

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202603008

碳纳米管薄膜-功能纳米颗粒复合材料的屏蔽及其轻量化性能研究

王飞¹, 杨淼¹, 张伟², 王晓斌³

(1. 火箭军工程大学, 西安 710025;

2. 火箭军某部队, 鄂尔多斯 017000;

3. 火箭军某部队, 三门峡 472000)

摘要: 针对伽马外照射防护装具对屏蔽性能与轻量化设计的双重需求, 设计了一种基于碳纳米管薄膜与功能纳米颗粒协同增强的梯度复合屏蔽材料体系。依据屏蔽性能参数的高通量计算结果, 分别选取钽、三氧化二钽和钽作为功能层材料, 制备得到碳纳米管薄膜-功能层复合材料样品, 并对其辐射屏蔽性能进行了实验研究; 同时, 构建了基材-功能层复合材料屏蔽仿真模型, 将碳纳米管薄膜与常规基材进行对比, 以验证其轻量化设计优势。实验结果表明: 厚度为1.33 mm的碳纳米管薄膜-钽复合材料样品对⁶⁰Co射线的屏蔽效率达到4.13%, 表现出良好的伽马射线防护性能; 当功能层厚度固定为150 nm时, 20 μm碳纳米管薄膜-钽复合材料的屏蔽性能与100 μm常规基材(聚乙烯、聚氯乙烯、有机硅橡胶)-钽复合材料相当, 表明碳纳米管薄膜能够在降低基材厚度的同时有效提升复合材料的屏蔽效果, 反映出其在伽马外照射防护装具轻量化设计中的应用潜力。

关键词: 碳纳米管; 功能纳米颗粒; 辐射屏蔽材料

中图分类号: TL77

文献标志码: A

开放科学标识码(OSID):

文章编号: 2097-2741(2026)03-0099-10



与作者互动
听语音 聊科研

作为国家战略性前沿科技, 核技术已被广泛应用于能源开发、医疗卫生和国防安全等关键领域。然而, 核技术在带来技术红利的同时, 其伴随的辐射暴露风险亦不容忽视。例如, 急性照射(>1 Gy)可诱发人体造血系统衰竭(LD_{50/30}≈3.5 Gy), 慢性低剂量辐射(<100 mSv/a)则与甲状腺癌、白血病等恶性肿瘤发病率呈显著正相关。国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)基于“合理可行尽量低”(as low as reasonably achievable, ALARA)的原则, 规定职业人员受照的年有效剂量限值不超过20 mSv, 公众年有效剂量限值为1 mSv。因此, 采取有效措施降低人员受照剂量, 是保障从业人员及公众安全的关键。在辐射防护领域, 时间防护、

距离防护与屏蔽防护构成降低人员受照剂量的三大基本方法。在核事故应急响应、核电站设施抢修等高危作业中, 防护装具是保障人员安全与应急处置效率的核心要素。高效、轻便、具有良好环境适应性的防护装具可显著缩短人员在高危环境下的暴露时间, 降低职业辐射风险, 为核工业安全运行提供关键保障。作为防护装具的核心介质, 辐射屏蔽材料的性能表现直接决定了装具对电离辐射的防护效能。目前, 应用最广泛的仍是传统铅基防护材料。然而, 传统铅基材料因其固有的生物毒性^[1]、高密度导致的大重量以及在约88 keV处存在屏蔽盲区等缺陷, 难以满足现代个人防护装备对安全性、舒适性与宽能域防护的性能需求。因此, 开发兼具轻量化、无毒性、宽能

收稿日期: 2026-01-22

修回日期: 2026-03-25

录用日期: 2026-04-15

第一作者: 王飞(1987—), 男, 讲师, 博士, 主要从事核能科学与技术研究。

引用格式: 王飞, 杨淼, 张伟, 等. 碳纳米管薄膜-功能纳米颗粒复合材料的屏蔽及其轻量化性能研究[J]. 火箭军工程大学学报, 2026, 40(3): 99-108. WANG Fei, YANG Miao, ZHANG Wei, et al. Shielding and lightweight performance of carbon nanotube film-functional nanoparticle composite material [J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2026, 40(3): 99-108.

域屏蔽效能的新型材料成为辐射防护领域的研究重点。

防护装具的辐射屏蔽材料通常由基材（衬底）和功能材料构成，功能材料一般为高原子序数材料（高 Z 材料），衬底一般为聚氯乙烯、天然橡胶等。为了破解防护材料“宽能域、高效率、无毒性”协同难题，目前的研究主要聚焦于以下三大技术路径。1）基于高 Z 元素协同设计。Zehtabian等^[2]通过对不同的高 Z 元素进行组合，发现钨-铋-钽协同屏蔽在放射学能量范围内表现出较好的防护性能。2）采用多层结构，利用层间散射效应延长光子路径。Du^[3]等研究发现，2.24 mm厚度的 $\text{SnO}_2/\text{BaSO}_4/\text{Bi}_2\text{O}_3$ 复合薄膜屏蔽效果接近铅当量为0.5 mm的铅围裙，但重量比铅围裙轻18%，同时对100 keV的X射线屏蔽效率高达96.3%。3）功能材料纳米化改进。已有研究表明，相较于微米尺度复合材料，纳米尺度 WO_3 ^[4]、 Bi_2O_3 ^[5]和 Gd_2O_3 ^[6]复合材料在对X射线和 γ 射线屏蔽方面表现出更优性能，且随着纳米颗粒尺寸的减小，其屏蔽性能会进一步提高^[5]。以上3种技术路线通过对功能材料的选择和优化，在防护材料性能提升方面取得了一定进展，但现有研究多集中于功能颗粒的优化，而对兼具超薄、柔性与结构支撑特性的新型基材开发关注不足。碳纳米管（carbon nanotube, CNT）薄膜的突破性进展为防护材料的基材选择提供了新的思路。相较于传统的橡胶、聚氯乙烯等基材，CNT薄膜具有良好的柔性和透气性，并且已具备实现规模化生产的能力^[7]。采用CNT薄膜作为基材，还可以进一步提升材料的防护能力，Fujimori等^[8]发现CNT的质量衰减系数显著高于（超出100%）高定向热解石墨（highly oriented pyrolytic graphite, HOPG）和富勒烯（C60）。此外，CNT薄膜材料在 ^{241}Am 源下表现出比铝更高的质量衰减系数。对于 ^{137}Cs 源的 γ 射线，厚度为10 mm的定向CNT薄膜层的衰减系数为 $0.086\text{ cm}^2/\text{g}$ ，衰减率达到4.9%，优于铝、铜和铁片^[9]。在力学性能方面，CNT除了本身具有较强的力学性能外，在增强聚合物基体性能方面应用广泛。Yokozeki等^[10]研究表明，在基体中添加一定比例的CNT（质量比分别为5%和10%）后，可将复合材料的拉伸强度和刚度分别提高25%和42%。此外，CNT还具有优异的耐热性和抗氧化性^[11]，这些特性使其满足成为“理想基材”的条件。

