

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0140

张松松, 路义萍, 杜谦, 等. 2014. 工业锅炉 $PM_{2.5}$ 产排特性试验研究[J]. 环境科学学报, 34(4): 843-848

Zhang S S, Lu Y P, Du Q, et al. 2014. Experiment study on production and emission characteristics of $PM_{2.5}$ from industrial boilers[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(4): 843-848

工业锅炉 $PM_{2.5}$ 产排特性试验研究

张松松¹, 路义萍¹, 杜谦^{2,*}, 董鹤鸣², 高建民², 苏利鹏², 苑鹏飞²

1. 哈尔滨理工大学 机械动力工程学院, 哈尔滨 150080

2. 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001

收稿日期: 2013-10-12 修回日期: 2013-12-16 录用日期: 2013-12-16

摘要: 采用荷电低压颗粒撞击器 (ELPI) 对哈尔滨市两台燃煤工业锅炉 $PM_{2.5}$ 排放特性进行了研究。研究表明: $PM_{2.5}$ 的粒数和浓度分布曲线均呈现单峰分布, 前者峰值出现在 $0.12 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 粒径范围内, 这部分粒子主要是由无机物气化-凝结形成的亚微米颗粒物和挥发分未完全燃烧形成的炭黑粒子, 而后者峰值出现在 $0.32 \mu\text{m}$ 处, 粒子主要是由炭黑粒子形成的亚微米颗粒和残灰粒子形成的超微米颗粒。同时发现, 旋风除尘和湿法除尘对 $PM_{2.5}$ 各级颗粒均有一定的去除效果, 采用多管旋风和冲击水浴除尘器联合除尘效率比单种水膜除尘器除尘效率高; 湿法脱硫系统对 $PM_{2.5}$ 的脱除也有明显的作用, 由于除雾器不能全部去除小雾滴, 这些雾滴中固体颗粒被干燥和水溶性物质结晶析出, $PM_{0.32}$ 颗粒物粒数浓度有所增加, 而 $PM_{0.32-2.5}$ 的颗粒物粒数浓度有所减少, 但总质量浓度降低。

关键词: 工业锅炉; $PM_{2.5}$; 浓度; 除尘效率; 脱硫系统

文章编号: 0253-2468(2014)04-843-06

中图分类号: X513

文献标识码: A

Experiment study on production and emission characteristics of $PM_{2.5}$ from industrial boilers

ZHANG Songsong¹, LU Yiping¹, DU Qian^{2,*}, DONG Heming², GAO Jianmin², SU Lipeng², YUAN Pengfei²

1. Institute of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080

2. School of Energy Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001

Received 12 October 2013;

received in revised form 16 December 2013;

accepted 16 December 2013

Abstract: The emissions of $PM_{2.5}$ in two bituminous coal-fired industrial boilers in Harbin were investigated by using Electric Low Pressure Impactor (ELPI). The results showed that the curves of particles number and mass size distributions of $PM_{2.5}$ presented one single peak. The peak of the particles number appeared between $0.12 \mu\text{m}$ and $0.2 \mu\text{m}$, mainly submicron particles formed by vaporization-condensation of mineral matter and soot particles transformed from unburnt volatiles. The peak for mass concentration appeared at $0.32 \mu\text{m}$, mainly submicron particles produced by soot and super-micron particles formed by residual ash particles. Meanwhile, it was found that cyclone and wet scrubber had a significant effect on the removal of $PM_{2.5}$, and the removal efficiency of $PM_{2.5}$ for cyclone and wet scrubber combined dust was higher than that for a single wet scrubber. The wet flue gas desulfurization (WFGD) system also decreased $PM_{2.5}$ obviously. This was because the demister could not remove all the small droplets, a big number of solid particles and water-soluble substances in droplets were dried or crystallized, resulted in the number concentration of $PM_{0.32}$ increased and the $PM_{0.32-2.5}$ reduced, with the total mass concentration also reduced.

