

# 基于 MCNP 模型 10MW 高温气冷实验堆燃耗测量误差分析与实验研究

马涛, 夏冰, 王军令, 陈晓明, 江二东

清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084

**摘要** 10MW 高温气冷实验堆 (HTR-10) 的燃耗测量系统通过测量燃料球内裂变产物  $^{137}\text{Cs}$  发出的  $\gamma$  射线进而间接确定燃料球的燃耗, 测量结果的准确性直接影响着反应堆的安全性和经济性。利用 HTR-10 现有的设备条件, 设计并实施了提升器偏转实验, 使燃料球逐步偏离正常测量位, 改变球心与准直器轴线的相对位置, 得到了偏离角度与计数率之间的对应关系, 进而确定燃料球球心与准直器轴线的周向偏移量。通过 MCNP 程序建立 HTR-10 燃耗测量系统模型, 模拟  $\gamma$  光子从燃料球发出, 经过提升器、密封法兰、准直器直到被 HPGe 晶体探测器捕捉的全过程。利用 MCNP 模型可以模拟在不同径向偏离情况下的实验过程, 通过与实验结果的对比, 确定燃料球球心偏离准直器轴线的径向偏移量。

**关键词** 球床式高温气冷堆; 燃耗测量; 准直器; MCNP 模型

**中图分类号** TL375.5

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.20.002

## Error Analysis and Experimental Research of HTR-10 Burn-up Measurement System Based on MCNP Modeling

MA Tao, XIA Bing, WANG Junling, CHEN Xiaoming, JIANG Erdong

*Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

**Abstract** With the burn-up measurement system for the 10MW high temperature gas-cooled reactor, the burn-up of the spherical fuel element is obtained indirectly by measuring the gamma-ray from the fission product  $^{137}\text{Cs}$ . The accuracy of results will affect the security and the economy of the reactor. In this paper, on the basis of the existing equipment conditions of HTR-10, the diversion experiment of the elevator is designed and implemented. By making the spherical fuel element gradually deviate the running measurement place, the relative position between the center of the spherical fuel element and the axis of the collimator is changed, and the relationship between the angle of the diversion and the count rate is obtained and is then used to determine the offset in the circumferential direction between the center of the spherical fuel element and the collimator axis. The model of the HTR-10 burn-up measurement system, established by the MCNP program, can be used to simulate the gamma photon transporting process from the spherical fuel element, through the elevator, the sealed flange and the collimator, to the HPGe detector. The MCNP model can be used to simulate the experiment in different radial deviations. By analyzing the experiment results and calculating results of the MCNP model, the radial diversion from the core of the spherical fuel element to the axis of the collimator can be estimated.

**Keywords** pebble-bed high-temperature gas-cooled reactor; burn-up measurement; collimator; MCNP modeling

### 0 引言

清华大学的 10MW 球床式高温气冷堆 (HTR-10) 自 2000 年临界以来, 积累了大量的运行数据。文献<sup>[1]</sup>对运行数据的研究表明, 燃料球燃耗的测量值应该比实际值偏低, 而造成这种误差最可能的原因是准直器轴线的不对准。

由于燃耗测量系统与反应堆的一回路系统相连, 一旦反应堆投入运行, 内空间充满氦气, 且存在辐射。对系统进行直接的几何测量, 要在停堆的情况下才能进行。同时, 拆卸相关的设备与辐射防护装置, 需要将一回路内系统内的氦气排出, 恢复运行时间长, 检修成本高。本文利用 HTR-10 现有设

