

无铅/少铅核辐射防护材料 X 射线铅当量 测量研究

赵 瑞¹ 吴金杰¹ 刘 博¹ 汤显强^{1,2} 郭 彬¹ 吕雅竹¹ 韩 露¹

1(中国计量科学研究院 北京 100029)

2(成都理工大学 成都 610059)

摘要 新型无铅/少铅核辐射防护材料被越来越多地应用于军事领域,用于保障军队人员的安全和身体健康。基于目前军用核辐射防护服屏蔽性能无法准确测量以及溯源问题,为满足国际上主流军用核辐射防护服辐射性能评价需求,建立了用于防护服铅当量测量装置,通过蒙特卡罗模拟和实验测量相结合方式建立了有效能量在 130 keV 条件下铅当量测量参考辐射质。采用窄束测量条件完成标准铅片的屏蔽性能测量,并对部分厂家生产的军用核辐射防护服材料进行了屏蔽效率与铅当量测试,铅当量测量结果的相对扩展不确定度为 4.2% ($k=2$),为后续更多的军用核辐射防护材料的出厂前性能测试提供测量参考。

关键词 核辐射防护材料, 130 keV X 射线, 衰减率, 铅当量

中图分类号 TL75⁺1

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.010201

X-ray lead equivalent measurement of lead-free/lead-composite nuclear radiation protection materials

ZHAO Rui¹ WU Jinjie¹ LIU Bo¹ TANG Xianqiang^{1,2} GUO Bin¹ LYU Yazhu¹ HAN Lu¹

1(National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

2(Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract [Background] Lead-free/lead-composite nuclear radiation protection materials are becoming increasingly prevalent in military applications to safeguard the health and safety of military personnel. Currently, accurate measurement and tracing of the shielding performance of military nuclear radiation protective clothing is difficult. [Purpose] This study aims to measure lead equivalent in nuclear radiation protection materials for satisfying the radiation performance evaluation requirements of international mainstream military radiation protective clothing. [Methods] Firstly, a device to measure lead equivalence in protective clothing was developed. Then, the reference radiation mass for lead equivalence at a photon energy of 130 keV was determined using a combination of Monte Carlo simulation and experimental measurements. Finally, the shielding performances of a standard lead sheet were assessed using developed device under narrow beam conditions, and shielding performances of military nuclear radiation protective clothing materials produced by a few manufacturers were tested in the same conditions. [Results] Evaluation results show the relative expanded uncertainty of lead equivalent measurement results for standard lead sheet and military nuclear radiation protective clothing samples correspond to 4.2% ($k=2$). [Conclusions] This study

国家市场监督管理总局技术保障专项(No.2022YJ33)资助

第一作者: 赵瑞, 男, 1992 年出生, 2018 年于成都理工大学获硕士学位, 主要研究方向为 X 射线计量

通信作者: 吴金杰, E-mail: wujj@nim.ac.cn

收稿日期: 2023-04-29, 修回日期: 2023-09-13

Supported by Special Technical Support Project of the State Administration of Market Supervision and Administration (No.2022YJ33)

First author: ZHAO Rui, male, born in 1992, graduated from Chengdu University of Technology with a master's degree in 2018, focusing on X-ray metrology

Corresponding author: WU Jinjie, E-mail: wujj@nim.ac.cn

Received date: 2023-04-29, revised date: 2023-09-13

identifies measurement conditions for subsequent performance tests of additional military nuclear radiation protective materials prior to delivery.

Key words Nuclear radiation protection materials, 130 keV X-ray, Attenuation rate, Lead equivalent

