文章编号: 1007-4627(2016)04-0466-05

一种宽能谱多球中子谱仪的研制

付鑫^{1,2},李宗强¹,徐俊奎^{1,3},李武元^{1,2},苏有武¹,毛旺^{1,4},严维伟^{1,5},徐翀^{1,2},庞成果³

(1. 中国科学院近代物理研究所,兰州 730000;

2. 中国科学院大学,北京 100049;

3. 兰州大学, 兰州 730000;

4. 西北师范大学, 兰州 730000;

5. 中国科学技术大学, 合肥 230026)

摘要:利用蒙特卡罗程序 MCNPX 模拟计算了纯聚乙烯球和加入辅助材料的聚乙烯球对不同能量中子的响应 函数曲线,使用计算出来的响应函数作为 U-M-G 软件解谱所需输入文件。研发了一套专门为此多球谱仪进 行数据采集的放大甄别一体化电路,该电路可为 SP9 管提供 900 V的工作高压,甄别阈设为 0.5 V,总的放 大倍数为 200 倍。使用研制的 Bonner 球谱仪对已知源强的 Pu-Be 中子源进行能谱测量,测量结果显示解出 的能谱数据与实际 Pu-Be 源中子能谱较为符合,实验结果验证了该套多球谱仪可用于测量 Pu-Be 能区的中子 谱。

关键词: 球中子谱仪; U-M-G; 能量响应函数; MCNPX 中图分类号: TL77 文献标志码: A DOI: 10.11804/NuclPhysRev.33.04.466

1 引言

中子能谱是强子加速器辐射防护研究的基础数据, 掌握中子能谱即可精确计算相应的周围剂量当量^[1-3]。 常用的中子能谱测量仪有飞行时间谱仪、反冲质子谱 仪、多球中子谱仪等,其中多球中子谱仪是目前应用最 广泛的在线测量中子能谱的仪器之一^[4-6]。

多球中子谱仪作为测量中子能谱的设备,最早在20 世纪60年代由Bonner等^[7]提出,它由热中子灵敏探测 器和一系列不同厚度(2~12 inch)的慢化体球壳组成, 根据不同厚度的Bonner球对中子有不同的能量响应这 一特性,可通过解谱得到中子能谱。此类Bonner球通 常用于中子能量低于20 MeV的辐射场测量,但对于能 量高于20 MeV的中子辐射场来说,慢化球的能量响应 很低,不适用于高能加速器周围辐射场的测量。

基于以上原因,多年以来,保健物理学家一直 致力于对传统的Bonner 球进行改进。2007年墨西哥 萨卡特卡斯自治大学计算了⁶LiI多球中子谱仪对中 子能量从2.5×10⁻⁸到100 MeV的响应矩阵^[8],研究 表明,Bonner球适用于中子能量低于20 MeV的辐 射场测量。2002年Vylet^[6]设计了新的多球中子谱仪, 通过在探头的慢化体内加入铅层,使其可探测的中 子辐射场能量达到1 GeV。英国Centronic 公司和德 国 PTB (德国物理技术研究院)合作研制了多球中子谱 仪 NEMUS (Neutron Multi-sphere Spectrometer),该 谱仪以³He 正比计数器作为中心灵敏探测器,通过在 聚乙烯球中加入铅和铜,使探测的中子能量达到400 MeV^[9]。

在国内也开展了一些相关的研究,中国原子能科学研究院研制了一套聚乙烯多球中子谱仪,可用于中子能量低于20 MeV 的辐射场监测^[10]。中国工程物理研究院研制了12个聚乙烯球的多球中子谱仪,能较好的探测能量低于20 MeV 的辐射场^[11]。中国科学院高能物理研究所研制的包含9个聚乙烯球和2个加铅的辅助材料球,可探测到能量在GeV量级的中子^[12]。目前,由于国内没有高能单能中子源,因此尚无高能多球中子谱仪实验研究的报道。

对于兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)^[13]这样的中高能重离子加速器,以及将来的ADS高能质子直线加速器^[14]来说,将会有大量的中高能中

收稿日期: 2016-01-11; 修改日期: 2016-02-29

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(编号2011YQ120096)

