

提高反散射测量方法灵敏度的研究

黄兴滨¹, 王欲晓¹, 马永和¹, 王国荣²

(1. 黑龙江省科学院 技术物理研究所, 黑龙江 哈尔滨 150086; 2. 黑龙江大学 电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 反散射方法是核分析与测量的重要方法, 本文首次用核参数建立了灵敏度的数学表达式, 研究了提高灵敏度的方法和影响灵敏度的各种因素, 为实现最佳灵敏度和最佳设计提供可靠依据。

关键词: 灵敏度; 低能 γ 射线; 反散射

中图分类号: O572.21 **文献标识码:** B

1 反散射测量灵敏度与核参数的关系

通常希望较大的计数率变化能对应较小的被测物理量的变化, 这样可使被测物理量更加灵敏、准确, 并能大大减少因统计涨落引起的误差。

灵敏度(S)通常定义为计数率(n)的相对变化(dn/n)与被测物理量(p)的相对变化(dp/p)之比, 它是 γ 射线的能量和被测物质成份或原子序数的函数, 并表示为:

$$S = \frac{dn/n}{dp/p} = p \cdot \frac{dn}{dp} \cdot \frac{1}{n} \quad (1)$$

为简化计算, 通常把被测物质化分为二元组分模型, 这里以测量聚乙烯塑料薄膜为例, 单体为 C_2H_4 , 成分结构最为简单, 通过测量 C 的质量厚度就可得到总的质量厚度。图 1 形象地绘出在聚乙烯膜中碳(C)质点和氢(H)质点吸收和反散射的示意图。 μ' 为入射 γ 射线的质量吸收系数, μ'' 为反散射 γ 射线的质量吸收系数。假定在散射过程中 γ 射线的能量不变, 这样会有 $\mu' = \mu'' = \mu$ 。 σ 为散射系数, 它是康普顿散射(非相干散射)系数和相干散射系数之和。探测器接收到的反散射 γ 射线的计数率 n 与散射系数成正比, 与吸收系数成反比, 并可表示为:

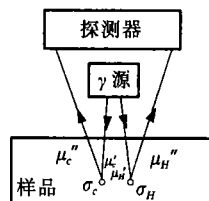


图 1 γ 射线吸收与反散射示意图

$$n = k \frac{\sum \sigma_i c_i}{\sum \mu_i c_i} = k \cdot \frac{\sigma_c p + \sigma_H (1-p)}{\mu_c p + \mu_H (1-p)} \quad (2)$$

式中, k 为比例系数, 脚标 C 和 H 分别代表碳和氢, P 为聚乙烯单体 C_2H_4 中碳的重量百分比, $p = 24/28$, $1-p = 4/28$ 。

$$\frac{dn}{dp} = k \cdot \frac{(\sigma_c - \sigma_H)[\mu_c p + \mu_H (1-p)] - (\mu_c - \mu_H)[\sigma_c p + \sigma_H (1-p)]}{[\mu_c p + \mu_H (1-p)]^2} = k \cdot \frac{\sigma_c \mu_H - \sigma_H \mu_c}{[\mu_c p + \mu_H (1-p)]^2} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} S &= p \cdot \frac{dn}{dp} \cdot \frac{1}{n} = p \cdot k \cdot \frac{\sigma_c \mu_H - \sigma_H \mu_c}{[\mu_c p + \mu_H (1-p)]^2} \cdot \frac{\mu_c p + \mu_H (1-p)}{k[\sigma_c p + \sigma_H (1-p)]} \\ &= \frac{p(\sigma_c \mu_H - \sigma_H \mu_c)}{[\mu_c p + \mu_H (1-p)][\sigma_c p + \sigma_H (1-p)]} = \frac{p(\sigma_c \mu_H - \sigma_H \mu_c)}{[\sigma_H + p(\sigma_c - \sigma_H)][\mu_H + p(\mu_c - \mu_H)]} \end{aligned} \quad (4)$$

