

文章编号: 1673-3363-(2014)04-0532-05

综放开采煤矸自动识别基础研究

张宁波, 鲁岩, 刘长友, 杨培举

(中国矿业大学矿业工程学院, 深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要 综放开采煤矸自动识别是实现综放开采技术自动化的关键, 为此, 提出了采用双能 γ 射线技术对放顶煤煤矸混合体中的矸石含量进行测定识别。分析了双能 γ 射线穿过煤矸混合体时的衰减规律, 建立了煤矸混合体灰分与含矸量间的量化关系, 通过实验的方法对双能 γ 射线煤矸识别的灰分、含矸率等相关参数进行了实验分析, 建立了两者之间的相关关系, 同时对仪器响应的实时性进行了验证。结果表明, 利用双能 γ 射线技术对放顶煤煤矸混合流中矸石含量进行实时测定识别是可行的。

关键词 煤矸识别; 综放开采; 双能 γ 射线技术; 含矸率

中图分类号 TD 323

文献标志码 A

Basic study on automatic detection of coal and gangue in the fully mechanized top coal caving mining

ZHANG Ningbo, LU Yan, LIU Changyou, YANG Peiju

(School of Mines, Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education of China, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract The key to realize the automatic fully mechanized top coal caving mining technology is the automatic detection of coal and gangue. Therefore, detection of gangue rate in coal gangue mixture of drawing opening by using of the dual-energy γ -ray method has been proposed and the attenuation law has been analyzed when dual-energy γ -ray crosses the coal gangue mixture. Quantitative relationship is established between gangue rate and ash content. The parameters of the gangue rate and ash content by experimental analysis has been studied and their correlation has been built. Real-time response property of the equipment has been tested in the experiment. The results show that dual-energy γ -ray method is feasible for real-time detecting the gangue rate of coal gangue mixture.

Key words coal gangue detection; fully mechanized top coal caving mining; dual-energy γ -ray method; gangue rate

自动化放顶煤工艺是厚及特厚煤层实现自动化综放开采技术的关键, 其瓶颈在于放煤过程中煤矸的自动识别^[1-4]。我国不少学者致力于这方面的研究, 所采用的识别方法有图像识别、声波频谱识别、

电磁波探测识别、电子自旋共振识别等^[5-9], 其中电磁波探测识别、电子自旋共振识别由于信号散射衰减较严重, 难以进行后期处理^[10]。目前研究较多的方法为图像识别和声波频谱识别, 但放煤口尘雾浓

收稿日期: 2013-04-16

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2010QNA32); 江苏高校优势学科建设工程项目; 江苏省“333”高层次人才培养工程专项基金项目; “泰山学者”建设工程专项经费项目; 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ13_0947)

作者简介: 张宁波(1987—), 男, 江苏省邳州市人, 博士, 从事安全高效开采及矿山压力控制方面的研究。

通信作者: 鲁岩

E-mail: luyancumt@126.com

Tel: 13775987018

度大使图像识别产生较大误差, 声波频谱识别有一定可行性, 但目前滤波以及后期频谱分离效果不好, 无法正确提取识别信号。

本文将通过双能 γ 射线技术对煤矸自动识别进行基础研究。双能 γ 射线煤矸自动识别技术是根据 γ 射线穿透煤矸混合物时发生的衰减规律对混合物中矸石的混合度进行判定^[11-12], 进而为综放开采自动放顶煤技术提供理论基础。

