

工业燃煤链条炉细粒子排放特征研究

王书肖¹, 赵秀娟², 李兴华¹, 魏巍¹, 郝吉明¹

(1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 河北工程大学城市建设学院, 邯郸 056038)

摘要: 链条燃煤锅炉是当前我国工业锅炉的最主要应用炉型, 其容量占到了工业锅炉总容量的 85%, 是重要的大气污染物排放源之一. 本研究在 3 个地区选取了 5 种典型容量的链条炉, 应用自行设计的二级稀释系统现场测试其细粒子($PM_{2.5}$)和各种气态污染物的排放特征. 结果表明, 链条炉烟气中的 $PM_{2.5}$ 质量粒径呈单峰或双峰分布, 第 1 个峰值在 $0.14 \mu m$ 处, 第 2 个峰值在 $1 \mu m$ 后; 湿法除尘和旋风除尘对 $PM_{1.0}$ 的细粒子仍具有有效的去除效率; 在相同或相似除尘控制技术的条件下, $PM_{2.5}$ 的排放水平随锅炉容量的增大而减小. 在 $PM_{2.5}$ 中, SO_4^{2-} 是最丰富的离子, 质量分数在 20% ~ 54% 范围内; C 是最丰富的元素, 质量分数在 7.5% ~ 31.8% 之间, 其次是 S, 质量分数为 8.4% ~ 18.7%. 采用碳平衡法计算得出 $PM_{2.5}$ 、 NO_x 和 SO_2 的排放因子分别为 $0.046 \sim 0.486 g \cdot kg^{-1}$ 、 $1.63 \sim 2.47 g \cdot kg^{-1}$ 、 $1.35 \sim 9.95 g \cdot kg^{-1}$, 这为建立我国的工业锅炉排放清单及大气污染源分析提供了必要的基础数据.

关键词: 工业锅炉; 颗粒物; 排放因子

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)04-0963-06

Emission Characteristics of Fine Particles from Grate Firing Boilers

WANG Shu-xiao¹, ZHAO Xiu-juan², LI Xing-hua¹, WEI Wei¹, HAO Ji-ming¹

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. College of City of Construction, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: Grate firing boilers are the main type of Chinese industrial boilers, which accounts for 85% of the industrial boilers and is one of the most important emission sources of primary air pollutants in China. In this study, five boilers in three cities were selected and tested to measure the emission characteristics of $PM_{2.5}$, and gaseous pollutants were applied by a compact dilution sampling system, which was developed for this field study. Results showed that particles mass size distributions for the five industrial boilers presented single peak or double peak, former peaks near $0.14 \mu m$ and the later peaks after $1.0 \mu m$; the cyclone dust remover and wet scrubber dust remover had effective removal efficiencies not only to $PM_{2.5}$, but also to $PM_{1.0}$; and under the condition of same control techniques, grate firing boiler with high capacity has less $PM_{2.5}$ emission than the boiler with low capacity. In the $PM_{2.5}$ collected from flue gases, SO_4^{2-} was the most abundant ion, accounted for 20%-40% of the $PM_{2.5}$; and C was the most abundant element (7.5%-31.8%), followed by S (8.4%-18.7%). Carbon balance method was applied to calculate the emission factors of these pollutants. The emission factors of $PM_{2.5}$, NO_x and SO_2 were in the range of $0.046 \sim 0.486 g \cdot kg^{-1}$, $1.63 \sim 2.47 g \cdot kg^{-1}$, $1.35 \sim 9.95 g \cdot kg^{-1}$ respectively. The results are useful for the emission inventory development of industrial boilers and the source analysis of $PM_{2.5}$ in atmospheric environment.

Key words: industrial boiler; fine particles; emission factors

截至到 2000 年, 我国已有工业锅炉 50.4 万台, 其中 $> 20 t/h$ 的锅炉占到 20%, $2 \sim 10 t/h$ 的锅炉占 75%, 其余均为 $< 1 t/h$ 的锅炉. 锅炉类型涉及链条燃烧锅炉、循环流化床锅炉和悬浮燃烧锅炉等, 其中链条炉是最主要和最有代表性的炉型, 约占总量的 57.9%. 燃料类型以原煤为主, 燃煤工业锅炉约 48 万台, 占工业锅炉总容量的 85% 左右, 年均耗煤量在 4 亿 t 左右^[1]. 当前燃煤工业锅炉首要污染控制对象是颗粒物(TSP), 除尘技术以旋风除尘和湿法除尘为主, 对 TSP 的去除效率为 70% ~ 95%, 但对 $PM_{2.5}$ 的去除率却仅为 10% 和 50%. 总体上, 工业燃煤锅炉排放的细粒子 $PM_{2.5}$ 已经成为大气污染物的重要来源^[2], 引起了国内外研究者广泛的关注^[3~5].

