

电厂除尘设施对 PM_{10} 排放特征影响研究

易红宏, 郝吉明*, 段雷, 李兴华, 郭兴明

(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 在 5 个不同燃煤电厂除尘器进、出口进行了现场测试, 对除尘器性能以及振打时对 PM_{10} 排放特征的影响进行了研究. 试验系统由低压荷电捕集器(ELPI)、等速采样系统、稀释系统组成. 结果表明: 该试验系统可对燃煤排放的可吸入颗粒物进行在线测量, 获得可吸入颗粒物的瞬时浓度、平均浓度和浓度分布, 最小粒径达 $0.03\mu m$, 可广泛用于固定源采样; 除尘器进口和出口的 PM_{10} 粒数浓度均呈明显的双模态对数正态分布, 峰值均分别出现在 $0.07\sim 0.12\mu m$ 和 $0.76\sim 1.23\mu m$; 电除尘器和布袋除尘器对粗颗粒态的颗粒物去除效率均较好, 最大穿透率均出现在 $0.1\sim 1\mu m$ 范围内, 但布袋除尘器在该粒径区间的穿透率低于电除尘器, 降低该区间接颗粒物的穿透率有利于控制可吸入颗粒物的排放; PM_{10} 的粒数浓度主要取决于亚微米态的颗粒, 针对粒数浓度而言, 电除尘器对 PM_1 和 $PM_{2.5}$ 的去除效率同样低于 PM_{10} ; 除尘器的运行和操作条件对 PM_{10} 排放影响较大, 电除尘器末电场振打清灰时, 出口 PM_{10} 的质量和粒数浓度均明显增加; 振打时电除尘器基于粒数和质量浓度的 2 种除尘效率均有不同程度的下降, 下降幅度最大的是 PM_1 .

关键词: 燃煤电厂; 除尘设施; 可吸入颗粒物; 排放特征

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)10-1921-07

Influence of Dust Catchers on PM_{10} Emission Characteristics of Power Plants

YI Hong-hong, HAO Ji-ming, DUAN Lei, LI Xing-hua, GUO Xing-ming

(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Influence of dust catchers on PM_{10} emission characteristics was determined experimentally at the inlet and outlet of dust catchers at five different power plants. Electrical low pressure impactor (ELPI) with a sampling system, which consisted of an isokinetic sampler probe, pre-cut cyclone, two-stage dilution system and sample line to the instruments, were used to measure *in situ*. Size distribution is measured on the range from $0.03\mu m$ to $10\mu m$ in aerodynamic diameter. The results show that the testing system can be used widely for sampling of particulate matters from stationary sources. Before and after all the dust catchers, the particle number size distributions display the bimodal distribution which contained the submicron mode and the coarse mode with a peak around $0.07\sim 0.12\mu m$ and $0.76\sim 1.23\mu m$, respectively. The minimum collection efficiency of the ESP and the bag-house both appear in the particle size range of $0.1\sim 1\mu m$. In this size range, bag-house collection efficiency is higher than that of ESP. The ESP collection efficiencies of PM_1 and $PM_{2.5}$ based on the number concentration are also lower than that of PM_{10} . The mass concentration of PM_{10} is mainly dominated by the particles which are larger than $1\mu m$, while the number concentration is dominated by the particles which are smaller than $0.1\mu m$. Mass and number size distributions measured after ESP can be seen that mass and number concentration of PM_{10} will increase obviously by rapping the last electric field. Furthermore, the ESP collection efficiencies based on the number concentration and mass concentration were both decreased by ESP rapping with different degree; and the maximum drop degree was appeared in PM_1 .

Key words: power plants; dust catchers; PM_{10} ; emission characteristics

我国的能源结构仍然是以火电为主、水电为辅、核电风能作为补充, 预计在近 10a 内火力发电所占的比重仍将在 70% 以上. 火电厂用煤量占煤炭消耗总量的 45% 左右, 预计到 2010 年占 62%^[1]. 各行业中, 燃煤电厂排放的工业烟尘所占比例最高^[2]. 目前我国燃煤电厂的除尘大部分采用电除尘器, 至 2000 年底, 我国已有 1080 个火电机组配备了电除尘器, 约占总容量的 90%^[3]. 随着排放标准的越来越严, 常规电除尘器的除尘效率有时不能满足要求, 因此, 国外开始转而采用布袋除尘器, 并且在美、澳等国运行相当成功, 国内也有一些厂家开始采用布袋除尘器, 但应用尚不普遍. 虽然现有除尘装置的除

尘效率大多可达 99% 以上, 但这些除尘器对可吸入颗粒物(PM_{10}) 的捕获率却较低, 仍有大量可吸入颗粒物进入大气中. 这些可吸入颗粒物中通常富集有毒有害成分^[4], 对人体健康的危害远远高于粗颗粒物^[5].

