

## 核医学科防辐射工程屏蔽材料选型与结构设计研究

王浩

河北医科大学第二医院, 河北 石家庄 050000

**[摘要]**核医学科在现代医院体系中的应用日益广泛,随着放射性核素诊疗技术的发展,其辐射种类多样、能量差异显著,给防护工程设计带来更高难度。如何在满足国家相关标准的基础上,根据不同射线特性选择合适的屏蔽材料,并优化结构设计,是保障医护人员与患者辐射安全的重要前提。本研究从核医学科常见辐射源特点出发,分析不同屏蔽材料(如铅、重晶石混凝土、高密度聚合物等)的物理性能和适用场景,探讨基于衰减规律、结构布局与施工可行性的防护设计思路。通过理论计算与工程参数比较,本研究总结了核医学科防辐射工程在材料应用、结构组合和设计优化方面的规律性结论,并提出未来在环保材料研发、模块化结构与智能评估系统方面的发展方向,以为医院核医学科辐射防护工程提供参考。

**[关键词]**核医学科; 辐射防护; 屏蔽材料; 结构设计; 衰减规律

DOI: 10.33142/ect.v4i1.18834

中图分类号: TL344

文献标识码: A

### Research on the Selection and Structural Design of Shielding Materials for Radiation Protection Engineering in Nuclear Medicine

WANG Hao

The Second Hospital of Hebei Medical University, Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

**Abstract:** The application of nuclear medicine in modern hospital systems is becoming increasingly widespread. With the development of radioactive nuclide diagnosis and treatment technology, the radiation types are diverse and the energy differences are significant, which brings higher difficulties to the design of protective engineering. How to select suitable shielding materials based on different radiation characteristics and optimize structural design while meeting relevant national standards is an important prerequisite for ensuring the radiation safety of medical staff and patients. Starting from the characteristics of common radiation sources in nuclear medicine, this study analyzes the physical properties and applicable scenarios of different shielding materials (such as lead, barite concrete, high-density polymers, etc.), and explores protection design ideas based on attenuation regularity, structural layout, and construction feasibility. Through theoretical calculations and engineering parameter comparisons, this study summarizes the regular conclusions of radiation protection engineering in nuclear medicine in terms of material application, structural combination, and design optimization. It also proposes future development directions in the research and development of environmentally friendly materials, modular structural design, and intelligent evaluation systems, in order to provide reference for radiation protection engineering in hospital nuclear medicine disciplines.

**Keywords:** nuclear medicine discipline; radiation protection; shielding materials; structural design; attenuation regularity

#### 引言

核医学科工作过程中使用的核素包含 $\gamma$ 射线、X射线以及 $\beta$ 射线等多种类型,其具有穿透能力强、不可感知、作用尺度小等特点,因此若缺乏科学的防护设计,极易造成职业人员和患者的慢性辐射损伤。防辐射工程不仅需要满足国家《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》等法规要求,还需结合实际使用场景、核素活度、设备布局及建筑结构条件进行综合设计。屏蔽材料的选型是防护设计的核心环节,不同材料的线性衰减系数、密度、可加工性、老化性等均会影响防护效果。随着核医学设备的不断更新,以及医院建筑对于施工便捷性、结构承载能力与环保性的多重要求,如何在复杂条件下实现科学合理的屏蔽材料组合与结构优化显得尤为重要。本研究从辐射特性分析入手,系统探讨屏蔽材料选型与结构设计策略,为核医学

科防护工程提供理论支撑与实践指导。

#### 1 核医学科辐射类型及其屏蔽需求分析

##### 1.1 常见辐射源的能量特点与危害规律

核医学科常用的核素包括 $^{99m}\text{Tc}$ 、 $^{131}\text{I}$ 、 $^{18}\text{F}$ 以及PET-CT工作中使用的正电子发射核素。不同核素的能量范围从140 keV到511 keV不等,其辐射穿透能力差异显著。 $\gamma$ 射线具有高穿透性,需要通过高密度高原子序材料进行防护; $\beta$ 射线穿透性弱但容易引发次级辐射,需要采用低原子序材料与吸收层组合防护。因此,屏蔽材料需要根据核素的能量谱进行选择,并结合实验室使用频率和空间布局进行定量设计。

