

## “神龙一号”直线感应电子加速器\*

丁伯南 邓建军 王华岑 程念安 戴光森 章林文 刘承俊 章文卫 李劲  
张开志 代志勇 赖青贵 李洪 文龙 刘小平 李伟峰 谢宇彤 陈思富  
杨国君 李欣 杨安明 王敏洪 杨兴林 潘健 王锦生 薛之春 曹国高  
何毅 闫志龙 李远 马冰 高峰 陈楠 石金水<sup>1)</sup>

(中国工程物理研究院流体物理研究所 绵阳 621900)

**摘要** “神龙一号”加速器是一台 20MeV 直线感应电子加速器. 本文介绍了“神龙一号”的物理设计、研制过程和调试结果. 物理设计中主要分析了加速器研制的技术难点, 并给出各分系统应达到的技术要求和具体结果. 文中重点介绍了脉冲功率系统、注入器、束流的调试情况, 调试结果表明, “神龙一号”加速器输出电子束的参数为: 电子能量 20MeV、束流强度 2.5kA、束流脉冲宽度 ~ 70ns、能散度 0.64%、发射度 2060mm·mrad、打靶焦斑尺寸 1.2mm.

**关键词** 直线感应加速器(LIA) 束流 注入器 脉冲功率 束流传输和聚焦 韧致辐射

### 1 引言

直线感应加速器(LIA)是 20 世纪 60 年代发展起来的一种新型加速器, 它能产生强流、高亮度、低能散度的高品质电子束, 而部件式结构的特点使它可大量串接获得所需要的能量. 由于 LIA 具备这些优越性能, 因而受到许多国家的重视, 美国、法国、俄罗斯已先后建成多台直线感应加速器<sup>[1-3]</sup>, 并已广泛地应用于闪光 X 射线照相、自由电子激光、粒子束聚变、高功率微波等研究领域. 近十年来, 由于精密闪光 X 射线照相的迫切需求, 极大地促进了直线感应加速器技术的发展.

本文所介绍的“神龙一号”加速器是一台直线感应电子加速器, 其具体的设计指标如下:

电子能量	18—20MeV,
束流强度	$\geq 2.5\text{kA}$ ,
束流脉宽	$\leq 90\text{ns}(\text{FWHM})$ ,
X 光焦斑直径	$\leq 1.5\text{mm}(\text{FWHM})$ ,

X 光照射量(1m 处)  $\geq 0.077\text{C/kg}$ .

### 2 物理设计

#### 2.1 总体布局

如图 1 所示, “神龙一号”加速器主体由注入器、加速段、聚焦段和韧致辐射靶室组成, 总长约 60m. 加速段由 72 个加速腔组成, 每个腔内置有螺线管线圈, 以产生轴向磁场引导电子束, 每 4 个加速腔串联为一节, 共有 18 节, 每节之间由多功能腔联接, 多功能腔内安装桥接线圈以确保引导磁场的连续性, 同时安装有束流及束位置监测器, 对束流大小及位置进行在线监测. 注入器提供的 3.6MeV, ~ 2.6kA, 90ns 的电子束经轴向磁场引导依次通过 72 个加速腔的加速间隙, 与此同时, 每个加速腔依次提供一个 ~ 220kV, 120ns 的脉冲高压至加速间隙, 使 ~ 2.6kA, 90ns 宽的电子束同步加速至 18—20MeV, 并经磁透

2004-10-18 收稿

\* 国家专项资助

1) E-mail: sjsleap@my-public.sc.cninfo.net

镜聚焦打靶,产生脉冲 X 光.该设备是一个十分庞大复杂的系统,除主体外,还包括脉冲功率系统、计算机控制和监测系统、辅助系统(真空、去离子水、冷却水、变压器油、高压绝缘气体等)以及束品质专用诊断设备等.

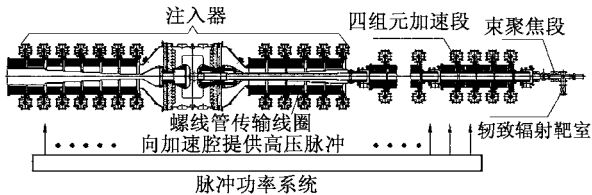


图1 “神龙一号”加速器总体布局示意图

获取小的焦斑直径集中反映了整个加速器研制的技术难度.理论和计算表明,为实现 1.5mm 焦斑直径指标,必须使加速器输出电子束的发射度和能散度分别控制在  $2000\text{mm}\cdot\text{mrad}$  和 1% 以内,同时需有效抑制束流质心的 Corkscrew 运动、BBU 不稳定性的增长<sup>[4,5]</sup>.

