

对比常见粉尘仪测量技术 并介绍一种新型抽取式烟道气颗粒物浓度分析仪

王 冲

(德菲电气(北京)有限公司, 北京 100085)

摘要: 烟气中的颗粒物是由燃烧过程产生的, 其粒径和数量取决于燃料和工艺过程。由于公众对细微颗粒物对健康影响的关注, 使大型燃煤电厂率先向近零排放的指标迈进。这对固定污染源颗粒物排放连续监测系统PM-CEMS提出了更高的要求。本文比较了目前比较常见的在线粉尘测量仪。并针对细微颗粒物超低量程、高湿烟气的工况, 着重介绍一款新型的抽取式颗粒物分析系统, 其核心传感器基于扩散荷电复合离子阱/法拉第杯静电计, 这种系统可以在线连续测量, 无需收集颗粒物。

关键词: 颗粒物, 超细颗粒物, 颗粒物排放连续监测系统, 扩散荷电, 离子阱, 静电计。

Comparing Commercial Dust Monitors for Exhaust Gases and introducing a new Technology of Particulate Content Monitoring

Wang Chong

(Delta-phase Electronics (Beijing) Inc., Beijing 100085, China)

Abstract: Particulate matter (PM) entrained in flue gases is produced by the combustion of fuels or wastes. The size and quantity of particles released depends on the type of fuel and the design of the plant. The concern about the health effect of the exposure to fine particles has led to the pioneer of near-zero emission of stacks in big coal-fired power stations. It requests the Continuous particulate emissions monitoring equipment (PM-CEMS) to be installed to fit extreme low concentration of small particles in wet stack gases. This study provides an overview of the main types of monitoring systems and a comparative analysis of the currently available technologies for measuring dust releases to atmosphere. The PPS-M sensor is an electrical aerosol sensor based on diffusion charging and Ion-trap/Faraday-cup current measurement without particle collection. We will introduce a new extractive PM-CEMS with the core sensor.

Keywords: particulate matter; Fine PM; PM-CEMS; Diffusion Charging; Ion-trap; Electrometer.

引言

随着我国公众对大气环境质量的日益关注，大气和污染源的颗粒物浓度监测越来越受到相关方面的重视。越微小的颗粒物，越能较长时间悬浮于空气中，其在空气中含量（浓度）越高，就代表空气污染越严重。粒径小，比表面积大，活性强，易附带有毒、有害物质（例如，重金属、微生物等），且在大气中的停留时间长、输送距离远，因而对人体健康和大气环境质量的影响更大。

可吸入颗粒物 PM_{10} 是指空气动力学当量直径小于等于10微米的可被人体吸入的颗粒物， $PM_{2.5}$ 指环境空气中空气动力学当量直径小于等于2.5微米的颗粒物，根据中国科学院大气物理研究所王跃思研究员课题组近10年来的监测数据显示，北京市的 PM_{10} 质量浓度每年下降2%~3%，但其中的 $PM_{2.5}$ 质量浓度却大约每年上升3%~4%。 $PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 的比重增加^[1]。

近年来国际上还流行所谓超细颗粒物UP（Ultrafine Particles）的概念，泛指1到100纳米（nm）粒径的颗粒物，尽管超细颗粒物对于 PM_{10} 或 $PM_{2.5}$ 的质量不占主体，却占据了颗粒物数量主体和总表面积主体^[2]。

相关研究表明，静电除尘器对燃煤电厂烟气中大颗粒的去除效率高，小颗粒去除效率低，除尘后烟气中 PM_{10} 或 $PM_{2.5}$ 所占比例迅速增加^[3]。我们有理由相信，目前广泛采用的袋式除尘器，电袋复合除尘器具有相同效应。对于燃煤电厂近年来为了超低排放而引入的湿法电除尘器或者高效脱硫除雾器，会进一步消除烟气中的绝大部分大颗粒，从而使烟气最终排放中颗粒物以 $PM_{2.5}$ 为主，其中超细颗粒物又占据了颗粒物数量和总表面积主体。

因此我们认为对于烟道气污染源颗粒物浓度检测，现有标准^[4]中只测量质量浓度 mg/NM^3 有一定局限性。欧洲就有发动机制造商针对排放标准降低排放颗粒物质量浓度，但增加数量浓度的先例，这对环境保护适得其反，迫使欧洲监管机构正在尝试改变监管标准，增加颗粒物数量浓度 $\#/cm^3$ （即每立方厘米里面的颗粒数量）以及肺沉积颗粒物表面积浓度 $LDSA$ ^[5]指标。

本文先介绍传统的原位法烟气粉尘浓度分析仪，然后介绍近年来针对超低排放而引入的抽取式粉尘浓度测量系统。重点阐述新型基于扩散荷电原理颗粒物传感器的分析系统，包括传感器原理，系统组成，烟道气应用情况等，与基于光散射原理的分析系统作对比。目前只有欧洲类似应用相关数据，这里更多的是原理性说明，待有国内相关数据支撑以后再做补充。

1 原位法烟道气粉尘浓度检测技术

原位法烟气粉尘浓度分析仪，是指直接测量烟道气粉尘浓度，而不需要进行任何样气抽取和预处理，目前常见的粉尘仪原理包括浊度法、光散射法和静电法等。

1.1 浊度法粉尘仪

浊度法粉尘仪基于 Beers-Lambert 定律，测量穿越烟道被粉尘吸收或散射的光强损失。通常由发射单元和接收单元组成，见图 1 示意图。操作原理是发射单元发射直光束穿越烟气气流，接收

