

文章编号: 1007-4627(2006)03-0310-05

# 中子散射对快中子照相质量影响的分析\*

陈亮, 蒋诗平<sup>#</sup>, 万里飏, 马晓冬, 李妹芳

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029)

**摘要:** 通过一内空的圆柱体模型, 对在快中子照相时由样品引起的散射中子强度与样品形状和探测距离之间的关系进行模拟, 并用<sup>241</sup>Am-Be 作中子源对散射中子的影响进行实验验证。结果表明, 在快中子照相时, 由样品引起的散射中子的强度与探测距离以及样品形状有关。对于同一样品, 探测距离增加, 散射中子的影响则降低。

**关键词:** 快中子; 照相; 中子散射

**中图分类号:** TL99 **文献标识码:** A

## 1 前言

快中子照相(FNI)作为一种无损检测技术, 有其独特的优势。快中子穿透能力比热中子强, 可实现对厚重的金属铸件<sup>[1]</sup>, 几厘米厚的含氢丰富的塑料板材等照相<sup>[2]</sup>。FNI 还可用于区分复合材料中高、低原子序数材料的分布, 解决 X 射线照相很难完成的检测任务。但 FNI 中也存在一些问题, 如照相时较强的中子散射造成图像质量下降。FNI 中往往出现图像存在一定程度的衬度畸变, 究其原因, 主要是快中子与物质作用时有很强的散射<sup>[3]</sup>。有报道, 因为散射中子的影响, 约 15% 的图像信息丢失<sup>[4]</sup>。本课题组在近几年研究 FNI<sup>[5]</sup> 过程中也发现, 因为中子散射的影响, 造成实验的可重复性较差, 不易获得高清晰的图像。因而研究散射中子的强度及其对照相质量的影响对于实现高质量的 FNI 很有意义。

快中子与物质作用机理非常复杂, 与中子的能量及作用物质的性质有关。理论上可用蒙特卡罗模型对快中子散射进行模拟计算<sup>[6]</sup>, 但最终要理解散射对照相影响的物理过程, 适当的实验是必不可少的。本文从快中子与物质作用的机理出发, 通过一内置圆孔的圆柱体铁样品模型, 对由样品本身引起

的散射中子对图像的影响进行了模拟。同时以<sup>241</sup>Am-Be 为中子源(平均能量 4 MeV)进行了 FNI 实验, 对散射中子的影响进行了实验验证。

## 2 理论分析

快中子穿透过样品后其强度发生衰减, 这主要是发生散射、吸收等作用。为简化分析, 设照相时快中子与物质作用只发生散射和吸收。中子散射造成图像衬度的畸变, 主要是因为散射中子和吸收透射的中子交叠造成的。概括起来散射中子来源主要有以下几种: (1) 与样品碰撞引起的散射; (2) 由实验室墙壁及周围物体引起的散射; (3) 中子源内部的中子散射等。不同来源的散射中子强度不同, 对照相的影响程度也不一样。

以图 1 所示的内为圆孔的圆柱体铁样品为模型, 对圆柱孔进行 FNI。样品内径为  $r$ , 壁厚为  $d$ , 厚为  $C$ 。照相时探测距离为  $h$ 。现能量为  $E$ 、强度为  $I_0$  的单能中子平行入射, 进入样品后在其内部  $P$  点发生散射, 散射中子又穿透样品, 到达圆孔像中心点位置被探测器接收。散射点  $P$  到样品下端面的垂直距离为  $c$ , 到探测器(圆孔像中心点)的直线距离为  $l$ , 到圆孔内壁的距离为  $t$ 。形成圆孔像的

\* 收稿日期: 2006-04-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60477001)

\* 作者简介: 陈亮(1973-), 男(汉族), 安徽巢湖人, 工学硕士, 助理工程师, 从事同步辐射及其应用研究;

E-mail: rychen@ustc.edu.cn

# 联系人: 蒋诗平, spjiang@ustc.edu.cn

中子强度主要由下列几部分组成：从圆柱孔直接穿过的中子  $I_t$ ，周围环境散射的中子  $I_z$ ，由样品本身造成的散射中子  $I_s$ ，中子源内部的散射中子  $I_n$ 。所以探测器探测到的圆孔区域中子强度为  $I = I_t + I_z + I_s + I_n$ 。中子平行入射，在样品厚度及探测距离变化不大时，可认为经圆孔直接到达探测器的中子强度保持不变，即  $I_t$  为常数；整个照相过程中环境不变，因此由周围环境造成的散射中子及源本身和未碰撞的散射中子强度不变，即  $I_z$  和  $I_n$  不变；圆孔像中心点的中子强度变化主要由样品引起的散射中子，部分进入中心区域被接收所造成的。下面就样品引起的散射中子进行讨论。

