

核动力堆安全壳内外中子能谱和剂量测量

陈 军

(中国原子能科学研究院 放射性计量测试部, 北京 102413)

摘要: 利用自制的多球谱仪测量了某核动力反应堆安全壳内外的中子能谱和剂量当量率。对安全壳外测量, 中心探测器为球形 ^3He 正比计数管; 对安全壳内测量, 中心探测器为球形金箔。系统的响应函数用 MCNP 程序计算, 解谱程序为 MIEKEB。为验证系统响应函数计算的准确性, 进行了一些实验测量, 并与理论计算结果进行了比较。结果表明, 测量结果与计算结果在不确定度范围内相吻合。

关键词: 多球谱仪; 球形 ^3He 正比计数管; 球形金箔; 中子能谱; 中子剂量当量率

中图分类号: O571.54

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2004)02-0131-06

Measurements of Neutron Spectra and Doses Inside and Outside the Containment of a Power Reactor

CHEN Jun

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

Abstract: The neutron spectra and the neutron dose equivalent rates inside and outside the containment of a power reactor were measured with two multi-sphere spectrometer systems that the central detectors are a spherical gold foil and a spherical ^3He proportional counter, respectively. The response functions were calculated by MCNP code, and MIEKEB code was used for unfolding. Some experiments were done in order to verify the accuracy of the calculated response functions of these systems. The measured results were compared with the calculated results. It is shown that they are accordant in their uncertainties.

Key words: multi-sphere spectrometer; spherical ^3He proportional counter; spherical gold foil; neutron spectrum; neutron dose equivalent rate

为了更好地提高我国动力堆的防护水平, 测量反应堆周围的中子能谱和剂量有着重要的意义。本项工作的目的是进行中子能谱和剂量现场测量的方法研究, 并现场测量某动力堆安全壳内外的中子能谱和剂量, 为现场工作人员提供个人剂量参考数据, 为现场剂量防护仪表

校准提供依据, 为动力堆的防护设计提供参考数据, 并可将此测量方法推广应用于诸如高能加速器周围中子能谱剂量测量、环境中子能谱剂量测量和高空大气层中子能谱剂量测量等。

1 多球谱仪

收稿日期: 2003-05-23; 修回日期: 2003-09-15

作者简介: 陈 军(1971—), 男, 辽宁沈阳人, 助理研究员, 硕士, 电离辐射计量专业

多球谱仪,也称 Bonner 球谱仪,由 Bramblett 等在 1960 年提出,它由一系列不同直径的聚乙烯球或石蜡球组成,球体中间放置有热中子灵敏探测器(如 ^3He 正比计数器、 $^{\text{B}}\text{F}_3$ 正比计数器、 $^6\text{LiI}(\text{Eu})$ 晶体探测器或活化片等)。谱仪基本原理如下。

1) 从物理角度,单色快中子打在不同直径球体上受到的慢化程度不同,探测效率因此随之有异,这反映着中子能量的变化。对于小球,中子慢化程度小,在慢化体中,主要是热中子的俘获,低能中子经慢化后能够到达位于中心的热中子探测器并被探测,而快中子趋于逃逸,因而其响应函数的峰值位于低能区;对于大球,低能中子也被大量俘获,但其趋于被慢化体吸收,而高能中子经慢化后有更大的几率被位于中心处的热中子探测器所探测,因而其响应函数峰值位于高能区(图 1)。

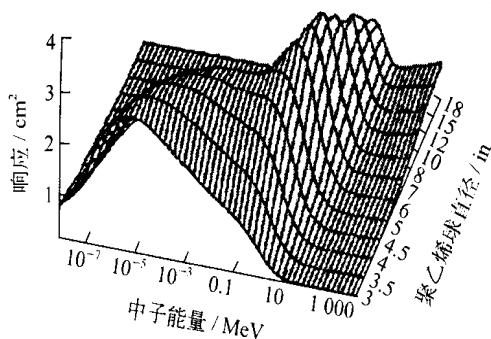


图 1 多球谱仪响应函数分布图
Fig. 1 Distribution of response functions of multi-sphere spectrometer

