

空间中子探测器能量响应仿真分析及验证

文 轩 安 恒 杨生胜 王 鷗 常思远 高 欣 王 俊 张晨光 冯展祖

(兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室

空间环境材料行为及评价技术国防科技重点实验室 兰州 730000)

摘要 空间中子会对在轨航天器的电子系统造成损伤,并可能对执行任务宇航员的生命安全造成严重威胁。准确分析空间的中子环境特性,是保障航天器抗辐射加固设计合理和宇航员生命安全的前提。基于 Fluka 软件利用蒙特卡罗的方法模拟、分析、设计了基于塑料闪烁体的复合结构中子探测器,从探头尺寸、结构位置、探测效率、反符合结构等方面进行了仿真分析,确定了探测器的 0.5 mm、3 mm 梯度复合结构,并利用 14~25 MeV 的单能中子进行了试验验证。结果表明:设计的探测器可用于空间站舱内中子环境以及近地空间中子探测,能够为后续的工程载荷设计提供理论和技术支持。

关键词 高能中子, 空间站, 深空探测, 探测器设计与分析

中图分类号 O571.6

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.120401

Simulation analysis and verification of energy response of space neutron detector

WEN Xuan AN Heng YANG Shengsheng WANG Yi CHANG Siyuan GAO Xin
WANG Jun ZHANG Chenguang FENG Zhanzu

(Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, National Key Laboratory
of Materials Behavior and Evaluation Technology in Space Environment, Lanzhou 730000, China)

Abstract [Background] Space neutrons can cause damage to the electronic systems of orbiting spacecraft and may pose a serious threat to the lives of astronauts on mission. [Purpose] This study aims to accurately analyze the characteristics of the space neutron environment to ensure the reasonable design of spacecraft's anti-radiation reinforcement and the safety of astronauts. [Methods] Monte Carlo method based Fluka software was employed to simulate, analyze and design a composite structure neutron detector based on plastic scintillator. Simulation analysis from the aspects of probe size, structure position, detection efficiency, anti-coincidence structure, etc., was performed to determine the 0.5 mm, 3 mm gradient composite structure of the detector by using 14~25 MeV single energy neutrons for experimental verification. [Results] The simulation and experimental results show that the designed detector can be used for space station cabin neutron environment and near-Earth space neutron detection. [Conclusions] This study provides theoretical and technical support for subsequent engineering load design.

Key words High-energy neutron, Space station, Deep space detection, Detector design and analysis

中子与航天器器件材料相互作用可能诱发位移 损伤效应、单粒子效应,会导致材料性能退化或器件

空间环境材料行为及评价技术国防科技重点实验室资助

第一作者: 文轩, 男, 1991 年出生, 2016 年毕业于中国空间技术研究院, 现为博士研究生, 研究领域为空间环境效应及控制

通信作者: 杨生胜, E-mail: 2yang@sina.com

收稿日期: 2020-05-20, 修回日期: 2020-08-28

Supported by National Key Laboratory of Materials Behavior and Evaluation Technology in Space Environment

First author: WEN Xuan, male, born in 1991, graduated from China Academy of Space Technology in 2016, doctoral student, focusing on space radiation effects and control

Corresponding author: YANG Shengsheng, E-mail: 2yang@sina.com

Received date: 2020-05-20, revised date: 2020-08-28

功能丧失,严重威胁航天器在轨安全,同时中子易于被储氢材料吸收,而人体中含有大量的水,因此中子对空间执行任务的航天员带来了很大的健康威胁。针对空间中子探测,目前主要通过单一尺寸的闪烁体实现,但是该方法探测能量范围窄,探测效率不高,而利用多尺寸复合结构的中子能量探测方法具有探测范围宽、探测效率高的优势。利用复合结构的中子探测器获取中子能量、通量等能谱数据,可实现对空间中子的探测,且能够在执行行星找水任务、寻找地球以外的生命现象、行星表面混合辐射环境测量等方面发挥重要作用,同时准确分析空间的中子环境特性,是航天器抗辐射加固设计和保障宇航员安全的基本要素之一^[1-5]。

1 中子与物质的相互作用

中子是电中性粒子,在与物质的相互作用过程中,并不会直接产生电离效应,而是通过核反应或散射等方式产生带电荷的次级粒子,继而产生电离效应沉积能量。中子与原子核的相互作用主要包括势弹性散射、复合核、直接作用、中间过程等方式,而从能量传递的角度上来讲可以分为弹性散射过程和非弹作用过程。对于 15~100 MeV 能量区间的中子探测,主要采用核反冲法,这是由于在这一区间弹性散射的相互作用截面较大。而中子与氢核的相互作用,一方面具有较大的反应截面,另一方面能量传递效率高,使得反冲氢核能够具有较长的可观测径迹,所以采用含氢丰富的塑料闪烁体材料进行探测^[6]。

