

湿式相变凝聚技术协同湿式电除尘器 脱除微细颗粒物研究

谭厚章¹ 熊英莹² 王毅斌¹ 曹瑞杰¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 热流科学与工程教育部重点实验室, 西安 710049;
2. 山西大学动力工程系, 太原 030006)

摘要 针对传统除尘设备对 0.1~2 μm 微细颗粒物的超低脱除能力, 本文首次提出了将湿式相变凝聚除尘与湿式静电除尘两者结合, 以强化微细颗粒之间的团聚与长大而实现高效脱除的新型除尘方法。基于饱和烟气中可凝结气体的强制相变冷凝作用原理, 同时考虑惯性、拦截、布朗扩散和热泳力作用等综合脱除机制, 自行开发与设计了湿式相变凝聚器。该装置协同湿式电除尘器在江苏省某 600 MW 机组进行了工程化示范研究, 并采用低压撞击器得到了凝聚器开关状态下系统进、出口的颗粒物粒度分布。结果表明: 饱和烟气的相变冷凝与柔性管排的合理布置可明显提高微细颗粒物的凝聚效果; 加装湿式相变凝聚器可以显著增加微细颗粒物的脱除效率, 同时能够保证系统出口颗粒物排放浓度小于 2 mg·m⁻³。该技术的提出为燃煤烟气的“近零排放”指出了新的发展方向。

关键词 湿式相变凝聚; 湿式电除尘器; 微细颗粒物; 脱除

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2016)12-2710-05

Investigation on Fine Particulate Matters Removal by Using Wet Phase Transition Agglomeration Technology Cooperated With Wet Electro Static Precipitator

TAN Hou-Zhang¹ XIONG Ying-Ying² WANG Yi-Bin¹ CAO Rui-Jie¹

(1. MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Power Engineering Department, Shanxi university, Taiyuan 030006)

Abstract Aiming at the lower removal efficiency of traditional dust removing equipment for fine particulate matters with diameter of 0.1~2 μm, a new removal technology on combining the wet phase transition agglomeration with wet electrostatic precipitator, to enhance the agglomeration and growing up of fine particles, was proposed at first time. The wet phase transition agglomeration device was self-designed, based on the forced condensation principle of flue gas and considering the coupling effect of inertial, intercept, brown diffusion and thermophoresis force on removing particles. The agglomeration device has been applied to a 600 MW coal-fired power plant in Jiangsu Province. The particle size distribution at the inlet and outlet was tested by using Dekati Low Pressure Impactor (DLPI) when the agglomeration device was on or off. The results showed that the condensation of the saturated flue gases, and the optimal arrangement of fluoroplastic tubes could improve significantly the agglomeration of fine particles. The higher efficiency of fine particle was obtained when the agglomeration device was applied. The final particle emission concentration of this plant with this agglomeration device was less than 2 mg·m⁻³. The proposed technology would be one of the removal methods to realize the ultra-low emission of particles for coal-fired power plants in future.

Key words wet phase transition agglomeration; wet electrostatic precipitator; fine particulate matter; removal

收稿日期: 2016-03-16; 修订日期: 2016-11-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.91544108, No.51376147)

作者简介: 谭厚章 (1965-), 男, 教授, 博士, 主要从事煤与生物质清洁高效的热化学转化, 燃烧源污染物形成与控制等方面的研究。

0 前言

燃烧过程会产生大量颗粒物, 虽然燃煤锅炉以及工业锅炉均在尾部烟道加装了除尘设备, 但现有传统除尘设备对微细颗粒物, 尤其是中间尺度(0.1~2 μm) 微细颗粒物的脱除效果很差^[1], 亟需建立新型高效的颗粒脱除方法。

