

# 多球谱仪测量 BNCT 医院中子照射器 中子束能谱

陈 军<sup>1</sup>, 李春娟<sup>1</sup>, 李 玮<sup>1</sup>, 宋明哲<sup>1</sup>, 张紫竹<sup>2</sup>

(1. 中国原子能科学研究院 计量测试部, 北京 102413; 2. 北京凯佰特技术有限公司, 北京 102413)

**摘要:** 用于硼中子俘获治疗(BNCT)的医院中子照射器(IHNI- I)已由北京凯佰特技术有限公司建设完成, 为获得空气中自由中子束的能谱, 建立了一套改进的主动式多球谱仪, 并开展了相关实验方法研究。该谱仪包含 14 个探测单元, 中心探测器为球形<sup>3</sup>He 正比计数器。为改善谱仪在超热能区的分辨率, 在常规多球谱仪的基础上增加了 4 个包裹不同厚度硼壳的探测单元。通过 MCNP 程序计算谱仪的响应函数, 并利用标准<sup>252</sup>Cf 和<sup>241</sup>Am-Be 中子源进行了校准和验证。测量在距离照射器孔道口 110 cm 处进行, 再采用迭代方法将能谱修正到孔道口处, 结果显示, 测量的中子能谱与理论模拟结果略有差异。因而利用 ROSPEC 谱仪和金箔对中子能谱和 PMMA 体模内中子通量密度的深度曲线进行了测量, 结果验证了多球谱仪测量结果的可靠性。

**关键词:** BNCT; 中子能谱; 多球谱仪; ROSPEC 谱仪

**中图分类号:** TL375.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2014)11-2127-06

**doi:** 10. 7538/yzk. 2014. 48. 11. 2127

## Neutron Spectra Measurement of IHNI- I BNCT Beam With Multi-sphere Spectrometer

CHEN Jun<sup>1</sup>, LI Chun-juan<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, SONG Ming-zhe<sup>1</sup>, ZHANG Zi-zhu<sup>2</sup>

(1. China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-20, Beijing 102413, China;

2. Beijing Capture Technology Corporation, Beijing 102413, China)

**Abstract:** The in-hospital neutron irradiator (IHNI- I) for boron neutron capture therapy (BNCT) was constructed by Beijing Capture Technology Corporation. To obtain the neutron spectra of free beams in air, an improved active multi-sphere spectrometer was established and the relevant experimental method was also developed. The spectrometer consisted of fourteen detection units and a spherical <sup>3</sup>He proportional counter was used as the central detector. In order to improve the resolution of the spectrometer in epithermal region, four detection units covered with different thickness boron shells were added into the routine multi-sphere spectrometer. The response functions of the spectrometer were calculated with the MCNP code, and calibrated and verified with standard <sup>252</sup>Cf and <sup>241</sup>Am-Be neutron sources. The measurements were performed at 110 cm distance

from exit of the irradiator, and then the neutron spectra at the exit were deduced by anti-iteration technique. The results show that there is a little discrepancy between the measured spectra and simulated ones. Therefore, the neutron spectra and the depth curve of neutron flux density were also measured by a ROSPEC spectrometer and gold foils. The results verified the reliability of the neutron spectra measured by the multi-sphere spectrometer.

**Key words:** BNCT; neutron spectrum; multi-sphere spectrometer; ROSPEC spectrometer

自 1936 年 Loche<sup>[1]</sup> 提出中子俘获治疗的概念以来,作为二元辐射疗法的硼中子俘获治疗(BNCT)因其潜在的疗效引起了人们极大的关注。目前,我国首个 BNCT 医院中子照射器(IHNI-I)已建设完成,在其投入临床应用前,需对中子束的源项参数进行测量,以确保治疗的有效性和安全性。中子能谱在 BNCT 源项参数中扮演着重要的角色:中子通量密度和中子剂量等参数的确定强烈依赖于中子的能量分布,为此,本文利用改进的多球谱仪测量热中子束和超热中子束能谱,以验证设计结果的准确性。

