

# 湿式相变冷凝除尘技术对微细颗粒物的脱除研究

熊英莹<sup>1</sup>, 谭厚章<sup>2</sup>

(1. 山西大学 资源与环境工程研究所, 山西 太原 030006; 2. 西安交通大学 热流科学与技术教育部重点实验室 陕西 西安 710049)

**摘要:** 为实现微细颗粒物的有效脱除, 采用 Mastersizer 2000 激光粒度仪和低压撞击器对颗粒物进行粒径分析, 研究湿式相变冷凝除尘系统对颗粒物的凝聚、脱除性能; 通过数值模拟定性考察颗粒物的凝聚作用, 预测湿式相变冷凝除尘技术的除尘效果。结果表明, 湿式相变冷凝除尘装置入口颗粒物为峰值 2.5  $\mu\text{m}$  的单峰分布, 中间颗粒物为峰值 2 和 30  $\mu\text{m}$  的双峰分布, 且大颗粒所占比例高于小颗粒, 说明存在显著的颗粒物凝并过程。湿式相变冷凝除尘系统对 PM10 以下的微细颗粒物有较好的脱除效果, 各粒级颗粒物的脱除效率均大于 70%。0.1 ~ 1  $\mu\text{m}$  颗粒物脱除效率在 85% 以上, 明显优于传统除尘设备, 表明凝并机制使系统对颗粒物有良好的适应性。流场模拟结果显示管排的存在对流场有明显扰动, 可促进微细颗粒物的凝并。

**关键词:** 湿式相变; 凝聚; 微细颗粒物; 除尘

中图分类号: X701 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2015)02-0020-05

## Influence of wet phase transition condensate dust removal technology on fine particle removal

XIONG Yingying<sup>1</sup>, TAN Houzhang<sup>2</sup>

(1. Institute of Resources and Environment Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Ministry of Education, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** In order to remove fine particle effectively, the particle size was analyzed through Mastersizer 2000 and low pressure impactor. The effects of wet phase transition condensate dust removal system on fine particle agglomeration and removal efficiency were investigated using numerical simulation method. The fine particle at the inlet of system was collected. The structure chart showed that there was only one crest and the crest value was 2.5  $\mu\text{m}$ . There were two crests and the crest value was 2, 30  $\mu\text{m}$  when the sample was collected in the middle of system which indicated that the process existed significant agglomeration. The system worked better for the particle whose size was below 10  $\mu\text{m}$ . For each size fraction, the removal efficiency was above 70%, even above 85% for 0.1 to 1  $\mu\text{m}$  particle. The wet phase transition condensate dust removal system was much better than traditional dust removal system. The tube rows accelerated the aggregation of fine particles.

**Key words:** wet phase change; agglomeration; fine particle; dust removal

## 0 引 言

受能源结构影响, 我国将长期以煤炭消费为主<sup>[1]</sup>。然而, 燃煤微细颗粒物排放是造成雾霾等极端天气的元凶之一。2011 年开始实施的 GB

13223—2011《火电厂大气污染物排放标准》, 将烟尘排放质量浓度由原先的 50  $\text{mg}/\text{m}^3$  提高至 30  $\text{mg}/\text{m}^3$ , 重点地区提高至 20  $\text{mg}/\text{m}^3$ 。为了解读和执行新国标, 三部委(财政部、中宣部、教育部)在 2014 年 9 月联合印发了《煤电节能减排升级与改造行动计

收稿日期: 2015-02-02; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2015.02.005

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51376147)

作者简介: 熊英莹(1979—), 女, 山西太原人, 讲师, 博士, 从事火电厂高效燃烧及污染物治理研究工作。E-mail: 20872193@qq.com

引用格式: 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]. Clean Coal Technology, 2015, 21(2): 20-24.