X射线在民用核技术领域的应用已经趋于成熟,尤其是医学诊断、介入治疗等,对X射线的防护也逐渐加强。其中,个人防护产品用于保护操作者、受检者免受X射线伤害,如防护围裙、防护眼镜等。铅作为传统防护材料,因其材料沉重,柔性差,且在特定能量区域吸收较弱,并且有毒,对人体和环境有害等缺点逐渐被以无铅柔性防护材料所取代^[1]。无铅柔性材料用作辐射防护服可以有效地在提供等效或更好的防护性能的前提下降低装备总质量,提高作战效率^[2-4]。目前,主流军用防护服均参照美国RST Demron全密闭式核辐射防护服,其材质采用金属钽纤维材料,是美国辐射屏蔽技术研究开发的一种改性聚乙烯(Polyethylene, PE)和聚氯乙烯(Polyvinyl chloride, PVC)的新技术,并且质量为传统铅衣的20%~30%,单层厚度近似为0.38 mm。钽对X射线和 γ 射线的衰减作用都与铅相当,可以有效地对辐射进行吸收且不含毒性。采用该技术生产制造的聚乙烯和聚氯乙烯具有抗核辐射能力,可以用作核辐射屏蔽材料^[5]。该防护服主要应用于核及射线的紧急事件处理、核恐怖和核事故、核设备检修、核事故救援小组、核环境作业及检查人员、出入境及关口检查、反恐特别小组、放射源处置人员等领域。根据军用辐射防护服的要求,一般重点部位对电离辐射防护性能要求是在130 keV X或者 γ 射线条件下铅当量大于0.5 mm Pb,非重点部位的铅当量大于0.25 mm Pb。

对于防护服的屏蔽性能评价测试,目前国内外均是以医用诊断防护材料为主,国际上有IEC 61331《Protective devices against diagnostic medical X-radiation》,其中包括三部分内容,分别是材料衰减性能的测定、防护玻璃板和防护服、护目镜和防护器具^[6-8]。另外还有德国标准DIN 6857-1^[9]、美国标准F2547-06^[10]。国内有GBZ/T 147-2002《X射线防护材料衰减性能的测定》^[11]和YY-T 0292.1-2020《医用诊断X射线辐射防护器具第1部分:材料衰减性能的测定》^[12]。医用防护服通常屏蔽X射线管的次级辐射,包括泄漏辐射和被受照物体的散射辐射。对于军用防护材料,通常是在核生化等紧急条件下的屏蔽和防护,可近似理解为主射束的屏蔽,其防护服的性能评价还未制定专门的标准规范,随着科技强军进程的加快,军方对于核辐射防护服等需求也越来越大,核辐射防护材料更多是朝着无铅或者少铅

的方向发展,急需对其屏蔽效率和铅当量等性能进行计量评价。本文主要针对这一需求,建立军用核辐射防护服屏蔽性能测试装置和方法,准确评估防护服的屏蔽效率和铅当量,为军队人员的人身安全提供计量保障。

1 原理及方法

1.1 X射线屏蔽的基本原理

辐射防护材料能够屏蔽X射线的主要原因就是X射线穿过物质时会与物质中原子发生反应,使得X射线强度降低。对于中、低能X射线,最主要的光电效应和康普顿散射效应。对于低原子序数的物质,在很宽的能量范围内,康普顿散射占优势;对于中、低原子序数的物质,在低能段时光电效应为主,高能段时康普顿散射占优势。窄束单能X或 γ 射线在物质中的减弱是遵从指数规律,即:

$$N = N_0 e^{-\mu d} \quad (1)$$

式中: N_0 和 N 分别是穿过物质前、后的光子数; d 是物质层的厚度, m ; μ 是X、 γ 射线在该物质中的线衰减系数, m^{-1} 。

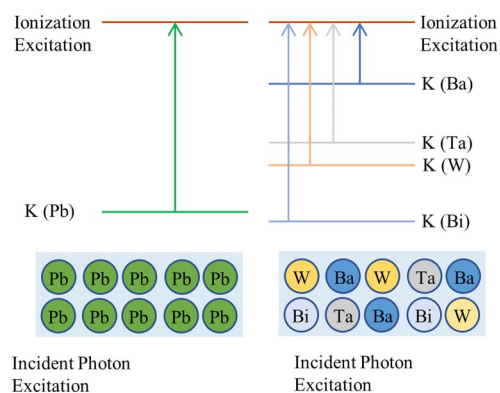


图1 不同屏蔽材料对电离辐射的屏蔽机理

Fig.1 Shielding mechanism of different shielding materials for ionizing radiation

防护材料对X射线的屏蔽效果主要由 μ 决定,不同材料在特定能量下具有不同的 μ ,当辐射防护服为多种材料的混合组成时,总的线衰减系数为各种元素在化合物或混合物中的质量百分比和相应的线衰减系数乘积之和^[13]。对于特定的材料,在不同能量下的质量衰减系数是具有规律的,通过NIST XCOM程序计算了不同单质在不同能量条件下的

