



10 MeV 同轴腔电子加速器辐射屏蔽设计*

李 阳¹, 李武元¹, 赵全堂¹, 刘学博¹, 李中平¹, 杨 博¹,
严维伟¹, 毛 旺¹, 罗昌丽^{1,2}, 苏有武¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 中国科学院近代物理研究所自主研制了一台同轴腔电子加速器, 能产生 10 MeV, 10 mA 的辐照电子束, 建成后有望成为我国首台国产化的花瓣形电子辐照加速器。为保证该装置运行时的辐射安全, 为今后同类型装置的辐射屏蔽设计提供参考, 对该加速器开展了辐射屏蔽研究。首先结合装置的使用情况给出了一种地上为主机室地下为辐照室的半地下机房结构, 然后采用蒙特卡罗程序 FLUKA 计算了相关墙体的厚度。在蒙特卡罗计算中, 基于同轴腔加速器的束流损失特点, 建立了适用于该类型装置的蒙特卡罗源项输入模型, 充分考虑了决定辐射场的主要束损点, 同时设置相对简单。结果表明: 在设定的屏蔽外剂量率目标下, 以普通混凝土作为屏蔽材料, 主机室的侧墙、顶板和辐照室顶板的厚度分别需要 160~220, 110~150, 150 cm。

关键词: 花瓣形加速器; 同轴腔; FLUKA; 辐射屏蔽

中图分类号: TL77

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220010

Radiation shielding design for 10 MeV petal-shaped electron irradiation accelerator

Li Yang¹, Li Wuyuan¹, Zhao Quantang¹, Liu Xuebo¹, Li Zhongping¹, Yang Bo¹,
Yan Weiwei¹, Mao Wang¹, Luo Changli^{1,2}, Su Youwu¹

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A petal-shaped electron irradiation accelerator, recirculating coaxial accelerator (Recotron) was designed by Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences. It can produce 10 MeV energy and 10 mA current irradiation electron beam. It is under construction now and expected to become China's first domestically produced petal-shaped electron irradiation accelerator. To guarantee the radiation safety of this facility during operation and provide a reference for the radiation shielding design of the same type of electron accelerator in the future, a study on radiation shielding for this facility was carried out using Monte Carlo code FLUKA. The proposed vault of the Recotron is a kind of semi-underground structure with the accelerator room above ground and the irradiation room below ground. According to the beam loss characteristic of the Recotron, a simple but effective radiation source input model was proposed for MC simulation. This model fully considered the main beam loss points that determine the radiation field of the Recotron. The results show that to meet the dose criterion of China, the thickness of side walls, ceiling of accelerator room and ceiling of irradiation room should be at 160–220 cm, 110–150 cm, 150 cm respectively, when ordinary concrete was used as the shielding material.

Key words: petal-shaped accelerator, recirculating coaxial accelerator, FLUKA, radiation shielding

花瓣形电子辐照加速器因其具有性能稳定、快速调束、高束流功率、可同时提供多种能量选择等诸多优势, 在电子辐照加工领域已经成为了优先考虑的装置^[1-4]。随着我国对该类加速器的技术突破以及国产化的推进, 今后这种辐照装置在我国安装率会有一个明显的提升。然而, 目前国内针对花瓣形电子辐照加速器的辐射屏蔽研究较少, 相关文献资料鲜有报道。该类型电子辐照加速器的屏蔽计算与传统直线型电子辐照加速器的差异主要体现在

* 收稿日期: 2022-01-06; 修订日期: 2022-11-22

基金项目: 核能开发科研项目 (HNKF2021001)

联系方式: 李 阳, yangli@impcas.ac.cn。

加速过程中辐射源项的处理上。传统直线型电子辐照加速器的加速部件一般是一个竖直的圆柱型加速腔,其加速过程产生的辐射来自沿程损失束流与加速腔壁相互作用产生的 X 射线,针对这一部分的辐射计算,通常假设单能的损失束流沿加速腔径向均匀射向腔壁^[5]。对于花瓣形电子辐照加速器,由于其加速原理从根本上有着明显的不同,这种假定将不再适用。因此,本文以中国科学院近代物理研究所自主研制的花瓣形电子加速器——同轴腔电子加速器为研究对象,开展辐射屏蔽研究,为今后同类装置的辐射屏蔽设计提供参考。

