

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0744

张琦, 李庆, 蒋靖坤, 等. 2016. 一套民用固体燃料燃烧大气污染物排放测试系统的搭建和评测[J]. 环境科学学报, 36(9): 3393-3399

Zhang Q, Li Q, Jiang J K, et al. 2016. A measurement system to characterize air pollutant emissions from residential solid fuel combustion[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(9): 3393-3399

# 一套民用固体燃料燃烧大气污染物排放测试系统的搭建和评测

张琦, 李庆, 蒋靖坤\*, 邓建国, 段雷, 郝吉明

清华大学环境学院, 北京 100084

收稿日期: 2015-10-15

修回日期: 2015-11-11

录用日期: 2015-11-11

**摘要:** 为研究民用固体燃料燃烧的大气污染物排放特征, 设计了一套箱式稀释采样测试系统. 相比于常用的烟罩法和烟道采样法, 该系统能减小环境空气中颗粒物对测试结果的影响, 同时收集了炉具泄漏的烟气, 能更准确获得固体燃料燃烧的大气污染物排放水平. 本文介绍了该系统的设计思路、主要结构组成和测试系统的性能评估结果. 评估结果表明: 进气经过滤后颗粒物浓度显著下降至约  $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 远小于燃烧过程中排放的颗粒物浓度(约  $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 有效减少环境空气中颗粒物对测试结果的干扰; 使用箱式法测得  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  排放因子结果均高于箱体敞开的对照组测试, 证明箱式法收集测试了燃烧时泄漏至室内的污染物, 有效减少污染物泄漏造成的误差. 利用该系统测试了 12 种常见民用煤和 3 种生物质燃料燃烧  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  等污染物排放水平, 其中民用煤  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  排放因子分别为  $0.23\sim 3.40 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $0.48\sim 6.15 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  和  $0.16\sim 1.09 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 生物质燃料的  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  排放因子分别为  $6.26\sim 39.76 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $0.04\sim 0.23 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  和  $0.05\sim 0.76 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ .

**关键词:** 民用固体燃料; 大气污染物; 箱式稀释; 采样方法;  $\text{PM}_{2.5}$

文章编号: 0253-2468(2016)09-3393-07

中图分类号: X851

文献标识码: A

## A measurement system to characterize air pollutant emissions from residential solid fuel combustion

ZHANG Qi, LI Qing, JIANG Jingkun\*, DENG Jianguo, DUAN Lei, HAO Jiming

School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084

Received 15 October 2015;

received in revised form 11 November 2015;

accepted 11 November 2015

**Abstract:** A chamber dilution measurement system was designed to characterize air pollutant emissions from residential solid fuel combustion. Compared with commonly used hood and stack sampling methods, this system can reduce the interference from ambient air and prevent the leaking of pollutants from tested stoves. We report the design, evaluation, and application of this system. It was found that background particulate matter concentration was reduced significantly to  $\sim 1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  by using high efficient filters in the measurement system, which was much lower than particulate matter emitted from typical residential combustion ( $\sim 100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Emission factors of  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_x$  measured with this new system were higher than those measured with open chamber which simulates hood and stack sampling methods. It was confirmed that the chamber dilution measurement system can significantly reduce leaking of pollutants in traditional methods. Using the new system, 12 typical residential coal samples and 3 biomass fuels were tested in a residential stove recommended by Beijing government. When burning coals, measured emission factors of  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_x$  ranged from  $0.23\sim 3.40 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,  $0.48\sim 6.15 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , and  $0.16\sim 1.09 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , respectively. When burning biomass, measured emission factors of  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_x$  ranged from  $6.26\sim 39.76 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,  $0.04\sim 0.23 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , and  $0.05\sim 0.76 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , respectively.

