

# NEC $^{14}\text{C}$ 测量 AMS 系统离子源升级

丁杏芳, 付东坡, 蒋正元, 路祥臣, 刘克新

(北京大学 重离子物理研究所和核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871)

**摘要:** 为提高样品测量效率, 对 MC-SNICS 多靶位铯溅射负离子源进行了升级改进。改进后的离子源采用球形电离器代替原有的锥形电离器, 对供铯系统也进行了比较彻底的改造, 通过参数优化,  $^{12}\text{C}^-$  引出流强最大可达近  $150\ \mu\text{A}$ , 比原有离子源提高了 1 倍以上。流强的提高增加了加速器的束载效应, 导致纹波变大, 对测量稳定性造成一定影响。通过增加主分析磁铁后的光阑孔径和优化束流传输, 可使 AMS 保持高的测量精度, 同时对测量本底未产生大的影响。

**关键词:** 加速器质谱; 离子源; 球形电离器; 引出流强

**中图分类号:** TL52; TL56

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-6931(2008)S0-0233-05

## Upgrading of Ion Source for NEC Compact AMS

DING Xing-fang, FU Dong-po, JIANG Zheng-yuan, LU Xiang-chen, LIU Ke-xin  
(*Institute of Heavy Ion Physics & State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology,  
Peking University, Beijing 100871, China*)

**Abstract:** The MC-SNICS ion source of NEC compact AMS system at the AMS laboratory of Peking University was upgraded recently. Spherical ionizer and improved Cs reservoir were equipped with this upgraded ion source.  $^{12}\text{C}^-$  beam current up to  $150\ \mu\text{A}$  can be obtained with careful optimization of operating parameters. Increased beam current causes bigger ripple of high voltage of tandem. To enlarge the diameter of the aperture downstream the analyzing magnet from 10 mm to 12 mm is helpful to keep the stability of the measurement. Experiment results show that background do not increase obviously with larger aperture.

**Key words:** AMS; ion source; spherical ionizer; beam current

加速器质谱(AMS)是在地球科学、考古学、生命科学、环境科学等领域具有广泛应用的一项现代核分析技术。由于 AMS 直接计数放射性核素原子, 因此, 具有所需样品量小、测量灵敏度高和测量效率高等优势。北京大学于

2004 年从美国引进了小型化 $^{14}\text{C}$  样品测量加速器质谱仪<sup>[1]</sup> (PCAMS), 该系统的加速器为 1.5SDH 型串列静电加速器, 端电压仅 0.6 MV, 系统测量精度为 0.3%, 测量本底低于  $4 \times 10^{-16}$ 。自 2004 年运行以来, 每年平均测

量考古、地球科学、环境科学和生命科学样品 2 000 多个,在促进交叉学科发展方面起着重要作用。近几年来,在这台 AMS 装置上开展了一系列重要应用研究。夏商周断代工程虽已于 2001 年结题并取得了阶段性成果,但有些年代学问题还远没有完全解决,因此,在这台 AMS 系统上补充测量了大量样品,主要是甲骨样品和郑州商城的系列样品。通过高精度年代测定并用贝叶斯方法对系列样品进行树轮校正,得到了更为科学的商代年代框架。另一个重要应用工作是中华文明探源工程项目。该项目的目标是对公元前 3000 年至公元前 1500 年间各主要文化区的考古学文化分期进行绝对年代测定,目前该项目已测量了数百个样品。其他重要应用包括广东四会古森林地下生态系统<sup>14</sup>C 地层年代学研究和用加速器质谱法研究环境级基因毒物汽油添加剂 (MTBE) 的基因毒性等。

这台 PCAMS 对全国开放。近年来,样品测量的需求越来越大,迫切需要提高样品测量效率,以满足不断增长的样品测量需求。为此,我们对该系统的重要组成部分离子源进行了升级,以提高引出流强,从而提高 AMS 系统的测量效率。本文在简要介绍溅射负离子源发展过程的

