

工业静电的原理测量和消除

河北大学静电研究室

编者说明

这份资料是为河北省科协、河北省物理学会、河北省化学学会和河北大学联合举办的。防止工业静电技术学习班准备的，全书共有六章。第一章的内容是工业静电的一般问题和固体、液体、粉体的带电原理；第二章是静电消除的一般原则和几种静电消除器的结构和性能；第三章中较详细地讨论了离子流静电消除器的原理、参数和结构设计；第四章中简单地介绍化学防静电剂的类型和性质；第五章则提纲性地讨论了化工设计中有关静电问题及其对策；第六章中较全面地介绍了静电领域中电压、电阻、电荷量、电容以及微小电流等基本参数的测量方法和测试仪器。

70年秋季，我室曾为化工部和石油部直属设计院和研究院以及主要厂矿举办静电讨论班。当时使用的教材有四个部分：一、电学基本原理和气体放电规律（张开锡、郭雅生、袁照房等三同志执笔）；二、静电的测量（林台同志执笔）；三、工业静电及其消除方法（王之朴同志执笔）；四、静电实验指导书（瞿建帮同志执笔）。现在的这份资料，就是上述第二、三两个部分经过重新编排和修改而成的。

静电本身是一门不成熟的科学。静电的基本理论还远远不能定量地概括或描述所有的静电现象，以致于许多静电的理论处理都是半定量的，或者是经验公式的形式。在技术方面，无论是静电的测量、静电的应用或是防止静电的危害，也还都存在不少实际上的难题。所以，从这种意义上来说，这份资料，在讲习班上除去提供某些基础知识以外，在更大程度上，只能起一个抛砖引玉的作用。希望参加这次活动的同志和有机会见到这份资料的同志批评指正。

河北大学静电研究室

1983年9月30日

参 考 资 料

- 1、第一届国际静电会议文集(1970)
- 2、英国物理学会第三次静电会议文集(1971)
- 3、日本高分子学会静电研究发表会文集(1965——71)
- 4、静电手册(日本)(1966)
- 5、村崎宪雄：静电讲座(1982)
- 6、北工静电科研组：静电起电问题(1980)
- 7、静电安全指南(日本)劳动出版社(1982)
- 8、Keith Johnson：抗静电剂工艺与应用(1972)
- 9、舩田孝一、藤本武彦：表面活性剂(1973)
- 10、增田闪一：静电文集(1982)

目 录

编者说明

参考资料

第一章 工业中的静电

- § 1—1 工业静电的一般问题..... 1—1
- § 1—2 固体表面和固体薄膜的带电..... 1—6
- § 1—3 液体介质流动时的带电..... 1—14
- § 1—4 粉体物质悬浮和流动时的带电..... 1—25

第二章 静电的消除

- § 2—1 静电消除的一般原则..... 2—1
- § 2—2 静电的消除和“接地”..... 2—7
- § 2—3 自感应式静电消除器..... 2—12
- § 2—4 高湿度空气静电消除器..... 2—20
- § 2—5 有源交流电晕排针式静电消除器..... 2—24

第三章 离子流静电消除器

- § 3—1 离子流静电消除器的基本原理及
基本参数..... 3—1
- § 3—2 离子流静电消除器的结构特点和
使用..... 3—9

§ 3-5	离子流静电消除器中的防爆手段	3-12
-------	----------------------	------

第四章 化学防静电剂

§ 4-1	化学防静电剂的一般问题	4-1
§ 4-2	化学防静电剂的类型、基本结构和性质	4-2
§ 4-3	实际使用的防静电剂举例	4-6

第五章 化工设计中有关静电的考虑

§ 5-1	处理对象的固有性质和环境	5-1
§ 5-2	最可能产生静电危害的部位和环境	5-4
§ 5-3	关于静电的对策	5-5

第六章 静电的测量

§ 6-1	静电电荷的测量	6-2
§ 6-2	静电电压的测量	6-6
§ 6-3	微小电流的测量	6-39
§ 6-4	电阻的测量	6-41
§ 6-5	电容的测量	6-48
§ 6-6	介电常数的测量	6-50
§ 6-7	时间常数、半值时间和松弛时间 的测量	6-52

