



·粒子束及加速器技术·

95 MeV 射频电子直线加速器辐射防护分析*

李迪开^{1,2}, 曹磊峰^{2,3}, 池云龙⁴, 周 征⁵, 陈秋宏⁶, 张春晖^{2,3}, 代艳萌^{1,2},
俞 健^{2,3}, 颜苗苗^{2,3}, 邓嘉玲^{2,3}, 汪 雪^{2,3}, 周沧涛^{1,2,3}

(1. 深圳技术大学 工程物理学院, 广东 深圳 518118; 2. 深圳技术大学 深圳市超强激光与先进材料技术重点实验室, 广东 深圳 518118;
3. 深圳技术大学 先进材料测试技术研究中心, 广东 深圳 518118; 4. 中国科学院 高能物理研究所, 北京 100049;
5. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900; 6. 广东中科揽胜辐射防护有限公司, 广东 佛山 528200)

摘 要: 应相关建设安评、环评、稳评以及职业健康评估的要求, 电子加速器设计过程中即应对其辐射情况进行分析。针对电子能量为 40~95 MeV 可调的光阴极微波电子枪直线加速器, 对其辐射源项进行分析, 并讨论了可能的辐射防护措施的效果。采用蒙特卡罗软件 FLUKA 对电子束流和加速器进行建模, 通过模拟计算发现, 加速器产生的等效剂量分布主要位于废束桶中, 废束桶以外辐射剂量迅速下降, 在电子加速器实验大厅四周设置混凝土墙体的情况下辐射等效剂量率将随墙体厚度迅速下降。若混凝土墙体厚度设置为 1 m, 则墙体外工作人员所在区域辐射等效剂量率不高于 1 $\mu\text{Sv/h}$ 量级, 能够有效屏蔽加速器产生的电离辐射, 给工作人员提供有效防护。研究方法及其结果对同能区同类型加速器建设中的辐射分析及辐射防护评估具有一定的参考价值。

关键词: 电子加速器; FLUKA 模拟; 电离辐射; 辐射源项分析; 辐射防护

中图分类号: TL508

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210518

Radiation protection analysis of 95 MeV RF electron linac

Li Dikai^{1,2}, Cao Leifeng^{2,3}, Chi Yunlong⁴, Zhou Zheng⁵, Chen Qiuhong⁶, Zhang Chunhui^{2,3},
Dai Yanmeng^{1,2}, Yu Jian^{2,3}, Yan Miaomiao^{2,3}, Deng Jialing^{2,3}, Wang Xue^{2,3}, Zhou Cangtao^{1,2,3}

(1. College of Engineering Physics, Shenzhen Technology University, Shenzhen 518118, China;

2. Shenzhen Key Laboratory of Ultraintense Laser and Advanced Material Technology, Shenzhen Technology University, Shenzhen 518118, China;

3. Center for Advanced Material Diagnostic Technology, Shenzhen Technology University, Shenzhen 518118, China;

4. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

5. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China;

6. ZhongkeLansheng Radiate Protection Technology Cooperation Limited, Foshan 528200, China)

Abstract: According to the requirements of relevant construction safety assessment, environmental assessment, stability assessment and occupational health assessment, the radiation situation of electron accelerator should be analyzed in the design process. The radiation source of photocathode RF electron gun linac with adjustable electron energy from 40 MeV to 95 MeV was analyzed, and the effect of possible radiation protection was discussed. Monte Carlo software FLUKA was used to model the electron beam and accelerator. Through simulation calculation, it is found that the dose equivalent distribution generated by the accelerator is mainly located in the beam dump, and the radiation dose outside the beam dump decreases rapidly. When the concrete shielding wall is set around the electron accelerator experimental hall, the radiation dose equivalent will decrease rapidly with the wall thickness. If the thickness of the concrete shielding wall was set to 1 m, the radiation dose equivalent in the area where the staff outside the shielding wall were located should not be higher than 1 $\mu\text{Sv/h}$. So, the wall can effectively shield the ionizing radiation generated by the accelerator and provide effective protection for the staff.

Key words: electron accelerator, FLUKA simulation, ionizing radiation, radiation source term analysis, radiation protection

* 收稿日期: 2021-11-25; 修订日期: 2022-03-16

基金项目: 广东省教育厅普通高校特色创新项目 (2021KTSCX113); 博士后出站留(来)深科研资助项目; 深圳技术大学新引进高端人才财政补助项目 (20200206)。

联系方式: 李迪开, lidikai@sztu.edu.cn。

通信作者: 曹磊峰, caoleifeng@sztu.edu.cn。

射频电子直线加速器在科技生产、国防建设、生物医疗等领域应用广泛^[1]。本研究所涉及的加速器由微波系统、功率源系统、束测系统、磁铁系统、真空机械系统、控制系统等组成。其微波系统包括光阴极微波电子枪、聚束腔、加速腔、偏转腔、激励系统。激光驱动的光阴极微波电子枪能产出高亮度、短脉冲、低发射度的高品质电子束^[2]。加速腔利用高频电场加速沿直线轨道运动的电子^[3]，本研究的电子加速器设计工作频率为 2.856 GHz，设计输出电子束能量为 40~95 MeV 可调，重复频率 1~10 Hz 可调，电子束团电荷量 150 pC，归一化发射度 0.5 mm·mrad (rms)，峰值电流 300 A，最终电子束横向尺寸 15 μm (rms)。

