

CSNS 简化版实验缪子源的辐射和屏蔽设计

张刚^{1,2} 敬罕涛^{1,2} 朱东辉^{1,2} 周路平^{1,2} 陈裕凯^{1,2} 穆奇丽^{1,2} 吴青彪^{1,2}

1(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2(散裂中子源科学中心 东莞 523803)

摘要 中国散裂中子源(China Spallation Neutron Source, CSNS)是一台基于散裂反应的大型多学科研究平台,于2018年8月竣工并正式运行。实验缪子源(Experimental Muon Source, EMuS)是CSNS未来规划建设的重要研究平台之一,其束流打靶能量为1.6 GeV、功率为20 kW。为了确保辐射安全要求,应用蒙特卡罗模拟软件FLUKA对该装置的瞬发辐射和剩余辐射进行了计算分析,以剂量限值进行了屏蔽优化设计。计算结果显示:靶区、准直区、垃圾桶和缪子运输线等辐射核心区域屏蔽体外部具有低的剩余辐射;内部设备,如靶、磁铁等,以及高能质子运输线真空管道活化严重,具有较高的剩余辐射,未来的维护升级需考虑远程操作方案和严格控制维护时间,以确保工作人员安全。FLUKA计算结果与Moyer模型半经验公式的计算结果基本一致,表明装置的屏蔽可以满足瞬发辐射防护要求。高能质子束轰击靶后的废质子束通量约 $10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,利用此条件可以考虑建设质子辐照实验平台以及中子辐照实验平台,并对辐照位置的本底进行计算和研究。

关键词 高能质子束, 瞬发辐射, 剩余辐射, 屏蔽, Moyer模型, 辐照实验平台

中图分类号 TL77

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.090501

Radiation and shielding design on the simplified experimental muon source at CSNS

ZHANG Gang^{1,2} JING Hantao^{1,2} ZHU Donghui^{1,2} ZHOU Luping^{1,2} CHEN Yukai^{1,2}

MU Qili^{1,2} WU Qingbiao^{1,2}

1(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

2(Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, China)

Abstract [Background] China Spallation Neutron Source (CSNS) based on the spallation reaction is a large multidisciplinary research facility, which has been constructed and commissioned since August 2018. Experimental Muon Source (EMuS) is one of the important research platforms for the future construction of CSNS. The proton beam energy is 1.6 GeV and the power on the carbon target is 20 kW. [Purpose] This study aim to design radiation and shielding system for EMuS that satisfies the requirements of radiation safety. [Methods] The Monte Carlo simulator of FLUKA was used to calculate and analyze the prompt radiation and residual radiation. According to the dose limit, the shielding optimization design was carried out, and abandoned proton beam flux was estimated. Finally, computational results of FLUKA were analyzed, and compared with that of the Moyer mode semi-empirical formula. [Results] The simulation results show that the exterior residual radiations of shielding for the high radiation area such as target area, collimation area, dump and muon transport line are very low whilst the inside components such as

第一作者: 张刚, 男, 1984年出生, 2009年于兰州大学获硕士学位, 研究领域为加速器辐射防护技术研究

通信作者: 敬罕涛, E-mail: jinght@ihep.ac.cn

收稿日期: 2021-03-09, 修回日期: 2021-06-04

First author: ZHANG Gang, male, born in 1984, graduated from Lanzhou University with a master's degree in 2009, focusing on radiation protection technology of accelerator

Corresponding author: JING Hantao, E-mail: jinght@ihep.ac.cn

Received date: 2021-03-09, revised date: 2021-06-04

carbon target, magnets, and vacuum pipes of high-energy proton transport line are critically activated and have high residual radiation. The abandoned proton beam after carbon target is of $10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. **[Conclusions]** The optimal shielding design meets the requirements of prompt radiation protection for EMuS of CSNS, but the strategy of remote operations and strict control of maintenance time need to consider for the future maintenance and upgrade. Abandoned proton beam can be efficiently utilized to build a proton irradiation platform and a neutron irradiation platform with carefully studying of the background of those irradiation points.

Key words High-energy proton beam, Prompt radiation, Residual radiation, Shielding, Moyer model, Irradiation platform

中国散裂中子源(China Spallation Neutron Source, CSNS)^[1]是“十二五”规划建造的大型多学科研究平台,它由一台直线加速器、一台同步加速器和一个靶站组成。CSNS 一期提供能量为 1.6 GeV、束流功率为 100 kW 的质子束流。CSNS 未来还规划建设其他实验平台,高能质子应用区(High-energy Proton Experimental Area, HPEA)是其中重要的平台之一,此应用区主要由实验缪子源装置(Experimental Muon Source, EMuS)^[2]和质子束应用终端组成,如图 1 所示。实验缪子源装置初期简化版方案中其束流打靶能量为 1.6 GeV、功率为 20 kW,是在环到靶的输运线(Ring to Target Beam Transport, RTBT)进入靶站(The first target station)前引出一部分高能质子束到缪子源靶区,轰击厚的方形碳靶,从靶侧面收集表面缪子,再由一条常温输运线,把缪子束传输到实验样品处。打靶之后的废质子束经过屏蔽体准直,通过真空管道送入下游的束流垃圾桶。

