

# 雷姆计在屏蔽墙内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** 在中能重离子反应中出射的  $E_n > 20$  MeV 中子在出射总中子中占有相当大的比例, 因此, 当用雷姆计测量剂量当量时, 由于仪器的能量响应, 雷姆计的直接读数低于真实的中子剂量当量值. 本文从重离子反应出射中子能谱入手, 理论上计算了在屏蔽墙内用 10 in. 直径单球雷姆计和标准 A-B 雷姆计测量  $41.7\text{MeV/u}^{12}\text{C} + \text{Fe}$  和  $100\text{MeV/u}^{12}\text{C} + \text{C}$  反应出射中子剂量当量的修正因子. 它可以近似应用于中能重离子反应出射中子的剂量当量测量.

**关键词** 高能中子 雷姆计 剂量当量 修正因子

## 1 引言

迄今为止, 雷姆计一直是广泛应用于中子区域监测的剂量仪器. 然而, 由于仪器的能量响应特性所致, 当用平均能量约为 5 MeV 的同位素中子源刻度过的雷姆计来测量能量低于 14 MeV 中子的剂量当量时, 雷姆计的直接读数与真实的剂量当量相差不大; 而用来测量 14 MeV 以上中子时, 其直接读数低于真实的剂量当量值. 多年来, 由于没有高能量单能中子源对仪器进行刻度, 因此, 高能中子剂量当量的准确测量一直是困扰剂量学界的一个难题.

在中、高能重离子反应中, 出射中子的能谱相当复杂, 能量大于 10 MeV 的中子占有相当大的比例<sup>[1,2]</sup>, 在  $100\text{MeV/u}^{12}\text{C} + \text{C}$  反应中, 能量大于 20 MeV 的中子占有出射总中子数的 50% 以上<sup>[3]</sup>. 因此, 当用雷姆计测量剂量当量时, 仪器的直接读数大大低于真实的剂量当量值, 必须进行修正. 为此, 文献 [3] 曾引入了一个修正因子  $K$ , 计算了用 10 in. 直径单球雷姆计测量中能重离子反应出射中子剂量当量的修正因子. 在该计算中, 使用的剂量当量响应曲线是 NCRP 和 ICRP1965 年的推荐值. 1993 年, ICRU 第 51 号报告定义了剂量当量响应的  $H^*(10)$  值<sup>[4]</sup>, 它与 NCRP 和 ICRP1965 年推荐值之间有较大的差别, 但  $H^*(10)$  数据更新, 更具权威性. 因此, 本文以  $H^*(10)$  值为标准, 进一步计算了用 10 in. 直径单球雷姆计和最常用的标准 A-B 雷姆计测量中能重离子反应中子剂量当量时的修正因子.

## 2 雷姆计的能量响应特性和剂量当量响应曲线

由于没有可用于能量刻度的高能量单能中子源,一般只能给出雷姆计在 14 MeV 以下的能量响应曲线. 迄今所见,只有标准 A-B 雷姆计和 10 in. 直径单球雷姆计给出了从热中子到 ~200 MeV 能量间较完整的能量响应曲线<sup>[5,6]</sup>.

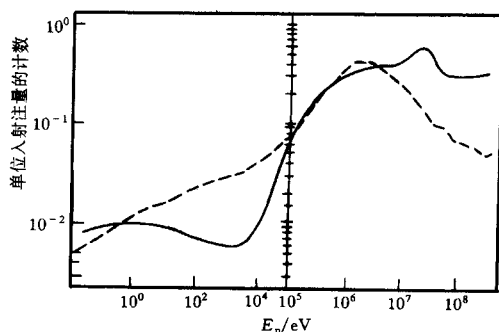


图 1 标准 A-B 雷姆计的能量响应曲线  
-----A-B 雷姆计, —— $H^*(10)$  曲线.

