

文章编号: 1007-4627(2015)03-0318-05

强中子本底辐射屏蔽体优化设计技术研究

郭洪生¹, 郭骥语², 杨高照¹, 朱学彬¹, 胡青元¹

(1. 中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621999;

2. 中国工程物理研究院工学院, 四川 绵阳 621999)

摘要: 在国内首次采用高强度窄脉冲DPF中子源, 采用直照法测量零功率堆瞬发中子时间常数 α 。由于外中子源本底太强, 导致直照中子和散射中子产生的干扰信号比测量信号高三个量级。为有效地抑制外本底, 针对不同能量的干扰中子, 采用不同材料进行屏蔽。通过数值模拟的方法优化辐射屏蔽体设计, 在屏蔽中子的同时也对散射 γ 进行了有效屏蔽, 使测量信噪比达到了7.5:1, 并与实验结果相符合, 实验中所采用的新型无机晶体也有效抑制了中子本底。

关键词: 瞬发中子时间常数; 非期望中子本底; 数值模拟; 信噪比; 零功率堆

中图分类号: TL81 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.32.03.318

1 引言

在反应堆实验物理中, 零功率堆是一个重要的实验室基准装置, 它可为中子/ γ 射线的模拟辐照实验提供辐射源。零功率堆装置瞬发中子时间常数 α 是表征零功率堆装置中子/ γ 辐射场强度的重要物理参数, 该常数的精确测量可为理论计算校验程序提供技术支持。针对该参数的测量, 近几十年来美国洛伦兹-利弗莫尔实验室、俄罗斯库尔恰托夫工程院与我国中国工程物理研究院等研究机构的科学家在基于概率统计的基础上发展了多种测量方法, 主要有: 方差平均比方法、Rossi- α 法、零几率法、时间间隔分布法、²⁵²Cf随机脉冲源法等。这些方法都是基于概率统计理论, 其共同缺点是费时, 测量一个参数需要7~8 h, 且精度不高。

随着科学技术的发展和国防科研的需求, 需要发展零功率堆瞬发中子时间常数瞬态测量技术。该技术基于以下两点: (1) 首先必须具备高强度, 短脉冲瞬态中子源; (2) 其次探测器必须采用闪烁体+光电倍增管(PMT)组成的电流型探测器(由实验条件限定)。近些年来, 中国工程物理研究院发展了基于稠密等离子体焦点(DPF)技术的脉冲中子源, 在充D-D气体条件下, 其中子产额约为 1×10^9 /pulse, 在充D-T气体条件下, 其中子产额约为 5×10^{10} /pulse, 中子波形脉冲半宽度(WFHM)约为30 ns。可以说, DPF脉冲中子源的研制成功为零功率堆瞬发中子时间常数瞬态测量技术奠定了基础。

2 测量原理

根据中子物理学与反应堆物理的相关理论, 只有零功率堆出射的 γ 射线时间谱才能反映零功率堆的本征瞬发中子时间常数 α 。用DPF脉冲中子源14.1 MeV中子照射零功率堆装置时, 14.1 MeV中子与零功率堆材料发生作用将产生 γ 射线, 采用电流型闪烁探测器测量该 γ 射线时间谱, 通过数学处理可得到装置的瞬发中子时间常数 α 。

零功率堆瞬发中子时间常数 α 的定义为

$$\alpha(t) = \frac{d[\ln I_\gamma(t)]}{dt}, \quad (1)$$

其中: $I_\gamma(t)$ 为测点的 γ 射线强度; t 为时间; α 的量纲为 T^{-1} 。

由式(1), 根据导数的定义, 可以用下面的差分公式来计算 α :

$$\alpha = \frac{\ln V(t+\Delta t) - \ln V(t-\Delta t)}{2\Delta t}, \quad (2)$$

其中: $V(t)$ 为示波器上显示的电流型探测器输出幅度, 在探测器动态范围内, 测量系统是线性的, 探测器的输出电压 $V(t)$ 与测点的 γ 射线强度成正比例关系。

