

快中子堆 n, γ 混合场中 γ 光子 注量的测量研究*

雷家荣 袁永刚 赵 林 赵敏智 崔高显

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所 绵阳 621900)

(2002 年 3 月 18 日收到 2002 年 4 月 30 日收到修改稿)

用热释光探测器对快堆堆外 n, γ 混合场进行了区分测量, 结果表明: 该方法可有效的检测出 n, γ 混合场的 γ 成分, 为了更较精确地测量快堆 n, γ 混合场 γ 光子注量, 提出了采用新配方的热释光探测器 LiFTLD(^6LiF , ^7LiF 各占 50%) 与 ^6LiF TLD 成对使用的方法. 考虑到 LiFTLD 对中子吸收剂量的响应存在 LET 效应, 对 LiF(Mg, Cu, P) TLD 进行了中子响应的 LET 效应因子 R_{LET} 的实验测定($R_{\text{LET}} \approx 0.05$), 在此基础上, 对 ^6LiF - ^7LiF TLD 的成对使用测量快中子堆的 n, γ 混合场中光子注量的方法进行了实验研究. 实验结果表明, 混合场中的中子在 ^7LiF (Mg, Cu, P) 中产生的热释光量(TL)占 n, γ 产生的总 TL 的 8.1%—17.1%. 实验结果表明该方法是行之有效的. 为钝化中子谱的不确定性所致的影响, 进一步提高 γ 光子注量测量结果的精度, 提出了采用新配方的 LiFTLD(^6LiF , ^7LiF 各占 50%) 与 ^6LiF TLD 成对使用测量快堆 n, γ 混合场 γ 光子注量的方法.

关键词: n, γ 混合场, 吸收剂量, LiFTLD, LET

PACC: 2880F, 2880C, 2850F

1. 引 言

在抗辐射加固实验研究中, 需要研究电子学元件受高剂量率的光子脉冲辐射照射后的性能变化. 脉冲工况下的快中子堆可以作为实验研究的辐射源项. 但快中子堆的辐射场不是纯 γ 场, 而是 n, γ 混合场, 故测量该混合场中的 γ 光子注量是有强烈的需求牵引的研究课题. 像“戈迪瓦-II”那样的快中子堆, 场点 γ 的组织中的比释动能约为中子比释动能的 10%^[1]. 用氢含量丰富的组织当量电离室与碳电离室的联合使用虽然可以给出 n, γ 混合场中的中子的比释动能^[2], 但 γ 的测量精度很低, 这是因为中子比释动能远高于 γ 的比释动能的原故. 文献[3]用 $^7\text{LiFTLD}$ 对零功率堆的场点 γ 强度作了实验测定, 但没能有效地提出中子的干扰. 文献[4]报道, 同样的吸收剂量, 中子在 LiF(Mg, Cu, P) TLD 中产生的热释光量(TL)仅为 γ 的 1.1%. 因此, 可以期望, 用 ^6LiF - $^7\text{LiFTLD}$ 的配对使用, 可以对快堆的 n, γ 场做更为有效的区分测量, 以较高的精确度测得 LiF 中

的 γ 吸收剂量, 并根据 γ 谱的数据资料推出 γ 光子注量.

2. LiFTLD 对中子的响应

用 ^6LiF - $^7\text{LiFTLD}$ 成“对”投入的方法能否有效地剔除中子的干扰并能较准确地测量混合场的 γ 光子注量, 除取决于混合场中中子/ γ 强度的比之外, 还与 LiFTLD 对中子的响应有关. 为了对最终的实验测定结果的准确性给出评价, 本文就 LiFTLD 对中子的响应做了实验研究.

LiFTLD 对不同能量的中子的响应可以用 LET 效应因子 E_{LET} ,

$$E_{\text{LET}} = R_n/R_\gamma \quad (1)$$

来定量描述. 式中 R_n 为 LiFTLD 对单位中子吸收剂量的响应值; R_γ 为 LiFTLD 对单位 ^{137}Cs - γ 吸收剂量的响应值.

