

一种违禁品背散射检测方法

向新程, 郑 健, 郑 欣, 王振涛

(清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要: 描述了一种以低活度¹³³Ba 为射线源的便携式背散射检测仪, 可以对物体的藏匿空间内是否存在违禁品进行检测, 并根据背散射能谱的特点对违禁品的物性做出一些判断; 论述了检测仪的系统设计和简化模型的 MCNP 仿真, 给出了检测仪的一些实验结果。

关键词: 背散射; 违禁品检测; ¹³³Ba; 双能检测

中图分类号: TP274. 51 文献标识码: A 文章编号: 0258-0934(2007)02-0203-04

集装箱、轮胎、车门、油箱等有着内部藏匿空间的物体常常被不法分子用来藏匿毒品、炸药、武器、货币等违禁物品, 如何对有着内部藏匿空间的物体进行快速有效的检查是安检、边检领域的重要课题。手持便携式背散射检测仪是近年来出现的一类检测设备, 它可以帮助检查人员快速发现物体的内部藏匿空间中是否存在可疑违禁品。本文介绍了一种以¹³³Ba 放射性同位素作为射线源的便携式背散射检测仪, 可以检测藏匿空间中有无可疑违禁物品, 并根据背散射能谱的特点来对违禁品的种类做出定性的判断, 为检查人员提供更为丰富的检测信息。

面平整的物质中, N_0 为入射线的光子数。 N_s 为被探测器探测到的散射光子数。 Φ 为入射光子与物质表面的夹角。 θ 为散射光子与物质表面的夹角, α 为入射线与散射线的夹角。 μ_0 为入射光子在物质中的线性衰减系数。 μ_θ 为散射光子在射物质中的线性衰减系数。 n_e 为反散射物质的电子密度, N_A 是阿佛加德罗常数, ρ 、 Z 和 A 分别是物质的密度、原子序数和原子量; σ_e 为光子对单个电子的积分散射截面。 x 为入射线进入物质的深度。 Δx 为入射光子在深度 x 处的薄层的厚度。 $\Omega(x)$ 为探测器对 x 处的散射光子所张立体角, ϵ 为探测器的探测效率。 探测器接收的总散射光子数如式 (1) 所示^[1], 散射光子能量 E_s 如式 (3) 所示。

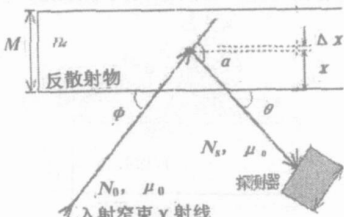


图 1 反散射物理模型

1 背散射检测仪的简介

一次康普顿散射测量的物理模型如图 1 所示: 假设一束窄束 γ 射线入射到厚度为 M 的表

$$\begin{aligned} n_e &= N_A \rho (Z/A) \\ N_s &= \frac{\varpi n_e \sigma_e N_0}{4\pi \sin \Phi} \int_0^M \Omega(x) e^{-(\frac{\mu_0}{\sin \Phi} + \frac{\mu_\theta}{\sin \theta})x} dx = \\ &= \frac{N_A N_0}{4\pi \sin \Phi} \frac{\rho Z \epsilon \sigma_e}{A} \int_0^M \Omega(x) e^{-(\frac{\mu_0}{\sin \Phi} + \frac{\mu_\theta}{\sin \theta})x} dx \quad (1) \\ N_s &= \frac{N_A N_0}{4\pi} \frac{\rho Z \epsilon \sigma_e \Omega}{A} \frac{1 - e^{-(\mu_0 + \mu_\theta)M}}{\mu_0 + \mu_\theta} \cong \\ &= \frac{N_A N_0}{4\pi} \frac{\rho Z \epsilon \sigma_e \Omega}{A} \frac{(\mu_0 + \mu_\theta)M}{\mu_0 + \mu_\theta} = \\ &= \frac{N_A N_0 \varpi \epsilon \Omega M}{4\pi} \frac{\rho Z}{A} \quad (2) \\ E_s &= E_\beta / [1 + (E_0/m_e c^2)(1 - \cos \theta)] \quad (3) \end{aligned}$$

