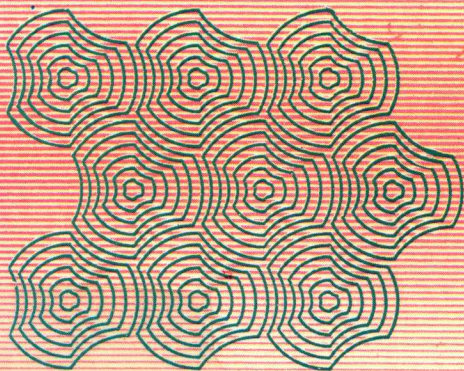


JINGDIANZAIHAIFANGHU

静电灾害防护

马 峰 霍善发 公崇江 编著



陕西科学技术出版社

静电灾害防护

马 峰 霍善发 公崇江 编著

陕西科学技术出版社

(陕)新登字第 002 号

静电灾害防护

马 峰 霍善发 公崇江 编著

陕西科学技术出版社出版发行

(西安北大街 131 号)

陕西豪迪印刷厂印刷

850×1168 毫米 32 开本 13.875 印张 36 万字

1997 年 4 月第 1 版 1997 年 4 月第 1 次印刷

印数:1—2000 册

ISBN7-5369-2622-7/TN·22

定 价: 25.80 元

前 言

静电是人类生活中基本而普遍的一种物理现象。大约在公元前六百年,古希腊人就发现摩擦过的琥珀能吸引诸如麦杆、羽毛等轻小物体;我国东汉时期王充所著《论衡·乱龙篇》里有“顿牟掇芥”的说法,与古希腊人的发现不谋而合,同是有关静电现象的早期记载。大自然中的雷鸣电闪是最为壮观的静电现象,它曾经并将继续给人类的生活及生产带来重大影响。到了近代,随着工业的高速发展,特别是石油化工的发展,塑料、合成橡胶、化学纤维等高分子材料相继问世,且其应用范围日益广泛,这就使得人们日常生活和工业生产中的静电现象更加普遍、频繁和剧烈,由静电引发的各种生产障碍和危害几乎遍及于各个领域和国民经济的各部门,日益引起人们的关注。

何谓静电?以往比较传统的定义是,相对于观察者静止不动的电荷叫静电。然而,绝对静止不动的电荷是不存在的。正如水总是由高处流向低处一样,物体或空间中的电荷总由高电位向低电位移动,只不过移动的速率随电位差和物质电导率的大小而有很大差异。所以,在此意义上可把静电定义为:在物体或空间极缓慢地移动,以致其磁场效应较之电场效应可忽略不计的电荷的带电现象。总之,静电是与流电(由电荷的宏观定向运动而形成,所表现出的主要是磁场效应)相比较而言的,它是一种处于相对稳定、或移动极为缓慢的电。静电的作用仅仅取决于电荷的位置、分布、多少及周围的环境,而电磁和电热现象则主要取决于电荷的运动——电流。必须注意到静电与流电有着不同的特点,遵守不同的规律;因此,想要防止和消除静电危害,就应对其进行专门的研究。

在静电情况下,物体带电后将在其周围空间激发不随时间而变化的电场——静电场,而且电场总是与电荷相联系着的。因此,

研究静电,离不开对于静电场的研究。作为一种特殊的物质,静电场的基本特征是具有能量和力的作用,而位于电场空间的其他物体将会受这些作用而表现出一系列的物理效应,主要有:静电的力学效应、放电效应和静电感应。可以说,静电在人类生活和工业生产中造成的种种危害都是基于上述的这些效应。