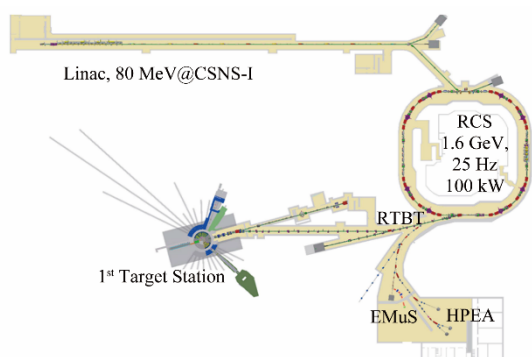


图1 CSNS装置及实验缪子源实验区布局
Fig.1 Layout of CSNS facility and EMuS

考虑到碳靶密度较低,打靶之后的废质子束依然具有较高的能量以及通量,若在进入垃圾桶之前选择合适的位置设置辐照平台,将获得高通量的质子辐照源。同时,基于高能质子和金属作用产生的大量次级中子,通过在垃圾桶内部选择合适的位置设置辐照孔洞,将获得高通量的中子辐照源。这将为不同辐射场下的很多材料辐射损伤效应的研究提供重要的实验平台。

在缪子源的运行过程中,高能质子束及其产生的次级粒子轰击靶以及加速器部件将产生大量的次级粒子形成很强瞬发辐射,同时生成放射性核素使得停机后还存在剩余辐射。为了确保该装置的辐射安全,本文应用蒙特卡罗模拟软件FLUKA^[3],对靶区、准直区、垃圾桶及缪子输运线等剩余辐射核心区进行了多种屏蔽模型的计算、对比、分析,确保长时间运行停机检修时,工作人员在该区域受到的辐射剂量处于安全水平。对高能质子输运线以 $0.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ 的束损功率沿真空管道均匀损失时产生的剩余辐射进行了计算。研究了活化严重位置碳靶、磁铁、垃圾桶中心以及高能质子输运线真空管道的剩余剂量随冷却时间的变化关系,为将来的维护工作提供辐射危害参考。对缪子源在高能质子沿输运线均匀损失和高能质子轰击碳靶损失时产生的瞬发辐射进行了计算,完成了屏蔽设计。将Moyer模型半经验公式^[4-5]和FLUKA计算结果进行了相互验证,确保屏蔽设计的可靠性。同时,利用打碳靶之后的废质子束设计了质子辐照平台以及中子辐照平台,对辐照位置的本底进行了计算和研究。

图2为简化版实验缪子源的束线布局简图,包括高能质子输运线、靶区、准直区、垃圾桶、缪子输运线1~4以及缪子源实验终端1~2。缪子输运线1~4长分别为295 cm、377 cm、1 070 cm和340 cm,靶区距离垃圾桶为820 cm。其中,靶区距离垃圾桶较远,主要考虑垃圾桶位置为缪子源剩余辐射最强位置,将来可能的升级方案需要将简化版的靶区更换为占地面积更大的超导螺线管靶区,从而在升级建设中尽量避免高剂量区域以降低剩余辐射带来的危害。

1 屏蔽限值及措施

缪子源靶区设计采用厚的长方形碳靶,尺寸为 $3 \text{ cm}(x) \times 12 \text{ cm}(y) \times 12 \text{ cm}(z)$,放置在内边长为50 cm、厚为5 cm的真空铝合金靶容器内。以质子束流方向为 z 方向,束流垂直面水平方向为 x 方向,束流垂直面竖直方向为 y 方向。靶容器外是靶区屏

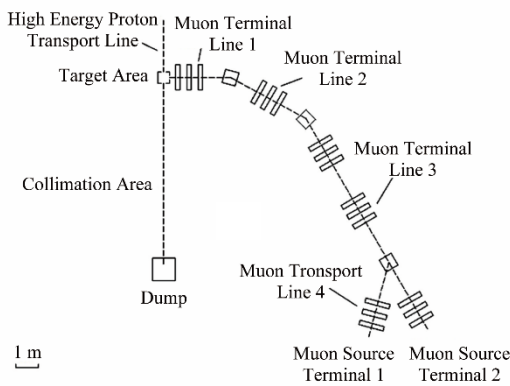


图2 实验缪子源的束线布局
Fig.2 Beamline layout of EMuS

蔽体,侧部采用棱台形的真空盒,在距靶60 cm 处的位置引出缪子束流,打靶后的废质子束流经过屏蔽体准直引入到下游的垃圾桶。图3为靶区几何模型剖面图。计算时,入射质子束能量为1.6 GeV、功率为20 kW,截面为高斯分布(半高全宽:FWHM_x=0.5 cm,FWHM_y=0.5 cm)。

