

煤质成分在线检测技术的最新进展

宋兆龙¹, 金 键²

(1. 东南大学 动力工程系, 江苏 南京 210096; 2 南京大陆中电科技股份有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要: 长寿命低成本电子脉冲式中子管产品的出现, 推动了新一代煤质成分在线分析技术的发展, 应用脉冲式快热中子元素分析技术, 综合应用多种核反应可以更高精度地分析煤炭元素成分, 装置也更安全。本文作者在论述脉冲式快热中子元素分析原理的基础上, 介绍了溜槽式和皮带式两种煤质成分在线检测系统。

关键词: 快中子非弹散射; 热中子俘获; 煤质成分

中图分类号: TP98; TQ520.62 文献标识码: A

1 引言

火力发电厂正从生产型组织向以效益、成本为核心的市场型企业转变, 为大幅度降低煤价, 改烧低质煤或混配煤已成为越来越多电厂首要考虑的问题。入炉煤质的变化对锅炉燃烧具有重大影响, 尤其是在燃烧偏离设计煤种的劣质煤和混配煤时, 将给运行调整带来更大的困难。过去, 通过采制样化验煤质的方法尽管具有很高的分析精度, 但存在较大的采制样误差, 而且至少要数小时才能分析出结果, 只能产生煤质的历史数据, 对实时燃烧调整和优化运行的促进作用非常有限, 因此迫切需要能在线分析煤质的新技术和新产品。

2 中子辐照下的核反应

在煤质成分分析的各类新技术中, 核技术具有很多优势, 可以快速测量大批量煤炭的元素成分, 可构成工业上的在线分析系统。元素成分的核分析方法主要是基于中子与物料的核反应, 应用的主要核反应有。

2.1 快中子非弹散射反应

2.1.1 瞬发散射($n, n'\gamma$)

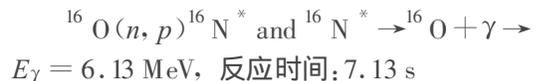
当中子的能量 E_n 大于元素的阈能 E (依元素的

不同, 通常在 2 到 9 兆电子伏之间) 时, 中子与元素的原子核发生非弹性碰撞, 中子损失部分能量后弹回, 元素的原子核在获得能量后处于激发态。处于激发态的原子在几个微微秒内就会退激回到基态, 同时发射与元素相对应的特征能量的 γ 光子, 即瞬发 γ 射线。该类核反应如:



2.1.2 缓发散射

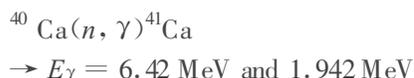
在中子能量足够大时, 受中子轰击后的原子核可能具有放射性, 即快中子活化了元素。放射性的原子核在延迟一定时间(数微秒、数秒、数分钟或更长)后会衰变, 放射出 γ 光子或其它粒子。这类 γ 光子称为缓发 γ 射线。该类核反应如:



2.2 热中子俘获反应(n, γ)

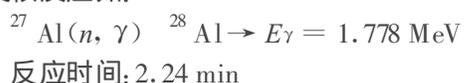
2.2.1 瞬发散射

当中子因散射而损失大部分能量并接近热平衡水平后, 中子就被元素的原子核俘获。发生这种俘获反应的过程中, 在中子热化后 50 μs 到 1 ms 之间, 会发射与元素原子核对应的瞬发 γ 射线。该类核反应如:



2.2.2 缓发散射

在元素原子核俘获中子后, 可能会产生一个人造的放射性同位素, 从而产生了热中子活化反应, 发出缓发 γ 射线。缓发时间或短或长, 缓发时间和缓发 γ 射线的能量都是产生的放射性同位素的特征量。该类核反应如:



收稿日期: 2001-08-29; 修订日期: 2001-12-18

作者简介: 宋兆龙(1965-), 男, 江苏盐城人, 东南大学博士研究生。

3 脉冲式快热中子元素分析技术

3.1 中子源

当今投入商业应用的煤质成分在线核分析仪都是基于同位素中子源, 典型的例子如美国 GAMMA - METRICS 公司的煤质分析仪使用了 ^{252}Cf 中子源。 ^{252}Cf 是一种自发裂变中子源, 自发裂变的中子产额可达 2.31×10^{12} 中子 / (克 · 秒)。中子的平均能量为 2.35 MeV, 半衰期 $T_{1/2}$ 为 2.65 年^[1]。因为无法关断同位素中子源的射线辐射, 中子源的运输、更换都需由专门人员完成, 这给维护、检修和拆卸都带来了很大的麻烦, 存在安全隐患。

