

光电子智能无水选煤机

周春生^{1*}, 周卫兵², 周林英³

(1.湖南科技大学 物理学院, 湖南 湘潭 411201; 2.华菱湘钢检验处, 湖南 湘潭 411101;
3.湘潭市第2副食品公司, 湖南 湘潭 411200)

摘要:用原子序数选煤, 用光电子智能无水选煤机排研脱硫, 能减少水对环境的污染, 能节省能源和带来明显的经济效益. 介绍了A.爱因斯坦光电效应原理. 有关学者通过对 $\tau_a = CZ^4\lambda^3$ 公式的深入研究, 得出: 非金属碳(C)原子与绝缘体 $\text{SiO}_2(\text{s})$ 的硅原子(Si)、绝缘体 $\text{CaCO}_3(\text{s})$ 的钙原子(Ca)、绝缘体 $\text{FeS}_2(\text{s})$ 的铁原子(Fe)等多种元素的原子序数 Z^4 之比, 即 $1\ 296 : 38\ 416 : 160\ 000 : 456\ 976 = 1 : 30 : 124 : 353$ 的智能比值. 这种数据, 通过使用FH-1901型单道 γ 谱仪和FJ-374X探测器、多脉冲延时器“+”和高速电磁气阀, 很容易识别非金属碳纯煤C(s)、绝缘体硅石 $\text{SiO}_2(\text{s})$ 、石灰石 $\text{CaCO}_3(\text{s})$ 、黄铁矿硫 $\text{FeS}_2(\text{s})$ 等群体. 经研究并试验证明了光电子智能无水选煤机的应用.

关键词:光电子; 光电智能; 光电效应; 原子序数; 光电子智能选煤机

中图分类号:TD945 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2019)04-0065-08

On Photoelectric Intelligent Non-Water Coal Separator

Zhou Chunsheng¹, Zhou Weibing², Zhou Linying³

(1.School of Physics and Electronic Science, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. Inspection Office, Xiangtan Iron & Steel Co., Ltd. of Hunan Valin, Xiangtan 411101, China;
3. Xiangtan Second Non-staple Food Company, Xiangtan 411200, China)

Abstract: To separate coal by using atomic number and remove refuse discharging and desulfurize by using photoelectric intelligent non-water coal separator can reduce water pollution to the environment, save energy and bring forth obvious economic benefits. This paper introduces Albert Einstein's photoelectric effect theory. Through a deep research on the formula $\tau_a = CZ^4\lambda^3$, scholars have calculated such proportion of atomic number Z^4 between non-metallic atom and Si of insulator $\text{SiO}_2(\text{s})$, Ca of insulator $\text{CaCO}_3(\text{s})$, and Fe of insulator $\text{FeS}_2(\text{s})$ as $1\ 296 : 38\ 416 : 160\ 000 : 456\ 976 = 1 : 30 : 124 : 353$. By using the FH1901 single track Spectrograph, FJ-374X detector, multi-pulse delay “+” and high speed solenoid valve, it is easy to identify the C(s) of nonmetallic pure coal, insulator $\text{SiO}_2(\text{s})$, $\text{CaCO}_3(\text{s})$, and $\text{FeS}_2(\text{s})$. It has studied and tested the application of photoelectric intelligent non-water coal separator.

Keywords: photoelectron; photoelectric intelligent; photoelectric effect; atomic number; photoelectric intelligent coal separator

自从1895年W.C.伦琴发现X射线以来,为适应在线识别工艺发展的需要,1906年A.爱因斯坦(Albet Einstein)提出用光电效应在在线识别物料的光电效应原理,取代化学分析物料各成分的传统工艺.用原子序数选煤经过爱因斯坦公式、A.爱因斯坦光电效应定律、北京大学褚圣麟教授的吸收系数与波长及吸收物的原子序数的关系等,光电子智能无水选煤成为可能.

收稿日期:2019-09-18

*通信作者, E-mail:1196335617@qq.com

1 爱因斯坦公式阶段

1906年A.爱因斯坦提出,当频率为 ν 、能量为 $E=h\nu$ 的入射光子照射金属器件表面时,金属中的电子接收入射光子的全部能量 $h\nu$ 后,克服金属表面的脱出功 B ,以速度 V 飞出金属器件表面成为自由电子,A.爱因斯坦称该类电子为光电子 e^- ,按照能量守恒定律,A.爱因斯坦将光电效应原理表示为

$$h\nu = 0.5 \text{ mV}_m^2 + B. \quad (1)$$

近代物理学称式(1)为爱因斯坦公式.当光子能量 $E=h\nu$ 大于结合能 B 时,能发生光电效应,当光子能量 $E=h\nu$ 小于结合能 B 时,不能发生光电效应,称不能发生光电效应的频率为极限频率 ν_0 ;在国内外,人们用简单公式^[1-4]表达光电效应原理表式(1).1906年,人们还不知道原子由原子核和电子组成,A.爱因斯坦未指出光电子 e^- ,是原子内层轨道电子在接收入射光子全部能量 $h\nu$ 后,克服原子核库仑电场的束缚飞出原子发生光电效应的本质,是可以理解的.

