

高能重离子加速器次级中子 屏蔽的理论估算

李桂生

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1995-08-31 收稿

摘 要

用 R. Madey 等人提出的由核反应参数计算屏蔽的方法, 计算了入射离子单核能为 0.6、1.2 GeV ^{12}C 束轰击厚 Cu 靶的次级中子屏蔽。当入射离子束流为 1×10^{13} ions/s 时, 其前向和侧向混凝土屏蔽厚度分别为 9.8、4.8 m (对 0.6 GeV) 和 11.5、6.9 m (对 1.2 GeV)。

关键词 高能重离子, 加速器, 次级中子, 屏蔽。

1 引 言

众所周知, 在各类防护措施中, 辐射屏蔽是首要的措施。合理而可靠的辐射屏蔽是加速器运行和核物理实验的安全保障, 也是保证实验人员人身安全、高灵敏度测量设备安全和周围居民安全的必要条件。

重离子反应出射中子的屏蔽取决于次级中子的产额、能量和角分布, 也取决于加速离子在加速器部件上的束流损失。在过去几年中, 我们对低、中能重离子反应出射中子的屏蔽进行了比较系统的研究^[1-4]。随着入射离子能量的升高, 次级中子的产额和能量显著地增加, 中子角分布表现出更加强烈的前冲趋势。所以, 高能重离子反应出射中子的屏蔽, 特别是对加速器束流前方向上的屏蔽, 应当给予高度的重视。

鉴于我国重离子物理研究逐步向高能区发展的需要, 我们用 R. Madey 等人^[5]在实验基础上推导的计算核反应参数的方法, 从理论上估算了 0.6、1.2 GeV/u ^{12}C 离子轰击厚 Cu 靶的重离子反应次级中子的屏蔽。

2 屏蔽计算

从辐射剂量学原理可知, 在以 ζ 为单位 ($1\zeta = 100\text{g}/\text{cm}^2$) 的混凝土屏蔽外, 距靶 10m 处的中子剂量当量率可以表示为

$$\dot{H}(\zeta) = F_{un} \cdot C(\zeta) \cdot 3.6 \cdot 10^6 (\text{mSv}\cdot\text{h}^{-1}), \quad (1)$$

式中 $F_{un} = I \cdot \frac{dN}{d\Omega} \cdot 10^{-6} (\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1})$ 是无屏蔽时距靶 10m 处的中子注量率; I 是入射离子流强 (ions/s); $dN/d\Omega$ 是入射一个离子时, 单位立体角内发射的中子数; $C(\zeta)$ 是穿过厚度以 ζ 为单位的混凝土屏蔽后, 中子注量率与剂量当量率之间的转换系数^[6].

根据 R. Madey 等人提出的方法, (1) 式可以表示为

$$H(\zeta) = \frac{2.5}{\pi} e^{-2\theta_{rad}} \cdot M \cdot F \cdot I \cdot C(\zeta) \cdot 3.6 \cdot 10^6 (\text{mSv}^{-1}), \quad (2)$$

式中 θ_{rad} 是以弧度为单位表示的出射角度; 参数 M 为中子多重性, 即每次核相互作用产生的中子数; F 是核相互作用的份额, 可以分别表示为

$$M = M(T > T_0) = 0.86 \frac{\bar{\sigma}_{NN}}{4\pi r_0^2} \left(\frac{R_G}{2r_0} \right)^{\alpha(T_0)-2} \left(1 - b \frac{r_0}{R_G} \right)^{-2}, \quad (3)$$

其中 $\bar{\sigma}_{NN}$ 是同位旋平均自由核子-核子截面; R_G 是入射离子与靶核的相互作用几何半径; T 是中子的动能; $r_0 = 1.2 \times 10^{-13} \text{cm}$; $\alpha(T_0)$ 是一个与能量有关的参数, 对应于 $T_0 = 0, 15, 25, 50, 100, 200 \text{MeV}$, $\alpha(T_0)$ 分别等于 5.00, 4.65, 4.50, 4.20, 4.00 和 3.60.

$$F = 1 - e^{-R/L}, \quad (4)$$

其中 R 和 L 分别为入射离子在靶中的射程和平均自由程.

