

利用示踪 ^{252}Cf 中子源的材料鉴别技术

郝昕^{1,2}, 竺礼华^{1,3}, L. Stevanato⁴, D. Fabris⁴, M. Lunardon⁴,
S. Moretto⁴, G. Nebbia⁴, S. Pesente⁴, G. Viesti⁴, L. Sajo-Bohus⁵

(1. 深圳大学 物理科学与技术学院, 广东 深圳 518060; 2. 中国原子能科学研究院 核物理研究所, 北京 102413;
3. 北京航空航天大学 物理科学与核能工程学院, 北京 100191; 4. 帕多瓦大学 物理系, 帕多瓦 35131, 意大利;
5. 西蒙波利瓦尔大学 核物理实验室, 加拉加斯 1080, 委内瑞拉)

摘要: 本文叙述了利用 ^{252}Cf 裂变中子源结合飞行时间技术对包裹进行无损检测的可行性研究, 通过联合测量中子和伽玛射线的吸收谱确定样品的平均原子序数, 完成被测材料的鉴定。实验采用自发裂变的 ^{252}Cf 中子源作为白中子源和伽马射线源, 用塑料闪烁探测器探测中子和伽马射线。通过 LabVIEW 程序控制步进电机运动并整合获取的实验数据, 实现了待测样品断层扫描数据采集工作的自动化。在对闪烁探测器进行能量和时间刻度后, 对几种典型材料组成的样品进行实验分析, 采集数据重建其分布图像, 确认了用这项技术对材料无损检测的可行性。

关键词: 中子源; 无损检测; 中子-伽马射线吸收测量; 中子飞行时间技术

中图分类号: TL81 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2011)04-0479-04

Material Recognition by Using ^{252}Cf Source

HAO Xin^{1,2}, ZHU Li-hua^{1,3}, L. Stevanato⁴, D. Fabris⁴, M. Lunardon⁴,
S. Moretto⁴, G. Nebbia⁴, S. Pesente⁴, G. Viesti⁴, L. Sajo-Bohus⁵

(1. *College of Physics and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;*
2. *China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;*
3. *School of Physics and Nuclear Energy Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;*
4. *Physics Department, Padova University, Padova 35131, Italy;*
5. *Nuclear Physics Laboratory, University Simon-Bolivar, Caracas 1080, Venezuela*)

Abstract: Non-destructive assay of parcels using a tagged ^{252}Cf source and time of flight technique was studied. The method of material recognition was achieved by measuring simultaneously the transmission of neutron and gamma ray to determine the average atomic number. The automatic tomography was realized with the movement of motors and autostart of the digital acquisition system. With the calibration of the detectors, the average atomic number for each pixel of the sample was determined which allows one to recognize material with this method.

Key words: neutron source; non-destructive assay; neutron-gamma transmission meas-

urement; neutron time-of-flight technology

长期以来,材料的无损检测技术受到热切关注,并广泛应用于如金属结构无缝检测、医学成像、安全检查等领域。随着反恐形势的不断加剧,集装箱和包裹的安全检查成为全世界的需要。当前安检的技术方法和无损检测应用在医疗领域的技术有着很多的相似性。X射线和伽马射线检测系统是发展较早的成像技术^[1-2],主要方法有吸收成像、双能成像、背散射成像和计算机扫描成像及其结合等。X射线和伽马射线成像系统有很高的分辨率,但光子的低穿透本领限制了这种技术的进一步发展。伽马射线发生光电效应的截面正比于原子序数的5次方,因此,高原子序数的材料发生光电效应的截面很大,光子很难穿透原子序数高或厚度大的材料,这类材料所成的像一般全黑。故需找到一种穿透本领很强的辐射作为材料检测的工具。

中子是一很好的材料检测探针,尤其是快中子,因为它具有很强的穿透本领,并可由加速器很方便地产生,较热中子有更广泛的应用。中子成像的主要方法有穿透成像和中子引起的二级辐射如散射中子或次级伽马射线成像。现在发展了一些成熟的技术,如快中子共振成像、中子进入材料放出的特征伽马射线成像^[3]及用14 MeV快中子和伽马射线联合成像,如在澳大利亚安装了商业化的成像仪^[4],它由704个塑料闪烁体和352个CsI(Tl)探测器组成。