从技术角度而言,达到上述发射度、能散度参数均具有挑战性.要获取低发射度的电子束,必须具有运行性能良好的注入器和束流传输线,前者确保电子束的初始发射度低,后者则使束流被传输过程中的发射度增长量小.要使电子束的能散度小,需要通过注入器、脉冲功率系统、加速腔等系统的精细设计、加工和安装、调试予以保证.确保机械轴、螺线管磁轴、电子束轴三轴的一致性达到相当高的精度才能有效抑制束流质心的 Corkscrew 运动.限制 BBU 不稳定性的增长则需要设计低横向耦合阻抗的加速腔,同时要保证束流初始偏心量小.

## 2.2 加速腔

根据总体指标要求,每个加速腔提供的加速电压不小于 230kV;加速脉冲持续期间 60ns 内的平顶波动不大于  $\pm 1\%$ ,以使电子被加速获取能量增益的散度小;横向耦合阻抗不大于  $700\Omega/\text{m}$ <sup>[6]</sup>,以有效控制 BBU 效应.

与传统加速腔的结构相比,“神龙一号”加速腔的设计,高压馈入采用轴向驱动方式,以降低横向耦合阻抗,铁氧体环浸在变压器油中,加速间隙是弯曲的,另有一阻尼带状环,置于加速间隙外角处.经检测,加速腔的横向耦合阻抗  $\sim 500\Omega/\text{m}$ ,每个加速腔可提供 250kV,  $\pm 1\%$  平顶不小于 70ns 的高压加速脉冲.

## 2.3 脉冲功率系统

脉冲功率系统是加速器的功率源,系统所能达到的总加速电压决定了被加速电子的最终能量,加速电压平顶宽度和加速电压馈送到各个加速腔的时间同步性决定了电子束的能散度.根据总体性能要求,脉冲功率系统给注入器段 12 个感应腔和加速段 72 个加速腔提供加速电压.84 个电压脉冲按照严格的时序输出到各自对应的感应腔或加速腔,注入器段脉宽为  $\sim 90\text{ns}$ ,加速段脉宽为  $\sim 120\text{ns}$ ,注入器段电压幅度  $\sim 300\text{kV}$ ,加速段电压幅度  $\sim 250\text{kV}$ .

“神龙一号”加速器的脉冲功率系统按照功能,可分为初级储能系统、脉冲成形系统和触发系统.初级储能系统采用了 8 台 300kV Marx 发生器.脉冲成形装置采用了 48 套 Blumlein 脉冲形成线(B 线),注入器段以 1B-1C(即一个 B 线为一个感应腔提供激励电压脉冲)方式工作,加速段以 1B-2C 方式工作.触发系统主体由三级触发网络构成,包含了点火机,增强器,小 Marx,发散装置,脉冲延时装置等.点火信号触动增强器,增强器同时输出 10 路快脉冲,分别触发小 Marx、8 台 Marx 发生器和经过一段时间延迟后( $\sim 3\mu\text{s}$ )触发 I 级发散装置 F I . F I 输出 8 路信号,触发 8 台 II 级发散装置 F II . F II 再触发 48 根 B 线开关.每台 Marx 发生器通过主开关对 6 根 B 线谐振充电至峰值附近,主开关导通,B 线将通过高压同轴电缆输出高压脉冲分别馈入到注入器感应腔和加速段加速腔上.

## 2.4 束流传输系统

整个束传输线全长约 48m,其间数千安培的强流脉冲电子束经过约 170mm 的二极管加速区,电子能量达到约 3.6MeV,再经过 4.5m 的无加速场漂移区到达注入器出口;随后进入到长 38.5m 的加速段,通过逐级加速到达加速段出口时电子能量不低于 18MeV;在加速段获得能量增益的电子束进入到长约 3.8m 的无加速漂移段,用于调整束流进入透镜的入口参数;最后部分就是通过两级磁透镜的聚焦将电子束聚焦到韧致辐射靶上产生高照射量、强穿透能力的 X 射线.

