

北京正负电子对撞机 (BEPC) 同步 辐射实验厅辐射剂量水平的测定

李建平 汤月里 刘曙东 姜文贵 雷传衡
邵贝贝 李铁辉 蔡小平 张清江
(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

摘 要

本文描述了北京正负电子对撞机 (BEPC) 同步辐射实验厅内辐射的来源和特点, 辐射测量方法及其测量结果。通过对东、西两个实验厅的辐射剂量水平随时间和空间变化的分析, 得出一个重要结论: 同步辐射实验厅内辐射剂量水平与实验厅相对正负电子束流注入点的位置、屏蔽墙厚度、束流注入的时间和效率有密切关系。

一、引 言

目前世界各国同步辐射装置的建造正在迅速发展, 但在辐射防护方面还存在着一系列问题有待解决, 其中之一就是关于同步辐射实验厅的辐射来源、特点及对其影响因素的研究, 这方面的实验结果甚少。在 BEPC 同步辐射实验厅的屏蔽设计中, 由于缺乏这方面的实验数据及对其变化因素的了解, 虽然参照了国外同类装置的屏蔽厚度, 但仍未能避免屏蔽厚度不够, 使得厅内辐射剂量水平偏高。在 BEPC 投入运行后, 在隧道屏蔽内外增加了大量的局部屏蔽, 才使辐射水平降下来。

在 BEPC 实际运行中 e^+ 和 e^- 在注入区的束流损失变化范围较大。在注入困难时, 束流损失可达 100%, 并且注入频繁。在注入顺利时, 束流损失很小, 注入次数明显下降。同步辐射厅内辐射水平或累积剂量当量值不仅与束流的注入效率和注入频繁程度有关, 而且还与同步辐射实验厅相对束流注入点的几何位置有关。在屏蔽设计中只有充分考虑到上述因素, 才能得到合理的设计结果。

本文的测量数据和结论, 为现有 BEPC 同步辐射实验大厅内辐射来源和防护措施的确定提供了依据, 也为其他同步辐射装置实验厅的布局和屏蔽设计提供参考资料。

二、辐射来源及特点

BEPC 同步辐射东、西两个实验厅位于储存环的东南和西南两侧, 分别靠近能量为

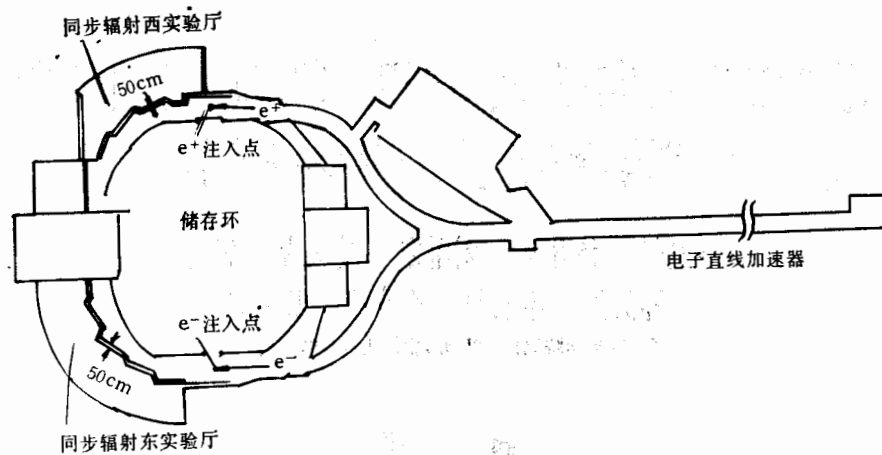


图1 同步辐射东、西实验厅布局及屏蔽厚度

1.1GeV 的电子和正电子注入点。大厅与束流线之间的混凝土屏蔽墙厚度为 50cm 见图 1。

当 e^+ 或 e^- 束流向储存环注入时,通过输运线和注入束流偏转系统,引导束流到注入点,并通过快速冲击磁铁 (Kicker) 将闭轨中心移向注入束,使束流进入储存环的中心轨道。这一注入过程不可避免地要发生电子束流损失,损失的多少取决于每次注入的质量(注入效率)。损失的电子与周围部件的结构材料发生相互作用,通过电磁级联过程产生韧致辐射,并通过光核反应产生中子。

