

文章编号: 1001-3571 (2024) 02-0092-07

PGNAA 多元素在线检测技术在选煤厂的应用

宋青锋, 赵 龙, 李海柱

(丹东东方测控技术股份有限公司, 辽宁 丹东 118002)

摘要: 煤质在线检测技术可对煤中矿物元素进行直接检测, 为煤炭洗选生产实现灰分自动回控提供关键数据支撑。文章在介绍并对比了用于煤质在线检测的 X 荧光分析 (XRF) 技术、激光诱导击穿光谱 (LIBS) 技术和瞬发 γ 射线中子活化分析 (PGNAA) 技术的基础上, 详细阐述了 PGNAA 多元素在线检测技术的原理、检测设备的组成, 重点介绍了 PGNAA 技术在矿井型选煤厂和中央型选煤厂的应用情况, 并对 PGNAA 在线检测设备得到的煤质检测结果与实验室化验结果进行了对比。PGNAA 在线检测设备在矿井型选煤厂和中央型选煤厂的应用表明: 在不同的生产条件和产品需求下, PGNAA 在线检测设备对灰分检测的标准偏差能够控制在 0.15% 以内, 相关系数在 0.91 以上; 对全硫检测的标准偏差为 0.032%, 相关系数达到 0.995; 对煤中 Fe_2O_3 含量检测的标准偏差仅为 0.025%, 相关系数为 0.950; 可见 PGNAA 多元素在线检测技术对于灰分、全硫、 Fe_2O_3 含量的检测结果与实验室化验结果之间有很好的相关性。随着选煤厂智能化建设的深入, 对煤质在线检测设备的要求越来越高, 未来 PGNAA 多元素在线检测技术以其高精度、强适用性等特点, 将在原煤均质、分选控制、精准配煤、商品煤出厂快速检测等方面发挥作用。

关键词: 煤质在线检测; PGNAA 多元素在线检测技术; 煤质指标; 标准偏差; 相关系数

中图分类号: TQ533.1

文献标志码: B

Application of the PGNAA multi-element online detection technique in coal preparation plant

SONG Qingfeng, ZHAO Long, LI Haizhu

(Dandong Dongfang Measurement & Control Technology Co. Ltd., Dandong 118002, China)

Abstract: Online detection of mineral elements contained in coal provides a crucial data support for realizing control of ash of products with feedback ash data. Following an introduction to and comparison of the XRF, LIBS and PGNAA techniques for online detection of mineral constituents contained in coal, the paper goes to elaborate on the working principle, make-up and structural design of the PGNAA online multi-element detection technique and particularly the effects obtained in field application of this technique in mine and central coal preparation plants, as well as the comparison of the actually measured and analysis data. Practice shows that under varying operating conditions and quality requirements of products, compared with the analytical data, the standard deviation of the ash values actually measured with the PGNAA technique can be controlled within 0.15%, with a correlation coefficient being over 0.91; and for the detection of total sulfur and Fe_2O_3 , the standard deviations and correlation coefficients are 0.032% and 0.995, 0.025% and 0.950, respectively. It can be seen that the actually measured ash, total sulfur and Fe_2O_3 data are in good agreement with the analytical data. With the ongoing development of intelligent coal preparation plants, an ever stricter requirement is placed online coal analysis units. Looking ahead, the high-accuracy and high-adaptability PGNAA technology will play an ever bigger role in raw coal homogenization, separation control, accurate coal blending and rapid determination of quality of delivered commercial coal.

收稿日期: 2024-03-01 责任编辑: 樊 阳 DOI: 10.16447/j.cnki.cpt.2024.02.014

作者简介: 宋青锋 (1981—), 男, 陕西西安人, 正高级工程师, 从事在线检测仪器开发工作。E-mail: songqingfeng@dfmc.cc, Tel: 13898516653。

引用格式: 宋青锋, 赵 龙, 李海柱. PGNAA 多元素在线检测技术在选煤厂的应用[J]. 选煤技术, 2024, 52(2): 92-98.

