

快中子堆脉冲工况下 γ 能谱的实验测定*

雷家荣 袁永刚¹⁾ 魏勇 赵敏智

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所 绵阳 621900)

摘要 根据不同能量的光子经过不同材料和厚度的减弱体时其减弱程度不同,利用不同的减弱体材料和热释光探测元件设计了用于快中子堆 γ 谱测量的叠层式探测器.基于GRAVEL方法,编写了连续谱的解谱程序,并对该程序进行了实验验证,最终测定了快中子堆堆外场点的 γ 能谱.

关键词 响应函数 非线性最小二乘法 吸收剂量

1 引言

快中子堆用于作为 γ 测试性能实验、电子器件抗辐射效应实验和材料老化实验等其他科学研究的辐射源项时,需要知道堆外场点的 γ 光子注量的数据^[1].在脉冲工况下,由于快中子堆的辐射场具有高剂量、高注量率的特性,使用通常的在线仪器无法测定场点的 γ 谱.本文根据不同能量的光子经过不同材料和厚度的减弱体时其减弱程度的不同,设计了适用于高剂量率条件下 γ 能谱测量的叠层式探测器.用EGS4软件模拟了探测器的响应函数,并在单能点上进行了实验验证.结合GRAVEL连续谱的解谱方法测定了快中子堆的 γ 能谱.

2 测量原理

对于某一能量的 γ 射线,射线在物质中某处沉积的能量与入射到物质表面的光子注量的关系式由下式确定^[2]:

$$D = \Phi k, \quad (1)$$

式中 D 的单位为Gy; Φ 为光子注量,单位为 cm^{-2} ; k 为响应函数,单位为 $\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$. D 与 k 的下标“ i ”表示深度为 i .

如果 γ 射线具有能量分布,用 $\Phi(E)$ 表示归一化的

光子注量谱,则(1)式为

$$D_i = \int \frac{d\Phi(E)}{dE} k_i(E) dE.$$

将 γ 光子注量谱离散化,则有以下方程组:

$$D_i = \sum_{j=1}^n \Phi_j \cdot k_{ij} \quad (i=1 \sim m, j=1 \sim n), \quad (2)$$

式中 $\{\Phi_j\}$ 表示离散化的光子注量谱(归一化谱), k_{ij} 则为能量为 E_j 的光子在深度 i 处的响应函数.

如果在深度为 i 的地方置放一小块辐射敏感介质——探测器,并知道对于该介质的响应函数矩阵 $\{k_{ij}\}$,则如测得各深度处探测器介质的吸收剂量,就可通过求解方程组(2)而得到光子注量谱.

3 探测器及其响应函数

3.1 叠层式探测器的研制

探测器(图1)主体由不同厚度的减弱体构成,构成减弱体的材料有氟化锂、铁和铅.在每个减弱体后面放置热释光探测元件(TLD);为了消除不同材料间的剂量突变现象,每个探测元件置于一个3mm厚的Teflon盒中,构成了一个所谓的“固体电离室”.探测器的外围用有机玻璃套固定,最后一个固体电离室后面加了一个20mm高的铅圆柱体,用于减少由于散射光子在最后一个探测元件中产生的干扰.

2005-11-30 收稿, 2006-02-26 收修改稿

* 中国工程物理研究院预研项目(20010206-2)资助

1) E-mail: yyg.2000@yeah.net

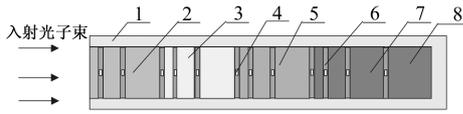


图 1 叠层式探测器

1 有机玻璃套; 2 氟化锂减弱体; 3 铝减弱体; 4 探测片; 5 铁减弱体; 6 氟化锂照射盒; 7 铅减弱体; 8 铅屏蔽体。

3.2 响应函数的模拟

假定光子平行入射到探测器前端面, 在此边界条件下用 Monte Carlo 程序 EGS4^[3-6] 模拟了叠层式探测器在入射光子能量范围为 0.015—12MeV 的响应函数。响应函数表示形式为吸收剂量/光子注量(单位为 Gy/cm⁻²)。

