

# 煤炭灰分无源在线检测技术应用与发展探究

唐 盛, 刘必成, 许艳伟

(同方威视技术股份有限公司, 北京 100084)

**摘 要** 随着煤炭行业的快速发展以及对煤炭质量要求的不断提升, 煤炭检测技术也应进一步优化现有流程与方法, 以适应高效、精准的生产需求。在煤炭灰分无源在线检测技术的支持下, 煤炭生产与加工企业应积极引入并完善该技术应用体系。本文基于对煤炭行业发展趋势和检测技术革新需求的考量, 探讨了煤炭灰分无源在线检测技术的应用现状、优势特点、面临挑战以及未来发展方向, 旨在为推动煤炭行业检测技术升级和高质量发展提供参考依据。

**关键词** 煤炭灰分; 无源在线检测技术; X 射线吸收法; 天然射线检测法; 激光诱导击穿光谱分析法

中图分类号: TD94

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.14.008

## 0 引言

在一定的温度下, 煤炭经过完全燃烧后, 残留的物质即为灰分, 是衡量煤炭质量的关键指标之一。煤灰分的传统化学检测法需经过取样、制样、筛分、检测等工序, 耗时极长, 不仅严重影响煤炭生产效率, 由于检测周期长, 难以及时反馈煤炭质量波动情况, 导致生产调整滞后, 易造成经济损失。煤炭灰分无源在线检测技术的出现, 为解决这些问题带来了新的契机, 有望从根本上革新煤炭灰分检测模式。

## 1 煤炭灰分检测技术发展现状

从 20 世纪末开始, 随着民用核技术、计算机技术的快速发展, 基于原子辐射技术的在线测灰设备应运而生, 并逐渐在煤炭灰分检测领域崭露头角。早期的检测技术受限于技术水平, 多依赖人工操作与简单仪器, 效率低下且准确性欠佳, 而原子辐射技术的应用, 开启了煤炭灰分检测的新篇章。

从检测原理发现来看, 基于原子辐射技术设计生产的有源测灰仪根据基本原理可以分为以下几种: (1) 低能  $\gamma$  射线反散射测灰仪, 利用低能  $\gamma$  射线与煤炭中元素相互作用后产生的反散射射线强度来推算灰分含量; (2) 中子活化测灰仪, 通过中子与煤炭元素发生核反应, 依据反应产生的特征射线来测定灰分; (3)  $\gamma$  射线透射测灰仪, 则基于  $\gamma$  射线穿过煤炭时的衰减程度与灰分含量的相关性来实现检测。在实际应用中, 有源测灰仪极大地提升了检测效率, 能实时对煤炭灰分进行监测, 有效减少了人工检测的繁琐流程与时间消耗<sup>[1]</sup>。

## 2 煤炭灰分无源在线检测技术概述

### 2.1 煤炭灰分无源在线检测技术原理

煤炭灰分无源在线检测技术基于天然  $\gamma$  射线检测法, 依托物质的放射性衰变特性以及  $\gamma$  射线与物质的相互作用机制, 实现对煤炭灰分含量的精准测定。从核物理学角度出发, 物质中的原子核在自然状态下会发生自发衰变, 部分原子核会释放出  $\gamma$  射线, 矿物质内部普遍存在极微量的天然放射性元素, 这些元素在煤炭漫长的形成过程中, 被包裹于煤炭结构之中<sup>[2]</sup>。

碳元素源于原始森林经地壳运动后历经亿万年演变而成煤炭, 在复杂的地质过程中, 矿物质内的放射性元素所处化学环境与物理状态发生动态变化, 但始终保持着天然放射性。不同煤炭因其成煤母质、沉积环境以及后期地质改造程度各异, 内部矿物质种类与含量呈现显著差异, 进而导致其辐射  $\gamma$  射线的能谱与强度特征各不相同。通过深入的理论研究与大量实验数据拟合, 发现煤炭发射的特征  $\gamma$  粒子通量与煤炭中灰分含量存在紧密的特定线性关系。运用高分辨率、高灵敏度的  $\gamma$  射线探测器, 实时采集煤炭辐射的  $\gamma$  射线信号, 并借助先进的多道分析技术与复杂的数学算法对  $\gamma$  粒子通量进行精确解谱与定量分析, 从而准确计算出煤炭灰分含量。此检测技术规避了传统有源检测技术中放射性源使用带来的辐射防护难题与安全隐患, 降低了设备全生命周期运行成本。同时, 该技术实现了煤炭灰分的连续、实时、在线监测, 突破了传统检测方法的时空限制, 极大地提升了检测效率与数据可靠性, 为煤炭质量精准控制与煤炭行业智能化转型升级提供了坚实的理论基础与技术保障。

