

王圣, 朱法华, 王慧敏, 等. 2011. 基于实测的燃煤电厂细颗粒物排放特性分析与研究 [J]. 环境科学学报, 31(3): 630–635

Wang S, Zhu F H, Wang H M, et al. 2011. Fine particle emission characteristics from coal-fired power plants based on field tests [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(3): 630–635

基于实测的燃煤电厂细颗粒物排放特性分析与研究

王圣^{1,2*}, 朱法华¹, 王慧敏², 左漪¹, 孙雪丽¹, 赵秀勇¹, 陈辉¹, 刘钢²

1. 国电环境保护研究院, 南京 210031

2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098

收稿日期: 2010-06-05 修回日期: 2010-07-02 录用日期: 2010-07-09

摘要: 选取我国 6 个有代表性的燃煤电厂对烟尘、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的排放情况进行实测, 根据所测数据计算各电厂对烟尘、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 除尘效率以及排放因子, 并分析得到其排放特性. 6 个受检燃煤电厂静电除尘及湿法脱硫设备对烟尘总除尘效率最高为 99.88%, 最低为 99.75%, 平均去除率为 99.82%; 除尘前, 烟气中 PM_{10} 含量范围为 20.93% ~ 34.98%, 平均为 25.60%, $PM_{2.5}$ 含量范围为 2.84% ~ 4.14%, 平均为 3.39%. 经过除尘器和脱硫设备后, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 在烟尘中的比例分别变为 87.54% ~ 95.90% 和 41.22% ~ 50.31%, 平均值分别为 91.57% 和 46.14%. $PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 的含量由 10.74% ~ 15.90% 提高到 42.99% ~ 55.14%, 平均值由 13.48% 提高到 50.45%; 通过除尘、脱硫之后, 电厂对 PM_{10} 的去除率为 98.88% ~ 99.62%, 平均为 99.29%, 对 $PM_{2.5}$ 的去除率为 95.68% ~ 98.47%, 平均为 97.41%; 通过与国外燃煤电厂相比, 6 个受检电厂单位发电量及单位燃料的烟尘排放因子稍大于加拿大及美国燃煤电厂的排放因子水平, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的排放因子则远大于后者的排放水平.

关键词: 实测; 燃煤电厂; PM_{10} ; $PM_{2.5}$; 排放特征; 排放因子

文章编号: 0253-2468(2011) 03-630-06

中图分类号: X513

文献标识码: A

Fine particle emission characteristics from coal-fired power plants based on field tests

WANG Sheng^{1,2*}, ZHU Fahua¹, WANG Huimin², ZUO Yi¹, SUN Xueli¹, ZHAO Xuyong¹, CHEN Hui¹, LU Gang²

1. State Power Environmental Protection Research Institute, Nanjing 210031

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resource and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098

Received 5 June 2010;

received in revised form 2 July 2010;

accepted 9 July 2010

Abstract Six representative coal-fired power plants were selected and monitored for the PM_{10} and $PM_{2.5}$ emission from these plants. The dust, PM_{10} and $PM_{2.5}$ removal efficiencies and emission factors can be calculated based on the monitoring results and the emission characteristics can be analyzed. The highest total dust removal efficiency among the 6 examined power plants through ESP (electrostatic precipitator) and FGD (flue gas desulfurization) is 99.88%, while the lowest efficiency is 99.75%, and the average efficiency is 99.82%. Before the ESP procedure, PM_{10}/TSP is 20.93% ~ 34.98%, and the average is 25.60%; $PM_{2.5}/TSP$ is 2.84% ~ 4.14%, and the average is 3.39%. After the ESP and FGD procedure, PM_{10}/TSP is 87.54% ~ 95.90%, and the average is 91.57%; $PM_{2.5}/TSP$ is 41.22% ~ 50.31%, and the average is 46.14%. $PM_{2.5}/PM_{10}$ increases from 10.74% ~ 15.90% to 42.99% ~ 55.14%, and the average is from 13.48% to 50.45%. The PM_{10} removal rate is 98.88% ~ 99.62%, and the average is 99.29% after the ESP and FGD procedure, while the $PM_{2.5}$ removal rate is 95.68% ~ 98.47%, and the average is 97.41%. Comparing with the coal-fired power plants abroad, the 6 examined power plants have slightly larger dust emission factors than Canada and the United States in terms of $kg\ MW^{-1}$ and $kg\ t^{-1}$. However, the PM_{10} and $PM_{2.5}$ emission factors are much larger than in Canada and the US.