国外学者很早就从不同角度对燃煤释放的颗粒物特性进行了研究, 如 Pope 等^[6]研究认为细颗粒物和超细颗粒物比粗颗粒物对于人体健康更有害; Braga 等^[7]利用离子诱导 X 射线发射技术(PIXE)检测了 $PM_{2.5}$ 中的元素分布及其浓度; Zhang 等^[8]采用计算机控制扫描电子显微镜对煤中矿物质在可吸入颗粒物(PM_{10})释放时的相关行为进行分析. 国内燃煤颗粒物的研究也日益受到重视, 对燃煤过程中矿物质转化机制、金属元素在不同粒径飞灰上的分布

收稿日期: 2008-04-08; 修订日期: 2008-06-20

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2005CB422201); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06A305)

作者简介: 王书肖(1974 ~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为大气污染与控制, E-mail: shxwang@tsinghua.edu.cn

特性及颗粒形貌特征等研究已有相当的积累^[9,10],燃煤过程中不同工况对颗粒物排放的影响也有一定研究^[11].岳勇等^[12]从空气动力学直径分级角度,对燃煤锅炉排放颗粒物的粒径分布和痕量元素富集特性进行了实验研究.郭欣等^[13]对燃煤电站锅炉除尘器入口、出口 PM₁₀的颗粒粒径排放规律及元素分布特性进行了研究.总的来说,已有研究尚未涉及燃煤工业链条炉的 PM_{2.5}排放因子和化学组成.

本研究应用自行设计的颗粒物稀释采样系统,针对配有旋风除尘器和湿法除尘器的链条炉的 PM_{2.5}排放,进行了现场采样测试工作,旨在系统深入地了解我国燃煤工业锅炉释放 PM_{2.5}的排放水平、

粒径分布及化学组分等特征,为建立我国的工业锅炉排放清单及大气污染来源分析提供必要的基础数据.

1 材料与方法

1.1 试验对象选择

本研究对 3 个不同地区的 5 台燃煤工业锅炉进行了现场测试.为了保证实验稳定性,测试期间,各生产设备均处于正常运行状态下,锅炉负荷、燃料及燃烧工况保证不变,排放的气态污染物浓度也相对保持稳定.试验工况见表 1,燃料的工业分析及元素分析结果见表 2.

表 1 试验工况

Table 1 Operational parameters during the tests

序号	炉型及容量	燃料类型	控制技术	地点
锅炉 1	链条炉, 2 t/h	型煤	无	山西省太原市
锅炉 2	链条炉, 4 t/h	烟煤	多管旋风除尘器	吉林省吉林市
锅炉 3	链条炉, 10 t/h	烟煤	湿式除尘器	吉林省吉林市
锅炉 4	链条炉, 20 t/h	山西大同煤	湿式除尘器	北京市
锅炉 5	链条炉, 40 t/h	山西大同煤	离心洗涤器	北京市

表 2 煤质工业分析及元素分析

Table 2 Proximate and ultimate analysis of coal

项目		锅炉 1	锅炉 2	锅炉 3	锅炉 4	锅炉 5
工业分析(收到基,质量分数)/%	水分	3.53	16.30	3.62	10.11	8.97
	挥发分	20.75	22.56	18.56	29.60	28.93
	固定碳	34.19	26.53	53.69	53.69	48.60
	灰分	41.53	34.61	35.79	6.61	13.53
元素分析(干基,质量分数)/%	C	46.08	43.87	56.74	71.41	63.95
	H	2.98	3.43	3.08	4.50	4.18
	N	0.73	0.92	1.27	0.94	0.97
	低位发热值/MJ•kg ⁻¹	18.68	17.47	22.40	29.85	25.98

1.2 采样测试系统

采样点设在锅炉除尘器的出口,代表已控制状态下燃煤锅炉向环境大气释放 PM_{2.5}的情况.由于颗粒物的许多组分会随着周边环境的变化,而在气相与颗粒相间相互转换,因此,源采样方法对测试分析结果至关重要.当今,国内外采用稀释通道法对固定燃烧源的颗粒物进行采样^[14~17].本研究自行设计的两级稀释串联采样系统如图 1 所示.整个采样系统由等速采样头、采样管、粗颗粒切割器、加热保温套、一级动态稀释器、二级静态稀释罐、荷电低压捕集器(electrical low pressure impactor, ELPI)、PM_{2.5}采样器、采样泵等组成.

