

燃煤工业锅炉可吸入颗粒物的排放特征

李超, 李兴华, 段雷*, 赵盟, 段菁春, 郝吉明

(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 利用基于荷电低压捕集器(ELPI)的颗粒物排放稀释采样系统, 在 8 个燃煤工业锅炉的除尘器进、出口进行了烟气可吸入颗粒物(PM₁₀)和细微颗粒物(PM_{2.5})的现场测试。粒径分布结果表明, 在所测粒径范围(0.03 ~ 10 μm)内, 燃煤工业锅炉产生和排放 PM₁₀ 的粒数浓度和质量浓度均出现 1 个峰值, 峰值粒径大约在 0.12 ~ 0.20 μm 范围内。PM_{2.5} 中碳组分和硫酸盐的含量较高, 其中有机碳(OC)和元素碳(EC)含量分别为 3.7% ~ 21.4% 和 4.2% ~ 24.6%, 硫酸盐含量则在 1.5% ~ 55.2% 之间。在无控条件下, 燃用原煤的层燃炉的 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 排放因子分别为 0.13 ~ 0.65 kg·t⁻¹ 和 0.08 ~ 0.49 kg·t⁻¹, 燃用型煤的链条炉分别为 0.24 kg·t⁻¹ 和 0.22 kg·t⁻¹, 而循环流化床的 PM_{2.5} 排放因子为 1.14 kg·t⁻¹, 明显高于链条炉。由于耗煤量大, 同时现有除尘设备的效率较低, 燃煤工业锅炉可能成为我国最重要的 PM₁₀ 排放源, 是今后重点控制的对象。

关键词: 燃煤工业锅炉; 可吸入颗粒物(PM₁₀); 细微颗粒物(PM_{2.5}); 粒径分布; 排放因子

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)03-0650-06

Emission Characteristics of PM₁₀ from Coal-Fired Industrial Boiler

LI Chao, LI Xing-hua, DUAN Lei, ZHAO Meng, DUAN Jing-chun, HAO Ji-ming

(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Through ELPI (electrical low-pressure impactor) based dilution sampling system, the emission characteristics of PM₁₀ and PM_{2.5} was studied experimentally at the inlet and outlet of dust catchers at eight different coal-fired industrial boilers. Results showed that a peak existed at around 0.12-0.20 μm of particle size for both number size distribution and mass size distribution of PM₁₀ emitted from most of the boilers. Chemical composition analysis indicated that PM_{2.5} was largely composed of organic carbon, elementary carbon, and sulfate, with mass fraction of 3.7%-21.4%, 4.2%-24.6%, and 1.5%-55.2% respectively. Emission factors of PM₁₀ and PM_{2.5} measured were 0.13-0.65 kg·t⁻¹ and 0.08-0.49 kg·t⁻¹ respectively for grate boiler using raw coal, and 0.24 kg·t⁻¹ and 0.22 kg·t⁻¹ for chain-grate boiler using briquette. In comparison, the PM_{2.5} emission factor of fluidized bed boiler is 1.14 kg·t⁻¹, much her than that of grate boiler. Due to high coal consumption and low efficiency of dust separator, coal-fired industrial boiler may become the most important source of PM₁₀, and should be preferentially controlled in China.

Key words: coal-fired industrial boiler; PM₁₀; PM_{2.5}; particle size distribution; emission factor

工业锅炉是我国重要的热能动力设备, 主要指压力 $P \leq 2.45$ MPa 和容量 $D \leq 45.5$ MW (或 ≤ 65 t·h⁻¹) 的工业用蒸气锅炉、采暖热水锅炉、民用生活锅炉、自备热电联产锅炉、特种用途锅炉和余热锅炉^[1]。目前, 我国共有工业锅炉近 50 万台, 总蒸发量约 108 万 t, 基本上燃用未经洗选加工的原煤, 而燃油或燃气锅炉不到总量的 5%^[2]。燃煤工业锅炉以层燃式链条炉为主, 占 90% 以上, 其次为层燃式往复炉, 还有少量的流化床、抛煤机炉和煤粉炉^[3,4]。我国燃煤工业锅炉大多容量小, 燃烧效率不高, 耗煤量大, 且大多数除尘脱硫设备落后, 有些甚至无除尘脱硫装置, 少有脱硝装置, 污染大, 采暖季节尤其严重, 是我国 PM₁₀、SO₂ 和 NO_x 污染排放的重要来源^[5]。

