

燃煤电厂细颗粒物中微量元素排放影响研究

王润芳^{1,2}, 姚为方^{1,2}, 马大卫^{1,2}, 邢 琛^{1,2}, 华雪莹^{1,2},
徐 鹏^{1,2}, 周 健^{1,2}, 陈国宏^{1,2}, 汤 泉³

(1. 安徽新力电业科技咨询有限责任公司, 合肥 230026; 2. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 合肥 230601;
3. 安徽大学 生命科学学院, 合肥 230601)

摘要:燃煤电厂排放颗粒物中的各种微量元素引起公众的广泛关注。为探究燃煤电厂排放颗粒物中微量元素含量及主要环保设备对元素排放的影响,通过现场试验、文献调研、理化分析等方法,对安徽省一台 600 MW 超低排放、超临界机组湿法脱硫装置(WFGD)和湿式电除尘装置(WESP)排放细颗粒物中 Cr、As、Se、Cd、Pb、Hg 元素分布及排放特征进行综合研究。结果表明:燃煤机组排放 PM₁、PM_{1~2.5} 和 PM_{2.5~10} 的细颗粒物浓度分别为 0.85、0.18 和 0.02 mg/m³,WFGD 对 PM_{2.5~10} 的脱除效率达到 95% 以上,WESP 对粒径小于 2.5 μm 细颗粒物的去除效率优于 WFGD。WFGD 入口处 PM₁₀ 中 Cr、As、Se、Cd、Pb、Hg 的质量浓度分别为 22.8、0.2、28.9、27.7、7.3、2.4 μg/m³,各元素质量浓度在不同分级颗粒物中的分布规律均呈现随着粒径增大而降低的趋势。颗粒物在经过 WFGD 后,Se 元素质量浓度下降 70%,Cr 元素质量浓度增加 466%,Hg 和 Pb 元素质量浓度增长 325% 和 205%,Cd 和 As 增长 101% 和 113%,微量元素主要富集在细颗粒物中。WESP 出口处 PM₁₀ 中 Cr、As、Se、Cd、Pb、Hg 的质量浓度分别为 8.3、0.2、8.9、8.2、3.5、1.0 μg/m³,颗粒物中有害微量元素呈下降趋势,其中 Se 元素质量浓度变化较小,其他 5 种元素质量浓度均下降约 50%。

关键词:燃煤电厂;湿法脱硫装置(WFGD);湿式电除尘装置(WESP);细颗粒物;微量元素

中图分类号:X513 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)09-0177-07

1990 年美国清洁空气法案修正案(CAAAs)中表明,微量元素如砷、汞、镉和硒的不断排放已经对环境和人类健康造成了严重的危害^[1]。煤炭作为我国的主要能源,化学物质组成复杂,其中包含各种微量元素,煤炭燃烧过程中会产生大量颗粒物,其中细颗粒物由于具有较大的比表面积和较强的物理吸附能力,极易吸收有害重金属,使其毒性增强,这些颗粒物排入大气中,将对公众健康构成威胁^[2-3]。2011 年,美国环境保护署(EPA)发布了《汞及其他有毒有害气体排放限制标准》,以减少燃煤

和燃油发电厂的重金属(包括汞、砷、铬和镍)和酸性气体(包括盐酸和氢氟酸)排放^[4]。

中国燃煤电厂的煤炭消费占全国煤炭消费量的 50% 以上,是重点关注的人为大气颗粒物排放源^[5]。截至 2020 年底,所有燃煤电厂都完成超低排放改造,实现了烟尘排放质量浓度的显著降低,一定程度上改善了空气质量。石灰石-石膏湿法脱硫装置(WFGD)是使用最广泛的脱硫设备,为达到排放标准,部分电厂安装了湿式电除尘装置(WESP)。国内对燃煤电厂大气污染物的排放目前仅针对

收稿日期:2022-11-08

基金项目:国家自然科学基金(42072200);安徽新力电业科技项目(2020 咨-KJ-03)。

作者简介:王润芳(1994—),女,安徽黄山人,安徽新力电业科技咨询有限责任公司,环境科学与工程硕士,研究方向为燃煤电厂环境污染;姚为方(1983—),男,安徽安庆人,安徽新力电业科技咨询有限责任公司,高级工程师,研究方向为电力环境保护;马大卫(1982—),男,安徽庐江人,国网安徽省电力有限公司科学研究院,高级工程师,博士,研究方向为电网、电站金属材料监督及评估;邢琛(1995—),女,安徽合肥人,安徽新力电业科技咨询有限责任公司,硕士,研究方向为电力环境保护;华雪莹(1987—),女,安徽宿州人,安徽新力电业科技咨询有限责任公司,高级工程师,硕士,研究方向为电力环境保护;徐鹏(1987—),男,安徽合肥人,安徽新力电业科技咨询有限责任公司,高级工程师,硕士,研究方向为电力环境保护;周健(1995—),男,安徽合肥人,国网安徽省电力有限公司科学研究院,初级工程师,硕士,研究方向为电力环境保护;陈国宏(1968—),男,吉林扶余人,国网安徽省电力有限公司科学研究院,高级工程师,硕士,研究方向为电网、电站金属材料监督及评估;汤泉(1987—),女,安徽安庆人,安徽大学生命科学学院,副教授,研究方向为微量元素生态地球化学等相关交叉学科领域。

