

# X射线透射法, X和 $\beta$ 射线反散射法 测定煤炭灰分的误差

## 前 言

目前, 波兰试验性测灰仪采用 $\beta$ 射线反散射原理, 连续测灰仪采用能量约60千电子伏的X射线透射或反散射原理。这些方法均以下述为依据。

### 1、灰分和矿物质的关系是

$$M = K A$$

式中  $A$ ——煤中灰分;

$M$ ——煤中矿物质;

$K$ ——取决于矿物质的化学组成和灰分的比例系数。

2、矿物质和有机物质的宏观有效截面积, 对射线的作用, 如质量吸收系数, 散射质量吸收系数是不同的。

X射线照射固定表面密度煤样而返回的射线强度 $N$ 是取决于质量吸收系数 $\mu_{\omega}$

$$N = N_0 e^{-\mu_{\omega} d} \quad (1)$$

式中  $d$ ——煤样厚度。

X射线反散射强度 $N_r$ 取决于散射质量吸收系数 $\sigma_{\omega}$ 和一次射线的质量吸收系数 $\mu_{\omega}$ 及射线的散射质量吸收系数 $\mu_{\omega}^*$

$$N_r = P \frac{\sigma_{\omega}}{\mu_{\omega} + \mu_{\omega}^*} \quad (2)$$

$\beta$ 射线的散射强度取决于散射质量吸收系数 $\sigma_{\omega}$  ( $\beta$ )。

$$N_r = P' \sigma_{\omega} (\beta) \quad (3)$$

式中  $N_0$ ——初始射线强度;

$P, P'$ ——与测量条件有关的常数。

X射线的质量吸收系数取决于物质的有效原子序数, 其计算式如下:

$$\mu_{\omega} \approx \sum_i a_i Z_i^4 \quad (4)$$

式中  $a_i$ ——表示某种物质的比重;

$Z_i$ ——表示某种物质的原子序数;

$i$ ——原子序数表示此种物质的组成部份。

散射的质量吸收系数均与有效的原子序数成比例。

$$\sigma_{\omega} \approx \sum_i a_i Z_i \quad (5)$$

由此得出, 在测定煤的灰分时, 化学成分波动对测灰法产生各种不同的数量影响。

本文作者旨在比较化学成分波动对 $\beta$ 射线散射法和能量60千电子伏的X射线吸收法和反散射法测灰精度的影响。

## 试 验 方 法

用放射性测灰法测出的灰分 $A(R)$ 值与用烧灰法得出的灰分 $A(S)$ 值之间

的差数作为测灰精度。

对上西里西亚煤田各矿的煤样进行了测灰试验。灰分的化学成分波动很大：

$\text{SiO}_2$	22—52%
$\text{Al}_2\text{O}_3$	11—30%
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	5—23%
$\text{CaO}$	2.8—17%
$\text{MgO}$	0.40—8.9%
$\text{K}_2\text{O}$	0.8—2.7%
$\text{Na}_2\text{O}$	0.67—3.5%
$\text{SO}_3$	1.7—17%
$\text{P}_2\text{O}_5$	微量—1.13%

煤样灰分与下列因素有关：

- 1、 $\beta$ 射线的反散射强度；
- 2、煤的质量吸收系数；

3、能量约60千电子伏X射线通过煤样固定表面密度而反回的射线强度。

实验室用IMP<sub>w</sub>测灰仪测量 $\beta$ 射线的散射强度。利用能量约60千电子伏的X射线，根据灰分的化学成分和有机物质，算出质量吸收系数。当使用定型的测定系统组装成试验性装置时，根据所得到的结果，确定灰分和X射线反回的强度之间的试验关系。

