

百万发电机组锅炉电除尘电场输灰管堵灰问题分析

王小龙

国能岳阳电厂，湖南 岳阳 414000

DOI:10.61369/EPTSM.2025090008

摘 要： 随着百万千瓦级发电机组在电力行业的广泛应用，锅炉电除尘电场输灰系统的稳定运行对环保达标和机组安全至关重要。然而，输灰管堵灰问题频发，成为制约系统高效运行的关键因素。本文基于实际运行经验，系统分析了输灰管堵灰的成因，包括煤质特性、设备状态、系统参数、环境条件及操作管理等方面，并提出针对性优化措施，旨在提升输灰系统可靠性，保障机组长期稳定运行。

关 键 词： 百万发电机组；电除尘；输灰管堵灰；系统优化；可靠性提升

Analysis of Ash Conveying Pipe Blockage in Boiler Electrostatic Precipitator of Million-Kilowatt Units

Wang Xiaolong

China Energy Yueyang Power Plant, Yueyang, Hunan 414000

Abstract： With the wide application of million-kilowatt units in the power industry, the stable operation of the boiler electrostatic precipitator (ESP) ash conveying system is crucial for meeting environmental standards and ensuring unit safety. However, frequent blockages in ash conveying pipes have become a key factor restricting the efficient operation of the system. Based on practical operational experience, this paper systematically analyzes the causes of ash pipe blockages, including coal quality characteristics, equipment conditions, system parameters, environmental conditions, and operational management, and proposes targeted optimization measures aimed at enhancing the reliability of the ash conveying system and ensuring long-term stable operation of the unit.

Keywords： million-kilowatt units; electrostatic precipitator; ash conveying pipe blockage; system optimization; reliability improvement

引言

百万千瓦级发电机组作为电力行业的主力机型，其锅炉电除尘系统承担着高效捕集烟气中粉尘、减少污染物排放的核心任务。输灰系统作为电除尘的关键环节，负责将收集的飞灰输送至灰库，其运行效率直接影响电除尘效果及机组环保指标。然而，输灰管堵灰问题长期困扰运行人员，尤其在煤质波动、设备老化或参数设置不合理时，堵灰频发导致电场停运、灰斗超载，甚至引发灰斗坍塌等严重事故。因此，深入分析堵灰成因并制定有效对策，对提升机组运行安全性与经济性具有重要意义。

一、煤质特性对输灰的影响

煤质作为影响输灰系统稳定性的核心要素，其特性变化会通过飞灰的物理与化学性质直接作用于输灰过程，进而引发管道堵塞、系统效率下降等一系列问题。具体而言，煤中灰分含量、粒度分布、化学成分及燃烧特性共同构成了影响输灰系统运行的关键变量。

（一）灰分含量与输灰负荷

煤中灰分含量是决定飞灰生成量的直接因素。高灰分煤燃烧后，单位燃料产生的飞灰量显著增加，当飞灰量超出输灰系统的设计容量时，管道内灰流密度上升，流动阻力增大，易在管道低

洼处或阻力较大的部位形成沉积。例如，若输灰系统按中低灰分煤种设计，而实际燃用高灰分煤时，系统需频繁启动以排空灰斗，长期超负荷运行会导致设备磨损加剧，同时增加堵灰风险。

（二）粒度分布与灰流流动性

飞灰的粒度分布直接影响其流动性。粗颗粒飞灰（如粒径 $> 50 \mu\text{m}$ ）因比表面积小、表面粗糙，颗粒间摩擦力大，流动性显著低于细颗粒飞灰。在输灰管道中，粗颗粒易在弯头、变径处因离心力作用沉积，形成“堵点”；而细颗粒飞灰（如粒径 $< 20 \mu\text{m}$ ）虽流动性较好，但易因静电作用吸附在管道内壁，长期积累后同样会阻碍灰流。此外，粒度分布不均会导致灰流分层，粗颗粒在下层沉积，细颗粒在上层流动，形成“桥接”效

