

伴随粒子成像技术及其研究进展

徐四大 朱维彬

(清华大学物理系 北京 100084)

摘要 综述伴随粒子成像技术的基本原理、主要性能和研究进展。伴随 α 粒子方法可以实现位置灵敏,可以用于需要位置灵敏的检查中,如机场隐蔽爆炸物的检查和毒品的检查,有着重要的应用前景。

关键词 伴随粒子成像 快中子 粒子探测器

分类号 TL8

1 引言

伴随粒子快中子飞行时间谱方法在二十多年前得以发展。经过多年的研究,这种方法已十分成熟,为中子物理的实验研究做出了重要贡献。近年来,由于探测伴随 α 粒子方法实现了位置灵敏,伴随粒子快中子飞行时间谱方法发展成为一种成像技术^[1,2]。通常将这种成像技术称为伴随粒子成像(Associated Particle Imaging, API)技术。具有伴随 α 粒子探测器的中子管(Associated Particle Sealed-Tube Neutron Generator, APST-NG)的研究成功^[3],使伴随粒子成像技术的实际应用成为可能。自90年代以来,这种成像技术的应用研究得以快速进展。本文将首先简述伴随粒子成像技术的工作原理及重要的技术特性,然后介绍在清华大学的研究进展。

2 伴随粒子成像的原理和技术特性

2.1 成像原理

在产生快中子的氘氚反应 $d+T \rightarrow {}^4\text{He}+n$ 中,反应产生的 α 粒子(${}^4\text{He}$ 核)与快中子 n 在时间上是同时的,在空间上是一一对应的(由运动学关系确定, α 和 n 飞行方向的夹角是确定的,通常接近于 180°)。采用伴随 α 粒子快中子飞行时间(TOF)谱技术,即同时测量 α 和 n (或者 n 诱发的 γ 射线),并确定

它们之间的时间关系,可以确定 n 的飞行距离(设为 z 坐标)。再采用位置灵敏的 α 粒子探测器探测 α ,由 α 的反冲方向确定 n 的飞行方向(设为 x 、 y 坐标)。因此,采用具有位置灵敏的伴随 α 粒子的快中子飞行时间谱技术可以确定与快中子相互作用的原子核所在位置坐标 x 、 y 、 z ,获得空间分布图象。

2.2 技术特性

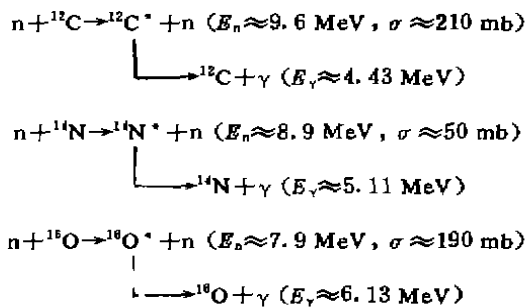
2.2.1 空间分辨率

空间分辨能力是成像技术的基本特性。它的优劣决定了成像技术的应用价值和范围。伴随粒子成像的空间分辨率由位置灵敏 α 探测器的位置分辨率、 α 探测器与氚靶的距离、快中子飞行时间(TOF)谱的半高宽(FWHM)和氚靶直径 d 等因素决定。根据核反应运动学关系,可以计算证明,要获得 x 、 y 方向的足够好的位置分辨率, d 应当足够小;而 z 方向的位置,则主要由FWHM的大小决定。通常情况,在氚靶直径 $d \leq 3$ mm、TOF谱的半高宽在纳秒量级、 α 探测器距氚靶5 cm和 α 探测器的位置分辨为 3×3 mm²等条件下,根据计算和实验^[3],在中子飞行1米处能够达到的空间分辨率为 $6 \times 6 \times 6$ cm³。如果减小氚靶直径(例如, $d \leq 1$ mm),并相应改善 α 探测器的位置分辨能力和TOF谱的半高宽,伴随粒子成像的空间分辨率将显著提高。但是,要把氚靶直径减小到1 mm,在技术上将遇到很大的困难,而且,这种中

