

# 加速器混合辐射剂量场的测量

唐鄂生 陈之布 李建平 刘曙东

(中国科学院高能物理研究所)

## 摘 要

高能粒子加速器周围的辐射场是粒子成分复杂的混合场。并且具有脉冲性。我们用三探头混合场剂量测定仪,初步测量了10MeV质子直线加速器调机过程中直线厅的辐射场分布,给出了中子与 $\gamma$ 成分的吸收剂量率,剂量当量率及混合场的平均品质因子,对测量结果及不确定度作了分析和讨论。

## 一、引 言

高能粒子加速器周围的剂量场是粒子成分复杂的混合辐射场,占空比小,瞬时辐射剂量率极高。为了评价辐射场的特性,我们制作了三探头混合辐射场剂量测定仪,分别给出了中子与 $\gamma$ 成分的组织吸收剂量率、剂量当量率以及混合场的平均品质因子等。

## 二、测量原理和方法

### 1. 组织吸收剂量率 $\dot{D}$ 的测量

在混合场的组织吸收剂量的测量中,我们选用两种剂量计。中子灵敏剂量计采用组织等效电离室( $T$ 计),中子不灵敏剂量计采用铝壁空气电离室( $U$ 计)。它们在( $n, \gamma$ )混合场中的响应可用下列方程式描述:

$$R(T) = \epsilon_r(T)\dot{D}_r + \epsilon_n(T)\dot{D}_n \quad (1)$$

$$R(U) = \epsilon_r(U)\dot{D}_r + \epsilon_n(U)\dot{D}_n \quad (2)$$

式中:  $R(T)$ ,  $R(U)$  分别表示  $T$  计及  $U$  计在混合场中的读数 (cps);  $\epsilon_r(T)$ ,  $\epsilon_n(T)$  和  $\epsilon_r(U)$ ,  $\epsilon_n(U)$  分别表示  $T$  计和  $U$  计对混合场中的  $\gamma$  与中子的吸收剂量率灵敏度 [cps/(mrad/h)]。  $\dot{D}_r$  和  $\dot{D}_n$  分别表示混合辐射场中  $\gamma$  和中子的组织吸收剂量率 (mrad/h)。

为了便于误差分析及运算,  $\dot{D}_n$  及  $\dot{D}_r$  的解,通常总是用相对灵敏度的形式来表示,由方程式 (1)、(2) 可得:

$$\dot{D}_n = \frac{h_U R'(T) - h_T R'(U)}{h_U k_T - h_T k_U} \quad (3)$$

$$\dot{D}_r = \frac{k_T R'(U) - h_U R'(T)}{h_U k_T - h_T k_U} \quad (4)$$

$R'(T)$  和  $R'(U)$  分别表示  $T$  计和  $U$  计在混合场中的读数与刻度用的  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  灵敏度  $\varepsilon_{\text{Co}}$  之比, 即  $R'(T) = R(T)/\varepsilon_{\text{Co}}(T)$ 、 $R'(U) = R(U)/\varepsilon_{\text{Co}}(U)$ ;  $k_T$  和  $k_U$  分别表示  $T$  计和  $U$  计对中子的灵敏度与刻度用的  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  灵敏度之比, 即  $k_T = \varepsilon_n(T)/\varepsilon_{\text{Co}}(T)$ ,  $k_U = \varepsilon_n(U)/\varepsilon_{\text{Co}}(U)$ ;  $h_T$  和  $h_U$  分别表示  $T$  计和  $U$  计对混合场中的  $\gamma$  灵敏度与刻度用的  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  灵敏度之比, 即  $h_T = \varepsilon_\gamma(T)/\varepsilon_{\text{Co}}(T)$ ,  $h_U = \varepsilon_\gamma(U)/\varepsilon_{\text{Co}}(\gamma)$ .

通常, 电离室对不同能量的  $\gamma$  射线几乎有相同的灵敏度, 因此可以认为  $h_T = h_U = 1^{[1]}$ . 因此只要知道  $k_T$  和  $k_U$ , 代入 (3)、(4) 式后, 即可求出  $\dot{D}_n$  及  $\dot{D}_\gamma$ .

