

核部件缓发 γ 能谱时间演化行为模拟

郭春莹, 陶灵姣, 刘志勇, 李虹轶, 罗昆升

(中国人民解放军 96901 部队, 北京 100094)

摘要: 在分析无外中子源照射条件下核部件中裂变产物的来源及其释放缓发 γ 射线机理基础上, 提出了应用 CINDER90 程序计算核部件中裂变产物活度的方法, 计算并分析了裂变产物的种类、活度及其随辐照时间和冷却时间的变化规律, 继而根据裂变产物 β^- 衰变释放的特征 γ 射线的能量与分支比数据, 计算得到了核部件中裂变产物缓发 γ 射线源项, 并应用蒙特卡罗方法计算了核部件释放的缓发 γ 能谱随辐照时间和冷却时间的变化, 分析了缓发 γ 能谱的时间演化行为。结果表明: 核部件缓发 γ 能谱中强度最大的 γ 射线是裂变核素 ^{140}La β^- 衰变发射的 1 596 keV 射线, 且该 γ 射线的强度在部件组装一定时间后保持稳定, 该结果与文献结果符合一致。本文提出的裂变产物缓发 γ 能谱模拟计算方法和结果可为核部件 γ 能谱的测量与分析提供参考。

关键词: 核部件; 裂变产物; 缓发 γ 能谱; 时间演化; 蒙特卡罗模拟

中图分类号: O571.43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2019)12-2327-09

doi: 10. 7538/yzk. 2018. youxian. 0910

Numerical Simulation of Time Evolution Behavior of Delayed γ -ray Spectrum from Nuclear Component

GUO Chunying, TAO Lingjiao, LIU Zhiyong, LI Hongyi, LUO Kunsheng

(Unit 96901 of Chinese People's Liberation Army, Beijing 100094, China)

Abstract: Based on analysis of the production mechanism of fission products in the nuclear component without exterior neutron radiation and the delayed γ -rays released from the products, a simulation method for calculating the fission product activities and their variations with time was proposed using CINDER90 program. According to energy and branch ratios of the delayed γ -rays released from β^- decay of the fission products, the intensities of the different γ -rays were calculated. Then, the variations of the delayed γ -ray spectra of the nuclear component with radiation time and cooling time were calculated by Monte Carlo method, and the time evolution behaviors of the delayed γ -ray spectra were analyzed. The results show that the maximum intensity ray in the delayed γ spectra from nuclear component is released from ^{140}La β^- decay, the γ -ray energy is 1 596 keV, and its intensity remains stable after the component is assembled for a

收稿日期: 2018-12-28; 修回日期: 2019-04-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51425040102)

作者简介: 郭春莹(1969—), 男, 山东沂水人, 副研究员, 硕士, 从事核物理研究

网络出版时间: 2019-08-09; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20190809.1407.002.html>

certain time. These results agree well with the ones in the literature. The simulation method and the calculation results presented in this paper can be used as a reference for the spectrum measurement and analysis of nuclear components.

Key words: nuclear component; fission product; delayed γ -ray spectrum; time evolution behavior; Monte Carlo simulation

在核部件的被动法探测中,通常利用衰变 γ 射线的测量分析实现部件识别^[1-6],但核部件释放的 γ 射线十分复杂,除衰变产生的 γ 射线外,还有其他来源的 γ 射线,如核部件中放射性核素裂变(自发裂变与诱发裂变)释放的瞬发 γ 射线以及裂变产物衰变产生的缓发 γ 射线、核素自发裂变中子与部件材料非弹性散射反应产生的散射 γ 射线,以及自发裂变中子俘获反应产生的俘获瞬发 γ 射线等^[7]。针对核部件 γ 射线的探测分析,应涵盖所有这些 γ 射线,数值计算分析这些 γ 射线的能量、强度等,对测量准备以及测量结果分析都具有重要意义。文献[8]给出了中子辐照时和辐照后任意1种或1组裂变产物缓发 γ 能谱模拟方法,文献[9]给出了外中子源照射铀材料时缓发 γ 能谱的数值计算方法,以上方法仅能计算部分裂变产物释放的缓发 γ 射线谱,针对核部件中存在自发裂变与诱发裂变情况下核素缓发 γ 能谱的计算,还需要研究新的计算方法。

本文以模拟核部件为对象,考虑到部件中核素的自发裂变及其裂变瞬发中子引起的其他核素诱发裂变反应,应用CINDER90^[10]程序计算裂变产物活度,得到裂变缓发 γ 射线源项数据,最后应用蒙特卡罗方法计算并分析核部件释放缓发 γ 能谱的时间演化行为。

1 核部件释放缓发 γ 射线的物理原理

由于核部件中核素不断发生自发裂变与诱发裂变反应,生成诸多裂变产物核,同时这些核素又不断发生衰变以及其他反应,从而转化为其他核素,由此可知核部件中裂变产物的类型与数量时刻都在发生变化;同时,不同裂变产物在衰变过程中又释放多种不同能量、不同强度的 γ 射线,因而裂变产物释放的缓发 γ 能谱十分复杂,且是随时间变化的。

