

# 30 MeV 电子直线加速器脉冲中子注量率 及剂量当量率的测定

李建平 吴靖民 刘曙东 唐鄂生

(中国科学院高能物理研究所)

## 摘 要

电子直线加速器的辐射场特点,要求探测器在窄脉冲辐射场中有正确的剂量响应,较高的 $n, \gamma$ 分辨能力和抗电磁干扰能力。本文中采用 $\text{In}$ 活化探测器测量脉冲中子,它能满足上述三点要求,是一种可靠的方法。此外,该探测器结构简单,造价低廉,便于大量使用。我们用它测定了30 MeV电子直线加速器屏蔽墙内外中子注量率及剂量当量率的分布。同时与TLD测量结果进行了比较。最后,讨论了韧致辐射的高能光子对 $\text{In}$ 发生的光核反应生成的活性对探测器的 $n, \gamma$ 分辨能力的影响。

## 一、加速器辐射场的特征

电子直线加速器运行时,电子在加速过程中由于束流损失或直接打靶,与物质相互作用而产生次级粒子。当电子能量较低时,电子在物质中的能量损失主要是使原子发生电离。当电子能量大于临界能量时,主要以韧致辐射损失能量,并在物质中发生电磁级联过程(如图1所示)。能量为 $E_0$ 的电子入射于介质中,产生韧致辐射(以波纹线表示),其光子又产生正负电子对(以虚线表示),继而在核 $N$ 上发生 $(\gamma, n)$ 反应,当光子能量在阈值以上30 MeV以下时,称为巨共振反应。这样,在加速器周围形成瞬发的韧致辐射和中子的混合辐射场,由于加速器中电子是脉冲式的,所以,辐射场也是脉冲式的。

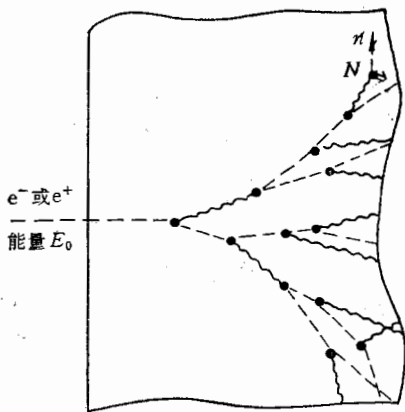


图1 电磁级联过程

本测量是在高能所30 MeV电子直线加速器上进行的,电子最高能量为26 MeV,束流脉冲宽度 $1 \mu\text{s}$ ,脉冲重复频率50pps,平均流强 $\sim 8 \mu\text{A}$ 。

率

剂  
器  
结  
屏  
比  
测

### (1) 中子产额

电子轰击无限厚靶时, 中子产额与电子能量  $E_0$  和靶材料的关系曲线见文献 [1] 图 34. 当  $E_0$  为 26 MeV, 平均流强  $8.3 \mu\text{A}$  时, 求得金靶(厚度 4mm) 的中子产额是  $\sim 3 \times 10^{11}\text{n/s}$ .

### (2) 中子能谱

按巨共振光核反应的机制, 产生的中子具有“蒸发能谱”, 即近似于裂变中子能谱. 文献 [1] 图 28 比较了铅的巨共振中子能谱和裂变中子能谱, 两者极为相似.

### (3) 中子角分布

蒸发中子能谱的特点是中子按各向同性分布, 见文献 [1] 图 6.

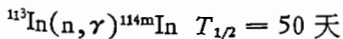
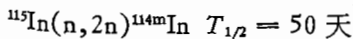
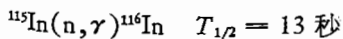
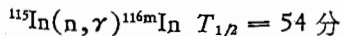
此外, 文献 [1] 图 20 和图 6 还给出韧致辐射的光子能谱、角分布和产额. 30 MeV 电子直线加速器韧致辐射的能量较高, 其光子的平均能量为 7.3 MeV, 角分布各向异性, 在与入射电子束成  $0^\circ$  的方向最强.

在测量中子注量率时, 除有较强的韧致辐射场外, 还有加速器速调管产生的强电磁干扰.

## 二、铟活化探测器

探测器(见图 2)是由铝箔 ( $\phi 25 \times 0.2\text{mm}$ ) 置于圆柱形聚乙烯慢化体中心组成. 慢化体的尺寸是  $\phi 125 \times 125\text{mm}$ , 慢化体外面包有 0.8mm 厚的镉片.