综上所述，本文基于CNT薄膜的结构、功能一体化特性，提出以CNT薄膜为基材的复合屏蔽

材料体系。由于CNT薄膜的厚度在20 μm 左右，采用物理气相沉积（physical vapor deposition, PVD）方法，将纳米量级厚度的功能材料沉积于CNT薄膜上，制备了CNT薄膜-功能纳米颗粒复合屏蔽材料样品，并对其屏蔽效率和轻量化水平进行了研究。

1 研究方法和计算工具

1.1 屏蔽计算与材料筛选方法

材料对X射线与 γ 射线的屏蔽效率（shielding efficiency, SE）可表示为

$$\eta_{\text{SE}} = \left(1 - \frac{I}{I_0}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中： I_0 和 I 分别为初始射线强度和透射后的射线强度。

理论上， γ 射线光子在介质中的传输遵循比尔-朗伯定律，可表示为

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2)$$

式中： μ 为线性衰减系数（linear attenuation coefficient, LAC）； x 为吸收体厚度。

为便于比较不同材料的本征屏蔽能力，引入与密度无关的质量衰减系数（mass attenuation coefficient, MAC）。MAC是单位密度入射光子与物质相互作用可能性的度量，其计算表达式为

$$\mu_m = \sum_i w_i (\mu/\rho)_i \quad (3)$$

式中： w_i 和 $(\mu/\rho)_i$ 分别为多元素材料中第 i 个组成元素的分数权重和质量衰减系数。

为便于进行屏蔽厚度的工程设计与估算，引入半值层（half-value layer, HVL）与十分之一值层（tenth-value layer, TVL）。HVL表示使初始射线强度衰减到原始强度的50%时所需屏蔽材料的厚度，TVL表示使初始射线强度衰减到原始强度的10%所需屏蔽材料的厚度，计算公式分别为

$$h_{\text{HVL}} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (4)$$

$$h_{\text{TVL}} = \frac{\ln 10}{\mu} \quad (5)$$

为从众多候选材料中快速准确地筛选出适用于后续复合材料设计的优选功能材料，本文采用Phy-X/PSD^[12-13]与XCOM^[14-15]程序进行同步计算。Phy-X/PSD程序具有可视化图形界面，可同步输出 μ_m 、 h_{HVL} 、 h_{TVL} 等多个参数，适用于材料的高通量初步筛选。XCOM程序是国际公认的光子截面

数据库, 在 10 keV~100 GeV 能区内数据可靠, 常作为基准验证工具。为确保筛选所依据数据的准确性, 本文定义偏差百分比对 2 个程序的计算结果进行一致性验证, 表达式为

$$e = \left| \frac{\mu_{m, XCOM} - \mu_{m, Phy-X/PSD}}{\mu_{m, XCOM}} \right| \times 100\% \quad (6)$$

式中: $\mu_{m, XCOM}$ 和 $\mu_{m, Phy-X/PSD}$ 分别为采用 XCOM 和 Phy-X/PSD 软件包计算出的 MAC 值。

若偏差 $e < 1\%$, 则采信 Phy-X/PSD 程序计算得到的一系列屏蔽参数用于后续筛选; 若偏差显著, 则需进一步检查核对该材料成分是否正确或者射线能量是否准确, 此方法兼顾了筛选效率与数据可靠性。

1.2 蒙特卡罗模拟与轻量化分析工具

为定量评估以 CNT 薄膜为基材所带来的轻量化优势, 本文采用基于蒙特卡罗方法的 Super-MC^[16-17]程序, 建立了“基材-功能层”复合材料的屏蔽仿真模型, 通过模拟大量光子 ($>10^6$) 在材料中的输运历史 (包括光电效应、康普顿散射和电子对效应) 来统计透射率, 从而计算材料的屏蔽效率。本文在固定功能层厚度的前提下, 通过调整不同基材的厚度, 计算其达到与 CNT 薄膜-功能纳米颗粒复合材料样品同等屏蔽效率时所需的基材厚度, 进而对比分析面密度, 从而量化 CNT 薄膜对辐射防护装具轻量化的贡献。

1.3 样品制备与实验测量方法

采用 PVD 技术制备 CNT 薄膜-功能纳米颗粒复合材料样品。以高纯度 (99.999%) 的靶材 (Bi、Bi₂O₃、Ta) 作为蒸发源, 在超高真空环境下 ($\leq 1 \times 10^{-5}$ Pa), 将气态的功能材料粒子沉积于单壁 CNT 薄膜 (厚度 10~20 μm) 表面, 形成纳米级厚度的功能层。

样品的屏蔽性能实验在标准放射源装置上进行。使用 ⁶⁰Co (1.17 MeV 和 1.33 MeV) 和 ¹³⁷Cs (0.662 MeV) 作为 γ 射线源, 经铅准直器准直后形成定向辐射场。将不同厚度的复合样品置于源与探测器之间, 测量有/无样品时的 γ 射线计数率, 并由公式 (1) 计算材料的屏蔽效率。

