

燃煤烟气中 SO₃ 浓度测试方法的准确性研究

杨 丁^{1,2} 郑 芳² 叶兴联^{1,2} 苏寅彪² 郭 俊^{1,2} 余艾冰³

1. 国家环境保护电力工业烟尘治理工程技术中心
2. 福建龙净环保股份有限公司
3. 澳大利亚新南威尔士大学

摘 要 采用控制冷凝法对燃煤烟气中的 SO₃ 进行捕集, 研制 SO₃ 采样系统, 并搭建校验装置, 分析该测试技术的影响因素, 分别从清洗液中 SO₄²⁻ 浓度分析方法的准确性、不同尺寸的冷凝管、采样枪伴热温度、采样流量对测试准确性的影响以及高浓度 SO₂ 对测试的干扰进行一系列的验证试验。

关键词 控制冷凝法 SO₃ 采样系统 影响因素 准确性

0 引言

燃煤烟气中 SO₃ 的浓度虽然较低, 但由于其化学性质活泼, 易与水蒸气结合形成酸雾^[1,2]。当设备壁温低于酸露点时, 酸雾则凝结造成腐蚀, 当 SO₃ 浓度越大, 则酸露点温度越高, 腐蚀范围越广^[3]; 在 SCR 脱硝后, SO₃ 易与逃逸氨反应, 生成硫酸氢氨, 堵塞下游设备, 影响设备安全稳定运行^[4-6]; 由于目前大部分电厂以湿式电除尘器作为终端治理设备, 排放烟气的湿度增大, 当烟气中 SO₃ 浓度达到 10ppm 以上, 则烟囱出口易出现蓝烟现象^[7-9]。所以控制 SO₃ 排放已迫在眉睫, 对烟气中的 SO₃ 浓度进行准确的测试则具有重要意义。

现阶段国内外 SO₃ 测试方法主要有仪器测试法和传统采样法。仪器测试法利用傅立叶红外分析仪, 采用塞曼效应背景校正原子吸收光谱原理, 此法测试较为便捷但受烟气成分影响较大, 精度较低, 且测试技术还不够成熟^[9], 无法满足 WFGD 和 WESP 进出口 SO₃ 低浓度测试的要求。传统采样方法主要有化学吸收和物理吸附法, 即异丙醇吸收法和控制冷凝法^[10]。异丙醇吸收法利用 80% 的异丙醇抑制吸收液对 SO₂ 的吸收^[11], 但由于异丙醇易挥发, 采样过程中烟温较高, 使吸收液温度升高, 异丙醇挥发量增大, 带出部分 SO₃ (酸雾), 导致测试结果偏低, 而剩下的吸收液中水含量增大, 部分 SO₂ 溶于吸收液中, 使测试结果偏高, 且 SO₂ 浓度越高误差越大。而控制冷凝法利用物理吸附原理^[11,12], 受 SO₂ 和 NO_x 的影响较小, 应用范围较为广泛, 但控制冷凝法测试的准确性及其影响因素还未知, 且目前没有 SO₃ 标气, 对测试准确性的校准则显得更有难度。

1 控制冷凝法原理

参考 GB/T 21508—2008^[13]、EPA 8A^[14,15]、JIS K 0103—2005^[16] 及相关文献, 控制冷凝法主要利用颗粒离心运动原理, 在一定采样流量的作用下, 烟气依次经过带伴热的采样枪和石英过滤器, 后进入水浴中的冷凝管, 烟气中的 SO₃ 冷凝成酸雾颗粒, 控制酸雾在冷凝管内做离心运动并吸附在冷凝管内壁, 用去离子水或 80% 的异丙醇清洗冷凝管, 分析清洗液中 SO₄²⁻ 的浓度, 最后计算出烟气中 SO₃ 的浓度。

控制冷凝法的采样系统主要由三部分组成, 即带伴热和过滤装置的采样枪、冷凝管和水浴装置以及烟气采样仪, 如图 1 所示^[10,11]。其中冷凝管对 SO₃ 的捕集效率是测试准确性的关键, 而冷凝管的内径、圈径以及螺距是影响捕集效率的主要因素。SO₃ 在冷凝管入口或前端形成酸雾, 受离心力、阻力等综合作用, 酸雾在冷凝管内圆周或离心运动, 最后大部分附着在冷凝管内壁,

