

锅炉烟气中微细颗粒的湿式相变凝聚试验研究

朱立平¹ 谭厚章² 熊英莹^{2*} 惠润堂¹ 许芸¹ 庄柯¹ 张方炜³

(国电环境保护研究院/南京国电环保科技有限公司¹ 南京 210031; 西安交通大学能动学院² 西安 710049; 华北电力设计院工程有限公司³ 北京 100120)

摘要 通过相变凝聚原理,开发了一种特殊的相变凝聚装置;并将其应用到锅炉烟气中微细颗粒凝聚和脱除。通过在工业锅炉尾部加装新型湿式凝聚和除尘装置的工业试验表明:加装湿式相变凝聚装置后,可以有效保证除尘器出口烟尘排放浓度 $\leq 20 \text{ mg/m}^3$,除尘效率在80%以上。

关键词 相变凝聚 微细颗粒物 锅炉 烟气
中图分类号 TK09 X77; 文献标志码 B

燃煤锅炉烟尘排放是大气污染控制的重点。燃煤锅炉烟尘的主要污染物为颗粒物、 SO_2 、 NO_x 等。其中,颗粒物污染尤其是微细颗粒物是大气凝胶的主要构成,会长期停留于城市上空,不但影响空气能见度,而且会吸附多种有害重金属(如 Hg、As、Pb等)和二噁英等有害有机污染物,严重危害人类健康^[1]。

新的《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011)将火电厂烟尘排放限值提高到 30 mg/Nm^3 ,重点地区提高到 20 mg/Nm^3 ^[2]。GB 13223—2011被称作史上“最严格”的标准,最新标准的出台,意味着相关单位面临着更加巨大的减排压力。

1 燃煤锅炉颗粒物控制技术发展现状

目前,对于燃烧引起的颗粒物的总体控制思路是对燃烧源颗粒物的控制,控制途径包括燃烧中颗粒物的形成过程以及燃烧后的烟气控制^[3,4]。燃烧后烟气控制中的传统除尘方法,包括电除尘、布袋除尘等除尘技术,对于脱除 $10 \mu\text{m}$ 以上的大颗粒粉尘很有效;但是对PM10或PM2.5及以下的微细粒子的脱除效率有限。对微细颗粒物控制的总体思路,是使细颗粒物长大再采取其他方式

脱除。微细颗粒物的长大,可以利用电场、声场、磁场、喷入少量化学团聚剂等方法,促进微细颗粒物间的有效碰撞接触后促使其团聚长大;也可以通过喷蒸汽、水雾等方法,在颗粒物表面核化凝结,促使其长大。

2 湿式相变凝聚

开发的湿式相变凝聚技术,利用相变凝聚原理^[5],实现烟气中水汽相变,并通过精确控制其相变度,使水汽在微细颗粒物表面凝结,并同时产生热泳和扩散泳作用,促使细颗粒迁移运动,相互碰撞接触,使细颗粒粒度增大、质量增加,再通过毛细管表面收集。

由于脱硫吸收塔出口烟气中水蒸气均为饱和或接近饱和,通过外部冷源可方便控制烟气中水蒸气相变,配置先进模糊数学协调控制装置,控制其相变度,从而达到凝水、均流作用。若布置在湿式静电除尘器前,将能大幅度改善进入湿式除尘器气流均匀性、同时提前脱除大的石膏颗粒、凝结出大量烟气中含水。

经过近三年的小试及中试研究,现已成功在某 35 t/h 燃煤工业锅炉上进行了工程应用,取得了较好的凝聚及除尘效果,运行状况良好。

3 结构及主要技术性能参数

改造对象是某HL35-4.57/250型链条锅炉,配有陶瓷多管除尘器,湿法脱硫装置,烟尘排放浓度为 80 mg/m^3 。

改造方案如图1所示,改造时,保持原有多管

2014年12月2日收到

* 通信作者简介:熊英莹(1979—)女,博士研究生。研究方向:电厂污染物排放控制、煤炭及生物质燃烧技术。E-mail: 20872193@qq.com。

陶瓷除尘设备及脱硫吸收塔不动,改造脱硫塔出口至烟囱的水平烟道,并安装湿式相变凝聚装置。整个湿式相变凝聚装置分为湿式相变凝聚器本体、冷却水循环系统、控制系统、PLC 系统、连接管线等几部分组成。图 2、图 3 为改造前后现场。