2 核部件自发裂变强度分析

2.1 核部件结构材料组成

文献[11]给出了某模拟核部件结构,如图1所示,最内部为一空腔,其余部分由里向外依次为武器级钚、铍、武器级铀、炸药、铝。其中武器级钚内半径4.25 cm、外半径5 cm;铍外半径7 cm;武器级铀外半径10 cm;炸药外半径20 cm;铝外半径21 cm。模拟核部件材料组成列于表1^[11]。

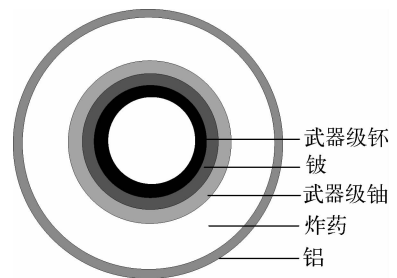


图1 模拟核部件结构及材料示意图
Fig. 1 Structure and material composition of simulated nuclear component

表1 武器级铀和武器级钚材料组成

Table 1 Material composition of WgU and WgPu			
武器级铀	质量分数/%	武器级钚	质量分数/%
^{234}U	1.0	^{238}Pu	0.005
^{235}U	93.3	^{239}Pu	93.3
^{238}U	5.5	^{240}Pu	6.0
其他	0.2	^{241}Pu	0.44
		^{242}Pu	0.015
		其他	0.2

2.2 核部件中核素自发裂变强度

根据表1,核部件中含有武器级铀、武器级钚2种核材料,每种核材料含有多种裂变同位素,这些同位素的自发裂变半衰期与每次自发裂变释放的平均瞬发中子数列于表2。

表 2 核素自发裂变半衰期
与每次裂变释放的瞬发中子数

Table 2 Half-life of spontaneous fission
of nuclide and number of prompt neutron per fission

核素	半衰期/a	中子数
^{234}U	2.04×10^{16}	2
^{235}U	3.50×10^{17}	1.86
^{238}U	8.20×10^{15}	2.01
^{238}Pu	4.77×10^{10}	2.22
^{239}Pu	5.48×10^{15}	2.16
^{240}Pu	1.31×10^{11}	2.16
^{241}Pu	1.5×10^{15}	2.25
^{242}Pu	6.84×10^{10}	2.15

根据表 1、2 可计算出每 kg 武器级铀自发裂变释放的瞬发中子强度为 1.6 s^{-1} , 每 kg 武器级钚自发裂变释放的瞬发中子强度为 $5.6 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$, 因而核部件中武器级钚材料释放的自发裂变中子的强度为 $1.783 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$, 武器级铀材料释放的自发裂变中子的强度为 48 s^{-1} 。

3 核部件中裂变产物活度计算方法

本文将核部件中武器级钚、武器级铀中核素自发裂变产生的中子作为外激励中子源, 运用蒙特卡罗方法计算裂变瞬发中子在核材料中的通量分布, 进而应用 CINDER90^[10] 计算 2 种材料区中裂变产物的类型、活度及其随时间的变化。

3.1 中子通量的蒙特卡罗计算

应用 MCNP^[12] 程序计算自发裂变中子在武器级钚区、武器级铀区产生的通量。考虑到自发裂变中子来源的不同, 分别计算武器级铀区、武器级钚区的自发裂变中子对 2 种核材料区的通量贡献, 然后将二者相加, 得到所有外激励中子源产生的总中子通量, 该中子通量作为 CINDER90 计算的输入。按照 CINDER90 的要求, 将中子能量分 63 群, 初始中子能谱按照裂变谱分布抽样, 采用 F4 计数卡记录体通量。

3.2 裂变产物活度的 CINDER90 计算

CINDER90 是专门计算嬗变/活化的程序, 能模拟裂变反应、 (n, γ) 反应、 $(n, 2n)$ 反应、核素衰变等核素嬗变途径, 可计算不同应用场景中核素的存量及随时间的变化。该程序的输入文件包括靶区的材料构成文件、靶区的中子

通量文件、数据库文件(包括裂变产物产额数据、核素衰变数据、核素的核反应数据), 还包括根据不同工作需要而输入的辐照源强度、辐照时间、冷却时间等参数。

3.3 计算参数

以核材料刚制备好的初始时刻为起点, 中子持续辐照时间为 50 a, 中间时间节点为 1、5、10、30、100、200、300 d, 1、2、3、5、10、20、30、40、50 a, 核部件分离(即移除中子源)后的冷却时间分别为 1 s, 1、5、10、20、30、60、100、200、300 d, 2、5 a。计算中, 武器级钚、武器级铀自发裂变中子的强度取值不变。

3.4 计算结果与分析

1) 武器级钚的裂变产物

经 CINDER90 计算, 得到不同时间点的核素种类有 1 358 个, 其中裂变产物核有 1 183 个, 这些核素活度的量级相差较大, 最小的为 $3.7 \times 10^{-32} \text{ Bq}$ (10^{-42} Ci), 最大的为 3.7 kBq (10^{-7} Ci), 从核部件缓发 γ 辐射场计算角度考虑, 不必全部计算这些核素释放的 γ 射线强度。如果只考虑最大的 3.7 kBq 量级核素, 则裂变核有 83 个。按照核素活度是否随辐照时间发生变化的情况共分 3 组, 利用 PLOTTAB^[13] 绘图程序分别绘制活度-辐照时间、活度-冷却时间曲线, 结果示于图 2~4。

