

文章编号: 1007-4627(2012)03-0310-06

氘源中子穿过聚乙烯样品泄漏中子谱的测量与模拟

聂阳波¹, 鲍杰¹, 阮锡超^{1,2}, 周祖英¹

(1. 中国原子能科学研究院核数据重点实验室, 北京 102413;

2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 采用飞行时间技术测量了氘(D-T)源中子穿过不同厚度板状聚乙烯样品后 40°方向的泄漏中子时间到达谱, 样品的长和宽均为 100 cm, 厚度分别为 4.5, 9, 18 和 27 cm。本底谱测量采用了无样本底测量和无样堵孔本底测量 2 种方案, 利用 MCNP-4C 程序模拟了相同实验条件下的泄漏中子时间到达谱, 模拟过程中考虑了源中子的能谱与角分布、脉冲中子束宽度、探测器的效率以及样品的有效面积。通过比较发现, 采用无样测量谱作为本底时, 计算值/实验值(C/E)值大于 1, 并且随着样品厚度的增加而偏离 1; 而本底谱采用无样堵孔测量谱时, C/E 小于 1, 并且随着样品厚度的增加而接近 1。通过对两套本底谱的分析, 并结合蒙特卡罗模拟, 计算求得了相应样品厚度下比较接近实际的本底谱, 采用该模拟计算本底谱后, C/E 值有了明显的改善。

关键词: 飞行时间法; 聚乙烯; 泄漏中子谱; MCNP-4C 程序; 有效面积

中图分类号: O571.5

文献标志码: A

1 引言

积分实验无论对核装置的研制, 还是聚变堆的设计都有非常重要的作用^[1-2, 5-7]。聚乙烯是中子物理实验中常用的屏蔽材料之一, 它的主要组成元素 C 和 H 的核反应截面已经相当完善。因此, 源中子穿过大块聚乙烯样品的积分实验, 不但可以很好地检验各种中子输运理论、计算方法以及模拟程序, 而且也可以作为积分实验系统检验的一个重要手段。在中国原子能科学研究院 600 kV 高压倍加器上, 利用 $D(d, n)^4\text{He}$ 反应提供的单能脉冲源中子, 通过飞行时间法, 使用 $\phi 5.08\text{ cm} \times 5.08\text{ cm}$ 的 BC501A 液闪探测器测量了不同厚度的聚乙烯样品在 40°方向的泄漏中子谱, 本底测量采用了无样本底测量和无样堵孔本底测量 2 种方案。同时利用 MCNP4C 程序对实验进行了模拟计算。计算过程中仔细考虑了靶结构, 加入 TARGET 程序计算得到的源中子能谱和角分布, 使用 NEFF 程序计算得到了探测器效率曲线^[8], 同时对样品的有效面积^[4-6]进行了模拟计算, 并且对源中子的脉冲宽度也进行了描述, 脉冲宽度是由实验过程中监视器的

飞行时间谱得到, 直接模拟探测器位置的时间到达谱, 这样的模拟更加接近实验的实际情况, 通过直接比较模拟和实验的时间到达谱更易于对数据分析。最后, 对中子通量的模拟与实验结果进行了比较, 发现 C/E 值与 1 偏差较大, 分析了两种实验本底测量与实际的本底存在较大差异的原因, 并结合蒙特卡罗方法, 对本底谱进行了修正, 综合考虑采用修正的本底谱后, 实验结果明显改善, C/E 值与 1 的偏差基本都在实验误差范围以内。

2 实验测量

实验是在中国原子能科学研究院 600 kV 高压倍加器上完成的, 布局如图 1 所示。中子源采用 $T(d, n)^4\text{He}$ 反应产生 14.8 MeV 的单能中子, 束流平均流强约 $30\ \mu\text{A}$, 频率为 1.5 MHz, 脉宽约为 3.5 ns, 束斑大小约 $\phi 5\text{ mm}$, 源中子强度利用伴随粒子法监测^[7]; 使用一个辅助的液闪探测器作为监视器直接测量源中子脉冲宽度; 中子源中心到样品后表面中心的距离为 38 cm, 样品后表面中心到主探测器的距离为 372.4 cm, 出射角度为 40°。为了减少

