

浓相气力输灰系统堵管机理及基于压力 - 流量耦合的智能预警方法研究

袁汉

国家电投集团贵州黔西中水发电有限公司, 贵州 毕节 551500

DOI:10.61369/EPTSM.2025040017

摘 要 : 本文聚焦于浓相气力输灰系统堵管这一关键问题, 深入剖析其堵管机理, 从粉尘特性、管道结构、气流参数、设备状态以及环境因素等多个维度展开全面探讨。鉴于传统预警方法存在的局限性, 提出基于压力 - 流量耦合的智能预警方法。该方法通过构建多传感器网络实现数据精准采集, 运用数据关联分析与机器学习算法挖掘数据潜在规律, 进而实现堵管风险的早期识别与精准预警, 为提升浓相气力输灰系统的运行可靠性与稳定性提供理论支撑与技术方案。

关 键 词 : 浓相气力输灰系统; 堵管机理; 压力 - 流量耦合; 智能预警方法

Study on Pipe Blockage Mechanism of Thick Gas Power Ash Conveying System and Intelligent Early Warning Method Based on Pressure-Flow Coupling

Yuan Han

Guizhou Qianxi Zhongshui Power Generation Co., LTD. State Power Investment Group Co., LTD. Bijie, Guizhou 551500

Abstract : This paper focuses on the critical issue of pipe blockage in thick-phase pneumatic ash conveying systems, conducting a comprehensive analysis of its blocking mechanisms from multiple dimensions including dust characteristics, pipeline structure, airflow parameters, equipment status, and environmental factors. To address the limitations of traditional early-warning method

Keywords : concentrated phase pneumatic ash conveying system; pipe blockage mechanism; pressure-flow coupling; intelligent early warning method

引言

浓相气力输灰系统作为火力发电、钢铁冶炼等工业领域中输送粉煤灰、矿渣粉等物料的关键设备, 具有输送效率高、占地面积小、环保性能好等显著优势。然而, 堵管问题一直是困扰该系统稳定运行的顽疾。一旦发生堵管, 不仅会导致输灰系统瘫痪, 引发灰斗高料位、电除尘电场跳闸等一系列连锁反应, 严重时甚至会造成灰斗坍塌、设备损坏以及人员伤亡等重大安全事故, 给企业带来巨大的经济损失和社会影响^[1]。

一、浓相气力输灰系统堵管机理分析

(一) 粉尘特性对堵管的影响

1. 粉尘粒径与分布

粉尘粒径大小及其分布情况是影响气力输灰系统堵管的关键因素之一。当粉尘中存在较大粒径的颗粒时, 这些颗粒在输送过程中需要更大的气流动力来克服自身重力和摩擦力。若气流动力不足, 大颗粒易在管道内沉积, 尤其是在管道弯曲处、变径处等局部阻力较大的区域, 沉积的大颗粒会逐渐堆积形成堵塞物, 阻碍后续粉尘的正常输送^[5]。此外, 粉尘粒径分布不均匀会导致输送过程中出现分层现象, 即大颗粒在下层, 小颗粒在上层, 使得管

道内局部粉尘浓度过高, 增加堵管风险。

2. 粉尘湿度与粘性

粉尘湿度过高会显著增加其粘性, 这是导致堵管的常见原因之一。当粉尘含有一定水分时, 水分会粉尘颗粒表面形成一层液膜, 使颗粒之间相互粘连, 形成较大的团聚体。这些团聚体在管道内输送时, 由于体积较大、重量较重, 更容易在管道内沉积, 逐渐积累形成堵塞。特别是在冬季或低温环境下, 粉尘表面的水分易结露, 进一步加剧了粉尘的粘性, 使堵管问题更加严重^[10]。