1 双能 γ 射线在煤矸混合物中的衰减规律

双能 γ 射线是指能量为 0.06 MeV 的低能 γ 射线 ^{241}Am 和能量为 0.66 MeV 的中能 γ 射线 ^{137}Cs 。 γ 射线束穿透物质后的剩余强度与吸收物质的厚度之间有关系, 它们之间的关系可通过下式来表示:

$$I = I_0 \text{Exp}(-\mu_m \cdot d_m) \quad (1)$$

式中: I_0 为射线初始通量密度; I 为通过被测物质后射线的通量密度; d_m 为被测物质质量厚度; μ_m 为被测物质的质量衰减系数。

由以上分析可知: 在 γ 射线穿过物质时, 射线强度的衰减由被穿透物质的质量衰减系数 μ_m 和质量厚度 d_m 决定。而入射 γ 射线的能量和被照射物质的原子序数决定了质量衰减系数 μ_m 。元素对于能量为 0.06 MeV 的低能 γ 射线 ^{241}Am 和能量为 0.66 MeV 的中能 γ 射线 ^{137}Cs 的质量吸收系数如图 1。

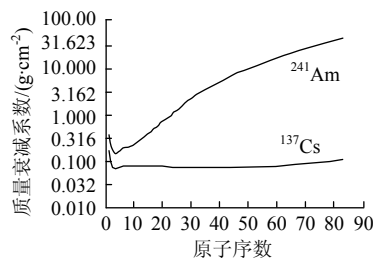


图1 原子序数与质量衰减系数的关系曲线

Fig.1 Relationship curve between atomic number and mass attenuation coefficients

从上图的原子序数与质量衰减系数的关系曲线可以得出: 不同的元素原子序数对于 ^{137}Cs 的质量衰减系数 μ_m 的影响较小, 只有 H 元素存在突变, 其他基本上一致; 而对于 ^{241}Am 的质量衰减系数 μ_m 却是随原子序数 Z 的增加而增大的。

煤矸混合物的组成极其复杂, 按其主要的组成成分来说是以碳为代表的低原子序数元素(C, O, N)物质和以硅为代表的高原子序数物质的二元混合物。假设高原子序数的元素(高 Z 元素)在混合物中的重量百分含量为 C_g , 那么低原子序数的元素

(低 Z 元素)的重量百分含量则为 $(1-C_g)$ 。 ^{241}Am 对高 Z 物质和低 Z 物质的质量衰减系数是不相同的, 假设 ^{241}Am 对混合体中高 Z 物质的质量衰减系数为 μ_g , 对混合体中低 Z 物质的质量衰减系数为 μ_d , 根据混合物的质量衰减系数的计算公式, 可以得到 ^{241}Am 对混合体的质量衰减系数 μ_l 为

$$\mu_l = C_g \mu_g + (1-C_g) \mu_d \quad (2)$$

由上式可知: 混合体对低能 γ 射线的质量衰减系数 μ_l 只与混合体中高 Z 物质的含量有关。

由以上讨论可知, 可以将混合体对中能 γ 射线的质量衰减系数视为一个常数, 即中能 γ 射线的衰减事实上只与混合体样本的质量厚度有关; 因此, 通过中能 γ 射线通量密度的衰减程度可以计算出混合体的质量厚度。鉴于此, 可以通过中能 γ 射线通量密度的衰减来修正因混合体的质量厚度的变化引起的低能 γ 射线通量密度的变化, 从而可以把高 Z 物质含量大小造成的低能 γ 射线通量密度的变化呈现出来。

混合体中高 Z 物质绝大部分来自矸石, 其含量 C_g 和混合体的含矸量 ω 基本上成线性关系, 这里假设这两者之间的比例为 A, 即

$$\omega = A C_g \quad (3)$$

在测量的过程中, 如果 2 个射线源处在同一个位置, 那么 2 种射线所接触混合体的质量厚度没有差别。因此, 由式(1)~(3)可得:

$$\frac{\mu_m}{\mu_l} = \frac{\ln(J_0) - \ln(J)}{\ln(I_0) - \ln(I)} \quad (4)$$

$$\omega = A \times \frac{\mu_m}{\mu_g - \mu_d} \times \frac{\ln(I_0) - \ln(I)}{\ln(J_0) - \ln(J)} - 2 \frac{\mu_d}{\mu_g - \mu_d} \quad (5)$$