划》, 计划中指出, 东部地区新建燃煤发电机组大气污染物排放浓度基本达到燃气轮机组排放限值(即在基准氧含量6%条件下, 烟尘、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>排放质量浓度分别不高于10、35、50 mg/m<sup>3</sup>), 中部地区新建机组原则上接近或达到燃气轮机组排放限值, 鼓励西部地区新建机组接近或达到燃气轮机组排放限值。支持同步开展大气污染物联合协同脱除, 减少SO<sub>3</sub>、汞、砷等污染物排放<sup>[2]</sup>。面对新标准及行动指南相关要求, 原有除尘技术已无法达到排放要求, 亟需新的、对微细颗粒物脱除效率更高的除尘技术来满足市场需求。现有除尘技术主要包括电除尘、湿式除尘等, 除尘效率可达到99%以上, 但受除尘机理制约, 现有除尘技术对粒度1 μm以下微细颗粒物的脱除效果不理想。

目前, 对微细颗粒物脱除的研究中, 比较有效的方法是在外力作用下, 促使微细颗粒物凝聚长大, 进一步脱除<sup>[3]</sup>。为实现微细颗粒物的凝聚长大, 采用的外力场包括电场、声场、磁场等, 以及喷入少量化学团聚剂等方法。刘凤云等<sup>[4]</sup>研究了固定污染源排气中可凝结颗粒物的测定方法。凡凤仙等<sup>[5]</sup>研究了燃煤PM<sub>2.5</sub>和垃圾焚烧颗粒在蒸汽作用下表面异质核化特性, 利用数值计算发现颗粒的物化性质和溶液对颗粒的润湿性能对异质核化特性起决定作用。杨林军等<sup>[6]</sup>、颜金培等<sup>[7]</sup>建立了利用蒸汽相变凝并机理促进微细颗粒物凝并长大进而脱除的装置, 研究蒸汽相变凝并以及蒸汽相变预处理的添加对设备除尘性能的促进作用。Schauer<sup>[8]</sup>发现蒸汽在颗粒物表面凝结是实现微细颗粒物凝并长大的最有效措施之一。Yoshida等<sup>[9]</sup>研究了4种具有代表性的疏水性亚微米颗粒在过饱和蒸汽中凝并的特性, 说明疏水性微细颗粒物也可通过蒸汽凝并快速增长。

目前凝聚技术应用研究的关注点基本集中在微细颗粒的凝聚过程, 对于凝聚后进一步脱除的报道很少。笔者在燃煤烟气深度节水研究中<sup>[10]</sup>, 首次发现布置在脱硫吸收塔出口的湿式相变冷凝装置具有良好的微细颗粒物脱除效果, 并提出了湿式相变冷凝除尘技术。该技术是饱和湿烟气中的水蒸气凝结相变作用、微细颗粒物凝并、湿式洗涤、颗粒惯性脱除的多因素除尘过程, 涉及到气、液、固三相间的流动与传热、传质<sup>[11-12]</sup>。多因素

叠加使得湿式相变冷凝除尘技术对微细颗粒物脱除效果明显, 但作用机制复杂, 传统的试验研究方法很难分析复杂的多相流内部热质耦合问题, 因此笔者采用试验研究和数值模拟相结合的方法研究湿式相变冷凝除尘技术, 以为湿式相变冷凝除尘技术的应用提供参考。

## 1 湿式相变冷凝除尘技术

湿式相变冷凝除尘技术与传统湿式除尘技术的区别在于不需要向设备内部进行喷水冲洗或雾化。湿式相变冷凝除尘技术利用饱和湿烟气进入湿式相变冷凝除尘装置内部后遇冷降温, 所含水蒸气相变凝结, 有利于微细颗粒碰撞、凝聚; 在设备内部温度梯度作用下, 凝聚后的颗粒物向冷凝壁面移动, 附着在冷凝管表面的液膜上, 在重力作用下随液膜流动到装置底部后收集。

湿式相变冷凝示意如图1所示。湿式相变冷凝除尘装置内部布置有数量众多的毛细冷凝管, 冷凝管采用自主研发的改性氟塑料制成, 可在脱硫吸收塔后的低温腐蚀环境中长期运行。饱和烟气进入后, 烟气中水蒸气在微细颗粒物表面相变、凝聚、长大, 并在温度梯度作用下向冷的管壁移动, 附着在管壁表面的液膜上, 最后在重力作用下, 随着流动的液膜被收集。颗粒物脱除过程中通过控制装置内部冷凝管壁面的温度, 进一步控制饱和湿烟气的相变程度, 结合了湿式相变冷凝、凝聚、惯性等多重除尘机制。