目前, 国内外关于可吸入颗粒物的研究工作多集中于源解析、环境影响及健康评价方面, 而对于可吸入颗粒物源的形成和控制技术的基础研究工作较

收稿日期: 2005-11-21; 修订日期: 2006-01-20

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB211600)

作者简介: 易红宏(1976~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: yhh02@mails.tsinghua.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: hjm-den@tsinghua.edu.cn

少,对不同煤种、不同燃烧方式、不同除尘设备形成的可吸入颗粒物尚无进行系统的研究.此外,以前对颗粒物的排放控制大多侧重于减少排放至大气中的颗粒物质量浓度,但是,由于细颗粒物的质量浓度较低,粒数浓度更能反映细颗粒物对环境和人体健康的影响.

为了研究细颗粒物和超细颗粒物的排放特征、为促进颗粒物控制技术提供有用的信息,本实验在不同燃煤电厂除尘器前后进行现场采样、测试分析,对燃煤电厂除尘器性能和可吸入颗粒物的排放特征(包括粒数浓度和质量浓度)进行了研究,测试粒径最小达到 0.03 μm .

1 材料与方法

1.1 试验工况

在 5 个不同的燃煤电厂进行了测试,其中 4 个厂采用电除尘器,另外 1 个厂采用布袋除尘器.为了保证试验的稳定性,测试期间,各电厂生产设备均处于正常运行状态下,锅炉负荷、燃用燃料及燃烧工况保持不变,排放的气态污染物浓度也相对保持稳定.各厂试验工况见表 1.

各厂燃煤工业分析及元素分析见表 2.

电厂 1 掺烧了 20% 的高炉煤气,煤气成分见表 3.

表 1 试验工况

Table 1 Operational parameters during test run periods

电厂序号	锅炉类型	发电量/MW	试验负荷/%	除尘器	燃料
1	煤粉炉	50	80	四电场 ESP	80% 口泉煤+ 20% 煤气
2	煤粉炉	600	90	五电场 ESP	准噶尔煤
3	煤粉炉	600	100	五电场 ESP	60% 富兴优+ 40% 木瓜界
4	煤粉炉	220	95	布袋除尘器	晋东南无烟煤
5	循环流化床	15	70	三电场 ESP	中煤+ 矸石

表 2 煤质工业分析及元素分析

Table 2 Proximate analysis and ultimate analysis of coals

电厂	燃料	基碳/%	基氮/%	基氧/%	基氢/%	基水/%	灰份/%	挥发份/%	硫份/%	低位发热值/ kJ $\cdot\text{kg}^{-1}$
1	口泉煤	51.59	0.78	6.82	3.95	9.8	19.75	27.14	0.33	22 781
2	准噶尔煤	43.72	0.88	10.43	3.22	9.1	24.78	27.85	0.51	21 736
3	富兴优	49.01				9.7	22.64	26.90	0.9	20 925
	木瓜界	48.39				9.95	22.65	27.62	1.24	20 963
4	晋东南无烟煤	65	0.79	0.84	2.1	8.5	31.24	8.65	0.54	23 617
5	中煤+ 矸石	42.08				5.6	40.38	16.85	1.33	17 615

表 3 煤气成分

Table 3 Component of coal gas

CO	CO ₂	N ₂	O ₂	热值
23% ~ 25%	18%	53% ~ 56%	1% ~ 2%	2 970~ 3 300kJ $\cdot\text{kg}^{-1}$

1.2 试验系统

采样点分别设在各电厂除尘器的进口及出口,分别代表无控状态下锅炉排放的颗粒物及控制后排入大气的颗粒物.

排气中总颗粒物的采样方法选用目前常用的滤筒收集,仪器为武汉市天虹智能仪表厂的 TH-800 III 型微电脑烟尘平行采样仪,采样滤筒在采样前后均在 105 $^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ 的烘箱内烘烤 1h,放入干燥器冷却至室温后称重,计算出总烟尘的排放浓度.

可吸入颗粒物的粒径分布测试采用荷电低压捕

集器(ELPI).

