

电 工 要 诀 丛 书

静电安全防护

要诀

郎永强 等编著

第2版



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS

电 工 要 诀 丛 书

静电安全防护要诀

第 2 版

郎永强 等编著



机 械 工 业 出 版 社

本书按照最新国家标准和行业要求,从静电防护实际工作需要出发,详细讲述了静电的产生和消散、危害与防护、测试与计算、控制及消除等知识。内容全面翔实、贴近实际、易懂易学。

本书可作为静电防护工程技术人员,以及电子工业企业、石油化工企业的工厂电工阅读使用;另外,专门从事静电防护培训的职业院校也可以参考本书。

图书在版编目(CIP)数据

静电安全防护要诀/郎永强等编著. —2版. —北京:
机械工业出版社, 2011.3
(电工要诀丛书)
ISBN 978-7-111-33171-1

I. ①静… II. ①郎… III. ①静电-安全技术-基本知识 IV. ①TM08

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第012080号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:付承桂 责任编辑:任鑫

版式设计:霍永明 责任校对:张莉娟

封面设计:姚毅 责任印制:杨曦

北京京丰印刷厂印刷

2011年3月第2版·第1次印刷

130mm×184mm·7.875印张·174千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-33171-1

定价:23.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
电话服务 网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821 封面无防伪标均为盗版

前 言

《静电安全防护要诀》一书自2007年9月出版以来，受到了广大读者的欢迎，在此感谢各位读者对本书的支持和热爱！为了帮助广大读者更好地学习静电安全知识，也为了更进一步增强本书的实用性，我们在第1版的基础上做一些修订和补充，对静电的测试和计算重新做了详细的介绍，加入了大量实用的图表，将一些过时的标准目录删除，并将静电学常用名词解释和定律做了更新整理。同时，还考虑到了一些热心读者的良好建议，一并做了修改，并再次向这些读者表示感谢！

我们相信修订后的《静电安全防护要诀》一定能帮助您技术进步，能力提高！

参加本书编写的还有马德明、郎丰坤、秦丽月、魏守昌、郎卫卫等，郎永强负责全书的统稿工作。

另外，限于自身能力，书中如有不当之处，敬请广大读者批评指正，以便再版时修改。

编著者

目 录

前言

第 1 章 静电的有关概念	1
1.1 静电学常用名词解释	1
1.1.1 电学、静电学基本概念	1
1.1.2 静电起电、静电积聚和静电消散	5
1.1.3 静电放电现象	9
1.1.4 防静电材料及制品	15
1.1.5 静电事故及其防护	17
1.2 静电感应与静电屏蔽	21
1.2.1 静电感应	21
1.2.2 静电屏蔽	23
1.2.3 法拉第筒（笼）	24
第 2 章 静电的产生和消散	27
2.1 静电的产生	27
2.1.1 液体静电的产生	27
2.1.2 固体静电的产生	37
2.1.3 粉体静电的产生	41
2.1.4 气体静电的产生	43
2.1.5 人体静电的产生	44
2.2 静电的消散	46

2.2.1 静电的泄漏	46
2.2.2 静电的气体放电	47
2.2.3 静电耗散材料	53
2.2.4 静电绝缘材料	54
第3章 静电的危害	55
3.1 静电放电的特点	55
3.1.1 静电放电可形成高电位、强电场和瞬时脉冲 大电流	55
3.1.2 静电放电过程会产生强烈的电磁辐射形成电 磁脉冲	55
3.2 静电放电的类型	56
3.2.1 电晕放电	56
3.2.2 火花放电	57
3.2.3 刷形放电	58
3.2.4 传播型刷形放电	59
3.2.5 表面放电	60
3.2.6 电场辐射放电	60
3.3 静电效应的作用危害	61
3.3.1 静电力学效应的危害	61
3.3.2 静电放电热效应的危害	62
3.3.3 静电放电对人体的电击效应	63
3.3.4 静电的强电场效应危害	65
3.3.5 静电放电的电磁脉冲效应危害	65
3.4 静电放电引起的燃烧、爆炸危害	66
3.4.1 静电积聚的安全界限	66
3.4.2 静电的最小点火能量	67
3.5 静电对工业生产的危害	74
3.6 静电对电子行业的危害	76
3.6.1 静电放电对电子行业的危害形式	76

3.6.2 电子器件静电损伤的失效形式	78
3.6.3 电子器件静电放电损伤机理	81
3.7 静电危害的预测	84
第4章 静电的测试与计算	87
4.1 静电测试的重要性	87
4.1.1 影响静电测试的因素	87
4.1.2 静电测试的主要项目	89
4.2 基本静电参量的测试与计算	90
4.2.1 静电电量的测试与计算	90
4.2.2 用法拉第筒测试静电的方法	90
4.2.3 微小电流的测试	92
4.2.4 静电电压（电位）的测试与计算	96
4.2.5 静电电容的测试与计算	106
4.2.6 静电电压衰减时间的测试	111
4.2.7 电阻、电阻率的测试与计算	114
4.3 人体静电参量的测试与计算	128
4.3.1 佩戴腕带时人体对地电阻的测试	128
4.3.2 人体综合电阻测试	129
4.4 防静电设施及器具的性能测试	130
4.4.1 防静电工作服的性能测试	131
4.4.2 防静电鞋的性能测试	133
4.4.3 防静电腕带、鞋束（足跟带）静电性能 测试	134
4.4.4 工作椅、运转车、存放架、工作台的 对地电阻和表面电阻测试	136
4.4.5 手套、指套对地电阻的测试	138
4.4.6 防静电地板、地垫的测试	139
4.4.7 静电消除器消除静电能力的测试	140
4.4.8 防静电设施及器具的检测周期	143

4.5 防静电织物的性能测试	145
4.5.1 防静电织物摩擦起电电压的测试	146
4.5.2 防静电织物面电荷密度测试法	147
4.6 防静电包装材料的性能测试	149
4.6.1 防静电包装材料的静电屏蔽性测试	151
4.6.2 防静电包装材料静电泄漏（衰减）性能 的测试	154
4.6.3 防静电包装材料摩擦起电性能的测试	155
第5章 静电的控制及消除	157
5.1 静电控制法	157
5.1.1 减少静电荷的产生	157
5.1.2 降低静电场合的危险度	159
5.1.3 合理选择工艺过程的材料及设备	164
5.1.4 控制降低摩擦速度或流速	164
5.1.5 控制人体静电	165
5.1.6 静电屏蔽	170
5.2 静电泄漏法	174
5.2.1 自然泄漏法	174
5.2.2 防静电接地	175
5.2.3 增湿	178
5.2.4 添加抗静电剂	181
5.2.5 安装静电中和器	184
5.3 电子工业特殊生产环境内静电灾害的控制 及消除	212
5.3.1 生产环境内的静电防护要求	212
5.3.2 操作人员的静电防范要求	223
5.4 石化工业特殊环境内静电灾害的控制及消除	225
5.4.1 油罐区的静电防范要求	225
5.4.2 油罐车的静电防范措施	233

附录	237
附录 A 防静电标志牌	237
附录 B 防静电工作区内的防静电装备用品配置表	238
附录 C 静电防护三句半	240
参考文献	242

第 1 章 静电的有关概念

1.1 静电学常用名词解释

1.1.1 电学、静电学基本概念

1. 静电

一种处于相对稳定状态的电荷。由它所引起的磁场效应较之电场效应可以忽略不计（静电可由物质的接触与分离、静电感应、介质极化和带电微粒的附着等物理过程而产生）。

2. 静电学

研究静电的相互作用及其所呈现的有关现象的学科。

3. 静电场

静电荷在其周围空间所激发的电场。它是一种特殊的物质，其最基本的特征是对位于该场中的其他电荷施以作用力，且不随时间而改变。

4. 静电位

静电场的标量函数。其梯度冠以负号等于电场强度。静电场中某点的静电位值等于把单位正电荷从该点移至无限远处静电场力所做的功，它也等于单位正电荷在该点的电位能。

5. 静电感应

在静电场影响下引起物体上电荷重新分布的现象。

6. 库仑定律

表示两静止点电荷间相互作用力的定律。其值与两点电荷的电荷量的乘积成正比，而与它们距离的二次方成反比。同性电荷相斥，异性电荷相吸。力的方向沿着两个点电荷的连线。

7. 静电力

亦称库仑力。由于带电体的静电场作用，使其附近的带电体受到的电的作用力。

8. 静电现象

由于带电体的静电场作用而引起的静电放电、静电感应、介质极化以及静电力作用等诸物理现象的统称。

9. 导体的电容

导体的电荷除以其电位，假定所有其他导体的电位为零。

10. 电场强度

描述静电场本身性质的物理量。静电场中任一点的电场强度等于单位电荷在该点所受的作用力，其方向为单位正电荷在该点所受作用力的方向。

11. 电荷

组成实物的某些基本粒子（如质子和电子等）具有的固有属性之一。电荷有两种，即正电荷和负电荷。两静电荷之间存在相互作用，其相互作用规律是同性电荷相互排斥，异性电荷相互吸引。

注：因电荷的量值是以电量来度量的，依此意义，电荷是电量的同义语。

12. 体电荷密度

一体积元内包含的电荷与此体积元之比，当此体积的尺寸趋于零时的极限值。

13. 面电荷密度

一表面元内所包含的电荷与此表面元之比，当此表面的尺寸趋于零时的极限值。

14. 质量电荷密度

物质的单位质量所带的电荷量。

15. 导体

其内部具有大量的能够在电场作用下定向移动的带电粒子（电子、正负离子），因而能很好地传导电流的固态、液态或气态物体。

16. （电）绝缘体

其内部没有可以自由移动的带电粒子（电子、正负离子），因而不能传导电流的物体。

17. （电）介质

（电）绝缘体的学名。在外电场的作用下能发生极化是（电）介质的基本电学特性。

18. （电）（介质）极化

呈电中性状态的电介质，在外电场的作用下，其表面或内部出现正、负束缚电荷的现象。

19. 介电常数，电容率

描述电介质极化性能的物理量。其与电场强度之乘积等于电位移（电通密度）的一个标量或张量。

$$\epsilon E = D$$

注：各向同性介质电常数为一个标量，而各向异性介质的介电常数为一个张量。

20. 相对介电常数，相对电容率

一种介质的介电常数与真空的介电常数之比。

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (\varepsilon_r \text{ 无量纲})$$

21. 电导率

表征材料导电性能的物理量。其与电场强度的乘积等于传导电流密度的一个标量或张量。

$$\sigma E = J$$

22. 静止电导率

绝缘性液体在静止的、不带电状态下的电导率。

23. 有效电导率

绝缘性液体带电后的电导率。

24. 电阻率

表征材料导电性能的物理量，其倒数为电导率。

25. (表)面电阻率

沿试样表面电流方向的直流电场强度与单位长度的表面传导电流之比。

26. 体(积)电阻率

在试样体积电流方向的直流电场强度与该处电流密度之比。

27. (电)中性体

在常态下，正负电荷数量相等(即电荷代数和为零)，对外界不显示电的特性的物体或体系。

28. 带电体

正负电荷数量不相等(即电荷代数和不为零)，对外界显示电的特性的物体或体系。

29. 带电体上的电荷

一个带电体中，一种极性的电荷的总量与另一种极性的

电荷的总量之代数和。

30. 带电区

带电体上积聚静电的部位。

31. 导电性

某些物质所具有的传导电流的性质。

1.1.2 静电起电、静电积聚和静电消散

1. (静电) 起电

使电介质或绝缘导体产生静电荷的过程。

2. 摩擦起电

用摩擦的方法使两物体分别带有等值异号电荷的过程。

3. 冲流起电, 流动起电

液体类物质与固体类物质接触时, 在接触界面形成整体为电中性的偶电层。当此两物质作相对运动时, 由于偶电层被分离, 电中性受到破坏而出现的带电过程。

4. 剥离起电

剥离两个紧密结合的物体时引起电荷分离而使两物体分别带电的过程。

5. 喷射起电

固体、粉体、液体和气体类物质从小截面喷嘴高速喷射时, 由于微粒与喷嘴和空气发生迅速摩擦而使喷嘴和喷射物分别带电的过程。

6. 吸附起电

人体由于吸附场所中的带电微粒而使之产生静电的过程。

7. 沉降起电

各种固体微粒、液体、气体在相互混合接触时, 由于密

度差异发生沉降，使在不同物质交界面上形成的偶电层发生电荷分离而产生静电的过程。

8. 溅泼起电

溅泼液体时，微小的非湿润液滴落在物体表面并在其界面产生偶电层。由于液滴的惯性滚动而发生电荷分离，使液滴及物体分别带上不同符号电荷的过程。

9. 喷雾起电，飞沫起电

喷射在空间的液体类物质由于扩展分散和分离，使之形成许多微小液雾和新的界面，当此偶电层被分离时而产生静电的过程。

10. 感应起电

利用静电感应原理，使导体带电的过程。

11. 破裂起电

固体或粉体类物体破裂时发生电荷分离，由于正负电荷平衡受到破坏而产生静电的过程。

12. 碰撞起电，冲撞起电

粉体物体由于粒子与粒子或粒子与固体之间发生碰撞，形成快速的接触和分离而产生静电的过程。

13. 滴下起电

附着在器壁等处的固体表面上的珠状液体逐渐增大，由于自重形成液体（或小滴），在坠落脱离时而产生静电的过程。

14. 极化起电

在外电场作用下，由于介质极化而使其内部及界面上出现束缚电荷的过程。

15. 静电（起电）序列

根据两种物质相互接触时产生静电的极性，将各种物质

依次排成的序列（根据这种序列，前、后两种物质接触时，前者带正电，后者带负电）。

16. 功函数，逸出功

一个电子从金属或半导体表面逸出时克服势垒所必须做的功。

17. 接触电位差

在没有电流的情况下，两种媒质界面或两种不同种材料接触面间的电位差。

18. 偶电（荷）层

两种物质接触时，在界面上由于电荷迁移而出现大小相等、符号相反的两层电荷。

19. 沉降电位差，沉积电位差

当悬浮于液体中的微粒沉降时，产生沉降起电，使容器内液体的上、下部分分别带上异号电荷而形成的电位差。

20. 冲流电流，流动电流

在流动的液体中，由随液体而流动的电荷所形成的电流。

21. 固定（电荷）层

在固体-液体类接触界面所形成的偶电层中，紧密吸附于固体表面，与固体表面约一个分子直径距离，且不随液体流动的极薄的电荷层。

22. 扩散（电荷）

在固体-液体类接触界面所形成的偶电层中，深入液体内部具有扩散性分布，且随液体流动而移动的一种电荷层。

23. 静电电压

在固体-液体类接触界面所形成的偶电层中，固定（电荷）层与扩散（电荷）层之间的电位差。

24. 静电积聚

由于某种起电使电介质或绝缘体上产生电荷的速率超过电荷的消散速率而在其上呈现同性电荷的积累过程。

25. 静电消散

带电体上的电荷由于静电中和、静电泄漏和静电放电而使之部分或全部消失的现象。

26. 静电中和

带电体上的电荷与其内部和外部相反符号的电荷（电子或离子）的复合而使所带静电部分或全部消失的现象。

27. 静电泄漏

指带电体上的电荷通过带电体内部和其表面等途径而使之部分或全部消失的现象。

28. 泄漏电流

指带电体上的电荷通过各种泄漏途径向大地泄漏的电流。

29. 杂散电流

任何不按制定的通路而流动的电流，这些非制定的通路可以是大地、与大地接触的管线和其他金属物体或构筑物。

30. （电荷）弛豫时间，（电荷）缓和时间

带电体上的电荷（或电位）消散（或下降）至其初始值的 $1/e$ 时所需要的时间。

31. （电荷）半值时间，（电荷）半衰期

带电体上的电荷（或电位）消散（或下降）至其初始值的一半时所需要的时间。

32. 静置时间

在有静电危险的场所进行生产时，由设备停止操作到物料（通常为液体）所带静电消散至安全值以下，允许进行下一步操作所需要的间隔时间。

1.1.3 静电放电现象

1. 静电放电

当带电体周围的场强超过周围介质的绝缘击穿场强时，因介质产生电离而使带电体上的电荷部分或全部消失的现象。

2. 电离

中性原子或分子由于外界作用使其分离成正离子和负离子的过程。

3. 离子电流

由于离子的定向移动而呈现的电流。

4. 气体导电

通过电离气体的导电。

5. 尖端放电

在带导体曲率半径很小处所发生的放电现象。

6. 电晕放电

发生不均匀的、场强很高的电场中的辉光放电。

注：电晕放电时，在电极周围有微弱发光的电晕层。

7. 辉光放电

当电场强度超过某值时，以发光形式表现出来的气体放电现象。此时，没有大的嘶声或噪声，也没有显著的发热或电极的蒸发。

8. 刷形放电

指发生于带电量大的绝缘体与导体之间空气介质中的一

种放电形式，其放电通道不集中，呈分支状。

9. 火花放电

由于分隔两极间的空气或其他电介质材料突然被击穿，使电流急剧上升，电压急剧下降，引起带有瞬间闪光，并有集中通道的短暂放电现象。

10. 表面放电

当带静电的物体接近接地体而在两者间发生放电时，沿带电体表面产生的发光放电，呈树枝状。

11. 火花间隙

一种含有两个或多个电极，用以在特定情况下产生火花放电的器件。

12. 静电放电能量

带电体所形成的静电场通过静电放电所释放出来的总能量。

13. 介质击穿

固体、液体、气体介质及其组合介质在高电压作用下，介质强度丧失而引起导电的跃变现象。介质击穿时，电极间的电压迅速下降到零或接近于零。

注：气体、液体介质击穿后，如切断电压，介质可能恢复其耐电强度。

14. 对地电压

带电体与大地之间的电位差（令大地电位为零）。

15. 击穿电压

使电介质击穿的最低电压称为击穿电压。

16. 电风

电晕放电时，空气电离产生的离子，由于电场力的作用而高速飞离电极，带动气体介质而形成的气流。

17. (静电) 电磁危害

由于静电放电发生的电磁辐射而对电子元器件及仪器所产生的有害影响,如电子仪器发生误动作或故障,或者电子元器件被击穿以及发生静电噪声等现象。

18. 静电斑痕, 静电痕迹

指在未显影的胶片上,由于发生静电放电,使其上显现出放射状的痕迹,或在胶片及其他薄膜表面因静电吸附污物而形成斑迹等现象的统称。

19. 静电噪声

由于静电放电产生的电磁波辐射而对电子装置、通信设施等产生的电磁干扰。

20. 静电半衰期

静电半衰期指试样上的电荷衰减至其终值的 $1/2$ 时所需的时间。对于塑料、橡胶、化纤织物等高分子材料来说,其泄漏电荷的能力通常用静电半衰期表征。静电半衰期 $t_{1/2}$ 与材料自身物理特性的关系为

$$t_{1/2} = 0.69\tau = 0.69\varepsilon\rho = 0.69RC$$

式中 R ——试样的对地泄漏电阻 (Ω);

C ——试样的对地分布电容 (F);

ε ——材料的介电常数 (F/m);

ρ ——材料的电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$)。

各种材料的物理特性是不同的, $t_{1/2}$ 值的差异很大,导静电好的材料可能只有几秒甚至几毫秒,而绝缘材料则可能长达数小时甚至数天。

21. 静电荷的耗散能力

带电体上的电荷由于静电中和、泄漏、放电而使之部分或全部消失的现象,称为静电耗散。

对于绝缘物质带电，或被绝缘的导体带电，因为无法采用依靠向大地泄漏电荷的方法消除静电，所以可利用离子流式静电消除器发出的正、负离子中和带电体上的电荷，离子流式静电消除器的电荷中和能力是其主要参数。

22. 粉体静电的性能参数

粉体是指由固体物质分散而成的细小颗粒，粉体是固体物质的一种特殊形态，其带电性能与固体物质有显著不同。这种不同来源于粉体存在状态的不均匀性和弥散性及粒子之间的无序排列，造成电性能的不均匀性、不稳定性和各向异性。

但是，由于粉体物质一般都具有较大的吸湿性，所以电性能测量受湿度的影响较大。粉体电性能的测量对温度和气压的影响有时也非常敏感。因此，造成了粉体静电性能测量的复现性较差。

用气流输送粉体物质，在工业中已有广泛应用，但是粉体物质在气流加工和管路输送过程中，会频繁地发生物料与管壁、容器壁之间以及粉体物料粒子彼此之间的接触和再分离，呈现明显的带电过程，因而经常产生强烈的静电。同时，在粉体输送过程中，又很容易产生不同强度的放电火花，这就涉及整个输送过程的安全性问题。为了找出粉体在气力输送过程中的起电规律，又考虑到实验的安全性，人们通常是利用惰性固体介质粉粒进行研究。

由于粉体静电受多种因素的影响，因此其定量计算是相当复杂的。实际的计算往往要限定某些条件及利用在某些特性条件下得出的实验系数，因此这种计算就带有一定的局限性和近似性。

23. 人体静电的性能参数

在有些时候，人体也会成为一个危险的静电源，由于人具有活动性，所以其危险性就更大了。

(1) 人体对地电容

由于人体是一个导体，通常人体一旦产生静电，会通过很多方式泄漏到大地中，因而不会积蓄电荷。但是，如果人穿的衣物（如鞋子等）是绝缘的，会使人形成与大地绝缘的孤立导体，这时人体则可能积聚静电荷，人体的电位可能会非常高，此时则可能诱发静电火灾、爆炸事故，也可能使静电敏感的产品质量受到影响。就好比这样一个模型：人体是电容器的一个极板，衣物相当于电容器中的电介质，大地是另一个极板，于是三者构成一个电容器。这个电容器的大小除了受衣物的影响外，还要受个人外貌特征、高矮、胖瘦等的影响。

我们已经知道，电容 C 、电量 q 、和电压 U 之间存在一个这样的基本关系是 $U = q/C$ ，所以不同的人对地的电容是不同的，即使是同一个人在不同的时间场合下，其电容也是不断变化的，于是人体对地的电压也是不断变化的。

(2) 人体对地电阻

人体对地电阻是指人体在正常穿戴静电防护衣物和腕带情况下的对地泄漏电阻值。在静电防护领域中，我们主要关心的是人体对地的电阻，而与人体自身的电阻关系不大。人体对地电阻值的下限主要受人体安全因素的制约。在非正常情况下，人体触及 200 ~ 380V 工频电压时，应确保流过人体的电流小于 5mA。确定人体对地泄漏电阻的上限时，要考虑泄漏电荷的能力。如考虑到某些电子产品对静电较为敏感，人体电位应在 100V 以下，而且从静电起电初始到电压下降至 100V 的时间不得超过 0.1s，否则难保敏感产品不受

损害。如果假定人体的初始电压 $U_0 = 5000\text{V}$ ，人体对地电容 $C = 200\text{pF}$ ，安全电压上限为 100V ，过渡时间为 0.1s ，由式 $U(t) = U_0 e^{-1/(RC)}$ ，可求得人体泄漏电阻为 $1.28 \times 10^8 \Omega$ 。这就是人体接地电阻的上限。工程上要求人体对地电阻须控制在 $1\text{M}\Omega$ 左右。可见人体带电因人体起电情况和人体放电情况而受人体对地电阻和人体对地电容的制约，因而人体对地电阻的控制是人体带电控制的重要手段。

(3) 人体静电位

我们习惯上认为大地的电位为零位，所以人体的静电位就是人体的对地电压。由上面的基本关系式可以看出，人体电压与带电量 q 成正比，与人体对地的电容 C 成反比关系。通常人体的对地电容是很小的，于是实际生产生活中人体电位有时会高达几十千伏的数量级。因为人体电位是造成静电危害的一个直观参数，所以需要作为一个控制指标来认真对待。

24. 液体介质电导率参数

液体静电的发生和液-固交界面处形成的偶电层厚度关系很大，并有计算式

$$\delta = \sqrt{D_m \tau}$$

也就是偶电层厚度 δ 与液体的弛豫时间常数 D_m 的 $1/2$ 次幂成正比。由于 $\tau = \varepsilon/\sigma$ ，所以时间常数的大小主要由电导率 σ 决定，因为对大多数液体介质来说，介电常数 ε 的差别不很大。

由此可知，当电导率增大时，时间常数和偶电层厚度将减小，静电的发生将减少。所以，液体介质的电导率 σ 不但是标志液体绝缘程度好坏的一个物理参数，而且是直接反映液体存在静电危险程度的重要参数。

1.1.4 防静电材料及制品

1. 静电导体

一种具有较低的电阻率，除非使它与地面绝缘，否则其上难以积聚静电荷的材料。

2. 静电非导体

一种具有很高的电阻率，因此能在其上积聚足够数量的静电荷而引起各种静电现象的材料。

3. 静电亚导体

一种电阻率（或电导率）介于静电导体和静电非导体两者之间的材料。

4. 导（静）电材料

指金属和炭等电导率大的材料以及用各种方法（如在绝缘材料中掺入导电材料等）使物体具有导（静）电性能的材料。

5. 导电纤维

全部或部分使用金属或有机物以及防静电剂等导电材料或亚导电材料制成的纤维的统称。导电纤维分金属导电纤维和有机导电纤维。

6. 防静电纤维

采用加入防静电剂的亚导电材料所制成的纤维。

7. 导电橡胶（塑料）

为了降低橡胶（塑料）、材料（或制品）的电阻率，在生产工艺中采用某种措施（如掺入导电材料）而制成的橡胶（塑料）。

8. 导电地面（板）

由电阻率小的材料制成的、旨在提供静电泄漏途径的地

面（板）。

9. 导体涂料，防静电涂料

涂覆在物体表面，能形成牢固附着的连续薄膜，并能去除积聚其上电荷的一种工程材料。

10. 导电垫

为了防止人体及地面上的金属物体的静电带电，在其生产加工中混入金属和炭等导电材料而制成的导电良好的垫子。

11. 亲水性绝缘材料

一种在空气中能吸附水分而在其表面形成水膜的绝缘材料。

12. 防静电织物

通过多种工艺方法，使纤维表面电阻率降低，从而形成或生产出的一种具有防止静电积聚的织物。

13. 防静电服

为了防止人体和衣物的静电积聚，用防静电织物为衣料而缝制的工作服。

14. 防静电鞋

鞋底用电阻变化小的防静电材料制成，不仅具有防止人体静电积聚的性能，而且还能避免因偶然触及工频电（220V 以下）而导致人体遭受电击的鞋类。

15. 导电鞋

具有良好的导电性能，因此可在尽可能短的时间内消除人体静电积聚，但不能防止因偶然触及工频电（220V 以下）而导致人体遭受电击的鞋类。

16. 防静电剂

加入物体中以提高其电导率，使其不能积聚危险的静

电，且又不影响该物体其他性能的物质。

1.1.5 静电事故及其防护

1. 静电安全

指在生产过程中不发生由于静电现象而导致的人受伤害、设备损坏或财产损失的状况和条件。

2. 静电安全工程技术

指为消除和防止静电灾害与事故而采取的各种工程技术方法或防护措施（如静电接地、静电屏蔽、添加防静电剂、相对湿度控制、装设静电消除器，以及静电检测、监控等）。

3. 静电障碍

由于某种静电现象的作用，导致生产系统、设备、工艺过程、材料、产品等发生故障、损害（如生产效率下降、产品质量不良，以致失效、破坏等）的现象或事件。

4. 静电灾害

由于静电放电而导致发生重大财产损失或众多人员伤亡的危害、损害的现象或意外事件（如火灾、爆炸、静电电击以及由此造成的二次事故等）。

5. （静电）二次事故

由于静电电击使人体失去平衡，导致人员由高空坠落或触及其他障碍物而引起的伤害；或造成已存在的火灾、爆炸的后果进一步扩大等危害的现象或事件。

6. 静电电击

由于带电体向人体，或带静电的人体向接地的导体，以及带静电的人体相互间发生静电放电，其所产生的瞬间冲击电流通过人体而引起的病理生理效应。

7. 人体静电

人体由于自身行动或与其他的带电物体相接触或相接近而在人体上产生并积聚的静电。

8. 人体电容

与人体位置、人体姿势、鞋和地面及其他物体等因素有关的人体对地或对其他物体所构成的电容。

9. 人体电阻

人的体内电阻与皮肤电阻之总和。

10. 地

任何一点的电位按惯例取为零的大地或导电物质。

11. 人体接地

通过使用导电垫、导电地面、导电鞋或其他各种接地用具，使人体与大地保持导通状态的措施。

12. （静电）接地

将金属导体（通过接地极）与大地进行电气上的连接，使金属导体的电位接近大地电位的措施。

13. （静电）连接

将彼此间没有良好导电通路的物体进行导电性连接，使其相互间大体上处于相同电位的措施。

14. 静电接地连接系统

带电体上的电荷向大地泄漏、消散的外界导出通道。

15. 静电屏蔽

为了避免外界静电场对带电体或非带电体的影响，或者为了避免带电体的静电场对外界的影响，把带电体或非带电体置于接地的封闭或近乎封闭的金属外壳或金属栅网内的措施。

16. 直接接地

将金属体与大地进行导电性连接的一种接地方式。

17. 间接接地

为使金属以外的物体进行静电接地，将其表面的全部或局部与接地的金属体紧密相接的一种接地方式。

18. 接地极

埋入大地以便与大地良好接触的导体或几个导体的组合。

19. 接地电阻

为接地体与地下零电位面之间接地引线电阻、接地器电阻、接地器与土壤之间的过渡电阻和土壤的溢流电阻之和。

20. 泄漏电阻

物体在不带电的情况下，从被测点到接地连接系统间的等效电阻。

21. 静电泄漏通道

带电区的静电荷通过带电体内部和表面而使之泄漏的途径。

22. 本质安全电路

在规定的试验条件下，正常工作或规定的故障状态下产生的电火花和热效应均不能点燃规定的爆炸性混合物的电路。

23. 静电消除

一种能产生消除带电体上的电荷所必要的正负离子的设备或装置。

24. 放射性静电消除器

利用放射性同位素产生的射线，使周围空气电离成正负离子，以中和积聚在带电体上的表面异性电荷的一种静电消除装置。

25. 离子流式静电消除器

凡利用空气电离以产生为中和带电体上的表面异性电荷所必需的正负离子的各种形式静电消除装置的统称。

26. 电晕放电式外加电源静电消除器

利用外加电源能量使电极发生电晕放电，从而产生为中和带电体上的表面异性电荷所必需的正负离子的一种静电消除装置。

27. 自感应式自放电静电消除器

利用带电体自身的静电能量感应于电极，介此电晕放电而产生正负离子，以中和原带电体上的表面异性电荷的一种静电消除装置。

28. 缓和器

为使管中流动的带电液体减缓流速，以便充分泄漏电荷，使其衰减到安全范围值内而在管路系统中装设的粗径管段或缓和储罐类装置。

29. 增湿

增加空气相对湿度，借以提高设备、材质的表面电导率，从而防止静电积聚的一种增泄措施。

30. 点火源

能引起爆炸性混合物燃烧或爆炸的点燃能源（包括电火花、电弧、热表面和冲击、摩擦火花等）。

31. 点火能

在一定条件下，点燃某一物质所需的能量。

32. 最小点火能（量）

在影响物质点火能的所有因素均处于最敏感状态下，点燃该物质所需的最小电气能量。

33. 引火火花

能释放足够的能量来引燃可燃性混合物的火花。

34. 非引火火花

不能释放足够的能量来引燃可燃性混合物的火花。

1.2 静电感应与静电屏蔽

1.2.1 静电感应

静电感应就是导体在静电场中，其表面不同部位感应出不同电荷或使导体上原有电荷重新分布的现象，如图 1-1 所示。它是导体在静电场中的一种特有现象，由于静电感应，不带电的导体可以变成带电的导体，即不带电的导体可以感应起电。

从图 1-1 中可以看出，图 1-1a 表示中性导体；图 1-1b 表示静电感应，即表示该中性导体在外界电场作用下，其上的电荷宏观移动而使它成为带电体，带有正电位，出现正的对地电压；图 1-1c 表示该导体与接地体之间发生火花放电；图 1-1d 表示该导体接地，其上正电荷泄入大地后，电荷宏观移动停止，该导体又与大地等电位；图 1-1e 表示断去接地线后，该导体带电情况保持不变，仍与大地等电位；图 1-1f 表示撤去外电场后，该导体成为带负电荷的孤立带电体，带有负电位，出现负的对地电压，这就是感应起电；图 1-1g 表示经感应起电的导体再次与接地体之间发生火花放电，其上的电荷通过火花放电被中和掉，复为中性导体。

应当指出，图 1-1b 中导体两端虽然带有极性相反的电荷，但导体仍然是一个等电位体。这时，导体处在静电平衡状态，其两端极性相反的电荷在导体内部产生的附加电场正好抵消外电场，以保持导体内电场强度为零。至于导体外

部，由于导体的存在，电场的分布会受到一定的影响。在电子工业生产中，静电感应及感应起电是常见的静电起电方式，可在导体（包括人体、电子元器件、测试和生产设备等）上产生较高的电压，导致静电对元器件或带电元器件对周围的导体直接接触或非接触式放电。这是一个极容易被人们忽视的危险因素。静电放电是指当带电体周围的场强超过周围介质的绝缘击穿场强时，因介质电离而使带电体上的电荷部分或全部消失的现象。

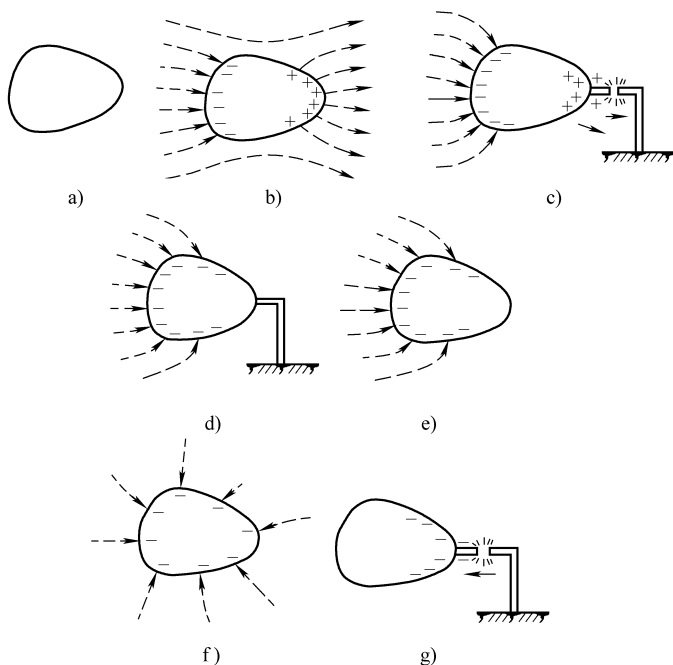


图 1-1 静电感应与静电起电

- a) 中性导体 b) 静电感应 c) 火花放电 d) 导体接地
e) 断开接地线 f) 外界电场消失 g) 导体接地

1.2.2 静电屏蔽

任意形状的空腔导体放入静电场中，达到静电平衡时，空腔内的电场强度为零，这一现象称为被动静电屏蔽。如图 1-2 所示，虽然空腔导体外部出现异性电荷，但静电平衡时，导体是等电位体，因此，导体内电场强度为零。至于内部空腔，因无任何电量存在，根据高斯定理，可知其电场强度为零。

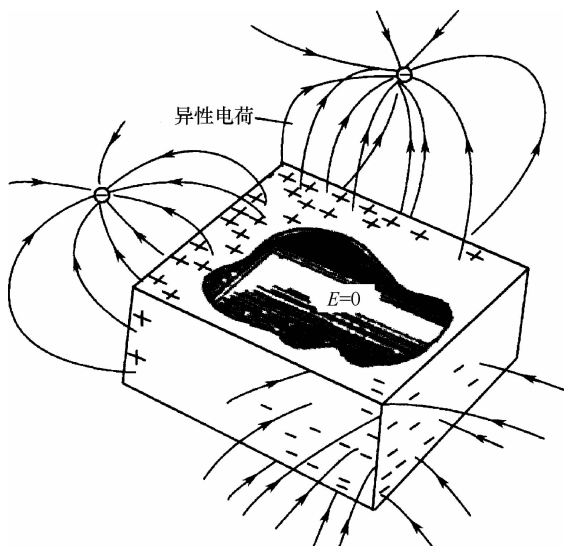


图 1-2 空腔导体对外电场的静电屏蔽

反之，如果空腔导体内有带电体产生电场，则当导体外表面不接地时（见图 1-3a），由于静电感应，导体外部仍有电场；而当导体外表面接地后（见图 1-3b），外表面感应电荷由于接地而中和，电场只存在于导体空腔之内，不能达到

导体外部，这也可用高斯定理予以证明。这种情况称为主动静电屏蔽。在有静电的场所，可利用静电屏蔽原理，防止静电危害。在防止外界电场干扰方面，静电屏蔽原理也得到了广泛应用。需要指出的是，主动静电屏蔽时必须采取屏蔽体接地才能取得屏蔽效果，同时屏蔽体还要呈全封闭状态，不得留有孔洞。

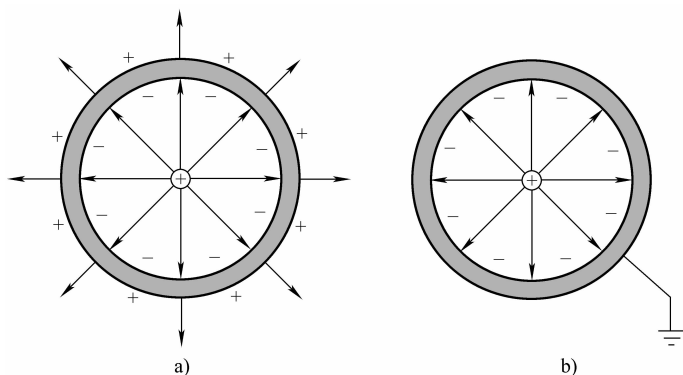


图 1-3 空腔导体对电场的静电屏蔽

a) 外表面不接地 b) 外表面接地

1.2.3 法拉第筒（笼）

在静电测量方面，利用法拉第筒（见图 1-4）静电感应原理可实现对静电电压或电量的测量。在安全防护方面，利用法拉第筒原理和静电接地可预防静电放电所造成的危害。

1. 法拉第筒在静电测量中的应用

在静电测量中，将静电带电物放入法拉第筒内后，在法拉第筒内、外可以感应出等量的异种电荷量（感应出静电电压），如图 1-5a 所示。如果将外筒接地，采取静电屏蔽，就

可防止外界静电场影响，将内筒连接静电电压表或电量表，就可方便地测出静电带电物所带静电电压值（或电量值），如图 1-5b 所示。



图 1-4 法拉第筒外形

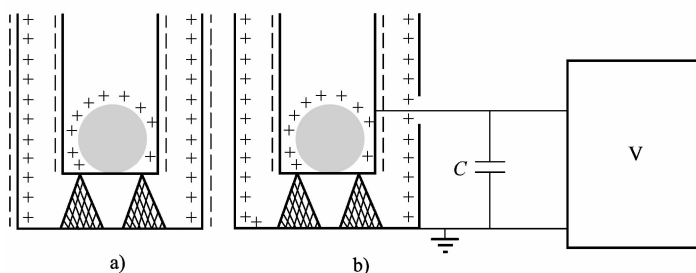


图 1-5 静电感应与测量

a) 感应带电 b) 静电测量

2. 法拉第筒（笼）原理在静电防护中的应用

雷电是一种自然界静电宏观放电现象，其瞬间放电可产生几万伏以上的感应电压，可对建筑物内接地不良的电气设

备、金属构架产生感应放电，对存放的易燃易爆物品等有引起爆炸和燃烧的危险。如果对该建筑物设置避雷系统（如金属避雷带、接地等），并将建筑整体改为钢筋混凝土（钢筋呈网状结构）并接地，建筑物整体可等效为法拉第筒（笼），在雷电释放瞬间可起到被动屏蔽作用，从而保护建筑物内的电气设备和人员安全。

第2章 静电的产生和消散

2.1 静电的产生

2.1.1 液体静电的产生

液体（如树脂、漆类等）在摇晃、冲刷、搅拌、流动、喷溅、灌注、过滤等过程中都可能产生静电。这种静电能引起易燃液体和可燃液体的火灾和爆炸。

1. 液体静电产生的过程

●要点提示：

易爆液体应注意，激烈运动有危险。
流动、喷射和冲击，搅拌、摇晃和飞溅，
过滤、灌注和冲刷，液体破碎水滴溅，
进行喷雾或发泡，以上活动起静电。
三种形态接触时，各有不同看界面。
四项作用有影响，流速不同电位变。

●实用技术：

(1) 气体-液体界面之间的静电产生

液体在喷雾和发泡时能产生大量的静电和较高的电动电位。它的起电原理和液体在管道中流动产生的静电不完全一样。

1) 当水滴破碎时, 大小不等的水滴相比较, 小水滴带负电, 大水滴带正电。

2) 液体、气体间的偶电层都位于接近气体的液体表面以下。

3) 带电是由于从表面剥出的微小液滴而产生的, 这些带电粒子产生于很薄的表面层里。

4) 利用喷雾法得到半径数量级大约为微米级的小液滴, 对这些小液滴进行测量后发现: 同样大小的液滴带正电和带负电的数目, 就平均而言是相等的, 即所谓的小液滴对称带电。表 2-1 给出了使水溶液喷雾所得到的正、负总电荷量。

表 2-1 使水溶液喷雾所得到的正、负总电荷量

(单位: 相对量)

蒸馏水	1mol KCl	1×10^{-2} mol KCl	1×10^{-4} mol KCl	1×10^{-5} mol KCl
+38	+2	+11	+43	+40
-38	-2	-11	-42	-40

(2) 固体-液体界面之间的静电产生

液体与固体形成偶电层的直接原因是正、负离子的转移。偶电层上的电位差通常称为电动电位或 ξ 电位。通常认为, 液体在固体表面的电荷层由两部分组成:

1) 紧贴在固体表面的电荷层称为紧密层, 该层厚度只相当于一个分子直径的数量级, 其所带电荷与界面上固体一侧的电荷符号相反;

2) 电荷与紧密层电荷符号相反, 其厚度则为分子直径的几十倍至几百倍, 称为扩散层。

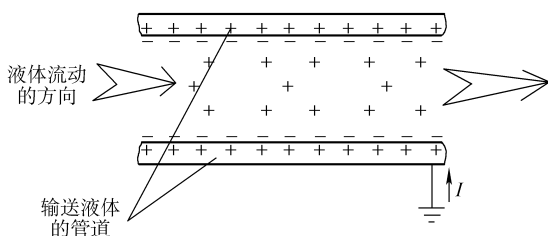


图 2-1 液体在管道内流动时静电荷的分布示意图

图 2-1 所示的是液体在管道内流动时静电荷的分布情况。固体界面上是一层正电荷，在液体中紧密层内是负电荷，而在扩散层内也是正电荷。正电荷随着液体流动形成冲流电流（或液流电流）。冲流电流的大小在数值上等于单位时间内通过管道横截面的电量。在图 2-1 所示的情况下，冲

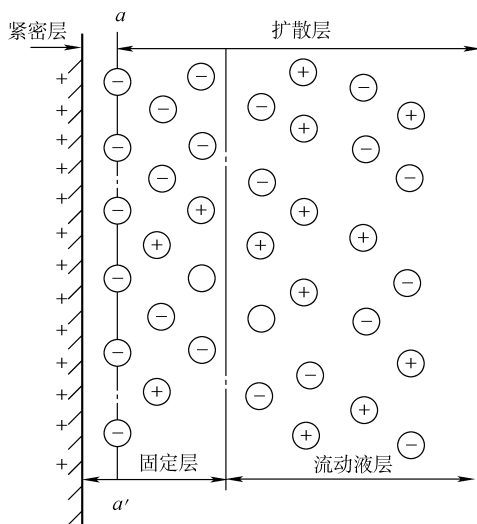


图 2-2 偶电层形成的模型示意图

流电流与液体的流动方向相同。如果管道是接地的，在冲流电流流动过程中，接地的途径上也有相应的电流流过；如果管道是由绝缘材料制成或是对地绝缘，就会在管道上积累大量的静电。

另外，在液体层内除了按电荷分布情况将液体层分为紧密层和扩散层外，还可根据液体层的流速分布情况划分为固定层及流动液层两部分，如图 2-2 所示。

2. 液体静电产生的形式

●要点提示：

冲击带电飞溅起，流动带电有机理。

沉降带电在绝缘，喷射带电小云滴。

●实用技术：

(1) 液体的冲击带电

液体从管道口喷出后遇到壁或板，使液体向上飞溅形成许多微小的液滴，这些液滴在破裂时会带有电荷，并在其间形成电荷云，如图 2-3 所示。这种起电类型在石油产品的贮运中经常遇到。

(2) 液体的流动带电

固体与液体接触时，介质界面处产生偶电层，位于液体侧的扩散层是带电的可动层。当液体在介质管道中因压力差的作用而流动时，扩散层上的电荷由于流动摩擦作用被冲刷下来而随液体作定向运动。这就是液体流动起电的过程。液体流动摩擦起电是工业生产中常见的一种静电带电形式，在石化工业中更为常见，如汽油、航空煤油等低电导率的轻质油品在管线中输送时，由于流动摩擦就能产生静电荷。

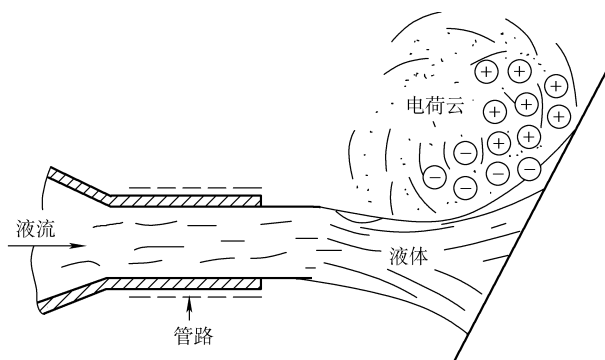


图 2-3 液体的冲击带电示意图

(3) 液体的沉降带电

当悬浮的液体中的微粒沉降时，会使微粒和液体分别带上不同性质的电荷，在容器上下部产生电位差，这就是液体的沉降带电。沉降带电也可以用偶电层解释。水中存在固体微粒时，在固-液表面形成偶电层。当固体微粒下沉时，带走吸附在表面的电荷，使水和离子分别带上不同符号的异性电荷。图 2-4 所示就是液体沉降带电的过程。

