

含硼轻材料屏蔽 14.1 MeV 中子的实验研究

郭洪生, 彭太平, 何锡钧, 陈法新, 冯春

(中国工程物理研究院 核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 在零功率堆中子衰变常数(常数)瞬态测量实验时, 必须进行本底中子的屏蔽。利用理论计算和实验测定的方法, 得到含 B_4C 聚乙烯对 D-T 中子的屏蔽效果, 并在此基础上, 设计了探测屏蔽系统用于常数的瞬态测量实验。测量结果与系统设计值相符, 测量数据的信噪比与理论计算结果相吻合。

关键词: 中子衰变常数; 屏蔽效果; 含 B_4C 聚乙烯

中图分类号: TL811

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2005)05-0474-03

Radiation-Shielding Effects of the $B_4C + (CH_2)_n$ to D-T Neutron

GUO Hong-sheng, PENG Tai-ping, HE Xi-jun, CHEN Fa-xin, FENG Chun

(Chinese Academy of Engineering Physics, P. O. Box 919-212, Mianyang 621900, China)

Abstract: It is necessary to shield the background neutron during the measurements of neutron decay constant on the zero power assembly. Based on the numerical calculation and experiment measurement, the radiation-shielding effects of the $B_4C + (CH_2)_n$ material to D-T neutron are gained. Using the results, detecting shielding system was designed for measuring the prompt neutron decay constant of the zero-power assembly. The measurement result is agree with the design value. The signal-to-noise ratio (9/1) of the neutron decay constant is similar to the numerical calculation (7.5/1).

Key words: neutron decay constant; radiation-shielding effects; $B_4C + (CH_2)_n$ material

在反应堆物理中, 零功率堆瞬发中子衰变常数是一重要物理参数, 该参数是表征反应堆中子辐射场强度的特征参量。测量该参数的方法有方差平均比方法、Rossi法、零几率法、时间间隔分布法、 ^{252}Cf 随机脉冲源法等。

设零功率堆系统的增殖系数为 $k(k < 1)$, 脉冲中子是 1 个 14.1 MeV 高能中子源, 强度为 S_0 、脉冲宽度为 (矩形中子源), 则堆内中子数随时间的变化为:

$$\frac{dn(t)}{dt} = -\lambda n(t) + S(t) \quad (1)$$

式中: $S(t)$ 是有效中子源强 (s^{-1}), 当 $0 \leq t < \tau$ 时, $S(t) = S_0$, 当 $t > \tau$ 时, $S(t) = 0$; S_0 是矩形中子源强。

在 $0 \leq t < \tau$ 区间内, 式(1)变为:

$$\frac{dn(t)}{dt} = -\lambda n(t) + S_0 \quad (2)$$

边界条件为 $n(t)|_{t=0} = 0$ 。

收稿日期: 2004-01-02; 修回日期: 2004-08-01

作者简介: 郭洪生(1961—), 男, 福建上杭人, 副研究员, 核辐射脉冲测量技术专业

解式(2)得:

$$n(t) = \frac{S_0}{\lambda} (e^{-\lambda t} - 1) \quad (3)$$

对于零功率堆, λ 为负值, 上式变为:

$$n(t) = \frac{S_0}{|\lambda|} (1 - e^{-|\lambda| t}) \quad (4)$$

在 $t > 0$ 区间内, 式(1)变为:

$$\frac{dn(t)}{dt} = -\lambda n(t) \quad (5)$$

$$n(t) \Big|_{t=0} = \frac{S_0}{|\lambda|} (1 - e^{-|\lambda| t}) \quad (6)$$

解式(6)得:

$$n(t) = \frac{S_0}{|\lambda|} (1 - e^{-|\lambda| t}) e^{-\lambda t} = \frac{FS_0}{|\lambda|} (1 - e^{-|\lambda| t}) e^{-|\lambda| t} \quad (7)$$

式中: F 为脉冲中子源的中子等效为堆内裂变中子的系数。

从以上分析可看出, 进行 λ 常数的瞬态测量, 需用强脉冲中子源激励装置产生 λ 辐射的时间谱, 再通过对该时间谱的数据处理得出 λ 。为保证堆装置的出射 λ 信号强度可供探测器测量, 对外中子源的源强有一定要求。强中子源势必产生强的中子散射本底, 若堆装置产生的散射中子比 λ 射线强, 不采取屏蔽措施, 本底则远高于信号, 将无法进行 λ 测量。因此, 必须对本底采取屏蔽措施。

