

# 核射线防护服的研究进展

马新安<sup>1</sup>, 陈功<sup>2</sup>, 张莹<sup>1</sup>, 侯琳<sup>1</sup>

(1. 陕西省纺织科学研究所, 陕西 西安 710038; 2. 北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

**摘要:**对核辐射产生的原理、种类及危害,以及防护核辐射材料的国内外研究现状和评测标准进行全面分析和综述,提出核射线防护主要是中子辐射的防护;在前期研究的基础上提出了轻质、高效、质密的无铅型核防护服设计理念,阐述了轻质核防护服的研究进展,并对轻质核防护服的功能性进行了展望。

**关键词:**核射线;轻质无铅;中子防护;屏蔽材料;防护服

**中图分类号:**TS 941.731.7 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2019)02-0095-07

## Research Progress in Nuclear Ray Protective Clothing

MA Xin'an<sup>1</sup>, CHEN Gong<sup>2</sup>, ZHANG Ying<sup>1</sup>, HOU Lin<sup>1</sup>

(1. Shaanxi Textile Science Institute, Xi'an 710038, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The research status and evaluation standards of protective materials for nuclear radiation at home and abroad are summarized in this paper. Also, the principle, types and hazards of nuclear radiation are introduced in detail. It is proposed that nuclear radiation protection mainly lies in neutron radiation protection. On the basis of previous studies, the design concept of lead-free nuclear protective clothing with light weight, high efficiency and compactness is put forward. The research progress of light nuclear protective clothing is reviewed and the function of light nuclear protection is prospected.

**Key words:** nuclear-ray, neutron protection, light quality without Pb, shielding materials, protective clothing

随着科学技术的进步,现有能源消费结构带来的环境问题以及人们对气候环境关注度的提升,使得原子核能在军事领域和民用辐射技术领域都得到了长足的发展。然而,核能在为人类提供高效、清洁能源的同时,也存在着核辐射泄漏的可能性。因此,随着核能应用领域的日趋扩大,对辐射屏蔽防护材料的需求越来越高,辐射防护材料研究的重要性日趋突显。鉴于此,文中对现有核辐射的危害、屏蔽材料和防护机理以及评价方法进行了全面的分析和总结,并在前期研究的基础上,提出了轻质核防护的新型理念,对轻质核防护服的功能进行了展望。

## 1 核辐射的理论依据

原子核是原子的核心部分,通常呈稳态存在,

整个原子不显电性;但一般情况下,每种元素都有一种可以进行放射性衰变的不稳定状态的同位素存在,当这些不稳定的原子核发生裂变或者聚变时,释放出原子核能。因此,核辐射是不稳定的原子核从一种结构或一种能量转变为另一种结构或另一种能量状态过程中所释放出来的微观粒子流。核辐射具有放射性,可以引起物质的电离或激发,故又称为电离辐射。

电离辐射根据成因的不同可以分为直接致电离辐射和间接致电离辐射,根据照射途径的不同又可分为外照射和内照射。其中:外照射是辐射源在体外对人体产生的照射伤害,主要由X射线、 $\gamma$ 射线、中子射线和 $\beta$ 射线产生;而内照射是指辐射源通过一定途径进入人体内部而引起的照射伤害,只有当辐射源从体内或体表完全除去后,其伤害方可

收稿日期:2018-12-07; 修订日期:2019-03-04。

基金项目:国家自然科学基金项目(51273006)。

作者简介:马新安(1987—),男,教授级高级工程师。主要研究方向为特种功能面料的研究和开发。

Email:mxal1118@vip.sina.com

停止,内照射主要由 $\alpha$ 射线产生。因此,电离辐射不仅会对被照射人造成伤害,增加癌症的发病率,而且有可能会引起人体基因的改变,甚至对其后代造成影响<sup>[1-4]</sup>。