静电对工业生产的危害大体上可分为三类。第一类是静电的力学效应引起的吸附或排斥作用给生产带来的不利影响,以及由静电的放电效应引起的电子元器件的击穿损害和放电噪声导致计算机误动作等,这类静电危害称为静电障碍。静电障碍的涉及面非常广泛,几乎遍及于一切生产部门,如粉体加工、塑料和橡胶制品成型、纺织、印刷、感光胶片以及电子、航空、航天工业等。其直接后果往往是降低产品质量和劳动生产率。第二类静电危害是对人员的静电电击。电击往往是人手与带电体发生静电放电时,放电电流通过人体内部,对心脏、神经等部位造成伤害。由于静电放电的能量很小,还未见过生产工艺过程中的静电电击直接造成人员丧生的报道;但电击往往会使操作人员产生恐惧情绪而使生产效率下降;在一些比较危险的操作场所,静电电击引发的诸如高空坠落等二次事故,则有可能造成人员的伤亡。第三类静电危害是由于静电放电火花作为点火源在充满活性介质的生产场所引起的突发性燃爆事件,它带来一次性的巨大损失,使生产设备和厂房破坏,并造成人员伤亡。这类静电危害称为静电灾害(或静电事故),大多发生在石油、化工、采矿、粉体加工、火炸药及火工品等工业部门,如苯罐及其他易燃液体、易燃气体容器的爆炸,药粉、煤粉及其他粉体的燃烧爆炸,巨型油轮的爆炸等静电成灾的例子很多。

由上可见,在三类静电危害中,以第三类危害、即静电放电火花引起的燃爆灾害最为严重。而在工业生产中,传送或分离中的固体绝缘材料、输送或搅拌中的粉体材料、流动或冲刷中的绝缘液体、高速喷射的蒸汽或气体都可能产生和积累足以成灾的危险静电。随着科学技术的发展和生产、使用易燃易爆物品的工业部门对静

电防护的迫切需要,建立在静电的抑制、泄漏与中和等原理基础上的各种防灾技术在工业生产中的应用日益广泛,对减少或防止静电灾害发挥着越来越重要的作用。但由于静电现象的复杂性及现有静电理论的不完善性,要想更好地提高防护效果,必须进一步加强静电防灾理论和实践的研究。本书就是基于上述背景而编写的一部着重介绍静电灾害防护理论与实践的著作。

本书是在马峰同志近年来应西安地区部分院所、厂矿之邀开设静电防灾讲习班的基础上编写而成的,重点是介绍工业生产中静电起电过程和防止静电灾害的措施。全书共分5部分:1. 静电学的基本原理。讲述静电学的基础理论,主要是静电场的基本规律和性质。2. 工业生产中的静电起电。结合生产实际,全面而系统地阐述了不同状态的物质静电起电的物理过程和数学描述,着重揭示固体、液体、气体、粉体和人体的静电起电规律以及影响起电的诸因素。3. 静电灾害的形成与分析。结合一些典型的静电灾害实例,分析静电灾害的形成条件及预测、处理静电灾害的一般原则和方法。4. 防静电灾害技术。详细论述了静电灾害的防护原理和技术,归纳出工艺控制、接地、增湿、掺杂、电离空气及控制场所的危险程度等六种防护措施。对每种措施,都密切联系生产实际,分别从防护原理、实施技术、设备器材和使用效果诸方面加以介绍,具有较强的实用性。该部分还叙述了人体静电的防护和雷电灾害的预防。5. 静电的测量。阐述静电防灾中各种静电量的测量原理和方法,还特别介绍了使用日益广泛的防静电制品的测量。

本书第1、2、4部分由马峰编写,第3部分由公崇江编写,第5部分由霍善发编写,全书由马峰修改并统稿。

本书力图为从事静电防灾工作的科技人员、工程技术人员、操作人员及相关的管理人员提供一部既有一定理论水平、又有较高实用价值的用书。亦可作为大专院校有关专业开设静电课的教材或参考书。

