

γ 射线反散射灰分仪测量精度优化方法研究

程栋[†],唐向东,黎福海,代扬

(湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要: γ 射线反散射灰分仪的测量精度受煤炭灰分成分的变化影响很大,现有的方法主要是在测量偏差较大的情况下重新对灰分仪进行标定,其灰分值测量范围窄,精度较低,操作过程繁琐.本文从 γ 射线反散射灰分仪的工作原理出发,分析了灰分中主要矿物成分的变化对灰分测量精度的影响,建立了基于双低能 γ 射线测量的校正模型,提高了测量精度,实现了灰分仪的软件自动处理.检验结果表明,采用本文研究的校正模型, γ 射线反散射灰分仪克服了现有的缺陷,灰分值测量误差满足 EJ/T1078-1998 所规定的 γ 辐射煤炭灰分探测仪的测量精度指标.

关键词: γ 射线;灰分检测;煤质

中图分类号:TD94

文献标志码:A

Research on Method to Optimize Accuracy of γ -ray Backscatter Ash Analyzer

CHENG Dong[†],TANG Xiangdong,LI Fuhai,DAI Yang

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Measurement accuracy of γ -ray backscatter ash analyzer is greatly affected by the changes in the composition of the coal ash. In current ash analyzer, calibration is underway anew when measurement error is comparatively large, with a narrow measurement range, low accuracy and complicated operation. In this paper, the impact of changes in the composition of the ash on the accuracy of ash analyzer was analyzed from the working principle of γ -ray backscatter ash analyzer. A calibration model based on the dual low energy γ ray measurement was established, which can improve the measurement accuracy and can be achieved automatically on software. The calibration model was then used on a γ -ray backscatter ash analyzer, and the test results show that the existing deficiencies are overcome with an measurement error of less than 1%, meeting the required measurement accuracy of EJ/T1078-1998 γ -ray coal ash analyzer.

Key words: γ -rays; ash detection; coal quality

煤炭的灰分值与发热量密切相关,是衡量煤炭品质的重要技术指标.传统的灰分灼烧化验法因工

序复杂、结果滞后,逐渐被不破坏煤样、测量速度快的非动力核测量方法所代替,本文采用的 γ 射线反

* 收稿日期:2018-04-08

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC0808500),National Key R & D Program of China(2018YFC0808500);广西精密导航技术与应用重点实验室开放基金资助项目(DH201811),Guangxi Key Laboratory Fund for Precision Navigation Technology and Application(DH201811)

作者简介:程栋(1978—),男,湖北黄冈人,湖南大学副教授

[†] 通讯联系人,E-mail:chengdongchina@163.com

散射灰分仪就是在此基础上发展起来的一种灰分探测仪器. 然而这种仪器的测量精度受煤炭灰成分变化的影响很大^[1-5], 文献[2]提出了铁元素的补偿思路, 但未给出具体的研究方法; 文献[4]提出了煤炭水分含量变化情况下提高灰分测量精度的方法, 但未对灰分成分的变化导致测量精度变化进行研究.

为此, 本文从 γ 射线反散射灰分仪的工作原理出发, 分析了灰分中 Fe、Ca 等高原子序数矿物成分的变化对灰分测量精度的影响, 得到了测量误差根源, 通过计算推导建立了基于双低能 γ 射线测量的校正模型, 提高了测量精度, 并将模型程序化, 实现了灰分仪的软件自动处理. 检验结果表明, 本文研究的方法, 灰分值测量范围宽, 精度高, 操作过程简单, 灰分值测量误差满足 EJ/T1078-1998 所规定的 γ 辐射煤炭灰分探测仪的测量精度指标.

1 γ 射线反散射灰分仪工作原理

γ 射线是原子核能级跃迁蜕变时释放出的高能光子, 与物质作用时因被吸收或受到散射而损失能量并生成次生电子, 其作用方式主要有光电效应、康普顿效应和电子对效应. 不同能量的 γ 射线与不同原子序数的物质将产生不同效应, 当低能 γ 射线与高原子序数物质作用时, 光电效应占主导地位; 当中能 γ 射线与低原子序数物质作用时, 康普顿效应占主导地位; 当高能 γ 射线与高原子序数物质作用时, 电子对效应占主导地位, 具体表现为不同物质对不同能量的 γ 射线质量吸收系数的差异^[5-6].