电离辐射会对人体造成很大的危害,但不同射线的电离辐射在穿透能力和电离能力等方面各不相同,不同类型射线的辐射穿透能力如图1所示<sup>[5]</sup>。

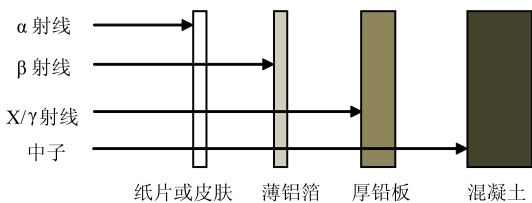


图1 不同类型射线的辐射穿透能力

Fig.1 Radiation penetration ability of different types of ray

由图1可以看出, $\alpha$ 和 $\beta$ 射线的穿透能力较弱,一块砖就可以对 $\beta$ 射线产生有效阻挡, $\alpha$ 射线仅用一张薄纸便可阻挡; $X$ 射线与 $\gamma$ 射线两者类似,都是短波长的电磁波,能量较高,通常采用吸收能力强的铅板进行防护;中子具有更强的穿透力,对人体产生的危害比相同剂量的 $X$ 射线、 $\gamma$ 射线更为严重,易诱发肿瘤导致早期死亡<sup>[6-7]</sup>。因此,在设计射线屏蔽防护材料时应着重考虑减弱射线穿透物质时的强度,在辐射源与人体之间设置一定厚度的屏蔽材料,从而降低辐射强度,使人们在作业过程中受到辐射的剂量在允许范围内,确保人身安全,达到有效防护的目的。核辐射除了在辐射过程中释放出 $\alpha$ 和 $\beta$ 等带电粒子,还有间接致电离辐射的 $X$ 射线和 $\gamma$ 射线以及中子辐射。

中子的能量决定了中子与物质的相互作用类型。在辐射防护中,根据中子能量的高低,将中子分为慢中子(能量小于1 eV(多为0.025 eV)的热中子和能量小于5 keV的中子),中能中子(能量在5~100 keV范围)和快中子(能量在0.1~500 MeV范围)三大类。中子与物质间的相互作用通常可分为散射和吸收两种形式。慢中子主要通过吸收与原子核发生作用;中能中子和快中子与原子核的作用形式为散射。这两种作用形式又会产生次级辐射。中子与物质之间的相互作用,首先是快中子的散射和减速,之后是慢中子被吸收后引起次级辐射放出共化粒子或 $\gamma$ 射线。因此,对中子的屏蔽可以从两个方面考虑,即将快中子慢化和对慢中子的吸收<sup>[8]</sup>。

## 2 国内外屏蔽材料研究现状

### 2.1 X/γ射线防护材料

铅和铁是单质类防护材料应用最广泛的金属材料。铅是最早应用于辐射屏蔽的材料,也是最常用的。铅不仅对低能和高能的 $X$ 光子和 $\gamma$ 光子具有优异的屏蔽性能,而且加工方便,产量充足。纯金属铅制作成铅皮或铅板可以用于移动频繁的小型或局部屏蔽设备中。但是铅对低能 $X$ 射线反向散射高、对能量介于40~88 keV之间的射线存在“Pb弱吸收区”。SINGH K J等<sup>[9]</sup>制备的 $PbO-SiO_2$ 系玻璃具有较高的 $\gamma$ 射线吸收性能;SING S等<sup>[10]</sup>和陈博等<sup>[11]</sup>采用熔体淬火方法,以氧化钡、氧化硼和粉煤灰为原料,制备出具有良好辐射防护性能的新型玻璃。然而陶瓷基复合材料硬度大、易碎、加工困难,使得陶瓷基复合防护材料的应用上存在局限性。

### 2.2 中子防护材料

由于中子的质量与质子质量相近,氢含量较高的聚乙烯、聚丙烯是较好的快中子慢化材料;而含锂、硼等元素的化合物,如氟化锂、溴化锂、硼酸、碳化硼等对慢中子有较强的吸收能力。此外,若将快中子慢化物质和热中子吸收物质的微粉混合使用,则可发挥二者的协同效应,实现同时屏蔽中能和低能中子的目的。

聚合物基复合材料作为防中子辐射纤维,通常由聚合物纤维和中子吸收添加剂组成。聚乙烯、聚丙烯、聚氯乙烯和聚碳酸酯均具有较好的快中子慢化能力,可作为聚合物基体并通过熔融纺丝的方法得到相应的纤维;中子吸收剂则主要包括重元素、具有较大吸收截面的元素和化合物<sup>[12]</sup>。

