

串列静电加速器的循环气体剥离技术

鲁向阳

(北京大学 重离子物理研究所, 北京 100871)

摘要:循环气体剥离是国际上普遍采用的对串列静电加速器改进的一项技术,介绍了该技术的原理、具体技术、现状及其发展动态。

关键词:循环剥离;加速器质谱计(AMS);串列静电加速器

中图分类号: TL52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6931(2000)04-0378-07

电荷剥离装置是串列静电加速器必不可少的重要组成部分,它的性能直接关系到串列静电加速器的束流品质与传输效率。串列静电加速器的电荷剥离装置主要有两大类,即固体剥离器和气体剥离器。固体剥离器剥离后粒子的能散度较大,特别是分子离子,由于“库仑爆炸”效应,粒子的能散进一步加大,而且束流的角发散度也加大^[1,2]。另外,随工作时间的增加,膜的厚度也在发生变化,因此,剥离后粒子的能损也发生变化。固体剥离膜的寿命较短,所能承受的束流强度有限。这些对于长时间高精密度连续测量是不利的。因此,许多要求高束流品质、长时间连续高精度测量的串列静电加速器,纷纷采用气体剥离器。气体剥离器的工作介质为高纯度的特定气体,如氧气或氩气,其等效剥离厚度取决于气体的压强和剥离管道的长度。它长时间工作稳定性好,剥离后粒子能散度小,但所有工作气体需要经由加速管排出,会导致加速器内部真空度下降。为在达到一定的剥离厚度的同时不过多地降低加速器内部的真空度,需将剥离管做得又细又长,这样的管道使系统的束流接受度受到很大限制。因此,传统的气体剥离器也不能满足长时间、高效率测量的要求。于是,国际上发展出用于串列静电加速器的循环气体剥离技术。

1 带电粒子的气体剥离实验研究

带电粒子与介质相互作用后,其电荷态的分布与粒子的入射能量及介质的种类和等效厚度有关。这一过程十分复杂^[3]。人们一般采用半经验公式^[3,4]或直接通过实验的方法进行研究。目前,对带电粒子经由固体靶剥离后平衡电荷态分布的估计较为普遍采用的半经验公式为 K. Shima 等人的工作^[4]。H. D. Bezt^[3]给出了带电粒子经由气体靶剥离后的平衡电荷态分布半经验公式。但是,最准确的方法是进行实验测量。瑞士苏黎世联邦理工学院(ETH)的 AMS 实验室针对 AMS 领域所感兴趣的一些核素进行了大量的实验研究,得到了诸如 C、Be、

收稿日期:1999-02-03;修回日期:1999-05-17

作者简介:鲁向阳(1963—),男,四川成都人,副教授,加速器物理专业

Al 和 Cl 等元素在使用碳膜和氧气、氩气为介质时的能量-剥离厚度-电荷态分布的实验数据。以 C 元素为例,从实验的对比结果可以看到^[5~7],使用固体膜与使用气体的剥离产额是基本相同的,但要达到相同电荷态的最大产额,气体剥离需要粒子有较高的能量,这是“密度效应”的表现。ETH 的研究发现,在以氧气为剥离介质时,对¹²C 粒子达到平衡剥离的条件是其等效剥离厚度为 $1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。这对于典型的、长度为 70 cm 的剥离管道而言,其相应的平均压强须达到 1.07 Pa。如果不采用循环剥离技术,这个条件是很难达到的^[2]。

2 循环气体剥离器的设计

2.1 循环气体剥离器的物理要求

在设计循环气体剥离器时,根据实际的物理实验要求,针对所要剥离的对象、加速器工作的能区、所要达到的等效剥离厚度及系统的真空度等方面的要求来进行物理设计。确定了所需要的等效剥离厚度以后,根据等效剥离厚度计算剥离管道内的气体压强。