Keywords: industrial boiler; $PM_{2.5}$; concentration; removal efficiency; WFGD

1 引言 (Introduction)

在我国中东部各地, 随着天气变冷, 大量的工业供暖锅炉投入使用, 将陆续出现大范围、长时间雾霾天气, 其中 $PM_{2.5}$ 是最显著的污染物之一, 严重影响了环境空气质量和人体的健康 (殷永文等,

2011; 杨卫芬等, 2010; 刘小峰, 2012)。而工业锅炉是重要的热能动力设备, 在我国国民经济发展和居民生活中发挥重大作用, 全国现用工业锅炉约为 48 万台, 约占我国锅炉总数量的 98% 以上, 已经成为我国 $PM_{2.5}$ 的重要来源 (郝吉明等, 2008; 史妍婷等, 2013)。

基金项目: 国家环保公益性行业科研经费专项项目 (No. 201009006); 中央高校基本科研业务费专项基金资助 (No. HIT.NSRIF.2013095)

Supported by the Special Fund for Environmental Protection Research in the Public Interest (No. 201009006) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. HIT.NSRIF.2013095)

作者简介: 张松松 (1987—), 男, E-mail: zhangsong0536@163.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: DuQ1973@163.com

Biography: ZHANG Songsong (1987—), male, E-mail: zhangsong0536@163.com; * **Corresponding author**, E-mail: DuQ1973@163.com

国内外已有很多学者对 $PM_{2.5}$ 进行了大量研究, Yoshihiko Ninomiya 等发现燃烧添加有 Mg 添加剂的燃煤可以减少 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的排放, 但受燃烧温度影响较大 (Ninomiya *et al.*, 2009). Zhang Chengfeng 等对中国几个火电厂 ESP 后采集的颗粒物化学成分测试, 发现颗粒物中化学主要组成为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 CaO , 并随颗粒粒径的减小, SiO_2 、 Al_2O_3 和 Na_2O 含量减少, Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 和 P_2O_5 含量增加 (Zhang *et al.*, 2005); 清华大学王书肖等测试 5 种不同容量链条炉的 $PM_{2.5}$ 生成特性, 发现锅炉后质量浓度均在 $0.14 \mu m$ 处有一峰值, 部分锅炉在 $>1 \mu m$ 处出现第二个峰值, 采集的 $PM_{2.5}$ 颗粒样品中, 最丰富的离子为 SO_4^{2-} , 含量在 20%~54% 之间, 最丰富的元素为 C, 质量分数在 7.5%~31.8% 范围内 (王书肖

等, 2009). 由于我国工业锅炉大多容量较小, 锅炉除尘设备以对 $PM_{2.5}$ 颗粒除尘效率较低的旋风除尘器和湿式除尘器为主, 脱硫设备也受到规模影响与大容量锅炉有不同之处, 因此对工业锅炉开展细颗粒物 $PM_{2.5}$ 排放特性及减排研究, 为分析污染物来源和成因, 改善我国大气环境质量有重要的意义.

2 试验方法及测试对象 (Experimental methods)

2.1 测试对象

目前, 我国的工业锅炉燃料以烟煤为主, 烟气净化设备主要为旋风除尘器和湿式除尘器, 因此本次试验在东北城市哈尔滨市郊区选取了两台锅炉, 测试锅炉情况见表 1, 煤质分析报告见表 2.

表 1 试验工业锅炉基本情况

Table 1 Basic condition of the test industrial boilers

锅炉序号	地点	锅炉类型	规模/ ($t \cdot h^{-1}$)	原料名称	试验负荷	污染物治理技术	
						末端除尘技术	脱硫技术
1	哈尔滨平房区某炉	抛煤机链条炉	40	烟煤	85%	水膜除尘	—
2	哈尔滨平房区某炉	链条炉	20	烟煤	80%	多管旋风+冲击水浴除尘器	石灰石-石膏湿法烟气脱硫

表 2 煤质工业分析及元素分析

Table 2 Proximate and ultimate analyses of the coal sample

干基水分	挥发分	灰分	固定碳	碳	硫	氢	氮	氧	高位发热量/ ($MJ \cdot kg^{-1}$)	低位发热量/ ($MJ \cdot kg^{-1}$)
2.41%	24.11%	29.23%	44.25%	54.27%	1.77%	3.33%	0.82%	9.17%	21.47	20.73

2.2 测试方法

本次测试采用芬兰 Dekati 公司生产荷电低压颗粒物撞击器 (electric low pressure impactor, ELPI) 对烟气中 $PM_{2.5}$ 的粒径分布进行连续测量, 并采用通入洁净空气的二级稀释系统 (如图 1) 将高温烟气稀释冷却至大气环境温度, 此方法可以模拟燃烧源产生的高温烟气在排放到大气时的冷却、稀释和凝结等物理化过程.

