

250 keV 高压 Pierce 型高梯度 加速管的设计与试验

丛治炳 郁庆长 李继刚 梁笏鸣
马兴华 刘殿奎 吕洪 夏德红
舒传玉 张灿英 刘铁柱 杨有山

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

为了研制 BPS 的 750 keV 预注入器,我们研制了一台高压 Pierce 型高梯度加速管的试验段,能量 250 keV,可加速脉冲质子流强 240 mA,在 180keV, 120mA 束流下,测得归一化发射度 $0.36\pi\text{cm-mrad}$ 。本文报道这根加速管的设计与试验结果。

一、引 言

高梯度加速管出现于六十年代初。由于使用它可以获得高质量的强流粒子束,所以

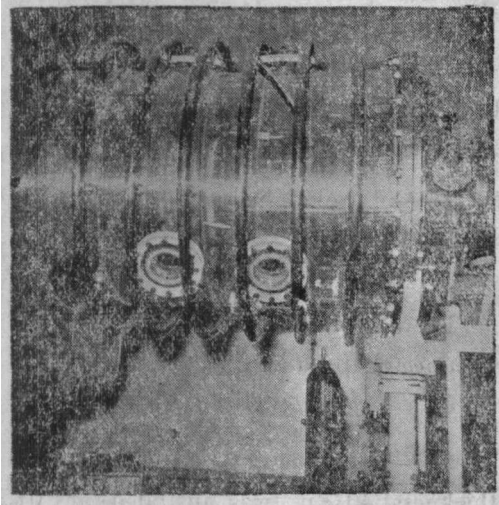


图 1 250 keV Pierce 型电极高压型高梯度加速管外形

高能加速器的预注入器毫无例外的全都使用高梯度加速管。高梯度加速管运行在高电场梯度 ($30\sim 50\text{kV/cm}$) 和高束流强度 (直流数十毫安, 脉冲数百毫安) 之下, 因而会导致大的空间电荷发散和加速管内部严重的微放电^[1]。因此, 设计高梯度加速管时, 必须小心地处理各个部位的电场分布, 仔细地设计屏蔽电极, 严格地选择各种材料, 同时还必须对加速管的封接工艺和真空系统提出严格的要求。

本文报道一台具有精确 Pierce 型加速电极的高气压型高梯度加速管的设计、结构、加工和运行结果。它使用于高能物理所 250 keV 脉冲质子加速装置上^[2]。自 1979 年 9

月出束以来, 运行可靠, 全部达到了设计指标。图 1 是这台高压型高梯度加速管的外形

照片。

二、Pierce 加速电场和粒子轨迹

为了克服空间电荷对带电粒子的发散作用,可设想施加一特殊形状的外电场。在这个电场中,平行入射的均匀粒子束既可得到加速,又能抵消空间电荷的发散作用,使粒子束仍然保持为均匀的平行束出射。这就是 Pierce 型加速管的物理模型。假设^[3]: (i) 粒子的发射面是半径为 a 的圆的平面; (ii) 束流均匀分布,密度为 j ; (iii) 粒子的初速为 0。选择圆柱坐标 z 轴为束流传输方向,粒子发射面位于 $z = 0$ 处。考虑空间电荷效应后,束流内部 ($r \leq a$) 的电位分布可由泊松方程解出

$$V(r, z) = \left(\frac{9j}{4\epsilon_0 \sqrt{2\eta}} \right)^{2/3} z^{4/3} = A j^{2/3} \cdot z^{4/3}. \quad (1)$$

其中: j 为束流密度, ϵ_0 为真空中介电常数, η 为粒子的荷质比。这里 V 为规范化电位。对于质子有: $A = 6.959 \times 10^4$ 。

在束流外部 ($r \geq a$), 电位分布由拉普拉斯方程决定。Emigh 给出一个积分解^[4]:

$$\frac{V(R, Z)}{A \cdot j^{2/3}} = Z^{4/3} + \int_0^\infty \frac{4}{9\Gamma(2/3)} \cdot \frac{1}{K^{7/3}} [U(R) - 1] e^{-KZ} dK \quad (2)$$

