

# 兰州重离子加速器及其应用前景

王义芳 叶峰

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

本文简要地介绍了兰州重离子加速器的结构和建造过程, 并对它的应用前景作了简单的描述。

加速器的出现已有 60 年的历史了。加速器在科学研究、医疗卫生、工农业生产及国防等方面的应用日益广泛。同时, 加速器物理和技术也得到重大发展, 加速器加速出来的离子能量越来越高, 如质子能量可达  $10^4 \text{GeV}$ , 加速离子的种类也由原来的轻离子向重离子开拓, 已具有加速元素周期表中所有离子的能力。

自从 50 年代人们成功地加速了重离子, 经过重离子反应, 合成了新的超铀元素以来, 重离子加速器在开展重离子物理和其他许多学科的研究方面展现着广阔的应用前景。特别是由于重离子具有质量大、正电荷数高和动量大的特点, 可以从研究的广度和深度开拓新的领域。

从 70 年代中, 我们开始了兰州重离子加速器的研制。经过十多年的努力和全国许多协作单位的配合, 于 1988 年 12 月 12 日正式调试出束。这是继法国 GANIL、日本 RIKEN 之后, 世界上第三台分离扇重离子加速器。兰州重离子加速器的正式运行, 标志着我国重离子加速器已跨入了世界的先进行列。

## 一、兰州重离子加速器

兰州重离子研究装置(HIRFL)即兰州重离子加速器系统, 它是由一台扇聚焦回旋加速器(SFC)作为注入器和一台分离扇回旋加速器(SSC)作为主加速器组合而成的。从离子源产生的重离子束由 SFC 预加速后, 经过 65m 长的前束流输运系统, 进入主加速器 SSC 继续加速, 然后经过 110m 长的后束流输运系统送到

八个物理实验终端。其总的布局如图 1 所示。

我们使用电子回旋谐振离子源(ECRIS)作为外离子源, 束流经小束流输运系统垂直注入到 SFC ECRIS 是当前国际上兴起的新型离子源, 它有对重离子产生较高电荷态的能力, 并具有产额较高、运行周期长的优点, 从而可以大大提高加速离子, 特别是较重离子的束流强度和束流品质的能力, 可以加速从碳(C)到铀(U)的所有离子, 即使对 U 离子, 其单核能也可以达到库仑位垒以上。该系统的束流设计指标列于表 1, SFC 和 SSC 的基本设计参数列于表 2。

表 1 束流设计指标

ECR 源	
离子种类	C—Ta
单核能量	100—7MeV/A
束流强度	$10^{12}$ — $10^{10}$ PPs(粒子/秒)
能散度	$5 \times 10^{-3}$
发射度	$10\pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$

表 2 SFC 和 SSC 的基本设计参数

	SFC	SSC
能量常数	69	450
最高磁场(T)	1.6(平均)	1.6
磁场稳定度	$10^{-3}$	$10^{-3}$
高频频率(MHz)	6—18	6.5—14
加速谐波	1,3	2,4,6
注入半径(m)	—	1.00(平均)
引出半径(m)	0.75(平均)	3.21(平均)

注入器 SFC 由中国科学院近代物理研究所原有的直径为 1.5m 的经典回旋加速器改装而成, 改装后的加速器直径为 1.7m, 它的极面上装有三个螺旋线形的扇形垫铁, 其上装有同

