

# 超低排放煤电机组烟尘控制技术探讨

沈亚林, 赵 文

(神华国华太仓发电有限公司, 江苏 太仓 215433)

**摘 要:** 本文介绍了超低排放煤电机组烟尘控制的背景、国家要求与神华集团相关示范工程, 分析了烟尘超低排放的主要技术路线, 对旋转电极、湿式电除尘、高频电源、低温省煤器等新技术进行了重要分析, 并通过一个示范工程验证了烟尘分级控制的效果。结合具体案例, 深入分析了烟尘控制系统中传统配置部分与新技术部分在设计、制造、运行等方面容易存在的问题, 并提出了相应措施。介绍了超低排放烟尘仪的基本工作原理, 并通过烟尘与负荷变化的曲线分析进一步佐证了超低排放烟尘仪数据的可靠性。本文还提出了烟尘超低排放的控制目标、技术路线等方面今后的发展方向。

**关键词:** 超低排放; 煤电; 烟尘

## 0 引言

近年来, 随着全国范围内大规模雾霾天气的持续, 国家对燃煤电站烟尘排放提出了越来越高的要求。根据《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223-2011)要求, 对于大气污染联防联控工作的重点区域烟囱出口烟气中的烟尘浓度应低于  $20\text{mg}/\text{Nm}^3$  的排放限值。2014 年 9 月, 国家发改委、环保部和能源局联合下发《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020 年)》(发改能源〔2014〕2093 号), 以燃气轮机排放限值(烟尘浓度应低于  $5\text{mg}/\text{Nm}^3$ )为标杆, 对新建机组供电煤耗和大气污染物排放浓度, 以及现役机组升级改造节能减排目标作出明确规定。

神华集团积极响应国家号召, 2014 年 6 月神华国华舟山电厂 4 号机组率先成为我国首个烟尘、二氧化硫、氮氧化物均达到燃机排放标准的超低排放煤电机组, 推动我国进入煤电清洁化时代。2014 年 7 月, 神华国华三河电厂 1 号机组成为京津冀地区首个达到燃机排放标准的超低排放煤电机组, 标志着神华集团对新建和改造机组均打通了超低排放技术路线。2014 年, 神华国华电力共有 6 台机组先后达到超低排放标准, 其中新建机组 1 台, 改造机组 1 台。烟尘控制是超低排放机组的核心要求, 需要在系统配置、运行控制及烟尘监控上统筹考虑。

## 1 超低排放烟尘控制系统技术路线

超低排放机组典型配置参见图 1, 其中, 高效

低氮燃烧和全负荷 SCR 主要为为了脱硝; 高效脱硫系统主要是脱硫, 对烟尘控制也有一定作用; 在烟尘控制方面, 与常规机组相比, 增加了湿式电除尘器, 同时一般将干式多电场电除尘器的最后一个电场改为旋转电极(其余电场仍为传统的平板形), 此外, 干式电除尘器和湿式电除尘器均将采用高频电源, 低温省煤器则根据机组的实际情况决定是否安装。超低排放煤电机组典型配置参见图 1。

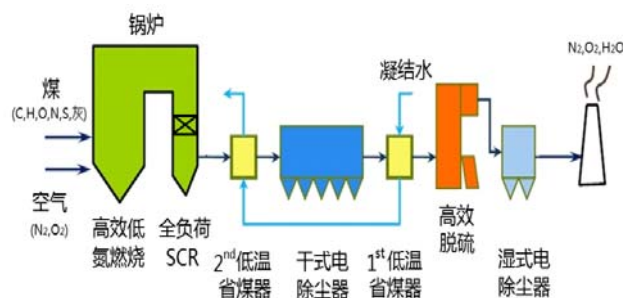


图 1 超低排放煤电机组典型配置

电除尘器的基本原理是利用强电场使气体电离, 烟尘荷电, 并在电场力的作用下分离、捕集烟尘, 由高压电源和电除尘器本体组成。1923 年, 电除尘器开始应用于火电厂排烟除尘, 因除尘效率高(99.8%以上)、阻力损失小(100-300Pa), 能耗少( $0.1-0.6\text{kW}\cdot\text{h}/10^3\text{m}^3$ ), 耐高温( $350^\circ\text{C}$ 以下)等优点, 得到普遍应用<sup>[1]</sup>。常规的电除尘器采用高压工频电源与平板形结构(若干组阳极板与阴极板平行布置, 通过定期振打清除极板上沉积的烟尘)。

