

# 电子储存环直线节中的韧致辐射的剂量率的计算

杨春<sup>1)</sup> 李裕熊

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230027)

**摘要** 电子储存环的电子束流与环中的残余气体碰撞会产生韧致辐射,这也是造成储存环中束流损失的主要原因之一. 一直以来,由于各种原因,人们在辐射防护上并没有给予它足够的重视. 本文通过一些经验公式对该韧致辐射进行了分析和计算:(1) 该韧致辐射会导致较高的剂量率,尤其是在直线节;(2) 影响剂量率的几个主要因素;(3) 韧致辐射中的高能粒子占有很大的比例.

**关键词** 储存环 韧致辐射 剂量率 经验公式

## 1 引言

在使用电子储存环的同步辐射装置中,电子束流与环中的残余气体碰撞产生韧致辐射,这是造成储存环中束流损失的主要原因之一. 一直以来,由于电子储存环中的真空度极高(国家同步辐射实验室 NSRL 电子储存环中的真空度达到  $10^{-7}$  Pa),人们认为在这种状态下束流与残余气体的碰撞产生的辐射的水平是很低的,因而在辐射防护上并没有给予足够的重视. 但事实上,这种认识是有缺陷的,主要原因有以下 3 点:

1) 虽然储存环中储存的电子数量不多,但是流强可能很高,这就大大提高了碰撞的总量. 例如 NSRL 储存环中大约有电子  $10^{11}$  个,但流强达到百 mA 量级,即环中的电子通量达到每秒  $10^{18}$  的量级. 所以储存环中由于碰撞而产生的韧致辐射其实是不容忽视的.

2) 早期的电子储存环的直线节不是很长,而且光束线大多在弯段处引出. 但在二代、三代同步辐射装置上,由于大量插入元件的使用,导致直线节的长度大大增加. 而在直线节中每次碰撞产生的韧致辐射一般都集中在很小的角度以内,这样在经过较长的直线节后,沿途产生的辐射会在末端累积形成一个高剂量点. 所以虽然在整个储存环的各个部分

都有这种碰撞产生,但在直线节中产生的韧致辐射强度最大,也最可能造成严重的辐射安全问题. 而在弯转部分,辐射会呈一个扇型分布,强度相对而言就比较低了.

3) 韧致辐射与同步辐射的不同点主要在于它的能量. 同步辐射的剂量率尽管很大,但它主要是 X 射线,能量一般比较低,因而屏蔽就比较容易实现. 而韧致辐射的能谱就宽的多,最高能量可以接近电子的能量. 这对屏蔽就提出了很高的要求.

我们将对国家同步辐射实验室(NSRL)800MeV 电子储存环直线节中的韧致辐射进行分析、估算.

## 2 韧致辐射的计算

### 2.1 计算公式

对于粒子输运问题,一般采用蒙特卡罗方法进行模拟跟踪. 但在本次计算中,由于储存环中的真空度极高,气体分子的平均自由程远远超过了直线节的长度. 所以在用蒙特卡罗软件(如 EGS4)进行模拟时,并不能得到满意的结果. 在这种情况下,采用一些经验公式来进行估算.

在直线节中,产生的光子会形成一个角度极窄的同向束流. 光子的出射角计算公式如下. 一般来

说,大约在  $10^{-3}$  弧度.<sup>[1,2]</sup>

$$\gamma = \frac{mc^2}{E} \text{ Or } \gamma = \frac{mc^2}{E^2}. \quad (1)$$

正常情况下,储存环中每毫安流强的束流每秒产生的  $k_{\min}$  (MeV) 以上能量的光子数可以采用下列经验公式近似计算<sup>[1]</sup>:

$$I = 6.25 \times 10^{15} S \frac{6.02 \times 10^{23}}{2.24 \times 10^4} \frac{P}{1.01 \times 10^5} \frac{273}{T} L, \quad (2)$$

式中:  $I$ : 每毫安流强的束流每秒产生  $k_{\min}$  (MeV) 以上的光子的数 ( $n \text{ mA}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ),  $S$ : 韧致辐射的截面 ( $\text{cm}^2$ ),  $P$ : 真空室中残余气体的气压 (Pa),  $T$ : 温度 (K),  $L$ : 储存环直线节长度 (cm).