ELPI 是现有能精确测量细小颗粒物较为准确的仪器之一, 工作响应时间小于 5 s, 甚至可以达到 1 s, 可以在线测量不同粒径范围 $PM_{2.5}$ 的质量和粒子数浓度.

2.3 测点布置

现场测试位置布置如图 2 所示, 锅炉后测点代表 $PM_{2.5}$ 的产生情况, 除尘装置后和脱硫装置之后的测点代表 $PM_{2.5}$ 的排放情况.

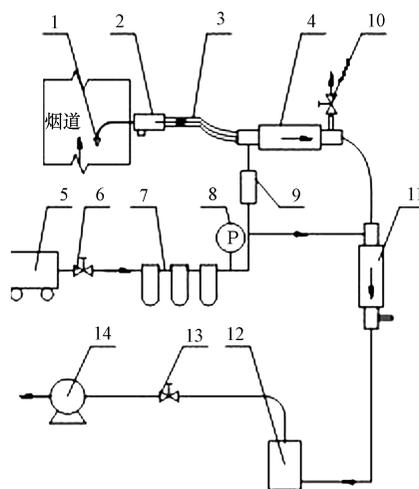


图 1 二级稀释采样系统 (1. 采样探头; 2. 带加热保温套的 PM_{10} 切割器; 3. 带加热保温套的采样管; 4. 带加热保温套的一级稀释器; 5. 空压机; 6. 调节阀 I; 7. 空气过滤器; 8. 压力表; 9. 空气预热器; 10. 调节阀 II; 11. 二级稀释器; 12. 荷电低压撞击器 (ELPI); 13. 压力调节阀; 14. 真空泵)

Fig. 1 Two-stage dilution sampling system

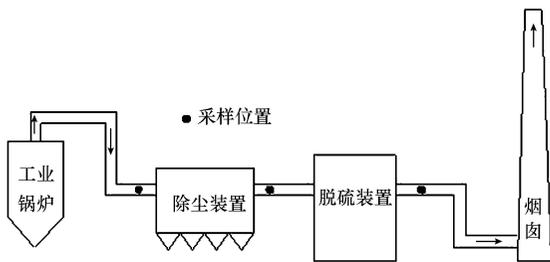


图2 采样位置布置

Fig.2 The arrangement of sampling location

3 结果及讨论 (Results and discussion)

在进行锅炉采样时,采样位置的选择遵循 GB/T 16157—1996《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》和 HJ/T 397—2007《固定源废气监测技术规范》相关要求。

3.1 锅炉出口 PM_{2.5} 粒数和质量浓度分布

在试验过程中,锅炉 1 负荷保持在 85% De (额定负荷),锅炉 2 负荷保持在 80% De,工况稳定,锅炉 1 抛煤机链条炉与锅炉 2 链条炉产生的 PM_{2.5} 粒数和质量浓度分布分别如图 3a 及图 3b 所示,锅炉 2 锅炉出口 PM_{2.5} 样品 SEM-EDS 图谱如图 4 所示,

