ICS 29.260.20
K 35

中华人民共和国国家标准

GB/T 3836.26—2019

爆炸性环境
第26部分：静电危害　指南

Explosive atmospheres—
Part 26：Electrostatic hazards—Guidance

（IEC TS 60079-32-1：2013，Explosive atmospheres—
Part 32-1：Electrostatic hazards，guidance，MOD）

2019-12-31 发布　　2020-07-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会　发布

目　　次

前言 …… Ⅲ
1　范围 …… 1
2　规范性引用文件 …… 1
3　术语和定义 …… 3
4　命名法 …… 6
5　概述 …… 6
6　固体材料静电 …… 7
6.1　概述 …… 7
6.2　使用导电或耗散材料代替绝缘材料 …… 8
6.3　使用固体绝缘材料的预防措施 …… 10
6.4　传送带和传动带 …… 15
7　液体中的静电 …… 17
7.1　一般信息 …… 17
7.2　液体处理操作中预防点燃危险的措施概要 …… 19
7.3　储罐及容器 …… 21
7.4　高黏度液体 …… 36
7.5　高起电设备 …… 37
7.6　储罐内测量及取样 …… 38
7.7　用于液体的管道和软管组件 …… 38
7.8　特殊加注程序 …… 46
7.9　车间流程(调配、搅拌、混合、结晶及搅拌反应器) …… 51
7.10　喷雾液体及罐清理 …… 52
7.11　玻璃系统 …… 53
8　气体中的静电 …… 54
8.1　概述 …… 54
8.2　喷砂 …… 55
8.3　灭火设备 …… 55
8.4　惰化 …… 55
8.5　蒸汽清洁 …… 55
8.6　压缩气体意外泄漏 …… 55
8.7　喷涂可燃性涂料或粉末 …… 56
8.8　固定式和移动式真空吸尘器 …… 56
9　粉末中的静电 …… 57
9.1　概述 …… 57
9.2　放电的产生和引燃性 …… 58
9.3　程序化措施 …… 58

9.4 无可燃性气体或蒸气的散状物料 …… 59
9.5 存在可燃性气体或蒸气的散状物料附加要求 …… 64
9.6 柔性集装袋(FIBC) …… 66
10 处理爆炸物和电子爆炸装置时的静电 …… 68
10.1 爆炸物的生产、处理和储存 …… 68
10.2 处理电子引爆装置 …… 69
11 人体静电 …… 70
11.1 总则 …… 70
11.2 静电耗散地板 …… 70
11.3 耗散型防静电鞋及导电型防静电鞋 …… 71
11.4 人体接地辅助装置 …… 71
11.5 衣物 …… 71
11.6 手套 …… 72
11.7 其他物品 …… 73
12 静电冲击 …… 73
12.1 概述 …… 73
12.2 与静电电击有关的放电 …… 73
12.3 静电电击源 …… 74
12.4 静电电击的预防措施 …… 74
12.5 特殊情况预防措施 …… 75
13 接地和等电位联结 …… 76
13.1 概述 …… 76
13.2 导体的静电耗散标准 …… 77
13.3 实际系统的接地要求 …… 79
13.4 接地系统的建立及监控 …… 81
14 对符合 GB 3836.1 设备的特殊要求 …… 82
14.1 概述 …… 82
14.2 外部非金属材料上的静电电荷 …… 82
14.3 外部导电部件上的静电电荷 …… 85
附录 A(资料性附录) 静电的基本原理 …… 86
附录 B(资料性附录) 在特定情况下的静电放电 …… 96
附录 C(资料性附录) 物质的可燃性 …… 101
附录 D(资料性附录) 危险场所分类 …… 106
附录 E(资料性附录) 设备保护级别分类 …… 108
附录 F(资料性附录) 静电系统评价流程图 …… 109
参考文献 …… 111

前　言

《爆炸性环境》分为若干部分：

——第1部分：设备　通用要求；

——第2部分：由隔爆外壳“d”保护的设备；

——第3部分：由增安型“e”保护的设备；

——第4部分：由本质安全型“i”保护的设备；

——第5部分：由正压外壳“p”保护的设备；

——第6部分：由液浸型“o”保护的设备；

——第7部分：由充砂型“q”保护的设备；

——第8部分：由“n”型保护的设备；

——第9部分：由浇封型“m”保护的设备；

——第11部分：气体和蒸气物质特性分类　试验方法和数据；

——第12部分：可燃性粉尘物质特性　试验方法；

——第13部分：设备的修理、检修、修复和改造；

——第14部分：场所分类　爆炸性气体环境；

——第15部分：电气装置的设计、选型和安装；

——第16部分：电气装置的检查与维护；

——第17部分：由正压房间“p”和人工通风房间“v”保护的设备；

——第18部分：本质安全电气系统；

——第19部分：现场总线本质安全概念(FISCO)；

——第20部分：设备保护级别(EPL)为Ga级的设备；

——第21部分：设备生产质量体系的应用；

——第22部分：光辐射设备和传输系统的保护措施；

——第23部分：用于瓦斯和/或煤尘环境的Ⅰ类EPL Ma级设备；

——第24部分：由特殊型“s”保护的设备；

——第25部分：可燃性工艺流体与电气系统之间的工艺密封要求；

——第26部分：静电危害　指南；

——第27部分：静电危害　试验；

……

本部分为《爆炸性环境》的第26部分。

本部分按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本部分使用重新起草法修改采用IEC TS 60079-32-1:2013《爆炸性环境　第32-1部分：静电危害指南》。

本部分与IEC TS 60079-32-1:2013的技术性差异及其原因如下：

——关于规范性引用文件，本部分做了具有技术性差异的调整，以适用我国的技术条件，调整的情况集中反映在第2章“规范性引用文件”中，具体调整如下：

- 用等同采用国际标准的GB/T 1410代替IEC 60093；
- 用等同采用国际标准的GB/T 3684代替ISO 284；
- 用修改采用国际标准的GB 3836.1代替IEC 60079-0:2011；

- 用等同采用国际标准的 GB/T 3836.11 代替 IEC 60079-20-1；
- 用等同采用国际标准的 GB 3836.14 代替 IEC 60079-10-1；
- 用修改采用国际标准的 GB/T 3836.15 代替 IEC 60079-14；
- 用修改采用国际标准的 GB/T 3836.27—2019 代替 IEC 60079-32-2:2015；
- 用等同采用国际标准的 GB/T 9572 代替 ISO 8031；
- 用等同采用国际标准的 GB/T 10064 代替 IEC 60167；
- 用修改采用国际标准的 GB/T 12476.3 代替 IEC 60079-10-2；
- 用等同采用国际标准的 GB/T 15706 代替 ISO 12100；
- 用修改采用欧洲标准的 GB 25286.1 代替 EN 13463-1；
- 用修改采用国际标准的 GB/T 26277 代替 ISO 16392；
- 用修改采用国际标准的 GB/T 32072 代替 ISO 9563；
- 用等同采用国际标准的 GB/T 33204 代替 ISO 21178；
- 用等同采用国际标准的 GB/T 34366 代替 ISO 21179；
- 用修改采用欧洲标准的 HG/T 3037 代替 EN 1360；
- 增加引用了 GB/T 1408.1、GB/T 1408.2、GB/T 10715、GB 12476.1、GB/T 20023、GB/T 23165、EN 1149(所有部分)；
- 删除了 ASTM D257、ASTM D2624-07a、ASTM D4308-95、ASTM E582-88、ASTM E2019-03、BS 5958(所有部分)、BS 7506-2、DIN 51412-1、DIN 51412-2、JNIOSH TR 42，并移至参考文献。

——将文中引用的 IEC 60079-7:2007 中试验方法 26.14 和 26.15 修改为 GB/T 3836.27—2019 中 4.10 和 4.11，两个试验方法已修订并列入了 GB/T 3836.27—2019。

——修改了 7.8.3.1 中汽油、柴油的有关参数等内容，以符合我国实际情况。

本部分做了下列编辑性修改：

——纳入了 IEC TS 60079-32-1:2013/AMD1:2017 的内容；

——删除附录 G“试验”，试验部分内容见 GB/T 3836.27—2019；

——删除第 6 章和附录 A 中关于 IEC 60079-7:2007 中试验方法 26.14 和 26.15 的注；

——删除 7.3.2.1 中关于导电储罐容量和容量单位的注；

——将表 9a)和表 9b)合并为一个表格。

本部分由中国电器工业协会提出。

本部分由全国防爆电气设备标准化技术委员会(SAC/TC 9)归口。

本部分起草单位：南阳防爆电气研究所有限公司、国家防爆电气产品质量监督检验中心、中海油天津化工研究设计院有限公司、托肯恒山科技(广州)有限公司、北京三盈联合石油技术有限公司、河南省济源市矿用电器有限责任公司、新黎明科技股份有限公司、福建上润精密仪器有限公司、江阴市富仁高科股份有限公司。

本部分主要起草人：张刚、王军、乔秦、张材、季鹏、周斌涛、郑振晓、王巧立、戈剑、徐东成。

爆炸性环境
第26部分：静电危害　指南

1　范围

《爆炸性环境》的本部分给出了设备、产品和工艺过程避免静电点燃和静电电击危害的指南，以及保证设备、产品或工艺过程安全使用的操作要求。

本部分适用于对静电危害进行危险评定，或用于制定电气或非电气设备标准或专用产品标准。

工业流程与环境中通常导致问题的静电危害都予以考虑。这些流程包括固体、液体、粉末、气体、喷雾及爆炸物的处理。对每种情况，确定静电危害来源及特性并给出具体处理建议。

本部分的目的是为控制静电提供标准的建议，例如，导体接地、减少起电、限制绝缘件的可起电面积。在某些情况下，静电是工艺过程的一部分，例如，静电喷涂，但同时静电产生的负面影响是本部分关注的内容。如果能够符合本部分的标准建议，则爆炸性环境中的静电放电危害可降低到可接受的低水平。

如果不能满足本部分的要求，也可采用其他至少达到同等安全水平的方法。

注：固体、液体、气体、爆炸物和人体静电的产生原因，以及静电如何导致点燃或静电电击的描述参见本部分附录A和附录B及IEC/TR 61340-1。

本部分不适用于与雷电有关的静电危害，也不适用于电子元件损坏。

本部分不取代涉及特定产品及特定工业环境的标准。

2　规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 1408.1　绝缘材料　电气强度试验方法　第1部分：工频下试验(GB/T 1408.1—2016，IEC 60243-1：2013，IDT)

GB/T 1408.2　绝缘材料　电气强度试验方法　第2部分：对应用直流电压试验的附加要求(GB/T 1408.2—2016，IEC 60243-2：2013，IDT)

GB/T 1410　固体绝缘材料体积电阻率和表面电阻率试验方法(GB/T 1410—2006，IEC 60093：1980，IDT)

GB/T 3684　输送带　导电性　规范和试验方法(GB/T 3684—2006，ISO 284：2003，IDT)

GB 3836.1　爆炸性环境　第1部分：设备　通用要求(GB 3836.1—2010，IEC 60079-0：2007，MOD)

GB/T 3836.11　爆炸性环境　第11部分：气体和蒸气物质特性分类　试验方法和数据(GB/T 3836.11—2017，IEC 60079-20-1：2010，IDT)

GB 3836.14　爆炸性环境　第14部分：场所分类　爆炸性气体环境(GB 3836.14—2014，IEC 60079-10-1：2008，IDT)

GB/T 3836.15　爆炸性环境　第15部分：电气装置的设计、选型和安装(GB/T 3836.15—2017，IEC 60079-14：2007，MOD)

GB/T 3836.27—2019　爆炸性环境　第27部分：静电危害　试验(IEC 60079-32-2：2015，MOD)

GB/T 9572　橡胶和塑料软管及软管组合件　电阻和导电性的测定(GB/T 9572—2013，

ISO 8031:2009,IDT)

GB/T 10064 测定固体绝缘材料绝缘电阻的试验方法(GB/T 10064—2006,IEC 60167:1964,IDT)

GB/T 10715 带传动 多楔带、联组V带及包括宽V带、六角带在内的单根V带 抗静电带的导电性:要求和试验方法(GB/T 10715—2002,ISO 1813:1998,MOD)

GB 12476.1 可燃性粉尘环境用电气设备 第1部分:通用要求(GB 12476.1—2013,IEC 61241-0:2004,MOD)

GB/T 12476.3 可燃性粉尘环境用电气设备 第3部分:存在或可能存在可燃性粉尘的场所分类(GB/T 12476.3—2017,IEC 60079-10-2:2009,MOD)

GB/T 15706 机械安全 设计通则 风险评估与风险减小(GB/T 15706—2012,ISO 12100:2010,IDT)

GB/T 20023 无气喷涂用橡胶和/或塑料软管及软管组合件(GB/T 20023—2005,ISO 8028:1999,IDT)

GB/T 23165 地毯 电阻的测定(GB/T 23165—2008,ISO 10965:1998,IDT)

GB 25286.1 爆炸性环境用非电气设备 第1部分:基本方法和要求

GB/T 26277 轮胎电阻测量方法(GB/T 26277—2010,ISO 16392:2007,MOD)

GB/T 32072 带传动 抗静电同步带的导电性 要求和试验方法(GB/T 32072—2015,ISO 9563:1990,MOD)

GB/T 33204 轻型输送带 电阻测定(GB/T 33204—2016,ISO 21178:2013,IDT)

GB/T 34366 轻型输送带 轻型输送带运转产生的静电场的测定(GB/T 34366—2017,ISO 21179:2013,IDT)

HG/T 3037 计量分配燃油用橡胶和塑料软管及软管组合件

IEC 61340-2-3 静电 第2-3部分:用于防止静电电荷积聚的固体平面材料电阻和电阻率测定试验方法(Electrostatics—Part 2-3:Methods of test for determining the resistance and resistivity of solid planar materials used to avoid electrostatic charge accumulation)

IEC 61340-4-1 静电 第4-1部分:特定用途的标准试验方法 地板覆盖物及固定式地板的电阻(Electrostatics—Part 4-1:Standard test methods for specific applications—Electrical resistance of floor coverings and installed floors)

IEC 61340-4-3 静电 第4-3部分:特定用途的标准试验方法 鞋类(Electrostatics—Part 4-3:Standard test methods for specific applications—Footwear)

IEC 61340-4-4:2018 静电 第4-4部分:特定用途的标准试验方法 柔性集装袋(FIBC)的静电分类[Electrostatics—Part 4-4:Standard test methods for specific applications—Electrostatic classification of flexible intermediate bulk containers (FIBC)]

ISO 6297 石油产品 航空和馏分燃料 电导率的测定(Petroleum products—Aviation and distillate fuels—Determination of electrical conductivity)

ISO 21183-1 轻型输送带 第1部分:主要特性和应用(Light conveyor belts—Part 1:Principal characteristics and applications)

ASTM F150 导电及静电耗散型弹性地板电阻的标准试验方法(Standard test method for electrical resistance of conductive and static dissipative resilient flooring)

ASTM F1971 轮胎试验台负载测试电阻标准方法(Standard test method for electrical resistance of tires under load on the test bench)

EN 1081 弹性地板覆盖物 电阻测定(Resilient floor coverings—Determination of the electrical resistance)

EN 1149(所有部分) 防护服 静电特性(Protecting clothes—Electrostatic properties)

EN 1149-3 防护服 静电特性 第3部分:电荷耗散测量试验方法(Protecting clothes—Electrostatic properties—Part 3:Test method for measuring the charge dissipation)

EN 1149-5 防护服 静电特性 第5部分:材料性能和设计要求(Protective clothing—Electrostatic properties—Part 5:Material performance and design requirements)

EN 1361 航空燃油储运橡胶软管及软管组件 技术条件(Rubber hoses and hose assemblies for aviation fuel handling—Specification)

EN 14125 加油站地下管道(Underground pipework for petrol filling stations)

EN 14973 地下装置传送带 电气和可燃安全要求(Conveyor belts for use in underground installations—Electrical and flammability safety requirements)

NFPA 77 静电推荐实践规程(Recommended practice on static electricity)

SAE J1645 地面车辆推荐实践规程 燃油系统和元件 静电电荷缓解(Surface vehicle recommended practice—Fuel systems and components—Electrostatic charge mitigation)

油轮与油码头国际安全指南(ISGOTT)第5版,国际航运协会,2006[International Safety Guide for Oil Tankers and Terminals (ISGOTT), fifth edition, International chamber of shipping, 2006.]

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

抗静电 antistatic

防静电

导电性或耗散性。

注1:用于描述某种材料在接地时不会积聚显著的静电电荷。本部分中该词通常用来描述鞋的类型及与液体一起使用的防静电剂(ASA)。

注2:最好根据具体情况选择导电性或耗散性。

3.2

导电性 conductive

形容具有电阻率或电阻值低于耗散范围(见3.7),允许产生杂散电流弧和静电电击的特性。

注1:导电性材料或物体既不耗散也不绝缘。当接地时,不会积聚显著的静电电荷。

注2:固体材料、外壳和物体的导电范围限值见6.1(表1),散状物料的导电范围限值见9.1。对于某些特殊物体,其他标准中有特殊定义(见3.3、3.8、3.9)。

注3:包含静电特性的产品标准或其他标准通常会包含"导电性"的特殊定义,这些定义仅适用于这些标准规定的产品,与本部分的定义可能不同。例如,GB/T 9572及GB/T 7528软管组件标准。

3.3

导电型防静电鞋 conductive footwear

即使在特别危险条件下(例如,处理敏感爆炸物),穿上后人员站立在导电地面上,可保证与大地间电阻足够低,能保证静电电荷的耗散,但不足以承受500 V耐压的鞋子。

注:见IEC 61340-4-3及IEC 61340-4-5。

3.4

电导率 conductivity

体积电阻率数的倒数。

注:单位为西门子每米。

3.5

导体 conductor

导电物体。

3.6

被污染的液体 contaminated liquid

自由水分或其他不溶液体体积超过0.5%，或悬浮体超过10 mg/L的液体。

3.7

耗散性 dissipative

静电耗散性 electrostatic dissipative

形容具有电阻率或电阻值介于导电与绝缘之间的特性(见3.2和3.15)。

注1：耗散性材料或物体既不导电也不绝缘，但是像导电物体一样，与地接触时，即使在安全限制条件下接触，仍会产生和/或耗散其设计应用的最大起电电流。

注2：固体材料、外壳和物体的耗散范围限值见6.1(表1)，散状物料的耗散范围限值见9.1。对于某些特殊物体，其他标准中有特殊定义(见3.3、3.8、3.9)。

注3：包含静电特性的产品标准或其他标准通常会包含"耗散性"的特殊定义，这些定义仅适用于这些标准规定的产品，与本部分的定义可能不同。

3.8

耗散型防静电服 dissipative clothing

材料及设计要求符合EN 1149-5的服装。

3.9

耗散型防静电鞋 dissipative footwear

穿上后人员站立在导电性或耗散性地面上，可保证与大地间电阻足够低，能保证静电电荷的耗散，但足以承受500 V耐压的鞋子。

注1：见IEC 61340-4-3及IEC 61340-4-5。

注2：符合GB 21148的防静电鞋可满足此功能。

3.10

静电电击 electrostatic shock

静电释放电流通过人体或动物身体导致的病理学效果。

3.11

外壳 enclosure

围绕和封闭设备的墙、门、盖、电缆引入装置、杆、轴、涂层等。

注1：对于电气设备来说，外壳指GB 3836.1规定的外壳。

注2：柔性集装袋(FIBC)及其他类似的容器不是设备外壳，在9.6中单独考虑。

3.12

危险场所 hazardous area

可燃性或爆炸性气体/蒸气与空气的混合物或粉尘与空气的混合物出现或可能出现的量达到足以要求采取专门防点燃措施的区域。

注：见GB 3836.14和GB/T 12476.3。

3.13

高度起电 high charging

静电起电率比简单人工操作高的流程。

示例：如摩擦、用布清洁、从座位起来、行走、擦拭衣服等。

注：典型的高度起电操作例子包括，例如，绝缘液体或粉末流动及高压喷雾起电过程。

3.14

杂混物　hybrid mixture

可燃性气体或蒸气与可燃性粉尘的混合物。

3.15

绝缘性　insulating

形容具有电阻率或电阻值高于耗散范围(见 3.7)的特性。

注 1：绝缘性材料或物体既不导电也不耗散。静电电荷可在上面积聚，即使与地接触时也不易耗散。

注 2：固体材料、外壳和物体的导电范围限值见表 1，散状物料的导电范围限值见 9.1。对于某些特殊物体，其他标准中有特殊定义(见 3.3、3.8、3.9)。

注 3：包含静电特性的产品标准或其他标准中通常有“绝缘性”的特殊定义，这些定义仅适用于这些标准规定的产品，与本部分的定义可能不同。见 GB/T 9572 和 GB/T 7528 软管和软管组件标准。

注 4：形容词“非导电性”常被用作“绝缘性”的同义词。本部分避免使用，因为“非导电性”可以理解为“绝缘性”“绝缘性或耗散性”，以免混淆。

3.16

被隔离导体　isolated conductor

由于接地泄漏电阻超过表 22 规定的值，可积聚电荷的导电物体。

3.17

泄漏电阻　leakage resistance

接地电阻　resistance to earth

接触测量表面的电极与地之间的电阻。

注 1：单位为欧姆。

注 2：泄漏电阻取决于材料的体积和/或表面电阻率，以及所选测量点与地之间的距离。

注 3：常见的配置(例如 IEC 61340-4-1、GB/T 23165 及 ASTM F150 中)使用直径(65±5)mm 的环形电极。

3.18

最小点燃能量　minimum ignition energy

MIE

通过标准程序测量，能够点燃特定可燃性物质与空气或氧气混合物的最小能量。

注：气体及蒸气的 MIE 见 ASTM E582-88，粉尘云的 MIE 见 GB/T 3836.12 和 ASTM E2019-03。

3.19

多相液体　multiphase liquid

固体悬浮在液体中、气泡悬浮在液体中，有明显界面边界的相分离不融合混合物。

注：液体在气体中的悬浮物(雾或喷雾)不包括在多相液体中。

3.20

释放时间　relaxation time

固体表面或大容量液体或粉末中静电电荷以指数方式从初值衰减到 1/e(即约 37%)的时间(参见 A.2.2)。

注：高电阻率液体产生的强电荷，可能是双曲线性释放而非指数性释放。

3.21

表面电阻　surface resistance

接触测量表面的两个电极之间的电阻。

注 1：单位为欧姆。

注 2：常见的规格为符合(见 GB 3836.1 及 GB/T 10064)为平行电极，长度 100 mm，相距 10 mm。

注 3：表面电阻取决于电极规格，使用示例规格电极测量的表面电阻比表面电阻率低 10 倍。

注 4：最好使用柔性导电橡胶带状电极，不用银色漆电极。

3.22

表面电阻率　surface resistivity

通过表面相对两边单位长度和单位宽度的电阻。

注 1：可参照 ASTM D257 及 BS 7506-2 规定的规格。

注 2：通常用欧姆表示。有时用欧姆每平方表示电阻率。这样表示不符合国际单位制，宜避免使用。

3.23

体积电阻率　volume resistivity

绝缘材料按照 GB/T 1410 测量，耗散材料按照 IEC 61340-2-3 测量时，物体单位长度和单位横截面的电阻。

注：单位为欧姆米。

4　命名法

静电安全规程采用许多形容词对材料及物体的导电性能分类。不同的规程、不同的行业采用的形容词不同，即便是相同的形容词，定义也可能不同。为了避免混淆，同时也为了方便翻译，这里列出了本部分中系统采用的专用术语。

固体材料：按照体积电阻率分为导电性、耗散性或绝缘性（见 3.2、3.7 和 3.15），范围限值见表 1。

固态物体及纺织品：根据不同应用，按照表面电阻或泄漏电阻分为导电性、耗散性或绝缘性（见 3.2、3.7 和 3.15）。外壳和一些物体的范围限值见表 1。对于某些特殊物体，其他标准中有特殊定义（见 3.3、3.8 和 3.9）。

散状物料（粉末等）：按照体积电阻率分为低电阻率、中电阻率或高电阻率（范围限值见 9.1）。

液体：按照电导率分为低电导率、中电导率或高电导率（范围限值见 7.1.4）。

注：关于静电特性、概念和术语的更多信息见附录 A～附录 F 和 GB/T 3836.27—2019。

电阻：在其他文件中多以指数形式描述。但是指数描述的数值太小，且静电学中常用的指数 6、8、9 在印刷物或项目文档中容易被误读，在注中甚至不容易读出。因此，本部分中采用国际单位制（SI）词头，不用指数形式：

10^{3} Ω＝1 kΩ

10^{6} Ω＝1 MΩ

10^{8} Ω＝100 MΩ

10^{9} Ω＝1 GΩ

10^{11} Ω＝100 GΩ

10^{12} Ω＝1 TΩ

电流：出于同样的原因，也采用国际单位制（SI）词头，不用指数形式：

10^{-3} A＝1 mA

10^{-6} A＝1 μA

10^{-9} A＝1 nA

10^{-12} A＝1 pA

5　概述

工业和日常生活中经常出现静电。大多数情况静电是无害的，有时完全没有被引起注意，有时也仅是令人讨厌。但是静电有时也会带来危险。对于这种情况，通常可以通过电荷释放减少危害（参见附录 A）。

静电电荷造成的危害包括：

a) 引起可燃性环境的点燃和/或爆炸，见 GB 3836.1、GB 12476.1 和 GB 25286.1；

b) 静电电击和其他危害(例如，跌落、摔倒)，见 GB/T 15706；

c) 静电电击造成伤亡，见 GB/T 15706；

d) 造成电子设备损坏(不属于本部分内容)。

另外，在加工和装卸流程中静电可能引起操作问题，例如，造成物品相互吸附，或吸附灰尘。

产生静电方式如下：

a) 固体接触和分离，例如，传送带、塑料胶片等在滚筒上的运动，人的行走；

b) 液体或粉末流动，产生喷雾；

c) 感应现象，例如，物体由于处在电场中而达到高电势或携带电荷。

大部分行业和工作环境中，静电电荷积聚会产生危害，出现问题，尤其是在化工、制药、石油及食品加工行业，可能会造成点燃和爆炸危险。

由于涉及的工业流程众多，不可能全部给出详细信息。本部分尽量对每个流程有关的问题予以说明，并对如何避免静电提出建议。这些信息有助于工厂操作者采取措施防止点燃潜在可燃性环境及产生静电电击。

本部分分成若干章节以方便使用。本部分主要涉及下列相关静电问题：

a) 固体处理；

b) 液体储存及处理；

c) 气体与蒸气处理；

d) 粉末储存及处理；

e) 爆炸物储存及处理；

f) 人体引起的静电问题；

g) 避免静电电击；

h) 机器和设备的接地及等电位联结；

i) 测量方法。

本部分也介绍了静电起电及危害相关的基本信息，参见附录 A～附录 F 和 GB/T 3836.27—2019。这些信息有助于读者更好理解文中给出的建议，有助于把这些建议应用于本指南中未涉及的领域。

本部分非常复杂，对于新读者来说，正确评价产品及工艺的静电危害可能不太容易。因此附录 F 给出了通用应用信息，与正文相关章节对应并提供参考。

静电危害很少能够自我消除。除了静电危害的预防措施，也宜采取其他预防措施，如防爆措施。这些预防措施宜与其他避免危害的措施一致，如防止其他原因引起的点燃、预防毒气危害等。考虑整个工作系统的所有风险来源，采取的覆盖所有风险的安全措施协调平衡，这一点至关重要。接地系统可能会影响到其他保护系统，例如，阴极保护或本质安全电气设备，对此宜特别注意。

6 固体材料静电

6.1 概述

按照体积电阻率固体材料通常划分为绝缘性材料、耗散性材料或导电性材料。外壳通常按照表面电阻或电阻率划分(按照 GB 3836.1、GB/T 10064、GB/T 1410、IEC 61340-2-3 的方法或等效方法测量)。GB/T 3836.27—2019 也详细介绍了测量方法。两种分类等效，因为对于指定的电极几何形状，表面电阻率是表面电阻的 10 倍。对于其他特定应用，可采用不同的定义(例如，地面的泄漏电阻)。这些应用中常用的临界值见表 1。

表 1　固体材料在温度(23±2)℃、相对湿度(25±5)%条件下的特性范围限值及物体分类示例

物体	单位	条款	导电性	耗散性[a]	绝缘性[a]
材料	体积电阻率(Ω·m)	6.2.1	<100 kΩ·m	100 kΩ·m～<1 GΩ·m	≥1 GΩ·m
外壳	表面电阻(Ω)	6.2.1	<10 kΩ	10 kΩ～100 GΩ	≥100 GΩ
	表面电阻率(Ω)	6.2.1	<100 kΩ	100 kΩ～<1 TΩ	≥1 TΩ
布料	表面电阻(Ω)	11.5	不适用	<2.5 GΩ	≥2.5 GΩ
鞋子	泄漏电阻(Ω)	11.3	<100 kΩ	100 kΩ～<100 MΩ	≥100 MΩ
手套	泄漏电阻(Ω)	11.6	<100 kΩ	100 kΩ～<100 MΩ	≥100 MΩ
地面	泄漏电阻(Ω)	11.2	<100 kΩ	100 kΩ～<100 MΩ	≥100 MΩ
管道	单位长度电阻(Ω/m)	7.7.2.1	<1 kΩ/m	1 kΩ/m～<1 MΩ/m	≥1 MΩ/m
软管[b]	单位电阻(Ω)	7.7.3.1	<1 kΩ	1 kΩ～<1 MΩ	≥1 MΩ

[a] 如局部环境条件与(23±2)℃、相对湿度(25±5)%的最不利试验条件有显著不同时，可对危险进行详细评估后采用其他试验条件。一些国家，尤其是在冬天，相对湿度(12±3)%、温度(23±2)℃适合用于设备取证的试验条件。由于非金属的电阻很大程度上取决于测量电压，所以测量时要选择与测量目的及测试结果一致的测量电压(一般 500 V～1 000 V)。

[b] 依据 GB/T 9572，软管的电阻值在相对湿度(50±5)%的条件下测量，这是 7.7.3.2 表 15 中的最新值。ISO 和 CENELEC 过去使用的值稍有不同。特殊应用行业标准可能采用其他分类(例如，GB/T 9572 中工业用导电软管、车用耗散性防静电软管)，这些并不表示静电安全。

外壳的要求是为了防止摩擦起电，因此没有必要把外壳内未指明的工艺所储存的电荷耗散掉。

过去没有除湿试验箱，出于安全考虑，通常在相对湿度 50%条件下测量。现在已不用这种方法，在相对湿度 50%时的限值(软管除外)仅在其他文件中给出。在无法满足适当气候条件时，才宜使用这些限值。由于相对湿度 20%时材料的起电能力高于相对湿度 30%时材料的起电能力，所以相对湿度 30%时的数值降低为相对湿度(25±5)%时的值。测量时尽可能采用相对湿度范围较低值。

除非试验方法另有规定，不均匀材质特性测量值宜取平均数，并在最接近的数量级处四舍五入。不均匀材质在不同方向的电阻率可能不同。

在表示衣物耗散特性时，用电荷衰减率表示，不用测量电阻表示(见 EN 1149-3 和 EN 1149-5)。

使用电气绝缘固体材料形式很多，包括管道、容器、板材、涂层及衬层等。在危险区域使用电气绝缘固体材料，可能产生多种静电危害，尤其是下列情况：

a) 材料可能使导电物体对地隔离，从而产生很高电势引起火花(参见 A.3.2)；

b) 材料表面的电荷可能导致刷形放电(参见 A.3.4)；

c) 静电发生器中导电性和绝缘性材料组合(见 12.3)，可能导致剧烈的传播型刷形放电(参见A.3.5)。

处理这些危害的措施见 6.2、6.3 和 6.4。

如果采用绝缘材料，需要进行风险评估，以确定是否存在任何能导致现场绝缘材料直接产生静电起电或者间接感应静电起电的工艺。

6.2　使用导电或耗散材料代替绝缘材料

6.2.1　总则

危险场所尽量减少使用绝缘材料，这是较好的做法。通常可以使用固有导电材料(例如，金属)，过

去许多以绝缘形式使用的材料(例如,橡胶或塑料),现在可符合表 1 给出的导电或耗散材料要求的等级。电导率的提高主要是通过添加导电成分(例如,炭黑),或者在其表面采用吸湿剂吸附空气中的湿气,导电聚合物、带有导电单元的层合板以及金属镀膜,已被开发用于提高静电耗散性。

这些导电性和耗散性材料按照第 13 章可靠接地,且按照第 13 章具有持久耐用性,这一点非常重要。同样,如果采用导电性涂覆或耗散性涂覆防止绝缘材料产生电荷,则涂覆的正确接地并且证明能持久适用于特定的危险场所,这一点也非常重要(尤其是 0 区和 1 区)。

同样需要注意,使用炭黑等添加剂的比例过高,可能降低材料的物理性能(主要是强度和耐化学性)。这会造成材料不适合某些应用。采用固有导电聚合物作为导电成分或涂层,可以避免这种情况。宜注意确保耗散性添加剂有足够高浓度含量,并且分布均匀。

注:材料是否是耗散性材料或是导电性材料,无法通过颜色判断。黑色聚合物可能不是耗散性材料,现代的导电性材料或耗散性材料可能有各种颜色。

纤维织物,例如,滤布,可加入不锈钢或其他导电性或耗散性纤维,成为耗散性材料。应注意确保洗涤及机械应力作用不会影响纤维整体的导电性,也不会形成导电纤维隔离斑块。

6.2.2 耗散性固体材料

如果材料的表面电阻、表面电阻率或体积电阻率符合 6.1 的复合标准,则被定义为耗散性材料。

一般来说,如果耗散性材料按照第 13 章要求接地,则不需要采取其他保护措施。但是,涉及高速分离的过程(例如,传送机和传动带,见 6.4)可能要求低电阻率和电阻。

注 1:对于电阻率处于耗散范围上限的材料,如果要使其符合第 13 章的要求,则其制成品的几何结构会有明显限制(例如,长管、细丝不符合接地要求,而有较大接地面积的薄片材料则符合要求)。

有些情况,尤其是有塑料薄膜或薄片的材料,通过添加材料使表面吸收湿气,从而提高表面导电性。如果这种耗散性塑料薄膜或薄片用于低湿度条件则宜注意:在环境湿度过低(低于 30%)时,材料可能成为绝缘性材料并积聚静电电荷。

宜保证耗散性涂覆不能被洗掉、擦掉,也不能随时间推移而失效。否则,此类涂覆仅适用于作为减少静电电荷积聚的临时措施。

包装材料用的耗散性添加剂宜与包装的产品匹配。如果产品吸收了其接触的耗散性添加剂,则可能导致产品污染和/或使包装耗散性能丧失。

注 2:新型静电耗散添加剂可增加体积电阻率,因此对湿度不太敏感,但是仍像其他添加剂一样受老化影响。

注 3:硫化橡胶加炭黑制成的耗散材料,电阻可能会随着温度的降低而升高。此类材料在 20 ℃可能为耗散性材料(~100 MΩ),但是在 0 ℃时,可能为绝缘材料(~10 TΩ)。