收稿日期: 2011-09-02; 修改日期: 2011-09-26

基金项目: 中国核工业集团公司核数据专题基金资助(4160109)

作者简介: 聂阳波(1982-), 男, 湖南沅江人, 助理研究员, 从事核数据测量研究; E-mail: nieyb@ciae.ac.cn

散射本底, BC501A 型液闪探测器置于屏蔽体(屏蔽材料最外层是铁, 中间层石蜡, 内层铅)内, 并且在探测器到样品路径上进行了准直。实验样品为 $100\text{ cm} \times 100\text{ cm} \times 4.5\text{ cm}$ (2 块, 相当于半个自由程) 和 $100\text{ cm} \times 100\text{ cm} \times 9\text{ cm}$ (2 块, 相当于一个自由程) 的板状聚乙烯样品, 其纯度为 99.9%。

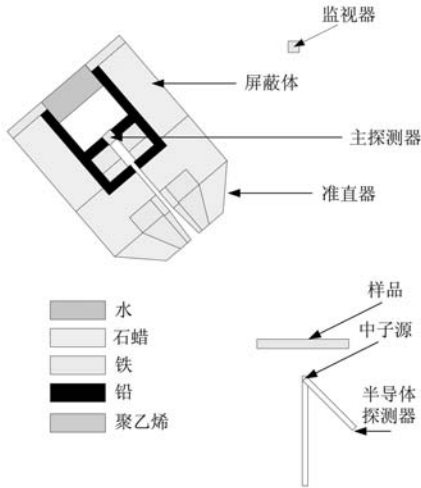


图 1 实验布局图

利用飞行时间法分别测量了 0.5 倍自由程、1 倍自由程、2 倍自由程和 3 倍自由程的聚乙烯样品在 40° 方向的泄漏中子时间到达谱, 本底谱测量采用了 2 套方案: 无样本底谱测量和无样堵孔本底谱测量(将准直孔用 Fe 和聚乙烯填满)。同时, 用 1 个 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 的聚乙烯样品作为标准样品来对实验数据进行归一^[2]。

源中子与厚度为 D 的聚乙烯样品作用后, 探测器位置单位立体角的中子注量定义为

$$\phi(D, t) = \frac{C(t)}{A_s \Delta\Omega S_n}, \quad (1)$$

$$\Delta\Omega = A_D / L^2, \quad (2)$$

其中: $C(t)$ 为测量时间 t 内的中子计数; A_s 为准直孔限制的有效面积; $\Delta\Omega$ 为样品中心到探测器表面的立体角; A_D 为探测器的面积; L 为探测器到样品后表面的距离; S_n 为源中子个数, $\phi(D, t)$ 的单位为 $\text{neutrons}/(\text{sr} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{source neutron})$ 。

3 模拟

3.1 源中子能谱与角分布以及探测器效率的模拟

中子源描述的准确性直接影响 MCNP 计算结

果的准确性, 通过 TARGET 程序计算了 D-T 源中子的能谱和角分布; MCNP 模拟计算的是单位源中子打在样品上到达探测器位置所探测到的出射中子几率。实际测量中, 考虑到探测器的效率, 所有到达探测器的中子不会全部被探测器记录到, 因此, 需要准确地知道探测器效率, 利用实验测量的探测器响应函数^[3], 通过 NEFF 程序计算了不同阈值条件下探测器的效率曲线, 结果如图 2 所示。

