

MCNP 程序在核弹头 核查中子探测技术研究中的应用

周百昌^{1,2}, 何彬¹, 朱文凯², 陈坤², 张全虎¹, 葛坤友²

(1. 第二炮兵工程学院 核工程系, 陕西 西安 710025;

2. 第二炮兵装备研究院 第二研究所, 北京 100085)

摘要:为合理设计基于核弹头泄漏中子被动测量核查方法的实验方案,根据假想核弹头模型,用 MCNP 程序计算了其泄漏中子能谱。结果表明,核材料自发裂变中子在透射出弹体后被慢化,大部分中子成为慢中子,能量小于 0.5 MeV。分析了这一结果对核武器现场核查中子探测技术的意义。

关键词:核武器核查;中子能谱;蒙特卡罗方法;MCNP 程序

中图分类号:O571.5 文献标识码:A 文章编号:1000-6931(2006)S0-0085-04

Application of MCNP Code in Research of Neutron Detecting Technique in Nuclear Warhead Verifying

ZHOU Bai-chang^{1,2}, HE Bin¹, ZHU Wen-kai², CHEN Kun²,
ZHANG Quan-hu¹, GE Kun-you²

(1. Department of Nuclear Engineering, Second Artillery Engineering Institute,
Xi'an 710025, China;

2. No. 2 Institute, Second Artillery Equipment Academy, Beijing 100085, China)

Abstract: In order to design a way to measure the neutron spectrum of nuclear warhead in the process of nuclear weapon inspecting, neutron spectrum of a supposed nuclear warhead was calculated by using MCNP code. The result shows that the spectrum is a moderated spectrum and the energy of mostly neutrons is lower than 0.5 MeV. The significance of the conclusion to nuclear warhead verifying is discussed in the paper.

Key words: nuclear warhead verifying; neutron spectrum; Monte-Carlo method; MCNP code

核弹头核查方法主要有主动法和被动法两类。其中,基于中子的被动法可在一定距离处一定时间内通过测量核弹头泄露中子辨别是否

有核弹头存在(即可探测性研究),另外可通过测量得到的泄露中子能谱来辨别核弹头的类型,探知“敏感信息”。这两方面信息的准确获

得都依赖于中子能谱的精确测量和探测效率的提高。

由于中子能域宽广,只用一种探测器对整个能域进行探测难以得到较好的测量精度和效率,应根据核弹头泄漏中子能谱的特点,将全中子能谱划为几个能区,分别针对不同能区选用不同的探测器,力求在各个能区中都能得到较高的探测效率。

为合理设计基于核弹头泄漏中子被动测量核查方法的实验方案,本文采用蒙特卡罗中子、光子输运模拟程序 MCNP,对核弹头泄漏中子能谱进行分析计算。

1 MCNP 程序简介

MCNP (General Monte-Carlo *N*-Particle Transport Code)是一个大型、多功能的蒙特卡罗计算程序,由美国 Los Alamos 实验室开发,可处理任意三维几何结构的中子-光子耦合输运问题。该程序以蒙特卡罗方法为算法基础,对每一个粒子在给定几何结构中运动时所发生的弹性散射和非弹性散射等真实运动历史进行模拟跟踪,通过对大量粒子历史的跟踪,得到大量随机实验值,并根据计算需要对相应物理量进行统计,得出某个数值特征的估计量,该估计量即为问题的解。计算一个粒子真实运动历史的主要步骤示于图 1。

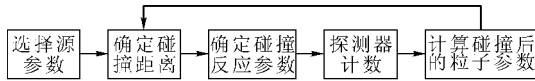


图 1 一个粒子历史的 MCNP 模拟流程

Fig. 1 Flow chart of calculating a particle with MCNP code

该程序计算功能强大、几何组合灵活方便,具有较多的降低方差技巧和较强的通用性,在源描述、空间物质的几何分布上具有很大的灵活性,适用面宽,现已广泛用于核仪器设计、辐射场计算、辐射屏蔽、保健物理、反应堆设计与安全性分析等很多问题上^[1]。