作者简介: 付鑫(1990-), 男, 湖南湘潭人, 硕士研究生, 从事核技术及应用研究; E-mail: fuxin@impcas.ac.cn

通信作者: 苏有武, E-mail: suyouwu@impcas.ac.cn。

子产生,对于这样的中子辐射场,其能谱测量是很困难 的。为此,在参考国内外多球中子谱仪研制的基础上, 研制了一套能够测量热中子到GeV量级中子的多球谱 仪系统。

2 Bonner球谱仪的设计

本研究工作参照文献[15]的计算结果,按照各球 响应函数曲线尽量不重叠、能量范围覆盖尽量宽的 原则,最终确定了10个纯聚乙烯球和4个加入辅助 材料的聚乙烯球的结构尺寸。它们的球壳厚度分别 为1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 5.0, 7.0, 9.0, 13.0, 16.0 cm 和 3C4-6 cm, 3P4-6 cm, 3P4.5-6.5 cm, 2P5-7 cm (其 中C代表铜, P代表铅, 3C4-6代表首先是3 cm 厚的 聚乙烯, 然后是1 cm 厚的铜, 最后是2 cm 厚的聚乙 烯的慢化球壳)。球壳中心采用英国 Centronic 公司生 产的SP9型³He正比计数器,其不锈钢球壳内充有4 atm (1 atm = 1.01×10^5 Pa) 的³He 气体,内直径为32 mm, 外直径为33 mm。不锈钢球壳外, 采用聚乙烯作 为慢化材料,铜和铅作为辅助材料,Bonner 球各材料 的质量密度如表1所列。在确定所有材料和尺寸后对其 进行了精密的加工和组装,以尽量减少能量响应函数计 算值与真实值间的误差。 WINC

表 1	Bonner	球材料的	质量密度
-----	--------	------	------

材料名称	质量密度 /(g/cm ³)	材料名称	质量密度 /(g/cm ³)
³ He气体 不锈钢外壳	4.966×10^{-4} 7.92	铅 聚乙烯	$11.35 \\ 0.93$
铜	8.96		

2.1 MCNPX计算验证

文献[15]中作者采用 FLUKA 模拟计算慢化球的响应函数曲线,本文采用MCNPX程序重复其计算过程,并选取了球壳厚度为7.0 cm和2P5-7 cm两种结构的响应函数曲线进行对比分析。如图1所示,(a)图为7 cm球壳的响应函数曲线,(b)图为2P5-7 cm球壳的响应函数曲线。由图中的响应函数曲线可以看出,对于7 cm球壳和能量低于20 MeV的2P5-7 cm球壳,两种程序计算的响应函数曲线趋势基本一致,存在的微小误差是由计算统计误差和不同程序统计计数方法不同引起的。而对于2P5-7 cm球壳,当中子能量高于20 MeV时,出现较大偏差,分析认为这主要是高能中子与铅发生了(n,*x*n)反应,产生了中子增殖,目前计算程序中,只有中子能量小于150 MeV的截面数据,对于高于此能量的数据,MCNPX和FLUKA都将使用物理模型来

产生截面数据,其产生的截面数据可信度偏低,由于两种程序使用物理模型不同,产生的截面数据将存在较大差异。在后续的解谱过程和实验测量过程中将全部采用 MCNPX 程序计算的响应函数。



图 1 7 cm 球壳和 2P5-7 cm 球壳 MCNPX 与 FLUKA 的计算结果比较

2.2 Bonner球响应函数的模拟计算

模拟计算时,球形³He 正比计数器置于慢化球中心,慢化球壳采用聚乙烯材料,辅助材料选用铜和铅。 计算模型如图2所示,假设慢化体与计数器之间没有间隙,同时忽略中心探测器的连接器与探头的各种线路影响。模拟计算纯聚乙烯球和加入辅助材料的聚乙烯球对 不同能量中子的响应函数。



图 2 (在线彩图)慢化球模型

使用 MCNPX 计算中子能量从1×10⁻⁹至1000 MeV,每个数量级计算3个能量点,分为37个点,每 次模拟的中子数为10⁸。记数卡采用F4卡和FM4卡, 其中F4卡用于计算经过一个栅元的平均注量,FM4卡 是对应F4卡用于计算不同反应通道而设定的,其格式 为FM4 C M R,其中C为归一化因子,*M*为对应的m 卡的材料序号,*R*为对应的反应率通道号。通过确定归 一化因子*C*和反应率通道号*R*,记录(n, p)反应次数, 从而得到中子的能量响应。

