

## 湿式电除尘器与管束式除尘器在工程实际应用的技术区别

张鑫东 吴金亮 韩君炎 谢华桥 翁信用  
荣盛石化股份有限公司, 浙江 杭州 311247

[摘要] 湿式电除尘器与管束式除尘器是两种在燃煤锅炉烟气超净排工程中比较常见除尘装置, 一般是配置在石灰石-石膏法脱硫工艺后道使用, 本篇文章对这两种除尘装置工作原理进行了简述, 技术特点进行了对比, 各自优点与不足也进行了说明, 为后期燃煤烟气超净排放工程除尘设备选择提供参考

[关键词] 湿式电除尘器; 管束式除尘器; 颗粒物

DOI: 10.33142/sca.v5i4.6674

中图分类号: X773:X701.2

文献标识码: A

### Technical Difference between Wet Electrostatic Precipitator and Tube Bundle Precipitator in Practical Engineering Application

ZHANG Xindong, WU Jinliang, HAN Junyan, XIE Huaqiao, WENG Xinyong  
Rongsheng Sinopec Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 311247, China

**Abstract:** The wet electrostatic precipitator and the tube bundle type precipitator are two common dust removal devices in the ultra clean exhaust project of coal-fired boiler flue gas, which are generally configured for use after the limestone gypsum desulfurization process. In this paper, the working principles of the two dust removal devices are briefly described, the technical characteristics are compared, and their advantages and disadvantages are also explained, providing a reference for the selection of dust removal equipment for the ultra static exhaust project of coal-fired flue gas in the later stage

**Keywords:** wet electrostatic precipitator; tube bundle dust collector; particulate matter

#### 引言

伴随我国国民经济的高速发展, 生态环境也遭到了严重破坏, 近些年政府加大了对生态环境的治理保护力度, 工业烟气排放是环境治理的重点内容之一。荣盛石化股份有限公司的子公司荣翔化纤有限公司聚酯产能为 60 万吨/年, 有五台有机热载体燃煤锅炉为聚酯生产提供热源, 2016 年贯彻政府的环保要求对锅炉的烟气排放进行了超净排技改, 技改项目为脱硫脱硝除尘一体化项目, 其中五台炉公用的石灰石-石膏湿法 (FGD) 脱硫系统和湿式电除尘系统为一体式, 在脱硫塔顶部安装湿式电除尘器, 备用脱硫塔未安装除尘装置, 当年投用后效果良好, 达到当时环保排放要求; 2018 年底, 杭州市又修订出台新的《锅炉大气污染物排放标准》(DB3301/T0250-2018), 提升了锅炉烟气排放达标标准, 荣翔化纤有限公司的烟气排放脱硫脱硝都在新标准限值以内, 粉尘排放使用脱硫主塔时因为配置有湿式电除尘系统也可控制在新标准限值以内, 但是, 脱硫副塔未配置除尘系统, 粉尘排放就可能超标, 为此荣翔化纤公司又进行技改, 2019 年在脱硫备塔增加了管束式除尘器系统, 调试投用后粉尘排放控制在新标准限值以内。本文就根据工程改造及生产应用中两种除尘器技术特点进行对比分析, 以便在同类工程中对除尘器的选择提供参考。

#### 1 湿式电除尘器

##### 1.1 工作原理

湿式电除尘器作用是脱除湿烟气中的超细颗粒物和

雾滴, 达到烟气净化的目的, 其除尘流程主要分为四步: 烟气的电离; 颗粒物与离子碰撞荷电; 荷电颗粒物向集尘极 (阳极) 移动被捕集; 将集尘极上的粉尘清除。

湿式电除尘器工作原理是通过静电控制装置和直流高压电源装置, 将交流电变成直流高压电加至湿式电除尘器的阴阳两极, 在电晕线 (阴极) 和集尘极 (阳极) 之间形成强大的电场, 含有微细固相、液相颗粒和它们的气溶胶的饱和湿烟气进入电场后, 电晕线在高压电场作用下发射出大量电子, 并向集尘极 (阳极) 高速运动, 在电场力的作用下, 高速运动的电子高速撞击中性分子, 从气体分子中电离出一个或若干个外层电子, 中性分子转变为正离子和自由电子, 这些派生的电子在电场作用下继续高速运动, 撞击新的中性分子而使其电离, 如此迅速地派生出新的离子和电子, 在电晕线附近的气体发生雪崩式电离, 在电晕线周围 2mm 形成电离区, 烟气中颗粒物进入电场后, 电场内运动的离子与颗粒物碰撞使其荷电。这些荷电的颗粒物微粒在电场力的作用下, 作定向运动, 抵达到集尘极的阳极管上。荷电粒子在阳极管上释放电子并被捕集, 在冲洗系统及重力作用下流到脱硫塔底部浆液区, 经排浆装置排出。这样就达到了净化颗粒物的目的。净化过的烟气, 经烟囱排入大气。