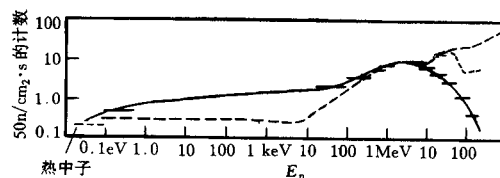


图 2 10in. 直径单球雷姆计的能量响应曲线  
——计算的雷姆计响应曲线,  
.....  $H^*(10)$  曲线,  
----- NCRP 和 ICRP 1965 年推荐的  
剂量当量响应曲线.

标准 A-B 雷姆计是常规剂量监测中最常用的仪器,其能量响应曲线和  $H^*(10)$  曲线在图 1 中给出<sup>[5]</sup>. 图 2 所示的是 10 in. 直径单球雷姆计的能量响应曲线, NCRP 和 ICRP 1965 年推荐的剂量当量响应曲线<sup>[6]</sup>和高能区段的  $H^*(10)$  曲线. 可以看出,两种雷姆计的能量响应曲线在中子能量超过几个 MeV 后均很快下降,从 10 MeV 左右开始,能量响应曲线与剂量当量响应曲线之间出现偏离. 在大约 100 keV 以上,  $H^*(10)$  曲线在 25 MeV 以下时与 NCRP 和 ICRP 1965 年推荐值基本一致,其后,随着中子能量的增加,  $H^*(10)$  值逐渐下降,在 50—200 MeV 间几乎趋于平坦,而 NCRP 和 ICRP 1965 年推荐值却继续增加. 因此可以预见,按  $H^*(10)$  计算的修正因子将低于按 NCRP 和 ICRP 1965 年推荐值计算的值.

## 3 修正因子

按定义,修正因子可以写作

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

式中,  $n$  是计算中划分的中子能量间隔数;  $k_i$  是第  $i$  个能量间隔中的中子数占总中子数的百分比;  $\eta_i$  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;  $\varepsilon_i$  是雷姆计对第  $i$  个能量间隔中子的相对响应(雷姆计对 5 MeV 中子的响应归一化为 1). 如果雷姆计的直接读数是  $A(\mu\text{Sv})$ , 那么,剂量当量值将是

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

计算中,  $100\text{MeV}/\text{u} \text{ }^{12}\text{C} + \text{C}$  和  $41.7\text{MeV}/\text{u} \text{ }^{12}\text{C} + \text{Fe}$  反应的出射中子能量分别划分为 11 和 13 个能量段, 雷姆计对 5 MeV 中子的响应和 5 MeV 中子的剂量当量响应均归一为 1.0. 参数  $k_i$ ,  $\eta_i$  和  $\varepsilon_i$  在表 1、表 2 中列出. 对 10 in. 直径单球雷姆计,  $\eta_i$  分别按 NCRP 和 ICRP1965 年推荐的剂量当量响应曲线和  $H^*(10)$  曲线取值.

表1 参数  $k_i$ ,  $\varepsilon_i$  和  $\eta_i$  的值(对  $100\text{MeV}/\text{u} \text{ }^{12}\text{C} + \text{C}$ )

$E_n / \text{MeV}$	$k_i (\%)^{[3]}$					10in. 雷姆计			A-B雷姆计	
						$\varepsilon_i$	$\eta_i$		$\varepsilon_i$	$\eta_i$
	$0^\circ - 15^\circ$	$15^\circ - 30^\circ$	$30^\circ - 60^\circ$	$60^\circ - 120^\circ$	$120^\circ - 180^\circ$		ICRP	$H^*(10)$		
0—20	5.83	11.86	40.45	80.37	91.51	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20—40	5.31	15.45	25.74	15.18	6.86	0.39	2.00	2.00	0.32	1.46
40—60	11.67	21.08	18.39	3.57	1.27	0.22	2.22	1.40	0.22	0.78
60—80	26.52	23.89	10.30	0.72	0.36	0.13	2.24	1.00	0.19	0.76
80—100	30.77	13.35	3.49	0.16	—	0.09	2.52	0.70	0.16	0.78
100—120	13.26	5.62	1.10	—	—	0.07	2.67	0.60	0.16	0.78
120—140	4.24	2.81	0.37	—	—	0.06	2.78	0.60	0.15	0.78
140—160	1.59	0.56	0.12	—	—	0.04	2.89	0.60	0.15	0.81
160—180	0.48	0.25	0.04	—	—	0.03	3.00	0.60	0.14	0.81
180—200	0.22	0.13	—	—	—	0.03	3.11	0.60	0.13	0.83
200—220	0.11	—	—	—	—	0.03	3.33	0.60	0.13	0.85