1 同轴腔电子加速器

1.1 工作原理

同轴腔电子加速器主要的部件包括电子枪、谐振腔、9块外部转向磁铁、270°偏转磁铁和扫描系统。其工作原理如图 1 所示,谐振腔提供径向的加速电场,电子束从电子枪水平射向谐振腔后沿径向加速电场加速,到达外部转向磁铁经转向再次射入谐振腔加速,如此反复,电子束会经过 9 次转向 10 次穿过谐振腔,最终从出束口引出。电子束每穿过一次谐振腔都会获得 1 MeV 的能量,因此引出电子束能量为 10 MeV。引出的电子束随后通过一个 270°偏转磁铁,束流方向从水平改为垂直向下,经扫描系统扩展成平行面束后完成对物品的照射。表 1 给出了同轴腔电子加速器的主要技术参数。

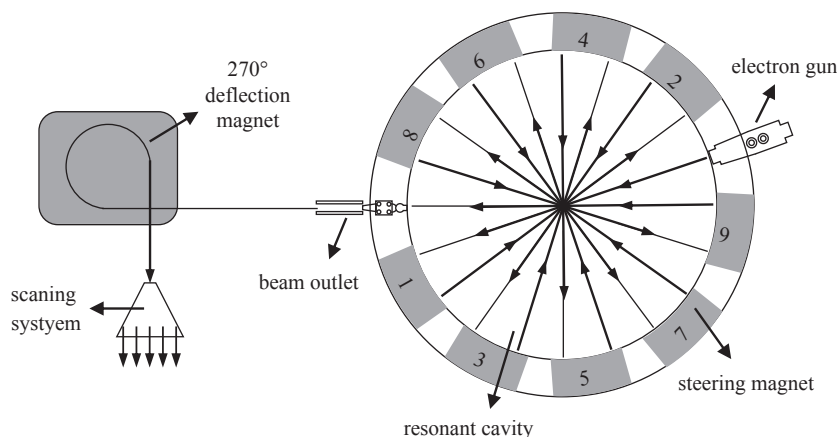


Fig. 1 Diagram of accelerator main structure and acceleration principle

图 1 同轴腔电子加速器工作原理示意图

表 1 同轴腔电子加速器主要技术参数

Table 1 Main tech parameter of recirculating coaxial accelerator (Recotron)

electron beam energy/MeV	electron beam intensity/mA	electron beam power/kW	energy instability/%	beam instability/%	scanning unevenness/%
10	10	100	<±2	<±2	<±10

1.2 辐射源项

电子加速器产生的辐射与电子束能量有关,对于 10 MeV 能量产生的辐射主要是次级 X 射线,同时伴有微量的中子。研究表明,以混凝土作为屏蔽材料,只需考虑次级 X 射线的屏蔽^[6-7]。同轴腔电子加速器产生的次级 X 射线有两个来源,包括电子偏转的同步辐射和损失束流与物质相互作用的韧致辐射。同步辐射的 X 射线能量低(仅 10^{-3} eV),穿透能力小,可以忽略^[8]。根据同轴腔电子加速器的物理设计,运行时的束流损失发生在电子束加速、引出、辐照等过程,每一个束流损失点即是一个辐射源项。加速、引出过程,束流损失在 9 个转向磁体和出束口的狭缝上,对应的束流能量分别为 1 MeV 到 10 MeV,总的损失流强为 6 μ A,高能电子损失较少,低能电子损失较多。辐照过程,扫描束流全部损失在辐照室内的束流回收水箱里,对应的束流能量为 10 MeV,损失流强为 10 mA。