电子束在直线加速器的各输运和加速区段，有可能偏离束流中心而形成束晕粒子^[4]，并撞向真空壁引起束流损失，尤其是电子在经过相互作用区后打向废束桶时，高能电子轰击可能形成很强的辐射剂量，并由此带来辐射屏蔽方面的一系列问题。同时高能电子与加速器结构材料相互作用，产生的光子与加速器材料发生光核反应产生中子，若在屏蔽层外形成泄露剂量，则将对工作人员甚至公众带来直接的放射性危害^[5]。要保证系统安全可靠运行，加速器设计建造中必需严格控制粒子束的损失率。

为确保实验装置放射性整体可控，满足建设安评、环评、稳评以及职业健康评估的要求，需对电子加速器的辐射源项进行分析，并设计和评估可行的辐射防护设施。1985 年发布的国家标准《粒子加速器辐射防护规定》GB5172-85^[6]适用于单核能量低于 100 MeV 的粒子加速器，对剂量当量限值、辐射防护设施设计原则、运行中的辐射安全、辐射监测辐射安全管理环境保护等都做出了相关规定。但此标准中的辐射剂量估算部分采用经验公式和数值查表，方法较为陈旧；现有辐射防护领域的其他关联法规和标准已更新，此标准难以适用。2018 年发布的国家标准《电子加速器辐照装置辐射安全和防护》HJ979-2018^[7]是加速器辐射防护领域较新的国家标准，其中对辐射源项、辐射屏蔽、屏蔽厚度等的计算仍是采用经验公式与数值查表的方法，如十分之一值层求解法。但此标准仅适用于能量不高于 10 MeV 的电子束辐照装置。显然，对 40~95 MeV 能量范围的电子加速器进行辐射源项计算与辐射防护评估时缺少较新的合适的国家标准。

通过调研国际上的同类加速器实验室发现，采用蒙特卡罗方法计算辐射效应比较普遍。相比于经验公式，蒙特卡罗程序可解决复杂几何结构的辐射屏蔽问题，得到高精度的计算结果，给出剂量大小和全局三维的剂量分布^[8]，因此被越来越多的加速器项目设计作为辐射分析计算的标准^[9-11]。如瑞士自由电子激光^[12]项目的概念设计报告中，在对比了各种方法后，采用 FLUKA^[13-15]软件的模拟作为其加速器辐射源项评估的最终模拟结果。

本文采用辐射分析与屏蔽设计领域的通用蒙特卡罗软件 FLUKA 程序，对最高输出能量的电子在束流管中可能撞向真空壁引发的簇射，以及电子打向废束桶等过程进行了模拟，以讨论加速器整体的等效剂量分布。据此辐射剂量分布结果，设计合适的加速器实验大厅辐射防护措施，并评估此防护措施的屏蔽效果及对工作人员和公众的影响。FLUKA 是计算粒子传输以及粒子与物质相互作用的通用工具，涵盖了从质子和电子加速器屏蔽到靶设计、量能器、活化、计量学、探测器设计、加速器驱动系统等广泛领域的应用。

1 模 型

1.1 加速器和工作环境建模

本项目涉及的射频电子直线加速器设计放置于一楼实验大厅中，四周、底面、顶棚以混凝土进行辐射防护，工作人员在加速器运行、调束期间均不会进入加速器大厅。加速器实验大厅外则设置相关实验室、走廊，有工作人员在此区域活动。为设计合适的辐射防护措施并评估其效果，建模中将加速器大厅四周、顶棚、底面均设置密度 2.35 g/cm³的 1 m 厚混凝土，由此测试混凝土墙体对辐射剂量的屏蔽效果。在目前的模拟中暂未考虑实验大厅开门、孔、洞等，而是用混凝土全部封闭。未来根据实际需要开孔时，在孔洞处使用与本文模拟中的混凝土等效厚度的铅门作为防护门，本文的辐射防护分析仍不失一般性。为评估混凝土墙外人员活动区域的辐射剂量，模拟中考虑了混凝土外 1 m 宽的空气。

束线距地面 1.3 m，选取 y 轴沿铅直向上，选取 z 轴平行于束线且指向电子束运动方向。束线起点即电子源点在 x - y - z 坐标系中为 (0, 130, 0) 点， x 方向范围 (-900, 400)， y 方向范围 (-200, 1400)， z 方向范围 (-705, 1995)，单位为 cm，3 个坐标方向均分成 500 个 bin；坐标范围包括了加速器实验室大厅，大厅四周、底面、顶棚各 1 m 厚的混凝土，以及混凝土墙外 1 m 宽的空气以表征实验大厅相邻空间。加速器、实验大厅、屏蔽墙体、墙体外区域的整体几何模型在过束线中心的水平面内俯视图如图 1 所示。