实验数据的处理方法: 根据参考文献[4]所提供的数据处理方法, 采用WFMConver软件包将数字示波器记录的WFM文件转换成离散的数字文件, 再对 γ 测量信号进行数学处理得到装置的 α 值(图1)。图1中, 纵坐标为 γ 射线强度(由于是求对数, 所以 γ 射线强度

收稿日期: 2014-09-20; 修改日期: 2014-12-20

作者简介: 郭洪生(1961-), 男, 福建上杭人, 博士, 研究员, 从事脉冲辐射场诊断技术研究; E-mail: well2462@sina.com。

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

归一), 横坐标为时间(单位 ns)。从图中可求出 α 值为 $-2 \mu\text{s}^{-1}$ 。

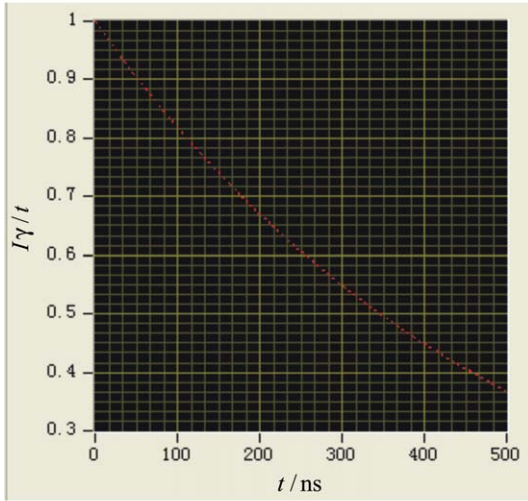


图 1 (在线彩图) 零功率堆出射 γ 射线的时间谱

3 实验方法

零功率堆装置瞬发中子时间常数 α 实验测量布局示意如图 2 所示。I 点为外中子源位置; O 点为零功率堆位置; D 点为探测器位置; d_1 是外源与零功率堆的距离 ($d_1 = 60 \text{ cm}$); d_2 是零功率堆与探测器的距离 ($d_2 = 60 \text{ cm}$); R 是实验大厅的半径。假设高强度脉

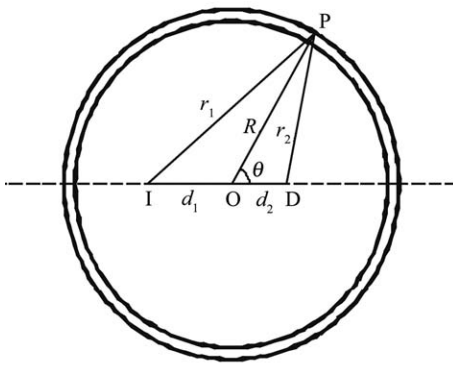


图 2 零功率堆出射粒子时间谱测量示意图

冲 D-T 中子源强度为 $1 \times 10^{10} \text{ n/pulse}$, 中子源脉冲半宽度 (FWHM) 为 25 ns, 中子在 4π 立体角均匀分布。

零功率堆瞬发中子时间常数测量过程: 用高强度脉冲中子源照射零功率堆装置, 脉冲中子与零功率堆装置内的核材料发生相互作用并放出 γ 射线, 该 γ 射线时间谱被闪烁探测器记录并通过电缆传输后显示在示波器上(见图 1 中所示)。对示波器上得到的电流 $I(t)$ (或者是电压 $V(t)$) 波形采用离散化数字处理, 获得一系列离散化数据 ($x_1, x_2, x_3, \dots; y_1, y_2, y_3, \dots$), 利用最小二乘法拟合出 $I(t)$ 曲线, 再利用上述方程 (1) 方法求出零功率堆装置的瞬发中子时间常数 α 。

