论文

反应堆中子边缘增强效应成像初步研究

唐彬^{①②}, 李航^{①②*}, 唐科^{①②}, 吴洋^{①②}, 霍合勇^{①②}

① 中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621900;

② 中国工程物理研究院中子物理学重点实验室, 绵阳 621900

*联系人, E-mail: lihang32@gmail.com

收稿日期: 2013-01-24; 接受日期: 2013-07-04

摘要 中子边缘增强效应是近年来发展的基于中子波动性的新型中子成像技术. 相较于传统的中子照相技术利用样品中不同元素对中子衰减能力的差别来得到样品内部的结构潜像, 边缘增强效应成像利用中子射线穿过物体时各种元素对中子的折射率不同来反映物体的内部结构. 为研究中子边缘增强效应成像的实际工业应用可行性, 通过数值模拟方法分析了边缘增强效应的产生过程, 并基于反应堆进行了不同条件下的多色热中子边缘增强效应成像实验. 模拟与实验结果表明在适当准直比条件下, 铝材料边缘将出现明显的边缘增强效应, 该效应与准直比、样品与转换屏之间的距离密切相关.

关键词 边缘增强, 中子成像, 反应堆**PACS:** 28.20.-v, 03.75.Be**doi:** 10.1360/132013-44

1 引言

中子成像技术是无损检测技术(NDT)的一个分支, 属于射线照相(Radiography)领域. 中子成像原理与现阶段广泛运用的 X 射线成像类似, 均通过探测穿过样品后射线的强度分布来揭示样品内部结构. 但中子不带电荷, 与物质相互作用时不受核外电场的影响而直接作用于原子核; 另外, 由于 X 射线与核外电子存在作用, 其吸收截面随原子系数的上升而上升, 而中子与轻元素的截面比较大但是没有统一的规律. 所以中子成像具有更强的穿透性和轻元素敏感性, 在轻元素和同位素检测方面存在更大的优势, 在军工、大构件检测方面有着广阔的应用前景.

经过多年的研究发展后, 中子成像在发达国家已经得到了广泛的利用, 早在 1956 年 Thewlis^[1]就通过中子成像成功地实现了铀柱体材料中缺陷的检测. 作为一种新兴的无损检测技术, 中子成像在国内具有广阔的发展前景.

传统的中子成像技术利用样品中不同元素对中子衰减能力的差别来得到样品内部的结构潜像, 利用的是中子的粒子性; 而根据量子力学理论, 中子具有波粒二象性, 利用中子的波动性也能进行成像, 此时成像的基础是样品内不同位置的折射率差别. 相较于不同材料对中子的衰减系数不同, 中子射线穿过物体时各种元素对中子的折射率不同将能反应样品内部结构图像. 这样, 中子边缘增强效应成像就可

引用格式: 唐彬, 李航, 唐科, 等. 反应堆中子边缘增强效应成像初步研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44: 42–48

Tang B, Li H, Tang K, et al. Preliminary study on the neutron edge enhancement imaging at a reactor source (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2014, 44: 42–48, doi: 10.1360/132013-44

以小衰减系数但是较大折射率的材料或者是组成元素具有相近衰减系数但是有不同折射率的混合材料提供较高的分辨率,特别是对一些传统中子成像技术检测灵敏度很低的材料(铝膜等)得出较为令人满意的检测结果.

2000 年, Allman 等人^[2]首次利用冷中子源得到大黄蜂的中子边缘增强效应图片,清晰地观测到成像带来的衬度增加. 早期认为该增强效应是中子衍射造成的,即认为中子束具有一定的相干性,当其通过样品时相位因样品不同部位的折射率不同而产生差异,使波前畸变. 畸变的波前作为新的相干波源使接收平面上的波前发生干涉,通过探测器将相位变化转化为强度变化可见^[3]. 于是将这种成像技术称为中子相衬成像. 源的空间相干性可以使用空间相干长度来评价.

