

# 防静电灾害学术讲座

## 技术资料汇编

上海市物理学会静电专业委员会

一九八四年三月

# 前 言

本汇编的日文资料来源,是由日本防静电专家田畠泰幸为在今年三月应本学会的邀请来沪讲学所提供。它包括静电基本理论、静电测量、静电灾害防护技术、静电灾害调查,以及静电灾害防治措施和法规等方面的内容。而在附录——静电参考资料中,则列举有各种液体和气体的物理常数等数据。

鉴于这些资料对于我国当前开展防静电灾害工作有一定参考和借鉴的价值,同时也有助于这次参加听讲学习的人员掌握讲学内容,特请上海市劳动保护科学研究所组织力量予以翻译、编辑和出版。由于时间仓促,水平有限,译文中错误和不当之处在所难免,望提出批评指正。

# 目 录

|                     |         |
|---------------------|---------|
| 1. 静电的灾障害           | ( 1 )   |
| 2. 静电灾害的防护          | ( 28 )  |
| 3. 静电灾害防护现状和展望      | ( 46 )  |
| 4. 粉尘带电灾害及其防护技术     | ( 52 )  |
| 5. 贮罐静电灾害的预防措施      | ( 65 )  |
| 6. 静电测定法            | ( 77 )  |
| 7. 带电绝缘体产生点火放电的最低电位 | ( 85 )  |
| 8. 制造业静电灾障害实际情况调查   | ( 93 )  |
| 9. 静电参考资料           | ( 114 ) |

# 静 电 的 灾 障 害

## 一、前 言

冬季的干燥季节，当一脱毛线衣时，便可听见“啪啪”响声；或在地毯上长时间行走后，伸手去摸金属门柄的时候，又会受到针刺一样的感觉而大吃一惊。这是人体产生的静电在作怪。这种物与物之间摩擦而产生的电，人们称之为“摩擦电”。

例如，18世纪初期，法国的斯坦蓬·古来用毛皮与玻璃棒，或用丝绸与硬橡胶棒相摩擦，以这种方法一旦产生静电，静电就能吸引麦杆、羽毛等轻物，或给人体以电击。这种现象引起了极大的兴趣，并做了种种实验进行尝试。由于这种静电主要靠摩擦产生，只能达到吸引轻物或给人以针刺一样电击的程度，因而没有把它作为能源加以利用。除一部分自然科学者外，平时看到上述这些现象而无动于衷的人也不在少数。

但是，随着石油化工的发展，塑料、化纤等有机高分子材料制成的产品相继问世，静电再一次引起各方面的重视。由于高分子是非常优良的绝缘体，容易产生大量的静电，并引起各种灾害，所以对于能量较小的静电，也是不可忽视的。

例如，在塑料薄膜、印刷作业；化纤、织物等制造作业，与滚筒摩擦所产生的静电，可达数十千伏，有时竟达100千伏。结果，操作者的手指因受到电击而感到麻木，产品也因吸附灰尘而黯然失色，

诸如此类的灾害，比以前发生得更频繁。而另一方面，利用静电吸引轻物的特性，又可使收集空中尘埃的空气净化机，以及吸附碳精粉而产生文字、图象的电子照相等各种静电应用产品得到开发。

这样，消除静电灾害，或者根据静电特性有效地进行应用等，也引起了广泛重视。现在静电已经在各个领域，从各个角度被提出来。其中特别是前者需要消除的静电，是引起灾害的原因，对此决不能掉以轻心，应采取相应措施。尤其在最近，不仅是生产现场，即使在我们日常生活中，由于家具、日用器具、衣服等产生静电而造成的灾害也时有发生。可见，现在对防静电措施是不可或缺的。

为此，这里就有关静电的基础以及防静电措施，概要地作些叙述，以供参考。特别是考虑静电防护措施的情况，对于理解静电的基本现象是很有必要的，所以对此重点进行解释，同时对近来静电的应用情况也作些介绍。

## 二、静电的产生和带电

公元前600年间，希腊哲学家塔来斯发现，只要物与物之间进行相互摩擦，就会产生静电。从此以后，许多科学家经过实验，终于明白静电是由于摩擦、接触等机械作用而产生的。即固体、液体或其他任何物体，经过摩擦、接触、剥离等机械能的作用而产生静电。我们按照物体相互

摩擦时产生静电的正负极性，将物体排成带电序列来表示其带电特性。

但是，摩擦和接触只是物体的表面现象。静电的产生随其表面状态的不同而发生变化，有时如果原来产生正静电的物体表面被污染，据说物体就会产生负电荷。产生的静电量或正极性或负极性，通常也随表面状态面变化。有关这一类静电的产生原理，要作定量说明是很困难的，而且在许多情况下也是毫无意义的。因而，有关静电的产生，仅作些定性的说明。

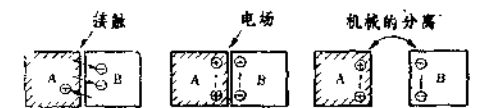
一般物体所具有的正负电荷是等量的，在电气方面呈中性。但是，呈中性的二个不同物体A、B一接触，如图1所示，其在接触界面上电荷就开始移动，形成一个物体正电荷过剩，而另一个物体则负电荷过剩（图1a）。这种状态仅存在于接触界面，而且只不过形成双电荷层，外部并不呈现静电现象（图1b）。但是，一旦在

