

核技术在煤炭工业中的应用

马永和

(黑龙江省科学院技术物理研究所)

摘要: 本文介绍了核技术在煤田地质勘探、采煤、选煤和计量等方面的应用。也评述了几种主要核方法的基本原理、优缺点及适用条件。煤炭工业的工作环境一般是比较恶劣的,核技术具有适应恶劣条件的特点,因此核技术成为煤炭工业不可缺少的检测手段。

一、前言

煤是世界上的最重要能源之一。煤是一种主要的固体燃料,通过加工可以转变成液体燃料和气体燃料,以补充石油和天然气的不足。由于煤做为主要能源的地位,必然要注意它的质量,重视燃煤锅炉和煤转换装置的效率。

由于煤的不均匀性,就要求有合适的在线分析方法,完善的核方法具有适应这种变化程度的特性。此外,核技术还具有快速准确、反应灵敏、不破坏不接触被测物和可在恶劣条件下工作等优点。以核方法为基础的一些测量装备已经建立起来,并广泛用于钻孔测井、采煤、煤质在线分析和控制等方面,在生产中日益发挥重要作用,取得了可观的经济效益,成为煤炭工业不可缺少的控制和检测手段。

二、煤田地质普查

煤在地下是分层存在的,所以煤矿开采之前,必须获取规划需要的大量原始信息。在野外条件下化验是相当困难的,利用放射性同位素测井的方法可以很方便的获得这些信息。天然 γ 测井、 γ 反散射测井和中子测

井都可以指示煤层的存在,确定出厚度,灰分以及相关的岩性。

天然 γ 测井是以煤层和岩层的天然放射性的差异为基础的。天然放射性强度取决于岩层的成分和地质历史,例如含有粘土和页岩的岩层要比砂石岩和石灰岩有更强的天然放射性,而煤有低的天然放射性,因为煤都含有不同程度的页岩,页岩又含有微量的天然放射性元素,如铀、钍、钾等。由其天然放射性强度可以区分煤层和岩层,再利用某种或某些核的天然放射性强度与灰分的相关性来测出灰分,其误差与煤种和灰分范围有关。这种方法简单方便,成本也低。然而,有些含炭的矿床确有高的天然放射性,使这种方法受到了限制。

γ - γ 测井是利用 γ 射线反散射的方法测井,是以煤层和岩层的密度差异为基础的,也是寻找煤层的最有效方法。一般可分为两种类型,即岩层密度测井和选择 γ - γ 测井。

岩层密度测井是利用高能 γ 射线,以康普顿散射为基础,所观测到的散射 γ 射线强度是岩层密度的函数。通常使用 ^{60}Co 和 ^{137}Cs γ 源,连同探测器隔开一定距离装在一个细长的密封管内构成探针,下到井下。使用 ^{60}Co 源有可能完全消除等效原子序数即成分变化的影响,采用电方法甄别掉散射 γ 射线的低能部分也有助于克服成分变化的影响。灰分和煤的密度有一定的相关性,当密度和灰分的相关性好时,密度和比能(发热量)的相关性也好。当岩层孔隙度大时应使探针长些,以减少孔隙度变化引起的误差。一般密度的误差低于 $\pm 3\%$,足够精确。

选择 γ - γ 测井是利用低能 γ 射线,以光电效应为基础,所观测到的散射 γ 射线强度不仅是岩层密度的函数,也是岩层成分的函数。通常使用 ^{241}Am 和 ^{208}Tl γ 源或韧致辐射。把反散射 γ 谱的形状与介质等效原子序数联系起来就可得出岩层中重元素的含量,即可测出煤中的灰含量,这是比较灵敏的测灰方法。当灰分在30%以下时,灰分误差为 $\pm 1.0-1.5\%$ 。

