

静电技术应用专题系列介绍

第四讲 静电放电与静电危害

任光瑞 陈加兴

(北京理工大学应用物理系)

在许多工业生产中,由于不同物质之间的接触、分离等原因,会产生不同程度的静电;而物体带电到一定量时,又会发生不同形式的放电。本文在概述静电现象的基础上,指出物体带电和静电放电都可能给工业生产带来种种危害,从而使人们充分认识在当今工业生产中,预防静电事故的发生是不容忽视的问题。

在日常生活和生产活动中,静电的产生、积累和消散作为一种自然现象总是存在的,而且是不可避免的。本世纪初以来,随着现代科学技术和现代工业的迅猛发展,各类静电问题出现在人们面前,迫使人们去研究它、利用它。现代静电学的研究和发展主要包括两个方面,即静电应用技术和防静电危害技术。本文仅就工业生产中的静电危害作一简略介绍,目的在于增强人们在生产中的防静电危害意识,从而预防静电事故的发生。

一、静电放电现象

众所周知,呈电中性的两种不同物质,无论是固体、粉体,还是液体、气体,只要与大地绝缘,都可通过相互接触、分离、流动、振动、破裂、粉碎等力学过程和光、热的辐射作用以及电场、电晕等电的作用,导致物质的电中性受到破坏,使物质中的一种电荷多于另一种电荷,即物体或物体的某一部分带有净电荷,该物体就成为带电体。

物体的带电过程亦称为起电过程或电荷积累过程。一般来说,不同的物质和不同的生产工艺过程,它们的起电的过程和起电量的大小极不相同,影响因素颇为复杂,往往需要针对具体产品的具体工艺过程用实验的方法加以研究

确定。如在摩擦起电过程中,起电的同时还伴有电荷的泄漏,其起电方程为

$$Q = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} Q_0 [1 - e^{-(\alpha + \beta)t}],$$

其中 Q 为起电电量; Q_0 为不计泄漏时的饱和起电电量,它仅取决于摩擦物本身的性质; α 为起电系数,它与摩擦物性质及摩擦系数有关; β 为泄漏系数,它与物体的电导率、气体放电以及在接触和摩擦后分离时的电复合等有关。

物体带电后,在其周围空间将产生电场,若电场的强度超过附近电介质的绝缘击穿场强,物体就会发生放电。一般来说,因为常用气体的绝缘击穿场强比常用绝缘固体和绝缘液体的击穿场强要低,所以在气体中容易发生放电。在气体中的静电放电主要有三种形式:即火花放电、电晕放电和沿面放电。它与高压输电线周围出现的电晕放电或由于绝缘击穿产生的火花放电等没有本质上的差别,只不过物体所带的静电荷的数量一般都较小(面电荷密度约为 $10^{-5}\text{C}/\text{m}^2$,很难超过 $10^{-3}\text{C}/\text{m}^2$),且大多为电介质带电,所带电荷不易流动,因此放电电流比普通放电电流要小得多。不过也有例外,雷电也属静电放电,它的放电电流可达 $20\text{—}200\text{kA}$,电量达 $10\text{—}160\text{C}$,电压可达 $10^8\text{—}10^9\text{V}$ 。因雷电现象非本文论及内容,故不多述。

所谓气体放电就是指气体中的电传导。在

正常状态下,空气中因宇宙射线和地层射线的作用,只有少量带电粒子,这时气体是不容易导电的绝缘体,但在一定的条件下,却会有不同程度的导电性。例如,当空气中存在电场时,带电粒子在电场力作用下将在电场中作加速运动,这些带电粒子在行进过程中将与中性原子或分子不断发生碰撞,每碰撞一次,带电粒子就将自身能量的一部分或全部交给中性原子或分子。当电场足够强时,带电粒子的动能将达到或超过中性原子或分子的电离能,此时受碰撞的原子或分子将以一定的几率分裂成正离子和电子(如图1所示),这种现象称为碰撞电离。碰撞电离产生的新电子和新正离子与原有的带电粒子再被电场加速,又进一步引起新的电离,产生新的正离子和电子。可见,每次碰撞都将使正离子和电子数倍增。当然,当电子与正离子相