1.2 电子束流参数

本研究射频电子直线加速器的电子源来自光阴极微波电子枪，即使用激光轰击金属阴极，经光电效应产生

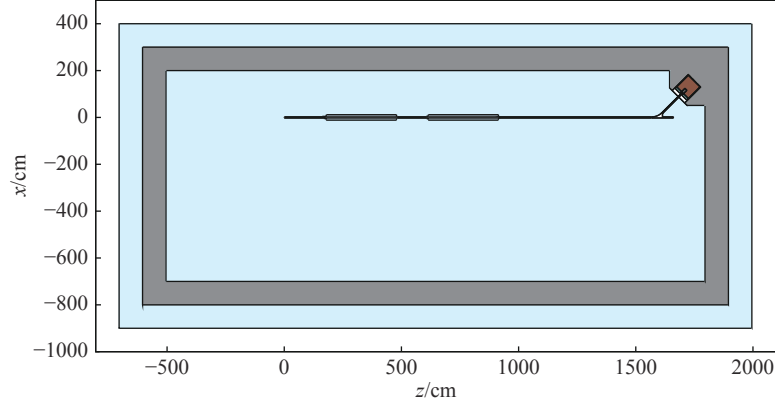


Fig. 1 Overall geometric modeling of accelerator and surrounding protective shielding wall

图1 加速器及四周防护混凝土墙体整体几何建模

的电子作为加速器的电子源。光阴极电子枪产生的光电子存在一定的热发射度,加速器技术设计报告中根据国内外同类S波段光阴极电子枪经验得到,初始归一化发射度 $0.2 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ (rms),初始束斑大小 0.25 mm (rms,均匀分布)。

沿束流管距源点约 13 m 处设计为相互作用点,能量为 95 MeV 的电子束在此处与未来可能的科学仪器设备相互作用。经过一系列电子束传输聚焦方案,电子束在相互作用点处设计指标将达到束斑归一化发射度 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ (rms),束斑尺寸 $15 \mu\text{m}$ (rms)。

整套聚焦系统十分复杂,难以在辐射计算中用FLUKA进行完全的模拟。由于FLUKA进行蒙特卡洛计算时,是一个接一个粒子进行模拟,缺少对粒子束团内粒子间相互排斥的考虑,也就是没有粒子束流发散的模拟。处理方法是在设置粒子束输入参数时,对粒子束给定一个发散情况的描述,包括束斑发射度、尺寸和形状。由于在FLUKA中无法设置运动过程中的发射度变化情况,因此需沿束流 z 坐标,分段给粒子束设置不同的发射度,并由此对各重要点位的粒子束在加速器中的运动和产生辐射情况分别进行模拟。

模拟中在 $z=0$ 的源位置将束流初始值设为光阴极电子枪初始束斑尺寸和发射度。之后粒子束沿束流管 z 方向运动,认为束斑尺寸和发射度线性变化,直至达到相互作用点处的设计束斑尺寸和发射度。

由于相互作用点处的束斑尺寸非常小,可以近似认为是一个点源,在相互作用点之后一直到废束桶之前的这段过程中,认为散角 σ_x 由几何发射度 ε_g 计算得到且保持不变,而几何发射度则由相互作用点处的设计归一化发射度 ε_n 求得(γ 为相对论总能量与静止能量之比,注意此处粒子束已达到加速器设计最大能量 95 MeV)。

$$\varepsilon_n = 0.5 \text{ mm} \cdot \text{mrad} \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{E}{m_0 c^2} = \frac{95 \text{ MeV}}{m_0 c^2} = \frac{95 \text{ MeV}}{0.511 \text{ MeV}} = 185.91 \quad (2)$$

$$\varepsilon_g = \frac{\varepsilon_n}{\gamma} = \frac{0.5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}}{185.910} = 0.00269 \text{ mm} \cdot \text{rad} \quad (3)$$

$$\varepsilon_g \equiv \sqrt{\langle x \rangle^2 \langle x' \rangle^2 - \langle x x' \rangle^2} \quad (4)$$

在束腰位置 $x-x'$ 无耦合, $\langle x x' \rangle = 0$,有

$$\varepsilon_g = \sqrt{\langle x \rangle^2 \langle x' \rangle^2} = \sigma_x \sigma_{x'} \quad (5)$$

$\sigma_x = \langle x \rangle$ 为束斑尺寸, $\sigma_{x'} = \langle x' \rangle$ 为散角大小,相互作用点处的散角大小为

$$\sigma_{x'} = \frac{\varepsilon_g}{\sigma_x} = \frac{0.00269 \text{ mm} \cdot \text{mrad}}{15 \mu\text{m}} = 0.1793 \text{ mrad} \quad (6)$$

而束斑尺寸为离开相互作用点后运动的距离与散角的乘积,如粒子束从相互作用点处开始直到废束桶前运动了 444.75 cm ,则废束桶前的粒子束斑尺寸为

$$\sigma_x = 0.1793 \text{ mrad} \times 444.75 \text{ cm} = 0.797 \text{ mm (rms)} \quad (7)$$

根据国内外同类光阴极射频电子直线加速器的运行经验,在加速器正常运行情况下,加速器上束流的总损失

率不大于1%。电子加速器末端设有废束桶,不用的束流主要通过废束桶吸收屏蔽掉。假设加速器沿束流管各段总的损失率为1%,即99%的粒子会经过加速器各部分后最终抵达废束桶前,在废束桶处为99%的点损失。可以认为,从 $z=0$ 点开始,直到废束桶前,束流损失是随机的,即全部1%的束损在加速器沿线均匀分布。

