

# SO<sub>3</sub> 采样技术改进及烟气处理设备 SO<sub>3</sub> 脱除能力测试

杨丁<sup>1</sup>, 陈永强<sup>2</sup>, 陈威祥<sup>2</sup>, 郑芳<sup>2</sup>, 林启超<sup>2</sup>

(1. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 210100; 2. 福建龙净环保股份有限公司, 福建 龙岩 364000)

**摘要:** 燃煤烟气中 SO<sub>3</sub> 由于其特有的化学性质, 一直是国内外燃煤电厂污染物测试的难点之一。参照国内应用广泛的 SO<sub>3</sub> 控制冷凝法, 自制了一套 SO<sub>3</sub> 采样系统, 在综合考虑烟气 SO<sub>3</sub> 采样过程中的各种影响因素后, 通过试验模拟, 确定了 SO<sub>3</sub> 控制冷凝法采样系统最佳蛇形管内径、圈径和圈数, 以及采样管、过滤器和循环水浴的伴热温度控制, 从而提高了 SO<sub>3</sub> 的捕集效率。利用该 SO<sub>3</sub> 采样系统对烟气进行采样, 测试燃煤锅炉烟气处理设备对 SO<sub>3</sub> 的脱除能力, 分析其影响因素及捕集机理。结果显示: SCR 脱硝催化剂对 SO<sub>2</sub> 具有一定的催化作用, 且随烟气温度的升高, SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub> 转化率升高; 对于 SO<sub>3</sub> 的脱除效率 (各设备进出口浓度对比), 干式除尘设备可达 80% 以上, 湿法脱硫设备为 35%~40%; 湿式电除尘器为 70%~75%。

**关键词:** 燃煤电厂; 烟气采样; SO<sub>3</sub>; 控制冷凝法; SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub> 转化率; 烟气处理设备; SO<sub>3</sub> 脱除能力

**中图分类号:** X701.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11930/j.issn.1004-9649.201706037

## 0 引言

燃煤锅炉 SCR 烟气脱硝加速了 SO<sub>3</sub> 的生成<sup>[1]</sup>, 而 SO<sub>3</sub> 又极易与烟气中的水蒸气结合形成 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 蒸汽<sup>[2]</sup>, 其在壁温低于酸露点的受热面上凝结, 造成酸露点腐蚀, 影响设备的安全稳定运行<sup>[3]</sup>; 同时, 未被脱除的 SO<sub>3</sub> 随烟气从烟囱排出, 导致蓝烟与“酸雨”产生, 影响人体健康<sup>[4]</sup>。因此, 烟气中 SO<sub>3</sub> 的准确测量与分析, 成为行业关注的重点。但由于燃煤烟气成分复杂, SO<sub>3</sub> 化学性质活泼, 且烟气中 SO<sub>3</sub> 浓度极低, 又没有标准物质可以溯源, 烟气中 SO<sub>3</sub> 检测一直是国内燃煤电站污染物测试的难点之一。

目前国内常用的 SO<sub>3</sub> 采样方法主要有异丙醇吸收法和控制冷凝法<sup>[5]</sup>。2 种方法的不足之处如下所述。

(1) 异丙醇吸收法。由于市场上销售的异丙醇溶液往往含有痕量的过氧化物质, 在高浓度的 SO<sub>2</sub> 环境条件下, 其可以将 SO<sub>2</sub> 部分氧化成 SO<sub>3</sub>, 影响测试结果; 虽然高温伴热采样避免了烟气 SO<sub>3</sub> 在采样管路中的冷凝吸附, 但高温烟气直接进入异丙醇溶液, 容易造成吸收液的挥发, 部分

SO<sub>3</sub> 来不及被冷凝吸收而直接逸出, 且 80% 的异丙醇溶液无法克服吸收液表面所具有的较高水蒸气分压, SO<sub>3</sub> 酸雾易悬浮于吸收液表面的气相中而无法进入吸收液内部, 造成 SO<sub>3</sub> 测试结果偏低。