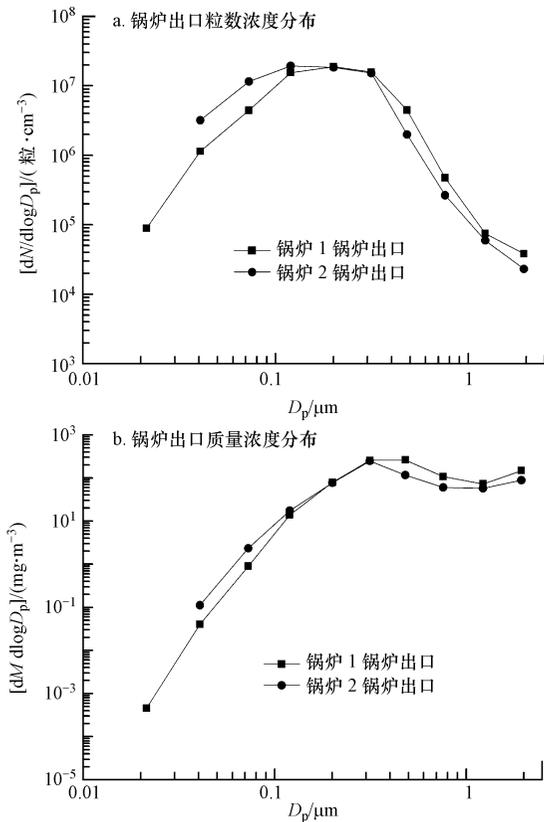


图3 锅炉出口粒数和质量浓度分布

Fig.3 The number and mass concentrations from the outlet of boilers

其形貌特征如图 5 所示,锅炉 1 与锅炉 2 各测点 PM_{2.5} 总粒数浓度和质量浓度如表 3 所示。

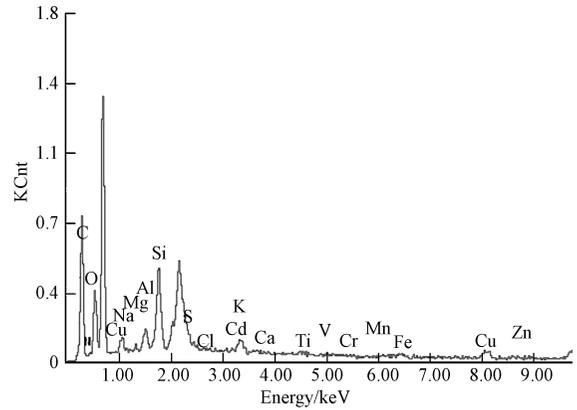


图4 锅炉 2 锅炉出口 PM_{2.5} 样品 SEM-EDS 谱图

Fig.4 SEM-EDS spectra of PM_{2.5} from outlet of boiler 2

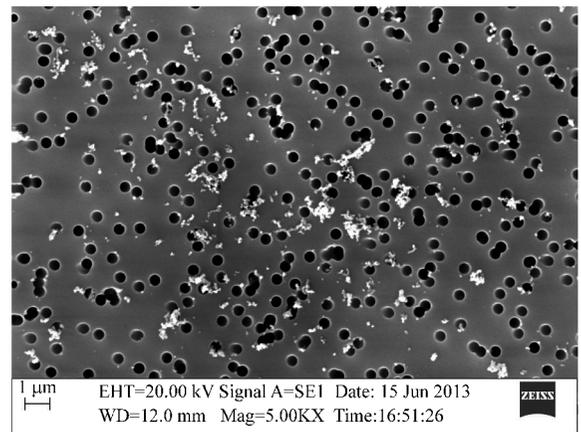


图5 锅炉 2 锅炉出口 PM_{2.5} 形貌

Fig.5 Morphology of PM_{2.5} from outlet of boiler 2

表 3 PM_{2.5} 总粒数浓度和质量浓度

Table 3 The number concentration and mass concentration of PM_{2.5}

测点	锅炉 1		锅炉 2	
	粒数浓度/ (粒·cm ⁻³)	质量浓度/ (mg·m ⁻³)	粒数浓度/ (粒·cm ⁻³)	质量浓度/ (mg·m ⁻³)
除尘前	12623320	179.14	14818321	126.50
除尘后	6524379	94.74	4121253	58.10
脱硫后	—	—	9577613	42.71

从图 3 中可知,链条炉和抛煤机链条炉 PM_{2.5} 生成特性基本相同,图 3a 中锅炉 1 和锅炉 2 产生的 PM_{2.5} 粒数浓度分布呈明显的单峰特征,峰值分别出现在 0.2 μm 和 0.12 μm,主要原因是煤中无机物的气化-凝结形成的亚微米颗粒和挥发分未完全燃烧形成的炭黑粒子.在层燃炉相对较低的燃烧温度环境下,煤中外在矿物质及次生内在矿物质中的主量

元素 Si、Al、Fe、Ca、Mg, 一般不会气化. 主要发生气化的的是与煤中有机官能团相连以离子交换态存在的无机元素, 如 Na、K、Ca、Mg 和矿物质中的部分碱金属, 气化后形成的金属化合物发生均相成核、异相凝结、凝并或团聚等过程形成亚微米颗粒物. 试验过程中, 锅炉 1 与锅炉 2 的过量空气系数低于 1.4, 挥发分不能完全燃烧, 形成大量炭黑粒子, 煤粉在燃烧过程中, 当温度达到 1100 K 时, 焦油分子聚合开始形成炭黑粒子, 在 1300 K 时, 多环芳烃开始形成 20~40 nm 近似球状炭黑粒子, 随温度升高 (2220 K 以下), 炭黑在还原气氛下生成速度高于氧化速度, 总量呈递增趋势. 从图 4 锅炉 2 锅炉出口 $PM_{2.5}$ SEM-EDS 谱图可知, C 元素峰值较高, 经计算 C 元素质量百分比 > 50%, 与工业锅炉排放颗粒物中存在较多炭黑粒子结论吻合.