目前, 国内外针对燃煤工业锅炉污染物排放特征, 特别是 PM₁₀ 排放特征的研究工作较少^[6-10]。本研究选取了多台有代表性的燃煤工业锅炉进行除尘

器前后烟气中 PM₁₀ 的现场测试, 以期为我国燃煤 PM₁₀ 的排放控制决策和控制技术的开发提供基础信息。

1 材料与方法

1.1 工业锅炉的选择

本研究共测试了 8 台燃煤工业锅炉, 各锅炉的基本情况列于表 1。主要选择燃用烟煤的工业锅炉, 容量涵盖了从 2 ~ 40 t·h⁻¹ 的较宽范围, 侧重于我国目前量大面广的中小容量锅炉, 在炉型方面主要选择应用最为广泛的链条炉, 同时兼顾往复炉和流化床, 在烟气净化设备方面主要考虑旋风除尘器和湿

收稿日期: 2008-03-13; 修订日期: 2008-04-09

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB211601)

作者简介: 李超(1982 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: lic@mails.tsinghua.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: lduan@tsinghua.edu.cn

表 1 测试锅炉的基本情况

Table 1 General information of tested boilers

锅炉编号	锅炉类型	额定蒸发量/t·h ⁻¹	实验负荷/%	烟气净化设备	燃料
1	链条炉	2	95	多管旋风除尘器	重庆壁山煤
2	往复炉	6	80	水膜除尘器	内蒙神木煤、榆次煤
3	循环流化床	40	100	三电场电除尘器	山西榆次煤
4	链条炉	2	100	无	型煤
5	链条炉	40	80	水膜除尘器	山西大同煤
6	链条炉	20	60	喷雾洗涤器	山西大同煤
7	链条炉	4	80	多管旋风除尘器	吉林九台、蛟河煤
8	链条炉	10	80	简易喷雾干燥塔	黑龙江鸡西、鹤岗煤

式除尘器,此外特别考虑了电除尘器和流化床锅炉的组合.

1.2 采样和分析方法

燃煤工业锅炉污染排放采样系统及分析流程如图 1 所示. 其中颗粒物稀释采样系统的设计参见文献[11]. 采用芬兰 Dekati 公司的荷电低压捕集器 (ELPI)测定大约 0.03 ~ 10 μm 粒径范围内颗粒物的粒径分布,采样膜为铝膜,采样后进行称重和水溶性离子分析(超声提取后利用 Dionex-600 离子色谱仪

进行分析). 采用 3 台中流量大气颗粒物采样器 (16.7 L·min⁻¹)采集 PM_{2.5}样品,其中 1 台采用 Teflon 滤膜捕集颗粒物,用于称重和元素分析(微波消解后用 Thermo 公司的 IRIS Intrepid II XSP 型 ICP-OES 和 X serial 型 ICP-MS 进行分析),另外 2 台采用石英膜,分别用于 OC 和 EC 分析(采用 DRI 的 Model 2001 型热光碳分析仪)、水溶性离子分析以及 PAH 分析(超声提取后用 Agilent 6890/5973 型 GC-MS 分析). 文中仅给出颗粒物的部分测试结果.

