.1	90.86	119.2
热耗率验收出力	1 676.8	25.13	571±5	1 433.3	4.10/3.93	307.1/569	274.4	90.93	117.8

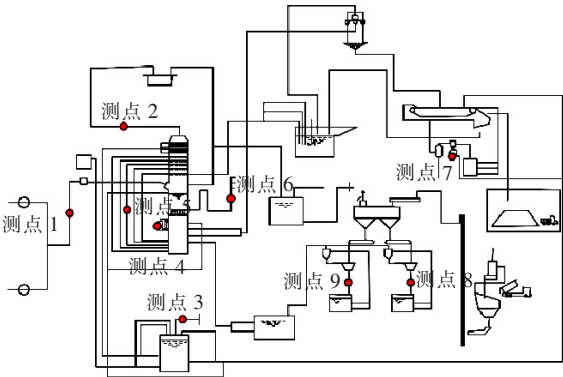


图 1 烟气脱硫系统及测点布置

Fig. 1 Flue gas desulfurization system and measurement point layout

目前,该锅炉主要燃用本地无烟煤,但由于其挥发分较低,在运行中混烧了部分外省贫瘦煤辅助锅炉稳燃。因此,在机组实际运行中,锅炉燃用煤源复杂,燃煤的煤质及含硫量变化很大,存在的低温受热面、相关辅助设备腐蚀严重、脱硫系统运行不稳、脱硫效率不高、购煤成本与脱硫经济性相互矛盾等问题对锅炉及脱硫系统的安全运行及经济性有很大的影响。

2 试验测试方案

2.1 测试条件

采用机组额定负荷(630 MW,1 900 t/h)作为试验负荷。燃煤使用本地无烟煤、北方烟煤、万阳无烟煤、晋城贫瘦煤和晋城无烟煤(分别标记为 A,B,C,D,E),其燃料特性见表 2。将 5 种燃煤随机混烧,在不同工况下按各煤种实际入炉比例测定入炉煤的含硫量。脱硫系统所用石灰石的要求为:

表 2 试验煤种燃料特性

Table 2 Fuel characteristics of test coal

煤种	$M_t$ / %	$M_{ad}$ / %	$A_{ad}$ / %	$V_{ad}$ / %	$S_{t,ad}$ / %	$Q_{net,ar}$ / (kJ·kg <sup>-1</sup> )
A	10.28	2.31	28.66	4.72	1.165	21 330
B	10.12	1.98	20.08	21.87	0.883	23 075
C	10.32	2.55	32.75	7.81	0.989	18 763
D	10.15	1.87	22.69	8.76	0.367	27 513
E	10.23	2.02	23.37	10.63	0.717	25 816

$\omega(\text{CaO})\geq 5\%$ ,  $\omega(\text{MgO})<2.5\%$ ,  $\omega(\text{SiO}_2)<1\%$ ,活性时间 $<1$  min。试验期间环境温度为 30~36 ℃。

2.2 测试与分析内容

测试与分析内容包括不同含硫量的燃煤脱硫效率的测量与分析;脱硫运行成本的测试与分析,包括脱硫剂(石灰石)消耗量、脱硫系统能耗、脱硫系统设备损耗及人工费用的调查与分析等;脱硫经济效益的分析,包括副产品(石膏)产量、排污权交易和脱硫电价加价的记录与分析;燃煤含硫量变化对整个脱硫系统的经济影响分析。脱硫系统经济性分析指标如图 2 所示。

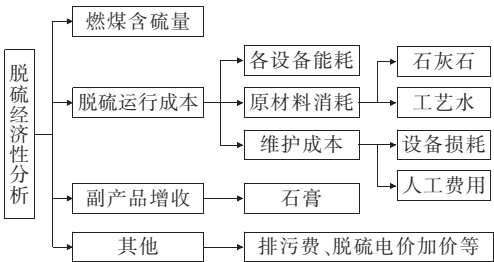


图 2 脱硫系统经济性分析指标

Fig. 2 Economic analysis indexes of desulfurization system

## 2.3 测试方法

确定几种典型试验工况。在不同试验工况下,在机组稳定运行 3 h 后开始试验并测试、记录相关参数,每 30 min 测试、记录一次,试验持续时间不少于 4 h。这些参数主要包括锅炉运行参数,脱硫运行参数,烟气流量、SO<sub>2</sub> 入口浓度(测点 1),SO<sub>2</sub> 出口浓度(测点 2),工艺水累积流量(测点 3),球磨机钢球损耗量(测点 4),浆液循环泵、脉冲悬浮泵、氧化风机、球磨机和脱硫真空泵的用电量(测点 5~9),测点的具体位置见图 1。调查相应人工成本、设备损耗运维成本、上网电价及脱硫脱硝电价加价,记录相关参数,同时对入炉煤、石灰石及脱硫产物(石膏)进行取样并分析。

