

# 抽屉型放射源运输容器辐射漏束预测与屏蔽设计优化研究

于小航, 张礼楠\*, 赵虹羽, 牛钦  
(中机生产力促进中心有限公司, 北京 100044)

**摘要:** **目的** 随着近年来医疗技术水平的提高, 可无创无痛进行病变治疗的伽玛刀设备的应用率也提高。其中钴源与圆柱形抽屉组成一体式结构是伽玛刀常用到的一种典型构型, 因此设计一种性能可靠且操作便利的抽屉型钴源专运容器具有必要性。该构型容器的抽屉孔道会沿着抽屉径向贯穿容器筒体, 导致容器在抽屉两端对应侧出现辐射漏束现象。因此, 从设计优化角度解决容器的辐射漏束问题, 并分析漏束区域在容器外部的分布特征。**方法** 采用高精度蒙特卡罗计算程序对经典构型的抽屉型容器展开一系列研究, 对其主要漏束路径(抽屉孔道与抽屉间的孔道缝隙)进行建模分析。**结果** 分析显示, 孔道缝隙的尺寸、孔道缝隙与放射源的距离及放射源的驻留位置对容器外部辐射剂量水平均具有高敏感性影响。**结论** 漏束的剂量率会随着孔道缝隙(10 mm 范围内)和源活性区偏离源抽屉中心距离的增大而快速增长, 设计单位可参考该结论对容器的屏蔽性能进行优化设计。容器外部的最大漏束影响区向远离抽屉中心的方向偏离, 距容器外部越远则偏离越大, 容器的操作人员可参考该特性合理规避漏束路径。

**关键词:** 放射源; 抽屉型运输容器; 辐射漏束; 蒙特卡罗方法

中图分类号: TB98

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2024)21-0028-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.21.005

## Radiation Streaming Prediction and Shielding Design Optimization for Drawer-type Radioactive Source Transport Containers

YU Xiaohang, ZHANG Linan\*, ZHAO Hongyu, NIU Qin

(China Productivity Center for Machinery, Beijing 100044, China)

**ABSTRACT:** With the advancement of medical technology in recent years, the use of Gamma Knife equipment for non-invasive and painless lesion treatment has significantly increased. The integrated structure of the cobalt source and the cylindrical drawer is a typical configuration commonly employed in Gamma Knife systems. Therefore, it is essential to design a drawer-type cobalt source transport container that offers reliable performance and ease of operation. In this configuration, the aperture of the drawer extends radially through the cylinder of the container, resulting in radiation streaming at the corresponding sides of the container at both ends of the drawer. Consequently, the work aims to address the radiation streaming phenomenon from a design optimization perspective and analyze the distribution characteristics of the leakage region on the exterior of the container. A series of studies on a drawer-type container with a classical configuration were conducted with the high-precision Monte Carlo computational program to model and analyze its primary radiation streaming path (drawer apertures and aperture gaps between the drawers). According to the analysis results, the size of the aperture gap, the distance between the aperture gap and the radioactive source, and the location of the radioactive source significantly affected the radiation dose level outside the container. The dose rate of the radiation

leakage beam increases rapidly with the increasing distance between the aperture gap (up to 10 mm) and the active zone of the radioactive source, relative to the center of the source drawer. Design units can utilize this conclusion to optimize the shielding performance of the container. Furthermore, the maximum impact area of radiation streaming outside the container deviates from the center of the drawer. As the distance from the container increases, this deviation increases. Operators can leverage this characteristic to effectively avoid the path of radiation streaming.

**KEY WORDS:** radioactive source; drawer-type transport container; radiation streaming; Monte Carlo method

随着近年来医疗技术水平的提高,可无创无痛进行病变治疗的伽玛刀设备的利用率也提高了。其中,内置在设备中的高活度放射源需采用满足国家相关标准的专用容器进行装载和运输。为确保运输过程中工作人员及环境安全,设计一类性能可靠且操作便利的运输容器对于提高我国放射源的利用率具有切实有效的意义。