但由于二次撞击，酸雾可能破碎并被带出冷凝管，导致捕集效率降低。为提高冷凝管的捕集效率，应增大酸雾的粒径，设计冷凝管的内径、圈径以及螺距在合适的范围内，控制冷凝管内烟气的流速，减少二次撞击和酸雾携带逃逸的情况。同时为防止 SO₃ 腐蚀采样装置，影响测试的准确性，所有与烟气中 SO₃ 接触的部位均采用玻璃或石英材质；为防止 SO₃ 冷凝附着在采样管路，对采样枪进行伴热处理，且伴热温度应控制在酸露点以上；为保证烟气中 SO₃ 能因离心力被吸附在冷凝管内壁，SO₃ 应以雾滴的形式存在，同时应避免烟气温度过低导致烟气中的水汽冷凝，则水浴温度需高于水的露点温度，同时低于硫酸酸雾的露点温度。

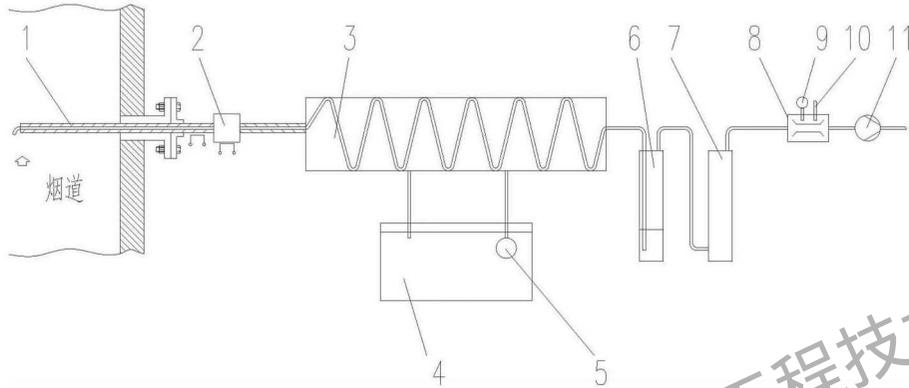


图1 SO₃ 采样系统示意图

1—伴热采样枪 2—伴热过滤器 3—控制冷凝管 4—水浴装置 5—水力循环泵 6—H₂O₂ 吸收瓶 7—干燥瓶 8—流量计 9—温度计 10—压力计 11—抽气泵

2 校验装置

2.1 校验装置原理

为校验 SO₃ 测试方法的准确性，在实验室内搭建了 SO₃ 测试校验系统，主要包括 SO₂ 标气、质量流量计、SO₃ 发生装置、蒸汽发生装置、采样枪、冷凝管、水浴装置、干燥瓶和烟气采样仪等，校验时各装置的连接如图 2 所示。试验原理是经过配气后得到的一定浓度的 SO₂ 气体经过高矾系催化剂，反应生成 SO₃ 气体，用 NGA 2000 测试 SO₃ 发生装置后 SO₂ 的浓度，计算生成的 SO₃ 理论值，与冷凝管捕集到的 SO₃ 量进行对比，计算捕集效率。通过试验不同尺寸的冷凝管、采样枪伴热温度、采样流量以及 SO₃ 浓度等情况下冷凝管的捕集效率，研究影响冷凝管捕集效率的因素，提高测试的准确性。

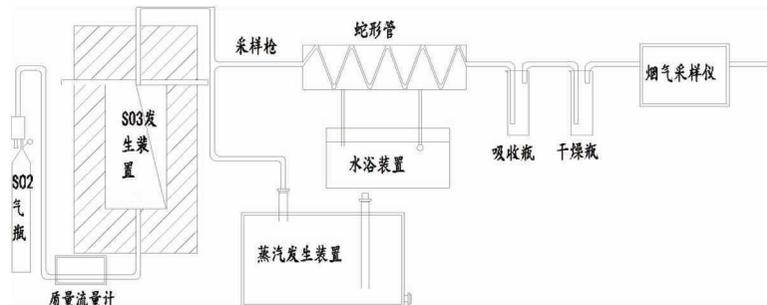


图2 SO₃ 采样系统校验装置示意图

2.2 校验前准备工作

为保证校验过程的严密性，试验前对高矾催化剂进行吹扫、激活处理，确保 SO₃ 发生装置

进出口硫元素质量相等；对试验用到的质量流量计、ZB1 转子流量计、DELIXI 累计流量计以及采样仪等进行校准，保证试验时 SO₂ 浓度、采样流量的准确性；对 NGA 2000 进行调零和校准，准确检测发生装置进出口 SO₂ 浓度，以保证生成的 SO₃ 理论值的准确性；对检测清洗液中 SO₄²⁻ 浓度的分析方法进行试验，选择合适的实验室分析方法，以确保冷凝管捕集到的 SO₃ 量的准确性。

