

# 大面积热阴极系统设计及初步实验结果

杨安民<sup>1)</sup> 夏连胜 张篁 张开志 石金水 邓建军

(中国工程物理研究院流体物理研究所 绵阳 621900)

**摘要** 建立了能满足大面积热阴极系统需要的2MeV热阴极实验平台,并配合研制了直径为100mm的B型储备式热阴极.在二极管电压为1.8MV、脉宽90ns(FWHM)、阴极工作温度为1350°C情况下,利用法拉第筒获得了1000A的发射电流,发射电流密度约12A/cm<sup>2</sup>.实验结果表明,利用大面积热阴极获得高亮度强流电子束在工程上是可以实现.实验结果也表明,阴极发射能力强烈依赖于二极管真空和阴极工作温度.

**关键词** 直线感应加速器 二极管 储备式热阴极 电流密度

## 1 引言

获得具有更低发射度、一致性较好三脉冲电子束是强流猝发型直线感应加速器研制的关键问题之一.在传统的天鹅绒场致发射阴极中,由于等离子体膨胀影响,很难保证猝发脉冲电子束的一致性和后续脉冲电子束的品质<sup>[1]</sup>.热阴极因其产生的电子束初始横向动量小,束亮度高,几乎无阴极等离子体产生,在高功率微波管、射频加速器中得到广泛应用<sup>[2]</sup>.最为显著的代表是美国DARHT-II长脉冲加速器,其采用发射面直径为6.5in储备式热阴极,在工作温度1140°C时,获得了2000A的工作电流,发射电流密度约为10A/cm<sup>2</sup><sup>[3]</sup>.

为了探索大面积储备式热阴极制备工艺、工作特性及其对工作环境的特殊要求,并最终能得到发射电流在kA级以上的热电子束流,外协研制了直径为100mm的B型阴极,进行了2MeV注入器的真空系统和二极管区的改造设计,实验研究了大面积热阴极工作特性.

## 2 实验装置

大面积热阴极系统主要包括产生2MeV, 90ns(FWHM)直线感应注入器功率系统<sup>[4]</sup>、 $\Phi 100\text{mm}$ 储备式热阴极组件、高强度低放气率陶瓷绝缘支撑系统、束流传输系统、高真空与水冷却系统.

### 2.1 注入器系统

2MeV注入器系统主要包括电子束源主体装置和

脉冲功率系统两大部分.主体装置由阴极段、阳极段及热发射二极管三部分构成.二极管模拟的基本思路是用电磁PIC方法模拟确定电子束包络及配置磁场,结合静电场有限元数值分析确定二极管结构参数.设计中采用无箔型二极管,结合使用皮尔斯阴极结构,使发射电子尽可能进入阳极孔,并具有初始聚焦效果.

注入器的高压通过阴阳极杆叠加到阴阳极头上,它们自身长度都超过了3m,为防止自身的下垂,在阴阳极头顶端设置绝缘支撑,支撑材料在耐高压的同时必须具有强的耐热性能和低的真空放气率.

设计的二极管外径达到1.2m,考虑到对中微调效果,单节支撑段长度不小于400mm.实验中采用95真空陶瓷作为支撑件,将多个陶瓷柱串联联结,陶瓷柱两端金属化处理,并辅助使用金属均压环,形成三点支撑结构.模拟显示,单节陶瓷柱耐压值在330kV左右.图1为单个陶瓷绝缘支撑段.

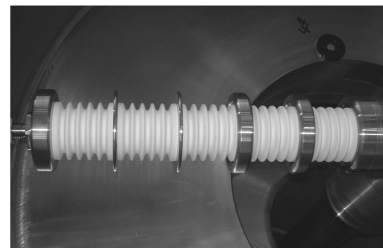


图1 陶瓷绝缘支撑

### 2.2 阴极组件

实验中采用的阴极直径为 $\Phi 100\text{mm}$ 的储备式热阴极(B型),是同类型目前国内最大的阴极.

2008-01-07 收稿

1) E-mail: caepyananmin@163.com

阴极寿命严重受阴极温度影响, 尤其是阴极面温度的不均匀性. 设计中在阴极面的轴向与径向分别设置多层热屏, 热屏采用低传导率的钼材料. 为减小阴极面电子发射初始角动量, 加热丝采用弱磁绕法. 图2为直径为 $\Phi 100\text{mm}$ 的钨膜型储备式热阴极结构示意图.