## 2.2 煤炭灰分无源在线检测技术优势

从放射原理来看,煤炭灰分无源在线检测技术具有安全、环保、无辐射风险的优势。在检测流程中简化了放射源管理环节,无需担忧放射源的运输、存储与衰变等复杂问题,不涉及对环境和操作人员潜在的辐射危害,符合当下绿色发展与安全生产理念。

从实时性表现来看,该技术可测得最短6秒的有效灰分,远优于有源灰分仪的实时性。其能够快速捕捉煤炭灰分变化,及时反馈数据。在适应性上,不受煤炭运输速度、堆积形态等因素过多干扰,能灵活应对不同工况,实现了全工况稳定检测。

在实际应用过程中,现场标定工作量只是双能 $\gamma$ 射线透射法灰分仪标定工作量的一半,减少了人力、物力投入,大大降低了检测成本与维护难度。为煤炭生产企业持续高效生产提供精准数据支撑,助力企业在保障煤炭质量的同时,提升生产效率,增强市场竞争力。

## 2.3 煤炭灰分无源在线检测技术的测试

煤炭作为一种关键的基础能源资源,在全球能源结构中占据着不可替代的重要地位。从能源转换与利用的科学视角出发,为实现高效的燃烧过程以及满足日益严苛的环境友好标准,对煤炭灰分含量进行精确测定是能源领域研究与工业实践中的核心任务之一。煤炭灰分含量的波动,会显著影响煤炭燃烧的热力学过程,进而干扰燃烧效率,较高的灰分含量往往伴随着更多的污染物生成,如颗粒物、硫氧化物等,对大气环境造成严重威胁。

煤炭灰分无源在线检测技术应运而生,其核心技术逻辑是基于煤炭中天然放射性元素的自发衰变行为,天然放射性元素在自然状态下持续辐射 $\gamma$ 射线,该技术运用高灵敏度、高分辨率的探测器获取 $\gamma$ 射线信号,再通过复杂且精密的数学建模方法,对 $\gamma$ 射线光谱数据进行深度挖掘、处理与分析。在数学模型构建过程中,综合考虑核物理、统计学以及信号处理等多学科理论,通过大量实验数据进行模型训练与验证,以实现煤炭灰分含量的精准反演。

在实际应用场景中,该技术可对煤炭质量的动态变化进行实时、连续监测。基于反馈控制理论,依据检测到的灰分含量波动,利用自动控制算法精确调节燃料输送量,优化燃烧器的配风比,确保燃烧过程始终维持在高效、稳定的状态,以此提升能源利用效率,减少能源浪费,从源头上降低污染物的生成与排放,契合可持续发展的战略要求。

## 3 煤炭灰分无源在线检测技术应用

### 3.1 X射线吸收法

X射线吸收法基于朗伯—比尔定律( $I=I_0 \cdot e^{-\mu \rho x}$ ),其中: $I$ 为透射X射线强度, $I_0$ 为入射X射线强度, $\mu$ 为质量吸收系数( $\text{cm}^2/\text{g}$ ), $\rho$ 为样品密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), $x$ 为样品厚度( $\text{cm}$ )。当X射线穿透煤炭时,与煤炭中的碳、氢、氧等主要元素以及构成灰分的矿物质元素发生光电效应、康普顿散射等相互作用,致使X射线强度衰减。由于不同元素对X射线的吸收特性差异较为明显,而灰分主要由矿物质构成,通过精确测量X射线强度的衰减程度,依据相关算法反演出煤炭的灰分含量。

