

# 电子帘加速器电子枪的研制

陈鹏飞 张明超 李新民 王玉洪

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 研究了电子帘加速器电子枪的束流传输特性,分析了影响束流纵向均匀性的几个因素,尤其对灯丝的下垂问题提出了一种理想的端约束模型,介绍了新研制的电子枪,其束流纵向不均匀度 $\leq \pm 10\%$ .

**关键词** 电子帘加速器 电子枪 辐照加工

## 1 引言

电子帘加速器是70年代由美国研制出的一种大功率工业用低能电子加速器,能量一般在150—300 keV. 由于它能引出帘状电子束的优点,至今已应用到涂层固化、热收缩薄膜、橡胶硫化、录音带、计算机磁盘及杀菌消毒等领域的辐照加工,并已形成产业化. 美、德、法、日等国相继推出各种新机型,主要解决电子枪引出束流的均匀性问题,从单跨直灯丝型电子枪,流强10 mA,不均匀度 $\pm 10\%$ 发展到EPZ(Extended Process Zone)型电子枪,流强1000 mA,不均匀度 $\pm 3\%$ <sup>[1,2]</sup>.

80年代末我国自行研制过一台电子帘加速器,亦仅处于中试阶段. 本文介绍了我们新设计的单跨500 mm长灯丝、流强20 mA电子枪,并给出其在原电子帘加速器上的实验结果.

## 2 设计理论

### 2.1 工作原理

直热式灯丝(阴极)发射帘状电子束,在栅压一般为+200—300V作用下,部分通过栅极缝进入加速腔成为负载电流,改变栅压可调节负载电流的大小;电子穿过加速腔获得能量后穿过钛窗进入辐照区,被辐照物以一定的速度从辐射区穿过,如图1所示.

### 2.2 灯丝工作温度的估计

由于反射极电位 $V$ 相对灯丝负电位,且处于阴极表面的电子的位能远大于阴极面发

射电子的平均初动能  $2kT$ , 因此灯丝上圆柱面发射的电子束流集中在灯丝两侧, 其中  $k$  为玻耳兹曼常数,  $T$  为阴极表面温度. 倘若这两侧的电子被引入至加速腔内, 将导致钛窗局部过度受轰击, 缩短钛窗的寿命, 因此希望这两部分束流打在栅极上. 再考虑到栅极缝处束流的损失, 初步估计灯丝发射的总束流为负载电流的 6 倍. 为使负载电流达到 1—20 mA, 对长度 500 mm、直径 0.8 mm 的纯钨丝, 按 Richardson<sup>[2]</sup> 公式, 发射束流面密度

$$J = 1.2 \times 10^6 T^2 e^{\frac{11600\varphi}{T}}, \quad (1)$$

取逸出功  $\varphi = 4.52 \text{ eV}$ , 求得  $T = (2000 \pm 100) \text{ K}$ .

### 2.3 反射极电位的讨论

由于电子枪整个处于负高压, 为减少电源传输电缆的芯数, 一般要将反射电极悬浮以形成负电位.

反射极一般由两部分组成, 如图 2 中的反射极 1 和反射极 2, 两者等电位. 为确定反射电极的电位, 我们提出一个简化模型: 灯丝和反射极构成一柱形电容器, 单位长度电容

$$C = \left(1 - \frac{\theta}{2\pi}\right) \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln R - \ln r}, \quad (2)$$

其中  $R$  为反射极内槽半径,  $r$  为灯丝半径,  $\epsilon_0$  为真空的电容率,  $\theta$  为反射极张角. 设  $t$  时刻反射电极电位为  $V$ , 则反射极上积累电子的电量为

$$Q = CV. \quad (3)$$

由于阴极发射的电子具有费米分布的能谱<sup>[3]</sup>, 假定只有初动能  $\epsilon \geq eV$  的电子才能打到反射极上, 则对单位长度有

$$C \frac{dV}{dt} = \frac{dQ}{dt} = (2\pi - \theta) r J|_{\epsilon \geq eV}, \quad (4)$$