令:

$$a = A \times \frac{\mu_m}{\mu_g - \mu_d}; \quad b = 2 \times \frac{\mu_d}{\mu_g - \mu_d}; \quad k = \frac{\ln(I_0) - \ln(I)}{\ln(J_0) - \ln(J)}$$

则式(5)可改写成

$$\omega = ak - b \quad (6)$$

式(6)便是根据射线通过煤矸混合物时与其发生作用而衰减的规律计算推导出的混矸率的数学模型, 只要测定中、低能 γ 射线穿过被测物质前后的通量密度, 便可得知煤矸混合物的混矸率。

2 煤矸混合物中含矸量的确定

前面关于混矸率的数学模型实质上是对煤矸混合体灰分的分析, 要确定煤矸混合体的含矸率必须要建立煤矸混合体灰分与含矸率的关系。

理论灰分计算公式可以表示为

$$\omega_1 = \frac{m_1 \times \eta_1 + m_2 \times \eta_2}{m_1 + m_2} \quad (7)$$

式中: m_1 为煤样本的质量; m_2 为矸石样本的质量; η_1 为煤样本的灰分; η_2 为矸石样本的灰分。那么含矸量可表示为

$$\omega_2 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \quad (8)$$

由式(7), (8)可得出

$$\omega_1 = (\eta_2 - \eta_1) \times \omega_2 + \eta_1 \quad (9)$$

上式中 η_1 , η_2 的值是已知量, 对于一个确定的矿区是固定值, 具体需要根据矿区和工作面的不同进行修正。

式(9)即为混合物灰分-含矸量的理论转换式。

3 现场实验分析

3.1 实验测试仪器

双能 γ 射线实验所采用的实验仪器为同源型在线测灰仪, 如图 2 所示。该仪器由射线源、接收探头和信号控制分析电路 3 部分组成, 分析电路可以外接计算机, 用来调节参数和随时查看数据, 其射线源安装在下方, 接收装置位于其正上方, 控制分析电路部分安装在侧面。



图 2 设备布置图

Fig.2 Equipment layout plan

3.2 实验方案

实验分 2 次进行, 第 1 次实验主要做静态实验, 采用箱体做容器, 其尺寸为 400 mm×1100 mm×600 mm。所用煤、矸材料取于现场, 通过机械秤确定质量。

1) 纯煤、纯矸灰分标定: 由于所采样品并非纯煤、纯矸, 这就需要对煤、矸样品的灰分进行测量, 为计算含矸率提供基础数据。将所采煤、矸样品置于测灰仪下方, 在计算机上读取其静态灰分。

在容器内平铺 1 层煤(质量为 m_1), 进行灰分测量, 再通过移动容器等手段略微改变皮带上的煤的状态再测量, 一共取 5 个测量值; 然后在原来的基础上再平铺 1 层煤(质量为 m_2), 进行测量, 分别将测量得到的数据记录于表中。并比较煤厚度对测量结果的影响。

2) 小粒度煤矸混合实验: 将粒度小于 10 mm 的矸石和煤进行不同比例的混合, 进行灰分测定, 验证利用双能 γ 射线技术测量煤矸混合体含矸率在混合体静止状态下的适应性。

将不同质量的煤和矸石混合后进行测量, 改变煤矸状态分别测量 5 次, 分别将测量得到的数据记录于表中。

3) 不同粒度煤矸混合实验: 模拟顶煤放出体中煤矸块度的大小不一的规律, 所采用矸石和煤粒度大小不一, 小至煤、矸粉末, 大至 200 mm 左右, 将不同块度的煤矸按不同的比例混合。这里由于块度的问题, 尽量控制比例的均匀增加。通过测灰仪测定灰分, 验证双能 γ 射线技术对放顶煤煤矸混合度检测在静止状态下的适应性。

4) 取块煤和块矸, 为方便实验, 所取样品粒度小于 100 mm, 按照矸石含量 5%, 8%, 10%, 13%, 15%, 17%, 20%, 23%, 25% 的比例分别配制样品 1 份, 每份质量为 25 kg。先在静态下测量 5 个不同点样品的灰分, 然后测量在动态条件下样品的灰分, 测量时间为 2 min。

