

艰难的事业 有为的前景

——北京质子直线加速器的现在和将来

王书鸿

北京质子直线加速器,在中国科学院高能物理研究所建成了。它的能量为 35.5 兆电子伏,脉冲流强达 60 毫安。它是我国自行设计和建造的第一台质子直线加速器。这台大型科研和应用设备,综合了许多门类的尖端技术,如超高频无线电、高电压、高真空、精密机械、高精度的光测及电磁测量、计算机自动控制技术等,因而设计和制造的难度很大。至今,只有少数发达国家才拥有这类加速器。近几年来,在中央的关怀下,由国家科委和科学院汇同全国许多部门如北京广播器材厂、上海先锋电机厂、东方锅炉厂、北京机电研究院、午阳钢厂、重庆钢厂等。上百个厂所大力协同、奋战攻关,建造了这台机器。它的建成,标志着我国的加速器研制达到了一个新水平,说明中国完全有能力,依靠自己的聪明才华和工业技术力量,设计和建造具有国际先进水平的粒子加速器。

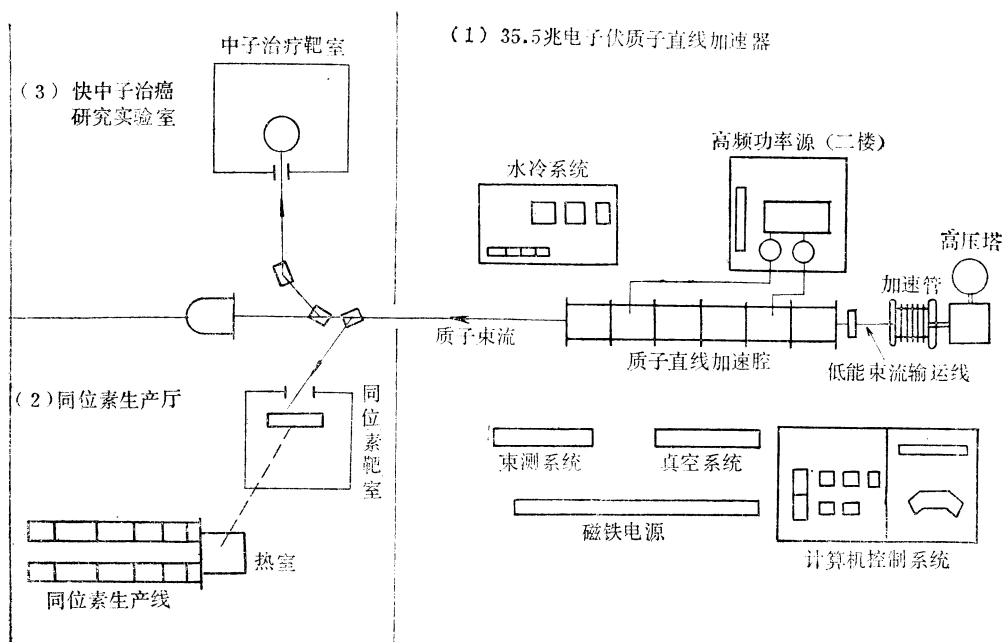


图 1 北京质子直线加速器及应用实验室示意图

难题

这台机器包括注入器、低能束流运输系统、加速腔体、高功率源、真空系统、水冷系统、磁铁及电源系统、束流测量系统、计算机控制系统和辐射剂量监测系统,如图 1(1) 所示。

注入器,是一台高压倍加器,能量为 750 千电子伏,建于 15 米高的大厅内,是我国最高能量的高压倍加器。它本身又可分解成三大部件,即高压发生器、离子源和加速管。一个频率为 5 千赫的音频电源,经高