基础上,重点描述升级后离子源的结构、性能及在流强增加后 AMS 测量中的问题和解决方法。

## 1 溅射负离子源的发展

早期的溅射负离子源以 HICONEX 834 源为代表。这种类型的离子源采用多孔的泡沫钨电离器,电离后的铯束被加速到较高能量,经聚焦透镜聚焦后,在样品表面溅射出负离子。由于铯离子束同时起到溅射和向样品表面提供铯覆盖层的作用,不能使铯覆盖层达到最佳厚度,故负离子产额较低,<sup>12</sup>C 引出流强只有 10  $\mu$ A 左右。另外,这类离子源所需样品量大,不适合小样品高精度 AMS 测量的需求。

后来出现了强流溅射源,采用钽表面电离器对铯原子进行电离。通过加热铯炉向源室注入铯蒸汽后,铯原子在被加热到约 1 100  $^{\circ}$ C 的电离器表面电离,铯离子在阴极和铯聚焦电压所形成的电场中被加速并会聚到样品表面。这种类型的离子源的源室内有大量的铯蒸汽,同时铯离子能量也较低,大幅改善了样品表面的铯覆盖层,从而有效提高了负离子产额。

图 1 所示为 NEC 原来在小型化<sup>14</sup>C 测量器质谱计上配置的 MC-SNICS 铯溅射强流负

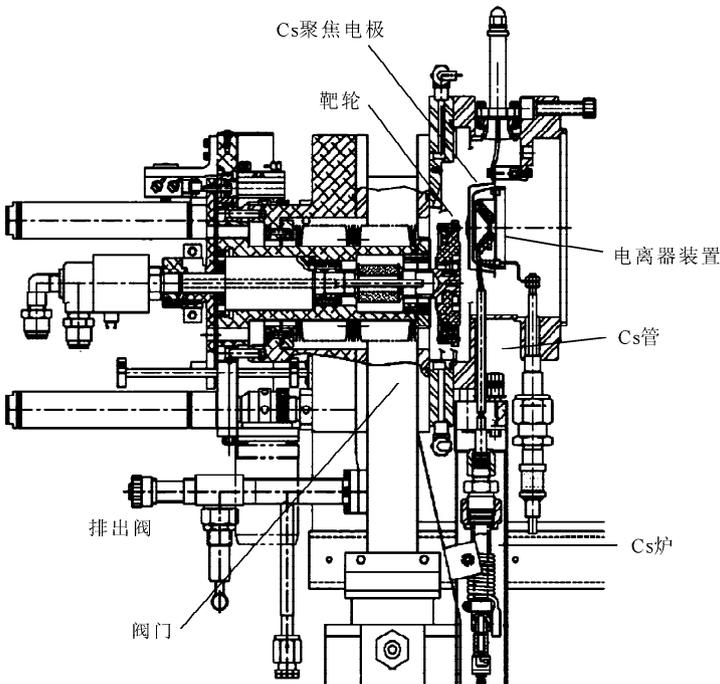


图 1 NEC 的 MC-SNICS 离子源

Fig. 1 NEC MC-SNICS ion source

离子源示意图。该源一次可装 40 个样品,具有引出束流强度较大、束流发射度小、稳定性好、样品之间相互干扰小等优点,引出的  $^{12}\text{C}$  束流一般在  $50\sim 80\ \mu\text{A}$  之间。运行中如果铯聚焦电压高于 3 kV,则引出流强还可增大,但此时铯束被过聚焦,大量的铝从靶座上溅射出来,在电离器表面形成 1 层覆盖物,降低了电离器的电离效率,增加了离子源的清洗频率。

近年来,国际上一些实验室将 NEC MC-SNICS 铯溅射强流负离子源所采用的锥面电离器改造成球面电离器,由于球面电离器对铯离子束的聚焦能力优于圆锥面电离器,解决了 MC-SNICS 离子源铯聚焦与引出流强的矛盾,使引出流强得到进一步提高,提高流强的同时可保持甚至减小原来的发射度<sup>[2]</sup>。MC-SNICS 铯溅射负离子源改进的另一个方面是供铯系统和源室真空度的改善。Southon 等<sup>[3-4]</sup>在这方面做了大量工作,其主要思路为简化铯炉系统结构,增加铯管内径,控制铯蒸汽在源室中扩散和通过改进各部件结构以改善源室中真空度。NEC 公司在这些改进的基础上对 MC-SNICS 离子源进行了升级设计。