清洗液中 SO₄²⁻ 浓度的分析方法包括铬酸钡分光光度法、钼试剂分光光度法^[17,18]、离子色谱法以及钼试剂滴定法等，试验比较各方法的检出限、重复性以及加标回收率。经分析，离子色谱法虽然分析流程简单、检出限低，但其对溶液的要求较高，干扰因素较多，并不适合烟气中 SO₃ 浓度的测试，这与多次现场实验以及清华等高校的测试结果一致；钼试剂分光光度法由于其显色情况受各试剂浓度、配比、反应时间等多方面的影响，且随着 SO₄²⁻ 浓度的增大，形成的钼-钼络合物的吸光值并没有较大梯度的变化，测试准确性不高；多次实验室和现场试验结果表明，铬酸钡分光光度法和钼试剂滴定法的准确性较高，可行性较好，部分试验数据如表 1、表 2 所示。

表 1 铬酸钡分光光度法的加标试验

编号	样液浓度 mg/L	标液浓度 mg/L	加标后理论浓度 mg/L	加标后实测浓度 mg/L	加标回收率 %
1	8.16	40	24.08	23.75	98.63
2	23.54		31.77	32.68	102.86
3	59.17		49.59	49.39	99.60
4	83.61		61.81	63.25	102.33
5	113.54		76.77	78.99	102.89
6	145.17		92.59	93.20	100.66
7	183.54		111.77	115.00	102.89

表 2 钼试剂滴定法系列浓度偏差试验

样品	1	2	3	4	5	6	7	8
理论消耗量 ml	0	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	8.00
实际消耗量 ml	0.05	1.03	2.04	3.10	4.05	5.05	6.00	8.00
精度 %		3.0%	2.0%	3.3%	1.3%	1.0%	0.0	0.0
说明	用 0.001mol/L 的高氯酸钡滴定 0.001mol/L 的硫酸钾，分别取 1~8ml 的硫酸钾溶液于锥形瓶中，并加入 50ml、80% 异丙醇，滴定前调节硫酸钾溶液的 PH 值为 3.5，溶液颜色由亮黄色变为深黄色时判定为滴定终点。							

参考 HJ/T342—2007^[19]，铬酸钡分光光度法的适用浓度为 8~200mg/L，相对标准偏差为 0.15%~7%，加标回收率为 97.9%~106.8%。对比表 1 试验数据，加标回收率在 98.63%~102.89% 之间，当样液浓度为 8.16mg/L 时，加标回收率为 98.63%，试验结果说明铬酸钡分光光度法的准确性和检出限满足 SO₃ 测试的要求。参考 ISO 7934—1989^[20]，钼试剂滴定法是以钼试剂作为指示剂，用高氯酸钡滴定硫酸根浓度，多次试验结果显示该分析方法的相对标准偏差小于 5%。分析表 2 数据，对一系列浓度的硫酸钾溶液进行滴定，试验精度偏差小于 3.3%，表明钼试剂滴定法的精度和检出限满足清洗液中 SO₄²⁻ 浓度的分析。

对比分析铬酸钡分光光度法和钼试剂滴定法，前者在试验精度和准确性方面较好，且受人为的影响较少，可实现性较高，但实验过程较为复杂，分析时间较长。后者要求以 80% 的异丙醇

为稀释剂，操作简单，但滴定终点颜色没有突变，难以判断，受人为的影响较大，对实验人员的要求较高。根据现场采样和实验室分析条件，可以从两者选择适合的分析方法。

3 测试准确性分析

分析控制冷凝法测试烟气中 SO_3 浓度的原理，影响冷凝管捕集效率的直接因素有 SO_3 酸雾的粒径大小、冷凝管的尺寸和冷凝管内烟气的流速等，结合测试过程， SO_3 浓度、烟气含水量以及烟气冷凝速度会影响 SO_3 酸雾的粒径大小，从而影响 SO_3 酸雾离心运动所需的离心力；冷凝管的尺寸影响冷凝管内烟气流速和 SO_3 酸雾在管内的运动轨迹，从而影响 SO_3 酸雾被捕集的概率。在校验装置的基础上，试验不同冷凝管尺寸、采样枪伴热温度、采样流量和 SO_3 浓度时的捕集效果以及高浓度 SO_2 对 SO_3 测试准确性的影响。

3.1 不同尺寸冷凝管的捕集效果

影响控制冷凝法测试烟气中 SO_3 准确性的主要因素是冷凝管对 SO_3 酸雾的捕集效率，而冷凝管的尺寸是影响捕集效率的关键。对 4 种不同尺寸冷凝管的捕集效率进行试验分析，冷凝管参数和试验数据分别如表 3、表 4 所示。