##### 1.2 辐射剂量评估对屏蔽厚度设计的影响

辐射屏蔽设计的基础是剂量评估。核医学科常采用年工作量估算、瞬时强度测量及距离衰减规律等方法计算屏

蔽需求。在已知核素活度与工作时间后,可通过指数衰减公式  $I=I_0e^{(-\mu x)}$  计算屏蔽厚度,其中  $\mu$  为线性衰减系数,  $x$  为材料厚度。屏蔽材料需达到剂量限值要求,使场所外剂量低于  $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。屏蔽厚度计算依赖于能量与材料系数,而材料的物理性能决定其在工程中的适配性。

### 1.3 核医学科空间功能分区对防护结构的要求

核医学科布局通常包括放射性药物配制室、注射准备区、候诊区、扫描室、废物储存区等。不同区域的辐射强度差异较大,如 PET-CT 扫描室辐射强度较高,而候诊区主要为散射辐射。功能分区决定材料选型与结构组合方式,应坚持“源强越高、防护越强;人员停留越长、防护越严格”的原则。

## 2 常用屏蔽材料性能比较与适用性分析

### 2.1 铅及其复合材料的屏蔽优势

铅因其高密度、高原子序以及良好的加工性能,是屏蔽  $\gamma$  射线及 X 射线的传统材料。其线性衰减系数在  $140\text{keV}$  辐射能量下约为  $1.4\text{cm}^{-1}$ ,具有优异的衰减能力。同等防护水平下,铅材料厚度相对较薄,适用于门体、观察窗框架及局部高能辐射区域。近年来出现的铅复合材料如铅橡胶、铅塑板等,进一步改善了柔韧性与耐久性,使施工更便捷。

### 2.2 重晶石混凝土在大面积屏蔽中的应用

重晶石混凝土密度较高 ( $2.8\sim 3.5\text{g/cm}^3$ ),其衰减能力优于普通混凝土,可广泛应用于墙体、地面及设备间隔墙。重晶石混凝土具有成本低、施工稳定性强、整体性好等优势,是核医学科结构性防护的主要材料。在等效衰减效果下,重晶石混凝土厚度通常需达到  $10\sim 15\text{cm}$ ,可满足 PET-CT 等设备使用需求。

### 2.3 新型高密度聚合物材料的潜在价值

近年来,高密度聚合物加入金属粉末形成的复合材料逐渐用于防辐射工程,具有密度高、耐腐蚀、施工便捷、环保性好等突出优势。其可通过模块化拼接减少施工周期,特别适用于旧院区改造及设备升级项目。此外,聚合物材料可加工成曲面或复杂形状,为结构设计提供更高灵活性。

## 3 核医学科防辐射结构设计的关键原则

### 3.1 基于辐射传播特性的结构厚度设计

结构厚度设计需根据核素活度、能量分布以及使用频次进行定量计算。例如,对于  $511\text{keV}$  的正电子湮灭辐射,通常需要  $1.5\sim 3.0\text{cm}$  的铅或  $15\sim 20\text{cm}$  的重晶石混凝土方能满足防护要求。设计时需考虑一次辐射、散射辐射及泄漏辐射的叠加效应,同时对薄弱部位如墙角、穿线孔、门缝等进行补强设计,避免因结构不连续导致防护薄弱。

### 3.2 结构整体性与施工可行性的协调

防护工程结构设计并非单纯依赖材料厚度来提升安全等级,而是一个涉及多专业协同的系统过程。设计阶段需要充分评估建筑原有承重条件,确保新增防护结构不会

对主体结构产生不利影响。施工过程中,铅板铺设对工艺精度要求较高,接缝处理必须严密可靠,避免因缝隙问题削弱整体防护效果。混凝土防护层的施工质量同样关键,浇筑与振捣工序需控制到位,以保证结构致密,减少气孔与裂隙的产生。进入使用阶段后,防护结构还应具备良好的耐久性与可维护性,降低后期检修和改造的复杂程度。对于注重环境品质的现代医院建筑而言,防护设计应与空间布局、装饰风格相协调,在满足安全要求的基础上营造舒适、有序的医疗环境,使功能需求与使用体验达到平衡。