应，进一步加剧堵塞。

（三）化学成分与灰分结块

煤中硫分、钙分等化学成分对飞灰的结块特性有显著影响。高硫煤燃烧后生成的硫酸盐灰分（如硫酸钙、硫酸镁）具有强吸湿性，在潮湿环境下易吸水膨胀，形成硬质结块；高钙煤燃烧后生成的氧化钙（CaO）会与飞灰中的二氧化硅（SiO₂）反应生成低熔点的硅酸钙，在高温下熔融粘附管道内壁。此外，煤中钠、钾等碱金属化合物在燃烧过程中会形成低熔点共晶物，附着在飞灰表面，降低颗粒间摩擦力，但同时会因吸湿性增强而导致灰分结块。

（四）煤粉细度与燃烧效率

煤粉细度不均会导致燃烧不充分，未燃尽碳粒混入飞灰中，形成“含碳灰”。含碳灰的密度、粒度与正常飞灰差异较大，易在输灰过程中因沉降速度不同而分层，导致管道局部堵塞。同时，未燃尽碳粒在输灰管道中可能因摩擦生热引发二次燃烧，产生高温结块，进一步威胁系统安全。此外，煤粉细度过粗会导致燃烧延迟，飞灰中残碳量增加；细度过细则会因燃烧速度过快导致局部过热，生成熔融态灰分，粘附管道内壁。

二、设备状态与维护管理

设备老化或缺陷是堵灰的直接诱因。仓泵流化装置故障导致灰流化不充分，管道内灰柱形成；平衡管堵塞引发仓泵排气不畅，灰斗压力失衡；压缩空气系统含水、含油导致气动阀门卡涩，输灰动力不足。此外，灰斗加热器失效使灰温降低，飞灰吸湿结块；布袋除尘器故障导致灰库排气不畅，系统背压升高。定期检修设备、更换磨损部件、加强压缩空气净化，是保障设备可靠运行的关键。

（一）设备老化对输灰系统堵灰风险的直接影响

设备老化是输灰系统堵灰问题的核心诱因之一，其影响贯穿于灰流输送的全过程。仓泵作为输灰系统的关键设备，其流化装置的老化会导致灰流化不充分。流化装置通过压缩空气使飞灰形成流态化，若布风板磨损、透气层破损或空气分布管堵塞，会导致局部流化风量不足，飞灰无法均匀悬浮，进而在管道内形成灰柱。灰柱的堆积会直接阻塞灰流通道，尤其在长距离输送管道中，灰柱的扩展会引发连锁堵塞，迫使系统停机清理。

平衡管作为仓泵排气的重要部件，其老化或堵塞会导致仓泵内压力失衡。在输灰过程中，仓泵需通过平衡管与灰斗保持压力平衡，若平衡管因积灰或腐蚀导致流通截面减小，仓泵排气不畅，灰斗内压力会持续升高，引发灰斗变形或排灰口堵塞。此外，平衡管堵塞还会导致仓泵进料阶段灰斗与仓泵压力差过大，飞灰无法顺利进入仓泵，形成“假满”现象，进一步加剧输灰中断风险。

压缩空气系统的老化对输灰动力的影响同样显著。压缩空气作为输灰的动力源，其质量直接影响气动阀门的动作可靠性。若空压机滤芯老化、干燥器失效，会导致压缩空气含水、含油量超标。水分在低温环境下会凝结成液态水，与飞灰混合后形成泥浆

状物质，粘附在管道内壁；油分则会污染气动阀门密封面，导致阀门卡涩或泄漏。气动阀门动作不畅会引发输灰程序中断，如进料阀无法关闭导致灰斗漏灰，或出料阀无法开启导致仓泵憋压，最终形成系统性堵塞。

