

文章编号: 1007-4627(2014) 03-0366-08

HTR-PM 中燃耗测量方法研究和测量系统原型研制

闫威华¹, 张立国², 张钊¹, 肖志刚¹

(1. 清华大学物理系, 北京 100084;

2. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要: 作为球床模块式反应堆中燃料元件循环的重要组成部分, 燃耗测量系统必须对连续排出堆芯的燃料球进行非破坏性在线测量, 以确定是作为乏燃料球退出循环, 还是将其返回堆芯。¹³⁷Cs 的活度和燃耗值存在很好的单调对应关系, 因此在高温气冷堆 (HTR-PM) 核电站示范工程中利用高纯锗探测器测量燃料球中 ¹³⁷Cs 的活度, 进而根据燃耗计算曲线确定其燃耗值。通过实验以及基于 Geant4 的蒙特卡罗全模拟, 利用效率传递方法准确得到了系统刻度的修正因子。同时发展了快速自动的谱寻峰和峰面积分析程序用于双源实验和 MCNP 模拟的 γ 谱分析, 结果表明, 尽管有干扰峰的影响, 该系统预计对 ¹³⁷Cs 的活度测量相对不确定度依然可以控制在 3.0% 以内。在以上工作基础上成功研制并测试了一套全尺寸的燃耗测量系统原型。

关键词: 高温气冷堆核电站示范工程; 燃耗测量; 蒙特卡罗模拟; 高纯锗; γ 活度

中图分类号: TL817 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.31.03.366

1 引言

高温气冷堆是在早期气冷堆和改进型气冷堆的基础上发展起来的先进堆型, 由于其安全性好、发电效率高, 而且可以实现不停堆进行换料, 因而在长远能源系统中具有广阔的应用和发展前景^[1-3]。清华大学 10 MW 高温气冷试验堆 (High Temperature gas-cooled Reactor-10 MW, HTR-10)^[4-5] 吸收了国际上成功运行的高温气冷堆的经验和模块式高温堆的先进理念, 于 1995 年正式动工, 2000 年顺利建成并达到临界, 2002 年底达到满功率运行, 为高温气冷堆的商业化和工业应用积累了宝贵的经验。在此基础上, 清华大学核能与新能源技术研究院和华能集团正在发展高温气冷堆的第一个商业版本: 200 MW 的球床模块式高温气冷堆 (High Temperature gas-cooled Reactor-Pebble bed Modules, HTR-PM)^[6-8] 核电站。HTR-PM 为双堆结构, 每座反应堆将有两套燃耗测量系统对连续排出堆芯的燃料球进行非破坏性在线测量, 是高温气冷堆燃料元件循环的重要组成部分。

燃耗 (Burnup) 是对装入堆芯的单位重量核燃料所产生的总能量的定量度量, 采用的单位是 MWd/tU (兆瓦天每吨铀)。燃耗标识了反应堆运行过程中核燃料的消耗程度, 燃耗越深, 核燃料就利用得越充分。球床模块式反应堆的特点就是燃料球在堆芯中多次循环, 并且在堆内运动的轨迹具有随意性, 燃料球的燃耗不像传统的水堆那样可以依据计算准确得出, 需要发展快速的在线测量方法^[9]。在 HTR-PM 正常运行过程中, 需要燃耗测量系统运行, 判断燃料球是否达到了卸料燃耗整定值, 将小于该整定值的浅燃耗球打回堆芯, 大于该整定值的深燃耗燃料球则被卸出堆芯^[10]。本文主要针对 HTR-PM 的新特点, 通过对谱仪工作条件的优化以及谱分析和系统刻度方法的研究, 为燃耗测量系统提供一个可行的设计方案, 并针对原型系统进行了测试。

2 测量方法

燃耗测量, 通常通过测量裂变产物或者超铀元素

收稿日期: 2013-09-12; 修改日期: 2013-09-21

基金项目: 国家科技重大专项资助项目 (ZX06901)

作者简介: 闫威华 (1985-), 男, 河南周口人, 博士, 从事实验核物理研究; E-mail: yanwh07@mails.tsinghua.edu.cn

通信作者: 肖志刚, Email: xiaozg@tsinghua.edu.cn.

