

燃煤电厂颗粒物测定方法研究

寿志毅¹, 郑少亮², 刘含笑¹, 徐旭东¹, 方小伟¹, 郭高飞¹, 张君毅²

(1. 浙江菲达环保科技股份有限公司, 浙江 诸暨 311800; 2. 神华国能哈密电厂, 新疆 哈密 839000)

摘要:燃煤电厂排放的颗粒物有3类:可过滤颗粒物(含细颗粒物)、可凝结颗粒物和可溶盐,国内对其测试方法的研究还较薄弱。笔者系统分析了3类颗粒物的测定方法,针对性地提出准确测定手段及控制要点并分别开展了现场实测验证。凭借精密度较高的测试仪器及开展空白试验等,可保证可过滤颗粒物测定结果具有较高精确度;电荷法(ELPI)和重量法(PM-10)的PM_{2.5}测试结果一致性较好;2级冷凝盘管+异丙醇吸收可实现对SO₃的高效捕集,且第2级盘管和异丙醇吸收的SO₃占比最高可达40%,建议低浓度测试优先采用该方法;采样枪温度加热到160℃,此时滤膜实际测定的颗粒浓度即为可过滤颗粒物+可溶盐。

关键词:超低排放;燃煤电厂;可过滤颗粒物;SO₃;可溶盐

中图分类号:X505;TK227.3

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2019)04-0130-07

Study on the determination of particulate matter in coal-fired power plants

SHOU Zhiyi¹, ZHENG Shaoliang², LIU Hanxiao¹, XU Xudong¹, FANG Xiaowei¹, GUO Gaofei¹, ZHANG Junyi²

(1. Zhejiang Feida Environmental Science & Technology Co., Ltd., Zhuji 311800, China;

2. Shenhua Guoneng Hami Coal-fired Power Plant, Hami 839000, China)

Abstract: There are three kinds of particulate matter discharged from coal-fired power plant: filterable particles (include PM_{2.5}), condensable particulates and soluble salt, and the domestic research on its testing method is still weak. In this paper, the determination methods of three kinds particles were researched, the determination methods and control points of particulate matter were pointedly put forward, and the field measurement and verification were carried out respectively. With high precision test instrument and blank test, the results of filterable particulate matter determination can be guaranteed to have high accuracy. The PM_{2.5} test results of charge method (ELPI) and gravimetric method (PM-10) are consistent with each other. The 2-stage condensing coil and isopropyl alcohol absorption can achieve the efficient capture of SO₃, and the SO₃ absorbed by the second stage coil and isopropanol can reach up to 40%. The method is recommended for low concentration tests. When the sampling gun is heated to a temperature of 160℃, the actual particle concentration measured by the filter membrane is filterable particles and soluble salt.

Key words: ultra-low emission; coal-fired power plant; filterable particles; SO₃; soluble salt

0 引言

国家层面的“行动计划”(《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020年)》)、“实施方案”(《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》)等实施以来,燃煤电厂烟气超低排放(颗粒物浓度 $\leq 10 \text{ mg/m}^3$)已全面实施^[1-5],目前,地方政策、标准也陆续出台,要求颗粒物排放 $\leq 5 \text{ mg/m}^3$ 或 $\leq$

10 mg/m^3 ,但颗粒物的准确采样和精准测定一直是困扰燃煤电厂超低排放项目验收的一大技术难题。杨建军等^[6-7]基于文献调研,对国内外基于大气环境的固定源细颗粒物测试方法进行系统分析,发现国内对固定源细颗粒物研究还较为薄弱,尚缺乏合适的测试方法,并针对性地分析了固定源细颗粒物稀释测试法现场应用存在问题及影响因素。王铮等^[8]基于文献调研,分析了燃煤电厂PM_{2.5}的排放

收稿日期:2018-07-24;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.18072401

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0209107)

作者简介:寿志毅(1959—),男,浙江诸暨人,工程师,主要从事环保科研、工艺研究和管理工作。E-mail:125793084@qq.com

引用格式:寿志毅,郑少亮,刘含笑,等.燃煤电厂颗粒物测定方法研究[J].洁净煤技术,2019,25(4):130-136.

SHOU Zhiyi, ZHENG Shaoliang, LIU Hanxiao, et al. Study on the determination of particulate matter in coal-fired power plants[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(4): 130-136.