煤炭的成分非常复杂, 是由有机质和无机矿物质构成的混合物. 有机质主要包含 C、H、O、N 和 S 等元素, 而无机矿物质主要由 Si、Al、Fe、Ca、Mg、K 和 Na 等元素组成. 有机质主要是可燃物质, 其组成元素的原子序数较低(等效原子序数为 6), 对 γ 射线的质量吸收系数相近; 无机矿物质主要为不可燃的金属元素, 其组成的原子序数较高(等效原子序数为 12), 对 γ 射线的质量吸收系数也相近, 从而可将煤炭划分为由低原子序数元素和高原子序数元素构成的二元混合物. 煤炭燃烧后, 留下的高原子序数元素氧化物即为灰分. 由于残留氧化物的化合形式固定, 因此只要通过利用 γ 射线的各种作用效应将高原子序数元素的百分比含量测量出来, 即可得到灰分值^[2,7]. 煤炭中各元素质量吸收系数与 γ 射线能量的变化关系如图 1 所示.

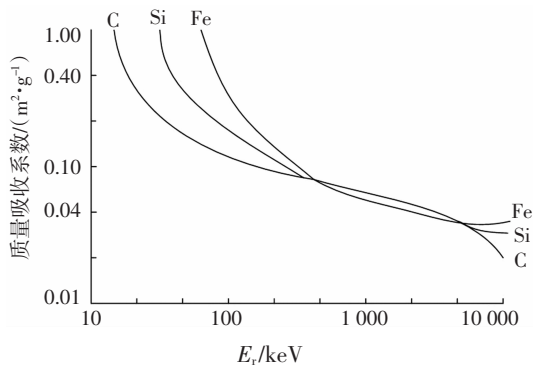


图 1 煤炭中各元素质量吸收系数与 γ 射线能量的变化关系

Fig.1 Relationship between mass energy-absorption coefficients of various elements in coal and the energy of γ ray

由图 1 可知, 在能量值小于 100 keV 的低能 γ 射线作用下, 煤炭中各元素的质量吸收系数差异较大. 本文的灰分仪就是基于低能 γ 射线与煤炭中高原子序数元素发生康普顿反散射, 与低原子序数元素发生光电效应的原理, 通过探测作用前后的 γ 射线强度实现高原子序数元素百分含量的测量. 灰分仪探测装置主要是由面板及显示、手柄、放射源、碘化钠闪烁探测器、屏蔽罩、煤桶等组成, 其结构示意图如图 2 所示.

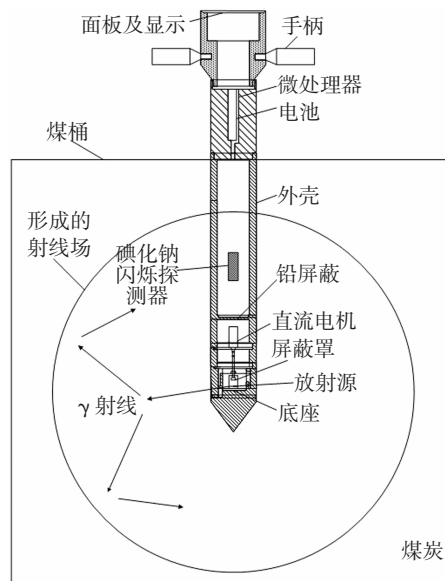


图 2 灰分仪探测装置示意图

Fig 2 Schematic diagram of detection apparatus with ash analyzer

在煤桶中填充好被测煤炭后, 将灰分仪从煤桶中间位置插入煤炭中. 电源开启后, 灰分仪放射源开始工作, 向四周发射低能 γ 射线. γ 射线经过煤炭的发射后, 被碘化钠闪烁探测器检测, 探测器将 γ 射

线的强度转换成计数值传送给微处理器进行处理,从而测得煤炭的灰分值.由 γ 射线的反散射经验公式可知

$$I = (K_m \rho / R^{2/3}) I_c \exp(-\mu m_t) \quad (1)$$

式中: $K_m = M\varepsilon$, M 为灰分仪常数, ε 为与放射源能量、探头材料及尺寸等相关的常数; R 为放射源与煤炭的间距; μ 为煤炭的质量吸收系数; m_t 为煤炭的质量厚度^[7-9].