层燃炉燃烧温度为 1600 K 左右, 此温度形成的炭黑粒子平均直径约 0.2 μm , 并有明显团聚, 另外矿物质在煤层中气化-凝结形成的细微颗粒物在炉膛内团聚, 但层燃炉炉膛温度不足以使得团聚的颗粒熔融球化, 故 $PM_{2.5}$ 中链状和丛状颗粒物较多 (岑可法等, 2004). 从图 5 锅炉 2 锅炉出口 $PM_{2.5}$ 颗粒形貌图也可看出, 锅炉 2 出口存在大量团聚颗粒, 粒径小于 0.06 μm 颗粒主要以单颗粒形式存在, 大于 0.06 μm 颗粒开始团聚, 这部分颗粒物大部分在 1 μm 以下, 在 0.09 到 0.38 μm 粒径范围内聚合颗粒物最多, 这也与图 3a 中 ELPI 在线监测的粒数浓度峰值出现在 0.12 μm 处吻合, 证明 ELPI 在线监测 $PM_{2.5}$ 粒数浓度数据的有效性. 由于抛煤机炉为半悬浮燃烧, 部分细煤粒在抛煤的过程中, 直接在炉膛中悬浮燃烧, 炉膛温度较高, 部分在炉排上产生的炭黑粒子被烟气携带经过炉膛时再次参与燃烧, 使得炭黑粒子总数量下降, 从表 3 中也可看出锅炉 1 总粒数少于锅炉 2.

从图 3a 中还可看出, 亚微米颗粒物粒数浓度在峰值后下降明显, 但 1 μm 后变化变缓, 而且在数量上抛煤机层燃炉比链条炉要高. 分析认为超微米颗粒物主要是煤燃烧后形成的残灰粒子, 而残灰粒子主要来源于炉排上燃尽的煤粒由气力携带进入烟气, 部分来源于在炉膛内燃尽的小煤粒, 由于抛煤机炉炉膛内空间燃烧的小煤粒要多于层燃炉, 产生的超微米残灰粒子量也多于层燃炉.

由图 3b 可以看出, 锅炉 1 抛煤机链条炉和锅炉 2 链条炉出口 $PM_{2.5}$ 质量浓度分布呈明显的单峰分

布, 峰值出现在 0.32 μm , 测试锅炉燃烧工况为扩散燃烧, 还原气氛较强, 一些难熔元素被还原成较易气化的次氧化物, 有利于细微颗粒物的生成, 由于大颗粒单颗粒质量较大, 虽然粒数较少, 峰值后的各级质量浓度曲线变化不大.

3.2 除尘器出口 $PM_{2.5}$ 粒数及质量浓度分布

锅炉 1 抛煤机链条炉和锅炉 2 链条炉除尘器出口 $PM_{2.5}$ 粒数质量浓度如图 6a 和图 6b 所示. 锅炉 1 水膜除尘器和锅炉 2 多管旋风与冲击水浴除尘器对 $PM_{2.5}$ 各级除尘效率如图 7 所示, 锅炉 1 与锅炉 2 除尘器对 $PM_{2.5}$ 总粒数和质量脱除效率如表 4 所示.