移动阅读

特征,并介绍了目前主要的 $\text{PM}_{2.5}$ 测试方法,其中较为成熟测试方法主要有 EPA 201A、202 法和 ISO 23210—2009 法,并指出 ELPI 法具有良好的应用前景,但未开展现场实测验证。易玉萍等^[9]对比了国内外几种低浓度颗粒物的测试原理和方法,指出一体化采样头可适用于国内燃煤电厂的低浓度颗粒物测试,并通过对采样滤膜、设备、分析天平、采样过程的控制来保证监测数据的可靠性和准确性。常倩云等^[10]总结和比较了国内外常用的颗粒物采样测试系统及方法,从颗粒物测量原理、采样方法的结构和特点、适用范围、误差来源等角度分析了采样系统的特点及准确性,并结合我国燃煤电厂脱硫塔、湿式静电除尘器出口等位置实际排放情况,提出适用于低浓度、高湿度条件下的超低浓度颗粒物的可靠测试方法,为燃煤电厂颗粒物排放浓度的准确测量和环保设备对颗粒物控制效果的运行和评估提供保证,但未进行现场实测验证。姚宇平等^[11]对国外低浓度烟尘标准测试方法做了系统性研究,探索一种科学合理的低浓度烟尘测试技术和方法,并通过现场实际测试进行了验证,为我国相应标准测试方法的选取提供一定的参考,但研究未涉及可凝结颗粒物和可溶盐。刘含笑等^[12]阐述了国内外相关测试标准,并分析了低浓度烟尘测试准确性,重点开展了燃煤电厂低浓度颗粒物测试的空白试验研究,探讨了低浓度测试时空白试验的合理性和必要性^[13],并对 $\text{PM}_{2.5}$ 测试标准、测试仪器等进行系统研究^[14-18]。基于此,开展超低排放工程的现场实测,对低低温电除尘器、湿法脱硫及湿式电除尘器出口颗粒物及 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度进行科学表征,但同样未涉及可凝结颗粒物及可溶盐等。

燃煤电厂排放的颗粒物有 3 类:第 1 类称为可过滤颗粒物(含细颗粒物),即烟尘,可在常温状态下被滤筒(或滤膜)过滤截留下来的烟气中的固体物质;第 2 类为可凝结颗粒物,主要指气态 SO_3 ,当烟温低于酸露点后,会发生冷凝,并与水蒸气形成硫酸雾气溶胶颗粒;第 3 类是所谓的可溶盐,溶解在液滴中,排到大气中水分蒸发后或在烟道加热蒸发后,析出形成颗粒物。

目前超低排放控制的颗粒物仅针对可过滤颗粒物,并未对可凝结颗粒物和可溶盐提出要求,但后者带来的污染不容忽视,尤其对于超低排放要求下低浓度颗粒物烟气,后者所占比例更多,且可凝结颗粒物(主要是 SO_3)是目前有色烟羽排放的主要来源之一^[19-21]。本文分别对 3 类颗粒物的测定方法进行系统性研究,针对性地提出各类颗粒物的准确测定

手段及控制要点,并通过现场实测进行验证,为准确、全面表征颗粒物排放特征提供了有效的技术手段和测试方法。

1 可过滤颗粒物测定

1.1 总颗粒物

低浓度可过滤颗粒物的测定难点在于如何保证采样的有效性和控制采样误差。国外低浓度颗粒物测定标准(如 ISO 12141—2002、ASTM D6331—13 等)通过开展空白试验的方式验证采样的有效性,并要求空白实验测定值不应超过试验期间正常采样测定值的 10%,且正常抽气采样的颗粒物增量值应 $>$ 空白值偏差正值 $\times 5$ 。

1.1.1 测定精确度管控

低浓度颗粒物测定结果的精确度包括 2 部分,即精密度和准确度。仪器应采用性能可靠且精度高的仪器,如应采用大流量抽气泵(70 L/min,甚至是 100 L/min);过滤材质采用耐酸腐蚀、失重小的石英材质;针对低浓度颗粒物环境,应采用一体化采样头(配石英滤膜)进行采样,样品称重应采用十万分之一甚至是百万分之一的天平,并严格控制称重环境,如条件允许,可采用自动称重系统,最大限度避免人为误差。

测试方法要开展空白试验,剔除错误样品,确保每个样品都有代表性;采样前后都要对过滤滤膜进行恒重处理,确保得到的数据接近“真值”。

1.1.2 测试方法及测试仪器

本文采用 ZR-3260 型自动烟尘测试仪和 ZR-D09A 型一体化采样枪,通过等速采样,滤膜称重的方法测量可过滤颗粒物浓度;用电化学或光学原理的传感器测定烟气中的气体成分含量及烟气流速、烟气温度、烟气湿度、烟道压力等参数。为防止采样接收后烟气倒吸引起的采样误差,增设电磁阀,采样暂停或结束时自动关闭气路;设置分水器自动排水工程,满足长时间采集高湿度烟气需求;配置高负载、低噪、大流量抽气泵,最高流量可达 100 L/min,电厂烟道内实际负压工况下,可稳定达到 50 ~ 70 L/min。

