

# 串行加速器质谱计束流传输系统的设计特点

赵小风 章 晖

(中国科学院上海原子核研究所, 201800)

串行加速器用于测定<sup>10</sup>Be 为例, 阐述质谱计(AMS)束流传输系统的设计特点。实现了对高丰度稳定同位素强峰拖尾的有效抑制和束流“平顶传输”, 以及确定分析缝宽和解决加速电压的稳定。得到注入系统分析磁铁的质量分辨率  $R_{10^{-5}}$  为 66, 高能分析磁铁的质量分辨率  $R_{10^{-11}} \geq 176$ 。

**关键词** 束流传输设计 串行加速器质谱计

## 1 注入系统设计特点

AMS 设计的目标是要解决以下问题:

### 1.1 实现对高丰度稳定同位素强峰拖尾的有效抑制

以<sup>10</sup>Be 测量为例, 由于天然样品中<sup>10</sup>Be 对<sup>9</sup>Be(高丰度稳定同位素)的含量比为  $10^{-11} \sim 10^{-12}$  量级, 所以设计的第一个特点就是要在束流传输系统上设置若干台有明确分辨率指标的各类分析器(如动量分析器、速度分析器、能量分析器等), 以保证系统对<sup>9</sup>Be 等本底干扰抑制比达到同一量级。对注入系统而言, 由于从离子源引出的负离子中, 含有质量数  $M$  为 25 的<sup>9</sup>Be<sup>16</sup>O, 为 26 的<sup>10</sup>Be<sup>16</sup>O、<sup>9</sup>Be<sup>17</sup>O、<sup>9</sup>Be<sup>16</sup>OH 和为 27 的<sup>9</sup>Be<sup>18</sup>O, 其天然丰度比为:

$${}^9\text{Be}^{16}\text{O} : {}^9\text{Be}^{17}\text{O} : {}^9\text{Be}^{18}\text{O} = 99.762\% : 0.038\% : 0.2\%$$

(<sup>9</sup>Be<sup>16</sup>OH 的天然丰度低于<sup>9</sup>Be<sup>17</sup>O), 因此注入系统宜采用大曲率半径的 90°分析磁铁, 以抑制<sup>9</sup>Be<sup>16</sup>O 的强峰本底到不超过<sup>9</sup>Be<sup>17</sup>O 的水平, 即分析磁铁仅允许<sup>10</sup>Be<sup>16</sup>O<sup>-</sup>、<sup>9</sup>Be<sup>17</sup>O<sup>-</sup>、<sup>9</sup>Be<sup>16</sup>OH 通过其象缝, 而<sup>9</sup>Be<sup>16</sup>O<sup>-</sup>仅通过其  $10^{-5}$  峰高以下的强峰拖尾。如果质谱峰形为高斯分布, 则  $10^{-5}$  峰高全宽度为:

$$W(10^{-5}) = 1.82 \sqrt{N} W\left(\frac{1}{2}\right) \quad (1)$$

式中  $W\left(\frac{1}{2}\right)$  为半高峰全宽度。如果  $(M/\Delta M)_{1/2}$  表示一台磁分析器对两束强度相仿但质量差为  $\Delta M$  的半峰全宽度束的质量分辨率, 那么分辨两束强度相仿但干扰衰减  $N$  个量级时分析器应具有分辨率为:

$$(M/\Delta M)_{10^{-5}} = 1.82 \sqrt{N} (M/\Delta M)_{1/2} \quad (2)$$

注意, 在 AMS 的情况下, 不满足两束强度相仿的条件, 此时, 为达到本底束强峰拖尾有  $10^{-5}$  的

抑制比, 其分析器的质量分辨应为:

$$R_{10^{-5}} = (1.82 \sqrt{N}/2 + 0.5)(M/\Delta M)_{1/2} \quad (3)$$

所以在测<sup>10</sup>Be 时, 注入系统分析磁铁的质量分辨率为:

