

燃煤电厂超低排放背景下颗粒物 在线测量方法研究

徐畅, 陆勇*, 陈璐, 上官秋豪

(能源热转换及其过程测控教育部重点实验室, 东南大学能源与环境学院, 江苏南京 210018)

摘要:燃煤电厂进行机组超低排放改造后, 机组颗粒物排放量大幅度降低。针对现有颗粒物测试方法测量原理及在超低排放背景下应用的局限, 提出一种新的集采样与测量于一身的测量方法。该方法通过鼓泡方式将颗粒分成2部分, 通过激光散射法进行测量, 通过参比实验验证方法的可行性, 参比误差随着待测颗粒物浓度增加而趋于稳定。该方法为准确测量超低排放条件下颗粒物浓度、制定燃煤电厂低浓度排放颗粒物测试标准提供依据。

关键词:燃煤电厂; 颗粒物; 超低排放; 测量方法; 质量浓度

中图分类号: X705

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2019)11-0221-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2019.11.047

Research on on-line monitoring technology for particulate matters based on ultra-low emission requirements in coal-fired power plants

XU Chang, LU Yong*, CHEN Lu, SHANGGUAN Qiu-hao

(Energy Thermal Conversion and Process Measurement and Control Key Laboratory of the Ministry of Education, School of Energy & Environment, Southeast University, Nanjing 210018, China)

Abstract: The content of particulate matters discharged from the power generator units has declined greatly since the units in a coal-fired power plant is renovated to meet requirements of ultra-low emission. In view of the detection principle of the existing measurement methods for particulate matter and their application limitations to meet the requirement of ultra-low emission, a new method integrating sampling and detection is proposed. This method divides particles into two parts through bubbling. These two parts are respectively measured by laser scattering method. The feasibility of the method is verified by reference experiments. The reference error tends to be stable as the concentration of the particles increases. This method provides a basis for accurately measuring the concentration of particulate matters under ultra-low emission requirements and formulating test standards for low-concentration emission particulate matter in coal-fired power plants.

Key words: coal-fired power plant; particulate matters; ultra-low emission; measurement method; mass concentration

随着中国环境空气污染的日益加重, 国家对燃煤电厂排放的关注度越来越高, 同时出台了包括《中华人民共和国大气污染防治法》等一系列控制排放政策, 近期国内部分大型能源集团相继提出了更为严格的超低排放标准。基于目前超低排放改造背景, 我国迫切需要研发可靠有效的方法并出台相应的国家或者地方测量标准。准确测量烟气内细颗粒物的含量, 对于评价和改善污染物控制措施, 降低污染物的排放起到了关键作用^[1-2]。

1 传统颗粒物测量方法分析

根据测量机理的不同, 当前主要的颗粒物测量方法有取样法和非取样法。

1.1 取样法

取样法是从待测区域中抽取部分具有代表性的含尘烟气, 当含尘的烟气经过过滤装置后, 颗粒物收集在过滤装置中, 气体逸出, 将捕集到的颗粒物进行称量, 得到该部分颗粒物质量, 然后将此部分质量除以采样气体的体积, 所得的数值便是待测区域内烟气内颗粒物的质量浓度。取样法是一种较为直接的颗粒物质量浓度测量方法, 主要包括滤膜称重法、压电晶体法、 β 射线吸收法、微量振荡天平法等。

1.1.1 滤膜称重法

滤膜称重法是测量颗粒物质量浓度的基本方法, 通常采用称重法标定其他颗粒物测量方法^[3-4]。滤膜称重法使用过程中耗时繁琐, 超低排放背景下

收稿日期: 2019-01-09; 修回日期: 2019-09-20

基金项目: 江苏省燃煤污染物超低排放监测仪器关键技术研发及产业化项目(SBA2016030292)

作者简介: 徐畅(1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向为多相流测量, xuchang_seu@163.com; 陆勇(1969-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为多相流测量、储能蓄热等, 通讯联系人, luyong@seu.edu.cn。