NO_x、SO₂、烟尘和汞及其化合物制定了排放限值，其中燃煤锅炉大气污染物汞及其化合物执行排放浓度 0.03 mg/m³ 的限值，对其他微量元素仍缺少具体的控制政策^[6]。针对燃煤电厂微量元素排放已有大量研究，Zheng 等^[7]研究了 5 个燃煤超低排放电厂大气污染控制装置中有害微量元素的划分，结果表明，粉煤灰中微量元素富集程度最高，分别为 Hg 58.0 ~ 93.3%、As 75.2 ~ 95.3%、Cd 78.2 ~ 94.9%、Se 79.4 ~ 96.6%、Cr73.8% ~ 89.2%和 Pb 86.5 ~ 99.5%。Wang 等^[8]研究了烟气、煤、粉煤灰、底灰、石膏、石灰石、废水中微量元素，结果表明，微量元素主要分布在粉煤灰中，而在底灰中所占比例较小。Fu 等^[9]研究中国东部安徽省某大型燃煤电厂粉煤灰和烟气脱硫石膏中 Cr、Pb、Cd、Cu、Zn 和 As 的分布和化学形态，结果显示，脱硫石膏中的微量元素对生态系统表现出中等风险或高风险。燃煤电厂排放的烟尘中元素主要来自煤炭和湿法脱硫装置引入的石灰石浆液^[10-11]。Chen 等^[12]对 660 MW 超低排放燃煤电厂排放烟尘进行现场采样测试，发现锰含量与粒度无关，Cr、As 和 Pb 主要富集在细灰粒中。在排放因子方面，Cr、As、Pb、Mn 主要存在于细颗粒物中。

对燃煤电厂微量元素排放研究主要集中在粉煤灰、废水、脱硫石膏等排放物，针对细颗粒物中微量元素含量^[13-14]，WFGD 和 WESP 系统对细颗粒物元素排放影响方面的研究仍然较少。本研究选取安徽省中部一台 600 MW 典型超低排放、超临界机组，对 WFGD 和 WESP 细颗粒物排放及细颗粒物中 Cr、As、Se、Cd、Pb、Hg 元素分布特征进行综合研究，为燃煤电厂微量元素排放源建立提供数据基础，为进一步加强我国对有害微量元素污染的控制提供参考。

1 采样与分析

1.1 采样地点与检测工况

选取安徽省一台 600 MW 超低排放、超临界机组进行采样。该机组烟气净化设备主要包括 SCR、ESP(双室 4 电场)、WFGD 和 WESP(1 室 5 电厂)，WFGD 工艺系统采用一炉一塔、石灰石-石膏法 WFGD，配置 3 层喷淋层，1 层除雾器。采样点位置

如图 1 所示，选取 WFGD 进出口和 WESP 出口处采集样品，各采样点采集 5 个平行样。采样期间，机组运行负荷 ≥ 75%，WFGD 进、口温度分别为 127.7、69.7 °C，WESP 出口温度为 51.4 °C。采样期间 WFGD 进、出口及 WESP 出口处 SO₂、NO_x 和烟尘排放浓度见表 1。

采样机组的煤种为淮南煤，煤质与灰分分析见表 2，在实际生产过程中，煤的灰分含量越高，会导致煤燃烧产生的灰分越多，燃烧效率越低，相应的经济价值也就越低。原料煤的灰分为 26.65%，根据煤的质量分级，该电厂的煤为中灰煤(MA)，20.01% < A(灰分) < 30.00%)。

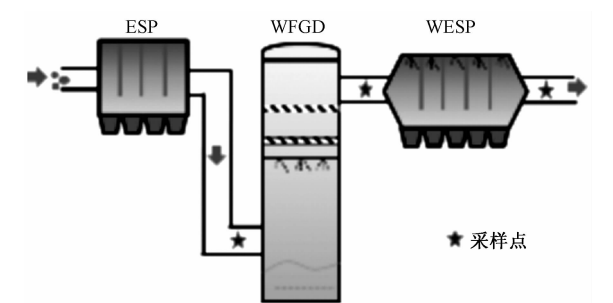


图 1 采样点位置

表 1 燃煤机组采样期间在线监测数据

机组 负荷/ MW	采样平 均负荷/ MW	SO ₂ 排放 浓度/ (mg·m ⁻³)	NO _x 排 放浓度/ (mg·m ⁻³)	烟尘浓度/(mg·m ⁻³)		
				WFGD 进口	WFGD 出口	WESP 出口
600	490	18.0	23.2	7.13	2.28	1.82