图 2a 中第 1 组核素活度随时间增大, 但在 10~300 d 后, 大部分核素的活度基本保持不变, 这是因为这些核素的半衰期大多在几秒、百秒、千秒量级, 在稳定中子源的照射下, 裂变核的生成与衰变很快达到平衡。该图中出现了 ^{137}Cs 、 $^{137}\text{Ba}^*$ 2 个例外情况, 其活度随辐照时间变大, 分析原因在于 ^{137}Cs 的半衰期为 30 a, 因而放射性活度随辐照时间持续增大, 而 $^{137}\text{Ba}^*$ 是 ^{137}Cs 的 β^- 衰变产生的同核异能态, 其半衰期为 2.55 min, 因此二者的活度几乎相同且随时间连续增大。

分析图 2b、3b、4b 可知, 移除武器级铀自发裂变中子源后, 与存在所有外中子源辐照相比, 各裂变核的活度随冷却时间基本保持不变, 分析原因在于: 相对于武器级钚的自发裂变, 武器级铀的自发裂变强度非常小, 这些裂变产物核基本来自于武器级钚的自发裂变及裂变中子引起的诱发裂变反应。

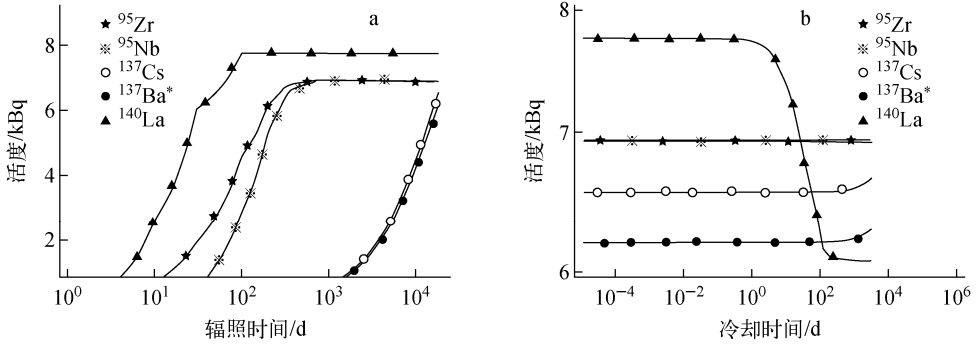


图2 武器级钚第1组核素活度随辐照时间和冷却时间的变化

Fig. 2 Change of nuclide activity of group I with radiation time and cooling time for WgPu material

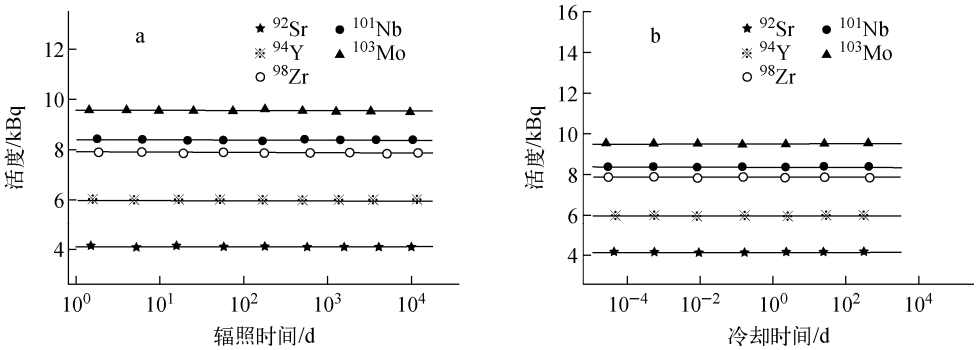


图3 武器级钚第2组核素活度随辐照时间和冷却时间的变化

Fig. 3 Change of nuclide activity of group II with radiation time and cooling time for WgPu material

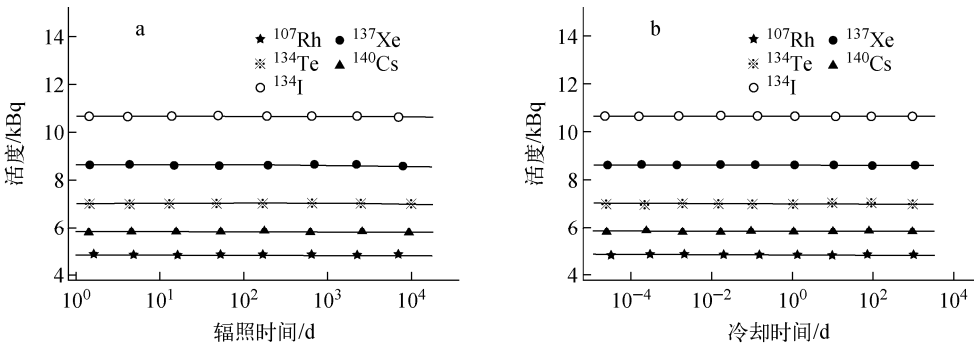


图4 武器级钚第3组核素活度随辐照时间和冷却时间的变化

Fig. 4 Change of nuclide activity of group III with radiation time and cooling time for WgPu material