2.2 循环抽气泵的选择

对循环抽气泵的要求包括以下几个方面。

1) 泵的耐高压能力 由于循环抽气泵安放在串联静电加速器的钢筒内,通常钢筒内充有高压绝缘气体,因此,所选泵必须具备在高压下工作的能力。

2) 泵的抽速 原则上讲泵的抽速越高对系统真空度的改善越好。但是,过分追求大抽速会使整个装置复杂程度以及成本提高,所需的功率也提高,况且当泵速达到一定程度后,真空度的改善程度明显变缓。

3) 泵的出口压强 由于循环抽气泵是在没有前级泵的情况下使用,因此,正常情况下,泵的最大使用出口压强与可实现的最大等效剥离厚度直接相关。采用复合泵(如牵引泵)可以得到较好的出口压强。

4) 泵的油扩散问题 如果泵有明显的油扩散,油会随工作气体进入加速管导致绝缘度下降,更为严重的是进入加速管的油污无法清洗,长时间积累会使加速管报废。因此,所选用的泵必须是无油的。

此外,由于循环抽气泵安装在加速器头部,因此它的冷却是一个需要考虑的问题。到目前为止,各实验室尚未有很好的冷却手段,为避免冷却难题,均采用降速运行的方法。

目前,各实验室循环剥离装置所采用的抽气泵主要为涡轮分子泵,也有些实验室计划采用牵引式复合泵,后者具有较高的出口压强。这些泵的共同特点是采用了陶瓷轴承或磁悬浮技术,只需要少量低挥发的润滑脂,基本无油,且可以任意角度安装,这对于加速器头部有限的空间具有十分重要的实用价值。

2.3 几种现有的循环气体剥离器结构

现有的循环剥离装置大致可分为单泵与双泵两种结构。

ETH 的 AMS 实验室的循环剥离装置是一个典型的单泵结构,该装置的示意图^[2]示于图 1。它是对 EN 串联静电加速器原有的剥离装置的改进,代表循环剥离装置的早期技术。具体的改进包括将原有的剥离管道缩短,内径加大,加装 1 台涡轮分子泵(德国 Leybold 公司的 TurboVac 150 型)。为适应 AMS 测量的特殊需要,将原有的固体剥离器从前面移到气体剥离器的后面。

90 年代以来,随着循环剥离技术日益得到重视,使用单泵进行循环抽气也暴露出一定的

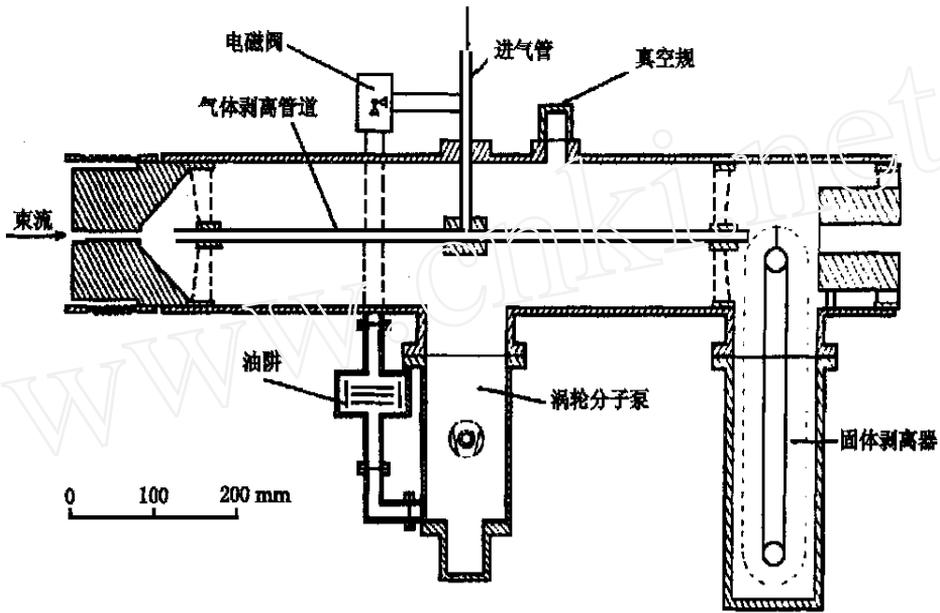


图1 瑞士苏黎世联邦理工学院 AMS 实验室的循环剥离装置^[2]