4 测点处非期望中子对测量信号影响评估

由于实验中测量对象是零功率堆出射的 γ 粒子时间谱, 探测器由闪烁体+光电倍增管组成, 该类型探测器对 γ 光子灵敏的同时也对中子灵敏。由 DPF 中子直照及其散射中子对测量结果所产生的辐射干扰称为“非期望中子本底”, 俗称“外本底”。为便于对辐射干扰对测量结果所产生影响作数学估算, 对测量环境条件作以下近似描述(图 2): (a) 假设实验大厅是球形的, 零功率堆是点源, 位于球心; (b) 不考虑中子的飞行弥散; (c) 中子全部在实验大厅的墙壁表面发生各向同性散射, (d) 不考虑实验大厅其它物质的散射作用; (e) 不考虑二次散射作用和墙壁的自吸收。根据图 2 有:

$$r_1^2 = R^2 + d_1^2 + 2Rd_1 \cos \theta, \quad (3)$$

$$r_2^2 = R^2 + d_2^2 - 2Rd_2 \cos \theta. \quad (4)$$

P 点处的中子注量为

$$I_P = \frac{I_0}{4\pi r_1^2} = \frac{I_0}{4\pi} \cdot \frac{1}{R^2 + d_1^2 + 2Rd_1 \cos \theta}, \quad (5)$$

其中: I_0 为 DPF 源中子强度, 即 $I_0 = (1 \times 10^{10}) / (25 \text{ ns}) = 4 \times 10^{17} \text{ n/s}$ 。探测器 D 点处(图 2 中的 D 点)的散射中子注量率可用下列方程计算^[1,3]:

$$\begin{aligned} i_D &= \int_0^\pi I_P \cdot 2\pi R^2 \sin \theta d\theta \frac{1}{4\pi r_2^2} = \int_0^\pi \frac{I_0}{4\pi} \cdot \frac{1}{R^2 + d_1^2 + 2Rd_1 \cos \theta} \cdot 2\pi R^2 \sin \theta d\theta \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1}{R^2 + d_2^2 - 2Rd_2 \cos \theta} \\ &= \frac{I_0 R^2}{8\pi} \int_0^\pi \left(\frac{1}{R^2 + d_1^2 + 2Rd_1 \cos \theta} \right) \sin \theta d\theta \cdot \left(\frac{1}{R^2 + d_2^2 - 2Rd_2 \cos \theta} \right) \\ &= \frac{I_0 R^2}{8\pi} \int_0^\pi \left(\frac{1}{\frac{2Rd_1}{R^2 + d_1^2} + \cos \theta} \right) \times \left(\frac{1}{\frac{2Rd_2}{R^2 + d_2^2} - \cos \theta} \right) \cdot (-d \cos \theta), \end{aligned} \quad (6)$$

令 $\cos\theta = x$, 则,

$$\begin{aligned} i_D &= \frac{I_0}{32\pi d_1 d_2} \int_{-1}^1 \left(\frac{1}{\frac{R^2+d_1^2}{2Rd_1} + x} \right) \times \left(\frac{1}{\frac{R^2+d_2^2}{2Rd_2} - x} \right) \cdot (dx) = \frac{I_0}{32\pi} \cdot \frac{1}{\frac{R^2+d_1^2}{2Rd_1} + \frac{R^2+d_2^2}{2Rd_2}} \cdot \ln \frac{\left(\frac{R^2+d_1^2}{2Rd_1} + 1\right) \cdot \left(\frac{R^2+d_2^2}{2Rd_2} + 1\right)}{\left(\frac{R^2+d_1^2}{2Rd_1} - 1\right) \cdot \left(\frac{R^2+d_2^2}{2Rd_2} - 1\right)} \\ &= \frac{I_0 \cdot R}{16\pi} \cdot \frac{1}{d_2(R^2+d_1^2) + d_1(R^2+d_2^2)} \cdot \ln \frac{(R^2+d_1^2+2Rd_1) \cdot (R^2+d_2^2+2Rd_2)}{(R^2+d_1^2-2Rd_1) \cdot (R^2+d_2^2-2Rd_2)} \\ &= \frac{I_0 \cdot R}{16\pi} \cdot \frac{1}{d_2(R^2+d_1^2) + d_1(R^2+d_2^2)} \cdot \ln \frac{(R+d_1)^2 \cdot (R+d_2)^2}{(R-d_1)^2 \cdot (R-d_2)^2} \\ &= \frac{I_0 \cdot R}{8\pi} \cdot \frac{1}{d_2(R^2+d_1^2) + d_1(R^2+d_2^2)} \cdot \ln \frac{(R+d_1) \cdot (R+d_2)}{(R-d_1) \cdot (R-d_2)}. \end{aligned} \quad (7)$$