6.2.3 导电性物体及耗散性物体的接地

除了非常小的物体,所有金属及其他导电性或耗散性材料都要根据第 13 章接地。被隔离物体的电容取决于物体尺寸、周围材料及与其他导体的距离,同时安装条件下与未安装条件下也可能有很大差别。被隔离物体的最大允许电容取决于气体、蒸气和粉尘的可燃性,如表 2 表示为Ⅰ、ⅡA、ⅡB 及ⅡC 类气体类别(GB/T 3836.11,参见 D.3),Ⅲ类粉尘(GB 3836.1),危险场所分类(GB 3836.14 和 GB/T 12476.3,参见 D.2),并考虑以下内容:

a) 对于ⅡC 类气体,如果物体达不到危险电势,并且不处于 0 区,则低于 3 pF 的电容不需要接地。
b) 对于 1 区ⅡA 气体及 20 区、21 区,如果没有高起电过程,则最大允许隔离电容可增至 6 pF。
c) 对于Ⅰ类及粉尘 20 区和 21 区,如果没有高起电过程,并且处理的粉尘最小点燃能量大于 10 mJ,则最大允许隔离电容可增至 10 pF。
d) 表 2 的限值并不是防止引燃放电的绝对值,仅是将出现的风险降至可接受的低水平。
e) 手持装置及手动工具可认为通过使用者接地。在危险场所工作时,如有任何疑问,用户宜确保设备接地。

f) 人体会导电，会形成足够电容，引起引燃放电。因此在进入0区、1区、20区、21区或Ⅰ类危险场所之前，宜按照第11章接地。

宜按照GB/T 3836.27—2019中4.10的方法测量电容。

表2 爆炸性环境不同区域允许的最大隔离电容

区域	Ⅰ类	ⅡA	ⅡB	ⅡC	Ⅲ类	附加条件
0区	10 pF	3 pF	3 pF	不准许有被隔离导电物体	—	无高起电过程
1区		6 pF	3 pF	3 pF	—	
2区		在正常运行包括维护和清洁时，如果不可能出现产生危险电势的起电过程，则无要求			—	
20区、21区 MIE<10 mJ		—	—	—	6 pF	
20区、21区 MIE>10 mJ		—	—	—	10 pF	
22区		—	—	—	在正常运行包括维护和清洁时，如果不可能出现产生危险电势的起电过程，则无要求	

注1：再分类的依据是可能安装设备的爆炸性气体环境的最大试验安全间隙(MESG)或最小点燃电流比(MICR)(见GB/T 3836.11)，详见C.6及D.3。

注2：手动摩擦通常不视为高起电过程。

表面电阻大于10 GΩ的耗散性材料，可能不需要接地。如有疑问，则需要进行附加试验，证明未接地物体的静电安全性(例如，6.3.9)。

6.3 使用固体绝缘材料的预防措施

6.3.1 概述

按照GB 3836.14和GB/T 12476.3的危险场所分类不同，用于危险场所绝缘材料的使用限制条件不同：

a) 0区，在正常运行包括维护和清洁时，甚至在出现罕见故障时，如果不会出现产生危险电势的起电过程，才能使用固体绝缘材料；

b) 1区，在正常运行包括维护和清洁时，以及可能出现故障时，如果不会出现产生危险电势的起电过程，才能使用固体绝缘材料；

c) 2区，在正常运行包括维护和清洁时，如果不会出现产生危险电势的起电过程，才能使用固体绝缘材料；

d) 20区、21区及22区，宜考虑火花、刷形放电、锥形放电及传播型刷形放电(参见A.3)。然而，实践经验、实验证据及缺少的案例都表明，在没有可燃性气体或蒸气的情况下，即使是点燃性敏感的粉尘云也不会被刷形放电点燃。

注1：清洁和擦拭布料中采用的混合纤维产生的静电电荷，足够产生点燃可燃性溶剂蒸气的放电。通常随着擦拭动作速度加快、强度增大，产生的电荷增多。如果清洁或擦拭的材料为绝缘材料，同样也能积聚大量电荷，产

1区的要求(ⅡA、ⅡB)同样适用于Ⅰ类设备。然而,绝缘性煤尘传送带很难点燃导电性煤尘,因此如果风险评估表明点燃风险很低则可以采用类似的传送带。

表5及6.4.2的内容不适用于通过电晕耗散电荷的传送带。此类传送带应由专家测试,如测量其在最不利条件下的起电能力。

传送带上覆盖的蜡层或污物层可能增加其荷电率及电阻,从而增加充电危害。宜注意保证修理工作不会增加这些数值。最基本的是保证用于连接传送带的绝缘性黏合剂不会中断导电通路。

ISO 21183-1中描述的轻型传送带经常需要符合高度专业化的客户需求,对这些情况,应使用具体标准GB/T 33204和GB/T 34366。

6.4.3 传动带

传动带指用于驱动旋转部件或机器的V形带或平带。由于接触表面的连续分离会生成的电荷数量取决于传动带的材质、滑轮的材质,并会随着速率的提高、带子张力的提高以及接触面宽度的增大而增加。按照GB/T 32072和GB/T 10715,如果满足如下条件,则可认为传动带材料为耗散性:

$$R \times B/L \leqslant 600\ \text{k}\Omega$$

其中,L为传动带上两个导电性电极(例如,石墨、银粉漆、金属电极)间的距离,B为平带的宽度或V形带侧面宽度的两倍,R为在温度(23±2)℃、无湿气凝聚时测得的电极间的电阻。

注:在旧文件中(如CENELEC TR 50404),接受准则为$R \times B \leqslant 100\ \text{k}\Omega \cdot \text{m}$,其中$R$为安装好的两个滑轮间传动带内侧中间点与地间的电阻,B为平带的宽度或V形带侧面宽度的两倍。因为这个$R \times B$准则依据的是两滑轮之间的距离,因此不可能作为传动带是否为耗散性的评判依据。因此,GB/T 32072和GB/T 10715对耗散性给出了独立于传动带长度的判定标准。如果两滑轮间的距离超过0.67 m,则两个标准都与上述的旧文件一致。

按照GB 3836.14和GB/T 12476.3的危险场所分类,表6中总结了所有需要采取的措施。

表6 传动带的要求

<table>
<tr><th rowspan="2">速度</th><th rowspan="2">0区</th><th colspan="2">1区</th><th rowspan="2">2区</th><th colspan="2">20区</th><th rowspan="2">21区</th><th rowspan="2">22区</th></tr>
<tr><th>ⅡC</th><th>ⅡA和ⅡB</th><th>MIE
<10 mJ</th><th>MIE
>10 mJ</th></tr>
<tr><td>≤0.5 m/s</td><td colspan="2">允许使用耗散性[a]传送带及导电性滑轮,不使用传送带连接装置</td><td>允许使用耗散性[a]传送带及导电性滑轮,可以使用传送带连接装置</td><td rowspan="3">符合6.4.1即可,除非经验表明,引燃放电情况频繁发生</td><td colspan="2" rowspan="2">允许使用耗散性[a]传送带及导电性滑轮,可以使用传送带连接装置</td><td rowspan="3">符合6.4.1即可,除非经验表明,引燃放电情况频繁发生</td><td rowspan="3">符合6.4.1即可,除非经验表明,引燃放电情况频繁发生</td></tr>
<tr><td>0.5 m/s~5 m/s</td><td colspan="2" rowspan="2">不准许</td><td rowspan="2">耗散性[a]传送带及导电性滑轮,不使用送带连接装置</td></tr>
<tr><td>5 m/s~30 m/s</td><td>不准许</td><td>不准许</td></tr>
<tr><td colspan="9">注:暂无速度>30 m/s的传送带的相关信息。</td></tr>
<tr><td colspan="9">[a] 关于耗散性传送带的定义见6.4.2。</td></tr>
</table>

1区的要求(ⅡA、ⅡB)同样适用于对Ⅰ类设备。

表6及6.4.3的内容不适用于通过电晕耗散电荷的传动带。此类传动带应由专家测试,如测量其在最不利条件下的起电能力。

带由多层不同材料构成的传动带,如果测得贯穿传动带的电阻(在温度23 ℃相对湿度50%的情况下测量)小于1 GΩ,则认为其为耗散性。

传动带上覆盖的蜡层或污物层可能增加其荷电率及电阻,从而增加充电危害。宜注意保证修理工作不会增加这些数值。最基本的是保证用于连接传送带的绝缘性黏合剂不会中断导电通路。

7 液体中的静电

7.1 一般信息

7.1.1 可燃性气体的出现

注:关于气体和蒸气易燃性和可燃性的一般信息参见附录C。

由于蒸发作用许多可燃性液体在处理过程中会导致形成可燃性环境。闪点是液体处理过程中形成可燃性环境所需的液体最低表面温度。但是,由于闪点测量的不确定性,闪点测试条件和实际工业环境条件的差异以及确定液体(非散装)表面温度的难度,因此我们谨慎的假设,即使液体温度低于闪点有一定的安全裕量,仍然会存在可燃性环境。安全裕量取决于温度、液体成分等的不确定性程度。在控制良好的条件下,纯净液体的安全裕量要求为5 ℃,混合液体要求至少为11 ℃。

对于闪点不超过60 ℃的液体,如果储罐直接暴露于阳光且液体温度未受监控,则宜认为出现可燃性环境。在环境温度较高且光照强烈区域,即使液体闪点高于60 ℃,也可能产生可燃性环境。

当液体处理温度大大超过闪点时,饱和蒸气可能会造成过浓(即不易燃)环境。然而,液体之上的实际环境可能不饱和(例如,由于通风影响),所以可能为可燃性环境。因此,除非能证明液面之上为非可燃性环境,否则有必要假定为可燃性环境。所以,对于闪点低的液体,不宜依赖饱和环境作为唯一控制措施。

在某些情况下,可燃性环境并不是由处理的液体造成的,而是由设备以前操作残留的挥发性液体或蒸气,或者由附近的操作造成的。以前装载的闪点低的液体(例如,汽油)改装闪点高的液体(例如,柴油)时,储罐会产生残留蒸气。很多油罐车发生火灾与改装不同的液体有关。

7.1.2 对于点燃敏感性和限制的范围的建议

可燃性环境静电点燃敏感性取决于可燃性物料的浓度及最小点燃能量(MIE,参见C.6)。按照常规经验,最易点燃的蒸气浓度约为可燃下限浓度的两倍。由于浓度的影响,MIE高的物料产生的混合物在其最易点燃浓度时,比MIE低的物料产生的混合物仅在其可燃范围内的蒸气浓度时,更易于点燃。

对于由可燃性液体形成的均匀蒸气/空气混合物,通常在温度高于闪点10 ℃～20 ℃时形成最易点燃蒸气浓度。中度挥发性可燃液体在常温环境下形成最易点燃混合物:这类液体包括甲苯(闪点6 ℃)、乙酸丙酯(闪点10 ℃)、氯化甲烷(闪点2 ℃)。

第7章给出的通用预防措施用于防止MIE不低于0.20 mJ的物料在最易点燃蒸气浓度时被点燃。因此这些措施适用于常规可燃性蒸气与空气形成的最易点燃混合物,如链烷和芳香族溶剂、烃类燃料以及许多有机溶剂(参见表C.2中的MIE列表)。在正常环境温度条件下,处理上文中所提到的中度挥发性可燃液体时其安全裕度最小。在这些操作中,宜特别注意确保严格执行建议的所有措施。

尽管爆炸组别不是依据MIE(参见C.6)确定的,但对于ⅡA类蒸气的预防措施与MIE不低于0.20 mJ的物质的预防措施类似。然而,如果液体之上的蒸气点燃敏感性更强的话,可能还需要附加预防措施。对于MIE小于0.20 mJ的挥发气体(多数为ⅡB和ⅡC物质)或富氧混合物,更容易出现最易

表 7（续）

液体	电导率	释放时间 s
白油	0.1～100	0.2～200
润滑油	0.01～100	0.02～2 000
乙二醇之外的醚类	0.1～100	0.2～200
所有的芳香族溶剂混合物	1～1 000	0.02～20
无防腐剂的天然气凝析油	10～100	0.2～2
中电导率	（pS/m）	
含有性能添加剂或 5%乙醇的汽油	50～1 000	0.02～0.4
含有耗散性添加剂的燃料和油类	50～1 000	0.02～0.4
重（黑）燃料油	50～10 000	2×10^{-4}～0.4
酯类	100～1 000 000	2×10^{-5}～0.2
高电导率	（μS/m）	
原油	＞0.001	＜0.02
含有 10%以上乙醇的汽油	≥0.01	＜0.002
含有防腐剂的天然气凝析油	＞0.001	＜0.02
乙二醇及乙二醇醚	1～100	2×10^{-7}～2×10^{-5}
醇类	1～100	2×10^{-7}～2×10^{-5}
酮类	0.1～100	2×10^{-7}～2×10^{-4}
纯净水	5	10^{-6}
水（非蒸馏）	＞100	＜2×10^{-7}
注：尽管酮类和酯类通常具有高电导率，但中链和长链酮类和酯类通常具有高起电率。		

具有中电导率或高电导率的液体宜被认为是导电性或耗散性物质，需要接地。

7.1.5 液体处理过程中的引燃放电

当储罐中注入低电导率的起电液体时，储罐中液体积聚的电荷会在液体中及蒸气空间内形成电场和电势。由于液体表面的高电势，起电液体的表面与储罐的金属部件间会产生刷形放电。研究表明诸如丙烷类的脂肪烃，如果其液体表面电势超过 25 kV，则可能被蔓延到接地极的刷形放电点燃。

在电势很低的情况下（通常为 5 kV～10 kV），如果储罐中有被隔离导体，例如，漂浮的金属罐或等电位联结不当的部件，亦或者容器具有绝缘衬层使液体没有接地点，溅入了导电性足够产生火花的液体时，也会产生点燃危险。

7.2 液体处理操作中预防点燃危险的措施概要

7.2.1 接地及避免被隔离导体

有意或无意间形成的与液体处理有关的被隔离导体，例如，金属储罐、储罐结构体或其他被隔离金属物件，会由于液体携带的电荷而产生高电势。这可能导致火花放电。由于火花放电经常能点燃刷形放电不能点燃的低电势易燃蒸气，所以尤为危险。因此液体处理系统的所有导电部件宜充分接地（见第

13 章)。处理易燃液体的人员也宜接地(见 11.1)。

宜经常检查罐体,保证没有松动、接触不良的未等电位联结物件,例如,漂浮在液体上的小罐。

7.2.2 限制电荷产生

可以通过控制相关的过程参数以限制电荷的产生,适当的控制措施包括:

a) 储罐填充操作:
   1) 通过限制泵送率或增加供料管线直径,限制罐体供料管线的线性流速(见 7.3.2.2.3 和 7.3.2.3.2~7.3.2.3.5);
   2) 保证在泵和滤网下游有足够的滞留时间使电荷释放;
   3) 避免液体中出现第二种不溶相,例如,将油罐底部的水搅拌起来时可能出现这种情况。如果不能避免液体中出现第二种不溶相,则进一步限制速度(见 7.3.2.2.2 和 7.3.2.3.5.3);
   4) 通过底部入口或延伸至接近罐底的注管注入以避免飞溅。如果在可燃性环境中必须使用罐体上部的短注管,则降低流速至 2 m/s,并且采用 7.3.2.3.2 的附加预防措施(例如,液体沿容器壁流动)。对于高电导率液体,容器底部有接地区域就可以了。
b) 搅拌或搅动操作(见 7.9):
   1) 限制搅拌器输入功率或速度(例如,在 BS 5958 中,对于电导率 1 000 pS/m 的悬浮物,要求最大功率为 0.37 kW/m^3);
   2) 避免液体中出现第二种不溶相;
   3) 使用高电导率连续相(电导率大于 10 000 pS/m)。
c) 使用液体喷嘴的罐体清洁操作(见 7.10):
   1) 按照 7.10 的要求限制液体压力及清洁机的吞吐量;
   2) 避免清洁液体中产生第二种不溶相,尤其是当使用再循环清洁液时;
   3) 避免使用可形成大量隔离液体的无阻断喷嘴(见 7.10)。

7.2.3 避免可燃性环境

避免点燃危险最有效的方法就是避免形成可燃性环境,例如:

a) 避免系统中的蒸气空间;
b) 使用如氮气、二氧化碳或净化过的烟道气等惰性气体惰化罐体中的蒸气空间(注意 8.4 给出的预防措施);
c) 避免改装物料,避免使用常规蒸气收集系统,这种收集系统能使可燃性蒸气空气混合物进入储罐;
d) 处理挥发性液体后,清理储罐并通风,以清除残留的可燃性液体、气体及蒸气;
e) 保证系统内连续吸入足够的新鲜空气。可能需要常规的气体试验及可能的强制通风措施。

如果储罐装有或曾经装过低闪点的可燃性液体,由于残留液体可能产生危险,因此用空气吹扫储罐避免形成可燃性环境时,宜特别注意。

7.2.4 促进静电耗散

如果不能避免可燃性环境,则可以通过限制电荷积聚控制点燃危害。对于处理系统中的部件,涉及固体导体的等电位联结、人员接地,必要时甚至是将系统的绝缘部件更换为接地的耗散性或导电性部件。对于液体本身,在液体中添加市场上可以买到的静电耗散添加剂(SDA),提高液体的导电性,可以有效地促进静电耗散。当液体中添加剂浓度大约百万分之几时,就能轻易将电导率提高至可防止电荷产生危险积聚的水平(见 7.1.4)。

注 1: SDA 广泛用于航空燃料,通常添加的浓度对航空发动机和过滤器/水分离器性能的影响可以接受。

注 2: 有些 SDA 在特定溶液中可能失效,例如,低温、与水接触后、黏土过滤后或由于与其他部件相互作用。

将绝缘性(低电导率)溶剂更换为导电性更强的(中电导率或高电导率)溶剂,或者在绝缘性溶剂中加入互溶的导电性溶剂,也可增强电荷耗散性。需要的导电性溶剂的量取决于液体种类以及所要求的电导率水平。

7.3 储罐及容器

7.3.1 概述

根据储罐或者其涂覆和内衬是否划分为导电性、耗散性或绝缘性,对可能的危险及相关保护措施进行分类(见 3.2、3.7 和 3.15)。充分导电的储罐外壳任意一点与地间电阻不大于 1 kΩ;充分耗散的储罐外壳任意一点与地间电阻不大于 1 MΩ。

按照这种分类,7.3 内容分为:

——导电性储罐和容器:7.3.2;

——完全由耗散性材料制成的储罐和容器:7.3.3;

——带有绝缘表面的储罐和容器:7.3.4;

——容器中衬层的使用:7.3.5。

罐体内部可产生静电危害的操作包括填充、运输(储罐及物料)、排空、测量及取样。如果进行这些操作时罐体内部存在可燃性环境,则宜采取预防措施。

注:如果罐体内部无可燃性环境(见 7.1.1),不需要采取 7.3 的预防措施。

其他操作如液体循环、搅拌、混合、结晶及清洁见 7.9 和 7.10。

7.3.2 中对于流速的标准限值主要用于烃类。这些限值也可谨慎地用于其他在 20 ℃时运动黏度小于 6 mm^2/s 的溶剂或燃料,但在处理生物燃料成分(参见 C.8)材料或与烃类化学成分不同的混合物以及处理经验有限的高流通量系统时,可能需要特别小心。对于像润滑油一类的高黏度液体(见 7.4),已知需要进一步采取措施,限制起电。

7.3.2 导电性储罐及容器

7.3.2.1 概述

为了描述可能的危害以及相关的预防措施,导电性罐可按照尺寸分为以下几种:

	垂直圆筒形罐及方形或近似方形横截面的非圆筒形罐	水平圆筒形罐及细长横截面的非圆筒形罐
大罐(7.3.2.2)	直径>10 m	容积>500 m^3
中罐(7.3.2.3)	1.3 m<有效直径≤10 m	2 m^3<容积≤500 m^3
小罐和容器(7.3.2.4)	有效直径≤1.3 m	容积≤2 m^3

注:"近似方形"储罐的长宽之比不超过 1.5,而"细长"罐的长宽之比则大于 1.5。对方形罐的要求也能保证同样横截面积的细长罐的安全,只是有些保守。

7.3.2.2 大型导电罐

7.3.2.2.1 概述

不考虑液体的电导率或罐体结构,宜采取如下的一般预防措施:

a) 将罐体及所有相关的结构如管道、泵、过滤器外壳等接地(见第 13 章);

b) 保证进入罐体或在罐体开口附近工作的人员接地(见第 11 章);

c) 通过罐体底部侧边入口、底部入口或延伸至接近罐底的注管加注避免飞溅。

7.3.2.2.2 固定顶储罐

对于中电导率和低电导率液体,定期检查储罐,尤其是在维修孔每次打开后,要检查是否有松动的

金属物体，例如，可能形成被隔离导体的金属罐。

对于低电导率液体，需采取下列附加预防措施：

a) 泵与过滤器定位。将泵、过滤器及其他强电荷生成元件安装于储罐入口上游可保证足够滞留时间的地方，使额外的电荷在液体进入储罐前释放掉(见 7.5 和 A.2.2)。

b) 限制流速。对于未污染的单相液体输入流，流速在初期注入阶段宜控制在 1 m/s 之内直至：

1) 注管及其他罐体底部结构已没入 2 倍于注管直径的深度；

2) 管道中收集的水已经清理完毕。

注 1：1)是用来防止对注管或结构的放电，同时减少沉淀物及水的扰动。

注 2：对于 2)需要等半小时，或 2 倍于管道容积的液体被注入储罐所需时间，二者之中较短者。

初期注入阶段之后，未污染的单液相液体的流速可以提升至 1 m/s 以上。最大的安全流速尚未确定，但有大量经验表明在流速 7 m/s 以下时不会产生危险电势。

因为两相流液体经常产生高电荷(参见 A.1.4)，所以，在整个加注过程中，两相流或受污染(见 3.6)输入流的流速都限制在 1 m/s 之内。

c) 入口设计。液体宜水平进入储罐，以减小对罐底部的水或沉淀物造成的扰动，防止高荷电输入液体喷射至液面。较好的方法是用水平三通或四通阀将液体水平引至四周罐壁上。

d) 控制底水。如果储罐底部有水或沉淀物，则宜通过监控及排水严格控制底层液面，使之至少低于入口 2 倍于注管直径的高度。c)中对入口的设计要求宜确保储罐底部的水或沉积物在液体注入过程中不会被过多扰动。

e) 如果存在可燃性环境，并且不能保证储罐底部的水或沉积物不被扰动，则在加注过程中宜将流速限制在 1 m/s 以下。

注 3：通常情况下没有必要只是因为第二相液体以底水或沉积物的形式出现在罐体底部，就在整个加注过程中都将流速限制在 1 m/s 以内。一般情况下，可以按照 c)和 d)的预防措施处理与底水相关的风险。

f) 如果有可能，则宜避免低密度液体装入盛有远高于此浓度液体的罐中，因为浮力作用会使新加入的高荷电液体浮于液体表面，从而产生高表面电势。基于同样的原因，也要避免将热的液体装入盛有较冷液体的罐中，也要避免液体中有空气或其他气体。如果不能避免这些操作，则宜将入口流速限制在 1 m/s 以下，尽量少产生电荷。

7.3.2.2.3 带有浮顶或内部浮盖的罐

带有浮顶或内部浮盖的储罐内，可以通过浮顶或盖将可燃性环境与液体注入产生的电势隔离开。因此，在初期注入阶段之后，如果顶或盖已经漂浮起来，则没有必要限制流速。但是，在顶浮起来之前流速还宜限制在 1 m/s 之内。为了确保达到预期的隔离效果，至关重要的是浮顶或内部浮盖由导电性材料制成并可靠接地(见第 13 章)。

有时候罐中会用漂浮的球状体或浮球来减少蒸发量。最基本的是这些球状体或球用耗散性材料或导电性材料制成。这些球状体只能用于高电导率液体，因为在低电导率或中电导率的液体中，单个或成组的球会与地隔离，从而可能导致火花。

7.3.2.2.4 大型导电罐预防措施概要

表 8 总结了低电导率液体注入大型导电罐时需要采取的预防措施。如果把电导率提高至低电导率范围以上，如使用静电耗散添加剂(SDA，见 7.1.4 和 7.2.4)，就没有必要采取这些预防措施。但是，对于这种情况，最基本的是保证添加剂添加的可靠性，因为添加剂与液体混合失败会引起火灾或爆炸。如果对添加剂可靠添加没有疑问，则宜保留对低电导率液体的预防措施。

表 8　低电导率液体注入大型导电罐的预防措施

预防措施	适用性	
	带有浮顶或内盖的储罐	有固定顶，无浮盖的储罐
流速控制在 1 m/s 以下	在顶或盖漂浮起来之前需要如此	在初期注入阶段、以及注入受污染的或两相液体或浓度远低于原来盛装液体浓度的液体时需要如此
流速控制在 7 m/s 以下	在顶或盖漂浮起来之后不必如此 注：通常需要限制流速，避免液体高速流动损坏浮顶	对流速控制在 1 m/s 以下不适用的所有情况，建议如此
保证在强电荷生成器（如微型过滤器）与罐体之间有足够的滞留时间	在顶或盖漂浮起来之前需要如此 注：对这种情况可使用 1 m/s 的流速计算滞留时间	需要
避免注入的产品、夹带的空气或气体喷射扰动底水	在顶或盖漂浮起来之前需要如此	需要
避免低浓度荷电液体进入装有较高浓度液体的罐中（见 7.3.2.2.2）	不必要	建议尽可能如此。在不能避免这类情况时将流速限制在 1 m/s 以下（见本表第一行）

7.3.2.3　中型导电罐

7.3.2.3.1　范围

中型导电罐（见 7.3.2.1 尺寸定义）包括固定式储罐及移动式罐如公路或铁路罐车。尽管航空器燃料罐在尺寸上也在中型罐范围内，但航空容器的装载在 7.8.1 中另述。

7.3.2.3.2　固定罐的预防措施

7.3.2.3.2.1　所有类型液体的预防措施

对所有类型的液体，可采取下列预防措施：

a）　接地：接地要求见 7.2.1 和 7.3.2.2.1a）。

b）　管道和软管：管道和软管宜分别符合 7.7.2 和 7.7.3 的要求。

c）　人员：宜按照第 11 章的要求避免由人员起电引起的危害。

d）　注入速度：流速宜限制在 7.3.2.3.5.2 限定的范围内。

注：根据罐体设计、管道直径以及液体特性的不同，其流速限值也不同。

e）　空气和气体：除非能肯定操作不会使设备过压，否则不使用空气或其他气体来清洁管路。宜使用氮气或氮气空气混合气清洁管路，不用其他压缩气体。为了避免流速过快（相关限值见 7.3.2.3.5.2），要使用可成功清理管路的最小压力源。尽量减小通过接收罐次表面夹带的气体量。

f）　测量及抽样：测量及抽样可能引起额外的危害。宜按照 7.6 的要求处理。

7.3.2.3.2.2　低电导率液体的附加预防措施

对低电导率液体，可采取下列附加预防措施：

a) 过滤器及其他高荷电设备：储罐上游管道内安装的精细过滤器、泵以及其他高荷电设备可产生高水平的电荷。可按照 7.5 的建议处理。

b) 储罐排水：如果产品不能与水完全混溶则可能形成底水(例如，注入的产品内含有水，或有部分水溶于其中或与湿气接触，以及由于温度循环使其水溶性变化)，则储罐宜具备低位排水功能以将水底清除。宜监视并控制水底的水位，使其至少比产品进口位置低 2 倍于管道直径的距离。

c) 储罐入口：入口的位置宜该在储罐底部但要高于允许水底积聚的水位。可通过罐顶插入接近罐底的注管或者通过底部注入(包括靠近底部的侧面注入)实现。为了尽量减少高荷电液体对表面的飞溅以及对罐底部的水或沉淀物造成的扰动，入口的设计宜保证液体水平注入储罐。用三通管入口引导液体与侧壁平行注入可达到理想效果。

注：对于带有侧边入口的固定罐，使用三通管入口比采用导流板要更好，它可以保持高荷电液体靠近罐体底部，并最小化罐体底部水和沉淀物的悬浮。

d) 喷射注入：

1) 绝大多数情况下，宜采用上述低水位入口以及将液体水平引入的方法(见 7.2.2)，避免喷射注入。

2) 某些流程需要顶部喷射注入方式(例如，化学反应容器中为了避免搅拌器的干扰)。对于这种情况：

——注管宜插入容器内部靠近容器壁，注入液体宜向下引导并略微倾向容器壁(与垂直面成 15°～30°角)。

——宜对操作的细节进行评估，以确定允许的注入速度。注入速度不宜超过正常流速或 vd 限值的 50%(见 7.3.2.3.5)，也不宜高于 2 m/s。

——注管(或其他突出物)的末端与最高液面宜至少有 200 mm 距离，以保证液体表面不会产生放电。

挥发性小的可燃性液体(例如，润滑油)，在最高处理温度时也不可能产生可燃性蒸气环境，可以采用喷射注入，不必考虑上述注入限制条件(这些条件适用于可形成可燃性环境的情况)。但是，采用这种处理方法时，要确保没有其他可燃性蒸气源，注入过程也不会产生足够形成可燃性环境的雾或悬浮液滴。

7.3.2.3.3 公路罐车的预防措施

公路罐车的预防措施与固定罐要求(7.3.2.3.2)大致相同，7.3.2.3.5.4 规定的流速限制以及如下附加要求不同：

a) 接地及等电位联结：

1) 底架、罐体、相关管道及卡车配件间等电位联结电阻不宜大于 1 MΩ。对于整个金属系统，电阻不宜大于 10 Ω，如果大于该值，宜检查是否存在腐蚀或连接松动等问题。

2) 在进行任何操作(例如，打开检修孔、连接管道)之前，宜将接地电缆连接至车辆。车辆与框架指定的接地点之间的电阻宜小于 10 Ω，且在所有操作完成之前不宜移除接地。

3) 推荐将 2)项接地电缆作为静电接地监控系统的一部分，静电接地系统持续监控车辆与框架指定的接地点之间的电阻，并在电阻大于 10 Ω 时触发联锁装置阻止装载。推荐静电接地监控系统能够区分与车辆储罐(或接地点)的连接和与其他金属物体的连接。这种类型的系统可以阻止操作人员将接地系统连接到其他可能与车辆储罐处于电隔离状态的物体(例如，挡泥板)上。

b) 上部装载：

1) 装载臂(或料腿、下悬管)在开始注入前宜伸入罐体底部。

2） 下悬管宜：

——垂直放置；

——到达空间底部；

——在底部放置三通管或类似导流器使液流沿着空间底部运动。

c） 雷电：

如果可能有雷电，则公路罐车不宜在露天情况下装载可能在罐体外部形成可燃性环境的液体。可在雨棚下或能提供充足伞状雷电保护的地方装载。

7.3.2.3.4 轨道罐车的预防措施

轨道罐车的预防措施与固定罐要求(7.3.2.3.2)大致相同，7.3.2.3.5.5 要求的流速限制以及如下附加要求不同：

a） 等电位联结：

1） 铁路的两条轨道之间、轨道与框架间宜等电位联结，等电位联结电阻宜小于 1 MΩ。

2） 两车轮间、罐体与车辆其他部分间的等电位联结电阻宜小于 1 MΩ。因为有轨道提供等电位联结，所以轨道罐车不需要独立等电位联结。

b） 循环电流/杂散电流：

1） 可在注管内安装绝缘法兰以防止杂散电流。对于这种情况下，加注前注嘴宜在与轨道车辆等电位联结。

2） 用于装罐的旁轨宜与铁路轨道的其他部分隔离以防止杂散电流。轨道设备或轨道车辆不宜使这些绝缘短路。

c） 上部装载：

装载臂(下悬管)在开始注入前宜伸入罐体底部。下悬管宜：

1） 垂直放置(上部自动化装载系统可以以较小角度插入注嘴)；

2） 到达空间底部；

3） 在底部放置三通管或类似导流器使液流沿着空间底部运动。

d） 雷电：

如果可能有雷电，则轨道罐车不宜在露天情况下装载可能在罐体外部形成可燃性环境的液体。可在雨棚下或能提供充足伞状雷电保护的地方装载。

7.3.2.3.5 流速及 *vd* 限值

7.3.2.3.5.1 说明性注释

通常直接用速度或间接以流速与管道直径乘积(vd)的形式表示流量限值。影响这些限制的关键因素如下：

a） 罐体的尺寸及形状：最危险尺寸范围为 3 m^3～10 m^3，高而且细的罐体通常产生的电压最高。大于或小于上述尺寸的罐体、水平细长的罐体或者长和宽(或者直径)远大于高度的罐体，其电势较低。

注 1：极细的罐体电压也可能较低，但其长宽比超出正常范围。

b） 采用中央导体：在接近方形的罐中(即所有尺寸相差不大)，实心导体垂直放置在中心可使最大电势减小一半。因为电势减小了，所以流速可以增大。在细长的水平罐体中或高、宽比例较小的罐体中，中央导体减小电势的作用就不太明显了。采用中央导体发挥作用的例子如：上部装载的公路罐车(填充臂为导体)以及用导管进行底部装载的公路罐车。

c) 液体特性：最重要的是电导率，是液体是否为多相的表现。另外，在石油工业中发现，当车辆装载低硫成分（质量分数$<50\times10^{-6}$）的中度蒸馏燃料时，静电点燃危险增大。

注 2：低硫柴油可提高静电点燃危险，主要是由柴油加工流程相关的因素引起，但是，没有证据表明其他低硫液体也会受此影响（例如，汽油、纯化学品或溶剂可能硫含量很低，但是没有证据表明它们的静电点燃危险会提高）。

d) 固定罐或移动罐：移动罐加注设施只能处理一系列尺寸范围及形状的罐，而固定罐加注设施可设计用于特定用途的罐。对于移动罐，速度及 vd 限值宜适用于最不利情况。为了运输中的稳定性移动罐倾向于细长水平放置，而固定式罐一般是高而窄（高与直径比>1）。

因为这些实际情况不同，所以对于固定式罐、公路罐车及轨道罐车，其流速及 vd 限值也不同。同样，对于公路罐车和轨道罐车，对于中度硫化烃类以及其他液体的限值也不同。

7.3.2.3.5.2 流量限值适用的区域

如果规定了流速和 vd 限值，则在储罐上游的“释放区域”也宜满足这些限值。释放区域包括 30 s 滞留时间内或储罐上游 3 倍释放时间液体流经的管道，两者中的较低值。如果要用释放时间来计算滞留时间，则宜按照可能的最低电导率计算。如果最低电导率未知，则宜采取 30 s 方案。