中子测井也可以区分煤层和岩层,这个方法是以煤层和岩层含氢量的差异为基础的。煤中含氢量较高,氢是热中子俘获技术的最好介质。热中子俘获产生的特征 γ 射线能量几乎都在3-10MeV范围,中子和 γ 射线穿透力强,可探测大体积的煤层,代表性好。通过多元素分析测定灰分是有吸引力的,灰分与 Al_2O_3 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 之和具有很高的相关性,即使灰成分变化很大时也能得到很高的精度。近年来中子 γ 能谱法测井的研究和应用取得了很大进展。

三、采 煤

同位素仪表在采煤中的应用是煤炭工业中的最重要应用领域。

由于采煤方法的现代化,引入机械采煤机,保持切割面在煤层内却成了大问题。在切割头上加一个能鉴别岩石和煤层的 γ 反散射计就能成功地解决维持切割机具在煤层内的问题。使用 ^{241}Am γ 源时,煤的饱和反散射厚度约10cm,距离岩石远到8cm时也有很高的灵敏度。误差主要是由探测器与工作面的空气隙和夹石层引起,使用这种仪器的全自动化采煤机,很少把煤层上下的岩石切入煤中,浪费在清理顶板塌落的时间大大减少了,煤的质量提高了,产量也增加了。

煤在地下装运是一项重要工作。特别是在用机械开采的大型煤矿和在有限的狭窄空间连续运出大量煤及在反方向提供供给的条件下,如果没有周密的规划和调度很容易造

成严重阻塞。任何能提高工作效率和减少成本的系统都是很重要的,为此目的已应用了几种放射性同位素仪器。在矿车、料斗和皮带上广泛使用了料位计,分别使用了垂直和水平二种射线束。按预先设定的料位即能满载又不致出现洒落就控制停止输料。在矿车上也普遍使用 γ 继电器对矿车进行自动计数和自动控制。

在大范围的地下开采中,为了向新的采区提供电力和通风,常常需要从地面向地下的工作区和巷道钻孔(井)。采用同位素的方法很容易定位,确定钻井的偏离方向。把一个高强度的放射源(如0.5Ci的 ^{60}Co)从井口下到与地下水平开掘处相对应的标准深度的位置,再用一个准直的探测器在水平开掘处的周围寻找源的位置并确定偏离距离。这种方法能成功地定到1.3m,一般也不会偏离太大,超过这个距离就应在估计的方向上扩大水平开掘范围。

在井下使用大量支撑坑木。为了检查使用多年的支撑坑木的状况,,广泛使用穿透方法和反散射方法测量圆坑木的密度。通过密度的变化可以方便的鉴别木材的质量好坏,这对确保生产安全具有十分重要意义。

放射性同位素仪器在采煤中除了以上几种主要应用外,还有其他一些应用。这包括:用中子慢化的方法测量顶板和底板的水分以及井下水情预报;用 γ 穿透或反散射方法测量水利采煤过程中的煤浆浓度;用 γ 穿透或反散射计探查排矿水管道的腐蚀、浸蚀和淤积;用 γ 反散射计测量坑道内可燃挥发物质的含量;用 β 反散射计测量粉尘的沉积率;用 β 穿透计测粉尘的浓度;用放射性探测器的气体色层分离法分析矿井瓦斯的浓度和成分;用离子吹风机防止静电积聚和放电;用高效能同位素电池在紧急情况下照明等等。

四、选 煤

大部分原煤都需不同程度的分选。煤的

工业分析包括灰分、水分、挥发分、含炭量、比能等,其中灰分是主要技术指标,而灰分的测量和控制是很难的。常规的分析方法不能进行连续测量,工艺繁琐,费时间,代表性差,累计误差大,不能利用所获取的数据及时控制生产流程。利用核方法可以克服传统分析方法的一些缺点和限制。

1. 灰分仪

在煤的生产和利用方面,精确知道煤的

灰分是很重要的。原煤灰分过高会使洗煤厂负担过重,燃料用煤灰分过高会给环境污染带来问题。用仪器的方法测灰所要求的精度依赖于测量结果是用于把煤按很宽的灰分范围分等还是用于控制洗煤厂工艺流程或调节燃煤锅炉参数。