其中:

$$R = \frac{r}{a} \geq 1, \quad Z = \frac{z}{a} \geq 1$$

$$U(R) = \frac{\pi K}{2} [J_1(K)Y_0(KR) - Y_1(K)J_0(KR)]$$

而 J_0, Y_0 和 J_1, Y_1 分别为零阶和一阶的第一类和第二类贝塞尔函数, 这些函数的数值计算公式可参考 [5]。我们编制了“PIERCE 静电场程序”, 计算出加速电场区域内的等位面。按照此等位面的形状安排的加速电极, 即称为 Pierce 型加速电极。由式(1)和(2)可以看出, 当粒子能量 U_c , 束流强度 I 和束流半径 a 选定之后, 则 Pierce 加速电场 $V(r, z)$ 就唯一地被确定下来。我们计算了一根 750keV 的 Pierce 型加速管, 选取的参数为: $U_c = 750 \text{ kV}$, $I = 250 \text{ mA}$ ¹⁾, $a = 14 \text{ mm}$ 。计算结果(简化)列于表 1。计算误差小于 0.1 mm。最大加速电场梯度为 34 kV/cm。

在 Pierce 加速场中, 带电粒子的轨迹应由下述方程组决定^[6]:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0}, & \text{(泊松方程)} \\ \dot{r} = \eta \frac{\partial V}{\partial r}, & \\ \ddot{z} = \eta \frac{\partial V}{\partial z}, & \text{(运动方程)} \\ \nabla \cdot \mathbf{j} = 0. & \text{(连续性方程)} \end{cases} \quad (3)$$

1) 按照质子比 80% 考虑, 250 mA 的 H_1^+ , H_2^+ 和 H_3^+ 混合束的空间电荷效应与 275 mA 的纯 H^+ 束相当, 因此计算时实际取 $I = 275 \text{ mA}$ 。

表1 Pierce 加速场等位线形状(加速电极中线形状)

电极号	离子源口	1	2	3	4	5	6	7	8
对地电位	750kV	700kV	600kV	500kV	400kV	300kV	200kV	100kV	0kV
$r(\text{mm})$									
14.00	0	36.93	84.18	123.48	158.92	191.88	223.05	252.82	281.46
20.00	2.28	37.07	84.24	123.52	158.92	191.88	223.05	252.82	281.46
25.00	4.06	37.37	84.37	123.61	159.08	191.97	223.12	252.89	281.52
30.00	5.76	37.80	84.57	123.74	159.13	192.05	223.20	252.95	281.58
35.00	7.41	38.34	84.82	123.92	159.26	192.17	223.29	253.03	281.66
40.00	9.01	38.98	85.12	124.13	159.43	192.30	223.41	253.14	281.75
50.00	12.13	40.49	85.88	124.65	159.84	192.64	223.70	252.40	
60.00	15.18	42.17	86.81	125.31	160.35	193.07	224.07	253.72	
70.00	18.18	44.06	87.90	126.09	160.97	193.59	224.52		
80.00	21.15	46.09	89.13	126.98	161.68	194.18	225.03		
90.00		48.21	90.49	127.99	162.48	194.86			
100.00		50.41	91.97	129.09	163.37	195.61			
110.00			93.49	130.29	164.35	196.44			
120.00			95.14	131.57	165.39				
130.00				132.93	166.52				
140.00					167.72				

其中 $\rho = \frac{i}{\sqrt{2\eta \cdot U}}$ 为空间电荷密度, U 为粒子在 (r, z) 处的能量。由于 ρ 决定于粒子的

轨迹, 粒子轨迹决定于电场分布, 而电场分布又与 ρ 和边界条件有关, 因此这组方程只能联合求出一个自洽解。计算程序是: 先假定离子束的发射面为平面, 在计算区域内处处求解泊松方程, 然后由运动方程和连续性方程分别求出粒子的轨迹和空间电荷密度 ρ 。利用第一次计算出的 ρ 值, 再求解泊松方程, 再计算运动方程和连续性方程, 计算出粒子轨迹和 ρ 值, ……周而复始循环计算, 直至达到满意的精度为止。在计算过程中还要逐步修改离子束的发射面形状。图 2 是计算出的 750keV Pierce 加速管内质子的运动轨迹。结果表明, 在加速管中部束流稍有会聚, 在加速管出口处, 束流基本上是平行出射的。

