

ICS 13.100

E 09

备案号: 29428—2010

SY

中华人民共和国石油天然气行业标准

SY/T 6340—2010

代替 SY/T 6340—1998

防静电推荐作法

Recommended practice on static electricity

(NFPA77: 2007, IDT)

2010—05—01 发布

2010—10—01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言	II
1 综述	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	3
4 符号	4
5 静电原理	5
6 静电危害的评估	12
7 静电危害的控制	15
8 易燃和可燃液体及其蒸气	20
9 粉末和粉尘	33
10 具体应用	37
附录 A (资料性附录) 说明材料	42
附录 B (资料性附录) 材料的物理特性	47
附录 C (资料性附录) 闪点	56
附录 D (资料性附录) 蒸气压	58
附录 E (资料性附录) 电荷弛豫	59
附录 F (资料性附录) 电导率	61
附录 G (资料性附录) 搭接和接地的推荐作法	62
附录 H (资料性附录) 术语汇编	67
附录 I (资料性附录) 参考资料	75

前 言

本标准等同采用美国国家消防协会标准 NFPA 77: 2007《防静电推荐作法》。

本标准介绍了静电的产生、危害以及静电引发火灾爆炸事故的预防。

SY/T 6340—1998《石油工业防静电推荐作法》仅选出了 NFPA 77 中与石油工业有关的技术内容,对 NFPA 77 内容进行了一定的删减。为方便大家全面了解静电问题及其在各行业中的表现,现对 NFPA 77: 2007 全部技术内容进行采标,标准内容与章节跟 NFPA 77: 2007 基本保持一致,而与 SY/T 6340—1998 存在较大的不同。

NFPA 77: 2007 是对防静电及其危害的最新推荐作法,它反映了当前对静电的认知水平,提供了能够解释现象本质的新资料,推荐了评价和控制事故的方法。新资料可用于防止可燃气体、蒸气和可燃粉尘的具体危害,指导具体的工业生产和操作。NFPA 77: 2007 还给读者提供了许多重要材料的相关物性、术语汇编和图解,在图解中还给出了可行的屏蔽接地方法和接地装置作法。

本标准与 NFPA 77: 2007 相比,进行了下列修订:

1. 根据 NFPA 技术委员会文件手册格式进行了许多编辑性修订;
2. 增加了与大地有效接触的允许自检式搭接夹具、连接线,其电阻值在可接受范围;
3. 关于在一定电力环境中选用设备的注意事项;
4. 关于在电力各类区域中使用高压电静电中和器以及在失去能量时利用这些静电中和器作为诱导中和器的注意事项;
5. 错误修正。

本标准由石油工业安全专业标准化技术委员会提出并归口。

本标准主要起草单位:中国石化集团胜利石油管理局安全环保处。

本标准参加起草单位:石油大学储建学院、中石化胜利油田现河采油厂。

本标准主要起草人:温涛、张克舫、高静、赵延茂、刘道华、史有刚、孙少光、刘瑞霞。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为:

—SY/T 6340—1998。

防静电推荐作法

1 综述

1.1 范围

- 1.1.1 本标准的目的是防止火灾和爆炸，适用于静电的鉴定、评估和控制。
- 1.1.2* 本标准不直接适用于静电电击危害，但运用本标准可以降低对操作人员的危害。
- 1.1.3* 本标准不适用于医院手术室和易燃麻醉剂管理场所中静电的预防和控制。
- 1.1.4* 本标准不适用于雷电。
- 1.1.5* 本标准不适用于杂散电流和由射频能量产生的感应电流。
- 1.1.6* 本标准不适用于机动车、船舶和飞机的油箱加油过程。
- 1.1.7* 本标准不适用于洁净室。
- 1.1.8 某些电子元件对静电有其自己的要求，本标准不适用于涉及这类电子元件的静电的控制和危害。

1.2 目的

本标准的目的是通过提供以下信息帮助用户控制静电的产生、积聚和放电产生的危害：

- 静电基本原理；
- 鉴定和评估静电危害指南；
- 控制静电危害技术；
- 特定工业静电的控制指南。

1.3 等效性

本推荐作法可以使用在质量、强度、耐火性、使用效果、持久性或安全性方面与本标准所述相当或更优的系统、方法或设备。

- 1.3.1 应向主管当局递交技术资料，表明其等效性。
- 1.3.2 应由主管当局证明该系统、方法或设备的预期效果。

2 规范性引用文件

2.1 概述

本标准中引用了下列文件或其中的部分，其应视为本标准的推荐部分。

2.2 NFPA 出版物

- NFPA 30: 2003 易燃、可燃液体规范 (*Flammable and combustible liquids code*)
- NFPA 69: 2002 防爆系统标准 (*Standard on explosion prevention systems*)
- NFPA 70: 2005 国家电气规范 (*National electrical code*)
- NFPA 99: 2005 保健设施标准 (*Standard for health care facilities*)
- NFPA 495: 2006 爆炸材料规范 (*Explosive materials code*)
- NFPA 496: 2003 电气设备的清洗和加压封装外壳标准 (*Standard for purged and pressurized enclosures for electrical equipment*)
- NFPA 498: 2006 炸药库和炸药运输中转站安全标准 (*Standard for safe havens and interchange lots for vehicles transporting explosives*)

* 标有“*”的条文在附录A中有附加说明。

NFPA 1124: 2006 制造、运输、储存和销售烟花爆竹商品规范 (*Code for the manufacture, transportation, storage, and retail sales of fireworks and pyrotechnic articles*)

NFPA 1125: 2007 模型火箭及高能火箭电动机制造规范 (*Code for the manufacture of model rocket and high power rocket motors*)

2.3 其他出版物

2.3.1 AICHE 出版物

静态危害评估中材料数据的应用 装置/操作进展 (Britton, L. G, "Using material data in static hazard assessment," *Plant/Operations Progress*), 1992. 4

2.3.2 API 出版物

API RP 2003: 1998 静电和杂散电流打火引燃的防护 (*Protection against ignitions arising out of static, lightning, and stray currents*), 第六版

2.3.3 ASTM 出版物

ASTM D 257: 1999 绝缘材料直流电导率或电阻率测试标准 (*Standard test methods for DC resistance or conductance of insulating materials*)

2.3.4 CENELEC 出版物

EN 61241-2-2 可燃粉尘环境中的仪器 第二章: 测试方法 第二节: 粉尘电阻率的确定方法 (*Electrical apparatus for use in the presence of combustible dust—Part 2: Test methods; Section 2: Method for determining the electrical resistivity of dust in layers*), 国际电工委员会, 布鲁塞尔, 1996

2.3.5 IME 出版物

安全丛书 3[#] 易爆物制造、运输、储存、销售、拥有和使用建议规范 (*Suggested code of regulations for the manufacture, transportation, storage, sale, possession, and use of explosive materials*)

安全丛书 17[#] 易爆物运输、储存、处理和使用安全 (*Safety in the transportation, storage, handling, and use of explosive materials*)

2.3.6 JIS 出版物

JIS B 9915 粉尘电阻率的测量方法 [*Measuring methods for dust resistivity (with parallel electrodes)*], 日本工业标准, 东京, 1989

2.3.7 美国国防部出版物

4145. 26M 弹药、炸药承包商安全指南 (*Contractors' safety manual for ammunition and explosives*)

6055. 9 弹药和易爆物安全标准 (*Ammunition and explosive safety standards*)

2.3.8 其他出版物

BS 5958 静电控制规范 第1部分: 综述 (*Code of practice for control of undesirable static electricity, Part 1—General considerations*), 英国标准协会, 伦敦, 1991

粉末处理中的静电危害 (Glor, M, *Electrostatic hazards in powder handling*, Research Studies Press), 探索研究出版社, 英国, 1988

原油终点站和储罐国际安全指南 (*International safety guide for oil tankers and terminals*), 第四版, Witherby and Co., Ltd., 英国, 1996

大学字典 (*Merriam - Webster's collegiate dictionary*), 第11版, Merriam - Webster, Inc., 斯普林菲尔德, 麻省, 2003

静电打火引燃及引爆 (Pratt, T. H, *Electrostatic ignitions of fires and explosions*), Burgoync, Inc., Marietta, GA, 1997.

石油工业静电危害的预防 (Walmsley, H. L, "Avoidance of electrostatic hazards in the petro-

leum industry)”, 静电学学报, 27 卷, Elsevier, 纽约, 1992

2.4 推荐部分摘录

NFPA 220: 2006 房屋建筑标准 (*Standard on types of building construction*)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1*

批准 approved

经主管当局认可。

3.2*

主管当局 authority having jurisdiction (AHJ)

负责强制执行规范、标准或者批准设备、装置或工艺程序的组织、政府机关或个人。

3.3*

注册的 listed

经主管当局认可, 并参与产品评定的组织公布的目录内的设备或材料, 该组织对已注册的设备或材料保持定期的生产检查, 并确认所生产的设备或材料符合相应的标准, 或经过试验确定是否适合在规定的情况下使用。

3.4

推荐作法 recommended practice

同规范和标准具有相似的内容和结构的文章, 但仅包含非强制性条款, 在文章中使用“宜”来表示推荐。

3.5

宜 should

表明一种意见或建议, 但不作为要求。

3.6

抗静电的 antistatic

可以在容许速率下耗散静电电荷的。

3.7

搭接 bonding

借助导体将两个或多个导电物体连接在一起的工艺。搭接的导体电势相等, 但不一定与大地电势相等。

3.8

击穿强度 breakdown strength

在规定测试条件下, 处于两电极产生的均匀电场中的固体材料被电火花击穿时的最小电压。通常用试样的击穿电压值与其厚度之比表示, 单位是伏 [特] / 米 (V/m)。

3.9

击穿电压 breakdown voltage

在规定的测试条件下, 处于两电极产生的均匀电场中的气体混合物被电火花击穿时的最小电压, 单位是伏 [特] (V)。

3.10*

电容 capacitance

使规定的物体或材料电压升高 1V 所储存的电量, 单位是库 [仑] / 伏 [特] (C/V) 或法 [拉] (F)。

3.11

可燃的 combustible

可在点火条件下与氧气反应并且燃烧的。

3.12

可燃性粉尘 combustible dust

分散良好的固体材料，直径不大于 $420\mu\text{m}$ （例如通过 U. S. No. 40 标准滤器的材料），当分散在空气或其他气态氧化剂中并被引燃时，会引起火灾或爆炸危险。

3.13

导电的 conductive

允许电荷通过的能力，电导率大于 10^4pS/m 或电阻率小于 $10^8\Omega\cdot\text{m}$ 。

3.14

导体 conductor

容易导电的物体。

3.15

接地 grounding

把一个或多个导体与大地连接的工艺，使所连接的导体处于零电势。

3.16

可燃性混合物 ignitable mixture

可被足够强的能量源（例如静电放电）引燃的气体—空气、蒸气—空气、雾—空气、粉尘—空气混合物或这些混合物的组合。

3.17

惰性气体 inert gas

不易燃烧、不易发生化学反应的气体，可阻止系统中的可燃性材料燃烧。

3.18

绝缘的 nonconductive

阻碍电荷流动的能力。

3.19

绝缘体 nonconductor

不容易导电的物体。

3.20

半导电的 semiconductive

电导率介于 $10^2\text{pS/m}\sim 10^4\text{pS/m}$ 。

3.21

静电放电 static electric discharge

静电以火花、电晕、电刷或传播型刷形放电的形式放电，在适当环境下可能会引发燃烧或爆炸。

3.22

静电 static electricity

只有明显的电场效应而无明显磁场效应的电荷。

4 符号

下列符号和定义适用于本标准。

A = 安 [培] (ampere) (库 [仑] /秒)，电流；每秒钟流过给定点的电量

C = 电容 (capacitance) (法 [拉])

d = 直径 (diameter) (米)
 $e = 2.718$ 自然对数的底数
 $E = V/m$ = 电场强度 (伏 [特] / 米)
 ϵ = 材料的介电常数
 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ (法 [拉] / 米) 真空介电常数
 $\epsilon\epsilon_0$ = 材料的介电常数 (法 [拉] / 米)
 I_s = 电流 (安 [培])
 κ = 流体电导率 (皮西 [门子] / 米)
 μ = 离子迁移率 [平方米 / (伏 [特] · 秒)]
 $\Omega \cdot m$ = 电阻率 (欧 [姆] · 米)
 p = 压力 (毫米汞柱)
 Q = 电量 (库 [仑])
 R = 电阻 (欧 [姆])
 ρ = 电阻率 (欧 [姆] · 米)
 S = 电导 (西 [门子])
 t = 时间 (秒)
 τ = 时间常数 (秒)
 v = 流速 (米/秒)
 V = 电势差 (伏 [特])
 W = 能量或功 (焦 [耳])

5 静电原理

5.1 概述

5.1.1 当把一块纤维制品从烘干机上取下时, 会有噼啪的声音, 并且会感觉到布对烘干机的吸附, 当走过一片铺有地毯的地面或下车后再去接触金属物体, 有时也会有电击的感觉。这些是人们对静电最普遍的体验。这些现象大部分发生在大气非常干燥的时候, 特别是在冬天。对大多数人来说, 这些只是烦人的事, 但对很多行业来说, 特别是那些涉及到可燃性材料的行业, 静电则会引起火灾或爆炸。

5.1.2 “电”这个词来源于古希腊语 “*elektron*” 一词, 意思是琥珀。人们通过将几块琥珀摩擦, 首次发现了起电现象。用其他如丝绸或毛皮物质摩擦以后, 也会发现某些物质会有吸附或排斥轻小物体的能力。几个世纪以来, 电除此以外并无其他含义。大约 300 年前居里克首次观察到伴随着光和小火花的较强起电现象。

5.1.3 当电流的性质被揭示后, “静电” 这个词被用来区别处于静止状态的电荷和处于运动状态的电荷。而现在这个词则用来描述由于电荷而引发的现象, 而不管电荷是处于静止状态还是运动状态。

5.1.4 所有的材料, 不论固体还是液体, 都是由千变万化排列的原子组成的。原子是由带正电的原子核和带负电的电子组成的。原子核具有质量, 电子围绕着原子核运动。在正常情况下, 原子可以被认为是电中性的, 也就是它具有相同数量的正电荷和负电荷。当电子过量或少量时, 原子就会带电。电子质量可以忽略, 并时刻处于运动之中, 是与静电联系最为紧密的带电体。

5.1.5 在如金属的导体中, 电子可以自由移动。在绝缘体中, 电子被原子核紧紧地束缚, 不能自由移动。常见绝缘体如下:

- 不导电的玻璃;
- 橡胶;
- 塑胶树脂;
- 干气体;

——纸；
——液体油料。

5.1.6 电子在半导体中的移动能力比在绝缘体中强，比在导体中移动能力差。半导体材料具有很高的电阻率，通常用兆欧计测量。

5.1.7 在另一些绝缘体中，电子可以从一个原子上分离下来，自由移动并吸附到另一个原子上形成负离子。失去电子的原子成为正离子。离子是带电的原子或分子。

5.1.8 相异的电荷相互吸引，当电荷可以自由移动时，吸引力使电荷相互靠近，储存的能量是保持电荷分离一定距离所做的功。

5.1.9 电荷的分离不能完全被阻止，因为电荷是在材料的表面产生的。当不同的材料接触时，电荷从一种材料移动到另一种材料，直到达到能量平衡（均势条件）为止。这种电荷的分离在液体和固体、固体和固体表面接触时最为明显。清洁气体流过固体表面时产生微量电荷。

5.1.10 把材料相互摩擦可以使起电增强，这是由于摩擦使得材料表面电子受到与其邻近材料中多种能量作用。在这种作用下，电子的分离更容易发生。液体通过溅洒和雾化产生相似的电荷分离。5000个原子中仅需传递一个电子，就可达到静电释放的条件。材料界面上积聚的少量表面污染物会对电荷分离产生重要的影响 [见图 5.1.10 a) 和图 5.1.10 b)]。

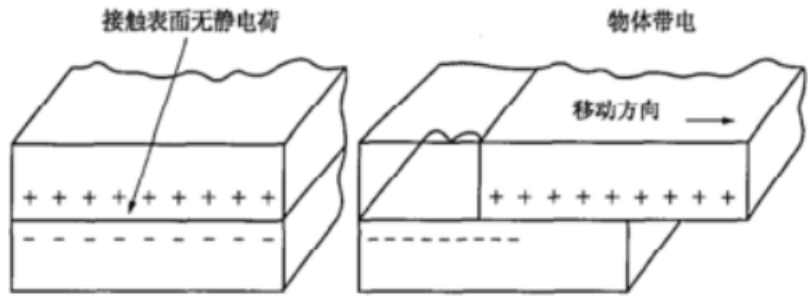


图 5.1.10 a) 绝缘体摩擦起电

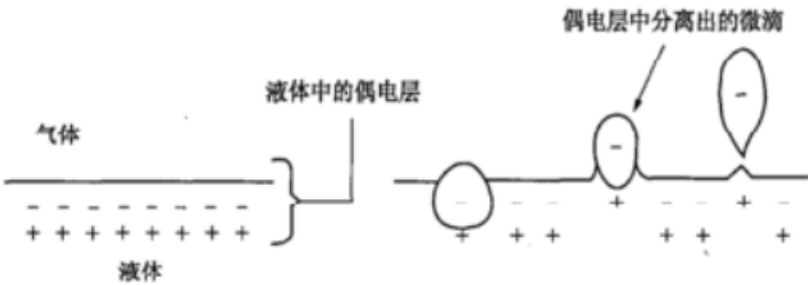


图 5.1.10 b) 雾化起电

5.1.11 当把导体材料靠近高带电表面时，导体会起电。导体材料中的电子或者被吸引到离带电表面最近的一端，或者被排斥到离带电表面最远的一端，这取决于带电表面的性质。把导体与大地（或另一导体）连接，就会有电子从导体流向大地（或另一导体），或者从大地（或另一导体）流向该导体。如果这时中断接触，把该导体与带电表面分开，则在此孤立导体上的电荷数量就发生改变。迁移的净电荷被称做感应电荷 [见图 5.1.11 a)、图 5.1.11 b)、图 5.1.11 c) 和图 5.1.11 d)]。

5.1.12 电中性的孤立导体上电荷的分离和位于带电绝缘体附近的电中性孤立导体上电荷的分布，都会在孤立导体的边缘点附近产生电势。在导体的尖端会由于气体游离而将气体击穿，产生电火花，人们称之为电晕或跨过缝隙火花。这两种情况每一种都会产生电荷的迁移，使孤立导体带电。例如，当穿着绝缘鞋的人接触一个高压电网金属支架时，会受到静电电击，就属于这种情况。此时，这个人身上就会带电，而当他离开此区域，与接地金属接触时，由于他身上获得的电荷要流向大地，他会受到第二次电击。

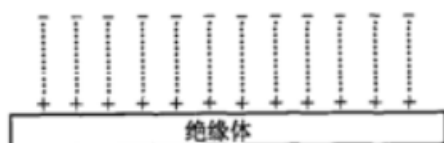


图 5.1.11 a) 带电绝缘体的静电场

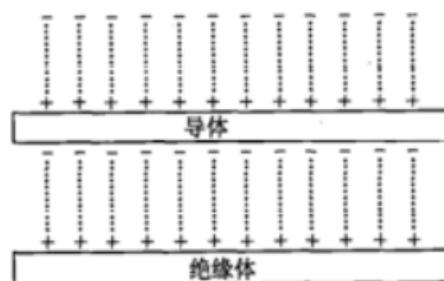


图 5.1.11 b) 在导体上产生的感应电, 移走导体, 其电荷数保持不变

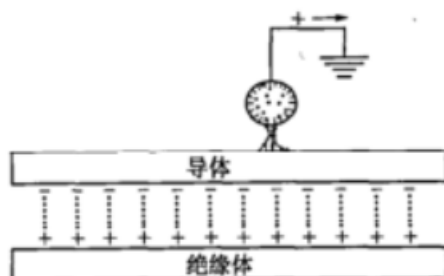


图 5.1.11 c) 导体接地放电

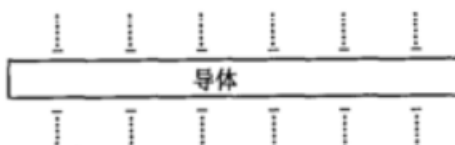


图 5.1.11 d) 移走导体所带的电荷

5.1.13 电荷能以电子流或离子流的形式分散到材料的表面或内部。如果表面或材料不导电或导电但与大地绝缘, 当电子流、离子流停止后, 分散的电荷仍然存在。

5.1.14 绝缘液体也可以通过浸入其中的高电压电极而带电。

5.2 电荷的积聚和释放

5.2.1 当电荷分离的速率大于电荷结合的速率时, 就会有电荷的积聚。分离电荷必须做功。电荷有回归电中性的趋势。任意两点间的电势差, 是将单位电荷从一点移动到另一点所做的功, 功的大小取决于该特定系统的物理几何性质 (如形状、大小、材料、特性、位置等), 可用以下方程式表示:

$$C = \frac{Q}{V}$$

式中:

C ——电容, F;

Q ——电量, C;

V ——电势差, V。

5.2.2 电荷积累的典型例子见图 5.2.2。

5.2.3 电荷分离本身可能不是潜在的火灾或爆炸因素, 只有当分离的电荷放电或突然再结合时才会造成引燃危险。防止静电放电最好的方法是通过导体或半导体的途径, 控制电荷的重新结合。

5.2.4 在静电现象中, 电荷一般是被电阻层分开的, 如被两导体之间的空隙或绝缘体分开, 或通过材料本身的绝缘特性分开。在实际应用中, 特别是处理的材料是带电的绝缘体, 确定其电荷量或电势差是很难的。

5.2.5 电荷在有电阻的通路上重新结合时, 其结合速率是有限的, 我们用弛豫时间或电荷衰减时间来描述。该过程按指数规律变化, 可以用下式表示:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

式中:

Q_t —— t 时刻时剩余电量, C;

Q_0 ——开始时电荷量, C;

$e = 2.718$;

t ——经过的时间, s;

τ ——时间常数, s。

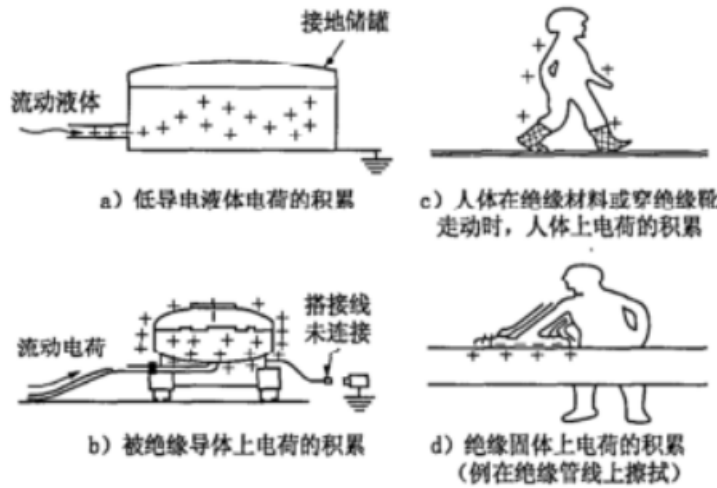


图 5.2.2 电荷积聚实例

5.2.6 电荷重新结合的速率取决于材料的电容和电阻, 可由下式表示:

$$\tau = R \cdot C$$

式中:

τ ——时间常数, s;

R ——电阻, Ω ;

C ——电容, F。

5.2.7 对于散装材料, 弛豫时间常用电阻率和介电常数来表示:

$$\tau = \rho \cdot \epsilon \epsilon_0$$

式中:

τ ——时间常数, s;

ρ ——电阻率, $\Omega \cdot m$;

$\epsilon \epsilon_0$ ——介电常数, F/m。

5.2.8 5.2.5 中介绍的按指数规律变化的衰减模型可以帮助我们解释电荷重新结合的过程, 但并不适用于所有情况。特别是当带电材料是低电导率的液体或绝缘体、半导体、导体组成的混合物时, 观测到的并不是按指数规律衰减。这些情况下的衰减比指数模型预计的要快。

5.2.9 静电电荷的消散受多种因素的影响, 例如向材料中添加抗静电的添加剂来改变绝缘材料的体积或表面电阻率, 或者把孤立的导体接地, 或者把绝缘体 (或孤立导体) 周围的空气电离。气体电离化包括向带电体周围加入可移动的电荷 (正电荷, 负电荷, 或两者都有)。这些离子被带电体吸引直至呈电中性。空气中的离子流起到了把中性电荷变为其他的束缚电荷或孤立电荷的作用。

5.3 静电放电和引燃机理

5.3.1 概述

随着电荷分离不断积聚, 将存在一个不断增加的电动力, 这个电动力可通过静电放电的形式将电荷重新组合在一起而恢复电中性。放电有多种形式 (见图 5.3.1)。静电放电要成为引燃的火源, 必须满足以下四个条件:

- 必须存在电荷分离的有效方式;
- 必须存在积聚分离电荷的条件, 并保持一定的电位差;

- 静电放电释放的能量必须足够大；
- 静电放电必须发生在可引燃的混合物中。

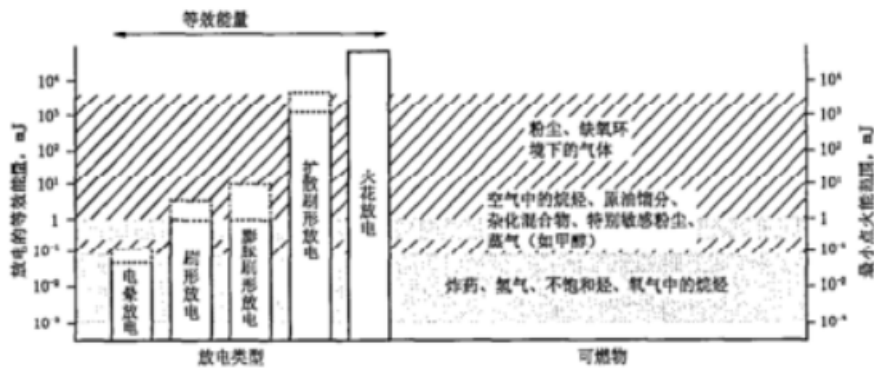


图 5.3.1 放电类型与可燃物的最小点火能

5.3.2 电晕放电

电晕是一种微安级别的放电，它是由于表面例如锐边、尖端和导线的充电而导致的局部气体的针状击穿现象。充电可能出现在高压导体上或带电表面附近的接地导体上。电晕伴随有微弱的亮度（见图 5.3.2）。

5.3.2.1 大多数情况下，电晕放电的电流密度非常低，因此，电晕放电所带来的危害也小。电晕放电强烈的地方，就会产生刷形放电。它们以任意的光丝状出现，发出微弱的嘶嘶声或油炸的声音。大体上，刷形放电发生在半径小于 1mm 的针尖范围内，能够引起燃烧。在刃部的放电可以点燃那些具有很低点火能的混合物，例如氢气—空气的混合物或二硫化碳—空气的混合物。如果刷形放电发生在边缘直径大于 5mm 的元件上或是在半球形顶端的杆上，例如人的手指，则可燃气体—空气的混合物、蒸气—空气的混合物就会被点燃（见图 5.3.2.1）。

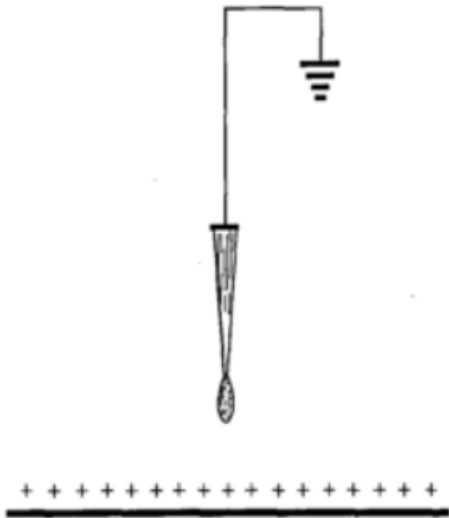


图 5.3.2 电晕放电

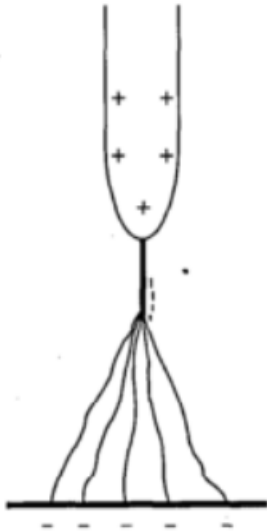


图 5.3.2.1 刷形放电

5.3.2.2 应固定那些指向放电表面的尖端、角落、凸出物（例如边缘直径大于 5mm）。这些尖端区域积聚电荷，提供强烈的局部电压，将引发电晕放电和火花。

5.3.3 导体间的火花放电

5.3.3.1 一些未接地导体包括人体所产生的火花，是静电引起火灾和爆炸的原因。火花放电发生在两个带电导体的间隙中，通常是金属，是一种典型的强烈电容性放电。火花放电的能量在空间和时间上高度集中。

