

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2018.05.019

# 面向辐射环境监测的反康普顿 $\gamma$ 能谱仪 蒙特卡罗模拟研究

邹全, 安竹

(四川大学原子核科学技术研究所辐射物理及技术教育部重点实验室, 成都 610064)

**摘要:** 使用蒙特卡罗软件 Geant4 设计模拟了一套用于核事故等辐射环境监测的反康普顿  $\gamma$  能谱仪。主探测器采用 HPGe 探测器, 选择新型闪烁体晶体  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  作为次级探测器。利用 Geant4 对探测器系统进行模拟优化, 确定最佳的探测器尺寸和结构。模拟的  $\gamma$  射线能量范围从 500 到 1500 keV。结果表明, 增加主体  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  晶体厚度能显著提升康普顿抑制系数, 当主体  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  晶体厚度达到 60 mm 时, 提升效果明显减弱; 在 HPGe 探测器的后方添加  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  晶体也能一定程度提升抑制效果, 而在 HPGe 探测器的前方增加  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  晶体厚度对康普顿抑制系数的提升非常有限。在最优化条件下模拟测量了放射性核素 I-131, Cs-134, Cs-137 和 K-40, 对发射单能  $\gamma$  射线的 Cs-137 和 K-40 康普顿抑制效果很好, 对存在级联衰变的 I-131 和 Cs-134 抑制效果相对较弱。

**关键词:** Geant4; 反康普顿  $\gamma$  能谱仪; 康普顿抑制系数; 辐射环境监测

**中图分类号:** TL817.2; TL751 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2018)05-1025-06

## Monte Carlo optimization of a Compton suppression system for gamma-ray diagnosis of radioactive environment

ZOU Quan, AN Zhu

(Key Laboratory of Radiation Physics and Technology of Ministry of Education,  
Institute of Nuclear Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

**Abstract:** In this study, the Geant4 toolkit is used to simulate a Compton suppression system based upon HPGe primary detector for radioactive environment such as nuclear plant accident.  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  crystal is selected for the anti-coincidence secondary detector. Simulations for the detector system are performed to gain the optimal sizes for 500~1500 keV  $\gamma$  rays. Simulation results show that the Peak Compton Suppression Factors (Peak CSFs) increase significantly with the thickness increase of the body  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  crystal from 10 to 60 mm, the Peak CSFs do not increase obviously after the thickness of the body  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  crystal reaches 60-70 mm. Moreover, by adding a  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  crystal to the back of the HPGe detector can also improve the Peak CSFs, but by adding a  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  crystal to the front of the HPGe detector has little effect on improving the Peak CSFs. Finally, we simulate a variety of sources in our Compton suppression system under the optimal conditions; for Cs-137 and K-40 that decay via a single  $\gamma$  emission Compton suppression effects are good; for I-131 and Cs-134 that decay in cascade some improvements are still obtained.

收稿日期: 2017-04-08

基金项目: 核工业西南物理研究院横向项目(HG2015099)

作者简介: 邹全(1992-), 男, 四川仁寿人, 硕士, 核技术及应用专业. E-mail: 1332190770@qq.com

通讯作者: 安竹. E-mail: anzhu@scu.edu.cn

**Keywords:** Geant4; Anti-coincidence detectors; Compton suppression factor; Radioactive environment monitoring

## 1 引言

近几十年,核能迅速发展给人类带来很多便利,也给环境带来一定污染.早期的核试验伴随着大量放射性物质污染,随着能源短缺,开始兴建大量核电站,带来了大量能源的同时,也留下安全隐患<sup>[1]</sup>.2011年3月11日,日本东北海域发生9.0级地震并引发海啸,受此影响日本福岛第一核电站发生核泄露事故<sup>[2-4]</sup>,大量放射性物质泄露,如Cs-137, Cs-134和I-131等核素,给环境造成严重污染<sup>[5-7]</sup>.目前,有媒体表明,福岛事故还没有得到完善处理,仍有继续泄露的可能.水、土壤、食品安全受到威胁,为分析低活度物质,本文利用Geant4设计一种基于HPGe主探测器的反康普顿 $\gamma$ 能谱仪,模拟探测器系统,对500~1500 keV的 $\gamma$ 射线进入反康普顿 $\gamma$ 能谱仪进行优化.