入射的“镉上中子”进入聚乙烯慢化体被慢化, 然后被铟俘获. 铟有两种核素:  $^{113}\text{In}$ (4.23%) 和  $^{115}\text{In}$ (95.8%), 热中子与铟发生如下反应:



In 探测器在测点位置照射  $t_i$  时间, 照射后等待  $t_w$  时间, 再进行  $\beta$  活性测量, 计数测量时间为  $t_c$ . 合理选择照射时间  $t_i$ , 例如 50~100 分钟, 即 1—2 个  $^{116\text{m}}\text{In}$  的半衰期, 既可使  $^{116\text{m}}\text{In}$  接近饱和活性, 而  $^{114\text{m}}\text{In}$  的活性又不大. 照射完了至少等待 3 分钟再测量, 使  $^{116}\text{In}$  充分衰变. 这样, 所测得的活化度主要是  $^{116\text{m}}\text{In}$  的贡献. 值得注意的是, 探测器在长期连续使用后(如一个月), 在照射前还应测量 In 箔的本底计数. 探测器外包有镉片, 目的是减少靶室内壁散射的慢中子的影响.

In 的饱和和活性计数率按如下公式计算:

$$\epsilon A_s = \epsilon N \sigma_n \tau \phi_0 = \frac{\lambda(c - B)}{(1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_w} (1 - e^{-\lambda t_c})} \quad (1)$$

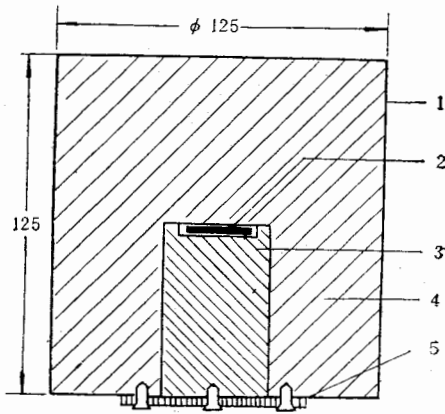


图 2 铟活化探测器结构

1 镉片, 2 铝箔, 3 聚乙烯芯柱, 4 聚乙烯, 5 铝板

相互作用  
电子  
电离  
致辐射  
呈(如图  
中,产生  
生正负  
粒( $\gamma, n$ )  
以下时,  
形成瞬  
于加速  
脉冲式  
eV, 束

式中,  $\lambda$  为  $^{116m}\text{In}$  的衰变常数,  $N$  为 In 片中 In 的原子数,  $\sigma_{n,r}$  为 In 的热中子活化截面,  $\phi_n$  为热中子注量率,  $\epsilon$  为  $\beta$  计数器的探测效率,  $c$  为在  $t_c$  时间内的总计数,  $B$  为  $t_c$  时间内的本底计数,  $A_s$  为饱和活性. 当计数时间为几分钟时,  $e^{-\lambda t_c} \ll 1$ , 则(1)式可简化为:

$$\epsilon A_s = \frac{(c - B)e^{\lambda t_w}}{t_c(1 - e^{-\lambda t_c})} \quad (2)$$

由公式(1)可见, 饱和活性计数率  $\epsilon A_s$  与热中子注量率成正比, 而热中子注量率又与入射的快中子注量率成正比. 所以, 当 In 活化探测器用已知强度的中子源刻度后, 即可测得现场的中子注量率.

In 活化探测器对中子能量的响应见文献[2], Stephens 和 Smith 用 Po-Li, Mock 裂变中子, d-d, Po-Be 和 d-t 等中子源, 测量了注量率与能量关系的曲线, 表明 In 活化探测器有较平坦的注量能量响应特性.

### 三、 $\beta$ 放射性测量装置

$\beta$  钟罩形 G-M 管测量装置<sup>1)</sup>的优点是: (1)对 In 活化片发出的  $\beta$  粒子, 凡能通过云母窗(厚度为  $1.5\text{mg}/\text{cm}^2$ )而进入计数管灵敏体积的都能被记录, 探测效率  $\sim 100\%$ ; (2)计数管坪长 250V, 坪斜  $\leq 0.05\%/V$ ; (3)输出脉冲幅度可达 0.5V, 脉冲波形标准, 对电子学电路要求不高. 缺点是: 死时间长  $120\mu\text{s}$ , 测量装置的分辨时间 ( $t_p$ ) 较死时间长, 并与甄别阈的高低有关<sup>[3]</sup>. 在现场测量时, 为消除周围电磁场的干扰, 设置甄别阈较高 (2V), 分辨时间用双源法测定为  $200\mu\text{s}$ , 最大计数率为:

$$N_p = \frac{1}{t_p} = 5 \times 10^3 \text{ cps}$$

考虑到输入脉冲的统计分布, 最大计数率为  $\sim 2 \times 10^3 \text{ cps}$ .