1 屏蔽体的计算与加工

一般情况下, 测量测点处的中子时, 用重介质铅、钨等材料来屏蔽 λ 射线。选择适当厚度的屏蔽介质, 可以达到较好的屏蔽效果。钨的屏蔽效果一般比铅的好, 但钨的价格昂贵, 铅是比较理想的屏蔽 λ 射线的介质。测量测点处的 λ 射线能谱时, 用含氢的轻介质, 如聚乙烯来屏蔽中子, 可以达到比较好的屏蔽效果。计算聚乙烯的微观总截面时, 必须考虑碳的贡献。

1.1 基本情况

实验所用中子源参数如下: 每脉冲中子总数为 10^{10} ; 中子波形半高宽(FWHM)为 $25 \mu s$; 角分布为 4 均匀分布。因此, 峰值中子强度 $I_0 = 4 \times 10^{17} s^{-1}$ 。外源与零功率堆相距 60 cm, 零功率堆与探测器相距 60 cm, 二者夹角 135° 。经计算^[1], 距零功率堆 60 cm 处(探测器布放

处)的直照中子、散射中子和记录信号强度分别为 3.5×10^{12} 、 1.4×10^{12} 、 $6 \times 10^9 cm^{-2} \cdot s^{-1}$ 。可见, 如果不作屏蔽, 外中子本底则比测量信号高 3 个数量级。

为了更好地设计屏蔽体, 采用粒子输运方法结合 Monte-Carlo 计算来指导探测屏蔽系统的设计加工^[1]。探测屏蔽系统的设计一般都会涉及到粒子输运问题, 通常采用 Monte-Carlo 方法计算。计算屏蔽时, 作如下考虑: 1) 仅有外源(14 MeV 点源)时, 考虑各散射体对探测器的影响; 2) 将装置产生的次级光子设为 1 MeV 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。

所设计的探测屏蔽系统示于图 1。

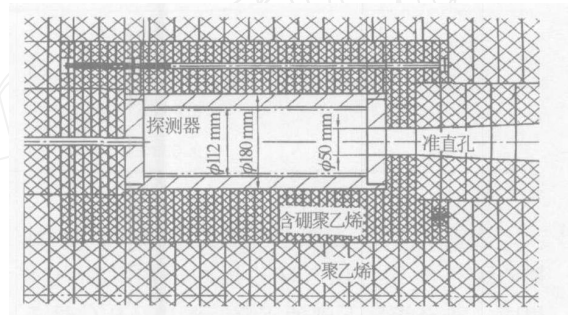


图 1 探测屏蔽系统设计图

Fig. 1 Setup of detecting shielding system

1.2 屏蔽体的加工

如图 1 所示, 探测屏蔽系统主要由聚乙烯、含硼聚乙烯和铅组成, 中间是探测器 ($\phi 12 mm$), 探测器外包 1 层 30 mm 厚的铅, 用于屏蔽散射 λ 射线和聚乙烯吸收中子产生的 λ 射线, 屏蔽铅的外层是厚 100 mm 的含硼聚乙烯, 含硼聚乙烯的外层是厚 200 mm 的聚乙烯, 用于屏蔽散射中子。含硼聚乙烯是一种相对廉价的中子屏蔽材料, 通过研究不同含硼量的聚乙烯对 14 MeV 中子的屏蔽性能, 可合理地设计探测屏蔽系统。

2 屏蔽实验

含硼聚乙烯实验样品是由不同比例的 B_4C 和 $(CH_2)_n$ 粉末制成的球壳系统。3 种含硼聚乙烯球中 B_4C 的质量百分比分别为 0、10% 和 50%, 相应于吸收/慢化原子比为 0、3.6% 和

23.7%, 其平均密度分别是 (0.802 ± 0.016) 、 (0.856 ± 0.017) 和 $(1.26 \pm 0.03) \text{ g/cm}^3$ 。