一种典型的伽玛刀的辐照装置设计构型为使用源抽屉(钴源与源抽屉为一体式结构),其专用容器在设计阶段在保证其安全性能的基础上还需考虑操作的便利性。常规构型的放射源运输容器通常外部整体结构为圆柱体,主要由防火罩、容器本体、运输托架 3 部分组成,导源操作通过开关容器顶部上盖的方式来完成<sup>[1]</sup>。抽屉型容器的最大特征是存在贯通的放射源抽屉孔道,该设计更便于放射源的装换操作,但存在一定的漏束风险。采用蒙特卡罗方法对该构型容器进行屏蔽性能分析,发现抽屉孔道的设计会导致容器在径向存在辐射漏束路径,会在容器筒体侧产生辐射剂量水平控制的负影响<sup>[2]</sup>。并且研究发现,放射源在源抽屉中源仓内的驻留位置也对容器的屏蔽性能具有高敏感性<sup>[3]</sup>。因此,本文将基于非常规构型(抽屉型)放射源运输容器屏蔽性能的可靠性,分别从设计优化和操作使用 2 个方面展开研究与分析。

## 1 抽屉型运输容器结构特征

该构型的容器在设计时需要从结构、热、包容、

屏蔽、货包操作等多个角度进行综合考虑,其中屏蔽设计和货包操作规程制订是确保人员与外部环境安全最重要的 2 个因素<sup>[4]</sup>。目前已有的抽屉型容器在结构设计上由于成本预算和操作便利等因素的影响,不适合简单采取在抽屉两端加厚屏蔽材料的方式避免辐射漏束,因此在不改变结构设计的前提下预测辐射漏束影响区和优化屏蔽设计方案是更具有经济性的解决方案。

此类型容器筒体设计有抽屉孔道且贯穿容器筒体,可根据实际的装载需求设计多孔道贮运多个源抽屉,并且抽屉端盖处的钨层厚度可根据使用需求进行调整(见图 1),源抽屉可通过专用设备(推杆工具)辅助在孔道内实现自由抽取。源抽屉在孔道间的抽取式设计和制造公差,均会影响容器筒体的辐射漏束路径。

## 2 抽屉型容器漏束计算模型

通常抽屉型容器在非漏束方向具备足够的屏蔽能力,其主要漏束路径为抽屉孔道与抽屉间的孔道缝隙,因此可通过建立抽屉孔道模型来模拟实际情况。在对某型号容器进行建模计算的过程中,主要细化放射源、源抽屉、抽屉孔道、抽屉两端盖板及屏蔽部件的结构,同时考虑了孔道周向上铅层屏蔽射线所带来的次级粒子效应<sup>[5-8]</sup>。采用蒙特卡罗计算方法,选取 ENDF/B-VI 数据库作为截面数据库,并在建立假设模型(见图 2)时留出了一定的保守假设:

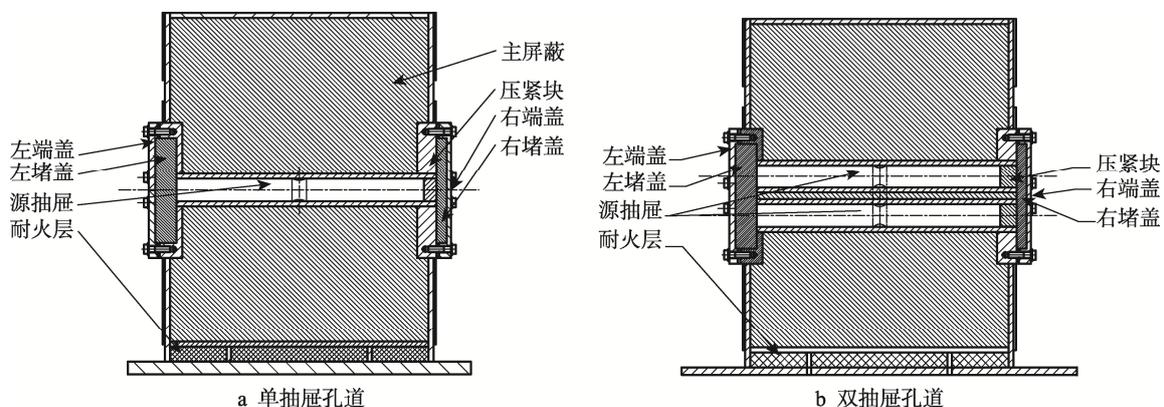


图 1 抽屉型运输容器结构示意图  
Fig.1 Schematic diagram of the structure of a drawer-type transport container