单元接收光信号，比较发射与接收到的光强电信号，根据由粉尘造成的光强损失，通过计算用浊度或透光度来表示粉尘浓度，或者经过采样称重校准后用质量浓度 mg/Nm^3 表示^[6]。

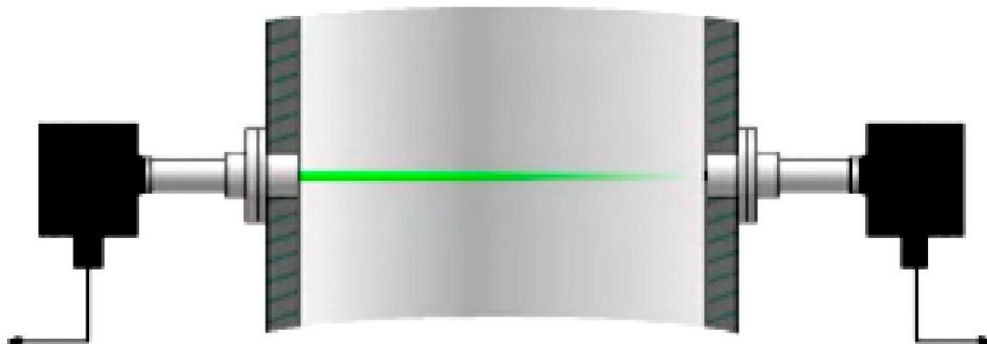


图1. 浊度法粉尘仪工作原理

浊度法粉尘仪有两种光路模式，一种是单光程即发射与接收单元分置烟道两侧，还有一种双光程是发射与接收在烟道同侧，烟道对面是反射镜，光需要两次穿越烟气气流。目前市场上常见的是单光程粉尘仪。光源方面，主要有 LED 光源的绿光、红光或近红外光等；也有采用激光光源的。目前市场上比较多见的是激光粉尘仪。浊度法粉尘仪的量程通常在 $10\sim 1000\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，适用烟道宽度/直径 $1\sim 15\text{m}$ ，其测量取决于颗粒物大小、成分、形状、颜色以及散射率等。因为这些颗粒物的属性会因为燃料的不同而变化，因此校准需要根据不同的工艺过程而改变。

安装要在烟道两侧开孔，要求良好的光路对中性，烟道变形或振动对光路对中性都会有影响，而会导致测量误差甚至失效。另外光窗需要随时用吹扫风来保持清洁，虽然近年来有所谓动态信号处理技术能够在一定程度上补偿光窗粘附杂物的影响^[7]，但浊度法粉尘仪安装麻烦，维护量高是????。总体来说，浊度法粉尘仪适用于袋式除尘器、静电除尘器、旋风除尘器等传统除尘设备，对于烟气流速变化不敏感。但其灵敏度不适合小颗粒物测量，对于超低排放的小量程 ($0\sim 10\text{mg}/\text{Nm}^3$) 通常无能为力。

1.2 光散射法粉尘仪.

在这里光散射是指颗粒物对光的反射与折射，光的散射量取决于处于光路中的颗粒物浓度和属性（例如粒径、成分、形状、颜色等）^[8]。如果入射光的波长远大于颗粒物半径，将会发生瑞利散射（Rayleigh scattering）；如果入射光的波长与颗粒物半径类似，将会发生米氏散射（Mie scattering）。参见图 2。

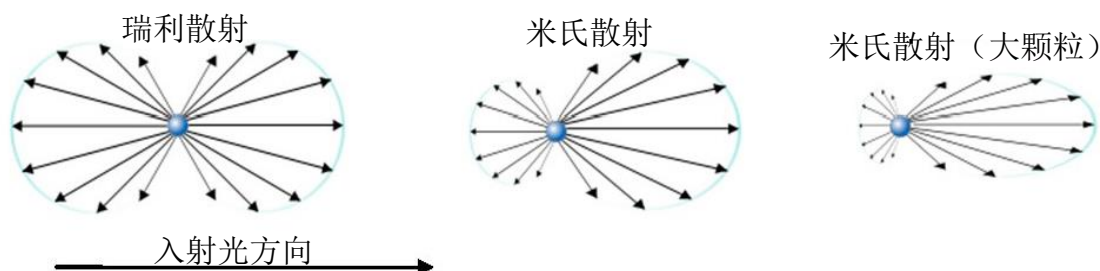


图2. 瑞利和米氏散射

光散射粉尘仪测量散射光的光强，有测量前向，侧向，后向等不同方向散射光强的粉尘仪类型。不论哪种类型，都需要把散射光强信号转换为仪器输出信号，再与人工采样称重得到的数据作相关，得到质量浓度 mg/Nm^3 。光源方面，主要采用调制脉冲激光光源。脉冲光源在现场具备一定抗杂散光干扰能力。目前国内比较常见的是测量后向散射光的类型，生产厂家也以国内为主。这种其工作原理见图3。

