

X射线能谱过滤的MC模拟研究

徐佳^{1,2}, 宋玉收¹, 孙光智², 代传波², 罗鹏², 徐卫峰², 聂凌霄²

(1. 哈尔滨工程大学, 哈尔滨 150001, 2. 武汉第二船舶设计研究所, 武汉 430064)

摘要:能量低于 300 keV 且能谱简单的稳定放射性核素较少, 作为替代, 利用 X 射线机产生 X 射线, 并经过不同厚度的材料的过滤, 可以得到用于对辐射防护仪器进行校准和确定其能量响应和角响应的一系列规定辐射质的参考辐射。由于材料的质量衰减系数与 X 射线在物质中各种作用过程有关, 并强烈的依赖于光子的能量, 基于这一物理现象, 可以通过 X 射线在物质中的衰减规律, 计算产生规定辐射质的过滤材料的厚度。针对过滤材料的厚度这一问题, 本文运用 Geant4 程序模拟了不同能量的电子打靶, 统计韧致辐射的 X 射线, 以获得计算所需 X 射线能谱, 再由文中滤片厚度计算方法, 计算产生规定辐射质过滤材料的厚度。模拟计算的结果显示, 过滤后的 X 射线能谱能够很好的满足标准要求, 从而验证了能谱过滤的理论计算的合理性。

关键词: X 射线; 能谱过滤; Geant4

中图分类号: TL 84 **文献标志码:** A **文章编号:** 0258-0934(2014)11-1339-04

多数核素的 K 吸收限和 L 吸收线能量在 150 keV 以下, 并且单一核素的在低于 150 keV 能量范围内通常具有多个吸收限, 所以一般材料对 X、 γ 射线的质量衰减系数在这个能量范围内, 具有明显的能量响应特性。为了确定防护水平剂量仪和剂量率仪, 即监测的空气比释动能率从 $10 \mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 到 $10 \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 范围内的 X、 γ 射线剂量仪表的能量响应, 需要配置各种能量的单能光子源^[1]。一种方法是利用放射性同位素衰变配备一套系列标准源, 一般使用射线发射能量范围为 5.95 ~ 1836.1 keV 的 ^{55}Fe 、 ^{109}Cd 、 ^{241}Am 、 ^{57}Co 、 ^{137}Ba 、 ^{137}Cs 、 ^{55}Mn 、 ^{60}Co 、 ^{22}Na 、和 ^{88}Y 这 10 种核素做成的标准源^[2]; 另一种方法是采用 X 射线源, 即荧光 X 射线源和过滤 X 射线源。

具有一定谱分布的 X 射线束, 在经过一种

物质时, 某些能量的射线要比其它能量射线的穿透力强, 射线的这种根据能量大小选择性的衰减就称作过滤作用^[3]。韩奎初、李景云、万兆勇等人^[1]以 X 光机作为射线源, 使用不同材料的滤片, 配合不同管电压, 通过此种方法获得尽量窄小的能谱。

本文以过滤 X 射线源为对象, 分别模拟 200 keV、250 keV、300 keV 的电子打在阳极钨靶上产生的 X 射线能谱作为射线源; 根据材料的衰减规律, 通过计算确定了过滤材料的厚度, 并作为 Geant4 建模时附加过滤片的尺寸, 期望产生 GB/T 12162.1-2000 中窄谱系列特性能谱的峰位分别为 164 keV、208 keV、250 keV, 具有一定能量分辨率的 X 射线能谱。

1 X 射线能谱计算

恒压 X 射线管发射的 X 射线强度随能量变化呈线性变化^[1], 如图 1, 由于内部材料, 包括冷却剂、内置过滤片等, 对于低能的 X 射线吸收强烈, 图 1 中曲线 2 为经上述材料吸收后的能谱; X 光机发射出来的 X 射线能谱的宽度

收稿日期: 2014-07-23

作者简介: 徐佳(1988-), 男, 江苏新沂人, 硕士研究生, 主要从事核仪器、辐射防护研究。

较大,一般需加上一定厚度的附加过滤片,过滤后的典型能谱如图1中曲线3。用Geant4蒙特卡洛程序,模拟电子穿透阳极材料,统计放出的X射线能量和数目,即可获得X射线能谱。其中,靶的材料为钨,电子束入射方向与靶面的夹角为 68° ,如图2所示,内置过滤片为铍、铝、铜(厚度分别为3 mm、3 mm、0.5 mm)依次叠加而成,如图2所示^[5]。

