

## “神龙一号”注入器研制\*

丁伯南<sup>1)</sup> 张开志 文龙 王勳 代志勇 章文卫  
李洪 王文斗 李劲 杨安民 谢宇彤 陈思富  
王华岑 戴光森 石金水 章林文 邓建军

(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”注入器是直线感应加速器的束流源,它采用了感应叠加的高压加载方式,包括脉冲功率系统、感应腔、阴阳极杆、绝缘支撑、二极管和束流传输系统等子系统.在研制中采用了径向绝缘支撑、对中支撑调节系统、类 Pierce 阴极等先进技术,以及二极管线圈内置和外径为 800mm 的铁氧体大环等创新.参数测试显示,3.5MeV 注入器达到了世界先进水平.

**关键词** 直线感应加速器 注入器 二极管 感应叠加

### 1 引言

注入器为加速段提供高品质的脉冲强流电子束,是直线感应加速器的束源.由于空间电荷效应、横向电磁场等的作用,以及束传输元件加工精度和安装准直精度等因素的影响,在束流传输和加速过程中,束品质会逐渐变差.所以,注入器输出束品质制约了加速器的整体性能.

直线感应加速器的注入器大多采用感应叠加的高压加载方式,如美国的 FXR、ATA 加速器<sup>[1]</sup>,以及我国的 LIAXF<sup>[2]</sup>等.而新近研制成功的加速器,如 DARHT/AIRIX<sup>[3]</sup>,采用变阻抗线将脉冲功率系统产生的脉冲高压直接加载到二极管上.由于具备了比较成熟的技术基础,并在铁氧体大环和径向绝缘支撑两项关键技术上取得了突破,“神龙一号”注入器采用了感应叠加形式的布局.脉冲功率系统产生的 250kV,90ns 脉宽(FWHM)的高压脉冲被馈入感应腔,阴阳极杆再将感应腔产生的 300kV,90ns 的高压脉冲叠加起来,加载到二极管上,在阴极表面形成 200kV/cm 的强电场.在强电场作用下,电子束将从

阴极发射面拉出,并在运输磁场约束下,进入阳极管,进而传输到注入器出口.

### 2 “神龙一号”注入器概貌

“神龙一号”注入器主体的布局如图 1 所示.

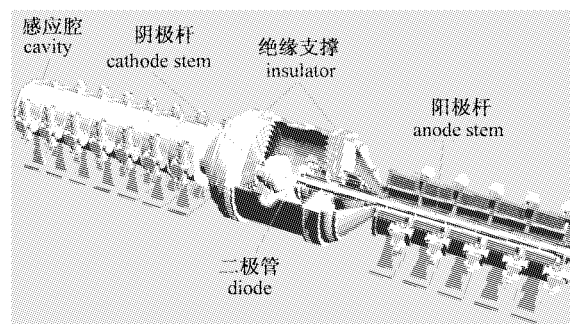


图 1 3.5MeV 注入器示意图

7 个阴极段感应腔和 5 个阳极段感应腔以及阴阳极杆组成了感应叠加器.每个感应腔采用 13 块 OD800mm, ID510mm, 厚 23mm 的铁氧体大环,工作电压大于 300kV.穿过腔中央的阴阳极杆将感应电压

2004-09-22 收稿

\* 国家专项基金资助

1) E-mail: kaiserzhang@hotmail.com

串联成 3.5MV 左右的高压,加载到二极管上。

二极管区的 3 个线圈都置于阴阳极头内。反向线圈的引线从阴极杆中引出,引导线圈和桥接线圈从双层阳极管中引出。

阴阳极杆长分别约 3.5m 和 4.5m;而由于线圈内置,阴阳极头大而沉。采用了径向绝缘支撑支承阴阳极杆,并将阴阳极头定位于注入器轴线上。

Blumlein 脉冲形成线(B 线)输出的高压脉冲通过 2 根 24Ω 的电缆馈入 1 个感应腔。为降低束流脉冲在加速段中能散度的增长,注入段 B 线的电长度为 45ns,这样注入器输出束流脉冲脉宽为 90ns (FWHM)。绝大部分束流可以在脉宽 120ns 的加速电压脉冲的平顶区域得到加速。