2 辐射屏蔽功能材料的多参数协同计算与筛选

根据辐射屏蔽的基本原理, 光子与物质相互作用的光电效应、康普顿散射等截面均与原子序

数密切相关, 使得高 Z 元素在单位质量下通常具有更优的屏蔽能力^[18]。因此, 与铅类似的高 Z 元素及其化合物被广泛用于辐射屏蔽材料研究, 包括铋、钨^[19]、钽^[20]、镧系元素^[21]以及锡、钡、锌等^[22]。此外, 这些高 Z 元素的氧化物或相关化合物, 如 BaSO₄、Gd₂O₃和 Bi₂O₃等^[23-24], 也表现出良好的辐射屏蔽性能, 已被考虑作为含铅材料的替代品, 用于开发新型辐射屏蔽材料。常用的功能材料如表 1 和表 2 所示。

表 1 单质功能材料^[25]

Table 1 Elemental functional materials^[25]

单质	原子序数	密度/(g·cm ⁻³)	熔点/℃
Bi	83	9.75	271.3
W	74	19.30	3 422.0
Ta	73	16.65	3 017.0
Gd	64	7.90	1 313.0
Sn	50	7.31	231.9
Zn	30	7.14	419.5
Ba	56	3.62	727.0

表 2 化合物功能材料^[26]

Table 2 Compound functional materials^[26]

化合物	密度/(g·cm ⁻³)	熔点/℃
Bi ₂ O ₃	8.90	817.0
Bi ₂ WO ₆	8.10	825.0
WO ₃	7.16	1 473.0
La ₂ O ₃	6.50	2 410.0
Gd ₂ O ₃	7.41	2 500.0
BaO	5.72	1 923.0
BaSO ₄	4.50	1 580.0
ZnO	5.61	419.6

利用 Phy-X/PSD 和 XCOM 程序对表 1 和表 2 中所列的所有单质和化合物在 15 keV~15 MeV 能量范围内的 MAC 进行模拟计算。表 3 列出了 2 种软件计算出的部分单质功能材料在某些具体光子能量处的 MAC 值, 并且通过公式 (4) 计算了 2 个结果的偏差百分比。从表 3 可以看出, Phy-X/PSD 和 XCOM 的结果偏差均小于 0.1%, 具有高度一致性。进一步对化合物进行相同的分析, 也显示出与单质相似的结果一致性。

单质和化合物的 MAC 随光子能量的变化曲线分别如图 1 和图 2 所示。

表 3 部分单质功能材料 MAC 的 Phy-X/PSD 与 XCOM 计算结果及其偏差

Table 3 Calculated values and deviations of Phy-X/PSD and XCOM for the MAC of selected elemental functional materials

光子能量 (MeV)	Bi			Ta		
	$\mu_{m, \text{Phy-X/PSD}}$	$\mu_{m, \text{XCOM}}$	$e/\%$	$\mu_{m, \text{Phy-X/PSD}}$	$\mu_{m, \text{XCOM}}$	$e/\%$
0.015	115.960 333 4	116.000 000 0	0.034 195 3	134.021 969 5	134.000 000 0	0.016 395 1
0.040	14.952 208 7	14.950 000 0	0.014 773 9	10.254 890 9	10.250 000 0	0.047 716 1
0.060	5.232 892 7	5.233 000 0	0.002 050 4	3.568 727 3	3.569 000 0	0.007 640 8
0.080	2.521 725 6	2.522 000 0	0.010 880 3	7.587 281 4	7.587 000 0	0.003 709 0
0.100	5.737 474 1	5.737 000 0	0.008 263 9	4.300 477 8	4.300 000 0	0.011 111 6
0.150	2.082 385 4	2.082 000 0	0.018 511 0	1.530 795 3	1.531 000 0	0.013 370 3
0.400	0.239 133 0	0.239 000 0	0.055 648 5	0.188 067 9	0.188 100 0	0.017 065 4
0.600	0.127 672 6	0.127 700 0	0.021 456 5	0.107 624 3	0.107 600 0	0.022 583 6
0.800	0.090 366 5	0.090 370 0	0.003 873 0	0.079 811 2	0.079 810 0	0.001 503 6
1.000	0.072 139 9	0.072 140 0	0.000 138 6	0.065 664 8	0.065 660 0	0.007 310 4
1.500	0.052 849 9	0.052 850 0	0.000 189 2	0.049 774 8	0.049 770 0	0.009 644 4
4.000	0.042 417 6	0.042 420 0	0.005 657 7	0.040 184 2	0.040 180 0	0.010 453 0
6.000	0.044 375 1	0.044 380 0	0.011 041 0	0.041 878 3	0.041 880 0	0.004 059 2
8.000	0.047 254 0	0.047 250 0	0.008 465 6	0.044 458 7	0.044 460 0	0.002 924 0
10.000	0.050 254 1	0.050 250 0	0.008 159 2	0.047 167 3	0.047 170 0	0.005 724 0
15.000	0.057 207 6	0.057 210 0	0.004 195 1	0.053 500 1	0.053 500 0	0.000 186 9

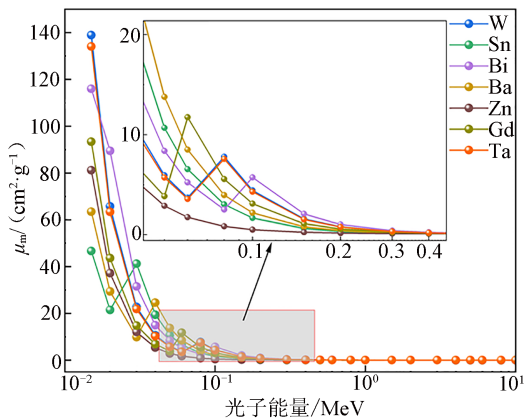


图 1 单质功能材料 MAC 随光子能量的变化

Fig. 1 Variations of MAC of elemental functional materials with photon energy

从图 1 和 2 可以看出，单质和化合物的 MAC 曲线均符合比尔-朗伯定律。在低能范围内（0.015~0.15 MeV），MAC 值随光子能量的增加而显著降低，这主要归因于光电吸收过程的主导作用；在中能范围内（0.15~1.5 MeV），MAC 值略有下降，这是由于康普顿散射成为主要的作用机制；在高中能范围内，MAC 值趋于稳定，归因于电子对效应的主导作用^[23]。另外，通过对比图 1

