



燃煤烟气 SO₃ 测试捕集效率试验研究

陈威祥^{1,3}, 郭俊^{1,3}, 叶兴联^{1,2}, 刘锡尧⁴, 陈永强³, 郑芳³, 龚国汉⁴

(1. 国家环境保护电力工业烟尘治理工程技术中心, 福建 龙岩 364000; 2. 东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 3. 福建龙净环保股份有限公司, 福建 龙岩 364000; 4. 龙岩市产品质量检验所, 福建 龙岩 364000)

摘 要: 燃煤烟气中的 SO₃ 浓度低、化学性质活泼, 一直是国内燃煤电厂污染物测试的难点。针对“控制冷凝法”测试 SO₃ 捕集效率低的问题, 依托自制的 SO₃ 校准发生装置进行试验研究。结果表明: 通过采用 D 型蛇形管+硼硅玻璃纤维滤膜过滤装置, 采样流量为 20 L/min 以及精准控制采样管、过滤器、蛇形管和滤膜过滤装置的伴热温度, 可以确保 SO₃ 捕集效率达到 90% 以上, 因而可保证烟气 SO₃ 的捕集效率和测试结果的准确性。改进后的方法已在模拟试验(低尘、含湿、不同 SO₃ 含量)中得到良好应用, 进而可用于燃煤电厂烟气 SO₃ 测量。

关键词: SO₃ 测试; 控制冷凝法; 捕集效率; 采样流量; 蛇形管; 滤膜过滤

中图分类号: TM621.9; X701 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11930/j.issn.1004-9649.201901088

0 引言

目前中国燃煤电厂普遍安装了 SCR 烟气脱硝装置, 所用催化剂加速了烟气中 SO₃ 的生成^[1]。而 SO₃ 易与水蒸气结合形成硫酸蒸汽, 使酸露点温度升高, 造成壁温低于酸露点的受热面腐蚀, 影响设备的安全稳定运行, 且 SO₃ 含量越多, 腐蚀越严重^[2-3]。另外, 未被脱除的 SO₃ 易导致“酸雨”, 直接影响人体健康^[4]。因此, 烟气中 SO₃ 越来越成为环境检测的重要参数之一。由于燃煤烟气成分复杂, SO₃ 化学性质活泼^[5], 测试过程中 SO₂ 有可能会被氧化成 SO₃, 以及烟气中含有的大量粉尘会降低测量的精度和准确度, 且其在烟气中浓度极低, 又没有标准物质可以溯源, 因此 SO₃ 一直是国内燃煤电厂污染物测试的难点之一。

目前国内外 SO₃ 的测试主要有异丙醇吸收法和控制冷凝法^[6-9]。其中控制冷凝法利用的是物理吸附^[10], 即利用温降使气态 SO₃ 冷凝成硫酸雾, 其依靠惯性附集在蛇形管内壁, 然后采用清洗液

清洗蛇形管并定容分析。GB/T21508—2008《燃煤烟气脱硫设备性能测试方法》和 DL/T998—2006《石灰石-石膏湿法烟气脱硫装置性能验收试验规范》对控制冷凝法测试 SO₃ 仅作为资料性附录, 并未规定蛇形管结构尺寸, 也就无法精准控制烟气 SO₃ 在蛇形管内的离心力大小, 其测试结果准确性得不到保证。一些机构和单位根据标准自制了蛇形管, 也做了一些研究, 但采样流量普遍低于 10 L/min, 未对更高的采样流量进行研究, 烟气 SO₃ 在蛇形管内的离心力和 SO₃ 捕集效率能否达到最佳得不到控制。根据文献 [7, 11] 的研究, 目前 SO₃ 的捕集效率最高约为 70%, 若测试参数控制不当, 甚至只有 40%, 因此提高 SO₃ 采样时的捕集效率问题亟待研究。

鉴于此, 本文采用控制冷凝法, 依托自制的 SO₃ 校准发生装置^[12], 选择较高的采样流量、不同结构尺寸的蛇形管和滤膜, 对 SO₃ 捕集效率进行了试验研究。

1 试验装置及原理

试验装置主要由 SO₃ 发生装置和采样系统 2 个部分组成, 其中 SO₃ 发生装置包括 SO₂ 标气、调节阀、流量计、空气净化器、混合罐、反应炉等, SO₃ 采样系统包括蛇形管(一级捕集器)、水浴、滤