为了保证流速或 vd 限值在整个释放区域都符合要求，需要保证它们在区域中最严苛部分符合要求。

对于无分支系统，最严苛部分为管道直径最小处，如果最小直径的管道长度小于 5 m，且是唯一小于第二小直径的标称尺寸管道部分，那么该部分认为是管道最严苛部分。

对于有分支的管道系统（例如，大型输送管道分成小管道从而使上游多管段供给多个罐，而下游管道仅供给一个罐），严苛部分为 F_S/d_S^m 值最高处，其中 F_S 为通过多管道区的最大流量，d_S 为多管道区管道直径，在评估 vd 限值时 $m=2$，在评估速度限值时 $m=3$（参见 A.1.4）。

同时加注多个储罐的关键部分最大可接受流量为 N_S 乘以单个储罐最大可接受流量，其中：

$$N_S=F_S/F_T$$

F_S 为通过多管道区的最大可能流量，F_T 为进入储罐的体积流量。多管道区流量增大可以接受，因为液体被输送到不同储罐。因为流体流量会根据流速的平方而变化，所以对于多管道区允许的最大流速或 vd 限值要相应地调整为单个储罐限值的 $N_S^{1/2}$ 倍（参见 A.1.4）。

7.3.2.3.5.3 对于固定罐的限值

初始缓慢开始阶段与主要加注阶段所采用的限值不同。

缓慢开始：对于罐体可能形成水底或沉淀物的中低电导率液体，初始流速不宜超过 1 m/s，直到注管出口浸入液面 2 倍于注管直径以下。缓慢开始加注是为了控制与沉淀物扰乱相关的危险。对于没有底水及沉淀物的液体是否有必要缓慢开始加注仍有不同意见。测量表明在这种情况下缓慢开始加注并没有显著降低最大电压。但是，仍然建议采用这些措施，避免替换管道中的水可能产生的问题。

如果分不同的阶段加注储罐，建议每个阶段都以不超过 1 m/s 的速度缓慢开始加注。

全流量：全流量阶段的流速与 vd 限值取决于液体特性及储罐，如下所示：

a) 所有高电导率液体及中电导率单相液体：对于流速没有强制性的限制，但是建议警戒流速为 7 m/s。如果仅是由于用静电耗散添加剂（SDA）增加液体电导率提高流速，则最基本的是保证 SDA 添加的可靠性，因为添加剂吸收不充分很可能导致着火或爆炸。如果不能保证 SDA 添加的可靠性，则宜采用低电导率液体的流速限值。

b) 被污染或两相中电导率或低电导率液体：将两相混合物（例如，被污染的液体、有悬浮水或固体

的液体)注入储罐时,如果其连续液相为中电导率或低电导率,则其固定流速限制为 1 m/s。这个限值也适用于注入中电导率或低电导率的液体时底水或沉淀物可能被搅拌起来的情况,如水一直在积聚直到产品/水交界面靠近(距离不超过 1 倍注管直径)或超过入口平面。速率不宜低于 1 m/s 太多,因为水可能在注管较低处积聚。

c) 未被污染的低电导率液体:对于未被污染的(洁净的)、单相低电导率液体,其流速的限制要么直接以数值方式给出流速,要么以 vd 限值进行划分,其中 v 为在管道中的平均流速(单位:m/s),d 为管道直径(单位:m)。对于垂直罐和水平罐的限值也不相同,区别如下:

1) 垂直圆筒形罐或具有方形或近似方形横截面的容器:

注 1:近似方形罐是指长宽比不超过 1.5 的罐。

通过无分支管路加注时,释放缓冲区域严苛部分(见 7.3.2.3.5.2)的加注速率 v 宜为:

$v \leqslant K(D/d)^{1/2}$ m/s

最大流速不超过 7 m/s。

其中,D 为罐体直径,对于长 L、宽 W 的近似方形容器,其有效直径可通过 $D=2(LW/\pi)^{1/2}$(因为方形截面的容器 $L=W$)来确定;d 为管道直径(D 和 d 单位相同);K 为常数,主要取决于液体流速而受液体介电常数影响较小。在 B.2.2 中,当 $\varepsilon=2$ 时,$K=0.7$ m/s,在低电导率液体(ε 不高于 5)介电常数下,最大偏离不超过 6.3%。这样的小偏差在分析的不确定度和安全余量范围内,所以普遍采用 0.7 m/s 的限值。

当通过分支管路加注多个储罐时,严苛部分可能出现在为多个储罐加注的地方。在这种情况下,严苛部分的最大流速可在上述值的基础上乘以系数 $N_S^{1/2}$,其中 N_S 为严苛部分最大流量与进入罐体流量之比(见 7.3.2.3.5.2 和 A.1.4)。

根据上述说明,得出用 schedule 40 壁厚管通过未分支管路加注储罐的流量见表 9a)(单位:m^3/min)和表 9b)(单位:USG/min)。

注 2:在北美,管道按照 NPS(标称管道尺寸,外径以英寸为单位)划分,并有专门的表格规定其壁厚。在欧洲,管道按照 DN(外径标称,外径以 mm 为单位)以及 IN(内径标称,外径以 mm 为单位)划分。

表 9 中型垂直罐使用 schedule 40 管注入流量限值

管道尺寸			罐体直径									
a) 以 m^3/min 为单位的流量限制(罐体直径单位为 m)												
NPS	DN	ID(mm)	1	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10
1	25	26.6	0.14	0.18	0.20	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
1.5	40	40.9	0.27	0.33	0.39	0.43	0.47	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
2	50	52.5	0.40	0.49	0.56	0.63	0.69	0.79	0.89	0.91	0.91	0.91
2.5	65	62.7	0.52	0.63	0.73	0.82	0.90	1.04	1.16	1.27	1.30	1.30
3	80	77.9	0.72	0.88	1.01	1.13	1.24	1.44	1.60	1.76	2.00	2.00
4	100	102	1.08	1.32	1.53	1.71	1.87	2.16	2.41	2.64	3.05	3.41
5	125	128	1.51	1.85	2.14	2.39	2.62	3.03	3.39	3.71	4.28	4.79
6	150	154	1.99	2.44	2.82	3.15	3.45	3.99	4.46	4.89	5.64	6.31

表 9（续）

管道尺寸			罐体直径									
8	200	203	3.01	3.69	4.26	4.76	5.21	6.02	6.73	7.38	8.52	9.52
10	250	254	4.24	5.19	5.99	6.70	7.34	8.47	9.47	10.4	12.0	13.4
12	300	305	5.51	6.75	7.79	8.71	9.54	11.0	12.3	13.5	15.6	17.4
b) 以 USG/min 为单位的流量限制(罐体直径单位为 ft)												
NPS	DN	ID(mm)	4	5	6	8	10	12	16	20	26	33
1	25	26.6	42	47	51	59	62	62	62	62	62	62
1.5	40	40.9	80	89	97	113	126	138	146	146	146	146
2	50	52.5	116	129	142	164	183	201	232	240	240	240
2.5	65	62.7	151	169	185	214	239	262	302	338	343	343
3	80	77.9	209	234	256	296	331	363	419	468	529	529
4	100	102	315	352	385	445	497	545	629	704	802	904
5	125	128	442	494	541	625	698	765	883	988	1 130	1 270
6	150	154	582	650	713	823	920	1 010	1 160	1 300	1 480	1 670
8	200	203	878	982	1 080	1 240	1 390	1 520	1 760	1 960	2 240	2 520
10	250	255	1 240	1 380	1 510	1 750	1 950	2 140	2 470	2 760	3 150	3 550
12	300	305	1 610	1 800	1 970	2 270	2 540	2 780	3 210	3 590	4 100	4 620

2） 对于其他中型罐的 vd 限值(例如，水平罐或窄长非方形截面的垂直安装容器)：

——$vd \leqslant N \times 0.50$ m²/s 有中央导体，顶部注入或底部注入；

——$vd \leqslant N \times 0.38$ m²/s 无中央导体，底部注入。

最大流速不超过 7 m/s。

上述限值描述中，N 表示受罐体长度 L(水平最大尺寸)影响的因数。当 $L<2$ 时，$N=1$；当 $2 \leqslant L \leqslant 4.6$ 时，$N=(L/2)^{1/2}$；当 $L>4.6$ 时，$N=1.5$。在确定罐体长度时，挡板之类的内部结构不需要计算在内，如果储罐被分割为几个完全独立的腔，则每个腔都宜被视为一个独立的罐。

这些限值适用于罐体上游释放区域管道的严苛部分(见 7.3.2.3.5.2)，当通过分支管路加注多个储罐时，严苛部分可能出现在为多个储罐加注的地方。在这种情况下，严苛部分的最大流速可在上述值的基础上乘以系数 $N_S^{1/2}$，其中 N_S 为严苛部分最大流量与进入罐体流量之比(见 7.3.2.3.5.2 和 A.1.4)。

结合 vd 和流速限值可得出可用的管道尺寸范围，通过未分支管路加注水平罐的流速及体积流量限值见表 10。

表 10　使用 schedule 40 管向固定水平矮罐(N＝1)注入低电导率液体时的流速和注入流量限值

管道尺寸[a]			底部注入或无中央导体注入		顶部注入或带中央导体注入	
			$vd=0.38\ m^2/s$		$vd=0.50\ m^2/s$	
NPS	DN	ID mm	流速 m/s	注入流量 m^3/min	流速 m/s	注入流量 m^3/min
1	25	26.6	7.0	0.23	7.0	0.23
1.5	40	40.9	7.0	0.55	7.0	0.55
2	50	52.5	7.0	0.91	7.0	0.91
2.5	65	62.7	6.1	1.12	7.0	1.30
3	80	77.9	4.9	1.40	6.4	1.84
4	100	102	3.7	1.83	4.9	2.41
6	150	154	2.5	2.76	3.2	3.63
8	200	203	1.9	3.63	2.5	4.78
12	300	305	1.2	5.46	1.6	7.18
[a] 基于管道严苛部分直径(见 7.3.2.3.5.2)。						

本部分给出的流速、vd、流量限值前提是假设 7.3.2.3.2 的所有要求都满足。有时候很难保证全部满足要求(例如,不能一直保证加注时没有飞溅)。如有任何疑问,宜进行危险评定,并采取适当的附加控制措施,这些措施可包括:

a)　将流速限制在表 10 规定的限值以下;

b)　通过 SDA 增加电导率(见 7.2.4)。

7.3.2.3.5.4　对于公路罐车的限值

本条描述了用公路罐车装载未被污染的单相低电导率液体时,其流速和 vd 限值与固定罐(7.3.2.3.5.3)的差异。本条中没有明确提及的流速和 vd 限值(例如,对于缓慢开始加注的限值和被污染液体的限值),仍参考 7.3.2.3.5.3 对于固定罐给出的数值。

石油燃料之外的液体:可使用 7.3.2.3.5.3 中对于固定罐的流速限值,但不包含用同一注口加注不同长度腔体的情况。对于这种情况,通常用最短腔体的 N 值计算 vd 限值和流速。如果最短腔体的长度未知,则宜取 $N=1$。这样可以保证最大流速适用于最不利腔体长度($L\leqslant 2$ m)。对于这种情况的流速及流量见表 10。

石油中间馏分燃料:为了适应不同的车辆设计,石油工业已经开始把可以承受高流速液体的罐车划分为"适合高速加注的车辆"。这些车辆具有表 11 列出的特性,可以有效减少电势,而且在地方法规允许的情况下,可以将标准车辆加注速度提高 33%。宜设置较高流速加注限制点,规定仅加注适合高速加注的车辆。

表 11 给出了被认为适合高速加注车辆的定义。用此定义对车辆分类时,宜限制流速,使 vd 不超过表 12 给出的相应限值。表 12 给出的 vd 限值取决于产品类型[低硫化(质量分数$<50\times10^{-6}$)或其他

中间馏分产品]、厢体特性(是否适合高速加注)以及产品电导率。

汽油:成品汽油的加注流量由通用限制 $vd \leqslant 0.5\ m^2/s$($v \leqslant 7\ m/s$)确定,不考虑车辆类型、汽油的电导率及含硫量。该流量是基于对高挥发性和底部注入式车辆空气进入的有限范围的保护,以及操作经验验证。该流量不适用于加注单一石油成分,如挥发性明显低于石油的石脑油。此类成分宜按照中间馏分产品的加注要求加注。

根据表 12 的 vd 限值及最大流速不超过 7 m/s 的要求,得出不同管道尺寸的流速及体积流量,见表 13。

表 11 符合 ADR 车辆要求适用于高速加注的车辆及厢体

项目	定义
车辆	如果车辆划分为适合高速加注的车辆,则该车辆上所有的厢体应为高速加注厢体
厢体	高速加注厢体为容积 2 000 L～15 000 L,且带有下列一种导体的厢体或腔体: a) 全高度的隔板或涌浪挡板;或 b) 一个内置管;或 c) 中央导体线。 而且液体任何部分的平面与导电性表面的距离不超过 0.8 m。更大尺寸的厢体分类为高速加注厢体时不需要此类导体。如果厢体装有满溢探头或其他探头,距离上文定义的"导体"至少 0.5 m,探头宜装有"探头扩展器"固定在探头上并置于厢体的底板上
中央导体	直径不小于 2 mm、具有电气连续性的电缆/电线/管,固定于厢体或腔体的顶部或底板上,采用的电缆/电线/管宜由抗腐蚀金属制成,并具有足够的机械完整性以防止正常的磨损
内置管	用于蘸取、保养或蒸汽回收,且与厢体或腔体外壳具有电气连续性的管
腔体	厢体内部按照 ADR 要求,通过隔板或涌浪挡板隔成的容量较小但超过 7 500 L 的空间
注:ADR 是危险品公路运输欧洲协议。	

表 12 硫含量对公路罐车中间馏分产品 *vd* 限值的影响

产品类别	电导率 pS/m		
	>50	>10	<10 或未知
硫的质量分数$>50\times10^{-6}$的柴油或汽油以及其他中间硫化燃料	$vd \leqslant 0.5\ m^2/s$	$vd \leqslant 0.5\ m^2/s$	$vd \leqslant 0.38\ m^2/s$ ($vd \leqslant 0.5\ m^2/s$)
硫的质量分数$\leqslant 50\times10^{-6}$的柴油或汽油	$vd \leqslant 0.5\ m^2/s$	$vd \leqslant 0.38\ m^2/s$ ($vd \leqslant 0.5\ m^2/s$)	$vd \leqslant 0.25\ m^2/s$ ($vd \leqslant 0.35\ m^2/s$)
注:括号内的值适用于高速加注车辆(见表 11)。			

表 13　用 schedule 40 管道对公路罐车进行加注时流速及流量限值
（用软管加注限值类似）

管道尺寸[a]			$vd=0.25\ m^2/s$		$vd=0.35\ m^2/s$		$vd=0.38\ m^2/s$		$vd=0.50\ m^2/s$	
NPS	DN	ID mm	流速 m/s	注入流量 m^3/min	流速 m/s	注入流量 m^3/min	流速 m/s	注入流量 m^3/min	流速 m/s	注入流量 m^3/min
2.5	65	62.7	4.0	0.74	5.6	1.03	6.1	1.1	7.0	1.3
3	80	77.9	3.2	0.92	4.5	1.3	4.9	1.4	6.4	1.8
4	100	102	2.4	1.20	3.4	1.7	3.7	1.8	4.9	2.4
6	150	154	1.6	1.81	2.3	2.5	2.5	2.7	3.2	3.6
[a] 基于管道严苛部分直径（见 7.3.2.3.5.2）。										

如果车辆不符合 ADR 要求，则需要对车辆是否适合高速加注进行细致的评估。

表 12 的 vd 限值以及表 13 的速度和加注流量的前提是假设满足 7.3.2.3.3 的所有要求。有时候很难保证全部满足要求（例如，并不能一直保证加注时没有飞溅）。如有任何疑问，宜进行危险评定，并采取适当的附加控制措施，这些措施包括：

a）　将流速限制在表 12 要求的 vd 限值以下；

b）　在低电导率产品中使用 SDA（见 7.2.4）。

7.3.2.3.5.5　对铁路罐车的限值

本条描述了用铁路罐车装载未被污染的单相低电导率液体时，其流速和 vd 限值与固定罐（7.3.2.3.5.3）的差异。本条中没有明确提及的流速和 vd 限值（例如，对于缓慢开始加注的限值和被污染液体的限值），仍参考 7.3.2.3.5.3 对于固定罐给出的数值。

给出这些限值的前提是，假设使用的标准铁路罐车箱体远大于公路罐车厢体。如果不是这种情况，宜进行风险分析考虑是否采用（较低的）公路罐车 vd 限值。

注：对于标准铁路罐车厢体，没有顶部加注、底部加注或中央导体的区别，因为这类厢体通常都较长，中央导体对减少最大表面电压无效。

装载不同液体时的 vd 限值如下：

a）　低硫（质量分数$<50\times10^{-6}$）石油中间馏分燃料（柴油等）的 vd 限值：$vd\leqslant0.53\ m^2/s$；

b）　对其他液体的 vd 限值：$vd\leqslant0.75\ m^2/s$。

在对产品分类有疑问时，宜使用 $0.53\ m^2/s$ 的 vd 限值。

根据 vd 限值及最大流速不超过 7 m/s 的要求得出不同管道尺寸的流速及体积流量，见表 14。

表 14　加注铁路罐车时的流速及流量限值

管道尺寸[a]			低硫柴油		标准产品	
			$vd=0.53\ m^2/s$		$vd=0.75\ m^2/s$	
NPS	DN	ID	流速 m/s	注入速率 m^3/min	流速 m/s	注入速率 m^3/min
2	50	52.5	7.0	0.91	7.0	0.91
2.5	65	62.7	7.0	1.30	7.0	1.30
3	80	77.9	6.8	1.95	7.0	2.00

7.5 高起电设备

7.5.1 过滤器、水分离器和滤水管

液体流经细过滤器(包括水分离器)和滤水管时,电荷密度比流经管道时高得多。

尽管粗线网或滤网(网孔尺寸<150 μm)局部堵塞时电荷密度比管道的电荷密度大很多,但是通常不被认为是高起电过程。通过监控压力下降可探测出是否出现局部堵塞。

微孔过滤器(网孔尺寸<30 μm)通常能产生很高程度的电荷,例如,曾经有记录显示,过滤系统电荷密度超过 5 000 μC/m³,管道流动电荷密度仅 10 μC/m³。中度精细过滤器(30 μm<网孔尺寸<150 μm)产生中等水平的电荷。

流量限制的基础是液体在管道流动过程中产生电荷。因此,如果在微孔过滤器、中度精细过滤器或粗滤器下游储罐的蒸气空间内可能形成可燃性环境,那么在过滤器和储罐之间应设置充分的停留时间,使液体中多余的电荷在流到罐体之前释放到安全水平。可通过过滤器下游的导电管道提供充分的停留时间,如果需要,也可另外增加导电性释放缓冲腔体。

对停留时间要求以及过滤器/滤网的附加预防措施如下:

a) 对过滤器和储罐之间微孔过滤器、网孔尺寸小于 150 μm 的过滤器和可能发生堵塞的粗滤器停留时间要求如下:

   1) (确定)已知最小电导率液体:停留时间宜至少为最小电导率电荷释放时间的 3 倍(见表 7 和 A.2.2),尽管不用提供下一段中提到的未知电导率液体的值。

   2) 未知电导率液体上限值:电导率未知或电导率很低的液体,最大停留时间要求如下:

      ——对于倾向于局部堵塞的微孔过滤器(网孔尺寸<30 μm)和中度精细过滤器(30 μm<网孔/筛孔尺寸<150 μm):100 s;

      ——对于无局部堵塞倾向的中度精细过滤器(30 μm<网孔/筛孔尺寸<150 μm)和有堵塞倾向的粗滤器:30 s。

      注:该停留时间适用于所有导电性液体,高黏度液体除外(见 7.4)。

b) 其他预防措施:

   1) 确保过滤器内所有导电部件以及外壳上部件等电位联结在一起并接地;

   2) 确保过滤器外壳、可能使用的静电释放腔体,在正常运行过程中保持液体充满,防止形成可燃性环境。

如果对停留时间的措施无法实现,考虑使用 SDA 增加液体的电导率,或者更换成电导率更高的液体。如果这些措施不可行,则宜对蒸气空间进行惰化。

如果采用比上限值短的停留时间,需要了解液体电导率的可靠知识,或对液体最小电导率进行控制。在很多实际应用中,液体最小电导率未知,需提供等于上限值的停留时间。

对于高黏度、低电导率液体,例如,润滑油(见 7.4),常规的最大停留时间是不够的。当要求的停留时间未知,或者时间太长在实践中不易执行,则最基本的是避免接收罐中形成可燃性环境。

对于浮顶罐或罐内有浮动盖的储罐,可由顶部或内部盖浮起之前(见 7.3.2.2.3),初始流速降至 1 m/s 时开始计算停留时间。这是因为在顶部或内部盖浮起之后,不再有点燃危险。

自由悬挂过滤袋,即管道终端抛光过滤器,不宜用于爆炸性环境。即使液体是导电性液体,过滤器也宜位于上游,使纤维与蒸气/空气混合物不接触。对于低电导率液体,过滤器宜位于适当停留时间的管道终端上游(见上文)。

7.5.2 泵和其他设备

其他设备,例如,泵和半关闭阀门,也会产生更多电荷。但是这些设备产生的电荷不会比微孔过滤

器产生的电荷多。因此，如果此种设备下游储罐中蒸气空间有可燃性环境，则中度精细过滤器的停留时间适用于此种情况[见 7.5.1，即设备与罐体间停留时间至少为 3 倍的释放时间(3τ)，最大为 30 s]。

7.6 储罐内测量及取样

7.6.1 概述

任何尺寸的罐中如果有可燃性环境，测量和采样可能会引起静电点燃，测量和采样设备或操作人员可能起电。对于大型和中型储罐，如果罐中液体在灌装过程和搅动过程中高度起电，例如，混合操作时，点燃危险非常高(见 7.9)。如果用接地固定安装的潜入管靠近罐底(仪表井)进行测量或采样，则可以消除这种危险。

在测量和取样过程中，液体与测量或取样设备之间，设备、操作人员和罐体检修孔或计量口之间会产生引燃放电。为了避免这些危险，宜遵守 7.6.2 的建议。

7.6.2 测量和取样过程中的预防措施

宜采取下列预防措施：

a) 测量和取样设备的所有导电性或耗散性部件宜接地，可以通过与罐体连接接地，如果罐体为绝缘材料，则可以直接接地。连接件宜用耗散性或导电性材料，不宜使用金属链条。

b) 如果用于低、中电导率液体的测量或取样设备接地不能保证，宜使用小型玻璃或小型玻璃容器(≤1 L)，最好有静电耗散涂层和木质油尺。对于未接地的高电导率液体，也宜使用这种设备。

c) 确保测量和取样人员不会引起点燃危险，并且要接地(见第 11 章)。

除非使用固定安装的测量设备，或者用接地固定安装的潜入管靠近罐底进行测量，否则宜采取下列措施：

a) 如果操作过程中会产生电荷，并且罐内存在可燃性环境，则不宜在液面以上进行测量和取样。泵送或循环低电导率、单相液体，泵送或循环低或中电导率、多相液体，以及很多清洁过程，都会产生电荷。

b) 低电导率混合物沉降过程中不宜进行测量和取样。因此，如果包含第二相物质的低电导率液体被泵入罐内或参与罐内混合操作，宜在完成操作后延时 30 min 进行测量和取样。这方面的例子包括搅起的水或其他不溶固体颗粒。

c) 惰化保护的容器内不宜通过打开检修孔进行测量和采样。在这种情况下，即使检修孔仅打开几秒钟，惰化保护已经被破坏。

在有可能发生雷暴、暴雪、冰雹或其他大气电干扰情况时，不宜在户外对可燃性液体进行测量和取样。

7.7 用于液体的管道和软管组件

7.7.1 概述

当液体在管道或软管组件内流动时，在液体和管道内壁电荷分离产生极性相反的静电电荷。如果管道整体为导电性或耗散性且接地，则电荷不会在管道壁上积聚，由于液体电荷在罐内积聚，所有静电危害仅限于储罐内。与储罐有关的静电危害见 7.3。

如果管道或软管组件包含绝缘材料，管道壁上可能积聚电荷，管道或软管组件本身也会产生危险。因此流动的液体或摩擦可使管道壁起电，金属部件可能被隔离并积聚电荷。对于整体或部分绝缘的管道或软管，电荷积聚产生的危险按本条的规定处理。积聚的程度取决于管道材料的电阻率，液体的电导率及系统的物理几何结构。这种电荷积聚可达到产生引燃放电的程度。

如果是低闪点可燃性液体，并且在管道内半空流动，则管道内部会出现点燃危险；如果管道周围是

1) 确保管道端到端电阻在安全风险分析得出的限值之内；或者

2) 根据经验调整管道电阻和运行条件，直到根据试验室危险评定显示，在最不利条件下按计划运行时不会产生引燃放电。

注 1：两种方法都可以应用，例如，在 SAE J1645 中用于设计机动车塑料制品燃料输送系统。

b) 对于高电导率液体，可使用低中电导率液体的预防措施或符合下列规定：

1) 确保液体在上游管道端直接与接地导电部件接触，例如，阀门、罐体；和

2) 确保流速不大于 1 m/s。

c) 采用第 6 章规定的预防措施，确保管道外壁不被外部影响而产生危险起电，例如，受蒸气冲击或摩擦。

d) 为了避免感应起电产生火花，所有与管道接触的导电部件接地（例如，法兰、阀门、球阀的球和管道内的导电层），以及所有管道附件的类似物体，除非它们安装后的电容值小于 3 pF。

注 2：安装后的电容指元件安装在工作位置后的电容。如果这个元件安装在接地表面附件，安装后的电容可能比独立的元件电容大得多。

注 3：在某些环境下，可能不用接地而采用其他方法避免导电物体产生静电放电，例如，用介电强度足够高的绝缘材料密闭围绕导电物体。

e) 利用本条 a)1)或 a)2)给出的程序，设定电阻限值和限定条件，通过下列方式防止管道内部产生引燃放电，或消除管道内部的可燃性环境：

1) 确保管道内一直充满液体；或者

2) 进行惰化保护。

f) 防止刺穿，例如，使用介电强度高的管道外壁、限制流速，或采用 7.7.2.3 规定的管道绝缘内衬的体积电阻率。

如果仅防止刺穿问题，最后一项预防措施单独使用。

如果管道经过分区的爆炸性危险区域，则宜符合 6.3 的要求。

7.7.2.4.3 埋设的绝缘管道

地下埋设的绝缘管道，整个管道的外表面与地接触，通常不需要采取其他措施预防外部产生引燃放电。外部与地的接触降低了内部产生刷形放电的危险，但是，如果管道壁电阻率很高，则不能全部消除危险。因此需要采取下列附加措施：

a) 高电导率液体：

1) 确保液体在某点与接地金属物体接触，例如，阀门；和

2) 防止放电刺穿外壳（例如，采用介电强度高的管壁、限制流速、选择电阻率低的管壁材质、使用 7.7.2.3 给出的管道绝缘内衬限值）；和

3) 将被隔离导电物体接地，或用介电强度足够高的绝缘材料密封环绕，防止放电（例如，用绝缘帽封闭承插焊接的连接件）。

b) 中、低电导率液体：

地下埋设的绝缘管道也可用于输送中、低电导率液体，但需要加强措施避免刺穿或管道爆炸（例如，降低流速、增加管壁材料的介电强度、进一步降低管壁电阻率、避免管道内出现爆炸性环境）。对这些措施宜进行详细具体的危险评定。

埋设的管道部分挖掘时，由于液体流动及导电性或耗散性元件暴露，会导致电压增大。因此，管道运行时不准许开挖，而且如果有可能存在可燃性环境，则管道上或管道旁所有由于静电感应能够起电的导电物体都宜接地。然而，在潜在可燃性环境进行接地连接存在危险。

注：加油站埋设管线要求见 7.8.4。

7.7.3 软管和软管组件

7.7.3.1 概述

7.7.3 涉及的软管用于输送化学和矿物油。对喷涂用软管的要求见 GB/T 20023。

7.7.3.2 软管的静电安全设计目标

软管的静电安全设计需要达到以下目标：

a) 设备等电位联结：软管经常用于与设备等电位联结，也可对等电位联结部件如喷嘴和喷枪进一步保护。软管端部连接件之间电阻不宜超过规定限值，软管连接件与连接的设备之间宜有可靠的电气连接。

b) 防止引燃放电：当软管组件内部或外部存在可燃性混合物时，宜通过下列设计避免危险电荷积聚：

1) 避免导电元件如软管接头、加强螺旋结构和管道阀门被隔离。对于有内螺旋和外螺旋结构的软管，应保证两者，尤其是内螺旋结构与连接件可靠连接。对于螺旋结构用绝缘涂覆保护的软管尤为重要。

注：对于由导电性或耗散性材料制成的软管，未涂覆的金属螺旋结构和端部连接件不必直接接触。

2) 根据实际情况布置导体，或者使用耗散性外部和/或内部表面，限制绝缘表面静电积聚。

3) 避免软管内形成起电的孤立液体“滴块”。

c) 避免软管损伤：静电放电不宜使软管有任何影响性能的损坏，特别宜避免放电造成软管壁产生针孔。

d) 防止杂散电流：有时需要防止显著的杂散电流沿软管流动，但同时还保证静电电荷能够被耗散。本部分中，这种软管分类为耗散性软管，能显著导通杂散电流的软管分类为导电性软管，电阻很高不能耗散静电起电电流的软管被分类为绝缘性软管。

尽管这些定义与 GB/T 9572 和 EN 12115 对软管分级的定义不同，但是这种方法有助于从静电安全角度对软管进行识别，因为 GB/T 9572 依据软管端部连接件之间电阻分类并不代表静电安全。这种按照控制静电放电和杂散电流危险的分类在表 15 中进行了总结，并在表 16 中与 GB/T 9572 的软管分类进行比较。

表 15 为控制静电和杂散电流危害对软管端到端电阻分类

分类	端到端电阻(R)限值	说明
导电性	$R<1\ \text{k}\Omega$	控制绝大多数静电危害，但需要附加措施处理高电阻的盖或内衬。 不限制电源系统故障、阴极保护系统和接地回路的杂散电流
耗散性	$1\ \text{k}\Omega\leqslant R<1\ \text{M}\Omega$	控制绝大多数静电危害，但需要附加措施处理高电阻的盖或内衬。 将杂散电流限制在安全水平
绝缘性	$1\ \text{M}\Omega\leqslant R$	不能依靠绝缘性控制静电危害。 将杂散电流限制在安全水平

为了满足上述控制点燃的要求，可能需要根据液体的导电性、工艺要求和可燃性环境的点燃敏感性，采用不同的设计类型。

7.7.3.3 避免点燃 MIE＜0.20 mJ 的可燃性环境采取的设计原则

7.7.3.3.1 端到端等电位联结(接地连续性)

端到端等电位联结一般由加强螺旋结构、嵌入软管壁的导线或编织的金属护套与末端导电连接件等电位联结,实现端到端等电位联结。每根等电位联结导线或加强螺旋结构与端部连接件牢固连接,这一点非常重要。等电位联结导线与端部连接件的连接宜牢固可靠,并且端部连接件之间的电阻宜定期测试。宜根据具体应用情况,并与制造商协商确定测试频率和测试类型。

7.7.3.3.2 消除电气隔离导电元件

导电软管元件通常包括端部连接件、软管卡(夹子)、加强螺旋结构、嵌入导线和编织护套。各元件措施如下:

a) 端部连接件:连接件与导电性或耗散性(防静电)软管部件等电位连接在一起,以满足端到端电阻要求。

b) 软管夹:运送可燃性液体的系统宜避免使用被隔离的金属软管夹,因为软管内的起电电流会使软管夹产生很高电势,从而成为潜在点燃源。

c) 加强螺旋结构、嵌入导线和编织护套:如果没有导电性或耗散性内衬,这些部件会通过流动的液体起电。这些部件的电容通常比较高,如果被隔立,可能会产生较大的放电能量。接地/等电位联结唯一常用的方法是通过端部连接件接地/等电位联结,因此确保每一个部件都与软管两端的连接件可靠连接,这一点非常重要。宜定期检查软管端到端电阻,确保等电位联结保持完整。如果有多重端到端导体(例如,两个加强螺旋结构或两个挠性等电位联结线),一个端到端连续性检查不能说明是否所有导体都可靠等电位联结。因此还需要在制造过程中进行严格的质量控制,以及定期的目视检查,以发现影响导体完整性的损坏。此类型软管一旦出现任何机械损坏的迹象,都宜停止使用,或者用于输送不燃液体。

7.7.3.3.3 避免绝缘表面产生引燃刷形放电

可用下列一种方法实现:

a) 采用耗散性或导电性外层和/或内衬,并端部连接件等电位联结,消除可起电的绝缘表面。

b) 使用较小的软管直径(见表 3),或者按照 6.3.2 限制加强螺旋结构间的间隙,限制可起电绝缘表面的面积。这些限制措施可能无法防止针孔腐蚀,尤其是内衬较厚和/或电阻较高时(例如,含氟聚合物)。

7.7.3.3.4 避免传播型刷形放电

如果在较薄的绝缘层下采用导电性衬层,并且绝缘层的击穿电压大于 4 kV,则会产生传播型刷形放电(见 6.3.4.2)。如果距离很近的加强螺旋结构不与液体直接接触,或者管壁很薄外部有编织护套,则会产生传播型刷形放电,但是需要形成较高的表面电荷密度。通常软管壁材质为充分导电材料,电荷通过管壁耗散到加强螺旋结构或护套时,电荷密度达不到要求的水平。对于使用含氟聚合物内衬的软管组件,不会出现这种,但是使用耗散性(例如,添加碳)含氟聚合物材料或者内衬击穿电压不大于 4 kV 的情况除外。

注:虽然击穿电压不大于 4 kV 可防止传播型刷形放电,但是会产生放电形成针孔。

7.7.3.3.5 避免导电性液体隔离积聚产生放电

导电性液体积聚成团(滴块),在流动过程中,由于蒸气的冲击使其与软管接地端隔离,如果软管内

表面为绝缘表面，则滴块会产生电荷。起电的液体滴块接近接地的端部连接件时，会产生引燃火花。利用导电性或耗散性软管内衬与端部连接件等电位联结，或者对于直径不大于 200 mm(8 in)的软管，使用较薄(≤1 mm)的内衬及螺距为 10 mm 或以下的加强螺旋线，可以避免这种情况。

7.7.3.4 软管实际分类

软管宜清楚标注出软管类型，防止使用错误型号的软管。GB/T 9572 定义了 6 种软管等级，包含 3 种导电和防静电类型。软管等级命名法及电阻限制与旧版本 GB/T 9572 规定不同，分类总结见表 16。

注：软管通常包括完整的端部连接件一起供货，端部连接件是静电耗散的关键部件。因此，GB/T 9572 对软管的分级仅覆盖含有端部连接件的软管组件。

GB/T 9572 对每个软管等级给出的电阻范围限制，适用于该标准规定的每种类型软管的电阻测量。当用于端到端电阻时，这些限值可把每个等级与表 15 的耗散分类联系起来。表 16 包含了每个软管等级的耗散分级。

