

探测器和光源之间的距离  $z$  的关系, 其结果见图 9 和图 10. 上述的结果与理论所给出的(21)式完全一致, 在远场区域  $d_{1/2}(z)$  与  $z$  成线性关系 [(19)式], 在非涅耳区则偏离直线性. 表 1 中  $\sigma_g$  的两组数据是用不同的方法估计的. 如果满足 Leader 判据<sup>[12]</sup> ( $z \gg k\sigma_g\sigma_l$ ), 则预期  $\sigma_g^{(a)}$  与  $\sigma_g^{(b)}$  将会相符. 这也被实验结果所证实.

总之, 上述实验结果确实证实了的确存在一类准均匀平面光源(Schell 模型光源的极限情形). 这种平面光源可以产生方向性很好的光束, 并且观测到的远场图样与该光源平面上的强度分布无关. 另外, 实验还证实, 象文献 [6] 中所预期的那样, 不管在非涅耳区还是在远场区, 光束的大小都由 (21) 式确定.

### 参 考 文 献

[1] E. Collett and E. Wolf, *Optics Lett.*, 2(1978),

27.  
 [2] L. Mandel and E. Wolf, *J. Opt. Soc. Am.*, 66 (1976), 529.  
 [3] E. W. March and E. Wolf, *J. Opt. Soc. Am.*, 62(1972), 379.  
 [4] A. C. Schell, The multiple plate antenna, Doctoral Dissertation, Massachusetts Institute of Technology (1961), Sec 7. 5  
 [5] E. Wolf and E. Collett, *Optics Comm.*, 25(1978), 293  
 [6] John T. Foley and M. S. Zubairy, *Optics Comm.*, 26(1978), 297.  
 [7] H. P. Baltés and B. Steinle, *Nuovo Cimento*, 41B(1977), 428.  
 [8] W. H. Carter and M. Bertolotti, *J. Opt. Soc. Am.*, 68(1978), 329.  
 [9] P. DeSantis, F. Gori, G. Guattari and C. Palma, *Optics Comm.*, 29(1979), 256.  
 [10] J. D. Farina, L. M. Narducci and E. Collett, *Optics Comm.*, 32(1980), 203.  
 [11] W. H. Carter and E. Wolf, *J. Opt. Soc. Am.*, 67(1977), 785.  
 [12] J. C. Leader, *J. Opt. Soc. Am.*, 68(1978), 1332.

## 绝缘体表面静电火花放电能量的研究

唐安镇 周锡忠

(复旦大学物理系)

### 一、概 述

许多年来国外对静电火花引爆易燃气体问题进行了广泛的研究. 1951年 B. Lewis 和 G. Von Elbe<sup>[1]</sup> 测定了各种易燃气体的最小点燃能量, 方法是将电容器充电后进行火花放电(以后简称电容火花)来点燃气体. 但电容火花与绝缘体的静电放电火花(以后简称绝缘体火花)的性质不同, 因此两种火花对同一气体的最小点燃能量也会不同. 1965年 N. Gibson 和 F. C. Lloyd<sup>[2]</sup> 标定了煤气、甲烷、丙酮蒸气和空气的混合气体对绝缘体火花的点燃能力, 但他们是采用等效的电容火花标定的. 1967年 E. Heidelberg<sup>[3]</sup> 指出, 75 厘米<sup>2</sup>的带电塑料板, 在直径为 2 厘米的小球下放电可点燃乙烷-空气混合气体. 他还指出, 在金属容器外覆盖非