备注: 进入湿式电除尘器的饱和湿烟气由于水滴的存在, 水的电阻相对较小, 水滴与颗粒物结合后, 使得高比电阻的颗粒物比电阻下降, 因此湿式电除尘的工作状态会更加稳定。

## 1.2 湿式电除尘器的效能及技术特点

湿式电除尘器效能及技术特点有：除尘效率高，达到  $5\text{mg}/\text{Nm}^3$  以下，对粉尘适应能力强，能有效去除亚微米级颗粒物、 $\text{SO}_3$ 、重金属及其氧化物、气溶胶以及  $\text{PM}_{2.5}$  的细微颗粒物等；能适用于处理较高温度，高湿度的烟气；没有机械振打装置，所以不会产生二次扬尘；安装改造工作量较大，造价相对较高，除尘过程中需要高压电源不断的提供能量，运行费用也相对较高，因为高压电存在，如果操作不当有一定火灾安全隐患，所以操作技术规范性要求较高。

## 1.3 湿式电除尘器的结构

湿式静电除尘器在结构上有两种基本型式：管式和板式。管式静电除尘器的集尘极为多根并列的圆形或多边形导电玻璃钢管，电晕线（阴极线）一般选用钛合金材质，均布于玻璃钢管中间，管状湿式静电除尘器用于处理垂直流动的烟气。板式静电除尘器的集尘极呈平板状，可获得良好的水膜成形的特性，极板间均布电晕线，板式湿式静电除尘器可用于处理水平或垂直流动的烟气。荣翔化纤有限公司的湿式电除尘装置采用的是蜂窝管式结构。

湿式电除尘器结构主要由电气系统、电场系统、保温热吹风系统、冲洗水系统和壳体四部分组成。电气系统是把交流电转换成高压直流电，为电场提供稳定的高压电源；电场系统是除尘器的核心由导电玻璃钢管组成的集尘极，连接高压电的正极并与地有效连接，玻璃钢管中间布置有电晕线，连接高压电的负极，烟气粉尘就是在电场中被荷电后捕集，然后被喷流水冲洗后脱除；保温热吹风是为了保障直流高压电源的稳定运行的配套设施，为高压绝缘子加热干燥，防止结冰结露发生闪络短路故障等；冲洗水系统主要是喷淋水定期对电晕线、集尘极玻璃钢管内壁等内部构件进行冲洗，确保湿式电除尘器正常稳定运行。

## 2 管束式除尘器

### 2.1 管束式除尘器工作原理

管束式除尘装置的使用环境是含有大量液滴的  $50^\circ\text{C}$  左右的饱和净烟气，特点是雾滴量大，雾滴粒径分布范围广，由浆液液滴、凝结液滴和尘颗粒组成；除尘主要是脱除浆液液滴和尘颗粒。管束式除尘器除尘流程主要分三步：

(1) 细小液滴与颗粒的凝聚：大量的细小液滴与颗粒在高速运动条件下碰撞机率大幅增加，易于凝聚、聚集成为大颗粒，从而实现从气相的分离。

(2) 大液滴和液膜的捕悉：除尘器筒壁面的液膜会捕悉接触到其表面的细小液滴，尤其是在增速器和分离器叶片的表面的过厚液膜，会在高速气流的作用下发生“散水”现象，大量的大液滴从叶片表面被抛洒出来，在叶片上部形成了大液滴组成的液滴层，穿过液滴层的细小液滴被捕悉，大液滴变大后跌落回叶片表面，重新变成大液滴，实现对细小雾滴的捕悉

(3) 离心分离下的液滴脱除

经过加速器加速后的气流高速旋转向上运动，气流中的细小雾滴、尘颗粒在离心力作用下与气体分离，向筒体

表面方向运动。而高速旋转运动的气流迫使被截留的液滴在筒体壁面形成一个旋转运动的液膜层。从气体分离的细小雾滴、微尘颗粒在与液膜层接触后被捕悉，实现细小雾滴与微尘颗粒从烟气中的脱除。

气体旋转流速越大，离心分离效果越佳，捕悉液滴量越大，形成的液膜厚度越大，运行阻力越大，越容易发生二次雾滴的生成；因此采用多级分离器，分别在不同流速下对雾滴进行脱除，保证较低运行阻力下的高效除尘效果。

