

# 微波量子物理学

任之恭 著

科学出版社

1980

## 内 容 简 介

本书是根据任之恭教授回国所作的学术报告的讲稿整理而成。书中综述了电子、原子、分子、原子核和固体以及生物分子和天文系统内的微波量子效应和激发现象，强调了微波量子物理学在近代科学研究和技术应用中的重要作用。

本书可供从事波谱学、磁共振、固体物理学、射电天文学和生物物理学方面的研究工作者和高等院校有关专业的师生参考。

## 微波量子物理学

任之恭 著

\*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1980年11月第一版 开本：787×1092 1/32

1980年11月第一次印刷 印张：6 5/8

印数：0001—7,250 字数：145,000

统一书号：13031·1284

本社书号：1784·13—3

定价：1.05 元

# 目 录

## 前言

第一章 静电的产生 .....	1
§ 1 电荷与电场 .....	1
§ 2 静电现象及产生静电的原因 .....	4
§ 3 静电放电的类型 .....	15
第二章 静电的测量方法和测量仪器 .....	19
§ 1 静电电位的测量 .....	20
§ 2 静电电量的测量 .....	28
§ 3 绝缘电阻的测量 .....	34
§ 4 静电电容和介电常数的测量 .....	41
§ 5 静电测量举例 .....	45
§ 6 静电测量仪器 .....	61
§ 7 振簧式静电计 .....	70
第三章 静电学实验 .....	81
§ 1 用放电法测量绝缘电阻 .....	81
§ 2 绝缘体表面静电电量的测量 .....	91
§ 3 绝缘体放电电量的测量 .....	100
§ 4 绝缘体放电火花能量的测量 .....	104
§ 5 库仑定律比例系数的测定 .....	114
§ 6 绝缘体表面静电放电的研究 .....	120
§ 7 演示库仑定律的一个简单实验 .....	126
§ 8 绝缘体放电时间常数的测量 .....	131
第四章 静电的危害及消除 .....	135
§ 1 静电的危害 .....	135
§ 2 消除静电危害的措施 .....	145

# 第一章 静电的产生

## §1 电荷与电场

### 一、电荷。库仑定律

人们在生产实践中很早就发现了摩擦起电的现象。物体经过摩擦后带上了电,因而具有吸引轻小物体的本领,这种物体称为“带电体”或者“带上电荷的物体”。后来人们又发现在带电体上存在着两种不同的电荷:一种称为正电荷,另一种称为负电荷,同号电荷之间有相斥作用,异号电荷之间有相吸作用。

在一般情况下,两个任意形状带电体之间的相互作用是很复杂的,所以在实验中最先测量的是两个点电荷之间的相互作用力。测量结果如下:

在真空中,两个静止点电荷之间的作用力  $F$  (称为库仑力) 正比于它们电量  $Q_1$  和  $Q_2$  的乘积,反比于它们之间距离  $r$  的平方。力的方向沿着电荷的连线,电荷同号时为斥力,异号时为引力,如果用公式表示可写为

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \cdot \boldsymbol{r}^0, \quad (1-1)$$

式中  $\boldsymbol{r}^0$  表示从  $Q_1$  指向  $Q_2$  的单位方向矢量,  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$  是比例常数,当  $Q_1$ 、 $Q_2$  的单位取库仑,  $r$  的单位取米,  $F$  的单位取牛顿时,则  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9.0 \times 10^9$  (牛顿  $\times$  米<sup>2</sup>/库仑<sup>2</sup>)。通过这个实验得出的结果就是通常所说的库仑定律。

## 二、电场

电荷之间的相互作用是通过电场来传递的，电荷周围总有电场存在；同时电场对场中其它电荷发生力的作用。当电荷静止不动时，所激发的电场叫做静电场。为了定量描述电荷周围空间中各点电场的强弱，我们引进一个物理量——电场强度  $\mathbf{E}$ 。电场强度的定义是单位正电荷在电场中某一点所受的作用力，即

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0}, \quad (1-2)$$

式中  $q_0$  是探测电场的试探电荷， $\mathbf{F}$  是作用在试探电荷上的力。由于力是一个矢量，因此电场强度也是一个矢量。

由库仑定律和电场强度定义可以很方便地求出在点电荷周围电场中的电场强度为

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{r}^0, \quad (1-3)$$

即在点电荷的电场中与点电荷相距为  $r$  一点的电场强度  $\mathbf{E}$  与点电荷所带电量  $Q$  成正比，与该点和点电荷之间的距离平方成反比，方向沿着两点电荷之间的连线。如果  $Q$  是负电荷，则电场强度指向负电荷。如果  $Q$  是正电荷，则电场强度与上述方向相反。因此可以通过测量电场强度  $\mathbf{E}$  来了解电场的性质。

