

D-T 中子照射下含硼聚乙烯球泄漏能谱测量

郭海萍, 安力, 牟云峰, 王新华, 陈渊

(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: 为了更清楚地了解含硼聚乙烯的屏蔽性能, 用反冲电子法测量了 D-T 中子照射下的不同 B₄C 含量的聚乙烯球的泄漏能谱, 并用 MCNP/4A 程序和 ENDF/B- 库数据进行模拟计算。实验测量值和计算值在误差范围内符合得较好。

关键词: 含硼聚乙烯; 泄漏能谱; D-T 中子; MCNP/4A 程序

中图分类号: O571.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6931(2005)03-0198-04

Measurement of Leakage Gamma Spectra in Boron-containing PE Spheres by D-T Neutron

GUO Hai-ping, AN Li, MOU Yun-feng, WANG Xin-hua, CHEN Yuan

(China Academy of Engineering Physics, P. O. Box 919-213, Mianyang 621900, China)

Abstract: The leakage gamma spectra from PE spheres with different percentage of B₄C and different thickness irradiated by D-T neutron were measured. The leakage gamma spectra were calculated using MCNP/4A code with ENDF/B- database. Comparing with the experiment, they have good consistency within the error range.

Key words: boron-containing PE; leakage gamma spectra; D-T neutron; MCNP/4A code

含硼聚乙烯是一种相对廉价的中子屏蔽材料, 其中子屏蔽特性已进行过一维基准实验。与其他中子屏蔽材料一样, 该材料在中子的作用下产生射线。相对于屏蔽中子而言, 射线是二级剂量。由于硼的中子吸收截面远大于氢, 为了对含硼聚乙烯材料的性能有全面的了解, 进行 D-T 中子照射下含硼聚乙烯材料泄漏能谱实验研究很有必要。

1 实验原理和方法

本实验测量的泄漏能谱是指 D-T 中子

进入球体内与物质因发生非弹散射产生的非弹、因发生(n,)反应产生的俘获及其他反应的伴随的总合。其中, 对于 14 MeV 中子反应截面比较大的反应有:¹⁰Be(n, n), = 3.5 × 10⁻²⁵ cm²; ¹¹B(n, n), = 2.7 × 10⁻²⁵ cm²; C(n, n), = 4.2 × 10⁻²⁵ cm²; 而 C(n,) (= 1.18 × 10⁻²⁸ cm²) 和 H(n,) (= 2.98 × 10⁻²⁹ cm²) 截面比较小。¹⁰B 和 ¹¹B 只是对低能中子才有(n,)反应。

实验测量的是康普顿反冲电子谱, 通过解逆矩阵方法得到谱。设实验测量的康普顿反

收稿日期: 2003-11-12; 修回日期: 2004-03-09

作者简介: 郭海萍(1965—), 女, 内蒙古自治区丰镇人, 副研究员, 实验核物理专业

冲电子谱为 J , 把反冲电子谱和连续的能谱分成 m 个能量间隔, 则第 i 个间隔内的反冲电子数为:

$$J_i = \sum_{j=i}^m f_{ij} j \quad (1)$$

写成矩阵为:

$$J = F \quad (1)$$

求逆矩阵:

$$= F^{-1} J \quad (3)$$

式中: f_{ij} 为 NE-213 闪烁体对单能射线的响应函数。

NE-213 闪烁体单能射线的响应函数用 MARTHA 程序计算。

2 实验装置及测量

2.1 样品球

含硼聚乙烯(PE)球作为样品,它是用不同比例的 B_4C 和 CH_2 粉末压制成型,再机械加工成 3 套尺寸相同的可组合的球壳系统。每套有 4 层球壳,每层球壳由上、下两个半球壳组成。由于粉末搅拌不均匀或压制松紧程度不同,各层的密度有可能不同。即使是同一层密度也可能不均匀,因此,每层只能给出一个平均密度。 B_4C 的质量百分比分别为 0、10 % 和 50 %, 相应于吸收与慢化原子比为 0、3.6 % 和 31.1 %。3 套样品球的精确尺寸及密度列于表 1。

