



# 质 子 静 电 加 速 器\*

叶铭汉 孙良方 徐建铭 金建中  
叶龙飞 陈志诚 陈鑑葵 夏广昌  
余觉先 李正武 赵忠堯

(中国科学院)

## 提 要

本文介绍了中国科学院的一架高气压型质子静电加速器。这架加速器所加速的质子的最高能量为2.3兆电子伏,瞬間可达2.5兆电子伏。已經运转了四年多的时间。

## 一、引 言

静电加速器具有电压稳定、加速粒子能量均匀、并且可以連續调节等优点,是1—6兆电子伏能量范围内,核反应实验最常用的加速器。目前串列式静电加速器所加速的质子的能量已达15兆电子伏<sup>[1]</sup>,已有人正在筹建质子能量高达20兆电子伏的串列式静电加速器<sup>[2]</sup>。在不久的将来,它将成为1—15兆电子伏能量范围内最适宜于作细致精确的核物理实验工作的一种加速器。

这架加速器所加速的质子的最高能量瞬間可达到2.5兆电子伏,稳定的最高能量为2.3兆电子伏。由于静电分析器内部击穿的限制,通过分析器的质子的能量最高为1.8兆电子伏。

## 二、整体结构

### 1. 发电系统

加速器安装在一个高气压钢桶内(见图1),钢桶内径1.4米,壁厚12.7毫米,桶高4.27米。工作气压为14大气压(表压,下同)。钢桶安装在四根支柱上,支柱在加速器大厅楼板上,高1.2米。钢桶顶端及侧壁各有直径150毫米的孔一个。孔外接有接长管,分别装有旋轉伏特計和稳定电压用的电量針尖。钢桶侧壁約一半高处开有一孔,装有安全閥和观察窗。钢桶底部有三个孔,一个通过加速管,其余二孔的盖板上装有各种引入接头,噴电高压、驱动輸电带的主电动机和控制离子源的小电动机的电源綫都由此引入。

高压电极的材料为鋼,顶部为直径660毫米的半球。

絕緣支柱由101片分压片和絕緣垫块迭成,总高度为2610毫米(包括厚25毫米的頂板)。分压片由鋁压鑄而成,直径610毫米,边缘为圓环,它的截面直径为16毫米。每二片分压片間用三块絕緣垫块隔开,絕緣垫块材料为层压胶木,直径76毫米。絕緣垫块和