Keywords field test; coal-fired power plants; PM_{10} ; $PM_{2.5}$; emission characteristics; emission factor

1 引言 (Introduction)

我国能源消耗最显著的特点就是以煤炭为主, 目前煤炭占我国一次能源消费的 75% 左右, 并且很

长时间这种格局不会发生大的改变 (Zhang 2007). 煤燃烧直接排放出一次粒子, 排放的 SO_2 和 NO_x 经大气化学反应后还可形成二次粒子. 研究表明, 2003 年美国 $PM_{2.5}$ 水平下降到最低, 与燃煤电厂 SO_2 、 NO_x

基金项目: 国家能源局基金资助项目 (No. 20090417)

Supported by the National Resource Bureau's Fund (No. 20090417)

作者简介: 王圣 (1973—), 男, 高级工程师, E-mail: wangsheng9999@126.com; * 通讯作者 (责任作者)

Biography WANG Sheng (1973—), male, senior engineer, E-mail: wangsheng9999@126.com; * **Corresponding author**

排放量减少同步 (Jiang 2005). PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{1.0}$ 分别指的是空气动力学直径小于或等于 $10\ \mu m$ 和 $1.0\ \mu m$ 的大气颗粒物, 其中 PM_{10} 也称为可吸入颗粒物, $PM_{2.5}$ 属于细微颗粒.

燃煤发电产生的可吸入颗粒物已经成为大气污染物的重要来源 (Xu *et al.*, 2006; Yi *et al.*, 2006), 并且颗粒物粒径越小其成分越复杂, 更易于富集空气中的有毒重金属、酸性氧化物和有机污染物, 从而导致城市人群患病率和死亡率增加, 现在已经引起国内外研究者的广泛关注 (Tucker 2000; Lee *et al.*, 2004; Yi *et al.*, 2008; Xavier *et al.*, 2001; Sbss *et al.*, 2000). 美国于 1997 年制定了 $PM_{2.5}$ 的环境空气质量标准, 该标准规定 $PM_{2.5}$ 的日均浓度和年均浓度的限值分别为 $65\ \mu g\ m^{-3}$ 和 $15\ \mu g\ m^{-3}$, 并在 2006 年修订了 $PM_{2.5}$ 日均值限值严格到 $35\ \mu g\ m^{-3}$, 2009 年 2 月, 联邦政府要求美国环保署制定更加严格的细颗粒物的环境空气质量标准 (Li 2009), 但我国尚未制定 $PM_{2.5}$ 的相关环境空气质量标准 (Yang *et al.*, 2000).

目前国内对于大气中细颗粒物的研究主要集中于区域环境中的分布状况、环境中可吸入颗粒物来源解析、污染特征以及影响因素等 (Zhang *et al.*, 1998; Yu *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2000; Liu *et al.*, 2004; Yan 2008), 这些研究主要还是以实验室数据为基础, 基于现场实测的覆盖多装机范围的燃煤电厂细颗粒物排放资料还非常少. 控制燃煤电厂的细颗粒物排放是控制大气可吸入颗粒物污染的重要途径之一 (Wang *et al.*, 2007), 对燃煤电厂锅炉细颗粒物排放进行实测研究可以准确了解燃煤电厂细颗粒物排放特性, 对我国“十二五”期间细颗粒物排放标准、质量标准的制定以及对燃煤电厂细颗粒物控制技术提供可靠资料. 本研究以我国某地区 6 个典型燃煤电厂为对象, 依据现场实测数据计算分析

其细颗粒物排放特性, 并给出不同装机等级燃煤电厂中 $PM_{2.5}$ 排放特征, 得出排放因子并与国外进行比较.