20世纪70年代,日本东丽公司采用中子吸收剂与高聚物熔融混合作为芯层,再以纯高聚物为皮层,通过复合纺丝法制得了具有皮芯结构的防中子辐射纤维<sup>[13]</sup>。此后,又有科研人员通过共聚的方法将锂、硼化合物微粉加入聚乙烯中,同样利用皮芯复合纺丝工艺制备了防中子辐射纤维,获得了较好的防辐射效果<sup>[14-15]</sup>。

国内的相关研究始于20世纪80年代,王学晨等<sup>[16]</sup>在纤维芯部添加偶联剂和中子吸收物质,制得具有皮芯结构的纤维,该碳化硼质量分数约为35%,同时具有较好的力学性能,适宜于制作辐射防护织物。碳化硼含量的提高有利于耐辐照性的改善,但可纺性则随之下降,为保证纤维的力学性能,碳化硼含量应适当控制。齐鲁等<sup>[17]</sup>采用碳化硼

微粉和聚乙烯醇为原料,通过湿法纺丝工艺制备防中子辐射纤维,该纤维对热中子具有较好的屏蔽效果,对中能中子也有一定的屏蔽作用。段谨源等<sup>[18]</sup>以聚乙烯醇和碳化硼为主要原料,采用湿法纺丝工艺制得一种中子防护纤维,同时研究了该纤维的加工成型方法,并测试了纤维的性能。结果表明,该纤维具有很强的热中子屏蔽能力,对中能中子也有一定的屏蔽功能,其防护效果达到国外同类水平。

刘力等<sup>[19]</sup>也对中子防护复合材料进行研究,结果表明,硼/聚乙烯和硼/聚甲基丙烯酸甲酯复合材料具有良好的屏蔽中子能力,但由于吸收中子后所形成的氦、锂没有吸收中子的能力,屏蔽性能随着吸收的进行逐渐递减。为此提出在该复合材料中加入一定量的稀土元素(稀土元素中的许多元素对热中子的  $n,\gamma$  反应截面比硼和镉高出几十倍,对慢中子和中能中子的反应截面也比后者高出许多倍),在保证良好界面相容的前提下,稀土高分子复合材料有效地弥补了铅的弱吸收区,是屏蔽中子辐射的理想材料。

### 3 核防护的评价标准

目前,核射线防护安全相关标准可查询到的有

GB 16757—2016《X 射线防护服》、LD 86—1996《100 keV 以下辐射防护服》、GBZ130—2013《医用 X 射线诊断放射防护要求》、GBZ 179—2006《医疗照射放射防护基本要求》、GB Z/T 271—2016《核或辐射应急准备与响应通用准则》及 GBZ/T 279—2017《核和辐射事故医学应急处理导则》。其中,GB 16757—2016《X 射线防护服》适用于接触 X 射线人员穿用的防护服。该标准以铅当量为指标评价防护材料的屏蔽能力,同时规定了 X 射线防护材料的物理性能(如拉伸强度,拉断伸长率,撕裂强度及材料硬度)并进行分级;另外,该标准还对 X 射线防护服的内外面覆盖材料性能进行了规定。LD 86—1996《100 keV 以下辐射防护服》适用于防 100 keV 以下辐射用不含铅的材料制成防护服产品系列。该标准规定了操作者按照不同照射剂量选用不同级别的防护服,防护服的防护效率采用 X ( $\gamma$ ) 剂量仪测定,防护效率以服装上、中、下 3 处的平均值为有效值,具体如下:

防护效率 = 
$$\frac{\text{样品前照射剂量} - \text{样口后照射剂量}}{\text{样品前照射剂量}}$$

国内核射线防护服安全标准及相应技术要求见表 1。

表 1 核射线防护服安全标准  
Tab.1 Safety standard for nuclear radiation protective clothing

标 准	防护材料技术要求		
	外 观	性 能	其 他
GB 16757—2016 《X 射线防护服》	不得有孔隙、裂痕、气泡、污点、异物和薄厚不均匀;不得修补、拼接或有补丁	拉伸强度/MPa 1 级 纵向 >4.8,横向 >4; 2 级 纵向 >6,横向 >5 拉伸伸长率/% 1 级 纵向 >320,横向 >300; 2 级 纵向 >400,横向 >380 撕裂强度/(kN/m) 1 级 纵向 >16,横向 >15.5; 2 级 纵向 >16.5,横向 >16 硬度/邵氏 A 1 级 ≤68; 2 级 ≤65	铅当量分类: I 级 0.25 mm ≤ $\delta_{Pb}$ < 0.35 mm; II 级 0.35 mm ≤ $\delta_{Pb}$ < 0.5 mm; III 级 0.5 mm ≤ $\delta_{Pb}$ < 1.0 mm; IV 级 $\delta_{Pb}$ ≥ 1.0 mm
LD86—1996《100 keV 以下辐射防护服》	分布均匀、无破损	断裂强力/N 经向 ≥600; 纬向 ≥400 耐水洗性/% ≥70	防护效率分类: I 级 ≥70% ; II 级 ≥80% ; III 级 ≥90%