物理

导电塑料层时, 只要其厚度超过数毫米, 就有放电的危险. 1975年 H. Bertein<sup>[4]</sup> 用独特的方法测定了绝缘板覆盖在接地金属板的条件下放电时对易燃气体的最小点燃能量, 但他对绝缘体使用了等效电容近似. O. Fredholm<sup>[5]</sup> 等对 PTFE (聚四氟乙烯) 和 PVC (聚氯乙烯) 材质的绝缘体火花成功地进行了拍照, 证实它与电容火花的明显不同, 绝缘体火花是多通道的局域放电, 能量密度较小, 而电容火花是单通道的整体放电, 能量密度较大. 放电火花的点燃能力与放电持续时间、能量密度和总能量有关. 可以推断绝缘体火花的最小点燃能量一般比电容火花的最小点燃能量要大. 为了确定绝缘体的安全带电密度, 有必要测定各种易燃气体对绝缘体火花的最小点燃能量. 但绝缘体无电容概念, 其静电能也不易计算. 考虑到这困难, O. Fredholm<sup>[5]</sup> 等将 PTFE 和 PVC 材质做成简单形

状,并使其均匀带电,系统的静电能即可理论计算,再由放电前后系统静电能差值,测定出放电能量,但他们没有考虑绝缘体局域放电的特点,认为带电面各处均匀一致地放电,这与实际情况不符,尤其在低电位时,系统的局域放电特性很显著,放电后的 Lichtenberg 图形<sup>[6]</sup>证实了这点. 这使他们的结果偏低. 其次,他们将被测系统放在接地金属球壳内而没有考虑此球壳对静电能的影响. 另外,这种环境下的放电与一般实际情况有一定差别,限制了其结果的适用范围. 我们对 PVC 材质的静电放电能进行了测定,进行了局域放电修正并且不用金属球壳,而将系统放在玻璃密封箱内(这与现场条件较接近). 测量方案与 O. Fredholm 等人的方案明显不同,而结果与他们的基本吻合,但他们的偏低,这是预期的. 考虑到放电能量有一定的随机性,结果的重现性令人满意.

## 二、测量原理

将 PVC 薄圆板(其体电阻率  $\rho = 10^{14}$  欧姆-厘米)用直流高压金属丝喷电,使其一面均匀带电. 将接地金属小球对准圆板中心并逐渐接近,最后形成放电,则放电火花能量  $\Delta W$  为

$$\Delta W = W - W',$$

式中  $W$  和  $W'$  依次分别为放电前后系统的静电能量. 放电前系统的静电能可由下式给出<sup>[2],[7]</sup>:

$$W = W_p + W_s,$$

其中

$$W_p = \frac{2\sigma^2 R^3}{3\epsilon_0} \text{ (MKS 制)},$$

$$W_s = \frac{\sigma Q_s}{4\epsilon_0} \{ [(h - \delta)^2 + R^2]^{\frac{1}{2}} - (h - \delta) \},$$

$$Q_s = -2\pi b \sigma \{ (h^2 + R^2)^{\frac{1}{2}} - h \},$$

$\delta = b^2/2h$  (参看图 1),  $R$  为聚氯乙烯圆板的半径(米),  $\sigma$  为聚氯乙烯圆板的面电荷密度(库仑/米<sup>2</sup>),  $Q_s$  为金属小球上的象电荷(库仑),  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $h$  为金属小球球心至圆板中心之距离(米),  $\delta$  为象电荷至金属小球球心的近似距离(米),  $b$  为金属小球半径(米),  $W_p$  是

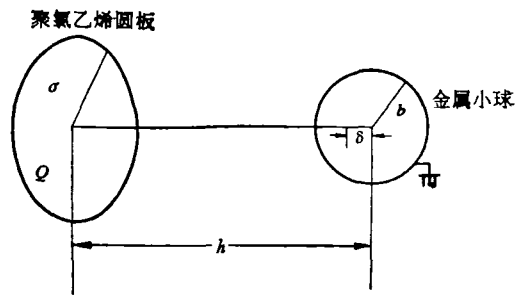


图 1 聚氯乙烯圆板与金属小球系统

孤立圆板的静电能量(圆板很薄,忽略极化影响),  $W_s$  是放入接地金属小球后的静电能修正项.