SONG Qingfeng, ZHAO Long, LI Haizhu. Application of the PGNAA multi-element online detection technique in coal preparation plant[J]. Coal Preparation Technology, 2024, 52(2): 92-98.

Keywords: online coal analysis; PGNAA online multi-element detection technique; coal quality indices; standard deviation; correlation coefficients

随着我国原煤入选规模的不断扩大, 选煤厂原煤来源的多样性和复杂性问题愈加突出, 为保证分选效率和最终精煤产品质量, 配煤入选已经成为众多选煤厂提高经济效益的重要手段^[1-3]。煤质情况的复杂化, 对煤质在线检测设备的作用和功能提出了更高的要求, 检测指标逐渐由原先的单一灰分指标检测, 向多指标、多元素检测过渡, 对各煤质指标检测精度的要求也越来越高^[4]。

目前, 应用于煤中元素分析的技术主要有 X 荧光分析 (XRF) 技术、激光诱导击穿光谱 (LIBS) 技术和瞬发 γ 射线中子活化分析 (PGNAA) 技术等。XRF 技术包括能量色散 X 荧光分析 (ED-XRF) 和波长色散 X 荧光分析 (WD-XRF) 两种^[5], 相比于 WD-XRF, ED-XRF 结构简单, 受环境震动、温度变化等因素影响小, 更适合应用于在线分析。LIBS 技术作为一种常用的物质成分分析技术, 具有分析速度快、可实现远程分析以及可对低原子序数元素进行检测等优点, 近年来开始在煤炭领域进行推广应用^[6-8]。PGNAA 技术是一种基于中子与被测物料原子核相互作用的核检测分析方法, 其用于元素在线检测已经近 40 年时间, 该技术目前在水泥、钢铁、煤炭、有色金属等行业得到了较为广泛的应用^[9-11]。

1 用于煤质在线检测的多元素分析技术

XRF 技术的基本原理可以分为原子的激发和荧光的产生。实际应用中, 由于空气对 X 射线的吸收, 利用 XRF 技术对 Na, Mg, Al, Si, S 等原子序数 (Z) 小于 20 的元素进行分析时, 需要在真

空环境或者氦气环境中进行, 以消除特征射线能量过低造成的空气对射线的吸收。此外, XRF 为近表面测量方式, 为了降低粒度变化对测量结果的影响并提高检测结果的代表性, 需要对样品进行破碎和研磨^[12]。

LIBS 技术利用脉冲激光聚焦在样品表面并产生高温等离子体, 等离子体内部高能态的原子和离子在向低能态跃迁时产生元素特征光谱, 可通过特征光谱的波长和强度确定元素种类和含量。将 LIBS 技术用于煤中元素的检测, 最大的问题是检测结果缺乏代表性, 脉冲激光频率通常为 1~10 Hz, 形成的等离子体仅仅产生于被测物料表面上的一点, 而煤作为一种均匀度较差的物料, 其内部矿物质的组成、分布和来源是多样性的。因此使用 LIBS 技术在线检测煤中元素含量, 确保样品的代表性和降低基体效应的影响仍然是该项技术重点研究的内容。清华大学侯宗余等^[13]建立了基于 LIBS 技术的煤质在线分析系统, 使用该系统分别对煤块、煤粉、压制煤片进行了测量, 测量结果表明: 相较于煤块测量和煤粉测量, 对采集到的样品进行压片测量, 是当前 LIBS 技术用于煤质检测较为合适的方式。

PGNAA 技术采用透射测量的方式, 由于中子及次生 γ 射线的强穿透性, 与其他元素检测技术只能进行物料表面分析不同, 该技术能够进行物料全深度分析。PGNAA 技术能够保证检测结果的代表性, 这也是其在用于固态非均匀散状物料检测方面最大的技术优势^[14]。