若 $d_1 = 60$ cm, $d_2 = 60$ cm, $R = 250$ cm, 则探测器处散射中子的注量为

$$i_D = 1.4 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}. \quad (8)$$

外源与探测器的距离

$$L^2 = 60^2 + 60^2 - 2 \times 60 \times 60 \times \cos 135^\circ = 12290 \text{ cm}^2.$$

依据上述假设条件, 无屏蔽材料时, 直照中子的注量率为

$$i_z = \frac{I_0}{4 \cdot \pi \cdot L^2} = \frac{4 \times 10^{17}}{4 \cdot 3.14 \cdot 12290} = 2.6 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s} \quad (9)$$

5 测点处 γ 射线注量率评估

依据 Hansen 理论^[3], 零功率堆的峰值中子数 N_{\max} :

$$N_{\max} = I \times \frac{S_0}{\tau \cdot |\alpha|} \cdot (1 - e^{-|\alpha| \cdot \tau}), \quad (10)$$

其中: S_0 为外中子源强度; I 为高强度脉冲中子源等效于零功率堆裂变中子的等效系数; τ 为外中子源宽度:

$$I = \frac{\pi R^2}{4\pi L^2} \cdot p \cdot \bar{\nu}, \quad (11)$$

其中: $\bar{\nu}$ 为零功率堆中平均裂变放出的中子数, 取 $\bar{\nu} = 3.7$; R 为零功率堆装置半径; L 为中子源距零功率堆心的距离; P 为一个 14.1 MeV 的 D-T 中子入射到零功率堆装置内并在其中引起裂变的几率:

$$P = \bar{\Sigma}_f \cdot \frac{4R}{3}, \quad (12)$$

为零功率堆装置的宏观裂变截面。则零功率堆达到峰值时的裂变率 F_{\max} 为

$$F_{\max} = \bar{V} \cdot \bar{\Sigma}_f \cdot N_{\max} = 1 \times 10^8 N_{\max}. \quad (13)$$

对于零功率堆: $E_n = 1.45$ MeV; $\sigma_f = 1 \times 10^{-24}$ cm²; $\bar{\Sigma}_f = 0.11$ cm⁻¹; $v = 1.67 \times 10^9$ cm/s。在距零功率堆心 0.6 m 处的中子峰注量率 ϕ

$$\phi(l=0.6 \text{ m}) = \frac{F_{\max}}{4\pi R^2} \left[\bar{\nu} - 1 - \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_f} \right) \right], \quad (14)$$

式中: $\bar{\nu} = 3.7$, $(\sigma_c/\sigma_f) = 0.0867$ 为零功率堆装置微观吸收截面与微观裂变截面之比, 在距零功率堆心 0.6 m 处的 γ 峰注量率 ϕ_γ

$$\phi_\gamma(l=0.6 \text{ m}) = \frac{F_{\max}}{4\pi R^2} \times 7 \times P, \quad (15)$$

式中: 7 为零功率堆每次裂变放出能量为 1.2 MeV 的平均 γ 光子数; P 为 γ 光子穿透零功率堆装置的几率, 即

$$P = e^{-H/h}, \quad (16)$$

式中: h 为 γ 光子在零功率堆内的平均自由程, 对 1.2 MeV 的 γ 光子, 零功率堆材料的线吸收系数 $\mu_m = 0.0779$ cm²/g, 当零功率堆装置材料密度为 $\rho = 19$ g/cm³ 时,

$$h = \frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_m \cdot \rho} = \frac{1}{0.0779 \times 19} = 0.68 \text{ cm}, \quad (17)$$