采样系统如图 1 所示,滤膜采用进口石英材质,测试方法参照 ISO 12141—2002,采样前后对滤膜进行恒重处理,每组工况均开展一次空白样品试验,用十万分之一电子天平称重。

1.1.3 工程实测结果(某 600 MW WESP 出口)

采用图 2 的测试方法对某 600 MW 机组湿式电除尘器(WESP)出口的颗粒物进行测定,采样前首

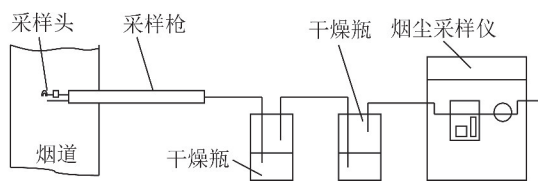


图1 一体化采样头采样系统

Fig. 1 Sampling system of integrated sampling head

先准备7个样品,并对每个样品进行恒重处理,样品反复烘干2次,采用十万分之一天平反复称重对比,结果分别如图2、3所示。历次称重的差值在0.03~0.32 mg,满足要求。

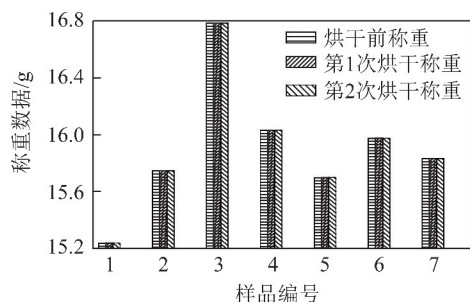


图2 样品历次称重数据

Fig. 2 Weight data of samples in previous times

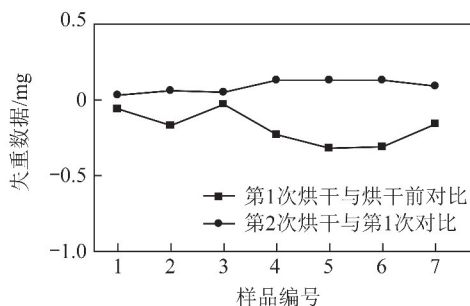


图3 历次称量的失重数据

Fig. 3 Weight loss data from previous times

一体化采样头(滤膜)的增重、空白值如图4所示,经换算,烟气中颗粒物质量浓度如图5所示。一体化采样头空白值为0.2~0.5 mg,最大正值为0.5 mg,其5倍即为2.5 mg,而实际采样过程中一体化采样头(滤膜)的增重达5.9~10.6 mg,颗粒物增重值应>空白值偏差正值 $\times 5$,完全满足要求。一体化采样头的增重与采集烟气量的比值即为烟气中颗粒物的质量浓度,经换算,该项目湿式电除尘器出口颗粒物浓度的测定结果为3.64~4.47 mg/m^3 ,平均值4.12 mg/m^3 。

1.2 细颗粒物测定

目前细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)测定的标准方法主要是重量法^[22],主要标准有EPA method 201A、ISO 23210—2009、ISO/DIS 13271—2011、日本JIS K 0302、DL/T 1520—2016等,仪器有PM-10、DLPI、