的量来进行^[11-14]。根据 HTR-PM 燃料测量系统的要求, 选定测量方法所考虑的问题如下^[10]。

(1) 只有采用非破坏性方法测量才能满足燃料在线测量的要求, 才可排除选取化学(分离出特定的裂变产物)类的测量方法。

(2) 由于 HTR-PM 要求测量时间短和统计不确定度小, 排除了选用测量中子方法的可能性, 这类方法由于设计比较复杂、测量时间长和统计不确定度大而难以满足要求。

(3) HTR-PM 中燃料球冷却时间短, 本底活度很

大, 而且所发射 γ 射线成分复杂, 要求谱仪具有高能量分辨率。

综合考虑, 只有利用 HPGe 探测器测量标识核素的 γ 射线才能符合条件, 通过测量标识核素的活度来测定燃料。为了减少本底的影响, 利用准直器和屏蔽体对探头的入射计数率进行限制, 整个装置的示意图如图 1 所示^[15], 主要包括探测器和后端谱仪、准直器、铅室、刻度源、定位器以及其支架。准直器和铅室的主要作用就是限制探测器所张的立体角, 控制照射到探头的入射 γ 射线和中子通量。

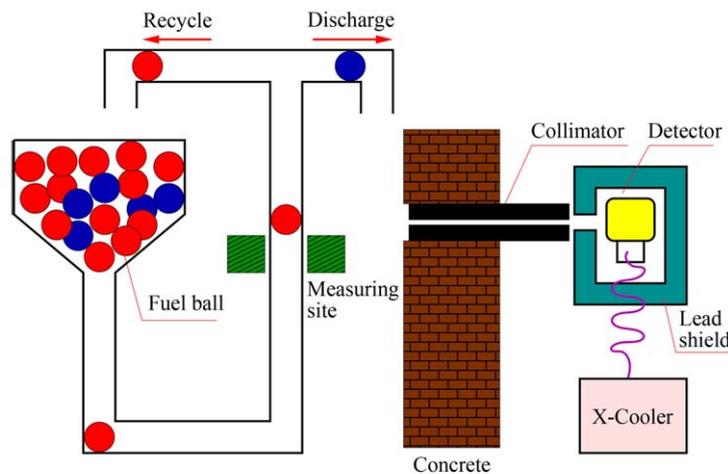


图 1 (在线彩图) HTR-PM 燃料测量系统示意图。

燃料球进入测量位的定位器后, 发出球入位信号, 然后燃料测量系统开始测量, 测量结束后将结果发送给燃料装卸系统以便其进行相应操作。定位器到探头的距离约为 4.9 m。

为了准确地确定燃料, 首先要保证燃料和标识核素活度的对应关系。反应堆中标识核素 α 数目 N_α 随时间 t 的变化满足^[9]:

$$\frac{dN_\alpha}{dt} = Y_\alpha N_f \sigma_f \phi + \sum_i \lambda_{i\alpha} N_i + \sum_j \sigma_{j\alpha} \phi N_j - (\lambda_\alpha + \sigma_\alpha \phi) N_\alpha \quad (1)$$

其中: N 代表核素的数目; Y 代表裂变产额; ϕ 代表中子注量率; λ 代表衰变常数; σ 代表反应截面; 下标 f 代表裂变核素; i 表示衰变母核; j 表示中子俘获前的初级粒子。从物理上讲, 等式右边第一项代表裂变产生的 α , 第二项代表其他核素衰变产生的 α , 第三项代表其他核素中子俘获的影响, 第四项是 α 核素本身的衰变和中子俘获。作为标识核素, 必须满足产额高、半衰期长、中子吸收截面小等条件, 而且来自其他核素的衰变和中子吸收最好尽可能少, 以减少燃

耗和活度关系的辐照历史相关性。从 ^{137}Cs 的裂变核素同位素链图(图 2) 可以看到它几乎完全符合这些条件, 这在 HTR-10 以及以前的高温气冷堆上也得到过验证^[16-17]。

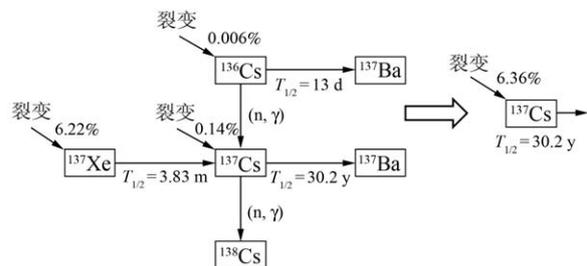


图 2 ^{137}Cs 裂变核素的同位素链图^[10, 18]

KOREIGEN^[19] 的计算也显示了燃料和 ^{137}Cs 的良好依赖关系, 如图 3 所示。通过对堆芯慢化剂温度、中子注量率、中子谱参数及燃料球流动速度等的情况

的分析, 我们利用 KORIGEN 软件完成了 HTR-PM 中 10 个情景共 38 个算例的模拟, 据此计算结果研究了燃耗计算曲线与燃料球辐照历史的关系, 并确定了用于燃耗测量系统在线计算平衡堆芯中燃耗和 ^{137}Cs 活度 A 的依赖关系, 基本与 A 成正比, 辐照历史造成的不确定度为 1.0%。