通过模拟计算,得到了纯聚乙烯球对中子的响应函 数曲线(图3)和加入辅助材料的聚乙烯球对中子的响应 函数曲线(图4)。从图3分析可知,对于纯聚乙烯球来 说,随着聚乙烯层厚度的增加,其对应的响应函数曲线 峰值逐步右移,但当中子能量高于20 MeV以后,无论 聚乙烯球的尺寸有多大,其响应均快速下降到很低的程 度。从图4分析可知,对于添加辅助材料的聚乙烯球来 说,当中子能量较低时,辅助材料几乎不影响低能中子 的能量响应,所以当中子能量低于20 MeV时,加入辅 助材料的聚乙烯球响应函数曲线与相近尺寸的纯聚乙 烯球的曲线相似;当中子能量高于20 MeV以后,中子 通过辅助材料时,与辅助材料发生(n, xn)反应,中子 会增殖,从而大大提高了高能中子的能量响应。还可以 看出,铅作为辅助材料的增殖效应明显大于铜的增殖效 应,并且辅助材料越厚,增殖效应越明显。





图 4 (在线彩图)加入辅助材料的聚乙烯球对中子的响应函数曲线

本工作中采用U-M-G 解谱软件包^[16]作为解谱程 序,其中主要用到MXD_FC31和GRV_FC31程序。程 序的运行需要能量响应函数矩阵作为输入文件。使 用MCNPX 模拟计算了详细的能量响应函数矩阵, 如图5 所示。考虑到能谱的测量范围在10⁻⁶~10³ MeV 之间,所以在每个量级中选取9个能量点,分 別为 1.5×10^{n} , 2.5×10^{n} , 3.5×10^{n} , 4.5×10^{n} , 5.5×10^{n} , 6.5×10^{n} , 7.5×10^{n} , 8.5×10^{n} , 9.5×10^{n} 作为平均响应函 数,计算能量在 $10^{-6} \sim 10^{3}$ MeV之间的响应函数,分 为81个点。最后将计算出的响应函数数据导入能量响 应函数矩阵文件,为后续能谱测量做准备。



图 5 (在线彩图) Bonner 多球的响应函数矩阵数据图

2.3 放大甄别一体化电路研究

图 6 给出了放大甄别一体化电路的模拟框图,通过 测量 SP9 的坪特性曲线,高压定为 900 V。为尽量保证 各个中子探测器的同一性,SP9 管与放大器之间线缆均 采用 40 cm RG-59 同轴线缆,连接插头选用 SHV 高压 同轴头。第一级为电荷灵敏前置放大器,放大倍数为2 倍,上升时间小于 25 ns。信号经前放后进入主放,主 放大器放大倍数为 100 倍,因而总的放大倍数为 200 倍, 这样输出的中子脉冲信号幅度在 0~3 V之间。主放输 出后接入甄别电路,将符合要求的信号甄别出来,最后 使信号进行单稳态整形,通过单稳态整形成宽度和幅度 恒定的 TTL 信号,可直接送入数据采集系统进行定时 计数^[17],为后续解谱过程提供数据。



图 6 (在线彩图)放大甄别一体化电路原理图

在大多数辐射场中,中子和γ射线同时存在,探测 中子时一个非常重要的问题是对γ辐射的甄别。由于绝 大多数γ辐射所引起的脉冲幅度很低,探测中子时发生 的 (n, p) 反应产生的能量远远大于 γ 辐射沉积的能量, 所以用简单的脉冲幅度甄别方法可最大限度的甄别掉 γ 本底。调节放大甄别一体化电路的甄别阈,通过分析比 较,甄别阈的阈值设为 0.5 V 时。