旋转电极改传统的振打清灰为清灰刷清灰, 清灰刷置于非收尘区, 最大限度地减少二次扬尘, 使

极板始终保持干净,防止反电晕,除尘器效率得到保障。旋转电极的原理示意参见图2。

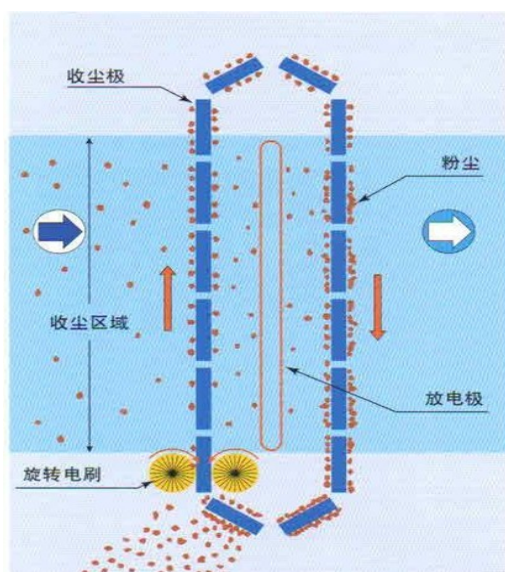


图2 旋转电极原理图

湿式电除尘器的主要工作原理与干式除尘器基本相同,即烟气中的烟尘颗粒通过电场力的作用,被吸附到集尘极上;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烟尘冲刷到灰斗中随水排出。同时喷到烟道中的水雾既能捕获微小烟尘又能降电阻率,利于微尘向极板移动。湿式电除尘器在日本、美国、欧洲已比较成熟,从日本碧蓝电厂等工程运行情况来看,湿式电除尘器可以长期高效稳定地除去烟气中PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>3</sub>等污染物微小颗粒。

高频电源把三相工频电源通过整流形成直流电,通过逆变电路形成高频交流电,再经整流变压器升压整流后,形成高频脉动电流送除尘器,其工作频率在20kHz左右。高频电源的供电电流由一系列窄脉冲构成,其脉动幅度、宽度及频率均可以调整,可以给电除尘器提供各种电压波形,控制方式灵活,可以根据电除尘器的工况提供最合适的电压波形。与工频电源相比,高频电源可增大电晕功率,增加了电场烟尘的荷电效果;转换效率与功率因数高、采用三相平衡供电对电网影响小;控制策略和控制模式多样,能适应各种工况;一体化设计、体积小、重量轻,安装方便。

低温省煤器能够降低排烟温度,减少排烟损失,提高电厂的经济性,这一提高烟气利用效率的手段便得到了火电行业的广泛关注。增设低温省煤器,

除了节能之外,还能够将电除尘器入口烟气温度降至酸露点以下(一般是90℃左右),使烟气中的大部分SO<sub>3</sub>冷凝形成硫酸雾,粘附在烟尘表面并被碱性物质中和,烟尘的比电阻大幅降低,除尘效率得到提高。一般将在酸露点温度运行的电除尘器称为低低温电除尘器,日本对低低温电除尘技术做了大量的研究,在煤电工程实践中成功解决了最受关注的是腐蚀和二次扬尘问题<sup>[2]</sup>。低温省煤器不是当前超低排放机组的必须配置。