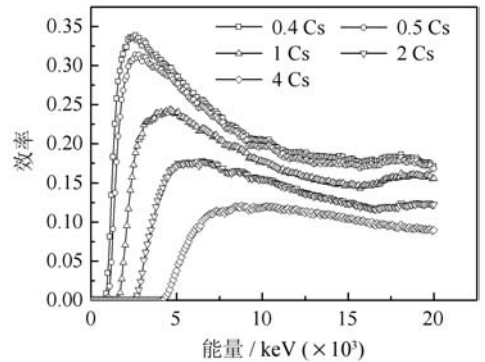


图 2 不同阈值下的探测器效率曲线

1 Cs 相当于 477 keV 电子能量。

3.2 有效面积 A_s 的模拟

受准直器的限制, 探测器上每个点看到聚乙烯样品后表面的范围是不一样的, 因此, 如果考虑准直器和屏蔽体的影响, MCNP 模拟时不能将探测器中心点作为点探测器, 必须将探测器作为体探测器进行模拟, 这样会大大降低模拟计算效率。为了提高 MCNP 计算效率, 参考了 Oyama^[4-6] 的处理方法, 对样品有效面积 A_s 进行模拟计算, 并且简化屏蔽体和准直器等材料。有效面积 A_s 的计算原理如图 3 所示, 定义一个源平面, 该平面穿过样品的后表面中心位置, 并且垂直于探测器与准直器系统的对称轴。中子源定义为点源, 其位置在源平面上变化, 不同位置的点源引起探测器的有效计数面积不同, 有效面积定义为

$$A_s = \int_0^\infty 2\pi r f(r) dr \text{ cm}^2, \quad (3)$$

$$f(r) = C_w(r) / C_0(r), \quad (4)$$

其中: r 为中子源到样品中心位置的距离; $f(r)$ 为探测器-准直器响应函数, $C_w(r)$ 为有准直器的条件下探测器的计数, $C_0(r)$ 为没有准直器的情况下探

测器的计数。通过 MCNP 程序，模拟函数 $f(r)$ ，其结果如图 4 所示，然后通过式(3)求得有效面积 A_s 。

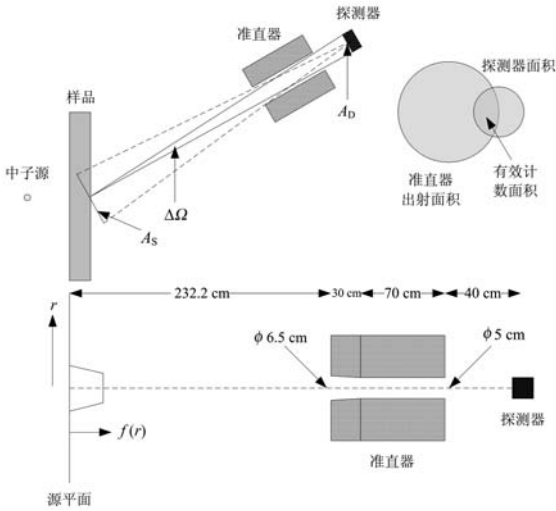


图 3 探测器-准直器响应函数计算所依据的实验几何布局图

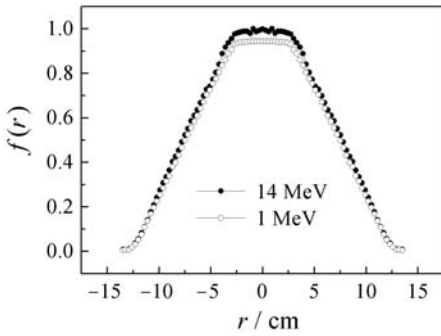


图 4 MCNP 模拟得到的探测器-准直器响应函数

3.3 泄漏中子时间到达谱的模拟

利用 MCNP 程序模拟 D-T 源中子穿过不同厚

度聚乙烯样品后 40° 方向的泄漏中子时间到达谱，图 5 给出了模拟计算模型。源中子的能谱和角分布采用 TARGET 程序的计算结果，探测器效率采用 NEFF 程序的计算结果，脉冲宽度由监视器获得，有效面积 A_s 由式(3)计算得到，不考虑准直器和屏蔽体，将次级中子飞行范围限制在横截面为 A_s 的圆柱形管道内，将中子源靶室、中子飞行管道和样品以外的空间重要性全部设置为 0。为了和实验数据进行比较，计算结果都要除以 A_s/L^2 。