在文献[5]的基础上, 对 LiF(Mg, Cu, P) TLD 的 LET 效应因子做了进一步的实验测定, 结果见表 1.

* 中国工程物理研究院行业科技预研基金(批准号 20010209)资助的课题.

表 1 E_{LET} 的实验数据

| 中子源项 | 中子能量 | E_{LET} |
|--------------------|--------------|-------------------|
| 热中子(Am-Be 中子源慢化) | 0.025eV | 0.046 |
| 加速器中子(p→T 反应) | 0.11—1.00MeV | 0.053 ± 0.016 |
| 加速器中子(D→D 反应) | 1.73—4.70MeV | 0.054 ± 0.022 |

3. 快中子堆 n, γ 辐射场的区分测量方法

3.1. 原理

通过 ${}^6\text{LiF}$ - ${}^7\text{LiFTLD}$ 的成“对”使用来对快中子堆 n, γ 辐射场作区分测量的原理见文献 [6]. 文献 [6] 的实验结果表明,中子在 ${}^6\text{LiF}$, ${}^7\text{LiFTLD}$ 产生的热释光量主要是 ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{He}$ 反应产生的 α 及 ${}^3\text{He}$ 重粒子, ${}^6\text{Li}$ 反冲核, ${}^7\text{Li}$ 反冲核所致,反冲核 ${}^{19}\text{F}$ 对 TL 的贡献可以忽略.将要采用的以 LiFTLD 为空腔、LiF 为壁的固体电离室对中子而言属大空腔情况,故中子在 ${}^6\text{LiF}$, ${}^7\text{LiFTLD}$ 中产生的热释光量与其中的 ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ 比释动能成正比.于是有

$$G_6 = G_{6\gamma} + G_{6n}, \tag{2}$$

$$G_7 = G_{7\gamma} + G_{7n}, \tag{3}$$

式中 G_6 为 ${}^6\text{LiFTLD}$ 的读出值(标称读值); G_7 为 ${}^7\text{LiFTLD}$ 的读出值(标称读值); $G_{6\gamma}$ 为混合场中的 γ 所致的 ${}^6\text{LiFTLD}$ 的 TL 标称值; G_{6n} 为混合场中的中子所致的 ${}^6\text{LiFTLD}$ 的 TL 标称值; $G_{7\gamma}$ 为混合场中的 γ 所致的 ${}^7\text{LiFTLD}$ 的 TL 标称值; G_{7n} 为混合场中的中子所致的 ${}^7\text{LiFTLD}$ 的 TL 标称值.

当选用的 ${}^6\text{LiFTLD}$ 与 ${}^7\text{LiFTLD}$ 有相同的尺寸、密度,且对 γ 有相同的吸收剂量响应(TLD 元件用 γ 场作逐片刻度,用归一的方法可达两种 TLD 对 γ 有相同灵敏度的目的)时, $G_{6\gamma} = G_{7\gamma}$, 则上面二式相减有

$$G_6 - G_7 = G_{6n} - G_{7n} = \Delta G.$$

现定义 K_{Δ} , K 如下:

$$k_{\Delta} = \Delta G / G_7,$$

$$K = G_{7n} / G_{6n},$$

于是有

$$G_{7\gamma} = (1 - f_n)G_7, \tag{4}$$

$$f_n = \frac{K}{1 - K}K_{\Delta}, \tag{5}$$

$$K = G_{7n} / G_{6n} = K_{7\text{Li}} / K_{6\text{Li}}, \tag{6}$$

式中 $K_{7\text{Li}}$, $K_{6\text{Li}}$ 分别为在 ${}^7\text{LiF}$, ${}^6\text{LiF}$ 中所致的比释

动能(只计 ${}^7\text{Li}$, ${}^6\text{Li}$ 的贡献).对于快中子堆的堆外中子场, 10^{10}cm^{-2} 的中子注量所致的 ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^{19}\text{F}$ 的比释动能列在表 2 中.表 2 中的值是根据文献 [7] 给出的快堆中子谱算出的.