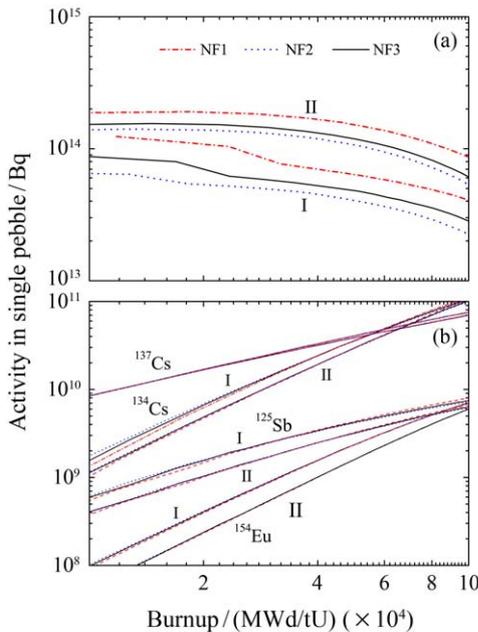


图 3 (在线彩图) 燃料球中核素活度与其辐照历史的相关性 (KORIGEN 计算所得结果)。

其中 (a) 为总活度与燃耗关系曲线, (b) 为单个核素活度与燃耗关系曲线。标识 “I” 和 “II” 表示曲线分别对应低富集度燃料球和高富集度燃料球, NF1, NF2, NF3 代表不同的中子通量。

所以燃耗测量的问题就转化为了如何得到 ^{137}Cs 的活度。利用 ^{137}Cs 的 662 keV 的特征射线, 在给定测量条件下, 其活度 A 可以表示为

$$A = \frac{n}{\eta} = \frac{n}{\eta_{\text{std}}} \times r_c = n \times \frac{A_{\text{std}}}{n_{\text{std}}} \times r_c \quad (2)$$

其中: n 为 662 keV 全能峰的面积; η 为效率刻度因子; 下标 std 代表标准刻度源; r_c 为由于刻度源和燃料球不同带来的修正因子。由此式可知准确测量 A 的关键在于峰面积 n 和修正因子 r_c 的准确性, 将分别将在第 3 节和第 4 节讲述。得到 ^{137}Cs 的活度以后, 通过燃耗计算曲线即能得到燃料球的燃耗。在 HTR-10 等以前的高温气冷堆上也曾运行过类似的系统^[16-17], 但是在 HTR-PM 核电站示范工程中由于冷却时间和

测量时间更短, 情况更为复杂, 具体表现在能谱成分非常复杂, 尤其是 662 keV 附近有很多的干扰峰, 且本底活度很大, 必须重新审视其可行性^[10]。

平衡堆芯时共有约 42 万个燃料球, 每套燃耗测量系统每天要完成 3 000 个球的测量和分检, 平均每个燃料球处理时间为 $24 \text{ h} \times 60 \text{ m} \times 60 \text{ s} / 3000 = 28.8 \text{ s}$, 除去燃料装卸系统的设备动作时间, 每球的平均处理时间为 20 s 略强, 而对深燃耗球, 燃耗的不确定度要控制在 5% 以下。因此平均分配测量时间是不妥当的。为了提高对接近卸料燃耗的燃料球燃耗的测量精度, 同时需要考虑简化测量逻辑, 我们设置了两个时间节点, 10 s 时进行判断是否是浅燃耗球, 对于燃耗值大于预定燃耗的则测量继续, 否则测量结束, 将此燃料球返回堆芯。只有对于深燃耗的燃料球, 测量要进行到 25 s, 根据分析结果判断其是否为乏燃料球, 将信号送给燃料装卸系统供相关设备。对平衡堆芯运行中排出的乏燃料球, 预期的平均燃耗是 90 000 MWd/tU。通过对堆内燃料球燃耗分布的初步分析, 可知上述测量方案满足单球处理时间平均为 20 s 的测量要求。

3 ^{137}Cs 峰面积与活度

HTR-PM 燃耗测量中的 ^{137}Cs 活度测量为高计数率下的高精度测量分析, 一个典型的浅燃耗球的能谱如图 4^[20] 所示, 可以看到有很强的干扰峰, 这对 γ 谱仪的性能和工作条件提出了较高的要求。经过比较, 探头选用了美国 ORTEC 公司的 P 型同轴高纯锗, 选择的工作条件是高压 2 300 V, 成形时间和坪时间都

