

稍超瞬发临界系统缓发中子发射率研究

谢奇林, 范晓强, 刘汉刚, 杨成德, 贺仁辅

(中国工程物理研究院 核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 使用蒙特卡罗直接模拟程序计算了弱源点火条件下超瞬发临界 $5\ \epsilon$ 的 Godiva I 快中子脉冲堆缓发中子发射率规律和脉冲引发时刻概率分布。计算结果表明, 脉冲引发时刻概率分布的计算结果与实验结果符合较好, 所获得的缓发中子发射率规律可合理解释引发时刻概率分布的实验结果。

关键词: 持续裂变链; 引发时刻; 缓发中子; 蒙特卡罗直接模拟; 超瞬发临界

中图分类号: O571.437; TL329

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2011)06-0641-04

Study of Delayed Neutrons Emission Rate in Slightly Super-Prompt-Critical System

XIE Qi-lin, FAN Xiao-qiang, LIU Han-gang, YANG Cheng-de, HE Ren-fu

(China Academy of Engineering Physics, P. O. Box 919-210, Mianyang 621900, China)

Abstract: Emission rates of delayed neutrons and burst initiation time for Godiva I burst assembly in the presence of weak neutron source, whose reactivity was $5\ \epsilon$ above prompt criticality, were calculated using analog Monte-Carlo method. The result of initiation time is consistent with experiment. Emission rate of delayed neutron attained from calculation can well explain the probability distribution of initiation time.

Key words: persistent fission chain; initiation time; delayed neutron; analog Monte-Carlo method; super-prompt-critical

由于每次裂变产生瞬发中子数目的随机性、中子发生核事件类型的随机性和中子发生核事件时刻(即中子寿命)的随机性, 裂变链的初期发展过程具有显著的随机涨落性质。在稍超瞬发临界系统内, 不仅只有少部分裂变链能够形成持续裂变链, 有限裂变链的长度也具有显著的随机涨落。因此, 处于稍超瞬发临界的快中子脉冲堆在弱中子源点火时, 脉冲(即持续裂变链)的引发时刻也具有显著的随机涨落, 这一现象早于 1960 年就在 Godiva I 和 Godiva II

快中子脉冲堆上观察到(引发时刻为 $0\sim 13\ \text{s}$ 之间, 平均引发时刻约为 $3\ \text{s}$)。

为从理论上解释这一现象, Hansen^[1] 求解了点堆模型下单个中子引发持续裂变链的概率和反应性阶跃及斜增近似加入下脉冲引发时刻的概率分布, 点堆结果物理意义明确, 具有很强的适用性, 但因源强考虑得不够(未考虑缓发中子的贡献, 有效中子源强度仅为 $90\ \text{s}^{-1}$), 不能对 Godiva I 的实验结果进行解释。Wimett 等^[2] 通过引入半经验公式, 在假设系统内总中子源强度

恒定(为自发裂变中子源强度的3倍)和考虑脉冲从产生到系统达到一定功率的时间间隔涨落的基础上,对 Godiva II 脉冲引发时刻的概率分布进行了解释。实际上,从脉冲产生到脉冲峰出现的时间间隔很短(仅几十 μs),对脉冲引发时刻概率分布的影响基本可忽略;另外,系统处于超瞬发临界状态时,源中子的来源包括自发裂变中子和缓发中子先驱核发生 β 衰变后退激发出缓发中子的贡献,自发裂变中子的发射率可近似看作常数,但缓发中子先驱核数目却非一成不变,而是随着时间的增长而增加,因此,应考虑持续裂变链形成之前,全部有限裂变链产生的缓发中子先驱核在系统中的行为。1997年, Spriggs 等^[3]对 Godiva II 系统的中子源强度进行了分析,认为包含缓发中子贡献的总有效源强约为 $1\ 000\ \text{s}^{-1}$,在反应性阶跃加入近似下,该结果可解释引发时刻的平均值,但仍认为系统内的中子源强度恒定,因此无法解释引发时刻概率分布形状。

可见,缓发中子的产生和发展规律对于脉冲引发时刻的概率分布研究具有重要意义。系统达到超瞬发临界之前,缓发中子发射率可通过定态输运方程求解,但所关心的处于超瞬发临界状态系统内的缓发中子发射率规律并不清楚。

蒙特卡罗直接模拟方法是解决这类随机中子输运问题的有效研究途径之一,本工作采用直接模拟方法,从有限裂变链长度的概率分布出发,研究缓发中子发射率的规律,进而基于所获得的缓发中子发射率规律对超瞬发临界 $5\ \text{¢}$ 的 Godiva I 系统内持续裂变链的引发时刻概率分布进行讨论。直接模拟程序的开发基于 Geant4 模拟平台^[4],由于所研究问题的随机涨落性质,模拟时将尽量避免使用物理量的平均值(如每次裂变产生瞬发中子数目),以保持裂变链的统计涨落。对模拟程序和计算方法的具体描述参见文献^[5]。

