

多能点 γ 准直标定源的建立及其应用

曾凡松 俞祥忠 李晓燕 伍晓利 张建华 李如荣

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所 绵阳 621900)

摘要 介绍了利用工业 ^{60}Co 线状源建立多能点 γ 准直标定源的方法。阐述了理论依据、大幅度降低散射本底的措施、理论计算方法、注量率实测方法、对安全防护和承重问题的考虑等, 并对实验结果进行了讨论。

关键词 工业 ^{60}Co 线状源, 多能点, γ 准直标定源, 散射本底, 注量率

中图分类号 O571, TB3, TH12, TL8

γ 能量测量系统需要通过标定实验来获取灵敏度曲线。在 γ -ray 的 0.3 MeV~1.25 MeV 的能区, 可直接作为标定源的只有 ^{137}Cs 和 ^{60}Co , 其它放射源或半衰期太短、或强度太低、或制备困难而不适用于 γ 测量系统标定^[1]。但 ^{137}Cs 源(γ -ray 能量为 0.662 MeV) 和 ^{60}Co 源(γ -ray 能量为 1.25 MeV) 各只有一个能量点, 仅用它们进行探测器标定不能获得灵敏度曲线。本课题依据 Compton 散射原理, 利用 ^{60}Co 源的 γ 光子在选定材料上的散射来获得 0.3~1.25 MeV 范围能量连续分布的散射 γ 光子。利用这些散射 γ 光子进行标定实验, 即可弥补标定源的不足。

1 实验方法和设计

1.1 实验依据

当 γ 光子与物质作用时, 有光电效应、Compton 效应和电子对效应等三种效应产生。当物质的原子序数在 30 左右、 γ 光子能量为 1.25 MeV 时, 以 Compton 散射为主, 光电效应和电子对效应可忽略不计。Compton 散射的计算公式为^[2,3]。

$$E_{\gamma}' = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}(1 - \cos\theta)}{m_e c^2}} \quad (1)$$

式中, E_{γ} 为入射光子能量, 单位 MeV; E_{γ}' 为散射光子能量, 单位 MeV; θ 为散射角度; $m_e c^2$ 为静止电子能量, 单位 MeV。

从式(1)中可看出, 散射光子的能量 E_{γ}' 只与入射光子能量 E_{γ} 和散射角度 θ 有关, 与散射体的材质无关, 散射体的材质仅影响散射光子的产额。经分析和估算, 选择 Cu 材料作为模型散射体, 从而

在 0~90° 范围内, 获得能量从 $E_{\gamma}'/(1 + E_{\gamma}/m_e c^2) \sim E_{\gamma}$ 内连续分布的的散射光子。对 ^{60}Co 源来说, 即可获得 0.3~1.25 MeV 能量范围的散射光子。

1.2 实验方法

计算和测量表明, 如不采取任何措施, 直接使用裸源进行实验, 散射本底将比欲测信号大 4~5 个量级。为了利用上述原理实现对 γ 测量探测器的标定, 采取了以下措施: (1) 用铅材料对 ^{60}Co 线状源进行约束, 以大幅度降低散射本底; (2) 使用准直器对 γ 射线进行准直, 使线状源成为模拟点源;

(3) 利用现有的安全防护系统, 设计源棒的提升和定位装置, 以安全、方便地进行标定实验。

1.3 实验设计

1.3.1 主体装置的设计 经过分析和计算, 设计了标定源主体装置。主体装置中铅屏蔽体的外形尺寸为 60 cm×60 cm×120 cm, 内空为 20 cm×20 cm×100 cm, 用以容纳截面尺寸为 20 cm×15 cm 的源架导轨。其下部开口, 用于小源架的升降。