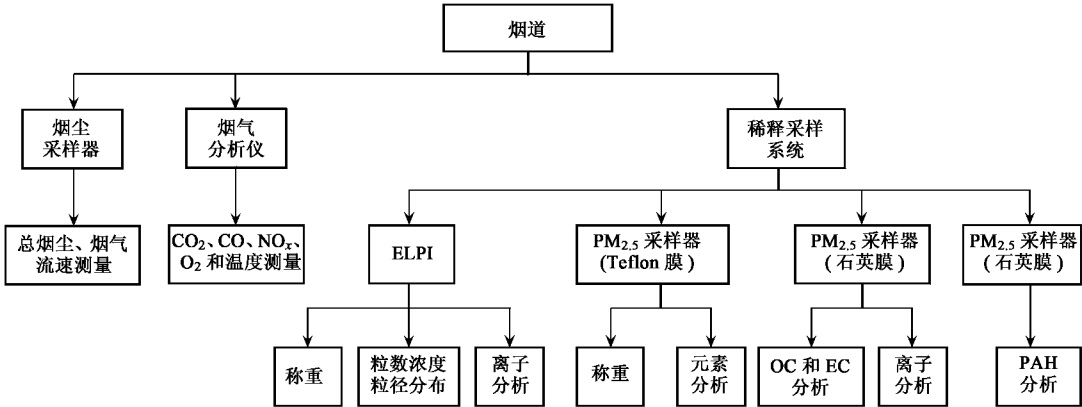


图 1 工业锅炉污染物排放采样系统

Fig.1 Sampling system for pollutant emission from industrial boiler

2 结果与讨论

2.1 PM₁₀的浓度与粒径分布

由 ELPI 测得的燃煤工业锅炉产生和排放 PM₁₀ 的粒数浓度如表 2 所示. 工业锅炉产生的 PM₁₀ 的粒数浓度在 10⁶ ~ 10⁷ cm⁻³数量级,与电厂产生 PM₁₀ 的粒数浓度^[12]在同一个数量级上;经过烟气净化设备后排放 PM₁₀ 的粒数浓度也在 10⁶ ~ 10⁷ cm⁻³数量级范围内,但总体上降低了约 25% ~ 70%. 相对而言,在 PM₁₀ 去除方面,多管旋风除尘器和湿式除尘器对粒数浓度的降低效果不显著,远低于电除尘器和布

袋除尘器等高效除尘器.

工业锅炉产生和排放 PM₁₀ 的粒数浓度粒径分布见图 2. 显然,PM₁₀ 的粒数浓度主要取决于粒径 < 1 μm 的颗粒. 由图 2(a)可知,多数锅炉产生的 PM₁₀ 在 0.12 ~ 0.20 μm 粒径范围内出现 1 个浓度峰值. 另外从趋势上看,还有部分锅炉会在粒径 < 0.04 μm 区间内出现另 1 个峰值. 经过烟气净化设备后,PM₁₀ 的粒数浓度仍主要呈单峰分布,但浓度值均有一定程度的降低,如图 2(b)所示.

工业锅炉产生和排放 PM₁₀ 的质量浓度粒径分布如图 3 所示. 由图 3(a)可知,锅炉产生的颗粒物

的质量浓度大多呈双峰分布:细颗粒模态在 0.12 ~ 0.20 μm 范围出现 1 个峰值,而锅炉 4 的峰值在 0.32 μm 附近,大于其他锅炉,可能与该锅炉燃用型煤有关;粗模态颗粒的质量浓度峰值大多出现在 > 10 μm 的粒径区间内,但锅炉 1 是例外. 这种双峰分布与许多煤粉炉(主要是燃煤电厂)产生颗粒物的粒径分布是一致的^[12~15]. 这验证了粗细颗粒物的不同形成机制,即细模态颗粒通过气化-凝结机制形成,而粗模态颗粒则是通过内在矿物质的聚结和外在矿物质的破碎作用形成的^[16~18]. 但是,锅炉 5 和 6 除呈现上述细颗粒模态和粗颗粒模态外,在 0.76 μm 附近还出现了一个不太明显的模态,即呈所谓的三峰分布. 不少学者在研究煤粉炉产生的颗粒物时也发

现过类似的三峰分布^[19~21],但其形成机制目前尚不清楚.

表 2 工业锅炉产生和排放的 PM_{10} 的平均粒数浓度/ cm^{-3}

Table 2 Average number concentration of PM_{10} generated and emitted from industrial boilers/ cm^{-3}

锅炉编号	锅炉出口	烟气净化设备出口
1	1.71×10^7	7.07×10^6
2	5.23×10^7	1.66×10^7
4	9.47×10^6	—
5	1.74×10^7	5.00×10^6
6	9.22×10^6	5.40×10^6
7	—	1.08×10^7
8	2.09×10^7	1.56×10^7