收稿日期: 2000-09-20

作者简介: 黄兴滨(1964-), 黑龙江伊春人, 黑龙江省科学院技术物理研究所高级工程师, 主要研究方向: 光电技术与核测量。

2 影响灵敏度和计数率的因素

2.1 γ 射线能量的选择

选择合适的 γ 射线能量是设计核测量仪器首先考虑的重要问题。灵敏度 S 是 γ 射线能量的函数,也是被测物成份或原子序数的函数,被测物不同所选取的 γ 射线能量也会不同。表 1 列出了聚乙烯单体中碳(C)和氢(H)在不同 γ 射线能量(E_{γ})下的核参数 μ 和 σ ,并利用式(4)计算了不同能量下的灵敏度 S 。

表 1

$E_{\gamma}(\text{keV})$	10	15	20	30	40	50	60	80	100	200
σ_c	5.98	4.99	4.48	3.97	3.71	3.52	3.39	3.16	2.99	2.45
μ_c	2.27	0.782	0.432	0.254	0.207	0.187	0.175	0.161	0.151	0.123
σ_H	0.639	0.692	0.617	0.597	0.579	0.561	0.545	0.516	0.492	0.406
μ_H	0.385	0.376	0.369	0.357	0.346	0.335	0.326	0.308	0.294	0.243
S	0.0699	0.3753	0.7152	1.1574	1.3477	1.4284	1.4755	1.5068	1.528	1.5458

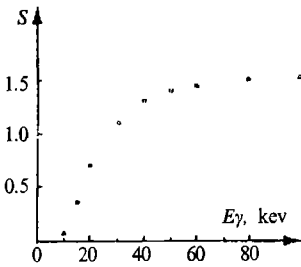


图 2 聚乙烯质量厚度灵敏度的理论曲线

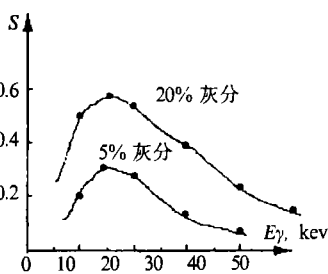


图 3 煤灰分灵敏度的理论曲线

图 2 描绘了聚乙烯单体测量灵敏度 S 随 γ 射线能量 E_{γ} 的变化曲线,可以看出,40 keV 以下 S 随 E_{γ} 上升而上升,变化较快,50 keV 以上随 E_{γ} 变化趋缓。兼顾到灵敏度和 γ 射线能量的关系以及 γ 射线源的可选用性,测量聚乙烯膜厚度选用 60 keV 的 ^{241}Am 源是恰当的。 ^{241}Am γ 源也同样适用于其它的碳氢化合物,如:纸张、木质板、橡胶等带材的测量。测量对象不同,灵敏度随 γ 射线能量的变化趋势也很不相同,但都可按二元组合理论模型按类似式(4)进行计算。例如:煤是结构相当复杂的化合物/混合物的混合体,可把它看成是由可燃的煤质(主要成份是 C、H、O)和不可燃的矿物质即灰份(主要成份是 Si、Al、Ca、Fe 等)两部分组成,煤灰分测量的灵敏度随 γ 射线能量的变化关系如图 3 所示,对应最大灵敏度,选用 15 keV 的 ^{238}Pu γ 源是最合适的。

实际测量中的灵敏度要比理论计算值小。这是因为:实际的测量系统并非理想的,理论计算中忽略了散射时 γ 射线能量的变化,认为 $\mu'=\mu''=\mu$,实际上散射后的 γ 射线能量减小, $\mu''>\mu'$;实际测量中忽略了探测器——样品之间的空气隙的影响,特别是对低质量厚度的测量,空气隙有不可忽视的影响,详见 2.2 及图 7。

