

# 超低排放湿式除尘器方案的选择

司徒有功

(大唐南京发电厂, 江苏 南京 210059)

**摘要:** 为降低污染物排放量, 国内燃煤发电机组开始了新一轮环保改造, 本文介绍了目前所用湿式电除尘器的三种技术类型, 即柔性电极湿式电除尘、金属电极湿式电除尘和导电玻璃钢电极湿式电除尘的工作原理和技术特点, 并进一步阐述了立式玻璃钢结构湿式除尘器的结构形式和特点, 对燃煤发电机组超低排放改造增加湿式除尘器的方案选择, 具有一定的参考价值。

**关键词:** 湿式除尘器; 立式玻璃钢结构湿式除尘器; 沉淀极; 电晕线; 超低粉尘检测

## 0 引言

近日, 国家环保部为降低燃煤发电机组污染物排放量, 联合发改委、国家能源局下发了关于印发《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014-2020年)》的通知, 文件要求到2020年, 现役60万千瓦及以上燃煤机组、东部地区30万千瓦及以上公用燃煤发电机组、10万千瓦级以上自备燃煤发电机组及其它有条件的燃煤发电机组, 改造后大气污染物排放浓度基本达到燃气轮机排放限值。排放限值为:  $\text{SO}_2 \leq 35\text{mg/Nm}^3$ ,  $\text{NO}_x \leq 50\text{mg/Nm}^3$ , 烟尘  $\leq 10\text{mg/Nm}^3$ 。

火电厂目前配置的烟尘处理装置是为了满足: 国家环境保护部颁布了《关于执行大气污染物特别排放限值的公告》(公告2013年第14号)的要求, 重点地区排放标准为  $20\text{mg/Nm}^3$ ; 进行的改造项目有: 电除尘前加低温省煤器、在静电除尘上增加高频电源、增加旋转电极、增加布袋除尘器等, 这些方案都很难实现烟尘  $\leq 10\text{mg/Nm}^3$  的目标, 因此, 燃煤机组的新一轮环保改造已近在咫尺, 2014年以浙能为代表的超低排放改造工程在全国燃煤机组中已吹响号角, 嘉兴、舟山等电厂已率先投运, 五大集团中, 国电在苏龙、宿迁已进行了试点, 大同、泰州等电厂正在改造中, 大唐集团在乌沙山、南京电厂正在做试点, 政策导向也在为改造工作推波助澜, 三部委的《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014-2020年)》的出台、环保专项补助资金的应用、改造电价补贴的传言等都带来了利好, 但对降低烟尘的改造方案却不尽相同, 下面我谈谈个人的一点浅薄意见。

## 1 湿式静电除尘器的工作原理

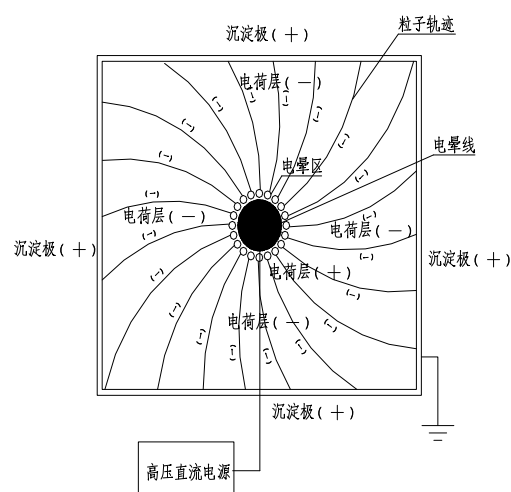


图1 湿式静电除尘器的工作原理

湿式静电除尘器(WESP)是用于脱除湿烟气中的尘、雾、液滴及气溶胶、PM<sub>2.5</sub>等杂质的静电除尘设备。由于处理的烟气为湿烟气(一般烟气中含有的水份为饱和状态), 通常称为湿式静电除尘器。工作原理包括三个基本过程:

- 悬浮粒子荷电;
- 带电粒子在电场内迁移和捕集;
- 捕集物从沉淀极上滑落清除。

湿式静电除尘器(WESP)主要由阳极系统(沉淀极)、阴极系统(电晕线)、高压直流供电电源组成, 工作时利用高压静电装置对架设在湿式静电除尘器内的电晕线施加高压电, 在阴、阳两极之间形成了高压静电场, 在电场力的作用下, 整个沉淀极管内都形成电晕区。当含尘、液滴、气溶胶、酸雾

及其他污染物的烟气进入足以使气体电离的静电场时,产生大量的正负离子和电子并使尘、酸雾、液滴等荷电,荷电后的粒子在电场力的作用下向沉淀极移动并在沉淀极上沉积,在沉积过程中沉淀极管内壁形成含尘液膜,含尘液膜在重力作用下流到湿式静电除尘器下部的集液槽中,从而达到捕集烟气中尘、液滴、气溶胶、酸雾和其它污染物的目的。

图 1 表示了电除尘器的工作原理。

## 2 湿式除尘器的方案比较

### 2.1 湿式电除尘技术的技术路线

在目前国内外的湿式电除尘器技术中,主要的差别在于阳极板材质的选取,由于该设备处理的对象为含大量游离水的饱和湿烟气,在工作过程中存在着电化学腐蚀、电位差腐蚀、低温腐蚀等,阳极板的选取和工作状态对整个设备的效果起到至关重要的作用。

目前国内外主要的湿式静电除尘器的类型或技术流派有三种:柔性电极湿式电除尘、金属电极湿式电除尘和导电玻璃钢电极湿式电除尘。

#### 2.1.1 柔性电极湿式电除尘技术

柔性电极湿式除尘器是利用静电除尘原理,采用新型耐酸碱腐蚀性优良的柔性纤维材料,强化超细颗粒物高效收集与彻底清灰,实现燃煤脱硫烟气清洁达标排放。

柔性电极湿式除尘器阳极板采用耐酸碱腐蚀柔性纤维织物,正常运行耗水量为零。阴极线采用铅铋合金芒刺线,耐腐蚀,广泛适用于饱和湿烟气环境。

柔性电极湿式除尘器的指标如下:

粉尘去除率(含石膏):	≥ 70%
SO <sub>3</sub> 去除率:	≥ 20%
雾滴含量:	低于 20mg/Nm <sup>3</sup>
系统阻力:	200~400 Pa

目前,此类型湿式电除尘器已经在国电益阳 300MW 机组、国电荃阳 600MW 机组等工程中投运,从运行情况看除尘效果基本能达到粉尘浓度设计值。

柔性电极湿式除尘器的电压稳定性、抗腐蚀能力等还需进一步提升。

#### 2.1.2 金属电极湿式电除尘技术

金属电极湿式电除尘器的主要工作原理与干式

电除尘器基本相同,利用阴极放电,使流经其中的雾滴、SO<sub>3</sub>、尘荷电,在电场的作用下向阳极板运动,最终在阳极板(集尘极)上实现收集、去除。与干式电除尘器通过振打将极板上的灰振落至灰斗不同的是,湿式电除尘器将水喷至极板上使粉尘冲刷到灰斗中随水排出。

金属电极湿式电除尘器运行的三个阶段与干式 ESP 相同:荷电、收集和清灰。从原理上来讲,首先由于水滴的存在对电极放电产生了影响,要形成发射离子,金属电极中的自由电子必须获得足够的能量,才能克服电离能而越过表面势垒成为发射电子。让电极表面带水是降低表面势垒的一种有效措施。水覆盖金属表面后,将原来的“金属—空气”界面分割成“金属—水”界面和“水—空气”界面,后两种界面的势垒比前一种界面的势垒低很多。这样,金属表面带水后,将原来的高势垒分解为两种低势垒,大大削弱表面势垒对自由电子的阻碍作用,使电子易于发射。另外,水中的多种杂质离子在电场作用下,也易越过表面势垒而成为发射离子。这些都改变了电极放电效果,使之能在低电压下发生电晕放电。其次由于水滴的存在,水的电阻相对较小,水滴与粉尘结合后,使得高比电阻的粉尘比电阻下降,因此湿式静电除尘的工作状态会更加稳定;另外由于湿式静电除尘器采用水流冲洗,没有振打装置,所以不会产生二次扬尘。

