

快中子照相模拟分析与实验验证

鲁昌兵 许鹏 鲍杰 王朝辉 张凯 任杰 刘艳芬

Simulation analysis and experimental verification of fast neutron radiography

Lu Chang-Bing Xu Peng Bao Jie Wang Zhao-Hui Zhang Kai Ren Jie Liu Yan-Feng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 198702 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.198702

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.198702>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I19>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

碰撞等离子体中电中性条件对单探针测量的约束

The electrical-neutrality constraint of single Langmuir probe measurement in collisional plasma

物理学报.2015, 64(11): 115201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.115201>

高压均匀直流辉光放电等离子体的光学特性

Optical properties of direct current glow discharge plasmas at high pressures

物理学报.2015, 64(4): 045206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.045206>

软 X 射线激光探针诊断高 Z 材料等离子体

Diagnosis of high-Z plasma with soft X-ray laser probe

物理学报.2014, 63(21): 215203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.215203>

一种基于成像板的能量卡阈式快中子图像测量方法

A method of fast-neutron imaging with energy threshold based on an imaging plate

物理学报.2014, 63(12): 128701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.128701>

相位平移误差与子孔径自身像差对稀疏光学合成孔径系统成像质量的综合影响分析

Analysis of comprehensive effects of piston error and sub-aperture aberrations on the image quality of sparse-optical-synthetic-aperture system

物理学报.2011, 60(10): 100702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.100702>

快中子照相模拟分析与实验验证*

鲁昌兵¹⁾²⁾ 许鹏^{1)†} 鲍杰²⁾ 王朝辉²⁾ 张凯²⁾ 任杰²⁾ 刘艳芬³⁾

1)(西安高技术研究所, 西安 710025)

2)(中国原子能科学研究院核数据测量重点实验室, 北京 102413)

3)(中国科学院高能物理研究所东莞部分, 东莞 523803)

(2015年5月30日收到; 2015年8月31日收到修改稿)

首次系统地推导出快中子照相像素值形成解析式, 建立图像反差不等式, 并利用该不等式首次对图像对比度与源强、照射时间和散射之间的关系进行说明. 并在像素值解析式基础上编制快中子照相模拟程序, 利用该程序对空间分辨率和图像对比度进行模拟, 并与实验对照, 研究表明空间分辨率模拟效果好于实验, 图像对比度模拟效果与实验相当. 最后通过对狭缝、方孔以及多材质组成的复杂样品模拟并与实验对照, 结果显示模拟效果与实验照片在反差灵敏度效果上非常一致, 该模拟计算方法可为实验设计和工程应用提供参考.

关键词: 快中子照相, 空间分辨力, 对比度, Monte Carlo 模拟

PACS: 87.57.Va, 87.57.C-, 87.15.ak, 52.70.-m

DOI: 10.7498/aps.64.198702

1 引言

快中子照相是一种优良的无损检测技术, 它对传统热中子照相技术起到重要的补充作用, 快中子的特点是由于穿透力强, 更适合大厚样品检测^[1-4], 其中子源可作到灵活小巧不依赖固定的反应堆, 配合移动式中子发生器将更加适合大部件样品现场检测. 快中子照相实验的开展需要特殊的实验环境和较高的中子束流强度, 对一些复杂样品、特殊量的测量, 例如武器部件现场检测, 实验方法和研究条件不足^[5-7]. 因此, 目前国内外开展了快中子照相模拟方法研究^[8-10], 利用模拟方法可灵活改变实验条件, 获取更多实验不便测量的量, 为系统优化提供理论指导^[11-16]. 本文主要根据中国原子能科学研究院2013年建成的一套快中子照相系统, 利用 Monte Carlo 方法编写了一套与之相配套的模拟程序. 利用该程序对快中子照相空间分辨力、反差对比度两个技术指标进行模拟计算, 并与实验进

行对照研究, 用来说明模拟方法的有效性.