表 2 快中子堆堆外中子在 ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^{19}\text{F}$ 中的比释动能
(中子注量为 10^{10}cm^{-2})

| 物质 | ${}^6\text{Li}$ | ${}^7\text{Li}$ | ${}^6\text{LiF}$ (只计 ${}^6\text{Li}$) | ${}^7\text{LiF}$ (只计 ${}^7\text{Li}$) | 天然 LiF (只计 ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^7\text{Li}$) |
|------------------------------|-----------------|-----------------|---|---|---|
| 比释动能 / 10^{-2}Gy | 62.58 | 5.40 | 15.0 | 1.45 | 2.48 |

3.2. 探测器

测量 CRBR- II 快中子堆堆外场点 γ 光子注量的探测器为 LiF 均匀固体电离室.固体电离室为平行板型,有双层结构的室壁,外层为 5mm ${}^6\text{LiF}$ (密度为 $2.65\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$),内层分别为 ${}^6\text{LiF}$ 和 ${}^7\text{LiF}$, 壁内分别置放 ${}^6\text{LiFTLD}$ 和 ${}^7\text{LiFTLD}$. 由于 ${}^6\text{Li}$ 对热中子有极高的 (n, α) 反应截面,故中子谱中少量的热中子“污染”就会对(5)式中的 K 值有很大影响,进而影响整个测量结果,而文献装置的运营者给出的中子谱没有包括可能存在的热中子部分.本课题采用的双层壁固体电离室将热中子全部吸收于外壁中,使测量结果达到令人满意的程度.图 1 给出了固体电离室的示意图.对于能量由 0.1MeV—8.0MeV 的光子,单位光子注量引起的固体电离室中的 LiFTLD 的吸收剂量可用 M-C 方法(EGS4 程序软件)计算而得到.

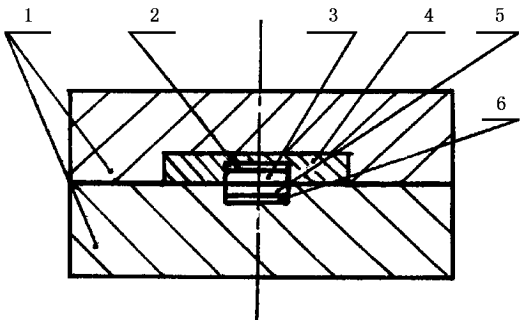


图 1 LiF 固体电离室示意图 1. ${}^6\text{LiF}$ 外壁 2. ${}^6\text{LiFTLD}$ 3. ${}^7\text{LiF}$ 压片 4. ${}^6\text{LiF}$ 内壁 5. ${}^6\text{LiF}$ 压片 6. ${}^7\text{LiFTLD}$

4. 在快中子堆上的实验结果

用固体电离室对快中子堆堆外场点的 n, γ 混合场作了区分测量.固体电离室置于堆外自由空间的

不同点位上 ,其轴线大致对准于堆芯 .表 3 给出了某些场点实验测量的原始数据和照射量 x 的测算结果 .表中的照射量系由 LiF 的 γ 吸收剂量换算而得 .在换算中 $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{air}}/(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{LiF}}$ 值取 1.076. 根据堆 γ 谱的实验数据及采用的固体电离室对 γ 的响应函数 (用 M-C 方法计算而得) ,还可以由 LiF 的 γ 吸收剂量推算出光子注量 .

本文还就 $^6\text{LiF}(\text{Mg},\text{Cu},\text{P})\text{TLD}$ 对快中子堆堆体表面中子响应的 LET 效应因子 E_{LET} 作了实验测定 .在稳态运行的情况下 ,中子注量为 $2.77\times 10^{10}\text{cm}^{-2}$.这样大的中子注量致 ^6LiF 的比释动能(只计 ^6Li 的贡献)为 0.416Gy ,致 ^6LiF 的比释动能(只计 ^7Li 的贡献)为 0.042Gy .表 4 给出了 LiFTLD 对快中子堆的中子谱的 E_{LET} 值的测算值 .