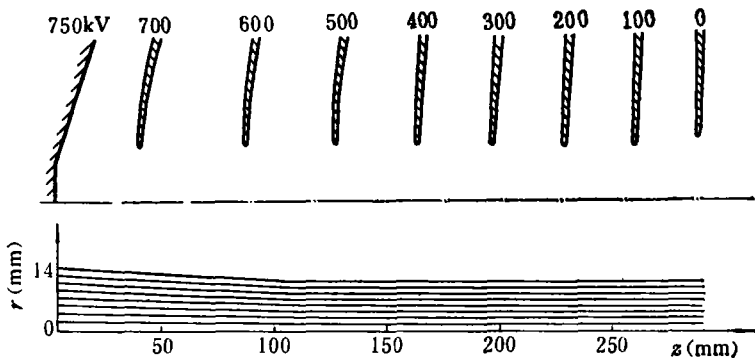


图2 750 keV Pierce 加速管内质子运动轨迹

三、高气压型 Pierce 加速管结构

取我们所设计的 750 keV Pierce 加速管的前三分之一, 设计成一根 250 keV Pierce 加速管试验段, 其结构如图 3 所示。这根试验段在高能物理所的 250keV 脉冲质子加速装置上已运行两年^[2], 完全达到了设计指标。

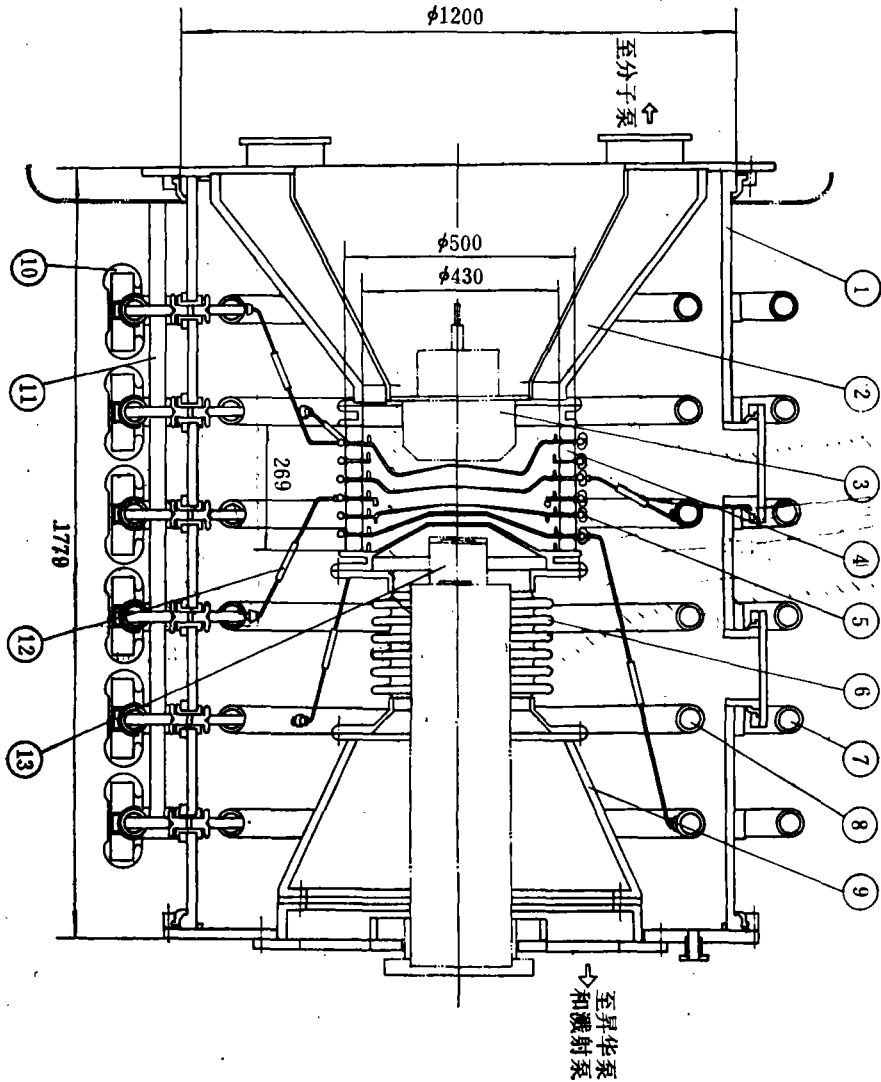


图 3 250 keV 高气压型 Pierce 高梯度加速管结构

- 1 高气压绝缘筒 2 夹层锥形管 3 脉冲离子源 4 绝缘环 5 管芯火花球隙
- 6 不锈钢软管 7 外均压环 8 内均压环 9 锥形接管 10 绝缘筒火花球隙
- 11 分压电阻 12 紫铜导线 13 狭缝板-酸敏变色片装置。

1. Pierce 加速管管芯

加速电极附近的电场强度、电极材料、电极表面的光洁度和受有机蒸汽污染程度, 都

