

球床模块式高温气冷堆在线燃耗测量系统 准直器性能的 Monte-Carlo 分析

张立国¹, 尚仁成²

(1. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084; 2. 清华大学物理系, 北京 100084)

摘要: 针对球床模块式高温气冷堆(HTR-PM)燃耗测量系统的设计特点, 利用 Monte-Carlo 模拟方法, 分析球形体源测量中不同形式的限制束流的准直器的性能及其对燃耗测量的影响。结果表明, 对 HTR-PM 在线燃耗测量, 选择双锥孔准直器更为适宜。

关键词: 燃耗测量; Monte-Carlo 法; 燃料循环; 球床模块式高温气冷堆; 准直器

中图分类号: TH73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2009)09-0813-04

Performance Analysis of Collimator in Online Burnup Measurement System for Pebble Modular High-Temperature Gas-Cooled Reactor With Monte-Carlo Method

ZHANG Li-guo¹, SHANG Ren-cheng²

(1. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The paper discusses the performance of different collimators with Monte-Carlo method and reveals their influence on the burnup measurement. The result shows that conical collimator is more appropriate for on-line burnup measurement.

Key words: burnup measurement; Monte-Carlo method; fuel circulation; pebble modular high-temperature gas-cooled reactor; collimator

作为球床模块式高温气冷堆(HTR-PM)燃料装卸系统的重要组成部分, 在线燃耗测量系统要在燃料球每次从堆芯排出后, 对其进行在线燃耗测量。根据测量结果, 将已达到预定燃耗值的燃料球排到乏燃料贮存罐中, 而将未达到限值的燃料球返回堆芯。图 1 示出了 HTR-PM 燃料循环的示意图^[1]。

HTR-PM 的燃耗测量系统通过分析燃料

球发出的 γ 能谱确定¹³⁷Cs 活度, 进而通过理论计算确定燃耗值^[2-3]。卸出堆芯的燃料球的 γ 发射率均处于 $10^{12} \sim 10^{13} \text{ s}^{-1}$ 水平, 为降低束流强度, 需采用准直测量。

与锥孔准直器相比, 柱孔准直器的散射较严重, 但对体源, 问题则较复杂。HTR-PM 燃耗测量系统测量的是球形燃料元件, 直径 60 mm, 燃料填充区直径 50 mm, 相对于准直器

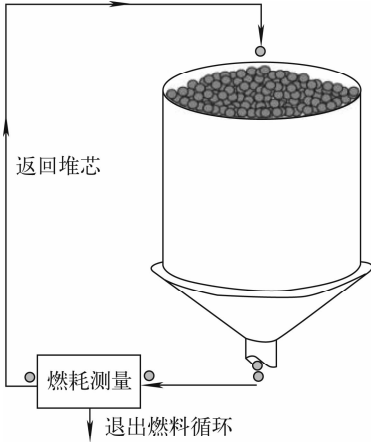


图1 燃料循环示意图

Fig.1 Scheme of fuel circulation in HTR-PM

的位置和内径而言是较大的体源。根据 HTR-PM 燃料测量系统的实际情况,利用 MCNP 程序,讨论和比较了两种不同形式准直器的性能^[4]。

1 MCNP 计算模型

1.1 几何布局

图2所示为 MCNP 计算所采用的几何布局,准直器左侧为源,右侧为探测器。柱孔准直器左端面与双锥孔准直器的喉部平齐。如图2所示,球上各点对准直器轴线垂直距离为 d ,柱孔准直器的准直孔半径为 r ,球中心与柱端面(锥孔准直器喉部)距离 r_0 为 3 600 mm。锥准直器喉部与柱孔直径均为 2.2 mm,柱准直器长度为 270 mm,为锥孔长度的一半,准直器外径为 60 mm。准直器材料为 WNiFe 合金,密度取为 17.0 g/cm^3 。

