

# 静电灾害 及其防护

关效圣 编著  
史崇岳  
任洪满

辽宁科学技术出版社

**静电灾害及其防护**

Jingdian Zaihai Jiqi Fanghu

关效圣 史崇岳 任洪满 编著

---

辽宁科学技术出版社出版 (沈阳市南京街6段1里2号)

辽宁省新华书店发行 沈阳新华印刷厂印刷

---

开本: 787×1092 1/32 印张: 13<sup>1</sup>/<sub>8</sub> 字数: 290,000

1986年12月第1版

1986年12月第1次印刷

---

责任编辑: 刘绍山

责任校对: 沈树东

封面设计: 邹君文

---

印数: 1—18,000

统一书号: 15288·244 定价: 2.40 元

## 内 容 提 要

本书是专门论述静电灾害的一本专著，全书共分六章，第一章介绍静电学基础知识，第二章阐述静电产生的机理，第三章讲述静电测量原理与方法，第四章系统介绍静电引起的各类灾害，第五章叙述各种静电灾害的预防原理与措施，第六章通过近百起国内、外各类静电灾害的典型案例分析，进一步阐述静电灾害的起因和预防措施。

本书除可供从事电气方面具体工作的工程技术人员、安全技术干部、技术工人、易燃易爆岗位操作人员和贮运人员阅读外，还可用作静电安全技术培训教材，亦可供从事静电方面的设计、教学、科研等工作的人员参考。

## 前 言

大约在公元前600年的时候,希腊哲学家泰利斯(Thales)就曾叙述过用毛织物摩擦过的琥珀具有一种能吸引轻小物体的能力,也就是我们现在常说的静电起电现象。又经过二千二百年之后,于1600年一位名叫威廉·吉尔伯特(William Gilbert)的英国学者对上述现象在进行深入研究后指出,用丝绸摩擦玻璃或许多其他物质同样也会观察到类似现象。当时曾把这种状态下的物体叫做“琥珀化的”物体,因为按希腊文“电”一词的意思就是“琥珀”。

为了区别直流电、交流电,人们通常把相对于观察者宏观上不发生定向流动的电荷称为静电。人们对静电规律虽然研究得最早,但在1800年之后,由于伏打发明了电池,人们的兴趣便转向了电流现象的研究。1820年奥斯特发现了电流的磁效应,1831年法拉第发明了电磁感应定律,1865年麦克斯韦导出了著名的麦克斯韦方程组,从而全面地揭示了宏观电磁现象的基本规律。近一百多年来电磁理论已成为宏大的现代工业的坚实基础之一,而静电这一古老的课题却长期处于停滞不前的落后状态,直至目前,在静电起电机理方面不论是物理过程还是数学描述仍不够完善,尚缺乏一个和谐的完整的理论。

二十世纪头几十年里,在高速发展的现代化工业的各个领域,如国防、化工、轻工、纺织、造纸、印刷、电子、橡

胶、塑料、制药及易燃易爆物的生产及贮运等部门，都不同程度地遭受了静电的危害，从此又迫使人们不得不把注意力重新转向这一古老的课题。防静电危害问题的研究就成了当代工业生产中安全技术的重要研究内容之一。

在本世纪五十年代，各工业发达国相继成立了静电问题的专门研究机构。至今仅研究静电起电问题的国际会议已达十余次。在我国，随着四化建设的发展静电安全技术的研究已开始着手进行，全国近十个省市建立了静电专业委员会，并出现了专门从事静电研究的研究所。

静电安全技术与静电应用技术是一门新崛起的应用边缘学科，它具有广阔的发展前途。

本书重点是讲述静电产生机理及消除措施。全书共分六章，第一章讲述静电学基础理论知识，第二章阐述静电产生、积聚及消散的规律，第三章介绍静电测量原理与方法，第四章系统讨论静电的故障与灾害，第五章介绍静电消除原理与消除措施，第六章列举近百起国内、外静电灾害典型案例进行分析。