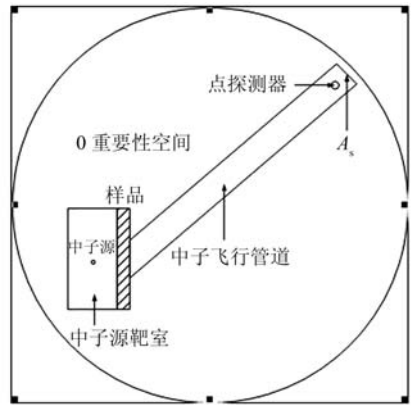


图 5 MCNP 程序计算模型

4 结果与讨论

4.1 实验结果和 MCNP 模拟结果的比较

图 6 给出了 D-T 源中子与不同厚度的聚乙烯样品作用以后在 40° 方向的泄漏中子时间到达谱的实验结果和 MCNP 模拟结果的比较。其中图 6(a)

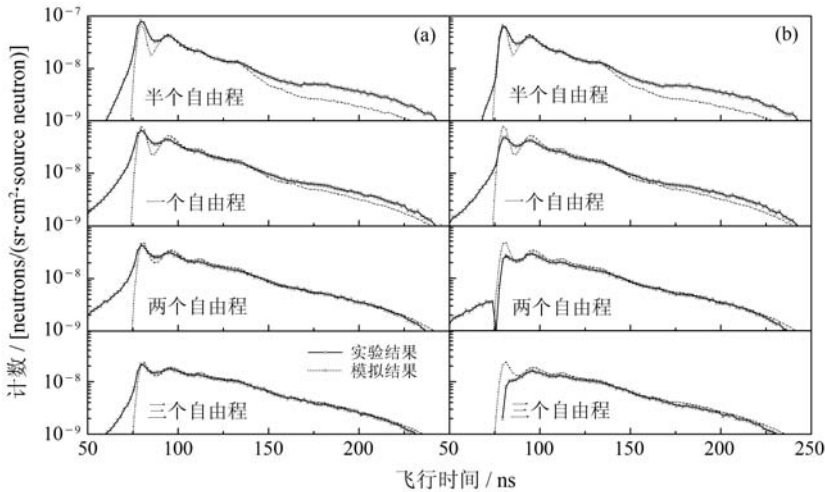


图 6 不同厚度聚乙烯样品泄漏中子时间到达谱的实验结果与模拟结果

(a) 无样堵孔谱作为本底谱，(b) 无样谱作为本底谱。

是采用无样堵孔测量谱作为实验本底谱，图 6(b)是采用无样测量谱作为实验本底谱。从图 6 可看出，除中子和碳(n-C)弹性散射能区和多次散射能区(低能区，飞行时间大于 150 ns)存在一定的分歧以外，其他能区的实验谱和模拟谱都符合得很好。

在使用无样测量谱作为实验本底谱的情况下，n-C 弹性散射能区出现非常明显的偏差。这是因为受到实验几何布局的限制，实验中没有在准直孔和中子源之间的路径上使用影锥，这样有一部分源中子经准直孔洞口散射后到达探测器，这点从图 7 无样本底谱和无样堵孔本底谱可以非常明显地看出。如果把直接到准直器洞口的源中子看成一个二级中子源 S，在无样测量情况下，假设 S 源中子通量为 A，而在进行有样测量时，D-T 源中子受样品的衰减而有部分不能到达洞口，此时 S 源中子通量肯定小于 A，而且样品越厚，衰减得越多，那么 S 源中子与洞口散射而被探测器探测到的中子要减少。如果堵住洞口，S 源中子都很难到达探测器。也就是说，在使用无样堵孔测量谱作为本底谱时，该本底谱要小于实际的本底谱，样品越厚，该本底谱越接近实际的本底谱；当使用无样测量谱作为本底谱时，该本底谱要大于实际的本底谱，样品越厚，该测量的本底谱越偏离实际谱。

