

# 半干法脱硫中应用蒸汽相变机理协同 脱除 PM<sub>2.5</sub>的技术分析

蒋振华, 杨林军, 鲍静静, 黄永刚

(东南大学洁净煤发电与燃烧技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

**摘要:**传统的半干法脱硫工艺对 PM<sub>2.5</sub> 脱除效率比较低, 大量的亚微米颗粒排入大气造成污染; 利用蒸汽相变机理可以有效促使 PM<sub>2.5</sub> 凝结长大; 针对半干法出口烟气中含湿量较高的特点, 应用蒸汽相变机理有望协助实现半干法脱硫 (FGD) 和脱除 PM<sub>2.5</sub>, 从而改善排放烟气的品质。

**关键词:**半干法脱硫; 蒸汽相变; PM<sub>2.5</sub>; 协同脱除

**中图分类号:**TQ113.264.1; O414.13

**文献标识码:**A

**文章编号:**0253-4320(2008)10-0068-03

## Analysis of cooperative removal of PM<sub>2.5</sub> by heterogeneous condensation in semi-dry FGD process

JIANG Zhen-hua, YANG Lin-jun, BAO Jing-jing, HUANG Yong-gang

(Key Laboratory of Clean Power Generation and Combustion Technology of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** With the traditional semi-dry flue gas desulfurization (FGD) process, the efficiency of PM<sub>2.5</sub> removal is low and a great deal of submicron particles goes into atmosphere and causes air pollution. The technical approach based on the enlargement of PM<sub>2.5</sub> by the heterogeneous condensation in semi-dry FGD system are analyzed. According to the characters of high humidity of the outlet flue gas, there exist prospects in simultaneously removing PM<sub>2.5</sub> with high efficiency in semi-dry FGD system by the heterogeneous condensation, and the quality of flue gas will be improved.

**Key words:** semi-dry FGD; heterogeneous condensation; PM<sub>2.5</sub>; cooperative removal

PM<sub>2.5</sub>是指空气动力学直径小于 2.5 μm, 可吸入人体肺部的超细颗粒物, 由于其粒径小, 比表面积大, 极易吸附多种有毒、有害物质, 且在大气中的停留时间长、输送距离远, 对人体健康和大气环境质量影响很大。化石燃料燃烧是 PM<sub>2.5</sub>的主要来源, 因此控制燃烧源对减少 PM<sub>2.5</sub>的排放具有重要意义。燃煤烟气 SO<sub>2</sub>的脱除已有比较成熟的技术, 其中喷雾干燥法是应用比较广泛的半干法烟气脱硫技术, 既有湿法脱硫反应速度快、脱硫效率高的特点, 又有干法脱硫无污水、废酸排出, 脱硫后产物易于处理的优点, 广泛适用于中小型电厂及垃圾焚烧电厂。但是, 目前半干法结合除尘器除尘时对亚微米级的细颗粒脱除效果不好, 处理后的烟气被直接排放, 使大量的 PM<sub>2.5</sub>进入空气中, 造成严重的大气污染。

## 1 国内外研究现状

### 1.1 半干法脱硫系统及脱除固体小颗粒的研究

喷雾干燥法脱硫于 20 世纪 80 年代初首先在欧美等国家开发成功。该技术在我国的燃煤电站上得到商业应用始于 1980 年, 如今在 FGD 市场中位列第二<sup>[1]</sup>, 仅次于湿法脱硫。该系统利用喷雾干燥原理, 将吸收剂浆液以雾状形式喷入吸收塔内, 在脱硫塔内发生剧烈的传热过程, 雾化液滴在高温烟气加热下不断的蒸发, 同时还存在剧烈的传质过程, 烟气中的气态污染物不断地进入溶液, 发生化学反应, 最后完成脱硫后的废渣以干态灰渣形式排出。固体反应产物大部分从反应塔底部排出, 脱硫后的烟气经过除尘器进一步除尘, 经风机从烟囱排放。半干法脱硫工艺脱除超细颗粒的效果主要取决于配套的除尘器性能, 对 PM<sub>2.5</sub>通常难以有效脱除, 且相关研究

