

# 正电子产生靶上初级电子束 半径的最小化研究

王书鸿<sup>1)</sup> 王九庆 叶强 乐琪

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 为获得尽可能高的正电子( $e^+$ )产额,严格控制初级电子( $e^-$ )束在 $e^+$ 产生靶上的束半径是至关重要的.首先分析了使 $e^-$ 束半径增大的各因素和对这些因素的制约;然后以北京正负电子对撞机(BEPC)的正电子源为例,给出了束半径的实测值和计算值的比较,以具体说明这些因素的影响;最后讨论了北京正负电子对撞机二期工程(BEPC-II)的相应优化设计研究,提出了获得靶上最小束半径的若干途径.

**关键词** 正电子产额 电子 束半径

## 1 引言

正电子( $e^+$ )产生主要靠初级电子( $e^-$ )束打靶引起的 $e^+e^-$ 对生成反应,特别是该反应的级联簇射过程.在 $e^-$ 束到达 $e^+$ 产生靶(以下简称靶)时的能量,电荷量和靶材料及靶厚度均确定的情况下, $e^+$ 的产额决定于 $e^-$ 束在靶上的横截面尺寸.束截面越小,该过程的反应截面越大, $e^+$ 的产额越高.而且 $e^+$ 的产额与 $e^-$ 束截面的依赖关系相当灵敏<sup>[1]</sup>.因此,为获得尽可能高的 $e^+$ 产额,研究在靶上 $e^-$ 束截面的最小化,具有重要的意义.

本文将首先分析影响 $e^-$ 束在靶上截面大小的各因素和对这些因素的制约;然后以 BEPC 的正电子源为例,给出了靶上截面的实测值和计算值的比较,具体说明这些因素的影响;最后讨论了 BEPC-II 的相应优化设计研究,提出了获得靶上最小束半径的若干途径.

## 2 影响靶上 $e^-$ 束截面尺寸的因素

靶上 $e^-$ 束半径( $\sigma$ )取决于两个基本因素:a)靶上游 $e^-$ 束的径向聚焦系统(Lattice),通常应设计和调整该系统,使包络在靶上形成束腰,即令 Twiss 参数 $\beta = \beta_{\min}, \alpha = 0$ ; b)束流

2002-02-05 收稿

<sup>1)</sup>E-mail: wangsh@sun.ihep.ac.cn

在靶上的径向发射度  $\epsilon$ :

$$\sigma = \sqrt{\epsilon\beta}. \quad (1)$$

通常,条件 a) 较容易实现,在聚焦系统的设计或运行调试时,可在不损失  $e^-$  束的条件下,使束包络在靶上形成束腰即  $e^-$  束半径最小. 然而该最小半径的大小,严重地依赖于  $e^-$  束的发射度  $\epsilon$ . 由于以下各种原因, $e^-$  束的归一化发射度将增长,从而使最小束半径增大:

#### (1) 初始束的发射度与聚焦系统的接受度不匹配

$e^-$  束流从纵向聚束段的螺线管磁聚焦系统进入主加速段的四极透镜聚焦系统时,若束流的发射度与透镜聚焦系统的接受度不匹配,则束流中各电子的相轨迹走向与透镜聚焦系统设定的不一致,导致归一化发射度增长. 且该增长与不匹配的程度成正比<sup>[2]</sup>:

$$(\gamma\epsilon)_i = B_{\max}(\gamma\epsilon)_i, \quad (2)$$

其中  $(\gamma\epsilon)_i$  和  $(\gamma\epsilon)_i$  分别表示聚束段出口和靶上的归一化发射度,

$$B_{\max} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\beta_l}{\beta_b} + \frac{\beta_b}{\beta_l} + \beta_b \beta_l \left( \frac{\alpha_b}{\beta_b} - \frac{\alpha_l}{\beta_l} \right)^2 \right] \quad (3)$$

是不匹配因子,式中脚标  $b$  和  $l$  分别表示束流和 Lattice 的 Twiss 参数. 为抑制不匹配导致的归一化发射度增长,应实测在聚束段出口的发射度,并以此设定 Lattice 参数的初始条件.

#### (2) 初始束能散

通常,在聚束段出口, $e^-$  束的能散较大(如 8%—15%). 该初始能散在四极透镜系统中的色差(Chromatic)效应,将导致归一化发射度增长约 20%—40%. 为部分抑制这个增长,当束流进入四极透镜聚焦系统后,应立即采用尽可能高的加速梯度(如  $\geq 20\text{MeV/m}$ ),以尽快减小沿途的相对能散及其 Chromatic 效应.

