

文章编号: 0258-0926(2014)S2-0016-03; doi: 10.13832/j.jnpe.2014.S2.0016

次临界装置中子时间特性研究

白云^{1,2,3}, 杨波^{1,2,3*}, 龚建², 彭先觉^{1,2}

1. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京, 100094; 2. 中国工程物理研究院中子物理学重点实验室, 四川绵阳, 621900;
3. 中国工程物理研究院高性能数值模拟软件中心, 北京, 100088

摘要: 用稠密等离子体聚焦源测量法确定次临界装置的瞬发中子衰减常数时发现, 反射层材料不同的次临界装置具有不同的中子时间特性。本文采用蒙特卡罗方法分析带含氢反射层和带金属反射层两种次临界装置的有效增殖因数(k_{eff})、瞬发中子代时间、能谱等中子学参数的时间特性。结果表明, 对含氢反射层装置, 在 10^{-6} s 的时间尺度内, 泄漏的快信号反映装置内部活性区的特性; 在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ s 或更长量级的时间尺度内, 中子的谱形和空间分布逐渐趋于平衡, 泄漏信号表征整个次临界装置的定态特性。

关键词: 次临界; 时间特性; 瞬发中子衰减常数

中图分类号: TP29 **文献标志码:** A

Research of Neutron Time Characteristics of Subcritical Device

Bai Yun^{1,2,3}, Yang Bo^{1,2,3*}, Gong Jian², Peng Xianjue^{1,2}

1. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing, 100094, China; 2. Key Laboratory of Neutronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan, 621900, China. 3. CAEP Software Center for High Performance Numerical Simulation, Beijing, 100088, China

Abstract: In the study of the method to diagnose the prompt neutron decay constant of the subcritical device by the Dense Plasma Focus source, the different neutron time characteristics are found in the subcritical device with different reflective layer, such as a metal reflector and a hydrogenous reflector. The different neutron time characteristics like k_{eff} , prompt neutron generation time, energy spectrum, and the different of prompt neutron decay constant within different energy segments and different geometric segments is analyzed by the Monte Carlo method. The results showed that, in the subcritical device with a hydrogenous reflective layer, within 10^{-6} s time scale, the leakage fast signal of the device can fully reflects the characteristics of the active region. In $10^{-6} \sim 10^{-4}$ s or much longer time, the shape of the leakage neutron spectrum and space spectrum may fully reflects the whole device.

Key words: Subcritical, Neutron time characteristics, Prompt neutron decay constant

0 前言

瞬发中子衰减常数是指核材料系统瞬发中子总数随时间的指数衰减系数^[1], 是表征系统内临界性质和状态的重要特征参数, 综合反映系统内瞬发中子的动力学行为。

一般应用单群点堆动力学模型来研究瞬发中

子衰减常数^[1-4], 中子谱形和空间分布被认为是与时间无关的常量。在装置仅由裂变材料组成或者带有金属反射层时, 中子寿命约为 10^{-8} s, 中子数形成稳定分布的时间尺度也在同一量级; 若待测系统时间尺度在 10^{-6} s 量级或更高, 点堆模型基本合适。但在带有含氢材料反射系统的装置中, 中

收稿日期: 2014-09-20; 修回日期: 2014-12-09

基金项目: 中国工程物理研究院中子物理学重点实验室基金; 国防科工局核能开发项目(科工技[2012]1523); 科技部 863 专项(2012AA01A303); 能源局 06 专项

作者简介: 白云(1976—), 女, 研究员。现从事核测试诊断理论研究

*通讯作者: 杨波, E-mail: heroyb@hotmail.com

子寿命大幅上升,可达 $10^{-4}\sim 10^{-5}$ s^[5],对于待分析系统在 10^{-6} s及更短尺度内的时间特性,则中子能谱谱形等随时间的变化不可忽略^[6-7],此时需要深入分析系统的中子学时间特性。

