

气体裂变产物的活度计算

王世联, 常永福, 王军, 连琦

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710613)

摘要:从裂变产物的衰变规律出发, 导出了利用 HPGe γ 谱仪测量的裂变产物 γ 峰计数计算裂变产物零时刻总核数的公式。利用该公式计算了 ^{239}Pu 裂变产生的气体裂变产物 $^{85}\text{Kr}^m$ 、 ^{87}Kr 、 ^{88}Kr 、 $^{133}\text{Xe}^m$ 、 ^{133}Xe 、 $^{135}\text{Xe}^m$ 、 ^{135}Xe 和 ^{138}Xe 的核数目随时间的变化关系, 并计算了距相对效率为 60% 的 HPGe 探测器表面 25 cm 处各气体裂变产物 γ 峰计数率变化, 为气体裂变产物的实验分析提供了参考。

关键词: ^{239}Pu 裂变; 气体裂变产物; γ 谱

中图分类号: O571

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2004)03-0210-03

Calculation of Gas Fission Products Activities

WANG Shi-lian, CHANG Yong-fu, WANG Jun, LIAN Qi

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710613, China)

Abstract: On the basis of the decay law of fission products and the γ peak counts measured by HPGe detector, the formula of calculating the total numbers of fission products at zero time was deduced. Taking binary fission of ^{239}Pu as an example, the numbers of gas fission products $^{85}\text{Kr}^m$, ^{87}Kr , ^{88}Kr , $^{133}\text{Xe}^m$, ^{133}Xe , $^{135}\text{Xe}^m$, ^{135}Xe and ^{138}Xe as a function of decay time were calculated, and the gamma ray count rates at the distance of 25 cm from a HPGe detector with the detection efficiency of 60% were evaluated.

Key words: ^{239}Pu fission; gas fission products; γ -spectrum

铀或钚裂变产生的气体裂变产物主要是 Kr 和 Xe 的同位素, 这些气体裂变产物主要有 $^{85}\text{Kr}^m$ 、 ^{87}Kr 、 ^{88}Kr 、 $^{133}\text{Xe}^m$ 、 ^{133}Xe 、 $^{135}\text{Xe}^m$ 、 ^{135}Xe 和 ^{138}Xe 等。在反应堆运行、中子活化分析以及核燃料裂变燃耗诊断过程中, 有可能发生气体裂变产物的少量释放, 对环境造成污染。本工作以 ^{239}Pu 裂变为例, 对主要气体裂变产物活度进行计算。

1 裂变产物的衰变规律

1 个核裂变生成第 k 个质量链上初始裂变产物 k_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) 的核数目即是它的独立产额, 用 y_{k_i} 表示, 则 N_i 个核裂变生成的裂变产物 k_i 的核数目为:

$$N_{k_i}(0) = N_i y_{k_i} \quad (1)$$

对于 k 衰变链, 初始生成的裂变产物 K_n 按指数规律衰变, 同时又由母体 K_1, K_2, \dots, K_{n-1}

收稿日期: 2003-06-23; 修回日期: 2003-09-12

作者简介: 王世联(1972—), 男, 黑龙江讷河人, 助理研究员, 硕士, 核物理专业

分别按递次衰变规律再生成,裂变产物 K_n 在 t 时刻存在的核数目为:

$$N_{K_n}(t) = N_f C_m y_n a_n e^{-\lambda t} + N_f (C_{11} e^{-\lambda_1 t} + C_{12} e^{-\lambda_2 t} + \dots + C_{1n} e^{-\lambda_n t}) y_1 a_1 + N_f (C_{22} e^{-\lambda_2 t} + C_{23} e^{-\lambda_3 t} + \dots + C_{2n} e^{-\lambda_n t}) y_2 a_2 + \dots N_f (C_{(n-1)(n-1)} e^{-\lambda_{n-1} t} + C_{(n-1)n} e^{-\lambda_n t}) y_{n-1} a_{n-1} \quad (2)$$