目前, 微细颗粒物控制技术的发展方向主要是通过物理或化学作用使其凝聚长大后加以脱除^[2-5]。湿式相变凝聚, 指的是通过饱和烟气相变促进微细颗粒物凝聚长大, 其机理是饱和烟气的相变凝结与微细颗粒物凝聚的协同效应, 过程中产生的热迁移和布朗扩散力促进了微细颗粒物的迁移, 提高了微细颗粒物之间相互碰撞的频率, 最终使微细颗粒物的粒径增大, 质量增加, 进而可以被顺利地脱除。在过饱和烟气环境中, 水蒸气以细颗粒为凝结核发生相变, 使颗粒质量增加、粒度增大, 从而提高惯性捕集效果^[6]。

本研究提出将湿式相变凝聚技术与湿式电除尘器结合以强化细颗粒团聚长大与脱除。将湿式相变凝聚与湿式电除尘器耦合, 湿式相变凝聚器会促进微细颗粒物团聚长大, 再通过湿式电除尘器脱除颗粒物。文中介绍了在江苏省某 600 MW 机组进行的工程化示范研究, 其中由我们自主设计、开发的湿式相变凝聚器与湿式电除尘器协同新型湿法除尘系统已于 2015 年 1 月通过 168 测试, 正常稳定运行。试验研究中采用低压撞击器 (Dekati Low Pressure Impactor, DLPI) 对不同测点的颗粒物取样, 得到系统入口、出口颗粒物的质量分布情况和分级脱除效率。该技术的成功工程化应用为“近零排放”技术指出了新的发展方向。

1 系统介绍

大试机组为 600 MW 超临界变压直流锅炉, 单炉膛、一次再热、平衡通风、露天布置、固态排渣、全钢构架、全悬吊结构 II 型锅炉。示范工程对机组脱硫、除尘进行改造, 在现有吸收塔基础上增加二级吸收塔, 形成双塔双循环系统, 同时拆除 GGH 系统, 并在二级脱硫塔后增设湿法除尘系统 (湿式相变凝聚器以及湿式静电除尘器)。湿式相变凝聚器安装

在湿式电除尘器入口烟道。大试系统图及试验现场情况如图 1 所示。系统主要技术参数见表 1。

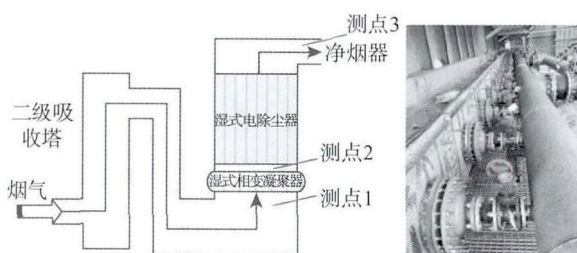


图 1 大试系统及现场安装图

Fig. 1 Installing position of the wet phase transition agglomeration device

表 1 系统主要技术参数

Table 1 Parameter of removing system

序号	项目	主要技术参数
1	处理烟气量/(m^3/h)	2780666
2	入口烟气含尘浓度/(mg/m^3)	<15
3	入口烟气温度/ $^{\circ}\text{C}$	50~57

试验中所用煤种的煤质数据如表 2 所示。

2 湿式相变凝聚原理

湿式相变凝聚器内部排列数量众多的柔性冷凝管排, 它不同于传统的湿式除尘, 不需进行水雾喷淋或冲洗。该装置的颗粒凝聚脱除原理如图 2 所示, 当烟气携带灰颗粒进入凝聚器后, 较大粒径颗粒由于自身惯性和柔性管排与液滴拦截作用而被壁面水膜粘附脱除, 同时柔性管内冷却工质迫使饱和烟气中的水蒸气发生相变, 或直接冷凝为微小雾滴, 增加了局部区域内的雾滴浓度而增强了颗粒间的碰撞概率, 促使微细颗粒物长大与脱除; 或者以微细颗粒为冷凝核发生表面凝结而润湿颗粒, 提高了微细颗粒间的粘附与长大。在惯性、拦截、布朗扩散、热泳和扩散泳等作用下, 促使微细颗粒相互碰撞接触而不断长大, 凝聚后的颗粒物部分随气流冲击在冷凝管上而被脱除, 部分经凝聚器出口进入湿式静电除尘而被脱除。