由 Lichtenberg 图可见,圆板对小球放电后,放电区域是与圆板同心的圆面,圆外面电荷密度  $\sigma$  不变,而圆内剩余面电荷仍可认为均匀,这样静电能量仍可计算. 从计算可得

$$W' = W'_p + W'_s,$$

其中

$$W'_p = \frac{2}{3\epsilon_0} \sigma^2 R^3 + \frac{2}{3\epsilon_0} (\sigma' - \sigma)^2 R'^3$$

$$+ \frac{2}{3\epsilon_0} \sigma (\sigma' - \sigma) R^3$$

$$\times \left\{ \left[ 1 + \left( \frac{R'}{R} \right)^2 \right] E \left( \frac{R'}{R} \right) \right.$$

$$\left. - \left[ 1 - \left( \frac{R'}{R} \right)^2 \right] K \left( \frac{R'}{R} \right) \right\};$$

$$W'_s = \frac{Q'_s}{4\epsilon_0} \{ \sigma' [\sqrt{(h - \delta)^2 + R'^2} - (h - \delta)]$$

$$+ \sigma [\sqrt{(h - \delta)^2 + R^2}$$

$$- \sqrt{(h - \delta)^2 + R'^2} \}];$$

$$Q'_s = -2\pi b \{ \sigma' [\sqrt{h^2 + R'^2} - h]$$

$$+ \sigma [\sqrt{h^2 + R^2} - \sqrt{h^2 + R'^2}] \},$$

$\delta = b^2/2h$  (参看图 2),  $\sigma'$  为放电区域内剩余面电荷密度(库仑/米<sup>2</sup>),  $R'$  为放电圆面的半径(米),  $Q'_s$  为放电后金属小球上的象电荷(库仑),  $K$  为第一类完全椭圆积分函数,  $E$  为第二类完

1) 圆板带电面在小球内的象电荷分布在小球内的一个球面上,象电荷球面中心,在金属球心至圆板中心连线上,半径  $\delta = \frac{b^2}{2h}$ ,象电荷球面通过金属球心,本计算近似取作全部象电荷  $Q_s$  集中于象电荷球面的中心处.

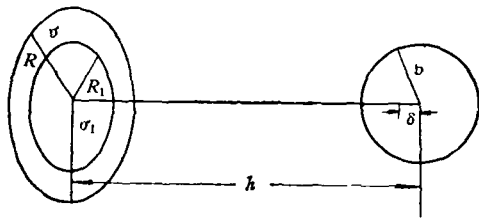


图2 放电后圆板与金属小球系统

全椭圆积分函数,  $W'_0$  为放电后孤立圆板剩余的静电能量(忽略极化),  $W'_s$  为放电后存在接地金属小球时对静电能的修正。

### 三、测量方法

#### 1. 测试环境

全部测试系统置于密封的玻璃箱 ( $1.0 \times 0.7 \times 0.8 \text{ m}^3$ ) 内。箱内用变色硅胶吸湿, 使相对湿度稳定在 35% 以下。试验表明, 这可使带电 PVC 圆板中心的对地电位长时间保持在 30 千伏以上而不显漏电。而相对湿度在 40% 以上时, 由于漏电, PVC 板就不能建立 30 千伏之电位。使用密封箱排除了试验人员和外界空气的干扰<sup>[6]</sup>。

#### 2. 试样的清洁处理及安装

先用肥皂及去污粉清洗 PVC 圆板, 然后用浸过无水乙醇的纱布洗擦, 再用蒸馏水或去离子水冲洗, 最后用无水乙醇揩, 并把圆板放置在真空烘箱中 ( $10^{-2}$  托,  $80^\circ\text{C}$ ), 烘烤一个半小时, 取出后放入相对湿度为 35% 以下的玻璃操作箱中存放 24 小时。

