

# 纤维基轻质高效 X 射线防护材料的制备及性能探究

冯斯涵<sup>a</sup> 韩刘佳<sup>b</sup> 陈长洁<sup>a</sup> 王新厚<sup>c</sup>

东华大学 a. 纺织学院; b. 化学与化工学院; c. 机械工程学院, 上海 201620

**摘要:** 采用机械搅拌方法, 将碳纤维、纸浆纤维与纳米氧化铋颗粒均匀分散混合, 再通过浸置法将混合物置于水性聚氨酯中, 制备纤维基轻质高效 X 射线防护材料。探讨将纳米氧化铋颗粒分散至纤维网结构对材料微观形貌、透气性能及 X 射线防护性能的影响。研究表明, 相同纳米氧化铋添加量下, 结合了碳纤维和纸浆纤维的材料相较于传统不含纤维网结构的纳米氧化铋-水性聚氨酯材料, X 射线防护效果更好, 且具备一定的透气性能。100 kV 管电压条件下, 质量为 26.00 g、厚 1.2 mm 的纤维基轻质高效 X 射线防护材料能够实现铅当量为 0.35 mmPb 的防护效果, 而相同面积下同等级铅当量、厚 1.2 mm 的市售铅橡胶材料的质量则为 32.46 g, 相比之下, 纤维基轻质高效 X 射线防护材料能够实现质量减小 20% 的效果。研究为轻质高效 X 射线防护材料的开发提供新思路。

**关键词:** X 射线; 纤维基; 氧化铋; 防护材料; 透气性能; 防护性能; 铅当量

中图分类号: TS 101.8

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2024)12-0020-07

## Preparation and performance research of fiber-based lightweight and efficient X-ray protection materials

Feng Sihan<sup>a</sup>, Han Liuji<sup>b</sup>, Chen Changjie<sup>a</sup>, Wang Xinhou<sup>c</sup>

a. College of Textiles; b. College of Chemistry and Chemical Engineering;  
c. College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China

**Abstract:** Carbon fibers, pulp fibers and bismuth oxide nanoparticles were dispersed and mixed by mechanical stirring method, and then the mixture was placed in waterborne polyurethane by immersion method to prepare fiber-based lightweight and efficient X-ray protection materials. The effects of dispersing the bismuth oxide nanoparticles into fiber network structure on the micro-morphology, air permeability and X-ray protection properties of the materials were investigated. The results showed that the materials combining carbon fibers and pulp fibers had better X-ray protection property and certain air permeability than the traditional bismuth oxide nanoparticles/waterborne polyurethane materials without fiber web structure at the same amount of bismuth oxide nanoparticles. Under the condition of 100 kV tube voltage, the fiber-based lightweight high-

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(52203056)

收稿日期: 2024-08-16

作者简介: 冯斯涵, 女, 2000 年生, 在读硕士研究生, 研究方向为辐射屏蔽复合材料

通信作者: 王新厚, 教授, 博士, 主要研究方向为防护用纺织材料, xhwang@dhu.edu.cn

efficiency X-ray protection material with the mass of 26.00 g and thickness of 1.2 mm could achieve the protective effect of lead equivalent of 0.35 mmPb, while the mass of the same lead equivalent and thickness of commercially available lead rubber material under the same surface area was 32.46 g, which indicated that the fiber-based lightweight high-efficiency X-ray protection materials could achieve a mass reduction of 20%. The research provides a new idea for the development of lightweight and efficient X-ray protection materials.

**Keywords:** X-ray; fiber-based; bismuth oxide; protective material; air permeability; protective property; lead equivalent

X 射线是一种具有高能量、强穿透力、短波长和显著电离效应的电磁波。X 射线在医疗诊断、工业检测和食品安全等领域扮演着至关重要的角色,如,用于疾病诊断、产品质量检验及食品卫生监控等<sup>[1-2]</sup>。然而,X 射线辐射会对人体产生潜在的危害,主要表现为对细胞造成损害,可能导致细胞突变和染色体异常,长期暴露还可能增加人体患癌症的风险<sup>[3-4]</sup>。目前,市场上广泛使用的 X 射线防护材料多为铅橡胶,但铅作为一种有毒金属,长期使用可能会对人体健康构成威胁。此外,市面上常见的 X 射线防护马甲(铅当量为 0.35 mmPb)的质量约为 3.5 kg,较笨重,穿戴舒适性差,使用不便。基于此,开发无铅、轻质的 X 射线防护材料,对提升工作人员的安全防护水平至关重要<sup>[5]</sup>。