质量衰减系数,如图2所示。

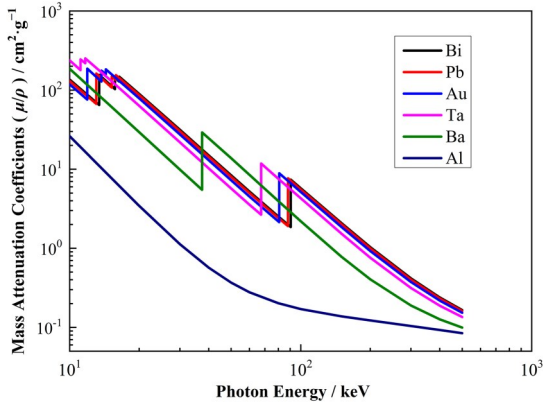


图2 几种单质材料的质量衰减系数(彩图见网络版)
Fig.2 Mass attenuation coefficient of several simple substance materials (color online)

即可得到如下:

$$N = N_0 e^{-\frac{\mu}{\rho} \cdot \rho \cdot d} \quad (2)$$

式中: $\frac{\mu}{\rho}$ 为质量衰减系数, $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。对于核辐射防护材料,在满足屏蔽条件的同时,需要尽可能减少其重

量,也就是当 $\frac{\mu}{\rho}$ 和 ρ 足够大时, d 可以减小。

1.2 窄束X射线参考辐射的建立

为了尽可能满足窄束、单能X射线条件,通常可采用钨合金或铅光阑进行多级限束,形成窄束条件,防止散射光子对测量结果的影响。对于单能或准单能X射线,可参照ISO 4037-1—2019标准中窄谱系列特性^[14],通过添加不同厚度的附加过滤的方式建立过滤X射线辐射质。辐射质可以用 Q_i 进行表征, Q_i 的定义为:

$$Q_i = \frac{E_{\text{eff}}}{E_{\text{tube}}} \quad (3)$$

式中: E_{eff} 为有效能量,keV; E_{tube} 为管电压,kV。对于窄谱系列通常 Q_i 大于0.8,越大表明能谱分辨率越小,单色性越好。本文结合实际需求,建立了80 kV、100 kV、120 kV、160 kV 4个参考辐射,利用蒙特卡罗模拟参考辐射能谱,并测量了X射线半值层及相关辐射特性参数。窄射线束测量方法如图3所示,选用平板型电离室进行实验测量。

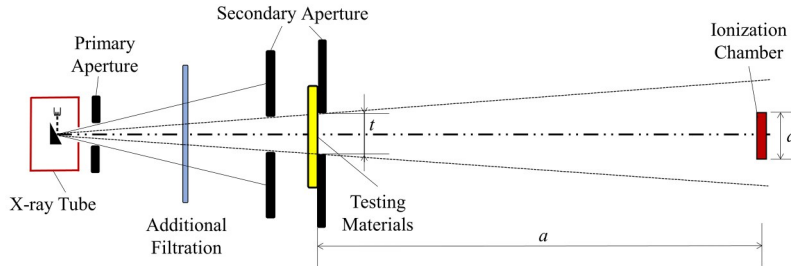


图3 窄射线束铅当量测量方法示意图
Fig.3 Schematic of lead equivalent measurement method for narrow beam

对于测试条件,窄射线束测量方法要求从测试样品到电离室中心的距离 a 应大于等于电离室直径 d 或从次级光阑出射的射线直径 t 的10倍,其中 d 和 t 取二者最大值。在窄射线束条件下,电离室处于均匀辐射野中心,并且被X射线全部覆盖,均匀照射。

1.3 衰减率和铅当量的测量

窄射线束测量方法被用来测量不考虑散射的辐射和荧光情况下的衰减特性,可用衰减率来表示^[15-16]。窄射线束条件下测得的衰减率可用 F_N 表示,计算公式如下:

$$F_N = \frac{\dot{K}_0 - \dot{K}_B}{\dot{K}_1 - \dot{K}_B} \quad (4)$$

式中: $\dot{K}_0$ 表示不添加材料时测量的剂量率; $\dot{K}_B$ 表示用一片相同形状且衰减率大于 10^5 的材料在辐射条件下测得的剂量率; $\dot{K}_1$ 表示在添加材料条件下测得