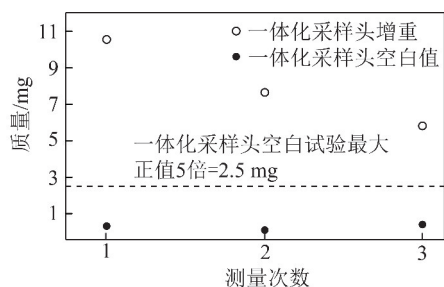


图4 空白试验值

Fig. 4 Blank test value

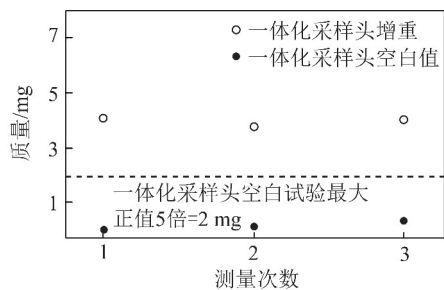


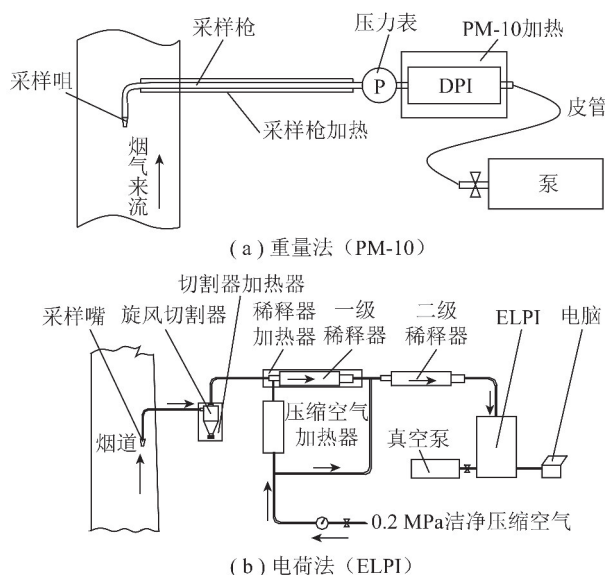
图5 换算质量浓度数据

Fig. 5 Convert mass concentration data

DGI、Andersen、WY-1、WY-2等。本文借鉴标准规定的采样方法,通过电荷法进行对比测试,以提高测试数据的代表性。

1.2.1 细颗粒物采样系统

重量法、电荷法的采样系统如图6所示。其中,重量法采用DEKATI公司生产的PM-10撞击器收集样品后,用微量天平进行称重计算,PM-10撞击器如图7(a)所示;电荷法采用DEKATI公司生产的ELPI进行在线测定,ELPI主机及工作原理如图7(b)所示。

图6 $\text{PM}_{2.5}$ 采样系统Fig. 6 Sampling system of $\text{PM}_{2.5}$

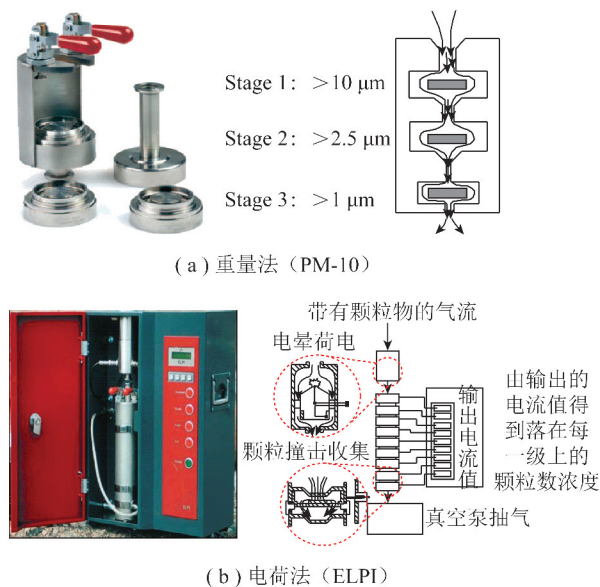


图7 主机及工作原理

Fig. 7 Main engine and working principle

1.2.2 工程实测结果(某600 MW 机组)

为研究不同测试仪器间的性能差异,选取同一时段 ELPI(10 L/min)与 PM-10(30 L/min)测试结果进行对比,如图8所示。对于 $PM_{2.5}$ 来说,电荷法(ELPI)与重量法(PM-10)测试结果较为接近,且重量法结果一般略大于电荷法。从实测数据可以看出,2种仪器的 $PM_{2.5}$ 测定数据重复性较好,验证了测试方法和测试仪器的合理性。ELPI和PM-10同为 DEKATI 公司生产,其核心部件——撞击器的规格、颗粒分级原理及加工方法基本一致,区别在于前者通过荷电颗粒撞击铝膜所产生的微电流信号换算得到数浓度及质量浓度数据,后者则直接通过天平称重,因此,只要前者的换算公式及系数准确,原则上两者的测试结果应该完全一致。

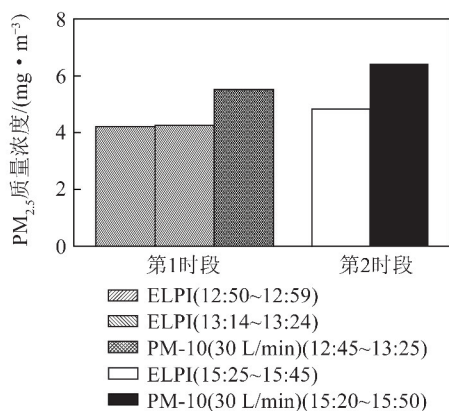


图8 2个时段 ELPI 与 PM-10 测试结果对比

Fig. 8 Test results comparison of ELPI and PM-10 in two periods

2 可凝结颗粒物测定

SO_3 测定难点在于 SO_3 采样较难实现不受其他因素干扰的完全捕集。目前 SO_3 采样的标准方法主要有控制冷凝法和异丙醇吸收法:前者有 GB/T 21508—2008《燃煤烟气脱硫设备性能测试方法》、DL/T 998—2016《石灰石-石膏湿法烟气脱硫装置性能验收试验规范》、ANSI/ASTM D 4856—2001《工作场所硫酸雾方法(离子色谱法)》、JIS K0103—2005《废气中硫氧化物含量的测定方法》等,后者有 EPA-8。但2种方法数据重复性均较差,本文借鉴标准规定的采样方法,将2者进行了有效集成,以提高 SO_3 捕集效率。