大颗粒切割器的作用是去除 10 μm 以上的颗粒,避免大颗粒沉积以致堵塞管路;加热保温套使采

样管线的温度略高于烟道内烟气温度,防止颗粒物热泳沉积及冷凝.一级动态稀释器为芬兰 Dekati 公司的喷射型稀释器,当提供稀释空气的空压机调至 0.2 MPa 时,可提供 10 倍的稀释比;二级稀释罐停留室的作用是为稀释后的烟气提供一段停留时间,以模拟烟气排放到大气中的成核、冷凝、凝聚等过程.在进气量 100 L/min条件下,二级稀释罐室可提供约 80 s 的停留时间,可满足同时进行不同粒径、化学物种和特定有机物的采样要求.此外,为保证压缩空气和稀释空气的洁净,应用由粗过滤器、活性炭床、干燥器和高效过滤器组成的四级过滤器装置,确保进入稀释系统空气不受到有机物、颗粒物和水分的不利影响.经稀释、降温后的烟气进入 ELPI 主机,进行颗粒物的分级在线测量;当 ELPI 关闭电晕放电时,

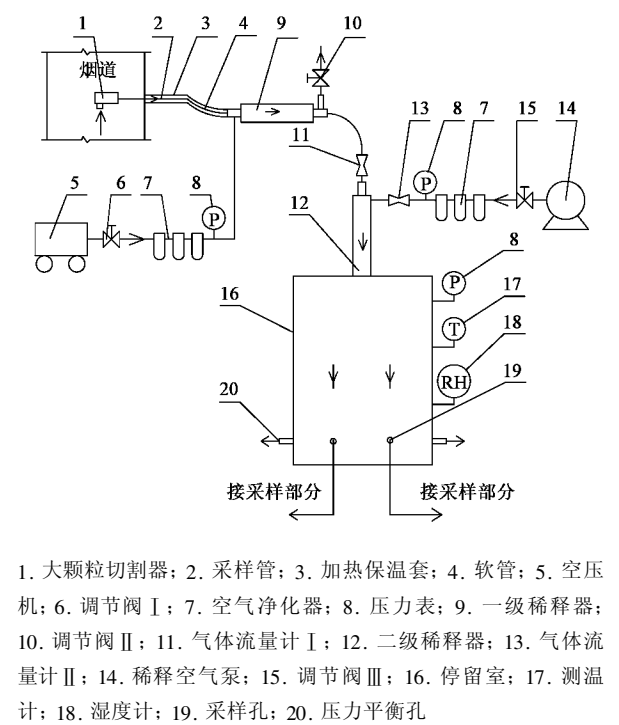


图 1 采样系统示意
Fig. 1 Flow chart of sampling system

可作为常规低压撞击器(low pressure impactor, LPI)使用.该仪器可捕集 30 nm~10 μm 范围内颗粒物的粒径分布,采样气体流量为 10 L/min, LPI 各级撞击板可以根据研究需要安装铝膜、石英膜、Teflon 膜或其它材质滤膜,进行称重或相应的化学分析.为了保证测量的准确性,铝膜表面必须是洁净而平整的;其表面可根据需要涂一层薄脂,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^[18].本研究还采用了英国 KANE 公司的 KM9106 便携式综合烟气分析仪,测量烟气中气态污染物(CO₂、CO、O₂、NO_x等)浓度和烟气温度.

采集后的样品需由冰箱冷冻保存,带回实验室进行元素、离子、OC、EC 等化学成分分析.其中,无机元素分析采用美国 Thermo Electron Corporation 制造的 IRIS Intrepid II 型 ICP-AES 和 X Series II 型 ICP-MS 联用仪, ICP-AES 用于测量含量相对较高的元素, ICP-MS 则用于测量含量低、质量数相对较高的元素.样品进入该仪器前,还需使用美国 CEM 公司的 MARS 密闭式微波化学反应系统^[19,20],将样品从固体相溶解为液体相.样品中的水溶性阴、阳离子采用离子色谱进行测量^[21],测试的物种有 K⁺、NH₄⁺、Cl⁻、NO₃⁻ 和 SO₄²⁻.分析仪器为美国 DIONEX 公司的 Dionex-600 型离子色谱仪. OC、EC 由 DRI 碳分析仪测试分析.