主探测器选用高分辨率高效率的HPGe探测器,在主探测器周围围绕8个次级探测器作为反符合探测器.次级探测器选用LaBr<sub>3</sub>(Ce)探测器.LaBr<sub>3</sub>(Ce)晶体是近年来发展的一种新型闪烁体晶体,具有探测效率高、光产额大、衰减时间短、温度效应小、密度大等特点,受到核探测领域的广泛关注.随着工艺和技术的进步,大尺寸的LaBr<sub>3</sub>(Ce)晶体生长成功,其商业应用也越来越广泛<sup>[8-10]</sup>.与NaI(Tl)对比,它具有很好的探测效率和宽能范围;与BGO对比,它衰减时间短,时间分辨率高,计数高,温度效应好,光产额变化小,能适应各种环境,很适合用于核事故的辐射环境分析.探测器系统工作时,LaBr<sub>3</sub>(Ce)用来吸收从HPGe探测器逃逸的光子能量进行反符合,只记录 $\gamma$ 射线的全能峰,这样大大削弱和压低了HPGe探测器所测 $\gamma$ 能谱中康普顿连续本底,提高了峰康比.

## 2 验证

Geant4软件是一个采用面向对象技术构建的蒙特卡罗通用程序包<sup>[11]</sup>,反康普顿 $\gamma$ 能谱仪的优化通过Geant4来完成.在Geant4中,通过“event”和“step”过程实现反符合功能.模拟一个粒子从发射到所有粒子(包括次级粒子)死亡的过程,称为一次“event”.每次“event”由很多个“step”组成,当粒子的信息(如能量、电荷、质量等)发生变化

时,就在变化的两点之间生成一个“step”,粒子在其中损失的能量等信息都记录在这个“step”中.因此,在模拟的反康普顿探测系统中,当 $\gamma$ 射线进入HPGe初级探测器,利用“step”记录沉积在探测器中的能量.此时,如果同时有能量沉积在LaBr<sub>3</sub>(Ce)次级探测器中,就删除这个“step”所在的“event”中所有沉积的能量.

为了验证编写的反符合功能程序,模拟了文献<sup>[12]</sup>里面的探测器(40 mm厚的Lid)探测Co-60放射源的情况,我们的模拟用与文献<sup>[12]</sup>中相同的物质材料和几何结构.对于HPGe探测器的内部结构,比如冷指直径和晶体支架的具体尺寸,在文献<sup>[12-13]</sup>中没有详细地给出,在模拟时从其它文献资料中获得.我们的模拟结果如图1所示,与文献<sup>[12]</sup>里面的图11对比,可以发现我们与他们的结果几乎是完全相同的.

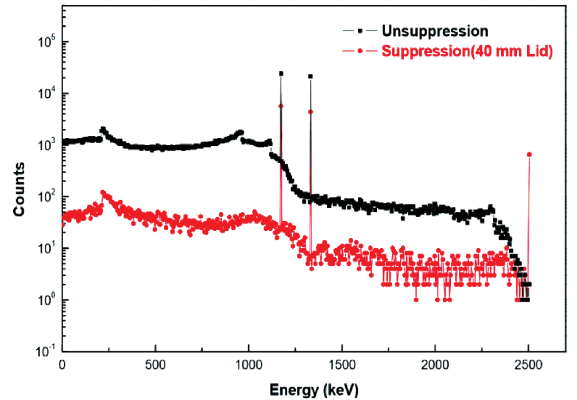


图1 本文用Geant4模拟的文献<sup>[12]</sup>中的探测器测量Co-60的结果,模拟的探测器与文献中的探测器具有相同的几何结构和材料物质

Fig. 1 Our unsuppressed and suppressed simulation results for Co-60 source by Geant4 code with the same materials and geometrical conditions (40 mm thick lid) as in Ref. <sup>[12]</sup>

## 3 结果与讨论

为了量化对康普顿连续本底的抑制效果,在本文中,使用了峰康比(P/C),峰总比(P/T),还有康普顿抑制系数(CSF)来评估优化效果<sup>[12,14,15]</sup>.

