



文章栏目: 大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202010034

中图分类号 X513

文献标识码 A

沈志刚, 李冠华, 刘泽宇, 等. 可凝结颗粒物采样系统的优化设计及实测应用[J]. 环境工程学报, 2021, 15(10): 3262-3269.  
SHEN Zhigang, LI Guanhua, LIU Zeyu, et al. Optimal design and determination study of condensable particulate matter sampling system[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(10): 3262-3269.

## 可凝结颗粒物采样系统的优化设计及实测应用

沈志刚<sup>✉</sup>, 李冠华, 刘泽宇, 义超

上海创蓝检测技术有限公司, 上海 200233

第一作者: 沈志刚(1983—), 男, 博士, 高级工程师。研究方向: 污染治理、环境监测。E-mail: feiyejiange@aliyun.com

✉通信作者

**摘要** 燃煤电厂烟气中可凝结颗粒物(CPM)主要由无机成分组成,其排放会影响大气环境。为有效捕集烟气中 CPM 并研究其无机组分排放特性,采用自主优化设计的 CPM 采样装置,就国家大气污染防治重点区域内 3 台 600 MW 等级以上超低排放燃煤机组开展了烟气中 CPM 实测研究,同时对采样装置的有效性、可靠性进行了探讨。该装置利用半导体材料进行制冷,与常规采样装置相比体积轻巧、便于携带、捕集效率高、冷凝效果好,且使用成本低。研究结果表明:燃煤电厂中 A、B、C 3 个机组烟囱排口的 CPM 质量浓度分别为 2.22、3.02、3.83 mg·m<sup>-3</sup>; CPM 无机水溶性离子中,阴离子主要有 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>等,阳离子主要有 Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>等;其中,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>质量浓度占比均大于 50%,在水蒸气存在的情况下,会与 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>产生硫酸氢铵和硫酸铵;而硫酸氢铵易与烟气中的水蒸气结合形成酸雾,会腐蚀烟气管道,还会因其黏附性较强附着飞灰等杂质在管道表面沉积附着,加剧管道的腐蚀和结垢。本研究结果可为探究超低排放燃煤电厂烟气中 CPM 的排放特性提供参考。

**关键词** 燃煤电厂烟气;可凝结颗粒物;半导体制冷;排放特性

燃煤电厂固定污染源的颗粒物排放是造成大气污染的重要原因。近年来,我国各大燃煤电厂进行了除尘设备的升级改造,大大降低了颗粒物的排放浓度。国内外相继出台相关测试标准方法以便能更准确监测大气中的固定源污染物,如固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法(GB/T 16157-1996)<sup>[1]</sup>、固定污染源废气低浓度颗粒物的测定重量法(HJ 836-2017)<sup>[2]</sup>和可凝结颗粒物测试标准(US EPA Method 202)<sup>[3]</sup>等。固定污染源排放的一次总颗粒物(total particulate matter, TPM)是由可过滤颗粒物(filterable total particulate matter, FPM)与可凝结颗粒物(condensable particulate matter, CPM)共同组成<sup>[4-5]</sup>。我国现行颗粒物采样方法大多针对 FPM,而忽视了颗粒物中的 CPM。这意味着 TPM 的排放水平被低估,故目前我国关于固定源颗粒物的测试结果(即 FPM)并不能代表固定源颗粒物的真实排放情况。CORIO 等<sup>[6]</sup>对燃煤烟气实测得出,燃煤锅炉 PM<sub>10</sub> 中 CPM 占 76%。LI 等<sup>[7]</sup>的研究结果表明,CPM 占总 TPM 的 83.20%。而 YANG 等<sup>[8]</sup>对多家燃煤电厂的测试结果表明,CPM 在 TPM 中占 50% 以上。以上研究表明,CPM 在总 TPM 中占比越大,其浓度会随着颗粒物粒径的减小和排烟温度的升高而逐渐提高<sup>[9]</sup>。

CPM 在固定污染源烟道内为气体状态,但其排入大气后,随着温度的降低,会立即凝结成

收稿日期: 2020-10-10; 录用日期: 2021-01-29

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0203701)

颗粒物状态。CPM 对环境的影响是由于其物理形态及化学组成<sup>[10-13]</sup>所导致。从物理形态上看，CPM 的粒径一般小于 1  $\mu\text{m}$ ，由气态物质凝聚而成，以气溶胶的形式存在于环境空气中，通过在大气中凝结和扩散对区域空气质量产生不利影响，影响到大气能见度，甚至致霾<sup>[14]</sup>；从化学组成上看<sup>[15-16]</sup>，CPM 主要为无机组分，富集了各种重金属(例如砷、硒、铅、铬等)和多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbon, PAHs)等致癌物质与基因毒性诱变物质，对环境和人类有极大危害；同时，由于 CPM 比表面积较大，吸附性较强，可携带各种污染物进入大气环境中，催化大气中的某些化学反应<sup>[17]</sup>。因此，有必要详细分析 CPM 中无机组分的排放特性。