机体组织在混合场中总的吸收剂量率可用下式求出:

$$\dot{D}_t = \dot{D}_n + \dot{D}_\gamma \quad (5)$$

## 2. 剂量当量率 $\dot{H}$ 的测定

中子剂量当量率  $\dot{H}_n$  通常用雷姆仪来测量, 但市售的雷姆仪(例如 2202D 等)在占空比很小的中子辐射场中应用时, 会有严重的漏计数发生. 为了适应脉冲场的特性, 我们研制了以包银的 GM 计数管为中心探测器的雷姆仪(简称 Ag-rem 仪), 其工作原理及在脉冲场中的响应可见文献 [2].

混合场中的中子剂量当量率  $\dot{H}_n$  可用下式求出:

$$\dot{H}_n = R(\text{rem})/\varepsilon(\text{rem}) \quad (6)$$

式中:  $\varepsilon(\text{rem})$  为中子灵敏度 [cps/(mrem/h)], 用标准中子源标定.  $R(\text{rem})$  为雷姆仪的读数 (cps).

混合场的  $\gamma$  剂量当量率  $\dot{H}_\gamma = \dot{D}_\gamma$ .

混合场的总剂量当量率:

$$\dot{H}_t = \dot{H}_n + \dot{H}_\gamma \quad (7)$$

## 3. 混合场平均品质因子 $\bar{Q}$

组织中某一点的剂量当量  $H$  与该点的吸收剂量  $D$  之间的关系由下列方程描述<sup>[3]</sup>:

$$H = DQN \quad (8)$$

$Q$  为品质因子,  $N$  为其他修正因子的乘积, 目前 ICRP 指定  $N = 1$ . 实际的辐射场总是多粒子成分并且粒子具有复杂的能谱分布, 此时可使用平均品质因子  $\bar{Q}$ :

$$\bar{Q} = H/D = \dot{H}_t/\dot{D}_t \quad (9)$$

将 (5) 与 (7) 代入 (9) 即可得出混合场的  $\bar{Q}$ .

# 三、测量系统与仪器标定

测量系统如图 1 所示, 它包括三个探头及有关电路及仪器, 它们装置在一辆小仪器车上, 便于移动, 有时我们把它称之为“三头狗”.

## 1. 组织等效电离室

组织等效电离室为以 A-150 TE 塑料为室壁的 P 型电离室, 灵敏体积:  $500\text{cm}^3$ ; 充

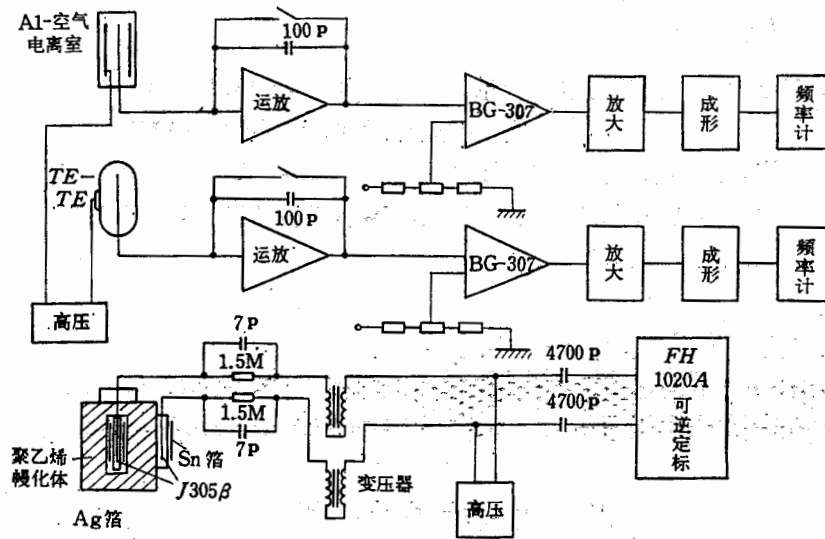


图 1 三探头剂量测定仪原理图

气压力：0.4atm；气体成分：CH<sub>4</sub>-64.4%；CO<sub>2</sub>-32.4%；N<sub>2</sub>-3.2%。

用 <sup>60</sup>Co 及 <sup>252</sup>Cf 对它进行了  $\gamma$  与中子响应的标定。 $\gamma$  辐射场：200 $\mu$ r/s，源强不确定度  $\pm 4\%$ 。中子辐射场：6.2mrad/h，源强不确定度  $\pm 4\%$ 。由于 <sup>252</sup>Cf 中含有约 1/3 的  $\gamma$  成分，我们按照 ICRP-21 号报告中提供的数据作了修正，其吸收剂量灵敏度如表 1 所示。