### 3.3 通风、照明与维护便利性

核医学科在运行过程中对空气流向和换气效率有着严格要求,而防辐射结构通常强调整体密封性,两者在设计上容易形成矛盾。为兼顾通风与安全,可在通风孔口采用铅衬或迷宫式结构,通过延长辐射传播路径和增加屏蔽层厚度,降低辐射外泄风险。在保证空气顺畅流动的前提下,实现有效的辐射防护。房间内的观察窗、管线穿墙部位以及各类设备接口同样属于潜在薄弱环节,需要进行针对性的屏蔽处理,确保防护连续性和完整性。工程设计中还关注运行期维护需求,优先选用耐久性好、性能稳定的材料,减少老化带来的隐患。可拆卸结构和模块化施工方式便于后期检修和局部改造,有助于缩短维护时间,降低施工对临床工作的影响,从整体上提升核医学科防辐射工程的实用性与可持续性。

## 4 屏蔽材料组合设计与工程优化策略

### 4.1 多材料组合以提升结构性能

单一屏蔽材料在面对不同能量等级辐射时往往存在防护局限,难以兼顾防护效果、结构安全与施工经济性。在防辐射结构设计中,采用多材料叠加方式能够更有针对性地满足实际需求。针对高能  $\gamma$  辐射区域,将铅板与重晶石混凝土组合使用,可在保证衰减能力的基础上增强结构稳定性,适用于重点防护部位。中低能量辐射区域则可选用聚合物材料与重晶石板进行搭配,在满足防护要求的前提下有效减轻整体重量,降低建筑荷载压力。不同材料在结构中分层布置,使各自优势得到充分发挥,避免性能冗余。合理的材料组合还能减少高成本材料的使用比例,简化施工工序,提高工程实施效率。多材料协同设计有助于实现防护性能、经济性与施工可行性的平衡,提升防辐射工程的整体质量与适用性。

### 4.2 模块化屏蔽结构的应用趋势

模块化结构已成为现代防辐射工程的重要发展方向,能够更好地适应医疗机构快速建设和灵活调整的实际需求。通过采用预制屏蔽板材进行现场安装,可显著缩短施工周期,减少对医院正常诊疗秩序的影响,特别适合既有建筑改造或新型核医学设备引入场景。聚合物屏蔽模块具有重量相对较轻、安装方式灵活的特点,其可拆卸设计便于后期调整和重复利用,在设备更新频率较高的核医学科

中可有效降低建筑破拆和二次施工成本。模块化构件在工厂预制阶段即可完成质量控制,通过标准化参数对材料密度、厚度及衰减性能进行统一管理,有助于保证屏蔽效果的均匀性和稳定性。模块之间的组合方式也便于根据空间条件进行优化布局,使防护工程在满足安全要求的同时兼顾施工效率和使用灵活性,从整体上提升工程质量与管理水平。

#### 4.3 以安全为核心的验收与监测机制

防辐射工程建成投入使用后,需通过系统的辐射剂量测定对防护效果进行验证。在实际检测中,应在墙体外及相邻功能区域设置多个测点,测量环境剂量率,综合评估屏蔽结构的防护能力,确保监测结果符合国家相关限值要求。检测数据不仅用于工程验收,也为后续安全管理提供基础依据。工程长期运行过程中,防护材料可能因环境因素和结构应力出现老化现象,如混凝土局部开裂、铅板位移或下沉等,这些问题若未及时处理,可能削弱屏蔽效果。定期开展结构检查和剂量复测,有助于及早发现隐患并进行修补或加固。引入数字化监测系统,可对辐射水平进行连续记录和动态评估,提高风险预警能力,使核医学科辐射安全管理更加科学、主动和高效。