束流传输和聚焦元件采用螺线管线圈,产生的峰值磁感应强度约 0.25T,螺线管线圈的励磁使用高稳定运行的恒流电源.21 个在线的电阻环束位置监测装置(BPM)监测输运过程中束流的强度和偏心状况.

螺线管线圈的绕制采用双线二象限密绕法,在线圈的内壁安置二极校正线圈和作匀场环的软磁材料.经此设计、研制的螺线管线圈,磁准直精度高,横向场分量小,磁轴倾角(Tilt)  $\leq 1\text{mrad}$ ,偏离轴线(Offset)  $\leq 0.2\text{mm}$ ,且内置的二极校正线圈可对束流进行动态校正.

## 2.5 注入器

注入器二极管阴阳极间高压的产生采用感应叠加技术,阴极段 7 个感应腔,阳极段 5 个感应腔,每个腔工作电压大于 300kV.穿过腔中央的阴阳极杆将这些感应腔串联起来,在二极管上叠加成 3.6MV 左右的高压脉冲.在阴阳极间强电场的作用下,表面粘有天鹅绒的阴极发射出强流电子束,该电子束被二极管区螺线管线圈和阳极段感应腔中的螺线管线圈产生的磁场引导出注入器.由于注入器工作电压高,二极管腔的内径达到了  $\Phi 1400\text{mm}$ ,因此二极管区线圈将全部置于阴阳极头内.反向线圈(安置在阴极头内,以使阴极面的磁场为零)的引线从阴极杆中引出,引导线圈从双层阳极管中引出.这种思路首先解决了设计时面临的困局,相比于传统的置于二极管腔外的方式,置于阴阳极头内的线圈对电源的要求更为实际可行,并且线圈本身的制造难度和成本大大降低;更重要的是提高了注入器的性能,因为二极校正线圈可以安置在螺线管线圈内,而在安装过程中磁轴的对中精度也将得到极大提高.

由于线圈内置,阴阳极头大而重.为支承阴阳极杆,并将阴阳极头定位于注入器轴线上,采用了径向绝缘支撑.

为降低束流脉冲在加速段中能散度增长,注入器输出束流脉冲宽度小于加速脉冲的脉宽,注入器输出束流脉冲脉宽为 90ns(FWHM).

## 2.6 韧致辐射靶

电子束与韧致辐射靶材相互作用,电子的能量部分转换为 X 射线能.韧致辐射靶的设计要考虑 3 个关键因素:制靶材料;靶的厚度;靶的结构.

利用 EGS4 程序可对束靶作用后的 X 光能通量(照射量)进行计算,“神龙一号”韧致辐射靶的靶材和靶厚的选取是根据 EGS4 程序的计算结果进行判断的.

计算结果表明,在相同的靶材厚度下,钨靶靶前 1m 处的照射量略低于钽靶,且钽靶靶前照射量随角度的增加而减小的速率是高于钨靶的,证明钽靶相

对于同等厚度的钨靶来说,产生的 X 光的前冲性较好,更加适用于闪光照相.选用钽靶,当靶厚为 1.2mm 时,靶正前方 1m 处的照射量最大.

强流电子束与韧致辐射靶作用后,电子束在靶内的能量沉积,将引起韧致辐射靶的烧蚀和破坏,具体表现为靶材鼓包或穿孔;此外,靶的烧蚀将形成靶表面等离子体,其中较轻的正离子在电子的负电荷作用下,易进入电子束团,导致电子束难于被正常聚焦<sup>[7]</sup>.为此,韧致辐射靶设计成叠靶结构.叠靶是将一定厚度的靶片一层层叠加起来,中间留有一定空隙或填充其他材料,通过该结构来减少电子束对靶的冲击和破坏.叠靶由 24 层钽箔组成,每层钽箔厚 0.05mm,间距为 0.5mm,层与层之间为真空间隙,实际的转换靶材厚度为  $24 \times 0.05 = 1.2\text{mm}$ .利用 EGS4 程序模拟了上述结构的叠靶所产生的 X 光照射量,结果表明,在同样电子束作用下,该叠靶与 1.2mm 整靶产生的 X 光照射量基本相同.