在传统电除尘器技术的基础上,通过旋转电极、高频电源、湿式电除尘等先进技术,国内部分电厂已经实现了烟尘超低排放,对PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>3</sub>等污染物微小颗粒也有较好的抑制作用。以某机组为例,该机组采用5电场干式电除尘器(4电场+1旋转电极电场)+海水脱硫+湿式电除尘器,所有除尘器采用高频电源技术,烟尘实测结果如下(电除尘器与湿式电除尘器之间的海水脱硫装置对烟尘也有一定控制作用):

(1) 静电除尘出口烟尘浓度运行测量值 16.53 mg/Nm<sup>3</sup>。

(2) 湿式电除尘器进口含尘浓度运行测量值 10.3mg/Nm<sup>3</sup>。湿式电除尘器出口烟尘浓度运行测量值 2.46 mg/Nm<sup>3</sup>。除尘效率为 75.92%。

(3) 雾滴进口 56.06mg/Nm<sup>3</sup>, 出口 16.02mg/Nm<sup>3</sup>, 除去率为 71.39%。

(4) 三氧化硫进口 2.18ppm, 出口 0.6ppm, 除去率为 71.9%。

(5) PM<sub>2.5</sub> 进口浓度 1.7mg/Nm<sup>3</sup>, 出口浓度 0.36mg/Nm<sup>3</sup>, 去除效率为 78.66 %。

## 2 超低排放烟尘控制系统注意事项

在确定技术路线后,还需要在制造和运行上加以精心控制,才能达到机组长周期稳定超低排放。既要精心维护好传统的干式平板形电除尘器,这是烟尘控制的基础,同时,加强对旋转电极、高频电源、湿式电除尘的维护。

对于干式平板形电除尘器,国内制造运行结束已比较成熟,但有时存在烟尘瞬时超标现象,需要运行及维护根据各项因素做好运行及设备完善工作。干式平板形电除尘器烟尘瞬时超标常见原因有:电除尘器降压振打设置不合理、电除尘器振打力度不足、电除尘运行参数影响电除尘效率、快速升负

荷及持续高负荷导致电除尘效率降低、低负荷氧量偏大、入炉煤含灰量偏大、电除尘内部变形影响除尘效率等。

以某火电机组为例，该机组脱硫出口含尘量时均超标，超标时间 2 小时，最大值为  $206\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，时均值为  $57.99\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。为此，该电厂采用如下措施：1) 降低锅炉入炉煤灰分至设计值；2) 通过试验摸索，调整电除尘器的运行参数及振打时间。一、二、三电场阴阳极振打时间由原来的 1 分 05 秒改为 2 分 10 秒；二电场的充电比由 1: 1 改为 1: 3；三、四电场的充电比由 1: 1 改为 1: 5；降低一电场整流变的火花放电闭锁时间。调整后烟尘排放降低到标准值以内，没有再发生超标。该厂拟在计划停机时对电除尘器内部进行检查消缺。

在电除尘器新技术应用上，高频电源需要考虑到 L-C 等关键参数的设置，并充分考虑高频变压器的散热问题；湿式电除尘在施工时要高度重视安全，严防高空施工带来的人生危险；旋转电极电除尘器因旋转电极式电除尘器阳极系统及清灰装置均为转动部件（旋转电极结构见图 3），整体上稳定可靠，但也暴露出了设计、制造、运输、安装上的一些问题<sup>[3]</sup>。