子管的使用寿命将明显降低。

2.2.2 元素的空间分布

伴随粒子成像技术以 $T(d, n)^4\text{He}$ 反应产生的快中子 n 为探针, 其能量达到 14 MeV, 能够激发出许多种原子核的 γ 射线。测量这些 γ 射线, 并确定其强度, 可以获得相应元素含量的空间分布。在伴随粒子成像技术的应用研究中, 确定 C、N 和 O 等元素含量的空间分布很有意义。14 MeV 的快中子与这些元素的原子核进行非弹性碰撞, 产生 γ 射线, 主要有



这些 γ 射线的能量 (E_γ) 高, 截面 (σ) 不小, 易于测量。有机物品均含有 C、N 和 O 等元素, 用伴随粒子成像技术研究有机物品, 以及其他含 C、N 和 O 等元素物质的 C、N 和 O 等元素含量的空间分布, 具有独特的意义。

3 伴随粒子成像技术的研究进展

自90年代以来, 清华大学物理系对伴随粒子成像技术中的关键部件和技术进行了研究, 取得了重大进展, 并将它应用于隐藏爆炸物的检测。现在就其主要方面综述如下。

3.1 α 中子管的研制

在 API 中, 需要探测核反应 $T(d, n)^4\text{He}$ 产生的 α 粒子, 因此在常用的产生核反应 $T(d, n)^4\text{He}$ 的密封中子管中, 需要安放 α 探测器。具有伴随 α 粒子探测器的密封中子管 (简称 α 中子管) 成为 API 技术的关键部件。 α 中子管相对于普通中子管有以下明显的特点: 具有 α 探测器; α 探测器和氘靶处于零电位,

离子源处于高电位; 由于 α 探测器的置入, 氘束飞行距离增长, 靶直径 d 又要足够小 (为获得好的空间分辨), 需要制造聚焦电极; 采用连续工作状态。由于 α 中子管的上述特点, 它的研制相对于普通中子管而言具有较大的困难。经多年的反复实验, 我们已经研制成适用于 API 技术的 α 中子管。其中子产额能够达到 API 技术的要求, 引出的 α 粒子信号足够快, 使 FWHM 容易达到 ns 量级。运行稳定可靠, 能够长时间工作。

3.2 位置灵敏 α 粒子探测器

正如在成像原理中所述, 探测 α 粒子实现位置灵敏才能确定待测原子核的 x 和 y 坐标, 因此位置灵敏 α 粒子探测器也是 API 中的关键部件。我们研制成功的位置灵敏 α 粒子探测器^[4] 由快响应 ZnS(Ag) 屏、正方形 (3 mm × 3 mm) 截面的光纤束和快光电倍增管 (R1535) 构成, 在光纤束与 ZnS(Ag) 屏和光电倍增管之间实现了极好的光学接触。此探测器的位置分辨率由光纤束的截面决定, 即 $\Delta x = \Delta y = 3 \text{ mm}$, 时间分辨 $\Delta t \sim 1.5 \text{ ns}$, 能够满足 API 技术要求。

3.3 大体积 BaF₂ γ 能谱仪

在 API 技术中, 需要测量由 14 MeV 快中子诱发的 γ 射线能谱 (见 2.2.2 节), 所选用 γ 探测器应当有足够好的能量分辨率, 同时, γ 探测器还必须引出一路快时间信号, 供给飞行时间谱测量用。因此, API 技术中的 γ 探测器, 应当具有好的能量分辨和快的时间响应。BaF₂ 晶体具有对 γ 射线响应时间快 (快成分为 0.6 ns)、能量分辨较高 (接近 NaI 晶体)、不潮解和对快中子不灵敏等独特优点, 它成为 API 技术首选的 γ 探测器。从文章 2.2.2 节可以发现, 待测 γ 射线能量很高, 分别为 4.43、5.11 和 6.13 MeV, 它们与晶体相互作用时, 电子对效应占优势。为了降低 γ 谱分析的困难, 选用能使双逃逸峰显著降低的大体积 (例如 $\Phi 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$) BaF₂ 晶体最为有利。我们与北京玻璃所合作, 经过