$$l_c = \lambda L / D. \quad (1)$$

λ 是中子源的波长, L 是物和源的距离, D 是源的尺寸. 在高空间相干性的情况下,要求长中子波长(冷中子比热中子效果好)、小源尺寸(大多小于 1 mm)、长物源距,即准直比 L/D 一般要求在 10^4 左右. 在如此高的准直比情况下,要保证合适的曝光时间,要求源具有很高的亮度,故实验一般都在反应堆中子源上进

行. 但是典型的干涉条纹一直没有观察到. 且在已发表的边缘增强效应成像工作中,分辨率约为 $100 \mu\text{m}$ ^[3,4]; 考虑相干长度 l_c , 最大 λ 约为 $5 \text{ \AA}$ (冷中子), L/D 约为 $0.5 \times 10^4 - 1 \times 10^4$, 故能达到的最大横向相干长度约为 $5 \mu\text{m}$, 因此,在横向 $100 \mu\text{m}$ 缺陷上只有 5% 的点能对衍射有贡献,在现有的设备条件下,该衍射峰难以分辨. Strobl 等人^[5]提出用中子折射现象来解释边缘增强效应成像,此方法可以解释现在的很多实验结果,但是不要求中子源的空间相干性,可以扩展中子边缘增强效应成像的应用范围.

本文通过 Matlab 编程,模拟折射引起的中子边缘增强效应成像,使用宽能区的入射中子得到了非单色冷、热中子的边缘增强效应成像结果;同时在反应堆上进行了不同条件下的多色热中子边缘增强效应成像实验,定性得到影响成像的因素,与模拟结论一致.

2 模拟原理

物质对中子的折射率 n 可以表示为

$$n = 1 - \delta - i\beta. \quad (2)$$

其中 β 是吸收项, δ 是相移项. 图 1 是不同元素的热中

图 1 不同元素热中子吸收系数和相移系数图^[6]

Figure 1 Thermal neutron absorption coefficient and phase coefficient of different elements [6].

子吸收系数图, 可以看到在有相同吸收系数的情况下, 可以通过不同的相移系数分辨元素.

从不同元素的热中子吸收系数图可以看到在有相同吸收系数的情况下, 可以通过不同的相移系数分辨元素.

当只考虑相移时, $n=1-\delta$, 或者写成

$$n = \sqrt{1 - \frac{V_{\text{opt}}}{E_0}} = \sqrt{1 - \frac{2\pi\hbar^2}{mE_0} Nb} \approx 1 - \frac{\pi\hbar^2}{mE_0} Nb. \quad (3)$$

其中, m 为中子质量, E_0 为入射中子能量, N 为介质原子密度, b 为中子相干散射长度. 热中子相移项 δ 一般为 10^{-6} , 冷中子的 δ 一般为 10^{-5} .

考虑中子束在样品中某不同材料表面发生折射, 并遵从斯涅尔公式:

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2. \quad (4)$$

其中, α_1 和 α_2 代表中子的入射角和折射角; n_1 和 n_2 为折射面两边不同材料的折射率. 由此角偏离为

$$\alpha_{\text{final}} = \frac{1}{k} \nabla_{\perp} \phi = \nabla_{\perp} \int \delta(s) ds. \quad (5)$$

其中 α_{final} 是最终中子出射方向和入射方向的夹角, s 是中子传播路径. 折射不需要很高的空间相干性, 采用尽可能小源只是为了降低几何不锐度, 与提高空间相干无关. 只要由于折射造成的束偏离能够被探测器所分辨, 就能得到希望的图像.

常见的中子输运模拟程序如 MCNP^[7], FLUKA^[8], GEANT^[9]等只考虑了中子的粒子性, 对波动性没有做考虑, 故不能用来模拟中子的边缘增强效应成像; 认真分析上述过程后, 参考蒙特卡罗方法原理, 以折射为基础的边缘增强效应成像可以通过自编程序来实现. Matlab 是美国 Mathworks 公司出品的数学软件, 可以方便地进行矩阵运算和图像绘制, 并具有极高的运算速度. 通过它编写程序模拟跟踪大量中子的径迹行为有较高的效率, 且可以方便地进行结果查看. 用其模拟中子折射造成的边缘增强现象在数学和软件上都是可行的.

