

固态反应堆次临界系统 中子照相处的 $n-\gamma$ 测量

宋景和 史永谦

(中国原子能科学研究院反应堆工程研究设计所, 北京, 102413)

中子照相时, 中子照相处的 $n-\gamma$ 比是控制成像对比度的 1 个重要因子, 在中子源激励的固态反应堆的次临界系统上对 $n-\gamma$ 比进行了实验研究。中子通量密度采用固体核径迹探测器测量, γ 辐射剂量率用热释光探测器测定。测得的 $n-\gamma$ 比与用其它中子照相装置测量的结果进行了比较, 结果在数量级上是一致的。

关键词 $n-\gamma$ 比 中子照相 中子源激励的固态反应堆次临界系统 核固体径迹探测器 热释光剂量探测器

中子照相是 70、80 年代推广的 1 种无损检测新技术。它利用中子很易穿透金属等重质材料(不含对中子强吸收物质)而不易穿透轻质材料(特别是含氢物质)的特性, 可以很清晰地显示出金属容器中的含氢轻质材料, 如水、火药、橡胶密封圈、有机粘接剂、金属腐蚀产物等, 这正是 X、 γ 射线照相所不及之处。

根据我国目前现有的成熟技术, 用国内已能生产的中子发生器与氢化锆固态零功率反应堆次临界系统相结合, 可满足中子照相所需要的中子束强度^[1]。

影响中子照相质量的因素除中子束强度外, 还与中子能谱硬度、准直器的长径比 L/D 和 $n-\gamma$ 比等有关。其中, $n-\gamma$ 比是控制成像对比度的 1 个因子。本实验对固态堆次临界倍增系统在中子照相位置处的 $n-\gamma$ 比进行测量, 为今后在该反应堆上设计专用中子照相的次临界倍增系统提供参考数据。

1 实验原理

$n-\gamma$ 比测量就是在次临界系统的某运行条件下, 测量中子照相处的热中子绝对通量密度和 γ 剂量率值, 从而给出它们的比值。

1.1 热中子通量密度绝对测量

热中子通量密度的绝对测量采用固体径迹探测器。反应堆处于次临界时, 中子通量密度低, 固体径迹探测器不受中子通量密度的限制, 可以累积计数, 空间分辨好, 操作方便, 测量简单。

假设裂变材料靶片中 ^{235}U 核数目为 N_s ,将固体径迹探测器紧贴在靶片上,放在中子通量密度为 φ 的中子场中辐照 T 时间。探测器上的径迹数 N_T ^[2]为

$$N_T = N_s \cdot \varphi \cdot \sigma_f \cdot T \cdot \epsilon \cdot \mu$$

其中: σ_f 为 ^{235}U 的热中子裂变截面, ϵ 为固体径迹探测器的探测效率, μ 为靶片对裂变碎片的自吸收修正系数。由测得的径迹数 N_T 求出测量点的中子通量密度为

$$\varphi = \frac{N_T}{N_s \cdot \sigma_f \cdot T \cdot \epsilon \cdot \mu}$$

1.2 γ 剂量率测量

选用氟化锂 $^7\text{LiF}(\text{Mg}, \text{Tl})$ 热释光剂量探测器测量 γ 剂量率。在中子和 γ 射线混合辐射场中, $^7\text{LiF}(\text{Mg}, \text{Tl})$ 对中子的灵敏度很低。 ^7LiF 热释光剂量探测元件在辐射场中受到 γ 射线的照射而储存能量,在受热时以光的形式将其能量释放出来,发光强度与吸收剂量成正比,通过RGD-3型热释光剂量仪测量其发光总和,从而计算出所受的辐射剂量。

2 实验装置及测点位置

2.1 氢化锆固态零功率反应堆(SZPR)^[3]

SZPR是1座固体慢化剂的热中子零功率装置。SZPR采用富集度为20%的 U_3O_8 粉末燃料棒,以氢化锆和聚乙烯作慢化剂,有机玻璃和聚乙烯作反射层。堆芯氢原子数 N_H 与 ^{235}U 原子数 N_s 之比 $N_H/N_s = 400$ 。

U_3O_8 燃料密封在 $\phi 6\text{mm} \times 1\text{mm}$ 的铝管中构成燃料元件,总长455mm,活性段400mm,两端加铝塞后焊接密封。

堆芯为准六角形,燃料元件插在 $\phi 15\text{mm} \times 4\text{mm}$ 的氢化锆管中或 $\phi 15\text{mm}$ 的聚乙烯棒之间,在堆芯内呈正三角形或正方形排列,栅距为15mm。氢化锆管间的间隙内插有聚乙烯三角条。

SZPR的2根安全棒和2根调节棒,均为镉吸收体,位于堆芯边缘。东西两侧各有可上下移动的反射层,底部有固定反射层。

2.2 通量阱

在次临界装置的结构设计中,为了使堆中子通量密度提高接近 $\frac{1}{1-k_{\text{eff}}}$ 的放大倍数,设计了通量阱^[4]。通量阱通常设计成用高效中子慢化剂(如聚乙烯、石墨、水等)材料制成的圆柱体,在其外围由核燃料组成燃料区,包上反射层。结合SZPR堆的实际情况,对几种通量阱材料进行了实验研究^[1]。在测量n- γ 比时,拔掉活性区物理中心的1根燃料元件,构成1个以空气腔为阱材料的通量阱。