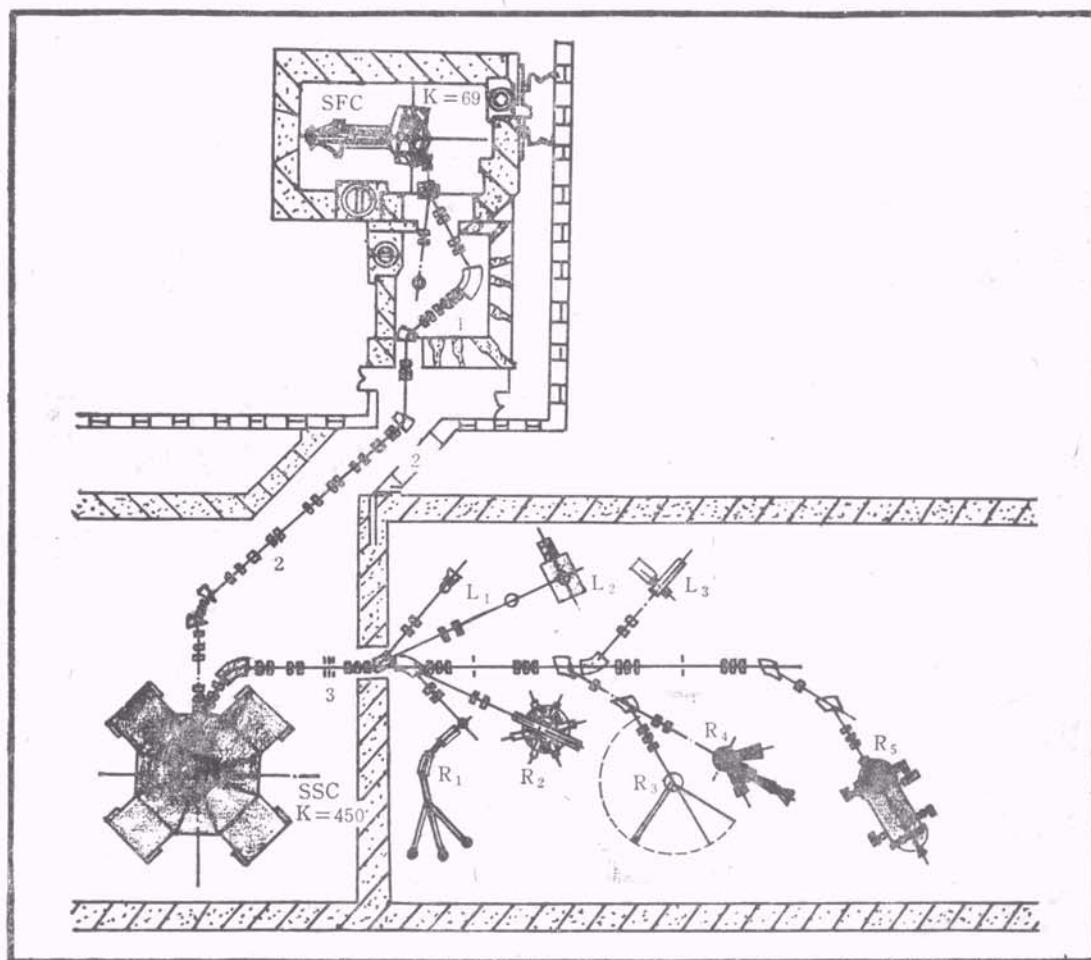


图1 兰州重离子加速器系统图

1.剥离器; 2.聚束器; 3.狭缝限制器;  $R_1$  在线同位素分离器;  $R_2$  在束 $\gamma$ 测量装置;  $R_3$  重离子飞行时间谱仪;  $R_4$  大面积位置灵敏电离室;  $R_5$  2.4m 直径圆柱型散射室;  $L_1$  氦喷嘴传输快化分离系统;  $L_2$  重离子辐照装置;  $L_3$  原子物理研究设备

轴线圈和谐波线圈,还有真空室、加速腔体、D形盒以及 200kW 的高频发射机。改建后的 SFC 如图 2 所示。它不仅可以满足作为注入器的要求,而且可以单独供束,进行低能重离子物理实验。

主加速器 SSC 主要由磁场系统、真空系统、高频系统、注入、引出系统,束流诊断和自动控制系统组成。SSC 的主要设计参数列于表 3,建成后的 SSC 示于图 3。