收稿日期: 2008-06-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (20576020)

作者简介: 蒋振华 (1975-), 男, 硕士生; 杨林军 (1967-), 男, 博士后, 研究员, 主要从事大气污染控制研究, ylj@seu.edu.cn。

很少。

## 1.2 利用蒸汽相变原理脱除细颗粒的研究

国外早已展开利用蒸汽相变作为脱除细颗粒的研究,作为一种重要的除尘预处理技术,它主要采用添加蒸汽、冷却中高温湿气体等措施使水汽达到饱和,进而使细颗粒长大,然后用静电除尘器、旋风分离器、除雾器等常规除尘技术脱除凝结长大的含尘液滴<sup>[2]</sup>。1951年, Schauer P J等<sup>[3]</sup>研究得出了利用蒸汽在微粒表面凝结是促使超细微粒增大的最有效措施之一。1967年, Rozen A M等<sup>[4]</sup>设计了一种专门用于脱除超细微粒的筛板塔,通过喷蒸汽和降温使气流中的细颗粒发生相变凝结长大并洗涤脱除。1974年,美国 Calvert S等<sup>[5]</sup>进行了在模拟废气中添加蒸汽使之达到饱和,然后用筛板塔脱除Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>微粒( $d_p < 2 \mu\text{m}$ )的研究。Heidenreich S等<sup>[6-7]</sup>先使含NaCl、石英或石蜡油等亚微米级微粒的气流达到饱和,然后进入多级串连的填料塔,各塔交替用热水、冷水喷淋,研究发现除石蜡油外,其余微粒均可达到90%以上的脱除效率。1993年,陈进成等<sup>[8]</sup>设计了一套包括气溶胶、过饱和蒸汽混合室、冷却凝结室及旋风分离器的脱除工艺,发现润湿性好、粒径大的微粒脱除效率较高。

以上研究使用的微粒性质与燃煤烟气PM<sub>2.5</sub>有较大差异,所采用的工艺不能直接应用于现有燃煤烟气半干法脱硫装置。燃煤烟气含湿量一般为5%~10%,脱硫塔进口烟气温度大多在80~120℃。因此,欲使进口烟气达到饱和,需添加大量蒸汽或使烟气温度降低几十度,能耗过高<sup>[9]</sup>。

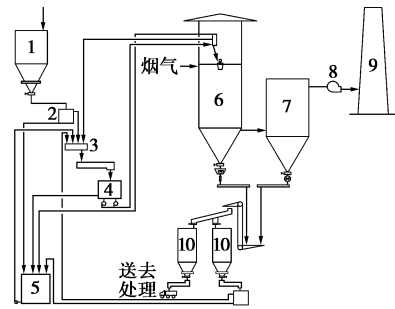
## 2 协同半干法脱硫和脱除PM<sub>2.5</sub>的可行性分析

### 2.1 蒸汽相变脱除细颗粒机理

当烟气中的水汽达到过饱和状态时,便会以微小尘粒为凝结核发生相变,从而使得微粒粒度增大,同时产生扩散和热运动<sup>[2]</sup>,促使含尘液滴相互碰撞接触凝结并进一步长大,长大后的含尘液滴很容易通过常规的除尘器脱除。笔者采用拍摄速率为10 000帧/s的高速显微摄像系统观察PM<sub>2.5</sub>微粒在过饱和水汽中的凝结长大过程发现,PM<sub>2.5</sub>微粒在几十至几百毫秒内即可快速长大至3~5 μm。与半干法脱硫工艺配套的除尘设备很难有效捕集PM<sub>2.5</sub>。因此,从现有的半干法脱硫工艺自身特点出发,通过配套除尘器将烟气中的粗颗粒脱除,然后利用蒸汽相变机理促使出口湿烟气中的PM<sub>2.5</sub>微粒凝结长大,可以达到半干法脱硫过程中协同脱除PM<sub>2.5</sub>的目的。