2 灰分成分对灰分测量的影响

当灰分仪定型,煤炭灰分探测方式确定后,系数 K_m 、 R 、 I_c 、 m_t 等各材料和尺寸参数均为常数.因此,煤炭的质量吸收系数 μ 由煤炭中各元素的质量吸收系数和含量决定

$$\mu = \sum_{i=1}^n \mu_i C_i \quad (2)$$

式中: μ_i 为元素 i 的质量吸收系数; C_i 为元素 i 的含量^[10].

由图1可知,煤炭中低原子序数元素质量吸收系数相近;灰分成分中大部分高原子序数无机元素质量吸收系数相近,而铁元素的质量吸收系数具有明显差异^[2].若在灰分成分尤其是铁元素的含量变化较大的情况下,采用二元混合物的方式进行处理,将使得测量结果误差较大,因此必须考虑铁元素的含量对测量结果的影响.若煤炭中无机元素的含量为 C_m ,其中铁元素在无机元素中的含量为 C_f ,则由式(2)可得

$$\mu = \mu_0(1 - C_m) + [\mu_m(1 - C_f) + \mu_f C_f] C_m \quad (3)$$

式中: μ_0 为有机元素质量吸收系数; μ_m 为无机元素质量吸收系数; μ_f 为铁元素的质量吸收系数.结合式(1)(3)进而得到

$$C_m = \frac{\ln(I_c K_m \rho / R^{2/3}) - \mu_0 m_t - \ln I}{m_t [(\mu_m - \mu_0) + (\mu_f - \mu_m)] C_f} \quad (4)$$

由于灰分是由高原子序数元素的氧化物组成,根据灰分元素分析数据可知,氧化物中氧元素约占49%,各种高原子序数元素约占51%,其质量比约为1:1.因此,常规定义灰分值近似等于煤炭中高原子序数元素含量的2倍^[9],从而有

$$C_a = 2C_m \quad (5)$$

式中: C_a 为煤炭灰分值.

由于 γ 射线的强度是通过灰分仪上的碘化钠闪烁计数器进行检测,其计数率与检测到的 γ 射线

强度成正比.此外,煤炭形成环境的差异使得不同地理位置的煤炭灰分成分有差异,导致其对 γ 射线的吸收特性不一致,因此灰分仪在使用之前必须进行特定煤炭样品下的标定.标定后,可由式(4)(5)得

$$C_{a0} = \frac{Q}{S} \frac{P/Q - \ln(K_c N_0)}{R/S + C_{f0}} \quad (6)$$

式中: C_{a0} 为标定煤炭的灰分值; C_{f0} 为标定煤炭中铁元素含量; N_0 为碘化钠计数器对标定煤炭的计数率; K_c 为 γ 射线强度与计数率之间的比例系数; $P = \frac{2[\ln(I_c K_m \rho / R^{2/3}) - \mu_0 m_t]}{m_t}$, $Q = \frac{2}{m_t}$, $R = \mu_m - \mu_0$, $S = \mu_f - \mu_m$ 均为与煤炭和灰分仪属性相关的常系数.

然而对于同一类型不同批次的煤炭,其灰分中铁元素的含量有微小差异,此时有

$$C_{as} = \frac{Q}{S} \frac{P/Q - \ln[K_c(N_0 + \Delta N)]}{R/S + C_{f0} + \Delta C_f} \quad (7)$$

式中: C_{as} 为被测煤炭的灰分值; ΔC_f 为被测煤炭相对于标定煤炭铁元素百分含量增量; ΔN 为碘化钠计数器对被测煤炭相对于标定煤炭的计数率增量.由于灰分仪未对被测煤炭的铁元素的含量进行检测,灰分仪计算得到的灰分值为

$$C_{ac} = \frac{Q}{S} \frac{P/Q - \ln[K_c(N_0 + \Delta N)]}{R/S + C_{f0}} \quad (8)$$