由于作者水平有限,加之仓促成书,谬误及不妥之处在所难

免,敬请读者批评指正。

编著者

一九九六年十月于西安

目 录

1 静电学的基本原理	(1)
1.1 物质的电结构和电学性质	(1)
1.1.1 电荷与电荷守恒定律	(1)
1.1.2 物质的电结构	(2)
1.1.3 导体和绝缘体、聚合物	(5)
1.1.4 物质的电阻率	(7)
1.1.5 静电的导体和非导体	(12)
1.2 静电场的基本规律	(13)
1.2.1 库仑定律	(14)
1.2.2 电场强度和高斯定理	(16)
1.2.3 电位和环流定理	(21)
1.3 静电场中的导体和介质	(26)
1.3.1 静电场中的导体	(26)
1.3.2 静电场中的电介质	(30)
1.4 电容、静电能	(35)
1.4.1 电容器及其电容	(35)
1.4.2 静电能	(40)
2 工业生产中的静电起电	(42)
2.1 固体的起电	(42)
2.1.1 固体材料的接触起电	(43)
2.1.2 固体起电的其他形式	(60)
2.1.3 静电的流散和积累	(65)
2.2 粉体起电	(71)
2.2.1 粉体起电的一般概念	(71)
2.2.2 气流输送粉体的起电规律	(73)

2.2.3	火炸药的静电起电	(81)
2.2.4	煤矿静电	(89)
2.3	液体的起电	(96)
2.3.1	液体起电的偶电层理论	(96)
2.3.2	液体的流动起电	(101)
2.3.3	液体起电的其他方式	(106)
2.4	烃类液体的起电	(109)
2.4.1	输油管道中的静电起电	(109)
2.4.2	过滤器的静电起电	(114)
2.4.3	储油罐的静电起电	(117)
2.4.4	铁路槽车的静电起电	(122)
2.4.5	汽车油罐车的静电起电	(125)
2.4.6	飞机燃油系统的静电起电	(128)
2.4.7	油轮的静电起电	(131)
2.5	气体的起电	(133)
2.5.1	高压气体起电的一般理论	(134)
2.5.2	几种典型的高压气体起电	(137)
2.6	人体起电	(142)
2.6.1	人体静电的定义及起电方式	(142)
2.6.2	人体的静电特性和起电规律	(148)
2.6.3	影响人体带电的主要因素	(155)
2.7	大气起电和雷暴起电	(160)
2.7.1	大气静电	(160)
2.7.2	雷暴起电	(162)
3	静电灾害的形成与分析	(166)
3.1	工业生产中的静电灾害	(167)
3.1.1	静电灾害的概况	(167)
3.1.2	静电灾害的实例	(169)
3.2	静电放电与介质击穿	(179)

3.2.1	气体放电的物理过程及其特性	(179)
3.2.2	静电放电的类型及其规律	(185)
3.2.3	静电放电的能量	(198)
3.3	静电灾害的形成	(205)
3.3.1	放电火花的引燃机理	(206)
3.3.2	物质的燃爆性能参数	(208)
3.4	静电灾害的预测和分析	(218)
3.4.1	静电灾害的预测	(218)
3.4.2	静电灾害的分析	(230)
4	防静电灾害技术	(238)
4.1	工艺控制法	(239)
4.1.1	固体静电的工艺控制法	(239)
4.1.2	粉体静电的工艺控制法	(241)
4.1.3	液态物料静电的工艺控制法	(244)
4.1.4	气体静电的工艺控制法	(255)
4.2	静电接地	(257)
4.2.1	静电接地的类型	(258)
4.2.2	静电接地的对象和范围	(259)
4.2.3	静电接地系统的各种电阻	(261)
4.2.4	静电接地的器材	(273)
4.2.5	静电接地的方法	(275)
4.2.6	关于静电接地效果的几点讨论	(283)
4.3	增湿	(287)
4.3.1	增湿法泄漏静电的机理	(287)
4.3.2	增湿的方法	(289)
4.3.3	应用增湿法的注意事项	(290)
4.3.4	增湿法的应用举例	(292)
4.4	掺杂	(294)
4.4.1	化学抗静电剂的应用	(295)

