

MeV 能区 HPGe γ 探测器 本征效率和 γ 剂量的确定

叶宗垣 丁声耀 李宇兵

丁锡祥 包宗渝 杨小芸

(中国原子能科学研究院计量测试部, 北京, 102413)

使用多线 γ 放射源、氯化钠热中子俘获 γ 射线源、 $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha\gamma)$ 源以及镍热中子俘获 γ 源来得到全能峰、单逃逸峰和双逃逸峰在 700—9000 keV 能区范围内探测器本征效率值随能量变化的曲线。所得结果用来确定镍热中子俘获 γ 场, $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha\gamma)$ 反应 γ 场及反应堆重水循环系统上 $^{16}\text{O}(\text{n}, \text{p})^{16}\text{N}$ 反应 γ 场的 γ 剂量, 并将其与用电离室测试的结果进行比较。

关键词 高纯锗探测器 γ 本征效率 MeV 能区 γ 射线 γ 空气比释动能率

为测量高能 γ 场中的剂量(如核电站运行中循环水产生的 6.13 MeV γ 场剂量), 需要对剂量仪表进行刻度。本工作用不同能量 γ 射线系列源来刻度探测器的本征效率值, 从而对高能区 γ 场用剂量仪表进行刻度。探测器本征效率定义为: γ 射线从水平方向入射到探测器上, 光子场作用面积大于探测器截面积时, 在全能峰(单逃逸峰, 双逃逸峰)面积上记录下的入射光子的几率。为得到探测器在立柱结构几何条件下的本征效率, 采用改变距离测得探测器对 γ 源探测效率值, 将此效率值随距离变化的反平方关系拟合, 得出对不同能量 γ 射线的本征效率值。

1 实验

所有实验均使 γ 射线从水平方向入射到探测器上。为对中子和低能 γ 射线进行屏蔽, 探测器头部罩以屏蔽帽。该屏蔽帽由 2.5 mm 的不锈钢外套、1.5 mm 的有机玻璃内衬、中间夹有 3 mm Pb 和 0.5 mm Cd 以及约 2 mm 厚 Li_2CO_3 粉末层组成。采用了下列 3 种 γ 射线源进行效率刻度。

1) 低能多线放射源 美国国家标准局 NBS 生产的多元素标准面源(4275-209), 它包括 ^{125}Sb , ^{154}Eu 和 ^{152}Eu , 其能量和强度取自其说明书。实验时将放射源平面中心对准探测器圆

柱体侧面的中心,在两中心 9.8—51.1 cm 间 11 个距离点上测量脉冲幅度谱。使用 ORTEC-659 高压电源, -3000 V; ORTEC-673 放大器,放大 50×0.8 , 成形 $6 \mu\text{s}$ 。输出脉冲用 S-40 多道分析器直接输入记录,记录时间使用多道本身的活时间。脉冲谱用 IBM 型 PC 机记录在软盘上。

2) NaCl 热中子辐射俘获 γ 源 测量低能量的 1368 keV γ 射线得到 ^{24}Na 的生成率来刻度 Cl 热中子俘获 γ 射线的强度,从而定出锗探测器对源的绝对效率。实验原理及细节参见文献[1]。为得到探测器本征效率,在 28.5—64.3 cm 距离内测量 4 个点。

3) $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)$ 反应产生 6129 keV γ 线 $E_p = 340$ keV 时,该反应产生的 α 粒子和 6129 keV γ 射线相对于入射质子方向的角分布为 $W(\theta) = A[1 + P_2(\cos\theta)]$ 。当 $\theta = 55^\circ$ 时, $P_2(\cos\theta) = 0$ 。略去高次项,在与质子束成 55° (或 125°) 角度上的小立体角内反应产生的 α 粒子数和 γ 光子数目相同。同时测量 α 粒子和 γ 光子数目,以定出探测器的绝对效率。实验细节参见文献[2]。为求得本征效率,在源到探测器中心距离 28.5—100 cm 间 5 个位置上进行了测量。