1.2 采样仪器与分析方法

烟气采样系统原理如图 2 所示。采样系统主要由采样枪、旋风分离器、真空泵、PM₁₀ 分级冲击采样器(DGI, 芬兰 Dekati 公司)、加热装置组成。烟尘经过旋风分离器，去除直径大于 10 μm 的颗粒，然后进入 DGI 装置，通过粒子惯性原理，依次以粒径大于 10、2.5~10、1~2.5、小于 1 μm 被分级收集于聚碳酸酯采样膜上。按照相关标准进行采样。采样烟气流量约为 10 L/min，采样系统全程加热，以消除采样系统上水汽的凝结。根据采样机组的在线监测数据确定采样时间，出口处 PM 的采样时间为 3~4 h，进口处采样时间为 5~30 min，采集后的聚碳酸酯膜存放在滤膜盒中带回实验室分析。

表 2 煤质和灰分分析

工业分析/%			灰分分析/%								
收到基水分(M)	收到基灰分(A)	可燃基挥发分(V)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
7.0	26.7	38.0	54.0	33.0	3.2	2.0	1.2	1.4	1.2	0.7	1.0

采用称重法分析烟气中不同粒径颗粒物的浓度,颗粒样品的表面微观结构分析采用电子显微镜(GeminiSEM 500)。定量称取颗粒样品,微波消解仪消解定容,采用电感耦合离子光谱仪(ICP-MS, Type-7900)测定溶液中 Cr、As、Se、Cd、Pb 元素的质量浓度。采用测汞仪(利曼 Hydra II C)直接测量 Hg 的浓度。本文中所有浓度均折算为标干态浓度。

2 结果与讨论

2.1 WFGD 与 WESP 前后颗粒物分布与形貌特征

WFGD 和 WESP 进出口 PM 的分级质量浓度如图 2 所示,WFGD 是烟气中 SO₂ 的主要控制装置,对烟尘也有脱除的效果,WFGD 入口处 PM₁、PM_{1~2.5} 和 PM_{2.5~10} 的质量浓度分别为 2.60、2.70 和 0.90 mg/m³,粒径 1~2.5 μm 颗粒物浓度最高,WFGD 出口处 PM₁、PM_{1~2.5} 和 PM_{2.5~10} 的质量浓度分别为 1.65、1.17 和 0.03 mg/m³,出口处各粒径段颗粒物浓度均显著下降。WFGD 对 PM₁、PM_{1~2.5} 和 PM_{2.5~10} 的脱除效率分别为 36.54%、56.80%和 96.30%,对粒径 1 μm 以上的颗粒物去

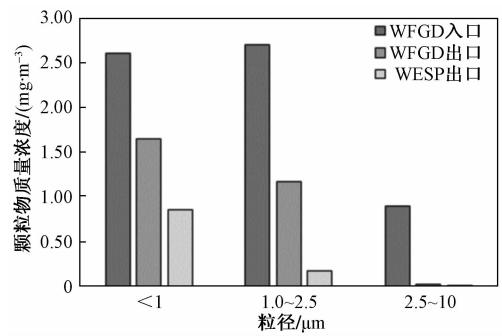


图 2 燃煤电厂 WFGD 与 WESP 进出口 PM 分级颗粒物质量浓度

除效果显著。WESP 出口处 PM₁、PM_{1~2.5} 和 PM_{2.5~10} 的颗粒物浓度分别为 0.85、0.18 和 0.02 mg/m³,PM_{2.5} 和 PM₁ 的质量浓度均小于 1 mg/m³。WESP 对 PM₁、PM_{1~2.5} 和 PM_{2.5~10} 的脱除效率分别为 48.23%、84.43%和 45.00%,WESP 在去除粒径 2.5 μm 以下颗粒物方面优于 WFGD。表明 WESP 对细颗粒具有更好的去除性能,弥补了传统 ESP 在去除细颗粒方面的不足。