Fig.1 Schematic diagram of ETH new stripper^[2]

局限性。一些实验室从实际应用出发,研制开发出双泵结构的循环剥离装置。例如,瑞典隆德大学(University of Lund)的 AMS 实验室新安装的循环剥离装置^[8](图2)。其设计出发点之一是利用 NEC 公司原有的剥离器腔体使之与原有的固体剥离器兼容。具体结构是在剥离腔两端分别插入 1 根内径 14 mm、长度 70 mm 的气体剥离管。在每根剥离管的气体出口处分别设置 1 台涡轮分子泵,直接将由剥离管道流出的工作气体抽回循环使用。所采用的泵为法国 Alcatel 公司 5030CP 的改进型。在剥离装置的两端与加速管的连接处,各设 1 根较短的气阻管以限制进入加速管的气流量。

该装置的特点是设计思想明确,泵的设置有针对性,结构较为简单,抽气效果较好。测量结果表明,至少有 90 % 的工作气体被抽回。由于无法在加速器头部提供整个装置所需动力,因此,两台泵均采用气动马达驱动。考虑到加速器头部的特殊情况,所用的驱动气体为绝缘度较高的 SF₆,该气体通过聚四氟乙烯管道由加速器钢筒外部送入。因此需要 1 套特制的容器与驱动设备。

美国 Purdue 大学 PRIME 实验室早在 1994 年便发表了新的循环剥离装置实施计划。该循环剥离装置由美国 Southern Cross 公司设计,也采用双泵结构^[9]。与瑞典隆德大学的装置不同的是,2 台泵的工作有明确的分工。1 台用于将流出剥离管道的工作气体抽回,另 1 台用于将泄漏出剥离腔的工作气体抽出并兼有对加速管抽气的功能。为获得较大等效剥离厚度以及将抽出的气体送入储气罐中,两台泵均选用法国 Alcatel 公司的 ATS-100 型涡轮牵引泵(Drag Pump)。其主要特点是泵的出口压强可达 5×10^3 Pa。根据设计,第 1 台泵将把 97 % 的工作气体抽回循环,第 2 台泵进一步将头部真空度提高一个数量级。预计正常工作时,加速器头部压强约为 10^{-4} Pa。遗憾的是此项升级计划迄今没有完成,人们还无法得知其使用情况。

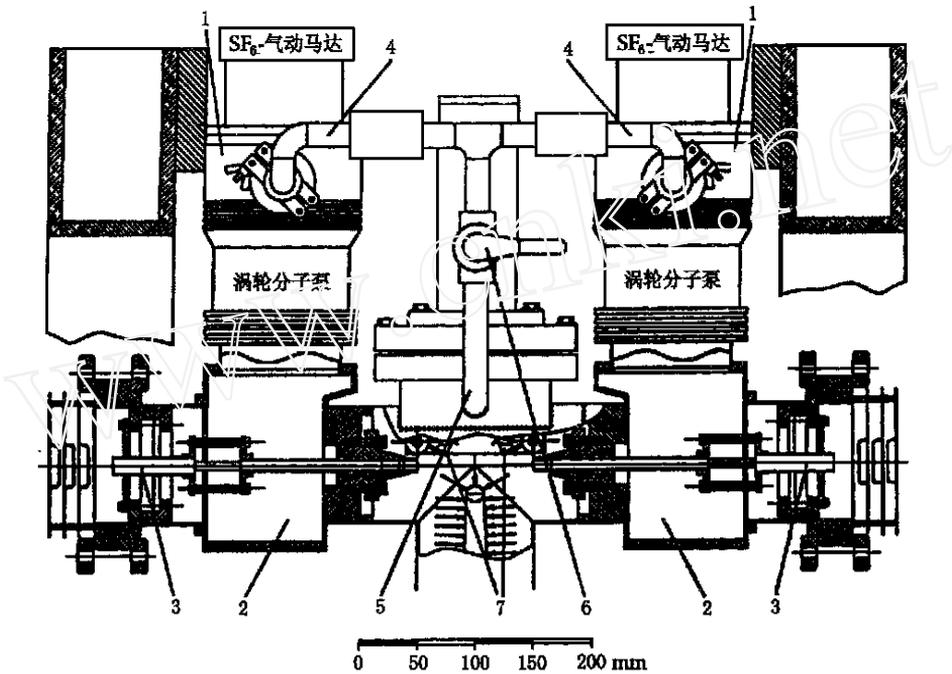


图2 瑞典隆德大学的循环剥离装置^[8]