**Keywords:** residential solid fuel combustion; air pollutants; chamber dilution; sampling method;  $\text{PM}_{2.5}$

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(No.2013CB228505);北京市科技新星计划(No.Z141109001814057)

Supported by the National Key Basic Research and Development Program of China (No.2013CB228505) and the Beijing Nova Program (No.Z141109001814057)

作者简介: 张琦(1993—),女,E-mail: zqjodie@126.com; \* 通讯作者(责任作者),E-mail: jiangjk@tsinghua.edu.cn

Biography: ZHANG Qi (1993—), female, E-mail: zqjodie@126.com; \* Corresponding author, E-mail: jiangjk@tsinghua.edu.cn

## 1 引言 (Introduction)

煤和生物质在我国被广泛作为固体燃料用于家庭炊事及采暖活动 (Duan *et al.*, 2014; 中华人民共和国国家统计局, 2009). 农村和城镇郊区居民多采用民用炉具燃烧这些固体燃料. 民用炉具设计简单, 燃烧不完全, 缺乏污染控制措施, 燃烧时产生大量颗粒物和气态污染物, 如二氧化硫和氮氧化物 (Zhang, 2003; Zhang *et al.*, 2000). 部分污染物直接泄露或者排入室内空气, 影响居民健康, 或通过烟囱和通风系统排入大气, 带来大气污染, 危害人体健康 (沈国锋, 2012; Oanh *et al.*, 1999; Launhardt and Thoma, 2000; Boman *et al.*, 2006).

为准确测试和评估燃烧过程排放的污染物, 需充分考虑民用固体燃料和炉具特点, 建立能有效采集民用固体燃料燃烧大气污染物的测试系统, 对研究燃烧机制、节能减排对策和大气污染物来源解析都具有重要意义. 国内外对民用固体燃料燃烧排放污染物的研究多采用烟罩法和烟道采样法 (如图 1 所示). 烟罩法在炉具上方或与炉具连接的烟囱上方设置烟尘罩, 在管道风机作用下, 燃烧产生的烟气与环境空气一同进入烟尘罩、稀释管段, 从而达到模拟烟气进入大气时的混合稀释效果 (Zhang *et al.*, 2000; 刘源等, 2007; 沈国锋, 2012; Zhang *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2004; Jetter *et al.*, 2012; Shen *et al.*, 2012). 采样管伸入稀释管段, 采样头与气流方向平行, 颗粒物通过采样管进入测试仪器部分. 烟道采样法无外加管道风机, 采样点位于烟囱侧壁, 对气态污染物和颗粒物进行在线监测或离线采集 (GE *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2000; Ravichandran and Corscadden, 2014; Johansson *et al.*, 2004; Shen *et al.*, 2010; 孔少飞等, 2014; 沈国锋, 2012; Wang *et al.*,

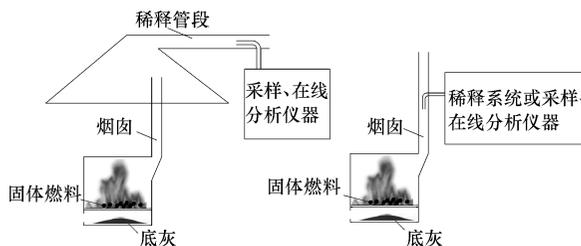


图 1 用于民用固体燃料燃烧污染物排放测量的 (a) 烟罩法和 (b) 烟道采样法示意图

Fig.1 Schematic diagrams of (a) method and (b) stack sampling method for measuring pollutant emissions from residential solid fuel combustion

2009). 燃烧过程中污染物排放浓度和温度高, 需要在进入测试设备前设置稀释和冷却装置 (白志鹏等, 2004; 李兴华等, 2008; Li *et al.*, 2007).

针对民用固体燃料燃烧的大气污染物排放测试目前尚无国际标准和国家标准. 美国环境保护署 (US EPA) 标准方法 Method 5G 和 Method 5H 分别推荐使用烟罩法和烟道采样法进行采样测试 (EPA, 2000a; EPA, 2000b). 实际测量中即使对同一种燃料采用不同测试方法测得的数据, 其可比性也较差, 这对燃料和炉具性能的评估带来不便. 烟罩法和烟道采样法存在一些限制: 第一, 民用炉具的密封性通常有限, 部分烟气未进入烟囱而由炉具其他部位泄漏到周边环境 (Zhang *et al.*, 2000; Jetter *et al.*, 2012), 传统密封性较差的炉具泄露现象尤为明显, 采用烟罩法或烟道采样法无法采集监测这部分污染物, 从而影响测试结果的准确性; 第二, 无法排除环境空气中污染物的干扰, 虽然一些系统使用过滤后的空气 (Chen *et al.*, 2015), 但进入炉具的空气一般未经过过滤, 空气中的颗粒物含量随通风条件、气候及人为活动变化, 影响测试结果. 另外由于固体燃料燃烧时烟囱中烟气流速和温度分布不均匀, 且变化较快, 烟道采样法测试时需要同时在线测量烟气流速才可以较为准确的获得排放因子. 直接在烟道中进行采样, 燃烧源排放的热烟气中气态物质难以迅速冷却成为颗粒态, 对颗粒物排放的测量结果也会有所低估 (Butcher and Ellenbecker, 1982).