我们知道,建一台大型加速器不仅标志着物理思想和设计水平的高低,而且标志着这个国家工业基础是否雄厚,工艺水平是否高超,当

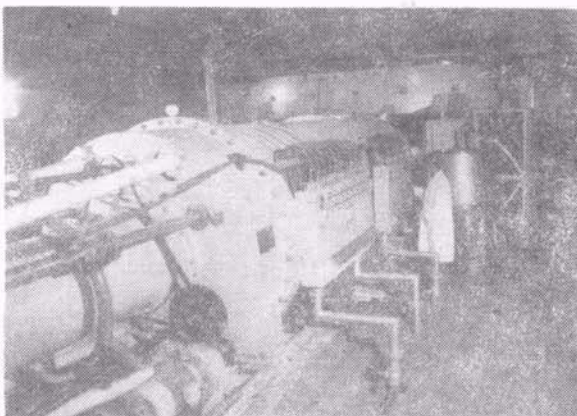


图2 改建后的 SFC

表3 SSC的主要设计参数

磁场系统		高频系统	
扇形磁铁数(台)	4	频率范围(MHz)	6.5—14
磁极扇角(度)	52	腔体Q值	>7000
磁极气隙(cm)	10	腔体最高电压(kV)	250
最高磁场(T)	1.6	腔体数(个)	2
励磁安匝(AT)	$1.6 \times 10^5$	D盒角(度)	26
励磁功率(kW)	550	D盒孔径(cm)	5
垫补线圈(对)	36	加速隙角(度)	4
垫补功率(kW)	110	高频机功率(kW)	$2 \times 120$
<b>真空系统</b>			
真空室容积( $m^3$ )	~100		
有效容积( $m^3$ )	~60		
工作真空(pa)	$1.3 \times 10^{-5}$		
有效抽速( $m^3/s$ )	140		



图3 建成后的SSC

然,加速器的建设反过来也促进了它们的进一步提高。

为了建造总重为2000吨的扇形磁铁,要锻造每块不超过50吨的大型超低碳钢组件。为保证导磁率,其含碳量 $\leq 0.06\%$ ,其他元素含量也要求相当严格,特别是碳偏析要求极其严格。如:一对磁极上十个试样之间的碳偏差不大于 $0.01\%$ ,任意两对磁极其平均含碳量之差不大于 $0.01\%$ ,内部缺陷要求进行超声探伤,在磁极内部不应有超过当量直径为6mm的单个缺陷,而磁性能和机械性能必须保证,这在国内是史无前例的。机械工业部第一重型机器厂组织了专门的攻关小组,研究出一整套工艺和热处理参数,圆满地达到了上述要求。最后产品含碳量在 $0.04\%$ 以下。对其机械加工的精度要求

也十分严格,如极心上下表面平面度为 $0.08\text{mm}$ ,光洁度 $\nabla 6$ ,偏角为 $52^\circ \pm 30'' - 40''$ ,实测结果达到了设计要求,且偏角公差只有 $\pm 6''$ 。

兰州重离子加速器需要200多台长期稳定度 $10^{-4}$ 到 $10^{-6}$ 的大功率直流电源,而当时经过了解只有 $10^{-2}$ 量级的,又无厂家愿意研制。我所专门组织了攻关小组,经过几年努力,攻克了这一难题。由中国科学院近代物理研究所给予技术帮助,西安电力整流器厂已形成了生产长期稳定度为 $10^{-4}$ 到 $10^{-5}$ 大功率直流电源的系列产品的能力。技术上以中国科学院近代物理研究所为主,生产了一台 $4000\text{A}/185\text{V}$ 供主线圈用的电源,8小时稳定度为 $5 \times 10^{-6}$ ,达到了国际先进水平,满足了磁场稳定的需要。由于这一技术突破,目前已有几个厂家形成了批量生产能力。除满足兰州重离子加速器工程需要外,还提供北京正负电子对撞机工程,合肥同步辐射加速器等工程使用,为国家节约了大量外汇,仅西安整流器厂1986年就净增产值681万元。同时,这种电源在许多测试仪器(如各种磁谱仪)中都是关键部件,因此有着广泛的用途。

高频系统是离子获得能量的主要来源,该系统的频率稳定度为 $5 \times 10^{-6}$ ,幅度稳定度为 $1 \times 10^{-3} - 5 \times 10^{-4}$ ,相位稳定为 $0.7 - 1^\circ$ ,在SFC的 $200\text{kW}$ 和SSC的两台 $120\text{kW}$ 发射机中,均采用了大功率超蒸发冷却功放管。这种超蒸发冷却技术在我国应用尚属首次,把我国高频大功率技术提高到一个新的水平。而在一个宽频带内相位稳定在 $1^\circ$ 之内的技术,在军事、通讯等各方面均有重要的实用意义。

主加速器真空室是一个超大型形状复杂的超高真空容器,它的研制成功表明我国大型不规则薄壳容器超高真空技术已达到国际先进水平。该真空室最大宽度约 $10\text{m}$ ,最大竖直高度约 $4.5\text{m}$ ,净重约 $65\text{t}$ ,容积 $100\text{m}^3$ ,是用 $316\text{L}$ 不锈钢板采用手工电弧焊的方法拼焊成的整体结构。真空室有大小各种法兰200多个,大多数采用纯铝垫密封。焊缝总长约 $1000\text{m}$ ,密封焊缝 $750\text{m}$ ,全部要求在二级标准以上;焊缝相对