表 3 冷凝管尺寸参数

冷凝管	圈径/mm	内径/mm	螺距/mm	圈数/圈
AΦ6	35	6	11	28
BΦ6	89	6	10	25
CΦ4	40	4	9	25
DΦ3	41	3	6	25

说明：冷凝管都采用石英或玻璃材质。

表 4 不同冷凝管的捕集效果对比试验

冷凝管	SO_3 理论值 mg	SO_3 测试值 mg	捕集效率%	相对偏差%	备注
AΦ6	32.42	21.68	66.87	0.62	钼试剂滴定法 铬酸钡分光光度法
	32.34	21.02	65.00	-2.20	
	34.77	23.47	67.51	1.58	
	34.49	23.12	67.03	-0.53	
	33.66	22.31	66.28	-1.65	
	33.21	22.87	68.86	2.18	

BΦ6	33.00	9.57	29.00	-1.79	钼试剂滴定法
	32.34	10.19	31.51	6.71	
	32.66	9.17	28.07	-4.92	
CΦ4	33.33	8.83	26.49	-3.92	
	34.61	9.52	27.50	-0.25	
	34.95	10.04	28.72	4.17	
DΦ3	33.76	20.73	61.40	-2.78	
	32.49	20.34	62.60	-0.87	
	32.65	21.37	65.45	3.64	

说明：采样流量设置为 7L/min，采样枪伴热温度为 220℃。

从表 4 数据可知，四种冷凝管中 AΦ6 的捕集效果最好，且在试验条件下的捕集效率稳定在 65.00%~68.86% 之间，最大偏差为 -2.20%，DΦ3 的捕集效果次之，平均效率为 63.15%，而 BΦ6 和 CΦ4 的捕集效率约为 28%。虽然理论上增加冷凝管的圈数可以无限提高捕集效率，根据 CFD 的模拟结果，AΦ6 的捕集效率应该在 99% 以上，但由于模拟时没有考虑酸雾由于颗粒撞击二次破碎，以及即使附在冷凝管内壁上的酸雾也可能被烟气夹带出冷凝管的情况，实际捕集效率很难达到 75% 以上，这与张悠等人的研究结果相符^[11]。同时，分析钼试剂滴定法和铬酸钡分光光度法的测试结果，两种方法的捕集效率分别为 66.46% 和 67.39%，相对偏差分别为 -2.2% 和 2.18%，试验结果和平行性没有明显的差别，这与实验室分析方法的试验结果相一致。

3.2 不同伴热温度时冷凝管的捕集效果

为防止 SO₃ 酸雾在采样枪内冷凝，腐蚀采样管路，导致测试结果偏低，需保证冷凝管前 SO₃ 以气体的形式存在，则采样枪的伴热温度应在酸露点以上，且有研究表明，220℃ 时 SO₃ 吸附在粉尘颗粒上的含量最低，测试过程损失量最少，但 GB/T 21508-2008 却建议伴热温度需 260℃ 以上，分别设置采样枪的伴热温度为 220℃ 和 300℃ 进行试验，数据如表 5 所示。

表 5 不同采样枪伴热温度时冷凝管捕集效率对比试验

采样枪伴热温度/℃	SO ₃ 理论值 mg	冷凝管捕集 SO ₃ 量 mg	捕集效率%	相对偏差%
220	32.42	21.68	66.87	0.62
	33.15	22.72	68.54	1.93
	32.17	21.64	67.27	0.04
	33.66	22.31	66.28	-1.43
300	32.4	15.98	49.32	0.14
	33.26	16.02	48.17	-2.21
	32.92	16.55	50.27	2.07

说明：试验采用 AΦ6 冷凝管，采样流量设置为 7L/min，实验室分析方法为钼试剂滴定法。

从表 5 数据可知，采样枪伴热温度设置为 220℃ 时，冷凝管的捕集效果明显较好，平均效率约为 67.24%，最大偏差为 -1.43%；而伴热温度为 300℃ 时，平均捕集效率为 49.25%，最大

相对偏差为 2.21%。分析结果可能是由于采样枪伴热温度较高, 烟气经过冷凝管时骤冷, 部分 SO₃ 气体未及时形成酸雾或形成的酸雾粒径较小, 随烟气被携带出冷凝管, 从而降低了冷凝管的捕集效率。