2 本征效率值的确定

根据本征效率值来定义。当 γ 束从水平方向入射到探测器圆柱体时,探测器对源的效率 $\epsilon(i)$ 与本征效率 $\epsilon_0(i)$ 和源到探测器间的距离 R 的关系为

$$\epsilon(i) = \epsilon_0(i)S/(4\pi R^2)$$

探测器是一个圆柱体,探测面积取圆柱纵截面,即 $S = 5.6 \times 5.9 = 33.04 \text{ cm}^2$ 。 γ 射线与探测器中材料相互作用有一个范围,为求得探测器的本征效率,引入一个有效平均作用中心,将测得的 $\epsilon(i)$ 随 R 变化的数据进行拟合,得到本征效率值 $\epsilon_0(i)$ 。数据拟合中使用 2 种办法。一种是:

$$\epsilon(i) = \epsilon_0(i)S/(4\pi(R(i) + R_0)^2) \quad (1)$$

在 $Y = CX + L$ 二项式拟合中, $Y(i) = \epsilon(i)$ 、 $C = \epsilon_0(i)S/(4\pi)$ 和 $X(i) = (R(i) + R_0)^{-2}$ 。

其中: $R(i)$ ——源到探测器几何中心的距离; R_0 ——探测器有效作用中心与几何中心的距离。在作线性最小二乘法拟合时,改变 R_0 值使截距 L 最小。严格地讲, L 值应为零。

另一种拟合方式是:

$$1/\sqrt{\epsilon(i)} = \sqrt{4\pi/\epsilon_0(i)S} \cdot (R(i) + R_0) \quad (2)$$

在 $Y = CX + L$ 式中,因变量 $Y(i) = 1/\sqrt{\epsilon(i)}$ 、斜率 $C = \sqrt{4\pi/\epsilon_0(i)S}$ 、自变量 $X(i) = R(i)$ 和截距 $L = C \cdot R_0$ 。由拟合系数 C 值求得 $\epsilon_0(i) = 4\pi(SC^2)^{-1}$,有效中心 $R_0 = L/C$ 。

在最小二乘法的拟合中,系数 C 和 L 按下式计算:

$$C = \frac{\sum W(i) \sum X(i) Y(i) W(i) - \sum X(i) W(i) \sum Y(i) W(i)}{\sum W(i) \sum X(i) X(i) W(i) - \sum X(i) W(i) \sum X(i) W(i)}$$

$$L = \frac{\sum Y(i) W(i) \sum X(i) X(i) W(i) - \sum X(i) W(i) \sum X(i) Y(i) W(i)}{\sum W(i) \sum X(i) X(i) W(i) - \sum X(i) W(i) \sum X(i) W(i)}$$

式中 $W(i)$ 是各距离的权。从上式可见,权的选择对结果有影响。若选误差平方倒数作权,用式(1)拟合时,则因近距离的 $X(i)$, $Y(i)$ 值都大,拟合结果偏向近距离测试值;与此相反,用式(2)时,因远距离 $X(i)$, $Y(i)$ 值大,则拟合结果偏向远距离测试值 为使每个距离上测量的效

率值在参与拟合计算中占有相近的贡献,在数据拟合时,对式(1)采用源到探测器的距离平方作权,对式(2),则用距离倒数作权。

探测器对3种射线源的本征效率值的计算说明如下。

1) 低能多线源效率的计算 测得的脉冲谱示于图1。数据处理中采用723、873、1000和1274 keV 4个点的数据,其中1000 keV是996.4和1004.8 keV的平均值。用2种拟合方式所得到的本征效率值彼此符合得很好。由此得到在低能量的 γ 射线区域,得到探测器的有效作用中心在它的几何中心稍偏后一点(约1 mm)。