峰康比(P/C):全能峰计数与康普顿坪的平均计数之比.康普顿坪一般是一个平台,通常在康普顿边缘的左边.在本文中,康普顿坪选取为 $(0.75 - 0.8) \times E_c$ ,  $E_c$ 是康普顿边缘的最高能量<sup>[16]</sup>.

峰总比(P/T):全能峰计数与能谱的总计数之比.

Peak CSF:定义为反符合与未反符合的能谱的峰康比之比.

Total CSF:定义为反符合与未反符合的能谱的峰总比之比.

最初设计的反康普顿  $\gamma$  能谱仪如图 2 所示,在模拟中,考虑了 HPGe 探测器的晶体死层、冷指、铜支架、真空环境,几何结构参数来自于一款 P 型同轴 HPGe 探测器<sup>[17]</sup>. 将  $\gamma$  射线点源放置在探测系统内部,置于 HPGe 探测器探头的正前方,并各向同性发射,用 Geant4 模拟优化当前探测系统,获得更高的 CSF 值.

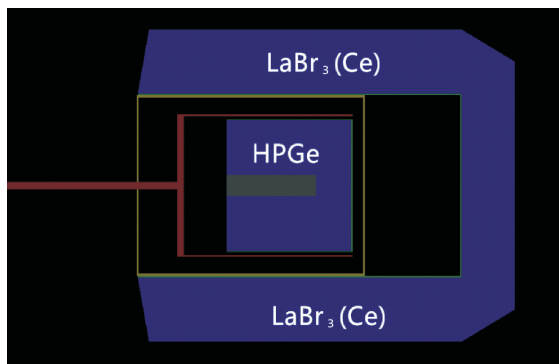


图 2 探测器结构剖面图:HPGe 晶体在内部的中心,HPGe 探测器被 LaBr<sub>3</sub>(Ce) 晶体围绕包裹成密闭空间

Fig. 2 A cross-section of the geometry for the detector system; the HPGe crystal is shown in the centre, which is surrounded by LaBr<sub>3</sub>(Ce) crystals

### 3.1 主体 LaBr<sub>3</sub>(Ce) 晶体厚度

主体 LaBr<sub>3</sub>(Ce) 晶体是 8 个 LaBr<sub>3</sub>(Ce) 晶体围成的空心圆柱,改变主体 LaBr<sub>3</sub>(Ce) 的厚度进行模拟以获得最优的主体 LaBr<sub>3</sub>(Ce) 厚度,模拟的主体 LaBr<sub>3</sub>(Ce) 厚度范围为 10~70 mm. 对不同能量的  $\gamma$  射线及不同厚度的主体 LaBr<sub>3</sub>(Ce) 的 Peak CSF 值如图 3 所示. 可以发现,对不同能量的  $\gamma$  射线,随着主体 LaBr<sub>3</sub>(Ce) 厚度的增大,Peak CSF 值在明显增加,而在主体 LaBr<sub>3</sub>(Ce) 厚度从 60 mm 增加到 70 mm 时,Peak CSF 值的提升效果已明显降低. 因此,综合性价比考虑,最优的主体 LaBr<sub>3</sub>(Ce) 厚度为 60 mm.