### 3 关键技术研究

#### 3.1 减小发射度

提高注入器能量和二极管位形优化设计是减小发射度最直接的措施。

##### 3.1.1 提高注入器能量

强流脉冲电子束刚从发射极中引出时,能量较低,空间电荷效应的影响非常显著。如果提高二极管电压,迅速提高电子的动能,则有助于抑制空间电荷效应对发射度增长的影响。

根据 G. J. Caporaso 的推导<sup>[4]</sup>,空间电荷效应对发射度增长的影响可以简单描述为

$$\epsilon_f^2 = (1 + 0.14\theta^2)\epsilon_0^2, \quad (1)$$

式中  $\epsilon_f$  为均匀分布的束剖面对应的均方根发射度;  $\epsilon_0$  为初始发射度,对应的束剖面为空心束;  $\theta$  为空间电荷效应的影响。

$$\theta = \frac{2I}{(\gamma\beta)^3 I_A k_c \epsilon}, \quad (2)$$

其中  $I_A$  为 Alfen 电流,17kA;  $k_c$  为回旋波数。

假定注入器中束剖面分布满足(1)式,则当  $\theta \geq 1$  时空间电荷效应将会造成显著的发射度增长。

在注入器二极管区,输运磁场平均值约 0.05T,束流强度约 3.5kA,如果均方根发射度取  $500\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ ,则可以导出如表 1 所示的注入器能量与  $\theta$  的关系。

表 1 注入器能量  $\gamma$  与空间电荷因子  $\theta$  的关系

$\gamma$	0.5	1	2	3	4	5	6
$\theta$	9.6	3.61	1.21	0.61	0.36	0.24	0.17

可见,注入器能量小于 2MeV 时,空间电荷效应对发射度的影响比较严重;而注入器能量增大到 3MeV 后,空间电荷效应的影响越来越小;在 4MeV 之后,能量增加的效果已经无明显差别。

结合现有的技术条件,“神龙一号”注入器能量选择在 3.5MeV 左右为宜。

##### 3.1.2 二极管位形优化设计

二极管优化措施包括采用无箔二极管、 $R/r$  取值较大的阴阳极面和类 Pierce 阴极等。

有箔阳极虽然有助于在二极管区形成均匀电场,但由于网孔存在,电子束经过时会被散射和聚焦,影响束品质;而电子束的碰撞使金属箔的寿命往往小于 100 次试验。应用无箔二极管必须满足下面的条件,  $d_{AK} \gg r_A$ , 否则,阳极孔就会严重地影响二极管区场强的均匀分布。其中,  $d_{AK}$  是阴阳极间距,  $r_K$  为阳极孔半径。由于电子束的初始能量低,因此二极管区的场分布对发射电子束的运动,亦即发射度影响极大。通常还采用  $R/r_K > 3$  的结构,以确保二极管区场的均匀分布,其中  $R$  为阴阳极面直径,  $r_K$  为发射极半径。

所谓 Pierce 阴极,即阴极发射面周围的电极面是一个斜面,面与系统中心轴线的夹角为  $67.5^\circ$ 。由于斜面的存在,初始发散的电子束将受到径向的电场箍缩力的作用。设计得比较好的 Pierce 阴极将使发射的电子束基本平行于轴线运动,从而降低发射度。对电流发射与传输的数值模拟计算结果表明,当类 Pierce 阴极发射面凹陷,低于阴极面约 6mm 时,发射电流的发射度最小。凹陷太小,则聚焦力太小;凹陷太大则可能过聚焦,空间电荷力将使电子束沿横向向外膨胀。

#### 3.2 减小能散度

影响注入器输出束能散度的因素有两个,一是二极管区电场分布的均匀性,这在二极管优化设计过程中已经予以充分的考虑。而加载到二极管上的高压脉冲的平顶度,即避免高压脉冲在产生、馈送和叠加过程中的变形则是我们努力的重点。

功率馈送涉及的环节众多,从 B 线的输出开始,包括感应腔,脉冲在阴阳极杆与腔内壁组成的同轴线中传输,以及二极管负载等。要求整个馈送系统是匹配的,以抑制来回反射引起的波形失真。

B 线输出的电压波通过感应腔间隙到达阴、阳极杆时分为两路,一路向二极管方向行进,另一路向相反方向即注入器两端方向行进;在不匹配的情况

下,这两路电压波每遇到一个感应腔间隙,就又会分为两路,一路继续前进,一路反射回来;到二极管和注入器两端的电压波也将被反射回去,反射回来的波经过感应腔间隙时也要发生同样情况.电压波的这种来回反射、叠加可使二极管和感应腔间隙上的电压波形发生畸变.

