

文章编号: 1006-9941(2018)02-0167-06

# 快中子照相在武器质量检测中的可行性研究

鲁昌兵<sup>1</sup>, 王 宋<sup>2</sup>, 文 刚<sup>3</sup>, 许 鹏<sup>4</sup>, 张显鹏<sup>5</sup>, 鲍 杰<sup>1</sup>

(1. 中国原子能科学研究院核数据重点实验室, 北京 102413; 2. 中国人民解放军第 92609 部队, 北京 100071; 3. 复杂航空系统仿真重点实验室, 北京 100076; 4. 西安高技术研究所, 陕西 西安 710025; 5. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

**摘 要:** 为研究快中子照相技术(FNR)在武器质量检测中的可行性,以公开的武器模型数据建立模拟模型,利用 Monte Carlo(MC)方法对快中子照相在武器质量检测中的安全性进行评估,由评估数据得出在 14.1 MeV 快中子累计照射  $2 \times 10^8$  n 条件下,铀、钚两种裂变材料损伤极小。同时,参考国外研究模型和预设缺陷,设计加工了类比模型实验样品,通过实验和模拟相结合的方式对武器检测中可能出现的内部狭缝、圆孔和中心位移等问题进行研究。实验结果表明 FNR 可以识别 5 mm 钢包裹条件下的 1 mm 的狭缝缺陷。模拟结果显示 FNR 可以实现对特定厚度的特殊材料进行中心位移缺陷诊断,模拟评估和实验结果表明快中子照相技术在武器质量检测中具有可行性。

**关键词:** 快中子照相技术(FNR); 武器质量检测; 安全性评估; 可行性研究; Monte Carlo(MC)方法

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.02.010

## 1 引言

快中子照相技术具有比传统 X 射线照相能量更高、穿透力更强的优点,可利用物质的截面差对放射性材料中的轻物质进行检测<sup>[1-2]</sup>。由于快中子照相的独特优势,该技术可用于核武器系统的无损检测。美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室在快中子照相应用于库存核武库检测方面进行了研究,其于 2008 年建成了一个大型快中子照相系统,利用 65 cm×65 cm 大型塑料闪烁体转换屏对加工武器模型进行成像,系统空间分辨率约 1 mm<sup>[3]</sup>。澳大利亚科学与工程研究学院从 2002 年开始研究结合快中子照相技术和高能  $\gamma$  或 X 射线为一体的集装箱检测成像技术,2008 年已有成品 AC6015XN,现在已经实现商业化<sup>[4]</sup>。德国国家研究所和以色列 SOREQ 研究所在加速器上利用飞行时间法进行多能量快中子共振实验研究,目前最好的空间分辨率能达到约 0.5 mm<sup>[5]</sup>。国内中子照相技术起步较晚,但中国工程物理研究院<sup>[6]</sup>、北京大学<sup>[7-8]</sup>、中国原子能科学研究院<sup>[9-10]</sup>等单位已经建立了集成化的快中子照

相系统,并在成像系统优化、理论研究方面取得进展<sup>[11-14]</sup>,目前系统空间分辨率也已达 1 mm。综合国内外发展现状,目前中子照相应用于库存核武库检测技术还处于实验探索研究阶段,一方面对快中子照相技术本身而言,存在高探测效率成像系统的建立优化、非期望信号对图像影响的定量分析、图像面密度反演和三维图像重构等问题;另一方面对快中子照相用于高浓度核材料检测这一特殊研究对象而言,还面临着检测的核安全性、技术的标准化、实际的可操作性等问题。

为全面分析快中子照相在武器质量检测中的可行性,本研究采用模拟计算和实验验证相结合的方法,以公开的武器模型数据建立模拟模型,开展安全性模拟评估,对狭缝、圆孔两种预设缺陷开展检测可行性研究,并分析了中心位移检测可行性。

## 2 安全性模拟评估

### 2.1 模型构建

快中子照相技术用于库存武库质量检测的安全性评估主要包括两方面,一是快中子对高浓度放射性材料直接照射的核安全性,二是大剂量累积照射条件下快中子对核材料的损伤特性分析。快中子直接照射在高纯度的裂变材料铀或钚上,有可能引起链式裂变反应,后果严重,长时间大剂量照射也有可能诱发核材料部分裂变,损伤核材料固有特性,降低核爆性能。在对