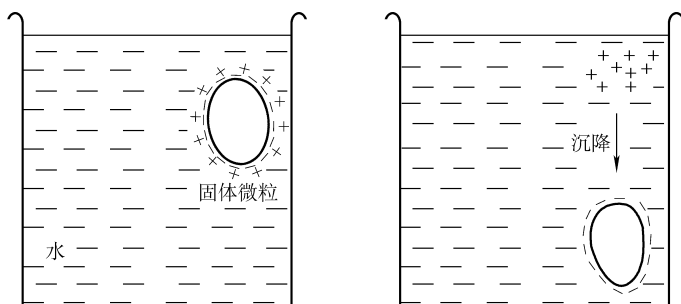


图 2-4 液体沉降带电示意图

(4) 液体的喷射带电

当液体从喷嘴中高速喷出时，会使喷嘴和微粒分别带上符号不同的电荷，这种现象称为喷射带电。这种起电方式的原因也可以由偶电层来解释。由于固态和液态微粒之间存在着迅速接触和分离，接触时，在接触面处形成偶电层，分离时，微粒把一种符号的电荷带走，另一种符号的电荷留在喷嘴壁上，结果使微粒和喷嘴分别带上不同符号的电荷，如图 2-5 所示。另外，当有压力的液体从喷嘴式管口喷出后呈束状，在与空气接触处分裂成很多小液滴，其中比较大的液滴很快沉降，其他微小的液滴停留在空气中形成雾状小液滴云。这个小液滴云会带有大量电荷。

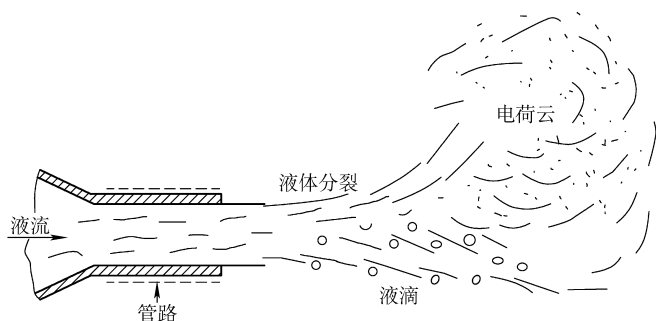


图 2-5 液体喷射带电示意图

3. 液体静电产生的原因

● 要点提示：

电阻率的影响宽，管道材料内壁沿。
水分影响不一般，形状尺寸在壁管。

流速、管径有影响，流体流动效果变。

充分接触过滤器，可能极性都改变。

●实用技术:

(1) 水分的影响

当高电阻率的油品中含有水分时，水虽然不会与油品直接作用使静电增加，但是会与油品中的杂质起作用，从而间接影响油品的带电量。

研究发现，当油品中混入水分在 1% ~ 5% 时，其静电产生量最多，静电危险性也越大。

(2) 杂质对液体静电产生量的影响

研究发现，非常纯净的高度精炼的石油产品在管道内流动时是不容易带电的。液体之所以带电，是因为液体内部存在着已离解的正、负离子，而一般的石油轻油制品的分子是无极分子，因此这类分子一般都不能直接电离。液体中的离子主要来源于其中所含的杂质，当这些杂质离解时就产生了正、负离子。如果在轻油中存在胶体杂质，例如水分子，它就能吸附自由离子而成为带电质点。在生产中常见到这样的现象，当油品中含有少量水时，水在沉降过程中很容易带电，甚至能引起静电事故。由表 2-2 可以看出，往 JP-5 燃油中加入不同量的沥青杂质会明显改变其带电状态。

表 2-2 加入杂质对液体带电的影响

JP-5 燃油	放电次数	电导率/ (S/cm)
无增加物	4	0.011×10^{-12}
加 0.005% 沥青	130	0.5×10^{-12}
加 0.0005% 不溶于石油精的沥青	112	1.2×10^{-12}
加 0.0005% 溶于石油精的沥青	131	1.6×10^{-12}

研究还发现，在液体中加入过多的杂质时，液体反而不容易产生静电了。原因是随着杂质的增多，液体的电导率加大，静电容易泄漏。

(3) 液体流动状态的影响

研究发现，液体流动时，由层流变为湍流时，其带电量就会显著增加。主要原因有

1) 当液体处于湍流状态时，由于增大了液体分子热运动和相互碰撞，就能产生新的空间电荷；

2) 由于速度梯度的变化，使处于偶电层的扩散层处流速变大，因此会使液流中带有更多的电荷。

液体的层流与湍流在管道内的速度分布规律有着很明显的差别。在图 2-6 中可以看出，层流的速度分布曲线呈抛物线形；湍流时管线中靠近管壁处有较大的速度梯度。

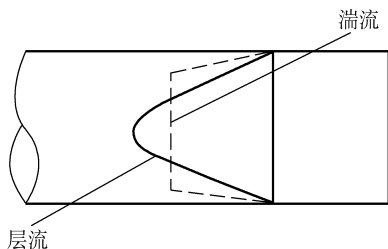


图 2-6 不同流动状态下的流速示意图

(4) 管路的形状及容器的尺寸对液体静电的影响

鹤管（注油管）管口形状对静电产生有很大影响。45°斜口圆筒管头比平圆筒管头产生的静电量要少得多。这主要是因为液体流经平圆筒管头处时，同斜口管头相比，液体被分散的程度要强烈得多。另外，一般说来在其他条件相同的情况下，大容器的液面静电电压较高。

(5) 管道材料和管道内壁状况对液体静电流的影响

管线材质对管线中流动的液体所产生的液流电流的影响

是很大的。研究发现，同种液体流过玻璃钢、硼酸玻璃、金、银等材质的管道时，其静电的产生量差别很小，但由于上述材质的电阻率差异很大，因此对静电的消散却有显著的影响，从而也就显著影响静电流的大小。图 2-7 是液体流经不同管道时所产生的液流电流的情况。另外，管道内壁越粗糙，产生的静电就越大。

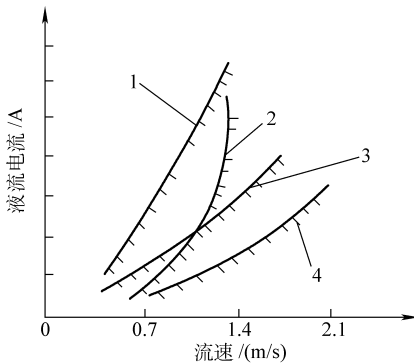


图 2-7 管线材质与电流的关系曲线

1—生锈的碳钢 2—氯丁橡胶
3—不锈钢 4—干净的碳钢

(6) 液体电阻率对静电产生量的影响

在一定范围内静电产生量随电阻率的增加而增大，但达到某一数值后，又随着电阻率值的增加而减小，研究发现，电阻率为 $10^{11} \Omega \cdot \text{m}$ 的液体最容易产生静电；而电阻率小到 $10^8 \Omega \cdot \text{m}$ 的液体由于其静电泄漏很强，所以不容易积聚静电；若电阻率大到超过 $10^{13} \Omega \cdot \text{m}$ ，也不容易产生静电。但是，由于苯和石油制品的电阻率多数在 $10^{10} \sim 10^{12} \Omega \cdot \text{m}$ 之间，所以产生静电的危险性很大。从图 2-8 中可以清楚地发现电阻率对油品带电的影响。

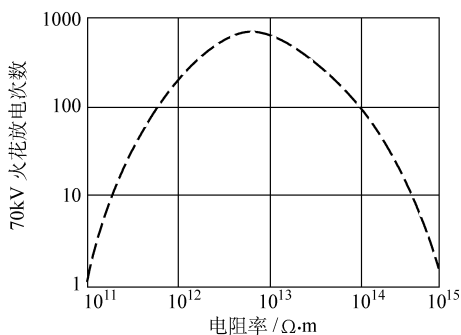


图 2-8 不同电阻率对油品带电的影响

如果在石油成品中加入化学药剂，则可改变其电阻率，并测得电阻率对在管道中流动的油品的冲流电流值也有明显的影响。在图 2-9 中所示为喷气燃料 JP-4 中加入药剂后，测得的电阻率对冲流电流的函数关系曲线。

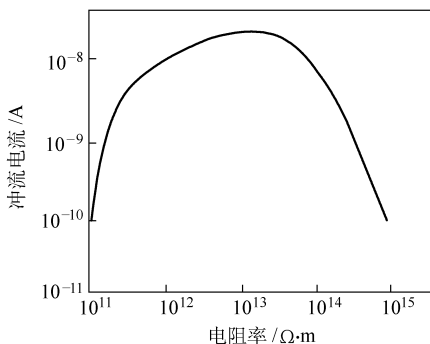


图 2-9 电阻率与冲流电流的关系

(7) 过滤器对液体静电的影响

过滤器会大大增加接触和分离的强度，更换不同的过滤

器，可使液体静电的电压增加十几倍甚至更大，有时还可以改变静电电荷的极性。

2.1.2 固体静电的产生

1. 固体之间的非对称摩擦起电

●要点提示：

两物摩擦起静电，橡胶梳子吸纸片。

冷热不同接触时，居然也能起静电。

●实用技术：

如图2-10所示，取两根橡胶棒，先令一根静止，使另一根在上面摩擦，这时静止的一根橡胶棒在较大的范围内受到了摩擦，而另一根运动的橡胶棒只有一个很小的面积（接触点）受到了摩擦，这样这两根橡胶棒就进行了非对称摩擦。这样的摩擦进行几次后，两根橡胶棒上就产生了静电。

另外，相同材质但温度不同的两物体相互摩擦也能产生静电。例如加热的玻璃棒与冷的玻璃棒相互摩擦后会分别带上极性相反的电荷。这是

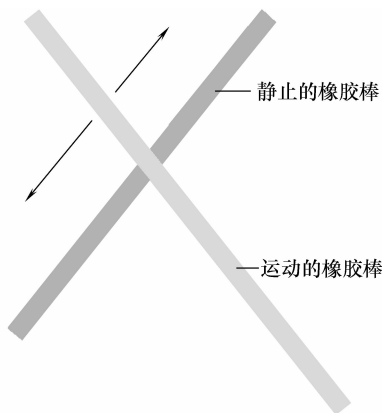


图2-10 两根橡胶棒
进行的非对称运动

因为：

1) 由于两棒间存在着温度差，使棒表面的带电粒子向冷的方向扩散；

2) 由于两者的温度差产生了表面能级之差，因此导致了带电粒子的定向运动。

2. 固体之间的接触起电

● 要点提示：

金属接触偶电层，接触界面起静电。

最终达到极限值，注意消除最关键。

● 实用技术：

(1) 金属与高分子固体之间的接触起电

如图 2-11 所示，当金属与均匀电解质接触时，也同样会形成偶电层。电荷分布在金属表面上，其电荷密度是 σ_{m1} ；而在电介质一侧，电荷则分布在具有深度为 t 的薄层内，其体电荷密度为 ρ_{m2} 。

(2) 金属之间的接触起电

两种不同材料的物体，在它们之间的距离达到或小于 $25 \times 10^{-10} \text{ m}$ 时，一种物质中的电子就会传给另一种物质。失去电子的物体带正电，得到电子

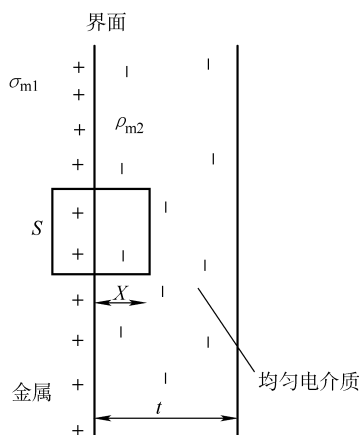


图 2-11 金属与均匀电介质的界面

的物体带负电。另外，金属之间紧密接触虽然可产生偶电层，但当两金属分开时各接触点不可能做到同时分开，因而接触面两边的正负电荷将通过尚未分开的那些接触点构成的导电通道而相互中和，这样在通常情况下导体分开后仍不带电。只有绝缘状态下的金属与绝缘材料摩擦时，两者都有可能带电，如图 2-12 所示。

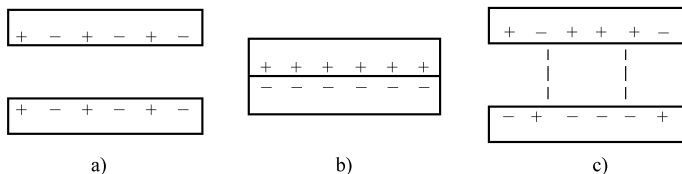


图 2-12 固体接触起电

a) 接触前 b) 接触产生双电层 c) 分离产生静电

生产中常见的是金属与高分子物质或两种高分子绝缘物质间的相互摩擦而起电的现象，例如橡胶带通过辊轴时的带电情况。在橡胶、塑料、造纸、纤维等行业生产中，静电有时可高达几万伏甚至几十万伏，如不采取适当的消除措施，则很容易导致电击、火灾等事故。

3. 静电感应带电

● 要点提示：

电场范围有感应，中和一端起静电。

感应带电有机理，产生、泄漏同时变。

● 实用技术：

感应带电是指当中性导体置于外电场中会发生静电感应现象，当把被感应而带电的导体的一端接地时，这端的电荷

就会被中和掉，这时再将接地线断开，去掉外电场，这时孤立的导体就带上了电。

另外，电介质在静电场中同样可能感应起电。在外电场中，电介质要发生极化。极化后的电介质在垂直电力线方向的两界面上将出现大小相等、符号相反的束缚电荷，当然这些束缚电荷也会影响电场。外电场取消后，电介质上的束缚电荷将逐渐消失。如果束缚电荷的某一种电荷由于某种原因消失，则电介质上另一种电荷将使电介质处于带电状态。

4. 因材料破裂而带电

●要点提示:

原本物体成中性，一旦碎裂起静电。

冻结冰块破裂时，电荷分离起了电。

●实用技术:

原来呈电中性的固体材料或粉体类物质因破裂会产生静电，如图 2-13 所示。

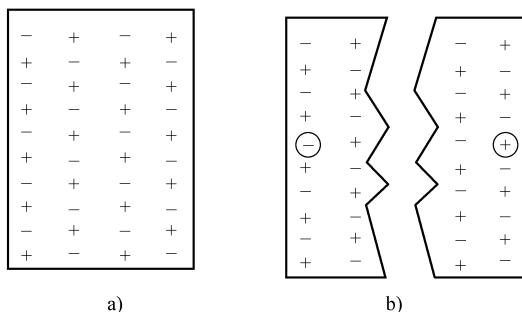


图 2-13 因破裂产生静电

a) 破裂前 b) 破裂后

如图 2-14 所示, 当有极性基的冰块破裂时也能产生静电。其产生静电的过程是电荷因冻结而分离, 冻结后如果中心部带负电, 外侧带正电, 则当冰层破裂时将引起电荷的分离, 这时碎冰片将带上正电。

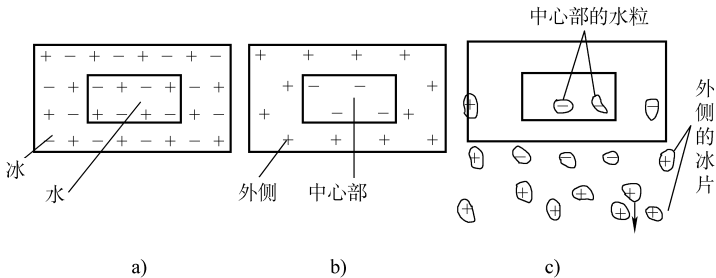


图 2-14 因冻结、破裂而产生静电

- a) 电荷因冻结而电离 b) 冻结结晶造成的电荷分离
c) 冰的破裂引起电荷分离

2.1.3 粉体静电的产生

●要点提示:

研磨、搅拌和筛选, 气力输送在料管, 此时极易产静电, 电击、爆炸事故连。影响静电五方面, 粉粒、材质和时间, 运动速度载荷量, 形状、结构都有关。粉体输送起静电, 基本规律靠经验。

●实用技术:

由固体物质分散而成的细小微粒一般叫做粉体, 它是固体物质的一种特殊形态。例如在搅拌、过滤、筛选等工序中

经常有静电产生。轻则使操作人员遭受电击，影响生产，重则引起重大爆炸事故。

由于粉体仍然是特殊形态下的固体，所以从理论上讲，它仍然要遵守有关固体起电的偶电层理论。但是同样重量的固体粉碎后其表面积要增加许多倍，因此便会大大降低了它的稳定性。例如很稳定的金属铝，制成粉体后不但能积聚静电，还能发生剧烈的爆炸。

粉体静电产生的原因主要有以下几点：

1) 运动速度的影响。运动速度是指粉体输送速度或搅拌速度。速度越高，颗粒的摩擦和碰撞就越激烈，静电产生量也就越多，这样在很短的时间内就能达到饱和。在气力输送工艺中，如果气流的速度是每秒数米或是每秒数十米，这样很快就能达到饱和状态。

2) 粉体材质的影响。研究发现，粉体与管道材料相同时，静电的产生量很少；当管道及粉体均由绝缘材料制成时，材料性质对静电的影响显著。

3) 粉体颗粒大小的影响。粉体颗粒越小，总面积就越大，因此所带电荷就越多。

4) 时间的影响。粉体在管道中输送或在容器中搅拌时间越长，静电量就会越多。但是同时却增加了带电粒子的放电机会，所以最终静电带电却趋于平衡，也就是开始时随输送时间或搅拌时间的增加，静电产生量也不断增多，但经过一段时间之后，便逐渐趋于饱和。图 2-15 便是粉体输送带电曲线。从图中可以看出，尼龙、苯乙烯、高压聚乙烯和低压聚乙烯四种粉体颗粒在镀铬的管道内输送时测出的结果。多数粉体经过几十秒钟后其静电量便趋于稳定值了。

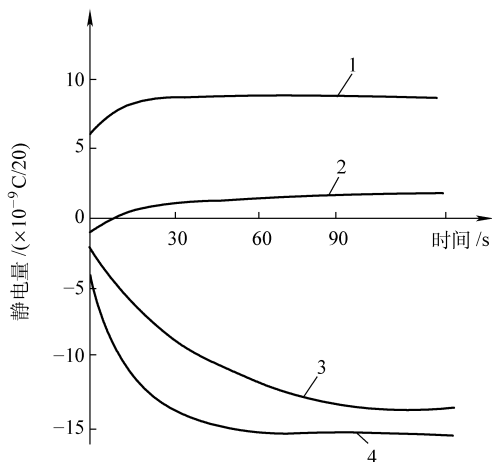


图 2-15 粉体输送带电示意图

1—尼龙 2—苯乙烯 3—高压聚乙烯 4—低压聚乙烯

2.1.4 气体静电的产生

●要点提示:

湿蒸汽，喷涌出，水滴伴，带静电。
若有微粒混其中，相似粉体起电性。

●实用技术:

试验发现，潮湿的蒸汽或湿的压缩空气喷出时，与从喷口流出的水滴相伴随的喷气射流也带有大量静电荷，有时在射流的水滴与金属喷嘴之间发生放电。另外，从氢气瓶中放出氢气或从高压乙炔储气瓶中放出乙炔时，喷出的射流带

电，射流与喷口之间存在放电现象。这就说明高压喷出的气体携带有大量的电荷。

但是单纯的气体在通常条件下不会带电。高压气体喷出时之所以带有静电，是因为在这些气体中悬浮着固体或液体微粒。气体中混进的固体或液体微粒，在它们与气体一起高速喷出时，与管壁发生相互作用而带电。所以，高压气体喷出时的带电，与粉体气力输送通过管道的带电属于同一现象，本质上是固体和固体、固体和液体的接触起电。气体中混杂粒子的由来，对带电与否完全没有关系。它也许是管道内壁的锈，也可以是管道途中积存的粉尘或水分，或由其他原因产生的微粒。

当高压气体中混有固体微粒时，气体高速喷出时使微粒和气体一起在管内流动，它们和管内壁发生摩擦和碰撞，也就是微粒与管内壁频繁发生接触和分离过程，以致使微粒和管壁分别带上等量异性的电荷。若在高压气体喷出时，管道中存在着液体，则伴随着高压气体的喷出会产生液滴云带电。

2.1.5 人体静电的产生

●要点提示：

人体活动起静电，三种原因靠绝缘。

衣着、速率有影响，电阻大小有关联。

●实用技术：

1. 人体静电的起电过程

人体是不断活动的，人体活动的起电方式主要有三种：接触起电、感应起电和吸附起电。

当人走在绝缘地面上时，鞋底与地面不断地紧密接触和分离，使地面和鞋底分别带上不同符号的电荷。若人穿塑料底的鞋，在胶板地面上走动时，可使人体带上 $2 \sim 3\text{kV}$ 的电压，这就是因接触产生的静电。

当走近已带电的物体或人时，将引起静电感应，感应所得的与带电物体（或人）符号相同的电荷通过鞋底移向大地，或通过正在操作接地设备的手移向大地，使人体上只带一种符号的电荷。当人体离开带电物体（或人）时，人体就带有了静电。这就是人体的感应起电。

人体带电的第三种方式是人体在带电微粒或小液滴（水汽、油气等）的空间活动后，由于带电微粒或小液滴降落在人体上，被人体所吸附而使人体带电。

2. 影响人体静电的主要原因

(1) 衣着电阻率对人体起电的影响

试验发现，在现代化生产和运输所达到的速率下，常常是电阻率高的介质起电量较大。人的衣着材料一般属于介质（抗静电工作服除外）。高电阻率介质的放电时间常数大，因而积累的饱和电荷也大，所以不同质料的衣着对人体的起电量有不同的影响。也就是说，衣着的表面电阻率越大，在起电速率一定时，就有较高的饱和起电量。

(2) 起电速率和人体对地电阻对人体起电的影响

人体的对地电阻对人体的饱和带电量 and 带电电位是有影响的。在起电速率一定的条件下，对地电阻越大，对地放电时间常数就越大，饱和带电量越大，人体带电电位也越高。

另外，人的操作速度和活动速度越大，起电速率就越大，人体的起电电位就越高；反之，起电速率就越小，人体的起电电位就越低。

(3) 人体电容对人体起电的影响

人体电容是指人体的对地电容。它是随人体姿势、衣着厚薄和材质的不同而不同的可变量。人体电容一般为 $100 \sim 200\text{pF}$ ，特殊场合下可达到 $300 \sim 600\text{pF}$ 。不同场合人体电容的变化是很大的。人体带电后，如果放电很慢，这时人体电容的减小会引起人体电位升高而使静电能量增强。

2.2 静电的消散

2.2.1 静电的泄漏

●要点提示：

吸湿水分成水膜，降低电阻静电泄。

泄漏途径有规律，内部泄放有公式。

●实用技术：

1. 湿度对静电泄漏的影响

吸湿性越大的绝缘体，对静电泄漏的影响也越大。这是由于随着湿度的增加，绝缘体表面凝结成很薄的水膜，在水膜中溶入了空气中的 CO_2 ，有时还能溶入绝缘体所析出的电解质，使绝缘体的表面电阻大大降低，从而加速静电的泄漏。表 2-3 给出了玻璃表面电阻与湿度的关系。

表 2-3 玻璃表面电阻与湿度的关系

相对湿度 (%)	40	50	60	70	80	100
电阻相对值	6×10^6	3×10^4	8×10^2	30	4	1

2. 静电泄漏的规律性

绝缘体上静电的泄漏一般有两条途径：

- 1) 通过绝缘体表面直接泄漏；
- 2) 通过绝缘体内部进行泄漏。

这两种泄漏途径都取决于绝缘体的表面电阻和体积电阻。

静电通过绝缘体本身的泄漏符合与电容器的放电规律，也就是符合下面的公式：

$$q = q_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

式中 q_0 ——泄漏前的电量；

τ ——泄漏时间常数。

2.2.2 静电的气体放电

●要点提示：

绝缘介质被击穿，放出电荷能量变。

均匀电场两典型：辉光、弧光泄静电。

气体放电伏安性，火花、电晕和刷形。

影响因素有多种，电压、湿度各不同。

电极形状有影响，棒状电极曲线图。

●实用技术：

静电的放电实际上就是电压较高、能量较小、在常温常压下的绝缘介质被击穿的过程。静电放电按照放电电场的不同，分为均匀电场放电和非均匀电场放电。下面以气体放电为例进行介绍。

1. 均匀电场的放电

在均匀电场的放电过程中，存在辉光放电和弧光放电两种典型形式。

研究发现，在约为 1mmHg ($1\text{mmHg} = 133.322\text{Pa}$) 的大气压下，在一只玻璃管的两端装上两个电极，在电极上加上几百伏的电压，就很容易观察到弧光放电的现象。气体在玻璃管中的放电可以分为四个光区（见图 2-16）：

第一暗区——阴极附近的弱光区；

第二暗区——法拉第暗区（弱光区）；

阴电辉光区（简称阴电辉区）；

强阳电辉光区（简称阳电辉区）。

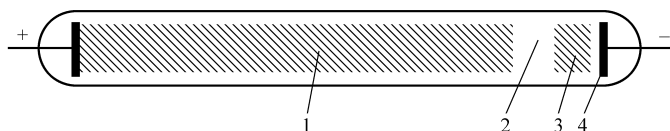


图 2-16 辉光放电示意图

1—阳电辉区 2—第二暗区 3—阴电辉区 4—第一暗区

但是沿放电管的电位降落不是沿管均匀发生的。如图 2-17 所示，绝大部分电位降落发生在第一暗区，也就是所谓的阴极电位降落；以后沿着整个管子的电位降落都十分微小（大约是 $1 \sim 2\text{V/cm}$ ）；仅在阳极附近才又观察到新的电位跃变，即

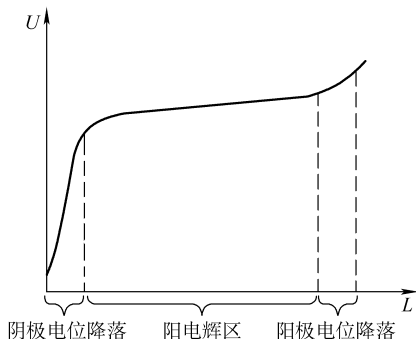


图 2-17 沿放电管的电位降落示意图

阳极电位降落。

阴极电位降落的大小主要取决于阴极的材料和气体的性质。在电流密度小的情形下，阴电辉光区仅覆盖着阴极表面的一部分。在这种情况下，阴极电位降落的大小与电流大小和气体的压强几乎没有关系；这时，这个阴极电位降落的值，叫做正常阴极电位降。对于不同的阴极材料和不同的气体，正常阴极电位降的值可以参考表2-4中的数值。

表 2-4 正常阴极电位降 (单位: V)

阴极材料	气 体					
	Ne	Hg	Ar	H ₂	N ₂	He
Al	120	245	100	171	179	141
Ni	140	275	131	211	197	158
Fe	150	389	131	198	215	153
Na	75	—	—	185	178	80
Cu	220	447	131	214	208	177

当电流增加时，为辉光所覆盖的阴极面积也成正比地增加，所以这时阴极表面的电流密度保持不变。当整个阴极全部被辉光覆盖后，电流继续增加时阴极电位降也随着增加。另外，在强电流的情况下，阴极发热，这时甚至能够观察到所谓下倾的特性曲线：电极上的电位差随着通过管子的电流的增加而减小。为了使放电开始，电位差必须稍大于阴极电位降。

从中我们可以看出，将足够的电位差加到电极上时，管子里产生电场，电场将使原来存在于气体中的自由电子和离子（即使是少量的）被加速。被加速的电子在运动过程中使气体原子发生碰撞电离而产生新的离子，致使电流激烈增

大。接着阴极电位降起着极其重要的作用，阴极电位降是集中在几乎与电子自由程同数量级的这一小空间里，电子在这里得到足以使其碰撞的能量。在这同一区域里，正离子沿着指向阴极的方向被加速，这些正离子与阴极相碰时从阴极表面击出新的电子，这些新电子的出现，又大大地增强了气体的导电性。

弧光放电是均匀电场下两个通电电极（最常用的是碳电极）接触后立即分开，两极间即可产生弧光放电。放电时两电极在 30 ~ 40V 的电压下燃烧，电流可高达几十安，两个电极在放电过程中温度可高达几千摄氏度。在大气压强下阳极温度更高，以致在阳极上形成一个凹陷的坑。经进一步试验后发现，弧光放电所必须的是，在阴极上只要有炽热的一点作为电子源就行了，而阳极甚至可以是冷的。

2. 非均匀电场的放电

静电放电通常是在非均匀电场中进行的，非均匀电场中的静电放电通常包括如下三种类型：

(1) 火花放电

就是指放电通道集中的火花放电，也就是电极上有明显放电集中点的火花放电。火花放电会发出明亮的闪光和短促的爆裂声。在易燃易爆的场所，火花放电具有很大的危险性。图 2-18 所示为火花放电。

(2) 电晕放电

这是自击放电的一种。它是在较大压强下，由于两个电极的表面曲率半径很小，放电间隙中

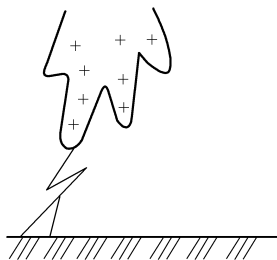


图 2-18 非均匀电场静电放电的火花放电示意图

的电场是很不均匀的。气体的电离和发光是在电极附近很窄的一层内发生的；在气体的其他部分，导电是由于两种离子运动的结果。在黑暗中电晕放电会有淡紫色的光芒，并伴有“嘶嘶”声。图 2-19 所示便是电晕放电的示意图。

(3) 刷形放电

这是火花放电的一种，其放电通道有很多分支，并且伴有声光。由于绝缘体束缚电荷的能力很强，其表面容易出现刷形放电，如图 2-20 所示。

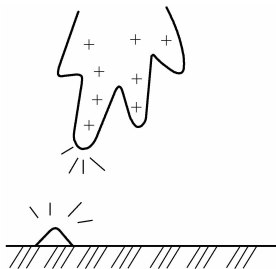


图 2-19 非均匀电场静电放电的电晕放电示意图

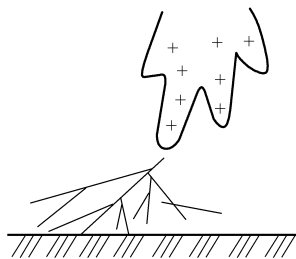


图 2-20 非均匀电场静电放电的刷形放电示意图

综上所述，电晕放电能量较小，危险性较小；刷形放电有一定危险性，有时也能引燃；而火花放电能量较大，因而危险性也最大。绝缘体带有静电时，较易发生刷形放电，也可能发生火花放电。金属电极之间或对地容易发生火花放电。

3. 影响气体放电的因素

(1) 电压作用时间的影响

一般说来，外加电压持续时间越短，放电电压就越高。

(2) 气体的压强或温度对放电的影响

当气体的温度升高或压强降低时，分子的密度就会降低，这样电子的平均自由程就会变大，电子的动能也就变大了，相应的电晕放电和击穿电压都有所降低。图 2-21 中列出了几种气体击穿电压随气压的变化而变化的曲线。

(3) 湿度的影响

当湿度增加时，电子与水汽碰撞后，可能形成不易运动的负离子，因而击穿电压也就升高了。

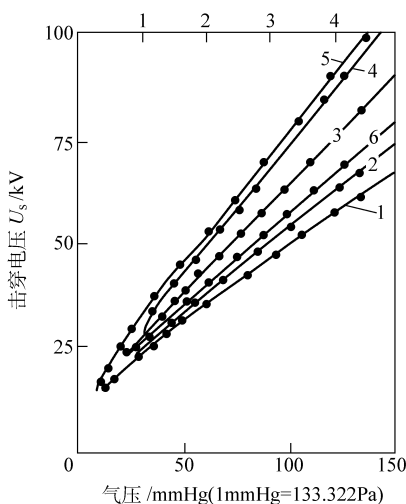


图 2-21 甲烷等气体击穿的电压变化

1—甲烷 2—乙烷 3—丙烷 4—丁烷

5—异丁烷 6—氮气

(4) 电极的形状和极性对击穿电压的影响

研究发现，当电极末端的曲率半径越小时，其击穿场强越低，也就是越容易放电。当电极呈正电时，击穿电压较

低。若是电极带负电，尖端附近因电晕产生的电子会很快地向远离负极的方向流散；正离子却不容易很快地吸向负电极而中和，这样就可能影响电晕放电的发展，使击穿放电比较困难。图 2-22 和图 2-23 分别给出了 30° 锥尖电极和端部为半圆形的棒状电极对平板电极的放电曲线。

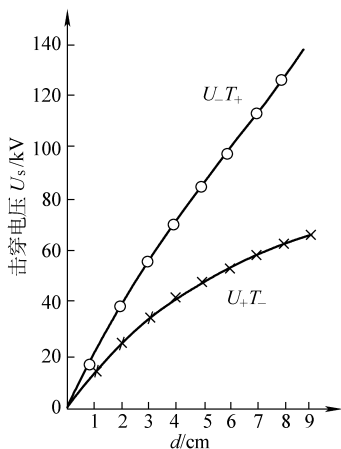


图 2-22 30° 锥尖电极对平板电极的放电示意图

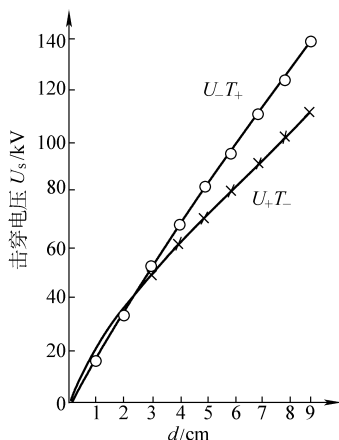


图 2-23 $\phi 2\text{mm}$ 半圆形棒状电极对平板电极的放电示意图

2.2.3 静电耗散材料

在 GB12158—2006《防止静电事故通用导则》中规定，表面电阻率在 $1 \times 10^7 \Omega$ 以上，但小于 $1 \times 10^{11} \Omega$ ；体积电阻率在 $1 \times 10^6 \Omega \cdot \text{m}$ 以上，但小于 $1 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{m}$ 的材料为静电耗散材料。

在 IEC61340-5-1: 2007 中规定，表面电阻和体积电阻在 $1 \times 10^5 \Omega$ 以上，但低于 $1 \times 10^{11} \Omega$ 的材料为静电耗散材

料。

2.2.4 静电绝缘材料

一般认为不能耗散和泄漏电荷的材料，叫做静电绝缘材料。

在 GB12158—2006《防止静电事故通用导则》中规定，体积电阻率和表面电阻率分别等于或大于 $1 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{m}$ 和 $1 \times 10^{11} \Omega$ 的材料为静电绝缘材料。

IEC61340-5-1：2007 中规定，表面电阻和体积电阻在 $1 \times 10^{11} \Omega$ 以上的材料为静电绝缘材料。

第 3 章 静电的危害

3.1 静电放电的特点

静电放电是指带电体周围的场强超过周围介质的绝缘击穿场强时，因介质产生电离而使带电体上的静电荷部分或全部消失的现象。

在实际情况中，产生静电放电事件往往是物体上积累了一定的静电电荷，且对地静电电位较高。带有静电电荷的物体通常被称为静电源，它在放电过程中的作用是至关重要的。静电放电具有以下特点。

3.1.1 静电放电可形成高电位、强电场和瞬时脉冲大电流

在大多数情况下静电放电过程往往会产生高电位、强电场和瞬时脉冲大电流，尤其是带电导体或手持小金属物体（如钥匙或螺钉旋具等）的带电人体，对接地导体产生火花放电时，产生的瞬时脉冲大电流可达到几十安甚至上百安，如图 3-1 所示。

3.1.2 静电放电过程会产生强烈的电磁辐射形成电磁脉冲

近年来随着静电测试技术及测试手段的不断发展，使人

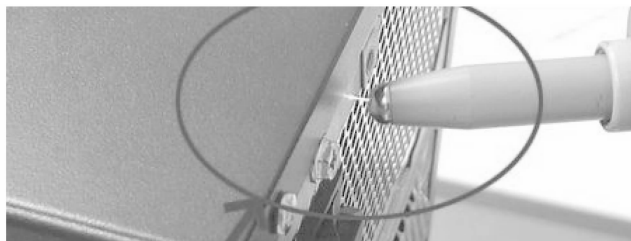


图 3-1 瞬间释放的 10000V 静电

们对静电放电这一瞬态过程的认识越来越深入。静电放电的过程中会产生上升时间极快、持续时间极短的初始脉冲大电流，并产生强烈的电磁辐射形成静电放电电磁脉冲，它的电磁能量往往会引起电子系统中敏感器件的损坏、翻转，从而使某些装置中的电火工品误爆，造成事故。目前静电放电电磁脉冲已受到人们的普遍重视，作为近场危害源，许多人已把它与高空核爆炸形成的核电磁脉冲及雷电放电时产生的雷电电磁脉冲相提并论。

3.2 静电放电的类型

静电放电的形态多种多样，主要有以下几种。

3.2.1 电晕放电

电晕放电也叫尖端放电，是发生在极不均匀的电场中，空气被局部电离的一种放电形式。若要引发电晕放电，通常要求电极或带电体附近的电场强度较强。电晕放电是一种高电位、小电流、空气被局部电离的放电过程。图 3-2 所示是空气中发生电晕放电时的照片。

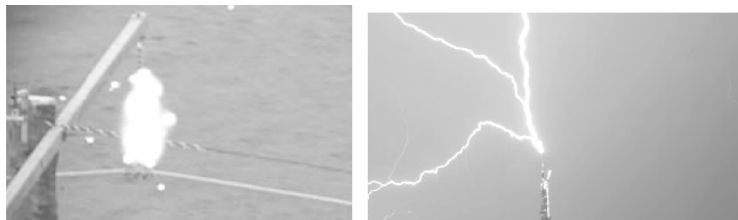


图 3-2 瞬间电晕放电

电晕放电被广泛利用于工业生产中。如在静电除尘、静电分离以及防静电场所的静电消除等都用到了电晕放电技术。

3.2.2 火花放电

当静电电位比较高的静电导体靠近接地导体或比较大的导体时，便会引起静电火花放电。静电火花放电是一个瞬变的过程，放电时两放电体之间的空气被击穿，与此同时还伴随着“噼啪”的爆裂声。爆裂声是由火花通道内空气温度的急剧上升形成的气压冲击波造成的。在发生静电火花放电时，静电能量瞬时集中释放，其引燃、引爆能力较强。另外，静电火花放电产生的放电电流及其产生的电磁脉冲具有较大的破坏力，可对一些敏感的电子器件和设备造成危害。

应当指出，带电金属导体产生的静电火花放电和带电人体产生的静电火花放电是不完全相同的。在多数情况下，金属导体间的静电火花放电会形成一次火花通道便能放掉绝大部分静电电荷，即静电能量可以集中释放。而对于人体静电放电来说，由于人体阻抗是随人体静电电位的变化而改变

的，在一次放电过程中可能包含了多次火花通道的形成和消失过程，即重复放电。在每次放电过程中仅仅放掉一部分静电电荷，即每次仅释放人体静电能量的一部分。

3.2.3 刷形放电

如图 3-3 所示，这种放电往往发生在导体与带电绝缘体之间，带电绝缘体可以是固体、气体或低电导率的液体。产生刷形放电时形成的放电通道在导体一端集中在某一点上，而在绝缘体一端有较多分叉，分布在一定空间范围内。根据其放电通道的形状，这种放电被称为刷形放电。当绝缘体相对于导体的电位的极性不同时，其形成的刷形放电所释放的能量和在绝缘体上产生的放电区域及形状是不一样的。当绝缘体相对导体为正电位时，在绝缘体上产生的放电区域为均匀的圆状，放电面积比较小，释放的能量也比较少。而当绝缘体相对于导体为负电位时，在绝缘体上产生的放电区域是不规则的星状区域，区域面积比较大，释放的能量也较多。

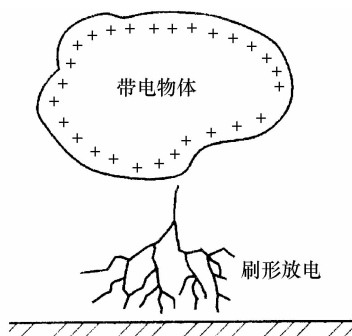


图 3-3 刷形放电

另外，刷形放电还与参与放电导体的线度及绝缘体的表面积的大小有关。在一定范围内，导体线度越大，绝缘体的带电面积越大，刷形放电释放的能量也就越大。一般来说，刷形放电释放的能量很高，因此它可引燃、引爆大多数的可燃气体。

3.2.4 传播型刷形放电

传播型刷形放电又称沿面放电，仅在绝缘体的表面电荷密度大于 $2.7 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2$ 时发生。一般情况下，传播型刷形放电发生在绝缘材料与金属导体之间，放电通道沿着绝缘材料的表面。在常温常压下，如此高的面电荷密度较难出现，这是因为在空气中当绝缘体表面电荷密度超过 $2.7 \times 10^{-5} \text{ C/m}^2$ 时就会使空气电离。只有当绝缘体两侧带有不同极性的电荷且其厚度小于 8mm 时，才有可能出现这样高的表面电荷密度。而此时绝缘体内部电场强度很强，在空气中则较弱。当绝缘体一侧紧贴有接地金属时，就可能出现这种高的表面电荷密度。另外，当电介质板被高度极化时也可能出现这种情形。若金属导体靠近带电绝缘体表面时，外部电场得到增强，也可引发刷形放电。

当发生传播型刷形放电时，初始发生在金属导体和绝缘体间的刷形放电会导致绝缘体上某一小部分的电荷被中和，与此同时其周围部分高密度的表面电荷便在此处形成很强的径向电场，这一电场会导致进一步的击穿，这样放电沿着整个绝缘体的表面传播开来，直到所有的电荷被全部中和。

传播型刷形放电释放的能量很大，有时可达到数焦耳，因此其引燃、引爆能力极强。在气流输送粉料和大型容器的灌装时，如果容器的材料为绝缘材质或金属材质带有绝缘层

时，有可能发生传播型刷形放电。

3.2.5 表面放电

表面放电是指带电绝缘体接近接地体时，几乎在与带电体和接地体之间产生放电的同时，沿绝缘体表面发生的放电。它具有固定形状的发光（呈树枝状，一旦形状形成时基本不变），如图 3-4 所示。它的放电能量大，与火花放电相同，极易成为引火源。产生表面放电的条件一是绝缘体带电量特别大；二是在带电绝缘体背面的邻近处有接地体。

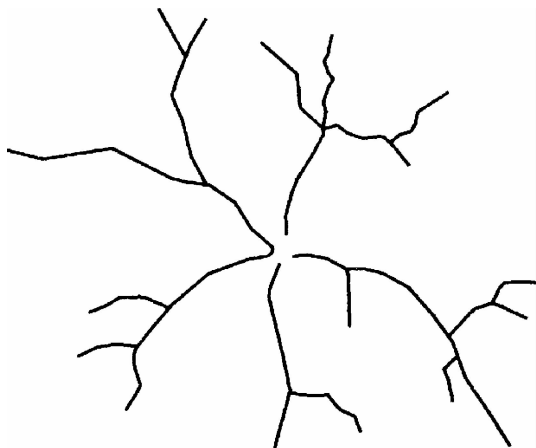


图 3-4 表面放电

3.2.6 电场辐射放电

电场辐射放电依赖于高电场强度下气体的电离，当带电体附近的电场强度达到 3MV/m 时，这种放电就可能发生。放电时，带电体表面可能发射电子。这类放电能量比较小，

引燃、引爆能力较小，出现这类放电的概率也比较小。

3.3 静电效应的作用危害

3.3.1 静电力学效应的危害

1. 静电的力学现象

物体带电后，在其周围空间有电场。在静电力的作用下，轻小物体被吸引或被排斥，如图 3-5 所示。在静电场中，这种吸引力或排斥力按库仑法则，此时带电体单位面积的作用力 F 为

$$F = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{\varepsilon}$$

式中 σ ——带电体的表面电荷密度 (C/m^2)；

ε ——介电常数， $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ 。

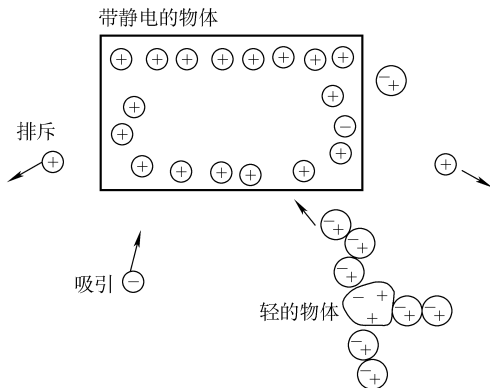


图 3-5 静电产生的力学现象示意图

从上式可以看出，静电场的作用力可以达到每平方厘米数百毫克力，只有磁铁的万分之一大小，因而只能对毛发、纸片、尘埃、粉体等非常轻的物体呈现静电的力学现象。例如，在气候干燥季节，脱毛线衣时毛发倒下或体毛被吸引，或者内衣贴附身体等。

