

冷凝湿膜离心除尘除雾技术在湿法脱硫系统中的应用

张红彬¹, 赵晓鹄², 程子剑¹, 夏亮¹, 龚磊¹

(1. 德梅斯特(上海)环保科技有限公司, 上海 200120; 2. 华电内蒙古能源有限公司包头发电分公司, 内蒙古 包头 014000)

摘 要:火电机组超低排放要求烟囱外排烟气粉尘质量浓度 $< 5 \text{ mg/m}^3$, 浆液质量浓度 $< 20 \text{ mg/m}^3$, 这就要求外排烟气中 $3.5 \mu\text{m}$ 以内各粒度颗粒物的平均去除率达到 70% 以上, 而脱硫系统内普通除雾装置及后方湿电装置对烟气中纳米级颗粒物几乎没有去除能力。提出一种冷凝湿膜离心除尘除雾技术, 应用冷凝相变原理, 将脱硫后湿烟气降温。析出的水汽可以“捕捉”微米级颗粒物, 再凝并生成大液滴, 从而被除雾装置去除。该技术可以高效去除烟气中 $3.5 \mu\text{m}$ 以下颗粒物(粉尘、浆液), 同时兼顾脱硫塔液位平衡、节省系统水耗, 显著提升机组经济效益。

关键词:火电厂; 湿法脱硫; 烟气粉尘; 超低排放; 冷凝相变; 除尘除雾; 节水

中图分类号: X 701

文献标志码: B

文章编号: 1674-1951(2018)10-0065-04

0 引言

国家环保部门确认, 目前大气中 60% 的粉尘污染物源于煤炭燃烧, 火力燃煤发电厂是我国最大的煤炭用户。随着环保要求的日益提高, 国家针对燃煤发电厂的超低排放不断制定与提出相关政策。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标准由原先的 50 mg/m^3 (标态、干基、6% O_2 , 下同) 提高至 30 mg/m^3 , 重点地区提高至 20 mg/m^3 。为了解读和执行新国标, 国家发展改革委、环境保护部和国家能源局在 2014 年 9 月联合印发了《煤电节能减排升级与改造行动计划》, 计划中指出, 东部地区新建燃煤发电机组大气污染物排放质量浓度基本达到燃气轮机排放限值(即在基准氧含量 6% 条件下, 烟尘、 SO_2 、 NO_x 排放质量浓度分别不高于 10, 35, 50 mg/m^3), 中部地区新建机组原则上接近或达到燃气轮机排放限值, 鼓励西部地区新建机组接近或达到燃气轮机排放限值。支持同步开展大气污染物联合协同脱除, 减少 SO_3 、汞、砷等污染物排放^[1]。对于天然气燃气轮机提出烟尘排放标准 5 mg/m^3 , 同时有些经济发达地区针对燃煤机组也提出粉尘排放要低于 5 mg/m^3 。现有的净烟气除尘技术, 主要是湿式电除尘。限于其除尘机制, 很难去除 $3.5 \mu\text{m}$ 以下粒径的粉尘, 以及从安全性、经济性、二次污染等方面考虑, 很难适应现在的超低排放政策及绿色生

产要求。

本文提出了一种针对微米级粉尘及浆液的治理路线, 应用冷凝相变原理对脱硫后饱和湿烟气进行冷却降温, 冷凝产生的水汽以 $3.5 \mu\text{m}$ 以下的颗粒物(粉尘、雾滴)为凝结核, 凝并放大数十倍生成大液滴, 再通过弯曲流道的离心力将液滴甩在波纹板上, 并最终回落到浆液池中。冷凝相变技术通过将 $3.5 \mu\text{m}$ 以下的颗粒物(粉尘、浆液)转化为数百微米大液滴, 再通过除雾装置去除的方法, 将 $3.5 \mu\text{m}$ 以下粉尘及浆液的去除效率提升至 90% 以上, 从而确保外排烟气达到超低排放要求^[2]。该技术结合了现有除尘、除雾技术, 实现大范围粒度颗粒物去除, 有效去除微小粒度颗粒物, 符合超低排放要求。

本文研究了冷凝湿膜离心除尘技术的原理, 探讨了不同工况下的微米级的粉尘及浆液去除效率, 并对应用该技术项目的节水性能进行分析。

1 冷凝湿膜离心除尘除雾技术

冷凝湿膜离心除尘除雾技术借鉴了气象中雾的形成原理, 湿空气遇冷形成过饱和, 析出水汽与空气中的尘凝结形成了“雾”^[3]。湿法脱硫工艺中, 高温原烟气进入脱硫吸收塔, 经过喷淋层洗涤脱硫降温, 形成饱和湿烟气。饱和湿烟气继续经过冷凝除尘器(如图 1 所示), 冷凝除尘器为折流板结构, 内通循环冷却水, 在对烟气降温的同时, 本身又作为离心分离器使用。饱和湿烟气降温过程中产生大量的冷凝水汽, 与烟气中的微小液滴和粉尘结合凝聚形成大的液滴。冷却后的烟气继续通过超精细分离器, 从而