(2) 控制冷凝法。采样管路的吸附对测试结果有影响, 如湿法脱硫和湿式电除尘器中水汽含量大, SO<sub>3</sub> 在采样管路中不能完全以气态形式存在, 即 SO<sub>3</sub> 极易溶于水中形成具有吸附性的 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 雾, 会在采样管中造成吸附损失; 蛇形收集管捕集 SO<sub>3</sub> 效率的影响因素多, 采样过程中 SO<sub>3</sub> 在蛇形收集管内不能被完全吸附; SO<sub>2</sub> 与 SO<sub>3</sub> 之间存在转化影响, 且 SO<sub>2</sub> 有可能在蛇形收集管中产生吸附等。

针对以上问题, 本文提出并推荐采用经过改进的控制冷凝法测定烟气中的 SO<sub>3</sub>, 即本文重新确定了采样管、过滤器和蛇形收集管的材质, 并选择合适的伴热温度、采样流量以及最佳蛇形收集管内径、圈径、圈数等, 以提高控制冷凝法测试结果的准确性。

## 1 控制冷凝法 SO<sub>3</sub> 采样系统改进

控制冷凝法采用的是物理分离吸附的原理, 在气相中, SO<sub>2</sub> 不与水蒸气反应, 二者可以共

收稿日期: 2017-06-05; 修回日期: 2017-09-29。

存, 而  $\text{SO}_3$  在一定的温度范围 (如  $85\sim 95\text{ }^\circ\text{C}$ , 该温度高于水的露点温度, 远低于酸的露点温度) 内极易与水蒸气反应, 生成  $\text{H}_2\text{SO}_4$  雾, 利用二者性质的不同, 通过循环水浴控制蛇形收集管温度恒定在一定的温度范围 ( $85\text{ }^\circ\text{C}$  左右) 内, 可以实现  $\text{SO}_2$  和  $\text{SO}_3$  的分离; 同时利用  $\text{H}_2\text{SO}_4$  雾可吸附于蛇形管内壁的特性<sup>[6]</sup>, 可以实现  $\text{SO}_3$  的收集。

经改进的控制冷凝法  $\text{SO}_3$  采样系统主要包括加热采样管、加热过滤器、蛇形收集管、循环水浴和抽气系统等 (见图 1)。采样管采用聚四氟乙烯材质, 过滤器和蛇形收集管采用石英玻璃材质, 耐酸、耐碱、耐高温。聚四氟乙烯采样管摩擦系数小, 对  $\text{SO}_3$  测试造成的吸附损失小; 石英玻璃过滤器内装粉尘过滤装置如玻璃纤维滤筒, 用于过滤粉尘。采样管和过滤器均采用高温伴热, 确保  $\text{SO}_3$  在采样管路中能够以气态  $\text{SO}_3$  的形式存在, 减少了采样管路中的吸附损失, 同时高温伴热可避免粉尘对  $\text{SO}_3$  测试的影响<sup>[5]</sup>; 采样管、过滤器与加热系统独立分开设置, 便于测试组装, 测试结束后可随时清洗或更换采样管和过滤器。循环水浴能够控制蛇形收集管恒定在一定的温度范围 (如  $85\text{ }^\circ\text{C}$  左右) 内<sup>[5]</sup>, 该温度下烟气中的水蒸气不会冷凝;  $\text{SO}_2$  不会与  $\text{O}_2$ 、水蒸气发生反应, 能够以气态形式存在, 不会被蛇形收集管吸附, 即  $\text{SO}_2$  对  $\text{SO}_3$  采样不产生干扰<sup>[7]</sup>; 同时, 该温度远低于  $\text{H}_2\text{SO}_4$  雾露点温度, 有利于  $\text{H}_2\text{SO}_4$  雾的吸附。蛇形收集管的内径不大于  $3\text{ mm}$ , 圈径控制在  $85\sim 90\text{ mm}$ , 圈数在 25 圈以上, 保证蛇形收集管具有足够长的收集距离和足够大的收集空间<sup>[5]</sup>; 同时, 为保证  $\text{SO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$  吸附完全, 采样流量不应太大, 应控制在  $5\sim 6\text{ L/min}$ , 确保  $\text{SO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$  在蛇形收集管内具有足够的停留时间, 以利于其吸附在管壁, 从而保证蛇形收集管捕集效

