

- 2 刘洪祥. 放射医学与防护简报, 1987; (108): 2-5 (3): 179-182
- 3 ICRP: Publication 49, Ann ICRP, 1986; 16(4): 1-31
- 4 ICRP: Publication 60, Ann ICRP, 1991; 22(1): 22-149
- 5 Giovanni Silini(张卿西译). 中华放射医学与防护杂志, 1983; 3(1): 7-9
- 6 UNSCEAR: 1986 Report to General Assembly, New York: United Nations, 1986; 263-366
- 7 Otake M, Schull WJ. Br J Radiol, 1984; 57: 409-414
- 8 Otake M, et al. J Radiat Res, 1992; 33(1): 78
- 9 Darby SC. Health Phys, 1986; 51(3): 269-281
- 10 胡玉梅, 姚家祥. 中国辐射卫生, 1992; 1(3): 135-138
- 11 Meyer MB, Tonascia J. Am J Epidemiol 1981; 114(3): 317-326
- 12 李兰如等. 中华放射医学与防护杂志, 1985; 5(3): 179-182
- 13 胡玉梅 姚家祥. 中华放射医学与防护杂志, 1992; 12(1): 2-6
- 14 Stanley Lee(谭绍智译). 中华放射医学与防护杂志, 1987; 7(6): 398-401
- 15 Totter JR, Macpherson HG. Health phys, 1981; 40: 511
- 16 Yoshimoto Y, et al. J Radiat Res, 1992; 33(1): 78
- 17 中华人民共和国国家标准. 放射卫生防护基本标准, GB4792-84, 北京: 技术标准出版社, 1984; 2
- 18 Pomroy C. Health Phys, 1993; 64; S4
- 19 Wiedis D. Health Phys, 1993; 64; S4
- 20 ICRP. Publication 34. Ann ICRP, 1982; 9(2/3): 41-43
- 21 Russell JGB et al. Br J Radiol, 1980; 53: 233-236

过热滴探测器的中子响应

苏州医学院 林 洁编译 李士骏 孙福印审校

摘要:过热滴探测器(SDD)是一种新型中子探测器,原理与气泡室相似。SDD的中子能量响应曲线与ICRP剂量当量曲线基本一致。经蒙特卡罗中子输运计算得出中子响应函数,表明在自由中子场内SDD-100包裹2.54cm厚的聚乙烯后,其剂量当量响应最佳,且得到了实验证实。

1979年,Apfel研制了一种新的中子探测器——过热滴探测器。这种探测器在工作时不需任何能源,室温下有近似剂量当量响应,及有直读、便携、操作简单、造价低廉等优点,目前应用较广泛。

理想的剂量当量中子剂量计应完全不受入射中子能量的影响。1988年,Lo和Apfel对各型SDD的中子响应函数进行了计算,发现SDD-100对高能中子和热中子的响应较灵敏,对低能中子响应不灵敏,甚至无响应。Chris Wang认为中子慢化效应可能是导致

这种现象的主要原因,并设想在SDD-100外周包裹聚乙烯。其原理是:适量含氢物质可提高慢化效应,增强了SDD-100对低能中子的响应,降低了它对高能中子和热中子的响应,使响应函数更接近剂量当量函数。

1 SDD的工作原理

液体蒸发时,其成核过程需要有微小的蒸汽胚(vaporous embryo),当蒸汽胚小于临界值时,就容易崩解。如去除了液体中的异质成核点,并选用适宜的过热温度(即室温时同

质成核率可忽略不计),就可使沸点低于室温的物质在常温常压下仍保持液态,此时该物质成为过热液体。

如将过热滴贮存在绝对光滑的容器中,就能较长时间(数月)保持过热状态。在 SDD 系统中,这种“绝对光滑的容器”采用了主基质(host mixture),即由聚合物或水、凝胶、甘油混合物组成的液态或半固体物质,过热滴均匀分嵌于主基质中。这样,主基质就象一张网托住每个过热滴,并将它们互相隔开,使每个过热滴在蒸发前都是一个敏感的小气泡室。当一个过热滴被射线或同质成核激发而沸腾时,不会激发附近的其它过热滴。每个过热滴沸腾都会产生一个气泡,并伴有声信号,这个声信号可用来记录气泡数。因此,SDD 可用作测量中子密度。

