

重力沉降作用下的采样管路颗粒物损失

朱润孺^{1,2,3}

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 节能工程技术研究分院,北京 100013; 2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013;
3. 国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室,北京 100013)

摘要:为了研究烟尘采样系统的系统误差,采用重力沉降理论对颗粒物在水平直管段内的穿透率进行了理论计算,并以此方法为基础估算了在线监测系统水平直管段由于重力沉降造成的测量误差。结果表明,水平直管段内的颗粒物损失会随着粒径增大、停留时间增长而显著增多;当颗粒物采样系统为烟气外抽式时,水平直管内颗粒物重力沉降会造成采样系统误差,超低排放的达标测量值应小于 10 mg/m^3 。以一台 600 MW 火电机组为例,估算出由于采样系统水平直管内颗粒物重力沉降造成的年烟尘误排量约为 15.5 t。

关键词:重力沉降;超低排放;颗粒物浓度监测;输送损失

中图分类号:TK284;X701 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2017)04-0119-04

Effect of gravitational deposition on particle tube loss of sampling system

Zhu Runru^{1,2,3}

(1. Energy Conservation and Engineering Technology Research Institute, CCTEG Coal Research Institute, Beijing 100013, China;
2. State Key Laboratory of High Efficient Mining and Clean Utilization of Coal Resources, Beijing 100013, China;
3. National Energy Technology and Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control, Beijing 100013, China)

Abstract: The effect of gravitational deposition on the transporting loss usually caused a system error in sampling tube according to the gravitational deposition theory. Thus, the measurement error of in-situ horizontal straight sampling tube was theoretically studied in this paper. Results show that with the particle diameter and the residence time increase, the transporting loss increases significantly. The on-line monitor standard of the ultra-low emission of particle should be less than 10 mg/m^3 when considering the transporting loss of the horizontal sampling tube in the in-situ external particle extraction sampling system. In addition, the extra particulate matter emission of a 600 MW coal-fired power plant is about 15.5 t per year due to the effect of the transporting loss on the horizontal straight sampling tube measurement.

Key words: gravity deposition; ultra-low emission; particle concentration monitoring; transport loss

0 引 言

目前大气环境污染形势严峻^[1-2],区域性复合型雾霾污染引起了全世界关注^[3],燃煤电站锅炉烟气排放是污染的重要来源之一^[4-5]。《煤电节能减排升级与改造行动计划 2014—2020》中要求火电厂的烟尘排放浓度为 10 mg/m^3 ,如何准确监测烟气中的超低颗粒浓度值,是一个棘手的难题。

颗粒物在采样系统中,由于重力、扩散、湍流惯

性、热泳、扩散泳等机理作用,会沉积在装置和管线的壁面上^[6-7],造成监测值失真。Henry 等^[8]对环境污染监测站采样管路内的颗粒物流动特性进行了数值试验,结果表明当颗粒粒径大于 $20 \mu\text{m}$ 时,颗粒物在管路内的平均损失率约为 75%; Prashant 等^[9]对不同长度采样管内的超细颗粒物管路损失进行了试验研究,结果表明当颗粒粒径处于 $5 \sim 10 \text{ nm}$ 时损失最大; Zhao 等^[10]对一种颗粒采样入口装置的性能进行了研究,结果表明对 $10 \mu\text{m}$ 以下颗粒物进行采

收稿日期:2017-02-24;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.04.019

基金项目:煤炭科学研究总院科技创新基金项目面上资助项目(2016110003000423)

作者简介:朱润孺(1984—),男,河北承德人,助理研究员,博士,从事颗粒动力学方面的研究工作。E-mail: joshzrr@163.com

引用格式:朱润孺.重力沉降作用下的采样管路颗粒物损失[J].洁净煤技术,2017,23(4):119-122.

Zhu Runru. Effect of gravitational deposition on particle tube loss of sampling system[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(4): 119-122.

样时,颗粒物损失较少。我国对燃煤烟气中的颗粒物浓度进行在线测量时,均为烟气外抽式颗粒物测量系统,如离子荷电法,光散射法和惯性撞击分级采样法等^[11],但对该类监测系统的管路颗粒物损失特性研究还较少。

本文针对重力沉降引起的采样管路颗粒物损失,对不同粒径颗粒物在水平直管线内的穿透率进行了理论计算,并结合理论计算结果和实际测试数据,估算了某超低排放电厂的真实排放值,以及由于重力沉降造成的电厂年烟尘误排量。

1 计算参数及方法

1.1 计算参数

计算对象为采样管的水平直管段,管长 L 为 2 m,管内径 d 为 10 mm。烟气采样流量 Q 为 10 ~ 120 L/min,烟温 50 ℃。烟气流动状态为湍流时,设定为完全发展湍流。颗粒物为球形,密度 ρ_p 为 2 000 kg/m³。