2 A.爱因斯坦光电效应定律阶段

1907~1913年,R.A.密立根在完成基本电荷测试后,测得电子电荷的近似值 $e=1.622 \times 10^{-19} \text{ C}$,使人类首次看到电荷的分立量子特性.1916年R.A.密立根用远大于油滴实验的超高频($\gamma-\nu_0$)电源照射若干种金属器件表面,测得光电子 e^- 的最大动能 0.5 mV_m^2 与入射光子频率 ν 之间的一组线性关系:

$$0.5 \text{ mV}_m^2 = h(\nu - \nu_0). \quad (2)$$

在式(2)中,光电子 e^- 的最大动能与频率之差 $(\nu - \nu_0)$ 成正比,各条直线的比例常数都为普朗克常数 $h=6.626 \ 20 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$;R.A.密立根称式(2)为A.爱因斯坦光电效应定律,并声明他用实验证明了爱因斯坦光电效应原理,使A.爱因斯坦(Albert Einstein)于1921年获得诺贝尔物理学奖,R.A.密立根(Robert Andrews Millikan)也于1923年获得诺贝尔物理学奖.

3 吸收系数与波长及吸收物的原子序数的关系阶段

1916~1979年,我国北京大学褚圣麟教授在他编著的《原子物理学》^[5]的前两章中,详细阐明N.玻尔的原子结构和原子辐射,在W.泡利(Wolfgang Pauli)关于不相容原理的推理下,他总结了原子的电子层结构、各壳层容纳的最多电子数、原子基态的电子组态与X射线有关的能级,原子的K吸收限和L吸收限及M吸收限等,对金属铑(Rh)、金属镉(Cd)、金属铅(Pb)、金属铜(Cu)、金属银(Ag)等原子的光电效应试验数据,进行数值处理指出,光电效应中的光电子 e^- 是从金属原子内层轨道、并克服原子核的库仑电场束缚飞出原子的,得到吸收系数与波长 λ 及吸收限的原子序数 Z 的关系式为^[5]

$$\tau_a = CZ^4 \lambda^3. \quad (3)$$

式(3)是金属原子光电效应的正确表达式,式(3)仅涉及金属原子,未涉及多种绝缘体分子内原子的光电效应,使式(3)的应用范围很小.北京大学李星洪教授等将式(3)应用到辐射防护^[6],使式(3)的应用范围有所扩大,在1970~1981年,张家骅等用多种射线源进行试验,将金属原子的光电效应扩大到100种元素原子的光电效应几率,也未涉及双原子分子和多原子分子中原子的光电效应几率,将试验数据统计在《放射性同位素X射线荧光分析》^[7]中,为国内外学者提供了方便.

4 光电子智能无水选煤机的可行性

要使光电子智能无水选煤机能排除煤炭中绝缘体硅石 $\text{SiO}_2(\text{s})$ 、绝缘体石灰石 $\text{CaCO}_3(\text{s})$ 、绝缘体黄铁矿硫 $\text{FeS}_2(\text{s})$ 、绝缘体硫酸钙 $\text{CaSO}_4(\text{s})$ 等块状物料,就必须将式(3)表示的金属原子光电效应几率 $\tau_a = CZ^4 \lambda^3$,扩大到非金属碳(C)原子、绝缘体硅石中的硅(Si)原子、绝缘体石灰石中的钙(Ca)原子、绝缘体黄铁矿硫中的铁(Fe)原子等的光电效应几率 τ_a ;并通过光电子智能无水选煤机的实验室小试、工业中试、示范工程建设的实验与试验数据,去检验式(3)在非金属碳(C)和绝缘体技术领域的正确性.我们在1994~

2006年研制光电子智能无水选煤机的实验证明:按照式(3)将非金属碳(C)原子与绝缘体 $\text{SiO}_2(\text{s})$ 的硅原子(Si)、绝缘体 $\text{CaCO}_3(\text{s})$ 的钙原子(Ca)、绝缘体 $\text{FeS}_2(\text{s})$ 的铁原子(Fe)等多种元素的原子序数 Z^4 的比较,得到 $1\ 296 : 38\ 416 : 160\ 000 : 456\ 976 = 1 : 30 : 124 : 353$ 之比.从而,因 ^{241}Am 的59.5 keV射线的波长 λ 已定,由式(3)求得的上述具有智能比值(1 : 30 : 124 : 353)的数据,使用FH-1901型单道 γ 谱仪和FJ-374X探测器、多脉冲延时器“+”和高速电磁气阀,很容易识别非金属碳纯煤C(s)、绝缘体硅石 $\text{SiO}_2(\text{s})$ 、石灰石 $\text{CaCO}_3(\text{s})$ 、黄铁矿硫 $\text{FeS}_2(\text{s})$ 等,并将上述块状绝缘群体排除出原煤群体.