在如下重要点位分别设置了相应的粒子束流参数并令其沿束流管运动直到打向废束桶:束流起始源点、6个YAG靶束测点处、2段加速管前后、相互作用点处、偏转磁场起始处、废束桶前。这些重要点位处的粒子束能量、发射度、束团尺寸、散角、束损都按照上述进行了计算,列于表1。

表 1 各重要点位束流参数表
Table 1 Parameters of beam at important positions

No.	important position	remnant beam/%	normalization parameter	path length/cm	path length after interaction point/cm	beam energy/MeV	γ
①	origin point	100.000	0.00038	0.00	—	5	9.785
②	YAG1	99.962	0.00064	67.00	—	5	9.785
③	start of acceleration1	99.898	0.00170	180.00	—	5	9.785
④	end of acceleration1	99.727	0.00057	480.00	—	50	97.847
⑤	YAG2	99.670	0.00019	581.00	—	50	97.847
⑥	start of acceleration 2	99.651	0.00170	614.00	—	50	97.847
⑦	end of acceleration 2	99.481	0.00030	914.00	—	95	185.91
⑧	YAG3	99.450	0.00040	967.00	—	95	185.91
⑨	YAG4	99.411	0.00147	1037.00	—	95	185.91
⑩	interaction point	99.263	0.00139	1296.00	0.00	95	185.91
⑪	YAG5	99.124	0.00015	1541.00	245.00	95	185.91
⑫	start of bending magnetic field	99.109	0.00043	1568.10	272.10	95	185.91
⑬	YAG6	99.066	0.00055	1644.10	348.10	95	185.91
⑭	front end of beam dump	99.011	0.99011	1740.75	444.75	95	185.91

No.	important position	normalized divergence/(mm·mrad ⁻¹)	geometric divergence/(mm·mrad ⁻¹)	beam size/mm(rms)	beam size/cm (FWHM)	divergence angle/mrad	divergence angle/mrad (FWHM)
①	origin point	0.20000	0.02044	0.25000	0.05888	0.08176	0.19254
②	YAG1	0.21551	0.02203	0.23785	0.05601	0.09260	0.21807
③	start of acceleration1	0.24167	0.02470	0.21736	0.05119	0.11363	0.26759
④	end of acceleration1	0.31111	0.00318	0.16296	0.03838	0.01951	0.04595
⑤	YAG2	0.33449	0.00342	0.14465	0.03406	0.02363	0.05566
⑥	start of acceleration 2	0.34213	0.00350	0.13867	0.03266	0.02522	0.05938
⑦	end of acceleration 2	0.41157	0.00221	0.08427	0.01984	0.02627	0.06187
⑧	YAG3	0.42384	0.00228	0.07466	0.01758	0.03054	0.07192
⑨	YAG4	0.44005	0.00237	0.06196	0.01459	0.03820	0.08996
⑩	interaction point	0.50000	0.00269	0.01500	0.00353	0.17930	0.42225
⑪	YAG5	0.50000	0.00269	0.43929	0.10345	0.17930	0.42225
⑫	start of bending magnetic field	0.50000	0.00269	0.48788	0.11489	0.17930	0.42225
⑬	YAG6	0.50000	0.00269	0.62415	0.14699	0.17930	0.42225
⑭	front end of beam dump	0.50000	0.00269	0.79744	0.18780	0.17930	0.42225

1.3 废束桶模型

在加速器末端设置一个废束桶用于收集不再需要的粒子束。废束桶设计主体为铁靶构成,为了进一步减弱电子打铁靶时反射的电子对束流管及周边关联实验设备的影响,废束桶前端设置了石墨芯,并用聚乙烯板进行包裹。该废束桶主体置于混凝土基座上,其上再覆盖混凝土进行整体包裹,前端开口与经过偏转磁场区域后的束流管相连。废束桶结构尺寸如工程图2所示(单位mm)。前向0°(正对电子束)的铁靶厚度为50cm,铁靶后端混凝

土基座厚度为 63 cm, 混凝土基座后端的混凝土墙角厚度为 141 cm。侧向 90°的铁靶厚度为 29 cm, 混凝土基座厚度为 71 cm, 混凝土基座外混凝土墙体厚度为 141 cm。