（二）关键部件缺陷对灰流特性的劣化作用

灰斗加热器作为防止飞灰吸湿结块的核心部件，其缺陷会直接改变飞灰的物理状态。灰斗加热器通过维持灰温在露点以上，防止飞灰吸湿板结。若加热器功率不足或温控系统失效，灰温会降至露点以下，飞灰中的硫酸盐、氯化物等吸湿性成分会吸收环境水分，形成硬质结块。结块飞灰在排灰过程中会卡滞在灰斗排灰口，形成“灰塞”，迫使系统停机清理。此外，灰斗加热器缺陷还会导致灰斗内壁冷凝水积聚，与飞灰混合后形成腐蚀性溶液，加速灰斗本体腐蚀，缩短设备使用寿命。

布袋除尘器作为灰库排气系统的核心设备，其故障会引发系统背压升高。布袋除尘器通过过滤飞灰维持灰库负压，若布袋破损、脉冲清灰系统失效或灰斗积灰，会导致除尘器阻力上升，灰库排气不畅。系统背压升高会反向影响输灰管道压力，导致灰流速度降低，飞灰在管道内沉积。此外，布袋除尘器故障还会引发二次扬尘，未被过滤的细颗粒飞灰会重新进入输灰系统，与粗颗粒飞灰混合后形成黏附性更强的混合灰，进一步加剧管道堵塞。

气动阀门作为输灰系统的执行机构，其缺陷会直接导致输灰程序失控。气动阀门通过压缩空气驱动开闭，若阀体磨损、密封圈老化或执行机构故障，会导致阀门内漏或外漏。内漏会引发仓泵与灰斗压力串通，飞灰无法顺利输送；外漏会导致压缩空气压力不足，输灰动力下降。气动阀门缺陷还会引发输灰程序误动作，如进料阀未关闭时启动输灰，导致灰斗与仓泵同时排灰，形成管道内灰流对冲，引发严重堵塞。

三、环境条件与操作管理

环境温度、湿度对输灰系统影响显著。低温环境下，飞灰吸湿性增强，管道内壁结露导致灰块粘附；高温季节，灰库排气量不足引发系统背压升高。操作管理方面，输灰支线与省煤器支线动作不同步、单一电场故障未及时处理、灰斗料位计误报未校准等，均可能引发连锁堵灰。加强环境监控、规范操作流程、建立应急预案，是降低环境与操作风险的有效手段。

（一）环境温度对输灰系统运行稳定性的作用机制

环境温度通过改变飞灰物理特性与设备运行状态，直接影响输灰系统稳定性。低温环境下，空气含湿量饱和度和降低，管道内壁温度易降至露点以下，导致飞灰中吸湿性成分（如硫酸盐、氯化物）吸收环境水分，形成黏附性灰块。这些灰块在管道弯头、变径处堆积，逐步缩小流通截面，最终引发堵塞。低温还会导致压缩空气中的水分凝结，在气动阀门、执行机构内部形成冰晶，阻碍阀门动作，造成输灰动力中断。此外，低温环境下灰斗加热器需持续运行以维持灰温，若加热器功率不足或温控系统失效，灰斗内壁冷凝水与飞灰混合后形成腐蚀性溶液，加速灰斗本体腐蚀，缩短设备使用寿命。

高温环境对输灰系统的影响主要体现在灰库排气与设备散热方面。高温季节，环境温度升高导致灰库内气体膨胀，若排气风机功率不足或布袋除尘器阻力上升，灰库排气量会显著下降，系统背压随之升高。^[1]背压升高会反向影响输灰管道压力，导致灰流速度降低，飞灰在管道内沉积。同时，高温环境下空压机、仓泵等设备散热效率下降，压缩空气温度升高，含水量增加，进一步加剧气动阀门卡涩与管道结露问题。此外，高温还会加速橡胶密封件老化，导致气动阀门内漏、管道连接处泄漏，引发输灰动力不足与灰流泄漏。^[2]