利用核技术已经研究了一些测灰方法并实现了商品化(见表1、表2)。这些方法多数都

表1 测量煤灰分的放射性方法

方法	放射源	探测器	最大粒度	灰分范围及均方误差	测量时间	优点	缺点	进展
β 反散射	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	电离室或盖革计数管	0.2mm	直到100% 取决于灰成分变化	10s ~ 1min	简单、廉价、可靠	对灰中Fe灵敏 粒度必须低于0.2mm	商品化 仅用于成分稳定煤
$E_\gamma < 7.11 \text{ keV}$ 穿透	^{55}Fe (5.9 keV)	闪烁探测器	0.3mm	直到100% $\pm 0.5 \sim 2\%$	~ min	对Fe含量变化不灵敏,灵敏度高	对灰中S、Cl、Ca灵敏,要求质量厚度不变	商品化
$E_\gamma < 7.11 \text{ keV}$ 反散射	$\text{CoK}\alpha$ (6.9keV)	闪烁探测器	0.3mm	~ 30% $\pm 0.1 \sim 1.5\%$	~ min	对Fe不灵敏	对灰中S、Cl、Ca灵敏	商品化
$E_\gamma > 7.11 \text{ keV}$ 穿透	^{241}Am ^{147}Pm (韧致)	闪烁探测器	1cm (10 keV) 10cm (20 keV)	~ 100% $\pm 0.5 \sim 3\%$	几s ~ 几min	简单、灵敏度高	对质量厚度、成分(主要是Fe)和质量厚度、水分灵敏	未商品化
$E_\gamma > 7.11 \text{ keV}$ 反散射	^{109}Cd (22 keV) $^3\text{H}/\text{Zr}$ ^{241}Am (60 keV) ^{238}Pu (5 keV)	闪烁探测器 正比计数器	~ cm	~ 45% $\pm 0.2 \sim 2\%$	1min	可补偿灰中Fe含量的变化,对水分和散密度变化不灵敏		商品化
中子方法	高能中子源 加速器中子源	闪烁探测器	~ cm			分析多种元素、分析大样品,代表性好、粒度可达几cm	设备复杂、笨重、昂贵,操作复杂 难维护	研究阶段

表2. 测灰仪产品概况

测灰仪名称	生产国家	测灰方法	与灰成分的关系	在线状况
Coalscan 3500	澳大利亚	双能 γ 射线穿透方法	测量误差受灰成分影响	在运输机皮带上直接在线测量
Rash	美国	双能 γ 射线穿透方法	同上	同上
Berthod	西德	^{241}Am 源60 keV γ 射线反散射方法	同上	分流在线
Wultex	英国	^{241}Am 源60 keV γ 射线反散射方法	同上	直接在线
Gunsons Sortex	英国	^{238}Pu 源15 keV x射线反散射和Fe K x射线补偿方法	补偿了灰中Fe含量变化的影响	分流在线
Coalscan 4500	澳大利亚	电子对生成效应	测量误差受灰成分影响小	同上
Conac	美国	中子- γ 射线	同上	同上
Gammametrics	美国	中子- γ 射线	同上	同上

是以射线和物质相互作用与原子序数的依赖关系、煤质与矿物质等效原子序数的差异以及灰分与矿物质有一定相关性为基础的。具体方法包括 β 带电粒子和电磁辐射的穿透吸收和散射,以及中子活化分析等。灰分与矿物质的相关程度主要依赖于C:H:O:S之比和铁含量及其变化。在通常情况下,对已知被分析煤种,前者的标定误差几乎总是允许的。铁引起的误差是很大的,有时会破坏相关性,这是因为铁的比重和原子序数都很高,其含量变化很大。因此灰分测量中,铁元素是主要的误差源。

对于灰分高达50-100%的燃烧灰、烧结料、尾煤、矸石等,最好选用穿透法,灵敏度高。如果铁含量是变化的,选辐射能量低于7.11 keV是必要的,但样品要研细。

对皮带运输机上高流量快速运动的煤流,采用双能 γ 射线穿透法最合适。常用的高低能量 γ 射线由 ^{137}Cs (或 ^{133}Ba)和 ^{241}Am 源发出。高能 γ 射线的穿透强度只与单位面积上的重量有关,而低能 γ 射线的穿透强度不仅与单位面积上的重量有关还与原子序数即成分有关。因此组合这两种强度测量就可测定出灰分。这种方法对垂直方向煤的偏析不灵敏,不受粒度的限制,不需对煤流加工,可实现直接在线测量。