为克服民用固体燃料燃烧污染物排放测试中的上述问题, 应在烟罩法和烟道采样法的基础上, 改进采样测试方法. 需确保排放的大气污染物不发生泄漏, 并尽量减少环境空气带来的干扰, 同时也应考虑模拟大气对排放烟气的稀释作用, 增加采样和测试的代表性. 本研究设计和搭建了一套针对民用固体燃料和民用炉具大气污染物排放测试的箱式稀释采样测试系统, 对其进行了性能评估, 并应用该系统对 12 组民用煤和 3 组生物质压块进行了污染物排放因子的测试. 该系统采用箱式稀释法, 进气经过滤进入箱体以降低环境空气干扰, 封闭箱体以收集泄漏污染物, 并模拟大气混合稀释效果, 稀释管段烟气流速及污染物分布较稳定, 增加测试结果的准确性.

## 2 系统设计 (System design)

图 2 给出了本系统的主要组成: 进气部分、主箱

体、稀释管段、采样测试部分及尾气处理部分。进气部分包括进气风机(北京风机二厂,型号 4-72 3.2A 4-1.1KW)和过滤装置,进气部分的过滤器选择 G4 级初效过滤器和 H14 级高效过滤器(HEPA)(Tronville and Rivers, 2005),为多褶结构纤维滤料,可有效去除进气中的颗粒物,其额定流量大于风机流量,保证进气流量准确且进气中所含颗粒物浓度很低,降低环境空气中颗粒物的干扰。空气经过滤后进入主箱体(2 m × 2 m × 2.5 m),箱体中放置民用炉具,炉具的进气口朝向箱体的无进气口侧面,使空气不会直接在进口风机的作用下进入炉具,避免空气过量而造成燃料在炉具中燃烧状态的改变。无进气口的侧面可开合,测试实验前后进行添加燃料、取出灰渣等操作。侧面上安装有耐高温的钢化玻璃,便于观察燃烧时的状态。箱体上方与稀释管段(直径 219 mm)相连,在出口风机抽力作用下使箱体内部的空气向上流动,烟囱出口的烟气和箱体内部的环境空气一同进入稀释管段,模拟民用炉的烟气进

入大气时的稀释效果。采样管伸入稀释管段,与气流方向平行,伸入稀释管段直径约 1/3 处,与气流方向平行并迎向气流方向。稀释管段的同一距离处沿圆周装有多根采样管,以实现多通道同时采样测试。与采样管相连的是测试烟气中颗粒物、气态污染物的在线监测仪器或离线采集装置。测试系统管道和箱体均为不锈钢制作,气态污染物测试仪器进样口与采样管之间采用 Teflon 管连接,颗粒物测试仪器进样口与采样管之间采用不锈钢或者黑炭管连接,以减少污染物在管壁上的损失。稀释管道中的烟气最终经过颗粒物过滤器后由出口风机排出。进口风机和出口风机的额定功率相同,而出口风机流量设置因为长稀释管道和排气管道带来的阻力略高于进口风机流量,因此箱体内保持微正压的状态,使环境空气不会进入箱体干扰实验结果。过滤器、进出口风机和箱体之间用波纹管相连,各连接部位使用卡箍和密封圈密封以保证其气密性。

