

# 高倍率灰钙循环脱硫过程及影响因素研究

陈福仲

(济南热力集团, 山东 济南 250000)

**摘要:**为深入了解神东 30 t/h 煤粉工业锅炉对应的高倍率灰钙循环脱硫除尘一体化技术(NGD, no gap desulfurization)脱硫过程及机理,研究不同影响因素对脱硫效率的影响。笔者在反应器上沿程打孔取样,检测不同位置脱硫剂硫含量和水分变化,结果发现,随着脱硫反应的进行,脱硫剂中水分和硫含量分别呈降低和增加的趋势,说明水分对脱硫反应至关重要,在有水存在的条件下,脱硫反应从气固两相反应变为离子间的液相反应,脱硫反应速率显著增加。随着脱硫反应的进行,脱硫剂中反应产物增加导致硫含量增加。检测反应器沿程烟气中成分及含量变化,根据反应器上单位距离脱硫效率的变化率,将脱硫过程分为 3 个阶段:常速段、降速段、拟平衡段,前 2 个阶段脱硫反应速率快,为脱硫反应的关键段,所脱除的  $\text{SO}_2$  占  $\text{SO}_2$  总量的 90%,因此强化前 2 个脱硫阶段是提高脱硫效率的有效手段。最后,在 NGD 脱硫装置上进行工程试验,研究增湿水量、 $\text{SO}_2$  初始浓度、掺混比对脱硫效率的影响规律,结果表明,增湿水量增加, $\text{SO}_2$  初始浓度降低,熟石灰占比增加,相当于脱硫反应物初始浓度增加,促进脱硫反应向右进行,初始阶段脱硫反应速率增加,因此最终脱硫效率呈现增加的趋势。但由于脱硫剂孔隙结构及活性物质含量的限制,脱硫反应存在最佳的工艺条件使脱硫剂中有效物质被充分利用,根据脱硫效率的变化量最终确定增湿水量、 $\text{SO}_2$  初始浓度、掺混比最佳范围,分别为 0.14~0.27 t/h、350~550  $\mu\text{L/L}$ 、3:1~2:1,此时脱硫效率的变化量分别为 28.81%、25.87%、10.55%。

**关键词:**高倍率灰钙循环;脱硫;脱硫效率;影响因素

中图分类号:X511

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2020)02-0130-07

## Study on the process and influencing factors of circulating desulfurization with high ratio of ash and calcium

CHEN Fuzhong

(Jinan Thermal Group, Jinan 250000, China)

**Abstract:** Based on the circulating desulfurization with high ratio of ash and calcium (No Gap Desulfurization) of Shendong 30t/h coal-fired industrial boiler, and in order to further find the desulfurization process and mechanism, the influence of different factors on the desulfurization efficiency was studied. In this paper, the sulfur content and water content of desulfurizer in different positions were detected by drilling and sampling along the reactor firstly. The results show that the water content and sulfur content in desulfurizer decrease and increase respectively with the desulfurizing reaction, which indicate that water is very important for desulfurizing reaction. In the presence of water, the desulfurizing reaction changes from gas-solid two-phase reaction to liquid-phase reaction between ions, and the desulfurization reaction rate increases significantly. At the same time, with the desulfurization reaction, the reaction products in the desulfurizer increase, so the sulfur content increases. Secondly, the change of composition and content of flue gas along the reactor is detected. According to the change rate of desulfurization efficiency per unit distance on the reactor, the desulfurization process is divided into three stages: constant speed section, deceleration section and quasi balance section. The desulfurization reaction rate of first two stages is fast, which is the key section of desulfurization reaction. The  $\text{SO}_2$  removed accounts for 90% of the total  $\text{SO}_2$ . Therefore, It is a effective method to improve the desulfurization efficiency by strengthening the first two desulfurization stages. Finally, the engineering test was carried out on the NGD desulfurization unit to study the influence of the humidification water quantity, initial concentration of  $\text{SO}_2$  and the mixing ratio on the desulfu-

收稿日期:2020-02-27;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.20022703

基金项目:天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项项目面上资助项目(2019-TD-MS012)

作者简介:陈福仲(1963—),男,内蒙古呼和浩特人,工程师,从事发电厂及热力系统研究。E-mail:15589995677@163.com

引用格式:陈福仲.高倍率灰钙循环脱硫过程及影响因素研究[J].洁净煤技术,2020,26(2):130-136.

CHEN Fuzhong. Study on the process and influencing factors of circulating desulfurization with high ratio of ash and calcium [J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(2): 130-136.



