

# 200MeV 电子直线加速器隧道内 辐射场测量

李裕熊 梁任又\* 李珏忻 徐云华\*

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室,合肥 230026)

\*(中国科学院中国科学技术大学结构分析开放实验室,合肥 230026)

## 摘 要

对电子直线加速器运行期间隧道内的辐射场进行测量,可以为装置提供重要的参考数据;预测元器件及材料的使用寿命和研究辐射场的开发利用。本文介绍了加速器周围辐射场的特点,论述了丙氨酸(alanine)剂量计的性能和用电子自旋共振测量法进行测量的依据、方法,并分析了用这种方法所得到的结果。

## 一、引 言

合肥国家同步辐射实验室的200MeV电子直线加速器是同步辐射装置的注入器。电子直线加速器在加速电子过程中将造成部分电子损失,这部分电子轰击在加速器真空室壁或其他部件上时,由于韧致辐射、级联簇射和其后的( $\gamma, n$ )反应等,在直线加速器周围形成极强的电离辐射场。根据通常作法,合肥国家同步辐射实验室的200MeV电子直线加速器建在地下隧道内,周围有3.5m以上的土壤屏蔽层,隧道截面为3.5m(宽) $\times$ 3m(高),长度超过140m(不包括输运线隧道)。

在电子直线加速器运行时,其隧道内存在一个极强的瞬发辐射场,基于以下的原因,对这一辐射场作出测量是十分必要的。

1. 在隧道中,管线上的垫圈及密封材料,电缆的橡胶或塑料绝缘护套等有机材料的使用寿命与其所在地的辐射水平有密切的关系。某些电子元器件寿命亦与吸收剂量有关。知道了辐射场强度分布,就可以根据直线加速器运行时数预报它们的寿命,防止事故的发生。

2. 某点的辐射场强度是直接与其对应的加速器位置上的束流功率损失成正比的。沿直线加速器束流方向束流损失估计,是作直线加速器屏蔽计算的最重要依据。通过测量可以得到该装置束流损失和其他有用的数据。

3. 测量结果可给直线加速器设计、运行人员提供一些有利于改进机器的信息。

4. 可为本是“废物”的辐射场的开发利用打下基础。

## 二、测量方法的选用

### 1. 电子直线加速器周围辐射场的特点

#### a. 辐射场内时空上的极大差异性

直线加速器运行于脉冲工作状态,无论是 50Hz 或 300Hz,由于脉宽极窄 ( $1\mu\text{s}$ ),其占空因子均在  $10^{-5}$  量级,因此造成辐射场的特定时间结构。空间上的差异是由于电子直线加速器不同位置上的束流功率损失差异引起的,这一差异可达两个量级以上。

#### b. 场分布在宏观时间坐标上的非稳定性

除了脉冲工作状态形成的辐射场微观时间结构外,由于各种条件的变化,每次开机同一点上的辐射场也会有相当的差异。这使得了解其平均效果更为重要,也就是每次测量的积累时间不能太短。

c. 该辐射场的能谱范围很广,从低能到 200MeV 左右,它是一个  $\gamma$ , n 混合场, $\gamma$  剂量贡献远大于中子,其比值超过两个量级。

### 2. 剂量计及测量方法的选用

根据以上对辐射场特点的分析和有关的实验资料<sup>[1]</sup>,选用丙氨酸 (alanine) 剂量计和电子自旋共振 (ESR) 测量方法作中高能加速器周围强辐射场测量最为合适。

丙氨酸/ESR 剂量测定法是近年才发展起来的剂量测定方法,由于其优良特性,很快就被国际原子能委员会 (IAEA) 选定作为对大剂量标准剂量的传递和比较手段<sup>[3]</sup>。我国国家计量技术规范 JJG 1020-90 也选定该方法为  $\gamma$  射线辐射加工剂量保证监测方法<sup>[2]</sup>。