4.4.2	导电性填充料与抗静电制品	(314)
4.4.3	导电纤维与抗静电织物	(320)
4.5	电离空气法	(324)
4.5.1	自感应式消电器	(325)
4.5.2	通用型外接高压电源式消电器	(332)
4.5.3	送风型外接高压电源式消电器	(338)
4.5.4	防爆型外接高压电源式消电器	(341)
4.5.5	放射源式消电器	(342)
4.5.6	静电消除器的选择和安装	(347)
4.6	控制场所的危险程度	(350)
4.6.1	以不可燃介质代替可燃介质	(350)
4.6.2	降低爆炸性混合物的浓度	(351)
4.6.3	使用不活泼气体置换氧气	(352)
4.7	人体静电的防护措施	(354)
4.7.1	防静电鞋	(355)
4.7.2	防静电地坪	(356)
4.7.3	防静电腕带	(357)
4.7.4	防静电工作服	(358)
4.8	雷电灾害的预防	(359)
4.8.1	防雷装置	(360)
4.8.2	避雷器	(365)
4.8.3	消雷器	(366)
5	静电的测量	(369)
5.1	静电位的测量	(370)
5.1.1	静电位测量仪表	(371)
5.1.2	静电位的测量方法	(383)
5.2	电量和电量密度的测量	(387)
5.2.1	导体电量的测量	(387)
5.2.2	绝缘体电量的测量	(388)

5.2.3	液体电荷密度的测量	(390)
5.2.4	空间电荷的测量	(392)
5.2.5	表面电荷的测量	(394)
5.2.6	产生电荷量的测量	(397)
5.2.7	放电电荷量的测量	(399)
5.3	电阻和电阻率的测量	(402)
5.3.1	绝缘电阻的测量	(402)
5.3.2	接地电阻和跨接电阻的测量	(405)
5.3.3	泄漏电阻的测量	(406)
5.3.4	人体电阻的测量	(407)
5.3.5	固体材料电阻率的测量	(408)
5.3.6	液体电导率的测量	(410)
5.3.7	粉体比电阻的测量	(412)
5.3.8	防静电制品电阻的测量	(413)
5.4	其他参数的测量	(419)
5.4.1	电容的测量	(419)
5.4.2	介电常数的测量	(422)
5.4.3	静电半衰期的测量	(424)
参考文献		(427)

静电学的基本原理

1.1 物质的电结构和电学性质

1.1.1 电荷与电荷守恒定律

电性是物质的基本特性之一。两种不同材料的物体,例如干燥的丝绸和玻璃棒互相摩擦后,都具有吸引毛发、羽毛、纸屑等轻小物体的性质。物体有了这种吸引轻小物体的性质,就说它带了电或带了电荷。带电的物体称为带电体。使物体带电的过程叫起电。上述用摩擦的方法使物体带电的过程叫摩擦起电。顺便指出,摩擦起电虽然是静电带电的主要方式,但却不是唯一的方式,还存在着多种静电起电过程;而且,即就摩擦起电本身来说,也不是一种单一的起电方式,而是包含多种起电机理在内的复杂过程;这些都将在今后有关章节中述及。带电体吸引轻小物体能力的强弱与它所带电的多少有关,表示物体所带电荷多少程度的量称为电量。习惯上也常以“电荷”一词代表带电体及其所带电量。

实验证明,物体所带电荷有两种,而且也只有两种:一种是与丝绸摩擦过的玻璃棒所带电荷相同的,叫正电荷;另一种是与玻璃棒摩擦过的丝绸所带电荷相同的,叫负电荷。将一系列物体按如下的顺序排列起来:玻璃、人发、尼龙丝、羊毛、丝绸、纸、麻、钢、合成橡胶、晴纶、聚乙烯。从中取任意两个物体摩擦,则前面的物体带正电,后面的物体带负电(但应注意,这个排列顺序往往要受物体的

表面状态和环境温湿度的影响)。实验还发现,任何带电体之间都具有相互作用,而且是带同号电荷的物体相互排斥,带异号电荷的物体相互吸引,吸引力或排斥力的大小与物体所带电量有关。通常把带电体之间的相互作用称为电力。根据电力的大小可以确定物体所带电量。