E_0 是入射光子能量, m_e 是电子质量。

收稿日期: 2006 12 13
作者简介: 向新程 (1967—), 男, 湖北人, 副研究员, 从事应用核技术研究

在式(1)中, σ_c 、 μ_0 、 μ_0 的影响因素为入射光子的能量与被测对象的物质构成, ϵ 由探测器性能决定, $\Omega(x)$ 、 θ 、 φ 由测量系统的几何结构决定。根据这些影响因素, 背散射检测仪的设计主要包含了射线源的选择、探测器系统的选择以及几何结构的选择。

本文介绍的测量仪以 NaI(Tl) 探测器与光电倍增管构成了探测器系统; 放射源选择了活度为 0.37MBq 的 ^{133}Ba , 半衰期是 10.7a, 其射线主要由 81.303 和 356keV 的 γ 光子构成, 其相对强度的比值是 51、29、100^[2]。

如果 M 很小, 即对薄层物体, $\Omega(x)$ 可以认为是常数, 且 $\varphi=90^\circ$, $\theta=90^\circ$ 的情况下, 式(1)简化为式(2), 背散射光子数由 $(\rho Z/A)$ 决定。如果物体中含有较多的氢元素, 则由于 (Z/A) 较大, 背散射光子的计数也就较大, 在这种情况下含氢较多的有机物的反射光子数相对其他物质要高。但是在本文介绍的检测仪中, 由于放射源的活度很低, 不适宜在放射源和探测器处都加上很好的准直, 式(2)的条件无法满足。式(1)也表明, 对不同能量的入射光子, 由于 μ_0 、 μ_0 的不同, 背散射光子的计数也不同。如果入射光子包含了两种高低能量的成分, 那么由于低能光子在高 Z 的重物质中 μ_0 、 μ_0 较大, 也就是其入射光子和背散射光子都被迅速衰减, 因此其散射光子较少; 而在低 Z 轻物质中则会存在相对较多的背散射光子。 ^{133}Ba 的光子中正好主要包含了 81、356keV 两种高低能的光子, 并且 81keV 的入射光子及其散射光子与高 Z 物质的作用以光电效应为主, 不形成背散射光子, 因此可以通过散射能谱中两种散射光子的相对强度来判断被测物体是重物质还是轻物质。

在检测仪的几何结构设计上, 以不同结构的 MCNP 模拟计算和实际物理实验的数据为基础, 结合检测仪在体积、装配及屏蔽防护上的设计要求, 最终选择了如图 2 所示的几何测量结构。放射源布置于圆柱形探测器的侧面, 源与探测器之间有屏蔽, 但放射源与探测器均没有准直结构。

整个检测仪的总体构成如图 3 所示, 仪器样机的尺寸是 158 mm \times 74 mm \times 80mm, 质量约为 650 g, 使用 9 V 电池供电。基本达到了随身携带的检测装备在灵巧方面的要求。

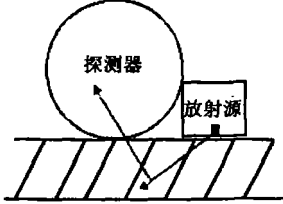


图 2 测量几何结构

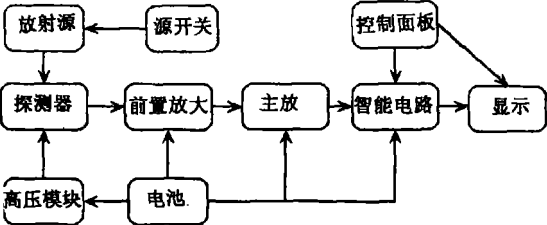


图 3 检测仪总体构成框图

2 MCNP 仿真结果及分析

根据检测仪的几何结构, 使用一个简化的模型对一个壁厚为 0.5mm 的铁圆柱空腔进行了 MCNP 仿真, 以分析空腔内为空气、顺丁橡胶(C_4H_6)、TNT 黄色炸药($\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_6$)或铁时的情况。仿真模型如图 4 所示, 被测物体是一个直径和高均为 250mm(远大于探测器的尺寸)的铁圆柱腔; ^{133}Ba 源简化为单向点源, 即射线全部向下垂直入射到腔的端面, γ 射线的能量为 81、303 和 356keV; 探测器为 NaI(Tl) 闪烁体, 尺寸为 $\varnothing 25\text{mm} \times 25\text{mm}$; 腔内完全充满被检物体, 250mm 的厚度使得除空气外都大于这些物体的饱和背散射厚度; 源与探测器距离 $a=15\text{mm}$, 铁壳与探测器距离 $b=3\text{mm}$; 仿真输出结果为散射光子在探测器内的能谱分布。