本工作以中子和伽马射线为检测探针,采用中子与伽马射线联合穿透成像的方法鉴别材料。

1 中子和伽马射线联合的穿透成像方法

中子的衰减公式^[4]为:

$$\frac{I_n}{I_n^0} = \exp(-\mu_n \rho x) \quad (1)$$

伽马射线的衰减公式为:

$$\frac{I_g}{I_g^0} = \exp(-\mu_g \rho x) \quad (2)$$

其中: I_n 、 I_n^0 分别为中子的出射强度及入射强度; I_g 、 I_g^0 分别为 γ 射线的出射强度及入射强度; ρ 为材料的密度; μ_n 、 μ_g 分别为材料对中子和 γ 射线的吸收系数; x 为材料厚度。

这两个公式表明,中子与 γ 射线的衰减程度

不仅与材料的成分有关,也与材料的厚度有关。因此,引入比值 R :

$$R = \frac{\mu_n}{\mu_g} = \frac{\ln(I_n/I_n^0)}{\ln(I_g/I_g^0)} \quad (3)$$

由上式可见,该比值仅与材料的成分有关,而与样品厚度无关,故 R 可用来确定未知厚度样品的组成成分。在对大量样品的 R 和原子序数 Z 进行刻度后,已知某部分样品的 R 即可得到其平均原子序数。在成像图中,用不同颜色来表示材料的不同平均原子序数,所成的彩色像比伽马射线成的灰度像包含了样品成分的更多信息,这丰富了无损检测对材料的认识。在 $R-Z$ 的刻度中,由于原子序数小的物质较原子序数大的物质的 R 下降速度快,这使 Z 的分辨本领对于原子序数小的物质足够好,在含 C、N、O 有机爆炸物检测中具有非常明显的优势。

2 实验装置搭建

实验选用自发裂变的²⁵²Cf中子源(强度为 10^6 s^{-1})作为白中子源和伽马射线源^[5],样品被安放在一可上下运动和绕轴转动的平台上,实验装置如图1所示。8个中子探测器用可活动的托架和塑料捆线固定在直支架上,固定时令每一中子探测器均在距中子源1 m的弧线上,以保证每一探测器到源的距离相同,示踪探测器置于中子源附近。激光器用来对齐所有探测器与源和样品。实验选用的中子探测器和示踪探测器为塑料闪烁探测器EJ-228,闪烁体为直径

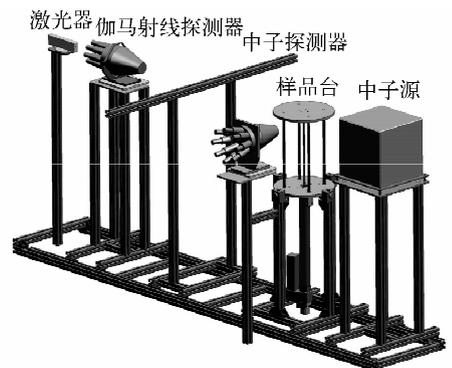


图1 实验装置图

Fig. 1 Schematic lay-out of tomography system

51 mm、厚 51 mm 的圆柱体,用硅胶片来连接闪烁体和光电倍增管。闪烁体被严密地包起来以防止漏光并保证光电倍增管能高效收集来自闪烁体的光信号。图 1 中的伽马探测器用来探测伽马射线的吸收谱,以利于后续实验的进行。

实验利用中子飞行时间技术确定中子能量。中子飞行时间 t_{TOF} 等于中子飞行距离 L 与中子速度 v 之比, $v = \sqrt{2E/m_n}$, E 为中子能量, m_n 为中子质量。粒子由源飞行到 1 m 远处探测器的时间近似于示踪探测器与其他探测器探

测到信号的时间差。实验的电子学线路如图 2 所示,以示踪探测器和 1~8 号探测器之间发生的符合事件作为触发信号。实验的获取系统采用 VME 的 16 道 TDC 和 ADC,数据转换速度为 30 Mb/s。

为实现自动化扫描成像,需建立数据获取和步进电机运动的用户界面。所需的硬件为两个步进电机和 1 个驱动卡,软件为 LabVIEW、CAEN 控制模块的驱动软件和 VME 数据获取系统的 EURITRACK 软件包。