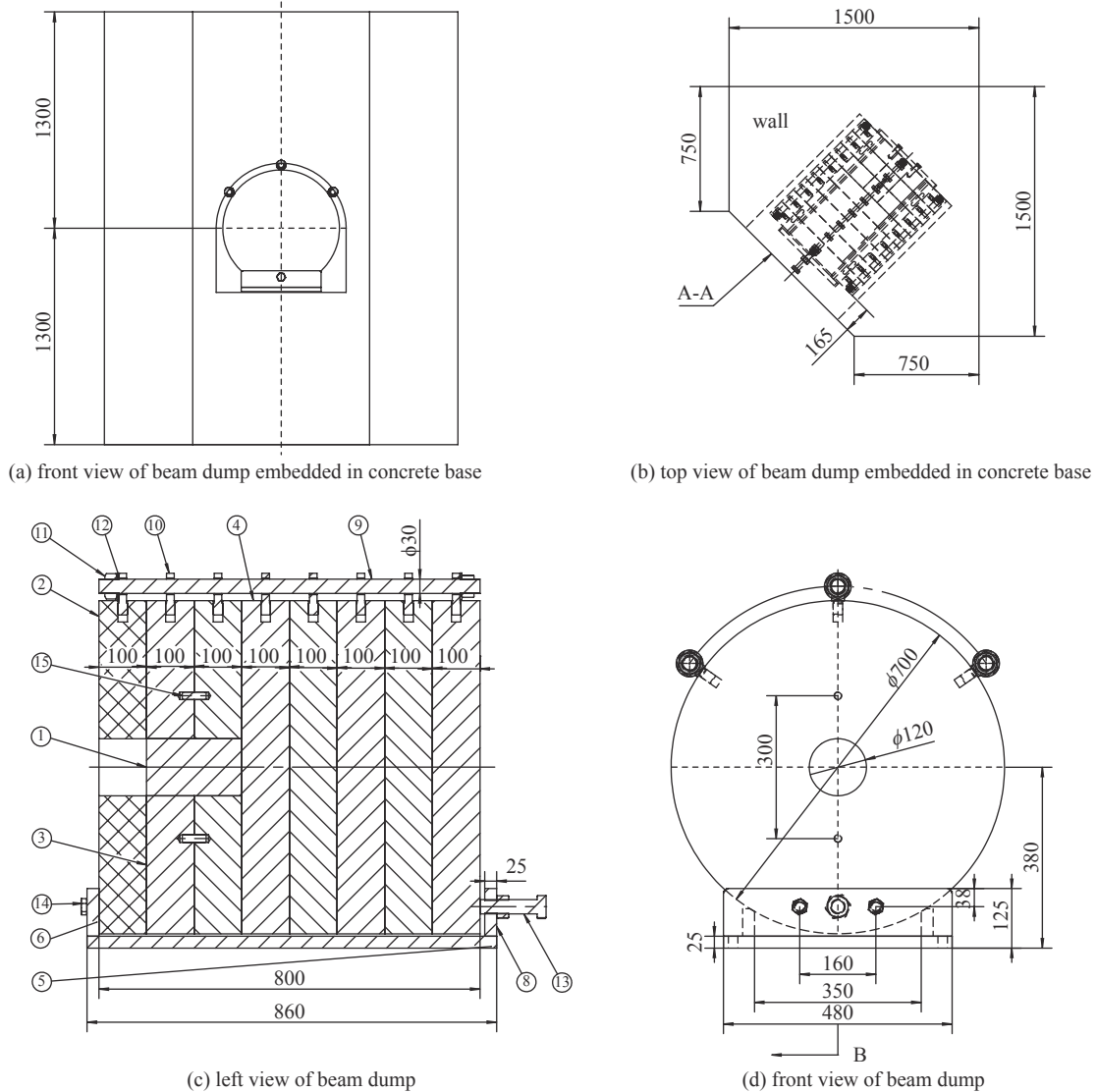


Fig. 2 Engineering drawing of beam dump
图 2 废束桶工程设计图

1.4 归一化

加速器设计电子束团电荷量 150 pC, 最终束团长度 0.5 ps, 束流峰值电流可达 300 A。而考虑到脉冲式加速器的占空比, 计算辐射剂量归一化时应该使用平均流强, 即单位时间内的总电荷量。设计单脉冲电子束团电荷量为 150 pC, 重复频率 1~10 Hz(可调), 即最高每 0.1 s 内发射一个脉冲束团, 因此平均流强为 $I_{ave}=Q/t=1.5 \text{ nA}$ 。

在每一段束流管中, 并非所有粒子都会损失并撞向束流管壁引发辐射。事实上在废束桶之前的加速器段仅有 1% 的粒子会撞向管壁, 而绝大多数粒子都会到达废束桶。且这 1% 的粒子可以认为是随机损失的, 即沿束流管线性均匀分布。因此在模拟时, 将每一段束流管的长度与源点至废束桶前的总长度之比作为该段束流管上束损粒子的归一化系数。

2 模拟结果分析与讨论

2.1 模拟结果分析

在 FLUKA 中使用默认的 PRECISION 精度选项, 以及剂量转换因子 AMB74, 在 USRBIN 卡片中利用 DOSE-EQ 参数记录粒子辐射等效剂量。通过 AUXSCORE 可对 DOSE-EQ 的结果进行粒子种类筛选。尽管很多加速器项目在辐射分析中认为中子的产额比例不高, 但考虑到本项目的流强和能量, 在计算辐射剂量时将穿透性较强的中子

及其次级粒子也都考虑在内。对于 150 pC 的脉冲电子束团, 相当于每束团含有 9.4×10^8 个电子。本文在 FLUKA 模拟软件中使用了 10^6 个源粒子, 并进行 $5(\text{cycle}) \times 50(\text{run})$ 次循环, 即达到了 2.5×10^8 个粒子的统计量, 在数量级上是合理的。还使用了多种 Biasing 设置以增加统计量, 但发现对结果几乎无影响, 这也说明本模拟的结果是收敛、可信的。由于继续增加统计量对结果影响微弱却显著增加 CPU 耗时, 故最终展示的结果仅对 neutron 进行了 Biasing 设置, 其余粒子并未包含 Biasing 设置。

如上文所述, 从电子源开始, 选取了 14 个重要点位, 分别设置电子束参数, 并令其沿束流管运动直到打向废束桶。模拟结果显示最主要的辐射剂量来自于电子束轰击废束桶, 这里着重介绍这一结果。