表 16 GB/T 9572 软管等级分类

GB/T 9572 等级			GB/T 3836.27—2019 静电耗散分类
等级编号	名称/描述	软管组件端部连接件之间的电阻(R)	
M	电气等电位联结 至少两个挠性金属等电位联结线带有或不带金属螺旋结构	$R<100\ \Omega$	导电性
—	连续电气等电位联结 金属螺旋结构电气连接到两端的连接件上	$R<100\ \Omega$	导电性
Ω Ω-L Ω-C Ω-CL	导电性 含有导电橡胶层或塑料层 仅内衬导电 仅外层导电 外层和内衬都导电	$R<1\ M\Omega$	导电性 或 耗散性
Ω Ω-L Ω-C Ω-CL	防静电性 包含防静电橡胶层或塑料层 仅内衬防静电 仅外层防静电 外层和内衬都防静电	$1\ k\Omega\leqslant R\leqslant 100\ M\Omega$	耗散性 或 绝缘性
—	绝缘性	$100\ M\Omega<R$	绝缘性
—	不连续	$10\ k\Omega<R$	耗散性或绝缘性
注：本表列出的不同类型软管的分类等级和试验方法在 GB/T 9572 中有详细说明。			

Ω 级防静电软管通常用于汽车领域及含氟聚合物内衬软管。对于这些应用及产生静电电荷级别不高的应用中，100 MΩ 可作为耗散等级范围的上限值。但是当电荷生成率超过 10 μA 时，电阻 100 MΩ 以下的软管不能安全耗散电荷[见 7.7.3.5c)]。

除了端到端电阻，确保避免产生刷形放电和传播型刷形放电的其他要求，见 7.7.3.3.3 和 7.7.3.3.4。因此，端到端电阻通常不是软管符合性的唯一判定标准。

某些软管结构采用混合方法，即提供等电位联结又采用导电或防静电(耗散性)内衬或表层。例如，设备接地要求电气等电位联结，但工艺上要求内衬加厚，如果加厚的内衬采用绝缘材料制成，则会导致内部放电。这些混合设计结构不符合 GB/T 9572 和表 16 定义的任何分级，但是可用表 17 定义的混合分级描述，对特定用途的软管选用和规定提供有用信息。

表 17　软管和软管组件的混合分级

基于 GB/T 9572 的混合分类			GB/T 3836.27—2019
混合分级	名称	组件终端连接件之间的电阻(R)	静电耗散性等级
M/Ω-L	与导电/防静电内衬等电位联结	R<100 Ω	导电性
M/Ω-C	与导电/防静电外层等电位联结	R<100 Ω	导电性
M/Ω-CL	与导电/防静电外层和内衬等电位联结	R<100 Ω	导电性

不能仅根据端到端电阻测量确定软管混合分级的安全性。也宜考虑其他测量，例如，内衬与终端部连接件之间的电阻测量(见 GB/T 9572)。

7.7.3.5　GB/T 9572 软管组件分级的特性和使用

按 GB/T 9572 分级的软管组件特性如下：

a) 电气等电位联结(M 级)和电气连续性等电位联结软管：电气等电位联结(M 级)和电气连续性等电位联结软管组件包括金属端到端等电位联结。宜按照 7.7.3.3.2 定期进行连续性检查和目视检查，防止一个或多个等电位联结部件(即，连接线、加强螺旋结构或护套)形成电气隔离。通常，这些软管等级能防止 7.7.3.3.3 描述的引燃刷形放电，对于维护良好的软管组件也不会产静电点燃危险。但是某些类型的等电位联结软管组件，例如，含氟聚合物(PTFE)内衬软管或有着非常厚内衬的软管或导电元件间有很大间隙的软管，仅靠等电位电气联结，不能防止绝缘表面发生危险或破坏性电压。在这种情况下，宜使用有耗散性内衬的混合等级 M/Ω-L 或 M/Ω-CL 软管，而不是单纯的 M 级软管。软管等电位电气联结特性在其连接的设备部件之间提供电气连续性，内衬的耗散特性防止软管表面积聚危险电荷。

   由于端到端电阻较低，M 级、M/Ω-L 级或 M/Ω-CL 级软管可导通杂散电流，并且在杂散电流被阻断时(例如，当软管断开连接时)产生点燃危险。如果杂散电流可能导致问题，则这些软管宜使用绝缘法兰。

b) Ω 级，导电性：Ω 级导电性软管组件在一层或多层软管表面上附有导电或耗散层。Ω-L 级有导电性或耗散性内衬，Ω-C 级有导电性或耗散性外层，Ω-CL 级有导电性或耗散性内衬和外层。导电性软管组件的结构宜使所有导电性部件与端部连接件等电位联结，使每个组件的电阻符合表 16 的规定。

   导电性软管的结构使其在使用时仍能保持电气连续性。如果软管结构用这种方式始终保持软管的电气连续性，则不需要定期进行连续性检查。

   如 7.7.3.4 中的描述，导电性/耗散性内衬或外层或许加上电气连接，形成混合分级 M/Ω-L 级、M/Ω-C 级和 M/Ω-CL 级。

c) Ω 级，防静电性：Ω 级防静电软管组件的电阻适中(见表 16)，在大多数环境下较低的电阻可以

安全耗散静电电荷，但是电阻值又不算太低，足以将杂散电流限制在安全水平。它们与Ω级导电性软管组件的区别仅仅在于电阻边界限值不同，虽然二者的电阻范围有重叠部分。防静电软管组件也可能是Ω级导电性软管。

仅流经管道或软管的起电电流可由附录A.1.4(也见NFPA 77)给出的关系式估算出来，通常小于10 μA。当电荷产生率大于10 μA时，电阻不大于100 MΩ的防静电软管，不能安全耗散电荷。尤其是高起电元件，例如，高处理量的精细过滤器，在其紧邻的下游起电电流会更高。此类设备的直接下游需有距离满足7.5设定的停留时间要求，最好选用固定安装的导电性管道，而不用软管。如果在该位置必须安装软管，在Ω级防静电范围上限的电阻可能太高，不能安全耗散电荷，宜避免使用。对于这种情况，如果杂散电流没有问题，宜使用Ω-L级或Ω-CL级导电性软管。如果杂散电流有问题，宜使用同时满足Ω-L级或Ω-CL级导电性和Ω-L级或Ω-CL级防静电要求的软管。

宜限制软管线中相互连接的Ω级防静电软管的数量，确保表16给出的接地电阻在软管线中任何部位不被超过，否则宜另外提供接地连接点。

d) 不连续性：端到端没有导电性等电位联结的软管。这种类型的软管通常由绝缘材料制成，其中可能含有金属线或加强螺旋结构，但是与终端连接件没有连接在一起。

在可能产生杂散电流的情况下，优选端到端电阻在耗散范围内(见表15)的Ω级防静电软管，不用等电位联结的软管，因为Ω级防静电软管既能防止杂散电流阻断产生的感应火花，同时也能防止静电放电。如果没有防静电软管，也可使用电气等电位联结的软管组件(M级或混合分级)。对于这种情况，可能需要嵌入绝缘法兰、连接件或软管段，防止杂散电流产生感应火花。如果采用了这些部件，软管线绝缘件的两端宜分别接地。

可能形成可燃性环境的地方，不宜使用绝缘软管。

表18总结了每种软管可使用的范围。

表18 可燃液体用软管选择表

等级	结构	高电导率液体 (>10 000 pS/m)	中等和低电导率液体 (<10 000 pS/m)
—	挠性金属	接受	接受
M	电气等电位联结	普遍接受[a]	普遍接受[d,e]
—	连续电气等电位联结	普遍接受[a]	普遍接受[d,e]
Ω-L	导电性内衬	接受	接受
Ω-C	导电性外层	审查每个应用[a]	审查每个应用[d]
Ω-CL	导电性内衬和外层	接受	接受
Ω-L	防静电内衬	接受	普遍接受[f]
Ω-C	防静电外层	审查每个应用[a]	审查每个应用[d,f]
Ω-CL	防静电内衬和外层	接受	普遍接受[f]
M/Ω-L	等电位联结和导电性内衬混合	接受	接受
M/Ω-C	等电位联结和导电性外层混合	审查每个应用[a]	普遍接受[d]
M/Ω-CL	等电位连接和导电性内衬和外层混合	接受	接受
M/Ω-L	等电位联结和防静电内衬混合	普遍接受	普遍接受[d,f]

表 18（续）

等级	结构	高电导率液体 （>10 000 pS/m）	中等和低电导率液体 （<10 000 pS/m）
M/Ω-C	等电位联结和防静电外层混合	普遍接受	普遍接受[d]
M/Ω-CL	等电位联结和防静电内衬和外层混合	普遍接受	普遍接受[d,f]
—	绝缘	禁止	禁止
—	不连续	普遍禁止[b,c]	普遍禁止[b,c]

[a] 仅在高电导率液体连续柱状贯通软管的条件下接受。如果柱状流体被绝缘蒸气分割成隔离的片段，并且管壁电阻很高（例如，厚内衬、含氟聚合物内衬），对嵌入导体的电容很小（厚内衬层、连接导体之间间隙很大），则可能产生危险。采用较低流速（1 m/s）直至液体柱连续或使用更多导电性内衬，可减少这些条件造成的危险。

[b] 单靠电阻数据无法确定不连续软管的安全性。需考虑软管的具体结构。在特殊情况下，也许能够安全操作。

[c] 对于海上应用，单个长度符合 GB/T 9572 不连续等级的海上用绝缘软管，可代替 ISGOTT 规定的绝缘法兰。

[d] 如果内衬电阻很高（例如，厚内衬、含氟聚合物内衬），对内嵌导体或导电层的电容很低（厚内衬、等电位联结导体之间间隙很大），可能会产生危险。可用导电性更好的内衬或混合等级（例如，M/Ω-L 级或 M/Ω-CL 级）降低危险。

[e] 在石油行业（例如，卡车运输业），有内嵌金属丝或外部加强螺旋结构的软管已经使用多年，没有出现问题。但是电阻非常高的 PTFE 内衬出现过问题。因此，建议只有进行了详细的风险评估，才可使用电阻非常高的内衬。

[f] 多数环境可使用 Ω-L 级和 Ω-CL 级防静电软管，但在高起电设备，如高处理量精细过滤器的紧邻下游，宜避免使用，因为这些设备可能产生大于 10 μA 的电流。对于有疑问的情况，宜规定符合 Ω 级导电性标准、或同时满足导电性的和防静电标准的电阻试验。

7.8 特殊加注程序

7.8.1 航空器燃料加注

7.8.1.1 概述

航空器通常通过移动加油车或给油栓系统通过移动加油机给飞机供油。较小的机场通常采用柜式加油系统（类似于加油站），远程机场可用防爆桶加注。燃料通过橡胶软管输送，在这些操作过程中，可能会产生静电点燃危险。航空器加注系统的燃料中或航空器油箱（通常用金属制成）中会产生电荷，尽管未来的航空器会采用复合材质的油箱或机翼部件等。航空器加注系统通常包括过滤监视器或油水分离器，后者比较少见。

注：航空器加注系统详细要求在 API/IP RP 1540 中给出。

在软管连接或断开时，虽然不会产生静电危害，但是像电力设备或阴极保护系统产生的杂散电流，有可能产生火花。防止静电点燃的措施宜与避免这些火花的预防措施一致。EN 1361 规定了软管的设计要求。

7.8.1.2 软管组件

航空器加注通常用耗散性挠性软管组件（见 7.7.3.2），因此在限制杂散电流的同时，能耗散静电电荷。电气等电位联结（导电性）软管仅可用于一些特殊应用（如在泵的吸入端，金属螺旋会阻碍软管的收紧）。对于给油栓系统，连接给油栓与入口连接件的软管宜为耗散性，不宜使用电气等电位联结软管。

7.8.1.3 接地和等电位联结

7.8.1.3.1 概述

加油车的所有金属加注元件(例如,底盘、罐体、过滤器、仪表、管道、取样设备、等电位联结盘)之间宜保持良好电气连接。在给油栓系统中,宜保持良好的电气连续性。

在连接加注软管之前,航空器与加注车之间宜先进行等电位联结。根据航空规则,等电位联结电缆的总电阻宜小于 25 Ω。在加油完成和断开软管连接之前,宜始终保持电缆等电位联结。宜始终使用航空器等电位联结片。航空业指南严格禁止使用航空器其他金属部件进行等电位联结,如空速管、起落架舱门等(除了翼上加油-见下面说明)。

在飞机加注口与加注软管末端金属部件间,宜有直接等电位联结。对于翼下加油,通过软管末端连接件与飞机加注适配器之间金属与金属接触,进行等电位联结。对于翼上加油,通过加注过程中保持油枪与金属加注口接触,进行等电位联结油枪与加注口之间可使用独立的等电位联结线,但是由于缺少合适的连接点,这种方法通常不易实现。如果不用油枪等电位联结线,最大加注流速不宜超过 200 L/min。

在航空业指南中,严禁使用漏斗进行翼上加油,因为漏斗降低了油枪的等级选择。

一些地方机场管理机构要求接地。如果有其他选择,建议不进行接地,因为多个接地点、多个接地回路和循环电流会导致潜在问题。如果采用接地,加注车宜通过电缆与等电位电缆相连接地,或者使用独立接地电缆与车辆等电位联结盘连接接地。

从大桶中加油宜遵循翼上加油的程序。特别指出的是,泵应与飞机和桶都等电位联结。容积小于 200 L 的桶不准许使用于航空燃料加油。

7.8.1.3.2 流速

对于电导率大于或等于 50 pS/m 的燃料,航空器加注软管中最大流速不宜大于 7 m/s,对于电导率小于 50 pS/m 的燃料,航空器加注软管中最大流速不宜大于 5 m/s。应当注意,在过滤器下游提供充分的停留时间(见 7.5.1)。

7.8.2 公路油罐车输油

公路油罐车可通过软管卷盘或松弛的软管,依靠重力或车辆上的泵进行加注。被隔离导体(例如,软管连接件或作为整体的公路罐车)产生的火花、由非导电性软管产生的刷形放电或接受罐内的刷形放电,可能造成静电点燃危险。

建议采取下列预防措施:

a) 使用导电性的或适当设计等电位联结的软管组件(见 7.7.3)。

b) 确保车辆和所有金属连接件与罐体等电位联结。建议使用的软管组件提供要求的等电位联结,这样不需要再另外进行等电位联结。如果企业标准要求独立的等电位联结,则宜在软管连接前进行等电位联结[见 7.3.2.3.3a)2)]。

c) 通过松弛软管加油时,当车辆与接收罐连接时,先将软管与罐体加注管连接,然后在完成软管与卡车连接之前,将软管端部连接件与卡车金属部件接触,进行电势平衡。

d) 通过软管卷盘输油时,在插入油枪或进行连接前,将软管端部接头或油枪与接收罐组件、管道或连接件的金属部件接触。首次接触宜远离有可能存在可燃性蒸气的区域,如油罐放电装置附近。

e) 如果不超过中等尺寸油罐的最大安全流速(见 7.3.2.3.3),则罐内不可能产生点燃危险。如果液体包含第二液相,流速不宜超过 1 m/s。

f) 宜定期检查软管电气等电位联结的连续性和机械连接情况(见 7.7.3.3)。

7.8.3 零售加油站

7.8.3.1 概述

零售加油站燃料处理工作包括用公路油罐车将燃料输送到站内的地下储罐,和从地下储罐向客户车辆加油。向地下储罐送油和向客户汽车加油的过程中都会出现静电引起火花点燃。

在燃料输送和加注过程中是否形成爆炸性环境取决于燃料的种类。柴油蒸气也可能在高环境温度下产生爆炸性混合物。

相反,汽油蒸气混合物通常在密闭空间内,例如,油箱内,由于浓度过高,不易点燃。但是在与新鲜空气混合后,有可能到达爆炸界限范围内(例如,给汽车加注汽油时,在加油口附近总有一个区域混合物浓度适合点燃,因此,加油口附近静电放电能引起着火,烧伤加油人员)。乙醇柴油中由于乙醇浓度较高,在标准环境条件下,在封闭的油箱内会形成爆炸性环境,但是由于乙醇汽油的电导率较高不易产生静电电荷。

根据上述说明,在下列场所会形成爆炸性环境:

——在汽油、柴油储罐内或者输油管内;

——加油后软管断开时,汽油输油管内进入空气形成爆炸性环境;

——补充加油时汽油加注口附近;

——汽油或乙醇汽油由于泄漏或溢出在管道外部易形成爆炸性环境,尤其是密闭的地下储罐或"加注箱"在地下管道与油罐或车辆加油软管断开时。

加油站中有多种燃料,包括从无静电耗散添加剂(SDA)的低电导率烃类混合物到包含氧化物成分(例如,乙醇)和烃类的高电导率混合物。即使对于低电导率燃料,限制流速使其足够小,以防止地下储罐内和用户车辆油箱内由于液体积聚电荷形成危险电势。

然而,如果与操作有关的导体(例如,加注油枪、管道连接件、被加注的车辆、加油口或人员)被电气隔离,则这些被隔离的导体上积聚的电荷会引起引燃火花放电。并且,处理系统中绝缘管道或其他绝缘元件上积聚的电荷也会引起引燃刷形放电。如果在爆炸性环境(见上文)中产生放电则会引起点燃。宜采取 7.8.3.2 和 7.8.3.3 列出的预防措施,避免向地下储罐输油及向客户车辆加油时引起静电点燃。

7.8.3.2 向地下储罐输油

7.8.3.2.1 带有金属管道的系统

宜采取下列预防措施:

a) 所有管件的接地方式宜能防止电气故障电流进入管道系统的风险(例如,采用合适的隔离电阻)。

b) 宜定期检查接地情况。

c) 精细过滤器这类设备会使燃料高度起电,只能在有足够释放时间的导电管道中使用。

7.8.3.2.2 带有塑料管道的系统

由于防腐性能和二级防护性能得到改进和提高,塑料管道越来越多的用于输送燃油,例如,用于由公路运输车向地下储罐输油、由地下储罐向加油机输油、用于油气回收和通风。

注 1:对于热塑性和挠性金属管在此领域应用的特殊要求见 EN 14125。

主要用两种不同的塑料管道系统:"非导电性"(绝缘性)管道和"导电性"管道(非导电性管道加入同时挤出型的耗散内衬)。典型的塑料管道系统使用包含金属加热线圈(电熔连接,EFC)的接头,用以密封管道和接头。根据安装方式不同,这些 EFC 有 5 pF～30 pF 的安装电容。塑料管道通常包含同时挤

出型的内衬，防止燃料渗透。同时具有耗散性内衬的管道，耗散性内衬通常在最里层。

这些类型管道系统的特定风险包括：

a) 低电导率或中电导率液体流动可能产生显著电荷，因此：

1) 对于完全绝缘("非导电性")管道：

——在埋设的管道壁或在关联的未接地接头上会产生高电压。

——在起电管道的内表面可产生放电。货车上软管加注点是一个关键部位，因为接地连接件或连接器产生放电，或高起电塑料表面向低起电表面放电，在管道断开时如果有空气进入，可能引起点燃。

——管壁积聚的电荷形成的静电场可使附近的导电性 EFC、工具和管道外的其他物体出现高电压，进而对附近接地的导电性物体产生放电火花。

——埋设管道壁可产生高电场，可能导致静电放电引起击穿和针孔。

2) 带有耗散性内衬的绝缘管道("导电性管道")：

——如果内衬接地则不会积聚电荷，由接地内衬提供的屏蔽层降低了有关导体(例如，EFC)由于流动产生高压的风险。

——但是，未接地的内衬部分或与之连接的接头可能产生电压。

b) 绝缘管道外表面摩擦起电可产生刷形放电。

c) 同一系统中混合使用绝缘管道和导电性管道，会导致导电性部件隔离。只有保证所有导电性部件都接地的情况下，才可以使用这种混合系统。特别宜注意保证金属法兰、连接器和绝缘管道上的夹具接地，保证接地金属端导电性管道的内衬接地。

d) 在系统维护过程中安装的管道，当出现可燃性环境时，可能会产生特定危险。在处理过程中导电性管道和绝缘管道都会起电，产生潜在引燃放电。

1) 对于绝缘管道，管道外表面可能产生引燃刷形放电。

2) 对于有耗散性内衬的管道，表面积聚的电荷会在不正确的未接地衬层上感应，产生高电压，会对人员造成电击和导致产生引燃放电。

绝缘管道由于燃料起电产生的高压取决于流速、加注量、管道外漏部分的长度、以及管道和燃料的特性。起电特性和电荷耗散特性随着时间和温度的变化规律至今仍知之甚少。因此，在对最不利起电特性有更好的了解之前，对于耗散特性宜采用较大的安全裕量。

在大量的管道安装实例中，仅有少数事故记录，所以现有的做法似乎广泛适用于如今的燃料。然而，如果汽油中越来越多的使用含氧生物组分，会产生更高的电荷，现有的做法能否提供足够的安全裕量，目前还无法判断。

注 2：有迹象表明至少一些醚类和酯类比烃类燃料更易于高起电。

为了避免管道壁、阀门和连接器产生过多静电电荷和电压，建议采取下列预防措施：

a) 塑料绝缘管道：

1) 为了避免产生针孔，按照 GB/T 1408.2 测量，管道壁的绝缘介电强度宜大于 100 kV。厚度至少 4 mm 的聚乙烯的绝缘介电强度通常超过这个值。

2) 外露的 EFC 宜该持久可靠的接地，或用气密方式密封。

3) 管道所有其他导电部件或连接处宜接地。

4) 宜对所有导电性和耗散性部件的接地进行定期检查。

5) 外露的全绝缘塑料管道部分宜尽可能短。

6) 燃料流速宜限制在<2.8 m/s。

注 3：将来如果加入生物成分可能会改变燃料的起电特性。

7) 每个管道通过大部分掩埋地下作为接地措施，有助于系统的安全运行。因此，在随后的安装或检修过程中，只有在所有要掩埋的管道部分完全被土壤覆盖之后，才允许液体进入

管道。

8) 对于会导致燃料加强起电的设备，例如，精细过滤器，宜对可能产生的危险进行详细评定之后，才可使用。

9) 车辆软管连接的加注口宜使用安全连接阀门，最好使用联锁装置，阻止空气进入系统与燃料蒸气混合，例如，在软管与管道断开连接之前关闭阀门。

10) 管道和油槽的连接处会积聚可燃性蒸气，宜尽量减少暴露。

11) 管道外表面处可能出现可燃性蒸气，人员宜避免摩擦管道外表面。

12) 在系统维护过程中，宜注意避免将高起电管道带入可燃性环境中。

b) 有耗散性内衬的塑料管道：

1) 衬层宜接地。耗散性内衬接地可防止内部起电，并屏蔽外部导体因流动起电。

2) 通过合理安排内部耗散层与外部接地连接布局进行接地。

3) 宜定期检查导电性和耗散性物体的接地。

4) 会导致燃料加强起电的设备，例如，精细过滤器，宜对可能产生的危险进行详细评定之后，才可使用。

5) 在系统维护过程中，宜注意避免将高起电管道带入可燃性环境中。在管道引入可燃性环境之前，耗散性内衬宜接地，在安装过程中宜保持接地，直至内衬通过安装系统可靠接地。

6) 管道外表面处可能出现可燃性蒸气，人员宜避免摩擦管道外表面。

7.8.3.3 为客户车辆加油

宜采取下列预防措施：

a) 泵宜正确接地。

b) 宜用导电性软管或者使用合理设计等电位联结的软管组件(见 7.7.3.2)，连接油枪和泵。对于导电性软管，加注油枪通过软管的对地电阻宜小于 1 MΩ，对于电气等电位连接的软管，宜小于 100 Ω。详细要求见 HG/T 3037。

c) 场地表面对地泄漏电阻宜小于 100 MΩ，在相对湿度小于 50%的干燥条件下测量，确保车辆通过轮胎接地。

d) 泵周围场地的耗散性面积宜足够大，保证客户车辆的四个轮胎在任何加油位置都能有效接触。

e) 油枪的手柄宜为导电性或耗散性材料，以保证加注人员在加注过程中接地。

注 1：为避免静电电击，最后使用耗散性材料。

f) 如果加注油枪有闩锁装置，宜符合当地对自动关闭装置的要求。

g) 一般情况下对于车辆，插入加油口的标准油枪与一个轮胎连续接触的金属板之间的电阻不宜大于 10 GΩ，此时其他轮胎在绝缘表面上。危险场所使用的轮胎，电阻限值不宜大于 1 MΩ。详细要求见 GB/T 26277 和 ASTM F1971。

h) 车辆设计宜保证车载塑料加注系统的元件上，电荷不会积聚至危险水平，车载金属加注系统的元件底盘充分等电位联结。详细要求见 SAE J1645。

这些预防措施将确保下列部件接地：

a) 油枪直接通过导电性或耗散性软管组件接地；

b) 手持油枪的人员接地，佩戴绝缘手套的情况除外；

c) 加注过程中车辆底盘通过与油枪接触以及通过轮胎接地；

d) 车上导电性加注系统部件通过与底盘等电位联结接地。

经验表明，通过油枪和轮胎接地，足以耗散加油过程中产生的相对少量的电荷。

注 2：加油过程中着火多数由人员产生的静电引起。

7.8.4 移动式或临时液体处理设备

临时设备如果有过滤器或其他限制措施时，使用时宜当特别注意，例如，带有精细过滤器保护敏感探头的便携式仪表标定设备。当使用此类设备时，宜采取保护措施，确保临时处理安排中，便携设备与被加注罐体之间有充分的滞留时间(见 7.5)，并且能保证符合通用接地要求(见第 13 章)。

7.9 车间流程(调配、搅拌、混合、结晶及搅拌反应器)

7.9.1 概述

加工液体或悬浮液(混合、搅拌、调配或结晶)时静电会造成点燃危险。当处理低电导率液体，有时候甚至是中电导率液体时，连续的液相悬浮液或固体颗粒物质上、或任何被隔离的金属物体上会附着电荷。如果存在可燃性蒸气/空气混合物、雾或泡沫，则会有点燃危险。为了防止点燃危险，宜采取 7.9.2～7.9.6 给出的措施。

含有两种不溶液相的液体或含有固体悬浮颗粒的液体通常会产生大量电荷(高电平电荷)。因此，两相流液体另加流速限制条件。处理“污染”液体时也需要这些减小的流速，“污染”液体定义见 3.6，即自由水分或其他不溶液体体积超过 0.5%，或悬浮体超过 10 mg/L 的液体。

7.9.2 接地

设备所有导电部件宜等电位联结并接地，见第 13 章。

通过采取第 11 章规定的防范措施，确保调配操作区域附件的工作人员不会产点燃危险。

7.9.3 管线内调配

在此工艺中，管道内以规定的速率泵入不同的成分进行混合。管道内通常没有蒸气空间，不会形成可燃性混合物，因此混合时没有点燃危险。

为了避免混合时及之后流入接收罐的过程中产生的电荷在接收罐内形成点燃危险，宜采取 7.3 对储罐加注的建议。

7.9.4 容器或储罐内调配

如果采取适当的预防措施，任何电导率的混合液体调配成单相溶液时，不会产生太大危险(见 7.3)。

如果混合物含有分散性液体或固体颗粒，通过增加系统中低电导率液体的电导率，可以减少静电的产生。可通过使用与混合物兼容、导电性更好的溶剂或添加 SDA(见 7.2.4)提供电导率。

如果混合物中所有相都为液体，将连续液相的电导率提高至大于低电导率，通常可满足要求。如果分散相一相或多相是固体，需要增大连续相电导率，使之大于 100 pS/m(通常是 1 000 pS/m，但有时还不够)，同时限制搅拌器输入功率(例如，在 BS 5958 中，电导率 1 000 pS/m 的悬浮液建议最大功率为 0.37 kW/m^3)。

注：通过固体相吸收离子，可大幅度减小连续相电导率。

如果调配容器有绝缘内衬，例如，玻璃、陶瓷或塑料，宜通过在容器内底部或靠近底部放置接地导电条或板，加强内容物电荷的释放。如果内衬很薄或导电性足够好，可以耗散电荷，能够避免形成危险表面电势，则可能不需要采取这种保护措施。当处理低电导率或多相液体时，可能产生大量电荷，宜考虑传播型刷形放电可能导致绝缘内衬产生针孔(参见 B.1.4)。

全部液体系统的测量和取样宜按照 7.6 的建议进行。对于含有分散性固体相的液体，根据特定的混合物采取不同的预防措施，没有通用建议。

也可按照 8.4 的建议，对调配容器内的蒸气空间进行惰化，增加液体电导率。这样就不需要限制搅

拌器的功率输入。

7.9.5 喷射混合

如果喷射不破坏液体表面，并且液体和设备的所有金属部件都接地，则电导率超过低电导率范围的液体进行喷射混合不会产生危险。

对于低电导率液体，可通过添加兼容的 SDA，提高电导率至中电导率范围。

也可对储罐内的蒸气空间进行惰化，提高液体电导率。

如果低电导率液体既不能使用耗散添加剂，也不能惰化，则风险等级取决于环境条件。为了控制罐内液体表面的电势，可能需要寻求专家的建议。考虑的因素包括：

a) 罐内液体表面与内部喷射的靠近程度，由于喷射流入的液体携带的电荷在蒸气空间形成高场强。

b) 在罐内底部存在的分离相(通常是水)。

c) 储罐是否在混合的同时进行加注。

d) 完成加注后延迟时间。

宜按照 7.6 的建议进行测量和取样。

7.9.6 高速混合

高速混合，例如，生产乳化剂，比一般混合过程产生更多电荷。在高速混合不相容液体时，宜寻求专家的意见，对 7.9.4 的预防措施进行补充。

7.10 喷雾液体及罐清理

7.10.1 概述

当清洁液体碰撞罐壁或管内突出物时，通常形成携带电荷的雾。由于冲洗液流产生的扰动，携带电荷的雾通常均匀地分布在罐体内。

携带电荷的雾产生很高电势，在罐体中心电势的最大值主要取决于罐体尺寸和雾的电荷密度。电荷密度取决于使用液体的种类(例如，水或油、洗涤剂)和采用的清洗系统(液体压力和流量、喷嘴直径)。

由于罐体内突出的接地导电物体产生刷形放电，可能会另外产生点燃危险。如果罐内空间电势超过约 58 kV，刷形放电可点燃碳氢化合物/空气环境，虽然罐清洁过程中很少产生如此高的电势。

如果罐内存在被隔离导体，即使电势很低也会产生引燃火花。一般来说，5 kV～20 kV 的电势产生的火花足以点燃碳氢化合物/空气环境。电势大小取决于被隔离导体的尺寸和火花间隙的长度。当使用高流量喷嘴用液体喷射冲洗时，不可避免形成被隔离导体，因为当液体喷流破裂时会产生大体积的隔离液体“滴块”。这些液块会被罐中心电势感应起电，当液块电势至少为 15 kV 时，接近接地导电物体会产生引燃火花。因此，建议尽可能避免使用喷嘴，防止在喷流破裂过程中产生大体积隔离液块滴块。还宜注意，液体不会在罐顶边缘或凹处积聚，然后滴落。

在清理操作结束后，随后的工序(例如，检查、计量、抽样)宜推迟，直至携带电荷的雾完全沉降消失。对于大型储罐这个过程可能需要几个小时。

7.10.2 使用低压或中等压力水流清洗储罐(最大 1.2 MPa)

1969 年三艘很大的油轮在喷射清洗罐时发生爆炸，随后的技术报告显示，罐内最大电势与雾的电荷密度和罐体线性尺寸的平方成比例(换句话说与 $V^{2/3}$ 成比例，V 为罐体容积)。这表示随罐体容积增大点燃危险增加。

技术报告显示，清洗容积小于 100 m^3 的罐危险等级很低，但是清洗容积 10 000 m^3 或更大的罐体

则非常危险。容积限值在于这些两个限值之间。只有在所有条件都已知的情况下，采纳给出更精确的容积限值。国际海事组织海上油轮的规定，装载能力为 50 000 总载重吨(dwt)或更大的油轮油罐只能在油罐惰化条件下清洗。详细的说明见“油轮与油码头国际安全指南(ISGOTT)”。

7.10.3 用低电导率液体清洗储罐

低电导率液体，例如，碳氢化合物，在喷洒过程中比水的起电程度低，因为它们仅包含少量的游离离子。在之前描述中喷洒低电导率溶剂被认为是安全的。但清洗溶剂中不宜包含水也不宜包含固体颗粒，因为它们会在溶剂中形成第二相。因此，清洗溶剂不宜循环使用，水或固体颗粒含量小于 5%的情况除外。

清洗过程中储罐内的液体宜排净，防止积聚的液体中产生静电。

7.10.4 用高压水或溶液清洗储罐(大于 1.2 MPa)

在化学工业中，容器或更小的器皿(例如，搅拌容器)通常用高压喷头进行清洗，工作压力达到 50 MPa。估计在清洗过程中喷射使罐产生很高的电荷密度和电势。然而，实验显示，在下列条件下，含有可燃碳氢化合物/空气环境的罐内点燃危险处于可接受水平：

a) 喷洒水：
   1) 直径 3 m 以下的圆柱形金属容器；并且
   2) 喷头液体最大工作压力 50 MPa，最大液体流速 5 L/s。
b) 喷洒低电导率液体：
   1) 容积 5 m^3 以下圆柱形金属容器；并且
   2) 喷头液体最大工作压力 5 MPa，最大液体流量 1 L/s。

清洗液体含有能形成第二相的其他液体或颗粒的量不宜超过 0.5%，并且在清洗过程中，宜排净第二相液体或颗粒，避免电荷积聚。此外，所有导电部件宜接地。

已证实仅在上述限值范围内能够安全运行，但是超出上述限值并不一定产生危险。超出上述限值时寻求专家的意见。

容器使用绝缘外壁的限值未知，但在任何情况下，都将低于金属容器的限值。这是因为，即使小型容器，在清洗过程中塑料壁也会起电，从而可能使导电性液体形成起电水注，当与接地部分接触时，会产生引燃放电火花。或者，用低电导率液体可使容器壁高度起电，也会产生引燃刷形放电。

由于这些原因，在清洗过程中，宜避免绝缘容器中存在爆炸性环境，例如，事先将容器灌满水再排空，或使用高闪点的清洗液体。如果预期有静电点燃危险，并且存在爆炸性环境，可能需要寻求专家意见。

7.10.5 蒸汽清洗储罐

蒸汽清洗储罐会产生携带静电电荷的雾。试验数据显示，对于容积不大于 100 m^3 的储罐，存在可燃性环境时，携带静电电荷的雾不会产生点燃危险。但是，对于更大容积的储罐则可能存在危险。

