

---

# 北京化工大学刘勇团队—从实验室到应用：伽马射线屏蔽纳米材料现状与无铅可穿戴设备前景 MDPI Nanomaterials

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/40716.html>

*本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！*

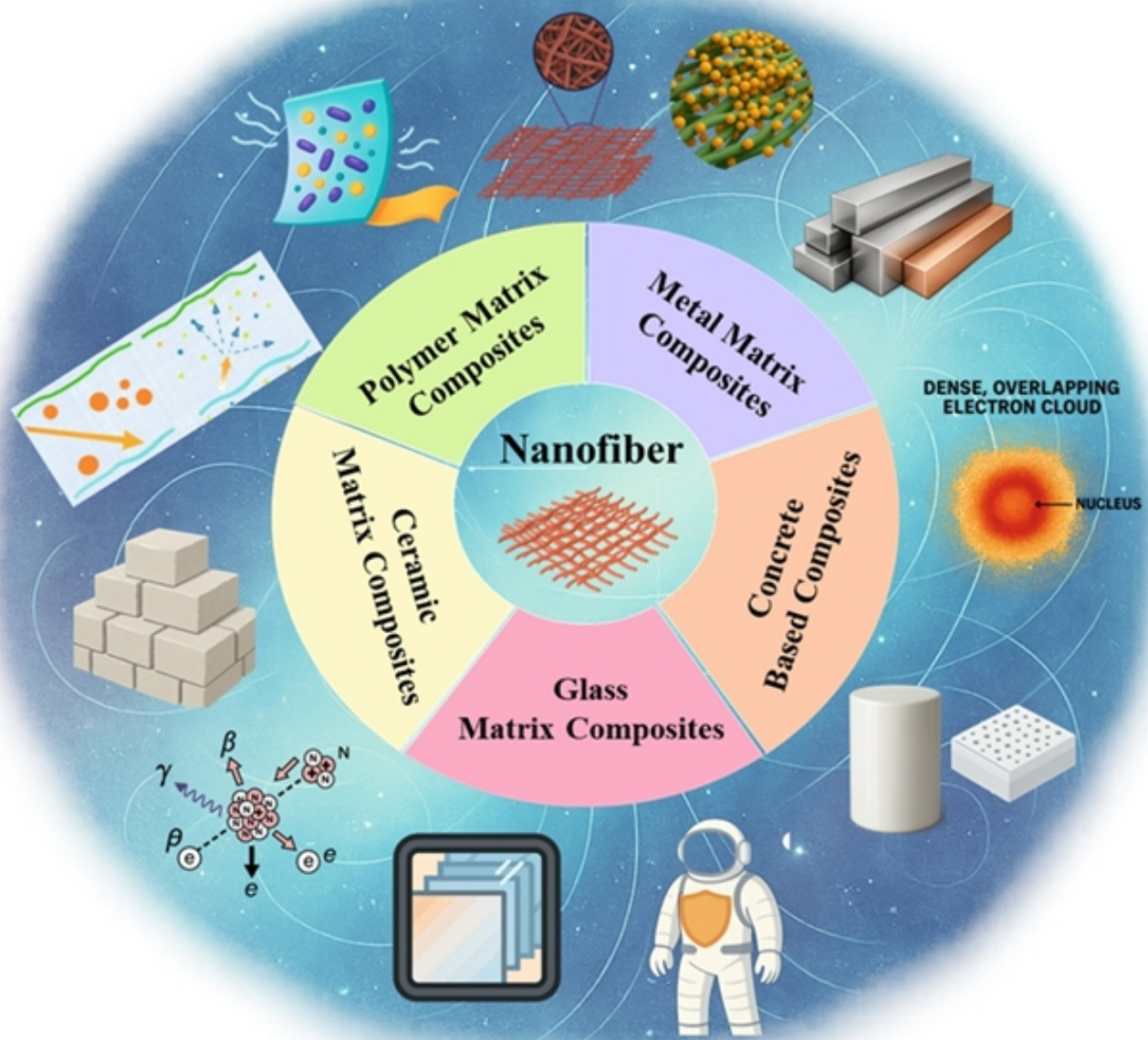
北京化工大学刘勇团队—从实验室到应用：伽马射线屏蔽纳米材料现状与无铅可穿戴设备前景 MDPI Nanomaterials。论文标题：From Bench to Use: The Status of Gamma-Shielding Nanomaterials and the Prospects for Lead-Free Wearables