2 模拟与实验解析对照

图1是实验时快中子照相示意图和数据转换图. 图中近似平行中子束强度为 I_0 , 穿过厚度为 h 的样品, 转换屏BC400上接受到的中子分为两部分, 一部分是直接衰减的中子, 另一部分是散射中子. 其中散射中子的强度与样品的材料和形状函数 $S(x, y, z, \mu)$ 有关且与中子强度 I_0 成正比, 所以穿过样品后某点中子强度 I 为

$$I = I_0 e^{-\mu h} + I_0 S(x, y, z, \mu). \quad (1)$$

穿过样品后的快中子束与转换屏继续发生反应. 就本实验而言, 转换屏是BC400, 主要成分是碳、氢元素, 比例接近1:1. 快中子与氢核发生反应产生反冲质子. 反冲质子密度与快中子和BC400中氢反应截面 σ_{BC} 、BC400固有核子密度 m 成正比. 反冲质子在传输过程中打出荧光光子, 荧光光子密度数 Q 与反冲质子在BC400中能量沉积 E 相

* 射线法测量中子非弹性截面实验方法研究(批准号: 11375275)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xupeng76345@163.com

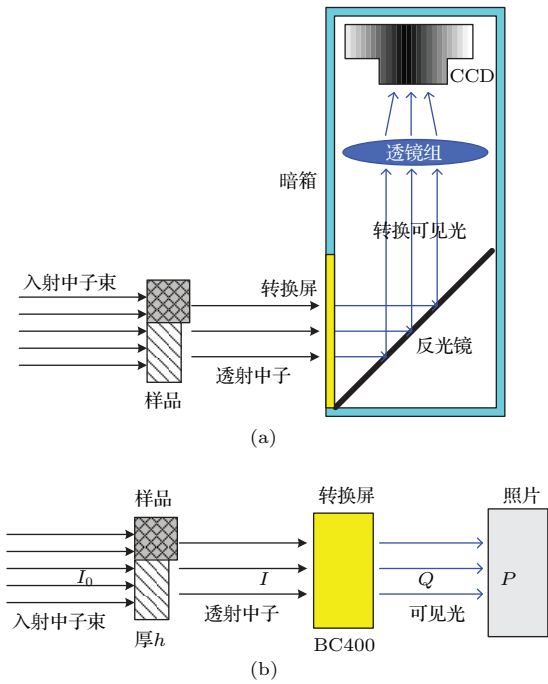


图1 (网刊彩色) (a) 快中子照相实验示意图; (b) 数据转换图
 Fig. 1. (color online) (a) Schematics diagram of the fast neutron radiography; (b) data conversion chart.

关, 满足比例函数 $\varepsilon(E)$. 则穿过 BC400 后由某点中子强度 I 产生的光子密度 Q 应为

$$Q \propto \varepsilon(E) I \sigma_{BCmn}, \quad (2)$$

其中 n 是快中子与碳核反应引起的反冲碳核对 Q 影响的修正系数. 转换时每一个光子产生处可看作点光源, 该点光子向 4π 立体角发射光子, 受转换屏遮挡和光路传输影响, 相机只记录每个点光源进入镜头的很小立体角内的光子数, 那么设光路传输效率为 K_1 , 反射镜反射效率为 K_2 , 到达镜头后, 镜头的透光率是 K_3 , 照片像素值 P 与光子能量 e 成正比, 满足比例函数 $\vartheta(e)$, 那么照片上由中子强度变化和散射引起的单位时间内的像素值与光子密度 Q 之间的关系式可表示为

$$\frac{P}{T} \propto \frac{\vartheta(e)hvQ}{4\pi L^2} \prod_1^3 K_i, \quad (3)$$

其中, h 是普朗克常量, v 是光子频率, L 是从光源点到镜头前的等效距离, 是一个与暗箱长度有关的参数. 设由于暗箱密封和相机暗电流噪声引起的本底像素值是与像平面坐标位置有关的函数 $B(w, v, u)$, 则在强度为 I_0 的快中子照射时间为 T 条件下, 宏观截面为 μ 的样品, 在厚度为 h 处实验所得照片像素值 P 为

$$P = \lambda T I_0 e^{-\mu h} + \lambda T I_0 S(x, y, z, \mu)$$

$$+ TB(w, v, u), \quad (4)$$

其中

$$\lambda = \frac{\varepsilon(E)\vartheta(e)hv\sigma_{BCmn}}{4\pi L^2} \prod_1^3 K_i,$$