对 0.6、1.2 GeV/u ^{12}C 离子轰击 Cu 靶的反应, 表 1 列出了由 Madey 理论计算的或由文献查得的屏蔽计算参数.

表 1 屏蔽计算参数

参数	表达式	计算结果	
		0.6 GeV/u $^{12}\text{C}+\text{Cu}$	1.2 GeV/u $^{12}\text{C}+\text{Cu}$
$\bar{\sigma}_{NN}$	$\frac{1}{2} (\sigma_{np} + \sigma_{nn})$	$35.5 \times 10^{-27} \text{cm}^2$	$44.5 \times 10^{-27} \text{cm}^2$
R_G	$r_0(A_T^{1/3} + A_p^{1/3})$	$7.53 \times 10^{-13} \text{cm}$	$7.53 \times 10^{-13} \text{cm}$
$\sigma(T > 0)$	$\bar{\sigma}_{NN} (R_G / 2r_0)^5$	$10.83 \times 10^{-24} \text{cm}^2$	$13.57 \times 10^{-24} \text{cm}^2$
σ_R	$1.16\pi r_0^2 \left(\frac{R_G}{r_0} - b \right)$	$1.65 \times 10^{-24} \text{cm}^2$	$1.65 \times 10^{-24} \text{cm}^2$
$M(T > 0)$	$\sigma(T > 0) / \sigma_R$	6.5	8.2
R^η		$8.0 \times 10^6 \text{mg/cm}^2$	$1.7 \times 10^6 \text{mg/cm}^2$
L	$(N_0 \sigma_{incl} / A_T)^{-1}$	55.1 g/cm^2	55.1 g/cm^2
F	$1 - e^{-R/L}$	0.77	0.95

σ_{np} 和 σ_{nn} 分别为中子-质子截面和中子-中子截面; A_T 和 A_p 分别为靶核和入射核的质量数; $\sigma(T > 0)$ 为中子生成截面; σ_R 为反应截面; σ_{incl} 为非弹性相互作用截面; N_0 为阿伏伽德罗常数.

将上述参数、 $C(\zeta)$ 和入射离子流强 I 代入 (2) 式, 即可从 $H(\zeta)$ 曲线上得到在不同束流强度下, 不同方向上应设置的普通混凝土屏蔽厚度 (剂量当量率限值取 $2.5 \times 10^{-2} \text{mSv}^{-1}$),

结果列于表2. 图1是屏蔽厚度的极坐标图.

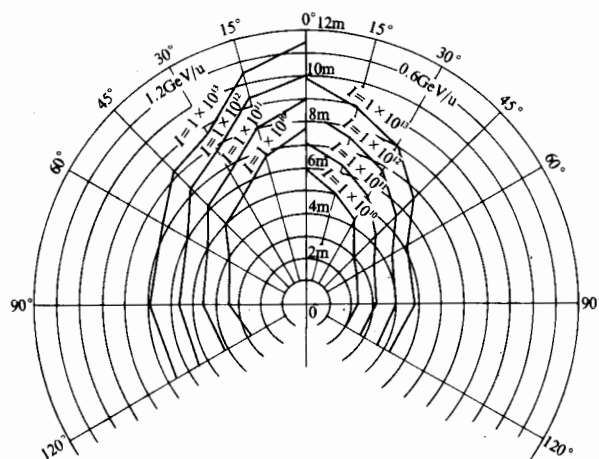


图1 混凝土屏蔽厚度的极坐标图

束流强度 I 的单位为 ions / s.