7.10.6 淋水系统

淋水系统主要用于去除和驱散可燃性环境。淋水系统不在高压下工作，不会产生高度起电的雾。由于淋水系统是驱散而不是积聚起电液滴，因此不可能导致静电点燃问题。

7.11 玻璃系统

7.11.1 概述

玻璃系统中的引燃放电主要是由低电导率液体或粉尘/空气混合物起电引起的。玻璃表面上有低

电导率塑料涂层会大幅度增加电荷积聚。

导电部件上(金属法兰、配件、阀门)会产火花放电。正常环境条件下,在塑料涂覆的玻璃上会产生刷形放电。

未涂覆的玻璃表面仅在相对湿度较低的条件下产生刷形放电,例如,表面温度远大于环境温度时。

7.11.2 低电导率液体采取的预防措施

采取 7.2 建议的预防措施可降低低电导率液体产生的危险。对于主要采用未涂覆玻璃的系统,还需要考虑下列接地要求。

在含有ⅡC 类气体或蒸气的 0 区场所(参见附录 D),所有导电部件,例如,金属法兰、配件、阀门或测量设备,宜接地,接地电阻宜小于 1 MΩ。对于所有金属系统,电阻宜小于 10 Ω。如果发现电阻显著增高,宜进一步检查可能出现的问题,例如,腐蚀或连接松脱。

对于ⅡA 和ⅡB 类气体或蒸气环境,仅需对安装电容大于 3 pF 的导体部件接地。因此,小螺栓或螺钉(电容不大于于 3 pF)不需要接地。对于包含未接地导电部分的配件、阀门或密封件,如果电容大于 3 pF,并且不能接地(例如,由于有绝缘涂覆),则不适合用于玻璃系统中。

如果使用大量产生电荷的元件,例如,微型过滤器,则在玻璃与导电表面之间会产生刷形放电。对于这种情况,法兰宜由绝缘材料制成。

在包含ⅡB 和ⅡC 类气体或蒸气的 1 区场所,电容大于 3 pF 的接地导体部件的要求适用。对于存在ⅡA 类气体的 1 区场所,电容不宜超过 6 pF。

在 2 区,如果管道直径不大于 50 mm,仅将靠近如泵、微型过滤器、喷嘴等强烈起电元件附近的导电法兰接地即可满足要求。

对于直径 50 mm 及以上的管道,所有法兰和类似尺寸的金属部件都宜接地。

在塑料涂覆的玻璃(玻璃外部有塑料涂层)系统中处理低电导率液体时,限制条件与在绝缘系统中处理相同的液体类似,见 7.3.4.6。处理导电性或耗散性物质,例如,水、酸、碱或醇类,预防措施与未涂覆玻璃相同。

玻璃中的导电性液体和玻璃金属内衬系统宜接地,例如,通过导电性入口或出口管道、或者系统底部接地金属连接片接地(见 7.3.4.2)。

当在玻璃系统中处理溶剂湿粉时,建议寻求专家的建议。

8 气体中的静电

8.1 概述

纯净气体或气体混合物在运动时很少产生静电,即使产生静电,电荷也非常少。如果气体中含有固体或液体微粒,这些微粒可能起电。在工业生产过程中,这些微粒普遍存在。它们可由污染产生,例如,灰尘或水滴,也可由气体本身冷凝产生,例如,二氧化碳制雪或饱和蒸汽中的水滴,或者是工艺过程产生的,例如,喷砂或喷漆。

工艺中因颗粒物起电产生大量静电电荷的实例包括:气动输送物料、含有颗粒的压缩气体溢出或释放、液化二氧化碳释放、使用工业真空吸尘器、喷漆。

这些机理产生的带电颗粒能够产生多种类型的引燃放电:由于撞击和积聚颗粒物,被隔离导体产生的电荷能形成火花放电(参见 A.3.2);当由带电颗粒构成的带电的云或喷流靠近接地金属凸起物时,能产生刷形放电(参见 A.3.4);带电颗粒撞击薄绝缘材料能产生传播型刷形放电(参见 A.3.5);当带电的颗粒积聚形成锥形时(例如,在筒仓内)会产生锥形放电(参见 A.3.7)。没有证据表明在工业规模设备中会发生闪电状放电(参见 A.3.6)。

避免颗粒物产生静电电荷不可能,但是可以通过确保环境中不会成为可燃性环境,或者防止出现引

燃放电，可以避免出现点燃。避免引燃放电的预防措施如下：

a) 确保所有金属和其他导电性物体接地（见第13章）；

b) 避免使用绝缘材料；

c) 通过限制流速或者用适当的喷嘴设计降低电荷密度；

d) 去除颗粒物。

有关气动传输粉末的建议见第9章。对其他工业生产过程的建议见8.2～8.8。

8.2 喷砂

涂覆前对表面进行清理或预处理需要进行喷（或射）砂。喷砂工艺可导致砂粒、喷砂设备、软管和软管端部连接的喷嘴起电。由于砂粒在未接地金属物体上积聚或碰撞可产生火花，或者直接从喷射装置部件上产生火花。

如果此种设备用于潜在可燃性环境，则区域内所有金属部件以及喷砂设备的所有部件，尤其是软管端部连接的喷嘴，都宜接地。软管宜为导电性或耗散性软管。

8.3 灭火设备

一些加压灭火器，尤其是使用二氧化碳的灭火器，能生成高度起电的云。如果仅有火灾，则不会出现问题。然而，如果这样的设备用于潜在可燃性环境，则容器和相关管道宜接地。如果没有着火，在确定区域内没有可燃性混合物之前，系统不宜进行测试、示范或惰化。

8.4 惰化

惰化一个系统，例如，使用二氧化碳正压惰化时，能引入大量带电的颗粒或液滴。如果系统内存在可燃性环境，在加入足够惰性物质保证环境不具爆炸性之前，会导致产生引燃放电。

如果被惰化容器包含可燃性气体混合物或粉尘悬浮物，为避免点燃危险，避免注入颗粒物。如果可能，使用不含颗粒物的气体或在高压释放过程中不凝结产生液体或固体相的气体，如清洁干燥的氮气。

含有任何种类可燃性混合物的容器惰化时，不宜用潮湿蒸汽进行惰化。如果在惰化之前能够将管路中的全部冷凝水去除，则可以用干蒸汽惰化。

无论用哪种物质进行惰化，最好通过较大注孔缓慢加注。这样既可以减少带起污垢，减少管道剥落物，也可以减少容器内激起尘土或喷雾。

8.5 蒸汽清洁

由喷嘴产生的蒸汽含有带电液滴。容器内带电的雾可能形成高电场，导致产生引燃放电。

试验数据显示，对于含有可燃性环境、容积不大于100 m^3的罐，不会导致点燃危险。但是，对于较大容积的罐可能存在危险。

因此，容积大于100 m^3、含有可燃性环境的罐，不宜用蒸汽清洗。容积不大于100 m^3的罐可用蒸汽清洗，前提是蒸汽喷嘴和系统的其他金属部件可靠接地，被清洁的罐或容器也接地，且如果可能，宜使用干蒸汽或过热蒸汽并防止在管道内冷凝。

8.6 压缩气体意外泄漏

无论是可燃性气体还是非可燃性气体，如果含有液体或固体颗粒，在意外泄漏时，会产生危险电荷。如果潜在泄漏可能形成可燃性环境，则容器或管道及附件导电物体都宜接地。如果导电物体能够被移动到含有可燃性环境的区域，则导电物体在移动之前宜先接地。进入上述泄漏区域的人员，例如，进行修理工作，人员也宜接地（见第13章），而且不宜将绝缘物体带入该区域。

8.7 喷涂可燃性涂料或粉末

8.7.1 概述

由喷涂涂料或粉末产生的液滴或颗粒物云雾通常高度起电。因此，喷涂设备、被喷涂物体及喷涂区域内的其他物体(包括人员)也会起电。如果液滴或颗粒物云雾具有可燃性，则会产生点燃危险。静电喷漆、粉末喷涂和绒屑喷布危险最大。即使用水性漆喷涂，仍可能产生传播型刷形放电，例如，汽车金属车身进行静电上漆时。也可用局部抽气排风措施控制可燃危险。

注：这些工艺的安全要求见 EN 50050、EN 50059、EN 50176、EN 50177 和 EN 50223。

真空喷漆过程也会高度起电，宜注意 8.7.2 给出的预防措施。空气雾化喷涂设备的起电水平不高，不必进行考虑。但是，如果遇到火花或静电电击，该设备宜按 8.7.2 的预防措施进行保护。

喷漆设备及喷漆室清洁时也需要采取预防措施，尤其是采用易燃溶剂喷涂时。

8.7.2 接地

喷涂设备、油漆或粉末云雾附近的所有金属物体，尤其是被喷涂的物体宜接地(见第 13 章)。

夹具和吊钩会阻碍油漆或粉末沉积接地。可通过合理的设计结构及定期清理避免这个问题。设备操作人员也宜接地(见第 11 章)。

8.7.3 塑料喷漆柜

由于会产生刷形放电，绝缘材料制成的喷漆柜不宜用于喷涂可燃性涂料。只有证明没有点燃危险时，才能被用于喷涂粉末。导电性或耗散材料制成喷漆柜可用于所有类型的喷涂，但前提是要接地。导电性或耗散性表面上要避免使用保护性绝缘箔，因为会引起传播型刷形放电危险。

8.8 固定式和移动式真空吸尘器

8.8.1 概述

真空吸尘器能产生大量静电电荷。灰尘、颗粒、液滴状物料或小物体通过管口和软管进入收集系统时，会起电。如果系统内有金属部件，并且未进行等电位联结和接地，则会获得很高电压。金属部件之间或者系统与地之间，会产生引燃火花放电(参见 A.3.2)。系统内积聚的带电物质与接地金属之间也会产刷形放电(参见 A.3.4)。

8.8.2 固定安装系统

如果设备用于收集可燃性物质，则系统中所有金属和导电部件宜等电位联结并接地。特别重要的是要确保金属管口与柔性收集软管始终保持等电位联结。收集软管宜为导电性或耗散性软管(液体见表 15，固体见 9.3.3)。也可用电气等电位联结的软管，前提是从结构上不会产生刷形放电(见 7.7.3)，或者不存在可燃性气体或蒸气。软管宜与收集系统等电位联结，收集系统也宜接地，并且最好位于危险场所之外。

在某些情况下软管管线很长，如果用耗散性软管，则不能为管道末端连接的导电性部件(例如，管口)提供足够小的接地电阻，因此，可能需要为这类导电性部件设置专用接地。

如果系统可能用于收集可燃性液体、蒸气或气体，则系统宜特殊设计用于此目的，避免产生刷形放电危险。现有知识显示，敏感粉尘中如果没有可燃性气体或蒸气(参见 A.3.4)，刷形放电也不会产点燃危险。

在存在可燃性蒸气，或者处理的非导电性粉尘的 MIE 值小于 30 mJ 时，宜始终使用接地的导电性材料作为过滤介质。对于 MIE 小于 30 mJ 的可燃性金属粉尘，也宜使用这种织物，前提是现行规定没

有明确禁止使用是干燥介质型集尘器。对地电阻宜小于 100 MΩ。使用含有导电丝的织物有助于减少电晕放电在粉末和过滤器上形成的电荷。

为了避免静电电击，所有收集系统的导电部件，即使不用于收集可燃性材料（见第 13 章），也宜接地。

大的吸尘器系统宜按气动输送系统处理（见第 9 章）。

8.8.3 便携式系统

如果设备用于收集可燃性物质，则系统中所有金属和导电部件宜等电位联结并接地。尤其重要的是要确保收集容器在使用时始终接地。这可以通过电源引线实现，或者对于压缩空气驱动的设备，可使用导电性或等电位联结的压缩空气用软管。

不能接地的设备（例如，由于外壳是绝缘的，见 3.15），管口与接收装置无电气连续性，不宜在危险场所使用（参见附录 D）。

8.8.4 真空吸尘车

真空吸尘车在任何操作前宜先连接现场指定的接地。如果区域内无现场接地，即需要便携式接地柱，或者对现场接地效果有怀疑，宜在任何操作前检查接地电阻。当车辆连接到检查过的接地时，车辆与接地之间的连接电阻对于纯金属连接不宜大于 10 Ω，对于其他连接不宜大于 1 MΩ。

此要求宜使用车载接地系统或便携式电阻表进行验证。软管的静电适用性宜按照 7.7.3 和 9.3.3 进行验证。

9 粉末中的静电

9.1 概述

根据经验，由精细粉尘到颗粒或片状的散状物料，随着颗粒尺寸的减小、最小点燃能量（MIE）的减小，可燃性提高。

宜依据可能出现的最小颗粒尺寸的最小点燃能量，进行爆炸危险评定。通常用 60 μm 筛筛选获得最小颗粒物。

注 1：粉尘 MIE 表见 BIA-Report 12/97“粉尘可燃特性和爆炸特性”。确定 MIE 的方法在 GB/T 3836.12 和 ASTM E2019-03 中给出。

注 2：众所周知，受多种参数影响，粉尘的 MIE 是可变的，这些参数在文献资料中通常没有详细说明（颗粒度分布、溶剂/水分含量等）。

如果相关最小点燃能量大于 1 J，且无可燃性气体或蒸气存在，通常不需要采取特殊措施防止静电点燃危险。可能产生传播型刷形放电的情况例外[见 9.2d)]。

注 1：可能需要减小静电电击危险的预防措施，见 12.2。

散状物料根据体积电阻率分为三组：

a) 低电阻率粉末：体积电阻率 $\rho \leqslant 1\ \text{M}\Omega \cdot \text{m}$；

b) 中电阻率粉末：体积电阻率 $1\ \text{M}\Omega \cdot \text{m} < \rho \leqslant 10\ \text{G}\Omega \cdot \text{m}$；

c) 高电阻率粉末：体积电阻率 $\rho > 10\ \text{G}\Omega \cdot \text{m}$。

注 2：测量电阻率的方法见 GB/T 3836.27—2019。

实践中低电阻率粉末很少见。即使是金属粉末导电性也不会保持很长时间，因为表面形成氧化膜，增加了电阻率。但是炭黑除外。

在处理散状物料过程中，通常产生静电起电。除了避免电荷积聚的危险，还可能需要采取防爆措施，例如，惰化、使用耐爆炸设备、泄爆或抑制爆炸措施。

9.2 放电的产生和引燃性

粉末或设备上产生和积聚的电荷，仅在以放电的形式突然释放引起点燃时，才产生危险。起电粉末和设备产生的放电形式有几种，它们的引燃性差别很大(参见 A.3.2～A.3.7)。与粉末处理有关的放电引燃性和细节如下：

a) 火花放电：通常通过对比存储能量(参见 A.3.2)，对比可燃性粉末的 MIE(参见 C.6)，对火花放电的引燃性进行评定。可通过将设备所有导电部件导电产品以及人员接地避免火花放电。

b) 刷形放电：现阶段知识表明，如果不存在可燃性气体或蒸气(参见 A.3.4)，仅依靠可燃性粉末的 MIE，可燃性粉末不能被刷形放电点燃。当处理大量中电阻率或高电阻率粉末时，刷形放电不能避免(参见 B.3.7)。

c) 当在粉尘环境中使用绝缘塑料时，污染的出现(例如，溶剂、油脂或湿气)可能影响潜在的点燃危险。

d) 在处理溶剂湿润的粉末时宜注意，它们会在长时间内释放 MIE 比纯粉末低得多的可燃性蒸气。同时还宜考虑，MIE 小于 1 mJ 是否是此机制造成的，而不是粉末本身造成的。

e) 电晕放电：电晕放电不能引燃可燃性粉末。当处理大量中电导率粉末或非导电性粉末时，电晕放电不能避免。

f) 传播型刷形放电：传播型刷形放电释放的能量可以计算出来，一般超过 1 J。计算实例和传播型刷形放电的更多细节参见 B.3.9。

g) 锥形放电：高度起电的粉末装入筒仓过程中会产生锥形放电。一般认为锥形放电能点燃可燃性气体、蒸气和可燃性粉末(也参见 A.3.7)。

h) 闪电状放电：理论上可能产生此种放电，但在工业生产中还未观察到。

9.3 程序化措施

9.3.1 概述

工艺参数的设置宜能最大程度减少静电起电。可以通过下列一项或全部预防措施实现：

a) 增加散状物料的电导率，例如，通过涂层；

b) 用接地导电设备代替绝缘设备；

c) 粉末加湿；

d) 电离；

e) 减少散状物料中的细颗粒，例如，避免磨损或摩擦产生细颗粒；

f) 避免分散，例如，用致密相输送代替稀释相输送；

g) 减小输送速度、流量和空气流速；

h) 避免大量散状物料；

i) 适宜采用重力运输，不用气动运输；

j) 气动运输中使用导电性或防静电软管。

9.3.2 加湿

如果用加湿方法从散状材料中耗散电荷，需要保持温度 23 ℃、相对湿度 70%。对高速运输和温热产品，这种方法可能无效。这种方法也会显著影响一些粉末的流动特性。

注：空气是不良导体。用加湿法耗散粉尘云电荷效果不佳。但是，较高的相对湿度确实降低了很多粉末的表面电阻率，对大部分聚合物则不起作用，并且可能加快散状粉末表面电荷衰减率。

9.3.3 气动传输的软管

7.7.3.4 定义的防静电和导电性软管不适用于气动运输散状物料。对于这种气动输送的软管，内壁任何地方泄漏电阻都宜小于 100 MΩ(按照 GB/T 9572 测量)。

9.3.4 电离

通过电离可增加粉尘/空气混合物的电导率。电离可能避免粉尘积聚。在处理大量散状物料和大量粉尘云时，则无法避免危险。

注 1：对相对较大的距离很难提供必要的电离，例如，大于 100 mm。此外，需要被中和的电荷总量通常比电离系统提供的量大。

当电场强度接近击穿值时，尖端、接地导电探头或导线的局部放电对于粉尘云和散状粉末都至关重要。接地导电探头或导线不宜整体或部分断开。

注 2：粉尘进入容器时，这种接地探针或导线放置在装入点，可以将单次放电的能量降到较低水平。当粉末进入绝缘容器时，它们也可以为积聚的电荷提供一个安全的接地通道。

注 3：分离部件(例如，如果探头或导线部分断裂)可能成为起电电容，引起火花放电。

注 4：使用有源离子发生器时，尖端污染会导致电阻加热，可能引起火灾，需要避免这种情况。

9.4 无可燃性气体或蒸气的散状物料

9.4.1 概述

在下列条件下，可认为粉末在处理和加工过程中无可燃性气体或蒸气：

a) 非可燃性散状物料的气体或蒸气浓度低于其爆炸下限(LEL)；

b) 可燃性性散状物料的气体或蒸气浓度低于其爆炸下限(LEL)的 20%。

注：如果干燥程序刚结束时散状物料中残余溶剂浓度低于 0.5%，随后在室温下处理粉末，并且不会产生精细颗粒，通常认为不会产生可燃性气体和蒸气。

9.4.2 导电性或耗散性材料制成的设备或物体

所有由导电性或耗散性材料制成的设备或物体在危险场所都宜接地，例如，用导电层层压及含不稳定涂层的容器。

对于下列情况，接地要求可免除/放松：

a) 如果能够证明，在正常工作或可能出现故障时，由导电性或耗散性材料制成的物体不会起电；或者

b) 被隔离物体存储的最大能量比散状物料的 MIE 小得多；或者

c) 物体的电容不超过表 2 给出的值。

9.4.3 由绝缘材料制成的设备和物体

由绝缘材料制成的设备或物体，仅在不形成危险电荷的情况下才允许使用。如果绝缘材料制成的设备或物体以管道、软管、容器、护套、涂层和内衬的形式出现，则不能避免产生电荷。

如果绝缘表面 10 mm 距离内有导电背板支撑，则绝缘表面起电产生的传播型刷形放电，能量通常能大于 1 J。如果使用击穿电压小于 4 kV 的绝缘薄膜、绝缘层或绝缘涂覆，则不会产生能点燃散状物料的传播型刷形放电。

由于被隔离导体材料起电可能产生火花放电，只有在所有导电性和耗散性材料都适当接地的条件下，才允许组合使用导电性、耗散性和绝缘材料。

9.4.4 粉尘分离器

在可燃性粉尘分离器中，绝缘过滤织物不宜隔断导电性或耗散材料构成的部件的接地连接，例如，过滤套筒的支撑笼或固定过滤兜的金属夹具。特别是当散状物料的 MIE 小于 3 mJ 时，确保所有金属部件如夹具等接地，且电容大于 10 pF，这些都非常重要。采用该限值条件的原因是，在实践中，即使很小的金属部件（单个螺钉、夹子等），通过电缆连接确保经常接地，也基本上不能实现。接地和等电位联结宜通过自身结构和/或使用材料的特性来保证。

因此，使用带有导电丝纤维的过滤织物，或使用末端缝有铜条的过滤兜，以使其与支撑笼或金属固定夹具自然等电位联结，这种方法被证明非常有用。

在可燃性蒸气存在，或处理 MIE 小于 30 mJ 的非金属导电性粉末时，宜始终使用由导电且接地的材料制成的过滤织物。如果多数规程没有明确禁止使用干燥介质型集尘器，这种织物也可用于 MIE 小于 30 mJ 的可燃性金属粉尘。接地电阻宜小于 100 MΩ。使用带有导电丝的过滤网也能够通过电晕放电减少粉末和过滤网上的电荷。

注：铝、镁、钛、锆粉尘的 MIE 通常小于 30 mJ，铁、钴、镍、铜、锰粉尘的 MIE 通常大于该限值。更多细节见 NFPA 484“可燃性金属标准”。

9.4.5 筒仓和容器

9.4.5.1 概述

散状物料进行处理和加工的方法，宜能避免产生危险电荷。散状物料及筒仓或容器壁上会积聚危险电荷。

注 1：这适用于大型筒仓和容器，也适用于小型移动容器、箱、桶、袋子、柔性集装袋或其他包装。柔性集装袋的特殊要求在 9.6 给出。

图 1～图 3 详细阐述了如何分析筒仓或容器填装散状物料过程中，物料本身起电是否能达到危险程度。如果需要，也要采取防止产生电晕放电、闪电状放电或火花放电的预防措施。根据散状物料的电阻率选择流程图：

——图 1：低电阻率散状物料的评定（$\rho \leqslant 1\ M\Omega \cdot m$）；

——图 2：中电阻率散状物料的评定（$1\ M\Omega \cdot m < \rho \leqslant 10\ G\Omega \cdot m$）；

——图 3：高电阻率散状物料的评定（$\rho > 10\ G\Omega \cdot m$）。

注 2：在图 2 和图 3 中，$W_{锥形放电}$ 表示锥形放电的最大预期能量。

作为替代方法，可测量粉末堆上方电场强度，可通过模拟筒仓内电场，同时考虑填装过程中电荷的耗散，评估电场强度。宜根据荷质比、散状物料密度、粉末填充速率、相对介电常数、散状粉末的电阻率，以及筒仓的几何形状，进行模型计算。如果径向电场保持在 3 MV/m 以下，则满足散状粉末的电场要求。放电间隙上 500 kV/m 的平均电场与 3 MV/m 的限值之间的区别，基于筒仓内电场的分布，筒仓内最大电场通常在径向指向筒仓壁处测量，不在粉尘堆上方轴向直接测量。

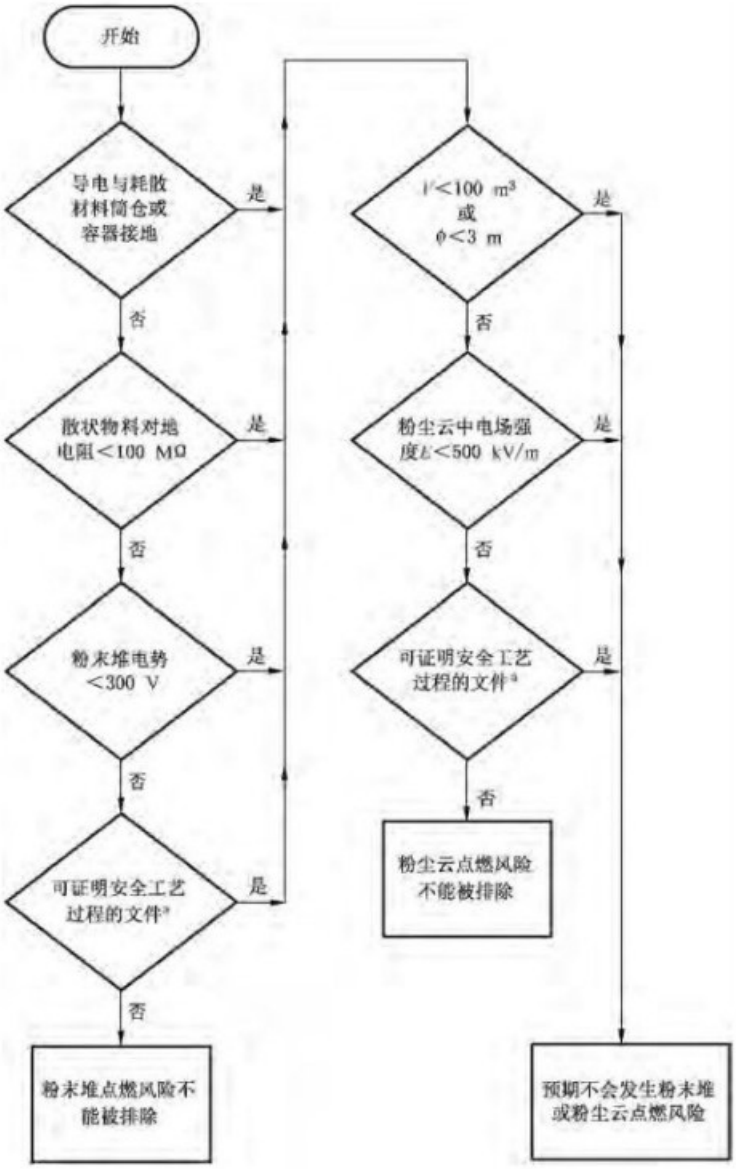
为了评定筒仓壁和容器壁产生的电荷，9.3 和 9.4 的要求也宜考虑。

对于无可燃性气体和蒸气的筒仓或容器，在卸货过程中，散状物料预期不会产生危险电荷。此外，所有卸货和传送装置需要单独进行分析。

注 3：也见 9.3。

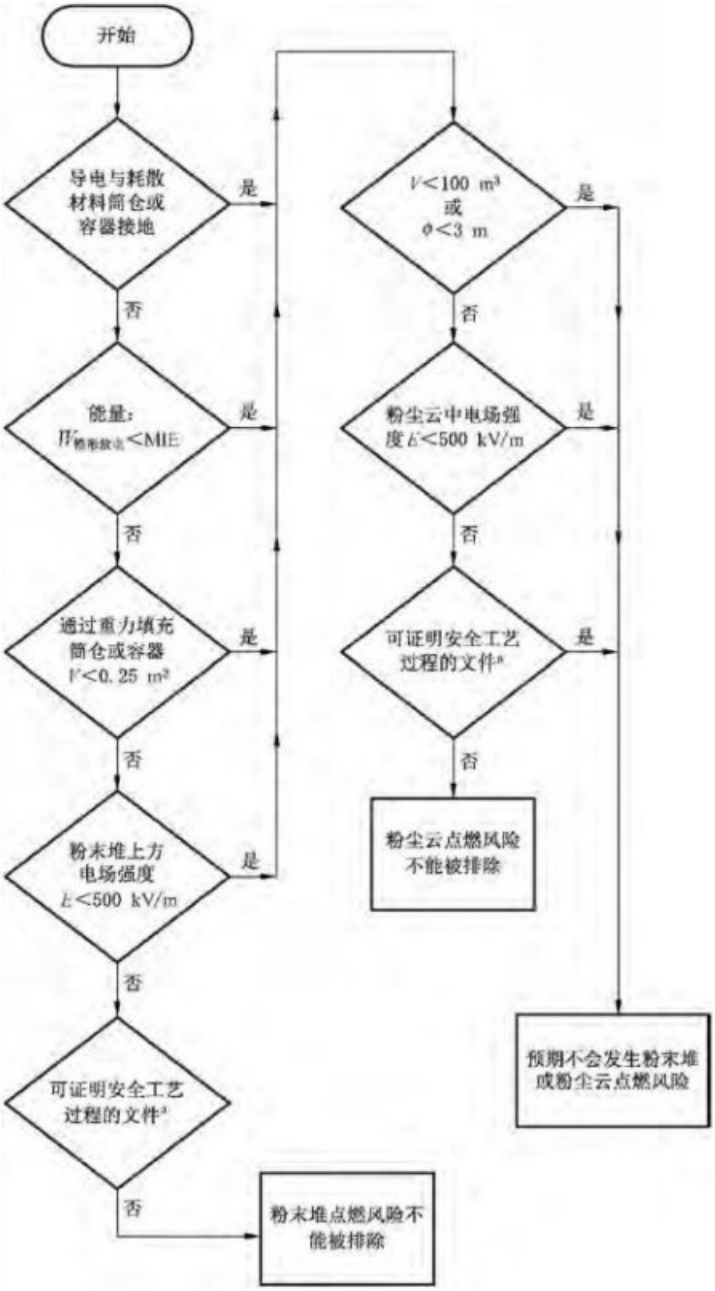
但是宜牢记多数卸货操作也是连续筒仓或容器的填装操作。

在填装和清空过程中，导电性筒仓和容器宜接地，耗散性筒仓和容器宜与地接触。



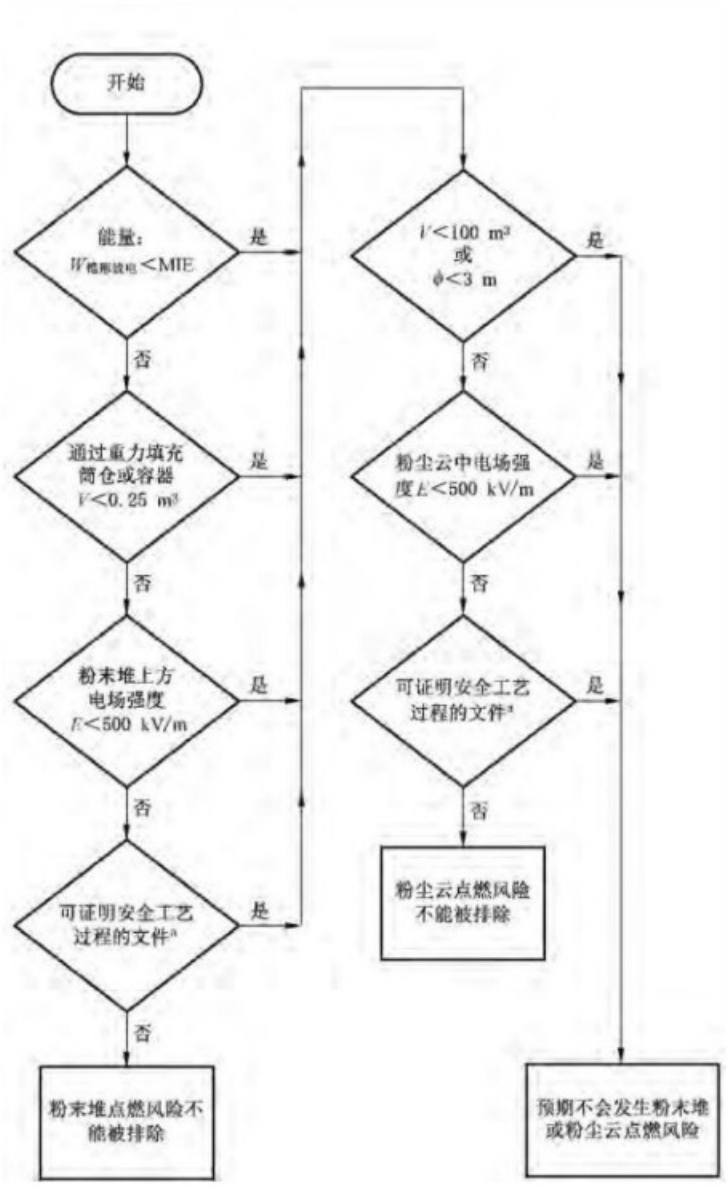
[a] 见 9.4.5.2。

图 1　流程图:评定 $\rho \leqslant 1$ MΩ · m 散状物料



[a] 见 9.4.5.2。

图 2　流程图：评定 1 MΩ · m<ρ≤10 GΩ · m 的散状物料



[a] 见 9.4.5.2。

图 3　流程图：评定 ρ＞10 GΩ · m 的散状物料

9.4.5.2　可证明安全工艺过程的文件

如果按照图 1～图 3 的流程图，根据“可证明安全工艺过程的文件”的决定步骤，排除了点燃危险，则对爆炸危险也宜进行了详细分析和评定。在评定时牢记，工艺、生产、设备、包装等方面的微小变化，都可能极大地影响放电的产生和点燃性，以及爆炸性环境的出现及浓度的改变。即使是最小的变化以及可能产生的结果都宜在防爆文件中解释说明。如果有效点燃源不能被排除，并且存在可燃性环境，则对于这些情况，都宜采取保护措施（例如泄爆、惰化、遏制爆炸设计）。

9.4.5.3　带导电性或耗散性衬层的导电性或耗散性容器

除了 9.3 的措施，导电性或耗散性衬层只有安全接地并且在装入容器和取出过程中保持接地，才能

在危险区域使用。这可以通过以下方法实现，例如通过容器可靠接地，或者在衬层放入和取出过程中通过人体可靠接地。否则不宜在危险区域放入或取出导电性或耗散性衬层。

9.4.5.4 带有绝缘衬层的导电性或耗散性容器

由于有传播型刷形放电危险，一般宜避免使用绝缘衬层。除了9.3列出的方法，如果至少还符合下列条件之一，才可使用绝缘衬层：

a) 容积$<0.25\ m^3$；

b) 击穿电压<4 kV，(对于编织材料小于6 kV)；

c) 衬层厚度>10 mm；

d) 文件证明不会产生传播型刷形放电。

注：根据衬层的厚度、电导率和击穿电压，以及散状物料的电气特性不同，可能会产生传播型刷形放电。由于薄涂层和小于50 μm的聚合物涂层击穿电压很低，因此容器内部不用这类涂层。

如果散状物料的电阻率小于100 MΩ，则宜接地。

例如，可通过引入一根或几根金属棒或金属管通到容器底部进行接地。在加注导电性散状物料前宜先接地。

9.4.5.5 绝缘容器

由于绝缘容器一般存在传播型刷形放电危险，因此宜避免使用。除了9.3列出的方法，如果至少还符合9.4.5.4中a)～d)的条件之一，才可使用绝缘容器。如果散状物料的电阻率小于100 MΩ，则宜接地。宜避免锥形放电。

注：根据容器的厚度、电导率和击穿电压，以及散状物料的电气特性不同，可能会产生传播型刷形放电。

9.4.5.6 有衬层的绝缘容器

由于导电性衬层存在对地隔离的危险，因此在绝缘容器中一般不使用导电性衬层。如果必须使用导电性衬层，则宜可靠接地。

绝缘容器中的绝缘衬层宜按照9.4.5.5，像绝缘容器一样进行评定。

9.5 存在可燃性气体或蒸气的散状物料附加要求

9.5.1 概述

存在可燃性气体或蒸气时，气体或蒸气混合物的浓度和悬浮散状物料的浓度(见3.14)共同决定了是否会形成可燃性气体或蒸气/空气混合物，或者杂混物(空气中可燃性气体或蒸气和可燃性粉尘的混合物)。混合物的最小点燃能量(MIE)主要由气体或蒸气的数量确定，通常比纯粉尘的MIE低。可燃性气体/蒸气可由其他来源(例如，粉末添加到可燃性液体中)形成，或由粉末自身形成(例如，如果含有大量溶剂或可能产生可燃性气体)。

