

北京大学加速器质谱计注入系统*

郭之虞 严声清 肖敏 张征芳 杨凤铃 陈佳洱

(北京大学重离子物理研究所, 100871)

刘克新 鲁向阳 李斌 钱伟述 袁敬琳 李坤

(北京大学技术物理系, 100871)

北京大学加速器质谱计的注入系统采用快交替注入技术, 注入磁铁分辨率高、强峰拖尾抑制能力强。为提高传输效率、减小分馏效应, 在束线设计中采取一系列措施, 充分考虑 AMS 的特殊要求。文章给出该注入系统的物理设计与调试测量结果。

关键词 加速器质谱计 注入系统 快交替注入 强峰拖尾抑制 平顶传输 传输效率

近十几年来加速器质谱计(AMS)技术发展很快^[1], 并在地质、海洋、水文、考古、环境科学与生物医学等多种学科中得到了日益广泛的应用^[2]。北京大学加速器质谱计(PKUAMS)于 1988 年开始设计建造, 1992 年建成投入运行, 并已于 1993 年 4 月通过验收及鉴定。本文介绍该装置的注入系统。与一般加速器相比而言, AMS 对注入系统有许多特殊要求: 1) 需要实现 2 种以上同位素的交替注入或同时注入。AMS 要测量样品中的同位素比值, 如¹⁴C/¹²C。为克服分馏效应, 需将各同位素以一定方式注入加速器, 并在加速后分别测量。目前所采用的方法有快交替注入、慢交替注入与同时注入等。2) 有足够的强峰拖尾抑制能力。AMS 所分析的主束(如¹⁴C)流强很弱, 而高丰度同位素(如¹²C)流强很强。主束实际上被湮没在高丰度同位素的强峰拖尾之中。由于溅射离子源引出束流的能谱在高能一侧有正比于 $1/E^2$ 的拖尾^[3], 注入磁铁要有较高的分辨率才能有效地抑制强峰拖尾。3) 具有平顶传输特性。AMS 要求束流输运过程中尽可能实现“平顶传输”, 即各束流元件的调节特性曲线有较宽的平顶部分。其主要目的是为了减少传输中引入的分馏效应。这实际上是要求各束流元件的接收度与束流的发射度相比有一定的余量。4) 可监测高丰度同位素束流。AMS 通常在注入磁铁后主束线旁侧设置一法拉第杯, 用在被测束通过像缝的同时, 监测偏离主束线的高丰度的同位素束流。该法拉第杯的输出可作为计算系统传输效率的依据。此外, 为了在 AMS 的探测器中得到尽可能高的计数率, 还要求注入系统有较高的传输效率。AMS 发展的历史表明, 注入系统的性能对于减小本底、提高效率、保障精度是十分重要的。一般用于核物理实验的加速器注入系统往往不能

* 国家自然科学基金资助的重大项目

收稿日期: 1993-08-11 收到修改稿日期: 1993-12-07

很好地满足 AMS 的需要。在 PKUAMS 注入系统的设计过程中,上述各点得以充分地考虑。

1 物理设计

在 AMS 注入系统的物理设计中,首先要解决的问题是同位素注入方式的确定与注入磁铁主要参数的选取。这是束线设计的基础。当然,在实际设计注入系统时,还要考虑与离子源和加速器的匹配以及可用几何空间的限制。

1.1 快交替注入

由于同时注入与慢交替注入的束载效应都较大,而 PKUAMS 所使用的 EN 型串列静电加速器束载能力较弱,故选用快交替注入方式。快交替注入除了具有束载效应小的优点外,还可在一定程度上补偿系统短时间波动(如离子源打火)的影响。为实现快交替注入,在注入磁铁物腰与像腰处须设置间隙透镜,并将两间隙透镜之间的束流管线(包括注入磁铁真空盒)对磁铁与支架加以绝缘,其上电位由高压脉冲电源加以调制,以使不同质量的各种同位素负离子可以顺序地交替注入到加速器中去。关于快交替注入系统的描述与参数的选择请参见文献[4]。

1.2 注入磁铁

为实现平顶传输,AMS 注入磁铁在运行时一般都应将物缝与像缝完全打开。但为了有效地抑制强峰拖尾,注入磁铁的分辨率又需足够高。这就要求注入磁铁有相当大的色散系数。大色散对于安装同位素监测法拉第杯也是有益的。因此,AMS 的注入磁铁通常都采用大半径 90° 双聚焦磁铁。本设计中注入磁铁的曲率半径为 400 mm,质量分辨率可达 $M/\Delta M = 200$ 。为实现平顶传输,采用了较大的磁极间隙 $g = 50$ mm。为便于监测高丰度同位素,避免非均匀场对其的散焦作用,磁极面被加宽到 180 mm。此外,为减小二级象差,改善束流品质以利于束流的后继传输,该磁铁的磁极出入口采用了曲线边界。