### 3.2 Lid 晶体的厚度

当  $\gamma$  射线进入 HPGe 探测器时,有部分粒子可能穿透 HPGe 探测器逃出反康普顿探测系统. 为了进一步提升 Peak CSF 值,在主体 LaBr<sub>3</sub>(Ce) 晶体厚度选取 60 mm 时,添加了一个圆环形的 LaBr<sub>3</sub>(Ce) 晶体放在 HPGe 探测器后面,叫做“Lid”晶体,Lid 晶体的位置如图 4 所示.

模拟的 Lid 晶体厚度为 0、10、20、30 mm,Peak CSF 值如图 5 所示. 当模拟的 Lid 晶体厚度在 0~20 mm 时,Peak CSF 值有不错的提升,尤其是对 1100~1500 keV 的  $\gamma$  射线,当厚度从 10 增加到 20 mm 时,Peak CSF 值可以提升 4%~13%,当厚度从 20 增加到 30 mm 时,Peak CSF 值只能提升 2% 不到,从图 5 中也可以看出,提升已经不太明显.

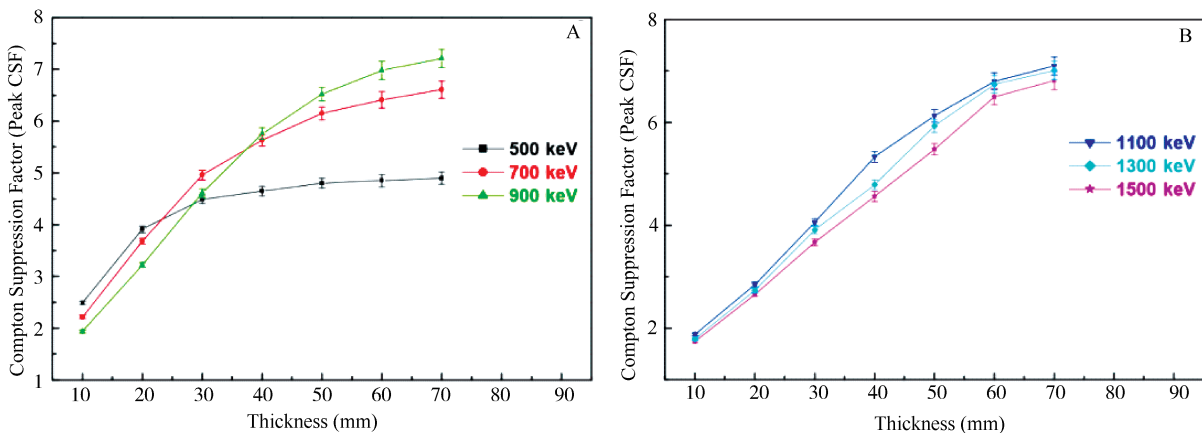


图 3 模拟 500~1500 keV 的  $\gamma$  射线进入探测器系统,主体 LaBr<sub>3</sub>(Ce) 晶体厚度在 10~70 mm 时各能量的  $\gamma$  射线的 Peak CSFs. (a) 500~900 keV 的 Peak CSFs; (b) 1100~1500 keV 的 Peak CSFs

Fig. 3 Pictures show the Peak CSFs when simulating the  $\gamma$ -rays of 500~1500 keV with thickness of body LaBr<sub>3</sub>(Ce) crystal between 10~70 mm. (a) The Peak CSFs of the  $\gamma$ -rays from 500 to 900 keV; (b) the Peak CSFs of the  $\gamma$ -rays from 1100 to 1500 keV

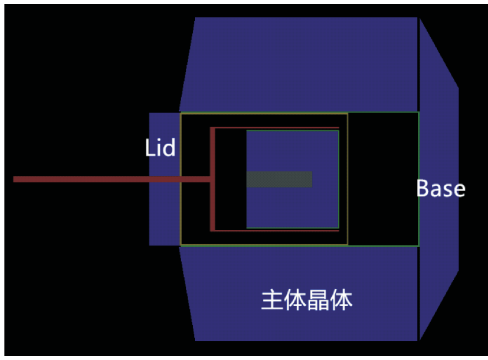


图 4 探测器结构剖面图:在 HPGe 探测器后部加入一个  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  晶体