测定 CPM 排放量对完整测算燃煤电厂向大气环境中排放的颗粒物含量意义重大，并已成为污染物排放监测的重要内容，而如何高效率捕集 CPM 为当前的研究重点。目前，捕集并测试 CPM 的方法有冲击冷凝法<sup>[3]</sup>和稀释冷凝法<sup>[18]</sup>2 种。李兴华等<sup>[19]</sup>对稀释冷凝法用到的稀释采样系统进行了研制、优化与应用。周楠等<sup>[20]</sup>对固定源稀释通道的设计与外场测试进行研究，对稀释比、停留时间等因素进行了优化。然而，上述采样系统无法实现 FPM 与 CPM 的分开采样，且采样装置体积较大，不便携带。YANG 等<sup>[8]</sup>利用冲击冷凝法对 5 个固定源(包括发电厂)的 FPM 和 CPM 排放情况进行了现场监测，但并未进行化学分析。LI 等<sup>[7]</sup>研究了某 1 030 MW 燃煤电厂排放烟气中 CPM 的物理和化学特性，同时对比分析了 CPM 与 FPM 的化学成分。而在实际应用中，该方法易受  $\text{SO}_2$  等水溶性气体的影响。TSUKADA 等<sup>[21]</sup>、杨柳等<sup>[22]</sup>对“湿式冲击冷凝法”进行了改进，用一级螺旋冷凝管与冷凝液吸收瓶代替冲击瓶组，可有效减少  $\text{SO}_2$  等可溶性气体的溶解，但未设置后置 CPM 滤膜，故不能保证充分捕集颗粒态的 CPM。同时，国内燃煤电厂烟气温度跨度较大(50~110  $^{\circ}\text{C}$ )、湿度较高，且易在采样枪中析出大量冷凝物质。为解决采样装置换热效果随水槽中冷凝水温度上升而快速减弱；烟气采样位点较高，现场采样空间受限，现有采样设备体积较大、不便携带等问题，亟需开发一种适合国内固定污染源实际情况的 CPM 采样装置和测试方法，以优化国内固定污染源 CPM 的监测及研究工作。

本研究旨在优化设计一种体积轻巧、便于携带的 CPM 采样装置，对 3 台国家大气污染防治重点区域内的 600 MW 等级以上超低排放燃煤机组进行 CPM 排放状况实测，并分析 CPM 中无机离子的分布与排放特征，以期为燃煤电厂的颗粒物污染监测提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究对象

3 台 600 MW 等级以上超低排放燃煤机组的详细信息见表 1。3 台机组均采用石灰石湿法烟气脱硫技术，用石灰石浆液吸收烟气中的  $\text{SO}_2$ ，脱硫烟气通过安装在吸收塔出口处的两级除雾器实现雾滴捕集。在每台机组的烟囱排口设置采样位点，在相同工况条件下分别采集 3 组样品。测试期间 3 台机组负荷工况保持稳定，净化设施均正常运行。

### 1.2 采样装置

CPM 采样装置<sup>[23]</sup>的结构如图 1 所示，包含滤膜过滤部分、冷凝部分和吸收部分。烟气采样枪中含伴热元件，烟气通过滤膜可过滤掉

其中的 FPM，再通过冷凝装置后，CPM 变为固态或液态的颗粒物状物质，最后被吸收装置吸收。

表 1 燃煤机组基本信息

Table 1 Basic information of the tested coal-fired power plants

机组编号	装机容量/MW	各机组的污染物控制技术
A	600	SCR+WFGD+ESP+MGGH
B	900	SCR+WFGD+ESP+MGGH
C	1 000	SCR+WFGD+LT-ESP+GGH

注：SCR(selective catalytic reduction)为选择性催化还原技术；WFGD(wet flue gas desulphurization)为湿法烟气脱硫技术；ESP(electrostatic precipitator)即电除尘器；LT-ESP(Low temperature electrostatic precipitator)即低低温电除尘器；MGGH(Mitsubishi gas-gas heater)指低低温烟气换热系统；GGH(gas-gas heater)指回转式烟气换热系统。