多年反复试验, 终于研制成了性能优良的 $\phi 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的 BaF_2 晶体, 再选用快响应的, 直径为 127 mm 的石英窗 EMI9823QKA 型光电倍增管与之配合, 制成了大体积的 BaF_2 γ 能谱仪^[6]. 谱仪的能量分辨率为 12.6% (对 ^{137}Cs 的 0.662 MeV γ 射线), 双逃逸峰已难于观察到, 时间分辨为 0.9 ns (用 ^{60}Co γ 源做符合测量, 另一端为小体积 BaF_2 γ 探测器). 所有指标均以达到 API 技术要求.

3.4 快中子飞行时间法检测隐藏爆炸物系统

清华大学物理系利用伴随粒子成像技术进行爆炸物检查, 研制成了快中子飞行时间法检测隐藏爆炸物系统^[3].

将隐藏在行李中的爆炸物在机场检测出来是一项紧迫和艰难的任务. 塑性炸药的出现使得常用的 X 射线检测已无能为力. 炸药由 C、N、O 等元素构成, 如前所述, 以 14 MeV 的快中子为探针最为有利. 隐藏在行李

中的炸药与普通有机物品挤在一起, 检测仪器应当具有良好的空间分辨率. 快中子飞行时间法检测隐藏爆炸物系统就是采用伴随粒子成像技术, 以快中子为探针, 具有良好空间分辨率的检测爆炸物系统. 系统的主要特点是: 用多路光纤束传输 ZnS α 探测器产生的荧光, 以实现灵敏探测 α 粒子位置; 采用大体积 ($\phi 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$) 快响应的 BaF_2 晶体探测 γ 射线, 以压低双逃逸峰, 并获得更好的时间分辨率. 系统的空间分辨率为 $6 \times 6 \times 9\text{ cm}^3$ (在距靶 1.5 m 处). 用此系统, 在高压倍压加速器上实验测得 TNT、黑索今、硝胺等炸药和胶鞋底、仪器壳等普通物品被快中子诱发的 γ 射线能谱, 再用人工神经网络进行识别, 炸药和普通物品被清晰地分开. 此系统检测炸药的灵敏度为 300 克, 每小时可以检测 600 件行李. 用此系统亦能进行隐藏毒品检测. 以此系统为基础的正式样机设计已经完成, 正式样机的制造已在计划中.

参 考 文 献

<p>1 Beyerte A, Hurley J P, Tunnell L. Design of an Associated Particle Imaging System. Nucl Instr and Meth, 1990, A299(3): 458~462</p> <p>2 Rhodes E, Dickerman C E, Devolpi A. APSTNG: Radiation Interrogation for Verification of Chemical and Nuclear Weapons. IEEE Trans NS, 1992, 39: 1 041~1 045</p>	<p>3 徐四大, 齐齐荃, 陈泽民等. 快中子飞行时间法检测隐藏爆炸物系统. 清华大学学报(自然科学版), 1996, 36(6): 88~94</p> <p>4 齐齐荃, 方雄, 梁伟等. 位置灵敏 α 探测器. 核电子学与探测技术, 1996, 16(5): 326~329</p> <p>5 徐四大, 任绍震, 齐齐荃等. 大体积 BaF_2 γ 能谱仪. 核电子学与探测技术, 1996, 16(4): 249~251</p>
---	--

Associated Particle Imaging and Its Progress

Xu Sida Zhu Weibin

(Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract The basic principles, important characteristics and recent progress of associated particle imaging were reviewed. Associated particle imaging is position-sensitive. It can be used in position-sensitive examinations, for instance, hidden explosive inspection in air-field custom examination, drug examination. It has an important perspective in application.

Key words associated particle imaging fast neutron alpha particle detector

Classifying number TL8