为照顾不同的读者对象的需要，本书在不影响全书系统性的前提下尽量考虑到不同文化程度、不同技术水平的人员能理解本书的基本内容，因此，编排上尽量采用了深浅兼顾的原则。为提高本书各部分内容的实用价值，故在第四、五、六章中尽量避免复杂的计算和理论推演。在前三章的讨论中虽采用了适量的理论分析和数学计算，但力求简明。同时编入了足够的例题，供具有较高水平的人员阅读和参考。

本书除可供从事电气方面具体工作的工程技术人员、安全技术干部、电气技术工人、易燃易爆岗位操作人员、贮运人员阅读外，还可作为静电安全技术的培训教材。同时也可

供从事静电方面的设计、教学、科研工作的人员参考。

本书的一、二、三章由关效圣执笔，四、五、六章由史崇岳执笔，任洪满参与了部分章节的编写工作。

在编写过程中，辽宁大学物理系给予了大力的支持；得到了河北大学瞿建邦、王之朴、林台三位副教授的帮助；公安部沈阳消防科学研究所马宝珠、孙玉梅为本书翻译了部分有关资料，在此一并表示衷心的感谢。

由于编写时间仓促，编者水平有限，书中难免还有错误和不妥之处，如能得到读者批评指正，将不胜感激之至。

**编 者**

1986年6月

# 目 录

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 第一章 静电学基础知识.....     | 1   |
| § 1 物质的电结构.....      | 1   |
| § 2 电量守恒定律.....      | 8   |
| § 3 库仑定律.....        | 9   |
| § 4 静电场.....         | 12  |
| § 5 高斯定理.....        | 26  |
| § 6 高斯定理的应用.....     | 30  |
| § 7 电位与电位差.....      | 36  |
| § 8 静电场中的电介质.....    | 46  |
| § 9 静电场中的导体.....     | 63  |
| § 10 导体的电容.....      | 74  |
| § 11 静电场的能量和静电力..... | 85  |
| 第二章 静电的产生、积聚和消散..... | 89  |
| § 1 固体静电.....        | 89  |
| § 2 粉体静电.....        | 103 |
| § 3 液体静电.....        | 108 |
| § 4 石油静电的产生.....     | 121 |
| § 5 气体静电的产生.....     | 131 |
| § 6 人体静电的产生.....     | 132 |
| § 7 其他静电的产生.....     | 135 |
| § 8 静电的消散.....       | 139 |

|     |                  |     |
|-----|------------------|-----|
| 第三章 | 静电的测量            | 151 |
| § 1 | 静电电位的测量          | 152 |
| § 2 | 静电电量的测量          | 168 |
| § 3 | 静电电荷密度的测量        | 173 |
| § 4 | 静电电流的测量          | 177 |
| § 5 | 静电时间常数的测量        | 181 |
| § 6 | 电阻的测量            | 183 |
| § 7 | 静电电容的测量          | 188 |
| § 8 | 介电常数的测量          | 191 |
| § 9 | 液体与粉体电导率的测量      | 193 |
| 第四章 | 静电引起的故障和灾害       | 197 |
| § 1 | 静电引起的生产故障        | 197 |
| § 2 | 静电引起的电击          | 202 |
| § 3 | 静电放电引起的着火爆炸灾害    | 205 |
| § 4 | 静电安全界限           | 267 |
| 第五章 | 静电的控制与消除         | 271 |
| § 1 | 防止形成危险性混合物       | 271 |
| § 2 | 工艺控制             | 276 |
| § 3 | 静电接地             | 284 |
| § 4 | 增湿               | 293 |
| § 5 | 化学防静电剂           | 296 |
| § 6 | 静电消除器            | 307 |
| § 7 | 防止人体带电           | 345 |
| § 8 | 静电屏蔽             | 349 |
| 第六章 | 静电灾害的实例和分析       | 353 |
| § 1 | 静电事故分析方法         | 353 |
| § 2 | 静电放电与金属碰撞产生的火花类型 | 355 |

|                    |     |
|--------------------|-----|
| § 3 液体的静电灾害·····   | 356 |
| § 4 粉体的静电灾害·····   | 373 |
| § 5 塑料的静电灾害·····   | 388 |
| § 6 橡胶的静电灾害·····   | 396 |
| § 7 气体的静电灾害·····   | 399 |
| § 8 化纤、人体带电灾害····· | 404 |

