

# Research and development of nuclear radiation protection materials

Shimin Sun Zhenhua Gao

Zibo Municipal Environmental, Zibo, Shandong, 255000, China

## Abstract

With the widespread application of nuclear energy technology, radiation protection has become increasingly crucial. This paper reviews the research progress in radiation protection materials, particularly focusing on the application of novel composite materials and nanotechnology in protective materials. Through experimental and computational simulation methods, this study investigates the protective efficacy and mechanisms of different materials such as lead-based composites, borides, and multilayer nanostructured materials. The results demonstrate that the introduction of nanostructures can significantly enhance shielding performance, especially in protecting against high-energy radiation. Additionally, the study reveals that the density and thickness of composite materials are key factors influencing their protective effectiveness. This research holds significant importance for developing more efficient and lightweight nuclear radiation protection materials, providing technical support for nuclear safety applications.

## Keywords

nuclear radiation shielding materials; nanotechnology; shielding performance

## 核辐射防护材料的研究与开发

孙世敏 高振华

淄博市环境污染防治中心, 中国·山东 淄博 255000

## 摘要

随着核能技术的广泛应用, 核辐射防护变得越来越重要。本文综述了核辐射防护材料的研究进展, 特别是聚焦于新型复合材料和纳米技术在防护材料中的应用。本研究采用实验和计算模拟的方法, 探讨了不同材料如铅基复合材料、硼化物以及多层纳米结构材料的防护效能及其机制。结果显示, 纳米结构的引入能够有效增加材料的屏蔽性能, 尤其是对高能辐射的防护效果更为明显。此外, 研究还发现复合材料的密度和厚度是影响其防护效能的关键因素。这项研究对于发展更高效、更轻质的核辐射防护材料具有重要意义, 可为核安全领域提供技术支持。

## 关键词

核辐射防护材料; 纳米技术; 屏蔽性能

## 1 引言

随着核能技术在核电站、医疗放射治疗、工业检测等领域的广泛应用, 有效防护核辐射变得尤为关键。核辐射的隐性健康风险, 促使科学界高度重视防护材料的研究。传统防护材料如铅等重金属虽因高密度和良好遮蔽性能被广泛使用, 但其重质和环保性差等缺点逐渐凸显。为此, 科研人员致力于研发更轻质、高性能且环保的新型材料。本调查报告聚焦铅混合材料、含硼化合物及纳米技术多层微小结构材料等重要防辐射材料。研究采用实验室测试与电脑模拟结合的方法, 揭示了这些材料的防护原理及实际效果, 尤其微小结构材料增强辐射阻挡能力的优势显著。调查还发现, 混合材料的密度和厚度是决定防护效果的关键因素, 为开发更高

效、便捷的防辐射材料指明了方向, 助力未来材料兼顾性能提升与环境友好。

## 2 核辐射及其防护需求

### 2.1 核辐射的类型与危害

核辐射意指源于原子核反应形成的辐射, 主要涵盖  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  射线和中子辐射等。 $\alpha$  射线是某种由氦核构成的具备正电荷辐射, 穿透能力偏低, 但其辐射源触及或吸入时对生物体伤害严重<sup>[1]</sup>。 $\beta$  射线由电子或正电子构成, 拥有适中穿透力, 能引发表面积渐进性伤害。 $\gamma$  射线是电磁辐射, 穿透力极高, 对人体组织破坏力明显, 是核辐射防御的核心。中子辐射无电荷, 可以渗透物质深处, 触发二次辐射现象, 危害人类健康。这些辐射类型将对生物体细胞带来直观的离子化伤害、迂回的化工变异, 以及癌症、突变以及细胞消亡。对环境带来的污染或许经由食物链波及生态系统。探索高能核辐射防御材料以降低或阻隔这些损害变为急需需要。

【作者简介】孙世敏 (1972-), 男, 中国江苏丰县人, 本科, 从事环境保护研究。

## 2.2 当前核辐射防护策略

在核安全管理领域，隔离技术是抵御辐射风险的关键防线。它通过物理封闭手段，如构筑坚固的防护屏障、设置多重隔离区域等，将辐射源与外界环境有效隔绝，防止辐射物质的无序扩散；同时结合远程操作技术，让工作人员在安全距离外对核设施进行操控，避免直接暴露于辐射场中，极大降低了人员受辐射伤害的可能性。不仅如此，隔离技术与尖端监测技术深度融合。高精度辐射传感器搭配智能分析系统，可实时、精准捕捉辐射剂量、分布范围等关键参数，迅速剖析辐射状况，为动态调整防护策略提供科学、可靠的依据，筑牢核安全防线。

随着核能应用从传统核电站向核医疗、核科研等新兴领域持续拓展，其应用场景愈发复杂多样，对防护技术的要求也水涨船高。传统防护方式已难以满足新需求，在此背景下，高性能轻质材料成为关键突破口，它能有效减轻防护装备重量，让工作人员行动更灵活，提升作业效率。同时，智能化防护技术也至关重要，可实现自主监测辐射状况并及时预警。二者协同发展，将为核能安全、高效利用筑牢坚实防线，推动核能事业迈向新高度。