压变压器产生 100 千伏的电压,再经几级倍加,得到空载为 850 千伏的高压。利用自动稳压系统,使这个高压稳定在 $\pm 0.05\%$ 范围内。这个高压加在加速管上,就在加速管的电极之间产生加速电场,用于预加速质子。加速管是一个外径约 1 米,长约 2 米的圆筒,由几十片陶瓷环和钛合金片交错地粘接起来,以承受高压。这种粘接工艺要求很高的粘接强度和极好的密气性能。离子源安放在加速管的头部,它是产生质子的源地。用电离氢气的办法,分离出氢原子内的电子,剩下的氢原子核就是质子。

低能束流运输系统,把来自注入器的低能(750千电子伏)质子流输送到直线加速腔入口。在这6米长的运输线上,密集而精巧地安放各种部件,用于控制和改造束流的形状,以满足加速腔入口。对束流的要求,例如用四极磁铁在径向聚焦束流,调节束流的截面和发散角,使绝大多数质子能顺利地进入加速腔的束流孔道;用导向线圈调整束流的方向;用聚束腔压缩束团在前进方向上的长度,让进入加速腔内的60%以上的质子能被加速腔俘获而稳定加速。此外,为了监测束流的性能,沿途安放了许多测量束流的装置。

加速腔体,是质子直线加速器的主体设备,用于加速质子流。腔体呈圆筒形,直径约1米,长约22米。腔内安装了105个高频电极。所谓高频电极,就是电极之间的电场以很高的频率(200兆赫)随时间变化。电极的中心与腔的轴线应严格重叠,误差应小于 ± 0.1 毫米。电极中心有一个直径为2厘米的束流孔道。每个电极的长度和安装位置是这样被精确地选定的:当腔内的高频电场指向束流前进的方向时(即高频的正半周,2.5毫微秒),质子束团正好处在电极之间的间隙上,受电场的推动作用而加速;当腔内的高频电场背向束流前进的方向时(即负半周,也是2.5毫微秒),让束团躲进电极的孔道内,不受反向电场的减速作用,只是在孔道内漂移前进。因此称这种电极 as 漂移管。粒子每进过一次间隙,就受到一次加速。随着粒子速度的增加,它在高频场的半个周期内走过的路程也增加。为了有效地屏蔽每个负半周的反向电场,漂移管的长度必须随粒子速度的增加而增长,而每个漂移管的长度各不相同,使设计和制造很不方便,同时,必须使漂移管中心的轴向位置精确地安装在设计的位置上,它的安装精度应控制在 ± 0.1 毫米。本加速器的105个漂移管的长度在4.8—27.4厘米范围内。它们的外径为18厘米,用6毫米厚的高导无氧铜制成。这样大的外径,使漂移管内有足够的容积安放一个四极磁铁,用于在径向聚焦束流,确保质子流在加速过程中尽量少丢失。可以想象,漂移管的制造工艺是相当复杂的。每个漂移管可加工成三件,即一个圆柱形的管体和两个端盖。将四极磁铁安放进管体后,合上两个端盖,再把端盖和管体焊成一体。这种焊接须用快速电子束焊,避免管体内的四极磁铁受热太多而破坏绝缘性能。圆筒形加速腔体的制造也很复杂。它由大面积的复合钢板卷制、焊接而成。它的外层是16毫米厚的钢板,内层为4毫米厚的高导无氧铜板。前者使腔体有很好的机械强度,既便于加工,又使腔体在高真空下不变形;后者可使腔内壁上的高频热损耗很小,节省能源。这种双金属的焊接又是一种特殊的工艺。加速腔上还安装了许多别的部件,如输入高频功率的陶瓷窗和耦合环、调节腔体谐振频率和电场分布的调谐器、稳定电场分布的耦合棒及高抽速的真空泵等。

高频功率源,是一台输出功率达5兆瓦的高频发射机,它向加速腔体馈送高频功率,从而在高频电极之间建立起加速电场。它是我国在几百兆赫频段上输出功率最高的发射机。为保证加速腔中电场的稳定性,这台发射机设有伺服自控系统,控制输出的频率、幅度和相位。