2 MCNP 计算中子慢化谱方法的建立

为建立 MCNP 计算核弹头泄漏中子谱的

计算方法,用该程序计算了 Am-Be 中子源经铁、石蜡屏蔽后的泄漏中子能谱,并与实验测量结果进行了比对,验证计算方法的正确性。

首先测量 Am-Be 裸源的中子能谱。将全能区划分为 A、B、C 3 个能区,A 区能量为 0~ 镉吸收限,B 区能量为镉吸收限~1.5 MeV,C 区能量大于 1.5 MeV。A 区中子出射率的获得利用镉差法原理,用包镉与不包镉的长中子管分别测量中子出射率,而两者之差即为 A 区的中子出射率。C 区用 ST-451 液闪体探测器,结合脉冲形状甄别的 n-γ 甄别技术,测量此能区的反冲质子谱,根据液闪体探测器的响应矩阵,用逆矩阵方法求出此区的能谱。B 区的中子出射率,由长中子管测得的镉限以上的中子出射率与 C 区的快中子总出射率之差求出。此实验结果与国内外其它作者或机构的结果列于表 1。由表 1 可看出,本实验方法是正确可靠的。

表 1 本实验 Am-Be 裸源中子能谱与其他作者的结果比对

Table 1 Comparison of neutron spectra between this experiment and other authors

作者	各峰值位/MeV			
E. A. Lorch ^[2]	3.25	4.5	7.6	9.5
K. W. Geiger ^[3]	3.40	4.8	7.8	9.7
李安利 ^[4]	3.00	4.35	7.35	9.35
本实验	3.35	4.5	7.5	9.7

利用上述经验证的中子能谱测量方法,又测量了 Am-Be 源的慢化中子能谱。其中,慢化体为一球体,分为内球及外球壳两部分,内球直径为 300 mm,材料为 Fe;外球直径为 600 mm,材料为石蜡。利用 MCNP 程序对这一模型进行了中子通过慢化体的出射率的计算,计算结果与测量结果符合较好(表 2)。由此证明,利用 MCNP 程序计算中子源慢化谱的方法是正确的。

3 核弹头泄漏中子能谱的计算

核弹头泄漏中子的过程类似于 Am-Be 中子源经慢化体屏蔽而出射中子的过程,与前文计算 Am-Be 源慢化中子能谱的方法类似,利用

表 2 Am-Be 源慢化中子能谱的实验及理论计算结果对比

Table 2 Comparison of Am-Be slow neutron spectra between numerical and experimental results

中子能量	出射率 $\eta/\%$	
	计算值	实验值
>1.5 MeV	3.54	3.86
镅限以上	7.67	8.16

MCNP 程序对核弹头泄漏中子能谱进行了建模计算。

由于真实核弹头的内部结构是保密的,故依据公开报道的原子弹结构原理构造了本工作的计算模型(图 2)^[5]。模型中心为一空心球,被武器级铀(12 kg)、钚(4 kg)制成的聚变芯包围,再由内向外依次为铍反射层、贫化铀反射层、高能炸药层和铝质外壳。

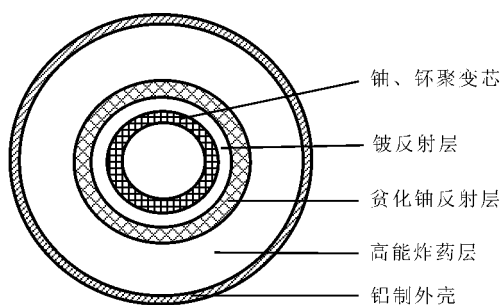


图 2 假想核弹头模型示意图

Fig. 2 Outline of hypothetical nuclear warhead model

根据 MCNP 程序的有关规定,在输入文件中,源的描述为体源,以核材料的放射性强度与其质量比为依据来确定各栅元的抽样概率。在²³⁵U、²³⁸U、²³⁹Pu 核材料部件中产生的中子,其能谱服从麦克斯韦分布:

$$N(E) \propto \sqrt{E} \exp(-E/a) \quad (1)$$

式中: a 为分布参数,对²³⁵U、²⁴⁰Pu、²³⁹Pu 的自发裂变中子谱,该参数分别为 1.29、1.32、1.33^[6]; E 为中子的能量。

计算中核材料栅元按参考文献^[5]给出的美国核弹头核材料的组分填充,详情参见表 3。

在输入程序中,根据探测器计数误差的允许范围设定了跟踪的中子数目。在栅元描述中,栅元中的中子抽样点都含在有核材料的栅

元中,各栅元中相应的抽样概率是根据各栅元材料发射中子率的不同数值而确定的。利用面通量计数卡 F1 对穿出模型最外层球面的中子通量进行记录,同时用计数能量卡 E1 对中子能谱进行能量段划分,可得出核弹头外表面中子计数率按能量的分布,即核弹头泄漏中子能谱。计算结果示于图 3。