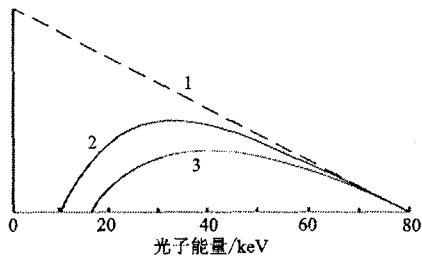


图1 X射线能谱示意图

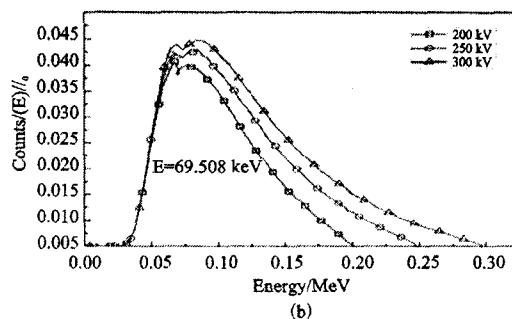
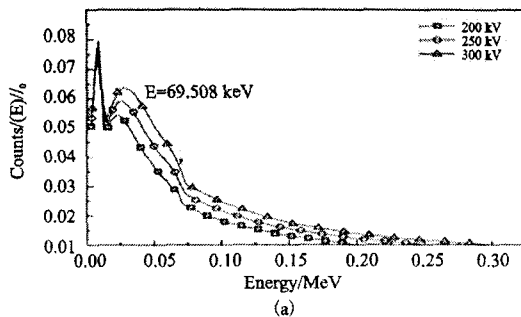


图3 Geant4模拟计算的X射线能谱

X光机内部设置了铍、铝和铜等一定厚度的内置过滤片,这些滤片对低能的X射线具有明显的能量响应。在经过三层内置过滤片,30 keV以下的X射线数目比其它能量低3个数量级,可认为这部分低能X射线被过滤掉。此处X射线能谱将用于后面计算过滤片的厚度。

2 附加过滤片厚度的计算

图4为X射线标准场试验装置基本结构示意图,X射线管产生的X射线射出后,由第一准直光阑限束,得到所需大小的射线束,经过附加过滤片及固有过滤片过滤后,得到所需的X射线谱。不同能量的X射线需要的附加过滤片材料及厚度均不相同,这就需要事先计算产生各种辐射特性的附加过滤片厚度。

2.1 基本方法^[7]

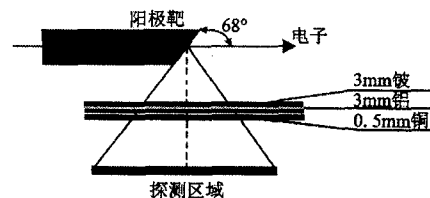


图2 Geant4建模示意图

而X射线在依次经过铍、铝、铜内置过滤片过滤后,到达探测器灵敏体积,从而可获得粒子的能量和通量信息。设置物理过程的能量截断为250 eV~0.5 MeV,分别得到X射线的能谱如图3所示。电子打在阳极靶上发生韧致辐射放出的X射线,图中69.508 keV(核素钨的K吸收限),为韧致X射线与钨发生光电效应发出的荧光X射线^[6],在能谱上有一个畸变,并在低能部分形成一个光电峰,如图3(a)所示。

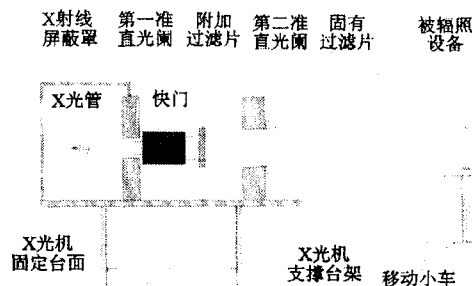


图4 X射线标准场试验装置基本结构

计算过滤材料厚度,选用铅和锡这两种材料,其线衰减系数和厚度分别为 $\mu_{E,Pb}$ 、 $\mu_{E,Sn}$ 和 L_{Pb} 、 L_{Sn} , $I_0(E)$ 为过滤之前,能量为 E 的X射线计数率,经滤片过滤后的计数率 $I(E)$ 为:

$$I(E) = I_0(E) e^{-(\mu_{E,Pb} L_{Pb} + \mu_{E,Sn} L_{Sn})} \quad (1)$$

能量 E 处于光机发射的X射线谱的能量范围,若需要过滤后的能谱峰值在 E 处,则需

满足条件:

$$\frac{dI(E)}{dE} = 0 \quad (2)$$

将式(1)带入式(2),整理得到:

$$\frac{I'_0(E)}{I_0(E)} = \mu'_{E,Pb} L_{Pb} + \mu'_{E,Sn} L_{Sn} \quad (3)$$

式(2)和式(3)是产生规定的辐射质的必要条件。为了计算式(3)中的 L_{Pb} 、 L_{Sn} ,需要用到前面计算得到的 X 射线能谱,并查询过滤材料的质量衰减系数并计算式中的参数。