2.3 准直器

该次临界倍增系统产生的中子从堆芯下部引出,堆底部的有机玻璃反射层有一圆柱形孔,经过准直器到达中子照相处。

中子束准直器由硼石蜡浇铸, $L/D = 16$ 。准直器入口直径 D 为15mm,出口直径为30mm。石蜡中硼的作用是吸收准直器内外的散射中子,需要进行中子照相的物体就放在准直器出口处。

准直器的布置见系统实验装置示意图(图1)。

2.4 固体径迹探测器的布置

固体径迹探测器采用白云母片, 厚度为 0.05 mm, 直径为 10 mm。靶片以 ^{235}U 为裂变材料, 其直径为 7 mm。把 ^{235}U 靶片与白云母片紧贴在一起用硫酸纸包好, 用透明胶带固定在测量点。准直器入口和出口各放置 2 个固体径迹探测器。

2.5 γ 剂量探测器的布置

LiF (Mg, Ti) γ 热释光剂量探测器为 3 mm × 3 mm × 0.8 mm 的方形片状探测器。将探测器用硫酸纸包好, 用透明胶纸固定在测量点, 准直器入口放置 3 片, 出口放置 5 片探测器。

3 测量结果及分析

3.1 测量结果

当堆内元件为 697 根时, 次临界系统的 k_{eff} 0.999。在侧反射层中的 1 个孔内放入中子发射率为 $2.4 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 的 Am-Be 中子源。

实验分 4 次进行。前 2 次测量时, 准直器周围无屏蔽, 照射时间均为 1 h。后 2 次测量, 将准直器放在铅室中以屏蔽堆周围的散射 γ 射线, 铅室厚度为 50 mm。准直器入口处无铅屏蔽, 在紧靠反应堆下反射层处放置厚度为 7 mm 的铅皮作屏蔽, 照射时间为 1.5 h。4 次实验结果列于表 1。

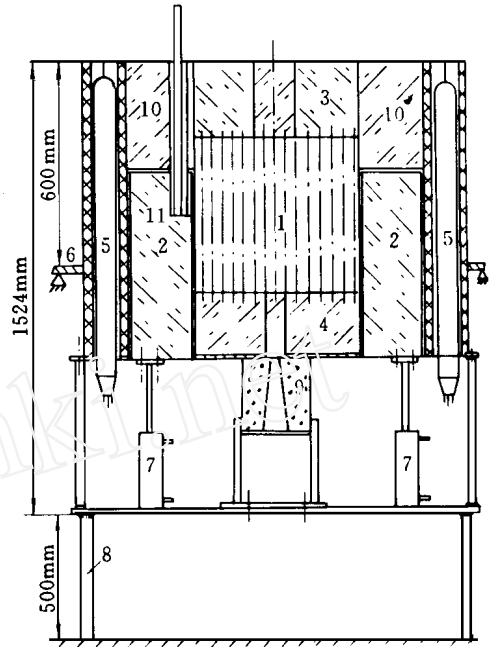


图 1 次临界倍增系统实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of testing device for subcritical reactor system

- 1——堆芯; 2——东、西侧活动反射块; 3——上反射层;
- 4——下反射层; 5——探测器; 6——操作平台;
- 7——气缸; 8——底支架; 9——准直器;
- 10——固定反射层; 11——外中子源

表 1 在准直器入口和出口处用 LiF 热释光 γ 剂量探测器测得的 γ 剂量率平均值 \bar{x}

Table 1 Average values of γ dose rate at the inlet and outlet of collimator

位置	$\bar{x}/\text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$			
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次
入口	$(2.99 \pm 0.23) \times 10^{-4}$	$(3.07 \pm 0.03) \times 10^{-4}$	$(2.22 \pm 0.09) \times 10^{-4}$	$(2.14 \pm 0.05) \times 10^{-4}$
出口	$(9.29 \pm 0.77) \times 10^{-6}$	$(8.51 \pm 0.52) \times 10^{-6}$	$(7.74 \pm 0.52) \times 10^{-6}$	$(7.48 \pm 0.26) \times 10^{-6}$

在反应堆处于同样的次临界状态 $k_{\text{eff}} = 0.999$ 时, 准直器入口和出口处测得的热中子通量密度分别为 $(1.70 \pm 0.09) \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $(1.21 \pm 0.07) \times 10^2 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

在准直器出口处, 即中子照相位置, 准直器有无铅室屏蔽时的 n-γ 比计算结果分别为 $5.74 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}/(\text{C} \cdot \text{kg}^{-1})$ 和 $4.92 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}/(\text{C} \cdot \text{kg}^{-1})$ 。