上述智能比值(1 : 30 : 124 : 353)是伴随着光电子 e^- 的出现而产生、伴随着光电子 e^- 的消失而停止,我们称该类识别为“光电子智能识别”;为了与人工智能比较方便,将光电子智能简称为光电智能.当价电子和外层轨道电子填充K壳层或L壳层轨出现的空位时,上述各元素的原子都对辐射K系特征X射线和L系特征X射线,当气体分子中某原子发生光电效应时,其价电子会按照选择定则跃迁到分子中原子的内层轨道空位,使分子解体;例如用 ^{241}Am 密封源的59.5 keV软X射线照射煤矿井下的甲烷 $\text{CH}_4(\text{g})$ 气体,甲烷分子 $\text{CH}_4(\text{g})$ 发生光电效应,碳原子的价电子跃迁到内层轨的空位,导致甲烷分子解体,达到治理煤矿甲烷 $\text{CH}_4(\text{g})$ 浓度超标发生瓦斯爆炸的目的;用 ^{241}Am 源的59.5 keV的X射线照射燃煤电站烟道气中 $\text{CO}_2(\text{g})$,该分子中的碳原子(C)、氧原子(O)的价电子都会脱离 $\text{CO}_2(\text{g})$ 分子中的碳原子(C)和氧原子(O),使 $\text{CO}_2(\text{g})$ 分子解体为电离态碳原子 C^{4+} 、氧气等离子体 O^{2+} ,再经物理还原部件对上述正离子进行还原,得到循环燃烧的炭黑(C),将还原的再生 $\text{O}_2(\text{g})$ 返还到大气中,使燃煤电站的化学需氧量趋于零,按照文献[5]第274页表9.1的试验数据,再生 $\text{O}_2(\text{g})$ 释放的结合能 $\Delta_f H_m^\ominus = -490.2\ \text{kJ/mol}$,能增加燃煤电站的发电量.

光电效应辐射的K系特征X射线或L系特征X射线,继续被物料中的原子吸收产生次级光电子 e^- 和次级K系特征X射线或L系特征X射线,直到K系特征X射线或L系特征X射线的能量 $h\nu$ 小于原子轨道电子的结合能为止;从而将X- γ 射线的能量 $E = h\nu$ 转化为有直接电离本领的 β 粒子(光电子 e^-)的能量,59.5 keV的X射线使具有一定厚度和粒度的煤炭和矿产品的原子都快速发生不同几率 τ_a 的光电效应,在 $10^{-9}\ \text{s}$ 时间内释放有直接电离本领的光电子 e^- ;1979年国际会议发布的数据,光电子 e^- 等单个电荷(基本电荷)的量值为 $e^- = -1.602\ 189\ 2 \times 10^{-19}\ \text{C}$,其近似值为 $e^- = -1.602 \times 10^{-19}\ \text{C}$ [8],

在光电效应中光电子 e^- 的延时检测中,美国测得光电子 e^- 的延迟时间约为纳秒($10^{-9}\ \text{s}$)级[9],中国测得光电子 e^- 的延迟时间在 10^{-9} [10]以下,在该项测量中的测量精度比文献[9]高1个数量级.

按照国际X射线和镭防护委员会(简称ICRP)和国际核咨询组(INSAG)的核安全原则,从事X射线源装置或设备的职业人员的年均有效剂量限值为20 mSv,公众的年均剂量限值为1 mSv[11],并以此年均剂量作为国家辐射和辐射源的基本安全标准;1940年人们用中子 ${}_0^1\text{n}$ 照射 ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ 核素,容易得到 ${}_{95}^{241}\text{Am}$ 源[11],使得 ^{241}Am 源体积很小.

1999年8月12日湖南省劳动卫生职业病防治研究所,按ICRP和INSAG核安全原则,对光电子智能选煤机进行放射防护测量,该选煤机各个部件外表面5 cm处的年均剂量限值均低于1 mSv[12],该选煤机无X射线泄漏.2004年4月22日湖南省劳动卫生职业病防治所检测光电子智能选煤机工作场所,该场所辐射水平符合国家《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)规定要求[13].