1.3 束线的总体布置

北京大学加速器质谱计注入系统的束线布置示于图 1。其中,双 30° 注入磁铁及其后的束线,包括预加速管、入口匹配透镜等,为 EN 加速器原有的注入系统。AMS 专用注入系统从该磁铁 0° 线注入。在 AMS 90° 注入磁铁的物腰与像腰处设置了间隙透镜。其作用一是实现交替注入所需的能量调变,二是利用间隙透镜的光学呆滞性,保持交替过程中束流腰位的稳定。因此,这里不能采用虚物腰方案。在离子源后设置了一个单透镜,以在间隙透镜处形成实的物腰。在离子源后还设置了一个可调光阑,其作用是限制束流的发射度、消除束晕。这对于其后的束流部件实现平顶传输很有益处。此措施不但可以提高传输效率,而且更重要的是可以有效地减小传输中的分馏效应^[5]。由于几何空间的限制及准直的需要, 90° 磁铁与双 30° 磁铁的距离不能小于 4.5 m。为限制束包络并便于安排束测部件,在 2 台磁铁之间设置了 2 个单透镜。

在确定束线的总体布置时,对于束测与束控的需要给予了充分的考虑。 90° 注入磁铁设置了物缝与像缝。法拉第杯 FC1 与 FC2 分别用来测量离子源引出的总束流与分析束,FCM 则用在注入被测核素时监测其高丰度同位素。在单透镜 EL1 之后的腰位附近设置了剖面仪与发射度测量仪。剖面仪对于磁铁的双聚焦调节是十分有用的。在注入磁铁前后还分别设置了 2 对 X-Y 双导向器。这样就为束线调试提供了较为齐全的手段。

1.4 注入系统的束流光学设计

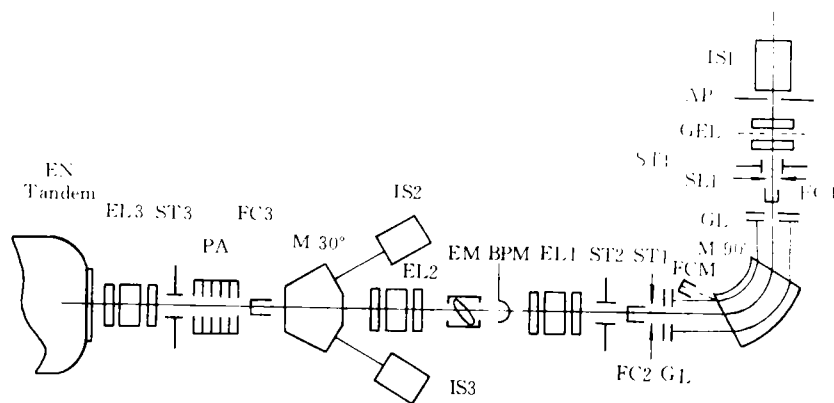


图 1 AMS 专用注入系统

Fig. 1 Dedicated AMS injection system

IS——离子源; AP——限束光栏; GEL——栅网透镜; SL——缝; FC——法拉第杯; GL——间隙透镜; M——磁铁; EL——单透镜; EM——相图仪; BPM——束流剖面仪; PA——预加速管。

注入磁铁的光学设计是用 TRANSPORT 程序进行的。该程序可计入磁极间隙与曲线边界的影响,并给出二级象差系数。注入系统全束线的束流光学设计则是用 OPTRYK 程序^[6]进行的。图 2 示出了束流包络的计算结果。束流光学设计中的一个重要问题是束腰特征长度的选取,特别是注入磁铁的物腰与像腰。特征长度小有利于提高磁铁的分辨率,但束流的最大包络将增加,不利于平顶传输。实际选取时须予以折衷。离子源到注入磁铁一段几何空间有较大限制,束线必须尽量短。但这一段上安排了较多的束流部件,还有离子源出口真空插板阀和分子泵真空机组及抽气管道,此外还须考虑电源与电控元件所需占用的空间。本工作中的束流光学设计方案中,对以上诸因素均给予了充分的考虑。设计中还考虑了离子源参数与发射度变化的影响及对电源稳定度的要求。

1.5 束流部件的物理设计

本注入系统中共使用了 4 个单透镜。一般说来,多个单透镜的重复使用容易引起束流发射度相图的严重纤维化,导致有效相面积扩张。为了改善束流品质,减小各个透镜特别是第一个透镜的球差是十分重要的。因此,第一个透镜选用了栅网透镜。栅网透镜具有象差小、几何长度短的优点,用在此处还可以缓解几何空间紧张的矛盾。对于 EL1 与 EL2 两台单透镜,则采取了将其孔径加大到 100 mm 的措施,以便其中的束包络可基本满足傍轴条件,从而达到减小球差的目的。