## 3 试验结果与分析

本研究所指含硫量均为空干基全硫,发热量均为收到基低位发热量。

### 3.1 燃煤含硫量对脱硫效率的影响

试验测得空干基全硫  $S_{t,ad}$  与烟气入口 SO<sub>2</sub> 浓度、脱硫效率的关系,见图 3 和图 4。

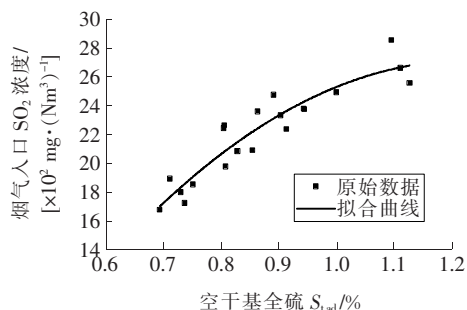


图 3 空干基全硫  $S_{t,ad}$  与烟气入口 SO<sub>2</sub> 浓度的关系

Fig. 3 Relationship of  $S_{t,ad}$  and SO<sub>2</sub> concentration in flue gas inlet

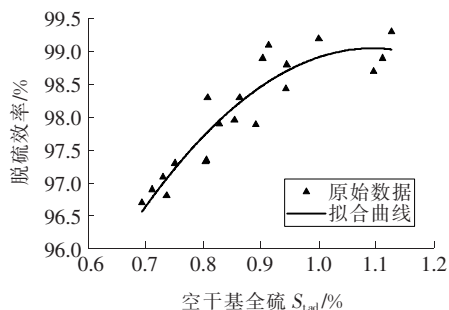


图 4 空干基全硫  $S_{t,ad}$  与脱硫效率的关系

Fig. 4 Relationship of  $S_{t,ad}$  and desulfurization efficiency

脱硫效率受烟气温度、烟气入口 SO<sub>2</sub> 浓度、液气比和浆液循环量、浆液 pH 值等多种因素的影响。由于本文研究的是燃煤含硫量对脱硫系统的影响,所以在保持其他影响因素基本稳定的情况下,主要考虑烟气入口 SO<sub>2</sub> 浓度对脱硫效率的影响。

分析图 3 可知,烟气入口 SO<sub>2</sub> 浓度随着空干基全硫  $S_{t,ad}$  的增大而增大,但是增大趋势渐缓,说明硫的析出率随着硫分的增大有所减小。

分析图 4 可知,脱硫效率随着空干基全硫  $S_{t,ad}$  的增大而呈上升趋势,但此趋势逐渐变缓。这是因为 SO<sub>2</sub> 的吸收是一个可逆反应,各组分浓度之间的制约会影响反应方向。在其他条件不变的情况下,增大烟气入口 SO<sub>2</sub> 浓度,可增大气相主体中 SO<sub>2</sub> 的分压,增大气液传质的推动力,进而加快反应速度,使脱硫效率随之提高。但是,太高的 SO<sub>2</sub> 浓度会使浆液碱性消耗速度加快,吸收 SO<sub>2</sub> 的液膜的阻力增大,反而影响脱硫效率。

### 3.2 燃煤含硫量对脱硫运行成本的影响

#### 3.2.1 对石灰石消耗成本的影响

根据试验所测原烟气和净烟气中 SO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> 的浓度和烟气量,以及对石灰石样、石膏样的成分分析,可利用下式计算脱硫石灰石的消耗量:

$$m_{\text{CaCO}_3} = \frac{V_{\text{RG}} \times (C_{\text{SO}_2, \text{rawgas}} - C_{\text{SO}_2, \text{reingas}})}{10^6} \times \frac{M_{\text{CaCO}_3}}{M_{\text{SO}_2}} \times \frac{1}{F_{\text{R}}} \times S_{\text{t}} \quad (1)$$