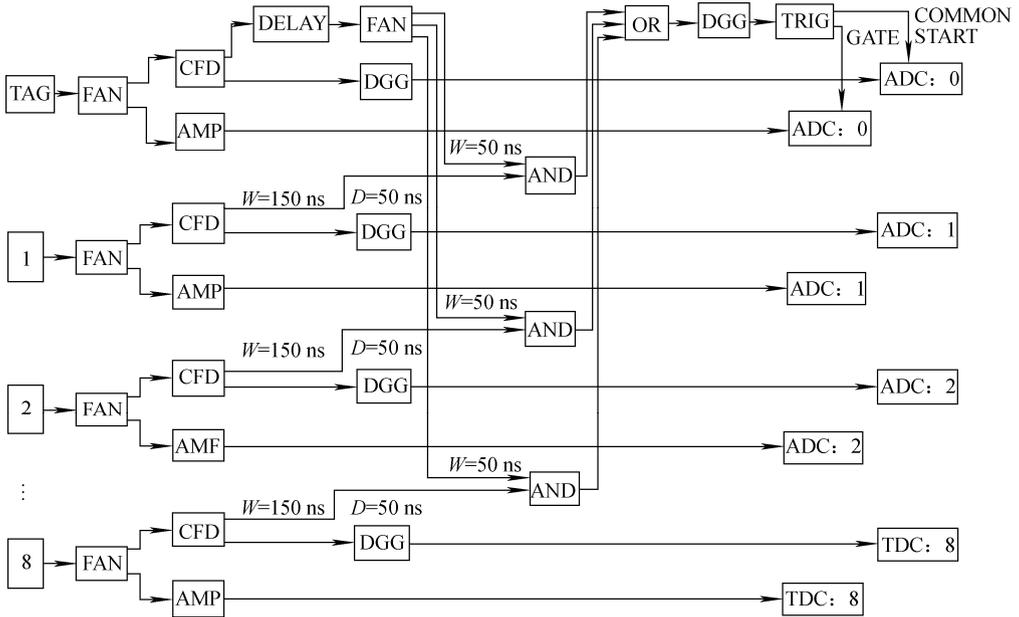


图 2 实验电子学线路原理图

Fig. 2 Block diagram of electronics

FAN 为多路扇入扇出器;CFD 为横比定时器;AMP 为放大器;DGG 为延时展宽器;W 为信号宽度;D 为信号延迟时间

3 系统刻度及样品图像重建

实验使用²²Na 伽马源对探测器进行能量刻度。对平均原子序数较小的塑料闪烁体,由于光电效应截面太小而看不到光电峰,故只能用²²Na 伽马源的两条特征射线康普顿坪下降沿的半高点来进行能量刻度。图 3 为能量刻度谱,图 3 中两个峰为²²Na 两条特征伽马射线康普顿下降沿,左侧为电子学能量阈值的位置。

通过分别对没有样品和有样品的光子强度和 中子强度(图 4)积分,可得到样品的 R 。飞行时间谱可区分光子和中子是由于光子飞行得快而先到达探测器,图 4 中左侧的峰为光子计数,同时,白中子到达探测器的时间有一分布,

即图 4 中右侧展宽的平台。

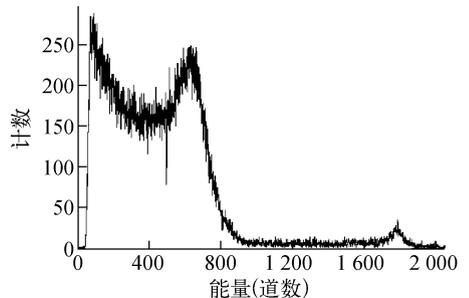


图 3 利用²²Na 伽马源的特征伽马射线康普顿下降沿的刻度谱

Fig. 3 Calibration spectrum of Compton edge for ²²Na source

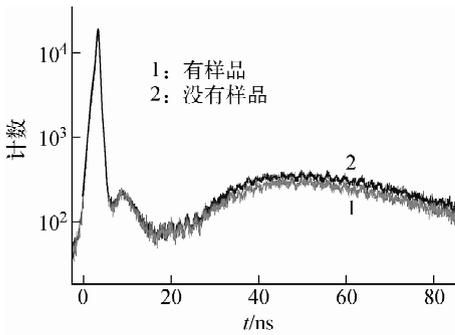


图4 有样品和没有样品时光子和中子强度
Fig. 4 Photon and neutron spectra with sample and without sample

