

# 火电厂石灰石湿法烟气脱硫效率模型的研究

刘志强

(山西省环境应急中心, 山西 太原 030006)

**摘要:**本文在对进口  $\text{SO}_2$  浓度、烟气流量  $X_2$ 、液气比、吸收浆液 pH、浆液浓度和烟气停留时间等 6 种主要火电厂石灰石湿法烟气脱硫影响因素进行综合分析并建立数学公式的基础上, 结合火电厂运行数据建立烟气脱硫效率模型。基于该数学模型, 以 2 组火电厂石灰石湿法烟气脱硫数据为实例进行了模型验证, 表明该模型能够较准确的反映脱硫效率。

**关键词:** 火电厂; 石灰石湿法; 烟气脱硫效率

中图分类号: X701.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2013)05-0011-03

## STUDY ON LIMESTONE WET FLUE GAS DESULFURIZATION EFFICIENCY MODEL OF THE THERMAL POWER PLANT

LIU Zhi-qiang

(Environmental Emergency Center of Shanxi Province, Taiyuan Shanxi, 030006, China)

**Abstract:** On the basis of the comprehensive analysis on such six main influence factors of limestone wet flue gas desulfurization as  $\text{SO}_2$  inlet concentration, flue gas flow  $X_2$ , the ratio of liquid to gas, absorber slurry PH, slurry concentration, the residence time of gas, and the establishment of mathematical formula, flue gas desulfurization efficiency model has been established by combining the thermal power plant operating data. Based on the mathematical model, the paper has worked on the model verification with the two groups of limestone wet flue gas desulfurization data and has proved that the model can more accurately present desulfurization efficiency.

**Keywords:** thermal power plant, limestone wet, flue gas desulfurization efficiency

$\text{SO}_2$  是大气中主要的污染物之一, 是衡量大气污染程度的重要指标之一。石灰石湿法脱硫技术是技术成熟、高效的脱硫技术, 目前已经全面应用于各种燃煤电厂, 成为我国电力行业实施  $\text{SO}_2$  减排的主要技术, 同时也是我国重点发展的烟气脱硫技术<sup>[1]</sup>。石灰石湿法烟气脱硫系统本身是一套相对复杂的系统, 已经投入运营的脱硫装置在实际运行中, 不可避免的可能出现偏离原有设计条件, 如煤

质发生变化等原因, 出现效率的降低、腐蚀、结垢、磨损等一些问题<sup>[2]</sup>。随着我国对火电厂环境保护的进一步重视, 石灰石湿法烟气脱硫技术在我国的应用也越来越广泛, 现场操作人员对设备及其特性的熟悉和掌握程度, 很大程度的决定了系统能否经济、安全运行。同时, 也会直接影响我国的  $\text{SO}_2$  排放现状。开展湿法烟气脱硫技术的动、静态特性的建模研究, 在此基础上建立脱硫效率模型, 解决脱硫设计、运行与人员培训等问题, 目前已成为一个非常值得关注与研究的课题<sup>[3]</sup>。

在过去开展的研究中, 学者们提出了较多的

收稿日期: 2013-02-14

作者简介: 刘志强, 男, 1973 年出生, 1997 年毕业于山西大学, 现主要从事环境监察、应急管理等工作。

烟气脱硫数学模型,国外的学者主要侧重理论方面的研究,注重通过设计改进数值模拟与仿真,侧重研究微观过程;国内的学者主要研究填料塔和板式塔,开展的脱硫效率研究,也不是在全工况实时仿真的环境中进行。因此,本论文的研究具有一定的实践意义和应用价值<sup>[4-8]</sup>。

由于火电厂石灰石湿法烟气脱硫效率涉及到进口 SO<sub>2</sub> 浓度、烟气流量、液气比等多种影响因素,而且不同影响因素又具有其自身不同的特点,因此建立烟气脱硫效率模型有一定的复杂性。本文在对 6 种主要影响脱硫效率的因素进行综合分析并建立数学公式的基础上,结合火电厂运行数据建立烟气脱硫效率模型,并对模型进行验证,表明模型能够较准确的反映脱硫效率。