当空间有许多点电荷  $q_1, q_2, \dots, q_n$  时，实验表明，它们所产生的电场可以同时存在于一个空间内，组成一个合电场，而合电场的电场强度  $\mathbf{E}$  等于各点电荷所产生的电场强度之和：

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \dots + \mathbf{E}_n = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} \mathbf{r}_i^0, \quad (1-4)$$

这里的  $r_i$  是观察点与第  $i$  个点电荷之间的距离。等式(1-4)

就是“场的迭加原理”。任何带电体或电荷系统都可以看成是由许多个很小的“电荷元”所组成，每个电荷元相当于一个点电荷。因此利用(1-3)，(1-4)两式原则上可以求出一个已知的带电体所产生的电场中各点的电场强度。

电场强度的单位是牛顿/库仑或伏/米。

这里必须说明的是实际带电体产生的电场强度通常都比较复杂，直接测量电场强度的方法至今还不够成熟。

### 三、电位。电位差

除了电场强度  $E$  外，还可以引进另一个物理量——电位  $V$  来描写静电场。静电场中某点的电位等于单位正电荷在该点时具有的势能。理论上常把无限远处作为电位零点。实际上则常取地球表面为电位零点，因此某点的电位数值也等于单位正电荷从该点移到无限远处(或地面)时电场对它所作的功。这个功与所经路径无关，所以电场中各点的电位各有一定数值，其实用单位为伏。

电位差是静电场中两点间电位的差值。数值上等于单位正电荷在这二点间移动时电场力所作的功：

$$V_a - V_b = \frac{A_{a \rightarrow b}}{q_0} = \int_a^b \mathbf{E} d\mathbf{l}。 \quad (1-5)$$

如果选定电场中某一点，例如  $b$  点为电位的零点，即  $V_b = 0$ ，则其它各点的电位即为将单位正电荷从该点移到电位为零点的过程中电场力所作的功

$$V_a = \int_a^b \mathbf{E} d\mathbf{l} \quad (V_b = 0)。 \quad (1-6)$$

在实际工作中往往选定大地为电位的零点(即电位为零)，这是由于地球作为一个导体，它的电位比较稳定，而且在各处都可以很方便地与它进行比较，以决定各个带电体

的电位。

在均匀电场中(例如平板电容器),上面二式表示的电位与场强间的关系就变得特别简单,由(1-5)式可得两块平行板之间的电位差为

$$V_a - V_b = \int_a^b \mathbf{E} d\mathbf{l} = E \int_a^b dl = Ed,$$

这里  $d$  是两平行板之间的距离,因此得

$$E = \frac{V_a - V_b}{d}, \quad (1-7)$$

即电场强度等于单位距离上的电位差。知道场中各点的场强  $\mathbf{E}$ , 就可以求出各处的电位;反之,了解场中各点的电位,就可以求出各点的场强。前面已经说过,场强  $\mathbf{E}$  是一个矢量,实际测量比电位复杂,因此,在静电场中往往采用“电位”作为描写场的物理量。在静电测量中,电位差的测量也比电场强度的测量成熟。

## § 2 静电现象及产生静电的原因

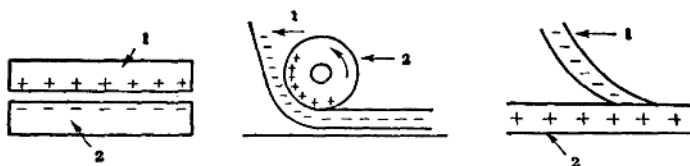
### 一、静电现象和物质的结构

前面已经谈到,两种物质发生摩擦时可以使它们都带上电,称为静电。为什么物体摩擦后带有电荷?这些电荷是从哪里来的?这不能不涉及到物质的内部结构。一切宏观物体(固体、液体和气体)都是由分子组成的。分子由更小的原子构成。原子内部有一个带正电的原子核,周围是一些带负电的电子围绕着原子核运动。通常,原子核所带的电量和它周围的电子所带的电量总是相等的,原子作为一个整体呈电中性,由原子组成的物体当然也显示出带电的性质。但是当