2. 力学现象引起的生产故障

静电的作用力（以下简称静电力）尽管实际上不过每平方厘米数百毫克力，但是由于这种力的作用，在实际生产过程中发生了各种生产故障。

在粉体加工行业，生产过程中产生的静电会降低生产效率、影响生产质量。例如粉体筛粉时，由于静电力的作用而吸附细微的粉末，使筛目变小或堵塞；气力输送时在管道上和管子弯道处粘附粉末造成输送不畅；在球磨过程中，由于钢球吸附一层粉末，不但会降低生产效率，而且这一层粉末脱落下来混进产品之中，还会降低产品质量；计量时，由于计量器具吸附粉体还会造成测量误差；粉体装袋时，由于静电斥力的作用，粉体四处飞扬。一般粒子半径为 $100\mu\text{m}$ 以下时，容易发生生产故障。

3.3.2 静电放电热效应的危害

静电火花放电或刷形放电一般都是在 ns 或 μs 量级时间完成的，因此，通常可以将静电放电过程看作是一种绝热过程。空气中发生的静电放电可以在瞬间使空气电离、击穿、通过数安培的大电流，并伴随着发光、发热过程，形成局部的高温热源。这种局部的热源可以引起易燃、易爆气体燃烧、爆炸。静电放电过程产生的瞬时大电流也可以使火炸药、电雷管、电引信等各种电发火装置意外发火，引起爆炸事故。

在微电子技术领域，静电放电过程是静电能量在 $0.1\mu\text{s}$ 时间内通过器件电阻释放的，其平均功率可达几千瓦。如此大功率的短脉冲电流作用于器件上，足以在绝热情况下，使硅片上微区熔化，电流集中处使互连局部区域发生球化，甚至烧毁 PN 结和金属互连线，形成破坏性的“热电击穿”，最终导致电路损坏失效。

3.3.3 静电放电对人体的电击效应

●要点提示：

静电电击人体伤，手指麻木神经慌。

虽然痛振伤害小，二次事故生危伤。

●实用技术：

当人体接近静电体或带静电的人体接近接地体时，可能会遭到电击如图 3-6 所示。一旦发生电击会对人体心脏、神经等部位造成伤害。电击的严重程度决定于电流大小、通电时间和时刻、通电途径、电流种类以及人体特征、人体健康状况和人的精神状况等很多因素。工频电流较长时间通过人体，数十毫安的电流即可引起人的心室颤动，终止血液循环甚至导致人员死亡。

静电引起的电击电流不是持续不断地通过人体的，而是由静电放电造成的瞬间冲击性的电击。对人体的影响一般是痛感和振颤；但有时在生产现场往往会产生指尖负伤或手指麻木等机能损伤。静电电击还会引起工作人员精神紧张使工作效率降低，甚至会造成因静电电击引起坠落、摔倒等二次伤害事故。静电电击人体的反应见表 3-1。



图 3-6 汽车上的静电会将手指电击得又疼又麻

表 3-1 静电电击人体的反应

电压/kV	电 击 程 度
1	没有感觉
3	有微弱针刺痛感
5	手掌至手臂前半部有电击痛感
7	手指、手掌强烈痛感，有麻痹感
9	手腕有强烈痛感，手有很强麻痹感
11	手指强烈麻痹，整个手有强烈电击感

静电引起的电击，由于放电是脉冲瞬时现象，所以作为电击发生的极限，一般不以电流衡量，而是以带电电位和人体电容来衡量。静电电击有两种情况：第一种情况是带电体向人体放电；第二种情况是人体向带电接地导体放电。

3.3.4 静电的强电场效应危害

静电荷在物体上的积累往往使物体对地具有高电压，并在其附近形成强电场。在电子工业中，MOS（金属氧化物半导体结构的晶体管）器件的栅氧化膜厚度为 10^{-7}m 数量级，100V 的静电电压加在栅氧化膜上，就会在栅氧化膜上产生 10^6kV/m 的强电场，超过一般 MOS 器件的栅氧化膜的绝缘击穿强度 $(0.8 \sim 1.0) \times 10^6\text{kV/m}$ ，导致 MOS 场效应器件的栅氧化膜被击穿，使器件失效。当电路设计没有采取保护措施时，就算栅氧化膜为致密无针孔的高质量氧化层，也会被击穿。对于有保护措施的电路，虽然击穿电压可以远高于 100V，但危险静电源的电压可以是几千伏，甚至几万伏。因此，高压静电场的击穿效应仍然是 MOS 器件的一大危害。另外，高压静电场也可以使多层布线电路间介质击穿或金属化导线间介质击穿，造成电路失效。需要强调的是，介质击穿对电路造成的危害是由于过电压或强电场，而不是功率造成的。

在其他领域，高压静电场使电介质击穿也会造成危害，比如烧毁电机、引起变压器短路等事故。

3.3.5 静电放电的电磁脉冲效应危害

我们知道，静电放电过程是电位、电流随机瞬时变化的电磁辐射过程。无论是放电能量较小的电晕放电，还是放电能量比较大的火花放电，都可以产生电磁辐射。这种静电放电电磁脉冲场对各种电子装备、信息化系统都会造成电磁干扰，对航空、航天、航海领域和各种现代化电子装备也会造成危害。

3.4 静电放电引起的燃烧、爆炸危害

物体带有静电后，总是要泄放掉的。电荷的泄放有两个途径：一是自然逸散；二是不同形式的放电。静电放电是由电能转换成热能的过程，并有可能将可燃物点燃，成为着火或爆炸的火源。

静电放电要成为点燃的火源，必须同时具备以下几个条件：

- 1) 有产生静电的来源；
- 2) 静电得以积聚，其静电电压足以引起静电放电；
- 3) 静电放电的能量足够点燃可燃的混合物；
- 4) 放电必须在爆炸混合物的爆炸浓度范围内发生。

从以上条件可以看出，只有四个基本条件同时具备时，点燃才能发生。从消除静电危害的角度考虑，只要破坏其中的任何一个条件都可以达到防止点燃的目的。

3.4.1 静电积聚的安全界限

现在主要用测试静电电位参数的方法来确定静电电位的安全界限。

1. 导体的静电积聚安全界限

当带电物体是导体时，一般认为最危险的情况是，一次静电放电可以将存储的静电能量几乎全部放出，带电导体所存储的静电能量等于或大于最小点火能量（或静电感度）时，便有发生静电危害事故的危险。带电导体所存储的静电能量为

$$W = \frac{1}{2}CV^2$$

那么，产生静电危害的静电电位值为

$$V = \sqrt{\frac{2W}{C}}$$

2. 绝缘体的静电积聚安全界限

当带电物体是绝缘体时，如发生放电，一般情况下带电体不会将所积蓄的静电能量全部放出，而是部分地放出。因此，带电物体为绝缘体的放电安全界限，就不能用带电导体所用的方法求出，这要视放电条件和放电类型而定，还与静电非导体的带电电位和接地导体的曲率半径有关。根据可燃性物质的最小点火能量，可粗略计算出绝缘体的带电电位的安全界限，见表 3-2。

表 3-2 绝缘体带电电位安全界限

最小点火 能量/mJ	安全电位 界限/kV	表面电荷密度 /($\mu\text{C}/\text{m}^2$)	可燃物举例
0.1 以下	1 以下	1 以下	氢气和氧气的混合物、二硫化碳、乙炔、乙烯、甲烷、丙烷、乙醚、普通油品蒸气、氨气、粉尘等
0.1 ~ 1	5 以下	3 以下	
1 ~ 10	10 以下	7 以下	
10 以上	10 以下	10 以下	

3.4.2 静电的最小点火能量

最小点火能量又称为最小点燃能量，是指点燃或引爆某物质所需要的最小外界能量。在一些生产过程中，常因静电

放电引起灾害。在可燃性气体、易燃液体中，轻油的最小点火能量为 0.2mJ，乙炔的最小点火能量为 0.019mJ，氢气的最小点火能量也只有 0.019mJ，二氧化硫的最小点火能量为 0.009mJ。按照国家标准，存在这类物质的场所都属于 I 类静电危险场所，危险性较大，极易出现燃烧、爆炸事故。而工业粉尘的气体混合物的最小点火能量大多在 10 ~ 100mJ 之间，属于 II 类静电危险场所。各种可燃性气体、蒸气和空气混合物及各种可燃性气体与氧气的混合物的最小点火能量可参考表 3-3 和表 3-4。粉尘爆炸性混合物的最小点火能量可参见表 3-5。从现在掌握的技术数据来看，一般没有规定粒子的大小，而合成树脂粉尘颗粒大小与最小点火能量之间的关系见表 3-6，减小微粒的大小或增加细粉的百分比，可以减少最小点火能量。另外，表 3-7 给出了弹药领域静电可爆物质的最小点火能量。

表 3-3 可燃性气体、蒸气和空气混合的引燃参数

物质名称	闪点/℃	爆炸极限 体积(%)		最小点火 能量/mJ
		下限	上限	
丙烯乙醛(丙烯醛)	<17.8	2.8	31	0.13
腈	-1	3.0	17	0.16
乙炔	(气体)	1.5	100	0.017
乙醛	-37.8	4	60	0.37
丙酮	-19	2.5	13.0	1.15
氮杂环丙烯(氮丙烯)	-11	3.6	46	0.48
异丁烷	(气体)	1.8	8.5	0.52
异丙胺	-37.2*	2.0	10.4	2.0
异丙硫醇	—	—	—	0.53
异戊烷(2—甲基丁烷)	-51	1.3	7.6	0.21

(续)

物质名称	闪点/℃	爆炸极限 体积(%)		最小点火 能量/mJ
		下限	上限	
乙烷	(气体)	3.0	15.5	0.24
乙胺	< -17.8	3.5	14.0	2.4
乙基-甲基-酮(2—丁酮)	-6.1	1.8	11.5	0.53
乙烯	(气体)	2.7	36	0.07
环氧乙烷、氧丙环	-20 *	3.0	100	0.06
烯丙基氯	-31.7	2.9	11.2	0.77
2-氯丙烷	-32.2	2.8	10.7	1.55
氯丁烷	-9.4	1.8	10.1	1.24
氯丙烷	< -17.8	2.6	11.1	1.08
过氧化氢第三丁基	18.3 *	—	—	0.41
甲酸甲酯	-18.9	5.0	23	0.4
醋酸乙酯	-4.4	2.1	11.5	1.42
醋酸乙烯	-7.8	2.6	13.4	0.7
二异丙醚	-27.8	1.4	21	1.14
二乙醚	-45	1.7	48	0.19
环丙烷	(气体)	2.4	10.4	0.17
环己烷	-20	1.2	8.3	0.22
环戊二烯	—	—	—	0.67
环戊烷	-42.0	1.4	—	0.54
二氢吡喃	-15.6	—	—	0.36
二甲基醚	—	2.0	27	0.29
二甲亚砷	95 *	2.6	28.5	0.48
2,2—二甲基丁烷(新己烷)	-47.8	1.2	7.0	0.25
氢	(气体)	4.0	75.6	0.011
噻吩	> -1	—	—	0.39
四氢呋喃	-14.4	1.5	12	0.54
四氢吡喃(氧己烷)	-20	—	—	0.22

(续)

物质名称	闪点/℃	爆炸极限 体积(%)		最小点火 能量/mJ
		下限	上限	
三乙胺	-6.7 *	1.2	8.0	0.75
2,2,3-三甲基丁烷	—	1.0	—	1.0
2,2,4-三甲基戊烷(异辛烷)	-12.2	1.0	6.0	1.35
二硫化碳	-30	1.0	60	0.009
新戊烷(2,2-二甲基丙烷)	< -7	1.3	7.5	1.57
乙烯基乙炔	(气体)	2	100	0.082
1,3-丁二烯	(气体)	1.1	12.5	0.13
丁烷	(气体)	1.5	8.5	0.25
呋喃	-40 *	2.3	14.3	0.22
2-丙醇(异丙醇)	11.7	2.0	12	0.65
丙烷	(气体)	2.1	9.5	0.25
丙烯	(气体)	2.0	11.7	0.28
氧化丙烯甲基氧丙醇	-37.2	1.9	37	0.13
丙炔(甲基乙炔)	(气体)	1.7	—	0.11
己烷	-21.7	1.1	7.5	0.24
庚烷	-3.9	1.0	6.7	0.24
1-庚炔	—	—	—	0.56
苯	-11.1	1.2	8.0	0.2
戊烷	-49	1.4	7.8	0.22
2-戊烯	-18	1.4	8.7	0.18
甲醛二甲醇缩乙醛 (二甲氧基甲烷、甲缩醛)	-17.8 *	—	—	0.42
甲醇	11.1	5.5	36	0.14
甲烷	(气体)	5.0	15	0.28
甲基环己烷	-3.9	1.2	—	0.29
硫化氢	(气体)	4.0	45.5	0.068

注：* 表示开放式测定的闪点，其他是密闭式测定。

表 3-4 可燃性气体和氧气混合的引燃参数

物质名称	闪点/℃	爆炸极限体积(%)		最小引燃 能量/mJ
		下限	上限	
乙炔	(气体)	2.8	100	0.0002
乙烷	(气体)	3.0	66	0.0019
乙烯	(气体)	3.0	80	0.0009
二乙烯	(气体)	2.0	82	0.0012
氢	(气体)	4.0	94	0.0012
丙烷	(气体)	2.3	55	0.0021
甲烷	(气体)	5.1	61	0.0027

表 3-5 粉尘的最小点火能量

物质名称	爆炸下极限浓度 /(g/m ³)	最小点火能量 /mJ
麻	40	30
己二酸	35	60
乙酰纤维素	35	15
铝	25	10
硫磺	35	15
铀	60	45
乙基纤维素	25	10
环氧树脂	20	15
树木(枞树)	35	20
尼龙	30	20
肉桂皮	60	30
仲甲醛	40	20
苯酚甲醛	25	15
六次甲基四胺、乌洛托品	15	10
季戊四醇	30	10

(续)

物质名称	爆炸下极限浓度 /(g/m ³)	最小点火能量 /mJ
聚丙烯酰胺	40	30
聚丙烯腈	25	20
聚氨基甲酸乙酯泡沫	25	15
聚乙烯	20	10
聚氧化乙烯	30	30
聚乙二醇对苯二甲酸酯	40	35
聚碳酸酯	25	25
聚苯乙烯	15	15
聚丙烯	20	25
聚甲基丙烯酸甲酯	30	20
镁	20	40
邻苯二甲酸酐	15	15
棉花	5	25
木质素	40	20
可可树	75	10
玷(脂)	30	30
橡胶(合成硬质)	30	30
橡胶(天然硬质)	25	50
小麦粉	50	50
小麦淀粉	25	20
大米(种皮)	45	40
软木粉	35	35
糖	35	30
对酞酸二甲脂	30	20
马铃薯淀粉	45	20
锆	40	5
煤	35	30

(续)

物质名称	爆炸下极限浓度 /(g/m ³)	最小点火能量 /mJ
肥皂	45	60
紫胶	20	10
纤维素	45	35
钛	45	10
玉米	45	40
玉米糊精	40	40
玉米淀粉	40	20
钽	75	5
甘油三硬脂酸铝	15	15

表 3-6 合成树脂粉尘颗粒大小与最小点火能量之间的关系

粉尘颗粒大小/ μm	最小点火能量/mJ
710 ~ 1680	> 5000
355 ~ 709	250 ~ 500
180 ~ 354	50 ~ 250
105 ~ 179	< 10
53 ~ 105	< 10
< 53	< 10

表 3-7 炸药的静电最小点火能量

最小点火能量 /mJ	静电可燃可爆物质
0.10 以下	火炸药:部分起爆药,如碱式斯蒂酚酸铅、叠氮化铅、D · s 共晶起爆药、三硝基间苯二酚铅等 电火工品:引信用薄膜式、火花式、导电药式电雷管和电点火具 易燃气体和空气的混合物

(续)

最小点火能量 /mJ	静电可燃可爆物质
0.10 ~ 1.0	火炸药:部分起爆药,如雷汞、特屈拉辛、二硝基重氮酚; 黑火药粉;部分烟火药粉 电火工品:导电药式电底火、引信用桥丝式电雷管和电 点火具 易燃溶剂蒸气与空气的混合物 硝化棉粉尘与空气混合物
1.0 ~ 10	火炸药:部分烟火药粉、粉状黑药、发射药粉、炸药粉 电火工品:部分火箭弹发动机用桥丝式电点火具 炸药粉尘与空气的混合物;黑药、发射药、部分炸药粉尘 等
10 ~ 200	火炸药:黑火药制品、部分烟火药制品、小粒发射药 电火工品:部分火箭弹发动机用桥丝式电点火具和炮弹 用桥丝式电底火 火炸药粉尘与空气的混合物:部分炸药粉尘
200 以上	火炸药:部分烟火药制品、大尺寸的发射药和推进剂、炸 药制品 电火工品:钝感电火工品

3.5 静电对工业生产的危害

静电对工业生产的危害主要表现在妨碍生产或降低产品质量。

在纺织行业及有纤维加工的行业，特别是在涤纶、腈纶等合成纤维的生产、处理工序，静电问题更是突出。例如在

抽丝过程中，每根丝都要从直径几十微米的小孔中挤出，会产生较强的静电，由于静电力的作用，会使丝飘动、粘合、纠结等，妨碍正常生产。在织布、印染等过程中，由于静电力的吸附作用，可能吸附灰尘等，降低产品质量，甚至影响缠卷，使缠卷不紧。

在粉体生产、加工过程中，静电除带来火灾和爆炸危险外，还会降低生产效率、影响产品质量。例如在进行粉体筛分时，由于静电力的作用而吸附细微的粉末，会使筛目变小，降低生产效率。在粉体气力输送过程中，在管道某些部位由于静电力的作用，积存一些被输送的物料，也会降低生产效率，而且由于静电作用结块的粉末脱离下来混在产品中会影响产品的质量。对粉体进行测量时，由于测量器具的静电吸附了粉体还会造成测量误差。粉体装袋时，由于静电斥力的作用，使得粉体四处飞扬，既造成粉体损失，又污染环境。

在塑料和橡胶行业，由于制品与辊轴的摩擦、制品的挤压或拉伸，都会产生大量的静电。一方面存在火灾和爆炸危险，另一方面由于静电不能迅速消散还会吸附大量灰尘，而不得不花费大量时间清扫。在印花和绘画工艺中，静电使油墨移动会大大降低产品的质量。在将塑料薄膜打卷时，会由于静电的斥力使缠卷不紧。

在印刷行业，由于纸张带有静电，纸张的移动会受到阻碍，可能使纸张不能分开，粘在传送带上，出现套印不准、折收不齐、油墨受力移动、降低印刷质量等问题。

在感光胶片行业，由于胶片与辊轴的高速摩擦，胶片的静电电压可高达数千伏甚至上万伏。一旦发生静电放电，即使是能量较低的电晕放电，也会使胶片感光而报废。另外，

带电的胶片会因静电引力吸附灰尘降低胶片质量。在涂膜工艺，由于静电力的影响，会出现涂膜不匀的问题。

在食品加工行业，粉状原料会由于静电作用而吸附在工艺设备的内壁上，往往一时不能清除，而在改制另一种食品时，这些残留在设备内壁上的原料可能脱落下来，从而降低食品质量。

3.6 静电对电子行业的危害

静电放电可以改变半导体器件的电性能，使它降级或损坏（见图 3-7）。静电放电也会扰乱电子设备的正常操作，引起设备故障或损坏。静电荷还会在无尘室引起麻烦。带电体表面能够吸引污染物，当硅晶体或器件的电路部分沾染了灰尘，就会造成电路中不可预料的缺陷并影响其产品质量。

3.6.1 静电放电对电子行业的危害形式

●要点提示：

吸附尘埃坏芯片，电容击穿透绝缘。

加速老化漏电流，模式失效有几种。

●实用技术：

静电对电子工业危害最大的主要有下列几种方式。

1. 吸附尘埃

静电吸附尘埃对微电子生产影响很大，在现代大规模集成电路生产中，芯片的线宽已达到 $0.1\mu\text{m}$ 。如果其产生静电，则对几微米到几十微米的尘埃吸附作用明显。一颗直径几微米的尘埃吸附在芯片上，即可造成十几根芯线之间的绝缘强度降低，使芯片漏电流增大，使用寿命缩短，甚至造

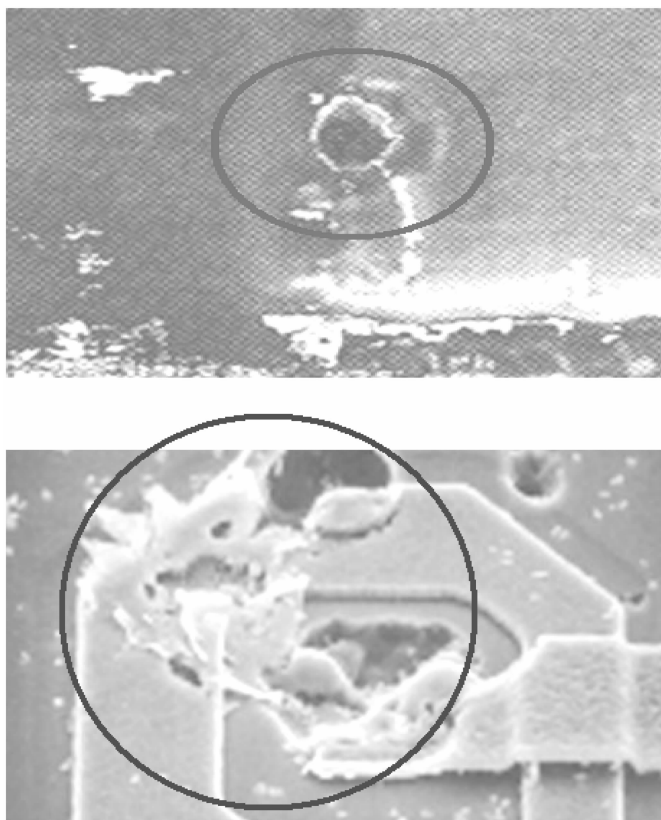


图 3-7 静电放电将电子元器件熔出孔洞或烧毁

成短路，使芯片损坏。酸、碱微粒子吸附在芯片上，还可造成芯片腐蚀。

2. 静电场感应及放电

导电物体置于静电场中感应带电，当感应到某一个限定值时也可发生静电放电。当元器件置于静电场中发生感应带

电时，在器件或芯片氧化膜两端及结构金属突出部位因尖端效应可感应出较强电场。因各点对地电位不同，当电场强度超过某结构点绝缘强度的限值时，就能导致介质之间或结构点之间击穿（或软击穿），使元器件失效或品质降低。除直接放电外，还可通过分布电容、电感耦合放电。

3. 静电放电及产生的宽带电磁脉冲效应

静电放电可使集成电路芯片介质击穿、芯线熔断、漏电流增大加速老化、电性能参数改变等。静电放电对芯片损坏具有潜在和缓慢的失效性，这种情况危害性更大。另外，静电放电可产生从低频到几兆赫兹的宽频带干扰，对电子仪器、信息化系统、医疗监护系统等产生静电噪声和电磁干扰，能量较大的放电产生的电磁脉冲可造成飞行器、通信系统联络中断，使其不能正常工作，甚至造成电子设备损坏。

3.6.2 电子器件静电损伤的失效形式

对于易受静电放电损坏的微电子器件（或是组件）称为静电放电敏感器件。其在静电放电影响下发生的失效形式有以下几种：

1. 突发性完全失效

突发性完全失效是器件的一个或多个电参数突然劣化，完全失去规定功能的一种失效。通常表现为开路、短路以及电参数严重漂移。这种失效一般分为两种：一种是与电压相关的失效，如介质击穿、PN 结反向漏电流增大等；另一种是与功率有关的失效，如铝条熔断、多晶电阻熔断、硅片局部区域熔化。对于结型器件，通常是与功率有关的热效应引起器件损坏。损伤部位往往是在 PN 结边缘的 Si-SiO₂ 界面或接触孔边缘处发生。因静电放电引起的局部高温区，会造

成杂质微扩散，形成的杂质管道导致 PN 结严重漏电和电流增益显著下降。

对于肖特基器件和浅结器件，静电损伤都集中在势垒区边缘的 Si-SiO₂ 界面处。该处电场集中，过电流形成热斑。热斑的不稳定会导致器件失效，其失效模式完全类似于热致二次击穿，失效部位往往集中在结区边缘。

CMOS 电路的失效主要表现为输入端铝互连线与输入保护电阻周围 PN⁺ 保护环之间的介质击穿短路；输入对地保护二极管的 PN 结击穿；扩散保护电阻的寄生 PN 结损伤；多晶保护电阻接触孔损伤等。损伤严重时，输入端金属互连线烧熔。对于铝栅器件，静电放电引起 Al-SiO₂ 界面发生反应，铝穿透 SiO₂ 并造成栅极漏电甚至短路。

采用 MOS 电容器作为内补偿的运算放大器，往往表现为过电压引起电容器的介质击穿。

对于 CMOS 电路和 MOS 功率管，由于存在寄生晶闸管效应，静电放电可能触发“闭锁”，如果供电回路无限流电阻存在，器件会被过大电流烧坏。

2. 潜在性缓慢失效

对某些集成电路，虽然 PN 结已受到静电放电损伤，但电路的电参数退化并不明显，只给电路留下了隐患，使该电路在以后的加电工作中，参数退化逐渐加重。因此，静电放电损伤具有潜在性和累积性的特点。如果带电体的静电位或存储的静电能量较低或者静电放电回路有限流电阻存在，则一次静电放电脉冲电流不足以引起器件发生突发性完全失效，但它会在器件内部造成轻微损伤。这种损伤又是积累性的，随着静电放电脉冲电流次数的增加，器件的损伤限定值电压会逐渐下降，器件的电参数逐渐劣化，这类失效称为潜

在性失效。它降低了器件防静电的能力和器件的使用可靠性。正因为存在这种潜在性失效，所以对器件进行 100% 的防静电筛选试验是不可取的。

3. 常见的静电放电损伤的失效模式

常见的静电放电损伤的失效模式有下列几种：

(1) 高频小功率二极管

- 1) 反向漏电流增加，击穿电压降低；
- 2) 正向压降减小；
- 3) 电极金属熔蚀。

(2) 高频小功率晶体管

- 1) e_b 结反向漏电流增大；
- 2) β 值减小；
- 3) 噪声系数增大；
- 4) 电极金属熔蚀。

(3) 场效应晶体管

栅-源极或栅-漏极短路或漏电。

(4) 双极数字电路

- 1) 输入漏电流增加；
- 2) 参数退化或失去功能。

(5) 双极线性电路

- 1) 输入失调电压增大，失调电流增大；
- 2) MOS 器件电容击穿短路。

(6) MOS 集成电路

- 1) 输入端或输出端与源极之间漏电流增大，输入保护网络的 PN 结击穿；
- 2) 其他功能参数退化；
- 3) 丧失功能，多晶硅布线膜熔断。

3.6.3 电子器件静电放电损伤机理

静电放电造成电子器件损伤的失效机理包括热二次击穿、金属导电层熔融、介质击穿、气体电弧放电、表面击穿和体击穿。其中，热二次击穿、金属导电层熔融和体击穿主要决定于放电电流或功率，介质击穿、气体电弧放电和表面击穿主要决定于放电电压。

对于集成电路和半导体分离器件而言，上述各项失效机理都有可能出现。薄膜电阻器的静电放电失效主要表现于金属导电层熔融和气体电弧放电。压电晶体的静电放电失效机理主要表现为体击穿。除这些致命失效机理外，封装前的芯片上和大规模 MOS 集成电路内，由于封壳内盖板和衬底之间气体电弧放电所产生的附着于芯片上的正电荷，也会导致器件暂时失效，这也归因于气体电弧放电的失效机理。

1. 热二次击穿

热二次击穿又称雪崩击穿。由于半导体材料的热时间常数通常比静电放电脉冲的持续时间长，故静电放电产生的热量几乎不会从功率耗散面积上向外扩散，因而在器件内可以形成大的温度梯度。局部结温可以接近材料的熔融温度，通常会导致热点扩大，然后由于熔融而短路。

在反偏压条件下，所加的大部分功率由结中心处吸收。在正向偏置条件下，在器件体内可消耗较大的功率，结的失效要求更大的功率。通常 eb 结比其他结的尺寸要小，所以对于大多数双极型晶体管，其 eb 结比 cb 结在更小的电流下就会退化。反向极性的静电放电脉冲电流，在电压超过击穿电压之前只有很小电流流过。在击穿时，因热点聚集和电流集中会导致结发热。在二次击穿点上，由于电阻率减小，电

流迅速增加，形成熔融通道，使结毁坏。这种失效机理是一种与电流或功率相关的过程。

2. 金属导电层熔化

当静电放电的瞬变过程使元器件的温度升高到足以熔化金属导电层或使键合引线烧熔时，会引起失效。通过理论计算可以得到使各种材料导致失效的电流，它和截面积及电流的持续时间有关。然而，理论上假定互连材料具有均匀的截面积，而事实上保持截面积均匀是困难的。由于截面积不均匀，在某些部分的电流密度增大，会在金属导电层上形成热点。在金属导电层跨越氧化层台阶处，其横截面积减小，就可能发生这一类失效。高频情况下，由于结的分流作用，产生此类失效需要的功率比在低频情况下使结破坏的功率大一个数量级。

3. 介质击穿

加在绝缘区两端的电压超过介质固有的击穿电压时，就要发生介质击穿。这种失效主要是由于电压而不是由于功率造成的。根据脉冲能量的大小，可以导致元器件全面退化或有限的性能降低。例如，如果在穿通的过程中，脉冲能量不足以使击穿的电极材料熔化，则该元器件可以在电压击穿后恢复。然而，这种事故之后，通常会呈现出较低的击穿电压或增大的漏电流，但元器件却没有发生致命的失效。但是，这种类型失效能引起潜在缺陷，若继续使用则会导致元器件失效。绝缘层的击穿电压是脉冲上升时间的函数，这是因为绝缘材料的雪崩击穿需要时间。

MOS 晶体管或 MOS 电容器由 ESD 引起的主要损伤机理之一是栅氧化层击穿。当加在栅氧化层上的电压超过介质的耐压时，就会发生栅穿失效。一旦发生栅击穿，当存在足够

大的静电能量时，击穿点就会出现短路。由于铝栅 MOS 器件的栅必须覆盖源极和漏极，即栅金属与源、漏极扩区边缘重叠，并且该处存在薄栅氧化层与厚栅氧化层交接的台阶。又由于两次不同的速率的氧化工艺造成台阶处存在应力集中，甚至存在微裂缝，因而导致该处介质击穿强度下降。所以台阶处最容易发生 ESD 击穿。

4. 气体电弧放电

如果元器件中未被钝化的薄层电极之间间距很小，气体电弧放电能使元器件的电性能降低，也会引起金属气化并使金属离开电极。在熔融和熔断时，金属聚拢而流动或沿电极方向而断开。在间隙处存在细小的金属球，但尚不足以引起桥接。对没有钝化层覆盖的薄金属电极，短路不会成为一个主要问题。

厚度为 $0.4\mu\text{m}$ ，间距为 $3.0\mu\text{m}$ 的薄金属电极的声表面波带通滤波器，曾经发现存在因静电放电引起工作性能降低的情况。对于有钝化层、易出现反型界面的有源结的大规模集成电路来说，封装件内的气体电弧放电能使正电荷附着在芯片上，使表面出现反型，从而引起失效。采用非导电性盖板的器件，特别容易发生这种失效情况。但是，采用石英盖板的紫外线可擦除可编程只读存储器，由于紫外线可通过石英盖板中和气体电弧放电产生的积聚电荷，所以可使这种效应得到减弱。

5. 表面击穿

对于垂直结，表面击穿被认为是表面处的结空间电荷区域变窄，引起局部雪崩倍增的过程。由于表面击穿与多种因素有关，如几何尺寸、掺杂程度、晶格不连续性或表面平整度等，因此，表面击穿期间消耗的功率通常是无法预计的。

表面击穿的毁坏区域使结周围有大的漏电流通路，从而使结的作用消失。这种效应与介质击穿一样，属于电压敏感效应，与脉冲上升时间有关。在热效应没有发生而电压超过表面击穿电压阈值时，通常会发生表面击穿。表面失效的另一种模式是在绝缘材料周围发生电弧，它类似于金属导电层的气体电弧放电，只是它发生在金属和半导体之间。

6. 体击穿

体击穿是在结区由于局部高温致使结的参数变化形成的。由于局部高温会使金属导电层熔化或杂质扩散，从而导致结参数发生很大变化，通常的结果是形成与结并联的电阻通路。这种效应通常发生在热二次击穿之后。

3.7 静电危害的预测

根据形成静电危害的条件、气体混合物（或粉尘）的爆炸浓度极限和物质的静电敏感度，就可以预先判断某一具体条件下的静电危害性。从而采取适当措施，防患于未然。

1. 构成静电危害的基本条件

1) 产生并积累起足够的静电，形成了“危险静电源”，以致局部电场强度达到或超过周围介质的击穿场强，发生静电放电。

2) 在危险静电源存在的场所有易燃、易爆气体混合物，并达到了爆炸浓度极限，或有电火工品、火炸药之类爆炸危险品，或有静电敏感器件及电子装置等静电易爆、易损物质。

3) 危险静电源与静电易爆、易损物质之间能够形成能量耦合，并且 ESD 能量等于或大于前者最小点火能量或静

电敏感度。

形成静电危害的这三个基本条件是缺一不可的，只要控制其中一个条件不成立，就不会有静电危害发生。

2. 静电危害的预测依据和方法

静电危害的准确预测，可以有针对性地事先采取防静电措施。静电危害的预测应依据形成静电危害的三个基本条件，按顺序逐项分析、判断、预测能否构成静电危害。在分析、判断过程中，只要基本条件中有一条不满足，即可确定静电危害不会发生。如果三个基本条件都成立，就说明存在发生静电危害的可能性，应该采取防护措施。一般来说，分析、判断过程要有一定的测试工作相配合，以便进行定量分析。

(1) 分析能否形成危害静电源

最容易判断的条件之一是环境的相对湿度。静电起电和消散与周围环境的相对湿度密切相关。当环境相对湿度在65%以上时，难以形成静电危害源。不必再进行其他分析，就可以预测该环境不会发生静电危害；如果相对湿度在50%以下，甚至在30%以下时，这种干燥环境很容易产生静电。

要进一步分析静电起电的物体是静电导体还是非静电导体。并要明确它的起电率有多大，静电泄漏电阻或电荷半衰期是多少，能否形成足够高的静电电压。若可以形成足以造成危害的静电电压，那么要根据带电体的性质、与接地体或其他导体之间的距离、放电电极的形状等条件，判断电场强度是否达到介质击穿场强，如果能够形成静电放电，则要判断静电放电的类型和能量大小。

(2) 分析静电危险场所

根据形成静电危害的第二个基本条件，针对被预测场所中存在的物质进行预测。如果是静电敏感器件或电磁敏感的电子装置，那就要按照半导体器件静电敏感度分类或进行电子器件敏感度分析。如果是电火工品、火炸药之类的爆炸危险品或易燃易爆气体混合物，要分析是否达到爆炸浓度极限，并分析敏感物质的静电感度和最小点火能量（或最小引燃能量），判断是否满足形成静电危害的第二个基本条件。

（3）比较静电放电能量（或电压）和敏感物质的敏感能量（或电压）

根据形成静电危害的第三个基本条件，比较静电放电能量（或电压）和敏感物质的敏感能量（或电压）以及能量耦合的通道和方式，从而预测能否发生燃爆性静电危害。

第4章 静电的测试与计算

4.1 静电测试的重要性

静电测试在静电的预防、消除、防护等工作中是非常重要的部分。掌握静电产生和放电的规律，了解生产、储运过程中的静电放电情况，判断静电放电的危害，确定静电危险场所的等级，检验静电防护措施的效能以及分析静电事故等，都需要准确、合理的静电测试。

还有，在静电科研以及静电应用的工艺设计、试验、施工、生产等过程中，也需要测试静电的参数。为考核静电敏感电子产品的设计和制造质量，也需要对这些产品的静电放电敏感度进行测试。

总之，静电测试是静电研究工作中不可缺少的。

4.1.1 影响静电测试的因素

静电测试不同于一般的强电或弱电测试，影响静电测试结果的因素很多，只有了解了这些因素，才能更好地选择适宜的测试仪器，制定出合理的测试方法和程序，得出较为准确的数据。

影响静电测试的因素主要有以下几点：

1. 静电测试受环境变化的影响非常大

静电测试受到环境变化的影响非常大，其比强电或弱电

的变化要显著得多。用相同的测试方法、相同的测量仪器、在相同的地点做相同的测试时，如果环境温度、相对湿度、被测物品与环境的平衡时间等测试条件不同，那么测试的结果也会有很大的差别，特别是环境相对湿度的影响尤为显著。所以，在静电测试的结果中报告中必须注明环境温度、环境湿度等环境条件。

2. 静电测试受测试方法、测试电压等测试条件的影响非常大

目前国内外静电测试的方法还没有标准化，测试仪器更是多种多样，在实际工作中往往存在测试方法不统一、测试结果不一致、再现性差等问题。这就要求测试人员尽量采用科学合理的测试方法，选用先进的测试仪器并定期进行测量，以避免测试结果的误差过大。这样看来，不同的带电历史、不同的测试电压，将导致不同的测试结果。所以，在静电测试报告中必须注明测试方法和测试电压等条件。

3. 使用的模拟器输出波形对静电放电敏感器件的测试影响非常大

由于静电放电敏感度测试时是通过模拟的方法来检查产品在实际工作过程中可能遇到的各种静电放电脉冲电压的冲击，所以现在人们只能使用各种模拟试验的波形，例如 IEC61340-4-4、IEC61340-4-2 与 IEC61000-4-2 分别规定了人体模型（HBM）、机器模型（MM）、人体金属模型（BMM）的电流波形参数及模拟方法。模拟器输出的波形集中反映了各种模型的特征，反之，从波形参数也可以检验出模拟模型的参量是否符合标准。

现在已经发现，波形参数不仅取决于给定的模拟器参

量，而且受到分布参数（主要是线路中的分布电容）的严重影响。近几年出台的测试标准，除规定使用短路波形校准外，还增加了使用 500Ω 负载的波形校准，且校准要定期进行以保证其满足标准的规定。

另外，静电起电的过程是一个起电、积聚、泄漏相平衡的动态过程，要求测试仪器既能测试静态信号，又能测试动态信号。例如，在现代静电安全工程中，为确保安全，必须准确测试带电体的动态电位，以把其峰值电位控制在安全电位以下。

4. 不同的输入电容和电阻对静电测试的结果影响非常大

由于静电电量很小，所以在静电测试过程中即使有少量电荷从带电体流入测试仪表或泄漏掉，也会造成很大的测量误差。此外，引入的测试仪器对原来场分布也会产生很大的影响。为降低测试仪器对静电测试的影响，要求测试仪器具有很小的输入（耦合）电容和极高的输入电阻（一般要求不低于 $10^{14}\Omega$ ）。

4.1.2 静电测试的主要项目

静电测试的主要项目包括：

- 1) 基本静电参量的测试；
- 2) 人体静电参量的测试；
- 3) 防静电设施及器具的性能测试；
- 4) 防静电织物的性能测试；
- 5) 防静电包装材料的性能测试。

4.2 基本静电参量的测试与计算

4.2.1 静电电量的测试与计算

静电电量是反映带电体情况最本质的物理量之一，它决定着带电体产生静电放电的概率和危险性。若带电体是一个导体，则所带电荷全部集中于物体表面，而且表面上各点的电位相等，故对于导体带电时电量的测试，可通过接触式静电电压表先测出其静电电压，然后按照基本关系式 $q = CU$ 计算出带电量 q 。此处， C 值为带电体对地电容 C_d 与仪表输入电容 C_b 之和。如果这两个电容已知，电量的测试实际上变为静电电压的测试，并可通过适当标定，在静电电压测试仪表上直接标出被测电量的数值。如果被测带电体对地电容无法确定，可增大仪表输入电容 C_b ，使得 $C_b \gg C_d$ ，从而使 C_d 的影响可以忽略不计，认为 $q = C_b U_0$ 。鉴于静电电量的测试是在静电电压测试的基础上进行的，所以同样需要电压仪表具有高的输入电阻，以减少测试误差。

在工程实际中，需进行静电电量测试的物体多为带电的绝缘物体。绝缘物体所带电荷并不完全分布在表面上，在其内部也有电荷存在，所以通常需借助于法拉第筒来完成静电电量的测试。对于导体带电体而言，法拉第筒也同样适用。

4.2.2 用法拉第筒测试静电的方法

1. 测试设备

用到的测试设备有法拉第筒（尺寸根据不同标准确定）、滚筒摩擦机（见图 4-1）或其他标准规定的摩擦起电

器具、静电电量表（或静电电压表见图 4-2，其精度为 $\pm 1\%$ ）、有机薄膜电容器（ $0.01\mu\text{F}$ ）。要求法拉第筒内筒与外筒之间的电阻、静电电量表输入端对地电阻和电容器的绝缘电阻都应大于 $10^{12}\Omega$ 。

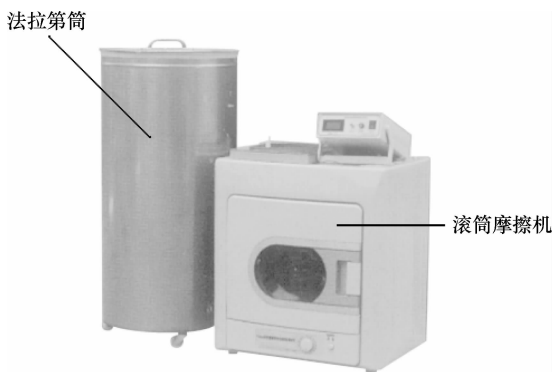


图 4-1 法拉第筒与滚筒摩擦机



图 4-2 静电电压表

2. 测试方法

将被测物和有关标准规定的摩擦器具摩擦后，放入与静电电量表连接的法拉第筒内，此时法拉第筒感应出静电电量

(电压), 并由静电电量表 (电压表) 测出, 如图 4-3 所示。

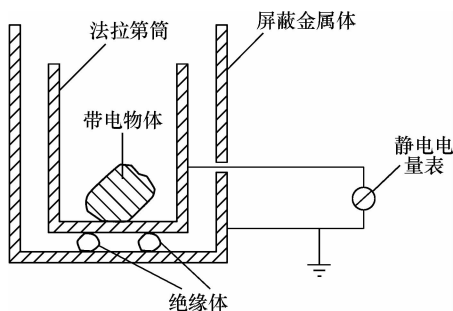


图 4-3 用法拉第筒测试静电电量的原理

3. 测试注意事项

1) 在测试仪表输入端和地线之间并联电容的绝缘电阻必须大于 $10^{12}\Omega$, 不能使用漏电流大的电解电容器等。

2) 测试时, 法拉第筒周围 40cm 以内应无对地绝缘的金属导体或人员。

3) 测试时, 环境相对湿度不应高于 40%, 被测物品应进行干燥处理和时间平衡。

4) 测试时, 测试人员应戴绝缘手套, 以免待测物体上的静电荷从人体泄漏。

5) 使用的接触式静电压表或静电电量表应计量和鉴定合格, 测试前要清零。

4.2.3 微小电流的测试

1. 产生微小电流的测试

产生电流是指产生静电的物体在单位时间内电荷的增加量, 即 $i = \Delta q / \Delta t$ 。

(1) 测试仪器仪表

1) 微小电流仪表（见图 4-4）一般用于测试平均产生电流。摩擦产生电流的值通常为 $10^{-11} \sim 10^{-6} \text{ A}$ ，应注意选用适宜测试范围的仪表。



图 4-4 微小电流仪表

2) 示波器（见图 4-5）用来测试产生电流的瞬时值。



图 4-5 示波器

(2) 测试方法

1) 若摩擦带电的物体是导体, 可在导体与大地之间连接微小电流仪表进行直接测试。

2) 若摩擦带电的物体是非导体, 可通过在该物体上安装测试用导体 (如金属箔、导电涂料等), 并在它与大地间连接微小电流表, 利用静电感应间接进行测试。

2. 放电电流的测试

放电电流是指带电物体同与其接近的接地导体之间的放电, 并通过接地导体流入大地的电流。为此, 可以在邻近接地导体 (或称带电电极) 和大地之间连接测试仪器, 进行放电电流的测试, 并分析其放电特性。

(1) 测试仪器仪表

1) 小电流测试仪表, 要求具有 $10^{-9} \sim 10^{-3} \text{ A}$ 的测试范围。

2) 测试用静电电容器, 一般取 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{F}$, 以保证测试电位在 $0.1 \sim 10 \text{ kV}$ 。

3) 观察放电用的示波器, 最好使用 100 MHz 以上的宽频带示波器。

4) 静电电压表。

(2) 测试方法

如图 4-6 所示, 使放电电极缓慢接近带电物体, 引起放电, 再用图中的测试回路分别测量此时的平均放电电流、放电电荷、放电波形, 以及放电距离和放电前后物体表面的电位。

1) 对于连续产生的电晕放电, 可接上直流电流表读出放电的平均放电电流。

2) 对于刷形放电、火花放电等间歇式放电, 可将放电

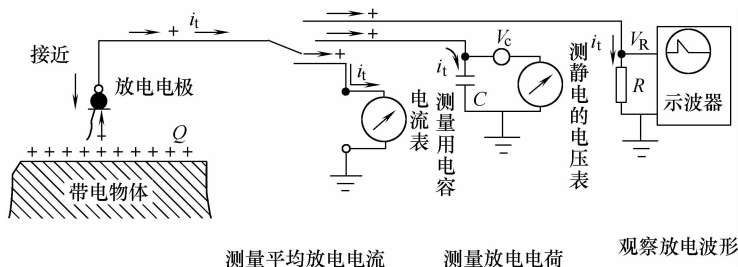


图 4-6 放电电流的测量

电荷存储在测试用电容内，再用静电电位仪测出电容上的端电位，然后计算出每一次放电时的放电电荷量。

3) 为观察刷形放电或火花放电现象，可在放电电极与大地间连接一只电阻，再用示波器测出电阻上的放电波形。

(3) 测试注意事项

1) 放电电极的形状应符合测试要求，一般使用直径为 1 ~ 30mm 的金属球电极。

2) 测试电晕放电的平均放电电流时，应注意不要引起火花放电。为防止损坏测试仪表，可在小电流表前串联一只 1MΩ 的保护电阻。另外，如果是脉冲型的电晕放电，测量值会产生误差。