2 研究目的与方法 (Research purpose and method)

2.1 研究目的

选取装机等级从 125 ~ 1000MW 具有代表性的 6 个燃煤电厂, 受检电厂除尘方式均采用静电除尘器, 脱硫方式均采用湿法脱硫. 对其烟尘中 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 含量以及去除率进行测试, 在实测的基础上分析得出燃煤电厂 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的排放特性.

2.2 仪器及方法

烟尘采样采用 WY-1 型冲击式尘粒分级仪, 测量范围为 $1.3 \sim 14.7\ \mu m$, 按照国标 GB5468-91 规定的等速采样过滤称重法进行, 同时记录烟气温度、含氧量、湿度等数据. 该仪器通过逐级提高含尘气流速度通过各级板上的喷孔 (孔径逐级缩小), 惯性大的尘粒逐级脱离流线撞击到捕集板上. 这样把不同大小的尘粒分别捕集到捕集板上, 即可得到 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 的重量分布.

采样点分别设在各电厂除尘器的进口、脱硫的出口, 分别代表无控状态下锅炉排放的颗粒物及控制后排入大气的颗粒物. 使用前将分级仪用超声波清洗器进行清洗, 每级接尘板的最大容尘量可达 100mg 左右, 测试最高浓度可达 $30\ g\ Nm^{-3}$. 采样后所有的尘粒送至实验室冷却至室温进行称重.

3 研究结果分析 (Research result analysis)

3.1 实验煤种及检测工况

对现场实测的 6 个电厂编号依次为 A ~ F, 6 个电厂均装有湿法脱硫及静电除尘设备, 没有 SCR 脱硝装置. 电厂装机容量、检测期间发电负荷、烟气流等工况参数见表 1.

表 1 各受检电厂工况参数

Table 1 Operation parameters of all examined coal-fired power plants

电厂	燃煤量 / ($t\ h^{-1}$)	装机容量 / MW	发电负荷 / MW	烟气流 / ($m^3\ h^{-1}$)	除尘设备	脱硫设备
A	35	125	100	4.35×10^5	双室三电场	
B	90	215	198	7.50×10^5	双室三电场	石灰石-石膏
C	100	300	250	10.01×10^5	双室三电场	湿法脱硫
D	205	600	490	17.91×10^5	四室五电场	
E	200	600	600	17.35×10^5	双室四电场	
F	250	1000	850	21.69×10^5	三室五电场	

现场对各个电厂燃煤煤质进行了分析, 分析结果见表 2

表 2 各受检电厂燃煤煤质分析

Table 2 Approximate analysis of coal quality for all examined coal-fired power plants

电厂	煤种	全水分	收到基灰分	干基挥发份	全硫(干基)	固定碳	低位收到基发热量 $Q_{\text{net,ar}}/(\text{MJ kg}^{-1})$
A	淮南煤	12.66%	23.85%	30.56%	0.92%	45.53%	20.85
B	大同煤	11.9%	21.98%	36.53%	1.08%	48.02%	19.60
C	富动 24(内蒙)	12.0%	16.17%	32.93%	0.96%	53.06%	22.23
D	澳大利亚 + 澳煤		16.56%	29.67%	0.65%	52.31%	24.02
	平三(山西) 平三煤	10.5%	26.53%	28.12%	1.20%	43.52%	19.47
E	神混 1 [#] (山西+陕西)	16.7%	11.66%	33.11%	0.94%	49.43%	22.72
F	山西神木煤	15.8%	13.56%	32.89%	1.02%	46.32%	21.23

检测工况保证机组负荷 $\geq 80\%$, 且最大波动幅度不超过 5%. 检测期间, 煤种、煤质基本不变, 燃料配比不变, 且锅炉及除尘、脱硫系统保证正常运行情况下, 同时测定除尘器及脱硫设备的主要性能参数如下: 烟气含氧量、烟气流量、烟尘排放浓度等.