4 解谱程序

通过测量叠层式探测器中不同位置处 TLD 的吸收剂量以及响应函数, 利用公式(2)求解 γ 谱。由于方程(2)属于超定方程组(要解析的未知数的数量远大于限定条件的数量, 即 $i \ll j$), 对于此类方程组理论上存在无穷组解。为了从无穷组解中选出正确的一组数据, 可以用限定边界条件的方法^[7-9], 如多球中子谱仪中子谱的解析中, 用理论模拟的中子谱作为初始谱。

本文采用了连续谱 GRAVEL 方法, 即采用非线性最小二乘法, 用 VB 语言编写了解谱程序。在该实验工作中响应函数最大值可能达到 6400 个数据(能量分组数 \times 响应函数分组数); 为此, 数据的输入和输出采用了 XLS 格式, 整个调试过程采用文本文件和电子表格文件的输出格式。

GRAVEL 解谱方法将公式(2)以公式(3)的形式给出

$$z_i^{(k)} = \sum_v R_{iv} \cdot \exp(\ln \Phi_v^{(k)}), \quad (3)$$

变为下列形式先假设入射初始谱 $\Phi_v^{(0)}$, 计算在此初始谱的条件下的 $z_i^{(0)}$, (R_{iv} 是响应函数矩阵); 根据公式(4)修正初始谱 $\Phi_v^{(0)}$, 修正后的谱用 $\Phi_v^{(k+1)}$ 表示:

$$\Phi_v^{(k+1)} = \Phi_v^{(k)} \cdot \exp \sum_i \left(\ln z_{0i} - \ln z_i^{(k)} \right) \cdot \frac{w_{iv}^{(k)}}{p_i^2}, \quad (4)$$

z_{0i} 为每个探测片的数据; $w_{iv}^{(k)}$, p_i 由公式(5)和(6)给出

$$w_{iv}^{(k)} = \frac{R_{iv} \cdot \Phi_v^{(k)}}{z_i^{(k)}}, \quad (5)$$

$$\lambda_v^{(k)} = \left(\sum_i \frac{w_{iv}^{(k)}}{p_i^2} \right)^{-1}. \quad (6)$$

公式(6)中的因子 p_i 由公式(7)给出

$$p_i = \frac{\sigma_{0i}}{z_{0i}}, \quad (7)$$

σ_{0i} 为实验测量的每个探测片的数据的分散性。

修正后的特征谱计算得的探测片的吸收剂量与实验的吸收剂量的符合程度用 χ^2 表示:

$$\chi^2 = \sum_i \left(\frac{R_{iv} \cdot \Phi_v}{z_{0i}} \right)^2, \quad (8)$$

然后重复上述的迭代过程 ($k=1, 2, 3, \dots$), 当 χ^2 小于 0.08 或迭代次数大于 14 时, 停止整个计算过程。

5 实验验证结果

5.1 响应函数的实验验证

为了保证光子平行入射这一边界条件, 将探测器前端面放在距标准源的 5m 处, 当用钴源作照射源时照射时间为 13h(光子注量为 $1.587 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$), 用铀源作照射源时照射时间为 4h(光子注量为 $3.391 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$)。实验和理论模拟的对比结果见表 1, 从对比结果可以看出各实验点偏差都小于 9%。

表 1 实验和理论模拟的响应函数对比结果

探测片位置	⁶⁰ Co 响应函数 实验值/(Gy/cm ⁻²)	⁶⁰ Co 响应函数 模拟值/(Gy/cm ⁻²)	相对 偏差(%)
1	5.18×10^{-12}	5.06×10^{-12}	2.3
2	4.99×10^{-12}	4.98×10^{-12}	3.4
3	4.69×10^{-12}	4.60×10^{-12}	1.9
4	4.14×10^{-12}	4.26×10^{-12}	2.9
5	3.86×10^{-12}	3.89×10^{-12}	0.7
6	3.39×10^{-12}	3.35×10^{-12}	1.3
7	2.53×10^{-12}	2.47×10^{-12}	2.5
8	2.08×10^{-12}	2.02×10^{-12}	2.8
9	1.78×10^{-12}	1.69×10^{-12}	5.9
10	1.43×10^{-12}	1.41×10^{-12}	1.3
11	1.21×10^{-12}	1.13×10^{-12}	7.6
12	8.53×10^{-13}	9.27×10^{-13}	8.6
13	6.20×10^{-13}	6.19×10^{-13}	0.2
14	4.01×10^{-13}	4.26×10^{-13}	6.4
15	2.50×10^{-13}	2.49×10^{-13}	0.4