§ 6—8 放电电荷量的测量.....	6—54
§ 6—9 几种典型材料的测量.....	6—57
§ 6—10 静电测量中的安全操作问题.....	6—61

第一章 工业中的静电

§ 1—1 工业静电的一般问题：

静电本来是人们最早的对于电的认识，也是电学入门的第一个概念。但是，在工业领域中，却由于它的低能量而被人们忽视了。

随着人们对于客观世界认识的逐步深入，不断地开辟人造和合成材料的领域，这些材料绝大多数都是高绝缘性能的。在生产和使用这些材料的过程中，特别是在生产规模不断大型化，生产工艺不断连续化，以及生产车速不断加快的情况下，静电问题就显得越来越突出了，在许多行业里，静电甚至成了阻碍进一步提高生产的主要矛盾。

一、高绝缘材料所引起的静电危害：

由于使用高绝缘材料而引起的静电危害，至少存在以下几种形式：

1、静电力的作用：吸引和排斥。

这是由库仑力的作用，或者是在强非均匀电场作用下，物质极化之后再由库仑力的作用而引起的现象。两个带有相同或相反符号电荷的物体，可以发生相互的排斥或吸引的现象是显而易见的。它们之间作用力 f 的大小服从库仑定律

$$f = K \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (1-1-1)$$

即分别与两物体所带的电荷成正比，而与他们之间距离的平方成反比。

一个本来不带电的物体，若处于很强的非均匀电场中，则物体中的分子会由于强电场对电子云的作用而发生像图 1—1—1 那样的极化变形。变形的结果，使极化分子的两端在电场中受到大小和方向都不相同的力，负极所受的引力大于正极所受的排斥力。因此，净结果

是使极化了的物体在电场中发生向带电体方向的运动。由于这种现象的存在，就在工业中发生许多问题或事故例如：

①带静电的胶片吸附灰尘，使涂布以后发生灰尘斑点或拉丝现象；

②带静电的橡胶帘布在裁断机上裁不整齐；

③快速纺纱（特别是纺合成纤维），会由于纤维带静电的排斥作用而引起纱支不匀和膨松现象；

④快速印刷会由于纸张带静电使纸张排不整齐而给套印带来困难；

⑤衣襟会被带静电的皮带吸引绞入皮带轮中而发生人身事故；

⑥带有静电的粉料粘附在料斗、管道、受器等的表面不能自动脱落；等等。

2、静电火花放电作用：

一个带静电物体上的静电荷总是要洩放的。一般来说，洩放的途径有两条：一个是有自然逸散，它包括沿着物体表面的漏电通道被导入大地和被大气中存在的由于宇宙线的作用而电离了的少量空气离子所中和；另一个途径就是静电的火花放电。“自然逸散”和“火花放电”对静电这个课题来说都是非常重要的。逸散得快，可以减少静电的潜在危险，而火花放电却可以带来灾难。

所谓火花放电，是指两个具有不同电位的物体相接近时（或者具有双电层的两个物体彼此分开时），它们之间的绝缘能力受到突然破

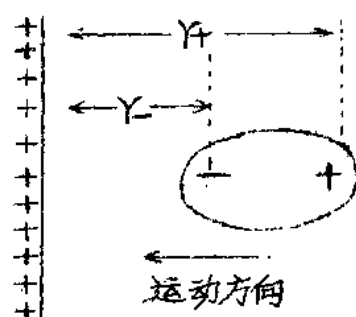


图 1—1—1 分子在强电场下的极化变形

坏并通过火花间隙而产生的瞬时电流。这个过程伴有高温和闪光。静电火花放电所引起的危害，就是由于以高温形式表现出来的能量和闪光。

以静电火花的形式放电，火花间隙的两端必须具有足够的电位差。这个数值的大小，与间隙的几何形状和介质性质有关。一般来说，在干燥的空气介质中平板对平板的击穿是30千伏/厘米。若有尖端存在；击穿电压大为降低，负尖端对正极极时是20千伏厘米正尖对负极极和两个尖端时都是10千伏左右（参看图1—1—2）