3. 粉尘比重与流动性

粉尘比重也是影响堵管的重要因素。比重较大的粉尘在输送过程中需要更大的气流速度来保持悬浮状态, 若气流速度不足,

作者简介: 袁汉 (1989.10-), 男, 汉族, 贵州遵义人, 学历: 大专, 职称: 助理工程师, 从事的研究方向或工作领域: 火力发电厂。

粉尘易在管道底部沉积。此外，粉尘的流动性也会影响输送效果。流动性差的粉尘在管道内流动时阻力较大，容易出现堆积现象，增加堵管的可能性。

（二）管道结构对堵管的影响

1. 管道直径与流速

管道直径的选择直接影响气力输灰系统的输送性能。若管道直径过小，气流速度过高，虽然能够提高输送效率，但会加剧管道磨损，同时可能导致粉尘与管道壁面的碰撞加剧，使粉尘破碎产生更多细小颗粒，增加堵管风险。因此，需要根据粉尘特性、输送距离等因素合理选择管道直径，以确保气流速度在合适范围内。

2. 管道弯曲与布局

管道的弯曲和布局方式对气流分布和粉尘输送有着重要影响。管道弯曲过多或弯曲半径过小会增加气流阻力，使气流在弯曲处产生涡流，导致粉尘在弯曲处沉积。此外，不合理的管道布局会增加系统复杂度，使气流分布不均匀，局部区域可能出现气流速度过低的情况，从而引发堵管。

3. 管道内壁粗糙度

管道内壁粗糙度会影响粉尘与管道壁面的摩擦力。内壁粗糙度较大的管道，粉尘在输送过程中与壁面的摩擦力增大，容易在管道内壁附着，形成一层粉尘层。随着时间的推移，这层粉尘层会逐渐增厚，导致管道有效直径减小，气流阻力增大，最终可能引发堵管。

（三）气流参数对堵管的影响

1. 气流速度

气流速度是气力输灰系统输送粉尘的动力来源，其大小直接影响输送效果。气流速度过低，无法提供足够的动力将粉尘输送至目的地，导致粉尘在管道内沉积；气流速度过高，虽能提高输送效率，但会加剧管道磨损，同时可能导致粉尘破碎，产生更多细小颗粒，增加堵管风险。因此，需要根据粉尘特性和管道条件合理控制气流速度。

2. 气流压力

气流压力的稳定性对气力输灰系统的正常运行至关重要。若气流压力波动过大，会导致输送过程中气流动力不稳定，使粉尘在管道内出现间歇性沉积或飞扬。压力突然升高可能会使粉尘被过度压缩，形成致密的堵塞物；压力突然降低则可能导致粉尘沉降，影响输送连续性^[6]。

3. 气流均匀性

气流在管道内的均匀分布是保证粉尘顺利输送的关键。若气流分布不均匀，局部区域气流速度过低，粉尘易在该区域沉积；而局部区域气流速度过高，则可能导致粉尘破碎和管道磨损加剧。因此，需要通过合理的管道设计和气流控制装置，确保气流在管道内均匀分布。

（四）设备状态对堵管的影响

1. 仓泵故障

仓泵是气力输灰系统的关键设备之一，其工作状态直接影响输送效果。若仓泵的进气阀、出料阀等部件出现故障，如阀门密封不严、卡涩等，会导致仓泵内压力异常，无法正常输送粉尘，

从而引发堵管。此外，仓泵的气化装置故障也会影响粉尘的流态化效果，使粉尘无法充分分散，增加输送阻力^[2]。

2. 阀门磨损与泄漏

输送管道上的各种阀门，如截止阀、球阀等，在长期运行过程中会出现磨损现象。阀门磨损后，密封性能下降，容易出现泄漏问题。泄漏的气流会扰乱管道内的正常气流分布，导致局部区域气流速度变化，影响粉尘输送，增加堵管风险^[8]。

3. 管道连接松动

管道连接部位的松动会导致气体泄漏，降低管道内的压力和气流速度。同时，松动的连接部位还可能使粉尘泄漏到外界，造成环境污染，并且泄漏的粉尘可能会在管道周围堆积，影响管道的正常安装和维护，进一步加剧堵管问题^[7]。

