

加速器分压用的負电暈間隙特性研究

陈鑑璞 叶銘漢

本文研究了气体成分、气压、針尖尖度、間隙长度、針尖突出高度等因素对电暈放电特性的影响。认为要适合具有很多分压間隙的高气压靜电加速器的要求,使用尖針、小間隙,并串联以适当电阻,可以在降低間隙起始工作电压的同时展寬工作区。文中对間隙串联电阻的特性进行了分析,指出它的优点在于改善非綫性,在小电流区沒有影响,在大电流范围能減低电流增长的速度和提高击穿电压。

对串联間隙中杂有坏針也进行了試驗,它的后果是提高間隙的起始工作电压和縮小工作区,因此是不允許的。

一、前 言

高压靜电加速器的沿絕緣柱分压的問題至今尚未完善地解决。通常所用的两种分压方法是高电阻分压和負电暈間隙分压。高电阻要求阻值为几百兆欧,并且长期工作在几十千伏高压下。实践证明,由于在加速器中电阻处在极高电位而引起电暈以及因加速器击穿而造成的过电压,高电阻不可能长期稳定可靠地工作。原子能研究所的2.5兆伏質子靜电加速器,在每次检修时都发现有5—6个高电阻损坏(共用100个),阻值变成无穷大(用兆欧表測量)。特别是处在絕緣柱两端的高电阻,即接近高压电极和接近地电位的那些分压片間所用高电阻最易损坏。这样就严重地破坏了分压的均匀性,引起分压片間的击穿,而这种击穿是近代加速器中不应有的。

使用負电暈間隙,即負針对平板的电极系統,在大气型加速器中問題不大,可以适当調节針尖間隙来获得所要求的特性。因为大气型加速器的分压片一般排得很稀,每两个分压片之間的电压可以很大,分压片間的間隙也較大,所以有充分調节的余地。除此之外,由于沒有密封容器以及人手可以插入分压片間調节,甚至可以針对不同的使用电压来調节針尖距离。在高压加速器中情况就不是如此了。

第一、电暈的起始放电电压由于气压的增高而升高,这个电压可能高于要求的工作电压。

第二、高压加速器的分压片間距一般在2.5厘米左右,針尖間隙調节的余地小,間隙电压較低。如果要求一定的針尖間隙在加速器各种电压和气压下都有合适的工作点,这是很难做到的。

由于电暈間隙能通过較大的电流,而且工作稳定性較高,用电暈間隙分压仍是今天的一个趋势。密恰尔(Michael)等^[1]的一架具有新型結構的靜电加速器,将电暈間隙密封在一个类似于加速管的管子中。在这根管子內充的气体 and 气压可在加速器鋼桶之外加以控制,在不同的加速器电压下改变“电暈管”內的气压以获得所要求的分压电流值。但是,这样就比用高电阻分压更为麻煩。当需要替换电暈針时,必須将整根管子換掉。更为理想的是使用这样一种电暈装置,它在相当广的电压和气压范围内都可以滿意地工作。更明确地說,我們所需要的电暈間隙应该是:

1. 起始工作电压低,即使在高气压下也要足够低;

2. 电暈工作区广。在靜电加速器分压中,我們把工作区定义为相应于从10到200微安分压电流的电压范围。因为分压电流小于10微安,則从分压装置流过的电流比之其它途径的損

失太小,不足以可靠地分压;分压电流大于 200 微安则这方面损失又过大,也是不合适的。相应于 10 微安的电压称为起始工作电压。

关于电晕放电的应用研究很少,曾经发表的只有大气中的一些实验结果及其在高电压方面的若干应用的讨论^[2]。此外,在 1—8 个大气压(绝对)的空气内曾对间隙长度为 10,15 及 20 毫米的针尖系统的伏安特性作过测量。

本文的主要目的在于通过对电晕放电有影响的一些因素的研究,并围绕降低起始工作电压和展宽工作区这两个要求,确定适合于高电压静电加速器分压用的电晕针装置。实验证明,尖针、小间隙、串联高电阻是降低起始工作电压和展宽工作区的有效措施,在一定程度上可以解决高气压下在实际工作电压不高的电晕间隙工作中的困难。

二、实验装置和方法

实验是在如图 1 所示的高气压罐中进行的。最高气压可达 30 个大气压(表压,以下均同)。试验用的最高电压为 50 千伏,从一半波整流 X 光机电源获得,有时也用一 5 级倍压线路的电源。电压用 550 兆欧高电阻(刻度经过校正)和微安表串联读取。电晕电流由和电极串联的微安表读出,电表用氦泡保护。在单针试验时,可以在不破坏高气压密封的情况下在罐外