静电的火花放电过程，在工业中引起的危害是巨大的，举例来说：

①快速运输的燃料油（汽油、煤油、柴油），会由于静电火花放电而引起燃烧或爆炸；

②大型化工生产中具有较高压力的低沸点易燃液体（如乙醛苯等在缝隙中意外地呈雾状喷出，会由于本身的带静电而发生燃烧或爆炸；

③甚至在小型化工生产中，倒装易燃低沸点液体时，也会由于静电而引起火灾；

④橡胶行业许多使用汽油的工序中，会由于静电的火花放电引起火灾；

⑤在胶片涂布和整理工序中，由于静电火花放电使胶片成品感光而产生灰雾、静电斑点，这就会给军工、科研等信息储存、传输和显示工作带来许多麻烦或错误，严重时，甚至带来不可弥补的损失。

除此之外，工人长时间在高压静电场下工作，总会发生被电击现

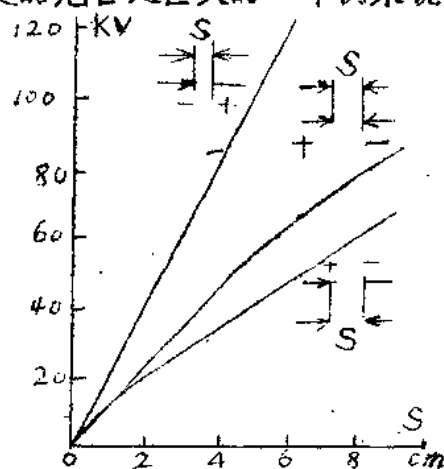


图 1—1—2 不同电极形状时的击穿电压

象。虽然，高压静电场本身对人体的健康有无损害，目前尚无定论，被低能量的静电电击本身也没有什么生命危险，但精神的紧张，往往会引起其它的二次安全事故。这种例子是很多的。因此，静电是一个应该认真对付的问题。

二、导体和分散体所引起的静电危害：

在前面所讨论的问题中，都特别提到静电是由于大量地使用高绝缘材料而引起的。实际上，一个导体，甚至金属物体，在它悬空之后，就和绝缘体一样，也是可以带静电的。但是它的放电却与绝缘体不同。绝缘体的火花放电多数情况下是局部的，绝缘体上的静电荷一次全部放掉的可能性是极小的；但悬空的带有静电的导体，一旦发生火花放电，就会把静电荷一次全部放掉。因此，从能量的观点来看，带有相同数量静电荷和表现电压的悬空导体的火花放电，比相当的绝缘体的火花放电更危险。

还有一点需要注意，前面讨论的都是以连续相状态存在的大块物质（包括固体和液体），但这些物质以分散状态存在时，会带来一系列的问题。例如，一根铁棒，把它做为电极使用时，在空气中千百万次的静电放电都不会使这个电极有所损坏；但是，如果把它做成200目大小的粉末以合适的密度悬浮在空气中，一个静电火花就有可能使它发生爆炸。同样，成块的硬橡胶绝不会被静电点燃，但把它做成粉并悬浮在空气中时，也很容易由静电引起爆炸。关于粉体爆炸问题，在§1—4节中还要讨论到。

三、静电并不一定都是坏事情：

前面谈到的一些内容，都是静电的危害方面。但静电并不都是坏事情。世界上第一个使基本粒子加速的装置就是静电加速器，这是众

所周知的事情。此外，由于静电本身固有的静电力特性，因此，可以广泛地加以利用像静电植绒、静电纺纱，静电喷吐、静电复印等等都是很好的例子。就与化工生产有关的来说，也有静电分选、静电拌合、静电除尘，静电防粘附等等。