率达 90% 以上, 保证所采样品的准确性。

## 2 采样系统准确性验证

烟气中的  $\text{SO}_3$  主要由锅炉燃煤产生<sup>[8]</sup>, 少部分由烟气中的  $\text{SO}_2$  经 SCR 脱硝催化转化而来。前者可按式 (1)、(2) 进行估算<sup>[9-10]</sup>。

$$V_{\text{SO}_3} = 0.007 \times K_{\text{SO}_3} \times K_s \times \frac{S_{\text{c,ar}}}{V_{\text{dy}}} \times 100\% \quad (1)$$

$$C_{\text{SO}_3} = \frac{80}{22.4} \times V_{\text{SO}_3} \times 10^6 \quad (2)$$

式中:  $V_{\text{SO}_3}$  为烟气中的  $\text{SO}_3$  体积分数, %;  $K_{\text{SO}_3}$  为燃烧过程中  $\text{SO}_2$  转化为  $\text{SO}_3$  的份额 (根据煤中硫含量取  $0.5\%\sim 2.0\%$ , 流量低取上限, 流量高取下限);  $K_s$  为燃烧过程中煤的可燃硫因灰中碱金属氧化物等成分结合而转化为不可燃硫的修正系数 (一般取  $0.90\sim 0.95$ );  $S_{\text{c,ar}}$  为煤中可燃硫质量分数, %;  $S_{\text{c,ar}} = 0.95S_{\text{t,ar}}$ ;  $S_{\text{t,ar}}$  为煤全硫质量分数, %;  $V_{\text{dy}}$  为干烟气质量体积,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;  $C_{\text{SO}_3}$  为烟气中  $\text{SO}_3$  质量浓度,  $\text{mg}/\text{m}^3$  (文中与体积相关的数值均已换算至标准状态)。

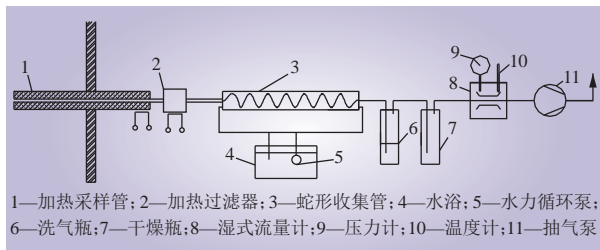
采用改进后的控制冷凝法  $\text{SO}_3$  采样系统在 SCR 脱硝装置 (以下简称为 SCR) 入口取样测试的  $\text{SO}_3$  浓度, 以及按式 (1) 和式 (2) 估算得到的  $\text{SO}_3$  结果如表 1 所示。从表 1 可知, 经改进的控制冷凝法采样系统采集到的  $\text{SO}_3$  实测值与计算值最大相对偏差仅为  $\pm 3.20\%$ , 可见该采样系统具有较高的准确性。

## 3 烟气处理设备 $\text{SO}_3$ 脱除能力测试与分析

采用改进后的控制冷凝法  $\text{SO}_3$  采样系统, 对燃煤电厂烟气处理设备  $\text{SO}_3$  脱除效率进行测试, 即对 SCR 脱硝设备进出口、干式除尘设备进出口、湿法脱硫装置进出口以及湿式电除尘器进出口  $\text{SO}_3$  浓度进行测试, 以获知这些设备对  $\text{SO}_3$  的脱除能力, 同时对测试数据进行分析。

### 3.1 SCR 脱硝设备对烟气 $\text{SO}_3$ 的影响

安徽某电厂 1 000 MW 机组 3 种工况不同温度下 SCR 脱硝装置 (以下简称 SCR) 进出口  $\text{SO}_3$  测试结果如表 2 所示。由表 2 可知, SCR 出口  $\text{SO}_3$  浓度比进口高, 且随烟气温度升高,  $\text{SO}_2/\text{SO}_3$  转



1—加热采样管; 2—加热过滤器; 3—蛇形收集管; 4—水浴; 5—水力循环泵; 6—洗气瓶; 7—干燥瓶; 8—湿式流量计; 9—压力计; 10—温度计; 11—抽气泵

图 1 烟气  $\text{SO}_3$  采样系统示意

Fig. 1 Flue gas  $\text{SO}_3$  sampling system

表 1 SO<sub>3</sub> 实测值与计算值Table 1 SO<sub>3</sub> measured value and calculated value