其中: $a_1 \sim a_n$ 为衰变链分支比; λ 为衰变常量。

式(2)中的 $C_{1i}, C_{2i}, \dots, C_{(n-1)i}$ 和 C_m 分别为:

$$C_{1i} = \frac{\prod_{j=1}^{n-1} \lambda_j}{\prod_{k=1, k \neq i}^n (\lambda_i - \lambda_k)}$$

$$C_{2i} = \frac{\prod_{j=2}^{n-1} \lambda_j}{\prod_{k=2, k \neq i}^n (\lambda_k - \lambda_i)}$$

$$\dots$$

$$C_{(n-1)i} = \frac{\prod_{j=n-1}^{n-1} \lambda_j}{\prod_{k=n-1, k \neq i}^n (\lambda_k - \lambda_i)}$$

$$C_m = 1.$$

将裂变产额、衰变常量和衰变链分支比数据代入式(2),则裂变产物 K_n 的核数目随时间 t 的变化关系可简单地表示成:

$$N_{K_n}(t) = N_f \sum_{i=1}^n B_i e^{-\lambda_i t} \quad (3)$$

其中:对于任何特定的待分析核素, B_i 是与衰变链上所有核素的衰变常量、衰变分支比和独立产额相关的常数。对 B_i , 有:

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ \dots \\ B_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ C_{1n} & C_{2n} & C_{3n} & \vdots & C_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 a_1 \\ y_2 a_2 \\ y_3 a_3 \\ \vdots \\ y_n a_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

即 B_i 可表示为:

$$B_i = \sum_{j=1}^i C_{ji} y_j a_j \quad (5)$$

因此,任何多级的递次衰变都可表示成式(3)的形式,特别是当 $n=1$ 时,第 i 个裂变产物的衰变规律为:

$$N_i(t) = N_f Y_i e^{-\lambda_i t} \quad (6)$$

其中: Y_i 为第 i 个裂变产物的累积产额。

2 衰变校正

在 γ 谱的数据分析中,测量时刻通常是指 γ 谱开始获取的时刻,此时的裂变产物 i 的核数目为 $N_i(t)$, 而由 γ 谱分析得到该时刻的核数目表示为:

$$N_{i,m}(t) = \frac{A_k}{t_i \epsilon_k P_{\gamma} \lambda_i} \quad (7)$$

其中: A_k 为第 i 个裂变产物的第 k 条 γ 射线的峰计数; ϵ_k 为峰效率; P_{γ} 为 γ 射线的发射几率; t_i 为测量的活时间。

测量期间第 i 个裂变产物的 γ 峰计数率不是一个常数,实验测量的 t 时刻(t 为冷却时间)第 i 个裂变产物的核数目实际上是测量期间核数目的平均值,即:

$$N_{i,m}(t) = \frac{1}{t_c} \int_t^{t+t_c} N_i(t) dt \quad (8)$$

其中: t_c 为测量时间。

对任何衰变链上的第 i 个裂变产物,其衰变校正为:

$$N_{i,m}(t) = \frac{N_f}{t_c} \sum_{l=1}^i \frac{B_l e^{-\lambda_l t}}{\lambda_l} (1 - e^{-\lambda_l t_c}) \quad (9)$$

由式(7)和(9)可得到第 i 个裂变产物的 γ 射线峰计数与核裂变材料零时裂变数的关系:

$$\frac{A_k t_c}{t_i \epsilon_k P_{\gamma} \lambda_i} = N_f \sum_{l=1}^i \frac{B_l e^{-\lambda_l t}}{\lambda_l} (1 - e^{-\lambda_l t_c}) \quad (10)$$

式(10)适用于利用任何第 i 个裂变产物计算核裂变材料裂变数 N_f 。

3 ^{239}Pu 裂变时主要气体裂变产物的活度计算

以 ^{239}Pu 为例,假设 1.306×10^{17} 个 ^{239}Pu 原子核发生裂变,利用式(3)计算出的气体裂变产物 $^{85}\text{Kr}^m$ 、 ^{87}Kr 、 ^{88}Kr 、 $^{133}\text{Xe}^m$ 、 ^{133}Xe 、 $^{135}\text{Xe}^m$ 、 ^{135}Xe 和 ^{138}Xe 的核数目随时间的变化关系示于图 1。根据式(10)计算出的距探测器表面 25 cm 处主要气体裂变产物 γ 射线的峰计数率随测量时间的变化示于图 2。