2.2 能谱过滤方案的计算^[8]

由图 3(b)中的 X 射线能谱,根据标准中窄谱系列特性对应管电压下的峰值能量,利用差分、内插法分别求出 $I_0(E)$ 和 $I'_0(E)$,并计算 $I_0(E)/I'_0(E)$ 。查询 NIST 在线标准数据库: XCOM; Photon Cross Sections Database 中关于 Pb、Sn 的质量吸收系数 $\mu_{E,Pb}$ 、 $\mu_{E,Sn}$,并求得 $\mu'_{E,Pb}$ 和 $\mu'_{E,Sn}$,统计其结果在表 1。

表 1 式(3)中的相关参数

能量/MeV	管压/kV	$I_0(E)$	$\mu'_{E,Pb}$	$\mu'_{E,Sn}$	$\mu'_{E,Sn} L_{Sn}$	Pb/mm	Sn/mm
0.164	200	-35.345	-275.130	-69.446	-0.928	1	1
0.208	250	-30.625	-116.149	-26.224	-0.633	2	3
0.250	300	-24.331	-60.695	-12.545	-0.494	3	5

3 MC 模拟

利用 Geant 程序,使用图 3(b)中计算出的能谱作为源项,粒子源的发射角 35° (立体角约为 0.1π) 朝向灵敏探测器,粒子源经过第一准直光阑后,开始被过滤片过滤,第二光阑将散射角度过大的 X 射线吸收掉,后面 4 mm 的 Al 固有过滤片将 X 射线与这些材料发生光电效应产生的荧光 X 射线吸收掉,剩下的粒子将会进入灵敏探测器,使用 G4PSFlatSurfaceFlux 记录每一个进入探测器的 X 射线的能量。

为了验证 Geant4 在 X 射线能谱过滤中的可行性、合理性,分别用表 1 和表 2 中的过滤材料尺寸建立模型,分别与表 2 中的峰值和分辨率作比较。计算结果如图 5 所示。

表 2 标准中窄谱系列特性^[9]

管压/kV	峰值/keV	分辨率/%	Pb/mm	Sn/mm
200	164	30	1.0	3.0
250	208	28	3.0	2.0
300	250	27	5.0	3.0

对图 5 中过滤后的能谱做归一化处理之后, $E=0.088$ MeV (87.6 keV) 处为 X 射线在穿过铅过滤片时,打出 K-壳层光电子,退激时发射的 K 系特征 X 射线,在图 5(a)中,1 mm 厚的锡片不足以完全吸收掉这部分的特征 X 射线,在能谱上形成一个明显的特征 X 射线峰,国标建议使用 3 mm 的锡片几乎可以将这部分的射线完全吸收掉。(a)、(b)、(c)中的峰值能量,与标准比较,计算他们的相对误差和能量分辨率,结果如表 3 所示。

统计表明,运用 Geant4 模拟标准中部分窄谱系列特性,能量峰值的相对误差在 5% 以内,分辨率的相对误差在 10% 以内,与标准中所列的数据符合的很好;运用上述方法计算得到的过滤片尺寸进行模拟计算,与标准中的相对误差在 5% 以内,分辨率的误差较大,这是由于在计算式(3)的相关参数时,使用内插法和差分法误差所致。