实验表明,用氟里昂-12作为过热滴时,SDD 对能量从 0.025eV ~ 14MeV 的中子均敏感,而且中子响应曲线与 ICRP 剂量当量曲线基本一致。

2 响应函数的计算

为使 SDD 对中子的响应函数更接近剂量当量函数,Chris Wang 提出在 SDD-100 外周包裹聚乙烯。为证实该设想,运用蒙特卡罗中子输运计算方法,从理论上计算无屏蔽及包裹不同厚度聚乙烯的 SDD-100 的中子响应函数,以找出最佳中子响应。

假设自由中子场中,平面平行中子束垂直入射到 SDD-100。SDD-100 外周分别裹有 0, 2.54, 3.81 和 5.08cm 的聚乙烯。计算中采用了 MORSE-CG 计算机代码和 BUGLE-80 截面库,该库有能量在 0.025eV (热中子)和 17.3MeV 之间的 47 组中子的数据。

一个入射中子激发一个气泡的可能性是根据期望值计算的。计算中假设:(1)氟里昂-12微滴与凝胶充分混合;(2)一个气泡只可以由一个与快中子发生弹性散射作用的反冲离子所产生,或由氟里昂-12中的 $^{35}\text{Cl}(n, p)^{35}\text{S}$

反应产生的 ^{35}S 反冲离子所激发;(3)未吸收的中子碰撞均呈 S 波散射;(4)只有当反冲离子形成“临界气泡”后才能激发出气泡。

在计算机处理中,如中子从 SDD-100 的边缘向内穿入,或在 SDD-100 中发生碰撞, MORSE 代码就启用 BUBBLE 子程序,处理上述慢化效应。BUBBLE 是为计算每个入射中子形成气泡的概率而设计的,它易于修改,可用于模拟其它类型 SDD 的中子响应。BUBBLE 首先计算出气泡形成所需要的最小能量及每个反冲离子的最可几能量,以估计气泡形成的概率。然后根据入射中子径迹长度计算出中子与氟里昂-12发生散射相互作用的概率,据此得出一个中子激发一个气泡的总概率。根据每单位中子流激发的气泡数计算出 SDD-100 对不同能量入射中子的响应,并分别作出包裹不同厚度聚乙烯时中子能量对中子响应的曲线。与 MFDE 的换算曲线(即 ICRP 给出的单位中子流量与深部剂量当量指数的换算曲线)相比,发现聚乙烯慢化 SDD-100 的中子响应与剂量当量函数相近,且当聚乙烯厚度为 2.54cm 时,呈现最佳剂量当量响应。

3 实验

实验采用四个有特定能量范围的中子源来检测探测器的响应函数。它们是:(1)铀-铍(α, n)源,中子能量范围为 1~10MeV;(2) D_2O 慢化的镭滤过 ^{252}Cf 自发裂变中子源,能量多在 1eV ~ 500keV 之间;(3)堪萨斯州立大学 TRIGA 实验反应堆发射的铝滤过切向中子束,能量为 20keV 左右;(4)TRIGA 实验反应堆发射的热中子束。

第一步从理论上估算出 SDD-100 对四种中子源的响应。表 1 是无屏蔽和包裹了 2.54cm 聚乙烯后, SDD-100 的中子响应的计算结果,计算值误差约为 10%。结果表明,无屏蔽 SDD-100 对热中子和 D_2O 慢化 ^{252}Cf 源的响应较灵敏,对铀-铍源和铝滤过 TRIGA