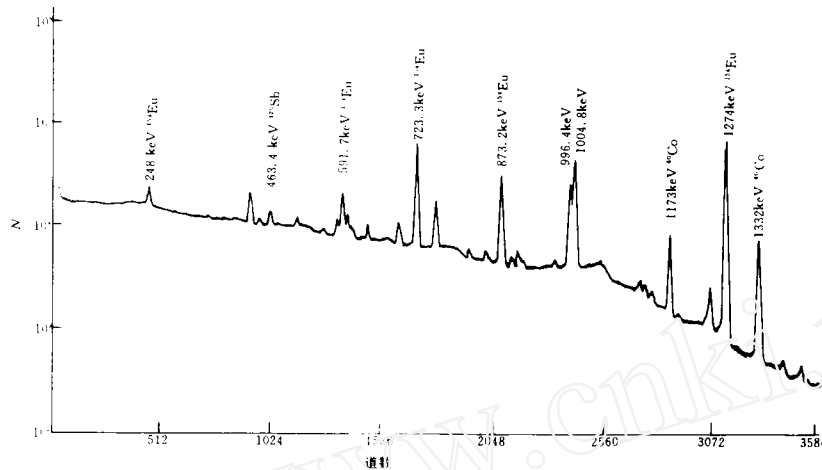


图1 低能多线源 γ 脉冲谱

Fig. 1 γ pulse spectrum of multiple lines radiation source

2) $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$ 衰变6129 keV γ 射线效率的计算 效率计算及校正等见文献[2]。由2种拟合方式所得结果在误差范围内一致。

3) Cl热中子俘获 γ 射线效率的计算 在距离28.5 cm处,探测器对源的效率在文献[1]有详细叙述。图2是一个脉冲谱示例。为得到本征效率,在每个距离下的能量效率拟合曲线上取给定能量点的效率值,用式(1)拟合,使截距 L 最小。全能峰从1900到8600 keV共20个点,双逃逸峰从4800到8500共10个点,单逃逸峰从2800到8600共15个拟合点。

此外,还利用下面测量Ni热中子俘获8998 keV γ 射线能点,根据Ni俘获 γ 各条线的分支比关系,将上面的本征效率关系曲线从8578 keV外推到9000 keV的数值进行校正。

以上所得全能峰、单逃逸峰以及双逃逸峰的本征效率值随能量的变化示于图3。由图可见, γ 射线能量低于2 MeV时,本征效率与能量关系和理论预期的指数衰减关系一致,说明用2种 γ 源刻度的结果一致。就6.13 MeV能量点而言,Cl俘获 γ 源与 $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)$ 反应源的结果在误差范围内一致。