图 3 为 99% 的粒子到达废束桶并轰击废束桶产生的等效辐射剂量率在过束线的水平面上的分布图。此时大量 95 MeV 高能电子轰击废束桶, 在其中产生了很强的辐射剂量, 最强处高达 $10^{10} \mu\text{Sv/h}$ 。从图 3 中可以看出, 废束桶的主体铁芯有效地约束了辐射, 从最强剂量处向外迅速下降。在包裹废束桶主体的混凝土中辐射剂量已经下降到 $10^2 \mu\text{Sv/h}$ 的水平。而到了加速器实验大厅的混凝土墙体中, 只有紧邻废束桶处的小区域辐射剂量达到 $10 \mu\text{Sv/h}$ 水平, 绝大部分的防护墙体中辐射剂量率都在 $1 \mu\text{Sv/h}$ 及以下, 且明显随着墙体厚度迅速下降, 在 1 m 厚混凝土墙外的等效剂量率均不高于 $1 \mu\text{Sv/h}$ 。

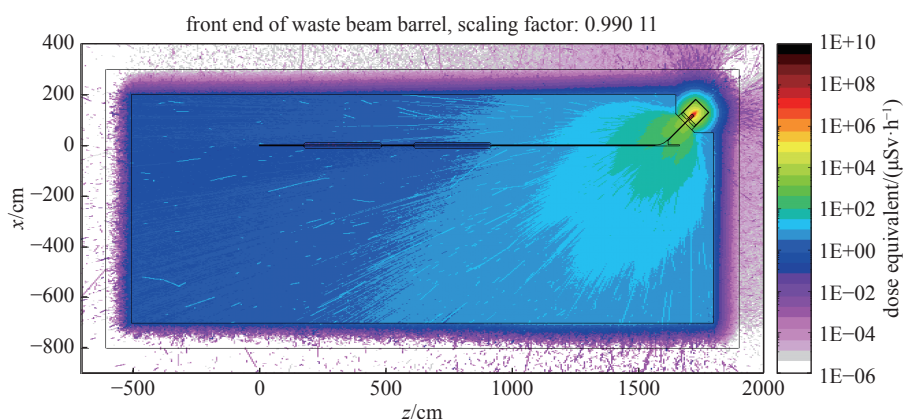


Fig. 3 Dose equivalent distribution produced by the beam moving from the front of the beam dump(horizontal plane)

图 3 束流从废束桶前开始运动产生的等效剂量分布(水平面图)

图 4 为 99% 的粒子到达废束桶并轰击废束桶产生的等效辐射剂量率在过废束桶中心且与束线平行的竖直面上的分布图。图中可以看到防护墙体中辐射剂量率在 $1 \mu\text{Sv/h}$ 及以下, 且明显随着墙体厚度增加而迅速减小, 在混凝土墙外等效剂量率均小于 $1 \mu\text{Sv/h}$ 。在建筑工程上, 一般希望顶棚的混凝土不太厚, 因此给出顶棚混凝土厚度 0.5 m 水平面的辐射剂量分布, 如图 5 所示。从顶棚厚度 0.5 m 处水平面内的辐射剂量分布可以看出, 此水平面上仅有分散点状区域剂量率水平达到 $1 \mu\text{Sv/h}$, 其余绝大部分区域剂量率水平都低于 $1 \mu\text{Sv/h}$ 。可见即便顶棚混凝土材料减

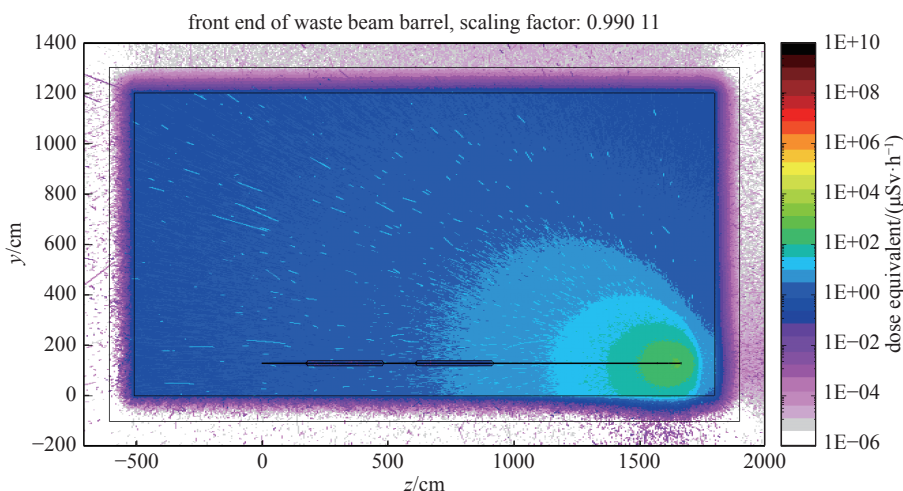


Fig. 4 Dose equivalent distribution produced by the beam moving from the front of the beam dump (vertical plane)

图 4 束流从废束桶前开始运动产生的等效剂量分布(垂直面图)

