

## 超灵敏小型回旋加速器质谱计 注入系统优化设计

刘永好

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

**摘要** 指出了 SMCAMS 原注入系统的问题, 提出了优化设计方案的计算结果, 在加速器和注入器之间增设了一块分析磁铁。

**关键词** 优化设计

**中图分类号** TL 542

A

SMCAMS 与串列 AMS 在  $^{14}\text{C}$  分析方法上存在本质的差别<sup>[1, 2]</sup>。前者不需要串列 AMS 通常使用的剥离箔 (或剥离气体) 以及高能边一系列的分析设备, 而是利用了回旋加速器本身具有的电磁共振特性选择被分析粒子, 即通过回旋加速器本身的分辨率来甄别干扰分子离子。为达到需要的质量分辨率, 低能的  $^{14}\text{C}$  负离子在加速器回旋 100 多圈, 回旋路径总长度超过 200m, 最后约 50keV 的  $^{14}\text{C}$  负离子直接从加速器中引出测量。然而所有这些原理上的差别也使这两种加速器质谱计的束流光学特性大不相同。例如, 总的来说, SMCAMS 从离子源到探测器的总束流传输效率比串列 AMS 要低, 当离子源束流为 50 $\mu\text{A}$ , 我们获得现代中国糖碳样品的  $^{14}\text{C}$  计数率最大是 25Counts/s, 如果离子源束流有 50% 的负离子属于碳原子离子  $\text{C}^-$ , 那么每秒将有近 150 个  $^{14}\text{C}^-$  负离子产生, 因而  $^{14}\text{C}$  的总传输效率为 16.7%, 而一般的串列 AMS 是这个数值的 3 倍以上。这不仅因为在回旋加速器中, 至少有 50% 的粒子位于高频减速相位而不能得到加速外, 也与加速器本身有限的接受度有关, 尽管设计时采取了许多特殊的技术措施, 大大提高了加速器的接受度; 同时低能负离子在加速器剩余真空中大的损失截面也影响了加速器的传输效率。然而, 更为重要的是, 由于以上的原因, 加上在回旋加速器上固有的束流注入、引出的困难, 使得在回旋加速器上获得所谓“平顶传输”的束流光学特性要比串列加速器困难得多。实验表明, 样品同位素比测量的重复性和稳定性对系统的参数很敏感。因此, 系统良好的束流光学特性是 AMS 分析成功的关键, 也是最需要花费精力的工作。尤其是注入系统和引出系统与加速器的匹配是两个最重要的环节, 而目前的注入系统的弊端已在过去几年的运行中日益暴露出来。

### 1 现有注入系统的主要缺点

现有注入系统的最大缺点是像放大因子过大, 从离子源到垂直偏转板入口处的像放大因子大于 5, 使得样品之间同位素比值的重复性严重依赖于转换样品时的样品定位精度。虽

然目前通过采取特殊的措施,样品定位精度得以大幅度提高,使样品之间同位素比值的重复性明显改善,然而注入系统的像放大问题并未从根本上得以解决。同时,由于注入系统三膜片透镜后漂移段过长,空间电荷效应严重,束腰过大的束流包络在通过2副注入偏转板时,不仅会造成束流的损失,导致注入效率下降,而且极易造成同位素分馏的波动,影响测量的精度。

## 2 缺少预分析磁铁带来的问题

由于经费不足的原因,注入系统的预分析磁铁从原始的方案中删去。这样,交替加速测量时,所有的粒子都同时注入到加速器中。这不仅带来测量各同位素粒子内束的困难(此时,除了 $^{12}\text{C}^-$ 束流外,在加速器中,很难不受同时注入的其它粒子的影响单独测量某种束流,例如 $^{13}\text{C}^-$ 束流),而且不能测量其它束流在加速器各段的传输效率,还同时带来以下的问题。

### 2.1 X射线本底

由于在加速 $^{14}\text{C}$ 时,所有不需要的粒子和 $^{14}\text{C}$ 一起同时注入到加速器中。尤其是 $^{12}\text{C}^-$ 和 $\text{C}_2^-$ ,同时注入到加速器中的束流达到几十 $\mu\text{A}$ ,从而在加速器中引发了强的X射线。虽然目前探测器被抬高到加速器中心平面以上而使正常的本底水平只有0.04/s,但X射线并未从根本上消除。在注入系统添加预分析磁铁,可以在加速 $^{14}\text{C}$ 时使束流很强的 $^{12}\text{C}$ 和 $\text{C}_2$ 偏离,进入加速器的不需要的束流大大减少,从根本上消除X射线。

### 2.2 同时注入带来加速器室真空度的下降

SMCAMS对现代中国糖碳样品的 $^{14}\text{C}$ 计数率达到25Counts/s,更高的 $^{14}\text{C}$ 计数率不仅可以扩展 $^{14}\text{C}$ 断代的年代范围(可以断代更老的样品),同时可以提高 $^{14}\text{C}$ 计数的统计精度和分析样品的速度。