两个物体相互摩擦或者接触时,其中一个物体失去一些电子,另一个物体则获得一些电子。例如用丝绸摩擦玻璃棒时,在一般情况下,玻璃棒就失去一些电子,丝绸则获得一些电子。这样就破坏了原来两个物体的电中性。当两个物体分开后,失去电子的物体,其体内的正电荷总数多于负电荷,表现为带正电;而获得电子的物体正相反,体内的负电荷总数多于正电荷,表现为带负电。所以从物质的电结构来看,无论用摩擦起电,还是用其他方法来使物体带电的过程,都只不过是使物体中原有的正负电荷分离和转移的过程而已。但是由于物质的种类不同,它们带电的极性和带电量的大小是不同的,而且又和温度、湿度、有无杂质、摩擦力大小、物体的电阻率、泄漏电阻等一系列条件有关。总之静电现象较为复杂,需要考虑的因素很多,必须视具体情况作具体分析。

## 二、固体的起电

1. 固体的接触带电现象:图 1-1 列举一些固体的接触摩擦带电的类型。(a) 表示两种不同金属接触后发生电荷分离的过程,结果一方失去电子而带正电,另一方获得电子而带负电。(b) 为金属与绝缘体之间摩擦带电的情况。(c) 为由于展开剥离而产生的带电,它也是由于接触后发生电荷的转移所



(a) 金属接触带电

(b) 接触摩擦带电

(c) 展开剥离带电

1—金属 A; 2—金属 B

1—绝缘物; 2—金属滚筒

1—绝缘物 A; 2—绝缘物 B

图 1-1 固体的接触摩擦带电



致。在干燥的地方或干燥季节里，积聚在绝缘体上的静电荷可以形成很高的对地电位，一般在几千伏至几万伏，而表面电阻很高的绝缘物有时甚至可达四至五万伏。

2. 金属的静电感应：图 1-2 表示静电感应带电现象。导体 2 原来不带电。当它接近带电体 1 时，在靠近 1 的表面感应带负电，远离 1 的表面感应带正电，如果用手靠近导体 2 时，

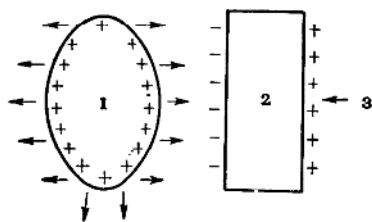


图 1-2 静电感应带电

1—带电体；2—绝缘导体；3—表面感应电荷

就可能引起放电而产生电击。

3. 固体的带电原理：如前所述，两个固体接触摩擦后，发生电子的转移，从而使两者带等量异号的静电荷，但是带电量的多少，电荷的符号等是如何决定的，它们与两个固体的

性质与外界条件有什么联系，对这些问题的研究是固体带电原理的内容。虽然影响带电的因素很复杂，有关的理论很不完整，但是对金属来说却很成功，也比较简单，因此下面首先从金属谈起。

### (1) 金属的功函数(或逸出功)

金属的原子结合在一起形成金属盐的时候，每个原子都释放掉它们最外层的电子(称为价电子)，成为正离子。这些正离子结合在一起，成为固体，而价电子就在整块固体内自由运动，称为自由电子。自由电子因受正离子的吸引，不能飞出体外。要将自由电子从金属内部移到外面，需要对电子做功，或者从外部供给它能量，如加热、光照等。一个电子从金属表面逸出时所需要的功叫做金属的功函数或逸出功。各种不同的

金属功函数是不一样的,但它们的数值都在几个电子伏左右,例如钨为 4.5 电子伏,镍为 4.3 电子伏。

## (2) 金属的接触电位差

原来不带电的两种金属互相接触时会分别带上正负电荷,产生接触电位差  $V_{AB}$ ,如图 1-3 所示。它的数值与两种金属的性质及接触面的温度有关,而与接触面的大小及接触时间的久暂无关。实验结果发现接触电位差  $V_{AB}$  大约在十分之几伏到一伏左右,并且各种不同金属可以排成一个序列: 锌、锡、铝、铜、银、金、铂、钯……等。

当序列中的任意两种金属接触时,前者带正电,后者带负电。

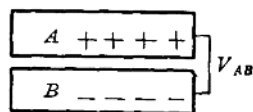


图 1-3 接触电位差

用功函数的概念很容易解释并计算接触电位差以及金属接触

带电的问题。显然,功函数较大的金属,其自由电子的移出较难,功函数较小的金属则较容易。不同金属接触后,平均说来,功函数小的金属将失去电子,功函数大的金属将获得电子,因此前者带正电,后者带负电。金属按功函数由大至小排列得到的系列与静电系列基本一致,这就解释了金属之间接触带电的符号问题。根据计算,金属的接触电位差与功函数之差成正比,这是与实验相一致的。