新一代煤质成分在线分析装置已不再使用同位素中子源, 以电子脉冲式中子管代之^[2~4]。14 MeV (DT) 中子管是一种小型的氘 - 氚 (D - T) 加速器, 中子管工作电压在 90 kV 到 110 kV 之间, 中子产额可达 2×10^8 n/s, 可以工作在连续方式, 也可以工作在脉冲方式。脉冲频率可达 20 kHz, 脉冲宽度最小为 5 μs 。在 5×10^7 n/s 的中子产额下, 中子管的工作时间可达 8 000 h, 工业中一般可使用 2 年以上。

3.2 脉冲式快热中子元素分析技术

以电子脉冲式中子管为核心的中子发生器可以代替 ^{252}Cf 中子源应用于在线分析系统中。为获得更高的探测性能, 中子管一般工作在脉冲方式下, 脉冲的宽度和频率都可以根据需要进行调节, 可以控制发生的中子通量。通过选择合适的时间窗, 并借助于专门设计的高计数率的探测器和谱分析仪可以清除能谱上的干扰信号, 可以满足瞬时的高精度测量需要或更短测量时间的要求。以 ^{252}Cf 为中子源的煤质成分检测系统, 只能利用热中子俘获反应 (n, γ), 不

γ), 而且还有显著的非弹性散射反应, C 和 O 元素都可以直接测量。

图 1 示出了脉冲式快热中子元素分析技术中各种核反应的时间之窗。物料在中子的照射下, 在不同的时间之窗, 发生不同的核反应, 核反应中发出的 γ 射线能谱含有关于物料元素成分的相关信息, 正确地选择并利用多种核反应, 可以有效地提高信噪比, 使用恰当的解谱算法后就可以从能谱中精确地分析出各元素的成分。

4 溜槽式脉冲快热中子煤质检测系统

文献[2]介绍了一种垂直溜槽式煤质成分在线检测系统, 其原理如图 2 所示。

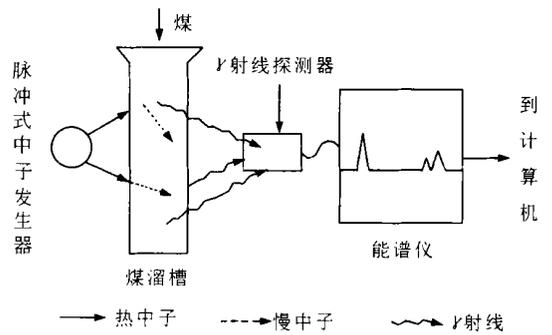


图 2 垂直溜槽式煤质检测系统原理示意图

系统中使用了 14 MeV (DT) 脉冲式中子发生器, 脉冲宽度几微秒, 频率为数千赫兹。高能快中子与 C 等元素相互作用, 立即产生特征 γ 射线(快中子瞬发反应); 在中子脉冲间隙之间, 快中子与煤中的轻质元素产生弹性碰撞而失去能量变成热中子; 热中子与煤中的众多元素作用产生特征 γ 射线(热中子俘获瞬发反应); 在一串中子脉冲作用之后会出现某些元素(如 Na)的活化反应。表 1 列出了部分元素的核反应及其反应能 E_γ (MeV)。

表 1 部分元素及其核反应信息

核反应	反应截面	γ 射线能 E_γ
C ($n, n'\gamma$)	200	4.44
H (n, γ)	332	2.22
O ($n, n'\gamma$)	750	6.13
N (n, γ)	75	10.83
S (n, γ)	520	5.42
Ca (n, γ)	430	1.94, 6.42
Cl (n, γ)	4 300	6.11

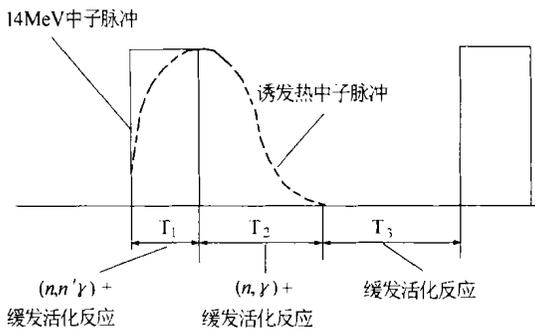


图 1 脉冲式快热中子元素分析技术原理

能测 O 元素, 测 C 元素的计数率也较小, 精度较低。14 MeV 中子源不仅可以产生热中子俘获反应 ($n,$

该系统具有以下特点: (1) 更换煤种时不需要重新标定; (2) 可以分析混配煤; (3) C、O 元素可以直

接测量；(4) 由于只在系统运行时，内部才会有辐射，从而减少了维护中的辐射危险；(5) 探测效率高，检测数据每分钟更新；(6) 探测精度高，硫分为 0.05%，热值为 349 kJ/kg。