和 2 可以发现，部分单质和化合物的 MAC 值在某些特定能量处会出现小幅增长，这种现象主要与 K 吸收边界效应有关。

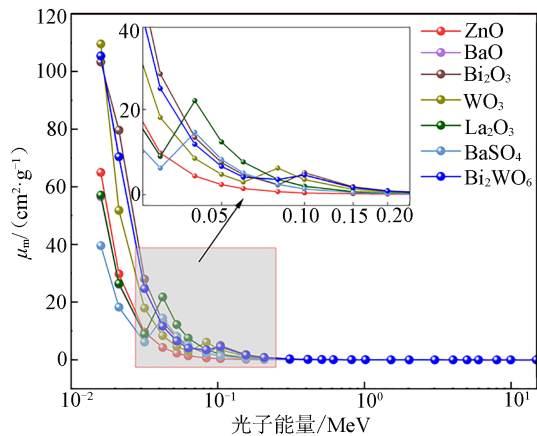


图 2 化合物功能材料 MAC 随光子能量的变化

Fig. 2 Variations of MAC of compound functional materials with photon energy

为详细对比表 1 和表 2 中不同功能材料的屏蔽能力，本文以铋、钨单质及其化合物为例，研究其 MAC 随光子能量的具体变化情况。铋、钨单质及其化合物 MAC 随光子能量的变化曲线分别如图

3和图4所示。

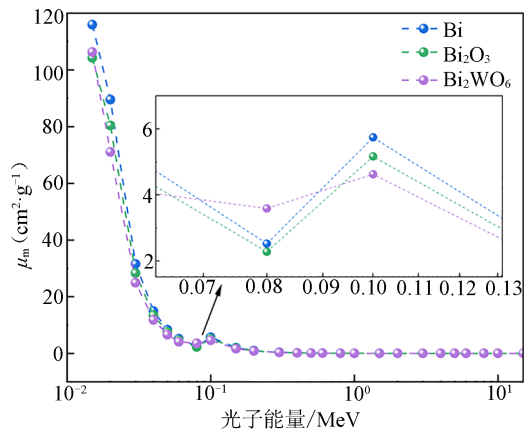


图3 Bi单质及其化合物MAC随光子能量的变化
Fig. 3 Variations of MAC of elemental Bi and its compounds with photon energy

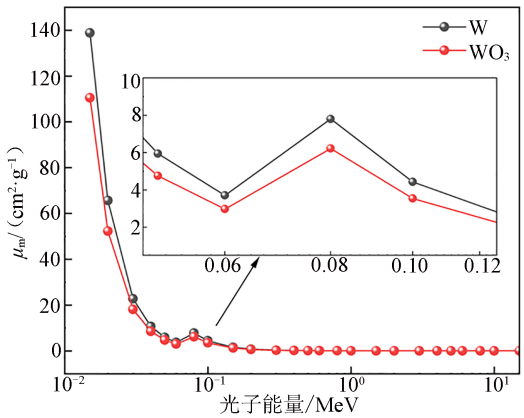


图4 W单质及其化合物MAC随光子能量的变化
Fig. 4 Variations of MAC of elemental W and its compounds with photon energy

从图3和图4可以看出,部分单质及其化合物的MAC值在相近能量范围内出现增长现象。例如,Bi及其氧化物Bi₂O₃、Bi₂WO₆的MAC值在0.08~0.10 MeV范围内略有增长,这归因于Bi的K吸收边界(90.5 keV);同样,W及其氧化物WO₃的MAC值在0.06~0.08 MeV范围内出现增长,与W的K吸收边界(69.5 keV)相关。这些现象表明,在化合物中高Z元素可能是主要的屏蔽贡献者,其K吸收边界的特性对MAC值的变化具有显著影响。

在实际屏蔽材料设计中,HVL和TVL可直接反映材料将入射光子强度衰减至原始强度一半或十分之一所需的厚度,因此能够更加直观地评价材料的工程屏蔽性能。使用Phy-X/PSD软件包,得到了各材料的HVL和TVL随光子能量的变化曲线,结果分别如图5~8所示。

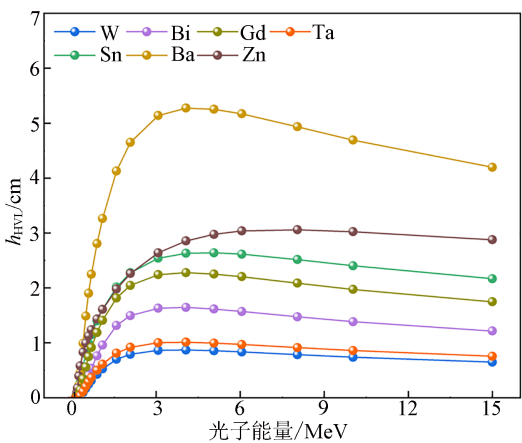


图5 单质功能材料HVL随光子能量的变化
Fig. 5 Variations of HVL of elemental functional materials with photon energy

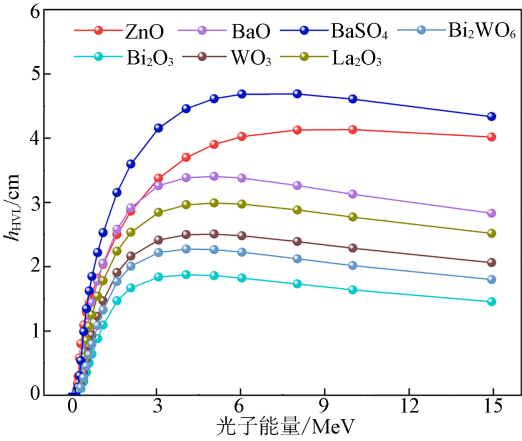


图6 化合物功能材料HVL随光子能量的变化
Fig. 6 Variations of HVL of compound functional materials with photon energy