其接触界面上施加任何机械作用，使这两个物体分离，则会在外部形成静电场，各个物体分别产生了静电（图1c）。

静电就是象上述那样，经过接触、电荷移动、双电荷层的形成、电荷分离的过程而产生的。而且只有经过这个基本过程，静电才得以产生。

举一些具体例子。如图2所示，用滚筒驱动纸张、薄膜等物体的过程；用管道输送液体、粉体等物体的过程；从喷嘴喷出涂料等物体的过程；剥离粘胶带的过程等等。

此外，还有其他的静电发生过程。如



a) 电荷的移动；b) 双电层的形成；c) 因电荷分离产生静电  
图1 因接触而产生静电

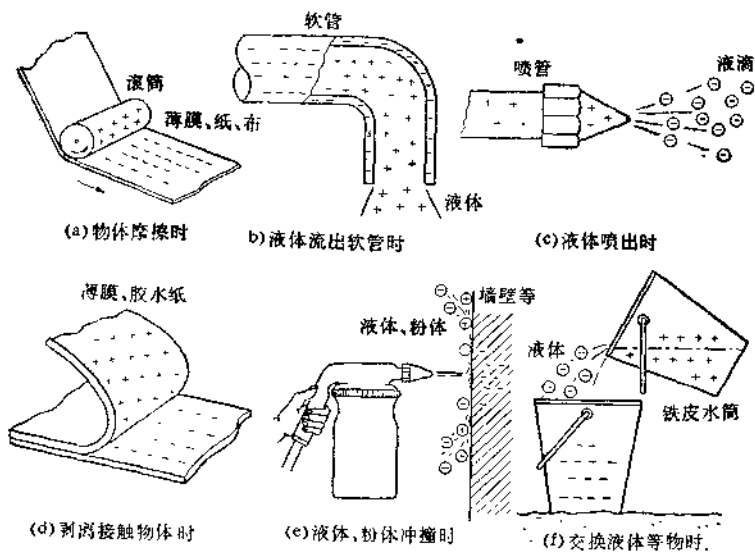
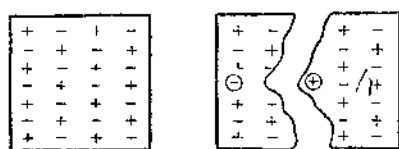


图 2 静电发生过程实例

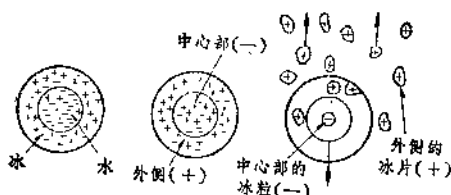
图3所示，原来呈中性的粉体类物质，当其破裂时；或当具有极性基的冰块破裂

时（如图4所示），即产生静电。  
如上面所述，除特殊情况外，静电在



a) 破坏前, b) 破坏后

图 3 因破裂而产生静电



a) 电荷因冻结而分离; b) 冻结完了的电荷分离; c) 冰的破裂而引起电荷分离

图 4 因冻结、破裂而产生静电

物体受到机械作用时产生。静电一产生，由于造成物体正电荷或负电荷过剩，就会给外部以电的作用。

另外，尽管物体产生静电，但一般来说，产生的静电不会全部储存于物体内，其中有一部分静电则会消失。我们把静电泄漏这一现象称之为静电缓和。由于发生静电泄漏，所以在静电产生 $t$ 秒后，物体内储存的静电量 $Q$ 应是：

$$Q = Q_0 \exp(-t/\tau) \quad (\text{库伦})$$

$$\tau = R_c = \epsilon_0 \epsilon_s \rho$$

这里，设 $Q_0$ 为所发生的静电量； $R$ 、 $\rho$ 为物体的电阻及电阻率； $c$ 、 $\epsilon_0$ 、 $\epsilon_s$ 分别为各种物体的静电容量、介电常数及真空介电常数。换句话说，用摩擦等方法使物体产生静电，其中一部分消失，而残留的静电即使储存于物体内，其储存量一般会随时间而减少。具有一定电阻或电阻率较大的物体，所产生的静电可以永久储存于物体内。反之，对于电阻较小的物体，所产生的静电瞬时即可消失，几乎不能储

存于物体内。

例如，液体流过管道，就在液体和管道的接触面上产生静电。但是假定管道是金属一类电阻很小的良导体，由于管道接地，则管道产生的静电立即向大地泄漏（图5a）。如管道是聚氯乙烯、尼龙一类电阻值很大的绝缘体，即使其接地，在管道上产生的静电也不向大地泄漏，大部分静电会储存于管壁上（图5b）。我们把产

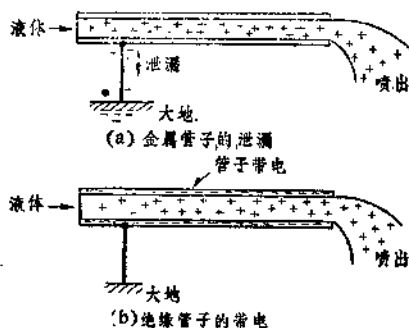


图 5 静电的泄漏和带电

生并储存于物体之中的静电，称之为静电带电。一般静电之所以容易在绝缘体上带电，就是由于上述这种道理。

表 1 列出了各种物体的电阻率和介电常数的值，以供参考。这里，电阻率为

表 1 各种物质的电阻率和介电常数

| 物质名称 | 电阻率<br>$\rho$ ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) | 介电常数<br>$\epsilon_s$ |
|------|--------------------------------------------|----------------------|
| 纯水   | $2.5 \times 10^7$                          | 80                   |
| 自来   | $10^3 \sim 10^4$                           | 80                   |
| 己水   | $1.7 \times 10^{17}$                       | 1.89                 |
| 苯    | $6.0 \times 10^{13}$                       | 2.28                 |
| 丙酮   | $1.7 \times 10^7$                          | 20.7                 |
| 甲苯   | $1.2 \times 10^{14}$                       | 2.37                 |
| 甲醇   | $6.7 \times 10^8$                          | 24.3                 |
| 丙烯   | $6.0 \times 10^{14}$                       | 3.7                  |
| 尼龙   | $4.0 \times 10^{13}$                       | 4.0                  |
| 聚乙烯  | $10^{14} \sim 10^{16}$                     | 2.3                  |
| 聚碳酸脂 | $2.1 \times 10^{15}$                       | 3.0                  |

注：缓和时间的标准

$$= \rho \epsilon_0 \epsilon_s (\text{秒}), \quad \epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$$