中子与物质的相互作用复杂,在实际的模拟计算中对于每一种相互作用设定相应的反应截面值,通过随机数来判定各类反应是否发生。对于能量较高的中子,可以为每一个能量按照相应的反应截面进行计算,但对于低能中子采用这样的计算方法会增加计算的复杂度,严重影响低能中子直至热中子下的计算收敛速度^[7-9]。因而对于低能中子,计算物理学上的一种广泛采用的处理方法是采用多群中子输运模型,将感兴趣的能量区间分为若干个能量段,称为能量群。相应地,相互作用过程也就用群间输运概率的散射矩阵来描述。不同群间的散射概率按照勒让德多项式展开至第 $N+1$ 项,为:

$$\sigma_s(g \rightarrow g', \mu) = \sum_{i=0}^N \frac{2i+1}{4\pi} p_i(\mu) \sigma_i(g \rightarrow g') \quad (1)$$

式中: $\mu = \Omega \cdot \Omega'$ 为散射角; N 为勒让德多项式的阶。

反冲质子的质量远大于电子的质量,可以认为属于重带电粒子,其主要的能量损失方式为电离能量损失。电离能量损失可以用 Bethe-Bloch 公式进行描述^[10-15],其具体形式如下:

$$S = -\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{m_e v^2} NB \quad (2)$$

式中: $S = -\frac{dE}{dx}$ 为能量随距离的损失率; z 为入射粒子电荷数,对于质子为 1; m_e 为电子的静止质量; v 为入射粒子的速度; N 为靶物质单位体积的原子数,而 B 则可以表示为:

$$B = Z \left[\ln \left(\frac{2m_e v^2}{I} \right) - \ln \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right] \quad (3)$$

式中: Z 为靶物质的原子序数; I 为靶物质平均等效电离电位; $-\ln \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2}$ 则为相对论修正项。从 Bethe-Bloch 公式中可以看出:

1) 由于质子质量远大于电子的质量,所以可以认为质子在电离效应损失能量的过程中并不改变其轨迹的方向。在非相对论极限下, B 随 v 变化缓慢,近似与 v 无关,则:

$$S \propto v^{-2} \propto E^{-1} \quad (4)$$

说明随着入射粒子能量的减少,其能量随距离的损失率即能量沉积率会增加。所以质子在沿着其轨迹方向上的能量沉积率会逐渐增加。

2) 由于:

$$B \propto Z \quad (5)$$

于是:

$$S \propto NZ \quad (6)$$

即电离效应的能量损失率与材料有关,吸收材料密度大,原子序数高的,其阻止本领大,而且该能量损失率正比于材料的特性参数,所以在对电离效应的能量损失分析中,可以采用材料折算的方法,即将未知材料的电离效应阻挡能力经过一些理论或部分实验分析,按比例折算为已知材料的电离效应阻挡能力,再根据已知材料电离效应阻挡能力的详细数据来分析未知材料整体的电离效应阻挡能力^[16-17]。

2 中子探测器仿真分析及设计

由于 15~100 MeV 的中子与塑料闪烁体的相互作用截面并不大,所以塑料闪烁体光纤阵列总尺寸的选择主要决定了中子探测器对中子的响应能力,进而影响探测效率。为了估测中子探测器的响应能力,需要对中子在塑料闪烁体材料中的首次相互作用深度进行模拟分析,在模拟设置中选择入射粒子为中子,选取能量为 15 MeV、20 MeV、30 MeV、40 MeV、50 MeV、60 MeV、70 MeV、80 MeV、90 MeV、100 MeV,选取的入射目标为 1 000 mm 厚的塑料闪烁体芯材料聚苯乙烯长方体,以保证材料

足够厚。在模拟过程中记录第一次相互作用的类型及深度,而且当第一次相互作用为(n,p)弹性散射时,同时记录弹性散射的相关信息。模拟研究中得到的相互作用深度结果如图1所示。

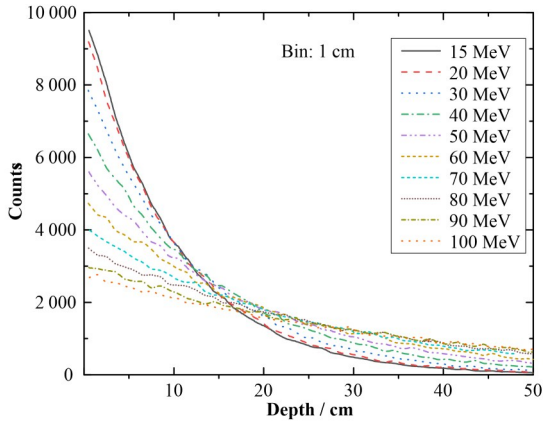


图1 中子在塑料闪烁体中的首次相互作用深度分布
Fig.1 The first interaction depth distribution of neutrons in plastic scintillators