表 3 零功率快堆堆外的某些场点的照射量测量结果一览表

| 点 号 | TLD 对 γ 灵敏度/ ($10^{-2}\text{Gy}/\text{标称读值}$) | | 堆外场点实测标称 读值 | | γ 当量吸收剂量/ 10^{-2}Gy | | ΔG | K_{Δ} | f_n | $D_L(\text{LiFeGy})$ | X | |
|--------|---|----------------|----------------|----------------|--|----------------|------------|--------------|-------|----------------------|-------|----------------------|
| | ^6LiF | ^7LiF | ^6LiF | ^7LiF | ^6LiF | ^7LiF | | | | | R | C/kg |
| | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0.0331 | 0.0271 | 34.52 | 19.86 | 1.143 | 0.538 | 0.605 | 1.125 | 0.120 | 0.473 | 0.581 | 1.50×10^{-4} |
| 2 | 0.0364 | 0.0294 | 9.747 | 5.013 | 0.355 | 0.147 | 0.208 | 1.415 | 0.151 | 0.125 | 0.154 | 3.97×10^{-5} |
| 3 | 0.0332 | 0.0303 | 10.80 | 5.521 | 0.359 | 0.167 | 0.192 | 1.145 | 0.123 | 0.146 | 0.180 | 4.63×10^{-5} |
| 4 | 0.0372 | 0.0283 | 5.026 | 3.372 | 0.187 | 0.095 | 0.092 | 0.964 | 0.103 | 0.085 | 0.106 | 2.70×10^{-5} |
| 5 | 0.0355 | 0.0293 | 2.991 | 1.656 | 0.106 | 0.049 | 0.057 | 1.163 | 0.124 | 0.043 | 0.053 | 1.36×10^{-5} |
| 6 | 0.0337 | 0.0294 | 8.826 | 5.755 | 0.297 | 0.169 | 0.128 | 0.757 | 0.081 | 0.155 | 0.191 | 4.92×10^{-5} |
| 7 | 0.0331 | 0.0273 | 15.95 | 8.759 | 0.528 | 0.239 | 0.289 | 1.209 | 0.129 | 0.208 | 0.256 | 6.60×10^{-5} |
| 8 | 0.0329 | 0.0263 | 7.675 | 3.965 | 0.253 | 0.104 | 0.149 | 1.423 | 0.152 | 0.088 | 0.108 | 2.79×10^{-5} |
| 9 | 0.0343 | 0.0276 | 3.703 | 2.567 | 0.127 | 0.071 | 0.056 | 0.789 | 0.084 | 0.065 | 0.080 | 2.06×10^{-5} |
| 10 | 0.0327 | 0.0287 | 51.56 | 27.39 | 1.686 | 0.786 | 0.900 | 1.145 | 0.123 | 0.689 | 0.847 | 2.19×10^{-4} |
| 11 | 0.0325 | 0.0263 | 33.86 | 16.09 | 1.100 | 0.423 | 0.679 | 1.600 | 0.171 | 0.351 | 0.432 | 1.11×10^{-5} |
| 12 | 0.0331 | 0.0271 | 34.52 | 19.68 | 1.143 | 0.533 | 0.610 | 1.144 | 0.122 | 0.468 | 0.576 | 1.49×10^{-4} |
| 13 | 0.0365 | 0.0294 | 9.747 | 5.013 | 0.356 | 0.147 | 0.209 | 1.419 | 0.152 | 0.125 | 0.154 | 3.97×10^{-5} |
| 14 | 0.0332 | 0.0303 | 10.80 | 5.521 | 0.359 | 0.167 | 0.192 | 1.156 | 0.123 | 0.146 | 0.180 | 4.63×10^{-5} |
| 15 | 0.0326 | 0.0263 | 7.675 | 3.965 | 0.250 | 0.104 | 0.146 | 1.401 | 0.150 | 0.088 | 0.108 | 2.79×10^{-5} |
| 16 | 0.0343 | 0.0276 | 3.703 | 2.576 | 0.127 | 0.071 | 0.056 | 0.789 | 0.084 | 0.065 | 0.080 | 2.06×10^{-5} |
| 17 | 0.0328 | 0.0287 | 51.56 | 27.39 | 1.691 | 0.786 | 0.905 | 1.151 | 0.123 | 0.689 | 0.847 | 2.19×10^{-4} |
| 18 | 0.0325 | 0.0263 | 33.86 | 16.09 | 1.100 | 0.423 | 0.677 | 1.600 | 0.171 | 0.351 | 0.432 | 1.11×10^{-5} |