2 屏蔽计算

2.1 加速器机房屏蔽结构及材料

电子辐照加速器机房结构一般分为上下两层,上层放置加速器称为主机室,下层辐照物品称为辐照室。目前,中科院近代物理研究所研制的同轴腔加速器还处于加速器技术研究阶段,产生的电子束流通过水靶进行回收,不用于辐照物品。基于该装置的使用情况并考虑到屏蔽成本,机房采用了一种半地下屏蔽结构,如图 2 所示。束流

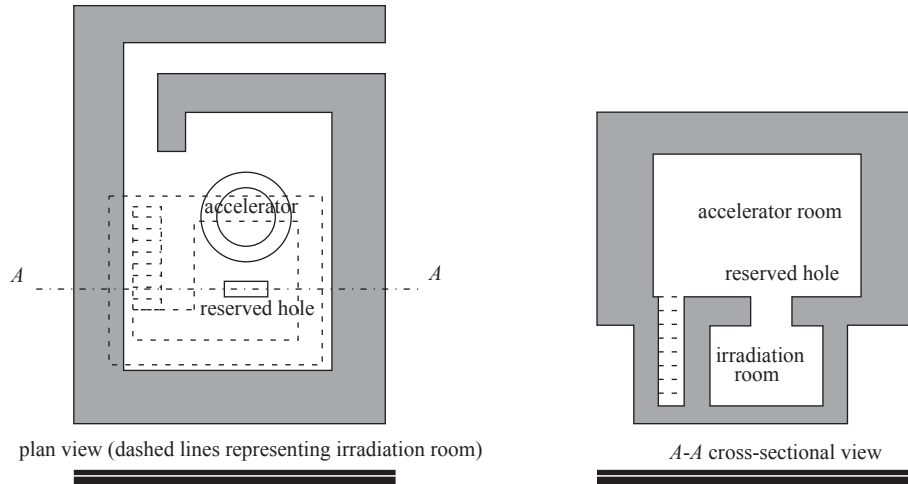


Fig. 2 Shielding structure used for Recotron

图 2 同轴腔加速器机房屏蔽结构

损失较大的辐照室设计在地下,以充分利用天然土壤进行屏蔽,而束流损失较小的主机室设计在地上,两者通过内部楼梯连通从而构成一个辐射控制区,出入口位于主机室。主机室净尺寸为长 7 m,宽 8.6 m,高 4.8 m;辐照室净尺寸为长 3.5 m,宽 4 m,高 2.2 m。辐照室顶板预留一长方形通孔,长 1.4 m,宽 0.4 m,用于通过束流管道和扫描系统。预留孔洞正下方 1.4 m 处为铁制支撑台,其上放置束流回收水箱。加速器机房所有墙体均采用普通混凝土 (2.35 g/cm^3) 建造。

2.2 剂量率设计目标

国家标准^[9]规定,放射性工作人员的年平均有效剂量限值为 20 mSv。屏蔽设计中其受照剂量通常约束在剂量限值的 10%~30% 范围内^[10-11],本文取 5 mSv/a。从上文机房屏蔽结构可以看出,放射性工作人员可达区域为主机室侧墙及顶墙外部的区域。保守考虑,侧墙外人员驻留时间最大为 2000 h,其剂量率应小于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$;顶墙外人员偶然居留,按每年 500 h 计,其剂量率应小于 $10 \mu\text{Sv/h}$ 。考虑到计算误差,屏蔽设计一般考虑 2 倍安全系数^[11],因此本文的剂量率设计目标为侧墙外 $1.25 \mu\text{Sv/h}$,顶墙外 $5 \mu\text{Sv/h}$ 。