的剂量率。从式(4)可以看到, F_N 由比值计算得到,在实际测量中,由于材料的引入会导致参考辐射的能谱发生变化,所以用于测量的电离室需要较好的能量响应,以消除测试材料的引入所带来辐射能谱差异对测量结果的影响,通常电离室能量响应要求在4%以内。

铅当量指的是把某种厚度某种材料的屏蔽效果与达到同种屏蔽效果的铅的厚度的表达,称为该厚度防护材料的铅当量,通常用mm Pb表示,铅当量的大小决定着核辐射防护服屏蔽X射线的能力。利用标准铅片(纯度大于99.99%),测量不同能量下的射线衰减率,得到铅片厚度与衰减率的关系,拟合成曲线,作为该条件下标准衰减曲线,当进行其他材料测试时,只需要测量得到相应的衰减率,即可通过内插的方式得到相应的铅当量数值。

2 测量结果与分析

2.1 X射线辐射质测量结果

管电压在 80 kV、100 kV 和 120 kV 的过滤 X 射线是依据窄谱系列,对于 160 kV 的过滤 X 射线是通过蒙特卡罗模拟程序 EGSnrc 中 BEAMnrc 程序包结合窄谱系列特性计算得到相应的附加过滤,使产生的 X 射线有效能量为 130 keV,同时利用 SpekCalc 程序产生不同管电压下 X 射线辐射能谱^[17],得到的注量谱如图 4 所示,经过计算得出相应的半值层、有效能量。利用不同厚度的铜吸收片对 4 个辐射质的半值层进行测量,最后得出相应的半值层。

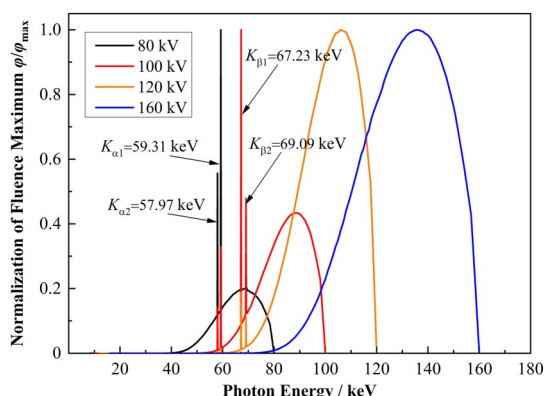


图 4 X 射线能谱模拟(彩图见网络版)
Fig.4 Simulation of X-ray energy spectrum (color online)

可以看出,对于模拟和测量结果,半值层偏差在 0.9% 以内,且 4 个辐射质的 Q_i 在 0.81~0.84,符合要求。半值层测量值比模拟计算得到的略大,主要原因是测量过程中由于散射辐射的影响,导致半值层偏大。该辐射质的建立,为核辐射防护服材料铅当量的测量提供了标准条件。

2.2 标准电离室的能量响应

选用 TW 34069 平板型电离室作为标准探测器,在 60~200 kV 窄谱过滤 X 射线参考辐射质下电离室进行校准,将测量结果在 60 kV 进行能量响应归一,得到电离室能量响应曲线如图 5 所示。可以看出,

TW 34069 电离室在规定范围内的能量响应最大偏差为 1.9%,能量响应曲线较为平坦。可以预期,采用该电离室测量辐射束衰减前和衰减后的剂量率的相对标准不确定度小于 2%,故可以在测量过程中不必考虑因为辐射材料的引入所导致的能谱的改变而造成电离室测量数值的变化,这与 Büermann^[18]和 Eder^[19]的测量结果是一致的。

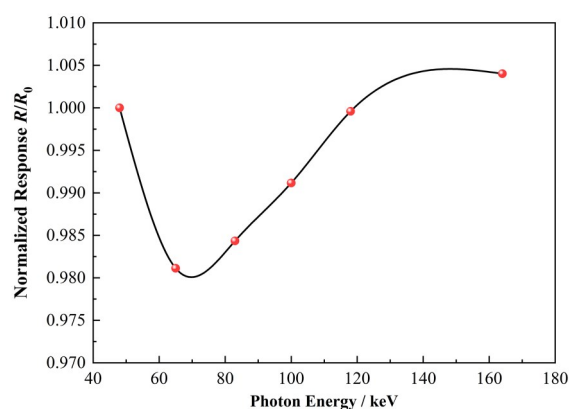


图 5 TW 34069 电离室能量响应曲线
Fig.5 Energy response curve of TW 34069 ionization chamber