若暗箱密封性好, CCD 相机热稳定性好, 那么在相同制冷条件下可认为由暗电流引起的相机本底噪声像素值 B 不随时间变化, 只是照片位置的函数 $B(w, v, u)$. 令 $P_a = \lambda e^{-\mu h}$, $P_s = \lambda S(x, y, z, \mu)$, $P_b = B(w, v, u)$, P_a 是由中子强度直接透射部分对像素值的贡献, P_s 是由中子散射对像素值的贡献, P_b 是由相机本底对像素值的贡献, 样品形状确定后则固定点 i 处的 P_a/P_s 比值 $\gamma(i)$ 一定. 根据人眼视觉效应, 人眼对像素值比值敏感, 在相邻两点厚度分别为 h_1 和 h_2 处, 且 $h_1 > h_2$, 在该两点处的 P_a/P_s 比值 $\gamma(i)$ 分别为 $\gamma(i_1)$ 和 $\gamma(i_2)$, 保证像素值 P 比值为真分数前提下, 则满足不等式:

$$e^{-\mu(h_1-h_2)} < \frac{TI_0P_a(h_1) + TI_0P_s(h_1) + P_b}{TI_0P_a(h_2) + TI_0P_s(h_2) + P_b} < e^{-\mu(h_1-h_2)} \left(1 + \frac{\gamma(i_2)}{\gamma(i_1)} \right) + 1. \quad (5)$$

由不等式(5)分析可得, 在中子强度一定条件下, 当实验照射时间 T 较小, P_a 与 $P_s + P_b$, 量级相当时, 在 h_1 和 h_2 处像素值比值受散射和本底影响较大. 若增加实验照射时长 T , 使 $TI_0P_a \gg TI_0P_s + P_b$ 时, h_1 和 h_2 两点像素值比值趋向于不等式(5)左边, 此时统计要好于计数涨落, 即实验时无限增加照射时间 T , 在 T 较小时, 对增加图像对比度和清晰度有用, 当 T 足够大时图像灰阶的像素值比值不再随时间变化, 仅与样品和缺陷差值有关. 从不等式(5)右边可以看出, 像素值比值差异性不仅与样品的材料、厚度差有关, 还与 P_a/P_s 的比值 $\gamma(i)$ 有关, 通常对同一样品, 位置接近时, P_a/P_s 的比值, 即左边 $2e^{-\mu(h_1-h_2)}$ 为 $2e^{-\mu(h_1-h_2)} + 1$, 1 是本底效应比值.

本文所有实验均在中国原子能科学研究院物理所核数据测量国家级重点实验室进行. 源中子是由该实验室 600 kV 高压倍加器提供的通量在 2×10^{10} n/s 左右的 14.1 MeV 快中子, 每张照片照射时间为 1800 s; 实验采用的转换屏是型号为 BC400 的塑料闪烁体, 几何尺寸为 200 mm \times 200 mm \times 10 mm, 密度为 1.032 g/cm³, 氢碳比为 1.103 : 1; 实验的准直器部分是由铅、聚乙烯、不锈钢和紫铜构成的复合结构, 长 $L = 147$ cm, 出口处

最大直径 $D = 8$ cm, 内部最小直径 $d = 5.14$ cm. 样品与准直空距离为 2 cm, 系统准直比约为 294, 固有系统几何不锐度 U_g 约为 0.0029 cm. 所得实验照片均经过扣除暗场处理, 暗场测量时间与实验照片时间一致. 模拟时对实验系统进行建模, 保证模拟几何条件、物屏距相对关系等与实验条件基本一致. 利用 MC 方法编写程序时参照 (4) 式, 模拟时通过改变模拟中子个数, 代替 TI_0 变化, 并将值中两个转换过程反冲质子能量沉积 E 到光子密度 Q 和光子能量 e 到像素值 P 之间正相关关系作简单近似正比处理. 通过记录模拟中子在每个 BC400 中以 $0.2 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ 为单元的小网格中沉积的反冲质子能量沉积与真实相机 $0.18 \text{ mm} \times 0.18 \text{ mm}$ 的像素点值进行比较. 由于模拟时并不存在相机本底 $B(w, v, u)$ 影响, 所以需将模拟记录的相对质子能量沉积图与经过减相机本底处理后的实验照片比较, 找出模拟结果与实验结果之间近似的比例关系. 最后, 在精度要求不高的条件下, 可利用模拟数据通过转换比例关系为实验分析设计提供参考. 模拟时保证每张照片样品上中子照射量与实验基

本一致.

3 实验模拟对照

3.1 空间分辨率对照

为了评估该程序对空间分辨率的模拟效果, 如图 2 所示, 对 $4 \text{ cm} \times 6 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$ 钨块进行了 8 cm 厚刀口法实验和模拟. 从图 2(a), (b) 直观对比上看, 模拟的空间分辨率要好于实验空间分辨率, 边沿展宽在两个记录单元左右, 经过数值分析, 实验的空间分辨率对边沿的展宽在 1 mm 左右, 模拟的边沿展宽在 0.5 mm 左右, 如图 2(c) 所示. 快中子照相空间分辨主要受系统几何不锐度、BC400 和 CCD 相机固有锐度及散射影响. 该程序模拟时, 记录的是反冲质子在 BC400 中的能量沉积, 所以只能模拟出系统几何不锐度和散射对空间分辨率的影响, 无法表征 BC400 和相机的固有锐度的影响. 模拟记录单元 $0.2 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ 大于实际像素点对应尺寸 $0.084 \text{ mm} \times 0.084 \text{ mm}$, 对空间分辨力也有较大影响.