2.3 屏蔽计算方法与源项模型

如前文所述,同轴腔电子加速器的束流损失点数量多,束流损失形式多样,既有集中的点损失,又有扫描后的面损失,且每个束流损失点的束流能量又不同,屏蔽计算经验公式难以解决。鉴于此,本文采用三维蒙特卡罗程序 FLUKA^[12-13]进行模拟计算。在蒙特卡罗模拟中,源项模型至关重要,其合理性直接决定了计算结果是否可信。根据同轴腔电子加速器的束流损失特点,分别建立了加速器源项模型和辐照源项模型,如图 3、图 4 所示。图 3 中中间的黑点表示点电子源,位于中心;虚线箭头表示电子的发射方向,其指向的数字表示电子能量,相邻虚线的夹角为 36° ;各个方向的抽样概率相等;外围的黑色圆柱体表示束流损失点处轰击的靶体,材料为铁,厚度为 1 cm;束流与靶体距主机室地面 1.45 m。该模型中忽略了谐振腔、外部转向磁体、电子枪等结构部件并同时作了两点近似处理:1)束流在转向磁体狭缝中的沿程线损失等效为一个集中的点损失,这种处理是合理的,因为转向磁体狭缝相对于大空间的主机室可近似为一个点,其本身的几何效应对辐射场的影响不大;2)束流的损失与电子能量无关,每个靶体处的束流损失流强一样,在无法准确给出各能量下束流损失比例的情况下,这是一种妥协但方便的做法,由于

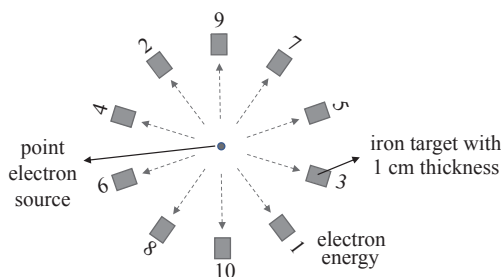


Fig. 3 Diagram of accelerator radiation source model

图 3 加速器源项模型示意图

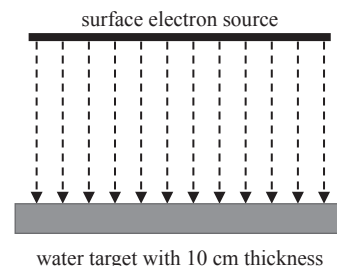


Fig. 4 Diagram of irradiation radiation source model

图 4 辐照源项模型示意图

高能电子会产生更强的韧致辐射,这种处理也是保守的。图4中上方的实线表示均匀面电子源,范围为长110 cm、宽10 cm;虚线箭头表示电子的发射方向;下方的长方体表示束流回收水箱,其厚度为10 cm,大于10 MeV的电子在水中的射程。此外,对于小概率问题的情形,为避免计算时间长、计算误差大甚至出现空计数的问题,采用了分布计算的模拟技术^[14],即第一步先模拟电子与物质的相互作用,接着以第一步产生的光子作为源粒子作第二步的运输模拟。

3 计算结果

对于本文提出的屏蔽结构,需要确定主机室墙体及辐照室顶板的厚度,以使主机室外剂量率满足设计要求。辐照室顶板用来屏蔽辐照源项,其厚度设计为使辐照源项对主机室外剂量率的贡献小到可以忽略,从而避免大范围地增加主机室主体屏蔽,减少屏蔽成本。在这样的设计理念下,主机室墙体厚度主要由加速器源决定。值得注意的是,辐照室顶板正对靶的位置留有通孔,辐照背向辐射会不经屏蔽地从该处漏出直接射向主机室,对主机室墙体厚度的影响需要评估。

图5给出了加速器源项在主机室中引起的剂量率分布,其中白色、红色包络线分别为1.25, 5 $\mu\text{Sv/h}$ 等值线。由此图确定了加速器源项下主机室各墙体厚度,结果见表2。经计算,当主机室墙体按表2中厚度设置,辐照室顶板不开通孔、厚度为150 cm时,辐照源项对主机室外剂量率的最大贡献为0.01 $\mu\text{Sv/h}$,可以忽略。因此,辐照室顶板厚度确定为150 cm。