表 1 组织等效电离室的吸收剂量灵敏度

$\epsilon_n(T)[\text{cps}/(\text{mrad}/\text{h})] \times 10^{-4}$	$\epsilon_r(T)[\text{cps}/(\text{mrad}/\text{h})] \times 10^{-4}$	$k_T$
6.5 $\pm$ 0.9	6.3 $\pm$ 0.3	1.02 $\pm$ 0.19

由表 2 看出，T 计的  $\epsilon_n(T)$  与  $\epsilon_r(T)$  有近似相同的灵敏度，这是符合组织等效要求的。

## 2. 圆柱形 Al-Air 电离室

中子不灵敏电离室为自制的 Al 壁充空气柱状电离室，灵敏体积 1150cm<sup>3</sup>，外面包有不锈钢筒，用以屏蔽加速器电磁场的干扰。

将电离室置于同上的 <sup>60</sup>Co 及 <sup>252</sup>Cf 辐射场中标定，其灵敏度系数如表 2 所示。

表 2 Al-Air 电离室的吸收剂量灵敏度

$\epsilon_n(U)[\text{cps}/(\text{mrad}/\text{h})] \times 10^{-4}$	$\epsilon_r(U)[\text{cps}/(\text{mrad}/\text{h})] \times 10^{-3}$	$k_U$
1.2 $\pm$ 0.2	1.53 $\pm$ 0.08	0.08 $\pm$ 0.01

由表 2 看出，Al-Air 电离室的中子相对  $\gamma$  的灵敏度约为 0.1。

### 3. 脉冲电荷积分器

当电离室置于脉冲辐射场中测量时,输出的电离电流是与加速器脉冲辐射场同步的脉冲电流,其宽度等于离子在电离室内的途越时间,它决定于极间距离及电场强度.对于这种脉冲电流,我们采用积分和比较电路将其线性地转换成脉冲频率<sup>[4]</sup>.实验表明此种积分电路用于脉冲电荷测量时,性能稳定、漂移小,既可显示平均剂量率,又可显示积分剂量,这在应用中是很方便的.

### 4. 脉冲中子雷姆仪

Ag 箔脉冲中子雷姆仪的测量系统如图 1 所示,Ag 箔厚 0.12mm,Sn 箔厚 0.2 mm.探测器用 <sup>252</sup>Cf 中子源标定,灵敏度:  $\epsilon_n(\text{rem}) = 0.27 \pm 0.05 \text{ cps}/(\text{mrem}/\text{h})$ .

## 四、测量结果及分析讨论

中国科学院高能物理所 10MeV 质子直线加速器于 1982 年底首次出束成功,1983 年处于调试阶段,为了配合调试,确保安全,我们用上述仪器对直线加速器大厅内的辐射场分布,作了初步测量与分析.

10MeV 质子直线加速器的结构及测量点布置如图 2 所示,测量结果列于表 3.

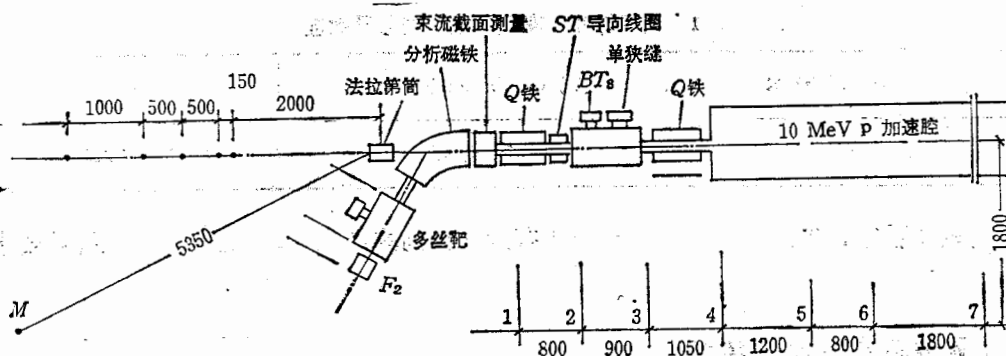


图 2 10MeV 质子直线加速器辐射场测量点

### 1. 测量偏差的分析

成对电离室测量吸收剂量的不确定度主要来自以下几项:

- ① 标定: 包括源强、剂量当量转换系数、散射、饱和修正等因素,其不确定度约为 7%—10%.
- ② 能量响应: 10MeV 质子打 *c* 靶发生  $(p, n)$  反应, 出射中子的能谱主要分布在 2—5MeV 范围<sup>[5]</sup>, 在该能区内, *T* 计及 *U* 计对中子有较为平坦的响应, 保守的估计可以认为  $\Delta k_U/k_U < 40\%$ , 按关系式 (10)<sup>[4]</sup>:

表 3 10MeV 质子直线加速器厅内的剂量场分布

位 置	0° 方向, c 靶(法拉第筒)						90° 方向, Al片		加 速 腔 平 行 区						
	2.00	2.15	2.65	3.15	4.15	2.77	10	1	2	3	4	5	6	7	
靶 距 [m]	42	32	48	40	/	2.77	10	1	2	3	4	5	6	7	
瞬时流强 [mA]	1/11.0	1/22.5	1/17.5	1/38.2	1/46	1/23.8	1/15.9	1/83.8	1/185.7	1/162.8	1/104.3	1/101.0	1/104.5	1/154.9	
读 数 [cps]	1/5.7	1/11.0	1/9.0	1/17.5	1/20.5	1/15.9	95	1/109.3	1/107.9	1/101.2	1/169.8	1/157.0	1/163.4	1/176.8	
	26.8	16.1	28.1	8.3	7.8	95	29.3	18.0	17.5	35.3	38.4	40.7	28.2		
吸 收 剂 量 率 [mrad/h]	142±28	69	89.3	40.9	30.4	92.7±12.0	18.6	8.4	9.6	15.0	15.0	15.5	14.9	10.1	
	±14	±14	±17.8	±8.8	±7.4	±12.0	±4.0	±1.6	±1.8	±3.4	±3.4	±3.4	±3.4	±2.0	
	30.8	11.5	18.8	4.3	2.6	26.9±5.9	13.8	2.6	3.4	12.0	12.0	12.2	11.8	6.9	
	±13.8	±7.1	±8.8	±4.4	±3.7	±5.9	±2.0	±0.8	±0.9	±1.7	±1.7	±1.7	±1.7	±1.0	
剂 量 当 量 率 [mrad/h]	111.2	57.5	70.5	36.6	31.4	65.8±6.1	5.1	5.8	6.2	3.0	3.0	3.3	3.1	3.2	
	±14.0	±7.1	±8.8	±4.4	±3.7	±6.1	±2.0	±0.8	±0.9	±1.7	±1.7	±1.7	±1.7	±1.0	
质 质 因 子 $\bar{Q}$	99.2	59.7	104.1	30.7	29.0	293.8±73.4	105.3	65.0	63.7	127.4	139.0	146.2	146.2	102.7	
	±27.1	±16.3	±28.4	±7.5	±5.7	±73.4	±30.0	±19.5	±19.1	±38.1	±41.7	±44.1	±44.1	±30.8	
质 质 因 子 $\bar{Q}$	207.9	115.7	171.9	66.5	60.6	359.6±79.5	110.4	70.8	69.9	130.4	142.3	150.0	150.0	105.9	
	±41.1	±23.4	±37.2	±11.9	±9.4	±79.5	±32.0	±20.3	±20.0	±39.8	±43.4	±45.8	±45.8	±31.8	
质 质 因 子 $\bar{Q}$	1.5	1.7	1.9	1.6	2.0	3.9	5.9	8.4	7.3	8.7	9.2	10	10	10.5	

$$\frac{\Delta D_n}{D_n} = \frac{\Delta k_U/k_U}{1/k_U - (1 + \Delta k_U/k_U)} \quad (10)$$