### 1 影响脱硫效率因素的综合分析

本文研究的火电厂石灰石湿法烟气脱硫系统是采用石灰石作为吸收剂,石灰石经过破碎,磨细成粉状,再与水混合搅拌成吸收剂的浆液。在喷淋式吸收塔内,吸收剂的浆液与烟气充分接触混合,烟气中二氧化硫与浆液中的水、碳酸钙和鼓入的空气进行一系列生物化学反应,最终的反应产物为石膏。脱硫后的烟气经过除雾器除去带出来的细小液滴,经过换热器加热升温后排入烟囱。脱硫石膏浆经过脱水装置脱水后再回收。

在火电厂石灰石湿法烟气脱硫系统中影响脱硫效率的因素有很多,主要因素是进口 SO<sub>2</sub> 浓度、烟气流量 X<sub>2</sub>、液气比、吸收浆液 pH、浆液浓度和烟气停留时间。本文在分析石灰石湿法烟气脱硫影响脱硫效果的各项影响因素的基础上,建立了进口 SO<sub>2</sub> 浓度、烟气流量、液气比、浆液 pH 值、浆液浓度、烟气停留时间等共 6 种数学公式。

(1)进口 SO<sub>2</sub> 浓度:FGD 的入口二氧化硫浓度与锅炉蒸发量、燃煤中的硫份和入口烟气量有关。

$$C_{\lambda} = \frac{W \times S \times 21}{8 \times G} \times 106 \quad (1)$$

式中: C 为入口的二氧化硫浓度,mg/Nm<sup>3</sup>;

S 为燃煤中硫份的含量,%;

W 为锅炉实际的蒸发量,t/h;

G 为 FGD 的入口烟气量,m<sup>3</sup>/h。

(2)烟气流量 X<sub>2</sub>: FGD 的入口烟气量与锅炉的蒸发量及燃煤中的灰份有关。

$$G = \frac{2 \times 720 \times W \times (100 + A_w)}{127} \quad (2)$$

式中: G 为 FGD 的入口烟气量,m<sup>3</sup>/h;

W 为锅炉实际的蒸发量,t/h;

A<sub>w</sub> 为燃煤中的灰分,%。

(3)液气比:由于循环泵启动状况的不同以及石膏洗水重吸收塔流量的不同,从而使液气比不稳定。但循环泵启动状况的不同造成的影响只是在系统运行初始阶段,在系统进入正式运行阶段之后,液气比主要就是从烟气流量与吸收浆液喷淋量决定。而浆液喷淋量主要是由循环泵流量和循环泵开启台数决定。

实际的操作过程中,液气比可以控制在 9~20 之间。设定系统有 2 台循环泵,泵流量为 Q,则液气比为:

$$N=1, \frac{L}{G} = \frac{Q}{G} \quad (3)$$

$$N=2, \frac{L}{G} = \frac{2 \times Q}{G}$$

式中: N 为液气比,L/m<sup>3</sup>。

(4)吸收浆液 pH:低 pH 值有利于 CaCO<sub>3</sub> 的溶解。当 pH 值在 4 和 6 之间时,若其他参数大部分保持恒定,则溶解速率接近线性的规律加快直到 pH=6。为提高 SO<sub>2</sub> 捕获量,要求尽可能的保持较高 pH 值。因此在石灰石规格和工艺条件不变的情况下只能提高石灰石浆液浓度,来加速反应动力学过程,进一步加快氢离子消耗和钙离子生成的速度。但这有一个上限,如果悬浮液中 CaCO<sub>3</sub> 含量过高,最终产物和废水中 CaCO<sub>3</sub> 含量也相应会增高。这一方面会增加吸收剂的消耗,另一方面会降低石灰石的质量。在实际运行过程中,pH 控制在 5.4~5.6 之间,脱硫效率最高。

