

# 高能质子降能器的物理研究

穆奇丽<sup>1,2</sup> 董启凡<sup>1,2</sup> 敬罕涛<sup>1,2</sup>

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)是一台基于强流质子加速器的大型多学科研究平台。CSNS的1.6 GeV高能质子束流在航天设备测试和粒子探测器测试方面都有重要应用。但是,由于单一的质子能量无法满足辐照应用及高性能探测器对束流不同能量的需求,研究设计可行的降能方案将质子束从1.6 GeV降至指定能量范围是十分必要的。本文研究发现,可以通过放置金属降能片的方式实现CSNS 1.6 GeV质子束流的能量调节。使用降能片产生弱流的 $\pi$ 粒子测试束也具有可行性。通过比较铜、铁和钨等几种材料降能器后的次级质子及 $\pi$ 粒子产额,降能片的活化及辐射屏蔽等多种因素,建议选择铁作为CSNS高能质子降能器的材料。

**关键词** 质子降能器,  $\pi$ 粒子, 能量沉积, 感生放射性, 辐射屏蔽

**中图分类号** TL77

**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.060503

## Physical study of a high-energy proton degrader

MU Qili<sup>1,2</sup> DONG Qifan<sup>1,2</sup> JING Hantao<sup>1,2</sup>

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

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

**Abstract** [Background] The China Spallation Neutron Source (CSNS) is a multidisciplinary research platform. Its high-energy 1.6 GeV proton beam serves various applications in aerospace devices and particle detector testing. However, certain irradiation applications and high-performance detectors require different beam energies. A degrader was designed to adjust the proton energy to a desired range. [Purpose] This study presents a reasonable degrader scheme for the 1.6 GeV proton test beam at the CSNS. [Methods] The physical process of the 1.6 GeV high-energy proton beam passing through a degrader made of either of three different materials (iron, copper, and tungsten) was simulated using FLUKA, a Monte Carlo particle transport code. Parameters such as the degrader thickness, the energy deposition, the outgoing proton beam intensity, and the irradiation dose were determined through simulations. The optimal degrader material was identified. In addition, a continuously adjustable structure of the degrader was given. [Results] Iron displays slight advantages in terms of energy deposition and radiation dose distribution, compared to copper and tungsten. Furthermore, the phase-space distribution of the outgoing proton beam and the secondary pion beam were also given, providing important references for future beam-line design. [Conclusion] An optimal degrader structure made of iron for the CSNS high-energy proton beam is proposed. The secondary pion test beam is also feasible at the proton test end station. This is a significant development for future engineering design.

国家自然科学基金(No.12075135)资助

第一作者: 穆奇丽, 女, 1993年出生, 2019年于吉林大学获硕士学位, 研究领域为核技术应用

通信作者: 敬罕涛, E-mail: [jinght@ihep.ac.cn](mailto:jinght@ihep.ac.cn)

收稿日期: 2023-01-13, 修回日期: 2023-04-07

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.12075135)

First author: MU Qili, female, born in 1993, graduated from Jilin University with a master's degree in 2019, focusing on nuclear technique application

Corresponding author: JING Hantao, E-mail: [jinght@ihep.ac.cn](mailto:jinght@ihep.ac.cn)

Received date: 2023-01-13, revised date: 2023-04-07

**Key words** Proton degrader,  $\pi$  particle, Energy deposition, Induced radioactivity, Radiation shielding

质子束降能器主要是利用初始质子束在材料中的电离损失机制,实现对初始束流的降能。降能器的材料和厚度是影响出射质子束流能量的关键因素,通常通过调节降能器厚度获得指定能量的次级束流。对于几十到几百兆电子伏的质子束流,石墨、铍、碳等已经广泛作为降能器材料应用于束流能量的调节。这类原子序数小的材料优势是核散射对束流发散度影响小,降能后的束流传输效率高,且对周围环境产生的辐射小,因而在低能质子束降能器的选择上优于较重的金属材料<sup>[1]</sup>。

GeV 以上的高能质子束流穿透能力强,石墨、铍、碳等材料密度小,降能效率低,并不是理想的高能质子降能器材料。俄罗斯圣彼得堡核物理研究所(Petersburg Nuclear Physics Institute, PNPI)与太空仪器研究所共同创建的通用电子元件测试中心,主要用于测试航空器件的性能。PNPI 的同步回旋加速器提供 1 000 MeV 的初始质子束流,通过使用铜降能器将初始束流降至 60~900 MeV<sup>[2]</sup>。该降能器由 11 个直径为 8 cm 的铜盘组成,每个铜盘厚度不同,分别为 0.1 cm、0.2 cm、0.2 cm、0.5 cm、1 cm、5 cm、2 cm、2 cm、10 cm、15 cm 和 20 cm。通过铜盘的不同组合方式实现降能器厚度的变化,最终得到特定能量的出射质子束流<sup>[3]</sup>。

