

工业中的静电及其防护

〔苏〕B.K.马克西莫夫 等

丁昌第 译

柯 林 校

国防工业出版社

TM 21-49
3 7

工业中的静电及其防护

[苏] Б. К. 马克西莫夫 编著
A. A. 布赫

丁昌第 译
柯林 校

国防工业出版社

380964

内 容 简 介

本书是科学技术普及性读物。书中以通俗易懂的形式介绍静电的基本知识,讲述电介质材料上产生电荷的机理,介绍物体带电参数的测定方法,以及静电测量用仪器的一般原理。书中还讲述了工业生产中采用的防静电的主要措施。本书内容浅显,可供工业企业中从事与静电防护有关的工作的电工人员阅读。

Статическое Электричество в Промышленности
и Защита от Него

Б. К. Максимов А. А. Обух

《Энергия》1978

工业中的静电及其防护

【苏】Б. К. 马克西莫夫 编著

А. А. 布赫

丁昌第 译

柯林 校

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张2⁵/₁₆ 49千字

1987年11月第一版 1987年11月第一次印刷 印数: 0,001—2,000册

统一书号: 15034·3053 定价: 0.52元

译 者 的 话

当前，随着工业的高速发展，静电危害已遍及到各个工业部门，如石油、化工、纺织、造纸、电子和国防工业等。它不仅影响产品质量，而且还造成重大燃爆事故。因此，我们翻译了苏联出版的《工业中的静电及其防护》这本小册子。本书较系统地介绍了静电的基础知识、静电的测量仪器和测量方法以及如何防止静电的故障和灾害等，可供从事这方面工作的工程技术人员参考。

由于译者水平不高，译文中难免有错误和不妥之处，敬希读者批评指正。

目 录

一、静电的基础知识.....	1
二、测定电介质静电起电各种参数的 仪器和测量方法.....	14
三、工业静电的防护.....	35
附录.....	44
参考文献.....	70

一、静电的基础知识

关于静电可以理解是分布在电介质表面或电介质体内或绝缘导体表面上的处于相对稳定状态的电荷。静电荷通常是随着带电体一起在空间移动的。

就物理、化学结构而言，所有物质都是电中性的，也就是说，具有等量的正负电荷。如果物体带有过剩的某种符号的电荷，则物体便成为带电体。某物体得到或向另一物体给出过多的同号电荷的过程，就是起电过程。相互作用的物体之间的电荷转移，是在接触界面上进行的，或者是由于复杂的理化过程在接触界面附近进行的。电中性的两个相互接触的物体分离后，可能各自带上符号相反的电荷。在两物体相互作用时，从一物体向另一物体转移的电荷量是静电起电的量度。

电介质材料表现出明显的起电能力。所谓电介质是这样一类物质，在电场的作用下，其中的电荷不象在导体中那样发生流动。这类材料对电流的阻力很大。

自然界中，没有绝对不传导电流的理想电介质。因此任何一种电介质的电导率都不等于零。所以即便是最好的电介质，也具有流散因起电而带上的电荷的性质。只是这种流散过程比导体中的流散过程要缓慢得多。

电介质的电性能用体积电导率 γ (s/m)，即单位体积传导电流的能力来表示。除体积电导率外，材料表面电导率 γ_s (S) 对起电也有很大的影响。实际上，表面电导率可能比体积电导率要大，因为电介质表面上的各种脏物以及溶有

不同物质的水膜等，都会使泄漏电流增大。周围空气的温湿度对表面电导率的影响也是很大的。表面电导率无论是对静电起电过程，还是对静电荷的流散过程，经常起着决定性的作用。

导体和半导体材料，可以参与起电过程，也可以自身起电。物体的起电，在很大程度上取决于起电材料体内或界面层的电荷载体的性质。根据物质的化学性质及物理结构，导电的主要类型可分为三种：电子导电、离子导电和分子离子导电。

电子导电的载流子是电子。导体，特别是金属，是这类导电最典型的代表。金属在起电时很容易得到或失去电子。离子导电的载流子是该物质自身的离子、夹杂物的离子以及离解了的电解质离子。离子导电的典型代表是晶体物质、树脂、漆膜、复合物、玻璃、液体等。就机理来说，分子离子导电近似于离子导电。这种导电的典型代表是胶体物系——乳浊液和悬浮物。

带电分子团或分散内相粒子团（它们被称为分子离子），在胶体物系中，起着载流子的作用。分子离子导电常见于带电的潮湿的液体电介质材料中，如漆、复合物、石油产品及油类等。