5 皮带式脉冲快热中子检测系统

文献[3]介绍了一种直接在原煤皮带上检测煤质成分的在线检测系统。其方法如图3所示，系统中同样使用了 14 MeV (DT) 脉冲式中子发生器和 BGO 闪烁体探测器。电子谱分析仪可将多个探测器的信号转变为能谱。在系统标定后，对每个探测器通道和每个时间窗的能谱进行处理，通过去卷积算法，可得到煤中各元素的相对比例。

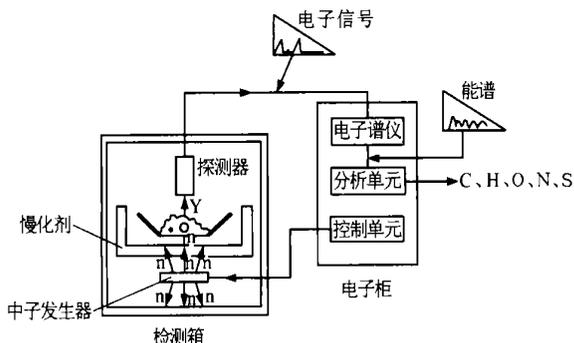


图3 皮带式煤质检测系统原理示意图

这套设备包括一个直接安装在原煤皮带上的检测箱，原煤皮带从检测箱中部穿过，在检测箱下部有

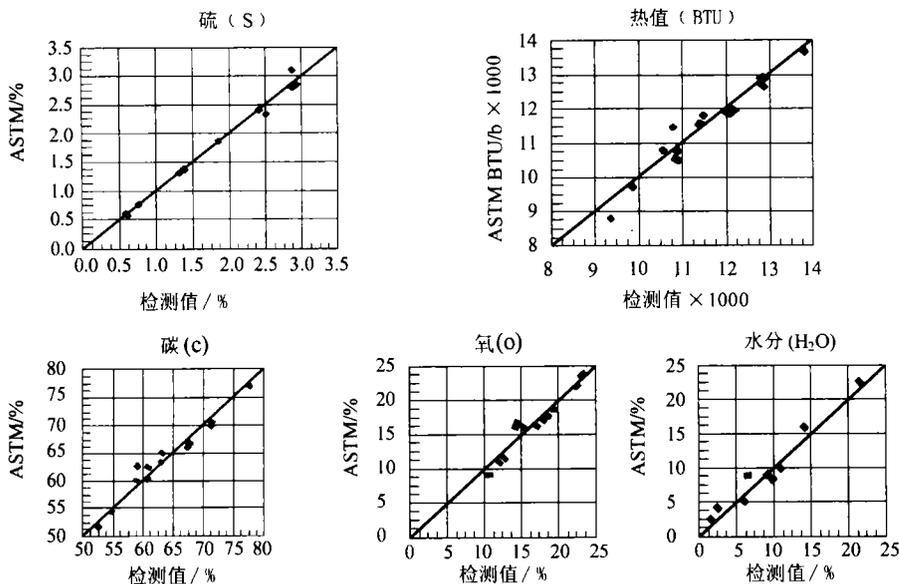


图5 检测值与 ASTM 分析值对比

一个中子发生器，在测量箱的上部是 γ 射线探测器。测量箱的作用之一是慢化中子，保证一定量的快热中子反应。在中子发生器、探测器和皮带周围，使用了不同的慢化材料(如铅、石墨、聚乙烯等)，使煤中的热中子通量最大化。根据皮带尺寸、所要求的精度及测量时间等要求，系统中可以使用多个 BGO 探头。

检测箱的信号连到电子柜，电子柜中包括：能选通每个探测器通道并对其高速计数的电子谱仪、中子发生器控制单元、探测器温度控制单元、工业 PC 及不间断电源等。

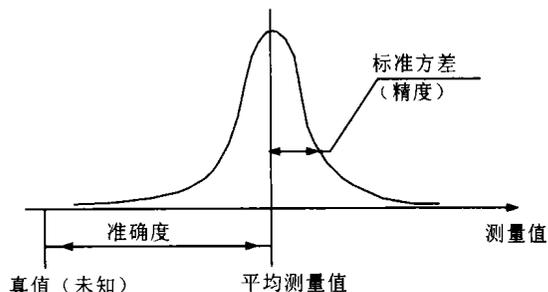


图4 测量误差分析

6 试验情况和误差分析

测量系统测量总误差的平方是系统各组成部分误差的平方和，煤质成分分析系统的误差主要由取样误差、制样误差和分析误差三部分组成。传统的取样分析方法，每次只能对极少部分物料(数十克到