真空系统,包括各种抽气泵和真空监测设备,使质子束经过的地方都处在高真空状态,避免质子束受气体分子的散射而损失掉。

水冷系统,用于对加速腔、漂移管等发热设备的冷却,使它们在恒温状态工作,防止因受热变形而破坏加速腔内的电场。

磁铁电源系统,用于在径向对束流聚焦,并用来调节质子束的横截面和发散角的大小。

束流测量系统,用于监测束流在不同位置上的性能,如束流强度、能量、能量散度、截面、发散度等。它们是整机调整的耳目。

计算机控制系统,用于控制加速器的启停、运行状态的调节和设备的联锁保护。

辐射剂量监测系统,用于监测加速器大厅内外的辐射剂量,确保设备和人身安全。同时,借助辐射剂量沿加速器的变化,可判断质子流沿途丢失的情况。

把以上介绍的这许多系统,有机地组装在一起,就构成一台技术密集的质子直线加速器。

攻 关

为设计、建造这台加速器,全国有上百个科研和企业单位投入了攻关。通过近三年的攻关,拥现出一批新技术、新工艺和新材料。根据建成后的不完全统计,属于在国内首次研制成功的新产品和新技术就有56项,例如:

大面积高导无氧铜层复合钢板的制造。它的轧制宽度大于3.5米。铜层与钢板的结合紧密,强度很高。表面均匀性好,铜层纯度高,与国际同类产品的质量相当。

大直径腔体的卷焊技术和精密加工。腔体直径约1米,由6节组成,每节长度大于3米。采用特殊的焊料和焊接工艺,攻下了双金属焊接的困难。卷焊后腔体的内径误差控制在1毫米以内,圆度和均匀性都很好。腔内表面的光洁度达九级以上。测试表明,空腔的品质因子高达8.6万,达到欧美的先进水平。

5兆瓦大功率发射机的制造和大功率馈送技术。高频、高功率、高稳定度是这台发射机的主要特点。它是我国首次研制的最大的高频功率源。除末级放大器由国外引进外,其它部件均由国内制造。为保证设备在高功率下的安全运行,采用了多级快速保护装置。发射机向加速腔内馈送功率,采用高精度的闭环控制技术,使加速腔的工作频率、电场幅度和相位分别控制在 ± 70 赫、 $\pm 1\%$ 和 $\pm 1^\circ$ 范围内,达到国际先进水平。

高能量、高流强和高稳定度的高压倍加器制造技术。北京质子直线加速器采用的注入器，是一台我国最高能量的高压倍加器。它采用双等离子体型的离子源，输出质子流强可达 300 毫安以上，寿命在 500 小时以上。通过自动稳压装置，使 750 千伏的高压稳定在 $\pm 0.05\%$ 范围内，内径为 60 厘米，长达 2 米的大型加速管的封接是国内首创。封接强度和性能很好。这台高压倍加器的本地控制采用红外激光，通过光纤和计算机进行控制。

高精度、大面积、恒温水冷系统的制造技术。它使加速腔体的冷却水温控制在 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。因而使整个腔体的形变极小，对频率的影响几乎可以忽略。

超高真空设备的制造技术。抽速高达每秒 1500 升的大型分子泵和每秒 1000 升的大型离子泵，以及各种超高真空阀门，都是在国内首次研制成功的。

先进的计算机控制技术。由中央控制台及接口柜，通过接口系统和加速器各设备的本地站相联，可对直接影响束流性能的主要设备实现控制和监测。这种控制技术达到了国外七十年代末的先进水平。

此外，还有高精度的束流性能测量技术，加速腔高频电场分布的快速测量技术，高精度的磁场测量技术，磁铁和电源的制造技术以及辐射剂量监测技术等，也都是经过奋战攻关，得以实现的。

现 状

北京质子直线加速器的设计工作，是从 1978 年正式开始的。它原先的设计能量为 200 兆电子伏，计划用作 50 京电子伏质子同步加速器的注入器。它由九个加速腔组成，其第一腔为 10 兆电子伏，自 1979 年起投产。1980 年国民经济调整，质子同步加速器的建造计划下马，但 10 兆电子伏的质子直线加速器的建造，已全面展开，我们为了充分利用正在加工中的设备，并通过挖潜，适当增加一些投资，将这台机器的能量扩展到 35 兆电子伏，用于医用短寿命同位素的生产 and 快中子治癌的研究。