3.3 不同采样流量时冷凝管的捕集效果

不同的采样流量, 直接导致冷凝管内烟气的流速不同, 从而影响 SO₃ 酸雾在管内离心运动所需的离心力以及运动轨迹。当采样流量太大, 会导致 SO₃ 未及时冷凝吸附在蛇形管内壁而被携带逃逸; 当采样流量太小, 产生的离心力可能不足以使硫酸酸雾吸附在蛇形管内壁。试验采样流量分别为 5、7、9 和 12L/min, 即管内烟气流速分别为 2.95、4.13、5.31 和 7.08m/s 时冷凝管的捕集效率。

表 6 不同采样流量时蛇形管的捕集效率试验

采样流量 L/min	SO ₃ 理论值 mg	冷凝管捕集 SO ₃ 量 mg	捕集效率%	相对偏差%
5	35.47	13.75	38.77	-4.65
	31.98	13.4	41.90	3.07
	32.45	13.4	41.29	1.58
7	32.42	1.68	66.87	-0.55
	33.15	22.72	68.54	1.98
	32.17	21.64	67.27	0.04
	33.66	22.31	66.28	-1.43
9	32.93	17.1	51.62	-2.97
	33.42	17.68	52.90	-0.57
	35.22	19.4	55.08	3.53
12	33.39	14.65	43.88	1.18
	34.9	15.4	44.13	1.76
	40.87	17.2	42.08	-2.95

说明: 试验采用 AΦ6 冷凝管, 采样枪伴热温度设置为 220℃, 实验室分析方法为钍试剂滴定法。

分析表 6 试验数据可知, 当采样流量设置为 7L/min 时, 捕集效果明显较好, 而采样流量为 5L/min 时捕集效果最差, 效率仅为 40.65%。根据 CFD 的模拟结果分析, 随着采样流量的增大, SO₃ 酸雾所需的离心力变大, 有利于酸雾附着在冷凝管内壁, 提高捕集效率。但烟气在管内的流速增大, 会使酸雾二次撞击、破碎的概率变大, 且被夹带出冷凝管的可能性变大, 所以一味的增大采样流量不能提高捕集效率, 应结合不同尺寸的冷凝管, 经试验确定合适的采样流量。

3.4 高浓度 SO₂ 对捕集效果的影响

结合现场 SO₃ 测试, 某些测试断面 SO₂ 浓度较高, 如 SCR、除尘设备出口烟道等。由于 SO₂ 易以 1:40 的比例微溶于水形成亚硫酸后氧化成硫酸, 而 SO₃ 浓度较低, 进而增大测试的相对误差, 影响测试的准确性。为研究高浓度 SO₂ 对测试的影响, 如图 3 所示连接各装置, 在 SO₃ 生成装置后通入约 1000ppmSO₂ 进行试验, 数据如表 7 所示。

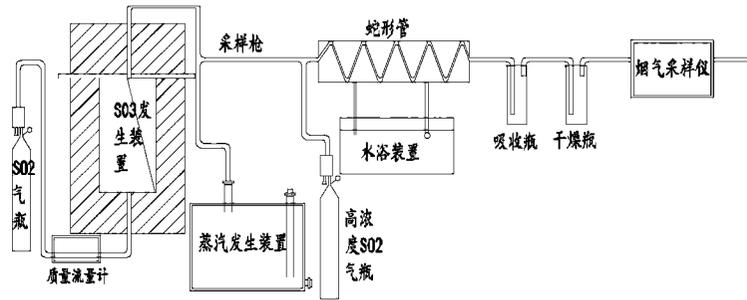


图 3 高浓度 SO₂ 影响试验装置连接示意图

表 7 高浓度 SO₂ 的影响试验数据

反应炉后通入 SO ₂ 浓度 ppm	SO ₃ 理论值 mg	SO ₃ 测试值 mg	捕集效率 %	相对偏差 %
995	31.34	20.78	66.31	-2.04
995	32.17	21.98	68.32	0.95
1023	32.65	22.34	68.42	1.09

说明：试验采用 AΦ6 冷凝管，采样枪伴热温度设置为 220℃，采样流量设置为 7L/min，实验室分析方法为钼试剂滴定法。

对比分析表 6 和表 7 的数据，在 SO₃ 发生装置后通入高浓度 SO₂，冷凝管捕集到的 SO₃ 的量并没有明显增大的趋势，说明高浓度 SO₂ 对 SO₃ 的测试不会产生明显的干扰，同时也表明控制冷凝法测试 SO₃ 浓度能很好的排除 SO₂ 的干扰。