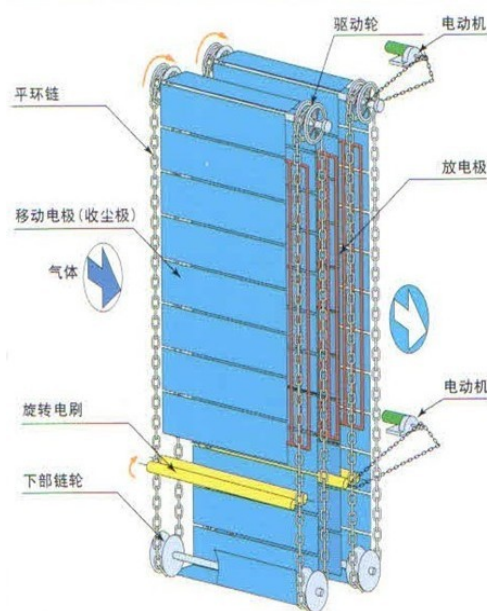


图 3 旋转电极电除尘器结构图

根据近年来旋转电极在应用上正反两方面的经验教训，在设计上，内部传动链条直接承受旋转阳极组的重量，链条的断裂将导致旋转阳极板的坍塌，需要高度重视链条的强度设计；在制造上，需严格按照相关技术图纸要求进行生产制造，制定科学合

理的生产工艺及检验规程，强化对链条、清灰刷等关键零部件的管理；在运输上，需要对整个运输过程精心策划，包装细致，防止旋转电极在运输中变形（个别旋转电极在运输中曾经翻车，造成旋转电极均匀度差影响正常使用）；在安装上，注意控制旋转阳极板与内部传动链条、上部传动轴、下部传动轴、清灰装置的安装质量，注意整体复核与调整，且在旋转电极电场安装完毕后应进行长周期的试运转（有的超低排放机组试运转时间长达一月）。同时，需要加强对电除尘器新设备的维护工作。

### 3 超低排放煤电机组烟尘控制监测系统

超低排放煤电机组产生后，由于烟尘环保监测设施与超低排放标准有所滞后，超低排放煤电机组烟尘控制监测系统得到业内的高度关注，烟尘监测系统的测量方法与检测线在不断改进，目前超低排放煤电机组烟尘监测仪以德国、美国等发达国家产品为主，其中，做得较好的产品检测线已经达到  $0.1\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，远低于  $5\text{mg}/\text{Nm}^3$  的超低排放烟尘浓度限值。

根据《火电厂烟气排放连续监测技术规范》，烟尘监测方法有浊度法和光散射法两种。其中，浊度法的原理是光通过含有烟尘的烟气时，光强因烟气的吸收和散射作用而减弱，通过测定光束通过烟气前后的光强比值来定量烟尘浓度。光散射法则是经过调制的激光或红外平行光束射向烟气时，烟气中的烟尘对光向所有方向散射，经烟尘散射的光强在一定范围内与烟尘浓度成正比例，通过测量散射光强来定量烟尘浓度。

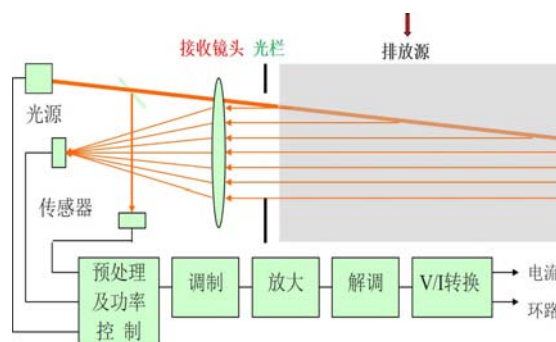


图 4 光散射法原理示意图

超低排放烟尘检测一般采用光散射法，其原理示意图参见图 4。固态光源发射经脉冲调制器调制的红外或激光平行光束，被光束照射的烟气中的颗粒物对光在所有方向散射，散射光被聚焦经检测器



监测,由放大器放大输出电压或电流信号,在一定范围内信号与颗粒物浓度呈正比。根据接收器与光源呈角度大小可分为前散射( $\pm 60^\circ$ )、边散射( $60^\circ \sim 120^\circ$ )及后散射( $120^\circ \sim 180^\circ$ )测尘仪。

在实践中,烟尘仪还常常将烟尘与热空气混合后测量,再倒推出原烟气浓度,即:运用射流法抽取原烟气与加热的空气混合进入加热取样头,相对湿度立即降低,通过取样头再加热成高温混合烟气进入测量室进行测量,根

