



# 强流回旋加速器技术的研究进展

张天爵, 樊明武, 李振国, 储诚节, 中国原子能科学研究院回旋加速器研究团队

中国原子能科学研究院, 北京 102413;

华中科技大学, 武汉 430074

E-mail: [tjzhang@ciae.ac.cn](mailto:tjzhang@ciae.ac.cn)

2009-03-28 收稿, 2009-06-06 接受

国家自然科学基金资助项目(批准号: 10772005, 10775185)

**摘要** 简要介绍了强流质子加速器的若干个主要应用领域, 并比较了目前国内外各类质子加速器的发展状况, 列举了有代表性的加速器技术指标. 在此基础上, 总结强流回旋加速器的技术特点, 介绍了中国原子能科学研究院的强流加速器研究与发展的三个主要阶段. 最后, 重点介绍了我们目前正在研究的一些强流回旋加速器关键技术及研究进展.

**关键词**

强流

回旋加速器

紧凑型

## 1 发展强流质子加速器的意义

强流质子束不仅在国防核技术中, 在核物理、材料科学与生命科学等多学科的基础研究中, 在能源、工农业、医学等多个国民经济领域的应用研究中, 都有着广泛的应用.

在国防核技术研究领域, 基于强流质子束可以构成核数据精确测量所需的白光中子源、单能中子源等(如美国LANL的武器中子研究设施WNR<sup>[1]</sup>); 强流质子束打靶还可提供放射性核束, 使不稳定核的核数据测量成为可能; 强流粒子束也是地面模拟研究核武器、核动力装置和航天器等国防装备的器件抗辐射加固技术经济可行的方法; 强流质子束也是氙生产长远发展的备用手段. 此外, 强流加速器技术的研究, 还可为射束武器的跟踪研究积累经验. 强流质子加速器在国防与国家安全中的更多应用, 还可参考文献[2].

在核物理基础研究中, 强流质子束及其产生的中子、放射性核束, 对核天体物理、中子科学等都有很重要的意义<sup>[3]</sup>.

在能源方面, 用加速器驱动次临界装置的能源系统实验研究已在进行. 欧洲CERN<sup>[4]</sup>、意大利ENEA<sup>[5,6]</sup>、瑞士PSI<sup>[7]</sup>、比利时IBA<sup>[8]</sup>、美国ANL<sup>[9]</sup>等

国家实验室和商业公司均提出强流加速器方案. 中国ADS研究已完成“启明星号”试验, 基于更高质子束功率的“启明星号”方案正在形成之中<sup>[10]</sup>. 目前世界上质子束流功率最高的加速器是PSI的回旋加速器.

在核废料处理方面, 用高功率束加速器嬗变处理轻水堆核电站等核设施产生的长寿命放射性核废物, 有可能为我国大规模发展核电提供一条良好解决环保问题的技术路径<sup>[11]</sup>.

发展强流回旋加速器所积累的关键技术, 还将对核医学的发展起到重要作用, 例如癌症和脑疾病的早期诊断与治疗等<sup>[12]</sup>. 在质子束流功率达到约200 kW的水平时, 还有望用于生产目前主要依靠反应堆生产的、包括<sup>99</sup>Mo-<sup>99m</sup>Tc等核医学广泛使用的同位素<sup>[12,14]</sup>, 与反应堆相比具有设施建造费用低、安全灵活的特点. 下面列举几个强流回旋加速器的实际应用或极有可能的发展方向:

(1) 5 MeV 强流小型回旋加速器(作为中子源, 用于核物理、核医学如 BNCT 等的基础与应用基础研究);

(2) 10 MeV 医用小型回旋加速器(用于 PET 与即时药物配送中心);

**引用格式:** 张天爵, 樊明武, 李振国, 等. 强流回旋加速器技术的研究进展. 科学通报, 2009, 54: 2169~2176

Zhanh T J, Fan M W, Li Z G, et al. Research progress in high intensity cyclotron technology. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0503-x

(3) 20 MeV 强流回旋加速器( $^{57}\text{Co}$ ,  $^{103}\text{Pd}$  等放射性同位素生产及癌症治疗种子源的制备);

(4) 30 MeV 医用回旋加速器(多种中、短寿命放射性同位素生产);

(5) 70 MeV 医用回旋加速器(眼睛等部位的恶性肿瘤治疗、特种放射性同位素生产等);

(6) 100 MeV 强流回旋加速器(国防核科学研究、放射性核束物理、核天体物理等基础研究、放射性同位素生产、眼睛等部位的恶性肿瘤治疗等);

(7) 200~250 MeV 回旋加速器(恶性肿瘤治疗、单粒子效应研究等);

