

裂变缓发 γ 射线能谱的蒙特卡罗模拟

曲德成¹, 杨国山¹, 常永福²

(1. 北京放射医学研究所, 北京 100850; 2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要:采用递次衰变路径搜索和遍历的递归算法编制一程序, 该程序可用于计算裂变核素在中子辐照时和辐照后任意1种或1组裂变产物在任意时刻的放射性活度、 γ 能谱及其随时间的变化。计算了²³⁹Pu在池式堆快中子照射下的裂变缓发 γ 能谱。用MCNP软件模拟了高纯锗探头对裂变缓发 γ 射线的能谱响应。模拟结果可用于指导核材料裂变产额测量等研究工作。

关键词:裂变缓发 γ 射线; 蒙特卡罗模拟; 高纯锗探测器

中图分类号: O571 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931(2008)04-0305-03

Monte-Carlo Simulation of Energy Spectrum of Delayed Fission γ -ray

QU De-cheng¹, YANG Guo-shan¹, CHANG Yong-fu²

(1. Beijing Institute of Radiation Medicine, Beijing 100850, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: A computer code using recursive algorithm searching the paths of the decay chains was written to calculate the activity and the energy spectra at any time of one or one group of fissile products from a sample of fissile nuclides irradiated by neutrons. The fission delayed gamma spectra of ²³⁹Pu irradiated by pool reactor neutrons were calculated. The MCNP code was used to simulate the energy responses of HPGe detector to fission delayed gamma rays. The results of the simulation and calculation can be used as a guide to the measurements of fissile yields of nuclear materials and other relative research works.

Key words: delayed fission gamma rays; Monte-Carlo simulation; HPGe detector

在放射性工作实践中, 对裂变产物的分析极其重要, 有时需对裂变样品进行 γ 无损分析。衰变方式多样, 裂变产物近千种, 半衰期不同, 因而, 裂变产物的缓发 γ 能谱及其随时间的变化很复杂。对裂变缓发 γ 能谱的探测器响应应进行蒙特卡罗模拟计算将有助于解决复杂 γ 放射性无损分析问题。

1 裂变缓发 γ 能谱计算

计算裂变缓发 γ 能谱须考虑每种裂变产物。若有一已知组成、质量的可裂变材料样品, 经反应堆以脉冲或稳态方式进行中子辐照, 欲计算零时(辐照停止时刻)后的某时刻或某时段样品的 γ 射线能量分布及其随时间的变化, 首先要计算辐照终止时各裂变产物核素的放射性

活度或原子数。对于脉冲辐照情形,裂变产物的零时原子数由裂变数和裂变产额决定。对于连续辐照,零时核素量的计算则要考虑辐照过程中的衰变。当零时核素量确定后,零后某时刻各裂变产物核素的量及其随时间的变化可根据递次衰变规律确定。

1.1 零时值计算

对于脉冲辐照情况,若裂变总数为 N_f ,则第 i 种裂变产物零时原子数 N_i 由下式计算:

$$N_i = N_f Y_i \quad (1)$$

式中: Y_i 为第 i 种裂变产物的裂变产额。

裂变产额由裂变材料种类及中子能量分布决定。不同裂变材料,如 ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu 等,及不同中子能量分布,如热中子、裂变中子、高能中子等,所对应的裂变产额不尽相同。本工作所用裂变产额数据来自于文献[1]。

对于连续辐照情况,若裂变速率(单位时间总裂变数)为 P_f ,则第 i 种裂变产物核素的产生速率 P_i 由下式计算:

$$P_i = P_f Y_i \quad (2)$$

用下式对裂变产物零时量进行计算:

$$A_{n1} = D \prod_{k=1}^{n-1} B_k (1 - e^{-\lambda_n t} + \sum_{i=1}^{n-1} ((e^{-\lambda_n t} - e^{-\lambda_i t}) / \prod_{i,j=1, j \neq i}^n (1 - \lambda_i / \lambda_j))) \quad (3)$$