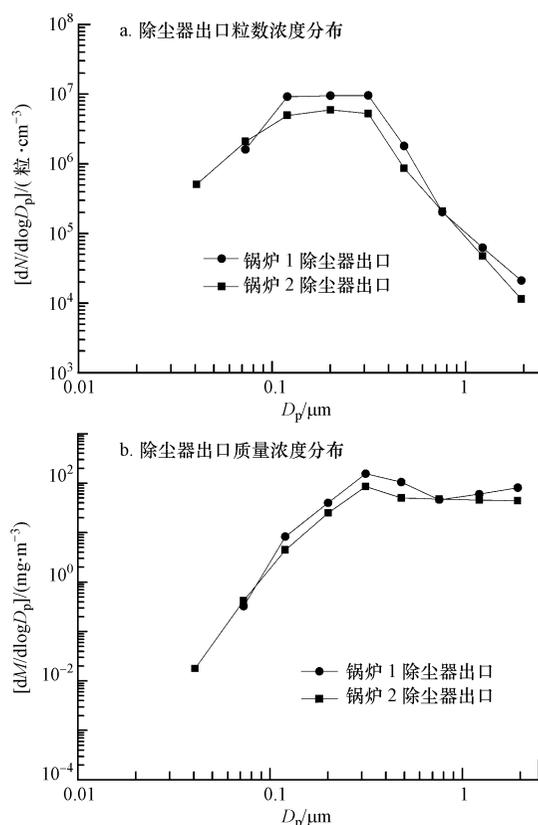


图 6 除尘器出口粒数和质量浓度分布

Fig.6 The number and mass concentrations in the outlet of dust removers

从图 6a 可看出, 经过除尘器后锅炉 1 和锅炉 2 烟气中 $PM_{2.5}$ 粒数浓度呈单峰分布, 峰值出现在 0.12 和 0.2 μm 处, 经除尘器后各级粒数浓度均有下降, $PM_{2.5}$ 总粒数主要取决于 $PM_{1.0}$, $PM_{1.0}$ 主要是通过无机物的气化-凝结机理形成的细小颗粒及炭黑粒子, 并通过凝并、聚结及表面凝并/反应等过程使颗粒粒径变大 (杨林军, 2011). 图 6b 中可看出, 除尘器后锅炉 1 和锅炉 2 烟气中 $PM_{2.5}$ 质量浓度呈明显单峰特征, 峰值出现在 0.32 μm , 峰值后的各级质量浓度

曲线变化不大。

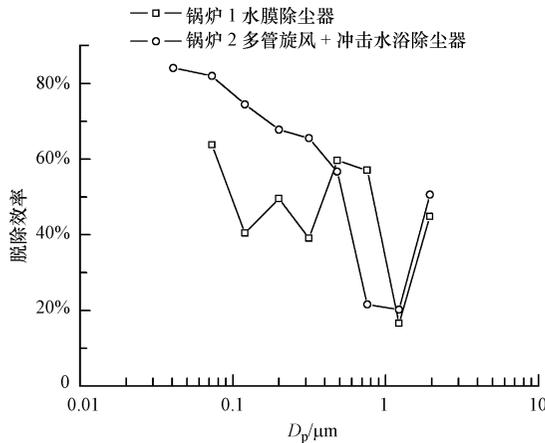


图7 除尘器各级除尘效率

Fig.7 The collection efficiency of dust removers

表4 工业锅炉除尘器对 PM_{2.5}总粒数和质脱除效率

Table 4 The collection efficiency of industrial boilers dust removers

参数	锅炉1	锅炉2
粒数脱除效率	48.31%	72.19%
质量脱除效率	47.11%	54.71%

从表3可以看出,锅炉1与锅炉2产生的粒数浓度为十几百万粒·cm⁻³,排放的粒数浓度为几十万粒·cm⁻³,产生的质量浓度为一百多 mg·m⁻³,排放的质量浓度为几十 mg·m⁻³.锅炉1与锅炉2烟气中 PM_{2.5}总粒数与总质量浓度经过除尘后有明显的下降,说明除尘器对粒数和质量都有一定的脱除作用.锅炉2烟气经过脱硫装置后,PM_{2.5}总粒数浓度有了明显的升高,而总质量浓度有所降低。

由图7可看出,旋风除尘和湿法除尘对 PM_{2.5}各级颗粒有一定的去除效率,对粒径小于0.1 μm的颗粒,脱除效率相对较高,而对于粒径大于1 μm的颗粒,随着粒径的增加,脱除效率升高,而对于粒径0.1~1 μm之间的颗粒物脱除效率相对较低,结果与国外的研究结论一致(Strand *et al.*, 2002; Ylätaalo and Hautanen, 1998).由表4可看出,旋风除尘器和湿法除尘器两种除尘器总的除尘效率都不高,分析认为,本次测试锅炉除尘器属于老式机械除尘,对于对<0.1 μm的颗粒除尘机理主要是扩散沉降,由于这部分颗粒布朗运动较强烈,颗粒像气体分子一样做无规则运动,使得颗粒从浓度较高的区域扩散到浓度较低的区域,当粒径为0.1 μm时,颗粒在单位时间内布朗扩散的平均位移为重力沉降距离的几十倍,当粒径减小至0.01 μm时达到几千倍,颗粒粒