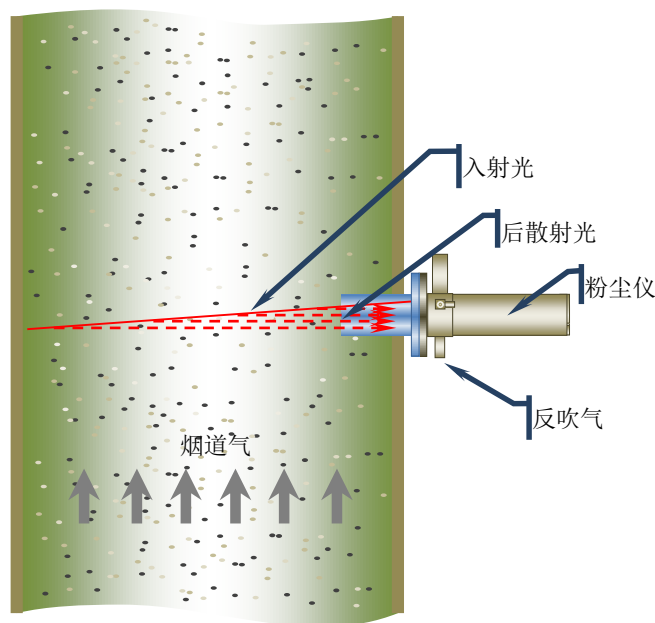


图3. 后散射激光粉尘仪

这种粉尘仪结构简单，安装方便单侧开孔，初始信号调节方便，价格便宜，因此在国内烟道气排放监测领域被广泛采用。量程通常在 $10\sim 500\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，适用烟道宽度/直径 $0.5\sim 8\text{m}$ 。但测量灵敏度不高，光窗需要吹扫风保持清洁，维护量较大。需要指出的是，目前逐步流行的抽取式光学粉尘仪也采用激光散射原理，后面会详述，这里不再介绍。

1.3 静电式粉尘仪.

静电式粉尘仪的基本外观和原理参见图4，其基本工作原理是利用位于气流中的传感器探头，测量撞击或经过的探头附近的颗粒物所带来的电信号（电压或电流）。这里需要区分传感器类型单独说明。

????? 是传统的裸金属杆传感器，这里粉尘仪测量到的电信号包含三种效应：

- a. 颗粒物撞击到探头上将颗粒物携带的电荷传给探头；
- b. 颗粒物撞击到探头摩擦生电产生的电荷；
- c. 带电的颗粒物经过探头附近时会在传感器探头上感应出正向或反向的电信号。

前两种效应受颗粒物速度、质量以及带电荷量影响；第三种效应是感应电信号，取决于颗粒物与传感器的接近程度以及带电荷量^[9]。

第二类传感器是绝缘传感器，是在裸金属杆外面镀膜或加装非金属套管。这类传感器对潮湿的烟

气具有一定适应性，因此目前在实际应用中使用更多。这时仅剩第三种效应，即感应电信号。

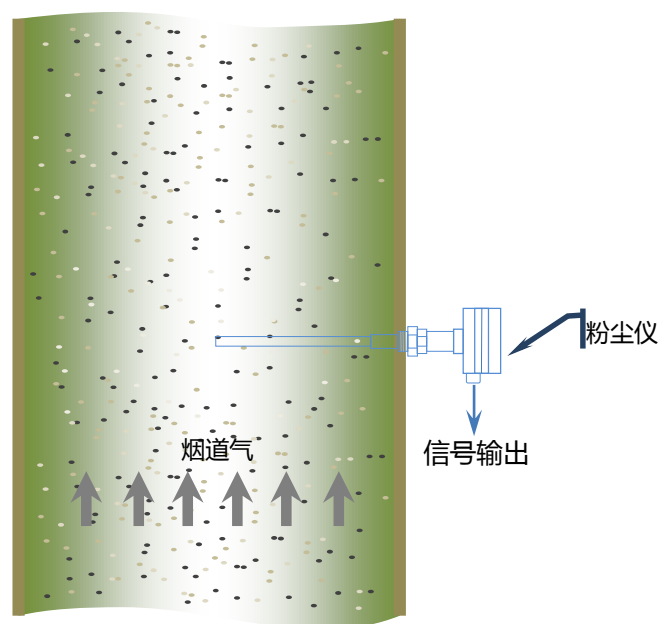


图 4. 静电式粉尘仪

静电粉尘仪对小颗粒和低量程灵敏度更高，量程通常在 $0\sim 1000\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，适用烟道宽度/直径 $0.1\sim 6\text{m}$ 。安装简便，维护量低，但传统静电粉尘仪易受流速扰动（通常需要流速大于 $4\text{m}/\text{s}$ 且稳定），不适合湿烟气以及带电荷量变化大的粉尘（例如静电除尘器后）。

然而随着近年来在信号处理方面的发展，所谓的电动力学技术，也就是俗称的交流静电感应技术成为主流，这时电子单元不测量传感器的直流信号，只测量交流感应信号，配合绝缘传感器，对潮湿的烟气具有一定适应性，对流速、传感器粘附的敏感度下降^[10]，因此可以广泛应用于多种工业过程，例如袋式除尘器和各类净化器；采用加装法拉第笼的绝缘传感器，还可用于静电除尘器之后的烟气排放等。