现在要问:物体带电的实质究竟是什么?下述一些实验事实,可以帮助我们了解这一问题。当把负电荷逐渐加到一个原来带正电的物体上去时,发现物体所带的正电荷先是逐渐减少,以至完全失去,只有在完全失去正电荷之后,该物体才开始显出带负电的性质;反之,一个原来带负电的物体,也必须在负电荷逐渐减少以至完全失去后,才能带上正电。由此可见,异号电荷可以互相中和。再如在摩擦起电中,原来两个不带电的物体,经过摩擦后都带了电而且总是一个带正电,另一个带数量相等的负电。从这些实验事实出发可以推想:在原来不带电的物体中,也有正负电荷;只不过正负电荷同时存在且数量相等因而相互中和了。而要使物体带正电或负电,就是使物体的正负电荷分离,或把一种电从一个物体移到另一物体上,使前者失去该种电荷,后者得到等量的同种电荷,结果一个物体带上正(负)电荷,另一物体带上负(正)电荷。当这两个物体接触时,正负电荷相互中和,物体都不再显出电性,但两物体的电荷总量不变。以上就是物体带电的实质。

上述物体带电的实质表明,电荷既不能被创生,也不能被消灭;它只能从一个物体转移到另一个物体上,或者从物体的一部分转移到另一部分。简言之,在一孤立系统中无论发生怎样的物理过程,系统的总电量(即正负电量的代数和)恒保持不变。这就是自然界中守恒定律之一的电荷守恒定律。

1.1.2 物质的电结构

物体的静电起电过程及物质的电学性质除受到外界电磁场与环境条件的影响外,主要取决于物质本身的结构。按近代物理学的

观点,任何物质都是由分子所组成,分子又由更小的粒子即原子所组成;而原子则由核及核外电子所组成。

1.1.2.1 电子及原子的核式结构

到目前为止的所有实验都表明,电子是自然界具有最小电量(负电荷)的粒子,所有带电体或其他微观粒子的电量都是电子电量的整数倍。电子的电量 $e=1.602\times 10^{-19}\text{C}$,质量 $m_e=9.109\,5\times 10^{-31}\text{kg}$,电子的半径约为 10^{-15}m 。由此可见,物体所带电荷不是以连续方式出现的,而是以一个个不连续的量值出现的,这称为电荷的量子化。然而,电荷的最小单元、即电子电量的绝对值 e 是如此之小,以致使电的量子性在研究宏观电现象时一般并不表现出来。

近代物理已经证实,物质的最小结构——原子具有典型的核式结构,即原子中央有一个带正电的核,几乎集中了原子的全部质量;电子则以封闭的轨道绕核旋转,与行星绕太阳旋转的情况相似。核的半径约在 $10^{-14}\sim 10^{-15}\text{m}$ 左右,比原子的半径(约为 10^{-10}m)小得多。就原子核而言,又是由一定数量的两种基本粒子质子和中子所组成的。其中质子带正电,中子不带电;而且一个质子所带的正电量与一个电子所带的负电量相等,也是 $1.602\times 10^{-19}\text{C}$;整个原子核所带的正电荷与核外所有电子的负电荷量值相等。

原子核外电子的运动是遵守量子力学规律的。各电子的运动并没有固定的轨道,但因每个电子的能量是量子化取值的,即电子是分布在一系列分立的能级上的,所以可等效地将它们看成是分布在不同的层次上,构成所谓的壳层分布。由主量子数 n 决定的壳层称为主壳层,如对应于 $n=1,2,3,4,\dots$ 的主壳层分别被称为 K、L、M、N……壳层;每个主壳层按副量子数的不同,又分为若干分壳层,如 s、p、d、f……等。一般来说,主量子数 n 越小的壳层,电子的能级就越低,因而也越稳定;又因为每个壳层只能容纳一定数量($2n^2$)的电子,所以电子总是优先排列在最低能级的壳层上,排满后再依次往能级较高的壳层上分布。如第一层容纳 2 个电子、第二层容纳 8 个电子、第三层容纳 18 个电子…等。