提升材料 X 射线防护性能的有效手段是引入足量的高原子序数(Z)元素<sup>[6]</sup>。铋元素因原子序数高达 83 且对人体无毒而成为理想的铅元素替代元素。铋能够提供与铅相似的防护效果,同时避免了铅的毒性风险<sup>[7-8]</sup>。基于此,以铋为高原子序数元素来源的轻质化材料成为当前研究的热点<sup>[9]</sup>。如,陈晶晶<sup>[10]</sup>采用静电纺丝技术,成功制备出氧化铋( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ )/聚丙烯腈复合纳米纤维膜,发现当  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  质量分数为 61.5% 时,纤维膜在 100 kV 管电压下的 X 射线衰减效率达 60%,表现出一定的 X 射线防护性能。该方法选用纳米级颗粒,并通过静电纺丝技术实现了颗粒在材料中的均匀分散,有效增加了光电作用概率,从而提高了纤维膜的 X 射线防护效果。Cheraghi 等<sup>[11-12]</sup>以聚二甲基硅氧烷(PDMS)为基质,制备出一系列不同  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  质量分数的 PDMS/ $\text{Bi}_2\text{O}_3$  复合材料。在 100 kV 管电压下,当  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  质量分数为 30% 时,该复合材料的衰减效率为 50%,且材料的衰减性能随着  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  质量分数的增加而增

强。文献[11-12]的研究还表明,高原子序数元素添加量的增加与 X 射线防护效果的显著提升之间存在直接的关联。Verma 等<sup>[13]</sup>则通过微波辐射技术在多壁碳纳米管(MWCNT)上原位合成了  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  纳米颗粒,并将其制备成凝胶状纳米材料涂覆于棉织物上,所得材料具有良好的纳米颗粒分散性,在 100 kV 管电压下,其防护效率达 70%。上述研究均以  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  作为铋元素的来源,通过不同技术制备 X 射线防护材料。然而,这些方法仍面临制备过程复杂、防护效率不足等挑战,尤其是在  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  质量分数较高时,确保纳米颗粒的均匀分散是一大难题。因此,采用具有较大表面积的纳米高原子序数颗粒,并实现其在材料中的有效分散与负载,是一种颇具前景的轻质高效 X 射线防护材料设计策略<sup>[14-15]</sup>。

本文通过机械搅拌使纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  颗粒附着在纸浆纤维上,并采用碳纤维构建纤维网络,确保颗粒在纤维间的均匀分散,并进一步地采用浸置法将混合物置于水性聚氨酯(WPU)中,使纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  颗粒稳定附着在纤维表面,制备纤维基轻质高效 X 射线防护材料,探讨将纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  颗粒分散至纤维网结构对材料微观形貌、透气性能及 X 射线防护性能的影响。研究旨在为无铅、轻质高效 X 射线防护材料的开发提供参考。

## 1 试验部分

### 1.1 试验原料及仪器

纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  颗粒,上海迈瑞尔生化科技有限公司;WPU(固含量为 38%),深圳吉和昌新材料有限公司;碳纤维(长 2.24~4.86 mm),上海治实合金科技有限公司;纸浆纤维(长 2.14~4.15 mm),仙桃市依柔商贸有限公司。市售 X 射线防护材料,杭州爱

凯医疗用品有限公司。

精密电子天平,上海精科有限公司;烘箱,上海一恒科学仪器有限公司;四氟乙烯模具,广州远途塑业有限公司;机械搅拌器(转速为 18 000 r/min),美的集团有限公司;XL 纤维原位拉伸形貌表征仪,复纳科学仪器(上海)有限公司;TGA-4000 型热重分析仪,美国 PerkinElmer 公司;YG461E 型透气性测试仪,宁波纺织仪器厂。X 射线防护性能检测由上海市计量测试技术研究院,采用 MGC-41 型 X 射线机和 ICS-321 型电离室进行测试。

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 碳纤维/纸浆纤维/纳米 $\text{Bi}_2\text{O}_3$ 混合体的制备