### 2.2 常规的喷雾干燥法脱硫系统分析

喷雾干燥法脱硫工艺大多采用生石灰(CaO)作为吸收剂,将生石灰制成Ca(OH)<sub>2</sub>浆液,通过喷雾机雾化成细小的雾粒喷入吸收塔内,这些雾粒与烟气接触后立即发生强烈的热交换和化学反应,迅速蒸发的同时生成固体产物。传统的喷雾干燥法脱硫系统图<sup>[1]</sup>见图1。



1—石灰仓;2—硝化槽;3—延时箱;4—吸收罐;5—贮存槽;  
6—吸收塔;7—除尘器;8—引风机;9—烟囱;10—终产物仓

图1 传统的喷雾半干法脱硫工艺流程图

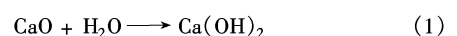
在脱硫塔内部,废弃物中除燃煤产生的飞灰外,主要成分为亚硫酸钙、硫酸钙以及过剩的氧化钙。完成脱硫反应后的干粉状产物,部分在塔内分离,由吸收塔锥形底部排出,部分随除硫后的烟气进入除尘设备。喷雾干燥法常与静电、布袋式除尘器等常规设备联用,但是这些常规除尘器对亚微米级小颗粒的脱除效率通常较低。

### 2.3 半干法脱硫中实现蒸汽相变的措施

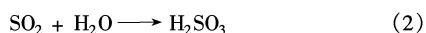
要使出口烟气中的水汽以PM<sub>2.5</sub>微粒为凝结核发生相变,必须满足过饱和条件。对于一般的燃煤烟气,其相对湿度很低,通常在5%~10%,添加水蒸气或者降低温度到饱和态都会造成较高的能耗。喷雾半干法脱硫系统的特点是:出口烟气相对湿度比较高,通常可达70%~90%,通过降低操作温度可以实现含湿量更高。因此,在半干法脱硫系统中利用蒸汽相变机理脱除细颗粒的方法有很高的应用价值。

通常脱硫塔进口烟温为80~120℃,烟囱的烟气排放温度要求在66~85℃,喷雾干燥脱硫工艺的操作温度一般要高于露点温度10℃<sup>[1]</sup>,并且出口烟气温度越低,脱硫效果越好。所发生的化学反应式(1)、(2)、(3)。

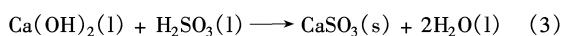
生石灰制浆:



SO<sub>2</sub>被液滴吸收:



吸收剂与  $\text{SO}_2$  反应:



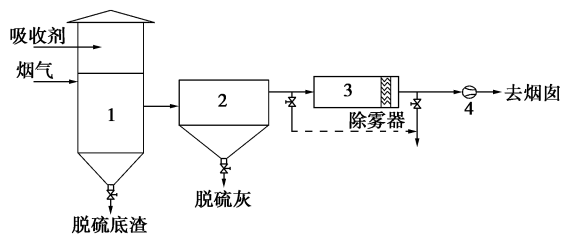
半干法脱硫系统中烟气中的水蒸气少量来自于煤炭燃烧中由氢元素转化来的水蒸气和煤炭自身所含有的水分蒸发产生,大部分是由吸收剂浆液中的水分蒸发进入烟气。从脱硫塔出来的烟气具有较高的湿度,同时烟气温度也较高。利用对湿烟气冷却或者采用向烟气中喷水或加入适量的蒸汽的方法,都可以使烟气中水蒸气迅速达到饱和。如果将两者结合起来即先喷入少量蒸汽再降低湿烟气的温度,可促使相变凝结快速发生。