2) 从数学角度,如果有 n 个不同直径的球,并设第 j 个球对中子的响应随入射中子能量 E 的变化为 $r_j(E)$,则当入射中子能谱为 $\phi(E)$ 时,第 j 个球探测器的计数 N_j 应为:

$$N_j = \int_0^\infty \phi(E) r_j(E) dE \quad j = 1, 2, 3, \dots, n$$

如果已知每个球在一系列单能点上的响应为 $r_j(E_i)$,同时将上式改为求和,则有:

$$N_j = \sum_i \phi(E_i) r_j(E_i) \quad j = 1, 2, 3, \dots, n$$

那么,通过一定的数学方法即可计算出 $r_j(E_i)$ 。目前,一般采用 Monte-Carlo 方法(如 MCNP 程序)对 $r_j(E_i)$ 进行计算。

2 响应函数计算

在本项工作中,响应函数的计算是求解中子能谱的前提,其计算的准确度决定着解谱质量的好坏。计算响应函数的准确性取决于很多方面,如解决放射性输运问题的方法、所用截面数据的准确性、系统几何模型描述是否充分等。目前,响应函数一般通过 MCNP 程序进行计算,它允许处理三维几何粒子输运问题。以下以中心探测器为 ^3He 正比计数管的多球谱仪为例,具体阐述计算过程。

2.1 计算模型

计算模型示于图 2。将其用 11 个面分成 9 个区,坐标原点为不锈钢球壳中心, x 轴向上, y 轴垂直纸面向前, z 轴向左。1 区为 ^3He 气体,2、3、4、5 区为不锈钢(计算中只考虑铁元素),6 区和 8 区为空气(计算中只考虑氮元素),7 区为质量密度为 0.92 g/cm^3 的聚乙烯,9 区为真空区。对探测器的描述中,未考虑柱形接口内各种材料的分布情况。将源描述为一截面为圆形的均匀分布平面源,其半径为聚乙烯球的半径,垂直于 z 轴,中子沿平行于 z 轴方向入射,中子能量从 10 meV 到 15.85 MeV,共 47 个点。计算中,中子一旦进入真空区,即认为它已逃逸,不再继续跟踪。聚乙烯密度和 ^3He 气体密度对计算结果影响较大^[1]。

2.2 归一化因子的确定

对于直径为 d 的 Bonner 球,如果入射中子能量为 E_n ,那么,其响应可表示为 $R_d(E_n) = \frac{M_d}{(E_n)}$,其中, M_d 为多球装置的读数, (E_n)

为入射到 Bonner 球上的单能中子注量。假设在正比管灵敏体积 V_{cl} 中的 $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$ 反应个数正比于 M_d ,通过输入文件的设置,可得到一个几何块上的中子注量 $\int_{V_{\text{cl}}} \phi_k l_k$

(E_j) , $E_j \in (E_{j-1}, E_j]$,式中, K 表示经过的径迹个数, l_k 为每个径迹的长度, ϕ_j 即为经聚乙烯球慢化后进入 ^3He 正比计数管的能量从 E_{j-1} 到 E_j 的中子数面积密度。经过推算,有:

$$R_d(E_n) = \sum_j \phi_j a_s n_{\text{He}} V_{\text{cl}} n_{\text{p}}(E_j) \quad (1)$$