收稿日期: 2017-04-23; 修回日期: 2017-06-21

基金项目: 西北核技术研究所所控预研项目(13021502); 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室基金(SKLIPIR1516)

作者简介: 鲁昌兵(1990-),男,硕士,主要从事快中子照相和辐射防护研究。e-mail: LCB163YX@163.com

裂变材料进行照射前,需对裂变材料和炸药性能随快中子照射强度的变化做系统而全面的安全评估。本研究采用文献[15]中的假想武器模型数据,利用MC(monte carlo)方法模拟软件建模,模型结构和参数参考文献[15-17]设置。

为了区分快中子对铀、钚不同裂变芯武器模型的影响,建模时分别建立铀裂变芯模型和钚裂变芯模型,钨作为相同惰层材料分别进行研究。根据实际快中子照相得到一幅较清晰照片所需的累积中子照射量,设定模拟时快中子数为 $2 \times 10^8$  n,照射方向为水平对准模型照射,中子能量14.1 MeV,照射范围为半径为5 cm的圆。

图1是铀、钚裂变芯MC建模模型的结构显示图,其中图1a是铀裂变芯内部结构和外部整球网状结构示意图,图中红色区域是炸药层,黄色区域为铀材料层;图1b是钚裂变芯内部结构和外部整球网状结构示意图,图中红色区域是炸药层,黄色区域为钚材料层,两种模型的具体尺寸和材料组成详见文献[15]。

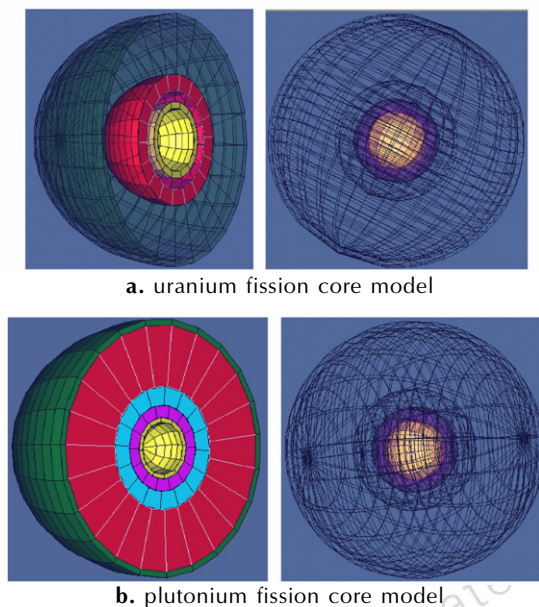


图1 铀、钚裂变芯MC模拟模型结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of uranium and plutonium fission core MC simulation model

表2 快中子照相引起的裂变芯变化模拟数据

Table 2 Simulation data of fission core change caused by fast neutron radiography

irradiated material	quality/g	neutron number /n · cm <sup>-2</sup>	sedimentary energy/J · g <sup>-1</sup>	fission energy/J · g <sup>-1</sup>	total reaction number	elastic scattering number	total absorption number	total crack
<sup>239</sup> Pu	4000.06	2.6629 × 10 <sup>6</sup>	3.3643 × 10 <sup>-7</sup>	3.6637 × 10 <sup>-7</sup>	2.3937 × 10 <sup>8</sup>	1.5387 × 10 <sup>8</sup>	5.1088 × 10 <sup>6</sup>	4.8313 × 10 <sup>7</sup>
TNT( <sup>239</sup> Pu)	48497.8	-	2.8488 × 10 <sup>-9</sup>	-	-	-	-	-
<sup>235</sup> U	12072.9	1.7979 × 10 <sup>6</sup>	1.7478 × 10 <sup>-7</sup>	1.8840 × 10 <sup>-7</sup>	4.9227 × 10 <sup>8</sup>	3.2230 × 10 <sup>8</sup>	1.2899 × 10 <sup>7</sup>	7.8485 × 10 <sup>7</sup>
TNT( <sup>235</sup> U)	61800.1	-	2.2438 × 10 <sup>-9</sup>	-	-	-	-	-