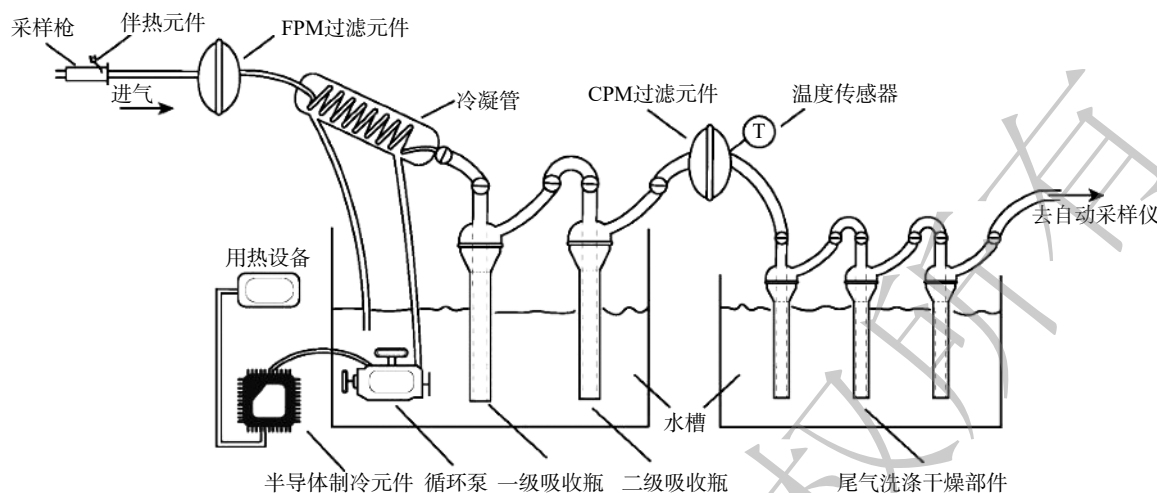


图1 采样装置的流程

Fig. 1 Diagram of sampling device

根据烟气采样体积和吸收装置中增加的颗粒物质量，可计算得到烟气中的 CPM 含量。

与常规方法相比，主要优化了采样装置的冷凝部分。为提升装置的换热性能、提高冷凝效率，当水槽中水温度过高、换热效果不理想时，使用半导体制冷元件对水槽中的水进行强制制冷。相较于其他制冷材料，半导体制冷元件轻便易携，适合现场作业，其最大功率为 500 W。冷凝部分为半导体制冷元件和螺旋冷凝管结合使用。其中，螺旋冷凝管增加了烟气停留时间和换热面积，可有效防止 CPM 逃逸，提高烟气中 CPM 冷凝效果；半导体元件技术原理如图 2 所示，可实现高效制冷<sup>[24-26]</sup>。半导体元件由 1 块 N 型和 1 块 P 型的半导体材料联结为 1 个电偶对。当电流从 N 端进入，P 端流出时，N 型元件中的电子在电场作用下从上端分离向下移动，与下端电源中的正电荷聚合放热；同样，P 型元件中的空穴在电场作用下从上端分离向下移动，与电源下端的负电荷聚合放热。由此可知，下端由于聚合作用放热成为热端，上端由于电子、空穴分离吸收热量成为冷端。因此，利用半导体制冷元件的冷端分别与冷凝管和循环泵连接，循环水利用半导体制冷元件的冷端降低温度，而在其热端加装 1 个小型用热设备使冷端温度降低，以提高装置的冷热端温差（一般可达 40~65 ℃）。半导体制冷元件体积较小，冷凝效果稳定，实现了 CPM 采样设备便携性，可降低成本。

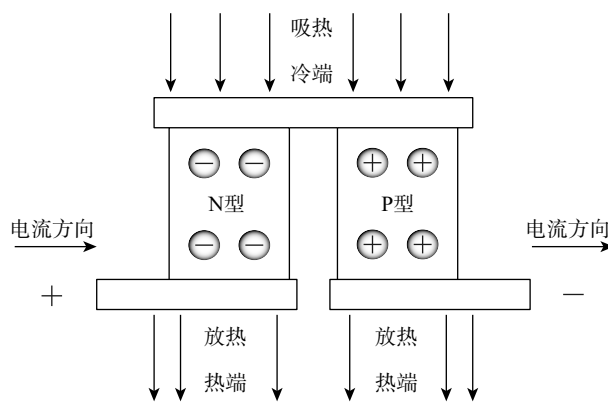


图2 半导体制冷的原理

Fig. 2 Schematic diagram of semiconductor refrigeration

整个采样装置的吸收部分包含一级吸收瓶、二级吸收瓶、CPM 过滤元件、温度传感器、尾气洗涤干燥装置和自动采样仪。吸收瓶用于吸收烟气中的冷凝 CPM，而 CPM 过滤元件与二级吸收瓶连接。烟气在通过二级吸收瓶后剩余少量被冷凝成微细颗粒物的 CPM，通过后置 CPM 过滤元件可完全过滤掉烟气中的 CPM。利用温度传感器对流经吸收装置的烟气温度进行监测，将烟气温度控制在 30 ℃ 以内，以确保 CPM 凝结成微细颗粒物。在 CPM 捕集完成后，利用尾气洗涤干燥部件处理烟气中残余的水分和污染物，并利用自动采样仪对烟气进行采集和分析。



