

成果与应用

兰州重离子加速器(HIRFL)建成 及其应用前景

叶 峰 魏宝文

(近代物理研究所)

50 多年来,原子核物理研究和粒子加速器技术的不断发展及其取得的一系列辉煌成就,对世界政治、经济、科学和军事都发生了重大影响。加速器已成为核物理研究中的关键设备。从 60 年代起,原子核物理向其前沿领域重离子物理方向发展,各国纷纷改建或新建各种类型的重离子加速器。目前已实现了对元素周期表上全部稳定元素离子的加速,为重离子物理及有关学科的应用研究提供了强有力的武器。我国自行设计、自行建造的兰州重离子加速器(HIRFL)于 1988 年 12 月 12 日建成出束,它标志着我国回旋加速器技术已进入了世界先进行列。

国外研究概况

随着重离子物理研究的迅速发展,重离子加速器的设计与建造在全世界范围内受到了普遍的关注。当前重离子加速器主要为直线型、回旋型和高压静电型,而世界上主要重离子加速器系统则是由这三种类型加速器组合而成。从其能量范围来说,从几个 MeV (兆电子伏)/核子到几个 GeV (吉电子伏)/核子。重离子加速器按能量一般分为两个能区:中低能区 $< 1\text{GeV/核子}$;高能区(相对论能区) $> 1\text{GeV/核子}$ 。

目前,最优越的高能重离子加速器是美国伯克利洛伦斯实验室(Berkeley Lawrence Lab)的贝伐拉克(Bevalac),该加速器系统是由超级重离子直线加速器与同步加速器串联而成的,是世界上唯一可将铀离子加速到 1GeV/核子 的高能重离子加速器。世界各国科学家在这台加速器上已进行了许多出色的高能重离子实验研究工作,开展了材料科学、生物医学、固体物理等应用研究,同时用了相当多的时间进行重离子治癌的临床治疗实验研究。

在中低能区,联邦德国 GSI 的全粒子重离子直线加速器早在 1976 年便实现了全粒子加速。引人注目的是近六、七年内国外新建成的 7 个加速器和我国兰州重离子加速器。它们是:美国 MSU 超导回旋加速器,法国 GANIL 分离扇回旋加速器组合加速系统,日本理化研究所直线加速器与分离扇回旋加速器串联的加速器系统,加拿大 Chalk River 的 $K = 520$ 超导回旋加速器,法国的 SARA $K = 90$ 与 $K = 160$ 回旋加速器组合加速系统,美国橡树岭实验室 25MV 串列静电加速器和 $K = 100$ 回旋加速器组合加速系统,以及英国达累斯伯里实验室的 30MV 串列静电加速器。兰州重离子加速器是由 $K = 69$ 扇聚焦回旋加速器和 $K =$

450 分离扇回旋加速器串联的组合加速系统。此外, 还有意大利、美国和苏联等国的几台中低能重离子加速器正在建造之中。

本装置水平

兰州重离子加速器系统也称兰州重离子研究装置, 它是由 1 台 1.7 米扇聚焦回旋加速器 (SFC) 作为注入器和 1 台分离扇回旋加速器 (SSC) 作为主加速器组合而成的。由离子源产生的重离子束由 SFC 预加速后, 经过 65 米长的前束流输运线, 进入主加速器 SSC 继续进行加速, 然后通过 110 米长的后束流输运线送到 8 个物理实验终端。该系统概貌示于图 1。该系统采用 PIG 源和 ECR 源 (电子回旋谐振离子源) 两种离子源。ECR 源是当前国际上兴起的新型离子源, 它可以大大地提高加速器性能与束流品质。当采用 PIG 源时, 系统可加速 C (碳) 到 Xe (氙) 的各种离子, 对较轻的重离子 (如 C、N、O 等) 能量可达 100 MeV/核子, 而对 Xe 等能量约为 5 MeV/核子。当使用 ECR 源时, 可加速 C 到 Ta (钽) 附近的全部离子,

