

快中子照相的实验研究

蒋诗平¹ 陈 亮¹ 陈 阳¹ 杜淮江² 王忠民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 合肥 230029)

2(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230027)

摘要 快中子照相是一种优良的无损检测技术,它有着 X 射线、热中子照相等所不具有的独特优势。本文介绍了作者分别采用 $^{241}\text{Am-Be}$ 同位素中子源和中子发生器进行的快中子照相研究,并利用自制的 $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{:Tb}$ 快中子转换发光屏进行探测,成功实现照相。

关键词 快中子照相, $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源, 中子发生器

中图分类号 TL99

快中子照相(FNR)是一种优良的无损检测方法。它以传统的 X 射线照相和热中子照相技术为基础,可用于检测复合材料中重元素和轻元素的分布^[1],也可用于大铸件内部结构的缺陷检查、航空器件的锈蚀检测、考古文物的分析以及爆炸物的检查等。从理论上讲,各种能量的中子都可进行照相研究,但目前研究较成熟、应用也较广泛的为热中子照相。这主要是因为热中子与物质的作用截面较大,中子探测较容易;不同物质与热中子的作用截面相差也大,因此材料之间对热中子的强度衰减相差大,容易区分。但大的作用截面造成热中子的穿透能力小,如不能穿透厚的金属材料、较厚的有机板材、人体等^[2],因而限制了其应用范围。而快中子由于其能量较高、与物质作用截面较小、穿透能力强,如果将快中子应用于照相研究,则可大大拓展中子照相的应用领域,延伸射线无损检测的应用范围。

穿透能力强是快中子照相的优势,目前国外积极发展该项技术^[1-4],而国内发展较滞后(包括热中子照相)。本文在对快中子照相进行理论研究的基础上,从解决快中子探测入手,用不同能量的快中子进行照相,获得了较好的结果。

1 快中子照相原理

中子不带电荷,与物质相互作用时,主要和原子核发生吸收、散射等一系列作用。作用的几率与原子核的性质有关(与 X 射线不同,作用截面随原子核外电子云密度的增加而增大),同一能量中子对不同材料、甚至同一材料的同位素之间的相互作用截面相差可能也很大。一般说来,中子与轻元素

(氢、锂、硼等)的相互作用截面往往很大,而与重元素(铁、铅、铜等)的相互作用截面有时却较小(与 X 射线相反),这就凸现出中子照相的优势:可对重元素材料内部的轻元素材料进行照相研究。中子穿过物体后,由于物体结构的不同或材料的差异,其强度衰减也将不同。探测穿过后的中子强度分布,就可获得物体的内部结构或材料分布信息。

对于快中子来说,与物质的相互作用机理更为复杂。不同物质对快中子的散射、吸收等作用过程都不尽相同,几率也不一样,这与快中子的能量直接相关。能量的变化,导致各种作用的过程、几率也可能随之发生变化。快中子与大部分物质作用时,主要发生散射作用过程。而对于射线穿过物体后的强度指数衰减规律而言,指的也是单纯的吸收作用过程。但当快中子穿过较厚的有机类复合材料时,中子的能量被衰减或中子方向发生偏转,很大一部分散射作用可等同于吸收作用过程^[5]。而快中子照相的优势正是表现在对有机类材料的研究,因而可用射线强度指数规律变化描述快中子穿过物体后的强度变化,即:

$$I = I_0 \exp(-\sum_R t)$$

式中 I_0 、 I 分别为中子入射前后的强度, t 为样品厚度, $\sum_R$ 为元素对快中子的宏观总截面,它等于各种作用截面之和。同一能量中子,与不同物质相互作用的宏观总截面 $\sum_R$ 不同,这样穿过样品后的中子强度 I 也不一样。利用探测装置接收中子强度变化信息,材料的元素分布或结构差异就可被反映出来。