对不同粒径颗粒物微观结构和形貌分析如图 3

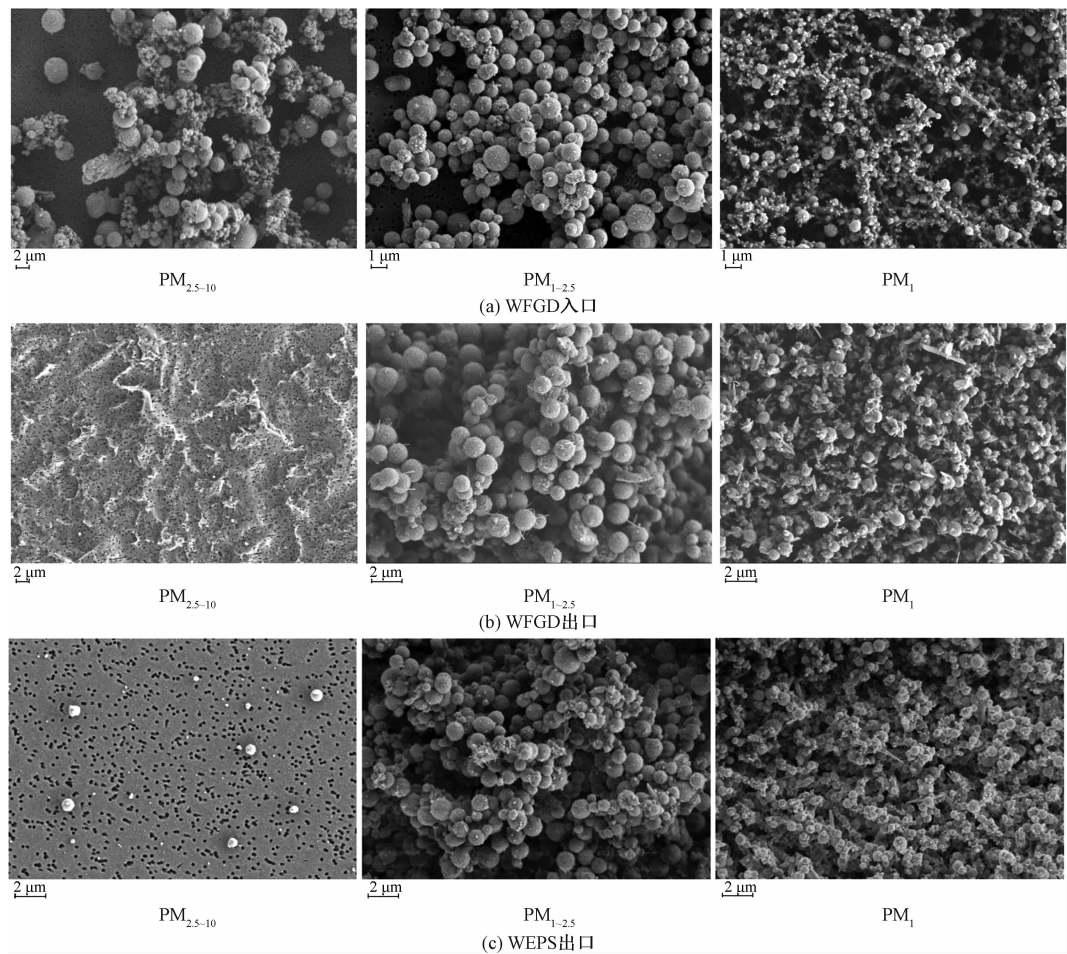


图 3 燃煤电厂 WFGD 进、出口与 WESP 出口各粒径颗粒物扫描电镜形态分析

所示,煤粉在锅炉高温条件下,大部分矿物蒸发后凝聚,液体表面张力使其形成球形颗粒。WFGD 入口颗粒物主要呈圆球状,伴随少量不规则形状。不规则颗粒是由煤中细粒矿物破碎或直接转化而成^[15]。在静电作用下,大量细小颗粒附着在粗颗粒的表面,PM₁ 细颗粒紧密聚集,呈链状颗粒物集合体,主要受到粒子间隙处静电力作用^[16]。WFGD 出口 PM_{1~2.5} 细颗粒中链状集合体减少,呈圆球状堆积,出现大量柱状和片状颗粒,在之前的研究中显示,柱状和片状颗粒主要成分是石膏,来自脱硫塔内化学反应产物^[17]。在经过湿式电除尘器后,

WESP 出口颗粒物中石膏颗粒减少。WFGD 和 WESP 出口处 PM_{2.5~10} 颗粒物浓度较低,在样品膜制样过程中未能选取样品集中的区域,电镜下未观察到颗粒物。

2.2 WFGD 与 WESP 进出口颗粒物中微量元素分布特征

燃煤电厂排放的微量元素已引起广泛关注,有必要分析电厂排放颗粒中微量元素的浓度及分布特征。对 WFGD 和 WESP 进出口颗粒物进行采样研究,分析不同粒径的颗粒物中 Cr、As、Se、Cd、Pb 和 Hg 的含量,结果如图 4 所示。WFGD 入口