模拟研究给出5 cm厚度范围内的发生相互作用的总计数分布及首次相互作用为n-p弹性散射的总计数分布,同时选取1 cm厚度的相应结果以进行对照,如图2所示。

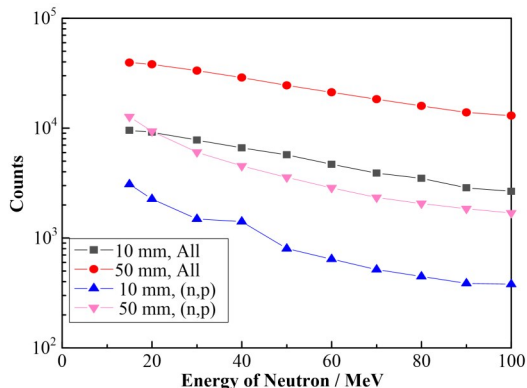


图2 1 cm及5 cm厚度范围内的相互作用事例数分布
Fig.2 Distribution of the number of interaction events within 1 cm and 5 cm thickness range

可以看到,在5 cm厚度范围内发生相互作用的几率数量级为10%,其中首次相互作用类型为n-p弹性散射的几率数量级为1%,说明探测效率数量级约为1%,而1 cm厚度范围内发生各种相互作用的几率仅为5 cm厚度范围内的约1/5。

由于中子探测器利用中子与质子发生碰撞产生反冲质子来进行观测,通过测量质子在塑料闪烁体中的反冲方向和产生的闪烁光进行中子能量推算,所以在对塑料闪烁体光纤截面尺寸进行选择时,需要考虑到质子的穿透深度,以使质子穿透足够的层数,从而可以进行质子反冲方向的推算^[19]。所有设

置的能量值为5 MeV、10 MeV、15 MeV、20 MeV、30 MeV、40 MeV、50 MeV、60 MeV、70 MeV、80 MeV、90 MeV、100 MeV。选取的目标材料为100 mm足够深塑料闪烁体光纤芯材料聚苯乙烯。在模拟中记录质子的通量密度随深度的变化,总事例数依然为100 000。模拟研究得到的质子入射深度分布如图3所示。

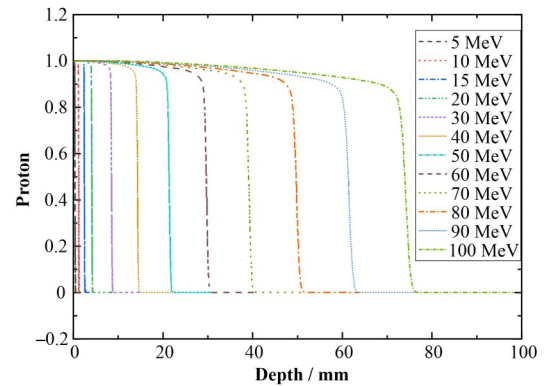


图3 不同能量质子的入射深度
Fig.3 Incidence depth of photons with different energies

可以看到,对于100 MeV的质子,其入射深度可达70 mm以上,而对于15 MeV的质子则在25 mm附近,而5 MeV的质子入射深度更浅,仅有不到0.5 mm。这说明对于15~100 MeV这一能量段的质子,其穿透深度范围比较广,最深的与最浅的相差约一个数量级。而要对质子径迹进行有效追踪,则最低需要在4层光纤中有闪烁光产生,最少也要穿过至少两根整光纤。因此对于15 MeV的质子,要想对其径迹进行有效观测,其单根光纤的截面尺寸理论上应当不超过约1 mm,以0.5 mm的厚度为佳,而对于能量较高的质子,进行观测所需的最小光纤截面尺寸要求则相对要宽松许多。

设置单根光纤截面尺寸为0.5 mm、1 mm、2 mm、3 mm,排列方式为16×16交错密排,共计256根。入射中子能量选取为15 MeV、20 MeV、23 MeV、25 MeV、30 MeV、40 MeV、50 MeV、60 MeV、70 MeV、80 MeV、90 MeV、100 MeV,入射位置并不在中心位置而是偏离中心位置0.5倍光纤厚度,以保证入射路径上有光纤芯材料。选取总模拟事例数为10 000。记录各光纤的输出光通量,同时记录相互作用类型的相关信息。不同尺寸下各类型事例数依次如图4所示。

从图4(a)可以看出,由截面尺寸为0.5 mm的闪烁体光纤搭建成的16×16阵列可以实现15 MeV中子的测量,而截面尺寸为1.0 mm的闪烁体光纤搭建成的阵列则已经无法进行有效观测,并且随着单根光纤尺寸的增加,其在低能区间的分辨率越低,对于