处理溶剂湿润的粉末时宜当特别注意，因为当处理大量介质或绝缘粉末时，产生的刷形放电点燃形成的气体/蒸气或杂混物环境是不可避免的。

不存在可燃性气体或蒸气时散状物料的低、中、高电阻率限值不适用于存在可燃性气体或蒸气的散状物料，此时电阻率重要限值仅100 MΩ·m。

下列要求仅适用于ⅡA和ⅡB类爆炸性气体和蒸气。对于ⅡC类爆炸性危险环境需要进行惰化。

9.5.2 电阻率大于或等于 100 MΩ·m 的措施

一般情况宜避免开放处理电阻率大于或等于 100 MΩ·m 的溶剂湿润散状物料。当不可避免要开放处理此类物质时，尤其是处理量很大时，通常需要采取附加爆炸预防或防护措施，具体如下：

a) 惰化；

b) 在真空下进行溶剂湿润物质加工；

c) 在温度显著低于闪点条件下加工；

d) 在防爆设备内加工；

e) 排除杂混物；或者

f) 采取特殊构造措施。

注：由于处理电阻率大于或等于 100 MΩ·m 的散状物料通常会高度起电，不能避免产生刷形放电，因此可能引起点燃。

9.5.3 电阻率小于 100 MΩ·m 的措施

如果散状物料电阻率小于 100 MΩ·m，例如，含有极性溶剂的散状物料，散状物料宜在导电性接地设备中处理，或者能为散状物料提供足够大接地点的其他设备中处理。

注 1：如果散状物料特别多，需要用代表性样品进行电阻率评定。评定时可不用电阻率，而根据溶剂特性和含量进行评定。

注 2：当加装到容器内或加入到液体中时，散状物料以及可燃性液体可能起电到危险水平。

9.5.4 散状物料加装到容器中

将散状物料加装到含有可燃性气体或蒸气的容器中时，在容器空间内、在衬层上、在斜槽管道或漏斗中、在掉落到接收装置的产品上、在接收装置上、在接收装置内的产品上或者在操作人员身上，可能导致产生危险起电水平。因此，最好在封闭的和/或自动系统中，在惰化气体环境条件下加装散状物料。

注 1：从金属桶、塑料桶或塑料袋子添加散状物料产生的电荷，在过去已造成很多火灾和爆炸事故。

注 2：散状物料从容器、袋子卸出或在斜槽、管道或漏斗中流动时产生电荷。

宜尽可能避免手动向开放容器添加物料。如果向含有爆炸性环境的容器开放添加粉末不能避免，宜采取特殊措施减少电荷产生：

a) 倒出物料被清空的容器或袋子宜由导电性或耗散性材料制成；

b) 在倒出清空过程中，导电性容器或袋子宜接地，耗散性容器或袋子宜与地接触。

注 3：用于制造容器的耗散性材料包括纸、耗散性复合材料以及一些塑料层压纸。对于耗散材料如纸袋制成的包装，通过操作人员的手与地接触就可以了。在此情况下，地板、鞋、手套也宜由耗散材料制成，并且接地电阻不宜因受污染物影响而增大。

注 4：在存储过程中，由于老化、吸附或相对湿度较低，包装袋的耗散特可能消失。在存储区域可能需要增加相对湿度，尤其是在冬天。

注 5：耗散性塑料袋通常不通过接地钳接地，而是与地接触，例如，仅通过操作人员接地。

注 6：将麻布袋或袋子等放在导电性支撑架子或桌子上，通过干净的表面与地连接，这种做法比较有利。

c) 绝缘衬层如果可能接触可燃性气体/蒸气，则不宜使用。

d) 导电性衬层只能在导电性或耗散性容器中使用。宜确保衬层与接地的容器良好接触，并在取出和放入容器中时保持接地。否则，不宜在危险场所取出和放入容器。在处理过程中，衬层不宜从容器上脱落。

e) 耗散性衬层可用于导电性或耗散性容器。宜确保衬层与接地的容器良好接触，并在取出和放

入容器中时保持接地。否则，不宜在危险场所取出和放入容器。在处理过程中，衬层不宜从容器上脱落。

f) 宜尽可能避免使用多层包装或带有绝缘层的包装。如果由于其他原因需要使用，则宜符合下列条件：

——绝缘涂层厚度大于 2 mm；并且

——包装的所有导电层或耗散层宜始终接地或始终与地接触。

g) 添加散状物料的辅助装置宜为导电性设备，并宜接地。所有斜槽或漏斗的最大长度宜为 3 m。

注 7：辅助装置的例子有：铲子、漏斗、斜槽等。

h) 确保所有涉及的操作人员接地。

i) 散状物料添加的速率不宜超过 1 kg/s。

然而，由于加装散状物料固有的高等级危险，可能还需要附加控制措施，以达到规定的安全水平。

如果由于添加散状物料在接收容器中形成悬浮物或乳状物，即使仅存在很短的时间，也宜考虑搅动这样的多相系统时，不受起电过程影响，会产生危险电荷。对于这种情况，考虑 7.9.4 的规定。

注 8：典型的例子：在生产染料、涂料和油漆时，添加颜料。

9.6 柔性集装袋(FIBC)

9.6.1 概述

柔性集装袋(FIBC)在工业中用于存储和运输粉末或颗粒物。它们通常由聚丙烯织物或类似强度和承重的绝缘材料制成。

在加装和清空柔性集装袋时会产生静电电荷，并且积聚在产品上以及构成 FIBC 的织物或任何部位上。可燃性环境中，如果积聚的电荷以引燃放电的形式释放，则会引起点燃。使用 FIBC 时，火花、刷形放电、电晕放电、传播型刷形放电都可能出现。

根据加装和清空过程中存在的可燃性环境性质和敏感度不同，FIBC 宜符合的要求和规定不同。FIBC 设计制造的最终目的是在应用中 FIBC 纤维不会产生引燃放电。由于可能产生不同引燃性的放电(即不同种类的放电，例如，火花、刷形放电或传播型刷形放电)，FIBC 消除静电的必要性以及制造要求要与预期用途相适应。因此开发了不同类型的 FIBC，分别定义为 A 型、B 型、C 型或 D 型(见 IEC 61310-4-4)：

——A 型 FIBC 由片状织物或塑料膜制成，没有任何防静电产生的措施。

——B 型 FIBC 由防止产生火花放电和传播型刷形放电的片状织物或塑料膜制成。

——C 型 FIBC 由导电片状织物或塑料膜制成，或者内部编制导电线或丝，防止发生引燃火花放电、刷形放电和传播型刷形放电。C 型 FIBC 的设计要求在填装和清空时接地。

——D 型 FIBC 由防静电织物制成，不需要接地，可防止产生引燃火花放电、刷形放电和传播型刷形放电。

根据消除引燃放电的机理不同，不同类型 FIBC 宜满足的要求不同，既可以是纯粹的物理参数，例如，击穿电压和电导率(B 型和 C 型)，也可以是证明不产生引燃放电的通用程序(D 型)。这些要求见 IEC 61310-4-4。

这四种 FIBC 宜按表 19 的要求使用。对于其他 FIBC 或未知类型 FIBC，只有经过专家详细评定后，才能在可燃性环境使用。

绝缘材料制成的文件袋或包宜满足 IEC 61310-4-4 的要求，这些要求类似于 6.3 的要求。对于 C 型文件袋，宜考虑它们有一层接地的导电性织物，能够防止表面高度起电。

表 19　不同 FIBC 的使用

FIBC 中的产品	周围物质		
粉尘的 MIE[a]	非可燃性环境	粉尘 21-22 区[b]	气体 1-2 区[b] (爆炸性气体ⅡA/ⅡB 类)[c]
MIE>1 000 mJ	A、B、C、D	B、C、D	C、D[d]
3 mJ<MIE≤1 000 mJ	B、C、D	B、C、D	C、D[d]
MIE≤3 mJ	C、D	C、D	C、D[d]

注 1：当 FIBC 内部存在可燃性气体或蒸气时，例如，溶剂湿润粉末的情况，通常需要采取附件预防措施。

注 2：非可燃性环境包括 MIE>1 000 mJ 的粉尘。

注 3：3 mJ 的 MIE 限值是基于锥形放电的引燃性。B 型 FIBC 中锥形放电的能量比 C 型、D 型 FIBC 高，因为 C 型、D 型 FIBC 的外壁接近零电势。基于这种情况，C 型、D 型 FIBC 锥形放电的电场分布最多仅跨越 FIBC 的一半直径。依据 A.3.7 的公式计算，常用的 B 型最大 FIBC(直径 1.5 m)内，中等尺寸仅 0.055 mm 粉末产生 3 mJ 能量，然而，在 C 型、D 型 FIBC 中，0.27 mm 或更大尺寸的粗粉就能达到 3 mJ 能量。但是这种粗粉的 MIE 通常大于 3 mJ。

[a] 用电容放电电路，按照 GB/T 3836.12 和 ASTM E2019-03 进行测量(无添加电感)。

[b] 分区的定义参见 D.2。

[c] 爆炸性类别解释参见 D.3。

[d] D 型宜限制用于ⅡA/ⅡB 类爆炸性气体，MIE≥0.14 mJ。

实际中，为了使 FIBC 发生传播型刷形放电，通常需要按高度静电电荷生成的方法(例如，气动输送)处理高电阻率粉末。如果不能满足这些条件，特别是对中等或高 MIE 粉末，然后进行详细的专家评定可能得出结论，易燃传播型刷形放电的危险在可接受的低水平。

如果 FIBC 内安装有内衬，在爆炸危险环境中使用 FIBC 的能力可能发生变化。表 20 给出了能在危险环境中安全使用的 FIBC 和内衬组合。特定的 FIBC 和内衬组合宜符合附加预防措施。这些预防措施也在表 20 中列出。

表 20　内衬和 FIBC：危险环境中允许和不准许使用的组合

FIBC[a]	内衬[b]		
	L1 型	L2 型	L3 型
B 型	不准许	允许	允许
C 型	允许[c]	允许	不准许
D 型	不准许	允许[d]	不准许

注：被隔离的导电性内衬静电放电，会对操作者产生痛苦的电击，或破坏电气/电子设备的运行。

[a] 无论采用何种类型内衬，A 型 FIBC 不宜用于爆炸危险环境。

[b] 在爆炸危险环境中，内衬不宜从清空的 FIBC 中取出。

[c] 为了确保内衬合适地接地，在 IEC 61340-4-4:2018 中 8.1 规定的条件下，按照 IEC 61340-4-4:2018 中 9.4 的方法测量，从内衬至少一面到 FIBC 接地点间的电阻宜小于 10 MΩ。

[d] FIBC 与内衬的组合宜满足在 IEC 61340-4-4:2018 中 8.2 规定的条件下，IEC 61340-4-4:2018 中 7.3.2 的试验要求。

不同类型内衬的材料要求如下：

——L1 型内衬由至少一面表面电阻率小于 10 MΩ 的材料制成，如果必要，通过材料的击穿电压小于 4 kV。

——L2 型内衬由至少一面表面电阻率在 1 GΩ～1 TΩ 之间的材料制成，通过材料的击穿电压小于 4 kV。

——L3 型内衬由表面电阻率大于 1 TΩ 的材料制成，通过材料的击穿电压小于 4 kV。

注：仅某些结构的 L1 型和 L2 型内衬需要测量击穿电压，即，当其中一面的表面电阻率大于 1 TΩ 时。L1、L2、L3 型内衬更详细的要求见 IEC 61340-4-4:2018。

两层绝缘层之间有导电层的材料制成内衬，不宜应用于 B 型或 D 型 FIBC。如果这种内衬用于 C 型 FIBC，导电层宜牢固地与地连接。

对于其他类型的内衬或未知型式的内衬，只有经专家详细评定后，才能用于爆炸危险环境。

FIBC 的绝缘吊装带或吊装环宜符合表 3 的宽度限值要求。B 型或 D 型 FIBC 在带子和绳子之间不宜使用金属连接件(锁扣)。对于 C 型 FIBC，在带子和绳子之间使用金属连接件宜接地。

9.6.2 使用 FIBC 时的附加预防措施

在加装和清空过程中，被隔离的导电物体(例如，工具、螺钉、夹子等)不宜放在 FIBC 内，也不宜接触，甚至也不宜暂时放置在任何种类的 FIBC 上。即使对于 C 型 FIBC，一些 FIBC 材料的粗糙性会阻碍放置在 FIBC 上的导电物体接触到 FIBC 织物的导电成分。

在危险场所，在加装和清空过程中，所有 FIBC 附近(即 1 m 范围内)的导电物体宜适当接地。

宜采取预防措施，防止可能产生点燃危险或削弱电荷耗散的物质(例如，水、绣、油、油脂等)污染 FIBC。

10 处理爆炸物和电子爆炸装置时的静电

10.1 爆炸物的生产、处理和储存

10.1.1 概述

被隔离导体或人体上积聚的静电点燃爆炸物造成严重后果甚至是灾难性后果。爆炸物的种类很多(固体、粉末或液体)，并且可能有多种存在形式，比如散状的、袋装的、塑型的、丸状的、压实的、模铸的或被装入金属或塑料容器的。在处理或加工爆炸物之前，宜考虑 10.1.2～10.1.4 给出的建议，但是，还宜参考本部分对进行特殊操作有关的条款。

导致爆炸物点燃的火花能量大小与爆炸物的种类和物理状态有关。一般来说，起爆药比发射药或高爆炸药更敏感，而烟火敏感性广泛更大。

采取的预防措施范围取决于最小火花点燃能量，按照最小火花能量可将爆炸物分为三个等级。爆炸物最小火花点燃能量是根据爆炸物的具体应用进行专门试验测出的，了解这一点很重要。

三个等级的爆炸物和对应的预防措施在 10.1.2、10.1.3 和 10.1.4 中给出。没有专家的意见，不宜偏离这些建议。对于爆炸物工业中敏感或高敏感爆炸物，需要使用专门的接地技术。

宜保持大于 40%的相对湿度。处理更加敏感的物质时，可能需要更高的湿度。

10.1.2 一级保护

相对不敏感的爆炸物最小火花点燃能量大于 450 mJ，处理过程中，这里给出的预防措施可以保证安全。

所有大的导电物体宜接地，例如，固定车间和设备系统。当采用金属导体的方法接地时，接地电阻

宜小于 10 Ω。这个电阻表明金属导体与地可靠连接。非金属物质也可用于接地，前提是它们符合第 13 章的要求。

10.1.3 中级保护

这些敏感爆炸物的敏感性介于 10.1.2 和 10.1.4 处理的爆炸物之间，具有最小火花点燃能量大于 1 mJ，小于或等于 450 mJ。

根据特定爆炸物的特性和处理的方法，对 10.1.4 给出的充分预防措施适当放松可以接受。宜根据专家建议，确定每种具体情况的预防措施水平。

10.1.4 二级保护

非常敏感爆炸物的最小火花点燃能量小于或等于 1 mJ，需要采取以下预防措施：

a) 所有设备，包括移动式和便携式的物品，都宜接地。金属部件接地电阻不宜大于 10 Ω，其他材质部件不宜大于 100 kΩ。宜严格排除绝缘材料。

b) 所有人员都要通过地板接地，地板的最大泄漏电阻 50 kΩ，鞋子最大泄漏电阻 100 kΩ。每个要求穿这种鞋子进入的区域入口，都宜安全装个人电阻监视器。当处理的物质点燃能量小于 0.1 mJ 时，宜考虑给每个工作台安装个人电阻监视器。

c) 外衣不宜由绝缘材料制成。在处理爆炸物的区域内，任何情况下都不宜脱掉衣物(见 11.5)。

d) 宜避免易产生火花的导电性物体，例如，人员手上的戒指、湿的手指、导电性工具或导线。

e) 环境的相对湿度不宜小于 65%。

f) 宜注意防止很多小的电容电气耦合后形成较大的电容。

g) 宜避免使用绝缘手套。当没有毒性或其他考虑因素时，最好完全不用手套。

10.2 处理电子引爆装置

10.2.1 概述

像电雷管这样的电子引爆装置，可能无意中通过引线、或在金属外壳与引线之间被静电放电引燃。很多电子引爆装置，在下面这种情况，对于静电能量更加敏感。由于人员移动静电可能积聚在被隔离的人员身上，在雷雨中、尘爆或干燥沙暴过程中人员和设备部件可能起电。在气动输送爆炸性颗粒物到炮眼中时，也可能产生电荷。

10.2.2～10.2.4 给出了防止危险的预防措施，在电子引爆装置处理过程中，包括储存、分发和准备使用时，都宜采取这些预防措施。

宜注意，在处理电子引爆装置时也有其他危险源，例如，电磁辐射的能量和点火电路连续性试验。对这些情况宜参考相关指南。

10.2.2 接地

人员宜有充分的接地通路，例如，穿导电鞋，最好穿棉质衣物。然而，在一些环境中，如煤矿，人员连续接地不可行，建议始终遵循 10.2.3 和 10.2.4 规定的程序。

区域内所有导电性设备，例如，铁轨和管道，以及所有机械设备均宜接地。宜注意，其他操作规程也可能要求导体相互等电位联结，防止出现电势差，导致与它们接触的线路存在电流。

如果气动输送爆炸性颗粒物到炮眼中，则填装设备宜接地。宜使用导电性或耗散性软管组件，并且宜接地。宜参考此领域的专门操作规程。

10.2.3 储存和分发时的预防措施

从制造商接收到的电子引爆装置，引线折叠包覆，裸露端拧在一起。如果发现裸露端没有连接在一

起，则技术人员宜自身接地后将其连接起来。如果可能存在显著的电磁场，需要注意确保重新连接程序不产生电磁辐射点燃危险。电子引爆装置不宜用绝缘材料包装和运输，例如，聚乙烯袋子或聚苯乙烯泡沫袋。建议用金属包装或导电性包装，这种包装对电磁辐射危险也可提供一些保护。

10.2.4 准备使用时的预防措施

当点火线被拉出时，裸露导线所有端部宜互相连接在一起并适当接地，例如，插入地下的金属棒，如果很干则宜使其湿润。点火线和所有其他引线宜远离区域内的导体，如轨道或管道。

宜检查确认引爆装置引线连接在一起。如果需要，把它们连接在一起之后(见 10.2.3)，宜在点火端通过接地棒或其他适当的方法接地。然后引爆装置引线可以展开平铺在地上。

然后，在连接到点火线上之前，在处理爆炸装置的金属外壳之前时，技术人员宜确保接地。

宜根据使用装置的类型，采取适当预防措施，防止大气中的放电(例如，闪电)。

11 人体静电

11.1 总则

在 MIE 小于 10 mJ 的可燃性环境中，人员宜接地，防止携带静电电荷，这一点非常重要，由于多数地板覆盖物和鞋底由绝缘材料制成，会导致与接地隔离。导致人体起电的机理很多，例如：

a) 走过地板；
b) 从座位上起来；
c) 脱掉衣服；
d) 触摸塑料制品；
e) 容器中收集或倒出带电物质；
f) 站在高度起电的物体如移动的输送带附近。

如果携带静电的人接触导电物体(例如，门把手、栏杆、金属容器)，接触点会产生火花。人们不太可能看到、听到、甚至感觉到这种火花，但是火花能引起点燃。人体产生的火花能够点燃气体、蒸气，甚至一些更敏感的粉尘。

在 MIE 小于 10 mJ 的可燃性环境中，人员宜接地，防止携带静电电荷，这一点非常重要。可使用导电性或耗散性地板，并确保人员穿耗散性鞋，人员可以很好地接地。在 2 区和 22 区危险场所，只有在连续产生电荷时，才需要人员接地。

注：通常情况下，人体获得的最不利的电压约 20 kV。人体电容通常约 150 pF，由此产生的最大存储能量约 30 mJ。然而，由于人体皮肤的欧姆电阻较高，大约三分之二的存储能量会消失。因此，除了接触大型导电性工具，人体产生的火花最大等效点火能量仅 10 mJ。

11.2 静电耗散地板

建议地板的泄漏电阻是 1 MΩ～100 MΩ(见第 13 章)。在许多工厂环境中传统的地板材料，例如，裸露的混凝土或钢结构，能充分导电。为了保持导电的有效性，地板不宜用绝缘漆、橡胶垫或塑料膜等覆盖，并且注意防止污染物积聚，例如，树脂或其他绝缘物质，宜定期检查地板的电阻。

如果是裸露的金属表面地板(例如，钢格栅和钢板)，需要穿适当的鞋子(见 11.3)，防止人员受到危险电击。

有几个标准中有测试地板导电性的不同测量方法。在 IEC 61340-4-1 中，用直径(65±5)mm、质量 2.5 kg(硬地)或 5 kg(软地)的圆形电极压向地板进行试验。在 GB/T 23165 中，使用直径 65 mm、5 kg 的圆形电极压向地板进行试验。在 ASTM F150 中，用直径 63.5 mm、2.5 kg 的圆形电极压在地板上进行试验。在 EN 1081 中，采用三脚电极，并由一人站在上面压在地板上进行试验。

因为每种方法测得的电阻稍有不同，在产品说明书和测试报告中说明采用的测试方法很重要。

注 1：理想的情况，上述不同方法测得的电阻差别很小。在现实中，粗糙的表面，如外部含有大量石头的混凝土场地，由于使用的电极表面和施加的压力不同，会影响测量电阻。可以在符合 IEC 61340-4-1 的电极下垫上导电性泡沫板，使粗糙度增加几毫米，改善测量结果。但是，这可能不符合人穿着硬底鞋的实际情况。

注 2：该段的数值不一定适用于处理敏感爆炸物的情况，对这种情况见第 10 章的特殊要求。

11.3 耗散型防静电鞋及导电型防静电鞋

有两种鞋可用于人员接地，防止人员产静电起电：

a) 耗散型防静鞋有电阻上限和下限要求（见 3.9）。上限电阻很低，在大多数情况下足以避免静电积聚，下限电阻可在在意外接触主电路时提供保护。这种类型的鞋适合于一般用途。

注 1：GB 21148 定义（耗散型）防静电鞋按照 GB/T 20991 测量的电阻在 100 kΩ～1 GΩ 之间。GB 21148 定义的（耗散型）防静电鞋可能不满足本部分规定的电阻要求。

注 2：不宜把穿耗散型防静电鞋作为防止接触主电源电路的主要保护措施，因为这可能鼓励人们在电气系统带电作业，但是在某些情况下（例如，潮湿的时候），这种鞋可能无效。

注 3：含有炭黑的橡胶制成的耗散性材料，电阻有时会随着温度降低而增大。

b) 导电型防静电鞋电阻很低（见 3.3），例如，处理敏感性爆炸物的人可以穿。如果有意外接触主电源电路的危险，不宜穿这种类型的鞋。这种鞋也不适合一般用途。

注 4：除了在敏感爆炸物的情况下，通常只要求耗散型防静电鞋。

袜子或长袜通常不会对任一类型的鞋产生不利影响，有些类型的鞋套和矫正鞋垫会产生影响。

在导电性或耗散性地板上穿耗散型防静电鞋可控制和耗散人体上的静电电荷。通过耗散型防静电鞋和导电性地板的对地电阻宜在 100 kΩ～100 MΩ 之间。处理爆炸物时，通过鞋和地板的对地电阻宜小于 1 MΩ，或者，如果爆炸物的最小火花点燃能量小于或等于 1 mJ，该电阻宜小于 150 kΩ。

可用市场上销售的鞋子导电性测试仪测定电阻，即测量手持金属棒和人员站立的金属板之间的电阻。作为替代方法，也可按照 IEC 61340-4-3 的方法，测量装满丸粒的鞋子与其紧压的钢板之间的电阻。

鞋子上积聚杂物、使用矫形鞋垫及减小与地接触面积都能增加鞋子的电阻。宜经常测试鞋子的电导率，以确认其功能。

11.4 人体接地辅助装置

如果耗散型防静电鞋不能为人员提供充分的接地，宜使用辅助接地装置，这些装置包括手环、足跟/足尖接地球和导电性鞋套。

选择的辅助装置宜能防止危险静电电荷积聚，同时也不会增加触电致死的风险。在多数实际情况下，确保对地电阻等于或小于 100 MΩ 实现人员接地。通过接地装置防止触电在皮肤与地之间施加至少 100 kΩ 的电阻。基于皮肤接触和与地面的接触，尤其是在整个鞋子不与地接触时（例如，跪下时），接地有效性会被减弱。接地装置防止电击至少宜有 100 kΩ 的电阻。

最简单的商用接地装置是一个加内置电阻的接地手环，防止电击的最小接地电阻约 100 kΩ。在通风罩中或其他不限制操作人员移动的场所，这种类型的手环最实用。如果需要紧急外出，则需要分离手腕系绳系统。罩子上可配带两个外置盘绕接地带，并配置袖口附件，使用者可以把袖口附件去掉保留在身上。宜按照制造商规定的限值定期检查接地连续性。

11.5 衣物

由合成纤维纺织品制成的现代衣物虽然容易产生静电起电，但是在多数情况下，如果穿戴者采用合适的接地方式，例如，合适的鞋子（见 11.3）和地板（见 11.2），或者用接地手环和接地连接带，则不会产生点燃危险。但是，衣物款式和尺寸宜合适（参见 GB/T 20097），在全身运动时所有部位都能按制造商的

规定系紧。衣物的贴身程度宜符合实际情况，在可能存在可燃性环境的场所不宜脱掉或松开（如 0 区、1 区、20 区和 21 区）。

尽管接地的人员由于衣物引起点燃的可能性很低，但是电阻率较高的衣物会使人员起电（例如，人员离开叉车时）大幅增加。

在高度起电的活动中如果出现 MIE 较低的气体或蒸气，可能需要穿戴耗散型衣物。表 21 给出了何时需要耗散型衣物的指南。耗散型衣物的范围限值见表 1。

可燃性环境用个人防护服的试验方法和性能要求见 EN 1149。耗散型衣物宜覆盖所有其他衣物。外层衣物宜通过与穿戴者身体接触接地或直接与地连接接地。如果衣物含有一体的导电纤维，则人员通过小于 100 MΩ 的电阻接地即可。

注 1：虽然丝绸和多数合成纤维是非常好的绝缘体，并且由这些材料制成的内衣也有产生静电现象，但没有证据显示穿着这样的内衣会产生危险。

注 2：穿着含有一体导电纤维的衣物并不能防止穿戴者遭到电击。

注 3：含有炭黑的橡胶制成的耗散性材料，电阻有时会随着温度降低而增大。

注 4：在欧洲，在可燃性环境中使用的衣物是Ⅱ类个人防护装备，宜符合（EU）2016/425 的基本健康安全要求。

表 21　确定是否需要耗散型防静电服和其他个人防护装配

危险区域	起电可能性	0.02 mJ≤MIE≤0.20 mJ	MIE>0.20 mJ
0 区	高	需要	需要
	低		建议
1 区	高		
	低		不需要
2 区	高	建议	
	低	不需要	
20 区、21 区、22 区	—	不需要	

在富氧环境中，例如，液氧灌装厂可能存在的环境，冷却气体产生的蒸汽可能渗入衣物中，增加了衣物可燃性，如果起电的人员或衣物产生静电放电，衣物很容易就能被点燃。

可燃性气体在富氧环境中的 MIE 可能比一般文献中记录的 MIE 小。如果确定可能存在富氧环境，则宜确保进行危险评定使用的 MIE 是在富氧环境中测出的。

选择在 MIE 小于 0.02 mJ 的危险区域使用的耗散型防静电防护服或装备，宜听取专家的意见。EN 1149-5 规定的要求是以 MIE 大于或等于 0.02 mJ 的爆炸性环境为基础。

如果衣物被可燃性溶剂污染，在脱掉衣物或有其他高起电活动时，有静电点燃危险。如果没有直接化学灼伤和有毒危害，被可燃性溶剂污染的衣物在脱掉之前宜浸入水中，或先将可燃性溶剂蒸发掉。

耗散型衣物中可能使用的金属纤维（例如，不锈钢、银涂覆纤维等）及其他电阻率很低的纤维不能防止静电电击危险。因此，在可能有静电电击危险的区域使用这些纤维时宜注意。

注 5：金属纤维能产生小的轻微冲击，在衣物接触皮肤的地方（例如，手腕和脖子处）能感觉到。这是由皮肤与金属织物之间的局部放电引起的。

防护服防静电特性可能随穿着时间变化。在清理或暴露于不利条件之后，宜按制造商的说明对衣物进行维护。例如，在每次清洗后，衣物可能需要进行重新特殊处理。

11.6　手套

由绝缘材料制成的手套会使握在手中的物体起电并维持带电。因此，在 0 区和 1 区宜佩戴由耗散

性或导电性材料制成的手套。手套可在穿戴时与鞋子一起测试。通常在手持金属棒与人员站立的金属板之间测量电阻。宜采用与鞋子相同长度电阻限值(见 11.3)。

注 1：上述试验程序适用于终端用户测试和日常检查手套/人/鞋子系统中的手套。对于型式验证试验，可能需要应用其他产品标准，例如，CEN 正在制定个人防护手套防静电产品标准。

注 2：在某些情况中，手部保护的基础是防止暴露于有毒物质，规定手套同时满足静电耗散性和耐化学性是不可能的。对此，可能需要提供其他方式使导电性手持物体接地。

注 3：在欧洲，在可燃性环境中使用的手套是Ⅱ类个人防护装备，宜符合(EU)2016/425 的基本健康安全要求。

当手持导电性物体或工具预计通过人员佩戴的手套接地时，通过手套的电阻宜小于接地总电阻的限值。对于一般用途，通过手套的接地电阻宜小于 100 MΩ，对于更加严格的应用(例如，处理敏感性爆炸物)，通过手套的接地电阻宜小于 100 kΩ。

11.7 其他物品

塑料制成的防护头盔、呼吸器、遮阳板等可能起电，但是如果按照制造商的建议小心使用，它们在 1 区、2 区、20 区、21 区或 22 区使用时，如果没有高起电活动，则不太可能出现静电点燃危险。与衣物一样，如果存在高起电活动(例如，擦拭遮阳板)，同时出现 MIE 低的气体或蒸气，则可能有静电点燃危险。表 21 给出的值也可用于其他个人防护装备。表 21 中显示使用耗散性物品的区域内，个人防护装备宜由符合表 1 的导电性或耗散性材料制成，并且通过穿戴者身体接地。个人防护装备采用的绝缘材料宜限制在表 3 所示的区域。

12 静电冲击

12.1 概述

释放的静电通过人体会引起静电电击。人体能够感觉到或释放的最小放电能量约为 1 mJ。随着能量增加反应不同，一些人对 10 mJ 引起的肌肉收缩感觉不适，而其他人在感受到强烈的肌肉收缩时放电已达到几百毫焦。毫无疑问，1 000 mJ 会使所有人受到严重伤害。在一些事故中人员遭受电击失去知觉，这时的放电能量估计达到几焦。

由于多数情况的静电放电能量小于 100 mJ，因此造成严重伤害的情况非常罕见。不论这种电击本身是否造成伤害，但电击引起的无意识的肌肉反应会引发事故，例如，造成工具跌落或人体急剧坠落，导致受伤甚至死亡。除了这些危害，静电放电通常也会先点燃可燃性环境。

静电电击与其他型式的电击有一定的区别，其他形式的电击时间非常短(小于 1 ms)，通常是高压电击，安全/危险级别用能量或电荷表示，不用电流表示。

12.2 与静电电击有关的放电

静电有几种放电类型，在 A.3.2 和 A.3.7 对不同放电类型的特性进行了论述。通常认为下面几种放电是与人密切相关的静电电击。

a) 当人接近或接触高度起电的绝缘体(固体或液体)时会引起刷形放电；

b) 当人接触高度起电的导体时会引起火花放电；

c) 以下原因会引起传播型刷形放电，例如，人触摸一面带正电另一面带负电的塑料板，或者接触到塑料桶里面高度起电的粉末或颗粒。

如果静电释放的能量超过 350 mJ 或电荷转移超过 50 μC，通常认为对人体健康产生直接伤害。因此，小型隔离金属物体(漏斗、金属罐、手持工具)产生的刷形放电或火花放电产生的的静电电击不会直接造成伤害。但是，大型物体产生的火花放电以及一些传播型刷形放电会造成直接伤害，因为这些类型的放电能量能超过 1 J。

低至几毫焦的放电能量会导致无意识的运动，从而对健康造成间接伤害。这种电击造成人员无意识接触到运动的机械装置或者跌倒，从而造成伤害。即使是轻微的电击也会引起焦虑，并导致精力不集中。

12.3 静电电击源

多数工业和非工业生产过程会导致静电电击，下面有介绍两种情况说明如何产生静电冲击。

第一种情况：

a) 有充分的起电源；和

b) 在物体上，通常是导体或者有导电性支撑的绝缘体上能够积聚电荷；和

c) 人能接触到这个物体。

第二种情况：

a) 有充分的起电源；和

b) 人通过直接起电或感应获得高压；和

c) 带电的人随后接触到接地物体。

充分起电过程示例如下：

a) 皮带或薄膜快速通过滚筒；

b) 气动输送物料；

c) 泵输送低电导率液体通过过滤器或其他限制物；

d) 用静电喷涂设备喷涂；

e) 用高度绝缘的粉末或颗粒加装 A 型柔性集装袋；

f) 潮湿蒸汽逸出；

g) 喷射带电滴剂或颗粒的灭火器；

h) 叉车或其他车辆在绝缘表面上移动或使用绝缘轮胎。

12.4 静电电击的预防措施

12.4.1 静电电击的来源

电荷在人体上积聚，或者在被隔离的导电部件上积聚，或者在工艺或设备中的绝缘材料上积聚，都会产生静电电击。

12.4.2 由设备或工艺产生的可感知电击

许多类型的设备和工艺会引起静电起电，但通常未引起注意。但是有操作者报告他们所受到的电击，对此宜进行研究。这些电击可能无害，但并非总是如此，有时会有设备故障和危险。

避免电击最有效的预防措施是将机械装置和设备的所有金属部件和导电部件接地(详见第 13 章)。但是，这种措施有时无法实现，即使全部进行了接地，高度起电的绝缘材料(固体或液体)仍然会产生问题。