可以估算出由于  $k_U$  的不确定度引起的  $D_n$  的相对偏差  $< 4\%$ 。

③ 测量过程中的不确定度：包括积分器的撞击电荷、电离室的漏电、离子的复合效应等。按照估计电离室收集效率两点法的理论<sup>[4]</sup>，我们在电离室的极化电压分别为 800V 及 400V 两种条件下作了测量，由此测得的电离室收集效率约为 92%。由以上各项引起的不确定度为 8—9%。

综合以上三项引起的总不确定度： $\frac{\Delta D_n}{D_n} \leq 13\%$ ；

$$\frac{\Delta D_r}{D_r} \leq 11\%。$$

④ 用成对电离室测量混合场时，分剂量的不确定度不仅与探测器本身的不确定度有关，而且与混合场中子与  $\gamma$  的相对比值有关：

$$\frac{\Delta D_n}{D_n} = -\frac{\Delta D_r}{D_r} \cdot \frac{D_r}{D_n} \quad \text{或者反之：} \quad \frac{\Delta D_r}{D_r} = -\frac{\Delta D_n}{D_n} \times \frac{D_n}{D_r}$$

从表 3 看出，在  $0^\circ$  方向，由于  $D_r$  成分相对较高 ( $D_r > D_n$ )，因而  $\frac{\Delta D_n}{D_n}$  较大，而在加速腔平行区则正相反， $D_n > D_r$  因而  $D_r$  的测量偏差较大。

## 2. 距离反平方律的初步验证

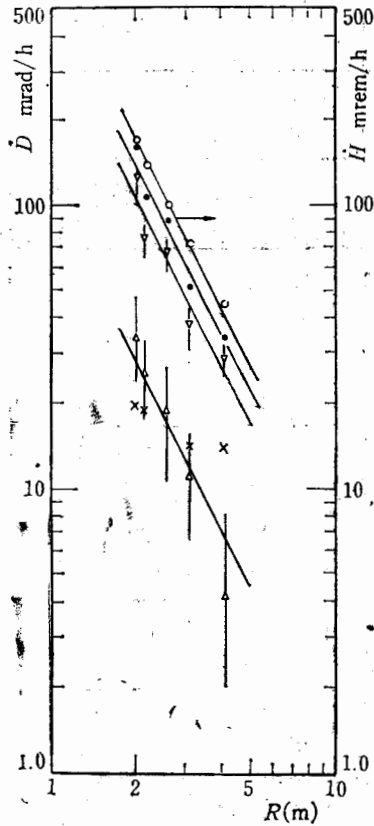
由于当时 10MeV 质子直线加速器还处于调试阶段，流强、能量等都还不够稳定，实验条件也不太理想。为了避免不同运行情况对测量上引起的系统误差，我们在与束线成  $25^\circ$  方向的 5.35m 处设立了固定的中子监测器，结构同 Ag-rem 仪。三探头测量系统在  $0^\circ$  方向沿轨道在 2—4.5m 之间作了测量，经流强及监测器归一后，在不确定范围内给出了近似的距离反平方关系，

图 3 束线  $0^\circ$  方向辐射场的分布  
 $E_p = 10\text{MeV}$ ,  $I = 48\text{mA}$ ,  $F = 2\text{pps}$ ,  
 $\tau = 100\mu\text{s}$ ,  $c$  靶(法拉第筒),  $0^\circ$  方向  
 $\circ$ :  $\dot{H}_n$ ,  $\bullet$ :  $\dot{D}_t$ ,  $\nabla$ :  $\dot{D}_r$ ,  $\triangle$ :  $\dot{D}_n$ ,  
 $\times$ :  $\dot{H}_n(2202D)$

见图 3。由此说明探测系统在加速器脉冲场中有近似正确的响应。为了便于比较；图 3 中同时给出了 2202D 中子雷姆仪在同一点的测量结果，显见由于加速器脉冲场较低的真空因子，2202D 因漏计严重而不能给出辐射剂量的正确响应。