在注入区单位束流功率产生的各类辐射的剂量当量率与电子能量的关系见文献 [1] 图 6。

注入的 e^+ 和 e^- 束流参数见表 1。在对撞工作状态下,一般先由予注入器(电子直线加速器)产生 e^+ 束流,通过输运段向储存环注入约 30 分钟,然后产生 e^- 向环内注入约 5 分钟。注入结束后,环内束流进入储存对撞状态。这时预注入器再产生 e^+ 并全部打在注入点附近的部件上,等待下次注入。

表 1 注入电子束流参数

注入束流	能量 (GeV)	脉冲流强 (mA/脉冲)	脉冲宽度 (ns)	重复频率 (pps)	注入时间 (min)
e^+	1.1	~3	2.5	12.5	30
e^-	1.1	~300	2.5	12.5	5

当 e^- 注入时,如果注入效率为零(最坏情况),在距束流损失地点 1m 处,与入射电子束流成 0° 方向上产生的韧致辐射约为 $2 \times 10^5 \text{Sv/h}$,中子为 0.21Sv/h 。对 1.1GeV 的电子产生的 μ 子剂量可以不考虑^[1],产生的辐射通过大厅的混凝土屏蔽墙在同步辐射厅内形成辐射剂量场。束流注入和储存期间的剂量当量率有明显差别。束流注入期间产生较高的瞬时剂量当量率,储存期间剂量水平接近本底。

束流向储存环注入期间的束流损失是产生辐射的根本原因,其辐射场的特点是:

1. 是一个脉冲辐射场,其占空比等于注入束流的脉冲宽度 (2.5ns) 与重复频率 (12.5 pps) 的乘积 3.1×10^{-8} 。
2. 是一个由光子和中子构成的混合辐射场,光子在束流的 0° 方向上的剂量当量率比 90° 方向上高 4 个量级。巨共振中子的角分布为各向同性。
3. 辐射场中有能量大于 20MeV 的中子和光子存在。
4. 辐射场中有能量低于 30keV 的光子存在。

三、测量方法

针对上述辐射场特点,测量中采用了以下五种中子, γ 探测器:

1. 中子雷姆计数器,其结构和技术性能见文献[2]。在未采用电路分频的情况下,能满足当前辐射水平测量。对于 20MeV 以下的中子有平坦的能量响应特性。
2. 碳活化探测器,利用 $^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$ 和 $^{12}\text{C}(\gamma,n)^{11}\text{C}$ 反应可测 $\sim 20\text{MeV}$ 以上中子和光子的剂量当量贡献^[3]。
3. 包有聚乙烯慢化体的 In 活化探测器^[4],它能给出 20MeV 以下中子的剂量当量贡献。
4. γ 监测器,其结构和技术性能见文献[2]。设计时考虑到了脉冲场的剂量响应,有较高的可测上限。
5. 热释光剂量计 ($^7\text{LiF-TLD}$),它能给出 γ 射线的累积剂量,在脉冲辐射场中有正确的剂量响应。TLD 外面包有工业塑料和铜过滤器,使剂量计在 30keV 处有平坦的能量响应,能量响应范围由 30keV 到 4MeV^[5],与 γ 监测器一致。

四、测量结果

1. 同步辐射东厅内沿 4B9 光束线方向,中子和光子(韧致辐射)测量点的布置和剂量当量率随距离减弱情况见图 2 及图 3。由图 3 可见中子和光子的剂量当量率随距离减弱较快,离开 4B9 光束线的窗口 5m 处,光子减弱 2 倍、中子减弱约 8 倍。