数百克)进行分析，虽然有较小的分析误差和较高的分析精度，但由于大堆煤炭并非均匀同质，往往存在较大的取样误差和制样误差，测量精度存在很大的不确定性。溜槽式和皮带式检测系统可以实现全部物料成分的在线检测，每小时检测的物料量达数百吨，而且与物料是否均匀同质无关，也不取决于物料的粒度，无取样误差和制样误差。

在线检测系统的测量值可用准确度(accuracy)和精密度(precision)来描述，图4

给出了其定义。

煤的测量真值一般以若干个煤样的统计值(均值)代替。文献[5]报道了检测值与美国试验和材料学会(ASTM)分析值的对比。

参考文献:

[1] 刘圣康. 中子物理[M]. 北京: 原子能出版社, 1986
 [2] WOMBLE P G, SCHULTZ F J. Non-destructive characterization using pulsed fast thermal neutrons[J]. *Nuclear instruments and meth-*

ods in physics research 1995, B99(4): 757—760.

[3] BACH P, TOUMNEUR P LE. Perspectives for one line analysis of raw material by pulsed neutron irradiation[A]. 5th International Conference on Applications of Nuclear Techniques[C]. Greece; Crete, 1996.
 [4] BARON J P, CARIU J. Use of a new neutron generator for in situ determination of elements[A]. *Proceedings of Application of Accelerator* [C]. USA; Denton, 1986.
 [5] Western Kentucky University. NUMAT on-line elemental coal analyzer, 2001.

(渠源 编辑)

胶球清洗方法在热电厂的应用

目前,清洗凝汽器铜管的方法很多,比如机械清洗、酸洗、通风干燥法、反冲洗法等,但此类方法大多需停机处理,有其一定的限制性。胶球清洗法对那些不便于停机的热电厂来说,不失为一种行之有效的方法。

胶球自动清洗系统由胶球泵、装球室、收球网、二次滤网等组成。清洗时把胶球投入装球室,启动胶球泵,胶球便在比循环水压力略高的压力水流的推动下,经凝汽器的进水室进入铜管进行清洗。由于胶球输送管的出口朝下,所以胶球在循环水中分散均匀,使各铜管的进球率相差不大。胶球把铜管内壁抹擦一遍,流出铜管的管口时,自身的弹力作用使它恢复原状,并随水流到达收球网,被胶球泵入口负压吸入泵内,反复清洗。

评价胶球清洗装置的效果如何,主要是看收球率的高低。造成收球率低的主要原因有以下几个方面:(A)活动式收球网不密合,引起“跑球”;(B)循环水压力低、水量小,胶球穿越铜管能量不足,堵在管口;(C)凝汽器进口水室存在涡流、死角,胶球聚集在水室中;(D)新胶球较硬或过大,不易通过铜管;(E)胶球比重太小,停留在凝汽器水室及管道顶部,影响回收等等。要针对实际情况找出收球率低的主要原因,并加以解决。

(1)在胶球的安装过程中,最要注意的是要把胶球输送管伸到循环水进口管的中间并要求管口朝下。这一点极为重要,这样做可使胶球分散均匀。

(2)循环水的排出口与机组零米层之间有一定的高度,造成了较大的虹吸,出水管内形成了一种负压状态,与胶球泵形成了“抢水”,造成了胶球泵无法

正常的运行。解决该问题的方法是关小循环水出水阀,使其出口压力达到微正压状态。

(3)由于循环水压力低,水流速度慢,使胶球穿越铜管的能量不足,造成堵在管口或一次循环的时间延长,而导致在短时间内胶球的回收率偏低。遇到这种情况,在条件许可的情况下,可以采取提高压力和水流速度的方法。另外,也可以延长清洗时间,根据多次的清洗,找出最佳的清洗时间。这样不仅可以提高清洗效果,而且对于开式循环的系统来说,胶球不会造成浪费。