为了减小准直器通道(截面 4 cm×4 cm, 长 50 cm) 内壁散射给转换靶和探测器带来的影响, 对准直通道作非对称设计。

在铅屏蔽体相对于准直器的一面设置有散射陷阱, 用以避免逆向散射对转换靶带来影响。

为加强屏蔽效果, 除了在准直器一侧增设 20 cm 厚的外接屏蔽体外, 还在探测器与散射陷阱泄漏散射墙面之间设置 20 cm 厚的屏蔽墙。

1.3.2 承重平台的设计 计算表明, 上述主体装置和外接屏蔽体的总重量约 7 t, 需要置于贮源井上方, 因此必须仔细地考虑承重问题。偏位受载筒支

第一作者: 曾凡松, 男, 1958年11月出生, 1982年于南京大学获理学学士学位(原子核物理专业), 核辐射工艺专业, 高级工程师

收稿日期: 初稿 2008-10-28, 修回 2008-12-19

梁的最大挠度计算公式为^[4] (式中 L 、 a 、 b 的定义如图 1 所示)。

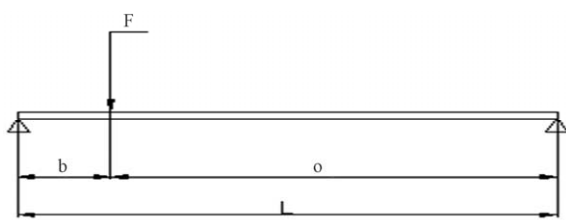


Fig.1 Sketch of bearing-weight computation

$$Y = \frac{Fb(L^2 - b^2)^{\frac{3}{2}}}{9\sqrt{3}EIL} \quad (2)$$

式中, I 为面积两次矩, 亦称惯性矩, 单位 cm^4 ; E 为所用材料的弹性模量, 单位 N/cm^2 。

我们希望最大挠度 $Y \leq 0.3 \text{ cm}$, 采用 6 根槽钢为跨井承重梁均匀承重。在实验条件下, 算出单根槽钢的惯性矩为 $I=850 (\text{cm}^4)$, 查表得知应选用 16 a 型槽钢^[5]。据此设计 6 根 16 a 型槽钢来构成跨

井承重平台, 承载屏蔽体和外接屏蔽体, 以确保放射源的安全。屏蔽墙则另用 2 根 16 a 型槽钢承重。

1.3.3 探头小车和回转平台的设计 为方便探头的距离和角度调节, 设计制作了带角度和距离刻度的回转平台。此装置的定位精度为: 角度 1° , 长度 1 mm。

1.3.4 小源架的设计 小源架整体用铅材料制作, 用不锈钢材料承重, 在其中部开口对应准直器和散射陷阱。

1.3.5 源架导轨的设计 考虑到安装和使用方便, 源架导轨设计为井下和井上两部分。井下部分为永久性装置, 井上部分可根据需要安装和拆卸。设计时考虑了装卸源的问题。

2 探测器灵敏度的理论计算和实际测量

2.1 探测器灵敏度的理论计算

在设计的装置条件下, 测点处 γ 光子的注量率用下式计算^[6] (散射体为薄片):

$$\varphi(\gamma) = \frac{N_0 I(t) S Z_{\rho_0}(\theta, E_\gamma) \text{def}(E_\gamma, E'_\gamma)}{4\pi A L^2 D^2} \quad (3)$$

式中, N_0 为阿伏伽德罗常数; $I(t)$ 为放射源强度, 单位 s^{-1} ; S 为散射片的面积, 单位 cm^2 ; Z 为散射片材料的原子序数; ρ 为散射片材料的密度, 单位 g/cm^3 ; A 为散射片材料原子量; L 为散射片与放射

源之间的距离, 单位 cm ; D 为散射片与探测器灵敏区之间的距离, 单位 cm ; $\sigma(\theta, E_\gamma)$ 为照射在散射片上的 γ 光子的微分 Compton 散射截面(单位 cm^2), 计算公式为:

$$\sigma(\theta, E_\gamma) = \frac{r_0^2 (1 + \cos^2 \theta)}{2 [1 + k(1 - \cos \theta)]^2} \left\{ 1 + \frac{k^2 (1 - \cos \theta)^2}{(1 + \cos^2 \theta) [1 + k(1 - \cos \theta)]} \right\} \quad (4)$$