3.2 燃煤电厂烟尘总除尘效率

6个受检燃煤电厂现场检测结果及总除尘效率见表 3. 除尘器入口及脱硫出口分别表示燃煤产生的烟气无控状态和处理后的检测位置.

表 3 各受检电厂检测结果及总除尘效率

Table 3 Test result and total dust removal efficiencies of all examined coal-fired power plants

电厂	烟气含氧量	烟气流量	烟尘浓度	烟尘排放量 $/(\text{kg h}^{-1})$	除尘效率
		(干标, 6% O_2) $/ (\text{m}^3 \text{h}^{-1})$	(干标, 6% O_2) $/ (\text{mg m}^{-3})$		
A	除尘器入口	6.15%	4.12×10^5	5304.94	99.75%
	脱硫出口	7.32%	4.35×10^5	13.48	
B	除尘器入口	6.14%	7.15×10^5	11285.14	99.75%
	脱硫出口	6.42%	7.50×10^5	27.80	
C	除尘器入口	5.54%	9.33×10^5	13189.46	99.81%
	脱硫出口	5.87%	10.01×10^5	25.68	
D	除尘器入口	4.94%	17.81×10^5	24534.33	99.86%
	脱硫出口	5.65%	17.91×10^5	37.13	
E	除尘器入口	5.18%	17.24×10^5	20605.87	99.85%
	脱硫出口	5.39%	17.35×10^5	31.26	
F	除尘器入口	4.32%	21.48×10^5	32200.58	99.88%
	脱硫出口	4.87%	21.69×10^5	39.02	

从表 3可以看出, 电厂静电除尘及湿法脱硫设备对烟尘总除尘效率最高为 99.88%, 最低为 99.75%, 平均除尘效率为 99.82%. 结合表 1中各电厂除尘设备可以得出, 除尘效率的高低与静电除尘方式有很大关系, 而总除尘效率还与湿法脱硫的除尘效果有关.

3.3 烟尘排放控制前后 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 分布规律及去除率

表 4所示为受检电厂除尘器入口和脱硫出口处检测到的 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 分布情况及去除率.

6个受检电厂通过静电除尘、脱硫之后, 对 PM_{10} 的去除率为 98.88% ~ 99.62%, 平均为 99.29%; 对 $\text{PM}_{2.5}$ 的去除率为 95.68% ~ 98.47%, 平均为 97.41%. 郝吉明等 (Hao et al., 2008) 研究表明, 2004~2005年期间现场实测的 5个煤粉炉电厂通过静电除尘、脱硫之后, 对 PM_{10} 的去除率为 98.20% ~ 99.76%, 平均为 98.92%; 对 $\text{PM}_{2.5}$ 的去除率为 95.58% ~ 99.16%, 平均为 97.26%, 与本文研究结论相近. 可以得到, 电厂的除尘设备对 PM_{10} 以上的颗粒物的去除率较高, 相比而言对粒径较小的烟尘的去除率并不高. 刘建忠等 (2003) 对 410

t h⁻¹的电厂锅炉(对应装机等级为 88.5MW)静电除尘器前后细灰组成进行测试,研究表明,除尘后 PM₁₀和 PM_{2.5}占总灰的比例为 92.47%和 35.56%,比除尘器前有大幅度提高, PM_{2.5}去除率为 90.6%. 与本研究相比,装机等级以及配套的除尘、脱硫设施的先进水平对 PM₁₀和 PM_{2.5}的去除率影响很明显.

