

在屏蔽墙外用雷姆计测量高能中子的修正因子

李桂生

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 考虑到穿过混凝土屏蔽墙后中子能谱相对变“硬”的效应和中子雷姆计的能量响应特性,计算了用10英寸直径单球雷姆计和标准A-B雷姆计在屏蔽墙外测量中能重离子反应出射高能中子剂量当量的修正因子。

关键词 雷姆计 修正因子 高能中子 剂量当量 屏蔽

1 引言

在中能重离子反应中,出射中子的最大能量可以高达入射离子单核能的两倍,甚至更高^[1,2].由于大量高能中子的存在并考虑到雷姆计的能量响应特性,当用中子雷姆计测量中子剂量当量时,雷姆计的读数和真实的剂量当量之间将出现较大的误差,严重地低估了剂量当量值^[3].因此,雷姆计的直接读数必须进行修正.在文献[3,4]中,已经用图1、图2给出的能量响应曲线^[5,6]计算了用10英寸直径单球雷姆计和标准A-B雷姆计在屏蔽墙内测量中能重离子反应出射中子剂量当量的修正因子。

然而,在混凝土屏蔽墙外,由于贯穿屏蔽层后的中子能谱相对地变“硬”,低能中子在屏蔽层中迅速衰减,高能中子所占的比例随着屏蔽层厚度的增加而越来越高^[7].在这种情况下,当用雷姆计测量时,其读数将更加严重地低估了中子剂量当量。

2 中子谱随屏蔽层厚度的变化

中能重离子反应中出射中子的能谱是一个包括从热中子直到数百 MeV 高能中子、显示出较强前冲趋势的比较复杂的连续谱.要精确计算在穿过屏蔽层后中子能谱的变化是相当困难的.从实际需要出发,为了使问题变得简单和方便,我们将 $100\text{MeV}/\text{u}$ ^{12}C 离子轰击 Cu 靶出射的中子能量 (E_n) 划分为 11 个能量间隔,用中子(在屏蔽层中)衰减理论方法计算了在不同厚度屏蔽层外距中子源(靶)10m 处 11 个能量间隔中的中子占总中子数的比例 k_i .为了避免烦琐,图 1 只给出了 $0^\circ-15^\circ$ 和 $15^\circ-30^\circ$ 方向上的两组曲线,以供参

3 修正因子

在文献 [3] 中, 曾定义了一个修正因子

$$K = \left(\sum_{i=1}^n k_i \cdot \eta_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n k_i \cdot \varepsilon_i \right), \quad (1)$$

这里, n 是划分的能量间隔数; k_i 是第 i 个能量间隔中的中子数占总中子数的百分比; η_i 是第 i 个能量间隔中子的剂量当量响应与 5 MeV 中子剂量当量响应的比值, ε_i 是雷姆计对第 i 个能量间隔中的中子的相对响应(雷姆计对 5MeV 中子的响应归一化为 1). 如果雷姆计的直接读数是 A (μSv), 那么, 剂量当量值将是

$$H(\mu\text{Sv}) = K \cdot A(\mu\text{Sv}). \quad (2)$$

修正因子的计算分两步进行. 和在文献 [8] 中一样, $100\text{MeV} / \text{u} \text{ }^{12}\text{C} + \text{Cu}$ 反应出射的中子能量划分为 11 个能量段, 首先计算中子谱在穿过不同厚度混凝土屏蔽层后的变化, 得到 k_i 值; 然后利用在表 2、表 3 中列出的 k_i 、 η_i 和 ε_i 的值, 按公式 (1) 计算修正因子 K .

表3 ε_i 和 η_i 值

E_n / MeV	10英寸直径单球雷姆计			标准A-B雷姆计	
	ε_i	η_i		ε_i	η_i
		按ICRP	按 $H^*(10)$		
0—20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20—40	0.39	2.00	2.00	0.32	1.46
40—60	0.22	2.22	1.40	0.22	0.78
60—80	0.13	2.24	1.00	0.19	0.76
80—100	0.09	2.52	0.70	0.16	0.78
100—120	0.07	2.67	0.60	0.16	0.78
120—140	0.06	2.78	0.60	0.15	0.78
140—160	0.04	2.89	0.60	0.15	0.81
160—180	0.03	3.00	0.60	0.14	0.81
180—200	0.03	3.11	0.60	0.13	0.83
200—220	0.03	3.33	0.60	0.13	0.85

4 结果与讨论

计算得到的 10 英寸直径单球雷姆计和标准 A-B 雷姆计的修正因子列于表 4.

从表 4 可以看出:

(1) 修正因子随混凝土屏蔽层厚度的增加而增大, 当屏蔽厚度为 0 (无屏蔽) 时, 修正因子为最小值;

(2) 修正因子随测量点与入射束流方向的夹角增加而减小.

这个结论反映了中子谱在穿过较厚屏蔽层后比穿过较薄屏蔽层时变得“更硬”^[8]的事实, 也就是说, 在屏蔽层外, 高能中子占总中子数的百分比随屏蔽厚度的增加而增加.