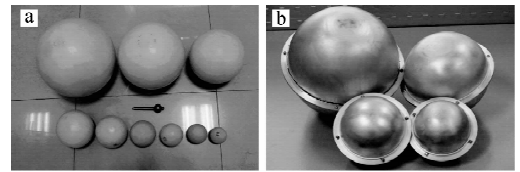
医院中子照射器的主体为 30 kW 微型反应堆,配有 2 个中子照射孔道和 1 个血硼浓度分析孔道,均为锥形准直。2 个照射孔道由反应堆径向对称引出,分别提供热中子束和超热中子束,孔径为 12 cm,满功率运行时,设计中子通量密度分别为  $2 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $4 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。血硼浓度分析孔道由热中子照射孔道切向引出,提供血硼浓度分析用热中子束,孔径为 2 cm。

## 1 测量装置

### 1.1 多球谱仪

多球谱仪法广泛应用于中子谱学和中子剂

量学领域<sup>[2-3]</sup>。由于常规多球谱仪的响应函数在 0.1~100 keV 之间显著重叠,使其在该能区的能量分辨率很差<sup>[3]</sup>,而对于 BNCT 中子束,尤其是超热中子束,100 keV 以下能区的中子十分重要,因此需对谱仪进行改进,以提高其在该能区的能量分辨率,从而满足 BNCT 中子束中子能谱测量的需要。如图 1 所示,本工作中建立的多球谱仪包含由 1 个 SP9 型球形<sup>3</sup>He 正比计数器和 9 个直径为 6.35~30.48 cm 的聚乙烯球组成的常规单元,以及 4 个由直径为 7.62 cm 聚乙烯球包裹于 4、10、30 mm 厚硼壳(以 1 mm 厚铝为壁的碳化硼壳)内和直径为 10.16 cm 聚乙烯球包裹于 40 mm 厚硼壳内组成的扩展单元。测量时,常规单元还将包裹于 1 mm 厚镉套内组成包镉单元。各探测单元对应的标识列于表 1。



a——常规单元;b——扩展单元

图 1 多球谱仪实物照片

Fig. 1 Photograph of multi-sphere spectrometer

表 1 多球谱仪探测单元标识

Table 1 Identification of detection unit for multi-sphere spectrometer

探测单元	探测单元标识	探测单元	探测单元标识
裸 <sup>3</sup> He 正比计数器	0.0	20.32 cm 聚乙烯球	8.0
6.35 cm 聚乙烯球	2.5	25.4 cm 聚乙烯球	10.0
7.62 cm 聚乙烯球	3.0	30.48 cm 聚乙烯球	12.0
8.89 cm 聚乙烯球	3.5	7.62 cm 聚乙烯球+4 mm 厚硼壳	3.1
10.16 cm 聚乙烯球	4.0	7.62 cm 聚乙烯球+10 mm 厚硼壳	3.2
12.7 cm 聚乙烯球	5.0	7.62 cm 聚乙烯球+30 mm 厚硼壳	3.3
15.24 cm 聚乙烯球	6.0	10.16 cm 聚乙烯球+40 mm 厚硼壳	4.5

## 1.2 响应函数的计算与校准

### 1) 响应函数的计算

在西安脉冲反应堆热柱<sup>[4]</sup>上利用热中子参考辐射场对<sup>3</sup>He原子数密度进行标定,并确定聚乙烯球和硼壳的密度,然后利用MCNP程序计算多球谱仪的响应函数。由于探测单元的几何结构对响应函数有很大影响,因而,计算中应尽可能详细和准确地描述各部分的结构材料,尤其是靠近探测器灵敏区附近的材料<sup>[5]</sup>。根据响应函数的具体变化情况,对于小球、大球和带有硼壳的探测单元,分别计算了36个、56个和120个能量点,再通过等间隔内插得到207个能量群的响应函数,结果如图2所示。由图2可看出,包硼单元响应函数的峰位恰好位于常规单元