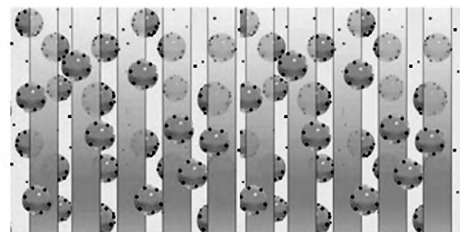


图1 湿式相变冷凝示意

## 2 试验条件

### 2.1 试验系统

采用相似模化原理, 在内蒙古某600 MW燃烧褐煤机组上搭建了中试试验系统。中试试验系统安装在湿法脱硫塔后面, 在脱硫吸收塔出口的水平烟道开孔抽取 $5 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/h烟气, 通过湿式相变冷凝

除尘系统,再经引风机重新汇入烟囱前的主烟气管道。试验中,为解决低温腐蚀及结垢问题,主体设备采用改性高分子材料。湿式相变冷凝除尘系统如图 2 所示。

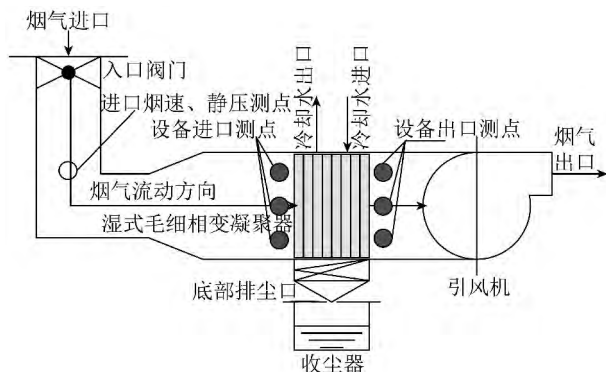


图 2 湿式相变冷凝除尘系统

## 2.2 试验方法

1) 试验研究。在湿式相变冷凝除尘系统的入口和出口处测孔,进行烟气流速、压力、温度等基础数据测试,确定试验过程的烟气流速、烟气流速等条件。在系统的入口、中间部位和出口采集颗粒物样品,并采用 Mastersizer 2000 激光粒度仪对颗粒物样品进行粒径分析,对比研究湿式相变冷凝除尘系统对颗粒物的凝聚和脱除性能。用低压撞击器在系统的入口和出口取样,对颗粒物样品进行称重,确定湿式除尘系统对颗粒物的脱除效率,将低压撞击器取得的颗粒物样品按照粒径分为 13 级,得到设备对不同粒径颗粒物的脱除效率。

2) 数值模拟。在 Fluent 软件中对烟气的流动进行模拟,定性考察颗粒物的凝聚作用;调用离散相模型对连续相(烟气)中的离散相(颗粒物)随烟气流动的行为进行模拟,并通过设定相应的壁面条件模拟湿式毛细相变除尘设备中的毛细管对颗粒物的捕集,同时对照模拟结果和试验结果。