式中:  $m_{\text{CaCO}_3}$  为石灰石消耗量, t/h;  $V_{\text{RG}}$  为烟气体积流量(6% O<sub>2</sub>, 干态), Nm<sup>3</sup>/h;  $C_{\text{SO}_2, \text{rawgas}}$  为原烟气中 SO<sub>2</sub> 浓度(6% O<sub>2</sub>, 干态), mg/Nm<sup>3</sup>;  $C_{\text{SO}_2, \text{reingas}}$  为净烟气中 SO<sub>2</sub> 浓度(6% O<sub>2</sub>, 干态), mg/Nm<sup>3</sup>;  $M_{\text{CaCO}_3}$  为 CaCO<sub>3</sub> 摩尔质量, 其值为 100.09 kg/kmol;  $M_{\text{SO}_2}$  为 SO<sub>2</sub> 摩尔质量, 其值为 64.06 kg/kmol;  $F_{\text{R}}$  为石灰石纯度, %;  $S_{\text{t}}$  为钙硫摩尔比。

在试验中使用的两批石灰石的纯度分别为 92.8% 和 91.7%, 差异较小。通过分析石膏品质可知, 钙硫摩尔比为 1.008~1.009。因此, 为方便

计算, 拟定石灰石纯度为  $F_R=92\%$ , 钙硫摩尔比为  $S_t=1.009$ 。将实测数据带入式(1)计算得到试验条件下石灰石的消耗量, 进而得到空干基全硫  $S_{t,ad}$  与每吨燃煤石灰石消耗量的关系, 见图 5。石灰石价格按 57 元/t 计算, 可得到每吨燃煤所需的石灰石成本。

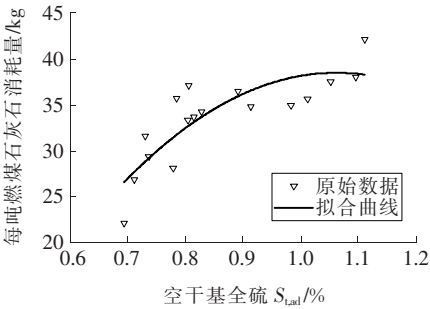


图 5 空干基全硫  $S_{t,ad}$  与每吨燃煤石灰石消耗量的关系

Fig. 5 Relationship of  $S_{t,ad}$  and limestone consumption per ton of coal

分析图 5 可知, 随着空干基全硫  $S_{t,ad}$  的增大, 每吨燃煤燃烧后产生的  $SO_2$  增多, 调节浆液需要的石灰石的量也随之增大。但随着烟气入口  $SO_2$  浓度的升高, 石灰石浆液对  $SO_2$  的吸收反应更加充分, 所以石灰石消耗量的趋势逐渐变缓。

3.2.2 对设备运行电耗成本的影响

脱硫系统厂用耗电设备较多, 电耗成本的计算较为复杂。试验测试表明: 脉冲悬浮泵和脱硫真空泵的能耗不受负荷、硫分变化的影响; 球磨机的运行与脱硫系统的运行无关; 浆液循环泵和氧化风机的能耗与锅炉负荷、燃料含硫量有对应关系。

对于本机组, 脉冲悬浮泵和脱硫真空泵的能耗不变, 分别为 800 kW/h 和 280 kW/h; 球磨机的能耗按照石灰石的需求量单独计算, 其处理石灰石的速度约为 50 t/h, 磨制石灰石的能耗为 16 kW/t; 浆液循环泵、氧化风机、低压段电机与脱硫效率、烟气流量、烟气  $SO_2$  入口浓度有关。空干基全硫  $S_{t,ad}$  与耗电量的关系见图 6。