3.5 不同浓度的 SO₃ 对捕集效率的影响

当 SO₃ 浓度不同，烟气在进入冷凝管形成酸雾时的粒径大小不同，而不同量的酸雾对冷凝管内壁面积的要求不同，以及酸雾在冷凝管内二次撞击、破碎、携带逃逸的情况也不尽相同，从而影响冷凝管的捕集效率和整个测试系统的准确性。根据上述的试验结果，调节冷凝管前 SO₃ 的浓度为 5ppm~50ppm，用 AΦ6 冷凝管进行试验，分析不同 SO₃ 浓度时冷凝管的捕集效率。试验数据如表 8 所示，并对 SO₃ 试验浓度和捕集效率进行线性回归，如图 4 所示。

表 8 不同 SO₃ 浓度时冷凝管的捕集效率

SO ₃ 浓度 ppm	SO ₃ 理论值 mg	SO ₃ 实测值 mg	捕集效率 %	相对偏差 %	平均捕集效率 %
5	23.25	16.89	72.65	1.02	71.91
	23.47	16.93	72.13	0.31	
	25.62	18.18	70.96	-1.33	
15	27.65	19.46	70.38	0.77	69.84
	28.30	19.77	69.86	0.02	
	28.17	19.52	69.29	-0.79	
25	29.11	20.16	69.25	0.44	68.95
	29.54	20.17	68.28	-0.98	
	30.32	21.02	69.33	0.54	

35	31.70	21.31	67.22	0.30	67.02
	32.12	21.65	67.40	0.57	
	33.40	22.19	66.44	-0.87	
45	34.36	22.67	65.98	0.49	65.66
	33.87	22.04	65.07	-0.89	
	33.28	21.94	65.93	0.41	
50	35.26	22.63	64.18	-0.07	64.23
	36.44	23.28	63.89	-0.53	
	34.59	22.35	64.61	0.60	
说明	试验采用 AΦ6 冷凝管, 采样枪伴热温度设置为 220℃, 采样流量设置为 7L/min。				

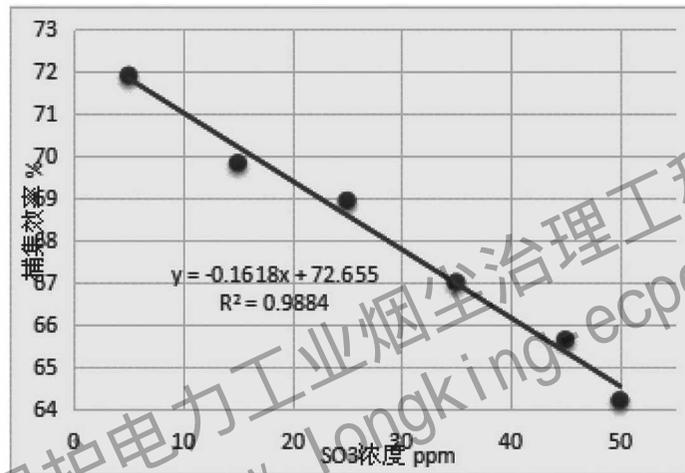


图 4 不同 SO₃ 浓度时冷凝管的捕集效率

从表 8 数据可知, 随着 SO₃ 浓度的增大, 冷凝管的捕集效率降低, 当 SO₃ 浓度为 5ppm 时, 冷凝管的捕集效率为 71.91%, 当 SO₃ 浓度为 50ppn 时, 捕集效率为 64.23%。对 SO₃ 的浓度和捕集效率进行回归分析, 如图 4 所示, 得到公式 $y = -0.1618x + 72.655$, 相关系数为 $R^2 = 0.9884$, 可信度大于 99%。

4 现场试验测试结果

陕西华电某电厂 2# 炉工程是 350MW 热电联产、超临界空冷燃煤机组。为满足超净排放要求, 该工程配套了脱硝、电袋复合除尘器以及湿法脱硫等设备, 烟气治理流程如图 5 所示。为确认 SCR 脱硝后 SO₃ 浓度以及电袋复合除尘器对 SO₃ 的脱除效果, 在电袋复合除尘器进、出口用控制冷凝法对烟气中的 SO₃ 浓度进行测试, 测试数据如表 9 所示。