ELPI 是现有测量颗粒物较为准确和精密的仪器之一,主要用于大气环境中燃烧过程产生的可吸入颗粒物及气溶胶的研究,它能够在线测量燃烧源产生的可吸入颗粒物不同粒径范围的质量浓度和粒数浓度^[6~8].其基本工作原理是:颗粒物进入 ELPI 主机后,首先通过电晕放电器使其荷电,然后气流从上而下通过每一级冲击器,通过惯性分离将颗粒物按粒径从大到小分成 12 级,粒径范围是 30nm~ 10 μm ,最后气流通过最末级的导流管排出

撞击器. 每一级冲击器都对应有 1 个静电计测量捕集至该级的颗粒物所带电流值, 通过电流值计算出各级的颗粒物浓度, 各冲击器之间用聚四氟乙烯绝缘体隔开. ELPI 的响应时间小于 5s, 甚至可达 1s, 能够支持实时测量^[9].

燃煤电厂排放烟气的浓度和温度一般均较高, 为了了解烟气中颗粒物排入大气后的特征, 同时将高温烟气的温度和浓度降至仪器可承受的温度和浓度, 需要将高温烟气冷却稀释至接近环境温度, 然后对稀释后的烟气进行采样和分析.

对于燃烧固定源的稀释处理采样, 目前国内外尚没有相应标准, 不同的研究者根据自己的研究重点建立了许多不同的稀释^[10]. 本研究采用两级喷射稀释器串联采样^[11]. PM_{10} 试验系统如图 1 所示.

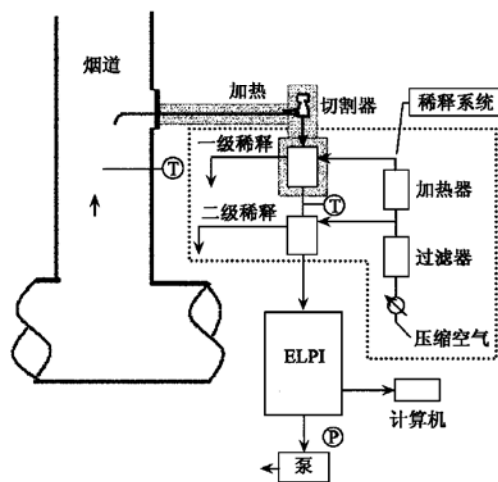


图 1 PM_{10} 采样系统

Fig. 1 Sampling system of PM_{10}

如图 1 所示, 整个 PM_{10} 采样系统由等速采样探头、采样管、预切割器、稀释系统、ELPI、采样泵等组成. 烟道中的高温烟气在采样泵的作用下, 通过等速采样探头、采样管进入切割直径为 $10\mu m$ 的预切割器, 将大于 $10\mu m$ 的颗粒物去除, 以避免烟气进入 ELPI 后, 前几级捕集大颗粒的冲击器很快过载. 随后高温烟气进入两级稀释系统, 稀释气体和高温烟气在稀释器内充分混合, 稀释比例与烟道压力和稀释气体的压力有关, 因此, 每个测点的烟道压力必须进行测量. 稀释气体为过滤、干燥后的洁净空气. 经稀释、降温后的烟气进入 ELPI 主机, 在此进行颗粒的分级及测量, 测量结果传输到计算机, 通过专用软件进行数据转换与处理. 为尽量减少大颗粒在采样过程中的损失, 采样系统中所有连接管的长度都尽可能缩短.

烟气进入稀释系统前所有管道均进行加热、保温处理, 加热温度与烟气温度一致, 一级稀释中, 稀释气体也加热至烟气温度, 烟气在没有温差的情况下稀释; 二级稀释中稀释气体不加热, 使烟气温度降至最终温度. 采样膜为 $\phi 25 \sim 26mm$ 的铝膜, 为了保证测量的准确性, 铝膜表面必须是洁净且平整的. 此外, 铝膜的表面需要涂一层薄脂, 如高纯度的阿皮松脂 (Apiezon L), 以减少颗粒反弹对测量造成的影响^[12].

总烟尘及 PM_{10} 的采样位置、采样点及其它相关要求均遵循 GB/T 16157-1996《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》进行.

2 结果与讨论

2.1 除尘器进出口 PM_{10} 浓度分布

各厂除尘器进出口 PM_{10} 的粒数及质量浓度分布分别见图 2、图 3.