### 1.3 分析方法

按照《固定污染源废气 低浓度颗粒物的测定 重量法》(HJ 836-2017)<sup>[2]</sup>和《固定源可凝结颗粒物的测定 干式冲击法》(EPA Method 202)对烟气中的 FPM 与 CPM 进行吸收测定。

利用后续连接的冲击式吸收瓶收集烟气通过 CPM 滤膜，再用去离子水冲洗吸收瓶，并将洗液存入样品瓶。滤膜置于恒温恒湿系统内恒重后，将增重记为  $CPM_{\text{滤膜}}$ ；样品瓶置于通风橱中，在室温下进行干燥，瓶内残留物质置于恒温恒湿系统内恒重后，将增重记为  $CPM_{\text{冷凝液}}$ 。CPM 的质量浓度由式 (1) 计算得到。

$$C_{\text{CPM}} = (CPM_{\text{滤膜}} + CPM_{\text{冷凝液}})10^6/V \quad (1)$$

式中： $C_{\text{CPM}}$  为 CPM 的质量浓度， $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ； $CPM_{\text{滤膜}}$  与  $CPM_{\text{冷凝液}}$  为测试得到样品的 CPM 质量，g； $V$  为标准状态下干采气体积，L。

FPM 采用烟道内过滤的方法计算得到。使用滤膜，利用微电脑颗粒物平行采样系统等速采集固定污染源排气中的颗粒物，记为采气体积  $V$ ；恒重后称取滤膜增重，记为  $m_{\text{FPM}}$ 。FPM 质量浓度根据式 (2) 计算。

$$C_{\text{FPM}} = m_{\text{FPM}}10^6/V \quad (2)$$

式中： $C_{\text{FPM}}$  为 FPM 质量浓度， $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ； $m_{\text{FPM}}$  为样品所得 FPM 量，g； $V$  为标准状态下干采气体积，L。

使用离子色谱仪 (ICS-600, Thermo Fisher Scientific Inc., USA) 对 CPM 无机组分中 5 种阳离子 ( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$ ) 和 3 种阴离子 ( $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{F}^-$ ) 进行分析。

### 1.4 监测质量控制与保证

为保证测试结果的准确及可靠性，取样过程中采取了一系列质量控制措施。采样之前用去离子水冲洗整个连接管路、冷凝管、吸收瓶、样品瓶及关联管路。然后将所有清洗后的玻璃部件放在烘箱中用  $160\text{ }^\circ\text{C}$  烘烤 8 h，样品瓶、CPM 滤膜 (石英滤膜，使用前先在烘箱中用  $180\text{ }^\circ\text{C}$  烘烤 1 h) 使用十万分之一天平称量，称量前将样品瓶、滤膜放置在恒温恒湿系统 (恒温  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ，恒湿 50% RH) 中 24 h 进行恒重。其余相关设备材料按照 HJ 836-2017 要求进行准备。每次采样过后采样头与 CPM 滤膜放置样品盒中保存，用去离子水冲洗螺旋冷凝管，之后将洗液混入一级吸收瓶，将一、二级吸收瓶中的冷凝液通过去离子水冲洗后存入样品瓶中，放入保温箱保存，待测。

测试期间确保 3 台锅炉负荷工况稳定。采样布点、频次等质控措施均依据 GB/T 16157-1996、HJ 836-2017 进行。每台机组在相同工况条件下采集样品。采样过程中保证整体装置的气密性及采样泵抽取流量的准确性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 燃煤电厂颗粒物排放状况

用自主设计的 CPM 采样装置收集并测得 3 种不同负荷机组烟囱排口处的颗粒物浓度 (见表 2)。在 A 机组中，烟囱排口处 CPM 的质量浓度为  $2.22\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，占 TPM 的 95.7%，而 FPM 质量浓度仅为  $0.1\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。这是由于烟气在除雾器后流经换热器，部分 FPM 可能通过物理碰撞被去除。同时，随着烟气在 MGGH 段的加热升温，可能导致 FPM 中部分物质转化为气态，从而造成烟囱排口处 FPM 质量浓度较低。由于 CPM 在烟道内以气态形式存在，物理碰撞对其去除效果并不明显。烟囱排口处的 CPM 变化与多种因素有关，如工况条件的波动、烟气冷凝液的夹带去除、燃料含硫量、排烟温度等<sup>[27]</sup>。

在 B 机组中，烟囱排口处 CPM 的质量浓度为  $3.02\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，占 TPM 的 52.5%，FPM 的质量浓度

表2 3台机组烟气中一次颗粒物排放情况

Table 2 Primary particulate matter emission in flue gas of three units

机组编号	CPM/(mg·m <sup>-3</sup> )	FPM/(mg·m <sup>-3</sup> )	TPM/(mg·m <sup>-3</sup> )	(CPM/TPM)/%	烟气流速/(m·s <sup>-1</sup> )	烟气温度/℃
A	2.22	0.1	2.32	95.7	16.5	77.8
B	3.02	2.5	5.52	54.7	20.3	77.3
C	3.83	5.4	9.23	41.5	24.8	69.2