项目	江西某电厂	福建某电厂	广东某电厂
收到基全硫/%	0.92	0.52	0.80
低位发热量/(MJ·kg <sup>-1</sup> )	22.01	21.28	20.81
烟气温度/℃	346	297	312
烟尘质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	30 812.1	11 396.4	28 276.8
SO <sub>3</sub> 质量浓度计算值/(mg·m <sup>-3</sup> )	28.38	16.47	25.78
SO <sub>3</sub> 质量浓度实测值/(mg·m <sup>-3</sup> )	27.29	17.05	24.18
相对偏差/%	1.96	1.73	3.20

表 2 不同温度SCR进出口 SO<sub>3</sub> 测试结果Table 2 SCR import and export SO<sub>3</sub> test results at different temperatures

项目	工况 1	工况 2	工况 3	
SCR 进口	烟气温度/℃	343.2	316.3	295.8
	烟尘质量浓度/(g·m <sup>-3</sup> )	16.5	15.6	15.4
	SO <sub>2</sub> 质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	533	496	480
	SO <sub>3</sub> 质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	1.35	1.23	1.21
SCR 出口	烟气温度/℃	339.8	313.1	292.3
	烟尘质量浓度/(g·m <sup>-3</sup> )	16.5	15.6	15.4
	SO <sub>2</sub> 质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	9.63	7.95	6.65
	SO <sub>2</sub> /SO <sub>3</sub> 转化率/%	1.24	1.08	0.91

化率增加<sup>[11]</sup>。这主要是由于锅炉燃烧过程中，煤中的可燃性 S 燃烧生成 SO<sub>2</sub>，飞灰和 SCR 催化剂表面存在 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 等金属氧化物，这些金属氧化物对 SO<sub>2</sub> 转化为 SO<sub>3</sub> 具有一定的催化作用，在一定烟气温度范围内，烟气温度越高，催化剂的活性成分越多<sup>[12-13]</sup>，SO<sub>2</sub> 转化为 SO<sub>3</sub> (SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub>) 的转化率也就越高。

### 3.2 干式除尘设备对烟气中 SO<sub>3</sub> 的脱除

干式电除尘器和电袋除尘器进出口 SO<sub>3</sub> 测试结果如表 3 所示。由表 3 可知，干式电除尘器和电袋除尘器对 SO<sub>3</sub> 脱除效率较高，可达 80% 以上<sup>[14-15]</sup>。这主要是在烟气进入除尘设备后，SO<sub>3</sub> 基本上以气态 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 雾形式存在<sup>[16]</sup>，H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 雾冷凝并吸附在飞灰表面，随飞灰的脱除而脱除，SO<sub>3</sub> 的脱除效率取决于飞灰的浓度<sup>[17]</sup>、表面积、烟气温度和粉尘成分。

### 3.3 湿法脱硫装置对烟气中 SO<sub>3</sub> 的脱除

湿法脱硫装置进出口 SO<sub>3</sub> 测试结果如表 4 所

表 3 干式除尘设备对 SO<sub>3</sub> 脱除效率测试结果Table 3 Test results of SO<sub>3</sub> removal efficiency in dry type electrostatic precipitator

项目	干式电除尘器	电袋除尘器
除尘器进口	烟气温度/℃	128.5 131.4 135.8 132.3
	烟尘质量浓度/(g·m <sup>-3</sup> )	26.9 59.2 29.2 15.6
	SO <sub>3</sub> 质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	28.39 30.32 26.45 23.86
除尘器出口	烟气温度/℃	126.3 128.6 134.0 130.1
	烟尘质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	17.3 12.8 9.8 7.2
	SO <sub>3</sub> 质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	5.61 5.23 3.77 3.15
SO <sub>3</sub> 脱除效率/%	80.24 82.75 85.75 86.80	

表 4 湿法脱硫装置对 SO<sub>3</sub> 脱除效率测试结果Table 4 Test results of SO<sub>3</sub> removal efficiency in wet desulfurization device