5.3.3.2 火花产生引燃的能力主要取决于它的能量，这个能量是总储存能量的一部分。

5.3.3.3 火花的能量可以通过导电系统的电容量和电势计算，或通过从导体分离的电荷数量来计算，表示为如下公式：

$$W = \frac{1}{2} C \cdot V^2$$

$$W = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C}$$

式中：

W——能量，J；

C——电容，F；

V——电压，V；

Q——电荷，C。

它们的关系见图 5.3.3.3。

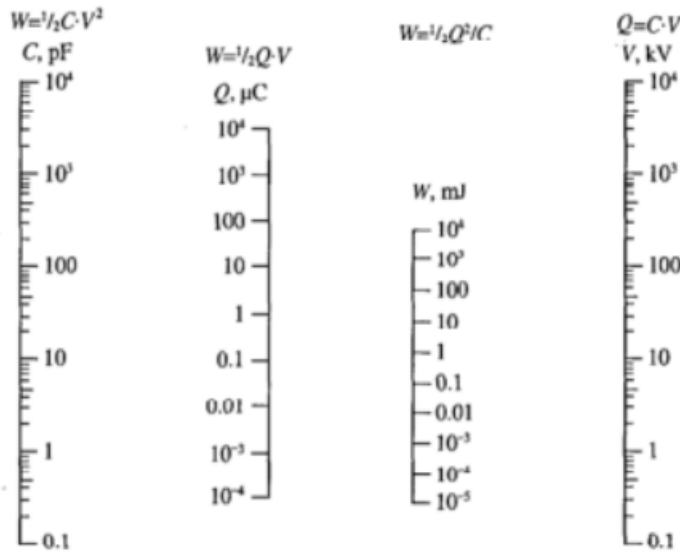


图 5.3.3.3 电容火花放电的能量估算图

5.3.3.4* 放电所释放的能量至少与可燃混合物的最小点火能相等，才能引燃。其他因素，比如放电电极的形状以及放电的形式，都会影响静电放电的状况和燃烧的可能性。

5.3.3.5 在和空气最佳混合的情况下，大多数饱和烃的蒸气 and 气体由火花放电引燃约需要 0.25mJ 的能量。不饱和烃的最小点火能低一些。具体物质的最小点火能见 8.2.3, 9.2.4 和 9.10.1。

5.3.3.6 雾气、粉尘和纤维通常需要的最小点火能要比气体和蒸气的大一两个数量级。对所有给定的颗粒材料，随着颗粒尺寸的减小，最小点火能迅速降低。

5.3.3.7 气体、蒸气和粉尘的点火能随着空气中氧气浓度的增加而降低。同样，点火能随着氧气浓度的减少而增大。

5.3.4 杂化混合物

不同物相的两种或两种以上易燃物质的混合物（例如粉尘加蒸气以混合物存在），该混合物被称为“杂化混合物”。试验表明：易燃气体掺和到粉尘悬浮物中，在很大程度上降低了粉尘的点火能。尤其是当气体以低于它的可燃浓度下限存在或粉尘以低于它的最小爆炸浓度存在的情况下。即使两个成分都在各自的可燃下限以下，但该混合物仍然可能是易燃的。杂化混合物生成途径如下：

——蒸气从颗粒中解吸（例如在树脂产品的接收器中）；

- 颗粒与大气中的水分反应，产生一种易燃蒸气；
 - 在易燃蒸气环境中处理粉尘（例如向易燃液体中添加粉尘或粉末）。
- 在上述情况下，低于最易引燃成分的最小点火能，就可能引燃杂化混合物。

5.3.5 人体的静电放电

5.3.5.1 人体是电的良好导体，大量事故都是由于人体的静电放电所引起的。

5.3.5.2 人在与地面绝缘的情况下，可以通过以下方式积聚可观的静电：在绝缘表面上行走，触摸带电物体，身着不导电衣服摩擦，或者在周围环境有电荷的情况下，瞬间触摸一个接地物体。在正常行动范围内，人体上的电压可达 $10\text{kV}\sim 15\text{kV}$ ，产生火花的能量可达 $20\text{mJ}\sim 30\text{mJ}$ 。将这些数值与气体或蒸气的最小点火能相比较，其危害是显而易见的。

5.3.6 导体和绝缘体间的放电

5.3.6.1 导体和绝缘体之间经常有火花产生。这种现象发生在塑料零部件与金属设备间、涂层与金属板、液体间以及颗粒的处理过程中。由积聚的电量和邻近导体表面的形状，这些物质的带电可以导致表面放电和火花的产生。在绝缘表面观察到的电流密度（在数量和极性上）的变化是由于这些放电在一个受限绝缘表面范围内扩散所产生的。

5.3.6.2 即使使用了静电中和器，某些范围内仍有电荷存在。如果没有静电积聚的途径，这些电荷一般没有危害。但是，危险的静电放电可以因个别电量的集中而产生。例如堆积空的塑料容器，在滚轴或卷筒上缠绕薄膜，往容器内填充不导电的液体或粉末等。

5.3.7 导体基座上绝缘体的表面放电

涂有一薄层（小于 8mm ）绝缘物质的表面可作为储存电量的电容器。在足够高电量的层位（大于 $250\mu\text{C}/\text{m}^2$ ），在薄层的外表面会观察到树枝状的放电。这种树枝状的放电称为扩散型刷形放电。或者电荷在层与层之间分散，储存在涂层中的能量每平方米可达到几个焦耳。因此，尽管放电的能量在空间被分散，但对于点燃可燃气体—空气、蒸气—空气和粉尘—空气的混合物已经足够了（见图 5.3.7）。

5.3.8 填充操作的放电

把粉末、颗粒以及球料填充到大储料仓时，可以观察到表面会发出 1m 长的光。这类放电被称为膨胀型刷形（锥体）放电，伴随有噼啪的爆裂声，这种声音比物料传输的噪声要大。膨胀型刷形放电的最大有效能量为 $10\text{mJ}\sim 25\text{mJ}$ ，膨胀型刷形放电是引起接地仓筒中粉尘爆炸的主要原因。向罐车灌装不导电液体的过程中也可观察到类似的放电，这种现象就是所谓的表面光束（见图 5.3.8）。

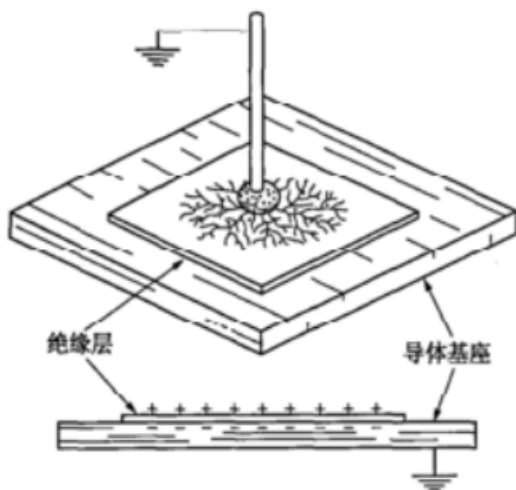


图 5.3.7 扩散型刷形放电

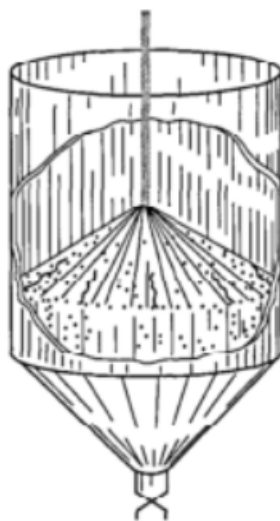


图 5.3.8 粉末仓中的膨胀型刷形放电

6 静电危害的评估

6.1 概述

6.1.1 以下是评估静电危害的两个基本步骤：

- 识别电荷分离和积聚的位置；
- 评估在这些位置处着火的危害。

6.1.2 评估基本步骤列于图 6.1.2 中。

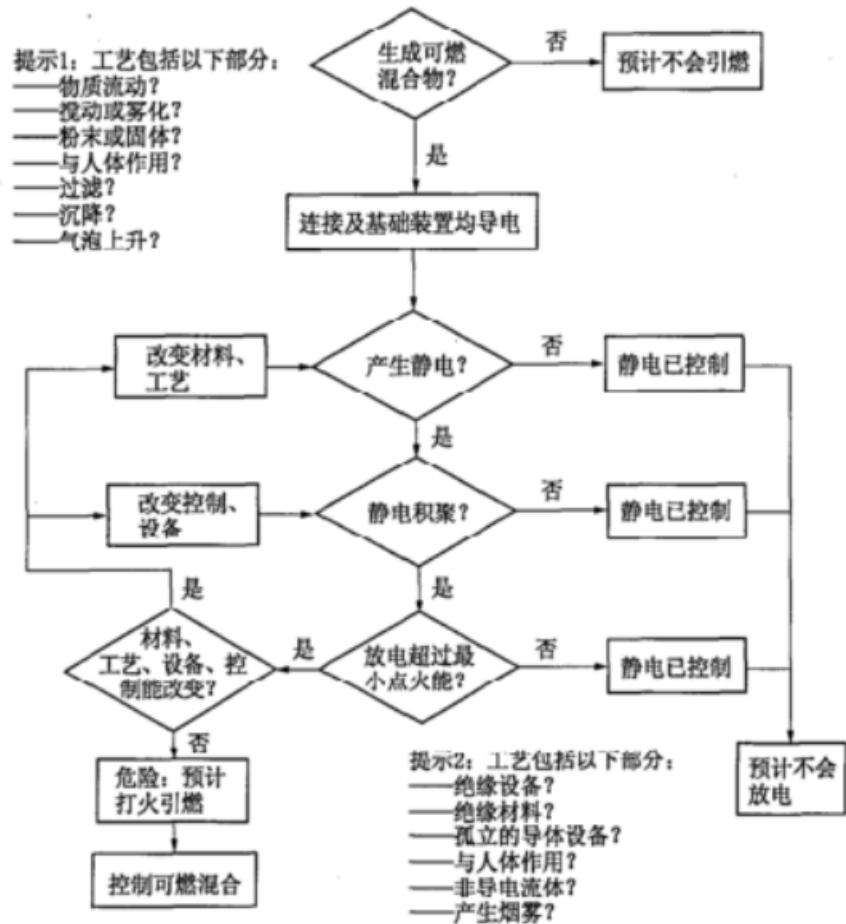


图 6.1.2 静电打火危害评估程序图

6.1.3 宜现场评估或调查工艺过程，弄清楚未接地的导电物体，包括妨碍正确搭接或接地的人体或其他任何绝缘体。尽管在评估的时候没有发现电荷积累的迹象，但也要确定那些可能存在静电危害的位置。

6.1.3.1 加工处理绝缘物质时应特别注意。

6.1.3.1.1 宜独立考虑每一个操作过程，并且注意物质的可能爆炸范围。例如，温度和相对湿度的变化严重影响材料的整体和表面导电能力。

6.1.3.2 宜对操作、生产过程或设备的设计进行复查以及实地勘测。在实际运行中，宜实施就地仪表测量评估，确定可能存在的静电危害的性质和大小。

警告：在检查过程中，需采取与设备相符合的预防措施和一些测量仪器。最初的着火危险来自于仪表接地电极，例如引入了带电表面附近的场强计的外罩（见 6.4），为静电放电提供了路线。被测的表面应缓慢靠近并同时观察仪表的反应。为了不让设备和测量方法导致引燃，需特别小心。

6.2 静电带电量的测定

有价值的评估需要使用适当的仪器，按照生产厂家的说明使用仪器，保持仪器的校正，根据生产

厂家的推荐来解释测量结果。

6.3 导体带电量的测定

6.3.1 导体上的电压和它所提供的电量是成比例的，表示为如下公式：

$$V = \frac{Q}{C}$$

式中：

V——电压，V；

Q——导体带电量，C；

C——导体的电容，F。

6.3.2 电压表上的电阻足够大时不会对导体产生放电，并且电容足够小也不会从导体上积聚大量的电荷，这时导体的电压可用电压表直接测量。内部电阻大于 $10^{12} \Omega$ 的静电伏特计可用于测量大部分未接地导体的电压。由于导体表面每点上的电压都相同，因此电压表的测试探头接到导体上的哪一个点上并不重要。

6.4 非导体上带电量的测量

6.4.1 非导体上的带电量不能用静电伏特计直接接触测量，必须用非接触式静电伏特计或场强计来测量。非接触式静电伏特计通过导体中或导体上的净电荷来感应所测静电场的强度。电场强度与每单位电荷的静电电场力成正比，电场强度说明了带电物体附近的电场力。作为工程应用，电场是带电物体周围能感受到的或测量到的力。

6.4.2 场强计用来测量电场，单位是每单位距离电压，一般为千伏/米。多数情况下，测定值与被测物体所带净静电荷成正比。根据操作方式以及精密程度，场强计被称做“旋转集电器”或“电荷定位器”。因为非导体上的电荷密度是不均匀的，因此应在多个位置测定。

6.4.3 带电的非导体有很多种，例如纸张、薄膜、纸卷筒、粉尘、液体、加工辊以及挤压机。这些材料或物体上的电荷会产生电场，附近的仪表、操作员以及导电的、半导电的或绝缘的材料都会影响到电场。因此，仪表的测定值通常和引入仪表前的场强值有所不同。这种现象是由于电容的变化引起的。

6.4.4 一定距离内，电荷间的势能会自己显现出来。因此，当靠近带电物体时，就可以察觉到积聚的电荷效应。例如，人的手和胳膊靠近高带电物体时会有发麻的感觉，当皮肤和头发带电甚至引出电火花。有时这些感觉和火花是潜在危险的第一征兆。即使人接地良好，人体的这种带电也可能发生。

6.5 一般作法

6.5.1 测量导体和非导体上的电荷的主要仪表有非接触式电压表和场强计。顾名思义，这些仪表不直接接触带电表面。这些仪器在它们的感应孔处可感应到电场的大小和极性。如 6.4.3 中所述，仪表和它的感应孔会干扰被测的电场，因此仪表的读数没有准确表明仪表不存在时的实际场强的大小。除了这个不足，场强计是价格便宜而且实用的测量静电荷的仪器。

6.5.2 有些像流体流动及散装固体流动的情形，从孤立的容器或杯子中采集带电物质的样品是很容易的，这种容器称做“法拉第杯”，用静电计可以测定流动电流或流入杯中的带电材料的净电荷。

6.6 电荷积聚和衰减的测定

6.6.1 测定电荷的积聚或衰减速率包括测定电压差的变化或电流。

6.6.2 在规定的初始电压条件下，可使用场强计和精密的电荷衰减监控器，对导体和非导体的电荷衰减进行观测。

6.6.3 商用静电计可以检测到孤立导体上小到 10^{-13} A 的泄漏电流。孤立的导体可看做是一个能容纳散装固体或流体的法拉第杯。

6.7 电阻率的测定

电阻率包括体积电阻率和表面电阻率。在静电工业中，根据不同的电阻率范围将物体分为绝缘

体、半导体（抗静电）和导体（见图 6.7）。

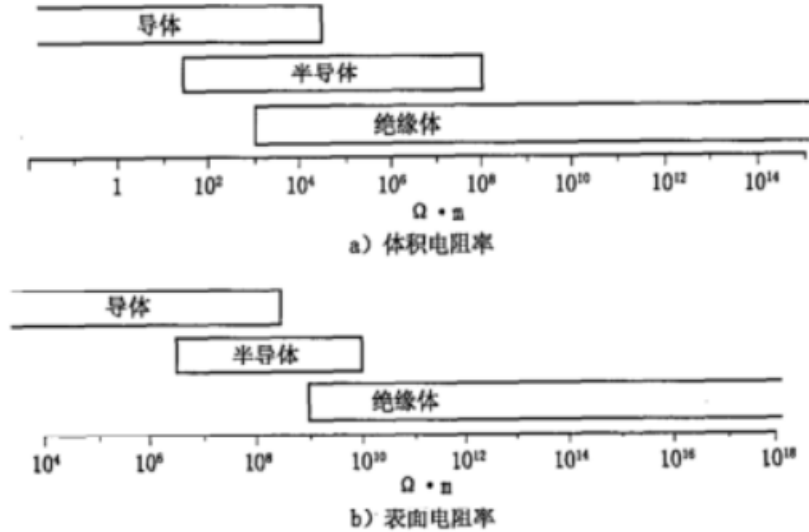


图 6.7 不同物体的体积电阻率和表面电阻率

- 6.7.1 电荷能通过固体、流体或粉末传导，可以经过表面传导也可以通过内部传导。
- 6.7.2 物体的体积电阻率，可以通过施加一个电位差，测定通过已知横截面的电流来测定。
- 6.7.3 吸了水的物质尤其是水蒸气，以及压缩了的物质可以降低物质的电阻率。已经发现对于许多物质，施加的电位差不同时电阻率不同，随着测定时间的推移，电阻率也不同。对于特殊的样品，已经设计出了各种各样的测定电阻率的传感器，用于标准结构样品的测定。正确的测试方法包括在以下部分：

- ASTM D 257
- EN 61241-2-2
- JISB 9915

6.8 搭接和接地的评价

- 6.8.1 在 3.7 中已经定义，搭接是通过导体把两个或两个以上的导电物体连接起来，使它们具有相同的电势；也就是说，物体之间的电位差为零。这些物体可以和大地电势相同也可以不同。事实上，物体和大地之间存在一个相当大的电位差。
- 6.8.2 按照 3.15 定义，接地是把导电的物体与大地相连，使它们的电势为零。
- 6.8.3 无论是搭接还是接地，目的都是为了消除静电火花的产生。
- 6.8.4 对良好的搭接和接地来说，对导电设备和物体的测定十分重要。定期对搭接和接地系统进行检查和检测同样很重要。适当的检查和检测能够保证积聚电荷的散失。
- 6.8.5 搭接或接地的电阻很重要，不仅能确保静电的弛豫，而且能保证工人的安全和其他设备安全。例如，保护点火装置和电力系统免受冲击波伤害。组成接地的作法根据实际情况的不同而变化。第 7 章~第 10 章提供了应用例子。
- 6.8.6 接地电阻的大小可以用普通欧姆表或兆欧表测定。

6.9 电火花能量的测定

- 6.9.1 导体的放电能量通过导体的电压和电容确定，公式如下：

$$W = \frac{1}{2} C \cdot V^2$$

$$W = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

式中:

W ——能量, J;

C ——电容, F;

V ——电压差, V;

Q ——电量, C。

6.9.2 当电荷在导体上储存时, 电荷的储存能力通常用电容计来测定。

6.10 点火能的测定

6.10.1 任何可燃的固体(粉尘)、流体(蒸气)或气体, 在有静电存在的时候, 应把它们看做易燃环境。这就要求确定物质的最小点火能。最小点火能量的数据见表 B. 1。

6.10.2 关于颗粒和气体物质的最小点火能, 目前已经有了标准测定仪器和方法。这种高度专业化的仪器需要由经过培训的技术员来操作。通常这种设备由专业检测公司来操作和保管。

7 静电危害的控制

7.1 概述

7.1.1 控制静电危害的目的是提供一种有效手段, 使无论何原因而被分离的电荷, 能在放电发生前重新结合而不产生危害。

7.1.2 静电火灾危害能通过以下方法控制:

- 在可能产生静电火花放电的区域内, 把可引燃混合物移走;
- 减少电荷的产生和积聚, 通过改进工艺过程或改变材料来减少电荷的产生和积聚;
- 中和电荷, 把孤立导体接地和对空气实施电离。

7.2 控制设备内的可燃混合物

7.2.1 概述

尽管在设计上努力防止静电积聚, 但处理许多不导电材料或不导电设备涉及的一些操作都不能使静电问题得到根本解决。因此, 根据涉及材料的危险性质, 在设计时最好采取其他措施, 例如下列之一:

- 惰化设备;
- 设备通风或使设备所在的场所通风;
- 把设备移装到一个更安全的地点。

7.2.2 惰化

7.2.2.1 在盛装可燃混合物处, 例如在工艺容器里, 引入足够多的惰性气体(例如, 氮气或燃烧尾气)使氧气不足而使混合物不能燃烧, 这种技术就是惰化。

7.2.2.2 通常在可燃物的可燃上限以上的环境中操作。只有当可燃物浓度处于其燃烧界限范围内时, 引入惰性气体才是有效的方法。

7.2.3 通风

可以应用强制通风稀释可燃物, 使它的浓度大大低于可燃物的可燃下限, 或大大低于粉末的最小爆炸浓度。这种方法一般需要稀释到下限浓度的 25% 或更低。另外, 用其他方法不能控制的可能存在静电危险的地方, 采用引导空气运动阻止可燃物接近操作区域或许是可行的。

7.2.4 转移

设备的部件没有必要放置在危险区内时, 最好是把设备转移到安全位置, 而不是依赖其他防静电的方法。

7.3 控制静电产生

当物体接触后再分开, 电荷就会分离。降低操作速度和流速会降低电荷产生的速率。例如在操作塑料元件和设备、绝缘薄膜和纸卷筒, 液体和颗粒这些材料时, 就会有静电分离。如果物质以足够低

的速率流动，将不会产生达到危险水平的静电。由于工作效率的要求，这种控制静电的方法可能不实用。

7.4 电荷的衰减

7.4.1 搭接和接地

搭接用于使导电物体之间的电位差减到最少，即使该系统没有接地。而接地是平衡物体和大地之间的电位差。搭接和接地的例子见图 7.4.1。

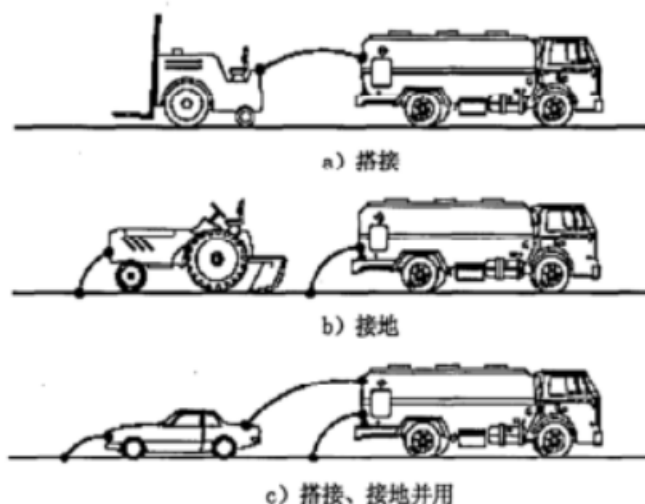


图 7.4.1 搭接和接地

7.4.1.1 导电物体可以通过地线直接接地，或将它搭接到已经接地的其他导体上。某些物体因为本身已与地接触，形成固有搭接或固有接地，例如地下管道或坐落在地上的大型金属储罐属于固有接地的形式。

7.4.1.2 接地物体和土壤之间的总电阻，由接地导线本身的电阻、接插件的电阻、接地线路上的其他导电材料的电阻和接地电极（如接地棒）到土壤的电阻组成。在接地连接中，电阻主要集中在接地电极与土壤之间。接地电阻常常随接地电极接触土壤面积的大小、土壤的电阻率以及土壤湿度而变化。

7.4.1.3 为防止导电设备静电的积聚，地线和大地之间的总电阻应达到一定值，以消散可能存在的电荷。一般 $1\text{M}\Omega$ ($10^6\Omega$) 或稍小的电阻就足够了。

7.4.1.3.1 搭接或接地系统全部是金属时，接触良好的接地线路的电阻一般小于 10Ω ，包括并联系统。电阻很大一般表示金属线路是断开的，一般情况下是因为连接松动或腐蚀。适合动力电路或雷电保护的接地，比防静电接地保护的要求更高。

7.4.1.3.2 附录 G 给出了各种接地的设备、连接方法和装置。

7.4.1.4 搭接或接地导线的最小规格由机械强度决定，而不是导线的载流能力。对于经常连接和拆卸的搭接，应使用多股导线或条带导线（更多信息参考附录 G）。

7.4.1.5 接地导线可以是绝缘的（例如加套或覆有塑料的电缆）或非绝缘的（例如裸露电线）。一般推荐使用非绝缘导线，因为非绝缘导线更容易发现缺陷。

7.4.1.6 永久性搭接和接地可以用焊接法连接。临时性的连接可以用螺栓、压力型接地线夹或其他专用夹子。压力型接地线夹应有足够的压力穿过保护层、锈层和污物，以保证与金属接触良好。

7.4.1.7 在常见的电压范围内，工作人员的接地电阻应能使到达地面的电流限制在 3mA 以下。这种方法叫做软接地，用来防止线路电压或泄漏电流引起的电击伤害。

7.4.2 加湿

7.4.2.1 许多材料的表面电阻率与周围环境湿度有关。65%或更高的湿度下，大多数材料的表面会吸收足够的水分，确保了表面电导率，防止了静电的积聚。如果湿度低于 30%，同样的材料会变成

良好的绝缘材料,这种情况下静电积聚会增加。

7.4.2.2 加湿使表面电导率增大,如果接地,电荷就会消散。

7.4.2.3 加湿并不能解决所有的静电问题。许多绝缘体并不易从空气中吸收水分,高湿度不会明显地降低它的电阻率。例如许多聚合物的洁净表面,像塑料管道、容器、薄膜、石油液体表面,即使空气的湿度高达100%,这些表面也能积聚静电电荷。

7.4.3 电荷衰减和防静电方法

7.4.3.1 根据材料的物性,带有静电电荷的液体和固体材料需要时间消散或“弛豫”这些电荷。某些情况下,材料在被引入危险区域或操作之前,会有足够长的时间去衰减电荷。

7.4.3.2 只有在接地的情况下,电荷的衰减才会发生。如果材料与大地绝缘,增加材料的电导率并不能消除危险。

7.4.3.3 不导电的材料通常能制成具有足够导电性的物质,以消除静电电荷,如在材料中添加导电性成分,或在材料表面上应用吸湿剂来吸收空气中的水分来实现。

7.4.3.4 有些塑料或橡胶可以添加炭黑增加电导率。加炭后的塑料或橡胶材料有时导电能力很大,可以像金属导体一样用来接地。在液体和粉尘颗粒中,掺拌抗静电添加剂可以促进电荷的衰减。

7.4.3.5 有些情况下,特别是塑料薄膜或塑料层,在塑料中添加一种物质吸收薄膜表面空气中的水分,从而提高其表面电导率。在低湿度的情形下,用防静电塑料薄膜或塑料层时要特别小心,因为在湿度低于30%的环境中,塑料薄膜或塑料层变得不导电且积聚静电。

7.4.3.6 表面的吸湿性涂层会吸收空气中的水分,使涂层表面变得导电。但是这些涂层容易被清洗掉或被蹭掉,或长时间后失效,这种涂层的方法是防止静电积聚的暂时性方法。

7.4.3.7 导电性聚合物、含导电成分的薄层以及金属化薄膜已经被用来提高静电的消散。

7.5 电荷中和

7.5.1 概述

空气可以用来携带运动离子,这些离子可以被表面的静电电荷吸收从而消除表面不平衡的静电电荷。在使用离子发生器时,必须考虑影响发生器效率的因素,例如空气条件(粉尘、温度等)、处理设备的摆放位置、机器零件、人员等。这些设备只是提供极性相反的离子来中和产生出来的静电电荷,绝不可能阻止静电电荷的产生。

7.5.2 感应中和器

7.5.2.1 感应中和器包含下面几部分:

- 针棒,是装有一系列针状发射器的金属棒;
- 用金属箔包裹的金属管;
- 导线;
- 用金属纤维或导电纤维做的刷子。

7.5.2.2 每个类型的感应中和器的设计都是以布置表面电荷静电场中的尖顶元件位置为基础的。

7.5.2.3 电荷从大地到感应中和器的针状尖端时,会在尖端产生一个积聚的电场。如果尖端特别尖,这个电场就会足够大(比3kV/mm还要大),可以在空气中产生电击穿。电击穿可以把离子注入到空气中,自由地移动到远处与之极性相反的电荷上去。电击穿产生的离子流构成了一个中和电流(见图7.5.2.3)。

7.5.2.4 尽管感应中和器价格便宜而且容易安装,但是在产生电击穿和中和过程中,在物体和尖端之间要求有一个最小的电压差。如果不在这个最小电压差范围内,中和就不会发生,并且当尖端和表面的距离大约小于12mm时,就会产生几千伏的剩余电压。