本文采用蒙特卡罗方法分析带含氢反射层和带金属反射层次临界系统的时间特性,包括瞬发中子代时间、不同能区中子注量随时间的变化、活性区各能群中子引起的裂变份额随时间的变化等,以明确在不同反射层的次临界装置中测量的中子时间行为可在何种程度上反应装置的次临界特性。

1 中子学参数的时间特性— k_{eff} 分析

本文的研究对象为一个 Pu 材料裸球装置加上不同厚度的反射层。采用蒙特卡罗方法在计算机上开展模拟实验分析,具体计算采用蒙特卡罗粒子输运程序 JMCT^[8]。

对于金属反射层和含氢反射层,各选取一个次临界状态来开展后续的分析。文中选取 30 mm 的 Fe 反射层和 27 mm 的聚乙烯反射层,对应的有效增殖因数 (k_{eff}) 分别为 0.98921、0.99744。

1.1 瞬发中子代时间和反射层厚度的关系

钢反射层中子代时间变化很小,为 3×10^{-8} s 量级。而对于聚乙烯反射层,中子代时间一直增加,当聚乙烯厚度为 27 mm 时,代时间达到 9×10^{-6} s。这说明对于该厚度的聚乙烯反射层,装置的弛豫时间为 10^{-4} s 量级。

1.2 活性区归一化能谱随时间的变化

单群近似的必要条件是能谱基本稳定。这里分析 10^{-6} s 时间尺度下活性区不同能区中子注量的时间谱。对于 Fe 反射层,系统能谱在不到 0.1 μ s 的时间内趋向平衡,<1 keV 的份额很少,基本可忽略,由此可判断系统趋向平衡的弛豫时间在 10^{-7} s 量级;对聚乙烯反射层,高能段的能谱份额基本保持不变,而低能段的能谱份额一直增加。通过 Fe 反射层与聚乙烯反射层系统的对比,可推断高能段的中子 (>1 keV) 是慢化的裂变谱中子,而低能段的中子 (<1 keV) 是从外层的含氢反射层返回的中子。由于低能段的影响,在 10 μ s 的时间尺度内,能谱逐渐趋向平衡。

1.3 活性区各能群中子引起的裂变份额随时间的变化

对于 Fe 反射层,在不到 0.1 μ s 的时间内,不

同能量引起裂变反应的份额趋向稳定,<1 keV 的份额很少,基本可以忽略;对于聚乙烯反射层,根据不同能量引起裂变反应的份额,4 μ s 时 1 eV 以上能区趋向平衡,而 1 eV 以下能区一直在变化,即使在 10 μ s 时 0.1 eV 以下中子引起的裂变反应份额也一直在增加。

对于含氢反射层较厚的装置,虽然低能段的能谱份额不高,但由于几微秒后低能中子对反应率的影响已经变为主要因素,低能中子对裂变反应开始起主导作用,使含氢反射层的装置在短的弛豫时间内难以达到稳定的平衡态,导致系统的时间常数一直变化,达到稳定的弛豫平衡时间远大于 10 μ s。

2 不同能区和空间瞬发中子衰减常数

分析表明,含氢反射层装置达到稳定平衡态需要的弛豫时间较长,需要重新分析该系统在 10^{-6} s 量级时间尺度内的瞬发中子衰减常数。

2.1 对裂变反应率起主要作用能群的注量时间谱

对于 Fe 反射层,对裂变反应率起主要作用的能段为 >1 keV 的能区;而对于聚乙烯反射层,对裂变反应率起主要作用的能段除了 >1 keV 的能区外,还包括 <1 eV 能区。

2.2 不同能群的瞬发中子衰减常数

对于 Fe 反射层,各能群的瞬发中子衰减常数与整个系统的衰减常数基本一致;而对于聚乙烯反射层,在 10 μ s 的时间尺度下,>1 keV 的能区内的瞬发中子衰减常数与整个系统的衰减常数基本一致。