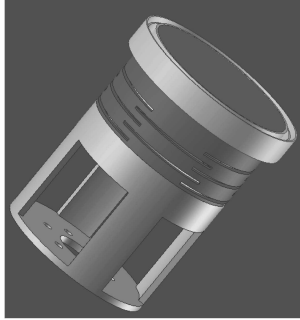


图2 阴极组件

### 2.3 实验辅助系统

由于系统存在热源, 设计中将阴阳极头热源附近的真空联结全部采用无氧铜密封, 从而减少放气源. 二极管区采用1200L/S的涡轮分子泵与1200L/S低温泵组合. 设计真空度优于 $5 \times 10^{-5}\text{Pa}$ .

阴极部分绝热主要通过四方面措施保证: 在钼桶外围添加多层辐射屏蔽体, 降低径向的热辐射; 在阴极头底端增加辐射屏蔽体, 减少其向自身一侧的热辐射; 在固定阴极头的钼桶上刻隔热线, 降低轴向的热传导; 设计水套结构, 通过水冷的方式继续降温. 模拟显示, 线圈附近的温度下降到 $60^\circ\text{C}$ .

## 3 实验结果

图3为直径100mm的B型阴极点燃的图像, 图4是实验中得到的二极管电压波形和阴极束流波形. 在二极管电压1.8MV, 真空 $5 \times 10^{-5}\text{Pa}$ , 阴极工作温度 $1350^\circ\text{C}$ 下, 测得最大电流接近1000A.

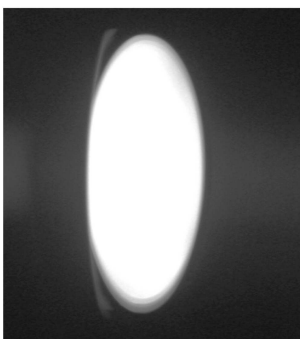


图3 发射面直径100mm的热阴极

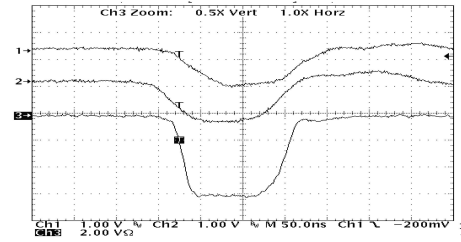


图4 测量到的阳极收集束流波形(通道3)

### 3.1 温度特性测量

图5是二极管电压为1.5MV, 二极管真空为 $4 \times 10^{-5}\text{Pa}$ 时引出束流与阴极温度关系. 从图中看出, 在阴极工作温度为 $1280^\circ\text{C}$ 情况下, 二极管工作开始进入空间电荷限制状态.

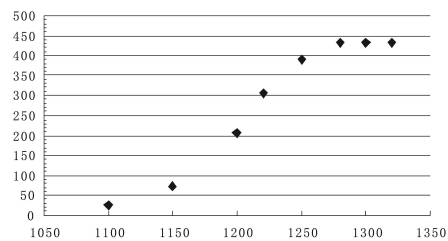


图5 阴极温度特性

实验对工作状态下阴极发射面温度均匀性进行了监测, 测量中按圆面均匀分布测量了25个点, 在中心点温度为 $1200^\circ\text{C}$ 时, 温度最低点 $1150^\circ\text{C}$ 位于阴极面边缘, 温度分布呈由边缘向中心递增趋势, 整个阴极面温度均匀性小于5%.

### 3.2 I-V 特性曲线

图6给出的是同一温度下引出束流和二极管电压的关系. 其中系列1的工作温度为 $1320^\circ\text{C}$ , 在工作电压1.73MV, 测得最大收集电流470A, 电流密度约 $6\text{A}/\text{cm}^2$ . 系列2的工作温度为 $1250^\circ\text{C}$ . 从图中看, 系列2已经工作在源限制状态, 而系列1也没有工作在空间电荷限制状态, 这说明该阴极的发射能力比预期的要低, 同时, 通常情况下, 钨钨阴极的工作温度为 $1050^\circ\text{C}$ — $1100^\circ\text{C}$ , 而该阴极在 $1250^\circ\text{C}$ 时仍工作在源限制状态, 说明该阴极工作状态不是很理想.