2.1 SO_3 采样系统

燃煤烟气中 SO_3 含量相对较低,且 SO_3 化学性质活泼,采样过程需最大限度避免干扰。本文所用采样系统如图9所示。采样枪加热至 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,最大限度减少气态 SO_3 沿程冷凝沉积,采用 ZR-D03A 型高温采样枪,采样头前面设置过滤装置,减少粉尘对采样的影响,防止粉尘进入 SO_3 捕集单元及低温时段粉尘颗粒对 SO_3 的吸附,如图10所示。 SO_3 捕集单元采用2级冷凝盘管+1级异丙醇冰浴吸收的方式,冷凝盘管加热至 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,异丙醇保持在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大限度实现 SO_3 完全捕集,并避免 SO_2 的干扰。蛇形盘管型号为 5023,内径 4 mm ,有效长度 200 mm 。

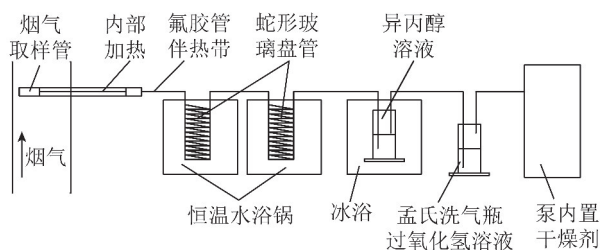
图9 SO_3 采样系统Fig. 9 Sampling system of SO_3 

图10 ZR-D03A 型高温采样枪

Fig. 10 High-temperature sampling gun of ZR-D03A

2.2 工程实测结果

1) 某中试平台

采用图9方法采样,用去离子水清洗样品后,用紫外-可见分光光度计测定样品中 SO_4^{2-} 浓度。光度计型号为哈希DR6000,波长在190~1100 nm,分辨率在0.1 nm,光谱宽度为2 nm,光度测量为3.0 Abs(200~900 nm),光度飘逸在 ± 0.0034 Abs。光度计中 SO_4^{2-} 读数如图11所示,烟气中 SO_3 浓度如图12所示。第1级盘管、第2级盘管、异丙醇溶液3个捕集单元3次采样中 SO_4^{2-} 读数分别为14、6、2 mg/L,16、7、1 mg/L,12、5、2 mg/L,经换算,对应烟气中 SO_3 浓度分别为1.24、0.53、0.06 mg/m³,1.48、0.65、0.01 mg/m³,1.16、0.48、0.19 mg/m³,不同单元均对 SO_3 有不同程度的捕集,且第1级盘管捕集量最大,之后依次递减。经换算,3个捕集单元3次采样中 SO_3 占比分别为67.76%、28.96%、3.28%,69.16%、30.37%、0.47%,63.39%、26.23%、10.38%,如图13所示。

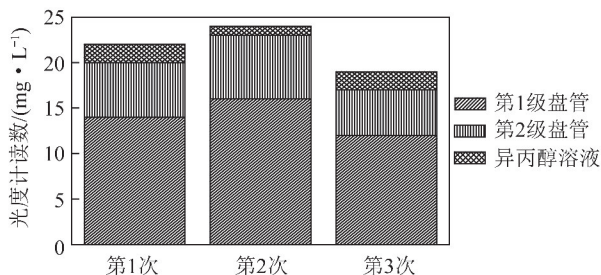


图11 光度计中硫酸根读数

Fig. 11 Sulfate reading in photometer

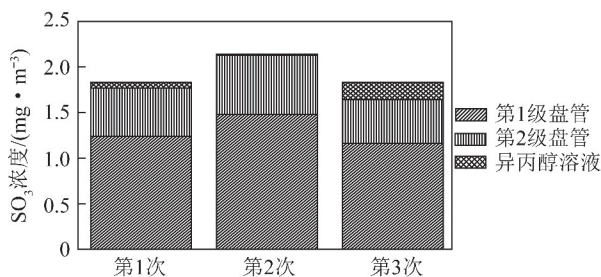


图12 烟气中 SO_3 浓度

Fig. 12 SO_3 concentration in flue gas

2) 某1000 MW 机组

针对某1000 MW 机组,第1级盘管、第2级盘管、异丙醇溶液3个捕集单元3次采样中对应烟气中 SO_3 浓度分别为3.38、0.90、0.45 mg/m³,7.43、2.03、0.45 mg/m³,5.18、1.20、0.48 mg/m³,如图14所示。3个捕集单元3次采样中 SO_3 占比分别为71.46%、19.03%、9.51%,74.97%、20.48%、4.54%,75.51%、17.49%、7%,如图15所示。