Fig. 4 A cross-section of the geometry for the detector system; adding a  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  crystal to the back of the HPGe detector

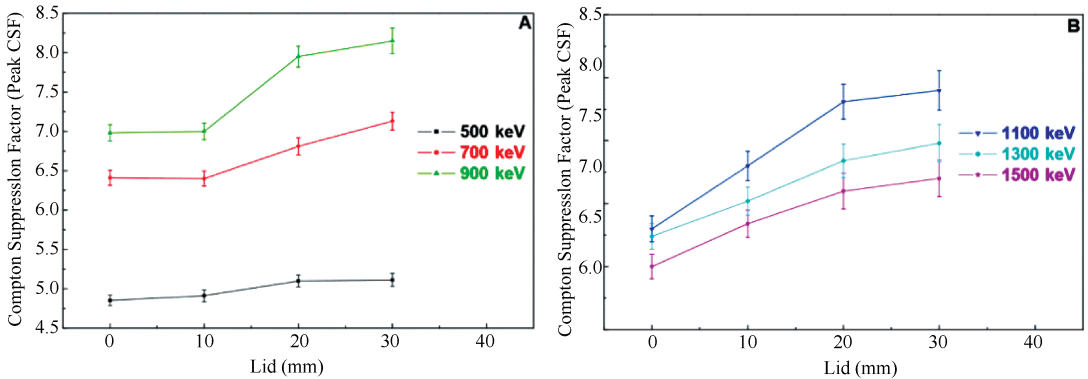


图 5 模拟 500~1500 keV 的  $\gamma$  射线进入探测系统, Lid 晶体厚度在 0~30 mm 时各能量的  $\gamma$  射线的 Peak CSFs; (a) 500~900 keV 的 Peak CSFs; (b) 1100~1500 keV 的 Peak CSFs

Fig. 5 Pictures show the Peak CSFs when simulating the  $\gamma$ -rays of 500~1500 keV with thickness of Lid crystal between 0~30 mm. (a) the Peak CSFs of the  $\gamma$ -rays from 500 to 900 keV, (b) the Peak CSFs of the  $\gamma$ -rays from 1100 to 1500 keV

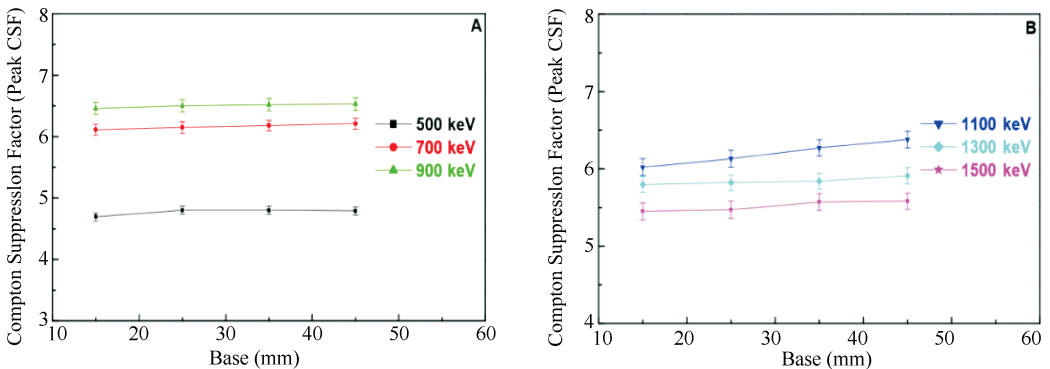


图 6 模拟 500~1500 keV 的  $\gamma$  射线进入探测系统, Base 晶体厚度在 15~45 mm 时各能量的  $\gamma$  射线的 Peak CSFs; (a) 500~900 keV 的 Peak CSFs; (b) 1100~1500 keV 的 Peak CSFs.