收稿日期: 2012-05-21; 修回日期: 2012-06-21

作者简介: 马涛, 副研究员, 研究方向为反应堆运行管理, 电子信箱: mt@tsinghua.edu.cn

备条件,通过提升器偏转实验,能够在不拆卸现场设备的情况下对目前燃料球球心偏离准直器轴线的距离进行评估。

## 1 HTR-10 燃耗测量系统简化模型

### 1.1 CFC 系统简介

HTR-10 采用球形燃料元件,大约 8300 个直径 1mm 的  $\text{UO}_2$  包覆颗粒弥散在直径 50mm 的石墨基体中,石墨基体外有 5mm 厚且不含燃料的石墨球壳作保护<sup>[2]</sup>。燃料球内由于  $^{137}\text{Cs}$  衰变向四周发出  $\gamma$  射线,经过自身吸收衰减后,到达燃料球表面,其中部分射线通过准直器而被高纯锗探测器捕捉到,最终成为反映燃料球  $^{137}\text{Cs}$  活度的计数率。由于该活度与燃耗之间存在对应关系,因此可据此推算出燃料球的燃耗。

HTR-10 的 CFC 系统主要包括燃料球的定位装置(提升器), $\gamma$  射线通道(准直器),以及 HPGe 谱仪(包括计算机)等设备,还有平封头、密封法兰及铅室等辅助设施,几何布局示意<sup>[3]</sup>见图 1。

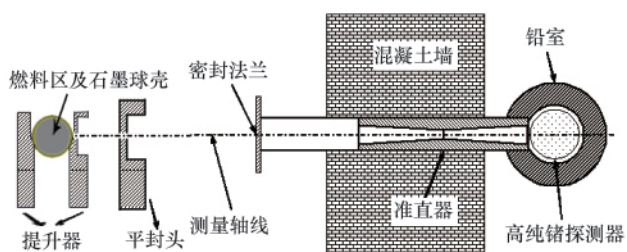


图 1 HTR-10 的燃耗测量系统示意

Fig. 1 Schematic diagram of the burn-up measurement system of the HTR-10

### 1.2 CFC 系统 MCNP 模型

燃料球在堆芯辐照后发出的  $\gamma$  谱非常复杂,在有准直器存在的情况下,MCNP 的计算效率和计算精度均受其影响。因此,在不改变问题讨论本质的前提下,将源模型简化为直径为 50mm 且  $\text{UO}_2$ 、SiC 等元素均匀分布的球形空间,只计算能量为 0.661757MeV 的  $\gamma$  光子在系统中的输运。

准直器在理论设计上采用双内圆锥孔结构,外壁是直径为 58mm 圆柱形,源侧内圆锥孔的延长线刚好与燃料球相切。但是内圆锥孔结构在加工方面存在较大困难,因而采用了一系列的圆柱台内孔结构代替圆锥孔。准直器材料为 WNiFe 合金,轴线与密封法兰轴线共线,且与提升器法兰平面垂直。

HTR-10 燃耗测量系统选用了高纯锗  $\gamma$  谱仪系统测量燃料球的  $\gamma$  谱。其他辅助设施如平封头材料为 16MnR 钢,密封法兰材料为 45 钢,提升器材料为 40Cr 钢,这些材料都位于从源到探测器的射线通道上,影响测量结果。

### 1.3 CFC 系统误差分析

从图 1 可以看到,HTR-10 的 CFC 系统是一套高准直系统,燃料球球心与高纯锗晶体球心都应该在准直器轴线的延长线上。出现偏离情况以后,燃料球的部分体积会偏出准直

器锥孔的延长线之外,这部分所发出的  $\gamma$  射线无法通过准直器到达探测器晶体,从而影响计数的准确性。如图 2 所示,左侧为燃料球,右侧为高纯锗晶体,中间加粗黑线表示准直器内锥孔轮廓线,左侧燃料球发生偏离之后,阴影部分偏出了准直器内锥孔的延长线。