\* 1962年9月17日收到。

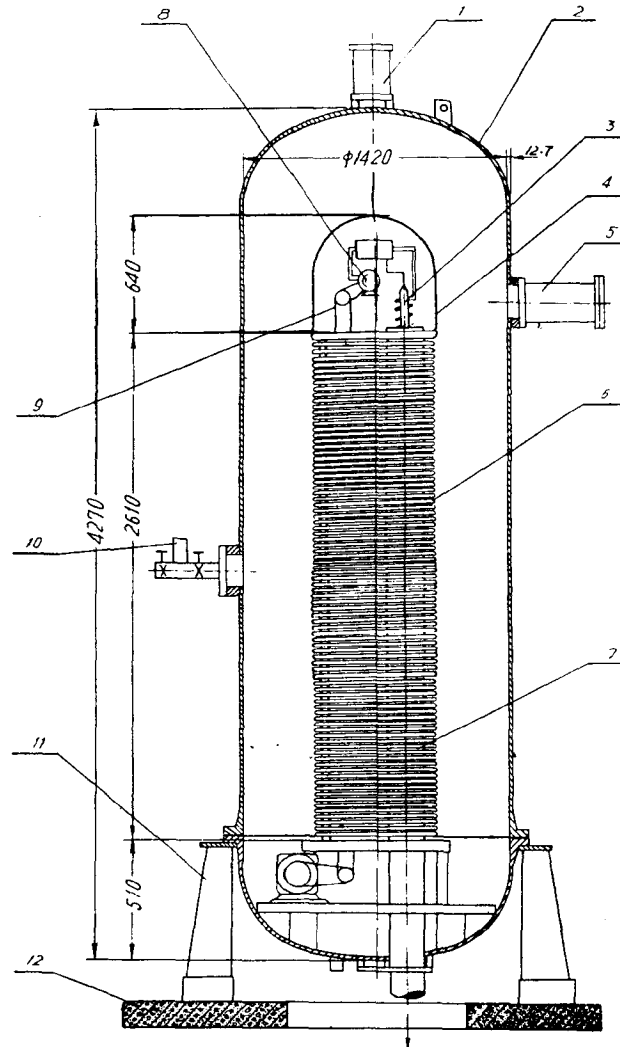


图1 静电加速器主体结构

1—旋轉伏特計，2—鋼筒，3—离子源，4—高压电极，5—电  
 晕針稳压装置，6—分压片，7—加速管，8—发电机，9—輸电  
 帶，10—安全閥，11—支柱，12—加速器大厅樓板。

分压片的安装方法见图2所示。安装好以后，二相邻分压片中心面間距为25.4毫米。整个絕緣柱结构是穩固的，运轉时振动很小。

絕緣支柱的分压方法如下：每两片分压片間安装一个500兆欧的高电阻。此外还安装了两个負电晕針尖，針尖对平板（即另一片分压片）的間距为5毫米。針和針之間相距15毫米。

輸电帶是棉織品夹橡胶制品，寬305毫米，厚1.2毫米。輸电帶的张力調整在150—200公斤之間。驅动輸电帶的轉軸直径为89毫米，长356毫米。二端带有 $2^\circ$ 的錐度，錐

度部分各长 28 毫米。这样的锥度相当合适，调整好的输电带运转时左右摆动的幅度很小。上下转轴都是实心钢轴，主电动机功率为 15 马力，输电带转轴的转速为 4000 转/分，输电带的线速度为 18.6 米/秒。

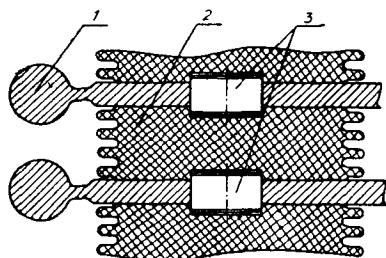


图2 分压片和绝缘垫块的安装方法  
1—分压片，2—绝缘垫块，  
3—小钢块。

喷电和吸电针排都是梳子形的，用缝衣针固定在直径 10 毫米的铜杆上，针长 12 毫米。针和针之间相距 5 毫米，这个间距曾试过自 5 至 10 毫米，发现影响不大。喷电针排的长度（即二端针尖之间的距离）应比输电带宽度略小，以免当输电带左右摆动时，针排二端边缘的针尖对轴火花放电。喷电电源的电压为 50 仟伏。

沿输电带二侧在分压片上装有直径 15.9 毫米的铝棍，作为分压棍，距输电带表面 22 毫米。每 10 片分压片中，有一片装有防止输电带和分压棍相擦的保护棍。保护棍为直径 12 毫米的硬玻璃棍，它的二端用环氧树脂粘上铜接头，然后固定在分压片上。玻璃棍距离输电带表面 1.5 毫米。经过上千小时的运转，有些玻璃棍内部显出形如电火花的裂纹，但极少发生断裂。

## 2. 离子源和加速管

离子源是高频率，仿照莫克 (Moak) 等<sup>[1]</sup>的制造的。使用的频率是 35 兆周，用电感耦合，加纵向磁场。放电管用硬玻璃做成。引出离子束的吸极用铝制成，孔道内径 1.2 毫米，长 6.8 毫米。当氩气流量不大于 4 毫升/时（标准状况下）时，桌上试验得到的离子流为 500 微安。

离子源所需的各种电源由一个频率为 400 周/秒的发电机供电。这个发电机原是用飞机上的变流器，我们把它作为具有整流子的自激发电机使用。在 3 大气压以上的空气中，发电机时常不能自激。在氮气（工业纯，含有 5% 氧）中出现这个现象的气压要高得多。可能是由于整流子表面氧化，增加了激磁回路中的接触电阻，以致不能自激。解决的办法是用干电池在发电机开始运转时帮助激磁一下。电池串有开关，在需要时才接通。这个方法行之有效。