所有的喷淋水在湿式静电除尘器下部的灰斗收集后,自流至循环水箱用于喷淋。在灰斗中收集的喷淋水不仅含有灰尘,还溶解了烟气中的三氧化硫和从 FGD 携带的水滴,因此 pH 值将呈酸性,为降低该水的腐蚀性,需加入 NaOH 以提高 PH 值。氢氧化钠的加入量将根据循环水箱中的 pH 值调节。

金属电极湿式除尘器的指标如下:

粉尘去除率(含石膏):	≥ 70%
SO <sub>3</sub> 去除率:	≥ 20%
雾滴含量:	低于 100mg/Nm <sup>3</sup>
系统阻力:	300 Pa

目前,此类型湿式电除尘器已经在国内的华电淄博 300MW、嘉兴电厂 1000MW 等应用。

金属电极湿式除尘器阳极板的腐蚀是一个致命弱点,一旦碱性水膜消失(如喷嘴堵塞),腐蚀将无法避免。同时,不间断的喷水增加了烟气的温度,在湿式电除尘后增加烟气升温装置也必不可少。

### 2.1.3 导电玻璃钢电极湿式电除尘技术

导电玻璃钢电极湿式电除尘收尘（雾）是使含尘（雾）气体通过高压直流静电场，利用静电分离原理将气体净化。利用静电分离作用净化气体一般分为四个过程：

#### （1）气体电离

使气体通过阴阳极间的电场，电场保持在电晕放电状态，为此电收尘（雾）器都采用非均匀电场，使电晕控制在电场强度较大的区域内。目前电收尘（雾）器的电晕电极（又称放电电极）是用导线做成，收尘电极采用管式电收尘（雾）器的操作电压一般在 50-70kV，为了维持比较高的极间电压，均采用负极作电晕电极。

#### （2）颗粒荷电

在电场的作用下，离子与颗粒碰撞荷电的过程。当一个离子接近颗粒时，颗粒靠近离子的部位被感应生成相反的电荷，于是离子被吸着的颗粒上，使颗粒荷电。

#### （3）荷电烟尘（雾）的运动

荷电烟尘（雾）在电场力的作用下，向着与其电性相反的电极方向产生加速度，于是它与气体的相对速度从零开始增大，这就使烟尘与气体开始分离。由于电晕电极有一强大高速离子流（也称电风）流向收尘极，其电性与电晕电极相同。使原来向电晕电极运动的颗粒的电性被电风的离子中和，然后又带上与电风电性相同的电荷向收尘电极运动。

#### （4）荷电颗粒放电

荷电烟尘（雾）在电场力的作用下到达收尘电极以后，烟尘（雾）上的电荷变与收尘电极上的电荷中和，从而使颗粒恢复中性，如烟气含湿量较大，则可以自流至底部的集液装置，吸附在收尘极上尘（雾）则通过定期的冲洗来将尘（雾）洗涤下去。

导电玻璃钢电除雾器制作时主要由以下部分组成：上壳体、集尘极室、中下壳体、绝缘子室、阴极系统及内部冲洗装置。

图 2 表示了导电玻璃钢电除雾器结构简图。

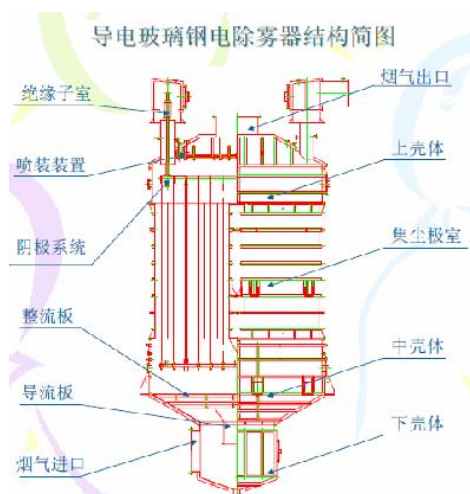


图 2 导电玻璃钢电除雾器结构简图

导电玻璃钢阳极板，蜂窝结构，具有收尘面积大、荷电均匀、长寿命等特点。

玻璃钢电除雾器本体、阳极管组等的材料为碳纤维增强复合塑料，阴极线材料为钛合金。

碳纤维主要是由碳元素组成的一种特种纤维，其含碳量随种类不同而异，一般在 90%以上。碳纤维具有一般碳素材料的特性，如耐高温、耐摩擦、导电、导热及耐腐蚀等，但与一般碳素材料不同的是，其外形有显著的各向异性、柔软、可加工成各种织物，沿纤维轴方向表现出很高的强度。