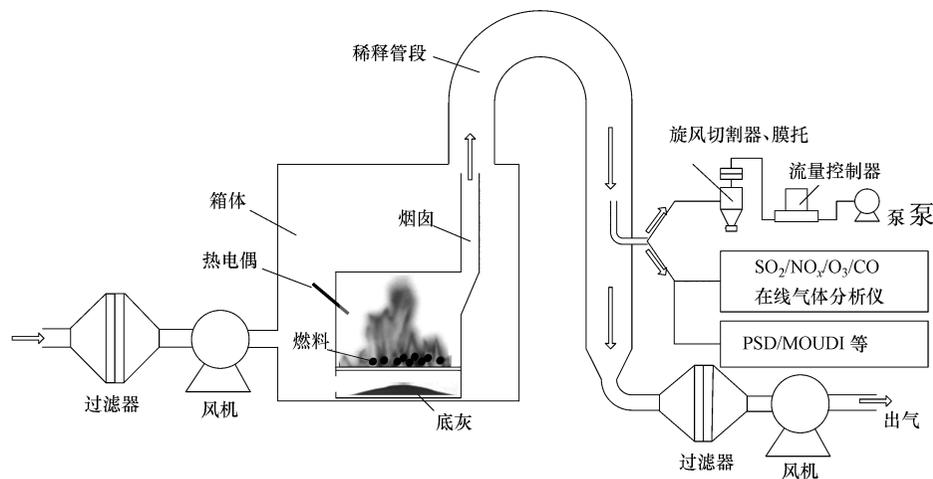


图 2 箱式稀释采样测试系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of the chamber dilution measurement system

根据炉具功率、炉膛大小和燃料种类,每次测试时燃烧固定质量的燃料,避免空燃比过大或过小而影响燃烧状态。将燃料放入炉膛内,根据研究目的和具体炉型选用点火方式,如使用天然气、薪柴点火或利用炉膛内残余燃料点火。但为了减小点火带来额外污染物对测试造成误差,建议采用电阻丝或燃气方式。测试取暖炉具时,炉具中设置水循环,外接暖气片,通过水循环和与外界的热量交换带出热量,使炉具正常工作,防止箱体内温度过高。测试炊事炉具时,可采用煮水法。实验时记录点火时间、结

束时间和燃料质量等参数,期间进行在线监测或离线采样,同时用皮托管等方法测稀释管段内实际流量。燃料燃尽后收集余灰,观察并称重。实验地点应选择远离其他污染源处,尽量选择民用燃料正常使用地点。

本测试系统可用于测试颗粒物和气态污染物的排放因子。根据稀释后的气体流量,可计算污染物排放总量,结合燃料质量可得单位质量燃料的排放因子。如式(1)为膜称重法测试颗粒物排放因子,即  $EF_{PM} (mg \cdot g^{-1})$  的计算公式:

$$EF_{PM} = \frac{mQ/q}{m_{燃料}} \quad (1)$$

式中,  $m$  为使用膜称重法测试颗粒物排放时收集颗粒物的石英膜前后质量差 (mg);  $Q$  为稀释管段内气体流量 ( $L \cdot \min^{-1}$ );  $q$  为采集颗粒物使用的采样流量 ( $L \cdot \min^{-1}$ );  $m_{燃料}$  为燃烧的燃料质量 (g).

同样, 气态污染物也可采用离线收集或在线监测, 从而计算其排放因子. 如式 (2) 为使用在线监测的气体分析仪, 通过对其在线浓度进行时间积分, 计算气态污染物的排放因子 (EF) ( $mg \cdot g^{-1}$ ):

$$EF = \frac{Q \int_{t=0}^T C_i dt}{m_{燃料}} \quad (2)$$

式中,  $Q$  指稀释管段内气体流量 ( $m^3 \cdot s^{-1}$ );  $T$  为燃烧总时间 (s);  $C_i$  为对应时间  $t$  的污染物质量浓度 ( $mg \cdot m^{-3}$ );  $m_{燃料}$  为燃烧的燃料质量 (g). 燃烧的热效率可通过加热水量、水温变化进行计算.



图3 箱式稀释采样测试系统实物照片

Fig.3 Photograph of the chamber dilution measurement system

### 3 系统性能评估 (Evaluation)

为评估箱式稀释采样测试系统, 验证其相对于常见的烟罩法、烟道采样法的优势, 本研究进行了两组验证实验.