光电效应延迟时间小于 $1 \times 10^{-9}\ \text{s}$,国产FJ-374X探测器的延迟时间为 $1 \times 10^{-6}\ \text{s}$,分选块煤的粒度通常为200~30 mm,光电智能排矸器击打硅石 $\text{SiO}_2(\text{s})$ 的时间为毫秒($10^{-3}\ \text{s}$)级;为确保排矸器击打硅石 $\text{SiO}_2(\text{s})$ 的时间约1 ms,图1中的无水选煤输送机的精块煤、硅石 $\text{SiO}_2(\text{s})$ 块或无机硫 $\text{CaSO}_4(\text{s})$ 块的平动速度调整为0.75~0.9 m/s,排矸器击打硅石 $\text{SiO}_2(\text{s})$ 和无机硫 $\text{CaSO}_4(\text{s})$ 块的长度为1.5~1.8 mm.工业机器人和工业互联网采用的可编程逻辑控制器(PLC),其延时间约50 ms,使排矸器击打硅石 $\text{SiO}_2(\text{s})$ 的长度约45 mm,使得20~40 mm,40~80 mm,80~120 mm,120~160 mm的精煤C(s)块和精矿块,都被排除到硅石 $\text{SiO}_2(\text{s})$ 块和无机硫 $\text{CaSO}_4(\text{s})$ 块等固体废渣中,大幅度降低精煤产率和矿产品的产率,使煤矿和矿山

的宝贵资源大量流失到固体矿渣中;如果现在要将人工智能体系用于智能无水选煤选矿设备,可编程逻辑控制器(PLC)的响应时间必须提到微秒(10^{-8} s)级,使得光电子智能无水选煤机暂时还不能使用人工智能系统.

5 光电子智能无水选煤机的实验阶段

光电子智能无水选煤机实验室样机(单通道煤矸石分选机),于1994年8月正式开展实验室的研制工作.

5.1 辐射防护要求进行射线源的选择

5.1.1 放射源的选择

从 $^{55}_{26}\text{Fe}$, $^{238}_{94}\text{Pu}$, $^{137}_{55}\text{Cs}$, $^{60}_{27}\text{Co}$, $^{241}_{95}\text{Am}$, $^{244}_{96}\text{Cm}$ 等6种放射源中选择适合无水分选煤炭和其他矿产品的放射源.经调查审核^[5,6],只有人造元素 $^{241}_{95}\text{Am}$ 容易与有大数据功能的多脉冲延时器“+”配套,将各种块状绝缘体排除出原煤群体,使 $^{241}_{95}\text{Am}$ 源成为光电子智能无水选煤选矿工艺的光电效应优良激发源.

5.1.2 选取 $^{241}_{95}\text{Am}$ 人工放射性核素作密封源的依据

$^{241}_{95}\text{Am}$ 密封源由大储量的铀-238($^{238}_{92}\text{U}$)经慢中子 ^1_0n 照射生成大储量中间产物 $^{239}_{92}\text{U}$,大储量中间产物 $^{239}_{92}\text{U}$ 通过 β^- 衰变生成第2大储量中间产物 $^{239}_{93}\text{Np}$,该核反应方程式为 $^{239}_{92}\text{U}\rightarrow^{239}_{93}\text{Np}+\beta^-$ (半衰期23 min),第2大储量中间产物 $^{239}_{93}\text{Np}$ 经 β^- 衰变生成大储量的 $^{239}_{94}\text{Pu}$,该核反应方程式为 $^{239}_{93}\text{Np}\rightarrow^{239}_{94}\text{Pu}+\beta^-$ (半衰期2.3 d);大储量的 $^{239}_{94}\text{Pu}$,再经两次慢中子 ^1_0n 照射得到大储量 $^{241}_{95}\text{Am}$ 密封源.现有资料统计, $^{235}_{92}\text{U}$ 的储量仅够当今裂变核电站燃用几百年,而 $^{238}_{92}\text{U}$ 的储量是 $^{235}_{92}\text{U}$ 储量的140倍;采用大储量的 $^{241}_{95}\text{Am}$ 源将煤矿的甲烷 $\text{CH}_4(\text{g})$ 加工成再生 $\text{H}_2(\text{g})$,将燃煤电站和工业窑炉排放的 $\text{CO}_2(\text{g})$ 加工成再生炭黑(s)和再生 $\text{O}_2(\text{g})$,实现煤炭循环燃烧和化学需氧量趋于零,达到能源自给自足;再将 $^{137}_{55}\text{Cs}$ 密封源参与燃煤电站和工业窑炉排放的 $\text{CO}_2(\text{g})$ 电离,将使我国能源自给自足的时间更长.因此,全球必须尽快改变能源生产方式,更改能源消费结构,缓改全球变暖的恶劣趋势.

5.1.3 确定核仪器的型号规格和多脉冲延时器“+”

购置北京核仪器厂生产的FH-1901单道 γ 谱仪1台套,该核仪器既可作计数率仪用,通过再线检测K系特征X射线和L系特征X射线的能量,确定煤矿和其他矿山矿产品的种类.现有技术的延时器只能同时对单个脉冲进行延时,延时长度仅为1微秒左右,不能采用;自己研制具有大数据功能的简易型多脉冲延时器“+”,单台FH-1901型单道 γ 谱仪和简易型多脉冲延时器“+”如图1所示.图1西侧为简易型多脉冲延时器“+”,该两部件的外壳相同.