CF是一种力学性能优异的新材料，它的比重不到钢的 1/4，碳纤维树脂复合材料抗拉强度一般都在 3500MPa以上，是钢的 7~9 倍，抗拉弹性模量为 23000~43000MPa亦高于钢。因此CF的比强度即材料的强度与其密度之比可达到 2000MPa/(g/cm<sup>3</sup>)以上，而A3 钢的比强度仅为 59MPa/(g/cm<sup>3</sup>)左右，其比模量也比钢高。

导电玻璃钢电极湿式除尘器的指标如下：

粉尘去除率（含石膏）：	≥ 80%
SO <sub>3</sub> 去除率：	≥ 20%

雾滴含量：                                不高于 20mg/Nm³  
系统阻力：                                300～400 Pa

导电玻璃钢电极湿式除尘器在化工行业已拥有上百台的使用业绩，但由于行业的局限性，处理的烟气量普遍偏小，约在 20 万m³/h左右。

目前，导电玻璃钢电极湿式除尘器已在国电都匀福泉电厂的 600MW 机组中、国电苏龙电厂、宿迁电厂投运，国电泰州电厂、大唐南京电厂等正在施工中。

2.2 湿式电除尘技术方案的比较

导电玻璃钢电极湿式电除尘技术采用专利的 CF 材质，阳极板具有良好的导电性、耐腐蚀性，表面光滑，系统运行电耗低，不额外增加药品，收集水可直接回用。物耗、能耗低。由于基本不喷水，且阳极吸附极性水液滴和SO₃气溶胶，可有效控制

PM2.5 的排放和避免烟囱雨的发生。

柔性电极湿式电除尘技术采用非金属织物柔性电极作为阳极板，在水浸润后可具备导电性，材质本身也耐腐蚀，不额外增加药品，收集水也可回用。物耗、能耗低。由于基本不喷水，且阳极吸附极性水液滴和SO₃气溶胶，可有效控制PM2.5 的排放和避免烟囱雨的发生。

金属电极式湿式电除尘技术的电极需采用高耐腐的哈氏合金（如 C276）或不锈钢 316L 材料制作，设备内需布置大量喷嘴，阳极板有腐蚀风险，还需对收集水进行废水处理，物耗、能耗高。上述三种湿式电除尘技术主要对比参数见表 1。