1.3 排放因子的确定

本研究采用碳平衡法计算污染物的排放因子.碳平衡法是基于燃烧过程中碳的质量平衡原理,即消耗的碳量等于以气态和颗粒物形式排出的碳的量,广泛应用于排放因子的计算之中^[22,23],由公式(1)表示.排放因子通常表示为消耗单位质量干基燃料所排放污染物的质量,其单位为 g•kg⁻¹.

$$C_f - C_a = C_{CO_2} + C_{CO} + C_{\text{gaseous organic compounds}} + C_{\text{particle}} \tag{1}$$

式中, C_f 为燃料中碳的质量; C_a 为灰分中碳的质量; C_{CO₂}、C_{CO}、C_{gaseous organic compounds}、C_{particle} 分别是 CO₂、CO、有机气体化合物和颗粒物的碳质量(以上值为扣除背景浓度后的数值),此研究中忽略了有机气体污染物和粒径 > 2.5 μm 颗粒物中的碳含量.

可以推导得到公式(2):

$$\frac{C_f - C_a}{C_{CO_2}} = 1 + \frac{C_{CO}}{C_{CO_2}} + \frac{C_{\text{particle}}}{C_{CO_2}} \tag{2}$$

这里 C_{CO}/C_{CO₂}、C_{particle}/C_{CO₂} 为 CO、颗粒物相对于 CO₂ 的排放比. CO₂ 的排放因子由公式(3)定义,其他气态污染物的排放因子由公式(4)定义.

$$E_{m, CO_2} = (C_f - C_a) / M \times [1 + (c_{f, CO} / c_{f, CO_2}) + (c_{f, PM} / c_{f, CO_2})]^{-1} \times (44/12) \tag{3}$$

$$E_{m, \text{others}} = c_{f, \text{other}} \times (E_{m, CO_2} / c_{f, CO_2}) \tag{4}$$

式中, E_{m, CO₂} 为 CO₂ 的排放因子, E_{m, others} 为其他气态污染物的排放因子,单位为 g•kg⁻¹; M 为燃料用量; c_{f, CO}、c_{f, CO₂}、c_{f, other}、c_{f, PM} 分别为烟道中 CO、CO₂、其他气态污染物和颗粒物碳的浓度(由 OC、EC 之和代替),单位均为 mg•m⁻³.

碳平衡法确定排放因子的一个优点是要求测量各污染物相对排放比,而不要求绝对值,这就意味着采样点的位置相对比较灵活,烟气在到达采样点可认为经历相同的稀释冷却过程.燃料、灰和未燃尽的残留物中的含碳量采用美国 Exeter Analytical Inc (EAI 公司)生产的 CE-440 型元素分析仪分析.

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5}的质量粒径分布

颗粒物的质量粒径分布是通过 ELPI 测定的, 5 个被测锅炉出口烟道气中的 PM_{2.5} 质量粒径分布情况如图 2 所示.结果表明:未安装任何除尘设施的锅炉,在 1.0 μm 粒径范围内的质量浓度明显高于其他

4 个安装了旋风除尘或湿法除尘装置的工业锅炉;而在同类除尘设施的条件下,可能由于燃烧温度的差异,高容量锅炉的 $\text{PM}_{2.5}$ 释放浓度仅为低容量锅炉的 20% ~ 25%.

5 台锅炉出口烟道气的颗粒物,均在 $0.14 \mu\text{m}$ 附近出现浓度峰值,主要原因是煤中无机物的气化-凝结过程.在高温条件下无机矿物首先以氧化物、次氧化物或原子的形式气化,当温度降低时,无机蒸气通过均相成核、异相冷凝、凝并、团聚等过程形成细微颗粒^[24].而锅炉 2 和锅炉 3 出口烟道气的颗粒物在 $> 1 \mu\text{m}$ 处,出现了第 2 个浓度峰值,可能与这 2 个锅炉燃煤的高灰分有一定关系.因为细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细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,矿物破碎对细颗粒的形成也有重要的影响^[25].