为节省空间,束流导向器装在一个束流部件壳体内。物缝与像缝均采用 4 爪独立可调的绝缘缝板结构,以便保证调节的灵活性并可监测缝电流。

2 系统性能

专用注入系统建成后,对其性能进行了较为系统的实验测量。结果表明,该注入系统的性能已完全达到了设计指标,能够满足 AMS 的特殊需要。

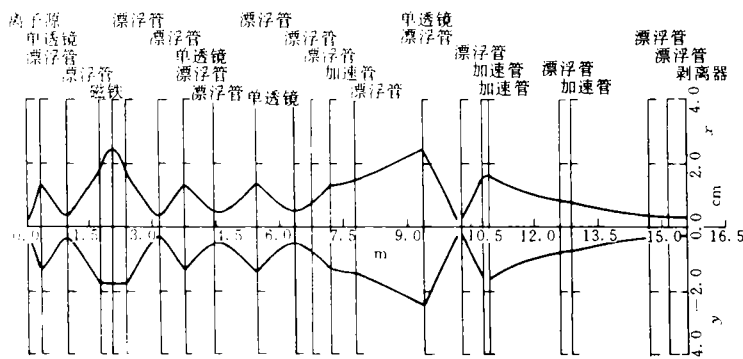


图 2 注入系统中束流包络
Fig.2 Beam envelope in injection system

2.1 分辨率及强峰拖尾抑制比

双聚焦磁铁的质量分辨率由其色散系数和物缝宽度决定。减小物缝宽度可获得很大的质量分辨率,但不可避免地要造成束流损失,无法满足 AMS 要求的平顶传输条件。因此注入磁铁具有的质量分辨率应为物缝开至刚好不损失束流时测得的值。测量分辨率时,首先使束流在 90°注入磁铁两端达到双聚焦,然后将物缝关至和束截面宽度相当。实际测量时,光阑孔径为 14 mm,物缝全宽为 8 mm,用扫描磁场的方法测得的质量分辨率为 110。测量值低于理论值的主要原因是束流通过栅网透镜后形成的物腰截面大于理论估算值。用类似方法测量了注入磁铁对强峰拖尾的抑制比。图 3 为在对数坐标下的注入磁铁强峰拖尾谱图,在质量数为 14 的位置上,对¹²C 的抑制比为 1.7×10^{-5} 。

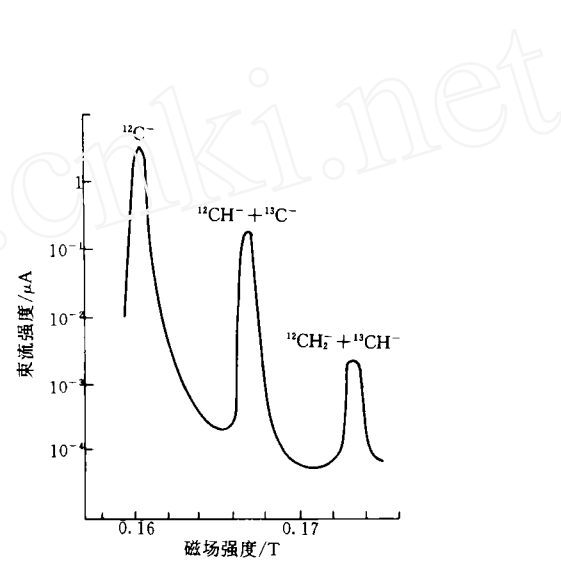


图 3 稳定同位素谱图
Fig.3 Spectrum of stable isotopes

2.2 束流传输效率

该注入系统中 90°注入磁铁的磁极间隙为 50 mm 以保证束流的平顶传输。为检验这一特性,对石墨靶引出束中各种成分的束流强度和发射度进行了测量。测量中所用的离子源为一台反射式 HICONEX 834 负离子溅射源,系统调试和首批¹⁴C 样品的测量都是由这台离子源进行的。束流强度由法拉第杯测量,在满足双聚焦的条件下,由磁铁像缝处法拉第杯 FC2 测得的各种束流成分的总和是磁铁物缝处法拉第杯 FC1 测得的离子源引出束的 85% 左右。发射度由一台多缝单丝发射度仪进行测量。各种束流成分的发射度有很大差别,¹²C 束的归一化发射度为 $4.2\pi\text{mm} \cdot \text{mrad} \cdot \text{MeV}^{1/2}$, ²⁴C₂ 束的归一化发射度为 $1.7\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad} \cdot \text{MeV}^{1/2}$, 而¹⁶O 束(占 FC2 测得的束流总和的 15% 左右)的归一化

