

CIAE重离子加速器物理研究平台

关遐令¹⁾ 周立鹏 彭朝华 吕钊 包轶文 黄青华 郑健

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 中国原子能科学研究院正在规划中的重离子加速器物理研究平台的基本方案是在现有的 HI-13 串列加速器的后端新建一台能量增益为 $18\text{MeV}/q$ 的重离子超导直线加速器. 超导直线加速器包括: 36 个铜铈溅射型四分之一波长(QWR)谐振腔; 9 个恒温柜, 及一系列等时性消色散束流传输系统. 同时配套建设一条与现有的 HI-13 串列加速器相并列的重离子四杆型射频四极加速器——RFQ 和交叉手指型漂移管直线加速器 IH-DTL 接受来自 ISOL 的正离子束, 然后直接注入到超导直线加速器.

关键词 射频四极加速器 交叉手指型漂移管直线加速器 超导重离子直线加速器

1 引言

中国原子能科学研究院正在建设的串列加速器升级工程(即串列加速器二期工程)提供了放射性束流. 串列加速器三期工程将对升级后的 HI-13 串列加速器进一步提升其能力. 建成可独立运行的重离子直线加速器和若干大型物理终端. 该装置在现有的 HI-13 串列加速器旁新建一台 RFQ-DTL 直线加速器和一台能量增益为 $18\text{MeV}/q$ 的超导直线加速器, 同时配套建设磁谱仪和探测器阵列等实验终端. 建设后的加速器系统和物理研究平台达到国际同类装置的先进水平, 回旋加速器、串列加速器、直线加速器和超导加速器将可以自由组合使用. 平台建成后, 将实质性地提高核数据测量、抗辐射加固研究和重离子核反应的测量精

度和范围, 满足国防、航天和科技创新的需求, 成为在我国国防核科学技术领域开展基础和应用的创新性与先导性研究的平台. 重离子加速器物理研究平台的总体布局如图 1 所示.

2 ISOL

重离子加速器物理研究平台即串列加速器升级工程三期是在串列加速器二期工程基础上进行的. 二期工程是利用前级 $100\text{MeV}/200\mu\text{A}$ 的强流质子回旋加速器提供的质子束和选定的靶材料相互作用, 产生需要的放射性核素. 放射性核素原子从靶中扩散出来进入离子源被电离.

从离子源中引出几十 keV 的正离子束, 经过电荷交换器转变为负离子(对于少数元素, 可以从离子源直接引出负离子), 通过分析磁铁选出有用的放射性核束. 再经预加速和同质异位素分离器分离后, 得到最高能量为 300keV 的纯的放射性核束, 供各种物理实验应用. 还可将其注入到 HI-13 串列加速器中, 进一步加速. 在线同位素分离器的总体布局如图 2 所示.

在线同位素分离器的第一阶段是对不同质量的粒子种类的鉴别, 第二是对各种同质异位素进行分析. 第二段的两段同质异位素分离器是由两个偏转半径为 2.5m , 偏转角为 100° 的分析磁铁组成, 其质量分辨率的设计要求是 20000.

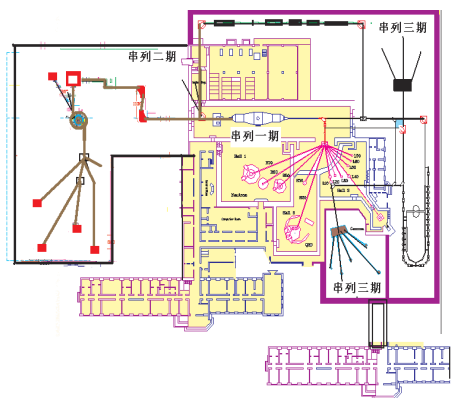
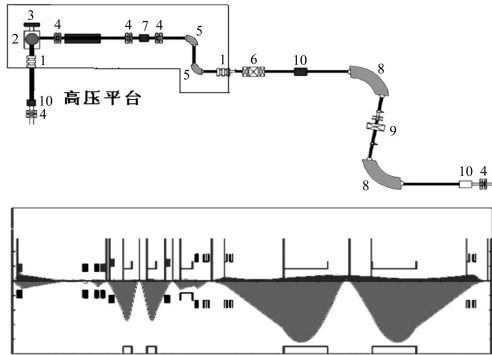


图 1 重离子加速器物理研究平台的总体布局

1) E-mail: gxl@iris.ciae.ac.cn

在线同位素分离器采用的是双能量系统^[1], 第一段能量为离子源引出能量20keV, 第二段能量为320keV. 其中每段都采用双磁铁布局, 大色散系统. 两段之间采用消色散布局, 消除离子源和引出电源能对质量分辨的影响.