(8) 800~1000 MeV 强流质子加速器(放射性核束物理、超重元素合成、原子核高自旋态等基础研究;核能开发,核废料嬗变,核武器材料检验,核材料生产方法,中子照相,质子连续脉冲照相,中子散射等提供综合性的研究设施)。

总之,中高能、强流质子加速器技术是一个可持续发展的方向,为了给国防工业应用研究提供支撑平台,为了给一些将在国民经济和科学技术基础研究领域中起长远促进作用的研究计划提供基础,为了给核医学等应用基础研究提供技术积累,并有带动小型加速器产业化的可能,强流质子加速器作为这样多学科需求的交叉点,特别需要加大力度开展研究与发展工作。

## 2 强流质子加速器的国内外发展现状

强流质子加速器的研究,近年来在质子脉冲直线加速器和连续波回旋加速器两个方面均取得了许多重要进展。目前,国际上现有的强流质子加速器的主要技术指标列于表 1,其中美国LANL和英国RAL的质子直线加速器的主要技术指标来源于文献[15]中的表 1,2008 年LANL的 800 MeV质子直线加速器 LANSCE,平均流强最高达到近 1 mA,最高功率达到 800 kW<sup>[16]</sup>。表 2 为国内质子加速器的主要技术指标。

截止到 2009 年 2 月,世界上质子束流平均功率最高的加速器是PSI的回旋加速器<sup>[17]</sup>(自 2006 年以来,该回旋加速器常规运行的束流平均功率为 1.2 MW,最高平均流强达到 2.2 mA,束流功率达到 1.3 MW),PSI目前正在为升级到~1.8 MW而改进高频等系统<sup>[18]</sup>,从他们的研究进展和科研计划看,平均每 4~5 年左右其回旋加速器的束流功率增加一倍。关于强流质子

表 1 国际上强流质子加速器的主要技术指标

	流强/ $\mu\text{A}$	能量/MeV	束功率/kW
LANL 质子直线	70	800	56
ANS(俄国)	400	600	240
ISIS 质子直线 + 同步	200	800	160
PSI 回旋	2000	590	1180
TRIUMF 回旋	300	500	150

表 2 国内质子加速器的主要技术指标

	流强/ $\mu\text{A}$	能量/MeV	束功率/kW
兰州近物所分离扇回旋	1(引出)	250	0.25
上海原子核所 1.2 m 回旋	10(外靶) 50(内靶)	30	0.3 1.5
高能所质子直线	60	35	2.1
高能所散裂中子源(在建)	65	1600	104
原子能院 30 MeV 回旋	370(外靶)	30	11.1
原子能院 100 MeV 回旋(在建)	200~500(外靶)	100	20~50

直线加速器,目前平均束流功率在 500 kW左右。2002 年经美国DOE专家论证,LANL的质子直线加速器 LANSCE,难以升级到 1~2 MW的束流功率<sup>[19]</sup>,因此,美国自 1996 年开始设计和前期研究、2002 年开始建造、2006 年出束的散裂中子源SNS,由 6 个DOE国家实验室(Argonne, Brookhaven, Jefferson, Lawrence Berkeley, Los Alamos和Oak Ridge)联合研制,总建设费用(按出束年 2006 年汇率估算)约为 116.47 亿人民币<sup>[19]</sup>。该加速器预计建成之后的束流功率是 1.4 MW<sup>[20]</sup>。2006 年该加速器已经按计划建成、调试出束,靶上束流功率在 2006 年 10 月达到 30 kW,2007 年 1~4 月靶上束流功率最高达到 90 kW,通常可运行在 60 kW<sup>[21]</sup>。到 2008 年底停机维护、2009 年 3 月恢复运行之前,该加速器最大功率达到过 700 kW,常规可运行在功率 500 kW<sup>[22]</sup>。

在国内,中国原子能科学研究院(原子能院)至今仍保持着强流加速器领域的某些技术优势,但在“九五”和“十五”前期,由于没有足够的经费投入系统性地跟踪、开展先进技术研究 and 加速器整机研制,迄今为止没有加速器可构成强白光中子源。目前,国内质子束流功率最高的加速器仍然是原子能院于 1994 年底建成的 30 MeV回旋加速器<sup>[23]</sup>(见表 2)。

回旋加速器在高平均流强、高平均束流功率方面有明显的技术优势,它的主要特点如下:

- (1) 平均流强高,故障率低;
- (2) 技术难度高,建造费用低;

(3) 转换效率高, 运行成本低.

回旋加速器在强流研究领域主要提供质子束、氦核束等轻重离子束; 法国GANIL的回旋加速器CSS2也引出了达3 kW的碳等更重的离子束<sup>[24]</sup>. 虽然自20世纪30年代以来回旋加速器就开始得到了迅速的发展, 至今仍然有其旺盛的生命力. 受众多需求的驱动, 越来越多的回旋加速器正在朝着单一独特性能的方向发展, 世界上每年新建数十台回旋加速器, 回旋加速器的数量在不断增加.