10 μ s 之前,含氢反射层系统的瞬发中子衰减常数一直在变化。对于较厚的含氢反射层系统,达到稳定平衡需要的弛豫时间较长,这与中子代时间的分析吻合。实际上,稳定平衡中包含大量慢中子信息,反而不能反映所关注的裂变区信息。值得注意的是,不论是金属反射层还是含氢反射层,在 1 μ s 内系统的瞬发中子衰减常数与 >1 keV 能段中子注量的衰减常数基本一致。这是由于该能群中子均是裂变直接产生的,该能群的中子注量远高于反射层慢化回来的低能群中子注量,即装置内中子注量主要为裂变反应产生的。

研究表明,在 10^{-6} s 量级的时间尺度内,对带有含氢反射层的系统,>1 keV 能段中子注量的瞬发中子衰减常数与整个系统的衰减常数有很好

的一致性；同时，出装置的中子流也可很好地反映系统内裂变材料区的特性。因此，可通过靠近装置的测点的泄漏中子流获取裂变材料区的相关中子学信息。

2.3 不同区域内瞬发中子衰减常数比较

对于带有反射层的系统，可将其看成 2 个子系统：活性区（Pu 或 U），该区产生中子，可被看作中子源；活性区以外的非活性介质区。中子由源（Pu 区）产生，进入非活性介质区输运，其中部分中子经输运泄漏出系统。

对于次临界系统，当反射层为金属介质时，由于 2 个子系统代时间较接近，反射层随着活性区的衰减而迅速衰减，整个系统很快达到平衡，可以认为系统中各处的时间衰减常数完全相同。

当反射层为含氢介质时，由于 2 个子系统代时间差别非常大，在 10^{-7} s 量级时间尺度内反射层中的中子注量（主要是 1 eV 以下的低能中子）份额一直在增加； $1\ \mu\text{s}$ 之内、 $>1\ \text{keV}$ 能段中子注量的衰减常数可完全反映装置活性区的信息，完全代表活性区的瞬发中子衰减常数，而 1 eV 以下的基本对应反射层的中子学特性。故 10^{-7} s 量级的时间尺度内系统中各处的时间衰减常数差别明显且一直变化，不能达到稳定。因此，在测量含氢次临界装置的瞬发中子特性研究工作中，测量到的泄漏曲线中 1 keV 以上、 $1\ \mu\text{s}$ 以内的中子波形完全可以表征活性区的信息，可用于分析所关心的活性区裂变材料的宏观中子学特性。

3 结论与展望

本文采用蒙特卡罗方法研究了带含氢反射层

和带金属反射层的次临界系统的中子学时间特性，分析了不同反射层材料下整个系统的瞬发中子时间常数、测量的泄漏中子流的时间常数以及裂变材料活性区瞬发中子衰减常数的关系。分析表明，对于金属反射层装置次临界系统，整个装置的中子注量在 10^{-7} s 后即达到稳定平衡，泄漏中子信息完全可以表征系统活性区特性；对于含氢反射层装置，由于含氢反射层的慢化作用，在 10^{-6} s 量级的时间尺度内，1 keV 以上能段中子的衰减常数特性可以很好地表征活性区特性。

参考文献：

- [1] Bell G I, Glasstone S. 核反应堆理论[M]. 北京：原子能出版社，1979.
- [2] 复旦大学. 原子核物理实验方法[M]. 上海：复旦大学出版社，1984.
- [3] 刘庆兆. 脉冲辐射场诊断技术[M]. 北京：科学出版社，1994.
- [4] Duderstadt J J, Hamilton L J. Nuclear reactor analysis[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1980.
- [5] 宋凌莉, 郑春. 中子能谱对瞬发中子衰减测量影响分析[J]. 核动力工程, 2007, 28(S1): 16-18.
- [6] 白云, 应阳君, 张本爱, 等. 强脉冲源法测量次临界系统中子学时间常数的分析[J]. 核技术, 2005, 12: 940-943.
- [7] 白云, 杨波. 脉冲源法测量系统次临界度的进一步分析[J]. 原子能科学技术, 2010, S1, 336-339.
- [8] 邓力, 李刚. JMCT 蒙特卡罗中子-光子输运程序全堆芯 pin-by-pin 模型的模拟[J]. 原子能科学技术, 2014, (48) 6:1061-1066.

(责任编辑：尚作燕)