发射度则大于 $6\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad} \cdot \text{MeV}^{1/2}$ 。传输效率是和束流发射度密切相关的,可以认为,通过注入磁铁损失的束流大部分为发射度较大的 ^{16}O , ^{12}C 则基本上能无损失地通过。因此,注入系统的束流传输效率就可由 FC2 和预加速管前的法拉第杯 FC3 所测流强的比值确定。为保证测量的准确性,两个法拉第杯接到同一束流积分仪上进行测量。通过仔细调节各聚焦导向元件, ^{12}C 束的传输效率可达 60%—70%。

为改善 AMS 测量精度与效率,系统中安装了一台改进型 860 强流负离子源以代替 834 源。该源的发射度略小于 834 源,为 $(2-4)\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad} \cdot \text{MeV}^{1/2}$,相应的传输效率可达 70%—80%。对 ^{10}Be 和 ^{26}Al 也具有同样的传输效率。

2.3 限束光阑的作用

实验中在不同光阑孔径下系统的传输效率进行了比较测量。测量结果如图 4 所示。光阑孔径最大时,由 834 源引出的 ^{12}C 分析束流强为 $4 \mu\text{A}$ 。光阑孔径为 10 mm 时传输效率最高,继续减小孔径,传输效率不再增加。对强流源,光阑孔径最大时 ^{12}C 分析束为 $95 \mu\text{A}$ 。比较两个离子源的测量结果可见,限束光阑对强流源的作用较大,可有效地限制束晕,提高束流传输效率,从而改善 AMS 的测量精度。

3 结论

北京大学加速器质谱计注入系统可实现不同同位素的快交替注入,使 PKUAMS 能达到较高的测量精度。高分辨率的注入磁铁则使注入系统具有较高的强峰拖尾抑制能力,从而保证了 PKUAMS 的高灵敏度测量。大孔径透镜和较大的磁极间隙使系统具有较高的传输效率,减小了束流传输过程中引入的分馏效应。

该注入系统建成以来,在 AMS 性能实验研究, ^{14}C 、 ^{10}Be 、 ^{26}Al 测量方法的建立,样品测量(已测量考古、地质、海洋等领域中的样品近百个)等过程中已运行了 2500 h 以上。实验和测量结果表明,该注入系统设计合理、调束方便、运行稳定可靠,保证了 AMS 同位素比值测量工作的顺利进行。

参 考 文 献

- 1 郭之虞,李 坤,陈铁梅,等. 加速器质谱计的原理、技术及其进展. 原子能科学技术,1989,23(6):76.
- 2 陈铁梅,李 坤,郭之虞,等. 加速器质谱计在地球科学中的应用. 海洋地质与第四纪地质,1989,9(1):103.
- 3 Doucas G. The Energy Spread of Some Negative Ions From a Sputter Source, Rev Phys Appl, 1977, 12:1465.
- 4 Lu Xiangyang, Zhang Rujun, Li Kun, et al. The Fast Switching Control and Data Acquisition System of Peking

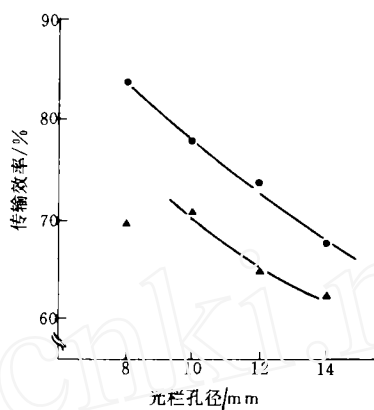


图 4 光阑孔径与束流传输效率

Fig. 4 Beam transmission efficiency with different diameter of diaphragm

●—强流源;▲—834 源。

University AMS Facility. *Collected Oceanic Works*, 1993, 16(1):14.

5 Kieser WE, Beukens RP, Kilius LR, et al. *Isotracer Radiocarbon Analysis-Equipment and Procedures*. *Nucl Instrum Methods*, 1986, B15:718.

6 Greenway TJJ. *OPTRYK*, Nuclear Physics Laboratory, Oxford University, 43/85, 1985.

INJECTION SYSTEM FOR AMS AT PEKING UNIVERSITY

GUO ZHIYU YAN SHENGQING XIAO MIN
ZHANG ZHENGFANG YANG FENGLING CHEN CHIAERH

(*Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing, 100871*)

LIU KEXIN LU XIANGYANG LI BIN
QIAN WEISHU YUAN JINGLIN LI KUN

(*Department of Technical Physics, Peking University, Beijing, 100871*)

ABSTRACT

An injection system with fast switching technique is constructed and put into operation for Accelerator Mass Spectrometry (AMS) measurements at Peking University. The special requirements of AMS measurement are considered adequately during the design of beam line. The designed features of injection system as well as the measured performance are presented.

Key words AMS Injection Fast switching Suppressing Flat top transmission
Transmission efficiency