

$^{241}\text{Am-Be}$ 中子源快中子成像研究

蒋诗平¹, 陈 亮¹, 万里彪¹, 杜淮江², 范扬眉², 韩荣典²

(1. 中国科学技术大学 国家同步辐射实验室; 2. 中国科学技术大学 近代物理系, 安徽 合肥 230029)

摘要: 中子成像是一种与 X 射线成像互补的无损探测技术。为探索同位素中子源用于发展可移动的无损检测系统, 利用 $^{241}\text{Am-Be}$ 作为中子源, 使用自制的中子发光转换屏和 X 射线胶片作为探测系统开展了快中子成像研究, 并获得了较高质量的图像。研究结果表明, 利用 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源发展小型探测系统是有潜力的。

关键词: $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源; 快中子成像; 无损检测

中图分类号: TL816 TL99 文献标识码: A 文章编号: 1000-7512(2007)02-0087-03

Fast Neutron Imaging Using $^{241}\text{Am-Be}$ Neutron Source

JIANG Shi-ping¹, CHEN Liang¹, WAN Li-biao¹, DU Huai-jiang²,
FAN Yang-mei², HAN Rong-dian²

(1. *National Synchrotron Radiation Laboratory;*

2. *Modern Physics Department, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China*)

Abstract: Neutron imaging is a powerful non-destructive test technique, which is complementary to X ray imaging. In order to explore movable systems for non-destructive test using isotope neutron sources, the research on fast neutron imaging is carried out using an $^{241}\text{Am-Be}$ neutron source and a detecting system consisting of a home-made converting screen and X ray films, some images with high quality are obtained. The results show that $^{241}\text{Am-Be}$ neutron sources have potential for developing mini-detective system.

Key words: $^{241}\text{Am-Be}$ neutron source; fast neutron imaging; non-destructive test

中子成像是在 X 射线成像的基础上发展起来的一种无损探测技术, 在工业生产中发挥着重要作用。X 射线成像是基于 X 射线与原子的核外电子相互作用, 而中子成像则是源于中子与原子核的作用, 因此, 与 X 射线不同, 中子可以穿透象铅等高原子序数的金属材料, 而对于含氢、碳、氮等低原子序数元素的材料穿透能力则很差。目前, 热中子成像技术被广泛研究并得到很

好的应用^[1~3], 如它作为一种无损检测技术, 已经用在如航空器、爆炸装置以及铸造产品的缺陷检测等很多工业领域。但热中子的穿透力有限, 对厚材料, 尤其是厚的有机复合材料, 其应用受到一定的限制。而快中子由于其俘获截面小、穿透能力强则在这方面具有相对优势, 因此倍受人们关注^[4,5]。然而, 我国的中子成像研究相对落后, 对快中子成像研究几乎是空白。近年来, 本

研究小组利用高压倍加器和同位素中子源开展了快中子成像研究,并取得了初步实验结果^[6]。

在中子成像实验中,中子源有反应堆、加速器(包括中子管)和同位素等。由反应堆制备中子源,中子注量率最高,但造价昂贵、管理技术难度大和运行费用高、体积庞大不可移动都限制了其广泛应用。由加速器和同位素生产中子源,对于建立可广泛应用的小型可移动快中子无损检测系统比较合适。而同位素应该是建立便携式检测系统的最佳选择。由于同位素的中子注量率低,成像时间长,所以只适合于可以较长时间成像的样品和场合。²⁴¹Am-Be 中子源由²⁴¹AmO₂粉末与铍粉混合制成,通过(α ,n)反应产生中子。可用于核物理实验、反应堆启动、中子活化分析、中子湿度计、辐射育种、石油测井、中子照像等^[7,8]。本工作利用²⁴¹Am-Be 中子源开展快中子成像研究是基于该中子源的一系列特性的考虑,如²⁴¹Am-Be 中子源半衰期长,使用过程基本上不用考虑衰减;产生的中子能量较低,平均能量为 4 MeV,探测相对容易;射线本底不高、射线能量较低(约 60 keV),很容易屏蔽,根据计算可以用 1~2 mm 厚的铅皮屏蔽。