#### (3) 初始束径向偏轴

来自电子枪的束流,若初始或途中有径向偏轴,将在加速结构中引起严重的尾场效应,包括单束团的短程尾场和多束团的长程尾场效应. 该效应导致的归一化发射度增长,正比于束团的电荷量(通常有 2.5—10nC),束团的径向偏轴量(如 0.1—1.0mm)和偏轴的起点到靶的轴向距离. 此外,束流的径向偏轴,还会因四极透镜系统的色散效应导致归一化发射度增长. 为部分抑制这些增长,须严格控制初始束的偏轴(jitter)和采用束流轨道校正系统. 后者对于高能电子束(靶上游束流的行程较长,如  $\geq 50\text{m}$ )更有必要. 对用甚强流(如 10nC/bunch)和高能电子束( $\geq 1.5\text{GeV}$ )打靶产生  $e^+$  束的情况,还可能用 BNS Damping<sup>[3]</sup>,即采用大加速相位(如  $\geq +15^\circ$ ,使束团尾部电子的能量较低)和四极透镜系统中的 Chromatic 效应(能量较低的尾部电子受到较强的聚焦作用),以部分抑制单束团的尾场效应<sup>[4]</sup>.

#### (4) 加速器的安装准直误差

各加速结构随机偏轴引起的尾场效应和各四极透镜随机偏轴引起的色散(Dispersive)效应,均会导致归一化发射度增长. 部分抑制这些影响的主要措施,是严格控制加速器的安装准直公差,并辅之以束流轨道校正系统.

### 3 在 BEPC 正电子源上的实验和模拟计算研究

为实际考察靶上最小束半径与上述各因素的关系,我们在目前运行的 BEPC 正电子源上实测了束斑尺寸,并与模拟计算比较.首先,在聚束段出口处(加速管 A0 出口, 30MeV)新建了发射度测量装置,并测得重复性很好的  $e^-$  束发射度参数<sup>[5]</sup>,作为束流进入四极透镜聚焦系统时径向匹配的初始条件.从 A0 出口到达  $e^-$  产生靶的轴向距离为 19.40m,其间有两组“三合一”四极透镜,用于径向聚焦.  $e^-$  束到达靶时的能量为 140MeV.由于在  $e^-$  产生靶上不能观察和测量束斑尺寸,故用其上游相距 0.56m 的束截面测量靶 PR2 来做实验.这样从 A0 出口到 PR2 的轴向距离为 18.84m.用实测的初始束发射度和 TRANSPORT 程序,计算出当  $e^-$  束到达 PR2 时形成束腰 ( $\alpha_x = \alpha_y = 0$ ),且束半径 ( $1\sigma$ ) 分别为 2.0mm, 1.5mm 和 1.0mm 时,相应的两组“三合一”透镜的 4 个磁场值 ( $B_1, B_2, B_3, B_4$ ),如表 1 所列.在此计算中,只考虑理想情况,即无初始束的偏轴,无结构的安装准直误差,因而无归一化发射度增长.

表 1 PR2 上束半径 ( $1\sigma$ ) 的设定值和测量值比较

$\sigma_x = \sigma_y$ (Design)	2.00mm	1.50mm	1.00mm
$B_1$ (kG)	0.208	0.206	0.202
$B_2$ (kG)	0.184	0.177	0.173
$B_3$ (kG)	0.443	0.483	0.613
$B_4$ (kG)	0.605	0.615	0.675
$\sigma_x$ (Measured)	2.24mm	1.66mm	1.50mm
$\sigma_y$ (Measured)	2.42mm	2.07mm	1.67mm
$\Delta\sigma_x/\sigma_x$	12 %	11 %	50 %
$\Delta\sigma_y/\sigma_y$	21 %	38 %	67 %

表中可见,实测的  $\sigma_x, \sigma_y$  均大于设定值;且设定值越小,实测与设定值相差越大.现具体分析导致束截面尺寸增大的实际因素.

首先,LIAR 程序<sup>[6]</sup>的模拟计算表明,由于初始  $e^-$  束能散较大 ( $\Delta E \geq 2\text{MeV}$ ),且沿途的加速梯度较低 (9.5MeV/m),当它到达 PR2 时,因沿途严重的 Chromatic 效应,使 ( $\gamma\epsilon$ ) 增长约 48%,因而束半径增大约 24%.初始束的大能散,是低能量电子束在低加速率的加速段中引起归一化发射度增长的主要因素之一.上述提到的设定值越小,实测与设定值相差越大,就是因为设定值越小,透镜的磁场值越高,Chromatic 效应引起的发射度增长越严重所致.