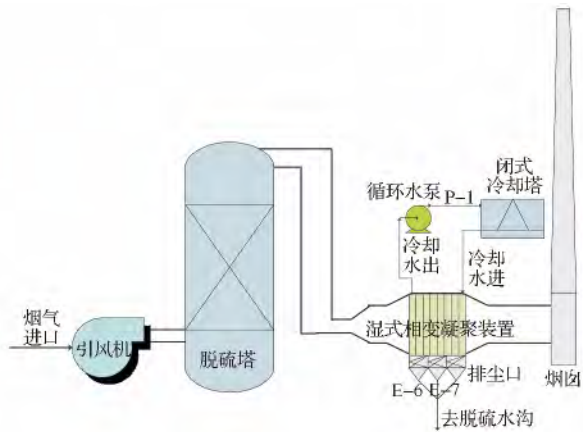


图 1 改造方案
Fig. 1 Retrofit scheme



图 2 改造前现场
Fig. 2 The scene before modification



图 3 改造后现场
Fig. 3 The scene after modification

相变凝聚装置主要技术参数如表 1 所示。

表 1 主要技术参数

Table 1 Main technical parameters				
序号	项目	单位	主要技术参数	备注
1	处理烟气量	m ³ /h	80 000	
2	出口粉尘排放	mg/m ³	<20	GB 13271—2013
3	烟气温度	℃	50~55	
4	系统阻力	Pa	100~300	新增
5	设备规格	m × m × m	2.5 × 2.0 × 2.2	长 × 宽 × 高
6	烟气流通截面积	m ²	约 5	
7	入口粉尘浓度	mg/m ³	<80	
8	凝聚指数	/	≥2	
9	清灰方式	/	自清灰	

4 凝聚实验结果与讨论

在湿式相变凝聚设备的入口、中间部位和出口取样,采集的颗粒物作为样品分别用密封带带回进行分析。分析仪器采用 Mastersizer 2000 激光粒度仪,应用激光衍射法得出颗粒物粒度分布结果如图 4 所示。

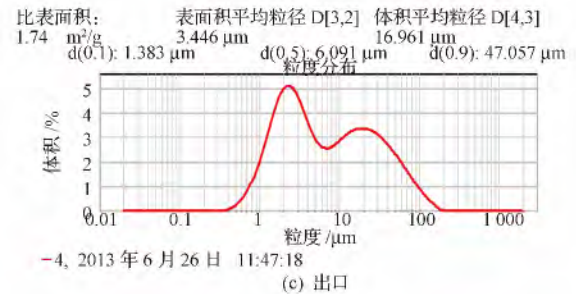
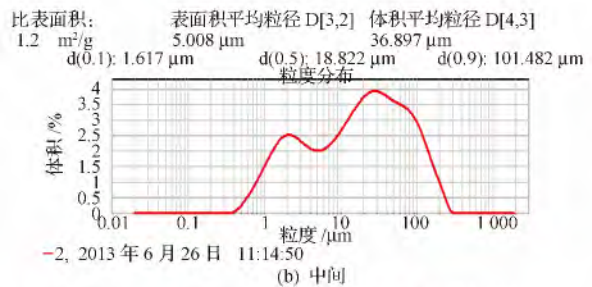
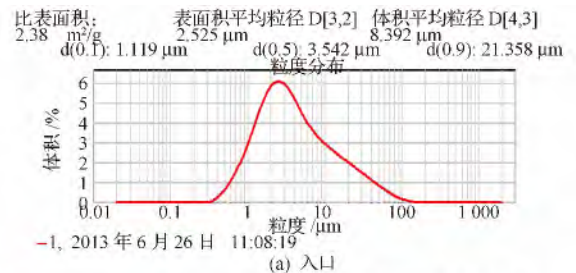


图 4 粒度分析结果

Fig. 4 Grain size analysis results

图 4 显示了湿式相变凝聚设备内部沿着烟气流动方向上各个截面上微细颗粒物的凝聚规律。设备入口颗粒物体积平均粒径 $D = 8.392 \mu\text{m}$, 设备中部 $D = 36.897 \mu\text{m}$, 设备出口 $D = 16.961 \mu\text{m}$ 。