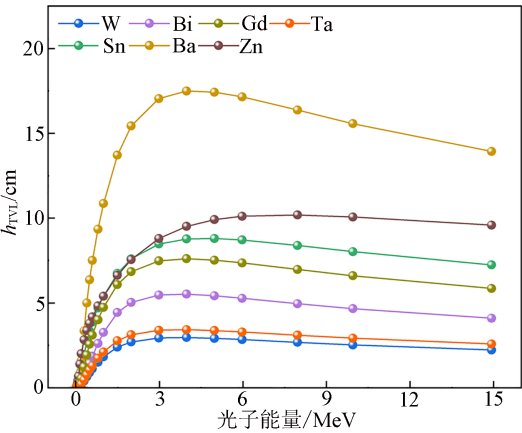


图7 单质功能材料TVL随光子能量变化
Fig. 7 Variations of TVL of elemental functional materials with photon energy

由图5~8可得,随着光子能量的增加,不同材料的HVL和TVL值均呈现出先增加后稍有下降的趋势,这是因为在较高能级上,辐射粒子与

物质间相互作用的概率降低。考虑到具有较低HVL和TVL值的功能材料在衰减伽马光子方面更为有效，对比图5~8中不同材料的HVL和TVL，发现单质材料中W、Ta和Bi均展现出优异的屏蔽性能，而化合物中Bi₂O₃、Bi₂WO₆和WO₃同样表现良好。其中，Bi的熔点（271.3℃）显著低于W（3422℃）、Ta（3017℃）以及Bi₂O₃（817℃）、Bi₂WO₆（825℃）、WO₃（1473℃），这使得Bi在复合屏蔽材料样品的制备过程中具有显著的工艺优势。此外，据美国地质调查局2023年的数据^[27]，Bi金属锭的年均价格（18.5美元/公斤）显著低于W（34.5美元/公斤）和Ta（285美元/公斤），分别约为二者价格的53.6%和6.5%，在经济性方面具有突出优势。

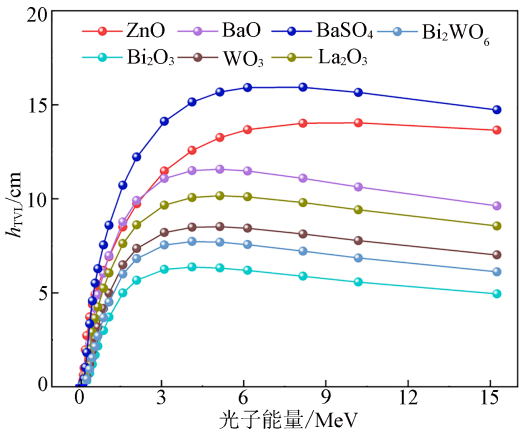


图 8 化合物功能材料 TVL 随光子能量的变化
Fig. 8 Variations of TVL of compound functional materials with photon energy

综合考虑功能材料的物理化学性质、原材料成本以及屏蔽性能，本文最终选定Bi、Bi₂O₃作为功能层材料，用于后续样品制备及性能研究。此外，本文同样制备了CNT薄膜-Ta复合材料，用以对比不同功能材料的屏蔽性能。

3 CNT薄膜基复合屏蔽材料性能研究

3.1 样品制备

本文所采用的单壁CNT薄膜型号为JCSW-CFM，其性能参数如表4所示。高纯铋靶材购自中诺新材（北京）科技有限公司，其纯度为99.999%，杂质元素主要包括Cu、Mg、Pb、Zn、Ag等，其含量最大不超过1 ppm。

采用北京创世威纳科技有限公司生产的MEB-600真空蒸发薄膜沉积系统进行样品制备。该系统基于PVD原理，通过加热源材料至蒸发或

升华状态，在真空环境下使气态粒子沉积于基片表面形成薄膜。该系统在室温下的真空度小于等于 1×10^{-5} Pa，沉积速率为0.1 nm/s，制备流程如图9所示。理论上，MEB-600系统能够稳定制备出厚度范围在几纳米至数十微米的镀层。然而，在实际的样品制备过程中，工艺参数和设备稳定性会对制备结果产生影响，尤其是功能材料的熔点会显著影响材料的蒸发速率。一般来说，材料的熔点越高，其蒸发速率相对较低。采用Bi和Bi₂O₃作为蒸发源，在样品制备中镀层厚度设定为150 nm，而采用Ta作为蒸发源时镀层厚度设定为20 nm。制备的样品如图10所示。

表 4 单壁CNT薄膜性能参数
Table 4 Performance parameters of single-walled carbon nanotube films

性能	参数
厚度/ μm	10~20
强度/MPa	30~120
金属含量/%	<0.5
导电率/ $(\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$	$0.8\times10^5\sim2\times10^5$
柔韧性	可反复弯折