# 第一章 静电学基础知识

静电的产生、积聚和消散的过程与常见的直流电、交流电相比有着自己独特的规律性。因此，为了防止和消除静电的危害不能采用动力电的常规方法，而必须去探索一些新的途径。为此，本章将对静电场的基本规律进行较为深入的研究。

## §1 物质的电结构

### 一、电子——基元电荷

在电学发展史上，曾有相当长的一段时间物理学家们都认为存在着两种“电液体”，他们认为，这些“电液体”不同于有重量的物质，是一种特殊的“电物质”。

随着分子物理学的进展，由法拉第电解定律得到启发，著名的物理学家亥姆霍兹于1881年大胆地提出：“如果我们承认有化学原子存在，那么我们就不得不得出进一步的结论：不论是正的还是负的电量，都可以分成一定数量的单元电荷，这些单元电荷量就起着电原子的作用。”

电子是英国物理学家约瑟夫·约翰·汤姆逊于1887年在研究气体放电中发现的。汤姆逊通过各种实验，确定了组成阴极射线的粒子的电荷与其本身质量的比值。在各种实验中他得到的荷质比 $e/m$ 大致相同，其平均值约为 $1.7 \times 10^{11}$ 库仑/

千克。如果考虑到从电解定律确定的最小电荷约为 $1.6 \times 10^{-19}$ 库仑的话，那么阴极射线粒子的质量就应等于

$$m \approx \frac{1.6 \times 10^{-19}}{1.7 \times 10^{11}} \approx 9 \times 10^{-31} \text{ 千克。而氢原子的质量为 } 1.7 \times$$

$10^{-27}$  千克即阴极射线粒子约为氢原子质量的 $1/1840$ 。

所有这些都大大地坚定了物理学家的信念：确实存在着一种比原子更小的粒子，这种粒子被称为电子。

1909~1913年美国著名的实验物理学家密立根 (Robert Andrews Millikan) 在美国芝加哥大学对电子电荷量进行一系列巧妙的实验，实验结果不仅决定性地证明了电荷的不连续性质，而且还测出了电子的电荷量约为 $1.6 \times 10^{-19}$ 库仑。从此，“电子”这一作为电荷的最小基元终于为人们所确认了。

## 二、原子及其核型结构

物理学的研究结果指出，不论是气态、液态或固态存在的物质，都是由分子组成的，而分子则是由更小的粒子——原子所组成。原子又是由原子核和核外电子所组成，原子核中又含有质子和中子两种基本粒子。

那么，原子究竟具有什么样的结构呢？这一问题曾引起当时许多物理学家的兴趣。

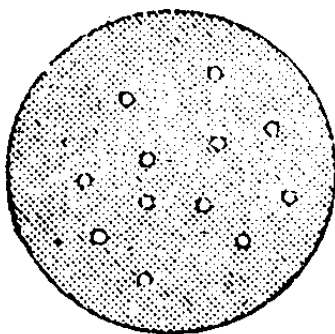
1903年J.J. 汤姆逊首先提出了一个原子模型，他把一个原子整体想象成一个球体，正电荷均匀地分布在整个原子的体积内，而带负电的电子则一粒粒地分布在球体内的各个不同位置上，见图1—1(a)所示。

1908年汤姆逊的学生卢瑟福提出了一种实验方法，用 $\alpha$ 粒子作为探测粒子去轰击金箔中的原子来验证汤姆逊的原子模型。 $\alpha$ 粒子是氦的原子核，所带电量为 $+2e$ ，质量约为电子质量的7400倍。1908~1910年期间盖革(Hans Geiger)和 马