在机械搅拌器中加入 0.6 g 短切碳纤维、0.2 g 纸浆纤维及 50 g 去离子水,常温下机械搅拌 20 s,使纸浆纤维与短切碳纤维初步混合。随后,称取一定质量(分别为 12、16、20、24 和 28 g)的纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  颗粒加入其中,再次机械搅拌 20 s,得到碳纤维/纸浆纤维/纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  混合体。碳纤维/纸浆纤维/纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  混合体制备流程示意如图 1 所示。

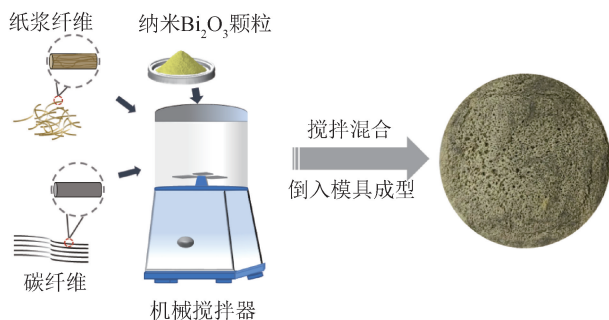


图 1 碳纤维/纸浆纤维/纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  混合体的制备流程

Fig. 1 Preparation process of carbon fiber/pulp fiber/bismuth oxide nanoparticles hybrids

### 1.2.2 复合材料的制备

将碳纤维/纸浆纤维/纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  混合体倒入直径为 9 cm 的过滤皿中,去除混合体中多余的去离子水,然后放置在 40 °C 烘箱中烘 24 h 直至干燥,得到蓬松带孔的干燥碳纤维/纸浆纤维/纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  混合体。将 WPU 稀释至固含量为添加的纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  颗粒质量的 5%,再将干燥的碳纤维/纸浆纤维/纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  混合体完全浸入稀释后的 WPU 中,在混合体上方平铺放置四氟乙烯片,再在四氟乙烯片上均匀增添砝码,通过砝码施加压力控制试样厚度为 1.2 mm。将浸置在 WPU 中的混合体在烘箱中烘

24 h,获得碳纤维/纸浆纤维/纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  复合材料。所得复合材料试样以 CF-PF-BO-WPU- $x$  命名,其中,CF 表示碳纤维(carbon fiber),PF 表示纸浆纤维(paper fiber),BO 表示纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ (bismuth oxide nanoparticle),WPU 表示水性聚氨酯(water-based polyurethane),“ $x$ ”表示添加的纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  的质量,分别为 12、16、20、24 和 28 g。其中,试样 CF-PF-BO-WPU-24 的实物图见图 2。

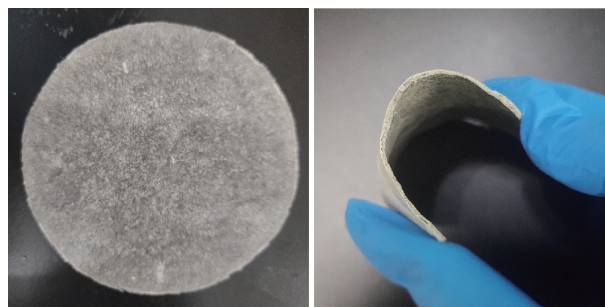


图 2 CF-PF-BO-WPU-24 的实物图

Fig. 2 Pictures of the CF-PF-BO-WPU-24

制备不添加纤维的  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -WPU 互混复合材料作为对比样。将一定质量(分别为 12、16、20、24 和 28 g)的纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  分别加入烧杯中。然后,将 WPU 稀释至固含量为添加的纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  颗粒质量的 5%,分别倒入对应烧杯中。使用搅拌器在常温下搅拌混合物 10 min,确保材料均匀混合。将均匀混合的混合物倒入直径为 9 cm 的四氟乙烯模具中,再放入烘箱中,在 40 °C 下烘 24 h,获得成型的试样。所得试样以 BO-WPU- $x$  命名,其中,BO 表示纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,WPU 表示水性聚氨酯, $x$  表示添加的纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  的质量,分别为 12、16、20、24 和 28 g。

## 1.3 性能测试与表征

### 1.3.1 微观形貌

使用 XL 纤维原位拉伸形貌表征仪观察复合材料的表面微观形貌,观察前先使用喷金机对试样进行喷金处理。XL 纤维原位拉伸形貌表征仪工作参数设置为高分辨模式,电压为 10 kV,采用标准束流,并在高真空模式下进行测试。