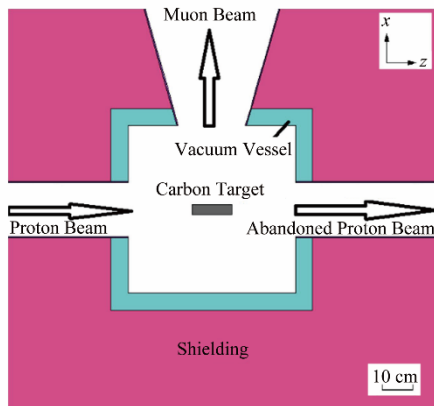


图3 靶区几何模型横剖图
Fig.3 Geometry model cross section of target area

运行时,由于入射质子束的高能量以及高功率,靶区、准直区、垃圾桶以及部分缪子束输运线将被严重活化,需要屏蔽以确保停机后工作人员在该区域检修时的辐射安全。国外同类质子加速器以及CSNS加速器在剩余辐射屏蔽设计时提出^[6-7]:加速器运行100 d停机4 h屏蔽体表面30 cm处剩余剂量需小于1 mSv·h⁻¹。对于缪子源,考虑到停机后工作人员长时间在该区域停留时尽量受到少的剂量,以运行100 d、停机4 h、屏蔽体表面小于2.5 μSv·h⁻¹作为剩余辐射屏蔽目标值。依据布局,高能质子输运线以及靶区、准直区、垃圾桶以及部分缪子束输运线及其屏蔽体位于加速器隧道,另一部分缪子源输运线和缪子源终端及其屏蔽体位于实验大厅,隧道和大厅通过固定式屏蔽体将其分开,其余屏蔽体为满足后续设备检修维护需求,均设计为可移动式屏蔽

体。运行时,加速器隧道内部辐射剂量较高,工作人员禁止入内,实验大厅为工作人员自由活动区域,辐射剂量需屏蔽至目标值以下。参照CSNS的屏蔽标准,实验大厅瞬发辐射屏蔽目标值取2.5 μSv·h⁻¹。

对于GeV能量以上的高能质子,其与靶以及加速器部件作用将产生核级联反应,产生大量的次级粒子,包括核子、π介子和γ。由于稀有粒子随着能量的增加其产额急剧下降,450 MeV以下的质子以及π介子能量损失比较大,π⁰介子衰变产生的强γ射线引发的电磁级联,其衰减长度比核级联的短的多,在屏蔽深处的次级粒子主要是中子和γ^[8-9]。对于中子的屏蔽,常用的材料为铁和混凝土,铁是高能中子的有效屏蔽材料,但⁵⁶Fe非弹性散射阈值为847 keV,这会导致铁屏蔽体外出现中低能中子堆积。混凝土可有效屏蔽中、低能中子,采用铁在内、混凝土在外的复合屏蔽,可实现各能区中子的有效屏蔽。其中,对于剩余辐射,考虑到主要为低能的γ射线,铅对于γ射线具有较好的屏蔽效果,采用铁在内、铅在外的复合屏蔽也可作为屏蔽方式的一种。对于瞬发辐射,靶区、准直区、垃圾桶、缪子输运线及缪子实验终端属于高放射性且设备密集区域,为了节省屏蔽占用空间,尽量采用屏蔽效果较好的低碳钢和混凝土作为屏蔽材料。高能质子输运线等区域屏蔽体外部为户外工作人员自由活动区域。依据CSNS以及J-PACR的建设经验^[10],如果控制质子加速器屏蔽墙外1 m深度内的土壤中平均剂量≤5.5 mSv·h⁻¹,土壤和地下水中的活化核素对环境影响在可接受范围之内。为了降低屏蔽成本,考虑采用土壤部分替代混凝土进行屏蔽优化。

2 剩余辐射和屏蔽

经过多次计算分析,在运行100 d停机4 h情况下,可以将剩余辐射严重区域的屏蔽体表面剩余剂量控制在2.5 μSv·h⁻¹以内。图4~9为采用低碳钢屏蔽、低碳钢和混凝土复合屏蔽以及低碳钢和铅复合屏蔽时的几何模型剖面图和剩余剂量分布。其中,低碳钢和混凝土复合屏蔽是将全采用低碳钢屏蔽时,屏蔽体外部48 cm的低碳钢替换为32 cm的混凝土。低碳钢和铅复合屏蔽是将屏蔽体外部48 cm的低碳钢替换为8 cm的铅。图10为采用不同屏蔽时,质子束流方向、垃圾桶中心右侧屏蔽体中剩余剂量和放射性核素活度的衰减。可以看出,三种屏蔽下,低碳钢和混凝土的复合屏蔽以及低碳钢和铅的复合屏蔽其屏蔽效果更优,占用空间更少。在垃圾桶内部,由于屏蔽材料一样,剩余剂量和核素活度浓度衰减一致,在垃圾桶外部,相对于低碳钢,混凝土和铅

中的剩余剂量衰减得更快,其核素活性浓度也衰减得更快。可以认为,混凝土和铅中的低放射性核素活性浓度导致了低的剩余剂量,从而降低了屏蔽需求。而且,相对于混凝土,铅对 γ 射线又有较好的自屏蔽,造成了外部屏蔽采用铅时需求最少、混凝土次之。考虑到工程实际建设,采用低碳钢和混凝土的组合屏蔽即可降低工程费用,又具有好的屏蔽效果,是较优的选择。