Fig. 2 A recirculation gas stripper with the double-pump system^[8]

1——涡轮分子泵; 2——高气导室; 3——气阻管; 4——泵出气管;
5——工作气体入口; 6——总阀; 7——端口阀

2.4 循环气体剥离器的电气与测量控制系统

由于泵是安放在串联加速器的头部使用, 因此带来一系列特殊问题。

1) 特殊的泵电源 在加速器头部, 所有电力来自于头部发电机。根据发电机型号的不同, 其输出的电压、频率以及功率各有不同。况且绝大多数泵需要降速运行, 因此需要针对具体情况重新设计制造泵电源。对于某些串联加速器, 由于条件限制, 不能在头部提供泵所需的动力, 需要从钢筒外将动力送入, 瑞典隆德大学的循环剥离装置便是一例。北京大学重离子物理研究所的 2×1.7 MV 串联静电加速器采用的是通过绝缘连杆将外部电机的动力送入。

2) 头部真空测量系统 在一般的循环剥离装置中通常设有两套真空测量装置, 并分别适用于不同的真空量程。对于小型串联加速器, 由于条件限制, 通常不在头部设置真空测量设备。在这种情况下, 头部的真空状况以及剥离管道内的气体压强一般是通过加速器钢筒外的真空测量装置来间接监测。

3) 头部控制系统及通信系统 头部控制与通信系统面临的一个重要问题是怎样安全可靠地在加速器头部与地电位之间建立通信联系。目前主要有两种方法: 一种是采用光纤通信; 另一种是采用红外通信。光纤通信的优点是不易被干扰, 传输速度快, 缺点是如果光纤选择不当或架设工艺不良, 会影响加速器内部电压分布梯度, 在头部电压较高时引起放电。红外通信的方法则避免了这一问题, 但是为了避免杂散光的干扰, 对发射与接收之间的准直要求较高。头部控制与通信系统所面临的另一个重要问题是要确保设备在较恶劣的电气环境下安全可靠

地工作。

3 循环气体剥离器的使用效果

采用循环剥离装置,剥离管道内的气体压强得到提高,剥离器的剥离本领增强,可以获得较高电荷态的粒子流,同时,加速器头部的真空状况得到改善。另一方面,剥离管道的内径得以增大,加速器的束流传输效率得到提高。

图3为ETH的AMS实验室新旧气体剥离器使用效果的对比结果^[2]。采用循环剥离以后,约有90%的工作气体被抽回循环使用。从图3可见,剥离管道中央的气体压强由0.53 Pa提高到3.3 Pa(相应的等效剥离厚度为 $1.6 \mu\text{g}/\text{cm}^2$),提高了5倍。而加速器入口处(低能端)的真空状态由 9.3×10^{-5} Pa下降为 3.3×10^{-5} Pa,加速器出口处(高能端)的真空状态由 9×10^{-4} Pa下降为 4×10^{-4} Pa,真空度提高了1倍多。而在 $1.6 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的等效剥离厚度及6 MV的端电压下, C^{4+} 电荷态的剥离效率大约为70%,远高于3 MV端电压下 C^{3+} 的剥离效率(约55%)。另外,由于剥离管道内径增大(8.1 mm)使加速器的束流接受度提高了5倍。使用原有气体剥离器,碳离子为 $3+$ 电荷态时束流的传输效率是27%,采用循环剥离后,碳离子取 $4+$ 电荷态时系统传输效率为50%^[2]。