5) 仪器反应时间测定:

由于测灰仪射源稳定性、接收装置的特性限制以及周围环境的影响, 一般在数据处理上需要一定量的数据进行筛选和中和, 最后才会得出较为精确的灰分值。得到一定量数据就需要一定的时间, 如果缩短数据的采集时间, 必然以牺牲数据量为代价, 那么精度将会受到影响。

为了查看在短的响应时间内测得的数据是否能够在允许的误差范围内, 下面实验验证, 将样品放置与仪器下侧, 分 1, 5, 10, 20 s 等 4 种响应时间对其灰分进行测量分析。

3.3 实验结果

1) 纯煤、纯矸灰分标定, 见表 1。

表 1 实验灰分
Table 1 Experiment ash content %

成分	8 kg 煤	12 kg 煤	14 kg 石	24 kg 石
矸石比例	0	0	100	100
实测灰分	14	15.7	71.1	76.7
灰分平均值	14.8		73.9	

以上实测灰分为 5 次测量的平均值, 通过测量可以发现, 煤中含有一定量的高 Z 物质, 这里认定为灰分, 矸石中也含有一定量的低 Z 物质, 这里认定为煤。同时将所测得的所有值平均作为本次实验

的一个基准参考值。

从表 1 可以得到：被测物的厚度对实验结果有一定的影响，厚度越大，灰分值将偏高；但影响幅度很小，从工程角度可以忽略。

2) 小粒度煤矸混合实验，见表 2。

表 2 实验灰分			
Table 2 Experimental ash content %			
成分	25 kg 煤+15 kg 石	20 kg 煤+15 kg 石	15 kg 煤+15 kg 石
矸石比例	37.5	42.9	50
实测灰分	38.5	47.8	47.9
理论灰分	37	40.2	44.4
成分	10 kg 煤+15 kg 石	5 kg 煤+15 kg 石	
矸石比例	60	75	
实测灰分	53.2	59.5	
理论灰分	50.3	59.1	

上述表中纯碎煤样本、纯碎矸石样本理论计算灰分值由实测灰分值平均得出。由于现场所取得的“纯煤”和“纯矸石”都带有一定成分的对方物质，即煤中有矸且矸中有煤，但仪器无法对此产生区分，故有必要对理论灰分进行计算。理论灰分的计算以纯煤样本和纯矸样本的实测灰分平均值为基础，分别得出“纯煤”中矸石比例 η_1 和“纯矸”中矸石比例 η_2 ，在计算其他组理论灰分时给予考虑。

图 3 为利用表 1, 2 数据所得到的曲线，由图 3 和表可得知：理论计算所得灰分与实测灰分值大致一致且相差较小。

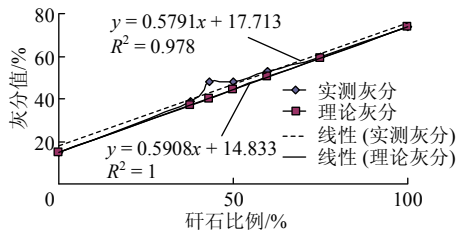


图 3 理论/实测灰分对比图
Fig.3 Theoretical/measured ash content contrast diagram

3) 不同粒度煤矸混合实验。

表 3 中纯煤和纯矸的理论计算灰分分别采用实测灰分，与表 2 比较可得：煤块度对其灰分的影响很小；而矸石块度大时，灰分相对来说要比碎矸大。这从洗煤厂提供的块矸、块煤灰分数据可以得以验证。表 3 中理论灰分的计算方法与表 2 一致，其中碎煤和碎矸的灰分值采用表 2 标准。