1.2 计算方法

当采样管内流动状态为层流时,重力作用下的颗粒物穿透率计算方法^[12]为

$$\eta_L = 1 - \frac{2}{\pi} \left(2\varepsilon \sqrt{1 - \varepsilon^{2/3}} - \varepsilon^{1/3} \sqrt{1 - \varepsilon^{2/3}} + \arcsin \varepsilon^{1/3} \right) \quad (1)$$

式中, $\varepsilon = \frac{3LV_{TS}}{dU}$, 其中 V_{TS} 为颗粒终端沉降速度, U 为采样管内烟气的平均流速。

当采样管内流动状态为湍流时,重力作用下的颗粒物穿透率计算方法^[13]为

$$\eta_T = \exp\left(-\frac{dLV_{TS}}{Q}\right) \quad (2)$$

2 计算结果

2.1 层流状态下的颗粒物穿透率

层流状态下不同粒径颗粒穿透率随停留时间的变化曲线如图 1(a) 所示。当停留时间相同时,穿透率会随着粒径的增大而降低,停留时间为 0.36 s 时,颗粒粒径 d_a (空气动力学直径) 由 1 μm 增大到 15 μm , 穿透率由 0.998 下降到了 0.738。主要是由于随颗粒粒径增大,其沉降速度随之变大,被管壁捕捉所需时间变短。随着颗粒物在采样管内停留时间的增加,颗粒物的损失也会随之增加,停留时间由 0.07 s 增大到 0.94 s 时, $d_a = 5 \mu\text{m}$ 的颗粒,穿透率

由 0.990 下降到了 0.883。

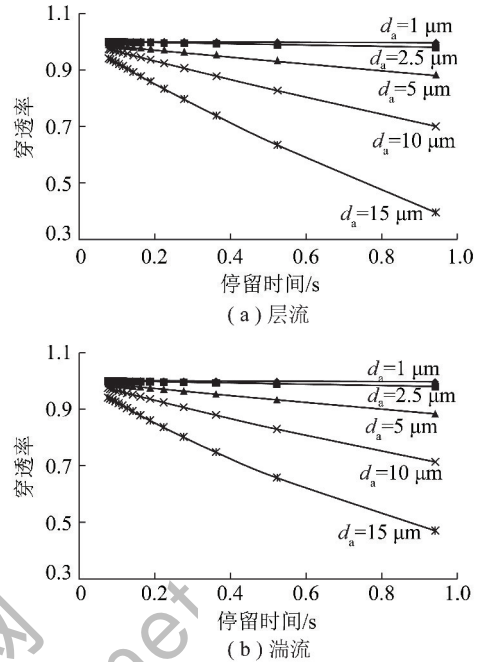


图1 层流和湍流状态下不同粒径颗粒穿透率随停留时间变化曲线

Fig. 1 Plots of the transport efficiency of particles undergoing different residence time flowing through a tube as a function of particle diameter in laminar tube flow and turbulence tube flow

2.2 湍流状态下的颗粒物穿透率

湍流状态下不同粒径颗粒穿透率随停留时间变化曲线如图 1(b) 所示。湍流状态下颗粒穿透率和停留时间之间的关系与层流状态下相同,粒径增大、停留时间增长都会造成穿透率下降,颗粒损失增多。

对比层流的计算结果可知,大颗粒在湍流状态下其穿透率要高于层流状态, $d_a = 15 \mu\text{m}$ 、停留时间为 0.94 s 时,其层流和湍流状态的穿透率分别为 0.396 和 0.470。这可能是由于湍流状态下管内烟气速度分布较之层流状态均匀造成的。需要指出的是,这个结论不能认定湍流状态管流有利于大颗粒物的采样,因为该结论仅考虑了重力沉降的影响,并没有考虑湍流惯性沉积等机理的影响。

综上所述,粒径和停留时间会显著影响颗粒的穿透率。当出现大粒径颗粒所占比例较高,停留时间较长的工况时,测量结果的修正是必要的。

2.3 重力沉积损失估算

赵磊等^[14]对某超低排放 300 MW 机组 WESP (湿式静电除尘器) 后的颗粒物浓度进行了测量,其采样烟气流量为 10 L/min,采样系统保温部件温度

为 150 ℃。现假设其采样管长度为 2 m, 内径为 10 mm, 烟气温度为 120 ℃。由此计算其管流雷诺数约为 830, 为层流状态, 采用式(1)估算其直管段颗粒穿透率。