由于 R 仅与材料的成分有关,而与样品厚度无关,这个特征决定了它可用来确定未知厚度样品的组成成分。实验用任意厚度的硫、铁等 14 种单质和聚乙烯、三聚氰胺等 10 种化合物作 R - Z 的刻度,每种样品测 6 h。对探测器的 R 刻度曲线如图 5 所示。得到该刻度曲线后,对不同材料拼起来的样品进行图像重建,重建后的图像(图 6)中用不同颜色代表不同平均原子序数的材料,图 6 中的样品由铅、铝、石墨和塑料拼成,已知样品的 R , 根据 R - Z 刻度曲

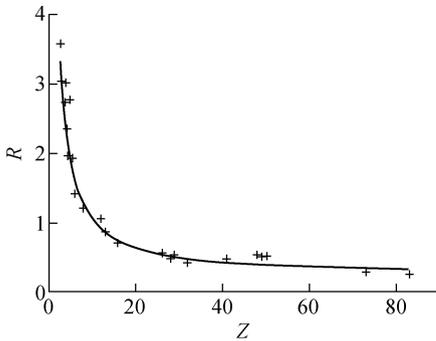


图5 探测器的 R 刻度
Fig. 5 R calibration of detectors

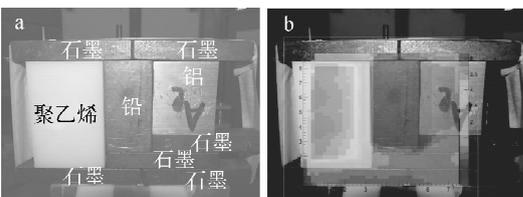


图6 样品(a)及其重建的图像(b)

Fig. 6 Figure (a) and image reconstruction of sample (b)

线即可得到样品的结构分布。图 6 中,步进电机移动的扫描步长为 2 cm,探测器对样品的位置分辨为 $1.8 \text{ cm} \times 1.8 \text{ cm}$,共有 8×10 个像素,经软件优化后的图像更清晰,总的测量时间为 200 min。

4 结论

系统开展了用示踪 ^{252}Cf 中子源和飞行时间技术对包裹进行无损检测的研究,采用联合测量中子和伽玛射线吸收谱的方法获得样品的平均原子序数分布,结合刻度曲线重建样品的材料结构分布图像,实现了被测材料的无损检测。由于实验采用的中子源较弱,样品平台每运动一步后要进行 20 min 的数据获取。为缩短数据获取时间,提高检测效率,可通过增强源强来实现,但增强源强受辐射防护条件制约。实验采用 8 个中子探测器,每步移动 2 cm,在这样条件下,样品的空间分辨能力为 $1.8 \text{ cm} \times 1.8 \text{ cm}$,为提高样品的分辨能力可通过增加探测器个数及减小每步运动距离来实现。在 R - Z 的刻度曲线中,由于原子序数小的物质的 R 下降速度远大于原子序数大的物质,这使得 Z 的分辨本领对于原子序数小的物质足够好,但对原子序数大的物质其材料分辨能力则不令人满意,因此,需找到其他补充的方法对高原子序数的物质进行材料鉴别。

参考文献:

- [1] VOGEL H, HALLER D. Luggage and shipped goods[J]. Eur J Radiol, 2007, 63: 242-253.
- [2] VOGEL H. Search by X-rays applied technology [J]. Eur J Radiol, 2007, 63: 227-236.
- [3] TSAHI G, DAN S. Advances in neutron based bulk explosive detection[J]. Nucl Instrum Methods B, 2007, 261: 311-315.
- [4] EBERHARDT J E, RAINEY S, STEVENS R J, et al. Fast neutron radiography scanner for the detection of contraband in air cargo containers [J]. Appl Radia Isot, 2005, 63: 179-188.
- [5] VIESTI G, COSSUTTA L, FABRIS D, et al. Material recognition by using a tagged ^{252}Cf source [J]. Nucl Instrum Methods A, 2008, 593: 592-596.