由图 6 可知, 随着燃煤含硫量的增加, 脱硫设备所耗电量相应增加。

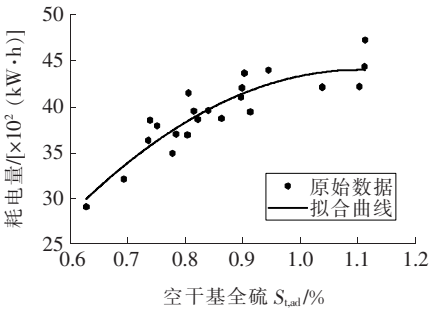


图 6 空干基全硫  $S_{t,ad}$  与耗电量的关系

Fig. 6 Relationship of  $S_{t,ad}$  and power consumption

3.2.3 对设备运行维护成本的影响

设备运行维护成本主要为人工费用和设备损耗, 而设备损耗又主要包括球磨机钢球损耗和烟囱内衬防腐材料损耗。

烟囱内衬防腐材料为 VEGF 鳞片复合树脂胶泥, 其价格约为 0.26 万元/ $m^2$ , 烟囱内衬防腐面积约为 1 400  $m^2$ , 一次检修费用约为 18 万元。根据防腐材料生产厂家提供的资料, 每次检修需处理的防腐面积约占总面积的 20%, 即 280  $m^2$ 。再结合该发电公司检修部门长期的跟踪数据, 按机组每年运行 3 400 h 考虑, 统计得出烟囱防腐成本, 见表 3。

综上所述, 汇总该发电公司相关部门的记录及现场试验数据, 整理出的脱硫运行成本见表 4。

表 3 烟囱防腐成本

Table 3 Anticorrosion cost of chimney				
空干基全硫 / %	填料损耗 / $m^2$	平均年检修次数	年成本 / 万元	每小时成本 / 元
0.75	280	5.00	18.16	53.41
0.80	260	4.67	19.44	57.18
0.90	280	4.00	22.70	66.76
1.00	280	3.50	25.94	76.29
1.10	280	3.00	30.27	89.03

表 4 脱硫运行成本

Table 4 Operating cost of desulfurization				
工艺水 / (元 · $h^{-1}$ )	人工费 / (元 · $h^{-1}$ )	脉冲悬浮泵、脱硫真空泵能耗 / (元 · $h^{-1}$ )	石灰石球磨机能耗 / (元 · $h^{-1}$ )	石灰石球磨机钢球损耗 / (元 · $t^{-1}$ )
22.5	384.615	447.98	16	3.45

3.2.4 对脱硫运行成本的综合影响

根据表 4 的数据, 结合石灰石消耗量和其他设备(浆液循环泵、氧化风机、脱硫变送器)的能

耗,即可计算出脱硫运行成本。由于负荷不同,锅炉每小时的耗煤量不同,各参数值不方便进行比较。因此,在分析中把数据换算成每消耗 1 t 煤所用的成本,即可得到空干基全硫  $S_{t,ad}$  与每吨煤脱硫运行成本的关系,见图 7。

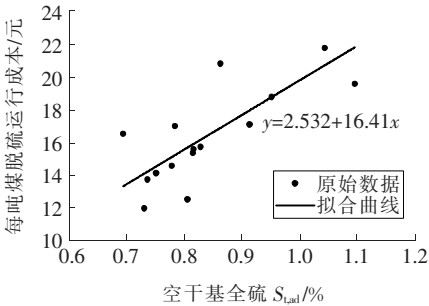


图 7 空干基全硫  $S_{t,ad}$  与每吨煤脱硫运行成本的关系  
Fig. 7 Relationship of  $S_{t,ad}$  and operating cost of desulfurization per ton of coal

分析图 7 可以看出:随着燃煤含硫量的增加,脱硫系统运行成本也随之增加;燃煤含硫量每增加 0.1%,每吨煤的脱硫运行成本约增加 1.641 元。

3.3 烟气脱硫的附加收益

烟气脱硫的附加收益主要包括三方面内容:副产品石膏的增收、排污费用变化和脱硫电价加价。

3.3.1 燃煤含硫量对副产品(石膏)产量的影响

石膏产量受烟气  $SO_2$  脱除量的影响,而烟气  $SO_2$  脱除量与燃煤含硫量有关。根据试验数据计算得到空干基全硫  $S_{t,ad}$  与石膏产量的关系,见图 8。

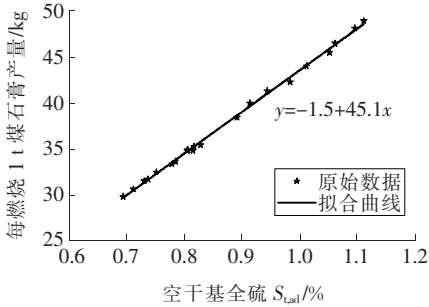


图 8 空干基全硫  $S_{t,ad}$  与石膏产量的关系  
Fig. 8 Relationship of  $S_{t,ad}$  and gypsum output

分析图 8 可知,燃煤含硫量每增加 0.1%,每燃烧 1 t 煤石膏产量约增加 4.51 kg。据 FGD 石膏市场的调研,石膏售价约为 42 元/t,那么每燃烧 1 t 煤所产出的石膏的收益与燃煤含硫量之间的关系为  $y = -0.063 + 1.8942x$ ,即燃煤含硫量每