## 2 升级后 MC-SNICS 离子源的结构特点

MC-SNICS 离子源升级后的主要结构变化为用球面电离器代替原锥面电离器、原铯聚焦电极改成与阴极同电位的浸没透镜、铯炉及铯管的内径均较大增加,但铯管长度明显减小。

### 2.1 电离器与多功能片

图 2 为球面电离器和多功能片结构示意图。球面电离器比圆锥形电离器对铯离子束具有更好聚焦能力。用 SIMION 程序对圆锥面与球面电离器的束流光学特性进行了模拟计算(图 3)。在相同阴极电压下,圆锥面电离器中铯离子初始运动方向不利于铯离子较好地聚焦于样品表面;对球面电离器,情况则有明显改善,铯离子运动方向比较集中且束斑较小。同时,也可看到,在采用球形面电离器情况下,铯聚焦透镜对聚焦场的调整作用明显减弱。

所以,NEC 的设计取消了铯聚焦片,而改装成图 2 所示的与阴极同电位的多功能片,该多功能片主要作用是阻止铯蒸汽外溢,对邻近样品起到屏蔽作用。同时,可在靶轮与电离器

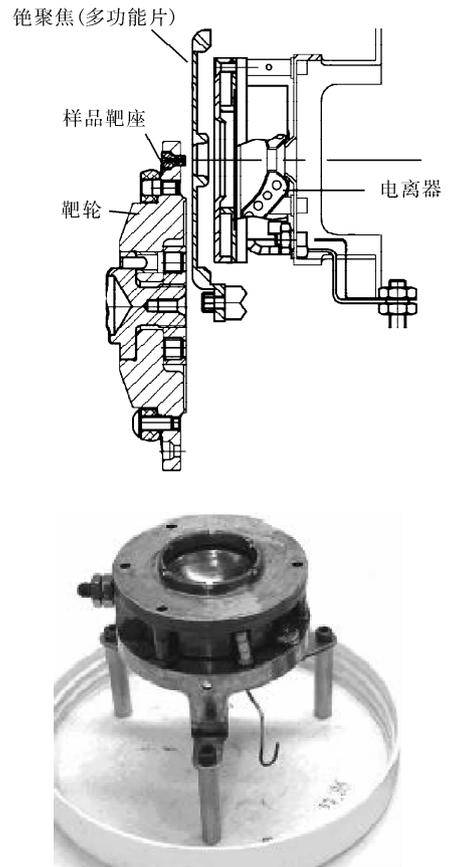


图 2 改进后的 MC-SNICS 离子源电离器

Fig. 2 Ionizer of upgraded MC-SNICS ion source

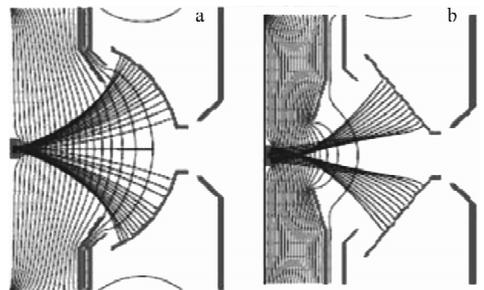


图 3 球面电离器与锥面电离器铯束聚焦能力比较  
Fig. 3  $\text{Cs}^+$  beam focus with spherical and conical ionizer

a——球面电离器; b——锥面电离器

之间起到一定隔热作用,有利于充分利用加在电离器上的功率。该多功能片与阴极电压同电位,可起到浸没透镜的作用,对从样品溅射出来的束流进行一定程度的聚焦,另外,它也是一个光阑,可阻挡杂散离子。

