

金属材料对放射性核素的屏蔽性能研究

何星星, 刘颖, 潘喆, 王亚淼, 杨毅

(南京理工大学 环境与生物工程学院, 南京 210094)

摘要: 目的 为应对在核反恐以及核应急中屏蔽体对放射性核素的监测和识别干扰, 对金属材料屏蔽体的放射性核素屏蔽性能进行研究。方法 选用三种不同壁厚、材质的金属作为屏蔽体, 探测它们对同一放射源的屏蔽作用。结果 发现研究中的几种金属材料屏蔽体对 200 keV 以下的 γ 射线均具有较强的屏蔽作用, 尤其对于低强度射线, 经屏蔽体后几乎无法检测到。同一材质金属, 其屏蔽性能与壁厚成正比, 但是 4 mm 铝筒的屏蔽效果比 3 mm 钢筒的屏蔽效果有时候还差。结论 在实际场景放射性核素探测识别中, 应充分考虑到不同材质和不同壁厚的屏蔽体对射线的吸收影响, 从而快速检测和识别放射性核素。这对核反恐和核应急过程中的监测有特别的现实意义。

关键词: 核反恐; 屏蔽体; 放射性核素

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.06.003

中图分类号: TJ04 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2016)06-0010-05

Shielding Properties of Metal Materials to Radionuclides

HE Xing-xing, LIU Ying, PAN Zhe, WANG Ya-miao, YANG Yi

(School of Environmental and Biological Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

ABSTRACT: The paper aims to research shielding properties of metal materials to the radionuclides so as to monitor and deal with interference of shield which impacts on monitoring and identification of radionuclides during the nuclear terrorism and nuclear emergency. Three types of metal with different thickness and materials were used as shield to detect the shielding effect of them on the same radioactive source. It was found that metallic materials had strong shielding effects on the gamma spectrum below 200 keV, especially for the low intensity ray which was almost impossible to be detected. The shielding performance of the same kind of metal was proportional to the thickness. But sometimes the shielding effect of 4 mm aluminum cylinder was inferior to that of 3 mm steel tube. Therefore, we should fully consider the effects of shield with different materials and different sizes on the absorption of radiation in the actual scene of the radioactive nuclear detection and identification, thus to detect and identify radionuclides rapidly. It is of special significance in monitoring nuclear terrorism and nuclear emergency.

KEY WORDS: nuclear terrorism; shield; radionuclides

收稿日期: 2016-09-18; 修订日期: 2016-10-18

Received: 2016-09-18; Revised: 2016-10-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(11205089); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(30915011309)

Fund: Supported by the national natural fund project (11205089) and the special fund for basic scientific research business expenses of the Central University (30915011309).

作者简介: 何星星(1992—), 男, 湖北荆州人, 硕士, 要研究方向为辐射防护与核安全。

Biography: HE Xing-xing(1992—), Male, from Jingzhou, Hubei, Master, Research focus: radiation protection and nuclear safety.

通讯作者: 刘颖(1978—), 女, 吉林人, 博士, 讲师, 主要研究方向为辐射防护与核安全。

Corresponding author: LIU YING(1978—), Female, from JiLin, Doctor, Lecturer, Research focus: Radiation protection and nuclear safety.

国际原子能机构的部分统计数据表明,在当前的国际环境下,对核与辐射恐怖袭击活动的担忧已经不是杞人忧天,针对核或辐射恐怖袭击的应急准备必须尽早提上议事日程^[1-4]。为此,世界各国在严格使用和保存核物质的同时,加强对它们的检测和装备技术,以防止和打击恐怖分子企图制造的核袭击。对诸如汽车、海关等各关口的行人、车辆或火车等进行实时核安检,有助于防止放射性物质的非法扩散^[5-6]。在监测过程中,由于这些运输工具本身会屏蔽部分天然本底,造成探测器本底计数的下降。普通的监测仪器的报警阈值设定方案,是在无屏蔽体的时候通过采集本底形成报警阈值,在有诸如此类的屏蔽体时会锁定报警阈值,由此被检对象本身的屏蔽效应会造成监测系统的报警灵敏度降低^[7-9]。此外,屏蔽体厚度不同,放射源本身的平均自由程等也会对测量结果有一定的影响,测得的能谱也可能不同。因此在非法的放射源被恐怖主义隐蔽的储备、运输或者使用的过程中,如何对其快速监测识别的问题就变得日益突出。