在式(2)中:

$$S = \int_{k_{\min}}^{E_0 - 0.511} \sigma(E_0, k) dk; \quad (3)$$

$$\sigma(E_0, k) = 4\alpha R_e^2 Z(Z+1)1/k \left\{ \left[ 1 + (E/E_0)^2 - \frac{2}{3} E/E_0 \right] \ln(183 Z^{-1/3}) + \frac{1}{9} E/E_0 \right\}, \quad (4)$$

式中:  $E_0$ : 电子束流的能量 (MeV),  $k$ : 光子的能量 (MeV),  $E: E_0 - k$ ,  $k_{\min}$ : 计算考虑的光子截止能量 (MeV),  $\alpha: 1/137$ ,  $R_e: 2.82 \times 10^{-13} \text{ cm}$  (经典电子半径),  $Z$ : 真空室中残余气体的平均原子序数.

对于光子而言,与  $1 \mu\text{Gy h}^{-1}$  的吸收剂量率相当的通量密度  $\phi$  可以由下式<sup>[3]</sup>近似的计算:

$$\phi = 1.734/E\chi, \quad (5)$$

式中:  $\phi$ : 通量密度与剂量率的转换因数 ( $\text{光子} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} / \mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ ),  $E$ : 光子的能量 (MeV),  $\chi$ : 水中质量能量吸收系数 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ).

## 2.2 影响辐射强度的因素

① 束流流强: 韧致辐射的强度和储存环中电子束的流强以及真空室中的残余气体的气压成正比, 而气压又与束流流强近乎于正比关系. 所以粗略的来说, 韧致辐射的强度与储存环中束流流强的平方成比例.

② 从公式(2), (3), (4)可以看出, 束流能量对韧致辐射的强度有很大的影响. 计算一下给定条件下韧致辐射的强度随能量的变化.

气压:  $10^{-7} \text{ Pa}$ , 流强:  $1 \text{ mA}$ , 长度:  $1 \text{ m}$ , 温度:  $293 \text{ K}$ ,

平均原子序数  $Z: 10$ .

表 1

电子能量/MeV	光子数( $E > 100 \text{ MeV}$ )/秒	光子数( $E > 0.1 \text{ MeV}$ )/秒
200	113	1813
500	318	2032
800	440	2145
1500	605	2295
2500	738	2417

③ 残余气体的平均原子序数: 真空室中残余气体的成分主要有  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  等, 其中  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$  占了绝大多数. 根据计算, 国家同步辐射实验室 (NSRL) 的  $800 \text{ MeV}$  电子储存环中的残余气体的平均原子序数  $Z$  大约为  $7.5$ . 但因为残余气体的成分会有微小的变化而难以准确测定, 所以在考虑屏蔽的时候, 一般趋向于保守的计算, 这里取残余气体的  $Z$  为  $10$ .

④ 光子的出射角直接决定了韧致辐射在直线节末端的截面面积, 也就决定了辐射所造成的剂量当量. 目前主要有两种计算方法, 见式(1), 但大多数倾向于第一种, 即韧致辐射的出射角与储存环中的束流能量的一次方成反比.

## 3 应用于国家同步辐射实验室 (NSRL) $800 \text{ MeV}$ 电子储存环

国家同步辐射实验室 (NSRL)  $800 \text{ MeV}$  电子储存环的物理参数如表 2 所示:

表 2

直线节长度 /cm	束流流强 /mA	真空室气压 /Pa	温度 /K	平均原 子序数
350	300	$10^{-7}$	293.15	7.5/10

计算结果如下

### 1) 光子的能谱

根据公式(2), (3), (4)计算, 每毫安流强的束流每秒产生的光子的能谱 ( $n \text{ mA}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) 如表 3 所示.