表2 不同入射能量和束流强度下的混凝土屏蔽厚度

入射离子能量 和反应	I (ions / s)	混凝土屏蔽厚度(m)						
		0°	15°	30°	45°	60°	90°	120°
0.6 GeV / u $^{12}\text{C} + \text{Cu}$	1×10^3	9.9	8.9	8.1	6.5	5.1	4.8	4.4
	1×10^2	8.5	7.6	6.8	5.6	4.3	3.9	3.6
	1×10^1	7.1	6.3	5.5	4.3	3.4	3.1	2.7
	1×10^0	5.9	5.0	4.3	2.9	2.6	2.2	1.9
1.2 GeV / u $^{12}\text{C} + \text{Cu}$	1×10^3	11.5	10.5	8.7	8.3	7.1	6.9	6.7
	1×10^2	10.1	9.3	7.7	7.2	6.0	5.7	5.4
	1×10^1	8.9	8.0	6.6	6.1	4.9	4.6	4.2
	1×10^0	7.6	6.7	5.5	5.0	3.8	3.4	2.9

3 讨 论

(1) 理论分析和已知的实验结果指出, 在重离子反应中, 随着离子单核能的提高, 出射次级中子的产额和中子最高能量迅速增加, 最高能量可达入射离子单核能的两倍. 次级中子的能量和数量则决定了应设置屏蔽的厚度. 所以, 对高能重离子反应次级中子的屏蔽, 应当给予高度的重视.

(2) 中子屏蔽的厚度主要取决于最高能量次级中子的份额. 因此, 屏蔽厚度和入射离子单核能的关系是显而易见的. 以 1×10^{11} ions / s ^{12}C 离子轰击厚 Cu 靶为例, 当入

射离子单核能为 0.1、0.6、1.2 GeV 时, 其前向混凝土屏蔽厚度分别为 4.5^[1]、7.1、8.9m.

(3) 由于出射中子, 特别是高能量中子的前冲分布, 高能量中子大都集中在前方向出射. 因此, 对高能重离子反应来说, 其前向屏蔽比中能反应更为重要. 从计算结果可以看出, 当入射离子单核能从 100 MeV 增加到 1.2 GeV 时, 前向屏蔽混凝土厚度增加了一倍.

(4) 因为在屏蔽计算中考虑了次级中子的角分布, 屏蔽厚度随着与入射束流夹角的增大而减小. 这样的屏蔽设置将大大节约加速器实验室的建造费用.

(5) 文中所列的屏蔽厚度是按入射离子单核能和束流强度严格计算的理论结果. 在实际情况中, 过厚的屏蔽受到许多条件的限制, 这时, 可以根据加速器实际可达到的粒子单核能、束流强度、用于设置屏蔽的空间和可用于建造屏蔽的经费等因素, 进行综合分析, 在确保安全的前提下, 选择适当的屏蔽厚度.

参 考 文 献

- [1] 李桂生等, 原子能科学技术, **25**(3)(1991)8.
- [2] 李桂生, 原子能科学技术, **26**(2)(1992)15.
- [3] 李桂生, 核技术, **15**(1992)13.
- [4] 李桂生, 核技术, **15**(1992)84.
- [5] Madey R *et al.*, *Phys. Rev.*, **C28**(1983)706.
- [6] Barbier M. M., SIS-ESR Shielding, Radioactivity and Decommissioning, GSI, 1984.
- [7] Littmark U., Ziegler J. F., *The Stopping and Ranges of Ions in Matter*, Vol. 6, *Handbook of Range Distributions for Energetic Ions in All Elements*, Pergamon Press, New York, 1980.

Theoretical Estimation of Shielding for Secondary Neutrons From High Energy Heavy Ion Accelerator

Li Guisheng

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

Received 31 August 1995

Abstract

The shielding for secondary neutrons has been estimated with the method presented by R. Madey *et al.* for the reactions of 0.6 and 1.2 GeV/u ¹²C-ion on thick Cu target. The concrete shielding thickness of forward and lateral direction are 9.8, 4.8m and 11.5, 6.9m respectively when beam current of 0.6 and 1.2 GeV/u ¹²C-ion are 1×10^{13} ions/s.

Key words high energy heavy ion, accelerator, secondary neutron, shielding.