增加 0.1%,每燃烧 1 t 煤所产出的石膏约增收 0.19 元。

3.3.2 燃煤含硫量对排污权购买成本的影响

发电公司排放  $SO_2$  需要购买排污权。根据规定,发电公司每年按照  $SO_2$  的排放总量以 200 元/t 的价格购买排污权,超额排放部分将按照 1.2 元/kg 的价格被处罚。因此,根据相关数据按照  $SO_2$  的排放量计算排污权成本,可以得到空干基全硫  $S_{t,ad}$  与每吨煤排污费用的关系,见图 9。

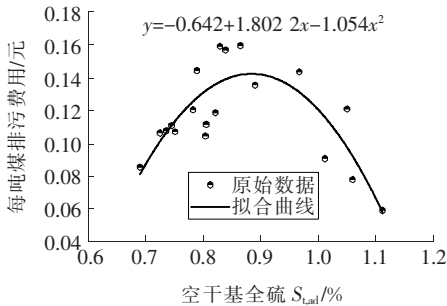


图 9 空干基全硫  $S_{t,ad}$  与每吨煤排污费用的关系  
Fig. 9 Relationship of  $S_{t,ad}$  and sewage charge per ton of coal

分析图 9 可知,燃烧生成的  $SO_2$  的量随着燃煤含硫量的增加而增加。但  $SO_2$  浓度的增加会促进烟气与浆液发生正向反应,提升浆液对  $SO_2$  的吸收率,从而提高脱硫效率,使烟气排放达标。综合分析可得,当硫分  $\leq 0.9\%$  时,燃煤含硫量每增加 0.1%,每吨燃煤所耗排污费用约增加 0.17 元;当硫分  $> 0.9\%$  时,燃煤含硫量每增加 0.1%,每吨燃煤所耗排污费用约减少 0.25 元。

3.3.3 脱硫电价加价

如果发电公司排放的烟气达标,则可得到上网电价提高 0.015 元/(kW·h)的奖励。

3.4 烟气脱硫经济效益的综合分析

通过对试验结果进行分析,当该发电公司的燃煤空干基硫分在 0.6%~1.2%之间,机组以额定负荷运行时,汇总得到燃煤含硫量变化对脱硫系统经济性的影响情况,见表 5。

将上述分析得到的空干基全硫  $S_{t,ad}$  与各参数之间的函数关系进行汇总,结果见表 6。

该发电公司的发电标煤煤耗为 314 g/(kW·h),而实际煤耗根据燃煤热值的不同会有所差异。据调查,该发电公司燃煤的平均热值为 22 350 kJ/kg,实际煤耗为 302 g/(kW·h)。

表 5 燃煤含硫量每增加 0.1% 时各参数的变化情况

Table 5 The variation of each parameter when sulfur content in fire coal increases by 0.1%

参数	变化情况	变化趋势	备注
燃煤发热量	不变	—	—
脱硫效率	上升	渐缓	效率较高,大于 95%
石灰石消耗量	上升	渐缓	—
工艺水消耗量	不变	—	90 t/h
脉冲悬浮泵和脱硫真空泵能耗	不变	—	1 080 kW·h
球磨机能耗	上升	渐缓	与石灰石需求量有关, 16 kW/t
其他设备能耗	上升	渐缓	—
人工维护费用	不变	—	384.615 元/h
防腐材料消耗	上升	递增	—
球磨机钢球损耗	上升	渐缓	与石灰石需求量有关, 3.45 元/t
石膏增收	上升	—	每燃烧 1 t 煤,石膏 约增收 0.19 元
脱硫电价加价	不变	—	0.015 元/(kW·h)
排污费用	先升后降,在硫分 为 0.9% 时达到最高		—

表 6 空干基全硫  $S_{t,ad}$  与各参数之间的函数关系

Table 6 Functional relationship of  $S_{t,ad}$  and parameters

参数	函数关系
脱硫效率/%	$y_1 = 83.080\,3 + 27.089x - 11.383x^2$
每吨煤脱硫运行成本/元	$y_2 = 2.532 + 16.41x$
每燃烧 1 t 煤,石膏增收/元	$y_3 = -0.063 + 1.894\,2x$
每吨煤排污费用/元	$y_4 = -0.642 + 1.802\,2x - 1.054x^2$
脱硫电价加价/ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	$y_5 = 0.015$