通过比较，导电玻璃钢电极湿式电除尘技术相对于柔性电极和金属电极具有一定的优势。

表 1 湿式电除尘技术主要参数对比表

参数描述	导电玻璃钢	柔性电极	金属电极
电极材质	导电玻璃钢	非金属织物	316L
导电方式	具有良好导电性和防腐性，不需借助外部水源，六角蜂窝结构，荷电均匀，单位体积阳极板面积大	金属织物表面需保持有水湿润且均匀，四角板块结构，荷电相对均匀，单位体积阳极板面积比较大	金属不直接作为电极，使用时需保证表面均匀覆盖水膜，板块平行结构，荷电均匀，单位体积阳极板面积小
冲洗方式	电极表面光滑，只需定时冲洗防止电极表面结垢，大约 24h 一次	定期冲洗	需保持金属电极表面水膜
水耗	～10t/h	～5t/h	～80t/h
布置要求	竖直	竖直	水平
系统阻力	～500Pa	～700Pa	～1000Pa
性能对比	阳极板机械强度较高，介于金属极板和柔性极板之间。 一个电场布置时，除尘效率可达 70～85%。 间歇冲洗，水耗较小。 除尘效率与除尘面积相关，在相同流速及停留时间下总集尘面积大； 设备总尺寸较紧凑； 本体阻力小于 300Pa；	柔性极板，自身机械强度弱，极板周围需设置张紧装置。 一个电场布置时，除尘效率 70～85%。 无水膜冲洗清灰，利用从烟气中收集的酸液带出灰； 仅在启动前、停运后对极板喷水，平时定期冲洗，水耗小。 除尘效率与除尘面积相关，在相同流速及停留时间下总集尘面积大； 设备总尺寸较紧凑； 本体阻力小于 300Pa；	金属极板，机械强度高，刚性好，不易变形，极间距有保证。 一个电场布置时，除尘效率一般为 70%。 采用水膜连续冲洗清灰，水耗大，碱消耗大，对喷嘴性能要求高。 收集的酸液稀释加碱中和，中和后的水一部分进入脱硫补水，一部分外排； 除尘效率与除尘面积有关，在相同流速及停留时间下总集尘面积较小； 设备总尺寸略大； 本体阻力小于 300Pa。
可靠性对比	导电玻璃钢使用寿命 10-15 年左右，与产品的质量，制作产品所用的树脂等原材料性能有关； 装置内部设喷淋水系统，不连续运行； 主体采用碳钢加玻璃鳞片。 运行中电场均匀，电压较稳定	柔性阳极使用寿命保证在两个大修期； 装置内部设喷淋水系统，不连续运行。柔性极板框架材质 2205、2507 不锈钢，其它支撑构件采用碳钢加玻璃鳞片； 受阳极材料影响，电场放电距离会发生变化，电压的稳定性较差。	阳极板低温耐腐蚀性能差，但有连续中性喷淋水膜保护，产品声称使用寿命 15 年以上； 喷嘴为易损件，对水质要求较高。一旦喷嘴堵塞，阳极板无喷淋水保护，易腐蚀、易结垢； 无框架，内部支撑构件采用碳钢加玻璃鳞片。 设备出口烟气中的含水量增大，装置后一般需增加烟气加热装置。
使用效果	可有效控制 PM2.5 的排放和避免烟囱雨的发生	可有效控制 PM2.5 的排放和避免烟囱雨的发生	由于连续喷水，烟气湿度上升较多，需配套建设 MGGH,提高烟温以控制烟囱雨的发生

3 立式玻璃钢结构湿式静电除尘器的结构形式和特点

立式玻璃钢结构湿式静电除尘器主要由阳极系统（沉淀极）、阴极系统（电晕线）、高压直流供电电源、间断冲洗系统等组成。

图 3 为立式玻璃钢结构湿式静电除尘器的结构图。

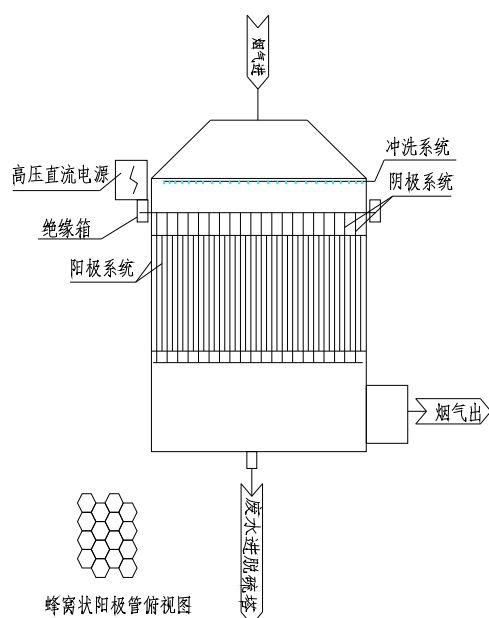


图 3 立式玻璃钢结构湿式除尘器的结构图

### 3.1 阳极系统（沉淀极）

阳极系统中的沉淀极采用立式蜂窝状结构，受力状态好、结构紧凑、六边型结构放电死区小。沉淀极采用 CF 高导复合材料整体加工而成。该材料是以高分子材料为粘合剂、纤维及其制品作增强材料、高碳纤维为导电功能材料合成的高导复合材料，它具有重量轻、导电性能优良、耐腐蚀性能优异、阻燃性能好、疏水性强等特点，能确保湿式静电除尘器在电厂脱硫之后的烟气中高效稳定运行，有效地除去尘、雾、液滴及气溶胶、PM2.5 等杂质，彻底消除石膏雨现象。