7.5.2.5 感应中和器安全接地是十分重要的,如果感应器没有接地,就会从感应棒中产生火花。

7.5.3 电中和器

7.5.3.1 电中和器需要很高的电压使尖端电极产生电击穿。任何接近中和器的物体从击穿中吸收电

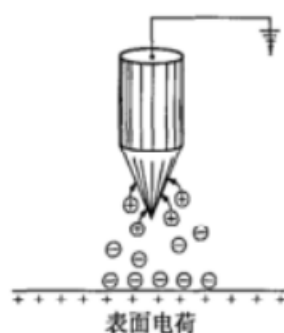


图 7.5.2.3 感应针图例

荷从而实现中和。一个电中和器必须适合其使用场所，并且一定不能形成一个点火源。例如，没有电源或不能保证电源正常的地方，电中和器应设计有感应中和器的功能。

7.5.3.2 供应高电压产生 50Hz~60Hz 的电晕电极的地方，适合应用电中和器。利用交变电场使电极产生正负离子，在中和过程中要使用这些正负离子。短路时，电源来的电流电容性地与每个或几个电极耦合，以限制火花能量。这些交流中和器（AC）—动力驱动的电中和器，必须经批准才能使用在危险场所。一个电中和器必须适合其使用场所，并且一定不能形成一个点火源。

7.5.3.3 使用脉冲电流或稳定的双极性直流电（DC）的电中和器，利用脉冲电场或稳定电场使电极产生离子，在中和过程中要使用这些离子。短路时，火花能量由限流电阻器控制。脉冲的或双极性直流电（DC）的离子发生器，在危险场所中使用时应标明。脉冲电流或双极性直流电（DC）的电中和器必须适合其使用场所，并且一定不能形成一个点火源。

7.5.4 放射性静电中和器

放射性离子发生器利用离子放射来产生中和静电荷的离子。最常见的放射性离子发生器是钋 210 衰变产生的 α 粒子。

7.5.4.1 放射性离子发生器的性能随着放射性物质的衰减而下降。根据原子核管理委员会的条例，这种中和器使用前必须注册，并且定期的置换（至少每年一次），因为随着放射性的衰减，电离能力变小。放射性离子发生器经常和感应中和器联合使用，来控制高密度电荷。

7.5.4.2 放射性离子发生器尽管费用高、操作复杂，但是它不可燃，不需要电线，而且能够把静电荷量降低到最低水平。

7.6 人体的静电控制

人体是个导体，在与大地绝缘时会积聚静电，这些静电是通过鞋袜与地板覆盖层间的接触和分离、感应或生产操作时产生的。在有可燃混合物的地方，存在着来自带电人体的潜在引燃的可能性，因此防止静电荷在人体上积聚的措施是必要的。

7.6.1 防止电荷积聚

应用以下方法防止电荷的积聚：

- 导电的地板和鞋袜；
- 人体接地设备；
- 抗静电的或导电的衣服。

7.6.2 导电地板和鞋袜

7.6.2.1 导电的或防静电的地板能够有效地消除人体上电荷，地板覆盖的材料应是具有耐磨、低电阻的固体。小范围内可用金属板。地板系统与大地之间的电阻一般应小于 $10^8 \Omega$ 。尘屑、蜡和其他高电阻材料不利于地板的导电。

7.6.2.2 防静电鞋袜使人体与导电的地板接触，从而控制并消散了人体上的静电。静电鞋袜和地板到大地之间的电阻应在 $10^6 \Omega \sim 10^9 \Omega$ 之间。对于点火能很低的物质，鞋袜和地板到大地的电阻应小

于 $10^6 \Omega$ 。电阻可以用商用鞋袜导电测试仪来测定。

7.6.2.3 鞋袜的电阻会因地板灰尘的积聚、整形外科脚板的使用、与地板接触面积的减小而增大。鞋袜的导电性能需要定期的测试以保证其功能。

7.6.2.4 导电鞋袜是以鞋袜和地板到大地的电阻小于 $10^6 \Omega$ 来设计的，一般应用在具有低点火能物质的环境中，例如易燃易爆物。在电压线路中可能引起电击的场合，不能使用导电鞋袜。

7.6.3* 人体接地装置

7.6.3.1 在导电鞋袜不能提供安全的接地保证时，需要使用辅助设备。这些设备包括腕链、脚指脚跟接地器和导电套鞋。

7.6.3.2 当电击的风险不增加的时候，精心挑选这些辅助设备，有助于防止有害的静电积聚。在多数实际情况下，保证人体皮肤到大地间的电阻大约在 $10^8 \Omega$ 或以下即可。若有电击危险，则接地装置必须保证皮肤到大地间的最小电阻为 $10^6 \Omega$ 。由于人体皮肤的接触以及和地板的接触，尤其在导电鞋袜的整个底面不与地板接触的行动中（如跪拜），导电鞋袜的作用会减弱。为了防止电击，接地设备的电阻最小为 $10^6 \Omega$ 。

7.6.3.3 最简单的商用设备是内装电阻器的接地腕链，为防电击，接地电阻一般约为 $10^6 \Omega$ 。这种腕链在通风罩和其他操作人员活动受到限制的场合得到广泛应用。当紧急情况发生时，工作人员能够切断腕部的束缚。机罩配备有两条可移动环带的盘绕状接地线，环带由操作人员控制。

7.6.3.4 接地线路需要使用电压表、欧姆表或专业测试仪来定期地检测，以保证安全。

7.6.4 防静电或导电服

7.6.4.1 虽然丝绸和某些合成纤维是良好的绝缘体，并且由它们制成的衬衣显示出静电现象，但是没有事实表明穿着这样的衬衣会构成危险。在某些工作区域中脱下外衣是特别危险的，例如医院手术室，易爆的生产、居住场所和衣服被易燃液体弄脏的地方。在这些区域中使用的外衣应适用于该工作区而且是抗静电的。NFPA 99 中提供了有关评价服装防静电性能的试验方法。

7.6.4.2* 一般情况下，任何衣服产生的静电都不会成为引燃源，但是如果衣服电阻很大，人体上的电荷会大量增加（比如人从叉车中出来时）。

7.6.4.3* 在富氧环境中，比如在液氧充装厂，来自冷却气体的蒸气可能渗入工人的衣服使衣服易燃。积聚在人体上的静电荷突然放电能够引燃衣服。

7.6.5 手套

手套应是抗静电的或导电的，它的电阻要求和前述导电鞋袜相同。应检验手套与导电鞋袜连接良好。

7.6.6 清洗衣物

7.6.6.1 用化学纤维清洗或擦拭衣物的时候，会产生大量的静电荷而放电，这样就有可能引燃溶剂蒸气。对于可燃、易燃的液体，一般在其闪点温度以上使用，所以使用合成剂清洗或擦拭衣服会增加起火的可能性。电荷产生一般会随擦拭速度和力量的增大而增加。即使是擦拭不导电材料，也能积聚电荷引燃。

7.6.6.2 如果静电的产生需要控制，尤其是用易燃溶剂清洗或擦拭时，应使用棉花或合成纺织品作为抗静电材料。建议使用导电的溶剂。测定纺织品的静电产生特性方法见 NFPA 99。

7.7 保养与检查

用于人体静电控制的所有设备必须定期检查和保养以保证其功能。衣物、鞋袜和地板的预防性保养程序和推荐作法详见 NFPA 99。

7.8 不适及伤害

静电电击可能导致不适感觉，且在某些情况下由于不自觉的反应可能对工人造成伤害。自身的放电对人并没有危险，但是它可能造成不自觉的反应，导致跌倒或者和运动中的机械缠在一起。如果不能避免电荷积聚，又没有易燃气体或蒸气存在，应考虑采取各种方法杜绝和金属部分接触。这些方法

其中包括使用非金属的护栏、绝缘的门把手和其他不导电的屏蔽。

8 易燃和可燃液体及其蒸气

8.1 概述

本章讨论易燃和可燃液体及其蒸气在储存、运输、使用过程中静电危害的评价和控制。虽然是对易燃和可燃液体，但本章的原理内容也适用于不可燃的液体及其蒸气（例如湿空气），因为这些液体和蒸气在储存、运输、使用过程中也能产生静电引燃危险。本章首先讨论了液体及其蒸气的燃烧特性，接着讨论了液体中静电的产生和消除，然后重点讨论了以下几个操作：

- 管道、软管内的流动；
- 储罐；
- 罐车的装载；
- 真空油槽车；
- 铁路罐车；
- 海运船和驳船油轮；
- 工艺容器；
- 测量和取样；
- 罐的清洗；
- 便携罐和容器；
- 真空清洗。

8.2 液体及其蒸气的燃烧特性

为正确评估静电引燃危害，需要熟悉以下液体燃烧的性能：

- 闪点；
- 可燃极限与蒸气压；
- 点火能；
- 氧化剂浓度。

8.2.1 闪点

8.2.1.1* 闪点是可燃性液体释放足够的蒸气，在液体表层附近形成易燃的蒸气—空气混合物的最低温度。可根据液体的其他物理性质，选择不同的测试方法和仪器来测定闪点。

8.2.1.2 当闪点低于或等于环境温度时，很有可能析出易燃蒸气。闪点越低，蒸气压越高，蒸气引燃的可能性越大。由于测定闪点的方法不同，公开的闪点温度也仅仅是接近液体可能引燃的最低温度，因此在评估引燃危害时，需要比公开发表的闪点低 $4^{\circ}\text{C}\sim 9^{\circ}\text{C}$ 。

8.2.1.3 除 8.2.1.2 描述的条件外，以下因素也会产生易燃蒸气：

- 从固体和低挥发性液体中释出可燃气体；
- 低于大气压的情况；
- 液体上方蒸气的不均匀分布；
- 蒸气表面的雾滴或泡沫。

8.2.2* 可燃极限和蒸气压

空气中的气体或蒸气只有在一定的浓度范围才是可燃的——可燃下限（LFL）和可燃上限（UFL）。这两个界限之间的浓度组成了可燃范围。低于可燃下限，蒸气太稀薄不能燃烧。高于可燃上限，蒸气太浓也不能燃烧。增大压力（高于大气压）和提高温度均可扩大一般碳氢化合物的可燃范围。

8.2.3 点火能

引燃蒸气—空气混合物所需的能量随浓度不同而变化（点火能与浓度的一般关系见图 8.2.3），

对大多数物质，最低点火能（MIE）出现在易燃极限的中点浓度附近。某些物质的最低点火能见表 B. 1。

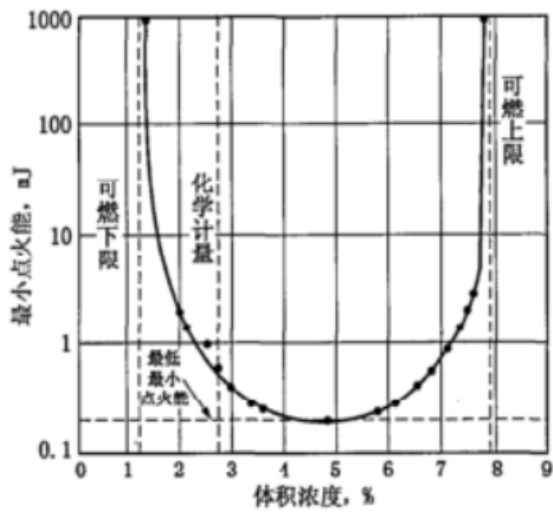


图 8.2.3 苯的最低点火能与浓度的关系

8.2.4* 氧化剂浓度

物质的可燃性通常是指在含氧量为 21% 的大气中。在富氧大气中，可燃范围变大。也就是说，可燃下限（LFL）降低，可燃上限（UFL）升高。当通过惰化使氧气浓度足够低时，就会达到一个低于可燃的氧气浓度，这个浓度称为氧气浓度极限（LOC）（参照 NFPA 69，通过有效惰化到低于 LOC，就能消除引燃危害。如果在混合物中存在其他氧化剂，应做相似的讨论分析，需要通过实验估计其危害。

8.3 液体中电荷的产生和消除

8.3.1* 电荷产生

当液体在管内和过滤器中流动、运输中飞溅或被搅动时会产生电荷分离。液体与管子的接触面越大，流动速度越快，电荷产生速率越大。电荷混杂在液体中被携带到储存容器，电荷可以在储存容器内积聚。电荷的多少通常用体积电荷密度和流向容器的流动电流来描述（见图 8.3.1）。

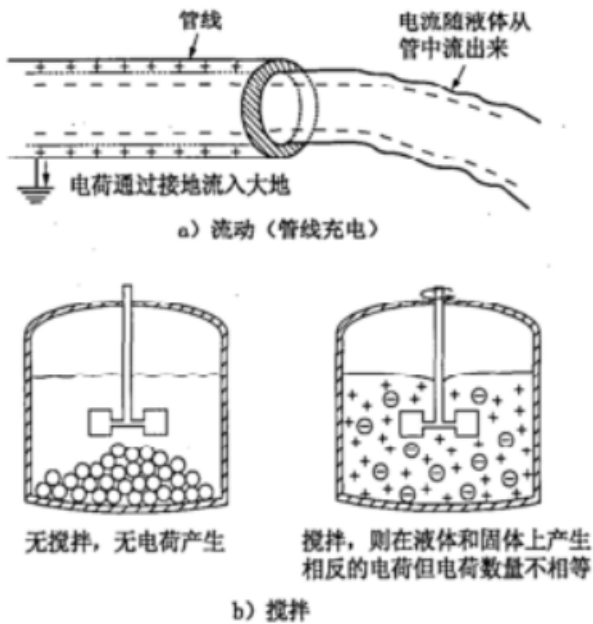


图 8.3.1 液体中产生电荷图例

8.3.2* 电荷弛豫

接地导电容器中的液体产生的静电，其消散速度取决于液体的导电性。对于电导率大于 1pS/m 的液体，电荷弛豫按照指数或欧姆规律衰减，半导体材料的电荷弛豫描述见 5.2.5。对于电导率小于 1pS/m 的液体，电荷弛豫比指数衰减模型预测得要快（见 5.2.8）。根据 Bustin 关系（见附录 E），对于带电荷的低黏度液体（低于 $30 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ ），电荷弛豫遵循双曲线规律衰减。但对同一液体，运用指数衰减估计的电荷弛豫时间要保守一些。

8.3.3 影响液体带电的因素

8.3.3.1* 在接地系统中，液态的导电性对液体中电荷的积聚或液态中悬浮的物质有很大影响。假设介电常数为 2，如果液体的电导率小于 50pS/m ，则被当做绝缘体（见 A.8.3.3.1）。表 B.2 给出了一些常见液体的电导率数值。重要的是要尽快将电荷从液体中弛豫以避免引燃危害。在某些特殊情况下，可接受的电导率范围可能更大或更小，这取决于液体流动速度和操作情况。

8.3.3.2 电导率大于 10^4pS/m 的液体，定义为导电液体。在常见的碳氢化合物或化合物的加工和处理过程中存在静电积聚，但导电液体不会因此而造成危害。根据此推荐作法，电导率在 $50\text{pS/m} \sim 10^4\text{pS/m}$ 之间的液体被认为是半导体。

8.3.3.3 许多工业液体尤其是非极性碳氢化合物的充电特性，受到液体中微量杂质的影响，即使杂质的浓度小于 1ppm 。因此，工业液体导电性的大小可以相差几个数量级，这取决于加工、储存、使用过程中产生的杂质浓度。

8.3.3.4 一开始表现比较安全的导电液体，如果通过绝缘容器与大地绝缘或悬浮在空气中，也会导致重大危害。当被隔离时，几乎所有导电液体中的电荷会以可燃火花的形式释放。当以蒸气形式悬浮时，强大的静电场能导致可引燃的刷形放电。

8.3.3.5 在石油工业中，对于石油的灌装、分配以及中间蒸馏过程中，半导体类液体一般当做导电液体处理。因为，不导电塑料软管、储罐、多相混合物和在管线末端安装过滤器在规程中是禁止使用的，所以这种处理方法是可行的。

8.3.3.6 在一般的化学处理中，半导体液体代表了一个特殊种类，它积聚电荷的趋势随着处理方法和液体导电性的不同而不同。这些处理包括：多相混合物、不导电罐内衬、微过滤器等都会增加设备中电荷的积聚。

8.4 管内流动

8.4.1* 金属管

8.4.1.1 连续金属管系统的所有部分到大地间的电阻应不超过 10Ω ，电阻越大，表明电连接越差。对于法兰连接，无论是法兰表面的油漆，还是螺栓、螺母上用的塑料薄层，一般都会阻碍接地。在法兰上，跨接电缆和星形垫圈通常是不需要的，星形垫圈甚至会干扰正常的扭矩传递。组装好之后，应确保接地线路的电气连通，之后还需要定期检修。

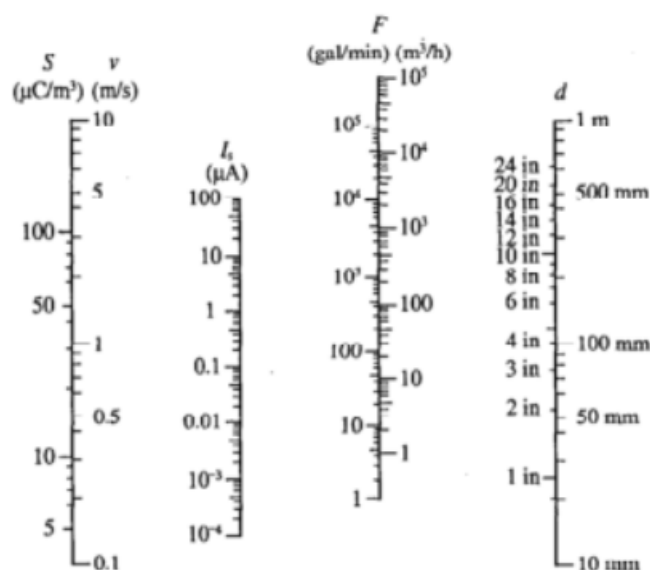
8.4.1.2 在挠性连接、旋转连接或滑动连接附近，需要使用接地线。实验和经验均表明，这些连接处的电阻通常小于 10Ω ，这个数值很低，能够阻止静电荷的积聚。但最好要看一下厂家的详细说明或检查一下连接处，因为有些连接处装有绝缘表层。使用不导电垫圈的滑动法兰（搭接），当管线上粉刷油漆时，会导致接地不良。可以使用导电垫片，例如挠性的、添加石墨的、金属缠绕垫或安装跨接电线来补偿接触不良。

8.4.1.3 应确保搭接和接地不影响应绝缘的管道部分。例如，为避免泄漏电流或阴极保护系统产生弧光放电，需要安装绝缘法兰，提供独立的接地线路。

8.4.1.4 图 8.4.1.4 a) 和图 8.4.1.4 b) 提供了不导电液体在光滑管中流动时产生电荷的估算图。

8.4.2* 绝缘管和衬里管

流体流过管道时，不导电表面影响电荷积聚和消散的速度。当不导电管内的电荷衰减速率很慢时，导电管和不导电管内电荷产生的速度大致相同。对于带电的不导电液体，被管壁绝缘能导致相反

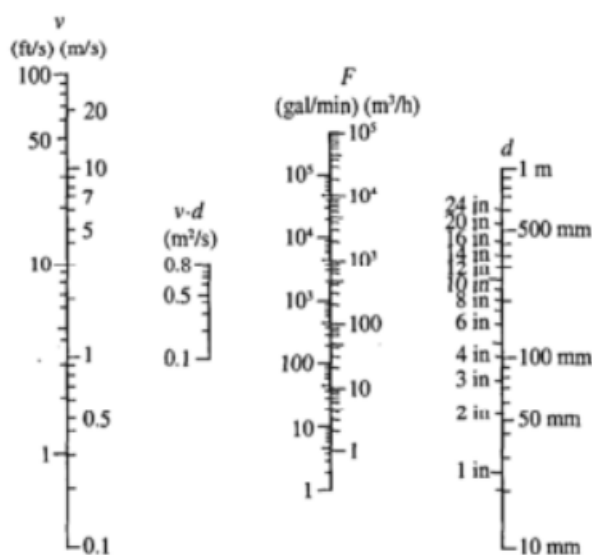


注：(1) 通过直线的标度可解以下关系式：

$$I_s = 2.5 \times 10^{-5} v^2 \cdot d^2, S = 3.18 \times 10^{-5} v, F = (\pi/4) v \cdot d^2.$$

(2) $1\text{m/s} = 1\text{ft/s} \times 3.28$, $1\text{m}^3/\text{h} = 1\text{bbl/h} \times 0.159$.

图 8.4.1.4 a) 不导电流体在光滑管中流动的电荷估算图



注：(1) 通过直线的标度可解以下关系式：

$$F = (\pi/4) v \cdot d^2.$$

(2) $1\text{m}^3/\text{h} = 1\text{bbl/h} \times 0.159$.

图 8.4.1.4 b) 流体流动参数估算图

极性的电荷积聚在绝缘衬里或管道的外表面。电荷积聚最终导致电击穿，会导致衬里或不导电管道整个管壁的穿孔。

8.4.3* 软管和挠性管道

软管和挠性管道材料可以是金属、衬里的金属、不导电的塑料、增强橡胶、增强塑料和复合材料。

8.4.3.1 由于工作需要必须使用不导电的软管或其他管的地方，应全面地研究静电产生的危害。

8.4.3.2 至少所有的导电连接和零件应搭接和接地。

8.4.3.3 如果过滤器中是不导电液体，并且软管在过滤器的下游使用，那么软管应是金属的或其他的导电材料。有必要使用半导体材料防止电荷积聚以及管子穿孔。

8.4.3.4 应保证导电软管的电路畅通并定期检查。

8.4.4 灌装管

灌装管应是导电的并且与灌装系统电气连通。

8.4.4.1 灌装管应伸到容器底部，并有一个 45°坡口，或在容器底部附近装有弯头使流体水平方流出。

8.4.4.2 设计时，应保证初始灌装阶段流体不能向上喷溅。为此，慢的初始进液速度是非常必要的。初始进液速度应控制在 1m/s 以下，直到管子出口被液面浸没 2 倍管径以上为止。

8.4.5 过滤

8.4.5.1 细过滤器

8.4.5.1.1 细过滤器的孔隙尺寸通常小于 150 μm ，由于接触面积很大，所以对于不导电液体，过滤器会产生很大的电流（导电液体通常会通过液体本身将电荷消散给大地），经常比进入过滤器前管内流动产生的电流大两个数量级，液体上的电荷密度会超过 2000 $\mu\text{C}/\text{m}^3$ 。

8.4.5.1.2 为防止 8.4.5.1.1 中电荷进入接收容器，过滤器应放置在接收容器上游足够远的地方，以使电荷量降到管内流动的正常水平。在工业实际中，特别是如果不知道液体的电导率，在管道中应有 30s 的滞留时间，或过滤器下游安装导电的软管。对于低电导率（小于 2pS/m）并且高黏度（大于 30cSt）的不导电液体，在最低的操作温度下，滞留时间应更长一些。在这些情况下，应按照滞留时间是液体弛豫时间的 3 倍来考虑。

8.4.5.2 粗过滤器

孔隙尺寸比 150 μm 大的滤网过滤器为粗过滤器。当被累积的残留物堵塞时，比 150 μm 粗的滤网过滤器也能产生相当多的静电荷。如果这种粗过滤器用在有残留物积淀的场合，粗过滤器应按照细过滤器看待。

8.4.5.3 袋式过滤器

袋式过滤器经常安装在排出管线的末端用于移除残留物。这种过滤器可以是安装在软管末端的一个袋子，并且直接暴露在储罐的水汽里。用于易燃液体供给的过滤器，应封闭在接地的金属护罩内。

8.4.6 悬浮物

不溶的或不易溶的液体以及难溶解的固体可以以微滴或乳浊液的形式分散。如果不导电液体中含有分散相，例如油中含水，连续相决定电荷弛豫状况。悬浮液的电荷产生通常比单相液体的强。

8.4.7 各种管线限流装置

管道系统的部件，例如节流孔板、阀门、弯头和三通会增加扰动和电荷产生的速率。特别是与塑料部件短暂的接触会产生很多电荷。已经发现如水等悬浮物，也会增加电荷的产生。

8.5 储罐

8.5.1 综述

液体流进储罐时携带进去的静电荷会在储罐中积聚。这种电荷可以通过储罐中液体表面的电压测得。所能达到的表面电压的最大值，不仅仅取决于输入液体的电荷密度还取决于储罐的尺寸。对相同体积的储罐，横截面积小的储罐最大表面电压越大，因为相对于电荷的弛豫速度，液体深度的增加更快一些。近矩形的船运罐内产生的电压小于相同容积的圆筒形立式罐内的电压。

8.5.2 导电的固定顶储罐

罐中液体的电荷积聚会导致静电释放，放电发生在液体表面和罐壁间以及罐顶或储罐附件之间。液体中的扰动以及颗粒物质的沉积，例如水滴、铁屑和残渣都影响到电荷产生的速率。

8.5.2.1 预防措施

如果蒸气空间里含有易燃的混合气体（例如，中低蒸气压储存的产品里混有高蒸气压液体时），

或正在进行装载转换，应采取以下防护措施：

- (1) 应避免飞溅灌装以及液体向上喷射。
- (2) 对罐底的水和沉淀应尽量少搅动，避免灌装管在罐底附近放电。
- (3) 如果可能，在装料的最初阶段，应限制进口流速以减少搅动和扰动。同时执行下列措施：
 - (a) 在灌装管被浸没 2 倍管径或 0.6m 的深度之前，输入液体的流速应不大于 1m/s；
 - (b) 在管道低位处，过低的速度会导致水沉淀，所以此阶段的进口流速尽可能接近 1m/s。
 另外，如果增加速度，水或其他杂质的夹带可以明显增加电荷产生的可能性。
- (4)* 对于大于 50m³ 的储罐，其储存的液体无论是不导电的，还是不知道其导电性，都应：
 - (a) 在灌装管已被浸没后，进口速度可以增加到 7m/s；
 - (b) 实践证明，在某些场合例如石油工业，进口速度可以超过 7m/s，但绝不可以超过 10m/s。可以参见图 8.4.1.4 a) 和图 8.4.1.4 b) 来决定流速。
- (5) 如果液体是不导电的并存在分散相，例如夹带水滴，在整个灌装过程中，进口流速应严格控制在 1m/s。
- (6) 在上游细过滤器和储罐之间，对液体应提供最小 30s 的弛豫时间来流动。
- (7) 应检查储罐中未接地的导电物体，如自由浮子和取样桶。如果这些物体漂浮在液体表面，会促进火花的产生。
- (8) 如果是 I 类液体或在闪点温度及以上操作的液体，管线中不能喷出空气或其他气体。把大量空气或其他气体引入储罐中，由于电荷的产生、液体的雾化以及可燃环境的形成，会产生危险。

8.5.2.2 接地

8.5.2.2.1 罐装不导电性液体的储罐应接地。以地表基准面为地基的储罐，不管地基是什么类型的（例如混凝土、砂岩或沥青），应认为是自然接地。

8.5.2.2.2 在抬高的地基上的或在支架上的储罐，到大地的电阻能高达 $10^6 \Omega$ ，从静电荷消散的角度看，仍应认为是充分接地，但应核实电阻的大小。附加的接地杆或类似的接地系统不会减小静电危害。

8.5.2.3 火花促发物

8.5.2.3.1 量油尺、高液位传感器或其他伸到储罐蒸气空间的导电设备，可能会在其自身与上升的液体之间造成静电释放空间。这些设备应符合以下标准：

- 应安全搭接，通过导电电缆或导电棒，直接与罐底相连或安装在一个与罐底相连的测量容器中以消除产生火花的机会；
- 应定期检查以确保连接系统没有断开。

8.5.2.3.2 如果在储罐上的固定装置是绝缘的，就不存在引起火花的潜力，也就不需要采取特别的措施。安装在罐侧壁上的设备（例如液位开关或测温器），以及只向罐内伸出很短的设施，是不会引起静电危险。这些情况应具体问题具体分析。

8.5.2.4 罐内搅拌器

罐内的喷射混合或高速搅拌混合能搅起水和碎屑并在表面产生飞溅，这会产生静电荷。如果在表面存在可燃混合物，就可能引燃。应减小表面飞溅。可采用气体覆盖隔离或惰化的方法消除引燃危险。

8.5.2.5 气体搅拌

8.5.2.5.1 不推荐用空气、蒸气或其他气体进行气体搅拌，这是因为会在液体、液雾或泡沫状物内产生大量电荷。此外，空气搅拌会在罐内的蒸气空间中产生可燃环境。如果空气搅拌不可避免，在混合之前应对蒸气空间进行净化，并且过程应缓慢开始，以确保静电荷积聚的速度小于消散的速度。