表 4 初次调束时的束流参数

加速器	粒子	A	Z	h	$f_{rev}(\text{MC/s})$	$f_{rf}(\text{MHz})$	$B_{ax}(\text{T})$	$W(\text{MeV/A})$	两器匹配效率
SFC	C	12	4	1	6.262	6.262	1.2270	4.529	50%
SSC			6	2	4.697	9.393	1.0735*	50	

\* 是 SSC 引出半径处的最大磁场

导磁率要求  $\mu \leq 1.01$ 。这就要求在加工焊接过程中采用一系列特殊工艺方法。经过航天部风华机器厂反复努力,在结构材料、焊接材料、焊接工艺、加工方法及热处理等方面研究实验,终于保证了设计指标。

另外,在许多设备的研制中,有的光洁度达到  $\nabla 10$  以上,有的需要大面积厚层电沉积,有的要使用特殊性能无油润滑轴承,有的冷却水水压高达近 30kg,以及加工中尚有着许多特殊的工艺要求,这些技术上的难点都是经过同协作单位组成的攻关小组一个个地解决的,大大提高了我国在这些方面的水平。

1988年4月,我们开始了兰州重离子加速器装置的初次调束,经过半年多的努力,克服了许多难点及设备故障,终于在当年12月12日完成了调束工作。在初次调束中,我们选用了C离子,这对主加速器SSC是有相当难度的。它主要表现在束流的注入和引出上。在这种情况下,由于加速电压比较低,仅有75—80kV,在注入半径附近相邻两圈束流之间的距离很小,必须经过细致的调整,第一圈加速束流才能较好地绕过注入元件而不致于打到它们的外壁上损失掉。另外,在引出半径附近,束流的圈距很小,仅有大约2mm,而束流本身的宽度却有8mm,因而若干圈束流相互重叠,要想得到高效率的较高品质的束流,就必须实现单圈引出,因此,必须在引出区产生一个一次谐波场,对束流进行扰动,使束流产生进动,束流在引出静电偏转板入口有较大的圈距,才能得到满意的引出束。而法国GANIL和日本RIKEN的初次调束都选用了氩(Ar),其束流在引出半径的自然圈分离对单圈引出来来说已经足够大,以致不用使用任何特殊的手段就可以得到好的引出束。

物理

在初次调束时的束流参数如表4所示。

在1989年初,从主加速器引出的束流可达30nA以上。

随着HIRFL的成功运行,一个与之配套的包括八个物理实验终端与公共实验设施的较先进的重离子物理实验室已经建成。目前HIRFL已先后调出了50MeV/u的C<sup>6+</sup>束,75MeV/u的C<sup>6+</sup>束和50MeV/u的O<sup>8+</sup>束流,并且已在六个实验终端上进行了各种物理、生物实验。今年准备加速较重的Ar束和Ne束,为物理工作者提供更多种类的实验条件。

## 二、应用前景

重离子物理是当前原子核物理的前沿领域。兰州重离子加速器是一台优良的中低能区重离子加速器,是开展中低能区重离子物理研究的理想工具。主要研究领域有两个方面。

新元素、新核素的产生及奇异衰变方式的研究。

自然界最重要的放射性元素是92号元素铀和94号元素钚,在101号元素之前的其他超铀元素均为人工合成。随着重离子加速器的发展,美国、苏联、德国先后合成了102号至109号元素。根据原子核理论计算,预示在质子数为114和中子数为184附近存在一个超重核稳定岛。显然,这是核物理学家们极希望解决的课题。

自然界中稳定同位素不过300多个,连同人工合成的也只有约2000个,而根据原子核理论预测共有5000多个,即还有3000多个新核素有待人们通过重离子反应去产生。

当然,这些新核素是不稳定的放射性核,它

除了人们熟悉的  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  和自裂变四种放射性衰变方式外,还有许多其他衰变方式,这无疑对研究核结构是极有价值的。

重离子核反应中,出现了许多轻粒子核反应中未出现过的反应机制,如深度非弹性碰撞、快裂变和非完全熔合等。在转移反应中也出现了多粒子和大质量转移。在一定能量条件下,产生复合核,发生熔合-裂变反应。在一定的反应系统和一定能量下,往往产生几种反应机制。