式中: C_{ac} 为灰分仪测量值.结合式(7)(8)得到

$$C_{as} = C_{ac} \frac{R/S + C_{f0}}{R/S + C_{f0} + \Delta C_f} \quad (9)$$

由上式可知,煤炭灰分值与测量值之间存在与 ΔC_f 相关的非线性关系.为解决这个问题,本文采用两种低能 γ 射线对被测煤炭进行反散射,将测量结果对测量值进行校正,从而得到准确的灰分值.若实际灰分值不变,铁元素含量有变动的情况下,则可得到

$$\begin{cases} C_{as} = C_{ac1} \frac{R_1/S_1 + C_{f0}}{R_1/S_1 + C_{f0} + \Delta C_f} \\ C_{as} = C_{ac2} \frac{R_2/S_2 + C_{f0}}{R_2/S_2 + C_{f0} + \Delta C_f} \end{cases} \quad (10)$$

式中: C_{as1} 、 C_{as2} 分别为利用40 keV低能 γ 射线、60 keV低能 γ 射线检测到的灰分值; R_1 、 S_1 为40 keV低能 γ 射线下的相关常系数; R_2 、 S_2 为60 keV低能 γ 射线下的相关常系数.为计算方便,进行如下处理

$$\begin{cases} A_1 = \frac{Q_1}{R_1 + S_1 C_{f0}}, B_1 = \frac{P_1 - Q_1 \ln K_c}{R_1 + S_1 C_{f0}} \\ A_2 = \frac{Q_2}{R_2 + S_2 C_{f0}}, B_2 = \frac{P_2 - Q_2 \ln K_c}{R_2 + S_2 C_{f0}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: A_1 、 B_1 、 A_2 、 B_2 分别为变换后的常数.从而有

$$\begin{cases} C_{ac1} = B_1 - A_1 \ln N_1 \\ C_{ac2} = B_2 - A_2 \ln N_2 \end{cases} \quad (12)$$

式中: N_1 、 N_2 分别为 40 keV 和 60 keV γ 射线下碘化钠计数器的计数率。

由式(10)(11)最终可得到在铁元素含量相对于标定煤炭有轻微的变动下的灰分值校正模型

$$C_{as} = \frac{C_{ac1}S_2A_2Q_1 - C_{ac2}S_1A_1Q_2}{A_1A_2(R_1S_2 - R_2S_1)} \quad (13)$$

3 校正模型验证

3.1 校正模型系数求解

为了说明校正模型的准确性,本文取某一特定的铁元素含量稳定的煤炭进行实验验证,煤炭质量厚度 m_t 约为 15 g/cm²。首先配备 5 组灰分值差异较大的煤样,分别在相同的 5 个实验桶中装满,然后将灰分仪插入桶中测量相关数据进行仪器的标定,并对煤样进行传统燃烧法的灰分值化验,将所获得的数据输入到一个 EXCEL 文件,利用 EXCEL 的散点图功能进行初步的线性分析。若发现明显偏离线性关系的点,则对该煤样重新取样,再次分别用仪器标定和燃烧化验,再次进行 EXCEL 散点图线性分析。如此反复,直到 5 组数据初步呈现线性关系为止。本文灰分仪先后发射 40 keV 和 60 keV 的低能 γ 射线对煤样进行探测,结果如表 1 所示。

表 1 标定过程的计数率和灰分值

Tab.1 Count rate and ash value in the process of calibration

煤样	N_1	$\ln N_1$	N_2	$\ln N_2$	灰分值/%
1	1 207.790 0	7.096 548	6 227.480	8.736 727	5.80
2	934.230 9	6.839 724	5 799.065	8.665 452	10.93
3	796.601 2	6.680 354	5 515.480	8.615 314	13.95
4	650.938 1	6.478 415	5 214.179	8.559 137	17.98
5	542.397 7	6.296 000	4 923.958	8.501 868	21.44

利用表 1 中的数据对式(12)中的两个子算式进行线性回归^[11],从而得到两种低能 γ 射线下的标定模型为

$$\begin{cases} C_{ac1} = 1.445 330 - 0.195 431 \times \ln N_1 \\ C_{ac2} = 5.880 122 - 0.666 217 \times \ln N_2 \end{cases} \quad (14)$$