离子源各参数的调节，用安装在钢桶底盘上的小电动机 (PII-09 型平衡电动机) 所牵引的拉线来控制。拉线为丝质胡琴弦线，绝缘性能良好。高压电极内装有测量电表，调整时曾经用望远镜来观察离子源各个参数的数值。

用钡管控制氩气的流量。离子源、各种电源的整流部分都用硒整流器。振荡管用 811 管，事先经过高气压试验挑选。有些 811 管约在 10 大气压左右就压破。

加速管是由碟形的加速电极和硬玻璃圈交迭粘合而成。加速电极总数为 101 个。加速管总长 2590 毫米。加速电极是用软铝板冲压成形后经车床加工制成。封接部分厚 1.2 毫米，断面形状见图 3。中心圆孔的直径各不相同，在加速管两端的最大，为 92.0 毫米，由两端向中部依次减小，至中部最小为 77.1 毫米。这些圆孔的内缘形成两个相连接的、锥度不大的圆锥面，这两锥面的轴线就是加速管的轴线。这是考虑了加速管的耐电压性能

和封接时便于使用心柱以保证加速管的几何条件而采取的设计。

玻璃圈材料为派来克斯玻璃，外径约 175 毫米，内径约 123 毫米，高 24.2 毫米。玻璃圈上下平面内外缘的边角都磨掉。

加速管封接时用心柱来定位，整根分二段封接。电极和玻璃圈的粘合用醋酸乙烯酯树脂，封接时的温度需达 180℃ 左右。在初封接时，玻璃圈冷却到室温后，常常发生裂纹，这是因为铝和玻璃的膨胀系数相差较大的缘故，严重时甚至把玻璃圈的表面剥离，采取退火措施效果不大。后来在加速电极的上下封接面上各开宽 2.5（内槽）和 1.5 毫米、深 0.5 毫米的槽两道，粘合面在两槽之间，结果良好。封接后冷却到 -12℃，没有发现玻璃破裂。估计槽的作用有二：(1) 保证上下粘合面边缘一致，使两粘合面平均负担应力。(2) 槽底厚仅 0.2 毫米，很易产生塑性应变，可以消除大部分来自铝电极内圈的应力。

按照我们的加速管的结构，可以把它当作一根等梯度的加速管，用厄耳凯因 (El-kind)<sup>[4]</sup> 的分析来计算。加速管和离子源之间有一套初聚系统，由一组三元素的周期场静电透镜和一组双圆筒静电透镜组成，见图 4。

周期场透镜可以在较低的电压比  $V_F/V_P$  ( $V_F$  为聚焦电压， $V_P$  为拉出电压) 下得到相当于双圆筒透镜在电压比很大的情况下的聚焦作用。周期场透镜的聚焦性能可以按照提姆 (Timm)<sup>[5]</sup> 或陈鑑璞<sup>[6]</sup> 的分析来计算，陈鑑璞的方法不但便于计算，并且结果较好。我们所用的周期场透镜的特性曲线见图 5。图上  $O$  点是物点（吸极孔道中点）， $O'$  是此系统的象点。

这里采用的双圆筒透镜的目的是在于造成一个虚象，作为加速管所要求的物点，以满足加速管需要较长物距的条件。我们的加速管的物点应在加速管入口前 330 毫米。吸极孔道中点到加速管入口的距离为 270 毫米。

$V_P$  和  $V_F$  分别由 0—2 仟伏和 0—20 仟伏的直流电源供给。双圆筒透镜的电压比为  $V_1/V_F$ ， $V_1$  为 2  $V/101$ ， $V$  为加速器的电压。分压片共 101 片， $V_1$  是从高压电极数下来第二片分压片上得到的。