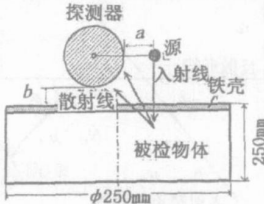


图 4 仿真模型示意图

仿真结果如图 5 所示, 考虑到实际系统中闪烁体的密封包装及多道测量系统的康普顿坪特性等因素, 计算总散射光子时忽略了 40keV 以下的光子。能谱中有两个明显的峰, 其能量分别约为 63、158keV, 按照散射光子能量公式(3), 分别对应了 81、356keV 的入射光子在 $\alpha=143^\circ$ 时的散射光子能量, 因此两个峰分别对应了两种入射光子的散射光子, 而强度较低的 303keV 入射光子的散射光子可以看作包含在

高能峰中。从仿真结果可以看出: 完全空腔的情况与其他三种情况有着显著的区别: 完全空腔时总散射光子为 4413, 而其他三种情况的总面积均大于 35660; 空腔内是铁时增加的散射光子中低能峰散射光子占 6%, 而在橡胶和 TNT 情况下分别是 31%、29%。因此仿真结

果表明检测仪可以区分空腔与放满了其他物质的情况, 并且可以根据散射光子能谱的特点判断其中放的是否高 Z 的重物质, 利用这个特点在某些场合下也就可以定性判定有机物与金属。

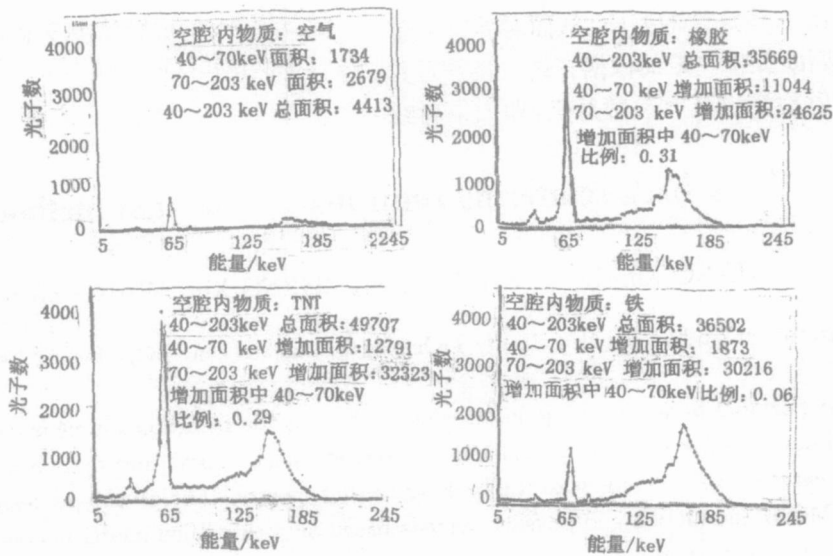


图 5 空腔内为不同物质时的仿真结果

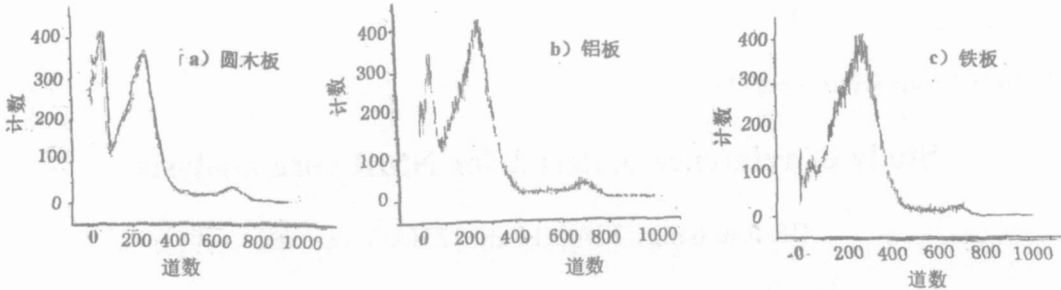


图 6 不同物质的背散射能谱

3 实验测量结果

使用本文设计的检测仪对几种物质进行重复测量, 结果列于表 1。由表 1 数据可以看到, 仪器对相同的测量对象, 具有较好的测量重复性, 从而可以事先测量出仪器在某种情况下的计数率, 并设定一个阈值, 如果实际检测对象的计数率超出了阈值范围, 则可以作为一个“可疑”对象进行后续的处理。比如一个轮胎的计数率超出了事先测量的标准轮胎的阈值范围, 轮胎腔内就可能藏有“可疑物品”。