## (3) 金属与高绝缘物或高绝缘物之间的接触

金属与高绝缘物或高绝缘物之间的接触或摩擦起电的问题较为复杂,因为绝缘物与金属不同,不存在自由电子。但近年来由于表面物理学的发展,有人提出由于化学成份的不纯,以及氧化和吸附分子引起表面缺陷等因素,实际的高聚物绝缘体的表面状态和其内部不一样,象一片薄的金属片,因此,高聚物绝缘体具有不同的有效功函数,如表 1-1 所示。因此,

金属与高聚物绝缘体或高聚物绝缘体之间的接触带电仍可用功函数来解释。实验观察到某一高聚物绝缘体与一系列不同金属接触时的带电量大体上与金属的功函数成正比，但是关于绝缘体表面状态的理论在实验上尚未完全确立，把有效功函数应用到绝缘体的摩擦带电方面经常得不到预期的结果。

表 1-1 高聚物的有效功函数①

材料名称	尼 龙 6 6	苯 乙 烯	氯 乙 烯	聚四氟乙烯
功函数值(电子伏)	4.30~4.54	4.90	5.13	5.75

4. 影响带电的因素：影响带电的因素很复杂，但主要有以下几点：

(1) 湿度：相对湿度(RH)超过 60% 时，绝缘体表面会因吸附空气中的水份而形成水膜。由于空气中的碳酸气或物体析出的电解质被水膜溶解并电离，因此使绝缘体的表面电阻大为下降而成为能导电的材质，这样静电荷就不能积累。对人体来讲，相对湿度在 30~50% 时，带电可以很多，但在 70% 以上时几乎就不带电了。

(2) 电阻率：若绝缘体的体电阻率小于  $10^{10}$  欧·厘米，表面电阻率小于  $10^9$  欧时，则一般情况下就不会积累静电荷。

(3) 表面状态：接触带电主要是表面效应，因此表面污染、酸化、氧化吸附等对带电的影响都很大。例如煤的表面氧化程度不同，接触带电的符号会改变，在煤与金属接触的情况下，新表面的煤带正电，而长期暴露在空气中强烈氧化的煤则带负电。在工业中可利用这一点作为检验煤氧化的程度。

表面吸附氧或水后，会改变材质的带电符号，水可使功函

① 见“工业火药”Vol. 26, No. 4, 228 (1965)。

数减小,而氧可使功函数增大。

白金和聚苯乙烯接触带电的符号,在干燥空气中与湿润空气中相反,这是由于上述作用使有效功函数的相对大小倒过来的缘故。

此外,如温度、压力、接触时间等均能影响物体带电。

5. 电荷的泄漏: 在摩擦起电的同时,电荷也在通过各种途径泄漏,因此带电量不会无限制增长,而有一个饱和值。绝缘体表面上产生的电荷由以下三条路径泄漏: ① 通过空气(雾气)消失。② 沿表面消失。③ 通过绝缘体的体内消失。在实际问题中往往是各种路径的组合,情况较为复杂。首先,通过空气而消失的情况,主要是由于空气中存在离子和电子等的带电粒子飞来以及带电体电荷复合或空气中因为放电而发生大量带电粒子和绝缘体上的带电电荷中和而产生。作为沿表面消失的主要原因在上面已叙述过了。作为通过绝缘体内部而消失的情况是由于固体中离子的移动或固体绝缘的破坏而产生。

上面简单地介绍了固体带电原理的理论,大体上能解释固体的接触带电。此外,还可应用其它理论,如带电载流子和离子接触理论。该理论认为在适当的相对湿度,例如50%时绝缘体表面吸附水分子形成水膜,水膜中有大量带电载流子(或离子)在界面移动(如扩散等)。

### 三、液体的起电

1. 液体的带电现象: 液体由于机械运动而带电的现象很多,但大体上可分为两类: 气体与液体间和固体与液体间产生的静电现象。前者如雾状水滴(云)与空气摩擦而带电,雷电的成因就是带电云的放电。后者是由于固体表面与液体表面的相对运动使液体带电。图1-4表示各种液体带电的类型。