利用产生电子对的相互作用也可以建立一种测灰方法。常用的放射源是 ^{226}Ra ,在反散射几何条件下,康普顿散射强度只与样品密度有关,而湮没辐射强度不仅与密度有关还与成分有关。组合这两种强度测量可测定灰分,并具有密度补偿。这种方法对成分的变化不灵敏,适于高流量分流的在线测量,对高低灰分煤都有良好的精度。

利用中子活化分析方法可以分析煤的成分及含量。最简单的测灰方法是测量与灰分有最好相关性的单一元素含量,煤中铝含量与灰分有最好的单一元素相关性,其次是硅。灰分与 Al_2O_3 、 SiO_2 和 Fe_2O_3 之和具有很高的相关性,当灰成分变化时也有很高的精度。通过对矿物质各成分分析并求和来确定灰分会使灰分的测量精度有实质性的改善,是很有

吸引力的方法。然而由于设备复杂庞大、成本高、器件寿命有限、操作及数据处理麻烦,在工业环境下应用是不适合的,但作为实验室设备是可取的。

利用中子活化方法还可以分析其它一些有意义的单元素含量。利用非弹性散射反应 $^{12}\text{C}(n,n'\gamma)^{12}\text{C}$ 放出的4.43MeV γ 射线可以分析煤中的含炭量,并能由此来确定煤的发热量,煤中氯的含量低,氯是煤中腐蚀锅炉的重要元素。由于氯有最大的俘获截面,也容易测出其含量,可为锅炉防腐蚀提供依据。

硫是煤中重要的杂质元素。工业用煤中过高的含硫量会造成严重的环境污染,炼焦煤中的硫会使炼钢成本提高、质量变坏。因此快速分析和控制脱硫工艺是很重要的。利用热中子俘获反应 $^{32}\text{S}(n,\gamma)^{33}\text{S}$ 放出的5.43MeV γ 射线可实现对含硫量的分析。这个方法的主要问题是煤中其它元素受激产生的能量相近的 γ 射线会产生严重干扰。解决的办法是把已知探测器特性与剥谱和线性组合联系起来可得到硫含量与微分谱强度的简单相关式,并能自动补偿水分、散密度、放射性衰变及康普顿散射的影响。

2. 水分仪

水分是煤质分析、运输、销售和贸易的主要指标。因此测量和控制炼焦煤和动力煤的水分有着越来越大的意义。传统的烘干法也不能进行连续测量。用仪器的方法测水,通常可在几分钟内将其测量误差限制在 $\pm 0.55\%$ 以内。在控制精煤干燥过程和测定煤的比能等场合,用仪器的方法在线测量水分显得特别重要。

用仪器的方法测量水分可分为核方法和非核方法两大类。用核方法测量水分大部分都是采用中子慢化的方法和快中子穿透方法,都是以中子与氢相互作用为基础的,氢比煤中其它大部分原子有更大的慢化本领。

基于中子慢化方法的水分计主要有三种测量几何条件,即插入式、表面式和穿透式,具体选择由使用条件而定。水分与慢中子强度有一定的相关性,在比较窄的水分范围,水分与慢中子强度成线性关系。由慢化产生的热中子穿透力弱,因此不能测量较大体积的水分,

同时慢化方法也受成分、散密度和温度的影响。

快中子穿透方法可以克服慢化方法的一些缺点和限制。在实际中很少采用单一快中子束的穿透方法,而是采用快中子和 γ 射线双束穿透方法,即 $n-\gamma$ 穿透法。快中子穿透强度主要与氢含量和单位面积上的质量有关,而 γ 射线的穿透强度只与单位面积上的质量有关。把两种强度的测量组合起来测定的含氢量与单位面积上的质量无关,克服了厚度和散密度变化的影响,可直接在运输机皮带上监测大流量的煤和焦炭的水份。