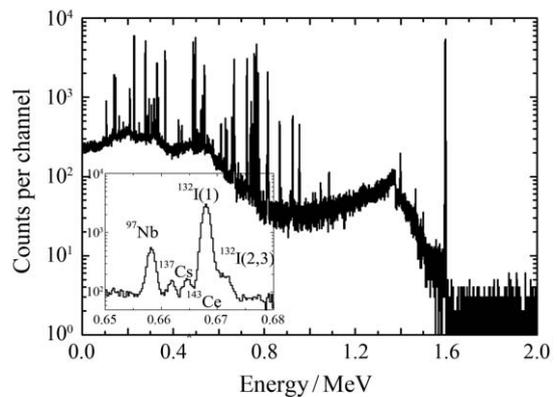


图 4 KORIGEN+MCNP 模拟得到的燃耗约为 30 000 MWd/tU 时燃料球的 γ 谱
中间的小图显示的是放大后 662 keV 附近的能谱。

是 $0.8 \mu\text{s}$, 662 keV 处峰半高宽 (FWHM) 在 $1.7 \sim 1.8 \text{ keV}$ 左右, 能满足对能量分辨率的要求。此时经过准直器后谱仪承受的入射计数率坪区约在 $100 \sim 150 \text{ kcps}$ ^[21], 在此基础上结合蒙特卡罗模拟确定了原型中准直器的设计参数以及铅室等屏蔽的尺寸。

确定工作条件之后, 我们利用一个强 ^{60}Co 源和一个弱 ^{137}Cs 源来采集实验谱, ^{60}Co 源用来模拟反应堆中的高本底, 通过改变 ^{60}Co 与探头之间的距离, 可以得到计数率从 150 到 10 kcps 的本底, 对应于从浅燃耗到深燃耗的情形。 ^{137}Cs 源的计数率分别选择 40 cps (模拟浅燃耗情况, 记为 CS1) 和 130 cps (模拟深燃耗情况, 记为 CS2), 这两个数值的选取是由模拟结果得到。针对 CS1 的情况, 每 10 s 记 1 个谱, 记录 30 个谱。针对 CS2 的情况, 每 25 s 记 1 个谱, 记录 5 个谱。共得到了 2904 个谱文件, 利用这些结果可以考察谱分析的可重复性及误差分析^[21]。

谱分析是燃耗测量系统中的核心和关键环节, 直接关系到燃耗测量的精度, 必须选择合适的方法, 并对其可靠性和稳定性进行充分的验证。谱分析主要可以分成两个步骤: 寻峰和拟合^[22]。通过寻峰算法先判断所关注的峰区内的候选峰的位置, 由于统计涨落的干扰会导致峰的位置和峰的边界难以确定, 尤其是在利用计算机自动分析中, 寻峰比目视确定更加困难。然后进行单峰或多峰的拟合, 求取峰面积和峰计数率, 由于全能峰不可能是理想的高斯分布, 必须要扣除本底的影响。我们采用了比较直观的直线本底。全能峰的净面积 N 等于总面积 T 减去本底计数 B , 由误差传递公式可得

$$\sigma_N = \sqrt{(\sigma_T)^2 + (\sigma_B)^2} = \sqrt{T + B} = \sqrt{N + 2B} \quad (3)$$

由此式可见, 本底对总不确定度有显著贡献, 尤其是在强本底情况下, 所以计算本底时取了附近几个点做平均, 以减少涨落的影响^[21]。

最终对实验谱分析得到的全能峰的净计数率 n 及相对误差 ($\sigma_n/n = \sigma_N/N$) 随入射计数率的变化如图 5 所示。每一个输入计数率条件下均测量多组结果以检验测量的可重复性和分散度, 图中实线就是用 Bessel 公式得到的 M 次测量的标准差 s 代替 σ_n 所得的相对误差。所以图 5(a) 中在 CS2 情况下由于测量时间长 (25 s) 而得到较小的相对误差, 但 CS1 情况下由于测量次数多 ($M = 30$) 而实线的涨落比较小。当然两

者结果的差别在误差范围以内, 这也证明了谱分析的正确性和可靠性, 而且可以看出在总计数率约为 30 kcps 的典型深燃耗情况下, 相对误差约为 2.8% 。而图 5(b) 显示的是谱分析得到的 662 keV 全能峰计数率随输入计数率 (由 ^{60}Co 来调节) 的变化关系, 全能峰的净计数率分别在 40 cps 和 130 cps 左右, 和输入是一致的, 且在强本底下这一计数率也能很好的重现。实验点附近的虚线和两条点线标识了 CS1 和 CS2 情况中不同入射率下所得的全能峰计数率的平均值及其附近 $\pm 1\sigma$ 的范围。

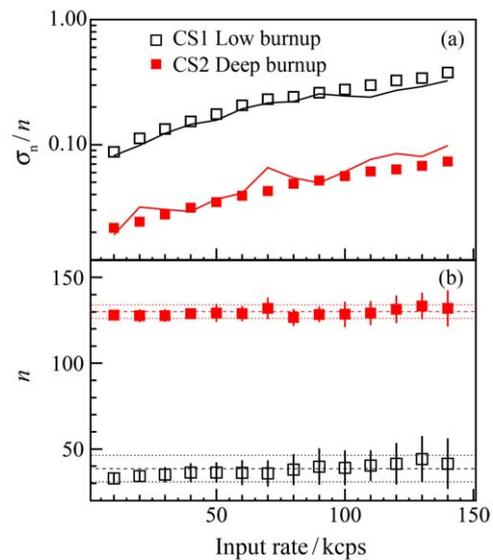


图 5 (在线彩图) ^{137}Cs 的 662 keV 全能峰的计数率 (b) 及其相对误差 (a) 随入射光子计数率的变化

在总计数率约为 30 kcps 的典型深燃耗情况下, 相对误差约为 2.8% , 而本底增加时虽然误差增大, 但是谱分析仍能得到比较准确的值, 显示了谱分析算法的稳定性和可靠性。