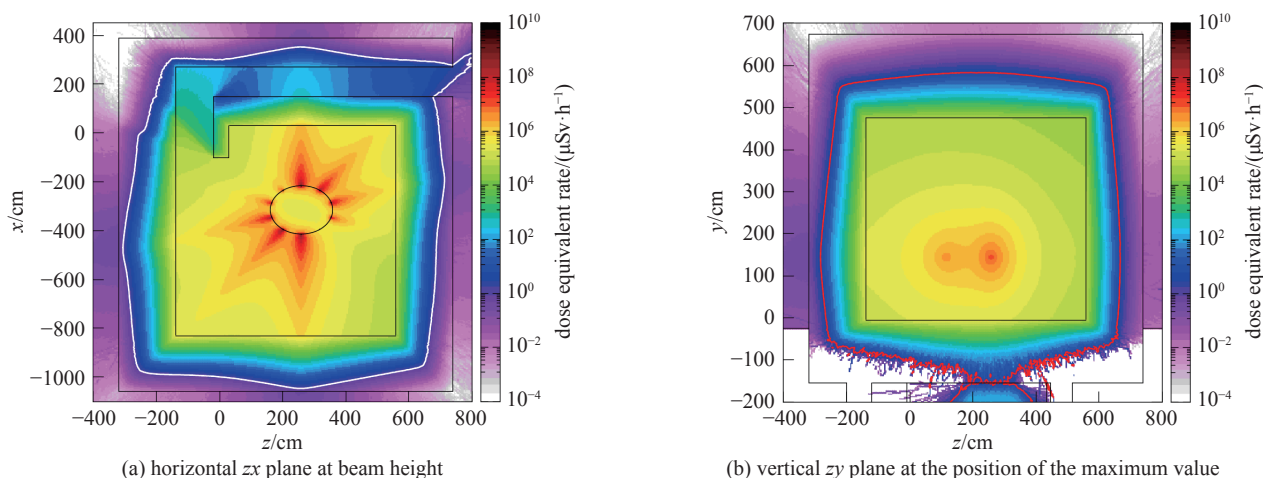


Fig. 5 Dose rate distribution in accelerator room induced by accelerator radiation source

图5 加速器辐射在主机室内的剂量率分布

图6给出了辐照背向辐射漏射到主机室的剂量率分布,其中红色包络线为5 $\mu\text{Sv/h}$ 等值线。从图中可以看出,侧向剂量率迅速衰减,当墙体为160 cm厚时剂量率降到了0.001 $\mu\text{Sv/h}$,可以忽略;而顶部正对通孔的位置剂量率较高,其值降到5 $\mu\text{Sv/h}$ 以下墙体需要150 cm厚。因此,主机室侧墙的厚度不受影响,其顶板需在正对通孔的区域局部增加40 cm混凝土。

门洞处的剂量率为8 $\mu\text{Sv/h}$,超过了剂量率设计目标,需要设置防护门进行局部屏蔽。针对X射线的屏蔽,防护门常

用的材料有铅和铁。铅在全能段对X射线的衰减均好于铁,尤其是在1 MeV以下能段,高于1 MeV两者的差异不再明显^[15]。图7给出了门洞处的X射线微分能谱,0~7 MeV均有分布,其中1 MeV以上分布较为平坦。防护门紧急情况下需人工移动,其设计应避免过重而造成开关不便甚至难以打开,其次还要考虑经济成本。为此,首先设置一定厚度的铅充分屏蔽低能X射线,随后选用铁对高能X射线进行屏蔽。以图7中的X射线能谱为输入,门外剂量率1.25 $\mu\text{Sv/h}$ 为目标,计算得到了不同厚度的组合屏蔽方案,结果见表3。可以看出:1)全铁门最重,价格最低,而全铅门最轻,价格最高,不过其重量有相对明显的减少,约为67%,而价格只增加了9%;2)随着铅含量增加,门的

表2 主机室各墙体厚度

Table 2 Thickness of each wall in the accelerator room

position	shielding thickness/cm
maze exterior wall	80
maze interior wall	120
west wall	160
east wall	160
south wall	220
ceiling	110