$10^{12}$ 欧姆厘米以上的物体,由于所产生的静电都需要一定的泄漏时间,所以一般可用来判断容易带电的物体。

### 三、静电的作用和物理现象

由于摩擦、接触等机械作用,使物体产生静电,带电体又在其附近产生静电作用,一般把带电体产生静电作用的附近空间,称作静电作用场,或电场。电场这一术语比较常用。其强度则称为电场强度。

如上所述,物体一带静电,其附近就变成静电作用空间,呈现出随电场强度大小而变化的物理现象。这是因为摩擦等机械能转换为电能而产生静电的缘故。所以,在带电体附近呈现出静电的物理现象。若加以区分的话,则有力学现象和放电现象两种。

下面就上述这两种现象及有关人们所熟知的静电感应现象逐一加以叙述。

#### 1. 力学现象

由于物体带上静电后,在其附近空间产生的电场具有电能,从而使轻物被吸引或被排斥。如图6所示,静电的力学现象出现在带电体的周围。在18世纪的欧洲,这一力学现象曾被用于魔术,当时人们都为静电吸引或排斥羽毛、枯叶等物的奇特现象而大为惊奇。

这一力学现象,与具有电磁能的磁铁在电磁场中吸引或排斥铁钉、铁片等物的现象类似。在静电场,这个吸引或排斥力 $F$ ,可用麦克斯韦的应力公式表示如下:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \frac{q^2}{\epsilon_0} = \frac{1}{2} \epsilon E^2$$

(牛顿/米<sup>2</sup>)

这里, $q$ 、 $E$ 分别为带电体表面电荷

密度,及表面电场强度。

若按上式进行计算,静电场的作用力可达到数百毫克/米<sup>2</sup>,但只及磁铁的万分之一大小。因而,对于毛发、纸片、尘埃、粉体等非常轻的物体,呈现静电的力学现象,而对重物却不起作用,即不产生力学现象。

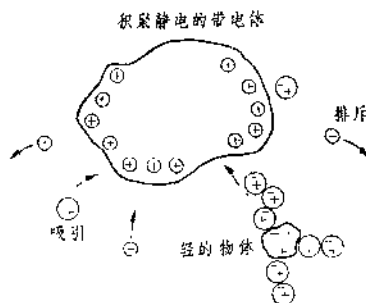


图6 带电体周围呈现的力学现象

例如,脱毛线衣时毛发倒下,或体毛被吸引,或者内衣贴着身体等等。静电的力学现象主要在气候干燥期间发生,其对象为轻物。如果知道这一类力学现象,便可检测物体是否带有静电,并考虑如何积极利用这一现象的办法。即尽管静电无色、无臭,不能用感觉器官察觉,但可以观察静电产生的二次力学现象来发现静电。

#### 2. 放电现象

物体一带上静电,尽管所带的静电量不多,但电位却有数千伏,甚至数万伏之多。特别在生产现场,有时竟达数十万伏的高电位,而一达到这样的高电位,物体内存存的电荷就象气体那样会释放出来。即物体内存存的电荷可以达到空间电场强度的极限值,一旦超过介质的击穿电场强度(如表2所示),便会出现发光、破裂声响等静电放电现象。例如,用滚筒驱动的薄膜带上静电后,在薄膜接近接地体的情况下,若薄膜与接地体的电场强度约为

表 2 各种气体、固体、液体的击穿场强

| 气 体   | 击穿场强<br>(千伏/厘米) | 固 体   | 击穿场强<br>(千伏/厘米) | 液 体   | 击穿场强<br>(千伏/厘米) |
|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|
| 空 气   | 35.5            | 云 母   | 50~150          | 酒 精   | 700~800         |
| 氢 气   | 15.5            | 铅 玻 璃 | 5~20            | 四氯化碳  | 1600            |
| 氧 气   | 29.1            | 长石瓷器  | 30~35           | 二硫化碳  | 1400            |
| 氮 气   | 38.0            | 电 缆 纸 | 6               | 丙 酮   | 640             |
| 碳 酸 气 | 26.2            | 硬 纸 板 | 1~10            | 苯     | 1500            |
| 一氧化碳  | 45.5            | 石 蜡   | 7~12            | 二 甲 苯 | 1500            |
| 氨     | 56.7            | 橡 胶   | 20~25           | 硝 基 苯 | 1300            |
| 甲 烷   | 22.3            | 聚 乙 烯 | 18~24           | 甲 苯   | 1300            |
| 丙 烷   | 37.2            | 氯 乙 烯 | 12~16           | 氯 仿   | 1000            |
| 乙 烷   | 75.2            | 酚醛树脂  | 8~30            | 变压器油  | 1000            |

注：由于是在冲击电压中的击穿场强，所以其数值较高，击穿场强在任何场合都随感应体厚度而变化。

35 千 伏/厘米以上，就会发生薄膜与接地体的静电放电。

这一静电放电现象是由于电场的能量，使带电体周围空间的气体电离而产生的。如图 7 所示，静电放电一旦发生，在带电体和接地体之间的离子电流就会流动。这类放电现象是气体击穿现象，此时由于离子电流流动，使带电体的静电中和。即最后带电体的静电向接地体移动，仅仅这部分带电体的静电得到消除。

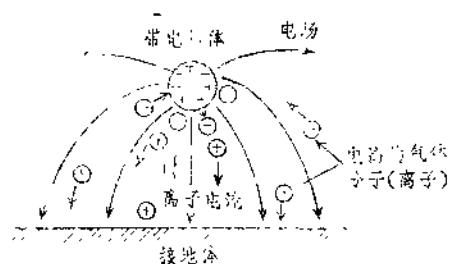


图 7 由于击穿场强使气体分子电离

上述那样的静电放电一旦发生，就会同时带有破裂声响，和发出青白色的光，并因离子电流流动而发生电波发射，以及产

生臭氧。若稍加注意，则静电放电现象（除电波发射外），也可通过感觉器官来察觉。而电波的发射，由于作为噪声向空间辐射，所以可用无线电接收机等仪器进行接收。

另外，若观察静电放电的发光形态，则大致可分为如图 8 所示的电晕放电、刷形放电、和火花放电三种，以及可以观察到沿带电体表面发光的表面放电。总共分为四类。电晕放电是当带电体或接地体上有曲率半径较小的突起部位时，在其尖端附近会出现轻微破裂声响和微弱发光的放电。