在实验中按照ICRP和INSAG两个国际核安全机构的基本安全标准,用光电子智能无水选煤机实验样机的FJ-374X探测器,对该实验室样机内安装的IV类30毫居里 $^{241}_{95}\text{Am}$ 密封源,对样机各外表面的电离辐射水平,经过长期反复进行自检合格后,再进行光电子智能的技术设计,用国产元件和国内市场能采购到的信息元件,自制具有大数据功能的简易型多脉冲延时器“+”,对全套设备的延时精度进行全面调整,使排矸部件同时具有排矸脱硫的功能,即只要能排矸就一定能脱硫;到1997年2月1日完成实验室研制.

该实验室样机宽度为0.3 m,选煤胶带送料速率为0.7 m/s;原煤直径分为3档:50~75 mm,75~100 mm,100~130 mm,检测结果:一次性排矸率的平均值为75%,精煤回收率的平均值95%.



图1 单台FH-1901型单道 γ 谱仪和简易型多脉冲延时器“+”

6 光电子智能无水选煤机的试样机中试

光电子智能无水选煤机的工业中试样机为两个通道,其左边通道的结构如图2所示.在图2的接地源容器和接地源容器盖中,安装的X射线源是两个IV类30毫居里 ^{241}Am 密封源.按照文献[5],[6]数据, ^{241}Am 密封源的59.5 keV的X射线,在每秒钟时间内,有约 10^{10} 个能量为59.5 keV的光子,使煤炭各成分的 10^{10} 个原子发生光电效应,每个原子发生光电效应的几率 $\tau_a = CZ^4\lambda^3$.在图2中,物料输送机以0.9 m/s的速率带动纯煤C(s)块、硅石 $\text{SiO}_2(\text{s})$ 块、黄铁矿硫 $\text{FeS}_2(\text{s})$ 块自东向西作匀速平动, ^{241}Am 密封源辐射的59.5 keV的X射线,分别先后从下向上照射纯煤C(s)块、硅石 $\text{SiO}_2(\text{s})$ 块、黄铁矿硫 $\text{FeS}_2(\text{s})$ 块,纯煤的原子序数 $Z_1=6, Z_1^4=1\ 296$;硅石 $\text{SiO}_2(\text{s})$ 的原子序数 Z_2 取14, $Z_2^4=38\ 416$;黄铁矿硫 $\text{FeS}_2(\text{s})$ 的原子序数 Z_3 取26, $Z_3^4=456\ 976$; $Z_1^4 : Z_2^4 : Z_3^4 = 1 : 30 : 353$.该连续比说明被照射吸收物的原子发生光电效率的几率,与被照射原子的原子序数 Z^4 成正比;在多原子分子中,原子序数较大的原子发生光电效应的几率,比其他原子发生光电效应的几率大得多,实验室小试证明,式(3)的光电效应数学表达式的4个技术参数,比的数学表达式精确得多^[1-4].在图2中,安装在接地源容器和接地源容器盖中的 ^{241}Am 密封源,到FJ-374X探测器下端晶体的竖直距离约320 mm,晶体的直径 $D=60$ mm,该立体角 $d\Omega=900\pi(\text{mm}^2)/102\ 400(\text{mm}^2)=0.008\ 8\pi$,是 4π 球面度的0.22%; ^{241}Am 源的59.5 keV的X射线激发空气的光电效应,与纯煤C(s)块、硅石 $\text{SiO}_2(\text{s})$ 块、黄铁矿硫 $\text{FeS}_2(\text{s})$ 颗粒激发的K系特征X射线和L系特征X射线比较,可忽略不计;由于 ^{241}Am 源在 α 衰变过程中产生的带正电 α 粒子,都被接地源容器和接地源容器盖还原为氦气 $\text{He}(\text{g})$,使 α 粒子不能射出接地源容器和接地源容器盖,就成为无电离能力的氦气 $\text{He}(\text{g})$; ^{241}Am 源在衰变过程中发生4次 β 衰变,都被厚度大于射程的接地源容器和接地源容器盖屏蔽,将 β 粒子屏蔽在接地源容器中;另一方面,FJ-374X探测器的晶体只有探测X射线的功能,不能探测 α 粒子和 β 射线,使得光电子智能无水选煤机中使用FJ-374X探测器是可行的.试验证明,在不太长的若干星期内的时间里,可暂用FJ-374探测器替代FJ-374X探测器.