## 2.2 结果分析

为了定量评估两种模型的建模情况,分别对两种模型进行keff值计算,得出铀、钚两种裂变芯武器模型不同类型的keff值和误差情况,如表1所示。

由表1可知,两种模型下模型的keff值均小于1,且铀芯模型的有效值keff略大于钚芯模型,与理论吻合。通过两种模型的keff值,可定量评估两种模型的基本情况,也可将该模型与其它模型数据做比较。通过MC模拟反应道计数,得到铀、钚两种结构模型的模拟结果数据,详见表2。

表1 两种裂变芯模型的keff模拟值

Table 1 keff simulation values of two fission core models

fissile material	collision	absorb	track	effective	evaluation error
<sup>239</sup> Pu	0.62143	0.62142	0.62181	0.62174	0.00036
<sup>235</sup> U	0.63660	0.63661	0.63670	0.63667	0.00038

对钚裂变芯,根据模拟数据分析可知约4 kg的钚材料,其中<sup>239</sup>Pu含量为93.3%,keff有效值为0.62174,裂变总数为 $4.8313 \times 10^7$ ,占模型中钚原子总量的比例为 $4.7952 \times 10^{-18}$ ,总反应数占总原子数的比例为 $3.3758 \times 10^{-17}$ ,裂变总能量为 $1.46548 \times 10^{-3}$  J,沉积总能量 $1.34572 \times 10^{-3}$  J。对铀裂变芯模型,同上分析,约12 kg铀材料,<sup>235</sup>U含量为93.5%,keff有效值为0.63667,裂变原子占比为 $2.5379 \times 10^{-18}$ ,总反应原子数所占比例为 $1.5918 \times 10^{-17}$ ,裂变总能量为 $2.2745 \times 10^{-3}$  J,沉积总能量 $2.1101 \times 10^{-3}$  J。

综上所述,由评估数据可知,在14.1 MeV快中子,累计照射 $2 \times 10^8$ 条件下,铀、钚两种裂变芯模型均未出现持续链式裂变反应,裂变原子数仅占总原子数的 $10^{-17} \sim 10^{-18}$ ,总体影响极小。从炸药中沉积能量看,该条件下快中子对不同裂变芯的炸药沉积能量较低,总体影响较小。

### 3 狭缝、圆孔缺陷检测可行性研究

#### 3.1 模型构建与实验平台搭建

##### 3.1.1 模型构建

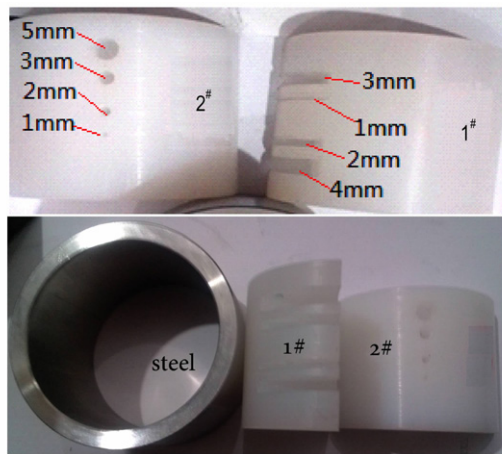
本研究仿照美国 LLNL 实验室设计的模型, 详见文献[3], 结合安全评估中假想武器模型尺寸, 加工了圆柱型样品模型, 具体尺寸如表 3 所示。

图 2 为圆柱模型实物图和 MC 模型示意图。圆柱最大半径 30 mm、高 40 mm, 从内到外依次是空腔, 聚乙烯和钢套。为了便于加工预设缺陷, 将聚乙烯圆环