通过研究金属材料对放射性的屏蔽性能,对在放射性核素现场中经常遇到的金属包装与屏蔽情况的识别,为未知放射性污染、核材料、核装置与放射源等进行快速放射性核素的识别具有重要的现实指导意义,也提供了可靠的技术支持。这种壁厚源外识别技术的研究,在军控核查领域的弹头识别核查中有可能得到有效应用,也可以应用于强辐射场定量测量中源的自吸收修正^[10-11],对在核反恐和核应急过程中的监测也有特别的现实意义。

1 研究方法

为了研究金属材料屏蔽体对放射性核素的屏蔽性,在不同材料以及厚度的屏蔽体条件下,使用同一种放射源,并利用探测器测量出放射源能谱的变化情况,通过谱图归一化的对比分析,分析屏蔽体本身屏蔽性特征以及壁厚对射线的屏蔽作用。

1.1 实验装置

实验所使用的放射源是¹⁵²Eu,¹⁵²Eu是一个衰变很复杂的核素,发射的多条 γ 射线覆盖能区宽,又因其半衰期较长(13.537年),所以它在 γ 谱仪的能量校准和效率校准中起着重要的作用^[12-14]。所选用的探测器为现在应用比较广泛的三种不同

类型的探测器,其基本情况如下:

1) CdZnTe 探测器。CdZnTe 探头选用 eV 公司的 CPG 10045,它带有前置信号处理电路,晶体大小为 $\phi 0.6'' \times 3''$,对于 122 keV 和 662 keV,标称相对能量分辨率分别为 6.83%和 2.27%,测量能量范围是 30 keV ~ 10 MeV。

2) LaBr₃(Ce)探测器。采用 Canberra 公司生产的 Inspector 1000 谱仪,其探头晶体是 Saint-Gobain 公司生产的 $\phi 1.5'' \times 1.5''$ LaBr₃(Ce)。探测器标称能量分辨率在 662 keV 能峰处为 2.8%。测量能量范围: 30 keV ~ 3 MeV。

3) HPGe 探测器。所用的 HPGe 探测器 γ 谱仪是 CANBERRA 公司生产的宽能低本底高纯锗谱仪探测系统,对于 1332.5 keV 能量峰,能量分辨率为 0.14%。测量能量范围: 3 keV ~ 3 MeV。

1.2 实验屏蔽体

IEC62327^[15]对手持仪器 γ 谱鉴别核素提出了要求与试验方法。IEC62327 标准中的对便携式 γ 谱鉴别核素要求与试验方法如下:无屏蔽条件下,剂量率为 0.5 μ Sv/h,1 min 内对单能核素¹¹¹In,¹³³Xe,^{99m}Tc,²⁰¹Tl,⁶⁷Ca,¹²⁵I,¹²³I,¹⁸F 进行识别;3 mm 钢屏蔽下,剂量率为 0.5 μ Sv/h,2 min 内对单能核素²⁴¹Am,⁵⁷Co,²³⁷Np 进行识别;5 mm 钢屏蔽下,剂量率为 0.5 μ Sv/h,2 min 内对单能核素¹³³Ba,⁴⁰K,¹³⁷Cs,⁶⁰Co,²²⁶Ra,²³²Th,¹⁹²Ir 进行识别。

为了研究金属屏蔽体对放射源的放射性屏蔽情况,根据 IEC62327,采用了三种一端封口的圆柱筒形状的屏蔽体,其材质和尺寸见表 1。

表 1 屏蔽体材质与尺寸
Table 1 Material and size of shield

编号	材质	内直径/cm	外直径/cm	高/cm	壁厚/mm
屏蔽体1	不锈钢	13	13.6	10	3
屏蔽体2	不锈钢	13	14.0	10	5
屏蔽体3	铝	13	13.8	10	4

2 实验结果

在相同的实验条件下,利用 HPGe 探测器、LaBr₃ 探测器和 CdZnTe 探测器,分别选用适当的放射源对谱仪进行能量刻度。然后利用放射源

¹⁵²Eu 得到实测 gamma 谱, 计算每个特征能量峰的净峰面积, 再以无屏蔽条件下的净峰面积作参考进行归一化。通过归一化后的结果对比, 讨论各探测器的屏蔽情况。