收稿日期: 2019-01-23; **修回日期:** 2019-02-15。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(低成本超低排放技术与高端制造装备, 2016YFC0203703); 福建省质量技术监督局科技项目资助(烟气中 SO₃ 的采样和测定方法研究, FJQI2017041)。

膜过滤装置（二级捕集器）、伴热采样管^[13]、酸回收瓶、冷凝瓶、干燥瓶、流量计、压力表和抽气泵等（见图 1）。

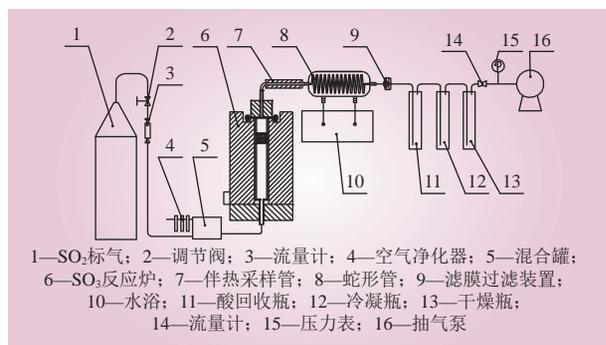


图 1 烟气SO₃发生与采样装置

Fig. 1 Device for SO₃ production and sampling

SO₃ 取样原理是在一定采样流量的作用下，SO₂ 和洁净空气混合后进入反应炉，在高钒系催化剂的催化作用下生成 SO₃（以下将这一过程简称为催化），生成的 SO₃ 经过伴热采样管后进入蛇形管和滤膜过滤装置，由于蛇形管产生的离心力和水浴的冷凝作用，将 SO₃/H₂SO₄ 酸雾吸附在蛇形管内壁上，从蛇形管逃逸的 SO₃/H₂SO₄ 酸雾通过滤膜过滤装置捕集，再对蛇形管和滤膜用去离子水清洗，分别定容至 100 mL，分析清洗液中 SO₄²⁻ 浓度，并按式（1）~（3）计算 SO₃ 浓度和捕集效率。试验时反应炉的温度为 480~520 °C，水浴温度为 75 °C，采样管伴热温度为 250 °C^[14]，滤膜过滤装置伴热温度为 85 °C。

$$C_1 = \frac{M_1}{M_2} \times C_s \times \frac{q_1}{q_2} \times \eta_c \quad (1)$$

式中：C₁为理论 SO₃ 质量浓度，mg/m³；M₁为 SO₃ 的摩尔质量，g/mol；M₂为 SO₂ 的摩尔质量，g/mol；C_s为 SO₂ 标气质量浓度，mg/m³；q₁为 SO₂ 标气流量，L/min；q₂为采样流量，L/min；η_c为反应炉催化效率，%。

$$C_2 = \frac{m}{V} \quad (2)$$

式中：C₂为实测 SO₃ 质量浓度，mg/m³；m为捕集到的 SO₃ 质量，mg；V为采样体积，m³。

$$\eta = \frac{C_2}{C_1} \times 100\% \quad (3)$$

式中：η为 SO₃ 捕集效率，%。

需要指出的是，在试验前应确保反应炉内的

催化剂完全被激活，催化效率成一恒定值。试验时，采用 D08-1F 转子流量计，调节 SO₂ 标准气体（质量浓度为 2 869 mg/m³）的流量为 0.28 L/min，将其与不同体积的洁净空气混合成不同浓度的 SO₂ 气体后进入反应炉，在反应炉进出口采用已标定和调零的 NGA2000 烟气分析仪测试 SO₂ 浓度，计算出催化效率（进出口 SO₂ 质量浓度差/进口 SO₂ 质量浓度）。不同 SO₂ 浓度时催化效率试验结果如表 1 所示。

表 1 SCR 催化剂对不同浓度 SO₂ 的催化效率

Table 1 Catalytic efficiency of SCR with respect to different SO₂ concentrations

进口SO ₂ 质量浓度/(mg·m ⁻³)	33.5	40.2	50.3	67.0	100.5
出口SO ₂ 质量浓度/(mg·m ⁻³)	20.9	24.6	30.6	41.3	60.4
催化效率/%	37.6	38.8	39.1	38.4	39.9