注: $x$  为空干基全硫  $S_{t,ad}$ , %。

若将排污费用计入脱硫成本,据表 6 可得不同含硫量时每燃烧 1 t 煤的脱硫总成本为:

$$y_{\text{总成本}} = 1.89 + 18.212x - 1.054x^2 \text{ (元)}. \quad (2)$$

所获得的收益为:

$$y_{\text{收益}} = 49.606 + 1.894x \text{ (元)}. \quad (3)$$

分析式(1)和式(2)可知,当燃煤含硫量小于 8.64% 时,脱硫总成本随含硫量的增加而增加。燃煤含硫量每增加 0.1%,每燃烧 1 t 煤脱硫总成本约增加 1.81 元,获得的收益约增加 0.19 元,脱硫系统综合效益约降低 1.62 元。现阶段由于试验所用燃煤含硫量较低,系统所获收益大于脱硫

成本。进一步分析可知,当燃煤含硫量小于 8.64% 时,成本的增加速度远大于所获收益的增加速度。照此估算,当燃煤含硫量  $\geq 4.0\%$  时,脱硫成本将超过所获收益。

4 结论

1) 脱硫系统烟气入口  $SO_x$  浓度及脱硫效率均随燃煤含硫量的增加而增加,且系统脱硫效率能保证在 95% 以上,但两者的增加趋势均逐渐变缓。

2) 脱硫系统各部分运行成本随燃煤含硫量的增加而升高,但上升趋势不尽相同。燃煤含硫量每增加 0.1%,每吨煤的总脱硫运行成本约增加 1.641 元。

3) 燃煤含硫量每增加 0.1%,每燃烧 1 t 煤所产出的石膏约增收 0.19 元。在燃煤含硫量  $\leq 0.9\%$  时,燃煤含硫量每增加 0.1%,每吨燃煤所耗排污费用约增加 0.17 元;在含硫量  $> 0.9\%$  时,燃煤含硫量每增加 0.1%,每吨燃煤所耗排污费用约减少 0.25 元。

4) 综合分析表明,当燃煤含硫量在 0.6% ~ 1.2% 变化时,燃煤含硫量每增加 0.1%,每燃烧 1 t 煤脱硫系统综合效益约降低 1.62 元。虽然现阶段试验所获收益能够承担脱硫成本的支出,但当燃煤含硫量  $\geq 4.0\%$  时,脱硫成本将超过所获收益,系统运行不经济。

〔参考文献〕

[1] 童家麟,齐晓娟,吕洪坤. 掺烧高硫煤对某 600 MW 机组锅炉的影响及运行优化[J]. 热力发电,2019,48(10):128-133.  
TONG Jia-lin, QI Xiao-juan, LYU Hong-kun. Influence and operation optimization of a high-sulfur coal blended boiler on a 600 MW unit[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(10): 128-133.

[2] 吕朝晖,丁钟宇,管小矿. 电厂燃料煤中硫分高低与烟气脱硫成本的关系[J]. 煤炭加工与综合利用, 2016, 21(1): 79-81.  
LYU Zhao-hui, DING Zhong-yu, GUAN Xiao-kuang. The relationship between the level of sulfur in fuel coal of power plant and the cost of flue gas desulfurization[J]. Coal Processing and Comprehensive Utili-