## 3 试验结果

### 3.1 被捕集颗粒物的采样及分析

采用 Mastersizer 2000 激光粒度仪对湿式相变冷凝除尘系统入口、中间部位和出口采集到的颗粒物样品进行粒径分析,结果如图 3 所示。

由图 3 可知,湿式相变冷凝除尘系统入口处捕集到的颗粒物样品,即原脱硫吸收塔直接排放到空气中的烟气颗粒物经电除尘器和湿法脱硫后,粒径

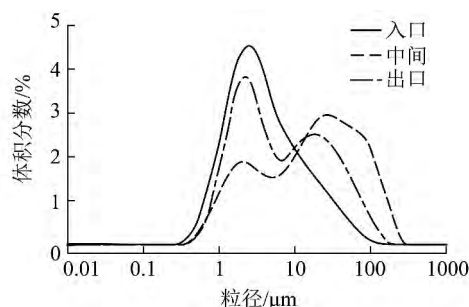


图 3 湿式相变冷凝除尘系统捕集颗粒物的粒径分布分布峰值在  $2.5 \mu\text{m}$  附近,即此处烟气颗粒物以微细颗粒为主,且浓度很高,更易富集有害物质。为便于表述,将入口到中间部分称为设备第一级,中间到出口部分称为设备第二级。经过湿式相变冷凝除尘系统第一级后,颗粒物在  $2$  和  $30 \mu\text{m}$  处呈双峰分布,且后者体积分数远大于前者,说明湿式相变冷凝除尘系统有明显的细颗粒凝并过程存在,可促进设备及整个湿式除尘系统对微细颗粒物的脱除;经过设备第二级后,颗粒物在  $2.5$  和  $20 \mu\text{m}$  处呈双峰分布,且细颗粒的峰值远大于大颗粒。微细颗粒物凝并和大颗粒脱除 2 个过程贯穿整个毛细相变除尘设备的始终。在第一级中,微细颗粒物浓度高,颗粒物碰撞频率也较高,微细颗粒物的凝并成为主要过程,所以经过设备第一级后出现微细颗粒物体积分数明显减小的现象,而经过这一级凝并后,产生的大颗粒物便于进一步脱除。在第二级中,因经过第一级的凝并作用,微细颗粒物浓度明显降低,颗粒物碰撞频率也减小,而大颗粒浓度升高,大颗粒的脱除取代微细颗粒物的凝并成为主要过程。

湿式相变冷凝除尘系统对各粒级颗粒物都具有较好的脱除效果,尤其是微细颗粒物,经过相变凝并过程后,成为便于脱除的大颗粒,解决了传统除尘设备难以脱除微细颗粒物的难题。

### 3.2 设备分级脱除效率

利用低压撞击器(DLPI)在湿式相变冷凝除尘系统入口和出口采集样品,得到系统出、入口  $\text{PM}_{10}$  以下颗粒物粒径分布,具体如图 4 所示( $m$  为该粒径颗粒物质量,  $D_p$  为中位粒径)。

由图 4 可知,湿式相变冷凝除尘系统对  $\text{PM}_{10}$  以下的微细颗粒物有较好的脱除效果,尤其是对中间粒级( $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ )颗粒物脱除效果明显优于传统除尘设备。经过除尘系统后,各粒级颗粒物浓度控制在较低水平。

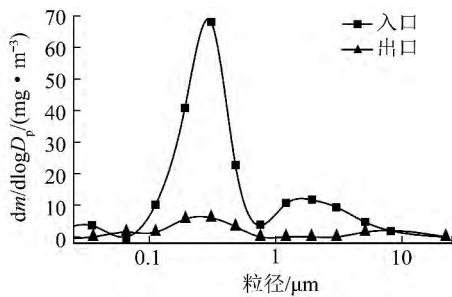


图 4 DLPI 取样结果

湿式相变冷凝除尘系统对不同粒径颗粒物的脱除效率如图 5 所示。

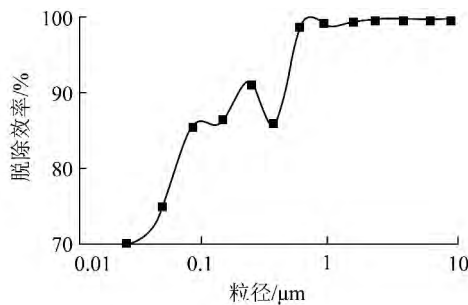


图 5 PM10 以下颗粒物的分级脱除效率

由图 5 可知,各粒径颗粒物的脱除效率均大于 70%。0.1 ~ 1 μm 颗粒物脱除效率在 85% 以上。

与传统除尘设备相比,湿式相变冷凝除尘系统对颗粒物的适应性大幅改善,特别是对 0.1 ~ 1 μm 颗粒物的脱除效率可与袋式除尘器相媲美<sup>[13-14]</sup>,而运行成本和维护成本则远低于袋式除尘器,可在湿法脱硫设备后直接添加,改造成本较低,具有很好的工业应用前景。

#### 4 数值模拟

通过数值模拟对湿式相变冷凝除尘装置中的流场和颗粒物的轨迹进行模拟,而后对毛细管不同排列方式下的颗粒物捕集效率进行模拟,预测湿式相变冷凝除尘技术的除尘效果。计算中采用通用软件 Fluent 6.3 中的离散项模型(DPM)。