丙氨酸的化学分子式为  $\text{CH}_3 \cdot \text{CH}(\text{NH}_2) \cdot \text{COOH}$ ,在辐射场中吸收辐射能量产生稳定的自由基  $\text{CH}_3 \cdot \text{CH} \cdot \text{COOH}$ 。可以用 ESR 法测量其自由基总量,该量在一定范围内与 ESR 仪输出信号成正比。丙氨酸剂量计线性测量范围很大,从 10Gy 到  $5 \times 10^4\text{Gy}$  都有相当好的线性关系。其总不确定度为 4% ( $k=2$ )。不受辐射场时间结构的影响。对能量高于 100keV 的光子和电子束的吸收剂量响应与  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线能响一致 (对低于 100keV 的光子能响在 0.6—1 之间)。因其本身就是有机物,所以可提供更可靠的组织等效。此外,辐射后样品中的自由基衰退小,年衰退率约为 0.5%,不需作任何处理 (如退火等) 即可读数,读数精度高且不会造成信号丢失,适合作剂量档案长期保存<sup>[3-5]</sup>。

丙氨酸剂量计对高 LET 辐射吸收剂量响应比对  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线响应偏低,其系数与剂量计中丙氨酸与石蜡的掺合比有关。我们使用的是粉末丙氨酸试剂与石蜡以 4:1 质量比混合制成的剂量计,它对 0.5 到 15MeV 中子相对能响为 0.36—0.7 之间<sup>[3,6]</sup>。实测场中中子吸收剂量贡献小于总剂量的 1%,在测量误差范围内而无需校正。

丙氨酸 ESR 波谱幅度  $h$  与吸收剂量  $D$  之间的关系可用下式表示:

$$\ln h = a + b \ln D \quad (50\text{Gy} \leq D \leq 10^3\text{Gy}), \quad (1)$$

式中  $a$ ,  $b$  分别为直线的截距和斜率。 $\ln h$  和  $\ln D$  之间的线性相关系数在上述吸收剂量范围内一般大于 0.9999<sup>[4]</sup>。这对我们要研究的辐射场显然是一种理想的测量方法。

### 3. 读数仪信号的定标

在测量之前, 首先要用已赋值的丙氨酸剂量计对 ESR 信号进行定标。

标准样品是由中国计量科学研究院提供的。用于读数的 ESR 仪是西德 Brüker 公司生产的 ER-200D 型电子顺磁共振谱仪, 标样经过读数和质量修正后得到的  $h$  值与标样的  $D$  值同列于表 1 中。

表 1

标样编号	1	2	3	4	5	6
$D(\text{kGy})$	0.0959	0.202	0.314	0.588	0.932	1.34
$h(\text{任意单位})$	0.879	1.85	2.80	5.06	8.01	11.2
标样编号	7	8	9	10	11	12
$D(\text{kGy})$	2.37	4.48	7.36	9.40	12.8	37.1
$h(\text{任意单位})$	20.1	36.9	56.5	72.9	95.0	234

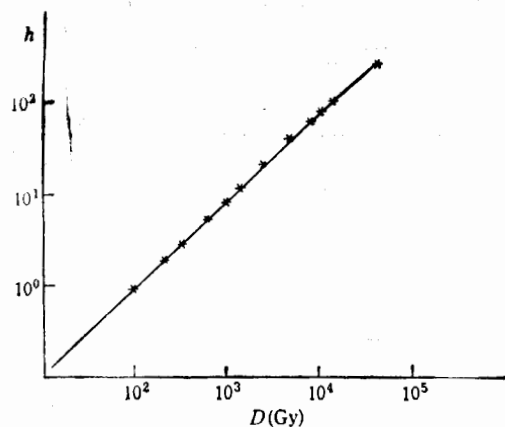


图 1

根据表 1 转换成常用对数, 作出的标准曲线如图 1 所示。

其标定结果显示出了良好的线性关系, 在  $4.48 \times 10^3 \text{Gy}$  以下的八个点, 线性相关系数  $r$  为 0.99995, 即使剂量高达  $1.28 \times 10^4 \text{Gy}$ , 其  $r$  值仍为 0.99992, 剂量高达  $3.71 \times 10^4 \text{Gy}$  时,  $r$  降至 0.9998。