$$\text{pH} = 5.4 + 0.2 \times \text{rnd} \quad (4)$$

式中: rnd 为生成 0 到 1 的随机浮点数。

(5)浆液浓度:吸收塔中浆液的主要成分为石灰石、亚硫酸钙、石膏、溶解在水中的酸性气体及水的混合物,而在实际运行过程中,浆液必须保持一定浓度。通常浆液的浓度为 20%。

$$C_s = C_{s0} + 100 \times \text{rnd} \quad (5)$$

式中: C<sub>s</sub> 为浆液实际浓度,kg/m<sup>3</sup>;

C<sub>s0</sub> 为浆液基准浓度,kg/m<sup>3</sup>。

(6)烟气停留时间:烟气的停留时间与入口烟气量及烟气流速有关。

$$t = \frac{G}{U} \quad (6)$$

式中:  $t$  为烟气的停留时间, s;  
 $G$  为 FGD 的入口烟气流,  $m^3/h$ ;  
 $U$  为烟气流速,  $m/s$ 。

## 2 建立烟气脱硫效率模型与模型验证

### 2.1 建立分析数据

根据火电厂的运行数据, 烟气中二氧化硫的含量通常为  $1\ 500\sim 3\ 000\text{mg}/\text{m}^3$ ; 吸收浆液 pH 值控制到  $5.4\sim 5.6$ ; 烟气得停留时间为  $3\sim 5\text{s}$ ; 液气比为  $10\sim 20\text{L}/\text{m}^3$ ; 浆液浓度为 20% 左右; 如果采用 200WM 机组, 烟气流为  $120\sim 200(\text{Nm}^3/\text{s})$ ; 脱硫效率可以达到 85% 以上。确定八组数据如表 1, 进行线性回归分析。

表 1 脱硫效率及其相关影响因素数据

脱硫效率 $Y/\%$	进口 $\text{SO}_2$ 浓度 $X_1/(\text{mg}/\text{m}^3)$	烟气流 $X_2/(\text{Nm}^3/\text{s})$	液气比 $X_3(\text{L}/\text{m}^3)$	浆液 pH 值 $X_4$	浆液浓度 $X_5/\%$	烟气停留时间 $X_6/\text{s}$
94	1555	123	9	5.43	19	3
95	1575	134	12	5.64	14	2
96	1755	144	15	5.47	16	4
93	1845	164	16	5.57	17	5
94	1873	173	13	5.62	10	3
92	1673	181	10	5.44	15	3
95	1950	162	14	5.56	14	4
93	1853	153	15	5.48	13	4

### 2.2 进行回归分析

根据表 1, 设定回归方程  $Y=a+bX_1+cX_2+dX_3+eX_4+fX_5+gX_6$  (7)

(1) 回归统计: 通过回归统计, 总体方差  $R$  值为  $0.813\ 772$ , 进行  $R$  检验。在  $\alpha$  为  $0.05$  时,  $n-k=10-6=4$ , 则  $R_{0.05}(4)=0.716$ ,  $R>R_{0.05}$ , 说明模拟模型线性关系密切, 模拟模型较为准确。

(2) 方差分析: 通过方差分析,  $F$  值为  $5.62336$ , 进行  $F$  检验。在  $\alpha$  为  $0.05$  时  $F_{0.05}(6-1, 60-6)=3.42$ ,  $F>F_{0.05}$ , 说明回归效果显著。

(3) 系数分布表: 通过回归统计, 常数  $\alpha$  为  $83.64214$ ; 系数  $b$  为  $0.0195191$ ; 系数  $c$  为  $-0.017314$ ; 系数  $d$  为  $0.8679383$ ; 系数  $e$  为  $-5.333602$ ; 系数  $f$  为  $0.9356287$ ; 系数  $g$  为  $-4.567755$ 。