### 3 原子能院强流回旋加速器的研究与发展

自1958年我国第一台回旋加速器在中国原子能科学研究院投入运行以来, 经过半个世纪的发展, 中国原子能科学研究院逐渐形成了我国加速器类型最多的综合性研制基地. 下面我们将主要介绍原子能院在回旋加速器领域的研究与发展.

#### 3.1 经典回旋加速器

20世纪50年代, 原子能院发展了中国的第一代回旋加速器, 即经典回旋加速器.

原苏联援建的经典回旋加速器Y-120是我国第一台回旋加速器, 该加速器于1958年9月27日在原子能院调试出束, 标志着我国跨进了原子能时代, 也标志着原子能院, 乃至我国加速器事业发展的全面开始. 这台1.2 m的回旋加速器可加速氦核和 $\alpha$ 粒子, 其中氦核的最高能量为12.5 MeV, 从此, 我国核物理科技工作者有了一个较为完备的实验基地.

#### 3.2 等时性回旋加速器

从20世纪60年代末至70年代, 率先发展了中国的第二代回旋加速器, Y-120改造建成了我国的第一台等时性回旋加速器. 当时, 根据国防核技术和核物理研究工作的需要, 把这台1.2 m回旋加速器经过两次重大技术改造, 成为我国第一台可变能量等时性回旋加速器(图1).

改造的技术内容主要是磁极结构, 在平头磁极之间引入螺旋型叶片以使得磁场达到等时性; 加入调谐线圈和谐波线圈以调节等时场、补偿非理想场, 从而满足加速不同粒子的要求. 另外, 在束流引出、高频耦合等方面均有重要的技术改进. 该加速器技术改造后的指标: 氦核能量在3~14 MeV, 质子能量6~20 MeV,  $\alpha$ 粒子能量6~28 MeV.

利用这台加速器, 原子能院开展了许多国防核技术和核物理研究的工作. 这台加速器为推动我国的

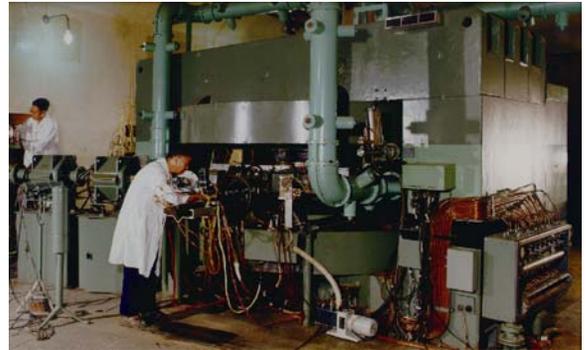


图1 我国第一台回旋加速器(技术改造后)

原子能事业的发展发挥了重要作用.

#### 3.3 强流质子回旋加速器

面对机遇与挑战, 中国原子能科学研究院将加速器研究重点定位于强流领域, 于20世纪90年代研究发展、建成30 MeV强流质子回旋加速器, 该加速器的成功研制于1996年被评选为中国重大科技事件(图2). 该加速器也是迄今为止我国质子加速器束流功率最高的加速器.



图2 30 MeV强流质子回旋加速器

该加速器包括离子源、轴向注入系统、中心区、主磁铁、主线圈、高频谐振腔与D型加速电极、高频机及传输系统、频率自动微调系统、高频控制闭环回路、真空室、真空及测量系统、剥靶、引出系统的定位与控制、双向引出管道、电源、水冷、气动、液压系统、计算机控制系统、束流测量与诊断系统、剂量监测系统、配电系统等主要部件与配套系统.

成果鉴定专家认为该加速器具有“四高一小”的技术特点: (1) 研制起点高, (2) 束流强度高, (3) 效率

高, (4) 自动化程度高, (5) 体积小. 它运行稳定可靠, 建成 14 年来, 每年供束时间约 5000 h, 前 7 年的年运行时间详见图 3. 该加速器的建成, 填补了我国利用加速器生产同位素的空白, 建立了我国第一个用加速器批量生产和供应同位素的基地. 该加速器是国家同位素工程中心的主要生产设施之一, 对推动我国核医学及生命科学的发展有深远的意义.