实际上，在起电和流散过程中，由于沾污和受潮，三种类型的导电可能同时发生。

物体由于起电失去或得到电荷的代数和是总电荷量，以 q 表示。物质的带电量，尤其是对那些质量和尺寸较大的物质的带电量，用单位面积电荷密度或单位体积电荷密度来衡量。如果由于起电而产生的过量电荷是分布在表面上的，例如象某些固体电介质的起电那样（如揭开薄片，展开纸卷、

布卷等)，则要用表面电荷密度来衡量。此时电荷密度的平均值用下式计算：

$$\sigma = \frac{q}{S} (\text{C/m}^2),$$

式中 q ——总电荷量 (C)；

S ——带电表面面积 (m^2)。

起电后，电荷分布于电介质整体时，就要以平均体积电荷密度来衡量它的带电量。最有代表性的范例是倒入装料料斗的带电松散物质和注入贮槽的液体电介质（如石油产品）。体积电荷密度的平均值等于：

$$\rho = \frac{q}{V} (\text{C/m}^3),$$

式中 V ——带电物料的体积 (m^3)。

在某些线状或带状产品的加工和制造工序中，用单位长度的电荷量来衡量其带电量

$$\omega = \frac{q}{L} (\text{C/m}),$$

式中 L ——长度 (m)。

静电荷的相互作用服从众所周知的静电规律，即异号相吸，同号相斥。因为电介质的电导率很低，可以把由起电而使电介质所带的电荷看做是束缚在某点上。这样，带电体之间或者带电体带电部份之间就必然存在作用力。实践中常能观察到这种现象。例如，两张纸是粘在一起还是互相推斥，就与其上面所带电荷符号有关。在纺织工业生产中，加工合成材料时，经常看到纤维竖起的现象。这就是由于线状纤维经导向辊时，带上了同号电荷的缘故。

在电荷周围构成电场，将带电物体或电中性物体，不管

它是导体还是非导体，只要置于电场内，就可以看到电场对这些物体的作用。表征电荷电场的主要参数是电场强度和各点的电位。

某一点上的电场强度是一个矢量，其量值 E (V/m)，等于电场对该点的电荷的作用力与电荷值之比。在有电荷的空间中，每一点的电场强度都有一定的值。此值与带电体的形状、电导率以及电荷在表面或体内的分布情况有关。电荷电场可以用电力线来描述。空间每一点的电力线密度与该点的场强成正比（图 1）。电荷电场的电力线总是连续的并终止于负电荷。如果在空间只有一种符号的孤立电荷，那么就可以认为，此电荷所建立的电场电力线一直延伸到无穷远处由

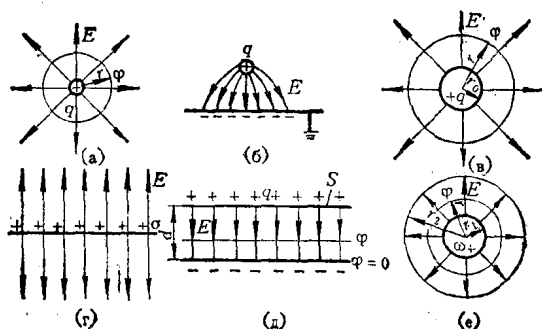


图 1 几种最简单形状的电场

a—集中在一点的电荷；b—接地表面上部的电荷；в—带有电荷 Q 的孤立球体（电场均匀分布于球体内或表面上）；г—表面电荷密度为 σ 的孤立平面；д—带有电荷 Q 的平板电容器；e—单位长度电荷量为 ω 的圆柱形电容器； E —电场强度； φ —等电位面； γ —极坐标； S —面积； r_0 —球体半径； r_1 和 r_2 —电容器内外筒的半径； d —电容器极板间的距离。

它感应产生的异号电荷上。实际上是把大地表面或接地物当做无穷远处的。这样一来，带电体与接地物之间的空间总是有电场存在，并在接地表面上感应出异号电荷（如图1，6）。

电场的能量特征是由电场各点的电位确定的。电场中任一点的电位，等于将与电场电荷同号的单位电荷从无穷远处移到该点所需的能量。在这种情况下，可将距该点无穷远处的电位视为零电位。实际上把大地表面和与大地连通的金属导体作为零电位面。