从图 2 所示电离器装置中可看出,从铯管出来的铯蒸汽经过环型的槽直接“流”到电离器

表面,避免铯蒸汽外溢,使铯蒸汽得到充分的利用,同时避免因铯过多引起的绝缘性能下降,从而降低了离子源的清洗频率。

## 2.2 供铯系统

离子源升级前的供铯系统存在较多问题。首先是铯管过长过细,在电离器和铯炉之间存在1个温度下降区域,必须对铯管进行加热(图1),引出束流对铯管加热电流比较敏感,且铯管加热电流小会造成铯蒸汽的凝结,使铯的供应不够通畅。运行时,铯炉温度较高(200℃左右),且不易控制,温度低时,供铯量不足,温度过高,会使大量的铯在短时间内涌入源室,造成样品表面铯的过量沉积,使引出束流大幅下降,甚至可影响到邻近靶位,使一些样品在未开始溅射前已覆盖了过量的铯。另外,装铯程序复杂,铯易氧化。

图4为改进后MC-SNICS的供铯系统图。铯管变短变粗,且源体外面部分为双层结构,内层铯管与电离器基座接触紧密,靠导热保持较高温度,所以,铯管无需额外的加热电源,避免了原来存在的铯管堵塞问题。内层铯管与外层铯管之间靠真空隔热,外层铯管与源体密封部分加冷却管,以保护密封O圈。

升级后离子源的装铯和清洗过程大为简化。装铯时,只需将装铯的玻璃瓶直接放入铯炉敲碎即可。清洗离子源时,将铯管外管的密封法兰取下后,内管可直接拧下,通过1个小塑料阀门即可密封(图4),不必采用原铯保护器。

## 3 离子源性能实验研究

升级离子源组装完成后,对离子源运行参数进行了优化。球面电离器对铯束具有更强的

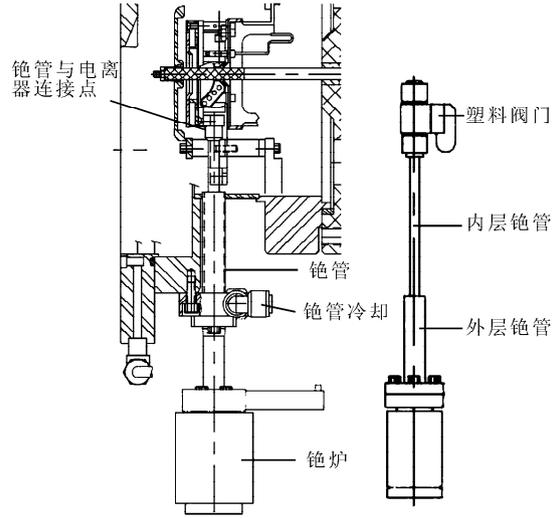


图4 改进后的铯炉及铯管

Fig. 4 Modified cesium oven and cesium line

聚焦作用,因此,对阴极(样品靶)与电离器之间的距离比较敏感,位置不合适会造成欠聚焦或过聚焦,影响引出束流强度。为此,首先对靶轮位置进行了调整优化。吸极电压与溅射电压的匹配对引出束流在离子源后的传输有很大影响,为使束流在90°注入磁铁物缝处较好聚焦,还应合理选择吸极电压与溅射电压的比例。图5所示为对离子源靶轮位置、阴极电压和吸极电压进行优化的结果。结果表明,升级后,离子源靶轮需后移2mm,阴极电压最佳值应约为8kV,而吸极电压未变化。实验中还对铯炉温度进行了反复对比研究,发现铯炉温度达到70℃时,离子源即可达到正常运行状态,这个值低于NEC公司建议的90℃的铯炉温度值。表1列出了升级前与升级后离子源的主要运行参数。