为 2.5 mg·m<sup>-3</sup>；在 C 机组中，烟囱排口处 CPM 的质量浓度为 3.83 mg·m<sup>-3</sup>，占 TPM 的 41.5%，FPM 的质量浓度为 5.4 mg·m<sup>-3</sup>。该结果与胡月琪等<sup>[28]</sup>的研究结果相似。同时，C 机组中 CPM 在 TPM 中的占比与烟气温度有关。与 A、B 两机组相比，C 机组烟气温度较低，为 69.2℃，使得 C 机组中 CPM 更易在烟道中冷凝附着，致使其占比降低。

由表2可知，3台机组烟囱排口处 TPM 中 CPM 与 FPM 的占比出现不同的变化特征，主要与烟气处理工艺<sup>[27]</sup>和烟气温度变化等因素有关。另外，对3台机组 TPM 的测定结果也表明，使用 FPM 标准方法测得的颗粒物含量并不能反映燃煤电厂一次颗粒物的真实排放水平，CPM 对一次颗粒物的贡献不应被忽视。因此，尽早建立完善的监测标准，以便于更好地监测和评价燃煤机组的烟气排放对大气环境的影响。

不同机组的 CPM/FPM 如图3所示。A 机组的 CPM/FPM 最大，在烟囱排口处为 22.2；其次为 B 机组，在烟囱排口处为 1.2；C 机组最小，在烟囱排口处为 0.7。该结果表明，不同机组的 FPM 颗粒物排放情况差异较大，这主要与各机组除尘设施类型有关。A 机组与 B 机组采用电除尘，CPM/FPM 均大于 1，说明除尘装置可有效降低 FPM 的排放<sup>[29]</sup>。C 机组采用低低温电除尘，在除尘前的 MGGH 中 CPM 被冷凝转化成 FPM，故 CPM/FPM 降低至 1 以下。

## 2.2 CPM 无机组分中水溶性离子的分布特性

CPM 的主要成分是以 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>等水溶性离子为代表的无机成分<sup>[30-31]</sup>。CPM 的无机成分中水溶性离子的分布情况如图4所示。由图4可知，CPM 中的阴离子以 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>等为主，阳离子以 Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>等为主。这与孙和泰等<sup>[32]</sup>的研究结果一致。在 CPM 中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>占比较大是由于 CPM 主要由燃煤或者 SCR 中产生的 SO<sub>3</sub> 在烟道中形成的酸雾组成<sup>[33]</sup>。脱硝系统的氨逃逸使得 3 组烟囱排口处均有一定的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>，NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 在水蒸气存在的情况下，会与烟气中的 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 反应生成可溶性铵盐(如硫酸铵与硫酸氢铵)，进而在烟道内壁沉积附着结垢<sup>[34-35]</sup>。烟气温度较低会影响脱硝过程中催化剂的使用效果，从而进一步提高氨的逃逸率<sup>[36]</sup>。NH<sub>3</sub> 的逸出会导致二次颗粒物的形成，造成严重的环境污染。

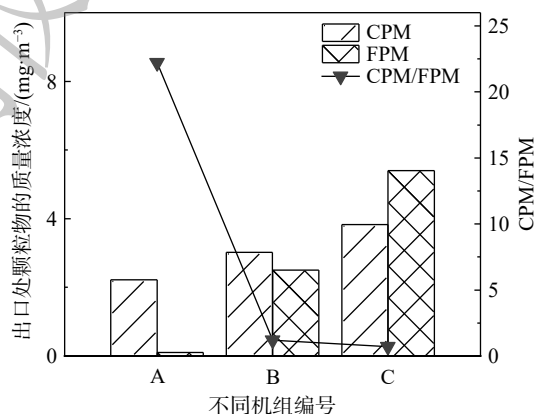


图3 不同机组烟囱排口处 CPM、FPM 排放情况  
Fig. 3 Emission of CPM and FPM of different units

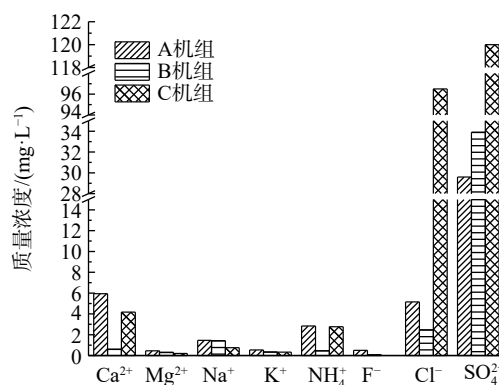


图4 CPM 无机水溶性离子的质量浓度  
Fig. 4 Concentration of inorganic water-soluble ion in CPM

其余样品成分中，Cl<sup>-</sup>主要来源于燃煤中产生的 HCl 与脱硫吸收塔浆液中富集的氯<sup>[37]</sup>。Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>主要来源于湿式石灰石-石膏法脱硫工艺中的浆液。