表 2 煤质数据

Table 2 Composition of coal

全水	收到基水分	收到基灰分	收到基全硫	干燥无灰基挥发分	收到基低位发热量
$M_t/\%$	$M_{ad}/\%$	$A_{ar}/\%$	$S_{t,ar}/\%$	$V_{daf}/\%$	$Q_{net,ar}/\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$
18.29	5.12	15.27	0.80	43.19	19.46

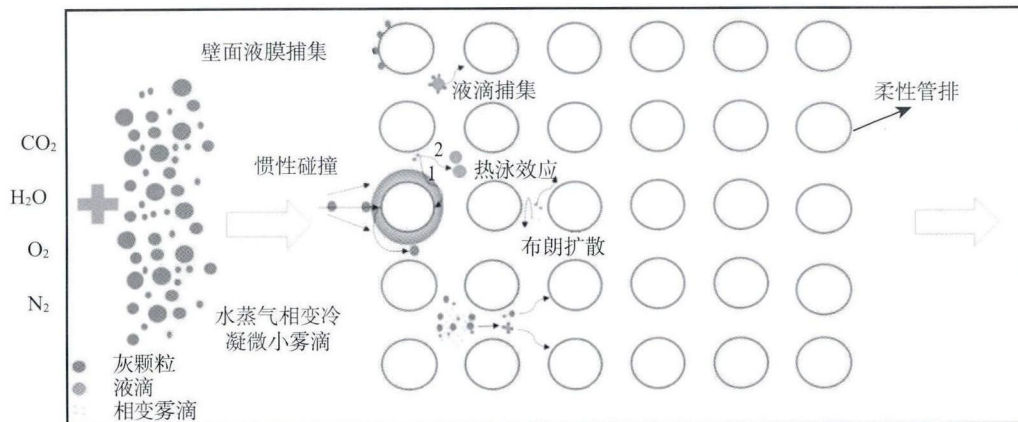


图2 相变凝聚颗粒脱除原理图

Fig. 2 Removing principle of fine particles

3 试验方法

根据现场条件和测试方便, 试验在湿式相变凝聚器入口与出口、湿式电除尘器出口布置三个测点, 测点位置如图 1 所示。在系统负荷稳定、设备正常运行的条件下, 采用低压撞击器对不同测点的颗粒物取样, 得到颗粒物的分布情况和分级脱除效率。为了便于描述湿式相变凝聚器的凝聚特性, 试验中定义凝聚指数 η , 如下所示:

$$\eta = \frac{D_{V1}}{D_{V0}}$$

式中, D_{V1} 为凝聚后颗粒物的体积平均粒径, D_{V0} 为原始颗粒物的体积平均粒径。 η 值越大, 表示颗粒物的凝聚性越好, 当 $\eta \geq 2$ 时, 认为凝聚器凝聚性能优异。

4 结果与分析

4.1 湿式相变凝聚器的凝聚能力试验

在湿式相变凝聚器的入口和出口位置 (测点 1 和 2) 取样, 对采集的颗粒物样品作粒度分析, 分析仪器为 Mastersizer 2000 激光粒度仪, 应用激光衍射法得出相变凝聚器进、出口处的颗粒物粒度分布结果如图 3 所示。由图 3 可以看出, 入口颗粒物的粒度分布呈现峰值在 $0.25 \mu\text{m}$ 和 $2.5 \mu\text{m}$ 处的双峰分布, 且细颗粒的体积分数远大于粗颗粒的体积分数, 说明经过电除尘器和两级脱硫吸收塔后烟气中的大颗粒基本已经被清除, 剩余的颗粒物主要以亚微米级微细颗粒物为主; 凝聚器出口颗粒物粒度分布为峰值在 $1.5 \mu\text{m}$ 和 $25 \mu\text{m}$ 的双峰分布, 且粗颗粒的体积峰值远大于细颗粒。这说明湿式相变凝聚器对亚微米级微细颗粒物有较好的凝聚效果, 经过相变凝聚