据混合烟气的稀释比计算出原烟气烟尘浓度,结构图和现场安装图参见图5和图6。

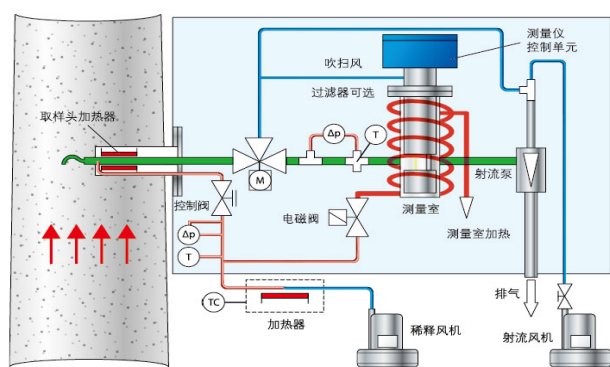


图5 某超低排放烟尘仪结构图



图6 某超低排放烟尘仪现场安装图

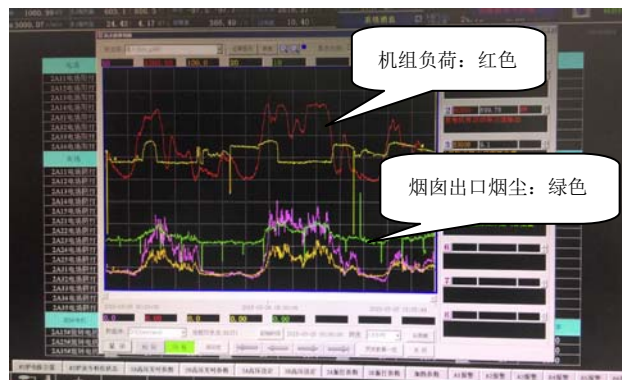


图7 某超低排放机组烟尘数值与负荷曲线对比图

通过对历史数据的分析,超低排放机组烟囱出口净烟气烟尘数据已经能够与机组负荷、干式电除尘出口烟尘数据变化趋势比较吻合。图7是某超低排放机组的历史数据截图,从中可以看出,机组负荷曲线(红色)与代表干式电除尘出口烟尘值(粉色和黄色为干式电除尘器两个方向出口)与绿色的烟囱净烟气值趋势一致。(绿色曲线数值定期间断突然下降到零为仪表定期校零过程造成)。

## 4 结论

随着全社会对大气污染的日益重视,烟尘排放标准将更趋严格,神华集团已经提出,拟在我国东部地区建设烟尘排放值低于 $1 \text{ mg/Nm}^3$ 的示范电站。示范电站的建设,将进一步提高烟尘控制系统的配置要求;同时,烟尘控制技术的不断进步,也在技术经济性合适的情况下进一步提高煤电示范工程的先进性。在控制烟尘的时候,还要加强对PM2.5等细微课题的协同控制。随着大量超低排放机组的陆续投运,如何对机组采用合适的维护和运行技术,实现超低排放机组的长周期稳定运行,也是一个重大而紧迫的研究课题,尤其是在当年煤电机组负荷率较低,机组长期调停、频繁起停机的情况下。此外,烟尘监控手段也要与时俱进,测量精度上适应并适当超前烟尘控制要求,并实现不同测量手段的有机结合与集成创新。

### 参考文献:

- [1] 《中国电力百科全书》编辑委员会.中国电力百科全书(第三版)火力发电卷[M].北京:中国电力出版社出版社,2014.
- [2] 舒英钢. 燃煤电厂电除尘技术综述[A].第15届中国电除尘学术会议论文集[C].2013. 1-8.
- [3] 朱建波,酆建国,吴泉明,等.旋转电极式电除尘技术研究进展、工程应用及注意事项[A].第15届中国电除尘学术会议论文集[C].2013. 154-158.

### 作者简介:

沈亚林(1975—),神华国华太仓发电有限公司运行部工作,熟悉煤电运行管理, E-mail: 2013217426@qq.com;  
赵文(1972—),神华国华太仓发电有限公司运行部值长,精通煤电运行管理。