刷形放电是电晕放电的进一步发展，可以观察到呈树枝状发光形式的一种放电。它也是电晕放电的一种，但与电晕放电有区别。这种放电如图 8 所示，在带电体、接地体等形状比较平坦的场合也容易发生，一般还伴有比电晕放电更强烈的发光和“啪啪”的破裂声响。

而火花放电则是伴有最强烈的发光和

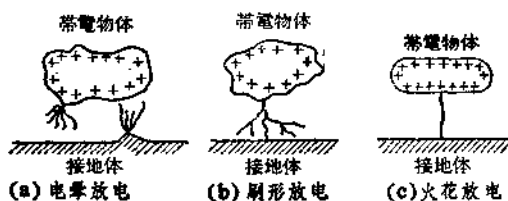


图 8 各种静电放电

破裂声响的放电。在带电体和接地体之间，可观察到线状的强光。这种放电如图 8 所示，在形状平坦的场合也容易发生。在电量较大时，电晕放电、刷形放电都不会发生，而首先发生火花放电。

其次，作为与上述三种性质不同的放电形式，只要绝缘体带有大量静电，就会在对空气发生放电的同时，沿着绝缘体表面发生放电的现象，如图 9 所示。这种放电形式，称之为表面放电。一般带电体的表面电荷密度约为  $10^{-8}$  库伦/厘米<sup>2</sup> 以上时才有可能发生。在带电体一侧有接地体，而另一侧又接近接地体，当带电体被接地体夹在中间时容易发生这种放电。



图 9 表面放电特征

我们把静电放电的具体实例用图 10 来表示，供大家参考。这里，图 10a、10b 为在静电发生时因摩擦、剥离带电的原因而发生的火花放电；图 10c、10e 为有突起形状的部位时，在该一部位容易发生电晕放电。此时，若静电带电量较大，就会从电晕放电进展为刷形放电。而图 10d 则为从粉体、烟雾等形成的带电云所产生的火花放电。在袋式除尘器中，和油船的清洗过程等等的情况下，都会发生这种放电。

### 3. 静电感应现象

不管完全不带电的物体如何，静电总会出现吸引尘埃的力学现象，以及产生伴有发光的放电现象。由于称作“静电感应”的现象是由物体引起的，因而其性质

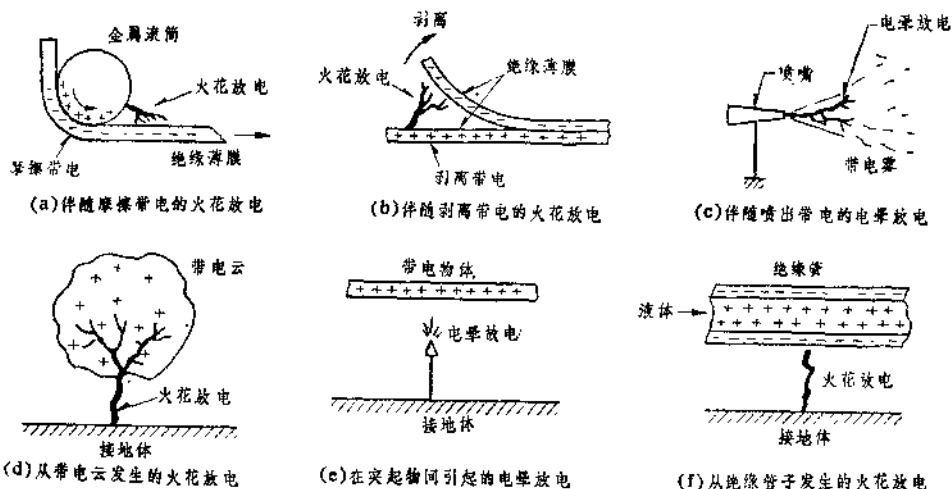


图 10 静电放电的具体事例

与静电现象是不能等同对待的。不过，这一静电感应现象，容易在考察静电现象时被疏忽。忽略这个现象，在种种意义上都是个大问题，所以这里将述及有关静电感应现象。

如图11所示，静电感应现象是当带电体附近存在绝缘体或与大地绝缘的物体时，在该物体表面上会感应出电荷的现象。这个表面上的感应电荷有正、负两种，而整个物体中的正、负电荷则处于平衡状态，因此其带电量为零。但是，由于表面正、负电荷完全分离而存在，所以和表面带有静电是等价的，并由此出现上述的静电现象。

表面感应电荷 $Q_s$ 为：

$$Q_s = \iint_S \epsilon_0 E dS \quad (\text{库伦})$$

式中 $S$ 为受静电感应的物体表面积； $E$ 为该表面电场强度。这个感应电荷与带电体的总电荷相比虽然比较小，但在一般情况下都不应忽略。而且电位也会因受到静电感应而上升，有时可达数10千伏。

这样，受到静电感应的物体与带电体完全等价，并伴有力学现象和放电现象的发生。尤其是如果物体为电阻较小的良导体时，就会发生火花放电，如图12所示。

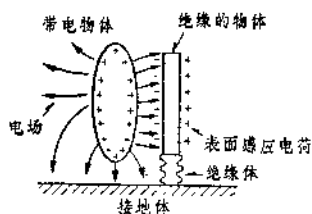


图11 静电感应现象

在18世纪还未发现静电感应现象的时代里，就已有处于绝缘状态的人体因触及带有摩擦电的物体时，发生放电而受到电

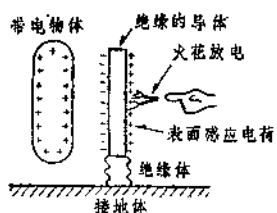


图12 表面感应电荷的放电

击的事例，还发表了所谓人体是导电的媒介体的论文。然而，仅仅因为处于绝缘状态的人体会受到静电感应，并与静电带电相等价，而以此来判断导电的媒介体是不充分的。

#### 四、静电引起的障灾害

如前所述，若带上静电，则带电体附近因有电场而产生力学现象、放电现象或静电感应现象。这里所说的障灾害基本上也就是这些不受欢迎的现象，或是造成不幸灾害的现象。其大致可分为：生产障害、爆炸和火灾、电击灾害三类。