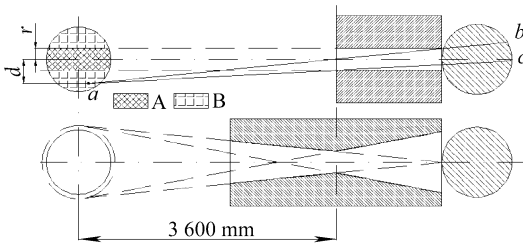


图2 几何布局示意图

Fig.2 Scheme of geometry layout

1.2 探头模型

HTR-PM 燃料测量系统选用高纯锗 γ 谱仪系统测量燃料球的 γ 谱。计算中所选用的单

开端同轴高纯锗探头 GEM30(ORTEC 公司产品)的结构如图3所示。探头晶体密度为 3.52 g/cm^3 。

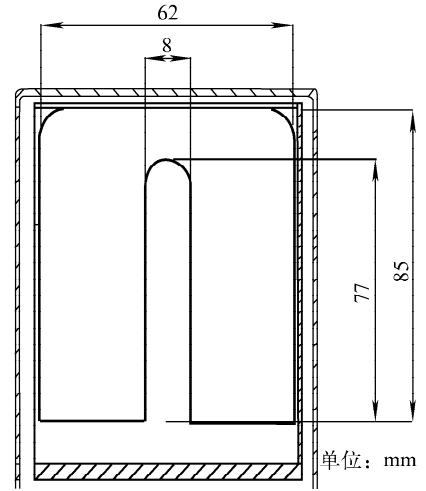


图3 GEM30 探头结构示意图

Fig.3 Scheme of detector GEM30

1.3 源模型

HTR-PM 所采用的燃料元件为直径 60 mm 的燃料球,其中心直径 50 mm 区域是由全陶瓷包覆颗粒填充的燃料区域^[5]。在堆芯辐照后的燃料球所发出的 γ 谱复杂,强度较大的有数百条之多;在有准直器存在的条件下,MCNP 的计算效率和计算精度均受其影响。因此,在不改变问题讨论的本质的前提下,将源计算模型简化为直径为 50 mm 的含 ^{137}Cs 的均匀球形空间,且不考虑源的自吸收。这样,可单纯计算准直器等效立体角修正因子。等效立体角修正因子为准直器出口光子数与源发射的光子数之比,即:

$$\Omega = \frac{N_c}{N_a} \quad (1)$$

式中: N_c 为准直孔出口的光子数; N_a 为源发射的光子总数。

2 计算参量

准直器的重要作用是要准确限制粒子束流,控制系统死时间。计算分析了两种准直器引入的等效立体角修正因子 Ω 及其对源位置变化的敏感性(因燃料球在定位器内有一定的定位误差)。

准直器对射线的散射效应会提高本底,影响测量精度。以 ^{137}Cs 全能峰区计数与全谱计数的比值为指征,分析两种准直方案的散射效应。

准直器内孔形式不同,出口处的注量率分布随之有异,同时,造成探测器的探测效率变化。这是准直器形式选择需考虑的因素之一。

3 结果与分析

3.1 等效立体角修正因子

计算表明,当柱孔直径与双锥孔喉部直径均取 2.2 mm 时,其等效立体角修正因子分别为 9.016×10^{-9} 和 2.318×10^{-8} 。柱孔的等效立体角修正因子与由准直器左端面射线入口面积计算所得的值($\frac{r^2}{4r_0^2} = (1.1 \text{ mm}/3600 \text{ mm})^2/4 = 2.334 \times 10^{-8}$)差别很大,而锥孔的则与之相当。为达到限束的目的,计算中将柱内孔的准直器孔径调整为 3 mm,使等效立体角修正因子值接近 2.334×10^{-8} ;在此条件(以下计算均采用该条件)下,计算源沿垂直于准直器轴线方向移动时等效立体角修正因子随源位移的变化,结果列于表 1。

表 1 等效立体角修正因子 Ω 随源位移的变化

Table 1 Variation of effective solid-angle factor Ω against displacement of source

位移/ mm	准直器 类型	Ω	模拟计算的 统计误差/%	$\frac{\Omega_i - \Omega_0}{\Omega_0}/\%$
0	锥孔	2.318×10^{-8}	0.21	
	柱孔	2.268×10^{-8}	0.33	
1	锥孔	2.322×10^{-8}	0.21	0.18
	柱孔	2.242×10^{-8}	0.33	-1.15
2	锥孔	2.325×10^{-8}	0.22	0.32
	柱孔	2.219×10^{-8}	0.33	-2.16

注: Ω_0 为零位移时的 Ω ; Ω_i ($i=1,2$) 分别为位移 1 和 2 mm 时的 Ω

从表 1 可看到,对于柱孔准直器,源位移造成的等效立体角修正因子的相对偏差(-1.15%和-2.16%)明显大于 MCNP 模拟计算的统计误差;对于锥孔准直器,源位移造成的相对偏差则处在 MCNP 模拟计算统计误差

的范围之内;这说明,在源有位移的情况下,柱孔准直器的限束性能有较明显的变化;锥孔准直器的限束性能基本无变化,数据所呈现的应是 MCNP 模拟计算的统计误差。

柱孔准直器将球源分成 A 和 B 两个区域(图 2)。A 区为准直器柱孔延展面所截取的一个类圆柱体,即 $d \leq r$,源与准直器距离远大于球源直径,该区中各点对准直器所张立体角基本相等;B 区为球体上 A 区以外的区域,即 $d > r$,该区中各点发出的射线会受到准直器边缘的阻挡(图 2 中直线 ab 和 ac),其对准直器所张立体角将随着其远离准直器轴线而迅速减小。当球源沿垂直准直轴线位移时,球上有些点所属区域发生变化,净效果是 A 区中的部分进入 B 区,造成有效立体角的显著减小,这即为柱孔准直器对源位置较为敏感的原因。这种现象与柱孔准直器的轴向长度有关,长准直器对源位置变化更敏感。