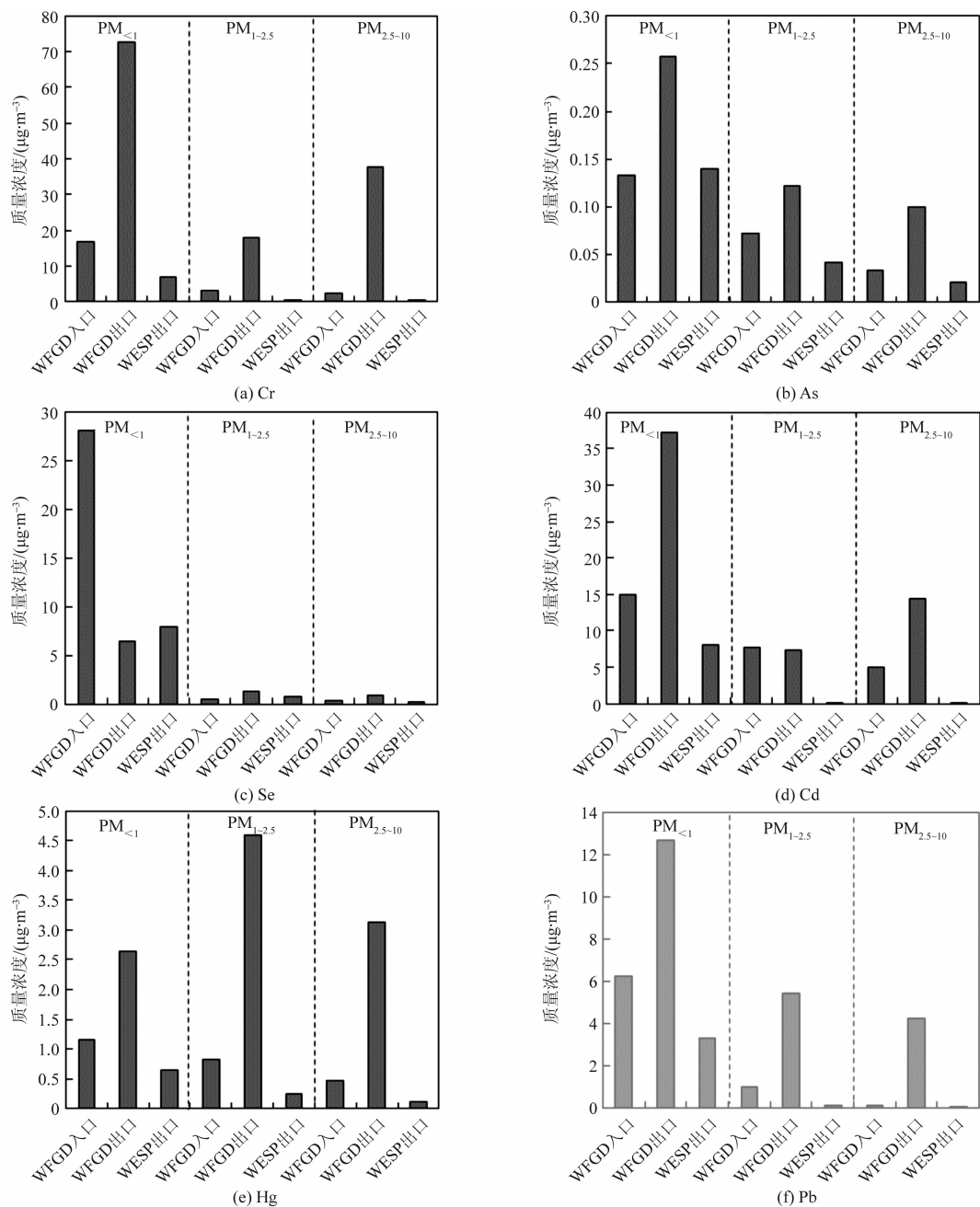


图 4 燃煤电厂不同粒径的颗粒物中 Cr、As、Se、Cd、Hg 和 Pb 元素质量浓度

PM₁₀中 Cr、As、Se、Cd、Pb、Hg 的质量浓度分别为 22.8、0.2、28.9、27.7、7.3 和 2.4 μg/m³,其中 Cr、Se 和 Cd 质量浓度较高,WFGD 入口处各元素质量浓度在不同分级颗粒物中的分布规律均呈现随着粒径增大而降低的趋势。WFGD 出口处 PM₁₀ 中 Cr、As、Se、Cd、Pb、Hg 的质量浓度分别为 128.8、0.5、8.6、59.1、22.3 和 10.4 μg/m³,Cr、Cd 和 Pb 质量浓度较高,As 含量较低。As、Se、Pb 元素质量浓度随着粒径增大而降低,Cr 和 Cd 元素质量浓度在 PM₁ 中最高,PM_{2.5~10} 中的质量浓度大于 PM_{1~2.5},Hg 元素在 PM_{1~2.5} 中的质量浓度最高,PM₁中最低。WESP 出口处 PM₁₀ 中 Cr、As、Se、Cd、Pb、Hg 的质量浓度分别为 8.3、0.2、8.9、8.2、3.5 和 1.0 μg/m³,相比 WFGD 出口,Cr、As、Cd、Pb、Hg 元素质量浓度均显著降低,Se 元素质量浓度变化较小。各元素质量浓度在不同分级颗粒物中的分布规律均呈现随着粒径增大而降低的趋势。

2.3 WFGD 与 WESP 对颗粒物中微量元素含量的影响

燃煤电厂 WFGD 和 WESP 进出口颗粒物中 Cr、As、Se、Cd、Hg 和 Pb 元素质量浓度变化情况如图 5 所示,经过 WFGD 后,除 Se 元素质量浓度下降 70%,其他 5 个元素质量浓度均上升,其中 Cr 元素质量浓度增加将近 5 倍,Hg 和 Pb 元素质量浓度增长近 3 倍和 2 倍,Cd 和 As 增长近 1 倍。