运用时,由于颗粒物质量浓度低需要长时间采样,但高湿的烟气使滤膜很容易发生破损。

1.1.2 β 射线吸收法

β 射线的吸收作用与气溶胶的种类、粒径、形状、颜色和化学组成等无关,只与颗粒的质量有关^[5-6]。应用 β 射线法原理制造的仪器对环境要求较高,不适用于潮湿高温的区域。

1.1.3 压电晶体振荡法

压电晶体振荡法的原理是利用压电晶体材料的压电效应^[7]。压电晶体法由于压电晶体材料本身工作寿命不长且在使用过程中需要定期清洗,通常不使用此方法测量烟气中颗粒物含量。

1.1.4 微量振荡天平法

微量振荡天平法是随着低浓度颗粒物检测研究的深入而提出的一种颗粒物浓度检测的方法^[1]。该方法通常用于大气颗粒物浓度的监测,目前我国还没有基于微量振荡天平法测量烟气颗粒物浓度的连续在线监测装置。

1.2 非取样法

非取样法是指在测量烟道中颗粒物含量时利用颗粒物本身存在的某种特性进行测量,目前常用的非取样法包括黑度测量法、光透射测量法、光散射测量法等。

1.2.1 黑度法

黑度法无法准确地获得烟尘颗粒物的绝对浓度^[8],只适用于煤烟烟尘颗粒浓度的粗略测量。

1.2.2 浊度法

浊度法测量颗粒物浓度时,需预先知道被测颗粒的粒径分布或者平均粒径。超低排放背景下运用时,由于颗粒物浓度低,导致信噪比明显降低,造成测量结果不准确^[9]。

1.2.3 光散射测量法

光散射测量法是基于光的散射原理^[10],颗粒物的重叠、标准颗粒物和被测颗粒物的折射率不同等问题会造成测量结果的偏差。超低排放下,高温高湿烟气更会对散射光测量方法造成影响,水蒸汽和其他物质的凝结作用可能导致测量的失真。

2 超低排放颗粒物测量方法适用性研究

经过超低排放技术处理后,燃煤电厂排放的烟气中颗粒物的成份和性质复杂,烟尘颗粒物的空气动力学直径小于 $10\ \mu\text{m}$ 的飘尘(PM10),且其中大部分属于细颗粒物(PM2.5),粒径小、粒度分布广,且烟气中含有大量湿蒸汽和液滴^[11-12]。超低排放

背景下,使用的烟尘在线测量仪器应当具备以下优点:测量方法准确、仪器监测限值低且具有较高的灵敏性;在高温高湿环境下能够正常工作且保证长期运行;系统本身易于维护、价格合适^[13-14]。传统的取样法虽然原理简单,但本身测量准确与否取决于抽取的烟气是否能够代表整个烟道内烟气,且取样法的测量精度受多种因素影响,操作程序复杂、低浓度时采样时间较长、仪器维修量较大以及花费成本较高,所以不适合应用于超低排放背景。非取样法可实现在线测量粉尘浓度排放,但是烟气中含有的水滴对测量的结果都无法回避,光学原理的检测仪(激光、可见光、红外仪)容易受湿烟气的影响,潮湿工况下,所有光学仪器都会产生水蒸汽并结雾,对所有光学原理的烟尘监测仪,任何细小的水滴都会反射或散射光,影响正常接受光的强度,从而导致测量信号被干扰,最终导致不准确的读数^[15-16]。所以在湿烟道中安装颗粒监测,首先要消除液滴对颗粒测量的干扰,这就要求测量前做一定的预处理,以消除液滴和水蒸汽的影响,然后再通过光学散射测量仪器进行粉尘浓度的测量。同时,进行超低排放后,污染物的排放浓度进一步降低,对监测仪的准确性、稳定性和可靠性提出了更高的要求,现行的测量技术多在传统上改进,使其更加适用于超低排放。