北京大学技术物理系核物理实验室的 2×1.7 MV 串列静电加速器采用循环剥离装置取代原有的气体剥离器后,高能加速管内的真空度提高了半个数量级以上,同时,剥离管道的内径由4.8 mm增加到8 mm。改装以后加速器的流强明显提高,对各种粒子,束流传输效率一

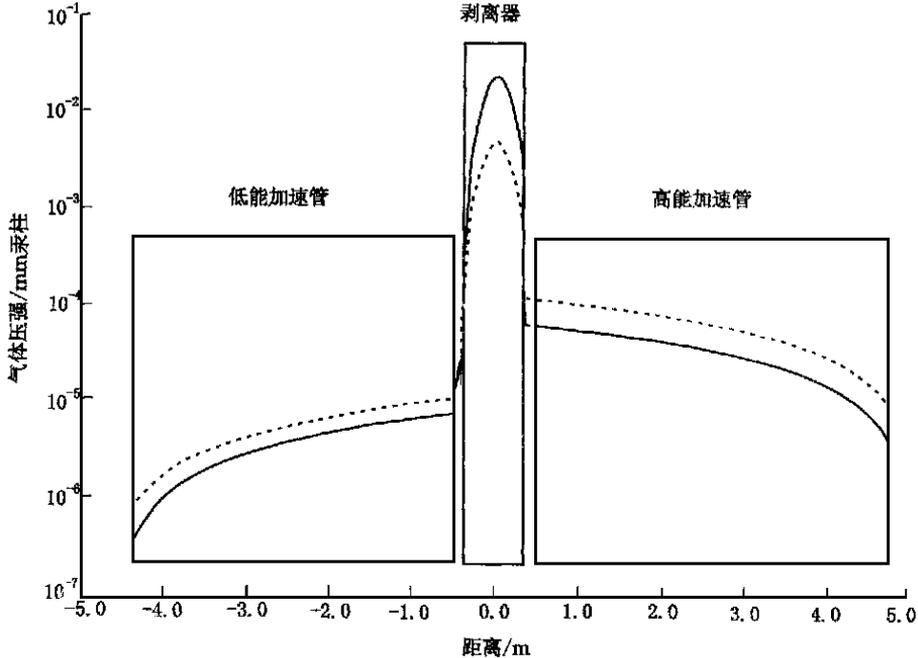


图3 ETH的AMS实验室新旧气体剥离器的使用效果对比^[2]

Fig. 3 The vacuum improvement of ETH EN tandem by the new stripper^[2]

实线——新剥离器;虚线——旧剥离器

(1 Pa = 7.5×10^{-3} mm 汞柱,作者注)

般提高 50 %以上^[10]。

4 循环剥离装置的发展趋势

理论与实验结果表明,采用循环剥离装置对串联静电加速器的性能改进作用十分明显。因此,循环剥离技术一经出现便得到国际上的普遍重视,并被迅速推广应用。

循环剥离系统装置中可以设置 1 台或 2 台循环泵。单泵系统较为简单,但局限性较明显。双泵系统较为复杂,但效果较单泵要好。另外,带电粒子电荷交换过程的研究结果表明,在整个传输-剥离损失中,负电荷的粒子由于电荷交换导致的束流损失是比较突出的一部分^[2,11]。因此,改善低能加速管的真空条件十分重要。于是国际上有人提出了不对称结构的循环剥离装置设想^[11],其目的在于实现循环抽气的同时,改善低能加速管的真空条件。

随着加速器质谱技术向小型化、商品化方向的发展,对气体剥离技术的要求也越来越高。1998 年 11 月于美国北德克萨斯大学召开的第 15 届加速器在研究与工业中的应用国际会议上,ETH 的 AMS 研究人员报告了他们与美国 NEC 公司联合在 500 kV 的 Pelletron 串联静电加速器上进行¹⁴C 的 AMS 测量获得成功的情况^[12]。这一报告在国际 AMS 界引起轰动。该技术的成功标志着 AMS 的小型化与商品化已获得了突破性的进展。在该小型 AMS 系统中,一项重要技术是采用循环气体剥离器,将 C⁻ 离子剥离为 C⁺ 离子的同时,还将束流中的分子离子击碎,从而大大地降低了测量本底。另外,此研究结果表明,在气体剥离器中气压变化 1 %会导致本底有 5 %的变化。因此,为确保高精度的 AMS 测量,考虑在循环剥离装置中增设反馈稳压装置。这一点也标志着循环剥离技术将向更高标准发展。