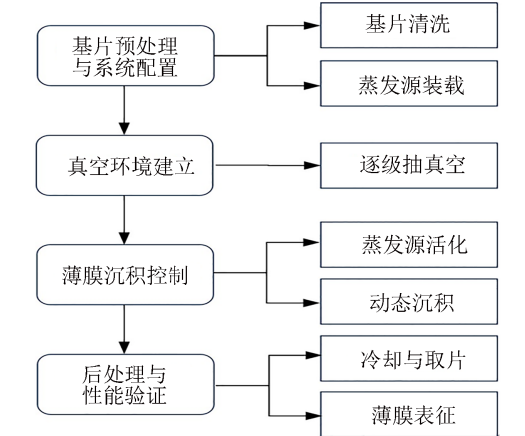


图 9 样品制备流程
Fig. 9 Flow chart of sample preparation

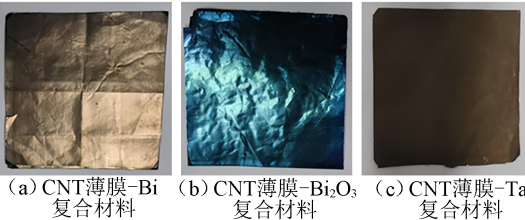


图 10 制备的CNT薄膜-功能材料样品
Fig. 10 Prepared CNT film-functional material samples

3.2 样品屏蔽性能测试结果

本文所制备的CNT薄膜-功能纳米颗粒复合

材料样品尺寸为 10 cm×10 cm。由于系统性工艺偏差与随机性环境干扰, 样品厚度不均, 实际测得单层样品平均厚度约为 0.033 2 mm。由于单层样品的屏蔽效果有限, 因此在性能测试中测量多层样品叠加后的屏蔽效果。

实验装置如图 11 所示。本实验选用 ^{60}Co 作为放射源, 并采用铅砖进行准直处理, 以确保射线的定向性。将制备的样品材料作为屏蔽层, 分别测量了 10 层、20 层、30 层和 40 层样品叠加后的屏蔽效果, 并与无屏蔽条件下的结果进行对比。通过测定不同层数样品屏蔽后的有效计数率, 计算得出各屏蔽条件下的屏蔽效率。实验结果如图 12 所示。

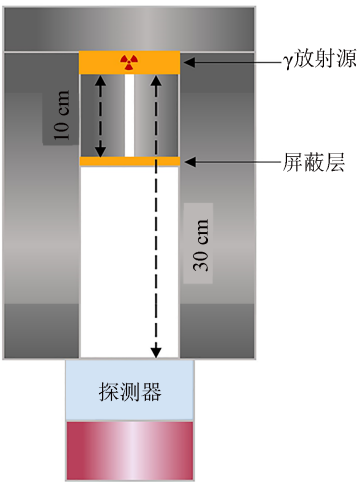


图 11 实验装置

Fig. 11 Experimental setup

由图 12 分析可得, 40 层 CNT 薄膜-Bi 复合材料叠加后的厚度为 1.33 mm, 对 ^{60}Co 放射源的屏蔽效率为 4.13%; 40 层 CNT 薄膜- Bi_2O_3 复合材料样品叠加后的厚度为 1.00 mm, 对 ^{60}Co 放射源的屏蔽效率为 6.78%, 以上 2 种样品均展现出良好的 γ 射线屏蔽效能。由于 Ta 的熔点较高, 所制样品中功能层厚度较薄, 展现出的屏蔽效果要低于上述 2 种样品。

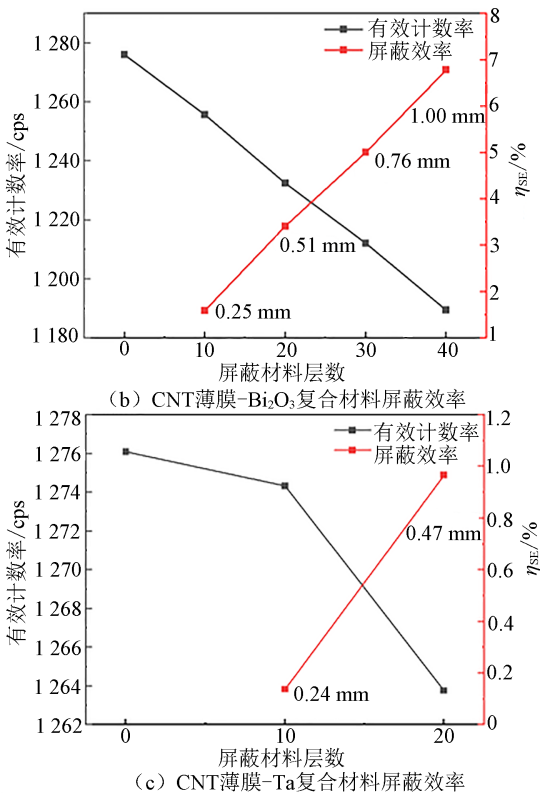
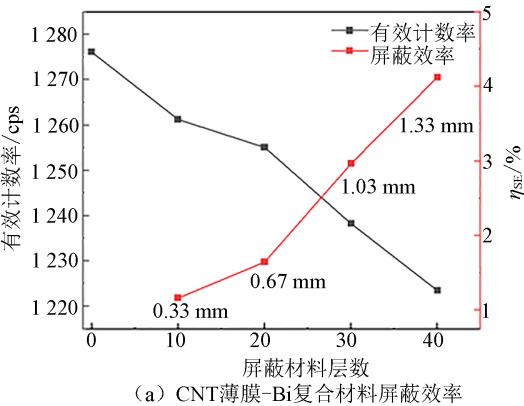


图 12 CNT 薄膜-功能材料样品的 γ 射线屏蔽性能
Fig. 12 γ -ray shielding performance for CNT film-functional material samples

注: 图中数字表示材料叠加后的实际厚度。

4 不同基材的复合屏蔽材料轻量化对比

为进一步验证 CNT 薄膜在复合屏蔽材料轻量化设计中所发挥的重要作用, 采用 Super-MC 软件对比了不同基材-Bi 复合材料的辐射屏蔽性能。其中, 复合屏蔽材料叠加层数为 40 层, 功能层 (Bi) 的厚度固定为 150 nm, 选取有机硅橡胶 (Silicone Rubber)、聚乙烯 (PE) 和聚氯乙烯 (PVC) 3 种常见材料作为基材^[28-29]。通过改变传统基材厚度, 使其复合屏蔽材料的屏蔽效率与实验制备的 CNT 薄膜-Bi 复材样品相当, 然后对比传统基材和 CNT 薄膜的厚度并分析其整体质量。不同基材-Bi 复合材料的屏蔽效率随基材厚度的变化关系如图 13 所示。

