

# 燃煤电厂电除尘器出口排放浓度波动的原因分析与运行对策探究

刘 新

国能吉林龙华热电股份有限公司延吉热电厂 吉林延吉 133000

**摘 要:** 电除尘器是燃煤电厂烟气治理的核心设备,其出口排放浓度的稳定性直接关系到机组能否满足超低排放要求。本文针对燃煤电厂电除尘器运行中常见的出口排放浓度波动问题,从烟气工况变化、电气系统异常、振打清灰失效、流场分布不均四个维度系统分析了波动成因。研究表明,煤质与负荷波动导致的粉尘比电阻变化、高压电源谐波污染与控制策略缺陷、振打时序与积灰特性的失配、以及烟气流量分配不均与局部逃逸是引发排放波动的主要因素。并在此基础上,提出了烟气适应性优化、电气智能控制、差异化振打制度及流场均匀性治理等运行对策,以期为燃煤电厂电除尘器的稳定达标运行提供技术参考。

**关键词:** 电除尘器; 排放浓度; 波动分析; 运行优化

## 引言

随着我国燃煤电厂超低排放改造的全面完成,电除尘器出口烟尘浓度限值已从传统的 $30\text{ mg/m}^3$ 逐步收紧至 $10\text{ mg/m}^3$ 乃至 $5\text{ mg/m}^3$ 以下。在此背景下,电除尘器的稳定运行能力面临严峻考验。实际运行中,许多机组虽在设计工况下能够达标排放,但在变负荷运行、煤质波动、设备老化等条件下,出口排放浓度频繁出现波动,甚至短时超标,给环保达标带来巨大压力<sup>[1]</sup>。

电除尘器出口排放浓度的波动并非单一因素所致,而是烟气特性、电气参数、机械状态、流场分布等多变量耦合作用的结果<sup>[2]</sup>。传统运行调整往往依赖经验,缺乏对波动根源的系统性诊断,导致调整措施针对性不强、效果难以持久。基于此,本文将从电除尘器的工作原理出发,系统分析出口排放浓度波动的深层原因,并提出相应的运行优化对策,以期在现场运行人员提供科学的调整思路。

## 一、电除尘器出口排放浓度波动的机理分析

电除尘器的收尘效率可由多依奇公式描述:

$$\eta = 1 - e^{-\omega A/Q}$$

其中 $\omega$ 为粉尘驱进速度, $A$ 为收尘面积, $Q$ 为烟气流量。在设备结构固定的前提下,效率的波动本质上是驱

进速度 $\omega$ 的变化和气流分布均匀性的改变所致。驱进速度受粉尘粒径、比电阻、电场强度等因素影响,而气流分布则与烟道阻力特性、灰斗积灰状态、导流板磨损等密切相关。

从波动时间尺度看,排放浓度波动可分为三类:短时波动(秒级至分钟级),多与振打清灰、火花闪络等瞬态过程相关;周期性波动(小时级),常与机组负荷变化、吹灰周期相关;长期漂移(天级至月级),反映设备性能劣化或煤质趋势性变化<sup>[3]</sup>。准确识别波动类型是定位故障根源的前提。

## 二、出口排放浓度波动的成因分析

### (一) 烟气工况变化的影响

#### 1. 煤质波动与粉尘比电阻

粉尘比电阻是影响电除尘性能的关键参数。适宜的电除尘范围在 $10^4 \sim 10^{11}\ \Omega \cdot \text{cm}$ 之间。比电阻过低时,粉尘荷电后电荷迅速释放,容易在极板上反弹并被气流带走;比电阻过高时,粉尘层电荷积聚形成反电晕,导致二次电流下降、除尘效率恶化。

实际运行中,燃煤煤质的灰分成分、硫分含量、水分变化都会显著改变粉尘比电阻。当燃煤硫分降低或灰分中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 等绝缘性成分升高时,比电阻呈上升趋势,容易引发反电晕,表现为二次电流异常降低、出口浓度攀升。研究表明,当粉尘中 $\text{SO}_3$ 含量偏低时,比电阻可超出适宜范围,导致除尘效率显著下降。