8.5.2.5.2 应注意采取特殊的预防措施，防止与空气的搅拌稀释原来的惰性组分。同样的，与惰性气体的搅拌会产生惰性蒸气空间，但罐内蒸气达到惰化程度以前，由于搅拌过程会产生静电荷，从而

引起火花和引燃，因此，在测量和取样之前应静置一定时间。

8.5.3 导电的储罐

如果浮顶与罐体搭接，浮顶储罐是绝对安全的。通常是在浮顶或覆盖层和罐壁之间安装分流器来实现搭接。分流器是为雷电保护而安装的，但它也能提供静电保护。如果浮顶落座在支架上，液体表面会发生电荷积聚，应采取与固定顶储罐相同的预防措施。如果一个内浮顶罐不能通风良好，浮顶上部空间就可能积聚易燃蒸气。

8.5.4 涂层罐和衬里罐

符合以下任一条件，不导电涂层或衬里的金属罐就可视为导电性罐。

(1) 不导电涂层或衬里的体积电阻率要小于或等于 $10^{10} \Omega \cdot m$ （例如防腐蚀的玻璃纤维增强衬里），并且厚度不能大于 2mm。

(2) 不导电衬里的体积电阻率大于 $10^{10} \Omega \cdot m$ （例如聚乙烯或橡胶衬里），但是其击穿电压小于 4kV。

8.5.4.1 不符合 8.5.4 (1) 和 (2) 条件的不导电涂层或衬里的金属罐应视为绝缘罐。无论涂层和衬里有多厚以及电阻有多大，储罐都应与灌装系统搭接。衬里和涂层不应看做是静电荷流动的阻力。它的电阻率和液体的电阻率是同一数量级的，否则涂层可能有小块裸露面积。

8.5.4.2 在管道、容器或设备内壁的薄涂层、薄塑料衬里或一层金属氧化物不会构成静电危险。

8.5.5 绝缘材料制成的储罐

由绝缘材料制成的储罐不允许存放 I 类、II 类和 IIIA 类液体，NFPA 30 的 4.2 中列出的特殊情况除外（设计和使用指南见 8.10.7）。

8.6 罐车的装载

对于罐车，推荐的装载防护措施随装卸液体的特性和装载设备结构的不同而变化。根据 API RP 2003 的要求，当罐车舱室内存在易燃混合物时，表 8.6 提供了推荐措施。这些预防措施是为导电舱室的罐车制定的（对于不导电衬里的舱室，见 8.10.4；对于不导电材料制成的舱室，见 8.10.7）。

8.6.1 顶部灌装

应按 8.4.4 的推荐方法设计灌装管，以避免喷溅灌装。

8.6.2 底部灌装

底部灌装入口应设计使用导斜器或转向器以防止向上喷溅以及产生雾化。为达到这个目的，可用罩或三通把进液引进隔舱室，防止向上喷溅。

8.6.3 转换装载

把高闪点、低导电性的液体装入存放过低闪点液体储罐的过程，称为转换装载。这个操作可能会引燃储罐内残留的易燃蒸气。危害预防方法与 8.5.2.1 (3) 和 8.5.2.1 (5) ~ 8.5.2.1 (8) 所述相似，流速见表 8.6。

8.6.4 高速公路运输

如 API RP 2003 所述，假如罐车被分隔或装有挡板，它们在运输过程中通常不会产生静电危害。隔舱或挡板减小了罐内液体的晃动，晃动会导致大量的电荷产生。无挡板的罐车不能用于盛装那些能产生可燃混合物的液体。

8.6.5 抗静电添加剂

添加电导率增强剂（抗静电添加剂）增强液体的导电性可以减少电荷的积聚。

8.6.5.1 添加剂通常以百万分之一的浓度添加，并且根据说明书来使用。

8.6.5.2 当用抗静电添加剂作为减少静电荷积聚的主要方法时，操作人员应核对系统关键点的添加剂浓度。

8.7 真空油槽车

8.7.1 为了控制静电，软管应是导电或半导电的。

表 8.6 罐车装载的预防措施总结

推荐装载预防措施 ^a	装载的液体			
	不 导 电 的			导电的 ^{c,d}
	低蒸 气压	中等蒸 气压	高蒸气 压 ^b	
1. 搭接与接地：罐车应与灌装系统连通，并且在开始操作之前，所有的搭接和接地都已连好。通常使用与灌装系统连接的接地指示器的指示来确保搭接良好。对于搭接部件，例如接线柱和灌装系统的连通性，应做定期的检查。对于顶部装载，灌装管应形成连续的导电通路，并与罐底接触良好	是 ^a	是	是	任意
2. 初期装载：顶部装载灌装管和底部装载系统应装备喷射转向器，以避免飞溅灌装。为了防止飞溅以及降低表面扰动，开始时应采用缓慢的速度（流速小于 1m/s），直到舱室的管线入口被覆盖有 2 倍管径的深度	是	是	是	是
3. 最大装载速度：应限制最大装载速度，灌装管或装料连接装置中的最大装载速度不能超过 7m/s 或 $(0.5/d)$ m/s（ d 为入口内直径，单位为米），取其中较小值 ^f 。从开始的缓慢速度转换到正常的泵送速度，可以通过特殊的调节器（当浸没到安全深度时能变速）自动地实现。无论是在操作上或还是在系统设计上，建议避免过大的流速	是 ^a	是	任意 ^a	任意
4. 电荷弛豫：任一细过滤器或粗滤器到加油罐车进口之间，至少要预备 30s 的液体滞留时间，以释放电荷 ^a 。通过车舱或油罐孔口采样测量油箱舱载量之前，至少应等待 1min 的时间。但是，任何时候都可以通过取样井或观测井中采样测量	是 ^a	是	是	任意
5. 火花促发：量油尺、高液位传感器或其他伸到储罐蒸气空间的导电设备，可能会在其自身与上升的液体之间提供静电释放空间，应尽量避免。这些设备应安全接地，通过导电电缆或导电棒，直接与罐底相连以消除产生火花的机会，或安装在一个与底部相连的测量容器中 ^a 。应进行定期的检查以确保搭接系统没有断开，没有未接地的部件或外物	是	是	是	任意
^a 推荐的装载预防措施随储运产品类型而异。在装填操作中，如果所储运产品类型变化很大，而且难于控制装填程序，例如在自助式装料架上，推荐使用包括所有预防措施的标准程序。 ^b 如果在低温（接近或稍低于闪点）下操作高蒸气压液体，应遵循所有的装载推荐预防措施。 ^c 当使用添加剂来增加电导率时，一定要慎重（见 8.6.5）。 ^d 在充电速率很高或与地有效绝缘的情况下，半导体液体能积聚电荷。这时，半导体液体需按照不导电操作（见 8.3.3.6）。 ^e 只有处于环境温度的低蒸气压可燃液体在装料架上操作，并且没有装载转换或产品交叉污染的可能，才没有必要应用推荐的装载预防措施。如果在温度高于闪点温度或接近闪点（在 4℃~9℃ 范围内）的条件下操作低蒸气压产品，必须遵循所有的推荐装载措施。 ^f 如果操作的是不导电的或单组分的液体（例如甲苯、庚烷），推荐最大填充速率为 $(0.38/d)$ m/s。 ^g 电导率非常低以及高黏性的产品，弛豫时间需要增加到 100s。 ^h 如果这些设备是不导电的，不会产生火花，不需要采取特殊的措施。安装在罐侧壁上的设备（例如液位开关和温度传感器），只向容器内突出很短距离，没有向下的突出物，这不会引起静电危险。这些情况应视具体情况而定。				

8.7.2 按照 8.7.1 的推荐,所有的导电元件应搭接,并且真空油槽车应接地。

8.7.3 绝不准使用塑料浸渍管或者塑料收集盘或桶。

8.8 铁路罐车

8.8.1 一般地,铁路罐车的预防措施与 8.6 相似。主要的不同是,铁路罐车的容积(大于 87m^3)通常比罐车的容积(约 50m^3)大。大容积允许较大的最大灌装速率,最大值可以高达 $(0.8/d)\text{m/s}$, d 是入口的内径,单位是米(m)。

8.8.2 很多罐车都在车身与旋转组件之间装备了不导电的轴承和不导电的衬垫。因此,铁轨到大地的电阻不能减小到防止罐车身的静电荷积聚。为防止电荷积聚,罐车身与输送系统管道进行搭接是必要的。此外,因为有可能存在泄漏电流,装油管线应与铁轨搭接。

8.9 海运船和驳船油轮

海运船和驳船油轮不在推荐的范围内。应遵循《原油终点站和储罐国际安全指南》(ISGOTT)中的推荐标准。

8.10 工艺容器

8.10.1 静电荷积聚方式

工艺容器中静电荷积聚的产生和 8.5 中所述的储罐相同。

8.10.1.1 导电液体和不导电液体混合的地方,应先向工艺容器中添加导电液体,以使混合液的导电性尽可能得高。

8.10.1.2 应设计循环回路以减少飞溅和表面破坏,例如,可以使用不破坏液体表面的液下喷嘴。

8.10.2 装罐程序

8.10.2.1 当把两种或两种以上的不导电性液体导入混合罐中时,应先装载低密度的液体,以避免液体表面层包含易燃的、高度带电的成分。

8.10.2.2 通常只有当容器内充满惰性气体或富裕蒸气时,才采用飞溅方式装罐。

8.10.3 搅拌

为了减少飞溅,在操作之前,搅拌器应被液体覆盖到足够的深度,或者降低操作速度,直到液体达到一定深度。在不能避免电荷积聚危害的地方,可以采用 8.10 所述的惰化容器的方法。

8.10.4 带绝缘衬里的容器

静电荷的积聚可以导致设备(例如瓷漆衬里或玻璃衬里的容器)穿孔。因为当液体从浸湿的壁面排出时,静电荷经常发生在液体表面,所以也可能存在蒸气引燃的危险。某些情况下,可以给容器或搅拌器涂静电消散涂层。建议把导电容器及辅助设备搭接并接地。某些情况下,惰化是必要的。

8.10.5 添加固体

在工艺容器中静电着火最常见的原因是向容器内易燃液体中添加固体。即使容器已经惰化,当从容器中排出易燃蒸气时,大量的固体添加会把空气引入到容器中。突然加入大量固体,也会因为带电粉末的悬浮堆积而引起静电放电。

8.10.5.1 通过敞口或人孔人工添加固体时,建议一次不能超过 25kg 。

8.10.5.2 一次投料量超过 25kg 时(例如往可变性的中型散装箱添加,见 10.1.6)应通过带有旋转阀的中间进料斗或等效设备来完成。进料斗可以单独惰化以减少空气夹带到混合容器中去,使容器排气到一个安全的地方,从而避免把蒸气排放到操作区域。即使固体是不可燃的(例如二氧化硅),用不导电的塑料袋添加固体也非常危险。

8.10.5.3 袋子应由纸、纸板和塑料构成,其中塑料是两面都包覆着纸的不导电塑料薄膜,或称其为抗静电塑料。由于用接地夹是不切实际的,这种袋子可以通过与接地的导电容器或接地的操作人员的皮肤接触而有效地接地。

8.10.5.4 纤维桶或纤维包装不应使用松弛的塑料衬里,否则衬里会脱离包装而像塑料袋一样。

8.10.5.5 金属凸边应接地。

8.10.5.6 盛有易燃气体的开口容器附近的人员应接地，并要特别注意内务管理，因为积累在地板上或物品（如接地夹）上的不导电残留物（如树脂）会减弱导电的连续性。

8.10.6 混合

当固体溶解或扩散到不导电性液体中时，电荷产生的速率很大程度上取决于固体加载、颗粒大小、搅拌速率等因素。往往通过与导电溶剂的重新组成或加入抗静电添加剂以增加连续相的导电性，从而实现电荷的消散，或者通过惰化来控制引燃危害。

8.10.7 绝缘工艺容器

8.10.7.1 通常，绝缘工艺容器不宜用于盛装易燃液体。如果它们的外表面带电，会导致表面的引燃危险。

8.10.7.2 如果要用一个绝缘容器，且在容器周围或蒸气空间中存在引燃的可能性，应联合应用以下措施以确保电荷的安全消散和防止放电：

- 所有的导电部分（例如金属边缘和舱口盖）应搭接在一起并接地。
- 对于不导电液体的储存，应符合以下标准：
 - （1）提供封闭的接地导电防护罩，以防止外来的电荷放电。
 - （2）防护罩应是嵌入罐壁上且接地的钢丝网，防护罩应包围所有的外表面。
- 用于储存绝缘液体的储罐，应有一块金属平板，在液体与大地之间提供一个电荷消散的电气通道，并且平板同时符合以下标准：
 - （1）平板的表面积与储罐容积之比应不小于 $500\text{cm}^2/\text{m}^3$ 。
 - （2）平板应设在储罐的底部并且接地。
- 用于储存导电液体的储罐，应装设一条从罐内顶部延伸到底部且与大地相连的接地电缆，或者安装一条延伸到罐底部的接地灌装管线，灌装管线应符合以下标准：
 - （1）接地的灌装管线从罐底进入。
 - （2）接地的灌装管线不能把火花促生剂带进来。

8.11 测量和取样

温度测量和取样操作，会把火花促生剂带进储罐或舱室内。人工取样或测量时，建议使用导电的量油立管。

8.11.1 预防措施

如果没有条件使用量油立管，对不导电的容器，或容器的蒸气空间是可燃的，应采取 8.11 部分的预防措施。

8.11.2 人工操作

当人工进行这些操作时，应考虑采取 7.6 部分推荐的操作人员接地的方法。

8.11.3 材料

测量和取样系统应或是完全导电的，或是完全绝缘的。例如，导电的测量和取样设备应与导电的降落装置配合使用，例如钢尺或钢缆。

8.11.3.1 链条不是连续导电的，不宜用在易燃环境中。

8.11.3.2 导电的取样与测量装置，包括取样容器和降落设备，应与罐或舱室搭接良好。

8.11.3.3 8.11.3.2 所指的降落设备与罐口的搭接可通过使用搭接电缆或连续不断的金属接触来实现。

8.11.3.4 理想情况下，如果使用不导电的人工测量或取样设备时，装载或装满后不需要一定的静置时间。但是应注意的是，由于环境因素，例如湿气和污染，这些设备的不导电性可能不会一直保持在必要的程度上。因此，使用不导电设备时，建议留出适当的静置时间。

8.11.3.5 应禁止使用由合成材料（如尼龙）制成的绳索，因为绳索快速滑过戴手套的手时可能会产生电荷。尽管原则上可以使用天然纤维绳索，但是这种绳索往往是由天然合成的混合物构成，具有相当大的电荷产生能力。

8.11.4 测量

如果可能,最好使用自动测量系统来测量。如果计量浮子和类似的设备通过导电的引线带或导电的导向电线搭接到了储罐的外壳上,测量系统可以安全地用在储罐里。没有搭接的自由浮子是高效的火花促生物,应避免使用。如果能确保导电的连续性,像雷达和超声波测量计等非接触式测量设备也令人满意。应避免使用孤立的导电部件。

8.11.5 静置时间

8.11.5.1 根据舱室的大小及装载产品的电导率,应允许足够的静置时间以使积聚的电荷消散。

8.11.5.2 大于 40m³ 的储罐,在计量或取样前,宜有 30min 的静置时间,使用量油立管时除外。20m³~40m³ 的小储罐,在计量或取样前,静置时间可降低到 5min,小于 20m³ 的罐可降低到 1min。对于低电导率的液体 ($k < 2\text{pS/m}$) 或含有次分散相的液体 (例如重量含水大于 0.5% 的 I 类液体),需要更长的静置时间。如果使用量油立管,静置时间就没有必要。

8.12 储罐的清洗

8.12.1 水洗

8.12.1.1 罐中喷水产生的水雾可能具有很高的带电性。基于能够形成的水雾大小,对大于 100m³ 的罐来说,水雾带电是特有的问题。

8.12.1.2 喷射水冲洗只能用在被惰化的或不易燃的环境中。尽管《原油终点站和储罐国际安全指南》(ISGOTT) 是专为海上油轮所写,但它对油罐清洗做了全面的论述。小于 100m³ 的储罐并且所有的导电部件都接地,放电危害可以忽略不计。在水洗过程中,如果蒸气可能进入罐内,应采取 8.12.3 所述的预防措施。

8.12.2 溶剂清洗

由可燃性溶剂产生的雾电荷浓度,与水洗过程中产生的相似,应采取类似的预防措施以使导电部件接地。

8.12.2.1 如果溶剂的种类或所使用的清洗方法限制,致使可燃性气体或雾不能避免时,正清洗的罐或容器应被惰化或浓化,以降低清洗过程中着火的可能性。

8.12.2.2 当容器没有惰化(或浓化)并且存在可燃环境,在使用溶剂作为清洗剂时,应考虑采取以下预防措施:

- 溶剂应是导电的。
- 当使用溶剂混合物(例如再生溶剂)时,应定期检查溶剂的电导率。
- 应使用高闪点(至少比清洗过程中的最高操作温度高 9℃)的物质。应每天核实闪点大小。
- 清洗系统应导电并与罐搭接。应对所有的搭接设备定期测试其连通性。
- 不导电物体应按如下处理:
 - (1) 在清洗过程中,不应把没有接地的导电物体带进罐内。
 - (2) 在清洗后的一定时间内,不应把没有接地的导电物体带进罐内。由于雾的产生,这个时间可能得几个小时。

8.12.3 蒸气清洗

蒸气清洗会产生很高的电荷浓度,并且空间的电荷电压会随着罐体积的增大而增大。因此,建议采用以下预防措施:

- 对于大于 4m³ 的罐,在蒸气清洗前应先惰化。
- 蒸气系统的所有部件都应导电并接地。
- 罐的所有导电部件应搭接在一起并接地。

8.12.4 内部喷砂清理

8.12.4.1 如果可能,罐和工艺容器应是洁净的且没有可燃性物质(不高于 10% LFL)。

8.12.4.2 用做喷砂清洗的软管应接地,软管系统的任何部分,特别是喷嘴到大地的电阻不能超过

$10^6 \Omega$ (见 A. 8. 4. 3)。

8.13 便携罐、中型散装容器及桶等非大型容器

以下推荐措施可以降低便携罐、中型容器及桶在灌装和排放过程中产生的静电危害。

8.13.1 金属的便携罐和中型散装容器

8.13.1.1 如果可能, 金属便携罐和中型散装容器最好底部充装。

8.13.1.2 若用来装不导电的易燃液体, 过滤器应安装在上游并且至少 30s 的流动时间处, 见 8. 4. 5. 1. 2。

8.13.1.3 便携罐及中型容器应在开口前与灌装系统搭接, 密闭后才能断开搭接。

8.13.1.4 充装速率应与罐灌装速率相似, 大约 225L/min 或更小, 容器被惰化的除外。

8.13.1.5 如果充装管不能延伸到底部, 容器也没有被惰化, 在充装管被浸没到 150mm 之前, 启动流速应降到 1m/s 或更低。

8.13.1.6 相等的电荷浓度下, 由于有绝缘层的便携罐及中型容器的大容量以及可以储存更多的能量, 因此其静电危害比桶的严重一些。

8.13.2 绝缘的便携罐和中型散装容器

8.13.2.1 用便携罐及中型容器装填温度低于闪点的易燃液体时, 不会有大的静电危害。灌装这样的容器时, 如果灌装的可燃液体的温度比闪点温度高, 或比闪点温度低 9℃ 以内, 都应当作易燃液体对待。

8.13.2.2 如果罐内含有以前产品放出的可燃蒸气时, 重装罐是不允许的。此外, 对于装有任何液体的不导电容器, 常规的处理方法都会在容器的外表面产生电荷。

8.13.2.3 当周围有易燃蒸气时, 不能使用不导电的便携罐及中型散装容器。

8.13.2.4 根据 NFPA 30 的规定, 由不导电材料制造的小型罐和中型散装罐, 禁止用来装载 I 类液体。当用来装 II 类或 III 类液体时, 预防措施取决于容器的大小、容器的结构以及液体的电导率。

8.13.3 非大型金属容器

8.13.3.1 灌装时, 金属集装箱和相关的装罐设备应搭接在一起并接地。

8.13.3.2 应用硬化的钢铁夹具进行接地, 这样螺栓力或强弹力会穿透油漆层、防腐层以及污垢层 (见附录 G)。

8.13.3.3 取走集装箱的塞子之前, 夹具应在远离塞口的顶缘处接好。

8.13.3.4 接地的灌装管应有约 45° 切角, 并且留下尖角, 以阻止液体表面的刷形放电。

8.13.3.5 灌装管的末端应伸入桶底 25mm 以内, 并且一直保持在液面以下, 直到桶装满为止。对于流动时不会发生喷溅的黏性液体, 可以通过一个短的喷灌喷嘴使液体沿着桶的内壁面流下。桶很少有必要惰化。

8.13.3.6 从金属集装箱中分配液体时, 金属集装箱应接地。

8.13.3.7 应使用自闭式金属分配阀。

8.13.3.8 从立式桶中分配时, 浸渍管、导电软管以及泵应搭接到桶上并接地 (见 8.13.6 的漏斗及接收器)。

8.13.4 塑料衬里的非大型金属容器

8.13.4.1 如果衬里的厚度不超过 2mm, 酚醛类漆或环氧类漆的薄内涂层的静电效果可以忽略。衬里厚度 2mm 以内的罐应视为金属罐。

8.13.4.2 如果桶的不导电塑料衬里比 2mm 厚, 应视为不导电容器, 表面电阻率不大于 $10^{10} \Omega/\text{m}^2$ 的除外。

8.13.5 非大型塑料容器

盛装 I 类液体的塑料容器的使用受 NFPA 30 的限制。此类容器用来装 II 类或 III 类液体时, 灌装过程中的预防措施取决于容器的大小、结构以及液体的电导率。

8.13.5.1 因为塑料容器不能接地, 没有成熟的危险评估, 所以不能用于 I 类液体的盛装以及不能在

易燃环境中操作。

8.13.5.2 对于Ⅱ类液体，应重视如下过程的静电危害：

- (1) 在装罐或排空过程中，液体温度可能超过它的闪点。
- (2) 容器在可燃的环境中储存或装卸液体时。

8.13.5.3 在 8.13.5.2 (1) 中，可以选择底部灌装和卸载前冷却液体，特别是容器在太阳直射下或处在加热的环境中，也可考虑在卸载过程中进行连续惰化。

8.13.5.4 在 8.13.5.2 (2) 中，塑料容器应远离盛有易燃液体的容器，这样就可以避免塑料容器外表面的静电危害。

8.13.6 容积不大于 20L 的手提式容器

静电打火危害随着容器的容积以及液体挥发度的增大而增加。因此，在满足要求的前提下，应挑选最小容量的容器并且不超过 20L。

8.13.6.1 推荐使用已注册的安全容器，特别是装备有挠性金属分配软管的容器，这样的容器没有必要使用漏斗。

8.13.6.2 因为不导电的容器不能接地，对于 IA 类液体容量应限制在 2L 以内，对于 IB 类油和 IC 类液体，应限制在 5L 以内。汽油是例外，多年来，用 20L 的塑料容器装汽油与用金属容器相比，静电起火事故并没有增加。部分原因是由于在容器内很快形成了富汽油蒸气（高于可燃上限）。

8.13.6.3 没有进行危害评估，8.13.6.2 所指的塑料容器不能用于其他的易燃液体。与汽油不同，导电的液体如酒精，可以被带电的塑料容器感应带电而引起火花。另外，这种容器可能包含可燃环境。

8.13.7 绝缘容器

容量限制问题已经在 8.13.6 中论述过了，通常用 0.5L 或更小容量的玻璃或塑料容器储存可燃液体。

8.13.7.1 当 8.13.7 所指容器用在液体频繁调用的地方，例如小规模溶剂配料操作，当灌装容器时，应使用一个接地的金属漏斗，漏斗的管嘴延伸到容器的底部。这种方法可以确保容器（例如塑料容器可能会由于摩擦而带电）内液体带的电荷通过接地的金属漏斗而消散。

8.13.7.2 只有不得已情况下，才使用塑料或玻璃漏斗。

8.13.8 取样容器

8.13.8.1 当容器外存在可燃环境时，着火危险就显著增加。例如，直接从罐中取样或在人孔附近传送样品时，这样会引发大的火灾或爆炸。这种情况下，可以使用接地的金属容器或接地金属盒中的玻璃瓶。

8.13.8.2 除了通风良好的地方，应避免使用不导电的塑料容器，因为它们比玻璃容器更容易带电。如果从远离罐开口并在自由通风处的取样插口中室外取样，并且取样 1L 或更少时，多数情况下不要求采取特别的火灾预防方法，把金属元件搭接起来即可。

8.13.9* 清洗

8.13.9.1 开始清洗如蒸气清洗之前，容器应搭接并接地。

8.13.9.2 清洗设备也应搭接或接地。

8.14* 真空吸尘

在易燃环境中使用真空吸尘器收集液体和固体时，由于静电放电而着火导致严重危害。如果在工艺装置区有必要使用这种设备，应仔细评估其危害以及遵守安全使用程序，并明确告知给潜在用户。

8.15 气流清扫

8.15.1 通常单相气流中产生的静电荷可以忽略不计。固体的存在，例如管垢或像水滴或冷凝物等的悬浮液体会产生电荷，这些电荷被气相携带。带电的气流撞击到没有接地的物体上会产生火花。例如，在一定压力下二氧化碳放电形成带电的固体“雪”。在易燃环境中，这种现象能导致着火危险。由于这个原因，高压罐或灭火器中的二氧化碳不会用来惰化容器。

8.15.2 像乙炔、氢气这样的最小点火能很低的气体，当高速放空时，含有的悬浮物质会由于电晕放

电而着火。这种现象与排出的带电气流周围的电击穿有关。即使接地良好，这种现象也会发生。

8.16 塑料薄膜和覆盖物

8.16.1 像用在覆盖海运货盘上的不导电塑料薄膜和覆盖物，产生的危害类似于塑料袋。当受摩擦或从表面分离时，这些薄膜和覆盖物会在表面发生刷形放电。绝缘的湿布同样会产生火花危害。

8.16.2 另一个问题是，在操作过程中应注意人体的放电。塑料薄膜不宜带入到易燃区域。如果有必要，可把塑料货盘覆盖物移出易燃区域，用适当的帆布或其他临时遮盖物来代替塑料薄膜，也可以使用抗静电薄膜。从配送器上扯下薄膜时会产生很强的静电荷，预防措施与塑料薄膜的类似。

9 粉末和粉尘

9.1 概述

粉末包括球粒、小颗粒以及粉尘颗粒。球粒直径大于 2mm，小颗粒直径在 $420\mu\text{m}\sim 2\text{mm}$ 之间，粉尘的直径为 $420\mu\text{m}$ 或更小。必须注意的是，球粒和小颗粒的混合物常常会包含相当数量的粉尘。在工业操作中，粉末的运动通常会产生静电荷。静电的积累和其后的放电会引起着火或爆炸。

9.2 粉尘云的可燃性

9.2.1 任何被分散成直径为 $420\mu\text{m}$ 或更小的细小固体物质被定义为可燃粉尘（例如，能够透过一种 40# 美国标准筛的物质），这种粉尘会产生着火或爆燃危害。

9.2.2 对于静电荷，要引燃可燃粉尘必须满足以下四个条件：

- 必须存在有效的静电荷分离的途径。
- 必须有积聚静电荷的方法以及维持电压差的方法。
- 具有足够能量的静电放电。
- 放电必须发生在粉尘的可燃混合物中。

9.2.3 若要能持续燃烧，空气中要有足够量的悬浮粉尘，这个最小量被称作最小爆炸浓度（MEC）。对于给定大小均匀地悬浮在空气中的颗粒，它是支持爆燃过程的最小浓度，用单位体积的质量表示（这一章中假设空气是助燃气体，除非指明存在另一种氧化剂）。

9.2.4* 静电放电要引燃粉尘云，不论是从空间还是时间上，需要足够的放电能量密度。然而，最小点火能仅是放电能量的一部分。粉尘云的最小点火能（MIE）是电容放电的能量，高于或等于这个能量就会发生着火燃烧。

9.3 带电机理

9.3.1 静电广泛发生在粉末的运动中。粉末和表面间的摩擦以及粉末颗粒之间的摩擦都会发生静电。颗粒的带电特性往往取决于表面的污染程度以及颗粒的化学特性；因此，很难预测电荷的多少和极性。

9.3.2 当粉末与其他表面接触时，例如在筛选、倾倒、滚动、研磨、微粒化、滑动以及气动输送时，可以随时预测粉末的带电。这些操作中，接触越激烈，产生的电荷也就越多，如表 9.3.2 所示。表中给出了不同操作下可能的电荷浓度范围；实际数值取决于颗粒成分和操作。