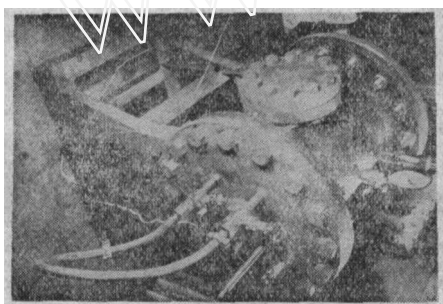


图 1 实验用的高气压罐

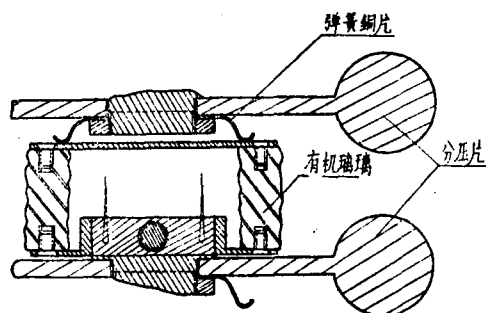


图 2 安装在加速器中的电晕针装置

调节针尖间隙,间隙距离最初用塞规测量,以后变动的数值可以根据指示读出来。有观察窗,可以看到放电的情况。

图 2 是准备用在 2.5 兆伏质子静电加速器中的电晕针装置。实验数据中注明双针的都是指用这种装置试验的结果。加速器分压片间隙为 25 毫米,片间电压最高为 25 千伏(加速器电压为 2.5 兆伏)。使用这种装置可以预先安好针尖,再嵌入分压片的座内,当需要更换时,也可从分压片间取出。它的优点是确保针尖间隙的距离,安装时不会碰坏针尖,安装和替换都相当方便。但使用这种装置后也使分压片间的有效绝缘距离缩短了一些(装置的绝缘物的长度较分压片间的绝缘块略短一些)。

实验所用的唱针和缝衣针都用放大倍数为 62.5 倍的显微镜挑选,并与显微标尺比较,大致确定针尖的直径。唱针较粗,直径大致在 0.1 毫米左右(0.09—0.12 毫米),缝衣针的直径约小一个数量级,为 0.01 毫米左右(0.01—0.04 毫米)。针尖特别不好的,可以用肉眼看出来。

三、实验结果和讨论

1. 气体成分和气压

加速器中常用的气体是 N_2 , 或 N_2 和 CO_2 的混合气体。加入 CO_2 后,电晕起始工作电压

升高,整个电晕放电曲线后移,相当于增加了气压或增大了间隙长度(图3)。混合气体中CO₂含量愈高,这个差别就愈大,提高起始工作电压对分压来说是不利的。

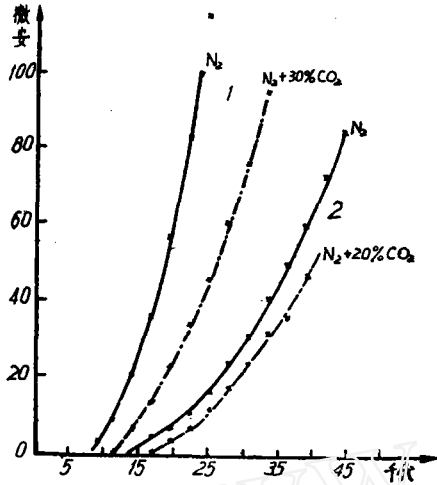


图3 CO₂含量的影响

1—双针, $\phi = 0.05$ 毫米, 间隙 $g = 5$ 毫米, 8个大气压(表压); 2—单针, 英武唱针, $\phi = 0.07$ 毫米, $g = 5$ 毫米, 12个大气压(表压)。