电荷所在点的电位是该电荷所建立电场的最大电位。

表1中列出几种最简单形状的电场参数计算公式。

在有电荷的空间中，电位相等的点所构成的面，称为等

表1 几种最简单形状的电场参数的计算公式

电荷的几何分布方式	电 场 电 位	电场强度
孤立电荷 q	$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}$	$E = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}$
带有电荷 q 的孤立球体 ($r > r_0$ 时，电荷 q 均匀分布于体内或表面上)	$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}$	$E = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}$
表面电荷密度为 σ 的孤立的无限大平面电场	—	$E = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0}$
极板带电荷 q 的平板电容器	$\varphi = \frac{qd}{\epsilon\epsilon_0 S}$	$E = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0 S}$
单位长度电荷为 ω 的无限长孤立圆柱或电轴	—	$E = \frac{\omega}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r}$
极板单位长度电荷为 ω 的圆柱电容器	$\varphi = \frac{\omega}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{r}{r_1}$	$E = \frac{\omega}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r}$

注： ϵ_0 —真空介电常数， $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ，

ϵ —介质的相对介电常数。

380964

电位面或称等位面。静电场中所有的导体表面，都是等电位的。由此得出结论，如果导体接地，各点的电位均等于零。

带电体对大地或对其他任何零电位表面的电位，取决于该带电体的几何尺寸和坐标。在这些条件不变的情况下，物体的电位取决于电荷量。几何参数（尺寸、外形以及到零电位表面的距离）和电场周围的介质决定着物体对零电位表面的电容。此时物体电位用下式计算：

$$U = \frac{q}{C} (V)$$

式中 C ——物体电容 (F)。

上述公式仅对表面为等位面、内部无电场的导体是正确的。对介质而言，只有在最简单的情况下，才可提出假设电容的问题。所谓最简单的情况，系指物体为电荷均匀分布的平板或其他不复杂形状的物体。对于这种不复杂的物体形状，可计算其电容的近似值。直接测量电介质的电容是不可能的。

从电容、电位和电荷之间的关系中，可以得出重要结论：尽管电位与电荷成正比，但仅根据某一电位还不能判定物体带电量的大小，即判定不出电荷量的大小。带同样电荷的物体远离地面或远离接地体时，物体电容减少，而其电位则相应地增高。因此，电位表明物体带电的程度时，计算物体的电荷则需有电容的数据。

在实际最常见的相互作用的物体相关位置中，应特别注意两个平板的平行放置方式。如垫板上放着纸或塑料布，表面带电的纺织品或传送带在接地表面上方的运动等。上述放置方式可简化为平板电容器，这样简化在实际估算带电量时是有些误差的。

对圆柱系统而言，如亚麻布围绕在辊子上的运动，气流输送中粉体沿管道的运动等，电容可按圆柱形电容器计算确定。

在计算电容时，最重要的是正确地确定介质的介电常数。例如，如果把一块带电平板置于接地表面上方，其与接地表面的距离比带电板的厚度大得多，那就完全可以把板与接地表面间的空气层作为介质。如果把带电板置于接地的导电垫板上时，就必须计算带电板本身的介电常数。如果带电板是由多层不同介电常数的材料所组成，那么就要按电容串联的一般规则计算总电容。

如已知带电体的电容及表面电位平均值，就能很容易计算出静电荷电场的能量：

$$W = \frac{CU^2}{2} \quad (\text{J})$$

带电体或带电材料能否产生火花放电，取决于其表面的电场强度。既然带电体和其相近的接地物件之间的主要绝缘多为空气，那么空气的绝缘强度就决定着带电体表面的最大电场强度。

在正常条件下，空气中均匀电场的起始放电场强约为 $3 \times 10^3 \text{ kV/m}$ (30 kV/cm)。因此，当物体表面电场强度超过这一数值时，在空气隙中就会产生放电现象。

在极不均匀的电场系统内，其场强可以扩展为不完全放电。例如，在单位长度线电荷密度不变的情况下，一个孤立的带电圆筒表面电场强度与圆筒半径成反比（见表1）。圆筒表面的曲率半径越小，其表面电场强度越高。因此，小曲率半径带电体附近的电场强度，可能要超过空气中起始气体放电的临界值。放电区是这样一个范围，超出此范围，电场

强度就不足以继续放电了。小曲率半径电极附近发生的这种不完全放电，叫做电晕放电。当金属物件（如带尖端的金属棒、针、细丝等）上的电压不变时，电晕放电才能发展为稳定状态。从外部现象观察，电晕放电常伴以轻微的 噼啪声，在黑暗中可见到暗蓝色的微光并闻到臭氧味。