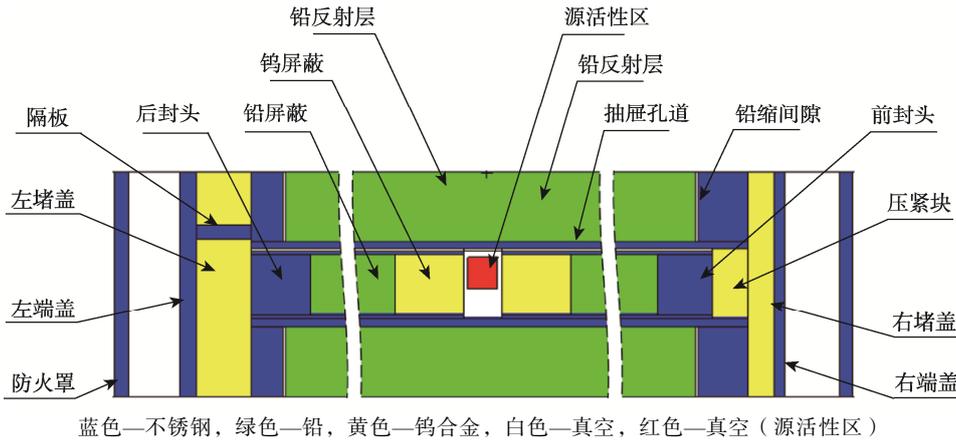


图2 初始的孔道模型示意图  
Fig.2 Schematic of the initial aperture model

几何建构：1) 源抽屉在抽屉孔道中摆放位置及放射源驻留位置的选取。孔道缝隙设置为 2 mm 以充分包络部件尺寸公差及弯曲带来的影响, 将源抽屉放置在紧贴孔道壁内表面下部, 同时将放射源活性区设置在尽可能靠近上部孔道缝隙的位置, 以此达到最大的辐射漏束效果<sup>[9]</sup>。2) 重要部件尺寸参数的选取。源抽屉和抽屉孔道的直径在建模时均根据其制造公差考虑保守裕量, 源抽屉上的钨合金、铅、前后封头及壳体的各接合面的尺寸均按照最不利于屏蔽的方向进行调整<sup>[10]</sup>。3) 预留铅缩间隙。考虑到容器可能会经受火灾等意外高温情况, 且铅的膨胀系数大, 因此设计时提前预留铅的膨胀间隙<sup>[11]</sup>。

模型的简化：1) 忽略源仓内的螺孔、支架等不锈钢结构以及抽屉前后封头的螺栓等细节部件。2) 忽略防火罩的隔热材料, 并将其 2 层不锈钢进行合并。3) 忽略放射源自屏蔽现象。

源项的选取：采用 <sup>60</sup>Co 的 1.173 2 MeV (50%) 和 1.332 3 MeV (50%)  $\gamma$  射线包络其他核素, 并忽略贡献极小的韧致辐射。

### 3 辐射漏束影响因素的预测与分析

#### 3.1 确定辐射漏束对容器外部的最大影响区

结合现场实际情况, 操作人员大部分时间位于距离容器外表面 1 m 左右的位置。基于上述屏蔽模型, 分析漏束所导致的最大辐射剂量当量率大概率出现在抽屉孔道的左、右端盖所覆盖的区域, 因此在距离两端盖外防火罩表面 1 m 处的位置, 从孔道缝隙中心点对应位置沿竖直方向上设置一系列点探测器(见图 3), 设置探测器间隔距离为 0.5 cm。

图 4 分别给出了容器外表面左、右两侧在 1 m 处辐射剂量当量率随高度变化的曲线, 根据曲线变化趋势可以看出左端盖处存在孔道缝隙(路径 1)和左堵盖与隔板间缝隙(路径 2) 2 条辐射漏束路径, 但孔道缝隙造成的外部辐射剂量当量率更高。由于本文作为示例的容器的左堵盖非一体式结构中间存在隔板, 导致出现了由漏束路径 2 所造成的辐射漏束现象。