表 3

光子能量/MeV	0.01—0.1	0.1—1	1—10	10—100	100—800
NSRL ( $Z = 7.5$ )	217	114	116	96	129
NSRL ( $Z = 10$ )	366	193	195	163	218

### 2) 光斑尺寸

NSRL 储存环中的电子束流截面是一个大约  $\phi 6 \times 1 \text{ mm}$  的椭圆形. 直线节的长度为  $3.5 \text{ m}$ , 光子从直线节初始端出射在直线节末端偏离束流的距离为

$$r \approx 350 \times \tan((0.511/800) \times (360/3.14)) \approx 0.45/\text{cm}.$$

### 3) 剂量率

在本次计算中,分别计算了  $Z = 7.5$  和  $Z = 10$  两种情况下的剂量率,如表 4 所示.

表 4

	NSRL ( $Z = 7.5$ )	NSRL ( $Z = 10$ )
剂量率/Sv/h	$5 \times 10^{-2}$	$8.4 \times 10^{-2}$

## 4 关于 BEPC II

在做本次计算的时候,得到了北京高能所 2.5GeV 正负电子对撞机(BEPC II)的一些数据. 因为 BEPC II 的能量为 2.5GeV,我们尝试将这种方法应用在这类高能机器上. BEPC II 的物理参数如下: 能量:2.5GeV,流强:900mA,直线节长度:13.5m,气压: $10^{-7}$ Pa,平均原子序数:10. 计算得出的每毫安流强的束流每秒产生的光子的能谱( $\text{n mA}^{-1} \text{s}^{-1}$ ),见表 5.

表 5

光子能量/MeV	0.01—0.1	0.1—1	1—10	10—100	100—2500
BEPC II ( $Z = 10$ )	2186	754	758	618	1254

依据以上的公式可以近似的估算出 BEPC II 储存环的直线节末端的剂量率大约为 2Sv/h.

## 5 结论与讨论

1) 由上面的计算可以看出,电子储存环的直线节中由于韧致辐射产生的剂量率是比较大的一个量,尽管过去我们一直忽视了这一点.

2) 由上面的计算可以看出,该剂量率与束流流强,直线节的长度,残余气体的气压成正比,与束流的能量成亚线性关系. 残余气体的平均原子序数也对它有很大的影响.

3) 从计算出的粒子能量可以看出,韧致辐射中高能粒子占了可观的比例,所以在设计辐射防护时要充分考虑对高能光子的屏蔽.

4) 对从直线节引出的光束线应该采取合适的屏蔽措施. 通常在直线节的引出部分安装束流阻挡器(Beam Stopper),当然它必须安装在屏蔽墙以内. 另外,在光束线穿过屏蔽墙的短节部分,我们要在短节两端安装法兰,起到“迷宫”的作用,防止辐射直接照射. 具体的防护措施我们将在其他文章中给予叙述.

## 参考文献 (References)

- 1 Syuichi Ban, Hideo Hirayama, Shigeyuki Miura. Health Physics, 1989, 57(3):407—412
- 2 Esposito A, Pelliccioni M. GAS BREMSSTRAHLUNG PRODUCTION IN THE ADONE STORAGE RING, LNF-86/23 (NT), Laboratori Nazionali di Frascati, 1986
- 3 Patterson H W, Thomas R H. Accelerator Health Physics, Atomic Energy Press, 1983

## Calculation of Dose Rate Due to Gas Bremsstrahlung in the Linear Section of the Electron Storage Rings

YANG Chun<sup>1)</sup> LI Yu-Xiong

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract** In electron storage rings, interactions by beams with residual gas produce the bremsstrahlung and it is one of the main sources of the beam loss. We analyze the bremsstrahlung and calculate the dose rate in the linear section of the storage rings. The result may help to understand it and shield it properly.

**Key words** storage ring, bremsstrahlung, dose rate, empirical formulae

Received 11 August 2003

1) E-mail: yangchun@mail.ustc.edu.cn