### 四、刻 度

刻度用中子源  $^{252}\text{Cf}$  的强度为  $1.125 \times 10^8 \text{ n/s}$ , 不确定度为  $\pm 5\%$ , 平均能量为 2.35 MeV. 其能谱与电子直线加速器巨共振光核反应产生的中子谱相似. 所以, 可不考虑能量响应问题.

刻度是在混凝土地面上, “露天”(木板房)条件下进行的. 中子源和探测器间的距离  $D = 1\text{m}$ , 它们离开地面  $H = 1.5\text{m}$ , 即  $H/D = 1.5$ , 在此情况下, 散射剂量与直接剂量之比小于  $4\%$ <sup>[4]</sup>.

按  $^{252}\text{Cf}$  源强求出离源 1m 处的中子注量率  $\phi_0$ , 再由公式(1)求出读数装置的刻度常数  $K$ :

1) 北京综合仪器厂定型产品, 带有一铅室.

或

式中:  
 $\text{cm}^2 \cdot$   
率大/  
 $[\text{g} \cdot \text{r}$   
(1%)E  
(sv · l

禾

电  
表击 4  
在 1m

In

化截面,  
1/c 时间  
可简化

$$K = \frac{\varepsilon A_s}{m\phi_0} = \frac{\lambda(c-B)}{m\phi_0(1-e^{-\lambda t_i})e^{-\lambda t_w}(1-e^{-\lambda t_c})} \quad (3)$$

或

$$K = \frac{(c-B)e^{-\lambda t_w}}{m\phi_0 t_c(1-e^{-\lambda t_i})} \quad (4)$$

(2)  
与入射  
可测得

式中  $m$  为铝箔的质量。上式的物理意义是: 每一克 In 对入射的单位中子注量率 ( $\text{In}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ) 的计数率 (cpm), 用 (cpm)  $[\text{g} \cdot \text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}]^{-1}$  表示,  $K$  为一常数, 与入射中子注量率大小无关, 仅与活化材料和中子能谱有关。对于本读数装置,  $K = 3.4 \pm 0.2$  (cpm)  $[\text{g} \cdot \text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}]^{-1}$ 。刻度时的不确定度为 6%, 它是由源本身 (5%)、源和探测器间距离 (1%)、读数 (2%)、时间 (1%) 和其他 (2%) 不确定度, 用方和根求得。

由此, 可求得测量现场的平均中子注量率  $\phi$  为:

$$\phi = \frac{\varepsilon A_s}{K \cdot m} \quad (5)$$

由测定的平均中子注量率  $\phi$ , 利用  $^{252}\text{Cf}$  中子源的平均剂量换算系数  $\bar{F} = 2 \times 10^{-3}$  ( $\text{sv} \cdot \text{h}^{-1})(\text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$ ], 求出中子的平均剂量当量率  $\dot{H}$ :

$$\dot{H} = \frac{\varepsilon A_s}{K \cdot m} \cdot \bar{F} \quad (6)$$

利用占空因子可求出脉冲中子注量率及剂量当量率。

## 五、测量结果

电子直线加速器运行时, 电子能量  $E_0 = 26 \text{ MeV}$ , 平均束流强度  $\bar{I} = 8 \mu\text{A}$ , 电子轰击 4mm 厚的金靶。在靶室内布置了三个测点:  $\phi_1$ 、 $\phi_2$  和  $\phi_3$ 。铅屏蔽门外一个点  $\phi_4$ 。在 1m 厚的混凝土屏蔽墙外一个点  $\phi_5$ , 见图 3。测量结果见表 1。

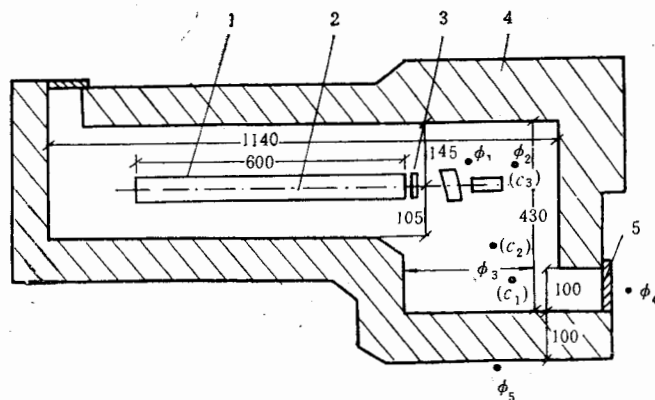


图 3 直线加速器靶周围测点分布

1. 加速管, 2. 电子束, 3. 金靶, 4. 混凝土屏蔽墙, 5. 铅屏蔽门。(图中尺寸单位: cm)