过程后, 成为便于脱除的大颗粒, 很好地解决了传统除尘设备应对微细颗粒物的难题。

试验测得湿式相变凝聚器入口体积平均粒径 $D_{V0}=1.34 \mu\text{m}$, 出口的体积平均粒径 $D_{V1}=4.25 \mu\text{m}$, 得到此时的凝聚指数 $\eta=3.17$ 。从结果可以看出, 湿式相变凝聚器的凝聚性能优异。

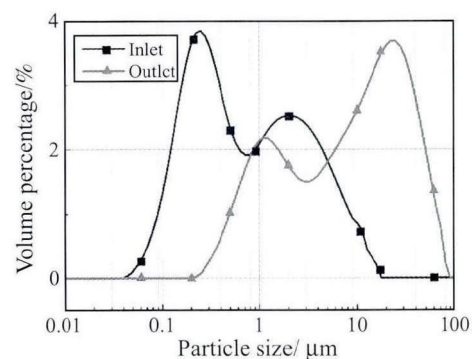


图3 湿式相变凝聚器入口和出口的粒度分布

Fig. 3 Particle size distribution at the inlet and outlet of wet phase transition agglomeration device

4.2 新式湿法除尘系统脱除颗粒物能力

采用低压撞击器 (DLPI) 在湿法除尘系统出口采集的颗粒物样品进行称重并作相应的数据处理, 得到不同运行条件下系统出口颗粒物质量粒径分布。

4.2.1 凝聚器开关状态对系统出口颗粒物分布的影响

当机组负荷为 600 MW 与 500 MW, 湿式静电除尘二次电压为 60 kV 时, DLPI 测得新型湿法除尘系统出口颗粒物质量粒径分布如图 4 所示。图 4 (a) 为负荷 600 MW、二次电压 60 kV 时凝聚器开、关状态下系统出口的颗粒物质量粒径分布, 该运行条件

下系统出口微细颗粒物排放的质量浓度最大值出现在 $0.05 \mu\text{m}$; 图 4 (b) 为负荷 500 MW、二次电压 60 kV 时凝聚器开、关状态下系统出口的颗粒物质量粒径分布, 该运行条件下系统出口微细颗粒物排放的质量浓度最大值出现在 $0.03 \mu\text{m}$ 。由图 4 可知, 运行相变凝聚装置可以明显增强粒径在 $0.01 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 的微细颗粒物的脱除能力。此外, 在负荷 600 MW 时湿式静电除尘器一电场关闭状态下, 新型除尘系统出口的颗粒物质量浓度在 $0.05 \mu\text{m}$ 处明显升高, 说明静电除尘电场二次电压对于系统出口颗粒质量粒径分布也存在一定影响。

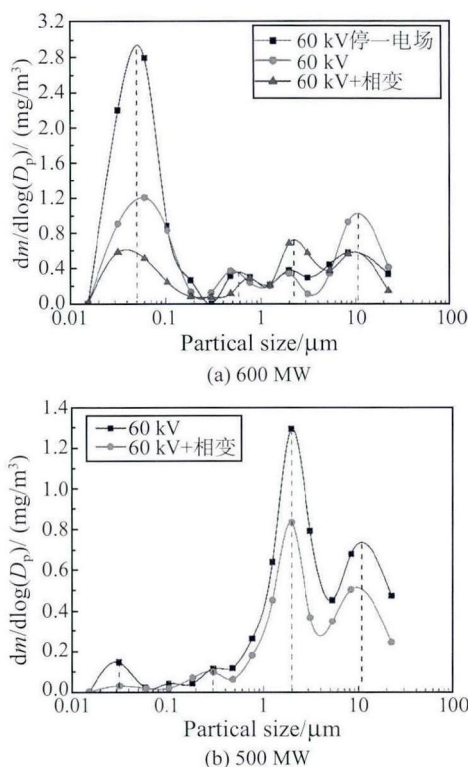


图 4 负荷 600 MW 和 500 MW 时湿法除尘系统出口颗粒物粒径分布对比

Fig. 4 Particle size distribution at the outlet of wet electrostatic precipitator under 600 MW and 500 MW load