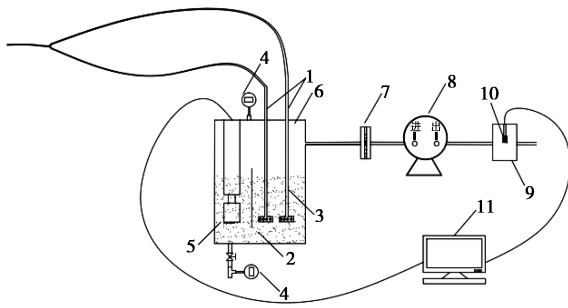
3 超低排放颗粒物在线测试方法

3.1 测量系统设计原理

为了解决上述测量方法中测量超低排放下颗粒物质量浓度存在的局限性,笔者设计了 1 套集采样与测量为一体的适应于超低排放背景的颗粒物质量浓度测量系统。系统将流动的烟气通过曝气水洗装置,大部分颗粒富集在曝气水洗装置中,该方法将烟气中原有的颗粒物分成两部分:截留在曝气水洗装置中的颗粒物及随烟气逸出的少部分颗粒物,然后分别对这两部分颗粒物进行测量。在此测量系统中,把截留在曝气水洗装置中的颗粒物定义为第一颗粒物,将随烟气一起从曝气水洗装置中逸出的颗粒物定义为第二颗粒物。由于第一颗粒物存留在液体中,采用光散射法测量水中颗粒物散射光强,水中颗粒物测量技术成熟^[17-20]。随着烟气逸出的第二颗粒物采用传统气固测量方法进行测量。最后,将第一颗粒物和第二颗粒物的质量浓度与烟气中颗粒物质量浓度相关联,最终获得超低排放下烟气中颗粒物质量浓度。

3.2 测量系统模块介绍

测量系统硬件结构原理图如图1所示。燃煤电厂超低排放颗粒物质量浓度在线测试系统主要由颗粒曝气水洗富集模块、第一颗粒物质量浓度测量模块、第二颗粒物测量模块、数据采集和处理模块及显示模块等部分组成。颗粒物曝气水洗富集模块由曝气管、曝气池、压力传感器、液位传感器、气泵等组成。第一颗粒物质量浓度测量模块采用液固散射光传感器。第二颗粒物测量模块采用气固散射光传感器。数据采集和处理模块的主要功能是将第一颗粒物和第二颗粒物的测量数据进行读取处理,计算出待测烟气中颗粒物质量浓度。结果在显示平台上进行显示,方便进行观测。



1—曝气管;2—多孔挡板;3—曝气管;4—压力传感器;
5—水下颗粒物散射光传感器;6—曝气池;7—流量传感器;
8—风机;9—集气池;10—气溶胶测量传感器;11—计算机

图1 颗粒测量系统硬件结构原理图

3.2.1 颗粒富集模块

颗粒富集模块采用的是鼓泡装置,其工作过程如下:烟气引入鼓泡反应装置以后,经过竖直向下的曝气管以一定的速度喷射进入去离子水中,通过气液鼓泡作用,收集烟气中颗粒物,鼓泡反应之后的烟气逸出液体表面后,由后方风机吸出,该部分烟气携带少量的烟尘颗粒物。鼓泡装置提供了高效的气—液接触方式,能够保证在稳定和可靠的基础上高效地将烟气中颗粒物富集在去离子水中,通过鼓泡装置,通入的烟气均匀地扩散在去离子水中,使得鼓泡装置富集效率达到很高水平。鼓泡装置在曝气过程中会形成鼓泡层,烟气经过曝气管后进入液体中产生气泡,气泡的直径约3~20 mm,大量的气泡意味着气液接触面积巨大,鼓泡取得气泡由于不断地形成和破碎会形成新的气液接触面积,因此颗粒脱除效率提高,曝气装置的富集效率就提高。烟气中含有的SO₂也会溶解在气泡表面的液膜中,烟气中的飞灰也会在液膜捕捉后被去除。这一过程造成的液湍流和扰动也能够实现物质传递的过程^[21-22]。

一定量的烟气经过富集模块后,大部分颗粒富集在装置内形成悬浊液,少量的颗粒随着烟气逸出,采用不同测量方法测得这两部分颗粒质量浓度,即可获得待测烟气中颗粒物的质量浓度。