2.3 铅当量测量

首先采用标称厚度分别为 0.1 mm、0.2 mm、0.3 mm、0.4 mm、0.6 mm 和 0.7 mm、尺寸为 15 cm×15 cm 的标准铅片在相应的 X 射线辐射束下进行测量,计算得到衰减率。在所建立的 160 kV 条件下将铅片厚度和衰减率进行线性-对数拟合,得到对应关系曲线,如图 6 所示。可以看出,在接近准单能和窄射线束条件下,对应关系曲线线性度好于 99%,表明杂散辐射引入的累计因子可以忽略不计,对于军用核辐射防护服材料的铅当量测量,可根据测量得到的衰减率直接利用该对应关系进行插值计算。

选用几种不同型号的核辐射防护材料,尺寸均为 15 cm×15 cm,分别对重点部位(型号 6 和型号 7)和非重点部位(型号 1~型号 5)在 160 kV 条件下进行屏蔽效率和铅当量测量,其结果如表 2 所示。结果表明,重点部位的铅当量基本上都能满足铅当量大

表 1 X 射线参考辐射质的建立
Table 1 Establishment of X-ray reference radiation quality

管电压 Tube potential / kV	附加过滤 Additional filtration / mm			半值层 Half value layer / mm Cu			有效能量 Effective energy / keV	Q_i
	Sn	Cu	Al	测量 Measurement	计算 Calculation	偏差 Deviation / %		
80		2.0	4.0	0.59	0.59	0.0	65.8	0.82
100		5.0	4.0	1.14	1.13	0.9	83.6	0.84
120	1.0	4.9	4.0	1.74	1.73	0.6	101	0.84
160	3.0	2.5	4.0	2.80	2.79	0.4	130	0.81

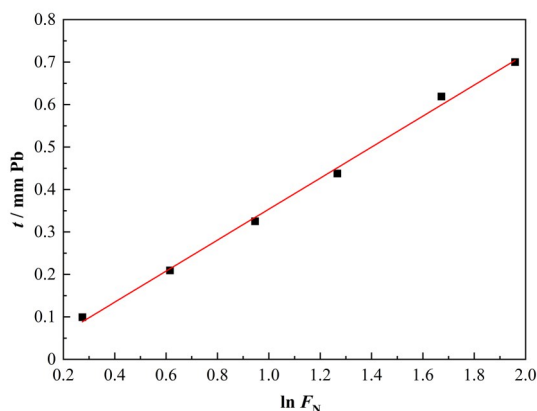


图6 160 kV下标准铅片厚度与衰减率的关系
Fig.6 Relationship between standard lead sheet thickness and attenuation rate at 160 kV

于0.5 mm Pb的要求,甚至更高,非重点部位铅当量结果存在一定差异,部分型号的产品不能满足指标。

表2 不同型号核辐射防护服材料铅当量测量结果

Table 2 Measurement results of lead equivalent of different types of nuclear radiation protective clothing materials

部位 Protective area	材料型号 Material model	屏蔽效率 Shielding efficiency / %	铅当量 Lead equivalent / mm Pb
非重点部位 Non-critical areas	1	33.4	0.136
	2	45.3	0.208
	3	47.9	0.226
	4	52.4	0.259
	5	55.8	0.287
重点部位 Critical areas	6	74.6	0.489
	7	82.2	0.619

表3 铅当量测量结果不确定度分析

Table 3 Uncertainty analysis of lead equivalent measurement results

源项 Source items	A类不确定度 Uncertainty of type A / %	B类不确定度 Uncertainty of type B / %
标准铅片的厚度测量 Thickness measurement of standard lead sheet	1.5	—
拟合方程 Fitting equation	—	0.23
电离室能量响应 Ionization chamber energy response	—	1.1
测试材料的测量 Measurement of test materials	0.5	0.5
扩展不确定度 Expanded uncertainty	4.2% ($k=2$)	

3 结语

本文通过对常用的军用核辐射防护服的调研,依托X射线机,建立了窄射线束铅当量测量参考辐射质,其中160 kV辐射质规范是目前迫切需求的测量规范。利用蒙特卡罗和实验测量得到了相应的半值层结果,验证了辐射质的准确性。为了满足窄束测量条件,研究了小体积平板电离室的能量响应,为