GBZ130—2013《医用 X 射线诊断放射防护要求》、GBZ 179—2006《医疗照射放射防护基本要求》、GBZ/T 271—2016《核或辐射应急准备与响应通用准则》和 GBZ/T 279—2017《核和辐射事故医学

应急处理导则》为职业卫生指标。GBZ130—2013 主要对医用诊断放射学、牙科放射学和介入放射学用设备防护性能、机房防护设施及 X 射线诊断操作的通用防护安全要求及其相关检测要求进行了规

定,适用于医用诊断放射学、牙科放射学和介入放射学的实践。该标准主要规定了设备的防护性能要求,而未对暴露在射线工作人员防护穿着进行规定。GBZ 179—2006 规定医疗照射的放射防护基本要求,适用于患者在医学诊断和治疗、职业健康监护、健康检查等过程中所接受的照射,对医疗照射的正当性判断、医疗照射防护的最优化给出一般要求,并对检查部位、投照方位,每次摄影入射体表剂量等给出了指导水平。GBZ/T 271—2016 规定了核或辐射应急准备与响应防护行动和其他响应行动的通用准则,适用于核或辐射应急的准备与响应。该标准给出了应急响应准则体系,为通用准则,给出了限制应急工作人员受照剂量的指导值。GBZ/T 279—2017 规定了核和辐射事故医学应急处理的原则和要点,适用于核和辐射事故的医学应急处理。

以上防护标准中多是防护 X 射线的相关标准,而对于中子辐射防护还没有国标,基本上都是企业标准。

## 4 轻质核防护服

### 4.1 轻质核防护服的设计思路

随着现代多种辐射核防护技术的发展,核辐射防护研究从大型固定传统辐射防护的重质材料转向紧凑型可移动防护轻质材料;从注重核设施的辐射防护转向注重核设施的辐射防护和辐射危险人群的防护并重。然而,由于铅的密度大,市面上以铅为主要屏蔽材料的防护服笨重不易取用,使得作业人员可操作性差,同时作为重金属的铅在使用过程中会对环境造成严重污染,且不易回收处理。因此,研究中子辐射、X/γ 射线等多种辐射环境下轻质防护纺织材料的结构和本体抗核辐射能力对防护效应的影响显得尤为重要。

传统的辐射防护屏蔽材料已经不能满足应用要求,核工业技术应用领域对屏蔽材料的要求推动着辐射屏蔽材料不断更新。因此,开发多功能复合、轻质、高效的辐射屏蔽材料将是未来的研究热点<sup>[20-21]</sup>。

**4.1.1 轻质** 穿着舒适性是防护服的重要指标之一。服装的舒适性包括手感、硬挺度、悬垂性,以及穿着服装过程中排出人体产生的热量和湿气的的能力。若穿着厚重的防护服,在很短的时间内就会达到热负荷轻度极限,从而降低人体运动的灵活性,增加作业人员在操作过程中的事故发生率;舒适性差的防护服,不易长时间穿着。因此,在保证防护

性能的前提下,应尽可能控制防护材料的厚度和质量,增加作业人员的可操作性。

**4.1.2 高效** 在已研制使用的辐射屏蔽材料中,铅是一种较好的辐射屏蔽材料,虽然增加铅的比例可在一定程度上提高材料的吸收性能,但由于铅的密度大,也降低了材料物理性能和使用性能,并且铅回收会对环境造成一定的污染。因此,希望研制出具有优异辐射屏蔽性能的防护材料。