一个完整的中子边缘增强效应实验平台包含中子源、样品和探测器. 考虑一个 XYZ 三维直角坐标系 (如图 2 所示), 在 $z=0$ 处, X-Y 平面内放置一个二维方形平面 (边长为 l_1) 中子源; 为简化模型, 在 $z=L_1$ 处放置一个低能中子弱吸收材料的小球 (如铝、碳等), 半径为 R ; 在 $z=L_1+L_2$ 处放置方形 (边长 l_2) 中子探测器.

模拟过程可以分为三个步骤: 首先在中子源平

图 2 边缘增强效应模拟物理模型示意图

Figure 2 Physical model of neutron edge enhancement imaging.

面上按出射位置随机抽样一个源中子, 该中子能量分布服从一定能谱分布, 出射方向方位角在一定范围内均匀随机分布; 然后跟踪该中子, 如果该中子与样品相交, 则计算该中子与样品的相互作用, 即中子入射和出射两次折射过程, 记录中子最后的出射方位角; 最后根据中子的方位角使其在探测器对应位置累积. 重复以上三个步骤, 抽样大量中子数后即可在探测器平面上得到成像图样. 该图像的统计性与抽样中子数相关.

在模拟中进行一定近似以加快模拟速度, 提高程序效率. 由于样品为弱吸收材料, 故不考虑中子在样品内部的衰减; 探测器上的结果为累积中子注量分布, 略去了闪烁屏对成像的影响; 按照麦克斯韦分布能谱抽样不同能区的中子, 对冷中子最可几能量为 0.0025 eV, 热中子最可几能量为 0.025 eV, 由于相同材料对不同能量中子具有不同的折射率, 能量连续分布的引入使模拟更接近真实情况; 中子的方位角范围根据准直比来决定, 不模拟超过该范围的中子; 整个系统放置在真空中, 不考虑中子在空间中的损失.

3 模拟结果及分析

3.1 不同材料影响

由于不同材料的折射率和本身密度不同, 在相同实验条件下成像结果应存在不同. 考虑设置源尺寸为边长 4 mm 的方形; 源-物距为 8000 mm, 相当于准直比 2000; 物-探测器距为 800 mm; 样品小球半径为 2 mm; 探测器尺寸为 10 mm×10 mm, 分为 100×100 像素; 采用热中子能谱输入, 每幅图像模拟 1.4×10^9 个中子.

图 3 为不同材料的成像模拟结果. 对碳、铝、镍、

图 3 不同材料的成像模拟

Figure 3 Imaging simulation of different materials.

钛四种材料, 模拟结果显示小球边缘形成的明暗交界, 可以看到在边缘位置存在很强的增强效应, 更多的中子被折射到真空; 但对于钛材料有不一样的增强效应, 即更多的中子被折射到钛材料内部, 这和文献[3]中给出的结果是一致的, 也证明了模拟的可靠性; 且对不同材料增强效应强度不一致, 高折射率的材料边缘增强效应强。

3.2 不同准直比的影响

对半径为 2 mm 的铝材料小球, 考虑源-物距 8000 mm, 物-探测器距 800 mm, 模拟不同源尺寸下的成像情况, 采用热中子能谱输入, 每幅图像模拟 1.4×10^9 个中子。

图 4 为不同准直比情况下的成像模拟结果。随着源边长尺寸的增加, 准直比下降, 几何不锐度的增加使成像图像模糊最终无法识别。

3.3 不同物-屏距的影响

对半径为 2 mm 的铝材料小球, 考虑源-物距 8000 mm, 源尺寸为边长 4 mm, 模拟不同物-屏距下的成像情况, 采用热中子能谱输入, 每幅图像模拟 1.4×10^9 个中子。

图 5 为不同物-屏距情况下的成像模拟结果。随着物屏距的增加, 边缘效应增强, 但同时也带来几何不锐度的增加, 使边缘变得模糊。

3.4 不同中子能谱的影响

对半径为 2 mm 的铝材料小球, 考虑源-物距

图 4 不同准直比情况下铝制小球成像模拟

Figure 4 Imaging simulation of different L/D by aluminum ball.