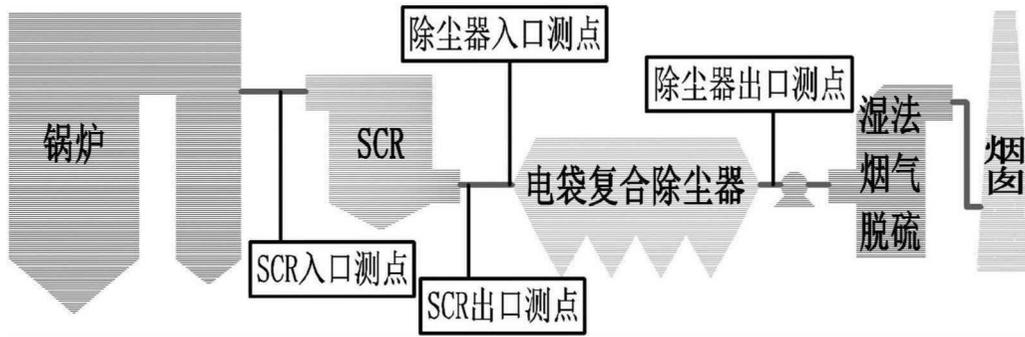


图 5 烟气治理流程示意图

表 9 电袋复合除尘器进出口 SO₃ 浓度测试结果

测试位置	SCR 脱硝		电袋复合除尘器	
	进口	出口	进口	出口
烟气温度 (°C)			121	119
含氧量 (%)	2.98	3.35	3.61	3.87
烟气量 (m ³ /h)	622848	622976	623003	632239
实测 SO ₃ 浓度 (ppm)	7.49	12.08	8.82	5.11
校正 SO ₃ 浓度 (ppm)	10.56	17.29	12.48	7.14

说明：测试时煤的 Star、Mt、Mad、Aar、Vdaf、Qnetar、Car、Har、Oar 以及 Nar 的数值分别为 0.70%、12.00%、2.55%、23.93%、33.18%、18.52MJ/kg、49.56%、2.90%、10.34% 以及 0.57%。

分析表 9 可知，SCR 脱硝进出口 SO₃ 浓度分别为 10.56ppm 和 17.29ppm，电袋复合除尘器进出口的 SO₃ 浓度分别为 12.48ppm 和 7.14ppm。烟气中 SO₃ 浓度与很多因素有关，如炉膛温度、炉膛内过剩空气系数、煤质以及催化剂等^[21-23]。有研究表明，SCR 脱硝前约有 0.5%~1.5% 的 SO₂ 转化为 SO₃^[24,25]，经过 SCR 后，由于脱硝催化剂氧化 SO₂，约 0.3%~2% SO₂ 再次转化为 SO₃^[26,27]。根据经验公式和测试时煤种信息，计算得 SCR 脱硝入口 SO₂ 浓度约为 800ppm，则 SCR 进出口 SO₃ 浓度约为 8ppm~12ppm、16ppm~20ppm，现场实测值与之相符。

5 总结

针对目前便携式 SO₃ 测试仪器还不够成熟，不能准确可靠的对烟气中 SO₃ 浓度进行测试的情况，参考国内外标准，采用控制冷凝法，研制 SO₃ 采样系统，并搭建校验装置，对影响测试准确性的因素进行一系列的验证试验，完善该测试方法，为测试的准确性提供有力的理论和数据支持。分析试验数据得到：1、铬酸钡分光光度法和钍试剂滴定法都适用于 SO₃ 测试中 SO₄²⁻ 浓度的分析；2、不同冷凝管对 SO₃ 的捕集效率不同，四种冷凝管中 AΦ6 的捕集效率最高，约为 68.99%；3、相对于 300°C，采样枪的伴热温度为 220°C 时，冷凝管对 SO₃ 的捕集效率更高；4、与采样流量为 5、9 和 12L/min 相比，当采样流量为 7L/min 时，AΦ6 冷凝管的捕集效率最好；5、高浓度 SO₂ 对 SO₃ 浓度的测试没有明显的干扰；6、随着 SO₃ 浓度的增大，AΦ6 冷凝管的捕集效率逐渐降低，当 SO₃ 浓度为 5ppm~50ppm 时，捕集效率为 71.91%~64.23%，对 SO₃ 浓度和捕集效率进行回归得到公式： $y = -0.1618x + 72.655$ 。

目前该 SO_3 采样系统已在多套 SCR 脱硝、电袋复合除尘器、低低温电除尘器以及湿法脱硫等设备中得到应用,为控制 SO_3 排放的工程技术的应用提供数据支持,为电厂根据 SO_3 含量采取有针对性的防腐措施提供依据,为减少烟囱出口蓝烟现象提供帮助。

