

燃煤电厂电除尘器反电晕现象的运行特征分析与抑制措施探讨

冯依然

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: 燃煤电厂处理高比电阻粉尘时,电除尘器易发生反电晕,导致除尘效率骤降。本文系统分析了反电晕的形成机理,揭示了伏安特性畸变、电流频谱低频化及振打响应异常等运行特征。在此基础上,从粉尘比电阻调控、本体极配优化、先进电源应用及智能振打协同四个方面探讨了抑制措施。结合660MW机组工程案例,验证了低低温改造、宽极距与高频脉冲电源综合方案的有效性,为电除尘器应对复杂煤质、实现稳定超低排放提供了理论与实践参考。

关键词: 反电晕;高比电阻粉尘;电除尘器;脉冲电源;低低温电除尘

引言

电除尘器是燃煤电厂超低排放的核心设备,但高比电阻粉尘引发的反电晕现象可导致除尘效率大幅下降、能耗异常升高,严重时甚至造成设备失控^[1]。现有研究多聚焦于单一抑制手段,缺乏从“机理识别—特征诊断—协同治理”的系统性视角。本文基于反电晕的形成机理与运行特征,系统探究粉尘比电阻调控、极配结构优化、电源技术升级及智能振打协同等抑制措施,并结合工程案例验证综合改造效果,以期电除尘器的高效稳定运行提供技术参考。

一、反电晕的形成机理与物理模型

(一) 粉尘比电阻与电荷释放机制

粉尘比电阻(ρ)是决定沉积后粉尘释放电荷速率的关键物性参数。当 ρ 介于 $10^4 \sim 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 时,电除尘器运行最佳;当 ρ 高于 $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ 时,粉尘层呈现绝缘体特性。

对于高比电阻粉尘,电荷释放时间常数 $\tau = \rho \cdot \varepsilon$ (ε 为介电常数)显著增大。随着粉尘层厚度 d 增加,流经粉尘层的电流密度 J_s 持续作用,粉尘层上的电压降 V_d 为:

$$V_d = J_s \cdot \rho \cdot d$$

即使粉尘层厚度仅有数毫米, V_d 也可能达到数千

伏,这部分电压降直接抵消外加电压,并在粉尘层内部建立极高的电场强度。

(二) 反电晕的击穿过程

当粉尘层表面电场强度超过气体击穿场强(约 $3 \times 10^6 \text{ V/m}$)或内部孔隙电场超过本征击穿阈值时,发生局部击穿。过程分为三个阶段:

1. 电荷积累阶段:电晕电流通过高比电阻粉尘层,在粉尘层内部形成电荷分离,靠近收尘极板一侧积累正电荷,靠近烟气侧积累负电荷。

2. 微击穿阶段:粉尘层内某点电场达到击穿阈值时,在孔隙或缺陷处发生微通道击穿,表现为微弱、间歇性的火花放电。

3. 稳态反电晕阶段:微击穿通道贯通后形成稳定放电通道,通道内温度升高发生热电离,产生大量正离子。正离子向放电极方向高速运动,形成与正常电晕放电方向相反的“正离子流”。

(三) 正反馈机制

反电晕具有强烈的正反馈特性:粉尘层击穿产生的正离子与负离子复合,抑制正常负电晕放电;负电晕减弱导致等效阻抗升高,自动电压控制系统提高输出;外加电压升高进一步加大粉尘层电位梯度,导致更多击穿点产生^[2]。这个恶性循环使得反电晕一旦越过临界点,若不主动干预,将持续加剧直至失控。

二、反电晕的运行特征分析

(一) 伏安特性曲线的畸变特征

正常电除尘器伏安(V-I)特性曲线呈现单调递增的饱和型曲线。反电晕发生时,V-I曲线出现典型的“S

作者简介: 冯依然,男,汉,吉林省农安县哈拉海镇姜家坨子村揣家坨子屯3组,1992年3月11日,本科,电除尘。

型畸变”：在临界电压 V_{cr} 之前，电流随电压增长缓慢；超过 V_{cr} 后，二次电流突然跃升，而二次电压不再增加甚至下降。二次电流显示异常偏高，但有效收尘功率 $P=V \cdot I$ 并未用于粉尘荷电，而是消耗在粉尘层的无效击穿上。定义反电晕强度指数 $BI=(I_{sc}-I_{nc})/I_{nc}$ ，其中 I_{sc} 为反电晕状态下的二次电流， I_{nc} 为正常工况下同电压的二次电流。当 $BI>0.3$ 时，表明反电晕已显著影响运行。