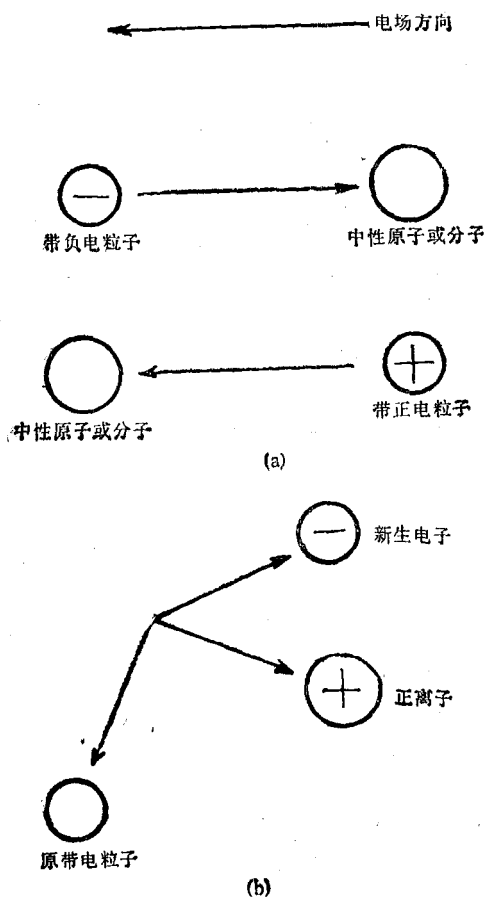


图1 碰撞电离过程示意图
(a) 碰撞前; (b) 碰撞后

遇时,又能相互中和还原为中性原子或分子,这种现象称为复合。综上所述,在电场作用下,空气中的带电粒子实际上是处在不断地产生和复合的过程中。如果带电粒子的产生速度远大于复合速度,则电场中的电子和正离子犹如雪崩式地增殖,这种现象称为电子雪崩,如图2所示。由图2可以看出,在电子雪崩过程中,电子群逆电场方向扩展,而在它的后面残留着圆锥状的正离子云(由于正离子的迁移率小,可视为它们不动)。如两电极间的电场足够强时,则在电极间的整个空间都将形成电子雪崩,此时空气实际上已变成了导体,两电极被短路,两极间的电流剧增,这通常称为击穿。击穿时还伴有爆炸声和明亮闪光,这就是火花放电现象。产生火花放电的电压称为火花电压。如果连接两极的电源具有持续的供电能力,在火花放电之后将发展成为稳定的弧光放电或辉光放电。若电源不具备这种供电能力,电极储存的电荷在放电过程中被中和之后便不能得到及时的补充,电极间的电压就会下降,放电亦随之消失。当然,若两极间的电压随时间再次增加到火花电压时,将再度发生火花放电。但由于静电荷的再度积聚需要一定的时间,不具备持续的供电能力,所以在火花放电之后,不再发展成为弧光或辉光放电。火花放电常发生在孤立的导体构件、绝缘的人体和导体产品上。

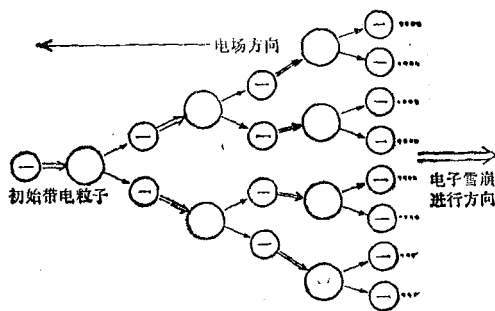


图2 电子雪崩示意图

在尖端带电的情况下,电场极不均匀,尖端附近的局部区域电场最强,电子雪崩仅发生在该强电场区内。在此区域外的弱场区,电子动能很小,故不能使中性原子或分子电离,所以电

子雪崩不能越过强电场区域的边界，如图 3 所示。进入弱场区的电子群，通常将附着于电子亲和性强的氧、水汽，特别是含有卤族元素的气体等原子、分子上，形成负离子，由它们来输送电流。这些负离子在行进途中也将与中性原子、分子反复碰撞；驱动中性原子、分子运动，从而在两电极间形成一股低速气流，称为电晕风。此类放电称为电晕放电。在强场区内可以听到微弱的嘶嘶声，看到微弱的发光，并具有持续性。电晕放电一般发生在带电体表面或接地导体表面的突出部分或有楞角（如角铁、槽钢、喷嘴、法兰盘、手柄、控制杆等）的地方。