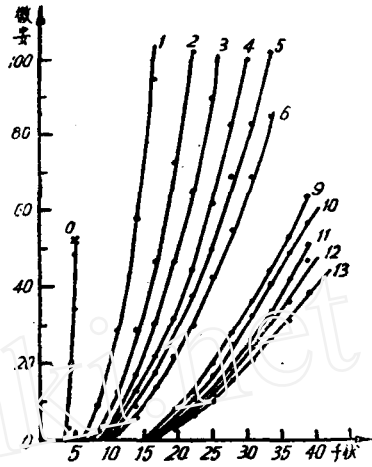


图4 不同气压下的电晕特性

气体为 N₂ + 20% CO₂, $g = 5$ 毫米, $\phi = 0.07$ 毫米, 英武唱针; 曲线上所注数字为大气压数(表压)。

气压愈高,放电的起始电压也愈高,电流上升的速率则变慢,后者对展览工作区而言,是有利的。图4是在不同气压下的电晕特性。

2. 针尖尖度、间隙长度和针尖突出的长度

针尖尖度对放电特性影响很大,图5比较了尖端为 $\phi 0.01$ 毫米(以下同,均以毫米为单位)的青岛金鸡(7)钢针和尖端为 $\phi 0.1$ 毫米的五一牌唱针的特性。这表明钝的针头不仅显著地推迟了起始工作电压,而且使整个放电特性曲线几乎全部往后平移了一个数值,这个数值大致上就相当于起始电压间的差值。尖针有低得多的起始工作电压,在设计分压用电晕间隙时这是十分重要的。因为只有当分压片间的电压大于起始工作电压时,这一装置才起分压作用。图6是 $\phi 0.01$ 毫米和 $\phi 0.1$ 毫米的针尖(间隙为5毫米)在不同气压下起始工作电压的比较。当气

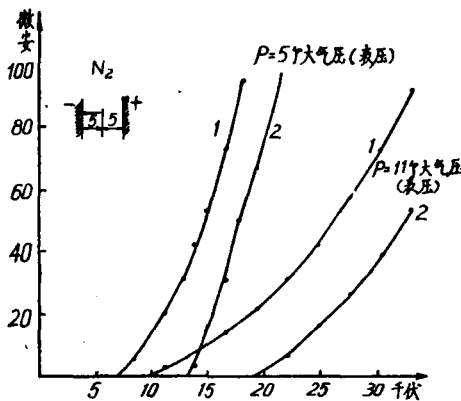


图5 高压下不同针尖的比较

1—缝衣针 $\phi 0.01$ 毫米; 2—唱针 $\phi 0.10$ 毫米。

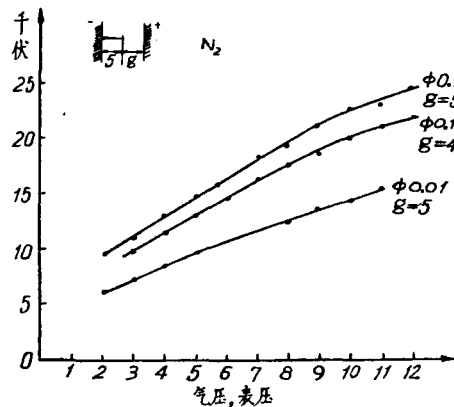


图6 10微安电流线

压为 11 个大气压(表压,下同) 气体为 N_2 时,这两种针尖的起始电压相差达 8.4 千伏;气压较低时相差得也较小,当气压为 2 个大气压时这种相差约为 2.8 千伏。假设加速器分压间隙用 100 个,气体为 N_2 ,在 10 个大气压下 $\phi 0.01$ 毫米针尖从 1.4 兆伏起就开始工作,而 $\phi 0.1$ 毫米则从 2.24 兆伏起才开始工作。非常可能在 10 个大气压的 N_2 下加速器还达不到 2.24 兆伏,因此这一分压装置就毫无用处了。

减小间隙长度也可降低起始工作电压,如图 6 所示,间隙长度为 4 毫米的起始电压比间隙长度为 5 毫米的低一些,但间隙长度的影响没有针尖尖度的影响大。要注意的是间隙缩短之后,击穿电压也随之降低,这是因为缩短间隙即相当于将整个放电特性前移。这一点在较低气压下显得更为突出。由于电流很快上升,因而极易击穿,电压的工作区常会变得很窄。增大间隙对放电的影响和提高气压的影响是相似的(图 7)。在 8 个大气压以上,它的影响似乎比改变气压更大。

针尖突出平面的高度愈高,愈容易放电,但对特性的影响一般不大,特别是当改变的长度比间隙小很多时,影响也很小。图 8 是针尖突出高度 5 毫米和 43 毫米两个近乎极端的情况,它们之间的差别也并不太大。