三种元素分析技术对比见表 1。表 1 从不同的角度对 XRF, LIBS, PGNAA 进行了比较。

表 1 三种元素分析技术对比

Table 1 Comparison of three elementary detection techniques

元素分析技术	检测结果代表性	分析元素种类	灰分检测精度	全硫检测能力	成本造价	技术成熟度
XRF	近表面分析, 料流方向 1~2 cm 检测区域	可测 $Z > 10$ 的元素, $Z > 20$ 的元素测量需要真空或氦气环境	真空或氦气环境下, 样品研磨压片可达到理想效果	需在真空或氦气环境下进行检测	较低	较为成熟
LIBS	物料表面分析, 分析频率 1~10 Hz	70 余种元素, 元素测量效果与原子的激发效率有关	样品研磨压片测量可达到理想效果	激发效率较低, 检测效果较差	一般	处于现场应用初期
PGNAA	全深度、全物料分析	70 余种元素, 元素测量效果与中子俘获反应截面有关	样品粗破、整形处理后可达到较高精度	中子俘获反应截面大, 检测灵敏度高	较高	较为成熟

2 PGNAA 多元素在线检测技术

2.1 检测原理

PGNAA 技术的检测原理为，中子源发射出的中子经过慢化之后，与被测物料中各个元素的原子核发生非弹、俘获等反应，形成处于激发态的原子核，激发态的原子核在小于 10^{-14} s 时间内释放出代表该元素的特征 γ 射线，通过特征 γ 射线的能量和强度计算出元素的准确含量。由于中子的电中性，以及诱发产生的特征 γ 射线能量范围为 2~10 MeV，能够穿过较厚的被测物料，因此 PGNAA 技术可以实现全物料分析。PGNAA 技术对元素的检测精度与该元素和中子产生俘获反应和非弹反应的截面有关^[9]。表 2 列出了煤中主要矿物元素与中子作用的俘获反应截面和主要特征 γ 射线能量。从表 2 中各矿物元素的中子俘获反应截面可以看出，煤中主要矿物元素能够获得较为理想的检测精度。

表 2 煤中主要矿物元素与中子作用的俘获反应截面和主要特征 γ 射线能量

Table 2 Capture cross-sections of the major mineral elements in coal with neutron interaction and main characteristic gamma-ray energies

元素种类	中子俘获反应截面/b	主要特征 γ 射线能量/MeV
Na	0.530	2.75, 3.59, 3.98, 6.40
Mg	0.067	2.83, 3.92
Al	0.231	3.03, 3.47, 4.13, 4.26, 7.72
Si	0.172	3.54, 4.93, 6.38
S	0.534	2.38, 2.93, 3.22, 4.87, 5.42
Ca	0.431	4.42, 6.42
Ti	6.080	6.42, 6.76
Fe	2.560	5.92, 6.02, 7.28, 7.63, 7.65

2.2 PGNAA 在线检测设备组成

PGNAA 在线检测设备主要由中子源、探测器、

测量装置、信号处理单元以及主机等部分组成，PGNAA 在线检测设备组成如图 1 所示。

(1) 目前用于 PGNAA 在线检测设备的中子源主要有同位素中子源和加速器中子源两种。图 2 所示为 Cf-252 自发裂变同位素中子源和 DD/DT 加速器中子源。Cf-252 自发裂变同位素中子源半衰期为 2.65 a，每次自发裂变发射 3.73 个中子，中子比发射率高达 10^6 中子/ $(\mu\text{g} \cdot \text{s})$ ，具有体积小、稳定性好、中子平均能量较低等特点，是目前基于 PGNAA 技术的在线分析仪器所使用的主要中子源之一。加速器中子源通常使用的有氘氘 (DD) 中子源和氘氚 (DT) 中子源，其通过 $^2\text{H}(\text{d},\text{n})^3\text{He}$ 或者 $^3\text{H}(\text{d},\text{n})^4\text{He}$ 核聚变反应产生 2.5 MeV 或者 14 MeV 单能中子。加速器中子源最大的优势是可关断，同时 DT 中子源中子能量高，除了能够分析矿物元素外，也可对煤中的 C、O 等非弹性散射截面大的元素进行检测。