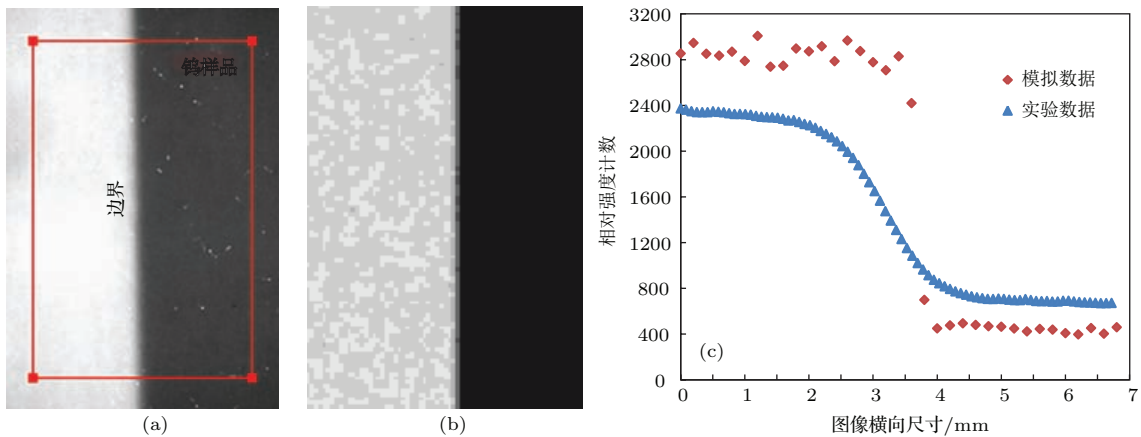


图 2 (网刊彩色) (a) 空间分辨率实验照片; (b) 模拟照片; (c) 相对计数强度分析

Fig. 2. (color online) (a) Experimental photograph of spatial resolution; (b) simulation Results; (c) analysis of relative counts.

总体看, 该模拟程序对空间分辨率的模拟效果好于实验效果, 即在该模拟程序条件下可以看清的狭缝, 实际照片未必能看清.

3.2 反差对比度对照

根据方程 (4) 知 $S(x, y, z, \mu)$ 越大, 中子散射对像素值的贡献与直接透射中子对像素值的贡献的比值 P_s/P_a 也越大, 像素值 P 对厚度 h 的评估偏差越大. 为了比较该程序与实验对样品厚度变化

的识别效果, 选择对快中子散射相对较小的铅样品. 该样品几何尺寸为 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$, 从 $5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 面对角切开呈斜三角型, 实验中中子垂直入射 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 面. 图 3(a), (c) 分别是实验和模拟照片. 由于散射函数 $S(x, y, z, \mu)$ 未知, 为了便于分析比较像素值与厚度变化规律, 选取 $y = ke^{-\Sigma h}$ 形式函数对图 3(a) 中 1 号红线区域和图 3(c) 中有效区域进行数据拟合, 其中厚度 h 单位为毫米. 图 3(b) 中蓝色代表实验数据点, 红色曲线

代表实验数据拟合曲线 $y = 840.3130 e^{-0.0135h}$, 拟合优度为 $R^2 = 0.9925$, 拟合曲线与实验数据在开始位置和结尾位置差别大, 一方面原因是在铅块在较薄和较厚处中子强度变化不明显, 统计涨落与差异性相当; 另一方面由于系统的固有不锐度引起铅样品的边沿具有一定的展宽, 造成实际厚度对应的像素值位置选取不当引入的偶然误差. 图 3(d) 中蓝色代表模拟数据点, 红色曲线代表模拟数据拟合曲线 $y = 0.00167 e^{-0.0131h}$, 拟合优度 $R^2 = 0.9986$.

比较实验与模拟数据拟合曲线, 两者反映像素值和能量沉积随样品厚度变化趋势一致, 模拟与实验函数之间的主要区别是 k 参量不同, 根据模拟与实验解析分析知中子在转换屏 BC400 中的能量沉积和像素值之间存在与系统有关的近似固定比例常数; Σ 一致性较好.