表2 参数  $k_i$ ,  $\varepsilon_i$  和  $\eta_i$  的值(对  $41.7\text{MeV}/\text{u} \text{ }^{12}\text{C} + \text{Fe}$ )

$E_n / \text{MeV}$	$k_i (\%)^{[3]}$					10in. 雷姆计			A-B雷姆计	
						$\varepsilon_i$	$\eta_i$		$\varepsilon_i$	$\eta_i$
	$0^\circ - 10^\circ$	$10^\circ - 30^\circ$	$30^\circ - 60^\circ$	$60^\circ - 80^\circ$	$80^\circ - 110^\circ$		ICRP	$H^*(10)$		
0—10	24.12	39.19	62.31	75.27	75.95	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10—20	26.66	25.34	21.04	13.17	13.06	0.78	1.33	1.20	0.49	1.27
20—30	22.22	15.67	8.90	5.08	5.77	0.56	1.78	1.80	0.34	1.51
30—40	19.05	9.93	4.05	3.01	3.34	0.44	2.00	2.00	0.24	1.24
40—50	5.08	4.70	0.86	1.42	0.85	0.33	2.12	1.40	0.22	0.88
50—60	1.27	2.22	1.13	1.05	0.56	0.22	2.22	1.00	0.21	0.78
60—70	0.76	1.09	0.73	0.26	0.21	0.17	2.23	0.90	0.20	0.78
70—80	0.27	0.84	0.65	0.35	0.14	0.13	2.24	0.80	0.18	0.81
80—90	0.14	0.47	0.08	0.13	0.06	0.11	2.33	0.70	0.18	0.81
90—100	0.14	0.37	0.20	0.13	0.06	0.09	2.56	0.60	0.16	0.81
100—110	0.19	0.05	0.05	0.13	—	0.08	2.60	0.60	0.16	0.83
110—120	0.05	0.08	—	—	—	0.07	2.67	0.60	0.15	0.83
120—130	0.05	0.05	—	—	—	0.06	2.78	0.60	0.15	0.85

## 4 结果与讨论

表 3 列出了计算得到的修正因子值. 可以看出:

(1) 当用雷姆计测量中能重离子反应出射的中子剂量当量时, 必须对雷姆计的直接读数进行修正, 才能得到真实的剂量当量值, 特别是对单核能较高的离子引起的反应.

(2) 由于重离子反应出射中子的前冲分布, 特别是高能量中子大部分集中于前向发

射区,修正因子随与入射束流方向夹角的改变而变化.所以,在不同方向上测量时,应采用不同的修正因子.很明显,在束流前方向上的修正因子值最大.

(3) 如前所述,用 NCRP 和 ICRP1965 年推荐的剂量当量响应曲线计算的修正因子大于用  $H^*(10)$  曲线计算的修正因子.例如,在束流前方向上,按前者计算的 10in. 直径单球雷姆计的修正因子分别是 13.38 (对 100MeV/u  $^{12}\text{C}+\text{C}$ ) 和 2.28 (对 41.7MeV/u  $^{12}\text{C}+\text{Fe}$ ), 而用后者计算的修正因子分别是 5.17 和 2.12.