圆板安放在有绝缘支架的尼龙丝上, 尼龙丝与支架的接触处用 PTFE 绝缘(见图 3)。

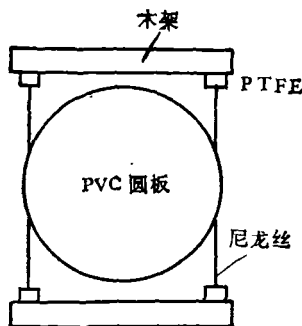


图3 圆板的安装

#### 3. 喷电与放电

摩擦带电不易保证带电均匀性<sup>[9]</sup>, 试验证明喷电方法可实现均匀带电。喷电方法如下: 用 45 号细直裸铜丝作为喷电电极, 将直流高压 (5 千伏—3 万伏) 加于其上, PVC 圆板以恒速 (约 1 厘米/秒) 在电极下 1 至 3 毫米处平行掠过, 圆板表面就均匀带电。喷电时在圆板背面放置比圆板面积略小的接地金属板, 喷电完毕后移去金属板, 这可使喷电量提高五至六倍以上。圆板中心对地电位可达 40 千伏以上。喷电后的 Lichtenberg 图形表明, 带电是均匀的。本文的讨论中对均匀性作了定量的验证。

用半径为 5 毫米的金属小球, 对准并移近带电 PVC 圆板中心直至放电。小球经导线接入长余辉示波器以显示放电。示波器输入端对地接入 0.25 微法的电容, 以保证小球在放电过程中始终处于接地状态。

#### 4. 静电电荷测量

绝缘板上放电前后静电电荷测量采用法拉第笼法, 法拉第笼的内外圆筒间用聚四氟乙烯绝缘。当把绝缘板丢入法拉第笼后, 此时绝缘板上的静电电量  $Q$  可用下式表示:

$$Q = CV.$$

内外筒间电容  $C$  可用万能电桥测定, 内筒对地电位  $V$  用振簧式静电计测量, 实验证明此法的重复性很好。

#### 5. 放电区域的显示——Lichtenberg 图形法

将黄色硫磺粉通一网眼为 76 微米的尼龙筛网, 硫磺粉因与尼龙丝摩擦而带电, 当带电硫磺落到带电绝缘体表面时, 由于异号电荷相吸, 同号电荷相斥, 所以在绝缘板上立即可显示出圆形放电区域, 这就是 Lichtenberg 图形。显示放电图形的目的是测量放电区域的半径, 用此法也可以显示喷电后带电的均匀性。

#### 6. 消电装置

圆板在喷电前应先消除残余电荷, 否则会影响均匀性。用 10 千伏交流高压消电装置 (JJS-A 型晶体管静电消电器) 进行消电。当圆板表面具有几万伏静电电位时, 消电后残余电位小于 50 伏。

总之,测试系统由下列七部分组成(见图4): (1) 环境湿度控制装置: 密封玻璃操作箱,全部操作在箱内进行; (2) 喷电装置; (3) 0—30 千伏振簧式静电电位计用来测量放电前后的静电电位; (4) 放电系统: 由半径为 5 毫米的金属小球,小球升降读数系统(小球球心至圆板中心距离由标尺读出)及 SB-14 型慢扫描示波器组成; (5) 电量测量系统: 振簧式静电电位计及法拉第笼( $C = 92.0$  微微法); (6) Lichtenberg 图形显示装置(在箱内,未画出); (7) 消电装置,其输出高压接入喷电电极时可以消电。