#### 2. 脱硝系统运行与硫酸氢铵问题

**作者简介:** 刘新,性别:男,汉,吉林省双辽市辽西街西电委电厂一组,1976年1月29日,本科,电除尘。

脱硝系统的运行状态对电除尘器性能存在重要影响。当脱硝喷氨过量或烟气流动不均时,未反应的氨气与烟气中的 $\text{SO}_3$ 反应生成硫酸氢铵(ABS)。硫酸氢铵在 $150\sim 230^\circ\text{C}$ 温度范围内呈粘稠熔融态,极易吸附飞灰并粘附在电除尘器极板、极线上,造成积灰致密化、振打清灰困难。某电厂案例中,脱硝喷氨过量导致极板积灰中ABS含量显著升高,二次电流下降,出口粉尘浓度持续偏高,形成顽固性积灰,引发排放浓度波动。

### 3. 负荷波动与烟气量变化

机组负荷变化直接影响电除尘器处理烟气量。当烟气量超过设计值或各电场烟气分配失衡时,烟气在电场内停留时间缩短,粉尘荷电不充分,收尘效率下降。同时,负荷快速变化还会引起烟气温度、成分的瞬态波动,加剧排放不稳定性<sup>[4]</sup>。

## (二) 电气系统异常的影响

### 1. 高压电源谐波干扰

电除尘器高压电源多采用晶闸管相控调压方式,运行中会产生高次谐波。谐波污染严重时,不仅影响电源自身控制稳定性,还可能传导至控制系统引发误动作<sup>[5]</sup>。某电厂#5炉电除尘器曾因5次、7次、11次谐波污染导致电磁振打大面积瘫痪,加装UPS优化供电质量后恢复稳定运行。

### 2. 闪络控制策略不当

传统控制策略对闪络响应较为粗放,一旦检测到闪络便大幅降压降流,导致电场短时失能,排放浓度瞬时跃升。实际上,低强度闪络(Type 1)无需完全去电离即可恢复,而高强度电弧(Type 2)需彻底熄弧。常规控制器难以区分,既降低了平均工作电压,又增加了无效功耗。

### 3. 电源运行模式与工况匹配度

现代电除尘器高压电源具备连续供电、脉冲供电、间歇供电等多种模式,分别适应不同工况。高比电阻工况下间歇供电有利于抑制反电晕,高粉尘浓度工况下连续供电可维持较高电晕功率<sup>[6]</sup>。若运行模式与工况不匹配,将导致效率下降或能耗上升,而实际运行中往往缺乏动态调整机制。

## (三) 振打清灰系统的影响

### 1. 振打时序与积灰特性的失配

振打清灰是电除尘器维持长期稳定运行的关键环节。振打过频,会造成极板粉尘层尚未形成足够厚度便被振落,大量粉尘在气流作用下二次飞扬进入后续电场甚至

排出;振打过疏,则极板积灰过厚,粉尘层电阻增大引发反电晕,同时积灰可能造成极间距减小、电场击穿电压下降。

研究表明,极板积灰厚度达到4 mm以上时进行振打,更有利于减少二次扬尘。不同电场的积灰速度存在显著差异:前电场粉尘浓度高、粒径大,积灰速度快;末电场粉尘浓度低、粒径小,积灰速度慢。若采用统一的振打周期,必然导致部分电场清灰不足或过度振打。

### 2. 振打强度与传递效率

阴极线松动、阳极板吊挂失效、振打锤磨损、振打杆断裂等机械故障均会削弱振打力传递效率,降低清灰效果。相邻电场同时振打时,大量粉尘同时剥落悬浮,易形成瞬时排放浓度尖峰。

### 3. 灰斗料位与二次扬尘

灰斗料位过高时,积灰可能反溢至电场底部形成灰堆,在气流作用下发生“灰瀑”现象,使已收集粉尘重新进入气流,导致出口浓度异常升高。灰斗积灰长时间滞留还可能因吸湿、硬化等问题造成排灰不畅,进一步加剧二次扬尘。