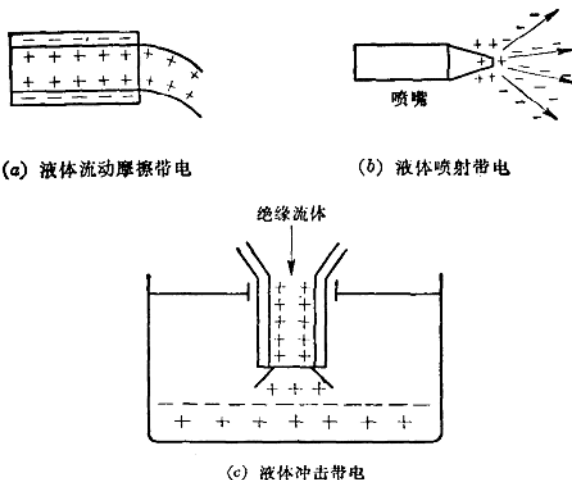


图 1-4 液体运动带电现象

(a)表示绝缘流体流出管口时可将分离的电荷带入贮油罐而产生带电的现象。(b)表示液体从喷嘴高速喷出后成为雾状液滴而产生带电的现象,喷嘴带有相反符号的静电。(c)表示液体对液面的冲击,而使液体产生带电的现象。

2. 液体的带电原理:上面列举了液体流动带电的例子,那么液体在流动或喷射时为什么会带电呢?因为在液体与固体(或气体,或其它液体)的分界面上存在双电荷层(或称电偶层)。双电荷层的结构十分复杂,但可简单地看作为一种带有

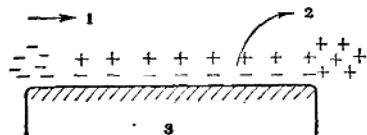


图 1-5 液体的流动带电

符号的电荷束缚在液面上,而在距离液面极近的液体内部有一层符号相反的自由电荷,两层电荷排列在一起,如图 1-5 所示。图中表明液

体在固体上流动时产生的电荷情况, 1 为液体流动的方向, 2 为液体与固体的界面的双电荷层, 3 为固体。

由于液体表面层的这种电特性, 当液体与固体(或气体)的分界面发生任何变化时, 就有可能把双电荷层上不同符号的电荷分离开, 从而使液体带上电荷。例如, 当液体在管中作片流流动时, 与管壁产生摩擦; 或者把液体喷成细雾时, 它的表面发生很大变化, 都会产生带电现象。

我们来分析图 1-5 的带电情况。当液体在固体上流动时, 液面的负电荷被固体吸附不易运动, 同时由于固体与液体间有摩擦力, 靠近固体的液面流动速度很慢, 离开表面的液体层流动较快, 因而这两部分液体间产生的相对运动将双电荷层中电荷分离, 如果液体的导电性很差, 当它从管中流出时, 就带上电荷, 结果使流至固体一端的液体带电。

电荷也可能在管子粗糙面上凸出的部分被分离开来。图 1-6 表示液体在固体表面上流动遇到凸出部分时电荷的变化情况。当液体在流动过程中遇到障碍物时, 双电荷层上的部分自由电荷就被堵住, 形成空间电荷。但是, 流过障碍物的液体又立即重新形成双电荷层, 并在不远处产生一带有相反符号的空间电荷, 这是由于凸出部分电荷被堵住后显得负电荷过剩而引起。

图 1-4(b) 的液体喷射带电, 就是因为液体喷射后形成细雾, 使液体与喷嘴的接触界面增加, 从而使界面处的双电荷层分离的电荷增加, 使液雾带电。



图 1-6 电荷在管子凸出部分被分离  
S—液体流动方向

产生双电荷层的原因主要是由于绝缘液体中含有杂质分

子,它们在液体内解离成正负离子,从而在液体表面形成双电荷层。纯度高的绝缘液体产生的静电并不多,例如高纯度汽油不易带电。在工业生产中或多或少都要混入一些杂质。

重油也不易积聚电荷,如柴油一般较少带电,因为它含的杂质太多,杂质离子有很多机会接近双电荷层,使电荷得到中和,以致双电荷层反而不易形成。

3. 水和油渗混时的带电:水和油的内部都含有少量杂质,它们会解离成带电的离子,因此在水和油的界面附近都有双电荷层存在。图1-7(a)表示水滴的双电荷层将油内的双电荷层的外层电荷紧密粘附。(b)表示水滴下降时将油中的双电荷层分离,使油体和水滴带上不同符号的电荷。