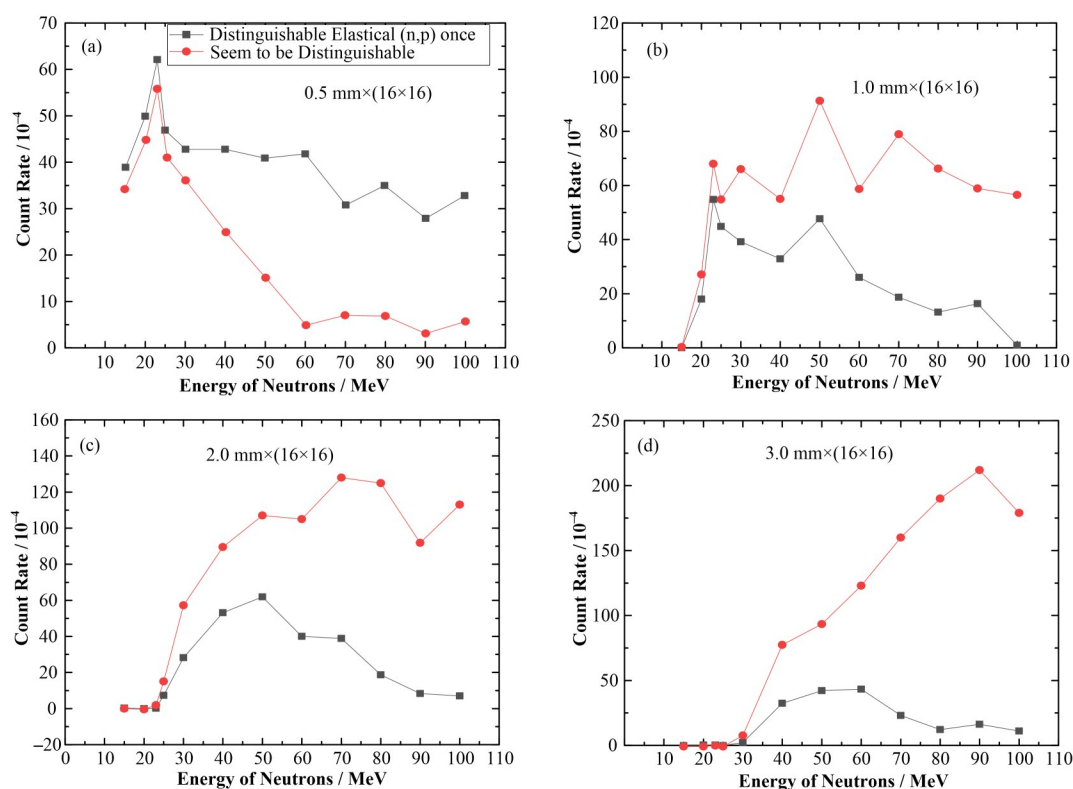


图4 不同尺寸塑料闪烁体光纤阵列一次n-p弹性散射及可探测的事例数 (a) 0.5 mm, (b) 1.0 mm, (c) 2.0 mm, (d) 3.0 mm
Fig.4 One n-p elastic scattering and the number of detectable events of plastic scintillator fiber array with different size (a) 0.5 mm, (b) 1.0 mm, (c) 2.0 mm, (d) 3.0 mm

由3.0 mm宽的闪烁体光纤搭建的阵列,30 MeV的入射中子已经无法进行有效观测。但同时可以看到,由0.5 mm光纤搭建而成的16×16光纤阵列对较高能量区间的探测效率也很低下,对于60 MeV以上的入射中子已经难以进行有效观测,而随着闪烁光纤厚度的增加,对于高能量区间的观测效率也逐渐有所改善。

由模拟结果可以认为,光纤阵列总厚度约相当于2 mm×(16×16)的光纤阵列的厚度,才能实现比较好的探测效果,而同时应维持光纤0.5 mm的厚度,那么整个光纤数目增加为4倍,从而使后续信号处理系统的复杂程度也同比增加。为此,设计采用若干层细光纤和若干层粗光纤相互组合成光纤阵列进行探测。但为了减轻信号处理系统的复杂度,最简单的做法是只是用两种尺寸(如0.5 mm和3.0 mm)。为了维持探测平面上下一致,细光纤和粗光纤每一层数目并不相同,而取决于二者的厚度比例。采用0.5 mm和3.0 mm时,0.5 mm光纤每层的数目为3.0 mm的6倍,依然会增加信号处理系统的复杂度。要维持处理系统的复杂度,可以将光纤与光电转换器件之间的连接方式重新设计,将同层的多根细光纤作为一根光纤使用,但层间不进行合并以维持层厚不变。但这样会带来一个问题,由于横向上“单

根”光纤间距变为数倍宽度而纵向上宽度仍维持不变,所以系统对径迹的角分辨率会变差,从而严重影响系统的能量分辨率。考虑到能量分辨率的降低是由“单根”光纤横向尺寸间隔远大于纵向尺寸间隔所造成的,所以可以通过在层间留有间隙来加大层间间距,改善能量分辨率。光纤阵列示意图如图5所示。

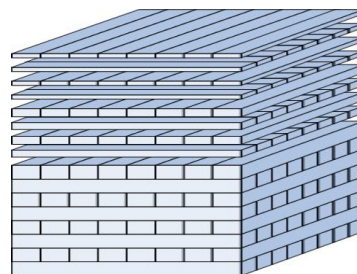


图5 梯度尺寸光纤阵列示意图
Fig.5 Schematic diagram of gradient size fiber array

模拟采用由8层0.5 mm光纤及16层3.0 mm光纤所组成的梯度尺寸光纤阵列。而横向上则均视为16层3.0 mm光纤。得到的各能量下的可观测事例率结果如图6所示。