## 2.7 控制和监测系统

控制系统的设计采用三级子网的网络结构.一级子网为面向设备子网,采用现场总线标准.按受控设备分为恒流源控制子网、Marx 升压控制子网、安全联锁控制子网、气压与真空系统控制子网.每个子网采用 PC 工控微机作为主机.子网总线为 RS-485 标准总线,最大传输距离 1200m(无中继器),最高传输速率为 115.2kbps,传输介质为双绞线.现场总线测控模块直接挂接在总线上,对设备进行现场监控.另外,一级子网还包括一个 GPIB 总线子网,用以控制示波器.二级子网为操作子网,采用一台工作站作为主控,每个一级子网的主机作为数据服务器,互相结合成一个局域网.通信协议采用 TCP/IP 协议,操作系统为 Windows 2000.三级子网为数据通讯子网.

束流强度及其质心位置监测采用传统的电阻环方法;加速腔电压的测量采用硫酸铜水阻分压器和 CVP 电压探头;束流包络、发射度、能散度等参数的诊断均是通过相应的转换装置将相关信息转换为切伦科夫光或 OTR 光,再经接收系统接收图像,并对图像进行处理获取相应结果;焦斑测量则采用狭缝成像方法<sup>[8]</sup>.

## 3 加速器部件检测及安装

### 3.1 关键元器件检测

分离腔内真空区与注油区的高压绝缘环和铁氧

体大环的研制质量及运行性能的好坏是加速腔能否正常工作的前提.每个应用于“神龙一号”加速腔的铁氧体大环在安装前都进行了磁滞回线的测量,安装前测量了970个铁氧体大环,全部符合使用指标.在“神龙一号”加速腔安装前对每一个高压绝缘环做了耐高压性能的检测,检测电压为295—300kV范围.

### 3.2 加速腔安装及准直

由于“神龙一号”的机械轴和磁场轴在加工时就固化在一起,而磁场轴在加速器整体连接后的测量非常困难,只有依靠机械轴来保证,所以机械轴的精密对中是磁轴准直及磁场误差校正的基础.

加速腔的安装和准直,采用了激光跟踪仪并配以全站仪、电子水准仪和倾斜仪.加速器整体安装统计直线性为:水平方向偏差  $D_x$ ,  $\pm 0.066 \pm 0.055\text{mm}$ ;高程方向偏差  $D_y$ ,  $\pm 0.062 \pm 0.082\text{mm}$ ;统计直线性,  $\pm 0.091 \pm 0.098\text{mm}$ .

### 3.3 磁场轴准直误差检测及校正

为确保“神龙一号”安装设计指标,对每一个加速腔和多功能腔进行了磁场轴误差检测,并在检测的同时采用二极校正线圈对每一加速腔的 Tilt 偏差进行了校正.检测方法采用脉冲悬丝法<sup>[9]</sup>.

“神龙一号”的束流加速部分共有18个加速段.经调节校正线圈电流对 Tilt 进行校正后,各加速腔 Tilt 偏差的绝对值均不大于  $0.12\text{mrad}$ . Offset 偏差的绝对值不大于  $0.25\text{mm}$ . 90个腔 Tilt 的标准偏差为  $x$  方向  $0.07\text{mrad}$ ,  $y$  方向  $0.068\text{mrad}$ , 远好于  $\text{Tilt} \leq 1\text{mrad}$  的设计要求. Offset 的标准偏差为,  $x$  方向  $0.1\text{mm}$ ,  $y$  方向  $0.11\text{mm}$ , 远好于  $\text{Offset} \leq 1\text{mm}$  的设计要求,确保了束流传输线的精度.

## 4 调试及结果

### 4.1 脉冲功率系统调试

在脉冲功率系统的调试中充分利用了数值分析模拟软件,建立起包含集总参数元件和分布参数元件的混合电路模型,对各种参数进行精细的调试,使系统全面达到设计指标.

发散装置的时间同步性和主开关的工作性能直接影响到束流与加速电压的同步.全系统共有48个主开关,动作时间是按照电子束到达的先后顺序确

定的.用F I 主开关动作的时间作为基准测量了8个相邻的主开关对应加速腔的动作时间抖动,其中4个主开关由F II - 4触发,4个主开关由F II - 5触发.测量的结果包含了两级开关的抖动,表1给出的是具体的测量结果.