其他预防措施包括：

a) 降低电荷产生率，这种方法适用范围有限，但是使用耗散性添加剂效果较好，尤其是对液态物料。

b) 减少电荷在非导体上积聚，静电消除器可以有效消除移动薄膜和网状物上的电荷。

c) 阻止人员接触带电部件，这种方法适用于静电喷涂过程(见 8.7)或者其他高度起电的过程。可

采用合适的绝缘、接地网等防止人员接触这些部件。

d) 使用接地电阻小于 100 MΩ 的地板或地板覆盖材料。人、车辆包括叉车或者停车场的车，在高阻地板上行走时会起电。

12.4.3 人员起电产生电击

人员经常会直接(脱衣服或从地毯上行走)或感应(由于接近高度起电物体)起电，从而造成电击，虽然不会直接造成伤害，但是却很烦人。

产生电荷的典型情况是在高电阻地板上行走或从覆盖了某些材料的座位上起立。当人们推着采用绝缘轮子的手推车行走时，会加剧起电速度。

使用接地电阻小于 100 MΩ 的地板覆盖物，可以防止步行时由于电荷积聚导致的电击。

通过穿耗散性服装并通过静电耗散性或导电性地板和鞋(见 11.2 和 11.3)，可减少人体直接起电。

但是，一般不宜让人员低电阻接地(<100 kΩ)，因为这样会导致更严重的电击，例如，当人员与高度起电的导体或电力电源接触时。

12.5 特殊情况预防措施

12.5.1 气动输送

通过管道鼓风或抽吸把粉末、颗粒或微小物体从一个地方输送到另一个地方，通常会大量起电。被输送的物料和输送系统的所有部分，包括管道和两端的容器，都会高度起电。

除了接地还宜采取下列预防措施：

a) 绝缘管道内堆积的导电性物体在清理之前要接地(可在接地导体上连接金属棒)。

b) 当气动输送的导电性物体收集在绝缘容器内时，容器底部宜有接地触点，或者宜防止人员接触内部物体。

c) 当气动输送的绝缘粉末或颗粒收集到大型绝缘容器(≥1 m^3)内时，宜防止人员接触内部物料(见 9.2 和 9.6)。

12.5.2 真空吸尘器

真空吸尘器与气动输送系统相似，输送的物料通过软管组件以及在系统内收集时会起电。

宜采取下列预防措施：

a) 固定式系统宜接地，金属或导电性软管和喷嘴宜等电位联结。

b) 便携式系统通常不会有问题，但是外部金属部件宜接地，尤其是在接近移动机械装置或在提升平台上使用时。

12.5.3 卷绕起电的薄膜或薄片

薄膜或薄片材料由于通过滚轴时起电，在卷轴上积聚大量电荷。最好用机器卷绕此类材料，但是也宜采取下列预防措施：

a) 所有带电部件尤其是中央框架(或滚轴)，在人员接触之前宜接地；

b) 使用静电消除器，尤其是在高摩擦力或高压力点(例如，滚轴)后适当的距离，例如，打印机第一机架辊和压片间，进入打印机区域前，使用静电消除器；

c) 滚轴、框架和滚筒用耗散性材料；

d) 使用电导率至少 10 000 pS/m 的油漆、油墨和胶水；

e) 增加相对湿度；

f) 减小薄膜速度；

g) 减小薄膜和滚轴间的压力和/或摩擦；

h) 可燃性气体或蒸气存在的场所，对于距离接地点至少 150 mm 的薄膜悬空长度，最大可允许的电场宜为 200 kV/m，或者，最大表面电荷密度宜小于 2 $\mu C/m^2$。

12.5.4 灭火设备

灭火器喷射的材料会大量起电，并且该系统(或其部分)没有接地，会产生很高电压。因此固定式灭火系统的所有金属部件或导电部件都宜接地。

便携式灭火器可能也会产生电击，但是比较少见。总的来说使用灭火器的优点大于可能产生的电击危险。

13 接地和等电位联结

13.1 概述

到目前为止避免静电危害最有效的方法是将所有导体接地。这样将会避免最常见的问题，即电荷在导体上积聚，形成单个火花将所有存储的能量释放到大地或者其他导体上。

在有潜在可燃性环境的工业应用中，有很多导体，如果不适当接地，则会起电至危险水平。有些导体是设备或者装置必不可少的部分，这些部分包括：设备结构、反应容器、管线、阀门、存储罐和桶。其他包括偶然事故或失误造成的，例如，多余的导线长度、漂浮在中等或低电导率液体中的金属容器、绝缘材料表面上的金属工具或导电性液体池。

注 1：接地和等电位联结技术也用于电力供电系统和防雷保护，但是要求不同。第 13 章仅是对防静电的要求。

采用等电位联结降低导电物体之间的电势差，即使所构成的系统没有接地，也能使电势差达到安全等级。另一方面，接地使物体和大地之间的电势均衡。等电位联结和接地示例如图 4 所示。

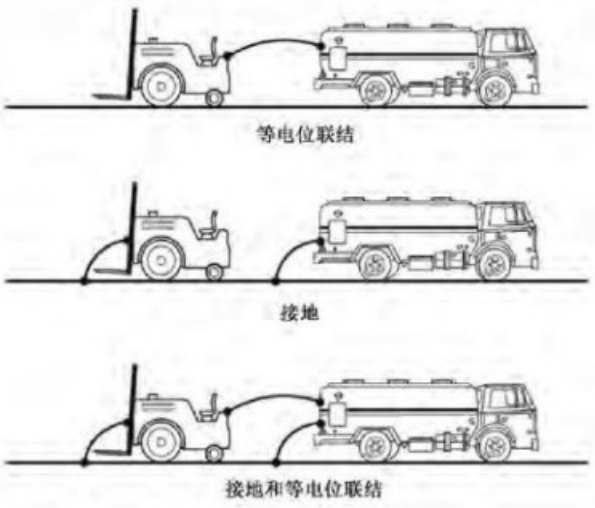


图 4 接地和等电位联结的区别

导电物体可以直接通过导电路径接地，或者与对地连接的其他导电物体等电位联结接地。由于与地连接，一些物体是内在等电位或者内在接地。

接地物体和地之间的总电阻是接地线、连接装置、沿预定接地路径的其他导电材料和接地电极(例

如，接地棒）到大地的阻值之和。

接地连接的大多数电阻可能在接地电极和大地本身之间。根据接触面积、土壤的电阻率和土壤中含水量的多少，接地电阻可能变化较大。

注 2：耗散性物体根据其电阻率，可能也需要接地。绝缘材料不能接地。

13.2 导体的静电耗散标准

13.2.1 基础理论

导电路径的电阻需要足够小，从而有利于电荷释放，并阻止电荷在导体上积聚形成危险电势。如果电势为 V，最大允许的电阻值 R 取决于导体上起电的速率，即起电电流 I。依据这个原理，接地总电阻不宜超过下式给出的可接受的最大值：

$$V=IR$$

当满足下列两个条件时，产生引燃放电：

a) 导体的电势差引起的电场强度超过环境的击穿强度；和

b) 火花释放的能量超过可燃性物料的最小点燃能量。

除了极少例外，接地的目的是为了防止所有引燃放电。因此需要确保导体电势达不到触发引燃放电水平。典型工业作业中触发引燃放电的电势至少是 300 V～1 000 V。用 100 V 作为静电耗散的安全极限值，接地总电阻值 R，可用下式计算：

$$R=100/I$$

式中，R 单位是欧姆（Ω），I 单位是安培（A）。

13.2.2 实践标准

当说明接地要求时，各种情况即起电电流 I 的所有值都宜考虑。因为已知起电电流范围 10 pA～100 μA，对应的 R 值是 10 TΩ～1 MΩ。对于最大的 I 值，1 MΩ 的对地电阻能够保证所有情况下的静电安全释放。但是，在大部分工业作业中 I 不超过 1 μA，被隔离导体的电容 C 不超过 100 pF（参见表 A.2 中例子），对于这种情况，100 MΩ 对地电阻可以充分释放静电。

与地良好接触的金属物体对地电阻宜小于 10 Ω。虽然静电耗散电阻值达到 1 MΩ 可以接受，但是电阻值大于 10 Ω 可能显示有问题（例如，腐蚀或连接松动），宜进行调查。重要的是所有连接可靠、永久，且不易产生质量下降。

小型导电物体如人，如果电荷释放时间小于 0.1 s，可认为静电接地。

为方便监控金属与金属的连接选择的电阻值和 1 MΩ（所有情况导体对地电阻的极限值）的阻值宜有显著区别。然而，最重要的是所有连接可靠、永久，且不易产生质量下降。

可移动式导电物体需要特殊的接地连接件，接地电阻不宜超过 1 MΩ。

绝缘材料不可能有效接地。因此，如果为保证在存在可燃性环境的场所安全使用，则需要采取其他控制措施。具体参考第 6 章。

在静电产生的风险非常低的 2 区和 22 区，金属部件仅为控制静电而接地可能没有必要。可采用耗散性或导电性材料避免静电积聚。虽然多数情况可接受 100 MΩ 以下的接地电阻，但此类设备所有部分适合的最大接地电阻是 1 MΩ。

表 22 列出了推荐的接地电阻。宜采用 100 V 试验电压，但是对于低电阻值，低电压可能更适合。

表 22　危险场所控制静电的最大接地电阻汇总

条款	安装类型	最大接地电阻[a,b,c,d,e]	备注
13.3.1.1	标准值	1 MΩ	在一些情况下，例如，<100 pF，可达到 100 MΩ
13.3.1.2	大型固定式金属设备（反应容器、粉尘仓等）	1 MΩ	结构通常内在接地。对于安装在非导电性支撑物上的设备要求特殊接地
13.3.1.3	金属管道	1 MΩ	结构通常内在接地。如果电阻大于 1 MΩ，需要通过接头特殊接地连接
13.3.1.4	移动式金属设备（桶、道路罐车或轨道罐车等）	1 MΩ	在装卸过程中通常需要接地连接。对于纯金属连接，建议接地点和金属部件临时连接点之间的阻值为 10 Ω
13.3.2	带有绝缘部件的金属装置（阀门等）	1 MΩ	在特殊情况下，可能接受 100/I Ω 的极限值，但是一般情况下如果不能满足 1 MΩ 的要求，宜采用特殊的接地连接。非常小的导电性设备不需要接地，见 6.2.3
13.3.3	有被隔离金属部件（例如，塑料管道上的螺栓）的绝缘设备	通常无适用值	由于常见的静电点燃危险和火灾隐患，除非能够证明不会积聚大量电荷，否则不建议使用这种材料。在 2 区和 22 区如果不会积聚电荷，则不需要接地
13.3.4	由耗散性材料制成的物体	1 MΩ～100 MΩ	由于不存在高度起电过程，边界是绝缘材料的物体不需要接地
11.2	可燃性环境中的地板	1 MΩ～100 MΩ	地板表面的接地电阻
11.3	可燃性环境中人员用于接地的鞋	100 MΩ	手持式金属棒到一个脚底金属板的电阻
11.3	在爆炸装置或物料处理区域人员接地的鞋	1 MΩ	手持式金属棒到一个脚底金属板的电阻。如果最小火花能量≤1 mJ，则最大接地电阻宜小于 150 kΩ
13.3.5	通过本质安全电路接地的外壳	100 MΩ	该电阻与低压应用中的绝缘电阻一样
13.3.6	装卸过程中的船舶	所有金属部件等电位联结	用独立的绝缘法兰，一边通过船与海接地，另一边通过岸上的接地连接接地
7.8.1.3	加油中飞机	25 Ω	遵循航空规定
7.8.3	加油中的车辆	100 MΩ	加油站前空地的泄漏电阻
		10 GΩ	通过一个轮胎，加油枪和空地之间的泄漏电阻
		1 MΩ	通过一根导电性加注软管组件在油枪和地之间的泄漏电阻。对于等电位联结的加注软管，最大值为 100 Ω

[a] 表格内容宜与对应段落内容一起使用。
[b] 宜使用相关条款规定的试验方法。
[c] 在 2 区和 22 区，仅在连续积聚电荷时需要接地。
[d] 为了预防雷电或满足电力电源接地要求，通常要求更小的接地电阻。
[e] 表格中的数值不适用于保护静电敏感类电气设备或者爆炸物。

13.3 实际系统的接地要求

13.3.1 全金属系统

13.3.1.1 概述

如果设备可以维护，接地电阻的标准值可以达到 1 MΩ。除非设备安装在绝缘支架上或者通过连接处产生的污染会影响绝缘，否则一般不需要特殊接地连接。

在一些情况下，接地电阻可达到 100 MΩ，尤其是导体的电容值不超过 100 pF(见 13.2.2，参见 A.3.2)时。

对于全金属系统，电阻通常宜小于 10 Ω。然而，对于使用如编织的等电位联结电缆的系统，电阻可不超过 25 Ω。

如果发现阻值明显增大，宜进一步检查查找可能的原因(例如，连接松动或腐蚀)。

13.3.1.2 主体结构

设备的主体结构及其主要部件，例如，反应器、磨粉机、搅拌器或容器，以及管道等，通常用螺栓或焊接接头永久性金属安装。它们通常与电源接地系统直接接触，接地电阻低，接地电阻达到 1 MΩ 以上的危险非常低，不用特殊接地连接即可达到较好接地效果，只有在装置的设计和使用不能保持低接地电阻时，才需要特殊的接地连接。一些设备内部部分与主体结构没有直接的电气连接，例如，安装在弹性或振动装配件或装载单元上的部分。如果不能接受规定的较大接地电阻(见 13.3.2)，这些部分宜采用特殊接地连接，确保良好接地。

13.3.1.3 管道

管道有时是临时装置，可包括绝缘管道的长度。因此，如果导电性管道部分经绝缘部分或配件与地隔离，则可能需要特殊的接地连接。由于这个原因，宜避免在整个金属管道中安装绝缘管或软管，因为这相当于中断了等电位联结。而且这种管道或软管可能引起传播型刷形放电。但是，为避免形成接地回路，有时需要绝缘法兰或者部分绝缘管道(见 13.3.6)。

在金属管道上所有接头一般不需要采用等电位连接件，只有因为设计原因，没有金属与金属接触时，才宜使用。当使用绝缘垫片及在管道外部刷漆而使螺栓不能与管道有可靠的电气接触时，才可能出现这种情况。

13.3.1.4 移动式金属物体

设备的一些部分，例如，筒、漏斗和手推车，不能够通过主装置结构实现永久接地。很多情况下，它们的接地电阻能远低于 1 MΩ，但是这并不可靠。因此，宜采用合适的临时接地连接。作为最低要求，在有可燃性混合物，同时可能产生静电时，如在容器装卸过程中，每个部分都宜接地。

移动式导电性物体(例如，装配有可导电性滚轴的手推车、金属桶等)通过与耗散性或导电性地板接触而接地。但是，如果在地板或者物体表面有如污垢或油漆等污染物，对地泄漏电阻可能增大，达到不可接受的数值，从而导致在物体上可能产生危险静电电荷。如果可能出现这种情况，该物体宜采用其他方式接地(例如，接地电缆)。建议电缆和接地物之间的连接电阻为 10 Ω。

在电荷可能积聚并引起静电危害期间，接地和等电位联结需要连续保持。在存在静电场的区域连接或断开接地或等电位联结，会由于感应产生静电造成危险(见 A.1.10)。

13.3.2 有绝缘部件的金属装置

金属结构装置通常包括绝缘部件，可能影响电气连续性和接地。示例为润滑油脂，和大量的聚合物如广泛应用的 PTFE 和聚乙烯。通常装置的所有金属部分直接接地或通过合适的接地连接装置接地，

所有的接地路径电阻都很小，但是绝缘部分可能产生问题。例如，之前提到的（见 13.2.2），小于 1 MΩ 的接地电阻可以充分地释放静电，在很多情况下，可以利用这个优势。一个重要的例子是用油脂润滑旋转轴、搅拌器等。试验表明通过轴承润滑油膜的电阻不可能超过 10 kΩ。这样，不用特殊的接地装置就能充分耗散静电。

注：经验表明，在一些高度起电过程中，由于电腐蚀作用，滚珠轴承使用寿命减少。可使用导电性/耗散性油脂减轻这种问题（例如，石墨油脂）。

当绝缘部件采用聚合物时，电阻基本都超过 1 MΩ，唯一的解决办法是将被隔离导体与相邻的接地金属部件等电位联结。

这种方法的实例如下：

a） 用 PTFE 填料和密封的球阀；

b） 由 PTFE 包裹的衬垫隔离的管道限位环；

c） 塑料连接件中间的被隔离金属管道段；和

d） 塑料管线末端的金属喷嘴。

如图 5 所示，让接地导体与流动的非导电物质接触可能产生电荷。因此为了耗散静电，流动的非导电物质中不宜放置接地导体。

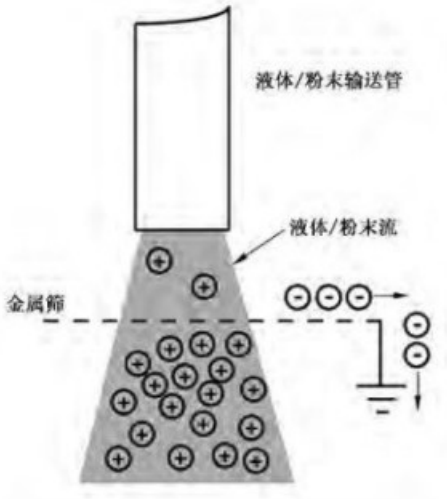


图 5 与流动绝缘物接触的危险接地导体

13.3.3 绝缘材料

玻璃和绝缘聚合物之类的材料越来越多用作设备的主要部分。采用这类材料，接地电阻很难符合防止静电危害的要求（见 13.2）。由于这些材料不能有效接地，所以积聚的电荷能保留很长时间。

绝缘材料放电能量相对较小，但是足以点燃敏感可燃性混合物。被这些材料与地隔离的导电性物体可能产生高能量的火花。具体示例如下：

a） 塑料管线上的金属部件，例如，连接螺栓和支撑法兰；

b） 通过一些类型的绝缘墙面覆盖层的金属网；和

c） 绝缘材料表面上的导电性液体（例如，水）池或层。

由于绝缘材料电导率较低，并且易于引起火灾，如果可能，在有可燃性混合物或可燃性液体的场合，宜避免使用绝缘材料。但是，有些情况，在不能完全排除可燃性混合的场所，仍然需要采用绝缘材料（例如，处理强腐蚀性液体时）。

13.3.4 导电性和耗散性材料

一些材料增加了聚合物的良好特性，例如，抗腐蚀性，同时体积电阻率很低，在与地接触时能防止电荷达到危险水平，这种材料越来越广泛应用。按照 13.2.1 计算的接地电阻通常范围是 10 kΩ～100 MΩ。对于一般用途，最大 1 MΩ 是合适的，但是如果不能满足，可采用计算值。大于 100 MΩ 仅适用于特殊情况，例如，没有强电荷产生机理，通过危险评定，建议用监控系统表明符合要求。

13.3.5 通过本安电路接地

由于工厂工艺流程的要求，本质安全设备或本质安全装置运行多数不需要接地。但是在危险场所，这类设备的导电性或耗散性外壳应静电接地。对于这些情况，即使内部连接可能不直接接地的电气设备，为了使外壳充分接地，并且使电流保持在安全水平，接地电阻应小于 100 MΩ。

13.3.6 船舶的接地

当从船舶上装卸可燃性液体时，可能同时产生静电电荷和爆炸性环境。因此，宜注意保证所有放电电路上的金属部分处于相同的电位。另外，当用金属线把船舶和海岸连接在一起时，船舶的阴极防腐系统和港口的电气设备，例如，电气机车，产生杂散电流，形成较大火花。为此，油轮与油码头国际安全指南(ISGOTT)推荐一种绝缘法兰(绝缘电阻≥1 kΩ)或者一种单一的不连续软管接头，用于连接从船舶到海岸的软管线，以及用于通过船舶和海岸的线缆所有导电部分独立接地。在可能存在的爆炸性环境中连接线路时，这种方法可以抑制杂散电流产生的引燃火花，并使线路的所有部分保持在相同电位。尽管如此，仍宜注意确保船舶和海岸之间没有被隔离的导体，例如，在一条线路上使用的两个绝缘法兰。出于这个原因，对于法兰或软管组件的绝缘电阻，上限是 100 MΩ 比较合理。

13.4 接地系统的建立及监控

13.4.1 设计

在设计阶段，宜检查确认装置可能的静电危害，并按照 13.3 的原则确定接地要求。如果没有其他接地方式，可以通过连接到敲入或埋入大地的金属棒或金属板实现接地。但是，特殊的接地设备，例如，等定位联结电缆、带子或者刷子，宜尽量少用。设计接地装置的重要特征如下：

a) 宜得到认可，并被认定对装置的安全操作必不可少。

b) 宜明显可见，或者对于装置的正确运行必不可少，如果出现任何问题，都宜能很快探测到。

c) 宜坚固，安装后不会受到高电阻率污物的影响，例如，腐蚀产物或油污。

d) 宜易于安装和更换。

e) 用于移动式设备的接地电缆宜装配有坚固的夹子，可以刺穿油漆或锈层。在操作之前宜先连接夹子，并一直保持到操作完成，危险静电全部耗散掉。

f) 在危险环境中如果忘记接地，建议用电晕尖端或装有内置电阻的特殊接地夹，缓慢靠近被隔离物体，使之安全放电。

如果等电位/接地系统都是金属，则连续接地路径上的电阻一般小于 10 Ω。这种系统也包括有多个部件的系统。如果电阻较大通常表明金属路径不是连续的，一般由于连接松动或腐蚀造成。电源电路或者防雷保护的接地系统比静电接地系统更充分。

注：NFPA 77 有各种接地装置、连接件和设备的示意图。

如果使用导线导体，等电位或接地线的最小尺寸由机械强度确定，不是由其载流能力确定。用于频繁连接和断开的等电位线宜是多股线或编织线。附加信息参见附录 A。

接地导体可以是绝缘(例如，护套电缆或塑料涂覆电缆)导体或非绝缘(即裸露)导体。非绝缘导体

的优点是故障易于检测，但是有涂覆的导体可能更耐机械损伤和腐蚀。

永久性等电位或接地连接宜采用铜焊或熔焊，使其在整个寿命周期内保证低电阻。暂时性连接可用螺栓、压力式接地夹或者其他特殊夹子。压力式夹子宜有足够的压力穿透任何保护涂层、锈层或者溢出材料，确保接触到主金属的接触电阻小于 10 Ω。

13.4.2 监控

静电保护接地检查被认为与其他目的检查完全不同，如电源和防雷接地系统的维护。宜在装置投入使用之前，在定期维护时，以及在其他维护或变更之后进行检查。

基础监控是测量装置和大地之间不同部分的电阻，但是宜另外进行目视检查也非常重要。这有助于发现接地装置的早期故障，降低变化导致导体断开的风险。

监控系统不仅宜能监控电阻，也宜能监测到电阻的任何变化。

14 对符合 GB 3836.1 设备的特殊要求

14.1 概述

在本部分中，产品静电试验的限值与 GB 3836.1 中的限值不同。本部分规定的限值在某些情况下更保守，因为它们适用的工业应用范围更广，这些应用中的物质状况与符合 GB 3836.1 的电气设备的情况区别很大。这些更保守的限值依据的理论模型有经验数据支撑。

为了将所有有关的静电要求集中起来，在本部分这一章中列出 GB 3836.1 对静电的要求作为资料，增加有用的解释性材料及对本部分其他内容的引用。

GB/T 3836.27—2019 中的试验方法与 GB 3836.1 的试验方法等效，但一些情况的气候条件不同。GB 3836.1 范围内的设备可按照 GB 3836.1 规定的气候条件进行试验。

注：在设备中利用符合 GB 3836.1 规定限制的产品和材料，未发现引起任何意外点燃。

14.2 外部非金属材料上的静电电荷

14.2.1 适用性

本条的要求仅适用于电气设备外部非金属材料，包括用于外壳外表面的非金属部件。

注 1：非金属涂层、薄膜、箔层和板通常附加在外壳外表面，为其提供附加环境保护。本条处理其储存静电电荷的能力。

注 2：通常认为玻璃不会储存静电电荷。

14.2.2 避免静电电荷在Ⅰ类或Ⅱ类电气设备上积聚

电气设备宜设计成在正常使用、维护和清洁时避免由静电电荷引起点燃危险的结构。宜通过下列一项或多项措施满足该要求：

a) 合理选材，使其在按 GB/T 3836.27—2019 的规定测量时，表面电阻应至少符合下列一项要求（见 6.2.1）：

——在相对湿度为(30±5)%的测量条件下，不大于 100 GΩ；

——在相对湿度为(50±5)%的测量条件下，不大于 1 GΩ。

注 1：更多信息见 6.1。

b) 限定外壳非金属部件的表面积，按照 6.3.2 确定，数值见表 23。

如果非金属材料外露面积用接地框架围住，则表面积可增加四倍（见 6.3.3）。

或者，对于有非金属表面的长条形部件，例如，管子、细棒或绳索，不必考虑表面，但其直径和宽

度不宜超过表 23 规定的值。

注 2：外部电路连接电缆不属于第 14 章的范围。外部电缆的信息见 GB/T 3836.15。

注 3：对于液体管道和软管的要求不属于第 14 章的范围。对于液体管道和软管的要求见 7.7。对于固体管道和软管的要求见 9.3.3。

c) 限制涂覆在导体表面的绝缘层，绝缘层厚度宜至少符合下列一项要求：

——绝缘层预期不会承受大于人工摩擦的较强起电过程(见 3.13)，且厚度对于Ⅰ类、ⅡA、ⅡB 不大于 2 mm，或者对于ⅡC 不大于 0.2 mm(见表 23 和 6.3.4.2)。

——按照 GB/T 3836.27—2019 测量时，通过绝缘层厚度测量的击穿电压不大于 4 KV。

注 4：根据 GB/T 1408.2，施加直流电源的绝缘材料，用直流进行击穿电压试验，试验方法见 GB/T 1408.1，并采用 GB/T 1408.2 的附加要求。试验方法和附加要求也在 GB/T 3836.27—2019 中给出。

d) 采用导电涂层的措施(见 6.3.5)。非金属表面可覆盖黏结牢固的导电涂层。涂层和黏结点(拟固定安装的设备)或外壳上最远的电位点(便携式设备)之间的电阻不宜超过 1 GΩ。宜按照 GB/T 3836.27—2019 测量电阻，但要使用 100 mm^2 的电极在表面和黏结点之间或外壳上最远的电位点之间最不利的位置测量。

注 5：对涂层材料有影响的环境条件包括气流中的小颗粒、溶剂蒸气和类似的东西。

e) 通过采用本部分的任何其他措施，避免静电电荷点燃危险。

f) 按照 GB/T 3836.27—2019 在最不利条件下测量，最大转移电荷在表 23 的限值范围内。

g) 对于特殊情况，GB 3836.1 允许使用不符合 a)～f)要求、且具有放电危险的固定式设备，但是需要标志“X”。对于这种情况，使用说明书宜向用户提供指南，通过使用措施将静电放电危险降至最小。如果适用，设备还宜按 GB 3836.1 的规定设置静电电荷警告牌。如果在使用过程中预期产生危险静电放电，则不宜采用加标志“X”的方法(例如，手持式设备或者连续起电的固定式装置)。

注 6：例如，对于操作人员接触到的电气设备的绝缘外壳，仅在清洁、维护和修理时，使用标志“X”。

表 23 GB 3836.1 范围内的设备绝缘固体材料、隔离导电部件或耗散性部件用于危险场所的限值

项目	Ⅰ类	Ⅱ类			Ⅲ类		
	EPL Ma、Mb	类别	EPL Ga	EPL Gb	EPL Gc	EPL Da	EPL Db	EPL Dc
a) 表面积	≤10 000 mm^2	A	≤5 000 mm^2	≤10 000 mm^2	≤10 000 mm^2	无限值		
		B	≤2 500 mm^2	≤10 000 mm^2	≤10 000 mm^2			
		C	≤400 mm^2	≤2 000 mm^2	≤2 000 mm^2			
b) 棒、杆宽度	≤30 mm	A	≤3 mm	≤30 mm	≤30 mm	无限值		
		B	≤3 mm	≤30 mm	≤30 mm			
		C	≤1 mm	≤20 mm	≤20 mm			
c) 避免刷形放电的绝缘涂层厚度	≤2 mm	A	≤2 mm			无限值		
		B	≤2 mm					
		C	≤0.2 mm					
c) 避免任何引燃放电的绝缘涂层厚度	不准许	不准许	不准许	不准许	不准许	如果面积>500 mm^2，≥8 mm		

表 23（续）

项目	Ⅰ类	Ⅱ类				Ⅲ类		
	EPL Ma、Mb	类别	EPL Ga	EPL Gb	EPL Gc	EPL Da	EPL Db	EPL Dc
d) 转移的电荷	≤60 nC	A	≤60 nC			固体绝缘无限值 ≤200 nC[a]		
		B	≤25 nC					
		C	≤10 nC					
e) 接地金属部件的电容	≤10 pF	A	≤3 pF	≤10 pF	≤10 pF	≤10 pF[b]		
		B	≤3 pF	≤10 pF	≤10 pF			
		C	≤3 pF					

注 1：b)项的宽度值适用于宽度或直径较小的薄管道、电缆护层和其他绝缘材料。

注 2：a)项和 b)项的限值不是防止放电的绝对值，仅是将引燃放电降至通常可接受的低水平。

注 3：c)项的限值适用于导电性或耗散性材料的绝缘涂层或绝缘层。

注 4：d)项的限值保证不会出现引燃放电。

注 5：d)项的所有值有一定的安全裕量。现在的工作表明，用于ⅡB的值的安全裕量比所有其他值低。为了使所有安全裕量相当，ⅡB的值从 30 nC 降至 25 nC。但是这并不表示以前的值不安全，也不表示需要重新做试验。

注 6：再分类的依据是可能安装设备的爆炸性气体环境的最大试验安全间隙(MESG)或最小点燃电流比(MICR)(见 GB/T 3836.11)。详细信息见 C.6 和 D.3。

注 7：EPL Gc 的值不排除高起电过程的可能性。人工摩擦通常不看作是高起电过程(见 3.13)。

注 8：对于如盖用螺钉等未接地的金属紧固件，电容不大于 3 pF 通常可以接受。

[a] 仅对未接地的导电性部件或耗散性部件产生火花放电有效的值。

[b] 对于承受粉尘快速移动的管道或管线中使用的设备，较低的电容限值在考虑之中。

14.2.3 避免静电电荷在Ⅲ类电气设备上积聚

对于粉尘云或粉尘层易燃的绝缘表面，仅通过人工摩擦不可能产生静电放电。但是，如果不排除高起电过程(见 3.13)，涂漆/涂覆的金属设备和塑料材质设备的设计宜能避免在正常使用时由传播型刷形放电引起的点燃危险。

塑料外壳不能起电至能够产生传播型刷形放电的危险电荷密度。然而，外壳内部距离外表面8 mm内不宜安装延伸的平面导电表面。

注 1：内置印制电路板可被看作是一个延伸的平面导电表面，如果设备不可能承受多电荷产生机制(例如，粉末气动输送过程，或粉末涂覆过程电荷喷射)，则不适用于小型手持设备。手持设备正常操作起电不认为会导致多电荷产生机制，因此不会导致可能产生传播型刷形放电的情况。

注 2：面积不超过 500 mm^2 的单一平面导体不认为是可延伸的平面，这允许支撑销或支架用于外壳内导电平板的安装。

金属部件如测试棒或类似元件外部采用厚度至少 8 mm 的绝缘可以防止产生传播型刷形放电。当评定使用或规定的绝缘层最小厚度时，允许在正常使用时出现的任何预期磨损。

如果用表面积超过 500 mm^2 的塑料覆盖导电材料，并且不能排除比人工摩擦强的高起电过程(见 3.13)，则塑料宜具有下列一项或多项特性值(见 6.3.4.3)：

a) 合理选材使材料表面电阻符合 14.2.2 规定的限值；

b) 按照 GB/T 3836.27—2019 规定的方法通过绝缘材料的厚度测量，击穿电压不大于 4 kV；

c) 金属部件上的外部绝缘厚度不小于 8 mm。

14.3 外部导电部件上的静电电荷

设备的所有外部导电部件(金属、导电塑料等)宜用最大 1 MΩ 的接地电阻接地。对于电容小于 100 pF 的部件，最大 100 MΩ 的接地电阻可以接受(见表 22)。

对于可接触的金属部件(例如，塑料外壳上的铝标签)，接地电阻大于 100 MΩ 时可能产生静电电荷，成为点燃源，宜按照 GB/T 3836.27—2019 的电容试验方法进行试验。最大允许值见表 23。

如果满足了表 23e)对未接地金属部件的电容要求，则 14.3 的要求不适用。

附 录 A
（资料性附录）
静电的基本原理

A.1 静电电荷

A.1.1 引言

静电电荷的主要来源是接触产生电荷起电。如果两个之前不带电的物质接触，通常在它们的公共边界会产生电荷转移。分开时，每个表面将携带极性相反的等量电荷。如果放置在其他带电荷物体产生的电场中，或者靠近高电位导体，导电性物体就会起电。如果带电荷颗粒或电离微粒在物体上积聚，则任何物体都会起电。

A.1.2 接触起电

固体/固体、液体/液体或固体/液体都会产生接触起电。气体接触不会起电，但是如果气体中悬浮有固体颗粒或液滴就会起电，气体就会携带静电电荷。高压气体释放引起绝热膨胀，使空气中凝结的水或凝结的气体（例如，二氧化碳）产生接触起电。

最初不带电的不同固体与大地等电位，当它们接触时，少量的电荷可以从一种材料传递到另一种材料。所以两种材料就带极性相反的电荷，从而在它们之间就产生了一个电场。如果材料被分开，由于相反的电荷和两者之间电势差的存在，就需要做功来克服随着距离增大而线性增加的吸引力。较高的电势差有驱使电荷回到剩余接触点的趋势。两种导体电荷完全重新组合，分离后任意一种材料上几乎没有剩余电荷。

如果一种材料或者两种材料都是非导体，电荷不会完全重新组合，分离后材料会剩余部分电荷。因为当接触时电荷间的距离非常小，尽管涉及电荷数量非常少，但是分离时产生的电势会轻松达到几千伏。对于粗糙的实际表面，如果在接触和分离时涉及摩擦，实际的接触面积也会增加，那么电荷数量就会增加。

A.1.3 液体接触起电

液体内部接触起电过程基本相同，但是它取决于离子或微小的带电粒子。一种极性的离子（或粒子）能附着在接触面上，然后它们吸引相反极性的离子，在接触面附近液体中形成弥散电荷层。如果液体之后相对于接触面移动，它能够带离一些电荷层，从而引起相反电荷的分离。典型的例子是液体沿着固体壁（例如，管道、泵、过滤器）流动、液体搅拌或搅动、液体喷洒或雾化。如果液体含有不融合的相，如悬浮的微细固体或者非常分散的液体或者气泡，由于接触面积增加很多，因此产生大量电荷。

与固体相同，如果液体充分绝缘防止重组，那么电荷分离所做的功会产生高压。固体/液体和液体/液体接触面上都会出现这种情况。

低电导率液体通常产生危险起电。喷洒液体时，无论液体电导率大小，由于电荷快速分离，液体雾化或喷洒时能产生大量电荷。

虽然高电导率液体通常携带非常少的电荷，但是也有高起电导电性液体，尤其是一些有机醋酸盐、乙醚和高酮，可能需要附加安全措施。这种液体包含乙酸乙酯和乙酸异丙酯，但是不包括丙酮。