中国散裂中子源(China Spallation Neutron Source, CSNS)<sup>[4]</sup>是世界第 4 台脉冲型散裂中子源,主要由直线加速器、环形快循环同步加速器<sup>[5]</sup>和靶站构成。CSNS 未来还规划建设其他实验平台<sup>[6]</sup>,高能质子束实验终端(High-energy Proton Beam Experimental Station, HPES)是其中重要的平台之一,其主要建设目的是提供高能质子测试束,建成后将是国内唯一的专用高能质子测试束。脉冲型高能质子测试束具有穿透能力强、飞行时间快的特点,在先进探测器研发和标定、辐照效应研究及质子成像等多个领域有重要的应用。CSNS 加速器为 HPES 提供单一能量的 1.6 GeV 质子束,降能器的使用可以将 1.6 GeV 质子束降能至 300 MeV、400 MeV、500 MeV、600 MeV、700 MeV、800 MeV、900 MeV、1 000 MeV、1 100 MeV、1 200 MeV、1 300 MeV、1 400 MeV、1 500 MeV 等目标能量。

CSNS 高能质子束实验终端的布局如图 1 所示,快循环同步加速器(Rapid Cycling Synchrotron, RCS)将质子束流加速到 1.6 GeV。从 RCS 引出的高能质子束流一部分经 RTBT 束运线(Ring to Target Beam Transport, RTBT)传输到第一靶站(1<sup>st</sup> target

station),另一部分则通向第二靶站(2<sup>nd</sup> target station)、高能质子束实验终端和缪子源实验终端(Muon beam experimental station)。高能质子束实验终端设置有实验终端 1(T1)和实验终端 2(T2)。两个终端分时使用,其中一个实验终端运行时,另一个实验终端可以布置下一个实验,或者两个同时开始的实验进行交互测试,充分利用束流时间。其中高能质子降能器布置在高能质子实验厅的上游位置,如图 1 中红色圆圈部分显示。

## 1 CSNS 上高能质子降能器设计

### 1.1 降能器的材料和几何

为了开展降能器的材料和几何分析,本工作采用 FLUKA<sup>[7]</sup>程序模拟高能质子与不同材料降能器的相互作用过程,FLUKA 广泛用于计算粒子传输及与物质的相互作用,其核模型与实验结果一致性得到了很好的验证<sup>[8]</sup>,在同位素产生和衰变等方面,FLUKA 也能够与实际测量值保持很好的一致性<sup>[9]</sup>。本文同时也使用 SRIM<sup>[10]</sup>程序计算质子在不同材料物质中的射程,SRIM 也是基于蒙特卡罗方法,用于模拟计算离子在靶材中能量损失和分布的计算程序。

经过调研,对于 GeV 以上的高能质子束流,一般采用铜等较重金属材料作为降能器材料。考虑到材料的经济性及实际建设中空间布局对降能器厚度的限制,将同时考察铁、铜、钨金属材料对于 HPES 降能器的适用性。水、石蜡和聚乙烯都是氢元素含量较高的物质,由于氢原子核与质子质量相同,弹性碰撞时能量损失高,理论上有益于质子束的慢化。图 2 为 SRIM 模拟计算得到的 300~1 600 MeV 质子束在水、石蜡、聚乙烯、铜、铁、钨材料中的射程,其中石蜡和聚乙烯材料的密度分别为 0.89 g·cm<sup>-3</sup>、0.93 g·cm<sup>-3</sup>。如图 2 所示,质子束在材料中的射程与入射能量呈正比例关系。相同能量的入射质子束在铁、铜、钨材料中的射程明显小于水、石蜡、聚乙烯。1.6 GeV 质子束在水、石蜡和聚乙烯中的射程达 6 m 以上,在金属材料铁、铜中的射程为 1 m 左右,在钨中的射程为 0.5 m 左右。水、石蜡和聚乙烯的密度太小,降能效率低,不符合实际应用。因此降能器材料从铁、铜和钨材料中选出。

根据射程结果,能够换算出 1.6 GeV 质子束流穿过降能器材料后出射质子束能量所对应的降能器厚度。图 3 为出射质子束能量与所需降能器厚度的

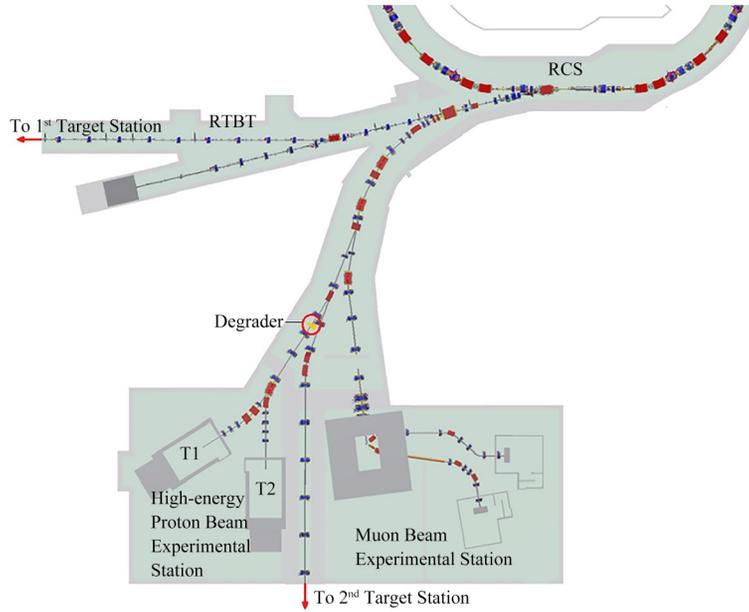


图1 CSNS 高能质子束实验终端布局(彩图见网络版)  
Fig.1 Layout of high-energy proton beam experimental station at CSNS (color online)