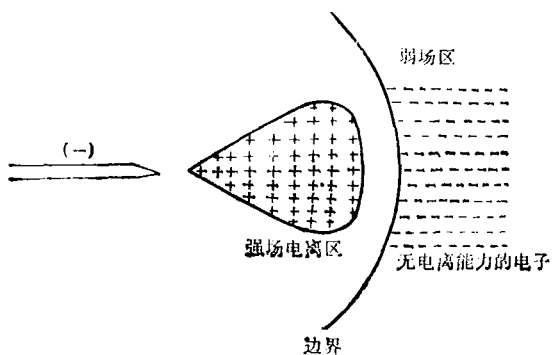


图 3 非均匀场中的雪崩

放电时沿着带电绝缘体表面伴有形状大致固定的发光(光条呈树叉状)，这种放电现象称为沿面放电(或沿面电晕)。当绝缘体带电量特别大或在带电绝缘体的背面邻近处存在接地金属物时，容易发生沿面放电。沿面放电的产生及伸展过程将随表面状态(特别是表面电导率)的不同而有很大的差异，因而它受到表面污损状况和大气湿度的影响。随着电压的增高，可在表面产生闪络。为了阻止这种闪络的发生，可采用加长表面、距离的方法，如在绝缘子上设置几个凹凸或叠纹即可。

二、静电放电的危害

1. 静电放电会引起爆炸性混合物(可燃性气体、液体和粉尘等)燃烧、爆炸

由于带电空间、被绝缘的导体或绝缘物表面积聚的电荷所具有的能量，在前述种种形式

的放电过程中释放出来，转变为热能，使放电回路中气体的温度迅速上升，如果周围有爆炸性混合物，可能诱发其着火。能够发生着火的条件是放电能量需大于爆炸性混合物的最小着火能；爆炸性混合物在爆炸范围之内。在火花放电的情况下，因放电通道中的电阻率很低，放电电流较大，温度高且上升速率快，因而着火率较高。人们根据大电容器放电的实验结果，认为可以用下式来推算火花通道上的温度^[1]：

$$v \geq \sqrt{\frac{\gamma k T}{M}},$$

其中 v 为温度扩散速度，在空气中可达 $(1-3) \times 10^3 \text{m/s}$ ，在氢气中可达 $(3-4) \times 10^3 \text{m/s}$ ； M 为分子量； T 为温度； γ 为定压比热和定容比热之比，对双原子分子， γ 为 1.4； k 为玻耳兹曼常数。据此，可推出在空气中放电时的温度约为 $2 \times 10^3 - 10^4 \text{K}$ ，而在氢气中放电时的温度约为 $10^4 - 1.5 \times 10^4 \text{K}$ 。对静电产生的火花放电，也可以认为大致遵循相同的规律。根据推算结果，不难看出火花放电的瞬时高温十分惊人！毋庸置疑，它将成为爆炸事故(包括着火)的火源。应指出的是，在放电时空间积累的电能不能在一次放电中全部放出，导体上积累的电荷在一次放电中也只能释放出大部分；在带电粒子云形成的空间带电和绝缘物表面带电的场合，在一次放电之后，总有相当一部分的电荷未被中和而残留下来。所以，在一次放电中只是部分能量转变为热能。不过从安全角度出发，在制定安全对策时，人们总是认为电场所储能量通过一次放电全部释放出来。另外，爆炸混合物也不一定恰在最小点火能处着火。这是因为物质的最小点火能是利用已充电电容器对某种物质单次放电引起着火为前提而测得的。在生产实际中的静电放电与电容器单次放电除波形上有较大差异外，实际中的静电放电多是由一系列反复放电构成，亦即爆炸性混合物是处在反复放电之中。这样，即使每次注入的能量不多，但随反复次数的增加，着火点将随注入的能量变化，显然反复放电较单次放电更容易引起着火。实验表明，若单次放电时的最小点

火能为 W_m , 则当增加反复放电的次数和缩短反复放电的周期时, 在 $W_m/10$ 处就可能着火。考虑到温度及易燃易爆物本身的条件, 有的场合在 $W_m/100$ 处也可能着火。由此可见, 着火率还和放电形态及现场环境密切相关, 这也是制定防灾对策要考虑的因素。