其中: a_s 为中子源的面积; n_{He} 为 ^3He 的原子数密度; V_{cl} 为正比管的灵敏体积; $n_{\text{p}}(E_j)$ 为对

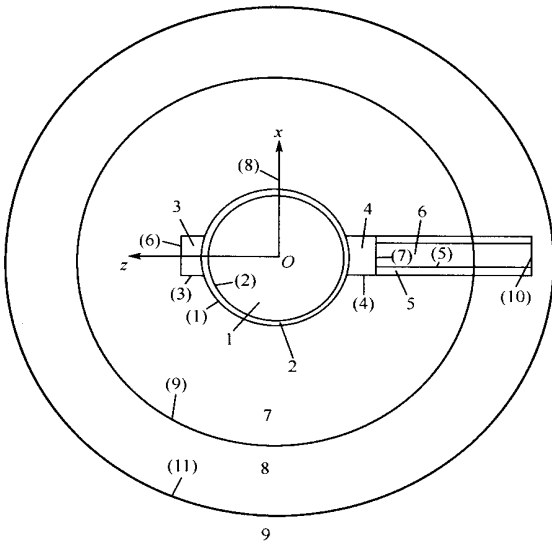


图 2 多球谱仪响应函数计算模型示意图

Fig. 2 Calculation model of response functions of multi-sphere spectrometer

1~9 表示区号, (1)~(11) 表示面号

慢化后能量 E_j (E_{j-1}, E_j) 的中子的 $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$ 反应截面, 则归一化因子 $C = a_s V_{cl} n_{\text{He}}$ 。

需要说明的是, 实际上, j 与 n_{He} 的关系较复杂, 但 Monte-Carlo 计算能够很好地处理这种关系, 因而, 在实际计算中, $C = - a_s V_{cl}$, 即 $C = - a V_{cl}$ 等价于 $C = a_s V_{cl} n_{\text{He}}$ 。

图 3 示出了所计算的多球谱仪能量响应函数曲线。

2.3 响应函数计算的不确定度

响应函数的相对不确定度可表示为 $u_c(R) = \frac{s(R)}{R} \frac{s(R_d(E_n))}{R_d(E_n)}$, 其中, $s(R_d(E_n))$ 为响应函数的计算误差, 即响应函数的均方差。式(1)中各因子是非相关的, 根据非相关合成运算法则, 容易得到 $s(R_d(E_n))$ 。MCNP 程序计算输出文件中所给出的 $R_d(E_n)$ 的不确定度仅是 Monte-Carlo 计算的统计偏差。计算中, 可以通过对感兴趣区增加其计算权重的方法来减小计算偏差, 即要达到相同的计算不确定度, 可以用此方法减少运行时间。

3 解谱程序

计算中采用的解谱程序为 MIEKEB 程序,

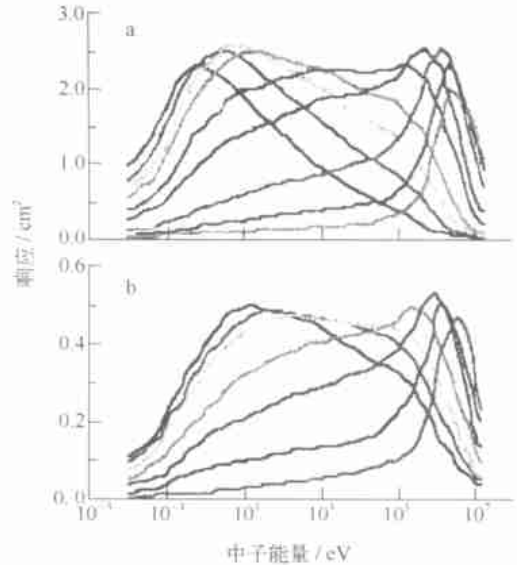


图 3 多球谱仪的响应函数曲线

Fig. 3 Response functions of multi-sphere spectrometers

a——中心探测器为 ^3He 正比计数器, 曲线左侧由高至低分别为 2、5、3、3.5、4、5、6、8、10、12 英寸球的响应; b——中心探测器为金活化球, 曲线左侧由高至低分别为 3、3.5、4、5、6、8、10 英寸球的响应

它采用 Monte-Carlo 方法, 方法详情可参阅文献[2]。

4 测量及其结果

为验证计算的响应函数的准确性, 进行了如下测量。

1) 用以球形 ^3He 正比计数管为中心探测器的多球系统对强度已知的标准 ^{252}Cf 和 $^{247}\text{Am-Be}$ 中子源进行测量。所测中子能谱示于图 4, 标准谱示于图 5^[3]。将测量值与标准值^[3]进行了比较, 两者在不确定度范围内一致。剂量当量率结果列入表 1。