$^{14}\text{C}$ 计数率的提高依靠系统良好的传输效率。由于被加速的粒子“低能”、“负”和“重”的特点,粒子在加速器中的回旋路径超过200m,所以粒子在加速器剩余真空中的损失截面很大,良好的传输效率对加速器的真空条件要求很高。当50 $\mu\text{A}$ 的离子源束流注入到加速器中时,由加速室旁别的真空规可以观察到真空度有 $10^{-7}\text{Pa}$ 的下降。真空度下降是由于同时注入的不需要粒子的束流轰击加速器室壁和高压电极造成局部放气引起的。而且由于真空规离加速器中心区较远,所以以上的真空下降值比加速区实际的真空下降低得多。而这些问题在采用了预分析磁铁后将不再存在,因为相对较强的束流不会进入加速器。

## 3 注入系统优化方案

为了减小注入系统的像放大作用,必须对原注入系统进行优化;增加预分析磁铁采用单一注入的方案有助于减轻空间电荷效应对测量精度的影响,同时单一注入还使得同时测量成为可能,并有利于加速器室真空度的提高,解决局部真空问题和彻底消除X射线本底。

### 3.1 磁铁半径的选择

为了在预分析磁铁注入 $^{14}\text{C}$ 时同时测量 $^{12}\text{C}$ 甚至 $^{13}\text{C}$ ,分析磁铁应具有一定的色散宽度,

我们定义磁铁的色散宽度为<sup>[3]</sup>

$$D_m = 0.5 \times \frac{dm}{m} \times \{R(1 - \cos \phi) + l_2 [\sin \phi + (1 - \cos \phi) \cdot \tan \beta]\} \quad (1)$$

式中,  $R$  为磁铁半径,  $\phi$  为磁铁张角,  $l_2$  为束流测量装置离磁铁出口边界的距离,  $\beta$  为边缘角。色散宽度不仅与磁铁半径和张角有关, 还与法拉第筒离磁铁边界的距离有关。我们需要磁铁在注入  $^{14}\text{C}$  时对  $^{12}\text{C}$ 、 $^{13}\text{C}$  分别有 4cm 和 2cm 的色散宽度(如图 1), 对于半径为 300mm 和 100mm 的  $90^\circ$  分析磁铁,  $^{12}\text{C}$  相对  $^{14}\text{C}$  色散宽度为 4cm, 需要的  $l_2$  分别为 180mm 和 300mm。而且, 我们希望磁铁是双聚焦的, 计算时发现, 用半径较小的双聚焦磁铁很难实现三膜片透镜与两副注入偏转板的匹配, 远离磁铁的双聚焦条件。使用  $R = 300\text{mm}$  的双聚焦磁铁不仅可以实现匹配, 而且磁铁的添加几乎不增加原注入系统的长度。

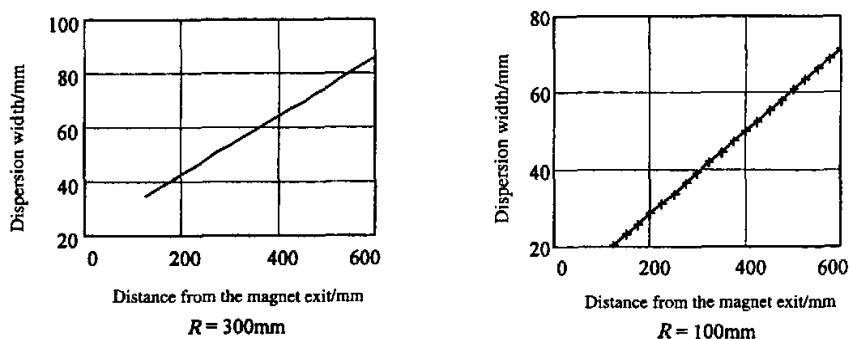


图 1  $^{12}\text{C}$  相对  $^{14}\text{C}$  的色散宽度与束流测量装置离磁铁出口边界距离的关系曲线

90 度分析磁铁的半径分别为(左)  $R=300\text{mm}$ ; (右)  $R=100\text{mm}$

Fig.1 The relative dispersion between  $^{12}\text{C}$  and  $^{14}\text{C}$  vs beam measuring device distance away from the magnet output  
the radius of the analysing magnet (left)  $R=300\text{mm}$ , (right)  $R=100\text{mm}$

### 3.2 优化计算

优化方案中保留了三膜片透镜, 以提供被加速离子初始能量, 为了匹配三膜片透镜和  $R=300\text{mm}$  双聚焦磁铁, 并考虑到相对较强的离子源束流, 在三膜片透镜和预分析磁铁之间增加了一组三单元静电四极透镜, 和预分析磁铁一起优化计算, 实现对束流的双聚焦。