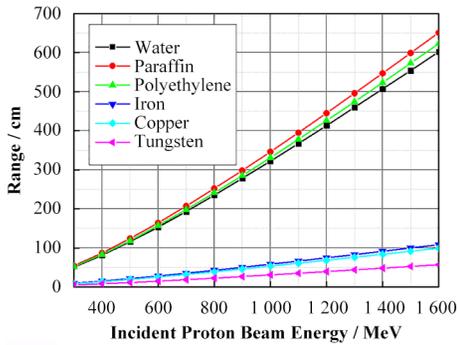


图2 300~1 600 MeV 质子束在不同材料中的射程  
Fig.2 Ranges in different materials bombarded by a 300~1 600 MeV proton beam

变化关系。出射质子束能量与降能器厚度呈规律的反比关系。获得相同能量的出射质子束所需降能器厚度钨材料最短,其次是铜,最长为铁。

实际建设时降能器拟采用如图4所示的双楔形

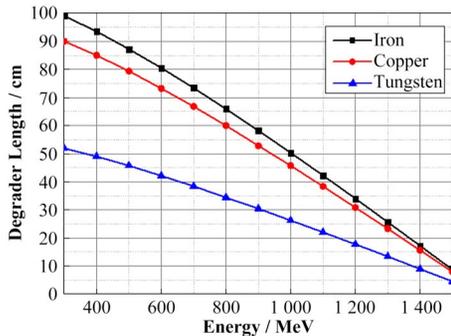


图3 出射质子束能量与降能器厚度的变化关系  
Fig.3 Relationship between the outgoing proton beam energy and the degrader thickness

几何结构,这种结构能够通过改变两个相同楔形块的相对位置来改变降能器的厚度,实现降能器厚度的任意调节。

入射质子束流呈高斯分布 ( $\sigma_x=1.5\text{ cm}$ ,  $\sigma_y=1.0\text{ cm}$ ),此处认为质子束流束斑尺寸为  $\Phi=6\sigma_x=9\text{ cm}$ ,  $L_{\min}$  和  $L_{\max}$  分别为 1.6 GeV 高能质子束流降能至 1 500 MeV 和 300 MeV 所需的降能器的最小厚度和最大厚度。根据 FLUKA 模拟结果(图5),  $L_{\min}=8.7\text{ cm}$ ,  $L_{\max}=99.0\text{ cm}$ 。由相似三角形定理:

$$L_{\min}/L_1 = \Phi/L_2 \quad (1)$$

$$(L_{\max} - L_1)/L_1 = (L_2 - \Phi)/L_2 \quad (2)$$

计算得到两个楔形块的直角边分别为  $L_1=53.85\text{ cm}$ ,  $L_2=55.71\text{ cm}$ 。

## 1.2 出射质子束

图4是降能器几何模型为计划中的理想方案模型,还需要根据实际情况进行必要调整优化。为了使获得的物理量更具普适性,下文中 FLUKA 模拟均采用同一简化的模型:初始质子束流的能量为 1.6 GeV,流强为  $1 \times 10^7\text{ p}\cdot\text{s}^{-1}$ ,呈高斯分布 ( $\sigma_x=1.5\text{ cm}$ ,  $\sigma_y=1\text{ cm}$ );降能器几何模型为特定厚度的半径 8 cm 的圆柱体。

### 1.2.1 降能后质子束能谱

经过一系列 FLUKA 模拟,得到降能器后出射质子束目标能量:300 MeV、400 MeV、500 MeV、600 MeV、700 MeV、800 MeV、900 MeV、1 000 MeV、1 100 MeV、1 200 MeV、1 300 MeV、1 400 MeV、1 500 MeV 对应所需降能器厚度。图5

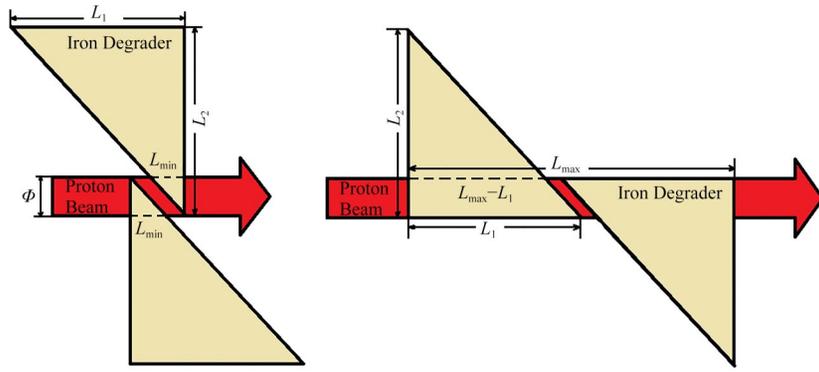


图4 双楔形降能片几何模型

Fig.4 Schematic diagrams of the degrader with a double-wedge structure

为 1.6 GeV、 $1 \times 10^7 \text{ p} \cdot \text{s}^{-1}$  流强的质子束穿过不同厚度 纵坐标单位中的 p' 表示出射质子。铁、铜、钨材料降能器后出射质子束能谱分布。图中