参考文献

- [1] Erickson, Clayton A, Jambhekar Rajaram. Current work on the impacts and control of SO_3 emissions from selective catalytic reduction systems [C]. //2002 Conference on SCR and SNCR for NO_x Control. Pittsburgh, USA, 2002: 133-136.
- [2] Cowdrick D A. Acid dew point experience in big bend Unit 4 precipitators, fans, and ductwork [C]. //South-eastern Electric Exchange 1986 Annual Conference of the Engineering and Operations Division and the Real Estate Section, Kissimmee. USA, 1986: 211-213.
- [3] 王宏亮. 燃煤电站锅炉烟气中 SO_3 的生成及控制 [J]. 电力科技与环保, 2014, 30 (5): 17-21.
- [4] 蒋海涛. 燃煤电厂 SO_3 形成、危害及控制技术 [J]. 发电设备, 2013, 27 (5): 366-368.
- [5] 肖雨亭. 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.
- [6] 王智, 贾莹光, 祁宁, 等. 燃烧电站锅炉及 SCR 脱硝中 SO_3 的生成及危害 [J]. 东北电力科技, 2005, 26 (9): 1-3.
- [7] 潘丹萍. 电厂湿法脱硫系统对烟气中细颗粒物及 SO_3 酸雾脱出作用研究 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36 (16): 4356-4362.
- [8] R. K. Srivastava, C. A. Miller, C. Erickson, R. Jambhekar. Emissions of sulfur trioxide from coal-fired power plants [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2004, 54 (6): 750-762.
- [9] 赵瑞. 浅谈燃煤电站 SO_3 检测方法及脱除策略 [J]. 神华科技, 2015, 13 (5): 62-66.
- [10] 王方群. 火电厂烟气中 SO_3 的检测技术及应用 [J]. 环境工程, 2008, 26 (5): 86-91.
- [11] 张悠. 烟气中 SO_3 测试技术及其应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [12] R. J. Jaworowski, S. S. Mack. Evaluation of methods for measurement of $\text{SO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$ in flue gas [J]. Journal of the Air Pollution Control Association. 1979, 29 (1): 43-46.
- [13] GB/T 21508-2008 燃煤烟气脱硫设备性能测试方法 [S]. 北京: 国家质量监督检验检疫总局、国家标准化管理委员会.
- [14] EPA-8 Determination of sulfuric acid vapor or mist and sulfur dioxide emissions from Kraft recovery furnaces [S]. USA.
- [15] EPA-8 Determination of sulfuric acid mist and sulfur dioxide emission from stationary source [S]. USA.
- [16] JIS K 0103-2005 Method for determination of sulfur oxides in flue gas precipitation titration method [S]. Japanese.
- [17] ISO 4221-1980 Air quality; Determination of mass concentration of sulphur dioxide in ambient air; Thorin spectrophotometric method [S].
- [18] 李婕. 钼试剂分光光度法测定固定污染源烟气中 SO_3 [J]. 环境污染与防治, 2008, 30 (10): 63-70.
- [19] HJ/T342-2007 水质 硫酸盐的测定 铬酸钡分光光度法 (试行) [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [20] ISO 7934-1989 Stationary Source Emissions-Determination Of The Mass Concentration Of Sulfur Dioxide-Hydrogen Peroxide/Barium Perchlorate/Thorin Method [S].
- [21] AHN J, OKERLUND R, FRY A, et al. Sulfur trioxide formation during oxy-coal combustion [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011, 1 (5): S127-S135.
- [22] HARDMAN R, STACY R, DISMUKES E. Estimating sulfuric acid aerosol emissions from coal-fired power plants [C]. //DOEFETC Conference on Formation, Distribution, Impact, and Fate of Sulfur Trioxide in Utility Flue Gas Streams, Pittsburgh, PA, 1998.
- [23] 郭彦鹏, 狄华娟, 潘丹萍, 杨林军. 燃煤烟气中 SO_3 的形成及其控制措施 [J]. 中国电力, 2016, 49

- (8): 154—156.
- [24] Erickson, Clayton A, Jambhekar Rajaram. Current work on the impacts and control of SO₃ emissions from selective catalytic reduction systems [C], //2002 Conference on SCR and SNCR for NO_x Control. Pittsburgh, USA, 2002 : 133—136.
- [25] MORETTI A L, TRISCORI R J, RITZENTHALER D P. A system approach to SO₃ mitigation [R] . The Babcock and Wilcox Company American Electric Power, 2006.
- [26] Gutberlet H, Hartenstein H, Licata A, SO₂ conversion rate of deNO_x catalysts — effects on downstream plant components and remedial measures [C] . //The Power Gen 1999. New Orleans, USA, 1999 : 212—214.
- [27] KAMATA H, OHARA H, TAKAHASHI K, et al. SO₂ oxidation over the V₂O₅/TiO₂ SCR catalyst [J] . Catalysis Letters, 2001, 73 (1): 79—83.

国家环境保护电力工业烟尘治理工程技术中心
<http://www.longking-ecpd.com>