## 3. 加速腔平行区

辐射的主要成分是散射中子以及较低能的束流损失打在加速腔壁而产生的中子，它们的能量较低。由于电离室方法测中子是建立在测量反冲核方法的基础上的，它对低能中子可能给出偏低的估计，与此相反，Ag-rem 可能给出偏高的估计。



#### 4. $\bar{Q}$ 的变化规律

由表 3 中的数据看出, 与束线成  $0^\circ$  方向的辐射场的平均品质因子  $\bar{Q}$  约为 2,  $90^\circ$  方向为 4, 加速腔附近  $\bar{Q}$  增至 8 左右.  $\bar{Q}$  的变化反映了辐射场的品质. 在质子加速器周围的混合场中, 中子对总剂量当量的贡献起着主要的作用, 在  $0^\circ$  方向约占 50%, 而在加速腔周围则几乎主要是中子的贡献, 因而当在开机时进入加速器厅调试仪器或设备时, 要特别注意对中子的防护和监测.

#### 5. 角响应

$\bar{Q}$  的区域性变化还反映了在质子束打靶产生的辐射场中,  $\gamma$  辐射场具有较明显的角分布, 它主要向  $0^\circ$  方向出射, 而中子相对于  $\gamma$  而言, 则有较小的角响应和较大的散射效应.

### 五、简要结论

1. 实验结果表明, 三探头剂量探测仪不仅可以分别测出加速器周围混合辐射场中的中子及  $\gamma$  成分的吸收剂量率分布, 而且可以给出混合场的平均品质因子  $\bar{Q}$ .  $\bar{Q}$  的合理确定对了解混合场的品质有很大的现实意义. 例如, 对混合场的监测通常总是要同时采用中子及  $\gamma$  两种探测器, 但如果某处的  $\bar{Q}$  一经测定, 则此后只要单只组织等效电离室(或对中子和  $\gamma$  都灵敏的充氢电离室)作监测器, 就可以确定  $\dot{H}_t$ , 因为组织等效电离室测出的  $\dot{D}_t$  乘以  $\bar{Q}$  值后, 即可给出  $\dot{H}_t = \bar{Q} \cdot \dot{D}_t$ . 这样在实际应用中, 既可确保安全监测, 又可减少探测器及其相应的电子仪器的数量, 因此, 在监测点众多的大型核企业辐射监测系统的实施中是有实际的经济效益的.

2. 在质子直线加速器周围的辐射场中, 中子在总剂量当量中起着主要的作用, 而在监测时要注意脉冲场的特点, 注意选择适合于脉冲场特点的剂量仪表.

3. 三探头测量仪的性能还有待进一步改进和提高, 例如灵敏度、测量精度、能响标定等方面都有待细做. 将三探头的信号送入微机进行自动记录和运算, 会使整个系统变得更加轻便.

解延风参加了部分探头的设计和讨论, 顾凤岭在电路和场效应管配对方面给予了帮助. 401 所刻度室的同志在仪器定标方面给予了方便. 张振刚、张宝襄、王跃兰、雷传衡、刘列夫等一起参加了测量, 在此一并表示谢意. 特别感谢 1 号厅质子直线加速器运行组的同志们对我们的支持. 刘桂林审阅了全文并提出了许多有益的意见, 深表感谢.

### 参 考 文 献

- [1] ICRU REPORT No 26 (1977)
- [2] 李建平、唐鄂生, 原子能科学技术, 2(1983), 206.
- [3] ICRU REPORT No 19 (1971)
- [4] 唐鄂生等, 核仪器与方法, Vol. 3, 4(1983), 6.
- [5] ICRU REPORT No 13 (1969)

## MEASUREMENTS OF THE MIXED RADIATION FIELD AROUND A PROTON LINAC

TANG E-SHENG CHEN ZHI-BU LI JIAN-PING LIU SHI-DONG

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

### ABSTRACT

The radiation field around a high energy accelerator is a pulsed mixed radiation field of complex particle constituents. The distribution of the radiation field around a 10 MeV proton Linac in commissioning is measured with a three detector system. The absorbed dose and dose equivalent of both the neutrons and  $\gamma$ -rays in the Linac hall are measured. The average quality factor of the mixed radiation field is given too. The results and uncertainty of the measurements are analyzed and discussed.