2 抽取式烟道气粉尘浓度检测技术

抽取法烟气颗粒物分析仪，主要是针对潮湿烟气、低颗粒物浓度而开发的。在目前国内的工业领域，湿烟气是非常普遍的。例如燃煤电厂由于超低排放的需求，湿法脱硫采用双塔双循环工艺，随后增加了湿法电除尘器或者高效除雾器。这使得最终排放的烟气基本处于饱和湿度，烟气温度较低（甚至低于露点）。其它的湿烟气过程还包括生物质或沼气锅炉排放，纸浆厂的碱回收锅炉，垃圾或医疗废弃物焚烧炉等。原位法烟气粉尘浓度分析仪在这些工况下通常无法满足测量要求，这就需要抽取式颗粒物分析仪。

2.1 β -射线衰减法粉尘仪

β -射线衰减法粉尘仪曾经是????????????????，系统由加热采样探头、样品收集滤纸带装置、 β -射线放射源与探测装置、计算输出装置组成。其工作原理和外观见图5。

测量过程是由采样探头周期性地（通常为15分钟）采集烟道内的颗粒物，全加热的采样系统是为了消除水分影响，采样出来的颗粒物聚集在转动的滤纸带上，缓慢通过 β -射线放射源，探测器在纸带的另一面测量 β -射线的衰减，这个衰减跟颗粒物质量相关。 β -射线源一般是C-14放射源，探测器通常是盖革-米勒计数器或光电管探测器。

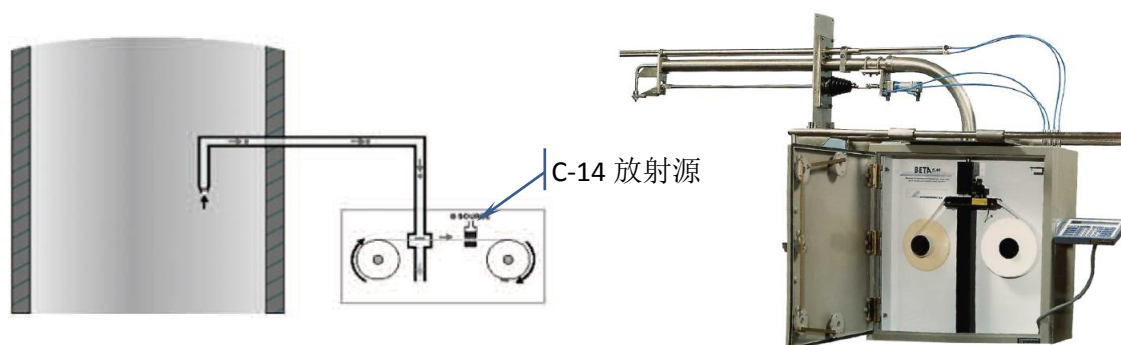


图5.6-射线衰减法粉尘仪工作原理和外观.

β -射线衰减颗粒物分析系统测量灵敏度高，量程比宽。量程通常在 $0\sim 1$ 或 $0\sim 1000\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，不受颗粒物成分、颜色、粒径影响。但不能进行短时动态分析；单点的测量值也可能不具有代表性；系统维护量较大，价格昂贵，滤纸带是耗材。

2.2 抽取式激光散射法粉尘仪

抽取式激光散射法粉尘仪，是利用原有的激光散射颗粒物浓度测量技术，由采样探头，抽取动力装置，核心测量腔体和附件等组合起来的测量系统。图6是典型系统组成和测量原理图。通常整个测量回路从采样到排放都需要加热保温，以防水汽冷凝。