第一作者:蒋诗平,男,1963年10月出生,2000年于中国科学技术大学核科学与技术专业获博士学位,主要从事 X 射线显微和医学成像、中子照相研究,副研究员

收稿日期:2004-03-16,修回日期:2004-06-22

2 实验条件

快中子的能量跨度较大,从 0.1 MeV 到 20 MeV 以上。中子源不同,快中子能量不同,与物质作用机理不尽相同,照相方法也不完全一样。要获得高强度的中子束,首选反应堆中子源^[2]。但反应堆投资大、维护和操作不便,更不能实现现场可移动式检测,因而较多采用同位素和中子发生器作为快中子源。本实验中分别采用 $^{241}\text{Am-Be}$ 同位素中子源和 D-T 中子发生器(图 1)作为中子源,以两种能量快中子进行照相研究。 $^{241}\text{Am-Be}$ 同位素中子源发射中子平均能量为 4 MeV 的多能中子,中子强度较低,为 $10^5/\text{s}$ 。中子发生器通过 (D, T) 反应产生能量为 14 MeV 的单能中子,中子强度可达 $10^9/\text{s}$ 。

因为中子呈电中性,很难聚焦,必须用准直器对中子源发出的中子束进行约束以降低中子的发散度。根据两种中子源发出中子的强度不同,实验中采用了不同准直比的准直器对中子准直。对于 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源,准直器的准直比为 10;而中子发生器的准直器的准直比为 40。经估算,对于 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源,样品距中子源 10 cm 时的中子强度约为 $100 \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$,而对于中子发生器,样品距中子源 20 cm 时的中子强度约为 $10^5 \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。快中子照相的一个难点问题就是在照相时如何实现对快中子的高效探测。快中子不能直接探测,目前在照相时通常都是利用快中子与富氢材料中的氢原子发生弹性散射产生反冲质子,反冲质子再激发荧光材料发光,接收发出的光强度间接实现探测^[6]。

实验中采用自制的由环氧树脂和稀土发光材料硫氧化钆 ($\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$) 发光转换屏结合 X 射线胶片进行照相。因为发光转换屏的探测效率直接影响到实验结果,在制作时,根据快中子的探测原理,经过理论计算,先确定最佳发光效率时的屏配比、厚度,并进行了实验验证。实验装置原理图见图 2。



图 1 实验中使用的中子发生器

Fig.1 The neutron generator used in the experiment

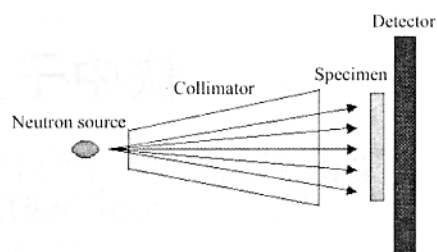


图 2 快中子照相原理

Fig.2 The principle of fast neutron radiography

3 结果和讨论

将 X 射线胶片贴于发光转换屏后共置于暗盒内,并放在样品之后。中子源发出的快中子经准直器准直后照射到样品,发生作用后中子强度发生变化。中子强度不同,发光转换屏对应部位发出光的强度不同, X 射线胶片感光程度也不一样,进而得到样品内部结构信息的潜像。胶片经显影、定影后即可得到中子照相的图像。图 3 至图 7 是我们的部分实验结果。其中,图 3 至图 5 为 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源照相机,图 6、图 7 为中子发生器中子源 (14 MeV) 的照相机。



图 3 Q9 头照相,照相时间 50 min,探测面距中子源 10 cm,这说明快中子可实现照相

Fig.3 Photo of Q9. Exposure time is 50 min, and distance between neutron source and detection plane is 10 cm. It shows that photography by fast neutrons is feasible



图 4 铁盒内药胶囊照相,照相时间 30 min,探测面距中子源 10 cm,这说明快中子可穿透外部金属材料,对内部有机材料照相

Fig.4 Photo of capsules in an iron box. Exposure time is 30 min, and distance between neutron source and detection plane is 10 cm. It shows that fast neutrons can penetrate metallic materials, and organic materials inside can be detected.