本征效率值的误差来源于放射源、距离测量、峰面积拟合以及能量-效率关系拟合。粗略

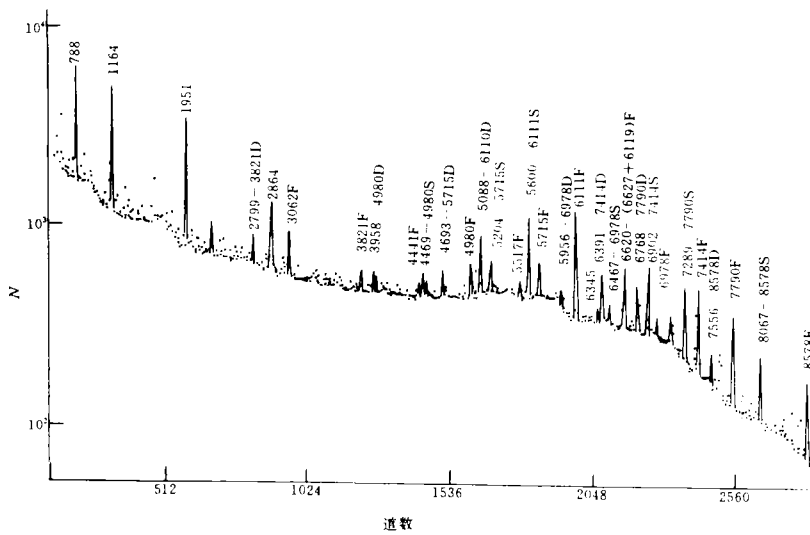


图 2 Cl 热中子俘获 γ 射线脉冲谱

Fig. 2 Chlorine capture γ pulse spectrum

图中 F、S、D 分别为全能峰、单逃逸峰、双逃逸峰。下同。

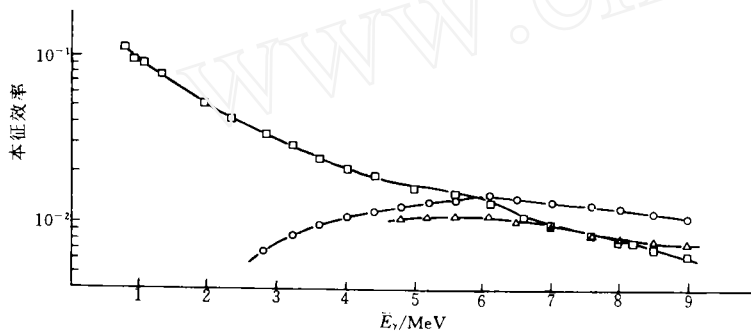


图 3 本征效率值随能量的变化

Fig. 3 Intrinsic efficiency curves vs γ energies

□——全能峰;○——单逃逸峰;△——双逃逸峰。

估计,低能 4 个点的误差在 3% 以内,6.129 MeV 能量点误差约为 5%, 9 MeV 外推点的误差约 10%,其他能量点的误差为 7%—10%。

3 3 种 γ 场的剂量值

3.1 Ni 热中子俘获 γ 场

实验在中国原子能科学研究院的游泳池式轻水反应堆 2 号孔道上进行。基本设置为 2 个

直径 10 cm 厚 8 mm 的金属 Ni 盘放在靠近反应堆芯距孔道口约 2 m 的位置处作为俘获 γ 源。直径 10 cm 长 46 cm 含有 Li_2CO_3 的聚乙烯靠近 Ni 样品,孔道口处的 0.5 mm 厚的 Cd 片和一块直径 20 cm、长度为 38.5 cm 的纯 Al 等用来过滤来自反应堆内的中子和 γ 束及经多次散射后而射出孔道的高能散射 γ 射线。在这种安排下,在距孔道出口墙壁外 254 cm 处形成一个直径约 17 cm 的高纯俘获 γ 束场。当反应堆功率在 3000 kW 以上时,它足够用来进行小电离室的电流测量以及 γ 剂量仪表的刻度。测量时探测器放在距反应堆孔道墙壁 254 cm 出射 γ 束的中心位置处。为使高纯锗探测器能刻度出 γ 束流强度的大小,在探测器前面有 15 cm 厚的 Pb,以及 31.5 cm 的聚乙烯来衰减 γ 束。测量 γ 脉冲幅度分布时的探测器工作条件与刻度效率时类似。

反应堆功率为 3500 kW 时测得的 Ni 俘获 γ 线的脉冲谱形如图 4 所示。从图 4 可见到发射率在 3% 以上的 Ni 俘获 γ 线,能量分别为 8998、8533、8120、7818、7537、6837、6105、5816 keV。此外,还有 2 条较强的 Al 俘获 γ 线 7723 keV 和 H 俘获 γ 线 2223 keV。Al 来自样品盒的包装材料和孔道外的铝过滤器,H 来自中子过滤器内的聚乙烯和防护材料中的石蜡,在剂量计算时包括了这两条 γ 线。