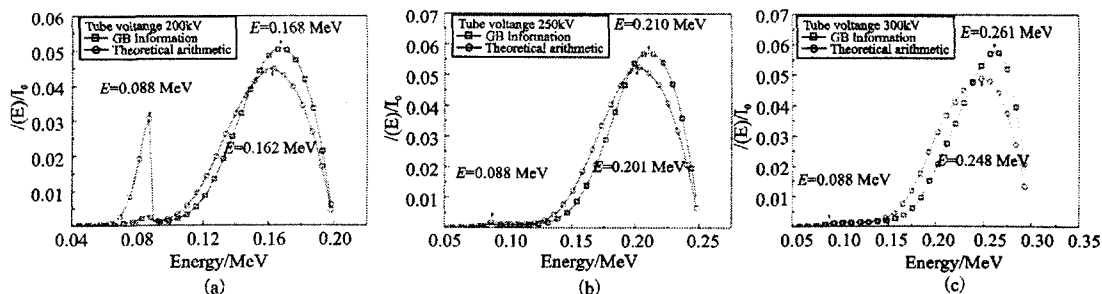


图 5 Geant4 模拟计算过滤后能谱

表3 模拟计算结果比较

管压/kV	峰值/MeV				能量分辨率			
	GB	相对误差	计算	相对误差	GB	相对误差	计算	相对误差
200	0.168	2.4%	0.162	1.2%	32%	6.5%	36%	20%
250	0.210	0.96%	0.201	3.4%	28%	—	35%	25%
300	0.261	4.4%	0.246	1.6%	28%	3.7%	36%	33%

4 结论

理论研究表明,利用X射线能谱过滤方法可以得到规定辐射质的X射线能谱。本文对管电压为200 kV、250 kV、300 kV时X射线机发射射线能谱,通过计算和模拟得到计数率峰值能量分别为0.162 MeV、0.201 MeV、0.248 MeV过滤后能谱,模拟结果与标准给出的参考基本一致,验证了上述理论。

研究表明,通过设置不同厚度和材料的过滤片,可以调整计数率峰值能量的位置,但是能量越高,需要设置更厚的过滤片,这样会大幅度的减少X射线的通量。为获取较好能量分辨率,关于峰值能量-管电压的设置需要进一步的实验和理论研究。

参考文献:

- [1] 韩奎初,李景云,万兆勇,等. 剂量仪表刻度用的X射线源[J]. 原子能科学技术,1981;536-542.
- [2] 杜鸿善,郭春生,李俊兰,等. X、 γ 系列标准源的研

制[J]. 辐射防护,1994,14(3):166-171.

- [3] 余建明. 放射物理与防护[M]. 北京:高等教育出版社,2005:51-54.
- [4] Geant4 Collaboration. Geant4 User's Guide for Application Developers (Version: geant4 10.0) [R] CERN,2013:159-163.
- [5] 李明生,欧向明,赵世安,等. 应用Geant4模拟放疗、诊断和防护线质下的X射线能谱[J]. 中国辐射卫生,2012,21(1):3-5.
- [6] 凌球,郭兰英. 核辐射探测[M]. 北京:原子能出版社,2002:499-509.
- [7] 张玉龙,陈怀璧,查浩. 剂量仪表刻度用的X射线源[J]. CT理论与应用研究,2014,23(1):1-8.
- [8] U. S. National Institute of Standards and Technology, XCOM: Photon Cross Sections Database [DB/OL]. (2011-12-09) [2014-04-15]. <http://www.nist.gov/pml/data/xcom/>.
- [9] 中国原子能科学研究院. GB/T 12162.1-2000用于校准剂量仪和剂量率仪及确定其能量响应的X和 γ 参考辐射第1部分:辐射特性及产生方法[S]. 北京:中国标准出版社,2001.

The Theory and Simulation of X-ray Energy Spectrum Filtration

XU Jia^{1,2}, SONG Yu-shou¹, SUN Guang-zhi², DAI Chuan-bo²,
LUO Peng², XU Wei-feng², NIE Ling-xiao²

(1. College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
2. Wuhan Secondary Ship Design and Research Institute, Wuhan 430064, China)

Abstract: X-ray machine is often used to produce the X-ray instead of a few stable primordial radionuclides for the energy spectrum below 300 keV. A series of specialized X-ray spectrum can be obtained to calibrate and determine the energy response and angular response of radiation detector by setting several layers of filters. These filter sheets are used to filter original X-ray spectrum with a certain distribution. The mass attenuation coefficient strongly depends on the energy of the photons. Based on X-ray attenuation in material, this paper describes a method to calculate the thicknesses of filters. Monte Carlo code Geant4 was used to simulate bremsstrahlung produced by electrons hitting the anode target. The X-ray from bremsstrahlung was calculated as well. After X-ray spectrums were obtained, the thickness of the lead and tin filter sheet were calculated according to the paper. The results show that the optimized X-ray spectrum agrees with the standards very well. It demonstrates the correctness of the theoretical calculation of spectrum filtering.

Key words: X-rays; spectrum filtration; Geant4