$$R_{10^{-5}} = (1.82 \sqrt{N}/2 + 0.5) \frac{26}{26-25} = 66$$

### 1.2 实现束流“平顶传输”

AMS 测量中的各种“分馏效应”, 包括束流传输过程中的传输分馏, 都要造成测量得到的同位素比值偏离实际值。为减小传输分馏, 就要保证束流传输线上各部件的束流接受度大于束流发射度, 即所谓实现“平顶传输”。多数串联加速器的束流接受度受气体剥离管道的限制。我所串联加速器气体剥离管道所允许通过的最大归一化发射度  $\epsilon_N$  为  $3\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad} \cdot \text{MeV}^{-1/2}$ , 而我们所研制的专用于 AMS 的溅射离子源, 其  $\epsilon_N = 10\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad} \cdot \text{MeV}^{-1/2}$ 。我们在注入系统中增设了光栏限束系统(双光栏或三光栏), 如图 1 所示。使进入低能分析磁铁的束流发射度限定在  $2.5\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad} \cdot \text{MeV}^{-1/2}$ 。经验表明, 使用这种光栏限束系统比通过降低离子源的引出流强来减小引出束发射度更为有利。

### 1.3 分析缝宽的确定和预加速电压的稳定

一台磁分析器的质量分辨率, 一般有两种定义, 如图 2(a) 和 (b) 所示, 前者能保证质量  $M$  和  $M + \Delta M$  的两束粒子不同时通过象缝  $S_2$ , 后者虽也能分辨  $M$  和  $M + \Delta M$  两束粒子, 但不利于通过调节分析磁铁激磁电流来确认强峰拖尾的抑制程度, 因而不适于 AMS 系统使用。在图 2(a) 的定义下, 分析磁铁质量分辨率计算公式<sup>[1]</sup>

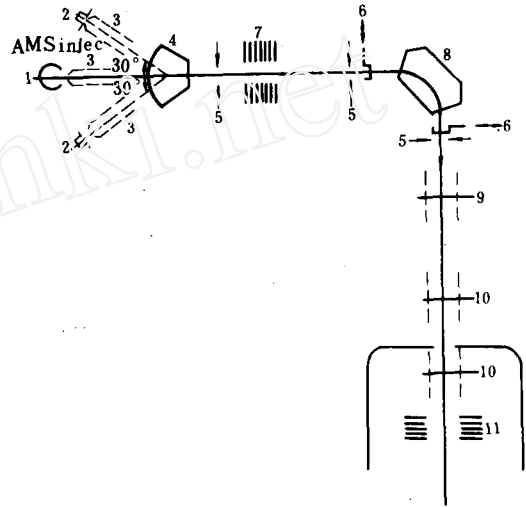


图 1 AMS 注入系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of AMS injection system

- 1—— 铯溅射离子源; 2—— 离子源; 3—— 引出透镜;
- 4—— 开关磁铁; 5—— 限束光栏; 6—— 法拉第筒; 7—— 预加速管; 8—— 90°偏转磁铁; 9—— 匹配透镜 I; 10—— 匹配透镜 II; 11—— 低能加速管。

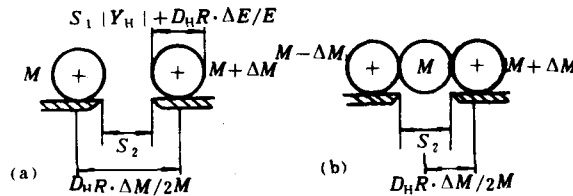


图 2 分析磁铁质量分辨率定义示意图

Fig. 2 Definition of resolving power for magnet

为:

$$(M/\Delta M)_{1/2} = D_H R / \{ \lceil |Y_H| S_1 + D_H R \cdot \Delta E/E \rceil \} \quad (4)$$

式中:  $D_H$ 、 $|Y_H|$  和  $R$  分别是分析磁铁色散系数、水平放大率和偏转半径;  $S_1$  是物缝全宽;  $\Delta E/E$  是被分析束的能散。从式(4)可见:一台分析磁铁所可能达到的质量分辨率直接受被分析束能散的影响。能散大,分辨率就变小,因为能散增大了束的象宽。为了限制束能散对系统质量分辨的影响,在 AMS 系统中一般要求  $\Delta E/E \leq 10^{-3}$ , 这样,注入系统预加速管的端电压稳定度必须优于  $10^{-3}$ 。