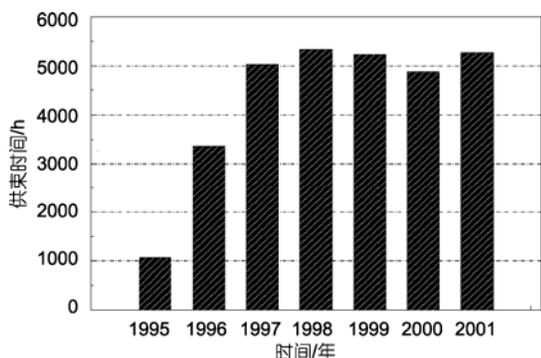


图 3 CYCIAE-30 回旋加速器每年运行时间

### 3.4 发展现状

中国原子能科学研究院目前正在研制 100 MeV 强流回旋加速器, 预计 2013 年建成<sup>[25]</sup>. 按照串列加速器升级工程可行性研究报告的批复要求, 已经完成了该工程的主工艺设备——100 MeV 强流质子回

旋加速器及束流管道的初步设计, 设计指标为能量 75~100 MeV 连续可调, 束流强度 200  $\mu$ A 可双向引出.

下面结合设计、建造 100 MeV 紧凑型强流回旋加速器 CYCIAE-100, 以及国家自然科学基金委员会杰出青年基金等基础研究课题的研究内容, 介绍一些强流质子回旋加速器关键技术的研究进展.

( ) 紧凑型强流回旋加速器的总体设计技术. 紧凑型强流回旋加速器主要包括离子源及注入系统、主磁铁、高频系统、多束流引出系统、束流输运系统等 20 多个子系统. 目前正在原子能院建造中的 CYCIAE-100, 其主体结构见图 4, 它结合了紧凑型回旋加速器的高精度和分离扇回旋加速器强聚焦的特点<sup>[26]</sup>, 其中主磁铁成品重量约 435 t, 单件最大重量 130 t, 单件浇铸所需钢水约 280 t, 且对钢材的杂质及加工的公差有十分严格的要求, 如要求碳含量偏差小于 0.01% (磁极)~0.03% (磁轭), 是目前国际上饼类铸件重量最大, 同时也是目前回旋加速器单件最大的磁铁. 紧凑型回旋加速器的结构特点是主磁铁采用整体型紧凑结构, 其他加速器主体及束流诊断、引出等子系统都设计、安装于紧凑磁铁之中, 布局难. 其总体设计的技术难度主要体现在既要保持结构紧凑以实现加工、安装的高精度, 实现加速器运行的高效率, 又要实现强聚焦以达到加速器引出

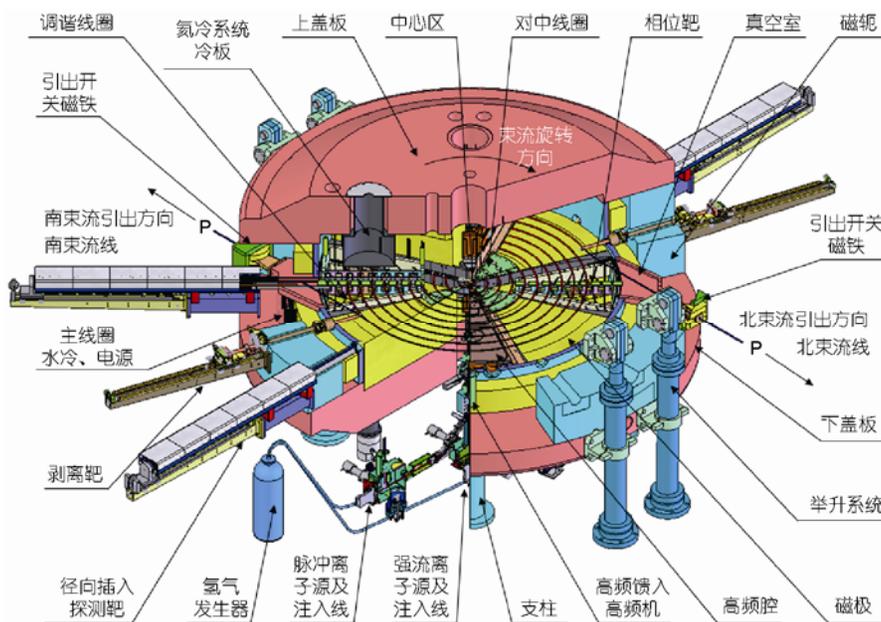


图 4 100 MeV 紧凑型强流回旋加速器总体结构图

束流的高功率。这样，在加速器物理设计上的强聚焦、低束损，在部件设计上主磁铁和高频腔的非理想磁场控制和束-腔相互作用及高频不稳定性，在通用工程上的  $10^{-8}$  Torr (1 Torr = 133 Pa) 高真空、大抽速低温冷板，在先进工业制造上的超大型精密加工与装配，集中表明 CYCIAE-100 是一个极具挑战性的艰巨任务。目前，该加速器主体施工设计已经完成，关键部件的制造进展顺利<sup>[25,27]</sup>。