沿光束线方向光子和中子剂量当量率之比在各测量点不同,但一般在 4—8 倍之间,表明厅内的剂量贡献主要来自韧致辐射。当 BEPC 运行在正常状态和特殊状态下,测量到各点光子和中子剂量当量率比不变。这一比值只与屏蔽厚度有关。这个结论符合电子加速器薄屏蔽外韧致辐射是主要剂量贡献的计算结果^[6]。

2. 东厅内各窗口剂量水平分布见表 2。由表 2 可知,2# 窗口的辐射剂量最高,其次是 5# 窗口。这是由于原设计屏蔽薄,后来增加了局部屏蔽,2# 窗口处由于空间位置的限制无法进行局部屏蔽。5# 窗口处曾在 Q_{12} 磁铁处增加屏蔽,使厅内剂量水平降低 6 倍。

3. 累积剂量水平与束流注入时的瞬时剂量率及频繁程度有关。图 4 给出东厅内 2# 窗口一周内的瞬时剂量当量率随时间的变化,最高达 0.25mSv/h。由图可见周累积剂量水平与一周内束流向储存环注入的次数有关。在 1990 年 10 月 15—22 日开机调束期间

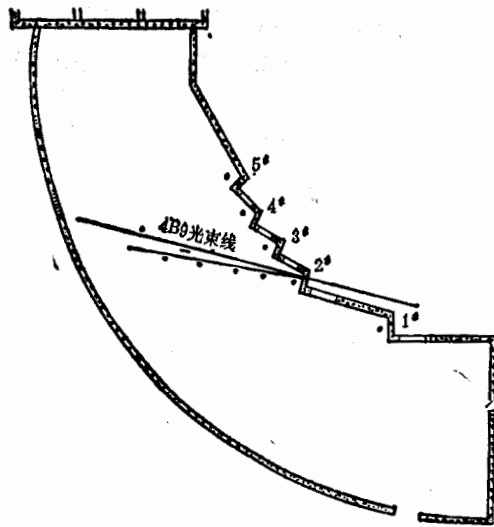


图2 同步辐射东实验厅测量布点

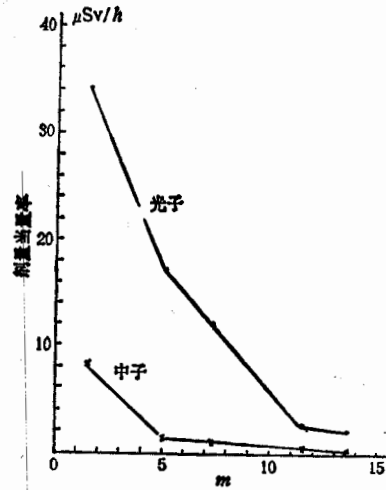


图3 东实验厅内沿4B9光束线中子和光子剂量当量率随距离减弱的情况

表2 东厅内各窗口剂量水平比较表

窗 口	1#		2#		3#		4#		5#	
	γ	n	γ	n	γ	n	γ	n	γ	n
峰值剂量率 10^{-2}mSv/h	1	0.5	6	4.2	3	2	0.4	0.2	5	0.5
总剂量率 10^{-2}mSv/h	1.5		10.2		5		0.6		5.5	

(图4(a)),注入较频繁,周累积剂量接近 1mSv 。在1990年11月15—22日机器进入正常注入储存工作状态(图4(b)),一周内注入次数明显下降,周累积剂量当量远低于 1mSv 。全年累积剂量当量为 $1.5 \times 10^{-2}\text{Sv}$,可以达到年剂量当量限值的 $3/10$ 。

4. 西厅各窗口的剂量水平测量布点见图5,束流在正常注入和储存过程中,厅内D点剂量当量率值最高,但不大于 $40\mu\text{Sv/h}$ 。只有在 e^+ 注入时,并用 $R_3\text{PR}_3$ 荧光靶阻挡,才在厅内产生高辐射剂量。