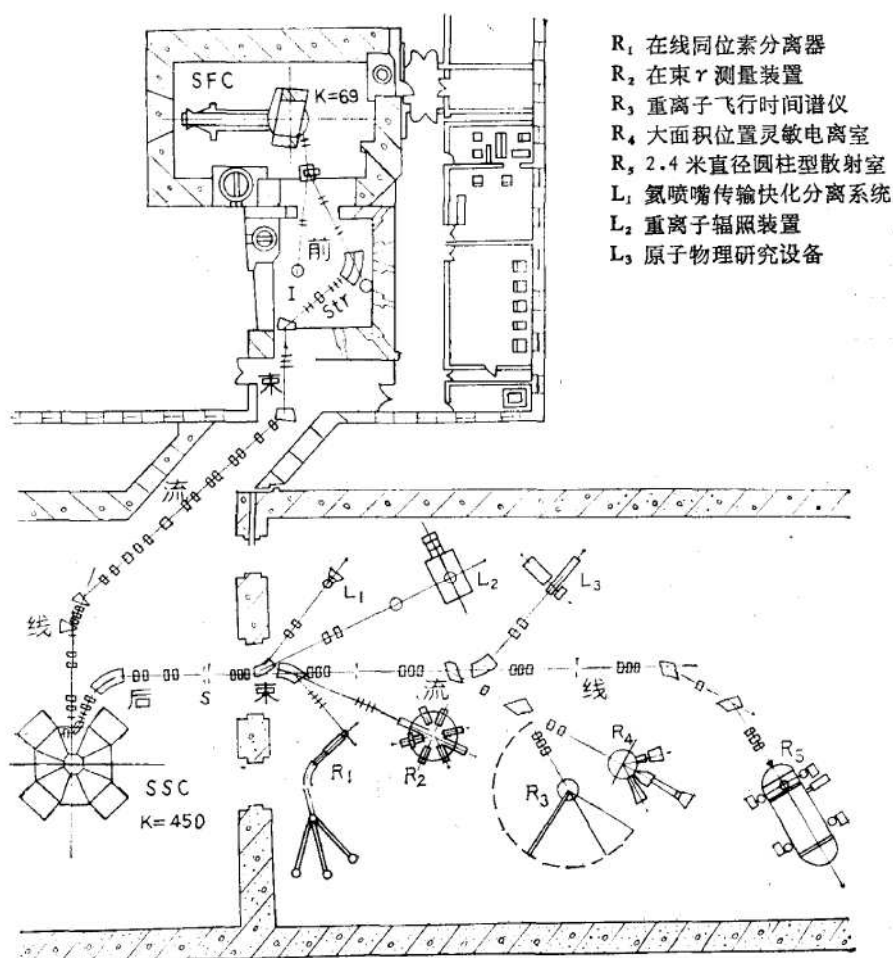


图1 兰州重离子加速器系统图

能量对应为 120MeV/核子和 5MeV/核子,当进一步提高 ECR 源性能时,可加速 U(铀)离子达库仑位势以上。系统的束流设计指标列于表 1。而 SFC 和 SSC 的基本设计参数列于表 2。

表1 束流设计指标

	PIG 源	ECR 源
离子种类	C—Xe	C—Ta
单核能量	100—5MeV/N(核子)	120—5MeV/N
束流温度	10^{12} — 10^9 p.p.s(粒子/秒)	10^{12} — 10^9 p.p.s(粒子/秒)
能散度	5×10^{-3}	5×10^{-3}
发射度	4 π mm.mrad(毫米·毫弧度)	4 π mm.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(特斯拉)	1.6(平均)	1.6
磁场稳定度	10^{-5}	10^{-5}
高频频率MHZ(兆赫)	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 是由原 1.5 米经典回旋加速器改建的,改建的着眼点是扩大磁极直径并建立等时场。极面直径由 1.5 米扩大到 1.7 米,其真空室、加速腔体及 D 形盒、偏转板等均需更换。为建立等时场,在磁极上必须附加扇块,同轴线圈和谐波线圈。为了适应改造的高频腔体及频段要求,原高频机也更换成新的 200KW(千瓦)高频发射机。改建后的 SFC 示于图 2,它不仅可以满足作为注入器的要求,而且也可单独运转,进行低能重离子物理实验工作。