2.2 反散射几何条件的考虑

探测器、放射源及被测样品的反散射测量几何布局示意图如图 1 所示。

当采用闪烁探测器时,探测器接收反散射 γ 射线的窗口面积为 $\Phi 40\text{ mm}[\text{NaI(Tl)}]$ 晶体尺寸为 $\Phi 40\times 40$,放射源尺寸为 $\Phi 10\times 6$,由于放射源中心背对探测器窗口,使得探测器窗口形成 $\Phi 10$ 面积的死区,不能接收反散射低能 γ 射线。同时在探测器窗口还形成一个圆环形阴影半死区,半死区的面积随探测器——样品间距而变,如图 4。这样使计数率大为下降,可采用以下两种方法来消除死区或半死区。一是按图 5 布局,按照反散射空间分布几率来确定探测器和放射源中轴线的夹角,两轴线交会点位于样品中间,这种布局结构复杂,占地面积大。二是利用井形晶体,放射源下到井内,如图 6 所示,这种布局结构紧凑,消除了环形半死区。本工作就是采用井型晶体方案,井型晶体方案可使计数率有很大提高。实验测得,利用 60 keV 的 γ 射线源 ^{241}Am 测量纸样品时,井型配置与有半死区的图 1 配置相比,计数率提高了 49%;利用 15 keV 的 γ 射线源 ^{238}Pu 测量煤样品时,两种配置相比,计数率提高了 21%。

探测器——样品之间的距离 d 也是影响灵敏度的另一个重要因素。理论分析和实践表明,随着探测器——样品间距(d)增大,灵敏度明显下降, $d=5\sim 10\text{ mm}$ 是最佳选择。以聚乙烯薄膜为例,低压聚乙烯密度为

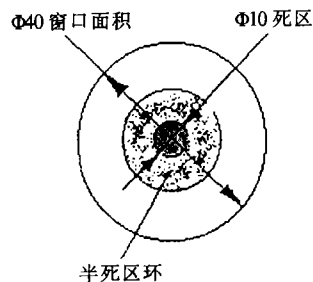
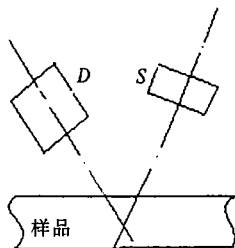
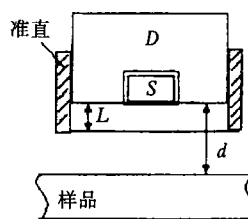
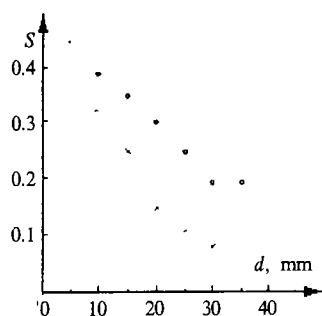
图4 探测器窗端面 γ 射线作用区

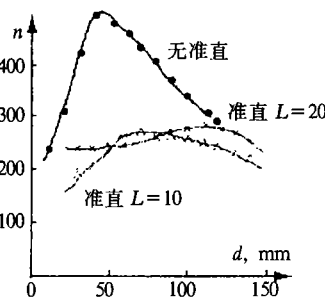
图5 互成夹角的反射几何布局

图6 γ 源入井的反射几何布局

0.91 g/cm³, 高压聚乙烯密度为 0.92 g/cm³, 30 μ m 聚乙烯膜的质量厚度为 2.76×10^{-3} g/cm², 10 mm 高的空气质量厚度为 1.29×10^{-3} g/cm², 两者具有相同的数量级。这样随着间距 d 增大, 空气的质量厚度要等于或超过被测物的质量厚度, 而空气的质量厚度就迭加在被测物上, 当空气的质量厚度大于被测物的质量厚度时, 被测物的质量厚度只占总的等效质量厚度的一小部分时, 测量灵敏度自然会下降, 尤其测量轻质材料薄层时, 探测器——样品间的空气隙是一个不可忽视的问题。在实际结构中, 探测器与样品之间或样品之外不得使用轻质材料保护屏或阻挡层, 以免降低灵敏度。图 7 是标定 15 μ m ~ 120 μ m 聚乙烯薄膜样品时, 灵敏度 S 随间距 d 的变化趋势。当 d 增加到一定程度 (50 mm 以上), 计数率几乎不随样品厚度改变, 灵敏度急剧下降。