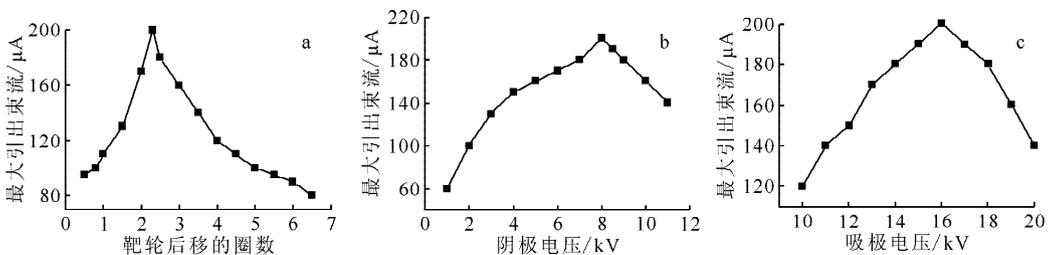


图5 改进后离子源研究结果

Fig. 5 Results of new ion source

a——阴极电压6kV,吸极电压16kV;b——靶轮后移2圈,吸极电压16kV;c——靶轮后移2圈,阴极电压8kV

表 1 升级前后离子源性能比较

Table 1 Typical operating parameters before and after upgrade

离子源参数	量值	
	升级后	升级前
溅射电压	8 kV	6 kV
铯聚焦	无	1.7 kV
吸极电压	16 kV	16 kV
单透镜	0.8 kV	0.6 kV
铯炉温度	70 °C	200 °C
电离器功率	160 W	190 W

升级后,离子源的 $^{12}\text{C}$ 引出束流可达 100~150  $\mu\text{A}$ ,且运行比升级前稳定。当离子源需要清洗前,性能下降仅表现为由于电离器电离效率下降而造成的在同样电离器功率下引出束流流强减小,无任何不稳定现象(如出现打火等),对样品测量精度没有影响。

#### 4 AMS $^{14}\text{C}$ 测量

增大离子源引出流强对提高 AMS 测量效率有很大作用,要达到同样统计测量精度,流强增加 1 倍,理论上可使测量时间减小 1/2。但流强过大会带来系统的不稳定性,引起系统误差,降低测量精度。不同 AMS 实验室有不同的做法,追求高精度的实验室一般对流强进行控制,而在保证一定测量精度前提下,追求高测量效率的实验室则在比较高的流强下测量样品。

实验中,高流强对 AMS 系统稳定性的影响主要是由束载效应引起的串列加速器高压纹波的增大。AMS 采用快交替注入,在每个注入周期内, $^{12}\text{C}$ 、 $^{13}\text{C}$ 、 $^{14}\text{C}$  的注入时间分别为 0.3、1、

100 ms,重复频率约为 10 Hz。若 $^{12}\text{C}$ 流强过大,则周期性的束载变化可产生 1 个附加的纹波。离子源升级前,注入束流强度一般小于 80  $\mu\text{A}$ ,加速器高压纹波约为 700 V,当注入流强超过 150  $\mu\text{A}$  时,纹波大于 1 kV。为有效抑制分子离子产生的干扰本底,在 AMS 主分析系统后设置了 1 个直径为 10 mm 的光阑。纹波变大后,在光阑后束流有少量损失,且向后的传输不够稳定,为此,将光阑直径扩大到 12 mm,改善了束流传输的稳定性,保证了测量精度。为检测增加光阑口径是否会影响测量机器本底,在新条件下对本底样品进行了反复测量,统计结果表明,机器本底未明显增加。在日常测量中,为保证实现高精度测量,仍对离子源引出流强进行了控制,通过减小电离器功率和降低铯炉温度,控制 $^{12}\text{C}$ 注入流强不超过 120  $\mu\text{A}$ 。

#### 参考文献:

- [1] LIU K X, DING X F, FU D P, et al. A new compact AMS system at Peking University[J]. Nucl Instrum Methods, 2007, B259: 23-26.
- [2] WEISSER D C, LOBANOV N R, HAUSLADEN P A, et al. Novel matching lens and spherical ionizer for a cesium sputter ion source[J]. J Phys, 2002, 59: 997.
- [3] SOUTHON J R, SANTOS G M. Life with MC-SNICS—Part II: Further ion source development at the Keck carbon cycle AMS facility[J]. Nucl Instrum Methods, 2007, B259: 88-93.
- [4] SOUTHON J R, ROBERTS M L. Ten years of source at CAMS/LLNL evolution of a Cs ion source[J]. Nucl Instrum Methods, 2000, B172: 257.