由定标结果取前八个标样作出的直线作为定标曲线, 即

$$\ln h = 2.15 + 0.970 \ln D. \quad (2)$$

### 三、测量及结果

合肥国家同步辐射实验室的电子直线加速器目前由一个三米段和四个六米段组成, 工作在脉冲状态。大功率速调管是它的微波功率源, 每个速调管最大瞬时功率可达 20

MW。现在的直线加速器长约40m，加速电子能量最高可达245MeV，脉冲重复频率50Hz，脉宽 $1\mu\text{s}$ ，脉冲流强50mA，并且留有加长的余地，将来可以达到400MeV和300Hz。

图2是该电子直线加速器及测量布点示意图。

直线加速器正下方有一个直径为400mm的铝质支撑管线，丙氨酸剂量计就置于该管线上表面，此处距加速器中心线为45cm，沿直线加速器和漂移段放置位置如图2上标的1—17。如果以电子枪前端为原点，则它的相对位置为 $L$ ，积累照射时间为46小时。这期间电子直线加速器运行主要是为储存环调机服务，对其运行条件要求为200MeV和较小的能散( $<1\%$ )。由于不断使用束流分叉处的正负6度靶，就有可能导致该处的高剂量水平。储存环注入的重复频率为0.5Hz。

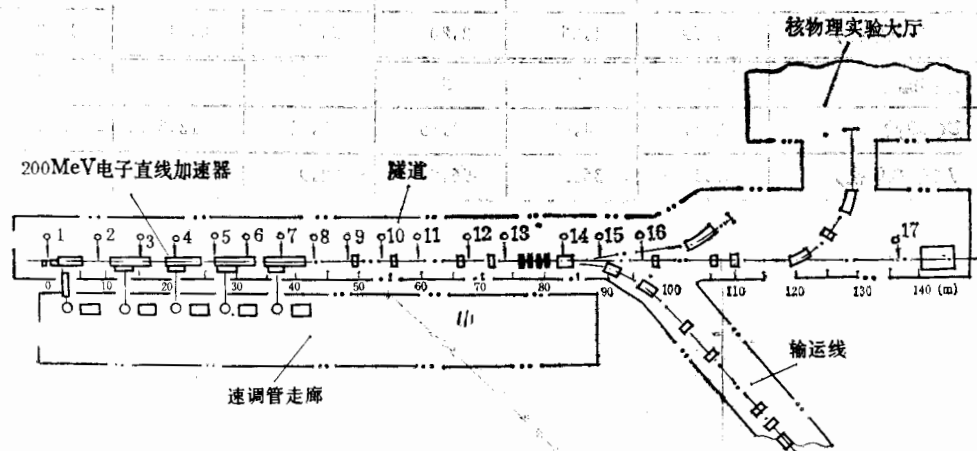


图 2

通过 ESR 仪读数得到的各点吸收剂量值为  $D(\text{Gy})$ ，剂量率为  $\dot{D}(\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1})$ ， $L$ 、 $D$  和  $\dot{D}$  值均列于表 2 中。

表 2

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$L(\text{m})$	0	8	13	20	27	32	38	43	48
$D(\text{Gy})$	4.22	23.4	7.21	26.8	141	48.9	61.2	459	51.2
$\dot{D}(\text{Gy/h})$	0.0917	0.509	0.157	0.583	3.07	1.06	1.33	9.98	1.11
No.	10	11	12	13	14*	15	16	17	
$L(\text{m})$	54	60	68	74	83	88	91	136	
$D(\text{Gy})$	24.0	149	33.4	11.0	19.3	1210	1720	879	
$\dot{D}(\text{Gy/h})$	0.522	3.24	0.726	0.239	0.420	26.3	37.4	19.1	