环境温度波动对输灰系统的复合影响更为显著。昼夜温差大的地区，管道内壁温度随环境温度变化而频繁升降，导致飞灰在管道内壁反复吸湿与脱水，形成硬质结垢层。结垢层会逐步增厚，最终完全堵塞管道。同时，温度波动还会引发设备热胀冷缩，导致管道法兰连接处松动、气动阀门执行机构位移，进一步加剧系统泄漏与故障风险。因此，维持环境温度稳定、优化设备保温措施、加强灰斗加热控制，是降低温度相关堵灰风险的关键。

（二）环境湿度对输灰系统堵灰风险的加剧效应

环境湿度通过改变飞灰吸湿性与设备运行环境，直接加剧输灰系统堵灰风险。高湿度环境下，空气含湿量升高，飞灰中吸湿性成分（如硫酸钙、氯化钠）会快速吸收水分，形成黏附性灰浆。这些灰浆在管道内壁附着后，会与后续飞灰混合形成硬质结块，逐步堵塞管道。尤其在管道低点、水平段等流速较慢区域，灰浆沉积更为严重。此外，高湿度环境还会导致压缩空气含水量超标，水分在气动阀门、管道内部凝结后，会与飞灰混合形成泥浆状物质，进一步加剧阀门卡涩与管道堵塞。^[3]

低湿度环境对输灰系统的影响则体现在静电积聚与飞灰扬尘方面。低湿度环境下，空气导电性下降，飞灰颗粒在输送过程中易因摩擦产生静电。静电积聚会引发飞灰在管道内壁吸附，形成“灰膜”，逐步缩小流通截面。同时，静电还会导致飞灰在灰斗、仓泵等设备内部扬尘，形成二次污染。此外，低湿度环境会加速

设备金属部件氧化，导致管道内壁粗糙度增加，飞灰摩擦力上升，进一步降低灰流流动性。

环境湿度波动对输灰系统的复合影响更为复杂。湿度频繁变化会导致飞灰反复吸湿与脱水，形成多孔状硬质结块。这些结块在管道内滚动时，会与管道内壁摩擦产生细颗粒飞灰，细颗粒飞灰又会填充粗颗粒结块间隙，形成致密堵塞体。同时，湿度波动还会引发设备金属部件疲劳，导致管道连接处密封失效，引发灰流泄漏与系统压力失衡。因此，控制环境湿度稳定、加强压缩空气干燥处理、优化管道内壁材质，是降低湿度相关堵灰风险的核心措施。

四、综合优化措施与实践

针对堵灰问题，需采取“预防为主、综合治理”的策略。一是强化煤质管理，通过配煤掺烧降低灰分、优化粒度分布；二是升级设备，采用耐磨损管道、高效流化装置及智能监控系统；三是优化参数，建立基于锅炉负荷的动态调整模型；四是完善维护体系，制定设备检修周期表，加强压缩空气、灰斗加热器等关键部件的定期检查；五是提升操作水平，通过培训强化运行人员对堵灰征兆的识别能力，建立快速响应机制。^[4]

五、结语

百万发电机组锅炉电除尘电场输灰管堵灰问题涉及煤质、设备、参数、环境及操作等多维度因素。通过系统性分析堵灰成因，并从煤质优化、设备升级、参数调整、环境控制及操作规范等方面制定综合对策，可显著提升输灰系统可靠性。实践表明，实施动态参数管理、加强设备预防性维护、建立快速排堵流程，能有效减少堵灰频次，保障电除尘系统长期稳定运行，为机组安全环保运行提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 李颖菲. 600MW 燃煤发电机组掺烧绿氨的能源—环境—经济综合评价研究 [D]. 华中科技大学, 2024.
- [2] 吴吉, 王伟哲, 金国强, 等. 百万千瓦发电机组协调控制策略分析与优化 [J]. 上海电气技术, 2021, 14(04): 10–19.
- [3] 谢誉军, 郑庆第, 杨荣东, 等. 百万千瓦发电机组锅炉重型顶板梁翻转技术 [J]. 安装, 2019, (10): 26–28.
- [4] 郑庆第, 谢誉军. 新技术在百万千瓦发电机组锅炉顶板梁吊装中的应用 [J]. 安装, 2019, (10): 29–31.