### 1.3.2 热重分析

在 0~600 °C、氮气环境下,采用 TGA-4000 型热重分析仪分析在纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  与 WPU 混合体中添加纤维网结构对复合材料热稳定性能的影响。升温速率设置为 20 °C/min,氮气流量为 50 mL,复合材料

质量为 5~10 mg。

### 1.3.3 透气性能

参照 GB/T 5453—1997《纺织品 织物透气性的测定》,采用 YG461E 型透气性测试仪对复合材料进行透气性能测试。试样面积为 20 cm<sup>2</sup>,试验压差为 200 Pa,每块材料测 10 次,结果取平均值。

### 1.3.4 X 射线防护性能

参照 GBZ/T 147—2002《X 射线防护材料衰减性能的测定》测试复合材料的 X 射线防护性能,测试结果以铅当量表征<sup>[16-18]</sup>。铅当量指用铅作为参考物质时以铅厚度来表示的衰减当量,单位是毫米铅(mmPb),该值能够直观地表征防护材料的屏蔽性能<sup>[19-20]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 微观形貌

图 3a) 为复合材料试样 CF-PF-BO-WPU-12 的微观形貌图,从图 3a) 中可以清晰地辨识出 2 种形态截然不同的纤维。其中,笔直且表面光滑、均匀的为碳纤维,其形态规整,几乎无任何弯曲,且表面洁净,几乎没有颗粒吸附。碳纤维的这种表面形态归因于其表面官能团的缺乏,使得其对周围环境中的颗粒物吸附能力较低。纸浆纤维的微观表面与碳纤维的光滑表面形成了鲜明对比,其表面遍布天然纹理并吸附有较多的颗粒。图 3b) 为试样 CF-PF-BO-WPU-12 中纸浆纤维的微观形貌,可以看出,纸浆纤维表面吸附了大量的纳米 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒。这是因为纸浆纤维亲水性好,水分子能参与广泛的氢键结合。复合材料制备过程中,纸浆纤维与水接触后,纤维-纤维结合被纤维-水键合取代,纸浆纤维的表面活性由此得以增强,其通过分子间作用力吸附大量的纳米 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒。复合材料干燥后,经 WPU 的进一步黏附,纳米 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒被成功负载在纸浆纤维表面,实现了颗粒在整个材料中的均匀分散。图 3c) 为试样 CF-PF-BO-WPU-28 的微观形貌图,可以看出,当纳米 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加量为 28 g 时,这些微小的颗粒堆积在各碳纤维之间。图 3d) 为试样 CF-PF-BO-WPU-28 中纸浆纤维的表面微观形貌,可以看出,此时纸浆纤维表面几乎完全被纳米 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒覆盖。

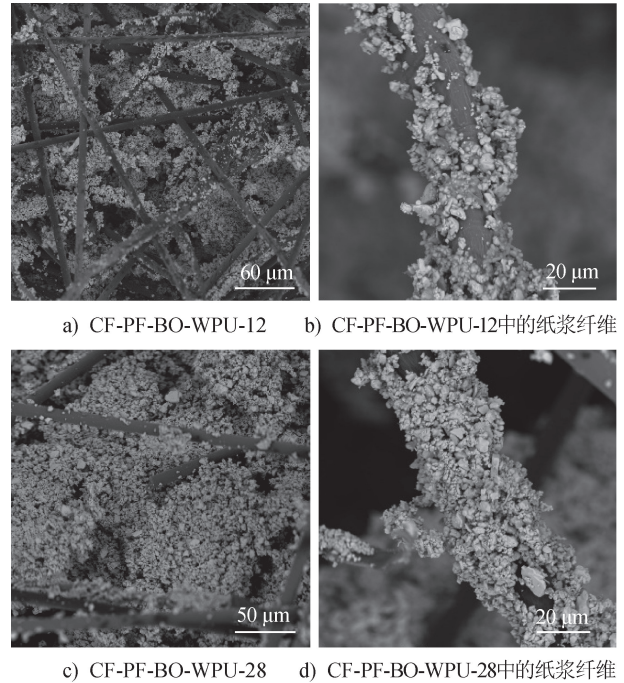


图 3 CF-PF-BO-WPU-12 和 CF-PF-BO-WPU-28 的微观形貌图  
Fig. 3 Microscopic morphology of CF-PF-BO-WPU-12 and CF-PF-BO-WPU-28

