

矿石品位仪的测量结构优化

龚亚林¹, 张 伟¹, 赵中华², 吴志强¹, 宋青锋¹, 陶俊涛¹

(1. 丹东东方测控技术有限公司, 辽宁 丹东 118002; 2. 辽宁地质工程职业学院 机电系, 辽宁 丹东 118008)

摘要: 为实现矿石品位仪的结构优化, 利用蒙特卡罗 (MCNP) 软件, 构建几何模型, 模拟伽马射线在矿石品位仪系统内的输运过程。比较两种伽马放射源⁶⁰Co 和²²⁶Ra 的测量效果差异, 并分析了放射源与伽马探测器安装位置对测量效果的影响。结果表明, 提高矿石品位仪测量效果的有效手段主要有: 采用²²⁶Ra 放射源取代⁶⁰Co 放射源; 减小探测器与放射源距离; 放射源与物料的距离调整为约 30 cm。

关键词: ⁶⁰Co; ²²⁶Ra; 矿石品位仪; 伽马放射源; 测量结构; 优化

中图分类号: R817 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7512(2009)02-0123-05

Optimization on the Structure of Ore Grade Analyzer

GONG Yan-lin¹, ZHANG Wei¹, ZHAO Zhong-hua²,
WU Zhi-qiang¹, SONG Qing-feng¹, TAO Jun-tao¹

(1. Dandong Dongfang Measurement & Control Technology Co. Ltd., Dandong 118002, China;
2. Liaoning Engineer Geology Vocational College, Dandong 118008, China)

Abstract: The MCNP software was used to simulate gamma reaction in a realistic geometric model of ore grade analyzer to optimize the analyzer's structure design. The measurement performance on the two kinds of gamma radiation resource, ⁶⁰Co and ²²⁶Ra was compared, and the effect to measurement caused by installing location between radioactive resource and gamma detector was analyzed. As a result, there were three methods to improve the measurement performance for the ore grade analyzer: substituting ²²⁶Ra for ⁶⁰Co radioactive, reducing the distance between detector and radioactive source, adjusting the distance between radiative source and material to 30 cm around.

Key words: ⁶⁰Co; ²²⁶Ra; ore grade analyzer; gamma radioactive source; measurement structure; optimize

1 矿石品位仪测量原理

矿石品位仪主要利用电子对湮灭效应。用高能伽马射线照射矿石, 当伽马射线的能量大于

2 个电子的静止质量对应的能量时, 即 $E_\gamma > 1.022 \text{ MeV}$, 将会产生电子对效应, 生成正、负电子对。电子对效应生成的正电子很不稳定, 它很

快和周围的其他负电子产生湮没辐射,生成一对方向相反、能量相等($E_{\gamma}=0.511\text{ MeV}$)的伽马光子。测定湮没辐射的强度就可得到电子对的产生几率,其几率又和矿石中的金属含量有关^[1-2]。在矿石厚度足够厚,矿石密度、粒度基本不变时,品位计算的公式为: $PW=A \cdot X^2+B \cdot X+C$,式中。 PW 为矿石品位; A 、 B 、 C 为系数; X 为电子对峰计数。

在矿石品位仪测量系统中,影响湮没辐射测量的主要因素有:伽马放射源的种类和强度,伽马探测器安装位置选择,放射源与物料距离等。本研究利用蒙特卡罗(MCNP)软件,构建几何模型,对矿石品位仪测量系统进行模拟计算,分析这几个因素对系统测量性能的影响。

2 MCNP 软件构建几何模型

首先根据实验研究目标和需要分析的问题建立起合理的结构模型,这样能够摒弃不必要的外界因素的影响,有针对性地对结构实行优化,提高装置的性能。所谓合理的结构模型,是指既能反映实验装置的主要特性,又能避免对要分析问题构成干扰的不确定因素的影响。例如,矿石品位仪在测量过程中主要的不确定因素影响有:装置外壳对伽马射线的散射作用、皮带支架对伽马射线的散射作用、皮带运行过程中的震动影响,以及温度引起伽马探测器的探测效率变化和增益改变等^[4]。如果建立起简易、合理的矿石品位仪模拟装置,在模拟计算的过程中,这些干扰因素都可以排除。在此前提下,利用 MCNP 软件,建立了矿石品位仪模拟实验装置,如图 1 所示。