两式的相关度系数分别为 0.999 5 和 0.999 96,这表明标定煤炭中的各无机元素的相对含量稳定,从而有 $A_1 = 0.195 431, B_1 = 1.445 330,$

$$A_2 = 0.666 217, B_2 = 5.880 122.$$

表 2 为根据文献[12]查到的煤炭中各主要元素在 40 keV 和 60 keV 低能 γ 射线下的质量吸收系数数据。若煤炭在每种能量 γ 射线作用下,有机元素的质量吸收系数取 C、O 质量吸收系数的均值;无机元素的质量吸收系数取 Al、Si 质量吸收系数的均值,则由式(6)(11)结合表 2 数据可得

$$\begin{cases} Q_1 = 0.133 00 \text{ cm}^2/\text{g} \\ R_1 = 0.396 80 \text{ cm}^2/\text{g} \\ S_1 = 2.972 32 \text{ cm}^2/\text{g} \\ Q_2 = 0.133 70 \text{ cm}^2/\text{g} \\ R_2 = 0.114 85 \text{ cm}^2/\text{g} \\ S_2 = 0.899 45 \text{ cm}^2/\text{g} \end{cases} \quad (15)$$

表 2 煤炭中主要元素的质量吸收系数

Tab.2 Mass energy-absorption coefficients of the main elements in coal

元素	质量吸收系数/(cm ² ·g ⁻¹)	
	γ 射线能量/(40 keV)	γ 射线能量/(60 keV)
C	0.206 9	0.175 1
O	0.256 8	0.190 3
Al	0.563 0	0.276 3
Si	0.694 3	0.318 8
Fe	3.601 0	1.197 0

3.2 验证结果

由于无机元素中的铁元素含量对探测器的灰分测量影响很大,其存在形式与自然界中的 FeS 最为相似,因此取 FeS 为标定煤炭的添加剂对煤样 3 进行掺杂,配备不同铁含量的测试煤样进行模型验证。探测装置准备好后,灰分仪先后发射 40 keV 和 60 keV 的低能 γ 射线对煤样进行探测,并对煤样进行传统方法的灰分值化验,结果如表 3 所示。

表 3 掺杂 FeS 后的计数率和灰分值

Tab.3 Count rate and ash value of the coal doped FeS

$W_{FeS}/\%$	N_1	$\ln N_1$	N_2	$\ln N_2$	灰分值/%
0.10	772.988 4	6.650 264	5 471.450	8.607 299	14.06
0.20	748.995 2	6.618 733	5 420.009	8.597 853	14.18
0.50	681.392 2	6.524 138	5 268.570	8.569 514	14.52
1.00	582.005 8	6.366 480	5 025.517	8.522 284	15.08
2.00	424.607 5	6.051 165	4 572.531	8.427 822	16.22
5.00	164.880 2	5.105 219	3 444.170	8.144 438	19.62
10.00	34.077 7	3.528 643	2 147.654	7.672 131	25.28

将表3中的数据分别代入式(14)的标定模型和式(13)的校正模型,可得到灰分仪的测量和校正灰分值,结果如表4所示。

表4 灰分仪测量和校正灰分值 %
Tab.4 Ash value measured by ash analyzer and after calibration %

W_{FeS} 含量	0.10	0.20	0.50	1.00	2.00	5.00	10.00
40 keV 下 测量灰分	14.57	15.18	17.03	20.11	26.27	44.76	75.57
60 keV 下 测量灰分	14.58	15.21	17.10	20.24	26.54	45.42	76.88
校正灰分	14.14	14.26	14.61	15.19	16.36	19.86	25.70

对比表3和表4可知,在化验灰分值变化不大的情况下,随着煤炭中FeS的含量的上升,测量的灰分值与化验的灰分值之间将产生非常大的正向误差,最大差值可达51.60%,远远超过EJ/T1078-1998规定的 γ 辐射煤炭灰分仪的测量误差。而校正后的灰分值与化验灰分值相差不大,其精度大幅度提升,最大误差,满足EJ/T1078-1998要求。具体生产时,可将测量过程和校正模型编写成程序存储到探测仪微处理器中的FLASH中,实现软件自动处理,从而准确显示测量结果。