表 1 实验样品的尺寸及密度

Table 1 Dimension and density of the sphere shell

层数	成分	内径/cm	外径/cm	密度/(g cm ⁻³)
第 1 层	PE	6.01	16.12	0.789
	PE+10%B ₄ C	6.04	16.16	0.845
	PE+50%B ₄ C	6.05	16.10	1.198
第 2 层	PE	16.25	26.10	0.769
	PE+10%B ₄ C	16.22	26.15	0.851
	PE+50%B ₄ C	16.22	26.12	1.211
第 3 层	PE	26.23	36.10	0.779
	PE+10%B ₄ C	26.22	36.12	0.825
	PE+50%B ₄ C	26.23	36.12	1.207
第 4 层	PE	36.21	47.62	0.823
	PE+10%B ₄ C	36.26	47.63	0.860
	PE+50%B ₄ C	36.25	47.64	1.301

注:内、外径数据为样品加工单位给出的原始数据

本工作选用了 7 种组合球体,分别是:由 3 种不同 B_4C 百分比材料的第 3、4 层组成的厚 10 cm 的 3 个球体;由 B_4C 百分比为 50 % 材料的第 2、3、4 层组成的厚 15 cm 的 1 个球体;由 3 种不同 B_4C 百分比的第 1、2、3、4 层组成的厚 20 cm 的 3 个球体。

球体由上、下两半球组成,在两个半球的剖面及 1 个半球的对称轴线上各有 1 条 $\phi 3.6$ cm 的彼此相互垂直的孔道,其中一条为靶室孔道,另一条为球内参数测量孔道,测量孔道不用时可以用相同材料的塞块填充。每一套球都要测量本底和样品的泄漏能谱。

2.2 靶室系统

实验在 ns-200 加速器上进行。靶室为单管铝制的,结构比较简单。靶用芯靶,氚靶位于实验球体球心,靶的活性区 $\phi 10$ mm。靶衬材料为真空无氧铜,尺寸为 $\phi 20$ mm。中子源强用 $T(d,n)$ 反应的伴随粒子监视,金硅面垒半导体探测器位于与 D^+ 束成 178.9° 位置上。实验时的中子源强为 $1 \times 10^8 s^{-1}$ 。

2.3 实验布置及测量

实验布置示于图 1。靶心距探头约 3.5 m, NE-213 谱仪探头用铅砖屏蔽。采用脉冲形状甄别技术进行 n 、 γ 分辨。对于环境散射本底,用倒影锥的方法进行测量,即影锥大头朝样品。影锥由铁饼和聚乙烯锥体组成,铁饼尺寸为 $\phi 20$ cm $\times 11$ cm,聚乙烯锥体大头为 $\phi 20$ cm,小头为 $\phi 5.5$ cm,长 70 cm。影锥放置的位置为探测器看不到、直接从样品发射射线的位置。测量样品得到的泄漏射线谱中含有靶室材料被活化而产生的射线的贡献,这部分射线本底采用实验测量和模拟计算相结合的方法加