总体看, 该程序模拟反差对比度效果与实验效果一致性较好, 能反应出样品厚度变化引起的图像反差对比度变化.

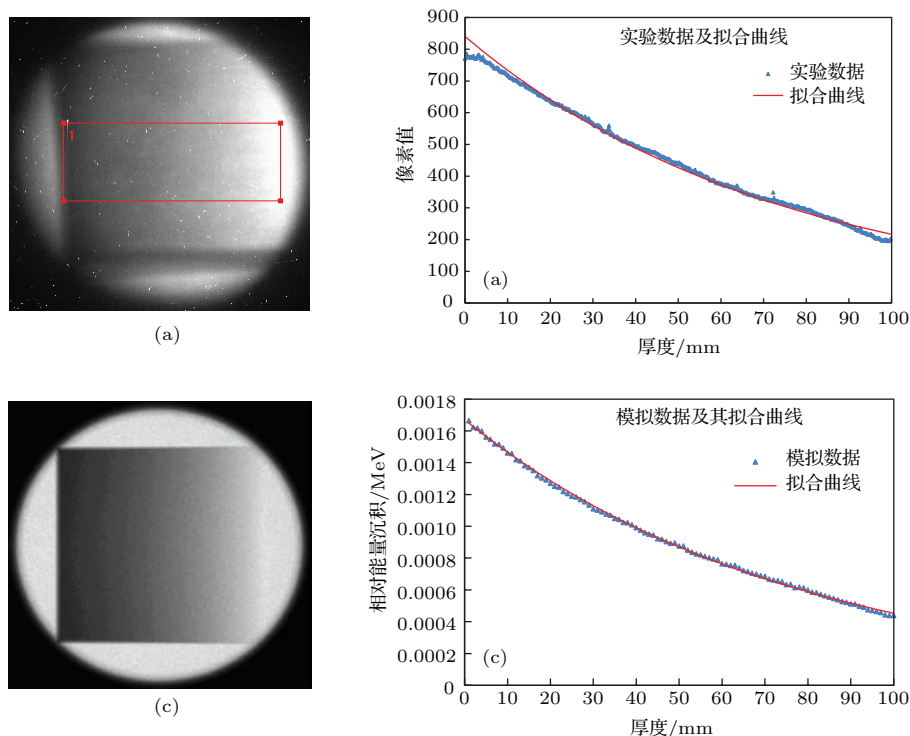


图 3 (网刊彩色) (a) 铅样品实验照片; (b) 实验照片拟合曲线; (c) 模拟图片; (d) 模拟图片拟合曲线
 Fig. 3. (color online) (a) Experimental photograph of lead; (b) fitting curve of experimental results; (c) simulation; (d) fitting curve of Simulated results.

3.3 狭缝、方孔、多材质复杂样品综合对照

如图 4 所示, 为了评估该程序在具体样品中针对同一材料的空间分辨效果、反差对比效果以及不同材料下缺陷的综合识别效果, 分别设计加工了相同材质的狭缝、方孔和多材质复杂样品与实验照片进行对比. 图 4(a) 是 $4\text{ cm} \times 6\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 的铅, 中间开有深 5 mm 宽 1 mm , 0.5 mm 和 0.3 mm 的缝. 图 4(b) 是 $6\text{ cm} \times 6\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ 的铁, 通过插入不同长度的插条, 控制 10 mm 边长的方孔深 2 mm ,

8 mm 边长方孔深 15 mm , 其余 6 mm , 5 mm , 4 mm , 3 mm , 2 mm , 1 mm 边长的方孔深度依次为 7 mm , 10 mm , 5 mm , 20 mm , 30 mm 和 40 mm . 图 4(c) 是半圆柱, 从左到右看分别是 5 mm 厚钢外壳、 20 mm 厚聚乙烯、 15 mm 厚铅和 5 mm 厚铝夹层除钢外壳外, 其余材料均是圆柱四分之一结构. 聚乙烯左侧从上到下开有 4 mm , 2 mm , 1 mm 和 3 mm 宽贯穿狭缝. 铅中间从上到下开有直径为 4 mm , 3 mm 和 2 mm 的通孔. 实验在约 $2.5 \times 10^{10}\text{ n/s}$ 快中子强度下进行, 每个样品照射 1800 s , 中子能量在 14 MeV .