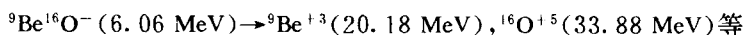
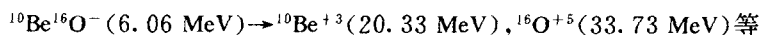
一台分析器的结构一旦确定,式(4)中的  $D_H$ 、 $R$ 、 $|Y_H|$  也就确定了。为保证低能磁分析器有好于 66 的质量分辨率,唯一可调整的参数是物缝宽  $S_1$ 。在  $R = 40$  cm、入射和出射角均为  $27.55^\circ$ 、物距  $l_1 = 946$  mm、 $\Delta E/E = 10^{-3}$  时,要求  $S_1 \leq 5.1$  mm。

#### 1.4 尽可能保留原有的部件布局并兼顾加速器的核物理实验运行状态

我所串列加速器主要供核物理实验用。为方便交替使用 2 个离子源,原设计采用双  $30^\circ$  开关磁铁分别将离子源的引出束流引入注入光路。由于 AMS 系统必须设置质量分辨率好于 66 的磁分析器,同时为减小分偏效应,要保证质量不同的粒子在进入低能磁分析器前有相同的轨道,这样就不能采用原有的  $30^\circ$  开关磁铁引入束流。为兼顾加速器的实验核物理运行状态,并尽可能保留原有的部件布局,我们为 AMS 专设  $0^\circ$  直通管道,作为溅射源离子束的引入段,同时利用原有的可变光栏作为双光栏限束系统的入口光栏,其出口光栏位于原有的泵上四象限光栏管道上的预留孔,并把出口光栏( $\phi 4$ )兼作了低能磁分析器的“物缝”。磁分析器工作于对称双成腰状态,这时整个注入光路的各部件,除象缝仪和匹配透镜 1 的位置有所前移外,均保留了原有布局,并达成了对低能加速管的有效光学匹配(仍然在气体剥离管道居中位置形成束双腰)。

## 2 高能传输系统的设计特点

把出高能加速管后的束流传输称高能传输系统。其设计的中心问题是如何进一步有效地抑制各种本底粒子对测定  $^{10}\text{Be}$  的干扰。我们可以把所有的本底粒子分为正常和非正常加速粒子两类。造成有这两类本底粒子的原因是:注入系统中的分子态负离子,如  $^{10}\text{Be}^{16}\text{O}^-$ 、 $^9\text{Be}^{16}\text{O}^-$  和  $^9\text{Be}^{17}\text{O}^-$  等,经过低能加速管加速后进入气体剥离管道,并被碎裂剥离成多种原子态离子,如  $^{10}\text{Be}^{3+}$ 、 $^9\text{Be}^{3+}$ 、 $^{16}\text{O}^{5+}$  和  $^{17}\text{O}^{5+}$  等,然后再进入高能加速管继续加速到最终能量。其间少数原子态离子将经受与剩余气体的碰撞、粒子间的散射、电荷态交换等干扰正常加速的过程,成为所谓“非正常加速粒子”,它们的最终能量或电荷态不同于正常加速粒子,例如,当串列加速器的端电压为 6 MV,注入电压为 60 kV 时,由  $^{10}\text{Be}^{16}\text{O}^-$  等得到的正常加速原子态离子为:



$^9\text{Be}^{17}\text{O}^- (6.06 \text{ MeV}) \rightarrow ^9\text{Be}^{+3} (20.10 \text{ MeV}), ^{17}\text{O}^{+5} (33.96 \text{ MeV})$  等这些由正常加速过程得到的原子离子,其动量值都不同(见表 1 中  $EM/q^2$  项),可以用一台质量分辨率足够高的磁分析器来分辨它们,其分辨率大小由动量值最靠近  $^{10}\text{Be}^{3+}$  的  $^{17}\text{O}^{5+}$  及其强峰拖尾的抑制比要求来确定。由于在注入系统设计中,  $^9\text{Be}^{17}\text{O}^-$  是与  $^{10}\text{Be}^{16}\text{O}^-$  一起通过低能分析磁铁象缝的,没有受到任何抑制本底干扰的处理,所以在高能传输系统对  $^{17}\text{O}^{5+}$  强峰拖尾的抑制比应达到  $10^{-11}$ 。由式(3)可得高能分析磁铁的质量分辨率应为:

$$R_{10^{-11}} \geq \left( \frac{1.82 \sqrt{11}}{2} + 0.5 \right) \frac{10/3}{17/5 - 10/3} = 176$$