通过反复试验^[7]将元素原子的结合能 B ,都转化为元素的K吸收限和元素的L吸收限^[1-4],也就是将光电子动能 $E=h\nu-B$ 转化为 $E=h\nu-(\text{元素的K吸收限}+\text{元素的L吸收限})$, ^{241}Am 源的59.5 keV的X射线,使纯煤C(s)块、硅石 $\text{SiO}_2(\text{s})$ 块、石灰石 $\text{CaCO}_3(\text{s})$ 块、黄铁矿硫 $\text{FeS}_2(\text{s})$ 块等,发生光电效应原子的主要K系特征X射线和L系特征X射线的能量都有确定值,并将他们测得的若干种结合能扩展到 $Z_1=1, Z_2=2, \dots, Z_{100}=100$ 的元素原子的吸收限,从而,在实验室探索和科学试验中,能精确测定100种元素的K吸收限和L吸收限、100种元素的K系特征X射线和L系特征X射线的能量. ^{241}Am 源59.5 keV的X射线的能量很难激发 $Z=69$ 号元素发生光电效应,使得光电子智能无水选煤机的K吸收限只能选取原子序数 $Z=68$ 的金属铈(Er),并精确计算接地源容器、接地源容器盖、接地探测器屏蔽室、隔离屏蔽板等金属和非金属屏蔽材料的厚度,确保光电子智能无水选煤机各部件的外表面和生产使用场地的X射线电离辐射防护设备设施,都符合国家《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)规定要求^[12,13].

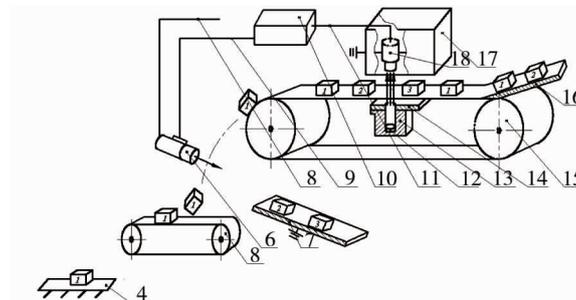
在图2中,(核仪器+)由核仪器和多脉冲延时器“+”组成,其中的核仪器为FH-1901型单道 γ 谱仪,用于分析煤矿和矿山要识别分选的元素K系特征X射线的能量及L系特征X射线的能量,从而确定X射线源 ^{241}Am 的活度,或者选取 ^{137}Cs 密封源作重金属、或贵金属矿产品的识别源.多脉冲延时器“+”是一种同时将纯煤C(s)脉冲、硅石 $\text{SiO}_2(\text{s})$ 脉冲、黄铁矿硫 $\text{FeS}_2(\text{s})$ 脉冲、黄铜矿 $\text{CuFeS}_2(\text{s})$ 脉冲、砷钴矿(Co, Ni, Fe)As(s)脉冲、方铅矿 $\text{PbS}(\text{s})$ 脉冲等脉冲序列进行多个脉冲延时的延时器,其延时的时间间隔从微秒(10^{-6}s),毫秒(10^{-3}s),秒,数10秒或数分钟,并从这些脉冲中选取特殊值,作为排除固体杂质提取精煤和精矿的技术参数.这种经过改进的多脉冲延时器“+”,其体积约为简易多脉冲延时器“+”的1%,将该多脉冲延时器“+”安装在图3表示的FH-1901型单道 γ 谱仪中.

在图2中,高速电磁气阀由阀体、阀焊、喷嘴组成,阀体的西端与高压空气管连通固接后,高压空气管再与空气压缩机的输出端口连通固接,阀体中部与脱硫排矸信号线的南端连接,脱硫排矸信号线的北端与

多脉冲延时器“+”的输出端子连接,多脉冲延时器“+”输入端子与 FH-1901 型单道 γ 谱仪分析器的输出端子连接, FH-1901 型单道 γ 谱仪的输入端子,与探测器信号线的西端连接,探测器信号线的东端与 FJ-374X探测器的顶端连接; FJ-374X 探测器晶体的底端,到纯煤 C(s)块、硅石 $\text{SiO}_2(\text{s})$ 块、黄铁矿硫 $\text{FeS}_2(\text{s})$ 颗粒等上表面的距离为 30 mm,确保被分选物料的上表面与 FJ-374X 探测器的下端表面不碰撞;两个 FJ-374X 探测器的轴线都竖直向下并且相互平行,两个 ^{241}Am 源之间的最小距离为 300 mm,确保两块 200 mm 的块煤互不相碰,确保两个 ^{241}Am 源的 X 射线辐射互相不干扰.当原煤中出现大于 200 mm 以上的大块硅石 $\text{SiO}_2(\text{s})$ 或石灰石 $\text{CaCO}_3(\text{s})$ 要排除时,高速电磁气阀已不能将大块硅石和石块排除出去,此时必须改用金属结构的冲击连杆,才能排除大块硅石和石块.

设置在图 2 东端的列队给料机,通过振幅调节,使纯煤 C(s)块、硅石 $\text{SiO}_2(\text{s})$ 块、黄铁矿硫 $\text{FeS}_2(\text{s})$ 颗粒等块状物料之间的距离基本为某个常数,确保高速电磁气阀的高压气体能排除大块硅石 $\text{SiO}_2(\text{s})$,确保冲击连杆能排除 250 mm 的大块硅石 $\text{SiO}_2(\text{s})$.