( ) 紧凑型磁铁的强聚焦技术。对于紧凑型强流回旋加速器，最重要的限制是轴向空间电荷力，这样的限制决定了被加速束流的强度。基于完全圈重叠的假定，我们容易得到

$$i_{\text{limit}} = \Delta z v_z^2 \omega_0 \epsilon_0 \frac{\Delta \Phi \Delta V}{2\pi Q_e},$$

式中  $\epsilon_0$  为介电常数， $\omega_0$  为轨道角频率， $\Delta z$  为束流高度， $\Delta V$  为每圈能量增益， $\Delta \Phi$  为相宽， $Q_e$  单位电荷量， $v_z$  为轴向自由振荡频率。可见，磁场轴向强聚焦技术对提高回旋加速器束流强度有重要作用。在 100 MeV 回旋加速器磁铁设计中，直边扇形磁极降低了主磁铁、高频谐振腔等主体部件的技术难度；深谷区、特殊的变气隙结构有效地提高了轴向聚焦力，CYCIAE-100 的轴向自由振荡频率如图 5 所示，它给出了原子能院设计结果与加拿大 TRIUMF 国家实验室采用不同软件的设计结果比对；对于高频接收度宽达  $\pm 20^\circ$ 、剥离引出的回旋加速器，我们主要是考虑轴向空间电荷力对束流强度的限制；以此为基础并假定圈能量增益为 200 keV，不难估算出从磁聚焦角度看，该加速器流强今后具备向 mA 量级升级的条件。

( ) 异形高频谐振腔的设计技术和数字式射频控制技术。回旋加速器的运行稳定性问题主要在于高频系统，为了提高高频谐振腔的机械稳定性，将高频谐振腔完全安装在磁铁的深谷区之中是一个行之

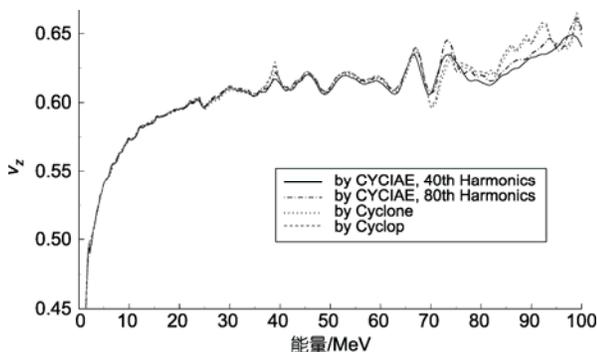


图 5 100 MeV 强流质子回旋加速器轴向自由振荡频率

有效的办法，但随之带来的技术难点是异形高频谐振腔的设计技术，这不仅需要考虑磁铁与腔体在结构形状上的紧密配合，由此而引起的谐振频率、 $Q$ 值、加速电压分布、高频功率泄漏等设计上的困难，以及水冷方案等一系列的工艺技术过程的复杂性，还要考虑由于多物理场的耦合而引起的问题，例如在某些特殊磁场分布区域的电子倍增效应，及其引起的高频崩溃等。图 6 给出了强流回旋加速器综合试验装置的高频谐振腔设计结果，它结合了类三角形腔<sup>[23]</sup>和半波长同轴线谐振腔<sup>[28]</sup>两者的结构特点，充分利用了紧凑型回旋加速器有限的谷区空间和盖板上的开孔，使高频系统结构稳定，也使该加速器装置结构更加紧凑。

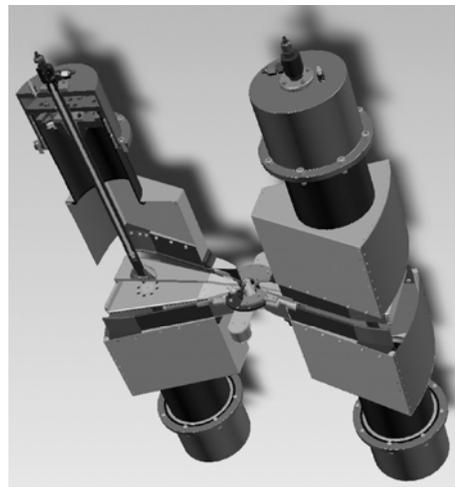


图 6 强流回旋加速器综合试验装置的高频谐振腔

射频系统的稳定性可通过射频低电平控制系统提高。相对传统的模拟控制方式而言，数字式射频控制是在其基础上引入数字信号处理技术(DSP)、数字总线等现代数字处理手段，从而改进传统的射频控制闭环(幅度环、相位环和调谐环)，相对模拟控制器而言增加了控制器的灵活性，使得系统能够根据束流负载的强弱调整控制器的零点，降阶并稳定射频系统。通常，每台加速器射频系统本身参数、布局特点和信号取样处理等不尽相同，因此射频控制系统需要根据射频系统特征定制。特别是当低电平系统幅度/相位环路不存在串扰回路时，高精度幅相控制成为可能。图 7 为 CYCIAE-100 的高频数字式控制的桌面试验系统，该系统 2006 年闭环成功，相位稳定度好于  $0.1^\circ$ ，幅度稳定度好于  $10^{-3}$ ，是国内较早试验数值式射频控制并获闭环成功的系统之一<sup>[29]</sup>，除回