表 3 美国核弹头中核材料的组分

Table 3 Composition of nuclear material in American nuclear warhead

核材料	$\omega/\%$							
	²³⁴ U	²³⁵ U	²³⁸ U	²³⁸ Pu	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu	²⁴² Pu
贫化铀	0.2	0.4	99.4	—	—	—	—	—
武器级铀	1.0	93.3	5.5	—	—	—	—	—
武器级钚	—	—	—	0.005	93.3	6.0	0.44	0.013

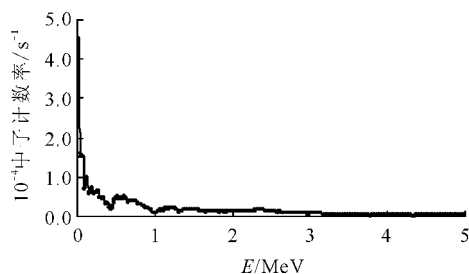


图 3 假想核弹头泄漏中子能谱
Fig. 3 Neutron spectrum of hypothetical nuclear warhead

图 4 是中子在核材料中产生之初的能谱,服从麦克斯韦分布。

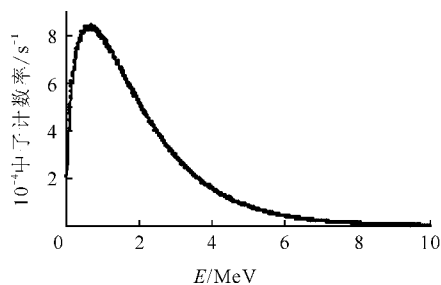


图 4 麦克斯韦裂变中子能谱
Fig. 4 Maxwell fission neutron spectrum

对比图 3、4 可看出,中子在核材料中产生之初,其能量服从麦克斯韦分布,中子主要为

0.5~10 MeV 的快中子。经过核弹头中核材料、炸药部件、中子反射层、外壳的散射作用之后,最终透射出弹体的中子绝大多数集中在能量小于 0.5 MeV 的低能区,为慢中子成分。由于从核材料中自发裂变产生的中子在向外运输的过程中,会引起诱发核裂变,使中子增值,故核弹头泄漏中子能谱的总中子发射率有所增强(MCNP 程序计算结果显示中子总数增加了 7.35 倍),但诱发中子透射出弹体后绝大部分也被慢化,增强了泄漏中子谱的慢化成分。

4 结语

本文对 Am-Be 源中子能谱进行了实验测量和理论计算,以此建立了利用 MCNP 程序计算核弹头泄漏中子能谱的计算方法,并对假想核弹头的泄漏中子能谱进行了计算。结果表明,核弹头泄漏中子能谱为一中子慢化谱。下一步将以此方法对真实核弹头的泄漏中子能谱进行模拟计算,掌握真实核弹头泄漏中子能谱的特点,为核武器现场核查过程中“敏感信息”分析和中子探测器的合理选择提供基本依据。

参考文献:

[1] 黄正丰. MCNP 程序使用说明[M]. 北京:北京第九研究所,1986;5-7.

- [2] LORCH E A. Neutron spectra of $^{241}\text{Am-B}$, $^{241}\text{Am-Be}$, $^{241}\text{Am-F}$, $^{242}\text{Cm-Be}$, $^{238}\text{Pu-}^{13}\text{C}$ and ^{252}Cf isotopic neutron sources[J]. *Int J Appl Radiat Isot*, 1973, 24(10):585-591.
- [3] GEIGER K W, BAERG A P. Improved calibration of a Ra-Be and an Am-Be neutron source[J]. *Canadian Journal of Physics*, 1965, 43:373-378.
- [4] 李安利,黄糖籽. 用双闪烁体飞行时间谱仪测量 Cf 和 Am-Be 源的中子谱[J]. *原子核物理*, 1982, 4(2):145.
LI Anli, HUANG Tangzi. Measuring the neutron spectrum of Cf and Am-Be source by time-of-flight spectrometer with double scintillators [J]. *Nuclear Physics*, 1982, 4(2): 145 (in Chinese).
- [5] 陈波,郝樊华,龚建. 核弹头模型的 γ 射线探测[J]. *核电子学与探测技术*, 1996, 16(6): 419-422.
CHEN Bo, HAO Fanhua, GONG Jian. Detecting the gamma-ray of warhead models[J]. *Nuclear Electron & Detection Technology*, 1996, 16(6): 419-422(in Chinese).
- [6] REILLY D, ENSSLIN N, SMITH H, et al. Passive nondestructive assay of nuclear materials; LA-UR-90-732[R]. USA: Los Alamos National Laboratory, 1991.