从图 13 可以看出, 分别选用 PE、PVC 和 Silicone Rubber 作为基材的复合材料屏蔽性能相差并不大。相较于 CNT 薄膜, 当 3 种基材理论厚度为 100 μm 时, 其屏蔽效率与所制备的 CNT 薄膜-Bi 复材样品相当 (约 0.7 mm 铅当量)。PE、PVC 和 Silicone Rubber 的密度分别为 0.92 g/cm³、1.406 g/cm³、1.108 5 g/cm³, 略小于 CNT 薄膜

(1.7 g/cm^3)，采用 PE、PVC 和 Silicone Rubber 作为基材时每平方米样品的理论质量分别为 0.874 g 、 1.06 g 和 0.946 g ，而采用 CNT 薄膜作为基材的样品每平方米的质量为 0.638 g ，远小于采用铅作为屏蔽材料时每平方米的质量 2.482 g 。因此，相较于常用的 3 种基材，CNT 薄膜作为基材可以大大减少复合屏蔽材料厚度，从而减轻其质量，实现屏蔽材料的轻量化设计。

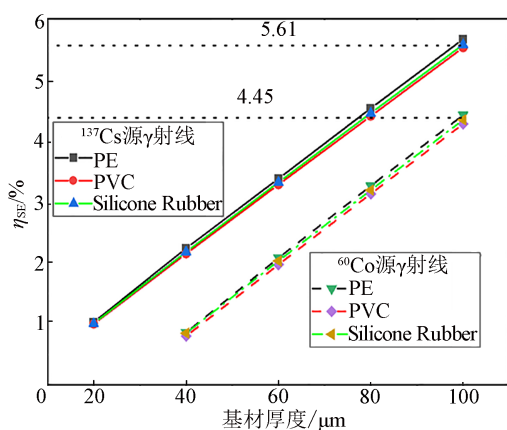


图 13 不同复合屏蔽材料 η_{SE} 随基材厚度的变化规律

Fig. 13 Variation of shielding efficiency of different materials with substrate thickness η_{SE}

注：实线和虚线分别表示 3 种复合屏蔽材料对于 ^{137}Cs (0.662 MeV) 源和 ^{60}Co (1.33 MeV) 源 γ 射线的屏蔽效率。

5 结论

本文采用实验和理论相结合的方法，对 CNT 薄膜-功能纳米颗粒复合辐射屏蔽材料体系进行了研究，主要结论如下。

1) 高 Z 元素及其化合物 (Bi 、 Bi_2O_3 以及 Bi_2WO_6) 在 $0.15\sim 15 \text{ MeV}$ 范围内具有较好的 γ 辐射屏蔽能力，且具有良好的理化性能和性价比，是铅基屏蔽材料的重要替代品。

2) 1.33 mm 厚度量级的 CNT 薄膜-纳米 Bi 复合屏蔽材料对于 ^{60}Co 的屏蔽效率达到 4.13% ，表现出良好的屏蔽性能。

3) 在固定功能层厚度为 150 nm 时， $100 \mu\text{m}$ 厚的传统基材 (PE、PVC、Silicone Rubber)-Bi 复合材料的屏蔽性能与 $20 \mu\text{m}$ 厚的 CNT 薄膜-Bi 复材样品相当。采用 CNT 薄膜作为基材可以将单位面积屏蔽材料的质量减轻 27% 以上，满足人员 γ 外照射防护屏蔽材料的轻量化设计需求。

后续，将进一步聚焦于样品的屏蔽效率和力

学性能随功能材料厚度的变化规律研究，探索出具有最佳屏蔽能力和力学性能的样品制备工艺，同时构建屏蔽效率与 CNT 孔隙率、直径之间的关系，以制备具有更高屏蔽能力的样品。

参考文献

- [1] Burns M K, Shoag M J, Kahlon S S, et al. Lead aprons are a lead exposure hazard[J]. Journal of the American College of Radiology, 2017, 14(5): 641-647.
- [2] Zehtabian M, Piruzan E, Molaieamaneh Z, et al. Design of light multi-layered shields for use in diagnostic radiology and nuclear medicine via MCNP5 Monte Carlo code[J]. Iranian Journal of Medical Physics, 2015, 12(3): 223-229.
- [3] Du Haiyang, Yu Haipeng, Macharia D K, et al. Integrating high- Z elements and multilayer structures into composite films with interlayer scattering effects for high-energy X-ray shielding[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2025, 689: 137195.
- [4] Aghaz A, Faghihi R, Mortazavi S M J, et al. Radiation attenuation properties of shields containing micro and Nano WO_3 in diagnostic X-ray energy range[J]. International Journal of Radiation Research, 2016, 14(2): 127-131.
- [5] Tiamduangtawan P, Kamkaew C, Kuntanwatchara S, et al. Comparative mechanical, self-healing, and gamma attenuation properties of PVA hydrogels containing either nano- or micro-sized Bi_2O_3 for use as gamma-shielding materials[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2020, 177: 109164.
- [6] Li Ran, Gu Yizhuo, Wang Yidong, et al. Effect of particle size on gamma radiation shielding property of gadolinium oxide dispersed epoxy resin matrix composite[J]. Materials Research Express, 2017, 4(3): 035035.
- [7] Wang Bingwei, Jiang Song, Zhu Qianbing, et al. Continuous fabrication of meter-scale single-wall carbon nanotube films and their use in flexible and transparent integrated circuits[J]. Advanced Materials, 2018, 30(32): 1802057.
- [8] Fujimori T, Tsuruoka S, Fugetsu B, et al. Enhanced X-ray shielding effects of carbon nanotubes[J]. Materials Express, 2011, 1(4): 273-278.
- [9] Zhang Wei, Xiong Huagang, Wang Shaokai, et al. Gamma-ray shielding performance of carbon nanotube film material[J]. Materials Express, 2016, 6(5): 456-460.
- [10] Yokozeki T, Iwahori Y, Ishiwata S, et al. Me-