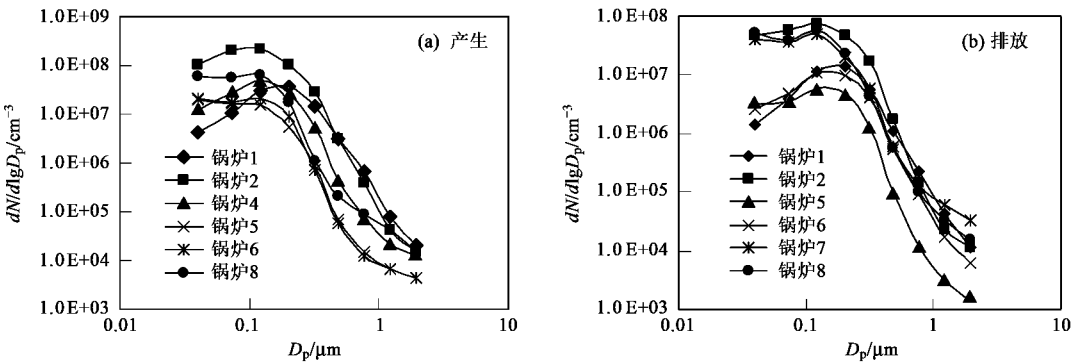


图 2 工业锅炉产生和排放 PM_{10} 的粒数浓度分布

Fig.2 Number size distribution of PM_{10} generated and emitted from industrial boiler

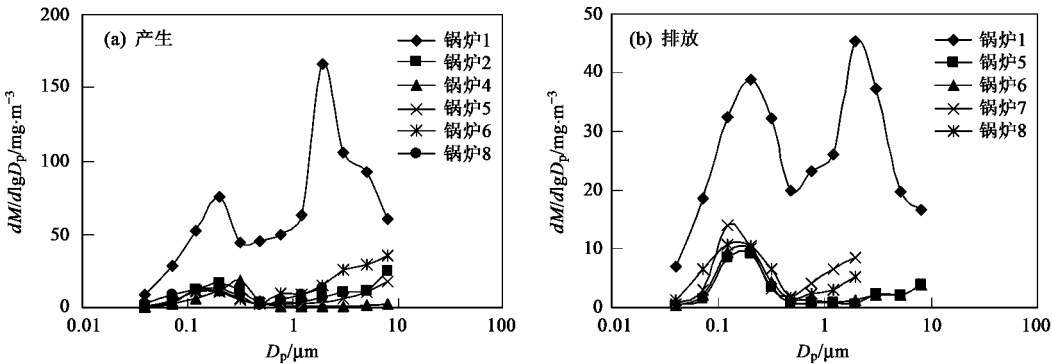


图 3 工业锅炉产生和排放 PM_{10} 的质量浓度分布

Fig.3 Mass size distribution of PM_{10} generated and emitted from industrial boiler

相对于文献[12]中煤粉炉排放 PM_{10} 的质量浓度,链条炉和往复炉的排放较低. 从燃烧方式上看,煤粉炉燃烧温度较高,煤粉的粒度要远低于原煤. 研究表明,随着燃烧温度升高,颗粒物的排放浓度明显增加,煤的粒径分布也会发生变化^[22]. 燃用型煤的链条炉,其 PM_{10} 排放浓度低于燃用原煤的链条

炉,且主要表现在粗颗粒浓度相差较大,原因可能是型煤结构在一定程度上抑制了由破碎和聚结机制产生的粗颗粒逸出到烟气中,使得更多的粗颗粒保留在灰渣中. 图 3(a)中锅炉 1 排放 PM_{10} 的质量浓度明显高于其他燃用原煤的链条炉,这与图 2(a)所示其粒径较粗是一致的,原因可能是该锅炉燃烧状况不

佳, 导致更多的含碳颗粒物排放(参见文中 EC 的含量和排放因子)。

由图 3(b)可知, 经过烟气净化设备后, PM_{10} 的质量浓度亦呈双峰(或三峰)分布。尽管质量浓度与净化前相比均有一定程度的降低, 但细颗粒的下降程度远低于粗颗粒, 即烟气净化设备对细颗粒的去除效果明显不如粗颗粒。