式中, $r_0 = e^2/m_e c^2 = 2.82 \times 10^{-13} \text{ cm}$; $k = E_\gamma/m_e c^2$ 。def (E_γ, E'_γ) 为散射片的等效厚度 (单位 cm), 计算

公式为:

$$\text{def}(E_\gamma, E'_\gamma) = \frac{1}{\frac{\mu}{\sin \alpha} - \frac{\mu'}{\sin \beta}} \left(e^{-\frac{\mu}{\sin \beta} d} - e^{-\frac{\mu'}{\sin \alpha} d} \right) \quad (5)$$

式中, μ 为散射片对于入射 γ 光子的线性衰减系数, 单位 cm^{-1} ; μ' 为散射片对于散射 γ 光子的线性衰减

系数, 单位 cm^{-1} 。 α 、 β 的定义如图 2 所示。

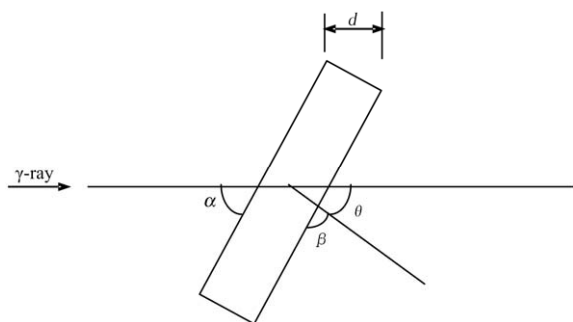


Fig.2 Sketch of scattering angle

将具体数据带入 (3) 式就可算出 $\varphi(\gamma)$ 值，再根据所用闪烁体的种类和几何尺寸数据，即可获得探测器相对灵敏度曲线。由于用质能吸收系数计算无机闪烁探测器的 γ 射线能响只能得到其相对趋势，所以这里与实验值比较用 0.667 MeV 能点作校合点。在我们的实验条件下计算的结果如图 3 和图 4 中圆点线所示。

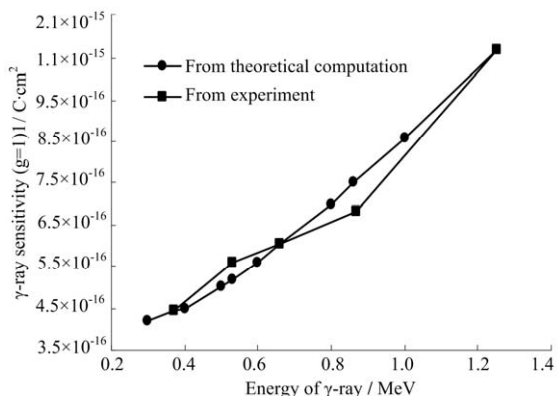


Fig.3 The γ -rays sensitivity curves from experiment and theoretical computation (detector No.1)

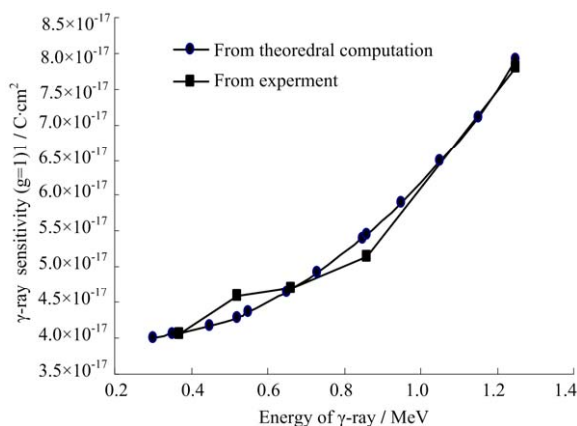


Fig.4 The γ -rays sensitivity curves from experiment and theoretical computation (detector No.2)