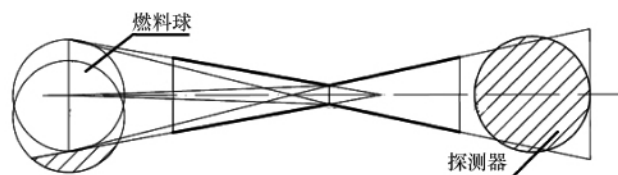


图 2 CFC 系统误差分析示意

Fig. 2 Schematic diagram of the error analysis of the CFC system

提升器、燃料球和准直器的几何位置如图 3 所示, $A$  为提升器轴线, $B$  为准直器轴线与提升器法兰所在平面的交点, $C$  为燃料球的球心,以  $A$  为圆心的圆弧表示燃料球球心随着提升器旋转所走过的轨迹, $BC$  为燃料球球心偏离准直器轴线的距离。可以看出,当  $A$ 、 $B$ 、 $C$  3 点共线的时候, $BC$  之间的距离最小,此时圆  $B$  和圆  $C$  之间的重叠面积最大,计数率在此时应达到最大值。当  $B$  位于圆弧内部的时候,上述结论同样成立。因此,以运行状态的测量位为中心,让提升器逐渐向两侧偏移,使燃料球球心沿着圆弧运动,计数率最大的时候就应该是  $A$ 、 $B$ 、 $C$  3 点共线的地方(此时燃料球球心所在位置记为  $D$ )。

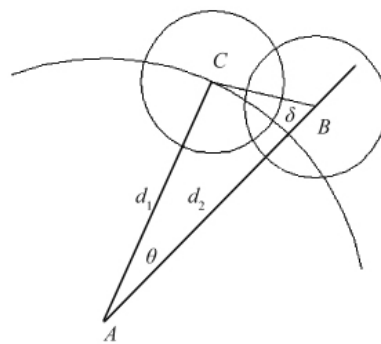


图 3 燃料球与准直器的相对位置示意

Fig. 3 Schematic diagram of the positions of the fuel element and collimator

设  $AC$  为  $d_1$ ,  $AB$  为  $d_2$ ,  $BC$  为  $d_3$ ,  $BD$  为  $\delta$ ,由余弦定理知,

$$d_3^2 = d_1^2 + d_2^2 - 2 \cdot d_1 \cdot d_2 \cdot \cos\theta \quad (1)$$

式中, $d_1$  为燃料球球心围绕提升器轴线的转动半径,而  $d_2 = d_1 + \delta$ ,  $d_3$  的大小将由  $B$ 、 $C$  点在周向的夹角  $\theta$  和径向距离  $\delta$  确定,而  $d_3$  与计数率密切相关。因此通过实验,可以得到在  $\delta$  一定时,计数率与  $\theta$  的直接关系。而当  $\delta$  取值不同时,计数率与  $\theta$  之间的关系也会发生变化,这可以通过 MCNP 模型在计算机

上实现,通过实验与模型计算结果的对比分析就可以确定燃料球球心偏离准直器轴线的实际距离。

## 2 HTR-10 的 CFC 系统误差验证实验

### 2.1 实验设备

HPGe 谱仪系统由 CANBERRA 公司提供,探头型号为 EGPC30-185-ER/P,多道脉冲幅度分析器型号为 DSA2000。计算机安装有基于 Genie 2000 频谱软件系统开发的控制软件,作为与谱仪进行数据交换的操作界面<sup>[4]</sup>。

### 2.2 实验过程

首先按照 FCA 系统和 CFC 系统操作规程的要求,做好实验准备工作。其次将 FCA 和 CFC 控制系统均置于手动操

作。开启碎球分离器,并将提升器转至接球位,从堆芯卸出一个燃料球。再将提升器转至提升位,进行燃耗测量,测量时间为 10min。然后依次转动提升器,使燃料球球心向左右两个方向逐渐偏离原位,每次偏离角度为  $1/3^\circ$  的整数倍。记录相应数据,直至完成实验,实验结果见表 1。表中偏离角度指试验中的各测量点偏离系统正常运行时测量位的角度,每次测量时间均为 600s。