多次散射区存在分歧主要是因为模拟过程中只考虑了样品有效面积以内的散射中子，其实有效面积以外也有散射中子，这些散射中子都是大角度散

射的中子，飞行的时间比较长，被探测器探测到的几率很小。当样品比较薄时，在有效面积内的样品上中子发生多次散射几率较小，多次散射区的计数主要来自有效面积外样品上的大角度散射中子；随着样品变厚，有效面积内样品上中子多次散射几率增加，而有效面积外样品上大角度散射中子减少，在多次散射区，来自多次散射中子的贡献逐渐占据主导地位。另外，D-T 源中子里有大约 3% 的 D-D 中子，能量约为 2.8 MeV，这个能量的中子与样品作用后飞行到探测器的时间正好在 170 ns 附近。而 MCNP 模拟并没有考虑这部分的影响。

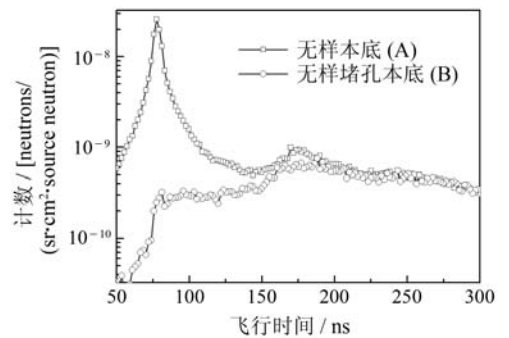


图 7 2 种本底测量结果的比较

4.2 C/E 值的比较

对于这种大块样品的泄漏中子谱，所关心的是某个角度泄漏中子的通量随样品厚度的变化情况。表 1 和表 2 列出了在不同的能量阈值条件下 40° 方向中子通量随厚度的变化情况。

表 1 不同实验条件下中子通量的模拟值(C)和实验值(E)的比较*

neutrons/(sr·cm²·source neutron)

厚度/cm	阈值 / MeV											
	1.12(0.5 Cs)			1.75(1 Cs)			2.77(2 Cs)			4.48(4 Cs)		
	C/10 ⁻⁶	E/10 ⁻⁶	C/E	C/10 ⁻⁶	E/10 ⁻⁶	C/E	C/10 ⁻⁶	E/10 ⁻⁶	C/E	C/10 ⁻⁶	E/10 ⁻⁶	C/E
4.5	1.02	1.29	0.789	0.851	1.01	0.84	0.666	0.765	0.87	0.438	0.504	0.868
9	1.32	1.47	0.904	1.09	1.15	0.944	0.826	0.853	0.967	0.525	0.539	0.973
18	1.08	1.13	0.955	0.862	0.878	0.981	0.632	0.635	0.995	0.384	0.382	1.01
27	0.685	0.695	0.986	0.539	0.54	0.998	0.385	0.383	1.01	0.226	0.222	1.02

* 无样堵孔谱作为本底，1 Cs 相当于 477 keV 电子能量。

从表 1 看出，当使用无样堵孔测量谱作为本底谱时，C/E 值随着样品厚度的增加而越来越接近 1；当使用无样测量谱作为本底谱时，如表 2 所列，C/E 值随着样品厚度的增加而越来越偏离 1；考虑源中子在洞口的散射，将图 7 无样本底谱(表 1)认为是源中子在洞口散射与屏蔽体内多次散射之和，

图 7 无样堵孔本底谱(表 2)认为是源中子在屏蔽体内多次散射之和，二者相减，剩下的谱全部认为是源中子在洞口散射造成的。当加上样品后，样品会阻止掉一部分源中子，利用 MCNP 模拟不同厚度聚乙烯样品的源中子穿透率 T，表 3 列出了 MCNP 计算结果。