1 中子源及成像装置

1.1 中子源

²⁴¹Am-Be 中子源:中国科学技术大学提供,中子发射率为 $10^5 \sim 10^6/s$ 。

中子源是用²⁴¹AmO₂粉末与铍粉混合后压片,焊封在双层不锈钢源壳内,源整体呈圆柱状,中子源直径和高度尺寸分别为 2 cm 和 3 cm。为便于实验移动中子源,将源放在一个相近尺寸的圆柱形铝盒内,铝盒系上细绳,细绳另一端系在竹竿上。平时将中子源放在由硼砂铸成的屏

蔽体内,实验时用竹竿吊出来。

1.2 中子成像装置结构及工作原理

中子成像装置示于图 1。该装置主要由中子源和探测器两大部分组成。根据计算,柱状的²⁴¹Am-Be 中子源用厚约 1.5 mm 的铅皮屏蔽约 60 keV 的 γ 射线。暗盒朝向中子源的面使用市售铝箔密封,暗盒内从近中子源端依次为样品、发光转换屏和医用 X 射线胶片。由于中子源的中子注量率低,将感光胶片和探测器之间的距离设为 10 cm。圆台准直器设置在中子源和探测器之间。圆台准直器是由铁片做成模子,将硼砂和石蜡灌入其中铸成(位置如图 1 中虚线所示)。准直器靠近中子源端孔径为 20 mm,靠近样品面孔径为 140 mm,壁厚度为 80 mm,圆台的高度为 100 mm。为了环境和实验人员的安全,整个装置安放在下面是深坑的木板地面上,且实验大厅的墙壁由 1.5 m 厚的混凝土筑成。

本实验采用快中子发光转换屏与 X 射线胶片的方法进行中子探测。发光转换屏为自制,其主要成分是环氧树脂和稀土发光材料硫氧钆($Gd_2O_2S:Tb$)。

2 成像实验与结果分析

本实验设计了 3 个样品,一个人工样品为金属铁盒内装三粒药物胶囊,铁盒壁厚 2 mm;另一个样品是 Q9 头(信号传输电缆插头);第三个样品是生物样品为新鲜龙虾,龙虾粘在铝箔上(这相当于一个无盖的铝盒)。

成像时,用医用 X 射线胶片感光记录图像,通过显影和定影得到底片,将底片用胶片扫描仪扫描即得到数字化图像,并可用 Photoshop 图像处理软件进行各种处理。中子成像的结果示于图 2~图 4。

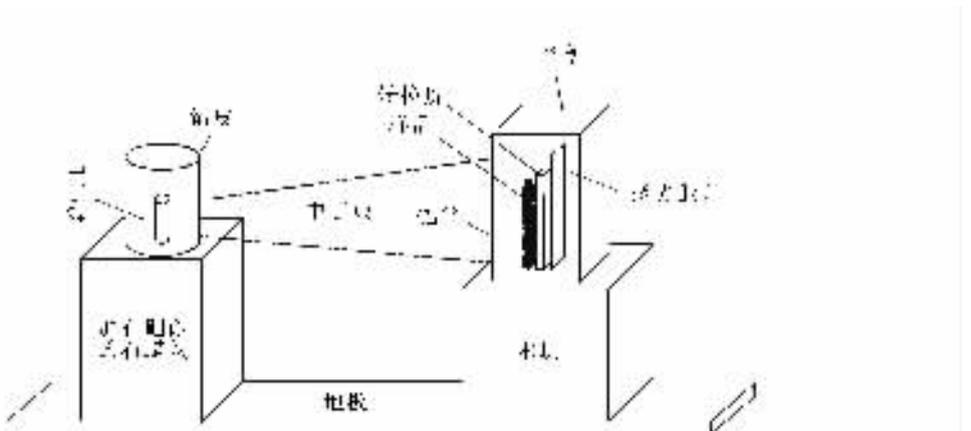


图 1 利用²⁴¹Am-Be 中子源的快中子成像装置示意图

由图 2 可以清楚地看到盒内的三粒胶囊;图 3 可以清晰分辨 Q9 头结构;图 4 中龙虾的体节和内部结构很清楚,龙虾的肢和身体连接的部分清晰可见。因为生物样品的主要组成元素是 C、H、O、N,因此中子穿透能力较弱,加上龙虾较厚,所以成像时间较长,达 90 min。