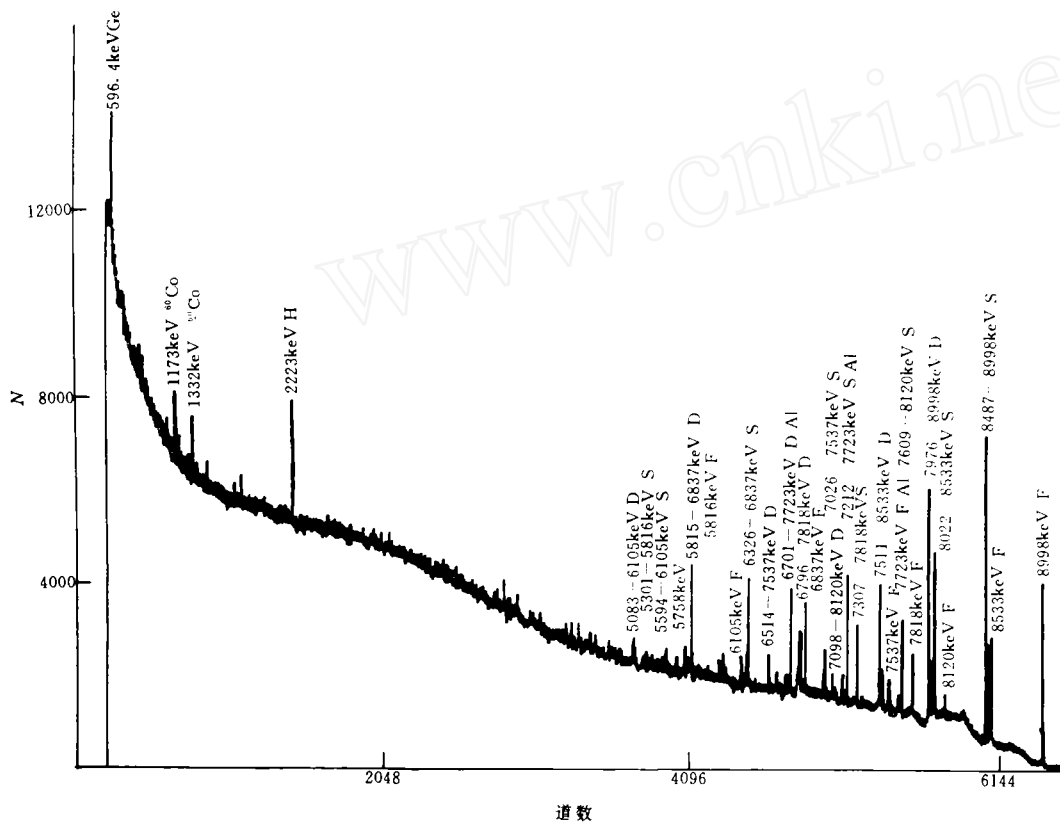


图 4 Ni 热中子俘获 γ 射线脉冲谱

Fig. 4 γ pulse spectrum of Ni neutron capture

用高分辨 γ 谱分析程序分别分析出所测量的各条 γ 线的全能峰、单逃逸峰、双逃逸峰的峰面积值。由求得的本征效率和探测器截面及测量时间, 求出相应能量 γ 射线的注量率, 即每秒每平方厘米 γ 光子数目 $\psi(\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2})$ 。探测器所在位置的 γ 空气比释动能率值 $\dot{K}(\text{Gy/s})$

$$\dot{K} = \psi E_{\gamma} (\mu_{\text{tr}}/\rho)_{\text{air}} \quad (5)$$

其中, E_{γ} 为 γ 射线能量, 单位为 J ($1 \text{ MeV} = 1.602 \times 10^{-13} \text{ J}$); $(\mu_{\text{tr}}/\rho)_{\text{air}}$ 是在空气中质能传递系数, m^2/kg 。数据引自文献[3, 4]。对多线 γ 源, 则是各种能量剂量之和。

按式(5)计算出通过 15 cm Pb 和 31.5 cm 聚乙烯衰减后的注量率值, 从而得出各种能量 γ 射线的空气比释动能率值列于表 1。

表 1 Ni 热中子俘获 γ 场各 γ 射线的注量率 ψ 及比释动能率值 \dot{K}

Table 1 Fluences and kerma rates of Ni capture γ -rays

E_{γ}	$\psi/10^4 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$	$\dot{K}/\text{mGy} \cdot \text{h}^{-1}$
8998	16.8	12.90
8533	6.47	4.73
8120	0.96	0.68
7818	2.29	1.57
7537	1.14	0.76
6837	2.75	1.70
6105	0.466	0.267
5816	0.37	0.207
7723	3.84	2.60
2223	0.41	0.12
总和		25.5