利用文献 [3] 可导出

$$J|_{\epsilon \geq eV} = \frac{4\pi em}{h^3} (kT)^2 e^{-\frac{\varphi + eV}{kT}} \left(1 + \frac{eV}{kT}\right), \quad (5)$$

其中  $m$  为电子质量, 即得关于  $V$  的方程

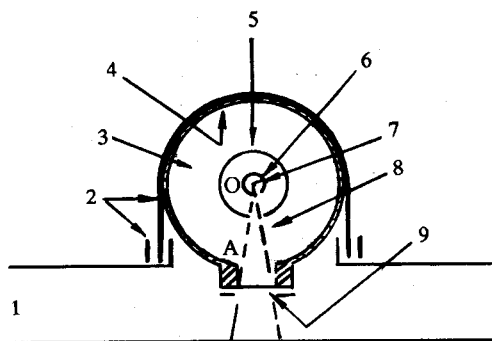


图 1 加速器主体截面图

1. 被辐照物; 2. 屏蔽; 3. 真空; 4. 筒体; 5. 高压电极; 6. 电子枪; 7. 灯丝; 8. 电子束; 9. 钛膜.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{4\pi rem}{\epsilon_0 h^3} (kT)^2 e^{-\frac{\varphi + eV}{kT}} \left(1 + \frac{eV}{kT}\right) \ln \frac{R}{r}, \quad (6)$$

作数值解, 可知  $V$  很快收敛, 并在 24h 内稳定在 10.5 V 左右.

## 2.4 反射极形状、大小的选择

2.4.1 阴极的加热功率主要消耗在热辐射上<sup>[4]</sup>, 如图 2 所示, 倘若灯丝处在反射极 1 的轴心, 则灯丝的光辐射将部分反射回灯丝, 从而减少热损失, 提高加热比功率.

2.4.2 栅极缝上部是弱场 ( $E_0 \approx 10^3 \text{ V/m}$ ), 下部是强场 ( $E_1 \approx 10^6 \text{ V/m}$ ), 由于栅极缝宽  $2a$  较窄 (十几 mm), 栅极缝的透镜效应可近似为无限大开缝平面, 如图 3 所示, 作保角变换得电位分布<sup>[5]</sup>为

$$V = V_g + E_0 z + \frac{1}{2} E \left( \frac{\sqrt{2}}{2} \times \sqrt{\sqrt{(y^2 - z^2 + a^2)^2 + 4y^2 z^2} - (y^2 - z^2 - a^2)} + z \right), \quad (7)$$

其中  $V_g$  为栅压, 作束流光学数值解知束流包络在通过栅极前后变化不大, 而且电子很快沿

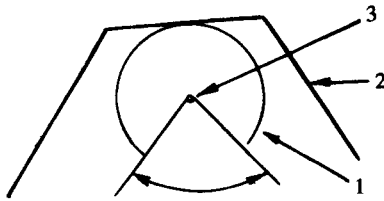


图 2 反射电极模型简化图

1. 反射极; 2. 反射极; 3. 灯丝.