参考文献:

- [1] Dollinger G, Marier-Komor P. Stripper Foil Requirements for Optimum Ion Transmission at the Munich MP-Tandem[J]. Nucl Instrum Methods, 1989, A282:153~160.
- [2] Bonani G, Eberhardt P, Hofmann HJ, et al. Efficiency Improvements With a New Stripper Design[J]. Nucl Instrum Methods, 1990, B52:338~344.
- [3] Betz HD. Charge States and Charge-changing Cross Sections of Fast Heavy Ions Penetrating Through Gaseous and Solid Media[J]. Rev Mod Phys, 1972, 44:465~539.
- [4] Shima K, Ishihara T, Mikumo T, et al. Empirical Formula for the Average Equilibrium Charge-state of Heavy Ions Behind Various Foils[J]. Nucl Instrum Methods, 1982, 200:605~608.
- [5] Hofmann HJ, Bonani G, Morenzoni E, et al. Charge State Distributions and Resulting Isotopic Fractionation Effects of Carbon and Chlorine in the 1 - 7 MeV Energy Range[J]. Nucl Instrum Methods, 1984, B5:254~258.
- [6] Stoller Ch, Suter M, Bonani G, et al. Charge State Distributions of 1 to 7 MeV C and Be Ions Stripped in Thin Foils[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1983, NS30:1 074~1 075.
- [7] Hofmann HJ, Bonani G, Himmel R, et al. Charge State Distributions and Isotopic Fractionation[J]. Nucl Instrum Methods, 1987, B29:100~104.
- [8] Hakansson K, Hellborg R. A New Design of Terminal Pumping in the Lund Pelletron Tandem[A]. Eighth Int Conf on Heavy Ion Accelerator Technology[C]. Sweden:Argonne Nat Lab, 1998(unpublished).
- [9] Puser KH, Elmore D, Mueller KA, et al. Upgrading Program for the FN Tandem and AMS System at PRIME Lab[J]. Nucl Instrum Methods, 1994, B92:69~73.
- [10] 沈定予,王雪梅. 北京大学 1.7 MV 串联加速器的维护与改进[J]. 现代科学仪器, 1996, 4:44~45.

- [11] Niklaus TR, Bonani G, Guo Z, et al. Optimising Tandem Accelerator Stripping Efficiency by Simulation of Charge Changing Processes[J]. Nucl Instrum Methods, 1994, B92: 115~121.
- [12] Suter M, Huber R, Jacob SAW, et al. A New Small Accelerator for Radiocarbon Dating[A]. Proceedings of the 15th International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry[C]. New York: America Institute of physics, 1998. 665~667.

The Recirculation Gas Stripping Technique of Tandem Accelerator

LU Xiang-yang

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

Abstract: The principle and the technique development of the recirculation gas stripper of tandem accelerator are reviewed. Adopted recirculation gas stripper, the performance of tandem has been great improved.

Key words: recirculation gas stripper; accelerator mass spectrometry; tandem

恰希玛核电站即将启动

中国核工业集团公司(CNNC)已经接受了巴基斯坦政府签发的300 MW恰希玛核电站的开始运行执照。

恰希玛核电站是以中国研制的第1个核电站——秦山核电站为原型。据说恰希玛的设计结合了各种技术改进,而巴基斯坦核管会亦已要求CNNC把西屋公司为秦山核电站推荐的各项改进加入恰希玛核电站。

CNNC计划在2000年4月开始运行该核电站。在几个月良好的运行之后,电站的管理将转交给巴基斯坦原子能委员会。

摘自《核动力运行研究》