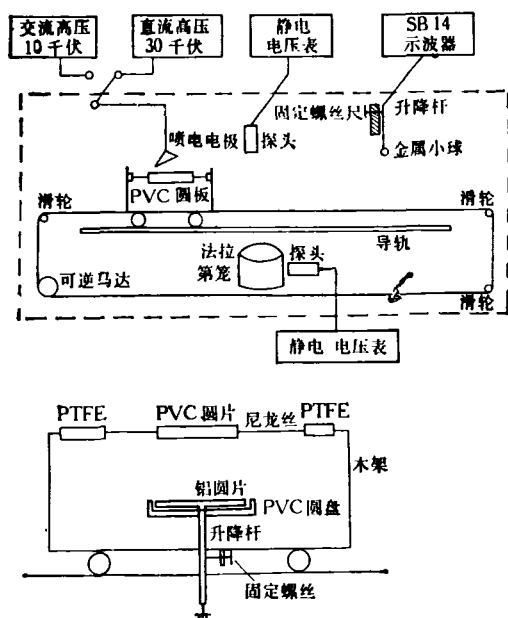


图 4  
(a) 测试系统; (b) 小车放大图

#### 四、测量过程

PVC 圆板半径  $R = 5$  厘米,厚 2 毫米,清洁处理后放入玻璃操作箱中,消电后喷电,再用振簧式静电计测圆板中心附近的平均对地电位  $V_0$  (以后简称圆板电位),然后将圆板中心对准金属小球放电,放电后由标尺读出圆板表面至金属小球球心的放电距离  $h$ ,再将圆板丢入法拉第笼内,测得放电后之剩余电量  $Q'$ 。至于放

电前圆板上所喷的静电电量  $Q$  以及放电区域半径  $R'$  的测量采用间接测量法,亦即事先作出喷电后圆板电位  $V_0$  对圆板静电电量  $Q$  的关系曲线以及  $V_0$  对放电区域半径  $R$  的关系曲线。对  $Q$  及  $R'$  采取的间接测量法是可靠的。例如,表 1 列出在不同时间、温度等条件下,对同一材质完全独立测量的三组数据,数据表明在  $V_0$  接近时,相应的  $Q, Q'$  及  $R'$  是接近的,表现出较好的重现性。

表 1  $Q, Q'$  及  $R'$  的重现性

$V_0$ (千伏)	$Q(10^{-7}$ 库仑)	$Q'(10^{-8}$ 库仑)	$R'$ (厘米)
-23.1	-0.78	-6.02	2.15
-23.4	-0.86	-5.89	2.29
-23.6	-0.93	-5.50	2.10

#### 五、测量数据与结果

1978 年 2 月至 8 月进行了三组测量,第二组是重复第一组的,目的是观察测量的重现性,第三组除低电位外着重高电位的数据。三组测量均独立进行,每次相隔二三个月以上,得到的静电火花能量数值重现性较好,基本在同一光滑曲线上。三组测量数据列表如下:

表 2\*

$V_0$ (千伏)	$Q(10^{-7}$ 库仑)	$h$ (厘米)	$Q'(10^{-8}$ 库仑)	$R'$ (厘米)
-39.8	-1.36	4.60	-9.64	2.85
-39.4	-1.34	4.55	-9.45	2.80
-35.6	-1.22	4.10	-9.64	2.55
-28.6	-0.97	2.90	-7.56	2.30
-23.1	-0.78	2.05	-6.02	2.15
-19.8	-0.67	1.30	-4.30	2.00
-15.9	-0.53	0.90	-2.92	1.60
-12.1	-0.41	0.80	-2.54	1.25

\* 时间: 1978 年 3 月 7 日; 温度:  $12.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$ ; 相对湿度  $33 \pm 1\%$ 。

表 3\*

$V_0$ (千伏)	$Q$ ( $10^{-6}$ 库仑)	$h$ (厘米)	$Q'$ ( $10^{-8}$ 库仑)	$R'$ (厘米)
-31.6	-11.5	2.50	-8.75	3.0
-29.4	-10.9	2.55	-7.82	2.7
-25.2	-9.25	1.80	-6.54	2.3
-23.4	-8.65	1.45	-5.89	2.2
-19.0	-7.05	0.95	-5.43	2.0
-18.1	-6.75	0.95	-5.06	2.0
-18.0	-6.70	0.95	-5.06	2.0
-16.8	-6.25	0.80	-4.60	2.0
-15.0	-5.60	0.70	-3.96	1.9
-14.5	-5.40	0.70	-3.86	1.9
-12.2	-4.55	0.60	-3.50	1.9

\* 时间: 1978年4月26日; 温度:  $20.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$ ; 相对湿度  $35 \pm 1\%$ .