在使用 GIOSP<sup>[4]</sup> 优化计算中, 浸没透镜和单透镜计算到一阶, 而其余的四级透镜、磁铁和注入偏转板均计算到二阶, 并考虑  $50\mu\text{A}$  离子源束流的空间电荷效应。考虑到低能负重离子, 我们采用 Laminar 模型<sup>[5]</sup>。透镜的聚焦变量设置为可变量, 四极透镜的长度、孔径、电压以及四极透镜前后的漂移距离也设置成可变量, 磁铁与垂直偏转板之间保持一定的距离, 以安装测量  $^{12}\text{C}$  和  $^{13}\text{C}$  束流的法拉第筒。束流在垂直偏转板入口处双向成像作为优化条件。

计算时束流发射度取  $40\text{mm} \cdot \text{mrad}$ , 特征长度取  $1.5\text{cm}$ , 磁铁边缘角为用使用最广的

26.565°。优化计算所得的四极透镜和磁铁参数如下所示：

|                  | 三单元四极透镜    The triplet and magonetic |       |      | 磁铁    Magnet       |        |
|------------------|--------------------------------------|-------|------|--------------------|--------|
|                  | 第一单元                                 | 第二单元  | 第三单元 | 边缘角 / (°)          | 26,565 |
| 长度 $L/\text{mm}$ | 32                                   | 64    | 32   | $\beta / (^\circ)$ | 26,565 |
| 电压 $V/\text{kV}$ | 3.84                                 | -2.11 | 3.84 | 偏转角 / (°)          | 90     |
| 孔径 $r/\text{cm}$ | 5                                    | 5     | 5    | 磁铁间隙 / mm          | 50     |
| 间距 $d/\text{cm}$ | 4.5                                  |       |      |                    |        |

图2 束流包络。图3 给出了水平偏转板出口束流在  $X$  和  $Y$  方向的发射度图形以及束斑形状。

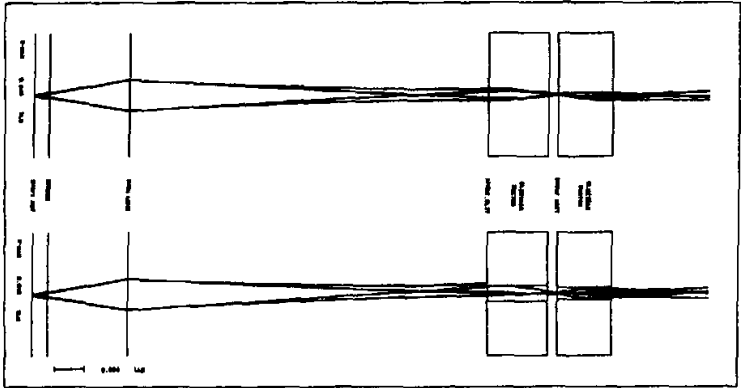


图2 样品偏离注入系统轴线 0.5mm 时的束流包络

Fig.2 The beam envelope in the optimized injection system with analysing magnet

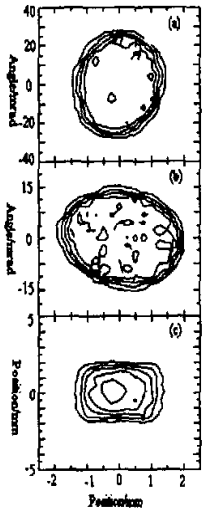


图3 注入系统加预分析磁铁后水平偏转板出口  $(X, A)$ 、 $(Y, B)$  相空间的发射度图形和束斑形状  
(a) 和 (b) 分别为  $(X, A)$  和  $(Y, B)$  相空间的发射度图形, (c) 为束流截面形状

Fig.3 The emittance and beam spot at the output of the horizontal deflector in the optimized injector with an analysing magnet: (a) emittance for  $(X, A)$ ; (b) emittance for  $(Y, B)$ ; (c) for beam spot

以上添加预分析磁铁的方案将使注入系统成为水平的,这使得目前的垂直多样品装置可以改成水平的。这不仅有可能解决垂直多样品装置机械稳定性差的问题,而且将大大简化离子源的换靶操作,从而提高样品的定位精度。由于垂直注入偏转板入口处两个方向成像的特征,因此磁铁的取向可以随意安排,垂直注入偏转板以前的注入通道可以水平架设在实验室内的任意方向。

### 参 考 文 献

- 1 CHEN Maobai, LU Deming, XU Senlin, *et al.* Nucl Instr Meth, 1994, B32: 213-216
- 2 CHEN Maobai, LI Deming, Xu Senlin *et al.* Proceedings of the 14th International Conference on Cyclotron 1995. 107
- 3 离子注入机基础. 北京:北京出版社, 1981. 184  
Foundation of ion implantation apparatus. Beijing' Beijing Press, 1981. 184
- 4 A program for the design of "general ion optical system on PC's", Andreas Przewloka, Oberlinweg 39, WD-6300 GIESSEN, West Germany, 1992
- 5 Martin Reiser. Theory and design of charged particle beams, AWiley-Interscience Publication, 1994. 189

## Optimum design of the SMCAMS injection system

LIU Yonghao

(Shanghai Institute of Nuclear Research, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

### Abstract

The problems of the original SMCAMS injection system is pointed, and an optimum design containing an analysing magnet between the injector and mini-cyclotron is calculated.

**Key words** Optimum design

CLC TL 542