在图 2 所示各条曲线的计算所需的峰效率采用锗 γ 射线谱仪活度标准装置(HPGe 探测器的相对效率为 60%)的峰效率曲线,测量时间为 1 000 s。

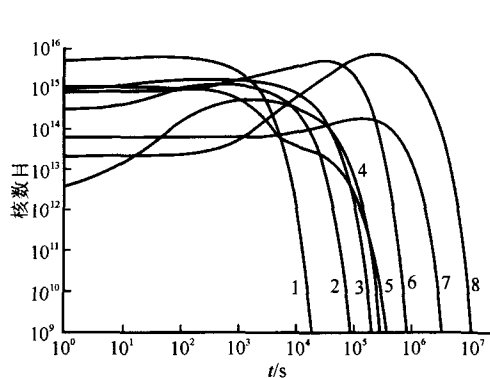


图1 主要气体裂变产物的核数目随时间的变化曲线

Fig. 1 Curves of nuclei numbers verse time for main gas fission products

1— ^{138}Xe ; 2— ^{87}Kr ; 3— ^{88}Kr ; 4— $^{85}\text{Kr}^m$;
5— $^{135}\text{Xe}^m$; 6— ^{135}Xe ; 7— $^{133}\text{Xe}^m$; 8— ^{133}Xe

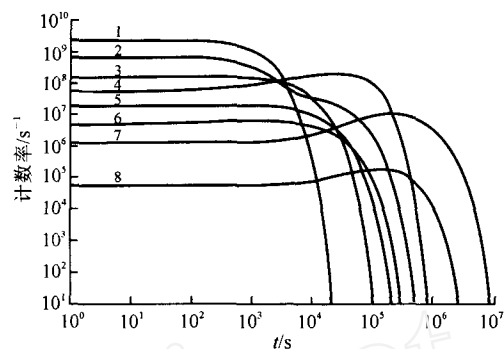


图2 主要气体裂变产物的 γ 峰计数率随时间的变化曲线

Fig. 2 Curves of gamma peak counts rate verse time for main gas fission products

1— ^{138}Xe , 258.41 keV; 2— $^{135}\text{Xe}^m$, 526.56 keV;
3— ^{87}Kr , 402.59 keV; 4— ^{135}Xe , 249.79 keV;
5— ^{88}Kr , 196.30 keV; 6— $^{85}\text{Kr}^m$, 304.87 keV;
7— ^{133}Xe , 80.997 keV; 8— $^{133}\text{Xe}^m$, 233.72 keV

4 结束语

从裂变产物的衰变规律出发,本文给出了裂变产物衰变规律的简洁表达式,并由此推导出衰变校正公式。利用该公式可由任何第*i*个

裂变产物计算核裂变材料的裂变数。

作为计算实例,计算给出了 ^{239}Pu 裂变时的主要气体裂变产物活度的变化曲线。

量子混沌:单色波中的谐振子

Quantum Chaos: A Harmonic Oscillator in Monochromatic Wave

著者: Dmitry I. Kamenev. 2001年美国 Rinton 出版社出版。

本书首次评论了在量子退化系统中常规动力学量子混沌的跃迁,介绍了一些实用系统,如磁场中同等离子波相互作用的电子和半导体异质结构中的二维电子等;详细解释了跃迁的发生及如何通过实验来验证理论预测。

全书分 12 章。

第 1 章 引言 定性描述了谐振子模型。第 2 章 经典共振摄动理论 研究经典单色摄动谐振子的动力学。第 3 章 经典基态的稳定性 讨论了中心共振元中的经典动力学。第 4 章 线性离子阱中的离子动力学 讨论了在线性离子阱中进行量子单色摄动谐振子实验的可能性。第 5 章 量子共振元 用退化量子共振摄动理论分析了量子模型,并演示了量子经典对应。第 6 章 准能量态的对称性 讨论了球状量子相空间的对称性。第 7 章 共振元中的隧道效应 对隧道效应做了分析。第 8 章 弱量子混沌 研究了弱混沌状态中的量子动力学。第 9 章 线性阱中离子的量子混沌 分析了强混沌中受具有接近频率的 2 个激光场摄动的俘获离子的动力学。第 10 章 单色摄动谐振子的动力学 将谐振子动力学作为电子定位的固态问题加以阐述。第 11 章 量子基态的稳定性 分析了单色波影响下线性离子阱中的俘获离子的量子基态稳定性。第 12 章 结论。

摘自中国原子能科学研究院《科技信息》