

带有厚吸收片的PIN中子探头灵敏度的计算

李文建 赵彦森

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 提出了一个计算带有厚吸收片的PIN中子探头灵敏度的方法,即分层分块蒙特卡罗模拟联合模型(LPMC)。根据计算过程,用FORTRAN 77语言编写了计算程序LPMC,其计算方法本身的误差不大于1.88%。LPMC计算结果与实验值在相对误差范围内符合,解决了仅用LP理论对带有厚吸收片的PIN中子探头灵敏度计算结果与实验偏差过大的问题。

关键词 中子,灵敏度,模型,反冲质子

在核试验中,聚变中子参数是重要的测量项目,通常利用反冲质子法测量聚变中子通量密度。为了满足现场测量的要求,中子要经较长准直器准直后^[1],以平行束入射到聚乙烯散射靶上与氢核发生弹性散射产生反冲质子,反冲质子束到达半导体探测器转换为电流信号送至记录系统记录。因为瞬发核裂变是由核裂变引起的,所以不可避免地要在裂变中子本底上测量聚变中子参数。为了降低甚至消除裂变中子产生的本底,须在探测器前挡一定厚度的金片,用以吸收由这些本底中子产生的低能质子。此外,由于现场测量需要选择不同的测点距离,所以当测点离爆心较近时,中子通量将很高,使半导体探测器输出电流很大,致使半导体探测器不能很好地工作在线性范围,所以常采取厚吸收片即高探测灵敏度的方法来满足探测器输出电流与中子通量密度的线性关系。这种关系的事先确定就是所谓的灵敏度标定。

灵敏度标定是一项耗资多、时间长的庞大实验,所以我们试图用理论计算来代替它。文献[2]提出的分层分块模型理论在计算无吸收片或带薄吸收片方面取得了成功,而在带厚吸收片的灵敏度计算方面误差过大,其原因是未考虑n-p多次散射效应。我们在此基础上提出了分层分块蒙特卡罗模拟联合模型理论,考虑了n-p多次散射效应,因此在计算带厚吸收片的灵敏度方面取得了成功,与实验值比较在误差范围内符合。

1 PIN中子探头灵敏度的计算

在用分层分块模型^[2]计算PIN中子探头灵敏度时,由于对厚吸收片的理论计算值与实验值相对偏差已超出误差范围,因此我们仅将吸收片分层分块变为分块加蒙特卡罗模拟计算,又由于在带厚吸收片的情况下,n-p散射质子穿过吸收片再进入探测器完全被阻止,所以穿过吸收片的质子能谱分布就是探测器测量得到的质子能谱分布。

1.1 探测系统概述

中子束经准直器准直后作用于聚乙烯转换靶,靶法线与束流方向成45°。探测器是PIN半导体探测器,其法线与靶法线平行,与束流方向成45°。金吸收片紧贴地放在探测器前面(如图1所示)。

收稿日期:1993-02-24,修回日期:1993-10-04

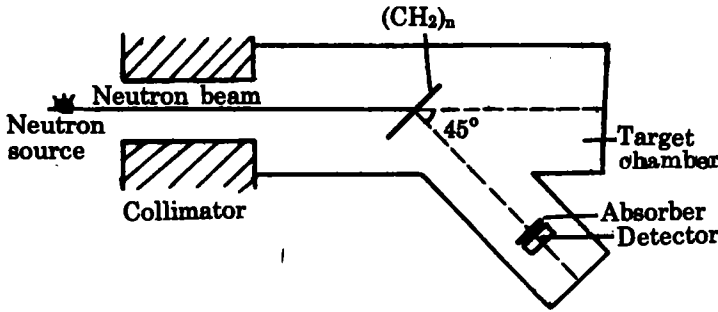


图1 中子探测系统示意图
Fig.1 Schematic diagram of the neutron detector system

1.2 n-p反冲质子的出射能量计算

在实际计算中，当n-p反冲质子射向探测器的同一位置时，聚乙烯内不同深度和离开轴心不同距离的质子都会造成质子从聚乙烯表面出射的能量不同。所以，首先要确定靶内深度x处第k层、第j块、向吸收片第i块出射的质子初始能量 E_{kji} (图2所示)，即