表 9.3.2 不同操作中中等电阻率粉末的带电等级（出自 BS 5958《静电控制实践准则》）

操作方式	电荷密度, $\mu\text{C}/\text{kg}$
筛选	$10^{-3}\sim 10^{-5}$
倾倒	$10^{-1}\sim 10^{-3}$
螺旋或螺旋給料输送	$10^{-2}\sim 1.0$
研磨	$10^{-1}\sim 1.0$
微粒化	$10^2\sim 10^{-1}$
气动输送	$10^3\sim 10^{-1}$

9.3.3 悬浮在气体中的粉末所携带的电荷量有一个上限。这个上限由颗粒表面的电场强度确定，取决于表面电荷密度以及颗粒的大小和形状。对分散良好的颗粒，最大表面电荷密度具有 $10\mu\text{C}/\text{m}^2$ 的数量级，可以根据这个值从颗粒直径和密度数据估算出最大荷质比（电荷量与质量之比）。

9.4 电荷滞留

9.4.1 较大粉末可以保留电荷，取决于它的体积电阻率和容积介电常数。弛豫时间由如下公式表示：

$$\tau = \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot \rho$$

式中：

τ ——弛豫时间，s；

ϵ ——较大粉末的介电常数；

ϵ_0 ——真空电导率，取值为 $8.85 \times 10^{-12} \text{ s}/(\Omega \cdot \text{m})$ ；

ρ ——粉末的体积电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ 。

9.4.2 固体传送的电荷的能力由体积电阻率来描述。对于液体，传送电荷的能力由电导率来描述。

9.4.3 粉末分为以下三类：

——低电阻率粉末，体积电阻率不大于 $10^8 \Omega \cdot \text{m}$ ，例如金属、煤粉、炭黑。

——中电阻率粉末，体积电阻率在 $10^8 \Omega \cdot \text{m} \sim 10^{10} \Omega \cdot \text{m}$ 之间，例如许多有机粉末和农产品。

——高电阻率粉末，体积电阻率大于 $10^{10} \Omega \cdot \text{m}$ ，例如有机粉末、合成聚合物和石英。

9.4.3.1 低电阻率粉末在流动过程中会带电，当粉末输送到接地的容器里时，电荷迅速消失。但是，如果粉末被传送到不导电容器中，积聚的电荷会产生引燃的火花。

9.4.3.2 当中等电阻率的粉末停止运动时，保留的电荷量取决于粉末和大地之间的电阻大小。如果粉末放置在接地的容器中，电荷的滞留取决于粉末的体积电阻率，包括微粒之间的电阻，由 9.4.1 中所给的关系式决定。如果粉末放置在不导电的容器中，电荷滞留取决于容器的电阻。中等电阻率粉末的一个重要特点就是在处理的过程中相对比较安全，因为它们不会产生膨胀刷形放电，也不会产生火花。

9.4.3.3 高电阻率粉末自身不产生火花放电，但是会产生其他形式的放电，例如电晕放电、刷形放电、膨胀型刷形放电和扩散型刷形放电（见 5.3）。即使在接地的容器中，高电阻率粉末电荷减少的速度也很慢。很多高电阻率粉末是不溶于水的，可以保留电荷几个小时甚至几天。高电阻率粉末，如热塑性树脂，电阻率可以达到 $10^{16} \Omega \cdot \text{m}$ 。

9.5 粉末作业中的放电

9.5.1 火花放电

9.5.1.1 导体发生火花放电的地方，火花中的能量可以通过以下公式计算，或根据图 5.3.3.3 图解得到：

$$W = \frac{1}{2} C \cdot V^2$$

$$W = \frac{1}{2} Q \cdot V$$

$$W = \frac{Q^2}{2C}$$

$$Q = C \cdot V$$

式中：

W ——能量，J；

C——电容, F;

Q——电量, C;

V——电位差, V。

9.5.1.2 应指出, 这些公式只适用于导体的电容放电, 不适用于绝缘体的放电。放电的能量可以比照粉尘的最小点火能来计算 (见 5.3.3), 最小点火能给出了电容火花放电可能引燃的能量。可燃性粉尘层可以被电容火花放电点燃, 这样会引起二次粉尘爆炸。对于粉尘层, 与粉尘云引燃的最小点火能之间没有关系。必须把所有导电容器、设备、产物以及人员进行接地以避免电容火花放电。

9.5.2 电晕放电和刷形放电

处理大量的中等或高电阻率的粉末时, 会出现电晕放电和刷形放电。然而, 没有证据证明电晕放电可以点燃粉尘云。同样, 没有证据能够证明, 若粉尘云中没有易燃气体或易燃蒸气存在时, 刷形放电能够引燃最小点火能大于 3mJ 的粉尘。

9.5.3 扩散型刷形放电

因为扩散型刷形放电可产生大于 1J 的能量, 因此, 应认为扩散型刷形放电能够引燃可燃粉尘云和粉尘层。

9.5.4 膨胀型刷形放电

9.5.4.1 当电阻率高于 $10^9 \Omega \cdot m$ 的粉末装入接地的导电容器中时, 电荷通过导电而消散的速率小于装载过程中电荷的积聚速率, 于是电荷积聚, 从膨胀点到容器壁之间就会发生放电, 这种放电称膨胀型刷形放电。经验告诉我们, 这种放电不能引燃最小点火能量大于 10mJ 的可燃粉尘。但是, 这种放电会使最小点火能小于 10mJ 的粉尘发生爆炸。

9.5.4.2 在压密过程中, 放电的能量随着颗粒的增大而增加。因此可预见, 有一定比例粉尘的颗粒存在时, 装置处于危险状态。

9.6 气动传输系统

9.6.1 通过管道或导管传输粉末物质时, 在传输的物质和管道上都会产生静电。当物质排出系统时, 这些静电荷仍然余留在物质上。因此在收集物质时, 应采取防止静电积聚的预防措施。

9.6.2 管道和导管应是金属的并且应接地。

9.6.2.1 管道连接的设备也应是金属的并且接地, 这样能够消除物质运输过程中传递到设备上的电荷。

9.6.2.2 使用管接或管道组件装配的地方, 会引起接地线路的连续性破坏, 因此, 应符合下列标准之一:

- (1) 可使用跨接电缆维持接地线的连续性。
- (2) 使管道的绝缘部分独立地接地, 见图 9.6.2.2。

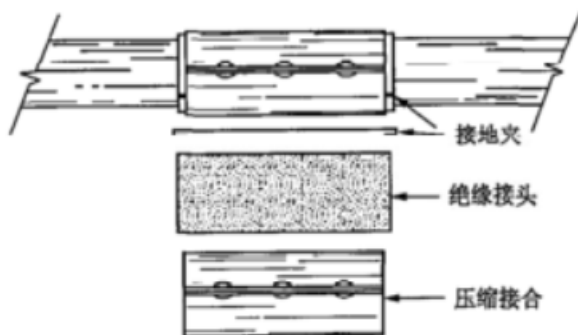


图 9.6.2.2 气动传输管道的压合接头

9.6.3 不应使用绝缘的管道或通风管。

9.6.4 不应使用透明的短塑料管来做流动观测。因为人们已经知道, 这会引起扩散刷形放电而引燃

粉尘。

9.7* 挠性软管

9.7.1 由不导电材料制成的，配有螺旋加强绕丝的软管应维修良好，以确保内部绕丝直接连接在金属接头上，而且接头接地良好。

9.7.2 多于一个内绕丝的软管不宜使用，因为不能确定其中的一个绕丝是否失去了它的导电连续性。

9.8 挠性套管和护套

9.8.1 挠性套管和护套常被用于重力传输。套管一般由塑料和橡胶制成，护套一般由纤维制品制成。非导热套管既可引起刷形放电又可引起扩散型刷形放电。因为纤维制品中空气隙的击穿强度比较低，所以扩散型刷形放电不会在护套发生。但是某些条件下护套可能产生刷形放电。

9.8.2 对于可燃粉尘，用兆欧表测量的挠性套管和护套间的总电阻应小于 $10^8 \Omega$ ，最好小于 $10^6 \Omega$ 。

9.8.3 工艺设备间的挠性连接，不应依靠一个搭接或接地连接。应使用多个独立的搭接或接地。

9.9 袋式集尘器

9.9.1 当粉尘落入或吹入袋式集尘器时，粉尘本身必然会携带静电荷，电荷的具体数量取决于粉尘的特性和操作，具体见表 9.3.2。这些电荷将会遗留在粉尘上，并会积聚在袋子表面。因此，要让所有的导电设备都接地，以防止导电元件上积聚的电荷发生静电感应。这类感应尤其常见于外壳系统上。

9.9.2 假如外壳系统没有良好接地，从未接地的外壳无论是到袋式集尘器设备还是到邻近的外壳系统，都会产生电容火花放电。许多情况下，会用金属引线把这些袋子与其套箍连接起来，这种做法仅仅是因为引线可以穿过外壳搭接到管板上。外壳接地的方法并不总是有效，因为袋子是不导电的，袋子本身也没有接地。因此除非把金属引线沿着袋子的总长延伸（见图 9.9.2）。

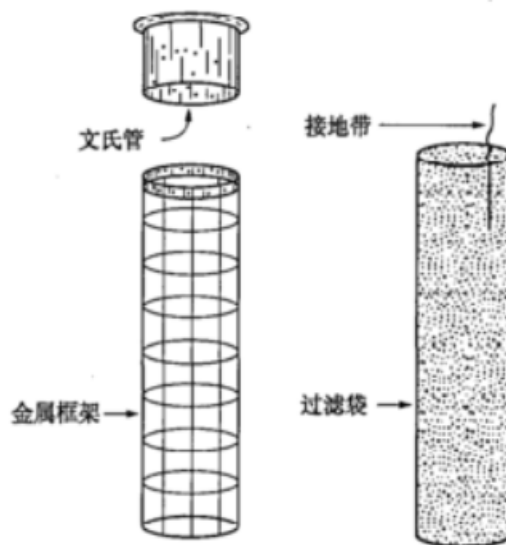


图 9.9.2 外壳与过滤袋的安装

9.9.3 工程设计时集尘袋和外壳的接地应考虑全面，以便在保养期间，即使是没经验或粗心的人，也能一直保持明确的接地。一种方法是，把两根金属引线按 180° 分开缝在袋子的套箍上，每根线连续地向上被缝在套箍内侧，经过顶部，然后向下缝在套箍外侧。这样，引线会总是与外壳、喉管和夹具明确地连接。任何情况下，外壳和大地间的电阻都应低于 10Ω 。

9.9.4 没有证据证明导电或抗静电纤维做的过滤袋需要防备静电引燃。相反，如果纤维部分被隔离了，或袋子落进了袋式集尘器底部，这些袋子可能引起放电危害。

9.10* 杂化混合物

9.10.1 杂化混合物指一切悬浮的可燃粉尘和易燃气体或蒸气的混合物，无论是粉尘本身还是蒸气本身数量再多也不助燃，但是两者的混合物能助燃。粉末操作过程中产生的高电荷密度和易燃蒸气小的

点火能相结合,引起杂化混合物的特殊问题。杂化混合物的最小点火能难以估计,但可以通过假设混合物的最小点火能(MIE)等于或接近纯净气体的最小点火能来保守估计。因为杂化混合物中包含易燃气体和蒸气,能被电晕放电引燃。

9.10.2 含有足够多溶剂(重量超过0.2%)的粉末,以便能够吸收操作中积累的高浓度可溶蒸气,这种粉末被称为溶剂型湿粉。除非溶剂型湿粉的电阻率小于 $10^8 \Omega \cdot m$,否则应考虑采用第7章的推荐方法。

9.11* 向易燃液体中人工添加粉末

9.11.1 在工艺容器中,静电着火最常见的是向容器的易燃液体中添加固体。即使容器已经惰化,当从容器中排出易燃蒸气时,大量的固体的添加会把空气引入到容器中。突然加入大量固体,也会因为带电粉末的悬浮堆积而引起静电放电。

9.11.1.1 通过敞口或人孔人工添加固体时,每次添加量宜控制在25kg之内。

9.11.1.2 当投料大于25kg(例如,挠性中型容器,见10.1.6)应通过带有旋转阀的中间进料斗或等效设备来完成。进料斗可以单独惰化以减少空气夹带到混合容器中去,通过使容器排气到一个安全的地方,从而避免把蒸气排放到操作区域。

9.11.1.3 即使固体是不可燃的(例如二氧化硅),用不导电的塑料袋添加固体也非常危险。袋子应由纸、纸板和塑料构成,其中塑料是两面都包裹着纸的不导电塑料薄膜,或称其为抗静电塑料。因为接地夹是不适用的,这种袋子可以通过与接地的导电容器或接地的操作人员的皮肤接触而有效地接地。

9.11.1.4 纤维桶或纤维包装不应使用松弛的塑料衬里,否则衬里会脱离包装而像塑料袋一样。

9.11.1.5 金属凸边应接地。

9.11.1.6 盛有易燃气体容器开口附近的人员应接地,并要特别注意内务管理,因为积累在地板上或物品(如接地夹)上的不导电残留物(如树脂)会减弱导电的连续性。

9.11.2 在易燃环境中,不应把粉末从不导电容器中卸空。严格禁止把粉末直接从不导电塑料袋中倒空到含有易燃环境的容器中。

9.11.3 应严格禁止把绝缘塑料袋中的粉末直接投放到含有易燃环境的容器中。

9.11.4 在对操作十分熟悉的地方,容器内不存在易燃环境的地方,添加液体前先向容器中添加粉末可能是比较实用的方法。

9.12 大量储存

9.12.1 当把粉末移入大量储存器(如料仓、铁路车厢、卡车、中型容器或挠性中型容器)时,粉末因重力作用而受到压缩。压缩过程会伴有膨胀型刷形放电,见9.5.4。压缩过程中,放电能量随颗粒体积的增大而增大。因此,系统多数危险是因为系统中含有一定比例的球状粉尘。

9.12.2 目前人们还没有十分清楚发生能引燃的膨胀型刷形放电的准确原因。但Glorzai在《粉末处理中的静电危害》一文中揭示出以下几种情况会增加放电的可能性:

- 增大粉末的电阻率,大于 $10^{10} \Omega \cdot m$ 。
- 增大粉末的颗粒尺寸,大于1mm。
- 增大粉末的电荷密度,大于 $1 \mu C/kg$ 。
- 增大填充速率:对于颗粒直径大于1mm~2mm的,填充速率大于 $20 \times 10^3 kg/h$;对于颗粒直径约0.8mm的,填充速率大于 $20 \times 10^3 kg/h \sim 30 \times 10^3 kg/h$ 。

10 具体应用

10.1 中型散装容器(IBCs)

10.1.1 概述

第9章所述的对于粉末和粒状固体的论述和预防措施,也适用于中型容器(IBCs)。

10.1.1.1 当粒状固体进入 IBCs 及从 IBCs 排出时,固体上会产生静电荷。这些电荷是在颗粒运动、与工艺设备或其他颗粒摩擦时产生的。

10.1.1.2 产生的电荷可在接地容器中的粉末堆上积累,积累的电量取决于粉末状物质的电阻率,而不是块状物质的电阻率。电阻率越高,电导率越低,电荷滞留时间越长。在高电阻率的情况下,电荷将缓慢释放,并在物料底部滞留相当长的时间。因此,在粒状物料运动过程中,电荷的产生和释放是同时的。当电荷产生率大于释放率时,就会有大量电荷积累。

10.1.2 放电形式

当静电荷在大型容器或相关的中间设备上积聚时,可能会发生以下四种放电形式(见 5.3 对四种放电形式的讨论):

- 火花放电。
- 刷形放电。
- 扩散型刷形放电。
- 膨胀型刷形放电。

10.1.2.1 在两个不同电势的导体间会发生火花放电,并释放能量,这些能量在工艺条件下可以引燃可燃气体、蒸气或粉尘与空气的混合物。这种放电可发生在材料库内一块离开地面的导体上。

10.1.2.2 一般处理颗粒状物质时可不考虑刷形放电。但是,当可燃气体或蒸气存在时,电晕放电可能是引燃源,就像处理多组分混合物或颗粒状物体时在容器中的快速放电。这种情况要尽可能避免。

10.1.2.3 扩散型刷形放电通常包含 1J 或更多能量,这取决于过程条件。这些放电可引燃大多数可燃气体。

10.1.2.4 膨胀型刷形放电产生能量的数量级在 10mJ 左右。为了减小膨胀型刷形放电带来的风险,最小着火能小于或等于 10mJ 的粉末应置于小于或等于 2m³ 的容器中,除非容器内是惰性环境。

10.1.3 颗粒物质

10.1.3.1 如果物质颗粒都大于 420 μ m,那么就不会形成可燃的粉尘云。但是,如果颗粒物质是由微粒组成的或包含一定百分数的微粒,那么可燃的悬浮粉尘就会形成,此时就不允许有点火源。

10.1.3.2 经验表明,在粉末电阻小于 10⁸ $\Omega \cdot m$ 的地方,静电在大量颗粒状物料中释放的速度足以防止静电积累。

10.1.4 导电的中型散装容器

10.1.4.1 导电的 IBCs (如由金属制成)处于可燃环境时,在整个操作中应接地。

10.1.4.2 为确保导电容器和相关导电设备在整个操作过程中接地良好,工程设计和管理的都要注意以下因素:

- 金属通风筒应接地。
- 挠性灌装管的导电部分包括内部任何加强绕丝也应接地。

10.1.4.3 当不导电物料被输送入接地的导电 IBC 中时,积累在物料上的电荷还会留在物料上。弛豫过程是电荷从物料上缓慢迁移到电荷极性相反的壁面上。弛豫过程取决于物料的电导率,可以持续几秒或几分钟。当这种弛豫过程发生时,物料的表面依然存在电场。

10.1.4.4 在 IBCs 顶部开口的情况下,这个电场可以感应其他导体(包括未接地的人员)上可能存在的电荷。因此,即使导电的 IBCs 接地良好,在其他未接地导体的表面上仍会产生感应电荷。应采取适当的预防措施。

10.1.4.5 只有 IBCs 必须用衬里时(例如,为了保持 IBC 和被处理物料之间的相容性),才使用由不导电的衬里和导电材料制成的 IBCs。着火的风险和扩散型刷形放电产生电击的可能性在很大程度上取决于衬里的厚度和电阻率、处理工艺、被处理物料的电性能以及可能存在的可燃物料的易燃特性。

10.1.4.6 一般情况下,倘若不导电内衬的击穿电压小于 4kV 时,扩散型刷形放电不会发生。各种情况应分别考虑。

10.1.5 绝缘的中型散装容器

10.1.5.1 绝缘的 IBC, 是指体积电阻率大于 $10^{10} \Omega \cdot m$ 或表面电阻大于 $10^{11} \Omega$ 的 IBC。

10.1.5.2 当物料送入不导电的 IBC 时, 容器材料会阻碍物料上的任何静电荷释放到地面。在这种情况下, 容器内的物料即使是导电的, 也能积累电荷。

10.1.5.3 易燃环境(如最小点火能小于 10mJ, 汽油、易燃蒸气、可燃粉尘和杂化混合物)区, 不能灌装或排空不导电的 IBCs。

10.1.5.4 当把粉末从不导电容器加入到易燃液体中时, 应关闭并惰化接收系统。

10.1.5.5 在环境温度接近或大于溶剂闪点的地方, 不能用不导电的 IBCs 盛放可溶的潮湿粉末(如溶剂的重量含量超过 0.2%)。

10.1.5.6 如果不导电的 IBC 被移到有易燃气体或蒸气的地方, 应避免容器的摩擦。

10.1.6 挠性中型散装容器(FIBCs)

10.1.6.1 描述

挠性中型散装容器(FIBCs)基本上就是一种有骨架支撑的大编织袋。它们比固定的 IBCs 更方便, 因为用完后可以折叠起来, 占用很小的储存空间。

10.1.6.1.1 制品通常是聚丙烯, 缝制成带有手提带的三维立方体或长方体形状。FIBC 可以盛放粉末或粒状物料, 可以经常用常规的物料搬运设备搬动。

10.1.6.1.2 挠性中型散装容器的优点之一就是可以被快速卸载, 通常卸 300kg~500kg 的物料只需 30s 或更少的时间。因此, 在通常的使用条件下, 静电荷积累的速率常常大于电荷的弛豫速率, 因此, 可以预测静电荷的积累。通常, 10.1 中 IBCs 的预防措施也适用于挠性中型散装容器。

10.1.6.2 电荷的产生

在装载或卸空 FIBCs 的过程中, 会产生静电荷, 静电荷会积累在 FIBC 的纤维制品上及容纳物(FIBC 内的物料)上。如果积累的电荷足够多, 在可燃环境中释放时, 就会发生着火燃烧。

10.1.6.3 绝缘的挠性中型散装容器

10.1.6.3.1 用不导电材料(如用聚酯缝合的聚丙烯纤维制品)制成的挠性中型散装容器, 在减少静电荷带电方面没有特别之处。这些不导电的 FIBCs 可以用于普通操作中不形成可燃环境的物料。

10.1.6.3.2 经验表明, 在处理过程中形成粉尘云的粒状物料, 如果静电放电不能很容易地点燃产生的粉尘云时, 也可以在不导电的 FIBCs 安全地操作粒状物料。换句话说, 物料产生的粉尘云的最小点火能应大于 100mJ, 并应符合以下标准:

——最小点火能小于 100mJ 的粒状物料, 不能使用挠性中型散装容器。

——绝不能在存在易燃气体或蒸气的环境中使用。

10.1.6.4 导电的挠性中型散装容器

10.1.6.4.1 由导电纤维制品制成的 FIBCs 可以当做是导电的 IBC, 详见 10.1.4。假如导电的 FIBCs 使用衬里, 10.1.4.5, 10.1.4.6 中的推荐作法依然适用。在整个操作过程中, 有必要使这些 FIBCs 接地。

10.1.6.4.2 由不导电纤维制品制成的 FIBCs, 当含有接地的导电细丝时, 可视为导电的。一种类型是, 导电的细丝间距小于 20mm, 每一根与邻近的细丝连接至少一次, 最好一端连接并设计好接地。另一种类型是, 导电细丝形成相互连接的格栅, 网孔大小不大于 50mm, 而且也设计好接地。

10.1.6.4.3 10.1.4 中给出的对于导电的 IBCs 的推荐作法也适用于 FIBCs。当 FIBCs 排空或装料时, 用导线连接在接地标记处并与接地端连接。

10.1.6.5 总结

目前, FIBCs 的制造和使用正处于发展阶段, 并引进了许多纤维制品化合物及其变体。因此, 存在可燃环境的地方, 不可能推荐适用于所有类型的 FIBCs 的安全措施。特别是对于由各种导电的和导电的纤维制品层制成的 FIBCs, 没有足够的数据进行说明。

10.1.7 容器内衬

10.1.7.1 导电的和导电的衬里（如碳填充的聚丙烯）都可以用在容器上。作为一种接地方式，导电的衬里已被用于不导电容器中。考虑产品污染的情况下，不导电的（如聚丙烯）衬里已被用于导电（如金属）和不导电（如聚丙烯）容器中。并且，很细微的粉末透过纤维制品泄漏时，使用不导电的（如聚丙烯）衬里。

10.1.7.2 应特别注意保证导电衬里接地良好。

10.1.7.3 对于导电容器，在整个操作过程中，导电衬里都应接地。

10.1.7.4 在处理静电积累的物料时，导电容器内使用电阻率大于 $10^{11} \Omega$ 的衬里，会给扩散型刷形放电或电容放电的发生创造条件。因为这类放电的发生条件多种多样，目前还无法给出建议。

10.1.7.5 在不导电容器中使用不导电衬里的地方，需要的预防措施与不导电容器的相同，见 10.1.5 和 10.1.7.4 中所述。

10.1.7.6 存在易燃环境（如 MIE 小于 30mJ 以及存在汽油、易燃蒸气、感光粉尘和杂化混合物）的地方，绝对不能从容器中移走衬里（如抖出残余物）。

10.2 卷筒纸和纸张工序（省略）

10.3 喷雾

10.3.1 液体喷雾或粉尘喷雾等喷雾过程，会导致在喷雾器上或被喷物体的表面上以及喷雾区域内其他物体上引起静电的积累。如果喷雾原料是可燃的，静电就有可能引发着火。

10.3.2* 静电喷雾设备的操作或维修人员应经过培训，以了解设备生产厂家所推荐的操作过程，并控制由喷雾原料及残渣引起的危害。

10.4 皮带和传送装置

10.4.1 概述

用于传输动力使用的橡胶或皮革扁平皮带及 V 型带，或用于输送固体物质使用的皮带，可能产生静电，如果有易燃气体或蒸气、可燃粉尘或纤维存在的可能性，需要提供预防措施。电荷产生的数量会随皮带速度、皮带张力、接触面宽度的增加而增加。

10.4.2 扁平皮带

10.4.2.1* 合成的、橡胶的或皮革的扁平皮带在操作时是干燥的，并且由于摩擦导致皮带在高温下运作，所以这种皮带通常是好的绝缘体。无论使用导电的或不导电的皮带轮，在皮带离开皮带轮的地方都会产生静电。

10.4.2.2* 使用导电材料制造的皮带，或将导电材料包在皮带上，可以防止电荷积聚。使用导电覆盖材料时，应经常更新这些覆盖材料，否则皮带的电导率会降低。同时，应保持皮带上没有静电电荷的积聚。应注意，无论皮带导电与否，都会在被传送的物料或物体上产生、积聚静电电荷。

10.4.2.3 静电中和器应靠近皮带的内侧，并且离开皮带轮只有几英寸的距离。这样，静电中和器将会有效地消除大部分静电电荷。

10.4.3* V 型带

10.4.3.1 V 型带不像扁平皮带那样容易产生危险的电荷积聚。但是，在一定的温度和湿度条件下，V 型带也可能产生可观的静电量。

10.4.3.2 存在由气体、蒸气、粉尘或纤维组成的可燃混合物的地方，为了限制由于静电释放而引起着火燃烧，更好的做法是使用直接传动代替皮带。如果由于其他原因必须使用 V 型带，其保护措施见 10.4.2.2。

10.4.4 传送带

10.4.4.1 用于输送固体物料的皮带通常运动速度很低，不能产生静电电荷。但是，如果输送的物料非常干燥，或者皮带在高温环境中运作，并且运行速度较高时，会产生可观的静电电荷。

10.4.4.2 从传送带末端流出的物料进入装料斗或者滑槽时，可能携带大量的静电电荷。这些情况下，

应把皮带支座和终端皮带轮接地，或者搭接在进料斗或滑槽上。在靠近传送带流出物料的一端，安装被动式或主动式静电中和器也有助于减少电荷。导电的或抗静电皮带并不能消除输送产品上的电荷。

10.4.5 皮带轮和轴

10.4.5.1 金属皮带轮上积聚的电荷与在它上面运动的皮带所承载的物质与皮带轮所携带的电荷数量相等、符号相反，通常电荷传送到支撑轴，从那里通过轴承传到设备和地上。在不导电元件把金属零件绝缘的地方，有必要把那些元件分别接地或搭接。

10.4.5.2 被润滑的轴承仍具有足够的导电性，允许轴上静电荷的消散。然而，产生电荷的速率较高时，高速运转轴承的导电性不足以防止静电荷的积聚。因此，高速运转的轮轴应符合以下标准：

——应检测静电荷的积聚情况。

——必要时，应通过一个滑动金属接触面与机壳进行搭接或接地。

10.4.5.3 运转状态下，穿过皮带轴承的有效电阻可以通过普通欧姆表测定。

——欧姆表的一个探针应放置在接地设备的支架上。

——另外一个探针应放置在轴承的旋转部分。

10.4.5.3.1 穿过皮带轴承的有效电阻一般要求为 $10^4 \Omega$ 左右。如果高于 $10^5 \Omega$ ，则应使用辅助的接地刷或接地鞋袜，以防止随着时间的推移，电阻值可能高于 $10^6 \Omega$ 。接地刷需要定期检测和维护。

10.4.5.3.2 没有接地刷的重要轴承需要定期监测。

10.4.6 皮带和传送装置的保养

10.4.6.1 为了减少静电产生的机会，需要经常检查皮带和传送装置，以防止打滑或黏接。

10.4.6.2 驱动系统在设计的时候应考虑到，设备工作在危险环境中时，停车时不会打滑。润滑油对静电荷的排除没有妨碍，所以所有的轴承都应正常润滑。但穿过润滑油膜的静电流，有时会引起轴承表面的点蚀。运转在轴或皮带轮上的导电接地刷，可以防止轴承的点蚀。