移动阅读

rization efficiency. Finally, the results are as follows: the humidification water quantity increases, the initial concentration of  $\text{SO}_2$  decreases, and the proportion of hydrated lime increases, which is equivalent to the increase of the initial concentration of the desulfurization reactant, and promotes the desulfurization reaction to the right, and the desulfurization reaction rate increases in the initial stage, so the final desulfurization efficiency shows an increasing trend. However, due to the limitation of pore structure and active substance content of desulfurizer, there are optimal technological conditions for desulfurizing reaction to make full use of the effective substances in desulfurizer. According to the variation of desulfurizing efficiency, the optimal range of humidification water quantity, initial concentration of  $\text{SO}_2$  and mixing ratio is finally determined, which are 0.14–0.27 t/h, 350–550  $\mu\text{L}/\text{L}$  and 3 : 1–2 : 1 respectively. At this time, the variation of desulfurizing efficiency is 28.81%, 25.87% and 10.55% respectively.

**Key words:** high ratio of ash and calcium circulation; desulfurization; desulfurization efficiency; influence factor

## 0 引言

近年来,随着  $\text{SO}_2$  排放量的增加,加上特殊的地形和气象条件最终导致雾霾的产生<sup>[1]</sup>,严重危害环境和人类健康,国家对不同污染物实行了超低排放标准,要求  $\text{SO}_2$  浓度  $\leq 35 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。目前,主要的脱硫方式是湿法脱硫和半干法脱硫,对于电站锅炉,应用较多的主要是石灰石-石膏法,脱硫效率在 90%~95%<sup>[2]</sup>,其中设备腐蚀是限制该脱硫方法发展的主要因素<sup>[3]</sup>。中小型燃煤工业锅炉不同于电站锅炉,其容量小、启停频繁,需要研发出一种适用于中小型燃煤锅炉的脱硫技术。而半干法脱硫对中小型锅炉有很好的适应性,煤科院节能技术有限公司结合 CFB 脱硫工艺和 NID 脱硫工艺研发出一种新型的高倍率灰钙循环脱硫除尘一体化工艺(no gap desulfurization, NGD),将粉煤灰作为脱硫剂进行循环使用<sup>[4]</sup>,利用高速热烟气中  $\text{SO}_2$  与脱硫剂中碱性物质发生酸碱反应的脱硫原理,最终达到脱除  $\text{SO}_2$  的目的。脱硫过程中将粉煤灰增湿,在有水的条件下粉煤灰与熟石灰发生水合反应,生成的脱硫剂具有比表面积大、持水性高等特点,是脱硫效率大幅提高的主要原因<sup>[5-7]</sup>。

王乃华<sup>[8]</sup>分析了半干法脱硫反应过程,对搭建半干法脱硫反应器具有指导性意义。高继录等<sup>[9]</sup>模拟脱硫塔内脱硫过程,发现沿脱硫塔高度方向  $\text{SO}_2$  浓度逐渐降低,且脱硫反应主要发生在喷口后 1.5 m 内,说明水分影响脱硫反应。李国莲<sup>[10]</sup>将模拟与试验手段相结合,研究了不同影响因素对脱硫效率的影响规律,验证了模型的准确性。沈应强<sup>[11]</sup>发现  $\text{Ca}/\text{S}$  摩尔比、入口烟气中  $\text{SO}_2$  浓度增加,系统脱硫效率增加。本文在神东 30 t/h 锅炉对应的 NGD 脱硫反应装置上打孔取样,检测脱硫过程中反应物变化,从而分析整个脱硫反应过程,研究脱硫反应机理,分析增湿水量、 $\text{SO}_2$  初始浓度、掺混比对脱硫效率的影响,以期获得试验中的最佳工况。

## 1 试验

### 1.1 脱硫试验装置

脱硫系统包括脱硫反应器、脱硫剂储存循环系统、脱硫剂增湿系统、除尘系统、测控系统 5 部分,试验装置示意如图 1 所示。

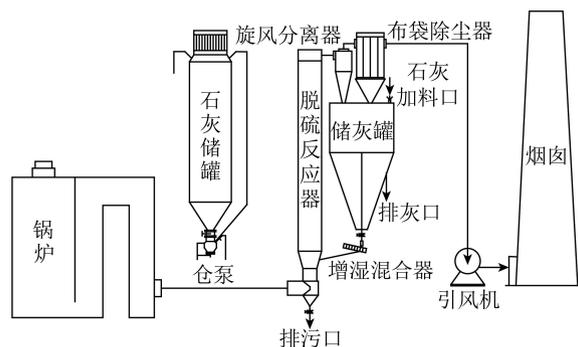


图 1 NGD 工艺流程<sup>[12]</sup>

Fig.1 NGD process flow chart<sup>[12]</sup>

脱硫反应的工艺流程为:首先,锅炉燃烧后产生的烟气经烟道口排出,进入脱硫反应器的直管段后流经文丘里,文丘里的渐扩段与脱硫剂进料口相连。由于文丘里特殊的结构使烟气流经文丘里后先加速后减速,烟气在高流速条件下扰动程度增加,烟气与脱硫剂充分接触,迅速发生脱硫反应,反应后的烟气从反应器上端直管段流出。经过布袋除尘器和旋风分离器,大颗粒被过滤,小颗粒被储存在灰仓中用来进行脱硫反应。为保证脱硫剂活性和除尘器正常运行,脱硫剂经过增湿混合器后被增湿至含水率为 0~5%,并通过测控系统观察整个锅炉运行系统及脱硫反应情况。