各机组 CPM 无机组分中离子占比如图 5 所示。A 机组烟囱出口质量浓度最高的 4 种离子依次是 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>，占比分别为 63.70%、12.78%、11.08% 和 6.11%。B 机组烟囱出口质量浓度最高的 4 种离子依次是 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup>和 Ca<sup>2+</sup>，占比分别为 85.65%、6.24%、3.59% 和 1.53%。与 A 机组相比，B 机组中烟囱出口处的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>占比明显下降，SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>占比明显提高。C 机组烟囱出口质量浓度最高的 4 种离子依次是 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>、Ca<sup>2+</sup>和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>，占比分别为 53.4%、42.94%、1.86%、1.23%。与其他 2 个机组不同的是，C 机组中 Cl<sup>-</sup>占比较高，而 Cl<sup>-</sup>的质量浓度与燃煤性质和脱硫浆液的高氯环境<sup>[37]</sup>有关。脱硫吸收塔浆液在循环过程中会不断富集氯离子，形成高氯环境，部分浆液被烟气携带排出，导致 Cl<sup>-</sup>含量有所提高。3 个机组产生的 CPM 无机组分中各离子浓度不尽相同，这可能与 3 个机组成装机容量、燃煤品质、烟气处理工艺等<sup>[27]</sup>不同有关。

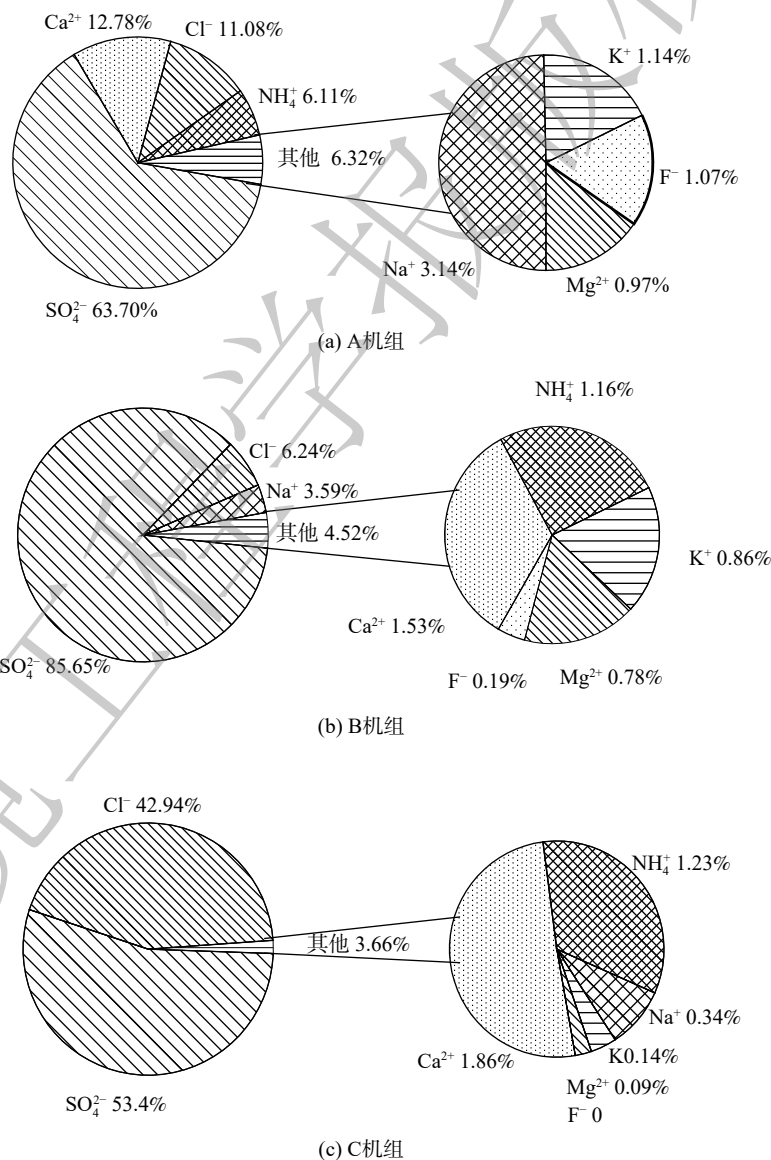


图 5 各机组烟气中 CPM 无机水溶性离子分布

Fig. 5 Distribution of CPM inorganic water-soluble ions in flue gas of each unit

### 3 结论

1) 使用自主优化设计的 CPM 采样装置测试了燃煤机组不同装机容量 (600 MW、900 MW、1 000 MW) 的 CPM 排放情况。该 CPM 采样装置利用半导体材料降温, 在迅速达到冷凝效果的同时, 减小了装置体积, 提高了其便携性及可操作性。