表4 修正因子K

混凝土屏蔽 厚度 (cm)	K (10英寸直径单球雷姆计)									
	0°—15°		15°—30°		30°—60°		60°—120°		120°—180°	
	ICRP	$H^*(10)$	ICRP	$H^*(10)$	ICRP	$H^*(10)$	ICRP	$H^*(10)$	ICRP	$H^*(10)$
0 ^[3]	13.4	5.2	6.6	4.1	3.0	2.3	1.4	1.3	1.2	1.1
100	29.8	8.3	24.1	7.7	15.2	6.6	5.7	4.3	3.4	2.9
200	38.5	9.3	36.0	8.9	27.8	8.1	10.4	6.4	8.2	5.9
300	49.3	10.8	45.5	10.2	41.6	9.5	13.8	6.9	9.6	6.2
400	54.5	11.6	52.9	11.0	46.4	10.6	15.6	7.2	9.9	6.3
500	61.8	12.9	59.2	12.5	51.6	11.1	16.8	7.4	10.1	6.4
混凝土屏蔽 厚度 (cm)	K (标准A-B雷姆计) (按 $H^*(10)$)									
	0°—15°		15°—30°		30°—60°		60°—120°		120°—180°	
	ICRP	$H^*(10)$	ICRP	$H^*(10)$	ICRP	$H^*(10)$	ICRP	$H^*(10)$	ICRP	$H^*(10)$
0	3.6		2.9		1.9		1.2		1.1	
100	4.9		4.5		4.1		3.0		2.2	
200	5.0		4.9		4.7		3.8		3.8	
300	5.2		5.1		5.0		3.8		3.6	
400	5.3		5.3		5.1		3.8		3.6	
500	5.5		5.4		5.2		3.9		3.6	

在中能重离子反应中,出射的高能中子占了总中子数的很大比例,因此,把雷姆计的直接读数看作是中子剂量当量值是不合适的.要得到真实的剂量当量值,必须对雷姆计的读数进行修正.

对 10 英寸直径单球雷姆计来讲,按 NCRP 和 ICRP 1965 年推荐值计算的修正因子大于按 $H^*(10)$ ^[10] 计算的值.其原因已在文献 [3] 中进行过讨论.

早期的研究指出,中子产额主要取决于入射离子的单核能.当靶核在 Al—Pb 之间改变时,重离子的中子产额变化是很小的^[11].因此,表 4 中列出的修正因子可以近似地应用于单核能为 100MeV/u 的重离子轰击重靶时出射中子剂量当量的测量.

我们提出的雷姆计修正因子方法是测量中能重离子反应中出射高能中子剂量当量准确值的有效方法,它可以避免用雷姆计测量剂量当量时由于仪器的能量响应引起的较大的测量误差,具有重要的实用价值.虽然,在本工作中,只计算了用雷姆计测量 100MeV/u ¹²C 离子轰击 Cu 靶时出射中子剂量当量的修正因子,然而,也可以用类似的方法计算用雷姆计测量任何已知能谱中子场的剂量当量时的修正因子.

参 考 文 献

- [1] Study Group of NUMATRON, NUMATRON—High Energy Heavy-Ion Facility, Institute for Nuclear Study, University of Tokyo, Japan, 1977
- [2] Bertini H W, Santoro R T, Hermann O W. Phys. Rev., 1976, C14(2):590—595
- [3] Li Guisheng. High Energy Physics and Nuclear Physics(in Chinese), 1998, 22:283
(李桂生.高能物理与核物理,1998, 22:283)
- [4] Li Guisheng, Nucl. Instr. and Meth., 1997, A394:381—386
- [5] Patterson H W, Thomas R H, Accelerator Health Physics, New York:Academic Press, 1973, 266
- [6] Birattari C, Ferrari A, Nuccetelli C et al. Nucl. Instr. and Meth. 1990, A297:250—257
- [7] Price B T, Horton C C, Spinner K T, Radiation Shielding, London, New York and Paris, Pergamon Press,

1957

- [8] Li Guisheng, Atomic Energy Science and Technology (in Chinese), 1993, 27(2):167—173
(李桂生. 原子能科学技术, 1993; 27(2): 167—173)
- [9] Jaeger R G, Blizard E P, Chiton A B et al. Engineering Compendium on Radiation Shielding, Spriger-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1975
- [10] ICRU, Quantities and Units for Use in Radiation Protection Dosimetry, Report 51(Bethesda, MD:ICRU Publications)(1993)
- [11] Hubbard E L, Main R M, Pyle R V. Phys. Rev., 1960, 118:507—514

Rem-Meter Correction Factor for High Energy Neutron Outside Concrete Shielding

Li Guisheng

(*Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*)

Abstract For the 10 inch diam. single-sphere rem-meter and the standard A-B rem-meter placed outside the concrete shielding wall, correction factors for measuring the high energy neutron dose equivalent produced by intermediate energy heavy ion reaction have been calculated taking into account the energy response of the rem-meter and the effect that the neutron spectra become remarkably “harder” after penetrating through a concrete shielding wall.

Key words rem-meter, correction factor, high energy neutron, dose equivalent, shielding