(二) 二次电流信号的时频域特征

利用高频采样技术对二次电流进行频谱分析。1) 时域特征：正常电晕放电时，电流波形为均匀的特里切尔夫脉冲；反电晕时，出现低频包络调制，高频脉冲串被低频（几十到几百赫兹）的大幅度浪涌电流调制。2) 频域特征：正常工况下频谱能量集中在1~5kHz；反电晕时，<500Hz低频段出现显著能量峰值，高频谐波衰减。表1总结了两种工况的特征对比。

表1 正常工况与反电晕工况运行特征对比

特征参数	正常电晕放电	反电晕放电
伏安特性	单调递增，饱和型	S型畸变，存在电流跃升拐点
二次电流/电压	电流随电压稳定增长	电流异常高，电压无法提升
电流波形时域	均匀、高频特里切尔夫脉冲	低频包络调制，间歇性浪涌
电流频谱	能量集中在1-5kHz	低频(<500Hz)能量突增，高频衰减
反电晕强度指数BI	接近0	>0.3
除尘效率	稳定高效	显著下降，亚微米粒子穿透率升高
振打响应	振打后短时扬尘，迅速恢复	振打后效率持续恶化或恢复缓慢

(三) 除尘效率与粒径分布的关联特征

反电晕对除尘效率的影响具有粒径选择性。1) 总效率降低：正离子与负离子和荷电粉尘中和，导致粉尘荷电量 q 降低。根据驱进速度公式 $w=qE/(3\pi\mu d_p)$ ，荷电量降低直接导致驱进速度下降，出口浊度可升高50%~200%。2) 特征粒径逃逸：对0.1~1 μm 亚微米粒子的穿透率异常升高。原因在于：正离子与负离子复合减少了细颗粒物荷电所需的离子源；同时，击穿点微爆炸产生的离子风将已收集的细颗粒物重新卷扬进入气流。

(四) 振打时序的耦合响应

反电晕与振打清灰存在强耦合关系。正常工况下，振打后出口浊度瞬间升高，但数分钟内迅速恢复。反电晕工况下，振打后出口浊度不仅不恢复，反而持续处于高位甚至进一步恶化，恢复时间长达数十分钟。

这一反常现象源于反电晕的物理特性。振打破坏了稳定击穿通道，但极板残留的“基底粉尘层”（厚度0.1~0.5mm）仍具有高比电阻。新沉积粉尘在残留层上迅速积累，因电场分布更不均匀，反而在更短时间内触发更剧烈的反电晕。

三、反电晕的抑制措施

针对前文所述的反电晕形成机理与运行特征，抑制措施应从“降低粉尘层电场强度、改善电荷释放路径、改变供电方式”三个维度入手。

(一) 粉尘比电阻的调控

1. 低低温电除尘技术(LL-ESP)

通过烟气冷却器将电除尘器入口烟气温度降至酸露点以下（通常为90~100 $^{\circ}\text{C}$ ）。在此温度区间，粉尘比电阻随温度降低呈指数级下降，从源头上消除了反电晕发生的物性基础。同时，烟气中的 SO_3 会冷凝并吸附在粉尘表面，形成液态导电膜，进一步降低比电阻。该技术具有多重效益，在实现余热回收利用的同时，彻底解决了高比电阻粉尘的反电晕问题，并为后续湿法脱硫系统减水^[9]。

2. 烟气调质与喷淋增湿

对于不具备低低温改造条件的机组，可采用 SO_3 调质技术。向烟气中注入微量的 SO_3 （通常控制在10~20ppm范围内）， SO_3 吸附在粉尘表面形成导电膜，可将比电阻从 $>10^{12}\Omega \cdot \text{cm}$ 急剧降至 $10^9\Omega \cdot \text{cm}$ 以下。此外，利用双流雾化喷嘴在电除尘器入口烟道内喷入少量去离子水，通过降低烟温并增加粉尘表面水分，也能起到降低比电阻的作用，但需严格控制喷水量，避免引发绝缘子爬电或灰斗结块。

(二) 本体极配结构优化

1. 宽极距与异型极线

传统的电除尘器设计收尘极板间距通常为300~350mm。在高比电阻粉尘工况下，这种紧凑的极配结构容易引发反电晕。增大收尘极板间距至400~450mm

具有显著的改善效果：在相同施加电压下，增大极距 d 降低电场强度 $E=V/d$ ，从而减少粉尘层表面的电场应力，提高击穿阈值电压；同时，宽极距允许匹配更高的运行电压，使放电极的电晕放电更加均匀，避免了因局部电流密度过高而引发的“点状”反电晕。