8000 mm, 物-屏距 800 mm, 源尺寸为边长 4 mm, 模拟不同中子能谱的成像情况, 每幅图像模拟 1.4×10^9 个中子。

图 6 为不同中子能谱情况下的模拟结果。低能量中子对应高的折射率, 带来更强的边缘增强效应。

3.5 模拟结果分析

对基于折射解释的中子边缘增强效应成像, 源的高相干性不再是影响成像结果的关键性因素, 对多色热中子源, 当准直比达到 1000 时已能出现典型的边缘增强效应; 该效应与材料相关, 不同折射率将带来不同强度乃至相反的边缘效应; 准直比越高、物-屏距越大、中子能量越低, 边缘增强效应越明显; 但在一定准直比条件下, 过大的物屏-距会使图像模糊, 影响对边缘的判断。

4 实验结果

我们在反应堆上进行了多色热中子边缘增强效应成像实验。实验装置布局如图 7 所示, 反应堆产生的多色热中子经不同尺寸光阑引出辐照样品成像, 光阑直径从 125 mm 到 4 mm 不等; 转换屏为 200 μm

图 5 不同物-屏距情况下铝制小球成像模拟

Figure 5 Imaging simulation of different distance between object and screen by aluminum ball.

图 6 不同中子能谱情况下铝制小球成像模拟

Figure 6 Imaging simulation of different neutron spectrum by aluminum ball.

厚度 $^6\text{LiF}+\text{ZnS}$ 闪烁屏; CCD+光学镜头装置通过 45° 放置前表面镀铝反射镜耦合到转换屏后表面, 整个成像系统放置在可移动机械平台上, 可方便调节物-屏距.

实验中使用的样品为一盛有铝屑的空心铝盒,

其外尺寸为 $40\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 30\text{ mm}$, 内尺寸为 $34\text{ mm}\times 24\text{ mm}\times 27\text{ mm}$. 样品放置在距离光阑 8 m 远的位置, 通过调整光阑孔径来获得不同的准直比. 当光阑直径为 4 mm 时, 不同物-屏距情况下的成像结果如图 8 所示, 物-屏距 16 cm 时曝光 7 min , 物-屏距 50

图 7 反应堆边缘增强效应实验布局

Figure 7 Sketch map of neutron edge enhancement imaging experiment.

图 8 光阑直径 4 mm 时不同物-屏距情况下边缘增强效应成像结果

(a) 局部灰度曲线, (b) 实物照片, (c) 不同物-屏距成像结果, (d) 不同物-屏距成像结果实线方框处放大图像

Figure 8 Neutron edge enhancement imaging results at different distance between object and screen (the diameter of aperture is 4 mm). (a) The local gray curve; (b) the photo of sample; (c) the imaging results at different distance between object and screen; (d) the local amplification images of (c).

cm 和 80 cm 时曝光 8 min, 物-屏距 110 cm 和 140 cm 时曝光 9 min.

由于铝的热中子截面很低, 当样品距离转换屏较近时, 吸收像占主要成分, 铝屑的像不明显(图 8 中下方为实线方框内铝屑像放大), 但铝盒边缘已经开始出现边缘增强效应(图 8); 随着物-屏距的增大, 铝屑边缘效应增强, 铝屑像变得清晰; 当物-屏距持续增大时, 由于几何不锐度的增加, 铝屑像开始变得模糊. 同时, 当扩大光阑孔径时, 由于几何不锐度的增加, 铝屑像变得完全模糊(如图 9 所示, 两幅图像均曝光 4 s).