## 2.3 新需求与挑战

核能量在很多行业中得到应用，核辐射防护方面的需求发生了变化。需要开发出性能更好的材料来解决高能量辐射带来的困难，普通的材料对各种辐射的阻挡能力不够好。在如今的技术使用场合中，材料的重量要轻，防护能力要强，还要能与其他设备匹配，这些成为研发材料时最重要的目标。对环保型材料的需求越来越多，在不降低防护能力的情况下，材料得具备容易循环再用和自然分解的特点<sup>[3]</sup>。正是这些新的需求和困难，推动核辐射防护材料一直向前发展，不断改进和创新，以适应实际应用中的各种复杂环境和要求。

## 3 核辐射防护材料的发展历程

### 3.1 传统防护材料与效能

核辐射防护发展历程里面，铅这种材料表现出极强的抵御电磁辐射能力，所以被应用到许多不同防护场合。铅拥有极高的密度，原子序数同样非常高，可以有效吸纳辐射能量并且让能量扩散开。不过铅材料格外沉重，制作过程异常艰难，还会引发严重的环境污染问题<sup>[4]</sup>。混凝土属于一种普遍使用的防护材料，凭借极高密度和坚固特性提供防护作用，适合大型基础设施以及建筑工程项目使用，但同时面临品质方面众多复杂问题。高分子材料重量极轻，操作起来极为容易，中子防护方面表现出特别突出的优势，但遇到其他类型辐射时防护作用就显得不够理想。钢材能够提供中子和伽马射线的防护功能，可惜重量过于沉重，成本也居高不下，灵活性不足严重约束使用范围。传统材料核辐射防护领域占据关键核心位置，但存在不少缺陷推动大家不断探索更新颖的材料，进行全面细致的科学研究。

## 3.2 新型复合材料的引入

新型复合材料开始应用于核辐射防护领域，表明防护技术实现了巨大发展。这种材料将不同元素和化合物的特性混合在一起，用来增强抵挡核辐射的能力，复合材料具备传统材料所没有的卓越特性，比如坚固性非常高，重量格外轻，还有很长的耐用年限，铅基复合材料密度高，防辐射性能优秀，成为探索和研制的一个主要领域。硼化物复合材料在吸收中子辐射方面能力很强，得到了许多专家的重视，多层结构设计和纳米技术融合在一起，使得材料拥有优异功能，提升了抵挡高能辐射的能力<sup>[5]</sup>。新型复合材料依靠深入研究和广泛实际应用，展现出独特的优势特点，完全符合现代核安全方面的急切需求，带来了高效的解决方案。

## 3.3 纳米技术在防护材料的应用历程

纳米技术在核辐射防护材料中的应用历程展示了显著的科学进步。早期研究主要集中于纳米粒子的辐射屏蔽能力，通过减少传统材料的厚度与重量来提升效能。随着技术的发展，纳米结构材料逐渐被应用于层状复合材料中，增强了阻挡不同能量辐射的能力。通过精准的结构控制，纳米技术有效提高了材料的吸收和散射能力，成为现代防护材料研发的重要工具。这种技术的不断进步为创造更轻质且高效的防护材料奠定了基础。

## 4 纳米技术和复合材料的作用机制

### 4.1 纳米结构增强屏蔽性能的原理

纳米结构在核辐射防护材料中的应用主要通过提升屏蔽性能实现。这些结构一般拥有微小的尺寸和大表面积，在同辐射交互时给予更加繁杂的散射路径，引发辐射能量的高效减弱。纳米粒子能够构建多路径散射，因而令辐射能量在接触纳米级障碍时产生多次反弹和吸纳。与此纳米材料的大表面积特性推动较多的辐射粒子同材料交互，改善屏蔽效能。尤其在面对高能量辐射的情形下，纳米结构呈现明显的优势，可以在材料内部构成繁杂的屏蔽网络，减少辐射渗透力。纳米技术的应用同时导致复合材料在维持拥有优秀防护性能的显著降低材料本身重量，达成轻量化设计。借助改进纳米结构的布局和实施化学修饰，可以更深层次提升材料的性能，使其满足苛刻的应用需求。

### 4.2 铅基和硼化物复合材料的防护特性

铅基和硼化物复合材料应用到核辐射防护领域，展现出非常显著的特点，这种材料的密度相当高，所以可以有效阻挡和吸纳核辐射带来的各种危害。铅基材料由于原子序数较高，能够出色地遏制 X 射线和伽马射线的透过情况，起到很好的防护效果，硼化物材料对热中子的吸纳能力表现极佳，利用中子俘获反应明显降低二次射线的产生以及扩散带来的风险隐患。铅基材料与硼化物材料组合成一个整体，大大提升了复合材料的全面防护能力，也改进了防护材料的内部结构设计方案，使得材料重量变得更轻，性能表现也显