### 2.2 热重分析

在辐射防护应用中,材料受到 X 射线辐射时会产生热量,尤其是在高剂量辐射的情况下,热量积累可能会对材料造成损伤,影响其结构和性能。因此,理想的 X 射线防护材料应具备一定的热稳定性,确保在遭受辐射时不会因温度的升高而导致防护效果严重受损。

复合材料试样 BO-WPU-24 与 CF-PF-BO-WPU-24 的热重曲线如图 4 所示。从图 4 可以看出,2 种材料的初始分解温度和终止分解温度并未表现出明显的差异,这表明纤维结构的引入并未破坏材料的热稳定性。温度为 600 °C 时,试样 CF-PF-BO-WPU-24 的残余质量分数为 85.9%,而试样 BO-WPU-24 的残余质量分数为 83.1%。因复合材料中其他组分的含量相对较低,可以推断热重分析后的残留物主要成分为纳米 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。从残余质量分数数据看,纳米 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的负载量(质量分数)超过 80%。此外,包含纸浆纤维和碳纤维的试样 CF-PF-BO-WPU-24,在温度超过 350 °C 后,其热重曲线始终位于 BO-WPU-24 之上,表现出更好的热稳定性。这表明,纤维的添加有助于提升复合材料在高温条件下的热稳定性。

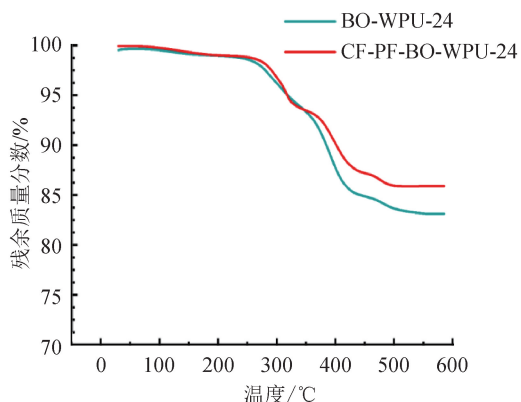


图4 BO-WPU-24与CF-PF-BO-WPU-24的热重曲线  
Fig. 4 Thermogravimetric curves of BO-WPU-24 and CF-PF-BO-WPU-24

### 2.3 透气性能

对未添加纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  颗粒的复合材料(CF-PF-WPU-0)进行透气性能测试。结果显示,该试样表现出优异的透气性能,其透气率达 692.00 mm/s。图5为不同纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  添加量的CF-PF-BO-WPU- $x$ 复合材料的透气性测试结果。由图5可以看出,随着纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  添加量的增加,CF-PF-BO-WPU- $x$ 的密度增大。当纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  添加量分别为12、16、20、24和28 g时,对应的CF-PF-BO-WPU- $x$ 的密度分别为1.76、2.31、2.86、3.41和3.96  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,透气率分别为128.60、116.32、105.64、88.77和61.50  $\text{mm}/\text{s}$ 。相较于未添加纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  颗粒的试样CF-PF-WPU-0,添加纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  后试样的透气性能显著下降,且随着纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  添加量的增加,CF-PF-BO-WPU- $x$ 的透气性能逐渐下降。原因在于材料的透气性能受其孔隙尺寸的直接影响。在未添加纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  颗粒的试样CF-PF-WPU-0中,因高强高模碳纤维产生的支撑作用,纤维层之间的间隙较大,这些间隙形成众多的透气通道,因此材料表现出良好的透气性。引入纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  颗粒后,颗粒填充于纤维层间隙,导致复合材料的结构变得更加致密,透气通道减少,因而透气性能下降。值得注意的是,目前市场上常见的X射线防护材料几乎完全不具备透气性能。而本文制备的复合材料在确保良好的X射线防护效果的同时,还具有一定的透气性能,这为既舒适又具有防护功能的X射线防护材料的制备提供了重要的参考。