2.4 不确定度的评定

为了评估被测材料的铅当量 t 的不确定度,对测量过程中的每一个步骤进行分析。通常,被测材料的标称铅当量是已知的。对于标准铅片,除了纯度满足要求外,其标称厚度的准确与否以及不均匀程度直接决定测量结果,所以厚度的测量引入的不确定度可通过多次重复性测量得到。另外对于标准铅片,根据铅当量与衰减率的关系的拟合会引入一个不确定度,根据拟合结果可以看出,其相关系数为0.996,按均匀分布计算不确定度。对于衰减率的测量,电离室的能量响应也会引入不确定度,根据测量结果,在测量能量范围内能响不超过1.9%,按均匀分布计算不确定度。最后,对于核辐射防护材料衰减率的测量,通常会因为衰减材料的不均匀性以及重复测量所引入的不确定度。综上分析,对于铅当量测量的不确定度评定如表3所示。

铅当量的测量提供基础。在窄束条件下完成了标准铅片的屏蔽性能测量,得到相应的关系式,并对部分核辐射防护服材料其屏蔽效率和铅当量进行测量,铅当量测量结果的相对扩展不确定度为4.2% ($k=2$),其中德国联邦物理技术研究院(PTB)在窄束条件下的研究结果为3.4% ($k=2$)^[18],测量结果在不确定度范围内一致,满足目前窄束条件X射线铅当量测量需求。随着高分子无铅防护服的快速发展,

铅当量测量尤其需要考虑散射和荧光等带来的影响,后续继续对逆向宽束条件下X射线铅当量测量方法进行研究,以满足越来越多无铅防护服的铅当量测量需求。本文的研究结果为军用核辐射防护材料的铅当量测量提供依据,弥补了目前市场上针对军用防护材料铅当量测量存在测量条件不具备、测量方法不统一、测量标准不完善的现状,为更多的军用核辐射防护材料提供测量支持。

作者贡献声明 赵瑞负责文章实验设计和撰写;吴金杰负责整体把握文章思路,文章实验方案提供,技术指导;刘博负责铅当量装置的搭建和实验测量;汤显强负责屏蔽效率实验测量和蒙特卡罗模拟;郭彬负责防护材料样品的收集和测量;吕雅竹负责协助实验和数据分析;韩露负责图片处理和数据分析。