### 1.2 试验工况

脱硫试验工况见表 1。在不同锅炉负荷下,  $\text{SO}_2$  初始浓度不同,当脱硫剂中活性物质含量一定时,脱硫初始反应速率不同,所以脱硫剂的脱硫效果不同。增湿水量为制备脱硫剂过程中添加的水量,增湿水量不同脱硫剂溶解在水中的硅离子和铝离子含量不同,因此脱硫剂脱硫反应过程不同。NGD 工艺中将

燃烧后产生的粉煤灰与外加熟石灰掺混制备脱硫剂,二者掺混的质量比不同使得制备的脱硫剂结构及活性不同。

表1 试验工况  
Table 1 Test condition

编号	锅炉负荷/ %	增湿水量/ ( $t \cdot h^{-1}$ )	掺混比(粉煤灰/ 熟石灰质量比)
1		0	
2	100	0.14	1:0
3		0.27	
4		0	
5	36.7	0.11	1:0
6		0.22	
7		0	
8	93.3	0.14	2:1
9		0.27	
10		0	
11	100	0.12	3:1
12		0.26	
13			2:1
14	100	0.27	3:1
15	36.7		
16	76.7	0.27	1:0

分别研究  $SO_2$  初始浓度、增湿水量、掺混比对脱硫效率的影响规律,表1中试验1~3、4~6研究不同锅炉负荷下增湿水量对脱硫效率的影响,试验1~6、7~9、10~12研究增湿水量对脱硫效率的影响,试验3、13、14研究掺混比对脱硫效率的影响规律,试验3、15、16研究  $SO_2$  初始浓度对脱硫效率的影响。

### 1.3 试验测点布置

在反应器壁面打孔,取样孔测点位置见表2。根据烟气流动方向设定  $x$  轴和  $y$  轴正方向,其中从左至右为  $x$  轴正方向,沿反应器从下至上为  $y$  轴正方向。设定反应器入口管径  $d=1.04$  m,所以  $y/d$  对于不同尺寸的脱硫反应器具有普适性,试验结果也具有相同的规律性。前人研究表明脱硫反应前半段为控制段,脱硫反应速率快,因此结合现场装置实际情况,将进料口附近部分的取样孔位置适当加密,测定相应位置取样孔中反应物成分及含量。脱硫剂中水分、硫含量变化以及烟气成分及含量变化均可以反应该取样孔位置的脱硫反应程度,进而推断整个脱硫反应过程。

表2 取样孔测点布置

Table 2 Layout of sampling hole measuring points

编号	$y/m$	$y/d$
1	6.0	5.8
2	6.9	6.6
3	7.4	7.1
4	8.0	7.7
5	8.6	8.3
6	10.3	9.9
7	12.1	11.6
8	17.1	16.4
9	26.8	25.8

## 2 结果与讨论

### 2.1 脱硫反应过程分析

#### 2.1.1 脱硫剂中水分变化

一些学者根据脱硫反应过程中脱硫剂水分的蒸发速率将脱硫反应分为3个阶段,前2个阶段为脱硫反应的主要阶段<sup>[13]</sup>,原因是该反应阶段脱硫剂中水分较充足,在有水的条件下脱硫反应性质从气固两相反应变成离子间的液相反应,反应速率大幅度提升<sup>[14]</sup>。

为了解反应过程中脱硫剂内部水分的变化,选取反应前后的脱硫剂,检测其中全水以及分析水,检测结果见表3,其中  $\alpha$  为分析水和全水的比值。结果发现随着脱硫反应进行,全水、分析水均呈现下降趋势,说明脱硫过程会消耗一定水分,水分是脱硫反应必不可少的物质。 $\alpha$  呈下降趋势,说明脱硫过程消耗的水分外水占比更高,原因是温度大于  $100$   $^{\circ}C$ ,分析水在一定时间内才能蒸发,随着脱硫反应进行,烟气温度逐渐下降,最终烟气出口温度小于  $100$   $^{\circ}C$ ,因此消耗的分析水含量较少。