响应函数的严重重叠区(0.1~100 keV),极大地改善了常规单元在此能区的能量分辨。

### 2) 响应函数的校准与验证

利用标准<sup>252</sup>Cf中子源校准多球谱仪响应函数。在相同条件下获得死时间修正后的各探测单元净计数率,然后通过MAXED程序<sup>[6]</sup>进行解谱,调整控制参数 $\chi^2$ ,使结果谱与标准<sup>252</sup>Cf源中子能谱<sup>[7]</sup>一致,可得到由<sup>252</sup>Cf中子源能谱和响应函数计算的各探测单元计数率 $N_{calc}$ 与测量的计数率 $N_{meas}$ 的比值,结果如图3a所示。根据图3a即可得各探测单元响应的平均修正系数。继续调整控制参数 $\chi^2$ 至运算收敛时的最小值,得到响应函数修正前测量的<sup>252</sup>Cf源中子能谱,如图4所示。

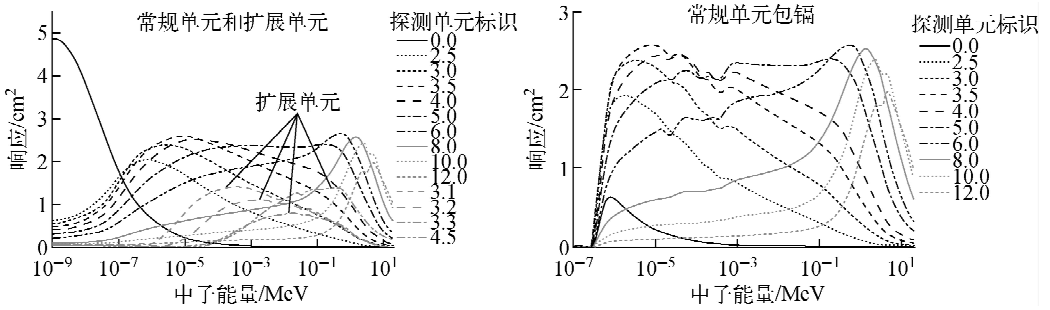


图2 多球谱仪的响应函数

Fig. 2 Response functions of multi-sphere spectrometer

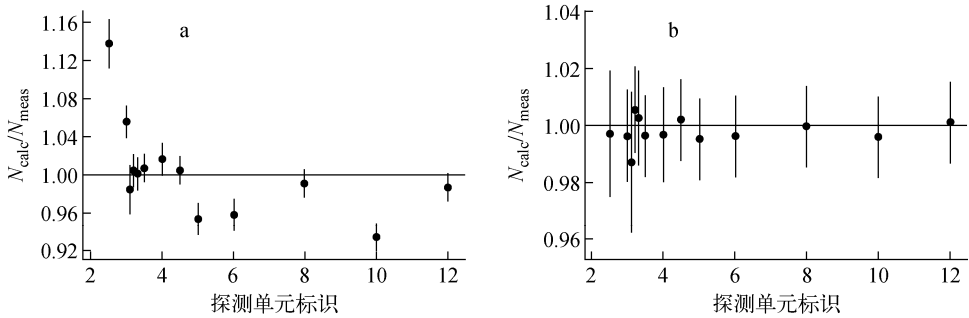


图3 响应函数修正前(a)、后(b)的 $N_{calc}/N_{meas}$

Fig. 3  $N_{calc}/N_{meas}$  derived from uncorrected (a) and corrected (b) response functions

响应函数修正后重新解谱,得到的<sup>252</sup>Cf中子源能谱如图5所示,同时可得到由解得的<sup>252</sup>Cf中子源能谱和修正的响应函数计算的各探测单元计数率 $N_{calc}$ 与测量的计数率 $N_{meas}$ 的比

值,如图3b所示。

利用校准后的多球谱仪测量<sup>241</sup>Am-Be源的中子能谱,并与标准<sup>241</sup>Am-Be中子源能谱<sup>[7]</sup>进行比较,结果示于图5。

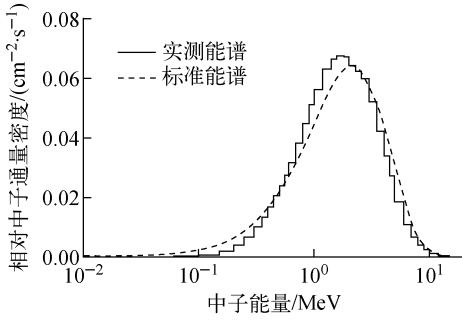


图4 响应函数修正前的 $^{252}\text{Cf}$ 中子能谱

Fig. 4 Neutron spectrum of  $^{252}\text{Cf}$  source unfolded with uncorrected response functions