3 Pu-Be中子源的能谱测量

利用研制的 Bonner 球谱仪测量源强为2.7×10⁷ n/s 的 Pu-Be 中子源辐射场。该中子源存放于一个长宽高 分别为8 m×5 m×6 m 的封闭混凝土密室中,且中子源 由一个半径为15 cm 的铅球包围,铅球置于一个半径 为22.5 cm 的石蜡桶中,前方开有一个直径5 cm 的洞。 实验过程中,Bonner 球的球心距离中子源2 m,与源处 于同一水平高度,距离地面为2 m。2 m测量点处,理 论中子注量率为53.7 n/cm²·s,由于中子的散射,实际注 量率应高于此值。每个 Bonner 球测量5次,每次测量1 min,得到平均计数率。由于 Pu-Be 中子源能量低于20 MeV,所以测量只选用了聚乙烯的 Bonner 球,测量结 果如表2所列。

表 2 Bonner 球实验条件下各球记数数据

球壳厚度 /cm	本底平均值 /(n/s)	记数平均值 /(n/s)	扣除本底记数 /(n/s)
1.5	2.67	90.36	87.69
2.0	2.84	94.9	92.15
2.5	2.93	101.72	98.79
3.0	3.5	119.77	116.27
3.5	3.57	132.63	116.27
5.0	3.24	154.75	151.51
7.0	1.97	117.02	115.05
9.0	2.78	151.7	148.92
13.0	1.02	85.83	84.81
16.0	0.52	58.7	58.18

将扣除本底记数的数据输入测量数据文件,通过MXD_FC31和GRV_FC31程序进行解谱,解得的中子能谱如图7所示,其中Default为IAEA给出的Pu-Be中子源在2m位置处的中子能谱^[18]。由图可知,在0.5 MeV以上,实验解出能谱与IAEA给出的标准能谱基本相符。而在0.5 MeV以下,实验解出能谱远高于IAEA给出的标准能谱,这主要是因为本次测量在封闭环境下进行,由于周围混凝土墙对中子的散射作用,使得低能中子成份增加所致。

为了分析周围散射的影响,采用 MCNPX 程序进行了实验场所的模拟。图8 将模拟结果与 IAEA 的标准谱进行对比,从中可以看出由于散射的影响,0.5 MeV 以下能量的中子成份明显高于 IAEA 给出的标准谱,与多球中子谱仪测量得到的中子能谱基本吻合,说

明中子散射的影响确实存在。对比图7和图8的数据, 可以得出该套多球中子谱仪对Pu-Be中子能谱信息的测 量结果是基本准确的,数据具有一定可靠性。



图 7 (在线彩图)MXD_FC31和GRV_FC31程序对Pu-Be源的解谱结果



图 8 IAEA标准能谱与MCNPX模拟能谱对比结果

4 总结与展望

本文论述了一套宽能谱多球中子谱仪的研究过程。 主要完成了以下3方面的工作:(1)使用 MCNPX 验证 并计算了各球的响应函数曲线,计算了详细的响应函数 矩阵作为解谱软件的输入文件;(2)完成了放大甄别一 体化电路的研制,确定了其提供给 SP9 管的工作高压 为 900 V,其放大倍数为 200 倍,其甄别阈值为 0.5 V; (3)使用研制的 Bonner 球进行了 Pu-Be 中子源的能谱 测量,在没有进行试验刻度的情况下,测量结果与实际 值符合较好,测量数据具有一定可靠性。

在未来的实际应用中,需要用单能中子源进行能量刻度,从而对模拟结果进行验证;本次实验只测量了Pu-Be中子源的能谱,在后续工作中,将使用该套谱仪测量不同能量区间的中子源,并使用多球谱仪去测量含高能成份的中子辐射场。只有所有能量区间测出的能

参考文献:

- ESPOSITO A, BEDOGNI R, DOMINGO C, et al. Radiation Measurements, 2010, 45(10): 1522.
- [2] GOLDHAGEN P, REGINATTO M, KNISS T, et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerator, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2002, 476(1/2): 42.
- [3] WIEGEL B, AGOSTEO S, BEDOGNI M, et al. Radiation Measurements, 2009, 44(7/8): 660.
- [4] MALLETT M W, MCLEAN T D, OLSHER R H, et al. Radiation Protection Dosimetry, 2004, 110(1-4): 549.
- [5] LI Taosheng. Radiation Protection Bulletin, 2003, 23(2): 16. (in Chinese).