**4.1.3 质密** 作业人员在接触核辐射材料的过程中,某些有毒物质会从防护材料的缝隙、孔洞或其他缺陷处以非分子水平透过防护材料,从而使防护材料发生降解,导致一种或多种物理性能降低。因此,研制过程中要求核防护服质密,防护材料不得有孔隙、裂痕、气泡等薄厚不匀;不得修补、拼接或有补丁的现象。

### 4.2 轻质核防护的研究进展

传统的中子辐射防护材料,通常是将无机硼化物与聚合物物理共混制成复合材料或纤维,这类混合材料虽然具有一定的抗中子辐射性能,但是无机物与聚合物之间存在无法克服的相容性以及不易分散等缺点,并且当硼元素增加到一定量后材料的力学性能下降,从而使材料的屏蔽效能变差。

北京航空航天大学在前期研究的基础上,采用有机杂化的方式,在聚酯 PET 和 PBT 分子链结构中引入含有多硼和多氢的有机硼氢笼型结构,制备出有机硼氢含量可控的聚酯纤维,赋予核辐射防护服轻质、屏蔽效率高等特点,大大改善了材料的中子屏蔽性能和机械性能<sup>[22-25]</sup>,具体合成路线如图 2 和图 3 所示;同时通过纺丝设备制备出含硼量可控的屏蔽纤维,具体如图 4 所示。

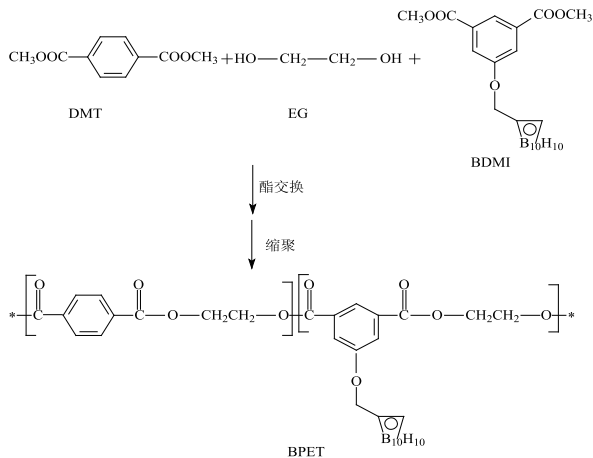


图 2 含多硼多氢笼型结构的 PET 聚酯合成路线

Fig. 2 Synthesis of PET-containing polyboron and polyhydrogen cage structure

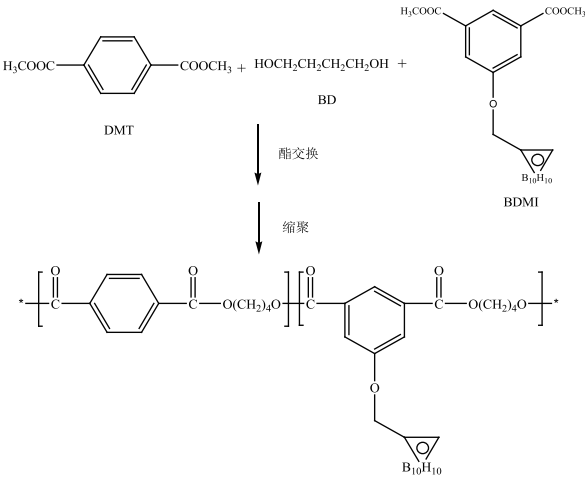


图 3 含多硼多氢笼型结构的 PBT 聚酯合成路线

Fig.3 Synthesis of PBT-containing polyboron and polyhydrogen cage structure



图 4 含硼量的屏蔽纤维

Fig.4 Shielding fiber containing boron

选择<sup>252</sup>Cf 为中子源,中子途经聚乙烯慢化层及直线通道( $d = 100\text{ mm}$ ),再经过样品槽,最后被<sup>3</sup>He 中子探测器检测,由数据处理仪器得到中子穿过数目,检测示意如图 5 所示。采用该测试仪测得含硼聚酯 PET 和 PBT 的中子屏蔽性能见表 2 和表 3。