(4) 现有的实验数据表明,入射离子单核能的变化对重离子反应中子产额的影响最为明显.一般来说,中子产额随靶核质量的增加而增加,但在靶核从 Cu 到 Pb 的较宽范围内,中子产额变化不大<sup>[7]</sup>.虽然同一单核能的同种离子轰击较轻靶比轰击较重靶时出射的中子分布更为前冲一些,但在一个较宽的靶核原子序数范围内,中子分布的变化也不是很大.因此,在一定的误差范围内,表 3 所列的修正因子不仅可用于这两个反应的中子剂量当量测量,而且还可以近似地应用于 50MeV/u 和 100MeV/u  $^{12}\text{C}$  离子轰击中等质量靶的剂

表3 计算得到的修正因子值

反应	仪器	修正因子 $K$					
		测量方向					
		$0^\circ-15^\circ$	$15^\circ-30^\circ$	$30^\circ-60^\circ$	$60^\circ-120^\circ$	$120^\circ-180^\circ$	
100 MeV/u $^{12}\text{C}+\text{C}$	10in. 雷姆计	13.38	6.55	3.04	1.39	1.15	按NCRP和ICRP 1965
		5.17	4.05	2.33	1.34	1.14	按 $H^*(10)$
	A-B 雷姆计	3.57	2.94	1.88	1.23	1.09	按 $H^*(10)$
		测量方向					
		$0^\circ-10^\circ$	$10^\circ-30^\circ$	$30^\circ-60^\circ$	$60^\circ-80^\circ$	$80^\circ-110^\circ$	
41.7 MeV/u $^{12}\text{C}+\text{Fe}$	10in. 雷姆计	2.28	1.90	1.42	1.28	1.25	按NCRP和ICRP 1965
		2.12	1.73	1.34	1.22	1.25	按 $H^*(10)$
	A-B 雷姆计	2.39	1.89	1.43	1.25	1.25	按 $H^*(10)$

量当量测量.由此可以断定,经过修正后的剂量当量值是比较安全的.

(5) 本文只考虑了无屏蔽墙时的剂量测量.在屏蔽墙外测量时,由于中子能谱发生了明显的变化,高能中子所占的比例将更大,因此,修正系数与无屏蔽墙时计算的结果大不相同.对这种情况下的修正,必须另作计算.

(6) 本文所述的“靶子”不是指核物理实验用的“薄靶”,而是指厚度不小于重离子射程的专用“厚靶”、Cu 制法拉第筒或束流阻止器等.

### 参 考 文 献

- [1] Gabriel T A *et al.* ORNL-TM-4334, 1975
- [2] Cecil R A, Anderson B D, Baldwin A R *et al.*, *Phys Rev*, 1981, **C24**:2013—2029
- [3] Li Guisheng. *Nuclear Techniques (in Chinese)*, 1993, **16**:370—376  
(李桂生. *核技术* 1993, **16**:370—376)
- [4] ICRU. *Quantities and Units for Use in Radiation Protection Dosimetry*. Report 51(Bethesda, MD: ICRU Publications) (1993)
- [5] Birattari C, Ferrari A, Nuccetelli C *et al.*, *Nucl Instr and Meth*, 1990, **A297**: 250—257.
- [6] Patterson H W, Thomas R H, *Accelerator Health Physics*, New York and London, Academic Press, 1973, 266

[7] Hubbard E H, Main R M, Pyle R V. Phys Rev, 1960, 118:507—514

## Rem-Meter Correction Factor for Measuring High Energy Neutrons Inside Shielding

Li Guisheng

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

**Abstract** The dose equivalent of neutrons from intermediate energy heavy ion reactions measured with a rem-meter would be underestimated because of the energy response of the instrument. Therefore the readings of rem-meter must be corrected in order to obtain the real dose equivalent. The correction factors for dose equivalent of neutrons from the reactions of  $41.7\text{MeV} / \text{u} \text{ }^{12}\text{C} + \text{Fe}$  and  $100\text{MeV} / \text{u} \text{ }^{12}\text{C} + \text{C}$  measured inside the shielding with both rem-meters, the 10 in. diameter single-sphere rem-meter and the standard A-B rem-meter, have been calculated. They could be applied in dose equivalent measurement for intermediate energy heavy ion reactions.

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