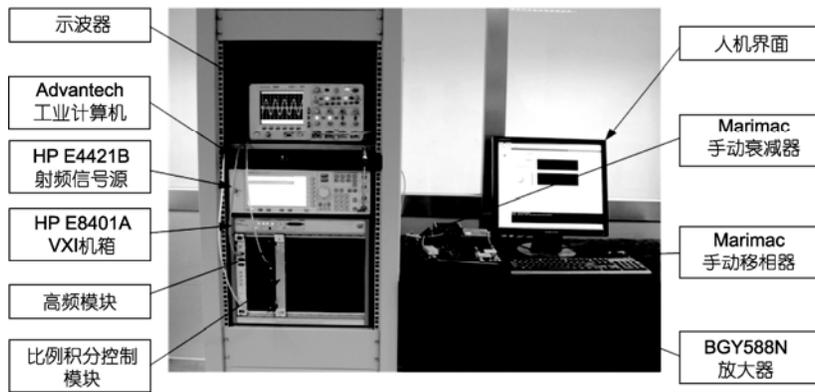


图7 CYCIAE-100 高频数字式控制的桌面试验系统

旋加速器以外, 对其他类型的加速器射频控制也有参考意义。

( ) 强流负氢离子源技术. 外部强流负氢离子源和效率的注入系统是制约强流回旋加速器发展的瓶颈问题. 原子能院于 2000 年建成的强流负氢离子源平均流强约 5 mA, 2003 年新建的负氢离子源稳定运行的平均流强高于 10 mA, 最大流强曾数次达到 15 mA, 在当时仅次于加拿大 TRIUMF 国家实验室. Hwang<sup>[30]</sup>在 2004 年 7 月给出的运行使用中的强流负氢离子源的主要技术指标比对结果列于表 3. 2008 年, 根据 CYCIAE-100 的预研需要, 又建造了一个新的负氢离子源试验台架, 新离子源结构见图 8. 初步调试结果表明, 在 30 kV 高压引出时稳定运行的束流平均强度为 15 mA, 在 11 mA 时测量的束流归一化发射度约  $0.65 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ .

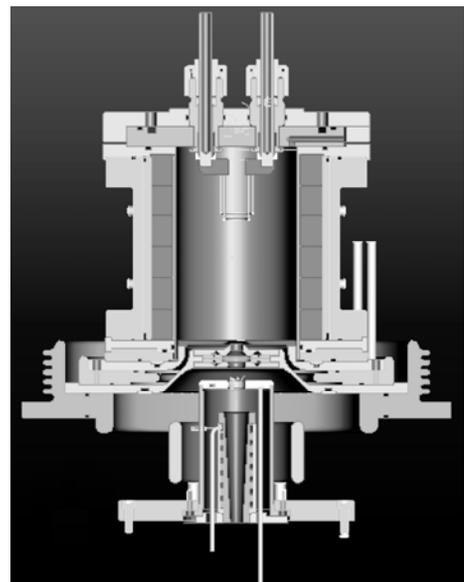


图8 15 mA 强流负氢离子源结构图

( ) 强流回旋加速器综合试验装置及相关技术

表3 国际上主要的强流负氢离子源技术指标

离子源类型	装置名或实验室名	峰值流强	平均流强	重复频率	占空比	引出电压
磁控管型	DESY-HERA	40 mA	20 $\mu\text{A}$	5 Hz	0.05%	18 kV
	BNL-AGS	35 mA	140 $\mu\text{A}$	7.5 Hz	0.40%	35 kV
	ANL-IPNS	48 mA	96 $\mu\text{A}$	30 Hz	0.20%	20 kV
	FANL	60 mA	60 $\mu\text{A}$	15 Hz	0.10%	18 kV
多磁极会切场/射频	DESY-HERA	40 mA	20 $\mu\text{A}$	5 Hz	0.05%	18 kV
	SNS	50 mA	3000 $\mu\text{A}$	60 Hz	6.00%	60 kV
潘宁型	RAL-ISIS	35 mA	875 $\mu\text{A}$	50 Hz	2.50%	18 kV
	INR-MMF	80 mA	2000 $\mu\text{A}$	100 Hz	2.50%	20 kV
多磁极会切场/表面电离	KEK-KENS	18 mA	72 $\mu\text{A}$	20 Hz	0.40%	into 750 kV
	LANL-LAN-SCE	20 mA	2400 $\mu\text{A}$	120 Hz	12.00%	80 kV
多磁极会切场/灯丝	TRIUMF	15 mA	15 mA	cw	100.00%	25 kV
	Jyvaskyla-LIISA	3 mA	3000 $\mu\text{A}$	cw	100.00%	5.8 kV