按回归系数带入该模型如下:

$$Y=83.64214+0.0195191X_1-0.017314X_2+0.8679383X_3-5.333602X_4+0.9356287X_5-4.567755X_6$$

### 2.3 建立烟气脱硫效率模型

将烟气脱硫影响因素的公式带入回归模型,

即可得到综合模型如下:

$$Y=83.64214+0.0195191\times\left(\frac{W\times S\times 21}{8\times G}\times 10^6\right)-0.017314\times\frac{2\times 720\times W(100+A_{ar})}{127}+0.8679383\times\frac{2\times Q}{G}-5.333602\times(5.4+0.2\times rmd)+0.9356287\times(C_{so}+rmd)-4.567755\times\frac{G}{U} \quad (8)$$

### 2.4 模型验证

表 2 脱硫效率及其相关影响因素数据

脱硫效率 $Y/\%$	进口 $\text{SO}_2$ 浓度 $X_1/(\text{mg}/\text{m}^3)$	原烟气流 $X_2/(\text{Nm}^3/\text{s})$	液气比 $X_3(\text{L}/\text{m}^3)$	浆液 pH 值 $X_4$	浆液浓度 $X_5/\%$	烟气停留时间 $X_6/\text{s}$
97	1653	137	18	5.64	16	5
96	1753	183	14	5.63	14	3

将表 2 中的 2 组数据代入烟气脱硫效率模型, 得到  $Y_1=91.223$ ,  $Y_2=96.232$ , 则  $Y$  平均  $= (Y_1+Y_2)/2=93.728$ 。烟气脱硫效率误差为  $95-93.728=1.272$ 。说明建立的烟气脱硫效率模型能够较为准确的反应脱硫效率的实际值。

## 3 结论与讨论

(1) 本论文分析了石灰石湿法烟气脱硫系统中影响脱硫效果的各项影响因素, 主要建立了入口  $\text{SO}_2$  浓度、吸收塔内  $\text{SO}_2$  吸收能力、原烟气流、液气比、浆液 pH 值、烟气停留时间等共 6 条数学公式。再利用线性回归分析定量分析各影响因素对脱硫效率的影响, 给出了相对较为准确的烟气脱硫效率模型, 验证了模型的准确性, 以保证它的实用性。

(2) 当然, 上述的模型是在既有的运行数据的前提下推导的。由于影响脱硫效率的因素很多, 对于与实际运行条件差别较大的工况, 模型应用的精确度必然会受到一定影响。但是, 正是由于电厂实际运行条件的差别, 本文的研究才更有其价值。

(3) 本文研究的火电厂石灰石湿法烟气脱硫效率模型是基于电厂运行数据得到的, 模型相对全面和客观, 同时能够最终以模型的形式对应于各种影响因素, 数值之间的大小可以说明脱硫效率的优劣关系, 直观性较强, 对现场操作人员的适应性较好, 可操作性较好。

(4) 掌握火电厂石灰石湿法烟气脱硫效率模型, 揭示烟气脱硫的效率规律, 能为现场操作人员有效的掌握烟气脱硫实际运行的工作状况与运行

(下转第 33 页)

在炉膛中心处 2# 工况的  $\text{CO}_2$  含量分布较均匀,等值线最稀疏,这可能是由于 2# 工况的炉膛中心温度相较于 1、3# 工况的均匀,而温度又会影响到  $\text{CO}_2$  的生成速率。

#### 5.4 旋风分离器内颗粒轨迹

经以上分析可知,2# 工况为较佳工况,现对 2# 工况旋风分离器的颗粒运动情况进行分析。由图 5 所示可知,进入旋风分离器的颗粒只有少部分进入尾部烟道,大部分颗粒由旋风分离器分离回收,保证了其回收效率,不仅可以确保循环流化床的燃烧充分度,提高燃烧效率,还可以减轻未燃颗粒对尾部受热面的冲刷、磨损,确保循环流化床的安全、经济运行。