影响着电极表面的二次电子的发射。现在已经证明^[7],使用钛合金(或纯钛)做加速电极和采用“无油”真空系统,是高梯度加速管获得成功的两大重要因素。

250 keV 试验段的加速电极和屏蔽电极都用 Ti6Al4V 合金制做,加速孔径 $\phi 28\text{mm}$,其四周开四只椭圆形抽气孔,每相邻电极的抽气孔交错叠置。电子陷阱电极、接地电极中心孔都为 $\phi 30\text{mm}$ 。所有电极都设计成可拆卸结构。加速电极的形状严格地与 Pierce 加速场等位面相同,由数控车床车制,光洁度 ∇ ,以上。为了避免有机物的污染,所有的电极都使用 Al_2O_3 粉调水抛光。为了保证加工精度,在车制电极的过程中先后共退火三次。

屏蔽电极必须起到对瓷环-电极胶接处的静电屏蔽和对反向电子和离子的屏蔽两种作用。一般要求负电位胶接角处的电场梯度在 5V/cm 以下,加速管内部最大场强不超过 100kV/cm 。用计算机分析 250keV 试验段内部电场表明,加速管内最大电场强度出现于屏蔽电极的端部,最大为 98kV/cm ;负电位胶接角处的电场梯度约为 3V/cm 。图 4 示出加速管内部电场分布。