### 2.3 实验数据初步处理

由于实验环境基本保持稳定,各测点的本底应该基本相同。各测点本底均值为 7906,当  $\theta=-1.33^\circ$  时,本底达到 10030。按照狄克逊准则进行判断,在置信度为 99% 时<sup>[5]</sup>,该点属异常值,应该剔除。

表 1 实验结果

Table 1 Experimental results

参数	偏离角度/ $^\circ$							
	-1.33	-1.00	-0.67	-0.33	0	1.00	2.00	3.00
净面积	79513	82555	82811	84050	84191	84513	85534	85047
积分面积	89543	90166	90628	91454	90858	92360	93292	93159
实验计数率	132.52	137.59	138.02	140.08	140.32	140.86	142.56	141.75
本底	10030	7611	7817	7404	6667	7847	7758	8112

## 3 比较与分析

### 3.1 确定燃料球球心位置

由前面分析可知,燃料球随着提升器逐渐偏离原测量位,在计数率达到最大值的时候,燃料球球心所在位置即为  $D$  点(图 3)。对实验测量的数据用二次多项式进行最小二乘法拟合,可求得当  $\theta=2.13^\circ$  时,计数率最大为 142.17。

### 3.2 确定交点 $B$

$B$  点是准直器轴线与提升器法兰所在平面的交点, $d_3$  就是在正常运行工况下燃料球球心偏离准直器轴线的距离,为

此就要确定  $BD$  的长度  $\delta$ 。

### 3.2.1 用 MCNP 模型模拟 $\delta$ 取值不同时的实验过程

燃料球球心位于  $D$  点时计数率  $i=142.17$ ,此时  $\theta=0$ ,对给定的  $\delta$  值,利用上述 MCNP 模型,可以得到  $i$  与  $I_0$  (燃料球  $^{137}\text{Cs}$  的活度)之间的关系系数  $k=i/I_0$ ,求出  $I_0$ 。这样当  $\theta$  分别取各测点对应数值时,通过 MCNP 模型可以得到对应的  $k_\theta$ ,进而计算出各测点在  $\delta$  保持不变时对应的计数率。这样当  $\delta$  逐渐变化时,即可得到一系列相应的计数率数据。部分数据如表 2 所示。

表 2 计算结果

Table 2 Computational results

$\delta/\text{mm}$	$\theta/^\circ$								绝对距离/mm
	-1.00	-0.67	-0.33	0	1.00	2.00	3.00		
0	137.64	138.13	138.64	139.12	139.74	140.17	140.02	8.03	
5	138.13	138.71	139.05	139.51	140.35	140.42	140.50	6.95	
10	137.72	138.36	138.90	139.58	140.22	140.69	140.32	6.32	
15	136.66	137.57	138.12	138.44	139.72	140.31	140.45	9.90	
20	137.35	138.32	139.10	139.71	140.94	141.35	140.60	4.58	
25	135.42	136.56	137.56	138.01	139.98	140.40	139.93	13.31	
-5	137.66	138.20	138.58	138.86	139.88	140.42	140.25	7.82	
-10	137.66	138.22	138.69	139.08	140.37	140.68	140.51	6.50	
-15	137.96	138.45	139.04	139.63	140.18	140.54	140.27	6.70	
-20	137.18	137.70	138.10	138.71	139.75	140.32	139.82	9.58	
-25	137.51	137.92	138.29	138.75	140.00	140.23	140.10	8.37	