实际上，均匀电场是比较少见的。积累电荷的机床、仪表的结构件和加工件、多半具有各种不平度和突出部分。此时，在突出处可观察到电晕放电或火花放电，这取决于零件表面的外形和电场能量。一般能看到的放电不是发生在平板带电电介质上，即不发生在其表面电场近似均匀电场的表面上，而是发生在距其较近的接地金属件上。例如，带电电介质附近的接地棒端部能感应出表面密度较大的电荷并建立场强很高的电场。当电场强度达到临界值时（起始放电场强），接地棒端部就开始向带电电介质表面方向的空气放电。在接地棒附近常能看到一条明显的静电火花放电通道，向平板方向逐渐扩展，并在平板面上消失，而于其上方变为散射的微光。这是因为在放电间隙建立了电场的带电电介质表面电荷是分布在不同点上的。由于电介质电导率低，所以电荷不能流入放电通道。这时，放电间隙电场能量特征的变化，主要是由于在空气中放电而产生的异号离子沉降在带电表面上而引起的。因此，电介质的低表面电导率使放电间隙中的能量释放受到限制。

固体、粉体、液体电介质的起电特性 两物体相接触的同时，在其界面处随着物体间电荷的转移而形成偶电层（图2）。由于两个作用面能量状态的差异，如电子逸出功、温度、电荷载体浓度等的不同，电荷可从一物体迁移到另一物体。一般地说，不同的材料相互作用才能起电。但是，同种电介

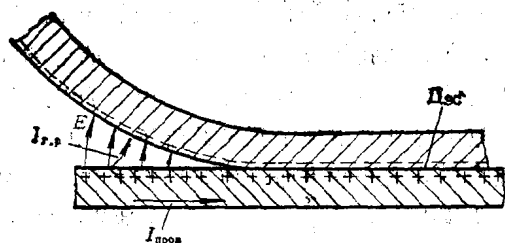


图2 薄膜起电

$I_{г.р}$ —气体放电电流； $I_{провод}$ —传导电流； $\Pi ЭС$ —偶电层。

质材料的物件，由于它们表面沾污和温度不同等，接触时也会形成偶电层。偶电层形成过程中的电荷交换，是在接触面的各接点上进行的。由于摩擦增加接触点数，并且摩擦生热可改变相互作用面的能量状态，所以摩擦能促使物体起电。在界面处形成偶电层的相接触的物体在接触前，若不带有过剩电荷，则是电中性的，即其总电荷量等于零。但是相互接触的每一物体所获得的电荷之密度与偶电层的电荷密度相等。相互作用的物体所带的电荷符号是相反的。可以把偶电层简单地看作电容器，两接触表面就是电容器的极板。将它们机械分离之后，每个物体所获的电荷量相等，符号相反。这时，其静电荷密度将小于被分离的偶电层的电荷密度。这种现象的产生是由于两接触面在分离的瞬间（如从固体表面剥离薄膜）偶电层电场发生畸变而使分离处电场强度急剧增长的缘故。在这种电场的作用下，不同符号的电荷有结合起来而中和的趋向，从而产生电荷的中和电流 $I_{провод}$ 。这一过程受材料电导率的限制。导体材料的电荷，在电场的作用下，能自由流动，当其两接触面分离时，电荷实际上就完全中和了，这就是导体起电很弱的原因。低电导率电介质的电流 $I_{провод}$ 很小，

偶电层上大部份电荷都积存在分离开的表面上。如果这种电荷量很大，那么在物体分离后，其气隙中的电场强度可增高到气体放电的量值。在这种情况下，由于此电场使空气电离，在气隙中另外又出现了正负载流子，在电场力的作用下，载流子沉降在分离开的表面，使其局部中和，这相当于流经气隙的气体放电电流 $I_{r,p}$ 。实际上，这种放电经常伴以暗蓝色的微光和噼啪声。接触表面的分离速度越快，电导率越小，则被空气放电电流和传导电流所中和的电荷越少。非导体接触表面快速分离时，静电荷的最大值是受空气绝缘强度制约的。平板表面可带电荷到 $26.5 \mu\text{C}/\text{m}^2$ ，此时的电场强度为 $3 \times 10^3 \text{ kV}/\text{m}$ ，即接近正常情况下空气中均匀电场的放电场强。实际上，由于接触点数少，以及传导泄漏和气体放电，最大的静电荷密度一般只能达到 $10 \mu\text{C}/\text{m}^2$ 。既然电荷密度在很大程度上取决于带电材料表面的电导率，那么空气的湿度对静电起电过程就会产生重要影响。空气相对湿度不超过 $30 \sim 40\%$ 时，我们可以看到固体的强烈起电过程。当空气湿度增加到 70% 以上时，多数场合下，静电起电实际上降低到最小。材料电阻率若超过 $10^6 \Omega\text{m}$ ，固体就明显地呈现起电现象。