2) 武器级钚的裂变产物

经 CINDER90 计算,得到不同时间点的核素种类有 1 311 个,其中裂变产物核有 1 163 个,这些核素的活度相差较大,范围为 $3.7 \times 10^{-30} \sim 3.7 \times 10^2$ Bq ($10^{-40} \sim 10^{-8}$ Ci),活度大于 3.7 kBq (10^{-7} Ci)的核只有 ^{134}I ,从计算核部件缓发 γ 辐射场的角度考虑,本文仅分析活度在 370 Bq (10^{-8} Ci)量级的 162 个核素。按照

核素质量大小及活度随辐照时间变化的情况分为 3 组(仅选取 60 种核素),结果示于图 5~7。

由图 5a 可知,第 1 组大部分核素的活度随辐照时间增大,到 300 d 后基本保持不变。2 个例外核素是 ^{90}Sr 、 ^{90}Y ,二者的活度几乎相同,且随辐照时间持续增大,分析原因在于它们的半衰期分别为 28.79 a 和 64.1 h,均远大于其他核

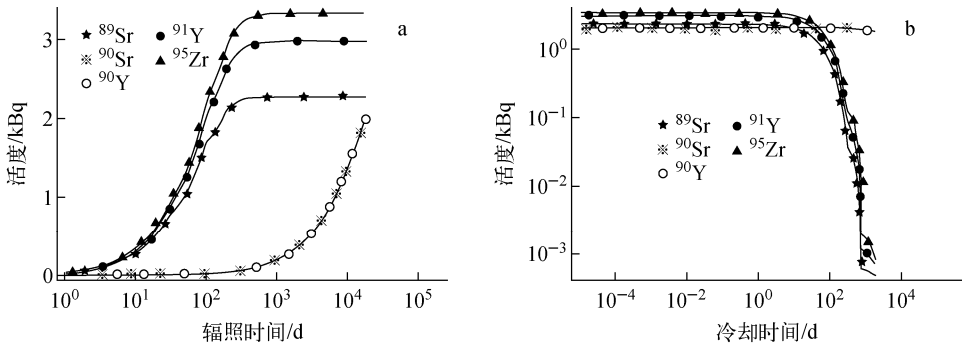


图 5 武器级铀第 1 组核素活度随辐照时间和冷却时间的变化

Fig. 5 Change of nuclide activity of group I with radiation time and cooling time for WgU material

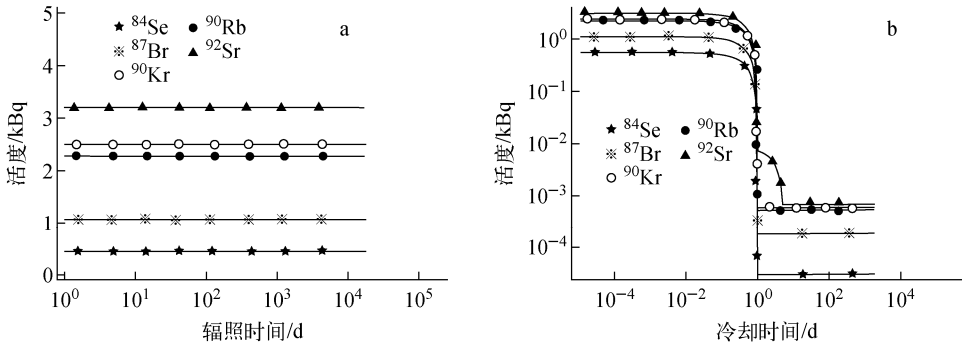


图 6 武器级铀第 2 组核素活度随辐照时间和冷却时间的变化

Fig. 6 Change of nuclide activity of group II with radiation time and cooling time for WgU material

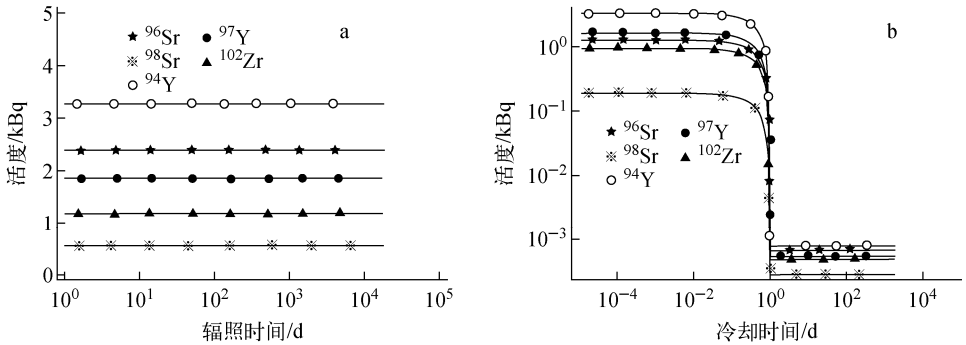


图 7 武器级铀第 3 组核素活度随辐照时间和冷却时间的变化

Fig. 7 Change of nuclide activity of group III with radiation time and cooling time for WgU material