运用的经验表明，调节  $V_P$  和  $V_F$ ，加速器的电压约从 0.6 兆电子伏到最高电压变化，都得到良好的聚焦，像点直径在 1 毫米左右。

### 3. 真空系统

真空系统部件大部分用钢制成，镀镍，长期使用结果良好。系统总体积为 180 升。用油扩散泵，抽气速率为 500 升/秒。机械泵和扩散泵之间有一 70 升/秒的升压泵 (booster pump)。这样在抽氩气时不必增加扩散泵的功率就可以防止氩气的反扩散作用。机械泵

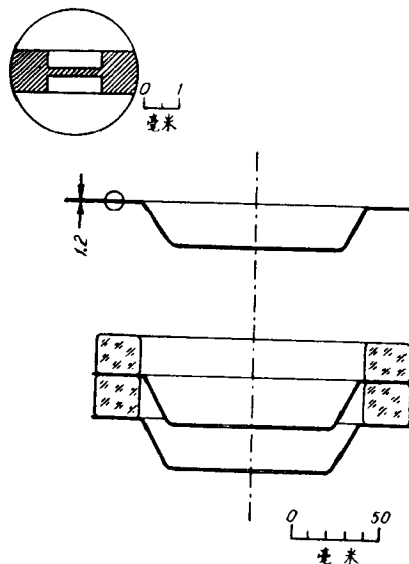


图 3 加速电极和玻璃圈

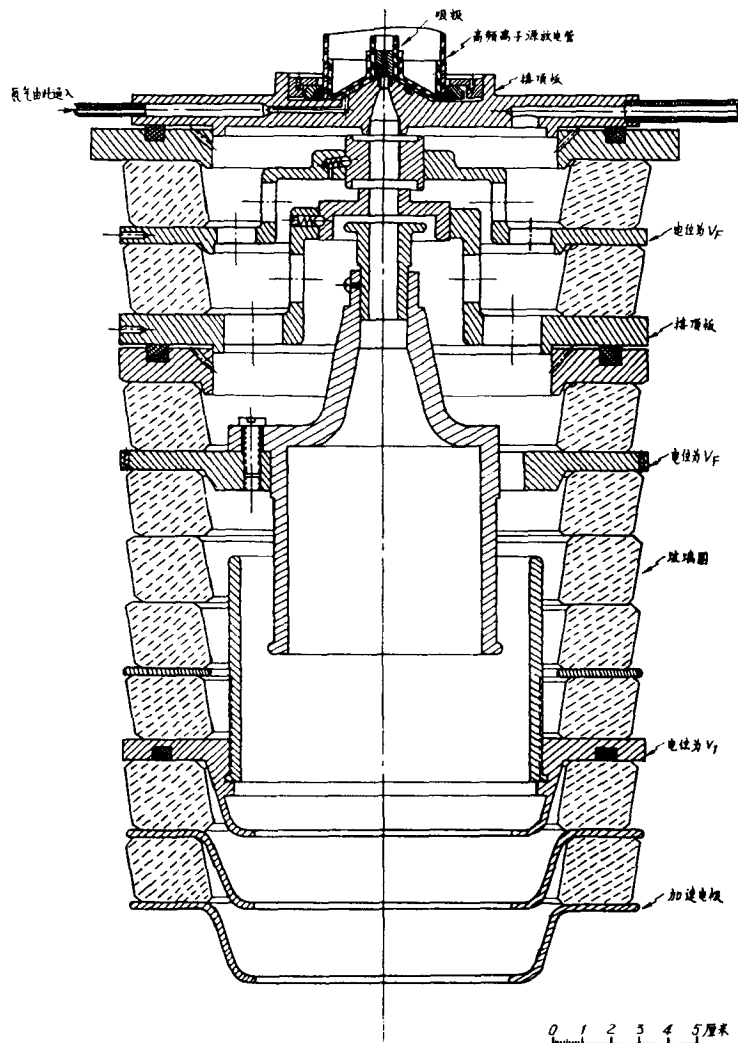


图 4 离子源初聚系统装配图

的抽气速率为 1 升/秒 (10 微米汞柱时)。整个系统的漏气速率在大气压下为 0.08 微米·升/秒, 9 大气压下为 0.17 微米·升/秒。由此可见, 加速管的密封是很好的。在不出离子束时, 真空度可达  $1 \times 10^{-6}$  毫米汞柱。出束而氦气流量为 5 毫升/时时, 真空度为  $1 \times 10^{-5}$  毫米汞柱。