表1 待分辨的典型粒子参数(端电压 6 MV)

Table 1 Typical parameters of particles to be resolved

参数	正常加速粒子				非正常加速粒子			
	$^{10}\text{Be}^{+3}$	$^{17}\text{O}^{+5}$	$^{16}\text{O}^{+5}$	$^9\text{Be}^{+3}$	$^9\text{Be}^{+3}$	$^{16}\text{O}^{+5}$	$^{17}\text{O}^{+5}$	$^{16}\text{O}^{+4}$
$E/\text{MeV}$	20.33	33.96	33.88	20.18	22.59	35.30	33.22	22.59
$E/q$	6.777	6.792	6.776	6.727	7.530	7.060	6.644	5.647
$M/q$	3.333	3.400	3.200	3.000	3.000	3.200	3.400	4.000
$EM/q^2$	22.59	23.09	21.68	20.18	22.59	22.59	22.59	22.59
$E/M$	2.033	1.998	2.118	2.242	2.510	2.206	1.954	1.412

对于那些由于碰撞、散射、电荷态交换等过程造成的非正常加速本底粒子, 其中有一部分的动量值( $EM/q^2$ )可以与正常加速得到的待测粒子 $^{10}\text{Be}^{+3}$  (20.33 MeV)完全相同或十分接近, 如表1中所列的 $^9\text{Be}^{+3}$  (22.59 MeV),  $^{17}\text{O}^{+5}$  (33.22 MeV)和 $^{16}\text{O}^{+5}$  (35.20 MeV), 它们的 $EM/q^2$ 均为22.59, 这样就无法用高能分析磁铁把它们剔除掉(图3)。由于进入高能束流传输系统的 $^9\text{Be}^{+3}$ 、 $^{17}\text{O}^{+5}$ 、 $^{16}\text{O}^{+5}$ 等本底粒子的数量大约是 $^{10}\text{Be}^{+3}$ 的 $10^{11}$ 倍, 所以即使形成这类非正常加速粒子的几率非常小, 例如 $10^{-8}$ , 那么它们的强度也将是 $^{10}\text{Be}^{+3}$ 的 $10^3$ 倍, 显然必须设法剔除这部分非正常加速粒子对测定 $^{10}\text{Be}$ 的干扰。如果速度分析器(交叉场