图 1 理论分析模型

设样品的厚度约等于该能量中子的平均散射自由程，这样可以不计散射中子在样品中的再次散射。因为中子在到达散射点  $P$  之前在样品中穿过了  $(C-c)$  的距离，这期间样品对中子有吸收作用。设样品物质与中子作用的宏观散射截面为  $\Sigma_s$ ，宏观吸收截面为  $\Sigma_a$ ，入射中子强度为  $I_0$ ，则由样品引起的散射中子强度  $I'_s$  为

$$I'_s = \int_0^{2\pi} \int_r^{(r+d)} I_0 ds \int_0^C \exp(-\Sigma_s C) \times \exp\left[-\Sigma_a(C-c)\right] dc \quad (1)$$

中子散射后将沿  $4\pi$  方向向外发散，这其中只有一小部分沿到圆孔像中心的方向前进并被接收。设能入射到中心的散射中子的几率为  $\eta$ ，则进入圆孔像中心的散射中子强度  $I''_s$  为

$$I''_s = \eta \int_0^{2\pi} \int_r^{(r+d)} I_0 ds \int_0^C \exp(-\Sigma_s C) \times \exp\left[-\Sigma_a(C-c)\right] dc \quad (2)$$

因为散射中子在样品中穿透时，还将与样品发生吸收作用，其强度也将有所衰减。对于铁材料，中子经一次散射后其能量减少可近似计算<sup>[7]</sup>为

$$\xi = 1 + \frac{\alpha}{1-\alpha} \ln \alpha \approx \frac{2}{A + \frac{2}{3}} = \frac{2}{56 + \frac{2}{3}} = 0.035\ 294\ 1 \quad (3)$$

$$\alpha = \left(\frac{A-1}{A+1}\right)^2 \quad (4)$$

$A$  为铁的原子量， $\xi$  为中子经一次散射后的平均对数能量衰减。因此能量为  $E_0$  的快中子经一次散射后的能量  $E$  约为

$$\ln E = \ln E_0 - \xi \quad (5)$$

经计算中子在铁样品中发生一次散射的能量减少约为 3.5%，可认为保持不变。散射中子在到达圆孔像中心之前在样品内穿透的直线距离为  $a$ ，与样品发生吸收作用。所以穿透出样品并进入圆孔像中心的散射中子强度为

$$I_s = \eta \int_0^{2\pi} \int_r^{(r+d)} I_0 ds \int_0^C \int_r^{(d+r)} \exp(-\Sigma_s C) \times \exp[-\Sigma_a(C-c)] \times \exp(-\Sigma_a a) dc dt \\ = \pi \eta I_0 [(r+d)^2 - r^2] \int_0^C \int_r^{(d+r)} \exp(-\Sigma_s C) \times \exp[-\Sigma_a(C-c)] \times \exp(-\Sigma_a a) dc dt \quad (6)$$

其中：

$$a = \frac{t\sqrt{(c+h)^2 + (t+r)^2}}{r+t} \quad (7)$$

在实验条件不发生变化时，几率  $\eta$  可视为常数。从公式看出，圆孔像中心的散射中子强度不仅与圆柱孔的大小有关，还与探测距离有关。

### 3 实验研究

加工外径为 10 cm，厚 3 cm，内径分别为 1, 2, 3, 4 和 5 cm 的圆柱体铁块共 5 块。另加工内径为 1 cm，厚度分别 2, 3, 4 和 5 cm 各 1 块。以  $^{241}\text{Am-Be}$  中子源对铁块进行照相。 $^{241}\text{Am-Be}$  中子源通过  $(\alpha, n)$  反应发射平均能量为 4 MeV，强度约为  $10^5$  n/s 的快中子。以自制的发光屏(环氧树脂+ $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S} : \text{Tb}$ )结合 Kodak100 X 射线胶片进行探测。实验中用 0.5 mm 的铅皮包裹  $^{241}\text{Am-Be}$  中子源，以屏蔽源自身发出的  $\gamma$  射线。中子源与样品之间的距离为 10 cm，并保持固定，以保证中子尽可能平行入射。改变探测器与样品之间的距离并对不同样品进行 FNI。照相完成后，对胶片进行显影、定影，并读取图像。每组实验做 3 次，结果取平均值。