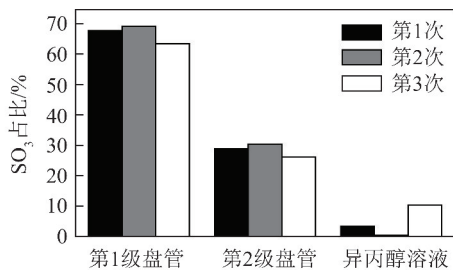


图13 各单元捕集的 SO_3 占比

Fig. 13 Proportion of SO_3 captured by each unit

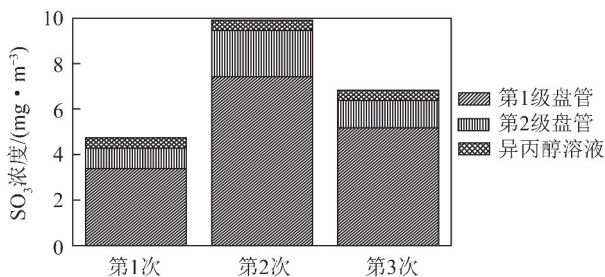


图14 烟气中 SO_3 浓度

Fig. 14 SO_3 concentration in flue gas

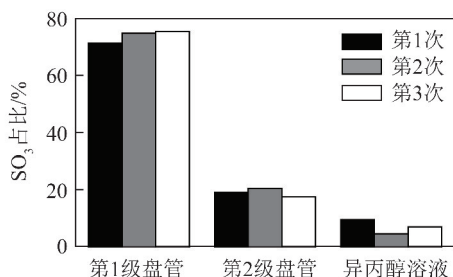


图15 各单元捕集的 SO_3 占比

Fig. 15 Proportion of SO_3 captured by each unit

3 可溶盐测定

以石灰石-石膏湿法脱硫为例,尤其是除雾器性能欠佳时,烟气中携带了大量细微液滴,即使优化喷淋层,采用除雾性能较好的除雾器等,湿法脱硫出口也会有20~40 mg/m³的雾滴携带,液滴中含有 SO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NO_4^- 、 NH_4^+ 、 Cl^- 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等离子。以 CaSO_4 及 CaCl_2 为例,其在水中的溶解度随温度变化如图16所示。

由图16可知, CaSO_4 溶解度较低,而 CaCl_2 溶解度相对高很多。但实际上,低浓度颗粒物采样中,尤其采用一体化采样头采样时,采样枪要加热到160℃,此时烟气是完全干燥状态,烟气中携带的小液滴全部蒸发,液滴中含有的可溶盐也会相应析出,并被滤膜截留,以可过滤颗粒物的形式被捕集下来。

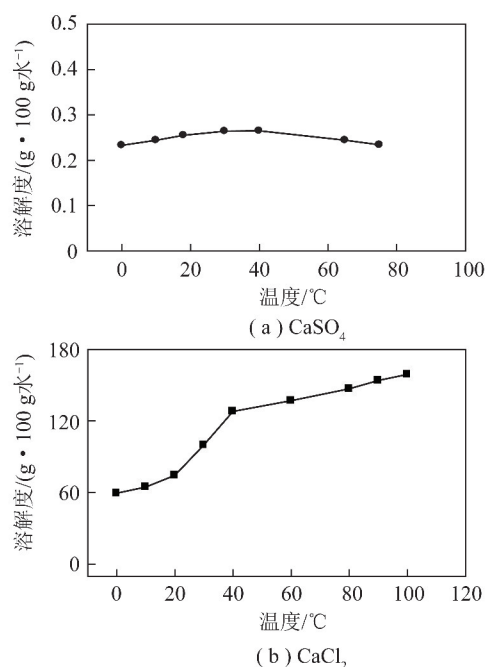


图 16 硫酸钙和氯化钙在水中的溶解度

Fig. 16 Solubility of calcium sulfate and calcium chloride in water

4 结 论

1) 在可过滤颗粒物测试方面,凭借精密度较高的测试仪器,如大流量采样仪、一体化采样枪、高精度天平等,保证测量精密度,通过开展空白试验,过滤粗大误差,保证数据的准确度。空白试验要求颗粒物增重值应>空白值偏差正值 $\times 5$;在 $\text{PM}_{2.5}$ 测试方面,电荷法(ELPI)和重量法(PM_{10})的测试结果一致性较好。