素的秒级、十秒级、百秒级半衰期,且二者很快达到衰变平衡。而 ^{89}Sr 、 ^{91}Y 、 ^{95}Zr 的半衰期分别为 50.57、58.51、64.03 d,经过 7 个半衰期后活度几乎保持稳定。由图 5b 可知,在移除武器级钚自发裂变中子辐照源后, ^{90}Sr 、 ^{90}Y 的活度在 300 d 内几乎保持不变,之后逐渐变小; ^{89}Sr 、 ^{91}Y 、 ^{95}Zr 的活度在 200 d 内几乎保持不变,随后迅速下降。

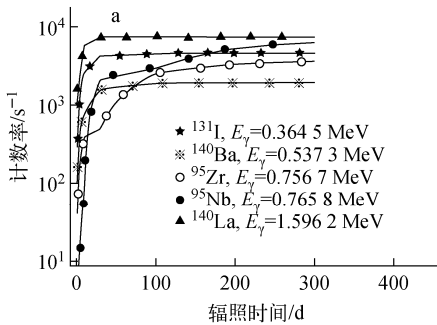
图 6a、7a 中核素的活度几乎不随中子辐照时间变化,这是因为它们的半衰期都很短。但移除自发裂变中子辐照源后,图 6b、7b 中核素活度在 1 d 的冷却时间内基本不变,之后随时间迅速下降,然后在很长时间内强度保持不变。分析原因在于:这些裂变产物绝大部分是由武器级钚自发裂变中子诱发裂变产生的,武器级铀自发裂变的贡献非常小,而半衰期长的几个

核素,其活度随冷却时间逐渐变小。

4 核部件缓发 γ 能谱随时间的演化

4.1 裂变产物缓发 γ 射线强度的计算与处理

得到裂变产物的活度后,查阅核素数据库^[14],得到其释放 γ 射线的能量及分支比数据,然后计算该裂变产物释放某条缓发 γ 射线的强度,假设第 i 个裂变产物的活度为 A_i ,其释放的第 j 条射线的分支比为 λ_j ,则该 γ 射线的强度为 $S_{ij} = A_i \lambda_j$ 。



4.2 武器级铀释放缓发 γ 射线强度随时间的变化

第1组的28个核素中有些核素不发射 γ 射线(如¹⁰⁶Ru),有些核素发射的 γ 射线强度随时间变化很小,如⁹³Y、⁹⁷Zr、⁹⁷Nb、⁹⁷Nb*、¹⁰⁵Rh、¹³³I、¹³⁵Xe等,不考虑这些核素,其余16种核素发射的特征缓发 γ 射线强度随辐照时间和冷却时间的变化示于图8,第2组、第3组核素发射的 γ 射线强度不随辐照时间和冷却时间变化。

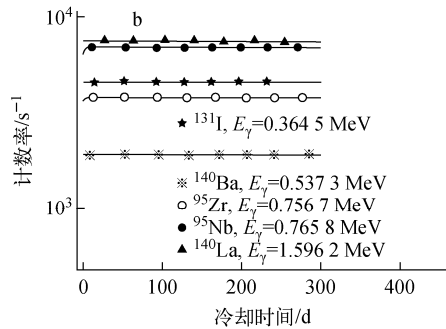


图8 武器级铀裂变核素发射特征 γ 射线强度随辐照时间和随冷却时间的变化

Fig. 8 Change of characteristic γ -ray intensity with radiation time and cooling time for WgPu fission product

针对各组核素释放 γ 射线强度的计算,选择分支比最大的特征 γ 射线^[15],其中辐照300 d时部分 γ 射线强度大于 $5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 的数据列于表3。

表3 武器级铀缓发 γ 射线强度

Table 3 Delayed γ -ray intensity in WgPu material

核素	能量/keV	强度/ s^{-1}
⁹⁷ Zr	743.4	7.2376×10^3
⁹⁵ Nb	756.7	6.9236×10^3
⁹⁷ Nb	658.0	7.7379×10^3
⁹⁷ Nb*	743.4	7.2337×10^3
¹⁰⁰ Nb	934.4	8.3846×10^3
¹⁰¹ Nb	276.1	8.5988×10^3
¹⁰³ Mo	424.0	9.7569×10^3
⁹⁹ Tc*	140.5	6.9681×10^3
¹⁰¹ Tc	306.8	7.9658×10^3
¹⁰² Tc	475.0	7.8769×10^3
¹⁰⁴ Tc	358.0	8.0020×10^3
¹⁰³ Ru	497.1	9.1986×10^3
¹³² Te	228.2	6.5674×10^3
¹³² I	667.6	7.6946×10^3
¹³³ I	529.9	8.7911×10^3
¹³⁴ I	847.0	1.0176×10^3
¹³⁸ Cs	1435.9	6.6117×10^3
¹⁴⁰ La	1596.2	7.4338×10^3