针对 HPGe 探测器, 选用 ¹⁵²Eu, 特征峰选用 121.78, 244.70, 344.28, 443.97, 778.90, 867.37, 964.08, 1085.87, 1408 keV 来进行能量刻度, 其屏蔽结果见图 1。从图 1 中可以看出, 对于低能 γ 射线, 不锈钢及铝屏蔽体均有着较好的屏蔽作用; 对于大于 400 keV 的 γ 射线, 其屏蔽效果只有 10% 左右, 而且随着能量的升高, 屏蔽效果逐渐削弱。由于 γ 射线穿过介质时强度衰减服从指数衰减规律, 衰减的快慢与穿过介质的厚度以及介质的衰减系数有关。衰减系数与介质的原子序数和入射 γ 能量有关: 介质的原子序数越大, 衰减越快; γ 射线能量越高, 衰减越慢。对于 HPGe 探测器, 相对于其他两种探测器, 能量分辨率好, 高能段的探测效率比较高, 因此屏蔽体对高能段 γ 射线的屏蔽效果差, 有利于探测器发现放射性核素。5 mm 不锈钢屏蔽体的效果要比 3 mm 好一些。对于不锈钢和铝两种不同材质的屏蔽体, 由于不锈钢的原子序数比铝大, 所以会出现 4 mm 铝屏蔽体的屏蔽效果不如 3 mm 的情况。

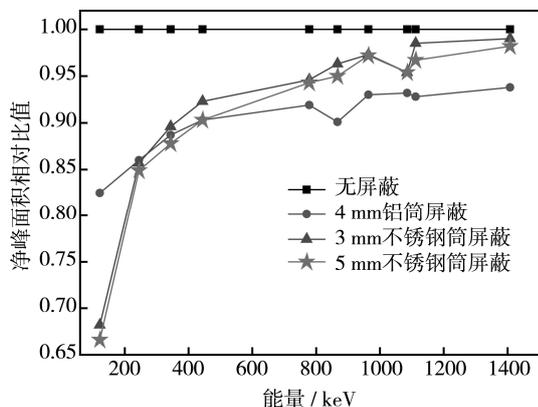


图 1 HPGe 探测器 gamma 谱仪屏蔽实验结果

Fig.1 Shielding experiment results of HPGe detector gamma spectrometer

针对 LaBr₃ 探测器, Inspector1000 选择谱测量模式, 选用 Stdlib 核素库, 采用其自带的 Fullcal 刻度功能进行自动能量刻度, 刻度源采用 ²⁴¹Am, ¹³⁷Cs 和 ⁶⁰Co。刻度峰选用 59.54, 661.65, 1173.21, 1331.48 keV。通过以无屏蔽条件下的净峰面积做参考归一化放射源 ¹⁵²Eu 的实测 gamma 谱, 得到其屏蔽结果如图 2 所示。

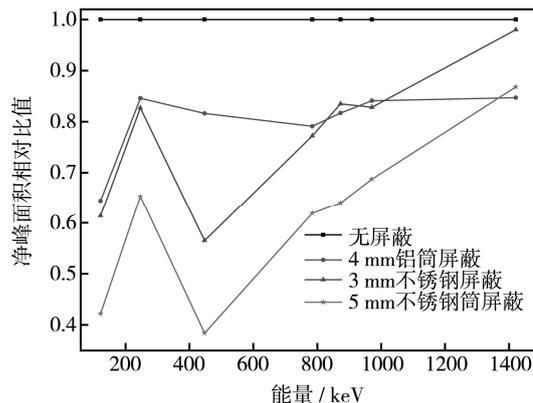


图 2 LaBr₃ 探测器 gamma 谱仪屏蔽实验结果

Fig.2 Shielding experiment results of LaBr₃ detector gamma spectrometer

LaBr₃ 探测器的屏蔽情况与 HPGe 探测器相比, 低能段的屏蔽效果更好, 而且在 300 keV 左右出现了一个拐点。这是由于就该实验所用的这两款探测器而言, HPGe 探测器比 LaBr₃ 探测器的探测效率要高, 能量分辨率好。LaBr₃ 探测器本身在 300 多 keV 处达到了其探测效率的峰值, 因而使得屏蔽实验中出现了明显的拐点。同样的, LaBr₃ 探测器的屏蔽实验中, 也出现了 4mm 铝屏蔽体的屏蔽效果不如 3mm 不锈钢屏蔽体的情况。