由于完全屏蔽外来其他粒子的干扰会带来很大的屏蔽重量,并进而影响中子探测,所以在探测器设计中,对于探测结构塑料闪烁体光纤阵列,采用反符

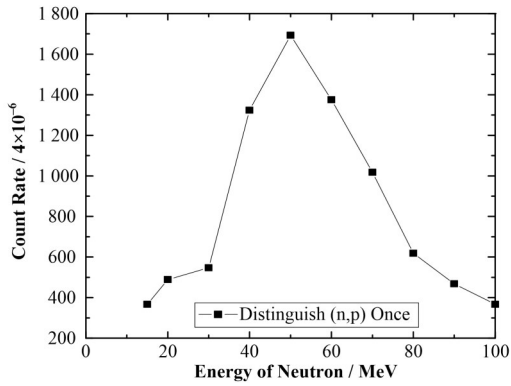


图6 梯度尺寸光纤阵列的分辨能力
Fig.6 Resolving ability of gradient size fiber array

合结构进行粒子甄别,以去除其他粒子的影响(图7)。反符合结构采用1 mm Al加1 mm塑料闪烁体BC404的5 cm×5 cm板形结构,记录每个事例中BC404板四周传出的闪烁光通量,并记录穿过BC404后的粒子通量,以判断该粒子是否穿过反符合结构。

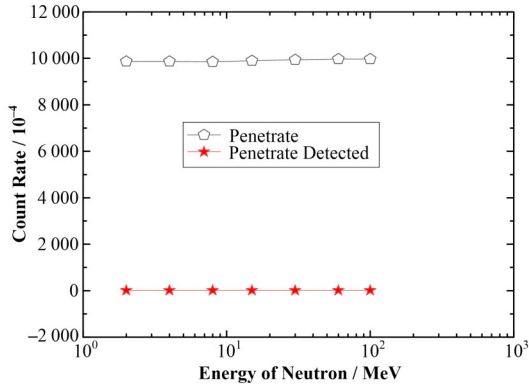


图7 中子的反符合效率
Fig.7 Anticoincidence efficiency of neutrons

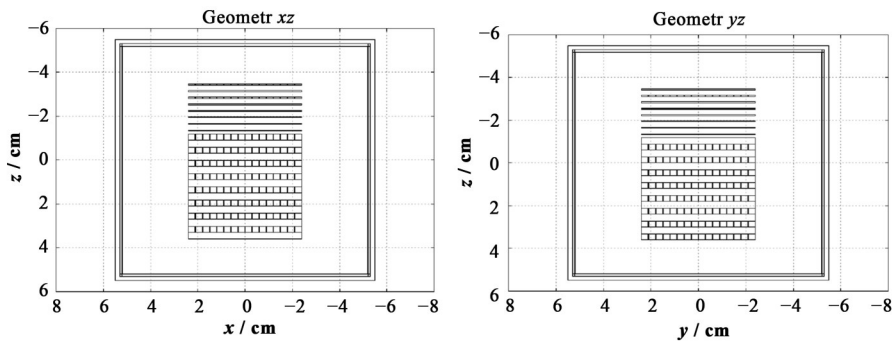


图8 探测器整体几何结构的模拟设置
Fig.8 Simulation setup of the overall geometry of detector

在进行有效探测判定时,所采用的方法首先是阈值法,对于截面尺寸为0.5 mm的光纤,闪烁光能量阈值选择为2.0 keV,而对于截面尺寸为3 mm的光纤则选择为6.0 keV。选取该值的原因目前仅仅源自经验,在探测器设计的数据处理环节中会考虑

从上述模拟结果可以看出,采用1 mm的Al与1 mm的BC404的结构即可对带电粒子进行有效的反符合探测。

3 中子探测器整体性能仿真分析

根据以上分析,下文对由探测器外壳、反符合单元、闪烁体光纤阵列所组成的整体结构进行模拟分析。模拟在梯度尺寸光纤阵列的基础上,增加了探测器外壳和反符合的部分。具体结构如下:最外层为外边长5.5 cm×5.5 cm、厚度为2 mm的铝壳;铝壳内表面为厚度1 mm的BC404反符合层;内部为复合尺寸光纤阵列,其中xy平面由3 mm宽的光纤并排而成,每排16根,而在z方向上为由8层0.5 mm厚的光纤与16层3 mm厚的光纤所组成的复合结构,并保持光纤中心在z方向上等距以维持角分辨,中心间距为3 mm,同时闪烁体光纤壳的厚度取为总尺寸的4%。所设计的整体结构模型如图8所示。入射中子能量选取为固定能量值(15 MeV、20 MeV、23 MeV、25 MeV、30 MeV、40 MeV、50 MeV、60 MeV、70 MeV、80 MeV、90 MeV、100 MeV),方向为沿z轴垂直入射,在xy平面上的击中位置略偏离探测结构的中心,为(1.5 mm, 1.5 mm)位置处以保证在入射方向上有尽量多的闪烁光纤芯材料。结果记录的是每个事例中光纤阵列四周侧面的可见光分布,以及各反符合面四边的可见光分布,另外对相互作用分类也进行了记录。所设定的总事例数为500 000。

