

典型燃煤锅炉烟气中可凝结颗粒物排放特征研究

彭国伟¹, 王 翀², 孟 哲³, 赵新娜¹, 平小凡¹, 王玲玲¹, 杜谨宏⁴, 李雷刚³, 李 峰⁵

1. 河南省生态环境监测和安全中心, 河南 郑州 450018

2. 河南省郑州生态环境监测中心, 河南 郑州 450007

3. 河南省洛阳生态环境监测中心, 河南 洛阳 471000

4. 中国环境科学研究院, 北京 100012

5. 上海淳禧应用技术股份有限公司, 上海 200000

摘要:采用美国环保署 Method 202 对某 4 台典型燃煤锅炉烟气中的可凝结颗粒物 (CPM) 进行了采样分析, 结果表明: 进行过超低排放改造的 4 台受试锅炉烟气中的可过滤颗粒物 (FPM) 的浓度均小于 5 mg/m^3 , CPM 浓度分别高达 $(29.7 \pm 7.3) \text{ mg/m}^3$ 、 $(66.9 \pm 7.8) \text{ mg/m}^3$ 、 $(67.4 \pm 8.2) \text{ mg/m}^3$ 、 $(9.8 \pm 1.3) \text{ mg/m}^3$ 。CPM 离子构成中, 阴离子以硫酸根离子、氯离子、硝酸根离子为主, 阳离子以铵根离子为主。CPM 的形成主要与脱硫浆液中溶解的硫酸铵及氯化铵等易溶盐分有关, 与脱硫工艺采用的脱硫剂种类无明显关联。选择性非催化还原 (SNCR) 脱硝工艺过量喷氨会导致氨逃逸及 CPM 浓度增高, 这些 CPM 进入大气后会形成气溶胶, 进而加重空气污染。实验研究证明, CPM 在典型燃煤锅炉烟气中不可忽视。关于如何高效治理 CPM 以及优化 CPM 采样分析流程, 需要环保科研人员开展进一步的研究和实践。

关键词: 典型燃煤锅炉; 可凝结颗粒物; 排放特征

中图分类号: X513 文献标志码: A 文章编号: 1002-6002(2025)04-0130-08

DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2025.04.12

Study on the Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter in Flue Gas of Coal-Fired Heating Boilers

PENG Guowei¹, WANG Chong², MENG Zhe³, ZHAO Xinna¹, PING Xiaofan¹, WANG Lingling¹, DU Jinhong⁴, LI Leigang³, LI Feng⁵

1. Henan Provincial Ecological Environment Monitoring and Safety Center, Zhengzhou 450018, China

2. Zhengzhou Ecological and Environmental Monitoring Center of Henan Province, Zhengzhou 450007, China

3. Luoyang Ecological and Environmental Monitoring Center of Henan Province, Luoyang 471000, China

4. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

5. Shanghai AlwaysBrong Application Technology Co., Ltd., Shanghai 200000, China

Abstract: Condensable particulate matter (CPM) in flue gas of four typical coal-fired boilers was sampled and analyzed by US EPA Method 202. The results showed that the filterable particulate matter (FPM) concentrations of the four tested boilers that had upgraded ultra-low emission were all less than 5 mg/m^3 , while CPM concentrations reached $(29.7 \pm 7.3) \text{ mg/m}^3$, $(66.9 \pm 7.8) \text{ mg/m}^3$, $(67.4 \pm 8.2) \text{ mg/m}^3$, and $(9.8 \pm 1.3) \text{ mg/m}^3$, respectively. Ionic composition analysis revealed sulfate, chloride, and nitrate as dominant anions, with ammonium being the primary cation. CPM formation primarily correlated with soluble salts such as ammonia sulfate and ammonium chloride dissolved in the desulfurization slurry, showing no significantly related to the type of desulfurizer used in the desulfurization process. Excessive ammonia injection in selective non-catalytic reduction (SNCR) denitrification process contributed to ammonia escape and elevated the concentration of CPM. These CPM will form aerosols after entering the atmosphere and aggravate air pollution. Experimental studies demonstrate that CPM can not be ignored in the flue gas of typical coal-fired boilers. How to effectively control CPM and optimize the sampling and analysis process of CPM requires environmental protection researchers to carry out further sufficient research and practice.