（五）环境因素对堵管的影响

1. 温度变化

环境温度的变化会对气力输灰系统产生多方面的影响。在低温环境下，粉尘表面的水分易结露，使粉尘粘性增大，增加堵管风险；同时，低温还会使管道收缩，可能导致管道连接部位出现松动，引发气体泄漏。在高温环境下，设备易出现热膨胀现象，影响管道的正常安装和密封性能，并且高温可能会使粉尘的物理性质发生改变，如流动性变差等，也会增加堵管的可能性。

2. 湿度变化

环境湿度的变化同样会影响系统的运行。高湿度环境下，空气中的水分容易被粉尘吸收，使粉尘湿度增加，粘性增大，导致堵管。此外，高湿度还可能对设备造成腐蚀，降低设备的使用寿命，影响系统的稳定性。

3. 外界异物进入

在工业生产环境中，外界异物如金属碎片、石块、杂物等可能会进入气力输灰系统。这些异物在管道内会阻碍粉尘的正常流动，容易在管道狭窄处或弯曲处形成堵塞，严重影响系统的正常运行^[9]。

二、基于压力－流量耦合的智能预警方法

（一）智能预警方法总体架构

基于压力－流量耦合的智能预警方法采用分层分布式架构，主要包括感知层、传输层、处理层和应用层。感知层由分布在输灰管道各关键位置的压力传感器、流量传感器等组成，负责实时采集管道内的压力、流量等参数；传输层通过有线或无线通信网络将采集到的数据传输至处理层；处理层利用数据关联分析、机器学习等算法对数据进行处理和分析，挖掘数据内在规律，识别堵管风险；应用层则将预警信息以直观的方式展示给运维人员，并提供相应的决策支持^[3]。

（二）多传感器网络构建与数据采集

为了实现对输灰管道运行状态的全面监测，需要构建多传感器网络。在管道的关键位置合理布置压力传感器和流量传感器。压力传感器用于实时监测管道内的压力变化，反映气流动力状态；流量传感器用于测量管道内的粉尘流量，反映输送效率。传感器应具备高精度、高可靠性和快速响应等特点，以确保采集到

的数据准确、及时。

（三）数据关联分析与特征提取

1. 数据关联分析

压力和流量作为气力输灰系统的两个关键参数，之间存在着密切的内在联系。通过对历史数据和实时数据的分析，建立压力 - 流量关联模型。在正常输送情况下，压力和流量之间呈现出一定的规律性变化；而当系统出现堵管趋势时，这种规律性会被打破，压力和流量的变化会出现异常。

2. 特征提取

从采集到的压力和流量数据中提取能够反映堵管风险的特征参数是智能预警的关键步骤。常用的特征提取方法包括时域分析、频域分析等。在时域分析中，可以提取压力和流量的均值、方差、峰值、谷值等统计特征，这些特征能够反映数据的波动情况和变化趋势。在频域分析中，通过傅里叶变换将时域信号转换为频域信号，提取信号的频谱特征。某些频段能量的异常变化可能与堵管过程中的振动、摩擦等现象相关，能够为堵管预警提供重要信息。

（四）基于机器学习的堵管风险预测模型

1. 机器学习算法选择

常用的机器学习算法包括支持向量机、随机森林、神经网络等。支持向量机是一种基于统计学习理论的分类和回归算法，具有较好的泛化能力和鲁棒性，能够处理小样本数据和非线性问题。随机森林是一种集成学习算法，通过构建多个决策树并进行集成，能够有效避免过拟合问题，提高模型的准确性和稳定性。神经网络具有强大的非线性映射能力和自学习能力，能够自动从数据中学习复杂的模式和规律，适用于处理大规模、高维度的数据。根据浓相气力输灰系统的特点和数据特性，可以选择合适的机器学习算法构建堵管风险预测模型。

2. 模型训练与优化

在模型训练过程中，需要准备大量的历史数据，包括正常输送数据和堵管故障数据。将数据分为训练集和测试集，训练集用于训练模型，测试集用于评估模型的性能^[4]。通过调整模型的参数，如支持向量机的核函数参数、随机森林的树的数量、神经网络的层数和神经元数量等，优化模型的性能，提高模型的预测准确率。同时，采用交叉验证等方法对模型进行评估，确保模型具有良好的泛化能力，能够在不同的工况下准确预测堵管风险。