以下就关于这三类障灾害，尽可能举例加以说明。但是，对于三种障灾害不再分别予以解释，在明确这些障灾害与静电现象的联系后，即以造成障灾害原因的静电现象作为出发点进行叙述。而且，这其中无论哪一类障灾害，都是因为带有一定数量静电而发生的，所以，我们将述及到有关障灾害发生极限的带电量。

##### 1. 由力学现象引起的生产障害

如前所述，静电具有吸引或排斥轻物的作用，并由此产生力学现象。然而，正是这种力学现象引起了种种意外的生产障害。也就是说，由于静电的作用力（以下简称静电力），尽管实际上不过数百毫克/厘米<sup>2</sup>左右，但由于这个力的作用，在实

际生产过程中发生了各种生产障害。

例如，粉末堵塞筛网；或者粉末粘附在管道上和管子弯道处造成输送不良；或者线被搞乱而使织机停车；或者线因静电斥力而分散不齐等等的生产障害相继发生。还有会发生因印刷纸被吸附而不能送出；或因油墨带电而使印刷不匀等等的生产障害。再或塑料制品、织物、陶瓷器等表面因吸附尘埃而被污染等等的生产障害，也有发生。

其他由力学现象产生的障害有：在计量容器里因粘附粉末而引起计量误差；或穿着的化纤内衣因紧贴身体而产生不舒适感等等。再举一个奇怪的例子，有个报告认为，若穿着同样的化纤衣服，在这上面产生的静电就会把病毒随同空气中的尘埃一起吸附，而容易引起感冒。还认为静电对身体的健康是不利的。然而，报告中所述的这两点都是不可信的。

如上所述，静电的力学现象所引起的，大部分是生产障害，一般其带电电荷密度若在  $10^{-11}$  库伦/厘米<sup>2</sup> 以上时，即可发生障害。但这一数位并不是绝对的，只不过是一个大致的标准。由力学现象引起的生产障害，根据物体表面所受的静电力和其反作用力的大小关系而定。于是，现在若以半径为  $\alpha$  的粒状粉体为例，则粉体表面所受的静电力  $F_c$  为：

$$F_c = 4\pi\alpha^2 \cdot \frac{1}{2} \epsilon E^2 \quad (\text{牛顿})$$

作用在这一粉体上的重力  $F_m$ ，当其密度为  $\rho$ ，加速度为  $g$  时，则：

$$F_m = \frac{4}{3} \pi \alpha^3 \cdot \rho \cdot g \quad (\text{牛顿})$$

这样，若静电力比重力大，则带电体克服重力吸附粉体，因而也就发生障害。但在相反的情况就没有问题。这里，如果

研究一下有关生产障害发生的原因，就会发现粒子的半径越小，则静电力越占优势。所以，小粒子容易引起生产障害。一般，粒子的半径约 100 微米，线的半径约 100 微米，薄膜的厚度约 50 微米以下时，容易发生生产障害。

## 2. 放电现象引起的生产障害

如果从具有数千伏、数万伏高电位的带电体发生脉冲刷形放电和火花放电时，则在瞬间内有数安培的离子电流流动的同时，带电体的静电也从放电空间释放出来。由此产生电波发射，同时又从带电体放射静电能，从而引起种种生产障害。

作为生产障害最典型的事例有：MOS 型 IC 等半导体元件的破坏，以及使用这些元件的电子装置、机器等的动作失误和故障，等等。还有，放电时产生的电波进入接收机后会产生杂音，从而降低了信息质量，或引起信息差错。

例如，在制造或使用 IC、半导体等的电子通信工业中，由于操作者带有静电，或包扎半导体元件用的发泡材料和薄膜等的带电，也会发生上述那样的生产障害。还有，在计算机室内，由于操作者、卡片及其他办公用品的带电，同样会发生计算机停止工作或动作失误等故障。在应用计算机来控制和管理工业生产过程的情况下，由于故障原因，可使产品质量变差、生产停工等等的生产障害会有新的发展。因而，在使用半导体及带有半导体元件的电子装置的情况下，必须采取静电防护措施。

此外，作为静电放电引起的生产障害还有：由于放电时的发光，使照相胶片、X 光胶片等感光而造成所谓产品不良的障害。特别在最近，因胶片的感光度很高，

所以这种生产障害常常发生。

### 3. 静电放电引起的爆炸和火灾

在带有静电的物体附近，若产生超过表2所示的击穿场强，则会发生静电放电。也就是说，物体若带有超过击穿场强的静电，就会发生静电放电，实际上这种放电是很危险的。这里所述的爆炸和火

灾，也正是由静电放电引发而造成的。

一般发生爆炸和火灾，须具备两个基本条件。首先要有可燃性物质存在。这种可燃性物质与空气等助燃气体混合，形成爆炸混合气体。而另一个条件要有点火源存在。这个点火源的能量至少必须大于点燃可燃性物质时所必需的最小点火能量。