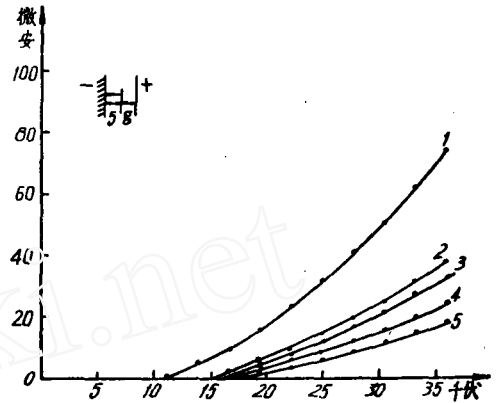


图 7 不同间隙长度及不同气压的影响

N_2 , 针尖 $\phi 0.01$ 毫米, 缝衣针。

- 1— $g = 5$ 毫米, $P = 6$ 个大气压(表压);
- 2— $g = 5$ 毫米, $P = 8$ 个大气压(表压);
- 3— $g = 5$ 毫米, $P = 11$ 个大气压(表压);
- 4— $g = 6$ 毫米, $P = 11$ 个大气压(表压);
- 5— $g = 7$ 毫米, $P = 11$ 个大气压(表压)。

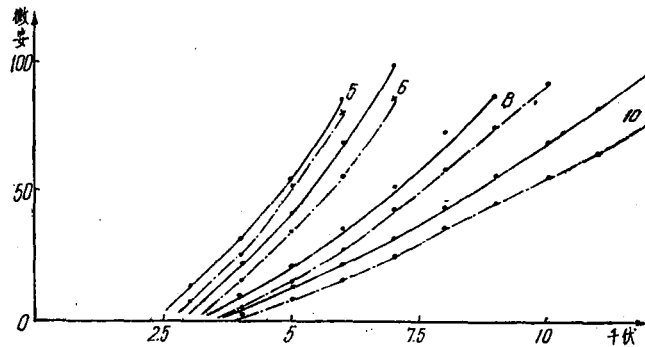


图 8 针尖突出长度对放电的影响

大气, 针尖 $\phi 0.01$ 毫米。

实线——针尖突出 43 毫米;

虚线——针尖突出 5 毫米;

x——击穿。

曲线上的数值为间隙长度, 单位毫米。

3. 击穿电压

以下试验均用图 2 的电量针装置进行,都用双针,针都经显微镜挑选,要求外形相同,特别是针尖尖度基本上控制在同一数值。在这一装置中,电压相同时双针的电流约为单针的一倍(大气中的试验结果)。

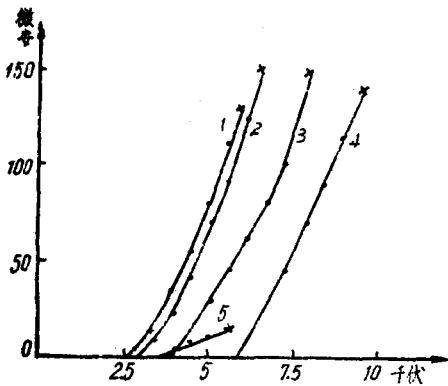


图9 不同间隙和针尖尖度对击穿电压的影响
大气,双针装置。
1— $g=3$ 毫米, $\phi 0.01$ 毫米, 真针;
2— $g=4$ 毫米, $\phi 0.01$ 毫米, 真针;
3— $g=5$ 毫米, $\phi 0.01$ 毫米, 真针;
4— $g=5$ 毫米, 针尾, 真针;
5— $g=4$ 毫米, $\phi 0.01$ 毫米, 正针;
x—击穿。

击穿电压决定于间隙中的气体介质, 间隙长度以及针尖尖度。图9是5毫米, 4毫米和3毫米三种间隙长度的比较。由此可见, 间隙长度愈长击穿电压愈高。图9中也表示了在相同间隙的情况下不同针尖尖度对击穿电压的影响, 针尖愈钝, 击穿电压也愈高。此外, 非常明显的是气体绝缘强度愈好, 击穿电压也愈高, 从图14可以看到, 气压增高击穿电压也相应地升高。

在其它条件不变时, 针尖愈尖, 电量电流愈大, 空间电荷使电场的畸变也就愈大, 因此在较低电压下击穿。 $\phi 0.01$ 毫米针尖和针尾的击穿电压不同, 但击穿前的电流却差不多相同, 约150微安(图9)。

正针尖的电量特性较差, 在较低的电压和很低的电量电流下就会击穿, 因此不能用作分压。比较图9的曲线5和2之后, 这就是非常清楚的了。

4. 串联特性

相同针尖间隙串联后的合成特性的实验结果并不等于各单个间隙特性的理论组合(图10)。它的电流值和击穿电压一般都较理论组合稍大一些。但是在大部分情况下, 击穿前电流变化