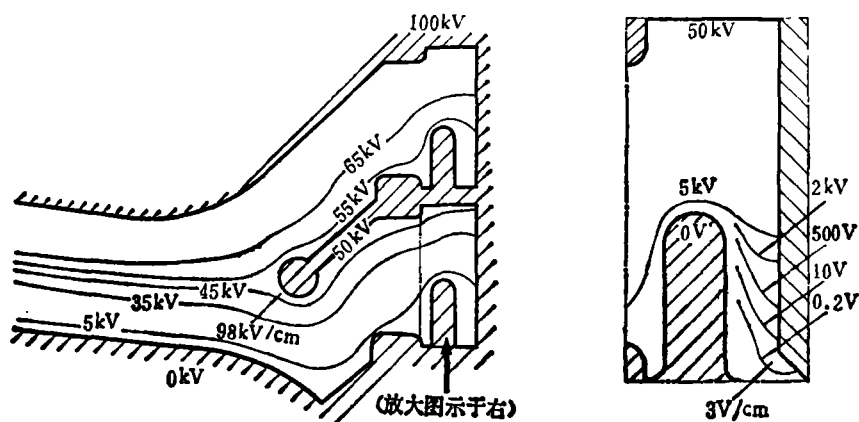


图 4 250keV Pierce 加速管试验段内部电场分布

对高压电瓷、95% Al_2O_3 瓷、钛刚玉和微晶玻璃四种材料进行胶接模拟试验的结果表明:95% Al_2O_3 瓷表面击穿电场梯度最高(空气中 $\sim 14\text{kV/cm}$,真空中 $\sim 38\text{kV/cm}$),钛刚玉最低(空气中(6—7) kV/cm ,真空中 $\sim 33\text{kV/cm}$)。但是,从高压电瓷表面击穿电场梯度的实验结果(空气中击穿电场梯度(8—9) kV/cm ,真空中(28—33) kV/cm)和价格两方面考虑,我们选用高压电瓷制做绝缘环,外径 $\phi 520\text{mm}$,内径 $\phi 430\text{mm}$,高 35mm ,外表面带三个裙边且上釉。封接电极和端法兰(带有消张力结构)以不锈钢制做,在封接面处车以宽 0.2mm ,深 0.2mm ,间距 0.5mm 的同心槽。以聚醋酸乙烯脂做胶粘剂。曾使一根 1:1 的加速管的模拟管呈悬臂状态,在其自由端施加 1.63 吨的重荷(相当于封接面处承受 33 吨·厘米的剪切力矩),模拟管未发生破裂。封好后的加速管在 0°C 以下冷冻 24 小时无损坏。

加速管的外均压环截面直径 $\phi 16\text{mm}$,装有两排放电保护球隙,间隙可调。

2. 高气压绝缘筒

高气压绝缘筒用厚 16mm 有机玻璃板热卷,拼接制成,直径 $\phi 1160\text{mm}$,高 1719mm 。沿筒壁设有六条宽 75mm 的加强带和六只 $\phi 140\text{mm}$ 的检修孔。筒壁内外各装有六只均

压环,以 $\phi 10\text{mm}$ 的紫铜管作导线,分别与加速管相应的电极连接。绝缘筒单独组装后曾进行水压检验,两个大气压(表压,下同)下无严重变形。加速管工作时,筒内允许充 1.2 大气压的 SF_6 。两年的运行表明,使用 0.2 大气压的 SF_6 即可有效地抑制高压击穿。

对绝缘筒内部(SF_6)和外部(空气)空间电场计算表明:内部最大场强为 85kV/cm ,外部最大场强为 30kV/cm ,都在允许的使用范围之内。

筒上有两串分压电阻,每串 5 只,每只由 50 只金属膜电阻串联焊在印刷线路板上,外面以环氧树脂浇注密封。总阻值 $250\text{M}\Omega$,分压电流 1mA 。有两串放电球隙,曲率半径 $R40\text{mm}$,间隙可调。

250keV Pierce 加速管试验段的特性参数列于表 2。表中同时列出国外几个高梯度加速管的参数,以资比较。

表 2 几个 Pierce 型加速管参数表

参数		实验室	BNL	FNAL	LAMS	本试验段
能量 (keV)			750	750	750	250
类型			大气型	高气压型	高气压型	高气压型
加速管总长 (cm)			114	51.4	50.1	30
加速间隙数			6	8	9	3
加速间隙总长 (cm)			18.7	30	36	12.3
最大加速梯度 (kV/cm)			~45	25	25	34
电 极	材 料		Ti 合金	Ti	Ti	Ti 合金
	孔径 (cm)		$\phi 2.2 \rightarrow \phi 3.7$	$\phi 2.8, \phi 4.2, \phi 3.2$	$\phi 4.0$	$\phi 2.8$
绝 缘 环	个 数		18	8	15+1	6
	内径 (cm)		$\phi 63.0$	$\phi 45.7$	$\phi 35.0$	$\phi 43.0$
	高 (cm)		6.4	2.5	3.1	3.5
	材 料		94% Al_2O_3 瓷	85% Al_2O_3 瓷	94% Al_2O_3 瓷	高压电瓷
每环平均电压梯度(kV/cm)			6.5	38	17	15
胶粘剂			环氧 (epoxy)	聚维尼耳 (polyvinyl)	聚维尼耳 (polyvinyl)	聚醋酸乙烯脂
密封材料			In-垫	—	—	In-垫
质 子 流	流强 (mA)		280, 脉冲	165, 脉冲	35, 脉冲	240, 脉冲
	归一化发射度 (cm-mrad)		0.25π	0.5π	0.2π	0.36π
绝缘筒材料			—	环氧+纤维	有机玻璃	有机玻璃
绝缘气体			—	$\text{SF}_6, 2\text{atm}$	$\text{SF}_6, 1.5\text{atm}$	$\text{SF}_6, 1.2\text{atm}$
绝缘筒总长 (cm)			—	213	300	170
分压电阻			碳膜	水电阻	碳膜	金属膜