2.2 $PM_{2.5}$ 的化学组成

水溶性离子组分的分析结果(图 4)表明, SO_4^{2-} 是燃煤工业锅炉产生 $PM_{2.5}$ 中含量最为丰富的离子, 但各锅炉之间差异较大。 SO_4^{2-} 在 $PM_{2.5}$ 中的含量在 1.5% ~ 55.2% 范围内波动, 其中燃用型煤的锅炉 4 最高, 而循环流化床锅炉 3 最低。 总体上, 型煤锅炉产生的水溶性离子(包括 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、 Cl^- 和 NO_3^-) 在 $PM_{2.5}$ 中的含量最高, 达到 62.3%; 循环流化床最低, 仅为 2.4%; 而其它燃用原煤的层燃炉(包括链条炉和往复炉)在 13.2% ~ 39.8% 之间。

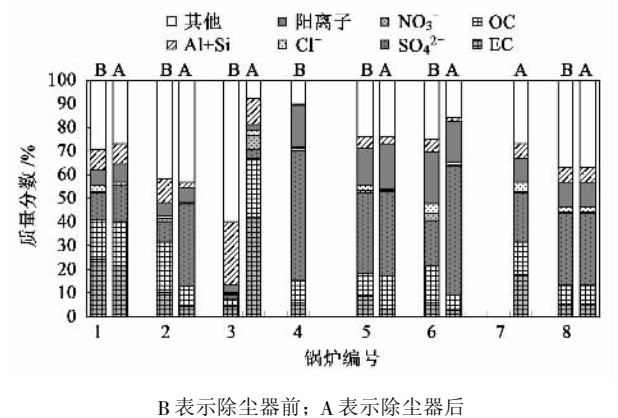


图 4 工业锅炉产生和排放 $PM_{2.5}$ 的化学组成
Fig.4 Chemical composition of $PM_{2.5}$ generated and emitted from industrial boiler

除了水溶性离子组分之外, 含碳组分(OC 和 EC)在 $PM_{2.5}$ 中的含量也较为丰富, 其中 OC 含量在 3.7% ~ 21.4% 之间, EC 含量在 4.2% ~ 24.6% 范围内, OC 与 EC 的含量均以循环流化床锅炉最低。此外, 燃用型煤的链条炉同其它燃用原煤的层燃炉相比, 产生 $PM_{2.5}$ 中的总碳含量(OC + EC)也处于较低的水平。这与其他研究得到的结论^[23]相同。

对燃煤工业锅炉产生 $PM_{2.5}$ 中元素含量的分析结果表明, Al 和 Si 等地壳元素也比较丰富。总体上, 流化床锅炉产生的 $PM_{2.5}$ 中 Al 和 Si 平均含量最高, 分别为 18.5% 和 8.4%; 型煤锅炉最低, 为 0.33% 和 0.33%; 其它燃用原煤的层燃炉在两者之间。

经过烟气净化设备之后, 工业锅炉排放 $PM_{2.5}$ 的化学成分谱同样如图 4 所示。水溶性离子组分中, SO_4^{2-} 仍是含量最高的物种, 其在 $PM_{2.5}$ 中的含量以循环流化床为最低, 仅 3.68%, 而燃用原煤的层燃炉在 15.3% ~ 54.0% 范围内波动。此外, 循环流化床排放水溶性离子(包括 NH_4^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-}) 的比例相对于其他锅炉要低, 经过烟气净化设备后, 水溶性离子占 $PM_{2.5}$ 的比例均呈上升趋势。

在工业锅炉排放的 $PM_{2.5}$ 中, 含碳组分的含量也较高, OC 在 3.7% ~ 21.4% 之间, EC 则在 4.2% ~ 24.6% 范围内。经过电除尘器后, 循环流化床锅炉排放的 $PM_{2.5}$ 中 OC 与 EC 的含量大幅度提高, 分别达到 25.0% 和 42.0%, 高于其它锅炉, 表明电除尘器对含碳粒子的捕集效率较低。