H 为零功率堆平均弦长的一半, 即

$$H = \frac{2R}{3}, \quad (18)$$

式中: R 为零功率堆半径。将上述各式代入, 可得距零功率堆心 0.6 m 处的 γ 射线的注量率为

$$i_j = 6 \times 10^9 / \text{cm}^2 \cdot \text{s}. \quad (19)$$

6 非期望中子本底屏蔽效果评估

根据方程(8)，(9)和(19)的计算结果，表1列出了探测器布放处，直照中子(强度归一)、散射中子和记录信号三者的强度比较，由表1中的结果可以看出，在没有屏蔽的条件下，非期望中子本底(直照中子+散射中子)比测量信号高3个数量级。实验时用来记录 γ 射线的探测系统对中子也灵敏，如果对中子不加以屏蔽，将对 γ 射线的测量产生显著影响。中子的干扰主要来自于DPF直射快中子和打到探测器屏蔽体、探测器支架和墙壁反射产生的散射中子。对于来自于DPF脉冲中子源的14.MeV高能中子，拟采用铁做屏蔽体；对于散射低能中子，可采用聚乙烯和含硼聚乙烯进行屏蔽。

表 1 直照中子、散射中子和记录信号强度比较

粒子类型	强度 /(n/cm ² ·s)	相对强度 (直照中子强度归一)
直照中子	2.6×10^{12}	1
散射中子	1.4×10^{12}	0.53
γ 射线的注量	6×10^9	2.3×10^{-3}

采用蒙特卡罗方法(MCNP4C程序)进行了辐射屏蔽的模拟计算和设计，屏蔽计算与设计时作如下考虑：(1) 仅有外源(14 MeV中子源)时考虑各散射体对探测器的影响；(2) 将零功率堆产生的次级光子设为1 MeV的稳态源，保守计算其影响；(3) 装置作为体源，便于考虑自身材料对裂变谱的影响。计算时也考虑了房间大小、墙壁反射、各种金属支架的散射等。

通过模拟确定的屏蔽体方案如图3中所示，屏蔽体为长1000 mm、直径780 mm的圆柱体，中间是测量瞬发中子时间常数 α 用探测器，探测器外包一层30 mm厚的Pb用于屏蔽中子打在散射体上所产生的散射 γ ，屏蔽Pb的外层是一厚100 mm的含硼聚乙烯，主要用于屏蔽低能中子，含硼聚乙烯的外层是一厚200 mm的聚乙烯，用于屏蔽散射中子。在探测器前端开有一长300 mm的锥形测试通道，在进行测量时，在此锥形测

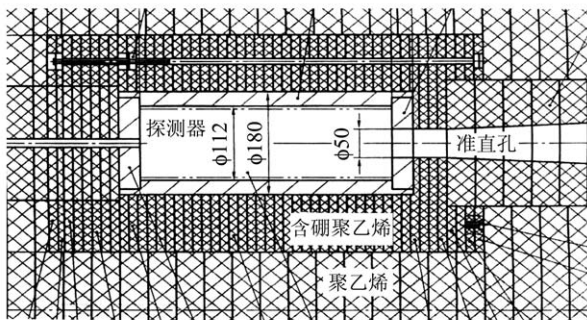


图 3 探测系统屏蔽体设计图

试通道中放置聚乙烯材料以降低来自零功率堆所产生的中子本底。

开展装置瞬发中子时间常数 α 测量时，在对直照中子和散射中子进行屏蔽的同时，为提高测量信噪比，探测系统采用了对 γ 光子较灵敏而对中子相对不灵敏的无机晶体，考虑到时间特性及灵敏度等因素，实验中采用了CeF₃晶体(晶体尺寸 $\phi 50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$)，它对1.2 MeV γ 光子的探测灵敏度比对1.45 MeV裂变能中子的探测灵敏度高7倍。同时，还需考虑的一个因素是如何屏蔽零功率堆出射的裂变能中子(一般能量约为1.45 MeV)，它与测量对象来自同一通道。屏蔽方法一般是在测试通道上放置原子序数比较小的含氢材料作为屏蔽介质，如1 cm厚聚乙烯塞对1.45 MeV裂变能中子的衰减倍数可达1个量级。实验中在测试通道上放置了20 cm长的聚乙烯塞。

通过实施以上屏蔽措施，可对测量信噪比作如下估算：

$$K = \frac{I}{B_1 + B_2} \approx 7.5。$$

其中： I 为光子信号(沉积在 $\phi 50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ CeF₃晶体单位质量上的能量) $1.6 \times 10^{-7} \text{ (MeV/g)}$ ； B_1 为零功率堆装置产生的裂变能中子本底 $8.4 \times 10^{-9} \text{ (MeV/g)}$ ； B_2 为DPF装置产生的散射中子本底 $1.3 \times 10^{-8} \text{ (MeV/g)}$ 。