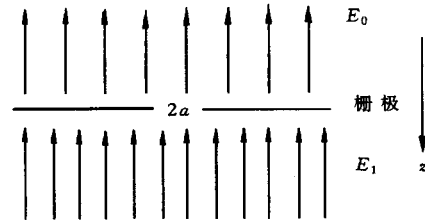


图 3 栅极缝简化图

栅极缝下部的强电场的直线电力线运动, 因此, 考虑束流在电子枪中的传输时可将有缝栅极简化为一封闭栅极, 如图 1 所示. 从灯丝发射的电子窄束在 OA 段包络都很小, 因此, 为避免在计算空间电荷效应时出现奇性, 在计算中只考虑电子在静电场中的轨迹, 而且由于灯丝下垂挠度很小, 因此, 将电场可近似为平面对称的二维电场. 选择一种反射极 (包括反射极 1 的半径及张角、反射极 2 的大小及形状), 选择一定的栅压, 用 RELAX 程序计算电子枪内电位分布, 忽略电子在阴极处的初动能, 在灯丝截面下半圆划分为 20 等分作为 20 条轨迹的初始位置, 计算束流轨迹. 由于束流在 OA 段近似为平行竖线, 因此其空间电荷效应可等效为平行板电极, 所以要求栅压的选择必须使得静电场中 A 点电位  $V_A$  要略大于由空间电荷限制区的二分之三次幂定律所决定的 A 点电位  $U_A$ , 即

$$U_A^{3/2} = 4.284 \times 10^5 Jx^2, \quad (8)$$

其中  $x$  为 OA 长. 取  $V_A = 1.5U_A$ .

改变反射极参数, 使得灯丝两侧的两条束流轨迹落在栅极以外, 且落在栅极缝上的束流轨迹分布比较均匀.

## 2.5 灯丝的下垂及端部约束问题

影响束流纵向均匀性的一个主要因素是长灯丝的下垂问题. 灯丝在截面不同位置时将导致不同截面场分布的差异, 从而使得栅极处束流密度产生差异. 对单跨灯丝可简化为受轴向拉力及均布横向荷载(自重)下的直梁的平衡问题. 其挠度方程<sup>[6]</sup>

$$EJ_z \frac{d^4 \omega}{dx^4} - F \frac{d^2 \omega}{dx^2} = q, \quad (9)$$

其中  $E$  为钨的弹性模量,  $T = 2000 \text{ K}$  左右时  $E = 3.210^{11} \text{ N/m}^2$ <sup>[7]</sup>

$F$  为轴向拉力 (N)

$J_z = \frac{\pi}{4} r^4$  为灯丝截面的惯性矩

$\omega$  为灯丝挠度 (m),

$q = \rho g \pi r^2$  为荷载线密度,  $g$  为重力加速度

$\rho$  为灯丝质量密度  $\text{kg/m}^3$

$r$  为灯丝横截面半径 (m)

边界条件:  $\omega|_{x=0} = 0 \quad \frac{d\omega}{dx}|_{x=0} = 0 \quad \omega|_{x=L} = 0 \quad \frac{d\omega}{dx}|_{x=L} = 0,$

其中  $L$  为灯丝全长, 考虑冷端效应  $L$  应大于  $500 \text{ mm}$ , 譬如为  $600 \text{ mm}$ . 解出

$$\omega = \frac{\rho g r^2 L^4}{8\pi^3 EJ} \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1 - \cos \frac{2n\pi x}{L}}{n^4 \left(1 + \frac{FL^2}{4\pi EJn^2}\right)}. \quad (10)$$

考虑高温下材料的蠕变,  $F$  不宜太大, 取  $F = 3.8(\text{N})$ , 则最大挠度

$$\omega|_{x=\frac{L}{2}} = 1.4 \times 10^{-3}(\text{m})$$

轴向拉力  $F$  由两侧弹簧产生, 选用一定强度及形状的片簧使得灯丝工作时热膨胀

$$\Delta L = L_{2000} - L_{293} = 5.3 \text{ mm}.$$

## 3 实验结果

在钛窗下部纵向  $500 \text{ mm}$  范围内均匀放置 11 个  $30 \text{ mm}$  宽铜靶收集束流, 与之间相连的微安表, 读数反映束流的纵向相对分布. 选择负载电流  $4 \text{ mA}$ , 测得束流纵向分布如图 4 所示. 负载电流增大时, 束流均匀性亦将随之变好.

调试结果表明, 栅压对束流均匀性而言存在最佳值, 此时第 6 靶和第 8 靶流强差值最小. 负载电流  $20 \text{ mA}$  时栅压调至  $180 \text{ V}$ .