2) 2级冷凝盘管+异丙醇吸收可实现对 SO_3 的高效捕集,且第1级盘管捕集量最大,占比为63%~69%,之后依次递减,第2级盘管为26%~30%,末级异丙醇约为0.5%~10%。因此现有的标准方法(仅采用1级冷凝盘管)并不适用于低浓度测试,建议优化。

3) 采样枪温度加热到160℃,此时烟气完全干燥状态,烟气中携带的小液滴全部蒸发,液滴中含有的可溶盐也会相应析出,并被滤膜截留,以可过滤颗粒物的形式捕集下来,因此实际测定的颗粒浓度即为可过滤颗粒物+可溶盐。

参考文献 (References):

[1] LI Jianguo, YAO Yuping, LI Weidong, et al. The research on co-benefit control technical route of flue gas "Ultra-clean Emission" for coal-fired power plants[C]/8th i-CIPEC. Shanghai: [s. n.], 2014.

[2] 中国环境保护产业协会电除尘委员会. 燃煤电厂烟气超低排放技术[M]. 北京:中国电力出版社,2015.

[3] 酆建国,郇祝海,李卫东,等. 燃煤电厂烟气协同治理技术路线研究[J]. 中国环保产业,2015(5):52-56.

LI Jianguo, LI Zhuhai, LI Weidong, et al. Research on flue gas co-benefit control technical route in coal-fired power plants[J]. China Environmental Protection Industry, 2015(5):52-56.

[4] 刘含笑,酆建国,姚宇平,等. 一种布置在 ESP 进口封头的微颗粒捕集增效装置研究和开发[J]. 中国电力,2015,48(8):1-8.

LIU Hanyao, LI Jianguo, YAO Yuping, et al. Research and development of enhanced $\text{PM}_{2.5}$ collection device installed in the ESP inlet hood[J]. Electric Power, 2015, 48(8):1-8.

[5] 酆建国,何毓忠,刘含笑,等. 低低温电除尘技术特点及在高灰煤超低排放工程中的应用[J]. 中国电力,2017,50(3):28-33.

LI Jianguo, HE Yuzhong, LIU Hanyao, et. Low-low temperature ESP and the application in high-ash coal engineering for ultra-low emission[J]. Electric Power, 2017, 50(3):28-33.

[6] 杨建军,杜利芳,卢立栋,等. 基于大气环境的固定源细颗粒物测试方法研究进展[J]. 环境科学与管理,2016,42(2):105-108.

YANG Jianjun, DU Lilao, LU Lidong, et al. Progress on testing methods for fine particulate matter for stationary sources based on atmosphere[J]. Environmental Science and Management, 2016, 42(2):105-108.

[7] 杨建军,杜利芳,马启翔,等. 固定源细颗粒物稀释测试法现场应用存在问题及影响因素分析研究[J]. 环境科学与管理,2015,40(8):127-129.

YANG Jianjun, DU Lilao, MA Qixiang, et al. Analysis on existing problems and influencing factors in applying stationary sources fine particulate matter dilution testing method[J]. Environmental Science and Management, 2015, 40(8):127-129.

[8] 王铮,薛建明,许月阳,等. 燃煤电厂 $\text{PM}_{2.5}$ 超细颗粒物排放测试方法研究[J]. 环境工程学报,2013,3(2):133-137.

WANG Zheng, XUE Jianming, XU Yueyang, et al. Research on testing methods for $\text{PM}_{2.5}$ emission in coal-fired power plants[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2013, 3(2):133-137.

[9] 易玉萍,朱法华,段玖祥,等. 燃煤电厂低浓度颗粒物的测试方法研究[J]. 电力科技与环保,2018,34(1):32-36.

YI Yuping, ZHU Fahua, DUAN Jiuxiang, et al. Research on test methods of low concentrations of particulate matter in coal-fired power plant[J]. Power Technology and Environmental Protection, 2018, 34(1):32-36.

[10] 常倩云,杨正大,郑成航,等. 高湿烟气中超低浓度细颗粒物测试方法研究[J]. 中国环境科学,2017,37(7):2450-2459.

CHANG Qianyun, YANG Zhengda, ZHENG Chenghang, et al. Research on ultra-low concentration particle measurement in high humidity flue gas[J]. China Environmental Science, 2017, 37(7):2450-2459.

[11] 姚宇平,刘含笑,朱少平. 燃煤电厂低浓度烟尘测试方法探讨[J]. 环境工程,2015,33(10):139-142.