表3 脱硫剂中水分变化

Table 3 Moisture change in desulfurizer

项目	反应前	反应后
全水/%	1.63	0.54
分析水/%	0.64	0.16
$\alpha$ /%	39.26	29.63

#### 2.1.2 烟气成分及含量变化

在锅炉负荷 76.7%、氧含量 5.5%、 $SO_2$  浓度 185  $\mu L/L$  时,使用德图 350 烟气分析仪测定不同取样孔中烟气的成分及含量,烟气分析仪量程为  $0 \sim 5\ 000 \times 10^{-6}$ ,检测精确度为  $1 \times 10^{-6}$ ,最终测量结果见表4。

表4 不同取样孔烟气成分及含量

Table 4 Composition and content of flue gas from different sampling hole

取样孔 编号	y/d	烟气 温度/ ℃	SO <sub>2</sub> 浓度/ ( $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ )	氧含量/ %	脱硫效 率/%	单位距离 脱硫效率 的变化量/ ( $\% \cdot \text{m}^{-1}$ )
1	5.8	137.1	175	5.48	5.4	—
5	8.3	119.9	151	5.84	18.4	5.4
6	9.9	118.1	143	5.50	22.7	3.1
7	11.6	118.7	130	5.56	29.7	3.5
8	16.4	117.8	102	6.12	44.9	3.2
9	25.8	116.0	93	9.98	49.7	0.5

利用不同取样孔下单位距离脱硫效率的变化量分析反应器不同位置的脱硫反应速率,如图2所示。可知脱硫反应初期反应速率最快,随着反应的进行,脱硫反应速率基本不变,直至反应器出口位置脱硫反应速率大幅下降,因此可将脱硫过程分成3个阶段:常速段、降速段、拟平衡段,不同取样孔在脱硫反应器上对应的位置及分段示意如图3所示。

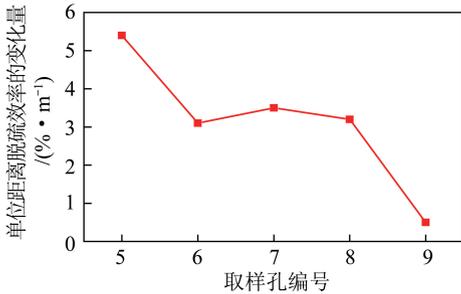


图2 不同取样孔单位距离脱硫效率变化量

Fig.2 Change of desulfurization efficiency per unit distance of different sampling holes

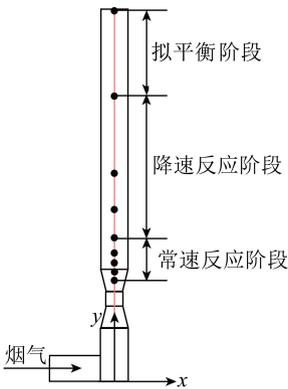


图3 脱硫反应过程分区示意

Fig.3 Schematic diagram of desulfurization reaction process

整个脱硫过程中,常速段中脱硫剂在有水的条件下,Al离子和Si离子溶解出来与脱硫剂中碱性物质发生反应,此时脱硫剂表面有充足的水分和有效

物质供脱硫反应<sup>[15]</sup>,脱硫反应速率最快。在降速段,由于脱硫产物体积大于脱硫剂孔隙体积,随着反应进行,脱硫产物逐渐覆盖在脱硫剂表面,最后形成致密的产物层<sup>[16]</sup>,气体扩散阻力增加,导致脱硫反应速率逐渐下降。根据不同取样孔中SO<sub>2</sub>浓度的变化,可以看出前2个阶段所脱除的SO<sub>2</sub>占入口烟气中SO<sub>2</sub>总量的90%,说明前2个阶段为脱硫反应的主要阶段,因此在工程中可强化前2个阶段来提高脱硫效率,若在脱硫剂中加入含氯的可溶盐可增加水分的持水性,从而延长水分在脱硫剂中的停留时间<sup>[17]</sup>。

由表4可知,随着脱硫反应进行,脱硫温度呈下降趋势,说明脱硫反应过程中存在能量传递,主要原因是在脱硫剂在进料口进入与烟气充分接触,气液固三相之间发生强烈的热传递、热交换,最终使烟气温度下降,在脱硫反应后半段烟气温度变化幅度减小,说明烟气与脱硫剂已发生充分接触,脱硫反应基本完成,此时烟气温度降低主要是由于烟气及脱硫剂中水分蒸发所致<sup>[18]</sup>。