去除含有细小粉尘及浆液的大液滴。

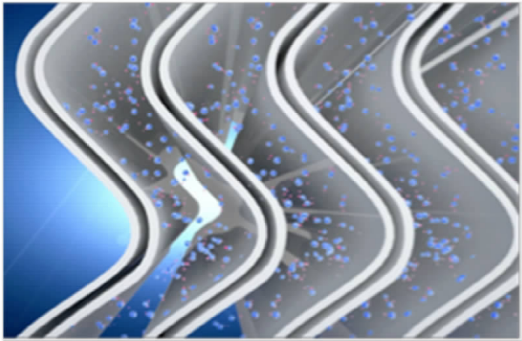


图 1 冷凝除雾除尘器示意

2 理论模型

2.1 粉尘构成

根据国家环保总局颗粒物监测要求和检测方法,烟气中的残余煤灰粉尘、净烟气液滴中的难溶性固体、净烟气液滴中的可溶性固体(脱硫浆液成分),一并纳入粉尘监测范围^[4]。

2.2 颗粒物分离工艺

首先,煤炭燃烧后产生大量灰分随热烟气进入烟道,目前原烟气除尘主要应用电除尘或者电袋复合除尘工艺。一般电除尘工艺除尘效率可达到 99.9% 以上,20.0 μm 以上的粉尘 100% 被去除,残余粉尘中,6.0 ~ 20.0 μm 的占 50%,6.0 μm 以下占 50%^[5]。烟气进入吸收塔后,经过喷淋层脱硫的同时,喷淋层及整个吸收塔也会对粉尘有一定的“洗尘”作用。研究及实际应用表明,当吸收塔喷淋层数、液气比相同时,入口粉尘含量越大,洗尘效率越高。按现有的电除尘要求和脱硫液气比设计,吸收塔喷淋洗尘率在 60% ~ 80% 之间^[6]。

如图 2 所示,脱硫后的烟气中除了粉尘,同时还携带大量浆液,这些颗粒物直径均在 10.0 μm 以下,其中 3.5 ~ 10.0 μm 区间的占 50%,3.5 μm 以下的占 50%。除尘除雾阶段,脱硫后烟气先进入高效预分离器对其中的大液滴进行去除,利用 CFD 软件模拟 4 m/s 烟气中颗粒物经过预分离器的过程(如图 3 所示),烟气中大于 8.0 μm 粒径的颗粒物去除效率达 90%,质量浓度小于 50 mg/m³。

烟气经过如图 4 所示的冷凝器入口增效聚合装置,再进入如图 5 所示的冷凝层充分换热降温,根据冷凝相变原理,析出水汽“捕捉”细微雾滴和粉尘,凝并放大形成大的液滴。根据各相应工况设计,冷凝产生的凝并现象基本上可以将各粒度颗粒物粒径放大数十倍,尤其对 1.0 μm 以下的微小颗粒物有更好的凝并效果。放大后的液滴经过冷凝器自身离心脱除后,进入超精细屋脊式分离器,如图 6 所示的超

精细分离器采用孔钩特殊设计,高性能分离去除的同时,也避免了堵塞的风险。

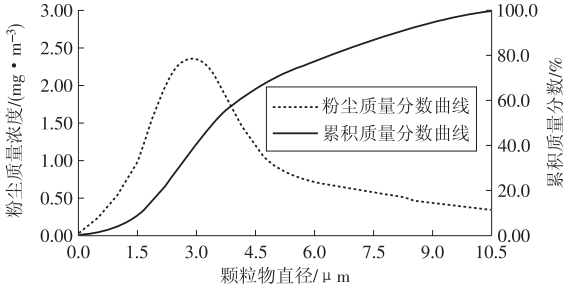


图 2 分离器入口粉尘粒径分布及质量浓度

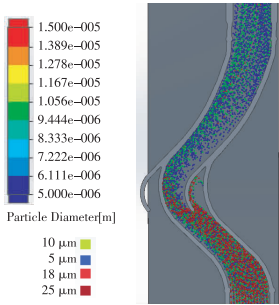


图 3 预分离器折流板通道内颗粒物运动轨迹 (4 m/s 入口流速)

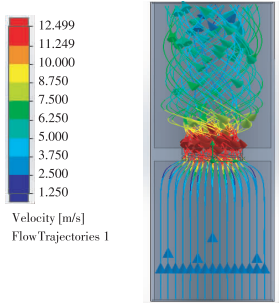


图 4 冷凝器入口增效聚合装置颗粒物运动轨迹 (4 m/s 入口流速)

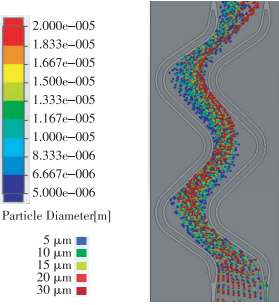


图 5 冷凝器折流板通道内颗粒物运动轨迹 (4 m/s 入口流速)

利用 CFD 软件模拟 4 m/s 烟气中颗粒物在经过超精细分离器的过程(如图 7 所示),得出对 5.0 μm 以上的液滴达到 99.9% 去除效率,对 3.5 μm 以上的(凝并后的粒径)达到 65% 以上的去除效率。此时,净烟气中的总颗粒物含量可以控制在吸收塔入口的 10% 以内,即通过单层冷凝湿膜离心除尘器,