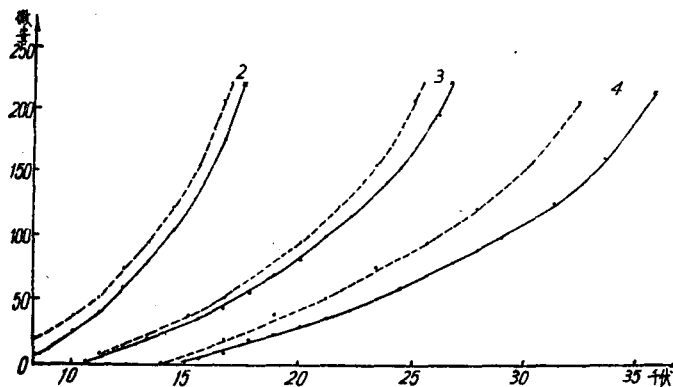


图10 串联间隙的电量特性
大气, 双针, $\phi 0.01$ 毫米, $g=5$ 毫米。
实线——实验曲线; 虚线——理论组合曲线; x——击穿。
曲线上的数值为串联的间隙数。

甚小, 或近乎不变。这说明到达这个电流值时串联间隙中任一间隙的击穿必然导致整个串联间隙的击穿。

在串联间隙中有某一个间隙的针尖变钝时, 由于钝针的起始工作电压变高(特别在高气压下), 整个串联间隙的起始工作电压也相应增高。当三个长为3毫米的间隙串联时, 在6个大气压的 N_2 下, 其中有一个间隙是针尾的起始工作电压比之全部间隙是 $\phi 0.01$ 双针的工作电压高百分之五十(图11)。因此加速器分压装置中不允许杂有不好的针尖间隙, 否则将会严重缩小工作区。在不同气压下, 上述两类串联间隙的工作区如图11所示。夹杂有坏间隙的在3个

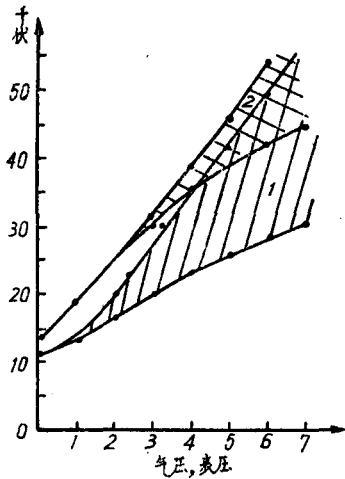


图 11 串联间隙中钝针的影响

1——3毫米间隙双针， $\phi 0.01$ 毫米，三个串联；
2——其中一个是针尾。
工作区：10—200 微安。

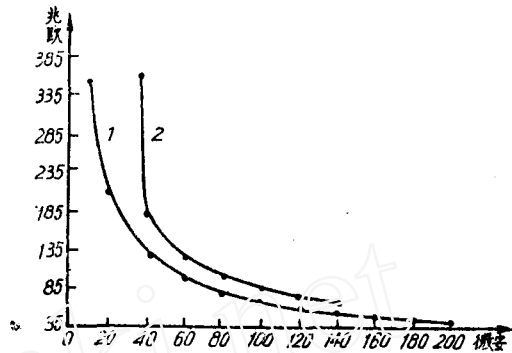


图 12 电量间隙的等效电阻

1——双针， $\phi 0.01$ 毫米， $g = 5$ 毫米；
2——双针，针尾， $g = 5$ 毫米。

大气压以下没有工作区，即一开始的电流就超过 200 微安；即使是 3 个好间隙串联，在 1 个大气压（表压）以下，电量电流也具有突然出现的性质，这可能和 N_2 有关，在空气中就无此现象。从图 11 可以看出，气压愈高工作区也愈宽，虽然它们的起始工作电压也相应地有些增高。

因为电量放电的伏安特性是非线性的，间隙的等效阻值随电流而变，电流愈大，电阻愈小。不同针尖尖度具有不同的伏安特性，因此在同一电流下，它们的等效阻值是不同的。图 12 是 5 毫米间隙的针尖 $\phi 0.01$ 毫米（双针）及针尾（双针）在不同电流时的等效电阻。可以看到，电流在 40 微安以下时阻值相差极大，分压自然是极不均匀的。电流在 40 微安以上时，阻值约差 20 兆欧。由于电流愈大等效电阻愈小，这一差值的影响也就愈大。对分压来说，因针尖尖度不同而造成的分压不均匀在大电流时也是不利的。因此加速器的分压针尖应力求完善。