在不同粒级煤质中,X射线吸收法表现出独特的性能。以粒度在0~50 mm的动力煤为例,当灰分小于15%时,精度可达 $\leq 0.5\%1\sigma$ 。在遵循正态分布的测量数据中,约68.27%的数据与真实值偏差在 $\pm 0.5\%$ 范围内。从技术层面分析,得益于在此灰分区间内,煤炭结构相对稳定,元素分布均匀,X射线吸收规律易于把握,探测器能够精准捕捉X射线强度变化。当灰分 $> 30\%$ 时,精度 $\leq 1.5\%1\sigma$ 。此时煤炭中矿物质种类与含量增加,元素分布复杂,导致X射线吸收规律复杂化,散射效应增强,干扰探测器对X射线强度的准确测量,从而降低了检测精度。在实际应用中,X射线管的管电压、管电流稳定性直接影响入射X射线强度的稳定性,进而影响检测精度,通常要求管电压波动控制在 $\pm 0.1\%$ 以内,管电流波动控制在 $\pm 0.5\%$ 以内;探测器的能量分辨率需达到100~150 eV,以准确分辨不同能量的X射线。

### 3.2 天然射线检测法

该方法基于放射性核素在自然界中的普遍存在特性。煤炭中的矿物质含有微量天然放射性核素,如钾-40、铀-238、钍-232等,其衰变产生的 $\gamma$ 射线能谱和强度与煤炭灰分含量存在内在联系。依据放射性衰变定律( $N=N_0 e^{-\lambda t}$ ),其中 $N$ 为 $t$ 时刻的放射性核素数目, $N_0$ 为初始放射性核素数目, $\lambda$ 为衰变常数),放射性核素衰变产生的 $\gamma$ 射线通量与核素含量相关,而核素含量又与煤炭灰分相关。

针对煤炭生产线上精煤检测,在精煤胶带安装1台 $\gamma$ 天然射线在线测灰仪,如NGAM—2008天然射线灰分仪。该仪器配备的高分辨率 $\gamma$ 射线探测器,能量分辨率可达3%~5%(在662 keV处),能够精确区分不同能量的 $\gamma$ 射线。在具体操作中,精煤在胶带上匀速通过检测区域,探测器实时采集 $\gamma$ 射线信号。仪器内部信号处理系统将模拟信号转化为数字信号后,依

据预先建立的基于蒙特卡罗模拟和大量实验数据校准的数学模型进行分析。该模型充分考虑不同产地煤炭的放射性核素分布差异、煤炭运输过程中的振动等因素。为保证检测精度,需定期维护校准,每两周进行一次本底计数测量,修正探测器的零点漂移;每月用标准样品(灰分已知且均匀性好,标准偏差 $<0.3\%$ )进行检测,验证仪器准确性<sup>[3]</sup>。

### 3.3 激光诱导击穿光谱分析法

高能脉冲激光矿物全元素在线检测技术利用高能脉冲激光(脉冲能量 $100\sim 500\text{ mJ}$ ,脉冲宽度 $5\sim 10\text{ ns}$ )激发待测样品,瞬间使样品表面局部温度达到 $10\ 000\text{ K}$ 以上,产生高温等离子体。在等离子体冷却过程中,原子和离子退激发射出特征光谱。根据玻尔兹曼分布( $N_i/N_j=(g_i/g_j)e^{-\{(E_i-E_j)/kT\}}$ ,其中 $N_i$ 、 $N_j$ 分别为能级 $i$ 、 $j$ 上的原子数, $g_i$ 、 $g_j$ 为统计权重, $E_i$ 、 $E_j$ 为能级能量, $k$ 为玻尔兹曼常数, $T$ 为等离子体温度),不同元素的特征光谱强度与元素含量相关<sup>[4]</sup>。