### 5 核医学科防辐射工程设计的发展方向

#### 5.1 环保型防护材料的研发

传统铅材料在辐射防护领域应用广泛,但其环境污染风险和回收处理难度逐渐成为制约因素,对生态安全和可持续发展提出挑战。在这一背景下,研发无铅高密度防护材料成为重要发展方向。钨基陶瓷材料因密度高、屏蔽性能优良,在相同防护效果下可减少材料厚度,有利于结构轻量化和空间优化。高密度硫酸钡复合材料兼具良好的辐射衰减能力和稳定的力学性能,在施工和使用过程中更加安全环保。此类新材料在耐久性、抗老化性和加工灵活性方面表现突出,适合多样化防护场景。随着材料制备工艺不断成熟,无铅高密度材料在成本控制和工程适配性方面的优势将进一步显现,有望逐步替代传统铅材料,成为新一代辐射防护工程的重要选择,为医疗防护和环境友好型建设提供有力支撑。

#### 5.2 基于智能算法的设计辅助系统

随着人工智能与大数据技术不断成熟,辐射防护工程的设计方式正逐步由经验导向转向数据与算法驱动。通过构建辐射传播模型,算法可对不同空间结构、材料组合和厚度参数进行快速计算与对比,自动生成更优的屏蔽设计方案,使设计过程更加高效、精准。模型在不断学习历史工程数据和运行反馈后,能够持续优化预测能力,减少人工反复试算带来的时间成本。基于此类技术基础,未来可建设统一的医院辐射防护数字平台,将设计、评估与运行

管理纳入同一系统,实现防护效果的智能评估与状态感知。平台可对辐射水平变化进行持续监测,为结构调整和运维决策提供数据支持。数字化与智能化手段的引入,将推动辐射防护从静态设计向动态管理转变,为医疗机构安全运行提供更可靠的技术保障。

#### 5.3 跨学科协作推进工程标准化

防辐射工程是一项高度综合性的系统工程,涉及医学物理评估、建筑结构设计、材料性能选择以及防护法规执行等多个专业领域。单一学科难以全面覆盖工程需求,建立稳定、高效的跨领域合作机制,有助于在设计阶段实现信息互通与方案协同。医学物理人员提供剂量评估与防护目标,建筑与结构工程师据此优化空间布局与承重方案,材料专家结合性能与施工条件提出可行选型,管理与法规人员保障方案符合现行规范。多方协作可减少重复设计与沟通偏差,推动工程流程标准化、技术路径规范化。协同机制还利于经验沉淀与成果复用,提升项目实施效率与质量稳定性。通过跨学科团队的持续协作,医疗机构辐射防护工程的安全性、可靠性与可持续性将得到显著提升,为高水平辐射安全建设奠定坚实基础。

### 6 结论

核医学科防辐射工程中的屏蔽材料选型与结构设计涉及多种因素的综合权衡,需要充分结合放射性核素的能量特性、临床诊疗需求、建筑空间条件以及施工与维护的可行性进行系统规划。不同屏蔽材料在实际应用中各具特点,铅材料密度高、屏蔽效果显著,适合用于局部重点防护区域;重晶石混凝土兼具结构承重与辐射防护功能,适用于大面积墙体和地面;新型高密度聚合物材料在减轻结构荷载和改善施工灵活性方面展现出优势。通过合理组合多种材料并进行科学的结构设计,可在满足防护要求的前提下提升整体工程效率。模块化结构设计有助于施工标准化和后期调整,智能化设计理念则为防护效果评估和运行管理提供支持。屏蔽工程向高效、安全与环保方向发展,对提升核医学科整体安全水平具有重要意义,也为相关工程建设提供了有价值的理论参考。

#### [参考文献]

- [1]李傲雪,孙红玉,刘元军,等.X射线防护材料在医用服装、建筑、工业领域的最新研究现状[J].印染助剂,2025,42(10):11-19.
  - [2]华德昊,刘元军,赵晓明.无铅医用射线防护服材料的最新研究进展[J].纺织科学与工程学报,2025,42(5):98-106.
  - [3]周碧波,孙红玉,刘元军,等.防X射线辐射玻璃材料最新研究进展[J].印染助剂,2025,42(3):7-16.
- 作者简介:王浩(1986.4—),男,汉族,毕业学校:河北工业职业技术学院,现工作单位:河北医科大学第二医院。