5. 间隙串联电阻

5 毫米间隙， $\phi 0.01$ 毫米的双针串联 1—15 兆欧电阻后，在大气中的特性如图 13 所示。串联的电阻值愈大，电流上升的趋势愈慢，击穿电压显著提高，特别可贵的是起始工作电压基本不变。在伏安特性曲线的小电流区域中，电流并无显著降低。这一些特点完全适合分压电量间隙的要求。理由是十分明显的，这可用图 12 中等效阻值来说明。当电流为 10 微安时，等效阻值高达 360 兆欧，如串联的是 15 兆欧电阻，则它仅占总值的 4%，因此基本上没有影响；而当电流为 200 微安时，等效电阻降至 40 兆欧，所串的 15 兆欧占总值的 28%，因此它大大降低了电流的增长速度，并降低了击穿电压。

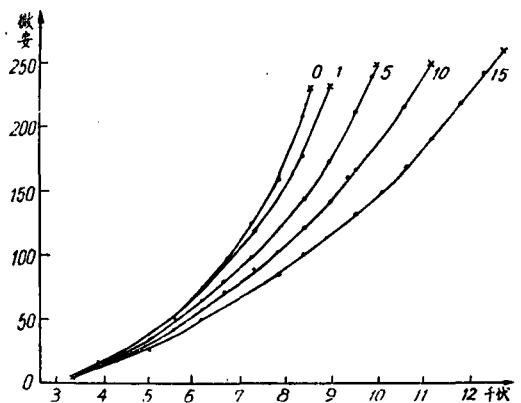


图 13 电量针串电阻的特性

大气，双针， $\phi 0.01$ 毫米， $g = 5$ 毫米。
×——击穿。图中数值为串联电阻值，单位为兆欧。

图 14 是在不同气压下串联 10 兆欧电阻及不串联电阻两种情况的比较。图中曲线表明，上述

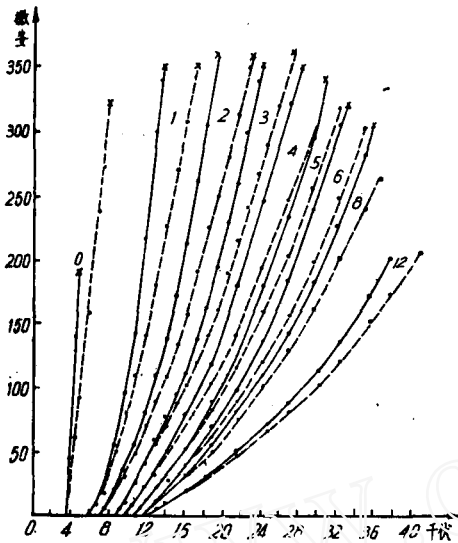


图 14 高气压下电量放电特性
 N_2 , $g = 3$ 毫米, 双针, $\phi 0.01$ 毫米(8个大气压以下
 为 $\phi 0.05$ 毫米)。曲线数值为大气压数(表压)。
 实线——电阻等于零; 虚线——电阻等于 10 兆欧;
 ×——击穿。

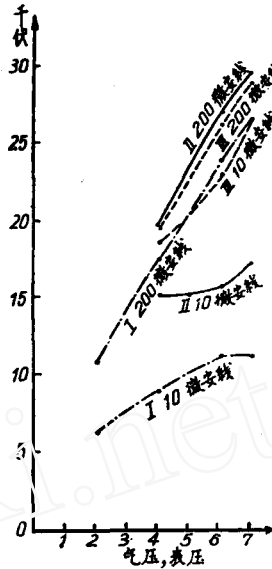


图 15 不同针尖尖度在各种气压下的工作区
 N_2 , $g = 5$ 毫米。
 I——双针, 缝衣钢针, $\phi 0.01$ 毫米;
 II——双针, 唱针, $\phi 0.07$ 毫米;
 III——双针, 针尾。

串联电阻的所有特点不仅在大气中存在, 在高气压下也是表现出来。但由于在高气压下, 工作区本来就较广, 因此相对的影响就较小。图 14 中较低气压的数据所用针尖已因“锻炼”而变粗, 约 $\phi 0.05$ 毫米。