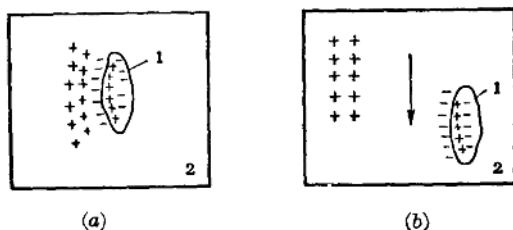


图1-7 水和油渗混时的带电

1—水滴; 2—油

这种情况常常发生在往贮油罐内注油时,而且即使停泵很久静电还能继续存在,因为停泵以后,分散的小水滴逐渐汇合成大水滴,通过油层向罐底沉降,沉降过程就是带电过程,因此应特别注意。

与以上类似,油体中气泡上升时,也能实现油体内双电荷层的电荷分离,从而使气油和油体都带上电,图1-4(c)的冲击带电主要因素就是液体向下冲击时,使液体中卷入无数气泡,这些气泡在液体中上升时,就产生电荷的分离而带电。因

此装油时要避免从上部流下的灌装方式，一般采用从油罐底部向上流的方式，这样可以避免液体产生飞沫而带电。

此外，两种不同的油体混合时，在其界面上也会因运动而使电荷分离，油体带电，在生产实践中已出现过这类静电放电引起爆炸的事例。

#### 4. 影响液体带电的因素

(1) 流速：流速越大，带电量也越大，一般管道产生的静电量与流速的 1.75 次方成比例。

(2) 管径和长度：静电与管道内径的 0.75 次方成正比，管道越长，静电量也越大，但不是正比关系，而接近于渐近值。

(3) 电阻率  $\rho$  的影响：一般应使  $\rho < 10^{10}$  欧·厘米，这样静电不易积聚。对高精度石油产品，若  $\rho > 10^{15}$  欧·厘米，则几乎不包含杂质离子，产生静电也很少； $\rho = 10^{12} \sim 10^{13}$  欧·厘米，则带电倾向最大。

(4) 空气的相对湿度越高，静电电荷的产生量越少。

5. 含有杂质时，静电电荷显著增加。但杂质太多时，静电电荷反而减少。

6. 对石油产品，温度越高，产生的电荷越多。但柴油的特性则相反，温度越高，产生的电荷反而低。

7. 管壁粗糙，流经的阀、弯头等越多，通过的过滤网越密，产生的静电荷也越多。

用帆布管、塑料管等绝缘性管道输送，比用金属管道产生的静电要多。

石油产品的装载方式也影响带电。当石油产品以 4.6 米/秒的流速从上部喷入油槽（箱）与从下部用通常的方法装入油槽（箱）时，产生静电量的比例约为 2:1。



8. 石油在金属管道中流动时会带上静电荷。石油的带电量可用下式表示:

$$Q = K\tau v^{1.75} \left(1 - e^{-\frac{L}{v \cdot \tau}}\right) \cdot t, \quad (1-8)$$

式中  $v$  为流速,  $L$  为管长,  $t$  为时间,  $\tau$  为油的时间常数(与  $\epsilon, \rho$  有关,  $\tau = \rho^{\epsilon}$ ),  $K$  为与管径和界面常数有关的常数。

当  $L$  很大时,  $Q$  与  $V^{1.75}$  成正比。

因此, 在油桶装油和放油的过程中, 为了减少静电积累, 控制流速是很重要的。

#### 四、气体的带电原理

当蒸汽迅速从液体蒸发或凝结成液体, 气体被迅速压缩或膨胀(气体压力迅速改变)时, 都有可能产生静电电荷。如图 1-8 所示, 当 5 大气压的蒸汽从直径 1.6 毫米的喷孔喷至 1

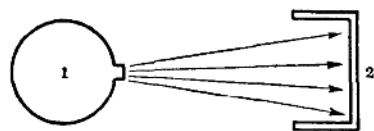


图 1 8 气体的喷射带电

1—5 大气压蒸汽; 2—电压 20 千伏的容器

米远处的容器中时, 5 分钟以后该容器的电压达 20 千伏, 充电电流为 4 微安。

含有水蒸气的高压空气很容易电离, 气流流出的喷口或孔眼假如与地绝缘, 则它具有某一符号的电荷, 与它接触而喷出的空气或气体就带有另一符号的电荷。

流动的气体带电是由于气体中含有固体的微粒, 或者气体中含有的液体带有杂质(或凝聚物微粒)而引起的。假使没有杂质, 则气体运动时就不会带电。在气体中含有液体成分(雾)时, 流动的气体是由于液滴互相接触和液滴分化而引起带电的。

纯氢在运动过程中不产生静电, 但通常气体或蒸汽是不