3) 观察放电波形用的电阻最好选用小阻值无感电阻，且要考虑测试回路与示波器的阻抗匹配。

4) 由于每一次放电电荷的测量值离散性大，需要统计处理，一般用放电脉冲的平均值或最大值来评价。

3. 测试微小电流时的注意事项

(1) 严格进行屏蔽

仪器设备所使用的电源和外部电场，会通过测试线路

的耦合，使数据不稳定或使结果产生较大的偏差。因此，被测物体、测试回路和测试仪表必须进行全屏蔽。

(2) 控制测试系统中失调电流

失调电流是指在测试微小电流时，微小电流测试仪表中存在的本底电流。它主要由如下原因所形成：

- 1) 输入端的绝缘材料带电，流入或感应到输入端。
- 2) 由于输入电缆的绕曲或振动而产生的噪声电流。
- 3) 测试时，信号源的阻抗以及并联输入电路的阻抗比检流计的电阻小时，则会发生零点漂移或失调电流过大的现象，从而造成测试误差。一般信号源的电阻是检测电阻的100 ~ 1000 倍时为最好。

4.2.4 静电电压（电位）的测试与计算

静电电压是带电体表面某点的静电电位与某一指定参考点（通常是地）电位之间的差值。由于通常将地电位取为零，故带电体表面的静电电位即代表了该处的电压水平。由于电位是与电荷成正比的物理量，电位的高低则会反映出物体带电的程度，即可通过测电位（电压）来了解带电量的大小。而且，由于静电电压的测试较其他静电参数的测试易于实现，因而得到了广泛的应用。

1. 导体静电电压测试

(1) 测试原理

利用等电位原理进行测试。把被测带电体用对地绝缘的电缆直接连在输入阻抗为 $10^{12}\Omega$ 以上静电电压表的测量电极上，由静电电压表表头直接读出被测带电体的电位，这种测试方法叫等电位测试法，也称为接触式测量。此测试方法仅适用于对静电导体带电电位的测试，测量准确度可以优于

2% , 但对于某类测试探头无法进行电接触的对象, 这种方法不宜使用。

(2) 测试仪器

接触式静电电压表(或简称静电伏特计)通常是利用静电力矩来进行测试的。其常用的也是最传统的是 Q-V 系列表。其型号、性能见表 4-1。

表 4-1 常用接触式静电电压表

型号	名称	外形图	级别	量程/V	特性
Q ₂ -V	静电伏特计		1.0	30、75、150、 300、750、1500、 3000	20℃、RH ≤90% 时, 输入电阻 $R > 10^{12} \Omega$, 输入电容 $C \approx 30\text{pF}$
Q ₃ -V	高压静电电压表		1.5	7500、15000、 30000	15 ~ 25℃、 RH ≤ 85% 时, 输入电阻 $R > 10^{10} \Omega$, 输入电容 $C \leq 12\text{pF}$
Q ₄ -V	高压静电电压表		1.0	20000、50000、 100000	20℃、RH ≤85% 时, 绝缘电阻 $R > 10^{10} \Omega$, 绝缘电容 $C \leq 20\text{pF}$

(续)

型号	名称	外形图	级别	量程/V	特性
Q ₅ -V	静电 伏特计		1.0	30、75、150、 300、600、1000、 1500、3000	0 ~ 40℃、 RH ≤ 85% 时， 输入电阻 $R > 10^{10} \Omega$ ，输入 电容 C 为 12 ~ 25pF

(3) 测试方法

1) 用绝缘电缆将仪表的高压端与待测带电体连接起来，其低压端与仪表的外壳进行良好接地，即可测出导体的静电电位。

2) 测试前应先检查仪表输入系统的（包括仪表的输入端和电缆）绝缘情况。其方法是在仪表的输入端加上适当的静电电压，去掉外加电压后，观察表头读数的衰减速度。若衰减得很慢，则说明测试系统绝缘性能良好；否则，说明绝缘性能不良。

3) 当测试仪表的输入系统受潮或被污染时，则绝缘性能变坏，高压加不上去，出现严重的漏电现象。因此要使用蘸了酒精的纱布或脱脂棉等擦拭干净，烘干后方可使用。

4) 每次测试前必须先对测试仪表调零。为避免直接短路给被测仪表的输入端造成损伤，可通过连接与输入端的外部短路电路进行调零。

(4) 减小测试误差的方法

接触式静电电压表等效电路如图 4-7 所示。

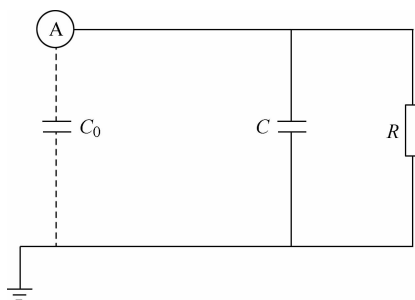


图 4-7 接触式静电电压表等效电路

在图 4-7 中 C_0 为被测带电体对地电容， C 和 R 分别是仪表的输入电容和输入电阻。当把仪表和被测带电体接触进行测试时，带电体的对地电容增大为 $C_0 + C$ ，因而接上仪表后，实际测得的 C 上的电压并不等于接仪表前带电体的实际电压 U_0 ，两者之间的关系如下：

$$U = \frac{C_0 U_0}{C_0 + C}$$

从上式可以看出，表头读数 U 低于带电体的实际电压 U_0 。为减小测试误差，应该使 $C \ll C_0$ ，即尽可能地减小仪表的输入电容。例如，使用量程在 3kV 以下的静电电压表，其输入电容 C 值都不大于 30pF。

另外，考虑电容 C 上的电压通过仪表输入电阻而衰减，可得出测试的电压为

$$U = [C_0 U_0 / (C_0 + C)] e^{-\frac{t}{R(C+C_0)}}$$

从上式可以看出，随测试时间 t 的增加，表头读数按指数规律衰减。为了减小由此造成的测量误差，应尽量提高仪表的输入电阻 R ，一般静电电压表的输入电阻应选择在 $10^{12} \Omega$

以上。

2. 表面电位测试

(1) 测试原理

根据测试原理的不同，可分为静电感应和空气电离两种测试原理。静电感应原理是将测试探头靠近带电体，利用探头与被测带电体之间产生的畸变电场测试带电体的表面电位。其实质上是对带电体表面电场的测试。空气电离原理是利用放射性同位素电离空气，在带电体与测试仪表输入端、输入端与接地端之间分别产生电阻分压，测试带电体的对地电位。由于这种测试不是直接与带电体相接触，因此也称为非接触式测量。其所使用的测试仪表，又称非接触式测试仪表。这类仪表目前在我国市场上比较多，有国内外许多厂家生产的各种类型的非接触式静电电压表。

与接触式测量相比，非接触式测量结果受仪表输入电容、输入电阻的影响较小，测量准确度可优于 15%。但这种方法受测试距离、带电体几何尺寸的影响较大。测试数据一般只能作为参考或相对比较。

(2) 测试仪器

根据工作原理的不同，该类仪表主要分为静电感应型和电离型两种。

1) 用感应型静电电压表测量。

静电感应式仪表测试原理如图 4-8 所示。图中 T 为测试探头，L 为仪表的等效输入电路， C_w 是测试探头与被测带电体之间的耦合电容， R_b 和 C_b 分别为仪表的输入电阻和输入电容。由于被测带电体的电场作用，探头 T 上将产生感应电位。由图中电路可知， C_w 是与 C_b 串联的，而 R_b 是 C_b 的泄漏电阻，若被测带电体的对地电位为 U (U 保持不变)，

则探头对地电位为

$$U_b = [C_w U / (C_w + C_b)] e^{-\frac{t}{R_b(C_w + C_b)}}$$

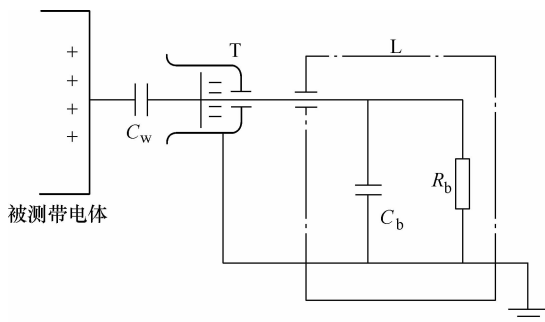


图 4-8 直接感应式仪表测试原理

可见，探头 T 上的感应电位 U_b 随着测试时间 t 而衰减。当探头与被测带电体相对位置固定，则 C_w 即确定。公式中的 $C_w / (C_w + C_b)$ 可视为常数，通过探头上测得的感应电位 U_b 可求出被测带电体的电压 U 。显然，通过改变探头与被测带电体之间的距离，也即改变两者之间的耦合电容 C_w 的大小，即可改变仪表的量程。

鉴于探头上的感应信号非常微弱，必须进行放大，才能由静电电压表显示。静电电压表可根据放大方式分为直流放大和交流放大，而交流放大又分为振动电容式和旋转叶片式。

用这种方法测试得到的数值，仅表示探头相对的局部面积上的电位平均值。对绝缘体而言，不同的位置可以有不同的电位，不能用测试值代表被测带电体的电位。

另外，从公式中还可以看出，即使被测电位 U 不变，测试值 U_b 仍随时间以指数规律衰减，时间常数为 $R_b (C_b + C_w)$ 。为减小测试误差，要求 R_b 或 C_b 充分大，但 C_b 增大

后又导致测试灵敏度降低，反而使测试发生困难。因而要求该类仪表具有很高的输入电阻，这一点同接触式测试仪表是一致的。即使如此，也只能减缓衰减速度，不能从根本上解决问题，故该类仪表不能用做固定接入的监测仪表。

其他常用静电感应型的表面电位计还有

①直流放大式表面电位计。

一般测试仪器选用直流差动放大电路。这种电路仪器的输入阻抗可以达到 $10^{15} \Omega$ 以上，同时还可以补充晶体管零点漂移所带来的误差。测量时，探头上的感应电位使指针偏移，即可指示被测带电体对地电位的大小和极性。

②旋转叶片式静电计。

由测试探头、放大器和显示仪表等组成。所不同的是测试探头部位有一个十字形的旋转叶片，将固定叶片的感应直流信号变成交流信号，然后再经交流放大。这样避免了直流放大器零点漂移的影响。

③振动电容式静电计。

振动电容式静电计也称振簧式静电计，主要由测试探头、交流放大器、振荡器、相敏检波器和指示器组成，如图 4-9 所示。与直接感应式仪表不同，其探头电极是一个可振动的金属片，在振荡器的驱动下，探头电极与被测带电体之间的电容周期性变化，被测带电体在探头电极上感应出一个周期性变化的电位信号。因为此信号非常微弱，故采用高输入阻抗的变换器来接收信号，再经交流放大和相敏检波后由直流表显示被测电位，而且还可以测试电位的极性。

2) 用电离型电阻分压静电电位计测量。

这种仪表是利用放射性同位素产生的射线电离空气，借助电阻分压原理测试带电体的静电电位，根据这种原理制成



图 4-9 振动电容式静电计

的仪表也属于电离型的非接触式仪表。其测试工作原理及等效电路分别如图 4-10 和图 4-11 所示。

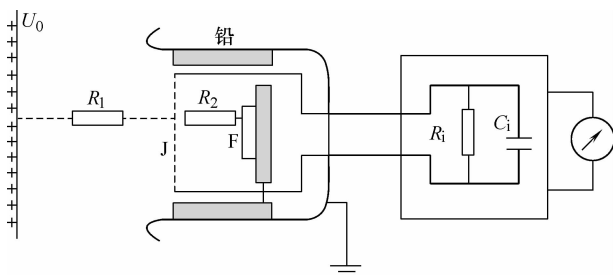


图 4-10 电离式电阻分压静电电位计工作原理图

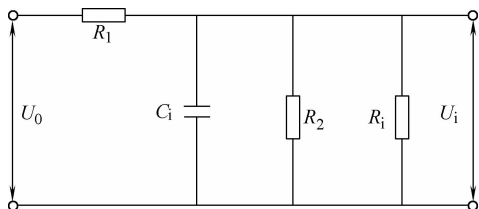


图 4-11 电离式电阻分压静电电位计等效电路

图 4-10 中，测试探头由：铅制金属屏蔽筒（接地）、放射源 F（通常选用镭、镅等放射性材料）和多孔型集电极小窗 J 三个部分组成。在集电极 J 与金属屏蔽筒之间用聚四氟乙烯等高绝缘材料固定并隔离。

放射源产生的 α 或 β 射线通过小窗射出，使集电极附近的空气发生电离，在集电极小窗附近形成一个稳定的电离区。当仪表探头引入带电体附近，在带电体电场的作用下，电荷定向运动，在带电体与测试仪表的集电极以及集电极与大地（屏蔽筒接大地）之间分别形成等效电阻 R_1 和 R_2 ，被测带电体上的电荷通过 R_1 和 R_2 向大地泄漏。这时，通过测试电阻 R_2 上的分压，完成对带电体静电电位的测试。

假定 R_i 和 C_i 分别为测试仪表的输入电阻和输入电容， U_0 和 U_i 分别为被测电位和测试仪表的输入电位。由仪表的等效电路得出测试仪表的直流输入电位为

$$U_i = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_0$$

该信号经放大后输入显示仪表，校准后即可代表被测带电体的静电电位和带电极性。

利用这种仪表进行静电测试，受外界电场影响较小，精度较感应式高，但是放射性材料对带电体有中和静电的作用，因此，测量值比物体实际带电电位要低。

3. 静电电压表使用方法及注意事项

1) 测量前，首先应检查电源电压是否符合规定的标准，仪器外壳（包括探头外屏蔽筒）接地是否良好。仪器要经多次调零后，方可进行测试。

2) 测试探头应放置在与被测带电体表面垂直的某一固定的空间位置上（按仪器说明书的要求）。为避免被测带电

体与探头外壳之间发生火花放电，开始测量时，探头必须放置在远离带电体的位置上。进行测试时，应逐渐接近带电体，最后调整到准确测挡的位置。

3) 测试表面电位时，一般带电体表面应离接地体足够远。如带电体是薄片或薄膜状，且其背面又靠近接地体，当探头移向接地体附近时，由于局部电荷的过于集中，就会有产生空间放电或表面放电的危险。

4) 当带电体的被测部位是较大的平板时，其测量值是准确的。但当带电体被测表面具有一定的曲率半径时，测量值就与实际的电位值有较大差别。在这种情况下，所测得的数值必须进行矫正，才能与实际情况相吻合。

5) 应当考虑测试仪器标定装置对测试结果的影响。为提高测试准确度，任何仪器都需要定期进行标定（量值传递）。对于非接触式测试仪器，还必须考虑标定极尺寸效应。实验结果表明，当被测带电体的面积大于标定极板的面积时，测量值较实际值高，反之偏低。

6) 应当注意屏蔽筒曲率对高压测试线性度的影响。由于屏蔽筒接地，在测试探头接近被测带电体的过程中，会使屏蔽筒的尖端电场强度增强。在测试高电压时，容易产生电晕放电，空间电荷在探头的前方形成带电屏蔽层，降低了仪表的测试敏感度，使仪表的显示值低于其真实值，产生高压非线性失真。反之，若空间电荷直接进入感应电极，则会导致测试值的单方向漂移，使仪表不能正常工作。为了防止电晕放电，应使测试探头尽量远离被测带电体，屏蔽筒的表面应当光滑，探头口部的曲率半径应当大一些，尽量采用圆弧形截面的屏蔽筒口。

7) 应当注意仪表电容对测试准确度的影响。一般说来，

被测带电体与测试探头的屏蔽筒之间以及被测带电体与测试探头的感应电极之间分别会形成分布电容 C_p 和 C_w 。测试时, C_p 直接与带电体的对地电容 C 并联, 而 C_w 与测试仪表的输入电容串联后也与带电体的对地电容并联, 这两个电容并联后, 被测带电体的实际电位有所降低。为保证测试准确度, 要求尽量减小测试探头的几何尺寸, 使 $C \gg C_p + C_w$ 。

8) 应当注意探头屏蔽深度对测试准确度的影响。感应式静电电压表实质上是对被测带电体某一局部电场的测试, 因而必须尽量减小外电场对测试信号的干扰和影响。通常的方法是把该类仪表及其探头安装在接地屏蔽的壳体内。显然外屏蔽套筒过深会降低仪器的测试灵敏度, 过浅又会降低测试的准确度, 因此要求深浅应适当, 一般选用 60° 的测试立体角。此外, 针对测试不同的电荷或电场分布情况, 探头电极可做成不同的形状。如板状电极适用于平面带电体的测试, 球形电极适用于体分布的带电体的电位测试, 而针状电极适用于带电体局部带电情况的测试 (非均匀电场分布)。

9) 由于电离型电阻分压测试仪器是通过放射性同位素使空气电离而工作。在有风的场合或测量移动速度过快时, 均会带来较大的误差。此外, 空气被电离后的离子与带电体的电荷相复合, 会降低带电体电位, 因此测试时间不宜过长。

4.2.5 静电电容的测试与计算

电容是与静电能量、静电电压、静电电量、静电时间常数等物理量有关的系统的重要参数之一。研究静电起电规律、判断静电能量的大小、确定静电源的安全电压以及分析产生静电事故的原因, 都要确定设备、工装、物料和人体的对地电容。因此, 在静电测试中, 电容的测试占有重要的地

位。测试电容的方法很多，主要分为直流测试法和交流测试法两类。

电容的测试，一般采用简便的交流测试方法。但是，静电现象主要是与静电电容的直流特性有关，所以从这点看，采用直流测试法测得的电容数据较切合实际。

1. 直流测试法测电容

(1) 电荷分配法

电荷分配法就是利用稳压电源（见图 4-12）给已知的标准电容（或被测电容）充电到某一电压，断开充电电源后，把该电容与未带电的被测电容（或标准电容）并联，并测量其平衡电压，利用电荷守恒定律计算被测电容的数值。测量原理如图 4-13 所示，图中 C_0 是标准电容， C_b 是高输入电阻电压表 V 的输入电容。测量步骤如下：



图 4-12 直流稳压电源

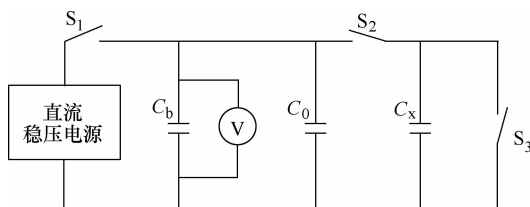


图 4-13 电荷分配法测量电容

1) 断开开关 S_2 ，合上开关 S_1 ，给标准电容 C_0 充电到电源电压 U_0 ；

2) 合上开关 S_3 ，把被测电容器上可能残存的电荷放尽后，再断开开关 S_3 ；

3) 断开开关 S_1 ，使标准电容 C_0 脱离电源，迅速合上开关 S_2 ，使 C_0 向被测电容器 C_X 充电，稳定后记下电压表 V 的读数 U ，根据电荷守恒定律，有

$$(C_0 + C_b)U_0 = (C_0 + C_b + C_X)U$$

由此便可求得被测电容为

$$C_X = (C_0 + C_b)(U_0 - U)/U$$

(2) 电荷衰减法

该方法利用直流稳压电源给电容器充电后，把电容器与电源断开，马上与已知阻值的高阻值电阻并联，利用电容器两端电压的衰减规律测量电容量。为了消除被测电容绝缘电阻对测量值的影响，对该方法改进后，形成了电荷衰减比较法，测量原理如图 4-14 所示。

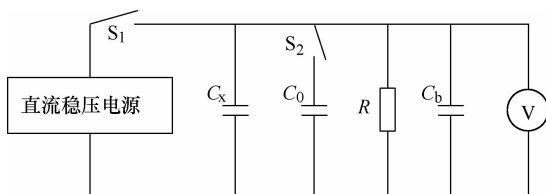


图 4-14 电荷衰减比较法测量电容

图中 C_X 是被测电容， C_0 是标准电容， C_b 是高阻电压表的输入电容。测量步骤如下：

1) 断开开关 S_2 ，合上开关 S_1 ，给被测电容 C_X 充电到电源电压 U_0 ；

2) 断开开关 S_1 ，使被测电容通过电阻 R 放电；当电压由 U_0 衰减至 U 时，记录所用的时间 T_1 ；

3) 合上开关 S_2 ，使 C_x 与 C_0 并联，合上开关 S_1 充电到电源电压 U_0 ；重复第2) 步实验，记录下电压由 U_0 衰减至 U 所用的时间 T_2 。因两种情况起止电压 U_0 、 U 相同，所以被测电容器的绝缘电阻在这两种情况下都与电阻 R 并联，同样发挥泄漏电荷的作用，不影响测量的准确性。

2. 交流测试法测电容

(1) 电桥法

这种方法是利用已知电阻、已知电容及被测电容、可变电阻箱等元件构成交流电桥，通过调整不同臂上的可变电阻箱，使电桥达到平衡，并计算出被测电容器的容量和等效电阻。电路原理如图 4-15 所示。

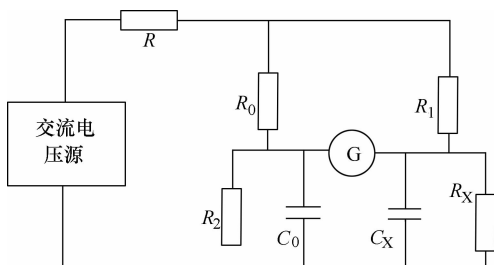


图 4-15 电桥法测电容

图中， R 是限流电阻， C_0 是标准电容， R_0 是标准电阻， R_1 和 R_2 是可变电阻箱， C_x 是被测电容， R_x 是被测电容的等效并联电阻， G 为检流计。反复调节 R_1 和 R_2 使电桥达到平衡，即检流计指零，则

$$\frac{R_0 R_X}{1 + j\omega C_X R_X} = \frac{R_1 R_2}{1 + j\omega C_0 R_2}$$

$$C_X = R_0 C_0 / R_1 \text{ (电容平衡条件)}$$

$$R_X = R_1 R_2 / R_0 \text{ (电阻平衡条件)}$$

利用电桥法测量，可以提高测量的准确度，但其缺点是需要熟练的测试技术，必须同时满足电容平衡条件和电阻平衡条件。

(2) 谐振法

这种方法采用标准电感、被测电容器、电阻器等集总参数与交流信号发生器构成串联或并联电路。通过改变信号发生器的频率，使电路产生谐振，并根据谐振频率求出被测电容。谐振法的测量原理如图 4-16 所示。

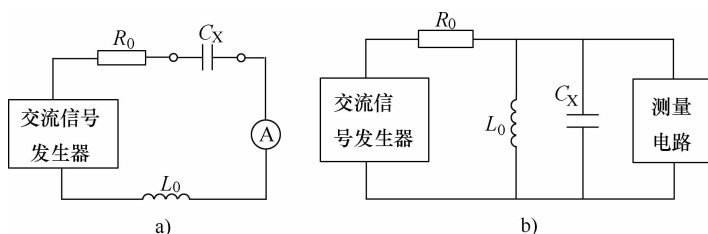


图 4-16 谐振法测量电容

a) 串联电路 b) 并联电路

图 4-16 中， L_0 是标准电感， R_0 是限流电阻，A 为电流表。对图 4-16a 所示串联谐振电路，调节信号发生器的频率，使电路中的电流最大。对图 4-16b 所示的并联谐振电路，调节信号发生器的频率，使被测电容器两端的电压值最高，电路产生谐振。若谐振频率为 f_0 ，根据谐振条件可以求得

$$C_x = 4\pi^2 f_0^2 L_0 = \frac{1}{39.5 f_0^2 L_0}$$

利用电压比较法或谐振法测量电容时，无法确定被测电容器的损耗电阻和泄漏电阻。如果被测电容器绝缘电阻不高、介质损耗很大或被测电容器中存在串联电阻（如测量人体对地电容时的人体电阻），则会产生较大的测量误差。为提高测量结果的准确度，可采用电桥法测量电容。

3. 测量电容注意事项

无论采用哪种方法测量电容，都要注意减小连接线分布电容引起的误差。为此应注意以下几点：

- 1) 应尽量缩短连接线；
- 2) 引接线要干净，不潮湿；
- 3) 引接线应尽量悬空，不宜靠近接地静电导体；
- 4) 必要时可单独测量一下连接线的分布电容，把它从测量值中扣除，以得到比较准确的测量值。

4.2.6 静电电压衰减时间的测试

静电电压衰减时间（期）的定义为带电体上的电压下降到起始值的给定百分数所需要的时间，为静电电压衰减时间。

静电电压衰减时间是一个非常重要的参数，它不但能判定材料静电泄漏性能优劣，同时能弥补由于材料电阻不均匀性所引出电阻测试误差，并在严格的情况下判定材料静电泄漏性能的优劣。

静电电压衰减时间一般用静电电压半衰期和 90% 电压衰减期两个参数来表示。但是静电电压半衰期因最后得到的衰减电压值较高，反映不出高分子改性高分子防静电材料在低电压时衰减时间较长的实际情况，不适合电子行业，所以

就提出了 90% 电压衰减期。

1. 测试方法

静电电压衰减时间测试方法有喷电法和充电法两种方法。

1) 喷电法是利用电晕放电的方法，使样品表面上积聚电荷而成为带电体，通过静电场测试仪和时间计数器来测量样品静电泄漏情况。

2) 充电法是利用充电的接触式电极直接使样品带电，将样品接地并通过非接触式静电场测试仪和时间计数器来测试样品静电的耗散情况。

充电法测试原理：用直流高压充电器和电极对放置在极板上的样品接触充电，达到规定的充电电压后，同时将样品接地，利用非接触式静电场测试仪和时间计数器测试其从初始带电电压降到给定百分比所带电压的时间。

测试静电电压衰减时间的仪器称为静电衰减时间测试仪（或离子平衡分析仪），如图 4-17 所示。它是由静电充电器、非接触式静电电压表、时间计数器和接地开关等组成的。



图 4-17 静电衰减时间测试

测试过程：把样品放置在静电衰减时间测试仪充电极板上并良好接触，利用“喷电法”将电极板充电，同时使接触的样品带电，并使其带静电荷对地有初始电压 U_1 ($\pm 1000\text{V}$)。然后将样品接地泄放静电，使初始电压衰减到指定电压 U_2 ($\pm 100\text{V}$)，时间计数器从接地泄放静电开始计数，至电压衰减到指定电压时结束。通常静电衰减期要测试正、负电压衰减时间，其测试范围应该在 $\pm 100 \sim \pm 1000\text{V}$ (或 $\pm 500\text{V} \sim \pm 5000\text{V}$)。测试时接地极不得与充电板接触。

测试仪器的参数：充电极板与接地之间电阻应大于 $10^{14}\Omega$ ；充电极板的尺寸为 $150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 、对地电容为 15pF ；仪器总输入电容为 $(20 \pm 2)\text{pF}$ ；静电电场测试仪测量电压误差不应大于 $\pm 10\%$ ；时间计数器分辨率为 0.1s ；接地电极的直径为 $\phi(50 \pm 0.5)\text{mm}$ 。

2. 静电电压衰减时间测试注意事项

1) 由于充电时的环境要求和静电衰减时间与环境相对湿度呈反比关系，所以测试时的环境相对湿度一定要符合要求，应当在较低相对湿度 ($12\% \pm 3\%$ 或 $50\% \pm 3\%$) 或标准规定的环境测试。

2) 应使用相关标准认定的仪器测试。一般静电衰减时间仪的分辨率为 0.1s 。仪器充电电压与时间计数器应经计量或鉴定。

3) 因材料衰减时间与所带电荷对地电压存在非线性关系，以及静电放电敏感器件 (SSD) 的静电敏感度高，所以在电子行业对防静电用品做静电衰减时间测试时，应检验静电衰减至 $\pm 100\text{V}$ 时的时间。

4.2.7 电阻、电阻率的测试与计算

任何材料（用品）本身的电阻都与其静电泄漏及耗散密切相关的电气参数有关，这些参数对于防静电系统质量评测和静电源分析有着极其重要的意义。

1. 电阻和电阻率的定义

电阻和电阻率的定义介绍如下。

1) 点对点电阻：在一给定的通电时间内，施加在材料表面任意两点间的直流电压与流过这两点间的直流电流的比值（单位为 Ω ）。

2) 静电泄漏电阻（系统电阻）：在一给定的通电时间内，施加于被测物体表面与被测物体接地点之间直流电压与流过电流的比值（单位为 Ω ）。

3) 表面电阻：在一给定的通电时间内，施加于材料表面上的标准电极之间的直流电压对于电极之间的电流的比值，在电极上可能引起的极化现象忽略不计（单位为 Ω ）。

4) 体积电阻：在一给定的通电时间内，施加于材料的相对两个表面上的接触电极之间的直流电压与两电极流过电流的比值，在电极上可能引起的极化现象忽略不计（单位为 Ω ）。

5) 表面电阻率：沿材料表面电流方向的直流电场强度与该处电流密度的比值（单位为 $\Omega \cdot \text{m}^2$ ）。

6) 体积电阻率定义：沿材料体积电流方向的直流电场强度与该处电流密度的比值（单位为 $\Omega \cdot \text{m}$ ）。

2. 绝缘材料的电阻、电阻率的测试与计算

(1) 测试方法

1) 恒压比较法。对高阻值阻（ $10^5 \Omega$ 以上）的测试一

般采用恒压法，其原理如图 4-18 所示。

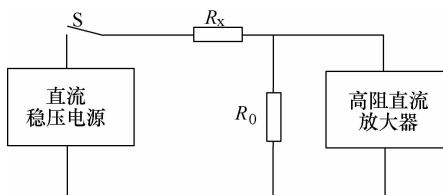


图 4-18 恒压比较法测试电阻原理图

图 4-18 中 R_x 是被测电阻， R_0 是标准电阻，若高阻直流放大器的放大倍数为 A 且其输入阻抗远远大于 R_0 ，则可求得

$$R_x = \left(\frac{AU}{U_0} - 1 \right) R_0$$

式中 U ——直流稳压电源的输出电压；

U_0 ——高阻直流放大器的输出电压。

经过适当标定，可以直接读出被测电阻值。改变电源电压 U 、标准取样电阻 R_0 或放大倍数 A 的大小，可以改变量程。超高阻计就是带有 $10 \sim 1000\text{V}$ 可调稳压电源、标准取样电阻、放大机构和测量仪表的仪器。一般的高阻计能够测量 $10^6 \sim 10^{13} \Omega$ 的电阻，有的甚至可测量高达 $10^{19} \Omega$ 的绝缘电阻。如 ZC36 型超高阻计（见图 4-19）采用晶体管直流放大电路，测试电源电压分为 10V 、 100V 、 250V 、 500V 和 1000V 五档，测量范围为 $10^6 \sim 10^{17} \Omega$ ，分为八档，对应的标准电阻 R_0 分别为 $10^5 \Omega$ 、 $10^6 \Omega$ 、 $\dots$ 、 $10^{12} \Omega$ ，由波段开关选择。

2) 伏安法。伏安法是根据欧姆定律测量电阻的一种基本方法，测量原理如图 4-20 所示。

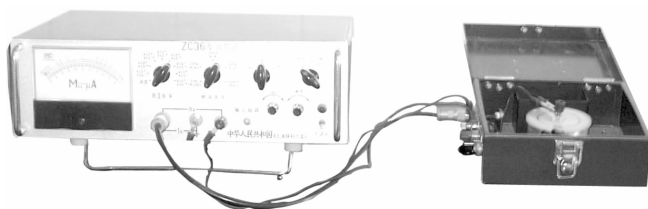


图 4-19 ZC36 型超高阻计

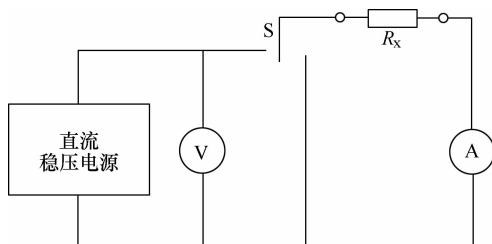


图 4-20 伏安法测试电阻原理图

测量时，首先把开关 S 拨到右边，短路被测电阻，使其所带的静电电荷泄漏掉，然后把开关 S 拨到左边，给被测电阻两端施加一定的直流电压，用直流电压表并联于电源的两端，读取此时的电压值 U 。同时，用直流电流表与被测电阻串联，读取流过被测电阻的电流值 I ，从而求出被测电阻值 R_x 为

$$R_x = U/I$$

电源电压的高低要根据被测电阻的大小改变，并选择不同灵敏度的电流测量仪表，以保证测量的准确度。

3) 绝缘电阻表法

在测量准确度要求不高且阻值较高的情况下，可以用绝缘电阻表（俗称摇表）（见图 4-21）测量电阻。绝缘电阻表

法测量的实质是给被测电阻加上直流脉动电压，通过与标准电阻比较，测量通过它的泄漏电流的相对值，并在表盘上给出经过换算得出的电阻值。绝缘电阻表主要由作为电源的手摇发电机（见图 4-22）和作为测量机构的磁电系流比计组成，其工作原理如图 4-23 所示。



图 4-21 绝缘电阻表（摇表）



图 4-22 手摇发电机

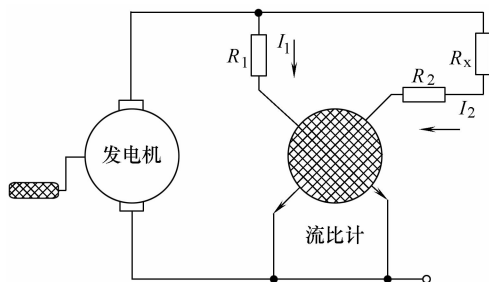


图 4-23 绝缘电阻表法的原理示意图

图 4-21 中 R_1 为标准比较电阻， R_2 为保护电阻（防止被测电阻过小时烧坏仪表）， R_x 为被测电阻。仪表指针偏转的角度决定于通过流比计两个线圈的电流 I_1 和 I_2 之比，即 I_1/I_2 。由于 I_2 取决于被测电阻 R_x 的大小，则 I_1/I_2 也取决于

被测电阻 R_x 的大小。这个电流比只决定于图中两条并联支路的电阻值，而与施加的电压无关（忽略被测电阻的高压非线性时）。由此可见，仪表指针偏转的角度可直接指示被测电阻的大小。

（2）电阻测试的注意事项

1) 环境温湿度。一般材料的电阻值随环境温湿度的升高而减小。相对而言，表面电阻（率）对环境湿度比较敏感，而体电阻（率）则对温度更为敏感。湿度增加，表面泄漏增大，体电导电流也会增加。温度升高，载流子的运动速率加快，介质材料的吸收电流和电导电流会相应增加。据有关资料报道，一般介质在 70°C 时的电阻值仅有 20°C 时的 10%。因此，测量材料的电阻时，必须指明环境的温度和湿度。

2) 测试电压（电场强度）。介质材料的电阻（率）值一般不能在很宽的电压范围内保持不变，即欧姆定律对此并不适用。常温条件下，在较低的电压范围内，电导电流随外加电压的增加而线性增加，材料的电阻值保持不变。超过一定电压后，由于离子化运动加剧，电导电流的增加远比测试电压增加的快，材料呈现的电阻值迅速降低。由此可见，外加测试电压越高，材料的电阻值越低，以致在不同电压下测试得到的材料电阻值可能有较大的差别。

值得注意的是，导致材料电阻值变化的决定因素是测试时的电场强度，而不是测试电压。对相同的测试电压，若测试电极之间的距离不同，对材料电阻率的测试结果也将不同，正负电极之间的距离越小，测试值也越小。

3) 测试时间。用一定的直流电压对被测材料加压时，被测材料上的电流不是瞬时达到稳定值的，而是按图 4-24

所示的规律变化。在加压的同时，流过较大的充电电流，接着是缓慢地减小吸收电流，最后达到比较平稳的电流。被测电阻值越高，达到平衡的时间则越长。因此，测量时为了正确读取被测电阻值，应在稳定后读取数值或在加压 1min 后读取数值。

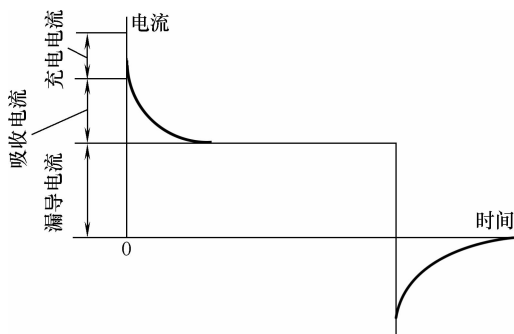


图 4-24 绝缘材料电流随时间的变化特性

另外，高绝缘材料的电阻值还与其带电的历史有关。为准确评价材料的静电性能，在对材料进行电阻（率）测试时，应首先对其进行消电处理，并静置一定的时间。静置时间可取 5min，然后再按测量程序测试。一般而言，对一种材料的测试，至少应随机抽取 3 ~ 5 个试样进行测试，以平均值作为测试结果。

4) 测试设备的泄漏。测试中，线路中绝缘电阻不高的连线，往往会不适当地与被测试样、取样电阻等并联，对测量结果可能带来较大的影响。为此：

①为减小测量误差，应采用保护技术，在漏电流大的线路上安装保护导体，以基本消除杂散电流对测试结果的影响；

②高电压线由于表面电离，对地有一定泄漏，所以尽量采用高绝缘、大线径的高压导线作为高压输出线并尽量缩短连线，减少尖端，杜绝电晕放电；

③采用聚乙烯、聚四氟乙烯等绝缘材料制作的测试台和支撑体，以避免由于该类原因导致测试值偏低。

5) 外界干扰。高绝缘材料加上直流电压后，通过试样的电流是很微小的，极易受到外界干扰，造成较大的测试误差。热电动势、接触电动势一般很小，可以忽略；电解电动势主要是潮湿试样与不同金属接触产生的，大约只有20mV。因在静电测试中均要求相对湿度较低，在干燥环境中测试时，可以消除电解电动势。因此，外界干扰主要是杂散电流的耦合或静电感应产生的电势。在测试电流小于 10^{-10} A时，被测试样、测试电极和测试系统均应采取严格的屏蔽措施，消除外界干扰带来的影响。

3. 耗散材料的电阻、电阻率的测试与计算

静电耗散材料指电阻率介于静电导体和绝缘体之间的材料。体积导电型静电耗散材料的体电阻率在 $10^4 \sim 10^{11} \Omega \cdot \text{m}$ 之间，表面导电型静电耗散材料的表面电阻率在 $10^5 \sim 10^{12} \Omega \cdot \text{m}$ 。实际上，这一类材料是控制静电的常用材料，即防静电器材的制造用料。

(1) 仪器

由一台供电电源和一只安培表（或一台综合式仪表即欧姆表）组成。如果使用无电流测试功能的欧姆表时，安培表量程至少为 $10(1 \pm 5\%) \text{ pA} \sim 10(1 \pm 5\%) \text{ mA}$ 。当被测电阻值在 $10^6 \Omega$ 以上时，开路电压为 $100(1 \pm 5\%) \text{ V}$ ；被测电阻值在 $10^6 \Omega$ 以下时，开路电压应为 $10(1 \pm 5\%) \text{ V}$ 。读数范围至少应在 $10^3 \sim 10^{13} \Omega$ 之内。

(2) 电极组件

电极应由一种能够快速加电和紧密保持与试样表面相接触的材料制成，不会因电极电阻或试样的污染而导致明显的误差。

电极材料在试验条件下应耐腐蚀，并且不会与被测材料发生化学反应。

对于静电耗散材料体电阻的测试，为了减少杂散电流读数误差，在中心电极和环电极之间，应该有测试探头充足的空间，间隙至少为 10mm。接触电极材料应具有邵氏 A 级硬度 50 ~ 70，其体电阻率应低于 $100\Omega \cdot \text{cm}$ 。进行表面电阻测试时，测试用组件如图 4-25 所示。

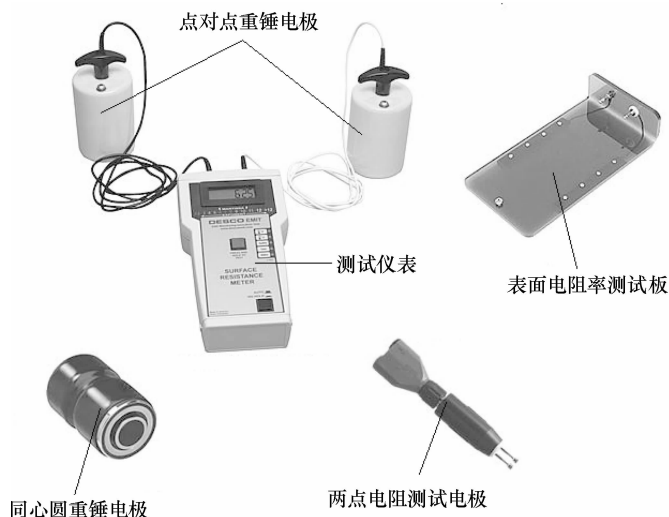


图 4-25 表面电阻测试用组件

进行表面电阻测试时电极的连接如图 4-26 所示。被测

样品放置在支撑板上，被测面向上。测试电极置于样品中心或距离样品边缘 10mm 以上。

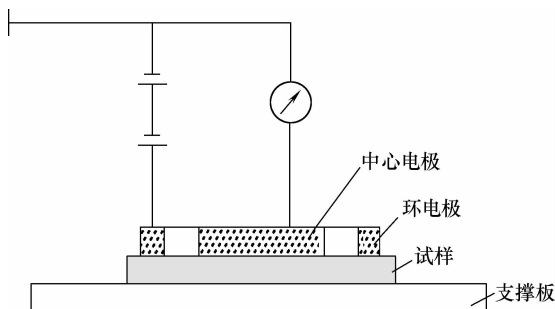


图 4-26 进行表面电阻测试时的电极连接图

进行体电阻测试时，其电极的连接法如图 4-27 所示。如图可见，有两个不同的电极分别置于被测材料的两边。

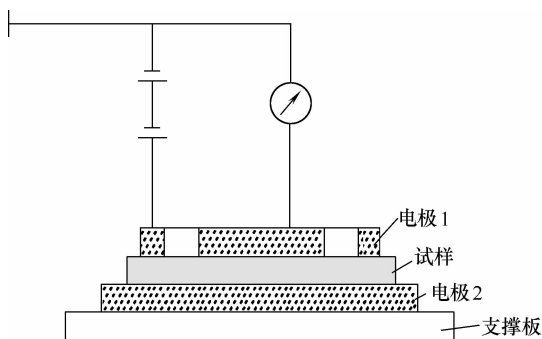


图 4-27 进行体电阻测试时的电极连接图

顶部电极（电极 1）的构造、重量和尺寸如图 4-28 所示。底部电极（电极 2）应由适宜的不锈钢、耐腐蚀的金属材料（铝除外）组成，其硬度要求为邵氏 A 级 50 ~ 70，其

直径尺寸至少 80mm，厚度最小 3mm。该电极应安装有一个永久性连接接头。

在进行对地泄漏电阻和点对点电阻测试时，其测试电极如图 4-28 所示。

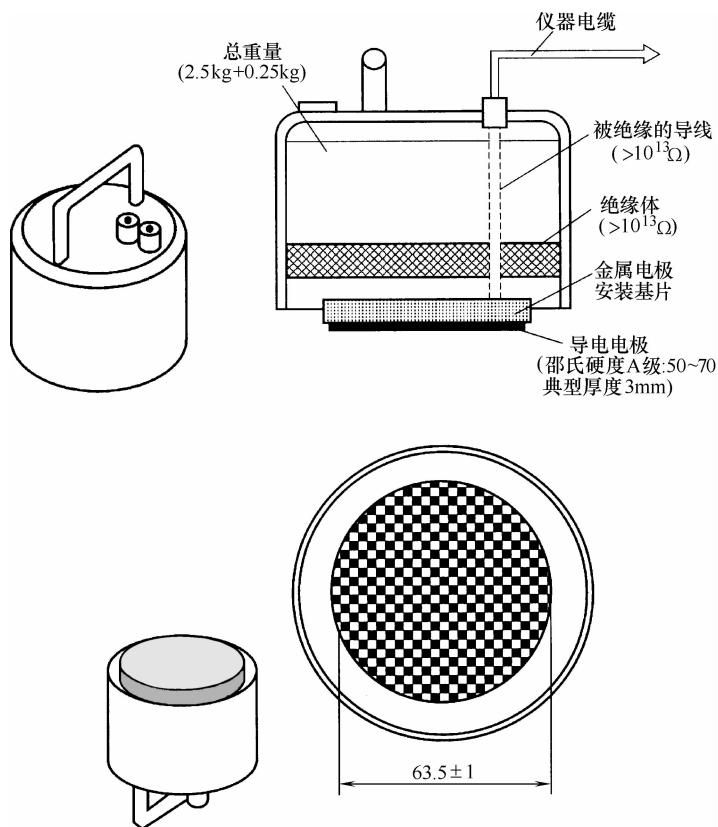


图 4-28 顶部电极的构造、重量和尺寸电极组件

(3) 支撑板

无论是进行表面电阻还是体电阻测量，均需使用一个光滑的平板。其尺寸要求为：测量时，它比试验样品的尺寸在长度和宽度上至少多 10mm，最小厚度是 1mm，在 500V 试验电压下其表面电阻应大于 $10^{13}\Omega$ 。

(4) 试样准备与处理

试样测试区域不应被加工或标志。测量表面电阻时，其表面一般不应进行清洁处理。

试样最好具有简单的几何图形，呈薄板形，最小尺寸至少为 80mm × 120(110)mm。

若无其他规定，至少应从样品材料中准备 3 件有代表性的试样，这些试样应被清楚地标记，以供识别被试验的表面。

(5) 测试步骤

1) 表面电阻测试：电极位于样品的中心或与样品边缘距离 10mm，加压 10V，如无特殊规定，15s 后读数。如果指示电阻小于 $10^6\Omega$ ，则记录测试电阻值；如果指示电阻大于等于 $10^6\Omega$ ，则重新加压 100V 重复测量，确定带电时间后，记录读数。