由图 2 可知, 各厂除尘器进口 PM_{10} 的粒数浓度分布呈明显的双模态对数正态分布: 亚微米颗粒态及粗颗粒态, 2 种模态分别反映了煤燃烧过程中的颗粒物的 2 种形成机理. 亚微米颗粒主要来自煤中无机物的气化-凝结过程; 粗颗粒主要由残留在焦炭颗粒中的矿物转化而成, 焦炭破碎和表面灰的聚合是决定粗颗粒最终粒径分布的主要过程, 除此之外, 对于含外来矿物较多的煤种, 矿物破碎对残灰颗粒的形成也有十分重要的影响^[13, 14]. 各厂 2 种模态的峰值分别出现在 $0.07 \sim 0.12\mu m$ 和 $0.76 \sim 1.23\mu m$. 经过除尘设施后, PM_{10} 的粒数浓度分布仍然呈双峰分布, 但浓度值明显下降. 各电厂粗颗粒态粒数浓度的下降趋势基本一致, 说明电除尘器和布袋除尘器对粗颗粒态的颗粒物去除效率均较好; 亚微米态粒数浓度则呈现不同的下降趋势, 布袋除尘器(电厂 4)的下降程度明显高于采用电除尘器的其它 4 个电厂, 说明布袋除尘器对亚微米区间的颗粒物去除效率优于电除尘器.

图 3 表明, 各厂质量浓度分布的亚微米颗粒态峰值均出现在 $0.2\mu m$ 左右, 粗颗粒态的峰值产生在大于 $10\mu m$ 的粒径范围, 因此, 图 2 中没有看到该峰值. 由于大部分粗颗粒被除尘设施捕集, 除尘器出口质量浓度分布的粗颗粒态的平均直径向小粒径偏移, 出现在 $2 \sim 5\mu m$ 之间. 由此可知, 燃煤电厂排至大气的 $PM_{2.5}$ 质量浓度仍然有相当一部分取决于粗颗粒态的粒子, 因此, 用 $PM_{2.5}$ 来定义细颗粒是否妥当尚有争议, 应采用更小的粒径来区分粗颗粒和细

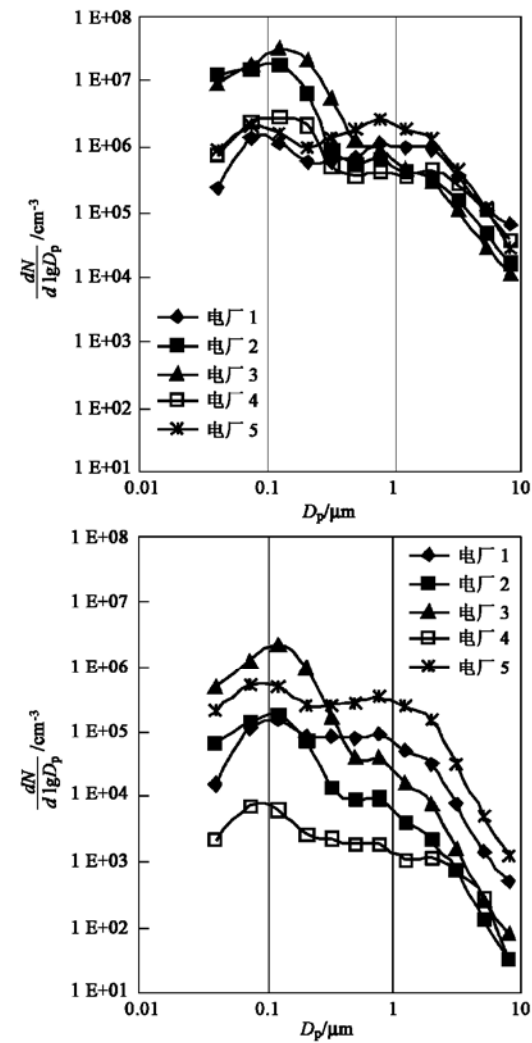


图 2 除尘器进出口 PM₁₀ 粒数浓度分布
Fig. 2 Number size distribution of PM₁₀

颗粒.

2.2 除尘器除尘效率

除尘器对不同粒径的分级除尘效率列于表 4.