为了安全运转, 真空系统装有停水(冷却水)、停电及漏气等保险装置。实践证明这些装置是非常必要的。漏气保险有高、低真空二种。高真空保险用冷阴极磁放电真空计作探测元件。低真空保险用皮氏真空计作探测元件, 当发生漏气时, 前级气压升高, 皮氏真空计电路的电桥不平衡, 连在电桥中的电表继电器就切断扩散泵电源并发出警报。使用经验指出, 这种低真空保险线路十分可靠, 并且动作也快。

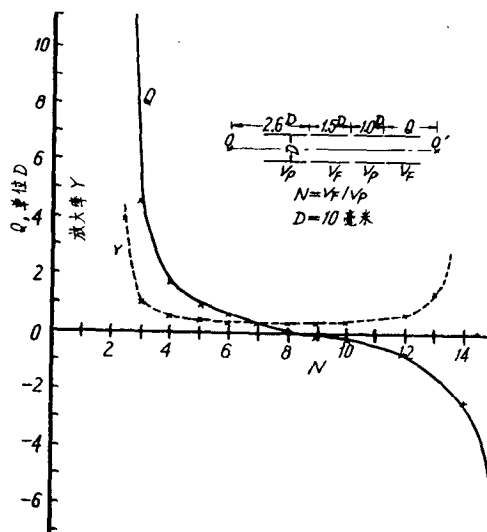


图5 周期场静电透镜的特性

扩散泵冷阱用冷冻机冷却,温度为  $-20^{\circ}\text{C}$  左右。

#### 4. 静电分析器、加速器电压的测量和稳定

静电分析器的结构和福勒(Fowler)等<sup>[7]</sup>的相似。分析器的偏转角为  $90^{\circ}$ , 平均半径为 1140 毫米。偏转电极材料为黄铜, 宽 63 毫米, 厚 6.6 毫米。两块偏转电极用 14 个云母石 (Mycalex) 框夹住, 电极间距为 9 毫米, 用云母石制的等厚块夹在电极中间来控制间距。在上述云母框中, 利用 8 个沿着  $90^{\circ}$  圆弧均匀分布的框子把偏转电极固定在一个直径 102 毫米的紫铜管内。在装入紫铜管内之前, 弧度经过校正, 电极曲率半径的公差为  $\pm 0.3$  毫米, 间距公差为  $\pm 0.03$  毫米。

粒子在进入分析器之前, 先经磁偏分离器, 将加速粒子按其质量分开。分析器具有一整套狭缝系统, 分析器的机械位置可作水平位置上的移动以及倾斜角度的改变, 以使加速粒子沿着最佳的入射方向进入分析器。

分析器电源的最高电压为  $\pm 20$  千伏, 稳定度优于  $\pm 0.03\%$ 。可以偏转 2.5 兆电子伏的带电粒子。分析器的绝缘结构有两点缺点: 一是总共 40 千伏的电位差加在 9 毫米长的绝缘框上, 很易沿着绝缘框表面击穿; 二是绝缘框易受到离子的轰击因而绝缘性能变坏。在分析器的桌上试验时, 可以加上  $\pm 20$  千伏的高压 (即可偏转 2.5 兆电子伏的带电粒子)。但在实际使用时, 由于结构上原有的缺点以及离子束所产生的次级电子的影响, 通过分析器的质子的能量最高为 1.8 兆电子伏。再高则偏转板之间很易发生火花击穿。电源的设计另有文章发表<sup>[8]</sup>。电压的数值是用电位差计测量高压电源中的精密高电阻中的分压值而得到的。这套精密高电阻是用锰铜丝绕制的。