3. 加速管总装

加速管管芯的入口端与一只夹层锥形管相连,其空心夹层作分子泵的抽空管道使用。脉冲质子双等离子体离子源安装在加速管管芯的入口端,第一加速电极即是离子源的引出电极。管芯的出口端与一直径 $\phi 320$ mm 不锈钢软管相接,此软管在组装时被压缩 12 mm,从而使加速管管芯承受 ~ 500 kg 的预压力,以抵消充进 SF_6 后产生的张力。为使电场均匀, $\phi 10$ mm 紫铜引线的形状应尽量与相应的等位面形状吻合。

使用一组“无油”真空系统保证加速管的真空,它是由两台 500 l/s 钛离子溅射泵,两台 1000 l/s 钛离子升华泵和一台 450 l/s 的分子泵组成。加速管内静态真空度为 1×10^{-6} Torr,出束时(离子源 H_2 气流量 ~ 2.5 cc · atm/min) 为 $(1-2) \times 10^{-5}$ Torr。

四、运行试验^[2]

1. 加速管锻炼

无束流高电压锻炼时,150 kV 始发生放电,而后电压按每挡 5kV 逐渐增加,加速管内微放电最多达 2 次/分。最终空载锻炼至 270kV,微放电小于 1 次/小时为止。离子源加上之后,微放电显著增加,仍须有一个较长时间的锻炼过程。由 200kV 锻炼到 250kV 共历时约 30 小时,才使微放电稳定在小于 1 次/小时的水平。在锻炼过程中,加速管管芯上的保护球隙(处于 SF_6 之中)始终保持为 6.8mm 间隙,而绝缘筒上的保护球隙其间隙由 17.5mm 渐增至 24 mm。

使用三种方法监测微放电:测量真空度的变化;测量分压电流的变化和测量剂量率的变化。试验表明,真空度的变化可灵敏地监测微放电:当加速管内发生微放电时,真空指示可有数量上的变化(例如由 3.1×10^{-5} Torr 变到 3.7×10^{-5} Torr),而后指针又慢慢地恢复到原位。假若加速管内发生击穿放电,则真空度会有数量级的变化(例如由 2×10^{-5} Torr 变到 9×10^{-5} Torr,甚至更大)。当加速管外部发生放电时,真空指针表现为受电压变化而快速来回摆动的状态。

2. 加速管与离子源的匹配

本试验段运行在脉冲质子流状态下,束流脉冲宽度 100 μs ,重复频率 10 pps,用示波器测量束流的波形和流强,用狭缝板-酸敏片法测量束流发射度。试验表明,束流脉冲顶部越平整,其发射度亦越小,若束流脉冲波形顶部发生畸变,相应的束流发射度亦增加,这是由于过聚焦和欠聚焦的粒子将会使狭缝板上接收到的束流增加或减少的缘故。在不同的能量下,调节离子源参数,若束流脉冲波形没有畸变,则认为此时加速管和离子源达到匹配状态。试验结果表明,这段加速管在 130 keV—250 keV 范围内可运行在匹配状态。若将第二、三加速电极短接,在 60keV—90keV 范围内亦能达到匹配状态。试验结果列于表 3。图 5 画出本试验段可匹配的能量与束流强度间的关系,它们近似地满足 $V \propto I^{2/3}$ 关系。

3. 流强与运行参数

在调整可匹配运行状态时,流强 I_p 强烈地依赖于磁场电流 I_M 和引出电压 V_{ex} 。图 6 示出不同能量下达到良好匹配时 I_p 与 I_M 的关系。每个能量都存在最佳 I_M 值。图 7 是不同能量下达到良好匹配时 I_p 与 V_{ex} 间的关系。当能量为设计指标 250 keV 时,可匹