$$E_{kji} = E_n \cos^2 \phi_B \tag{1}$$

式中， E_n 为入射中子能量(MeV)； ϕ_B 为入射中子与出射质子间的夹角。

然后，根据质子在聚乙烯中的能量 E_p 、射程 R_p 曲线(图3)和出射路程长度，即可求得靶内第k层、第j块、离开聚乙烯表面向吸收片第i块出射的质子能量

$$E_{kji} = E'_{kji} - \Delta E'_{kji} \tag{2}$$

式中， $\Delta E'_{kji}$ 为质子在出射路程长度内的能量损失。

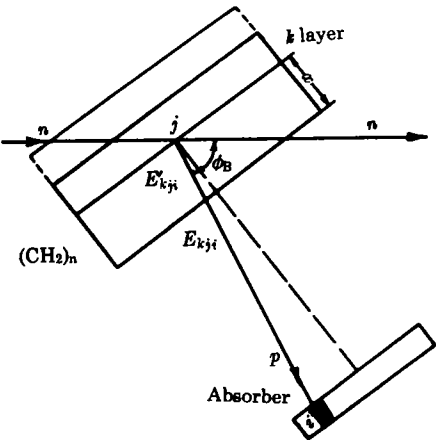


图2 计算n-p反冲质子离开聚乙烯表面时出射能量的示意图

Fig.2 Calculation of the energy of n-p recoil protons out of $(CH_2)_n$

1.3 n-p反冲质子能谱分布计算

为了与实验得到的反冲质子谱比较和根据能谱求得其相应的灵敏度，需要计算

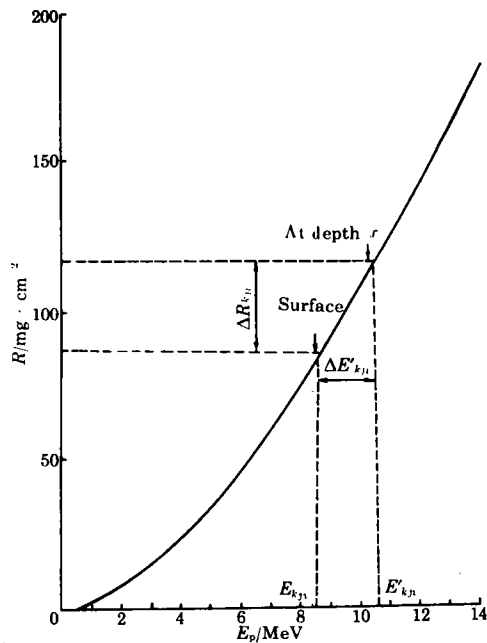


图3 质子在聚乙烯中的射程和能量关系
Fig.3 The R_p - E_p relation in $(CH_2)_n$

反冲质子能谱分布情况。

先计算对应于出射能量为 E_{kji} 的、靶内第 k 层、第 j 块的、入射到金吸收片第 i 块产生的反冲质子数:

$$N_{kji} = [2 \pi I N_s / (N_K N_J)] \int_{\theta_i}^{\theta_{i+1}} \sigma_n(\theta_{np}) \sin \theta_{np} d \theta_{np} \tag{3}$$

式中, I 为单位时间内入射中子数; N_s 为靶密度; N_K 和 N_J 分别为靶的分层数和分块数。 θ_i 和 θ_{i+1} 分别为反冲质子入射到金吸收片第 i 块的最小和最大n-p散射角。 $\sigma_n(\theta_{np})$ 为氢对中子的微分散射截面 $[10^{-27} \text{cm}^2/\text{sr}]$, 可用Hopkins公式计算^[3]

$$\sigma_n(\theta_{np}) = 4 \cos \theta_{np} [55.14 + 1.981 \cos^2 \theta_{np} + 0.177825 \times (3 \cos^4 \theta_{np} + 1) + 0.0319625 \times (5 \cos^6 \theta_{np} + 3 \cos^2 \theta_{np}) + 0.00168 \times (35 \cos^8 \theta_{np} + 20 \cos^4 \theta_{np} + 9)] \tag{4}$$