表 2 环境监测站验收结果

Table 2 Environmental monitoring station inspection results

监测断面	监测项目	2013 年 12 月 26 日				2013 年 12 月 27 日			
		第一次	第二次	第三次	日均值	第一次	第二次	第三次	日均值
除尘器 进口断面	标干烟气流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	47 045	47 657	47 341	47 384	47 866	46 821	47 386	47 385
	烟气含氧量/%	11.7	11.5	11.5	11.6	11.4	11.6	11.5	11.5
	实测烟尘浓度/($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	62.9	59.9	59.8	60.9	60.3	70.8	65.2	65.4
	烟尘排放速率/($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	2.96	2.85	2.83	2.88	2.89	3.31	3.09	3.10
	折算烟尘浓度/($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	85.1	77.5	77.4	80.0	78.1	91.6	84.4	84.7
除尘器 出口断面	标干烟气流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	46 362	48 299	45 120	46 594	46 968	47 080	46 499	46 849
	烟气含氧量/%	11.3	11.3	11.3	11.3	11.4	11.4	11.3	11.4
	空气过剩系数	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
	实测烟尘浓度/($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	12.2	10.3	12.4	11.6	14.9	13.1	14.5	14.2
	烟尘排放速率/($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	0.57	0.50	0.56	0.54	0.70	0.62	0.67	0.66
	折算烟尘浓度/($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	14.9	12.6	15.2	14.2	18.2	16.0	17.7	17.3
	除尘效率/%	80.7	82.3	80.2	81.3	75.8	81.3	78.3	78.7
	监测期间锅炉工况	实际出力 30 t/h 生产负荷 100%				实际出力 30 t/h 生产负荷 100%			
评价标准		《西安市燃煤锅炉烟尘和二氧化硫排放限值》(DB 61/534—2011)表 1 中规定二类区 I 时段烟尘最高允许排放浓度限制为 $80 \text{ mg}/\text{m}^3$; 西安市环保局发【2013】48 号《西安市环境保护局关于加快实施燃煤锅炉烟气污染综合治理的通知》要求烟尘排放浓度限值为 $30 \text{ mg}/\text{m}^3$							

为了便于描述设备的凝聚特性,定义凝聚指数: $\eta =$ 凝聚后颗粒物体积平均粒径/原始颗粒物体积平均粒径, η 值越大,表示凝聚性能越好,当 $\eta \geq 3$ 时,表示凝聚器凝聚性能优异。

对于图 4 所示的结果,颗粒物通过湿式相变凝聚设备的凝聚指数 $\eta = 36.967/8.392 = 4.4$,说明湿式相变凝聚设备的凝聚性能优异。

5 运行情况及检测结果

该湿式相变凝聚设备自 2013 年 11 月份投运至今,运行稳定,除尘效果良好。长期监控尾部烟尘排放达到 $\leq 20 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。

2013 年 12 月 31 日,西安市环境监测站对该设备进行进行了“建设项目竣工环境保护验收监测”(西环监测字[2003]0087 号)。验收结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出,加装湿式相变凝聚设备后,可以有效保证除尘器出口烟尘排放浓度 $\leq 20 \text{ mg}/\text{m}^3$,平均除尘效率在 80% 以上。

保守估计,按进口烟气粉尘平均浓度 $65 \text{ mg}/\text{m}^3$ 计算,改后粉尘排放浓度按 $20 \text{ mg}/\text{m}^3$ 计算,35 t/h 的燃煤工业锅炉年均减排粉尘可达 191.8 t 以上/年,环境效益良好。具体数据见表 3。

6 结论

(1) 开发了一种新型的湿式凝聚装置,通过在燃煤锅炉尾部安装后,除尘效果很好,平均除尘效率大于 80%。

(2) 实验显示:颗粒物通过该湿式相变凝聚设

备的凝聚指数 $\eta = 4.4$,说明湿式相变凝聚设备的凝聚性能优异。

表 3 烟气中微细颗粒物脱除量

Table 3 Fine particulate matter removal volume in flue gas

序号	项目	单位	指标
1	年运行时间	h	7 200 (按 300 d 满负荷计算)
2	处理锅炉烟气量 (单台炉)	m^3/h	80 000
3	烟气温度	$^{\circ}\text{C}$	55
4	原始粉尘排放	mg/m^3	65
5	改后粉尘排放	mg/m^3	小于 20
6	微细粉尘脱除量	t/a	191.8