从表 1 可知：反应炉进口 SO₂ 质量浓度为 33.5~100.5 mg/m³ 时，催化剂的催化效率为 37.6%~39.9%，平均催化效率为 38.8%，相对标准偏差为 2.20%。

与此同时，需选择合适的分析方法^[15-17]测试清洗液中 SO₄²⁻ 浓度。分析方法主要有铬酸钡分光光度法、钼试剂滴定法、钼试剂分光光度法和离子色谱法等，本文选用较为常用的铬酸钡分光光度法。为确定铬酸钡分光光度法的准确性和适用性，对其进行加标盲样试验，当样液 SO₄²⁻ 质量浓度为 8.16~183.54 mg/L 时，加标回收率为 98.63%~102.89%，相对标准偏差为 1.75%，符合相关规定^[18]。

2 试验结果及分析

2.1 采样流量对 SO₃ 捕集效率的影响

采样流量的大小会影响烟气在蛇形管内的停留时间以及离心力的大小，一般来说，停留时间长、离心力大有利于 SO₃ 捕集。因此，选择不同的采样流量对 D 型蛇形管（见图 2）在 SO₃ 校准发生装置上进行试验，研究分析采样流量对 SO₃ 捕集效率的影响。D 型蛇形管的圈径为 90 mm^[19]，内径为 5.5 mm，螺距为 15 mm，圈数为 22 圈，展开长度约 6.2 m。当采样流量为 10~25 L/min 时，D 型蛇形管对 SO₃ 捕集效率试验结果如表 2 所示，采样流量与 SO₃ 捕集效率关系如图 3 所示。



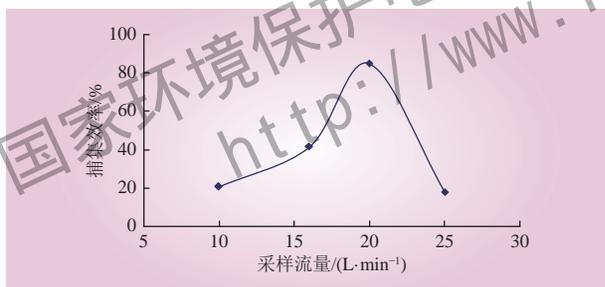
图 2 D 型蛇形管

Fig. 2 Picture of D-type condenser tube

表 2 采样流量对 D 型蛇形管捕集 SO₃ 效率的影响Table 2 The effect of sampling flow on the SO₃ to collection efficiency of D-type condenser

项目	采样流量/(L·min ⁻¹)			
	10	16	20	25
理论SO ₂ 质量浓度/(mg·m ⁻³)	160.8	104.4	85.5	68.1
催化效率/%	38.8	38.8	38.8	38.8
理论SO ₃ 质量浓度/(mg·m ⁻³)	78.0	50.6	41.5	33.0
蛇形管捕集SO ₃ 质量浓度/(mg·m ⁻³)	16.1	21.0	35.2	5.9
蛇形管捕集效率/%	20.7	41.5	84.8	17.8

注：（1）SO₂标气质量浓度为2 869 mg/m³，SO₂标气流量为0.28 L/min；（2）理论SO₂质量浓度是通过SO₂标气浓度、标气流量和采样流量计算得到的反应炉进口SO₂浓度；（3）理论SO₃质量浓度是通过理论SO₂浓度和催化效率计算得到的反应炉出口SO₃浓度。下同。

图 3 采样流量与 SO₃ 捕集效率关系Fig. 3 Relationship between SO₃ collection efficiency and sampling flow volume

由表 2 可知：当采样流量为 10 L/min、16 L/min、20 L/min、25 L/min 时，D 型蛇形管对 SO₃ 捕集效率分别为 20.7%、41.5%、84.8%、17.8%，即采样流量为 20 L/min 时，捕集效率趋于最高值。分析这一结果的原因为：当采样流量不大于 20 L/min 时，随着采样流量的增加，烟气在蛇形管内的离心力越来越大，吸附效果也越来越好，SO₃ 捕集效率呈坡度上升；当采样流量大于 20 L/min 时，烟气进入蛇形管内的离心力继续增大，烟气流速也继续提高，烟气在蛇形管内的停留时间变短，