来自反应堆内的 γ 和热中子, 因通过孔道内的含硼聚乙烯和放在孔道口 γ 束上的铝过滤器衰减不会进入探测器和电离室而不用校正。需要校正的是 Ni 俘获低产额 γ 线和 511 keV γ 线。对散射 γ 射线、电子干扰和快中子剂量的校正另作考虑。

1) 对低产额 γ 线效应的校正 Ni 的俘获 γ 线除上面提到的部分外, 产额接近 1% 的(数据取自文献[5])还有 7696 (1.23%)、6583 (1.77%)、5973 (0.7%)、5836 (0.62%)、5695 (0.92%)、5312 (1.01%)、4858 (1.06%) keV。平均能量取为 6000 keV, 产额相加为 7.31%, 比相近的 6105 keV (1.88%) 大 3.9 倍, 对照 6105 keV γ 线的剂量作校正, 计算得到对低产额 γ 线的校正因子为 4%。

2) 511 keV γ 射线的校正 根据文献[6]的数据, 对于点源高能 γ 射线在环境物质中产生的 511 keV γ 射线, 其剂量值为总剂量的 5%。此处准直平行束取为 1%。从此处校正后 Ni 热中子俘获 γ 场的总空气比释动能率值为 26.8 mGy/h。由电离室在同一位置测得的空气比释动能率为 25.3 mGy/h。两者在误差范围内一致。

3.2 ${}^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha\gamma)$ 反应产生的 γ 场

当 $E_p = 2.04 \text{ MeV}$ 时, 产生 6129、6915 和 7115 keV 的 γ 射线场。锗探测器放在质子束 0° 方向, 其中心距 CaF_2 靶 103 cm。在与束成 45° 方向 150 cm 处放置一个小 NaI(Tl) 闪烁计数器作为束流监视器。

实验得到的 γ 脉冲谱示于图 5。由于多卜勒效应, 将 7115 和 6915 keV 脉冲峰明显展宽。

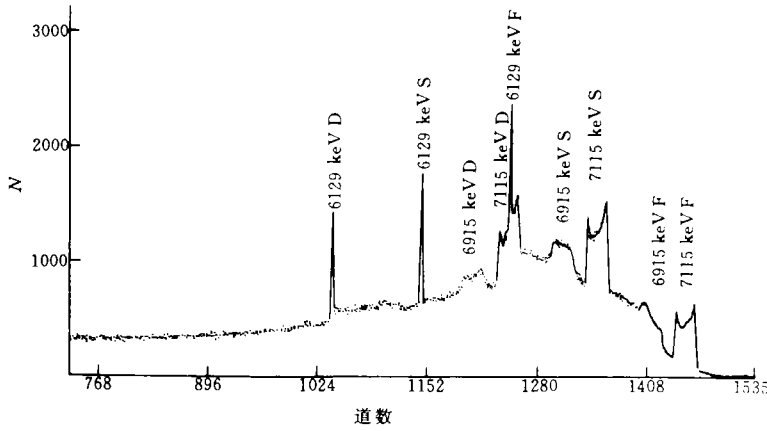


图 5 $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)$ 反应, $E_p = 2.04 \text{ MeV}$ 的 γ 脉冲谱

Fig.5 γ pulse spectrum for $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)$ reaction with $E_p = 2.04 \text{ MeV}$

数据处理时,由周围环境产生 511 keV γ 线的污染因子取为 1.05^[6]。表 2 给出探测器处单位面积单位监视器计数 (N_m) 时的 γ 注量值及空气比释动能率值。