此矿石品位仪简易模拟装置主要由放射

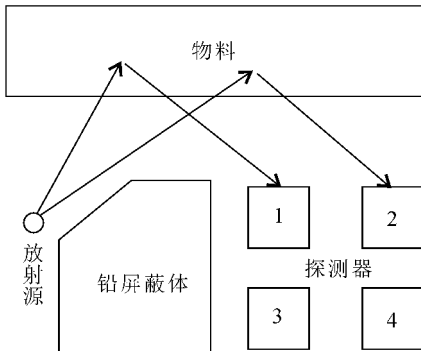


图 1 矿石品位仪模拟实验装置示意图

源、铅屏蔽体、物料和伽马探测器几部分组成。伽马放射源为 ^{60}Co 和 ^{226}Ra 两种,伽马探测器为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ NaI 探测器。伽马放射源与探测器之间用铅屏蔽体隔开。为了研究伽马探测器安装位置对电子对峰的测量效果影响,本工作选取了 4 个不同安装位置比较它们的测量效果,图 1 中 1、2、3、4 为标记的位置。

蒙特卡罗模拟的大致过程为:MCNP 软件生成随机数,实现对已知分布的抽样,模拟跟踪伽马射线在测量系统内的输运过程,最后在探测器区域记录模拟的探测结果。伽马运输的路径大致是:放射源按 ^{60}Co 或 ^{226}Ra 能量分布谱各向同性发射,其发射的高能伽马射线(大于 1.02 MeV)与物料中的原子发生电子对湮灭效应,产生 0.511 MeV 的伽马射线,这种能量的伽马射线被处于位置 1、2、3 或 4 的伽马探测器接收,形成电子对峰。为了避免放射源放射的伽马射线直接入射到探测器,被探测器记录而对电子对峰计数形成干扰,放射源右侧放置铅屏蔽体,用以屏蔽直射入伽马探测器的伽马射线。

3 探测器所探测的伽马谱

采用 MCNP 软件,使用 F8 计数器记录 NaI 探测器内的沉积能量谱,根据源强,将 F8 计数乘以源强系数,得到各种能量射线的相对计数,即探测器的探测伽马谱。

图 2 为蒙特卡罗模拟装置采用 ^{60}Co 放射源,探测器处于位置 1 得到的伽马谱形。图 3 为蒙特卡罗模拟装置采用 ^{226}Ra 放射源,且探测器处于位置 1 处得到的伽马谱形。由图 2 和图 3 的伽马谱形可以看出,它们的共同特点是,在 0.4 MeV 以下的能量区域为康普顿散射平台, 0.4 MeV 以上的能量区域,出现一个以 0.511 MeV 能量为中心的高斯型峰。这个高斯峰为电子对峰,是放射源放出的伽马射线与物料发生电子对湮灭效应生成的 0.511 MeV 光子被探测器接收而形成。

比较图 2 和图 3 的电子对峰(0.511 MeV)可知,采用 ^{226}Ra 放射源得到的伽马谱的电子对峰计数是 ^{60}Co 放射源得到的伽马谱的电子对峰计数的 20 多倍。

下面从 ^{60}Co 和 ^{226}Ra 放射源的发射能谱上分析两种放射源的差异。 ^{60}Co 主要发射 1.173 MeV 和 1.332 MeV 两种能量的伽马射

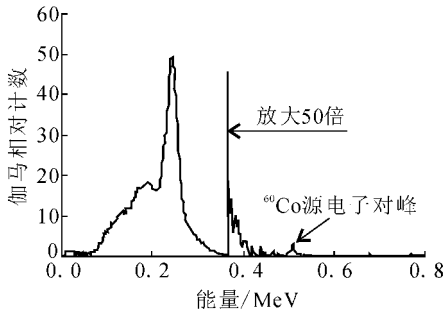


图 2 MCNP 模拟矿石品位仪使用⁶⁰Co 源得到的伽马谱形

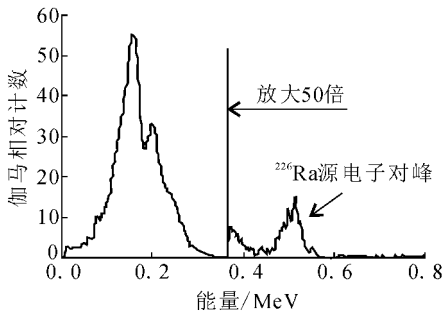


图 3 MCNP 模拟矿石品位仪使用²²⁶Ra 源得到的伽马谱形

照射物料,比采用⁶⁰Co 源得到的电子对峰要高。

表 1 ²²⁶Ra 源发射主要伽马射线的能量和发射强度^[5]

主要 γ 射线能量/MeV	发射概率/%	主要 γ 射线能量/MeV	发射概率/%
0.186 0	4.40	1.238 2	6.30
0.241 9	9.20	1.377 8	4.20
0.295 2	21.80	1.509 5	2.30
0.352 0	41.00	1.661 5	1.17
0.609 4	48.10	1.729 9	3.07
0.665 6	1.60	1.764 7	16.60
0.768 4	5.10	1.847 7	2.20
0.806 2	1.31	2.118 9	1.30
0.934 1	3.27	2.204 5	5.40
1.120 4	15.9	2.293 7	0.35
1.155 3	1.77	2.448 0	1.66