表 3 可匹配运行参数 (实验结果)

V _c 运行方式	能量 (keV)	离子源参数							束流强度 (mA)	
		灯 丝		弧 脉 冲		H ₂ 压力	偏压	磁场电流		引出电压
		电流 (A)	电压 (V)	电流 (A)	电压 (V)	(Torr)	(V)	(A)		(kV)
加速电极不短接	250	15.7	16.3	—	720	0.20	-50	5.0	50	240
	230	15.7	16.3	—	720	0.20	-50	4.5	46	200
	200	18.0	21.5	48	780	0.25	-45	4.5	40	165
	180	18.0	21.5	40	700	0.28	-55	4.5	36	120
	150	17.5	21.5	42	720	0.24	-55	4.0	3.0	100
	130	17.5	21.5	41	720	0.23	-55	3.5	26	85
第二、三加速电极短接	90	17.5	21.0	40	690	0.20	-55	3.5	45	100
	75	17.5	21.0	40	700	0.20	-55	2.5	37.5	64
	60	17.5	21.0	40	700	0.20	-55	2.5	30.0	40

配状态的流强为 240 mA, (详见文献[2]),与设计指标偏离 10 mA.

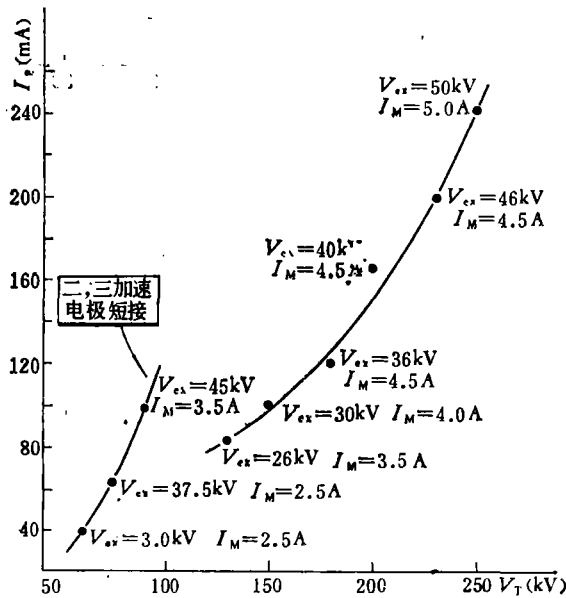


图 5 250keV Pierce 加速管试验段可匹配运行特性曲线

4. 束流发射度及亮度测量

“狭缝板-酸敏变色片”发射度测量装置设置在距加速管出口 230 mm 处。狭缝上有七条狭缝,缝宽 0.17 mm,缝距 6 mm,狭缝板距酸敏变色片 130mm。为了抑制二次电子,狭缝板前设有电子陷阱(陷阱电压 -6kV),狭缝板上串接 5kΩ 自给偏压电阻。在能量 180 keV、流强 120 mA 下,由狭缝投影的酸敏变色片照像,化为其发射度相椭圆,其包络线面积为 569 mm-mrad,归一化发射度为 0.36π cm-mrad,亮度为 1.90 × 10⁹A/