项目	广东某电厂	陕西某电厂	山东某电厂	
脱硫塔进口	烟气温度/℃	125.2	131.0	128.4
	烟尘质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	19.8	24.3	15.4
	SO <sub>3</sub> 质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	3.16	3.17	4.28
	烟气温度/℃	48.5	50.4	51.1
脱硫塔出口	烟尘质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	11.2	12.5	9.2
	SO <sub>3</sub> 质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	1.95	2.06	2.59
SO <sub>3</sub> 脱除效率/%	38.29	35.02	39.49	

示。由表 4 可知，湿法脱硫装置对烟气中 SO<sub>3</sub> 的脱除效率为 35%~40%，脱除效率不是很高。其主要原因是：烟气进入湿法脱硫系统，脱硫塔内部水汽含量大，烟气温度迅速降低，烟气 SO<sub>3</sub> 在快速降温过程中来不及被石灰石-石膏浆液吸收而直接转化生成了亚微米级的 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 气溶胶颗粒<sup>[18-19]</sup>，且脱硫塔内粉尘浓度较低，没有足够的粉尘吸附 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 气溶胶，加之烟气在吸收塔的停留时间较短。

### 3.4 湿式电除尘器对烟气中 SO<sub>3</sub> 的脱除

湿式电除尘器进出口 SO<sub>3</sub> 测试结果如表 5 所示。由表 5 可知，湿式电除尘器对烟气中 SO<sub>3</sub> 的脱除效率为 70%~75%<sup>[20]</sup>。这主要是由于湿式电除尘器内部水汽含量较大，电场在放电过程中，因放电电极被水浸润后，电子较易溢出，同时水雾被放电电极尖端的强大电火花进一步击碎细化，使电场中存在大量的带电雾滴，大大增加了亚微米级粒子碰撞带电的几率<sup>[21]</sup>；亚微米级的粒子在荷电

表 5 湿式电除尘器对SO<sub>3</sub>脱除效率测试结果  
Table 5 Test results of SO<sub>3</sub> removal efficiency in wet type electrostatic precipitator

项目	河北某电厂	广东某电厂	山东某电厂	
湿式电除尘器进口	烟气温度/℃	45.1	48.3	47.5
	烟尘质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	12.5	10.8	14.6
	SO <sub>3</sub> 质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	1.66	1.45	2.34
湿式电除尘器出口	烟气温度/℃	44.9	46.1	45.6
	烟尘质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	2.1	1.9	2.2
	SO <sub>3</sub> 质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	0.43	0.43	0.62
SO <sub>3</sub> 脱除效率/%	74.10	70.34	73.50	

后,更易向收尘极运动,并随冲洗水排出而被脱除,而SO<sub>3</sub>在湿式电除尘器内部主要是以亚微米级的H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>雾形式存在,因而湿式电除尘器对SO<sub>3</sub>具有较好的脱除效果。

#### 4 结语

本文梳理国内应用最多的测试烟气中SO<sub>3</sub>方法——控制冷凝法,改进其关键点,采取诸多措施保证了SO<sub>3</sub>采样的准确性。应用改进后的控制冷凝法SO<sub>3</sub>采样系统开展实际测试,所采样品测试值与经验式计算结果比较,偏差较小。研究实现了SO<sub>3</sub>的精准采样与测量,但对于SO<sub>3</sub>酸雾的形成机理与规律因装置有限,无法涉及,SO<sub>3</sub>采样系统的优化还有很大的改进空间。