（五）预警决策与信息发布

1. 预警决策

根据堵管风险预测模型的输出结果，结合预设的预警阈值，进行预警决策。预警阈值可以根据历史数据和专家经验确定，不同的预警等级对应不同的阈值范围。当预测结果超过相应阈值时，系统判定为存在堵管风险，并生成相应等级的预警信号。预警等级可以分为一级预警、二级预警和三级预警等，一级预警表示堵管风险较低，但需要引起关注；二级预警表示堵管风险较高，需要及时采取措施进行检查和处理；三级预警表示堵管风险极高，系统可能即将发生堵管故障，需要立即停机检修。

2. 信息发布

将预警信息以直观、易懂的方式发布给运维人员是智能预警系统的重要环节。可以通过声光报警、短信通知、手机应用推送等多种方式将预警信息及时传达给相关人员。同时，在监控中心的显示屏上展示详细的预警信息，包括预警等级、风险位置、预测的堵管时间、建议的处理措施等，为运维人员提供全面的决策支持，以便他们能够迅速采取有效的措施，防止堵管故障的发生。

三、结论与展望

本文深入分析了浓相气力输灰系统的堵管机理，从粉尘特性、管道结构、气流参数、设备状态以及环境因素等多个方面全面探讨了导致堵管的原因。针对传统预警方法存在的不足，提出了基于压力 - 流量耦合的智能预警方法。该方法通过构建多传感器网络实现数据的精准采集，运用数据关联分析和机器学习算法挖掘数据潜在规律，能够实现对堵管风险的早期识别和精准预警。研究结果表明，该智能预警方法能够有效提高浓相气力输灰系统的运行可靠性和稳定性，降低堵管故障的发生率，为工业生产的安全运行提供有力保障。

未来的研究可以进一步拓展以下几个方面：一是深化堵管机理研究，考虑更多复杂因素对堵管的影响。二是优化智能预警方法，引入更先进的机器学习和深度学习算法，提高预警的准确性和实时性；三是开展实际应用验证，在不同工业场景下对智能预警方法进行长期测试和优化，积累更多的实际运行数据，不断完善预警模型和策略；四是加强智能预警系统与其他工业自动化系统的集成，实现数据的共享和协同控制，进一步提高工业生产的智能化水平。

参考文献

- [1] 王军锋, 杜仲平, 刘安义, 等. 浓相正压气力输灰系统堵管机理研究与处理 [J]. 陕西电力, 2008, (07): 38-40.
- [2] 符美道. 浓相正压气力输灰系统故障分析及对策 [J]. 中国设备工程, 2023, (19): 117-119.
- [3] 潘建华. 正压浓相气力输灰系统改造分析 [J]. 有色金属文摘, 2015, 30(01): 91-92.
- [4] 郝云冯, 胡玲玲. 正压浓相气力输灰系统故障原因分析及处理对策 [J]. 能源与环境, 2014, (02): 19-20+22.
- [5] 舒朝龙. 气力输灰系统堵管分析及其防范措施 [J]. 科技信息, 2012, (33): 395-396.
- [6] 钟金光. 正压浓相气力输灰系统顺畅运行的措施 [J]. 企业技术开发, 2012, 31(14): 114-116.
- [7] 朱佳. 正压浓相气力输灰系统及应用分析 [J]. 人民长江, 2008, (07): 50-51.
- [8] 陈志超. 正压浓相气力除灰系统出现的问题及解决措施 [J]. 发电设备, 2006, (03): 178-180.
- [9] 蒋丽华, 顾源, 杨红. 浓相气力除灰系统堵塞的原因及处理 [J]. 重庆电力高等专科学校学报, 2003, (03): 50-53.
- [10] 林朝扶, 容严. 气力输灰系统堵管的分析与对策 [J]. 电力环境保护, 2003, (01): 40-42.