2) 燃煤电厂烟囱排口处的 CPM 占 TPM 的 41.5%~95.7%, 故应重视对燃煤电厂烟气中 CPM 的监测。排放烟气中 CPM 的质量浓度受燃煤性质、烟气温度和烟气处理工艺的影响明显。

3) CPM 的无机组分中阴离子以  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$  等为主, 阳离子以  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  等为主。同时,  $\text{SO}_4^{2-}$  占比均在 50% 以上, 最高为 89.81%。可推测煤燃烧或 SCR 中  $\text{SO}_3$  的产生提高了 CPM 无机组分的浓度, 从而增加了 CPM 的排放量。因此, 控制 CPM 排放应重点研究烟气中  $\text{SO}_2$ 、 $\text{SO}_3$  的形成与转化规律。

4) CPM 无机水溶性离子中过量的  $\text{SO}_4^{2-}$  还会与  $\text{NH}_4^+$  在水蒸汽存在下生成硫酸氢铵和少量硫酸铵。硫酸氢铵具有粘性、吸湿性和腐蚀性, 会导致管道堵塞腐蚀。

### 参考文献

- [1] 国家环境保护局. 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法: GB/T 16157-1996[S/OL]. 1996. [2020-10-08]. [https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bzwb/jcfbz/199603/t19960306\\_67508.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bzwb/jcfbz/199603/t19960306_67508.shtml).
- [2] 环境保护部. 固定污染源废气 低浓度颗粒物的测定 重量: HJ 836-2017[S/OL]. 2017. [2020-10-08]. [https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bzwb/jcfbz/201801/t20180108\\_429326.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bzwb/jcfbz/201801/t20180108_429326.shtml).
- [3] US. EPA. Method 202: Dry impinger method for determining condensable particulate emissions from stationary sources[S/OL]. [2020-10-08]. The Federal Register/FIND, 2017, 82(173). <https://www.epa.gov/emc/proposed-revisions-method-202>.
- [4] 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): 1544-1549.
- [5] FENG Y, LI Y, CUI L. Critical review of condensable particulate matter[J]. *Fuel*, 2018, 224: 801-813.
- [6] CORIO L A, SHERWELL J. In-stack condensable particulate matter measurements and issues[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2000, 50(2): 207-218.
- [7] LI J, QI Z, LI M, et al. Physical and chemical characteristics of condensable particulate matter from an ultralow-emission coal-fired power plant[J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31(2): 1778-1785.
- [8] YANG H H, LEE K T, HSIEH Y S, et al. Filterable and condensable fine particulate emissions from stationary sources[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2014, 14(7): 2010-2016.
- [9] 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): 5091-5102.
- [10] 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.
- [11] 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): 5234-5239.
- [12] BHANARKAR A D, GAVANE A G, TAJNE D S, et al. Composition and size distribution of particulates emissions from a coal-fired power plant in India[J]. *Fuel*, 2008, 87(10): 2095-2101.
- [13] GOODARZI F. Corrigendum to "characteristics and composition of fly ash from canadian coal-fired power plants"[J]. *Fuel*, 2006, 85(10/11): 1418-1427.
- [14] 林治卿, 裘著革, 杨丹凤, 等.  $\text{PM}_{2.5}$  的污染特征及其生物效应研究进展[J]. *解放军预防医学杂志*, 2005, 23(2): 150-152.
- [15] LI J, LI X, ZHOU C, et al. Study on the influencing factors of the distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in condensable particulate matter[J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31(12): 13233-13238.
- [16] LI J, LI X, ZHOU C, et al. Correlation between polycyclic aromatic hydrocarbon concentration and particulate matter during the removal process of a low-low temperature electrostatic precipitator[J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31(7): 7256-7262.
- [17] TAN B, WANG L, ZHANG X. The effect of an external DC electric field on bipolar charged aerosol agglomeration[J]. *Journal of Electrostatics*, 2007, 65(2): 82-86.
- [18] 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): 4515-4524.
- [19] 李兴华, 段雷, 郝吉明, 等. 固定燃烧源颗粒物稀释采样系统的研制与应用[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(3): 458-463.
- [20] 周楠, 曾立民, 于雪娜, 等. 固定源稀释通道的设计和外墙测试研究[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(5): 764-472.
- [21] TSUKADA M, HORIKAWA A, SUGIMOTO K, et al. Emission behavior of condensable suspended particulate matter from a laboratory scale rdf fluidized bed combustor[J]. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2007, 40(10): 869-873.
- [22] 杨柳, 张斌, 王康慧, 等. 超低排放路线下燃煤烟气可凝结颗粒物在 WFGD、WESP 中的转化特性[J]. 环境科学, 2019, 40(1): 121-125.
- [23] 沈志刚, 戴璞, 杨志林, 等. 可凝结颗粒物 CPM 采样设备: CN206990280U [P]. 2018-02-09.
- [24] 贾艳婷, 徐昌贵, 闫献国, 等. 半导体制冷研究综述[J]. *制冷*, 2012, 31(1): 49-55.
- [25] 李冰. 半导体制冷技术及其发展[J]. *山西科技*, 2009(4): 95-101.
- [26] 徐昌贵, 贾艳婷, 闫献国, 等. 半导体制冷技术及其应用[J]. *机械工程*