表1 两级开关抖动测量结果

主开关号	21	22	23	24	25	26	27	28
发散开关号	4	4	4	4	5	5	5	5
抖动( $\sigma$ )/ns	0.5	1.1	0.5	0.8	0.5	0.6	0.5	0.4

从表1测试统计结果来看,包含了两级开关的时间抖动基本上在亚纳秒水平.偏差最大的22号开关和F II - 5开关合成抖动也只有  $1.1\text{ns}$ .这就保证了电子束能够在电压平顶处得到加速,不会产生新的能散.而且在多次实验中重复性好.

### 4.2 注入器调试

注入器的调试需要达到4个目的:首先,考察注入器能否工作在额定工作电压,即  $3.6\text{MV}$ ;其次,以注入器输出电子束的发射度参数为判断依据,选择合适的二极管构型(发射面形状、阴阳极间距等);调试合适的注入器匹配磁场,获取较好的输出束流波形、束心位置和束包络;测试注入器输出电子束的发射度、能散度等相关参数.

初始调试时,采用的是平面阴极,阴阳极间距为  $160\text{mm}$ ,二极管叠加电压  $3.3\text{MV}$ ,在解决了阴极面上严重的杂散发射、天鹅绒与阴极面内沿之间的打火等问题之后,与高压耐压性能相关的各部件工作状态良好,系统工作正常.为进一步提高二极管工作电压,增大二极管阴阳极间距,以优化二极管区场形,将阴极表面进行了镜面处理,用类 Pierce 阴极替换了平面阴极,阴阳极间距增大到  $170\text{mm}$ .当二极管电压增大到  $3.6\text{MV}$ ,阴极表面无杂散发射,系统工作正常.采用类 Pierce 阴极得到发射电流  $3.5\text{kA}$ ,注入器输出束流  $2.8\text{kA}$ .

在不同的磁场配置下,可以得到不同的注入器输出束流.校正线圈的应用在注入器调试中收到了很好的效果.不采用校正线圈时,注入器出口束心偏移  $r < 1.412\text{mm}$ ,采用动态校正,能将束心偏移调整为  $r < 0.61\text{mm}$ .

采用修正三梯度法测量了注入器输出束时间分辨的发射度<sup>[10]</sup>.当空间电荷力不可忽略时,测得注入器输出的电子束脉冲中间部分束的发射度为

1040mm·mrad, 经对比, 采用类 Pierce 阴极结构发射电流品质明显优于平面阴极结构。

能散度测量是采用 90°的分析磁铁将不同能量的入射电子束在空间展开, 展开的电子束再入射到石英玻璃片上发出 Cerenkov 光<sup>[11]</sup>, 分析 CCD 记录的光信号, 可以得到电子束的能谱分布. 测得束脉冲中心能量为 3.7MeV, 60ns 范围内能散度约 2.1%.

### 4.3 加速段磁场配置与束流调试

加速段磁场配置与束流调试是充分结合数值分析、模拟和实验调试进行的. 首先, 根据被传输束流的强度、电子的能量增益情况和束包围方程, 大致确定束线上的磁场分布; 再考虑抑制束包围半径的振荡、Corkscrew 运动、BBU 不稳定性等横向运动, 并根据恒流电源的极限励磁能力, 选择尽可能小的束传输包围半径, 对上述磁场布局进行调整; 以调整后的磁场布局为基础, 利用现有粒子编码软件进行充分的数值模拟, 考察被要求传输的束流强度在给出磁场布局下的运动情况, 以便进一步调整磁场布局或作为实验调试的基础和依据; 最后, 对实际的束线按理论计算和数值模拟获取的磁场布局进行设置, 并在实际的束流调试过程中, 充分利用束流参数诊断装置获取的束流相关信息, 再对传输磁场进行微调, 确定最终的全束线的传输磁场布局。

### 4.4 束心横向运动监测及校正

在强流电子束传输过程中, 束流质心轨迹与聚焦磁场轴线的偏离是导致 Corkscrew 振荡的两个主要因素之一<sup>[12]</sup>, 因此除加速器组装时在磁场轴准直上投入大量精力以外, 利用二极管校正线圈动态调谐是获得高品质束流必不可少的重要环节。