#### 2.4 脱硫吸收塔出口湿烟气中 $\text{PM}_{2.5}$ 凝结长大并脱除

蒸汽相变原理促使  $\text{PM}_{2.5}$  凝结并长大,半干法脱硫吸收塔出口烟气相对湿度高达 70% ~ 90%,为该机理的实际应用提供了可能。其机理是:在过饱和蒸汽环境中,水蒸气自发地以  $\text{PM}_{2.5}$  微粒为凝结核发生相变,使微粒粒径变大,体积和质量增加<sup>[2]</sup>,从而很容易通过常规的除尘器脱除。因此,在脱硫塔出口设置一相变凝结室,通过添加少量蒸汽或使烟气适当冷却即可达到过饱和状态,实现水汽在  $\text{PM}_{2.5}$  微粒表面凝结长大,然后由除雾器脱除长大的含尘液滴。

### 3 技术方案分析

根据以上分析,设计了半干法脱硫系统中应用蒸汽相变凝结协同脱除  $\text{PM}_{2.5}$  的技术方案,如图 2 所示。从吸收室出来的烟气经过除尘器,绝大部分粗颗粒和部分细颗粒被脱除,低温、高湿的含尘烟气



1—吸收塔;2—除尘器;3—相变凝结室;4—引风机

图 2 半干法脱硫中利用蒸汽相变协同脱除  $\text{PM}_{2.5}$  系统示意图

进入相变凝结室,在相变凝结室内通入的蒸汽迅速在微粒表面凝结长大,然后由除雾器脱除凝结长大的含尘液滴。

该方案对原有的工艺流程不做过多的改变,只是增加了相变凝结室和除雾器,易于通过现有的装置改造来实现。

### 4 结语

利用过饱和蒸汽相变机理促进细颗粒凝结并长大是脱除  $\text{PM}_{2.5}$  的重要预处理方法,将该技术与现有烟气半干法脱硫系统结合具有重要的应用前景。但已有的蒸汽相变技术研究所采用的脱除工艺、实现相变的措施、所研究的微粒特性等与在燃煤烟气实际应用尚存在较大距离,与半干法脱硫系统结合的研究尚未开展。依据蒸汽相变促进细颗粒凝结长大的原理及半干法脱硫工艺特征,采用以下措施有望实现半干法脱硫中协同促进  $\text{PM}_{2.5}$  凝结长大并高效脱除的目的:①改进半干法脱硫操作条件,如适当降低饱和温度;②促进脱硫净化高湿烟气达到过饱和。

### 参考文献

- [1] 钟秦. 燃煤烟气脱硫脱硝技术及工程实例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [2] 杨林军, 颜金培, 沈湘林. 蒸汽相变促进燃烧源  $\text{PM}_{2.5}$  凝并长大的研究现状及展望[J]. 现代化工, 2005, 25(11): 22 - 26.
- [3] Schauer P J. Removal of submicron particles from a moving gas stream[J]. Ind Eng Chem, 1951, 43: 1532 - 1538.
- [4] Rozen A M, Kostin V M. Collection of finely dispersed aerosols in plate columns by condensation enlargement[J]. International Chemical Engineering, 1967, 7(3): 464 - 467.
- [5] Calvert S, Jhaveri N C. Flux force/condensation scrubbing[J]. Journal of the Air Pollution Control Association, 1974, 24(10): 946 - 951.
- [6] Heidenreich S, Vogt U, Büttner H, et al. A novel process to separate submicron particles from gases—a cascade of packed columns[J]. Chemical Engineering Science, 2000, 55: 2895 - 2905.
- [7] Vogt U, Heidenreich S. Separation of submicron particles in packed columns—optimization and scale-up of the process[J]. Chemical Engineering Technology, 1999, 22(11): 935 - 942.
- [8] Chen C C, Shu H K, Yang Y K. Nucleation-assisted process for the removal of fine aerosol particles[J]. Ind Eng Chem Res, 1993, 32: 1509 - 1519.
- [9] 杨林军, 颜金培, 沈湘林. 湿法脱硫中应用蒸汽相变机理协同脱除  $\text{PM}_{2.5}$  的技术分析[J]. 现代化工, 2007, 27(11): 22 - 26. ■

欢迎订阅《现代化工》杂志, 邮发代号 82—67。