#### 3.1 降低环境空气中颗粒物干扰

为验证测试系统的进气部分是否能有效过滤环境空气中颗粒物, 比较了经过过滤和未过滤两种情况下空气进入测试系统时的颗粒物数浓度. 在燃料未点燃阶段, 进气不经过滤, 直接进入箱体中, 此时使用全粒径谱仪 (PSD) 测得未过滤的稀释管段中的分粒径颗粒物数浓度 (Liu *et al.*, 2014). 再加上过滤装置, 测得过滤后的分粒径颗粒物数浓度. 图 4

为两种情况下的颗粒物浓度对比, 进气经过过滤后, 在稀释管段中测得各粒径颗粒物数浓度均大幅下降, 由此可见进气过滤系统能有效减少进气中的颗粒物浓度. 经过过滤后的进气里颗粒物质量浓度小于  $1 \mu g \cdot m^{-3}$ , 而民用燃料燃烧过程中排放的颗粒物质量浓度约为  $100 \mu g \cdot m^{-3}$ , 远远大于过滤后的进气里颗粒物质量浓度. 因此, 在箱式测试系统中, 进气经过过滤后进入主箱体, 提供燃烧和稀释所需空气, 此时进气中含有的颗粒物对测试结果的影响可以忽略.

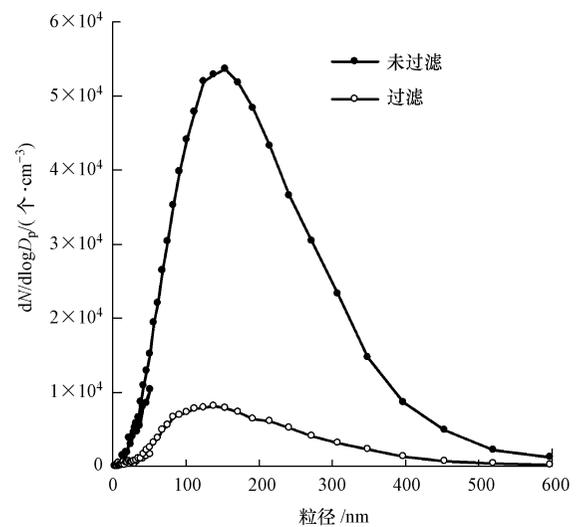


图4 经过和未经过过滤器后的箱体中颗粒物数浓度分布

Fig.4 Filter effect on the background particulate number concentration in the sampling chamber

#### 3.2 泄漏烟气测试

为验证箱式系统能测得泄漏的污染物, 提高测试的准确性, 本研究设计了一组对照实验. 实验中的对照组, 将燃料置入炉膛中, 将箱体门打开, 如发生污染物从炉具泄漏, 则有部分污染物不进入稀释管段, 而是从箱体开启的门泄漏出测试系统, 测试得到的污染物排放因子结果则会偏低; 实验组则在正常应用箱式稀释系统的情况下进行测试, 进气过滤, 箱体封闭, 测试稀释管段中的污染物. 该实验选用燃料为一种污染物排放浓度较高的烟煤, 因为烟煤污染物排放因子高, 可以忽略箱门开启、外界污染物进入箱体造成的误差. 实验点火方式均采用天然气点火, 减少传统点火方式 (如使用薪柴点火) 可能引起的误差. 使用  $PM_{2.5}$  旋风切割器 ( $16.7 L \cdot \min^{-1}$ , URG-2000-30 EH) 和直径为 47 mm 的石英膜收集  $PM_{2.5}$ , 膜称重法确定排放因子; 使用在线气体分析仪 Thermo Scientific™ model 42i 和 43i 分

别测试  $\text{NO}_x$  和  $\text{SO}_2$  的实时浓度,计算排放因子.排放因子计算方法见式(1)和式(2).

实验结果见图 5,实验组使用箱式稀释法测得的细颗粒物、二氧化硫、氮氧化物排放因子均高于对照组,这证明了箱式法中收集测试了燃烧中泄漏至室内的污染物,有效减小污染物泄漏造成的误差.现场实验中也可观测到对照组污染物的泄漏.因此烟道采样法和烟罩法对污染物排放因子的测算会有一定的低估,同时烟罩法将周边环境中非测试炉具燃烧产生的部分颗粒物抽到烟道中,本研究采用的测试系统能提高测试结果的准确性.