表 4 $\text{LiF}(\text{Mg},\text{Cu},\text{P})\text{TLD}$ 对快堆堆外中子响应的 E_{LET} 测量结果

| 序 号 | TLD 对 γ 的灵敏度/ ($10^{-2}\text{Gy}/\text{标称读值}$) | | 标称读值 | | γ 当量吸收剂量/ 10^{-2}Gy | | ΔG | K_{Δ} | f_n | ^6LiF 的 LET 效应因子 | |
|--------|--|----------------|----------------|----------------|--|----------------|------------|--------------|-------|------------------------------|------------------|
| | ^6LiF | ^7LiF | ^6LiF | ^7LiF | ^6LiF | ^7LiF | | | | 中子所致标称读值 | E_{LET} |
| | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0.0372 | 0.0276 | 108.8 | 71.20 | 4.047 | 1.965 | 2.082 | 1.060 | 0.113 | 2.304 | 0.055 |
| 2 | 0.0342 | 0.0305 | 113.6 | 64.81 | 3.885 | 1.977 | 1.908 | 0.965 | 0.103 | 2.112 | 0.051 |
| 3 | 0.0309 | 0.0289 | 122.0 | 63.66 | 3.770 | 1.840 | 1.930 | 1.049 | 0.112 | 2.136 | 0.051 |
| 4 | 0.0340 | 0.0292 | 108.1 | 65.32 | 3.675 | 1.907 | 1.768 | 0.927 | 0.099 | 1.957 | 0.047 |
| 5 | 0.0334 | 0.0262 | 114.3 | 71.17 | 3.817 | 1.865 | 1.952 | 1.047 | 0.112 | 2.161 | 0.052 |

5. 提高 n, γ 混合场中的 γ 测量精度的方法

有效地剔除中子的干扰是提高 n, γ 混合场中的 γ 测量精度的关键. 当快堆被用作抗辐射加固等实验研究的射线源时, 为了提高场点 γ 强度/中子强度或中子强度/ γ 强度比, 对到达探头的 γ 、中子辐射用聚乙烯或铅作屏蔽, 屏蔽后的 γ 、中子谱将发生一定程度的变化, 因此 (6) 式中的 K 值将发生变化, 这将构成场点照射量测算结果误差的主要来源. 本文制作了新配方的 LiFTLD (^6LiF , ^7LiF 各占 50%). 由于中子在新配方的 LiFTLD 中的比释动能主要是 ^6Li 贡献的, 当将其与 $^6\text{LiFTLD}$ 配对使用时, (6) 式定义的 K 值约为 0.55. 当中子谱退化, 能谱向低能方向漂移, K 值向 0.50 趋近, 故谱的不确定性引起的 K 值的不确定度最大为 10%, 从而钝化了中子谱的不确定性对 γ 测量结果的影响, 达到提高 n, γ 混合场中的 γ 测量精度的目的. 此方法有待进一步的实验验证.