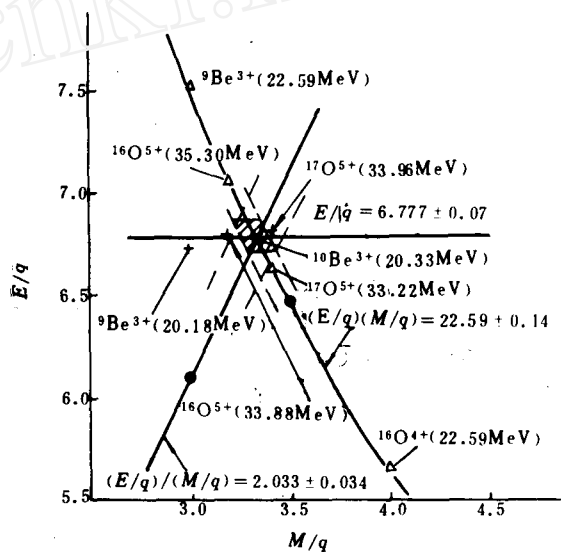


图3 联合分析器原理示意图

Fig. 3 Principal scheme of combination analysers

分析器, 其 $(E/q) \div (M/q)$ 为常数)、能量分析器(静电分析器,  $E/q$ 为常数)和高能磁分析器组合起来使用, 如我所的AMS高能传输系统(图4)那样, 在高速分析磁铁前设置一台交叉场分析器, 其分析缝就是高速分析磁铁物缝; 在分析磁铁后设置一台 $10^\circ$ 静电分析器, 这样就能有效地抑制非正常加速粒子, 确保AMS对 $^{10}\text{Be}$ 的高精度测定, 其原理如图3所示。速度分析器的分辨率大小由 $(E/q)/(M/q)$ 值最靠近 $^{10}\text{Be}^{+3}$  (20.33 MeV)的非正常加速粒子 $^{17}\text{O}^{+5}$  (33.22 MeV)来确定, 同时要求其强度衰减3—4个量级。由式(3)有

$$R_{10^{-4}} = (1.82 \sqrt{4/2 + 0.5}) \frac{2.033}{2.033 - 1.954} = 60$$

静电分析器的分辨率大小应当与速度分析器、动量分析器相近。当然, 在不损失待测粒子 $^{10}\text{Be}$ 的条件下, 总希望选取较大的分辨率。图3的阴影部分表示当静电分析器的分辨率为100时, 我所AMS系统测量 $^{10}\text{Be}$ 粒子时的 $E/q, M/q$ 值接受区, 它反映了从束流传输设计角度看, 测量 $^{10}\text{Be}$ 粒子可达到的精度。

高能分析磁铁工作于 $90^\circ$ 对称双聚焦状态, 其 $R = 120 \text{ cm}$ ,  $D_H = 4$ ,  $|Y_H| = 1$ , 在保证串列加速器端电压稳定度优于 $10^{-4}$ 条件下, 为达到176的质量分辨率, 要求物缝宽 $S_1 \leq 6.3 \text{ mm}$ , 如果

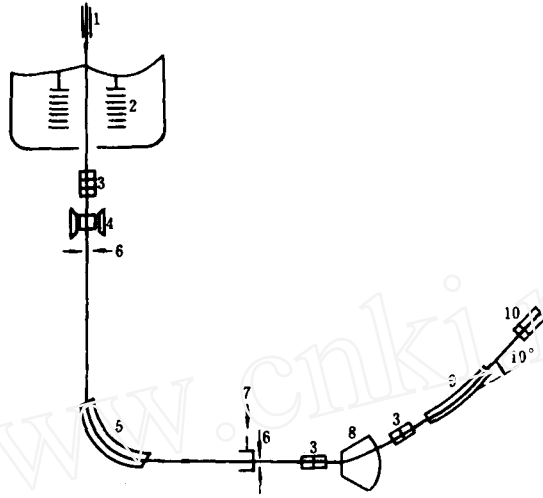


图4 高能段束流运输示意图

Fig. 4 Schematic diagram of high energy beam transport

- 1——气体剥离管;2——高能加速管;3——两组合或三组合四级透镜;4—— $\vec{E} \times \vec{B}$ 速度选择器;  
5——高能分析磁铁;6——物缝或象缝;7——法拉第筒;8——开关磁铁;9—— $10^\circ$ 静电分析器;  
10—— $\Delta E$ - $E$ 粒子鉴别器。

端电压稳定度仅在  $10^{-3}$ , 则  $S_1 \leq 2 \text{ mm}$ 。可见, AMS 对串列加速器端电压稳定度有严格要求。象缝宽的要求是:  $S_2 = S_1 + 4800 \text{ mm} \times \frac{\Delta E}{E}$ 。

关于整个束流传输系统的束流光学匹配计算以及束流诊断部件的配置, 类似于一般传输系统的处理方法, 只是在不同同位素的共同通道上使用磁四极透镜和磁导向器应十分谨慎, 本文不予赘述。

### 参 考 文 献

- 1 Wollnik H. Focusing of Charged Particles. New York: Academic press, 1967.

## THE DESIGN OF SOME BEAM TRANSPORT ELEMENTS FOR TANDEM AMS

ZHAO XIAOFENG ZHANG HUI

(Shanghai Institute of Nuclear Research, 201800)

### ABSTRACT

Taking measurement of  $^{10}\text{Be}$  as an example, the main design features of beam transport system of SINR tandem AMS are presented.

**Key words** Beam transport design Tandem AMS