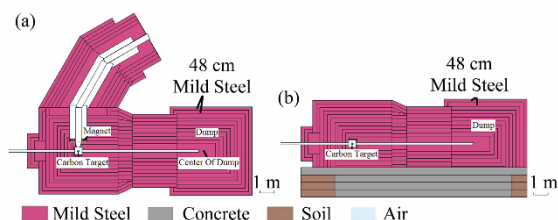


图4 采用低碳钢屏蔽时的几何模型剖面图 (a) 水平截面,(b) 竖直截面

Fig.4 Geometry model with mild steel shield (a) Horizontal profile, (b) Vertical profile

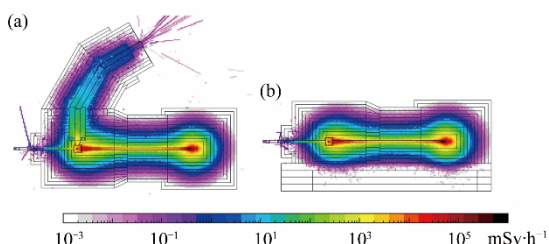


图5 采用低碳钢屏蔽时运行 100 d、停机 4 h 剩余剂量分布 (a) 水平截面,(b) 竖直截面

Fig.5 Residual dose equivalent rate distribution after 100 d irradiation and 4 h decay with mild steel shield (a) Horizontal profile, (b) Vertical profile

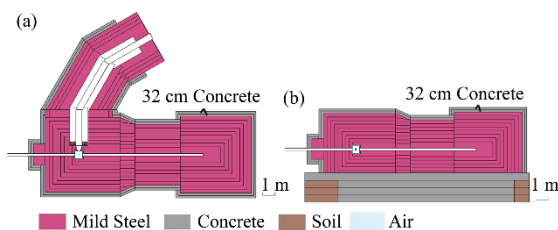


图6 采用低碳钢和混凝土复合屏蔽时的几何模型剖面图 (a) 水平截面,(b) 竖直截面

Fig.6 Geometry model with the combination shielding of mild steel and concrete (a) Horizontal profile, (b) Vertical profile

对于高能质子输运线,以入射粒子与真空管道内壁成 10 mrad 作用均匀损失,束损功率为 $0.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$,对该区域的剩余辐射进行计算。真空管道内径为 8 cm ,厚为 0.4 cm ,管壁材料为 304 不锈钢。以质子束流方向碳靶右侧屏蔽体外表面,垃圾桶中心右侧屏蔽体外表面,距离质子输运线真空管道表面 30 cm 位置,碳靶、磁铁和垃圾桶中心位置作为关注点,对缪子源长时间运行停机后的剩余剂量进行研究。图 11 为运行 100 d 停机后,不同位置的

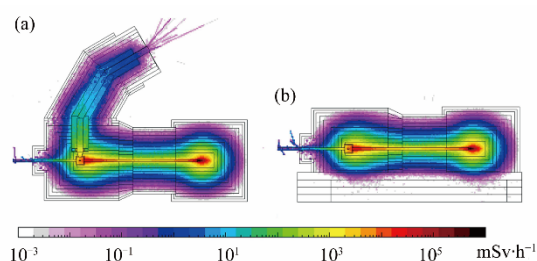


图7 采用低碳钢和混凝土复合屏蔽时运行 100 d、停机 4 h 剩余剂量分布 (a) 水平截面,(b) 竖直截面

Fig.7 Residual dose equivalent rate distribution after 100 d irradiation and 4 h decay with combination shielding of mild steel and concrete (a) Horizontal profile, (b) Vertical profile

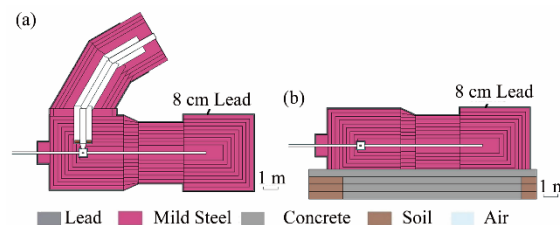


图8 采用低碳钢和铅复合屏蔽时的几何模型剖面图 (a) 水平截面,(b) 竖直截面

Fig.8 Geometry model section view with combination shielding of mild steel and lead (a) Horizontal profile, (b) Vertical profile

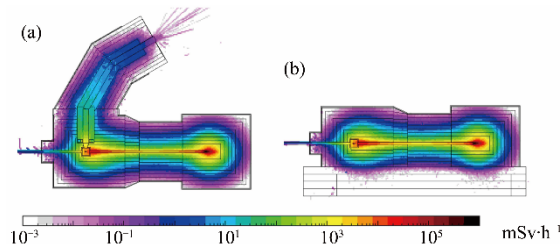


图9 采用低碳钢和铅复合屏蔽时运行 100 d 停机 4 h 剩余剂量分布 (a) 水平截面,(b) 竖直截面

Fig.9 Residual dose equivalent rate distribution after 100 d irradiation and 4 h decay with combination shielding of mild steel and lead (a) Horizontal profile, (b) Vertical profile