Keywords: typical coal-fired boilers; condensable particulate matter; emission characteristics

美国环保署 (US EPA) 对可凝结颗粒物 (Condensable Particulate Matter, CPM) 的定义为:

该物质在排放烟道中的状态为气态, 离开烟道后经环境空气稀释降温, 会凝结或反应生成固态或

收稿日期: 2024-05-28; 修订日期: 2024-10-28

第一作者简介: 彭国伟 (1974-), 男, 湖南衡阳人, 学士, 高级工程师。

通讯作者: 李雷刚

液态颗粒物(PM)^[1]。US EPA 还规定,总颗粒物(Total Particulate Matters, TPM)包含可过滤颗粒物(Filterable Particulate Matters, FPM)和 CPM 两部分^[2]。CPM 的主要成分是气溶胶,其空气动力学直径小于 1 μm ,是形成雾霾的核心物质^[3]。CPM 基础数据缺失将导致固定源颗粒物排放量被低估,这是在实现大气污染精准科学治理过程中值得高度关注的问题^[4]。实际生产中,部分燃煤锅炉使用非主流污染治理工艺组合,且实际治理设施相对简易低效或运维粗放,存在如喷氨雾化不佳或流量无法精准控制、分布式控制系统(DCS)反馈信息不准确、计量仪表失准失效等情况,导致其 CPM 污染排放问题突出。这些设施在气态污染物治理过程中会因脱硝装置过量喷氨而产生大量水溶性盐和有机物,而这些物质无法被现有 FPM 手工监测方法和在线监测系统观测到,且其随液滴进入烟气并被排放到大气中后,会成为凝结核,促进大气非均相反应,导致颗粒物快速增长。随着相关行业超低排放改造的急速推进,FPM 对大气污染的贡献急剧降低,而 CPM 对大气颗粒物的贡献则日益增大^[4]。

国内外针对燃煤电厂及燃煤锅炉排放的 FPM 及 CPM 进行了不少分析研究。CORIO 等^[5]认为,对 CPM 的忽视可能会造成对固定源一次颗粒物排放量产生较大程度的低估。其测试结果表明,CPM 平均占总 PM_{10} 排放量的 76%;18 家燃煤源测试结果中,CPM 平均占 TPM 排放量的 49% (范围为 12%~92%),FPM 平均占 TPM 排放量的 51% (范围为 8%~88%)。裴冰等^[6]采用 EPA Method 202(冲击冷凝法)对燃煤电厂的测试结果显示,CPM 的平均排放浓度为 $(21.2 \pm 3.5) \text{ mg/m}^3$,同步使用国标方法测得的 FPM 的平均排放浓度为 $(20.6 \pm 10.0) \text{ mg/m}^3$,两者处于相同水平,均不可忽视。胡月琪等^[7]对北京市燃煤电厂、供热厂和工业企业的监测结果表明,CPM 排放量占 TPM 排放量的比例为 43.5%~92.2%;燃煤锅炉烟气中的颗粒物和可溶性离子排放水平与烟气含湿量无显著相关性,而与随烟气排放的水汽的“洁净”程度有关,即与脱硫除尘工艺、脱硫产物的溶解度及其脱除方式密切相关;烟温越高,水溶性离子和 CPM 以气态形式存在的比例越大。孙和泰等^[8]发现,超低排放燃煤电厂经静电除尘后的烟气中,CPM 占主导地位,其在湿法脱硫入口、湿法脱硫出口、湿电除尘出口的质量浓度分别

为 24.07、12.71、7.72 mg/m^3 ,在各点位 TPM 中的占比分别为 61.83%、53.34%、76.06%,因而超低排放燃煤电厂 CPM 排放不容忽视。戴争博等^[9]对经超低排放改造后的燃煤电厂的 FPM 及 CPM 排放进行了监测,得到的 FPM 的排放浓度均值为 2.51 mg/m^3 ,CPM 的排放浓度均值为 4.85 mg/m^3 ,较超低排放改造前分别下降了 88% 和 77%;低温电除尘+湿法脱硫+湿电除尘联用方式对 CPM 的协同脱除效果最佳。胡月琪等^[10]对北京市燃气电厂排气的研究表明,FPM 在 TPM 中的平均占比为 3.0%,CPM-F(由 CPM 滤膜捕集到的 CPM)在 TPM 中的平均占比为 5.2%,CPM-D(由冷凝液捕集到的 CPM)在 TPM 中的平均占比为 91.9%。

综上,燃煤锅炉废气中的 CPM 的排放量被严重低估,这与当前持续推动大气环境质量改善的要求相悖。同时,国内对 CPM 排放的研究集中在超低排放燃煤或燃气发电锅炉,很少有针对污染治理设施较落后或采用非主流治理工艺组合的典型燃煤锅炉进行的专项研究。本文选择 4 台采用不同气态污染物治理工艺的典型燃煤锅炉作为研究对象,对其烟气中的 FPM、CPM 进行采样测试,对锅炉运行工况、FPM 浓度、CPM 浓度及 CPM 中的主要阳离子和阴离子的质量浓度进行对比分析,以梳理典型燃煤锅炉 CPM 源头排放控制措施,为有效防控燃煤供热行业及采用类似污染治理工艺的其他行业的大气污染提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究对象