1991年1月24日11点30分 e^+ 束流(脉冲流强 2.5mA)注入时,用荧光靶 $R_3\text{PR}_3$ 阻挡束流,在D点产生光子剂量当量率 $\dot{H}_\gamma = 0.6\text{mSv/h}$ 。在其它监测点较低。重复多次实验,又经理论估算,表明在这种条件下西厅内D点产生这样高的剂量当量率是可能的,这是厅内引起高辐照的主要原因。

5. e^+ 束流注入时对东、西两厅的影响。

当 e^+ 束流向储存环注入时在西厅内产生了明显的辐射剂量,与此同时在东厅内无任何影响,仍然处于本底水平,见图6。当 e^+ 5mA 束流注入时,在西厅瞬时剂量当量率为 $40\mu\text{Sv/h}$,东厅为本底水平。

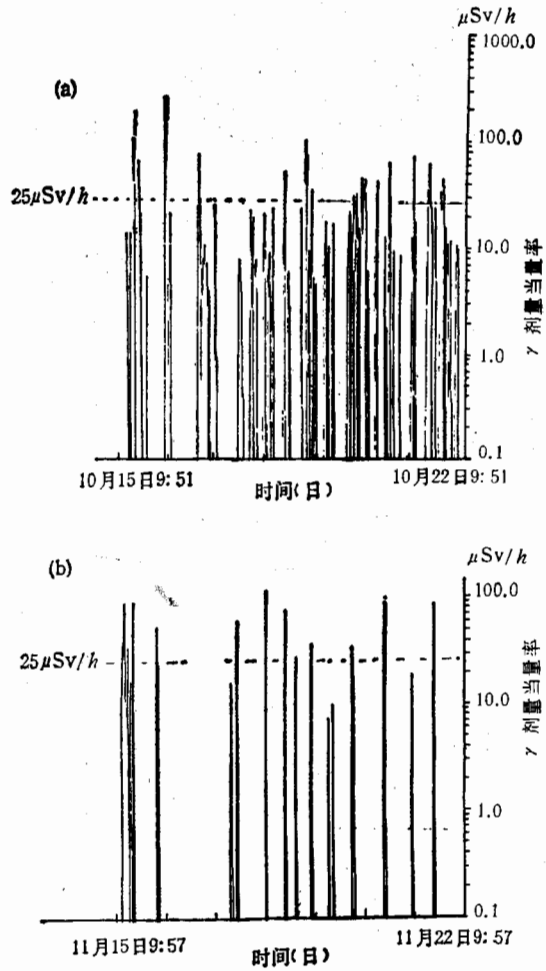


图 4 东实验厅2*窗口一周内累积剂量与束流注入次数的关系

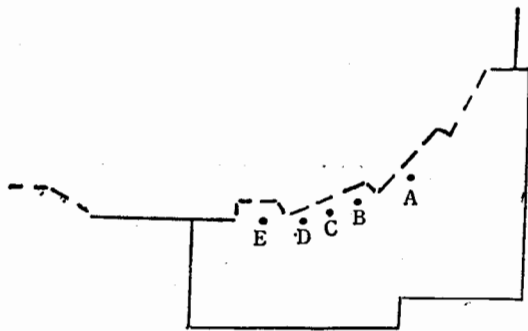


图 5 同步辐射西实验厅测量布点

6. e^- 束流注入时对东、西两厅的影响。

当 e^- 束流向储存环注入时在东厅产生了明显的辐射剂量, 与此同时在西厅内产生了较低的辐射剂量见图 7。

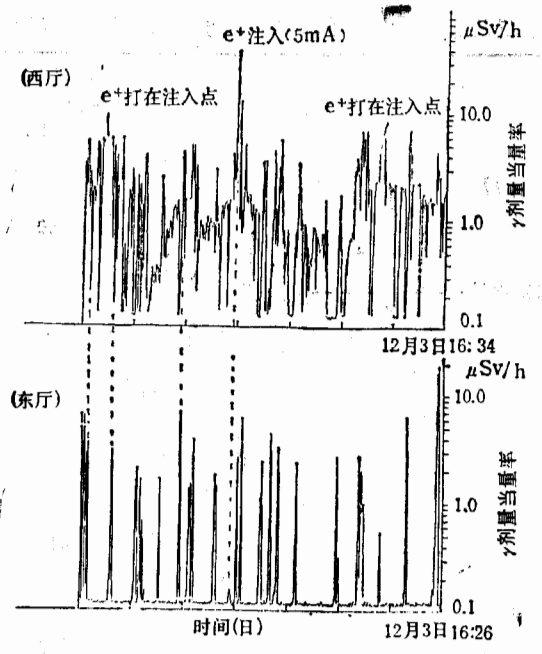


图6 e⁺注入时对东、西实验厅的辐射剂量贡献

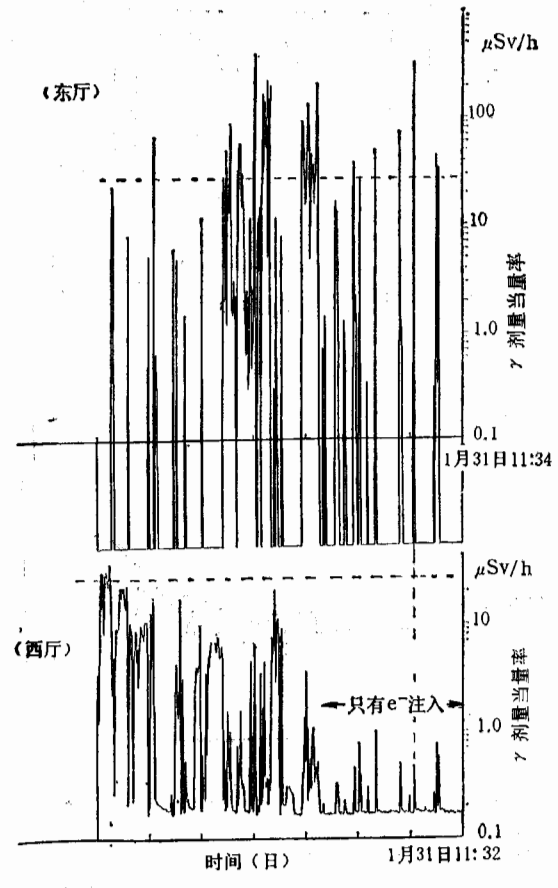


图7 e⁻注入时对东、西实验厅的辐射剂量贡献