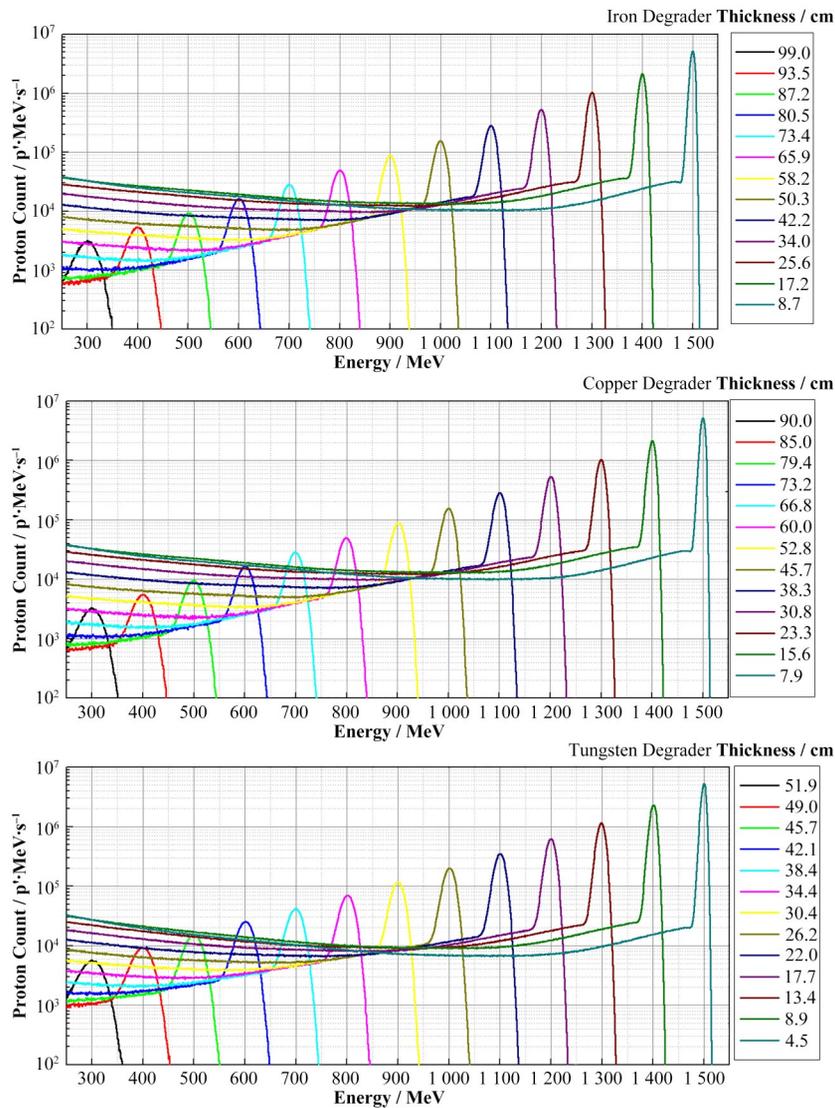


图5 不同厚度铁、铜、钨材料降能器后出射质子束能谱分布

Fig.5 Energy spectrum distribution of the outgoing proton beam after traversing an iron, copper, or tungsten degrader with variable thickness

三种材料降能器后出射质子束的能谱分布情况基本一致。每个降能器厚度对应的能谱曲线,其峰值处能量都很好地吻合在目标能量处。每条能谱曲线在峰值前有一个缓慢下降再缓慢上升的过程,到峰值附近时曲线快速上升,过了峰值急剧下降。此外降能器厚度越小,峰值处的质子能量越集中。

### 1.2.2 出射质子束的相空间

为了给后续质子束输运线设计提供参考,开展了出射质子束流的束斑和相空间分布计算与分析。此处模拟中的探测器平面放置在距离降能器入口 110 cm 处,降能器模型为半径 8 cm 的圆柱体。以厚度分别为 8.7 cm、80.5 cm 和 99 cm 的铁降能器为例,以上 3 个厚度分别对应的出射质子束能量峰值为 1 500 MeV、600 MeV 和 300 MeV。图 6 和图 7 分别为 3 个厚度铁降能器后的出射质子束束斑分布图<sup>[11]</sup>和相空间分布图。从图 6 可以看到,在半径 8 cm 范围的探测器平面内收集到的质子束能量集中在降能器的目标能量 1 500 MeV、600 MeV 和 300 MeV 附近,据此,图 7 相空间分布图只包含半径 8 cm 范围内的质子。从图 7 可以看到,降能器厚度越大,出射质子束的角散越大,对应的相空间也越大。