(2) 为了保证探测效率和分辨率，探测器通常选用 NaI 或者 BGO 闪烁探测器，对被测物料中各元素发射出的特征 γ 射线进行接收，并将射线信号转换成电脉冲信号输出。

(3) 测量装置主要包括中子慢化、物料通道、辐射屏蔽等部分，用于保证中子利用效率最大化及设备周围辐射处于安全水平。

(4) 信号处理单元主要用于对探测器输出的脉冲信号进行放大、整形以及甄别，最终输出代表射线能量和数量的 γ 能谱。

(5) 主机用于对代表元素含量信息的 γ 能谱进行反演，计算出被测物料中各元素的含量。

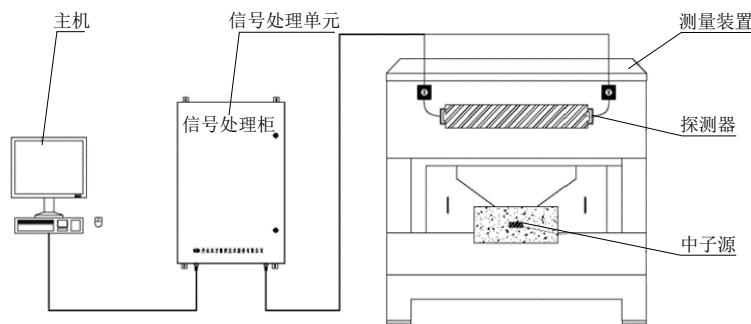


图 1 PGNAA 在线检测设备组成
Fig. 1 System of the PGNAA device

PGNAA 在线检测设备两种典型的应用方式为：跨带检测和旁流检测。跨带检测可直接将检测设备安装在现场物料输送装置上，如安装在带式输送机上，对带式输送机上所有流经 PGNAA 在线检测设

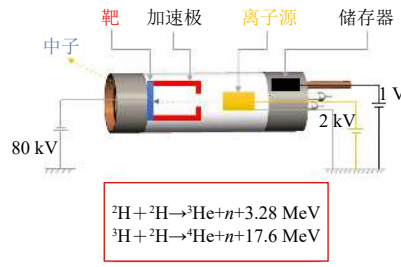
备的物料进行检测；旁流检测通过与现场采样系统相结合，从生产系统中采集有代表的样品，使之进入 PGNAA 在线检测设备中进行分析。旁流检测方式可以在物料进入测量区域之前进行破碎、整形等

预处理, 为测量创造较好的条件, 以减少物料粒度、形状、厚度变化对测量的影响, 因此旁流检测方式

检测精度更高, 但设备的维护量也相应增加。PGNAA 在线检测设备应用方式如图 3 所示。



(a) Cf-252 同位素中子源



(b) DD/DT 加速器中子源

图 2 PGNAA 在线检测设备的中子源

Fig. 2 PGNAA online detector's cf-252 isotope neutron source



(a) 跨带检测



(b) 旁流检测

图 3 PGNAA 在线检测设备应用方式

Fig. 3 Picture of the PGNAA device in field application

在选煤厂生产过程中, 原煤入选量及精煤产率的变化会造成物料在输送过程中厚度发生波动。在满足质量指标条件下, 为了使精煤产率达到最大, 生产过程中希望在线检测设备的检测精度越高越好, 以便用来对灰分等指标进行精准控制。因此, PGNAA 多元素在线检测技术在选煤厂的应用, 对于重介精煤等对煤质检测精度要求较高的检测点推荐采用旁流检测方式, 在保证在线检测数据准确性的同时也能够满足生产过程对数据时效性的要求。