表 4 不同粒径的除尘效率/%

Table 4 Collection efficiency of different particle size/%

粒径	PM ₁	PM _{2.5}	PM ₁₀	总烟尘
电厂 1 电除尘器	90.83	95.58	98.20	99.00
电厂 2 电除尘器	98.59	99.16	99.62	99.89
电厂 3 电除尘器	95.74	96.75	98.58	99.76
电厂 4 布袋除尘器	99.54	99.72	99.76	99.94
电厂 5 电除尘器	85.79	87.31	92.97	96.38

表 4 数据说明,除电厂 5 外,电除尘器和布袋除尘器对总烟尘的去除效率均较高,分别达到 99.0% ~ 99.76% 和 99.94%.电除尘器对可吸入颗粒物和超细颗粒物的去除效率较低,对 PM₁ 和 PM_{2.5} 的去

除效率仅为 90.83% ~ 98.59% 和 95.58% ~ 99.16%,相比之下,布袋除尘器的去除效率较高,分别可达 99.54% 和 99.72%.由于电厂 5 是循环流化床锅炉,且燃用中煤和煤矸石,灰份较高,约在 40.38%,高于电除尘器的设计值,因此,电除尘器效率未能达到设计值,明显低于其余厂,但对不同粒径的除尘效率变化趋势与其余电厂相同.

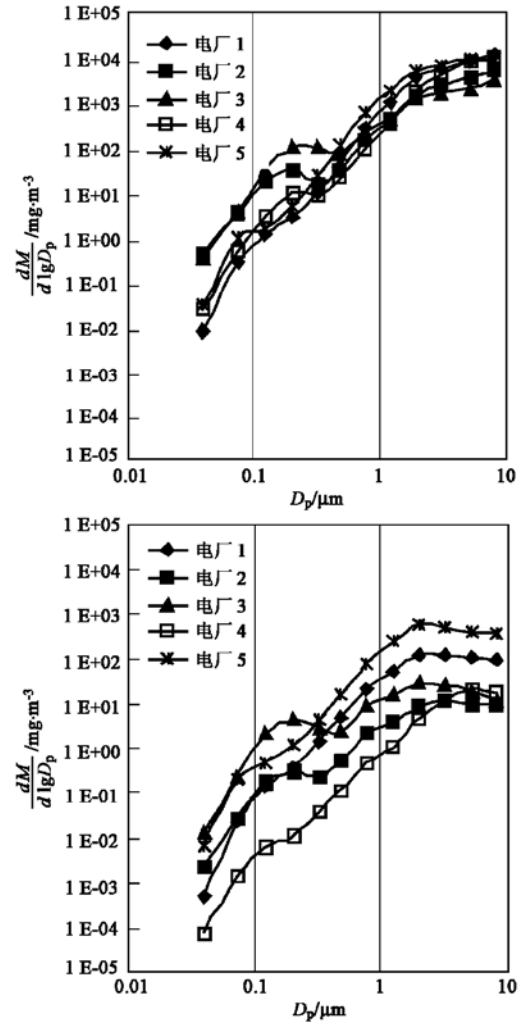
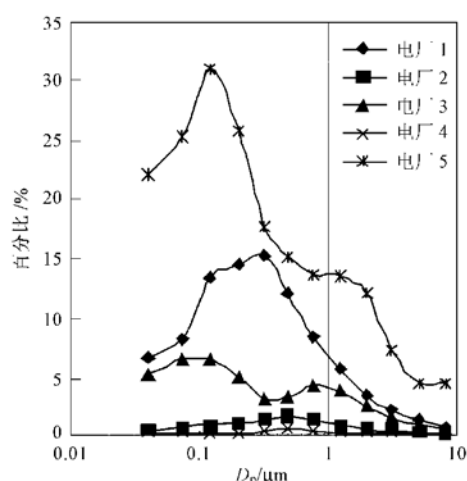


图 3 除尘器进出口 PM₁₀ 质量浓度分布
Fig. 3 Mass size distribution of PM₁₀

颗粒物的捕集过程受到多种作用力,颗粒的粒径大小和种类不同,所受作用力不同,颗粒的动力学行为也不同.惯性碰撞、重力等作用力对颗粒的捕集效率随粒径增大而增大,相反,扩散沉降的捕集效率随粒径减小而增大.因此,在多种机理共同作用下,一般在 0.1~1μm 范围内会出现除尘效率的最低点^[15].本研究中,各电厂除尘器对 PM₁₀ 的分级穿透曲线见图 4.