剩余剂量随时间的变化关系。可以看出,束流方向碳靶和垃圾桶中心位置右侧屏蔽体外表面,停机 1 h 剩余剂量已经低于 $2.5 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ 。距离质子输运线真空管道表面 30 cm 位置,停机 4 h 剩余剂量为 $62.8 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$,工作人员检修时需要严格控制操作时间。碳靶和垃圾桶中心位置,刚停机时剩余剂量为 $10^6 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上。磁铁位置刚停机时为 $10^3 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上。停机 4 h,碳靶衰减约两个量级,垃圾桶中心和磁铁衰减约两倍。停机 1 个月,碳靶衰减两个量级以上,垃圾桶中心衰减近一个量级,磁铁衰减近两个量级,剩余剂量分别为 $4.5 \times 10^3 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $1.2 \times 10^5 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $57.7 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1}$ 。经长时间衰减,这些位置依然具有较强的剩余辐射,为了将来的维护升级,需按照实际情况考虑远程维护方案,以确保工作人员的辐射安全。

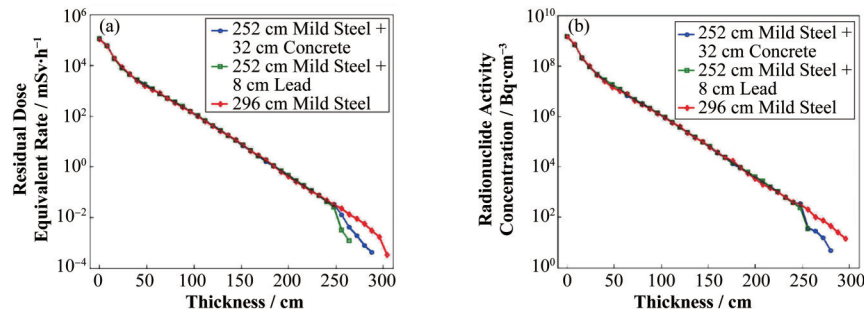


图10 采用不同屏蔽时,运行100 d停机4 h后,垃圾桶屏蔽体中剩余剂量(a)和放射性核素活度浓度(b)的衰减
Fig.10 Residual dose equivalent rate (a) and radionuclide activity concentration (b) attenuation in dump shield after 100 d irradiation and 4 h decay for the different shielding situations

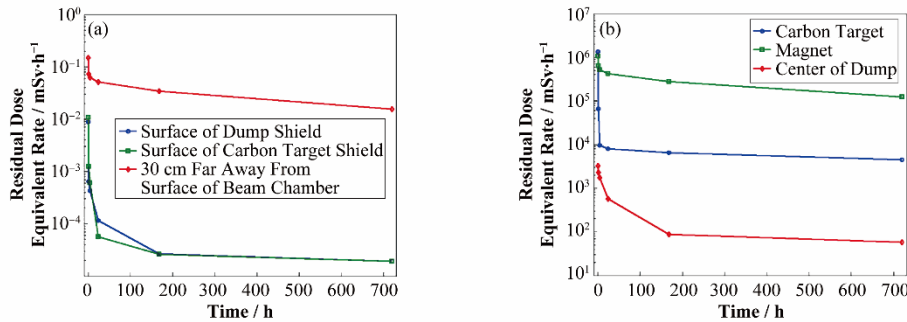


图11 运行100 d停机后,不同位置的剩余剂量随时间的变化关系 (a)屏蔽体外,(b)屏蔽体内
Fig.11 Change of residual dose equivalent rate with time at different locations after 100 d irradiation after shutting down (a) Inside shield, (b) Outside shield

3 瞬发辐射和屏蔽

3.1 Moyer模型

高能质子沿真空管道均匀损失,当质子能量在1~3 GeV,且在适用范围内($d/\lambda=2\sim 15$),可以采用Moyer模型半经验公式(1)对质子输运线屏蔽墙外某点的剂量当量进行计算,从而得到横向的屏蔽需求。

$$H_L = \frac{0.065H_0(E_p)S}{r} \exp(-1.09d/\lambda) \quad (1)$$

式中: S 为单位长度的质子损失率, $s^{-1}\cdot m^{-1}$; $H_0(E_p)$ 为单个质子打铜(或铁)靶时,离靶1 m处的剂量; r 为靶到屏蔽层外表面的距离; d 为屏蔽厚度; λ 为屏蔽层的剂量当量衰减长度。当质子能量为1.6 GeV时, $H_0(E_p)=2.83\times 10^{-13} Sv\cdot m^2$,屏蔽材料为密度为 $2.35 g\cdot cm^{-3}$ 的混凝土时, $\lambda_{cn}=50.0 cm$ 。

对于缪子源,高能质子输运线距离屏蔽底板、屏蔽顶板和束流方向左侧墙分别为160 cm、440 cm和510 cm,且输运线和底板、顶板以及左侧墙互相平行。以混凝土作为屏蔽材料,采用Moyer模型半经验公式与FLUKA计算,得到了高能质子输运线左侧墙中瞬发剂量的衰减如图12所示。可以得到,在适用范围,两者的计算结果在两倍以内相符。