## 2 IHNI-I 中子束能谱测量

### 2.1 实验方法

由于孔道口处中子束不能覆盖所有探测单元,且多球谱仪探测效率高,无法选择适当的反应堆功率消除死时间过大的影响,为此设计了如下实验方法:1) 优化设计一个孔径为 3 cm 的准直器塞入锥形孔道口进行限束,该准直器具有良好的限束效果,且对中子能谱无较大影响<sup>[8]</sup>;2) 在探测单元距准直器口 110 cm 处

进行测量,散射本底即可通过影锥法扣除,当反应堆运行于最小稳定功率时,各探测单元计数率死时间影响均在可修正范围,同时,测量位置的中子束可覆盖所有探测单元;3) 由于 IHNI-I 照射器孔道为锥形准直,中子束呈发散状不均匀分布,因而通过扫描中子束的方法获得测量位置的径向中子分布,然后利用 MCNP 程序计算实际中子分布和均匀中子分布时探测单元的计数率比值,从而将各探测单元的计数率从不均匀束修正到均匀束;4) 考虑空气和准直器的影响,利用 MCNP 程序通过反迭代的方法<sup>[9]</sup>将 110 cm 处测得的中子能谱修正到孔道口处。

### 2.2 测量结果

以理论计算的中子能谱作为初始谱,利用 MAXED 程序解谱,结果通过多次反迭代得到孔道口处的中子能谱,如图 6 所示。

此外,利用加拿大 BTI 公司生产的 ROSPEC 谱仪<sup>[10]</sup>分别测量了热中子束和超热中子束的能谱,如图 7 所示,以验证多球谱仪的测量结果。该谱仪包含 1 个直径 2 cm 的  $^3\text{He}$  正比计数

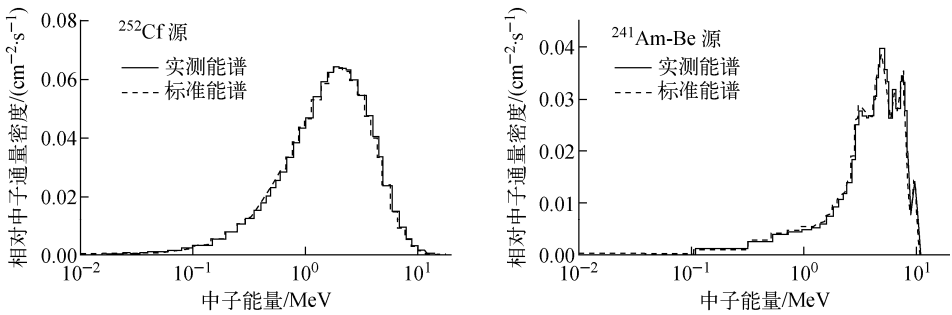


图5 响应函数修正后解得的 $^{252}\text{Cf}$ 源和 $^{241}\text{Am-Be}$ 源的中子能谱

Fig. 5 Neutron spectra of  $^{252}\text{Cf}$  and  $^{241}\text{Am-Be}$  sources unfolded with corrected response functions