1、静电分选：这是把微小颗粒的导体和非导体物质分离的一种手段。它的大致过程可参看图 1—1—3。A 是装有导体和非导体小颗粒混合物的料斗，颗粒落下后就到达被绝缘并带有一定极性电压的金属转鼓 B 上，C 是一个能使颗粒带电的另一极性的电晕装置，当转鼓上的颗粒转到电晕装置附近时，非导体颗粒就带上与电晕符号相同的电荷，并与转鼓形成双电层而具有一定的吸附力，导体颗粒则因为与转鼓接触而具有和它

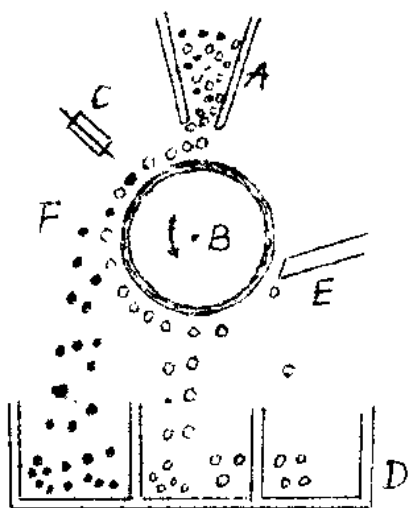


图 1—1—3 静电分选

相同的电位。因此，导体颗粒（黑色）即受到转鼓的斥力作用落下进入带有间隙的槽 D 中，此时非导体颗粒（白色）却因为有双电层的吸附力，随转鼓转至下方受重力作用而落下，部分较小的颗粒最后被刮刀刮去，这样就可以达到分离的目的。

2、静电拌合：是依靠相反符号电荷相吸引的原理。这样装置可以使比重相差很大的两种粉体均匀地混合。例如，聚乙烯粉与铜粉比重相差六倍，在混合之前，先使两种粉体分别带有正负电荷，然后再拌合，可以得到非常均匀的且很难分离的混合物。

3、静电除尘：静电除尘是把一根很细的金属丝，放在一个金属筒的中心位置，然后把金属丝和金属筒分别接上直流高压电源的正负极，在金属丝周围即发生强烈的电晕。当灰尘被气流带入金属筒以后，由于图 1—1—1 中所叙述的那种原因，灰尘将向高压金属丝方向移动，在灰尘移入电离空气区的时候，空气离子撞击灰尘并使灰尘带上与电晕相同符号的电荷，此时，带电的灰尘立刻被强电场斥向地极。再经震打后落下。

4、静电防粘附：在一些与火药有关的化工生产过程中，有时会出现以下的现象，输送一种粉体物质经过一个金属制的料斗送入特制的储仓，由于料斗是接地的，并且粉体物料在输送的过程中带了静电，当它进入料斗时，就与金属料斗形成偶极层而被粘附在其表面，最后能使整个料斗的空间充满粉体物料堵塞通路。如果把金属料斗绝缘起来，同时加以与粉体物料相同极性并大体相等的电压，由于同性相斥的道理，料斗即可不再粘附粉料而保持通畅。

§ 1—2 固体表面和固体薄膜的带电：

一、静电的产生和表现：

任何两种物质，当它紧密接触时，都会在界面上发生电子的转移。也就是说，有一些电子，从相对来说是疏电子的一种物质的表面，穿过界面转向相对来说是亲电子的另一种物质的表面。转移的结果，在界面上形成双电层。当这两种物质迅速分离时，如果它们都是导体，由于分离的过程中，各接触点分离先后不一，那么先分离部分的电子就很容易通过最后的接触点洩漏返回原位，仍然表现为电中性的两种物质，如果两种或其中一种物质是绝缘材料，那么，分离之后，就会

有多余的电子或空穴保留在绝缘材料表面，而表现为带有负电荷或正电荷。材料的绝缘性能越好，电荷就越不容易返回原位。我们平时常说的“摩擦生电”，“摩擦”也就是这种紧密接触和迅速分离的过程。在这里要说明一点，如果分离过程十分迅速，以至远小于电荷泄漏速度时，即使两个导体也同样可以带电。