在图 2 的下部,接地滑板的接地电线的接地电阻必须小于 $4\ \Omega$,确保矽石 $\text{SiO}_2(\text{s})$ 块、黄铁矿硫 $\text{FeS}_2(\text{s})$ 块等绝缘体物料,在到达地面之前都转化为电中性的矽石块和电中性的黄铁矿硫块.



1-纯煤块;2-矽石块;3-黄铁矿硫块;4-大地;5-精煤输送机;6-高速电磁气阀;7-接地滑板;8-高压空气管;9-脱硫排矽信号线;
10-核仪器+;11-探测器信号线;12- ^{241}Am 密封源;13-接地源容器;14-接地源容器盖;15-物料输送机;16-给料列队机;
17-接地探测器屏蔽室;18-FJ-374X 探测器

图 2 光电子智能无水选煤机

按照图 2 进行如下操作:首先预热核仪器 15 min,测量天然本底;将 20~160 mm 块煤分为 20~40 mm, 40~80 mm, 80~120 mm, 120~180 mm 等 4 个粒度级进行无水分选;启动精煤输送机和物料输送机,调整它们的运行速率为 0.9 m/s,其运行速率是英国 X 射线选煤机运行速率的 3 倍^[14];打开接地源容器盖;启动给料列队机,将纯煤块、矽石块、黄铁矿硫块装入给料列队机中,确保纯煤块与矽石块不重叠;调整多脉冲延时器“+”的技术参数,使 90%的矽石块和黄铁矿硫块被高速电磁气阀排除到接地滑板上,并转化为电中性物料,确保光电子智能无水选煤工业运行试验的脱硫降灰率为 90%;调整图 3 所示的 FH-1901 型单道 γ 谱仪的技术参数,使高速电磁气阀的高压气体不排打纯煤块,只排打矽石块和黄铁矿硫块,32 d 的工业中试证明:光电子智能无水选煤机不使用洗水,具有良好耐寒防冻性能;其脱硫降灰率为 90%,比湿法洗煤厂高 20~40 个百分点;工业运行试验的精煤回收率为 98%;光电子智能无水选煤的耗电率为 $2\ \text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$,为湿法洗煤厂的 1/3 左右;单个通道无水选煤的效率为 15 t/h.

7 光电子智能无水选煤机的示范工程建设

光电子智能无水选煤机的示范工程建设的年入选能力为 8 万 t,煤质包括中等可选原煤和难选块煤.重新购置 2 台套 FH-1901 型单道 γ 谱仪,自制 2 台套多脉冲延时器“+”,并安装 FH-1901 型单道 γ 谱仪中,如图 3 所示.

原煤输入、精煤输送、矽石块和黄铁矿的倾斜式物料输送机共 2 台套.块煤和原煤的无水分选主机的设备结构,与工业中试样机的图 2 相同.块煤的入选粒度为 200~20 mm;原煤中的粉煤由导体纯碳 C(s)

小粒、绝缘体硅石 $\text{SiO}_2(\text{s})$ 小粒、绝缘体石灰石 $\text{CaCO}_3(\text{s})$ 小粒、绝缘体黄铁矿硫 $\text{FeS}_2(\text{s})$ 小粒等组成, ^{241}Am 密封源辐射的 59.5 keV 的 X 射线激发的光电效应,很容易使上述各小颗粒中原子的 K 壳层和 L 壳层释放光电子 e^- ,导致上述各颗粒中原子的 K 壳层和 L 壳层出现空位,释放碳 C(s)、氧(O)、硅(Si)、硫(S)、钙(Ca)、铁(Fe)等元素对应的 K 系特征 X 射线,干扰 FJ-374X 探测器的计数率,使精煤回收率降低;因此,将原煤入选粒度上限由 200 mm 降到 140 mm,将原煤入选粒度确定为 140~0 mm.



图3 双台 FH-1901 型单道 γ 谱仪和双台多脉冲延时器“+”

购置 30 毫居里 ^{241}Am 密封源和 50 毫居里 ^{241}Am 密封源各 1 枚,自制接地源容器 2 个,接地源容器盖 2 件;按照国家关于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2006)的规定,2005 年 5 月 17 日,将两个 ^{241}Am 密封源转移到示范工程,进行了防护检测和生场地电离辐射检测,结论符合国家安全基本标准.

自制的 1 台套倾斜式物料输送机 and 双通接地探测器屏蔽室如图 4 所示,图 4 西端为黄色接地探测器屏蔽室,两个 FJ-374X 探测器安装在接地探测器屏蔽室中.自行设计和合作建设的运行车间 120 m^2 栋,自制的倾斜式物料输送机 2 台套,如图 5 所示.