其次,在用 PR2 测量束截面尺寸时,观察到束斑的偏轴,在垂直方向 ( $y$ ) 更明显.由此可推断其尾场效应(束团电荷量约为 1.1nC)导致的束半径增大在  $y$  方向也应更明显.这与束半径的测量结果相符,如表 1 中所列.如设束流的初始偏轴为 0.15mm ( $x$ )—0.35mm ( $y$ ),并根据实测的加速结构偏轴误差,则由 LIAR 程序计算可得,当  $e^-$  束到达 PR2 时,归一化发射度增长约 15% ( $x$ )—20% ( $y$ ),相应的束半径增大约 10% ( $x$ )—15% ( $y$ ).

最后,反复调试两组“三合一”透镜的 4 个磁场值 ( $B_1, B_2, B_3, B_4$ ),企图在不损失束

流的条件下,得到 PR2 上的最小束半径.经多次调试表明,能获得的最小束半径不小于表 1 中所列的最小值.这进一步说明,上述各因素导致的发射度足够增大,以致束半径的进一步压缩不再可能.

## 4 BEPC-II $e^+$ 产生靶上初级 $e^-$ 束半径的优化研究

### 4.1 BEPC 与 BEPC-II 的差别

a) 初级  $e^-$  束在靶上的能量:由 140MeV 增加到 240MeV.若它们的归一化发射度相同,则非归一化发射度( $\epsilon \propto \gamma^{-1}$ )相差约  $\Delta\epsilon/\epsilon = 42\%$ ,因而束半径相差约  $\Delta\sigma/\sigma = 21\%$ ,这对于减小 BEPC-II 的  $e^-$  束半径是有利的.

b) 加速率  $dW/dz$ :由 9.2MeV/m 增加到 17.5MeV/m,则束能散  $\Delta E/E$  的减小率变得更快,由能散的 Chromatic 效应引起的归一化发射度增长由 30%—40% 减小到 5%—10%,这对减小 BEPC-II 的束半径也是有利的.

c) 初级  $e^-$  束团的电荷量  $Q(e^-)$ :由 1.1nC 增加到 2.33nC,这可能使 BEPC-II 的  $e^-$  束发射度比 BEPC 的大;但电子枪的电压由 80keV 增加到 150keV,这对于减弱低能电子束的空间电荷效应,从而减小 BEPC-II 的束发射度又是有利的.

d) 控制公差.拟在 BEPC-II 工程中,严格控制初始束的偏轴(如 0.1mm—0.3mm),加速管偏轴(如 0.1mm,  $1\sigma$ )和四极透镜偏轴(如 0.1mm,  $1\sigma$ ),以利于减小 BEPC-II 的束斑尺寸.

### 4.2 BEPC-II $e^+$ 产生靶上 $e^-$ 束斑尺寸的模拟计算

作为对各种误差影响的模拟计算的基础,首先给出理想情况(不含任何误差)下的束流光路,如图 1 所示.调节  $e^+$  产生靶上游的两组“三合一”透镜的磁场值(共 4 个可调变量),拟合靶上的束斑半径( $\sigma_x = \sigma_y = 1.0\text{mm}$ )和形成束腰条件( $\alpha_x = 0, \alpha_y = 0$ )这 4 个参数.

表 2 给出了初始  $e^-$  束能散和各种误差导致束归一化发射度增长和靶上束斑尺寸增大的情况.模拟计算采用 LIAR 程序.

表中各行表示:

1) 初始束能散为零的理想情况,选择相应靶上束斑半径( $1\sigma$ )为 1.0mm.

2) 由于初始束能散( $\pm 2.5\text{MeV}$ )在四极透镜系统中的 Chromatic 效应,使归一化发射度增长仅 2.6%,束斑半径( $1\sigma$ )仅增至 1.05mm.这些增长量较小,是因为采用 240MeV 的  $e^-$  束打靶,其间的加速梯度较高(17.5MeV/m),因而相对能散( $\Delta E/E$ )沿轴减少较快所致.