表3 与空气混合的气体或蒸气的爆炸浓度范围

| 气体或蒸气 | 爆炸浓度范围(%) | 气体或蒸气 | 爆炸浓度范围(%) |
|-------|-----------|-------|-----------|
| 氢气    | 4.1~74.2  | 甲醇    | 6~36.5    |
| 一氧化碳  | 12.5~74.2 | 乙醇    | 3.3~19    |
| 甲烷    | 5.3~13.9  | 乙醚    | 1.7~4.80  |
| 乙烷    | 3.1~15.0  | 乙醛    | 4.0~57.0  |
| 丙烷    | 2.4~9.5   | 丙酮    | 2.2~13.0  |
| 乙烯    | 3.0~34    | 醋酸乙脂  | 2.2~11.5  |
| 乙炔    | 2.5~80    | 正戊烷   | 1.4~8.0   |
| 氯化氢   | 5.6~40    | 正辛烷   | 0.84~3.2  |
| 氰基    | 6.6~12.6  | 苯     | 1.1~8     |
| 氨     | 16.0~27.0 | 甲苯    | 1.3~7.0   |
| 硫化氢   | 4.3~45.5  | 环己烷   | 1.3~8.4   |
| 二氧化碳  | 1.0~50    | 汽油    | 1.3~6     |

(P=760mmHg, t=20℃。)

例如，假定可燃性物质是氢气，则如表3的爆炸浓度范围所表示的那样，一旦和空气混合成为1.1~74.2%的爆炸混合气，其点火源若具有0.019毫焦耳以上的能量（如表1所示），就会引起氢气爆炸或起火。对于各种粉尘的爆炸浓度范围和最小点火能量的数位，分别列于表5、表6，以供参考。

静电放电是作为上述两个基本条件中的后一条件——作为点火源来引发爆炸和火灾的，也就是说，这是由于静电放电成为可燃性物质的点火源而产生的灾害。可以说，它起了点火的作用。

若从带电体发生静电放电，则在带电

体附近储存的静电能W为：

$$W = \iiint_V \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 dU = \frac{1}{2} CV^2 (\text{焦耳})$$

由于其全部或一部分静电能在放电场所或空间消耗掉，所以这一场所或空间的某气体分子温度上升。换言之，因放电消耗的能量而使气体分子温度上升。若这气体分子是可燃性物质，就会引起燃烧反应而产生爆炸和火灾。而上式的U是有电场存在的空间体积，C、V分别为带电体的静电容量及带电电位。

例如，假定人在地毯上行走，则人体会带上3000~5000伏的静电。若这个人发生静电放电，则一般要消耗200~400微焦耳的静电能。因此，这个放电足以能点燃

表 4 各种气体、蒸气和空气的混合气的最小点火能量

| 物 质 名 称 | 最小点火能量(mJ) | 静电容量(PF) | 电压(KV) | 电荷计算值( $\mu\text{c}$ ) |
|---------|------------|----------|--------|------------------------|
| 2-丁 酮   | 0.29       | 9        | 7.9    | 0.07                   |
| 甲 烷     | 0.28       |          |        |                        |
| 正 戊 烷   | 0.28       |          |        |                        |
| 丙 烷     | 0.26       | 10       | 7.2    | 0.07                   |
| 乙 烷     | 0.25       | 10       | 7.1    | 0.07                   |
| 正 丁 烷   | 0.25       | 7~4      | 8~10   | 0.06~0.04              |
| 正 己 烷   | 0.24       |          |        |                        |
| 正 庚 烷   | 0.24       |          |        |                        |
| 环 己 烷   | 0.22       |          |        |                        |
| 苯 酮     | 0.20       |          |        |                        |
| 乙 醚     | 0.19       |          |        |                        |
| 环 丙 烷   | 0.17       |          |        |                        |
| 氧化丙烯    | 0.13       |          |        |                        |
| 1,3-丁二烯 | 0.13       |          |        |                        |
| 丙 炔     | 0.11       |          |        |                        |
| 环氧乙烷    | 0.065      |          |        |                        |
| 乙 炔     | 0.019      | 4        | 3.1    | 0.012                  |
| 氢 气     | 0.019      |          |        |                        |
| 二硫化碳    | 0.009      |          |        |                        |

( $P = 760\text{mmHg}$ ,  $t = 20^\circ\text{C}$ )

表 5 与空气混合的粉尘的爆炸下限

| 粉 体  | 爆炸下限 ( $\text{g}/\text{m}^3$ ) | 粉 体       | 爆炸下限 ( $\text{g}/\text{m}^3$ ) |
|------|--------------------------------|-----------|--------------------------------|
| Zr   | 40                             | 乙 烯 树 脂   | 40                             |
| Mg   | 20                             | 合 成 橡 胶   | 30                             |
| Al   | 35                             | 乌 洛 托 品   | 15                             |
| Ti   | 45                             | 无 水 苯 二 酸 | 15                             |
| Si   | 160                            | 酪 胺 粉     | 45                             |
| Fe   | 120                            | 软 木 粉     | 40                             |
| Mn   | 210                            | 淀粉        | 60                             |
| Zn   | 500                            | 淀 粉       | 45                             |
| 天然树脂 | 15                             | 太 豆       | 40                             |

续 表

| 粉 体       | 爆炸下限 (g/m <sup>3</sup> ) | 粉 体     | 爆炸下限 (g/m <sup>3</sup> ) |
|-----------|--------------------------|---------|--------------------------|
| 烯 丙 醇     | 35                       | 小 麦     | 60                       |
| 酚         | 35                       | 砂 糖     | 19                       |
| 聚 乙 烯     | 25                       | 硬 质 橡 胶 | 25                       |
| 醋 酸 纤 维 素 | 25                       | 肥 皂     | 45                       |
| 木 质       | 40                       | 硫 磺     | 35                       |
| 尿 素       | 70                       | 煤       | 35                       |