配合宽极距，采用管状芒刺线或高效锯齿线替代传统角钢芒刺。这类异型极线具有更小的曲率半径，能在较低的电压下产生强烈的电晕放电，并能产生更强的“离子风”，有效破坏粉尘层表面的离子滞留层，将电流分布均匀度系数从0.5提升至0.8以上。

2. 分区供电与末端电场增效

针对烟气在电场中沿气流方向粉尘浓度和粒径分布变化的特点，采用前后分区差异化供电策略。前级电场（第1、2电场）粉尘浓度高但粗颗粒占比大，比电阻相对较低，可采用常规工频电源或高频电源，维持较高的电流密度，保证80%以上的粗粉尘被快速捕集。后级电场（末电场）粉尘浓度已大幅降低，但剩余粉尘多为微细颗粒，比电阻极高，应采用间歇供电。间歇供电通过设置“供电-停电”周期（例如100 ms供电，50 ms停电），在停电期间让沉积的高比电阻粉尘层充分释放电荷，有效切断前文所述的正反馈循环。

（三）电源技术的升级

1. 高频电源的波形调控

高频电源（HFP）相较于传统工频电源，其输出纹波小（ $<5\%$ ）、平均电压高、控制响应速度快。抑制反电晕的关键在于利用其毫秒级快速响应特性：当控制器检测到二次电流异常升高（预示反电晕）时，可在数毫秒内降低输出电流，将电压维持在临界击穿值以下，使电场始终工作在即将发生反电晕但又未发生的临界最优状态。

此外，高频电源可实现脉冲叠加模式，在较低的直流基压（如20kV）上叠加高幅值的窄脉冲（脉冲宽度 $<100\mu\text{s}$ ，幅值可达60kV）。窄脉冲提供了极强的峰值电场用于粉尘荷电，但由于脉冲宽度极窄，提供给粉尘层的平均电流非常小，有效避免了电荷在粉尘层中的积累。与专用脉冲电源不同，高频电源的脉冲叠加模式是在直流基压上叠加脉冲，两者在技术实现和成本上各有优劣。

2. 脉冲电源的应用

脉冲电源被认为是目前解决高比电阻粉尘反电晕问题的最有效技术。其输出波形由窄的高压脉冲和间歇的“零电压”或“低电压”平台组成。在脉冲持续期间

（几十微秒），施加极高的峰值电压，使电晕线产生强烈的电晕放电，完成粉尘荷电；在脉冲间歇期间（几百微秒到几毫秒），电场电压极低或为零，收尘极板上的电荷有足够时间通过高比电阻粉尘层泄放。大量工程实测数据表明，将末电场的工频电源改造为脉冲电源后，可降低出口浊度30%~50%，同时系统能耗可降低40%~60%。其核心优势在于从时间尺度上实现了“强荷电”与“充分泄放”的物理隔离，从根本上破坏了反电晕形成的时间条件。

（四）智能振打与运行协同

传统的定时振打模式无法适应复杂多变的工况，需要引入基于反电晕特征在线识别的智能协同控制。

1. 振打周期优化

基于前文所述的反电晕电流频谱特征，建立反电晕强度在线监测模型。通过安装高频电流传感器，实时采集二次电流波形并进行FFT分析^[4]。当系统检测到低频电流分量（ $<500\text{Hz}$ ）的能量占比超过设定阈值（如15%）时，判定反电晕已进入显著阶段，系统立即触发快速振打指令，跳过原有的定时周期，提前对相应电场进行振打，将粉尘层厚度严格控制在临界击穿厚度（工程经验值通常 $<5\text{mm}$ ）以下。

2. 旋转电极技术

对于末电场极难清除的高比电阻粉尘，常规振打可能因振打加速度不足或粉尘粘附性强而失效。旋转电极式电除尘器（REE）是一种结构性的彻底解决方案。它将末电场的固定收尘极板改为由链条驱动旋转极板，并在下部设置旋转钢刷。通过钢刷连续或高频次的机械刷除，极板表面始终保持洁净，从根本上杜绝了厚层高比电阻粉尘的形成，彻底消除了反电晕的物理基础^[5]。