针对煤炭元素组成复杂且含量差异大的特点,建立基于谱线筛选的PLS(偏最小二乘)模型。首先采集大量不同灰分含量煤炭样品(涵盖多种煤阶、产地,样品数不少于200个)的激光诱导击穿光谱数据,运用Savitzky-Golay滤波等预处理技术去除噪声和基线漂移。然后,通过相关系数分析、变量重要性投影(VIP)等方法筛选出与灰分含量相关性强的特征谱线,如硅元素 $288.16\text{ nm}$ 、铝元素 $396.15\text{ nm}$ 等谱线。将筛选后的特征谱线强度作为自变量,对应的灰分含量作为因变量构建PLS模型。以某大型煤矿炼焦煤检测为例,在灰分含量 $10\%\sim 25\%$ 范围内,模型预测精度可达 $\pm 1.0\%$ 。在实际应用中,优化激光参数,如调整脉冲能量和频率,可改变等离子体特性,提高光谱信号强度和稳定性。改进样品激发和光谱采集方式,如采用双脉冲激光激发、积分球收集光谱,进一步提高检测准确性和稳定性。

## 4 煤炭灰分无源在线检测技术的发展

煤炭选矿过程中灰分的快速准确测定一直是行业内亟待攻克的难题。目前,尽管市场上存在各类快速灰分仪,然而在实际应用场景中,受到煤炭成分复杂多变、现场工况差异大等多种因素的影响,其检测效果往往不尽人意。因此,在新型检测技术与设备的设计中,要遵循高效、精准、安全的原则,研发快速采、制、化一体机。针对原煤、中煤、重介精煤、复合式干法选矿产品以及智能干法选矿产品等不同种类的煤炭物料,均需实现高精度的灰分检测<sup>[6]</sup>。

一是建立涵盖大量煤炭样本的数据库。收集来自全国不同矿区、不同地质年代、不同煤种的煤炭样本,数量不少于 $5\ 000$ 个。对每个样本进行详细的元素分析、灰分含量测定以及物理特性测试。利用先进的光谱分析技术、X射线衍射技术等,获取样本的全面数据信息。例如:通过光谱分析得到样本中各种元素的特征谱线强度,这些元素包括构成灰分的硅、铝、铁等,将数据进行整理、分类,建立结构化的数据库,为后续检测模型的建立提供坚实的数据基础<sup>[6]</sup>。

二是基于数据库的数据,运用机器学习算法构建检测模型。选择支持向量机(SVM)、神经网络等算法,将样本数据按照70%训练集、20%验证集、10%测试集的比例进行划分。利用训练集数据对算法模型进行训练,不断调整模型参数,如神经网络的层数、节点数等,以优化模型性能,通过验证集对训练过程中的模型进行评估,避免过拟合现象。并使用测试集数据对训练好的模型进行测试,确保模型在未知样本上具有良好的泛化能力,满足煤炭选矿过程中对灰分检测精度的严格要求。

## 5 结束语

基于核辐射原理的检测技术大多原理简单,运行成本低,但对防护要求高,且多为旁路检测,难以满足复杂工况下的实时在线需求。而煤炭灰分无源在线检测技术凭借独特优势崭露头角,未来应加大研发投入,优化算法与设备,推动其与智能化生产深度融合,进一步提升检测精度与稳定性,为煤炭行业高效、绿色、可持续发展筑牢技术根基。

## 参考文献:

- [1] 朱圣恩.基于激光诱导击穿光谱的煤炭成分检测与分析方法研究[D].济南:齐鲁工业大学,2024.
- [2] 苏明跃,王海仙,杨丽飞,等.煤炭灰分含量现场快速检测技术的研究与应用[J].中国口岸科学技术,2024,06(05):47-51.
- [3] 白飞燕,樊民强,杨宏丽,等.基于X射线衍射的煤炭灰分快速检测方法研究[J].选煤技术,2023,51(04):26-32.
- [4] 余天骄.基于机器学习的煤灰分检测方法研究[D].西安:西安工程大学,2023.
- [5] 张业才,郑见云,郝红亮,等.提高激光诱导击穿光谱的在线测定煤质方法研究[J].煤炭科技,2022,43(06):30-35.
- [6] 赵辉.煤炭灰分在线检测技术的应用现状及发展前景[J].煤炭加工与综合利用,2022(04):79-82.