论文链接：<https://www.mdpi.com/2079-4991/15/23/1799>

期刊名：Nanomaterials

期刊主页：<https://www.mdpi.com/journal/nanomaterials>

随着深空探测和载人航天的快速发展，如何在复杂宇宙射线场中实现高效、轻质、低二次辐射的射线防护，已成为材料领域的关键挑战。现有研究往往难以同时兼顾衰减效率、面密度/厚度、柔韧性以及二次射线抑制。针对上述难题，北京化工大学刘勇团队联合吉林大学王策团队、清华大学胡平团队在Nanomaterials期刊发表综述，系统总结了射线屏蔽纳米材料的研究进展，重点面向深空及混合辐射环境，提出了多层/梯度结构、微纳填料协同、纤维网络等多尺度结构设计策略，用于抑制二次射线，并勾勒出面向柔性、可穿戴、无铅屏蔽体的成分-结构-形貌耦合设计路线。该综述还系统梳理了蒙特卡罗模拟工具与实验的协同方法，为下一代无铅射线屏蔽可穿戴材料提供了设计规则和规模化路径。



## 综述内容

全文围绕 射线屏蔽材料的设计与应用，从三个方面展开：1)

射线与物质的相互作用机制及材料选用的物理基础；2) 候选元素 (铅、铋、钨、稀土) 的屏蔽性能、工程适用性及多元素协同策略；3) 复合材料 (尤其聚合物基) 的研究进展，涵盖纳米填料效应、多层/梯度结构、纤维织物网络等结构设计对抑制二次 射线和保持柔性的作用。

第一部分， 射线与物质的相互作用机制。 射线与物质的相互作用主要有光电效应、康普顿效应、电子对效应和相干散射，其中前三者贡献最大。在低能区 (约30 – 200 keV) 光电效应占主导，高原子序数 ( $Z$ ) 材料吸收能力强；中能区 (200 – 1000 keV) 康普顿散射为主，依赖于材料的电子数密度；高能区 ( $>1.02$  MeV) 电子对效应成为主要机制，其发生概率与  $Z^2$  成正比 (图1)。因此，提高材料的原子序数和密度是射线屏蔽设计的核心思路，高 $Z$ 元素成为主要候选对象。