7 结论

综上所述，利用高强度、窄脉冲DPF中子源首次发展了零功率堆瞬发中子时间常数 α 测量技术，探测系统采用 $\phi 50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ CeF₃晶体+大线性电流光电倍增管组成的电流型闪烁探测器，由于电流型闪烁探测器本身的特点(对 γ 光子灵敏的同时也对中子灵敏)，导致在测点处直照中子和散射中子等非期望中子本底比测量信号高3个量级。在实验中，为有效抑制中子本底，采用数值模拟方法完成了辐射屏蔽体优化设计，主要结果及结论如下：

- (1) 采用5 cm厚的铁块对DPF 14 MeV直照中子进行屏蔽，使直射快中子通量降低了约4个量级；
- (2) 采用100 mm厚的含硼聚乙烯和200 mm厚的聚乙烯对散射中子和低能中子进行了有效屏蔽；
- (3) 采用30 mm厚的Pb包裹探测器，有效地屏蔽了次级 γ 射线；
- (4) 采用 $\phi 50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ CeF₃无机晶体作为探测媒介，对 γ 光子探测灵敏度提高7倍，有效提高了测量信噪比；

(5) 在测试通道上放置 20 cm 长聚乙烯塞, 有效屏蔽了来自于零功率堆出射的裂变能中子。

实验中通过采用上述措施有效地抑制了高强度、窄脉冲高能中子及散射中子对测量信号的影响, 测量信噪比达到了 7.5 左右, 与实验测量值相符, 证明我们所采用的数值模拟及屏蔽措施是有效的。

参考文献:

- [1] XIE Zhongsheng. Analysis of Physics om the Reactor[M]. Beijing: Nuclear Energy Publishing House(A), 1985: 30-52. (in Chinese)
(谢仲生. 核反应堆物理分析[M]. 北京: 原子能出版社(上), 1985: 30-52.)
- [2] Fudan University, Qinghua University, Beijing University. The Experimental Methods of Nuclear Physics[M]. Beijing: Nuclear Energy Publishing House(B), 1981: 237-325. (in Chinese)
(复旦大学、清华大学、北京大学, 原子核物理实验方法[M]. 北京: 原子能出版社(下), 1981: 237-325.)
- [3] Purouaphieo. Physics of Experimental Reactor[M]. Beijing: Nuclear Energy Publishing House, 1988: 142-196. (in Chinese)
(普罗菲奥. 实验反应堆物理学. 北京: 原子能出版社, 1988: 142-196.)
- [4] TDS Digitizing Oscilloscopes Performance Verification and Specifications 071-0630-03 [EB/OL] [2014-03-15]. <http://www.tek.com/downloads>

Development of an Optimizing Design for the Radiation Shielding with Intense Neutron Extra-background

GUO Hongsheng^{1,1)}, GUO Qiyu², YANG Gaozhao¹, ZHU Xuebin¹, HU Qingyuan¹

(1. Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China;

2. Worker's Education College; China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China)

Abstract: The value of prompt neutron multiplication, α , is measured under the condition of using a denser plasma focus(DPF) neutron-source irradiating zero power assembly for the first time in China. The acquired signal is lower three orders of magnitudes than that of the noise caused by direct and scattered neutrons from the extra-high-intensity neutron-source. Using different kinds of material to decrease the noise caused by neutron with different kinds of energies, an optimized design for radiation shielding is developed by the method of numerical simulation to suppress noise signal. Both neutron and γ -ray are shielded simultaneously. The Signal/Noise Ratio (SNR) with the optimal design was up to 7.5:1 and was consistent with the experimental results. The noise of neutron is decreased effectively by the new kind of unorganic crystals used.

Key words: prompt neutron multiplication; un-expect neutronbackground; numerical simulation; signal/noise ratio; zero power assembly

Received date: 20 Sep. 2014; Revised date: 20 Dec. 2014

1) E-mail: well2462@sina.com.

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