由于异号电荷相吸的原因,故在正常状态下原子中的电子是不能脱离原子核的,而核外电子的数目又与核内质子的数目相等,所以原子呈电中性。但如果在某种作用下,中性的原子、原子团或分子失去或得到电子时,它们的正负电荷不再相等,就分别变成了带正电或带负电的正离子或负离子。因此,所谓物体带正电,就是物体比正常状态失去若干电子;而物体带负电,就是物体比正常状态有过多的电子;这表明物体带电的基础在于电子的转移。

各种原子得失电子的能力,主要取决于原子最外壳层上的电子——价电子的势能大小。而价电子势能的大小又与原子的壳层结构、原子半径的大小和原子核内质子的多少有关。除惰性气体外,原子最外壳层电子越少者,越容易失去电子;原子半径越大或核内质子数目越少者,由于核对电子的吸引力较小,也容易失去电子。反之,原子最外层的电子愈多,原子半径愈小或核内质子数愈多,则得到电子形成稳定电子层的能力愈强。由此可见,物质得失电子的能力亦即物体带电的能力是与物质的电结构密切相关的。

1.1.2.2 分子结构

分子是由原子组成的,是保持物质化学性质的最小粒子。各原子间是靠一种被称为化学亲和力的相互作用而形成分子的,这种相互作用又可称为化学键,分为离子键、共价键和金属键三种。

1. 离子键

当电离能很小的金属原子和电子亲合能很大的非金属元素的原子互相接近时,前者可能失去价电子成为正离子,后者容易得到电子成为负离子,正负离子间由于存在着库仑力而相互吸引,从而形成稳定的化学键,称为离子键。由离子键所形成的化合物称离子型化合物。这种化合物的分子,其等效正电荷中心与等效负电荷中心不相重合而带有极性,故属于极性分子。

2. 共价键

由共有电子对把两个原子结合起来的化学键叫共价键。每个原子外层的价电子,若其电子组态不同(例如自旋方向相反),则就

会组成电子对,这些电子对的电子为分子内互相结合的原子所共有,就如同它们在绕这两个原子核运动一样。一些双原子分子,如 H_2 、 N_2 、 O_2 的化学键就属于这一类。除同类原子可通过共价键组成分子外,不同种类的原子也可通过化学键结合成分子,如 H_2O 、 SO_3 、 CH_4 等。由共价键形成的分子,有些正、负等效电荷中心不相重合,属极性分子,有些正、负等效电荷中心是重合的,属无极分子。

3. 金属键

金属键是指自由电子和组成晶格的金属离子间的相互作用。金属原子由于其价电子与原子核联系比较松弛,故容易失去电子而成为正离子。在金属中由于正离子彼此靠得很近而呈现某种规则的排列——晶格。各原子的价电子能脱离各自的原子核成为共有的电子且能在晶格中自由移动,故称之为自由电子。

1.1.3 导体和绝缘体、聚合物

按导电能力的强弱,物体可分为导体和绝缘体(又称电介质或简称介质)。

1.1.3.1 导体

具有大量能在外电场作用下自由移动的带电粒子(电子或离子)、因而能传导电流的物体叫导体。从物质的电结构可知,金属由于其内部有自由电子,所以是良好的导体。电解液也是导体,不过在其中发生电荷传导的不是电子,而是溶解在溶液中的酸、碱、盐等溶质分子离解成的正、负离子,这种正负离子称为自由电荷。电离的气体也是导体,起传导作用的自由电荷也是正、负离子,但负离子往往是电子。

1.1.3.2 电介质

几乎不能传导电荷的物体叫绝缘体,或称电介质。如空气、木材、玻璃、石英、陶瓷、云母、塑料、橡胶、化纤等。电介质的分子结构有两种形式:一种是由共价键结合的气体、液体和固体,由于原子