### 2.2 管束式除尘器效能及技术特点

管束式除尘器效能及技术特点有：除尘效率高，达到  $5\text{mg}/\text{Nm}^3$  以下、消除石膏雨，出口液滴最低测试值为  $25\text{mg}/\text{Nm}^3$ 、运行阻力低，不增加额外的运行成本、只需利用原有吸收塔空间进行改造，不改变吸收塔外部结构、施工安装工期短，可在 30 天内完成改造、因为管束式除尘器由改性高分子材料制造，材料价格低廉，制作费用低，所以投资成本低，运行费用省，经济性好、安全性高，稳定可靠。

### 2.3 管束式除尘器装置结构

管束式除尘器主要有：汇流环、管束筒体、导流环、增速器、分离器等组成。汇流环主要作用是控制液膜厚度，维持合适的气流分布状态；管束筒体内筒壁光洁，筒体垂直，断面圆滑，无心，主要作用是捕捉收集粉尘；导流环主要作用是控制气流出口状态，防止捕获液滴被二次带走；增速器主要作用是确保以最小阻力条件提升气流的旋转运行速度；分离器作用是实现不同粒径的雾滴在烟气中的分离。

## 3 湿式电除尘器与管束式除尘器对比及说明

湿式电除尘器与管束式除尘器都是用来处理含微量粉尘和微颗粒的除尘装置，主要是去除脱硫工艺后湿烟气中的尘、酸雾、水滴、气溶胶、重金属微颗粒、 $\text{PM}_{2.5}$  等有害物资，都能够满足烟气粉尘超净排放限值要求。但是，两种装置技术原理不同，改造施工及实际应用中还是有存在大区别，下面就荣翔化纤的两台湿式电除尘器与管束式除尘器实际情况举例做个对比，工程初始设计工况参数及工程改造后要达到污染物排放目标由下面表格展示。

表 1 FGD 入口烟气参数

项目	单位	数值	备注
锅炉台数	台	5 (4用1备)	
FGD 入口烟气体量(工况)	$\text{m}^3/\text{h}$	240000 (四台炉满负荷)	
FGD 入口烟气温度	$^\circ\text{C}$	130	
烟气含氧量		9%	
烟气污染物成份 (标准状态, 干基, 9%, $\text{O}_2$ )			
FGD 入口粉尘浓度	$\text{mg}/\text{Nm}^3$	$\leq 30$	

表 2 装置在设计条件改造增加除尘装置后污染物排放极限值

项目	单位	数值	备注
FGD 出口粉尘浓度	$\text{mg}/\text{Nm}^3$ (工况, 干基, 9% $\text{O}_2$ )	$\leq 5$	
雾滴	$\text{mg}/\text{Nm}^3$ (标态, 干基, 9% $\text{O}_2$ )	$\leq 30$	

基于上述初始工况条件和改造后污染物排放极限值要

求一致，两种除尘装置具有可比性，具体对比表如下表 3:

表 3 湿式电除尘器与管束式除尘器技术对比表

序号	对比项目	湿式电除尘器	管束式除尘器
1	改造工程工作量	改造工作量大，脱硫塔塔体需要切割及焊接，所需人力物力较大	改造工作小，脱硫塔不需要变动，所需人力物力小
2	改造工期	长(约100天左右)	短(30天以内)
3	改造项目投资费用	约800万	约80万
4	运行费用	较高(电功率80kW左右)	低(电功率2.5kW左右)
5	对锅炉负荷适应范围	30%-100%BMCR 工况范围	40%-100%BMCR 工况范围
6	除尘效果	优良	较优
7	装置安全风险	一般	低

通过以上表 3，湿式电除尘器相较于管束式除尘器对比说明如下：改造工程量较大，改造工期长；湿式电除尘器结构较复杂，体积大、重量大，改造工程所需要的人力较多，投用工程机械较多，大型汽吊，多台焊机，还需要在脱硫塔顶部切割，就够加固后再把湿电设备安装在脱硫塔顶部对接好，湿电顶部在安装小烟囱，工程周期需要 100 天左右方可完成；管束式除尘器结构简单，体积较小，重量轻，改造工程所需人力很少，投用工机械少，大型工程机械基本不用，2 吨电动葫芦已经属于安装最大工具，不需要改变脱硫塔结构，也不需要进行结构加固，拆除原有的除雾器后安装空间足够，管束除尘器具具备除雾功能，效能更优，施工周期 30 天内即可完成；