### 4 结果和讨论

以图像的黑度差表示照射时中子强度大小。比较内孔径相同、探测距离不同时所得到的图像，以及探测距离相同，孔径不同的图像黑度差别。图像黑度差随探测距离和孔径变化而有所差别。

图 2(a)给出了直径为 1 cm 和厚 3 cm 的圆柱孔，探测距离为 3 cm 时的像。图 2(b)给出了对该样品改变探测距离得到的像沿其直径方向扫描得到的黑度曲线。从图像黑度变化看出，图像黑度的均匀性随探测距离变化而变化。当探测距离  $d=0$  cm 时，黑度均匀性最差。后随着探测距离的增加，黑度均匀性逐渐好转。当探测距离超过样品厚度时，黑度变化已很小。从图中看出，当  $d=5$  和 7 cm 时，黑度均匀性已很好。这说明随着探测距离增加，探测到的散射中子强度逐渐降低，对图像的影响逐渐减小。从图中还可以看出，因为散射中子造成图像边界模糊，像的大小会发生变化。但随着探测距离的增加，像与物也逐渐一致。不同孔径样品的图像黑度差均匀性随探测距离变化也存在类似变化。

从前面的分析可知，圆孔像的黑度变化差异主要是由样品引起的散射中子强度不同造成的。当孔径和厚度不变时，由样品造成的总的散射中子强度在照相时间内可认为保持不变。但探测距离的增加，越来越多的散射中子逃逸出探测器区域，造成可探测到的散射中子强度降低。

探测距离不变，改变内孔径大小时，像的黑度均匀性随孔径的增加逐渐好转。图 3(b)给出胶片紧贴样品( $d=0$  cm)得到的像沿直径方向扫描的黑度差图。从图中看出，当孔径增大时，像的黑度均匀性逐渐变好。这主要是因为孔径增大，由样品引起的总的散射中子强度逐渐降低。

当探测距离和孔径不变，样品厚度增加时，样品引起的散射中子对图像的影响先较高，后逐渐降低。这是因为样品厚度增加，样品的散射中子强度增加。但随着样品厚度进一步增加，样品引起的散射中子在样品内运动的距离也增加，部分又将被吸收，因而最后探测到的散射中子强度降低。

图 2 (a)  $\phi=1$  cm 圆孔探测距离 3 cm 时的像，(b)沿直径方向的黑度差随探测距离变化的关系

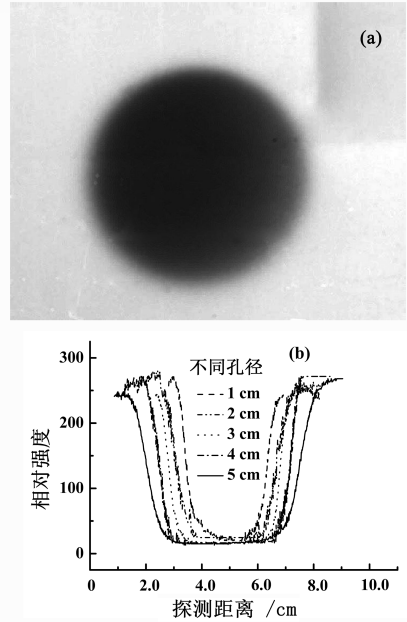


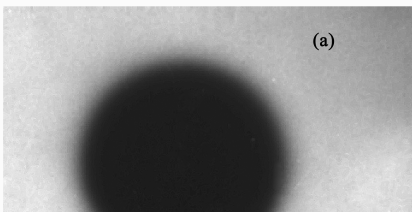
图 3 (a)  $\phi=1$  cm 和  $d=0$  cm 时的像，(b)不同孔径的像沿直径方向扫描得到的黑度曲线