(李桃生. 辐射防护通讯, 2003, 23(2): 16.)

- [6] VYLET V. Nucl Instr Meth A, 2002, **476**: 26.
- [7] BRAMBLETT R L, EWING R I, BONNER T W. Nucl Instr Meth, 1960, 9: 1.
- [8] VEGA-Carrillo H R, EDUARDO G, ALFREDO L, et al. MEXICO: AMEE, 2007: 36.
- [9] WIEGEL B, ALEVRA A V, MATZKE M, et al. Nucl Instr and Meth A, 2002, 476: 52.
- [10] LI Chunjuan, CHEN Jun. Annual Report for China Institute of Atomic Energy, 2010(1): 172. (in Chinese) 李春娟, 陈军. 中国原子能科学研究院学报, 2010(1): 172.
- [11] WEI Xiye, YUAN Yonggang. Nuclear Techniques, 2010,

33(7), 532. (in Chinese)

(魏熙晔, 袁永刚. 核技术, 2010, 33(7), 532.)

[12] WANG Panfeng. Research and development of a Neutron Multi-sphere Spectrometer[D]. Beijing: Institute of High Energy Physics Chinese Academy of Sciences, 2015: 54. (in Chinese)

(王攀峰. 多球中子谱仪的研制[D]. 北京: 中科院高能物理研究 所, 2015: 54.)

- [13] XIA Jiawen, ZHAN Wenlong, WEI Baowen, et al. High power Laser and Particle Beams, 2008, 20(11): 1787. (in Chinese).
 (夏佳文, 詹文龙, 魏宝文, 等. 强激光与粒子束, 2008, 20(11): 1787.)
- [14] ZHAN Wen Long, XU Hu San. Bulletin of Chinese Academy and Sciences, 2012, 27(3): 375. (in Chinese).
 (詹文龙, 徐瑚珊, 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 375.)
- [15] YUAN Jiao, SU Youwu, LI Wuyuan. Nuclear Physics Review, 2015, 32(2), 224. (in Chinese).
 - (袁娇,苏有武,李武元.原子核物理评论,2015,32(2),224.)
- [16] Marcel Regiatto. The "multi-channel" unfolding programs in the UMG package: MXD_MC31 and IQU_MC31 and GRV_MC31. UMG package, version 3.1-release date: August5, 2002,
- [17] DONG Chengfu, SU Hong, WU Ming. Nuclear Electronics
 & Detection Technology, 2007, 27(5): 817. (in Chinese)
 - **(**董成富, 苏弘, 吴鸣. 核电子学与探测技术, 2007, **27**(5): 817.)
- [18] IAEA, Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2001: 97.

Research and Development of a Neutron Multi-sphere Spectrometer

FU Xin^{1,2}, LI Zongqiang¹, XU Junkui^{1,3}, LI Wuyuan^{1,2}, SU Youwu¹, MAO wang^{1,4}, YAN Weiwei^{1,5}, XU Chong^{1,2}, PANG Chengguo³

(1. Institution of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lan Zhou, Gan Su, 730000, China;

2. University of Chinese Science Academy, Bei Jing, 100049, China;

3. University of Science and Technology of China, He Fei, 230026, China)

Abstract: Neutron response of Bonner spheres which include pure polyethylene and polyethylene with auxiliary material was calculated with Monte Carlo code MCNPx, the calculated response was used as the input file of U-M-G code for neutronspectrum unfolding. A special screening of amplification integrated circuits was developed, which can provides high voltage 900 V working for the SP9 tube, the screening threshold is set to 0.5 V and total magnification is 200. Neutron energy spectrum of a Pu-Be source were measured with the developed Bonner spheres spectrometer,good agreement was found in the measured result of the spectrum datasolution and the real spectrum, which indicated that the multi-sphere spectrometer was reliable in the neutron measurement at energy region of Pu-Be neutron source.

Key words: Multi-sphere neutron spectrometer ; U-M-G; energy response function; MCNPX

Received date: 11 Jan. 2016; Revised date: 29 Feb. 2016

Foundation item: National Key Foundation for Exploring Scientific Instrument of China(2011YQ120096) Corresponding author: SU youwu, E-mail: suyouwu@impcas.ac.cn.