为了更直观说明不同工作电压对新型湿式除尘系统出口颗粒质量粒径分布的影响, 测试中分别设定湿式静电除尘电场的二次电压值为 35 kV、45 kV、55 kV 和 60 kV。由于现场负荷调度受限, 则选择在电厂负荷为 500 MW 稳定运行状态下开展测试工作。图 5 为湿式静电除尘电场不同二次电压下系统出口的颗粒质量粒径分布, 从图中可以看出, 在电厂 500 MW 负荷下电场二次电压由 35 kV 升至 55 kV 时, 系统出口颗粒质量粒径分布在 $0.01 \sim 0.3 \mu\text{m}$

微细颗粒物的排放浓度值变化较小。但当电场二次电压升至 60 kV 时, 系统出口微细颗粒物质量排放浓度急剧降低。虽然一定运行负荷下二次电压为 60 kV 能够明显脱除 $\text{PM}_{0.3}$, 但较高的二次电压可明显增加厂用电耗和影响电厂经济性。相对而言, 相变凝聚器对 PM_1 具有明显脱除能力, 而且消耗的厂用电也较低, 因此该相变凝聚装置对电厂实现低浓度颗粒排放具有一定优势。

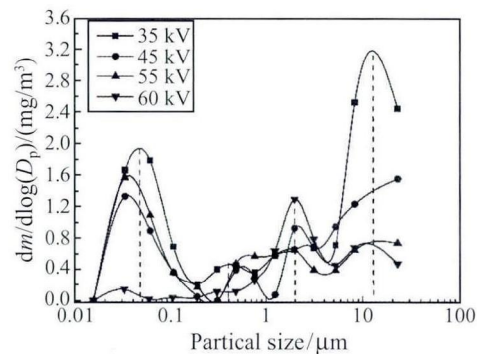


图 5 500 MW 时湿除不同工作电压下出口颗粒物粒径分布对比
Fig. 5 Particle size distribution at the outlet of WESP under different working voltage

综合可见, 在相变凝聚器运行时, 对 PM_1 脱除效果更加明显, 湿式除尘脱除效率能够进一步提高。这主要是由于在惯性、拦截、布朗扩散、热泳和扩散泳等作用下, 相变凝聚器使得细颗粒物发生凝聚长大, 较大粒径更易于被湿式电除尘电场脱除, 因此提高了系统总除尘效率。也就是说, 湿式电除尘器除尘效率与颗粒物粒径存在直接关联, 通过相变凝聚器与湿式静电除尘器的结合可增强对 $\text{PM}_{2.5}$ 的脱除效果, 有效降低电厂微细颗粒物的排放。

4.2.2 颗粒物分级脱除效率

分级脱除效率可用来量化表征湿法除尘系统对不同粒径颗粒物的脱除效果, 根据实验结果计算得到锅炉 600 MW 负荷时系统对 PM_1 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 TSP 的脱除效率。凝聚器开关时结果如表 3 和表 4 所示。

对比表 3 和表 4 的颗粒物分级脱除效率可以发现, 在湿式电除尘器运行基础上, 增开湿式相变凝聚器对 PM_1 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 TSP 的脱除能力进一步提升, 分级脱除效率显著提高。湿式除尘系统入口的颗粒物浓度为 $13.586 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (标态, $6\% \text{O}_2$, 下同), 经过新型湿法除尘系统, 湿式相变凝聚器关闭时出口排放浓度为 $1.589 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 而增加湿式相变凝聚器后, 出口颗粒物排放浓度降低为 $1.044 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 使 TSP 脱除效率由 88.3% 提高至 92.32%。