有研究显示,部分 Cr 以气态形式进入 WFGD 脱硫石膏形成 CaCrO₄^[18],在 WFGD 出口颗粒物中有大量石膏颗粒物,说明部分石膏颗粒物附着在烟尘中,随烟尘一起排出脱硫装置,有可能导致 WFGD 出口处颗粒物中 Cr 元素质量浓度升高。结合上文中经过 WFGD 后,颗粒物浓度随粒径增大而降低,而 Cr 元素质量浓度在 PM_{2.5~10} 中增长比例最高,说明粗颗粒物中有大量 Cr 元素富集。As 在烟道内主要以气相 AsO 的形式存在,随着温度降低,砷蒸气与飞灰发生作用,凝结附着在颗粒物表面,燃煤电厂的 As 绝大部分经过 WFGD 后,富集在石膏和飞灰中^[19]。前人研究结果表明,细灰颗粒对 Pb 吸附具有物理吸附和化学吸附作用,Pb 燃烧会以 PbCl₂ 的形式从煤粉中释放出来,随着烟气温度的降低,它会与细灰颗粒中的 Al₂O₃ 和 SiO₂ 发生化学反应,最终附着在飞灰表面^[20]。

Hg 燃煤烟气中汞以元素汞 Hg⁰、Hg²⁺、Hg^p 3 种形式存在,Hg²⁺ 溶于水,Hg^p 容易依附在飞灰颗粒中,可以被电厂常规污染物控制装置,除尘器和

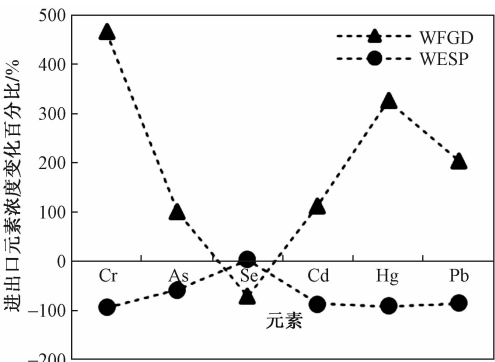


图 5 燃煤电厂 WFGD 和 WESP 进出口颗粒物中元素质量浓度变化百分比

脱硫装置脱除,而 Hg⁰ 不溶于水,不能被除尘器、烟气脱硫系统脱除^[21-22]。Se 作为人体不可缺少的微量元素,但是随着浓度的升高,也会表现出一定的毒性,燃煤电厂的 Se 主要来源是煤炭^[23],烟气中的硒元素在气相中以 SeO 和 SeO₂ 的形式存在,在烟气脱硫过程中以硒酸根或亚硒酸根的形式进入脱硫石膏和脱硫废水中富集^[24]。在经过 WESP 后,Se 元素质量浓度变化较小,其他 5 种元素质量浓度均下降约 1 倍。这 6 种微量元素在经过脱硫系统后,在颗粒物中的质量浓度呈现不同程度的上升,可能是原本以气态形式存在的元素经脱硫塔内反应固定在石膏中,被颗粒物夹带,也存在石灰石浆液中的元素或气态形式存在的元素与颗粒物直接发生化学反应而富集^[25-26]。