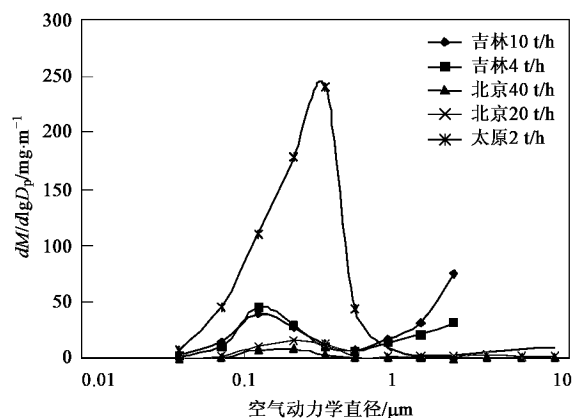


图 2 颗粒物质量分布

Fig. 2 PM mass distribution in stack gas of the five boilers

2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 的化学源成分特征

$\text{PM}_{2.5}$ 的化学成分分析结果见表 3, 包括 S、Al、Fe、Na、K、Mn 等无机元素, Pb、Cd、Cr、Cu、Zn、Ni 等重金属痕量元素, Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、 K^+ 等水溶性离子, 以及元素碳(EC)和有机碳(OC).

水溶性离子中, SO_4^{2-} 是锅炉排放 $\text{PM}_{2.5}$ 中最丰富的成分, 其范围在 20.0% ~ 54.1%. 燃煤硫含量是影响细粒子中 SO_4^{2-} 含量的主要因素, 而湿式除尘器对细粒子以及其 SO_4^{2-} 含量的影响甚小. NH_4^+ 质量百分比范围为 3.45% ~ 5.59%, 差异不大. K^+ 质量百分比, 在锅炉 1 的 $\text{PM}_{2.5}$ 中达 11.08%, 而在其他

4 个锅炉的 $\text{PM}_{2.5}$ 中仅为 1.15% ~ 2.69%, 该差异主要来源于旋风除尘器和湿法除尘器对 $\text{PM}_{2.5}$ 中 K^+ 的脱除效应. NO_3^- 和 Cl^- 的含量都较低, 质量百分比变化范围为 0 ~ 4‰, 只有锅炉 2 中的 Cl^- 例外.

$\text{PM}_{2.5}$ 中 TC(OC 和 EC 之和)含量的波动范围较大, 锅炉 4 具有最低值(7.5%), 锅炉 2 具有最高值(31.8%). 具体而言, 锅炉 2 的 EC 含量为 17.9%, 其余锅炉的 EC 含量相似, 2.2% ~ 4.8%; OC 含量的波动幅度为 5.4% ~ 13.9%. OC/EC 的比值差异也较大, 0.78 ~ 4.42. 具体可见表 4.

从元素分析结果来看, S 是 $\text{PM}_{2.5}$ 中最丰富的元素, K、Zn、Na、Pb、Al、Fe 次之, 而 Hg、Sc、Zr、Co、Ag 的含量最少.

2.3 主要污染物排放因子

利用碳平衡法计算得到的燃煤锅炉出口烟气中颗粒物及气态污染物排放因子见表 5. 锅炉 1 的 SO_2 排放水平明显高于其他 4 个锅炉, 是由于其它锅炉采用了湿式除尘器, 湿式除尘器中添加的碱性物质对 SO_2 有一定的洗涤脱除作用; 同时, SO_2 的排放因子主要取决于燃煤的硫含量, 因此同一地区的燃煤锅炉呈现出 SO_2 排放水平的相似性. NO_x 和 CO 的排放水平更多地决定于燃烧条件和燃烧效率, 受燃料的影响较小; 总体上, NO_x 的排放因子随锅炉容量的增加呈升高趋势, 而 CO 排放因子则呈降低趋势.

与文献中给出的排放因子比较, 本研究测得的排放因子与国内相关研究具有较好的可比性^[16, 27, 29], 但由于燃烧条件和燃烧效率的差异, 气态污染物的排放因子与国外数据的差别较大^[26, 28].