通常, 环境空气 $PM_{2.5}$ 中的 OC 与 EC 比值被用来判断大气污染的来源^[24]。本研究中测得的燃煤工业锅炉排放 $PM_{2.5}$ 的 OC 和 EC 的比值在 0.6 ~ 4.6 之间, 其中采用干法除尘技术的锅炉(锅炉 1、3、7)的 OC 和 EC 比值 < 1, 在 0.6 ~ 0.9 之间, 而采用湿法脱硫除尘技术的锅炉(锅炉 2、5、6、8)的 OC 和 EC 比值均 > 1, 在 1.6 ~ 4.6 范围内。部分气态有机物在湿式脱硫除尘器内通过喷淋降温等过程转化为颗粒态有机物, 是采用湿法脱硫除尘技术的锅炉排放 $PM_{2.5}$ 中 OC 和 EC 比值普遍高于采用干法除尘技术的锅炉的主要原因。作为比较, 有研究者测试了我国家庭燃用蜂窝煤和原煤的排放, 结果表明在排放颗粒物中 OC 和 EC 比值波动很大, 蜂窝煤在 4.8 ~ 56.1 之间, 而原煤燃烧在 1.1 ~ 14.1 之间^[25, 26]。

在燃煤工业锅炉排放的 $PM_{2.5}$ 中, Al 和 Si 仍是含量较高的元素, 其含量分别为 0.4% ~ 6.7% 和 0.8% ~ 5.4%。经过烟气净化设备后, 上述元素含量均呈下降趋势, 其中尤以流化床锅炉下降最为显著, 表明烟气净化设备对地壳物质的捕集效率要高于其他组分。

2.3 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的排放因子

基于现场实测数据, 计算出各台燃煤工业锅炉控制前后 PM_{10} 或 $PM_{2.5}$ 的排放因子, 结果列于表 3。其中排放因子以消耗单位燃料的污染物排放量表示, 单位为 $kg \cdot t^{-1}$ 。燃用原煤的层燃炉在无控条件下的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 排放因子分别在 0.13 ~ 0.65 $kg \cdot t^{-1}$ 和 0.08 ~ 0.49 $kg \cdot t^{-1}$ 范围内, $PM_{2.5}$ 在 PM_{10} 中的比例为 40% ~ 66%; 燃用型煤的链条炉的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 产生因子分别为 0.24 $kg \cdot t^{-1}$ 和 0.22 $kg \cdot t^{-1}$, $PM_{2.5}$ 占

PM₁₀的绝大部分(达 92%);而循环流化床的 PM_{2.5}产生因子明显高于层燃炉,为 1.14 kg•t⁻¹. 在除尘器后,层燃炉的 PM₁₀和 PM_{2.5}排放因子分别下降到 0.06 ~ 0.20 kg•t⁻¹和 0.05 ~ 0.42 kg•t⁻¹,PM_{2.5}在 PM₁₀中的比例上升为 66% ~ 83%;循环流化床由于使用的是高效电除尘器,其实际 PM_{2.5}排放因子下降最为明显,仅为 0.03 kg•t⁻¹. 上述结果同文献[6,7]中采用类似的稀释采样系统进行测试得到的结果有很好的可比性,但也有一些研究^[8,9]和美国 EPA 的 AP-42 报告^[10]的结果均较高. 各研究结果之间相差较大的原因可能是实际测试基于不同的燃烧条件、除尘设备

类型及运行状况,另外测试方法的差异也可能是一个重要因素^[27~29].
由于 OC 和 EC 对环境、健康和气候等方面有重要影响,其排放逐渐引起国内外学术界的关注. 我国工业锅炉由于燃烧条件相对较差,污染控制设施落后,OC 和 EC 排放不容忽视. 如表 3 所示,燃煤工业锅炉 PM_{2.5}中 OC 和 EC 的产生因子分别在 6.9 ~ 64.4 g•t⁻¹和 6.5 ~ 87.3 g•t⁻¹范围内,而 OC 和 EC 的排放因子分别为 4.9 ~ 31.7 g•t⁻¹和 1.4 ~ 37.5 g•t⁻¹. 上述排放因子与文献[6,7]结果具有一定的可比性.