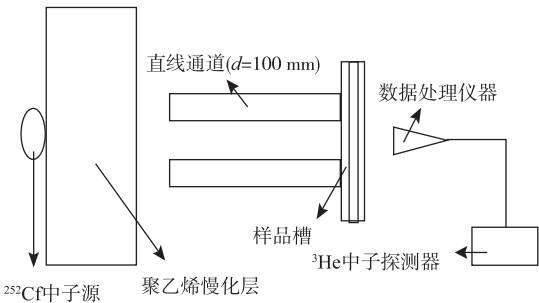


图 5 热中子屏蔽检测示意

Fig.5 Schematic diagram of thermal neutron shielding detection

表 2 含硼聚酯 PET 的中子屏蔽性能

Tab.2 Neutron shielding properties of PET-containing boron

样品	硼质量 分数/%	中子透过 率/%	吸收截 面/ $\text{cm}^{-1}$
空白样		100	
PET	0	99.8	1.935
1 <sup>#</sup> B-PET	1.375	99.6	2.740
2 <sup>#</sup> B-PET	2.692	98.8	3.897
3 <sup>#</sup> B-PET	3.953	97.7	5.705
4 <sup>#</sup> B-PET	5.163	96.6	8.696

注:薄膜厚度为 0.02 mm。

表 3 含硼聚酯 PBT 的中子屏蔽性能

Tab.3 Neutron shielding properties of PBT-containing boron

样品	硼质量 分数/%	中子透过 率/%	吸收截 面/ $\text{cm}^{-1}$
空白样		100	
PBT	0	99.5	0.430
1 <sup>#</sup> B-PBT	2.362	97.7	3.124
2 <sup>#</sup> B-PBT	4.553	97.4	6.740
3 <sup>#</sup> B-PBT	6.591	97.1	11.560
4 <sup>#</sup> B-PBT	8.491	96.6	17.037
5 <sup>#</sup> B-PBT	10.266	95.6	22.609

注:薄膜厚度为 0.02 mm。

图 6 为聚酯薄膜中硼元素质量与热中子透过率的关系,以薄膜的厚度表征硼元素质量的增加。

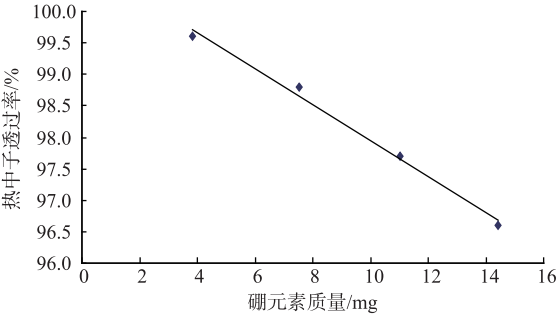


图 6 硼质量与热中子透过率的关系

Fig.6 Relationship between boron mass and thermal neutron transmittance

由图 6 可以看出,热中子的透过率随着聚酯中硼元素质量的增加而减弱,当薄膜厚度分别增大 10 倍和 20 倍,即薄膜厚度增大到 0.2 和 0.4 mm 时,热中子透过率分别为 58.7% 和 17.5%,由此可以说明薄膜具有良好的热中子屏蔽效果。

陕西省纺织科学研究院与北京航空航天大学合作研究,计划采用 X/ $\gamma$  屏蔽层专用树脂柔性涂料构建核心防护层,通过纺织技术配备特种面料外层和舒适里衬层,形成“三明治”夹心复合防护技术,

从而实现轻质中子和 X/ $\gamma$  射线防护功能集成方案,满足防护服整体质量小于 4 kg、而整体防护面积不小于 0.5 m<sup>2</sup> 的要求,热中子屏蔽率达到 50%;当  $\gamma$  射线能量为 120 keV 时,X/ $\gamma$  射线的防护能力不小于 0.5 mm Pb;整件防护服带电电荷量不大于 0.6  $\mu$ C。

## 5 结 语

目前,辐射防护用轻质纺织材料多采用物理混合的方法将防护功能体添加到高分子聚合物基体中。在共混过程中,随着防护功能体的增加,材料的辐射防护性能增强,但是当防护功能体增加到一定量后,若进一步提高防护功能体的含量,则防护材料的质量和体积都会随之增大,由于分子极性、密度差异和易团聚等问题使得材料的力学性能明显下降,并且材料的轻质化、防护性能与其他性能难以兼顾,以至无法应用。而采用化学共混法将屏蔽功能体以化学键的形式引入聚合物中,能够得到具有良好物理机械性能的本征性多种辐射防护材料。通过计算机模拟,计算中子和 X/ $\gamma$  射线在材料中的通量,从而优化材料的厚度和功能体的含量,是一种全新的研究思路,具有广阔的发展前景。