双源法得到的能谱中没有包括 662 keV 附近干扰峰的影响。为了进一步验证谱分析的结果, 我们还用 KORIGEN+MCNP 模拟计算了不同燃耗、不同中子辐照下的能谱, 所用几何和原型系统相同。图 6 显示了平衡堆芯下 3 种不同中子通量 NF1, NF2, NF3 情况下谱分析得到 ^{137}Cs 活度和模拟时输入的 ^{137}Cs 活度^[23], 可以看到在深燃耗时分布越来越趋近于 $y = x$ 这条直线, 其内部的直方图显示了对燃耗值大于 40000 MWd/tU 的燃料球的谱分析得到的活度 A_{rec} 和输入的活度 A_{ini} 比值的分布, 通过对其做高斯拟合可以得到其均值在 0.98 , 方差为 0.026 。通过模拟和实验的对比, 验证了算法在峰面积涨落范

国内的准确性，在各种不同功率历史条件下，深燃耗时谱分析结果都能和模拟谱的输入值符合得很好。所以干扰峰并没有造成谱分析结果的恶化。对于深燃耗球，谱分析的误差仍能控制在 3.0% 以内。

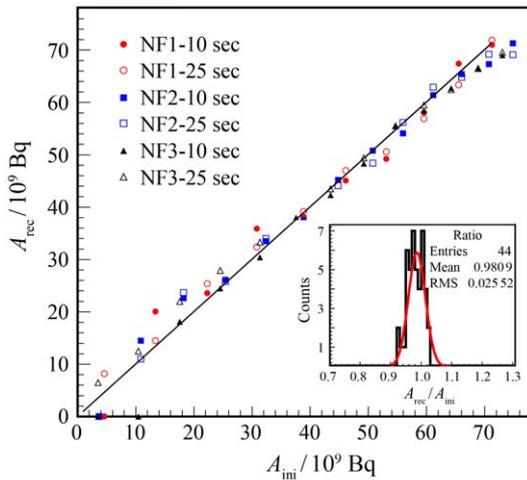


图 6 (在线彩图) 谱分析得到 ^{137}Cs 活度和模拟时输入的 ^{137}Cs 活度关系图

其中的实线为 $y = x$ 。内部的小图显示的是燃耗较深的燃料球的 $A_{\text{rec}}/A_{\text{ini}}$ 分布。

4 原型系统刻度因子

HTR-PM 中使用的燃料球的结构示意图如图 7 所示^[2, 10]。其直径为 60 mm，其中燃料核芯为直径 0.5 mm 的 UO_2 小球，外面包有 3 层热解碳和 1 层 SiC，包覆后的颗粒直径为 1.0 mm，把许多包覆的颗粒均匀地弥散在直径为 50 mm 石墨基体的燃料区内，外区为 5 mm 厚的不含燃料的石墨球壳，主要功能是保护中心燃料区。这样的燃料球设计具有耐高温、耐磨和破损率低等特点，即使在 1600 °C 的温度下，致密的 SiC 包覆层仍保持其完整性，能使气态和金属放射性裂变产物几乎完全被阻留在包覆颗粒内，这种结构

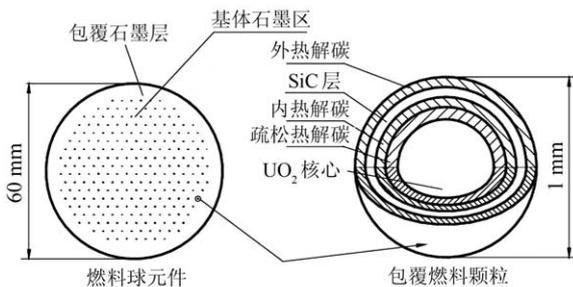


图 7 燃料球结构示意图

的燃料球亦经受了严格的耐冲击实验。

理想情况下刻度源和待测的燃料球完全相同， $r_c = 1$ 。但是对于 HTR-PM，没有现成的燃料球可供活度刻度使用。最相似的方法就是在石墨球中均匀掺杂具有确定活度的放射性物质，但是这样在制作上很难实现。所以我们采用在与燃料球具有相同几何的石墨球中心放置点源来作标准源，但这必须要考虑修正的问题，特别是标准源和燃料球中的自吸收效应的影响。因此，待测燃料球活度可表示为

$$A_x = \frac{\eta_{\text{std}}}{\eta_x} \times \frac{n_x}{\eta_{\text{std}}} \equiv r_c \times \frac{n_x}{\eta_{\text{std}}} \simeq \left(\frac{\eta_{\text{std}}}{\eta_x} \right)_{\text{MC}} \times \frac{n_x}{\eta_{\text{std}}} \quad (4)$$