- lization, 2016, 21(1): 79-81.
- [3] 郝宏生. 煤种变化对燃煤电厂综合经济性影响分析[J]. 锅炉技术, 2018, 49(2): 8-11, 16.  
HAO Hong-sheng. Analysis of the effect of coal type change on the comprehensive economy of coal-fired power plants[J]. Boiler Technology, 2018, 49(2): 8-11, 16.
- [4] 周玲妹, 张冠军, 朱宪然, 等. 600 MW 机组锅炉掺烧劣质煤技术经济性研究[J]. 中国电力, 2018, 51(9): 1-7.  
ZHOU Ling-mei, ZHANG Guan-jun, ZHU Xian-ran, et al. Research on technical economics of 600 MW unit boiler mixed with low-quality coal[J]. China Electric Power, 2018, 51(9): 1-7.
- [5] Koralegedara N H, Pinto P X, Dionysiou D D, et al. Recent advances in flue gas desulfurization gypsum processes and applications—a review[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 10(3): 251-254.
- [6] 卢晗, 郑鑫, 李薇, 等. 燃煤电厂脱硫技术及超低排放改造费效分析[J]. 环境工程, 2018, 36(1): 97-102.  
LU Han, ZHENG Xin, LI Wei, et al. Cost-effectiveness analysis of coal-fired power plant desulphurization technology and ultra-low emission transformation[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(1): 97-102.
- [7] 刘敏, 周然, 郑川江, 等. 火电厂脱硫系统运行优化控制模型研究[J]. 热能动力工程, 2017, 32(6): 95-99, 136.  
LIU Min, ZHOU Ran, ZHENG Chuan-jiang, et al. Study on the optimal control model of thermal power plant desulfurization system operation[J]. Thermal Power Engineering, 2017, 32(6): 95-99, 136.
- [8] 许丹, 沈凯, 张亚平, 等. 基于模糊理论的湿法脱硫故障诊断和优化模型研究[J]. 环境工程, 2018, 36(2): 92-97.  
XU Dan, SHEN Kai, ZHANG Ya-ping, et al. Research on fault diagnosis and optimization model of wet desulfurization based on fuzzy theory[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(2): 92-97.
- [9] Warych J, Szymanowski M. Optimum values of process parameters of the “wet limestone flue gas desulfurization system”[J]. Chemical Engineering & Technology, 2002, 25(4): 427-432.
- [10] 蔡毅, 程乐鸣, 许霖杰, 等. 循环流化床锅炉组合脱硫系统运行策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 161-172.  
CAI Yi, CHENG Le-ming, XU Lin-jie, et al. Research on the operation strategy of circulating fluidized bed boiler combined desulfurization system[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2017, 37(1): 161-172.
- [11] 牛拥军, 宦宣州, 李兴华. 燃煤电厂烟气脱硫系统运行优化与经济性分析[J]. 热力发电, 2018, 47(12): 22-28.  
NIU Yong-jun, HUAN Xuan-zhou, LI Xing-hua. Operation optimization and economic analysis of flue gas desulfurization system of coal-fired power plants [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(12): 22-28.
- [12] 刘军, 罗晓宇, 廖义涵, 等. 1 000 MW 超临界燃煤发电机组湿法脱硫系统优化研究[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(6): 139-145.  
LIU Jun, LUO Xiao-yu, LIAO Yi-han, et al. Optimization of 1 000 MW ultra-supercritical coal-fired generating unit wet desulfurization system [J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(6): 139-145.
- [13] 张建新. 超临界 350 MW 机组 CFB 锅炉脱硫脱硝经济性分析[J]. 热力发电, 2017, 46(11): 114-118.  
ZHANG Jian-sheng. Economic research on desulfurization and denitration for a supercritical 350 MW circulating fluidized bed boiler[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(11): 114-118.
- [14] 曹洋, 赵建业, 刘军辉, 等. 吸收塔入口烟气参数对石灰石—石膏湿法脱硫效率的影响[J]. 煤炭加工与综合利用, 2019(6): 107-109, 112.  
CAO Yang, ZHAO Jian-ye, LIU Jun-hui, et al. Effects of flue gas parameters at the entrance of absorption tower on the efficiency of limestone-gypsum wet desulfurization[J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, 2019(6): 107-109, 112.
- [15] 李元, 杨志忠. 湿法烟气脱硫关键影响因素及新型单塔双循环技术[J]. 环境工程, 2016, 34(1): 69-73.  
LI Yuan, YANG Zhi-zhong. The key influencing factors of wet flue gas desulfurization and the new single-tower dual-cycle technology[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(1): 69-73.
- [16] 殷风光, 时轩. 湿法烟气脱硫装置运行中影响脱硫效率的因素分析[J]. 热电技术, 2017, 41(3): 24-27.  
YIN Feng-guang, SHI Xuan. Analysis of factors affecting desulfurization efficiency in wet flue gas desulfurization unit operation [J]. Thermoelectric Technology, 2017, 41(3): 24-27.
- [17] 宋艳杰, 贾志军. 火电厂燃煤烟气石灰石—石膏湿法脱硫影响因素分析[J]. 内蒙古石油化工, 2018, 44(10): 50-51.  
SONG Yan-jie, JIA Zhi-jun. Influencing factors analysis of coal-fired flue gas limestone-gypsum wet desulfurization in thermal power plants [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2018, 44(10): 50-51.