径越小,其布朗扩散能力越强扩散沉降效率越高,除尘器的除尘效率升高,与本实验结果一致;对于>1 μm的颗粒,旋风除尘器主要借助离心力将颗粒从气流中分离并捕集于器壁,湿法除尘器的颗粒除尘机理为惯性碰撞和拦截作用,由于 PM_{2.5}颗粒的惯性力、重力较小,受气体阻力相对较大,随气流流动性较好,机械除尘器对 PM_{1~2.5}颗粒的除尘效率较低.对大于0.1 μm小于1 μm的颗粒,除尘机理作用可能处于过渡区,除尘效率较低。

从图7和表4中都可以看出,锅炉2采用多管旋风与冲击水浴除尘器联合除尘效率明显高于采用水膜除尘器的锅炉1,结果表明:选用两种或多种除尘设备联合除尘效率高于单种除尘器.由于锅炉1和锅炉2除尘后质量浓度峰值出现在粒径为0.32 μm处,粒径在0.32~1.0 μm范围内,各级质量浓度相对较高,并处于除尘器除尘效率较低的区间,导致除尘器对总质量浓度脱除效率较低.因此,除尘设备的选取对细颗粒物的排放影响较大,多种除尘设备联合使用或选用其他高效的除尘器会产生较低的排放因子。

3.3 锅炉2脱硫装置出入口烟气中 PM_{2.5}的粒数和质量浓度分布

锅炉2尾部烟道装有石灰石-石膏湿法烟气脱硫(WFGD)系统,锅炉2烟气经过WFGD系统前后 PM_{2.5}粒数和质量浓度分布如图8所示。

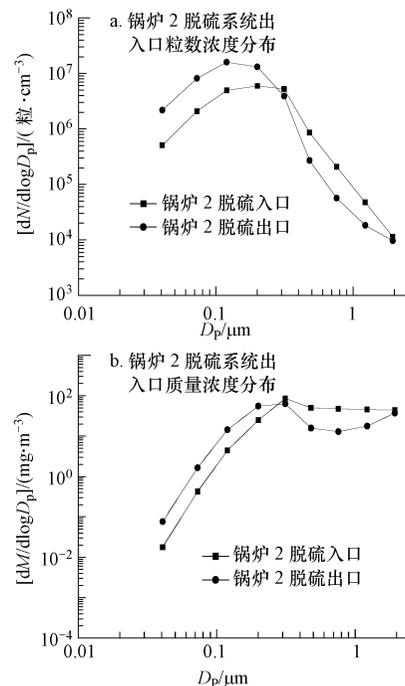


图8 锅炉2脱硫前后粒数及质量浓度分布

Fig.8 The number and mass concentrations from inlet and outlet of WFGD of boiler 2

由图 8a 可看出,脱硫装置入口与出口处 $PM_{2.5}$ 粒数浓度呈现单峰分布,WFGD 系统入口峰值出现在 $0.2 \mu\text{m}$ 处,WFGD 系统出口峰值出现在 $0.12 \mu\text{m}$ 处,说明峰值向小粒径发生偏移,在小于 $0.32 \mu\text{m}$ 的粒径范围内,WFGD 系统出口粒数和浓度明显高于 WFGD 系统入口粒数浓度,在大于 $0.32 \mu\text{m}$ 的粒径范围内,粒数浓度有明显的减少.分析认为,通过布朗扩散作用,WFGD 系统可以去除一小部分细模态颗粒,通过尘粒与喷淋液之间的惯性碰撞、拦截和凝聚作用将较大粒子捕集,使得 $PM_{2.5}$ 浓度有所下降,由于在脱硫塔中雾滴携带大量的石灰石颗粒和烟气中的二氧化硫形成的二次颗粒物,除雾器不可能全部去除雾滴,雾滴中含有的固体颗粒被干燥和水溶性物质结晶析出,使得 $PM_{2.5}$ 浓度有所升高.清华大学王琿对某 300 MW 电厂 WFGD 系统去除细颗粒物研究表明,WFGD 出口烟气中新增的石灰石与石膏颗粒分别占颗粒物质量的 47.5% 和 7.9% (王琿等,2008).

从图 8b 中可看出,锅炉 2 烟气经过 WFGD 系统前后质量浓度仍呈明显单峰特征,峰值出现在 $0.32 \mu\text{m}$ 处,由于粒径小于 $0.32 \mu\text{m}$ 颗粒粒数浓度上升,粒径大于 $0.32 \mu\text{m}$ 颗粒大量被 WFGD 系统脱除,使得粒径小于 $0.32 \mu\text{m}$ 的颗粒各级质量浓度 WFGD 系统出口高于 WFGD 系统入口,粒径大于 $0.32 \mu\text{m}$ 的颗粒各级质量浓度 WFGD 出口低于 WFGD 系统入口.