研究. 为了进一步开展强流回旋加速器的先进技术试验研究, 自 2002 年以来, 在一系列基础研究课题的支持下, 研究了基于 PIC 技术的强流回旋加速器束流动力学并行计算核心算法和回旋加速器中的相邻束团空间电荷效应<sup>[31]</sup>, Lawrence Berkeley 国家实验室 Ryne 博士在 2008 年的欧洲加速器大会上报告认为有两个重要的、运用并行束流动力学软件的工作, 一个是 2005 年的直线加速器到储存环的多束团注入, 另一个是今年的工作, 第一次并行计算模拟强流回旋加速器中的相邻束团效应<sup>[32]</sup>; 还研究了强流负氢回旋加速器束流损失机理, 包括洛仑兹剥离和真空剥离引起的束流损失研究与数值计算软件开发, 从束流损失的角度对主磁铁和真空系统等提出技术要求; 研究了束流对中与等时性磁场调谐新技术和谐波场垫补的新方法, 降低了晶粒均匀度、偏析、缩孔等磁铁非理想因素的技术要求, 使大型的实验室回旋加速器主磁铁首先采用铸件; 研究了紧凑型加速器的中心区狭窄空间中螺旋型偏转板的高压场、D 盒头部的高频场和主磁铁高调变度的静磁场作用下的束流注入行为等. 在有关强流回旋加速器前沿问题研究的过程中, 还设计加工关键部件、开展试验研究; 并统筹规划, 在单项技术研究之后, 已集成为一套强流回旋加速器综合试验装置(图 9)<sup>[33]</sup>; 该装置既是一台强流回旋加速器的综合技术试验台架, 用于试验在建工程 CYCIAE-100 的关键设计和长远的强流加速器技术研究, 也是一台完全由我国自主设计制造的、可加速负氢离子到 10 MeV、剥离引出质子束的小型回旋加速器样机, 是我国用于恶性肿瘤、心脑血管疾病

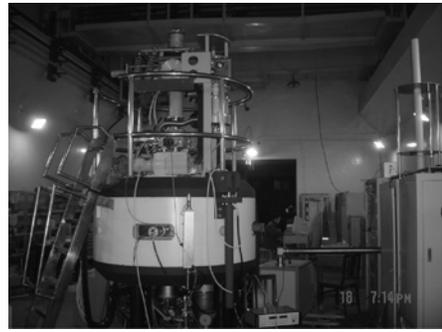


图 9 强流回旋加速器综合试验装置

断的医用 PET 小型回旋加速器研制的一个新起点; 该装置的磁场测量与垫补, 证明了变气隙提高轴向聚焦力的关键设计方案, 突破了能量高于 70 MeV 的 AVF 回旋加速器采用螺旋扇磁极的国际上传统设计思路, CYCIAE-100 设计采用直边扇形磁极<sup>[34]</sup>, 该装置在中心区束流调试达到 150  $\mu\text{A}$ , 2008 年 7 月底剥离引出了 10 MeV 质子束. 目前正在继续调试以进一步提高流强.

#### 4 结论

强流回旋加速器由于其高平均流强、高平均束流功率的技术优势而拥有广泛的应用领域, 得到长期可持续的发展; 中国原子能科学研究院已经积累了 50 年的回旋加速器研究经验, 平均每 20 年把我国的回旋加速器技术推进一大步; 中国原子能科学研究院目前正在研究的若干强流回旋加速器先进技术, 对发展高平均束流功率的质子加速器有长远的技术推动作用.