本文的研究对象为某市用于供热的 4 台循环流化床燃煤锅炉。采样时正处于供暖季,锅炉运行负荷较为稳定,整体波动均在 $\pm 11\%$ 以内。锅炉参数及污染治理工艺见表 1,锅炉运行负荷见图 1。

1.2 采样与回收

国际上针对 CPM 的测试方法包括冲击冷凝法、间接稀释法、直接稀释法三类,其优缺点见表 2。本研究采用冲击冷凝法进行采样分析,该方法具有以下优势:(1)设备成本相对较低,耗材更换较方便;(2)操作过程更易标准化,采样条件可控性强;(3)可实现 CPM 完全收集(稀释法为部分收集),样品变异性较小,采样稳定性更好^[11-17]。

表1 锅炉基本参数汇总

Table 1 Summary of boiler basic parameters

锅炉指标	锅炉1	锅炉2	锅炉3	锅炉4
锅炉容量/(t/h)	45	260	220	160
煤含硫量/%	0.40	0.32	0.55	0.40
测试期间燃煤用量/(t/h)	3.7	48.4	32.4	14.0
日平均运行负荷/%	60	115	88	74
污染治理工艺	选择性非催化还原(SNCR)脱硝+选择性催化还原(SCR)脱硝+布袋除尘+石灰石-石膏湿法脱硫	SNCR脱硝+布袋除尘+臭氧脱硝+石灰石-石膏湿法脱硫	SNCR脱硝+SCR脱硝+布袋除尘+氨法脱硫	SNCR脱硝+臭氧脱硝+布袋除尘+氧化镁脱硫*
烟囱流量/(万 m ³ /h)	3.4	36.3	25.6	11.3

注：“*”表示采样当天臭氧脱硝装置未开启，脱硫剂采用氧化镁浆液。

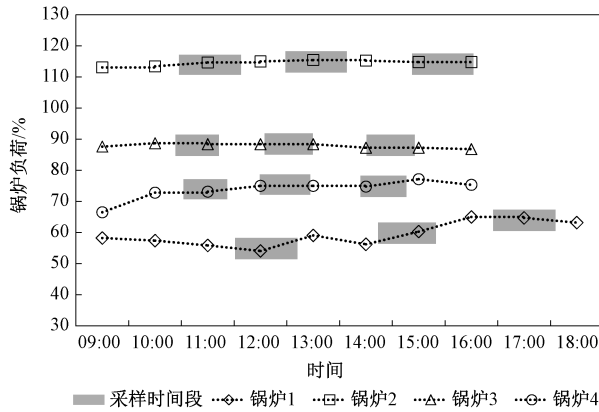


图1 采样当日锅炉运行负荷及采样时间段

Fig. 1 Boiler operating load and sampling period on the sampling day

表2 CPM测试方法对比

Table 2 Comparison of CPM test methods

项目	冲击冷凝法	间接稀释法	直接稀释法
标准	EPA Method 202	EPA Method CTM-039	EPA Method CTM-039
优点	操作较为简便,整个流程按照有组织废气采样程序进行;设备成本相对较低;采样条件可随工况调控	能较好地模拟烟气在空气中的冷凝过程	比较容易模拟烟气在空气中的冷凝过程
缺点	采样过程中,烟气中的二氧化硫会溶于冷凝水,可能转化为硫酸根离子,导致CPM测量结果出现正偏差;样品回收前,需使用高纯氮气吹扫,以尽可能消除影响	操作复杂,需要保证稀释气的净化度,对稀释过程控制和样品采集的要求较高;计算过程为差减法,容易引入偶然误差,导致测量结果出现正负偏差,测量不确定度较大	操作复杂,需要保证稀释气的净化度,对稀释过程控制的要求较高;实际操作中,CPM不完全冷凝会导致测量结果出现负偏差

冲击冷凝法的原理为通过冷凝管将滤除FPM后的烟气直接冷却到30℃以下,使得可形成CPM的气态物质在样品采集通道中凝结并停留在管壁和CPM滤膜上。采样结束后,使用去离子水、丙酮和正己烷冲洗,以收集冷凝析出的无机物和有机物。

本文所采用的采样设备包括120℃以上伴热烟气采样管、120℃以上伴热FPM滤膜夹、蛇形冷凝管、CPM冲击瓶、CPM滤膜夹、双级干燥瓶、X1-APIS智能烟尘采样仪等。其中,烟气采样管

内芯、滤膜夹、冷凝管和各部件接头等均为玻璃材质,FPM滤膜托架和CPM滤膜托架为聚四氟乙烯(PTFE)材质。

1.3 试剂和耗材

采样用试剂:去离子水、正己烷(优级纯)、丙酮(优级纯)。

采样用滤膜:FPM滤膜(石英材质,直径47mm,过滤精度0.3μm)、CPM滤膜(PTFE材质,直径90mm,过滤精度1μm)。

实验室分析试剂:浓硝酸(优级纯)、标准储

备液(购自生态环境部环境发展中心环境标准样品研究所)、标准使用液(使用标准储备液按规范配制)、硝酸淋洗液($c=2.0\text{ mmol/L}$)。

1.4 样品保存及处理

CPM 滤膜:两次对折后用铝箔包覆,置于保存箱中,并在运输全程保证温度不超过 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