4.3 武器级铀释放缓发 γ 射线强度随时间的变化

分析上文得到的162个核素活度随时间的变化可知,半衰期很小(秒级、几十秒)的核素活度在中子辐照期间基本不变,移除中子源后其活度呈断崖式下降;而半衰期较大(大于 10^4 s)的核素,在中子辐照期间活度逐渐增大,移除中子源后其活度逐渐减小,属于这种情况的核素有17个,计算这些核素发射的特征 γ 射线强度随辐照时间和冷却时间的变化,结果示于图9。

辐照时间为300 d时,第2组核素中部分有代表性且 γ 射线强度大于 $5 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$ 的数据列于表4。

4.4 核部件表面缓发 γ 能谱随时间演化的计算

1) 钚材料裂变产物释放 γ 射线强度随时间的变化

根据4.2节得到的缓发 γ 射线数据,利用MCNP^[12]计算了不同辐照时间下核部件表面的缓发 γ 能谱,结果示于图10a,为比较不同辐照时间下 γ 计数的大小,将辐照时间为1、30、

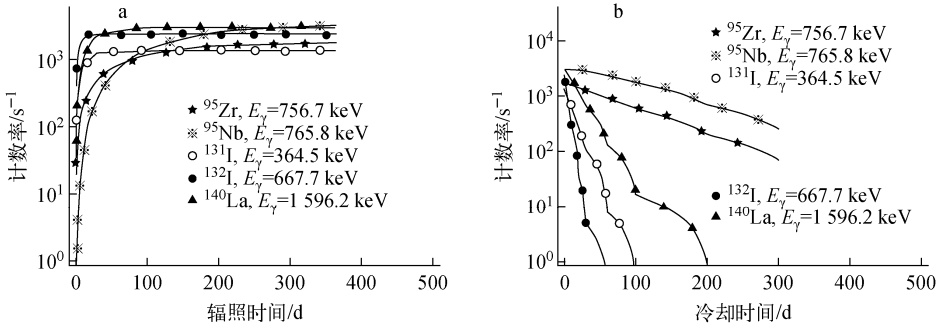


图9 武器级铀裂变核素发射特征 γ 射线强度随辐照时间和随冷却时间的变化

Fig. 9 Change of characteristic γ -ray intensity with radiation time and cooling time for WgU fission product

300 d 的 γ 计数与辐照 1 d 时的 γ 计数相除, 结果示于图 10b。

表 4 武器级铀缓发 γ 射线源强度

Table 4 Delayed γ -ray intensity in WgU material

核素	能量/keV	强度/ s^{-1}
^{84}Se	408.0	544.64
^{86}Br	1 564.9	577.79
^{88}Br	775.3	691.37
$^{85}\text{Kr}^*$	151.2	511.16
^{87}Kr	402.6	658.60
^{88}Kr	2 392.1	616.16
^{90}Kr	1 118.7	931.31
^{91}Kr	108.4	692.71
^{89}Rb	1 031.9	142.73
^{89}Rb	1 248.1	104.21
$^{90}\text{Rb}^*$	831.7	605.17
^{92}Rb	815.0	714.77
^{94}Rb	836.9	881.41
^{91}Sr	1 024.3	994.95
^{92}Sr	749.8	717.30

分析图 10a 可知, 随着辐照时间的增加, 核部件表面的缓发 γ 射线计数略有增大。由图 10b 可知, 相对于辐照时间为 1 d 的 γ 计数, 其他不同辐照时间的 γ 计数为 1 d 时的几倍到 10 倍之间。

据图 2b、3b、4b 可知, 移除外中子源后, 裂变产物核素的活度基本不随时间变化, 因此不同冷却时间下, 核部件表面的缓发 γ 能谱与辐照 300 d 时的能谱相同。

2) 铀材料裂变产物释放 γ 能谱随时间的变化

根据 4.3 节得到的缓发 γ 射线数据, 计算了不同辐照和冷却时间下核部件表面由铀材料裂变产物释放的缓发 γ 能谱, 结果示于图 11a、12a, 计数比示于图 11b、12b。

由图 11a 可见, 核部件表面缓发 γ 射线强度随辐照时间的增加而增大, 由图 11b 知, 变化最明显的是 ^{140}La 发射的 1 596 keV γ 射线, 辐照 300 d 时的强度约为辐照 1 d 时的 20 倍。

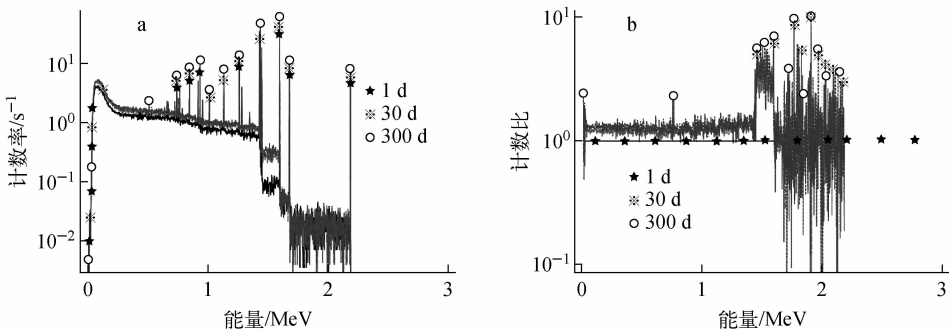


图 10 钚裂变产物释放缓发 γ 能谱随辐照时间的变化(a)和不同辐照时间能谱强度相对于辐照时间为 1 d 时的比(b)