一种物质是亲电子的还是疏电子的，是相对的概念。比如说，A对于B来说是亲电子的，也许对于C就是疏电子的。表1—2—1是一些物质的摩擦系列。它是按照亲电子的程度顺序排列的，越靠右面，亲电子的性质越强。如果用其中任意两种物质相互摩擦，靠左面的一

表1—2—1 一些物质的摩擦系列

亲电子趋势加强																			
玻 璃	晴 纶	尼 龙 纤 维	尼 龙	羊 毛	绸	人 造 丝	棉 纱	纸	麻	钢 铁	聚 苯 乙 烯	硬 橡 胶	醋 酸 纤 维 素	合 成 橡 胶	聚 酯 纤 维	丙 纶	聚 乙 烯	聚 氯 乙 稀	聚 四 氟 乙 烯

种带正电，而靠右面的带负电。除此之外，摩擦系列还与温度、湿度等环境因素有关。因此，这个次序可能由于客观条件的不同而有某些出入。

紧密接触和迅速分离还有其它的表现形式，如撕裂、剥离、拉伸、加捻、经过辊轴、互相撞击等等。这些过程都会使介质带电。

“静电”，就是这样一些附着在介质表面上而很难移动的电荷。

附着在介质表面上的电荷，对外界表现为一定的电势。电势 V 的大小，取决于电荷量 Q 和被附着介质的分布电容 C 。它们之间的关系为

$$Q = C V \quad (1-2-1)$$

式中 Q 的单位为库仑， C 的单位为法拉， V 的单位为伏特。一个带有一定数量电荷的介质薄膜，在悬空时，由于它的分布电容很小，因而可以表现出极高的电势；而把同一薄膜移至有金属背景的地方，由于此时的分布电容可以变得很大，还是那些电荷，电势又会变得很小。所以，从原则上来讲，静电危害虽然常常以高电势的形态出现，但实际上，起作用的却是电势和电荷（或电容）两个因素综合的结果。这是由于，引起危害的是静电火花能量，而静电火花的能量是等于

$$\frac{1}{2} C V^2 \text{ 或 } \frac{1}{2} Q V.$$

在一个指定的绝缘体的带电过程中，随着电荷的逐步增加，绝缘体的电压就会上升。由于任何物质的绝缘电阻不可能是无限大，所以，通过绝缘电阻的电荷洩漏会随电压的上升而加大。当带电过程和洩漏过程的速度相等时，绝缘体上的静电荷数量就不再变化，而达到稳定的电压。如果这个稳定电压低于发生静电火花放电的最低电压，则不会发生火花放电过程，如果可能达到的稳定电压，高于绝缘体当时所处状态发生火花放电所需电压时，那么，在还没有达到稳定电压之前即发生火花放电。火花放电发生之后，静电荷即洩放，电压也随之降低。如果此时带静电的过程仍然继续，那么电压又再逐步上升。

刚才已经提到，介质表面的静电荷是可以自行逸散的，从理论上说，完全逸散掉需要无限长的时间。通常我们是用静电荷逸散掉原来的一半所需的时间来衡量，这个时间称为半衰期。半衰期的长短，与介质本身的表面电阻率有关。一般来说，表面电阻率在 $10^8 \Omega$ 以下的介质，静电荷可以瞬间逸散，不会引起什么危害；超过 $10^{11} \Omega$ 的介质，静电荷就较难逸散了。如果介质在当时所处环境时的分布电容很小时，就会表现出很高的静电压而带来静电的潜在危险。目前，绝大多数的人造材料和合成材料，表面电阻值都在 $10^{12} \Omega$ 左右，有些甚至高达 $10^{15} \Omega$ 以上。在这种情况下，若不特别加以处理，静电就是不可避免的了。

不过，介质的表面电阻与它当时所处的环境条件有关。较大的湿度和较高的温度，都会加快静电的逸散。这一点，在后面一章中还要讨论到。

二、固体介质薄膜与金属表面的接触：

在化工生产中，固态连续相带静电主要表现在薄膜或薄片上。面产生静电的原因，多数情况下，是由于介质薄膜与金属辊轴紧密的接触再分离的过程。所以，特别讨论一下介质薄膜与金属表面的接触是有意义的。