分析器要求的真空度较高, 通常需要连续保持高真空达数天之后, 才能加上较高的偏转电压。分析器在开始工作时, 加速器电压应略大于预期的稳定值, 以免离子流打在上偏

轉電極上而在偏轉電極間產生過大的次級電子電流，因而在高壓電源到偏轉電極之間的保護電阻上產生過大的電位降。

用分析器偏轉電壓的讀數來測量加速粒子的能量。用核反應的共振峯來校正分析器的讀數，所採用的為  $F^{19}(\beta, \alpha\gamma)O^{16}$  的 872.5 仟電子伏和 935.3 仟電子伏共振， $Al^{27}(\beta, \gamma)Si^{28}$  的 992.0 仟電子伏共振等。

加速器電壓的粗糙測量用裝在鋼桶頂上的直讀式旋轉伏特計，距高壓電極頂部約 0.5 米。

利用電暈三極管的原理來穩定加速器的電壓。

電暈針裝在鋼桶壁上正對高壓電極的接長管部分內。針尖從一塊接地鋁板的孔中突出。整個針尖系統可以前後移動，由一個裝在裏面的正反轉電動機帶動。

電暈針連到 809 三極管的板極。從分析器出口狹縫得來的訊號經過放大後輸到 809 的柵極。柵極電位的變化，引起電暈電流的變化，使它对加速器電壓起一負反饋作用。放大器是一個一級的差分放大器，放大倍數經常用在數十至一百左右。

809 管的工作柵偏壓一般以 -30 至 -50 伏左右較好，板流在 40 微安左右較合適，此時 809 板極的電位約 2 仟多伏（對地而言）。在工作時，經常用示波器監察 809 管柵壓的波形，可以由此看出穩定的好壞，對於加速器的操作方便不少。

### 三、調整和運轉

我們所用的工作氣體是氮和二氧化碳的混合氣體。氮和二氧化碳都是工業純。氮中約有 5% 左右的氧，二氧化碳的純度不低於 98%。圖 6 給出在氮氣中和在氮、二氧化碳各占 50% 的混合氣體中兩種情況下、不同氣壓下所達到的電壓值。曲線 1 和 2 是用工業純氮作絕緣氣體時電壓隨氣壓變化的情況。曲線 1 是瞬間最高電壓，曲線 2 是穩定的最高電壓。瞬間最高電壓是指加速器在達到此電壓後即發生擊穿，擊穿後電壓下降，然後又上升到最高值，又擊穿。在 10 大氣壓以前，電壓隨氣壓的增加近於綫性地上升，增加率約

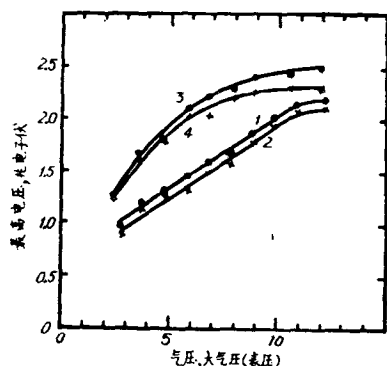


圖 6 最高電壓與氣壓的關係

曲線 1 和 2 各為工業純氮下的瞬間最高電壓和穩定的最高電壓。曲線 3 和 4 各為氮和二氧化碳各占 50% 的混合氣體下的瞬間最高電壓和穩定的最高電壓。

130 仟伏/大氣壓。但在 10 大氣壓以上，曲線開始變平，12 大氣壓以上趨向飽和。從 11 大氣壓增到 12 大氣壓，電壓只增加 60 仟伏左右。

氮和二氧化碳的混合氣體，在與氮相同的氣壓下可以達到較高的電壓。圖 6 曲線 3 和 4 是在氮和二氧化碳各占 50% 的混合氣體中所測得的電壓隨氣壓變化的情況。曲線 3 是瞬間最高電壓，曲線 4 是穩定的最高電壓。瞬間最高電壓達到 2.5 兆電子伏，穩定的最高電壓達到 2.3 兆電子伏。作最高電壓試驗時有離子束通過加速管。從曲線上可以看出，7 大氣壓以上，增加氣壓並不能使電壓有較多的提高。