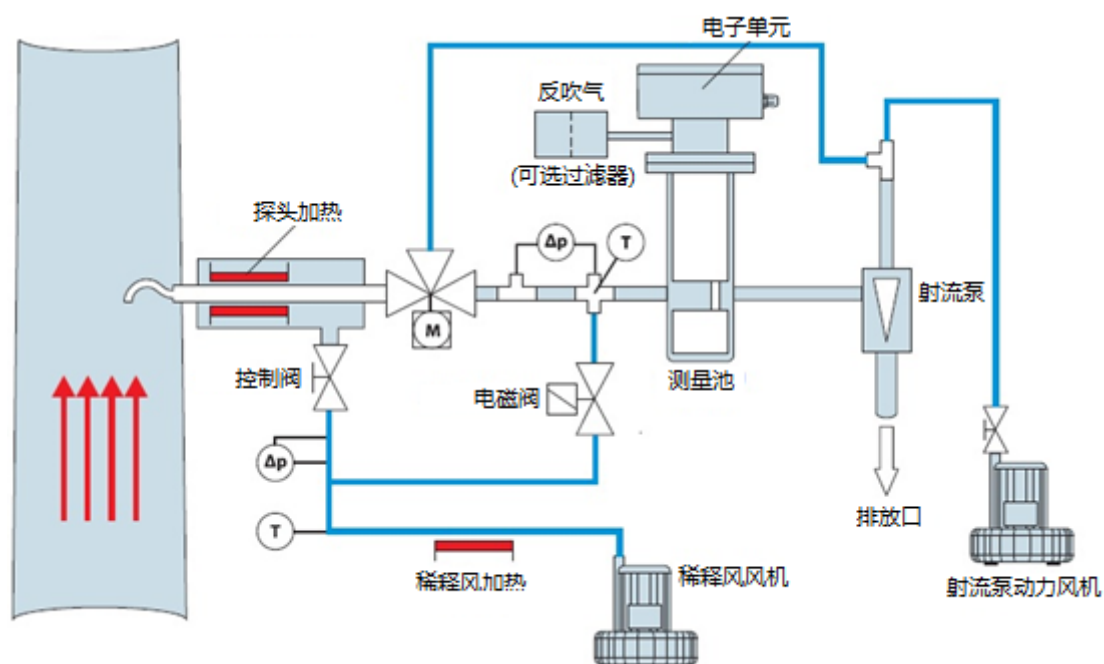


图6. 典型抽取式激光散射法粉尘仪的系统组成及工作原理

典型抽取式激光散射法粉尘仪的系统通常采用射流泵作为抽取动力，样气经稀释或者不经稀释进入测量激光测量腔体（激光散射测量原理前面已经介绍），测量完成后样气放空。典型抽取式激光散射法粉尘仪的系统对低量程灵敏度高，量程通常在 $0.1\sim 15\text{mg}/\text{Nm}^3$ 或 $5\sim 200\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，采样探头需要定时反吹。测量腔体需要定时拆开清洗，管路复杂，维护量高。整体系统成本较高。

另外有一款抽取式激光散射法粉尘仪，还附加了微天平装置，可以定期进行称重标定比对，能够在一定程度上弥补激光散射法由于颗粒物形状，颜色，密度等影响造成的误差。满足美国EPA PS-11规范，当然造价就更高一些。

2.3 抽取式扩散荷电法粉尘仪

扩散荷电复合离子阱/法拉第杯静电计颗粒物测量原理，是近年来逐步兴起的一种新的颗粒物浓度分析技术。采用类似技术的静电低压撞击器ELPI已广泛应用于颗粒物浓度和粒径分布测量^[11]，我国的相关科研机构也有不少装备使用。但由于价格昂贵，没有在线长期应用的案例。

随着传感器的创新设计，小型化降低了成本，使这一技术可以应用于颗粒物污染源连续监测，例如汽车尾气排放和电厂等锅炉尾气排放^[12]；同样的技术也可应用于室内空气质量监测^[13]和户外大气质量监测^[14]。

2.3.1 核心传感器 PPS-M 简介

PPS-M是一款新型电子颗粒物传感器，利用了单极扩散荷电器给气溶胶颗粒物荷电并测量颗粒物携带电荷的静电流值。

PPS-M的测量原理呈现在图7。图中左面是部件功能示意图，右面是实际传感器外观。传感器包含以下主要部件：入口的防止大颗粒物进入/堵塞传感器的旋风切割器，用于给颗粒物荷电的电晕离子源，用于采样的射流泵，离子阱用于捕获消除超量的离子并形成电迁移分析仪，一个静电计测量随颗粒物逃逸的电荷。

传感器有两个进气流：干净的压缩空气和含有颗粒物的样气。压缩空气被引入一个包含恒流电晕放电的腔体，然后气流携带电晕放电产生的阳离子进入射流泵，产生负压并吸入样气，待测样气在紊流状态下与阳离子混合致颗粒物扩散荷电。经过颗粒物充分荷电后，超量的自由离子被电离子阱捕集，携带电荷的颗粒物由于惯性作用随气流流出传感器。采用静电计可以测量出捕集到的电荷所产生的电流值，从而计算出颗粒物带走的电荷量，而这个电荷量与颗粒物浓度和粒径相关。

PPS-M集成了单极电晕荷电器，离子捕集阱/法拉第杯静电计，原始信号是静电流，离子阱的捕集电压可以设置，从而改变仪器对小微颗粒物的响应，标准电压设置到200V，可以消除全部自由离子但不会显著消除微小颗粒物。