阻抗匹配是通过调整阴阳极杆各段的直径,改变其与感应腔组成的同轴线的波阻抗,使得向注入器两端行进的电压波在感应腔间隙和注入器两端都不发生反射.即从间隙二极管一侧向注入器两端“看到”的,间隙阻抗和另一侧传输线阻抗的串联阻抗,等于“当地”传输线阻抗.这样,只有一开始就向二极管行进的电压波才能到达二极管上,这些波在行进过程中只是幅度倍增而波形不会畸变.支撑阴阳极头的径向绝缘支撑是电阻分压形式的,其中的水电阻和二极管负载并联,以与功率源匹配.

### 3.3 二极管区线圈内置

二极管区的磁场通常由3个线圈提供,即反向线圈、引出线圈和桥接线圈,传统的配置方式是将线圈放置在二极管腔外.由于高压设计的需要,二极管腔内径增大到 $\phi 1400\text{mm}$ ,再采用传统的方式将面临许多挑战.首先是线圈尺寸超大,难以制作,加工和安装精度都难以保证;而要产生满足要求的磁场,则需突破线圈电源研制等关键技术.

将二极管区线圈放在阴阳极头内可以解决上述难题,如图2所示.首先,线圈尺寸回归正常;其次,现有的恒流源完全能满足这种线圈的需要;并且,可以在线圈中安装校正线圈以校正横向场.但这样做也极具挑战性,比如高压的风险,线圈内置的复杂工艺,线圈引线等.

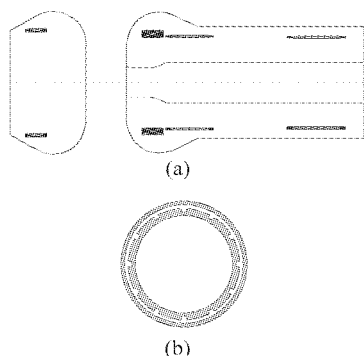


图2 二极管区线圈内置及阳极段引线示意图

(a)二极管区线圈配置示意图;(b)阳极管横截面.

借鉴加速腔设计方法,遵循静电屏蔽的原则,成

功地消除了高压对线圈正常工作影响.

为减小阳极管中的引线电流,以减小引线产生的横向磁场对阳极管中束流传输的影响,螺线管线圈采用 $\phi 2.54\text{mm}$ 的漆包线,并以四线并绕的方式绕制.这样,引线电流可以降低到小于100A.

反向线圈的引线从阳极管中引出,而阳极段3个线圈共24根引线都从阳极管的外筒和中筒之间引出.由于阳极管中有束流传输,引线必须精心布置.阳极管横截面如图2(b)所示,引线的原则是圆周对称和相反流向的引线互补.即每个螺线管线圈的进线和出线在同一个引线槽内,每个线圈的4对引线对称地分布在圆周上的4个引线槽中.这样引线大大地减小了引线带来的横向场,计算表明,每根螺线管线圈引线通过100A电流时,所有引线在阳极管中心形成的横向磁场小于0.05mT.

### 3.4 径向绝缘支撑

径向绝缘支撑用以支承阴阳极杆,并将其中心定位于加速器轴线上,但绝缘支撑的表面闪络将会降低二极管腔与阴阳极杆之间的击穿电压.

DARHT注入器采用的是阻容分压形式的绝缘支撑,绝缘支撑直径1.8m,稳定工作电压为3.2MeV. AIRIX注入器采用电阻分压形式的分层式的绝缘材料稳定工作电压提高到4MV.

所谓电阻分压即优化绝缘体之间水电阻纵截面的形状,使得电阻值沿径向的分布是均匀的.这样,水电阻两端的电压也将沿径向均匀分布.将径向电阻看作是一系列电阻的串连,则径向长度 $\Delta r$ 对应的电阻值为

$$\Delta R = \rho \frac{\Delta r}{S}, \quad (3)$$

式中 $\rho$ 为电解质溶液的电导率, $S$ 为径向电阻的截面积.当 $\Delta r$ 很小时,截面积近似为 $S = 2\pi r \cdot d$ . $d$ 为电解质溶液的厚度.因为电阻沿径向均匀分布,所以 $\Delta R \propto \Delta r$ ,于是,电解质溶液的厚度应满足

$$d = \frac{\rho \Delta r}{2\pi r \Delta R} \propto \frac{1}{r}. \quad (4)$$

结合现有的技术条件,按照上述要求研制了图3所示的绝缘支撑.外径 $\phi 1560\text{mm}$ ,整体厚度大于200mm,绝缘体为两块有机玻璃,中间是液体电阻.真空侧绝缘体纵截面为锯齿状,表面与径向夹角 $45^\circ$ ,铝质均压环嵌套在锯齿上以改善场分布.