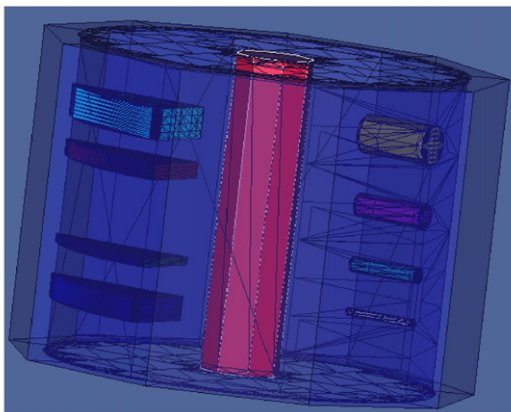
表 3 圆柱模型由内到外组成及各部分尺寸

Table 3 The cylindrical model consists of internal and external components and the dimensions of each part mm

material	internal diameter	external diameter	thickness
cavity	0	5	5
polyethylene	5	25	20
steel	25	30	5



a. physical model



b. simulation model

图 2 圆柱模型实物图和 MC 模型示意图

Fig.2 Physical map of the cylindrical model and schematic diagram of the MC simulation model

柱从样品中间切开成两个半圆柱, 如图 2a 所示。1# 半圆柱开宽 4, 2, 1 mm 和 3 mm 裂缝, 裂缝长 10 mm, 最大缝深 20 mm; 2# 半圆柱从正前方中间开直径为 5, 3, 2 mm 和 1 mm 圆孔, 孔深为 10 mm, 如图 2a 所示。

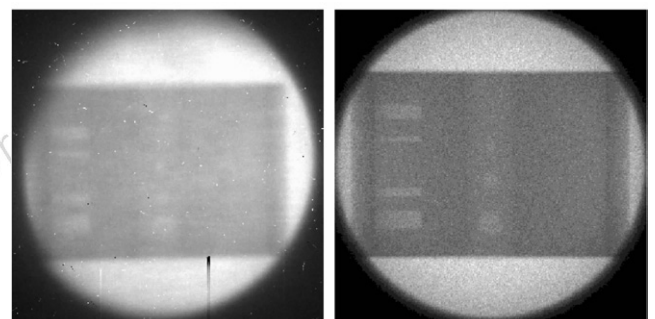
实验时将两个聚乙烯半圆柱放入钢圆柱筒中, 用于模拟研究武器保护壳内的炸药缺陷。MC 模拟所用三维模型图如图 2b 所示。

##### 3.1.2 实验平台

实验在中国原子能科学研究院 600 kV 高压倍加器上进行, 实验中子能量为 14.1 MeV。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×200 mm×10 mm, 密度为 1.032 g·cm<sup>-3</sup>, 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, 实验时每个像素点对应转换屏上的尺寸约为 0.084 mm×0.084 mm。样品与准直孔距离 2 cm, 系统准直比约为 294, 固有系统几何不锐度 U<sub>g</sub> 约为 0.0029 cm。圆柱模型样品进行实验和模拟时, 保证模拟建模条件与实验条件尽可能一致, 具有可比性<sup>[9]</sup>。实验时中子强度约 1×10<sup>10</sup> n·s<sup>-1</sup>, 照射时间为 1800 s, 经过准直器后, 累计中子个数为 7.369×10<sup>8</sup>。

#### 3.2 实验和模拟数据处理分析

通过对实验照片进行暗场和中值滤波处理, 最终得到图 3a 所示实验照片。相同条件下, 通过模拟得到图 3b 所示模拟照片图。



a. experimental photograph

b. simulated photograph

图 3 圆柱模型实验照片和模拟照片对照图

Fig.3 Contrast chart of the cylindrical model experiment photograph and simulation photograph

对比图 3a 实验照片和图 3b 模拟照片图, 可以看出模拟结果与实验照片在视觉效果上整体一致, 均能反映出缺陷的基本情况, 由于模拟时仅记录中子作用, 模拟照片整体清晰度比实验好。一是从视觉效果上定性分析, 两图对不同宽度的狭缝缺陷均可识别, 对圆孔

缺陷基本可区分出 5, 3, 2 mm 圆孔。二是从数据上定量分析, 由于模拟效果图由模拟数据绘制而成, 现仅对实验图 3a 进行定量分析。选取实验照片中 3 个红色线框标定的区域分别对裂缝、圆孔和不同材料进行像素值定量分析, 如图 4a 所示。从像素统计图看, 图 4b 中 1 号区裂缝区别比较明显, 图 4c 中 2 号区 1 mm 圆孔已经和像素值统计涨落接近, 所以图像上很难区分, 图 4d 中 3 号区聚乙烯和钢层像素值区分明显。