实验在 200 kV ns 加速器上进行, 用 $T(d, n)$ 反应提供 14 MeV 中子源。T 靶位于聚乙烯球的球心, 探测器放在与 D 束成 18° 的方向上, 距靶心 36 cm。实验采用 ST-401 闪烁体加 Philips2262B 型光电倍增管组成的快中子探测器和 BF_3 正比计数管, 分别测量 3 种含量、3 种厚度共 9 个聚乙烯球的泄漏中子, 计算 9 个球体对 14 MeV 中子的积分泄漏率。由积分泄漏

率随质量厚度的变化可得出 3 种含硼聚乙烯单位质量的分出截面。分出截面的定义为:

$$K = \frac{I}{L} \quad (10)$$

式中: L 是质量厚度, g/cm^2 ; I 是积分泄漏率; K 是单位质量的分出截面, cm^2/g 。

对应于不同的 T , 取不同的积分下限, 得到不同能量下阈的的分出截面。表 1 列出了 3 种聚乙烯在 4 个能阈下的分出截面。

表 1 各种含硼聚乙烯的分出截面

Table 1 Fragile cross section of different kinds of $(\text{CH}_2)_n$ material

能量阈/ MeV	分出截面/ $(\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1})$		
	$(\text{CH}_2)_n$	$(\text{CH}_2)_n + 10\% \text{B}_4\text{C}$	$(\text{CH}_2)_n + 50\% \text{B}_4\text{C}$
> 10	$0.076\ 65 \pm 0.001\ 05$	$0.076\ 62 \pm 0.000\ 82$	$0.052\ 83 \pm 0.000\ 56$
> 7	$0.064\ 43 \pm 0.000\ 86$	$0.072\ 27 \pm 0.000\ 81$	$0.045\ 46 \pm 0.000\ 61$
> 1	$0.041\ 82 \pm 0.000\ 76$	$0.044\ 77 \pm 0.001\ 01$	$0.031\ 47 \pm 0.000\ 94$
> 20	$0.033\ 26 \pm 0.001\ 45$	$0.037\ 71 \pm 0.001\ 45$	$0.026\ 13 \pm 0.000\ 69$

从表 1 可见, 当能量下阈为 10 MeV 时, 纯聚乙烯和含 10% B_4C 聚乙烯的分出截面基本相同。随着能量下阈的下降, 含 10% B_4C 聚乙烯逐渐显示出比纯聚乙烯略好的屏蔽结果, 这是硼的吸收所致。但在测量的能量范围内, 硼的吸收截面较小, 对于 14 MeV 中子, 主要还是氢起慢化作用。所以, 含 50% B_4C 聚乙烯的分出截面最小, 对相同的质量厚度, 它的屏蔽性最差。另一方面, 含 50% B_4C 聚乙烯的密度高, 对相同的线性厚度, 它对中子的衰减最大。

3 结果

应用上述的实验结果, 图 1 所示探测屏蔽系统中的含硼聚乙烯选用的是含 10% B_4C 的聚乙烯, 它的信噪比为:

$$K = \frac{I}{B_1 + B_2} \quad (11)$$

式中: I 为光子信号(沉积在闪烁体单位质量上的能量); B_1 为零功率装置产生的散射中子本

底; B_2 为外中子源产生的散射中子本底, 外中子源及零功率装置中子的强度相对于光子强度归一。

经计算, $I = 1.6 \times 10^{-7} \text{ MeV/g}$, $B_1 = 8.4 \times 10^{-9} \text{ MeV/g}$, $B_2 = 1.3 \times 10^{-8} \text{ MeV/g}$ 。故其信噪比为 7.5。

采用图 1 所示的探测屏蔽系统, 在零功率堆上进行了有外源激励下的瞬态测量实验。根据设计好的探测系统、屏蔽系统、传输系统和记录系统, 进行了中子散射实验、内本底实验和实验测量。测得 $\lambda = 4.9 \mu\text{s}^{-1}$, 与系统设计值 $\lambda = 5 \mu\text{s}^{-1}$ 相符, 实验结果与静态测量方法(如 Rossi-法, ^{252}Cf 裂变源法)等相一致。测量数据的信噪比(约为 9:1)与理论计算结果(约为 7.5:1, 由式(2)给出)相符合。

参考文献:

- [1] 郭洪生. 静态次临界装置衰变常数的瞬态测量方法[D]. 绵阳:中国工程物理研究院, 2002.