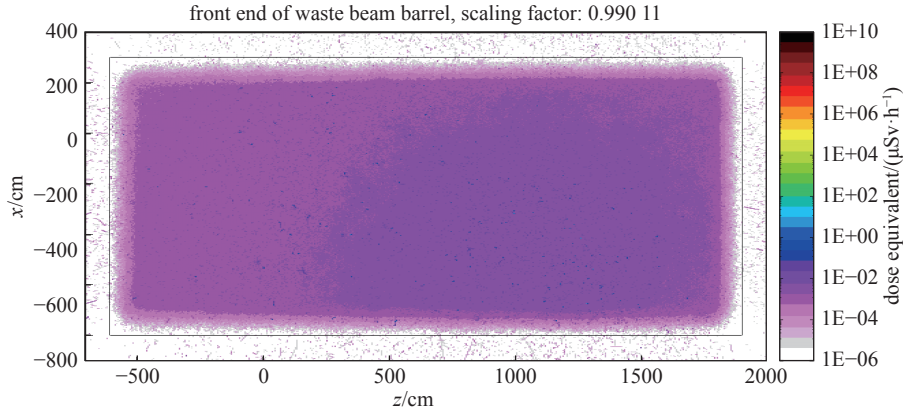


Fig. 5 Dose equivalent distribution, at the height where the concrete thickness of the ceiling is 0.5 m, produced by the beam moving from the front of the beam dump (horizontal plane)

图5 束流从废束桶前开始运动产生的等效剂量在顶棚混凝土厚度0.5 m处分布(水平面图)

到0.5 m厚也是安全的,这样顶棚重量的减轻对于建筑整体承重设计来说是尤为重要的。

保守假设本项目加速器实验室每天工作8 h,根据一般的《电子加速器操作流程》,在开机前和关机后必须进行各项巡检,工作人员需要时间进行各种准备和收尾工作,还需要进行调试和分析,每天实际的电子束输出时间大约4 h;按照每周5 d,每月4周,每年10月计算,即全年电子束输出时间约800 h。由上文可知当采用1 m厚混凝土墙体作为防护措施时,加速器实验大厅外等效剂量率不高于1 μSv/h,即加速器大厅外的工作人员每年累计受辐射剂量在0.8 mSv水平。这远低于2002年发布的国家标准GB18871-2002《电离辐射防护与辐射安全基本标准》的5年以内年平均有效剂量不超过20 mSv,以及任何单一年份有效剂量不超过50 mSv的规定。可见,当使用密度2.35 g/cm³的混凝土在加速器大厅四周、顶棚、底面设置1 m厚混凝土辐射防护墙体时,能够有效屏蔽辐射剂量,为加速器大厅外的工作人员提供有效的辐射防护。同时,模拟结果提示我们必须严格遵守相关加速器安全操作流程,在开机前确保大厅内无人,整个开机过程中实验大厅内不得有人员进入。

2.2 讨论

为便于与传统方法进行比较,根据国标HJ979-2018^[7]附录A中的方法对本研究涉及的95 MeV直线电子加速器进行辐射屏蔽估算。由于HJ979-2018中只给出了电子束能量在10 MeV及以下的资料,这里依据该国标索引的NCRP-51^[16]报告选择适合于95 MeV电子束的参数。

据NCRP-51图E1,保守地使用100 MeV电子束的X射线发射率 Q 为: $4.5 \times 10^6 \text{ rad} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} = 4.5 \times 10^4 \text{ Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ (前向0°); $5 \times 10^3 \text{ rad} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} = 50 \text{ Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ (侧向90°)。

X射线透射比 $B_X = (H_M d^2 / D_{10} T) \times 10^{-6}$,其中 H_M 为参考点最大允许周围剂量当量率,取为1 μSv·h⁻¹; d 为X射线源与参考点之间的距离,据本研究几何应取2.54 m(前向)、2.41 m(侧向); T 为居留因子,本研究中加速器大厅外属偶然居留可取1/16; D_{10} 为距离X射线辐射源1 m处的标准参考点的吸收剂量率,为

$$D_{10} = 60 Q I f_e$$

式中: Q 为X射线发射率,由上文所述查询NCRP-51图E1得到; I 为电子束流强度,取 $1.5 \times 10^{-6} \text{ mA}$; f_e 为X射线发射率修正系数,据靶的材料而不同。电子束主要由废束桶中的铁吸收,继而由废束桶外包裹的混凝土基座、混凝土墙体屏蔽,但国标中未给出易用的多层靶结构计算方法。这里保守地估算电子束仅由包裹废束桶的混凝土基座和加速器大厅的混凝土墙体屏蔽时的情形。因此, f_e 在0°方向修正系数为0.5,在90°方向修正系数为0.3。

可以算得:前向 $D_{10} = 2.03 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$;侧向 $D_{10} = 1.35 \times 10^{-3} \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

X射线透射比:前向 $B_X = 5.09 \times 10^{-5}$;侧向 $B_X = 6.88 \times 10^{-2}$ 。

再由十分之一值层法:前向 $n = \lg_{10}(1/B_X) = 4.29$;侧向 $n = \lg_{10}(1/B_X) = 1.16$ 。

从NCRP-51图E12中查得100 MeV电子束产生的宽束X射线在混凝土中的第一个十分之一值层厚度 $T_1 = 60 \text{ cm}$,平衡十分之一值层厚度 $T_e = 47.5 \text{ cm}$ 。故屏蔽体厚度:前向 $S = T_1 + (n-1)T_e = 216.3 \text{ cm}$;侧向 $S = T_1 + (n-1)T_e = 67.6 \text{ cm}$ 。