PGNAA 多元素在线检测技术用于煤质检测时, 对灰分、硫分等与元素相关的检测指标是通过检测硫元素以及其他矿物元素的氧化物得到。由于成灰组分是各矿物元素氧化物, 所以采用 PGNAA 在线检测设备检测到的各元素氧化物含量求和来计算灰分。

$$A = \sum_{i=1}^n \eta_i + \varepsilon, \quad (1)$$

式中: η_i 为设备检测到的各元素氧化物含量, %; ε 为无法被设备检测到的微量元素氧化物含量, %。

3 PGNAA 多元素在线检测技术在不同类型选煤厂的应用

不同的生产条件和对产品的不同需求, 使各

选煤厂对于煤质指标的关注点存在差异, 除了灰分这一关键指标之外, 对煤中全硫含量、铁元素的含量等也有着不同程度的需求^[15]。基于此, 分别对 PGNAA 多元素在线检测技术在矿井型和中央型两种类型选煤厂的应用情况进行了介绍。

3.1 在矿井型选煤厂的应用

开滦集团范各庄矿业公司选煤厂(以下简称范各庄煤矿选煤厂)为矿井型选煤厂, 原煤来源于同一矿井的三个煤层, 三个煤层的精煤产率、全硫含量具有较大差异, 为了满足商品煤指标要求并确保效益最大化, 范各庄矿选煤厂对三个煤层的煤进行分仓存储, 按照商品煤指标要求配煤入选, 最终产品为 12 级精煤和 15 级精煤, 生产过程中重点关注的指标为精煤灰分和全硫两个指标。图 4 为 PGNAA 在线检测设备在现场应用的工作流程。

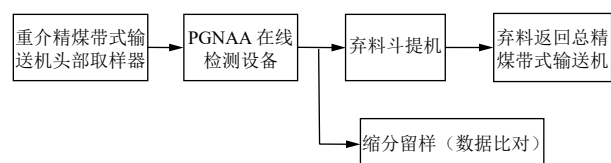


图 4 PGNAA 在线检测设备在现场的工作流程

Fig. 4 Flowchart of PGNAA detection process

为了验证 PGNAA 在线检测设备的检测性能，对范各庄矿选煤厂两种精煤的检测数据与采样化验数据进行比对。表 3 为灰分和全硫在线检测值与化验值对比，其中检测值为 PGNAA 在线检测设备的检测结果，灰分和全硫的化验值分别为实验室通

过灼烧法和定硫仪给出的结果。在 27 组样品中，第 1—20 号为 12 级精煤产品指标，第 21—27 号为 15 级精煤产品指标。图 5 为灰分在线检测值与化验值对比曲线，图 6 为全硫在线检测值与化验值对比曲线。

表 3 灰分和全硫在线检测值与化验值对比

Table 3 Comparison of analytical ash and total sulfur data

%

样品序号	灰分		全硫		灰分偏差	全硫偏差
	在线检测值	化验值	在线检测值	化验值		
1	10.61	10.38	1.28	1.19	0.23	0.09
2	10.47	10.39	1.30	1.21	0.08	0.09
3	10.76	10.77	1.28	1.17	-0.01	0.11
4	10.63	10.72	1.36	1.24	-0.09	0.12
5	10.56	10.48	1.36	1.29	0.08	0.07
6	10.55	10.54	1.30	1.22	0.01	0.08
7	10.60	10.83	1.30	1.21	-0.23	0.09
8	10.37	10.31	1.27	1.18	0.06	0.09
9	10.57	10.48	1.23	1.11	0.09	0.12
10	10.48	10.57	1.28	1.15	-0.09	0.13
11	10.59	10.46	1.31	1.21	0.13	0.10
12	10.66	10.54	1.35	1.29	0.12	0.06
13	10.72	10.76	1.31	1.23	-0.04	0.08
14	10.56	10.53	1.41	1.33	0.03	0.08
15	10.54	10.32	1.36	1.29	0.22	0.07
16	10.66	10.63	1.22	1.11	0.03	0.11
17	10.59	10.48	1.28	1.17	0.11	0.11
18	10.51	10.32	1.29	1.18	0.19	0.11
19	10.48	10.26	1.30	1.19	0.22	0.11
20	10.45	10.22	1.35	1.26	0.23	0.09
21	11.73	12.06	1.00	0.87	-0.33	0.13
22	12.46	12.46	1.00	0.85	0	0.15
23	13.13	12.91	0.96	0.83	0.22	0.13
24	12.02	12.23	0.96	0.81	-0.21	0.15
25	12.80	12.65	0.98	0.81	0.15	0.17
26	12.60	12.49	1.00	0.82	0.11	0.18
27	12.44	12.30	0.99	0.82	0.14	0.17