### 2.1.3 脱硫剂中硫含量变化

脱硫中硫含量反映了该取样孔中脱硫反应进行程度,为研究脱硫反应过程中脱硫剂中硫含量的变化,选取与2.1.2相同的锅炉工况,锅炉负荷为分别为76.7%和93.3%时,对不同的取样孔进行取样,测量硫含量,结果见表5,脱硫剂中硫含量随取样孔位置的变化如图4所示。试验中取样设备所选取的脱硫剂为脱硫反应器中建立的坐标系中 $x=1$ 时不同取样孔位置的脱硫剂,由图4可知,在不同工况下,随着取样孔位置升高,除取样孔2、4、6外脱硫剂中硫含量呈增加趋势,原因是脱硫反应从反应器底端开始沿脱硫反应器向上进行,随着脱硫反应的发生,脱硫剂中的活性物质与SO<sub>2</sub>发生反应,所生成的硫化物覆盖在脱硫剂表面,导致脱硫剂中硫含量增加。同时发现在工况1和工况2中,反应前后脱硫剂中的硫含量分别增加0.50%、0.95%,原因是工况2中锅炉负荷较大,在脱硫剂中活性物质一定的情况下,SO<sub>2</sub>初始浓度较高,脱硫反应速率越快,生成的脱硫产物越多,反应前后硫含量差值越大。取样孔2的硫含量出现小幅下降,原因是取样孔2处位置在烟气的进气口附近,由于是直角弯头,所以反应器内出现烟气向右偏斜的情况,而取样孔6处在脱硫剂进料口附近,因此脱硫剂左侧进料会导致烟气向左偏斜,因此推测导致取样孔2和6处出现硫含量降低的原因是脱硫反应器内流场出现偏斜,存在流场不均匀的情况。说明在该工艺中可通过优化反应

流场提高脱硫效率,主要采取改进反应器内部结构或添加内构件等手段<sup>[19-21]</sup>。

表5 不同取样孔中脱硫剂硫含量变化

Table 5 Change of sulfur content of desulfurizer in different sampling holes

取样孔编号	y/d	工况1 硫含量/%	工况2 硫含量/%
1	5.8	1.97	2.20
2	6.6	2.13	2.13
3	7.1	2.20	2.23
4	7.7	2.13	2.24
6	9.9	2.06	2.16
7	11.6	2.29	2.38
8	16.4	2.25	2.33
9	25.8	2.47	3.15

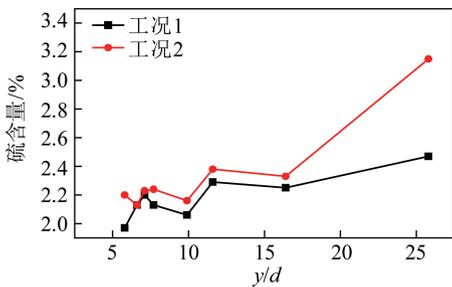


图4 脱硫剂硫含量随取样孔位置的变化

Fig.4 Change of sulfur content of desulfurizer with sampling hole position

## 2.2 脱硫工艺条件对脱硫效率的影响

### 2.2.1 增湿水量

水分对脱硫反应至关重要<sup>[22-23]</sup>。由于神东地区较低的烟气排放标准,加上神东煤种硫含量较低,燃烧后所产生的粉煤灰有较高的碱性。神东现场通常在脱硫剂掺混比为1:0的条件下进行脱硫即可达到烟气排放标准。为了寻找最佳增湿水量,在掺混比为1:0、锅炉负荷为100%、氧含量5%~6%、增湿水量分别为0、0.14、0.27 t/h条件下进行脱硫试验,系统连续稳定运行30 min后通过数据监测系统读取出口SO<sub>2</sub>浓度,最终获得脱硫效率随增湿水量的变化曲线如图5所示。

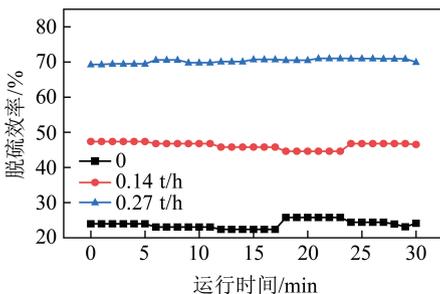


图5 脱硫效率随运行时间的变化

Fig.5 Change of desulfurization efficiency with operation time

由图5可知,随着增湿水量增加,脱硫效率增加,原因是增湿水量增加,水分在脱硫剂中的停留时间延长,发生脱硫反应的有效时间增加,同时溶解在水中的硅离子和铝离子浓度增加,脱硫反应速率增加,有效物质被充分利用,脱硫效率增加<sup>[24]</sup>。该结果得到了相关学者的验证<sup>[25-27]</sup>,但由于现场限制,增湿水量过多会出现布袋结露现象,导致布袋阻力及能耗增加<sup>[28]</sup>,因此现场中在不影响布袋正常运行的情况下应选择最佳的增湿水范围,使脱硫剂中有效物质和水分均得到充分利用。根据脱硫结果,增湿水量从0增加到0.14 t/h时,平均脱硫效率增加17.60%,增湿水量从0.14 t/h增加到0.27 t/h时,平均脱硫效率增加28.81%,因此本试验中最佳增湿水量为0.14~0.27 t/h。