(2) 投资费用大：湿式电除尘器的电晕线材料需要具有强度高，抗腐蚀、比电阻低的特性，选用的是钛合金，价格昂贵，收尘极材料需要具抗腐蚀，颗粒物附着性好，比电阻低的特性，选用的是导电玻璃钢管，另外还需配置高压电源系统，造价高，再加上改造工程量较大，所以整个投资费用很高，约 800 万左右；管束式除尘器有改性高分子材料制成，价格低廉，没有任何电气设备和动设备，改造工程量较少，所以整个投资费用较低约 80 万左右；由此可以看出管束是除尘器投资费用比湿式电除尘器投资费用低很多。

(3) 运行费用高：①电耗：湿式电除尘器由有高压电源产生电场，实际电功率约为 80kW 左右，管束式除尘器利用烟气自身的动力在管束内产生的离心力除尘，只是增加了一台全自动冲洗过滤器配套增压水泵，实际电功率约为 2.5kW 左右，电功率费用管束式除尘器约是湿电的 3.1%；②水耗：安装湿式电除尘器装置脱硫塔需在其顶部湿式电除尘器下面安装除雾器，除雾器需定时清洗，湿式电除尘器也需定时对集尘极冲洗清除灰尘，消耗一定量的水约 38T/d，管束式除尘器定时对管束装置进行冲洗，消耗水量与湿式电除尘器相当，区别不大，也为约 38T/d；③维护保养：湿式电除尘器高压电源及相关高压配件需定期检

查保养，老化易损件定期进行更换，阴极线是钛合金材料，有衰减周期，更换费用较高；管束式除尘器设备主体是改性高分子材料制成，抗腐蚀抗衰老能力强，维护保养工作量小，检查喷头有没有堵、管接头是否松动，进行紧固疏通等少量工作即可，基本没有什么易损或定期更换备件；

(4) 对锅炉的负荷适应范围宽，除尘效果更优：①湿式电除尘器对锅炉负荷适应范围瓶颈主要在脱硫工序，脱硫对锅炉负荷的适应范围为 30%-100%BMCR 工况范围内；管束式除尘器对烟气的流量有相对高的要求，烟气流速低达不到设计要求的除尘效果，所以对锅炉负荷适应范围为 40%-100%BMCR 工况范围内；②湿式电除尘器除尘效果良好，对锅炉燃烧工况和燃煤煤种变化的适应性强，对脱销过程生成的氨溶胶能有效去除；管束式除尘器相对湿式电除尘器除尘效果稍有欠缺，对于锅炉使用硫含量稍高的燃煤，管束式除尘器除尘效率会有一定影响，对脱销过程生成的氨溶胶去除效果不佳；

(5) 装置运行安全风险较高：国内外湿式电除尘器有多起火灾案例，湿式电除尘器因为有高压电存在，长时间未对湿式电除尘器进行喷淋水冲洗，导致环境干燥，如高压电发生闪络，电场空间有可燃气存在，引发火灾，或者玻璃钢被电火花点燃引发火灾；管束式除尘器不需要高压电，也没有什么高风险源存在，风险极低，国内外未听说过重大风险事故；

#### 4 结论

湿式电除尘器与管束式除尘器是目前燃煤锅炉烟气为达到超净排放目标，脱去烟气中所含的微量粉尘和微颗粒的两种技术原理的除尘装置，都是燃煤锅炉烟气先经过布袋除尘器或静电除尘器对烟气进行初除尘，先去除烟气中的大颗粒粉尘，最后再经湿式电除尘器或管束式除尘器脱除微细颗粒物，使烟气达到超净排放的要求，烟气粉尘排放可以控制在到 5mg/Nm<sup>3</sup> 以下。

湿式电除尘器对粉尘去除效率高、对微量粉尘和微颗粒、SO<sub>3</sub>、气溶胶等污染物去除净化效率高，对于燃煤炉子工况变化较大，燃煤煤种更换频次高，以及烟气排放标准要求高的地方适合选用；管束式除尘器投资及运行费用低，保养维护简单，安全风险低，在锅炉燃烧工况稳定、改造场地受限、装置安全要求较高的地方适合选用。

#### [参考文献]

[1] 闫循英, 王峰. 管束式除尘器与湿式除尘器技术初探[J]. 绿色科技, 2016(20): 3.  
[2] 文艳林. 管束式除尘器在粉尘超低排放中的应用[J]. 热电技术, 2016(2): 3.  
[3] 刘鹤忠, 陶秋根. 湿式电除尘器在工程中的应用[J]. 电力勘测设计, 2012(3): 5.  
作者简介: 张鑫东(1975-)男, 本科, 工程师, 主要从事聚酯化纤公用工程技术及管理工作。