对0—0.2毫米级煤样进行了试验。试验证明，煤样分布不均匀有关的误差可忽略不计。

对于机械强烈粉碎的煤，使用 $\lambda$ 射线反散射法测定灰分有困难。因为在这些测灰法中煤样表面密度均要求大于20克/厘米<sup>2</sup>。

以一般方法确定反散射法的误差，推算出透射法和反散射法之间的关系。

### 试验结果

第1、2和3图说明煤对射线强度、质量吸收系数和灰分间的关系。表综合了测定煤样灰分的差值。

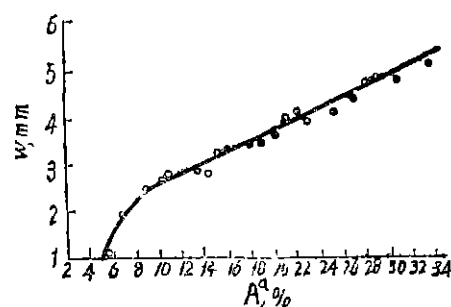


图1  $\beta$ 射线反散射强度和灰分的关系  
(IMP<sub>w</sub>型测灰仪校准曲线)

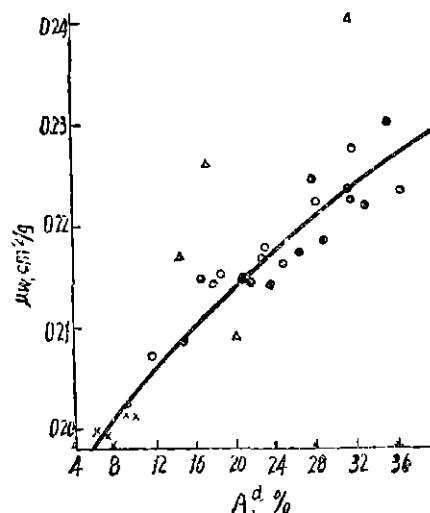


图2 能量约60千电子伏的X射线对煤的质量吸收系数和灰分间的理论关系

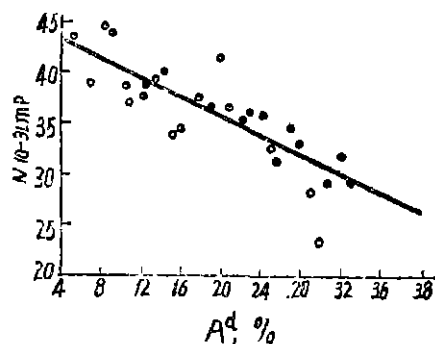


图3 能量约60千电子伏的X射线照射固定表面密度的煤样反回的强度与灰分之间的关系

用烧灰法和放射性测灰法测出的灰分差一般取决于测量技术。

29个煤样经30次测试， $\beta$ 射线的反散射法测灰的相对误差不超过10%。对于灰分大于30%的煤，则其测量误差较大，而灰分小于12%的煤，则其测量误差较小。

用X射线吸收法测灰时相对误差值达到灰分值的100%。由试验曲线（图8）和理论曲线（图2）中确定的误差表明是一致的，随着灰分的增长，没有任何的变化。

理论误差一般均小于试验误差。因准

烧灰法和放射性测灰法差值综合表

$A^*$	$A^d$	$\Delta A^*(\beta)$	$A^*(x)_D$	$\Delta A^d(x)_T$	$A^*$	$A^d$	$\Delta A^*(\beta)$	$A^*(x)_D$	$\Delta A^d(x)_T$
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
5.3	6.2	0.3	1.38	0.80	21.3	22.8	1.2	2.3	0.4
6.2	7.3	0.0	1.2	0.60	22.2	23.2	1.6	1.2	1.1
6.9	7.7	0.2	6.4	1.70	23.0	23.5	0.6	3.2	3.1
9.1	10.0	0.4	6.1	1.80	24.3	24.7	0.0	4.5	4.2
10.5	11.8	0.9	3.5	1.60	25.3	26.4	1.5	2.0	2.6
11.1	12.2	1.2	6.3	2.60	25.6	27.8	2.3	3.6	4.8
12.5	—	2.6	4.0	9.0	27.1	28.2	0.6	4.1	1.4
13.5	15.3	0.4	0.5	0.60	28.1	29.8	0.6	2.1	4.8
14.4	—	1.6	2.6	—	29.0	31.7	0.5	7.0	1.7
15.2	16.8	0.8	8.8	4.2	30.4	—	3.5	1.4	—
16.0	17.8	0.8	7.4	2.6	30.8	32.1	1.3	3.2	5.0
16.2	—	1.6	11.6	17.0	32.1	33.3	1.5	3.7	3.9
18.0	18.7	0.0	1.4	2.7	33.6	35.1	0.5	5.7	5.7
19.0	—	1.1	0.6	5.2	34.6	36.5	0.6	5.6	5.3
20.1	21.4	0.8	12.1	0.7					