$^{115}\text{In}$  活化探测器测量中子注量率的结果与 TLD ( $^6\text{LiF}$  和  $^7\text{LiF}$ ) 测量值作了比较, 在靶

能通过云  
6; (2) 计  
电子学电  
并与甄  
(2V), 分

能量为  
可考

间的距离  
直接剂量

刻度常数

周围取了三个测量点, 分别以  $c_1$ 、 $c_2$  和  $c_3$  表示. 两种方法测量结果在它们的总不确定度范围内相符合(见表 2)

表 1 加速器周围中子注量率分布

( $E_0 = 26 \text{ MeV}$   $\bar{i} = 8 \mu\text{A}$ )

测量点	平均中子注量率 ( $\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ )	平均剂量当量率 ( $\text{sv}/\text{h}$ )
$\phi_1$	$(1.9 \pm 0.2) \times 10^3$	0.228
$\phi_2$	$(1.5 \pm 0.2) \times 10^3$	0.180
$\phi_3$	$(8 \pm 0.8) \times 10^4$	0.096
$\phi_4$	$(5 \pm 0.5) \times 10^3$	0.006
$\phi_5$	$(7 \pm 0.7) \times 10$	$8.4 \times 10^{-3}$

表 2 In 箔与 TLD 测量结果的比较

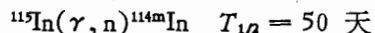
测量点	探测器	平均剂量当量率( $\text{sv}/\text{h}$ )
$c_1$	In <sup>1)</sup>	0.0889
	TLD <sup>2)</sup>	0.0857
$c_2$	In	0.0657
	TLD	0.0665
$c_3$	In	0.1684
	TLD	0.1695

1) In 活化探测器的总不确定度为 10%.

2) TLD 的总不确定度为 10%.

## 六、讨 论

1. 关于韧致辐射中高能光子对 In 活化探测器  $n$ 、 $\gamma$  分辨能力的影响问题. 当光子能量超过 In( $\gamma, n$ ) 反应阈值 ( $K_{th} = 9.03 \text{ MeV}$ ) 时<sup>[1]</sup>, 发生如下反应:



截面最大处的能量  $K_0 = 15.63 \text{ MeV}$ , 共振最大处截面  $\sigma_m = 266\text{mb}$ . 当 In 箔被照射 1 小时, 由 ( $\gamma, n$ ) 反应产生的活性, 造成  $\beta$  粒子的发射率计算如下:

$$A_0 = N\sigma_{\gamma, n}\phi_{\gamma}(1 - e^{-\lambda t_i})$$

式中  $\phi_{\gamma}$  为光子注量率, 对于能量为 26 MeV 的电子, 产生超过 In 光核反应阈值的韧致辐射光子注量率仅为总注量率的 15%. In 的 ( $\gamma, n$ ) 与 ( $n, \gamma$ ) 反应截面之比为:

$$\frac{\sigma_{\gamma, n}}{\sigma_{n, \gamma}} = \frac{266 \times 10^{-3} b}{29000 b} \approx 10^{-5}$$

另外,  $^{115}\text{In}(\gamma, n)^{114\text{m}}\text{In}$  中的  $^{114\text{m}}\text{In}$ ,  $T_{1/2} = 50$  天, 而  $^{115}\text{In}(n, \gamma)^{116\text{m}}\text{In}$  中的  $^{116\text{m}}\text{In}$ ,  $T_{1/2} = 54$  分, 所以, 当 In 照射 1 小时, 由光核反应生成的  $\beta$  粒子发射率只占饱和活性的  $5.8 \times 10^{-4}$ . 但电子直线加速器的光子注量率较中子注量率强  $\sim 10^4$ . 综上所述, ( $\gamma, n$ ) 与 ( $n, \gamma$ ) 反应产生的活性之比是:

可见

土内  
与靴

的散  
化体  
量贡

源的  
其换  
软时

射场  
较高  
场干  
是个

[1]

[2]