湿式静电除尘器运行时收集下来的液滴在沉淀极表面形成液膜，由于该材料（CF）具有很强的疏水性，能有效地阻隔尘和石膏对沉淀极壁的粘接，靠重力自流至下部集液槽，实现自动清灰，收集液可返回脱硫塔内循环使用。

### 3.2 阴极系统（电晕线）

阴极系统包括电晕线、绝缘箱等。

电晕线采用刚性高效芒刺型结构，材料选用耐氯离子及电化学腐蚀的钛合金。可最大限度地提高

烟气流速（安全运行风速可达到 3.5m/s），有效解决了阴极系统的腐蚀。同时，阴极性的固定采用刚性连接，使得放电距离均匀，提高了电压的稳定性。

利用最新研发的具有特殊几何形状、起晕电压低的电晕线，通过大量实验研究找到了电晕线和沉淀极之间最佳距离。电晕线采用高效芒刺饱和放电形式，增强了电场强度，进一步提高了电流密度和粒子驱动力。能确保立式玻璃钢结构湿式静电除尘器在高烟气流速条件下具有较高的除尘、除雾效率。

### 3.3 供电电源

立式玻璃钢结构湿式静电除尘器多采用高频电源供电，相对工频电源，其具有转换效率高、高压特性好、供电平衡、电场闪络控制优越等优点。

### 3.4 间断冲洗系统

为防止少量烟尘的沉积，在沉淀极管上部设置有一层间断喷淋装置，此喷淋装置由冲洗水泵供水，采用高压及专用的无堵塞冲洗喷嘴，每隔 24~48h 冲洗一次，每次 3~5min。立式玻璃钢结构湿式静电除尘器正常运行过程中无需冲洗，每台湿式静电除尘器分为多个电场，当需要进行间断冲洗时，控制系统会自动停掉其中一个电场或该电场降压运行，并按程序打开相应的冲洗水阀门，冲洗完成后即可开启该电场。在整个冲洗过程中仍能满足烟气污染物的达标排放。

### 3.5 电场设计

要想获得性价比最优的湿式静电除尘器，电场设计至关重要（沉淀极管长度的设置以及配套阴极系统的设计）。根据多依奇公式：

$$\eta = 1 - \frac{c}{c_0} = 1 - \exp\left(-\frac{A\omega}{Q}\right)$$

除尘效率取决于沉淀极面积、粒子直径、电流密度、电场强度和电场驱动力等；沉淀极面积与沉淀极管径、管长有关。

经过大量实验研究发现，沉淀极管径 300~330mm、管长 3.5~4.5m 性价比为最佳。沉淀极管过长容易引起电晕线共振、摆动，做功下降；沉淀极管过长会使收集下的石膏、尘等板结在沉淀极管下部不易清除，导致除尘效率下降。

## 4 结束语

燃煤机组增加湿式除尘器是新一轮环保排放改

造的必选方案,选择一种高效、节能、经济、简单的湿式除尘器是大家渴望的。

立式玻璃钢结构湿式静电除尘器应用在燃煤机组脱硫之后,除尘效率可达到 80%以上,可有效消除石膏雨现象,同时有效捕集液滴、尘、酸雾等亚微粒子,且在运行过程中不需要喷淋水及碱液,不产生新的二次污染物;收集液可返回脱硫塔循环使用。在燃煤电厂应用该产品可使尾气排放烟尘 $\leq 5\text{mg}/\text{Nm}^3$ ,达到燃气轮机组的排放标准,具有极高的推广应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 国家环境保护部. 关于执行大气污染物特别排放限值的公告(公告 2013 年 第 14 号)[Z].2013.
- [2] 大唐南京发电厂烟气污染物超低排放改造工程可行性研究报告[R].2014

---

#### 作者简介:

司徒有功(1967-),男,江苏溧水人,本科,高级工程师,从事火电厂电气技术及环保技术的研究和应用。