针对 CdZnTe 探测器, 能量刻度选择了放射源 ¹⁵²Eu, 特征峰选用 121.78, 344.28, 964.08, 1408.0 keV。再以无屏蔽条件下每个特征能量峰的净峰面积做参考, 对实测 ¹⁵²Eu 谱进行归一化, 得到其屏蔽结果见图 3。相对于前两种探测器, CdZnTe 探测器的能量分辨率与 LaBr₃ 探测器水平相当。而由于 CdZnTe 探测器晶体体积小, 因此探测效率比 HPGe 和 LaBr₃ 探测器都要低。特别是由于其在高能段的探测效率明显降低, 导致 800 keV 以上特征

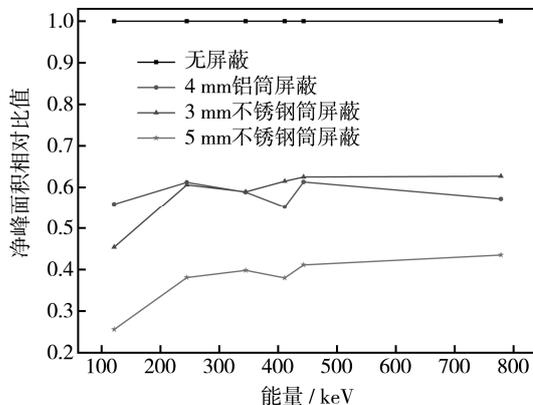


图 3 CZT 探测器 gamma 谱仪屏蔽实验结果

Fig.3 Shielding experiment results of CZT detector gamma spectrometer

峰的统计性很差,无法进行屏蔽效果的实验研究。同时,随着 γ 射线能量的升高,其屏蔽效果变化缓慢,这也表明了屏蔽体对 CdZnTe 探测器的影响比前两种探测器要大,不利于实际应用中放射性物质的监测和检测。

通过屏蔽实验的测量,结合数据分析结果可知,屏蔽体对 200 keV 以下的 gamma 谱具有较强的屏蔽作用,尤其对于 10~100 keV 的弱峰,经屏蔽体后几乎测不到。对于较强能量峰其衰减大约是 30%~50%,随着能量的增加,衰减程度逐渐减小,大约从 20%降为 10%。比较 3 mm 不锈钢筒和 5 mm 不锈钢筒的屏蔽结果得出,相同金属材质的屏蔽体,壁越厚,屏蔽效果越好。同时,比较 4 mm 铝筒屏蔽和 3 mm 不锈钢筒屏蔽的结果可知,在同等 γ 射线能量同样测量仪器的测量条件下,4 mm 铝筒的屏蔽效果比 3 mm 钢筒的屏蔽效果有时候还差,说明了不同金属材料的屏蔽体对放射性核素的屏蔽性也是有差异的。这也从侧面反映了放射性核素被动壁厚识别的难度。因此,在实际场景放射性核素探测识别中应充分考虑到屏蔽体的材质和尺寸对射线的吸收影响,从而为快速反映精确测量放射性核素提供有力的依据。

3 结语

在实验研究金属材料的屏蔽性能时,使用的屏蔽体是特制的规则的空心圆柱(有底),在实际的核应急过程中,放射性物质的屏蔽体的材料、结构、尺寸等基本参数可能都没有实验室里的那么规则,更何况在规则的屏蔽体屏蔽下测量其屏蔽效果时会遇到各种问题。由此可见,要对屏蔽体的问题进一步解决,需要研究出更为方便快捷的方法或仪器。目前有一种方法可以供参考,就是 X 射线光幕,这是一种可以分辨出屏蔽体外形的技术,通过 X 射线的衰减规律得到屏蔽体的密度信息^[16],可以方便我们更迅速、快捷地确定辐射因子。

参考文献:

- [1] 潘自强. 核与辐射恐怖事件管理[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
PAN zi-qiang. Nuclear and Radiological Terrorism Management[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [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范[J]. 核科学与工程, 2005(1): 1—13.
PAN Zi-qiang, CHEN Zhu-zhou, YE Chang-qing. The Protection and Prevention of the Consequences of Nuclear and Radiological Terrorism[J]. Nuclear science and Engineering, 2005(1): 1—13.
- [3] 郑丝雨, 葛楹, 马卫江, 等. 核与辐射恐怖事件的辐射应急监测准备与响应[J]. 中国辐射卫生, 2015(2): 162—164.
ZHENG Si-yu, GE Ying, MA Wei-jiang, et al. Radiological Emergency Preparedness and Response of Nuclear and Radio-logical Terrorism[J]. Radiation Hygiene in China, 2015(2): 162—164.
- [4] MAY M M. Proceedings of Risk Management-For Tomorrow's Challenges[J]. American Nuclear Society, 2011: 320—323.
- [5] 吴州. 放射性物质的检测技术和装备概述——《俄罗斯反恐防爆技术与装备》系列文章之三[J]. 警察技术, 2007(2): 53—57.
WU Zhou. Overview of the Technology and Equipment for the Detection of Radioactive Materials—Russia Anti Terrorist Explosion Protection Technology and Equipment Series of Articles Three[J]. Police Technology, 2007(2): 53—57.
- [6] 任林茂. 新形势下城市轨道交通的防恐措施研究[J]. 才智, 2014, 19: 251—252.
REN Lin-mao. Research on the Anti Terrorism Measures of Urban Rail Transit in the New Situation[J]. Intelligence, 2014, 19: 251—252.
- [7] 邓先祺, 李荐民, 王小兵. 降低放射性物质检测系统中被检车辆的屏蔽效应的方法研究[J]. 核电子学与探测技术, 2008, 28(1): 150—154.
DENG Xian-qi, LI Jian-ming, WANG Xiao-bing. To Reduce the Detection System of Radioactive Substances on the Method of Shielding Effect of Vehicles[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2008, 28(1): 150—154.
- [8] 杨璐, 王国保, 陈玉华, 等. 放射性物质检测装置的研制[J]. 同位素, 2005(Z1): 39—42.
YANG Lu, WANG Bao-guo, CHEN Yu-hua, et al. Development of Radioactive Material Detection Device[J]. Isotope, 2005(Z1): 39—42.
- [9] 史军军, 毕大平, 李季. 特殊人工环境下电子战装备的防护[J]. 装备环境工程, 2006, 3(4): 82—84.
SHI Jun-jun, BI Da-jun, LI Ji. Protection of Electronic Warfare Equipment in Special Artificial Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(4): 82—84.
- [10] 张连平, 韦孟伏, 吴伦强. 放射源壁厚被动识别的可行性分析[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(8): 762—765.
ZHANG Lian-ping, WEI Meng-fu, WU Lun-qiang. Fea-

- sibility Analysis of Passive Wall Thickness Identification of Radioactive Sources[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43(8): 762—765.
- [11] MIHALCZO J T, MATTINGLY J K, NEAL J S, et al. NMIS Plus Gamma Spectroscopy for Attributes of HEU, PU and HE Detection[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 2004, 213: 378—384.
- [12] CASTRO R M, PASCHOLATI P R, MAIDANA N L, et al. Developing ^{152}Eu into a Standard for Detector Efficiency Calibration[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2004, 60(2—4): 283—287.
- [13] GRIGORESCU E L, RAZDOLESCU A C, SAHAGIA M, et al. Standardization of ^{152}Eu [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2002, 56(1—2): 435—439.
- [14] FAO, IAEA, ILO, et al. International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources (IBSS), Safety Series No.115 [S]. IAEA, 1996.
- [15] IEC 62327—2006[S]. International Electrical Commission, 2006.
- [16] 王绍钢, 王苏程, 张磊. 高分辨透射 X 射线三维成像在材料科学中的应用[J]. 金属学报, 2013, 49(8): 897—910.
- WANG Shao-gang, WANG Su-cheng, ZHANG Lei. Application of High Resolution Transmission X-ray Three Dimensional Imaging in Materials SCIENCE[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(8): 897—910.