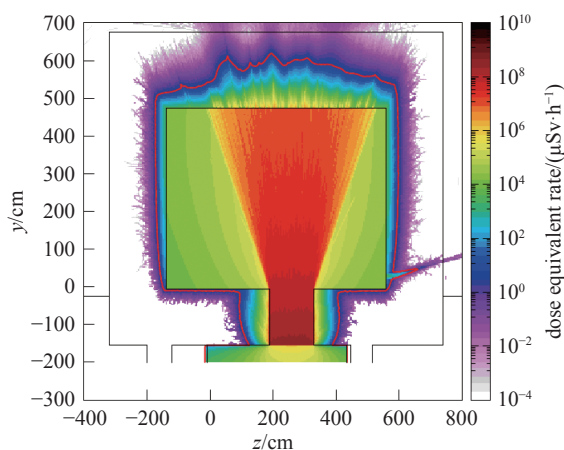


Fig. 6 Dose rate distribution in accelerator room induced by back irradiation radiation

图6 辐照背向辐射泄露到主机室的剂量率分布

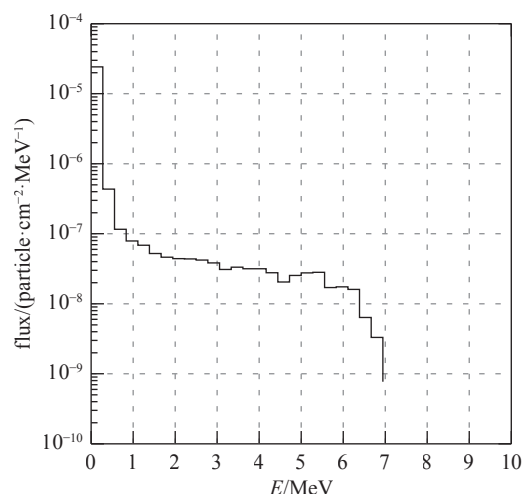


Fig. 7 X ray energy spectrum at door position

图7 门洞处X射线微分能谱

表3 防护门不同厚度组合方案比较

Table 3 Comparison of different shielding case for door

case	thickness of lead/cm	thickness of iron/cm	total thickness/cm	total weight/t	total price/RMB
1	0	4.00	4.00	0.94	5616
2	0.2	3.05	3.25	0.78	5644
3	0.4	2.35	2.75	0.69	6023
4	0.6	1.10	1.7	0.46	5630
5	0.8	0.15	0.95	0.308	5658
6	0.9	0	0.9	0.306	6129

重量单调下降,但其价格并非单调增加,方案4较方案3门的重量突然下降,其原因是增加同样厚度0.2 cm的铅较之前等效减少更多的铁,这表明对于铅铁组合方案,铅含量存在最坏点,就本文而言最坏点为0.4 cm,即方案3;3)比较方案5与方案6(全铅门),增加0.1 cm铅等效减少0.15 cm铁,两者基本相当,说明0.8 cm铅恰好充分屏蔽低能X射线,继续增加铅的厚度无论从重量还是经济角度已经没有必要,因此本文防护门的设计选择方案5。

4 结 论

不同于传统直线型电子辐照加速器,同轴腔加速器的束流损失复杂,针对该类加速器本文建立了蒙特卡洛计算的源项特别是加速器源项的输入模型,该模型充分考虑了决定辐射场的主要束损点,能够合理的给出屏蔽体厚度,同时其设置相对简单,可有效简化源项的输入和计算,为该类加速器的屏蔽计算方法提供了重要参考。

就本文提出的加速器机房结构及材料,为满足屏蔽设计目标只需考察主机室的侧墙、顶板及辐射室顶板的厚度,计算得到主机室的侧墙需要160~220 cm,顶板需要110~150 cm,辐照室顶板需要150 cm。此外,从辐照室泄露到主机室的辐照背向辐射对主机室侧墙的厚度影响可以忽略,而对主机室顶板的厚度影响较大,它决定了主机室顶板的最大厚度。