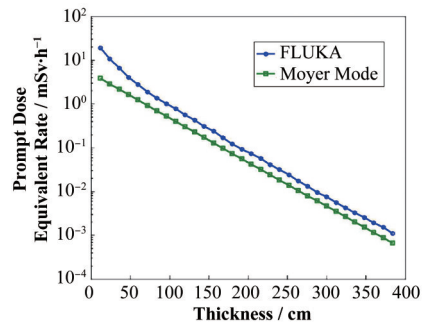


图12 高能质子输运线混凝土屏蔽墙中瞬发剂量当量的衰减

Fig.12 Attenuation curves of prompt dose equivalent rate in concrete shielding wall of high-energy proton transport line

3.2 瞬发辐射屏蔽优化

由§3.1可知,对于高能质子输运线左侧屏蔽墙,以混凝土作为单一材料屏蔽到瞬发剂量目标值,至少需要厚度350 cm以上。依据CSNS和J-PARC的建设经验,以加速器屏蔽墙外1 m深度内的土壤中平均剂量 $\leq 5.5 mSv\cdot h^{-1}$ 为限值,采用土壤部分替代混凝土进行屏蔽优化,经过了多次计算分析,得到了将缪子源装置瞬发剂量控制在 $2.5 \mu Sv\cdot h^{-1}$ 以下的屏蔽。图13为瞬发辐射屏蔽几何模型剖面图,图14~15为高能质子沿输运线均匀损失和高能质子束轰击碳靶损失时瞬发剂量分布。

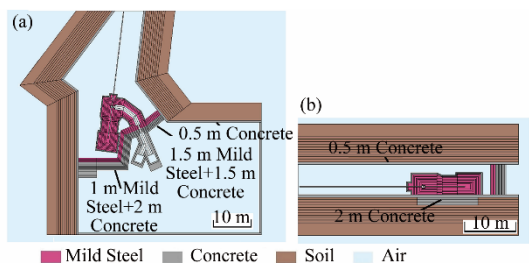


图13 瞬发辐射屏蔽的几何模型剖面图

(a) 水平截面, (b) 竖直截面

Fig.13 Geometry model prompt radiation shielding

(a) Horizontal profile, (b) Vertical profile

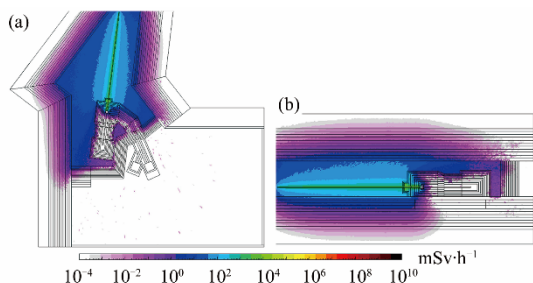


图14 高能质子沿输运线均匀损失时的瞬发剂量分布

(a) 水平截面, (b) 竖直截面

Fig.14 Prompt dose equivalent rate distribution on the case of uniform loss along the transport line

(a) Horizontal profile, (b) Vertical profile

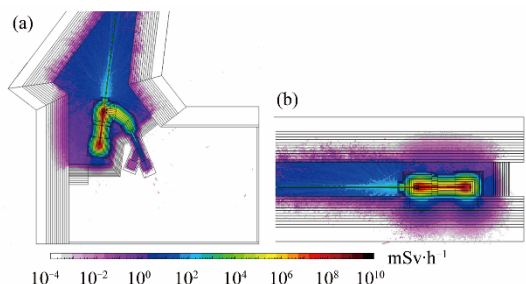


图15 高能质子束轰击碳靶时的瞬发剂量分布

(a) 水平截面, (b) 竖直截面

Fig.15 Prompt dose equivalent rate distribution with the high energy proton beam bombarding on carbon target

(a) Horizontal profile, (b) Vertical profile.

4 废质子束的利用

4.1 质子辐照平台

经过计算分析,在碳靶下游 436 cm 的位置,设置内边长 10 cm、厚度为 0.2 cm 厚的铝合金容器作为辐照点,该位置具有高质子通量和较低的其他粒子本底。图 16 为质子辐照点几何模型横剖图,其中,铝合金容器起到隔绝真空和空气的作用,网格位置为各粒子能谱计算位置。图 17 为辐照点处的质子通量分布。以束流中心为 $x=0, y=0$ 。图 18 为网格位置、 x 方向和 y 方向上的质子通量分布曲线。可以看出,网格位置 ($x=0, y=0$) 处质子通量为 $2.13 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,且质子通量有随束流方向缓慢下

降的趋势。这主要是由于废质子穿过铝合金容器后,大部分质子依旧保持原来方向,小部分质子会有大角度的散射。质子束流在 x 方向和 y 方向基本成高斯分布。图 19 为网格内的重要本底粒子能谱。可以看出,质子能量范围跨 5 个量级以上,但主要以高能质子为主,1.35 GeV 能量以上的质子占了 99% 以上。其他粒子,中子能量范围较宽,跨接近 10 个量级以上,通量为 $10^{10} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, γ 和电子的能量范围与质子相近,通量为 $10^{10} \sim 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,正负介子能量跨约三个量级,通量为 $10^9 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。