部分烟气中的硫酸酸雾来不及吸附在蛇形管内壁而直接逃逸；同时，在大烟气离心力的作用下，即使是已吸附在蛇形管内壁上的硫酸酸雾，也容易被撞击成小颗粒，小颗粒更容易随烟气流逃逸，从而使烟气 SO₃ 捕集效率呈直线下降。因此，采用控制冷凝法测试 SO₃，应选择最佳的采样流量，否则将导致测试结果偏低。

2.2 蛇形管类型对 SO₃ 捕集效率的影响

蛇形管的结构尺寸同样影响着烟气 SO₃ 在蛇形管内的离心力大小和停留时间长短。为研究蛇形管类型对 SO₃ 捕集效率的影响，选择 D 型和 F 型蛇形管进行试验。F 型蛇形管如图 4 所示，其圈径为 35 mm，内径为 3 mm，螺距为 15 mm，圈数为 29 圈，展开长度约 3.2 m。当采样流量为 20 L/min 时，D 型和 F 型蛇形管对 SO₃ 捕集效率如表 3 所示。



图 4 F 型蛇形管

Fig. 4 Picture of F-type condenser tube

表 3 蛇形管类型对 SO₃ 捕集效率的影响Table 3 The effect of condenser tube type on SO₃ collection efficiency

项目	蛇形管类型	
	D	F
理论SO ₂ 质量浓度/(mg·m ⁻³)	85.5	85.5
催化效率/%	38.8	38.8
理论SO ₃ 质量浓度/(mg·m ⁻³)	41.5	41.5
蛇形管捕集SO ₃ 质量浓度/(mg·m ⁻³)	35.2	23.1
蛇形管捕集效率/%	84.8	55.7

由表 3 可知：当采样流量为 20 L/min 时，D 型和 F 型蛇形管对 SO₃ 捕集效率分别为 84.4%、55.7%，D 型蛇形管对 SO₃ 捕集效率要比 F 型高出 28.7 个百分点。分析其原因，顺着烟气的流动方向，硫酸酸雾在蛇形管内壁吸附，其吸附的浓度逐渐降低。试验中，D 型蛇形管相较 F 型蛇形管的内径大，圈径大，展开长度长，在相同的采样流量下，虽然 F 型蛇形管内的烟气离心力较大，但因其展开长度比 D 型蛇形管短 3 m，不利于吸收。因此，采样过程中，在抽气系统能够克服采样系统阻力

的前提下,应尽量加长蛇形管的展开长度,蛇形管长度越长,越有利于硫酸酸雾的吸附。

2.3 滤膜对 SO₃ 捕集效率的影响

如前所述,经过蛇形管吸附后还有部分硫酸酸雾逃逸,造成 SO₃ 浓度测试结果偏低。由于硫酸酸雾呈颗粒状,所以本次研究在蛇形管后端增加滤膜过滤装置,测试增加滤膜二级捕集器后烟气 SO₃ 的总捕集效率。滤膜宜采用不易与酸性物质产生化学反应的材质,如硼硅玻璃纤维膜^[20];两级捕集器之间连接管可不伴热,但不宜过长,测试结束后应与蛇形管一起清洗;二级捕集器应进行伴热,伴热温度应低于酸露点温度。滤膜对 SO₃ 的捕集效率试验结果如表 4 所示,根据表 2 和表 4,对 SO₃ 捕集效率趋势进行拟合,结果如图 5 所示。

表 4 滤膜对 SO₃ 捕集效率的影响
Table 4 The effect of filter membrane on SO₃ collection efficiency

项目	采样流量/(L·min ⁻¹)			
	10	16	20	25
理论 SO ₃ 质量浓度/(mg·m ⁻³)	78.0	50.6	41.5	33.0
滤膜捕集 SO ₃ 质量浓度/(mg·m ⁻³)	19.5	12.0	5.6	1.1
滤膜捕集效率/%	25.0	23.7	13.5	3.3