### 1.2.3 出射质子束流强

为了进一步定量比较 3 种材料降能器后出射质子束的流强,将各峰值能量百分比展宽±5%范围内的质子流强在表 1 中列出。50.3 cm 的铁降能器、

45.7 cm 的铜降能器和 26.2 cm 钨降能器后质子束的峰值能量均为 1 000 MeV,能量百分比展宽±5%即能量范围 950~1 050 MeV。铜和铁降能器后的出射质子束流强差距较小,钨降能器后的出射质子束流强明显大于铜和铁降能器。不同材料降能器后质子束流强之间的差距随其峰值能量的增加有减小趋势。

### 1.3 π 束流

高能质子束轰击靶材料,与靶材原子核中的核子(质子或中子)发生碰撞会产生大量 π 介子。因此降能器在获得可变量质子束的同时也可以充当 π 介子产生靶,π 介子的产生对于一些强子探测器测试是必要的。图 8 是铜、铁和钨降能器末端处收集到的 π 介子单位时间产额随降能器厚度的变化关系。π 介子的产额随降能器厚度的增加先增大后减小,在铜降能器和铁降能器厚度达到约 10 cm,钨降能器厚度达到约 6 cm 时,对应的 π 介子产额达到最高。3 种材料中,铁材料的 π 介子产额最高,钨则明显低于铁和铜。10 cm 的铜降能器和铁降能器,6 cm 的钨降能器都对应为这 3 种材料作为 π 介子产生靶的最优厚度。铜降能器、铁降能器和钨降能器的 π 介子最高产额分别为  $5.23 \times 10^5 \pi^+ \cdot s^{-1}$ 、 $5.35 \times 10^5 \pi^+ \cdot s^{-1}$  和  $3.81 \times 10^5 \pi^+ \cdot s^{-1}$ 。

图 9 是 10 cm 铜降能器和铁降能器及 6 cm 钨降能器产生的 π<sup>+</sup>束流能谱分布图,π<sup>+</sup>的能量都集中在

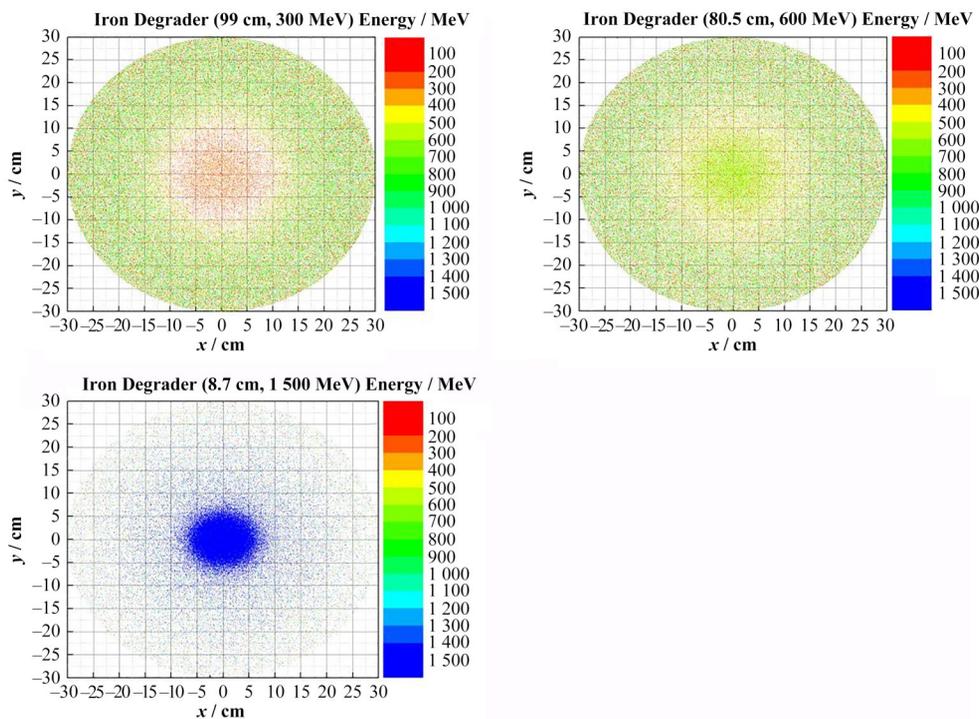


图 6 不同厚度铁降能器后质子束束斑分布图

Fig.6 Beam spot distribution of the outgoing proton beam after traversing iron degraders of different thicknesses