#### 参考文献

- 1 Lisowski P W, Bowman C D. The Los Alamos National Laboratory spallation neutron sources. Nucl Sci Eng, 1990, 106: 208—218
- 2 Cooper N G. LANSCE into the Future. LA-UR-06-0515, LANL, 2006
- 3 Schmor P. New achievements at TRIUMF and future plans. In: Proceedings of 18th International Conference on Cyclotrons and Their Applications, Giardini Naxos, Italy, 2007
- 4 Fietier N, Mandrillon P. A three-stage cyclotron for driving the energy amplifier. CERN/AT/95-03
- 5 Rubbia C. TRADE: General lay-out of the experimental facility. TRADE Technical Report, 2004
- 6 Cianfarani C, Picardi L, Ronsivalle C. Preliminary conceptual design of TRADE cyclotron. ENEA, 2004
- 7 Stambach T. High intensity problems, revisited or cyclotron operation beyond limits. In: Proceedings of 15th International Conference on Cyclotrons and Their Applications, Caen, 1998
- 8 Jongen Y, Kleeven W, Zaremba S. New cyclotron developments at IBA. In: Proceedings of 17th International Conference on Cyclotrons and Their Applications, Tokyo, 2004
- 9 Imel G. Experimental techniques for ADS: From MUSE to TRADE and future transmutators. TRADE Workshop in the Frame of IP-Eurotrans, 2004

- 10 赵志祥. 加速器在能源领域的一些应用. 中国核学会加速器分会会员代表大会, 北京, 2008
- 11 赵志祥. 嬗变核废料的加速器驱动次临界系统关键技术研究. 973计划2007年立项项目建议书
- 12 Karamysheva G. IBA C400 cyclotron project for hadron therapy. In: Proceedings of 18th International Conference on Cyclotrons and Their Applications, Giardini Naxos, Italy, 2007
- 13 Jongen Y, Dhondt P, van Den Durpel L, et al. A cyclotron-driven, subcritical neutron source for radioisotope production. In: BNS-SFEN Conference in Brussels, 1995
- 14 Manual C. Lagunas-solar, cyclotron production of NCA  $^{99m}\text{Tc}$  and Mo. An alternative non reactor supply source of instant  $^{99m}\text{Tc}$  and  $^{99}\text{Mo} \Rightarrow ^{99m}\text{Tc}$  generators. Appl Rad Isot, 1991, 42: 643—657
- 15 Gardner I S K. A review of spallation neutron source accelerators. EPAC'98
- 16 Rybarczyk L. High power operational experience with the LANSCE LINAC. HB08, Nashville, USA, 2008
- 17 Seidel M. Experience with high power operation at PSI. HB08, Nashville, USA, 2008
- 18 Schmelzbach P. Current and future developments at PSI. In: XXXIV European Cyclotron Progress Meeting, Belgrade, Serbia and Montenegro, 2005
- 19 Orbach R. Spallation Neutron Source Project Execution Plan, 2002. 5, 16
- 20 Strawbridge C. SNS Parameters List. SNS 100000000-PL0001-R13, 2005
- 21 Henderson S. Status of the spallation neutron source: Machine and science. In: Proceedings of PAC' 2007, Albuquerque, New Mexico, USA, 2007
- 22 <http://neutrons.ornl.gov>, February 2, 2009
- 23 樊明武, 张兴治, 李振国. 强流质子回旋加速器 CYCIAE-30 建成. 科学通报, 1995, 40: 1825
- 24 Jacquot B, Chautard F, Savalle A, et al. GANIL status report. In: 17th International Conference on Cyclotrons and Their Applications, Tokyo, Japan, 2004, 57
- 25 The Project Team of BRIF. Design and construction progress of BRIF. Chin Phys C, in press
- 26 Zhang T J, Li Z G, Zhong J Q, et al. Physics Design of CYCAIE-100. Chin Phys C, in press
- 27 Zhang T J, Li Z G, Chu C J. Design and construction progress of CYCIAE-100, a 100 MeV H-cyclotron at CIAE. In: 18th International Conference on Cyclotrons and Their Applications, Giardini Naxos, Italy, 2007. 33
- 28 Eiche M, Erdman K L. Dual frequency resonator system for a compact cyclotron. In: Proceedings of 13th International Conference on Cyclotrons and Their Applications, Vancouver, Canada, 1992. 515
- 29 殷志国, 侯世刚, 夏乐, 等. 1000 MeV 强流回旋加速器射频数字低电平系统研制. 高能物理与核物理, 2007, 31: 962—966
- 30 Hwang Y S. Development of long-lifetime radio frequency plasma ion sources at SNU. TRIUMF, Canada, 2004
- 31 Yang J, Adelmann A, Humbel M, et al. Modeling high intensity beams in cyclotrons. HB2008, Nashville, 2008
- 32 Ryne R. Advanced computing tools and models for accelerator physics. EPAC2008, 2947—2951
- 33 张天爵, 李振国, 储诚节, 等. 强流回旋加速器综合试验装置建造. 中国物理 C, 2008, 32(S1): 237—240
- 34 Zhang T J, Chu C J, Zhong J Q, et al. Magnet design and construction preparation for CYCIAE-100 at CIAE. Nucl Instrum Meth Phys Res B, 2007, 261: 25—30 [DOI](#)