## 参考文献:

- [1] 郑钧正. 关于电离辐射防护学科的定位与内涵[J]. 辐射防护通讯, 2015, 35(3): 1-5.  
ZHENG Junzheng. Orientation and connotation of the discipline of ionizing radiation protection [J]. Radiation Protection Bulletin, 2015, 35(3): 1-5. (in Chinese)
- [2] 潘自强, 陈竹舟, 叶长青. 核和辐射恐怖事件后果的防护及其防护[J]. 核科学与工程, 2005, 25(1): 1-13.  
PAN Ziqiang, CHEN Zhuzhou, YE Changqing. Prevention and counteracting of nuclear and radiological-terrorist events[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2005, 25(1): 1-13. (in Chinese)
- [3] 郑钧正. 我国电离辐射防护学科与事业的历史演进梗概[J]. 辐射防护通讯, 2015, 35(4): 1-15.  
ZHENG Junzheng. The historical evolution of the discipline and the undertaking of protection against ionizing radiation in China [J]. Radiation Protection Bulletin, 2015, 35(4): 1-15. (in Chinese)
- [4] 施楣梧, 周洪华. 防辐射纤维及其纺织品研究[J]. 纺织导报, 2013(5): 91-93.  
SHI Meiwu, ZHOU Honghua. A study on fibers and textiles of anti-radiation [J]. China Textile Leader, 2013 (5): 91-93. (in Chinese)
- [5] 杨值宗, 邓磊, 喻莉, 等. 核辐射及其安全防护[J]. 物理

通报, 2012(2): 117-119.

YANG Zhizong, DENG Lei, YU Li, et al. Nuclear radiation and its safety protection [J]. Physics Bulletin, 2012 (2): 117-119. (in Chinese)

- [6] 江腾秀雄. 辐射防护[M]. 范朝晖, 译. 北京: 原子能出版社, 1986: 157.
- [7] 何建洪, 孙勇, 段永华, 等. 射线与中子辐射屏蔽材料的研究进展[J]. 材料导报, 2011, 25(增2): 347-351.  
HE Jianhong, SUN Yong, DUAN Yonghua, et al. Research progress of ray and neutron radiation shielding material [J]. Materials Review, 2011, 25 (Sup. 2): 347-351. (in Chinese)
- [8] 王志伦, 窦海英. 中子辐射防护[J]. 中国个体防护装备, 2006(5): 26-29.  
WANG Zhilun, DOU Haiying. Neutron radiation protection [J]. China Personal Protective Equipment, 2006(5): 26-29. (in Chinese)
- [9] SINGH K J, SINGH N, KAUNDAL R S. Gamma-ray shielding and structural properties of PbO-SiO<sub>2</sub> glasses [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2008, 266(6): 944-948.
- [10] SINGH S, KUMAR A, SINGH D, et al. Barium-borate-flaysh glasses: as radiation shielding materials [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2008, 266(1): 140-146.
- [11] 陈博, 姜志鹏, 罗青松, 等. 核辐射屏蔽材料的研究进展 [J]. 西部皮革, 2016, 38(20): 23-24.  
CHEN Bo, JIANG Zhipeng, LUO Qingsong, et al. Research progress in shielding materials for nuclear radiation [J]. West Leather, 2016, 38 (20): 23-24. (in Chinese)
- [12] 韩毅, 陈法国, 于伟跃, 等. 中子屏蔽材料研究现状[J]. 材料导报, 2015, 29(增2): 483-488.  
HAN Yi, CHEN Faguo, YU Weiyue, et al. Investigation of the research status of neutron shielding materials [J]. Materials Review, 2015, 29 (Sup. 2): 483-488. (in Chinese)
- [13] 韦薇. 防辐射纤维的研究[J]. 广西轻工业, 2010(7): 97-98.  
WEI Wei. Study on radiation-proof fiber [J]. Guangxi Journal of Light Industry, 2010(7): 97-98. (in Chinese)
- [14] 梁威, 杨青芳, 马爱洁. 防辐射纤维及材料的研究进展 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2005(5): 51-55.  
LIANG Wei, YANG Qingfang, MA Aijie. Progress in study of fiber and materials for radiation shielding application [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composite, 2005(5): 51-55. (in Chinese)
- [15] 顾琳燕, 高强, 唐虹. 防核服装及其研究进展[J]. 纺织报告, 2016(6): 29-33, 49.  
GU Linyan, GAO Qiang, TANG Hong. Anti-nuclear