1 加速管 2, 靶源 3, 挡束器 4, 四极透镜 5, 磁分析器 6, 9, 四极透镜 7, 电荷交换器 8, 磁分析器 10, 束流监测

图 2 在线同位素分离器的总体布局和包络

3 注入器升级和低能脉冲化

串列加速器注入器升级改造项目采用两条注入传输线. 一条是将现有注入器台架电压由现在的-150kV 提高到-300kV, 光路系统保持不变, 在保证串列加速器正常运行的前提下满足串列升级工程的要求.

再增加一套高质量分辨率的粒子注入系统, 采用先加速后分析结构, 静电分析器和磁分析器构成能量消色散系统. 静电分析器和磁分析器位于地电位, 主要满足 AMS 实验要求.

注入器升级改造技术指标: 注入器台架电位300kV 能稳定工作; 用于 AMS 的束流注入的质量分辨好于380.

为了提高放射性核束从低能段到超导加速器之后的传输效率, 必须提高聚束效率与纵向聚焦能力, 为此在串列加速器低能段要重新设计低能束流脉冲系统. 直流离子束被行波切割器切割成分布均匀的脉冲束, 这些脉冲束经过双漂移聚束器能量调制后, 在超导后加速器入口形成时间聚焦点, 分布均匀的束流被压缩到超导加速器纵向接受度的范围内.

4 低能 RFQ/DTL

为了进一步提高束流利用率和传输效率, 增大束流强度, 在 HI-13 串列加速器的侧面, 建设一套低

能重离子直线加速器, 这套系统将和串列加速器并行, 直接接受来自 ISOL 的放射性核束, 然后加速到超导直线加速器可以接受的能量, 注入到后加速器里. 这套系统包括: 在线 ECR 离子源、低能束流传输段 LEPT、低能聚束器(12MHz)、射频四极加速器 RFQ(108MHz)、中能束流传输段 MEPT、中能聚束器、交叉手指型漂移管加速器 IH-DTL(108MHz; 216MHz).

重离子物理平台加速可同时加速放射性核束和稳定核束. 放射性核束来自 ISOL 系统. ISOL 系统的靶源系统将产生电荷态为+1 的放射性核束, 引出后注入一个 ECR 源以获得高电荷态; 同时另一个 ECR 源产生的高电荷态稳定核束也可以注入 RFQ 加速.

这里的 ECR 源的作用是针对广泛质量数的 RIB 产生足够高的放射性核束的电荷态, 所谓在线 ECR 双源系统. 在强放射性区域的靶源(通常是 EBIS 和表面源)产生的 RIB, 被俘获到 ECR 的等离子区内, 这个源将工作在超超高 B 模式, 所产生的放射性核束的荷质比为: 1/15—1/20.

RFQ 在作为注入器使用时, 通常是利用自身的聚束段把直流束聚为脉冲束, 从而实现束流的在纵向上的 100% 传输. 但是计算和实践表明, 如果利用 RFQ 外部的聚束器实现束流的脉冲化虽然损失了一部分束流(25% 左右), 但是束流品质会有较大提高, 同时由于省去了 RFQ 的聚束段, 纵向长度大为缩短. CIAE 重离子物理平台的 RFQ 将采用外聚束方案.

RFQ 采用四杆型结构, 所承接的束流是微安量级的弱流. 注入能量为 15keV/u, 输出能量为 300keV/u, 工作频率为 108MHz, 极间电压为 45kV, 长度为 3m.

DTL 采用 IH 结构, 聚焦单元分离于 DTL 谐振腔, 每个 DTL 腔的前几个单元工作在负相位实现纵向匹配, 其他单元都工作在 0° 以得到高的加速效率和低的横向散焦^[2].

DTL 工作在荷质比在 $q/A = 1/6$ 的情况下, 离子从 300keV/A 加速到 2.4MeV/A. DTL 共有 7 个谐振腔, 腔与腔之间安置一个三单元四极透镜组以保证横向匹配. 谐振腔之间的 5 个三单元四极透镜的几何尺寸完全一样. 全长为 8.72m. 谐振腔的主要参数见表 1.

