

# 中能重离子物理实验小区的顶部屏蔽

李桂生

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 在考虑了中能重离子反应出射中子天空反射效应的基础上,以  $4 \times 10^{11}$  ions/s、100MeV/u  $^{12}\text{C} + \text{Cu}$  (厚靶) 反应为例,计算出重离子物理实验小区需设置的顶部屏蔽混凝土厚度  $d = 1.1\text{m}$ .

**关键词** 中能重离子反应 实验小区 天空反射 中子 顶部屏蔽

## 1 引言

当今,世界各先进的重离子物理实验室,为了适应各种物理实验的要求,其实验大厅内都配备若干个实验终端设备.为了提高加速器的利用效率,做到其中一个终端进行物理实验时,研究人员能够在另一个终端设备上进行实验准备.要保证各终端实验区有一个辐射安全的工作环境,实验大厅一般都用混凝土屏蔽墙分隔成若干个实验小区,可以独立开展实验工作.

早期,许多加速器实验厅只在实验装置的四周设置屏蔽墙.但是,很快就发现,这种无顶屏蔽或顶部屏蔽很薄的加速器,尽管有足够的侧墙屏蔽,但其周围的辐射水平仍然很高,以至于干扰了加速器的正常运行和实验工作.究其原因,归咎于辐射的天空反射效应,所以,后来建造的加速器,特别是高能、高强度加速器和加速器实验室的物理实验小区都设置了顶部屏蔽<sup>[1]</sup>.

众所周知,重离子加速器的辐射危害主要来自重离子反应出射的次级中子,中子剂量占总剂量的绝大部分.因此,考虑中子的天空反射效应,在重离子物理实验小区安装足够的顶部屏蔽是重离子加速器实验室辐射防护的重要内容.

在文献[2、3、4、5]中,曾以  $4 \times 10^{11}$  ion/s、100MeV/u  $^{12}\text{C} + \text{Cu}$  反应为例,对中能重离子反应的辐射屏蔽问题进行过较系统的研究.

现在,我们仍以该反应为例,来进行顶部屏蔽的计算.

## 2 顶部屏蔽的计算方法

在大量的中子天空散射理论和实验研究的基础上,文献[6]给出了计算5MeV点中子源实验室顶部屏蔽的计算公式,其中子透射系数由下式计算

$$\xi_{n,s}(\text{rem} \cdot \text{cm}^2) \leq 3.3 \times 10^{-3} \frac{H_{L,h} r_i^2}{\varphi_0 \Omega} \quad (\text{当 } r_s < 20\text{m}) \quad (1)$$

式中,  $H_{L,h}$  是参考点 Q 处的剂量当量率限值, mrem/h;  $r_i$  是辐射源到屋顶外表面上方 2m 处的距离, m;  $r_s$  是参考点到辐射源的水平距离, m;  $\varphi_0$  是距中子源 1m 处的中子注量率,  $\text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\Omega$  是辐射源对屋顶所张的立体角, sr.

在国际单位制(SI)中,若  $\xi_{n,s}$  用  $\text{Sv} \cdot \text{cm}^2$ ,  $H_{L,h}$  用  $\text{Sv/h}$  表示,则上式可改写为

$$\xi_{n,s}(\text{Sv} \cdot \text{cm}^2) \leq 3.3 \frac{H_{L,h} r_i^2}{\varphi_0 \Omega} \quad (\text{当 } r_s < 20\text{m}) \quad (2)$$

这个公式只给出了计算中子源实验室顶部屏蔽计算的一般方法.要解决中能重离子反应实验小区的顶部屏蔽计算,还需要结合中能重离子反应的次级中子分布特点,求解参数  $\varphi_0$ ,对此公式作具体应用,因为,中能重离子反应出射的次级中子具有复杂的能量分

布和角分布,而且随着入射离子能量的变化和不同的靶系统而变化.

### 3 中能重离子反应的次级中子分布

一般说来,中能重离子反应出射的次级中子能谱可粗略地分为三个能区.一个由蒸发裂变过程生成的低能区;一个最高能量可达入射离子单核能两倍的较高能量区和反映准自由过程和前平衡过程的中等能量区<sup>[7,8]</sup>.出射的次级中子呈前冲分布,特别是高能量中子,其前冲趋势更甚.

图1<sup>[2]</sup>和文献[9]表1给出了100 MeV/u <sup>12</sup>C+C 反应出射中子的能量和角度分布.我们也对50MeV/u <sup>12</sup>C 离子实验靶区的次级中子能量分布和角分布进行了实验测量,结果也显示出明显的前冲分布<sup>[8,10]</sup>.