切向束的响应不太灵敏。

表1 无屏蔽及包裹2.54cm 聚乙烯的 SDD-100 对各种中子源响应的计算结果

| 中子源 | 中子响应(气泡数/ μSv) | |
|---|----------------------------|-----------------------|
| | 无屏蔽 SDD-100 | 包裹2.54cm 聚乙烯的 SDD-100 |
| 铀-钚源 | 2.43 | 2.47 |
| D_2O 慢化 ^{252}Cf 源 | 3.76 | 2.78 |
| 铝滤过 TRI-GA 切向束 | 1.21 | 1.78 |
| 热中子 | 6.50 | 2.56 |

第二步对四种中子源分别进行气泡计数。在 SDD-100 上置一微型麦克风作为声音传感器,然后依次接上线性放大器、门控发生器和计数器。门控发生器的作用是将每个气泡发生时产生的正弦信号转换为单个逻辑脉冲,这样气泡计数的效率近于 100%。实验中 SDD-100 的温度由热电偶控制。

表 2 是 SDD-100 对四种中子源响应的实验数据。用相应剂量当量 (μSv) 除每个辐照阶段的累积总气泡数,乘以微滴消耗校正系数,即能得出表中结果。误差主要来自以下四个方面:(1)中子剂量当量估算时的误差;(2)与所测计数值直接相关的泊松统计涨落;(3)未使用过的 SDD-100 中氟利昂-12 微滴数的差异,使微滴消耗校正系数产生误差;(4)实验中的温度变化。

表2 无屏蔽及包裹2.54cm 聚乙烯的 SDD-100 对各种中子源响应的实验数据

| 中子源 | 中子响应(气泡数/ μSv) | |
|---|----------------------------|-----------------------|
| | 无屏蔽 SDD-100 | 包裹2.54cm 聚乙烯的 SDD-100 |
| 铀-钚源 | 1.86 \pm 11.9% | 1.55 \pm 11.6% |
| D_2O 慢化 ^{252}Cf 源 | 2.61 \pm 12.6% | 1.83 \pm 12.6% |
| 铝滤过 TRI-GA 切向束 | 1.41 \pm 11.9% | 1.45 \pm 11.8% |
| 热中子 | 2.80 \pm 6.3% | 1.84 \pm 7.6% |

4 讨论

表 2 中无屏蔽及 2.54cm 聚乙烯慢化 SDD-100 的中子响应与表 1 中的计算结果基本吻合,证明自由中子场中,2.54cm 聚乙烯慢化 SDD-100 确实比无屏蔽 SDD-100 更适合于剂量当量的测量。然而,表 1 和表 2 之间亦存在差异,即计算结果似乎高估了 SDD-100 对热中子的响应。原因可能是计算中假定所有热中子的 $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}$ 反应的截面为单值 0.4 靶,而该值实际上只适用于 0.0253eV 的中子截面。由于 TRIGA 热柱发射的中子实际平均能量可能高于 0.0253eV,且 $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}$ 反应的截面遵循 $E_n^{1/2}$ 关系,因此其实际平均截面可能明显低于 0.4 靶。而 SDD-100 对热中子的响应与 $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}$ 反应的有效截面成反比,因此,用 0.4 靶作为热中子 $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}$ 反应截面,可导致计算中 SDD-100 对热中子的响应值偏高。

5 结论

SDD-100 是新型探测器,计算与实验结果表明,2.54cm 聚乙烯包裹的 SDD-100 的中子响应与 MFDE 换算曲线十分相近,且它具有直读、便携、操作简单、价廉等优点,看来在中子剂量监测中有着广泛的发展前景。若用循环水代替固体聚乙烯作为慢化剂,就能克服 SDD-100 的主要缺点,即中子响应随温度而变化。只需一小型加热器,就能保证温度的精度要求。

参 考 文 献

- 1 Chris Wang C-K. Health Phys, 1992; 62(3): 215-222
- 2 Apfel RE et al. Health Phys, 1989, 56(1):79-83