表 3 机组负荷 600 MW 时分级脱除效率 (凝聚器关闭)

Table 3 Removal efficiency of PM at 600 MW load (agglomeration device is off)

	入口浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	出口浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	脱除效率/%
PM ₁	3.149	0.987	68.66
PM _{2.5}	6.208	1.071	82.75
TSP	13.586	1.589	88.30

表 4 机组负荷 600 MW 时分级脱除效率 (凝聚器打开)

Table 4 Removal efficiency of PM at 600 MW load (agglomeration device is on)

	入口浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	出口浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	脱除效率/%
PM ₁	3.149	0.516	83.61
PM _{2.5}	6.208	0.764	87.69
TSP	13.586	1.044	92.32

5 结 论

本文自主开发与设计了湿式相变凝聚器协同湿式电除尘器的新型湿法除尘技术,并在某 600 MW 机组进行了工程示范。通过测试结果分析,得到如下结论:

1) 饱和烟气中水蒸气的相变冷凝效应与柔性管排的合理布置对亚微米级微细颗粒物有较好的凝聚效果,微细颗粒物在相变凝聚器内部,易于增长为较大粒径颗粒而被脱除,很好地解决了传统除尘设备对微细颗粒物低脱除率的难题。

2) 湿式相变凝聚器协同湿式静电除尘器的新型湿法除尘系统,可增强对微细颗粒物的脱除效果,将 600 MW 电负荷 PM₁、PM_{2.5} 的脱除效率由湿式静电除尘器单独运行时的 68.66%、82.75% 分别提高至 83.61%、87.69%,有效降低电厂微细颗粒物的排放。

3) 机组负荷为 600 MW 时,运行湿式相变凝聚器能够将湿法除尘系统对 TSP 的脱除效率提高至 92.32%。

4) 湿式相变凝聚器协同湿式静电除尘器的新型湿法除尘系统的成功工程化示范为“近零排放”技术指出了新的发展方向。

参 考 文 献

[1] 周科, 聂剑平, 张广才, 等. 湿法烟气脱硫燃煤锅炉烟气颗粒

物的排放特性研究 [J]. 热力发电, 2013, 42(8): 81-85. 89
ZHOU Ke, NIE Jianping, ZHANG Guangcai, et al. Emission Characteristics of Particulate Matter from Coal-fired Plant Equipped with WFGD [J]. Thermal Power Generation. 2013, 42(8): 81-85, 89

[2] 刘胜强, 曾毅夫, 周益辉, 等. 细颗粒物 PM_{2.5} 的控制与脱除技术 [J]. 中国环保产业, 2014(6): 16-20

LIU Shengqiang, ZENG Yifu, ZHOU Yihui, et al. Control of Fine Particulate PM_{2.5} and Removal Technique [J]. China Environmental Protection Industry, 2014(6): 16-20

[3] Zhuang Y, Biswas P. Submicrometer Particle Formation and Control in a Bench -scale Pulverized Coal Combustor [J]. American Chemical Society, 2001, 27(3): 510-516

[4] Torben Schfer. Growth Mechanisms in Melt Agglomeration in High Shear Mixers [J]. Powder Technology, 2001, 117(1): 68-82

[5] Durham M, Bustard J, Martin C, et al. Success with Non-traditional Flue Gas Conditioning for Hot -and Cold -side ESPs [C]//Proceedings of the US EPA/DOE/EPRI Combined Power Plant Air Pollutant Control Symposium: The Mega Symposium and the A&WMA Specialty Conference on Mercury Emissions: Fate, Effects & Control, 2001

[6] 熊英莹, 谭厚章. 湿式相变冷凝除尘技术对微细颗粒物的脱除研究 [J]. 洁净煤技术, 2015, 21(2): 20-24

XIONG Yingying, TAN Houzhang. Influence of Wet Phase Transition Condensate Dust Removal Technology on Fine Particle Removal [J]. Coal Clean Technology, 2015, 21(2): 20-24