#### 参考文献:

- [1] 王宏亮,薛建明,许月阳,等.燃煤电站锅炉烟气中SO<sub>3</sub>的生成及控制[J].电力科技与环保,2014,30(5):17-20.  
WANG Hongliang, XUE Jianming, XU Yueyang, *et al.* Formation and control of SO<sub>3</sub> from coal-fired power plants[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2014, 30(5): 17-20.
- [2] 李彦,武彬,徐旭常.SO<sub>2</sub>、SO<sub>3</sub>和H<sub>2</sub>O对烟气露点温度影响的研究[J].环境科学学报,1997,17(1):126-130.  
LI Yan, WU Bin, XU Xuchang. Study on the influence of SO<sub>2</sub>、SO<sub>3</sub> and H<sub>2</sub>O on the temperature of flue gas[J]. Journal of Environmental Science, 1997, 17(1): 126-130.
- [3] 崔娟玲,郭昭胜.150 m高钢筋混凝土烟囱及烟道腐蚀检测及分析[J].中国电力,2015,48(5):7-11.  
CUI Juanling, GUO Zhaosheng. Inspection and analysis of the corrosion of 150-meter super high reinforced concrete chimney and flue[J]. Electric Power, 2015, 48(5): 7-11.
- [4] SRIVASTAVA R K, MILLER C A, ERICKSON C, *et al.* Emissions of sulfur trioxide from coal-fired power plants[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2004, 54(6): 750-762.
- [5] 肖雨亭,贾曼,徐莉,等.烟气中三氧化硫及硫酸雾滴分析方法[J].环境科技,2012,25(5):43-48.  
XIAO Yuting, JIA Man, XU Li, *et al.* The analytic method of sulfur trioxide and sulfuric acid mist in flue gas environmental science and technology[J]. Environmental Science and Technology, 2012, 25(5): 43-48.
- [6] RONL O, MATTHEW S D. Controlled condensation method for flue gas SO<sub>3</sub> measurement [EB/OL]. (2011-12-16)[2017-01-08]. <http://www.metl.doe.gov/publications/proceedings/98/98fg/oda.pdf>.
- [7] NIELSEN M T. On the relative importance of SO<sub>2</sub> oxidation to high dust SCR DeNO<sub>x</sub> units[C]//DOE/NETL Conference on Selective Catalytic Reduction (SCR) and Selective Non-Catalytic Reduction (SNCR) for NO<sub>x</sub> Control. Lyngby, 2003.
- [8] 魏宏鹤,程雪山,马彦斌,等.燃煤烟气中SO<sub>3</sub>的产生与转化及其抑制对策探讨[J].发电与空调,2012,33(2):1-4.  
WEI Hongge, CHENG Xueshan, MA Yanbin, *et al.* Some discussion about SO<sub>3</sub>'s generation, transformation and its inhibiting methods in coal-fired flue gas[J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2012, 33(2): 1-4.
- [9] 张建中.火电厂烟气脱硫脱硝项目中有关烟气特性计算方法若干问题的讨论[J].电力环境保护,2008,24(4):6-10.  
ZHANG Jianzhong. Discussion on problems of flue gas properties calculation methods in thermal power plants desulfurization and denitrification projects[J]. Electric Power Environmental Protection, 2008, 24(4): 6-10.
- [10] 张悠.烟气中SO<sub>3</sub>测试技术及其应用研究[D].杭州:浙江大学,2013.
- [11] 吴宁,宋蕾,李水清,等.SCR烟气脱硝过程中SO<sub>2</sub>和SO<sub>3</sub>的测量[J].煤炭转化,2006,29(2):84-87.  
WU Ning, SONG Qiang, LI Shuiqing, *et al.* Measurement of SO<sub>2</sub> and SO<sub>3</sub> in SCR flue gas denitrification[J]. Coal Conversion, 2006, 29(2): 84-87.
- [12] 朱崇兵,金保升,李峰,等.SO<sub>2</sub>氧化对SCR法烟气脱硝的影响[J].锅炉技术,2008,39(3):68-70.  
ZHU Chongbing, JIN Baosheng, LI Feng, *et al.* Effect of SO<sub>2</sub> oxidation on denitration of SCR flue gas[J]. Boiler Technology, 2008, 39(3): 68-70.