Fig. 6 Pictures show the Peak CSFs when simulating the  $\gamma$ -rays of 500~1500 keV with thickness of Base crystal between 15~45 mm. (a) the Peak CSFs of the  $\gamma$ -rays from 500 to 900 keV; (b) the Peak CSFs of the  $\gamma$ -rays from 1100 to 1500 keV

### 3.3 Base 晶体的厚度

当  $\gamma$  射线进入 HPGe 探测器时,可能发生大角度的背散射从整个探测系统的底部逃逸,因此底部的  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  晶体厚度仍能影响 CSF 值. 模拟 15~45 mm 的底部 Base 晶体,观察 Peak CSF 值的变化.

Base 晶体的模拟结果如图 6 所示. 对 500~900 keV 的  $\gamma$  射线,厚度变化对于 Peak CSF 值基本没有影响;对 1100~1500 keV 的  $\gamma$  射线,厚度增加时 Peak CSF 值有提升,但是提升效果非常有限. 因此,我们认为没有必要增加底部 Base 晶体厚度.

### 3.4 放射源探测

将以上三种优化方案组合起来,选择最优条件: 主体  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  晶体厚度 60 mm, Lid 晶体厚度 20 mm, Base 晶体厚度 15 mm. 分别探测 Cs-134, Cs-137,

I-131, K-40 放射源,它们的  $\gamma$  能谱如图 7~10 所示,反符合前后的抑制效果如表 1 所示. 由图表可知,当放射源存在级联衰变时,如 Cs-134, I-131, 探测器系统的抑制效果要比无级联的 Cs-137, K-40 差. 这是因为探

测器系统不能分辨级联的  $\gamma$  射线, 产生和峰, 会降低特征能峰的探测效率, 因此对有级联衰变的放射源的反符合探测效果要比单能  $\gamma$  射线放射源差.

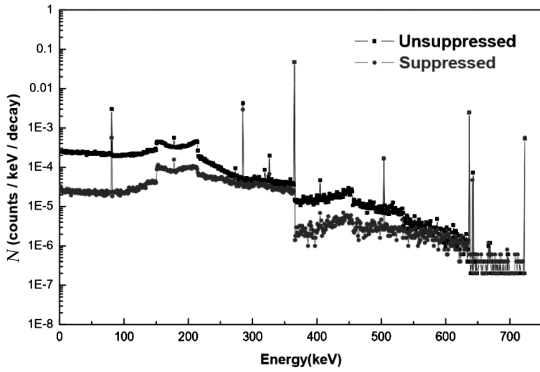


图 7 模拟的最优条件下探测器系统测量 I-131 的能谱图

Fig. 7 A simulated spectrum for I-131 source in our Compton suppression system under the optimal condition

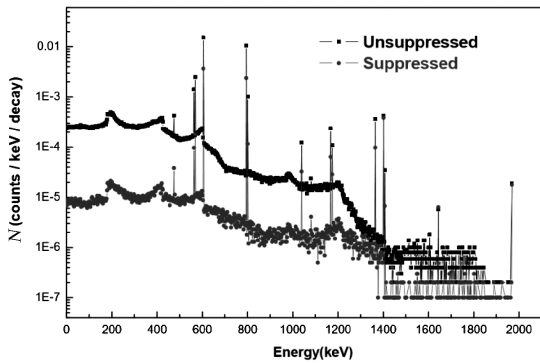


图 8 模拟的最优条件下探测器系统测量 Cs-134 的能谱图, 各个能峰的计数都有损失

Fig. 8 A simulated spectrum for Cs-134 source in our Compton suppression system under the optimal condition, the loss of counts in the peaks can be seen