4 结论

煤炭的灰分成分的含量有变动的情况下,针对现有 γ 射线反散射灰分仪灰分值测量范围窄,精度较低,标定过程繁琐的现状,本文从 γ 射线反散射灰分仪的工作原理出发,分析了灰分中铁元素的变化对灰分测量精度的影响,建立了基于双低能 γ 射线测量的校正模型,提高了测量精度,并可实现灰分仪的软件自动处理。检验结果表明,采用本文研究的测量方法, γ 射线反散射灰分仪能有效提高灰分探测仪的检测精度,灰分值测量误差,满足EJ/T1078-1998所规定的 γ 辐射煤炭灰分探测仪的测量精度指标,能很好地满足工程应用的要求。

参考文献

- [1] 陈文龙,熊友辉.便携式快速灰分仪浅析[J].热力发电,2007(4):88-90.
CHEN W L, XIONG Y H. Analysis of portable quick ash analyzer [J]. Thermal Power Generation, 2007(4):88-90. (In Chinese)
- [2] 马永和,翁放,肖度元,等.成分对双能 γ 射线穿透法测灰的影

响[J].核电子学与探测技术,1989,9(6):324-329.

MA Y H, WENG F, XIAO D Y, *et al.* The effect of composition on the double-energy γ -ray penetration method [J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 1989, 9 (6):324-329. (In Chinese)

- [3] 张志康,杨鼓行,雷章云,等.双能量 γ 射线透射法煤炭灰分在线测量的实现[J].核电子学与探测技术,1991,11(3):132-138.
ZHANG Z K, YANG G X, LEI Z Y, *et al.* On-line determination of ash content of coal based on the transmission of bi-energy γ -rays [J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 1991, 11 (3): 132-138. (In Chinese)
- [4] 盖莉.关于提高煤炭灰分测定的准确度方法的探讨[J].华东科技(学术版),2015(3):355-355.
GAI L. Discussion on the method of improving the accuracy of coal ash measurement [J]. East China Science and Technology (Academic Edition), 2015(3):355-355. (In Chinese)
- [5] 陈文龙.基于低能伽马射线法便携式快速测灰仪的研制[D].武汉:华中科技大学,2007.
CHEN W L. Development of portable fast measuring instrument based on low energy gamma ray method [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. (In Chinese)
- [6] 曾庆德. γ 射线煤炭灰分检测传感器[J].电测与仪表,1985(11):41-43.
ZENG Q D. γ -ray coal ash detection sensor [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 1985(11):41-43. (In Chinese)
- [7] 鞠佳勇.基于虚拟仪器技术的测灰仪上位机软件开发[D].北京:清华大学工程物理系,2012.
JU J Y. Based on the virtual instrument technology of the ash top PC software development [D]. Beijing: Department of Engineering Physics, Tsinghua University, 2012. (In Chinese)
- [8] 董元敏.低能 γ 射线测灰仪在煤炭测灰中的应用[J].选煤技术,1988(3):23-25.
DONG Y M. Application of low energy γ -ray ash measuring instrument in coal ash measurement [J]. Coal Preparation Technology, 1988(3):23-25. (In Chinese)
- [9] 顾文浩.平均强度法对双能量伽马射线灰分计读数的影响[J].煤炭学报,2001,26(2):220-224.
GU W H. Effect of average intensity method on reading of double energy gamma ray ash meter [J]. Journal of Coal Science, 2001, 26 (2):220-224. (In Chinese)
- [10] 黄兴滨,王国荣,孙普男,等.测量煤炭灰分的低能 γ 射线反散射方法[J].核技术,2005,28(11):72-75.
HUANG X B, WANG G R, SUN P N, *et al.* Low-energy γ -ray backscattering method for measuring coal ash [J]. Nuclear Technology, 2005, 28(11):72-75. (In Chinese)
- [11] 钱焱.低能 γ 射线煤炭灰分仪的应用[J].煤炭技术,2011(6):43-45.
QIAN Y. Application of low energy γ -ray coal ash analyzer [J]. Coal Technology, 2011(6):43-45. (In Chinese)
- [12] NOGUCHI M, KAKIMOTO S, KAJIGAESHI S. 1,3-dipolar addition of nitrile oxides to 3a,4-dihydro-1-isoindolinones [R]. Yamaguchi University, 1987:43-49.