2) 在 250 和 630 keV 两个能量点, 对中心探测器分别为球形 ^3He 正比计数管和球形金箔的两种自制多球谱仪系统的响应进行刻度。金活化球的活度用低本底反康谱仪测量, 并被推算成饱和活度。另外, 用 MCNP 程序计算两种系统在这两个能点的响应。将测量结果与计算结果进行比较, 两者在不确定度范围内符合较好(表 2)。

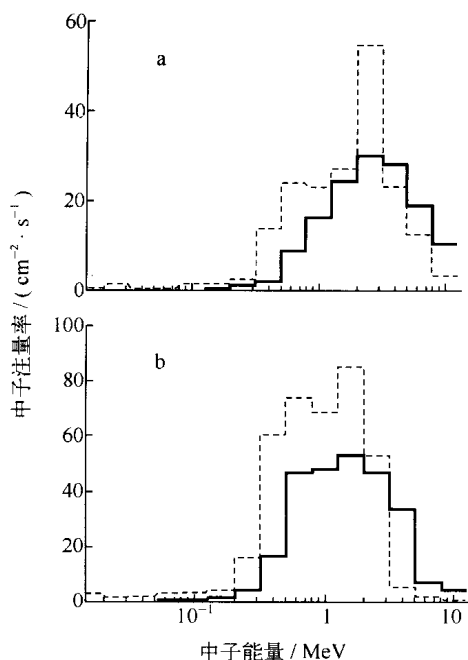


图4 测量的²⁴¹Am-Be(a)和²⁵²Cf(b)中子源能谱

Fig. 4 Measured neutron spectra of ²⁴¹Am-Be(a) and ²⁵²Cf(b) neutron sources
虚线——未扣除本底的中子能谱；
实线——扣除本底后的中子能谱

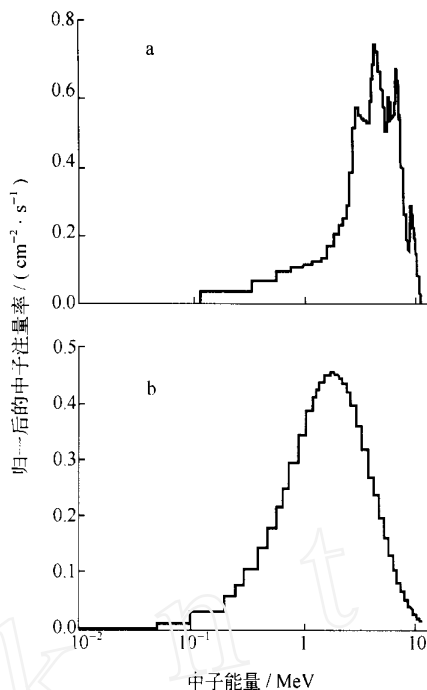


图5 标准²⁴¹Am-Be(a)和²⁵²Cf(b)中子源能谱^[3]

Fig. 5 Standard neutron spectra of ²⁴¹Am-Be(a) and ²⁵²Cf(b) neutron sources^[3]

表1 ²⁵²Cf和²⁴¹Am-Be中子源中子剂量当量率测量结果

Table 1 Neutron dose equivalent rates of ²⁴¹Am-Be and ²⁵²Cf neutron sources

中子源	中子强度/ s^{-1}	源到探测器距离/cm	中子剂量当量率/ $(\mu Sv \cdot h^{-1})$		
			标准值	测量值	标准值/测量值
²⁴¹ Am-Be	2.70×10^7	120	210	212	0.990 6
²⁵² Cf	6.98×10^7	140	393	373	1.053 6

表2 两个多球谱仪系统在250和630 keV能点的响应的比对

Table 2 Comparison of responses of two multi-sphere spectrometer systems at 250 and 630 keV

中子能量/ keV	中心探测器	源到探测器 距离/cm	R_{exp}/cm^2	R_{cal}/cm^2	$A = R_{exp, ^3He}/$	$B = R_{cal, ^3He}/$	A/B
					$R_{exp, Au}$	$R_{cal, Au}$	
250	³ He 正比计数管	100	14.187	2.520	(5.276)	(5.143)	1.026
	球形金箔	50	10.755	0.490			
630	³ He 正比计数管	100	3.195	2.368	6.063	5.071	1.196
	球形金箔	100	0.527	0.467			