参考文献

- 1 陈利尧, 赵晓明. 柔性X射线防护材料的研究现状及展望[J]. 材料导报, 2021, 35(15): 15088 - 15093, 15106. DOI: 10.11896/cldb.20040096.
CHEN Liyao, ZHAO Xiaoming. Research status and development trend of flexible X-ray resistant materials[J]. Materials Reports, 2021, 35(15): 15088 - 15093, 15106. DOI: 10.11896/cldb.20040096.
- 2 刘丽英. 新一代军用防护服的性能要求和发展趋势[J]. 中国个体防护装备, 2006(6): 15 - 18. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0312.2006.06.004.
LIU Liying. Performance requirements and development trend of a new generation of military protective clothing [J]. China Personal Protective Equipment, 2006(6): 15 - 18. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0312.2006.06.004.
- 3 李文红, 魏宗源, 张立群, 等. 无铅屏蔽X射线材料的作用机理和技术优势[J]. 中国医学装备, 2008, 5(1): 13 - 15. DOI: 10.3969/j.issn.1672-8270.2008.01.007.
LI Wenhong, WEI Zongyuan, ZHANG Liqun, *et al.* Mechanism of lead-free protection X-ray material and its advantage[J]. China Medical Equipment, 2008, 5(1): 13 - 15. DOI: 10.3969/j.issn.1672-8270.2008.01.007.
- 4 马新安, 陈功, 张莹, 等. 核射线防护服的研究进展[J]. 服装学报, 2019, 4(2): 95 - 101. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7147.2019.02.001.
MA Xin'an, CHEN Gong, ZHANG Ying, *et al.* Research progress in nuclear ray protective clothing[J]. Journal of Clothing Research, 2019, 4(2): 95 - 101. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7147.2019.02.001.
- 5 Friedman H W, Singh M S. Radiation transmission measurements for demron fabric[R]. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, 2003.
- 6 IEC 61331-1:2014. Protective devices against diagnostic medical X-radiation — Part 1: Determination of attenuation properties of materials[ED/OL]. [2014-05-07]. <https://webstore.iec.ch/publication/5289>.
- 7 IEC 61331-2:2014. Protective devices against diagnostic medical X-radiation — Part 2: Translucent protective plates[ED/OL]. [2014-05-07]. <https://webstore.iec.ch/publication/5290>.
- 8 IEC 61331-3:2014. Protective devices against diagnostic medical X-radiation — Part 3: Protective clothing, eyewear and protective patient shields[ED/OL]. [2014-05-07]. <https://webstore.iec.ch/publication/5291>.
- 9 ASTM International. Standard test method for determining the attenuation properties in a primary X-ray beam of materials used to protect against radiation generated during the use of X-ray equipment, Standard F2547-06[M]. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006. DOI: 10.1520/F2547-06.
- 10 DIN 6857-1: 2009-01. Radiation protection accessories for medical use of X-radiation — Part 1: Determination of shielding properties of unleaded or lead reduced protective clothing[ED/OL]. [2013-01-12]. https://infostore.saiglobal.com/en-us/standards/din-6857-1-2009-01-410268_saig_din_din_928951/.
- 11 中华人民共和国卫生部. X射线防护材料衰减性能的测定: GBZ/T 147—2002[S]. 北京: 法律出版社, 2004.
Ministry of Health of the People's Republic of China. Determination of attenuation properties for protective materials against X-rays: GBZ/T 147—2002[S]. Beijing: Law Publishing House, 2004.
- 12 国家药品监督管理局. 医用诊断X射线辐射防护器具第1部分: 材料衰减性能的测定: YY/T 0292.1—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
State Drug Administration of the People's Republic of China. Protective devices against diagnostic medical X-radiation—Part 1: Determination of attenuation properties of materials: YY/T 0292.1—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- 13 闫思齐, 成鹏, 于广益, 等. 新型无铅柔性辐射防护材料的设计与防护效果模拟[J]. 核技术, 2020, 43(5): 10 - 15. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.050201.
YAN Siqi, CHENG Peng, YU Guangyi, *et al.* Design of novel lead-free flexible composites for radiation protection and simulation of protective effect[J]. Nuclear Techniques, 2020, 43(5): 10 - 15. DOI: 10.11889/j.0253-

- 3219.2020.hjs.43.050201.
- 14 ISO 4037-1:2019. X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy —Part 1: Radiation characteristics production methods [ED/OL]. [2019-01-06]. <https://www.iso.org/standard/66872.html>.
- 15 韩露, 赵瑞, 吴金杰, 等. 窄X射线束屏蔽材料铅当量测量研究[J]. 计量学报, 2021, 42(3): 370 - 374. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1158.2021.03.18.
- HAN Lu, ZHAO Rui, WU Jinjie, *et al.* Research on lead equivalent measurement of narrow X-ray beam shielding material[J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(3): 370 - 374. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1158.2021.03.18.
- 16 李梦宇, 赵瑞, 屈冰冰, 等. 低剂量率X射线辐射质的建立与仪器校准[J]. 核技术, 2022, 45(6): 060403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.060403.
- LI Mengyu, ZHAO Rui, QU Bingbing, *et al.* Establishment of low-dose rate X-ray radiation quality and calibration of the instruments[J]. Nuclear Techniques, 2022, 45(6): 060403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.060403.
- 17 Poludniowski G, Landry G, DeBlois F, *et al.* SpekCalc: a program to calculate photon spectra from tungsten anode X-ray tubes[J]. Physics in Medicine and Biology, 2009, 54(19): N433 - N438. DOI: 10.1088/0031-9155/54/19/N01.
- 18 Büermann L. Determination of lead equivalent values according to IEC 61331-1: 2014—report and short guidelines for testing laboratories[J]. Journal of Instrumentation, 2016, 11(9): T09002. DOI: 10.1088/1748-0221/11/09/t09002.
- 19 Eder H, Schlattl H. IEC 61331-1: a new setup for testing lead free X-ray protective clothing[J]. Physica Medica, 2018, 45: 6 - 11. DOI: 10.1016/j.ejmp.2017.11.015.