1 模拟结果

Godiva I 快中子脉冲堆由无反射层的球形高富集铀金属(含 93.71% ^{235}U 、5.27% ^{238}U 和 1.02% ^{234}U ,密度为 $18.74\ \text{g/cm}^3$)构成^[6],其建立目的是为了研究临界装置在缓发临界以上 $95\sim 110\ \text{¢}$ 反应性之间的瞬间特性,验证热膨胀自熄灭裂变脉冲的机理。采用动态模拟方法^[7]计算得到超瞬发临界 $5\ \text{¢}$ 的 Godiva I 系统

的半径 r 约为 $(8.771\ 5\pm 0.000\ 5)\ \text{cm}$ 。

1.1 有限裂变链长度概率分布

图 1 示出统计的脉冲(持续裂变链)引发之前全部有限裂变链中子发射数长度的概率分布^[8]。可看出,概率分布为明显的指数规律,链长较长的裂变链的产生概率很低,大多源中子未增殖,中子发射数长度仅为 1(被吸收或多次散射后泄漏出系统)。

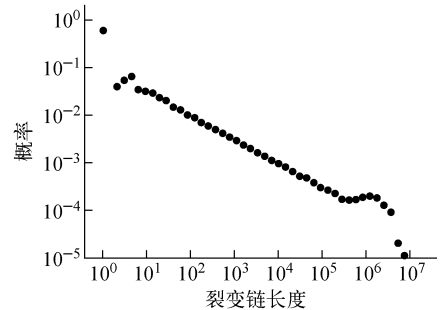


图 1 有限裂变链中子发射数长度概率分布
Fig. 1 Probability of fission chain length for finite fission chains

1.2 缓发中子发射率规律

在稍超瞬发临界系统内,1个源中子引起的有限裂变链发生的裂变数或释放的裂变中子数具有一定的概率分布,如果系统内源中子数目非常多,使得能够产生那些概率极低却有着极大裂变链长度的有限裂变链,那么,源中子引起的有限裂变链释放的裂变中子数具有一平均值 \bar{n}_p ,同时产生 $\beta\bar{n}_p$ 个缓发中子先驱核(β 为缓发中子有效份额)。这样,在持续裂变链形成之前,每个源中子(包括系统中自发裂变中子和缓发中子先驱核衰变放出的中子)的消失均会引起 1 条持续时间很短的有限裂变链而平均产生 $\beta\bar{n}_p$ 个缓发中子先驱核,因此,系统中缓发中子先驱核数目将急剧增长。

对于含弱中子源的稍超瞬发临界系统,其裂变链的初期发展过程具有显著的随机涨落,从有限裂变链中子发射数概率分布(图 1)来看,产生的缓发中子先驱核数目越多,该裂变链的产生概率就越小,大多源中子未增殖即被吸收或泄漏出系统。因此,含弱中子源的稍超瞬发临界系统内的缓发中子先驱核数目及缓发中子发射率的生长并不像强源情况那样急剧且有

规律,而是具有显著的随机涨落,难以用确定的增长规律来描述。不同缓发中子发射率的增长过程对应着不同的脉冲(持续裂变链)引发时刻概率分布。如果缓发中子发射率增长较慢,较晚引发脉冲(持续裂变链)的概率较大,反之如果缓发中子发射率增长较快,较早引发脉冲(持续裂变链)的概率则较大。即实验测得和蒙特卡罗模拟计算的脉冲(持续裂变链)引发时刻概率分布是与不同缓发中子发射率增长过程相对应的不同引发时刻概率分布的总和。如果模拟的次數足够多,统计到的缓发中子发射率分布具有一定的规律,即可用归一的缓发中子发射率分布对应的引发时刻概率分布来近似替代上述与不同缓发中子发射率增长过程相对应的不同引发时刻概率分布的总和。

模拟时,对脉冲产生前全部有限裂变链产生的缓发中子先驱核衰变放出缓发中子的发射率 $R_{DN}(t)$ 进行了统计(即只要产生了脉冲,就不再对引发时刻之后的源中子进行跟踪模拟)。就单次脉冲而言, $R_{DN}(t)$ 从零时刻之后就开始增长直至脉冲引发。当然,由于缓发中子发射率显著的随机涨落,如果在持续裂变链建立之前产生了一些中子发射数长度较长的有限裂变链, $R_{DN}(t)$ 随时间的变化就不再是单调上升。