表 4 控制前、后的 PM₁₀、PM_{2.5}分布情况及其去除率

Table 4 Distribution characteristics of and removal efficiencies of PM ₁₀ and PM _{2.5} between the fore-and-aft control						
电厂	采样位置	PM ₁₀ /TSP	PM _{2.5} /TSP	PM _{2.5} /PM ₁₀	PM ₁₀ 去除率	PM _{2.5} 去除率
A	除尘器入口	20.93%	2.84%	13.57%	98.88%	95.68%
	脱硫出口	92.06%	48.22%	52.38%		
B	除尘器入口	22.08%	3.51%	15.90%	98.93%	97.11%
	脱硫出口	95.90%	41.22%	42.99%		
C	除尘器入口	23.01%	3.56%	15.47%	99.26%	97.41%
	脱硫出口	87.54%	47.31%	54.04%		
D	除尘器入口	34.89%	4.14%	11.87%	99.61%	98.47%
	脱硫出口	89.23%	41.96%	47.02%		
E	除尘器入口	23.89%	3.19%	13.35%	99.41%	97.73%
	脱硫出口	93.47%	47.79%	51.13%		
F	除尘器入口	28.77%	3.09%	10.74%	99.62%	98.03%
	脱硫出口	91.24%	50.31%	55.14%		

注: TSP为总悬浮颗粒物.

3.4 排放因子计算及其与国外水平比较

得到的最终的烟尘、PM₁₀和 PM_{2.5}排放量数据.

3.4.1 排放因子 表 5所示为 6个受检电厂测试

表 5 各受检电厂烟尘、PM₁₀和 PM_{2.5}的排放量及排放因子

Table 5 Dust, PM ₁₀ and PM _{2.5} emission and emission factor of all examined coal-fired power plants									
电厂	烟尘排放量 /(kg h ⁻¹)	PM ₁₀ 排放量 /(kg h ⁻¹)	PM _{2.5} 排放量 /(kg h ⁻¹)	烟尘排放因子 /(kg t ⁻¹)	PM ₁₀ 排放因子 /(kg t ⁻¹)	PM _{2.5} 排放因子 /(kg t ⁻¹)	烟尘排放因子 /(kg MW h ⁻¹)	PM ₁₀ 排放因子 /(kg MW h ⁻¹)	PM _{2.5} 排放因子 /(kg MW h ⁻¹)
A	13.48	12.41	6.50	0.3852	0.3545	0.1858	0.1348	0.1241	0.0650
B	27.80	26.66	11.46	0.3089	0.2962	0.1273	0.1236	0.1185	0.0576
C	25.68	22.48	12.15	0.2568	0.2248	0.1215	0.1216	0.1065	0.0509
D	37.13	33.13	15.58	0.1811	0.1616	0.0760	0.0654	0.0611	0.0313
E	31.26	29.22	14.94	0.1563	0.1461	0.0747	0.0599	0.0534	0.0251
F	39.02	35.60	19.63	0.1561	0.1424	0.0785	0.0459	0.0419	0.0231

结合表 1的燃煤量 (t h⁻¹)和发电负荷 (MW)即可得到单位燃煤量及单位发电量的排放因子,如图 1所示.

由图 1可以看出,随着机组容量的增加,各电厂烟尘、PM₁₀和 PM_{2.5}的排放因子总体上有下降的趋势,且三者变化趋势一致,说明各电厂烟尘、PM₁₀和 PM_{2.5}排放因子的大小与装机等级与除尘设备有关,另外与煤质也有一定关系.

同等级装机的 D 和 E 电厂,负荷率分别为 81.7%和 100%,比较两电厂单位发电量的排放因子可以看出,负荷率越大其单位发电量的排放因子则相对越小.