通过计算，灰分的检测值与实验室化验值之间的标准偏差为 0.146%，相关系数为 0.986；在线检测得到的全硫检测值与实验室化验值之间的标准偏差为 0.032%，相关系数为 0.995。

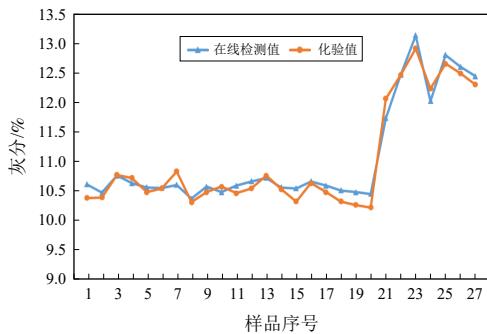


图 5 灰分在线检测值与化验值对比曲线

Fig. 5 Comparison of analytical and PGNAA measured ash data

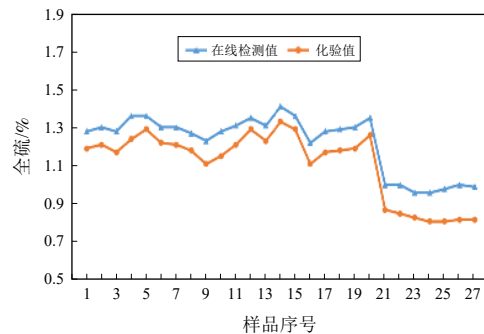


图 6 全硫在线检测值与化验值对比曲线

Fig. 6 Comparison of analytical and PGNAA measured total sulfur data

3.2 在中央型选煤厂的应用

淮北矿业股份有限公司涡北选煤厂为中央型选煤厂，原煤来源于周边的四座矿井，原煤分仓存储，配煤入选，主要煤种为主焦煤和肥煤。现场原

煤全硫含量较为稳定, 所关注的重点指标为灰分。此外, 由于现场原煤灰成分中的 Fe_2O_3 含量较为稳定, 因此通过 PGNAA 在线检测设备检测精煤中 Fe_2O_3 元素含量的变化能够直接反映出精煤脱介效果的好坏, 若能准确检测 Fe_2O_3 含量, 也可为现场

介耗控制提供数据依据。

采用 PGNAA 在线检测设备分别对主焦煤和肥煤进行灰分检测, 不同煤种灰分在线检测值与化验值对比见表 4。图 7 为 PGNAA 在线检测设备灰分检测值与化验值对比曲线。

表 4 不同煤种灰分在线检测值与化验值对比

Table 4 Comparison of analytical and PGNAA measured ash data of different types of coal