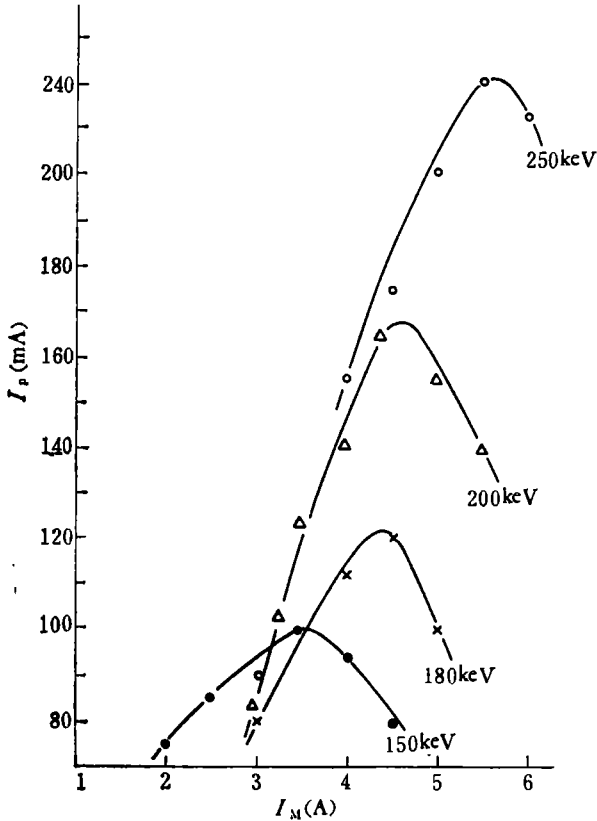


图6 不同能量下,脉冲质子流强 I_p 与磁场电流 I_M 关系

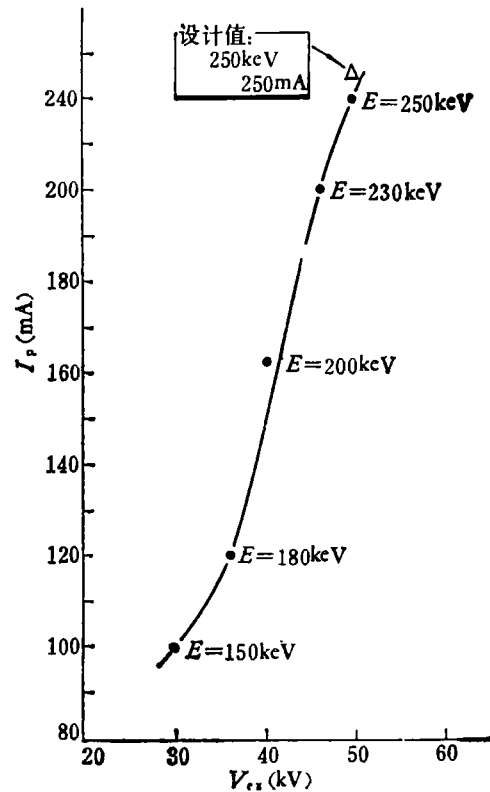


图7 不同能量下,脉冲质子流强 I_p 与引出电压 V_{ex} 关系

$m^2 \cdot rad^{1/2}$.

五、结 束 语

作者对力一教授所给予的指导和鼓励表示衷心的感谢。在加速管试验段的设计与试验过程中,朱孚泉、潘惠宝、陈鉴璞同志曾给予许多具体的帮助;高能物理所预注入器室的同志们参加了调试工作,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] 例如 J. Huguenin, V. Tallgren, M. Weiss, BNL50120, Part 1, P. 269. J. L. McKibben, La-5376-MS.
- [2] 高能物理所预注入器室,高能物理与核物理, 5(1981), 6.
- [3] Pierce, "Theory and Design of Electron Beam" chap. 10.
- [4] C. R. Emigh, La-3909, P. 398.
- [5] M. Abramowitz and I. A. Stegun, "Handbook of Mathematical Function with Formulas, Graphs and Mathematical Tables", P. 369.
- [6] 郁庆长, "强流离子光学原理"第三章,原子能出版社,1981年.
- [7] C. W. Wheeler, Proc. 8th Inter. Conf. on High-Energy Accel., CERN, 1971, P. 531.

DESIGN AND TESTS OF A PRESSURED "PIERCE" TYPE HIGH GRADIENT ACCELERATING TUBE OF 250 keV

CONG ZHI-BING YU QING-CHANG LI JI-GANG LIANG JIA-MING MA XING-HUA

LIU DIAN-KUI LU HONG XIA DE-HONG SHU CHUAN-YU

ZHANG CAN-YING LIU TIE-ZHU YANG YOU-SHAN

(Institute of high energy physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

A "Pierce" type pressured accelerating tube has been manufactured in our laboratory. A 240 mA pulsed beam was obtained from this tube at 250 keV. The design and the tests of this accelerating tube are described in detail.