5.2 解谱方法的实验验证

5.2.1 加速器实验验证

叠层式探测器的使用主要是针对快堆脉冲工况下 γ 谱的测量, 课题组选择在脉冲加速器上作其韧致辐射谱的测量工作, 通过实验来验证所设计的探测系统及其使用的实验数据的处理方法是否可用于连续谱的解析。加速器产生的电子束能量为 6MeV, 其产生韧致

辐射 X 射线的靶为钨钼合金 (靶厚 2mm), 产生的韧致辐射 X 射线穿过 1mm 厚的有机玻璃过滤窗。

图 2 给出了用组合探测器获得的加速器韧致辐射谱和用穿透系数数值分析的最小二乘法^[10]获得的 6MV 加速器韧致辐射谱的测量结果。可以看出, 两种方法所获取的该装置的谱是基本吻合的, 验证了解谱方法的可靠性。

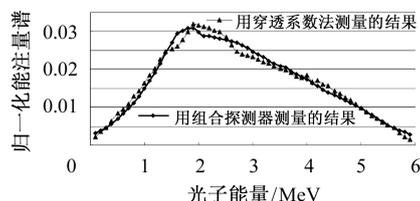


图 2 加速器实验结果

5.2.2 稳态运行下快中子堆实验验证

通过 5.2.1 的实验验证可以说明本文所采用的连续谱测量方法可适用加速器韧致辐射那样的连续 X 射线谱的测定。但快中子堆的辐射场是混合场(中子+ γ), 中子会在热释光探测器中产生信号。本文采用重材料铅堵塞准直孔的方法和对低能中子不灵敏的 $^7\text{LiFTLD}$ 。假设堵和未堵准直孔条件下直接入射到叠层式探测器端面的中子注量和中子谱不发生显著的变化, 则源项中子在 $^7\text{LiFTLD}$ 中产生的 TL 信号不变。通过未用铅堵准直孔条件下得到的 $^7\text{LiFTLD}$ 测量值减去用铅堵上准直孔条件下得到的 $^7\text{LiFTLD}$ 测量值便可扣除中子在 $^7\text{LiFTLD}$ 产生 TL 信号, 同时可剔除散乱 γ 和散乱中子的影响。本文用叠层式探测器对稳态工况下快中子堆的 γ 谱作了实验测定, 图 3 给出了 γ 谱谱形。图 3 还给出了用 NaI 谱仪的测算的 γ 谱谱形。用 NaI 谱仪测量快中子堆时用的解谱方法为 GRAVEL。

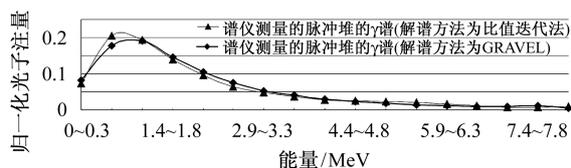


图 3 不同探测方法测量的堆 γ 谱对比图

6 结果和讨论

6.1 脉冲工况下堆 γ 谱的测量结果

由于 $^7\text{LiFTLD}$ 在很高的剂量率的情况下其响应无剂量率依赖性^[11], 所以在稳态装置上经实验证实可行的测连续 γ 谱的方法用于测脉冲装置的连续 γ 谱毫无疑问也是可行的。在用叠层式探测器测量脉冲工况下堆 γ 谱时, 叠层式探测器被置于与其同轴的圆柱形组合式屏蔽体中。组合式屏蔽体的最外层为 25cm 厚的聚乙烯, 以慢化可能抵达叠层式探测器中的散乱的快中子, 最大限度的减小快中子在叠层式探测器的 $^7\text{LiFTLD}$ 中产生的 TL 量; 第 2 层为 1mm 的镉, 用来防止慢、热中子可能在叠层式探测器中产生俘获 γ ; 最内层为 5cm 的铅, 用来屏蔽慢、热中子在镉中产生的俘获 γ 及可能抵达叠层式探测器中的散乱 γ 。如将散乱的中子和散乱 γ 在 $^7\text{LiFTLD}$ 中产生的 TL 量视为噪声, 而将垂直入射到叠层式探测器端面的源项 γ 光子在 $^7\text{LiFTLD}$ 中产生的 TL 量视为信号, 则信噪比高达 4:1, 这表明本文设计的准直屏蔽装置是合理的。图 4 示出了本文测得的脉冲工况下快中子堆堆外场点的源项 γ 谱。