我們曾在氮和二氧化碳三種不同混合比例下都達到了 2.5 兆電子伏的瞬間最高電壓。為了達到最高電壓，不同比例氣體所需用的氣壓不同：二氧化碳



占 5% 和 50% 时, 气压为 12 大气压; 二氧化碳占 15% 时, 气压为 10 大气压。看来二氧化碳的含量在 15% 左右较为有利。这一点和文献[9]的结果是符合的。

这些电压是用旋轉伏特計测量的, 它的讀数曾用經核反应校正的静电分析器的讀数来校正过。

关于击穿的判断, 不太能肯定。7 大气压以下, 击穿似乎发生在径向, 即对鋼桶的击穿。7 大气压以上, 击穿似乎轉变为軸向, 即分压片間的击穿。

我們的分压高电阻的数值在使用中經常改变, 因此分压的均匀度得不到保証, 在較高气压下因而导致軸向击穿也許是可能的。

不同气压下, 輸电帶上的电流見图 7。輸电帶的綫速度为 18.6 米/秒, 单激輸电, 气体为 70% 氮和 30% 二氧化碳。图中最大电流是針尖稳定的电暈針尖尽量靠近高压电极时所測得的通过針尖的电暈电流, 比短路电流的数值略小。所測到的最大电流最大可达 300 微安。气压在 4 大气压以上, 輸电电流即不再随气压而增加。我們曾試过复激輸电, 輸电帶綫速度为 28 米/秒, 气体为 80% 空气和 20% 氮, 得到的最大电流在 4 大气压时为 640 微安。气压再增加, 电流也不再增加。

加速器原来設計是可以装二条輸电帶的, 按照上述試驗, 預期短路电流可以超过 1 毫安。由于实际所需的电流远小于此值, 因此經常運轉時只装了一根輸电帶, 且只用单激輸电。在大气压下, 单激輸电时, 短路电流的波动为  $\pm 0.8\%$  左右。

噴电針排使用数百 (500 以上) 小时后針尖变鈍, 必須更換, 否則会发生电暈放电的临界气压問題<sup>[10]</sup>。这时当气压增加到某一数值, 加速器的电压反而大幅度下降, 輸电电流突然减小。这是由于正电暈針 (即噴电針排) 在到达某一气压后, 不再出現电暈放电現象, 因此无法实现噴电。用鈍的針排曾在 8 大气压左右发生此現象。新的針排, 在 14 大气压以下, 未发生此現象。

我們的加速管的加速电极的形状較簡單, 便于制造。到 2.5 兆电子伏, 沒有出現明显的电子負載現象, 也沒有发生击穿。加速管真空密封的质量很好, 从封接好以来, 从未发生过漏气。

离子束在相当大能量范围内都聚焦良好。离子束位置飘移很小, 长时期内的移动不大于 1 毫米。

由于静电分析器不允許通过較大的离子流, 从加速管出来未經分析的离子流經常为 10—20 微安。当能量稳定度为 0.1—0.2% 左右时, 通过静电分析器的质子流最大可达 1—2 微安, 再大則偏轉电极間的次級电子电流較大。

图 8 所示为  $Al^{27}(\rho, \gamma)Si^{28}$  992.0 仟电子伏共振。静电分析器的入射狭縫为 1 毫米, 出口狭縫为 0.6 毫米。用鋁厚靶。激发曲綫 1/4 高处至 3/4 高处的宽度为 220 电子伏。在上述条件下, 此宽度經常在 200—500 电子伏間, 即相当于共振能量的 0.2—0.5%。

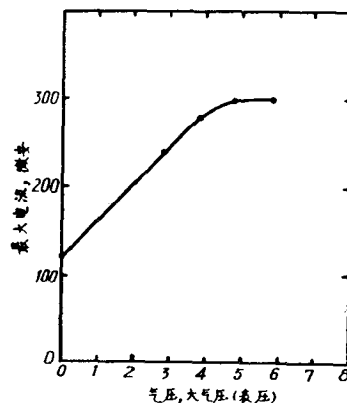


图 7 最大电流与气压的关系

图9所示为加速器大厅内剂量的平面分布图。测量时加速器电压为1.68兆电子伏，离子流为12微安，靶子为石英。实验大厅在加速器大厅楼下，剂量很小，上述情况下小于0.05毫伦/时。