利用检测仪对饱和厚度的圆木、铝板和铁板进行测试, 得到的能谱如图 6 所示。这些能谱中都有三个计数峰, 三个峰的位置是相同的, 经过刻度后发现三个峰的能量分别是 356、150 和 60keV, 对应能量光子的来源分别是 356keV

表 1 仪器对有机玻璃、铁板和洗衣粉的测量结果

材料	有机玻璃	铁板	厚洗衣粉
厚度/mm	20	2	30
平均计数率/s ⁻¹	350	325	417
标准偏差/s ⁻¹	12.3	9.5	12.0

的源射线的泄漏以及 356、81keV 两种光子的背散射光子。散射光子能谱的峰位与 MCNP 仿真能谱中峰位的差别是由于仿真模型与实际系统的差异造成的。可以看到低能峰占总背散射光子的比例在圆木能谱中最大, 而在铁板能谱中最小。实测能谱验证了 MCNP 仿真结果, 即在低 Z 物质中低能峰占有较大比例, 而在铁等高 Z 物质中低能峰的比例很小。

4 总结

利用¹³³Ba 作为射线源实现的便携式背散

射检测仪, 可以作为一种随身携带的检测设备, 用于检查有藏匿空间的物品中是否有违禁品, 从而可以在某些特定的反恐、反走私领域做为一种警用设备。由于¹³³Ba 的射线中包含了高低能量的两种主要射线, 可以通过分别计算低能峰的面积与总散射光子数, 通过低能峰与总散射光子数的比例来对被检物质的原子序数 Z 的构成做出一些定性的判断, 从而对异常夹带品的类别判断提供一定的依据。这一特点对其他的背散射检测也具有参考意义, 即如果射线

源中含有高低两种能量, 则背散射能谱对不同物质可能具有不同的特点, 从而可以为物性的判别提供依据。

参考文献:

[1] 郑欣. 基于康普顿反散射的便携式违禁品探测仪设计研究 [D] . 北京: 清华大学, 2003.
[2] 刘运祚. 常用放射性核素衰变纲图 [M] . 北京: 原子能出版社, 1982: 155-156.

A back scattering contraband detection method

XIANG Xin cheng, ZHENG Jian, ZHENG Xin, WANG Zhen tao

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract A portable back scattering detector using ¹³³Ba as the radiation source is described. The detector can find out whether there is contraband in a hidden space. Some information about the type of the contraband can be given according to the back scattering spectra. The prototype design of the detector is described, MCNP simulation and physics analysis based on a simplified model is done, and some experiment results are also given.

Key words: back scattering; contraband detecting; ¹³³Ba; dual energy detection

(上接第 198 页, Continued from page 198)

Study of reference material for NMR core analysis

XIE Ran hong, XIAO Li zhi, ZHAO Tai ping

(Faculty of Natural Resource and Information Technology,
China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract Reference Materials of NMR core experimental analysis have been studied systematically in this paper. According to the national standard criterion, a set of NMR reference materials have been made successfully. These reference materials include fluid pattern —D₂O and H₂O, divergence of glass grain muster, and the solid ceramics. They have been applied to the core analysis in Daqing, Xinjiang, Dagang Oilfield, etc. The results show, fluid pattern, divergence of glass grain muster as well as ceramics reference materials have different calibration results of core NMR porosity as a result of their different relaxation mechanisms. Fluid pattern is suitable for NMR porosity calibration in Berea sandstone as well as terrestrial sediment sand with little shale content and well sorted. Ceramics reference material is applied to shaly sand with average sorted. Both fluid pattern and solid ceramics material are not suitable for calibration in sandstone sample with high clay content, complex lithology with rich paramagnetic materials. It is suggested that the representative natural core sample should be selected as regional reference material to calibrate NMR porosity of complex lithology, or internal magnetic field gradient in complex rock grain/fluid system should be studied in order to get corrected NMR porosity.

Key words: petrophysic; NMR; reference material; experimental study