自制的蓝色接地源容器安装在双通道送料胶带中间,送料胶带被两个滚筒均匀平直拉紧,主动滚筒安装在送料胶带的东端,从动滚筒安装在送料胶带内的西端, ^{241}Am 密封源安装在蓝色的接地源容器中,如图 6 所示,确保机电式排矸机将 90% 以上的矸石块排除出去.自制的双通道机电式排矸机 1 台套,如图 7 所示.



图4 倾斜式物料输送机和接地探测器屏蔽室



图5 斜式物料输送机和 120 m^2 建筑物



图6 ^{241}Am 接地源容器与双通道送料胶带



图7 双通道送料胶带与双通道排矸机

该示范工程的建设工程期和运行时间,从 2005 年 5 月 17 日开始,到 2006 年 12 月 14 日结束,历时 546 d.在共同验收中,第 1 项,外观、指示灯、警示牌合格;第 2 项,送料胶带速率的平均值为 0.816 m/s ;第 3 项,识别分

选块煤各成分总时间的平均值为 1.12 s;第 4 项分选块煤的入选粒度上下限的平均值为 210~20.6 mm;第 5 项,精块煤与矸石混合时,矸石排除率的平均值为 85%,精块煤回收率为 98%;第 6 项,无机硫块与精块煤混合时,无机硫块脱除率和精块煤回收率分别为 88%和 97.5%;第 7 项,分选块煤的耗电率的平均值为 1.91 t/(kW·h);第 8 项,单个通道选煤效率的平均值为 15.8 t/h;根据国家关于煤炭洗选工程设计规范标准 GB50359-2005 规定,选煤厂每年工作 330 d,设备每天运行 16 h,光电子智能无水双通道块煤机的年入选能力为 8.34 万 t;第 9 项,分选 140~0 mm 的原煤,矸石排除率为 83%~83.5%,粗精煤回收率为 91.5%~92%;该技术指标下降,是粉煤中纯煤 C(s)细粒、硅石 SiO₂(s)细粒、石灰石 CaCO₃(s)细粒、黄铁矿硫 FeS₂(s)细粒辐射的 K 系特征 X 射线、L 系特征 X 射线干扰的结果。第 10 项,放射性防护检测结果符合 ICRP 和 INSAG 核安全标准^[12,13]。

8 结论

1) 使用²⁴¹Am 密封源只能无水分选原子序数 $Z_1 = 6$ 的煤炭~原子序数 $Z_2 = 68$ 的铒(Er)的矿产品。

2) 使用¹³⁷Cs 密封源能无水分选原子序数 $Z_3 = 69$ 的金属铟(Tm)矿产品~原子序数 $Z_4 = 82$ 金属铅(Pb)的铅矿(PbS)等矿产品,其中含盖原子序数 $Z_5 = 79$ 的黄金(Au)、原子序数 $Z_6 = 78$ 的铂(Pt)、原子序数 $Z_7 = 74$ 的钨(W)等贵金属和重金属;由于¹³⁷Cs 的 γ 射线能量为 662 keV,该类选矿设备的接地源容器和各个部件的电离辐射防护层要重新设计。

3) 如果要实现人工智能无水选煤选矿,现有的可编程逻辑控制器 PLC 的响应时间必须提高 10^{-6} s。

4) 在现有技术条件下使用多脉冲延时器“+”,可以实现光电智能无水选煤选矿。

参考文献:

- [1] 凯格纳克 B,裴贝-裴罗拉 J-C.近代原子物理学(上)[M].张恽慈,俞雪珍,译.北京:科学出版社,1980.
- [2] Whitehouse W J, Putman J L.放射性同位素[M].汤良知,译.上海:上海科学技术出版社,1958.
- [3] 哈里德 D,瑞斯尼克 R.物理学(第二卷)[M].李仲卿,等,译.北京:科学出版社,1979.
- [4] 母国光,战元龄.光学[M].北京:人民教育出版社,1979.
- [5] 褚圣麟.原子物理学[M].北京:高等教育出版社,2010.
- [6] 李星洪.辐射防护基础[M].北京:原子能出版社,1982.
- [7] 张家骅,徐君权,朱节清.放射性同位素 X 射线荧光分析[M].北京:原子能出版社,1981.
- [8] 赵凯华,陈熙谋.电磁学[M].北京:高等教育出版社,1985.
- [9] Gautrau R, savin W.THEORY AND PROBLEMS OF MODERN PHYSICS[M]. New York:McGraw-Hill,1978.
- [10] 华东师大教材编写组.光学教程[M].北京:高等教育出版社,1989.
- [11] 王建龙,何仕均.辐射防护基础教程[M].北京:清华大学出版社,2015.
- [12] 喻晓彩,许志勇.放射防护测量报告[z].长沙:湖南省劳动卫生职业病防治研究所,1999.
- [13] 谭雄,向佳民.检测报告(TEST REPORT)[z].长沙:湖南省劳动卫生职业病防治所,2004.
- [14] 詹金斯 D E,高夫 P B,金 H G,等.X 射线选煤机[J].选矿技术,1973(3):35-44.