6. 讨 论

1. 由表 3 的测量结果可以看出, 就 ^7LiF Mg, Cu,

P)TLD 而言, 中子所致的 TL 标称读值为总的 TL 标称读值(γ 、中子的联合贡献)的 8.1%—17.1% (表 3 中的 f_n 值). 假定 LiFTLD 的 LET 效应因子测量值不确定度为 50%, 则由于中子的存在而引起的 γ 吸收剂量 D_γ 的测量值的不确定度在 4.1%—8.6% 之间. 从由 n, γ 混合场中检测出 γ 成分的角度, 中子的干扰而引起的 D_γ 的不确定度是不算很大的.

2. 对于快中子堆的堆外中子谱, LiFTLD 的 LET 效应因子的测算值与表 1 中的值基本相符. 这表明本文表 3 中的实验结果是自洽的. 总体方法是行之有效的.

3. 本文表中的实验数据的误差来源于以下几个方面: 1) LiFTLD 的复现性引起的相对误差 ($\pm 3.0\%$); 2) γ 参考辐射场的传递误差 ($\pm 2.5\%$); 3) 加速器中子注量测量误差 ($\pm 8\%$); 4) 快中子堆表面中子注量误差 ($\pm 15\%$); 5) (6) 式定义的 K 值的不确定性而引起的 f_n 值的计算误差 ($\pm 10\%$). 为了提高 γ 照射量的精度, 应尽可能准确地剔除中子的干扰, 本文采用的固体电离室已排除了热中子的干扰. 用实测得的各场点的中子谱 ($1/E$ 谱和裂变谱部分) 来计算 K 值, 可使 f_n 更准确.

[1] Frank H Attix and Tochilin E 1969 *Radiation Dosimetry* (New York and London: Academic Press) p323

[2] Li Z Y, Wang C S and Chen D 1987 *Radiation Protection* **7** 47

[3] Simons G G and Yule T T 1979 *Nuclear Science and Engineering* **53** 162

[4] Horowitz Y S and Shacher B B 1988 *Radiation Protection Dosimetry* **23** 401

[5] Lei J R, Zhao M, Zh, Zhao Letal 2001 *Atomic Energy Science and Technology* **4** 367

[6] Shou-Ichi Tanaka Yutaka 1974 *Nucl. Instrum. Method* **117** 93

Investigations of the photon fluences in various $n + \gamma$ mixed fields in the fast neutron reactor^{*}

Lei Jia-Rong Yuan Yong-Gang Zhao Lin Zhao Min-Zhi Cui Gao-Xian

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

(Received 18 March 2002 ; revised manuscript received 30 April 2002)

Abstract

The LET factors R_{LET} ($R_{\text{LET}} \approx 0.05$) of neutron response for $\text{Li}(\text{Mg}, \text{Cu}, \text{P})\text{TLD}$ have been determined experimentally due to the existing LET effects of the response for LiFTLD to neutron absorbed dose. Based on the data, one experimental method to define the photon fluence in various $n + \gamma$ mixed fields in the fast neutron reactor with coupled ${}^6\text{LiF}$ - ${}^7\text{LiFTL}$ detectors has been checked. The experimental results show that the ratios of the TL due to the effect of neutrons in ${}^7\text{Li}(\text{Mg}, \text{Cu}, \text{P})$ to the total TL due to the combined effects of the γ -rays and neutrons are between 8.1% and 17.1%. In order to reduce the effect caused by the uncertainty of the neutron spectra and improve the accuracy of the measurement for the photon fluence, we propose a new LiFTLD in which there are 50% ${}^6\text{LiF}$ and 50% ${}^7\text{LiF}$. It is coupled with a ${}^6\text{LiFTLD}$ to measure the photon fluence in the $n + \gamma$ mixed fields.

Keywords : mixed neutron-gamma field , absorbed dose , LiFTLD , LET

PACC : 2880F , 2880C , 2850F

^{*} Project supported by the Science Foundation of China Academy of Engineering Physics (China) (Grant No. 20010209).