2) 体电阻测量：底部电极置于测试平台上，样品放在底部电极上，顶部电极放在样品的中心或与样品边缘距离 10mm，加压 10V，15s 后读数。如果小于 $10^6\Omega$ ，则记录测试电阻；如果大于等于 $10^6\Omega$ ，则重新加压 100V 重复测量，确定带电时间后，记录读数。

4. 接地电阻的测试

静电接地一般是用电线等将可能发生问题的带电导体与大地进行电气连接，以防止导体带电。在使用接地装置前，需测量其接地电阻是否满足设计要求。接地装置在运行中，

因气候环境等因素的影响,可能会出现接触不良、断线及质量变坏等情况。因此,对于设备的接地装置每年应至少测量一次接地电阻,测量时不应在雨后立即进行。测量接地电阻的目的是为了检查接地装置是否可靠接地,接地体附近的土壤流散电阻是否满足接地的要求。

接地电阻表(见图4-29和图4-30)是专门测量接地电阻的仪器。

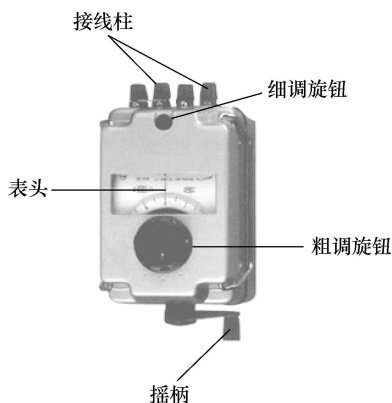


图 4-29 ZC-8 型接地电阻表



图 4-30 钳式接地电阻表

常用的 ZC-8 型接地电阻表为手摇发电机式的仪表，使用时需要安装两个辅助接地极，如图 4-31 所示。新式的 CA6310 型钳式接地电阻表，使用时不需安装辅助接地极，只需用卡钳卡住接地极导线，仪表上的显示屏便会呈现出电阻数据，如图 4-32 所示。其操作类似于钳形电流表。

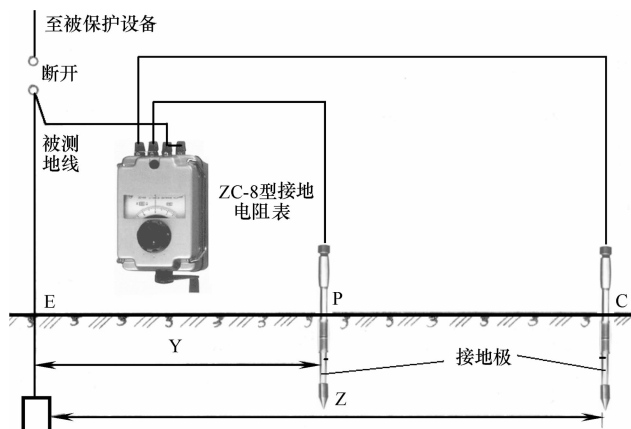


图 4-31 ZC-8 型接地电阻表的接线方法

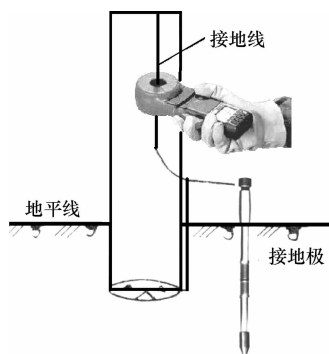


图 4-32 钳式接地电阻表的使用方法

但是使用钳式接地电阻表虽然不需安装辅助接地板，但不能测量单点接地系统，只能检测环路接地电阻。

ZC-8 型接地电阻测试仪的使用方法是

1) 分别在距被测接地体 20m 和 40m 处打入两个辅助接地板（见图 4-33）P 和 C，深度应不小于 40cm，如果场地有限，P 和 C 距离可小些。通常用 $\phi 6\text{mm}$ 以上的钢棍作为辅助接地板。

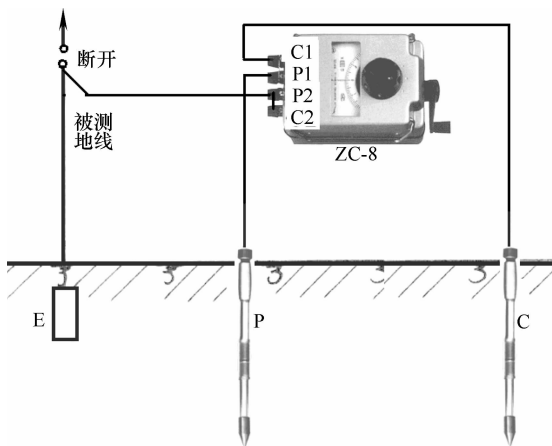


图 4-33 接地电阻测试仪的使用方法

2) 接地体 E，两个辅助接地板 P 和 C 必须在同一直线上，相距不低于 20m。

3) 接地电阻表必须先放平，然后调零。

4) 将被测接地体与仪表的接线柱 P2、C2 相连，较远的辅助电极 C 与接线柱 C1 相连，较近的辅助接地板 P 与仪表接线柱 P1 相连。

5) 测量时, 接地引线禁止与设备连接, 否则会影响测量数据的准确性。

6) 当接地电阻表灵敏度不够时, 可沿辅助接地极 P 和 C 注入一些水, 使其湿润。

7) 将量程开关置于最大倍数上, 缓慢摇动发电机手柄, 同时转动测量分度盘, 使检流计指针处于中心线位置上。当检流计接近平衡时, 不能再缓慢转动手柄, 而要加快速度转动手柄, 达 120r/min 左右, 同时调节测量分度盘, 使检流计指针稳定在中心线位置上。此时读取被测接地电阻值, 即接地电阻值 = 测量分度盘读数 × 测量量程最大值。

4.3 人体静电参量的测试与计算

人体由于自身的活动及与周围物体的接触分离, 在干燥环境中常常有几千伏甚至几万伏的静电。当没有形成火花放电时, 自身往往不会有异常感觉。但是, 在静电危险场所, 人体作为带电的静电导体, 一旦形成能量比较集中的火花放电, 会造成严重后果。因此, 人体静电是静电防护工程中的主要危害源之一。

4.3.1 佩戴腕带时人体对地电阻的测试

测试时, 被测人手握直径 25mm、长度 75mm 的圆柱形不锈钢电极, 该电极用导线与欧姆表连接。测出的电阻包括腕带与人体皮肤间的接触电阻、安全限流电阻和接地导线电阻等三个部分。使用不同的测试电压时, 测试结果在电压低于 10V 时差别很大, 但 20V 以后便趋于稳定。

4.3.2 人体综合电阻测试

为了评价工作人员穿着工作服、袜子、鞋子后，人体对静电的综合泄漏能力，可以利用人体综合静电测试仪（见图4-34）测试人体对地的泄漏电阻。



图4-34 人体综合静电测试仪

测试方法如下：

1) 测试时，双脚分别踏上“测试踏板”，用手按下测试盒的“手压测试”按钮约1~3s，即可完成测试，如图4-35所示。根据面板指示灯情况，测试结果如下：

①红灯亮时：表示人体综合电阻高，超出 $10^8\Omega$ 不满足防静电要求。此时还会伴有“滴滴”的报警声，提醒被测试者不要进入静电危险场所。

②绿灯亮时：表示人体综合电阻在 $10^6 \sim 10^8\Omega$ 范围，满足防静电要求，可进入Ⅱ、Ⅲ类静电危险场所。

③黄灯亮时：表示人体综合电阻低，在 $10^6\Omega$ 以下，满

足导静电要求，可进入Ⅰ～Ⅲ类静电危险场所。

2) 该测试仪的“手压测试”按钮适合垂直按压，避免强拉强拽，避免接触腐蚀性液体。除此之外，测试仪对使用环境、使用条件等无特殊要求。

3) 该测试仪使用两块9V层叠电池供电。面板设置“欠电指示”指示灯，当电池电压低于8V时需更换电池。注意，只有当绿灯亮且“欠电指示”灯亮时，才说明电池电压偏低；当红灯或黄灯亮时，是由于报警扬声器瞬时电流较大引起的“欠电指示”灯亮，不必更换电池。



图 4-35 人体综合电阻的测试

4.4 防静电设施及器具的性能测试

防静电系统包括防静电腕带、防静电服、防静电鞋、地

面、接地设施、工作台、储物架、小推车等防静电设施及用品，它们都是实施静电防护必不可少的物质手段。因此，对这些防静电设施进行静电性能测试，可确保投入使用时性能合格，对静电防护效果的影响是直接而又具体的。这种测试，也是静电防护测试的重要组成部分。

所需测试的主要参数通常是接地电阻和表面电阻。因此，其测试原理见本章4.2节所述。测试仪器包括地电阻测试仪、500V 绝缘电阻表、万用表、腕带测试仪、人体综合电阻测试仪等。测试所用电压依据被测电阻而定。根据标准规定，当电阻值 $R_x \leq 10^5 \Omega$ 时，使用电压为 10V；当电阻值 $R_x > 10^5 \Omega$ 时，使用电压为 100V。

4.4.1 防静电工作服的性能测试

1. 防静电工作服表面电阻的测试

防静电工作服对静电防护的有效性直接依赖于它的表面电阻。工作服的内、外表面要能够使人在操作中因摩擦等动作所产生的电荷顺利地到达人体表面，并最后通过防静电腕带、鞋袜等泄漏于大地。这就要求工作服的设计应能保持其在穿着状态下与人体直接或间接接触，并自身具有较小的表面电阻值。必要时，所穿工作服还应设置专门的接地连接点。

一般要求防静电工作服的表面电阻为 $75 \times 10^5 \sim 1 \times 10^{10} \Omega$ ，对地电阻为 $75 \times 10^5 \sim 1 \times 10^8 \Omega$ 。防静电工作服的表面电阻测试原理分别如图 4-36 所示。

2. 防静电工作服电荷量的测试

防静电工作服所带电荷量，必须遵守每件小于 $0.6 \mu\text{C}$ 的国家标准。否则，它将失去防静电的功能。工作服电荷量



图 4-36 防静电工作服表面电阻（点对点）测试原理图

的测试程序如下：

（1）准备工作

被测试样应预先洗净。要求在普通双桶家用洗衣机中，以 $(40 \pm 3)^{\circ}\text{C}$ 的温水配上中性或碱性（pH 值小于9）的合成洗涤剂（洗涤液浓度 2g/L ），使用浴比（布：水）为1:30的条件，浸洗5min，排水，再脱水2min。然后，换常温清水漂洗2min，排水，再脱水1min。如此重复漂洗5次，直至洗净。

洗涤后的试样，在 $(60 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 温度下干燥1h后，以模拟穿用状态（正面朝外，扣上纽扣、拉锁）装入塑料袋中，在温度为 $(20 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ 、RH为40%以下的气候条件下，静置24h。

（2）充电

将工作服从塑料袋中取出，放入滚筒摩擦机中运转

15min。

滚筒摩擦机的技术参数为：滚筒内径大于 40cm，滚筒深度大于 35cm，滚筒转数大于 46r/min，滚筒口径大于 28cm，滚筒内衬材质为尼龙或丙纶标准布，滚筒叶片数应为 2 片以上，风量为 $2\text{m}^3/\text{min}$ ，滚筒内温度为 $(60 \pm 10)^\circ\text{C}$ 。

(3) 测试

使试样直接从滚筒摩擦机中自动进入（或戴绝缘手套直接取出后立即投入）法拉第筒内。取出后，投入时应注意试样距离人体、金属物体等要在 30cm 以上。

根据电位计上读数 U 和法拉第系统总电容量 C （由电容测试仪器测得的内外筒间电容、电位计输入电容和装置上并联的电容之和），按公式 $q = CU$ 计算出工作服的电量。

按上述充电和测试程序，重复 5 次，取结果平均值。每次测试，相隔 10min，并在每次测试前应对试样和滚筒内衬标准布进行消电处理。

4.4.2 防静电鞋的性能测试

防静电鞋也是提供人体静电荷泄漏通道的主要措施，它能在腕带发生问题（如断路）时或在不可能使用腕带的情况下，可以作为一种最基本的人体与大地的连接方式。

防静电鞋的性能测试（见图 4-37），测试样本的最少数目应为 3 双，操作方法是利用若干直径为 5mm 的小钢球做鞋内电极，鞋底涂敷体积电阻小于 $1\text{k}\Omega$ 导电胶，待干燥后放在一块金属板上，将加有 100V 测试电压的电阻测试仪两电极连接在鞋内电极和金属板上，测试鞋底电阻。测试时的环境相对湿度应为 $(30 \pm 3)\%$ ，仪器应保证 $\pm 10\%$ 的准确度。加电压时，当负载小于 $10^6\Omega$ 时，加电压应为 $10\text{V} \pm$

0.5V；当负载不小于 $10^6 \Omega$ 时，加电压应为 $100V \pm 5V$ 。

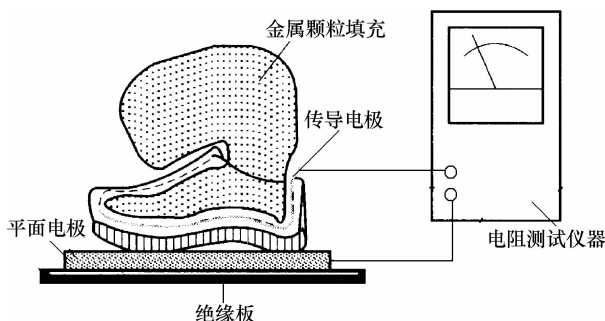


图 4-37 防静电鞋电阻测试装置

4.4.3 防静电腕带、鞋束（足跟带）静电性能测试

佩戴防静电腕带是解决人体带电的有效方法，腕带与人体皮肤直接接触，可以把人体皮肤上的静电荷通过连接导线传导泄漏至大地。

测试方法如下：

1) 腕带穿戴状态下电阻（静电泄漏电阻）的测试。操作者以正常方式戴上腕带，把线端插入测试器，压住手触摸板，直至仪器可以稳定地测量，如图 4-38 所示。此时测得的系统电阻应为 $7.5 \times 10^5 \sim 1 \times 10^7 \Omega$ 。

2) 腕带内表面对电缆口的电阻（点对点电阻）测试。将两端测试电极分别接触腕带内表面和电缆扣进行测量，如图 4-39 所示。此时测得的电阻值应为不大于 $10^5 \Omega$ 。

3) 腕带连接电缆两端的电阻（点对点电阻）测试。用测试电极连接电缆两端电阻测试如图 4-40 所示。此时测得的电阻值应为 $7.5 \times 10^5 \sim 1 \times 10^7 \Omega$ 。

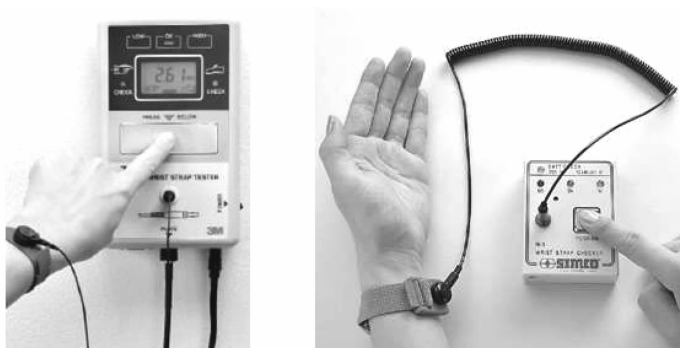


图 4-38 测试佩戴腕带时的系统电阻

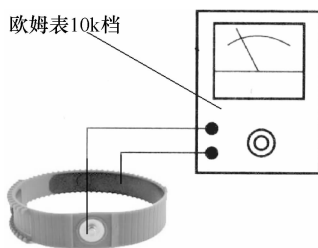


图 4-39 腕带内表面对电缆扣的电阻测试

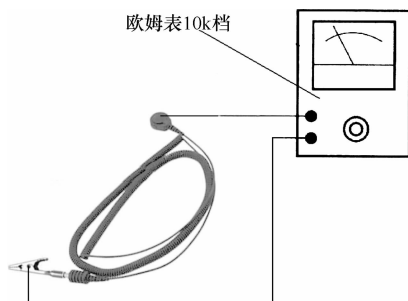


图 4-40 腕带连接电缆两端的电阻测试

在使用腕带不方便的情况下，也可以使用鞋束（足跟带）进行人体防护接地。鞋束（足跟带）应由静电耗散材料制作，系统电阻一般规定为 $5 \times 10^4 \sim 1 \times 10^8 \Omega$ 。其测试方法见图 4-41 所示。

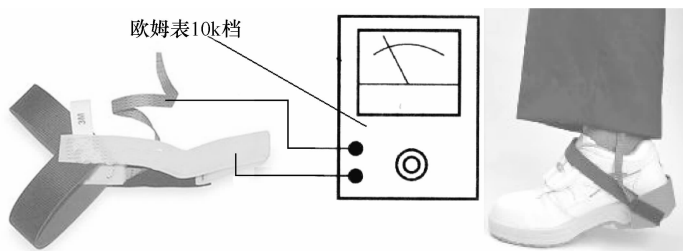


图 4-41 防静电鞋束的电阻测试

4.4.4 工作椅、运转车、存放架、工作台的对地电阻和表面电阻测试

工作椅、运转车、存放架、工作台应能通过支脚或轮子接地，在正常情况下与工件、人体接触的表面应由静电耗散材料制作。对地电阻测试，一般以支脚架、脚轮等作为接地电极，另一电极接于器具表面的某一点；表面电阻（点对点）为器具表面上两点之间的电阻值。测试时，应保持电极与被测表面之间良好的电接触。

1. 工作椅

工作椅的对地电阻和表面电阻的测试方法如图 4-42 所示，椅面与靠背之间点对点电阻测试方法应符合国家相关标准。正常时，其对地电阻应为 $5 \times 10^5 \sim 1 \times 10^{10} \Omega$ ，表面电阻（点对点）应不大于 $1 \times 10^{10} \Omega$ 。

测试时, 脚轮下放置一块 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ 导电板并良好接触。一个电极与导电板接触, 另一个与椅面良好接触, 如图 4-42 虚线所示。

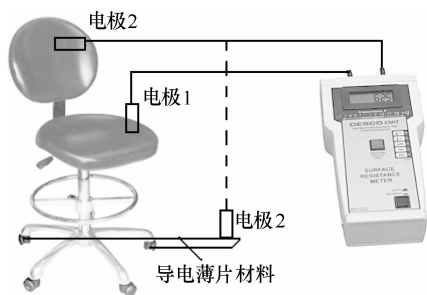


图 4-42 工作椅电阻测试

2. 运转车、存放架

运转车、存放架的对地电阻和表面电阻的测试方法如图 4-43 所示。正常时其对地电阻应为 $7.5 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^9 \Omega$, 表面电阻应为 $7.5 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^{10} \Omega$ 。

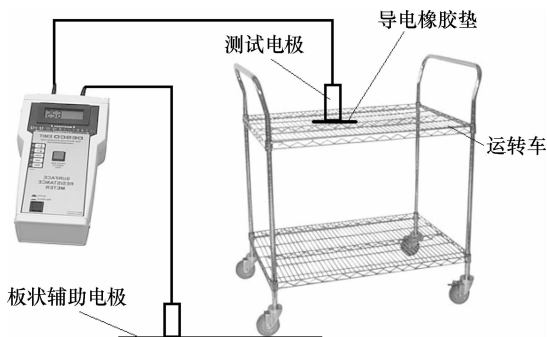


图 4-43 运转车、存放架的电阻测试

运转车台面与脚轮之间电阻的测试方法与工作椅一样。

3. 工作台

工作台表面点对点电阻的测试应符合国家电子行业标准的規定。测试工作台静电泄漏电阻时，一个电极与台面良好接触，另一个电极（夹子）与工作台接地线（或腕带插孔）连接，如图 4-44 所示。

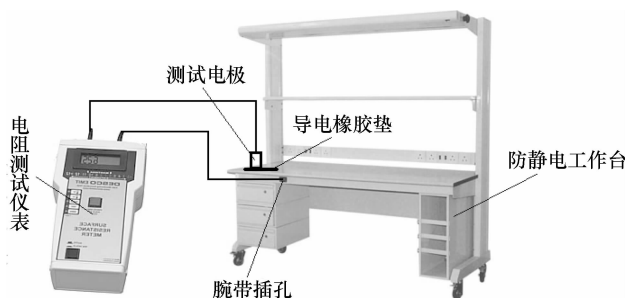


图 4-44 工作台对腕带插孔电阻测试

工作台面应使用静电耗散材料制成，并良好接地。正常时其对地电阻应为 $7.5 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^9 \Omega$ ，表面电阻应为 $7.5 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^{10} \Omega$ 。

4.4.5 手套、指套对地电阻的测试

在进行操作时，防静电手套、指套的外表面直接与工件相接触，所以它必须能耗散静电，又要使电荷耗散的速度不能太快以防突发放电。这些只能依靠它在穿着情况下具有合适的对地电阻。测量时，一般使用 2 个 $\phi 20\text{mm}$ 的平板型金属电极作为与测试导线相接触的面积。如果上述要求不能实现，也可使用接线夹子。手套对地电阻的测试可按图 4-45 所示进行。

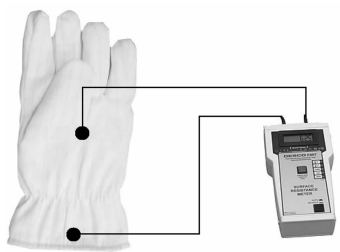


图 4-45 手套对地电阻的测试

在佩戴情况下，一般要求手套、指套的对地电阻为 $7.5 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^{10} \Omega$ 。

4.4.6 防静电地板、地垫的测试

防静电地板、地垫应采用静电耗散材料并接地良好，其对地电阻应为 $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^9 \Omega$ ，表面（点对点）电阻应为 $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^{10} \Omega$ 。其对地电阻的测试如图 4-46 所示；表面（点对点）电阻的测试如图 4-47 所示。每隔 4m^2 随机抽取 5 个点，并取中心对四角 4 次测试结果的平均值，测试电极距地板的边缘不得小于 100mm。

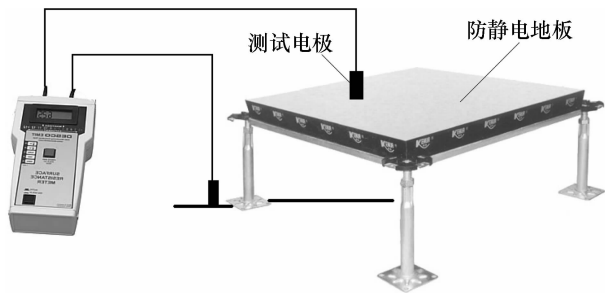


图 4-46 防静电地板对地电阻的测试

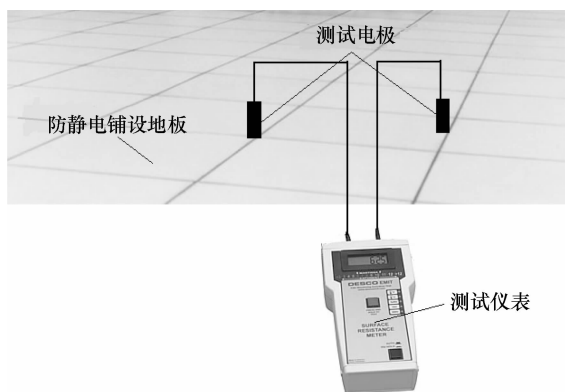


图 4-47 防静电地板表面（点对点）电阻的测试

4.4.7 静电消除器消除静电能力的测试

在防静电区域的适当部位应装设静电消除器，以消除未打开的包装件上的静电荷和操作过程中因人体、工具及其他物品相互摩擦在工件上所产生的静电荷。静电消除器应能消除任何一种极性的电荷，电荷中和能力是评价静电消除器消电能力的主要参数。

静电消除器消除静电能力的测试方法如下：

(1) 测试用设备

测试离子静电消除器消除静电的仪器采用离子平衡仪，充电板的尺寸应为 $150\text{mm} \times 150\text{mm}$ ，最小电容电容量为 15pF ，测试电路的总电容量应为 $(20 \pm 2)\text{pF}$ ，附近应无接地导体。充电时，充电板在 5min 内的自然放电不应超过测试电压的 10% ，并应能精确地测量充电板的电压变化及时间变化。

测试时，台式离子静电消除器与测试仪之间的相对位

置,如图4-48所示。主视图位置如图4-48a所示,俯视图位置如图4-48b所示。

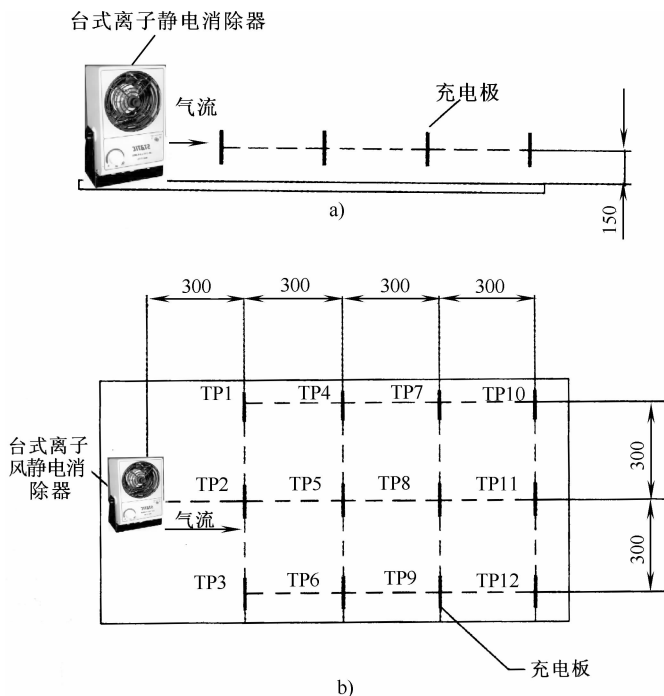


图4-48 台式离子静电消除器与测试仪之间的相对位置

a) 主视图 b) 俯视图

(2) 测试方法

将测试仪和台式离子静电消除器按图4-48所示位置放置,吊挂式离子静电消除器的测试位置如图4-49所示,离子枪的测试位置如图4-50所示。然后将测试仪极板充电 $\pm 1000\text{V}$ 时,打开静电消除器电源,使充电极板暴露在离子

气流或窗口测试角内，关闭仪器充电电源，同时监测极板电压降至 $\pm 100\text{V}$ 时的静电衰减时间，然后在中心线每个测试点用带有残余电压测试耦合电极的静电电压表测试离子静电消除器的残余电压。

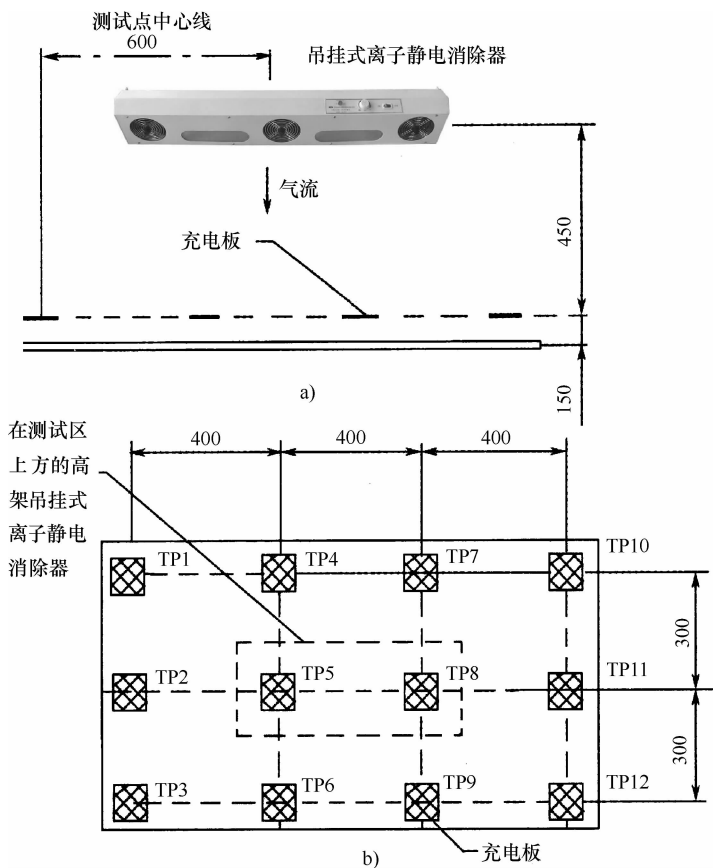


图 4-49 吊挂式离子静电消除器的测试位置

a) 主视图 b) 俯视图

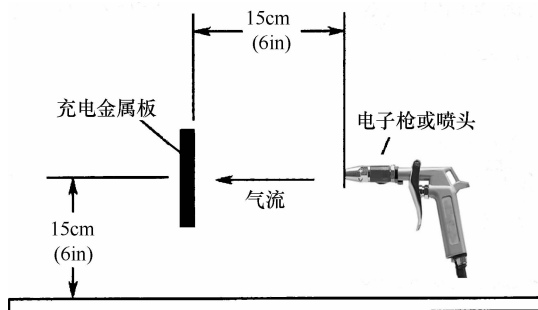


图 4-50 离子枪的测试位置

(3) 测试注意事项

测试时的注意事项如下：

- 1) 测试时，距测试仪表和离子静电消除器 100cm 以内无金属物体、电气设备、人员和其他带静电体。
- 2) 测试室内无集中空调、风扇或其他空气调节装置产生的水平层、垂直层的气流扰动。
- 3) 测试环境相对湿度为 $(40 \pm 3)\%$ 。
- 4) 测试环境的电磁场应符合国家相关标准的要求。

4.4.8 防静电设施及器具的检测周期

防静电设施及器具的检测周期见表 4-2。

表 4-2 防静电设施及器具的检测周期

检查频次	项 目 名 称	检查方式
每天检查	环境温度	测量
	环境相对湿度	测量
	佩戴腕带时系统电阻（人体对地电阻）	测量
	人体防静电用品的使用要求	检查

· 静电安全防护要诀 ·

(续)

检查频次	项 目 名 称	检查方式
每天检查	防静电鞋（鞋束）的性能	测量
	服装、鞋、手套、指套、腕带、帽子的穿戴情况	目视
	EPA 防静电工作区内静电电位	测量
每月检查	静电源控制	检查
	EPA 总体要求	检查
	离子静电消除系统（器）的使用要求	检查、测量
	工位传输带对地系统电阻	测量
	工作台（桌）面对地系统电阻	测量
	接地系统状况	目视和测量
	EPA 标记情况	目视
	环境洁净度	测量
	环境电磁场	测量
	防静电包装使用要求	检查
	座椅和运转车对地系统电阻	测量
	EPA 维护	检查
	包装容器防静电性能	测量
	工位器具、存放架、物流传递器具的防静电性能	测量
	EPA 静电源检测	测量
	手套、指套、帽子、工具的防静电性能	测量
	离子静电消除器和系统消除静电的性能	测量
	电气设备（仪器、电动工具、气动工具）、焊接设备、吸锡器的接地	测量和目视

(续)

检查频次	项 目 名 称	检查方式
半年检查	墙壁、天花板系统电阻	测量
	地坪、地板（地垫）系统电阻	测量
	防雷要求	目视和测量
	地线接地电阻	测量
每月检查	防静电喷剂、蜡防静电性能	测量
半年检查	工作服、窗帘的防静电性能	测量
每年检查	人员培训	检查
	EPA 验收	检查

4.5 防静电织物的性能测试

防静电织物如图 4-51 所示。常用的测试方法介绍如下。

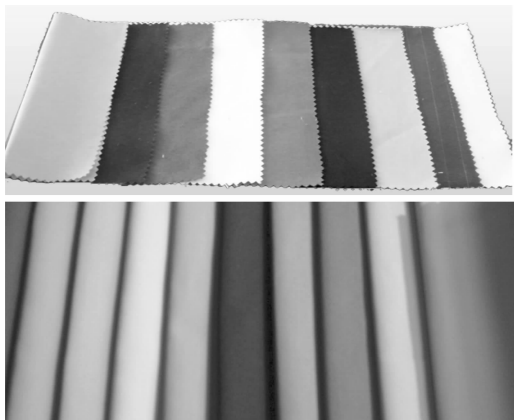


图 4-51 各种防静电织物

4.5.1 防静电织物摩擦起电电压的测试

织物摩擦起电电压测试装置如图 4-52 所示。在一定的张力下，使被测织物式样与标准摩擦布相互摩擦，模拟衣物之间摩擦、剥离带电关系。测试电位越低，织物的防静电性能越好（此方法主要用于石油、化工系统）。

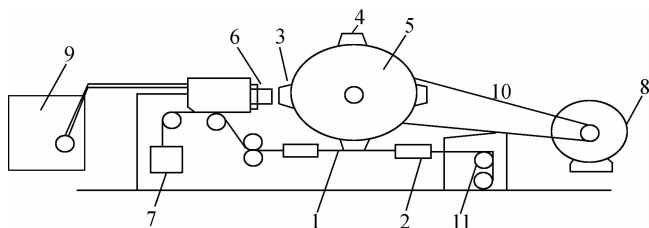


图 4-52 防静电织物摩擦起电电压测试装置

- 1—标准布 2—标准布夹 3—样品框 4—样品夹框
5—金属转鼓 6—测量电极 7—负载 8—电动机
9—放大器及记录仪 10—传输带 11—传动轮

1. 测试方法

具体的测试方法如下：

1) 用 0.1 级的静电电量表对测试电极（样板直径 $20\text{mm} + 1\text{mm}$ ）上的电压进行标定。

2) 测量探头距式样放置框的外表面 $15\text{mm} \pm 1\text{mm}$ 。

3) 将样品裁 4 个 $40\text{mm} \times 80\text{mm}$ 的块，分别夹入金属转轮（外径为 $150\text{mm} + 1\text{mm}$ 、宽为 $60\text{mm} + 1\text{mm}$ 、转速为 400r/min ）的样品夹框。

4) 对夹于标准布夹（宽 $25\text{mm} \pm 1\text{mm}$ 、左右布夹相距 $130\text{mm} + 1\text{mm}$ ）间的标准摩擦布料（尼龙、丙纶）消电，并调节其位置，使之在 500g 负载下，能与转轮上的被测式

样进行切线方向的摩擦。

5) 对被测样品消电后, 起动电动机, 带动转轮以 400r/min 的转速旋转, 1min 后测试样品的摩擦带电电位。

6) 改变样品的纬向和经向, 再次测试。

7) 对 4 块样品分别测试后, 取测试值最大值和平均值, 作为该织物的测量值。测试时样品的正、反两面均应测试, 用此法的测试值小于 $\pm 500\text{V}$ 的织物可判定为合格。

2. 测试注意事项

1) 采用该方法时, 负载和摩擦切线要调整好, 否则会带来很大的测试误差。

2) 静电电压表和测试设备要接地良好, 并保证周围没有静电源, 测试设备距人体 40cm 以上, 防止测试出现干扰。

3) 环境相对湿度应当低于 40%。

4.5.2 防静电织物面电荷密度测试法

面电荷密度的定义: 带电物体(织物)表面单位面积上带有的静电电荷量。

1. 测试装置

1) 摩擦布与摩擦棒: 将 450mm × 500mm 的尼龙摩擦布, 以摩擦布长边方向, 在长 400mm、外径 30mm 外壁光滑的硬质聚四氟乙烯管(或其他的绝缘管)上紧密缠绕 5 圈, 制成摩擦棒。要求摩擦布内层用胶布和棒体粘牢, 两端拉紧塞入管内。

2) 垫板: 将一块面积为 450mm × 400mm 与摩擦布料质地相同的尼龙布料用胶带从四面裹在面积为 320mm × 300mm、厚度为 3mm 的金属板上, 垫板接地示意图如图 4-53 所示。

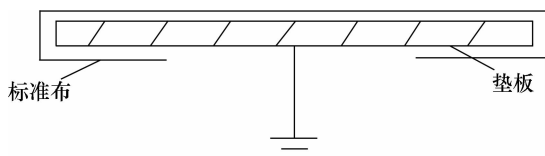


图 4-53 垫板接地示意图

3) 垫座：供实验时放置垫板用。除两个绝缘柱用尼龙外，其他均用木板制作。

4) 绝缘棒：用于固定被测样品，长度为 500mm、直径为 20mm，利用有机玻璃等制作。

2. 测试方法

1) 随机取样 4 块（经向 2 块、纬向 2 块），尺寸为 250mm × 350mm，将一端缝制成如图 4-54 所示的样子。测试时，将绝缘棒插入缝好的套内，放置在垫板上，勿使样品产生褶皱。

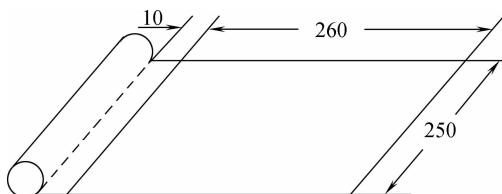


图 4-54 被测样品的裁剪

2) 双手握住摩擦棒两端，使其保持不转动，由前端向后端一方摩擦被测试样，约 1s 一次，连续 5 次。

3) 握住绝缘棒一端，与垫板保持平行地将样品与垫板剥离如图 4-55 所示，并在 1s 内将其投入法拉第筒测出带电荷量，并计算出面电荷密度。

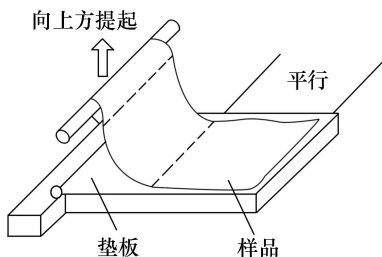


图 4-55 样品与垫板剥离

4) 每块样品进行 3 次测试 (每次测试要对试样进行放电处理), 取平均值作为测试结果。4 块样品的测试结果取平均值, 作为该试样的测试值。

5) 一般测试出的电荷面密度值小于 $7\mu\text{C}/\text{m}^2$ 为合格品。电子工业用防静电布料的面电荷密度指标应符合国家标准的规定: 一级小于 $3\mu\text{C}/\text{m}^2$, 摩擦电压小于 200V; 二级小于 $5\mu\text{C}/\text{m}^2$, 摩擦电压小于 1000V; 三级小于 $7\mu\text{C}/\text{m}^2$, 摩擦电压小于 2000V。

3. 测试注意事项

- 1) 试样剥离时, 人体或其他物体应与被测织物距离 300mm 以上。
- 2) 试样表面应清洁无污物, 手不得直接接触及试样。
- 3) 摩擦时, 用力应均匀。

4.6 防静电包装材料的性能测试

每种静电放电敏感产品, 都依其本身设计而具有一定的静电放电敏感电压阈值, 当周围环境的静电电压超过此值

时,就有可能造成敏感产品的静电破坏。因此,只能依赖于防静电包装材料(见图4-56),使其免受包装外部静电的影响。为保证静电防护得以维持,即从产品制造完毕到投入安装使用之前的全部过程(包括厂内、外运输,贮存,拆包装),产品的完整性和基本功能不受到损害,作为防静电包装的材料必须满足必要的静电性能要求,同时还要具有诸如防振、定位、防尘等功能。



图 4-56 各种防静电包装材料

4.6.1 防静电包装材料的静电屏蔽性测试

防静电包装材料的静电屏蔽性能测试用于评估材料对静电场或静电放电产生的电磁脉冲屏蔽能力。

1. 电容充电放电法

电容充电放电法的原理如图 4-57 所示，给电容 C 充上高电压，电容探头置于被测材料包装袋内，并将它们放置在测试装置的放电电极和接地电极之间，电容充电后，利用转换开关经过放电电阻对包装袋放电，将电容探头上感应的电压信号引入到测量仪器（如示波器、绘图仪等）进行测量并分析。通过电压值的大小反映材料屏蔽性能的好坏，即感应信号电压值越低，材料的屏蔽性能越好。

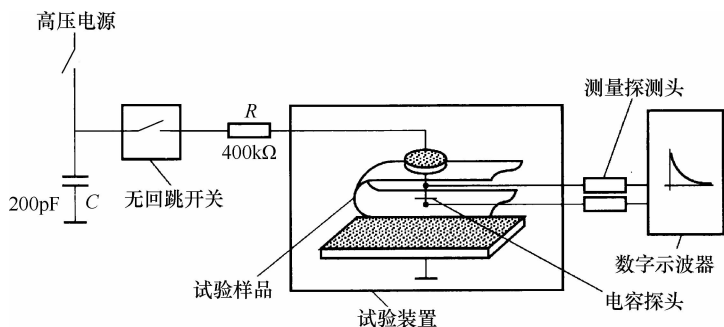


图 4-57 电容充放电实验原理图

(1) 测试准备

从试验材料中截取 $125\text{mm} \times 300\text{mm}$ 的样片，沿 300mm 的边对折后两边热封，封合宽度不小于 12.5mm ，制作成 $100\text{mm} \times 150\text{mm}$ （内尺寸，误差为 -6mm ）的试验袋，每组至少 5 个。样品在温度 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 和相对湿度 $(12 \pm 3)\%$ 的

条件下处理 48h。

(2) 测试方法

测试探头应具有较高阻抗（至少为 $1 \times 10^7 \Omega$ ）和低的电容（5pF 或更小），电容探头是镶在一块绝缘材料上的厚 1.5mm 的金属板。试验装置是一个包括上部一块 22 ~ 38mm 的金属接触板和一块用以支撑被试样品与电容探头的适当尺寸的接地金属板。

将电容探头置于试验袋内，其中心约在试验袋开端内侧 50mm 处，并将它们放置在试验装置的上下金属板之间，试验装置的夹具应设计成使被试部分在足够的夹紧力作用下得到充分的平行接触。试验电压为 1000V，使电容充电，然后利用转换开关经电阻器通过被试材料放电。每组 5 个测试样品中任一个峰值电压高于 30V 即为不合格。

该测试方法中的最主要的测试仪器为 ACL500 型静电屏蔽检测表（见图 4-58）。该仪器包括 ESI（电喷雾）模拟器、静电屏蔽检测传感器、不锈钢放电头、基准板和测试导线。其测试结果由传感器上装有一排标有 10V、20V、30V、

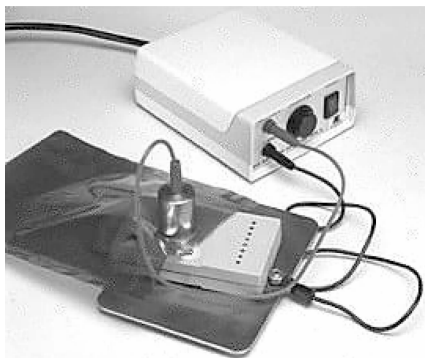


图 4-58 ACL500 型静电屏蔽检测表

40V、50V、100V、200V、300V 的发光二极管（LED）来指示，代表测量到最大电压的 LED 保持发光。

2. 能量法

由于电容充电放电法使用的示波器所测得的感应电压信号应为电容探头信号之差，但波形衰减越快相应的两信号（其中的共模成分）的差值（感应电压信号）会变小，从而测得的感应电压不易确定，而且该方法中人体模型静电放电脉冲的测量仅要求示波器的测量带宽为 50MHz，这些条件不能够满足测量材料随脉冲频率变化情况下的屏蔽效果。为了克服上述问题，现在普遍采用能量法进行测试，其测试原理如图 4-59 所示。

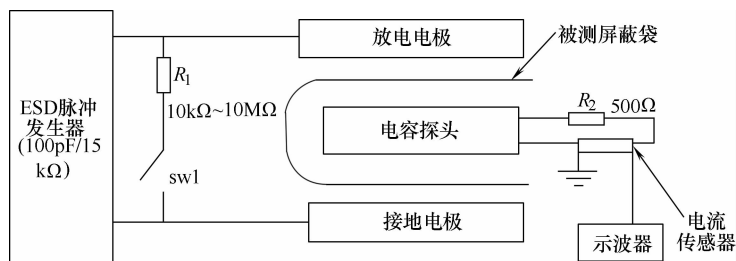


图 4-59 能量法测试防静电包装材料的原理图

该方法不是测量包装袋内电容探头上的感应电压值，而是将电容探头上感应信号经过电流传感器传输给示波器，然后通过软件分析进行能量计算，得到测试过程中渗透到袋内的能量大小，根据该能量与静电放电总能量（由 $CU^2/2$ 确定， U 为放电电压）之比来确定包装袋的屏蔽效果。这种测能量法相对测电压法，能更准确评价材料的屏蔽性能。

目前主要使用的仪器是 ETS431 型屏蔽袋测试系统（见

图 4-60)，这是由美国电子科技系统（ETS）有限公司开发的一套比较完备的测试装置。



图 4-60 ETS431 型屏蔽袋测试系统

4.6.2 防静电包装材料静电泄漏（衰减）性能的测试

防静电包装材料静电泄漏（衰减）性能的测试原理是人为地对被试材料的确定表面进行充电后，用场强计或非接触式静电计观察其电荷衰减（电压下降）的情况，记录所用时间，并以从电压起始值下降至规定值（如 10%、1% 或 $1/e$ 即 36.8%）所需的时间来度量。例如，有的包装材料规定的衰减时间是从初始值电压 1000V 下降到起始值的 10%（即 100V）所需的时间最长是 2s。