然后将计算得到的 N_{kji} 按金吸收片分成的块数分别进行蒙特卡罗模拟计算, 再将每一块计算结果加起来, 就得到靶内第 k 层第 j 块产生的反冲质子穿过金吸收片的质子能谱分布。

1.4 探头系统灵敏度的计算

这里所说的分层分块蒙特卡罗模拟联合模型是指对聚乙烯转换靶进行分层分块, 而对吸收片仅在质子入射吸收片表面进行分块, 然后分别对每一小块入射质子采用蒙特卡罗模拟计算。根据得到的中子探测系统能谱, 可以求得相应的灵敏度为

$$S_n = 4.425 \times 10^{-14} \sum n_i E_i / \phi \tag{5}$$

式中, n_i 为能量 E_i 的反冲质子数, ϕ 为入射中子通量 (n/cm^2) 。

2 计算结果

我们采用与实验相同的参数来计算PIN中子探头系统的质子能谱和灵敏度, 并且与分层分块模型计算结果进行了比较(如图4和图5所示)。图4和图5中, 入射中子能量为14.1

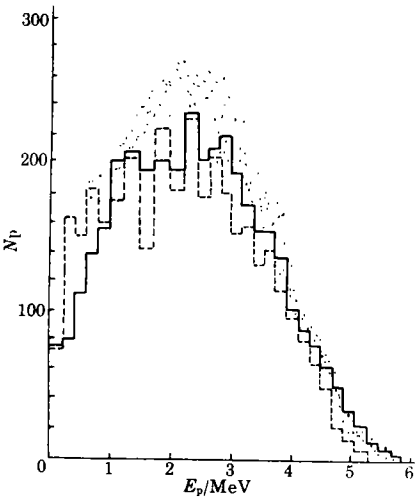


图4 测量和计算的反冲质子能谱(之一)
Fig.4 Measured and calculated spectrum of recoil protons (Part I)
— LPMC --- LP ● Experiment

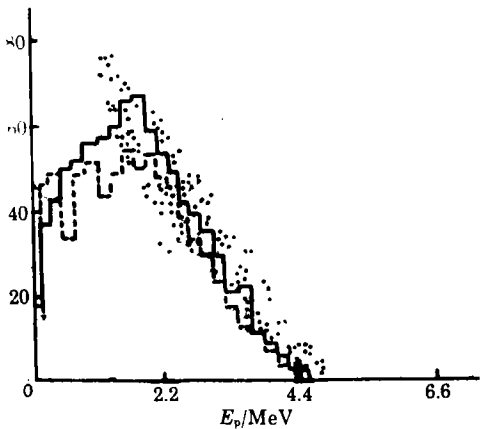


图5 测量和计算的反冲质子能谱(之二)
Fig.5 Measured and calculated spectrum of recoil protons (Part II)
— LPMC --- LP ● Experiment

MeV; 聚乙烯靶的面密度分别为 $57.32 \text{mg}/\text{cm}^2$ 和 $20.35 \text{mg}/\text{cm}^2$; 吸收片的面密度分别为

$162.29\text{mg}/\text{cm}^2$ 和 $181.9\text{mg}/\text{cm}^2$;反冲质子探测器的光栏半径 R_D 为 0.9cm ;聚乙烯靶到反冲质子探测器的距离 R_0 分别为 11.73 、 14.31cm ;LP模型计算的灵敏度 S_n^{LP} 分别为 0.15151×10^{-17} 、 $4.4284 \times 10^{-19}\text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^2/\text{n}$, LPMC模型计算的灵敏度 S_n^{LPMC} 分别为 0.17254×10^{-17} 、 $4.91733 \times 10^{-19}\text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^2/\text{n}$, 灵敏度实验值 S_n^{Exp} 分别为 $0.18277 \times 10^{-17}\text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^2/\text{n}$ 和 $5.1622 \times 10^{-19}\text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^2/\text{n}$ 。

从图4和图5可知,吸收片采用分块加蒙特卡罗模拟计算(LPMC)得到的质子能谱要比采用分层分块方法(LP)更接近于实验结果,特别在高能区部分。前者计算得到的灵敏度与实验比较,其相对偏差分别为 5.9% 和 5.0% ,而后者计算其相对偏差分别为 20.6% 和 16.6% 。