表 2 不同实验条件下中子通量的模拟值(C)和实验值(E)的比较*

neutrons/(sr·cm²·source neutron)

厚度/cm	阈值 /MeV											
	1.12(0.5 Cs)			1.75(1 Cs)			2.77(2 Cs)			4.48(4 Cs)		
	C/10 ⁻⁶	E/10 ⁻⁶	C/E	C/10 ⁻⁶	E/10 ⁻⁶	C/E	C/10 ⁻⁶	E/10 ⁻⁶	C/E	C/10 ⁻⁶	E/10 ⁻⁶	C/E
4.5	1.02	1.14	0.897	0.851	0.897	0.949	0.666	0.676	0.985	0.438	0.435	1.01
9	1.32	1.31	1.01	1.09	1.03	1.05	0.826	0.764	1.08	0.525	0.47	1.12
18	1.08	0.97	1.11	0.862	0.763	1.13	0.632	0.546	1.16	0.384	0.312	1.23
27	0.685	0.539	1.27	0.539	0.524	1.27	0.385	0.294	1.31	0.226	0.152	1.48

* 无样堵孔谱作为本底。

表 3 40°方向不同厚度聚乙烯样品的中子穿透率

样品厚度/cm	穿透率
4.5	0.551
9	0.303
18	0.092
27	0.028

因为源中子发生两次或多次散射后被探测器探测到的几率要比发生一次散射被探测器探测到的几率小得多,所以这里只简单地考虑了一次散射的源中子。对于厚度为 D 的聚乙烯样品,实际的本底应该近似为 $S_D = T_D \times (A - B) + B$ 。其中, T_D 为厚度为 D 的聚乙烯样品的源中子穿透率 T , A 表示无样本底谱, B 表示无样堵孔本底谱。图 8 给出了使用本底谱 S_D 后的结果,图 9 给出了不同本底条件下不

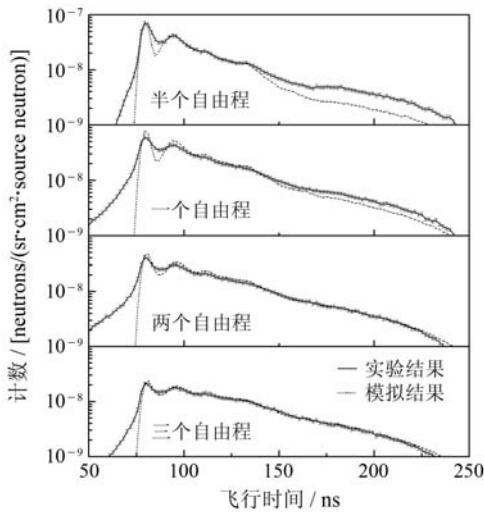


图 8 不同厚度聚乙烯样品泄漏中子时间到达谱的实验与模拟结果(S_D 作为本底)

同厚度聚乙烯样品泄漏谱的 C/E 值随阈值的变化。利用 S_D 作为本底谱后, C/E 值都非常接近 1。

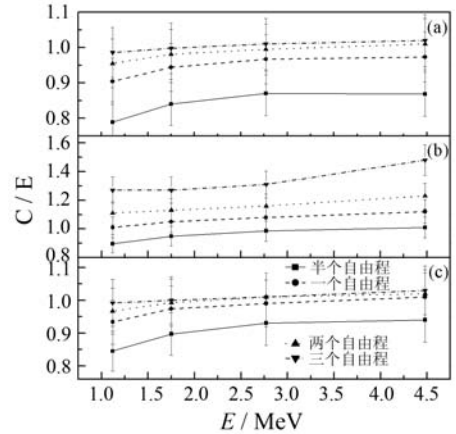


图 9 不同厚度聚乙烯样品泄漏谱的 C/E 值随阈值的变化 (a) 无样堵孔本底谱作为本底谱, (b) 无样本底谱作为本底谱, (c) S_D 作为本底谱。

4.3 不确定度分析

D-T 源中子与聚乙烯样品作用后次级中子时间到达谱的实验测量不确定度主要来源有: (1) 探测器效率不确定度小于 4%; (2) 归一系数不确定度小于 3%; (3) 有效面积 A_s 的不确定度小于 5%; (4) 统计误差等等, 总误差小于 10%。