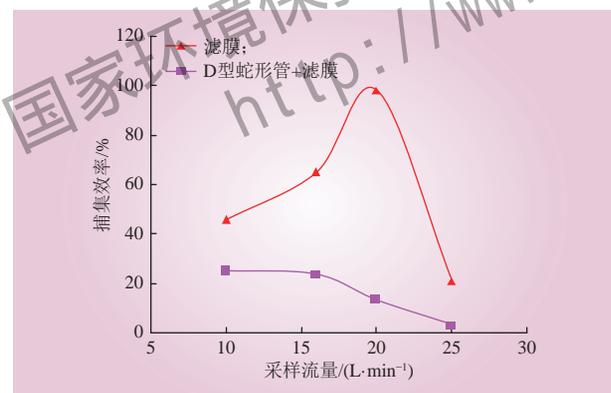


图 5 滤膜、D 型蛇形管+滤膜 SO₃ 捕集效率

Fig. 5 The SO₃ collection efficiency with filter membrane or filter membrane+D type condenser

由图 5 可知:随采样流量的增加,滤膜对 SO₃ 的捕集效率逐渐减小,与蛇形管捕集效率趋势一致,也是先增加后降低;当采样流量为 20 L/min 时,D 型蛇形管与滤膜对 SO₃ 总捕集效率趋于最高值,为 98.3%。

滤膜对颗粒状的硫酸雾以过滤的方式进行捕

集,当采样流量越低时,滤膜过滤风速越低,烟气 SO₃ 在滤膜上停留的时间越长,捕集效率则越好。当采样流量大于 15 L/min 时,随采样流量的增加,滤膜对 SO₃ 的捕集效率降低。当采样流量达 25 L/min 时,蛇形管和滤膜对 SO₃ 的捕集效率均降至较低水平,即受烟气在蛇形管内离心力大的影响,蛇形管内的硫酸雾被撞击成小颗粒状,其粒径达亚微米级^[21],甚至纳米级,使滤膜对硫酸雾难以捕集。

综合分析采样流量、蛇形管和滤膜对 SO₃ 捕集效率的影响,对于烟气中的 SO₃,推荐采用 D 型蛇形管(圈径为 90 mm、内径为 5.5 mm、螺距为 15 mm、圈数为 22 圈以上)与滤膜过滤装置相结合的采样方式;采样流量控制在 20 L/min 左右,即可确保 SO₃ 捕集效率达 90% 以上。

3 实际工况模拟试验

为验证所研究的采样测试方法对现场测试是否适用,结合标准粉尘发生装置^[22]进行了测试。当标准粉尘发生装置的烟气温度为 90 ℃,烟气含湿量为 5%,颗粒物质量浓度为 13.8 mg/m³,风机全开,通入质量浓度为 228.57 g/m³ 的高浓度 SO₂ 标准气体,调节 SO₂ 标气出气流量至 0.35 L/min,稳定一段时间后,采用 NGA2000 型烟气分析仪测试 SO₂ 浓度并计算催化效率和理论 SO₃ 浓度,之后采用 D 型蛇形管和 F 型蛇形管以及滤膜过滤装置对标准粉尘发生装置 SO₃ 进行了试验,试验结果如表 5、6 所示。

表 5 催化效率试验结果
Table 5 The test result of catalytic efficiency

项目	第1次			第2次		
理论 SO ₂ 质量浓度/(mg·m ⁻³)	11.2			9.4		
实测 SO ₂ 质量浓度/(mg·m ⁻³)	7.2	6.8	6.7	5.4	6.1	5.9
	6.9			5.8		
催化效率/%	38.8			38.6		
烟气流量/(m ³ ·h ⁻¹)	429			509		

注:SO₂标气质量浓度为228.57 g/m³,SO₂标气流量0.35 L/min。

从表 5 可知:2 次不同时间段试验,烟气 SO₃ 发生装置的催化效率分别为 38.8% 和 38.6%,烟气 SO₃ 发生装置的催化效率基本稳定。

表 6 烟气 SO₃ 试验结果Table 6 The test result of SO₃ examination in flue gas

项目	采样流量/(L·min ⁻¹)			
	20		10	
蛇形管类型	D	F	D	F
烟道中理论SO ₂ 质量浓度/(mg·m ⁻³)	11.2	11.2	9.4	9.4
催化效率/%	38.8	38.8	38.6	38.6
标干烟气流量/(m ³ ·h ⁻¹)	429	429	509	509
烟道中理论SO ₃ 质量浓度/(mg·m ⁻³)	5.44	5.44	4.55	4.55
蛇形管捕集SO ₃ 质量浓度/(mg·m ⁻³)	3.98	3.22	2.19	2.06
滤膜捕集SO ₃ 质量浓度/(mg·m ⁻³)	0.93	1.53	1.12	1.16
烟道中实测SO ₃ 质量浓度/(mg·m ⁻³)	4.91	4.75	3.31	3.22
蛇形管捕集效率/%	73.21	59.21	48.13	45.13
滤膜捕集效率/%	17.13	28.07	24.66	25.50
总捕集效率/%	90.35	87.28	72.79	70.63