将不同物-屏距情况下铝盒边缘位置(图 8 中虚线框位置)的灰度曲线作对比(如图 10), 可见在 5 种物-屏距情况下铝盒边缘均出现了增强效应; 当物-屏距较小时, 受限于探测器分辨率, 增强效果较弱; 随着物-屏距的增大, 增强效果变强; 但当物-屏距过大时, 几何不锐度影响增加, 边缘增强效果被模糊. 对于该套实验布局 and 此种样品, 增强效果最佳位置位于物-

图 9 光阑直径 125 mm 时不同物-屏距情况下成像结果
Figure 9 Neutron edge enhancement imaging results at different distance between object and screen(The diameter of aperture is 125 mm).

图 10 光阑直径 4 mm 不同物-屏距情况下铝盒边缘灰度曲线

Figure 10 Neutron edge enhancement imaging gray curves at different distance between object and screen(The diameter of aperture is 4 mm).

屏距 80 cm 附近.

5 结论

中子边缘增强效应成像能够提高中子弱吸收材料的检出灵敏度; 基于折射的理论能够解释非单色中子的边缘增强效应结果, 白光热中子源的边缘增强效应成像研究和实现极大扩展了该成像方式的适用范围并验证了其有效性; 模拟与实验结果趋势一致, 在适当准直比条件下, 铝材料边缘将出现明显的边缘增强效应; 准直比越高、物-屏距越大, 该效应越明显; 但过大的物-屏距带来的几何不锐度增加将使边缘增强效应模糊. 对边缘增强效应强度的量化将是进一步研究的课题.

参考文献

- 1 Thewlis J. Neutron radiography. *British Appl Phys*, 1956, 7: 345–350
- 2 Allman B E, McMahon P J, Nugent K A, et al. Phase radiography with neutrons. *Nature*, 2000, 408: 158–159
- 3 Thornton J, McMahon P J, Allman B E, et al. The detection and sizing of flaws in components from the hot-end of gas turbines using phase-contrast radiography with neutrons: A feasibility study. *NDT & E Int*, 2003, 36: 289–295
- 4 Kardjilov N, Lehmann E, Steichele E, et al. Phase-contrast radiography with a polychromatic neutron beam. *Nucl Instr Meth Phys Res A*, 2004, 527: 519–530
- 5 Strobl M, Treimer W, Kardjilov N, et al. On neutron phase contrast imaging. *Nucl Instr Meth Phys Res B*, 2008, 266: 181–186
- 6 Lehmann E, Lorenz K, Steichele E, et al. Non-destructive testing with neutron phase contrast imaging. *Nucl Instr Meth Phys Res A*, 2005, 542: 95–99
- 7 Pelowitz D B. *Mcnpx User's Manual*. Version 2.5.0, 2005
- 8 Ferrari A, Sala P R, Fass'o A. *Fluka: A Multi-particle Transport Code*. Technical Report, Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), 2008
- 9 Agostinelli A. Geant4-a simulation toolkit. *Nucl Instr Meth Phys Res A*, 2003, 506: 250–303

Preliminary study on the neutron edge enhancement imaging at a reactor source

TANG Bin^{1,2}, LI Hang^{1,2*}, TANG Ke^{1,2}, WU Yang^{1,2} & HUO HeYong^{1,2}

¹ *Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;*

² *Key Laboratory of Neutron Physics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*

Neutron edge enhancement image is a recently developmental technique which is based not only on the amplitude like in the projection imaging but also on the contribution of phase alteration of the neutron beam. With the additional contrast from the difference of neutron refraction index in the sample which mainly leads to edge enhancement, this method can show more details about the neutron phase materials, especially some low attenuation contrast materials. Numerical simulation of neutron edge enhancement imaging is processed by MATLAB based on reflection theory and some experiments are carried out at a reactor using polychromatic thermal neutron beam line. The simulation and experiment results all show that a proper L/D condition would cause image enhancement at the edge of aluminum materials and the monochromatic neutron source isn't needed. The effect is related to L/D and the distance between sample and scintillator.

edge enhancement, neutron imaging, reactor

PACS: 28.20.-v, 03.75.Be

doi: 10.1360/132013-44