##### 4.1 模型建立

建模计算的物理模型按照中试试验装置 1:1 进行搭建(图 6)。计算中为了降低计算量,根据装置的对称性,对模型的 1/2 进行建模计算。图 6 中所示密集区为冷凝细管排所在区域。对模型进行网格划分时,采用六面体结构网格,为了保证计算的可靠性,管排处的网格进行加密,采用 Cooper 形式生成网格,如图 7 所示。

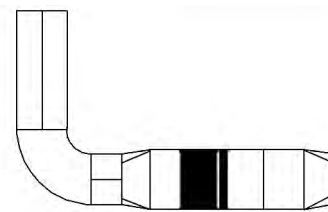


图 6 建模计算的物理模型

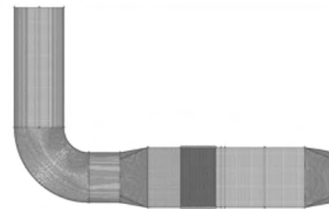


图 7 网格划分

##### 4.2 结果与分析

计算中采用烟气流速为入口边界条件,分别选用 2、4、5、7、10 m/s 进行计算,以 5 m/s 为例进行分析,结果如图 8 所示。

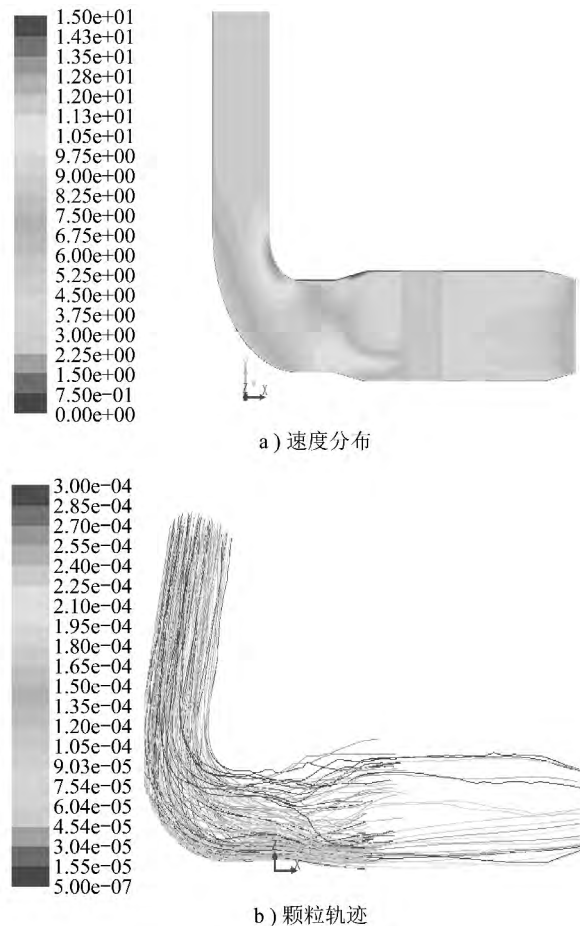


图 8 烟气流速 5 m/s 时的计算结果  
由图 8a 可知,连续相(烟气)流场的速度云图

中,管排的存在对流场有较明显的扰动作用,可增加烟气中颗粒物之间的碰撞概率,为颗粒物的凝并创造了良好条件。图8b根据采集到样品的粒度分析进行Rosin-Rammler拟合,加入离散相(颗粒物)后,追踪离散相的轨迹。经过湿式相变冷凝除尘装置后,绝大部分颗粒物都被捕捉。根据入口和出口颗粒物的量可计算湿式相变冷凝除尘装置对颗粒物的捕集效率,并与试验结果进行对比。