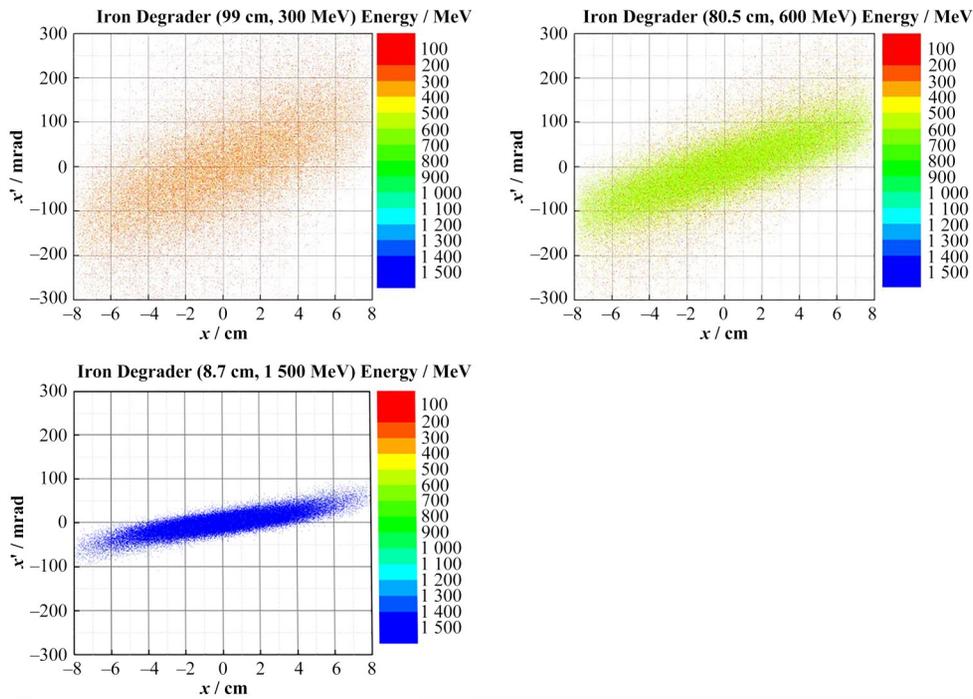


图7 不同厚度铁降能器后出射质子束相空间分布图

Fig.7 Phase-space distribution of the proton beam after traversing iron degraders of different thicknesses

表1 各峰值能量±5%范围内的出射质子束流强  
Table 1 Outgoing proton beam intensity within ±5% of the peak energy

峰值能量 Peak energy / MeV	±5%峰值能量展宽内质子束流强 Proton beam intensity within 5% range / $10^4 \text{ p}' \cdot \text{s}^{-1}$		
	铁 Iron	铜 Copper	钨 Tungsten
300	8.61	9.04	1.60
400	1.78	1.85	3.16
500	3.33	3.39	5.69
600	5.77	5.91	9.73
700	9.69	9.83	1.51
800	1.62	1.64	2.41
900	2.69	2.77	3.75
1 000	4.49	4.55	5.96
1 100	7.51	7.61	9.42
1 200	1.25	1.27	1.50
1 300	2.11	2.11	2.38
1 400	3.52	3.44	3.87
1 500	5.91	5.91	6.19

0~600 MeV, 能量峰值都在 200~300 MeV 之间。

除了能谱和产额,  $\pi$  束流的角散也是一个重要参数, 能够为  $\pi$  束流束运线设计提供参考。图 10 给出 10 cm 厚的铁降能器后  $\pi^+$  束流的相空间分布。模拟采用的探测器平面参数与模拟质子束相空间分布时所用一致, 放置在距离降能器入口 110 cm 处, 探测器为半径 8 cm 的圆面。

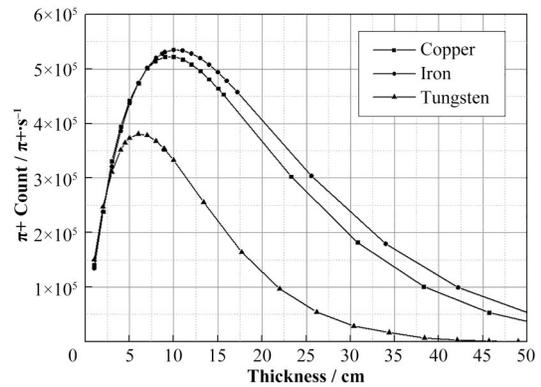


图8 降能器后  $\pi$  介子产额与降能器厚度的变化关系  
Fig.8 Relationship between the  $\pi$  meson yield and the degrader thickness

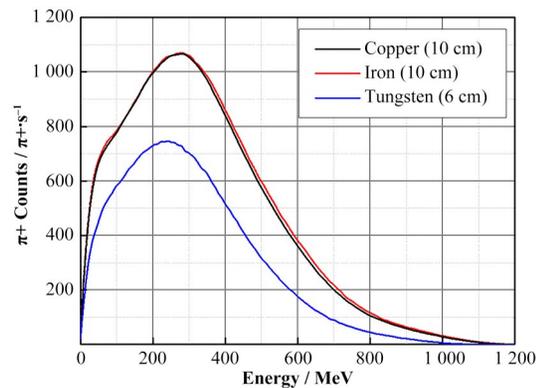


图9 降能器后  $\pi^+$  粒子的能谱分布  
Fig.9 Energy spectrum of  $\pi^+$  after traversing the degrader

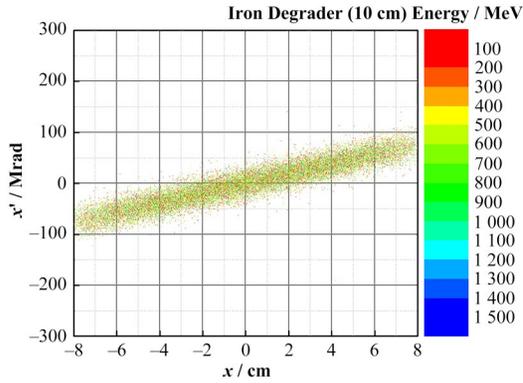


图10 铁降能器后 $\pi^+$ 粒子的相空间分布  
Fig.10 Phase space of  $\pi^+$  after traversing the iron degrader