最后一步利用了 Efficiency Transfer 方法，需要做 Monte Carlo 模拟来得到修正值 r_c ^[24]。在我们的实验条件下，燃料球和刻度源的效率刻度因子 η 最主要的区别就在于燃料球(石墨球)以及定位器的吸收，其余几何效应的影响对比值完全没有贡献。因此有

$$r_c \simeq \frac{f_{\text{sc}}^x f_s^x}{f_{\text{sc}}^{\text{std}} f_s^{\text{std}}} \neq 1, \quad (5)$$

其中： f 为吸收因子；上标 std 代表标准源；x 代表燃料球；下标 sc 代表定位器；s 代表石墨球(燃料球)的自吸收。为验证刻度方法的可行性，首先通过 Monte Carlo 模拟和实验得到了标准源的 $f_{\text{sc}}^{\text{std}}$ 和 f_s^{std} ，通过两者的符合验证模拟的准确性。然后通过模拟得到 f_{sc}^x 和 f_s^x ，进而求出修正值 r_c ^[15]。

为了减小未定系统误差及更好地估计误差的大小，我们采用组合实验测量了放射源离探头不同距离时的情况。对标准刻度源来讲，整个源都在准直器的视野内，计数率 $n(r) \propto r^{-2}$ ，完全是出于几何立体角的限制，在双对数坐标下计数率和距离之间应为斜率为 -2 的一条直线，如图 8 所示，C1, C2, C3 分别代表点源、点源+石墨球、点源+石墨球+定位器 3 种情况。从不同条件下直线截距的差值就可以得到石墨球和定位器的吸收因子：

$$\ln(f_s) = b_2 - b_1, \quad (6)$$

$$\ln(f_{\text{sc}}) = b_3 - b_2, \quad (7)$$

其中： b_1, b_2 和 b_3 分别对应图 8 中 C1, C2 和 C3 三种情况下拟合所得直线的截距，实验和模拟情况下得到的结果见表 1。得到截距之后，对于给定的距离，真实源的单点单次测量(单次模拟)的不确定度可

以由不同距离的结果预报得到, 根据误差预报公式, 95% 置信水平时的相对不确定度为^[25]

$$U_{0.95}(y) = t s_y \left[1 + \frac{1}{M} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \right]^{1/2}, \quad (8)$$

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum_i (y_i - (b - 2x_i))^2}{M - 2}}. \quad (9)$$

其中: $x_i = \ln(r_i)$, $y_i = \ln(n_i)$ 分别为第 i 次测量时距离和全能峰计数率的对数; M 为测量次数; $t = 2.36$, 为 95% 置信水平时的 t 因子。

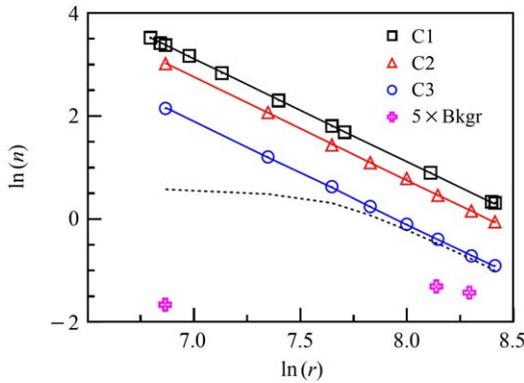


图 8 (在线彩图) 模拟和实验结果比较

黑色方块为裸源情况 (C1), 红色三角代表裸源+石墨球 (C2), 蓝色圆圈表示裸源+石墨球+定位器 (C3), 粉色十字符号是五倍的本底。以上都是实验结果, 实线为相应模拟得到的结果。虚线为模拟得到的燃料球结果。

根据 HTR-PM 将来的几何条件, 距离选择 4510 mm, 由实验值和模拟值预测得到的该距离处 $U_{0.95}(y)$ 见表 1, 由式 (6) 和 (7) 得到的吸收因子的结果见表 2, 可以看到模拟和实验得到的吸收因子在误差范围内是完全一致的。