表 2 列出了 SZPR 装置和 NC-1、NC-2^[4] 2 种²⁵²Cf 热中子照相装置的几项参数值的比较。

表 2 中子照相装置参数比较

Table 2 Parameter comparison of some neutron radiograph facilities

参数	装置名称		
	SZPR	NC-1	NC-2
长径比 L/d	16:1	8:1	15:1
照相处的热中子通量密度 φ ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.21×10^2	2.8×10^2	9.4×10^2
γ 剂量率 \dot{X} ($\text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	7.74×10^{-6}	4.13×10^{-6} ①	2.06×10^{-5} ①
n- γ 比 ($\text{cm}^{-2}/(\text{C} \cdot \text{kg}^{-1})$)	5.74×10^{10}	2.44×10^{11}	1.63×10^{11}

注: ① φ 与 n- γ 均为计算值

3.2 结果分析

从表 1 可看出, 用 LIF 热释光 γ 剂量探测器在准直器入口和出口处不同时间测得的平均 γ 剂量率值均在误差范围内符合 (单次测量给出的误差为几个探测器测量值的均方差), 说明用 LIF 热释光 γ 剂量探测器测量的 γ 剂量率值是可信的。固体径迹探测器测量热中子通量密度的方法是经典方法之一, 中子照相处的 n- γ 比值也是可信的。另外, 从表 2 中的 n- γ 比及中子通量密度可计算出 NC-1 和 NC-2 装置的 γ 剂量率值。SZPR 装置的 γ 剂量率值介于两者之间, 这对测量的 n- γ 比值的可信性是 1 个旁证。铅室屏蔽可提高 n- γ 比值, 从而改善了中子照相的清晰度。

从表 2 可以看出, SZPR 的 L/d 优于其它 2 个装置。在其它条件相同的情况下, 中子照相的质量也应好于其它 2 个装置, 而照相处的热中子通量密度则低于其它 2 个装置。这是因为固态反应堆次临界装置的 $N_H/N_S = 400$, 中子谱较软, 因此中子阱所起的作用不大。若降低 $N_H/N_S < 200$, 则照相处的中子通量密度有所增加, n- γ 比也将随之增大。若将空气阱改成慢化剂阱, 照相处的热中子通量密度和 n- γ 比均将提高, 中子照相的质量将会有较大的改善。另外, 若用产额为 10^{10} s^{-1} 的中子管代替 $2.4 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 的中子源, 各项指标将优于 NC-1 和 NC-2 装置。

次临界系统作为进行中子照相的装置, 为了安全, k_{eff} 不能为 0.999, 而应在 0.995 以下, 这对 n- γ 比值的影响不大。

本实验得到了堆物理研究室中子学课题组全组同志的大力支持和帮助, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 陈华兴, 史永谦, 林生活, 等. 固态零功率堆用于中子照相的某些特性研究. 核科学与工程, 1996, 16(3): 284.
- 2 史永谦, 高雅云, 兰义正, 等. 白云母径迹探测器测量宽范围的绝对热中子通量. 原子能科学技术, 1985 (1): 109.

- 3 罗璋琳, 林生活, 苏著亭, 等. 氢化锆固态零功率反应堆. 核科学与工程, 1995, 15(4): 71.
 4 藤征森编. 镭-252 的制备及应用. 北京: 原子能出版社, 1983.

MEASUREMENT OF n - γ RATIO AT NEUTRON RADIOGRAPH PLACE IN SOLID REACTOR SUBCRITICAL SYSTEM

Song Jinghe Shi Yongqian

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-45, Beijing, 102413)

ABSTRACT

n - γ ratio at the neutron radiograph place is an important factor of controlling image contrast. The measurement of n - γ ratio is made in a neutron source driven solid reactor subcritical system with neutron radiograph. The thermal neutron flux density is measured with Solid State Nuclear Track Detector (SSNTD), and the γ radiation dose rate is detected with Thermoluminescence Dosimeter (TLD). The measured n - γ ratio is compared with those of other neutron radiograph facilities.

Key words n - γ ratio Neutron radiograph Neutron source driven solid reactor subcritical system SSNTD TLD

化学中的激光技术

Laser Techniques in Chemistry

编者: Anne, B. M. 和 Thomas, R. R.。1995 年约翰·威利父子公司出版。

30 年前激光器还是少数物理学家和工程技术人员实验研究的主要课题, 如今已成为化学、物理、生物以及其它各个领域研究的独立工具。它在化学特别是光谱学应用中已发挥重要作用。激光器打开了以前难以想象的化学研究领域。

本卷系《化学技术》第 23 卷, 该卷叙述了十种不同的激光光谱技术: 1. 傅里叶变换非线性谱学; 2. 近红外激光-光热技术; 3. 超声射流中的直接吸收; 4. 紫外高分辨光谱学; 5. 相干真空紫外线的产生; 6. 可见光和紫外光范围时间-分辨的共振喇曼; 7. 流体中 Local Order 和超快动力学——不稳定光栅状光电介质效应实验; 8. 连续孔洞燃烧分子体系的电场效应; 9. 由基态共振喇曼强度激发的电子态性质; 10. 超快共振谱学——方法、理论和应用。

摘自中国原子能科学研究院《科技信息》