YAO Yuping, LIU Hanyao, ZHU Saoping. Study on particulate matter gravimetric method at low concentration for coal-fired

- power plants [J]. Environmental Engineering, 2015, 33 (10): 139-142.
- [12] 刘含笑,姚宇平,郦建国,等. 超低排放下低浓度可过滤颗粒物的手工测试[J]. 中国粉体技术, 2017, 23(4): 50-54.
LIU Hanxiao, YAO Yuping, LI Jianguo, et al. The research of low concentration test method of PM for ultra-low emission[J]. China Power Science and Technology, 2017, 23(4): 50-54.
- [13] 刘含笑,姚宇平,郦建国. 燃煤电厂低浓度颗粒物测试的空白实验研究[J]. 中国电力, 2017, 50(7): 115-121.
LIU Hanxiao, YAO Yuping, LI Jianguo. The blank test study of particulate matter gravimetric method at low concentration for coal-fired power plant [J]. Electric Power, 2017, 50 (7): 115-121.
- [14] 刘含笑,姚宇平,郦建国,等. 燃煤电厂 $PM_{2.5}$ 测试方法研究[J]. 电力与能源, 2018, 39(2): 101-106.
LIU Hanxiao, YAO Yuping, LI Jianguo, et al. The study of $PM_{2.5}$ test method for coal-fired power plant [J]. Power & Energy, 2018, 39(2): 101-106.
- [15] 刘含笑,朱少平,姚宇平,等. $PM_{2.5}$ 重量法现场测量技术研究[J]. 电力与能源, 2014, 35(5): 572-575.
LIU Hanxiao, ZHU Shaoping, YAO Yuping, et al. The field measurement technology research of $PM_{2.5}$ weight method [J]. Power & Energy, 2014, 35(5): 572-575.
- [16] 刘含笑,郦建国,姚宇平,等. 较高负压烟气环境下 $PM_{2.5}$ 测试技术研究[J]. 中国粉体技术, 2017, 23(2): 79-83.
LIU Hanxiao, YAO Yuping, LI Jianguo, et al. $PM_{2.5}$ test experimental research for bigger negative pressure environment [J]. China Power Science and Technology, 2017, 23(2): 79-83.
- [17] 刘含笑,姚宇平,郦建国,等. $PM_{2.5}$ 测试方法对比及其燃煤电厂排放特征分析[J]. 中国粉体技术, 2017, 23(5): 34-39.
LIU Hanxiao, YAO Yuping, LI Jianguo, et al. The construct of $PM_{2.5}$ test method and $PM_{2.5}$ emissions characterization research for coal-fired power plant [J]. China Power Science and Technology, 2017, 23(5): 34-39.
- [18] 刘含笑,朱少平,姚宇平,等. 电荷法测试 WESP 进出口烟气中 $PM_{2.5}$ 的试验研究[J]. 中国电力, 2014, 47(12): 37-41.
LIU Hanxiao, ZHU Shaoping, YAO Yuping, et al. Research of classification dust removal efficiency and pollutant emission characteristics for WESP in coal-fired power plant [J]. Electric Power, 2014, 47(12): 37-41.
- [19] 刘含笑,陈招妹,王少权,等. 燃煤电厂 SO_3 排放特征及其脱除技术[J]. 环境工程学报, 2019, 13(5): 1128-1138.
LIU Hanxiao, CHEN Zhaomei, WANG Shaoquan, et al. Emission characteristics and removal technology of SO_3 from coal-fired power plants [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(5): 1128-1138.
- [20] 刘含笑,姚宇平,郦建国,等. 燃煤电厂烟气中 SO_3 生成、治理及测试技术研究[J]. 中国电力, 2015, 48(9): 152-156.
LIU Hanxiao, YAO Yuping, LI Jianguo, et al. The study of SO_3 measurement method at low concentration for stationary source [J]. Environmental Engineering, 2015, 48(9): 152-156.
- [21] 刘含笑,姚宇平,郦建国,等. 低低温电除尘技术适用性及污染物减排特性研究[J]. 动力工程学报, 2018, 38(8): 650-657.
LIU Hanxiao, YAO Yuping, LI Jianguo, et al. Research on applicability and pollutant emission characteristics of a LLT-ESP [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018, 38(8): 650-657.
- [22] 刘含笑,姚宇平,郦建国,等. $PM_{2.5}$ 团聚测量技术及其研究进展[J]. 电力与能源, 2013, 34(4): 118-123.
LIU Hanxiao, YAO Yuping, LI Jianguo, et al. The measurement technology and research progress of the $PM_{2.5}$ coalescence experiment [J]. Power & Energy, 2013, 34(4): 118-123.