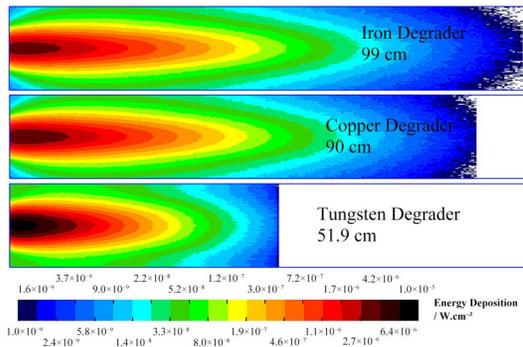


图11 降能器的能量沉积密度分布  
Fig.11 Energy deposition density distributions of the degraders

### 1.4 能量沉积

铜降能器上能量沉积共  $1.50 \times 10^{-3} \text{ W}$ , 能量沉积最高点位于距入口 2.5 cm 中心处, 值为  $4.08 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-3}$ ; 铁降能器上能量沉积共  $1.48 \times 10^{-3} \text{ W}$ , 能量沉积密度最高点位于距入口 2.0 cm 中心处, 值为  $3.63 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-3}$ ; 钨降能器上能量沉积共  $1.63 \times 10^{-3} \text{ W}$ , 能量沉积密度最高点位于距入口 1.5 cm 中心处, 值为  $8.23 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。降能器几何中心所在平面的能量沉积密度分布情况见图 11: 降能器入口处, 钨材料的能量沉积最大, 铁材料最小; 垂直于束流方向, 相同位置处, 钨材料的能量沉积也是 3 种材料中最大的。

## 2 降能器的辐射与屏蔽

高能质子及其产生的次级粒子具有很高的辐射剂量, 会对周围设备和环境产生严重的辐射破坏和污染。因此, 对高能质子降能器的辐射剂量评估和屏蔽都是必不可少的。由于高能质子穿过降能器会产生大量次级粒子, 且由于材料被活化, 即使在停止运行的时候, 降能器材料依然具有放射性, 因此, 我

们不仅需要评估束流穿过降能器瞬间的瞬发辐射剂量情况, 还需要按照 CSNS 隧道维护剂量限值的要求, 提供装置持续运行 100 d, 停机 4 h 后的剩余辐射剂量情况。

### 2.1 瞬发辐射

辐照模拟计算所用模型为半径 8 cm、高度分别为 90 cm、99 cm 和 51.9 cm 的铜、铁、钨圆柱体降能器, 降能器外包裹厚度为 20 cm 的混凝土屏蔽层, 见图 12。图 12 为 3 种材料降能器及其屏蔽体的瞬发辐射剂量当量分布图。在垂直于束流方向上, 20 cm 厚的混凝土屏蔽层可以将高能质子穿过 3 种材料降能器所产生的瞬发剂量当量控制到  $1 \times 10^4 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$  以下。其中, 铜和铁及其屏蔽体的瞬发剂量当量差距很小, 钨材料及屏蔽体的瞬发剂量当量在相同位置处要比铜和铁材料更大。

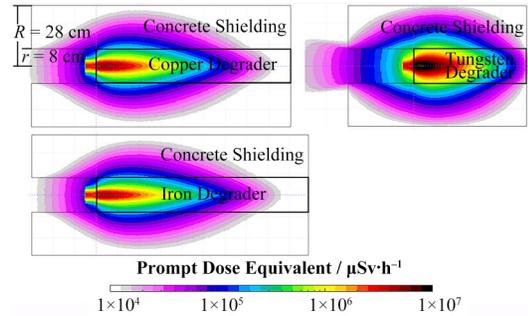


图12 降能器及其屏蔽体的瞬发剂量当量分布  
Fig.12 Prompt dose equivalent distribution of the degraders and shielding

### 2.2 剩余辐射

HPES ( $1.6 \text{ GeV}$ ,  $1 \times 10^7 \text{ p} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 装置持续运行 100 d, 停机 4 h 后 3 种材料及其屏蔽体的剩余辐射剂量当量分布如图 13 所示, 12 cm 厚的混凝土屏蔽体即可将铜和铁降能器的剩余剂量当量降至  $1 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$  以下。而钨降能器的剩余辐射剂量在相同位置处也都要大于铁和铜, 需要更厚一点的屏蔽层才能将剂量降至相同水平。

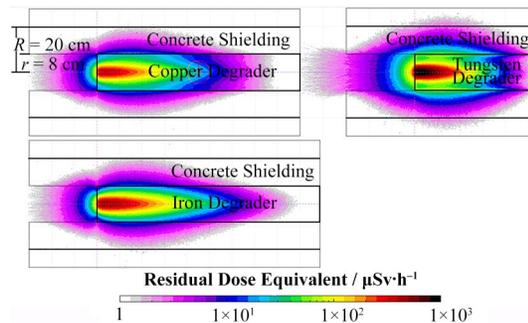


图13 降能器及其屏蔽体的剩余剂量当量分布  
Fig.13 Residual dose equivalent distribution of the degraders and shielding