图 2 示出统计多次脉冲再归一得到的缓发中子发射率的累积分布 $\tilde{R}_{DN}(t)$ 。不难看出,该分布和第 i 次脉冲的缓发中子发射率分布 $R_{DN,i}(t)$ 及引发时刻概率分布 $P(t)$ 有如下关系:

$$\tilde{R}_{DN}(t) = \int_t^{13} P(t) dt \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{DN,i}(t) \quad (1)$$

式中: n 为进行脉冲实验的次數。

因此,如果再知道引发时刻概率分布 $P(t)$, 即可得到 n 次脉冲实验归一的 $R_{DN}(t)$ 分布:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{DN,i}(t) = \frac{\tilde{R}_{DN}(t)}{\int_t^{13} P(t) dt}$$

由此解出的归一分布示于图 3。可见,开始阶段归一的 $R_{DN}(t)$ 增长较快,随着时间的变化增长率逐渐变小,至时间较大处(10 s 之后)增长又开始变快,最终满足指数规律。

若认为缓发中子先驱核的增长服从分布 $P_1 e^{P_2 t} + P_3$ (开始时缓发中子先驱核的数目类似“瞬跳”迅速增加,之后的缓发中子先驱核数

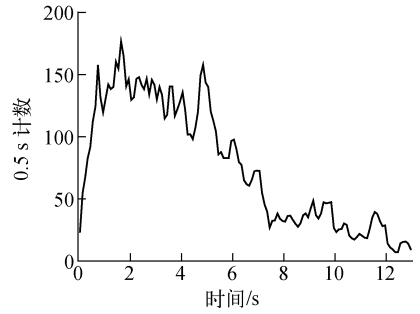


图 2 归一的 $\tilde{R}_{DN}(t)$ 分布

Fig. 2 Distribution of normalized $\tilde{R}_{DN}(t)$

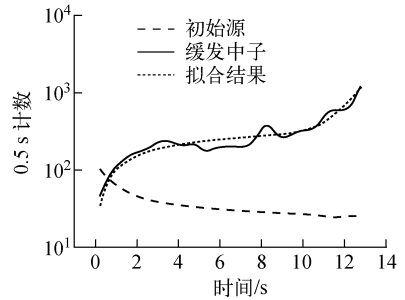


图 3 归一缓发中子发射率分布

Fig. 3 Normalized distributions of source emission rate

目的增长满足指数规律,其中指数项的贡献应较小),那么归一的 $R_{DN}(t)$ 为:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{DN,i}(t) = (P_1 e^{P_2 t} + P_3) \cdot \int_0^t \sum_{j=1}^6 \lambda_j C_j e^{-\lambda_j(t-t')} dt' \quad (2)$$

式中: λ_j 和 C_j 分别为第 j 组缓发中子先驱核的衰变常量和数目。

从图 3 可看出,该分布可较好描述归一的 $R_{DN}(t)$, 10 s 之后,归一的 $R_{DN}(t)$ 增长变快归因于份额较小的指数项的贡献越来越显著。

根据式(2)描述的 $R_{DN}(t)$ 分布,总的源中子发射率分布 $S(t)$ 为:

$$S(t) = S_{SF} + S_{PreDN} \sum_{j=1}^6 \lambda_j C_j e^{-\lambda_j t} + \frac{\tilde{R}_{DN}(t)}{\int_t^{13} P(t) dt} = S_{SF} + S_{PreDN} \sum_{j=1}^6 \lambda_j C_j e^{-\lambda_j t} + (P_1 e^{P_2 t} + P_3) \int_0^t \sum_{j=1}^6 \lambda_j C_j e^{-\lambda_j(t-t')} dt' \quad (3)$$

其中: S_{SF} 为自发裂变核放出自发裂变中子的发射率; S_{PreDN} 为初始缓发中子先驱核的数目。因

此,第2项为初始6组缓发中子先驱核衰变放出缓发中子的发射率。

1.3 引发时刻概率分布

将式(3)描述的总源强分布 $S(t)$ 带入阶跃近似的引发时刻 t 的概率分布模型^[1]:

$$P(t)dt = \bar{w}S(t)\exp\left(-\int_0^t \bar{w}S(t'')dt''\right)dt \quad (4)$$

得到阶跃近似下源强随时间变化的引发时刻概率分布:

$$\begin{aligned} P(t)dt = & \frac{1}{N_{\text{norm}}}\bar{w}\left[S_{\text{SF}} + S_{\text{PreDN}}\sum_{j=1}^6\lambda_j C_j e^{-\lambda_j t} + \right. \\ & \left. \frac{\tilde{R}_{\text{DN}}(t)}{\int_t^{13} P(t)dt}\right]e^{-\int_0^t \bar{w}\left[S_{\text{SF}} + S_{\text{PreDN}}\sum_{j=1}^6\lambda_j C_j e^{-\lambda_j t'} + \frac{\tilde{R}_{\text{DN}}(t')}{\int_t^{13} P(t)dt'}\right]dt} dt = \\ & \frac{1}{N_{\text{norm}}}\bar{w}\left(S_{\text{SF}} + S_{\text{PreDN}}\sum_{j=1}^6\lambda_j C_j e^{-\lambda_j t} + \right. \\ & \left. (P_1 e^{P_2 t} + P_3)\int_0^t \sum_{j=1}^6\lambda_j C_j e^{-\lambda_j(t-t')} dt'\right) \cdot \\ & \exp\left\{-\int_0^t \bar{w}\left[S_{\text{SF}} + S_{\text{PreDN}}\sum_{j=1}^6\lambda_j C_j e^{-\lambda_j t'} + \right. \right. \\ & \left. \left. (P_1 e^{P_2 t'} + P_3)\int_0^{t'} \sum_{j=1}^6\lambda_j C_j e^{-\lambda_j(t'-t'')} dt''\right]dt'\right\} dt \quad (5) \end{aligned}$$

其中: \bar{w} 为平均1个中子引发持续裂变链的概率,可由 Hansen 物理模型直接求得^[1]; N_{norm} 为归一化因子。

式(5)即为最后用来拟合源强随时间变化情况下引发时刻概率分布的模型,如果实验次数足够多,那么可从拟合来准确解出源中子发射率分布,对于实验次数较少的情况,最好在拟合时将已知的自发裂变中子的发射率 P_1 和初始缓发中子先驱核数目 P_2 固定。

采用式(5)对 Godiva I 系统脉冲引发时刻概率分布的实验结果和蒙特卡罗模拟计算结果进行了拟合,结果示于图4。可见,该引发时刻概率分布模型能够较好描述实验和模拟结果。从图4还可看出,蒙特卡罗模拟的引发时刻概率分布接近实验结果。

2 结论

本工作采用直接模拟方法对弱源点火条件下,超瞬发临界5 β 的 Godiva I快中子脉冲堆脉冲引发时刻概率分布和缓发中子发射率规律进行了计算,脉冲引发时刻概率分布的模拟计算结果与实验结果符合较好,基于获得的缓发中子的发射率分布,推导了可合理解释实验结果的源强

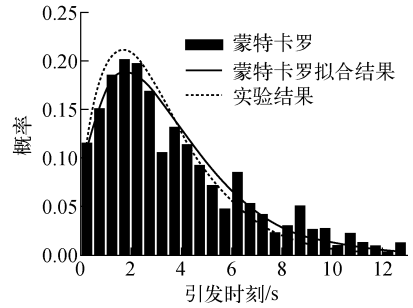


图4 脉冲引发时刻概率分布的实验和蒙特卡罗模拟结果

Fig. 4 Probability of initiation time from experiment and Monte-Carlo

随时间变化的引发时刻概率分布模型。

参考文献:

- [1] HANSEN G E. Assembly of fissionable material in the presence of weak neutron source[J]. Nucl Sci Eng, 1960, 8: 709-719.
- [2] WIMETT T F, WHITE R H, STRATTON W R, et al. Godiva II—An unmoderated pulse-irradiation reactor[J]. Nucl Sci Eng, 1960, 8: 691-708.
- [3] SPRIGGS G D, BUSCH R D, SAKURAI T, et al. The equivalent fundamental-mode source, LA-13253[R]. USA: LANL, 1997.
- [4] Geant4 Collaboration. Geant4 user's guide[EB/OL]. (2007). <http://geant4.web.cern.ch/geant4>.
- [5] 谢奇林,刘汉刚,杨成德,等. 持续裂变链引发概率的直接模拟研究[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(6): 641-646.
XIE Qilin, LIU Hangang, YANG Chengde, et al. Study of initiation probability of persistent fission chain with analog Monte-Carlo method [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(6): 641-646(in Chinese).
- [6] PETERSON R E. Lady Godiva: An unreflected uranium-235 critical assembly, LA-1614 [R]. USA: LANL, 1953.
- [7] CULLEN D E, CLOUSE C J, PROCASSINI R J, et al. Static and dynamic criticality: Are they different? UCRL-TR-201506 [R]. USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 2003.
- [8] NOLEN S D. The chain-length distribution in subcritical systems, LA-13721-T [R]. USA: LANL, 2000.