(3) 采用这种新型除尘技术,成本低、效果好,完全可以满足锅炉最新的烟尘排放 $\leq 20 \text{ mg}/\text{m}^3$ 国家新标准。

(4) 该装置应用后,该厂厂区周围地区的大气污染状况得到了很好地改善,减轻了微细粉尘排放给该地区带来的“雾霾”影响。

参 考 文 献

- 王 臻,王 辰. 可吸入颗粒物对呼吸系统危害的研究进展. 国外医学 2004; 24(04): 231—233
Wang Z, Wang C. The research progress of particulate matter harmful to respiratory system. Foreign Medical Sciences Section of Respiratory System, 2004; 24(04): 231—233
- 火电厂大气污染物排放标准(GB 13223—2011). 2011
Power plant air pollutant emission standards(GB 13223—2011). 2011
(下转第 215 页)

153—167

Gao J P. Foundation of electromagnetic engineering. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press 2008: 153—167

- 6 田 森. 复杂涂覆目标高频电磁散射特性研究. 南京: 南京航空航天大学 2012

Tian S. Research of electromagnetic characteristics of complex coated

targets using high frequency methods. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012

- 7 程守洙, 江之永. 普通物理学. 北京: 高等教育出版社, 2006: 140—141

Cheng S Z, Jiang Z Y. General physics. Beijing: Higher Education Press, 2006: 140—141

Research on Multilayer Dielectric Reflection Coefficient Based on Optical Laws

LI Xu, GAO Wen-kun, GU Liang-xian, GONG Chun-lin

(National Key Laboratory of Aerospace Flight Dynamics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China)

[Abstract] Starting with the law of reflection and refraction of electromagnetic waves, an approximate reflection coefficient of multilayer medium is derived, and the relationship between reflection coefficient multilayer media and two layer of reflection coefficient are given. There is a difference between the reflection approximate coefficient with the one derived from Maxwell equations, which comes from the single reflection assumption. Finally the simulation calculation of three layer radar absorbing material (RAM, Radar Absorbing Material) reflection coefficient is performed, and the relationship between reflection coefficient versus incident angle and polarization mode is analysed.

[Key words] electromagnetic waves multilayer dielectric reflection coefficient

(上接第 212 页)

- 3 张 磊, 李彦涛, 艾 华, 等. 燃煤锅炉烟气微细颗粒物控制技术. 工业安全与环保, 2012; 38(6): 28—30

Zhang L, Li Y T, Ai H, et al. The control of fine particulates for coal-fired boiler. Industrial Safety and Environmental Protection, 2012; 38(6): 28—30

- 4 韩晶晶, 王丽萍, 李 杰. 燃煤电厂烟气高效除尘技术的选择及应用. 环境科学与管理, 2011; 36(1): 86—89

Han J J, Wang L P, Li J. Selection and application of coal-fired pow-

er plant flue gas efficient dust removal technology. Environmental Science and Management, 2011; 36(1): 86—89

- 5 刘凤云, 张秀娟. 对固定污染源排气中颗粒物测定的新思考——以可凝结颗粒物为例. 科技信息, 2011; (20): 393—394

Liu F Y, Zhang X J. For stationary sources exhaust particulate matter in the determination of new thinking—in a condensed particles, for example. Science & Technology Information, 2011; (20): 393—394

Experimental Research on Wet Phase Change Condensation of Fine Particle in Boiler Flue Gas

ZHU Li-ping¹, TAN Hou-zhang², XIONG Ying-ying^{2*}, HUI Run-tang¹,
XU Yun¹, ZHUANG Ke¹, ZHANG Fang-wei³(Nanjing Guodian Environmental Protection Technology Co., Ltd¹, Nanjing 210031, P. R. China;
School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University², Xi'an 710049, P. R. China;
North China Power Engineering Co. Ltd³, Beijing 100120, P. R. China)

[Abstract] Theory of wet phase change condensation and experimental research of fine particle condensation in boiler flue gas are introduced. With the wet phase change condensation equipment, particle emission concentration at the exit of dust remover could be controlled lower than 20 mg/m³, and the dedusting efficiency is over 80%.

[Key words] phase change condensation fine particle boiler flue gas