注：SO₂标气质量浓度为228.57 g/m³，SO₂标气流量0.35 L/min。

从表 6 可知：采样流量为 20 L/min 时，D、F 型蛇形管和滤膜过滤装置对 SO₃ 的总捕集效率分别为 90.35%、87.28%，采样流量为 10 L/min 时，D、F 型蛇形管和滤膜过滤装置对 SO₃ 的总捕集效率分别为 72.79%、70.63%。同样的采样流量，D 型蛇形管比 F 型蛇形管的捕集效率也略高，且采样流量为 20 L/min 时，D 型蛇形管和滤膜过滤装置对 SO₃ 的总捕集效率高于 90%。与 SO₃ 校准发生装置研究结果给出的 SO₃ 总捕集效率为 98.3% 相比，工况模拟试验时增加了粉尘和水蒸气，其对烟气 SO₃ 捕集效率测试有一定的影响，因而捕集效率略低，但较接近，说明该 SO₃ 采样测试方法可满足现场测试要求。

4 结语

本文研究结果表明，燃煤烟气 SO₃ 测试采用控制冷凝法及本文给出的试验条件，即采用 D 型蛇形管+硼硅玻璃纤维滤膜过滤装置，采样流量为 20 L/min，采样管伴热温度为 250 ℃，水浴温度为 75 ℃，滤膜过滤装置伴热温度低于酸露点温度，SO₃ 捕集效率可达 90% 以上。本文研究成果为烟气 SO₃ 测试提供了可供借鉴的成功案例，所采用的方法可为烟气 SO₃ 治理等相关研究提供较为准确的基础数据。

参考文献：

- [1] 王宏亮, 薛建明, 许月阳, 等. 燃煤电站锅炉烟气中 SO₃ 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 SO₃ 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. SO₂、SO₃ 和 H₂O 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. Effect of SO₂, SO₃ and H₂O on dew point of flue gas[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 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] 吴宁, 宋嵩, 李水清, 等. SCR 烟气脱硝过程中 SO₂ 和 SO₃ 的测量 [J]. 煤炭转化, 2006, 29(2): 84-87.
WU Ning, SONG Qiang, LI Shuiqing, *et al.* Measurement of SO₂ and SO₃ in SCR flue gas denitrification[J]. Coal Conversion, 2006, 29(2): 84-87.
- [6] EPA. Determination of sulfuric acid mist and sulfur dioxide emissions from stationary sources: EPA-Method 8-2017[S]. 2017.
- [7] 肖雨亭, 贾曼, 徐莉, 等. 烟气中三氧化硫及硫酸雾滴的分析方法 [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[J]. Environmental Science and Technology, 2012, 25(5): 43-48.
- [8] 杨丁, 陈永强, 陈威祥, 等. SO₃ 采样技术改进及烟气处理设备 SO₃ 脱除能力测试 [J]. 中国电力, 2018, 51(7): 157-161.
YANG Ding, CHEN Yongqiang, CHEN Weixiang, *et al.* Improvement of SO₃ sampling technology and SO₃ removal capability testing of flue gas treatment equipment[J]. Electric Power, 2018, 51(7): 157-161.
- [9] 陈永强, 陈威祥, 郑芳, 等. 燃煤烟气 SO₃ 采样分析与应用研究 [C]// 第 17 届中国电除尘学术会议论文集. 合肥, 2017: 652-655.
- [10] RONL O, MATTHEW S D. Controlled condensation method for flue gas SO₃ measurement [EB/OL]. (2011-12-16)[2017-01-08]. <http://www.metl.doe.gov/publications/proceedings/98/98fg/oda.pdf>.
- [11] 张悠. 烟气中 SO₃ 测试技术及其应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学,