2.2 探测器灵敏度的实际测量

用热释光 (测量元件为 LiF) 方法对测点的注量率进行测量。热释光仪测量值 D_{LiF} 与测点处的注量率 $\varphi(\gamma)$ 的关系为:

$$\varphi(\gamma) = \frac{D_{LiF}}{E_{\gamma}' t \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{LiF}} \quad (6)$$

式中, $\varphi(\gamma)$ 为测点处的注量率, 单位 $s^{-1} \cdot cm^{-2}$; D_{LiF} 为热释光仪测量值, 单位 mGy; E_{γ}' 为散射光子能量, 单位 J; t 为热释光剂量测量时间, 单位 s; (μ_{en}/ρ_{LiF}) 为 LiF 的质量吸收系数, 单位 cm^2/g 。

探测器灵敏度由下式求出:

$$S = \frac{I}{\varphi(\gamma)} \quad (7)$$

式中, I 为探测器输出的电流, 单位 A。

根据测出的电流值和注量率值, 即可得到探测器灵敏度曲线。

3 标定实验

实验中选用了两种闪烁探测器, 分别在 35° 、 50° 、 64° 、 85° 等 4 个角度上进行了剂量率和探测器响应测量 [其中 50° 角散射 γ 光子能量(0.667 MeV) 对应 ^{137}Cs 的 γ 光子能量 (0.662 MeV); 探测器 1.25 MeV 的 γ 射线灵敏度的标定实验是在国家二级计量站标准 ^{60}Co 源上进行的, 其实验大厅空旷, 辐射源准直屏蔽等实验条件良好, 其测量信噪比 > 50 倍]。

测量结果如表 1 和表 2 及图 3 和图 4 中的方点线所示。表 1 和表 2 中探测器的 γ 射线灵敏度都是把实验用光电倍增管的增益归为 1 所得到的实验结果, 实验所用光电倍增管的实际增益约为 1×10^5 。表 3 列出了两种方式结果的比较。

Table 1 The experimental results of detector No.1

Scattering angle / °	Energy of γ -ray / MeV	Flux rate of γ -ray / $\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	Output current / μA	γ -ray sensitivity (g=1) / $\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$	Signal-to-noise
85	0.377	3.74×10^4	1.679	4.49×10^{-16}	15.13
64	0.527	5.60×10^4	3.175	5.67×10^{-16}	19.75
50	0.667	8.54×10^4	5.192	6.08×10^{-16}	16.16
35	0.867	1.29×10^5	8.824	6.84×10^{-16}	12.44
0	1.25	6.64×10^4	7.105	1.07×10^{-15}	>50

Table 2 The experimental results of detector No.2

Scattering angle / °	Energy of γ -ray / MeV	Flux rate of γ -ray / $\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	Output current / μA	γ -ray sensitivity (g=1) / $\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$	Signal-to-noise
85	0.377	3.74×10^4	0.153	4.08×10^{-17}	15.13
64	0.527	5.60×10^4	0.259	4.62×10^{-17}	19.75
50	0.667	8.54×10^4	0.402	4.71×10^{-17}	16.16
35	0.867	1.29×10^5	0.673	5.22×10^{-17}	12.44
0	1.25	6.64×10^4	0.517	7.79×10^{-17}	>50

Table 3 Comparing the results from experiment with that from the theoretical computation

Energy of γ -ray / MeV	Comparing the results from experiment with that from the theoretical computation	
	Detector No.1	Detector No.2
0.377	0.72 %	0.30 %
0.527	9.25 %	6.95 %
0.667	Unitary point	Unitary point
0.867	-9.79 %	-5.54 %
1.250	0.33 %	-1.90 %