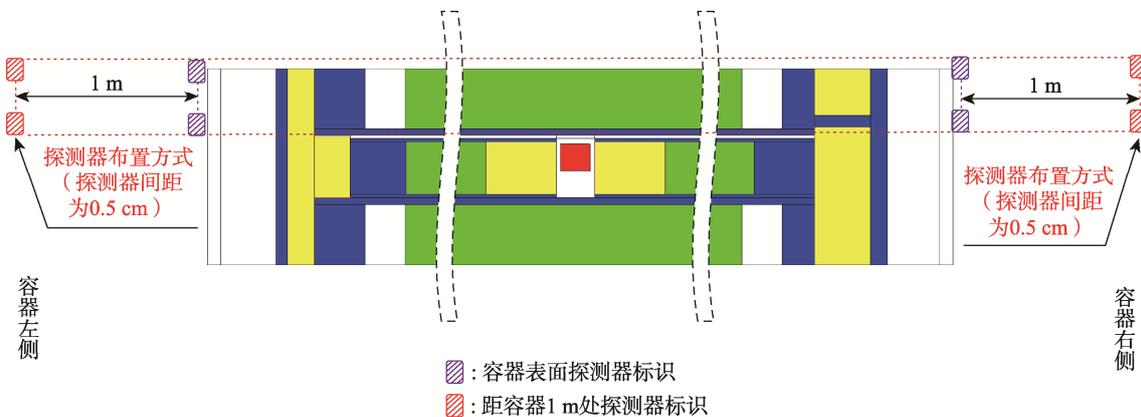


图3 探测器布置方式  
Fig.3 Arrangement method of detectors

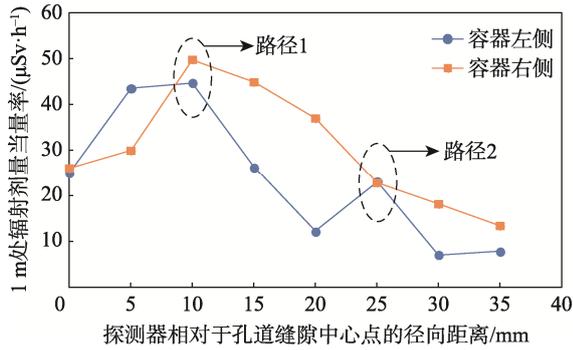


图 4 常规运输条件下容器外部 1 m 处辐射剂量当量率

Fig.4 Radiation dose equivalent rate at a distance of 1m from the container under the routine transport condition

图 4 所示的结果表明, 容器周向侧受辐射漏束影响, 所引起的外部最大辐射剂量当量率并不在孔道缝隙中心正对位置, 而是在孔道缝隙中心正对点沿径向上偏移 1 cm 左右的位置。

基于上述 1 m 处辐射水平的示例以及对表面和 2 m

处的研究结果, 发现容器抽屉两端的漏束路径并非沿着抽屉方向, 而是如图 5 所示大致呈一个锥面, 锥面上的剂量率高于抽屉中心正对方向的剂量率。对于这种特性, 现场操作人员若依据常规经验避开抽屉中心正对的方向, 则有可能正好处于漏束锥面的高剂量率位置。因此, 容器操作人员可参考该特性选取合适的操作位置来规避漏束路径, 从而可大大降低操作人员在工作岗位上受到辐照损伤的风险<sup>[12]</sup>。

### 3.2 孔道缝隙对于辐射漏束影响的敏感性分析

相关从业单位在设计容器时应确保其结构和屏蔽性能能够满足 GB 11806—2019 和 IAEA SSR-6 对于货包的设计要求, 容器需按照其规定经受正常运输条件和事故运输条件下的一系列设计验证试验<sup>[13]</sup>。基于上述试验条件, 假设容器在经受正常和事故条件的全部试验后导致容器内部结构发生大量变形 (见图 6)。考虑事故条件下由冲击产生的铅塌陷<sup>[14]</sup>, 在模型中假设侧面间隙为 28 mm; 抽屉孔道发生变形, 抽屉与孔道间的缝隙增大。