### 2.2.2 SO<sub>2</sub>初始浓度

不同锅炉负荷下SO<sub>2</sub>初始浓度不同,选取锅炉负荷36.7%、76.7%、100%进行脱硫试验,寻找SO<sub>2</sub>的最佳初始浓度范围。在氧含量为5%~6%、增湿水量为0.27 t/h条件下,使用testo350烟气分析仪检测不同负荷下的SO<sub>2</sub>初始浓度分别为355、555、705 μL/L。工况稳定后系统连续运行30 min,在数据监测系统上读取出口烟气中SO<sub>2</sub>浓度,最后得到的脱硫曲线如图6所示。

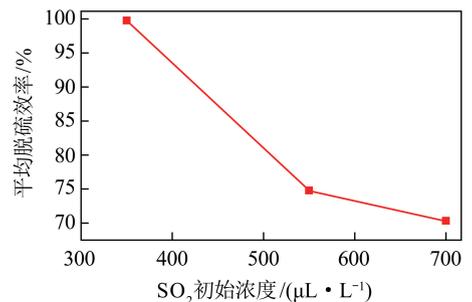


图6 平均脱硫效率随SO<sub>2</sub>初始浓度的变化

Fig.6 Change of average desulfurization efficiency with the initial concentration of SO<sub>2</sub>

由图6可知,随SO<sub>2</sub>初始浓度增加,平均脱硫效率呈下降趋势,主要原因是在一定的含湿量和Ca/S比下,SO<sub>2</sub>初始浓度不同相当于脱硫剂的水钙比发生变化。SO<sub>2</sub>初始浓度越高,脱硫反应向右移动,反应速率越快,但烟气扩散速率不变,所以二者差值增加,导致脱硫效率降低。该结论与相关学者所得结论一致<sup>[29-31]</sup>。若脱硫反应速率远大于气体扩散速率,则脱硫剂中有效物质未被利用就被脱硫产物覆盖,此时脱硫剂有效物质利用率低,因此存在最佳初始浓度使脱硫剂有效物质利用率最高。初始浓度由350 μL/L增至550 μL/L时,脱硫效率降低

25.87%,初始浓度由 550  $\mu\text{L/L}$  增至 700  $\mu\text{L/L}$  时,脱硫效率降低 2.47%,因此本文最佳初始浓度为 350~550  $\mu\text{L/L}$ ,说明较低的初始浓度对脱硫反应更有利。

### 2.2.3 掺混比

当锅炉负荷为 100%时,选取掺混比为分别为 1:0、3:1、2:1 进行脱硫试验,研究脱硫效率随掺混比的变化规律,结果如图 7 所示。

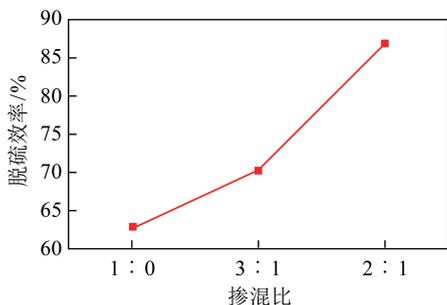


图 7 平均脱硫效率随掺混比的变化

Fig.7 Change of average desulfurization efficiency with mixing ratio

由图 7 可知,随着熟石灰占比增加,脱硫效率呈上升趋势,主要是由于熟石灰占比增加,脱硫剂中活性物质含量增多,反应物浓度增加,促进脱硫反应向右进行,因此脱硫效率增加。若外加熟石灰过多,降低脱硫工艺的经济性,同时应考虑脱硫剂的有效利用率,降低脱硫反应速率与气体扩散速率差值,因此需要找到试验中最佳的掺混比。掺混比从 1:0 增至 3:1 时,脱硫效率增加 7.72%,脱硫效率从 3:1 增加至 2:1 时,脱硫效率增加 10.55%。因此本文最佳掺混比为 3:1~2:1。

## 3 结 论

1) 通过检测沿程脱硫剂中水分及硫含量变化,发现随着反应的进行,脱硫剂中水分及硫含量分别呈降低和增加的趋势,水分对于脱硫反应具有至关重要的作用。

2) 根据沿程烟气中单位距离脱硫效率的变化将脱硫过程分为 3 个阶段:常速段、降速段、拟平衡段,前 2 个反应阶段为关键段,所脱除的  $\text{SO}_2$  为入口  $\text{SO}_2$  总量的 90%,采取有效手段延长水分在脱硫剂中的停留时间可提高脱硫效率。

3) 通过研究增湿水量、 $\text{SO}_2$  初始浓度、掺混比对脱硫效率的影响,发现增湿水量增加、 $\text{SO}_2$  初始浓度降低、熟石灰占比增加都会促进脱硫反应,脱硫效率增加。试验最佳增湿水量、初始浓度、掺混比分别为:0.14~0.27 t/h、350~550  $\mu\text{L/L}$ 、3:1~2:1。