4 结论 (Conclusions)

1) 抛煤机链条炉和链条炉 $PM_{2.5}$ 生成特性基本相同,粒数浓度均呈单峰分布,峰值分别出现 0.2 和 $0.12 \mu\text{m}$ 处,峰值后粒数浓度下降明显,这部分亚微米颗粒主要来源于矿物质的气化-凝结和炭黑粒子的形成.锅炉 1 与锅炉 2 产生的粒数浓度为十几百万粒 $\cdot\text{cm}^{-3}$,排放的粒数浓度为几百万粒 $\cdot\text{cm}^{-3}$,产生的质量浓度为一百多 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$,排放的质量浓度为几十 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

2) 除尘器后烟气中 $PM_{2.5}$ 各级粒数与质量浓度均有所下降,粒数和浓度仍成单峰分布,粒数浓度峰值出现在 0.12 和 $0.2 \mu\text{m}$ 处,质量浓度峰值出现在 $0.32 \mu\text{m}$ 处.旋风除尘器和湿法除尘器对

$PM_{2.5}$ 各级颗粒有一定脱除效率,但两种除尘器除尘效率都不高,采用多种除尘器联合除尘或选用高效的除尘器可以降低细颗粒物的排放因子.

3) 烟气经过湿法脱硫装置后, $PM_{2.5}$ 中的粒数浓度呈明显单峰分布,峰值向小粒径方向发生偏移,粒径为 $0.12 \mu\text{m}$ 处.粒径大于 $0.32 \mu\text{m}$ 的颗粒由于与喷淋液之间的拦截碰撞作用浓度有所下降;粒径小于 $0.32 \mu\text{m}$ 的颗粒通过布朗扩散运动可被少量去除,由于除雾器不能全部去除小雾滴,大量雾滴中固体颗粒被干燥和水溶性物质结晶析出,使得粒径小于 $0.32 \mu\text{m}$ 的各级粒数浓度有明显的上升.

参考文献 (References):

- 岑可法,姚强,骆仲泱,等. 2004. 燃烧理论与污染控制[M]. 北京: 机械工业出版社. 462-486
- 郝吉明,段雷,易红宏,等. 2008. 燃烧源可吸入颗粒物的物理化学特征[M]. 北京: 科学出版社. 116-129
- 刘小峰. 2012. $PM_{2.5}$ 及其工业源头控制技术[J]. 中国环保产业, (8): 27-30
- Ninomiya Y, Wang Q Y, Xu S Y, *et al.* 2009. Effect of additives on the reduction of $PM_{2.5}$ emissions during pulverized coal combustion[J]. *Energy & Fuels*, 23(7): 3412-3417
- 史妍婷,杜谦,高建民,等. 2013. 燃煤锅炉 $PM_{2.5}$ 控制现状及改进建议[J]. 节能技术, 31(4): 345-348, 352
- Strand M, Pagels J, Szpila A, *et al.* 2002. Fly ash penetration through electrostatic precipitator and flue gas condenser in a 6 MW biomass fired boiler[J]. *Energy & Fuels*, 16(6): 1499-1506
- 王琿,宋蕾,姚强,等. 2008. 电厂湿法脱硫系统对烟气中细颗粒物脱除作用的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 28(5): 1-7
- 王书肖,赵秀娟,李兴华,等. 2009. 工业燃煤链条炉细粒子排放特征研究[J]. 环境科学, 30(4): 963-968
- 杨林军. 2011. 燃烧源细颗粒物污染控制技术[M]. 北京: 化学工业出版社. 12-14
- 杨卫芬,银燕,魏玉香,等. 2010. 霾天气下南京 $PM_{2.5}$ 中金属元素污染特征及来源分析[J]. 中国环境科学, 30(1): 12-17
- 殷永文,程金平,段玉森,等. 2011. 上海市霾期间 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 污染与呼吸科、儿呼吸科门诊人数的相关分析[J]. 环境科学, 32(7): 1894-1898
- Ylätalo S I, Hautanen J. 1998. Electrostatic precipitator penetration function for pulverized coal combustion [J]. *Aerosol Science and Technology*, 29(1): 17-30
- Zhang C F, Yao Q, Sun J M. 2005. Characteristics of particulate matter from emissions of four typical coal-fired power plants in China[J]. *Fuel Processing Technology*, 86(7): 757-768