表 1 裸源 (C1)、裸源+石墨球 (C2)、裸源+石墨球+定位器 (C3) 3 种不同情况下 $\ln(n) \sim \ln(r)$ 拟合所得直线的截距及其误差, 斜率固定为 -2

| 情况 | 实验 | | 模拟 | |
|----|-----------|---------------|-----------|---------------|
| | b_i | $U_{0.95}(y)$ | b_i | $U_{0.95}(y)$ |
| C1 | 17.110(4) | 0.045 | 17.113(3) | 0.007 |
| C2 | 16.759(4) | 0.045 | 16.756(4) | 0.010 |
| C3 | 15.898(3) | 0.041 | 15.896(4) | 0.017 |

表 2 实验和模拟得到的吸收因子

| 吸收因子 | 实验 | | 模拟 |
|--------------------------|----------|----------|----------|
| | 刻度源 | 刻度源 | 燃料球 |
| 石墨球吸收因子 f_s | 0.704(3) | 0.700(3) | 0.739(7) |
| 定位器吸收因子 f_{sc} | 0.423(2) | 0.423(2) | 0.375(7) |
| 总吸收因子 $f_s \cdot f_{sc}$ | 0.298(1) | 0.296(1) | 0.277(5) |

在模拟结果和实验结果完全一致的基础上, 可以利用 Efficiency Transfer 方法^[24], 计算真实燃料球的修正因子。对于燃料球来说, 也分 3 种情况。

(1) 具有燃料球的几何条件, 但其中的材料为真空, 无定位器。这对应于刻度源情况下的裸源 (C1)。

(2) 具有燃料球的几何条件和真实材料, 但是无定位器。这对应于刻度源包覆在石墨球中的情形 (C2)。

(3) 具有燃料球的几何条件和真实材料, 同时还有定位器。这对应于真实使用时刻度装置的情形 (C3)。

图 8 中的虚线就是 C3 情况下 662 keV 全能峰计数率与距离的变化关系, 由于准直器几何因子的影响, 在近距离时会有部分射线被准直器阻挡, 导致 n 偏离平方反比的分布, 所以就不能像标准源的情形测多个点再进行拟合后再求吸收因子, 而只能根据单个距离的结果。在距离为 4510 mm 时模拟得到的 C1, C2 和 C3 3 种情况下的计数率分别为 1.280, 0.946 和 0.355, 由它们的差值即可得到燃料球情况下的吸收因子 f_s 和 f_{sc} , 见表 2。

考虑到燃料球和标准源模拟时的最主要区别在于抽样时所取范围不同, 所以置信限可以取和标准源相同的值, 均采用式 (8) 和 (9) 的计算结果。最终可以得到燃耗测量系统原型的修正因子 $r_c = 1.07 \pm 0.02 (p = 0.95)$ 。综合上述结果, 燃料球中 ^{137}Cs 活度 A 与测量得到的 662 keV 全能峰净计数率 n 的关系为

$$A = \frac{n}{\eta_{\text{std}}} \times 1.07. \quad (10)$$

5 总结

作为高温气冷堆燃料装卸系统的一部分, 燃耗测量系统是保证燃料装卸系统正确运行的关键信号来源, 是保证燃料完整性、安全性和堆芯装料平衡的关

键因素之一。采用 γ 谱仪分析裂变产物活度,进而确定核燃料的燃耗的方法在国际上已经获得广泛的应用。本课题的主要创新点是研究在高温气冷堆核电站示范工程的工程实际要求下,如何高精度并快速地完成燃料球的燃耗深度的测量。燃耗测量系统通过在线测量燃料球中裂变产物核素 ^{137}Cs 的活度进而计算燃料燃耗,可知燃耗测量误差主要来自 ^{137}Cs 活度的测量和燃耗的计算。 ^{137}Cs 活度测量的误差来自于标准刻度系数的测定、修正因子的误差和燃料球谱中 ^{137}Cs 特征峰峰面积(计数率)的测量误差。燃耗计算过程的误差主要是来自于燃料球功率历史的差异。根据误差传递公式,可以得到对深燃耗球 25 s 测量的结果的误差范围在 3.7%~4.2%,在此基础上研制了包括高纯锗探测器、准直器、屏蔽体以及刻度源的一套全尺寸燃耗测量系统原型,并确定了其可行性和可靠性,完成了在线燃耗测量的控制程序及流程测试。

HTR-PM 已于 2012 年 12 月正式开建,预计燃耗测量系统将在不久以后在运行中的 HTR-PM 中投入使用,届时可以利用反应堆上的真实实验数据做进一步的分析。

参考文献:

- [1] WAND D, LU Y. Nuclear Engineering and Design, 2002, **218**: 3.
- [2] WU Z, ZHANG Z. Advanced Nuclear Energy System and High Temperature Gas-cooled Reactor [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004. (in Chinese)
(吴宗鑫, 张作义. 先进核能系统和高温气冷堆[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.)
- [3] IAEA TECDOC. Advances in HTGR Fuel Technology, 2011.
- [4] WU Z, LIN D, ZHONG D. Nuclear Engineering and Design, 2002, **218**: 25.
- [5] XU Y, ZUO K. Nuclear Engineering and Design, 2002, **218**: 13.
- [6] ZHANG Z, WU Z, SUN Y, *et al.* Nuclear Engineering and Design, 2006, **236**: 485.
- [7] ZHANG Z, SUN Y. Nuclear Engineering and Design, 2007 **237**: 2265.
- [8] ZHANG Z, WU Z, WANG D. Nuclear Engineering and Design, 2009, **239**: 1212.
- [9] HAWARI A, CHEN J, SU B, *et al.* IEEE Transaction on Nuclear Science, 2002, **48**(3): 1249.
- [10] LI T. Research and Primary Design of On-line Burnup Measurement System for High Temperature Gas-cooling Reactor [D]. Beijing: Tsinghua University, 2006. (in Chinese)
(李桃生. 高温气冷堆在线燃耗测量系统研究与初步设计[D]. 北京: 清华大学, 2006.)
- [11] MATSUURA S, TSURUTA H, SUZAKI T, *et al.* Journal of Nuclear Science and Technology, 1975, **12**: 24.
- [12] MATSSON I, GRAPENGIESSER B. Applied Radiation and Isotopes, 1997, **48**: 1289.
- [13] MATSSON I. ORIGEN2 simulations of spent BWR fuel with different burnup, power history and initial enrichment. SKI Report, 1995.
- [14] IQBAL M, MEHMOOD T, AYAZUDDIN S, *et al.* Annals of Nuclear Energy, 2001, **28**: 1733.
- [15] YAN W, ZHANG L, ZHANG Z, *et al.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2013, **712**: 130.
- [16] LI T S, FANG D, LI H, *et al.* Nuclear Electronics & Detection Technology, 2006, **26**: 129. (in Chinese)
(李桃生, 方栋, 李红, 等. 核电子学与探测技术, 2006, **26**: 129.)
- [17] DANIEL F, NASYROW R, TOSCANO E. Burn-up determination of high temperature reactor spherical fuel elements by gamma spectrometry[C]// Proceedings HTR2006: 3rd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, 2006.
- [18] ZHANG L G, LI T S, FANG D. Nuclear Power Engineering, 2008, **29**: 88. (in Chinese)
(张立国, 李桃生, 方栋. 核动力工程, 2008, **29**: 88.)
- [19] FISCHER U, WIESE H W. Verbesserte konsistente Berechnung des nuklearen Inventars abgebrannter DWR-Brennstoffe auf der Basis von Zell-Abbrand-Verfahren mit KORIGEN, Report KfK-3014. Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1983.
- [20] YAN W, ZHANG L, ZHANG Z, *et al.* Chinese Physics C, 2013, **37**(11): 116201.
- [21] YAN W, ZHANG L, ZHANG Z, *et al.* Chinese Physics C, 2012, **36**(11): 1082.
- [22] PANG J. Data Analysis of γ spectra [M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1990. (in Chinese)
(庞巨丰. γ 能谱数据分析[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1990.)
- [23] YAN W, ZHANG L, ZHANG Z, *et al.* Nuclear Engineering and Design, 2014, **267**: 172.
- [24] LEPY M, ALTZITZOGLOU T, ARNOLD D, *et al.* Applied Radiation and Isotopes, 2001, **55**: 493.
- [25] SEBER G, LEE A. Linear regression analysis [M]. Wiley-Interscience, 2003.

Burnup Measurement Study and Prototype Development in HTR-PM

YAN Weihua¹, ZHANG Ligu², ZHANG Zhao¹, XIAO Zhigang¹

(1. Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Institute of Nuclear And New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In a pebble-bed core which employs the multi-pass scheme, it is mandatory to determine the burnup of each pebble after the pebble has been extracted from the core in order to determine whether its design burnup has been reached or whether it has to be reinserted into the core again. The burnup of the fuel pebbles can be determined by measuring the activity of ^{137}Cs with an HPGe detector because of their good correspondence, which is independent of the irradiation history in the core. Based on experiments and Geant4 simulation, the correction factor between the fuel and calibration source was derived by using the efficiency transfer method. By optimizing spectrum analysis algorithm and parameters, the relative standard deviation of the ^{137}Cs activity can be still controlled below 3.0% despite of the presence of interfering peaks. On the foundation of the simulation and experiment research, a complete solution for burnup measurement system in HTR-PM is provided.

Key words: HTR-PM; burnup measurement; Monte Carlo simulation; HPGe; γ activity

Received date: 12 Sep. 2013; **Revised date:** 21 Sep. 2013

Foundation item: National Science and Technology Major Project(ZX06901)

Corresponding author: XIAO Zhigang, E-mail: xiaozg@tsinghua.edu.cn.

<http://www.npr.ac.cn>