10.5 爆炸物

大多数爆炸物和用于固体助燃物的物料，即使没有外界的助燃，因为含有足够多的氧化剂也会发生爆炸反应。这些物料通常对静电很敏感，而且如果不采取适当的预防措施，操作起来会非常危险。除了本推荐作法推荐的措施外，应参考以下文献以获取更多的具体信息。

——NFPA 495；

——NFPA 498；

——NFPA 1124；

——NFPA 1125；

——美国国防部出版物 6055.9；

——美国国防部出版物 4145.26M；

——IME 出版物安全丛书 3[#]；

——IME 出版物安全丛书 17[#]。

10.6 阴极射线管视频显示终端（省略）

附录 A
(资料性附录)
说明材料

本附录不是本标准的推荐部分，仅作为参考资料。本附录包含的说明材料，与正文中的编号对应一致。

- A.1.1.2 为防止电击危害，关于接地的更多信息见 NFPA 70。
- A.1.1.3 在医院手术室及相似的区域中，静电危害见 NFPA 99。
- A.1.1.4 雷电危害见 NFPA 780。
- A.1.1.5 杂散电流和感应电流的危害见 API RP 2003。
- A.1.1.6 有关汽车和船舶加油中的危害见 NFPA 30A 以及 NFPA 302。有关飞机的加油见 NFPA 407。
- A.1.1.7 有关洁净室静电的危害见 NFPA 318。
- A.3.1 批准：国家防火协会不批准、检测、校验任何装置、过程、设备及原料，也不批准或评估试验室。在确定装置、过程、设备及原料的可接受性上，主管当局的权限建立在 NFPA 或其他相应标准的基础上，如果没有这样的标准，主管当局将根据现已表明为正确的装置、过程或应用来确定。主管当局的权限也涉及注册或登记组织的管理，这种组织涉及产品评估，因此它可根据相应的标准确定现有产品的条款。
- A.3.2 主管当局：“主管当局”这个词或其首字母缩写词“AHJ”在 NFPA 文件中被广泛使用，其原因是权限和批准机构不同，他们的职责也各不相同。如对于公共安全场合，联邦、州、地方政府是主管当局，而其他具体部门管理者如消防队长、消防执行官、防火办公署长官等是主管当局；如果以保险为目的，则保险检查部门、各级办公署或其他保险公司代表是主管当局。在许多情况下，财产的拥有人或者是他的代理人扮演具有“主管当局”角色。在政府机构，最高管理者及部门管理者是主管当局。
- A.3.3 注册的：鉴别注册设备的含义对于每个涉及产品评估的组织来讲可能不一样，有些组织仅把已标记的设备作为注册设备。主管当局应利用注册组织应用的体系来鉴别一个产品是否注册。
- A.3.10 电容：是导体和非导体固有的性质，当两导体间存在电压差时，电容能储存电荷。对于给定的电压差，电容越大，储存的电荷就越多。在数值上，电容等于一个导体的电荷（相同或相反电荷在另一个导体上）与其两端电压差的比值。电容的单位是法拉。由于法拉的单位很大，电容通常用微法拉（ μF ）和皮法拉（ pF ）。

$1\text{F} = 10^6 \mu\text{F} = 10^{12} \text{pF}$ （见表 A.3.10）

表 A.3.10 各种物品的电容

物 品	电容, μF
罐车	1000
汽车	500
人	100~300
油筒/溶剂筒	10~100
金属铲斗	10~20
针状电极	1
粉尘粒子	10^{-7}

A.5.3.3.4 可以测定出纯物质或其混合物的最小点火能 MIEs。如果混合物中最易着火成分的浓度变化很大,实际点火能可能比最小点火能 MIE 高一个数量级或更多。对于危害评估,最小点火能 MIE 应被视为最坏的情况。

A.5.3.8 详情参见 Britton《化学制品操作中静电打火危害的预防》(1999)。

A.7.6.2.2 参见 ANSI Z41。

A.7.6.3 详情参见 Britton《化学制品操作中静电打火危害的预防》(1999)。

A.7.6.4.2 详情参见 Britton《化学制品操作中静电打火危害的预防》(1999)。

A.7.6.4.3 参见 NFPA 53。

A.8.2.1.1 I类可燃液体其闪点低于 38℃,在通常情况下可形成可燃的挥发气与空气的混合物;II类和III类可燃液体其闪点大于或等于 38℃,其特点是要进行预热才能挥发,挥发气与空气混合后形成可燃混合物。有些低火灾液体,如易溶于水的液体,当它们被放置在低于 38℃的密闭容器中,也可以形成可燃的挥发气与空气的混合物,对于这样的液体我们也称为可燃液体。有些液体虽然没有闪点,但是经过缓慢分解或者是蒸发也可产生可燃的气体混合物,尤其是液体体积大大超过挥发空间时更易形成气体挥发物(见附录 C)。

A.8.2.2 在低于可燃下限(LFL)条件下操作往往比在高于可燃上限(UFL)条件下操作安全,在操作油箱和其他大型容器更是如此。虽然油箱内液体会快速挥发出大量气体从而使操作处于 UFL 之上,但是仍可采取方法在油箱出口处阻止可燃混合物燃烧,比方在取样口处,通过启动或其他方式使油箱内的混合物控制在可燃范围以外。通常做法是如 NFPA 69 中描述的那样,采取将容器内的空气惰化的方法。这项技术是通过将氧气聚集速度降低到其助燃能力下,但是油箱口周围空气可以引起燃烧,尤其在固体边缘可以进空气的情况下更为严重。同样对于大型油罐,惰性气体可以补偿油罐内温度的变化,对于空油罐可以调节其空气的吸入量(见附录 D)。

A.8.2.4 我们可以利用 NFPA 69 中的任一种方法来预防可燃气体。在这些方法中,最常用的是向空间加入相应的像氮气这样的惰性气体,这样,空间的氧气被惰化,达不到助燃的分量。对于绝大多数可燃气体,惰性气体加入量标准是,将氧气含量冲淡到空间的 5% 以下,就可以阻燃而达到安全的目的。

A.8.3.1 带有相反静电荷的两个层组成的系统就是所谓的电偶层。在远离接触面的地方是扩散层,扩散层具有相反极性的电荷。任何剪切液体的操作,如管内流动等,都将产生电荷。对于管内流动,假设管壁接地,扩散层随液体流动而移动到下游的同时,边界层电荷离开管壁,这个过程有效地阻止了液体扩散层电荷的聚集。对于像水这样的导电液体,扩散层的厚度仅仅为几个分子直径,但是对于像轻质石油馏出物这样的绝缘液体,其扩散层的厚度有几毫米。液体内部阻止边界层电荷的分离,造成边界层上一面的电荷强度远远大于另一个面,从而出现了液体边界层靠近接触面的现象。在这个接触面上形成了厚度小于边界层的小液滴,这些液滴能将静电荷消除。电荷消除后管内不论是导电的还是绝缘的液体形成雾状,分界面越大,形成电荷的速度越快。像细孔过滤、油水两相搅动、液体中的悬浮颗粒中均存在这种现象。流动液体中所带电荷形成的电流称为流动电流。虽然电荷在管壁处分离,分离后的电荷与液体混合流动。我们可以用每立方米液体中所含的电荷库仑数来测定电荷密度。流动电流(C/s 或 A)等于容积流速(m^3/s)乘以电荷密度(C/m^3)。

A.8.3.2 见附录 E。

A.8.3.3.1 电荷产生的机理非常复杂。当液体在管内流动时,电荷产生的因素有液体的导电率、电容率、液体的黏度以及液体的流动特性(液体的流速、管径表面粗糙度)。在液体流动特性相同情况下,导电率是电荷产生的主要因素,尤其对于因管壁存在污染造成低导率的液体最为明显。管壁污染物对电容率和黏度的影响可以忽略,而对于传导性影响却非常大。但是管壁污染对传导性强的液体影响很小。对于长输管道,电荷浓度达到平衡状态,在这种状态下产生电荷的速度等于电荷返回地面的速度(见附录 E)。

A.8.4.1 更多信息见 Britton《化学制品操作中静电打火危害的预防》(1999)。

当已知流动特性如管内径和液体流速等条件时,可以得到有关电荷密度和电荷产生速度的理论和经验公式,液体的电容率和流动特性模型更加复杂。在停留时间远远大于松弛时间条件下,绝缘液体在管内湍流流动时产生的电荷公式如下:

$$I_s = N \cdot v^x \cdot d^y$$

式中:

I_s ——电流, A;

N ——常数(与流动条件有关,见下文);

$x \approx 2$;

v ——流速, m/s;

d ——管线直径, m;

$y \approx 2$ 。

式中各常数值可在文献中查阅。常数 N 值介于 $3.75 \times 10^{-6} \text{ C} \cdot \text{s/m}^4$ 和 $25 \times 10^{-6} \text{ C} \cdot \text{s/m}^4$ 之间。当液体湍流通过光滑管段时, N 取较小值;通过波纹管时, N 取较大值。 N 的数量级为 $1 \times 10^{-5} \text{ C} \cdot \text{s/m}^4$, 最新的研究表明 $y=1$, 最常见的是 x, y 的值都近似等于 2。因此,充电电流约正比于管线直径的平方。这些研究的一个重要结果是,管线直径可以表征管内的充电电流,当填充罐时作为设定流动极限的依据(见 8.5 和 8.6)。

A.8.4.2 使用不导电塑料管存在外部静电放电或从小孔处泄漏等危险,除非它的优势远远超过这些危险,或测试证实危险情况不会发生,否则不导电塑料管不能用于绝缘液体或导电液体的输送。接地的、塑料内衬金属管不会有上述两种危险,但应考虑衬管针孔的承受能力。例如,若液体对金属管道有腐蚀性,由于针孔原因,金属将不断流失,最终导致产品污染以及管线的报废。相反,假如内衬只是用来减少因生锈和剥落而引起的产品污染,轻微的针孔伤害是可以接受的。

若不导电液体及部分导电液体需要塑料管系统传递,以下方法可以减轻危害:

- 降低流速以减轻充电速率。
- 卸除过滤器或将其放置在上游段。
- 尽可能地把管壁的电导率降低到 $10^8 \Omega/\text{m}$ 以下。
- 通过增加管壁厚度或改变材料来增强管壁的击穿强度。
- 管道外敷设接地的导电层。

可以综合运用上述方法。例如,在许多情况下,塑料管外层的导电层不会自动消除内部塑料管的针孔击穿,并且如果导电层不能全面包覆,就不能阻止外部泄漏。

A.8.4.3 对于金属导电软管,除非为了避免杂散电流产生火花而使用绝缘法兰,否则管上任意点到地面的接地电阻一般为 10Ω , 甚至更小。对于连续搭接的元件,如导线或导线编织物,从任何金属连接器到地面的接地电阻,一般应为 $1000 \Omega/\text{m}$ 或者更小,例外的情况同上。通过半导电的软管(为了消除低电阻的搭接元件而限流设计)到地面的接地电阻,以及通过绝缘法兰到地面的接地电阻应介于 $10^3 \Omega/\text{m} \sim 10^5 \Omega/\text{m}$ 之间。无论哪种情况,从金属软管连接器到地面的电阻不应超过 $10^6 \Omega$ 。

大多数情况下,接地电阻小于 $10^6 \Omega$ 时可阻止静电的积累。周期性的测试显示,如果设备的电阻值显著增加,这可能是腐蚀或其他破坏的结果,这将会导致意外断路。此时应检查软管和绝缘法兰以便确定是否更换。

双金属绕丝的导电软管,一条绕丝用于搭接,另一条绕丝用于机械强度。连接器末端间的连通只能证实一个螺旋线的连通。据报道,一罐车因通过软管排泄甲苯而着火,后来发现内部螺旋线不是断开的,而是设计时没有搭接到端部连接器上。对于不导电液体的处理,可以使用有导电内衬或导电内衬的软管,这样即使内螺旋线断开了,也不会与地面绝缘而形成火花间隙。理想的作法是,把内螺旋线单独地搭接到端部连接器上。

当软管用在可燃环境中时,确保与端部连接器(或喷嘴)的搭接特别重要。一般来说,安全的作法是应用设计合理的罐装系统,比如对于灌装罐车,安装浸渍管比使用软管要好。

当用于可燃环境中时,比如用于内罐,实用的软管应是导电的或半导电的。特别是,所有的金属连接器和喷嘴都应接地。不导电软管上的未接地软管连接器会以各种方式充电,例如把氮管插入含有带电液体或带电薄雾的罐中。然而清洁干燥的气体不产生电荷,不导电软管因为蒸气的流动而产生大量电荷。

A. 8. 5. 2. 1 (4) 更多的信息见 API RP 2003。

A. 8. 7 常用建议见 API Publ 2219。

A. 8. 10. 2 附加补充辅助信息见 NFPA 69。

A. 8. 13. 9 见 NFPA 326。

A. 8. 14 如果真空清洁器用于可燃液体溅出的清理,这将涉及到另一相如颗粒或碎屑的溢出控制。干—湿真空清洁器会引起一系列问题,包括以下几个方面:

- 静电的产生。
- 驱动装置的分类。
- 化学兼容性。
- 工业卫生(与真空清洁器的排气有关)。

用于 I 类 D 组, II 类 E, F, G 组环境的商用机械一般是由文丘里管气动控制,所以它们不带电力。气体供给软管和液体回收软管应是导电的,并且由半导体纤维构成。过滤器也应是导电的或导电的。设计时应把所有部分连续地搭接并接地,通常,每次使用前都必须检查。一旦回收罐达到最大容量时,使用浮筒或类似的结构来关闭抽气机的运行。为避免虹吸管内的溢流(若回收管完全浸没于液体中)或没有使用除沫剂的地方,就需要其他的预防措施。特别是对于可燃液体的溢出,应采取一些措施,包括培训、人体接地,以确保人体不是起火源。

A. 9. 2. 4 粉尘的最小点火能(MIE)通常用粉尘的样品测定。这些年来,测定设备和方法种类多样而且不断变化。因此,数据组集之间的 MIE 值不具备可比性。此外,实验数据的试验条件也不一样。因此,MIE 值的比较是定性的不是定量的。虽然如此,数据间的对比还是有意义的。

粉尘的 MIE 值随粒径的减小和温度的增加而降低,随粉尘湿度的增加而增大。与粉尘吸湿问题有关的除外,周围的空气湿度对 MIE 值影响很小。影响 MIE 值的因素应在风险分析中予以考虑。

A. 9. 7 一些柔性软管可任意截取长度并用软管夹接到管道上。为使绕丝管接地良好,保证绕丝与管道金属接触良好非常重要。可通过剥出绕丝并弯曲在软管以及接线夹下面来保证接触良好。如有金属绕丝的软管与塑料管道连接,则绕丝应独立接地。

使用多于一条绕丝软管的缺点是,如果其中一根绕丝断开不能接地,则它就能成为起火源。

A. 9. 10 附加信息见 Britton《化学制品操作中静电打火危害的预防》(1999)。

A. 9. 11 附加信息见 Britton《化学制品操作中静电打火危害的预防》(1999)。

A. 10. 3. 2 更多信息见 NFPA 33。

A. 10. 4. 2. 1 对谷物升降机中的静电起火研究表明,当传送带上的电压达到 30000V 时,就可能发生静电起火;低相对湿度是一个重要的因素,在零度以下温度时,低相对湿度允许电压迅速增加。

A. 10. 4. 2. 2 谷物传送带的表面电阻率影响聚集电荷的能力。试验表明,当传送带的电阻介于 $10^6 \Omega \sim 10^8 \Omega$ 时,导电性足以防止电荷的大量积累。根据 CENELEC《电动机械安全标准 电工技术》(草案),当传送带的表面电阻小于 $3 \times 10^8 \Omega$ 时,就认为足够导电。

A. 10. 4. 3 根据 CENELEC 草案标准《电动机械安全标准 电工技术》(草案),如果满足以下判据,V 型带及其类似的传输则被认为足够导电,

$$R \cdot B < 10^5$$

式中:

R ——电阻，传送带两皮带轮中间电极与地面之间的测量电阻， Ω ；

B ——平带的宽度或 V 型带侧面深度的 2 倍，m。

不同材料制成的传送带，在温度为 23℃、相对湿度为 50% 的条件下测量，若带的电阻值不超过 $10^9 \Omega$ ，则认为传送带具有足够的导电性能。

附 录 B
(资料性附录)
材料的物理特性

本附录不是 NFPA 推荐的部分，仅作为参考资料。

B.1 气体或蒸气燃烧性能参数

表 B.1 列出了一些典型的气体和蒸气的最低的最小点火能 (mJ)、化学当量成分 (以在空气或其他氧化剂中的体积分数表示)、可燃极限 (以在空气或其他氧化剂中的体积分数来表示)。

表 B.1 气体和蒸气的燃烧参数

气体或蒸气*	最低的最小点火能 mJ	化学当量混合物 (体积分数) %	可燃极限 (体积分数) %
乙醛、醋醛	0.37	7.73	4.0~57.0
丙酮	1.15@4.5%	4.97	2.6~12.8
乙炔、电石气	0.017@8.5%	7.72	2.5~100
乙炔 (氧气环境)	0.0002@40%	—	—
丙烯醛	0.13	5.64	2.8~31
丙烯腈	0.16@9.0%	5.29	3.0~17.0
烯丙基氯	0.77	—	2.9~11.1
氨水	680	21.8	15~28
苯	0.2@4.7%	2.72	1.3~8.0
1, 3-丁二烯	0.13@5.2%	3.67	2.0~12
丁烷	0.25@4.7%	3.12	1.6~8.4
n-丁基氯	1.24	3.37	1.8~10.1
二硫化碳	0.009@7.8%	6.53	1.0~50.0
环己胺	0.22@3.8%	2.27	1.3~7.8
戊基	0.67	—	—
环戊烷	0.54	2.71	1.5~ND
环丙烷	0.17@6.3%	4.44	2.4~10.4
二氯磷酐	0.015	17.36	4.7~96
二乙醚	0.19@5.1%	3.37	1.85~36.5
二乙醚 (氧气环境)	0.0012	—	2.0~82
二异丁烯	0.96	—	1.1~6.0
二异丙醚	1.14	—	1.4~7.9
二甲氧基甲烷	0.42	—	2.2~13.8
二甲基丁烷	0.25@3.4%	2.16	1.2~7.0
二甲醚	0.29	—	3.4~27.0

表 B.1 (续)

气体或蒸气*	最低的最小点火能 mJ	化学当量混合物 (体积分数) %	可燃极限 (体积分数) %
2, 2-二甲基丙烷	1.57	—	1.4~7.5
二甲基硫醚	0.48	—	2.2~19.7
二叔丁基过氧化物	0.41	—	—
乙烷	0.24%~6.5%	5.64	3.0~12.5
乙烷 (氧气环境)	0.0019	—	3.0~66
乙酸乙酯	0.46~5.2%	4.02	2.0~11.5
乙胺	2.4	5.28	3.5~14.0
乙烯	0.07	—	2.7~36.0
乙烯 (氧气环境)	0.0009	—	3.0~80
环乙亚胺	0.48	—	3.6~46
环氧乙烷	0.065~10.8%	7.72	3.0~100
呋喃烯	0.22	4.44	2.3~14.3
庚烷	0.24~3.4%	1.87	1.05~6.7
己烷	0.24~3.8%	2.16	1.1~7.5
氢气	0.016~28%	29.5	4.0~75
氢气 (氧气环境)	0.0012	—	4.0~94
硫化氢	0.068	—	4.0~44
异辛烷	1.35	—	0.95~6.0
异戊烷	0.21~3.8%	—	1.4~7.6
异丙醇	0.65	4.44	2.0~12.7
2-氯丙烷	1.08	—	2.8~10.7
异丙胺	2.0	—	—
异丙硫醇	0.53	—	—
甲烷	0.21~8.5%	9.47	5.0~15.0
甲烷 (氧气环境)	0.0027	—	5.1~61
甲醇	0.14~14.7%	12.24	6.0~36.0
甲基乙炔	0.11~6.5%	—	1.7~ND
亚甲基二氯	>1000	—	14~22
甲基丁烷	<0.25	—	1.4~7.6
甲基环己胺	0.27~3.5%	—	1.2~6.7
丁酮	0.53~5.3%	3.66	2.0~12.0
甲酸甲酯	0.4	—	4.5~23
正戊烷	0.28~3.3%	2.55	1.5~7.8
2-戊烷	0.18~4.4%	—	—

表 B.1 (续)

气体或蒸气*	最低的最小点火能 mJ	化学当量混合物 (体积分数) %	可燃极限 (体积分数) %
丙烷	0.25@5.2%	4.02	2.1~9.5
丙烷 (氧气环境)	0.0021	—	—
丙醛	0.32	—	2.0~17
n-氯丙烷	1.08	—	2.6~11.1
丙烯	0.28	—	2.0~11.0
环氯丙烷	0.13@7.5%	—	2.3~36.0
四氢呋喃	0.54	—	2.0~11.8
四氢吡喃	0.22@4.7%	—	—
噻吩	0.39	—	—
甲苯	0.24@4.1%	2.27	1.27~7.0
三氯硅烷	0.017	—	7.0~83
三乙胺	0.75	2.10	—
2, 2, 3-甲基丁烷	1.0	—	—
醋酸乙烯	0.7	4.45	2.6~13.4
乙烯基乙炔	0.082	—	1.7~100
二甲苯	0.2	1.96	1.0~7.0
* 除特殊注明外, 均指在标准温度与标准压力下。 数据摘自 L. G. Britton, "Using Material Data in Static Hazard Assessment." 静电危害评估中使用的材料数据。 注: "ND" 表示不能确定。			

表 B.2 列出了典型的易燃可燃流体和它们的电导率性、介电常数和弛豫时间常数。

表 B.2 液体的静电特性

流 体	电导率 pS/m	介电常数	弛豫时间常数 s
导电的液体: 电导率>10 ⁴ pS/m			
乙醛 (15℃)	1.7×10 ⁸	21.1	1.1×10 ⁻⁶
乙硫胺	8.8×10 ⁷	59	5.9×10 ⁻⁶
乙酸 (0℃)	5×10 ⁵	6.15	1.1×10 ⁻⁴
乙酸 (25℃)	1.12×10 ⁶	6.15	4.9×10 ⁻⁵
乙酸酐 (25℃)	4.8×10 ⁷	NA	NA
丙酮 (25℃)	6×10 ⁶	20.7	3×10 ⁻⁵
乙腈 (20℃)	7×10 ⁸	37.5	5×10 ⁻⁷
乙硫苯 (25℃)	3.1×10 ⁵	17.39	5.0×10 ⁻⁴
溴化乙酰 (25℃)	2.4×10 ⁸	NA	NA
乙酰氯 (25℃)	4×10 ⁷	NA	NA
丙烯醛	1.55×10 ⁷	NA	NA

表 B.2 (续)

流 体	电导率 pS/m	介电常数	弛豫时间常数 s
丙烯腈	7×10^5	38	4.8×10^{-4}
烯丙醇 (25℃)	7×10^8	NA	NA
氨基乙-乙醇胺	$>1 \times 10^6$	NA	NA
n-氨基吡啶	2.4×10^5	NA	NA
氨 (-79℃)	1.3×10^7	NA	NA
异戊醇	1.4×10^5	14.7	9.3×10^{-4}
苯胺 (25℃)	2.4×10^6	6.89	2.5×10^{-5}
蒽 (25℃)	3×10^4	NA	NA
三溴化砷 (25℃)	1.5×10^8	NA	NA
三氯化砷 (25℃)	1.2×10^8	NA	NA
苯甲醛 (25℃)	1.5×10^7	NA	NA
苯甲酸 (125℃)	3×10^5	NA	NA
氰化苯 (25℃)	5×10^6	25.2	4.5×10^{-5}
苯甲醇 (25℃)	1.8×10^8	NA	NA
苯甲胺 (25℃)	$<1.7 \times 10^6$	NA	NA
苯甲酸苄酯 (25℃)	$<1 \times 10^5$	NA	NA
苯乙腈	$<5 \times 10^6$	18.7	$>3.3 \times 10^{-5}$
联苯 (120℃时为流体)	$>1 \times 10^4$	NA	NA
溴仿 (25℃)	$<2 \times 10^6$	4.39	$>1.9 \times 10^{-5}$
异丁醇	9.12×10^5	17.51	1.7×10^{-4}
仲丁醇	$<1 \times 10^7$	16.56	$>1.5 \times 10^{-5}$
叔丁醇	2.66×10^6	12.47	4.2×10^{-5}
氯代异丁烷	1×10^4	6.49	5.7×10^{-3}
氯代仲丁烷	1×10^4	7.09	6.3×10^{-3}
己腈 (25℃)	3.7×10^8	NA	NA
间氯苯胺 (25℃)	5×10^6	NA	NA
氯代醇 (25℃)	5×10^7	NA	NA
间甲酚	1.397×10^6	11.8	7.5×10^{-5}
邻甲酚	1.27×10^5	11.5	8.0×10^{-4}
对甲酚	1.378×10^6	9.91	6.4×10^{-5}
氟	$<7 \times 10^5$	NA	NA
环乙酮	5×10^5	NA	NA
异丙基苯 (25℃)	$<2 \times 10^6$	NA	NA

表 B.2 (续)

流 体	电导率 pS/m	介电常数	弛豫时间常数 s
二丁基邻苯二甲酸	1.8×10^5	6.436	3.2×10^{-4}
二氯乙酸 (25℃)	7×10^6	NA	NA
二氯乙烷	8.5×10^5	9.20	9.6×10^{-5}
二氯丙醇 (25℃)	1.2×10^9	NA	NA
二乙胺 (-33.5℃)	2.2×10^5	NA	NA
碳酸二乙酯 (25℃)	1.7×10^6	2.82	1.5×10^{-5}
二甘醇	5.86×10^7	31.69	4.8×10^{-6}
二亚乙基三胺	$>1 \times 10^6$	NA	NA
草酸二乙酯 (25℃)	7.6×10^7	NA	NA
硫酸二乙酯 (25℃)	2.6×10^7	NA	NA
二甲基乙酰胺	1.1×10^7	NA	NA
二甲基甲酰胺	6×10^6	36.71	5.4×10^{-5}
二甲亚砜	2×10^5	46.68	2.1×10^{-3}
硫酸二甲酯 (0℃)	1.6×10^7	NA	NA
二苯基氧化物	$<1.7 \times 10^6$	4.22	$>2.2 \times 10^{-5}$
表氯酸 (25℃)	3.4×10^6	22.6	5.9×10^{-5}
乙醇胺	1.1×10^9	37.72	3.0×10^{-7}
乙基盐 (25℃)	4.6×10^4	6.02	1.2×10^{-3}
乙基乙酰基酸盐 (25℃)	4×10^6	15.7	3.5×10^{-5}
乙基丙酸盐	3.35×10^5	NA	NA
乙基醇 (25℃)	1.35×10^5	24.55	1.6×10^{-3}
乙胺 (0℃)	4×10^7	NA	NA
苯酸乙酯 (25℃)	$<1 \times 10^5$	6.02	$>5.3 \times 10^{-4}$
溴化乙基 (25℃)	$<2 \times 10^6$	9.39	$>4.2 \times 10^{-5}$
氯乙烷	$<3 \times 10^5$	9.45	$>2.8 \times 10^{-4}$
氰乙酸乙酯	6.9×10^7	26.7	3.4×10^{-6}
碳酸乙烯	$<1 \times 10^7$	89.6	$>7.9 \times 10^{-5}$
乙二胺	9×10^6	12.9	1.3×10^{-5}
二溴化乙烯 (25℃)	$<2 \times 10^4$	4.78	$>2.1 \times 10^{-3}$
乙二醇	1.16×10^8	37.7	2.9×10^{-6}
乙二醇-丁醚	4.32×10^7	9.30	1.9×10^{-6}
乙二醇单乙醚	9.3×10^6	29.6	2.8×10^{-5}

表 B.2 (续)