可见,对于本研究的平均流强1 nA、最高能量95 MeV的电子束而言,使用国标中的传统方法计算结果为:在

前向混凝土厚度达到 216.3 cm、侧向混凝土厚度达到 67.6 cm 时,即可使得加速器大厅混凝土墙体外侧的参考点剂量当量率达到 $1 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

结合上文介绍废束桶尺寸结构时的参数,电子束前向有 50 cm 厚铁靶和 204 cm 厚混凝土、侧向有 29 cm 厚铁靶和 212 cm 厚混凝土。因此,正文中使用 FLUKA 模拟得到的结果,即加速器大厅混凝土墙体等效剂量率不高于 $1 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ 的结论,与使用国标中的传统方法计算结果在数量级上是一致的。

3 结 论

采用蒙特卡罗 FLUKA 软件模拟了 95 MeV 射频电子直线加速器的辐射剂量分布,分析了发射度、束损等对束流的影响因素,并考虑了合理的剂量归一化因素。模拟结果显示,绝大部分粒子都将沿束流管运动直到废束桶,大部分辐射剂量将沉积在废束桶中,从废束桶中的最高辐射剂量处往外等效剂量率迅速下降。当在加速器实验大厅四周、底面、顶棚以密度 $2.35 \text{ g}/\text{cm}^3$ 的混凝土设置 1 m 厚屏蔽墙体时,墙体中等效剂量率迅速降低到 $1 \mu\text{Sv}/\text{h}$ 的水平,实验大厅外的辐射剂量不高于 $1 \mu\text{Sv}/\text{h}$ 。在保守考虑电子每年实际输出时间 800 h 的情况下,工作人员每年累计受辐射剂量低于 0.8 mSv/a,远低于国家标准规定的 20 mSv/a。可见,此辐射防护措施能有效屏蔽辐射剂量,对工作人员提供足够的保护。

参考文献:

- [1] 赵振堂,高杰.高能粒子对撞机加速器物理与设计[M].上海:上海交通大学出版社,2020.(Zhao Zhentang, Gao Jie. Physics and design for accelerators of high energy particle colliders[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2020)
- [2] 李成龙,汤振兴,裴元吉.低发射度L波段光阴极微波电子枪物理设计[J].核技术,2016,39:090203.(Li Chenglong, Tang Zhenxing, Pei Yuanji. Physical design of low-emittance L-band photocathode microwave electron gun[J]. Nuclear Techniques, 2016, 39: 090203)
- [3] 陈佳洱.加速器物理基础[M].北京:北京大学出版社,2012.(Chen Jia'er. Physics basics of accelerator[M]. Beijing: Peking University Press, 2012).
- [4] 方锦清,陈关荣.强流加速器中的束晕-混沌现象的定性分析[J].中国原子能科学研究院年报,2000:69-70.(Fang Jinqing, Chen Guanrong. Qualitative analysis of beam halo chaos in high current accelerator[J]. Annual Report for China Institute of Atomic Energy, 2000: 69-70)
- [5] 何丽娟.高能电子直线加速器(NSRL Linac)感生放射性研究[D].合肥:中国科学技术大学,2016:7-30.(He Lijuan. Induced radioactivity research of high-energy electron linear accelerator (NSRL Linac)[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016: 7-30)
- [6] GB 5172-1985,粒子加速器辐射防护规定[S].(GB 5172-1985, The rule for radiation protection of particle accelerators[S])
- [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] 邱睿,李君利,武祯,等.四种蒙特卡罗程序的比较计算[J].原子能科学技术,2008,42(12):1149-1152.(Qiu Rui, Li Junli, Wu Zhen, et al. Comparison calculation of four Monte-Carlo codes[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(12): 1149-1152)
- [9] Diamond W T, Ross C K. Actinium-225 production with an electron accelerator[J]. Journal of Applied Physics, 2021, 129: 104901.
- [10] Huang Mingyang. Study of accelerator neutrino detection at a spallation source[J]. Chinese Physics C, 2016, 40: 063002.
- [11] Perillo-Marcone A, Calviani M, Solieri N, et al. Design and operation of the air-cooled beam dump for the extraction line of CERN's Proton Synchrotron Booster[J]. Physical Review Accelerators and Beams, 2020, 23: 063001.
- [12] Ganter R. SwissFEL conceptual design report[R]. PSI Bericht 10-04, 2011: 10-04.
- [13] Ahdida C, Bozzato D, Calzolari D, et al. New capabilities of the FLUKA multi-purpose code[J]. Frontiers in Physics, 2022, 9: 788253.
- [14] Battistoni G, Boehlen T, Cerutti F, et al. Overview of the FLUKA code[J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, 82: 10-18.
- [15] Vlachoudis V. FLAIR: a powerful but user friendly graphical interface for FLUKA[C]//Proceedings of International Conference on Mathematics, Computational Methods & Reactor Physics. New York: American Nuclear Society, 2009, 2: 790-800.
- [16] Kutcher G J. Radiation protection design guidelines for 0.1 to 100 MeV particle accelerator facilities[J]. Medical Physics, 1978, 5(1): 73.