式中: D 为母核活化率; λ_i 、 λ_j 为各核衰变常量; B_k 为所计算路径衰变方式分支比; A_{n1} 为第 1 路径 t 时刻第 n 个子体活度。

对所有路径求和可得任意衰变子体的活度。

1.2 衰变链计算

对于任意核素的任意 1 条衰变路径,衰变子体活度计算公式为:

$$A_{n1} = (A_{1,t=0} / \lambda_1) \prod_{k=1}^{n-1} B_k \cdot \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i e^{-\lambda_i t} / \prod_{i,j=1, j \neq i}^n (1 - \lambda_i / \lambda_j) \right) \quad (4)$$

式中: $A_{1,t=0}$ 为母核零时活度。

对所有路径求和可得到任意子核的活度^[2]。

1.3 裂变缓发 γ 能谱计算

若算得零时后 t 时刻各裂变产物核素及其子体的放射性活度,对所有核素按能量分布求和,则可得到该时刻裂变产物的 γ 能谱。某时段累积能谱可通过计算积分值得。

1.4 其它值的计算

裂变产物总放射性活度由式(5)计算:

$$A = \sum_{i=1}^n A_i \quad (5)$$

式中: A_i 为第 i 种核素活度; n 为核素种类数。

γ 射线发射率(单位时间发射光子数)为:

$$\epsilon = \sum_{i=1}^n A_i \sum_{j=1}^m p_j \quad (6)$$

式中: m 、 p_j 分别为第 i 种核素的 γ 射线数和第 j 条 γ 射线的强度。

平均 γ 射线能量为:

$$\bar{E} = \left(\sum_{i=1}^n A_i \sum_{j=1}^m p_j E_j \right) / \left(\sum_{i=1}^n A_i \sum_{j=1}^m p_j \right) \quad (7)$$

式中: E_j 为第 i 种核素第 j 条 γ 射线的能量。

1.5 计算程序

裂变产额数据库以文本格式存储,不同裂变材料、中子能量分布的产额数据存储在不同的文件中。核素数据库采用 Access 类型,包含核素的丰度、半衰期、衰变方式及其分支比、 γ 射线能量及其分支比等数据。计算结果可用于蒙特卡罗模拟计算。

1.6 裂变产物 γ 射线参数计算

计算了 ^{239}Pu 在快堆中子能谱脉冲辐照情况下的裂变缓发 γ 射线参数。图 1 所示为计算所用的裂变产额分布曲线,每个数据点代表 1 个质量链的独立产额。图 2a、b、c 所示分别为裂变产物总放射性活度、 γ 射线发射率、 γ 射线平均能量随时间的变化。

2 蒙特卡罗模拟

采用 MCNP 程序模拟高纯锗探测器对 ^{239}Pu 快堆中子辐照裂变产物 γ 射线能谱的

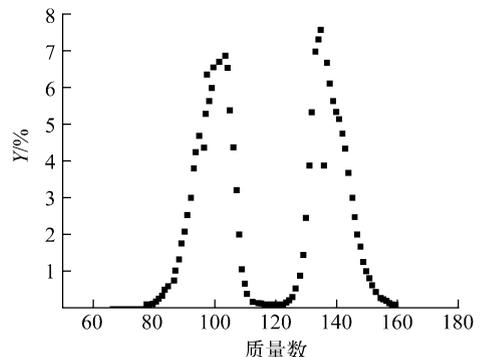


图 1 裂变产额分布曲线

Fig. 1 Distribution of fission yield

响应。探测器为同轴型高纯锗,相对探测效率60%,裂变源近似为点源,距探测器前表面25 cm。源能量分布用式(1)~(4)计算,以MCNP定义格式输出,加入几何、材料和输出等数据卡,形成符合MCNP要求的输入文件。峰半高宽等参数由实验数据拟合获得。

模拟计算了 ^{239}Pu 在快堆中子束中辐照时间为5 min,冷却时间分别为15、1 435、14 395 min,测量2 h情况下的裂变缓发 γ 射线能谱,结果示于图3。图4所示为脉冲辐照方式、冷却时间为20 min、测量2 h的模拟结果。