### 3.2.2 实验数据与模型计算数据的对比分析

实验测得的数据可以看作 1 个 7 维行向量  $c$ ，而模型计算出的数据是由很多组 7 维行向量组成的矩阵  $B$ ，数据处理的目的从矩阵  $B$  中找到 1 个行向量  $b$  与  $c$  最为相似。在理想情况下， $b$  和  $c$  应该完全相等，但是由于误差的存在，势必会导致  $b$  和  $c$  不完全一样，但与  $B$  中的其他向量相比，应该选择相似程度最高的那一组。判断两个向量的相似度，可以用向量间的绝对距离（曼哈顿距离）衡量。设  $n$  维向量  $x$  和  $y$  分别为： $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ， $y=(y_1, y_2, \dots, y_n)$ ，则绝对距离可以表示为

$$d(x, y) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|$$

绝对距离的计算结果见表 2 最后一列。绝对距离最小为  $d_{\min}=4.58$ ，对应  $\delta=20\text{mm}$ 。考虑到模型简化及测量本身产生的误差， $\delta$  在一定范围内取值应该都是合理的。当  $\delta=20\text{mm}$  时，燃料球球心偏离准直器轴线距离为  $a=20.36\text{mm}$ 。

## 4 结论

以上分析表明，HTR-10 燃耗测量系统在运行工况下，燃料球球心偏离了准直器轴线。初步估计偏移距离达到了 20.36mm，并由此产生了一定的系统误差，导致燃料球燃耗的

测量值比真实值偏低，验证了文献<sup>[1]</sup>关于 HTR-10 的 CFC 系统存在系统误差的推测。

### 参考文献 (References)

- [1] 夏冰. HTR-10 过渡过程物理特性的初步验算 [D]. 北京: 清华大学, 2010.  
Xia Bing. The preliminary simulation on the physical features in the running-in phase of the HTR-10[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [2] 李桃生, 方栋, 李红, 等. 10MW 高温气冷堆的燃耗测量研究 [J]. 核电子学与探测技术. 2006, 26(2): 129-136.  
Li Taosheng, Fang Dong, Li Hong, et al. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2006, 26(2): 129-136.
- [3] Xia B, Li F, Wu Z X. Burn-up calibration and error analysis of HTR-10 spherical fuel elements by gamma spectroscopy [C]. Proceedings of the 18th International Conference on Nuclear Engineering ICONE18, Xi'an, China, May 17-21, 2010.
- [4] 马涛, 黄鹏, 胡守印, 等. 高温气冷堆燃料装卸监控系统改造 [J]. 高技术通讯. 2007, 17(9): 953-957.  
Ma Tao, Huang Peng, Hu Shouyin, et al. High Technology Letters, 2007, 17(9): 953-957.
- [5] 于成龙, 郝欣, 沈清. Origin 8.0 应用实例讲解[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 264-265.  
Yu Cheng Long, Hao Xin, Shen Qing. Origin 8.0 application examples to explain[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 264-265.

(责任编辑 朱宇)

·学术动态·

## “第九届全国微波化学暨 第四届样品制备学术会议”征文



“第九届全国微波化学暨第四届样品制备学术会议”由中国电子学会微波分会微波化学专业委员会、中国分析仪器学会样品制备分会主办，定于 2012 年 11 月 9-11 日在昆明市召开。

征稿范围：(1) 微波化学研究及应用领域 (①微波化学理论及应用研究进展；②微波技术在化学、化工、食品科学、环境等领域中的研究和应用；③微波在制药工业中应用及基本理论研究；④微波在医药检测方面应用及研发；⑤微波化学反应设备研制、开发和应用；⑥微波化学及技术与绿色制备)。(2) 样品制备及技术领域 (①样品前处理理论及其技术的新进展；②样品前处理专用仪器设备的研制、开发和应用；③样品前处理技术和仪器在工业监测及分析中的应用；④工业产品的样品前处理技术和仪器)。(3) 微波冶金及微波材料处理领域 (①微波在冶金工业中应用及基本理论研究；②微波冶金设备研发及工业推广；③微波在材料制备及研发领域应用研究)。(4) 微波机理研究及微波设备研发 (①微波腔体设计及计算；②微波场模拟及温度测量；③微波产业研发及应用研究)。

全文截稿日期：2012 年 8 月 30 日

联系电话：0714-6515602, 6575919, 6531032

电子邮箱：microwave2012@163.com

大会网站：www.wlxy.hbnu.edu.cn/microwave2010