3.2.2 测量模块设计

一定量烟气经过曝气水洗装置后,大部分颗粒物富集在曝气池的液体中,此部分颗粒称之为第一颗粒物;虽然大部分颗粒通过曝气水洗作用存留在富集装置中,但仍有一些颗粒随着烟气逸出,该部分颗粒被称为第二颗粒物。对第一颗粒物测量,实际上就是测量颗粒物悬浊液,想要求出颗粒物的质量浓度,可以先测得随被测颗粒物浓度变化而变化的浊度值,浊度测量方法在浊度低区间范围(0~4 000 NTU)内有很好的线性性能,通过使用标准样品配比溶液测量标准样品颗粒浊度与质量浓度之间关联,这种标准化的分析方法完全可以使浊度测量法成为定量分析^[23],因此对此部分中颗粒物的质量浓度可采用水下散射光测量法(浊度法)进行测量;对于第二颗粒物的测量,可采用高精度的气溶胶检测仪,其测量原理是:利用前一章提到的光散射原理,当光线穿过待测量的第二颗粒物时,由于颗粒物对光线的散射作用,光线发生偏移,散射光的强度与烟气中的颗粒呈一定的数值关系,依据此数值关系计算出颗粒物的质量浓度。

3.2.3 数据采集及处理模块

本系统采用485通讯模块进行数据采集。数据处理模块采用PyQt5编写,主要为了实现测量数据的计算、处理并且绘制浓度曲线。

3.3 标定实验

由测量系统的设计原理可知,第一颗粒物测量过程中颗粒的散射光强与颗粒的质量浓度存在一定的线性关系,由此可得到第一颗粒物的测量浓度是:

$$C = ax + b \quad (1)$$

其中: C 为第一部分颗粒物标定后给出的颗粒物质量浓度; a 为采样系数; x 为传感器实时测量值与不含颗粒时去离子水底值的差值。

最终颗粒物测量装置测量的结果是第一颗粒物质量浓度以及第二颗粒物质量浓度之和,具体计算过程如下:

$$C_v = C_1 + C_2 \quad (2)$$

$$C_1 = CV/QT \quad (3)$$

其中: C_v 为测量系统标定后给出的颗粒浓度; C_1 为第一颗粒物标定后的颗粒物浓度; C_2 为第二颗粒物标定后给出的颗粒物浓度; V 为富集装置内水容量;

Q 为测量系统气体单位时间内的流量; T 为测量系统鼓泡时间。

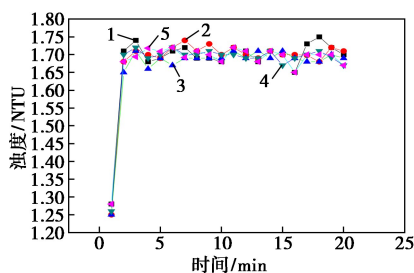
由式(1)、式(2)、式(3)可以看出,测量系统的标定分为两部分:测量系统内富集装置内去离子水底值以及第一部分颗粒物散射光强与质量浓度之间关系,据此,可给出颗粒物测量系统内浓度值的理论计算关系。

对实验样机进行浊度底值标定的目的是为了减去每次测量开始时实验样机中存在的浊度值,便于和软件中存储的颗粒物光强和质量浓度标准曲线相匹配。这个浊度底值会存储在设计的测量系统中,然后测量样机每次测量过程中测得的浊度值会自动减去该值,进而从颗粒物光强和质量浓度标准曲线上找出对应的悬浊液中颗粒物浓度值,方便下一步计算。

测量系统在测量过程中,由于曝气管的运行,水中会存在一定的气泡,该气泡在实际测量过程中会像颗粒物一样造成光散射现象,如果测量系统不剔除此影响,结果会产生很大误差,因此需要对运行过程中底值进行标定。

气泡底值实验装置由玻璃曝气装置和工程样机串联,实验将常温下空气通入曝气装置中进行曝气水洗,空气中颗粒和水发生质交换,较为洁净的空气通入工程样机,测量此过程中整个溶液的散射光强。该值称为实验样机的底值。