流 体、	电导率 pS/m	介电常数	弛豫时间常数 s
乙二醇单甲醚	1.09×10^8	16.93	1.4×10^{-6}
乙烯溶液	8×10^8	18.3	2.0×10^{-7}
烯氧化物	4×10^6	12.7	2.8×10^{-5}
甲酸乙酯	1.45×10^5	7.16	4.4×10^{-4}
亚乙基二氯	2.0×10^5	10.0	4.4×10^{-4}
异硫氰酸乙基 (25℃)	1.26×10^7	NA	NA
乳酸乙酯	1.0×10^8	13.1	1.2×10^{-6}
硝酸乙酯 (25℃)	5.3×10^7	NA	NA
草酸乙酯	7.12×10^7	NA	NA
丙酸乙酯	8.33×10^{10}	5.65	6×10^{-10}
硫氰酸乙酯 (25℃)	1.2×10^8	NA	NA
丁子香酚 (25℃)	$<1.7 \times 10^6$	NA	NA
甲酰胺 (25℃)	4×10^8	111.0	2×10^{-6}
甲酸 (25℃)	6.4×10^9	58.5	8.1×10^{-8}
糠醛 (25℃)	1.5×10^8	NA	NA
甘油 (25℃)	6.4×10^6	42.5	5.9×10^{-5}
邻甲氧基苯酚 (25℃)	2.8×10^7	NA	NA
溴化氢 (-80℃)	8×10^5	NA	NA
氯化氢 (-96℃)	1×10^6	NA	NA
氢氰酸 (0℃)	3.3×10^8	NA	NA
碘化氢 (沸点)	2×10^7	NA	NA
碘 (110℃)	1.3×10^4	NA	NA
汞 (0℃)	1.063×10^{18}	NA	NA
甲氧基三甘醇	$>1 \times 10^6$	NA	NA
甲基乙酰胺	2×10^7	191.3	8.5×10^{-5}
乙酸甲酯 (25℃)	3.4×10^8	6.68	1.7×10^{-7}
甲醇 (18℃)	4.4×10^7	32.70	6.6×10^{-6}
氨基乙酸甲酯	4.49×10^7	29.30	5.8×10^{-6}
甲基苯酮 (25℃)	1×10^7	18.51	1.6×10^{-5}
甲基酰胺	8×10^7	182.4	2.0×10^{-5}
甲酸甲酯	1.92×10^8	8.5	3.9×10^{-7}
碘化甲烷 (25℃)	$<2 \times 10^6$	NA	NA
甲基异丁基酮	$<5.2 \times 10^6$	13.11	$>2.2 \times 10^{-5}$

表 B.2 (续)

流 体	电导率 pS/m	介电常数	弛豫时间常数 s
硝酸甲酯 (25℃)	4.5×10^8	NA	NA
n-甲基-2 吡咯烷酮	2×10^6	32.0	1.4×10^{-4}
硫氰酸甲酯 (25℃)	1.5×10^8	NA	NA
蔡球 (82℃)	4×10^4	NA	NA
硝基苯 (0℃)	5×10^5	34.82	6.2×10^{-4}
硝基乙烷	5×10^7	28.06	5.0×10^{-6}
硝基甲烷 (18℃)	6×10^7	35.87	5.3×10^{-6}
1-硝基丙烷	3.3×10^7	23.24	6.2×10^{-6}
2-硝基丙烷	5×10^7	25.52	4.5×10^{-6}
硝基甲苯 (25℃)	$<2 \times 10^7$	NA	NA
辛酸	1.39×10^7	10.34	6.9×10^{-6}
苯乙醚 (25℃)	$<1.7 \times 10^6$	NA	NA
苯酚	1×10^6	9.78	8.7×10^{-5}
异硫氰酸苯酯 (25℃)	1.4×10^8	NA	NA
光气 (25℃)	7×10^5	NA	NA
磷 (25℃)	4×10^8	NA	NA
三氯化磷 (25℃)	2.2×10^8	NA	NA
蒽烯 (23℃)	$<2 \times 10^4$	NA	NA
哌啶 (25℃)	$<2 \times 10^7$	NA	NA
丙醛 (25℃)	8.5×10^7	18.5	1.9×10^{-6}
丙酸 (25℃)	$<1 \times 10^8$	3.44	$>3.0 \times 10^{-4}$
乙基胍	8.51×10^6	27.2	2.8×10^{-5}
醋酸丙酯	$1 \sim 6 \times 10^6$	6.002	NA
正丙醇 (25℃)	2×10^6	20.33	9×10^{-5}
异丙醇 (25℃)	3.5×10^8	19.92	5×10^{-7}
甲酸丙酯	5.5×10^9	7.72	1.2×10^{-8}
吡啶 (18℃)	5.3×10^6	12.4	2.1×10^{-5}
喹啉 (25℃)	2.2×10^6	9.0	3.6×10^{-5}
水杨酶 (25℃)	1.6×10^7	13.9	7.5×10^{-6}
丁二腈	5.64×10^{10}	56.5	8.9×10^{-9}
环丁砜	$<2 \times 10^6$	43.3	$>1.9 \times 10^{-4}$
磺酰氯 (25℃)	2×10^8	NA	NA
硫酸 (25℃)	1×10^{12}	NA	NA
氮化甘醇	$>1 \times 10^6$	NA	NA

表 B.2 (续)

流 体	电导率 pS/m	介电常数	弛豫时间常数 s
四甲基铅	$<6 \times 10^6$	23.06	$>3.4 \times 10^{-5}$
间甲苯胺	5.5×10^4	9.91	1.6×10^{-3}
邻甲苯胺	3.79×10^7	6.34	1.5×10^{-6}
对甲苯胺 (100℃)	6.2×10^6	4.98	7.1×10^{-6}
三氯醋酸 (25℃)	3×10^5	NA	NA
1, 1, 1-三氯乙烷	7.3×10^5	7.53	9.1×10^{-5}
三甘醇	8.4×10^6	23.69	2.5×10^{-5}
三乙烯四胺	$>1 \times 10^6$	NA	NA
三乙胺 (-35℃)	2.2×10^4	NA	NA
乙酸乙烯酯	2.6×10^4	NA	NA
水 (纯)	4.3×10^6	80.4	1.7×10^{-4}
水 (空气中蒸馏)	$\sim 1 \times 10^9$	80.4	7.1×10^{-4}
半导体液体: 电导率为 $50 \text{ pS/m} \sim 10^4 \text{ pS/m}$			
醋酸戊酯	2160	4.75	1.9×10^{-2}
armeen	470	NA	NA
联苯 (69℃~120℃的液体)	2500~10000	NA	NA
溴苯	1200	5.40	4×10^{-2}
溴苯	3660	4.83	1.1×10^{-2}
醋酸异丁酯	4300	NA	NA
丙烯酸吡啶酯	3580	NA	NA
氯苯	7000	5.621	7.1×10^{-3}
氯仿, 三氯甲烷	<10000	4.806	$>4.3 \times 10^{-3}$
癸二酸二丁酯	1700	4.54	2.4×10^{-2}
二氯苯	3000	9.93	2.9×10^{-3}
二氯乙烷	4000	10.36	2.2×10^{-2}
2-2 乙基丙烯酸酯	610	NA	NA
汽油 (含铅)	>50	2.3	<0.41
硫化氢 (沸点)	1000	NA	NA
二氯甲烷	4300	8.93	1.8×10^{-2}
五氯乙烷	100	3.83	0.3
硫 (130℃)	5000	NA	NA
1, 2, 4-三氯苯	200	4.08	0.18
三氯乙烯	800	3.42	3.7×10^{-2}
乙烯硅烷 (<2%甲醇)	5900	NA	NA

表 B.2 (续)

流 体	电导率 pS/m	介电常数	弛豫时间常数 s
非导电液体：电导率 $<50\text{pS/m}$			
苯甲醚	10	4.33	3.8
苯	5×10^{-3}	2.3	~100 (散逸)
联苯 (固体 $<69^{\circ}\text{C}$)	0.17	NA	NA
溴 (17.2°C)	13	NA	NA
硬脂酸丁酯	21	3.111	1.3
辛酸	<37	2.45	>0.58
二硫化碳 (1°C)	7.8×10^{-4}	2.6	~100 (散逸)
四氯化碳	4×10^{-4}	2.238	~100 (散逸)
氯 (-70°C)	<0.01	NA	NA
环乙烷	<2	2.0	>8.8
十氢萘	6	2.18	3.2
二氯硅烷	NA	NA	NA
柴油 (纯)	~0.1	~2	~100 (散逸)
1,4-二氯六烷	0.1	2.2	~100 (散逸)
乙醚	30	4.6	1.4
乙苯	30	2.3	0.68
汽油 (直馏)	~0.1	~2	~100 (散逸)
汽油 (无铅)	<50 (变化)	NA	NA
庚烷 (纯)	3×10^{-2}	2.0	~100 (散逸)
正己烷 (纯)	1×10^{-5}	1.90	~100 (散逸)
六甲基二硅胺烷	29	NA	NA
异戊酸	40	2.64	>0.58
航空燃料	0.01~50	2.2	0.39~100
煤油	1~50	2.2	0.39~19
五氯二苯基磷	0.8	5.06	~100
四氯化硅	NA	NA	NA
硬脂酸 (80°C)	<40	NA	NA
乙烯基苯	10	2.43	2.2
硫 (115°C)	100	NA	NA
甲苯	<1	2.38	21
三氯硅烷	NA	NA	NA
松脂	22	NA	NA
二甲苯	0.1	2.38	~100
NA: 未采用。			
数据源白: L. G. Britton 《静电危害评估中材料数据的应用》。			

附录 C

(资料性附录)

闪 点

本附录不是本标准的推荐部分，仅作为参考资料。

C.1 闪点测定误差

已报道的液体闪点不代表容器中的液体形成可燃气体的最低温度。

C.1.1 一般的闭口杯测定法，涉及火焰向下蔓延，这比向上蔓延困难。而且，由于测试仪器容积太小，无法让某些易燃蒸气如卤化烃的火焰蔓延。

C.1.2 闪点测试方法局限性的论述见 ASTM E 502。大多数情况下，闭口闪点低于开口闪点。

C.2 闪点使用的安全余量

C.2.1 因为在液面上蒸气和液体达到气液平衡，所以确定危害的温度是暴露的液体表面的温度，而不是容积内液体的温度。然而，很多情况下表面温度难以测定。因为表面温度应考虑到可能的范围内，由于必要性和可操作性，所以多数危险评价是基于容积温度。因此，使用闪点来估定危害时，应考虑一个安全余量。

C.2.2 对于容器中的纯液体，如果液体的温度与闪点温度相差 4℃ 以内，蒸气应被视为潜在的可燃。对于混合物，其组成不是很确定时，如烃类混合物，其安全余量至少应为 9℃。如果各种因素都考虑在内，安全余量就要相应地提高。

C.3 液体容积温度的影响

C.3.1 在某些情况下罐的上壁面可能被阳光加热高达 60℃，由于从罐的上壁面传来热量，因此罐中静止液体的表面温度明显大于容积温度。

C.3.2 由于汽液相平衡是建立在汽液界面上，与容积温度相比，C.3.1 所述的较高的表面温度，可引起蒸气的积聚。这种升高的浓度意味着，即使液体的容积温度低于闪点，罐中的蒸气也可能是可燃的，因此取样时可能危险很大。从大型储罐中排出蒸气的浓度可能是容积温度下理论饱和度的 30%~50%。如果罐内蒸气高于可燃上限，这种蒸气的危害也可能很大。

C.4 环境压力的影响

C.4.1 液体上方的蒸气压力仅取决于表面温度和达到平衡所需要的时间，总压力的分压取决于蒸气—空气混合物的成分。因此，可能出现在高海拔地区，当总压降低时，空气中的蒸气浓度增加。

C.4.2 因为报道的闪点是标准大气压下 (760mmHg 或 101.3kPa) 的数值，因此如果环境压力小于此值 (标准大气压)，实际闪点会降低。ASTM E 502 给出的闪点修正如下：

$$FP_{\text{corr}} = C + 0.25(101.3 - A)$$

$$FP_{\text{corr}} = C + 0.03(760 - B)$$

$$FP_{\text{corr}} = F + 0.006(760 - B)$$

式中：

FP_{corr} ——修正的闪点，℃；

C——测定闪点,°C;

A——环境压力, kPa;

B——环境压力, mm Hg;

F——测定闪点,°F。

C.5 挥发物低浓度的影响

随着时间的推移,液态混合物中挥发性组分的微弱浓度,能积聚在容器的蒸气空间,这样闪点可以降低到低于报道的闪点温度。这可能是因为气体泄漏、化学反应或其他原因。沥青就是一个例子。同样,如果油罐车在卸完汽油后而没有清洗干净,再转运高闪点液体时,如煤油或柴油燃料,残余汽油会产生可燃环境。可燃溶剂的质量分数超过固体的0.2%时,就应评价它在容器中形成可燃蒸气的能力。

C.6 液态薄雾

C.6.1 如果液体分散在空气中形成薄雾,即使温度低于液体的闪点,也有可能透过薄雾传播火焰。

C.6.2 在C.6.1这样的情况下,薄雾水珠性质类似粉尘粒子。当确定薄雾的可燃性时,液体的闪点是无关的。甚至液体的温度非常低,冷冻液滴也可以点燃。当薄雾的液滴尺寸减小时,就容易点火,燃烧速度也增加。由于液体的挥发性,直径小于 $20\mu\text{m}$ ~ $40\mu\text{m}$ 的雾滴通常都汽化,在火焰前缘的前面被引燃,整个燃烧现象类似于蒸气燃烧。

C.6.3 因为薄雾通常是通过某种剪切过程而形成的,这些剪切过程也产生静电,所以好的作法是避免飞溅,避免在设备里采用产生薄雾的其他工序。

附 录 D
(资料性附录)
蒸 气 压

本附录不是本标准的推荐部分，仅作为参考资料。

D.1 蒸气压

D.1.1 可以利用蒸气压和测得的可燃下限确定闪点。由于闪点测试技术的局限性，通常情况下，计算出的闪点低于实测值。相反，可以通过闪点粗略地估计出易燃下限。

D.1.2 可以用蒸气压来代替如图 8.2.3 中的“浓度”轴，这种方法只需要一个参数就可以确定出液体的相应温度，在此温度下蒸气很可能燃烧。对很多液体，大约介于可燃下限和可燃上限之间。例如，苯约在 7°C（空气中苯蒸气 4.8%）产生最低的 MIE（最小点火能）蒸气—空气混合物，甲苯约在 2.6°C 生成最低的 MIE 蒸气—空气混合物（空气中甲苯蒸气 4.1%）。因此，对于室温条件下的操作，甲苯比苯更容易由于低能量放电而着火。在平衡状态的封闭容器内，苯在高于 16°C 的温度下，苯的浓度太高而不能燃烧（蒸气浓度超出了可燃上限 UFL8%）。相反，约 7°C 时，苯比甲苯容易着火，因为后者产生的蒸气成分不会远高于可燃下限 LFL。表 B.1 给出了最低 MIE 的组成。

D.2 高蒸气压液体

D.2.1 高蒸气压液体的定义见 API RP 2003，指 Reid 蒸气压高于 4.5 psia（绝对压力 31kPa）。在正常的操作温度下，液体的快速蒸发将液体上面可燃环境的保持时间减少到最短，很快超过可燃上限。但是，如果罐中没有初始尾料以及罐没有被惰化，可燃范围将增大到蒸气平衡之前。

D.2.2 对于液化气体如丙烯，可燃环境的持续时间最短，但对一些石油馏分燃料可能会相当大。当向没有液体尾料而含有空气的罐内装载高蒸气压的非导电液体时，应考虑惰化方法。

D.3 中等蒸气压液体

D.3.1 中等蒸气压液体的定义见 API RP 2003，指 Reid 蒸气压小于 4.5 psia（绝对压力 31kPa），且闭口闪点温度低于 38°C。在常温下，在容器中很有可能产生可燃混合物。

D.3.2 虽然根据 Reid 蒸气压，可以应用图示法估计液体在不同温度下产生可燃环境的可能性，但这些图表源自油料混合物，并不完全适用于其他易燃液体。

D.4 低蒸气压液体

低蒸气压液体是第Ⅱ类和第Ⅲ类可燃液体（即闭口闪点高于 38°C），而且只有在很高的温度下操作，才产生可燃环境，像薄雾那样悬浮，或缓慢汽化。然而，处理过程中产生的静电能点燃先前操作中存在的蒸气。

附录 E

(资料性附录)

电荷弛豫

本附录不是本标准的推荐部分，仅作为参考资料。

E.1 概述

电荷弛豫由时间常数体现，假定电荷弛豫符合指数衰减，它是电荷耗散到原有电量的 $1/e$ (约 37%) 所需要的时间。这个时间常数由下列公式确定：

$$\tau = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0}{\kappa}$$

式中：

τ ——时间常数；

ϵ ——液体介电常数；

ϵ_0 ——真空介电常数，取值为 $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ；

κ ——液体的电导率， pS/m 。

E.1.1 总之，时间常数表示液体保持静电电荷能力的大小。实验已证实，对于电导率为 1 pS/m 或更大的烃类液体，符合指数型或“欧姆型”衰减，如下式所示：

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-t \cdot \kappa / (\epsilon \cdot \epsilon_0)}$$

式中：

Q_t ——电荷密度， C/m^3 ；

Q_0 ——初始电荷密度， C/m^3 ；

e ——2.718，自然对数的基数；

t ——时间， s ；

κ ——液体的电导率， pS/m ；

ϵ ——液体介电常数；

ϵ_0 ——真空介电常数，取值为 $8.845 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 。

E.1.2 根据 API《高阻抗燃料静电释放新理论》，电荷损失速度取决于液体的电导率。电导率越低，弛豫越慢。当液体带电量很大时，电导率小于 1 pS/m 的液体的弛豫是不同的。这时，欧姆定律表示的一般关系式不再适用。对于非黏滞性液体（即小于 $30 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ），弛豫高于双曲线衰减。

E.1.2.1 无论是小比例实验还是全尺寸的试验，都已证实，对于低电导率的烃类液体，电荷衰减符合 Bustin 理论，如下式所示：

$$Q_t = \frac{Q_0}{1 + \mu \cdot Q_0 \cdot t / \epsilon \epsilon_0}$$

式中：

Q_t ——电荷密度， C/m^3 ；

Q_0 ——初始电荷密度， C/m^3 ；

μ ——离子迁移能力， $\text{m}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ ，对带电的馏分油，约为 $1 \times 10^{-8} \text{ m}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ ；

t ——时间， s ；

$\epsilon \epsilon_0$ ——介电常数， F/m 。

E.1.2.2 电荷弛豫的 Bustin 理论只取决于最初的电荷密度 Q_0 和离子迁移能力 μ 。不带电荷的液体的电导率不是主要因素。此外,当初始电荷密度大于 $100\mu\text{C}/\text{m}^3$ 时, Bustin 电荷衰变理论对初始电荷密度不是很敏感。

附录 F

(资料性附录)

电 导 率

本附录不是本标准的推荐部分，仅作为参考资料。

F.1 按电导率分类液体

多数易燃和可燃液体的电导率约为 10^{-2} pS/m \sim 10^{10} pS/m (达 12 个数量级)。介电常数范围通常从 2~40，液体的极性越强，其电导率越大。因为弛豫现象主要取决于电导率，根据电导率把液体划分为非导电液体、半导体液体和导电液体。

F.1.1 因为电导率对纯度和温度很敏感，分类划分只能给出数量级的大小。

F.1.2 应牢记的是，实际导电时的电导率要小于实验室中测量的数值 (见附录 B)。

F.2 非导电液体

F.2.1 弛豫时间常数大于 0.36s (相当于一个介电常数约为 2，电导率小于 50pS/m 的典型碳氢化合物的液体) 的液体被认为非导电。例如纯甲苯和多数低硫柴油。

F.2.2 F.2.1 所述的非导电液体由于微量杂质的影响，很容易变化，可以从带电的非导电液体中观察到电晕放电及刷形放电，而不是火花放电。由于只可能局部放电，所以从带电很强的塑料容器感应充电并不是非常危险。非导电液体更容易把电荷聚集在接地的金属容器中。

F.2.3 作为此推荐作法的标准，50pS/m 不是固定的，介电常数也起作用。举例来说，乙醚的介电质常数是 4.6，苯的是 2.3。因此，乙醚在电导率为 100pS/m 时的衰减时间常数，大约和苯在电导率为 50pS/m 时的衰减时间常数一样。不是电导率，而是时间常数决定了电荷的损失速率。

F.3 半导体液体

F.3.1 弛豫时间常数从 0.36s \sim 0.002s (相当于一个介电常数约 2，电导率在 50pS/m \sim 10^4 pS/m 的碳氢化合物) 的液体，被认为是半导电的，例如原油。

F.3.2 半导体液体往往不积累电荷，除非是充电速率非常高，或有效地与地面绝缘，例如液体通过橡胶软管流动时。这些液体很可能产生火花放电。

F.4 导电液体

F.4.1 弛豫时间常数小于 0.002s (相当于介电质常数约为 2，电导率大于 10^4 pS/m 的碳氢化合物) 的液体，被认为是导电的。

F.4.2 这些液体往往不会积累电荷，除非操作时把它们与地面隔离。导电液体最容易被塑料容器感应充电，并以电火花的形式消除感应电荷。

F.5 凝固导致导电性的变化

F.5.1 液体的电导率在凝固点可能突然地急剧下降，某些情况下可能会引起意想不到的静电危害。例如，联苯从液相 (高于 69℃) 变化到固相，电导率下降 4 个数量级。据报道，在先前剩有一层厚固体联苯，在 120℃ 时再把联苯装入罐内时，产生了静电着火情况。

F.5.2 通常情况下，当热联苯被装载到接地的金属容器中时，热联苯的导电能力足以能快速消散静电。但由于联苯的厚度以及固体联苯的保温层，因此电荷会聚集，并在液面到装料管处发生刷形放电。