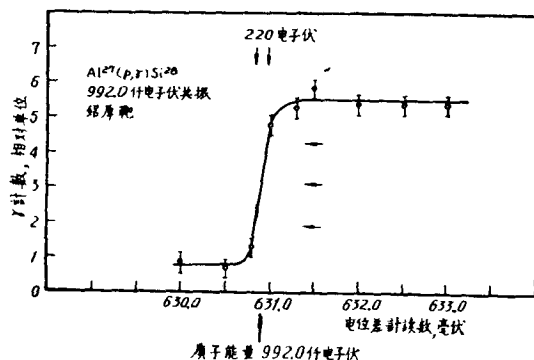


图8  $Al^{27}(p, \gamma)Si^{28}$  992.0 千电子伏共振曲线。铝厚靶。激发曲线1/4高处至3/4高处的宽度为220电子伏(图上三个横向箭头各表示1/4, 1/2, 3/4高处)

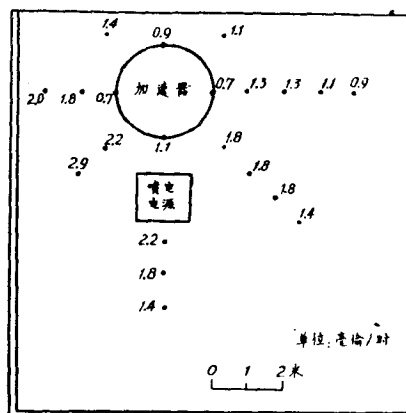


图9 加速器大厅内剂量的平面分布图。加速器电压1.68兆电子伏，离子流12微安，靶子为石英。剂量仪离地1.7米。剂量单位为毫伦/时。

加速器的运转巩固可靠。以一部分的运转时间为例：在1227运转小时内，平均122.7小时吊开钢桶检修一次。在作核物理实验工作时，由于工作需要常不停地连续运转20—30小时。

#### 四、结 束 语

梅镇岳先生曾参加了一段时间的领导工作，前后参加过本工作的研究人员还有张仲木、周文宗、顾润观、王祝翔、鍾溟等同志，马兴华同志参加了加速器的安装和加速管的封接工作，特此向他们表示感谢。感谢忻贤杰、吕余庆同志为静电分析器作了一个很好的高压稳定电源。最后谨向本组负责加速器维护、本所工厂、器材等部门的工作同志致谢，没有他们的辛勤劳动，这架加速器是无法完成和经常运转的。

#### 参 考 文 献

- [1] Rose, P. H., *Nuclear Instr. Methods*, **11** (1961), 49.
- [2] —, *Nuclear Power*, **6** (1961), No. 65, 58.
- [3] Moak, C. D. et al., *Nucleonics*, **9** (1951), No. 3, 18.
- [4] Elkind, M. M., *Rev. Sci. Instr.*, **24** (1953), 429.
- [5] Timm, U., *Z., Naturforsch.*, **10 a** (1955), 593.
- [6] 陈鑑璞, *物理学报*, **18** (1962), 514.
- [7] Fowler, W. A., et al., *Rev. Sci. Instr.*, **18** (1947), 818.
- [8] 忻贤杰、吕余庆, *物理学报*, **18** (1962) 558
- [9] Пивовар, Л. И., Тубаев, В. М., *Электростатические Генераторы* (Атомиздат, 1959, Москва), 67.

## A PROTON ELECTROSTATIC ACCELERATOR

YEH MING-HAN, SUN LIANG-FANG, SHYU CHIEN-MING, CHIN CHIEN-CHUNG, YEH LONG-FEI  
CHEN JYH-CHEN, CHEN CHIEN-POU, SHAH GUANG-CHANG, Yü CHÜEH-HSIEN  
LI ZHENG-WU, CHAO CHUNG-YAO  
(*Academia Sinica*)

### ABSTRACTS

A proton electrostatic accelerator of the high pressure type is described. The protons accelerated by this accelerator have a maximum energy of 2.3 Mev, while 2.5 Mev momentary. It has been in operation for more than four years.