参考文献:

- [1] Pottier J. A new type of RF electron accelerator: the rhodotron[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 1989, 40/41: 943-945.
- [2] Nguyen A, Capdevila J M, Laine F, et al. Rhodotron first operations[C]//Proceedings of the 2nd European Particle Accelerator Conference. 1990: 1840.
- [3] 陈勇, 黄文会, 唐传祥. Rhodotron型加速器粒子动力学研究[J]. 高能物理与核物理, 2005, 29(2): 180-185. (Chen Yong, Huang Wenhui, Tang Chuanxiang. Dynamics study of the Rhodotron accelerator[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2005, 29(2): 180-185)
- [4] 宋瑞英, 施惠栋, 钟世材, 等. 花瓣形加速器加速腔结构的优化设计[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(12): 1881-1884. (Song Ruiying, Shi Huidong, Zhong Shicai, et al. Design of resonant cavity of petal-shaped accelerator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(12): 1881-1884)
- [5] 于国兵, 陈志, 顾先宝, 等. 高频高压电子辐照加速器主机室辐射场研究[J]. 辐射防护, 2015, 35(2): 82-86,92. (Yu Guobing, Chen Zhi, Gu Xianbao, et al. Radiation field study on high frequency and high voltage electron irradiation accelerator machine room[J]. Radiation Protection, 2015, 35(2): 82-86,92)

- [6] 杨芝歌, 张保增, 王玮. 某工业电子直线加速器的辐射危害及防护[J]. *铀矿地质*, 2015, 31(5): 541-546. (Yang Zhige, Zhang Baozeng, Wang Wei. Radiation hazard and protection of an industrial electronic irradiation accelerator[J]. *Uranium Geology*, 2015, 31(5): 541-546)
- [7] HJ 979-2018, 电子加速器辐照装置辐射安全和防护[S]. (HJ 979-2018, Radiation safety and protection on electron accelerator irradiation facilities[S])
- [8] Tabbakh F, Borhani M. Radiation emission from the "Rhodotron-TT200" cavity[J]. *Chinese Physics C*, 2011, 35(7): 675-678.
- [9] GB 18871-2002, 电离辐射防护与辐射源安全基本标准[S]. (GB 18871-2002, Basic standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources[S])
- [10] 吴青彪, 彭毅, 王庆斌, 等. 恒健质子治疗装置的辐射与屏蔽设计[J]. *南方能源建设*, 2016, 3(3): 16-22. (Wu Qingbiao, Peng Yi, Wang Qingbin, et al. Radiation and shielding design of Hengjian proton medical facility[J]. *Southern Energy Construction*, 2016, 3(3): 16-22)
- [11] 李长园, 蔡军, 张国庆, 等. 1.5MeV电子辐照平台屏蔽改造[J]. *原子能科学技术*, 2015, 49(9): 1715-1721. (Li Changyuan, Cai Jun, Zhang Guoqing, et al. Shielding structure modification of 1.5 MeV electron irradiation platform[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2015, 49(9): 1715-1721)
- [12] Battistoni G, Boehlen T, Cerutti F, et al. Overview of the FLUKA code[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, 82: 10-18.
- [13] Ballarini F, Battistoni G, Brugger M, et al. The physics of the FLUKA code: recent developments[J]. *Advances in Space Research*, 2007, 40(9): 1339-1349.
- [14] Wu Qingbiao, Zhuang Sixuan, Liu Qiongyao, et al. Research on radiation dose rate distribution in the backscattering neutron hall of CSNS[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2020, 4(1): 116-129.
- [15] 李德平, 潘自强. 辐射防护手册—第一分册: 辐射源与屏蔽[M]. 北京: 原子能出版社, 1987: 282-283. (Li Deping, Pan Ziqiang. Handbook of radiation protection—division I: Radiation sources and shielding[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1987: 282-283)