\* 此处测量值较低是由于开关磁铁本身屏蔽的结果。

其中低于定标值的吸收剂量读数，是用(2)式求出的，因为这些值均在其线性区域内，不会造成明显的误差。

## 四、结 论

从以上结果可以看出:

1. 瞬发辐射场强度是在辐射防护设计时所考虑到的范围之内。3.5m 厚的土壤屏蔽层, 运行期间所采取的人身辐射安全联锁措施以及停机后限定一定时间以后才能进入隧道的规定是科学的, 必要的。

2. 直线隧道内某些部分的瞬时剂量率水平接近 40Gy/h。多数有机密封材料和绝缘材料在受到  $10^5$ — $10^6$ Gy 左右照射即可能发生中度至重度损伤。直线加速器 2500—25000 运行小时即可使这些地方的辐照剂量达到这一数值, 到目前为止, 直线加速器已运行 2193 小时, 接近了某些材料使用的限度。

3. 辐射场沿直线加速器的变化, 符合直线加速器物理设计所预计到的情况, 在每个直线段的刮束器后, 辐射场增强是正常的。漂移段上 60m 处的辐射场增强是由于设在该处上游的能量狭缝造成的。但束流开关后的辐射场上升有些异常, 有关人员已开始研究这一情况。这一结果也反映了我们的直线加速器束流损失过高, 达到 4% 左右, 这与一般电子直线加速器束流损失在 2% 左右相比显然过大了<sup>[7]</sup>。这次测量提供的这一信息便于机器的改进。有关部门已据此对直线加速器和输运线工作条件作了调整。

丙氨酸 ESR 方法测量加速器隧道中的辐射场分布, 无疑是一种非常好的手段。由于目前调机工作很忙, 只作了沿束流线方向的测量, 尚未作截面分布测量, 而且布点较稀。在今后时间、经费允许的情况下, 将根据需要再作进一步测量。

中国计量科学研究院的高钧成先生提供了丙氨酸标样, 并对各种测量工作提出了很多宝贵意见和建议, 在此一并表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] F. Coninckx et al., Alanine dosimetry as the reference dosimetric system in accelerator radiation environments, Appl. Radiat. Isot., Vol. 40, No. 10—12, 1989, 977—983.
- [2] 中华人民共和国国家计量技术规范 JJG1020-90,  $\gamma$  射线加工剂量保证监测方法, 1990.12.1.
- [3] D. F. REGULLA et al., Dosimetry by ESR Spectroscopy of Alanine, Appl. Radiat. Isot., Vol. 33, 1982, 1101—1114.
- [4] 高钧成, 第一次全国 TL 及 ESR 年会。
- [5] K. J. Olsen et al., ESR Dosimetry in Calibration Intercomparisons with High-energy Photons and Electrons, Appl. Radiat. Isot., Vol. 40, No. 10—12, 1989, 985—988.
- [6] H. Schraube et al., Fast Neutron Response of Alanine Probes, Appl. Radiat. Isot., Vol. 40, No. 10—12, 1989, 941—944.
- [7] R. C. McCall et al., Health Physics Manual of Good Practices for Accelerator Facilities, SLAC-Report-327, April 1988.

## The Radiation Field Measurement in the 200 MeV Electron Linac Tunnel

LI YUXIONG LIANG RENYOU\* LI JUEXIN XU YUNHUA\*

*(University of Science and Technology of China Hefei National Synchrotron Radiation Laboratory (HESYRL))*

*(\* Structure and Elements Analysis Center, Hefei 230026)*

### ABSTRACT

To measure the radiation level in tunnel during a Linac running period, can provide important data to improve the machine, forecast the lives of electronic devices and other materials, exploit the radiation field as well. This paper introduces the properties of the radiation field around Linac, discusses how to measure the radiation level with alanine dosimeter and ESR method, analyses the result of our measurement.