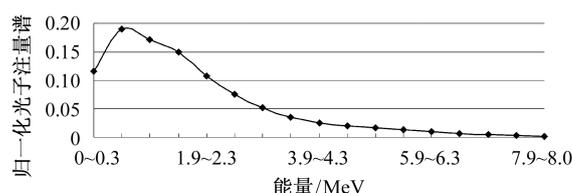


图 4 脉冲工况下快中子堆堆外场点 γ 谱实验测定结果(谱形图)

6.2 讨论

连续 γ 谱的测算可以用不同方法进行, 但解谱是十分困难的。本文设计了用于高剂量率条件下测谱的叠层式探测器, 采用 GRAVEL 连续谱的解谱方法, 可用于连续谱的测算。但尚有不足之处, 有待进一步开展对不确定的分析研究以及对不同解谱方法的比较研究。

参考文献(References)

- 1 LEI Jia-Rong, YUAN Yong-Gang, ZHAO Min-Zhi et al. Journal of Physics, 2003, **52**(1): 53—57 (in Chinese)
(雷家荣, 袁永刚, 赵敏智等. 物理学报, 2003, **52**(1): 53—57)
- 2 Noltet R, Behrent R. Radiation Protection Dosimetry, 1999, **84**(1—4): 367—379
- 3 XU Shu-Yuan. Applications of the Monte Carlo Method in Experimental Nuclear Physics. Beijing: Atomic Energy Press, 1996. 10—12 (in Chinese)
(许淑艳. 蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用. 北京: 原子能出版社, 1996. 10—12)
- 4 Briesmeister J F. MCNP—A General Monte Carlo N-Particle Transport Code: LA-12625-M. US: Los Alamos National Laboratory, 1997
- 5 Shtejer-Diaz K et al. Applied Radiation and Isotopes, 2003, **59**: 263—266
- 6 Rodriguez M L. Health Physics, 2003, **85**(4): 433—437
- 7 Matzke M. Unfolding of Pulse Height Spectra: The HEPRO Program System: PTB-N-19. Braunschweig: Physikalisch Technische Bundesanstalt, 1994
- 8 Reginatto M, Goldhagen P. A Computer Code for the Deconvolution of Multisphere Neutron Spectrometer Data Using the Maximum Entropy Method: EML-595. New York: Environmental Measurements Laboratory, 1998
- 9 McElroy W N et al. A Computer-Automated Iterative Method for Neutron Flux Spectra Determination by Foil Activation: AFWL-TR-67-41. U S: Air Force Weapons Laboratory, 1967
- 10 LEI Jia-Rong, YUAN Yong-Gang, ZHAO Lin et al. Nuclear Electronics & Detection Technology, 1999, **19**(2): 123—126 (in Chinese)
(雷家荣, 袁永刚, 赵林等. 核电子学与探测技术, 1999, **19**(2): 123—126)
- 11 Robertson M E A. Identification and Reduction of Errors in Thermoluminescence Dosimetry System. England: D.A. Pitman Ltd. Weybridge, Surrey, 1981. 6

Measurements of the Photon Spectrum of the Fast Reactor Working on Pulsed Condition^{*}

LEI Jia-Rong YUAN Yong-Gang¹⁾ WEI Yong ZHAO Min-Zhi

(Chinese Academy of Engineering Physics, Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Mianyang 621900, China)

Abstract The photon attenuation effects are different, when the photons with different energy pass through the attenuators with different thickness and material. Using the above attenuators and the thermoluminescent probes, the degrader detector was designed for detecting the gamma spectrum of the fast reactor. Meanwhile the unfolding Program is programmed for the continuous spectrum in GRAVEL algorithm, and this program is proved reliable by experimental results. Finally, the photon spectrum of the fast reactor is given.

Key words response function, non-linear least-square method, absorbed dose

Received 30 November 2005, Revised 26 February 2006

^{*} Supported by Study in Advance of CAEP (20010206-2)

1) E-mail: yyg_2000@yeah.net