表 6 各种粉尘和空气混合时的最小点火能量

| 物 质 名 称 | 最小点火能量 (mJ) |       | 物 质 名 称 | 最小点火能量 (mJ) |        |
|---------|-------------|-------|---------|-------------|--------|
|         | 粉 尘 云       | 粉 尘 层 |         | 粉 尘 云       | 粉 尘 层  |
| 醇合成树脂   | 20          | 80    | 酚       | 10          | 40     |
| 铝       | 10          | 1.6   | 沥 青     | 20          | 6      |
| 甘油三硬脂酸铝 | 10          | 40    | 聚 乙 烯   | 30          | —      |
| 阿 斯 匹 林 | 25          | 160   | 聚 苯 乙 烯 | 15          | —      |
| 硼       | 60          | —     | 硅       | 80          | 2.4    |
| 醋 酸 纤 维 | 10          | —     | 肥 皂     | 60          | 3.840  |
| 对钛酸二甲脂  | 20          | —     | 甘油三硬脂酸  | 25          | —      |
| 锰 铁     | 80          | 8     | 砂 糖     | 30          | —      |
| 乌 洛 托 品 | 10          | —     | 硫 磺     | 15          | 1.6    |
| 铁       | 20          | 7     | Tm      | 5           | 0.004  |
| 镁       | 20          | 0.24  | 钛       | 10          | 0.008  |
| 锰       | 80          | 3.2   | 铀       | 45          | 0.004  |
| 甲基丙烯酸甲脂 | 15          | —     | 尿 素 树 脂 | 80          | —      |
| 多 聚 甲 醛 | 20          | —     | 钒       | 60          | 8      |
| 季 戊 三 醇 | 10          | —     | 乙 烯 树 脂 | 10          | —      |
| 二硝基甲苯酰胺 | 15          | 24    | 锌       | 100         | 400    |
|         |             |       | 锆       | 5           | 0.0004 |

氢气、丙烷、甲烷、汽油等可燃性物质。这一点似乎已得到证实。在( )环境中，最近即使在家庭里，意想不到的爆炸和火灾也有发生，所以应当把人体也作为危险的带电体加以考虑。

再者，带电体产生静电放电是引起爆

炸和火灾的原因，但这个带电体并不限于人体，而由人体以外的带电体发生放电，并由此而引起的灾害占大多数。静电放电引起爆炸和火灾的事例可参考表7。另外，引起灾害的带电体和发生频率之间的关系如图13所示。

表 7 静 电 灾 害 事 例

| 灾 害<br>发生场所 | 点火<br>物质 | 灾 害 的 状 况                                                                                     | 预 防 措 施                                                                                                                                                 |
|-------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 清洗容器        | 汽油       | 在循环机曲轴箱附近, 拆卸主轴轴承, 并清洗其金属轴瓦的工作中, 容器内充满溶剂蒸汽, 因静电起火而使操作者的手腕等处负轻伤。在清洗用具里, 使用了刮刮刀                 | 在挥发性流体的清洗工作中, 应制定本部门的安全操作规程                                                                                                                             |
| 油 罐 车       | 甲苯       | 在装载量为30公吨的油罐车里装灌甲苯, 并在此过程中进行抽样。由于接连不断地抽样和清洗试样瓶, 所以在提取放入的试样瓶时, 油罐车的进出口附近发生着火                   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 限制装灌的速度;</li> <li>2. 抽样要要在装灌后静置30分钟进行;</li> <li>3. 把氮气封入油罐车内</li> <li>4. 防止人体带电 (防静电鞋)</li> </ol>             |
| 干燥作业        | 己烷       | 用乙烯树脂软管, 从缓冲罐抽取溶剂时, 因有溶剂由接缝处漏出。在这一场所操作阀门的工人移动脚步时, 因脚底下着火而引起火灾                                 | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 使用防静电鞋;</li> <li>2. 禁止使用 乙烯软管</li> </ol>                                                                      |
| 排 水 工       | 环己烷      | 在回收排水工所漏出的大部分环己烷操作时, 由于残留的少量蒸汽被蒸发, 因而在水面上猛吹蒸汽时, 环己烷着火而引起火灾。由于附近是禁火区, 应无火种, 因而根据蒸汽喷出可判断其为静电的原故 | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 中止猛吹蒸汽;</li> <li>2. 在排水处, 按一定间隔设置灭火器;</li> <li>3. 用油水分离的方法, 把排水工漏出的环己烷滤掉;</li> <li>4. 用界面活性剂进行分散处理</li> </ol> |
| 稀释剂排放 机     | 二甲苯      | 由于阀门操作失灵, 清扫漏在机床面上约20升的稀释剂。由于残留蒸汽的原因, 在开始排放作业约2分钟后, 从排放机附近随着“啪”的一声而起火, 火苗在床面上扩散               | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 采取完全接地;</li> <li>2. 防止操作者带电 (防静电鞋);</li> <li>3. 制定操作规程</li> </ol>                                             |
| 溶剂储罐        | 环己烷      | 用泵把有机溶剂从储罐转移到不锈钢制的开口罐过程中, 泵的乙烯软管因带静电而发生放电, 点燃罐内的溶剂, 引起火灾                                      | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 转移方式改为下落式;</li> <li>2. 换上导电性软管;</li> <li>3. 封入氮气</li> </ol>                                                   |
| 混入装置        | 汽油       | 因混合装置的泵发生故障, 使混入配管不能进行着色剂混入作业, 从80升的金属容器倒入约30升汽油时, 发生点火引起火灾                                   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 罐、喷嘴配管都要接地;</li> <li>2. 铅吸管用合金制成</li> </ol>                                                                   |
| 清 洗 机       | 丁酮, 甲醇   | 清洗过滤器配件时, 操作者用扳手拆卸过滤器配件, 在这过程中, 因从操作者手里发生放电而着火, 立即用粉末灭火器进行灭火, 但安放清洗机的工作室已被烧毁                  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 检查清洗室的通风情况;</li> <li>2. 采取完全接地;</li> <li>3. 防止工作衣、工作鞋带电;</li> <li>3. 检查清洗方法</li> </ol>                        |