### 2.4 X射线防护性能

100 kV 管电压下,CF-PF-BO-WPU- $x$  系列5种

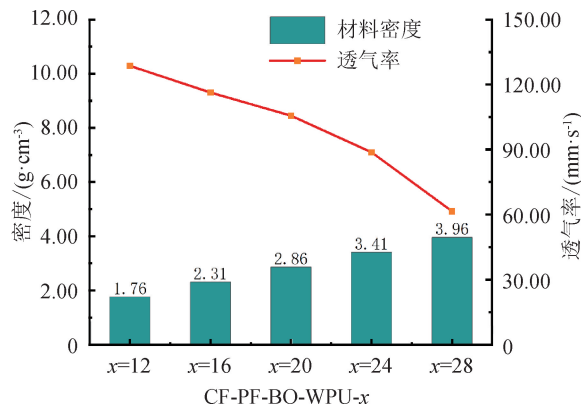


图5 CF-PF-BO-WPU- $x$ 的密度及透气性能  
Fig. 5 Density and air permeability of CF-PF-BO-WPU- $x$

复合材料试样的铅当量测试结果如图6所示。可以看出,随着纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  添加量的增加,复合材料试样的铅当量显著增大。这表明,高原子序数元素的添加量对复合材料的X射线防护性能有重要影响。 $\text{Bi}_2\text{O}_3$  添加量为24 g时,制备的防护材料的质量为26 g,铅当量达0.35 mmPb。YY 0318—2000《医用诊断X射线辐射防护器具》标准规定,医用诊断X射线辐射防护器具的铅当量不得低于0.25 mmPb。据此可知本文制备的X射线防护材料在质量为26.00 g、厚度为1.2 mm时,防护效果超过标准要求。对市售多种屏蔽效果为0.35 mmPb的X射线防护材料进行对比,发现目前市场上的X射线防护材料多采用铅橡胶制备,且直径为9 cm的圆片形市售X射线防护材料的质量为32.46~35.61 g。取相同面积下质量最小(质量为32.46 g)的一款市售材料与试样CF-PF-BO-WPU-24进行防护性能对比,发现100 kV管电压条件下,2种材料的铅当量均为0.35 mmPb,但CF-PF-BO-WPU-24的质量(26.00 g)明显小于市售材料,即在相同的X射线防护效果下,CF-PF-BO-WPU-24的质量相对于市售X射线防护材料可减小至少20%。此外,CF-PF-BO-WPU-24的密度(3.41  $\text{g}/\text{cm}^3$ )也明显小于铅板密度(11.34  $\text{g}/\text{cm}^3$ )和市售铅橡胶材料密度(4.25  $\text{g}/\text{cm}^3$ )。这证实了制备的纤维基X射线防护材料具有轻质高效的优势。

试样CF-PF-BO-WPU- $x$ 与BO-WPU- $x$ 的X射线防护性能测试结果对比如图7所示。从图7可以看出,对于未引入纤维网结构的BO-WPU- $x$ 材料,其X射线防护效果同样与纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  添加量呈线性正

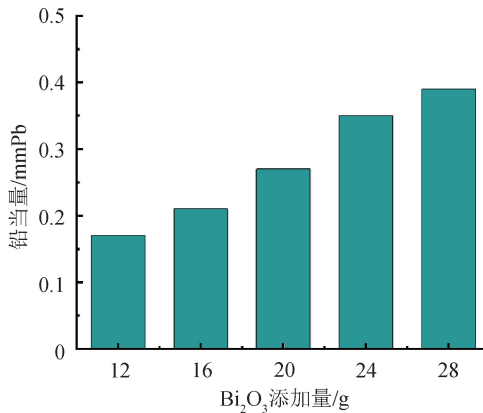


图 6 CF-PF-BO-WPU- $x$  的 X 射线防护性能测试结果  
Fig. 6 X-ray protection performance test results of CF-PF-BO-WPU- $x$

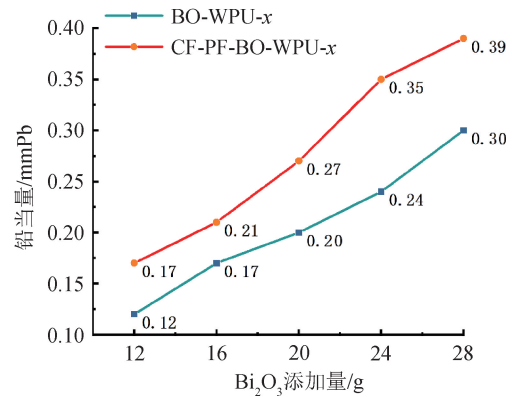


图 7 CF-PF-BO-WPU- $x$  和 BO-WPU- $x$  的 X 射线防护性能测试结果对比  
Fig. 7 Comparison of X-ray protection test results of CF-PF-BO-WPU- $x$  and BO-WPU- $x$