用电极传导带电测试法测试防静电包装材料的静电泄漏性能，电极传导使样品带电的测试装置如图 4-61 所示。

1. 测试装置要求

1) 非接触式静电计，准确度不低于满量程的 10%。板状敏感探头尺寸为 (35 ± 5) mm。

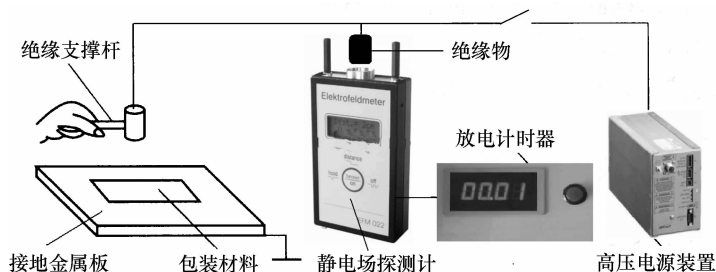


图 4-61 电极传导带电测试法测试防静电包装材料的静电泄漏性能

- 2) 放电计时器, 分辨能力为 0.1s。
- 3) 高压电源应带有电流限制, 可将试样充电到 1000V。
- 4) 电极由 $\phi(63.5 \pm 2.5)$ mm 圆柱形金属制成; 触头材料为静电导体, 硬度为 50 ~ 70 (邵式 A 级)。在电极和接地金属板之间的电阻应小于 $10^5 \Omega$ 。

2. 测试步骤

用一根电缆将电极连接到试验静电测试仪表, 并确保该电缆不与任何其他金属零件发生电接触。将被试材料样品放在接地的金属板上, 然后压上充电电极, 初始电压调至 1000V, 测量其耗散至 100V 所用的时间。

4.6.3 防静电包装材料摩擦起电性能的测试

防静电包装材料的摩擦起电性能是指其与其他材料进行摩擦和接触分离时, 产生的静电电压 (以大地为参考点) 低于 100V。该 100V 被认为是带有自身内部防护设计的最敏感器件可接受的水平或通常在防静电工作区内所控制的环境电压的上限。

主要数据规定和要求如下：

1) 摩擦材料通常由合成纤维制成，厚度为 5mm，每次试验应更换新料，投入试验前需严格进行表面处理，去除所有的表面异物。其表面电阻率至少为 $10^{13} \Omega \cdot m$ 。

2) 被试样品尺寸为 120mm × 120mm 或 $\phi 120mm$ ，表面应为自然本性（即不需要表面处理）。

3) 试样中心摩擦速度 0.5m/s。

4) 摩擦重复频率为每 2s 进行一次。

5) 每块样品试验 3 回，每回共摩擦 50 次，由场强计读出电荷量，并取 3 回的平均值，作为该试样的测试结果。

6) 由于试样表面状况对结果影响很大，所以操作过程中不准以手触及样品表面。

7) 当系统确定时，场强计可以用电荷面密度标定。可以在间歇性摩擦过程中连续测试，也可以在摩擦停止后立即对样品表面进行测试。

8) 在整个测试过程中，应保持摩擦速度、方向和接触压力不改变。

应当注意的是，此方法只规定了一种摩擦材料。实际上，由于摩擦材料在带电序列中位置的不同，对测试结果也会产生很大的影响。在实际测试时，应选用在带电序列中上、中、下不同位置的材料作为摩擦材料，也可以选择几种被包装产品材料作为摩擦材料。

第5章 静电的控制及消除

在很多情况下，不产生静电是不可能的。但产生静电并非危害所在，危险在于静电的积蓄，以及由此产生的静电电荷的放电。

控制静电的方法就是在发生静电火花之前，为彼此分离的电荷提供一条通路，使它们毫无危害地中和。为此，可以采用下述几种方法。

5.1 静电控制法

5.1.1 减少静电荷的产生

●要点提示：

静电荷，积存大，若泄漏，放火花。

注意产生和逸散，查明区域最关键。

增大对地接触面，加装缓冲效果显。

消散、产生有过程，速度变化靠计算。

●实用技术：

静电事故的基础条件就是静电荷的大量产生，所以人为控制和减少其产生，便可认为不存在点火源。

人们知道，在容易产生静电的工艺中，包含静电产生和消散两个过程。在静电产生的过程中，主要指的是带电过程

(即分离出相反极性的电荷);在静电消散的过程中,主要是指电荷从介质材料上的泄漏或松弛而消散。这些现象的本质是电荷守恒定律。根据电荷守恒定律,两个过程的存在,可以制定不同的预防静电危害的方法。

在一些生产工艺过程中,静电的产生和消散过程可参见表5-1。

表 5-1 静电产生和消散过程

过 程	产 生	消 散
1. 薄膜材料经辊轴的传送	辊轴	收卷薄膜
2. 气动输送颗粒材料	给料机、管道	料斗、料仓、除尘器
3. 液体沿着管道流动	直线管道	接受容器
4. 多箱干燥器内干燥	网栅、箱子四角	箱壁中间部分
5. 液体在系统内流动 微过滤器-管道-接受器	微过滤器	接受容器

在采取预防静电的措施时,应首先查明电荷的产生和消散的区域,以便于采用合理的方法。例如在料斗、接受容器、料仓等静电消散区域,装设导电性网栅格子、叶板等是为了增大介质同接地设备的接触面积,对于消除静电的危害是有效的。而若装设在管道内或个别带电区域,电荷相反会增多,还会增加其火花放电的危险性。有些工艺过程中,静电的产生和消散是同时存在的,在这种情况下,就要根据哪种过程占优势来确定静电的产生过程和静电的消散过程。

液体或粉体通过管道最后输运到储槽、储罐后,物料速度降为零,此时的静电电荷为消散过程,根据随着流速的降低而使静电消散过程加强的特点,常在管道中加装缓冲器,这样可以大大消除物料在管道内流动时积聚的静电。

用于液体输送管道末端的缓冲器的直径和长度可按下式

计算：

$$D_s = D_g \sqrt{2v}$$
$$L_s = 2.2 \times 10^{-11} \varepsilon_r \rho$$

式中 D_s ——缓冲器直径 (m)；

L_s ——缓冲器长度 (m)；

D_g ——输送管道直径 (m)；

v ——液体流速 (m/s)；

ε_r ——液体相对介电常数；

ρ ——液体电阻率。

缓冲器适用于输送电阻率为 $10^9 \sim 10^{12} \Omega \cdot m$ 的液体介质，对电阻率更高的液体，缓冲器将变得太大而不便采用。例如，对某种燃料油的输送，液体的流速为 10m/s，流经容器为 10L 的缓冲器后，其上 95% 的静电得到消除。可见采用缓冲器消除静电的效果是显著的。

5.1.2 降低静电场合的危险度

●要点提示：

爆炸物，有极限，遇火源，生灾乱，
只要降低浓度数，加强通风无危险。
含氧量，系火源，惰性气，替代全，
减少空气氧含量，不能燃烧无危险。
可燃物，太危险，少使用，保安全，
尽量使用不燃物，生产过程真方便。

●实用技术：

在静电放电时，它的周围有可燃物存在才是酿成静电火

灾和爆炸事故的最基本条件。因此控制或排除放电场合的可燃物，成为防静电危害的重要措施。

1. 降低爆炸性混合物在空气中的浓度

当可燃液体的蒸气与空气混合，达到爆炸极限浓度范围时，如遇到火源就会发生火灾和爆炸事故。因此降低爆炸性混合物在空气中的浓度是有效防止爆炸火灾等事故发生的措施。所以可以在爆炸或火灾危险场所安装通风装置或抽气换气装置，及时有效地排出爆炸性混合物，把爆炸性混合物的浓度控制在低于爆炸下限，或高于爆炸上限的范围，防止静电火花引起爆炸或火灾事故。

易燃液体在其表面上由于蒸发产生的蒸气爆炸性混合物的数量是与温度密切相关的，所以，易燃液体还有一个爆炸温度极限问题。爆炸温度极限也有爆炸温度下限和爆炸温度上限之分。当温度处于这个下限和上限之间时，液体蒸发产生的蒸气混合物的浓度正好在该液体的爆炸浓度极限范围之内，液体的爆炸温度下限即该液体的闪点。例如，车用汽油的爆炸温度是 $-39 \sim 8^{\circ}\text{C}$ ，灯用煤油是 $40 \sim 86^{\circ}\text{C}$ ，酒精是 $11 \sim 40^{\circ}\text{C}$ ，乙醚是 $-45 \sim 13^{\circ}\text{C}$ 等。显然，把温度控制在爆炸温度极限范围之内也是一条防止静电引起爆炸和火灾的途径，但是爆炸性混合物是按照可燃性物质的特性、使用量、使用条件以及温度、压力和湿度等环境条件而变化的，因此控制温度的办法不能作为唯一的安全措施。

2. 减少氧含量或采取强制通风措施

限制或减少空气中的氧含量，使可燃物达不到爆炸极限浓度，通常氧含量不超过8%时就不会使可燃物引起燃烧和爆炸。减少氧含量的方法很多，常用的方法是在蒸气或粉尘的容器内充填二氧化碳、氮或其他不活泼气体，以减少蒸

气、气体或粉尘爆炸性混合物中的氧含量，消除燃烧条件，防止发生爆炸或火灾事故。

在图 5-1 中表明了汽油的爆炸极限与其蒸气混合物中惰性气体含量多少的关系，图中的各条曲线与垂直线的上、下交点就是汽油在相应情况下的爆炸上限和爆炸下限。从图中可以看出，当空气中的不活泼气体含量为零时，这种汽油的爆炸极限为 1.4% ~ 7.3%；随着空气中不活泼气体的逐渐增加，汽油的爆炸上限便不断降低，爆炸下限不断升高；当不活泼气体的含量增加到一定数值时，汽油的爆炸上限与爆炸下限合为一点，这时混合物中的氧含量称为最小氧含量；当不活泼气体的含量进一步增加，混合物中的氧含量低于最小点燃氧含量时，则不会引起混合物燃烧。所以，充填氮或二氧化碳等不活泼气体可以起到防止静电爆炸和火灾的作用。

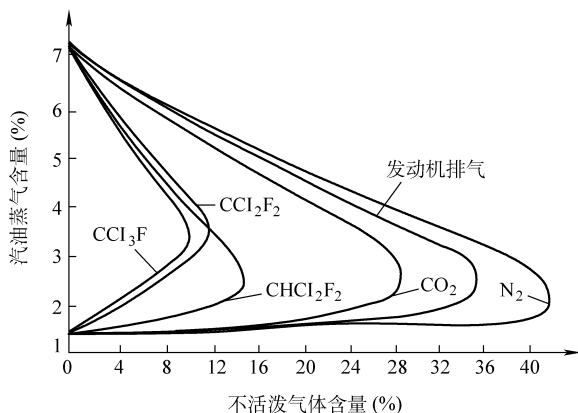


图 5-1 汽油含有不活泼气体时的爆炸极限

应该注意的是，对于镁、铝、锆等粉尘爆炸性混合物，充填氮或二氧化碳是无效的。这时应充填氩、氦等气体，以

防止爆炸和火灾。

3. 尽量用不可燃物质代替可燃物质

在许多化工生产的工艺过程中使用着有机溶剂和易燃液体，如果不影响工艺过程的正常进行，应该最好用不可燃介质代替可燃介质，这样做既经济又实惠，不仅防止了静电的引燃，而且杜绝了一切着火的根源。例如，汽油和煤油可以洗涤设备或设备零部件上的油脂污物。但是汽油和煤油即使在正常温度下也容易产生蒸气，在其表面附近与空气形成爆炸性混合物，而且汽油和煤油的闪点和燃点都很低，加之两者又都比较容易产生静电，使用它们作为洗涤剂会带来很大的危险性。因此，建议采用危险性较小的三氯乙烯和四氯化碳等溶剂作为洗涤剂，当然还要注意其毒性以及可能形成光气的危险性。最好采用不可燃混合溶剂进行化学脱脂，见表5-2。油和碱相互作用形成水状乳浊液，能清洗掉物体表面的脏物。

表 5-2 化学脱脂时使用的一些不可燃混合剂

组分	混合剂内组分含量/(g/L)						
	1	2	3	4	5	6	7
苛性钠或苛性钾	80 ~ 100	110 ~ 150	20 ~ 30	—	—	—	3 ~ 5
磷酸钠	30 ~ 40	—	70 ~ 80	30 ~ 35	80 ~ 100	20 ~ 25	2 ~ 4
碳酸钠	—	30 ~ 50	—	20 ~ 25	—	20 ~ 25	40 ~ 50
水玻璃	—	3 ~ 5	5 ~ 8	5 ~ 10	10 ~ 15	—	20 ~ 30
0 II-7 或 0 II-10 活性剂	—	5 ~ 7	5 ~ 7	3 ~ 5	—	5 ~ 7	—
彼得洛夫接触剂	40 ~ 50	—	—	—	—	—	—

注：混合剂1、2、3适用于黑色金属，4、5适用于铜及其合金，6、7适用于铝及其合金。在温度为 70 ~ 80℃ 下，脱脂时间为 10 ~ 15min，用压缩空气搅拌溶剂。

到现在为止，已广泛采用电化及超声波脱脂的方法使零件和容器净化。化学脱脂时使用的溶剂成分及电化脱脂条件见表5-3。溶剂成分及超声波脱脂的条件见表5-4。

表 5-3 化学脱脂时使用的溶剂成分及电化脱脂条件

项 目	组分含量/(g/L)				
	1	2	3	4	5
苛性钠或苛性钾	40 ~ 50	30 ~ 40	—	—	—
碳酸钠	60 ~ 70	20 ~ 30	—	5 ~ 10	25 ~ 30
磷酸钠	10 ~ 15	50 ~ 60	40 ~ 50	30 ~ 40	25 ~ 35
水玻璃	3 ~ 5	8 ~ 10	—	3 ~ 5	—
0 II-7 或 0 II-10 活性剂	—	—	—	—	1 ~ 3

注：混合剂 1 和 2 适用于黑色和有色金属，2 适用于铜及其合金，3 适用于锌及其合金，4 适用于锌、铝及铜等的合金，5 用于交流电使金属脱脂。

表 5-4 溶剂成分及超声波脱脂的条件

项目	组分含量/(g/L)			脱脂的条件	
	磷酸钠	碳酸钠	0 II-7 或 0 II-10 活性剂	溶剂温度/℃	脱脂时间/min
1	30	10	3	55 ~ 60	3 ~ 5
2	3	—	3	55 ~ 60	1 ~ 3
3	3	3	3	40 ~ 50	1 ~ 3

利用电化和超声波脱脂时，不仅不会发生燃烧和爆炸，而且提高了劳动生产率。

对于粉体、粉尘来说，微粒越小，粒子的总面积就越

大，在空气中发生氧化作用就越容易。所以用颗粒状材料代替粉尘，也是防止静电危险的一种有效措施。

5.1.3 合理选择工艺过程的材料及设备

●要点提示：

（皮）带轮，要导电，换齿轮，减静电。

物料输送要中和，工艺顺序有关联。

●实用技术：

1) 带轮及输送带应选用导电性好的材料制作，以减少摩擦产生的静电。

2) 用齿轮传动带替代带轮传动，以减少摩擦产生的静电。

3) 使物料与不同材料制成的设备或装置进行摩擦而产生不同极性的电荷，从而互相中和。

4) 搅拌工艺应适当安排加料顺序，以降低静电产生。

5) 选用导电性的工具，增加泄漏渠道等。

5.1.4 控制降低摩擦速度或流速

●要点提示：

灌注方式要改变，消除杂质最关键。

●实用技术：

1) 对烃类燃油在管道中的流速应进行控制，使其不大于表 5-5 中的规定。

2) 对于管径为 12mm 的乙醚管道和管径为 24mm 的二

硫化碳管道，其流速不应大于 $1 \sim 1.5\text{m/s}$ 。对于脂类、酮类、醇类液体，在管道内的流速不应大于 $9 \sim 10\text{m/s}$ 。

表 5-5 烃类燃油最大管流速与管径的关系

管径/mm	1	2.5	5	10	20	40	60
流速/(m/s)	8	4.9	3.5	2.5	1.8	1.3	1.0

3) 改变注油方式或改变鹤管的形状，当往油箱、油罐注油时应从底部压入，避免冲击和飞溅，可减少静电产生。当从顶部往油箱、油罐注油时，可改变鹤管的形式或将注管插到底部，以减少飞溅，进而消除静电。

4) 消除杂质。消除油罐或管道内的杂质或积水，以利于消除静电。

5) 正确合理选用防爆设备。

5.1.5 控制人体静电

●要点提示：

人活动，带静电，随衣物，达表面。

爆炸环境生火花，引来灾祸太危险。

用腕带，地导电，辨极性，最关键。

穿好防止静电鞋，严禁脱衣记心间。

●实用技术：

人在活动过程中，由于衣服与外界介质的接触分离，鞋底与绝缘地面的接触分离以及其他原因，会使衣服、鞋等带电。人的身体对于静电是良好的导体，衣服等局部所带电荷通过静电感应会使人体带上一定的电位，形成人体周身带电。以后随着衣物局部电荷逐渐消散到全身表面，达到静电

平衡。

另外，人在走路时因鞋底与地面不断地紧密接触、分开，就发生接触起电。冬天脱毛衣时有静电，这是由于身穿的衣物之间经过长时间的充分接触和摩擦而起电。当将尼龙纤维的衣服从毛衣外面脱下时，人体可以带 10000V 以上的负高压静电。人手拿着东西时，也可以使人体带电。而且人的皮肤在干燥条件下也能和外界的介质表面接触起电。

1. 预防人体带静电的主要目的

一是防止因静电电击引起坠落、摔倒等二次伤害事故，同时防止引起工作人员的精神紧张或恐惧，影响工作情绪，造成其他心理上的伤害，从而引发其他故障。

二是防止人体静电带电的放电火花引燃可燃性物质，避免造成爆炸和火灾事故。

2. 人体静电的主要极性

人体自身活动产生的静电主要有：一是人穿绝缘鞋与地面接触摩擦，鞋子带上静电，结果人体也带上静电。人坐在椅子上，当站立起来时工作服与椅子之间产生摩擦和剥离，使工作服带电，结果人体也带上了静电；二是人体在工作中与物体相接触摩擦，产生静电而带电。如洗涤、黏合、研磨和搅拌等；三是人体穿用的衣服、帽子、手套等由于接触摩擦使人体带上静电，如脱工作服引起人体带电就是典型的例子。

人体接触产生的静电主要有：一是悬浮的带电物体或离子等附着于人体，使人体带上静电，如带电灰尘、雾、粉尘等；二是人体与带电物体接触时，带电物体上的静电荷转移到人体上，使人体带电。表 5-6 中列举了人体与有关材料的静电关系。

表 5-6 人体与有关材料的静电关系

(+)										(-)								
玻璃	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	醋酸纤维丝	合成橡胶	聚酯纤维	丙纶	聚乙烯	聚氯乙烯	聚四氟乙烯

3. 防止人体带电的主要方法

(1) 人体接地

车间内门的把手和门闩必须接地，工作人员不能戴戒指和手镯。在防爆厂房等特殊危险场所的操作人员，应先接触设备在安全区内的金属接地棒，以便及时消除人体电位，然后再进行操作。如果是不能站立工作的操作人员，可以在手腕上佩戴如图 5-2 所示的腕带，将人体接地。人体是否需要接地要根据实际情况测定后决定。比如说，在一个电雷管生产车间，有一台为了制造粉体起爆药的特殊机械，一旦完成药品的混合干燥后机器将自动停止，工作人员用手取出起爆药粉，在未设置接地棒的时候并没有引起爆炸火灾事故；但是后来设置了接地棒，结果在第一次实施操作时便发生了爆炸事故。后来通过不断地研究发现，在粉体起爆药品混合干燥完成后用仪器测出的起爆药品的带电电压为 +10kV，工作人员没有接触接地棒时的人体带电电压为 +9kV，那么人体的手指与起爆药品的电位只相差 1kV，这个电位差下并未达到起爆药品的火花放电能量，也就不会发生爆炸事故；但是当人体连接好接地棒后，人体的静电完全消除，电位为 0，但是起爆药的电位依然为 +10kV，这样在手接触起爆药品时电位差就成了 +10kV，因而产生火花并引起爆炸。假如人体带的是 -9kV 静电，人体不经过接地棒而直接接触及上

述带电 +10kV 的粉体起爆药时，人手指的电位差变为 +19kV；而如果经过了接地棒则电位差为 +10kV，这样接地棒就又提高了安全性。所以安装接地棒必须定期测定人体及带电体的电位和极性。

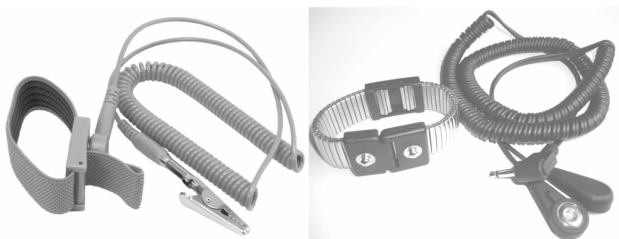


图 5-2 腕带

(2) 穿防静电鞋

防静电鞋（见图 5-3）的电阻值应为 $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^8 \Omega$ ，目的是将人体接地，防止人体和鞋本身带电，以及防止人体一旦接触到带电的低压线而发生触电事故。



图 5-3 防静电鞋

在下列场所应穿防静电鞋：静电能产生生产故障的电子部件和薄膜等场所；处理可燃性物质；接触带电物体或在其

附近工作；危险场所及其附近。

穿用防静电鞋时应注意，必须考虑所穿袜子为薄尼龙袜子还是导电性袜子，严禁在脚底粘贴绝缘胶片，并应做好定期检查。

(3) 穿防静电工作服

防静电工作服可以降低人体静电电位，同时可以避免服装带高电位所引起的灾害。防静电工作服的适用场所和防静电鞋是一样的，对于手套和帽子等也应在不同的场所考虑其导电性。图 5-4 所示为常用的防静电工作服。



图 5-4 防静电工作服

(4) 工作地面导电化

操作人员穿用防静电鞋，要有效地消除人体静电的先决条件是人必须站在导电性地板上。为此必须使工作地面导电化。最简单的办法是洒水，有些场所不能洒水，则必须采用导电地面，如导电橡胶板等，其泄漏电阻值（地面与大地之间的电阻值）应根据工作环境（场所）不同按表 5-7 取值；各种地面材料的一般（普通状态）泄漏电阻见表 5-8。

表 5-7 工作环境与工作地面的泄漏电阻

工作环境	泄漏电阻/ Ω	备 注
有可能产生爆炸和火灾的危险场所	10^8 以下	手术室，可燃性气体和溶剂的贮藏室
有可能产生静电电击的场所	10^{16} 以下	粉体的装袋工序，纸张等的卷取工序
有可能产生生产故障等的场所	10^{11} 以下	计算机室，半导体处理场所

表 5-8 各种地面材料的一般泄漏电阻

地面材料名称	泄漏电阻/ Ω	地面材料名称	泄漏电阻/ Ω
一般的涂刷地面	$10^9 \sim 10^{12}$	导电性水磨石	$10^5 \sim 10^7$
橡胶（粘面）	$10^9 \sim 10^{13}$	导电性橡胶（粘面）	$10^4 \sim 10^8$
木、木胶合板	$10^{10} \sim 10^{13}$	石	$10^4 \sim 10^9$
沥青	$10^{11} \sim 10^{13}$	混凝土（干燥时）	$10^5 \sim 10^{10}$
聚氯乙烯（粘面）	$10^{12} \sim 10^{15}$	导电性聚氯乙烯	$10^7 \sim 10^{11}$

（5）危险场合严禁脱衣服

在危险场所（一般指防爆厂房且介质的最小点燃能量较小）工作时不准脱衣服，因为在脱衣服时，人体和衣服上产生的静电可能达到数千伏甚至上万伏的高电位，极易形成火花放电而点燃可燃性气体混合物，发生爆炸火灾事故。

5.1.6 静电屏蔽

●要点提示：

主动屏蔽靠接地，体外电路无干扰。

被动屏蔽无放电，平时注意有三点。

●实用技术：

静电屏蔽的作用是用壳体将一个区域封闭起来实现的。壳体可以做成金属隔板式、盒式，也可以做成电缆屏蔽和连接器屏蔽。静电屏蔽的壳体不允许存在孔洞。静电屏蔽分为主动屏蔽和被动屏蔽。

（1）主动屏蔽

将静电场封闭在屏蔽体内，称为主动屏蔽。其静电屏蔽

效果与接地有很大关系，只有将屏蔽体接地，才能保证屏蔽体上感应的静电荷泄漏，使屏蔽体外的电路不受静电场干扰。

(2) 被动屏蔽

将静电场屏蔽在屏蔽体以外，称为被动屏蔽。由于被动屏蔽体内空间处于等电位，不存在电场，从理论上讲不一定接地。但在实际工程中，为使屏蔽体的电位与地电位相等或为防止屏蔽体内电子设备接地和屏蔽体存在较大的地电位，常常将屏蔽接地与设备接地相连。静电屏蔽包装是静电被动屏蔽原理的典型应用。

静电屏蔽材料应使用具有足够机械强度的、直径尽量小的金属线或数厘米方孔的金属网等。但屏蔽接地一定要可靠，并且以不使屏蔽材料与带电体发生静电放电为佳，为此要注意以下几点：

1) 静电屏蔽应尽量使屏蔽材料紧密结合于带电体上，因此最好是将屏蔽材料的各重要部位分别固定在带电体上。

2) 使用细金属线做屏蔽材料时，应将细金属线间隔数厘米紧密缠绕在带电体上。图 5-5 所示为管或软管等的屏蔽，它是将金属线在软管的表面上进行屏蔽或使用内有金属线的软管和管子，金属线要可靠地接地，并应注意金属线中间不能断开。

3) 使用金属以外的材料做屏蔽时，应在屏蔽材料的一部分上配上与其紧密结合的金属，并将此金属可靠地接地。如图 5-6 所示的布袋过滤器（简称袋滤器），应使用在布内加导电性纤维或金属线的材料，导电纤维布通过金属环进行接地。另外，带电体部分屏蔽的例子如图 5-7 所示，在储油罐内取样和检测的场所，为了限制带电液体电位，可在罐内

设置开孔金属圆筒测井，检测井内孔直径为 30cm 左右，并可靠接地。如单纯为了限制带电液面电位上升，也可以在罐内各处和罐顶盖与底面之间每隔数米设置垂直的接地金属线或导电性绳索。

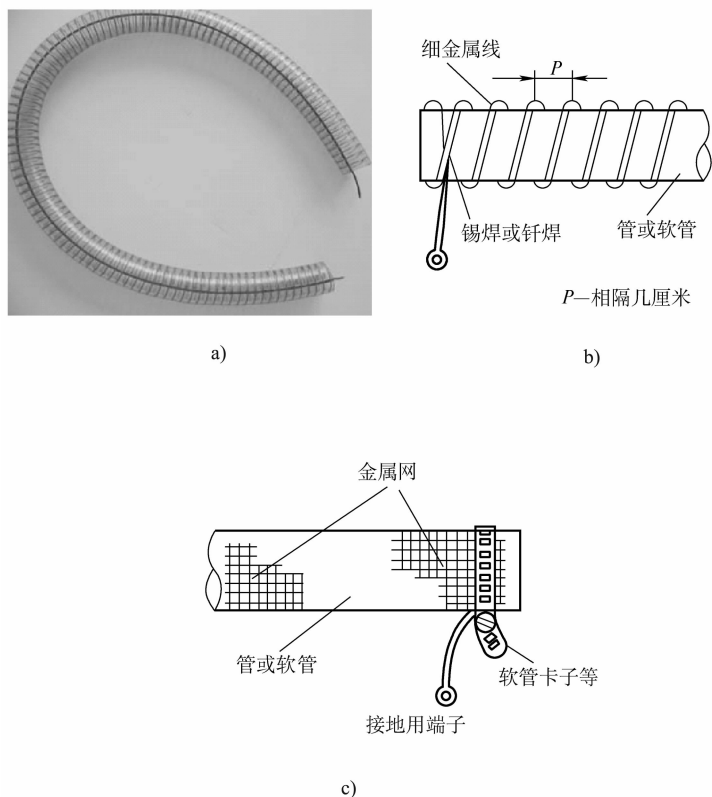


图 5-5 管或软管等的静电屏蔽示意图

a) 防静电软管 b) 采用细金属线的屏蔽 c) 采用金属网的屏蔽

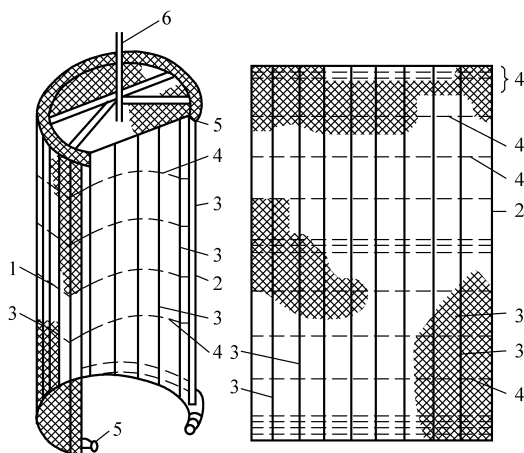


图 5-6 掺入导电性纤维的袋过滤器示意图

1、3—间隔 1~3cm 的导电性纤维 2—滤布
4—间隔 4~8cm 的导电性纤维 5—接地
金属环 6—吊具（为金属时接地）

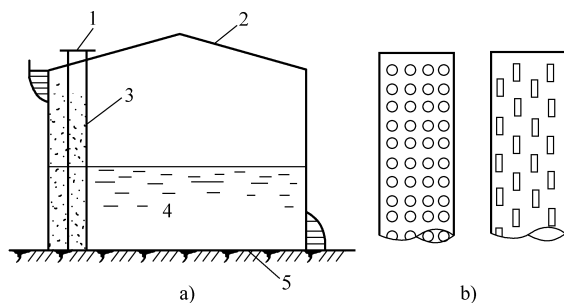


图 5-7 采用检测井减少液面电位示意图

a) 设置检测井 b) 开孔式检测井
1—井口 2—储罐 3—检测井 4—液体 5—大地

5.2 静电泄漏法

5.2.1 自然泄漏法

●要点提示:

导电材料造机器，增加湿度好导电。

增强使用活性剂，自然泄漏最方便。

●实用技术:

使静电从带电体上自然消散。具体方法有

1) 易于产生静电的机械零件尽可能采用导电材料制造。必须使用橡胶、塑料和化纤时，可在加工工艺或配方中适当改变其成分，例如掺入导电添加剂炭黑、金属粉末、导电杂质等材料。

2) 在绝缘材料的表面喷涂金属粉末或导电漆，形成导电薄膜。

3) 在不影响产品质量的情况下，适当提高空气的相对湿度，物质表面吸湿后，导电性增加，这样可加速静电的自然泄漏。一般情况下，空气相对湿度在 70% 左右即可防止静电的大量积累。此法仅适用于表面易于吸湿的物质。

4) 对于表面不易吸湿的化纤和塑料等物质，可以采用各种抗静电剂，这种抗静电剂的主要成分是以油脂为原料的表面活性剂，能赋予物质表面以吸湿性和电离性，从而增加导电性能，提高静电自然泄漏的效果。

5.2.2 防静电接地

●要点提示:

接地能防电积累, 操作安装都简便。

移动设备要装好, 固定设备应紧牢。

接地设备有种类, 安装方法分三种。

●实用技术:

1. 应该采用防静电接地的生产设备

- 1) 输送或生产可燃粉尘的设备和管道;
- 2) 生产或加工易燃烧和可燃气体的设备和储罐;
- 3) 输送易燃液体和可燃气体的设备和储罐;
- 4) 输油设备和油槽车;
- 5) 通风管道上的金属网过滤器;
- 6) 其他能产生静电的生产设备。

2. 防静电接地的电阻值

由于静电电流为微安级, 如果要使接地体造成的电位差不超过 10V, 那么接地电阻最大可以取到 $10^6 \Omega$ 。如果把电流取到 10^{-4}A , 电压取到 0.1V, 再考虑到土壤干燥等原因, 容易造成接地电阻不稳定, 会有引起灾害的危险, 则接地电阻可取到 $10^2 \Omega$ 以下。因此静电的接地电阻取在 $10^2 \sim 10^6 \Omega$ 范围内是合适的。可是, 如果接地不仅是为了防止静电带电, 还要兼作防雷保护、电气漏电保护等时, 那么接地电阻应按防雷等级及电气漏电保护的要求来选用。

3. 防静电接地的安装方法

(1) 移动设备的防静电接地安装方法

移动设备不能像固定设备那样接地, 因此可以采用如图

5-8 所示的连接器具进行接地。经常用到的接地器具还有夹钳或电池夹子、钳式插入连接器等。

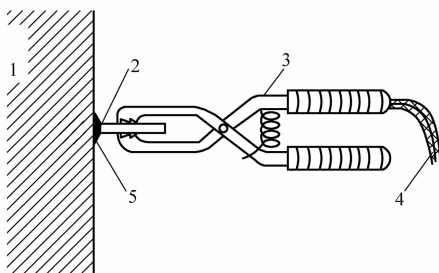


图 5-8 接地用连接器具的实例

1—带电物体 2—接地端子 3—连接器

4—接地线 5—电焊或钎焊

另外，对温度计、液体取样容器等要采用如图 5-9 所示的方法，可以使用混入铜丝、导电纤维或金属纤维的绳索进行接地。对台车等，可用电阻率为 $10^8 \Omega \cdot \text{m}$ 以下的导电性橡胶制成的导电性滚轮进行接地。目前我国的导电性橡胶制品有驱动皮带、软管等，都可以应用于静电接地。

对移动式设备和装置等而言，平时作永久性接地的情况较少，总是频繁地进行接地和断开。所以，需要注意接地的时间、地点，因为在存在溶剂、可燃性气体等场所进行接地时，它有可能成为点火源。

(2) 固定设备的防静电接地方法

静电接地和一般电气设备的接地相比，不需要过高的技术，重要的是要可靠地接地。在选择接地线时，要充分考虑到机械的变形和机械运转时引起的振动，例如使用具有足够机械强度的 1.25mm^2 截面积的钢芯线、绞线等作为接地线较适宜。

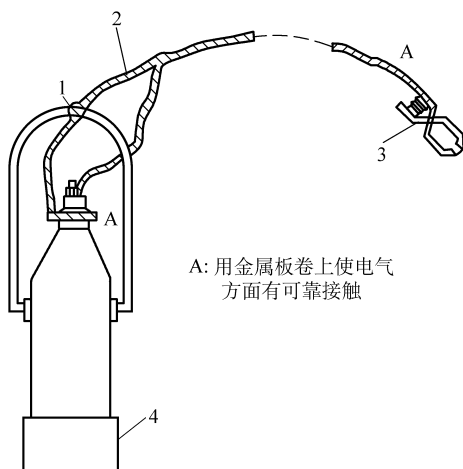


图 5-9 取样容器的接地示意图

1—联结 2—导电性绳索 3—连接器 4—金属取样容器

为了可靠地连接接地线，最好采用锡焊的方法，电焊如图 5-10 所示的压紧端子螺母紧固方式。安装时最需要注意的是，要充分加大接触面积、接触压力，将接触电阻控制在几欧以下。当接地的对象为非金属物时，最好采用接触面积为 20cm^2 以上的金属板或在物体和金属板之间采用导电橡胶。

另一方面，接地线和大地的连接应尽可能采用接地棒；当不能采用接地棒时，最好采用与金属水管、蒸气管、建筑物的钢筋等相连，或与埋入地下的金属结构物直接连接。

对于将装置安装在接地的固定平台或埋于地面时，只要电阻不过分大，就不必进行防静电的专门接地。

接地是防止静电的有效方法，但它并不能防止、抑制静

电的产生，而且采用接地方法也不能防止绝缘体带电。因此，接地并非万无一失的方法。接地线安装好后，应对其作定期检查，检查接地线有否损伤，螺栓有无松动，同时掌握接地电阻的变化。这些在安全管理上都是十分重要的。

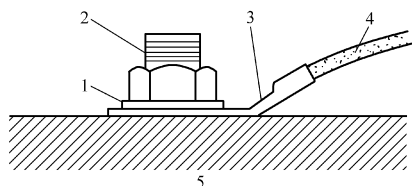


图 5-10 螺母作为接地端子的实例

1—弹簧垫 2—接地端子 3—压紧端子等连接头
4—接地线 5—带电物体

(3) 旋转部件的接地

一般旋转设备，其轴承部分所使用的润滑油通常为绝缘物，如果旋转部件不接地，就会带有大量的静电。因此，对其接地应使用导电性润滑油，或使用电刷、金属触头等。由于旋转部件静止时和旋转时的接触电阻不同，所以必须测定旋转状态的泄漏电阻，需要验证其为 $10^{-6}\Omega$ 以下。而且润滑油在使用过程中的特性会变化，往往也会带电。轴承部分有发生放电的可能性。所以，对旋转设备的接地状态作定期检查是不可缺少的。

5.2.3 增湿

● 要点提示：

静电逸散有快慢，带电介质直接关。

高湿空气一接触，瞬间凝露电量变。

装置原理在图中，从左至右看一遍。

增湿与否在工艺，考虑危害最关键。

●实用技术：

增湿是促使静电泄漏的措施，适用于绝缘体上静电的消除。增湿对于表面易形成水膜或者是易被水湿润的绝缘体，如醋酸纤维素、硝酸纤维素、纸张、橡胶等消除静电是有效的；而对于表面不宜形成水膜或者不宜被水湿润的绝缘体，如纯涤纶、聚四氟乙烯等，增湿消除静电是无效的。表面水分易蒸发或蒸发快的绝缘体、孤立的绝缘体且没有泄漏渠道的增湿是无效的。一旦放电，火花较强烈，这在危险环境是不允许的。

静电的场所，可装设空调设备并设喷雾器或挂湿布片，提高空气的湿度；也可用温度略高于绝缘体表面温度的高湿度空气吹向绝缘体，结成水膜，进而泄漏静电。这些场所一般应保持相对湿度在 70% 以上为好。

高湿度空气静电消除器装置的原理如图 5-11 所示。压缩空气从左方送入，先经过一个浸在恒温水池中的预热螺旋管预热至一定温度，再进入蒸发器，使空气在水中鼓泡，然后带着饱和水汽出来，由于水分不断蒸发，出来的饱和空气的温度略低于水池温度，再经过热螺旋管加热以使空气略欠饱和，最后经喷头的各个小孔喷出。水池温度一般维持在高于室温 30℃ 左右，这样温度的高湿度空气，一经与室温条件下的界介质薄膜接触，就会立刻在表面凝聚一层极薄的水雾膜。由于水分子的极性性质和高介电常数，以及溶解在水中的二氧化碳（这在空气中是必然存在的），所以大大地降低了介质薄膜的表面电阻，在有接地的条件下，可以迅速地

把静电导走。但是，对于孤立的带电介质，空气增湿以后，虽然其表面上能形成水膜，但没有泄漏静电的途径，对消除静电也是无效的；而且在这种情况下，一旦发生放电，由于能量集中释放，放电火花能量会更大。

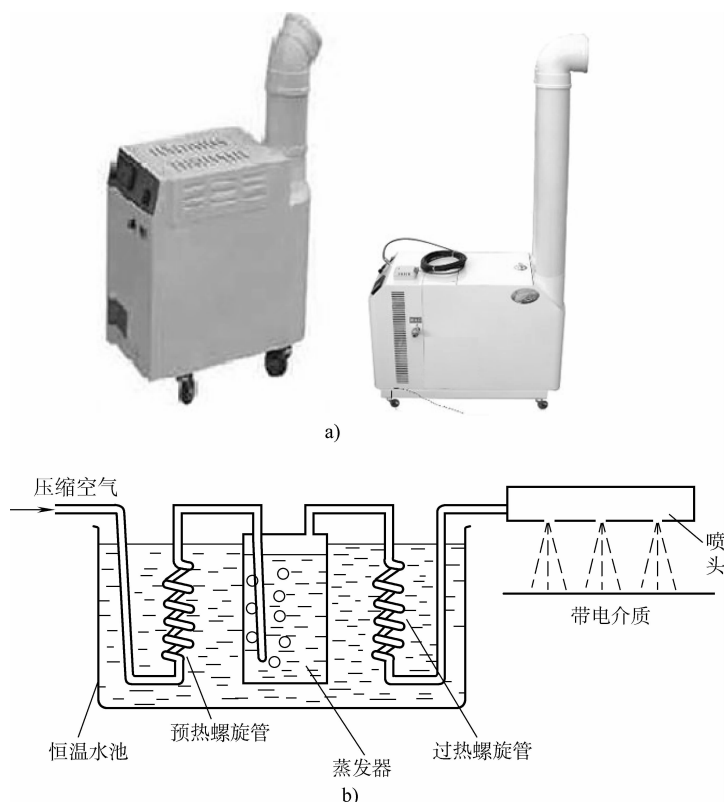


图 5-11 高湿度空气静电消除器装置

a) 外形图 b) 原理图

5.2.4 添加抗静电剂

●要点提示:

具有较好导电性, 不易产生高绝缘。

加速静电外泄漏, 消除静电危险。

类型、性质分多类, 使用方法有限制。

●实用技术:

在容易产生静电的高绝缘材料中加入少量的抗静电添加剂, 能降低材料的电阻, 加速静电泄漏, 消除静电危险。例如橡胶中一般加入导电炭黑, 药粉中一般加入石墨, 聚氯乙烯塑料中一般加入酰胺基季铵硝酸盐/SN 抗静电添加剂, 化纤中一般加入季胺盐, 石油中一般加入环烷酸盐或合成脂肪酸盐等。

但是对于悬浮状粉尘和蒸气的静电, 采用抗静电添加剂是不起作用的, 因为这些微粒之间都是相互绝缘的, 应采用工艺控制法。

1. 常用抗静电添加剂的类型和性质

(1) 无机半导体类

这类物质主要是指无机半导体盐和炭黑, 它们具有很好的防静电效果, 而且导电性能基本不随温度变化, 化学稳定性也好, 多用于胶片生产工艺中, 也可以把导电炭黑用于橡胶的添加剂。

(2) 无机盐类

多数是与水有合适的平衡蒸气压的易吸湿性碱金属和碱土金属的化合物。例如硝酸钾、氯化钾、氯化钡、醋酸钾等。应该提到的是, 这些盐类往往是和甘油并用。

(3) 电解质高分子成膜物类

这类物质一般都是表面活性剂，本身就具有不饱和基团单体。

(4) 表面活性剂类

这类抗静电添加剂又可以分为离子型和非离子型两大类。

1) 离子型中主要包括以下几类：

阴离子型抗静电添加剂：主要特点是制造工艺简单、价格便宜、腐蚀性小、吸湿性强，极少量（一般只有千分之一二或更少）的这类物质就可以达到防静电的效果。有不少纺织工业中使用这种抗静电剂。

两性型抗静电添加剂：主要特点是它的溶解性不受溶液 pH 值的限制，只是价格较高，所以使用得较少。

阳离子型抗静电添加剂：由于这类物质呈酸性，所以腐蚀性较大，用途不如阴离子型广泛。但是有把季胺植酸盐用于燃料油防静电的例子。

2) 非离子型中主要包括以下两类：

多元醇型：是指在像甘油、季戊四醇等多元酸分子上附有高级脂肪酸类的憎水基团等。

聚乙二醇型：一种是以多个醚键相结合的聚乙二醇脂肪酸酯；另一种是以多个醚键相结合的高级醇环氧乙烷加成物。

(5) 有机半导体高聚物类

一些由 α 、 β 不饱和二元酸和羧酸乙烯酸共聚而成的高聚物，由于广泛地形成 π 键而具有半导体的性质，用这种高聚物作为防静电剂，或者用不饱和二元酸与苯乙烯共聚物作为抗静电剂，都可以收到良好的效果。

2. 抗静电添加剂的使用

(1) 在塑料生产中的应用

一般来说,涂层型的防静电剂经过洗涤之后,防静电效果会大为降低。最理想的情况是内加型的表面活性剂,它可以渗入到合成物质之中,在表面的一层起防静电作用。在表面层被洗掉之后,由于亲油亲水平衡的原因,仍然能从内部渗透至表面,而保持其防静电的效果。

(2) 在聚酯薄膜——涤纶片基生产中的应用

烷基二苯醚磺酸钾盐(简称DPE)是用于涤纶薄膜防静电较有成效的一种化学防静电剂。经过实验证明,在相对湿度为65%的环境下,使用DPE,可使涤纶薄膜的表面电阻率从 $10^{15} \Omega \cdot m$ 降低到 $10^{11} \Omega \cdot m$ 的数量级;相对湿度为60%时,也可降到 $10^9 \Omega \cdot m$ 的数量级以下。这样就可以满足一些工业对涤纶薄膜防静电的要求。

(3) 在纤维生产中的应用

用于纤维的防静电剂种类最多,绝大多数为表面活性剂,其中以阴离子和季铵盐两种类型为最好,这一点从表5-9中可以明显地看出。表中的数据是以布样的形式在20℃和相对湿度为65%条件下测得的相对电阻值,表面活性剂的加入量为0.2%。

表 5-9 各种表面活性剂的防静电效果

表面活性剂		空白对比 (未处理)	脂肪醇硫 酸酯钠盐	烷基磷酸酯 有机盐	季铵盐型 阴离子	多基酸环氧 乙烷加成物	多元醇 脂肪酸酯
表面电阻率 / $\Omega \cdot m$	涤纶	$>10^{10}$	2×10^6	6×10^6	9×10^6	5×10^7	2×10^8
	尼龙	7×10^{10}	7×10^7	5×10^8	8×10^7	8×10^8	5×10^{10}
	腈纶	$>10^{10}$	2×10^6	5×10^6	4×10^6	2×10^7	5×10^8
	醋酸 纤维素	$>10^{10}$	5×10^7	1×10^8	8×10^7	6×10^9	8×10^9

5.2.5 安装静电中和器

●要点提示:

四种静电中和器，各有特性要注意。

自感应式中和器，结构简单使用便，
不能完全消除净，针尖越尖消电好。

高压静电中和器，种类多种要想全，
原理要用强电场，中和静电再除掉。

放射线式中和器，利用元素半衰期，
结构简单效果好，一定注意防射线。

离子流式中和器，防爆场合用得少。

组合静电中和器，各项优点都较全。

合理、安全选择好，经济效益最关键。

若是安装不得当，效果极差功劳半。

首先安装高电位，距离大小有定义。

背面不装接地体，易于污染不方便。

安装角度应垂直，支撑坚固最可靠。

●实用技术:

静电中和器与抗静电添加剂相比，具有使用简便、不影响产品质量的特点。目前的静电中和器有感应式静电中和器、高压静电中和器、放射线式中和器、离子流式静电中和器（枪）、组合式静电中和器。

1. 感应式静电中和器

感应式静电中和器是一种最简单的静电中和装置，它没有外加电源，是由接地的若干支非常尖的针、电刷或细电线

作消电电极，以及支架等附件组成。放电针感应式静电中和器如图 5-12 所示。使用时，针尖对准带电介质，放在距表面 1~2cm 的地方，或者将针插入带电液体介质的内部，都可以达到消除静电的目的，并且不需要其他附属设备。

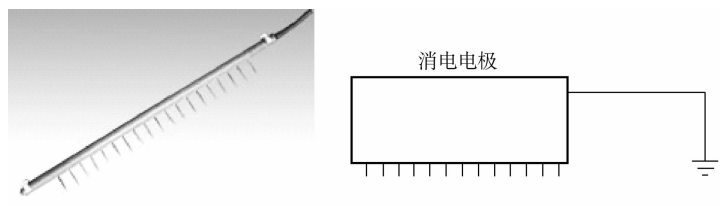


图 5-12 放电针感应式静电中和器

(1) 感应式静电中和器的工作原理

感应式静电中和器的工作原理如图 5-13 所示。

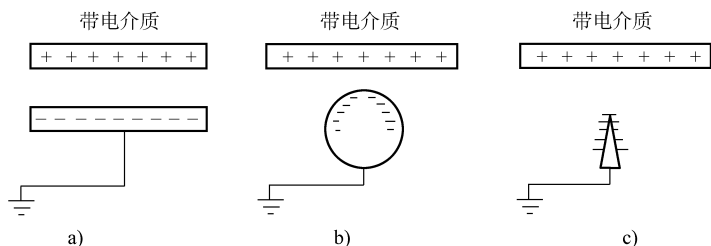


图 5-13 感应式静电中和器的工作原理

从图 5-13a 中可以看出，用一块与带电介质一样大小相同的接地金属平板对准正电荷的介质，这样感应出的负电荷均匀地分布在金属板上，电荷的多少与带电介质相同，形成对应的偶极层。从图 5-13b 中可以看出，用一个接地小球对准带电介质，感应出来的电荷密度大于金属平板时的情况。若改成图 5-13c 所示的以接地针尖对准带电介质，则感应出来的电荷都集中在针尖那么大的面积上，所以电荷的密度会

非常大，因而电场的强度也会很大。利用这个强电场，可以使针尖形成电晕而使周围的空气电离。遭受电离的空气离子，受带电介质与针尖之间电场力的作用，把相反符号的一种离子推向带电介质的表面。这样，带电介质表面的静电荷就被中和掉了。但要注意的是，针尖周围的强电场是因为带电介质本身的作用而产生的，所以当介质表面的静电荷降低到一定程度的时候，这种作用也会随之消失。因此，使用这种装置并不能把静电荷完全消除干净，总会保留一定数值的静电压。保留静电压的大小，与针尖的尖锐程度和针尖距离带电介质的远近等因素有关。一般来说，针越尖、距离越近，效果越好。

在需要解除静电危害的带电介质上方平行地拉一根极细的金属丝，或用导电纤维制成的刷形或用导电橡胶做成的锯齿形来代替整个排针，也能达到同样的效果。原因是在金属丝、锯齿形尖端、导电纤维周围也可形成电晕。

(2) 感应式静电中和器的性能

感应式静电中和器通常用两个指标来衡量：

1) 电晕电流：电晕电流越大，说明在单位时间内消除掉的静电荷数目越多，消除器的效果就越好。

2) 临界电压：是指能够使消除器针尖起电晕作用的最低电压。这个数值越小，最后剩余的静电压就越小，因此消除器的效果也就越好。

影响上述指标的主要原因有以下几点：

1) 带电体的极性和电压的影响：在放电针上被感应出来的电源极性与带电体的电荷极性相反。电晕的强度则取决于带电体的电压。图 5-14 所示为不同极性的带电体电压值 (kV) 对电晕电流 (μA) 和临界电压 (kV) 的影响。这个

图是用以下条件作出的：消除器长度为 500mm，针尖与带电体的距离为 25mm，放电针的直径为 3mm 而长度为 30mm。图中虚线是带电体带正电时的情况，实线是带负电时的情况。可以看出，正电晕和负电晕的效果是不同的。在其他条件完全相同的情况下，负电晕比正电晕要强许多，但两种极性的电晕电流，都随带电体的电压的升高而加大，也就是说，消除静电的速度都随带电体电压的升高而加大。还可以看出，带电体带正电时，电晕电流趋向于零的电压值，即临界电压值，大约为 2.7kV；而带电体带负电时，这个值要升高到 4kV。所以，对于所使用的这个自感应式静电中和器装置的具体条件来说，最好的效果也只能把静电消除到 2.7kV（带电体是正电）或 4kV（带电体是负电）。至于几十微安或一二百微安的电晕电流，对于消除一般工业中的静电来说，已经足够了。

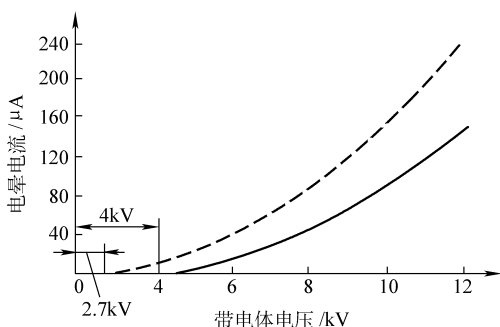


图 5-14 不同极性的带电体电压值
对电晕电流和临界电压的影响

2) 放电针间距离的影响：放电针间距离的大小，既影响电晕电流，也影响临界电压。减小放电针间距离（也就是加大放电针密度），相当于增加静电电荷移向电极通道的数

目, 因此就这一点来说, 会使电晕电流增加。但是过多的放电针数目, 会产生两种不利的效应, 一个是放电针间的距离越小, 产生电晕所需的临界电压值越高; 另一个是在带电体电压较低时, 放电针密度过大反而会使电晕电流降低。图 5-15 便说明了这个问题。这两个分图都是在消除器长度为 30mm 的相同条件下作出的。三个不同的参量是针尖距离分别为 5mm、25mm 和 50mm。可以看出, 带电体带正电时, 把放电针间距离从 5mm 加大到 50mm 时, 可以使临界电压值从 3.1kV 降为 2.2kV。带电体带负电时, 可以从 4.3kV 降为 3kV。除此之外, 还可以看到图中三条曲线的交叉, 这说明带电体电压低时, 放电针间的距离小, 电晕电流反而低, 特别是放电针间的距离小到 5mm 时更是这样。这是由于过多放电针密集在一起, 相当于减小了针尖的曲率。另外, 针

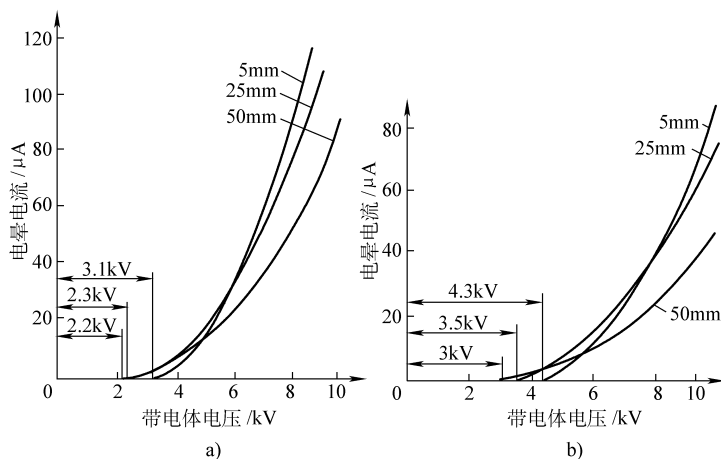


图 5-15 放电针间距离的影响

a) 带电体带正电荷时 b) 带电体带负电荷时

与针之间太近，相同极性的电场相互影响，反而降低了针尖的电场强度。因此，在带电体电压较低时，电晕电流会有所降低。从这个图中可以看出，当带电体电压较低时，针间距离大，针数少的效果好；而当带电体电压较高时，针间距离小，针数多者效果好。放电针越尖越细，消电效果越好。一般放电针直径不应超过 $0.5 \sim 1\text{mm}$ ，针间角度不应超过 60° ，放电针可用不锈钢丝、钨丝等材料制成，针长可取 $10 \sim 50\text{mm}$ ，针间距可取 $10 \sim 30\text{mm}$ ，沿直线排列。

3) 中和器与带电体之间安装距离的影响：安装感应式静电中和器时，针尖与带电体间的距离是很重要的。安装距离远，效果差；距离近，电晕电流的效果可以成倍甚至几十倍地增长。图 5-16 反映了这一事实。这个图的基本实验条件是，消除器长度为 200mm ，放电针长度为 30mm ，放电针间的距离也是 30mm 。整个实验是在带电体带正电的情况下

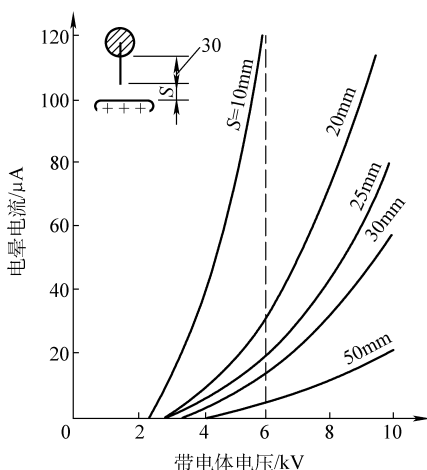


图 5-16 安装距离的影响

做出的。从图中可以看到，除去发生电晕的临界电压值随安装距离加大而升高外，电晕电流值随安装距离的减小而急速增长（注意图中6kV处的虚线）。因此，在安装这种消除器时，应使它与带电体的距离尽可能小，以便取得较好的效果。一般放电针与带电体之间的距离原则上在10~50mm范围内选择，最好不超过20mm。

4) 保护罩或保护杠材质和尺寸的影响：在制作感应式静电中和器时，为了保证放电针不被碰坏，或者人体不被针尖刺伤，往往在装置上加有保护罩或保护杠（见图5-17）。

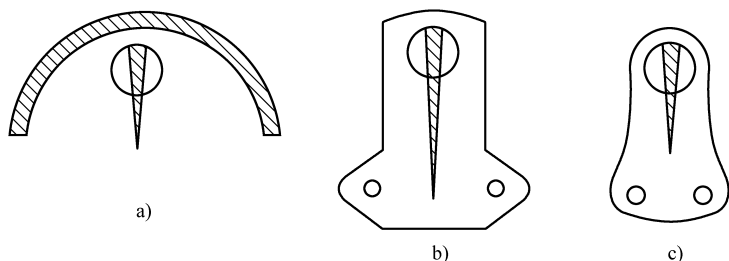


图 5-17 感应式静电中和器的保护装置（端视）

a) 保护罩 b) 保护杠1 c) 保护杠2

图5-17a所示为半圆形的保护罩，图5-17b中两个小角的圆形截面是两根保护杠。保护装置往往都是用金属材料做成，而这一点对于消除静电来说却是不利的。特别是保护罩的尺寸过小或保护杠的距离过近，都会影响消除器的效果。以保护罩为例，半圆罩的直径从100mm减小到25mm，其他条件相同时，电晕电流大约降到原来的1/4，而产生电晕的临界电压则从2.2kV上升到4.1kV，如图5-18所示。保护杠与放电针的距离也有同样的情况，如果把针缩到里面很

多，保护杠又靠得很近并且接地（见图 5-17c），那么这样装置的消除静电效果就很有有限了。

作图 5-18 时，保护罩材质用的是铝。有的自制的感应式排针式静电中和器，支撑架和保护罩都是用钢质的。关于材质和尺寸这一点，在制作和使用时要给予足够的注意。可采用聚氯乙烯塑料制成，其前方开孔直径或开槽宽度不宜太小。

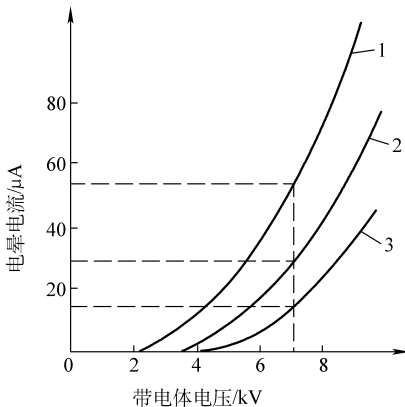


图 5-18 保护装置的影响

1— $\phi 100\text{mm}$ 2— $\phi 50\text{mm}$ 3— $\phi 25\text{mm}$

(3) 固体感应式静电中和器

固体感应式静电中和器有放电针型、锯齿型、金属丝型、刷型。

放电针型感应式静电中和器前面已经介绍过了，现仅对后三种逐一介绍。

1) 感应式锯齿型静电中和器：可以用导电橡胶、导电纸或导电布制成，其基本结构如图 5-19 所示。导电橡胶制成的静电中和器是用天然橡胶或氯丁橡胶中配用炭黑等添加

剂制成的，其电阻率多在 $10^3 \Omega \cdot \text{m}$ 以下。取厚度为 0.6mm 以下的导电橡胶片，前方削成锯齿形状，后方固定在硬塑料或浸蜡木材制成的支架上，将橡胶片通过金属线接地即构成锯齿型静电中和器，锯齿越尖，中和静电的效果越好。

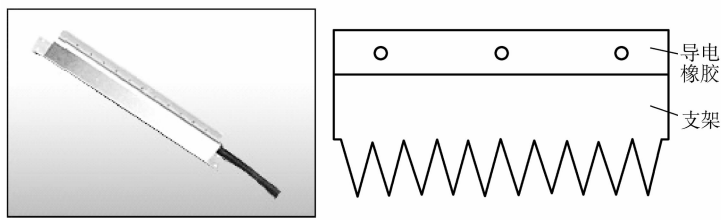


图 5-19 感应式锯齿型静电中和器

2) 感应式金属丝型静电中和器：如图 5-20 所示，它的消电效果随金属丝的直径增加而减小。图 5-21 所示为 0.11mm 和 0.2mm 两种不同直径金属约距带电体 20mm 时的消静电效果。可以看出，金属丝直径加大，电晕电流减小，而临界电压增大，消除静电的效果变差。当把金属丝直径加大到 0.45mm，只有在带电体电压达到 12kV 时，才能有觉察的电晕电流出现。

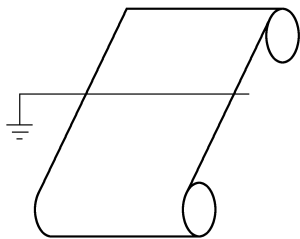


图 5-20 感应式金属丝型静电中和器

3) 感应式刷型静电中和器：可以用导电纤维、导电布等制成，其结构如图 5-22 所示，它是用直径为 0.05mm 的导电纤维制成的。

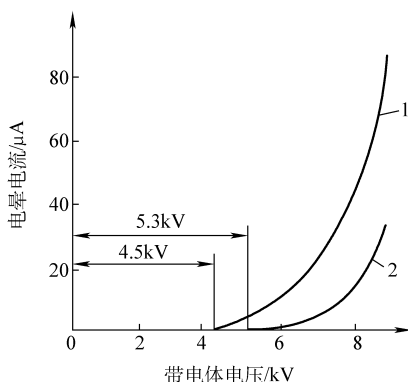


图 5-21 线径与耗电性能的关系曲线

1— $\phi 0.11\text{ mm}$ 2— $\phi 0.2\text{ mm}$

另外，上述介绍的锯齿型静电中和器和刷型静电中和器有一个共同特点，就是在消除器的前端都是柔软的，没有锐利的尖端。因此这些消除器不会刺伤人手或生产物件，不需要保护罩或保护杠。即使消除器同生产物件接触，除了增加消除器的磨损外，也不会带来其他更大伤害。在带电位置不完全固定的情况下，采用这些消除器是有利的。

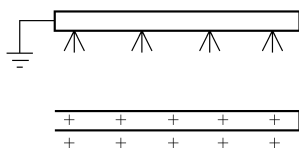


图 5-22 感应式刷型静电中和器

2. 直流高压静电中和器

直流高压静电中和器由高压直流电源和电晕放电器组成。放电器是由放电针、支架和保护罩所组成的，这种静电中和器的原理如图 5-23 所示。在图 5-23 中， FD_1 和 FD_2 分别是正电晕放电器和负电晕放电器，当带电体带负电时，高

压电源输出的电压极性为正，正电晕放电器发生作用；反之亦然。T 是升压变压器，电容器 C_1 和 C_2 配合整流器 VD_1 和 VD_2 起倍压整流作用，电阻 R_1 和 R_2 起限流作用，直流电源的输出电压在 4000V 以上。

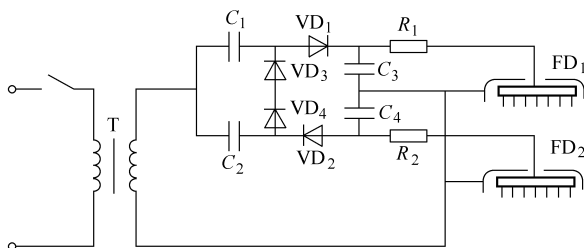


图 5-23 直流高压静电中和器的原理图

3. 工频高压静电中和器

工频高压静电中和器的高压电源通常是直接使用变压器，其外形及结构原理如图 5-24 所示。图中 T 是升压变压器，其二次电压为数千伏至数十千伏。变压器二次侧的一端接地，并接向消电电极的金属外罩。变压器二次侧的另一端，即高压端通过电阻接向放电针（见图 5-24b），或者通过电容接向放电针（见图 5-24c），或者通过高压导线与放电针金属支架间的电容耦合，使放电针发挥产生电晕的作用（见图 5-24d）。

图 5-24b 中的 R_x 和图 5-24c 中的 C_x 都是限制变压器二次短路电流的。为了防止工作人员偶然触及放电针而发生电击危险，变压器二次短路电流不应超过人的摆脱电流，即不应超过 5 ~ 10mA。因此对于 10kV 的二次电压，限流电阻应保持在 1 ~ 2MΩ 以上。

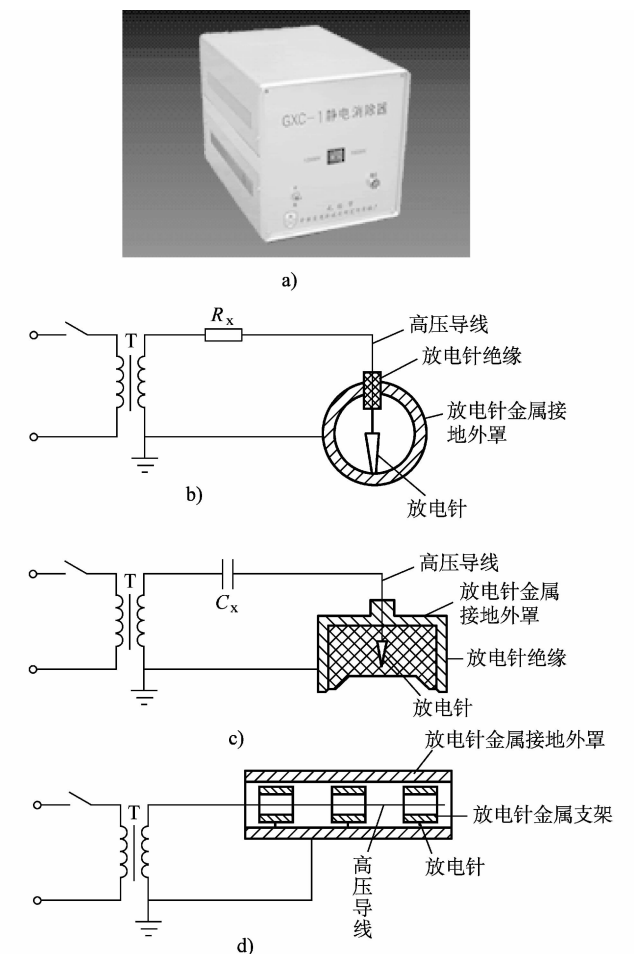


图 5-24 工频高压静电中和器

a) 外形图 b)~d) 工作原理图

图 5-24d 所示消电电极的放电针与高压电线是电容耦合，每支放电针发生短路时的短路电流不超过数十微安，这对人体是没有危险的。从火花放电的危险性来看，图 5-24d 所示电容耦合静电中和器有很多优点。由于这种消电电极的放电针是互相独立的，任何一支放电针与带电体或接地体之间发生的火花放电，其火花能量是有限的，一般没有引起火灾和爆炸的危险。而图 5-24b 和图 5-24c 所示为直接耦合，消电电极的各放电针与带电体或接地体之间的火花放电即相当于高压导体对该带电体或接地体的放电，火花放电强烈，在周围有爆炸性混合物的场所是很危险的。因此一般工频高压静电中和器是非防爆的，不能用于有爆炸危险的场所。其主要原因有

1) 这类静电中和器的放电针尖附近是与环境可能存在的爆炸性混合物直接接触的，当有源放电的能量较大时，就有可能引爆或引燃。

2) 在这类静电中和器中，高压电源与电晕放电器的耦合方式有可能引起放电针与带电体或接地体之间发生火花放电。不过直接耦合消电电极的结构比较简单，而且消电效果也比较好。

3) 静电中和器的高压电源或引线本身有可能发生火花放电。

但是，直接耦合静电中和器的结构比较简单，而且中和静电的能力非常好。

外接电源式静电中和器的消电电极金属接地外罩是多种多样的，如图 5-25 所示。接地外罩有管型的、槽型的，也有保护杠型的。消电电极工作时，由于电晕放电，放电针与接地外罩开孔或开槽的边缘之间，或与接地的保护杠之间产

生较多的正负离子，借以消除带电体上的静电，还兼起保护罩的作用。放电针的前端与金属接地外罩上开孔或开槽的边缘应保持适当距离。距离太大，则其间电场强度减弱，致使电晕减弱，消电效果降低；距离太小，则保护罩的屏蔽作用增强，能达到带电体的电力线减少，也使得消电效果降低。外罩上圆孔直径或长槽宽度一般取为 10mm。为了安全，放电针不能超出接地外罩开口、开槽或保护杠平面。

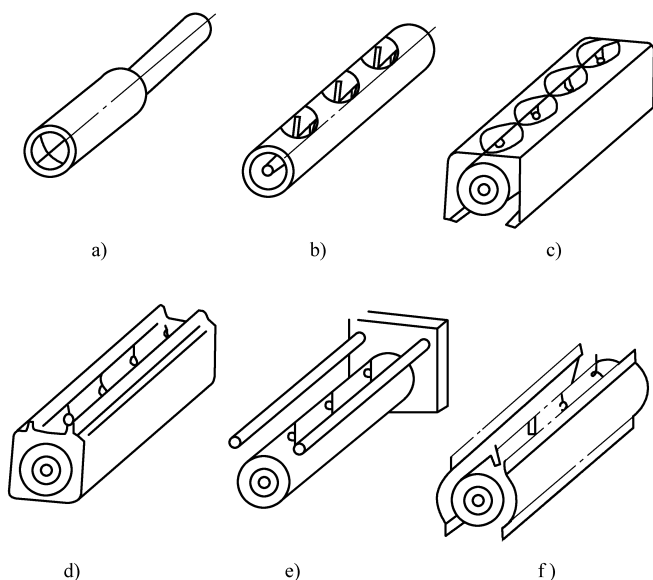


图 5-25 外接电源式静电消除器的消电极金属接地外罩

放电针可采用缝纫用钢针。放电针长度宜取 8 ~ 10mm。相邻放电针之间的距离可在 10 ~ 30mm 范围内选取，且当该

距离与针长之比接近 1 时，有良好的消电效果。

消电电极与带电体之间相距数百毫米时就有消电作用，但一般不宜超过 250mm，正常工作时宜取为 25 ~ 35mm，如果条件允许，还可取得小一些。

放电针的支架宜用绝缘材料制成，而不宜用金属材料制成，以免增大带电体对地分布电容，降低消电效果。

高压电源的升压变压器应当是可控的。图 5-26 所示是升压变压器一种比较简单的控制电路。图中 R_1 、 R_2 和 R_3 是分压电阻，供调整输出电压用；控制转换开关 S 有选择地接通分压电阻，可以分别得到几种输出电压；图中 R_4 是限流电阻，可使输出端发生短路或击穿时线路电流不至于过大。

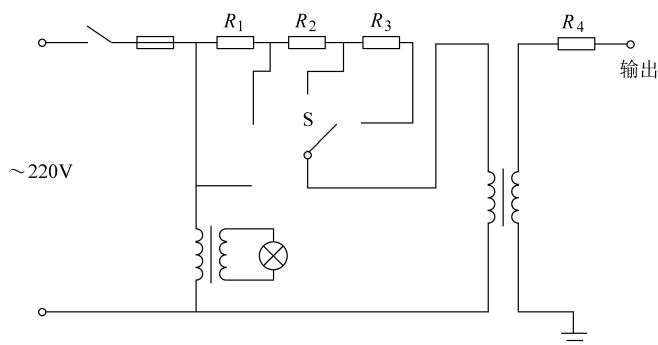


图 5-26 工频高压电源线路

高压电源的输出电压也可用晶闸管控制。晶闸管高压电源线路如图 5-27 所示。工频交流电通过灯泡给电容器 C 充电，VT 导通后，电容器再通过升压变压器的一次绕组高速

放电。由此可知，变压器二次侧输出的是脉冲电压。通过电阻 R 的调节，可以改变晶闸管的导通时间，调整变压器的输出。因为电晕电流很小，所以变压器的工作电流一般不超过 $1 \sim 2\text{mA}$ 。变压器的容量约为 $5 \sim 10\text{W}$ 即可。

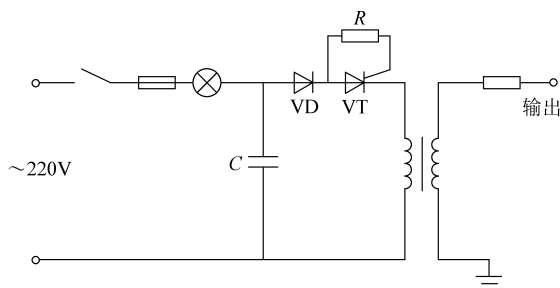


图 5-27 晶闸管高压电源线路

4. 离子流式静电中和器（枪）

离子流式静电中和器（枪）是把电离子的空气快速输送到较远的地方去消除静电的装置。

（1）离子流式静电中和器（枪）的基本原理及其参数

离子流式静电中和器（枪）的基本原理如图 5-28 所示，主要由离子流喷头、高压电源和送风系统组成。其离子流喷头是由中间有小孔的金属导引环、导引电阻（与地连接）及在导引环小孔中心的放电针（直接与高压电源连接）组成。其送风系统由风源、风道等组成。离子流式静电中和器（枪）工作时，在高压电源作用下，放电针附近的空气发生电离，并由压缩空气以极快的气流速度把空气离子送出去，发挥消电作用。

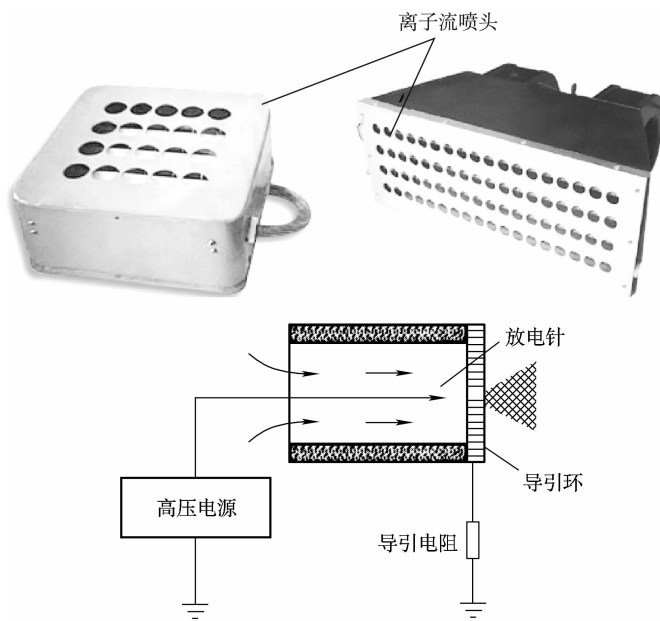


图 5-28 离子流式静电中和器的基本工作原理

离子流式静电中和器（枪）的基本参数用如图 5-29 所示的装置来测定。它可以测量一个离子流发生器能够产生多少离子，又有多少离子可以被气流输送出来。A 是一个离子流发生器。针尖电压由可调的直流电压电源 GY 来供给，通过放电针的总电源的电流 I_0 是由与其相连并接地的检流计 G_0 读出的；压缩空气从 F 处送入，由于针尖与导环间存在电场，所以不可能把由电晕产生的全部离子都吹出去，总有一部分回经导引环、导引电阻 R 和检流计 G_1 而入地，这部分电流 I_1 对于消除静电来说是无效的；被空气吹出的离子

用收集筒 B 来捕获并通过检流计 G_2 而入地， G_2 给出的数值 I_2 就是单位时间内离子流引出总量，这些离子是真正能用来消除静电的有效部分。因此，一个静电消除器的离子流引出效率可以用 I_2/I_0 来表示。

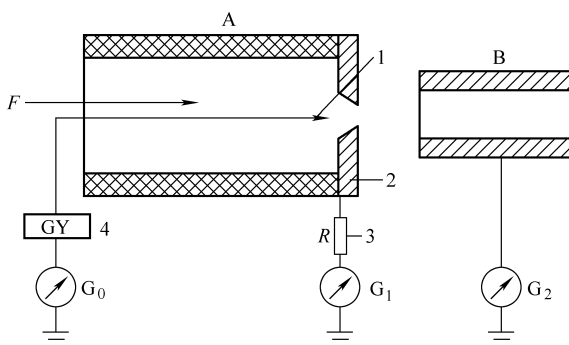


图 5-29 离子流引出总量及离子流引出效率测定装置

1—放电针 2—导引环 3—导引电阻 4—高压电源

1) 针尖电压和电晕电流对离子流式静电中和器（枪）的影响：针尖电压能直接决定电晕电流的大小，电压提高，电晕加强，电晕电流也随之加大。表 5-10 所列为在导引电阻 $R = 200\text{M}\Omega$ ，针环距 $d = 0$ ，风量 $F = 30\text{m}^3/\text{h}$ ，孔径 $\phi = 1.5\text{mm}$ 条件下得出的数据。在电晕电流增大时，被引出的离子流也增加，但引出效率却明显降低，可以看出在离子流引出总量和引出效率之间存在着一个最佳电压值，这个最佳值与气流速度、针环距以及导引电阻的大小都有密切关系。在选取这个数值时，首先要考虑静电消除的效果，在保证效果的前提下，应选取较大效率的条件。对于消除静电来说，过大的离子流是不必要的，有时甚至是有害的。

表 5-10 针尖电压的影响

电压/kV	$I_0/\mu\text{A}$	$I_1/\mu\text{A}$	$I_2/\mu\text{A}$	I_2/I_0
2.5	5.0	3.5	0.938	0.188
5.01	2.0	9.5	1.88	0.157
7.5	22.5	18.5	3.12	0.137
10.0	28.5	24.5	3.43	0.120
12.5	40.0	33.8	4.06	0.102

2) 导引电阻 R 的影响: 不同大小的导引电阻 R , 可以在放电针附近形成不同强度的电场。当针压一定时, 导引电阻越小, 形成的电场越强, 因而电晕也越强。虽然这样可以产生较多的空气离子, 但由于导引环的低电压, 使得较多的离子被吸引而经 R 和检流计 G_1 入地, 离子流引出效率反而降低。增加 R 的数值, 可以提高导引环的电位, 这对于刚刚离开电晕区的空气离子有排斥作用。当总电晕电流一定时, R 越大, 这种向外的排斥力越大, 所以可以将更多的离子引出。表 5-11 所列为一组实测的数据, 实验条件是风量为 $7\text{m}^3/\text{h}$ 、导引环孔径为 3mm 、针环距为 0 , 改变电阻 R 同时用电压来维持恒定的电晕电流 I_0 为 $25\mu\text{A}$ 。可以看出, 单位时间内引出的离子流总量 I_2 随导引电阻 R 的增加而加大, 引出效率 I_2/I_0 也随之提高。因此, 用较大的导引电阻, 可以增加电晕电流的可利用部分, 但是为了同样维持 $25\mu\text{A}$ 的电晕电流, 所需要的电压值也相应增高。考虑到生产现场和装置本身的安全性, 使用过高的电位也许是不适当的。当然导引电阻也不宜过小, 否则除可引出的离子流总量 I_2 和引出效率 I_2/I_0 都会降低外, 在较低的电压下就有被击穿的可能, 击穿电流很大, 这也同样带来了不安全因素, 所以在选

择导引电阻的大小时, 要根据具体情况加以权衡。

表 5-11 导引电阻 R 的影响

$R/\text{M}\Omega$	U/kV	$I_0/\mu\text{A}$	$I_1/\mu\text{A}$	$I_2/\mu\text{A}$	I_2/I_0
0	50	25	23.7	0.93	0.037
10	—	25	34.8	1.70	0.068
100	70	25	22.0	4.03	0.161
200	85	25	21.6	4.65	0.186
∞	20.0	25	0	15.1	0.604

3) 针环距的影响: 针环距是指针尖与导引环外侧的距离 d (见图 5-30)。

表 5-12

所列列为在风量 $F = 2\text{m}^3/\text{h}$ 、

导引电阻 $R = 200\text{M}\Omega$ 、导

引环孔径 $\phi = 3\text{mm}$ 、针尖

电压 $U = 7.5\text{kV}$ 的条件下

得出的数据。可以看出,

针环距 d 在 1mm 的范围

内变化时, 对于总电晕电

流的影响不大, 但却影响

了离子流引出总量和引出

效率, 两者都随 d 的

增加而减小, 这是由于

针环距 d 的大小就是被

空气吹出的离子在电场中所走路程的长短, 也就是离子在这一

电场中停留时间的长短, 停留时间越长, 离子被导引环吸收

的可能性就越大。因此, 随着 d 的加大, 离子流引出总量

和引出效率的降低是必然的。在可能的情况下, 应尽量缩短

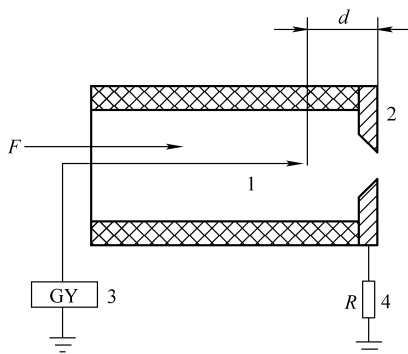


图 5-30 针环距

1—放电针 2—导引环 3—高压电源
4—导引电阻

针环距。但是要注意，当导引环孔径较小时，过小的针环距容易导致针环之间的火花放电，这种现象在某些场合下是不允许的。

表 5-12 针环距的影响

d/mm	$I_0/\mu\text{A}$	$I_1/\mu\text{A}$	$I_2/\mu\text{A}$	I_2/I_0
0	22.0	18.0	3.73	0.170
0.25	22.5	18.5	3.63	0.160
0.50	23.0	19.0	3.16	0.137
0.75	22.0	18.5	2.64	0.120
1.00	22.0	18.5	2.55	0.116

4) 气流量和导引环孔径的影响：气流量和导引环孔径反映了气流速度这一参量。气流速度等于零时，电晕区所产生的离子都将被导引环所吸收，但当有气体从小孔流出时，有一部分离子在还没有来得及被吸收之前即被吹出。气流速度越快，引出的离子流就越多，引出效率也越高。表 5-13 和表 5-14 所列是在两种不同导引环孔径和多种气流量条件下做出的结果，其他的条件为：针尖电压 $U = 15\text{kV}$ ，针环距 $d = 0$ ，导引电阻 $R = 200\text{M}\Omega$ 。把两表数据进行比较可以看出，当气流量相同时，孔径减小，相当于气流速度的增加，所以无论是离子流引出总量还是引出效率都相应增加。同理，当孔径相同时，气流量的增加，也导致离子流引出总量和引出效率的增加。

表 5-13 $\phi = 1.5\text{mm}$ 时气流量的影响

气流量/ (m^3/h)	$I_0/\mu\text{A}$	$I_1/\mu\text{A}$	$I_2/\mu\text{A}$	I_2/I_0
2.0	59	38.0	12.8	0.207
2.5	58	37.8	12.5	0.215

(续)

气流量/(m ³ /h)	$I_0/\mu\text{A}$	$I_1/\mu\text{A}$	$I_2/\mu\text{A}$	I_2/I_0
3.0	58	37.5	12.8	0.221
3.5	58	37.0	13.4	0.231
4.0	58	36.5	14.1	0.243
4.5	58	35.5	14.7	0.254
5.0	58	34.5	15.9	0.275
5.5	58	34.0	17.2	0.296

表 5-14 $\phi=3.1\text{mm}$ 时气流量的影响

气流量/(m ³ /h)	$I_0/\mu\text{A}$	$I_1/\mu\text{A}$	$I_2/\mu\text{A}$	I_2/I_0
2.0	50.5	38.5	6.55	0.130
2.5	51.0	38.0	7.33	0.143
3.0	52.0	38.0	8.74	0.168
3.5	52.5	38.0	9.20	0.175
4.0	51.5	37.0	9.35	0.181
4.5	52.0	37.0	10.0	0.192
5.0	52.5	36.0	10.6	0.202
5.5	53.0	36.0	11.2	0.212
6.0	53.0	36.0	12.5	0.236

(2) 离子流式静电中和器(枪)的结构和使用

离子流式静电中和器(枪)的框图和结构简图如图 5-31 所示。离子流式静电中和器(枪)的工作过程可用框图来加以说明。压缩空气径自送往离子流喷头,压力足够时,压力检测器给出信号,使时间继电器延时动作,并由时间继电器自动启动电源开关;低压电源经电源开关给高压电源供电,高压电源工作后即带动离子流喷头工作。当发生故障或

压力不足时，压力检测器发出相反的信号，时间继电器释放，电源开关断开，离子流喷头停止工作。这样的工作过程保证了消除器只有在对外保持正压的情况下才能工作。

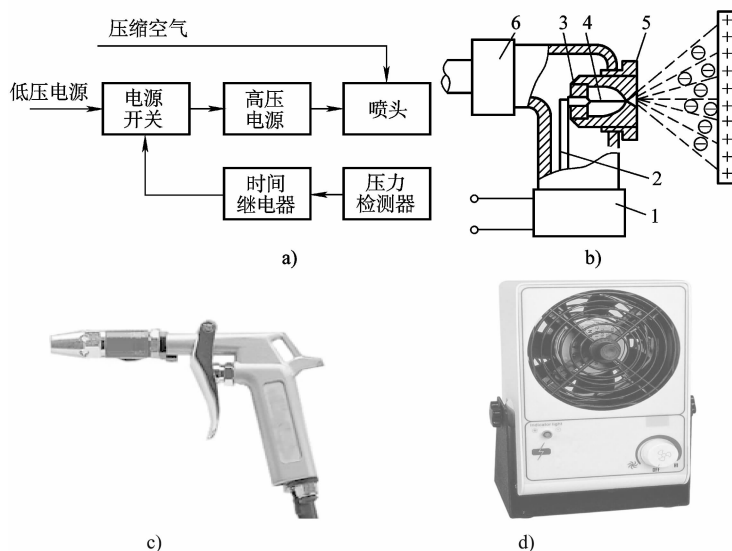


图 5-31 离子流式静电中和器

a) 框图 b) 结构简图 c) 离子喷枪 d) 离子风机

1—高压电源 2—高压导杆 3—绝缘 4—放电针

5—导引环 6—压力检测器

离子流式静电消除器使用的电源如果没有防爆要求，一般普通的低压直流稳压电源就可以使用。如果用于防爆场合，对于电源的要求就非常严格了，需采用防爆措施。

5. 防爆型高压电源式静电中和器

防爆型高压电源式静电中和器就是离子流式静电中和器附加上防爆手段制成的。这种静电中和器可以用于航天运载

器、石化工业等有爆炸危险的场所。目前生产的种类较多,结构比较复杂,一般由防爆高压电源和电晕放电器、电极火花监测器、输出电压监视器、压缩空气压力监测器、异常情况报警器等组成。图 5-32 所示是一种有代表性的防爆型静电中和器的原理框图。

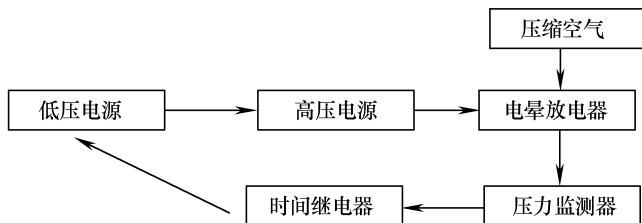


图 5-32 防爆型静电中和器工作原理框图

防爆型静电中和器的工作原理是,压缩空气直接送至电晕放电器,当压力足够时,压力监测器给出信号,使时间继电器延时动作,并由时间继电器自动启动低压电源开关,低压电源向高压电源供电,高压电源工作后即带动电晕放电器工作。反之,当压力不足或发生故障时,压力监测器发出停机信号,使时间继电器释放,电源开关断开,电晕放电器停止工作。这样的过程就保证了静电中和器只在压缩空气正常压力的情况下才能工作,而正常压力的气流可使环境中的爆炸性混合物不与针尖附近的电晕层和高压电源相接触,并且正常压力的空气流的吹入,还能减低放电针尖附近的爆炸性混合物的浓度,从而保证了静电中和器具有防爆功能。

有些防爆类型的离子流式静电中和器,为了安全可靠还要在上述装置基础上采取如下措施:

1) 在延时继电器与低压电源开关之间加设安全栅,防止意外电波干扰。

2) 在电晕放电器和高压电源之间串接一高限值的限流电阻 ($200\text{M}\Omega$), 以防止放电针与导引环发生短路形成火花放电。

3) 对高压电源和低压电源都采取防爆处理措施, 如将电源放入防爆箱内或充以非燃爆性气体等。

6. 高频高压静电中和器

高频高压静电中和器的高频高压电源是用振荡线路配合一次绕组构成的。图 5-33 所示为一种高频高压电源的线路。图中两只晶体管与变压器的一次绕组构成振荡线路。工作时, 两只晶体管轮流导通, 变压器一次绕组中出现高频电流, 二次绕组则输出高频电压。通过电阻 R_1 的调节, 可以调整变压器的输出电压。这种高频电压电源的输出电压可调整为 10kV 左右, 频率可调整为 3kHz 左右, 输出电流约为 2mA , 输出功率约为 20W 。在人造丝帘布压延过程中, 运用这种中和器可将帘布上 10kV 左右的静电电压消除至零。

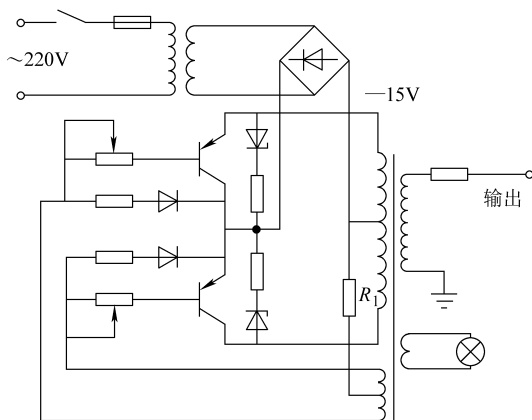


图 5-33 高频高压电源线路

高频高压静电中和器由于频率很高,通过电容的耦合作用很强,所以能够比较方便地配合电容耦合型消电电极,在放电针上的短路电流很小,防爆性能较好,使用范围较广。

高频高压静电中和器的输出电压可控制在 $3 \sim 10\text{kV}$ 的范围内,频率可控制在数千至数十千赫范围内。高频高压静电中和器的消电电极与带电体之间的距离一般为 $25 \sim 35\text{mm}$ 。

7. 放射线式静电中和器

放射线式静电中和器也称为同位素静电中和器,它是利用放射性同位素发出的射线使空气电离,产生正负离子对,中和带电体上的静电。放射性同位素种类较多,放出的射线有 α 、 β 、 γ 等。不同的放射性同位素,有不同的半衰期(放射性强度减弱到初值的一半所用的时间),短的只有百分之几秒,长的有 10^{10} 年以上。如静电中和器经常使用的天然放射性同位素钋(Po)-210 和镭(Ra)-226 的半衰期分别为 138.38 年和 1600 年,它们主要发出 α 射线,但也有 γ 射线。 α 射线的电离能力很强,一个 α 粒子在空气中每厘米长度上能产生 10000 个离子对,但是它穿透物质的能力不强,在空气中只能穿透十几厘米,一层普通写字纸即可吸收它。 β 射线的电离能力和穿透能力为中等, γ 射线的空气电离能力很弱(在空气中每厘米长度上只能产生几对离子),穿透能力很强,照射剂量超过人体允许剂量(每天 8h 工作条件下,人体最高照射量为 50mR)时,对人有伤害。由上所述,静电中和器中放射源应选择电离能力强、穿透能力差的放射源。

放射线式静电中和器是由放射源、屏蔽框和保护网等部分组成,其结构如图 5-34 所示。放射源一般是厚度为 $0.3 \sim 0.5\text{mm}$ 的片状元件,用紧固件固定在屏蔽框的底部;屏蔽框应有足够的厚度,以防止射线危害;为了防止操作者不慎