Fig. 10 Change of delayed γ spectrum with radiation time (a) and ratio of spectral intensity of different radiation time to that of radiation time of 1 d for WgPu fission product

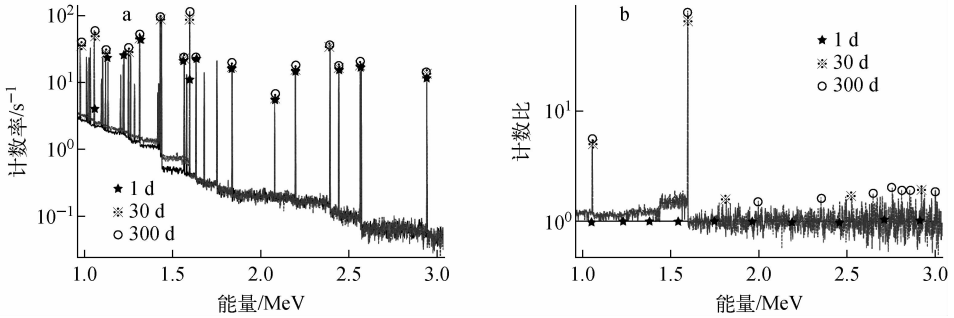


图 11 铀裂变产物释放缓发 γ 能谱随辐照时间的变化(a)和不同辐照时间能谱强度相对于辐照时间为 1 d 时的比(b)
Fig. 11 Change of delayed γ spectrum with radiation time (a) and ratio of spectral intensity of different radiation time to that of radiation time of 1 d for WgU fission product

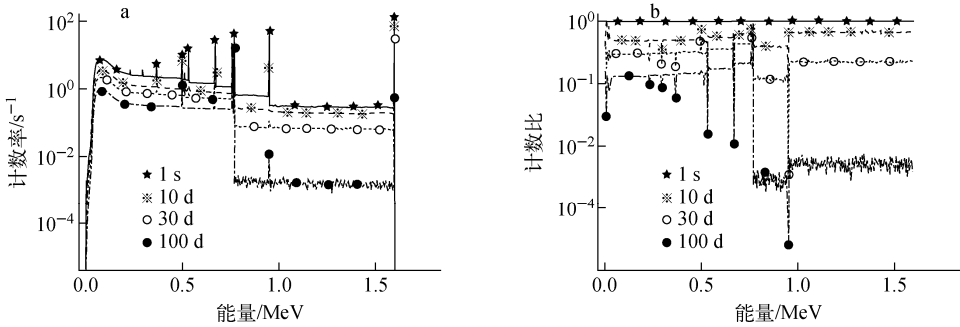


图 12 铀裂变产物释放缓发 γ 能谱随冷却时间的变化(a)和不同冷却时间能谱强度相对于冷却时间为 1 s 时的比(b)
Fig. 12 Change of delayed γ spectrum with cooling time (a) and ratio of spectral intensity of different cooling time to that of cooling time of 1 s for WgU fission product

由图 12a 可见,移除外中子源后,部件表面的缓发 γ 射线强度逐渐变小,由图 12b 可知,冷却到 100 d 时强度约减小 2~4 个量级。对比图 11a、12a 可见,在中子辐照期间有很多条不同能量的 γ 谱线,而在冷却期间只有数条 γ 谱线,并且强度随时间很快变小。

比较图 10a、11a 中缓发 γ 计数的大小,核部件表面缓发 γ 能谱构成中主要的成分是武器级铀裂变核素释放的 γ 射线;同时,根据图 11b、12a 可知,能量在 1.6 MeV 附近有 1 条强度最大的 γ 射线,分析认为该射线是铀、钚裂变产物¹⁴⁰La 发射的 1.596 MeV γ 射线,该结果与文献[11]分析的缓发 γ 射线强度结论一致,这也印证了本文计算方案与计算结果的正确性。

5 结论

本文分析了核部件中缓发 γ 射线的来源,计算了核部件中裂变产物的类型、活度随辐照时间和冷却时间的变化,计算了核部件表面缓发 γ 能谱随时间的演化,得到以下结论。

1) 核部件中武器级钚区的裂变产物主要来自自于该区核素的自发裂变反应,武器级铀区的裂变产物基本来自于武器级钚中²⁴⁰Pu 自发裂变中子的诱发裂变,其自身核素自发裂变贡献很小。

2) 核部件中只有少量裂变产物的活度随辐照时间而变大,这些核素的半衰期较大,活度达到稳定值需要一定时间(约 300 d);大多数短半衰期核素的活度不随辐照时间而改变;移除外中子辐照后,武器级钚区裂变产物活度基本不随冷却时间而变化,而武器级铀区裂变产物活度迅速变小,这是由于相对于武器级钚的自发裂变中子强度,武器级铀材料自发裂变中子强度很小。