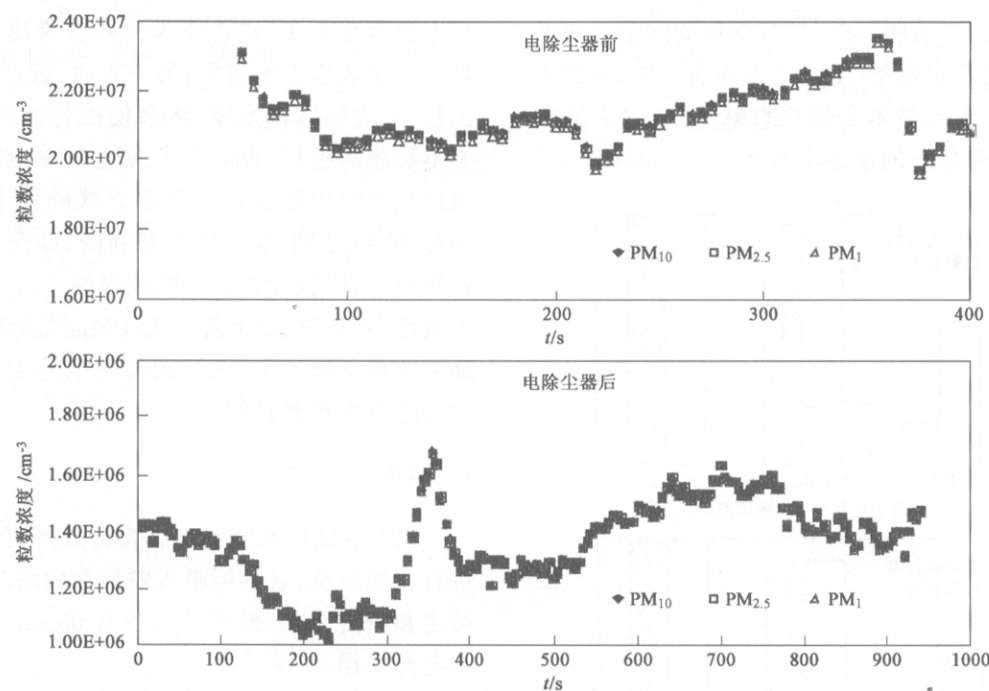
图4 除尘器对PM₁₀的分级穿透曲线Fig. 4 Penetration of PM₁₀ through the dust catchers

如前所述,电除尘器和布袋除尘器的最大穿透率均出现在0.1~1 μ m范围内.该粒径区间的颗粒物在电除尘器中穿透率为1.42%~14.2%,最大达到31%;在布袋除尘器中穿透率为0.46%,低于电除尘器.

2.3 除尘器前后在线粒数浓度

为进一步了解除尘器前后可吸入颗粒物的粒数浓度,对电厂3除尘器前后PM₁、PM_{2.5}、PM₁₀的粒数浓度进行了在线测试分析,如图5所示.

不论除尘器前后,PM₁、PM_{2.5}、PM₁₀的粒数浓度均相差很小,说明PM₁₀的粒数浓度主要取决于亚微米态的颗粒(粒径0.1 μ m左右)^[16].电除尘器前PM₁、PM_{2.5}的粒数浓度分别占PM₁₀粒数的99.2%和99.5%,除尘后增大至99.7%和99.97%,说明

图5 电除尘器前后PM₁、PM_{2.5}、PM₁₀的粒数浓度比较Fig. 5 Comparison of the number concentrations of PM₁, PM_{2.5} and PM₁₀ before and after the ESP

针对粒数浓度而言,电除尘器对PM₁和PM_{2.5}的去除效率同样低于PM₁₀,与表4所示的质量去除效率相同.由此可知,虽然燃煤电厂排入大气的PM₁₀中超细颗粒物质量浓度很低,但有很高的粒数浓度.

2.4 除尘器操作对颗粒物浓度的影响

由于ELPI的响应时间低于5s,可达到1s,因此,可以进行在线的实时监测,了解因除尘器操作条件改变引起的颗粒物浓度的瞬时变化情况,如电除尘器振打、布袋除尘器清灰等.图6所示的是电除尘

器出口的PM₁₀在线监测数据,虚线框内是最后一个电场在振打.由图6可知,末电场振打对PM₁₀的质量和粒数浓度影响均较大,一方面是由于末电场捕集的灰灰粒径较小,基本都是PM₁₀的范围;另一方面,前几个电场振打导致的二次飞扬粉尘有可能在下一电场重新被捕集,末电场振打时的二次飞扬粉尘则重新进入气流排出电除尘器,导致出口的PM₁₀浓度明显增加.布袋除尘器出口PM₁₀的在线浓度也可以得到相同结论:当布袋脉冲清灰时,PM₁₀的质