附录 G
(资料性附录)
搭接和接地的推荐作法

本附录不是本标准的推荐部分，仅作为参考资料。

G.1 图表

图 G.1 a) ~图 G.1 k) 是从美国颜料与涂料协会 (NPCA) 出版的《静电的产生与控制》中翻印的。查阅此出版物可得到另外的图表。

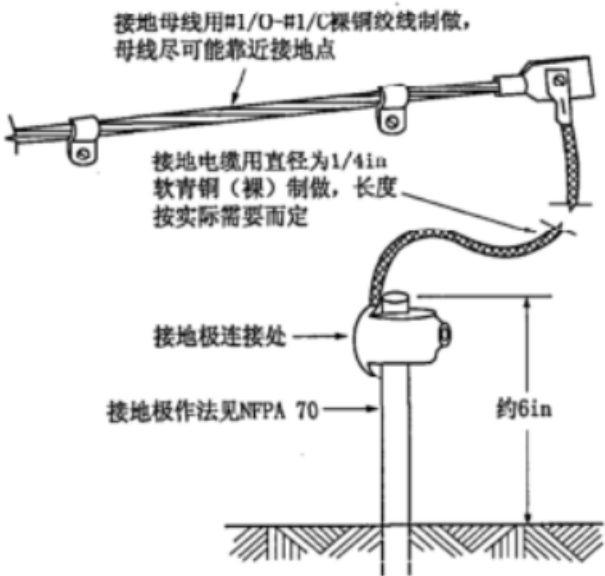


图 G.1 a) 接地母线与接地极的连接

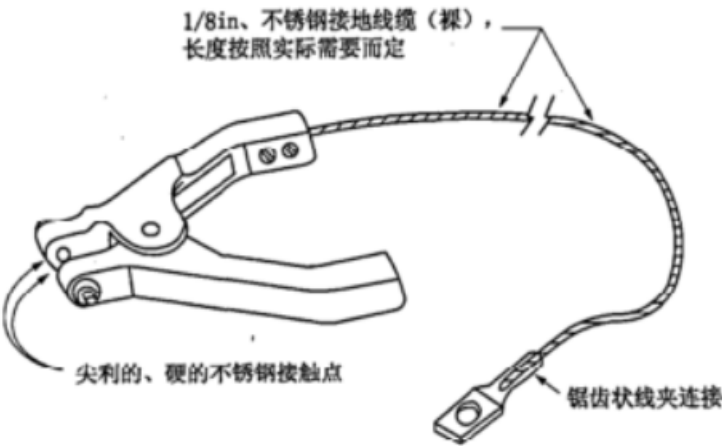


图 G.1 b) 小型接地线夹

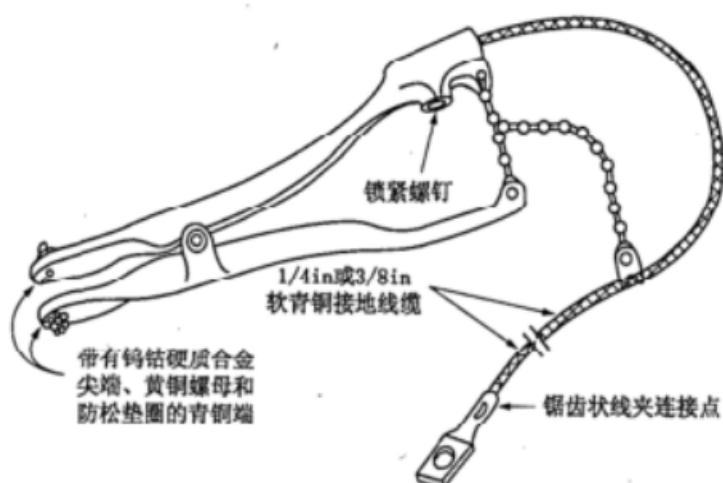


图 G.1 c) 大型接地线夹

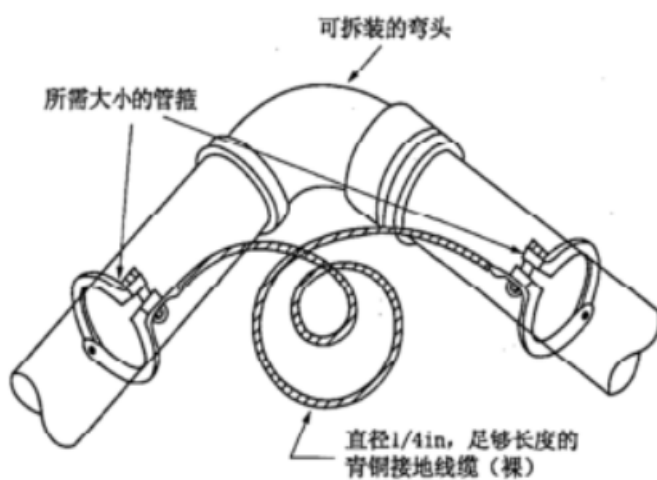


图 G.1 d) 接地管道跨接

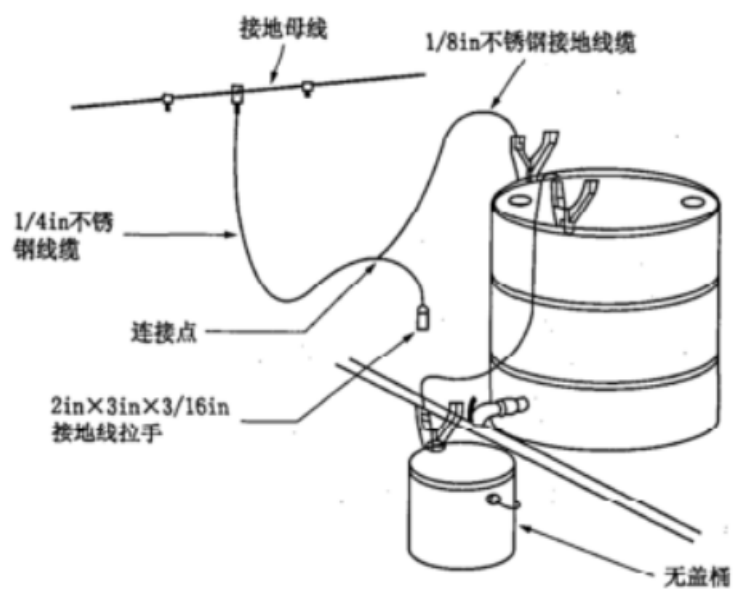


图 G.1 e) 通过圆桶活栓分配少量溶剂的典型接地系统

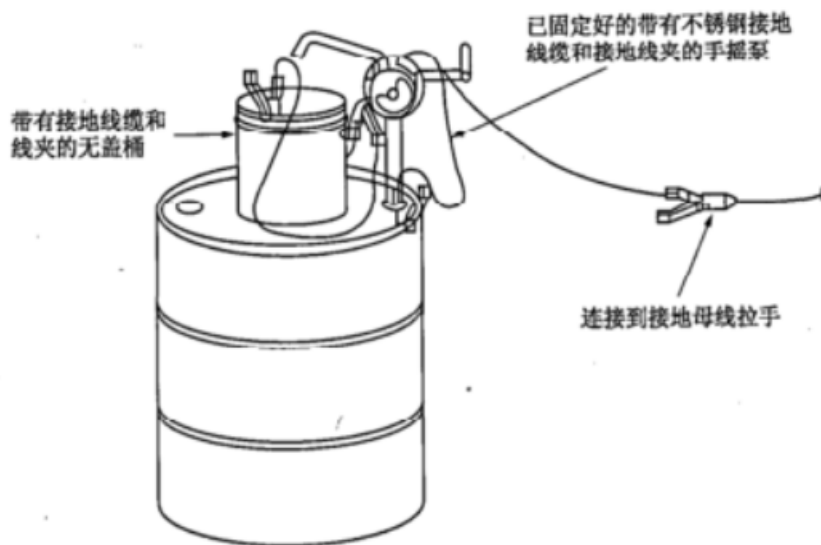


图 G.1 f) 通过圆桶手摇泵分配少量溶剂的典型接地系统

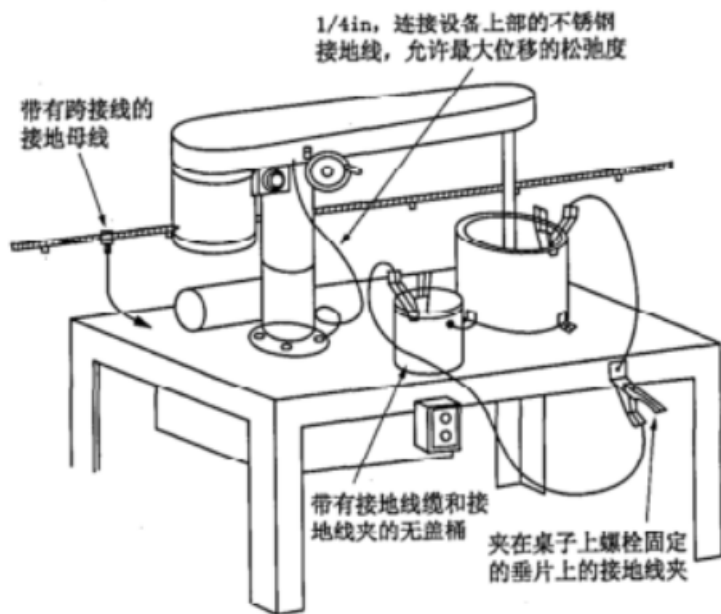


图 G.1 g) 小型设备的典型接地系统

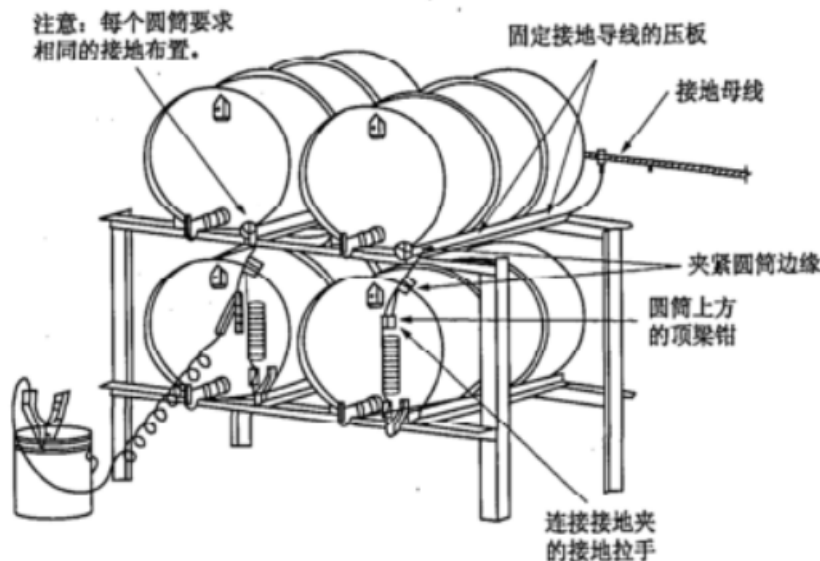


图 G.1 h) 分配站内分配少量溶剂的典型接地系统

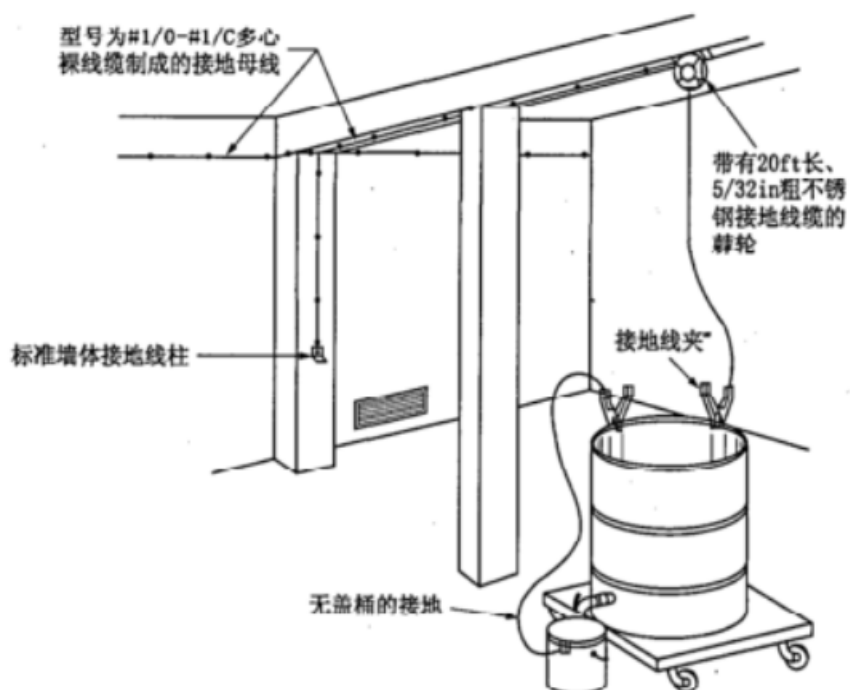


图 G.1 i) 手提桶与圆筒转移少量溶剂区域的典型接地系统

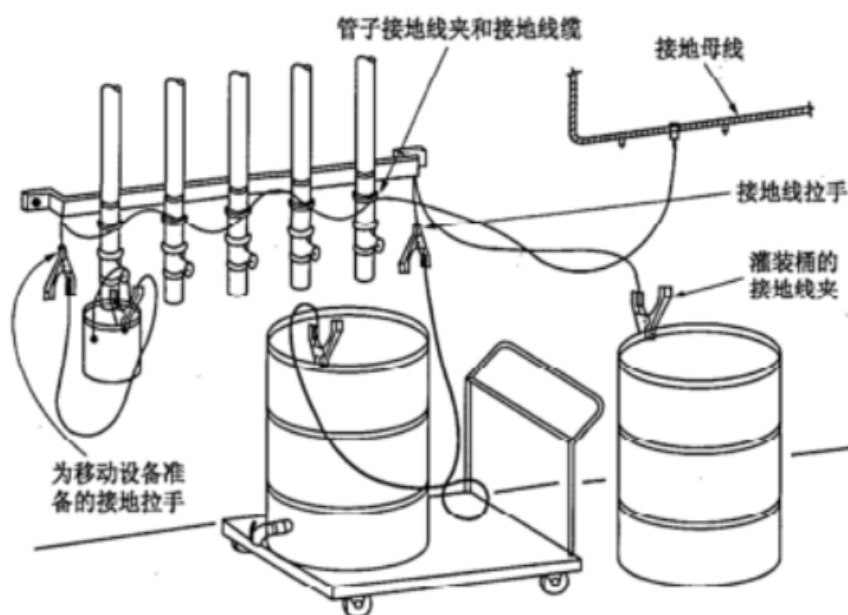
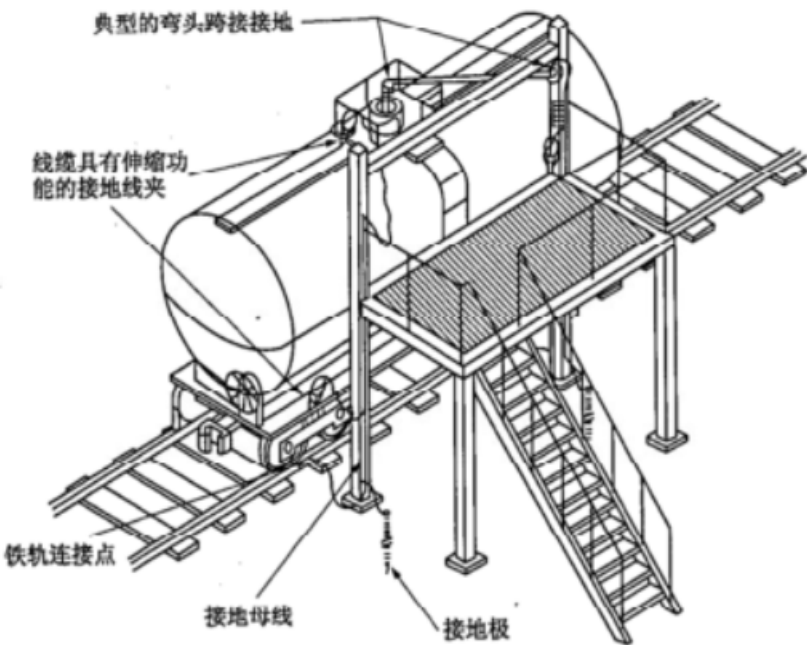


图 G.1 j) 托架上圆桶的典型接地系统



注意：任何导电的测量设备或管道在灌装前必须先连好接地。

图 G. 1 k) 车载罐装卸的典型接地系统

附录 H

(资料性附录)

术语汇编

本附录不是本标准的推荐部分，仅作为参考资料。

H.1 概述

本附录为第3章中没有的一些术语和定义。

H.2 术语

H.2.1

空气离子发生器 air ionizer

一种在空气中产生离子的装置。不导电项（或与地面绝缘项）上的静止电荷能吸引空气电离器产生的离子，以消除电荷的不平衡。其他的空气电离器用来向包壳中注射单一极性的离子。

H.2.2

交流电静电中和器 alternating current static neutralizer

见 H.2.53.1。

H.2.3

抗静电添加剂 antistatic additives

一种用来改变固体和液体材料静电性质的添加剂。根据添加的方法可将防静电添加剂分为外加添加剂和固有添加剂。基于它们作用效果的耐久性，防静电处理可分为短时的和长期的。

H.2.4

刷形放电 brush discharge

见 H.2.23.1。

H.2.5

容积密度 bulk density

每单位体积的灰尘堆或灰尘堆积物具有的质量。

H.2.6

膨胀型刷形放电 bulking brush discharge

见 H.2.23.1.1。

H.2.7

充电 charge

电子或正负离子的积聚或者不平衡，使它们在导体和绝缘体上积累，并且它们既有大小又有极性。电荷的运动形成电流。物体得到和失去的电子用库仑为单位度量。一个电子具有的电量为一 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。

H.2.8

电荷衰减时间 charge decay time

静电荷减少到原电荷数量的给定百分数所需要的时间。

H.2.9

电荷密度 charge density

单位表面积或单位体积具有的电荷量。面电荷密度以每平方米上的电荷量度量。体电荷密度以每立方米体积具有的电荷量来度量，也称为空间电荷密度或空间电荷，用单位立方米具有的电荷的库仑量度量。

H. 2. 10

电荷弛豫 charge relaxation

分离的电荷重新组合或一个系统失去多余电荷的过程。

H. 2. 11

起电 charging

H. 2. 11. 1

电场起电 field charging

电场中粒子的起电是由于电晕放电所释放的离子或其他来源的离子，如已知的离子炮轰击。微粒通过电场所获得的最大起电量与微粒的有效面积和电场的强度成正比。对于一个大于几十分之一微米的颗粒，电场起电是微粒带电的主要原因。

H. 2. 11. 2

感应起电 induction charging

接地物体接近带电体所引起的起电，称为感应起电。临近带电表面的接地物体上会产生电荷极化，这是由于接地物体和带电表面之间存在电场作用的结果。如果物体断开接地，感应电荷会留在物体上。当一个人从导电地面走到绝缘地面，在电场作用下将会产生感应静电。

H. 2. 11. 3

摩擦起电 triboelectric charging

由于不同材质的物质相接触或摩擦而产生的静电充电，称为摩擦起电或接触—分离充电。摩擦充电是最为人熟知、至少是最容易理解的电荷产生的机理。两种不同的物质接触或摩擦产生摩擦充电。以这种方式产生的电荷的数量主要取决于接触的方式、相关材料的固有属性和静电属性以及湿度、温度状况。最近的研究表明材料转移电荷的数量不仅取决于材料的组成还有接点的容量。摩擦充电的例子如下：

- 粉尘沿管道的气动传输。
- 越过滚筒高速运转的合成材料传送带。
- 人体走过地毯的带电。
- 塑料的挤压或模型中塑性材料的抛射。

表 H. 2. 11. 3 列出了在两种不同相对湿度的情况下，由于摩擦起电引起的典型静电压值。

表 H. 2. 11. 3 两种不同相对湿度的情况下，摩擦起电引起的典型静电压值

情 形	相对湿度 10%~20%	相对湿度 65%~90%
在地毯上行走	35	1.5
在乙烯树脂地板上行走	12	0.25
在工作台上工作	6	0.1
乙烯基文件袋	7	0.6
从工作台上拿起聚乙烯袋	20	1.2
填充了聚氨酯泡沫的工作椅	18	1.5

H. 2. 12

充电电流 charging current (I_c)

单位时间充入给定系统电量的速度，用安培表示。

H. 2. 13

导静电地板 conductive floor

平均电阻在 $2.5 \times 10^3 \Omega \sim 1.0 \times 10^6 \Omega$ 的地板。

H. 2. 14

导电软管 conductive hose

每米管子两端之间的电阻不超过 $10^3 \Omega$ 的软管。

H. 2. 15

电导率 (κ) (1/电阻率) conductivity (1/resistivity)

给出两个定义。

H. 2. 15. 1 定义 1: 它是控制电荷流过固体和液体表面或其内部的固有属性。

H. 2. 15. 1. 1 理想状况下, 电导率主要受温度的影响, 尤其是在存在湿气或静电添加剂的情况下。金属、水溶液等导体具有良好的导电性, 当接地时能快速失去电子。绝缘体具有高的电阻率, 即使在接地状况下其失去电子的过程也比较缓慢。

H. 2. 15. 1. 2 不接地的导体能储存电子, 在许多工业状况下, 能达到很高的电势导致危险的火花放电。

H. 2. 15. 1. 3 电导率的单位为 pS/m (注意: 电阻率倒数的单位与电导率的单位相同)。 $100 \Omega \cdot \text{cm} = 1 \Omega \cdot \text{m}$ 。

H. 2. 15. 1. 4 电导率通常不用于气体, 在气体中, 可以采用外部方法产生或注入电子或离子。电场存在的情况下, 离子向电极或带电表面移动, 形成电流。电导率不能算是气体的固有属性。

H. 2. 15. 2 定义 2: 电导率 (电导率或传导系数) 为某种物质的电流密度与电场的比值。

H. 2. 16

锥体放电 cone discharge

见定义 H. 2. 23. 1. 1 的膨胀型刷形放电。

H. 2. 17

电晕放电 corona discharge

见 H. 2. 23. 1. 3。

H. 2. 18

库仑 coulomb

等于 6.24×10^{18} 个电子具有的电量。也可以是电容为 1F 的电容器当其两极板电势差为 1V 时正极板所带电量。

H. 2. 19

电流 current (I)

电荷通过某一特定点或某一特定面时电子迁移速率的一种度量。符号 I 表示恒电流, i 表示随时间变化的电流。电流的单位是安培。 1A 相当于 1C/s 。

H. 2. 20

介质击穿 dielectric breakdown

当一个超过电介质区域固有故障特征的电压应用于电介质区时所发生的一种电压依赖失效。

H. 2. 21

介电常数 Dielectric Constant

物体的电容率与真空电容率的比率, 显示了一种材料相对于真空在电场中储存能量或电荷的能力。一些典型的介电常数和介电强度见表 D. 2. 21。电介质并不一定是绝缘体, 例如水的介电常数很高, 但却并不是好的绝缘体。电介质的好坏并不是取决于材料的极化率而取决于其导电性能。

H. 2. 22

介电强度 dielectric strength

一种材料在没有断裂之前可以经得起的最大电势梯度 (电场), 通常用每毫米厚度的伏特数表示, 也称为电强度或者击穿强度, 具体的数据见表 B. 2。在大气环境中的空气, 它的介电强度的最大值为 $3 \times 10^6 \text{V/m}$ 。这个数据表明存在表面电荷密度的最大值。与稳定的电场相比, 振荡的电场在材料上明显产生更大的压力。基于这个原因, 当采用交流电源装置时, 建立在直流电级别基础上的绝缘系统将很快失效。

表 H. 2. 21 所选材质的介电特性

材 质	介 电 常 数	介 电 强 度 V/m
胶木	4.9	2.4×10^7
醋酸纤维素	3.8	1.0×10^7
云母	5.4	1.0×10^8
胶质玻璃, 路赛特	3.4	4.0×10^7
聚苯乙烯	2.5	2.4×10^7
陶瓷	7	6.0×10^6
二氧化钛	90	6.0×10^6
钛化钡	1200	5.0×10^6

H. 2. 23

放电 discharge

H. 2. 23. 1

刷形放电 brush discharge

一种更高能量的电晕放电形式，表现为低频率脉冲或者电子流，刷形放电一般在带电绝缘体的表面和作为电极的接地导体之间形成。对于正电极而言，可以观察到击穿电子流，最大有效能量是几毫焦。对于负电极而言，最大有效能量是一毫焦的十分之几。刷形放电能使可燃气体和杂化混合物燃烧，但是空气中的粉尘除外。也称为锥形放电。

H. 2. 23. 1. 1

膨胀型刷形放电 bulking brush discharge

在容器中粉末膨胀期间，由部分表面放电引起的。从器壁到容器的中心，它以一个闪烁发光的放射枝状通道的形式出现。它的最大有效能量是 10mJ~25mJ。它能使可燃气体、杂化混合物和空气中的一些细小粉尘燃烧。

H. 2. 23. 1. 2

扩散型刷形放电 propagating brush discharge

在电容器中，由于介电层的电子雪崩引起的高能量放电。尽管塑料管和搬运箱也能形成所需要的带电层，但是典型的电容器是由覆盖了一层金属底层的带电塑料组成的。它的有效能超过 1000mJ，可以引起人员的电击伤害，并且能引燃多种物质，包括空气中的灰尘。

H. 2. 23. 1. 3

电晕放电 corona discharge

由尖锐的边缘、针尖和导线等表面上的电荷引起的气体局部电击穿而产生的一种微安级的放电。处于高压的导体或放置于带电表面附近的接地导体能产生电荷。

H. 2. 24

消散 dissipative

具有表面电阻率 $10^5 \Omega/\text{m}^2 \sim 10^{11} \Omega/\text{m}^2$ 的材料，能够释放静电。

H. 2. 25

电偶层 double layer

通常是与固液交界面有关的一种现象，在固液交界面处同种电荷类型的离子固定在固体表面上，相同数量相反电荷的活动离子分布在液体的相邻区域内。在这样一个系统中，液体的运动会引起与固体表面上与固定电荷有关的活动离子的迁移。

H. 2. 26

电动静电中和器 electrically powered static neutralizer

见 H. 2. 53. 2。

H. 2. 27

静电计 electrometer

用来测量静电荷的仪器，它具有很高的输入阻抗，通常大于 $10^{13} \Omega$ ，这样，通过测量物体的电流就可以忽略。

H. 2. 28

静电场 electrostatic field

每单位电荷的电场力，它是由电荷的分布引起的，也称为电场强度或电势梯度，电场可以想象成为起始于单位正电荷，终止于单位负电荷无穷的电力线。因此，它与表面和气流中的电荷密切相关。

H. 2. 29

静电场计 electrostatic field meter

通过在导体或绝缘体的表面感应电荷和电荷的极性来估计带电物体电场的仪器。

H. 2. 30

法拉第笼 faraday cage

它是一个连续的、导电的封闭笼，能提供静电屏蔽保护（在屏蔽笼内没有静电场）。尽管不一定需要，但是屏蔽笼通常是接地的。

H. 2. 31

电场起电 field charging

见 H. 2. 11. 1。

H. 2. 32

场抑制 field suppression

当某物体靠近接地物体时，这一物体周围的电场就会减弱。这是由于朝向接地表面电力线被重新配置。

H. 2. 33

可燃极限 flammable limit

H. 2. 33. 1

可燃下限 lower flammable limit (LFL)

在氧化介质中能使特定的燃料产生火焰的可燃成分的最低摩尔（体积）浓度。

H. 2. 33. 2

可燃上限 upper flammable limit (UFL)

在氧化介质中，可燃物质能产生火焰的最高摩尔（体积）浓度。

H. 2. 34

点火能 ignition energy

在规定实验条件下，能使某给定混合燃料燃烧所需要的能量。

H. 2. 34. 1

最小点火能 minimum ignition energy (MIE)

能量用焦 [耳] 表示，储存在电容器中，在特定的试验条件下，正好有效点燃给定燃料的可燃混合物所需的放电能量。

H. 2. 35

易燃的 incendive

能够容易引起燃烧的。

H. 2. 36

感应 induction

在电场作用下或导体移动到已存在的电场，导体上电荷重新分布的过程。

H. 2. 37

感应棒 induction bar

一种被动的电晕放电设备。这种设备同大地连接，当高度带电的物体接近时，在设备接地极上产生电晕放电。当物体上的电量足够大，或物体同设备足够近时就会达到电晕放电的条件，在电极上就会产生离子。

H. 2. 38

感应起电 induction charging

见 H. 2. 11. 2。

H. 2. 39

电离 ionization

中性原子或分子失去或得到电子，因此，获得一个净电荷就变为离子。

H. 2. 40

焦耳 joule

功和能量的单位，1J 相当于 $1\text{W} \cdot \text{s}$ 。

H. 2. 41

最低氧化剂浓度 limiting oxidant concentration (LOC)

使特定的燃料产生火焰的气相氧化剂的最低摩尔（体积）浓度。

H. 2. 42

可燃下限 lower flammable limit (LFL)

见 H. 2. 33. 1。

H. 2. 43

兆欧计 megohmmeter

比标准欧姆计工作在更高的试验电压下，通常电压范围为 $100\text{V} \sim 1000\text{V}$ ，用于测量更高电阻值。

H. 2. 44

最低爆炸浓度 minimum explosible concentration (MEC)

空气中易燃灰尘产生火焰的最小浓度，用每立方米的克数来表示。

H. 2. 45

最小点火能 minimum ignition energy (MIE)

见 H. 2. 34. 1。

H. 2. 46

欧姆 ohm

电阻的单位，相当于通过电阻的电流为 1A ，相应的电压降为 1V 时的电阻。

H. 2. 47

欧姆每平方 ohms per square

表面电阻的单位，表面电阻是指一个正方形中作为电极的两个边之间的电阻值，它与正方形的大小无关。所得的值反映了电子流过一个表面的容易程度。它通常作为薄导电层或覆盖在相对绝缘材料上的物体的电阻测量。

H. 2. 48

扩散型刷形放电 propagating brush discharge

见 H. 2. 23. 1. 2。

H. 2. 49

弛豫时间常数 relaxation time constant

根据欧姆定律, 电荷衰减到其初始数值的 e^{-1} (36.7%) 所需要的时间, 单位为秒。对于电容器而言, 弛豫时间常数是电阻 (欧姆) 和电容 (法拉) 的乘积。

H. 2. 50

电阻 resistance

一个装置或材料对直流电流的流动所呈现出的阻力, 相当于通过电阻丝的压降除以通过电阻丝的电流。

H. 2. 51

电阻率 resistivity

H. 2. 51. 1

表面电阻率 surface resistivity

一个绝缘体表面的电阻, 单位为每平方多少欧姆, 用来测量正方形相对两个边表面间的电阻, 所测得的欧姆值与正方形的大小或表面涂层的厚度无关。

H. 2. 51. 2

体积电阻率 volume resistivity

材料样品的电阻, 用 $\Omega \cdot m$ 来表示, 有单位长度和单位横截面积两种。

H. 2. 52

火花 spark

由于不同电势的导体间空气或其他绝缘材料的突然击穿而发生的短时放电现象, 伴有瞬间闪光, 也称为电火花、火花放电, 或者绝缘击穿。

H. 2. 53

静电中和器 static neutralizer

H. 2. 53. 1

交流电静电中和器 alternating current static (a. c.) neutralizer

这种静电中和器是用交流电晕放电来产生正负离子的。这个设备所产生离子用来中和带电的表面 (通常是绝缘的), 交流电静电中和器的频率通常是线频率 (50Hz/60Hz)。

H. 2. 53. 2

电动静电中和器 electrically powered static neutralizer

这种静电中和器采用一个或多个固定在支架上的坚固的带电针尖和一个为中和器提供动力的高压供应装置。离子产生在高度荷电的针尖周围的空间内。

H. 2. 54

表面电荷密度 surface - charge density

单位固体表面积上的电荷量, 用每平方米上电荷的库仑数表示。在空气中, 空气击穿之前能承受的最大表面电荷密度为 $2.65 \times 10^{-5} \text{C/m}^2$ 。在大多数实际情况中, 只为上述标准值的一定百分数。

H. 2. 55

表面电阻率 surface resistivity

见 H. 2. 51. 1。

H. 2. 56

表面电子流 surface streamer

在容器灌装期间, 会观察到荷电的液体表面向器壁的放电现象, 有 30cm 长的闪光并伴随噼啪声响。它的有效能量是未知的, 可能是 10mJ 左右。在摩擦起电的固体表面中, 也可以看到表面电子流, 例如, 在飞机的挡风玻璃和金属机身之间, 但是不会发生击穿。

H. 2. 57

摩擦起电 tribocharging

表面的摩擦引起电荷的分离，产生摩擦电，也可见定义 H. 2. 11. 3。

H. 2. 58

摩擦起电 triboelectric charging

见 H. 2. 11. 3。

H. 2. 59

摩擦电序 triboelectric series

不同的物质相互摩擦时，会发生电荷的转移。许多致力于摩擦起电这一领域的研究员建立了摩擦电序这一定义，以显示在物质组合中哪一项将会从另一项中获得电子。尽管一些物质在定位上有一致性，但即使采用相同的物质，多数电序也有不同。

H. 2. 60

可燃上限 upper flammable limit (UFL)

见 H. 2. 33. 2。

H. 2. 61

体积电阻率 volume resistivity

见 H. 2. 51. 2。

附录 I

(资料性附录)

参考资料

I.1 参考出版物

下面的文献或文献中的一部分在本推荐作法中仅作为参考，除在第2章列出的外均不是本标准的推荐部分。

I.1.1 NFPA 出版物

- NFPA 30A: 2007 电动机燃料分配设备及其修理厂规范
- NFPA 33: 2007 易燃和可燃材料喷涂作业标准
- NFPA 53: 2004 富氧环境下材料、装置和系统推荐实施规程
- NFPA 69: 2002 防爆系统标准
- NFPA 70: 2005 国家电气规程
- NFPA 99: 2005 人身防护设备标准
- NFPA 302: 2006 娱乐和商业机动船防火标准
- NFPA 326: 2005 进入、清洗、维修储罐、容器安全防护标准
- NFPA 407: 2007 飞机燃料供应标准
- NFPA 780: 2004 雷电防护系统安装标准

I.1.2 其他出版物

I.1.2.1 AIChE Publications 美国化学工程师协会

- Britton, L. G. 静电危害评估中材料数据的应用. 设备/操作进展, 第11卷, 1992.4, 56~70
- Britton, L. G. 化学制品操作中静电打火危害的预防, 1999

I.1.2.2 ANSI 出版物 美国国家标准化组织

- ANSI Z41: 1991 人身防护标准 防护靴

I.1.2.3 API 出版物 美国石油协会

- Bustin, W. M., et al. 高阻抗燃料静电释放新理论. API 精炼油学报, 第44卷第3期, 1964
- API RP 2003: 1998 静电、雷电和杂散电流打火的防护 (第6版)
- API Publ 2219: 1999 石油业真空吸尘器车操作安全 (第2版)

I.1.2.4 ASTM 出版物 美国材料实验协会

- ASTM E 502: 1984 用闭口杯法确定化学品闪点时所选择和使用的试验方法标准

I.1.2.5 CENELEC 出版物 欧洲电工技术标准化委员会

- CENELEC 电动机械安全标准 电工技术 (1996)

I.1.2.6 NPCA 出版物 美国颜料与涂料协会

- 静电的产生与控制 (1998)

I.2 参考资料 (保留)

I.3 参考资料摘录 (保留)

中华人民共和国
石油天然气行业标准
防静电推荐作法
SY/T 6340—2010

石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)
石油工业出版社印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

880×1230 毫米 16 开本 5 印张 150 千字 印 1—5000
2010 年 10 月北京第 1 版 2010 年 10 月北京第 1 次印刷
书号: 155021·6496

版权专有 不得翻印