表 4\*

$V_0$ (千伏)	$Q$ ( $10^{-7}$ 库仑)	$h$ (厘米)	$Q'$ ( $10^{-7}$ 库仑)	$R'$ (厘米)
-41.6	-1.63	5.0	-1.16	3.1
-38.0	-1.49	4.8	-1.09	2.7
-36.0	-1.41	4.5	-1.01	2.6
-30.4	-1.20	3.8	-0.91	2.3
-23.6	-0.93	2.8	-0.55	2.1

\* 时间: 1978年7月3日; 温度:  $30.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$ ; 相对湿度:  $26 \pm 1\%$ .

表 5

$V_0$ (千伏)	$\sigma$ ( $10^{-3}$ 库仑/米 <sup>2</sup> )	$\Delta W$ (毫焦耳)
-39.8	-1.73	1.31
-39.4	-1.71	1.29
-35.6	-1.55	0.84
-28.6	-1.23	0.53
-23.1	-0.99	0.32
-19.8	-0.85	0.24
-15.9	-0.67	0.095
-12.1	-0.52	0.045

表中  $V_0$  为放电前圆板中心附近的平均电位值,  $Q$  为放电前圆板静电电量,  $h$  为放电时小球中心到圆板表面中心的距离,  $Q'$  为放电后圆板静电电量,  $R'$  为放电区域的圆半径.

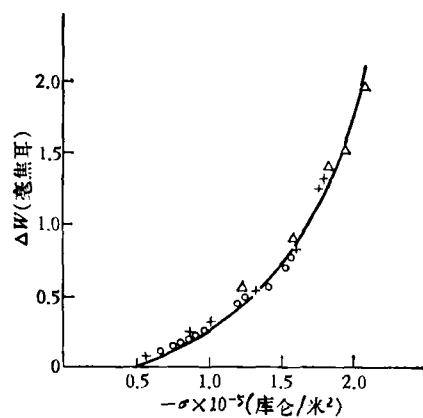
经计算得到实验结果如表 5—7.

表 6

$V_0$ (千伏)	$\sigma$ ( $10^{-3}$ 库仑/米 <sup>2</sup> )	$\Delta W$ (毫焦耳)
-31.6	-1.47	0.81
-29.4	-1.39	0.64
-25.2	-1.18	0.52
-23.4	-1.10	0.45
-19.0	-0.90	0.21
-18.1	-0.86	0.21
-18.0	-0.85	0.20
-16.8	-0.80	0.18
-15.0	-0.71	0.14
-14.5	-0.69	0.13
-12.2	-0.58	0.08

表 7

$V_0$ (千伏)	$\sigma$ ( $10^{-3}$ 库仑/米 <sup>2</sup> )	$\Delta W$ (毫焦耳)
-41.6	-2.08	1.98
-38.0	-1.90	1.53
-36.0	-1.79	1.40
-30.4	-1.53	0.89
-23.6	-1.18	0.56

图 5  $\sigma$  与  $\Delta W$  关系曲线 (见表 8)

上述三组测量结果我们以  $\sigma$  对  $\Delta W$  作曲线可得聚氯乙烯圆板面电荷密度与放电能量关系曲线(图 5)。

表 8

符号	日期	温度(°C)	相对湿度	圆板半径(厘米)	小球半径(厘米)
+	1978.3.7	12.5	33%	5	0.5
○	1978.4.26	20.0	35%	5	0.5
△	1978.7.3	30.5	26%	5	0.5
$\Delta W$	静电火花放电能量				
$\sigma$	圆板电荷面密度				

## 六、与 O. Fredholm 等人的实验结果比较

瑞典学者 O. Fredholm 与 K. G. Lostrand 于 1972 年在 *J. Phys. E* 上发表了“论绝缘体表面静电放电”一文(见图 6)。其测量装置如图 6 所示,整个实验在半径为 0.25 米的金属球壳内进行,用场强计测球壳边缘处的场强  $E$ ,通过

$$Q = E \cdot 4\pi\epsilon_0 R^2 / \left( 6 - \frac{2(R^2 + 3a^2)}{a\sqrt{a^2 + R^2}} \right)$$