表 2 $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)$ 反应 γ 线的注量及空气比释动能值

Table 2 γ fluence and air kerma value for $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)$ reaction γ field

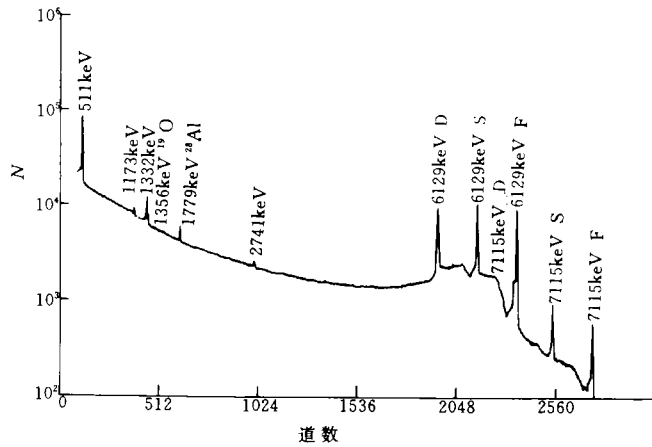
E_γ/MeV	ψ/cm^{-2}	$\dot{K}/\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$
6.13	0.085	1.40×10^{-12}
6.92	0.116	2.06×10^{-12}
7.11	0.381	6.86×10^{-12}
总计		1.032×10^{-11}

按强度反平方关系将 103 cm 处的数据换算到 12 cm 处(电离室测量位置),得到 12 cm 处在空气中的比释动能为 $\dot{K} = 7.6 \times 10^{-10} \text{ Gy}$, 对 511 keV γ 线校正后的数值为 $\dot{K} = 7.98 \times 10^{-10} \text{ Gy}$ 。电离室测试得出相应结果为 $\dot{K} = 8.32 \times 10^{-10} \text{ Gy}$ 。可见由 HPGe 所得数值稍小于电离室结果,这是因为周围物质散射效应、电子污染以及实验误差之故。

3.3 重水循环系统 γ 场

实验在反应堆重水循环系统的屏蔽门外 1.5 m、距地面高 1 m 处进行。探测器周围以及顶上有 5 cm Pb 屏蔽。为与剂量仪表能在同样条件下工作,在入射方向上另加 5 cm Pb 以衰减 γ 束。反应堆功率由小到大逐渐提升,最后达到适合探测器测量。

测试脉冲谱示于图 6,由反应堆中子与循环水的 $^{16}\text{O}(n, p)$ 反应生成的 $^{16}\text{N}^*$, β^- 衰变后到 ^{16}O 激发态上, ^{16}O 衰变到基态时发射 6129 keV 和 7115 keV 以及少量的 2750 keV 的 γ 射线。除此以外,还有来自环境中的 ^{60}Co 衰变产生的 1332 和 1173 keV 的 γ 射线本底;管道中少量 $^{27}\text{Al}(n, \gamma)^{28}\text{Al}$ 反应产生具有半衰期 2.24 min 的 ^{28}Al , 它的衰变产生 1779 keV 的 γ 射线;重水天然氧 $^{18}\text{O}(n, \gamma)^{19}\text{O}$ 反应产生的 ^{19}O 衰变发射 1356 keV γ 射线,其半衰期为 26.9 s。强度很大的 511 keV γ 线,大部分来自高能 γ 射线与探测器周围及环境物质相互作用,只有很小部分是高

图6 $^{16}\text{O}(\text{n}, \text{p})$ 反应 γ 脉冲谱Fig. 6 6.13 MeV γ pulse spectrum of $^{16}\text{O}(\text{n}, \text{p})^{16}\text{N}$ reaction

能 γ 射线与探测器的电子对相互作用而产生的;能量低于 511 keV 的 γ 线,则因几乎完全被屏蔽物质除掉,这里可以忽略不计。表 3 列出重水循环系统的 γ 空气比释动能率。