3) 核部件武器级钚材料区的缓发 γ 射线强度较武器级铀区大 1 个量级(个别核素除外),但核部件外表面的缓发 γ 能谱主要是武器级钚材料区裂变产物的贡献,这是因为武器级钚材料在核部件最内部,其自发及诱发裂变产物释放的 γ 射线在穿出部件过程中得到很大程度的衰减。

4) 核部件表面由武器级钚释放的缓发 γ 能

谱随辐照时间基本不变;核部件表面由武器级铀释放的缓发 γ 能谱强度随辐照时间逐渐变大,变化最为明显的是 ^{140}La 发射的1 596 keV γ 射线;停止外中子辐照后的冷却时间内,来自武器级铀的特征缓发 γ 射线数变少,且强度迅速变小。

根据本文计算结果,在核部件组装完成后约300 d,其发射的缓发 γ 能谱是稳定的;在小于300 d内,核部件缓发 γ 能谱强度随时间逐渐变大,如 ^{95}Zr 发射的756.7 keV、 ^{95}Nb 发射的765.8 keV γ 射线、 ^{140}La 发射的1 596 keV γ 射线等。测量这些特征 γ 射线强度的变化,有可能推断核部件组装时间的信息,此方面的研究需进一步深入。

参考文献:

[1] 王冰,张松柏,伍钧. 基于钚特征 γ 谱的核弹头模板技术可行性研究[J]. 原子核物理评论,2008,25(4):362-367.

WANG Bing, ZHANG Songbai, WU Jun. Feasibility study on nuclear warhead template technology based on plutonium characteristic gamma spectrum[J]. Nuclear Physics Review, 2008, 25(4): 362-367(in Chinese).

[2] 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):419-423. CHEN Bo, HAO Fanhua, GONG Jian. Detecting the γ rays of warhead model[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 1996, 16(6): 419-423(in Chinese).

[3] 王献敏. 基于人工神经网络的核弹头 γ 辐射指纹识别[D]. 沈阳:辽宁师范大学,2012.

[4] 刘杰,张全虎,王中杰. 核材料 γ 辐射特征模板识别技术研究[J]. 核技术,2011,34(5):377-380. LIU Jie, ZHANG Quanhu, WANG Zhongjie. Identification of nuclear materials using the γ -ray characteristic template method[J]. Nuclear Techniques, 2011, 34(5): 377-380(in Chinese).

[5] 王崇杰,包东敏,程松. 核材料 γ 指纹模糊识别机理研究[J]. 物理学报,2008,57(9):5 361-5 365. WANG Chongjie, BAO Dongmin, CHENG Song. Investigation on the fuzzy recognition mechanism for γ -ray fingerprints of nuclear materials[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(9): 5 361-5 365 (in Chinese).

[6] 刘素萍,伍怀龙,古当长,等. 类型 γ 射线能谱指纹的识别机理[J]. 物理学报,2002,51(11): 2 411-2 416.

LIU Suping, WU Hailong, GU Dangchang, et al. Investigation of gamma-ray fingerprint identifying mechanism for the types of radiation sources[J]. Acta Physica Sinica, 2002, 51(11): 2 411-2 416(in Chinese).

[7] 郭春营,李虹轶. MC法模拟核部件自发裂变中子活化瞬发 γ 能谱[J]. 核电子学与探测技术,2017,37(1):60-63.

GUO Chunying, LI Hongyi. Simulation of the gamma spectrum from spontaneous fission neutron activation on nuclear component with MC method[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2017, 37(1): 60-63(in Chinese).

[8] 曲德成,杨国山,常永福. 裂变缓发 γ 能谱的蒙特卡罗模拟[J]. 原子能科学技术,2008,42(4): 305-308.

QU Decheng, YANG Guoshan, CHANG Yongfu. Simulation on the fission delayed gamma rays' spectrum by Monte Carlo method[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(4): 305-308(in Chinese).

[9] 姜猛,段占元,林源根. 铀材料诱发裂变缓发 γ 能谱的数值计算[J]. 核电子学与探测技术,2010,30(7):42-46.

JIANG Meng, DUAN Zhanyuan, LIN Yuangen. Numerical calculation of the delayed gamma spectra from the uranium materials' induced fission[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2010, 30(7): 42-46(in Chinese).

[10] WILSON W B, ENGLAND T R, van RIPER K A. Class on Cinder'90 code and associated programs and data for transmutation calculations[R]. US: Los Alamos National Laboratory, 1998.

[11] FETTER S, FROLOV V A, MILLER M, et al. Detecting nuclear warheads[J]. Science & Global Security, 1990, 12(5): 225-302.

[12] BRIESMEISTER J F. MCNP—A general Monte Carlo N -particle transport code, Version 4C [R]. US: Los Alamos National Laboratory, 2000.

[13] CULLEN D E. Program PLOTTAB—General plotting program[R]. US: University of California, 2013.

[14] FIRESTONE R B, SHIRLEY V S. Table of Isotopes[M/CD]. Version 1.0. [S. l.]: [s. n.], 1996.

[15] 赵志祥,黄小龙,葛智刚. 核素数据手册[M]. 第3版. 北京:原子能出版社,2004.