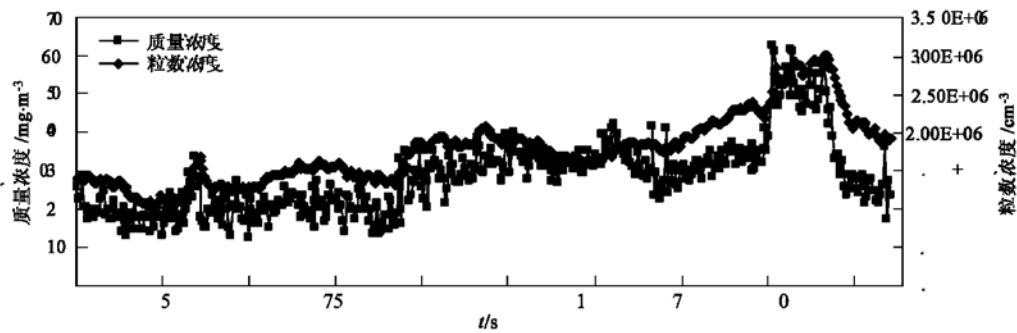
图6 电除尘器出口 PM_{10} 质量浓度和粒数浓度变化

Fig. 6 Real time measurement of particulate mass and number concentration at the outlet of ESP

量和粒数浓度增大。

振打时电除尘器对 PM_1 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 的除尘效率变化如图7所示, 分别针对粒数浓度和质量浓度进行了比较。图7表明, 基于粒数浓度的除尘效率低于基于质量的除尘效率, 主要原因如前所述, 是由于粒数浓度大多由亚微米态颗粒贡献, 而电除尘器在 $0.1 \sim 1 \mu m$ 具有最大的穿透率所致。

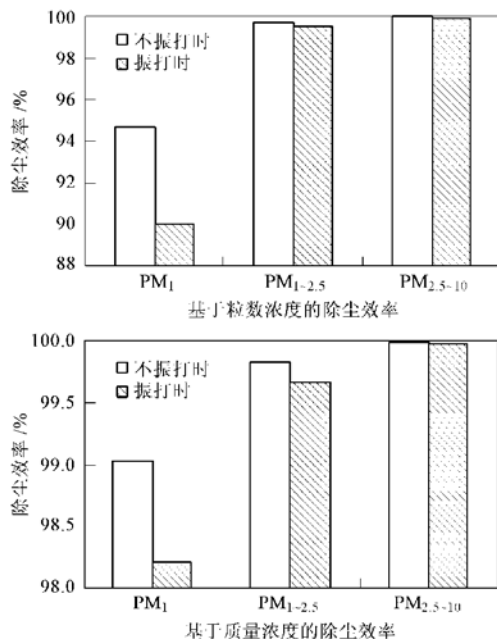


图7 振打时电除尘器除尘效率变化

Fig. 7 Variety of collection efficiency caused by ESP rapping

振打时2种除尘效率均有不同程度的下降, 下降幅度最大的是 PM_1 。电除尘器收尘极板捕集粉尘是借助于粒子与粒子之间、粒子与收尘极板之间的粘附力。振打周期对电除尘器的影响体现在2方面: 一方面, 振打间隔时间太短, 收尘极表面尚未形成适当厚度的粉尘层, 颗粒之间的凝聚力较小, 振打时粉

尘层容易破碎成细颗粒, 沉降速度较低, 形成二次飞扬随气流排出, 若增大振打的间隔时间, 可增强收尘极板上颗粒间的粘附和凝聚力, 振打时颗粒会从极板上脱落至灰斗, 或者作为大颗粒排出, 因此, 容易被下一级收尘设施捕集; 另一方面, 振打的间隔时间太长, 粉尘层堆积太厚, 将会使振打的惯性减小, 粉尘不易脱离极板, 也会导致除尘效率的降低。因此, 通过改善除尘器运行条件等方式降低 PM_1 的穿透率对控制总烟尘排放是很有利的, 如选择合适的振打周期, 可以减少这部分颗粒物的二次飞扬, 提高除尘效率^[8]。此外, 虽然振打时 PM_{10} 质量增加较多, 但除尘效率下降不大, 说明振打时电除尘器对大颗粒的去除效率仍然较好。

3 结论

(1) 本试验系统可对燃煤排放的可吸入颗粒物进行在线测量, 获得可吸入颗粒物的瞬时浓度、平均浓度和浓度分布, 最小粒径达 $0.03 \mu m$, 可广泛用于固定源采样。