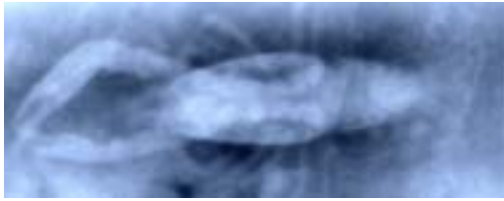


图5 龙虾照相图,照相时间 30 min,探测面距中子源 10 cm。从图中可看出,龙虾结构上的细微差别基本可辨,这说明快中子照相可穿透较厚的有机体

Fig.5 Photo of a lobster, exposure time is 30 min, and distance between source and detection plane is 10 cm. As can be seen in the picture, fine differences of the structure can be recognized. It shows that fast neutrons can penetrate thicker organic bodies

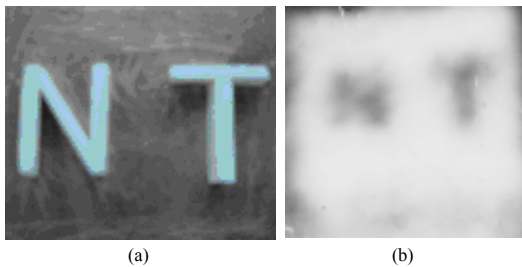


图6 (a)铜板后面的英文字母 N 和 T (聚丙烯材料) 的样品; (b) 和中子成像图 (中子能量 14 MeV)。这说明快中子可穿透外部金属材料,对内部有机材料照相

Fig.6 (a) The English letters 'N' and 'T' (made of polypropylene) behind a copper plane; (b) Its photo by fast neutrons (neutron energy: 14 MeV). This also shows that fast neutrons (higher energy) can penetrate metallic materials, and organic materials behind them can be imaged.

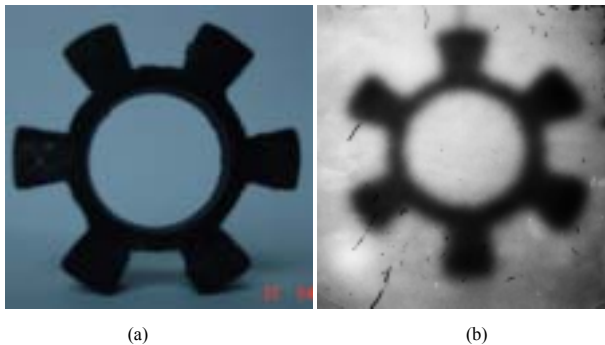


图7 橡胶齿轮实物照片 (a) 及其中子照相 (b) 照片。这说明快中子可实现对有机物照相

Fig.7 (a) A rubber gear; (b) Its photo (neutron energy: 14 MeV). It also shows that organic objects can be imaged by fast neutrons (higher energy)

对于快中子照相而言,要实现高质量的照相,中子束的强度要高、发散度要小。强度大小不仅与中子源有关,还与准直器的准直比 (L/D) 有关。准直器的准直比是衡量中子束准直程度的一项重要指标,它直接影响到照相衬度、分辨率和时间^[7]。准直比不同,引出中子束的发散度不一样,对中子强

度的衰减也不相同。较高准直比可降低中子束的发散度,但中子强度的衰减较大。²⁴¹Am-Be 中子源的中子强度较低,准直器的准直比不能选择得太高,否则中子强度衰减较大,增加了照相难度,但低的准直比造成照相分辨率降低。从照相图可看出,只要距离、时间、准直比等选择恰当,低强度中子也能进行快中子的照相研究,且分辨率也较好。