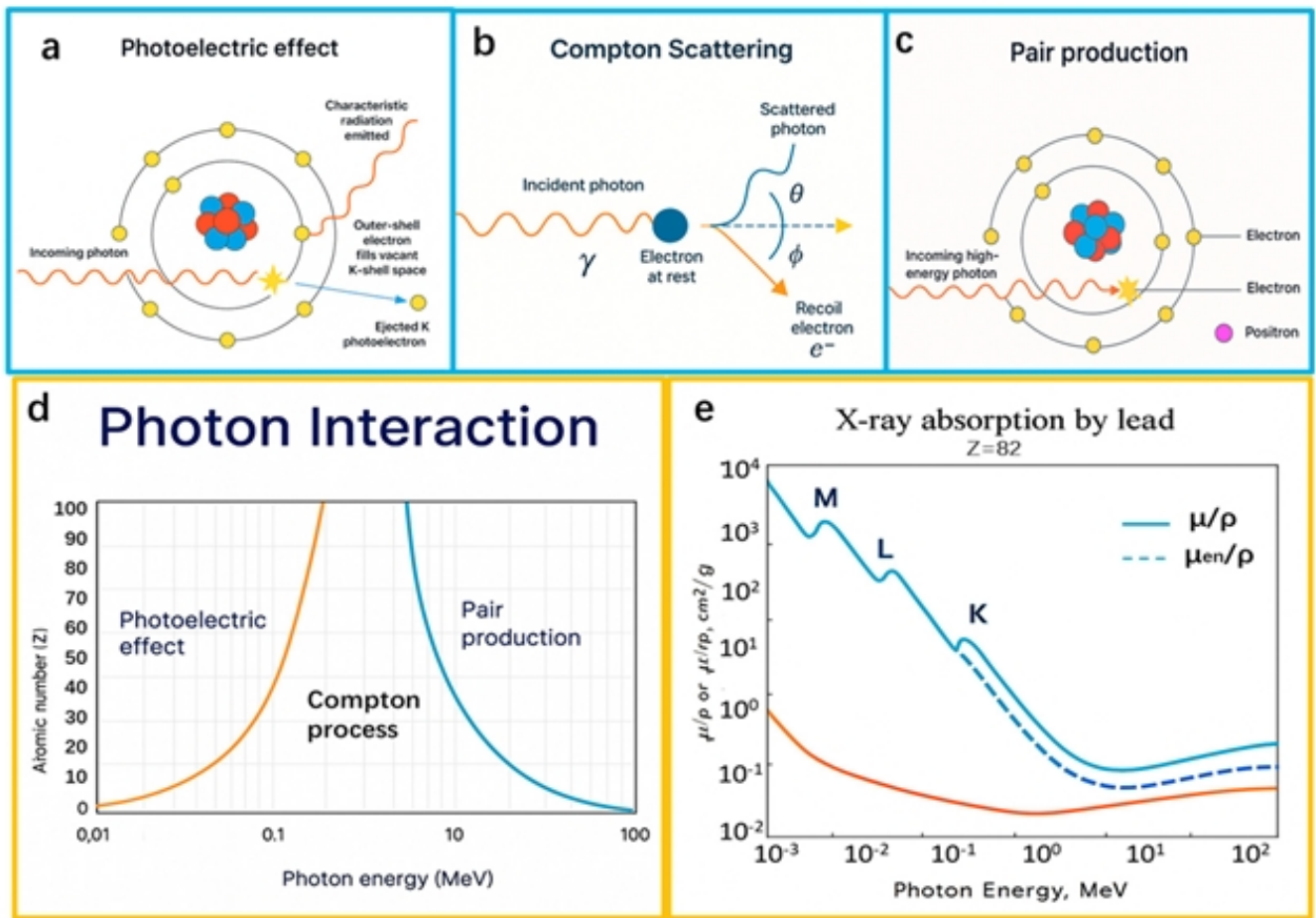


图1. (a) 光电效应；(b) 康普顿效应；(c) 电子对效应；(d) 不同能量范围内光子与物质的主要相互作用；(e) 吸收边现象。

第二部分，候选元素选择与工程考量。综述从屏蔽性能、毒性、加工性、吸收边特性以及供应链稳定性、可回收性和成本等维度，系统比较了铅、铋、钨、稀土元素。铅虽廉价、回收成熟、屏蔽性能优异，但存在明确的神经毒性且受严格环保法规限制；铋被认为是绿色重金属，其氧化物  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  在混凝土和环氧体系中与铅的屏蔽能力相当，但铋几乎全部为伴生矿，供应弹性小且价格较高；钨密度高、对高能射线屏蔽能力强，但加工困难且被列为关键矿产，供应链风险高；稀土元素(如Gd、Ce、Sm)可利用其K吸收边补偿铅、铋的弱吸收区，从而拓宽复合材料的有效屏蔽能量范围，但开采分离过程复杂且价格波动大。综述强调，实际应用中需根据具体能区要求和工程约束，选择合适的元素组合或进行多元素协同设计。

第三部分，复合材料研究进展。在介绍各类复合材料之前，综述首先点明蒙特卡罗模拟工具(如MCNPX、Geant4、XCOM等)的关键作用：多数研究中模拟得到的质量衰减系数、半值层与实验数据吻合良好，能缩短材料开发周期、降低辐射实验风险。在此基础上，聚合物基复合材料(环氧、橡胶、聚烯烃、乙烯基聚合物等)

因其轻质、易加工和可设计性强，成为重要载体。在聚合物基体中添加高Z纳米填料(如 $\text{MgO}$ 、 $\text{Bi}_2\text{O}_3$ 、 $\text{WO}_3$ )相比微米填料分散更均匀，尤其在低能区可显著提升屏蔽效率。例如，环氧树脂中加入纳米 $\text{MgO}$ 后，半值层随填料含量增加而明显降低，且纳米体系的屏蔽性能优于微米体系(图2)；橡胶基复合材料也显示出高Z纳米填料的优点，并天然适用于防护服、手套等可穿戴场景。