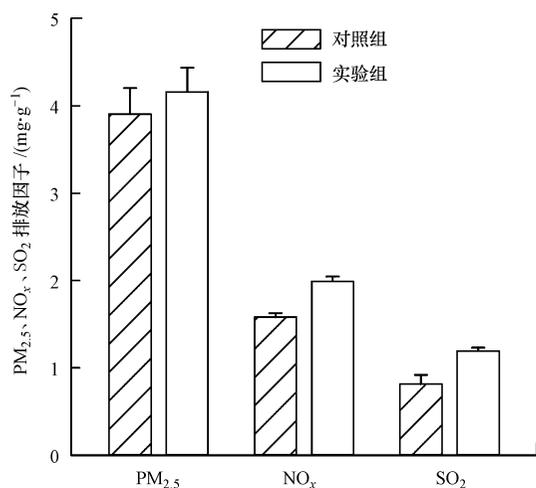


图 5 收集泄漏烟气对测试结果的影响

Fig.5 Effect of collecting stove leakage on measured pollutant emission factors

#### 4 测试系统应用 (Application)

目前,该测试系统已用于测试北京市常见民用煤和生物质固体成型燃料的污染物排放.已测试的民用煤种包括烟煤、无烟煤和半焦煤,生物质固体成型燃料包括由玉米秸秆、棉花杆、锯末等制成的颗粒状或块状燃料.使用民用炉具为北京市推荐的新式取暖炉具(老万牌 NS18C),其额定功率为 18 kW,供暖面积 160 m<sup>2</sup>.测试实验中,点火方式均采用天然气点火,以减少引入其他物质燃烧产生的污染物;每次燃烧的民用煤均为 10 kg,生物质燃料 3 kg;煤块和煤球粒径约 5~7 cm;不同燃料燃烧时间约在 3~8 h 范围内,污染物采样从点火前开始到燃料燃尽结束;炉具连接暖气片,设置水循环与外界进行热交换,以带走热量.每组样品测试 3 次,取平均值.

测试民用煤的  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  排放因子结果

如表 1 所示,  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  排放因子分别为 0.23~3.40  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、0.48~6.15  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$  和 0.16~1.09  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ .无烟煤、半焦煤和烟煤的平均  $\text{PM}_{2.5}$  排放因子分别为 0.51、0.91 和 2.40  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,平均  $\text{SO}_2$  排放因子分别为 2.69、4.25 和 4.36  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,平均  $\text{NO}_x$  排放因子分别为 0.50、0.28 和 0.65  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ .已有研究中测得的民用无烟煤和烟煤的  $\text{PM}_{2.5}$  排放因子是 0.048~1.5  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$  和 0.13~42  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$  (Shen *et al.*, 2014),民用煤  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  排放因子分别为 0.08~0.40  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$  和 0.07~3.84  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$  (Zhang *et al.*, 2000; Ge *et al.*, 2004).

表 1 民用煤排放因子测试结果

Table 1 Emission factors from residential coal combustion

民用煤	$\text{PM}_{2.5}/$ ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )	$\text{SO}_2/$ ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )	$\text{NO}_x/$ ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )
无烟煤块 1#	0.23±0.10	3.42±0.04	0.40±0.08
无烟煤块 2#	0.35±0.14	4.41±0.04	1.09±0.06
无烟煤球 1#	0.59±0.24	0.48±0.02	0.18±0.27
无烟煤球 2#	0.73±0.30	3.04±0.03	0.40±0.07
无烟煤球 3#	0.64±0.27	2.09±0.05	0.43±0.08
半焦煤球 1#	0.60±0.25	4.41±0.03	0.28±0.05
半焦煤球 2#	0.50±0.21	2.09±0.05	0.43±0.08
半焦煤球 3#	1.19±0.49	4.34±0.02	0.26±0.03
半焦煤球 4#	1.35±0.56	6.15±0.56	0.16±0.03
烟煤块 1#	1.16±0.48	2.33±0.02	0.58±0.05
烟煤块 2#	3.40±1.41	5.24±0.04	0.97±0.07
烟煤块 3#	2.64±1.09	5.52±0.02	0.39±0.03

测试 3 种常见的生物质成型燃料的  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  排放因子结果如表 2 所示.  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  排放因子分别为 6.26~39.76  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、0.04~0.23  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$  和 0.05~0.76  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ .已有研究测得的生物质燃料的  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  排放因子分别是 0.5~14.8  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、0.01~0.21  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$  和 0.23~1.54  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$  (EPA, 1995; Zhang *et al.*, 2000; 耿春梅等, 2013; Oanh and Dung, 1999; Meyer, 2012; Alves *et al.*, 2011).