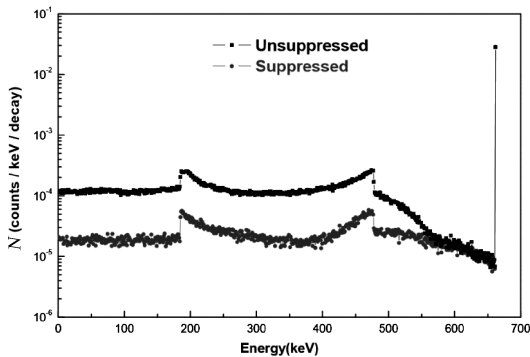


图 9 模拟的最优条件下探测器系统测量 Cs-137 的能谱图, 对该核素的抑制效果如图所示

Fig. 9 A simulated spectrum for Cs-137 source in our Compton suppression system under the optimal condition

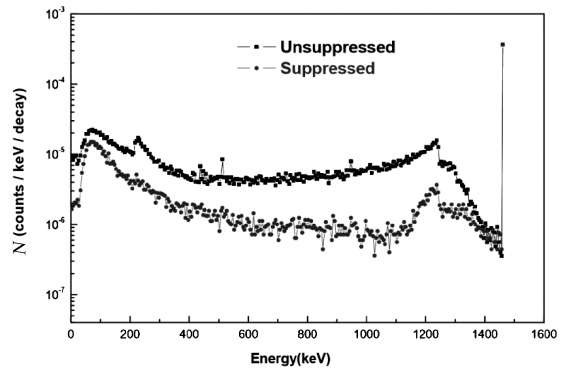


图 10 模拟的最优条件下探测器系统测量 K-40 的能谱图, 对该核素的抑制效果如图所示

Fig. 10 A simulated spectrum for a K-40 source in our Compton suppression system under the optimal condition

表 1 各种核素的能峰探测效率及康普顿抑制系数  
Tab. 1 CSFs and peak efficiency are showed in the table

核素	能峰 (keV)	Unsuppressed efficiency (%)	Suppressed efficiency (%)	Peak CSF	Total CSF
I-131	364.49	5.76	5.72	4.25	1.83
Cs-134	569.33	3.20	0.23	1.95	0.78
Cs-134	604.721	3.12	0.75	6.43	2.58
Cs-134	795.86	2.48	0.56	4.37	2.39
Cs-137	661.66	3.34	3.34	6.90	2.33
K-40	1460.82	1.71	1.71	7.24	2.36

对衰变单能  $\gamma$  射线的核素 Cs-137, K-40, 它们的 Peak CSF 都达到了 6 以上, 对级联衰变的核素 I-131, Cs-134, Peak CSF 也有提升, 但是受限于能峰的计数损失.

## 4 结 论

本文设计的反康普顿  $\gamma$  能谱仪主要用于探测核事故等辐射环境的放射性核素监测. 主探测器为 HPGe 探测器, 采用 LaBr<sub>3</sub>(Ce) 探测器作为次级探测器. 利用 Geant4 软件模拟优化反康普顿  $\gamma$  能谱仪, 通过代码编程建立了 Geant4 的反符合功能. 模拟了 500~1500 keV 的  $\gamma$  射线进入探测器, 并从主体 LaBr<sub>3</sub>(Ce) 晶体厚度、Lid 晶体厚度、底部 Base 晶体厚度等方面进行了优化讨论. 最终结果表明, 包裹 HPGe 探测器的主体 LaBr<sub>3</sub>(Ce) 晶体厚度对 CSF 值的影响最大, 增加主体 LaBr<sub>3</sub>(Ce) 晶体厚度能很大程度的提升 Peak CSF 值, 当主体 LaBr<sub>3</sub>(Ce) 晶体达到 60 mm 时, 再增加 LaBr<sub>3</sub>(Ce) 晶体厚度, Peak CSF 值的提升已经趋于平缓, 增加 Lid 晶体的厚度对 Peak CSF 值的提升也有一定效果, 而增加底部 Base 晶体的厚度对 Peak CSF 值的提升没有太大效果. 在最优条件下测量核素 Cs-134, Cs-137, I-131, K-40 都取得了不错的效果, 同