表 3 工业锅炉的 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} (及 PM _{2.5} 中 OC 和 EC)的排放因子 ¹⁾ /kg•t ⁻¹								
Table 3 Emission factor of PM ₁₀ and PM _{2.5} (together with OC/EC in PM _{2.5}) from industrial boiler/kg•t ⁻¹								
锅炉编号	控制前				控制后			
	PM ₁₀	PM _{2.5}	OC	EC	PM ₁₀	PM _{2.5}	OC	EC
1	0.65 ± 0.25	0.43 ± 0.16	64.4 ± 7.0a	87.3 ± 52.5	0.20 ± 0.07	0.15 ± 0.05	26.8 ± 1.8a	30.8 ± 0.1
2	0.30 ± 0.03	0.16 ± 0.08	33.3 ± 9.1	14.3 ± 0.7	0.09 ± 0.03	0.06 ± 0.02	4.87 ± 0.56	2.30 ± 0.79
3	—	1.14 ± 0.23	42.6 ± 11.6	47.6 ± 9.6	—	0.03 ± 0.02	5.46 ± 0.16	7.02 ± 6.65
4	0.24 ± 0.10	0.22 ± 0.08	19.6 ± 1.9	10.6 ± 2.8	—	—	—	—
5	0.13 ± 0.02	0.08 ± 0.01	6.94 ± 2.95	6.48 ± 1.23	0.06 ± 0.01	0.05 ± 0.01	6.29 ± 1.62	1.42 ± 0.04
6	0.30 ± 0.01	0.12 ± 0.01	18.7 ± 3.3	6.99 ± 0.66	0.14 ± 0.02	0.10 ± 0.02	6.33 ± 2.06	2.60 ± 0.93
7	—	—	—	—	—	0.21 ± 0.02	29.1 ± 5.6	37.5 ± 16.4
8	—	0.49 ± 0.11	—	—	—	0.42 ± 0.17	31.7 ± 8.2	22.3 ± 14.5

1) 表中为平均值 ± 标准偏差

2.4 除尘器的净化效率

不同烟气净化设备对 PM₁₀和 PM_{2.5}的捕集效率列于表 4. 电除尘器对 PM_{2.5}的捕集效率为 97.4%,明显高于其他类型的除尘设备. 目前,多管旋风除尘器和水膜除尘器是我国工业锅炉应用最普遍的除尘器,它们对 PM_{2.5}和 PM₁₀的捕集效果不太理想. 其中,多管旋风除尘器对 PM_{2.5}和 PM₁₀的捕集效率分别为 65.1%和 69.2%,水膜除尘器分别在 37.5% ~ 62.5%和 53.8% ~ 70.0%范围内. 喷雾洗涤器和简易喷雾干燥塔的除尘效果则更差.

3 结论

- (1)燃煤工业锅炉排放 PM₁₀的粒径分布特征与燃煤电厂十分相似,即质量浓度总体上呈双峰分布,但浓度相对较低,同时峰值粒径区间均向大粒径方向偏移,即颗粒物整体较粗.
- (2)不同类型的燃煤工业锅炉,其无控条件下的 PM₁₀排放因子差异很大,燃用型煤的链条炉与燃用原煤的层燃炉排放因子相当,而循环流化床则明显高于链条炉.
- (3)由于耗煤量大,同时现有除尘设备的效率较低,燃煤工业锅炉可能成为我国最重要的 PM₁₀排放源,是今后重点控制的对象.

表 4 烟气净化设备对 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 的平均捕集效率/%			
Table 4 Average collecting efficiency of PM ₁₀ and PM _{2.5} by flue gas treatment equipment/%			
锅炉编号	烟气净化设备	PM ₁₀	PM _{2.5}
1	多管旋风除尘器	69.2	65.1
2	水膜除尘器	70.0	62.5
3	电除尘器	—	97.4
5	水膜除尘器	53.8	37.5
6	喷雾洗涤器	53.3	16.7
8	简易喷雾干燥塔	—	14.3

参考文献:

[1] 国家环境保护局科技标准司. 工业污染物产生和排放系数手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.

[2] 田贺忠. 中国氮氧化物排放现状、趋势及综合控制对策研究[D]. 北京: 清华大学, 2003.

[3] 机械工业联合会. 中国机械工业年鉴 2002[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.