表 2 生物质成型燃料排放因子测试结果

Table 2 Emission factors from biomass briquette combustion

生物质成型燃料	$\text{PM}_{2.5}/$ ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )	$\text{SO}_2/$ ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )	$\text{NO}_x/$ ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )
锯末压块	39.76±8.30	0.04±0.01	0.18±0.02
玉米秸秆颗粒	7.65±1.93	0.20±0.06	0.76±0.10
棉花杆颗粒	6.26±2.99	0.23±0.02	0.05±0.01

## 5 结语 (Conclusions)

1) 民用煤、生物质燃料等民用固体燃料在不同燃烧条件下排放因子有很大区别, 采样和测试方法对结果影响较大, 因此, 研究其排放特征和测试排放因子, 统一和准确的采样及测试方法尤为重要。

2) 箱式稀释采样测试系统能克服烟罩法和烟道采样法的不足, 测试收集民用炉自身泄漏的污染物部分, 并有效减少环境空气中颗粒物对实验结果的干扰, 使民用固体燃料燃烧污染物排放因子测试结果更为精确。同时也具有模拟实际燃烧条件及大气混合稀释作用、多通道同时进行在线监测和离线采样等优点。

3) 箱式稀释采样测试系统应用于民用煤和生物质燃料排放因子测试, 民用煤  $PM_{2.5}$ 、 $SO_2$  和  $NO_x$  排放因子分别为  $0.23 \sim 3.40 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $0.48 \sim 6.15 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $0.16 \sim 1.09 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 生物质燃料的  $PM_{2.5}$ 、 $SO_2$  和  $NO_x$  排放因子分别为  $6.26 \sim 39.76 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $0.04 \sim 0.23 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $0.05 \sim 0.76 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

**责任作者简介:** 蒋靖坤 (1980—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为气溶胶测量和大气颗粒物成因, E-mail: jiangjk@tsinghua.edu.cn.

### 参考文献 (References):

Alves C, Gonçalves C, Fernandes A P, *et al.* 2011. Fireplace and woodstove fine particle emissions from combustion of western Mediterranean wood types [J]. *Atmospheric Research*, 101(3): 692-700

Boman C, öhman M, Nordin A. 2006. Trace Element Enrichment and Behavior in Wood Pellet Production and Combustion Processes [J]. *Energy & Fuels*, 20(3): 993-1000

Butcher S S, Ellenbecker M J. 1982. Particulate Emission Factors for Small Wood and Coal Stoves [J]. *Journal of the Air Pollution Control Association*, (32(4)): 380-384

陈魁, 白志鹏, 朱坦, 等. 2003. 烟道气湍流混合稀释采样系统研究与开发 [C]. 城市环境空气颗粒物源解析国际研讨会论文集. 220, 224

Chen Y, Bi X, Mai B, *et al.* 2004. Emission characterization of particulate/gaseous phases and size association for polycyclic aromatic hydrocarbons from residential coal combustion [J]. *Fuel*, 83(7/8): 781-790

Chen Y, Tian C, Feng Y, *et al.* 2015. Measurements of emission factors of  $PM_{2.5}$ , OC, EC, and BC for household stoves of coal combustion in China [J]. *Atmospheric Environment*, 109: 190-196

Duan X, Jiang Y, Wang B, *et al.* 2014. Household fuel use for cooking and heating in China: Results from the first Chinese Environmental

Exposure-Related Human Activity Patterns Survey (CEERHAPS) [J]. *Applied Energy*, 136: 692-703

EPA US. 1995. *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume I Stationary Point and Area Sources* [M]. Fifth edition. US: EPA

EPA US. 2000a. Method 5G-PM; Wood Heaters from a Dilution Tunnel; CFR Promulgated Test Methods [S]. US: EPA

EPA US. 2000b. Method 5H-PM; Wood Heaters from a Stack; CFR Promulgated Test Methods [S]. US: EPA

Ge S, Xu X, Chow J C, *et al.* 2004. Emissions of Air Pollutants from Household Stoves: Honeycomb Coal versus Coal Cake [J]. *Environ Sci Technol*, (38): 4612-4618