- 与自动化, 2012(3): 209-211.
- [27] 冯玉鹏. 典型煤种在沉降炉中燃烧可凝结颗粒物排放特性研究[D]. 青岛: 山东大学, 2020.
- [28] 胡月琪, 马召辉, 冯亚君, 等. 北京市燃煤锅炉烟气中水溶性离子排放特征[J]. 环境科学, 2015, 36(6): 1966-1974.
- [29] 沈志刚, 刘启贞, 陶雷行, 等. 湿式电除尘器对烟气中颗粒物的去除特性[J]. 环境工程学报, 2016, 10(5): 2557-2561.
- [30] YANG H H, LEE K T, HSIEH Y S, et al. Emission characteristics and chemical compositions of both filterable and condensable fine particulate from steel plants[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2015, 15(4): 1672-1680.
- [31] YANG H H, ARAFATH S M, LEE K T, et al. Chemical characteristics of filterable and condensable PM<sub>2.5</sub> emissions from industrial boilers with five different fuels[J]. *Fuel*, 2018, 232: 415-422.
- [32] 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/OL]. 洁净煤技术, 1-7 [2020-11-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20200706.1109.002.html>.
- [33] WEN C, GAO X, YU Y, et al. Emission of inorganic PM<sub>10</sub> from included mineral matter during the combustion of pulverized coals of various ranks[J]. *Fuel*, 2015, 140: 526-530.
- [34] BAO J, MAO L, ZHANG Y, et al. Effect of selective catalytic reduction system on fine particle emission characteristics[J]. *Energy & Fuels*, 2016, 30(2): 1325-1334.
- [35] 尹子骏, 苏胜, 王中辉, 等. 燃煤烟气中SO<sub>2</sub>与NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub>生成特性及其控制方法研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(4): 2328-2337.
- [36] 高瑞飞, 翟鹏霄, 田明. 燃煤电厂烟气脱硝氨逃逸的分析与研究[J]. 辽宁化工, 2020, 49(10): 1272-1273.
- [37] 张倩. 吸收塔浆液氯离子超标原因分析及控制措施[J]. 电子技术与软件工程, 2017(17): 144.
- (责任编辑: 靳炜)

## Optimal design and determination study of condensable particulate matter sampling system

SHEN Zhigang\*, LI Guanhua, LIU Zeyu, YI Chao

Shanghai Chuanglan Testing Technology Co., Ltd, Shanghai 200233, China

\*Corresponding author, E-mail: feiyejiange@aliyun.com

**Abstract** The environmental impact of the Condensable Particulate Matter (CPM) emission, in flue gas, from coal-fired power plants is innegligible. However, the CPM collection methods existed are not well suited to the actual situation of the fixed stationary source within the country. Inorganic component is the main component of CPM. In order to capture CPM in flue gas effectively and study its inorganic components emission characteristics, we adopted the self-designed CPM sampling device to carry out the CPM measurement research in flue gas, and at the same time, the effectiveness and reliability of this CPM sampling device are discussed. The test objects are three ultra-low emission coal-fired power plants in the national key field of air pollution prevention and control. The CPM sampling device uses semiconductor materials for refrigeration, which has light in size, easy to carry, high collecting efficiency, good condensation effect, and low cost compared with the conventional sampling device. The study shows that the CPM concentration at the chimneys of A, B and C coal-fired power plants is 2.22, 3.02 and 3.83 mg·m<sup>-3</sup>. The anions in CPM inorganic water-soluble ions, are mainly SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and Cl<sup>-</sup>, while the cations are mainly Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. The mass concentration of SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> accounts for more than 50%. In the presence of SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, ammonium hydrogen sulfate and ammonium sulfate will be produced when the water vapor is present with NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Ammonium hydroxide is easy to combine with the water vapor in the flue gas to form acid mist, which will not only cause corrosion to the flue gas pipeline, but also fly ash and other impurities because of its strong adhesion. The deposition and attachment on the surface of the pipeline will aggravate the corrosion and scaling of the pipeline. Therefore, it is of great significance to study the effective capture and emission characteristics of CPM in coal-fired power plants.

**Keywords** flue gas from coal-fired power plants; condensable particulate matter; semiconductor refrigeration; emission characteristics