## 参考文献 (References):

- [1] 生明亮,原永涛,刘凤,等.燃煤锅炉污染物排放对雾霾产生的影响以及治理措施[J].山东化工,2015(1):145-147.  
SHENG Mingliang, YUAN Yongtao, LIU Feng, et al. The effects of haze generated from coal-fired boiler emissions and the improvement measures [J]. Shandong Chemical Industry, 2015 (1): 145-147.
- [2] 钟毅,林永明,高翔,等.石灰石/石膏湿法烟气脱硫系统石灰石活性影响因素研究[J].电站系统工程,2005,21(4):1-3.  
ZHONG Yi, LIN Yongming, GAO Xiang, et al. Study on influence factors of reactivity of limestone in limestone/gypsum wet FGD system [J]. Power System Engineering, 2005, 21(4): 1-3.
- [3] 赵毅,沈艳梅.湿式石灰石/石膏法烟气脱硫系统的防腐蚀措施[J].腐蚀与防护,2009(7):495-498.  
ZHAO Yi, SHEN Yanmei. Corrosion and anticorrosion of wet limestone-gypsum flue gas desulfurization system [J]. Corrosion & Protection, 2009 (7): 495-498.
- [4] 禾志强,祁利明.石灰石-石膏法脱硫系统 GGH 堵塞解决措施[J].电站系统工程,2009,25(5):18-20.  
HE Zhiqiang, QI Liming. The measures to GGH blocking in limestone - gypsum desulfurization system [J]. Power System Engineering, 2009, 25(5): 18-20.
- [5] 崔名双,周建明,张鑫,等.半干法脱硫剂的性能及脱硫机理[J].煤炭转化,2019,42(3):58-64.  
CUI Mingshuang, ZHOU Jianming, ZHANG Xin, et al. Performance and desulfurization mechanism of semi dry desulfurizer [J]. Coal Conversion, 2019, 42(3): 58-64.
- [6] WANG E W, LEI S M, ZHONG L L, et al. Review of advanced technology of flue gas desulphurization [J]. Advanced Materials Research, 2014, 852: 86-91.
- [7] SHENG G, LI Q, ZHAI J. Investigation on the hydration of CFBC fly ash [J]. Fuel, 2012, 98(4): 61-66.
- [8] 王乃华.新型半干法烟气脱硫的试验及机理研究[D].杭州:浙江大学,2002.  
WANG Naihua. Experimental and theoretical study on a new semi-dry flue gas desulfurization [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [9] 高继录,陈晓利,高继慧.半干法脱硫塔内  $\text{SO}_2$  脱除过程数值模拟[J].东北电力技术,2008,29(7):4-7.  
GAO Jilu, CHEN Xiaoli, GAO Jihui. Numerical simulation of  $\text{SO}_2$  removal processing in semi-dry desulfurization tower [J]. Northeast Electric Power Technology, 2008, 29(7): 4-7.
- [10] 李国莲.半干法烟气脱硫过程的数值模拟[J].能源环境保护,2008,22(6):13-15.  
LI Guolian. Study on numerical simulation of flue gas desulfurization progress [J], Energy Environmental Protection, 2008, 22 (6): 13-15.
- [11] 沈应强.烧结烟气半干法脱硫实验研究[D].武汉:华中科技大学,2009.  
SHEN Yingqiang. Experiment study on semi-dry desulfurization of sintering flue gas [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2009.