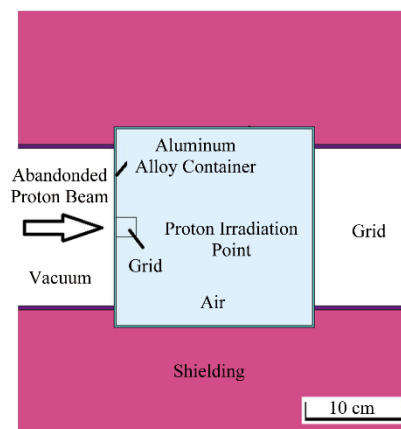


图16 质子辐照点几何模型横剖图

Fig.16 Geometry model profile of proton irradiation point

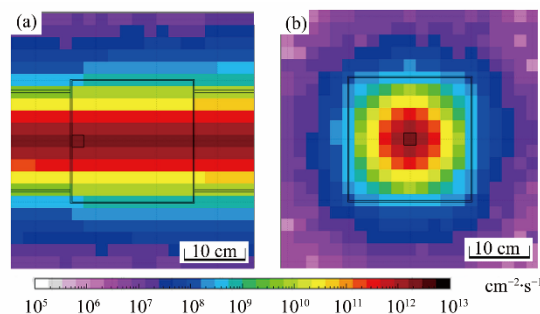


图17 质子辐照点质子通量分布

(a) 水平截面, (b) 竖直截面

Fig.17 Proton fluence distributions around the proton irradiation point (a) Horizontal profile, (b) Vertical profile

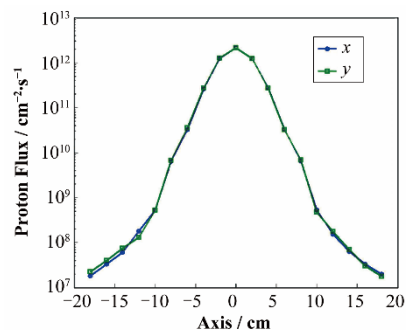


图18 质子通量剖面曲线

Fig.18 Proton fluence profile

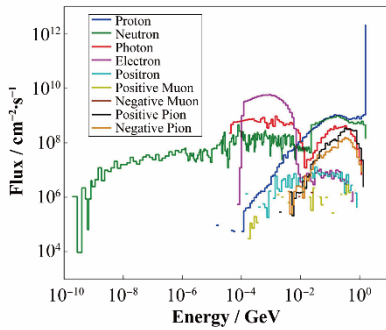


图19 质子辐照点附近的重要本底粒子能谱

Fig.19 Energy spectrum of main background particles around the proton irradiation point

4.2 中子辐照平台

依据§4.1 计算结果,考虑到废质子束依然具有较高能量以及通量,若在垃圾桶内选择合适的位置设置辐照孔洞,将获得高通量的中子辐照源项。经过计算分析,相对于垃圾桶的前部,垃圾桶的侧部具有高通量中子的同时,具有较低的其他粒子本底。在垃圾桶侧部距离中心位置为11 cm处,预留4个内边长为10 cm的正方体孔洞作为中子辐照点。图20为中子辐照点几何模型横剖图。其中,网格位置为各粒子能谱计算位置。图21为辐照点处的中子通量分布。图22为网格位置(x 方向)上的中子通量分布曲线。可以得到,网格位置($x=-12$ cm, $y=0$)处中子通量为 9.9×10^{11} $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图23为网格内的重要本底粒子能谱。可以看出,中子的能量范围跨10个量级以上,在27.7 keV、73.9 keV等能区出现峰值,这是由于高能质子打靶后产生的高能中子在该能区和铁反应总截面较低,导致了中子的堆积。在几十到几百 MeV 能区,存在连续的级联中子峰。其他粒子和 γ 的能量范围跨4个量级,通量为 10^{11} $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。质子和正负电子能量范围和 γ 接近,通量为 10^9 $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。正负介子能量范围接近,通量约 10^9 $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。相比CSNS已经建成并运行的反角白光中子源^[11-12],其中子能量范围更宽,通量更高,可开展对高通量的中子辐射损伤效应的研究。

5 结语

为了确保EMuS装置的辐射安全,应用蒙特卡罗模拟软件FLUKA,对该装置的瞬发辐射和剩余辐射进行了计算分析,以剂量目标值进行了屏蔽优化设计。对靶区、准直器区、垃圾桶以及缪子源输运线等辐射核心区域进行了多种屏蔽的计算和分析,确保运行维护人员在该区域检修时的辐射安全。研究了关键位置碳靶、磁铁以及高能质子输运线真空管道等处的剩余剂量随冷却时间的变化关系,为将来