从图 4 可看出：被测物大小块度混合后，理论灰分与实测灰分相差较大，但在可接受的范围内。

由于容器限制，此处数据较少，不能十分肯定是块度的影响，而且要考虑到所采集的块矸和碎矸的灰分不同。

表 3 实验灰分				
Table 3 Experimental ash content %				
成分	12 kg 碎煤 22 kg 块煤	10 kg 块矸 +10 kg 块煤	10 kg 块矸+10 kg 块煤+2 kg 碎煤+ 8 kg 碎矸	11 kg 块矸
矸石比例	0	50	60	100
实测灰分	14.4	53.1	64	79.1
理论灰分	14.4	46.7	58.8	79.1

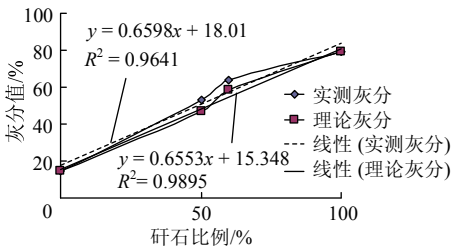


图 4 理论/实测灰分对比图
Fig.4 Theoretical/measured ash contrast diagram

4) 块煤和块矸不同比例动、静实验对比，如表 4 所示。

表 4 实验结果			
Table 4 Experimental results			
比例/%	灰分/%		
	静态	动态	理论
5	13.8	13.82	13.5
8	15.9	16.45	15.6
10	18.3	17.84	17.0
13	19.8	19.58	19.1
15	20.7	21.46	20.5
17	21.2	22.23	21.9
20	22.6	23.05	24.0
23	25.8	26.02	26.1
25	27.5	27.62	27.5

表 4 中纯煤和纯矸的理论计算灰分采用的是矿洗煤厂提供的平均灰分，煤的灰分为 10%，矸石的灰分为 80%，且经过样品实验校对。从表 4 可得到：在动态条件下，灰分的漂移较静态大，通过对数据的筛选和处理，可将误差控制在可接受范围之内。

从图 5 可看出：实验所得的静态灰分、动态灰分和理论灰分有很好的线性相关性，线性度很好。从技术的角度讲，通过双能 γ 射线测量煤矸混合物的灰分和混合物的含矸量具有一一对应的关系，通过测量混合物的灰分而去得知含矸量是完全可行的。在仪器的响应时间达到要求的条件下，可以通过此方法对自动放顶煤进行控制。

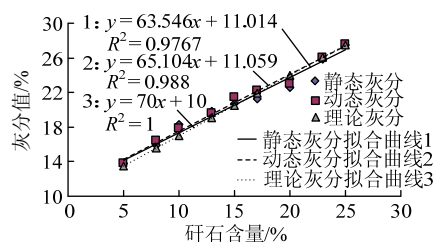


图 5 实验灰分对比图

Fig.5 Experimental ash content contrast diagram

5) 仪器反应时间测定, 见表 5。

表 5 不同响应时间灰分

Table 5 Ash content at different response time

响应时间/s	1	5	10	20
灰分值/%	16.939	15.396	15.527	14.176

从表 5 可看出, 响应时间小的时候, 测量得到的灰分值偏大, 1 s 响应时间得到的灰分比 20 s 大 2.8 个百分点。根据现场调研, 一般放煤时间在 1 min 左右, 1 s 的响应值可以满足实时显示的需要。

4 结 论

1) 通过对双能 γ 射线穿过煤矸混合体时的衰减规律的分析, 可建立煤矸混合体灰分与含矸量间的量化关系; 并通过实验的方法对双能 γ 射线煤矸识别的灰分、含矸率等相关参数进行确定。

2) 煤矸混合流的厚度对测量结果有一定的影响, 但影响幅度很小。煤矸块度对测量结果基本不产生影响, 动态情况下测量得到的数据较静态漂移大, 但在允许范围之内。仪器完全响应时间可以在 1 s 内对测量数据做出响应, 符合实时监测的要求。

3) 采用双能 γ 射线技术对放顶煤煤矸混合体中的矸石含量进行测定识别是可行的, 是煤矸自动识别技术研究的有效途径。

参考文献:

- [1] 张守祥, 张艳丽, 王永强, 等. 综采工作面煤矸频谱特征[J]. 煤炭学报, 2007, 32(9): 971-974.
ZHANG Shouxiang, ZHANG Yanli, WANG Yongqiang, et al. Caved coal and rock spectrum on longwall face [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(9): 971-974.
- [2] 张艳丽, 张守祥. 基于 EMD 方法的煤岩界面识别研究[J]. 煤炭技术, 2007, 26(9): 49-50.
ZHANG Yanli, ZHANG Shouxiang. Identification of coal and rock interface based on emepirical mode decomposition[J]. Coal Technology, 2007, 26(9): 49-50.
- [3] 王增才, 富强. 自然 γ 射线穿透煤层及支架顶梁衰减规律[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25(6): 804-807.
WANG Zengcai, FU Qiang. Attenuation of natural γ -ray passing through coal seam and hydraulic support[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2006, 25(6): 804-807.
- [4] 王增才, 张秀娟, 张怀新, 等. 自然 γ 射线方法检测放顶煤开采中的煤矸混合度研究[J]. 传感技术学报, 2003, 16(4): 442-446.
WANG Zengcai, ZHANG Xiujuan, ZHANG Huaixin, et al. The research on detection of rock content in coal rock mixture in top coal caving by natural γ -ray[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2003, 16(4): 442-446.
- [5] 张艳丽, 张守祥. 基于 Hilbert-Huang 变换的煤矸声波信号分析[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 165-168.
ZHANG Yanli, ZHANG Shouxiang. Analysis of coal and gangue acoustic signals based on Hilbert-Huang transformation[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 165-168.
- [6] 马瑞, 王增才, 王保平. 基于声波信号小波包变换的煤矸界面识别研究[J]. 煤矿机械, 2010, 31(5): 44-46.
MA Rui, WANG Zengcai, WANG Baoping. Coal-rock interface recognition based on wavelet packet transform of acoustic signal[J]. Coal Mine Machinery, 2010, 31(5): 44-46.
- [7] 孔力, 李红, 徐琦, 等. 基于双能 γ 射线的煤、矸石区域分割识别方法[J]. 华中理工大学学报, 1998, 26(1): 39-40, 62.
KONG Li, LI Hong, XU Qi, et al. Field segmentation method for the identification of coal and gangues based on dual-energy γ -ray[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology, 1998, 26(1): 39-40, 62.
- [8] 于师建, 刘家琦. 煤岩界面弱反射波小波多分辨分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3224-3228.
YU Shijian, LIU Jiaqi. Wavelet multi-resolution analysis of weak reflected wave from the interfaces of coal seam and strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3224-3228.
- [9] 马宪民, 蒋勇. 煤与矸石识别的数字图像处理方法探讨[J]. 煤矿机电, 2004(5): 9-11.
MA Xianmin, JIANG Yong. Digital image processing method of coal gangues[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2004(5): 9-11.
- [10] 张岩, 赵乃卓, 张守祥, 等. 基于 DSP 嵌入式煤矸识别系统的设计[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(2): 81-83.
ZHANG Yan, ZHAO Naizhuo, ZHANG Shouxiang, et al. Design on embedded identification system of coal and rejects based on DSP[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(2): 81-83.
- [11] 陈国杰, 赵维义, 朱星. 基于单片机双能 γ 射线透射煤矸石在线识别仪[J]. 核电子学与探测技术, 2004, 24(2): 140-142.
CHEN Guojie, ZHAO Weiye, ZHU Xing. An on-line identification device for coal and gangue based on dual-energy γ -ray transmission and microcontroller[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2004, 24(2): 140-142.
- [12] 徐琦, 孔力, 刘文中. 生态遗传算法在煤矸石模糊模式识别中的应用[J]. 工矿自动化, 2003(2): 9-11.
XU Qi, KONG Li, LIU Wenzhong. Application of niche genetic algorithm in fuzzy pattern recognition of gangues [J]. Industry and Mine Automation, 2003(2): 9-11.