选取更为复杂而有效的判据,从而更好地实现有效事例甄别。根据该能量值选择出有效像素点,满足两个及以上奇数层与两个及以上偶数层均有有效像素点则视为可以得到质子径迹方向,从而判定为有效穿层事例。

模拟首先给出探测效率以及反符合效率的结果。其结果如图9所示。

依据推算的出入射中子能量绘制出各已知入射能量下的能量推算值的直方图,如图10所示。由图

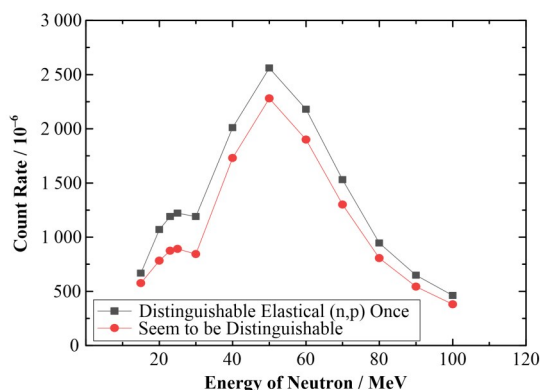


图9 探测器系统的探测效率及对中子的反符合效应
Fig.9 The detection efficiency of the detector system and the anticoincidence effect on neutrons

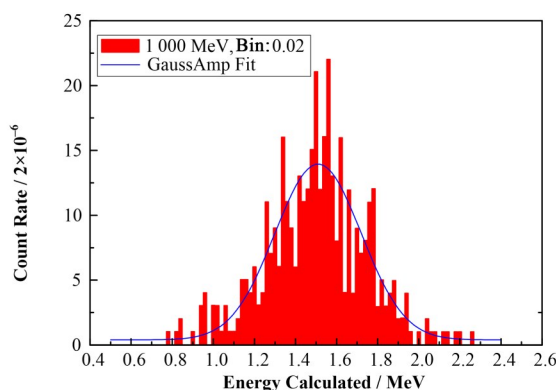
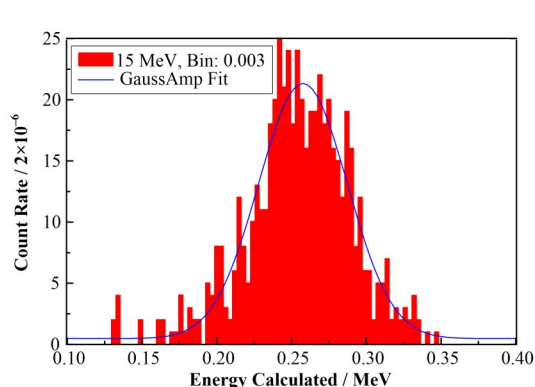


图10 各入射能量下能量推算值的分布
Fig.10 Distribution of estimated energy values at each incident energy

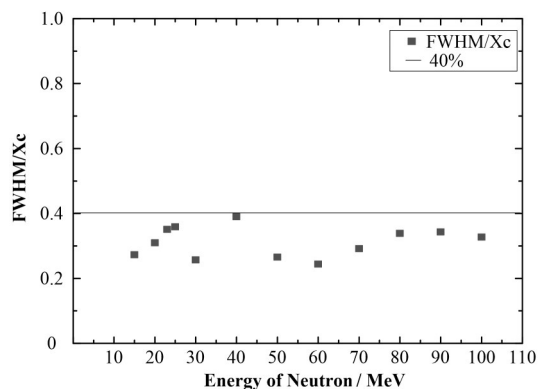


图11 能量推算值的能量分辨率分布情况
Fig.11 Distribution of energy resolution of estimated energy value

探测器放置角度分别为 0° 、 30° 、 50° 及 110° ,此时对应的出射中子能量为24.2 MeV、23.1 MeV、

10,各能量下能量推算值显示出高斯分布的特点。依据拟合结果的半高全宽及峰值位置,可以得到用FWHM/峰值表示的能量分辨率,进而得到能量分辨率随入射中子能量的变化关系,如图11所示。可以看出,能量分辨率随入射能量变化并无明显变化,保持在30%附近,最高不超过40%。可以看到结果呈现出良好的线性,相关系数 $r=0.99745$ 。考虑到系统能量分辨率本身并不高,可以认为该线性关系是可以接受的。

4 试验验证

通过以上仿真分析,最终确定了探测器的探头部分由8层0.5 mm光纤及16层3.0 mm光纤所组成的梯度尺寸光纤阵列组成。在设计研制探测器后利用单能中子源进行了辐照试验,验证探测器的性能和能量分辨率。