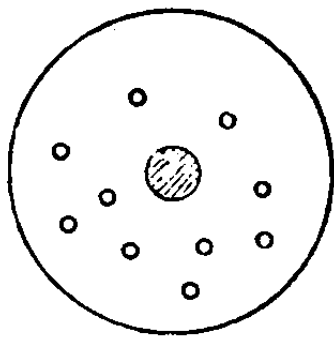
斯顿(Ernest Marsden)在卢瑟福的指导下,从大量的观测中发现,绝大多数 $\alpha$ 粒子穿透金箔后仍按原方向( $\theta = 0$ )或基本上沿原方向( $\theta$ 角很小,一般只有2、3度)前进。同时也发现了约占 $\alpha$ 粒子数1/8000的粒子发生了大于 $90^\circ$ 的大角散射,有的几乎被完全弹了回来( $\theta = 180^\circ$ )。

大角散射现象用汤姆逊模型是无法解释的。卢瑟福当时曾给这一现象一个形象的比喻,他说:“这是我一生中遇到的最不能想象的事情,因为它就象拿15英寸的炮弹去轰击一张薄纸,炮弹居然会弹回来打到自己一样。”

根据上述实验结果,卢瑟福提出了另一个原子模型: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。核的半径比电子轨道半径小得多。核所带的正电荷与核外电子的负电荷量值相等,因此原子通常呈中性。见图1—1(b)所示。



(a) 汤姆逊模型



(b) 卢瑟福模型

图 1—1 原子模型

从以后的实验中证实了卢瑟福的这一模型的正确性。从而,在历史上确认了原子的核型结构。

原子核外的电子运动是遵守量子力学规律的,各电子的运动没有固定的轨道,但每个电子的能量是量子化取值的,即电子是分布在各分立的能级上的(可看成它们是分布在不同

的层上,即通常所说的壳层分布)。核外电子处在最内层时能量最低也最稳定,电子总是尽先排列在最低能级的壳层上。例如,第一层能容纳两个电子,第二层能容纳8个电子,第三层能容纳18个电子,第四层能容纳32个电子等。

由于异号电荷相吸的原因,故在正常情况下原子中的电子是不能脱离原子核的,而核外电子的数目与原子核内质子数相等,所以原子是中性粒子。当中性的原子、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原子、原子团和分子——均称为离子。带正电的被称为正离子,带负电的被称为负离子。

元素的化学性质主要取决于原子最外层的电子——价电子。一般说来,金属容易失去价电子成为正离子,而非金属容易获得电子成为负离子。

### 三、分子结构

分子是由原子组成的。分子是保持物质化学性质的最小粒子。物质的分子由相同原子组成的称为单质,由不同原子组成的叫化合物。

各原子间是靠一种被称为化学亲和力的彼此作用而形成分子的。通常又用化学键的概念来说明分子的构成。化学键通常有三种,即离子键、共价键和金属键。

离子键是当电离能很小的金属原子(例如碱金属原子)和电子亲合能很大的非金属元素(例如卤素)的原子互相接近时,前者可能失去最外层电子成为正离子,后者容易得到电子而成为负离子。正负离子之间由于存在着库仑力而相互吸引,但它们充分接近时离子的电子之间将产生排斥力。当吸引力和排斥力相等时就可以形成稳定的离子键,这时二离子间的静电能最小。食盐结晶的构成就是由离子键将离子结合

起来的典型例子。所有由离子键构成的分子都是有极性的。

由共有电子对把两个原子结合起来的化学键称为共价键。因为每一原子的内层电子仅在自己的原子核附近运动，原子的外层电子则组成电子对，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（双原子分子）运动一样。当这样的分子受到高热或吸收辐射能时就可分解，就又得到了各个原子。例如， $H_2$ 、 $N_2$ 、 $O_2$ 的化学键就属于这一类。除了同类原子可组成分子外，不同种类的原子也可通过共价键将它们结合成分子，如 $H_2O$ （水）， $SO_2$ （二氧化硫）， $CH_4$ （甲烷）， $CO_2$ （二氧化碳）， $NH_3$ （氨）等。在这些分子中如果不同的原子核对共有电子吸引力不同，共有电子就靠近吸引力较强的一方，这方就略显负电性，另一方则略显正电性。这样的分子被称为有极分子，如水、二氧化硫、氨等。而另外一些分子由于电子分布可以认为是对称的，这些分子的正、负电荷的中心重合在一起，分子不显极性故称为无极分子，如双原子分子 $N_2$ ， $O_2$ ， $H_2$ ， $Cl_2$ 及多原子分子 $CH_4$ ， $CCl_4$ 等均属无极分子。