实验过程中气量一直稳定在 $4 \text{ m}^3/\text{h}$, 测量工程样机中装水量为 1000 mL , 测量区域保持在 -9 kPa 的负压条件。实验过程中每隔 20 min 测量 1 次数据,共进行 5 组实验。气泡存在下浊度随时间变化关系如图 2 所示。从图 2 中可以看出,测量样机刚运行时,浊度测量值为纯水底值,基本稳定在 1.25 NTU 左右,当系统运行一段时间后,5 组实验底值稳定在 $(1.7 \pm 0.5) \text{ NTU}$, 采用的传感器探头灵敏度较高。



1—第 1 组;2—第 2 组;3—第 3 组;4—第 4 组;5—第 5 组

图 2 底值随时间的变化关系

由测量模块设计可知,浊度与颗粒物的类型以及形状没有直接的关系。浊度是颗粒物存在于水中作用的结果。浊度测量在低浊度范围内,颗粒物质量浓度与浊度值有很好的线性关系,通过使用标准样品的比对和标准化的分析过程及方法,浊度测量可以对颗粒物浓度进行质量分析。设计的测量系统中最重要的环节之一就是对待测颗粒物质量浓度与光强之间的关系进行分析。待测颗粒物的质量浓度与浊度的关系如图 3 所示,其关系可以用线性方程表示:

$$C = 2.579x - 2.8638 \quad (4)$$

式中: C 为悬浮液中待测颗粒物的质量浓度, mg/L ; x 为颗粒物的浊度值, NTU 。

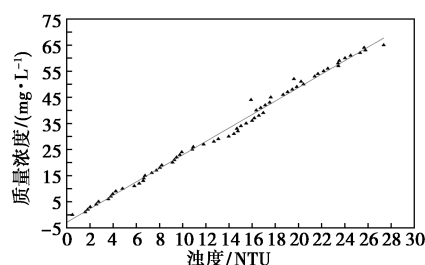


图 3 待测颗粒物浊度与质量浓度关系曲线

该曲线为待测颗粒物的标准曲线,在实际测量中,只需减去不含颗粒物的去离子水的底值,即可得到标准曲线上颗粒物质量浓度与浊度的关系,此处提到的底值会在每次实验前测定好,存储在设计的软件程序中。

3.4 参比实验验证

采用从电厂排放中收集到的烟尘颗粒,在烟尘发生装置上进行模拟颗粒浓度的在线测量过程。等速采样法测量的浓度值作为烟尘发生装置产生的烟气中真实颗粒浓度值,将在线测量系统的测量结果和真实浓度值进行比较、分析,验证本课题设计的测量系统的准确性。

利用实验样机和称重法测得的发生装置内颗粒物质量浓度如表 1 所示。从表 1 中可以看出,当待测烟尘颗粒浓度较低时,由于实验样机测量系统的扰动因素引起的误差值和待测对象真实的浓度值相差很大,即实验样机的测量结果存在很大误差,精度不高,但是随着待测烟气中颗粒物质量浓度的增加,实验样机的测量值与浓度的真实值越来越接近,系统中存在的误差对测量精度的影响呈现降低趋势,整体相对误差低于 7%。

表1 参比实验标定结果

序号	称重法测量质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	实验样机测量质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	相对 误差/%
1	0.85	0.59	30.59
2	1.23	0.91	26.02
3	2.35	1.96	16.60
4	3.80	3.21	15.53
5	4.45	3.83	13.93
6	5.90	5.20	11.86
7	7.20	6.54	9.17
8	7.90	7.12	9.87
9	8.56	8.01	6.43
10	10.10	9.40	6.93
11	10.30	9.60	6.80
12	10.90	10.10	7.34
13	11.50	10.90	5.22
14	12.60	11.96	5.08
15	13.70	12.90	5.84
16	15.83	14.89	5.94
17	16.26	15.33	5.72
18	17.21	16.26	5.52
19	18.29	17.13	6.34
20	20.10	19.31	3.93
21	22.30	20.98	5.92
22	22.40	21.60	3.57
23	25.60	24.69	3.55
24	26.80	25.78	3.81
25	28.32	27.13	4.20

4 结语

(1) 超低排放条件下,传统测量方法存在许多不足之处。取样法难以实现在线测量要求,非取样法可实现在线测量粉尘浓度排放,但是烟气中含有的液滴对测量结果影响较大。

(2) 针对现有测量方法提出的新的集采样和测量于一身的实验样机系统进行参比实验,实验准确性较高,但更进一步的工程应用还有待研究。

参考文献

[1] 王志轩.煤电是我国治霾的关键[J].中国电力,2014,(9):6-9.