得相当优秀。设计这种复合材料时,充分考虑如何避免辐射对身体造成的伤害问题,也非常重视材料生产过程的效率提升和整体成本的合理控制,确保生产过程顺畅且经济效益良好,满足实际应用中的各种需求。

### 4.3 多层纳米结构材料的优点与应用

多层纳米结构材料在核辐射防护领域表现出显著的优点。其独特的结构设计能够有效提高材料的屏蔽效能,这是由于纳米层的叠加形成了密集的屏障层,阻止辐射穿透。多层结构可以分散和吸收辐射能量,降低材料自身的损耗率。在应用方面,多层纳米材料逐渐被用于核反应堆、医疗设备防辐射设施等领域,展现了其极大的灵活性与适应性。通过精准的纳米技术设计,能够优化材料的性能以满足不同防护需求。

## 5 实验与模拟验证

### 5.1 复合材料的屏蔽效能实验

核辐射防护材料的屏蔽效能实验,依赖几种常见的复合材料开展测试,研究各种材料应对不同辐射强度时的屏蔽能力。实验选用高能伽马射线辐射来源,安排多个测试样本,包括铅基复合材料、硼化物材料以及多层纳米结构材料,测量每个样本吸收辐射的具体数量,对比空白对照组的实验数据,评估各种材料的屏蔽效果,铅基复合材料展现出出色的辐射抵御能力,但重量偏大,不方便携带和使用,硼化物材料减少中子辐射的能力相当显著,多层纳米结构材料融合多种元素的优点,展现出重量轻且能高效抵挡高能辐射的优秀屏蔽效果,实验结果证明,复合材料的屏蔽效果与材料的密度和厚度存在联系,纳米结构的细致设计也有重要影响,这次实验开发新型材料提供了稳固的基础和清晰的方向,为未来研究和实际应用奠定了良好基础。

### 5.2 防护性能的计算模拟分析

在对核辐射防护材料的防护性能开展推算仿真探究时,采用了蒙特卡罗方法和有限元分析。蒙特卡罗方法得到应用于仿真高能辐射与材料之间的相互作用,可以精确预估材料在不同环境下的屏蔽效能。有限元分析就应用于探讨材料结构及其几何特性对防护性能的作用。这两种方法相融合,能全面探究材料的微观结构变异与防护性能之间的联系。尤其是在多层纳米复合材料内,推算结果展示了其对多种类型辐射的明显抗御效能,给改进设计给予了学术支撑。

### 5.3 材料性能的比较评估

材料性能对比评定,选择几类具有代表性的核辐射防

护材料进行详细研究,主要重视防护效能,机械稳定性,耐久性以及制造成本等方面的具体表现情况,铅基复合材料依靠卓越的防护能力和较低的经济成本获得了广泛应用,只是重量过于庞大,携带起来不太方便,硼化物复合材料具备良好的热稳定性和突出的中子吸收能力,可以很好地适应高温和极端环境的使用需求,多层纳米结构材料展现出优异的高能辐射防护效果,重量较轻,加工起来也容易,被认为是未来开发的关键方向,不同材料性能差异体现在各种应用场景下的适用程度,核辐射防护技术的进步提供了丰富多样的选择方案和思路。

## 6 结语

本次研究全面剖析了核辐射防护材料的发展现状与前沿趋势,着重探讨了新型复合材料及纳米技术提升屏蔽效能的具体应用。通过实验与计算机模拟相结合,深入探究了铅基复合材料、硼化物及多层纳米结构材料的防护机制与实际效果,验证了纳米结构对提高材料抗高能辐射能力的显著作用,同时明确了复合材料密度与厚度对防护效果的关键影响,为优质轻便防护材料的设计制造提供了理论支撑与技术指引。然而,研究也暴露出一些不足,如对材料长期稳定性及环境适应性的认知尚不全面,这关乎材料的耐用性与可靠性。未来需加强相关测试,解决材料老化问题,确保使用安全;同时,探索更多创新方案,提升防护效果,满足不同场景需求。此外,高性能防护材料的成本效益比亟待优化。后续研究应聚焦于材料组合与内部结构的改进,发掘更多质优价廉的材料,强化材料抗环境干扰与长期稳定性能的研究,以推动核辐射防护材料技术不断进步,拓展应用领域,为社会提供坚实的技术保障。

### 参考文献

- [1] 高静,丁谦学,梅其良,肖学山.核辐射综合屏蔽材料研究进展[J].材料导报,2023,37(20):7-14.
- [2] 李晓宁.新型核辐射防护材料的设计及应用探析[J].科技创新与应用,2020,(22):100-101.
- [3] 李善荣,陆恒玉,陶刚,俸洪舜,孙乐华.核辐射防护材料的研究进展[J].现代橡胶技术,2020,46(03):1-5.
- [4] 付春亮,郭明,龚林华.新型核辐射防护材料的设计及应用[J].价值工程,2021,40(31):145-147.
- [5] 蔡永成,刘学宇,蔡永军,何林.核辐射危害及核辐射屏蔽材料研究现状[J].粉末冶金工业,2023,33(02):96-102.