由图可见 1991 年 1 月 30 日只有 e^- 注入时在东厅产生 $350 \mu\text{Sv/h}$ 的瞬时剂量当量率, 此时西厅的剂量当量率为 $0.5 \mu\text{Sv/h}$ 。

7. 20MeV 以上中子和光子的剂量贡献。

用碳铀比法测量了 20MeV 以上中子和光子的剂量贡献。当脉冲流强 300mA、能量为 1.1GeV 的 e^- 注入时, 在同步辐射东厅内剂量水平较高处, 对石墨活化体进行 1 小时照射, 然后将石墨活化体用低本底 NaI(Tl) γ 谱仪进行测量, 获取井型石墨活化探测器 β^+ 的饱和活性计数率为 $5.67 \times 10^3/\text{min}$, 经数据处理后给出 20MeV 以上中子和光子的混合剂量当量率。同时用包有聚乙烯慢化体的 In 探测器和裸铀探测器测量 20 MeV 以下中子剂量贡献。测量结果如下:

$$\dot{H}_{n+\gamma}(E > 20\text{MeV}) \quad 51 \mu\text{Sv/h};$$

$$\dot{H}_n(E < 20\text{MeV}) \quad 52 \mu\text{Sv/h};$$

$$\dot{H}_n(\text{热中子}) \quad 1.4 \mu\text{Sv/h}.$$

与此同时用 γ 、n 监测器在测量点测到的剂量当量率分别为 $188 \mu\text{Sv/h}$ 和 $41 \mu\text{Sv/h}$ 。所以 20MeV 以上中子和光子剂量贡献最大不超过总剂量当量的 18%。