表 1

谐振腔	长度/cm	单元数	平均场强	最高表面电场	高频功率
1	34.3	9	30kV/cm	1.04Kilp	8kW
2	85.6	17	30kV/cm	1.15Kilp	19kW
3	113.2	18	30kV/cm	1.26Kilp	25kW
4	166.7	22	28kV/cm	1.19Kilp	36kW
5	117.7	25	36kV/cm	1.31Kilp	26kW
6	127.3	26	36kV/cm	1.38Kilp	28kW

5 超导 Linac

超导直线加速器将分别接受来自 IH-13 串列加速器和 IH-DTL 的输出束流, 来自 IH-DTL 的输出束流不必转换为串列加速器需要的负离子, 从而大大提高了离子的传输效率. 来自串列加速器的束流在注入直线加速器之前, 需要进行能量分析, 加速器后聚束, 以及匹配传输.

为了提高注入到直线加速器的粒子电荷态, 提高荷质比, 充分利用后加速器谐振腔的电压增益, 需要设置一台第三剥离器. 为了减少束流通过剥离靶因为散射而造成的相面积扩大, 要求剥离器放置在束流的空间与时间的最小包络处. 为了保持剥离后束流的纯度, 需要对束流在进入直线加速器之前进行电荷态选择, 因此第三剥离器必须放在偏转磁铁之前.

超导直线加速器采用四分之一波长谐振腔, 它的材料为铜基溅射铌, 铌是良好的超导材料, 但其导热性能很差, 铜有良好的导热性能. 谐振腔的中心由液氦致冷. 每4个谐振腔放在一个低温柜里. 柜的外壳有液氮循环维持相对低温环境, 柜内有1个液氮储存箱, 提供液氮给4个谐振腔的内导体. 整个柜子同束流

管道连通, 处在真空条件之下.

超导直线加速器部分由36个QWR谐振腔构成, 每个恒温柜内装4个腔, 共9个恒温柜, 柜与柜之间是一组三单元四极透镜组. 谐振腔的参考相位取 -20° . 头5个恒温柜的20个腔的参数为 $f = 108\text{MHz}$, $\beta = 0.07$; 接着4个恒温柜的16个腔的参数为 $f = 144\text{MHz}$, $\beta = 0.11$. 超导直线加速器的光学元件布局如图3所示.

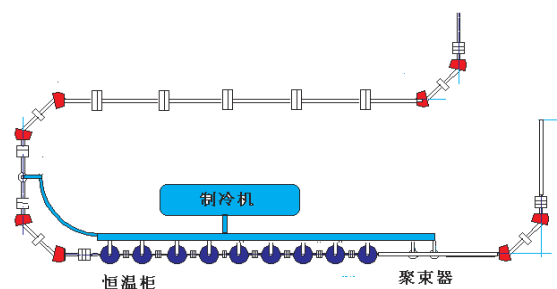


图3 超导直线加速器的光学布局

超导直线加速器的最后设置一个QWR腔组成退聚束器, 其作用或者能压缩束流的时间宽度, 或者可以展览时间而把束流的能散减小1个量级. 用来满足物理实验对束流的时间分辨或能量分辨要求.

参考文献(References)

1 Hermann Wollnik. Ion Optics in Mass Spectrometers, J. Mass Spectrom, 1999, **34**: 991—1006

2 Laxdal R E. ISAC-I and ISAC-II at Triumf: Achieved Performance and New Construction, Proceedings of LINAC2002

CIAE Heavy Ion Nuclear Research Facility

GUAN Xia-Ling¹⁾ ZHOU Li-Peng PENG Zhao-Hua LÜ Zhao

BAO Yi-Wen HUANG Qing-Hua ZHENG Jian

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract The project of the CIAE Heavy Ion Nuclear Physics Researcher Facilities has been proposed. It is composed of a super-conducting linac with 9 cryostatus and 36 QWR cavities, which can boost the energy of heavy ion up to $18\text{MeV}/q$ following the existing HI-13 tandem. A new low energy heavy ion linac composed of an on-line ECR ion source, a four rods RFQ and an IH-DTL linac was also designed to accept the RNB directly from the ISOL bypassing the existing HI-13 tandem and inject the beam into the superconducting linac.

Key words RFQ, IH-DTL, superconducting linac

1) E-mail: gxl@iris.ciae.ac.cn