根据 CEMS 在线监测设备数据显示,该机组在 WFGD 出口处的烟尘浓度已低于 5 mg/m³,但在经过 WFGD 后,细颗粒物占比较高,颗粒物中夹带大量石膏颗粒物,Pb 和 Hg 等有害微量元素含量显著升高,随着大气传输进入自然环境中,存在一定的环境污染风险,在经过 WESP 进一步脱除后,一方面,可以有效降低 PM_{2.5} 颗粒物排放,另一方面,降低燃煤机组产有害颗粒物进入大气中的风险。建议有条件的燃煤电厂在脱硫装置后安装 WESP。

3 结论

1) 该燃煤电厂排放 PM₁、PM_{1~2.5} 和 PM_{2.5~10} 的颗粒物浓度分别为 0.85、0.18 和 0.02 mg/m³,WFGD 对 PM_{2.5~10} 的脱除效率达到 95% 以上,对 PM_{2.5} 脱除效率较低,WESP 在去除 PM_{2.5} 方面优于 WFGD。

2) 各元素质量浓度在不同分级颗粒物中的分

布规律均呈现随着粒径增大而降低的趋势,在经过 WFGD 后,PM₁₀ 中 Se 元素质量浓度下降 70%,Cr 元素质量浓度增加 466%,Hg 和 Pb 元素质量浓度增长 325%和 205%,Cd 和 As 增长 101%和 113%,WESP 出口处 PM₁₀ 中 Cr、As、Se、Cd、Pb、Hg 的质量浓度分别为 8.3、0.2、8.9、8.2、3.5 和 1.0 μg/m³。在经过 WESP 后,Se 元素质量浓度变化较小,其他 5 种元素质量浓度均下降约 1 倍。

3)WFGD 出口处的烟尘浓度低于 5 mg/m³,但在经过 WFGD 后,颗粒物中夹带大量石膏颗粒物,细颗粒物占比较高,部分微量元素含量显著升高,存在一定的大气污染风险,经过 WESP 后,PM_{2.5} 细颗粒物及颗粒物中微量元素有一定脱除效果。

参考文献

[1] 林贻非. 美国清洁空气法 1990 年修正案的要点[J]. 中国环境监测,1992,8(2):63-64.

[2] WU J Y, TOU F Y, YANG Y, et al. Metal-containing nanoparticles in low-rank coal-derived fly ash from China: characterization and implications toward human lung toxicity[J]. Environmental Science & Technology 2021, 55 (10):6644-6654.

[3] 伍显飞,叶华香,臧淑英. 黑龙江省大气污染物时空分布特征及影响因素[J]. 科技和产业,2021,21(8):134-141.

[4] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Fact Sheet:Mercury and Air Toxics Standards for Power Plants,Summary[EB/OL]. (2011-12-21)[2022-09-08]. <https://www.epa.gov/mats>.

[5] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2019[M]. 北京:中国统计出版社,2019.

[6] 程轲,王艳,薛志钢,等.《火电厂大气污染物排放标准》实施对燃煤电厂大气汞减排的影响[J]. 环境科学研究, 2015,28(9):1369-1374.

[7] ZHENG C H,WANG L,ZHANG Y X,et al. Partitioning of hazardous trace elements among air pollution control devices in ultra-low-emission coal-fired power plants[J]. Energy Fuel,2017,31(6):6334-6344.

[8] WANG J,ZHANG Y,LIU Z,et al. Coeffect of air pollution control devices on trace element emissions in an ultralow emission coal-fired power plant[J]. Energy Fuels, 2019,33(1):248-256.

[9] FU B,LIU G,MIAN M M,et al. Characteristics and speciation of heavy metals in fly ash and FGD gypsum from Chinese coal-fired power plants[J]. Fuel,2019,251:593-602.

[10] HAN D,XU L,WU Q,et al. Potential environmental risk of trace elements in fly ash and gypsum from ultra-low emission coal-fired power plants in China[J]. Science

of the Total Environment,2021,798:149116.

[11] 王文峰,秦勇,宋党育. 燃煤电厂中微量元素迁移释放研究[J]. 环境科学学报,2003,23(6):748-752.

[12] CHEN C,SHEN A,DUAN Y F,et al. Removal characteristics of particulate matters and hazardous trace elements in a 660 MW ultra-low emission coal-fired power plant[J]. Fuel,2021,311(3):122535.

[13] WANG T,LOU Y B,JIANG S C,et al. Distribution characteristics and environmental risk assessment of trace elements in desulfurization sludge from coal-fired power plants[J]. Fuel,2022,31(4):122771.

[14] LIU X,TENG Y,ZHANG K,et al. Migration behaviors of as,se and pb in ultra-low-emission coal-fired units and effect of co-firing sewage sludge in CFB boilers[J]. Energies,2022,15(4):1544.