- [12] LI Y R, QI H Y, YOU C F, et al. Kinetic model of CaO/fly ash sorbent for flue gas desulphurization at moderate temperatures [J]. *Fuel*, 2007, 86(5): 785-792.
- [13] 崔名双. 燃煤工业锅炉烟气脱硫技术及经济性分析[J]. *洁净煤技术*, 2019, 25(5): 131-137.  
CUI Mingshuang. Flue gas desulphurization technology and economic analysis of coal-fired industrial Boilers [J]. *Clean Coal Technology*, 2019, 25(5): 131-137.
- [14] GETLER J L, SHELTON H L, FURLONG D A. Modeling the spray absorption progress for SO<sub>2</sub> removal [J]. *Air Repair*, 1979, 29: 1270-1274.
- [15] 贾东坡, 王明毅, 宋魏鑫, 等. 循环流化床锅炉尾部增湿活化深度脱硫工艺研究[J]. *电站系统工程*, 2014(5): 41-43.  
JIA Dongpo, WANG Mingyi, SONG Weixin, et al. Research on deep desulfurization process of CFB boiler tail humidification and activation [J]. *Power System Engineering*, 2014(5): 41-43.
- [16] SHENG G, LI Q, ZHAI J. Investigation on the hydration of CFBC fly ash [J]. *Fuel*, 2012, 98: 61-66.
- [17] 傅国光, 颜岩, 彭晓峰, 等. 钙基脱硫剂水合改性试验分析[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(3): 178-182.  
FU Guoguang, YAN Yan, PENG Xiaofeng, et al. Experimental analysis on hydration modification of calcium based desulfurizer [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(3): 178-182.
- [18] 刘洋, 郭兵兵, 祝月全. 脱硫剂的研究进展[J]. *当代化工*, 2013(6): 827-829.  
LIUYang, GUO Bingbing, ZHU Yuequan. Research progress in desulfurizers [J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2013(6): 827-829.
- [19] 谷林, 张延玲, 林纲, 等. 半干法烟气脱硫机理及影响因素[J]. *过程工程学报*, 2008, 8(S1): 306-314.  
GU Lin, ZHANG Yanling, LIN Gang, et al. Mechanism and influential factors of semidry flue gas desulfurization [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2008, 8(S1): 306-314.
- [20] 胡金榜, 李艳平, 陈安新, 等. 循环流化床脱硫反应器入口结构对气体流动影响数值模拟[J]. *化学工程*, 2005, 33(1): 20-23.  
HU Jinbang, LI Yanping, CHEN Anxin, et al. Effect of the venturi inlet configuration on gas flow in circulating fluidized bed desulfurization reactor-numerical simulation [J]. *Chemical Engineering*, 2005, 33(1): 20-23.
- [21] 杨竟亮. NID 半干法脱硫工艺和脱硫反应器的模拟与优化 [D]. 上海: 华东理工大学, 2016.  
YANG Jingxian. Simulation and optimization of NID semi-dry desulfurization technology and reactor [J]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2016.
- [22] 王岳军, 刘学炎, 李泽清. 基于 CFD 的半干法反应器优化设计 [J]. *环境工程*, 2013, 31(1): 73-76.  
WANG Yuejun, LIU Xueyan, LI Zeqian. Optimization design of semi-dry flu gas desulphurization reactor based on the CFD [J]. *Environmental Engineering*, 2013, 31(1): 73-76.
- [23] 高翔, 骆仲泱, 陈亚非, 等. 水分对钙基吸收剂脱硫性能影响的研究 [J]. *燃烧科学与技术*, 1999, 5(1): 39-45.  
GAO Xiang, LUO Zhongyang, CHEN Yafei, et al. Effect of water content on desulfurization characteristic of calcium-based sorbent [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 1999, 5(1): 39-45.
- [24] 贾利峰. 钙基吸收剂水分赋存形态表征及对脱硫特性的影响研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.  
JIA Lifeng. Characterization water morphology and its effect on desulfurization characteristics based on Ca-based sorbents [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [25] 崔名双. 半干法脱硫剂脱硫性能及机理研究 [D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2019.  
CUI Mingshuang. Study on desulfurization performance and mechanism of semi-dry hydrated ash [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2019.
- [26] 周屈兰, 刘尧祥, 惠世恩. 高钙粉煤灰直接应用于烟气脱硫的试验研究 [J]. *动力工程学报*, 2007, 27(1): 117-121.  
ZHOU Qulan, LIU Yaoxiang, HUI Shien. An experimental study of flue gas desulfurization by direct application of fly ash with high calcium content [J]. *Journal of Power Engineering*, 2007, 27(1): 117-121.
- [27] 杨博, 宋存义, 何佳. 水和水蒸气对钙基吸收剂脱硫性能影响的研究 [J]. *科学技术与工程*, 2007, 7(6): 1273-1275.  
YANG Bo, SONG Cunyi, HE Jia. Study on the effect of water and steam on desulfurization capability of calcium sorbent [J]. *Science, Technology and Engineering*, 2007, 7(6): 1273-1275.
- [28] 樊保国, 项光明. 循环流化床烟气脱硫机理研究 [J]. *环境科学*, 1998(3): 14-17.  
FAN Baoguo, XIANG Guangming. Study on mechanism of flue gas desulfurization by circulating fluidized bed [J]. *Environmental Science*, 1998(3): 14-17.
- [29] 杨松, 王林, 李婷, 等. 布袋除尘器粘结原因及处理办法 [J]. *陶瓷*, 2017(2): 37-38.  
YANG Song, WANG Lin, LI Ting, et al. Cause of sticking of bag filter and its treatment [J]. *Ceramics*, 2017(2): 37-38.
- [30] 王庆东. 循环悬浮式半干法烟气脱硫技术的试验和机理研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2002.  
WANG Qingdong. Experimental and theoretical study on circulating and suspension semi-dry flue gas desulfurization [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [31] 柳龙. 烧结烟气 NID 半干法脱硫试验研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2015.  
LIU Long. Experimental study of semi-dry NID for sintering flue gas [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2015.