烟气流速为2、4、5、7、10 m/s时进行模拟计算,得出相应工况下湿式相变冷凝除尘装置除尘效率的模拟值,模拟值与试验值的对比如图9所示。

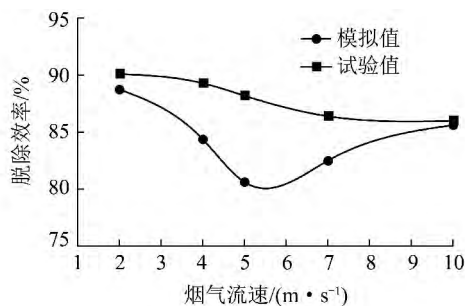


图9 除尘效率模拟值与试验值对比

由图9可知,模拟值在对应的流速下呈现先降低后升高的趋势,流速5~6 m/s时出现最低点,这是由于在湿式相变冷凝过程中,当流速较小时,烟气的流动状态为一维层流,颗粒物的脱除机制中分子间作用力促进的团聚、长大、脱除占主导作用;当流速较大时,烟气的流动由层流变化为湍流,颗粒物凝聚过程中的碰撞、扰动、热泳机制占主导地位;当流速为5~6 m/s时,2种机制均不占主导作用,导致脱除效率降低。

由图9还可知,模拟值均低于试验值,这是由于模拟计算中不考虑连续相(流体)与离散相(颗粒)之间的传热、传质、化学反应,同时忽略设备内除换热管之外的组件对流场的影响等原因造成的。

## 5 结 论

1) 湿式相变冷凝除尘装置的湿式相变可显著促进微细颗粒物的凝并。从设备入口2.5 μm处的单峰分布到第一级出口在2和30 μm处的双峰分布(后者峰值高于前者),均说明在湿式相变冷凝除尘装置中存在微细颗粒物凝并过程。

2) 微细颗粒物凝并和大颗粒脱除在烟气通过

设备的整个过程中始终存在,其速率取决于相应尺度颗粒物的浓度,结合第一级入口、第一级出口和二级出口的粒径分析可判断,设备第一级以凝并作用为主,设备第二级以大颗粒脱除为主。

3) 传统除尘设备对PM10以下微细颗粒物,尤其是0.1~1 μm颗粒物的脱除效率在60%以下,脱除效果较差;而凝并机制的存在使湿式除尘系统对颗粒物具有良好的适应性,对0.1~1 μm颗粒物脱除效率在85%以上。

## 参考文献:

- [1] 吴晓华,宋二波,贾尚伟.基于SWOT分析的我国洁净煤技术发展研究[J].洁净煤技术,2015,21(1):24-28.
- [2] 北极星节能环保网.《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014-2020年)》的通知[EB/OL].(2014-09-22)[2015-02-02].<http://huanbao.bjx.com.cn/news/20140922/548675.shtml>.
- [3] Crawford M.空气污染控制理论[M].梁宁元,译.北京:冶金工业出版社,1985:375-376.
- [4] 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[J].科技信息,2011(20):393-394.
- [5] 凡凤仙,杨林军,袁竹林,等.水汽在燃煤PM2.5表面异质核化特性数值预测[J].化工学报,2007,58(10):2561-2566.
- [6] 杨林军,颜金培,沈湘林.蒸汽相变促进燃烧源PM2.5凝并长大的研究现状及展望[J].现代化工,2005,25(11):27-29,31.
- [7] 颜金培,杨林军,张霞,等.应用蒸汽相变机理脱除燃煤可吸入颗粒物实验研究[J].中国电机工程学报,2007,27(35):12-16.
- [8] Schauer P J. Removal of submicron aerosol particles from moving gas stream[J]. Industrial and Engineering Chemistry,1951,43(7):1532-1538.
- [9] Yoshida T,Kousaka Y,Okuyama K. Growth of aerosol particles by condensation[J]. Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals,1976,15(1):37-41.
- [10] Xiong Y Y,Xu W G,Liu Y Y,et al. Pilot study on in-depth water saving and heat recovery from tail flue gas in power plant[C]//13<sup>th</sup> proceedings of the international conference on power engineering. Wuhan [s. n.],2013.
- [11] Jung C H, Kim Y P, Lee K W. Analytic solution for polydispersed aerosol dynamics by a wet removal process[J]. Journal of Aerosol Science,2002,33(5):753-767.
- [12] Jung C H, Kim Y P, Lee K W. A moment model for simulating rain drop scavenging of aerosols[J]. Journal of Aerosol Science,2003,34(9):1217-1233.
- [13] 王实朴.袋式除尘器在高效煤粉工业锅炉中的应用[J].洁净煤技术,2013,19(4):100-104.
- [14] 王鹏.燃煤电厂可吸入颗粒物排放及控制研究[D].杭州:浙江大学,2008:12-13.