FPM 滤膜:置于专用滤膜盒中,并在运输全程保证集尘面朝上。

液体样品:置于棕色玻璃样品瓶中,并在运输全程保证密封冷藏。

1.5 样品分析

1.5.1 FPM 称重

使用 RT-AWS1 滤膜自动称重系统,对 FPM 滤膜采样前初重、采样后终重进行称量。烘干滤膜后,将其置于自动称重系统内,在恒温恒湿箱内恒重后,自动进行称量。

1.5.2 CPM 样品分析

将 CPM 滤膜置于 50 mL 萃取管中,加入去离子水完全覆盖滤膜(约 20 mL)。将萃取管置于超声波振荡槽内持续振荡 2 min ,随后将萃取液倒入无机物回收液中。重复上述步骤两次(总共萃取 3 次)。合并萃取液于无机物回收液中,并转移至 250 mL 容量瓶。用纯水荡洗无机物回收液容器内壁,同样转移至容量瓶中,定容至刻线,混匀。取 15 mL 定容后的溶液过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜,然后使用离子色谱仪分析测试。

1.6 质量控制

样品采集前,验证所使用的全部试剂,保证其蒸发残余量均低于 1.0 mg/L ;验证所有采样使用的玻璃器皿及样品容器,保证其本底贡献量不超过 0.5 mg 。

样品采集过程中,设置专门的样品回收区域,

要求操作人员佩戴洁净丁腈手套,确保样品不受污染,并留取全程序空白样品作为对照;同时确保现场试剂空白、现场验证空白、现场取样序列回收空白均符合要求。采集每组样品前后,均对采样设备进行全系统气密性检查,保证气体泄漏率低于采样总体积的 4% 。

样品采集后,立即将滤膜样品及液体样品分别装入专用保存箱,尽可能缩短外界暴露时间。

2 测试结果

2.1 CPM、FPM 质量浓度测试结果分析

4 台受试锅炉烟气中,FPM 浓度均小于 5 mg/m^3 ,CPM 浓度在 $9.8\sim 67.4\text{ mg/m}^3$ 之间,CPM 占 TPM 的比例分别为 98.3% 、 93.3% 、 99.6% 和 86.7% (表 3)。

1~4 号锅炉 FPM 浓度分别为 $(0.5\pm 0.3)\text{ mg/m}^3$ 、 $(4.8\pm 0.2)\text{ mg/m}^3$ 、 $(0.3\pm 0.1)\text{ mg/m}^3$ 、 $(1.5\pm 0.1)\text{ mg/m}^3$ (图 2)。除 2 号锅炉 FPM 浓度略高于在线监测结果之外,其余均远小于在线监测结果。出现该现象的原因是使用 EPA Method 202 采样时,FPM 滤膜位于采样管末端,烟气中的颗粒物在到达滤膜之前在采样管内部发生沉积黏附,导致出现采样损失。同时,受试锅炉烟气 FPM 浓度均小于 5 mg/m^3 ,达到超低排放水平,因而采样损失对测试结果影响较大。比较 CPM 浓度与在线监测系统显示的二氧化硫及氮氧化物排放浓度(图 3)发现,1、3、4 号锅炉的 CPM、二氧化硫、氮氧化物排放浓度及氨逃逸浓度并未出现同增同减的趋势,但 2 号锅炉 FPM、CPM 排放浓度及氨逃逸浓度均较高,可能与 2 号锅炉处于超负荷生产运行状态有关。

表 3 FPM、CPM 及主要离子平均质量浓度

Table 3 FPM, CPM and average mass concentration of main ions

锅炉名称	锅炉容量/(t/h)	FPM/(mg/m^3)	CPM/(mg/m^3)	TPM/(mg/m^3)	硫酸根离子/(mg/m^3)	铵根离子/(mg/m^3)
锅炉 1	45	0.47	29.7	30.2	13.1	4.3
锅炉 2	260	4.80	66.8	71.6	35.1	18.0
锅炉 3	220	0.27	67.4	67.7	42.4	11.3
锅炉 4	160	1.49	9.8	11.3	2.8	0.9

2.2 CPM 阴阳离子质量浓度测试结果分析

4 台受试锅炉烟气的 CPM 离子构成中,阴离子以硫酸根离子、氯离子、硝酸根离子为主,阳离子以铵根离子为主(图 4)。阴离子中,硫酸根离子提供了大部分的负电荷,占比 $55\%\sim 96\%$;氯离