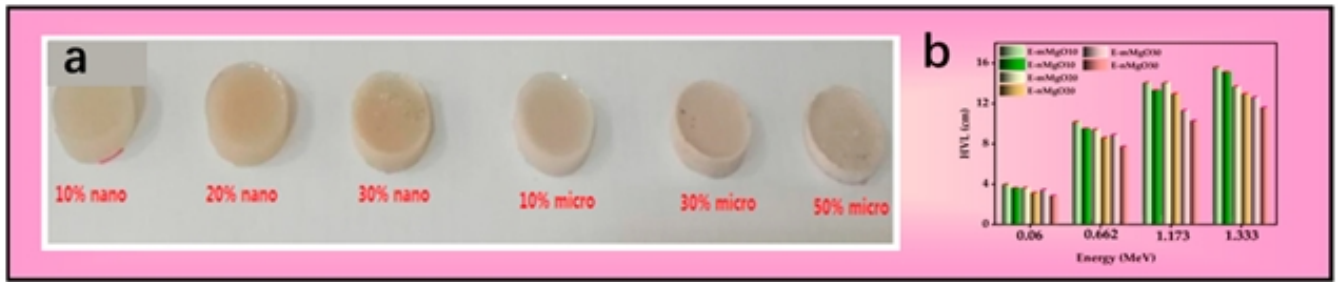


图2. (a) 环氧树脂-MgO复合材料；(b) 环氧树脂基样品的半值层 (HVL) 数值

然而，高Z材料在屏蔽过程中可能因非弹性散射或辐射俘获产生二次射线，削弱综合防护效果。为抑制二次射线，综述提出了多层/梯度结构策略：将不同吸收边的材料组合，可拓宽有效屏蔽能量范围。例如，将WO<sub>3</sub>层 (K吸收边69.5 keV) 与CeO<sub>2</sub>层 (K吸收边40.449 keV) 组合，使高能光子先经钨衰减、再被铈进一步吸收，实现吸收边互补，增强宽能区的整体衰减效率。此外，纤维织物网络是另一类重要结构设计：采用钨单丝/钨合金纤维作为纬纱、化学纤维或天然纤维作为经纱，可制备兼具抗冲击性和良好屏蔽性能的织物，既能单独使用也可作为复合材料的增强体，有效缓解传统钨材料因密度过高而导致的柔性不足问题。上述结构设计在抑制二次射线的同时，维持了材料的柔性及衰减效率。

## 研究总结及展望

本综述系统回顾了面向深空和复杂辐射环境的射线屏蔽纳米材料的研究现状，并从成分、结构、形貌三个耦合维度总结了设计策略，明确提出：单纯增加高Z填料含量已无法满足工程需求。未来的发展方向包括：(1) 多能区整体设计与二次辐射抑制，利用吸收边协同和梯度多层结构；(2) 多尺度结构 (核壳、纤维网络、多孔/蜂窝) 与多物理场耦合；(3) 柔性、可穿戴及可重构系统，引入自修复或形状记忆聚合物以及低熔点石蜡基可塑屏蔽体；(4) 可持续制造、数据驱动筛选和标准化评价体系；(5) 跨学科协作与工程示范。该综述为开发用于航空航天和医疗防护的下一代轻质、柔性、无铅射线屏蔽材料提供了系统的理论依据和设计路线图。

## Nanomaterials 期刊介绍

主编：Eugenia Valsami-Jones, University of Birmingham, UK

期刊聚焦纳米材料科学领域的研究，旨在发表纳米材料制备、表征和应用各个方面的研究。目前期刊已被Scopus、SCIE (Web of Science)、PubMed、PMC、Embase、CABIplus / SciFinder、Inspec等数据库收录。

2025 Impact Factor: 4.8

2025 CiteScore: 10.3

Time to First Decision: 12.5 Days

---

Acceptance to Publication: 2.7 Days

来源：Nanomaterials

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](http://www.iikx.com)转发