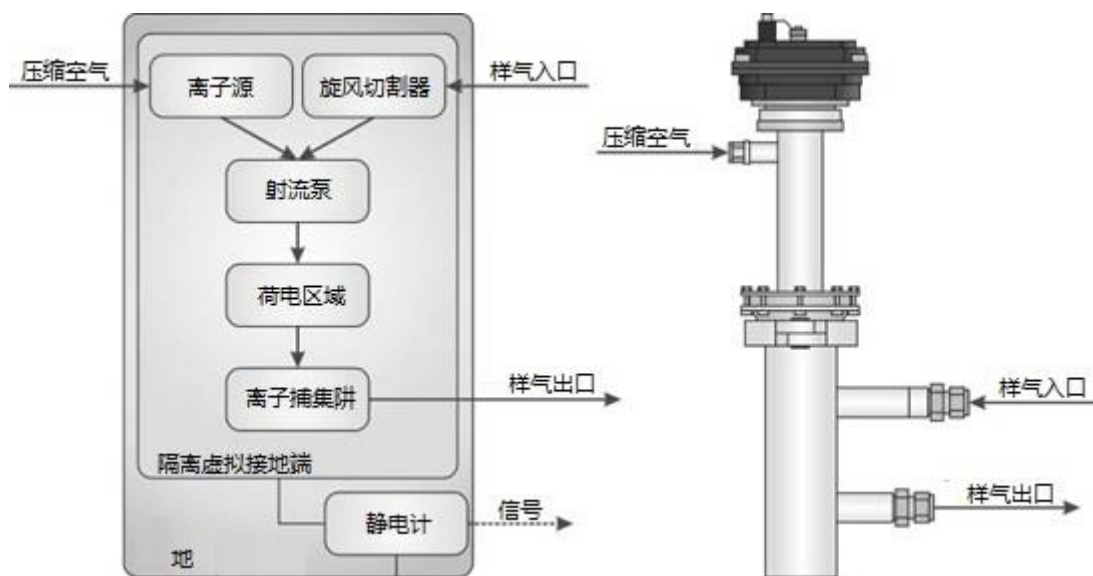


图7 扩散荷电复合离子阱及法拉第杯静电计传感器示意图

2.3.2 测量系统简介

抽取式扩散荷电法粉尘仪测量系统，由采样探头和主机柜组成，主机包含压缩空气过滤与控制单元装置，核心测量传感器，控制和显示单元等。图8是典型系统组成和测量流程图。通常整个测量回路从采样到排放都需要加热保温，以防水汽冷凝。

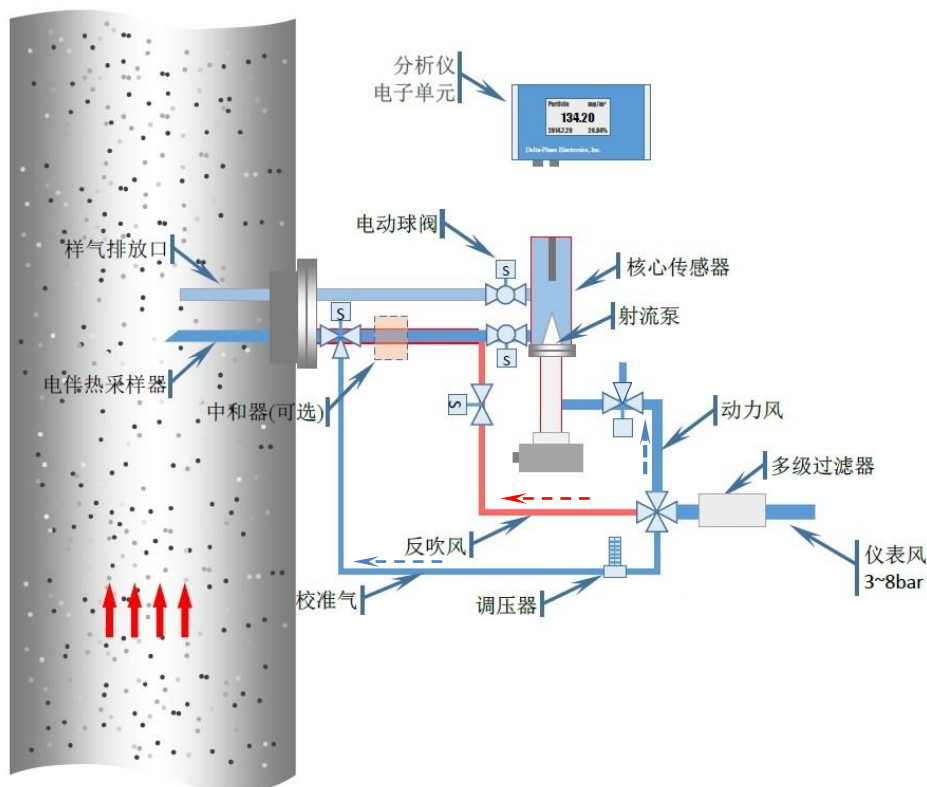


图8 抽取式扩散荷电法颗粒物分析系统组成和测量流程图

压缩空气气源要求无水、无油、无尘，可使用现场的仪表风，要求压力大于1.5bar，流量不小于

10L/min。为了保险起见，主机柜内置了过滤单元。调节压力可以控制进气量，从而实现等速采样。为了保持压力平衡和保护环境，测量后的样气又排回到烟道内。

需要指出的是，如果系统用于静电除尘器，包括湿法静电除尘器（Wet-ESP）之后，由于颗粒物自带的电荷量比较大，为了防止对测量的干扰，会在采样环节加装中和器，预先消除这些影响。

2.3.3 性能指标

测量范围	0.01~300 mg/Nm ³
敏感粒径	大于等于 10nm
防护等级	IP65
烟气湿度	40%绝对湿度或 100%相对湿度
环境温度	-20~+50℃
供电	主机：220VAC；400W
	采样管线：220VAC；100W/m
模拟输出	4-20mA（标配 4 路）
继电器输出	标配 4 个 DPDT
数字输出	Modbus-RTU
外形尺寸	主机 900X380X210
重量	主机 35kg
维护周期	典型 6 个月（量程 0-5mg/Nm ³ ）



图9. 主机外观

2.3.4 与抽取式激光散射测量系统的比较

测量技术	扩散荷电复合法拉第杯	抽取式光散射法
最小可测粒径	10nm	200~300nm
测量范围	0.01~300mg/Nm ³	0.1~15mg/Nm ³ 5~200mg/Nm ³
粉尘性质（颜色/反射率等）	不敏感	敏感
加热采样和测量回路	配备	配备
采样方式	等速或定速	等速或定速