采用ANSYS模拟计算结果显示,阴极段绝缘支撑三相点附近最高场强为34kV/cm;阳极段绝缘支

撑最高场强约 20kV/cm. J.C. Martin 的研究<sup>[5]</sup>显示, 对于图 3 所示的,  $\theta = 45^\circ$  的绝缘支撑, 其表面击穿场强可以由(5)式估算.

$$E_b = K_{\pm} t^{-1/6} A^{-1/10}, \quad (5)$$

式中  $K$  为与材料和角度相关的常数, 基于具体的应用环境取  $K_- = 4.2 \times 10^5$ ,  $K_+ = 7 \times 10^5$ ;  $t$  为超过电场最大值的 89% 时的脉冲持续时间;  $A$  为绝缘体的有效面积. 代入实际的参数, 可以求得阴极边绝缘体表面击穿场强约为 80kV/cm, 阳极边为 133kV/cm, 远高于模拟计算得到的三相点峰值场强.

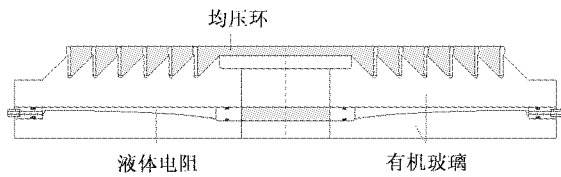


图 3 径向绝缘支撑横截面示意图

## 4 束流参数测试

### 4.1 发射电流

当二极管电压取 3.6MV, 阴阳极间距为 170mm

时, 测得发射电流 3.5kA, 注入器输出束流 2.8kA, 脉宽 80ns(FWHM).

### 4.2 发射度测量

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. 当空间电荷力不可忽略时, 测得束脉冲中部归一化发射度为  $1040\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ .

### 4.3 能量与能散度

采用分析磁铁将入射电子束在空间展开, 再穿过石英玻璃片转换成 Cerenkov 光. 分析 CCD 记录的光信号, 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%.

## 5 结论

3.5MeV 注入器可以输出能量约 3.7MeV, 流强 2.8kA 的电子束, 测得束流归一化发射度为  $1040\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ , 能散度约 2.1%, 满足“神龙一号”加速器对束源的要求, 能量、束流强度、发射度等各项主要指标都达到了世界先进水平.

## 参考文献 (References)

- Scarpetti R et al. Upgrades to the LLNL Flash X-Ray Induction Linear Accelerator(FXR). 11th IEEE International Pulsed Power Conference, 1997
- DING Bo-nan. 10MeV LIA Research Report. Proceedings of 10MeV LIA Conference, CAEP, 1994(in Chinese)  
(丁伯南. 10MeV 直线感应加速器会议文集. 中国工程物理研
- 究院流体物理研究所, 1994)
- de Mascureau J et al. Status of the AIRIX Induction Accelerator. Proc. of the Particle Accelerator Conf., Dallas IEEE, 1995, 1210
- Caporaso G J, Cole A G. High Current Electron Transport. American Institute of Physics, 1992
- Martin J C. Internal Report SSWA/JCM/704/49. AWRE, Aldermaston, England, 1970

## Development of Dragon- I Injector<sup>\*</sup>

DING Bo-Nan<sup>1)</sup> ZHANG Kai-Zhi WEN Long WANG Meng DAI Zhi-Yong ZHANG Wen-Wei  
LI Hong WANG Wen-Dou LI Jin YANG An-Min XIE Yu-Tong CHEN Si-Fu  
WANG Hua-Cen DAI Guang-Sen SHI Jin-Shui ZHANG Lin-Wen DENG Jian-Jun  
(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract** 3.5MeV injector is the electron beam source of Dragon-I induction linac. Electron beam is extracted by the magnetic field from diode powered by an induction voltage adder, which is composed of pulsed power system, induction cavities, cathode/anode stem and radial insulator. Innovation is adopted in the development such as Pierce-like cathode, 800mm OD ferrite torroid and solenoids placed inside cathode/anode. Measurement shows that this injector is of high performance with output beam of 2.8kA, 3.7MeV, and normalized emittance of  $1040\pi\cdot\text{mm}\cdot\text{mrad}$ , energy spread of 2.1%.

**Key words** induction linac, injector, diode, induction adder