金属键是由自由电子和组成晶格的金属离子间相互作用构成的。金属原子由于其最外层电子与其原子核联系比较松弛，故容易失去而成为正离子。在金属中由于正离子彼此靠得很近而呈规则排列——形成了晶格。各原子的最外层电子，能脱离开各自的原子核成为共有的电子且能在金属中自由移动，故称之为自由电子。

#### 四、导体、半导体和绝缘体

近代物理学的研究表明，晶体中电子共有化的结果，使原来每个原子中具有相同能量的价电子能级，因各原子的相互影响而分裂成为一系列和原来能级很接近的新能

级，这些新能级基本上连成一片而形成新能带。许多实验证明了晶体中能带的存在。有人曾作过下面的实验：用高能电子束射入晶体，把其中一些电子打出来，而晶体中的另外一些电子便由高能级跃迁到低能级，而激发出相适应的辐射。它们的辐射能量大约为几十电子伏，这和晶体中能带宽度是一致的。

由价电子所处的基态能级组成的能带称为价带。在通常状况下，价电子就处在这个价带上，价带的宽度约为几个电子伏。如果价带中所有能级都填满电子，则就称为满带。原子内层的电子虽也有相应的能带，但在这能带上通常都填满电子，对导电不起作用，所以不予考虑。

激发态能级也要形成能带，原子处于基态时，这种能带中没有电子，故称为空带。由于价电子被激发后可跃迁到空带中，并参与导电，所以空带又称为导带。

对于绝缘体和半导体而言，在满带与导带之间总存在着一个间隔，这个间隔被称为禁带。

半导体的禁带较窄，其宽度 $\Delta E_g$ 约从十分之几电子伏至1.5电子伏。绝缘体的禁带较宽，其值 $\Delta E_g$ 约为1.5~10电子伏。从能带结构上看半导体和绝缘体不存在本质上的区别。在任何温度下，由于电子的热运动，总有一些电子从满带越过禁带，激发到导带里去。因为导带中的能级在被热电子占据之前是空着的（空带），因此在热电子进入后，它在外电场的作用下就可定向运动，就使得晶体导电了。但由于绝缘体的禁带较宽，因此在一般温度下，从满带激发到导带的电子是极少的，从而表现出绝缘性。导体的情况就与此完全不同了，有些导体满带与导带交迭在一起而形成一个统一的宽能带；另一些则是价带的能级未被电子填满，即一些被电子