4 两种放射源的实验谱

矿石品位仪分别采用 1.85 MBq 的²²⁶Ra 源和 3.07 MBq 的⁶⁰Co 源,对铁矿石物料测得的伽马谱形示于图 4。

线,一次衰变两者的发射强度均接近 100%,而²²⁶Ra 衰变时发射 20 多种主要的伽马射线,它们的能量和发射强度列于表 1。

从表 1 可以看出,²²⁶Ra 发射的主要伽马射线比较多,能量和发射强度各有不同^[5]。要与物料中原子发生电子对效应,入射伽马射线的能量必须 >1.02 MeV。而²²⁶Ra 发射的主要伽马射线中, >1.02 MeV 的有十几种,总的发射强度为 62.22%。⁶⁰Co 放射源发射 1.173 MeV 和 1.332 MeV 的伽马射线,两种射线的能量均大于 1.02 MeV,总发射强度接近 200%。这些数据说明,在相同发射强度下,采用⁶⁰Co 放射源照射物料比采用²²⁶Ra 放射源会获得更高计数的电子对湮灭光子。但是,电子对效应发生的几率还与入射伽马射线的能量有关,入射伽马的能量越高,发生电子对效应的几率越大。²²⁶Ra 发射的伽马射线,能量大于 1.332 MeV 的还有十余种,最高的能量达 2.448 MeV。它们与物料发生相互作用时,发生电子对效应的几率要比⁶⁰Co 大很多。所以在同源强情况下,采用²²⁶Ra 放射源

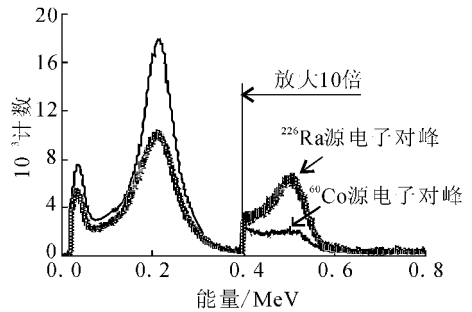


图 4 矿石品位仪使用⁶⁰Co 和²²⁶Ra 源实验伽马谱形

从图 4 的实验谱形可以看出,矿石品位仪采用²²⁶Ra 放射源,得到的电子对峰形状接近高斯形,好于采用⁶⁰Co 放射源时的电子对峰形状,且计数较高。在扣除本底之后,²²⁶Ra 的电子对峰的净面积计数是⁶⁰Co 电子对峰的净面积计数的 10 多倍。所以从实验谱形看,矿石品位仪采用²²⁶Ra 放射源,测量效果优于⁶⁰Co 放射源。

5 伽马探测器安装位置及放射源与物料之间的距离对探测效率的影响

5.1 探测器安装位置对探测效率的影响

为比较伽马探测器安装位置对探测电子对峰测量效果的影响,模拟计算了 NaI 探测器安装位置 1、2、3 和 4 的电子对峰相对计数,其模拟计算结果列于表 2。

从表 2 可以看出,探测器 1、2、3、4 位置上电子对峰相对计数比较,当伽马探测器处于位置 1 时,电子对峰相对计数最高。由图 1 可知,位置 1 最接近放射源,说明探测器越靠近放射源,对湮灭产生的 0.511 MeV 的光子探测效率越高。所以,为提高电子对峰的探测效率,探测器要尽可能靠近放射源。但当探测器过于靠近放射源时,放射源发出的高能射线会直接穿过屏蔽体而被探测器所接收。这样,高强度的高能射线会将湮没辐射光子形成的电子对峰覆盖,从而在探测器的能谱中,分辨不出电子对峰的存在。所以,探测器尽量靠近放射源,同时确保铅屏蔽体足够厚,有利于提高矿石品位仪的探测能力。

表 2 伽马探测器处于不同位置时电子对峰计数

放射源	电子对峰相对计数			
	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4
^{60}Co	16.5	7.5	7.3	6.7
^{226}Ra	344	253	230	208

5.2 放射源与物料之间距离对探测效率的影响

当放射源放出的伽马射线与被测量物料发生作用后,不仅产生电子对湮灭光子(能量 0.511 MeV),而且会产生大量的散射伽马射线。其中能量在 0.511 MeV 附近的散射射线或者更高能量的散射射线,会对电子对峰的探测形成干扰。根据康普顿散射射线能量的角分布数据,散射夹角越小,散射能量越低。增大放射源与物料距离,可以使散射夹角变小,散射能量降低,从而降低高能散射射线对电子对峰测量的干扰。为验证不同源距下散射射线的干扰情况,做了模拟实验分析。