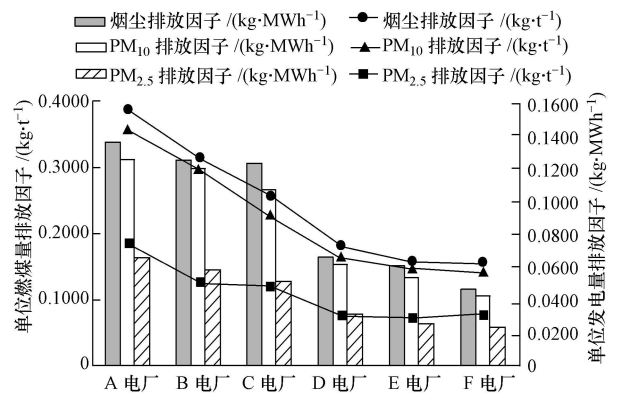


图 1 各受检电厂烟尘、PM₁₀和 PM_{2.5}的排放因子比较

Fig. 1 Dust, PM₁₀ and PM_{2.5} emission factor comparison of all examined coal-fired power plants

3.4.2 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 排放因子与国外水平比较

F. Goodarzi (Goodarzi 2006) 测试研究了加拿大 3 个燃煤电厂 (均采用静电除尘) 的颗粒物排放情况, 排放浓度范围为 $9.9 \sim 53.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (干标), 单位发电量的烟尘排放因子为 $0.039 \sim 0.118 \text{ kg} \cdot \text{MW}^{-1}$, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的排放因子范围分别为 $0.048 \sim 0.057 \text{ kg} \cdot \text{MW}^{-1}$ 、 $0.011 \sim 0.013 \text{ kg} \cdot \text{MW}^{-1}$. 本研究 6 个受检电厂的出口烟尘浓度为 $17.99 \sim 37.07 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (干标, $6\% \text{ O}_2$), 与加拿大电厂的烟尘排放浓度有较好可比性. 6 个受检电厂单位发电量烟尘排放因子范围为 $0.0459 \sim 0.1348 \text{ kg} \cdot \text{MW}^{-1}$, 稍大于加拿大 3 个电厂的排放因子水平; PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的排放因子范围分别为 $0.0419 \sim 0.1241 \text{ kg} \cdot \text{MW}^{-1}$ 、 $0.0231 \sim 0.0650 \text{ kg} \cdot \text{MW}^{-1}$, 远大于后者.

以受检电厂的灰分为变量, 使用美国环保署颁布的《空气污染物排放系数汇编 (AP-42)》中颗粒物排放因子计算公式, 得到烟尘、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的单位燃料排放因子范围分别为 $0.1166 \sim 0.2385 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 、 $0.0758 \sim 0.1550 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 、 $0.0350 \sim 0.0716 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$, 6 个受检电厂烟尘、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 实测排放因子范围分别为 $0.1561 \sim 0.3852 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 、 $0.1424 \sim 0.3545 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 、 $0.0747 \sim 0.1858 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$. 相比而言, 单位燃料的烟尘实际排放因子稍大于美国燃煤电厂排放因子, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的排放因子则远大于后者.

通过比较得到, 我国典型电厂的烟尘排放因子稍大于加拿大 3 个电厂的排放水平以及美国电厂排放水平, 但是 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的排放因子却远大于后者. 这与我国当前火电厂烟尘控制水平高, 但对火电厂排放的细颗粒物尚没有控制排放标准, 尚没有得到较好控制是一致的.

4 结论 (Conclusion)

1) 电厂静电除尘及湿法脱硫设备对烟尘总除尘效率最高为 99.88% , 最低为 99.75% , 平均除尘效率为 99.82% .

2) 除尘前, 烟气中 PM_{10} 含量范围为 $20.93\% \sim 34.98\%$, 平均为 25.60% , $PM_{2.5}$ 含量范围为 $2.84\% \sim 4.14\%$, 平均为 3.39% . 经过除尘器和脱硫设备后, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 在 TSP 中的比例分别变为 $87.54\% \sim 95.90\%$, $41.22\% \sim 50.31\%$, 平均值分别为 91.57% 和 46.14% .