3 结论

现场测试结果表明, 燃煤链条锅炉排放 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量粒径分布呈现单峰/双峰分布, 第 1 个峰值在 $0.14 \mu\text{m}$ 附近, 表明汽化-凝结过程是燃煤工业锅炉排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 形成的主要机制. $\text{PM}_{2.5}$ 的化学组分中, 总碳的质量范围为 7.56% ~ 31.79%, 而 OC/EC 值差异也较大, 0.78 ~ 4.42; SO_4^{2-} 是所有锅炉排放 $\text{PM}_{2.5}$ 中最丰富的离子成分, S 是最丰富的元素; 重金属元素中, Pb 的富集度高于 Cd、Sb、Cr、As、Ni、Hg、Ag. 根据碳平衡法计算得到了 CO、 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放因子, 其中 NO_x 的排放因子随锅炉容量的增加呈升高趋势, 而 CO 排放因子则呈降低趋势.

表 3 锅炉出口烟气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的化学成分含量/%
Table 3 Mass chemical composition of $\text{PM}_{2.5}$ in stack gas/%

化学成分	锅炉 1	锅炉 2	锅炉 3	锅炉 4	锅炉 5
Cl^-	0.000 ± 0.000	2.962 ± 3.153	0.371 ± 0.659	0.337 ± 0.505	0.000 ± 0.000
NO_3^-	0.365 ± 0.547	0.430 ± 0.573	0.226 ± 0.185	0.505 ± 0.337	0.000 ± 0.000
SO_4^{2-}	54.060 ± 15.785	20.449 ± 2.293	20.012 ± 5.991	44.276 ± 8.081	35.824 ± 8.571
NH_4^+	5.611 ± 1.186	4.921 ± 0.908	3.438 ± 1.544	4.882 ± 0.168	3.736 ± 0.879
K^+	11.086 ± 5.246	1.147 ± 1.051	2.553 ± 0.885	2.694 ± 0.673	2.198 ± 0.879
OC	8.987 ± 0.821	13.903 ± 2.676	5.394 ± 0.412	5.387 ± 1.852	13.846 ± 3.516
EC	4.836 ± 1.277	17.917 ± 7.836	3.747 ± 2.121	2.189 ± 0.842	3.077 ± 0.220
Al	0.340 ± 0.201	2.314 ± 0.775	2.927 ± 2.604	0.583 ± 0.309	0.413 ± 0.162
Ca	0.089 ± 0.041	1.787 ± 0.461	0.573 ± 0.545	0.834 ± 0.479	0.583 ± 0.179
Fe	0.205 ± 0.089	1.634 ± 0.258	3.012 ± 1.404	1.052 ± 0.195	2.306 ± 0.119
K	10.405 ± 1.369	0.770 ± 0.089	3.263 ± 0.352	2.865 ± 0.297	3.484 ± 0.547
Mg	0.011 ± 0.007	0.252 ± 0.057	0.194 ± 0.178	0.155 ± 0.086	0.190 ± 0.034
Na	2.011 ± 1.015	2.588 ± 1.066	2.196 ± 1.182	11.359 ± 1.665	11.134 ± 2.737
Pb	2.150 ± 0.069	1.562 ± 0.346	0.928 ± 0.131	0.899 ± 0.044	1.245 ± 0.024
S	18.677 ± 9.105	8.372 ± 1.288	8.550 ± 1.422	17.098 ± 2.235	14.613 ± 1.673
Zn	3.344 ± 0.434	4.317 ± 1.107	2.009 ± 0.264	2.008 ± 0.119	2.468 ± 0.042
Si	0.217 ± 0.105	2.099 ± 1.368	1.729 ± 2.029	0.618 ± 0.090	1.877 ± 0.888
Sc	0.000 ± 0.000	0.001 ± 0.000	0.002 ± 0.001	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
Ti	0.013 ± 0.001	0.237 ± 0.054	0.189 ± 0.185	0.040 ± 0.018	0.026 ± 0.005
V	0.002 ± 0.002	0.020 ± 0.002	0.023 ± 0.009	0.011 ± 0.002	0.024 ± 0.002
Cr	0.006 ± 0.002	0.008 ± 0.001	0.036 ± 0.002	0.036 ± 0.006	0.056 ± 0.000
Mn	0.006 ± 0.001	0.027 ± 0.004	0.018 ± 0.009	0.033 ± 0.006	0.060 ± 0.008
Co	0.000 ± 0.000	0.004 ± 0.000	0.005 ± 0.002	0.019 ± 0.002	0.025 ± 0.001
Ni	0.002 ± 0.001	0.008 ± 0.001	0.010 ± 0.003	0.073 ± 0.006	0.107 ± 0.009
Cu	0.035 ± 0.009	0.127 ± 0.027	0.095 ± 0.019	0.195 ± 0.016	0.240 ± 0.048
Ga	0.074 ± 0.046	0.158 ± 0.069	0.291 ± 0.060	0.185 ± 0.023	0.294 ± 0.015
As	0.028 ± 0.006	2.984 ± 0.426	0.142 ± 0.040	0.107 ± 0.015	0.226 ± 0.055
Se	0.039 ± 0.005	0.002 ± 0.000	0.002 ± 0.000	0.009 ± 0.001	0.014 ± 0.001
Sr	0.002 ± 0.002	0.036 ± 0.007	0.042 ± 0.034	0.037 ± 0.019	0.032 ± 0.010
Zr	0.001 ± 0.001	0.027 ± 0.004	0.033 ± 0.038	0.002 ± 0.001	0.000 ± 0.000
Mo	0.003 ± 0.001	0.037 ± 0.006	0.012 ± 0.001	0.017 ± 0.003	0.028 ± 0.004
Ag	0.002 ± 0.001	0.004 ± 0.001	0.003 ± 0.000	0.002 ± 0.000	0.003 ± 0.000
Cd	0.015 ± 0.002	0.021 ± 0.002	0.005 ± 0.001	0.006 ± 0.000	0.004 ± 0.000
In	0.005 ± 0.001	0.002 ± 0.000	0.002 ± 0.000	0.002 ± 0.000	0.002 ± 0.000
Sn	0.104 ± 0.027	0.138 ± 0.037	0.088 ± 0.007	0.068 ± 0.002	0.092 ± 0.004
Sb	0.022 ± 0.014	0.089 ± 0.017	0.022 ± 0.015	0.038 ± 0.001	0.087 ± 0.025
Ba	0.002 ± 0.001	0.018 ± 0.005	0.040 ± 0.038	0.058 ± 0.011	0.129 ± 0.024
Hg	0.000 ± 0.000	0.001 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
Tl	0.018 ± 0.006	0.017 ± 0.005	0.012 ± 0.004	0.018 ± 0.001	0.025 ± 0.001