子是负电荷的第二大贡献源,占比 $3\%\sim 24\%$ 。阳离子中,铵根离子提供了绝大部分的正电荷,占比 $74\%\sim 98\%$;钙离子和钠离子次之,占比均在 $1\%\sim 15\%$ 之间。从正负电荷平衡的角度来看,本次实验分析的阴阳离子基本达到平衡,说明离子分析

结果准确可靠^[18-20]。4台采用不同气态污染物治理工艺的燃煤锅炉烟气CPM阳离子中,与脱硫剂相关的钙离子和镁离子的占比均小于15%,说明CPM组分与湿法脱硫采用的脱硫剂种类关系不大,CPM阳离子主要来自脱硫浆液内溶解的硫酸铵及氯化铵等易溶盐类物质,而氯离子则主要来自燃料煤。

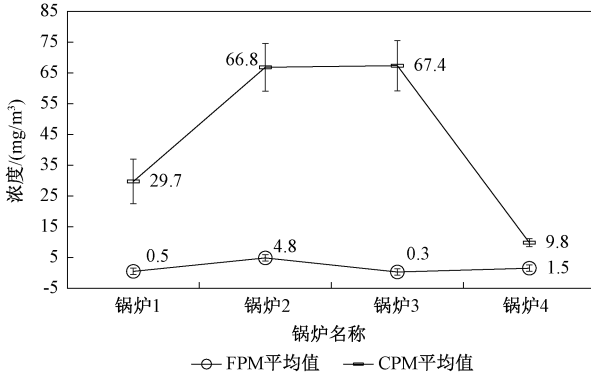
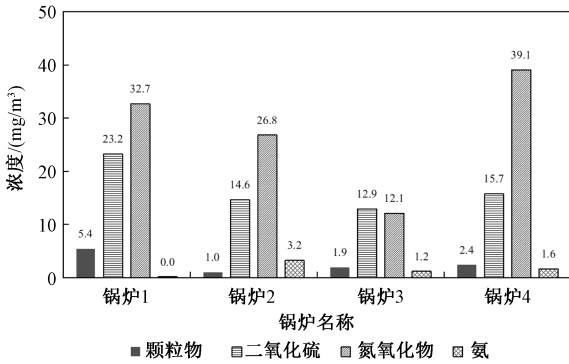


图2 FPM及CPM测试结果

Fig. 2 FPM and CPM test results



注:颗粒物采用同时段在线监测结果均值,二氧化硫、氮氧化物和氨采用同时段便携式仪器测试结果均值。

图3 常规污染物手工监测结果

Fig. 3 Manual monitoring results of conventional pollutants

从各离子组分浓度(图5、图6)来看,4台锅炉烟气CPM的离子构成各有不同:锅炉1采用常见的燃煤电厂超低排放控制技术路线,治理工艺组合为SNCR脱硝+SCR脱硝+布袋除尘+石灰石-石膏湿法脱硫,烟气中的CPM离子组分以硫酸根离子、铵根离子、氯离子、钙离子为主。锅炉2采用SNCR脱硝+布袋除尘+臭氧脱硝+石灰石-石膏湿法脱硫作为治理工艺组合。由于未使用脱硝催化剂,锅炉2脱硝设施的氨逃逸浓度高于锅炉1,CPM离子组分中的硫酸根离子及铵根离子占比

高于锅炉1。同时,由于采用臭氧氧化法脱硝,锅炉2烟气CPM中含有较高浓度的硝酸根离子和亚硝酸根离子。锅炉3采用SNCR脱硝+SCR脱硝+布袋除尘+氨法脱硫作为治理工艺组合。由于采用氨水作为脱硫剂,锅炉3烟气CPM离子组分以硫酸根离子和铵根离子为主。

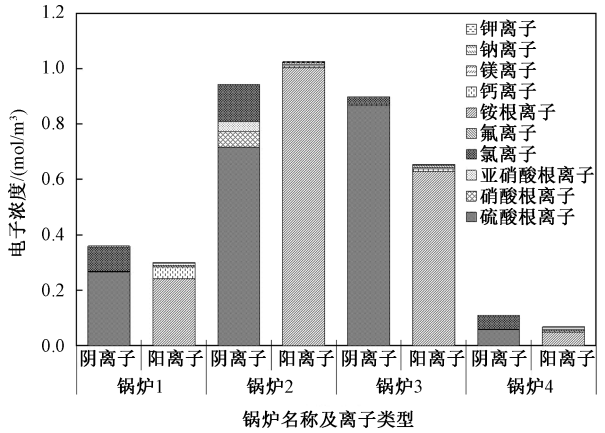


图4 CPM中10种主要阴阳

离子的电荷数量关系

Fig. 4 The quantitative relationship between the charge of ten main anions and cations in CPM