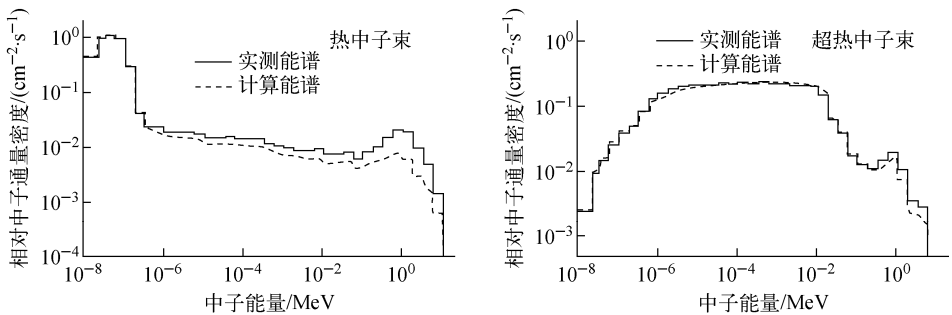


图6 多球谱仪测量的中子束能谱

Fig. 6 Neutron spectra measured by multi-sphere spectrometer

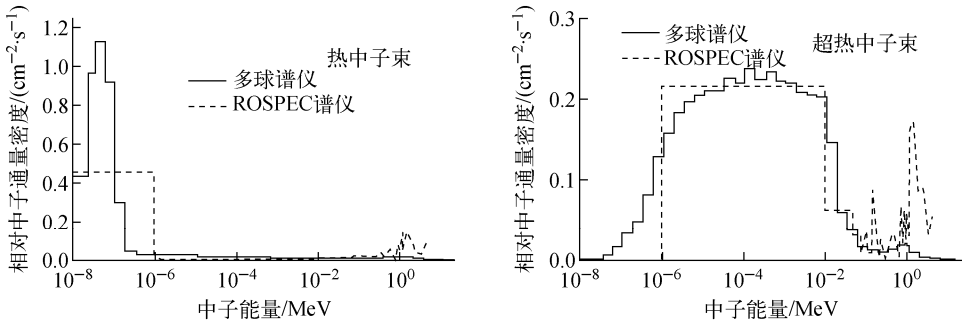


图7 ROSPEC 谱仪和多球谱仪测量的中子能谱比较

Fig. 7 Comparison of neutron spectra measured by ROSPEC spectrometer and multi-sphere spectrometer

器、1 个直径 2 cm 的包硼<sup>3</sup>He 正比计数器(测量能量范围为热能~50 keV)、3 个直径 2 cm 的充 H<sub>2</sub>(气压分别为 1.01×10<sup>5</sup>、4.05×10<sup>5</sup>、7.09×10<sup>5</sup> Pa)正比计数器(测量能量范围为 50 keV~1.5 MeV)及 1 个直径为 6 cm、气压为 1.01×10<sup>6</sup> Pa 的充 CH<sub>4</sub> 正比计数器(测量能量范围为 1.5~4.5 MeV),各探测器固定于一个可旋转的底盘上,由计算机控制绕底盘中心匀速旋转。由于 ROSPEC 谱仪在热能~50 keV 能区只有 2 个探测器进行测量,能量分辨率很差,因而在该能区仅能给出类似矩形的分布,但仍可看出,其谱面积(表示积分通量密度)与多球谱仪测量的相应能区的谱面积基本一致。在高能区(50 keV~4.5 MeV),ROSPEC 谱仪的测量结果更高,尽管由于 ROSPEC 谱仪的测量范围不能覆盖更高能区,无法对更高能量中子产生的下散射(高能中子与含氢正比计数器中的 H 相互作用,产生的反冲质子落在脉冲幅度谱的相对低能区)影响进行修正,且由于谱仪的旋转和大小不同,无法对尺寸不同的探测器进行不均匀束归一修正,但由此可定性判断中子束中可能存在相对较多的高能中子。

为进一步定量验证多球谱仪测量的准确性,利用金箔测量了热中子束在 PMMA 体模内的中子通量密度深度曲线(可反映中子谱的软硬程度),并与以测量谱为源项的 MCNP 模拟结果进行比较,结果示于图 8。由图 8 可见,两者符合较好,间接证明了测量结果准确可靠。

### 2.3 不确定度评估

本工作所关注的中子能量区间可划分为热中子能区(0.5 eV 以下)、超热中子能区

(0.5 eV~10 keV)和快中子能区(10 keV 以上),因而针对以上能区的谱积分中子通量密度的不确定度进行评估,结果列于表 2。

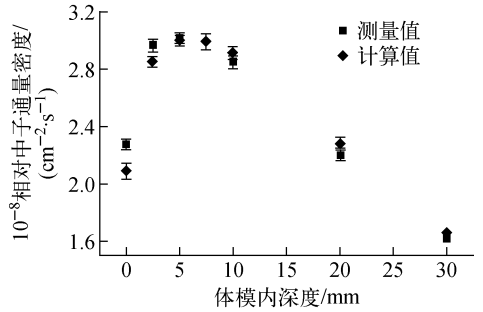


图8 热中子束在 PMMA 体模内的中子通量密度深度曲线

Fig. 8 Depth curve of neutron flux density in PMMA phantom for thermal neutron beam