在加速器的扩建设计中，科技人员作了巧妙的安排，既不修改任何已在加工中的部件，使 10 兆电子伏加速器能按原计划组装调试，取得经验，又使扩建后的整机能充分利用 5 兆瓦发射机的功率容量，获得能量为 35.5 兆电子伏、脉冲流强为 60 毫安、平均流强达 75 微安的质子束，满足两项应用的要求。

从 1981 年 10 月，10 兆电子伏加速器主体设备安装调试到 1985 年 8 月，整机联调，获得 35 兆电子伏质子流的能量和流强均达到设计指标。

目前，加速器的可靠性和稳定性与调试初期相比，已有很大的改进。各系统均能正常的工作，除个别系统还需进一步改进和完善外，整机的调整基本结束。将质子流送到两个应用实验室的束流运输系统，总长约

60 米，基本上加工完毕，不久就可投入安装。预期在 1986 年底，可将束流送到应用靶站，开始做些应用的初步实验。

前 景

北京质子直线加速器将一器两用，用于医用短寿命同位素的生产 and 快中子治癌的研究，填补我国在这两个方面的空白。

用加速器产生的同位素，是缺中子同位素。它与用反应堆产生的丰中子同位素相比，在医疗诊断上有极大的优越性。一方面，由于它的寿命短，辐射剂量少，对人体的副作用小；另一方面，将缺中子同位素制成放射性药物注入到人体的病变部位后，有的在衰变中发射 X 射线和 γ 射线，使诊断的显象很清晰；有的是正电子发射体，正电子湮灭时，同时发射两条方向相反、能量相同的 γ 射线，可利用正电子断层照相设备进行符合测量，成象的分辨率和灵敏度较高。人们把这类同位素的临床使用，作为医学，特别是核医学现代化的标志之一。

然而至今我国还不能批量生产这类同位素，主要靠国外进口，价格昂贵。由于它们的寿命很短（半衰期大多小于 100 小时），从国外运到国内的长途中，就损失掉很多，很不合算。北京质子直线加速器的同位素生产厅已基本建成，如图 1(2) 所示，它有两条生产线，可生产同位素铊-201，镓-67 和碳-11 等。估计年产量可达 50 居里以上，可供应北京、天津、华北及其它地区的医用需要。铊-201 的半衰期为 73 小时，用于心血管病的早期诊断，是当前最佳的心肌显象剂。镓-67 的半衰期为 78 小时，是极好的肿瘤阳性扫描剂。碳-11 的半衰期为 20 分钟，它是最好的脑代谢及肺功能的显象剂。此外，还可利用这套生产及实验设备，研制和生产其它 20 多种重要的医用短寿命同位素。

用能量为 35.5 兆电子伏、平均流强为 75 微安的质子束打靶，可产生平均能量约为 20 兆电子伏的中子束。中子束的特性以 0° 方向为例，距靶点 1 米处，中子吸收剂量率为每分钟 145 拉德。利用这类快中子束进行癌症的治疗研究，是国际上正在发展中的治癌研究的重要手段之一。与常用的 X 射线、 γ 射线和电子束相比，中子束对某些种类的癌症治疗具有特殊的效果。它对缺氧的癌细胞有较强的杀伤力。北京质子直线加速器的中子治癌实验室正在建设中。治疗大厅已建成，如图 1(3) 所示，治疗和研究用的设备正在加工或购置中。预期在近两年内，我国第一个快中子治癌研究实验室将在这里建成。

北京质子直线加速器及两项应用研究工程完全建成后，无疑将产生极好的社会效益和一定的经济效益。目前，参加这项工程建设的同志们正在加紧努力，为早日实现这个大有作为的应用前景而奋斗！