3) 经过除尘和脱硫之后, $PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 的含量

由 $10.74\% \sim 15.90\%$ 提高到 $42.99\% \sim 55.14\%$, 平均值由 13.48% 提高到 50.45% .

4) 通过除尘、脱硫之后, 6 个受检电厂对 PM_{10} 的去除率为 $98.88\% \sim 99.62\%$, 平均为 99.29% ; 对 $PM_{2.5}$ 的去除率为 $95.68\% \sim 98.47\%$, 平均为 97.41% .

5) 随着机组容量的增加, 各电厂烟尘、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的排放因子总体上有下降的趋势, 且三者变化趋势一致. 同等级装机的燃煤电厂, 负荷率越大其单位发电量的排放因子则相对越小.

6) 与国外燃煤电厂相比, 6 个受检电厂单位发电量与单位燃料烟尘排放因子范围分别为 $0.0459 \sim 0.1348 \text{ kg} \cdot \text{MW}^{-1}$ 、 $0.1561 \sim 0.3852 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$, 均稍大于加拿大和美国电厂的排放因子水平; PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 单位发电量的排放因子范围分别为 $0.0419 \sim 0.1241 \text{ kg} \cdot \text{MW}^{-1}$ 、 $0.0231 \sim 0.0650 \text{ kg} \cdot \text{MW}^{-1}$, 单位燃料排放因子分别为 $0.1424 \sim 0.3545 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 、 $0.0747 \sim 0.1858 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$, 均远大于加拿大和美国电厂的排放因子水平.

8) 这与我国当前火电厂烟尘控制水平高, 但对火电厂排放的细颗粒物尚没有控制排放标准, 尚没有得到较好控制是一致的.

责任作者简介: 王圣 (1973—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事电力环评、规划环评、电力环境保护等方面的研究, 已在国内外期刊及重要会议发表论文 75 篇. E-mail wangsheng999@126.com.

参考文献 (References):

- Goodarzi F. 2006. The rates of emissions of fine particles from some Canadian coal-fired power plants [J]. *Fuel* 85: 425-433
- 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. 70-76
- Hao J M, Duan L, Yi H H, et al. 2008. Physical and chemical characteristics of inhalable particulates for combustion source [M]. Beijing: Science Press. 70-76 (in Chinese)
- 江刚. 2005. 美国 $PM_{2.5}$ 水平下降 [J]. *中国环境科学*, 25 (3): 309-309
- Jiang G. 2005. Emission level has decreased of $PM_{2.5}$ in USA [J]. *China Environmental Science*, 25 (3): 309-309 (in Chinese)
- Lee S W, He I, Young B. 2004. Important aspects in source $PM_{2.5}$ emissions measurement and characterization from stationary combustion systems [J]. *Fuel Processing Technology*, 85: 687-699
- 李英杰. 2009 美国 EPA 重新审定空气质量标准 [J]. *中国环境科学*, 29 (8): 891-891
- Li Y J. 2009. USA EPA redesigns air quality standard [J]. *China Environmental Science*, 29 (8): 891-891 (in Chinese)