### 3 结语

CSNS 后期升级计划建设高能质子束实验终端 HPES, 由于 CSNS 加速器只能提供单一能量的质子束, 无法满足有些高性能探测器和辐照应用对测试束不同能量的需求。又由于目前得到广泛应用的质子慢化材料针对的都是较低能段的质子, 对 GeV 以上高能质子束降能效率低。因此, 针对 CSNS 1.6 GeV 高能质子束降能器的设计与研究对于实验终端 HPES 的建设是十分重要的。

本文通过粒子输运的蒙特卡罗程序 FLUKA 和 SRIM 模拟 1.6 GeV 的高能质子束穿过铁、铜、钨 3 种材料降能器的物理过程, 给出 1.6 GeV 的初始质子束流降能至 300 MeV、400 MeV、500 MeV、600 MeV、700 MeV、800 MeV、900 MeV、1 000 MeV、1 100 MeV、1 200 MeV、1 300 MeV、1 400 MeV、1 500 MeV 等特定能量时所需降能器的厚度。同时经过 FLUKA 程序进一步的模拟计算, 给出铁、铜和钨 3 种材料降能器后出射质子束流强、能谱,  $\pi$  介子产额、能谱, 降能器上的能量沉积分布以及辐射剂量当量分布等信息, 并以铁材料为例给出降能器后出射质子束及产生的  $\pi$  束流的相空间分布情况。为 CSNS 高能质子束降能器方案提供可行性数据支持。

通过对 3 种降能器材料的以上模拟结果比较发现, 钨材料在几何厚度、出射质子束产额方面具有优势, 但是其  $\pi$  介子产额明显低于铜和铁, 相同位置处的能量沉积以及辐射剂量也都高于铜和铁。铜和铁两种材料在以上信息方面数据都比较接近, 在能量沉积以及辐射剂量分布方面铁材料略有优势。结合以上信息和实际工程需要, 认为铁是 3 种材料中最为理想的降能器材料。

**作者贡献声明** 穆奇丽负责数据模拟分析, 文章撰写与修改; 董启凡负责文章修改和校订; 敬罕涛提出降能方案思想, 负责研究方向指导和文章审阅。

### 参考文献

- 1 梁志开. 用于质子治疗的降能器系统设计与优化[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.  
LIANG Zhikai. Design and optimization of energy reducer system for proton therapy[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- 2 Artamonov S A, Ivanov E M, Ivanov N A, *et al.* Numerical simulation and optimization of the variable energy 60~1 000 MeV proton beams at PNPI synchrocyclotron for testing the radiation resistance of electronics[J]. Physics of Particles and Nuclei Letters, 2017, 14(1): 188 - 200. DOI: 10.1134/S1547477117010046.
- 3 Artamonov S A, Tonkikh V A. Numerical simulation of additional proton beams with variable energy for testing the radiation resistance of electronics and other applications at the PNPI synchrocyclotron[J]. Physics of Particles and Nuclei Letters, 2020, 17(6): 882 - 892. DOI: 10.1134/S1547477120060023.
- 4 Chen H S, Wang X L. China's first pulsed neutron source [J]. Nature Materials, 2016, 15(7): 689 - 691. DOI: 10.1038/nmat4655.
- 5 Wu B, Li X, Li Z, *et al.* Development of a large nanocrystalline soft magnetic alloy core with high  $\mu'_p Q_f$  products for CSNS-II[J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, 33(8): 99. DOI: 10.1007/s41365-022-01087-x.
- 6 Jiang X F, Zhou J R, Luo H, *et al.* A large area  $^3\text{He}$  tube array detector with vacuum operation capacity for the SANS instrument at the CSNS[J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, 33(7): 89. DOI: 10.1007/s41365-022-01067-1.
- 7 Ferrari A, Sala P R, Fasso A, *et al.* FLUKA: a multi-particle transport code[J]. Lancet, 2005, 10(7740): 44 - 45. DOI: <https://www.osti.gov/biblio/877507>.
- 8 Battistoni G, Cerutti F, Fassò A, *et al.* The FLUKA code: description and benchmarking[C]//AIP Conference Proceedings. AIP: Batavia, Illinois (USA). 2007, 896(1): 31 - 49. DOI: 10.1063/1.2720455.
- 9 Brugger M, Khater H, Mayer S, *et al.* Benchmark studies of induced radioactivity produced in LHC materials, Part I: specific activities[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2005, 116(1 - 4): 6 - 11. DOI: 10.1093/rpd/nci051.
- 10 Ziegler J F, Ziegler M D, Biersack J P. SRIM - the stopping and range of ions in matter (2010)[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 2010, 268(11 - 12): 1818 - 1823. DOI: 10.1016/j.nimb.2010.02.091.
- 11 Sun Y K, Jing H T, Tian B B, *et al.* Research on proton beam spot imaging based on pixelated gamma detector[J]. Journal of Instrumentation, 2022, 17(2): P02033. DOI: 10.1088/1748-0221/17/02/p02033.