注:括号内数值为源到球形金箔探测器距离归一到100 cm后的值

3) 对实验中所用便携式 HPGe 谱仪(用于测量金箔活度)的效率进行刻度。分别用低本底反康谱仪(效率已知)和便携式 HPGe 谱仪对某一辐照后球形金箔的活度进行测量,并将测量结果归一到同一时刻。便携式 HPGe 谱仪测量活度值为 34.76 Bq,低本底反康谱仪测得值为 381.06 Bq,两者之比为 0.091 2。

现场测量中,用中心探测器为³He 正比计数器的多球谱仪对安全壳外测量了 11 个位置,用中心探测器为球形金箔的多球谱仪对安全壳内测量了 7 个位置。这里给出几个具有代表性位置处的能谱(图 6)。由能谱得到的各测量位置的剂量当量率结果分别列于表 3(安全壳外)和表 4(安全壳内)。另外,在安全壳外的测量过程中,还利用已校准过的雷姆仪对各测量点的中子剂量进行巡测,巡测数据同被列于表 3。

5 测量不确定度

测量不确定度主要来源于以下几个方面:

- 1) 测量系统本身的系统不确定度;
- 2) 计数统计引起的不确定度;
- 3) 反应堆功率的变化;
- 4) 对于安全壳内测量,还包括便携式 HPGe 谱仪效率刻度引进的不确定度。不确定度分析均根据文献[4]进行,具体数值列入表 5。

6 结论

通过对本测量系统测量不确定度的分析可看出,其主要来源为响应函数的不确定度和计数统计的不确定度(尤其对安全壳外)。如能得到好的响应函数(德国 PTB 的多球谱仪响应函数计算不确定度好于 3%)并进行较长时间的测量以得到好的计数统计,则其测量的合成标准不确定度可好于 10%。即使如此,其测量准确性也是雷姆仪或阈探测器等所无法比拟的。