主加速器——分离扇回旋加速器(SSC)主要由磁场系统、真空系统、高频系统、注入引出系统及束流诊断与自动控制系统组成。SSC 主要设计参数列于表 3 中,建成后的 SSC 示于图 3。

磁场系统由 4 台总重 2000 吨的扇形磁铁、主线圈、垫补线圈、调差线圈和 60 多台大功率高稳定度直流电源组成。每扇磁铁重 500 吨,是由每块不超过 50 吨的大型超低碳钢锻件组成。使用光学检测系统保证了安装公差。供给主线圈和垫补线圈电流的稳定度分别为 $5 \times 10^{-6}/8$ 小时和 $2 \times 10^{-4}/8$ 小时,从而保证了磁场稳定度为 10^{-5} 。磁场测量的结果表明,磁铁质量完全符合要求。根据所测得的大量数据,能很好地建立起各种离子各种能量的等时场。

高频系统是离子获得能量的主要来源。产生高频加速电场的两台谐振腔是“燕式”异型 1/2 波长结构,由 D 盒、内杆、外罩和波纹状调谐板组成,这种结构稳定紧凑,调谐部件单一方

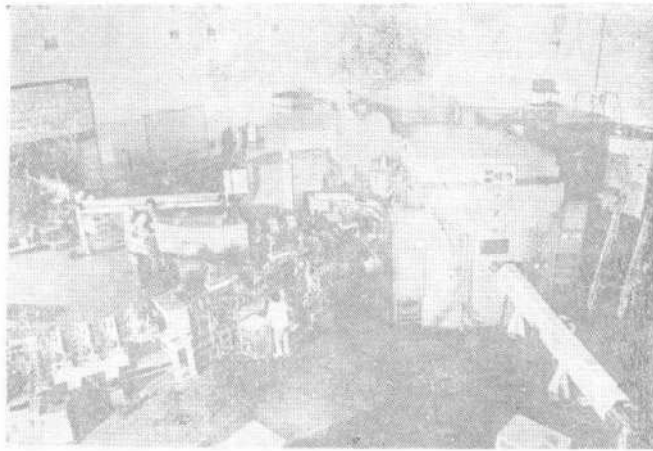


图2 改建后的 SFC

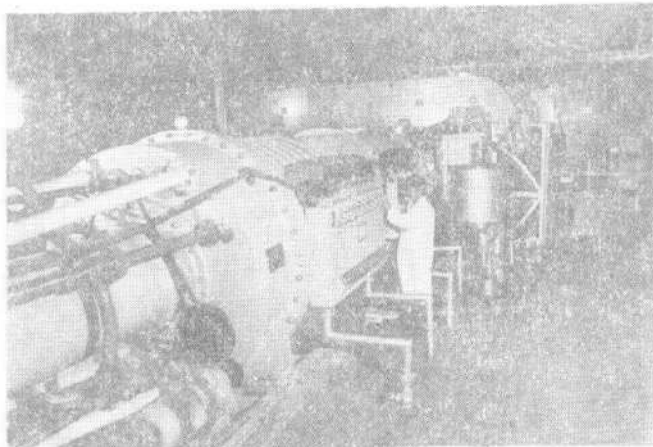


图3 建成后的 SSC

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)	1.6×10^5	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)	2×120
真空系统			
真空室容积 (m^3)	~100		
有效容积 (m^3)	~60		
工作真空 (pa)	1.3×10^{-5}		
有效抽速 (m^3/s)	140		

便。每台腔体配备一台 120KW 高频发射机馈送功率。系统的频率稳定度为 5×10^{-6} , 幅度稳定度为 1×10^{-3} — 5×10^{-4} , 相位稳定为 0.7 — 1° 。

真空室是一个十分庞大的部件, 最大宽度约 10 m, 最大竖高约 4.5 m, 净重约 65 吨, 容积约 100m^3 , 是用 316L 不锈钢板采用手工电弧焊的方法拼焊成的整体结构。真空室上有各种大小法兰 200 多个, 大多数采用纯铝垫密封。排气系统的主抽泵为 8 台 RKP-800 型低温泵, 2 台 TPH-5000 型涡轮分子泵为辅助泵。在调束过程中, 启动 2—3 台低温泵, 可达 3 — 5×10^{-5} Pa (帕)。