- [2] 岑可法,倪明江,高翔,等.煤炭清洁发电技术发展及前景[J].中国工程科学,2015,17(9):49-55.
- [3] 李昆,钟磊,张洪泉.烟尘浓度测量方法综述[J].传感器与微系统,2013,32(2):8-11.
- [4] Mark D. Problems associated with the use of membrane filters for dust sampling when compositional analysis is required[J]. Annals of Occupational Hygiene, 1974, 17(1):35-40.
- [5] Chueinta W, Hopke P K. Beta gauge for aerosol mass measurement [J]. Aerosol Science and Technology, 2001, 35(4):840-843.
- [6] Park S S, Kim Y J, Lee K W, et al. Development of an automatic beta gauge particulate sampler with filter cassette mechanism [J]. Aerosol Science and Technology, 2001, 35(4):844-851.
- [7] 石林雄.粉尘浓度的压电晶体差频测量法[J].农机试验与推广,1995,(3):17-19.
- [8] 张建龙,赵朝阳.超低排放背景下的低浓度颗粒物检测方法及应用[J].环境与发展,2017,(7):110-111.
- [9] 孟令媛,朱法华,易玉萍,等.燃煤电厂超低排放颗粒物测试方法研究[J].中国电力,2016,49(10):123-126.
- [10] Murman S N, Barnes R N, Woodhead S R, et al. Electrostatic modelling and measurement of airborne particle concentration [J]. Instrumentation & Measurement IEEE Transactions on, 1996, 45(2):488-492.
- [11] 帅伟,李立,崔志敏,等.基于实测的超低排放燃煤电厂主要大气污染物排放特征与减排效益分析[J].中国电力,2015,48(11):131-137.
- [12] 李小龙,周道斌,段玖祥,等.超低排放下燃煤电厂颗粒物排放特征分析研究[J].中国环境监测,2018,34(3):45-50.
- [13] 易玉萍,朱法华,段玖祥,等.燃煤电厂低浓度颗粒物的测试方法研究[J].电力科技与环保,2018,(1):32-36.
- [14] 朱杰,许月阳,姜岸,等.超低排放下不同湿法脱硫协同控制颗粒物性能测试与研究[J].中国电力,2017,50(1):168-172.
- [15] 王海华,孙贤明,申晋,等.纳米级颗粒系对激光的多次散射特性[J].红外与激光工程,2011,40(8):1495-1498.
- [16] 宋雪平,贾晓东,覃一凡,等.云雾对激光后向散射特性试验研究[J].红外与激光工程,2010,39(2):260-265.
- [17] Merten G H, Capel P D, Minella J P G. Effects of suspended sediment concentration and grain size on three optical turbidity sensors [J]. Journal of Soils & Sediments, 2014, 14(7):1235-1241.
- [18] 张磊.水中颗粒物的检测技术研究[D].北京:北京工业大学,2009.
- [19] 许盈松,黄振杰.台湾集集堰沉沙池泥沙浓度与浊度率定关系研究[J].泥沙研究,2009,(3):37-44.
- [20] 孟庆功,唐晓津,吕庐峰,等.浊度法用于测量悬浮液中微量固体颗粒浓度[J].工业水处理,2008,(7):74-77.
- [21] 谭军毅,周建华.湿法烟气脱硫法鼓泡反应器的气液传质建模[J].上海环境科学,2003,(9):652-655.
- [22] 刘凤.喷射鼓泡反应器同时脱硫脱硝实验及机理研究[D].保定:华北电力大学(保定),2008.
- [23] 吕武轩,苑明哲.水工业仪表自动化[M].北京:化学工业出版社,2011.■