%

序号	煤种	灰分		序号	煤种	灰分	
		在线检测值	化验值			在线检测值	化验值
1	主焦煤	10.18	10.02	29	主焦煤	9.61	9.86
2	主焦煤	10.29	10.14	30	主焦煤	9.91	10.13
3	主焦煤	10.01	10.01	31	肥煤	10.03	9.85
4	主焦煤	9.85	9.81	32	肥煤	10.04	10.00
5	主焦煤	9.98	9.95	33	肥煤	10.17	10.09
6	主焦煤	10.02	9.86	34	肥煤	10.18	10.06
7	主焦煤	9.79	9.81	35	肥煤	10.16	10.19
8	主焦煤	9.60	9.38	36	肥煤	9.96	9.76
9	主焦煤	10.12	10.33	37	肥煤	10.08	9.96
10	主焦煤	10.26	10.02	38	肥煤	10.20	10.41
11	主焦煤	9.92	10.07	39	肥煤	10.20	10.42
12	主焦煤	9.72	9.65	40	肥煤	10.19	10.12
13	主焦煤	10.03	10.06	41	肥煤	10.07	10.05
14	主焦煤	9.89	9.93	42	肥煤	10.09	10.03
15	主焦煤	9.64	9.76	43	肥煤	10.10	10.20
16	主焦煤	9.50	9.46	44	肥煤	10.30	10.40
17	主焦煤	9.45	9.32	45	肥煤	10.47	10.61
18	主焦煤	9.71	9.88	46	肥煤	10.35	10.62
19	主焦煤	9.77	9.77	47	肥煤	10.42	10.64
20	主焦煤	9.99	9.83	48	肥煤	10.17	10.34
21	主焦煤	9.71	9.59	49	肥煤	10.15	10.28
22	主焦煤	9.64	9.42	50	肥煤	10.40	10.32
23	主焦煤	9.82	9.69	51	肥煤	10.43	10.43
24	主焦煤	9.83	9.92	52	肥煤	10.40	10.35
25	主焦煤	9.63	9.53	53	肥煤	10.56	10.37
26	主焦煤	9.72	9.56	54	肥煤	10.54	10.68
27	主焦煤	9.89	9.98	55	肥煤	10.38	10.38
28	主焦煤	9.87	9.88	56	肥煤	10.64	10.85

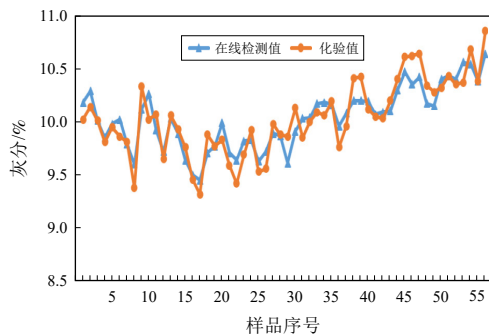


图 7 不同煤种在线检测值与化验值对比曲线

Fig. 7 Comparison of analytical and PGNAA measured ash data of different types of coal

通过计算, 灰分的检测值与实验室化验值之间的标准偏差为 0.142%, 相关系数为 0.916。

为了验证 PGNAA 在线检测设备对煤中 Fe 元素的检测效果, 对主焦煤和肥煤各采集了两个样品, 其中 Fe_2O_3 含量在线检测值与化验值对比见表 5。由表 5 可知, Fe_2O_3 含量在线检测值和化验值之间有很好的相关性, 在线检测值与化验值之间的标准偏差为 0.025%, 相关系数为 0.950。

3.3 应用效果评价

针对某个检测指标, 检测设备的应用效果可用设备检测值与实验室化验值之间的标准偏差, 以

及二者之间的相关系数进行评价：标准偏差越小、相关系数越大，说明设备检测值与实验室化验值的吻合度越高。

表5 焦煤与肥煤中 Fe_2O_3 含量在线检测值与化验值对比

Table 5 Comparison of analytical and PGNAA actually measured Fe_2O_3 data %

煤种	在线检测值	化验值	偏差
主焦煤	0.29	0.29	0
主焦煤	0.31	0.32	-0.01
肥煤	0.42	0.39	0.03
肥煤	0.44	0.47	-0.03

PGNAA 在线检测设备不同检测项目的标准偏差和相关系数见表6。PGNAA 在线检测设备在矿井型选煤厂和中央型选煤厂的应用案例表明，灰分检测值与实验室化验值之间的标准偏差能够控制在0.15%以下、相关系数在0.91以上，对全硫检测的标准偏差为0.032%、相关系数达到0.995，对煤中 Fe_2O_3 含量检测的标准偏差仅为0.025%，相关系数为0.950。可见PGNAA多元素在线检测技术对于灰分、全硫、 Fe_2O_3 含量的检测结果与实验室化验结果之间有很好的相关性。

表6 不同检测项目的标准偏差和相关系数

Table 6 Standard deviation and correlation coefficients of PG-NAA technology for detection of different items