在注入器、主加速器及前后束流线上, 安装了各种束流诊断元件。如在主加速器内安装了 4 个径向探针, 可以测量束流位置、分布及大小, 安装了容性感应探针, 可以测量出束流相位偏离。在束流线上安装了法拉第筒、多丝室、狭缝等, 用来测量束流大小、剖面、发射度、能量和能散等。用这些装置不但可以测量束流参数, 而且方便束流调整。

整个加速器系统有各种设备上千台件, 为了使其有效运行, 系统采用计算机控制。现已实现第一步: 分系统计算机控制 (即分控站)。今后逐步过渡到第二步: VAX8350-CAMAC 串并环的集中控制。

综上所述, 我们不难看出, 无论从能区、加速离子种类来说, 还是从束流品质、加速器技术及质量来说, 兰州重离子加速器都是世界上优良的大型重离子加速器系统之一。

建 造 过 程

兰州重离子加速器建成出束是我国高科技领域中的一重大成果。毫无疑问, 在其建造中取得的技术成果对工业、科技等诸多方面作出了重要贡献, 例如大型超低碳钢的锻造与加工、超高真空技术, 大功率高稳定度直流电源技术, 高频相位稳定技术等。

每台扇形磁铁是由 12 块平板型超低碳钢锻件组成。较大的重 48 吨, 锻件宽度为 3500mm (毫米), 含碳量 ≤ 0.06 , 其它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 10 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 $\leq 0.01\%$, 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 $\phi 6$ 的单个缺陷。而磁性能和机械性能必须保证。这在国内是无先例的。机械工业部第一重型机器厂组织了专门攻关小组, 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。对其机械加工精度要求也十分严格, 如极心上下表面平面度为 0.08mm , 光洁度 $\nabla 6$, 偏角为 $52^\circ \pm 30''$ — $40''$, 实测结果达到了设计要求, 且扇角公差只有 $\pm 6''$ 。

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, 而当时国内只有 10^{-2} 量级的, 又无厂家愿意研制。我所组织一个小组, 经过几年努力, 攻克了这一难关。由我所给予技术帮助, 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。技术上以我所为主, 生产了 1 台 4000A/185V 供主线圈用电源, 稳定度为 5×10^{-6} /8 小时, 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。

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,曾在1986年东京举行的第11届国际回旋加速器会议上受到了一致赞扬。该真空室焊缝总长约1000 m、密封焊缝750 m,全部要求在二级标准以上,焊缝相对导磁率要求 $\mu \leq 1.01$ 。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试验,终于保证了设计指标。该项技术在航天航空及许多工业部门有着广泛的用途。

高频发射机是产生加速能量的功率源,在SFC的200KW和SSC的两台120KW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水平。而在一个宽频带内相位稳定在 1° 之内的技术,在军事、通讯等各方面均有重要的实用意义。

应 用 前 景

兰州重离子加速器在开展重离子物理和其它诸多学科的研究方面有着广阔的应用前景。

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1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。

(一) 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元素是92号元素铀和94号元素钚,在101号元素之前的其它超重元素均为人工合成。随着重离子加速器的发展,美、苏、联邦德国先后合成了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1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 α 、 β 、 γ 和自裂变4种放射性衰变方式外,还有许多其它衰变方式,这无疑对研究核结构是极有价值的。

(二) 重离子核反应机制的实验与理论研究。

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、非完全融合等。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,发生融合——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 π 介子的产生阈能,但仍可能产生 π 介子,即所谓 π 阈下产生或产生高能 γ 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它有机物。

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 微米,而重离子束可制成 0.01 微米的小孔,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: U^{235} 和 U^{238} 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,在全息照相、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相来研究人体组织、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。

兰州重离子加速器已经建成出束,正期待着全国各有关学科的科学家们在这台加速器上进行各种研究工作,为我国科学事业和经济建设作出新的贡献。