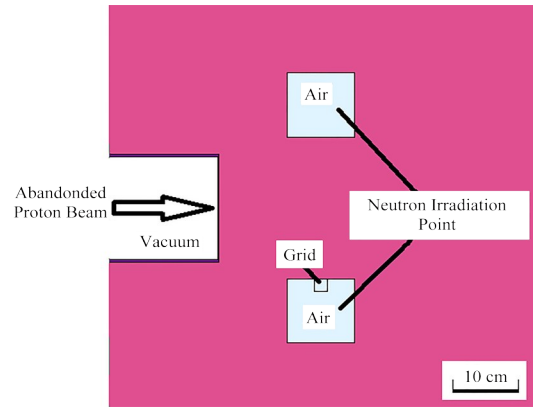


图20 中子辐照点几何模型横剖图

Fig.20 Geometry model profile of the neutron irradiation point

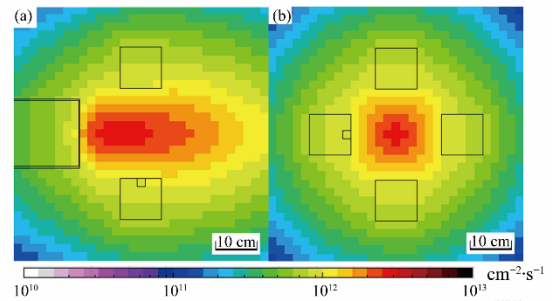


图21 中子辐照点中子通量分布

(a) 水平截面, (b) 竖直截面

Fig.21 Neutron fluence distribution of neutron irradiation point (a) Horizontal profile, (b) Vertical profile

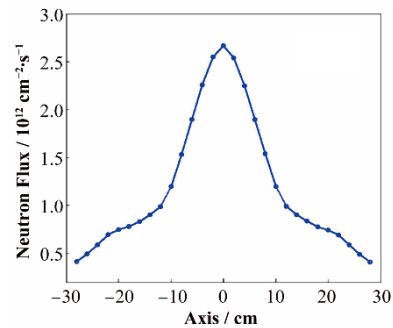


图22 中子通量剖面曲线

Fig.22 Neutron flux profile

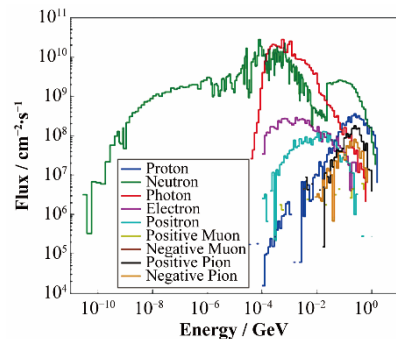


图23 中子辐照点附近的重要本底粒子能谱

Fig.23 Energy spectrum of key background particles around the proton irradiation point

的设备更换、维护工作提供辐射危害参考。以 $2.5 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ 作为屏蔽目标值进行了缪子源瞬发辐射屏蔽的计算和优化。将 Moyer 模型半经验公式计算结果和 FLUKA 计算结果进行了相互验证, 以确保屏蔽设计可靠。同时, 利用高能质子束轰击碳靶后的废质子束设计了通量为 $10^{12} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的质子辐照平台以及中子辐照平台, 对辐照位置的本底进行了计算和研究。

参考文献

- Chen H S, Wang X L. China's first pulsed neutron source [J]. *Nature Materials*, 2016, **15**(7): 689 - 691. DOI: 10.1038/nmat4655.
- Zhou L P, Mu Q L, Jing H T, *et al.* A possible scheme for the surface muon beamline at CSNS[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2019, **30**(11): 169. DOI: 10.1007/s41365-019-0684-1.
- Alfredo F, Paola R S, Alberto F, *et al.* FLUKA: a multi-particle transport code[M]. Geneva: European Organisation for Nuclear Research, 2018.
- Tesch K. Comments on the transverse shielding of proton accelerators[J]. *Health Physics*, 1983, **44**(1): 79 - 82.
- Swanson W P. Radiological safety aspects of the operation of electron linear accelerators[M]. International Atomic Energy Agency, 1979.
- Mokhov N V, Chou W. The 7th ICFA mini-workshop on high intensity high brightness hadron beams: beam halo and scraping[M]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 1999.
- Wei T, Wu Q B, Li W Q. Beam collimation for CSNS/RCS[J]. *Chinese Physics C*, 2010, **34**(4): 506 - 511.
- 帕特森 H W, 托马斯 R H. 加速器保健物理[M]. 北京: 原子能出版社, 1983.
Patterson H W, Thomas R H. *Accelerator health physics* [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1983.
- Protection N C O R, Measurements (NCRP). Radiation protection for particle accelerator facilities[J]. *Health Physics*, 2003, **88**(2): 175 - 175.
- 吴青彪, 王庆斌. 用 FLUKA 程序模拟设计中国散裂中子源的束流垃圾桶结构[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2007, **47**(S1): 996 - 1000. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2007.s1.023.
WU Qingbiao, WANG Qingbin. Using FLUKA code to simulate and design the beam dumps' structure of CSNS [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2007, **47**(S1): 996 - 1000. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2007.s1.023.
- Tang J Y, An Q, Bai J B, *et al.* Back-n white neutron source at CSNS and its applications[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2021, **32**(1): 11. DOI: 10.1007/s41365-021-00846-6.
- Liu X Y, Yang Y W, Liu R, *et al.* Measurement of the neutron total cross section of carbon at the Back-n white neutron beam of CSNS[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2019, **30**(9): 139. DOI: 10.1007/s41365-019-0660-9.