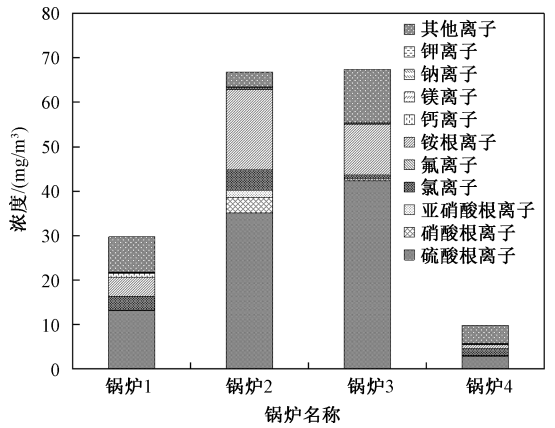


图5 CPM离子浓度

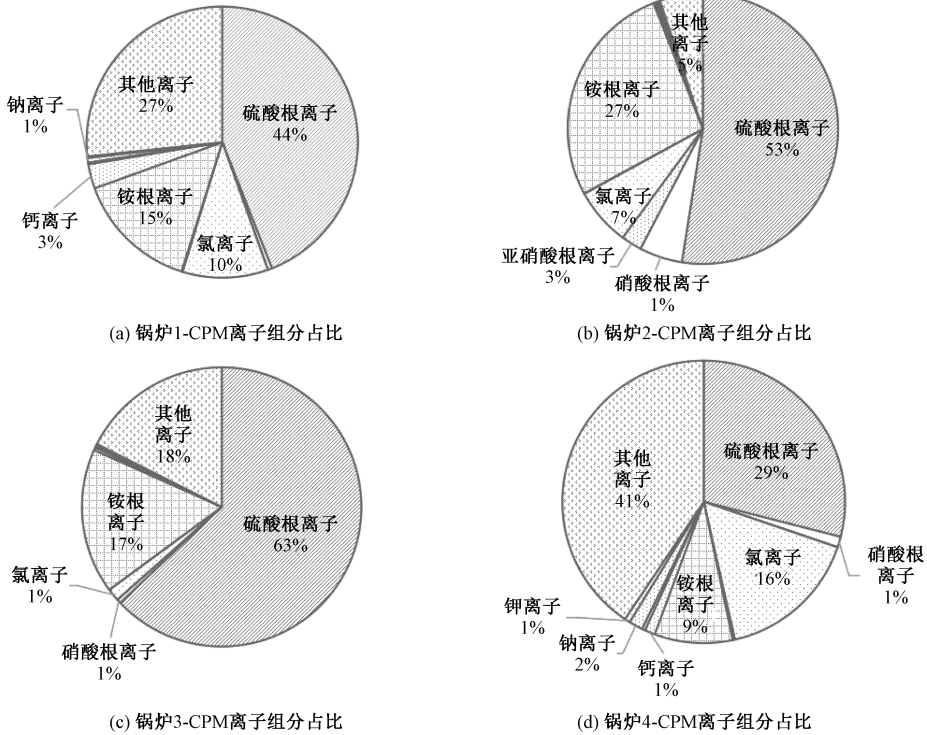
Fig. 5 The concentration of ions in CPM

2.3 过量喷氨对CPM的影响

采用SNCR脱硝的锅炉存在过量氨进入脱硫浆液并以CPM形式排放的问题。锅炉2采用SNCR脱硝+布袋除尘+臭氧脱硝+石灰石-石膏湿法脱硫的治理工艺组合。测试结果显示,该锅炉CPM排放浓度高达(66.9±7.8) mg/m³。离子组分分析结果显示,该锅炉烟气CPM中,硫酸根离子浓度高达35.1 mg/m³,铵根离子浓度高达18.0 mg/m³。此外,该锅炉烟气CPM中的硫酸根离子、亚硫酸根离子、氯离子排放浓度在4台锅炉中

最高。这说明锅炉 2 配备的 SNCR 脱硝装置因过量喷氨导致烟气中存在较高浓度的氨逃逸,而逃逸的氨在后续的湿法脱硫塔中进入脱硫浆液,使浆液中存在大量铵根离子,最终与硫酸根离子在脱硫塔喷淋洗涤过程中通过液气固三相转换形成盐类化合物,随烟气排放。此外,CPM

组分中出现大量的硝酸根及亚硝酸根离子,说明在臭氧氧化作用下,烟气中的一氧化氮被氧化为二氧化氮,进而在脱硫塔中通过气液交换进入脱硫浆液,形成硝酸根及亚硝酸根离子。这些离子同样可通过液气固三相转换再次进入烟气中并随之排放。