由于尖针具有比钝针广得多的工作区(特别在高气压下), 而且起始电压也低(图 15), 故分压间隙应采用尖针。由于小间隙也会稍许降低起始电压, 而串联适当电阻又可降低它的电流增长速度及提高击穿电压, 因此在气压高、间隙电压低和间隙长度短的情况下, 用小间隙再串联以 10—20 兆欧电阻是十分有利的。

6. 湿度的影响

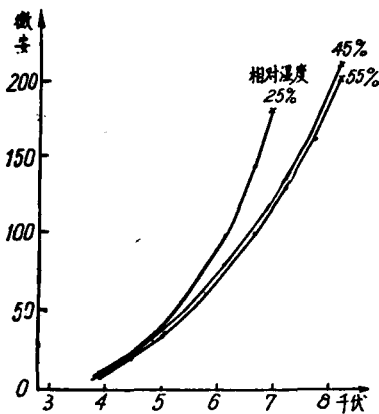


图 16 湿度的影响
 大气, 双针, $\phi 0.01$ 毫米, $g = 5$ 毫米,
 ×——击穿。曲线上的数值为相对湿度。

从图 16 的曲线看来, 相对湿度在 45% 以上, 湿度基本上对特性没有影响; 相对湿度在 30% 以下时, 特性似乎稍有变坏, 即电流增长较快, 击穿电压较低。但由于实验时湿度是用毛发计测量的, 反应慢而且读数不准, 所以这一结论还不能肯定。文章中未注明湿度的, 一般都在 40% 左右的相对湿度下测量的。

7. 起始的脉动放电

在试验中曾发现这样一些现象: 在气压(表压)为零的 N_2 中对 $\phi 0.1$ 毫米的针尖进行试验, 发现开始时的电量电流极不稳定, 在一开始放电之后, 电流读数即在 0 到 100 微安之间摆动。这种

摆动是有规则的，周期约为 1 秒。当有空气渗入后，在同样气压下的电流读数又变得很确定了，和在更高气压的 N_2 中或任何气压的空气中一样。在 $\phi 0.01$ 毫米针尖系统中也有这一现象。从开始出现电量电流起，电流即在 0 到 20 微安之间脉动；电压再增加，电流开始稳定在 16 微安；以后电流随电压稳定地增加，电流值也非常稳定。

这种脉动显然不是特里切 (Trichel) 脉动^[3]，因为它频率低，而且不发生在负电性气体中。我们用的 N_2 是工业纯的，含有约 5% 的 O_2 ，这一点也许是重要的。因为在高压 N_2 中由于 O_2 的绝对含量增高了，所以在高压下就没有出现这种脉动。

在两个间隙串联的试验中，也发现这一现象，在气压(表压)为零的 N_2 中，电流极不稳定，很快就击穿。

8. 针尖尖端的“锻炼”

针尖经过几小时工作后，尖端就有“锻炼”效应了，即尖端变圆，如图 17 所示。尖端上常有黑色，这大概是氧化所造成的，和布路德 (Bouloud)^[5] 所观察到的结果相同。由于“锻炼”成形，特性会有下列的变化：

- (1) 对于一定的气压和电压，电量电流减少；
- (2) 电晕工作区缩小；
- (3) 针尖尖端变形。

原来针尖较粗的，如 $\phi 0.1$ 毫米，成形后形状改变很小，曲率半径基本上不变。尖的针成形后直径会从 $\phi 0.01$ 毫米增加到 $\phi 0.05$ 毫米。在经过剧烈的击穿后，甚至可增加到 $\phi 0.1$ 毫米。在高压下的击穿对变形的影响特别严重。表 1 是在 3 个大气压的 N_2 中，间隙为 3 毫米的双针装置，两个串联，击穿前与经过 6—7 次击穿后放电特性的比较，起始电压和小电流区改变很大，但大电流区和击穿电压则并未变化。

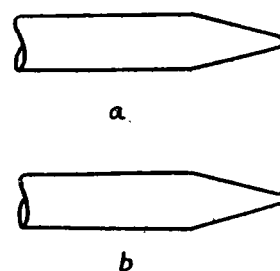


图 17 针尖的“锻炼”成形
a——锻炼前； b——锻炼后。

表 1 3 个大气压(表压)，双针 $\phi 0.01$ ，间隙 3 毫米，两个串联击穿前和击穿后放电特性的比较

电压, $\times 560$ 伏	17	18	20	23	25	28	30	33	35	38	40	42	44
未击穿前的电流, 微安	4	10	22	45	62	98	125	180	210	280	350	490	600 (击穿)
经 6—7 次击穿后的电流, 微安	0	0	0	10	20	42	65	165	205		330	430	600 (击穿)