[15] LIU Y K,ZHUO Y Q,ZHU Z W,et al. Leaching characteristics of trace elements in desulfurization gypsum from a coal-fired power plant [M]. Berlin: Springer, 2013: 377-385.

[16] ZHAO Z,DONG H,GUO X. Size distributions, microstructures, and elemental compositions of PM_{2.5} from two coal-fired fluidized-bed boilers equipped with fabric filters[J]. Energy Fuels,2020,34(4):4899-4908.

[17] 王润芳,马大卫,姜少毅,等. 超低排放改造后燃煤电厂细颗粒物排放特征[J]. 环境科学,2020,41(1):100-107.

[18] 吕雪峰,于溯源. 铬/氢/氧燃烧火焰中的热力学参数计算和平衡分析[J]. 工程热物理学报,2005,26(2):354-356.

[19] 商攀峰. 燃煤电厂脱硫石膏中痕量元素赋存形态分析[D]. 北京:华北电力大学,2017.

[20] 付建,刘国,薛志钢,等. 燃煤电厂砷的动态分布及排放特征[J]. 中国电力,2013,46(3):95-99.

[21] 孙喆. 燃煤电站砷、铅、镉、铬的迁移规律[D]. 北京:华北电力大学,2015.

[22] 惠霖霖,张磊,王祖光,等. 中国燃煤电厂汞的物质流向与汞排放研究[J]. 中国环境科学,2015,35(8):2241-2250.

[23] 余学海,张翼,常林,等. 超低排放燃煤电站湿法脱硫和湿式电除尘器中硒含量分布及形态演变[J]. 洁净煤技术,2019,25(3):100-104.

[24] YAN R,GAUTHIER D,FLAMANT G,et al. Fate of selenium in coal combustion: volatilization and speciation in the flue gas[J]. Environmental Science & Technology,2001,35(7):1406-1410.

[25] YUAN C,SU S Q,XU R G,et al. Effect of wet flue gas desulfurization on the concentrations and component profiles of condensable particulate matter from ultralow emission coal-fired power plants[J]. Atmospheric Pollution Research,2022,13(4):101376.

[26] 王家伟. 超低排放电厂典型痕量元素排放控制的研究[D]. 北京:华北电力大学,2020.

Effects of Trace Element Emission in Particulate Matter from Coal-fired Power Plants

WANG Runfang^{1,2}, YAO Weifang^{1,2}, MA Dawei^{1,2}, XING Chen^{1,2}, HUA Xueying^{1,2},
XU Peng^{1,2}, ZHOU Jian^{1,2}, CHEN Guohong^{1,2}, TANG Quan³

(1. Anhui Xinli Power Technology Consulting Co., Ltd., Hefei 230026, China; 2. State Grid Anhui Electric Power
Research Institute, Hefei 230601, China; 3. School of Life Sciences, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: Human-induced harmful trace elements have attracted public attention. Particulate matter emitted by coal-fired power plants contains various trace elements. The distribution and emission of Cr, As, Se, Cd, Pb and Hg in the particulates emitted by wet flue gas desulfurization(WFGD) and wet electro staticprecipitator(WESP)of a 600 MW ultra-low critical unit in Anhui Province were comprehensively studied, literature research, and physical and chemical analysis. The results show that the particulate matter concentrations of PM₁, PM_{1~2.5} and PM_{2.5~10} emitted by coal-fired units were 0.85, 0.18and 0.02 mg/m³, respectively. The removal efficiency of WFGD for PM_{2.5~10} was over 95%, and WESP for particle size smaller than the removal efficiency of 2.5 μm fine particles is better than WFGD. The mass concentrations of Cr, As, Se, Cd, Pb and Hg in PM₁₀ at the inlet of WFGD were 22.8, 0.2, 28.9, 27.7, 7.3 and 2.4 μg/m³, respectively. The distribution law of the mass concentration of each element in different graded particles showed a decreasing trend with the increase of particle size. After the particles passed through WFGD, the Se element mass concentration decreased by 70%. The mass concentration of Cr element increased by 466%. The mass concentrations of Hg and Pb elements increased by 325% and 205%, respectively. Cd and As increased by 101% and 113%, respectively. WFGD increases the mass concentration of trace elements in particulates, which are mainly concentrated in fine particulates. The mass concentrations of Cr, As, Se, Cd, Pb and Hg in PM₁₀ at the outlet of WESP were 8.3, 0.2, 8.9, 8.2, 3.5 and 1.0 μg/m³, respectively. The mass concentration of Se element changed little, and the mass concentrations of the other five elements all decreased by about 50%.

Keywords: coal-fired power plant; wet flue gas desulfurization(WFGD); wet electro staticprecipitator(WESP); fine particulate matter; trace elements