通过以上实验和模拟对比分析可知, 模拟效果与实验效果相当, 在不便实验的情况下可用模拟照片效果作为实验结果的参考预判<sup>[18-19]</sup>。当肉眼无法对照片识别时, 可对实验照片像素值进行定量分析, 在本实验条件下, 快中子照相技术可以识别 5 mm

钢包裹条件下的 1 mm 狭缝缺陷, 而 1 mm 圆孔缺陷很难识别。由此推断可知, 快中子照相技术通过改进和优化, 具备对武器系统内部缺陷的探测能力, 若武器系统结构已知, 可通过模拟对武器系统内部缺陷进行预先探测预判。

## 4 中心位移检测可行性研究

### 4.1 模型构建

本研究设计 MC 模拟中心位移模型如图 5 所示, 其中黄色区域代表铀, 浅蓝色代表炸药, 深红色代表钢壳。图 5a 和图 5c 两侧半球是为了展示内部结构将整球切开后显示模型效果图, 真实模拟时是图 5b 的整球结构。整个结构由内到外分别是铀、炸药和钢, 球心

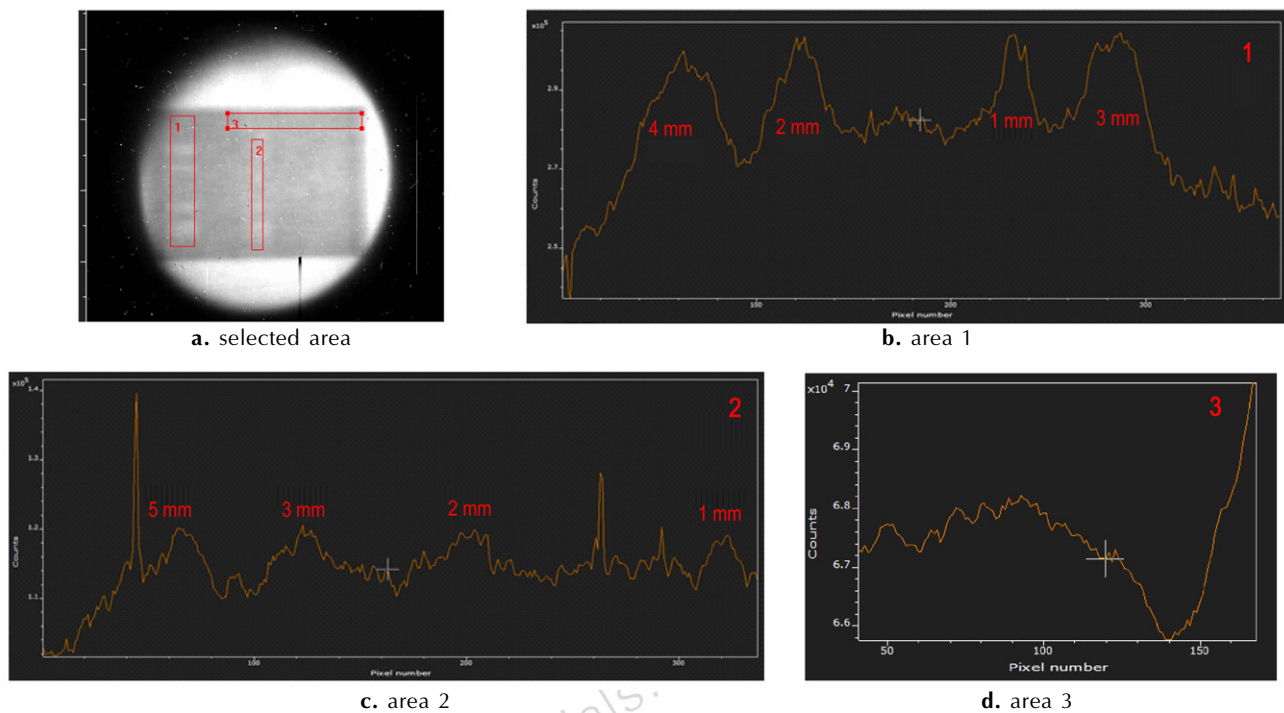