改变矿石品位仪的模拟几何装置中放射源与物料的距离,模拟计算了不同源距下,来自物料的散射伽马射线形成的康普顿平台对电子对峰的干扰贡献。模拟实验装置采用 ^{226}Ra 放射

源,NaI 探测器位于图 1 所示的位置 1 处,取能量 0.475 ~ 0.547 MeV 的散射射线作为电子对峰(0.511 MeV)的干扰贡献。计算结果列于表 3。

表 3 不同源物距离时散射干扰伽马射线计数

源物距离/cm	电子峰 相对计数	散射干扰 相对计数	电子峰与散射干扰 相对计数的比
10	265	3 878	0.068
15	344	1 023	0.336
20	281	139	2.02
25	194	32.3	6.06
30	138	20.4	6.76
35	94	12.6	7.46

从表 3 可以看出,当放射源与被照射物料的距离(简称源物距离)增大时,物料散射产生的并对电子对峰形成干扰的伽马射线计数不断减小,电子对峰计数与散射干扰计数的比值呈上升趋势。这说明增大放射源与物料的距离,可以减小物料散射计数对电子对峰的影响。但值得注意的是,过分增大放射源与物料的距离,会使电子对峰计数变弱,测量效率降低。所以综合考虑,放射源与物料的距离应保持在约 30 cm,能够获得较好的测量效果。

6 讨论与结论

为实现矿石品位仪测量结构的优化,进一步提高仪表的测量性能,本工作主要利用蒙特卡罗模拟方法分析了影响矿石品位仪测量性能的几个因素。经过模拟计算,主要得到以下 3 个重要结论。

(1) 采用 ^{226}Ra 伽马放射源有利于提高矿石品位仪的测量效果。通过对 ^{60}Co 和 ^{226}Ra 两种伽马放射源的蒙特卡罗模拟计算,可以看出,选择 ^{226}Ra 做矿石品位仪的伽马放射源,与 ^{60}Co 放射源相比,相同装置结构和相同源强情况下,前者的电子对峰相对计数是后者的 20 至 30 倍。实验扣除本底以后,采用 ^{226}Ra 放射源,得到的电子对峰计数是采用 ^{60}Co 放射源得到的电子对峰计数的 10 多倍。所以,蒙特卡罗模拟和实验测量结果都表明,矿石品位仪的伽马放射源宜采用 ^{226}Ra 放射源。

(2)调整伽马探测器的安装位置有利于改善矿石品位仪的测量性能。通过对矿石品位仪的伽马探测器 4 个典型位置处进行模拟计算,从得到的电子对峰相对计数可以看出,当伽马探测器位于位置 1 时计数最高,统计涨落最小。说明伽马探测器距离放射源越近,得到的电子对峰计数越高,矿石品位仪的测量效果越好。不过伽马探测器与放射源之间需要有足够厚的铅屏蔽体,阻止放射源放出的高能伽马射线直接被探测器接收。

(3)合理地增大放射源与物料之间距离,有利于降低散射计数的干扰。放射源与物料之间的距离越大,高能散射伽马射线对电子对峰测量的干扰越小。但过分增大放射源与物料之间距离,会使电子对峰的测量效率变低,最佳距离应选择为约 30 cm。

综上所述,通过蒙卡模拟分析,为优化矿石品位仪的测量性能,可采取以下几个措施:采用 ^{226}Ra 放射源取代 ^{60}Co 放射源,减小探测器与放射源之间距离,将放射源与物料之间距离调整为 30 cm 附近。

最后,需要指出一点,本工作建立的矿石品

位仪的蒙卡模拟实验装置主要是为了定性地分析采用两种放射源 ^{60}Co 和 ^{226}Ra 的测量效果,及伽马探测器与放射源位置对测量效果的影响。此模拟装置比较简易,与实验中真实的测量装置存在较大的差异。如果要将模拟结果与实验结果作对比,需要建立与实验装置相同的复杂的几何结构模型。

参考文献:

- [1] Watt JS, Sowerby BD. On-line determination of ash in coal using "SIROASH" gauges[C]//Australian coal preparation conference. NSW: Australian Coal Preparation Society, 1983: 263-290.
- [2] 侯朝勤, 郭衍斗, 尚庆敏, 等. 正负电子对湮没辐射效应用于大块矿石品位的在线检测[C]//同位素技术与辐射应用学术研讨会. 北京:中国核学会同位素分会, 2002:22.
- [3] 许淑艳. 蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用[M]. 北京:原子能出版社, 1996:1-7.
- [4] 汲长松. 核辐射探测器及其实验技术手册[M]. 北京:原子能出版社, 1990.
- [5] 强亦忠. 常用核辐射数据手册[M]. 北京:原子能出版社, 1990:449-450.