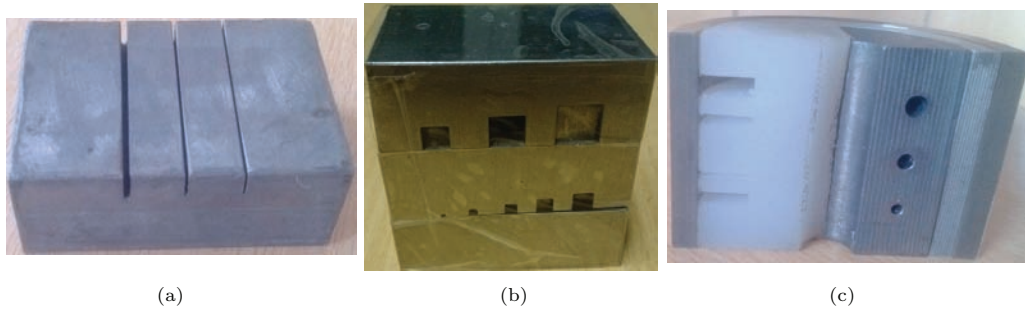


图4 (网刊彩色) (a) 铅狭缝; (b) 铁方孔; (c) 多材质复杂样品

Fig. 4. (color online) (a) Pb sample with slits; (b) Fe sample with square holes; (c) sample of multiple materials.

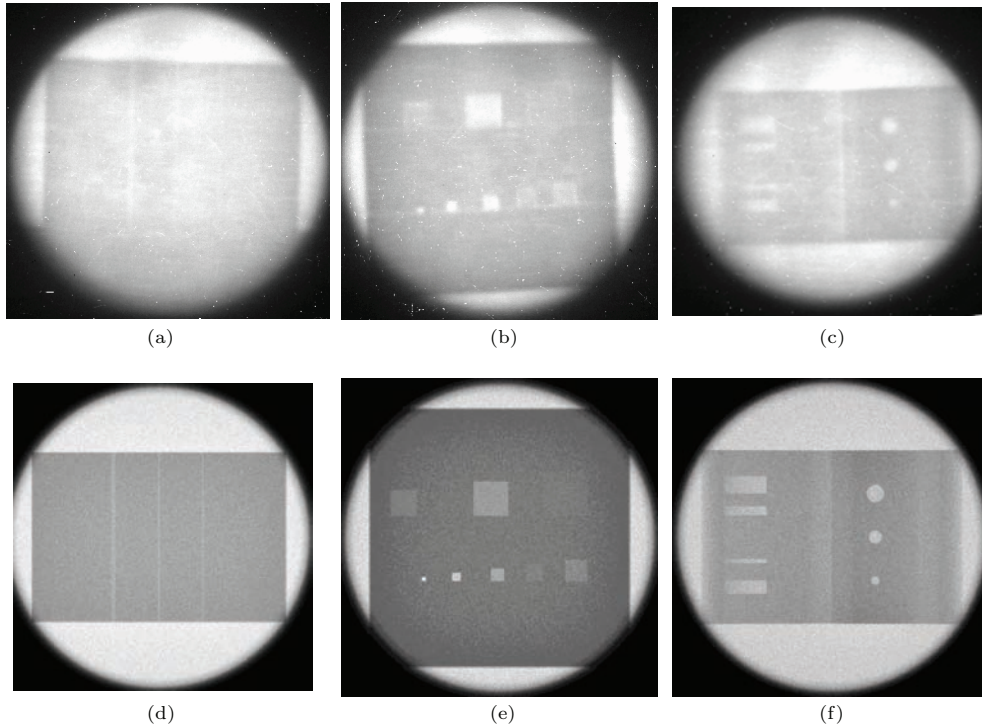


图5 (a) 铅狭缝实验照片; (d) 模拟结果; (b) 铁方孔实验照片; (e) 和模拟结果; (c) 多材质复杂样品实验照片; (f) 模拟结果

Fig. 5. (a) Experimental photo and (d) simulation result of Pb sample with slits; (b) experimental photo and (e) simulation result of Fe sample with square holes; (c) experimental photo and (f) simulation result of sample of multiple materials.

图5是图4样品的实验和模拟照片. 从整体效果上看, 第二行模拟照片整体比第一行实验照片视觉效果好. 从空间分辨效果看, 由于模拟不存在CCD相机和转换屏固有锐度影响, 铅狭缝模拟效果(d)好于实验效果(a), 0.5 mm和0.3 mm狭缝实验已模糊不清, 模拟却可以看出. 从反差对比效果看, 铁方孔样品, 2 mm深的10 mm方孔实验和模拟效果基本看不清楚, 实验照片10 mm方孔周边效果是由于加工精度不够好, 使插条与方孔贴合不够好所致, 通过铁方孔实验照片(b)和模拟照片(e)的综合对比看, 其他深度的方孔实验与模拟效果一

致性较好, 通过模拟能反映实验样品在射线入射方向上的变化引起的反差对比效果. 从不同材料下的缺陷综合识别效果看, 模拟效果图(f)与实验照片(c)一致, 均能有效识别钢和聚乙烯代表的不同材料、中间凹陷代表的相同材料不同深度以及其中缺陷的变化情况.