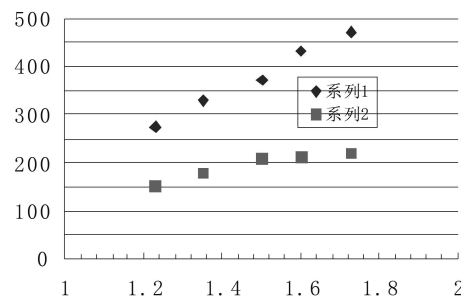


图6 二极管伏安特性

### 3.3 真空对阴极发射的影响

图7为工作电压1.5MV, 工作温度1250°C情况下,

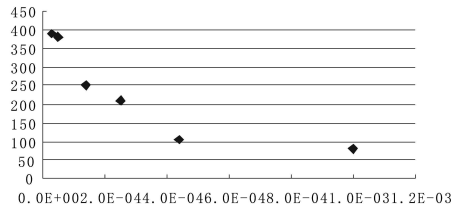


图7 真空对发射性能的影响

不同的真空点下阴极发射性能衰减曲线. 从曲线下下降趋势来看, 二极管区真空度对阴极发射影响极大,  $5 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-4} \text{Pa}$  之间是阴极发射能力变化最为敏感的区域, 在  $1 \times 10^{-3} \text{Pa}$  下, 阴极发射电流实际衰减大

于70%. 实验也发现, 阴极激活温度必须大于1270°C, 在  $5 \times 10^{-5} \text{Pa}$  下, 阴极激活温度可以为1200°C.

## 4 结论

从初步实验结果来看, 利用大面积热阴极获得高亮度强流电子束在工程上是可以实现的. 但B型阴极工作温度比预想的要高很多, 这将严重影响阴极工作寿命和稳定性, 对实验系统的设计也提出更高要求. 从减小阴极工作温度, 进一步降低电子逸出功的角度考虑, 研制覆膜型储备式阴极(M型)尤为必要. 实验结果也表明, 阴极发射能力强烈依赖于系统真空度, 实验系统的真空度不得低于了  $5 \times 10^{-5} \text{Pa}$ , 低的真空会引起阴极中毒并提高了阴极激活温度和阴极工作温度.

### 参考文献(References)

- XIA Lian-Shen, ZHANG Huang et al. HEP & NP, 2006, **30**(5): 471—474 (in Chinese)  
(夏连胜, 张篁, 江孝国等. 高能物理与核物理, 2006, **30**(5): 471—474)
- Stanley Humphries, Jr. Charged Particle Beams. ZHAO Kui interpret et al. Beijing: Atomic Energy Press, 1999. 157—158 (in Chinese)
- (小斯坦利·汉弗莱斯. 带电粒子束. 赵夔等译. 北京: 原子能出版社, 1999. 157—158)
- Scarpetti R D, Nath S et al. Status of the Darht 2nd AXIS Accelerator at the Los Alamos National Laboratory. Proceedings of PAC07, Albuquerque, New Mexico, USA
- DAI G S, XIE M, LIU X P et al. The Pulsed Power System for 2MV Electron Beam Source. In: Editorial Office of HPLPB, Proc. 3rd Intern. Symposium on Pulsed Power and Plasma Applications. Sichuan: Editorial Office of HPLPB, 2002. 201

## Large Area Thermionic Cathode and Its Prilimiary Experimental Results

YANG An-Ming<sup>1)</sup> XIA Lian-Sheng ZHANG Huang ZHANG Kai-Zhi SHI Jin-Shui DENG Jian-Jun  
(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract** A 2MeV thermionic cathode test stand was established to meet the requirement of the large area thermionic cathode system. A 100mm in diameter type “B” thermionic dispenser cathode was developed. A 1000A emission current was produced at the voltage of the diode about 1.8MV, the pulse width about 90ns(FWHM), and the cathode temperature about 1350°C. The emission current density is  $12 \text{A/cm}^2$ . The results indicate that a large area thermionic cathode which produces high quality and high current electron beams is visible. The results also indicate that the ability of cathode emission relies on the diode-vacuum and cathode-temperature.

**Key words** LINAC, diode, thermionic dispenser cathode, current density