时放射性核素是否存在级联衰变对康普顿抑制的效果有很大影响。

### 参考文献:

- [1] 杨奎. 碘化钠能谱仪在测量核事故放射性物质活度中的应用[D]. 南昌:东华理工大学, 2015.
- [2] 万恩源, 郑向东, 万国江, 等. 2011年春季日本福岛核泄漏污染输送: 贵阳<sup>131</sup>I和<sup>137</sup>Cs观测示踪分析[J]. 环境科学学报, 2012, 32: 2182.
- [3] 王蕾, 郑国栋, 赵顺平, 等. 日本福岛核事故对我国大陆环境影响[J]. 辐射防护, 2012, 32: 325.
- [4] 盛黎, 周斌, 孙明华, 等. 日本福岛核事故对我国辐射环境影响的监测和分析[J]. 气象, 2013, 39: 1490.
- [5] Morino Y, Ohara T, Nishizawa M. Atmospheric behavior, deposition, and budget of radioactive materials from the Fukushima Daiichi nuclear power plant in March 2011 [J]. Geophys Res Lett, 2011, 38: L00G11.
- [6] Chino M, Nakayama H, Nagai H, *et al.* Preliminary estimation of release amounts of <sup>131</sup>I and <sup>137</sup>Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi nuclear power plant into the atmosphere [J]. J Nucl Sci Technol, 2011, 48: 1129.
- [7] Kawamura H, Kobayashi T, Faruno A, *et al.* Preliminary numerical experiments on oceanic dispersion of <sup>131</sup>I and <sup>137</sup>Cs discharged into the ocean because of the Fukushima Daiichi nuclear power plant disaster [J]. J Nucl Sci Technol, 2011, 48: 1349.
- [8] Bystritsky V M, Zubare E V, Krasnoperov A V, *et al.* Gamma detectors in explosives and narcotics detection systems [J]. Phys Part Nuclei Lett, 2013, 10: 566.
- [9] Quarati F G A, Owens A, Dorenbos P, *et al.* High energy gamma-ray spectroscopy with LaBr<sub>3</sub> scintillation detectors [J]. Nucl Instrum Meth A, 2011, 629: 157.
- [10] 谢希成, 赖万昌, 赵祖龙, 等. LaBr<sub>3</sub>(Ce)与NaI(Tl)闪烁探测器的性能研究与比较[J]. 核电子学与探测技术, 2014, 34: 917.
- [11] Allison J, Amako K, Apostolakis J, *et al.* Recent developments in Geant4 [J]. Nucl Instrum Meth A, 2016, 835: 186.
- [12] Britton R, Burnett J L, Davies A V, *et al.* Monte Carlo optimisation of a Compton suppression system for use with a broad-energy HPGe detector [J]. Nucl Instrum Meth A, 2014, 762: 42.
- [13] Britton R, Burnett J L, Davies A V, *et al.* Determining the efficiency of a broad-energy HPGe detector using Monte Carlo simulations [J]. J Radioanal Nucl Ch, 2013, 295: 2035.
- [14] Britton R. Compton suppression systems for environmental radiological analysis [J]. J Radioanal Nucl Ch, 2012, 292: 33.
- [15] Britton R, Burnett J L, Davies A V, *et al.* Improving the effectiveness of a low-energy Compton suppression system [J]. Nucl Instrum Meth A, 2013, 729: 64.
- [16] 王永昌, 王连滨, 袁俊谦, 等. 高纯锗-塑料闪烁体反康普顿 $\gamma$ 能谱仪[J]. 兰州大学学报:自然科学版, 1987, 23: 40.

### 引用本文格式:

中文: 邹全, 安竹. 面向辐射环境监测的反康普顿 $\gamma$ 能谱仪蒙特卡罗模拟研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2018, 55: 1025.

英文: Zou Q, An Z. Monte Carlo optimization of a Compton suppression system for gamma-ray diagnosis of radioactive environment [J]. J Sichuan Univ; Nat Sci Ed, 2018, 55: 1025.