图 5 2# 工况旋风分离器内颗粒轨迹

## 6 结论

(1)一、二次风配比分别为 5:5、5.5:4.5 和 6:4 时,密相区的温度变化较剧烈,2# 工况的燃烧情况较好。

(2)三种一、二次配风情况下,密相区和炉膛出口处的烟气流速变化相较于炉膛中心的要大,2# 工况的炉膛烟气速度水平较高。

(3)三种一、二次配风情况下,密相区的  $\text{CO}_2$  等值线较密集,且含量普遍高于稀相区的  $\text{CO}_2$  含量。大部分未燃颗粒能够被分离回收,只有少部分进入尾部烟道。

## 参考文献

- [1]白志刚,杨晨.循环流化床气固两相流动模拟[J].计算机仿真,2009,(3):272-275.
- [2]郑鑫,张大英,赵慧.基于 CFD 的循环流化床旋风分离器模拟[J].河南科技大学学报:自然科学版,2009,30(2):29-31.
- [3]高翔,刘剑焜,王宁,等.基于数值模拟方法的循环流化床的颗粒特性分析[J].硅谷,2012,(11):38-39.
- [4]王明俊,于尔铿,刘广一.配电系统自动化及其发展[M].中国电力出版社,1998.
- [5]黄志荣,孙佰仲,王擎.油页岩循环流化床燃烧数值模拟[J].东北电力大学学报,2012,32(2):1-5.
- [6]J. Ding, D. Gidaspo. A bubbling fluidization model using kinetic theory of granular flow[J]. AIChE Journal, 2004, 36(4): 523-538.
- [7]J. Cao, G. Ahmadi. Gas-particle two-phase turbulent flow in a vertical duct[J]. International journal of multiphase flow, 1995, 21(6): 1203-1228.
- [8]A. Samuelsberg, B.H. Hjertager. An experimental and numerical study of flow patterns in a circulating fluidized bed reactor[J]. International journal of multiphase flow, 1996, 22(3): 575-591.
- [9]倪建民. 75t/h 电站循环流化床锅炉的数值模拟研究[D]. 杭州:浙江大学,2003.
- [10]王康健,张丹娅,金军,等. 75t/h 电站循环流化床锅炉燃烧和污染物排放的数值模拟[J]. 能源工程, 2004, (1): 36-42.

(上接第 13 页)

环境,保障脱硫系统安全、经济的运行提供实际依据,同时也可现场操作人员提供反应与操作处理能力的培训,从而为火电厂湿法烟气脱硫提供技术支持,具有很大的现实意义和使用价值。

## 参考文献

- [1]乐园园,金东春,张岩,等.浙江省火电厂石灰石湿法烟气脱硫装置运行分析[J].浙江电力,2010,7:53-56.
- [2]牛治国,张勇,陈鸿伟.我国燃煤电厂烟气脱硫技术进展[J].河北化工,2006,1:43-45.
- [3]郑晓坤.火电厂烟气脱硫方法的研究[D].北京:华北电力大

学,2009.

- [4]卓小芳.石灰石/石膏湿法烟气脱硫系统仿真研究[D].重庆:重庆大学,2007.
- [5]胡满银,李立锋,赵毅.湿式石灰石/石膏法烟气脱硫仿真数学模型的研究[J].华北电力大学学报,2005,32(6):84-88.
- [6]陈海占,袁星,徐钢.火电机组湿法脱硫系统水耗建模与分析[J].现代电力,2011,28(5):68-71.
- [7]张华伟.660MW 机组石灰石湿法烟气脱硫系统仿真研究[D].重庆:重庆大学,2007.
- [8]唐志永,仲兆平,孙克勤,等.湿法脱硫喷淋塔空塔流场数值模拟[J].能源利用与研究,2003,2:10-12.