就实验中采用的两种中子源来说,²⁴¹Am-Be 中子源应用于快中子照相研究,具有操作简便、维护方便、可移动性强等优点,为实现现场可移动式照相检测创造了可能。但是其中子强度较低,照相效率不是很高;同时,因准直器准直比不能大,也限制了有效照相面积和分辨率。而中子发生器中子源则可避免这些不足。中子发生器发射能量为 14 MeV 的准单能中子,中子强度大 (10^9 s^{-1}),这样一方面可选择较高准直比的准直器对中子约束,以降低中子的发散度,也可减少周围环境引起的散射中子对照相质量的影响,提高图像分辨率;胶片在较短时间内即可接收足够的中子强度曝光,减少了照相时间,提高了效率;另外,对于 14 MeV 的快中子,其能量更高,穿透力更强,可实现对更厚物体的检测。只是在操作和维护上中子发生器难度有所增加。

快中子照相的优势在于可对金属材料内部的有机材料照相,图 4 和图 6 就体现出快中子照相在这方面的优势:快中子可穿过铁盒壁和铜板,对内部的有机药胶囊和聚丙烯字母进行照相,这是由于快中子与有些金属的材料相互作用截面较小,与有机材料的作用截面缺较大。而 X 射线却很难实现对金属材料内部有机材料的照相,因此二者在照相上可实现互补。

快中子比热中子穿透能力强,这从图 5 和图 7 可体现出来。龙虾的最厚部位以及橡胶齿轮的厚度均超过 3 cm,仍获得了清晰图像。而热中子和物质作用时主要发生弹性散射,有机材料厚度增加时,可造成中子束扩散,对于厚度超过 3 cm 的有机材料,基本不能实现照相^[8],而快中子依然能获得较好的照相结果。

由于中子照相的复杂性:与物质作用机理复杂,影响因素较多等,目前几乎所有快中子照相的图像衬度和分辨率都不是非常理想^[1,2]。本文中的图 3 至图 7 也存在同样的不足。

4 结束语

在本实验中,我们利用两种不同的中子源进行了快中子照相研究。中子源不同,实验方法有所差异,但均展示出快中子穿透力强、可对有机材料照

相等优势,是一种优良的无损检测技术。快中子照相不仅操作简便、实用性强,同时可实现与 X 射线照相的互补,具有很高的研究和应用价值。

参考文献

- 1 Kim K H, Klann R T, Raju B B. Nucl Instr Meth A, 1999, **422**: 929—932
- 2 Fujine S, Yoneda K, Yoshii K, *et al.* Nucl Instr Meth A, 1999, **424**: 190—199
- 3 Nakajima T, Oda M, Tamaki M, *et al.* Nucl Instr Meth A, 1996, **377**: 90—92
- 4 Mikerov V, Waschkowski W. Nucl Instr Meth A, 1999, **424**: 48—52
- 5 El-Sayed Abdo A. Annls Nucl Energy, 2002, **29**: 1977—1988
- 6 Rahmanian H, Watterson J I W. Nucl Instr Meth B, 1998, **139**: 466—470
- 7 Spowart A R. J. Phys. E: Sci Instrum, 1972, **5**: 497—510
- 8 Budinger T F, Howerton R J, Plechaty E F. Phys Med Biol, 1971, **16**: 439—450

Experimental study on fast neutron radiography

JIANG Shiping¹ CHEN Liang¹ CHEN Yang¹ DU Huaijiang² WANG Zhongmin² FAN Yangmei²
HAN Rongdian²

1 (National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science & Technology of China, Hefei 230029)

2 (Department of Modern Physics, University of Science & Technology of China, Hefei 230027)

Abstract As a non-destructive testing technique, fast neutron radiography has many unique advantages comparing with X-ray and thermal neutron radiography. This article represents two different neutron sources to study fast neutron radiography, one is ²⁴¹Am-Be neutron source, and the other is neutron generator. The fast neutrons were detected by a scintillator screen using Gd₂O₂S:Tb as phosphor. A series of results were obtained and discussed.

Key words Fast neutron radiography, ²⁴¹Am-Be neutron source, Neutron generator

CLC TL99