- 2013.
- [12] 杨丁, 陈威祥, 郑芳, 等. 一种三氧化硫采样测试系统的校验方法和装置: 20141 0401789.1 [P]. 2014-08-14.
- [13] 陈威祥, 杨丁, 陈永强, 等. 一种烟气三氧化硫采样装置: 201420579623.4[P]. 2014-10-08.
- [14] WILLIAM E F, PETER M W, JOHN P G, *et al.* Identification of (and responses to) potential effects of SCR and wet scrubbers on submicron particulate emissions and plume characteristics[R]. Alabama: Environmental Protection Agency, 2004: 1-81.
- [15] ISO. Air quality; Determination of mass concentration of sulphur dioxide in ambient air; Thorin spectrophotometric method: ISO 4221-1980[S]. 1980.
- [16] ISO. Stationary source emissions —Determination of the mass concentration of sulphur dioxide —Hydrogen peroxide/barium perchlorate/Thorin method: ISO 7934-1989[S]. 1989.
- [17] BS. Stationary source emissions —Section 4.1 Method for the determination of the mass concentration of sulphur dioxide: Hydrogen peroxide/barium perchlorate/Thorin method: BS 6069-4.1-1990[S]. 1990.
- [18] 国家环境保护总局. 水质 硫酸盐的测定 铬酸钡分光光度法 (试行): HJ/T342-2007[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [19] MADDALONE R, GAMER N. Process measurement procedures H₂SO₄ emissions[R]. Washington: Environmental Protection Agency, 1979: 1-31.
- [20] 罗毅, 陈威祥. 高湿低温环境下低浓度颗粒物采集滤膜试验研究 [J]. 中国电力, 2018, 51(8): 180-184.
LUO Yi, CHEN Weixiang. Experimental study on sampling filter membrane for low concentration particulate matter under high-humidity low-temperature environment[J]. Electric Power, 2018, 51(8): 180-184.
- [21] YANG Ding, ZHENG Fang. Detection technique of SO₃ content in coal-fired flue gas and accuracy analysis[C]//The 8th International Symposium on Coal Combustion.Beijing, 2015: 563-566.
- [22] 郭俊, 杨丁, 叶兴联, 等. 用于标定低浓度颗粒物测试方法准确性的烟气发生系统: 201721869892.4 [P]. 2017-12-27.

作者简介:

陈威祥 (1978—), 男, 工程师, 从事火电厂环保监测方面的研究, E-mail: 13859531361@139.com;

叶兴联 (1984—), 男, 博士, 工程师, 从事烟气污染防治技术研究, E-mail: yexinglian1228@163.com.

(责任编辑 刘明)

Experimental Study of the SO₃ Detection and Collection Efficiency in Coal-fired Flue Gas

CHEN Weixiang^{1,3}, GUO Jun^{1,3}, YE Xinglian^{1,2}, LIU Xiyao⁴, CHEN Yongqiang³, ZHENG Fang³, GONG Guohan⁴

(1. State Environmental Protection Engineering and Technology Center for Power Industrial Dust Control, Longyan 364000, China; 2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. Fujian Longking Co., Ltd., Longyan 364000, China; 4. Longyan Institute of Quality Inspection for Products, Longyan 364000, China)

Abstract: Because of the low concentration and active chemical properties, it has always been difficult to detect SO₃ in the coal burning flue gas for pollutant inspection domestically and abroad. Aiming at the problem of the low collection efficiency of SO₃ detection by control condensation method, the experiment was conducted based on the homegrown SO₃ calibration system. Study results show that: the collection efficiency can be effectively improved to over 90% through the application of the D-type condenser and filter membrane filter device with borosilicate glass fiber membrane, if the optimal sampling flow rate was kept at 20 L/min, and the heating temperature of sample tube, condenser pipe and filter was controlled precisely. Hence both the collection efficiency of SO₃ detection and the accuracy of test result are guaranteed. The enhanced control condensation method has been widely used in computer simulations under the conditions of low dust content with certain moisture and various concentrations of SO₃, and consequently can be implemented to examine the SO₃ concentration in fume for the entire coal-fired power industry.

This work is supported by National Key R&D Program (Low Cost and Ultralow Emission Technology and High-end Manufacturing Equipment, No.2016YFC0203703); Fujian Province, Bureau of quality and Technology Supervision Research Program (Study on the Collection and Test of SO₃ in Fume, No.FJQI2017041).

Keywords: SO₃ test; control condensation; capture efficiency; sampling flow; snake pipe; membrane filter