位于带电体电场中的未接地导体和电介质能因静电感应而带电。此时导体起电具有极大的危险性，因为导体在火花通道中放电，能释放出很大的能量。位于外电场中的绝缘导体以下述方式起电：作用于物体上的电场（如图 3）引起导体中电荷的分离，从而沿导体绝缘支承体的表面并在体内建立起电场。绝缘体的表面电导率和体积电导率不等于零，那么在电场力的作用下，电流 $I_{n,s}$ 和 $I_{o,s}$ 就会流向导体。外电场感应出的电荷消耗完，这一过程即告结束。此时导体获得

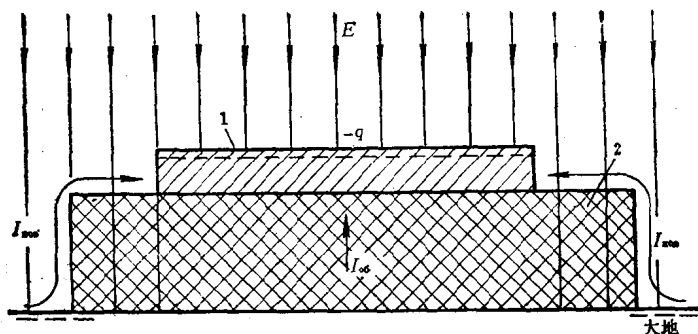


图3 感应起电

1—导体；2—绝缘体； E —外电场； I_{06} ， I_{0on} —由于感应而流经电介质体内及其表面的电流； q —感应出的电荷。

的过剩电荷 q ，等于感应出的电荷量。这样，带电的导体就变成一个充了电的电容器，其能量为：

$$W = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} (\text{J})$$

式中 C ——物体对地电容。

在现代工业生产中，有关松散材料的制造、加工和运输，广泛地采用筛分、沸腾床烘干等这样一些工序。在从事这些作业时，电导率低的粉状材料能强烈地带电。在许多情况下，这种带电现象会破坏工艺过程的进行，如材料粘在设备的壁面上等，而在某些特定条件下，静电放电就会造成爆炸和火灾。必须注意到，看起来很安全的物质，如面粉与砂糖等，在悬浮状态下，是很容易燃烧的。松散材料某些颗粒的起电，是因为颗粒之间和颗粒与工艺器具的壁面相互碰撞而引起的。这时，颗粒所获得的电荷量与其分散度、电导率，与设备壁面的电导率、周围空气湿度、颗粒间相互作用的强烈程度、碰撞时的接触面积等有关。颗粒越小，颗粒与设备壁

面的电导率越低，空气相对湿度越小，相互作用越强烈，颗粒之间和颗粒与设备壁面碰撞时的接触面积越大，则起电就越强烈。电中性颗粒相互碰撞时，电荷进行等量交换。此时，一个颗粒如带正电荷，另一颗粒则带负电荷。从整体看，全部物料呈电中性。当颗粒与管壁相碰撞时，如用气流沿金属、玻璃或塑料管道输送时，颗粒可能获得或失去电荷。管道内颗粒相互碰撞过程中，电荷可能增加。电荷的极限值决定于许多因素，但主要因素原则上与制约整块固体电荷极限值的相同。这些因素是颗粒电导率、设备壁面电导率、气体放电等。所输送物料进入的料斗或旋风除尘器中，积存大量带有过量同号电荷的物料。于是产生电场，在电荷量甚大时，便会起火花。带电颗粒团的电荷能存留很长时间。电荷的流散速度取决于材料体积电导率和表面电导率，并在很大程度上与周围的空气湿度有关。置于接地导体表面上的材料的电导率越高，其电荷流散速度越快。用气流沿接地金属管道输送的过程中，在带电物料倒入料斗时，料斗使电路闭合，所输送物料的起电电流即可从金属管道上导走。沿电介质材料制的管道用气流输送物料时，管道表面也起电。积累的电荷使管道出现很高电位，因此，触及这些部位会被电击并产生火花。在带电很多的情况下，可能沿管道表面向接地件方向放电，甚至可击穿管壁。

液体电介质沿固体表面的流动，如沿管道的流动，在一定的条件下，亦能引起强烈的起电现象。如果液体电阻率高于 $10^{10}\Omega\cdot\text{m}$ ，那么易燃液体的起电会产生静电放电并引燃其蒸气。沿管道流动液体的起电机理，可用液相与固相界面形成的偶电层的机械破坏来解释。任何一种电介质液体，不管它具有多高的电阻率，不管它有多高的纯度，其内部总有一定数量的