- chanical properties of CFRP laminates manufactured from unidirectional prepreps using CSCNT-dispersed epoxy[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007, 38(10): 2121-2130.
- [11] 崔刊. 镍-碳纳米管复合纳米结构材料的热稳定性与抗辐照损伤性能研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022: 45-57.
- Cui Kan. Thermal stability and radiation tolerance of nanostructured Ni-carbon nanotube hybrid[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2022: 45-57.
- [12] Sakar E, Özpölat Ö F, Alım B, et al. Phy-X/PSD: development of a user friendly online software for calculation of parameters relevant to radiation shielding and dosimetry[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2020, 166: 108496.
- [13] Nodagala R, Ponnada T R. Enhancement of radiation shielding properties in BaTiO₃ added with Bi₂O₃ at the energy range of 356keV-1333keV[C]//*Journal of Physics: Conference Series*, Bristol: IOP Publishing Ltd., 2024, 2778: 012004.
- [14] Berger M J, Hubbell J H, Seltzer S M, et al. XCOM: photon cross section database [DS/OL]. National Institute of Standards and Technology (2020-08-18) [2026-03-15]. <https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-section-database>.
- [15] El-Khayatt A M, Ali A M, Singh V P. Photon attenuation coefficients of heavy-metal oxide glasses by MCNP code, XCOM program and experimental data: a comparison study[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2014, 735: 207-212.
- [16] Wu Yican, Song Jing, Zheng Huaqing, et al. CAD-based Monte Carlo program for integrated simulation of nuclear system SuperMC[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, 82: 161-168.
- [17] 吴宜灿, 宋婧, 胡丽琴, 等. 超级蒙特卡罗核计算仿真软件系统 SuperMC[J]. *核科学与工程*, 2016, 36(1): 62-71.
- Wu Yican, Song Jing, Hu Liqin, et al. Super Monte Carlo simulation program for nuclear and radiation process: SuperMC[J]. *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering*, 2016, 36(1): 62-71.
- [18] Knoll G F. Radiation detection and measurement [M]. Hoboken, NJ: John Wiley, 2010: 47-53.
- [19] Li Weibin, Peng Min, Zhao Xiaoming, et al. Properties of Bi₂O₃/epoxy resin coated composites for protection against gamma rays[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2022, 51(5): 7545S-7568S.
- [20] Li Qian, Zhong Rui, Xiao Xiao, et al. Lightweight and flexible Bi@Bi-La natural leather composites with superb X-ray radiation shielding performance and low secondary radiation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(48): 54117-54126.
- [21] Kaçal M R, Polat H, Oltulu M, et al. Gamma shielding and compressive strength analyses of polyester composites reinforced with zinc: an experiment, theoretical, and simulation based study[J]. *Applied Physics A*, 2020, 126(3): 205.
- [22] Mc Caffrey J P, Tessier F, Shen H. Radiation shielding materials and radiation scatter effects for interventional radiology (IR) physicians[J]. *Medical Physics*, 2012, 39(7): 4537-4546.
- [23] Mahmoud I S, Issa S A M, Zakaly H M H, et al. Material characterization of WO₃/Bi₂O₃ substituted calcium-borosilicate glasses: structural, physical, mechanical properties and gamma-ray resistance competencies[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 888: 161419.
- [24] Mc Conn R J, Gesh C J, Pagh R T, et al. Compendium of material composition data for radiation transport modeling: PNNL-15870 Rev.1[R]. USA: Pacific Northwest National Laboratory, 2011.
- [25] 刘光启, 马连湘, 项曙光. 化学化工物性数据手册: 无机卷(增订版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 231.
- [26] U.S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2023: bismuth, tungsten, tantalum[R]. Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2023.
- [27] Bakri F, Gareso P L, Tahir D. Advancing radiation shielding: a review the role of bismuth in X-ray protection[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2024, 217: 111510.
- [28] Plionis A A, Garcia S R, Gonzales E R, et al. Replacement of lead bricks with non-hazardous polymer-bismuth for low-energy gamma shielding[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2009, 282(1): 239-242.
- [29] El-Fiki S, El Kameesy S U, El Nashar D E. Influence of bismuth contents on mechanical and gamma ray attenuation properties of silicone rubber composite[J]. *International Journal of Advanced Research*, 2015, 3(6): 1035-1041.

Shielding and Lightweight Performance of Carbon Nanotube Film-Functional Nanoparticle Composite Material

WANG Fei¹, YANG Miao¹, ZHANG Wei², WANG Xiaobin³

(1. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;

2. A Troop of PLA Rocket Force, Ordos 017000, China;

3. A Troop of PLA Rocket Force, Sanmenxia 472000, China)

ABSTRACT: To address the dual requirements of shielding performance and lightweight design for gamma external radiation protection equipment, a gradient composite shielding material system based on synergistic enhancement by carbon nanotube films and functional nanoparticles was designed. Based on the high-throughput computation of shielding-performance parameters, Bi, Bi₂O₃, and Ta were selected as function-layer materials. The carbon nanotube film functional layer composite samples were then fabricated and evaluated for their radiation shielding performance. In addition, a substrate functional layer composite shielding simulation model was established to compare carbon nanotube films with conventional substrates, and verify their advantages for lightweight design. The results show that a 1.33 mm-thick carbon nanotube film Bi composite sample achieves shielding efficiencies of 4.13% against ⁶⁰Co gamma ray, demonstrating excellent protection against gamma-ray. When the functional layer thickness is fixed at 150 nm, a 20 μm carbon nanotube film Bi composite exhibits shielding performance comparable to that of 100 μm conventional substrates, such as Bi composites based on polyethylene, polyvinyl chloride, and silicone rubber. These findings suggest that carbon nanotube films can enhance the shielding performance of composite materials with reduced substrate thickness, highlighting their potential for light-weight protective equipment against external gamma radiation exposure.

KEYWORDS: carbon nanotube; functional nanoparticle; radiation shielding material

(编辑: 刘建民)