- 2008, 39(3): 68-70.
- [13] 马双忱, 金鑫, 孙云雪, 等. SCR 烟气脱硝过程硫酸氢铵的生成机理与控制[J]. 热力发电, 2010, 39(8): 12-17.
- MA Shuangchen, JIN Xin, SUN Yunxue, *et al.* The formation mechanism of ammonium bisulfate in SCR flue gas denitrification process and control thereof[J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(8): 12-17.
- [14] 胡斌, 刘勇, 任飞, 等. 低低温电除尘协同脱除细颗粒与 SO<sub>3</sub> 实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(16): 4319-4325.
- HU Bin, LIU Yong, REN Fei, *et al.* Experimental study on simultaneous control of fine particle and SO<sub>3</sub> by low-low temperature electrostatic precipitator[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(16): 4319-4325.
- [15] FU Wenling, ZHOU Hao, MORETTI A L, 等. 有效的 SO<sub>3</sub> 脱除技术-烟道喷吸收剂和安装湿式电除尘器[C]//第十六届二氧化硫、氮氧化物、汞、细颗粒物污染控制技术研讨会. 厦门, 2012.
- [16] 张中建. 燃煤烟气降温除尘过程中 SO<sub>3</sub> 浓度的浓淡分离现象及对酸露点温度影响的分析[J]. 锅炉技术, 2015, 46(3): 12-18.
- ZHANG Jianzhong. Dense-dilute separation phenomenon of SO<sub>3</sub> concentration during the coal-fired flue gas cooling and dedusting process and analysis on the influence of acid dew point temperature[J]. Boiler Technology, 2015, 46(3): 12-18.
- [17] ROBERT E. SO<sub>3</sub>'s impacts on plant O&M: Part I [EB/OL]. (2006-10-15)[2017-01-08]. <http://www.powermag.com/SO3s-impacts-on-plant-om-part-i/>.
- [18] 潘丹萍, 吴昊, 黄荣廷, 等. 石灰石-石膏法烟气脱硫过程中 SO<sub>3</sub> 酸雾脱除特性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(2): 311-316.
- PAN Danping, WU Hao, HUANG Rongting *et al.* Removal properties of sulfuric acid mist during limestone-gypsum flue gas desulfurization process[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2016, 46(2): 311-316.
- [19] ROBERT E. SO<sub>3</sub>'s impacts on plant O&M: Part II [EB/OL]. <http://www.powermag.com/SO3s-impacts-on-plant-om-part-ii/>, 2007-02-01.
- [20] 闫军. 湿式静电除雾器脱除烟气中酸雾的试验研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.
- [21] 陈招妹, 王剑波, 姚宇平, 等. 湿式电除尘器在燃煤电厂 WFGD 后的应用分析[C]// 第十五届中国电除尘学术会议论文集. 蚌埠, 2013.

#### 作者简介:

杨丁(1981—), 男, 博士研究生, 从事大气污染控制技术研究, E-mail: yblued@139.com;

陈永强(1984—), 男, 助理工程师, 从事大气污染控制技术研究, E-mail: chen Yongqiang128@163.com.

(责任编辑 刘明)

## Improvement of SO<sub>3</sub> Sampling Technology and SO<sub>3</sub> Removal Capability Testing of Flue Gas Treatment Equipment

YANG Ding<sup>1</sup>, CHEN Yongqiang<sup>2</sup>, CHEN Weixiang<sup>2</sup>, ZHENG Fang<sup>2</sup>, LIN Qichao<sup>2</sup>

(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 210100, China; 2. Fujian Longking Co. Ltd., Longyan 364000, China)

**Abstract:** Due to its unique chemical properties, SO<sub>3</sub> in coal-fired flue gas has been one of the difficult parts in pollutant testing in coal-fired power plants both at home and abroad. In this article, the SO<sub>3</sub> testing system is developed by utilizing the widely used control-condensation method and taking various factors into consideration during the sampling process. The optimal inner diameter, ring diameter and the number of rings of snake-shaped tube in SO<sub>3</sub> controlled condensation sampling system are determined through experimental simulation as well as the sampling tubes, the temperature control of filter and circulating water bath to improve the capture efficiency of SO<sub>3</sub>. This SO<sub>3</sub> sampling system has been used to test the removal capability of the flue gas treatment equipment in the coal-fired boiler. The influencing factors and the trapping mechanism on SO<sub>3</sub> by sampling the flue gas are also analyzed. It is showed that SCR catalyst had some catalytic effects on SO<sub>2</sub>, and the conversion rate of SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub> increases with higher flue gas temperature. As for the removal efficiency of SO<sub>3</sub>, based on the comparison results of the inlet and outlet concentration between each equipment, the dry dedusting equipment can reach more than 80%, while the wet desulphurization equipment is 35%~40% and the wet electrostatic precipitator is 70%~75%.

**Keywords:** coal-fired power plants; flue gas sampling; SO<sub>3</sub>; controlled condensation method; SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub> percent conversion; flue gas treatment equipment; SO<sub>3</sub> removal ability