束质心轨迹的调谐是从注入器开始, 分组进行. 二极管区二个线圈为第一组, 阳极段第二组, 加速器中每一个加速段为一组. 根据前次实验中沿束线的 BPM 上所测得的束心位置轨迹, 螺旋模的振幅和调谐经验, 逐个改变相邻两个 BPM 之间束输运磁场元件中校正磁场的大小, 再进行下一次实验验证及修改, 如果束心轨迹的横向运动振幅和各 BPM 上束流脉冲期间的螺旋模振幅皆在减小, 说明调谐方向正确, 如此循环往复, 直至得到较满意的结果。

图 2 是调谐前与调谐后第 20 个 BPM 上螺旋模幅度的比较, 在束流顶部 50ns 范围内经调谐后螺旋模的幅度减少了 50% 以上. 图中细实线为调谐前的束心位置, 粗实线为经调谐后的束心位置. 表明加入

调谐磁场的确起到了抑制束螺旋模的作用。

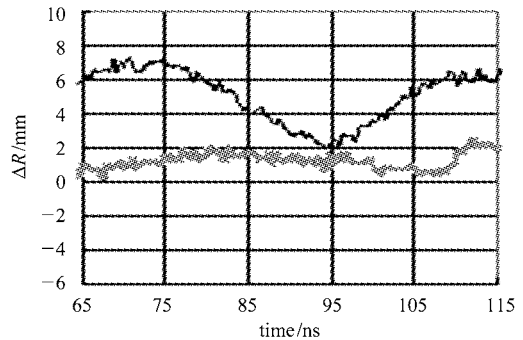


图 2 调谐前后在束脉冲平顶部分束螺旋模的振幅比较

### 4.5 调试结果

在全程的束流传输过程中, 束流损失较少, 约 5%, 束流脉冲形状基本维持不变; 打靶束流强度约 2.6kA, 脉冲宽度约 60ns (FWHM); 束心偏移控制在 1mm 以内. 图 3 给出了韧致辐射靶前的典型束流波形。

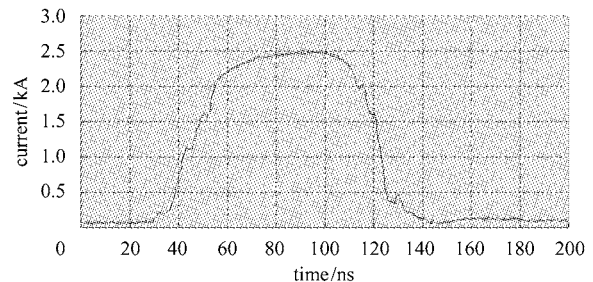


图 3 韧致辐射靶上的束流波形

采用修正三梯度方法测量了时间分辨发射度. 实验中通过改变束剖面测试装置前的螺线管线圈的电流, 测量了时间分辨束剖面. 得到束脉冲期间中间某一时刻的归一化边发射度为 2060mm·mrad.

采用光学渡越辐射与切伦科夫辐射相结合的方法测量了积分发射度. 在 4731 发实验中, 用切伦科夫辐射测量了束剖面, 同时用光学渡越辐射测量了能量与发散角. 测量得到归一化边发射度为 2935mm·mrad. 图 4 是该发实验获得的束剖面图像和水平方向扫描得的强度分布曲线. 从高斯拟合, 得到均方根半径为 5.22mm.

图 5 是 OTR 方法获得的角分布图和水平方向扫描得到的 OTR 角分布曲线. 由角分布曲线, 计算得到电子能量为 18.3MeV,  $x$  方向均方根发散角为 5.4mrad. 依据图 4 和图 5 的结果, 计算得到时间积分的归一化边发射度为 2935mm·mrad.