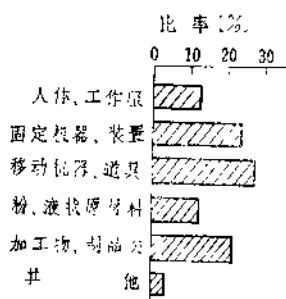


图13 引起灾害的带电体及其发生频率

如上所述，静电放电之所以引起爆炸和火灾，这是因为静电放电成为可燃性物质的点火源的缘故。过去，在高分子等的优良绝缘体问世之前，这类灾害并没有最近那样多。随着优良绝缘体的出现，由于其所带的静电量较大，所以容易引起灾害。如果其带电量较小，那末即使发生静电放电，也不会成为点火源。

例如，根据对各种实验报告，或现场实验、调查报告的分析，就会发现氢气、乙炔的最小点火能量特别小，带电电位约为1千伏以上；而丙烷、甲烷其最小点火能量则比氢气大一位数。若带电电位为5千伏以上，则发生静电放电时，有可能成为点火源。但这个值只是一个大致标准，而且是在带电体为薄膜、塑料、碳氢化合物一类液体等电阻率较大的绝缘体场合。

在带电体为人体、金属等电阻率较小的良导体场合，仅仅根据带电电位来预测发生静电放电的点火源是不够的，在这种情况下，它还与带电电容量有关。即带电体为良导体的场合，尽管带电电位低，但如果静电容量大，则放电能量也大，并有可能成为点火源。参考图14所示的图表，可从良导体的带电电位和静电容量，求得放电时的能量。

另外，对于作为点火源的放电，仅仅根据上述带电电位、放电能量的因素来确

定也还不够，它还与放电形式有关。即有

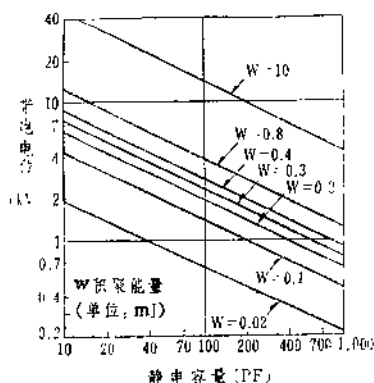


图14 导体放电能量的求定

的放电形式发生放电时容易成为点火源；而有的放电形式尽管带电电位高，放电能量也大，但成为点火源的概率则是很小的。而成为点火源的概率较高的放电形式，是火花放电、表面放电、刷形放电。反之，概率较小的放电形式是电晕放电。因而，若带电体的形状比较平坦，接地体的形状也同样如此，则容易发生静电放电而成为点火源。一般形状为圆球形或是圆球形的一部分时，假定其直径约为3毫米以下，则发生电晕放电，但这种放电是不大可能成为点火源的。反之，则发生容易成为点火源的刷形放电、火花放电等（参见表8）。从这个意义上我们可以认为，从人体指尖发生的静电放电是刷形放电、火花放电，其成为点火源的概率是很高的。

#### 4. 静电放电引起的电击灾害

在地毯上行走后，一接触门柄，或一接触正在启动的门，就会随着“啪”的一声，在指尖上受到电击而产生痛感。还有，在生产现场进行卷绕薄膜等作业、粉体的装袋作业等过程中，只要一接触这些

表 8 带电液面和接地体的放电特性

| 接地体的形状      | 放电距离<br>(cm) | 放电形态 | 放电电荷量<br>(nC) | 放电能量<br>(mJ) |
|-------------|--------------|------|---------------|--------------|
| 针           | 1~5          | 电 晕  | <1            | <0.001       |
| 60° 角的 针    | 0.25         | 火 花  | 28            | 0.27         |
|             | 1.0          | 电 晕  | 0.9           | 0.003        |
|             | 5.0          | 电 晕  | 0.9           | 0.008        |
| 直径为1/4英吋的球体 | 2.5          | 电 晕  | 4.0           | 0.04         |
|             | 10.0         | 电 晕  | 2.0           | 0.02         |
| 直径为1/2英吋的球体 | 2.5          | 刷 形  | 97.0          | 0.91         |
|             | 7.5          | 刷 形  | 27            | 0.34         |
|             | 10.0         | 刷 形  | 24            | 0.39         |
| 直径为 1 英吋的球体 | 2.5          | 刷 形  | 49            | 0.43         |
|             | 5.0          | 刷 形  | 65            | 0.57         |
|             | 10.0         | 刷 形  | 72            | 1.78         |

注：带电液体——JP—5。

物体时，就会受到意外的电击而惊恐万分。

这是起因于静电的电击，是由于电流在人体内流动。这种电击与触电时所受的电击没有什么不同。即电击是从带静电的人体发生放电，由于这时电流从人体流向接地体；或由于从带电体向人体发生放电时，电流流向人体而产生的。

就这样，由于和人体发生关系的静电放电引起电流在人体内流动而发生电击。尽管一般电击大多数只是产生痛感和震颤。但有时在生产现场，往往会产生指尖负伤，或手指麻木等机能损伤；或由于屡次受到电击的恐怖情绪而使工作效率下降等等障害。另外，还会发生由于电击的最初原因而造成手被轧在滚筒中，或从高空坠落等的二次灾害。

此外，还发生因电击引起的皮炎、皮肤烧伤等身体伤害。

如上，静电放电引起身体内电流流动

而发生电击，即使不是直接关系，但也会产生种种灾害。

另外，在静电场合，由于是由放电电流引起的脉冲瞬时现象。所以，作为电击发生的极限，一般不以电流，而是以带电电位或作为放电电流时间积分值的电荷量来表示。例如，给人体带上不同的电荷量，若根据这些情况进行研究，则可从表9所示的实验结果认为，人体带电电位约为3千伏以上的场合是电击的发生极限。

即1千伏以下完全无感觉；1~2千伏时多少有点感觉；若在3千伏以上，则在受到震颤的同时还伴有痛感。因此，电击灾害的发生极限定为3千伏。但是，电击不仅在上述人体带电的场合发生，由带电物体向人体发生放电时也会受到电击。这种场合若对人体放电的电荷约为 $10^{-7}$ 库伦以上时，就会发生电击，其电荷量与前者从人体向接地体放电的场合，数位大致相同。另外，接近带静电的绝缘体时所受到