[4] 机械工业部第二设计研究院. GEF 中国高效工业锅炉项目市

- 场调查研究报告[R]. 2000.
- [5] 赵钦新, 王善武. 我国工业锅炉未来发展分析[J]. 工业锅炉, 2007, **101**: 1-10.
- [6] 周楠, 曾立民, 于学娜, 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.
- [7] 北京大学. 北京市大气环境二次污染控制研究[R]. 北京市科技专项报告, 2006.
- [8] Streets D G, Gupta S, Waldhoff S T, *et al.* Black carbon emissions in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**: 4281-4296.
- [9] 北京市环境保护监测中心. 北京市大气环境污染现状和污染源研究[R]. 北京市科技专项报告, 2005.
- [10] US-EPA. Compilation of Air Pollutant Emission Factors[R]. Report AP-42, Research Triangle Park NC, USA, 1996.
- [11] 李兴华, 段雷, 郝吉明, 等. 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, 2008, **28**(3): 458-463.
- [12] 易红宏, 郝吉明, 段雷, 等. 电厂除尘设施对 PM_{10} 排放特征影响研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(10): 1921-1927.
- [13] Kauppinen E I, Kappanen T A. Coal combustion aerosols: a field study[J]. *Environmental Science and Technology*, 1990, **24**: 1811-1818.
- [14] Mcelroy M W, Carr R C, Ensor D S, *et al.* Size Distribution of Fine Particles from Coal Combustion[J]. *Science*, 1982, **215**: 13-19.
- [15] 隋建才, 徐明厚, 丘纪华, 等. 燃煤锅炉 PM_{10} 形成与排放特性的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2006, **27**(2): 335-338.
- [16] Sarofim A F, Padia A S, Howard J B. The physical transformation of the mineral matter in pulverized coal under simulated combustion conditions[J]. *Combustion Science and Technology*, 1977, **16**: 187-204.
- [17] Helble J J. Mechanisms of ash formation and growth during pulverized coal combustion [D]. Cambridge: Massachusetts of Institute of Technology, 1987.
- [18] Quann R J, Neville M, Janghorbani M, *et al.* Mineral matter and trace-element vaporization in a laboratory-pulverized coal combustion system[J]. *Environmental Science and Technology*, 1982, **16**: 776-781.
- [19] Seames W S. An initial study of the fine fragmentation fly ash particle mode generated during pulverized coal combustion [J]. *Fuel Processing Technology*, 2003, **81**: 109-125.
- [20] Linak W P, Miller C A, Seames W S, *et al.* On trimodal particle size distributions in fly ash from pulverized-coal combustion[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, **29**: 441-447.
- [21] Yu D X, Xu M H, Yao H, *et al.* Use of elemental size distributions in identifying particle formation modes [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, **31**: 1921-1928.
- [22] 陶叶, 徐明厚, 于敦喜, 等. 煤粉粒径及燃烧工况对 PM_{10} 排放特性的影响[J]. 煤炭转化, 2006, **29**(1): 53-57.
- [23] Ge S, Bai Z, Wang T, *et al.* Boiler briquette coal versus raw coal: part I-stack gas emissions [J]. *Journal of Air and Waste Management Association*, 2001, **51**(4): 524-533.
- [24] Novakov T, Menon S, Kirchstetter T W, *et al.* Aerosol organic carbon to black carbon ratios: analysis of published data and implications for climate forcing[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, **110**, D21205, doi: 10.1029/2005JD005977.
- [25] Chen Y, Sheng G, Bi X, *et al.* Emission factors for carbonaceous particles and polycyclic aromatic hydrocarbons from residential coal combustion in China[J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, **39**: 1861-1867.
- [26] Chen Y, Zhi G, Feng Y, *et al.* Measurements of emission factors for primary carbonaceous particles from residential raw-coal combustion in China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**, L20815, doi: 10.1029/2006GL026966.
- [27] Corio L A, Sherwell J. In-stack condensable particulate matter measurements and issues[J]. *Journal of Air and Waste Management Association*, 2000, **50**: 207-218.
- [28] Hidemann L M, Cass G R, Markowski G R. A dilution stack sampler for collection of organic aerosol emissions: design, characterization and field tests[J]. *Aerosol Science and Technology*, 1989, **10**: 193-204.
- [29] England G C, Watson J G, Chow J C, *et al.* Dilution-based emissions sampling from stationary sources: part I-compact sampler methodology and performance [J]. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 2007, **57**: 65-78.