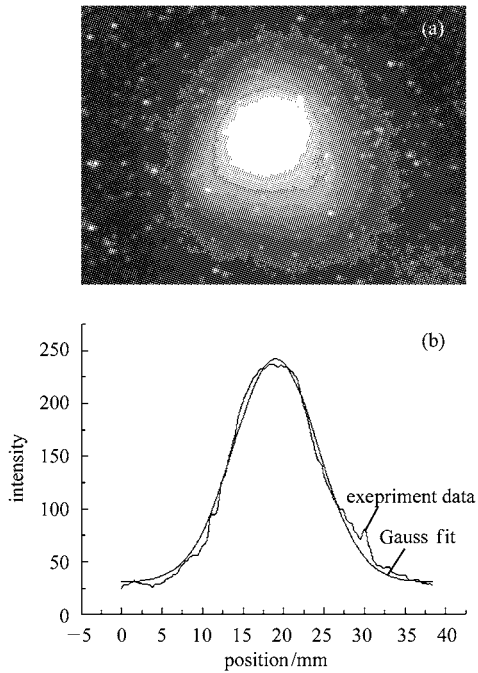


图 4 CR 方法测量的束剖面  
(a)CR 方法测量的束剖面图像;  
(b)强度分布曲线及高斯拟合曲线.

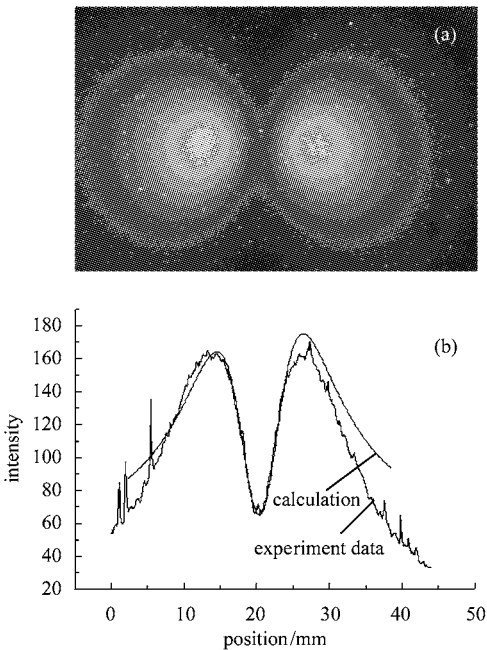


图 5 OTR 角分布图案及计算曲线图  
(a)OTR 角分布图案;(b)角分布曲线及计算曲线.

时间分辨的能谱图像如图 6 所示.76ns 范围内,最高能量 18.57MeV,最低能量 18.33MeV,能散度 0.64%.

图 7 给出了用狭缝法测得的打靶电子束焦斑尺

寸的典型结果,该 X 光强度分布图近似高斯分布,用高斯分布拟合后,其分布半高宽为 1.2mm,同时用大的圆孔装置检测了光源发光强度的对称情况,光源发光近似对称分布.因此,此发实验打靶电子束的焦斑直径为 1.2mm(FWHM).

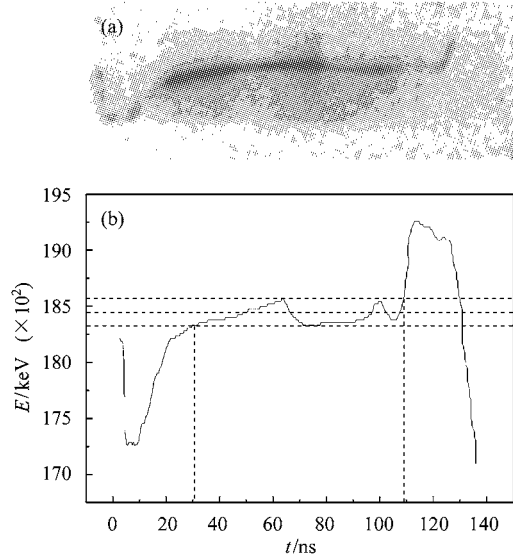


图 6 时间分辨的能谱图及其处理结果  
(a)能谱图像;(b)由能谱图像处理的结果.

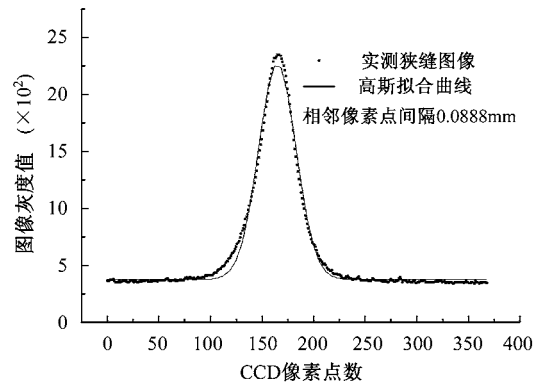


图 7 精细调试后的焦斑测量结果

利用热释光剂量仪多次测量了 1m 处 X 光照射量,结果表明 1m 处 X 光照射量不小于 0.103C/kg.