表 4 $\text{PM}_{2.5}$ 中 TC、OC、EC 的质量比
Table 4 Mass proportions of TC, OC, EC in $\text{PM}_{2.5}$

项目	锅炉 1	锅炉 2	锅炉 3	锅炉 4	锅炉 5
OC/EC	1.858	0.777	1.438	2.437	4.415
TC/ $\text{PM}_{2.5}/\%$	13.80	31.79%	9.15	7.56	16.96
OC/ $\text{PM}_{2.5}/\%$	8.97 ± 0.82	13.90 ± 2.68	5.39 ± 0.41	5.36 ± 1.85	13.83 ± 3.52
EC/ $\text{PM}_{2.5}/\%$	4.83 ± 1.28	17.89 ± 7.84	3.75 ± 2.12	2.20 ± 0.84	3.13 ± 0.22

表 5 $\text{PM}_{2.5}$ 和气态污染物的排放因子/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 5 Emission factors of $\text{PM}_{2.5}$ and gaseous pollutants/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	锅炉 1	锅炉 2	锅炉 3	锅炉 4	锅炉 5	文献中给出的排放因子
CO	11.01	1.43	2.87	9.05	0.67	$2.12^{[26]}$, $15^{[27]}$, $0.25\sim4.1^{[28]}$
CO_2	2 263	1 359	1 590	2 141	2 384	$2\,400\sim3\,200^{[26, 28]}$
SO_2	9.95	5.8	5.65	1.35	2.9	$18.0^{[26]}$, $15.0\sim20.0^{[28]}$
NO_x	1.63	1.71	2.13	2.38	2.47	$4.20^{[26]}$, $2.5\sim10.5^{[28]}$, $1.05\sim2.61^{[29]}$
$\text{PM}_{2.5}$	0.219	0.209	0.486	0.059	0.046	$0.019\sim0.630^{[28]}$, $0.032^{[16]}$

1) 无脱硫控制措施; 2) 无脱氮控制措施, 湿法除尘

参考文献:

[1] 黄学诚, 张洁. 中国工业锅炉的调查和展望[J]. 工业锅炉, 2003, (5): 1-5.

[2] 赵亚玲, 王丹平, 郑长科. 浅析我国燃煤污染危害及其防治方法[J]. 中州煤炭, 2006, (6): 16-19.

[3] Tucker W G. An overview of $\text{PM}_{2.5}$ sources and control strategies [J]. Fuel Processing Technology, 2000, **65-66**: 379-392.