四、结 语

1. 对于具有很多分压间隙的高气压静电加速器，分压片间的电位差往往较低，为了使电量起始工作电压低于实际工作电压，采用尖的针及较小的间隙长度是有利的，但这种结构也使电流增长较快。为了展宽工作区、降低电流增长的速度以及提高击穿电压，在间隙串联以 10—20 兆欧电阻是有好处的。特别是在 4—5 个大气压以下时，串联以电阻所获得的改善更明显；在更高气压下，由于高压下的电量电流的增长速度本来就较慢，工作区较宽，串联电阻的影响相对说来就较小。

采用尖针要防止过度地击穿，否则，“锻炼”变形的过程会加速，针尖迅速变钝。

2. 串联间隙中杂有个别钝针或坏针会严重地增高整个系统的起始工作电压，缩小工作区，它也造成分压不均。当分压电流为 60—100 微安时，不均匀的程度要稍小一些，但电流愈小或

愈大,影响都非常严重,甚至根本不能分压。

3. 間隙的击穿电压决定于气体的种类、气压、間隙长度、針尖尖度等因素。气压愈高、間隙长度愈长、針尖愈鈍,則击穿电压就愈高。串联間隙的击穿前的电流和单个間隙的相同。

4. 加速器最高电压为 2.5 兆伏, 100 个分压間隙。假設采用图 2 的双針装置, 間隙 3 毫米, 針尖用 $\phi 0.01$ 毫米的縫衣針, 气体为 N_2 , 按照实际工作情况气压在 4 个大气压左右, 則加速器的电压估計可达到 1 兆伏, 此时分压針的工作范围为 1—2.2 兆伏(參看图 14, 并注意图中的 4 个大气压的数据实际对应的針尖为 $\phi 0.05$ 毫米, 較粗), 除非所用的針尖未經击穿变鈍, 否則起始工作电压可能高于工作电压。在这个气压以下, 分压装置很难工作。对于 8 个大气压的 N_2 , 估計加速器可到 1.5 兆伏, 分压装置約从 1.3 兆伏起工作, 一直到 3 兆伏; 对于 12 个大气压的 N_2 , 估計加速器电压可到 2—2.2 兆伏, 此时分压針的工作范围为 1.5—3.7 兆伏, 較为理想。由此可见, 这一装置在較低的气压下工作是不好的。在較高气压下, 由于加速器电压的提高, 工作范围尚算合适; 如气压为 12 个大气压时这一装置的实际工作范围为 1.5—2.2 兆伏; 而在 4 个大气压时就几乎没有实际工作区。問題仍是起始工作电压不够低。这一装置用于上述的加速器中, 必須用尖針, 而且要避免在低气压下試运转时造成击穿(此时分压装置未起作用), 因为針尖变鈍之后, 即使在高气压下也沒有足够的工作区了。上述装置的工作电压的上限远高于在相同气压下的加速器实际可能达到的电压, 因此串联电阻是不必要的。除非在解决低气压下不工作的問題, 而进一步縮短間隙时, 为了避免在低气压下过早击穿, 才有串联电阻的必要。

分压針尖应用在一般高气压型电子静电加速器中, 由于分压片間电压較高, 以及电子加速器电压一般不需在大范围内調节, 工作情况估計比較有利。

所有这些結論都有待在加速器上正式試用后才能进一步加以肯定。

实验所用高压气罐是宋旦华、刘柱华同志帮助設計的, 苏振东、王震遐同志曾帮助做了部分試驗工作, 在此謹致謝忱。

参 考 文 献

- [1] Michael, I., et al., *Rev. Sci. Instr.* **30** (1959), 855—863.
- [2] Van Atta, L. C., et al., *Rev. Sci. Instr.* **12** (1941), 305—308.
- [3] Nonaka, I., et al., *Mem. Fac. Sci. Kyusyu Uni.* **B1** (1952), No. 2, 37—42.
- [4] Trichel, G. W., *Phys. Rev.* **54** (1938), 1078.
- [5] Boulloud, A., *C. R. Acad. Sci. (Paris)*, **238** (1954), 1981—1983; *Rev. gén. Elect.* **64**, No. 6 (1955), 283—299.

(編輯部收稿日期 1961 年 12 月 23 日)