4 讨论

(1) 信噪比问题

信噪比测量结果表明,总趋势是小角度的信噪比比大角度的要差一些(85°方向出现异常表明不能忽视辐照室墙面散射的影响),这说明准直器通道内壁散射对小角度信噪比的影响较大。可采取加强对可能进入探头的非信号散射的屏蔽、加长加厚探头准直器、减小准直器通道的散射面积(比如设计圆形准直通道)等措施来适应高信噪比要求。

(2) 线源均匀性问题

在安装放射源的过程中,通过调整钢丝绳长度来避开肉眼可见的“黑区”(即非活性区),使我们认为的放射源均匀区对准准直器(放射源活性区总长

度为40 cm,准直器通道截面为4 cm×4 cm)。但在测量过程中我们发现源强在变化,经仔细分析我们确定是放射源活性区分布不均匀所致,应用时需注意。

(3) 安全性问题

工业⁶⁰Co辐照站的安全防护系统是比较完备的,对原系统稍加改动加以使用,既保证了安全,又节约了费用。采用这种方式进行了上千次运行,未出辐射安全事故。

(4) 对一些问题的考虑

实验中,是将线源通过准直变为模拟点源,靶片距线源约50 cm,准直器的线度为4 cm。在要求较高的情况下,应按4 cm长线源进行计算;此外,由于探测器灵敏区是有一定尺度的,对靶片有一定

张角, 进入探测器灵敏区的 γ 光子能量就会有一定分布, 在要求较高的场合需予以考虑。

5 结论

通过采取一定措施将工业用 ^{60}Co 线状源进行屏蔽和约束, 实现了将信噪比提高到10以上的目的, 获得了从0.3~0.9 MeV范围连续分布的 γ 光子, 弥补了标准源的不足, 拓展了工业用 ^{60}Co 线状源的应用范围, 使工业用 ^{60}Co 线状源得以用于科学实验研究。

参考文献

- 1 郑成法. 核辐射测量. 北京: 原子能出版社, 1983. 41-43, 196-219, 258-260
ZHENG Chengfa. Nuclear radiation measurement. Beijing: Atomic Energy Press, 1983. 41-43, 196-219, 258-260
- 2 王祝翔. 核物理探测器及其应用. 北京: 科学出版社, 1964. 199-206
WANG Zhuxiang. Nuclear physics and its applications detector. Beijing: Science Press, 1964. 199-206
- 3 鲁克. 放射性同位素实验室技术. 北京: 科学出版社, 1977. 28-30, 151-155
LU Ke. Radioisotope laboratory technology. Beijing: Science Press, 1977. 28-30, 151-155
- 4 张德智. 实用机械学. 北京: 兵器工业出版社, 1990. 164-173
ZHANG Dezhi. Practical mechanics. Beijing: Ordnance Press, 1990. 164-173
- 5 徐灏. 新编机械设计师手册. 北京: 机械工业出版社, 1995. 172
XU Hao. Mechanical designers of the new handbook. Beijing: Machinery Industry Press, 1995. 172
- 6 张建华. 核科学技术与应用, 2005, 1(2): 152-154
ZHANG Jianhua. Nucl Sci Technol Appl, 2005, 1(2): 152-154

Building and application of a collimated γ -ray source with multi-energy point

ZENG Fansong YU Xiangzhong LI Xiaoyan WU Xiaoli ZHANG Jianhua LI Rurong

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

ABSTRACT The paper introduces a method to build up a collimated multi-energy point γ -ray source for experiment with an industrial ^{60}Co source. In details the theoretical design, measurement method of reducing scattered background greatly and measurement of flux, theoretical computation method, solution for radioprotection and weight bearing problem, and so on have been described and discussed. The experimental results show that the building of new method has better application.

KEYWORDS Industrial ^{60}Co line source, Multi-energy point, γ -ray collimated source, Scattered background, Flux

CLC O571, TB3, TH12, TL8