## (四) 流场分布不均的影响

### 1. 进口烟道气流分布

电除尘器进口烟道气流分布均匀性是影响除尘效率的前提。理想状态下,电场内烟气速度应控制在 $0.8\sim 1.2\text{ m/s}$ ,各电场入口断面流量偏差不得超过 $\pm 5\%$ 。受烟道布置、导流板磨损、分布板堵塞等因素影响,实际运行中常出现气流偏流。某电厂660 MW机组测试数据显示,A、D通道进口流场不均,导致A、B通道出口烟尘浓度偏高,整体出口平均浓度达 $81\text{ mg/m}^3$ ,改造导流板后降至 $20\text{ mg/m}^3$ 以下。

### 2. 烟道阻力变化与负荷分配

对于多室电除尘器,各室烟气流量分配取决于并联烟道阻力特性。引风机入口导叶开度变化、烟道积灰、挡板门故障等因素均可改变阻力平衡,导致流量分配失衡<sup>[7]</sup>。某640 MW机组因2号引风机入口导叶与驱动轴脱离,指令开度与实际开度严重不符,造成C室烟气量异常增大,不透明度基线从1%飙升至8.5%。

### 3. 电场间烟气逃逸

各电场之间若缺乏有效隔离,烟气可能越过部分电场直接流向出口,形成“短路”逃逸。常见原因包括灰斗设计不合理、电场间结构梁缺失、横向输灰装置密封不良等,是排放浓度异常偏高的隐蔽原因之一。

### 三、运行优化对策

#### (一) 烟气工况适应性优化

##### 1. 煤质与喷氨优化

针对煤质波动引起的粉尘比电阻变化,可在煤质掺配环节控制灰分中绝缘性成分的比例,维持适宜的比电阻范围。对于硫分较低的煤种,可考虑在烟气中喷入少量SO<sub>3</sub>或采用烟气调质技术,降低粉尘比电阻,抑制反电晕发生。

脱硝系统应加强喷氨均匀性调整,严格控制氨逃逸率在2.5 μL/L以下,减少硫酸氢铵生成。对已受ABS污染的除尘器,可通过提高运行温度或高压水冲洗等离线清灰措施恢复极板清洁度。

##### 2. 变负荷工况下的协同控制

机组变负荷过程中,应建立电除尘器与脱硫系统、引风机之间的协同控制机制。升负荷时提前提升电除尘器二次电压,降负荷时适当延长振打周期,避免因烟气流突变造成的瞬时排放尖峰。对于配备多台引风机的机组,应优化引风机导叶控制策略,维持各室流量均衡。

#### (二) 电气系统智能优化

##### 1. 谐波治理与供电可靠性提升

针对高压电源谐波污染问题,可在电源进线侧加装滤波器或有源滤波装置,抑制高次谐波干扰。对振打系统、仪表控制系统等敏感设备,采用UPS或隔离变压器供电,确保控制电源纯净度。定期检查整流变、隔离开关等高压设备状态,防止绝缘劣化引发异常放电<sup>[8]</sup>。

##### 2. 基于VI曲线的闪络精细控制

引入基于VI曲线分析的智能控制策略,实时采集二次电压、电流信号,生成动态VI曲线,根据曲线特征判断电场运行状态。对低强度闪络(Type 1)按比例降低电流后快速恢复,对高强度电弧(Type 2)执行完整去电离流程<sup>[9]</sup>。采用双时间尺度控制策略,在火花熄灭后快速提升电压(毫秒级),再以较慢速率恢复至目标值(秒级),避免连续闪络,使电场长期运行于接近击穿电压的高效率区间。

##### 3. 运行模式自适应切换

根据粉尘比电阻和浓度的实时变化,自动调整高压电源的运行模式。当检测到反电晕征兆(二次电流升高但电压下降)时,切换至间歇供电模式,降低平均电流,抑制反电晕;当粉尘浓度突增时,切换至连续供电模式,维持较高的电晕功率。运行模式的自适应切换可在不改

变硬件结构的前提下,扩大电除尘器的工况适应范围。

#### (三) 振打制度优化

##### 1. 分区差异化振打策略

根据各电场的积灰特性,制定差异化的振打制度。前电场因粉尘浓度高、积灰快,宜采用短周期、强振打的策略;末电场粉尘浓度低、粒径细,宜采用长周期、弱振打的策略,避免因过度振打造成的二次扬尘。振打周期还应考虑极板积灰厚度,通过极板加速度传感器或根据运行电流变化趋势,实现“按需振打”。