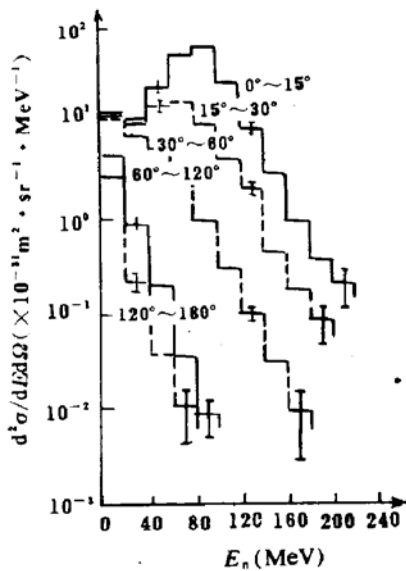


图1 100MeV/u <sup>12</sup>C 离子轰击 C 靶时的出射中子能谱和角分布

在一定条件下,出射中子的能量分布和角分布决定了参与天空反射中子的能量和中子数,也决定了顶部屏蔽的厚度.从表1可以看出,对100MeV/u <sup>12</sup>C+C 反应,在束流前向60°夹角内出射的中子约占出射总中子数的75%.因此,为了有效地减少参与天空反射的中子数,实验小区侧屏蔽墙的高度 H 不应低于  $L \tan 60^\circ + h$  (L 为靶点至屏蔽墙的距离;h 是

加速器束流管道中心距地面的距离),才能对 中子进行更有效的屏蔽,若侧屏蔽墙低于此值,就必须增加顶部屏蔽的厚度.

### 4 顶部屏蔽厚度的计算

#### 4.1 计算条件及参数选取

1) 加速器运行在最大辐射发射率状态下,即<sup>12</sup>C 离子能量为100MeV/u ;<sup>12</sup>C 离子束流强约  $4 \times 10^{11}$  ions/s;次级中子的总中子发射率为  $7.8 \times 10^{11}$  n/s<sup>[2]</sup>.

2) 封顶实验小区面积为  $5 \times 5$  m<sup>2</sup>.

3) 封顶实验小区侧屏蔽墙的高度 H = 4m.

4) 侧屏蔽墙足够厚,可以认为,封顶小区周围的辐射剂量主要来自向上方出射的中子经天空反射后产生.

5) 实验大厅内与封顶小区相邻实验区的剂量当量限值取  $2.5 \times 10^{-5}$  Sv/h.

#### 4.2 实验小区的几何布局

图2为实验小区的几何布局和天空反射示意图.在此限定条件下,靶点对实验小区屋顶的上张立体角  $\Omega = 2$ sr.

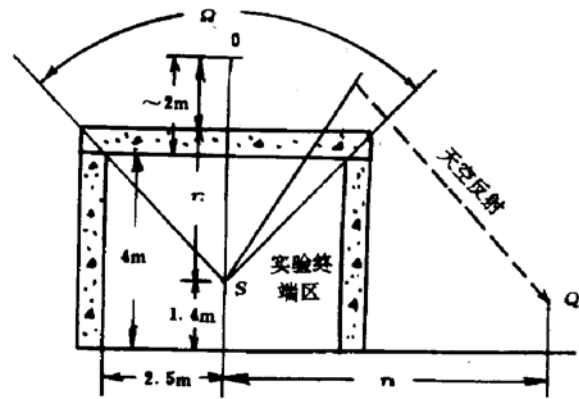


图2 实验小区的几何布局及天空反射示意图

#### 4.3 φ<sub>0</sub>的计算

根据理论分析,重离子反应出射次级中子的产额和分布主要决定于入射离子的能量,而与靶核的关系不是很大.在缺少 100MeV/u <sup>12</sup>C+Cu 反应实验数据的情况下,我们假定,该反应与100MeV/u <sup>12</sup>C+C 有近

似的出射中子分布. 在此假定下, 计算的次级 中子发射率和  $\phi_0$  列于表1.

表1 次级中子发射率和  $\phi_0$

小区尺寸	$\Omega(\text{sr.})$	中子能量间隔 (MeV)	中子发射率 ( $\times 10^{11}\text{n/s}$ )	$\phi_0$ ( $\times 10^7\text{m}^2\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$H=4\text{m}$ $S=5\times 5\text{m}^2$	2	0~20	2.330	0.6730
		20~40	0.878	0.2535
		40~60	0.519	0.1498
		60~80	0.272	0.0785
		80~100	0.089	0.0259
		总计	4.088	1.1807

将  $\Omega=2\text{sr}$ 、 $\phi_0=1.1807\times 10^7\text{m}^2\cdot\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$  代入(2)式, 得到  $\xi_{n,s}\leq 5.1\times 10^{-11}\text{Sv}\cdot\text{cm}^2$ .

重离子反应出射的次级中子有很复杂的能谱, 理论和实验结果指出, 次级中子的平均能量略低于入射离子单核能. 若取  $100\text{MeV}/u$   $^{12}\text{C}+\text{Cu}$  反应出射次级中子的平均能量  $E_n\approx 50\text{MeV}$ , 则从图3<sup>[6]</sup>可得到, 顶部屏蔽的混凝土厚度  $d=223\text{g}/\text{cm}^2$ , 其线性厚度为  $95\text{cm}$ .