说明： $\Delta A(\beta)$ —— $\beta$ 射线散射法的测量结果与烧灰法结果之差值。

$\Delta A(X)$ ——X射线吸收法的测量结果与烧灰法结果之差值。

D——试验结果。 T——理论结果。

确测量射线强度是有困难的，因为误差较大。当射线强度每秒相当于40000脉冲时，射线起伏测定的标准误差相当于每秒200脉冲，测灰精度达到0.5%；标准误差每秒为600脉冲时，测灰精度为1.5%。

射线强度测定结果说明，理论误差和试验误差不相等。但是，根据理论公式计算的结果和试验结果相接近。由此得出：根据理论关系 $\mu_w(A)$ （图2）的放射性测灰法测定的误差值是最小的。

### X射线反散射法误差的评定

煤中含铁量的变化是降低X射线反散射法精度的系数。X射线的反散射强度与截面成正比例。

$$\sigma_w : (\mu_w + \mu_w^*)$$

图4和5所示之灰分中 $Fe_2O_3$ 含量和质量吸收系数及灰分散射质量吸收系数

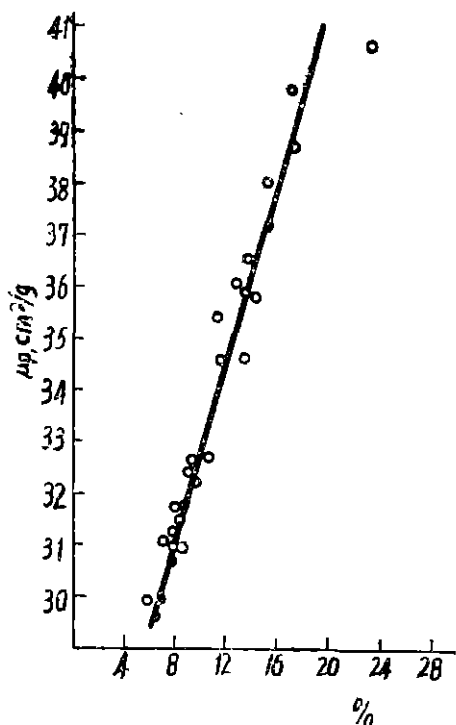


图4 分灰对能量约60千电子伏的X射线的质量吸收系数和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  之间的理论关系

间的关系表明,量约60千电子伏X射线对煤散射质量吸收系数和质量吸收系数均达到

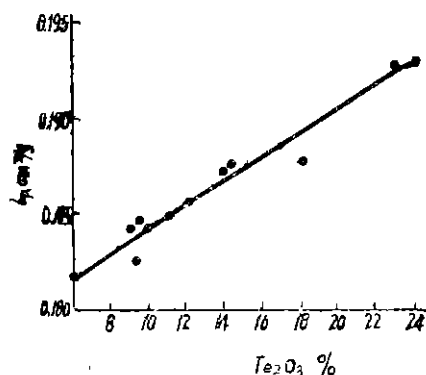


图5 灰分对能量约60千电子伏X射线的散射质量系数和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  之间的理论关系

$$\sigma_w = (\sigma_R - \sigma_O)A + (\sigma_{\text{Fe}} - \sigma_R)\alpha + \sigma_O \quad (6)$$

$$\mu_w = (\mu_R - \mu_O)A + (\mu_{\text{Fe}} - \mu_R)\alpha + \mu_O \quad (7)$$

式中  $R$ 、 $O$ 和 $\text{Fe}$ —分别为不含铁的矿物质、有机物质和铁;  
 $\alpha$ —煤中铁的化合物。

根据灰分中  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $\Delta a p$ ) 密度的变化测定灰分的相对误差:

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\partial \mu_w}{\partial \alpha} \left( -\frac{\partial \mu_w}{\partial A} \right)^{-1} \Delta a p \frac{1 - \frac{\mu_w}{\sigma_w} \frac{\partial \sigma_w}{\partial \alpha} \left( \frac{\partial \mu_w}{\partial \alpha} \right)^{-1}}{1 - \frac{\mu_w}{\sigma_w} \frac{\partial \sigma_w}{\partial A} \left( \frac{\partial \mu_w}{\partial A} \right)^{-1}} \quad (8)$$

推导公式得出  $\mu_w = \mu_w^*$

$$\text{方程式 } \frac{\partial \mu_w}{\partial \alpha} \left( -\frac{\partial \mu_w}{\partial A} \right)^{-1} \Delta a p \quad (9)$$

是采用透射法时测定的相对误差,而使用散射法得出的误差可用系数  $R$  表明 公式 (8) 的另一部分。

公式 (8) 中的偏导数对煤中灰分和铁的变化有相应的宏观有效断面的灵敏度特点。

同时考虑

$$\frac{\partial \sigma_w}{\partial \alpha} = A^{-1} \frac{\partial \sigma_w}{\partial \alpha_P} \quad (10)$$

和

$$\frac{\partial \mu_w}{\partial \alpha} = A^{-1} \frac{\partial \mu_w}{\partial \alpha_P} \quad (11)$$

式中  $\alpha_P$  为灰分中的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ，根据图4和图5的曲线计算相应的偏导数，但是根据图6的数据计算  $\mu_w / \sigma_w$ 。

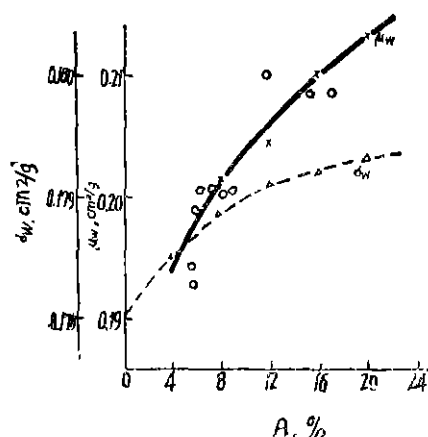


图6 上西里西亚煤田的一般化学组成来计算能量约60千电子伏X射线的散射质量系数、质量吸收系数和灰分之间的理论关系

灰分  $A = 8\%$  和  $16\%$ ，则  $R$  系数  $0.96$  和  $0.95$ 。

## 结 论

对于矿物质化学成分差别较大的煤， $\beta$ 射线的反散射法测灰出现误差大的可能性较小。

用  $\beta$ 射线反散射法测定上西里西亚煤田煤的灰分时灰分相对误差最大不超过  $20\%$ ，当使用能量约60千电子伏的X射线反散射法和透射法时测灰精度为  $100\%$ 。

当煤灰中的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量较大时，若用X射线测定法测灰，则可用回归方程曲线来表示。

使用反散射法测灰的误差比透射法的测灰误差约小  $5\%$ 。

对于不均质煤，使用  $\beta$ 射线反散射法测灰为最有效。

对于一个矿井的同一种煤或化学特性彼此接近的煤层的煤所测结果是不相同的。

郑痴佛摘译自波兰《采矿观察》，  
1976年，第11期，504—507页

(上接第52页)

### 气吹式干燥机主要参数

处理能力，吨/时：

接入料计 250

按蒸发水分计 30

气体最初温度， $^{\circ}\text{C}$  1100—1200

干燥物料粒度，毫米 0—13

物料水分，%：

入料 15—18

### 干燥产品

6—7

干燥机单位体积排出的水分，

公斤/米<sup>3</sup>·时 3500—4000

蒸发1吨水需电耗，千瓦小时/吨 32

重力分离在入料浓度大于

1公斤/公斤(气体)时的效率，% 97

空气动力阻抗。公斤/米<sup>2</sup> 320—400

吴式瑜整理