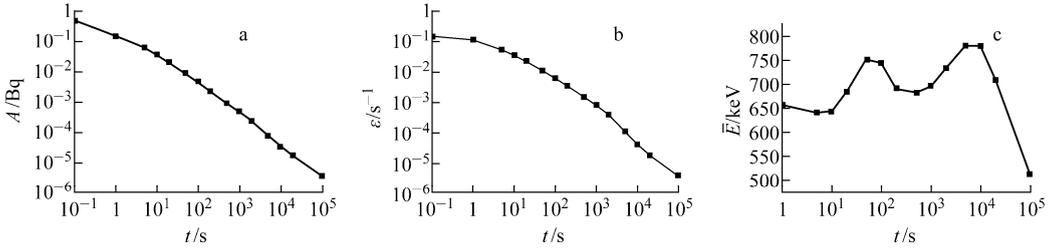


图2 裂变产物总放射性活度(a)、 γ 射线发射率(b)及 γ 射线平均能量(c)随时间的变化曲线

Fig. 2 Total fission activity (a), γ -ray emission rate (b) and average γ -ray energy (c) vs. time

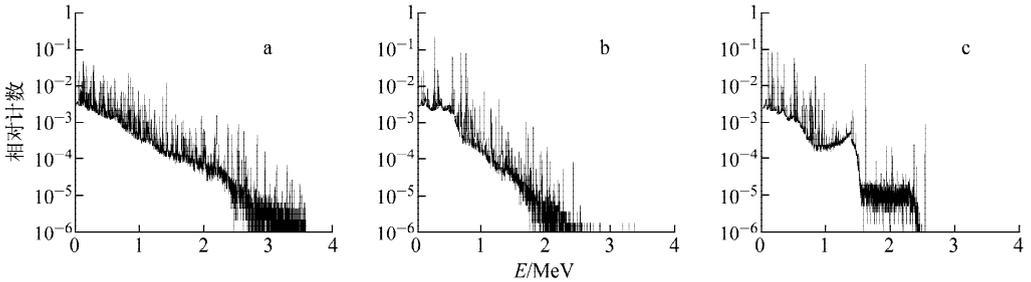


图3 不同冷却时间下的裂变缓发 γ 谱

Fig. 3 Fission γ -spectra at different cooling time

冷却时间: a—15 min; b—1 435 min; c—14 395 min

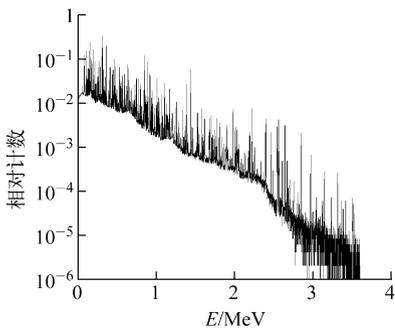


图4 脉冲辐照方式裂变缓发 γ 谱

Fig. 4 Fission γ -spectrum at pulse radiation

3 结果与讨论

由于源能谱的描述中依次给出了各裂变产物核素的活度、 γ 射线能量和强度,因此,既可计算所有裂变产物总的能谱,又可选择性地计算感兴趣核素的能谱并将其与总能谱作比较,

有利于进行裂变 γ 射线能谱的研究和分析。

裂变产物放射性计算的准确性取决于核参数的可靠程度。尽管有些放射性核素,特别是短寿命核素,其核参数的误差相当大,但在现有核数据的基础上计算所得的裂变产物放射性数据还是有重要的应用价值。随着核参数测量的精细化,计算结果的可靠性将会进一步提高。

参考文献:

[1] ENGLAND T R, RIDER B F. Evaluation and compilation of fission product yields, LA-UR-94-3106 (ENDF-349)[R]. USA: LANL, 1994.
 [2] 曲德成, 常永福. 多分支递次衰变递归算法[J]. 原子能科学技术, 2004, 38(1): 1-4.
 QU Decheng, CHANG Yongfu. A recursive algorithm of multi-branches decay chains[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2004, 38(1): 1-4(in Chinese).