选煤厂类型	检测项目	标准偏差/%	相关系数
矿井型	灰分	0.146	0.986
	全硫	0.032	0.995
中央型	灰分	0.142	0.916
	Fe_2O_3 含量	0.025	0.950

4 结语及展望

PGNAA多元素在线检测技术能够实现煤中主要矿物元素的在线分析，检测指标包括灰分、全硫以及 Fe_2O_3 等灰成分的含量，可以有效消除因煤中灰成分变化对灰分检测结果的影响，适用于入选原煤煤质波动大、对检测精度要求高的应用场所。目前，PGNAA多元素在线检测技术已经在选煤行业得到推广和应用，其在矿井型选煤厂和中央型选煤厂的应用表明，PGNAA多元素在线检测技术对于灰分、全硫、 Fe_2O_3 含量的检测值与实验室化验值之间有很好的相关性。

随着选煤厂入选原煤煤质复杂程度的加大以及选煤厂智能化建设的深入，对煤质在线检测设备

的功能、现场适用性和检测精度等提出了更高的要求，PGNAA多元素在线检测技术对煤中矿物元素进行直接检测，结果不受灰成分变化影响，现场适用性强，可满足选煤生产对煤质在线检测设备的需求。未来，PGNAA多元素在线检测技术将会在原煤均质、分选控制、精准配煤、商品煤出厂快速检测等方面发挥更加重要的作用。

参考文献：

- [1] 王宏. 我国炼焦煤选煤技术现状及发展趋势[J]. 煤炭工程, 2018, 50(7): 18-22.
- [2] 张茜. 基于硫分差异的配煤生产实践研究[J]. 山东煤炭科技, 2021, 39(10): 229-230, 233.
- [3] 边远. 选煤厂原煤配煤入洗方案对比优化[J]. 陕西煤炭, 2021, 40(1): 90-94.
- [4] 李霞, 张治军, 高建川. 智能化选煤厂建设面临的难点及问题[J]. 山西焦煤科技, 2023, 47(4): 29-31.
- [5] 杨明太, 张连平. WDXRF光谱仪与EDXRF光谱仪之异同[J]. 核电子学与探测技术, 2008, 28(5): 1008-1011.
- [6] 李悦. 激光诱导击穿光谱信号增强技术研究进展[J]. 光学仪器, 2022, 44(2): 87-94.
- [7] 李晓林. 基于XRF辅助LIBS的煤质分析仪技术研究[D]. 太原: 山西大学, 2021.
- [8] WEIRAN S, ZONGYU H, SHER M A, et al. Validated ensemble variable selection of laser-induced breakdown spectroscopy data for coal property analysis[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2021, 36(1): 111-119.
- [9] 唐艳云, 代梦博, 春铁军, 等. 成分在线检测技术进展及其在铁矿烧结应用趋势[J]. 烧结球团, 2021, 46(3): 1-8, 58.
- [10] 刘永超, 张伟. PGNAA技术对铜精矿元素及水分进行在线检测的应用研究[J]. 现代矿业, 2020, 36(9): 237-239.
- [11] GREGORY K M, DOUGLAS M C. Process/Industrial Instruments and Controls Handbook[M]. New York: McGRAW-HILL, 1999.
- [12] GUO R, ZHANG L, ZHENG Y H, et al. Accurate and stable measurement of ash in coal by X-ray fluorescence spectrometry based on partial least squares[J]. Frontiers in Physics, 2022(10): 1054796.
- [13] 侯宗余, 宋惟然, 宋玉洲, 等. 激光诱导击穿光谱煤质在线分析技术现状与展望[J]. 煤质技术, 2023, 38(1): 1-12.
- [14] 卢毅, 宋朝晖. 瞬发伽马中子活化分析技术发展现状[J]. 核电子学与探测技术, 2013, 33(12): 1527-1531.
- [15] 李霞, 李娅楠, 邢春芳, 等. 快速测灰设备在山西焦煤集团的应用分析[J]. 山西焦煤科技, 2021, 45(11): 18-21.