图 4 圆柱模型实验照片像素值数据分析图

Fig.4 Analysis of the pixel value of the experimental data of the cylinder model

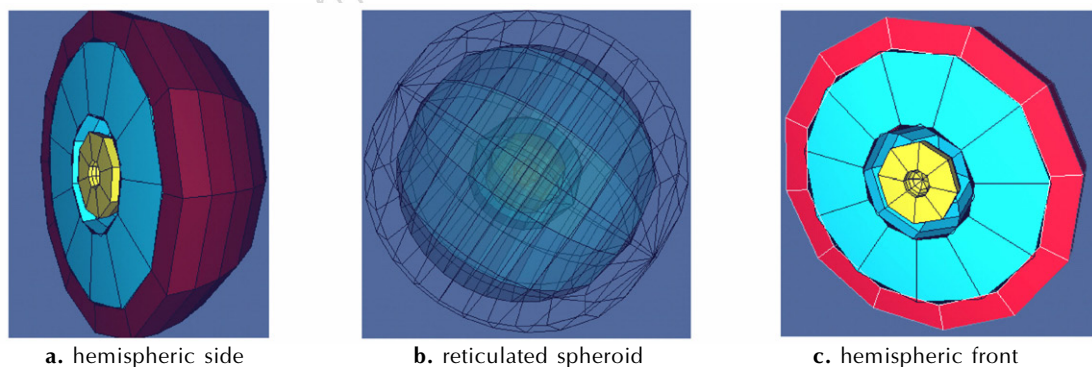


图 5 MC 模拟中心移位模型图

Fig.5 MC simulation center shift model

为半径 0.5 cm 的空腔,铀层厚 1 cm,炸药层厚 2 cm,钢层厚 1 cm,其中铀层和炸药层有 0.6 cm 的间隙。模拟时,通过移动中间铀球体(黄色区域)观察快中子照相技术对球心位移的检测能力。

#### 4.2 结果分析

设定中子照射量为  $1 \times 10^8$ ,中子能量 14.1 MeV,垂直正对球心照射,记录距球心 7 cm 处的塑料闪烁体中质子能量沉积,得到快中子照相中心位移 MC 模拟图,如图 6 所示。