21.3 MeV、14.8 MeV。其中 30° 和 50° 的高压分别选取为750 V和850 V,以在不同高压下进行数据对比;对试验结果进行判选,将采集到的幅度数据经过阈值选取后作为能量数据,同时对采集到的有效像素分布进行线性回归得到径迹信息,经过分析处理,得到可推算事例的中子能量分布。如表1所示为 30° 、-750 V和 50° 、-750 V时推算得到的中子能量分布。

相应的能谱图如图12所示。由能谱图可以看出,在-750 V的工作电压下,探测到的中子能谱峰值约为250道,而中子探测器的电子学采集数值可以到达2 047道,测量到的单像素幅度值远小于电子学实际的探测能力。

中子能谱进行高斯拟合,可以得到拟合峰值及半高全宽,进而得到以半高全宽表示的能量分辨率,如表2所示。从表2可看出,入射能量为

表1 推算得到的中子能量分布
Table 1 The calculated neutron energy distribution

中心道址(道宽:16) Center (Channel width: 16)	场景1 Scene 1	场景2 Scene 2	中心道址(道宽:16) Center (Channel width: 16)	场景1 Scene 1	场景2 Scene 2
8	0	0	600	13	10
24	0	0	616	12	6
40	0	0	632	12	8
56	0	0	648	8	11
72	0	2	664	2	10
88	2	1	680	8	8
104	5	4	696	5	5
120	4	10	712	7	6
136	14	12	728	7	3
152	27	18	744	8	4
168	29	40	760	4	4
184	47	49	776	5	4
200	62	69	792	2	7
216	68	94	808	3	7
232	86	104	824	6	7
248	113	134	840	5	4
264	101	124	856	3	0
280	73	54	872	5	5
296	61	35	888	3	1
312	34	26	904	4	2
328	43	19	920	5	2
344	25	25	936	3	0
360	20	15	952	2	2
376	25	13	968	5	1
392	20	10	984	4	2
408	10	12	1 000	1	1
424	17	12	1 016	2	2
440	17	10	1 032	4	0
456	11	13	1 048	2	0
472	19	9	1 064	0	1
488	10	11	1 080	3	1
504	14	5	1 096	0	0
520	12	9	1 112	1	1
536	16	6	1 128	1	0
552	13	9	1 144	1	0
568	11	9	1 160	0	0
584	7	8	1 176	1	0

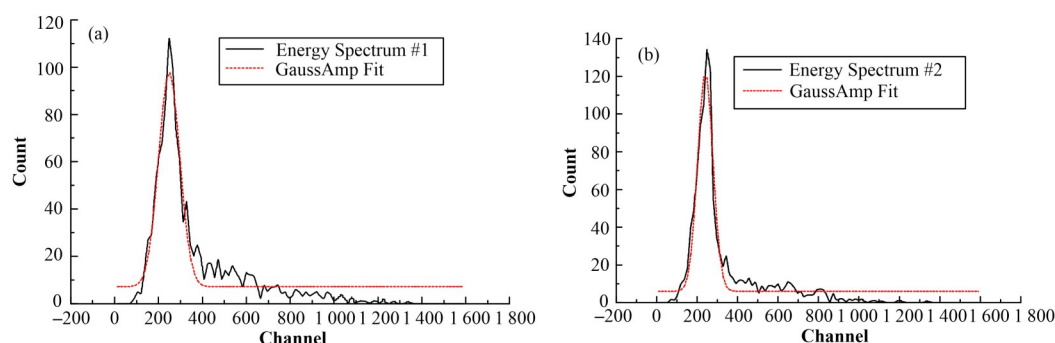


图12 场景1 (a)和场景2 (b)所得到的推算中子能谱图
Fig.12 The inferred neutron spectrum obtained in scenario 1 (a) and 2 (b)

21.264 MeV 时,入射能量分辨率最高达到了 中子探测中有很高的探测效率。
36.84%,因此不同尺寸梯度结构的复合探测在空间

表2 定标测试测量到的能谱拟合结果
Table 2 The energy spectrum fitting result measured by the calibration test

入射能量 Energy / MeV	高斯拟合 Gaussian fitting		能量分辨率 Energy resolution / %
	峰值 Peak	半高全宽 FWHM	半高全宽/峰值 FWHM / Peak
24.220	658.304 3	216.602 1	32.90
23.069	645.113 6	231.598 5	35.90
21.264	613.713 2	226.076 3	36.84
14.817	464.191 7	166.250 0	35.82

5 结语

通过模拟仿真分析确定了中子探测器的结构和尺寸大小。结果表明:对于闪烁体光纤阵列,采用多种截面尺寸复合而成的闪烁体光纤阵列结构,采用 0.5 mm 厚的光纤实现低能量段中子的探测,并以 3 mm 厚的光纤以增加高能量段的探测效率。反符合结构采用 BC404 材料,厚度为 1 mm 即可满足反符合需求。若反符合结构为全方向包围,则对于干扰粒子中的电子和质子,在模拟结果上可以实现 100% 反符合探测,而对中子探测的干扰率约为 18%。通过中子模拟试验可以看出,14~24 MeV 范围内,探测器的能量分辨率为 32%~36%。结合试验数据和模拟外推,验证设计的探测器能够实现 15~100 MeV 中子探测。