[4] Ohlstrom M O, Lehtinen K E J, Moisio M, *et al.* Fine-particle emissions of energy production in Finland [J]. Atmospheric Environment, 2000, **34**(22): 3701-3711.

[5] Sloss L L, Smith I M. PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$: an international perspective [J]. Fuel Processing Technology, 2000, **65-66**: 127-141.

[6] Pope A C, Hill R W, Villegas G M. Particulate Air Pollution and Daily Mortality on Utah's Wasatch Front [J]. Environ Health Perspect, 1999, **107**: 567-573.

[7] Braga C F, Teixeira E C, Meira L, *et al.* Elemental composition of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ in urban environment in South Brazil [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(10): 1801-1815.

[8] Zhang L, Ninomiya Y. Emission of suspended PM_{10} from laboratory-scale coal combustion and its correlation with coal mineral properties [J]. Fuel, 2006, **85**(2): 194-203.

[9] 齐立强, 原永涛, 纪元勋. 燃煤飞灰化学成分随粒度分布规律的试验研究煤炭转化[J]. 煤炭转化, 2003, **26**(2): 87-90.

[10] 赵承美, 孙俊民, 邓寅生, 等. 燃煤飞灰中细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)的物理化学特性[J]. 环境科学研究, 2004, **17**(2): 71-73.

[11] 刘建忠, 范海燕, 周俊虎, 等. 煤粉炉 $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$ 排放规律的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, **23**(1): 145-149.

[12] 岳勇, 陈雷, 姚强, 等. 燃煤锅炉颗粒物粒径分布和痕量元素富集特性实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, **25**(18): 74-79.

[13] 郭欣, 陈丹, 郑楚光, 等. 燃煤锅炉可吸入颗粒物排放规律研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(3): 587-592.

[14] Hildemann L M, Cass G R, Markowski G R. A Dilution Stack Sampler for Collection of Organic Aerosol Emission: Design, Characterization and Field Tests [J]. Aerosol Science and Technology, 1989, (10): 193-204.

[15] 朱坦, 郭光焕, 白志鹏, 等. 烟道稀释混合湍流分级采样器 [P]. 中国: ZL03 119498.2, 2005-02-02.

[16] 周楠, 曾立民, 于雪娜, 等. 固定源稀释通道的设计和外墙测试研究[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(5): 764-772.

[17] Yi H H, Hao J M, Duan L, *et al.* Characteristics of Inhalable Particulate Matter Concentration and Size Distribution from Power Plants in China [J]. Journal of Air and Waste Management Association, 2006, **56**(9): 1243-1251.

[18] Mikko M. Real Time Size Distribution Measurement of Combustion Aerosols [D]. Finland: Tampere University of Technology publications, 1999.

[19] 刘虎生, 邵宏祥. 电感耦合等离子体质谱技术与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.

[20] 辛仁轩. 等离子体发射光谱分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.

[21] 余学春. 北京 $\text{PM}_{2.5}$ 水溶性粒子物种污染特征及来源解析 [D]. 北京: 清华大学, 2004.

[22] Zhang J F, Morawska L. Combustion Sources of Particles: Emission Factors and Measurement Methods[J]. Chemosphere, 2002, **49**(9): 1059-1074.

[23] Li X H, Wang S X, Duan L, *et al.* Particulate and Trace Gas Emissions from Open Burning of Wheat Straw and Corn Stover in China [J]. Environmental Science and Technology, 2007, **41**(17): 6052-6058.

[24] 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.

[25] 顾璠, 沈红梅. 大颗粒煤燃烧传递动力学破碎理论模型[J]. 煤炭转化, 1994, **17**(4): 21-25.

[26] [http://www.naei.org.uk/\[EB/OL\]](http://www.naei.org.uk/[EB/OL]).

[27] Ge S, Bai Z P, Liu W L, *et al.* Boiler Briquette Coal versus Raw Coal: Part 1. Stack Gas Emissions [J]. Journal of Air and Waste Management Association, 2001, **51**: 524-533.

[28] [http://www.epa.gov/ttn/chieff/ap42/index.html/\[EB/OL\]](http://www.epa.gov/ttn/chieff/ap42/index.html/[EB/OL]).

[29] 孙庆贺, 陆永琪, 傅立新, 等. 我国氮氧化物排放因子的修正和排放量计算: 2000 年[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, **5**(2): 90-94.