占有的能级和空着的能级紧紧地挨在一起，见图1—2所示。

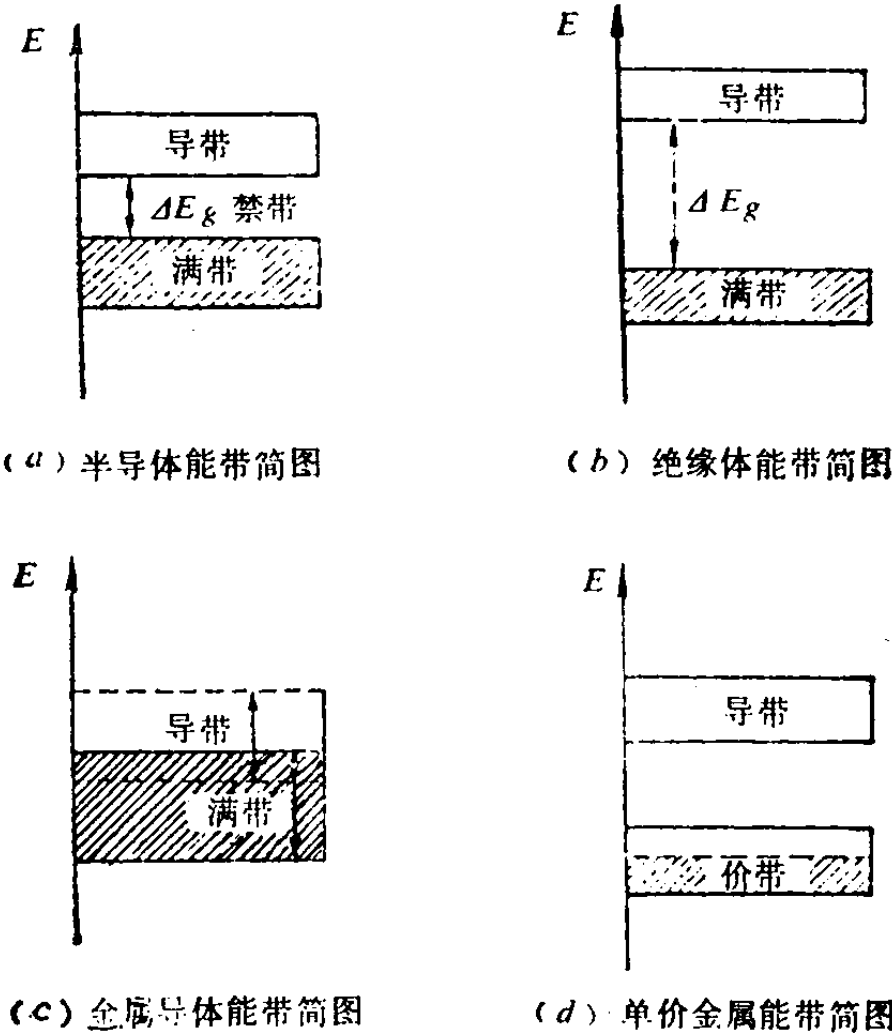


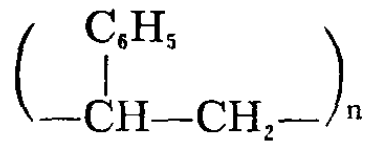
图1—2 晶体的能带简图

也可以从电阻率来区分导体、半导体和绝缘体。电阻率为 $10^{-8} \sim 10^2$ 欧姆·米的物体称为导体，电阻率为 $10^3 \sim 10^{16}$ 欧姆·米的物体，称为绝缘体，而半导体的电阻率则介于导体和绝缘体之间。

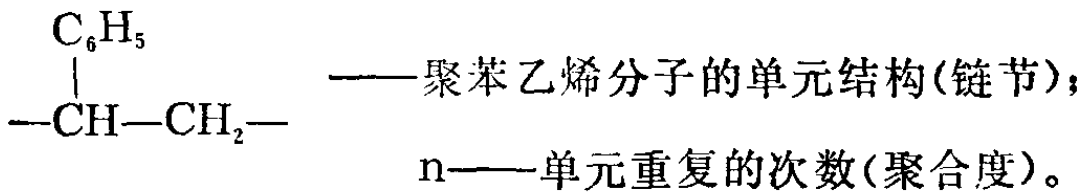
五、高分子化合物

高分子化合物通常是指高分子的碳氢化合物及其衍生物而言的。

高分子化合物是由特定结构的单元多次重复而构成。以聚苯乙烯的分子结构为例



式中



高分子化合物是以其分子内含原子数多（几千至几十万）、分子量大、分子间引力强、机械强度高为主要特征的。

高分子化合物除可制成橡胶、纤维、塑料外，还可制成合成油料、漆料、粘合剂等多种合成材料，在生产及生活中应用都十分广泛。高分子材料非常容易产生和积累静电，因此随着高分子工业的发展给静电研究工作不断提出了新的课题。

## §2 电量守恒定律

自然界中存在着两种性质不同的电荷，其中正电荷用符号“+”表示，而负电荷用“-”表示。如前所述电子是带负电的，因此某中性物体得到电子后将带有负电荷。反之，某中性物体由于构成该物体的原子、原子团或分子失去电子而使得该物体带正电。

无数实验证明，无论摩擦起电过程、感应起电过程、还是其他任何一种起电的过程，其正、负电荷的产生总是遵循着如下的规律：即正、负电荷总是同时出现的，而且这两种