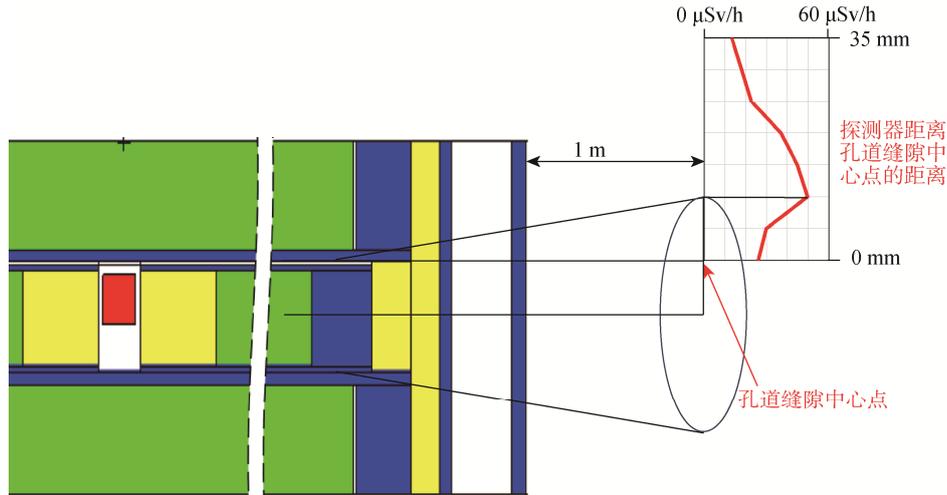


图 5 容器外 1 m 处辐射漏束的变化趋势

Fig.5 Trend of radiation streaming at 1 m outside the container

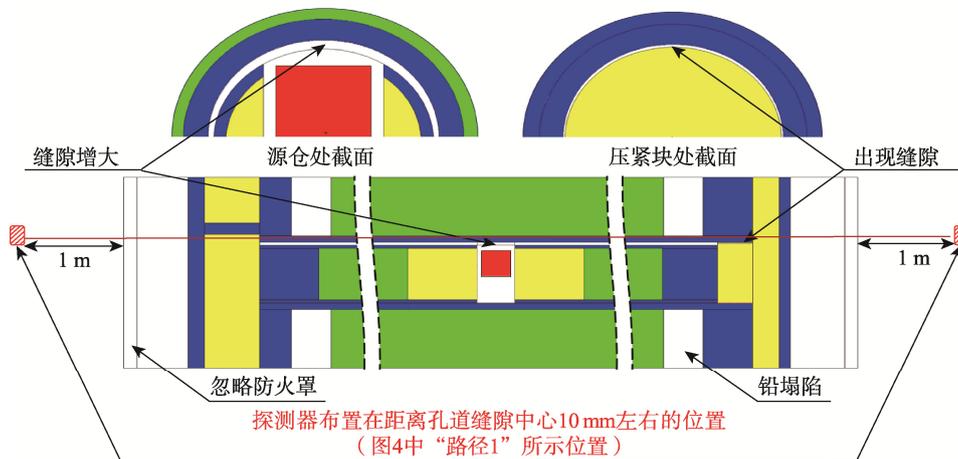


图 6 变形后的孔道模型示意图

Fig.6 Schematic diagram of the deformed aperture model

以孔道缝隙的尺寸为变量，分析其变化对于辐射漏束情况的影响趋势。探测器设置在本文第3章所选定的位置，孔道缝隙初始值设定为2 mm。以容器右端的剂量率变化情况为例，缝隙尺寸的影响如图7所示。

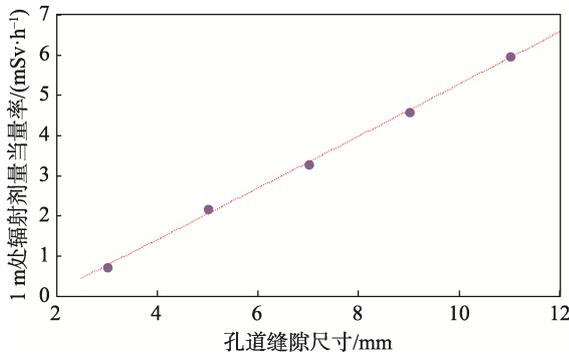


图7 孔道缝隙尺寸的变化对辐射漏束的敏感性  
Fig.7 Sensitivity of variations in aperture gap size to radiation screening

图7的结果说明孔道缝隙尺寸的变化对辐射漏束的影响很显著。在10 mm范围内，随着孔道缝隙的增大，容器外部辐射剂量当量率也以近似线性增长。缝隙每增大1 mm，辐射漏束对容器外部屏蔽性能的负影响增幅在50%~100%。

据此结论，设计可根据容器在经受正常和事故运输条件下的全套试验后的结构评价结果(孔道缝隙的尺寸变化值)，并引用图7中所示的缝隙大小与容器外辐射剂量水平的变化关系，对其设计的容器的屏蔽性能进行预评估。