静电放电的引燃性是工业生产中的不安全因素, 由它引起的爆炸(燃烧)事故在石油化工、食品、制药、采矿等许多工业部门均有发生, 给人类带来了巨大的损失和痛苦。人们曾做过许多研究, 并得到大量的研究成果。实验表明^[2], 当绝缘体带电的面电荷密度达到 $1 \times 10^{-4} \text{C/m}^2$ 以上时, 表面放电可放出数百微焦耳的能量, 这种放电也具有引燃性。E. Heidelberg 指出, 75cm^2 的带电塑料板与直径为 20mm 的接地球放电的能量足以引燃乙烷与空气的混合物。直径较大的接地球引燃率较高^[3]。M. Glor 用摩擦的方法使塑料板带电, 当塑料板带电面积达 0.13m^2 时, 塑料板放电能引燃丙烷、丁烷、2, 2'-二甲基丙烷、乙醚、丙酮、乙醇、醋酸乙酯和烷烃的混合物等气体^[4]。N. Wilson 研究了聚合织品和棉织品放电电量与引燃的关系。实验表明^[5], 带负电的纤维织品放电电量大约为 $0.1\mu\text{C}$ 时, 就能点燃天然气, 而点燃氢气的放电电量大约为 $0.02\mu\text{C}$, 并观察到带负电的表面放电比带正电的表面放电持续时间短, 放电能量大。Klinkenberg 根据荷兰壳牌石油公司二十多年的生产实际, 对石油起电机理进行了研究, 结果表明, 许多着火事故也起源于静电放电。他还于 1958 年首次在实验装置上复现了用管道输送油品时, 储罐中的静电放电引燃油品的事实^[6]。1975 年, Hughes 等人首先在实验装置上成功地复现了用气流输送巧克力粉渣的静电放电火花, 引起 20t 巧克力粉渣储罐起火爆炸事故(在此以前, 曾发生过气流输送巧克力粉时, 33t 巧克力粉的储仓发生爆炸), 并测得导致引爆的静电火花的持续时间达 0.2s , 放电电量约为 $9 \times 10^{-6}\text{C}$ ^[7]。

2. 静电放电使人遭电击, 引起二次灾害

人在各种活动中可以产生和积累静电。人

体带电后, 所储存的电能 W 可按 $W = \frac{1}{2} CV^2$ 来

计算, 这里 C 为人体对地电容, V 为人体对地电位。若人体对地电容取 200pF , V 取 5kV , 则人体储能为 2.5mJ 。当带电人体对地放电或带电物体对人体放电时, 都有放电电流通过人体。这种突然的短暂的放电电流会使人紧张甚至惊慌, 有可能使受电击者发生跌倒、摔伤、中风等二次事故。通过人体的放电电流的大小除与带电的多少有关外, 还与人体的电阻有关, 而人体的电阻因人而异, 皮肤越干燥的人, 其电阻越大, 通过人体的电流就越小。

3. 静电放电的电磁辐射会干扰电子仪器的工作

静电放电时, 总伴有不同频率的电磁辐射。这种电磁辐射作为一种干扰噪声进入仪器, 就会使仪器的信号噪声比降低, 从而使信息质量变坏, 甚至引起信息差错, 导致计算机、继电器、开关等设备的误动作, 因而引起各种事故。例如某饭店, 因静电放电引起客房内的火烟报警器报警; 在火箭发射中, 因静电放电使制导计算机失灵, 导致发射失败; 在银行管理中, 静电放电使计算机误动作, 造成户主互易事故。若这种干扰信号进入录音机、录相机, 就会使圆润的声音变质, 清晰的画面变坏, 影响收听、收视的效果。

这种干扰信号进入通讯设备, 会影响正常的通讯乃至发生不幸的事故。例如, 当飞机在空中穿过云层飞行时, 由于机身和冰晶的摩擦可能带有很强的静电, 于是在机翼、螺旋桨及天线等尖端部分可能发生有光的电晕放电, 这些放电可能产生很强的无线电干扰。严重时, 它能使飞行员失去和地面的联系, 从而使无线电导航失控, 特别是电罗盘无法定向, 有可能导致发生飞行事故。

4. 静电放电使产品质量下降, 甚至报废

在现代电子行业中, 由于电子仪器设备的日益小型化、智能化、多功能化和高精密化, 要求电子器件的集成度愈来愈高, 因而集成电路的线度变得愈来愈小。这必然导致元、器件间的引线变细、间隙变窄、绝缘层变薄, PN 结面

积变小等,从而使集成块的抗静电能力下降。例如, $2N_{2631}N_{99}$ MOSFET 器件在 100V 静电电压作用下即可损坏。可见,静电给电子工业及电子仪器仪表工业带来的危害已不可忽视。归纳起来,静电放电对电子器件造成的危害主要是两个方面:一是静电放电会使 MOS 器件的栅极和多层布线电路层间的介质击穿,前者使器件输入极损坏,后者造成引线短路或断路,使器件失效;二是静电放电电流会引起局部过热,从而会使 PN 结熔断,薄膜电阻阻值变化或熔断,引线熔断等,造成短路或断路,使组件报废。