注:其他离子组分为 CPM 浓度减去离子色谱测试得到的硫酸根离子、硝酸根离子、亚硝酸根离子、氯离子、氟离子、铵根离子、钙离子、镁离子、钠离子、钾离子 10 种阴阳离子浓度后的结果。

图 6 CPM 离子组分占比

Fig. 6 The proportion of ionic components in CPM

3 结论

测试结果表明,4 台受试锅炉烟气 FPM 浓度均小于 5 mg/m^3 , CPM 浓度分别高达 $(29.7 \pm 7.3) \text{ mg/m}^3$ 、 $(66.9 \pm 7.8) \text{ mg/m}^3$ 、 $(67.4 \pm 8.2) \text{ mg/m}^3$ 、 $(9.8 \pm 1.3) \text{ mg/m}^3$, 表明 CPM 在典型燃煤锅炉烟气中不可忽视。4 台受试锅炉在采用 3 种不同脱硫剂的情况下,烟气 CPM 离子构成中的阴离子均以硫酸根离子、氯离子、硝酸根离子为主,阳离子均以铵根离子为主,说明 CPM 离子构成与脱硫剂本身的化学成分无明显关联,CPM 的形成与脱硫工艺采用的脱硫剂种类无关,CPM 离子主要来自脱硫浆液中溶解的硫酸铵及氯化铵等易溶盐分。另外,锅炉 2 采用的是 SNCR 脱硝+布袋除尘+臭

氧脱硝+石灰石-石膏湿法脱硫的治理工艺组合,存在过量喷氨产生的高浓度逃逸氨在后续湿法脱硫过程中会生成盐类化合物并以 CPM 形式排放的问题,而这些 CPM 进入大气后会快速凝结形成颗粒状物质。因此,该工艺组合的次生污染及转移排放问题应引起关注。

CPM 测试是鉴别简易低效治理设施、质量低劣治理设施和转移排放的良好技术手段,也是对固定污染源废气真实排放情况进行全面评估不可或缺的重要环节。但是 EPA Method 202 规定的冲击冷凝法的采样环节比较烦琐,设备笨重且附件繁多,需要逐步对其采样设备序列进行简化和优化。建议后期围绕以下几个方面进一步研究利用冷凝法测试 CPM 的优化改进方案:一是对二氧化硫浓度较低的烟气进行样品采集时,适当缩

短氮吹时间;二是通过优化布局及形态设计,提高设备集成度,以降低采样设备的重量和体积;三是参考三氧化硫及氨的监测方法,优化 EPA Method 202 部分步骤;四是根据采样和分析需求,有针对性地开发适配度更佳的专用耗材和配件。另外,在超低排放烟气中,CPM 占 TPM 的比例越来越高。关于如何高效率、低成本地治理 CPM 排放,需要相关环保科研人员开展针对性的研究和实践。

参考文献 (References):