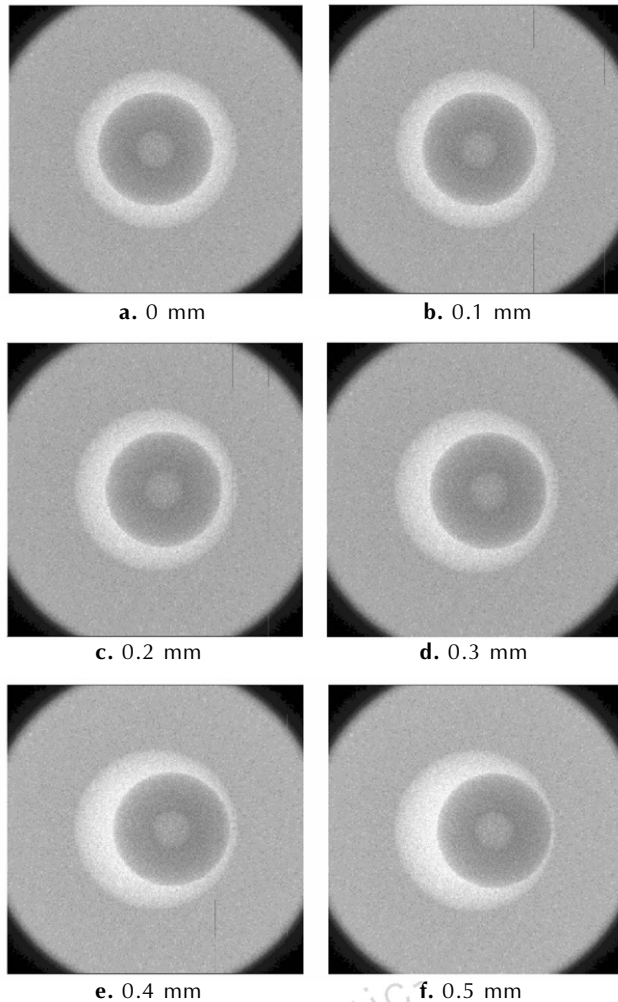


图 6 不同偏差下的中心位移 MC 模拟图

Fig.6 MC simulation of center displacement under different deviation

从图 6a 可以看出,在零偏差时,模拟图中可以分辨出系统的空腔、铀材料和聚乙烯以及两者之间的缝隙,模拟时设定铀芯位移量分别为 0.1,0.2,0.3,0.4,0.5 mm,从图 6b~图 6f 中可以看出随着铀裂变芯的向右位移,反差越来越明显,因此快中子照相技术可以实现对特定厚度的特殊材料进行中心位移缺陷的诊断。

## 5 结论

(1)以公开武器模型数据为依据建立安全评估研究对象,通过 MC 方法计算模型 keff 值、反应道和能量沉积,结果显示在满足照相条件下,快中子照相对武器的裂变损伤率仅为  $10^{-17} \sim 10^{-18}$ ,模拟中未发生链式裂变反应,初步表明快中子照相技术用于武器质量检测具备安全可行性。

(2)参照国外研究模型,结合假想炸药缺陷,设计加工实验样品,通过实验和模拟对照的方法,对武器检测中可能出现的狭缝、圆孔问题进行了研究,结果表明,模拟与实验效果一致,快中子照相技术具备穿过金属壳体探测内部缺陷的可行性。

(3)通过模拟炸药包裹铀材料模型,表明快中子照相技术具备一定的中心位移检测能力,具体检测精度与材料厚度和系统分辨率有关。

#### 参考文献:

- [1] 貂大卫,刘以思,金光宇,等.中子照相[M].北京:原子能出版社,1996:1-3.  
MO Da-wei, LIU Yi-si, JIN Guang-yu, et al. Neutron radiography [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1996: 1-3.
- [2] 郑小海.基于加速器的快中子照相技术研究[D].北京:中国原子能科学院,2014:5-30.  
ZHENG Xiao-hai. Fast neutron radiography based on the multiplier[D]. Beijing: Chinese Academy of Atomic Energy, 2014: 5-30.
- [3] Hall J, Rusnak B, Fitsos P J. High energy neutron imaging development at LLNL [R]. Processing of 8th World Conference on Neutron Radiography UCRL-CONF-230835, 2007.
- [4] Nicholas G, Liu Y, Yjames R, et al. Development and commercialization of a fast-neutron/X-ray cargo scanner[J]. *Process Science and Engineering*, 2010, 330-336.
- [5] Zboray R, Mor I, Dangendorf V, et al. High-frame rate imaging of two-phase flow in a thin rectangular channel using fast neutrons[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2014, 90: 122-131.
- [6] 唐彬,周长庚,霍合勇,等.14 MeV 快中子数字照相初步实验研究[J].中国科学 G 辑,2009,39(8):1090-1096.  
TANG Bin, ZHOU Chang-gen, HUO He-yong, et al. The pilot experimental study of 14 MeV fast neutron digital radiography [J]. *Science in China Series G*, 2009, 39(8): 1330-1336.
- [7] Zou Y B, Guo L A, Guo Z Y et al. Development of a converter made of scintillator and wavelength-shifting fibers for fast neutron radiography. *Nucl. Instrum. Methods A*, 2011, 651: 62-66.
- [8] Li H, Zou Y B, Wang S, et al. Preliminary study on neutron radiography with several hundred keV fast neutrons [J]. *Chinese Physics Letter*, 2012, 29(11): 1-4.
- [9] 鲁昌兵,许鹏,鲍杰,等.快中子照相模拟分析与实验验证[J].物理学报,2015,64(19):198702.  
LU Chang-bing, XU Peng, BAO Jie, et al. Simulation analysis and experimental verification of fast neutron radiography[J]. *Acta. Phys. Sin*, 2015, 64(19): 198702.
- [10] 鲁昌兵,许鹏,鲍杰,等.快中子照相细节灵敏度初步实验研究[J].核技术,2015,38(8):080202.