[3]

[4]

[5]

[6]

内总不确定度

$$G = \frac{N\sigma_{\gamma,n}\phi_{\gamma}(1 - e^{-\lambda_1 t_i})}{N\sigma_{n,\gamma}\phi_n(1 - e^{-\lambda_2 t_i})}$$

$$\approx 10^{-3} \times 10^4 \times 10^{-4} \approx 10^{-3}$$

可见, In 活化探测器对  $\gamma$  射线是不灵敏的, 它是一种 n、 $\gamma$  分辨能力较强的探测器。

2. 靶室对中子的散射。本测量中靶室的墙壁、顶盖和地板的厚度, 均大于中子在混凝土内的衰减长度  $\lambda$  值, 所以靶室内的散射中子, 是经过多次散射形成的, 其散射贡献大小与靶室的大小有关, 文献[6]给出具体数据。对本工作靶室散射的注量贡献为  $\sim 100\%$ 。

散射中子能谱。原初中子谱经过靶室的多次散射后使其软化, 可参考 Pu-Be 中子源的散射谱形<sup>[6]</sup>, 表明散射中子中镭下中子贡献较小。我们在同一测量点, 对包有聚乙烯慢化体的  $^6\text{LiF}$  和  $^7\text{LiF}$ , 与不包慢化体的  $^6\text{LiF}$  和  $^7\text{LiF}$  测量的结果作了比较, 表明热中子的剂量贡献占 5%。

由于 In 活化探测器的注量-能量响应特性平坦<sup>[2]</sup>, 所以, 当测量现场的中子谱较刻度源的能谱软时, 对中子注量率的测量影响不大。但是, 当由注量率转换成剂量当量率时, 其换算系数与能量有关(见 ICRP-21 号报告), 如果测量现场的中子能谱较刻度源的能谱软时, 求得的剂量当量率要偏高, 但在本测量中散射剂量贡献小于 30%<sup>[6]</sup>。

3. In 活化探测器的优点可归纳如下: (1) 由于它是贮能型探测器, 对窄脉冲中子辐射场无漏计问题, 可以给出正确的剂量响应; (2) 对  $\gamma$  射线(包括高能光子在内)不灵敏, 有较高的 n、 $\gamma$  分辨能力; (3) 可同时测量加速器周围各点的中子注量率分布; (4) 不受电磁场干扰。在电子或质子直线加速器上测量中子时, 对一般探测器来说电磁场的干扰往往是个严重的问题。

感谢王耀兰同志提供有关 TLD 的测量数据和刘桂林同志审阅文稿。

### 参 考 文 献

- [1] W. P. Swanson, Radiological Safety Aspects of the Operation of Electron Linear Accelerator IAEA-188 (1979).
- [2] L. D. Stephens, A. R. Smith, Fast Neutron Surveys Using Indium-Foil Activation UCRL-8414(1958).
- [3] Е. И. Долшрев, Детекторы Ядерных Излучений, Судпромгиз(1961).
- [4] F. H. 阿蒂斯等, 辐射剂量学, 第三卷(上), 383(1981).
- [5] 陈常茂等, 原子能科学技术, 5(1980), 633.
- [6] A. K. Са Винский, Neutron Monitoring for Radiation Protection Purposes, Vol. 1(1973), 220.

当光子能

箔被照射 1

值的韧致辐  
为:
$$1, T_{1/2} = 51$$

$$15.8 \times 10^{-4}$$

$$\bar{\epsilon} (n, \gamma) \text{ 反}$$

## MEASUREMENT OF PULSED NEUTRON FLUX AND DOSE EQUIVALENT RATE FOR 30MeV ELECTRON LINAC

LI JIAN-PING    WU JING-MIN    LIU SHU-DONG    TANG E-SHENG

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica*)

### ABSTRACT

In this paper Indium active detector is suggested to measure the pulsed neutrons around Electron Linac. It can be hopefully expected to have correct dose response of detector in the short pulsed neutron field, high resolution ability of the neutrons to  $\gamma$ -rays and of against electromagnetic disturbance.

This detector was used to measure the distribution of neutron flux and dose equivalent rate both inside and outside of the 30 MeV Electron Linac shield. The results are compared with TLD measurement. At the end of this paper the Indium activation products by high energy photon reaction ( $\gamma, n$ ) are estimated.

射计  
是采  
射计  
并工  
的机  
盖簇  
器 T<sub>1</sub>  
物理性

由 0.5  
13.9m  
号由附  
实验中