耿春梅, 陈建华, 王歆华, 等. 2013. 生物质锅炉与燃煤锅炉颗粒物排放特征比较 [J]. *环境科学研究*, 6(26): 666-671

Jetter J, Zhao Y, Smith K R, *et al.* 2012. Pollutant Emissions and Energy Efficiency under Controlled Conditions for Household Biomass Cookstoves and Implications for Metrics Useful in Setting International Test Standards [J]. *Environmental Science & Technology*, 46(19): 10827-10834

Johansson L S, Leckner B, Gustavsson L, *et al.* 2004. Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets [J]. *Atmospheric Environment*, 38(25): 4183-4195

孔少飞, 白志鹏, 陆炳. 2014. 民用燃料燃烧排放  $PM_{(2.5)}$  和  $PM_{(10)}$  中碳组分排放因子对比 [J]. *中国环境科学* (11): 2749-2756

Launhardt T, Thoma H. 2000. Investigation on organic pollutants from a domestic heating system using various solid biofuels [J]. *Chemosphere*, 40(9/11): 1149-1157

Li X, Duan L, Wang S, *et al.* 2007. Emission characteristics of particulate matter from rural household biofuel combustion in China [J]. *Energy & Fuels*, 21(2): 845-851

李兴华, 段雷, 郝吉明, 等. 2008. 固定燃烧源颗粒物稀释采样系统的研制与应用 [J]. *环境科学学报*, 28(3): 458-463

Liu J, Jiang J, Zhang Q, *et al.* 2014. A spectrometer for measuring particle size distributions in the range of 3 nm to 10  $\mu\text{m}$  [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 10(1): 63-72

刘源, 张元勋, 魏永杰, 等. 2007. 民用燃煤含碳颗粒物的排放因子测量 [J]. *环境科学学报*, 27(9): 1409-1416

Meyer N K. 2012. Particulate, black carbon and organic emissions from small-scale residential wood combustion appliances in Switzerland [J]. *Biomass and Bioenergy*, 36: 31-42

Oanh K N T, Dung N T. 1999. Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Particulate Matter from Domestic Combustion of Selected Fuels [J]. *Environmental Science & Technology*, 33(16): 2703-2709

Ravichandran P, Corscadden K. 2014. Comparison of gaseous and particle emissions produced from leached and un-leached agricultural biomass briquettes [J]. *Fuel Processing Technology*, (128): 359-366

Shen G, Tao S, Wei S, *et al.* 2012. Reductions in emissions of carbonaceous particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbons from combustion of biomass pellets in comparison with raw fuel

- burning [J]. *Environmental Science & Technology*, 46 ( 11 ): 6409-6416
- Shen G, Wang W, Yang Y, *et al.* 2010. Emission factors and particulate matter size distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons from residential coal combustions in rural Northern China [ J ]. *Atmospheric Environment*, 44( 39 ): 5237-5243
- Shen G, Xue M, Chen Y, *et al.* 2014. Comparison of carbonaceous particulate matter emission factors among different solid fuels burned in residential stoves[J]. *Atmospheric Environment*, 89: 337-345
- 沈国锋. 2012. 室内固体燃料燃烧产生的碳颗粒物和三环芳烃的排放因子及影响因素[D]. 北京: 北京大学
- Tronville P, Rivers R D. 2005. International standards: filters for buildings and gas [J]. *Filtration & Separation*, 7(42): 39-43
- Wang S, Wei W, Du L, *et al.* 2009. Characteristics of gaseous pollutants from biofuel-stoves in rural China[J]. *Atmospheric Environment*, 43 ( 27 ): 4148-4154
- Zhang J. 2003. Indoor air pollution: a global health concern[J]. *British Medical Bulletin*, 68(1): 209-225
- Zhang J, Smith K R, Ma Y, *et al.* 2000. Greenhouse gases and other airborne pollutants from household stoves in China: a database for emission factors [ J ]. *Atmospheric Environment*, 34 ( 26 ): 4537-4549
- Zhang Y, Schauer J J, Zhang Y, *et al.* 2008. Characteristics of Particulate Carbon Emissions from Real-World Chinese Coal Combustion[J]. *Environmental Science & Technology*, 42 ( 14 ): 5068-5073
- 中华人民共和国国家统计局. 2009. 中国第二次全国农业普查资料汇编(综合卷)[M]. 北京: 中国统计出版社