- LU Chang-bing, XU Peng, Bao Jie, et al. Preliminary experimental research of detail sensitivity in fast neutron radiography[J]. *Nucl Tech*, 2015, 38(8): 080202.
- [11] Li H, Wu Y, Cao C, et al. Design optimization, manufacture and response measurements for fast-neutron radiography converters made of scintillator and wavelength-shifting fibers[J]. *Nucl. Instrum. Methods A*, 2014, 762: 64-69.
- [12] 章法强, 杨建伦, 李正宏, 等. 厚闪烁体内次级中子对快中子图像质量的影响研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(2): 1316-1320. ZHANG Fa-qiang, YANG Jian-lun, LI Zheng-hong, et al. Effects of secondary neutrons on fast neutron image quality in thick scintillator[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(2): 1316-1320.
- [13] Tang B, Wu Y, Li H, et al. The physics analysis and experiment study of zinc sulphide scintillator for fast neutron radiography[J]. *Nucl. Instrum. Methods A*, 2013, 729: 327-333.
- [14] Lu C B, Bao J, Huang Y, et al. Study on the contrast sensitivity of 14MeV fast neutron radiography [J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2017, 28: 78.
- [15] 杜祥琬. 核军备控制科学技术基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996: 117-120.
- DU Xiang-wan. Nuclear arms control basis of science and technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996: 117-120.
- [16] 春雷. 核武器概论[M]. 北京: 原子能出版社, 2005: 30-50. CHUN Lei. Introduction to nuclear weapons[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2005: 30-50.
- [17] 伍均, 刘成安, 胡思得, 等. 以中子作外源的假想核弹头主动探测[J]. *计算物理*, 2003, 20(1): 71-75. WU Jun, LIU Cheng-an, HU Si-de, et al. By neutron hypothetical nuclear warheads exogenous active detection[J]. *Journal of computational physics*, 2003, 20(1): 71-75.
- [18] Bishnoi S, Thomas R G, Sarkar P S, et al. Simulation study of fast neutron radiography using GEANT4[J]. *JINST*, 2015, 10: P02002.
- [19] Zou Y B, Guo L A, Guo Z Y, et al. Development of a converter made of scintillator and wavelength-shifting fibers for fast neutron radiography[J]. *Nucl Instrum. Methods A*, 2009, 605: 73-76.

## Feasibility of Fast Neutron Radiography in Weapon Quality Detection

LU Chang-bing<sup>1</sup>, WANG Song<sup>2</sup>, WEN Gang<sup>3</sup>, XU Peng<sup>4</sup>, ZHANG Xian-peng<sup>5</sup>, BAO Jie<sup>1</sup>

(1. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China; 2. The Chinese People's Liberation Army 92609 Troops, Beijing 100071, China; 3. Complex Aircraft System Simulation Key Laboratory, Beijing 100076, China; 4. High Technique Institute of Xi'an, Xi'an 710025, China; 5. Northwest Nuclear Technology Institute, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** In order to study the feasibility of fast neutron radiography technology(FNR) in weapon quality detection, the research object was established on the basis of the open hypothetical weapon model, and the MC method was used to evaluate the safety of the fast neutron radiography in the weapon quality detection. Results showed that the fissile materials of uranium and plutonium have minimal damage under 14.1 MeV fast neutron irradiation with a total dose of  $2 \times 10^8$  n. On the basis of referring to the foreign research model and the default defects, the author designed and manufactured the experimental samples, and studied the internal slit, round hole and center displacement which may appear in the weapon inspection by means of both experiments and simulations. The experiment results show that FNR can identify the defects of 1-mm-thick slits inside a steel block of 5 mm thickness. The simulations further show that FNR is able to diagnose the center displacement with certain thicknesses for particular materials. Therefore, our results suggest FNR could be a feasible and potential technique in weapon quality testing.

**Key words:** fast neutron radiography(FNR); quality inspection safety evaluation; feasibility study; monte carlo (MC) method

**CLC number:** TJ55

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.02.010



## 《含能材料》“观点”征稿

为了丰富学术交流形式,及时传递含能材料领域同行们的学术观点和思想,《含能材料》开设了“观点”栏目。“观点”栏目的来稿应观点鲜明、内容新颖、形式上短小精悍。欢迎含能材料各领域的专家积极来稿。来稿时请附个人简介及主要研究工作介绍。

《含能材料》编辑部