四、工程案例

选取某660MW燃煤机组进行改造前后对比分析。该机组燃煤灰分25%，灰中 Al_2O_3 与 SiO_2 含量总和超过85%，属于典型高比电阻粉尘。

（一）改造前工况

电除尘器为4电场、工频电源、收尘极板间距350mm。入口烟温125℃，粉尘比电阻 $5 \times 10^{12}\Omega \cdot \text{cm}$ 。二次电压升至35kV时，二次电流从600mA陡增至1200mA，V-I曲线呈“S型下弯”。300Hz能量占比达18%。电除尘器入口粉尘浓度约45mg/Nm³，PM2.5占总尘40%以上。末电场振打后，出口粉尘浓度30分钟内无法恢复。

(二) 抑制措施实施

针对上述问题,实施了以下综合性改造

1. 低低温改造: 在电除尘器入口前增设烟气余热利用系统, 将入口烟温由 125°C 降至 95°C 。

2. 极配优化: 将第4电场(末电场)的收尘极板间距由 350mm 调整为 450mm , 并将原有的角钢芒刺线全部更换为管状芒刺线。

3. 电源升级: 将第4电场的2台工频电源更换为 $1.8\text{A}/80\text{kV}$ 的高频脉冲电源, 设置运行模式为“脉冲+直流”叠加, 脉冲宽度 $80\mu\text{s}$, 脉冲频率 400Hz , 直流基压 25kV 。

4. 智能控制: 在第4电场加装二次电流高频采集模块, 并接入DCS系统。设定当 $200\sim 500\text{Hz}$ 电流成4分的频谱能量占比超过 10% 且持续5分钟时, 自动触发第4电场快速振打一次。

(三) 效果评价

改造后, 机组在相同负荷和燃煤条件下运行, 效果显著:

1. 电气参数: 高频脉冲电源运行稳定, 二次电压可提升至 52kV , 二次电流稳定在 650mA 左右。V-1曲线恢复正常的饱和形态。计算反电晕强度指数BI, 由改造前的 0.45 降至 0.05 , 表明反电量得到了根本性抑制。

2. 频谱特征: 二次电流的FFT频谱分析显示, 低频谐波分量大幅衰减, 300Hz 频段能量占比降至 3% 以下, 能量谱回归 $1\sim 5\text{kHz}$ 的正常区间。

3. 排放指标: 电除尘器入口粉尘浓度仍约为 $30\text{g}/\text{Nm}^3$, 出口粉尘浓度降至 $9.5\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下, 稳定满足超低排放要求, 对应除尘效率由改造前的 99.85% 提升至 99.97% 以上。PM_{2.5}的排放浓度占总尘比例降至 20% 以下, 表明细颗粒物的捕集效率显著提升。

4. 运行稳定性: 智能振打系统投用后, 末电场振打

周期由原来的固定8小时调整为根据反电晕特征动态调整, 平均每4小时振打一次。振打后出口粉尘浓度在5分钟内即可恢复, 彻底消除了因反电晕导致的效率延迟恢复问题。

结语

综上, 反电晕是高比电阻粉尘工况下电除尘器面临的核心难题, 其本质是粉尘层电荷积累引发的局部击穿与正反馈失控。运行特征表现为伏安特性“S型畸变”、低频电流能量突增、亚微米粒子穿透率升高及振打后效率恢复迟缓。抑制反电晕需从降低粉尘层电场强度、改善电荷释放路径与优化供电方式三方面协同发力。工程实践证明, 低低温改造结合末电场宽极距、脉冲电源与智能振打的综合方案, 可从根本上抑制反电晕, 实现稳定超低排放。

参考文献

- [1] 顾欣, 施刚夜, 侯新建, 等. 超低排放技术工程设计方案研究[J]. 电力科技与环保, 2020, 36(01): 6-11.
- [2] 徐赫泽. 高频脉冲电源在热电厂超低排放中的应用[J]. 石油石化节能, 2021, 11(08): 4-6+1.
- [3] 刘含笑, 姚宇平, 郇建国, 等. 低低温电除尘技术适用性及污染物减排特性研究[J]. 动力工程学报, 2018, 38(08): 650-657.
- [4] 李凯, 胡文斌, 刘宇芳, 等. 一种串联对称式脉冲静电除尘电源研究[J]. 电力电子技术, 2021, 55(10): 50-53.
- [5] 刘明坤, 党小庆, 谢东明, 等. 电极配置及参数对多孔电极电除尘器电场与除尘性能影响研究[J]. 环境工程, 2024, 42(03): 122-130.