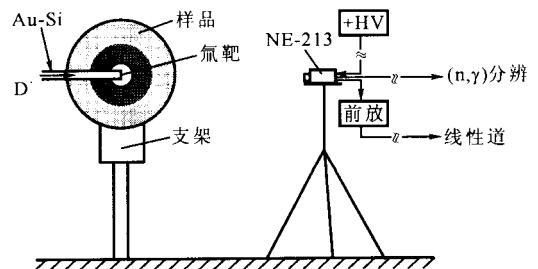


图 1 实验布置示意图

Fig. 1 Scheme of experimental assembly

以扣除^[2]:对于由靶室来的本底,先测量只由靶室产生的射线谱,然后作为输入谱,用MCNP程序进行输运模拟计算,其结果作为本底从测量的泄漏能谱中加以扣除。

2.4 实验测量

泄漏能谱分高能段(2.5~10.0 MeV)和低能段(0.4~3.5 MeV)两段进行测量。首先测量有样品球的泄漏能谱,然后加影锥环境散射本底。先后测量了3种B₄C质量百分比的7个实验球体(模型)的泄漏能谱。为了保证测量过程中探测器和影锥的相对固定,7个实验球体的大小相同,但厚度不同。测量能谱的同时用金硅面垒半导体探测器记录粒子,两段测量用伴随粒子归一。测量射线的能量范围是0.4~10 MeV。

3 数据处理

实验中,NE-213谱仪和MCA程序测量所得到的是康普顿反冲电子谱,要得到射线能谱就必须进行相关的数据处理。MCA中的反冲电子谱以CHN形式存在,它是不可读文件,经FORTRAN编译的CHN.FOR程序可将其转化成可解读的十进制文件。为了确保测量过程中射线的高低能区都能被有效地测出,因而,在实验中分为高低能区分别测量。将实验测量的康普顿反冲电子谱剥去环境本底,用⁶⁰Co源对高、低两段反冲电子谱进行能量刻度并用伴随粒子归一。两段电子谱衔接能区的不一致性一般小于3%。通过解逆矩阵方法得到谱。NE-213闪烁体单能射线的响应函数用MARTHA程序计算。

4 结果与讨论

对3种含硼量的聚乙烯球共7个实验球体测量所得的泄漏能谱与用MCNP/4A程序和EDNF/B-库数据对其模拟计算的结果分别示于图2~5中。在图2~5中,纵坐标为归一到一个源中子和相同探测器面积下的射线相对注量。

从图2可以看出,实验值和计算值在误差范围内符合得较好。图3是相同厚度不同含硼量泄漏谱测量值的比较。可以看出,纯聚乙烯球在2.3 MeV处有一个峰,而含硼聚乙烯球却没有,这说明在聚乙烯球中氢的慢化起主要作用,中子被慢化后,主要是低能中子对氢的

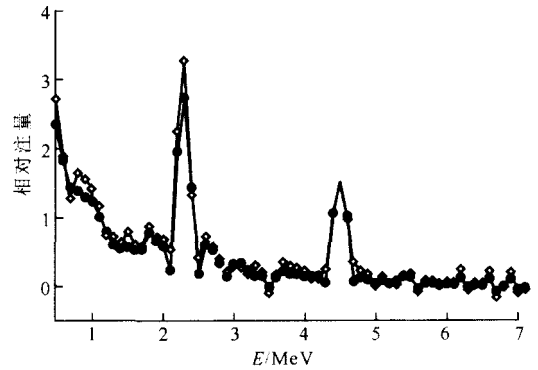


图2 聚乙烯球泄漏能谱比较
Fig.2 Leakage gamma spectra of PE
球壳厚度为20 cm
—○— 计算值; —●— 实验值

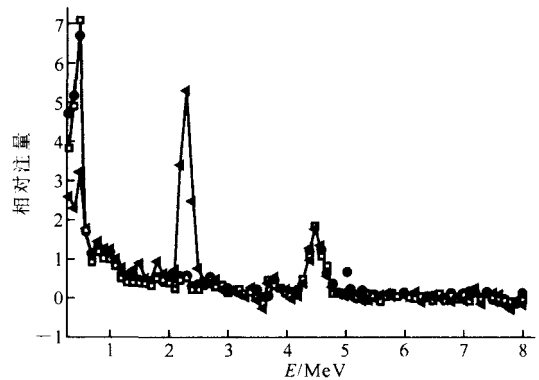


图3 不同含硼量聚乙烯球泄漏测量能谱
Fig.3 Leakage gamma spectra of PE
with different percentage of B₄C(experimental)
球壳厚度为20 cm
B₄C质量百分比: ▲—0%; —■—10%; —●—50%