相关。这进一步证实高原子序数元素添加量对复合材料 X 射线防护性能有至关重要的影响。高原子序数元素对 X 射线的防护效果与 X 射线光子在穿过材料时经历的能量衰减过程有关。在 X 射线光子穿过材料的过程中,光子不断与材料中原子的原子核及其核外电子发生碰撞,使其能量持续减小,最后将能量沉积在材料中。在 100 kV 管电压条件下,光子主要与材料中的原子发生光电效应。高原子序数元素的原子序数较高,它们的原子核外电子处于较高能级上,与 X 射线光子相互作用时更容易被击出,发生光电效应。并且高原子序数元素的电子密度较高,这意味着单位体积内其含有更多的电子可供 X 射线光子与之相互作用。铋元素作为高原子序数元素,具有较高的核外电子密度,随着纳米 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加量的增加,光子在原子之间穿梭时发生碰撞与能量递减的概率增加。因此,复合材料的铅当量随着纳米 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加量的增加而呈现出线性增大的趋势,表明材料的 X 射线防护能力随之增强。

对比 CF-PF-BO-WPU- $x$  ( $x = 12, 16, 20, 24, 28$ ) 与 BO-WPU- $x$  ( $x = 12, 16, 20, 24, 28$ ) 的 X 射线防护性能可以看出,CF-PF-BO-WPU- $x$  的防护效果明显优于相同纳米 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加量的 BO-WPU- $x$ 。这表明,在材料中引入纤维网结构能够有效增强复合材料的 X 射线防护能力。原因是纤维网结构实现了纳米 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒在整个材料中的均匀分布。在 CF-PF-BO-WPU- $x$  复合材料中,碳纤维因其出色的物理特性,一方面在机械搅拌过程中产生剪切力和冲击力,改善纳米颗粒团聚,增大颗粒的比表面积,

使材料能够更有效地捕捉和散射 X 射线光子;另一方面其构建的三维网络结构能够有效物理分隔纳米 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒,为 X 射线散射和吸收提供更多路径。当 X 射线穿过复合材料时,光子会被多次散射和吸收,自由程延长,从而穿透能力显著降低。纸浆纤维分布于碳纤维之间,其颗粒黏附作用使纳米 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒均匀而稳定地分散于纤维之间,这些颗粒能够形成紧密的光子吸收空间,减少光子逃逸,提高光电作用发生概率,如图 8 所示。因此,引入纤维网结构的复合材料对光子通过时的能量耗散更高,X 射线防护性能提升。

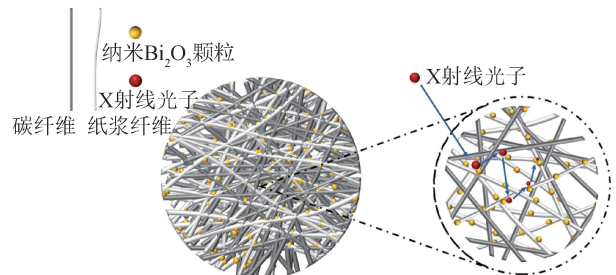


图 8 X 射线光子与复合材料的碰撞作用机制  
Fig. 8 Mechanism of X-ray photons colliding with composite materials

### 3 结论

本文通过机械搅拌使纳米 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒附着在纸浆纤维上,并采用碳纤维构建纤维网络,确保颗粒在纤维间的均匀分散。进一步地,采用浸置法将混合物置于水性聚氨酯中,使纳米 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒稳定附着

在纤维表面,成功制备出纤维基轻质高效 X 射线防护材料。试验结果显示,采用该方法制备的材料 X 射线防护性能好;纤维网结构能够有效分散纳米  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  颗粒,且由于纤维之间存在一定的孔隙,所得材料具有一定的透气性能,优于市面上的不具有任何透气性能的 X 射线防护材料。在 100 kV 管电压下,质量为 26.00 g、厚 1.2 mm 的纤维基轻质高效 X 射线防护材料能够实现 0.35 mmPb 的防护效果。与此同时,与市售的防护效果为 0.35 mmPb、厚 1.2 mm 的铅橡胶材料相比,其质量可减小至少 20%。且纤维基轻质高效 X 射线防护材料的密度为  $3.41 \text{ g/cm}^3$ ,明显小于铅板密度( $11.34 \text{ g/cm}^3$ )和市售铅橡胶材料密度( $4.25 \text{ g/cm}^3$ )。研究为轻质高效 X 射线防护材料的开发提供了新思路。