- 刘建忠, 范海燕, 周俊虎, 等. 2003 煤粉炉 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 排放规律的试验研究 [J]. 中国电机工程学报, 23(1): 145-149
- Liu J Z, Fan H Y, Zhou J H, *et al*. 2003. Experimental studies on the emission of PM_{10} and $PM_{2.5}$ from coal-fired boiler [J]. Proceeding of the CSEE, 23(1): 145-149 (in Chinese)
- 刘泽常, 王志强, 李敏, 等. 2004 大气可吸入颗粒物研究进展 [J]. 山东科技大学学报 (自然科学版), 23(4): 97-100
- Liu Z C, Wang Z Q, Li M, *et al*. 2004. Progress of study on respirable particles in atmosphere [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 23(4): 97-100 (in Chinese)
- Sloss L L, Smith I M. 2000 PM_{10} and $PM_{2.5}$: an international perspective [J]. Fuel Processing Technology, 65/66: 127-141
- Tucker W G. 2000. An overview of $PM_{2.5}$ sources and control strategies [J]. Fuel Processing Technology, 65/66: 379-392
- 王鹏, 骆仲决, 徐飞, 等. 2007 复合式静电除尘器脱除电厂排放 $PM_{2.5}$ 研究 [J]. 环境科学学报, 27(11): 1789-1792
- Wang P, Luo Z Y, Xu F, *et al*. 2007. $PM_{2.5}$ removal from coal-fired power plant with combined ESP and pulse charge pretreatment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 27(11): 1789-1792 (in Chinese)
- 王玮, 汤大钢, 刘红杰, 等. 2000 中国 $PM_{2.5}$ 污染状况和污染特征的研究 [J]. 环境科学研究, 13(1): 1-5
- Wang W, Tang D G, Liu H J *et al*. 2000. Research on current pollution status and pollution characteristics of $PM_{2.5}$ in China [J]. Research of Environmental Sciences, 13(1): 1-5 (in Chinese)
- Xavier Q, Andres A, Sergio R, *et al*. 2001. PM_{10} and $PM_{2.5}$ source apportionment in the Barcelona Metropolitan area Catalonia Spain [J]. Atmospheric Environment, 35: 6407-6419
- 徐鸿, 宋凯, 雷小云, 等. 2006 200MW 机组电除尘器可吸入物排放控制试验研究 [J]. 热力发电, (10): 37-39
- Xu H, Song K, Lei X Y, *et al*. 2006. Test study on emission control of absorbable particles into electrostatic precipitators for 200MW unit [J]. Thermal Power Generation, (10): 37-39 (in Chinese)
- 颜芬. 2008 综述城市大气中 $PM_{2.5}$ 的污染 [J]. 广东科技, (2): 212-213
- Yan F. 2008. Review about $PM_{2.5}$ pollution in urban atmosphere [J]. Guangdong Science & Technology, (2): 212-213 (in Chinese)
- 杨复沫, 马永亮, 贺克斌. 2000 细微大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 及其研究概况 [J]. 世界环境, (4): 32-34
- Yang F M, Ma Y L, He K B. 2000. A brief introduction to $PM_{2.5}$ and related Research [J]. World Environment, (4): 32-34 (in Chinese)
- Yi H H, Hao J M, 2008. Fine particle and trace element emissions from an anthracite coal-fired power plant equipped with a bag-house in China [J]. Fuel, 87: 2050-2057
- 易红宏, 郝吉明, 段雷, 等. 2006 电厂除尘设施对 PM_{10} 排放特性的影响 [J]. 环境科学, 27(10): 1921-1927
- Yi H H, Hao J M, Duan L, *et al*. 2006. Influence of dust catchers on PM_{10} emission characteristics of power plants [J]. Environmental Science, 27(10): 1921-1927 (in Chinese)
- 俞新华, 焦荔, 包贞, 等. 2008 杭州市区大气能见度变化趋势及其与主要污染物相关性分析 [J]. 环境污染与防治, 30(12): 106-108
- Yu X H, Jiao L, Bao Z, *et al*. 2008. Atmospheric visibility change tendency and correlation analysis with main pollutants in Hangzhou [J]. Environmental Pollution and Control, 30(12): 106-108 (in Chinese)
- 张晶, 陈宗良, 王玮. 1998 北京市大气小颗粒物的污染源解析 [J]. 环境科学学报, 18(1): 62-67
- Zhang J, Chen Z L, Wang W. 1998. Source apportionment on fine particulates in atmosphere in Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 18(1): 62-67 (in Chinese)
- 张运洲, 张风营, 李德波. 2007 我国未来煤炭供应能力预测研究 [J]. 中国电力, 40(11): 9-14
- Zhang Y Z, Zhang F Y, Li D B. 2007. Study on forecast of future coal supply capability in China [J]. Electric Power, 40(11): 9-14 (in Chinese)