通过图5的实验、模拟照片综合对比, 该模拟程序在空间分辨和反差对比度变化效果上与上述结论基本一致, 对多材质组成的复杂样品也能较好的反映, 模拟效果具有可参考价值.

为了进一步验证比较实验、模拟综合比对效果,如图6(a)所示,设计加工了1.5 cm厚的铅层,中间刻有“中国”字样,实验时将有字层夹在2 cm和0.5 cm厚铅块中间,从外看是一整块5 cm × 6 cm × 4 cm的铅样品.前期模拟时,为了提高模拟程序的运行效率,并未考虑实验室大厅结构和准直器内部结构,而是利用模拟程序控制中子源出射角度达到准直效果,简化后的理想照相模型

无法模拟由于准直器内部结构和环境引起的散射中子和 γ 本底对图像的影响;后期通过将实验大厅结构和准直器内部详细构造写入模拟程序,由准直器结构控制出射中子方向和强度,此时实验与模拟更接近,模拟时由于准直器内部结构和实验大厅结构引起的中子散射和 γ 本底散射将被记录,如图6(b), (c)所示,模拟效果边沿模糊度和整体不清晰度与实验照片更接近.

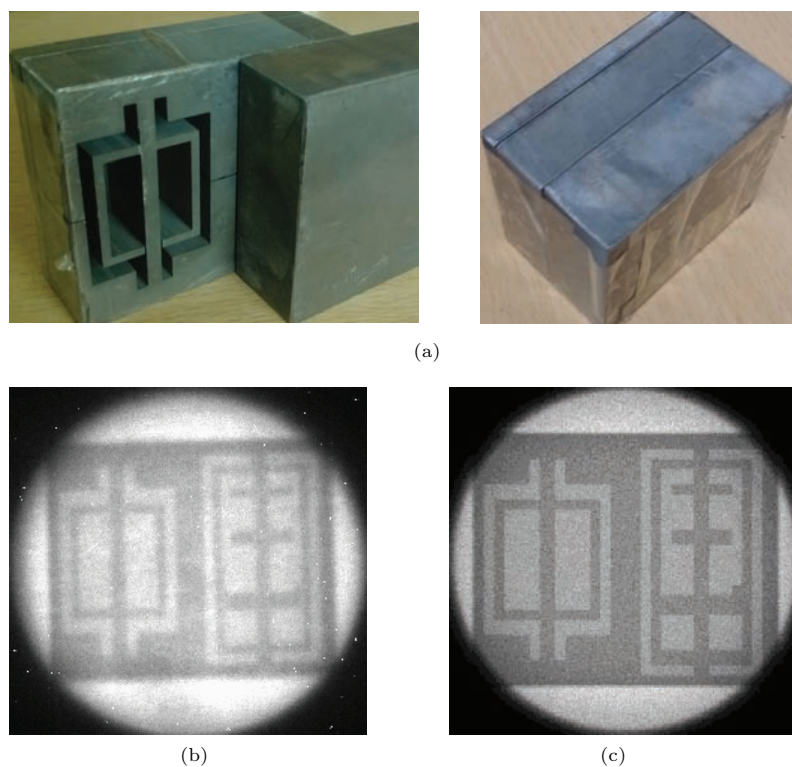


图6 (网刊彩色) (a) 铅字样实物图; (b) 实验照片; (c) 模拟结果

Fig. 6. (color online) (a) Lead sample with Character “中国”; (b) experimental photograph; (c) simulation results.

4 结 论

本文首先推导出了实验像素值的形成过程,建立了快中子照相理论分析不等式,分析得出了图像对比度与照相时间、源强以及散射之间的关系.其次利用在该不等式基础上编写的模拟程序,对快中子照相空间分辨率和反差对比度进行了实验模拟对照研究;结果显示,空间分辨模拟效果好于实验,反差对比度模拟效果与实验相当.最后通过对狭缝、方孔以及多材质组成的复杂样品综合比对,表明该程序模拟与实验效果在反差灵敏度效果上非常一致,进一步改进优化后,可为实验设计和工程应用提供参考.