(2) 除尘器进口和出口的 PM_{10} 粒数浓度均呈明显的双模态对数正态分布。电除尘器和布袋除尘器最大穿透率均出现在 $0.1 \sim 1 \mu m$ 范围内, 但布袋除尘器在该粒径区间的穿透率低于电除尘器, 降低该区间颗粒物在除尘器中的穿透率有利于控制可吸入颗粒物的排放。

(3) PM_{10} 的粒数浓度主要取决于亚微米态的颗粒。针对粒数浓度而言, 电除尘器对 PM_1 和 $PM_{2.5}$ 的去除效率同样低于 PM_{10} 。

(4) 除尘器的运行和操作条件对 PM_{10} 排放影响较大。基于粒数浓度的除尘效率低于基于质量的除尘效率。振打时2种除尘效率均有不同程度的下降, 下降幅度最大的是 PM_1 ; 振打时 PM_{10} 质量增加

较多,但除尘效率下降不大,说明电除尘器振打时
对大颗粒的去除效率仍然较好。

参考文献:

- [1] 国家计委宏观经济研究院. “十五”能源发展规划[R]. 北京: 国家计委宏观经济研究院, 1998.
- [2] 中国环境统计专题组. 中国环境统计 2000[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.
- [3] 王励前. 我国燃煤电厂除尘现状及提高细尘捕集效率的措施[A]. 见: 中国工程院工程科技论坛(第十四场)[C]. 2001.
- [4] Siegmann, Konstantin. Soot formation in flames[J]. J. Aerosol Sci., 2000, **31**(S1): S217~ S218.
- [5] Pope A C, Hill R W, Villegas G M. Particulate air pollution and daily mortality on Utah's Wasatch front[J]. Environmental Health Perspectives, 1999, **107**(7): 567~ 573.
- [6] Moisio M, Laitinen A, Hautanen J, *et al.* Fine particle size distributions of seven different combustion power plants[J]. J. Aerosol Sci., 1998, **29**(S1): S459~ S460.
- [7] Terttaliisa Lind, Jouni Hokkinen, Jormak Jokiniemi. Electrostatic precipitator collection efficiency and trace element emissions from co-combustion of biomass and recovered fuel in fluidized-bed combustion[J]. Environ. Sci. Technol., 2003, **37**(12): 2842~ 2846.
- [8] Thomas Ferge, Jorgen Maguhn, Hannes Felber, *et al.* Particle collection efficiency and particle re-entrainment of an electrostatic precipitator in a sewage sludge incineration plant[J]. Environ. Sci. Technol., 2004, **38**(5): 1545~ 1553.
- [9] Marko Marjamaki, Jorma Keskinen, DaRen Chen, *et al.* Performance evaluation of the electrical low-pressure impactor[J]. J. Aerosol Sci., 1999, **31**(2): 249~ 261.
- [10] Glenn C England, Barbara Zielinska, Karl Loos, *et al.* Characterizing PM_{2.5} emission profiles for stationary sources: comparison of traditional and dilution sampling techniques[J]. Fuel Processing Technology, 2000, **65-66**: 177~ 188.
- [11] Mikko Moisio. Real Time Size Distribution Measurement of Combustion Aerosols[D]. Finland: Tampere University of Technology Publications, 1999.
- [12] Jouko Latva-Somppi, Mikko Moisio, Esko I Kauppinen, *et al.* Ash formation during fluidized-bed incineration of paper mill waste sludge[J]. J. Aerosol Sci., 1998, **29**(4): 461~ 480.
- [13] JoAnn Slama Lighty, John M Veranth, Adel F Sarofim. Combustion aerosols: factors governing their size and composition and implications to human health[J]. J. Air & Waste Manage. Assoc., 2000, **50**: 1565~ 1618.
- [14] 于敦喜, 徐明厚, 易帆, 等. 燃煤过程中颗粒物的形成机理研究进展[J]. 煤炭转化, 2004, **27**(4): 7~ 12.
- [15] Helble J J. A model for the air emissions of trace metallic elements from coal combustors equipped with electrostatic precipitators[J]. Fuel Processing Technology, 2000, **63**: 125~ 147.
- [16] Lipsky E, Stanier C O, Pandis S N, *et al.* Effects of sampling conditions on the size distribution of fine particulate matter emitted from a pilot-scale pulverized-coal combustor[J]. Energy and Fuels, 2002, **16**: 302~ 310.