允许吸收塔入口粉尘质量浓度 50 mg/m^3 时,吸收塔出口烟气总颗粒物质量浓度小于 5 mg/m^3 。当吸收塔入口粉尘质量浓度高时,适当增加冷凝设计量及设备级数,可以匹配高入口粉尘工况。

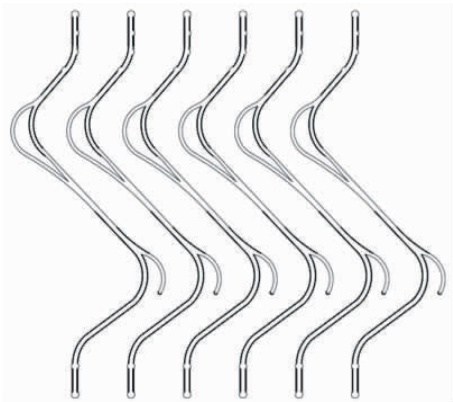


图 6 超精细分离器折流板结构示意图

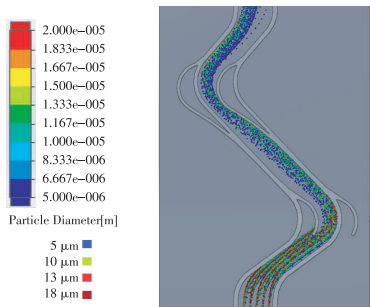


图 7 超精细分离器折流板通道内颗粒物运动轨迹(4 m/s 入口流速)

3 实施应用

华电内蒙古能源有限公司包头发电分公司 #2 600 MW 机组烟气脱硫超低排放改造工程,采用石灰石-石膏湿法脱硫技术及冷凝湿膜离心除尘除雾技术,“一炉两塔”配置,原有吸收塔作为一级塔,新建吸收塔作为二级塔,不设置烟气再热器和烟气旁路。当燃用设计煤种时,确保烟气脱硫(FGD)装置出口 SO_2 质量浓度和粉尘质量浓度满足当前环保排放要求,在使用寿命内 FGD 装置出口 SO_2 质量浓度不大于 35 mg/m^3 ,粉尘质量浓度不大于 5 mg/m^3 。

#2 机组于 2016 年 10 月完成超低排放改造,采用冷凝湿膜离心除尘技术,外排烟气达到超低排放要求。该项目冷除设备安装在二级塔内,二级塔入口烟气流量 $2863\ 176\text{ m}^3/\text{h}$,入口烟温 $55\text{ }^\circ\text{C}$,二级塔蒸发量少,需要控制吸收塔补水量。应用冷凝湿膜离心除尘除雾技术,保证粉尘排放的同时,可以很好地控制除尘除雾器冲洗补水量。在该项目中,烟气冷凝析出水量平均 $2.8\text{ m}^3/\text{h}$,吸收塔径 18.5 m ,相当于截面积水位 $250\text{ mm}/24\text{ h}$,而在气象学中,超过 $200\text{ mm}/24\text{ h}$ 降水量为特大暴雨级别^[7-8]。所以,整套

除尘除雾一体化装置相当于被特大暴雨不断淋湿,避免了长期不冲洗造成的堵塞风险。2017 年 4 月, #2 机组临时停机时,发现除尘除雾设备连续运行 7 个月无任何堵塞现象(如图 8 所示),干净如新,且经专业检测机构检测外排烟气中颗粒物质量浓度(见表 1),在低中高 3 种负荷段下,外排烟气中颗粒物质量浓度始终稳定在 2 mg/m^3 水平。



图 8 #2 机组临时停机查看除尘除雾设备照片

表 1 第三方检测机构烟尘检测数据

采样方式	采样设备	机组负荷/MW	烟尘质量浓度/(mg·m ⁻³)	
			FGD 入口	吸收塔出口
等速	崂应 3012H	500	20.7	1.9
等速	崂应 3012H	450	15.6	2.0
等速	崂应 3012H	310	14.1	2.3

4 节能、节水分析

冷凝湿膜离心除尘除雾技术的应用是技术思维的转变,其将怎么去除更小的颗粒物转变为去除大液滴的思路,冷凝除尘器与高效除雾器结合的应用方式,施工简单、初期投入少,而且避免了湿电等技术的高能耗和产生二次废水的弊端。冷凝湿膜离心除尘除雾一体化装置,分为塔内冷除一体化设备和塔外循环水闭式冷却站两部分。其中,循环水冷却站含用电设备,设有控制系统,根据机组不同负荷、煤种、季节性,智能调节循环水量、温度等参数,其能耗按机组划分见表 2。根据其冷凝相变原理,饱和湿烟气中析出大量冷凝水,对设备本体起到连续不间断的淋洗润湿效果,可以大大减少设备的冲洗频率,减少水耗。在保证安全运行的情况下,不同机组补水量控制见表 2。

另外,根据季节变化和负荷变化,循环系统可设定自动切换逻辑控制,提供节能状态和性能最优状