振打时序方面,应避免相邻电场同时振打,设置足够的振打间隔(一般不少于30秒),防止多电场同时清灰造成粉尘大量悬浮。振打前可适当降低或切断对应电场的供电电压,利用“振打消电”原理减少粉尘剥离时的静电力吸附,降低二次扬尘风险。

##### 2. 振打系统健康管理

建立定期巡检制度,重点检查振打锤磨损、振打杆连接状态、绝缘轴完整性等关键部位。对电磁振打系统,定期检测线圈绝缘电阻和冲击力,发现振打力衰减时及时调整参数或更换老化部件。

##### 3. 灰斗料位管控

安装可靠料位计,建立料位预警机制。达到高限时自动连锁启动输灰系统,防止积灰反溢。对易吸湿、易架桥的灰种,设置空气炮或振动器辅助破拱,定期检查灰斗加热装置,防止结露粘灰。

#### (四) 流场均匀性治理

##### 1. 烟道导流板优化

对于进口烟道气流分布不均的问题,可通过数值模拟(CFD)分析流场分布,针对性优化导流板的形式、数量与布置角度。导流板的设计应兼顾均流效果和磨损寿命,宜采用耐磨材料制作,并定期检查磨损情况。凤台电厂的改造实践表明,恢复导流板功能后,电场入口流场均匀性显著改善,出口浓度明显下降。

##### 2. 分布板清堵与维护

气流分布板(多孔板)的堵塞是流场劣化的常见原因。应根据烟气含尘浓度和分布板压差,制定定期清理计划,采用蒸汽吹扫或压缩空气反吹方式清除堵塞物。对于无法在线清理的严重堵塞,应结合机组检修进行离线清理或更换。

##### 3. 烟气短路封堵

检查电场之间、电场与灰斗之间是否存在烟气短路的通道。对于平底灰斗结构的除尘器,应在灰斗内部设

置横向输灰装置，并确保输灰槽与电场底梁之间的密封良好。电场之间的结构梁应保证与极板的合理间隙，既防止放电，又避免形成烟气逃逸通道。

### 结语

电除尘器出口排放浓度波动是烟气特性、电气参数、机械状态与流场分布多变量耦合作用的结果。本文研究表明，实现稳定超低排放需从系统诊断转向精细化、智能化的运行管理。通过实施煤质与喷氨协同优化、基于VI曲线的闪络精细控制、分区差异化振打策略以及流场均流治理，可有效抑制浓度波动。未来可进一步融合在线监测与大数据分析，构建电除尘器全流程智能调控平台，以提升对复杂工况的自适应能力，确保环保设备长周期稳定达标运行。

### 参考文献

[1] 刘学军, 胡汉芳, 郇建国, 等. 2020年电除尘行业发展评述和展望[J]. 中国环保产业, 2021, (03): 23-27.  
[2] 郭海鹰, 赵金达, 朱锦杰, 等. 燃煤机组电除尘

超低排放改造技术研究[J]. 电力与能源, 2021, 42(02): 240-244.

[3] 梁创霖. 静电除尘器超低排放控制和长周期运行管理[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2026, 46(03): 75-77.

[4] 刘宇芳, 凌雁波, 易辉, 等. 一种基于移相策略的电除尘器高频电源控制技术研究与应用[J]. 电力科技与环保, 2026, 42(01): 80-89.

[5] 邱锐. 电除尘器高压脉冲电源控制系统设计要点分析[J]. 中国新技术新产品, 2023, (24): 61-63.

[6] 岳鹏. 基于多前馈的静电除尘闭环控制技术分析[J]. 电力设备管理, 2026, (01): 226-228.

[7] 程厚德, 曹宝辰. 燃煤电厂超低排放技术现状及发展路线[J]. 产业创新研究, 2020, (20): 129-130.

[8] 张云峰, 陈山, 谭云春, 等. 牵引供电系统高次谐波谐振分析及治理策略[J]. 电工技术, 2025, (14): 266-269+272.

[9] 郭鹏飞. 电除尘器变频高压电源的仿真探析[J]. 电子世界, 2021, (08): 51-52.