图 2 铁盒内药胶囊快中子成像
探测面距中子源 10 cm,成像时间 30 min



图 3 Q9 头的快中子成像
探测面距中子源 10 cm,成像时间 50 min

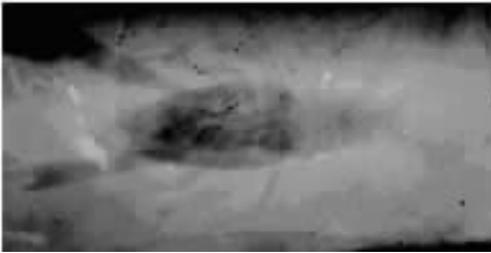


图 4 龙虾的快中子成像
探测面距中子源 10 cm,成像时间约 90 min

3 讨论

中子的高效率探测一直是中子成像特别是快中子成像中没有解决的问题。中子与原子核作用时没有库仑力,这个特性是其价值所在也是其难以探测的原因。提高快中子的探测效率成为快中子成像的关键,特别是对中子注量率非常有限的加速器和同位素中子源。

利用中子被含氢材料中的 H 散射产生的反冲质子,与发光屏中的荧光材料作用产生荧光辐射是探测快中子的实用方法之一。本实验所用

的发光转换屏中含氢材料和荧光材料分别是环氧树脂和硫氧钆。反冲质子的产生是中子与氢原子作用的结果,氢元素含量越高其转换效率应该越高。聚乙烯是含氢最高的固体有机物质,但是聚乙烯和荧光材料不容易混合均匀加工成转换屏。为方便起见,本实验选择易于加工的环氧树脂作为转换屏的含氢材料。

中子源的背景 γ 射线以及中子与重金属作用产生 γ 射线构成本底。因此,消除 γ 射线的影响对 γ 射线敏感的硫氧钆发光转换屏至关重要。本实验所用中子源背景 γ 射线能量低,容易屏蔽。但是,实验中所用的中子源呈圆柱形不利于成像,理想的源应该是接近“点源”的球状。

本工作的结果初步证明,利用 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源进行中子成像是可行的。由于中子成像过程复杂,影响因素很多,如中子源的特性、中子探测方法、散射中子以及背景 γ 射线等,要获得更理想的快中子成像结果,还有很多问题需进一步研究解决。

参考文献:

- [1] SCHILLINGE B, LEHMANN E, VONTOBEL P. 3D Neutron Computed Tomography: Requirements and Applications [J]. *Physica B*, 2000, 276-278: 59-62.
- [2] NNAKANISHI TM, FURUKAWA J, MATSUBAYASHI M. A Preliminary Study of CT Imaging of Water in a Carnation Flower [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physica Research A*, 1999, 424: 136-141.
- [3] CREMER JT, PIESTRUP MA, GARY CK. Biological Imaging With a Neutron Microscope [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(3): 494-496.
- [4] KIM KH, KIANN RT, RAJU BB. Fast Neutron Radiography for Composite Materials Evaluation and Testing [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physica Research A*, 1999, 422: 929-932.
- [5] FUJINE S, YONEDA K, YOSHII K, et al. Development of Imaging Techniques for Fast Neutron Radiography in Japan [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physica Research A*, 1999, 424: 190-199.
- [6] 蒋诗平, 陈亮, 陈阳, 等. 快中子成像的实验研究 [J]. *核技术*, 2005, 28(2): 151-154.
- [7] 蔡善钰. 镅-铍中子源 [J]. *测井技术*, 1979, 3(5): 35.
- [8] 蔡善钰. 人造元素 [M]. 上海: 上海科学出版社, 2006: 284.