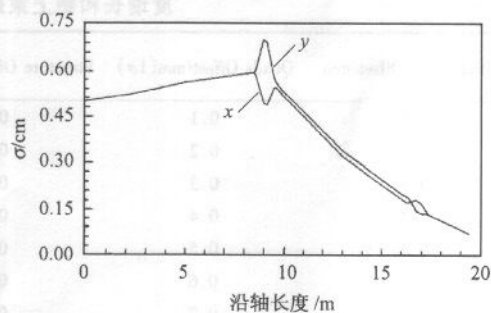


图 1 初级  $e^-$  束由聚束段出口(30MeV)至  $e^+$  产生靶(240MeV)的包络分布

表 2 初始  $e^-$  束能散和各种误差(束流初始偏轴,四极透镜偏轴和加速管偏轴)导致束归一化发射度增长和靶上束斑尺寸增大的情况

Item	$\Delta E_r$ /MeV	Ini. Beam offset/mm	Quads Offset /mm( $1\sigma$ )	Struc. Offset /mm( $1\sigma$ )	$\frac{\Delta(\gamma\epsilon)}{\gamma\epsilon}$	$\frac{\Delta(\gamma\epsilon)}{\gamma\epsilon}$	$\frac{\Delta(\gamma\epsilon)}{\gamma\epsilon}$	$\frac{\Delta(\gamma\epsilon)}{\gamma\epsilon}$	$\frac{\Delta(\gamma\epsilon)}{\gamma\epsilon}$	$\sigma_t$ /mm
					disp/chrom (%)	SR-wake (%)	LR-wake (%)	SR + LR-wake (%)	total (%)	
1)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.00
2)	2.5	0	0	0	2.6	0	0	0	2.6	1.05
3)	2.5	0	0.3	0	2.7	0	0	0	2.7	1.05
4)	2.5	0	0	0.3	in sum	5.1	8.6	13.7	13.7	1.14
5)	2.5	0.3	0	0	in sum	7.7	11.2	18.9	18.9	1.17
6)	2.5	0.3	0.3	0.3					48.0	1.46

3) 四极透镜偏轴  $0.3\text{mm}(1\sigma)$  引起的 Dispersive/Chromatic 效应也不严重,其影响与 2) 相当.

4) 加速管偏轴导致的单束团尾场效应(短程尾场作用,SR-wake)和多束团尾场效应(长程尾场作用,LR-wake)均较弱.在偏轴为  $0.3\text{mm}(1\sigma)$  的情况下,归一化发射度增长约 14%,束半径( $1\sigma$ )增至  $1.14\text{mm}$ .

5) 束流初始偏轴导致的尾场效应较严重,特别是多束团的长程尾场效应(每个束脉冲中有 3 个束团,相间约  $10.5\text{cm}$ ).若束流初始偏轴  $0.3\text{mm}$ ,则尾场效应导致的归一化发射度增长 18.9%,相应的靶上束半径( $1\sigma$ )增至  $1.17\text{mm}$ .

6) 综合初始束能散,束流初始偏轴  $0.3\text{mm}$ ,四极透镜偏轴  $0.3\text{mm}(1\sigma)$  和加速管偏轴  $0.3\text{mm}(1\sigma)$ ,则束流归一化发射度增长 48%,相应的靶上束半径( $1\sigma$ )增至  $1.46\text{mm}$ .表 3、图 2 和图 3 分别给出了归一化发射度和束半径( $1\sigma$ )随各项误差的增加而增大的情况.

表 3 束流初始偏轴,四极透镜偏轴和加速管偏轴对束归一化发射度增长和靶上束斑尺寸增大的影响

Initial Beam Offset/mm	Quads Offset/mm( $1\sigma$ )	Structure Offset/mm( $1\sigma$ )	$\frac{\Delta(\gamma\epsilon)}{\gamma\epsilon}$ (%)	$\sigma_t$ /mm
0.1	0.1	0.1	9.2	1.09
0.2	0.2	0.2	24.0	1.25
0.3	0.3	0.3	44.0	1.46
0.4	0.4	0.4	71.6	1.76
0.5	0.5	0.5	98.4	2.06
0.6	0.6	0.6	120.0	2.29
0.7	0.7	0.7	156.2	2.69
0.8	0.8	0.8	181.8	2.97
0.9	0.9	0.9	214.1	3.31
1.0	1.0	1.0	247.9	3.68

由表 3 和图 3 可见,各项误差的大小对靶上束斑尺寸的影响是较灵敏的.图 4 给出了 BEPC-II 正电子源的产额和靶上束半径的关系<sup>[7]</sup>,可见为获得最小束半径,以获得最高  $e^+$  产额,应严格控制初始束的偏轴(如  $0.1\text{mm}-0.3\text{mm}$ )和四极透镜与加速管的安装准直误差(如  $0.1\text{mm},1\sigma$ ).