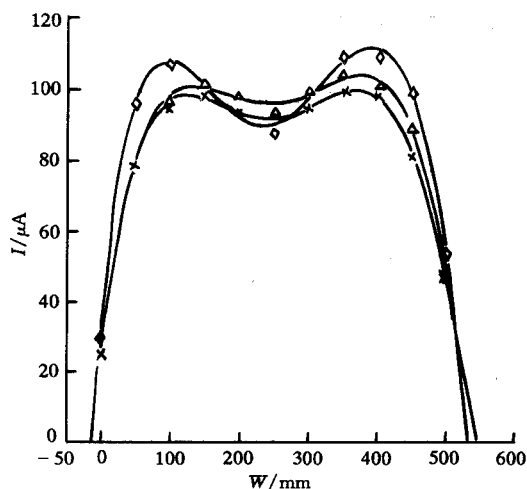


图 4 实测束流纵向分布(能量为 185 keV)

\*  $V_g = 95 \text{ V}$ ;  $\Delta V_g = 100 \text{ V}$ ;  $\diamond V_g = 112 \text{ V}$ .

## 4 讨论

在上述计算中反射极电位是相对于灯丝中点的值(栅压也是相对于灯丝中点的值),反射极可当作等势体. 50 Hz 交变的灯丝加热电流导致距灯丝中点  $x$  处横截面反射电极与该截面灯丝电位差值为  $V + I\rho_t \frac{x}{s} \sin 100 \pi t$ , 其中  $I$  为加热电流值,  $\rho_t$  为工作温度下钨的电阻率. 由于电子在电子枪中的穿越时间远小于 0.02 s, 因此, 任意横截面束流包络交变小于 50 Hz 交变, 即钛窗底下任意横截面处束流密度以 50 Hz 交变(故实验所测为各靶位处的平均电流), 在辐照加工中当被辐照物高速通过辐照区时, 将导致沿其前进方向剂量的不均匀. 通过电源调节反射极电位  $V$  并使之远大于  $I\rho_t \frac{x}{s} \sin 100 \pi t$ , 灯丝压降对束流纵向均匀性产生的影响则可忽略.

截面静电场及束流光学计算表明: 灯丝位置在竖直方向上稍有偏离, 该截面纵向束流密度很快变化. 即是图 4 中间靶束流出现谷值的原因. 增大图 1 中 OA 段长度可减少灯丝偏离造成的影响.

## 参 考 文 献

- [1] Judith N AARONSON, Sam V NABLO. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1981, 184(1):55—59
- [2] Williams K, Frutiger W A et al. Radiat. Phys. Chem, 1988, 31(1):29—44
- [3] Wang Zhicheng. Thermodynamics and Statistical Physics. Second Edition. Beijing: High Educational Press, 1993. 60—80
- [4] Liu Xueque. Cathod Electronics. Beijing: Scientific Press, 1980. 117—170
- [5] Dai shiqiang. Static Electricity and Electrodynamics. Beijing: Scientific Press, 1981. 56—80

- 
- [ 6 ] Hu Haichang. Variational Principal in Elastodynamics and Application. Beijing: Scientific Press, 1981. 139—156
- [ 7 ] Hua Dong Dian Zi Guan Chang. Materials and Manufacture of Electronic Apparatus, 1972, 1(2):34—60

## Research and Design of Electron Gun of Electrocurtain

Chen Pengfei    Zhang Mingchao    Li Xinmin    Wang Yuhong

*(Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)*

**Abstract** The characteristics of the electron beam current transport in the electron gun of the electrocurtain accelerator were studied and the origin of the influence on longitudinal uniformity of beam current was analysed. The deflection of the cathode is considered under the boundary condition of perfect constraint. Then a newly designed electron gun is introduced with longitudinal uniformity of current within  $\pm 10\%$ .

**Key words** electrocurtain, electron gun, radiation processing