直接接触及放射源，中和器前面装有保护网。针对带电体的表面形状不同，可将放射线式静电中和器设计成条型、环型、盘型和送风型等。钋-210 放射源活性区的厚度不超过 1mm、宽度为 10mm。条型静电中和器适宜于消除幅面宽的平整材料，如塑料薄膜、橡胶板材、纸张、化纤织物等。为了消除圆柱状材料的表面静电，放射线式静电中和器还可以制成环型或其他形式的。放射线式静电中和器也可制成送风型结构的形式，构成离子风防爆型静电中和器。

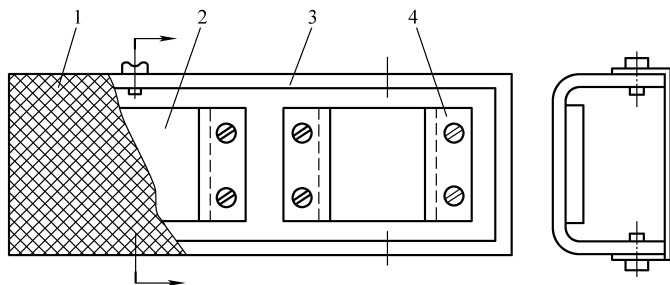


图 5-34 放射线式静电中和器

1—保护网 2—放射源 3—屏蔽框 4—紧固件

由于放射线式静电中和器是利用射线电离空气形成正、负离子对来消除静电，因此距带电体越近，消电效能越好，一般取 10 ~ 20mm。根据工艺要求，消除器至带电体之间的距离可以适当增大。为了保证足够的消电效果，采用 α 射线者不宜超过 4 ~ 5cm，采用 β 射线者不宜超过 40 ~ 60cm。

使用放射线式静电中和器一定要控制放射线对人体的伤害和对产品的污染。在每天 8h 的工作时间中，人的最高允许照射量为 50mR。为此，放射线式静电中和器的放射性同位素元件应有铅制屏蔽装置或其他屏蔽装置，使中和器只能

在其特定方向上使空气电离，发挥中和作用。放射线式静电中和器应有坚固的外壳，防止机械损伤。

放射线式静电中和器结构简单，不要求外接电源，而且工作时不产生火花，适用于有火灾和爆炸危险的场所。放射线式静电中和器的离子电流较小，当电场强度为 2kV/cm 时，若中和器长度为 1m ，则离子电流一般只有 $2 \sim 12\mu\text{A}$ ，可见其消电效果较差。

8. 静电中和器的正确安装

静电中和器的安装位置是非常重要的，安装不妥，会降低消电效果。所以应根据现场情况，正确放置静电中和器。图 5-35 是静电中和器设置位置的实例，从图中可以看出，在安装静电中和器时要考虑下列问题：

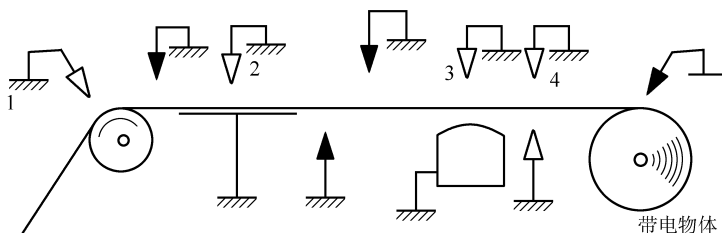


图 5-35 静电中和器设置位置的实例

1—静电产生源 2—背面接地体 3—邻近接地体 4—其他静电中和器

△—不理想的位置 ▼—理想的位置

- 1) 静电中和器应尽量安装在最高电位的位置上。
- 2) 静电中和器不应安装在相对湿度 80% 以上或周围环境温度超过 150°C 的地方，当空气内存在易于污染静电除尘器的杂质时，也不宜安装静电中和器。
- 3) 离开静电产生源的距离最低应大于设置距离，一般为离开静电产生源 $5 \sim 20\text{cm}$ 以上，如图 5-36 所示。

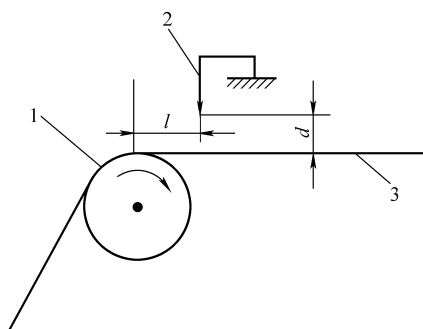


图 5-36 静电中和器的设置位置

d —设置距离 $l \leq$ 安装位置的距离

1—静电产生源 2—静电中和器 3—带电物体

5.3 电子工业特殊生产环境内静电灾害的控制及消除

5.3.1 生产环境内的静电防护要求

●要点提示:

耗散材料装地坪，泄放静电无积累。
传输线应不起尘，任意表面无电流。
工作台椅散静电，金属材料不安全。
其他用品防静电，耗散材料做齐全。

●实用技术:

1. 地坪

当把静电耗散类材料应用于电子工业中的防静电地坪中

时，人体和防静电装备中积累的静电就可以泄放掉了。一般说来，防静电地坪表面与地线接地极之间的静电泄漏电阻值应在 $10^5 \sim 10^9 \Omega$ 之间，地坪中还要设置接地网络（如钢筋或铜箔），对于有特殊要求的电子系统机房，静电泄漏电阻值还应控制在 $10^{10} \Omega$ 以下。各类防静电地板如图 5-37 ~ 图 5-39 所示。

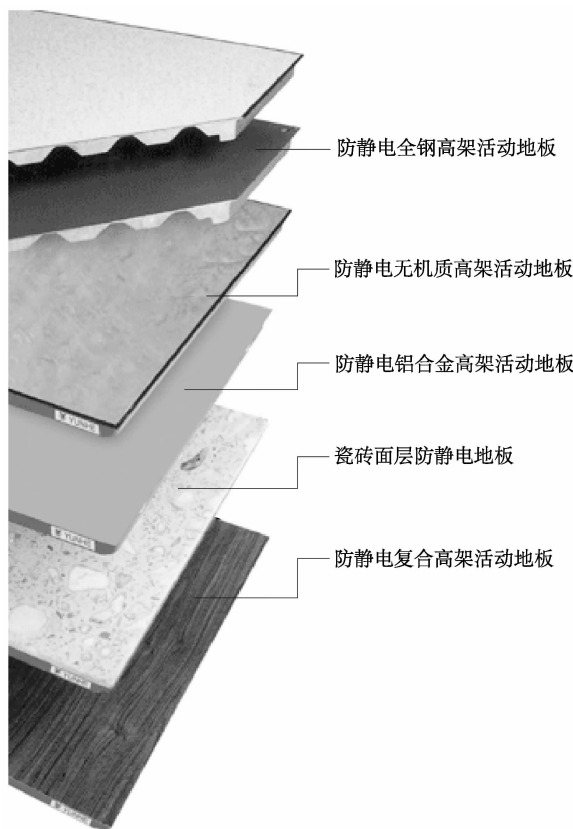


图 5-37 各类防静电地板

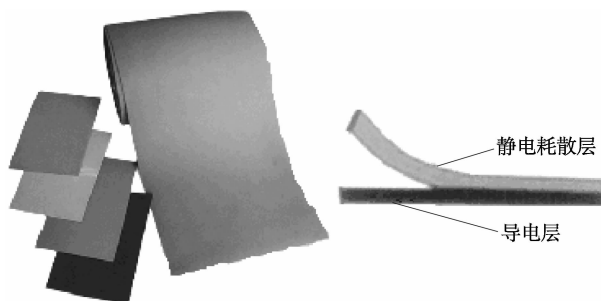


图 5-38 防静电台垫



图 5-39 防静电活动地板

对于计算机房、程控机房等地方，可以应用有高架活动的地板类防静电地坪，这类地坪的材质有钢质、铝质、木质、无机矿物质等，该类地板各项技术指标应满足 SJ/T10796—2001《防静电活动地板通用规范》中的要求。

对于用来生产电子设备的厂房，一般可以安装 PVC 地板砖类地坪，各项技术指标应满足 SJ/T11236—2001《防静电贴面板通用规范》中的要求。

对于那些要求非常洁净的厂房，可以使用环氧树脂类防静电地坪，这类地坪的各项技术指标应满足 SJ/T11294—

2003《防静电地坪涂料通用规范》中的要求。

而水泥类（水磨石、高耐磨水泥自流平地面等）地坪，本身具有一定的导电性。在相对湿度 30% 以上的环境中使用时，可以不用添加任何导电材料，就能满足防静电要求。当然在相对湿度小于 25% 的情况下，就应该进行防静电处理。

对于环境洁净度极高的屏蔽室，就要使用有表面处理的高压铸铝地板、不锈钢板等金属类地坪。

瓷砖类地坪具有不燃、耐老化、耐磨、耐水浸泡等优点，可以应用于电子设备生产厂房、洁净厂房等。

2. 天花板、墙壁

在电子工业中某些有特殊要求的防静电洁净车间中，天花板和墙壁最好使用不起尘、环保的静电耗散材料。对于采用金属材料的屏蔽机房环境，电气设备设计和设置应考虑人身安全。

天花板、墙壁应采用接地措施，静电泄漏电阻应小于 $10^{10}\Omega$ 。

3. 传输线

在电子设备生产运转过程中，使用的传输线应为静电耗散型，要求其具有一定的机械强度外，还应不起尘和耐磨。带电体应与接地的传输线金属轮轴紧密接触，用于泄漏静电放电敏感器件与传输线相对运动摩擦时产生的静电。传输线任意表面对防静电地线之间的静电泄漏电阻应在 $10^5 \sim 10^9\Omega$ 。

4. 防静电工作台、防静电工作椅

防静电工作台（见图 5-40）面应采用静电耗散材料，不宜使用金属材料（可能感应放电）。台面可以利用一只 $1M\Omega/0.25W$ 安全电阻与防静电地线相连。



图 5-40 防静电工作台

防静电工作椅（见图 5-41）要使用导电金属链（导电轮）与防静电地坪接触，用于泄漏静电。其静电泄漏电阻不大于 $10^9 \Omega$ 方可使用。



图 5-41 防静电工作椅

5. 刷子、工位器架

刷子、螺钉旋具、镊子、分路棒等操作工具（见图 5-42），以及工位器架（见图 5-43）最好用静电耗散材料制作，不宜直接使用金属材料制作工具。如果必须使用金属材料制作工具时，为防止静电放电敏感器件带电时对金属器具发生放电或金属器具接地不良感应带电，应考虑使用离子流式静电中和器。



图 5-42 防静电工具

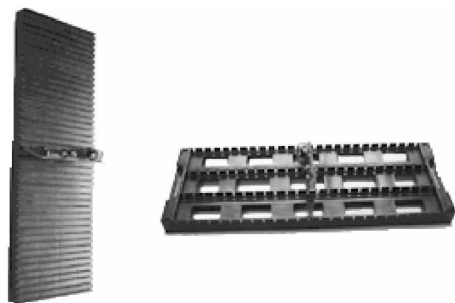


图 5-43 防静电工位器架

刷子、工位器架外表面端点之间的电阻应小于 $10^9 \Omega$ 。另外，静电 90% 的衰减（ $\pm 1000 \sim \pm 100V$ ）时间不大于 2s 方可使用。

6. 防静电运转车

防静电运转车（见图 5-44）为金属或其他结构。车轮用导电金属（或橡胶）制成，而且要与防静电地坪有良好的接触。放置的运转车不宜与其金属结构体直接接触，应用防静电包装或静电耗散材料制作的垫子将其隔离。放置在运转车上的静电放电敏感器件应使用防静电包装。另外，运转车的静电泄漏电阻应小于 $10^9 \Omega$ 。

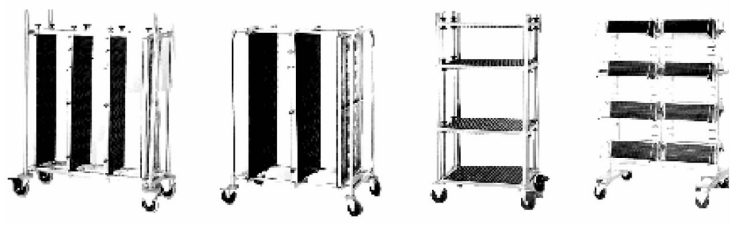


图 5-44 防静电运转车

7. 窗帘、粘尘垫（抹布）

窗帘、粘尘垫（抹布）的点对点电阻应在 $10^5 \sim 10^{10} \Omega$ 范围内、静电衰减（ $\pm 1000 \sim \pm 100V$ ）时间不大于 2s 才能使用。

8. 焊接设备（烙铁）

焊接设备的焊头与接地极之间的电阻应小于 2Ω 。焊头发生氧化时的对地电阻不应大于 20Ω 。对于 I 类静电放电敏感器件的焊接应使用专用防静电烙铁（或断电焊接）。不允许使用焊头不接地的“二芯”烙铁。电线的漏电和其他类

型的感应带电都会对静电放电敏感器件造成损害。

9. 包装类（盒、箱、发泡垫、袋、托盘等）

防静电包装材料（见图 5-45 ~ 图 5-49）大都是用防静电改性的高分子材料制作，如聚乙烯（PE）、ABS、玻璃钢、聚丙烯（PC）等。防静电包装除了满足一般包装耐老化、防潮、耐撕裂、耐低温、抗冲击等功能外，还应满足下列静电防护要求。



图 5-45 防静电包装袋

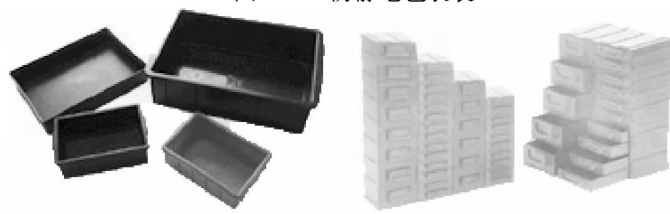


图 5-46 防静电元件盒



图 5-47 防静电周转箱



图 5-48 防静电托盘

1) 静电耗散类包装内表面电阻率应大于 $10^6 \Omega$ ，但小于 $10^{11} \Omega$ （美国标准 ANSI/ESDS20.20），外表面电阻率应小于 $10^{12} \Omega$ 。静电 90% 的衰减（ $\pm 1000 \sim \pm 100V$ ）时间不大于 2s（IEC61340-5-1:2007）。

2) 包装材料的使用应无腐蚀性和毒性，并且不起尘。当使用多重包装时，内层包装应为起电低的静电耗散材料，

不能用金属导电或静电屏蔽类材料，因其在静电场中可能产生静电感应及放电。

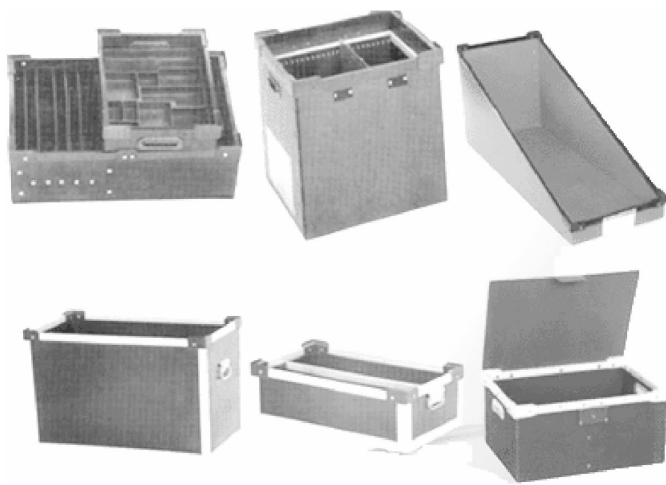


图 5-49 防静电中空板箱

3) 静电屏蔽包装的使用应是全封闭的（法拉第筒原理），才能取得效果。静电耗散材料包装的自身材质应为同一种，导电均匀，杂质含量少，无破损，表面光滑，以减少摩擦时的带电量。有些防静电包装是靠外涂敷，随着长期使用，其表面磨损或防静电涂层剥落，其防静电性能会变差。

4) 静电屏蔽类包装的静电屏蔽性及其他相关性能。除具有静电耗散包装的性能外，当包装外施加 1000V 放电试

验电压，并串接 $1.5\text{k}\Omega$ 放电回路电阻时，包装内耦合静电电压应小于 30V 或静电能量小于 50nJ 。

5) 防静电工作区以外区域的包装组合使用原则如下：

①内包装采用起电低的静电耗散类；中间包装采用静电屏蔽类；外包装采用常规性能的普通包装。

②内包装采用起电低的静电耗散与静电屏蔽复合类；外包装采用常规性能的普通包装。

6) 防静电工作区所用的包装组合方式。不具备防静电性能的包装不允许在防静电工作区内使用与放置。

①起电低的静电耗散类包装：防潮、减振静电耗散类外包装（必要时使用）。

②起电低的静电耗散与静电屏蔽复合类：防潮、减振静电耗散类外包装（必要时使用）。

③起电低的静电耗散包装和静电屏蔽包装双重组合。

7) 包装使用注意事项如下：

①对静电放电敏感器件的操作及包装，必须在防静电工作区内进行。

②所有的防静电包装应有静电敏感警示标识。

③包装操作人员应接受过防静电技能培训。

④可重复使用的包装应定期测验防静电性能和外观，符合要求方可再使用。

⑤包装封口时，不允许使用普通胶带粘接。

⑥在防静电工作区外不允许打开外包装，使静电放电敏感器件暴露在外面。

⑦包装件的贮存环境的相对湿度一般不应低于 30% 。

⑧静电放电敏感器件所用包装必须是防静电包装，不能用普通包装。

⑨已经拆去包装的电子设备,在没有使用前,应将其输入/输出端等引脚用短路棒连接或插在防静电泡沫塑料上以形成等电位。

⑩在运输和贮存过程中应避免跌落、摩擦、撞击,远离强电磁、强电环境。

5.3.2 操作人员的静电防范要求

●要点提示:

工作区内定制度,培训考核要完善。

●实用技术:

1. 管理要求

在防静电工作区内工作的操作人员除要使用合格的静电防护用品外,还应形成合理的管理制度:

1) 制订和贯彻执行静电放电防护的标准,积极推行有关静电防护的国内外先进标准。

2) 对设计文件、工艺文件进行标准化审查时,涉及的防静电条款应重点予以审查。

3) 静电防护的基本文件及其他相关配套文件中的有关条款都是静电防护作业和管理技术法规,不但要建立健全,还要符合下列要求:

①工艺文件目录及其他相关文件中,在有关静电防护的文件和防静电条款的明显位置,应标注防静电符号,以提醒使用人员注意。

②结合新建、扩建、技术改造或技术措施,应一次性完成静电防护的整套设施建设,涉及的施工安装图必须明确技术要求,竣工时必须作为工程验收的条件之一。

③工艺文件中涉及防静电的检查、测试条款时，应明确仪器、设备的防静电测试要求，有时也需要指定仪器、设备。

④静电防护的生产技术文件，包括对所应用的静电防护器材使用的检查和测试文件。

2. 企业职工的培训与考核

凡参加防静电培训的人员，都必须经考核合格才能上岗。静电防护的培训内容，根据培训对象的不同而有所区别，企业对职工的静电防护知识培训可以参考 5-15 中的内容。

表 5-15 企业对防静电工作区内的职工培训内容

培训人员	培 训 大 纲							
	静电原理、静电危害	器件损害与失效分析	静电防护途径与办法	防静电器材分类与性能	静电工程设计与技术	环境分析技术	接地技术知识	防静电守则
工艺人员	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
设计人员	✓	✓	✓		✓			✓
管理人员	✓							✓
采购、物管人员		✓		✓				✓
操作、检验人员	✓	✓		✓				✓
现场安装维修人员	✓			✓		✓	✓	✓
其他人员	✓							✓

5.4 石化工业特殊环境内静电灾害的控制及消除

5.4.1 油罐区的静电防范要求

●要点提示:

控制流速消静电,减小混合无危险。

避免杂油乱相混,加强管理是关键。

●实用技术:

为了防止油罐区因静电而引发的火灾与爆炸事故,必须对静电进行控制或消除。

我们知道,油品内的杂质是起电的重要因素,然而使油品达到高精度是困难的,同时也是不经济的。因此,对于防止油品静电灾害来说,不是完全消除静电电荷的产生而是控制各项指标。例如,产生的电荷量或电荷密度,积聚电荷产生的电位或场强的大小,放电的形式与能量,爆炸混合气体的浓度等。控制它们不致达到危险的程度,从而不致发生灾害。

1. 控制流速

表5-16中列出了油品在不同管径内流动时管径与流速的关系,由于静电的危险程度受许多因素的影响,所以表中的数字并不是绝对的。

如果有长期运行经验证明,也可以提高速度。但是,在此要注意防止因高速形成喷雾的状态。此外,对乙醚输送在管径不大于12mm以及对二硫化碳输送管径不大于24mm

时，两者的流速均不宜超过 $1 \sim 1.5 \text{ m/s}$ 。如管径增加，则流速要降低。其他如脂类、酮类和醇类等液体流速允许达到 10 m/s 。

表 5-16 不同管径允许的最大流速

管径/in	最大流速/(m/s)	管径/in	最大流速/(m/s)
10	8	200	1.8
25	4.9	400	1.3
50	3.5	600	1.0
100	2.5		

注：1 in = 0.0254 m。

2. 控制油面空间的混合气体

为防止爆炸混合气体的形成，在不少场所采用正压通风的办法。然而对于油面空间就不好使用了，往往用充惰性气体的办法，即在充油容器油面以上的空间可能形成爆炸性混合气体时，充以惰性气体。可以充满全部空间，也可以充局部。按其使用方法，可分为密封隔离和置换稀释两类。前者是用以隔离氧气以及抑制混合性气体的形成，后者是降低混合气体的浓度，以控制它在爆炸浓度范围以外。一般要求在空间内含氧体积不超过 8%，这时即使有火源也因氧气不足而不会被引燃。

3. 控制加油方式

铁路槽车加油分大鹤管和小鹤管两种。为了减少油流进入槽车新产生的静电荷，应使鹤管伸入到槽车底部，当采用喷洒装油时，可在鹤管端部加装不同形式的分流头。

4. 避免水、空气与油品以及不同油品的相混

当油中含水、空气与油品相混并通入压缩空气时，静电的发生量将增大。实验证明，油中含水 5%，会使起电效应增大 10 ~ 50 倍。油品通风调和是十分危险的。某厂一个

5000m³ 油罐，罐内先已装有 40t 航空煤油，之后装柴油并进风调和，在进风只 1min 时便发生了爆炸。因此，油品调和时必须要有相应的安全措施。

5. 加强组织管理

为控制和消除静电灾害必须加强组织管理工作：

- 1) 要使操作人员具有油品静电基本知识。
- 2) 要有完整的管理规程和操作规程，根据我国目前情况，应着手确立如下的组织管理措施：

①建立静电安全管理体系：

- a. 编制油品防静电设计准则；
- b. 建立油品静电安全操作规范；
- c. 建立测试方法标准；
- d. 建立油品静电安全标准；
- e. 建立油品静电教育课程；
- f. 建立用于检测、取样及衣、鞋等器具标准；
- g. 建立设备接地及消电器设置等标准。

②测定现场安全状况：

- a. 测定现场环境中可燃气体的浓度分布；
- b. 测定静电危险源情况；
- c. 测定接地电阻值。

③加强静电安全的宣传教育：

- a. 加强静电研究，包括安全器具和防静电衣服及鞋的研究；
 - b. 分析事故，进行通报和统计；
 - c. 举办灾害预防展览；
 - d. 举办技术讲座，普及防静电知识。
- ### 6. 油罐的接地与跨接

对于一般金属拱顶罐通过外壁良好接地即可；对于浮顶罐或内浮顶罐，除外壁良好接地外，尚需将浮顶与罐体、挡雨板与灌顶、活动走梯与灌顶进行跨接。跨接应使用截面积不小于 25mm^2 的钢绞线。为保证接地安全可靠，油罐原则上要求在多个点进行接地。其接地点应设两处以上，接地点应沿设备外围均匀布置，其间距不应大于 30m 。为消除人体静电，在扶梯进口处，应设置接地金属棒，或在已接地的金属栏杆上留出 1m 长的裸露金属面。

7. 安装静电中和器

油管用静电中和器是 20 世纪 60 年代由美国人发明的，近几十年来在许多国家获得了应用。

(1) 油管用静电中和器的结构

如图 5-50 所示，中和器主要由三部分组成：接地钢管及法兰部分，内部绝缘管，电离针及镶针螺栓等。

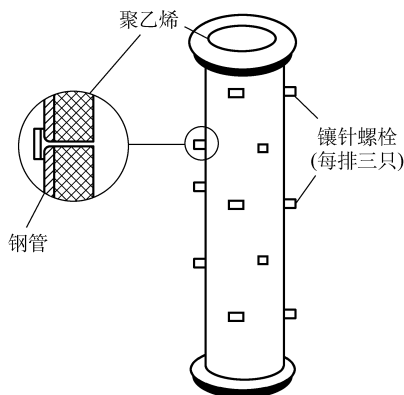


图 5-50 油管用感应式静电中和器的结构

为了均匀地在油内产生相反的电荷，放电针沿长度方向

交错布置4或5排，每排沿圆周均匀布置3根或4根针。为了方便检查和维修，放电针用螺栓做成可拆卸式。

放电针要选用耐高温、耐磨的钨合金等金属材料制作。针体的直径约为1~1.5mm，其末端经处理成尖形，长度一般突出管内壁10mm左右为宜。绝缘管系用高绝缘、低介电常数的耐油塑料（如聚乙烯、聚四氟乙烯等）制作。它可以做成整体的，也可以分层衬在钢管内壁，而其厚度和长度依据试验确定。表5-17所列为美国石油学会（API）推荐的尺寸和规格。

表 5-17 API 推荐的尺寸和规格

钢管直径 /in	管长/ft	电介质管内径 /in	塑料管壁厚 /in	最大流量 /(USgal/min)
8	4	4	2	600
10	6	6	2	1200
10	3	6	2	1200
20	6	12	3 ¹ / ₂	5000

注：lin = 0.0254m，1ft = 0.3048m，1USgal = 3.78541dm³。

(2) 消电原理

油管用感应式静电中和器的工作原理如图5-51所示。

当带电油品注入中和器绝缘管后，对地电容变小，使内部电位增高，这样在介电管内形成一个高压段。在放电针端部，由于具有高电场使其

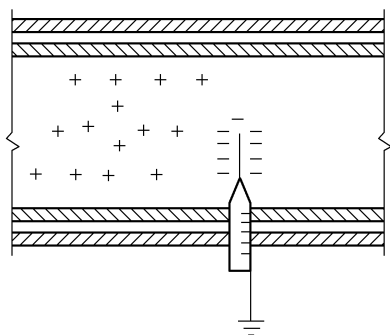


图 5-51 油管用感应式静电中和器的工作原理

因感应而堆积的电荷被拉入油中或因高场强使油品部分电离而发生中和作用，达到消除部分电荷的效果。

(3) 使用情况

1) 图 5-52 及图 5-53 所示为美国 4in (1in = 0.0254m)-4in 及 6in-6in 的中和器试验结果。

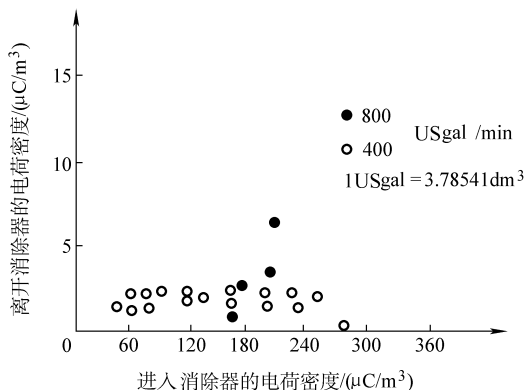


图 5-52 4in-4in 中和器试验结果

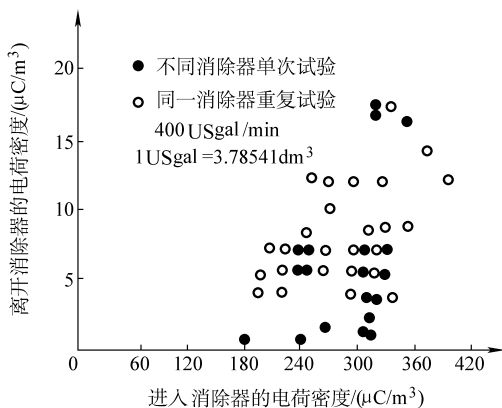


图 5-53 6in-6in 中和器试验结果

2) 表 5-18 所列为 150 个 6in-3ft (1ft = 0.3048m) 中和器在几年内试验统计的结果, 它可将每立方米几百微库的电荷密度减到 $20\mu\text{C}/\text{m}^3$ 以下。

表 5-18 6in-3ft 中和器进出口电荷密度比较

位置	电荷密度/ $(\mu\text{C}/\text{m}^3)$			
	平均	标准误差	最大值	最小值
出口	166	34	258	103
进口	6.8	4	15	0

3) 表 5-19 所列为 YO_{401} 加油车静电中和器前后管中心电压的对比。

表 5-19 YO_{401} 加油车中和器前后管中心电压的对比

(单位: V)

项目	流量/ (L/min)				
	1620	1390	1260	770	410
中和器前	4000	3500	3800	2700	3000
中和器后	0	-50	130	-35	-450

8. 使用静电张弛器 (缓和器)

(1) 工作原理

带电的油品在进入油罐之前先进入该装置内一段时间, 使大部分电荷在这段时间内趋向管壁, 通过管壁接线装置中和, 从而减小进入油罐的电荷。

(2) 张弛器的使用

1) 使用张弛器时要尽量使器内各处都充满油, 并尽可能把它设置在系统的末端, 并保证接地良好。为了确保油品质量, 还要顾及维修和清洗的方便。

2) 对于通过过滤器或短管线以及绝缘材料管线（如胶管、玻璃钢管等）进入容器的油品，使用张弛器是合适的。

9. 抗静电添加剂的选择及使用

(1) 选择抗静电添加剂时要满足以下要求

- 1) 对皮肤无刺激性、无毒性；
- 2) 燃烧后灰分少，不产生有害气体；
- 3) 加入微量的添加剂就能显著地提高燃料的电导率，并且不影响燃料的其他理化指标及使用性能；
- 4) 低温下油溶性良好；
- 5) 可溶于水，但不乳化，不因水存在而发生水解现象。溶于水中之后，不被排除到系统之外；
- 6) 和其他添加剂共存时性能无变化；
- 7) 长期稳定。

(2) 使用抗静电添加剂的方法

加剂时，通常先将添加剂以数倍燃料稀释，调配成母液，然后根据调和罐溶剂，再进行充分循环。停泵 30min 后用电导率仪表测定，当各部电导率值相同时，就可以认为已经调和均匀。添加剂可在炼油厂加入，也可以在使用地点加入。方法有以下几种：

- 1) 在混油时，通过比例泵加入；
- 2) 在循环泵入口处，经过添加剂储罐吸入已经计量好的添加剂；
- 3) 在混油管线的孔板处，通过恒定差压流量控制器按比例加入；
- 4) 在高位罐中的添加剂通过流量计向基础油中混对。

(3) 使用注意事项

由于添加剂是易燃品，在使用中要注意以下事项：

1) 添加剂应贮存于铁桶中, 开启桶盖时禁止利用可能产生火花的工具;

2) 添加剂储罐应存放在库房里, 周围严禁烟火。要避免和强氧化剂、酸类等同库存放;

3) 搬运储罐时要轻拿轻放, 禁止振动、撞击、摩擦、重压和倾倒;

4) 使用时要避免接触皮肤和衣服, 严防溅入眼睛中。一旦与皮肤接触要用水和肥皂清洗, 若溅入眼内要用大量水冲洗, 并立即就医治疗;

5) 添加剂着火时, 可用砂、土或二氧化碳灭火器扑灭, 不能用水;

6) 注意定期检查油品电导率。

5.4.2 油罐车的静电防范措施

●要点提示:

顶部注装起静电, 接地可靠最关键。

不忘压速要控制, 严防罐内浮物乱。

●实用技术:

1. 汽车油罐车的静电防范措施

(1) 尽量避免顶部喷溅注装方式

上部注装油料容易形成可燃混合气体, 也易于起电, 应尽量避免。从实践经验看, 在目前尚不能改装的地方, 应采用将加油管伸到 $1/2$ 罐高以下的暗流加油方式, 且流量最好不超过 $1000\text{L}/\text{min}$ 。对于大型汽油车, 则不应允许顶部注装低电导率的航空煤油, 更不允许用本车泵双管同时在加油罐口加油。此外, 由于汽车油罐车内总是有部分存油, 因此在

放置时间较久或罐内存油较脏时，切忌顶部喷溅加油。

(2) 安全可靠的接地措施

从防静电角度出发，接地电阻值的要求并不高，但一定要连接可靠，确保系统安全。例如不少水泥路面的地坪和加油站没有固定的接地装置，随意将接地针扔在地面上即算接地，这是很危险的。事实上这种水泥路面电阻常可高达 $10^{11} \sim 10^{12} \Omega$ 以上，而油罐“悬空”情况下注油时，罐体可带 10kV 以上的电位。在这种情况下，金属对地打火只要 300 ~ 500V 就可点燃石油蒸气混合气体。

接引接地线，人们还是比较重视的，但在拆卸地线时，往往造成人为地使油罐“悬空”。由于罐内液体流动等因素，有时虽已停止加油，油面电位常可保持几分钟，因此在停泵后过快拆除地线同样可以造成与上面相似的“悬空”状况。为安全起见，汽车油罐车注装结束后最好静止 5min 后再收地线。同时要注意先拆除加油接头及其连接导线，最后拆除罐体接地线。

(3) 合理地控制油压和流速

通常，设备在正常压力与流量下是不会发生事故的，意外原因或工作疏忽而使压力、流量增加时，往往是很危险的。另外，要尽量避免突然开泵或突然停泵。我们知道，过滤器是主要的静电源，它的起电率往往在初启动时最高，所以突然开、停泵都会造成瞬时冲击压力和流速过高，使静电涌起，往往造成事故。合理的解决措施是利用一种缓减手段，例如某机场采用先开小泵、后开大泵，停泵时先大泵、后小泵的操作顺序，起到了很好的防护作用。

(4) 严防罐内有浮游物体存在

据相关资料介绍，在给汽车油罐车加油时，油面电压达

到28kV左右才会出现放电现象，但是当油面有游离的绝缘金属物，即相当于有一些电荷收集器时，只要1~2kV就会出现放电。目前汽车油罐车液面计浮子大多采用开口销活络连接，易锈蚀又不可靠。加油过程进行检尺、取样，或将手电筒、工具等掉进正在加油的油罐中，都可能因“集电”而引起放电。因此在进行装油作业时，灌顶不站人，更不允许进行其他作业。

(5) 换装过滤器芯后要降速装油

平时过滤器内总是充满着油，然而换装新滤芯后，过滤器内则充满油气混合气，由于新滤芯又有着高的起电特性，因此就出现了过滤器内静电放电和蒸气爆炸的潜在威胁。这时如以较高速度排气和加油，发生过滤器静电爆炸是完全可能的。为此在换新滤芯和排除容器内气体时，泵速必须限制在最小范围内，一般不得大于10%额定速度，最好采取自流式。

2. 铁路槽车的静电防范措施

(1) 排除气体

已经输送过汽油的槽车，如未经清洗又装煤油、柴油等油品，会因吸收汽油蒸气而使混合气体进入爆炸范围。从注入柴油开始，经10~15s左右便进入这个状态。所以对于这类槽车必须进行清洗或者用排气装置排除汽油蒸气，或用惰性气体进行更换。

(2) 人体除电

油槽车的装车工人，需先用空手接触接地金属体进行人体放电后再从事操作。一般的操作工人应当换防静电工作服、鞋。

(3) 接地

装车开始前一定要把接地线接在槽车某一指定的位置，并用专用的接地夹以防止车体上积聚电荷。对铁路槽车来说，因铁轨对地电阻很低，可不再另行接地。但对鹤管等活动部件，则应分别单独接地。

(4) 装车方式

要将鹤管插入到槽车底部。

(5) 控制流速

装轻质油品等易燃液体时，要求先以 1m/s 流速装入，到鹤管管口完全浸入在油中以后，才可逐渐提高流速。

(6) 过滤器的设置

要求过滤器至装油栈台间留有足够的距离，或者采用消电器等措施以便消散过滤器所产生的电荷。

(7) 检测及取样

当测温盒等设备是金属制品时，其吊绳也必须用导体材料制作，并且上端用特制金属夹与槽车接地线相连。当测温盒等器具都是绝缘材料制品时，其吊绳应用尼龙绳。其他测量尺、取样器具等也应与测温盒一样处理。检尺等工作，需在装车以后静止 3min 后进行。

附录

附录 A 防静电标志牌

防静电工作区标志牌通常印成橘黄色，如图 A-1、图 A-2 所示。其中，图 A-1 为防静电工作区标志牌，图 A-2 为防静电包装标志牌。



图 A-1 防静电工作区标志牌



图中 * 代表包装功能的字母：A—低起电性包装；
C—导静电包装；S—静电屏蔽包装；
D—静电耗散包装。

图 A-2 防静电包装标志牌

附录 B 防静电工作区内的 防静电装备用品配置表

配置部位 器材名称 配置项目	元器件待 验	元器件 检验及 老化筛选	元器件 库房	元器件 预处理	设计 工艺 实验室	装配	调试	机房	维修	外场 维修	运输
防静电元器件 存放架	▲	▲	▲	▲	▲						▲
静电识别标签	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲				▲
防静电元器件 盒(袋)		▲	▲	▲	▲	▲	▲		▲	▲	▲
防静电桌垫	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲		
防静电地垫		△	△		△	△		▲			

(续)

配置部位 器材名称 配置项目	元器件待 件 验	元器件 检验及 老化筛选	元器件 库房	元器件 预处理	设计 工艺 实验室	装配	调试	机房	维修	外场 维修	运输
防静电周转箱	▲	▲	△	▲	△	▲	△				▲
防静电运输车	△	▲	△	△	△	▲	△		△		▲
防静电工作服	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	△	▲
防静电腕带	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	
腕带监视器		△			△	△	△			△	
导电鞋束		△	△		△	△	▲	△			
防静电工作鞋	△	△	△	△	△	▲	▲	▲		△	
防静电工作手套	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	△
防静电维修箱										▲	
防静电海绵泡沫		△	▲		△	▲	△		△	△	▲
防静电接地线 (带)	▲	▲	▲		▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
防静电工作区 标志牌	▲	▲	▲	△	△	▲	▲	▲	▲		
防静电文件袋	▲	▲	▲		▲	▲	▲	▲	▲	△	
抗静电剂(溶 液)	△	△	△		△	△	△	▲	△		
静电监测设备		▲	△		△	▲	▲	▲			
防静电烙铁					▲	▲	▲		▲	▲	
防静电吸锡器					▲	▲	▲		▲	▲	

(续)

配置部位 配置项目 器材名称	元器件待 件检验	元器件 检验及 老化筛选	元器件 库房	元器件 预处理	设计 工艺 实验室	装配	调试	机房	维修	外场 维修	运输
防静电印制板架					▲	▲	▲		▲	△	▲
静电电压表		△	▲		▲	▲	△				△
离子流式静电消除器		△	▲	△	△	▲	△	▲	△		

注：▲表示必须配置项目；△表示需要时配置项目或局部区域配置项目。

附录 C 静电防护三句半

喜气洋洋节日到，男女老少齐欢笑，集体举行联欢会——（铛!）热闹！

步入电子新世纪，生活优越添新喜，我们来段三句半——（铛!）鼓掌！

干燥冬天摸汽车，“啪”的一声麻一下，吓地一跳问为啥——（铛!）静电！

两物摩擦易带电，橡胶梳子吸纸片，外在因素失电子——（铛!）起电！

静电有害也有功，日常生活随处见，利用消除人来办——（铛!）好手！

内部物体起了电，外壳感应有电荷，若是外壳接了地——（铛!）屏蔽！

法拉第筒小试验，广泛应用有百年，屏蔽作用靠原理——（铛!）简单！

微型电子更精密，生活使用更方便，静电击穿也容易
——（铛!）防护!

液体流动有冲击，输送管道起静电，爆炸物体怕火花
——（铛!）接地!

电阻率的影响宽，管道材料也好办，流速不同起作用
——（铛!）控制!

绝缘介质被击穿，放出电荷能量变，生产设备有静电
——（铛!）耗散!

静电大小要测量，几种仪器来帮忙，电压电流能知道
——（铛!）准确!

预防人体带静电，接地防护很关键，穿好衣服扣腕带
——（铛!）安全!

四种静电中和器，各有特性要注意，选择、安装应合理
——（铛!）好办!

电子工业防静电，生产环境很关键，地板还要防静电
——（铛!）不麻烦!

石化工业防静电，接地灌装很关键，加强管理无混乱
——（铛!）防范!

安全第一记心间，操作规程要照办，节目到此算一段
——（铛!）撤退!

参 考 文 献

- [1] GB 12158—2005 防止静电事故通用导则 [S] .
- [2] GB/T 15463—2008 静电安全术语 [S] .
- [3] GJB 3007A—2009 防静电工作区技术要求 [S] .
- [4] GB/T 12703.1—2008 纺织品 静电性能的评定 第1部分: 静电电压半衰期 [S] .
- [5] GB/T 12703.2—2009 纺织品 静电性能的评定 第2部分: 电荷面密度 [S] .
- [6] GB/T 12703.3—2009 纺织品 静电性能的评定 第3部分: 电荷量 [S] .
- [7] GB 21146—2007 个体防护装备 职业鞋 [S] .
- [8] GB/T 2887—2000 电子计算机场地通用规范 [S] .
- [9] GJB/Z 86—1997 静电包装手册 [S] .
- [10] GJB/Z105—1998 电子产品防静电放电控制手册 [S] .
- [11] GB 50074—2002 石油库设计规范 [S] .
- [12] 张公伯, 李云鹏, 宋玉峰. 用电安全必读 [M] . 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [13] 张庆河. 电气与静电安全 [M] . 北京: 中国石化出版社, 2005.
- [14] 陆荣华. 电气安全手册 [M] . 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [15] 郎永强. 静电安全防护要诀 [M] . 北京: 机械工业出版社, 2007.

我社推荐用书

书 名	书 号	定价	出版时间
农村电气设备使用安全与保养 266 问	978 - 7 - 111 - 23433 - 3	27	200803
电工仪表技术 365 问	978 - 7 - 111 - 20773 - 3	39	200901
物业电工问答	978 - 7 - 111 - 19850 - 6	33	200701
常用电机与变压器技术问答	978 - 7 - 111 - 20670 - 5	28	200801
变频调速 460 问	978 - 7 - 111 - 18186 - 6	30	200808
常用电子元器件使用技巧 300 问	978 - 7 - 111 - 16363 - X	25	200609
电工基本操作技能	978 - 7 - 111 - 21495 - 3	16	200801
常用电机与电气控制技术问答	978 - 7 - 111 - 21439 - 7	18	200803
常用电动机修理问答	978 - 7 - 111 - 21496 - 0	13	200807
常用电动机的选择和应用	978 - 7 - 111 - 21497 - 7	13	200708
实用电动机控制电路 150 例	978 - 7 - 111 - 21386 - 4	18	200709
低压配电技术问答	978 - 7 - 111 - 21440 - 3	16	200806
电工电子常用工具与仪表初学入门	978 - 7 - 111 - 21433 - 5	10	200705
家用电器检修方法与拆修技巧入门	978 - 7 - 111 - 21434 - 2	15	201003
汽车摩托车蓄电池 250 例	978 - 7 - 111 - 21658 - 2	13	200810
电动自行车使用与维修问答	978 - 7 - 111 - 21408 - 3	13	201003
实用电路手册	978 - 7 - 111 - 28151 - 1	88	201001
电气接地、接零安全安装方法与技巧	978 - 7 - 111 - 20275 - 2	15	200902
电工安全操作禁忌实例	978 - 7 - 111 - 24378 - 6	18	200808
维修电工识图入门	978 - 7 - 111 - 26188 - 9	27	200906
运算放大器速查速用	978 - 7 - 111 - 26344 - 9	47	200904
电工安全一点通	978 - 7 - 111 - 28552 - 6	19	201004
电工技能学用速成	978 - 7 - 111 - 29017 - 9	25	201004
配电实用技术	978 - 7 - 111 - 31042 - 6	58	201009

编著书籍推荐表

姓名		出生年月		职称/职务	
单位					
专业		E-mail			
通讯地址				邮政编码	
联系电话	O:	H:	研究方向及 教学科目		
	手机:				
个人简历（毕业院校、专业、从事过的以及正在从事的项目、发表过的论文）					
您近期的写作计划有：					
您认为目前市场上最缺乏的图书及类型有：					

地址:北京市西城区百万庄大街22号 机械工业出版社 电工电子分社
邮编:100037 电话:010-88379764 010-68326336(传真)
E-mail: fuchenggui52@163.com 网址: www.cmpbook.com

● ISBN 978-7-111-33171-1

封面设计 / 电脑制作:
姚毅

■ 电工要诀丛书

- 电工安全知识要诀
- 电工安全作业要诀
- 静电安全防护要诀 (第2版)
- 电气线路安装与检修要诀

工业技术/电气工程/电工技术

定价: 23.00元

地址: 北京市百万庄大街22号
电话服务
社服务中心: (010)88361066
销售一部: (010)68326294
销售二部: (010)88379649
读者服务部: (010)68993821

邮政编码: 100037
网络服务
门户网: <http://www.cmpbook.com>
教材网: <http://www.cmpedu.com>
封面无防伪标均为盗版

ISBN 978-7-111-33171-1



9 787111 331711 >