在感光胶片、相纸等生产行业,静电放电会使胶片、相纸出现感光斑痕,导致胶片、相纸的质量下降甚至成为废品。

5. 静电放电使电介质的绝缘性能下降

当带电体对介质表面放电时,必有带电粒子碰撞电介质的表面并附于其上,这些残留在介质表面上的电荷将影响附近的电场。电子或正离子碰撞介质时,将自己的动能传给电介质,使电介质局部被加热,最终导致该局部电介质裂化。另外,电介质受带电粒子碰撞后,将有一部分电介质飞溅出去而形成凹坑。根据实验^[6],聚乙烯在 $10^{-8}J$ 能量的电晕放电作用下,将有 $10^{-21}m^3$ 的电介质飞溅出去。在其它一些例子中,电晕放电能量为 $10^{-5}J$ 时,飞溅物质可达 $(5-20) \times 10^{-18}m^3$ 。这些作用使电介质的绝缘性能受到破坏。若静电放电发生在高压电源线的绝缘层上,最终会导致绝缘层击穿,之后高压线犹如电源一样继续向放电通道供电,使放电发展成为弧光放电或辉光放电,从而造成更严重的灾害。

在许多工业生产部门,除了上面介绍的由静电放电引起的危害之外,还存在由静电力引起的种种危害。比如,物体带静电后因吸附尘埃而被污染,造成产品质量下降,严重者使产品报废。光学镜头带静电后因吸附尘埃而使质量

变坏;电子器件生产中会因吸附尘埃使器件失效;在手术室中,静电吸附尘埃使细菌增加;化纤衣服因吸附尘埃而使衣服易脏等等。又如,由于静电的相斥或相吸作用,影响生产的顺利进行,且可能造成废品或次品。在纤维和纺织、印染行业中,抽丝过程产生的静电,不仅使纤维飘动,还使纤维粘合;在纺纱、织布、印染生产过程中产生的静电会导致乱纱、挂条、断头、缠花、污染等故障;在造纸和印刷行业中,静电力将使纸张不能按规定的程序运转和就位;在粉体加工行业中,静电力的直接作用,使粉尘四处飘散,过筛不畅,粘壁堵管,输送不良;在粉体的包装过程中,静电力使粉体落下不匀,称量不准,飞散的粉体使封合困难等等。值得指出的是在许多对静电敏感的粉体生产中,如果说上述的直接作用只是产生故障,那么有些故障会造成静电荷的进一步增加,从而产生静电火花,有可能最终导致发生更严重的灾害。

上面介绍了静电的种种危害,尤以静电放电引起的爆炸事故极大地威胁着安全生产,但这并不是说只要有静电产生就一定带来危害,更不是说静电事故是不可避免的。当然,这需要根据具体情况具体研究解决。有关静电事故的判别及防静电危害措施需另文介绍。

- [1] (日)管义夫编,《静电手册》翻译组译,静电手册,科学出版社,(1981),286.
- [2] (日)劳动者产业安全研究所著,吉林化学工业公司设计院、劳动人事部劳动保护局译,静电安全指南,劳动出版社,(1982),48.
- [3] E. Heidelberg, *Inst. Phys. Conf.*, Ser. 4(1967), 147.
- [4] M. Glor, *J. Electrostatics*, 10(1981), 327.
- [5] N. Wilson, *J. Electrostatics*, 16(1985), 231.
- [6] A. Klinkenberg and J. L. van de Minne, *Electrostatics in the Petroleum Industry*, Elsevier Pub. Co., (1958), 10.
- [7] J. F. Hughes et al., *Inst. Phys. Conf.*, Ser. 27 (1975), 264.
- [8] 岡本英夫,電氣学会誌,80(1960),80.

(上接第 693 页)
 [12] M. Sagawa et al., *J. Appl. Phys.*, 55(1984), 2083.
 [13] R. K. Mishra, *J. Magn. Magn. Mater.*, 54—57, (1986), 450.

[14] K. D. Durst and H. Kronmüller, *Proceedings of 4th International Symposium on Magnetic Anisotropy and Coercivity in Rare Earth-Transition Metal Alloys*, ed. K. Strnat, Dayton Univ. Press, Dayton, (1985), 725.