图7 灵敏度 S 随探测器——样品间距 d 的变化

\times 无准直实测值; \circ : 准直长度 $L=5$ 实测值

图8 计数率 n 随探测器——样品间距 d 的变化

准直是消除多次散射的有效手段 (图 8), 无准直时计数率随探测器——样品间距增大而增大, 当 d 增到一定程度计数率几乎不变, 然后下降。计数率上升阶段是由于空气隙和多次散射的贡献, 计数率下降阶段是由于探测器相对样品的空间立体角减少所致。加入准直后使多次散射对计数率的贡献大大减少, 计数率的变化趋势较不加准直趋缓。计数率虽有所下降, 但计数率的变化更能真实的反映厚度的变化, 消除了多次散射引起的虚假计数的影响。图 6 是本工作最终确定的几何配置, 准直长度 $L=5$ mm, 探测器窗面到样品距离 $d=10$ mm。

2.3 晶体尺寸及封装材料的考虑

闪烁探测器内包含闪烁晶体和光电倍增管, 反散射 γ 射线被探测器接收, γ 射线首先打在晶体上, 使晶体激发并产生闪光 (荧光), 闪光被电倍增管的光阴极收集并产生光电子, 光电子被管内打拿极倍增, 最后在阳极负载上产生负电压脉冲信号。

增大晶体接收面积对提高计数率有利, 但对低能 γ 射线的测量通常采用薄晶体, 如: $\Phi 40 \times 1$, 晶体厚度增加会使闪光衰减增大, 反而降低探测效率。不同的窗口材料对 γ 射线的透过率有很大影响。在 15 keV 能量下, 0.2 mm 的铍窗可使透过率接近 100%, 而 0.2 mm 的铝窗其透过率为 65%。当能量超过 35 keV 时, 用铝窗或铍窗对透过率没什么影响, 都接近 100%。用 15 keV 的 ^{238}Pu γ 射线源实验测得, 用 Be 窗 $\Phi 40 \times 1$ 晶体的计数率比 Al 窗提高了 11%。

3 结束语

灵敏度是核分析或核测量的一个重要指标, 本工作首次用核参数建立了灵敏度的数学表达式, 核参数 (包括光电截面、相干散射与非相干散射截面、总质量吸收系数等) 是射线能量的函数也是物质成分的函数, 被测

物确定后,利用灵敏度与射线能量的关系,对选取合用的射线源提供了重要的理论根据。测量系统的几何配置对提高探测效率和灵敏度同样有重要的影响。本工作的理论计算、分析和实验结果为实现最佳设计、最佳灵敏可提供可靠依据,对今后的工作具有重要的实际指导意义。

参考文献:

- [1] BOYCE I F, et al. Nuclear techniques and mineral resources[M]. Vienna: IAEA, 1977.
- [2] NOGUCHI M. Radio isotopes[J]. 1987, 36(2): 49.

Study on improving sensitivity of back-scattering measurement

HUANG Xing-bin¹, WANG Yu-xiao¹, MA Yong-he¹, WANG Guo-rong²

(1.Institute of Technical Physics, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150086, China; 2.College of Electronic Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: Back-scattering method is one of important techniques for nuclear analysis and measurement. It is first time for us to establish the mathematical formula for the sensitivity the effect of various factors on the sensitivity is considered. A reliable basis is provided for optimum sensitivity and optimum device.

Key words: sensitivity; low-energy gamma-ray; back-scattering

(上接第 53 页)

A research on characteristic of sound propagation in complicated bottom ocean

SHI Yong-chen¹, JIANG Guan-ting², YANG Shi-e³

(1.Department of Basic Courses, Heilongjiang Bayi Agriculture University, Mishan 158308, China; 2.Institute of Acoustics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China; 3.Department of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Almost all of the sound rays will touch the bottom in shallow sea. So it is very important to research the characteristic of sea bed, especially its absorption and its contour reflection.

A ray trace theory was discussed and applied to calculate sound trace and its loss. The best advantage of this method is its clear ray physical photo and its short calculating time.

The result revealed, in shallow sea, the bottom mountains will remarkably influence sound transmission and made its intensity lower than flat bottom. At the same time, above the rest of the mountain, an additional convergence zone will be formed.

Key words: sound wave; wedge sea area; level refraction