我们看到，光散射法测量的粒径下限是200nm，无法测量超细颗粒物，而经过湿法电除尘器或高效除雾器之后，烟气中50%的颗粒物小于1μm，超细颗粒物对人体健康危害更大，因此对环境监测系统要求更高。光散射法量程比较低，如果工艺波动，粉尘浓度升高，单一分析系统无法同时满足测量要求。

而扩散荷电方法，量程比宽0.01~300 mg/Nm³，如果工艺波动，也能满足测量要求。

2.3.5 法国某焚烧炉具体应用数据比较

抽取式测量系统在法国某焚烧炉的应用，其测量数据与参比仪器的比对曲线

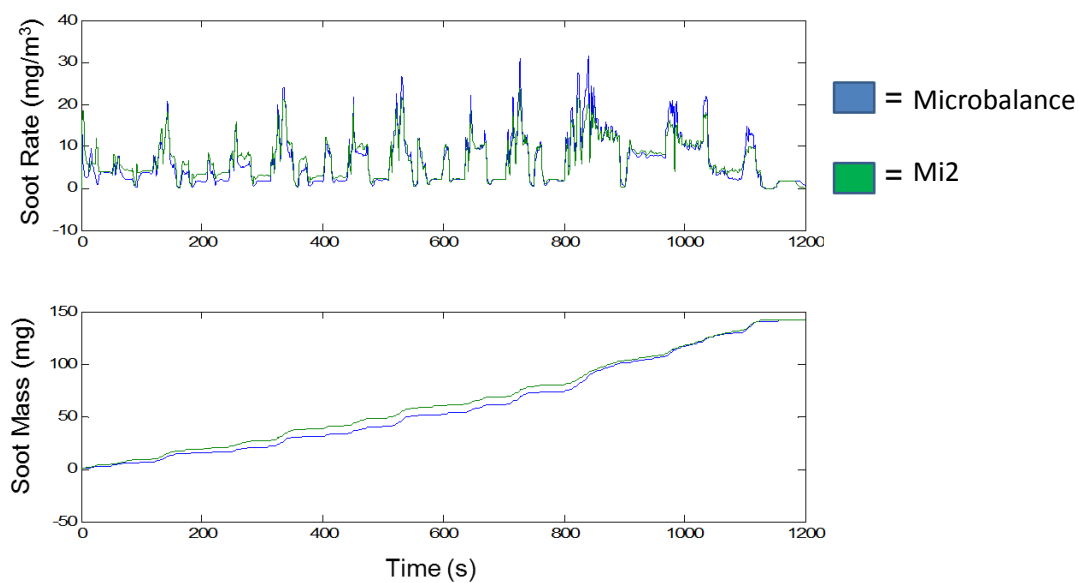


图10. 与微震荡天平比对

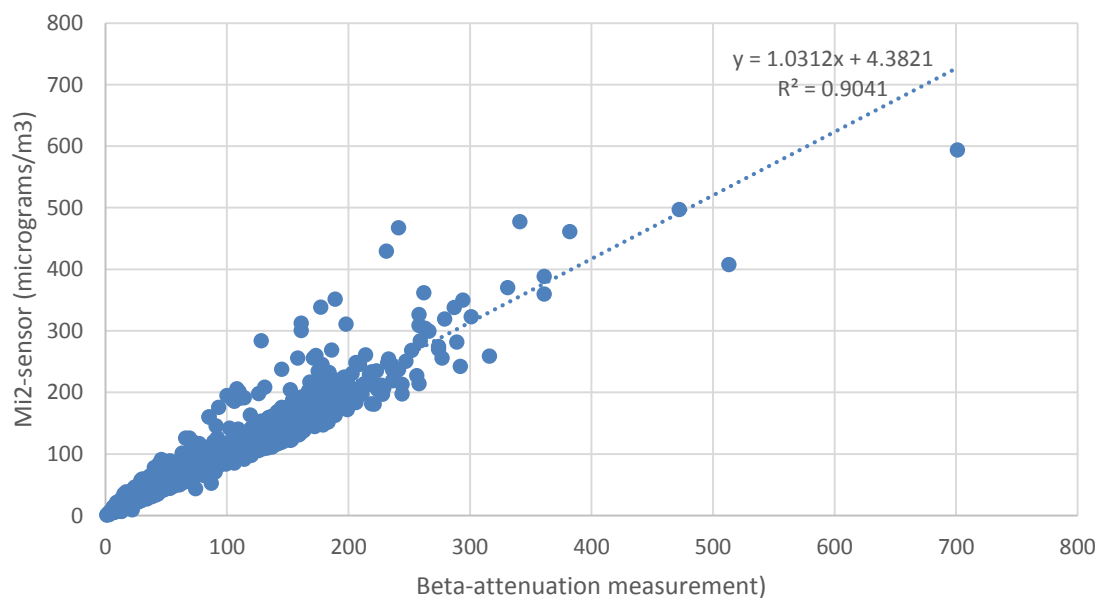


图11. 与 β -射线衰减颗粒物分析系统比对

3 结语

工业领域有大量的颗粒物污染源，主要经济大国和地区制定的环保法规所要求的颗粒物排放浓度限值越来越低，目前按质量浓度单位 mg/m^3 来表示，这相对于颗粒物数量浓度或者肺沉积颗粒物表面积浓度等新指标来说，虽然有一定的局限性，但对于现阶段的颗粒物排放连续监测系统PM-CEMS，提出了越来越高的要求。