3 讨 论

(1)实验室测量的 S_n 和反冲质子能谱与LPMC理论计算符合较好,仅在能谱的低端($\sim 1\text{MeV}$ 以下)有较大偏离。从实验方面讲,这主要是信号和本底测量时准直屏蔽体和靶室内俘获 γ 效应的差异所引起的。但这部分对总的 S_n 的贡献很小,经适当处理后,对结果只引进 0.8% 的误差。

(2)实验测量的质子能谱在 0.4MeV 以下受到电子学系统噪声的干扰,因而不能准确给出该区域的质子能谱。为此,只能借助理论计算谱作近似处理。

(3)LPMC与LP相比减小了误差,但总的来说仍系统地小于实验测量的结果。对此,可作如下猜测:①在理论计算中假定了入射中子束是平行束,而实际上存在 0.4° 的角度,这可造成在 $(\text{CH}_2)_n$ 表面入射中子能量和通量的不同,因而理论计算影响了质子产额;②聚乙烯靶中存在 $n-p$ 的二次效应,这会引起质子数的增加,而理论计算并没有考虑这种效应;③聚乙烯中还存在 $p-p$ 效应,这也会引起质子数的增加,而理论计算也没有考虑这种效应。

为了进一步提高理论计算的准确度,对此尚需深入分析和研究。

4 计算误差分析

(1)在蒙特卡罗游戏即蒙特卡罗直接模拟中,我们所求的量即为独立同分布随机变量。当置信水平为 0.95 时,则根据中心极限定律即可求得蒙特卡罗游戏的误差为

$$|\bar{M} - M| < 1.96(\bar{\sigma}^2/N)^{1/2} \quad (6)$$

式中,入射质子数为 32860 ,透过质子数为 11729 ,所以方差 $\bar{\sigma}^2 = 0.2295$,于是蒙特卡罗游戏误差为 0.52% 。

(2)在计算中子轰击聚乙烯转换靶产生的质子数时,采用的 $n-p$ 微分截面是Hopkins表达式,由此带来的误差为 1% 。

(3)所用的计算物质即聚乙烯对质子阻止能力的公式是近似的,用文献[2]中的计算公式以及 $E_p > 400\text{keV}$ (对中子灵敏度产生贡献的主要能区)时,对有实验数据的氢、碳元素来说,实验数据误差小于 1% ,拟合精度为 1% ,总误差小于 1.4% 。

另外, R_D 、 R_0 的精度带来的误差分别是 0.5% 和 0.1% ;由于大部分质子能量大于 400keV ,所以舍弃 400keV 以下质子对 S_n 带来的误差仅为 0.2% 。因此,这种理论计算方法的总误差 $< 1.88\%$ 。

5 结 束 语

近年来,随着PIN中子探头灵敏度标定实验的频繁进行,经济上大量的浪费日益引起人

们的关注。因此,能否建立一个物理模型来计算这种探测系统的灵敏度以代替这种灵敏度标定实验便提到了议事日程。分层分块模型^[2]成功地计算了带薄吸收片的中子探头的灵敏度,但对带厚吸收片的中子探头灵敏度计算却显得无能为力。然而分层分块蒙特卡罗模拟联合模型可以适用于这种带厚吸收片的探测系统灵敏度的计算,而且其计算方法的本身误差(1.88%)小于分层分块模型计算的本身误差(6.4%)^[2]。

参 考 文 献

- 1 Glasgow D W, Velkley D E, Brandenberger J D. Nucl Instr Meth, 1974; 114:521
- 2 西北核技术研究所. 试验与研究. 1982; 3:280
- 3 Hopkins J C, Breit G. Nucl Data Tables, 1971; A9:137

Sensitivity calculation of PIN neutron detector system with thick absorber

Li Wenjian Zhao Yansen

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000)

Abstract

A method of calculating sensitivity of PIN neutron detector system with a thick absorber, that is, the model of Layers and Pieces with Monte-Carlo (LPMC) simulation has been put forward. The program LPMC was written in FORTRAN 77 language. The error of the calculation is not more than 1.88%. The results from LPMC calculation are in agreement with the experiments within the above error, thus the shortcoming of over-deviations for the LP calculation has been avoided.

Key words Neutrons, Sensitivity, Model, Recoil protons