在化工生产中所涉及的薄膜或薄片都是用流延、拉伸、吹塑或压延等手段制成的。产器表面都很光滑，并且具有一定的可塑性或弹性。当这些薄片或薄膜与经过抛光的金属表面接触时，两者的最小接触距离可以达到分子的大小，也就是说，可以达到 10^{-7} 厘米左右的数量级。在这种情况下，正象前面所说的那样，在界面上，两种物质可以发生电子的转移。电负性较小元素的疏电子物质表面，越过界面

转入含有电负性较大元素的亲电子物质的表面。而相反的过程是较难的。转移的结果，前者留下

了多余的空穴，而后者有了多余电子，这样，就在界面上形成了双电层。双电层的形成，使两种物质之间产



生电势差，这种电势差就是所谓的“接触电势”。它的数量级大约只有 $10^{-3} - 10^{-1}$ 伏那么多，随物质的不同而异。

图 1—2—1 接触电势和双电层

这样小的接触电势能给静电带来多大问题呢？可以看一下，把两物质分开为相距一厘米，有什么后果。

介质薄膜与金属相接触，实际上形成了一个电容器。根据定义，这个电容器的电容值为

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 / d \text{ 法拉/米} \quad (1-2-2)$$

式中 ϵ_0 是绝对介电常数， ϵ_r 是介质的相对介电常数， d 是两物质间的距离。

两物质相距 10^{-7} 厘米时，电容为

$$C_1 = \epsilon_r \epsilon_0 / 10^{-9} \text{ 法拉/米} \quad (1-2-3)$$

当把它们分开为相距 1 厘米时，电容为

$$C_2 = \epsilon_r \epsilon_0 / 10^{-2} \text{ 法拉/米} \quad (1-2-5)$$

如果两物质彼此分离时，双电层间没有任何电子的回流，那么根据式 (1-2-1) 可得

$$C_1 V_1 = C_2 V_2 \quad (1-2-5)$$

即当原来的接触电势为 0.01 伏，分开为 1 厘米距离时，电势将升高为

$$V_2 = \frac{C_1 V_1}{C_2} = 10^5 \text{ 伏}.$$

即这个介质薄膜表现为10万伏的高电压。

当然，实际上，在两物质分离时，总有一部分电子要回流，而且还有一部分电荷会被空气中受宇宙线作用而生成的离子所中和。所以，真正表现出来的电压并没有计算出来的那么高。但不管怎样，有时即使显示数千伏的电压也是有潜在危险的。

一个介质薄膜或薄片经过金属辊轴的情况，就是上面所说的接触和分离的过程。在介质薄膜与金属辊轴接触时形成双电层，经过辊轴后，就带着某一种极性的电荷离去。

三、固体介质薄膜带电的积累和火花放电能量：

由于从微观角度来看，无论是介质薄膜表面还是辊轴表面，都是凹凸不平的。因此，如果薄膜是在多辊装置中运行，每经过一个辊轴，总要在原来的基础上增加一些新的接触面，所以，每经过一个辊轴，介质薄膜上所带的静电就要增加一

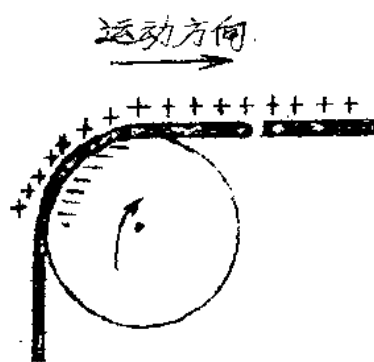


图 1—2—2 介质薄膜经过金属辊轴时的带电

些。但是由于已经带电部分的静电场的作用，使得进一步建立双电层变得困难，同时在运行过程中还有部分电荷自行逸散或产生火花放电，所以，在经过几个辊轴之后，表面电荷密度不再进一步增加，即达到饱和状态。(参看图1—2—3)。