感谢原子能院周祖英研究员和唐洪庆研究员对实验的悉心指导,感谢加速器组提供的优质中子束流.

参考文献

- [1] Zhang F Q, Yang J L, Li Z H, Zhong Y H, Ye F, Qin Y, Chen F X, Ying C T, Liu G J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 0583 (in Chinese) [章法强, 杨建伦, 李正宏, 钟耀华, 叶凡, 秦义, 陈法新, 应纯同, 刘广均 2007 物理学报 **56** 0583]
- [2] Mongy T 2014 *Applied Radiation and Isotopes*. **85** 54
- [3] Tang V, Falabella S, Rusnak B, Wang H, Hall J, McCarrick J, Ker P, Ellsworth J 2012 *LLNL-PROC-568672*
- [4] Tang B, Zhou C G, Huo H Y, Wu Y, Liu B, Lou B C 2009 *Sci. China Ser. G* **8** 1090 (in Chinese) [唐彬, 周长庚, 霍合勇, 吴洋, 刘斌, 娄本超 2009 中国科学G辑 **8** 1090]

- [5] Hall J, Rusnak B, Fitsos P J 2007 *Proceedings of 8th World Conference on Neutron Radiography*, UCL-CONF-230835
- [6] Rusnak B, Hall J, Fitsos P, Souza R, Jong M *Proceedings of PAC07*
- [7] Bishnoi S, Thomas R G, Sarkar P S, Datar V M, Sinha A 2015 *JINST* P02002
- [8] Han W, Tang V 2013 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **729** 728
- [9] Tharwat M, Mohamed N, Mongy T 2014 *Applied Radiation and Isotopes* **89** 30
- [10] Zhang F Q, Yang J L, Li Z H, Ying C T, Liu G J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3577 (in Chinese) [章法强, 杨建伦, 李正宏, 应纯同, 刘广均 2007 物理学报 **56** 3577]
- [11] Andersson P, Valldor B J, Andersson S E 2014 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **756** 82
- [12] Zboray R, Mor I, Dangendorf V 2014 *Applied Radiation and Isotopes* **90** 122
- [13] Guo L A, Zhang G H, Zou Y B, Tang G Y, Guo Z Y, Xu J G, Guo J M 2009 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **598** 826
- [14] Fujine S, Yoneda K, Yoshii K, Kamata M, Tamaki M, Ohkubo K, Ikeda Y, Kobayashi H 1999 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **424** 190
- [15] Mohamed H 2009 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* **267** 2545
- [16] Zhang F Q, Qi J M, Zhang J H, Li L B, Chen D Y, Xie H W, Yang J L, Chen J C 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 128701 (in Chinese) [章法强, 祁建敏, 张建华, 李林波, 陈定阳, 谢红卫, 杨建伦, 陈进川 2014 物理学报 **63** 128701]

Simulation analysis and experimental verification of fast neutron radiography*

Lu Chang-Bing¹⁾²⁾ Xu Peng^{1)†} Bao Jie²⁾ Wang Zhao-Hui²⁾
Zhang Kai²⁾ Ren Jie²⁾ Liu Yan-Feng³⁾

1) (Xi'an Institute of High Technology, Xi'an 710025, China)

2) (Science and Technology on Nuclear Data Laboratory, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

3) (Dongguan Campus, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Dongguan 523803, China)

(Received 30 May 2015; revised manuscript received 31 August 2015)

Abstract

Expression for the formation of the pixel value of fast neutron radiography has been derived. The contrast inequality for the photograph has been established using the derived expression; then the relationships of the image contrast with the source intensity, the exposure time, and the scattering have therefore been obtained through the acquired inequality. A simulation on the process of fast neutron radiography is carried out based on the pixel value analysis, and the spatial resolution and image contrast have also been considered. Simulation results show that the spatial resolution is better than that from experiments and the effect of image contrast is equivalent to that of the experiments. Finally, various samples, such as Pb samples, with slits, Fe samples with square holes and multiple materials-combined samples, are used to test the performance of the simulation. Results demonstrate that the simulations are in agreement with the experiments, thus providing a reference to the future experimental design and engineering application.

Keywords: fast neutron radiography, spatial resolution, contrast, Monte Carlo simulation

PACS: 87.57.Va, 87.57.C-, 87.15.ak, 52.70.-m

DOI: 10.7498/aps.64.198702

* Project supported by the Prompt Gamma Ray Method Research on Neutron Inelastic Cross Section (Grant No. 11375275).

† Corresponding author. E-mail: xupeng76345@163.com