参考文献

- 杨海波,孔洁,赵红赞,等. 高密度塑料闪烁体探测器的数据获取系统设计[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(10): 1882 - 1887. DOI: 10.7538/yzk.2015.49.10.1882.
YANG Haibo, KONG Jie, ZHAO Hongyun, *et al.* Design on data acquisition system for high density plastic scintillator detector[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(10): 1882 - 1887. DOI: 10.7538/yzk.2015.49.10.1882.
- 汲长松. 中子探测实验方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1998.
JI Changsong. Experimental method of neutron detection [M]. Beijing: Atomic Press, 1998.
- Akselrod G M, Akselrod M S, Benton E R, *et al.* A novel Al_2O_3 fluorescent nuclear track detector for heavy charged particles and neutrons[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2006, 247(2): 295 - 306. DOI: 10.1016/j.nimb.2006.01.056.
- 王建新, 杨世凤, 隋美丽. LabWindows/CVI测试技术及工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
WANG Jianxin, YANG Shifeng, SUI Meili. LabWindows/CVI testing technology and engineering application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- Moiseev A A, Deering P L, Hartman R C, *et al.* High efficiency plastic scintillator detector with wavelength-shifting fiber readout for the GLAST Large Area Telescope[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2007, 583(2 - 3): 372 - 381. DOI: 10.1016/j.nima.2007.09.040.
- Bindi V, Casadei D, Castellini G, *et al.* The scintillator detector for the fast trigger and time-of-flight (TOF)

- measurement of the space experiment AMS-02[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2010, **623**(3): 968 - 981. DOI: 10.1016/j.nima.2010.08.019.
- 7 Hideo Hirayama, Hiroshi Nakashima. Inter-comparison of the medium - energy neutron attenuation in iron and concrete (6) [C]. Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities (SATIF8), Pohang, Korea, 22-24 June 2006, NEA/NSC/DOC, 2010, (6): 237 - 249.
- 8 McElroy W N, Berg S, Gigas G. Neutron-flux spectral determination by foil activation[J]. Nuclear Science and Engineering, 1967, **27**(3): 533 - 541. DOI: 10.13182/nse86-a17618.
- 9 Bravar U, Bruillard P J, Fleckiger E O, *et al.* Design and testing of a position-sensitive plastic scintillator detector for fast neutron imaging[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006, **53**(6): 3894 - 3903. DOI: 10.1109/TNS.2006.886046.
- 10 Muraki Y, Koga K, Goka T, *et al.* Measurement by FIB on the ISS: two emissions of solar neutrons detected? [J]. Advances in Astronomy, 2012, **2012**: 1 - 14. DOI: 10.1155/2012/379304.
- 11 Koga K, Goka T, Matsumoto H, *et al.* Measurement of high-energy neutrons at ISS by SEDA-AP[J]. Astrophysics and Space Sciences Transactions, 2011, **7** (3): 411 - 416. DOI: 10.5194/astra-7-411-2011.
- 12 Battistoni G, Muraro S. The FLUKA code: description and benchmarking[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2009, (56): 2947 - 2954. DOI: 10.1063/1.2720455.
- 13 安恒, 薛玉雄, 杨生胜, 等. 星用介质材料深层充电效应仿真分析[J]. 核技术, 2016, **39**(12): 120502. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.120502.
- AN Heng, XUE Yuxiong, YANG Shengsheng, *et al.* Analysis and simulation of dielectric deep charging effect for satellites[J]. Nuclear Techniques, 2016, **39**(12): 120502. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.120502.
- 14 Ferrari A, Sala P R, Fass'o A, *et al.* FLUKA: a multi-particle transport code (program version 2005)[C]. CERN-2005-10, INFN/TC-05/11, SLAC-R-773 (CERN, Geneva), 2005.
- 15 安恒, 杨生胜, 苗育君, 等. CMOS APS 光电器件单粒子效应电荷收集特性仿真分析[J]. 核技术, 2017, **40**(7): 070502. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.070502.
- AN Heng, YANG Shengsheng, MIAO Yujun, *et al.* Simulation of characteristic of charge collecting for CMOS APS with single event effects[J]. Nuclear Techniques, 2017, **40**(7): 070502. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.070502.
- 16 Goiffon V, Estriebeau M, Marcelot O, *et al.* Radiation effects in pinned photodiode CMOS image sensors: pixel performance degradation due to total ionizing dose[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2012, **59**(6): 2878 - 2887. DOI: 10.1109/TNS.2012.2222927.
- 17 Dodd P E, Shaneyfelt M R, Schwank J R, *et al.* Current and future challenges in radiation effects on CMOS electronics[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, **57**(4): 1747 - 1763. DOI: 10.1109/TNS. 2010. 2042613.