表 2 测量结果不确定度评估  
Table 2 Evaluation of uncertainty for measured result

热中子束		超热中子束	
能区	不确定度/%	能区	不确定度/%
0.5 eV 以下	5.6	0.5 eV 以下	20.0
0.5 eV~10 keV	15.0	0.5 eV~10 keV	5.9
10 keV 以上	39.2	10 keV 以上	53.0

### 3 结论

针对 BNCT 中子束,设计了改进的主动式多球谱仪,并对其响应函数进行了校准与验证,同时通过大量实验对影响探测单元计数率的因素(如探测器的定位、反应堆功率变化等)进行

了多次测试和校对,以确保数据的准确可靠。同时,针对医院中子照射器的特点,通过相应的实验方法研究,解决了不均匀发散束测量、探测系统死时间过大、散射本底扣除等问题。此外,利用 ROSPEC 谱仪和金箔对中子能谱和 PM-MA 体模内的中子通量密度深度曲线进行了测量,验证了多球谱仪测量结果的可靠性。本工作作为医院中子照射器临床试验研究的开展提供了重要的源项参数,同时也为 BNCT 中子束能谱的测量提供了相应的技术手段。

### 参考文献:

- [1] LOCHE R G L. Biological effects and therapeutic possibilities of neutrons[J]. American Journal of Roentgenology, 1936, 36: 1-13.
- [2] BRAMBLETT R L, EWING R I, BONNER T W. A new type of neutron spectrometer[J]. Nucl Instrum Methods, 1960, 9: 1-12.
- [3] ALEVRA A V, THOMAS D J. Neutron spectrometry in mixed fields; Multisphere spectrometer[J]. Radiat Prot Dosi, 2003, 107(1-3): 37-72.
- [4] 刘书焕,江新标,于青玉,等. 西安脉冲堆热柱孔道中子束流参数测量[J]. 核动力工程,2007,28(4):1-4.  
LIU Shuhuan, JIANG Xinbiao, YU Qingyu, et al. Parameter measurement of thermal neutron beam in thermal column of Xi'an Pulse Reactor [J]. Nuclear Power Engineering, 2007, 28(4): 1-4(in Chinese).
- [5] WIEGEL B, ALEVRA A V, SIEBERT B R L. Calculations of the response functions of bonner spheres with a spherical  $^3\text{He}$  proportional counter using a realistic detector model, PTB-N-21[R]. Germany: PTB, 1994.
- [6] REGINATTO M, GOLDHAGEN P. MAXED: A computer code for the deconvolution of multisphere neutron spectrometer data using the maximum entropy method, EML-595[R]. USA: US-DOE, 1998.
- [7] ISO 8529-1:2001(E) Reference neutron radiations, Part 1: Characteristics and methods of production[S]. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2001.
- [8] 陈军,李春娟,宋明哲,等. BNCT 医院中子照射器辐射场特性参数初步测量[J]. 中国工程科学, 2012,14(8):106-112.  
CHEN Jun, LI Chunjuan, SONG Mingzhe, et al. Preliminary characterization of radiation fields of IHNI- I for BNCT[J]. Engineering Sciences, 2012, 14(8): 106-112(in Chinese).
- [9] ROBERTS N J, PARFITT M J. MCNPX modeling of the NPL manganese bath facility based on a converted CAD model[J]. Radiation Measurements, 2010, 45(10): 1 346-1 349.
- [10] ING H, CLIFFORD T, MCLEAN T, et al. ROSPEC: A simple reliable high resolution neutron spectrometer[J]. Radiat Prot Dosi, 1997, 70(1-4): 273-278.