## 5 结论

“神龙一号”加速器的研制,各项指标达到或好于设计指标.电子能量 18—20MeV,束流强度 ~2.6kA,束流脉宽 ~70ns(FWHM),X 光焦斑直径 1.2mm(FWHM),1m 处 X 光照射量 ~0.103C/kg.

## 参考文献 (References)

- 1 Burns M et al. Technology Demonstration for the DARHT Linear Induction Accelerators. In: Conference Preceeding on High Power Particle Beams. 1992. 283—290
- 2 Mascureau J de et al. Design and Progress of the AIRIX Induction Accelerator. In: IEEE Particle Accelerator Conference Preceeding. 1993, 687—699
- 3 Pavlovskii A I et al. In: Conference Preceeding on High Power Particle Beams. 1992, 273
- 4 DENG Jian-jun et al. High Power Laser and Particle Beams, 2003, **15**(5):502—504(in Chinese)  
(邓建军等. 强激光与粒子束, 2003, **15**(5):502—504)
- 5 SHI Jin-shui et al. High Power Laser and Particle Beams, 2001, **13**(2):245—249(in Chinese)  
(石金水等. 强激光与粒子束, 2001, **13**(2):245—249)
- 6 WANG Hua-cen et al. High Power Laser and Particle Beams, 1996, **8**(3):313—319(in Chinese)  
(王华岑等. 强激光与粒子束, 1996, **8**(3):313—319)
- 7 Thomas J T et al. Simulations, Experiments, and Analysis of Beam Target Interaction. In: IEEE Particle Accelerator Conference Preceeding, 1999. 1842—1844
- 8 SHI Jin-shui et al. High Power Laser and Particle Beams, 1999, **11**(2):177—179(in Chinese)  
(石金水等. 强激光与粒子束, 1999, **11**(2):177—179)
- 9 Melton J G et al. Pulsed Taut-Wire Measurement of the Magnetic Alignment of the ITS Induction Cells. In: IEEE Particle Accelerator Conference Preceeding, 1993, 2944—2946
- 10 Piot P et al. Real-Time Transverse Emittance Diagnostics. In: Proceedings of LINAC, 2000
- 11 CHEN Si-fu et al. High Power Laser and Particle Beams, 2003, **15**(4):391—393(in Chinese)  
(陈思富等. 强激光与粒子束, 2003, **15**(4):391—393)
- 12 Chen Y-J. Corkscrew Modes in Linear Accelerators. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1990, **A292**: 455—464

## Dragon-I Linear Induction Electron Accelerator \*

DING Bo-Nan DENG Jian-Jun WANG Hua-Cen CHENG Nian-An DAI Guang-Sen ZHANG Lin-Wen LIU Cheng-Jun  
ZHANG Wen-Wei LI Jin ZHANG Kai-Zhi DAI Zhi-Yong LAI Qing-Gui LI Hong WEN Long LIU Xiao-Ping  
LI Wei-Feng XIE Yu-Tong CHEN Si-Fu YANG Guo-Jun LI Xin YANG An-Ming WANG Min-Hong  
YANG Xing-Lin PAN Jian WANG Jing-Sheng XUE Zhi-Chun CAO Guo-Gao HE Yi YAN Zhi-Long  
LI Yuan MA Bing GAO Feng CHEN Nan SHI Jin-Shui<sup>1)</sup>

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract** Dragon-I is a linear induction electron accelerator. This facility consists of a 3.6MeV injector, 38 meter beam transport line and 16MeV induction accelerator powered by high voltage generators, including 8 Marx generators and 48 Blumlein lines. This paper describes the physics design, development and experimental results of Dragon-I. The key technology is analyzed in the accelerator development, and the design requirements and operation of the major subsystems are presented. The experimental results show Dragon-I generates an 18—20MeV, 2.5kA, 70ns electron beam. The X-ray spot size is about 1.2mm and dose level about 0.103 C/kg at 1 meter.

**Key words** linear induction accelerator, beam, injector, pulse power, beam transport and focus, bremsstrahlung

Received 18 October 2004

\* Supported by National Special Project

1) E-mail: sjsleap@my-public.sc.cninfo.net