5 结论

通过飞行时间法测量了不同厚度大块聚乙烯样品在 40° 方向的泄漏中子时间到达谱, 本底谱测量采用了无样本底测量和无样堵孔本底测量 2 套方案。利用 MCNP 程序模拟计算了相同实验条件下的泄漏中子时间到达谱。模拟过程中, 考虑了源中子能谱-角分布、探测器效率、实际脉冲宽度和有效面积等因素。最后对模拟结果和实验结果进行了分析, 从 C/E 值比较发现, 当使用无样堵孔谱作为本底谱时, C/E 值随着样品厚度的增加而越来越接近 1; 当使用无样谱作为本底谱时, C/E 值随着样品厚度的增加而越来越偏离 1, 这主要是因为 2 套本

底谱都与真实的本底谱存在偏差。对这 2 套实验测量的本底谱进行了仔细的分析, 结合 MCNP 模拟程序, 计算出厚度为 D 的聚乙烯样品的实际本底谱 S_D , 利用 S_D 作为本底谱后, C/E 值都非常接近 1。需要指出的是, 该本底谱 S_D 只是考虑了源中子在洞口的散射以及屏蔽体内发生多次散射的中子事件, 而没有考虑源中子与样品作用后再经洞口散射到探测器的中子事件, 这些中子往往都有比较长的飞行时间, 而且, 发生这种事件的概率随着样品厚度的增加会不断减少。因此, 图 8 中半个自由程泄漏中子时间到达谱的实验结果要明显高于模拟结果; 图 9(c) 中半个自由程泄漏中子通量的 C/E 值也要明显小于 1。

参考文献 (References):

- [1] CHEN Yuan. Journal of Nuclear Science and Technology, 2002 (Suppl 2): 1021.
- [2] NIE Yangbo, BAO Jie, RUAN Xichao, *et al.* Annals of Nuclear Energy, 2010, **37**: 1456.
- [3] HUANG Hanxiong, RUAN Xichao, *et al.* China Physics C, 2009, **33**(8): 677.
- [4] OYAMA Y. Nuclear Science and Engineering, 1987, **97**: 220.
- [5] OYAMA Y. Nuclear Science and Engineering, 1993, **115**: 24.
- [6] OYAMA Y. Nucl Instr and Meth A, 1986, **245**: 173.
- [7] ZHONG Qiping, CHEN Xiongjun. Atomic Energy Science and Technology, 2005, **39**(2): 130(in Chinese).
(仲启平, 陈雄军. 原子能科学技术, 2005, **39**(2): 130.)

Measurement and Simulation of Leakage Spectra on Polyethylene Slab Irradiated with D-T Neutrons

NIE Yang-bo^{1, 1)}, BAO Jie¹, RUAN Xi-chao^{1, 2}, ZHOU Zu-ying¹

(1. Science and Technology on Nuclear Data Laboratory, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

(2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Shanxi Xian 710024, China)

Abstract: The neutron leakage spectrum were measured at 40° by time-of-flight method for polyethylene slabs with the thicknesses of 4, 5, 9, 18 and 27 cm, respectively. The experimental results were compared with the MCNP-4C simulations, which carefully considered many effects, such as the angle and energy distributions of the source neutrons, the width of the beam pulse, the detection efficiency and the effective measured area. The sample out and collimator-filled spectra were measured as the background, and the results showed that C/E values were larger than 1 when using the sample out background spectra, but smaller than 1 when using the collimator-filled background spectra. Combine these two different background spectra, a new method was used to calculate the background spectrum, and the results have a better agreement with the simulations.

Key words: time-of-flight (TOF); polyethylene; neutron leakage spectrum; MCNP-4C code; effective measured area