计算绝缘板上的静电电量  $Q$ 。放电电能由放电前后圆板静电能量之差确定。在计算中假定圆板上的静电电荷在放电前后都是均匀分布在表

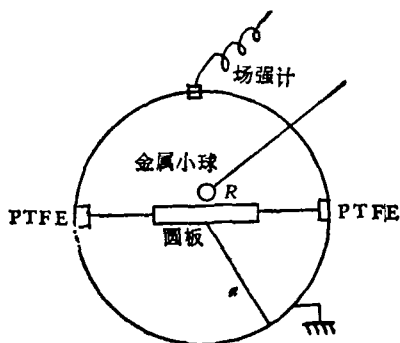


图 6 O. Fredholm 等的测量装置

面上(实际上,放电后不再均匀,对此我们作了修正)。其实验温度为  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ,相对湿度  $33 \pm 8\%$ ,聚氯乙烯圆板半径  $R = 5$  厘米,放电金属球半径  $b = 0.75$  厘米。

表 9 本文结果与 O. Fredholm 等人结果比较

$\sigma$ ( $10^{-5}$ 库仑/米 <sup>2</sup> )	$\Delta W$ (毫焦耳)	$\Delta W$ O. Fredholm (毫焦耳)
-2.08	1.98	1.75
-1.90	1.53	1.35
-1.79	1.40	1.18
-1.71	1.29	1.12
-1.55	0.84	0.80
-1.39	0.64	0.58

## 七、讨 论

1. 本文计算建立在下述条件下:

(1) 放电前聚氯乙烯圆板面电荷密度  $\sigma$  是均匀的。

(2) 放电后在放电区域内的剩余面电荷密度  $\sigma'$  也是均匀的。

为了检验放电前电荷分布的均匀性,试作如下分析:

绝缘圆板中心电位值  $V_0$  与均匀带圆板的总电量  $Q$  满足

$$V_0 = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 R}$$

其中  $R$  为圆板半径。将静电计测得的  $V_0$  值代入以估算总电量  $Q$ 。将此值与用法拉第笼法的实测值比较,发现二者基本吻合,这证明喷在绝缘板上的电荷基本均匀。例如:若  $R = 5$  厘米,  $V_0 = 30$  千伏,得  $Q = 8.4 \times 10^{-8}$  库仑。用法拉第笼实验测得  $C = 92$  微微法,  $V = 1100$  伏,  $\therefore Q = 92 \times 10^{-12} \times 1100 = 1.0 \times 10^{-7}$  库仑。两者相差  $\sim 16\%$ ,这个差别是由于测得的  $V_0$  是中心附近的平均值,比真正中心点电位低,因此计算的  $Q$  偏低。用 Lichtenberg 图形显示也说明绝缘板上电荷分布基本均匀。

2. 对一定的电荷密度, 放电电量和放电区域的大小有涨落, 尤其是聚氯乙烯圆板的清洁度对此有一定的影响, 因此放电区域(近似为圆形)半径  $R'$  最好每次都实测, 而我们是从小  $V_0-R'$  曲线上求得的, 但从各组结果的重现性来看仍是可靠的。

3. 对同一面电荷密度, O. Fredholm 等人的结果比我们的结果约低 10% 左右(见对照表), 这主要是因为 (1) 他们的实验装置放在接地金属球内进行, 这降低了圆板上的电位, 因此放电能量偏低。他们的放电距离比我们的小就说明了这点。(2) 他们忽略了局域放电, 也造成结果偏低。其次他们的金属小球半径稍大, 也会影响放电能量, 但这不是主要的。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] B. Lewis and G. Von Elbe, 1961 *Combustion, Flames and Explosions of Gases* (New York and London: Academic Press).
- [ 2 ] N. Gibson and F. C. Lloyd, *Br. J. Appl. Phys.*, **16**(1965), 1619—1629.
- [ 3 ] E. Heidelberg, 1967 *Static Electrification*, (Inst. Phys. Conf. Ser. 4), 147—155.
- [ 4 ] H. Bertoin, *Inst. Phys. Conf. Ser. No. 27*(1975), 290—300.
- [ 5 ] O. Fredholm and K. G. Lövstrand, *J. Phys. E*, **5**(1972), 1058—1062.
- [ 6 ] H. H. Hull, *Br. J. Appl. Phys.*, **20**(1949), 1157—1159.
- [ 7 ] E. Durand, *Electrostatique et Magnétostatique*.
- [ 8 ] G. W. Brundrett, *J. Electrostatics*, **2**(1977), 310.
- [ 9 ] W. R. Harper, 1967 *Contact and Frictional Electrification* (London: Oxford University Press), 14; 76—86.