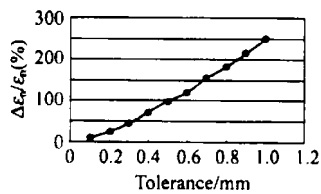


图 2 归一化发射度增长与各项误差的关系

束流初始偏轴 = 四极透镜  
偏轴 = 加速管偏轴。

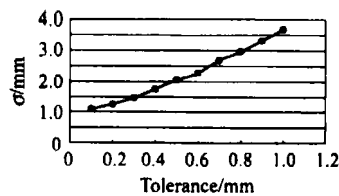


图 3 束斑半径(1σ)与各项误差的关系

束流初始偏轴 = 四极透镜  
偏轴 = 加速管偏轴。

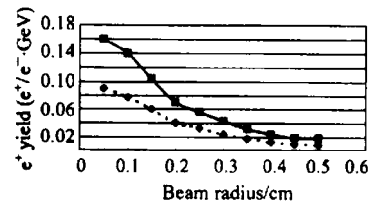


图 4 正电子源的产额和靶上束半径的关系

·····BEPC-正电子源,  
径向接受度 $[0.22\pi(\text{MeV}/c)\cdot\text{cm}]$ ;  
—■— BEPC-II 正电子源,  
径向接受度 $[0.31\pi(\text{MeV}/c)\cdot\text{cm}]$ 。

## 5 结论

为获得尽可能高的  $e^+$  产额,严格控制初级  $e^-$  束在  $e^+$  产生靶上的束半径是至关重要的。本文的模拟计算和测量分析表明,为尽可能地抑制靶上  $e^-$  束半径的增大,要求:

- 1) 严格实现初始  $e^-$  束发射度与聚焦结构接受度的匹配,以免失配引起的  $e^-$  束截面尺寸增大。
- 2) 尽可能提高加速率,以减小较大初始能散引起的 Chromatic 效应。
- 3) 尽可能提高初级  $e^-$  束的打靶能量,除  $e^+$  产额与靶上  $e^-$  束的能量成正比外,还可使靶上  $e^-$  束的非归一化发射度和束半径尽可能小。
- 4) 严格控制初级  $e^-$  束的初始偏轴,以减小强流  $e^-$  束在加速结构中的尾场效应和在透镜聚焦系统中的色散效应导致的束截面尺寸增大。
- 5) 严格控制加速器的安装准直误差,以减小尾场效应和色散效应等导致的束截面尺寸增大。

## 参考文献 (References)

- 1 Eklund S. Handbook of Accelerator Physics and Engineering. Edited by A. W. Chao and M. Tigner, World Scientific, 1999. 430
- 2 Seeinan J T, Decker F J. SLAC-PUB-5705, August, 1992
- 3 Balakin V, Novokhatsky S, Smirnov V. Proc. 12th Int. Conf. On High Energy Acc., 1983
- 4 Kamitani T, Wang J Q, WANG S H. KEK Report 2000-4, 2000
- 5 WANG S H, YE Q, CAO J S et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2002, 26: 1184 (in Chinese)  
(王书鸿, 叶强, 曹建社等. 高能物理与核物理, 2002, 26: 1184)
- 6 Assmann R et al. LIAR-A Computer Program for the Modeling and Simulation of High Performance Linacs. SLAC/AP-103, April 1997
- 7 GOU Wei-Ping. Physical Design of BEPC II Positron Source. Master Thesis, IHEP, 2001 (in Chinese)  
(苟卫平. BEPC II 正电子源物理设计. 硕士论文, 中国科学院高能物理研究所, 2001)

## Minimization of Primary Electron Beam Radius at the Positron Production Target

WANG Shu-Hong<sup>1)</sup> WANG Jiu-Qing YE Qiang I.E Qi

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

**Abstract** To have a high positron yield, it is extremely important to minimize the primary electron beam radius at the positron production target. Various effects on electron beam blow-up have been analyzed. By comparing the measured beam radius with simulation, result at current BEPC positron source, some concrete effects on beam blow-up have been described. A design study on minimizing the electron beam radius at BEPC-II positron source is given, and the ways to reach this goal have been summarized.

**Key words** positron-production yield, electron, beam radius

---

Received 5 February 2002

1) E-mail: wangsh@sun.ihep.ac.cn