中能区重离子核反应研究起步较晚,有待进一步开展。在中能情况下,尽管每个核子的平均能量小于  $\pi$  介子的产生阈能,但仍可能产生  $\pi$  介子,即所谓  $\pi$  阈下产生  $\pi$  介子或产生高能  $\gamma$  光子。正常核物质状态下每个核子能承受的最大激发能的极限,中能碰撞中的复杂粒子发射,多重碎裂等都是该能区中颇受重视的研究课题。

重离子束在材料科学、固体物理、生物医学、天体物理、原子分子物理以及重离子束引发可控聚变反应等诸学科领域已有广泛的应用,但在我国尚处于起步阶段。

众所周知,离子注入技术已广泛应用于半导体掺杂工艺之中,成为生产超大规模集成电路必不可少的手段。重离子束蚀刻制版,不但具有电子束曝光的一切优点,而且使传统的二维蚀刻制版成为三维。另一个重大优点是不局限于以光敏材料作为基体,硅层上的二氧化硅就可作为基体,其优越性大大超过其他有机物。

重离子束在材料科学的研究中扮演重要角色,特别是堆材料辐照损伤的研究。在反应堆中用中子直接照射来研究材料抗辐射性能,不

仅耗资大,而且时间太长。用重离子束来模拟中子,其效率将提高几万,乃至几十万倍,因而在极短时间内就可以获得在快中子反应堆中材料长期辐照性能的资料。这是反应堆、核电等工程中至关重要的课题。

通过重离子束注入手段可明显改善材料表面的硬度和耐磨性能,已在某些工业部门应用。而重离子核微孔膜则显示出其无与伦比的优点。激光打孔其直径只能达  $0.1\mu\text{m}$ ,而重离子束可制成  $0.01\mu\text{m}$  的小孔,其效率尤为激光生产的 10 万倍。核微孔膜又可以作为液体或气体混合物的分离处理膜片,例如:  $^{235}\text{U}$  和  $^{238}\text{U}$  分离、废液中贵金属回收、海水淡化等,还特别适用于渗透和半渗透理论研究。核微孔膜在生物医学中更可大显身手,如用于正常与不正常红细胞的鉴别。此外,在全息照像、光学和电子显微镜中作为针孔光栏也是大有作为的。

由于重离子束在物质中的末端效应,使其在医疗诊断中更具特色,它能比 X 射线更灵敏地显示出物质密度的变化,因此完全可以用重离子照像来研究人体组织、脑结构及肿瘤。而高能重离子束已在用于癌症的实验治疗研究。

目前,兰州重离子加速器已正式运行两年了,全国许多科学工作者已在该加速器开展了工作。随着时间的推移,我们加速的离子种类会越来越多,能量会越来越高,束流品质和束流强度都会不断提高,设备更加完备。我们正期待着全国各有关学科有更多的科学家在这台加速器上进行各种研究工作,为我国科学事业、经济和国防建设作出新的贡献。

(上接第 755 页)

- trans. by J. M. Child, MIT. (1966), 114.
- [9] B. Jones, *The Life and Letters of Faraday*, Vol. 2, London (1870), 6.
- [10] I. Newton, *Unpublished Scientific Papers*, edited by A. R. Hall and M. B. Hall, (1978), 337.
- [11] J. Agassi, *Faraday as a Natural Philosopher*, Chicago, (1971), 157.
- [12] I. Newton, *Unpublished Scientific Papers*, edited by A. R. Hall and M. B. Hall, (1978), 228.
- [13] J. Agassi, *Faraday as a Natural Philosopher*, Chicago, (1971), 102.
- [14] B. Jones, *The Life and Letters of Faraday*, Vol. 1. London, (1987), 195—196.
- [15] B. Jones, *The Life and Letters of Faraday*, Vol. 2, London, (1987), 249.
- [16] B. Jones, *The Life and Letters of Faraday*, Vol. 2, London, (1987), 249.
- [17] M. Faraday, *Phil. Mag.*, 24-171(1844), 144; *Experimental Researches in Electricity*, Vol. 2, London, (1969), 200.
- [18] M. Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, Vol. 2, London, (1969), 291.
- [19] M. Faraday, *Diary*, Vol 4, London, (1933), 322, 440.