表 3 重水循环系统的 γ 空气比释动能率值Table 3 γ fluence and air kerma rate from $^{16}\text{O}(\text{n}, \text{p})$ reaction γ field

E_{γ}/MeV	$\psi/\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$	$\dot{K}/10^{-9}\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$
7115	142.1	2.52
6129	2457.5	39.17
2756	20.7	0.18
1778	82.3	0.58
1359	373.7	2.13
总计		44.6

空气比释动能率值为 $44.6 \times 10^{-9}\text{Gy/s} = 161 \mu\text{Gy/h}$ 。这种试验用于常规剂量仪表的刻度中。

4 结论

本工作得出对 N 型高纯锗 γ 探测器,在能量为 700—9000 keV 范围内的本征效率曲线,它包括全能峰、单逃逸峰和双逃逸峰 3 种效率值。其中用多线源的低能部分精度最高,单个能点误差好于 3%。6129 keV 能量点的误差估计约为 5%,其他能量在 2000—8500 keV 能区的误差为 6%—8%,个别能点可达 10%。9000 keV 是外推的,估计误差为 10%左右。这样的效率曲线完全可以用在剂量测定和一些核反应的研究中。

在这项工作中,给出一套确定探测器效率的方法,如首次使用 NaCl 中 Na 的热中子活化 γ 线来确定 Cl 俘获 γ 线的强度,避免了常规刻度中中子注量率量度和样品核数目的测量,也避免了高能与低能部分的连接归一问题,从而提高使用 Cl 俘获 γ 方法的精度。为求本征效率,采用实验数据随距离变化拟合的方法,在数据拟合过程中采用恰当的权,使得拟合结果更为合

理。利用得到的本征效率值,对3种高能 γ 场中的空气比释动能值进行计算,并与电离室测试值进行比较,两者结果在误差范围内符合。

感谢李景云,毕全礼提供的电离室剂量测试数据。

参 考 文 献

- 1 Ye Zongyuan, Li Yubing, Ding Shengyao, et al., A Modified Method for Efficiency Calibration of High Energy γ -Detector. Chinese Physics Letters, 1994, 11(1):12.
- 2 丁声耀,李宇兵,叶宗垣,等. 准单能6—7 MeV γ 射线参考辐射场的建立和对6.13 MeV能点 γ 探测器效率的绝对刻度. 原子能科学技术, 1992, 26(6):9-15.
- 3 Hubbell JH. Photo Mass Attenuation and Mass Energy-Absorption Coefficients for H, C, N, O, Ar and Seven Mixtures From 0.1 keV to 20 MeV, Radiation Research, 1977, 70:74.
- 4 Attix FH. The Partition of Kerma to Account of Bremsstrahlung. Health Phys, 1979, 36:347-354.
- 5 Lone MA. Prompt Gammas From Thermal-Neutron Capture. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1981, 26:511.
- 6 Rogers DWO. A Nearly Mono-energetic 6—7 MeV Photon Calibration Source. Health Physics, 1983, 45(1):127.

INTRINSIC EFFICIENCIES AND γ -DOSE DETERMINATIONS FOR HPGe DETECTOR AT MeV REGION

YE ZONGYUAN DING SHENGYAO
LI YUBING DING XIXIANG BAO ZONGYU YAN XIAOYUN

(Division of Radiometrology, China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-20, Beijing, 102413)

ABSTRACT

Using multiline γ radiation source, thermal neutron capture γ rays of NaCl and $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)$ reaction γ rays the intrinsic efficiencies of total energy, single escape and double escape peaks for high purity germanium detector are determined in the 700—9000 keV γ energy range. The measured doses of nickel thermal neutron capture γ ray field, $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)$ reaction γ ray field and 6.13 MeV γ ray field produced by $^{16}\text{O}(n, p)^{16}\text{N}$ reaction on the heavy water cyclic system of reactor are compared with measured data of the ionization chamber dosimeter.

Key words HPGe detector γ -intrinsic efficiency MeV γ -rays γ -air kerma rate