### 3.3 放射源驻留位置对容器外部剂量率的影响规律

由于各型号治疗设备的源抽屉设计不同，放射

源活性区的位置通常不在抽屉径向中心；在出现运输事故情况时，放射源会因力学冲击而偏离原驻留位置，甚至有概率出现在源仓内发生翻转等极端情况<sup>[15]</sup>。因此使用本文第2章初始的假设模型，以放射源的活性区中心到源抽屉中心的距离(沿径向向上偏移)为变量(见图8)研究活性区位置的影响，计算容器左右两侧的外表面及1 m处的辐射剂量当量值。

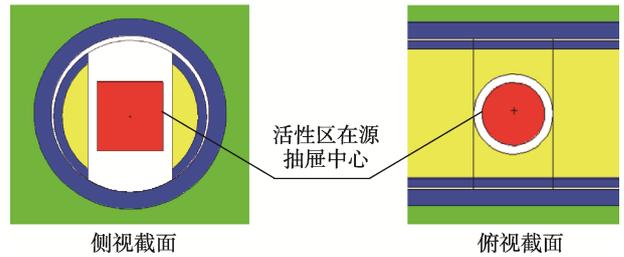


图8 放射源活性区驻留在中心的示意图  
Fig.8 Schematic diagram of the active zone of a radioactive source positioned at the center

容器外表面上辐射剂量水平的变化规律可作为典型案例进行分析，如图9所示。当放射源活性区在源仓正中心时，容器外部的辐射漏束水平最低。容器外部辐射漏束水平随着源活性区的驻留位置越靠近上部孔道缝隙变得越大，呈指数增长趋势。活性区位置每向上移动1 cm左右，外部的辐射漏束水平的增幅近似为原来的10倍左右。

基于上述结论，设计源抽屉时，可尽量将源仓设计在源抽屉的正中心，从而提高放射源的活性区保持在源仓中心的概率，容器外部的辐射剂量水平才会更低。而使用单位在装源阶段可采取一定措施，将放射源的活性区尽可能固定在源抽屉中源仓中心位置保持不动。

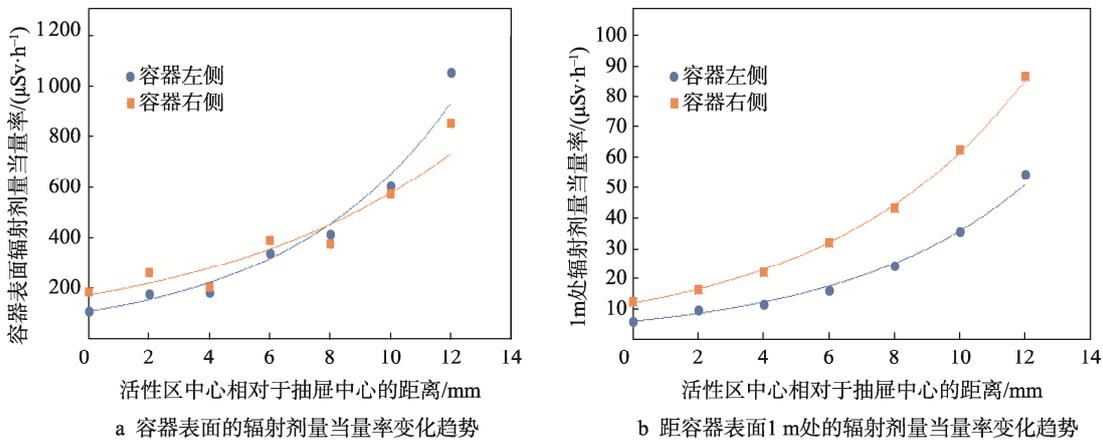


图9 放射源驻留位置对容器外部剂量率的影响规律  
Fig.9 Effect of the location of the radioactive source on the dose rate outside the container

## 4 结论

抽屉型放射源运输容器具有重要的使用价值,本文从辐射防护的角度入手,针对优化设计和操作安全2个方面开展了系列研究,具体的结论如下:

从设计角度:1)孔道缝隙在10 mm范围内,漏束剂量率随着孔道缝隙的增大以近似线性关系快速增长,设计单位可参考图7所示的曲线,对容器的屏蔽性能进行预评估。2)漏束剂量率随着源活性区偏离抽屉中心的距离呈指数趋势快速增长,建议在设计源抽屉时尽可能将源活性区设计在抽屉的正中心。