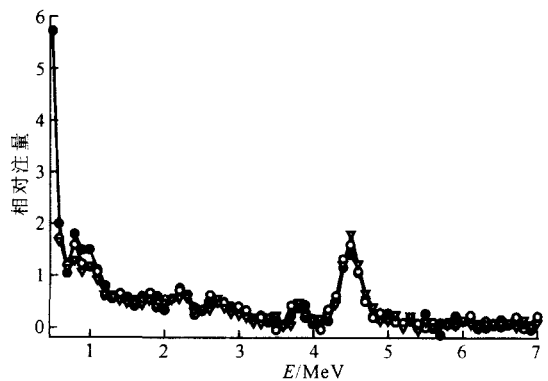


图4 不同厚度聚乙烯球泄漏测量能谱
Fig.4 Leakage gamma spectra of PE
with different thickness
B₄C质量百分比为50 %
—■—10 cm; —●—15 cm; ▽—20 cm

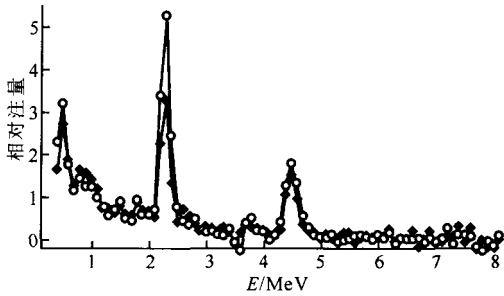


图5 不同厚度聚乙烯球泄漏 测量能谱

Fig.5 Leakage gamma spectra of PE
with different thickness
B₄C 质量百分比为 0
——10 cm; ——20 cm

(n,)反应。而在含硼聚乙烯球中,主要是硼起吸收作用。硼对低能中子的反应截面比较大,在还没有发生氢的(n,)反应之前低能中子基本已被硼完全吸收,因此在2.3 MeV处看不到这一峰值。在约4.5 MeV处的峰主要是碳的非弹散射 射线。从含硼量的变化上看,B₄C质量百分比从10%到50%,泄漏能谱的积分量变化很小。图4是B₄C质量百分比为50%、厚度为10、15、20 cm的聚乙烯球的泄漏 能谱。从图4可以看出厚度的变化对能谱的影响也不是很大,泄漏能谱的积分量变化也很小。图5为聚乙烯球泄漏 能谱。从图5可以看出,厚度的变化在2.3 MeV处起到了一定的作用,厚度越大,氢的慢化、吸收越强,表现在

氢的(n,)反应的峰值的幅度也就越大。在以往对含硼聚乙烯的中子屏蔽性能研究中观测到,在B₄C质量百分比为10%、厚度为15 cm时,含硼聚乙烯对14 MeV中子的屏蔽效果已达到要求。在此基础上再增加含硼量或厚度,中子的积分泄漏量基本不发生变化。本实验表明,射线的积分泄漏量也不发生变化。从以上的分析可以看出,作为一维基准实验,本实验的结果与用MCNP/4A程序和ENDF/B- 库数据的计算结果在误差范围内一致。

5 实验结果误差

实验结果误差主要包括中子源强监测误差,小于2.5%;NE-213探测器响应函数的计算误差为3%~4%;测量系统的能量刻度误差约为1%;n/ 分辨误差约为1%;本底扣不准误差小于2%;解谱过程中的误差为3%。总的实验误差为5%~6%。

参考文献:

- [1] 复旦大学、清华大学、四川大学合编.核物理实验方法(下)[M].北京:原子能出版社,1982.23~24.
- [2] 陈渊,郭海萍,安力,等.钒球14 MeV中子的泄漏能谱测量[J].原子能科学技术,2002,36(2):157~159.
- [3] 牟云峰,陈渊,安力.D-T中子照射铁球 射线角通量谱测量[J].原子能科学技术,2000,34(增刊):113~116.