此外, 因无详细的粒径分布信息, 按其测试结果作如下假设: ① PM_{2.5} 的穿透率按 $d_a = 1 \mu\text{m}$ 的颗粒计算; ② PM_{2.5} ~ PM₁₀ 的穿透率按 $d_a = 5 \mu\text{m}$ 的颗粒计算; ③ >PM₁₀ 的颗粒穿透率按 $d_a = 10 \mu\text{m}$ 的颗粒计算。估算真实颗粒物浓度的计算公式为

$$m_e = \frac{m_{S,PM2.5}}{\eta_{L,PM1}} + \frac{m_{S,PM2.5-10}}{\eta_{L,PM5}} + \frac{m_{S,PM>10}}{\eta_{L,PM10}} \quad (3)$$

式中, m_e 、 $m_{S,PM2.5}$ 、 $m_{S,PM2.5-10}$ 、 $m_{S,PM>10}$ 和 $\eta_{L,PM1}$ 、 $\eta_{L,PM5}$ 、 $\eta_{L,PM10}$ 分别为估算颗粒物的质量浓度、实测 PM_{2.5}、PM_{2.5} ~ 10 和 PM>10 的质量浓度值和计算得出的 PM₁、PM₅ 和 PM₁₀ 的穿透率。

将文献[14] $m_{S,PM2.5} = 0.77 \text{ mg/m}^3$, $m_{S,PM2.5-10} = 0.24 \text{ mg/m}^3$ 和 $m_{S,PM>10} = 0.79 \text{ mg/m}^3$ 代入式(3) 可得 $m_e = 2.11 \text{ mg/m}^3$, 与原文献测定值 1.8 mg/m^3 相差 17.2%。以此为依据, 计算超低排放达标测量值应为 8.53 mg/m^3 , 小于 10 mg/m^3 。此外, 假如以 $\eta_{L,PM15}$ 代替 $\eta_{L,PM10}$, 该误差将上升至 52.6%, 这说明大颗粒的管路损失会极大影响监测准确性。

2.4 重力沉积损失排放总量估算

600 MW 及以上的机组已成为我国火电机组的主力^[15]。以 600 MW 机组为例, 假设排放烟气量为 $2\,000\,000 \text{ m}^3/\text{h}$, 年发电 4 500 h。如采用烟气外抽式监测方式测得的排放浓度为 10 mg/m^3 , 基于之前的计算方法(由水平直管重力沉降造成的测量误差为 17.2%), 可得年颗粒物误排量约为 15.5 t。若为 1 000 MW 机组, 这一数值约为 23.2 t/a。

本文计算仅考虑了颗粒物管路损失机理中的一种, 而管路损失又只是采样系统损失的一部分, 管件、装置等损失还未计入, 就已造成如此大的误排量, 这说明, 对在线采样系统的颗粒损失进行深入研究并制定相应的颗粒物采样标准势在必行。

3 结 论

1) 颗粒粒径和管线停留时间会显著影响其穿透率。当出现大粒径颗粒所占比例较高, 停留时间较长的工况时, 监测结果修正是必要的。

2) 烟气外抽式采样系统, 如计入水平直管内颗

颗粒物重力沉降造成的误差, 超低排放达标测量值应低于 10 mg/m^3 。

3) 火电机组由于颗粒物重力沉降造成的年烟尘误排量数值巨大, 需对采样系统的颗粒损失特性进行深入研究, 并制定相应的颗粒物采样标准来减少误排。

参考文献 (References):

- [1] 熊桂龙, 李水清, 陈晟, 等. 增强 PM_{2.5} 脱除的新型电除尘技术的发展[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2217-2223.
Xiong Guilong, Li Shuiqing, Chen Sheng, et al. Development of advanced electrostatic precipitation technologies for reducing PM_{2.5} emissions from coal-fired power plants[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2015, 35(9): 2217-2223.
- [2] 竹涛, 陈锐, 王晓佳, 等. 电凝并技术脱除 PM_{2.5} 的研究现状及发展方向[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(2): 6-9.
Zhu Tao, Chen Rui, Wang Xiaojia, et al. Research status and development direction of electric agglomeration technology for PM_{2.5} removal[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(2): 6-9.
- [3] 张军, 郑成航, 张涌新, 等. 某 1 000 MW 燃煤机组超低排放电厂烟气污染物排放测试及其特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1310-1314.
Zhang Jun, Zheng Chenghang, Zhang Yongxin, et al. Experimental investigation of ultra-low pollutants emission characteristics from a 1 000 MW coal-fired power plant[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2016, 36(5): 1310-1314.
- [4] 王忠杰, 李颖杰, 朱辰泽, 等. 火电厂 NO_x 排放在线监测研究[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(2): 93-96.
Wang Zhongjie, Li Yingjie, Zhu Chenze, et al. NO_x emissions online monitoring platform for power plant[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(2): 93-96.
- [5] 熊英莹, 谭厚章. 湿式相变冷凝除尘技术对微细颗粒物的脱除研究[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(2): 43-46.
Xiong Yingying, Tan Houzhang. Influence of wet phase transition condensate dust removal technology on fine particle removal[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(2): 43-46.
- [6] 胡月琪, 王琛, 郭晓东, 等. 固定源细颗粒物监测技术现状分析与思考[J]. 环境科技, 2016, 29(1): 69-74.
Hu Yueqi, Wang Chen, Wu Xiaodong, et al. Analyzing on monitoring technology situation of fine particulate matters emitted from stationary source[J]. Environmental Science and Technology, 2016, 29(1): 69-74.
- [7] 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 等. 固定污染源排气中 PM_{2.5} 采样方法综述[J]. 环境科学, 2014, 35(5): 2018-2024.
Jiang Jingkun, Deng Jianguo, Li Zhen, et al. Sampling methods for PM_{2.5} from stationary sources; A Review[J]. Environmental Science, 2014, 35(5): 2018-2024.
- [8] Henry Granek, John Gras, David Paterson. The aerosol transmission