3.2 散射分析

通常认为,柱孔准直器会造成较大的散射份额,对探头探测到的 ^{137}Cs 0.662 MeV 的射线谱的 MCNP 模拟证实了这一点,但并不显著。在柱孔准直器情况下, ^{137}Cs 全能峰相对计数率与全谱计数率的比值为 0.308 9,MCNP 模拟计算的统计误差为 0.21%;锥孔情况下的比值为 0.311 6,计算的统计误差为 0.14%;两个比值的相对偏差为 0.87%。

3.3 探测效率分析

用 MCNP 程序模拟光子输运时,在准直器出口截面上记录了距准直器轴线不同距离处的光子注量率,其分布示于图 4。柱孔准直器出口处的束流更为集中,且在出口边界处,注量率衰减很快。锥孔准直器出口较宽,随着记录点与轴线间距离的增加,注量率的变化较为平缓。同轴高纯锗探测器中间有空腔,所以,无论是轴向照射还是径向照射,在一定范围内,探测器对射线的探测效率随着照射野的增加而提高^[6];只要照射野不太大,对同轴高纯锗探测器,锥孔准直器的这种分布应比柱孔有更好的探测效率。在锥孔准直器情况下,相对探测效率为 0.308 1,MCNP 模拟计算的统计误差为 0.25%;柱孔准直器情况下为 0.306 9,MCNP 模拟计算的统计误差为 0.65%。探测器距离

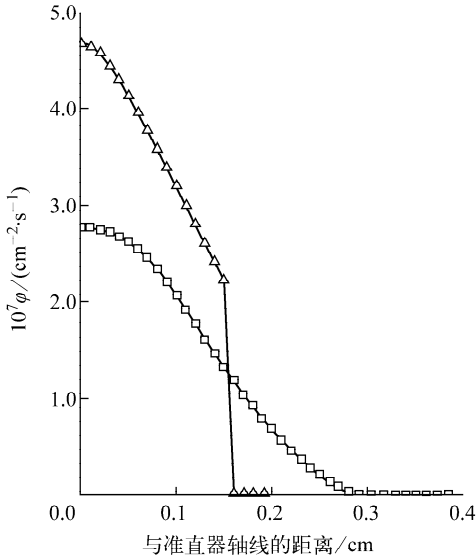


图4 γ 注量率分布

Fig. 4 Distribution of γ fluence rate

□——锥孔准直器;△——柱孔准直器

出口很近,效率差别已淹没在计算的统计误差中。加大探测器与准直器间的距离,使射线在探测器上的照射斑点直径约为探头直径的一半,这时,两者对应分别为 0.314 0(MCNP 模拟的统计误差为 0.25%)和 0.308 4(MCNP 模拟的统计误差为 0.65%),此时,两者间的相对偏差为 1.78%。

4 结语

对于 HTR-PM 在线燃耗测量来说,选择双锥孔准直器更为适宜。首先,在测量系统中,准直器和探测器的位置相对固定,只有燃料元件的位置是变动的,锥孔准直器的上述特点很大程度上降低了球的流动与定位随机性对测量的影响,锥孔探测器对球源的位置变动不太敏感。其次,与柱孔准直器相比,锥孔准直器使得测量系统具有较好的探测效率和信噪比,但准

直器与探测器间的距离影响着这一优点的发挥,进一步研究探测系统的设备布局是有必要的。

参考文献:

- [1] HAWARI A I, CHEN J W. Assessment of on-line burnup monitoring of pebble bed reactor fuel using passive gamma ray spectrometry[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2002, 49(3): 1 249-1 253.
- [2] LI Taosheng, DONG Fang, ZHANG Ligu. The γ -spectra analysis for burnup measurement in HTR-PM[C]// The 2nd Asian and Oceanic Congress for Radiation Protection. Beijing: [s. n.], 2006: 263-266.
- [3] 张立国,李桃生,方栋. 球床式高温气冷堆在线燃耗测量中 ^{239}Pu 的影响分析[J]. 核动力工程, 2008,29(4):88-92.
ZHANG Ligu, LI Taosheng, FANG Dong. Effect from ^{239}Pu in burnup measurement process in HTR-PM[J]. Nuclear Power Engineering, 2008, 29(4): 88-92(in Chinese).
- [4] BRIESMEISTER J F. MCNP—A general Monte-Carlo N -particle transport code (Version 4B), technical report LA-UR-03-1987[R]. Los Alamos, US: Los Alamos National Laboratory, 2003.
- [5] TANG Chunhe, TANG Yiping, ZHU Junguo, et al. Design and manufacture of the fuel element for the 10 MW high temperature gas-cooled reactor[J]. Nuclear Engineering and Design, 2002, 218: 91-102.
- [6] 李桃生,张立国,白晓萍. HPGe 探测器对照射野的依赖性[J]. 核电子学与探测技术,2007(4): 624-627.
LI Taosheng, ZHANG Ligu, BAI Xiaoping. Dependence of incident area for HPGe detecting efficiency[J]. Nuclear Electronic & Detection Technology, 2007(4): 624-627(in Chinese).