在线颗粒物浓度分析仪/粉尘仪，分为原位法和抽取法两大类。原位法粉尘仪包括光学透射浊度法，光散射法以及静电式。各有优缺点和适用场合，大量应用于各类除尘器、过滤器、净化器、干燥器之后，就使用数量而言仍然占有主流。但对于最终排放的烟气，特别是大型燃煤电厂的最终排放，由于采用高效湿法脱硫、湿式电除尘器等新工艺，烟气处于饱和湿度，在实现超低或近零排放的同时，也使传统的原位法粉尘仪难以再满足使用要求。

抽取式粉尘仪目前比较常见的光散射法和 β -射线衰减法，都可满足超低量程（ $<10 \text{ mg}/\text{m}^3$ ）测量需求。但光散射法测量的粒径下限是200nm，无法测量超细颗粒物，而经过湿法电除尘器或高效除雾器之后，烟气中50%的颗粒物小于 $1\mu\text{m}$ 。光学部件比较娇气，需要定期维护，价格也比较贵。 β -射线衰减法，无法真正连续测量，维护量大，价格昂贵且使用有耗材。

本文介绍了一种新的抽取式颗粒物分析系统。其核心传感器基于扩散荷电离子阱/法拉第杯静电计原理。测量不受颗粒物形状、颜色、密度等变化影响。可以测量的颗粒物粒径下限是10nm。可以同时测量质量浓度和数量浓度，且具备测量颗粒物粒径分布的潜在能力。在法国某焚烧炉的具体应用中，经过跟人工采样，在线微震荡天平，以及 β -射线衰减法粉尘仪的数据比对，取得了很好的相关性。这种测量系统还具备响应速度快(响应时间0.2秒)，宽量程比（ $0\sim 300 \text{ mg}/\text{m}^3$ ），低维护量，价格经济等优点。相信会有广泛的应用前景。

4 参考文献：

- 1、杨勇杰, 王跃思, 温天雪,等. 北京市大气颗粒物中 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度及其化学组分的特征分析[J]. 环境化学, 2008, 01 期(1):117-118. DOI:doi:10.3321/j.issn:0254-6108.2008.01.027.
- 2、Judith C. Chow*, John G. Watson, *Review of Measurement Methods and Compositions for Ultrafine Particles* Desert Research Institute, 2215 Raggio Parkway, Reno, NV, 89512 USA.
- 3、鲁晟, 姚得飞《燃煤电厂烟气中颗粒物粒径分布特征研究》浙江省环境研究中心, 环境污染与防治, 2010, 第 8 期
- 4、HJ/T75-2007 《固定污染源烟气排放连续监测技术规范》
- 5、1601. <http://dx.doi.org/10.4271/2014-01-1601>. Asbach, C., Fissan, H., Stahlmecke, B., Kuhlbusch, T.A.J., Pui, D.Y.H., 2009. Conceptual limitations and extension of lung-deposited Nanoparticle Surface Area Monitor (NSAM). J. Nanopart. Res. 11, 101–109.
- 6、Horne, R. Particulate emissions—Optical and other methods for continuous monitoring from a point source. In *Industrial Air Pollution Monitoring*, 1st ed.; Springer: Houten, The Netherlands, 1998; pp. 61–80.
- 7、Averdieck, W. *Selection of Particulate Monitors*; Technical Paper 4 (Issue 1); PCME Ltd.: St Ives, Cambridgeshire, UK, 2011; pp.8.
- 8、McCartney, E.J. *Optics of the Atmosphere: Scattering by Molecules and Particles*; John Wiley and Sons, Inc.: New York, NY, USA, 1976; p. 421.

- 9、Matsusaka, S.; Maruyama, H.; Matsuyama, T.; Ghadiri, M. Triboelectric charging of powders: A review. *J. Electrostatics* **2004**, *62*, 277–290.
- 10、Averdieck, W. *Electrodynamic Technology for Particulate Monitoring*; Technical Paper 13 (Issue 12); PCME Ltd.: St Ives, Cambridgeshire, UK, 1999; pp.5.
- 11、龙正伟, 姚强, 黄斌, 宋蕾 《用 ELPI 测量颗粒物的分级荷电量》工程热物理学报, 第 27 卷第 2 期 2006 年三月
- 12、Ntziachristos L., Fragkiadoulakis P., Samaras Z., Janka K., 2011. Exhaust particle sensor for OBD application. SAE Technical Paper 2011-01-0626. <http://dx.doi.org/10.4271/2011-01-0626>.
- 13、Lanki, T., Tikkanen, J., Janka, K., Taimisto, P., Lehtimäki, M., 2011. An electrical sensor for long-term monitoring of ultrafine particles in workplaces. *J. Phys.: Conf. Ser.* 304, 012013. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/304/1/012013>.
- 14、A. Järvinen, H. Kuuluvainen, J.V. Niemi, S. Saari, M. Dal Maso, L. Pirjola, R. Hillamo, K. Janka, J. Keskinen, T. Rönkkö 2014 Monitoring urban air quality with a diffusion charger based electrical particle sensor

作者简介: 王冲, 男, 毕业于天津大学自动化系, 仪器仪表行业从业 20 年。
Email: wangchong@delta-phase.com.cn 电话: 010-62962862