期刊采编平台

中国知网下载

### 参考文献

- [ 1 ] 田欣,刘文静,赵晓曼,等. X 射线防护用无铅柔性材料的研究进展[J]. 丝绸,2023,60(8):63-72.
- [ 2 ] MUNGPAYABAN H, RINDHATAYATHON P, NINLAPHRUK S, et al. X-ray protective materials from barium sulfate/amorphous cellulose/natural rubber composites [ J ]. Radiation Physics and Chemistry, 2022, 194: 110011.
- [ 3 ] 李昊,王亚平,闫林萍,等. 碘化铯/天然皮革复合可穿戴 X 射线屏蔽材料的制备及性能[J]. 复合材料学报,2023,40(7):3852-386.
- [ 4 ] 王越,冯岩,孙嘉伟. 氧化铋橡胶复合材料的 X 射线防护性能研究[J]. 中国医疗器械信息,2021,27(7):23-25.
- [ 5 ] 宫学斌. 无铅 X 射线防护柔性纺织复合材料的制备及耐磨性能研究[D]. 天津:天津工业大学,2022.
- [ 6 ] 栗辰飞. 伽马射线防护柔性纺织复合材料的制备及耐老化性能研究[D]. 天津:天津工业大学,2023.
- [ 7 ] 李世雄,侯琳,蔡普宁,等. 纺织用 X 射线防护材料的研究进展[J]. 棉纺织技术,2024,52(3):89-94.
- [ 8 ] LI H, ZHOU J B, YAN L P, et al. Barbican-inspired bimetallic core-shell nanoparticles for fabricating natural leather-based radiation protective materials with enhanced X-ray shielding capability [ J ]. Chemical Engineering Journal, 2023, 466: 143355.
- [ 9 ] 蒲阳艳,杨国荣,田欣,等. X 射线防护服用  $\text{BaSO}_4$ -橡胶基柔性材料的制备及性能研究[J]. 丝绸,2023,60(5):35-41.
- [ 10 ] 陈晶晶. 轻质柔性无铅型 X 射线防护纤维材料的制备及其性能研究[D]. 上海:东华大学,2023.
- [ 11 ] CHERAGHI E, CHEN S Y, LIU J A, et al. Lightweight and flexible bismuth oxide composite with enhanced X-ray shielding efficiency [ J ]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 139(45/46): e53130.
- [ 12 ] CHERAGHI E, SHAAER A, CHEN S Y, et al. Enhanced electron radiation shielding composite developed by well dispersed fillers in PDMS polymer [ J ]. Radiation Physics and Chemistry, 2023, 211: 110994.
- [ 13 ] VERMA S, AMRITPHALE S S, DAS S. Properties of a non-toxic, self-healing X-ray radiation shielding bandage developed using smart gel [ J ]. Cellulose, 2017, 24(7): 2939-2951.
- [ 14 ] 洪琴,陈帅,侯硕,等. 柔性氧化铋 X 射线防护材料研究[J]. 针织工业,2024(6):83-88.
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] 袁杰,胡崇庆,白雪,等. 不同能量与射束下含铅、铋、钷辐射防护材料的铅当量测试与屏蔽防护特性[J]. 上海计量测试,2023,50(2):40-42.
- [ 17 ] 李伟,魏乐倩,王泽宇,等. 医用 X 射线防护材料的研究进展[J]. 产业用纺织品,2024,42(6):11-18.
- [ 18 ] 陈晶晶,孟胜楠,刘洪玲,等. 氧化铋/聚丙烯腈复合纳米纤维膜的制备及其 X 射线防护性能[J]. 东华大学学报(自然科学版),2023,49(6):26-32.
- [ 19 ] 刘思忆. 医用诊断 X 射线辐射防护服装的舒适性评价[D]. 上海:东华大学,2022.

欢迎投稿! 欢迎刊登广告!