碳氢比值法测水是利用快中子非弹性散射反应 $^{12}\text{C}(n,n'\gamma)^{12}\text{C}$ 产生的4.43MeV γ 射线和氢俘获反应 $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$ 产生的2.22MeV γ 射线,并与联合的 γ 射线反散射密度修正组合起来建立的一种测水方法。这种方法可测大样品也可测小样品煤的水分,还可以同时测出灰分和比能。

非核方法包括电容法、微波穿透法、核磁共振法和红外反射法等。这些方法与核技术相配合会得到更理想的效果。

3. 密(浓)度计

浓度测量是洗煤厂的一个重要应用领域。洗煤厂有许多需要测量煤浆浓度的工艺流程。但是由于煤浆中固体含量较低,水作为恒定的本底而降低了精度和灵敏度。原则上可以通过煤浆的浓度测量和流速测量得出固定的流量。但由于工艺上的需要,有意向煤浆中鼓入大量气泡,气泡的变化会使浓度测量产生不可接受的误差。利用中子被氢核(水中含氢11%,煤中含氢5%,空气不含氢)慢化的原理来测量煤浆中的氢含量,并与 γ 射线穿透或反散射方法测得的浓度结合起来,按照固体含量与氢的相关性就可得出与可变气泡无关的固体含量。对浮选车间的进料,浓缩和尾流分别采用三探头组进行测量是目前的最佳方案。三探头组包括:(1)中子探头,含有中子源和锂玻璃闪烁探测器,被探测的慢中子强度与煤浆中氢含量、气泡和温度有关;(2) γ 射线穿透探头,含 γ 源和NaI(Tl)闪烁探测器,用来测量煤浆的浓度;(3)x射线探头,含 ^{239}Pu 源和薄晶体闪烁探测器,用来测量反散射x射线和FeK α x射线,由此求出灰分。由于相补

偿修正,测量结果与可变气泡无关。三探头组同时浸到被测工艺流中,都要求密封和牢固。

4. 计量

在运输和储存过程中的计量是加强企业管理所必须的。在水利采煤和水利运输中,煤水浆通过管道运输。用 γ 射线密度计测出煤浆的密度,再用其它方法测出流速,通过简单的数据处理便可得出质量流。

在机械化运输中,以皮带运输机为主。在皮带上的散物料可用核子秤来计量。核子秤所用的放射源和探测器安装在C型架上,分别位于皮带的上下两边。探测器接收到的向前散射 γ 射线强度与皮带上的质量成线性增加。散射信号与速度信号一起用计算机处理可得出散物料的瞬时质量或累计质量。核子秤与电子秤比具有占地面积小、安装方便、不必改动现场、适于恶劣条件和各种运输方式的非接触测量等优点。核子秤的计量精度一般为 $\pm 0.5-1.0\%$ 左右。

五、结 语

煤炭工业中传统的古老检测方法本身的固有缺点和限制已不适应现代化生产和管理的需要。核方法具有快速连续地进行非接触测量并能适应煤炭工业恶劣环境的特点,这与传统方法相比具有无比的优越性。目前核技术已渗透到煤炭工业的各个领域,为提高煤炭质量,合理利用能源发挥出越来越大的作用,并取得了显著的经济效益。核技术已成煤炭工业自动检测和控制的不可缺少的手段。随着技术的发展,核检测方法正朝着由单参数测量向多参数测量、由简单的强度型测量向复杂的能谱型测量发展。伴随计算机的使用,为复杂的数据处理、控制和由煤自身的不均匀性所要求的补偿与修正提供了极大的便利,使核技术的发展日趋完善。

我国的核技术应用水平与国际差距较大,而在煤炭工业方面的差距更大。为了适应四个现代化建设的迫切需要,促进我国能源事业的发展,要充分吸收国外的先进经验,大力发展核技术在煤炭工业中的应用。