(上接第 575 页)

- 37(1962), 729.
- [ 7 ] W. A. Harrison, *Surface Science*, **55**(1976), 1.
- [ 8 ] D. J. Chadi, R. S. Bauer, R. H. Williams, G. V. Hansson, R. Z. Bachrach and J. C. Mikkelsen, Jr. F. Houzay G. M. Guichar, R. Pinchaux and Y. Pétrouff, *Phys. Rev. Lett.*, **44**(1980), 799.
- [ 9 ] J. Clabes and M. Henzler, *Phys. Rev. B*, **21**(1980), 625.
- [ 10 ] K. C. Pandey, *IBM J. Res. and Develop.*, **22**(1978), 250.
- [ 11 ] G. V. Hansson, R. Z. Bachrach, R. S. Bauer and P. Chiradia, Proc. 15th Int. Conf. Physics of Semiconductors, Kyoto, 1980; *J. Phys. Soc. Japan*, **49**(1980), Suppl. A, 1043.
- [ 12 ] D. J. Chadi, *Phys. Rev. Lett.*, **43**(1979), 43.
- [ 13 ] D. J. Chadi, *Phys. Rev. B*, **18**(1978), 1800.
- [ 14 ] W. E. Spicer, P. W. Chye, P. R. Skeath, C. Y. Su and J. Lindau, *J. Vac. Sci. Technol.*, **16**(1979), 1422.
- [ 15 ] J. Bardeen, *Phys. Rev.*, **71**(1947), 717.
- [ 16 ] S. Kurtin, T. C. McGill and C. A. Mead, *Phys. Rev. Lett.*, **22**(1969), 1433.
- [ 17 ] M. Nishida, Proc. 15th Int. Conf. Physics of Semiconductors, Kyoto, 1980; *J. Phys. Soc. Japan*, **49**(1980), Suppl. A, 1093.
- [ 18 ] C. M. Garner, Ph. D. dissertation, Stanford University, (1978).
- [ 19 ] R. Z. Bachrach and R. S. Bauer, *J. Vac. Sci. Technol.*, **16**(1979), 1149.
- [ 20 ] L. J. Brillson, *Vac. Sci. Technol.*, **16**(1979), 1137.
- [ 21 ] J. R. Chelikowsky, Abstracts of the Eighth Annual Conference on the Physics of Compound Semiconductor Interfaces.
- [ 22 ] A. Y. Cho, *J. Vac. Sci. Technol.*, **16**(1979), 275.
- [ 23 ] L. L. Chang, Proc. 15th Int. Conf. Physics of Semiconductors, Kyoto, 1980; *J. Phys. Soc. Japan*, **49**(1980), Suppl. A, 997.
- [ 24 ] H. L. Stoïmer, Proc. 15th Int. Conf. Physics of Semiconductors, Kyoto, 1980; *J. Phys. Soc. Japan*, **49**(1980), Suppl. A, 1013.
- [ 25 ] L. J. Brillson, Proc. 15th Int. Conf. Physics of Semiconductors, Kyoto, 1980; *J. Phys. Soc. Japan*, **49**(1980), Suppl. A, 1089.
- [ 26 ] Y. Uemura, Proc. 15th Int. Conf. Physics of Semiconductors, Kyoto, 1980; *J. Phys. Soc. Japan*, **49**(1980), Suppl. A, 1309.