从操作和使用角度:对于与容器有一定距离的操作人员,容器抽屉两端的漏束路径并非沿着抽屉方向,而是大致呈一个与抽屉同轴并向外发散的锥面,锥面半径随着远离容器而逐步增加。因此,容器操作人员可参考该特性选取合适的操作位置来规避漏束路径。

### 参考文献:

- [1] BASU P, SARANGAPANI R, VENKATRAMAN B. Compact Shielding Design for 740 Gbq Am-241-be Neutron Source Transport Container[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2020, 170: 108670.
- [2] 黎辉,王梦琪,郑征. CAP1400 核电厂堆腔辐射漏束屏蔽设计研究[J]. 核科学与工程, 2021, 41(2): 230-235.  
LI H, WANG M Q, ZHENG Z. The Shielding Design of Cavity Radiation Streaming for CAP1400 Nuclear Power Plant[J]. Nuclear Science and Engineering, 2021, 41(2): 230-235.
- [3] 唐松乾,肖锋,谭怡,等. 华龙一号反应堆本体屏蔽设计[J]. 核动力工程, 2019, 40(S1): 13-15.  
TANG S Q, XIAO F, TAN Y, et al. Design of HPR1000 Reactor Primary Shield[J]. Nuclear Power Engineering, 2019, 40(S1): 13-15.
- [4] 生态环境部,国家市场监督管理总局. 放射性物品安全运输规程: GB 11806—2019[S]. 北京: 中国环境出版社, 2019.  
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material: GB 11806—2019[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2019.
- [5] 钟兆鹏,施工,胡永明. 用 MCNP 程序计算水平辐照孔道屏蔽[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(12): 16-18.  
ZHONG Z P, SHI G, HU Y M. Shielding Calculation of Horizontal Radiation Ducts Using the MCNP Code[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2001, 41(12): 16-18.
- [6] 徐阳,魏彪,毛本将,等. 基于蒙特卡罗的小尺度参考辐射装置屏蔽研究[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(9): 174-181.  
XU Y, WEI B, MAO B J, et al. Shielding Research of Minitype Reference Radiation Device Based on Monte Carlo Simulation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(9): 174-181.
- [7] 史涛,马纪敏,邱有恒,等. 基于蒙特卡罗正算运输的全局减方差方法[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(1): 159-164.  
SHI T, MA J M, QIU Y H, et al. Global Variance Reduction Based on Forward Monte Carlo Calculation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30(1): 159-164.
- [8] GALLMEIER F X. Shielding Calculations for the Proposed NISOL Facility at the ORNL Spallation Neutron Source[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2000, 37(S1): 154-157.
- [9] JARADAT A K, BIGGS P J. Measurement of the Leakage Radiation from Linear Accelerators in the Backward Direction for 4, 6, 10, 15, and 18 MV X-Ray Energies[J]. Health Physics, 2007, 92(4): 387-395.
- [10] CAI B, LAUGEMAN E, HSU H, et al. Technical Note: Self-Shielding Evaluation and Radiation Leakage Measurement of a Jawless Ring Gantry Linac with a Beam Stopper[J]. Medical Physics, 2021, 48(6): 3143-3150.
- [11] St I S S S. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material[J]. American Journal of Public Health & the Nations Health, 1999, 13(3): 26.
- [12] 黄凡. 某医院头部伽玛刀应用辐射污染及防治措施研究[J]. 黑龙江环境通报, 2021, 34(2): 24-25.  
HUANG F. Research on Radiation Pollution and Preventive Measures in the Application of Gamma Knife to Head in a Hospital[J]. Heilongjiang Environmental Journal, 2021, 34(2): 24-25.
- [13] IAEA. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, SSR-6 (Rev. 1, 2018 Edition) [R]. Vienna: IAEA, 2015.
- [14] US NRC. Standard Review Plan for Transportation Packages for Spent Fuel and Radioactive Material: NUREG-2216[R]. USA: US NRC, 2020.
- [15] 张建岗,李国强,孙洪超,等. 放射性物品运输容器试验验证经验总结[J]. 辐射防护, 2018, 38(5): 422-427.  
ZHANG J G, LI G Q, SUN H C, et al. Safe Test Experience on Radioactive Material Transport Packages[J]. Radiation Protection, 2018, 38(5): 422-427.