- clothing and its research Progress [J]. Textile Reports, 2016(6):29-33,49. (in Chinese)
- [16] 王学晨,牛建津,印瑞斌. 聚丙烯与碳化硼共混体系的纺丝与性能研究[J]. 天津纺织工学院学报,2000,19(2):12-14.  
WANG Xuechen, NIU Jianjin, YIN Ruibin. Research on the spinnability and properties of PP/ B<sub>4</sub>C blend systems [J]. Journal of Tianjin Institute of Textile Science and Technology, 2000,19(2):12-14. (in Chinese)
- [17] 齐鲁,段谨源,王学晨,等. 防X射线纤维的力学性能及屏蔽效果[J]. 纺织学报,1995,16(2):23-25.  
QI Lu, DUAN Jinyuan, WANG Xuechen, et al. Mechanical properties and shielding effect of X-ray shielding fibers [J]. Journal of Textile Research, 1995,16(2):23-25. (in Chinese)
- [18] 段谨源,张兴祥,牛建津,等. 防中子辐射纤维的研制性能分析[J]. 天津纺织工学院学报[J]. 1993,12(2):59-69.  
DUAN Jinyuan, ZHANG Xingxiang, NIU Jianjin, et al. The manufacture and properties of neutron shielding fiber [J]. Journal of Tianjin Institute of Textile Science and Technology, 1993,12(2):59-69. (in Chinese)
- [19] 刘力,孙朝晖,吴友平. 稀土/高分子复合材料的射线屏蔽性能和磁性能[J]. 合成橡胶工业,2001,24(3):188-190.  
LIU Li, SUN Zhaohui, WU Youping. Radiation shielding and magnetic properties of rare earth/ polymer composites [J]. China Synthetic Rubber Industry, 2001,24(3):188-190. (in Chinese)
- [20] 霍瑞亭,杨文芳,田俊莹,等. 高性能防护纺织品[M]. 北京:中国纺织出版社,2008.
- [21] 柳伟钧,王强华. 防中子辐射纤维及复合材料的开发[J]. 玻璃钢/复合材料,2012(增1):266-268.  
LIU Weijun, WANG Qianghua. Development of anti-neutron radiation fibers and composites [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composite, 2012 (Sup. 1): 266-268. (in Chinese)
- [22] 赵晔,樊星,冯晨,等. 含碳癸硼烷交联聚氨酯弹性体的合成及热性能[J]. 高分子材料科学与工程,2015,31(10):1-5.  
ZHAO Ye, FAN Xing, FENG Chen, et al. Synthesis and thermal properties of carbon deborane-containing crosslinked polyurethane elastomers [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2015, 31 (10): 1-5. (in Chinese)
- [23] 王世超,陈功,杨继萍,等. 含碳癸硼烷结构的端炔丙基苯醚树脂的制备和表征[J]. 高分子材料科学与工程,2015,31(4):142-147.  
WANG Shichao, CHEN Gong, YANG Jiping, et al. Synthesis and characterization of bipropargyl phenyl ether-containing carborane derivatives [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2015, 31 (4): 142-147. (in Chinese)
- [24] 尹晓峰,黄鹏程,陈功. 卡十硼烷的合成及其在耐热胶粘剂中应用的研究进展[J]. 中国胶粘剂,2012,21(2):60-64.  
YIN Xiaofeng, HUANG Pengcheng, CHEN Gong. Research progress of carborane-10 synthesis and its application in heat-resistant adhesive [J]. China Adhesives, 2012,21(2):60-64. (in Chinese)
- [25] 蔡益波,陈功,杨继萍,等. 抗中子辐射新型含碳癸硼烷聚酯的研究[J]. 功能材料,2014,45(9):9096-9100.  
CAI Yibo, CHEN Gong, YANG Jiping, et al. Study on thermal neutron shielding ability of new carborane-containing polyester [J]. Journal of Functional Materials, 2014,45(9):9096-9100. (in Chinese)

(责任编辑:邢宝妹)