8. γ 监测器测量结果与 LiF-TLD 比较, 表明 γ 监测器在脉冲场中有正确的剂量响应。

9. 中子雷姆计数器测量结果与包有聚乙烯慢化体的 In 探测器比较, 两种探测器所测得的剂量当量率在 21% 以内是符合的。

五、几点结论

1. 同步辐射西厅靠近 e^+ 束流注入点, 东厅靠近 e^- 束流注入点, 并且它们都位于束流注入的朝前方向上。实测数据表明, e^+ 和 e^- 分别注入时, 对两个厅的辐射影响有明显差别。这说明同步辐射实验厅相对束流注入点的几何位置, 是决定厅内辐射剂量水平的重要因素之一。如果同步辐射实验厅设置在远离注入点的地方, 或在注入束流的大角度方向上, 它的屏蔽墙厚度相应可以薄一些。

2. 同步辐射实验厅内辐射剂量水平与束流注入时产生的瞬时剂量当量率 (或注入效率) 有关。在调机注入频繁期间, 特别是注入困难时, 在局部地区的年累积剂量当量可以达到放射性工作人员年剂量当量限值的 3/10。该区称为控制区, 在边界线上应设置辐射危险标志。在 BEPC 正常注入对撞状态, 同步辐射厅内的年剂量当量值可以低于限值的 1/10。

3. 厅内中子、光子辐射场的时空分布和能量特性, 即 20MeV 以上的光子和中子对剂量当量的贡献都与屏蔽墙厚度有关。由于在同步辐射实验厅屏蔽墙(50cm 混凝土)内外又增加了大量的局部屏蔽, 并且屏蔽情况对各窗口又不一致, 所以中子, 光子辐射场差别较大。东厅 2# 窗口处未加局部屏蔽, 该处的辐射场分布是薄屏蔽外辐射场的特性。本文着重讨论了该处辐射场。

4. 对于同步辐射光束线周围的低能 X 射线的测量是辐射剂量测量中的一个难题。我们准备用薄壁自猝灭流光(SQS)探测器解决这一问题。但是对低能 X 射线的防护是很好

易的,在光束线管道外包有 1mm 厚的铅皮就可使 30 keV 以下光子至少减弱 8 个量级。

丁大钊教授对同步辐射实验厅的辐射防护十分关心,对这次测量提出了宝贵意见,在测量过程中得到了于鸿璇、唐鄂生、董宝中等同志的支持和帮助,在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] William P. Swanson, Radiological safety aspect of the operation of electron linear acceleratre- Technical reports series No. 188.
- [2] 汤月里等,核电子学与探测技术,4(1988),244.
- [3] 姜文贵等,碳钨比法测定中子($E_n > 20\text{MeV}$)剂量贡献,未发表(1988).
- [4] 李建平等,高能物理与核物理,3(1987),314.
- [5] 陈妮,热释光剂量测量技术(1978 年会议资料选编),原子能出版社,1980 年,102.
- [6] W. R. Nelson and T. M. Jenkins, IEEE Transaction on Nuclear Science Vol. NS-23, No. 4, August 1976.

Measurement of Radiation Dose Level of Synchrotron Radiation Experimental Hall of BEPC

LI JIANPING TANG YUELI LIU SHUDONG JIANG WENGUI
LEI CHUANHENG SHAO BEIBEI LI TIEHUI
CAI XIAOPING ZHANG QINGJIANG

(*Institute of High Energy Physics, Academis Sinica, Beijing 100039*)

ABSTRACT

This paper describes the radiation source and its characteristics of the Synchrotron Radiation Experimental Hall of BEPC, the radiation measuring method and measured results. It has been found that the radiation dose level of the Synchrotron Radiation Experimental Halls is closely correlative with the relative location of the Experimental Halls to the injection points of the electron and positron beams, the thicknesses of the shielding walls, the times and efficiencies of the beam injections.