本项工作得到了很多有关人员和专家的帮助和指导,在此表示衷心的感谢。

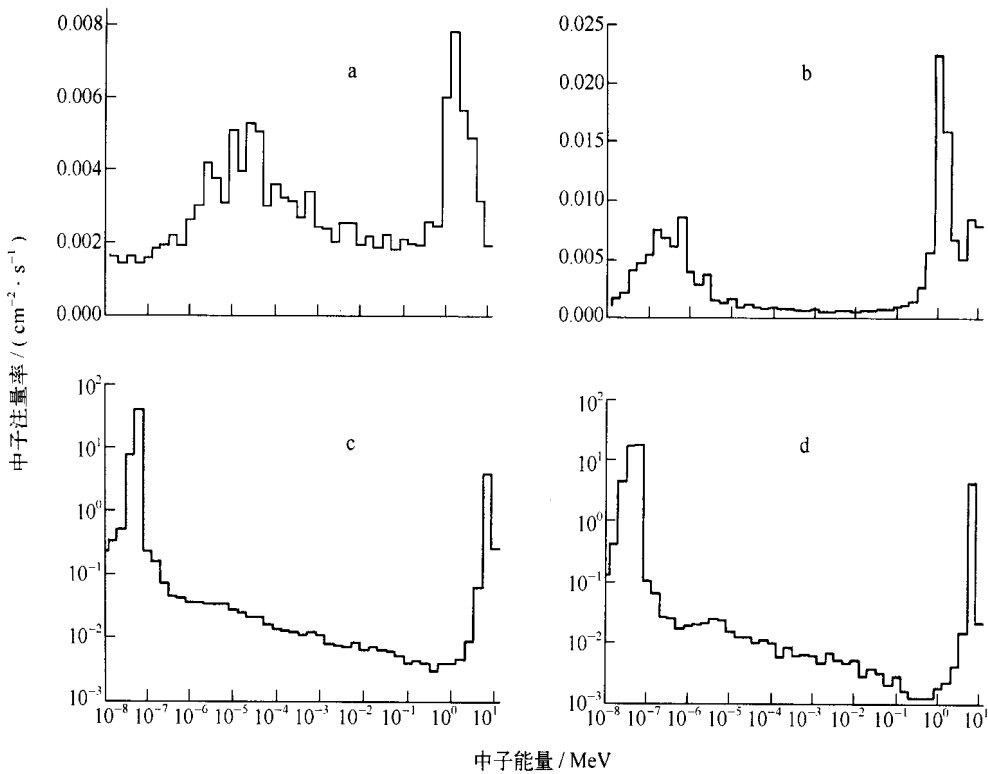


图 6 安全壳内外的中子能谱

Fig. 6 Measured neutron spectra inside and outside the containment

a——安全壳外测量点(1); b——安全壳外测量点(5); c——安全壳内测量点(3); d——安全壳内测量点(4)

表3 安全壳外中子剂量当量率测量结果

Table 3 Neutron dose equivalent rates outside the containment

测量位置编号	中子剂量当量率/ ($\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$)	
	多球谱仪	雷姆仪
(1)	6.87×10^{-2}	
(2)	6.30×10^{-2}	
(3)	2.75×10^{-2}	$3 \times 10^{-2} \sim 11 \times 10^{-2} 1)$
(4)	2.07×10^{-1}	
(5)	1.11×10^{-1}	
(6)	1.431	1.76
(7)	1.106	1.24
(8)	3.29×10^{-2}	
(9)	1.75×10^{-2}	
(10)	1.18×10^{-2}	$0 \sim 1.7 \times 10^{-2} 2)$
(11)	8.67×10^{-3}	

注:1) 对应测量位置(1)~(5)

2) 对应测量位置(8)~(11)

表中数据均为反应堆功率为10%满功率时的结果

表4 安全壳内中子剂量计算结果

Table 4 Neutron dose equivalent rates inside the containment

测量位置编号	中子剂量当量率/ ($\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$)
(1)	9.030
(2)	1.043
(3)	8.525
(4)	8.247
(5)	72.781
(6)	9.941
(7)	15.049

注:表中数据均为归一到1满功率·天的结果

表5 安全壳内、外中子剂量当量率测量不确定度分析

Table 5 Uncertainty analysis of the measured neutron dose equivalent rates inside and outside the containment

不确定度来源	不确定度/ %		评定类型 ^[4]		
	壳内	壳外	壳内	壳外	
多球系统响应函数	Monte-Carlo 程序计算	<20	<10	A	A
	聚乙烯球的密度	11 ^[1]	10 ^[1]	B	B
	He 气体的密度		1 ^[1]		B
多球系统所用球的个数	<15 ^[5]	<15 ^[5]	B	B	
计数统计	2~10	2~30	A	A	
反应堆功率的变化	<3	<10	A	A	
仪器(HPGe 探测器)效率刻度	<2		B		
	<28~30 ¹⁾	<24~38 ¹⁾			

注:1) 为合成标准不确定度

参考文献:

- [1] Wiegel B, Alevra AV, Siebert BRL. Calculations of the Response Functions of Bonner Spheres With a Spherical³He Proportional Counter Using a Realistic Detector Model: PTB-N-21 [R]. Braunschweig, Germany: Physikalische Technische Bundesanstalt, 1994.
- [2] Matzke M. Unfolding of Pulse Height Spectra — The HEPRO Program System: PTB-N-19 [R]. Braunschweig, Germany: Physikalische Technische Bundesanstalt, 1994.
- [3] ISO8529-3 (1989), Neutron Reference Radiation Part 3 — Calibration of Area and Personal Dosimeters and Determination of Response as a Function of Energy and Angle of Incidence[S].
- [4] ISO 1993(E), Guide to Expression of Uncertainty in Measurement[S].
- [5] Matzke M. Propagation of Uncertainties in Unfolding Procedures: PTB-S7-01 [R]. Braunschweig, Germany: Physikalische Technische Bundesanstalt, 1994.