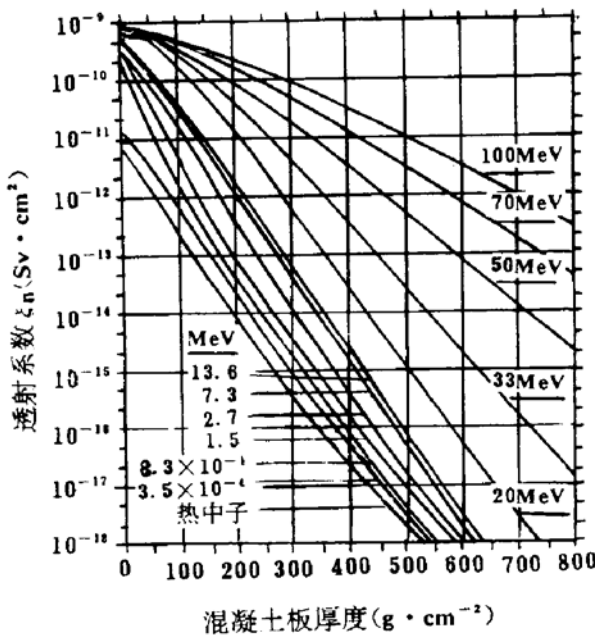


图3 单能中子穿过混凝土后的透射系数  $\xi_{n,s}$

### 5 结果讨论

1)任何加速器的屏蔽设置, 应该是加速器运行在最大的辐射发射率状态下所需的屏蔽. 如果加速器运行在较低的辐射发射率状

态下, 这种屏蔽设置是偏安全的.

2)本计算结果是只考虑了加速器产生的次级中子穿过顶部屏蔽并经由天空反射后对周围环境的影响而计算的顶部屏蔽厚度. 但实际情况比较复杂, 实验小区设置在实验大厅内, 小区顶部屏蔽上方约  $12\text{m}$  处是实验大厅的混凝土屏蔽顶, 考虑到大厅屋顶的反射, 可以在此计算结果的基础上, 适当增加一点屏蔽(例如, 增加一个平均能量中子的半减弱厚度约  $15\text{cm}$  混凝土).

3)本文计算的假定条件是侧墙屏蔽足够厚, 略去了直接透射中子的影响. 例如, 考虑到按剂量当量率限值  $2.5\times 10^{-5}\text{Sv/h}$  所计算的屏蔽设置侧墙屏蔽<sup>[1,4]</sup>, 则顶部和侧墙屏蔽均应各增加  $\sim 15\text{cm}$  的混凝土厚度, 顶部屏蔽总厚度  $d=95\text{cm}+15\text{cm}=1.1\text{m}$ .

4)若只有一个实验小区设置顶部屏蔽, 其屏蔽厚度就为  $1.1\text{m}$ ; 若相邻实验小区均设置顶部屏蔽, 那么, 各小区均设置  $55\text{cm}$  厚的混凝土顶部屏蔽就足够了.

5)(1)式是根据  $5\text{MeV}$  中子天空反射研究而得出的计算公式. 重离子反应出射的次级中子有大量  $E_n>5\text{MeV}$  的中子, 这时, 按此公式计算的屏蔽应是偏安全的.

6)若实验小区的侧墙屏蔽可设置的较高, 则立体角减小, 参与天空反射的中子数也减少, 顶部屏蔽的厚度可减少许多. 计算表明, 当  $H\approx 5.5\text{m}$  时, 几乎无需设置顶部屏蔽.

7)当各实验小区均按计算结果设置侧墙

屏蔽和顶部屏蔽后,实验大厅就无需很厚的屏蔽墙.这将大大节约用于屏蔽的经费开支.

### 参 考 文 献

- 1 Patterson H W, et al. Accelerator Health Physics, Academic Press, Inc., 1973
- 2 李桂生等.原子能科学技术,1991,25(3):8
- 3 李桂生.原子能科学技术,1992,26(2):15
- 4 李桂生.核技术,1992,15(1):13
- 5 李桂生.核技术,1992,15(2):84
- 6 NCRP Report 1977,51
- 7 Cecil R A, et al. Phys Rev., 1981,C24:2013
- 8 李桂生等.高能物理与核物理,1993,6:499
- 9 李桂生.核技术,1993,16(6):370
- 10 李桂生,王经等.核化学与放射化学,1993,15(4):1

## Overhead Shielding of Small Experimental Area for Intermediate Energy Heavy Ion Reaction

Li Guisheng

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

**Abstract** Based on considering the skyshine and the distribution of neutrons emitted from the reaction of  $100\text{MeV/u } ^{12}\text{C}+\text{Cu}$ , the concrete shielding thickness of overhead shielding of the small experimental area in the physical experimental hall is calculated, which would be about 1.1m.

**Key Words** intermediate energy heavy ion reaction small experimental area skyshine neutron overhead shielding

(上接第54页)

## Secondary Radiation and Skyshine from Heavy-ion Accelerators

Zhu Lianfang Su Youwu Chen Xuebing

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

**Abstract** Estimating methods and measuring results of maximum intensity of secondary radiation from heavy-ion accelerators are summarized. Estimating methods of skyshine dose distribution of secondary radiation from heavy-ion accelerators are given.

**Key Words** heavy-ion accelerators maximum intensity of secondary radiation skyshine