- efficiency of the Cape Grim Baseline Air Pollution Station 10 m sampling inlet [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2003, 34 (11): 1523-1537.
- [9] Prashant Kumar, Paul Fennell, Jonathan Symonds, et al. Treatment of losses of ultrafine aerosol particles in long sampling tubes during ambient measurements [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42 (38): 8819-8826.
- [10] Zhao Guan, Chen Yenyu, Thomas M. Holsen, Suresh Dhaniyala. Numerical simulations of the sampling performance of a large particle inlet [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2015, 90: 63-76.
- [11] 岳玎利, 周炎, 钟流举, 等. 大气颗粒物理化特性在线监测技术 [J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(5): 64-69.
Yue Dingli, Zhou Yan, Zhong Liuju, et al. Continuous online monitoring techniques for physical and chemical properties of atmospheric aerosols [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(5): 64-69.
- [12] Heyder J, Gebhart J. Gravitational deposition of particles from laminar aerosol flow through inclined circular tubes [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1977, 8(4): 289-295.
- [13] Schwendiman L C, Stegen G E, Glissmeyer J A. Report BNWL-SA-5138 [R]. Richland; Battelle Pacific Northwest Laboratory, 1975: 1-5.
- [14] 赵磊, 周洪光. 超低排放燃煤火电机湿式电除尘器细颗粒物脱除分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(2): 468-473.
Zhao Lei, Zhou Hongguang. Particle removal efficiency analysis of WESP in an ultra low emission coal-fired power plant [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2016, 36(2): 468-473.
- [15] 王志轩, 张建宇, 潘荔, 等. 中国电力减排政策分析与展望 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2016: 5.
- [16] 邵媛, 胡杰, 邓宇. 微波辐射下烷基吡啶季铵盐类离子液体的制备 [J]. *化工中间体*, 2006(8): 20-23.
Shao Yuan, Hu Jie, Deng Yu. Synthesis of the ionic liquid of alkyl quaternary ammonium based on pyridinium cation by microwave radiation [J]. *Chemical Intermediate*, 2006(8): 20-23.
- [17] 王军, 杨许召, 李刚森, 等. N-甲基咪唑季铵化反应动力学研究 [J]. *日用化学工业*, 2007, 37(4): 235-237.
Wang Jun, Yang Xuzhao, Li Gangsen, et al. A kinetic study of quaternization of N-methyl imidazole [J]. *China Surfactant Detergent & Cosmetics*, 2007, 37(4): 235-237.
- [18] Tang Jianbin, Sun Weilin, Tang Huadong, et al. Enhanced CO₂ absorption of poly(ionic liquid)s [J]. *Macromolecules*, 2005, 38 (6): 2037-2039.
- [19] 孙亚飞, 林金清, 左霜, 等. 功能化季铵盐离子液体在制备生物柴油中的应用 [J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2011, 32 (6): 657-662.
Sun Yafei, Lin Jinqing, Zuo Shuang, et al. Application of synthesis biodiesel by functional quaternary ammonium ionic liquid [J]. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 2011, 32(6): 657-662.
- [20] 蒋晶. 凝胶型离子液体/聚合物电解质的制备及其性能研究 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2006: 21-28.
- [21] 王东莎, 刘彦军. 种子溶胀法制备单分散高交联聚苯乙烯微球 [J]. *应用化学*, 2007, 24(11): 1289-1294.
Wang Dongsha, Liu Yanjun. Mono-dispersed cross-linked polystyrene microspheres prepared by seed swelling polymerization method [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2007, 24 (11): 1289-1294.

(上接第 118 页)