- [1] US EPA. Method 202: Dry Impinger Method for Determining Condensable Particulate Matters from Stationary Source[S]. Washington:US EPA,2017.
- [2] PAGE S D. Interim Guidance on the Treatment of Condensable Particulate Matter Test Results in the Prevention of Significant Deterioration and Nonattainment New Source Review Permitting Programs[R]. Washington:US EPA,2014.
- [3] 裴冰. 固定源排气中可凝结颗粒物排放与测试探讨[J]. 中国环境监测,2010,26(6):9-12.
PEI Bing. Discussion on the Emission Issues and Testing of Condensable Particulate Matter from Exhaust Gas of Stationary Source[J]. Environmental Monitoring in China,2010,26(6):9-12.
- [4] 江得厚,苏跃进. 治霾当务之急是控制可凝结颗粒物的排放浓度[J]. 电力科技与环保,2018,34(4):1-6.
JIANG Dehou, SU Yuejin. The Haze Pollution Controlling Requires Emission Concentration Reducing of Condensable Particulates First [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection,2018,34(4):1-6.
- [5] CORIO L A, SHERWELL J. In-Stack Condensible Particulate Matter Measurements and Issues [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2000,50(2):207-218.
- [6] 裴冰. 燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放[J]. 环境科学,2015,36(5):1 544-1 549.
PEI Bing. Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-Fired Power Plants [J]. Environmental Science, 2015, 36 (5):1 544-1 549.
- [7] 胡月琪,冯亚君,王琛,等. 燃煤锅炉烟气中 CPM 与水溶性离子监测方法及应用研究[J]. 环境监测管理与技术,2016,28(1):41-45.
HU Yueqi, FENG Yajun, WANG Chen, et al. Studies on Monitoring Method of Condensable Particulate and Water-Soluble Ions in Fumes from Coal Fired Boilers [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring,2016,28(1):41-45.
- [8] 孙和泰,黄治军,华伟,等. 超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物排放特性[J]. 洁净煤技术,2021,27(5):218-223.
SUN Hetai, HUANG Zhijun, HUA Wei, et al. Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from an Ultra-Low Emission Coal-Fired Power Plant[J]. Clean Coal Technology,2021,27(5):218-223.
- [9] 戴争博,徐航,谢一鸣,等. 燃煤电厂超低排放改造对可凝结颗粒物排放的影响[J]. 环境污染与防治,2021,43(4):453-457.
DAI Zhengbo, XU Hang, XIE Yiming, et al. Influence of Ultra-Low Emission Retrofit on the Condensable Particulate Matter Emission in the Coal-Fired Power Plant[J]. Environmental Pollution & Control,2021,43(4):453-457.
- [10] 胡月琪,颜旭,孔川,等. 超低排放高湿废气总颗粒物监测方法及燃气电厂实际测试[J]. 环境科学,2020,41(8):3 563-3 571.
HU Yueqi, YAN Xu, KONG Chuan, et al. Monitoring Method of Total Particulate Matter in Ultra-Low-Emission and High-Humidity Exhaust Gas from Stationary Sources and an Actual Test in a Gas Power Plant [J]. Environmental Science, 2020, 41 (8): 3 563-3 571.
- [11] 李军状,朱法华,李小龙,等. 燃煤电厂烟气中可凝结颗粒物测试研究进展与方法构建[J]. 电力科技与环保,2018,34(1):37-44.
LI Junzhuang, ZHU Fahua, LI Xiaolong, et al. Progress and Method Construction of Condensable Particles in Flue Gas of Coal-Fired Power Plants[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection,2018,34(1):37-44.
- [12] FENG Y P, LI Y Z, CUI L. Critical Review of Condensable Particulate Matter[J]. Fuel,2018,224:801-813.
- [13] 朱法华,李小龙,段玖祥,等. 固定污染源排放可凝结颗粒物采样方法综述[J]. 环境监控与预警,2019,11(3):1-5,11.
ZHU Fahua, LI Xiaolong, DUAN Jiuxiang, et al. A Review of Sampling Methods of Condensable Particle Matter Emission from Stationary Source [J]. Environmental Monitoring and Forewarning,2019,11(3):1-5,11.
- [14] 张斌,杨柳,李军状,等. 燃煤锅炉烟气可凝结颗粒

- 物研究进展[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(2): 99-103.
- ZHANG Bin, YANG Liu, LI Junzhuang, et al. Research Progress on Condensable Particulate Matter Emitted from Coal-Fired Boiler [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(2): 99-103.
- [15] 蒋靖坤, 邓建国, 王刚, 等. 固定污染源可凝结颗粒物测量方法[J]. 环境科学, 2019, 40(12): 5 234-5 239.
- JIANG Jingkun, DENG Jianguo, WANG Gang, et al. Measuring the Condensable Particle Matter from a Stationary Source [J]. Environmental Science, 2019, 40(12): 5 234-5 239.
- [16] 李小龙, 朱法华, 段玖祥, 等. 固定污染源排放可凝结颗粒物研究进展[J]. 化工进展, 2019, 38(11): 5 091-5 102.
- LI Xiaolong, ZHU Fahua, DUAN Jiuxiang, et al. An Overview of Condensable Particulate Matter Emission from Stationary Sources [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(11): 5 091-5 102.
- [17] 李妍菁, 邓建国, 王刚, 等. 固定源可凝结颗粒物稀释采样器的设计[J]. 环境科学学报, 2020, 40(5): 1 656-1 660.
- LI Yanjing, DENG Jianguo, WANG Gang, et al. Design of Dilution Sampler for Measuring Condensable Particulate Matter from Stationary Sources [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(5): 1 656-1 660.
- [18] 彭越, 汪涛, 王家伟, 等. 燃煤烟气中可凝结颗粒物测试方法评估[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2021, 48(3): 117-126.
- PENG Yue, WANG Tao, WANG Jiawei, et al. Evaluation of Sampling and Analytical Methods for Condensable Particulate Matter in Flue Gas During Coal Combustion [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2021, 48(3): 117-126.
- [19] 于洋, 周欣, 程俊峰, 等. 燃煤电厂可凝结颗粒物检测方法、排放特征及脱除技术研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(8): 4 515-4 524.
- YU Yang, ZHOU Xin, CHENG Junfeng, et al. Research Progress in Detection Methods, Emission Natures and Removal Technologies of Condensable Particulate Matter from Coal-Fired Power Plants [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(8): 4 515-4 524.
- [20] 吴凯, 李军状, 朱林, 等. 典型超低排放燃煤电厂总颗粒物中水溶性离子分布规律研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1 895-1 904.
- WU Kai, LI Junzhuang, ZHU Lin, et al. Distribution Characterizations of Water-Soluble Ions in Total Particulate Matter of Typical Ultra-Low Emission Coal-Fired Power Plants [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1 895-1 904.