(4)对于采用软胶球的用户来说,浸泡胶球也是一个很重要的环节,因为这也是造成收球率低的一个重要原因。胶球要浸泡在45℃~50℃的温水中,并且用外力使它悬浮在水中24h左右,然后撤去外力,挑出那些浮在水面或沉在水底的不合格胶球。因为浸水后的胶球比重应接近于水的比重,这样做使胶球不至于停留在凝汽器水室及管道的顶部。

(5)对于含有水草等杂质的循环水来说,二次滤网的清洗是一个难题。二次滤网本身虽然有反冲洗装置,但效果有时不佳。我们通过运行,总结出了一种清洗的方法(对小机组比较合适):在低负荷的状态下,凝汽器单侧运行,将凝汽器一侧的循环水出水阀关闭,让循环水充满这半侧凝汽器后,关闭循环水进水阀,然后迅速打开二次滤网的反冲洗阀,利用虹吸将附着在二次滤网外壁的杂物松动后冲走,最后再次开启循环水进水阀,利用二次滤网的蝶阀再次进行反冲洗,这样效果比较明显。

(卢伟 供稿)

生物质与煤混烧的燃烧特性研究 = **A Study of the Combustion Characteristics of Biomass and coal Mixed Firing** [刊, 汉] / LIU Hao, QIU Jian-rong, DONG Xue-wen, et al (National Key Laboratory of Coal Combustion under the Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 451 ~ 454

With the help of an integrated thermoanalyzer of the type STA 409C the characteristics of combustion were analyzed with respect to a mixed sample consisting of one type of coal and two kinds of biomass as well as a sample of the above items mixed in different proportions. The results of this analysis show that after the adding of biomass in the coal the combustion process can be viewed as distinctly divided into two stages with an ignition being realized ahead of the designated time. Meanwhile, better burn-off characteristics were obtained. As a result of the mixing of biomass and coal there emerged an increase in heat generation rate coupled with an enhanced utilization rate of the biomass. Moreover, through an in-depth analysis of thermogravimetric and differential-scanning calorimetry curves the combustion kinetic parameters of the above-cited samples were investigated. **Key words:** biomass, coal combustion characteristics, thermal analysis

煤粒燃烧表面灰层氧气质扩散系数试验研究 = **Experimental Study of Oxygen Mass-transfer Coefficient in a Surface Ash Layer during the Burning of Pulverized Coal** [刊, 汉] / ZHU Qun-yi, QIN Yu-kun, WU Shao-hua (School of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 455 ~ 457

Through the use of a thermal analysis technique an experimental study is conducted of the effect of ash layer porosity on oxygen mass-transfer characteristics. A formula has been derived for calculating the oxygen mass-transfer coefficient in a surface ash layer during the burning of pulverized coal. **Key words:** thermal analysis, ash layer porosity, oxygen mass-transfer coefficient

煤质成分在线检测技术的最新进展 = **Recent Advances in the On-line Detection Technology of Coal Elemental Composition** [刊, 汉] / SONG Zhao-long (Power Engineering Department, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096), JIN Jian (Nanjing Continental Zhongdian Science & Technology Co. Ltd., Nanjing, China, Post Code: 211100) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 458 ~ 461

The emergence of long-life and low-cost neutron tube products of electron-impulse type has played a significant role in the further advancement of a new-generation on-line analytical technology for coal elemental composition. By using the analytical technology of fast thermal neutron elements of the impulse type coupled with the application of multifarious nuclear reactions it is possible to analyze the coal elemental composition with a better accuracy. Moreover, the apparatus used also features a higher safety. After an exposition of the analytical theory of fast thermal neutron elements of the impulse type the authors describe two kinds of on-line detection system for the coal elemental composition, namely, the chute type and the belt type. **Key words:** fast neutron inelastic scattering, fast neutron capture, coal elemental composition

原煤可磨性与磨煤机最大出力探讨 = **Exploratory Investigation of Raw Coal Grindability and Coal Pulverizer Maximum Capacity** [刊, 汉] / SHEN Yue-liang (Guangdong Provincial Electric Power Testing Institute, Guangzhou, China, Post Code: 510600), LIN Zhi-ning (Guangzhou Zhujiang Power Plant, Guangzhou, China, Post Code: 511458), ZHAO Xiao-feng (Guangdong Zhanjiang Power Plant, Zhanjiang, China, Post Code: 524099) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 462 ~ 464

The maximum grinding capacity test results of a model RP783 race pulverizer installed at Zhujiang Power Plant was investigated along with those of a model DTM350/700 ball mill installed at Zhanjiang Power Plant. It has been found that the grindability index of some kinds of coal does not fully reflect their actual grinding capacity. After the cause of the low