理论模拟的结果和实验结果基本相一致。图 4、图 5 和图 6 为计算的和实验得到的像中心点散射中子强度随探测距离以及孔径变化的关系曲线(以图像中心点的黑度差异表示散射中子强度的不同)。从图 4 中可以看出，随着探测距离的增加，由样品引起的散射中子强度降低，和实验结果的变化趋势基本一致。从图 5 中可以看出，在相同探测距离上不同孔径的圆柱体的散射中子强度呈下降趋势。实验得到的散射中子强度采用样品像中心点的黑度与在相同照相条件下无样品时的胶片黑度比较获得的。在 4 MeV 时，计算的中子与铁的宏观散射和吸收截面分别约为 0.28 和 0.04  $\text{cm}^{-1}$ [8]。

图 4 理论计算的和实验得到的圆孔像中心的散射中子强度与探测距离变化的关系

(a)不同孔径计算结果： 1 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm; (b)不同孔径实验结果： 1 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm。

图 5 理论计算的和实验得到的不同孔径散射中子强度变



## 化关系曲线

(a)不同探测距离计算结果: 0 cm, 1 cm, 3 cm, 5 cm, 7 cm; (b)不同探测距离实验结果: 0 cm, 1 cm, 3 cm, 5 cm, 7 cm。

图 6 样品厚度变化与散射中子强度关系(孔径 1 cm, 探测距离 0 cm)

从以上几幅图中可以看出,在进行 FNI 时,由样品引起的散射中子强度与探测距离和样品形状均相关。对于同一样品,增加探测距离,可降低接收到的散射中子强度,提高图像的质量。这些结果表明,适当选择照相条件,可以降低散射中子对照相质量的影响。

实验中选用样品的厚度为 3 cm,是因为对于 4 MeV 的快中子,与铁作用的散射自由程约为 3.2 cm,这样可以忽略散射中子的再次散射,减少分析误差。

需要指出的是,实验中采用的同位素中子源为圆柱体,发射的中子不是单一能量,中子束也不是绝对平行入射,加之采用胶片探测,在处理过程中存在人为因素,以及在讨论样品厚度变化时的散射中子强度变化,没有考虑二次散射。这些都会给实验结果分析造成误差,但总的变化趋势反映出散射中子强度与探测距离及样品形状的关系。

## 5 结论

在进行 FNI 时由样品造成的散射中子会造成图像衬度畸变,实验中应尽可能减小其对图像的影响。本文通过一圆柱体的铁样品模型,对由样品引起的散射中子与孔径及探测距离之间的关系进行了模拟,并通过实验进行了验证。结果表明,散射中子的强度与样品的形状和照相时的探测距离有关。当探测距离超过样品本身的厚度时,很大部分的散射中子发生逃逸而没有被探测到,其对图像的影响已很小。这些说明,在 FNI 中,恰当地选择照相条件,可以降低散射中子对照相质量的影响。

## 参 考 文 献:

- [1] Mikerov V, Waschkowski W. Nucl Instr and Meth, 1999, **A424**: 48.
- [2] Kim K H, Klann R T, Raju B B. Nucl Instr and Meth, 1999, **A424**: 190.
- [3] Richards W J, Gibbons M R, Shields K C. <http://repositories.cdlib.org/cgi/viewcontent>.
- [4] Ikeda Y, Yokoi M, Oda M, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1996, **A377**: 85.
- [5] 蒋诗平, 陈亮, 陈阳等. 核技术, 2005, **28**: 151.
- [6] Ambrosi R M, Watterson J I W, Kala B R K. Nucl Instr and Meth, 1998, **B139**: 286.
- [7] 刘圣康. 中子物理. 北京: 原子能出版社, 1986, 165.
- [8] <http://159.226.2.40/>

# Analysis of Neutron Scattering in Fast Neutron Imaging<sup>\*</sup>

CHEN Liang, JIANG Shi-ping, WAN Li-biao, MA Xiao-dong, LI Mei-fang

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

**Abstract:** The relationships between intensities of scattered neutrons by specimens and their shapes and detecting distances have been simulated using a hollow cylinder model, and the results were validated by experiments of fast neutron imaging using  $^{241}\text{Am}$ -Be neutron source. The results showed that the intensities of scattered neutrons are closely related to the detecting distances and sample's shapes. The influences of scattered neutrons in fast neutron imaging will be reduced while detecting distances increased.

**Key words:** fast neutron; imaging; neutron scattering

---

\* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(60477001)