生物燃料参见 C.8。

A.1.4 管道中流动液体产生电荷

A.1.4.1 固定直径的管道

液体通过管道流动时，液体产生电荷，管道壁产生极性相反的等量电荷（如果是导电性管道且接地，管道壁上的电荷立即耗散掉），导致电荷分离。湍流比层流产生的电荷更多。考虑到工业生产装置中的液体通常是湍流，这里仅仅考虑更严酷的湍流。对于湍流液体，长管道中产生的流动电流基本与速度的平方成正比。

注：对于层流液体，流动电流与速度成正比。

如果液体进入管道时不带电荷，液体携带的电荷密度以及形成的流动电流将随着在管道中移动而增大，如果管道足够长，会逐渐接近一个固定值。对于大多数低电导率液体，尤其是饱和烃液体，电荷密度的固定值 $\rho\infty$ 不取决于液体的电导率或液体的介电常数，而是与流速 v 除以管道直径 d 大约成正比：

$$\rho\infty \approx Kv/d$$

式中，K 是常数，单位为库仑秒每立方米（Csm^{-3}）。

注：以前也用过其他表示方法，历史上 $\rho\infty \approx Kv$（肖恩定律）比上述方法用得更多流量限值表示为 vd 限值。但是，$\rho\infty \approx Kv/d$ 似乎与报告的测试值更匹配（Walmsley and Mills 1992，Britton 和 Smith 2012），更接近于管道起电的理论公式（Koszman and Gavis 1962，Walmsley 1982），通过选择合适的常数 K，可以得出与现有条件相同的电流。通过对较小直径的管道（≤50 mm）进行测量得出最大肖恩常数，然后对较大管道（例如，100 mm）测得的最大电流进行高估。当该数据与上述公式匹配时，与依据管道直径相反，较大管道中产生较低电荷。

K 值有很多建议数值。对于大多数烃类，1.0 μCsm^{-3} 看起来是合理的，对于其他记录较少的液体类型或有起电添加剂的液体，可能需要较大数值。在普通管道中，1.6 μCsm^{-3} 数值涵盖了所有的记录的起电级别。

对于实际的速度和管道直径范围（$v=1$ m/s～10 m/s，$d=0.025$ m～0.2 m），电荷密度在 5 $\mu C/m^3$ 和 400 $\mu C/m^3$ 之间。

实际上，管道可以认为无限长，如果

$$L \geqslant 3v\tau, \tau = \varepsilon_r \varepsilon_0 / \gamma$$

式中：

L ——管道长度，单位为米（m）；

τ ——液体静电释放时间，单位为秒（s）；

ε_r ——液体相对介电常数（对烃类 ε_r～2）；

ε_0 ——自由空间介电常数（8.85×10^{-12} F/m）；

γ ——液体电导率，单位为西门子每米（S/m）。

有证据表明，管道流动产生的电荷密度与低于取决于燃油电导率限值的电导率成正比。因此电导率最低时，电荷密度并不是最大。对于这种情况电导率限值似乎与黏度成反比。例如，Hearn（2002）和 Walmsley（2011）记录，当电导率分别达到 50 pS/m 以及到 200 pS/m 时，汽油的电荷与电导率成正比。而 Walmsley 和 Mills（1992）记录的数据，柴油的黏度比汽油约高十倍，表明电导率达到大约 7 pS/m 时，电荷密度与电导率成正比。而润滑油黏度更高，非常低的电导率能达很高的起电电荷（见 7.4）。因此，对于黏度不高于车用柴油的燃料和溶剂，可以合理的假定当电导率为 3 pS/m 时起电电荷开始下降，这是最不利的数值。

注：这允许低于上述柴油数据有一个安全裕度。对于低黏度液体，例如，汽油，这个裕度可能更大。

高黏度液体，例如，润滑油，是一种特殊情况，在 7.4 中另行考虑。对于这种液体，电导率极低时预期电荷开始降低。因此，电流减小至低于 3 pS/m 不宜看作适用于比车用柴油年度高的液体。

虽然通常不推荐使用绝缘管道，但是可用于一些特殊情况。对液体在绝缘管道或软管中流动产生

电荷发布的数据很少。但是，低电导率液体，$<25\varepsilon_r$ pS/m，流经绝缘管道时，产生的流动电流与导电性管道类似，对于无限长的管道，可用导电性管道的公式估算出电荷密度。

当包含不融合的第二相介质，如分散液或悬浮固体的液体，通过管道用泵抽送时，起电率远远大于单相介质。由于存在多种影响因素，起电水平很难预测。

A.1.4.2 不同直径的多种截面管道

通向液体槽的管道如果沿着它的长度直径不同，有 N 个部分直径各不相同，假定指数型（欧姆定律）释放特性，第 j 部分到液体槽入口处的电荷密度是：

$$\rho_j = K\,(v_j/d_j^n)\,[1-\exp(-L_j/v_j\tau)\,]\exp(-t_{resj}/\tau)$$

式中，v_j、d_j 和 L_j 分别是流速、直径和 j 部分的长度，t_{resj} 是 j 部分的出口末端和液体槽间的滞留时间。τ 是液体的放电时间。乘方 n 用于建议的分析（$n=1$，电荷密度与 v/d 成正比）或肖恩定律分析（$n=0$，电荷密度与 v 成正比）。通常不建议使用肖恩定律分析，但是使用限值 vd 时仍然需要使用。

当 $t_{resj}>3\tau$ 时，j 部分产生的电荷到液体槽入口处剩余非常少，所以可液体槽上游部分大于 3τ 部分的电荷可以忽略。由于允许双曲线放电最大有效放电时间为 10 s，这样就出现了在 7.3.2.3.5.2 使用的放电区域定义。

水槽入口总电荷密度是放电区域内所有部分的总和，即：

$$\rho=\sum_{j=1}^{j=N}\rho_j = K\sum_{j=1}^{j=N}(v_j/d_j^n)\,[1-\exp(-L_j/v_j\tau)\,]\exp(-t_{resj}/\tau)$$

这个公式在实际使用时比较繁琐，所以通过忽略指数项简化，把最糟糕（苛刻）部分的电荷用于整体管道。这两项简化使估算的电荷密度大于实际值，所以简化估算过程同时增加了安全裕度。

去掉指数项，j 部分的简化量是：

$$\rho = K\,(v_j/d_j^n) = (4K/\pi)\,(F_T/d_j^{n+2})$$

式中，F_T 是液体槽的体积流速。公式显示最糟糕（苛刻）部分是直径最小的部分。最苛刻部分的电荷密度使用到整体管道时，液体槽入口电荷密度估算为：

$$\rho = (4K/\pi)\,(F_T/d_w^{n+2}) = Kv_w/d_w^{n+2}$$

式中，w 代表最苛刻（直径最小）部分。水槽入口处相应的流动电流为：

$$I = (\pi K/4)\,v_w^2 d_w^{2-n}$$

A.1.4.3 不同直径多种截面的分支管道

分支管道是，上游是单一管道，在一个或多个阶段，分成多个下游部分，通向独立的液体槽。对于这种管道，计算特定部分到特定液体槽入口的电荷密度计算稍微有点复杂，因为当同时加注多个液体槽时，上游部分的流速会大一些。

对于这种情况，j 部分对入口的电荷密度简化为：

$$\rho = Kv_j/d_j^n$$

最苛刻部分仍然是 $v_j/{d_j}^n$ 值最大的部分，但是速率 v_j 必须从多个液体槽同时注满时最大可能流速 F_S 计算得出，而不是从到单个液体槽估算的最大流速 F_T 计算出。

在液体槽入口中，上游部分提供给流动电流的最苛刻情况是：

$$I = (\pi K/4)\,v_w^2 d_w^{2-n}/N_S$$

$N_S = F_S/F_T$ 是管道部分中的最大可能流速与流入液体槽中流速的比率。因此，同时供给几个液体槽、最苛刻管道部分最大可接受速度或 vd 限值（基于 $n=0$，vd 限值），可在液体槽确定的标准值（未分支管道）增加系数 $N_S^{1/2}$。

A.1.5 过滤器中产生电荷

管线中的过滤器能够成为大量电荷的产生器。粗滤器产生电荷类似于管道流动产生电荷，精细过

滤器产生的电荷能够超过管道流动产生的电荷几个数量级。

当电导率低于 1 pS/m 时，精细过滤器产生的电荷密度仍然很高。这与管道流动产生电荷不同。经过过滤器到达液体槽的电荷，电荷密度可能非常大，而且放电时间非常长，从而导致非常高的电势。所以把精细过滤器放在液体槽上游足够距离非常重要，从而使下游管道和/或放电槽中的滞留时间至少是三倍的放电时间，从而使电荷耗散到安全水平。根据过滤器的精度不同，用 30 s 或 100 s 的默认滞留时间表示最苛刻的实际情况(见 7.5)。

A.1.6 液体搅拌和混合过程中产生电荷

搅拌和混合过程使液体和接触的固体表面之间产生相对运动。如果液体不包含第二相不融合介质，则产生的电荷通常不是太多。如果连续相电导率低，则带有分散性液体或者悬浮固体的液体搅拌时容易产生很多电荷。

A.1.7 沉降电势

低电导率液体中悬浮的固体颗粒或液滴沉降能导致电荷分离，因此能通过液体在重力方向生产电势差。在大型液体槽中，例如，用泵把油水混合物输送到液体槽或搅拌水底部后，导致的沉降电势能导致点燃危险。气体通过液体，例如，气泡上升，也能搅动水底或其他沉积物，从而能够增大液体槽内的电场。

A.1.8 液体射流的分解

液体射流分解成小的液滴，例如，液体槽清洗过程中射流喷射到障碍物上，无论液体的电导率高低，形成的喷雾或薄雾都会有很多电荷。一般来说，液体导电性越强，产生的电荷越多。例如，喷射水比喷射油产生的电荷多，但是油水混合物产生的电荷比单纯水或油产生的电荷多。

A.1.9 粉末接触起电

考虑粉末积聚的电荷水平时，单位质量的粉末携带的电荷(荷质比)，通常是一个重要参数。对于介质电阻率和绝缘粉末(见 9.1 的定义)，典型值介于 10 pC/kg 和 1 mC/kg 之间，并且主要取决于过程本身(接触后的分离速度)、粉末的细度(与表面积比)及其化学成分，包括污染物(电阻率和相对介电常数)。表 A.1 给出了不同过程中中等介电常数粉末产生的电荷量的测量数据。

表 A.1 粉末上积聚的电荷

操作	大量的电荷密度 μC/kg
摩擦起电粉末涂覆	10 000～1 000
气动输送	1 000～0.1
粉碎	100～0.1
研磨	1～0.1
卷轴滚动传输	1～0.01
倾注	1～0.001
筛分	0.001～0.000 01

A.1.10 感应起电

任意带电物体周围存在电场。导体放入电场能够改变附近区域电势的分布，从而引起导体内相反电荷分离。如果导体与地绝缘，根据其在电场中的位置导体可以产生电势，也就是说通过感应起电。由于它的电势，加上它携带的分离电荷，导体能够产生静电火花。

如果电场中的被隔离导体临时接地，则会产生火花放电。火花使导体电势降低到零，导体降低电势的同时获得了静电荷。当被隔离导体从最初带电荷的物体附近移开时，剩余电荷能引起二次火花。这种类型的感应火花可能会有危险，例如，当人与地绝缘在带有静电电荷的物料附近走动时。

A.1.11 传导产生电荷转移

当带电荷的物体接触未带电荷的物体时，两者之间就共享了电荷。这可能是静电起电的主要来源，例如，带电荷的喷雾、薄雾或粉尘撞击或沉降到固体表面上。当一连串的气体离子在最初不带电的物体表面积聚时，也能发生类似的电荷转移。

A.1.12 通过电晕放电起电

物体起电的一种方法是，用几十千伏负电压的金属尖喷射电子。这种起电机理也会偶然发生，例如，静电喷射设备的高压喷涂点或 D 型 FIBC 电晕针。

A.2 静电电荷积聚

A.2.1 概述

在起电过程中分离之后，静电电荷通过直接接触或接地会很快重新组合。绝缘体由于本身的电阻，电荷可以保留；而导体要保留电荷，则需要与其他导体以及大地隔离。

正常条件下，纯净的气体是绝缘体。粉尘云、薄雾或喷雾中悬浮的颗粒，不管导电性如何，悬浮颗粒上的电荷可以保留较长时间。

对每一种情况，电荷以系统中非导体的电阻确定的速率流失，这个过程被称为放电。电阻、电阻率或者电导率能否造成危险，主要取决于工业过程，这一点在后面予以讨论。

许多工业过程中，持续产生的电荷在被隔离的导体上积聚。例如，隔离的金属容器中倒入带电荷的液体或者粉末时，电荷输入和泄漏的速率之间平衡造成被隔离导体的电势。等效电路如图 A.1 所示，导体的电势用下式计算：

$$V=IR\{1-\exp[-t/(RC)]\}$$

式中：

V ——导体电势，单位为伏特(V)；

C ——电容，单位为法拉(F)；

R ——对地泄漏电阻，单位为欧姆(Ω)；

I ——静电起电电流，单位为安培(A)；

t ——起电时间，单位为秒(s)；

当 t 足够大时达到最大电势 V_{max}。

$$V_{max}=IR$$

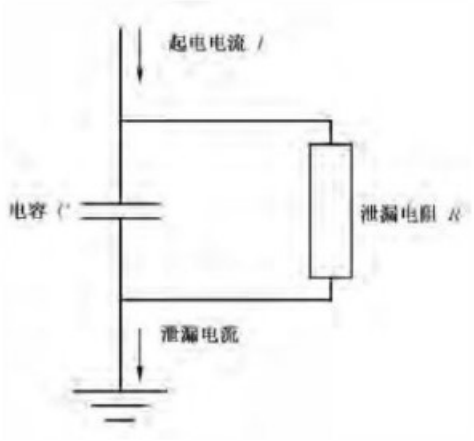


图 A.1　静电起电导体的等效电路

通常可以测量被隔离导体的泄漏电阻和电容，用于确定电荷积聚是否达到危险等级。但是对与空气中悬浮的粉尘和薄雾，这种评定方法不适用。

A.2.2　液体中电荷积聚

液体中是否积聚电荷取决于两种相反的作用：电荷生成和电荷释放。

液体容器的导电性能影响电荷的释放速度。在没有电荷生成的情况下，液体中电荷密度呈指数率衰减，典型的释放时间如下：

$$\tau=\varepsilon_r\varepsilon_0/\gamma$$

式中：

τ ——释放时间；

ε_r ——液体相对介电常数(饱和烃液体大约是 2)；

ε_0 ——自由空间介电常数(8.85×10^{-12} F/m)；

γ ——液体电导率。

指数释放是指在释放时间内，电荷衰减至原来的 37%(更精确一点，衰减至 1/e，e 是自然对数的基数)。例如，某电导率 $\gamma=1$ pS/m (10^{-12} S/m)的烃类液体，释放时间是 $\tau=18$ s，而电荷下降到原来的 50%所用的时间是 $0.7\tau=13$ s。

即使电导率很低的液体，在电荷密度很高时，电导率高于其未带电荷时的电导率。这就是所谓的双曲线电荷释放。结果是，电导率很低的液体电荷耗散更快，电荷密度比上面计算的结果更大。

这种现象的有益之处在于，无论电导率大小或者电荷密度非常高，100 s 的滞留时间足够把过滤器下面水箱中的电荷密度降低到与管道液体的电荷密度相当的水平。

液体的电导率划分为高($\gamma>10\ 000$ pS/m)、中(100 pS/m$<\gamma<$10 000 pS/m)或低($\gamma<100$ pS/m)三个等级。就烃类来说，50 pS/m 是低电导率的限值(见 7.1.4)。在表 7 中给出了部分液体的电导率及放电时间。

通常低电导率液体电荷会积聚至危险水平。对于中级导电性液体，如果起电速率较高，例如，流动速度高或者搅拌某些悬浮物时，电荷积聚也会达到危险水平(见 7.7 和 7.9)。高电导率液体接地时电荷积聚的危险水平仍是未知数。

雾或者喷雾中悬浮的带电荷液滴，由于周围环境高度绝缘电荷不会耗散。电流传导不会引起电荷释放，而下列过程会引起电荷释放：液滴附着在或者冲击到箱体结构上；在电荷密度较高时，槽内突起物产生电晕。因此，无论液体导电性如何，带电荷的薄雾电荷释放速度通常比较缓慢。

A.2.3 粉末电荷积聚

如果散状粉末的体积电阻率很高，那么即便容器接地或者与接地金属接触，粉末上的电荷也仍然不会消失。电荷耗散至原有值的 1/e(e 约为 2.718)所需要的时间被称为释放时间，用下式表示：

$$\tau = S\varepsilon_r\varepsilon_0$$

式中：

ε_r ——粉末相对介电常数；

ε_0 ——自由空间介电常数(8.85×10^{-12} F/m)；

S ——粉末体积电阻率。

体积电阻率为 10 GΩ·m，相对介电常数为 2 的情况下，释放时间大约为 0.2 s。这说明，0.2 s 之后，散状粉末接地释放了 2/3 的电荷。

由于空气绝缘性能良好，空气中悬浮的粉末(粉尘云)电荷衰减不受粉末体积电阻率的影响。只有在粉尘相互作用或接触到设备时粉尘颗粒上的电荷才会释放。对于这些情况，主要是空气流动引起颗粒运动、重力及空间电荷场的作用造成电荷衰减。

不论是散状粉末还是空气中悬浮的粉末，它们的电荷量都取决于放电开始的时间。当电场(通常在粉尘堆或粉尘云的边缘最强)达到空气的介电强度 3 MV/m 时，开始放电。

A.3 静电放电

A.3.1 概述

只有当液体或者固体上的电荷向其他物体放电，或者主要是对地放电时，才会产生危险。放电类型和点燃能力差别很大。在 A.3.2～A.3.7 分别予以介绍。

A.3.2 火花

两个导体之间、液体或者固体放电产生火花。放电过程特征明显，形成一个轮廓分明、携带高密度电流的发光放电通道。通过整个通道后，气体全部电离。放电过程十分迅速，并产生刺耳的声响。

当导体之间的电场强超过大气的介电强度，导体之间就会产生火花。导体击穿所需电势主要取决于导体的形状以及导体之间的距离。在正常空气环境中，间距 10 mm 及以上的两个扁平面或半径面间的击穿强度约为 3 MV/m，随着间距缩短，击穿强度增大。

由于放电是在两个导体之间产生，储存的大部分电荷会在火花产生时消耗掉。对于多数实际情况，这一过程消耗了大量储存能量。一个导体与另一个接地导体之间产生的火花能量可以用下式计算：

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

式中：

W ——耗散的能量，单位为焦耳(J)；

Q ——导体上的电荷数量，单位为库伦(C)；

V ——电势，单位为伏特(V)；

C ——电容，单位为法拉(F)。

上面得出的是能量的最大值，如果对地放电通路上存在电阻，则火花能量会更小。导体电容的典型值见表 A.2。

表 A.2　导体电容的典型值

物体	电容 pF[a]
小金属物体(勺子、软管喷嘴)	10～20
小容器(50 L 的桶)	10～100
中等容器(250 L～500 L)	50～300
周围紧邻接地结构的大型设备(反应槽)	100～1 000
人体	100～200
[a] 1 pF=1×10^{-12} F。	

计算火花放电能量的实例：

研磨装置研磨出来的粉末装入未接地的金属容器中。对于这种情况，起电电流 I 能达到 100 nA，容器与地之间的泄漏电阻 R 是 100 GΩ，容器电容 C 是 50 pF。那么容器的最大电压：

$$V_{max}=IR=10\ \text{kV}$$

火花放电释放的最大能量：

$$W_{max}=\frac{1}{2}CV_{max}^{2}=2.5\ \text{mJ}$$

A.3.3　电晕放电

电晕放电发生于导体的尖锐部分或者边缘(以下简称“尖端”)，即曲率高的表面部分。当这样的接地导体靠近高电势带电体，或者导体电势很高时，就会出现电晕放电。如果尖端表面的电场非常高(高于 3 MV/m)，放电过程则会加强。离导体表面越远，电场越弱，所以电离区域离尖端不会太远。它能直接指向带电体，或者对于高电势导体，它会直接远离导体。

电晕放电很难看到，但是在暗光环境下，临近中心点上能看到光晕。在电离区域外，离子会慢慢耗散，它们的极性取决于场强方向。放电的能量密度远远小于火花放电，因此，电晕放电通常不具点燃性。尽管如此，在某些情况下，例如，如果尖端导体的电势增加，则它与另一个物体之间的电晕能形成火花。

A.3.4　刷形放电

当圆形(与尖状相反)接地导体朝带电的绝缘物体移动时，会产生刷形放电，例如，人的手指与塑料表面之间、接地金属突起和液体槽内液体表面之间。

刷形放电时间非常短，在适当环境下，能看到、听到。与火花放电不同，刷形放电仅涉及与系统有关的一小部分电荷，并且放电不会将两个物体连接起来。尽管如此，刷形放电能点燃大部分的可燃性气体、蒸气和杂混物。但是，现有技术表明，如果不存在可燃性气体或蒸气，无论粉尘的最小点燃能量(MIE)大小，刷形放电不会引燃可燃性粉末。

试验证明，当刷形放电通过气体转化成火花放电时，能够点燃 MIE 达到 3.6 mJ 的气体环境。但是，这些试验没有给出粉尘刷形放电可燃性的任何信息。

注：刷形放电能量在空间和时间上的分布与火花放电有很大差别。刷形放电对气体和蒸汽的引燃性能与对粉尘的引燃性能不同。

A.3.5　传播型刷形放电

对于这种类型的放电，需要有电阻率和介电强度很高的片状(或分层)材料，材料两个表面高度起电

(表面电荷密度高),但极性相反。

两个表面之间电气连接(短路)引起放电。这种放电通常具有明亮的树状结构,并伴有非常大的爆裂声。带双极性电荷的薄板可以在"自由空间",或者,更常见的是,一个表面与导电性材料(通常接地)紧密接触。

下列方式可实现短路:

a) 击穿表面(机械或电击穿);

b) 两个电气连接的电极同时接近表面;或者

c) 一个表面接地时,用一个接地导体接触另一个表面。

放电从绝缘表面汇集了大部分分散电荷,然后流通到发生短路的地方。这种类型的放电条件很难实现,尤其对于厚的板材。大多数情况下,厚度超过 10 mm 足以防止传播型刷形放电。厚度小于该值的板材,表面电荷密度至少需要 250 $\mu C/m^2$。

另一项要求是,即使对于像薄膜、网状物和板材这样的平面,带电荷的板材击穿电压至少需要 4 kV,对于纤维织物,至少为 6 kV。这说明,油漆层上的电荷通常不会引起传播型刷形放电。

注:厚的编制材料或多孔材料能够承受 4 kV 以上的电压,如果它们包含不透水材料,即能够承受 4 kV 以上电压的材料,则不会引起传播型刷形放电。

这种放电释放的能量会非常高(1 J 或更多),取决于带电荷板材的面积、厚度和表面电荷密度。这种放电能够点燃爆炸性气体、蒸气和粉尘环境。

A.3.6 闪电状放电

原则上,当带电荷的颗粒使电场场强非常大时,电荷云内部或者从电荷云到地之间就会产生闪电状放电。在火山喷发时,从大的火山灰云中能够看到这种闪电状放电。这种放电很显然能够点燃可燃性环境,但是工业生产中产生的带电云中从来没有发现这种放电。

根据试验研究,在任意高度、体积小于 100 m^3 或直径小于 3 m 的筒仓不可能出现这种类型的放电。这些参数并不是安全上限值,仅是上述研究中设备的尺寸。另外,在清洗体积 30 000 m^3 以下的船舱时也没有发现闪电状放电。

如果平均电场场强小于 500 kV/m,则更大的筒仓或容器中也不可能产生闪电状放电。

A.3.7 锥形放电

高度起电的绝缘粉末注入筒仓或大型容器时,在粉末堆中能够形成空间电荷密度很高的区域。这样在粉末堆顶端产生很高电场。这种情况下,沿着表面能观察到大型放电(放射状,在圆筒型容器中)。

这种类型的放电条件复杂,影响因素有散状粉末的电阻率、起电电流、散状粉末的体积和形状及颗粒大小。有报道表明这种类型的放电能点燃可燃性气体、蒸气环境以及敏感的可燃性粉尘环境。

根据对接地导电性筒仓的大量试验,这种类型的放电释放的能量大小取决于筒仓的直径和形成粉末堆的产品颗粒大小(质量中值)。对于直径 0.5 m~3.0 m 的筒仓和中值在 0.1 mm~3.0 mm 的粉末,锥形放电释放的最大能量可用数学公式估计:

$$W = 5.22 \times D^{3.36} \times d^{1.46}$$

式中:

W ——锥形放电能量上限值,单位为毫焦耳(mJ);

D ——接地导电性筒仓直径,单位为米(m);

d ——锥形粉末堆粒度分布的质量中值,单位为毫米(mm)。

对于直径大于 3 m 和中值大于 3 mm 的筒仓,测量或试验用上述公式不适用。实际证据表明,点燃效率较低,锥形放电的等效能量也低于上述公式的计算值。对于这些情形,建议征询专家意见。

从上述公式可以得出,粗粉末产生的锥形放电能量远远高于细粉末产生的锥形放电能量。因此最

危险的情况是，高度绝缘的颗粒与细粉末（精细）一起处理时形成的低 MIE 粉尘云。

如果筒仓用绝缘材料制成，用上述公式计算锥形放电的等效能量时，直径宜增加一倍。这个建议不是基于实验数据，而是基于事实，即与接地导电性筒仓相比，接地导电性筒仓的最高电势通常在中心轴上，筒仓壁不是零电位。如果强迫一面成为零电位，相反的一面则可能有最高电势，因此锥形放电能越过整个直径，从而比相同直径的导电性筒仓积聚更多电荷。

A.4 危险评定测量

为了识别静电危害及进行点燃危险评定，通常需要进行测量。另外，测量也可以验证防止危险的预防措施是否有效。基于电阻、电荷量和/或空间电荷密度的测量建立的电势和电场分布计算机模型，在处理液体或粉尘时可能非常有用。

进行危险评定测量静电现象（电荷、电荷密度、电势、电场、荷电率、电荷衰减、电流和电容）和相关材料特性的通用方法见 IEC TR 61340-1。转移电荷的测量方法见 GB/T 3836.27—2019 中 4.11。

另一种常用方法是，用非接触式静电电压表或场强计测量表面电压，从而确定导体或非导体上的危险电荷。宜用测量值与标准推荐的安全值比较，评定点燃危险。在现场测量时，把接地仪表放入高度起电的环境中之前，宜注意避免引起放电。对于测量可能产生的点燃危险宜单独进行评定。

对接地和等电位联结进行评定时，宜测量接地电阻或者等电位联结部件物体之间的电阻。通过电阻测量可检查易于腐蚀的、移动、带有等电位夹具、绝缘层等的电气连接。检查人员接地时，地板和鞋类的电阻测量法在 IEC 61340-4-1 和 IEC 61340-4-3 中给出。

a) 测量材料静电特性，例如，电阻率（电导率）和电气强度的程序，在下列标准中给出：固体材料的电阻率和电导率：GB/T 1410、GB/T 10064 和 IEC 61340-2-3。可参考的国外标准包括：ASTM D257、BS 7506-2、JNIOSH TR 42 和 DIN 54345-5。

b) 液体的电导率：ISO 6297，可参考的国外标准包括：ASTM D2624-07a、ASTM D4308-95、JNIOSH TR 42、DIN 51412-1 和 DIN 51412-2。

c) 粉末电阻率：GB/T 3836.12。可参考的国外标准包括：JNIOSH TR 42。

d) 电气击穿强度：GB/T 1408.1 和 GB/T 1408.2。

注：所有这些测试方法的综合性总结见 GB/T 3836.27—2019。

测量电阻和电阻率时宜注意电极结构。例如，用 3.21 注中描述的电极结构测量的表面电阻，比表面电阻率小 10 倍。

评定材料是否能够点燃环境时，宜有专业人员在实际条件下，测量材料的最小点燃能量和可燃限值。相关标准试验方法：ASTM E582-88（气体）、GB/T 3836.12（粉尘）和 ASTM E2019-03（粉尘）。

附 录 B
（资料性附录）
在特定情况下的静电放电

B.1 固体绝缘材料引燃放电

B.1.1 概述

绝缘材料表面会直接产生或者由隔离的导电部件引起各种类型的放电，从而使其带电。

B.1.2 被隔离导体引起的火花

采用绝缘材料可以把金属元件或其他导电性物体对地隔离。靠近带电材料时，通过感应、电荷共享或通过积聚喷射的电荷或带电荷颗粒，这类导体携带电荷。这些导体可以积聚大量电荷和能量，并且可能够存储较长时间。多数能量最终作为引燃火花对地释放。

因此避免使用被隔离导体非常重要，被隔离导体宜等电位联结在一起并接地（见第 13 章）。

B.1.3 固体绝缘材料刷形放电

接地导电物体接近带有大量电荷的绝缘材料时，会产生刷形放电。这种材料主要是塑料，在工业上广泛应用。例如，水桶、管道、勺子、袋和各种类型的容器、输送带、地板和墙面涂料、仪器箱和许多建筑材料。这些物体能够起电的方式很多，例如，触摸、擦拭、加注物料、物料进入或倒出，表面积聚带电颗粒都会产生电荷。

刷形放电的引燃性取决于许多参数，尤其是起电区域的大小，实际上与起电材料的类型无关。然而，众所周知，刷形放电能够点燃 MIE 低于约 4 mJ 的气体混合物。但是，现有技术表明，如果不存在可燃性气体或蒸气，无论粉尘的最小点燃能量大小，刷形放电不会引燃可燃性粉末。

刷形放电通过气体转化成火花放电，测出刷形放电的等效能量。但是，这些试验没有给出粉尘刷形放电可燃性的任何信息。

带正电荷的物体或材料，例如，带正电荷的液体比带负电荷的物体不易燃。

如果带电荷的板材未带电荷的一面与接地金属板接触，则刷形放电更弱（参见 B.1.4）。

刷形放电点燃危险评定的参见 A.4 和 6.3.9。

B.1.4 固体绝缘材料传播型刷形放电

出现大量电荷产生机理时（例如，气动传输粉末、粉末涂覆过程中电荷喷射），带金属接地支撑的绝缘板或绝缘层会产生大量表面电荷。如果绝缘层的击穿强度足以承受其中大的电场强度，则 300 $\mu C/m^2$ 的表面电荷密度可以把刷形放电转化成传播型刷形放电。

传播型刷形放电能够释放大量能量。因此，能够点燃几乎所有可燃性气体、蒸气和粉末，并可能导致严重的静电电击。在特殊情况下，没有金属支撑，绝缘板也可发生双极起电。

B.2 液体处理过程产生引燃放电

B.2.1 概述

当向罐内加注低电导率带电荷液体时，罐内液体中积聚的电荷能够在液体表面产生很高电势，并在

剩余空间形成很强的电场。电场强度和电势分布取决于罐的大小与形状、液体的深度和介电常数。它们与积聚的电荷量是成正比，也取决于电荷在液体内如何分布。

由于液体表面电势很高，在液体表面和罐内剩余空间内的金属突出物之间会形成引燃刷形放电。对于带负电荷的液体，一个优化碳氢化合物/空气环境和理想的直径为 12.8 mm 球形突起，试验经表明，如果邻近突起物的表面电势超过约 −25 kV，则刷形放电成为引燃刷形放电。

如果罐内有隔离导体，则非常低的电势能够引起点燃危险。例如，浮在液体表面的容器如果移近接地的金属突起物或者罐壁，能够获得周围的电势，并产生引燃火花。

实践中，多数情况已经有安全加注规则（例如，公路和铁路油罐车装载），但是，加注中型固定垂直轴储罐的规则是从理论上推导出的（如果有重叠，则与有实证方法结果非常相似），因为这类储罐还没有实际测量数据。B.2.2 总结该理论方法。

B.2.2 计算中型垂直轴储罐加注最大安全流速

最大安全流速是在整个加注过程中，保持最大表面电压低于规定的危险阈值（25 kV）的速度。为了得出 7.3.2.3.5.3 推荐用于加注中型垂直储罐速度的限值，已经进行了计算[Britton 和 Smith(2012)、Britton 和 Walmsley(2012)]。

这种计算方法不适用于大型储罐（直径＞10 m），因为，对于大型储罐这些计算中假设的均匀电荷密度偏差较大。这种计算方法可用于小型金属容器，例如，桶和金属散装容器。但是，对于小型容器，通常需要考虑通过位于容器轴线附近的落水管加注的好处，以及标准加注设备的流速一般都很低，不需要给出明确的速度限制。

计算的结果不适合用 vd 限值，利用该方法直接计算并列出最大安全速度和相关最大安全流速与储罐和管道直径的关系。

最大安全速度的计算依据：

a) 加注过程中液体表面任何时候最大表面电势 25 kV（参见 B.2.1）。

b) 用 A.1.4 的公式得出管道流动起电管道入口电荷密度，电导率补偿小于 3 pS/m 经验常数为 1.0 μCsm^{-3}。

c) 欧姆定律释放模型，利用有效释放时间 τ_{eff}（从燃料剩余导电性直接得出的释放时间的两倍），从管道入口电荷密度推导储罐内均匀的电荷密度。对于大多数实际情况，液体总电荷接近 $I\tau_{eff}$，这里 I 是入口流动电流（充电密度×流速）。如果总电荷偏离 $I\tau_{eff}$ 数值较小，则运用 $I\tau_{eff}$ 代表最不利情况。因此根据液体总电荷 $I\tau_{eff}$ 计算出最大安全速度。低于 3 pS/m，电荷密度（流动电流）与导电性成正比，有效释放时间与流动电流成反比。所以总电荷和表面电压与导电性无关。因此 3 pS/m 的电压（τ_{eff}＝12 s）等于最不利情况，完成该导电性计算。

d) Asano(1979)、Britton 和 Smith(1988)独立得出的公式，用于部分加注均匀起电液体的圆柱形垂直轴金属储罐，计算液面中心电压。

e) Britton 和 Smith(2012)利用 Asano/Britton 和 Smith 公式，进行许多计算，并利用得出的数据进行实证分析，得出不同加注条件下液面最大电势的简化结果。

根据 Britton 和 Smith(2012)的公式(12)和 A.1.4 的电荷密度公式，得出计算最大安全加注速度 v 的公式：

$$v=K(D/d)^{0.5}$$

式中，K 是一个常数，与液体的速度和介电常数 ε_L 有关，并且[Britto 和 Walmsley(2012)]表示为：

$$K<0.6\{(1+\varepsilon_L)/\varepsilon_L\}^{1/2}$$

对于 ε_L＝2.2，K 取值 0.72 m/s，图 B.1 是不同管道和储罐直径利用该公式得出的限定速度。

分析中的不确定度（例如，在液体中均匀分布的电荷）不能保证使用常数的高精确值，所以，为简单起见，7.3.2.3.5.3 的常数四舍五入为 K＝0.7 m/s。

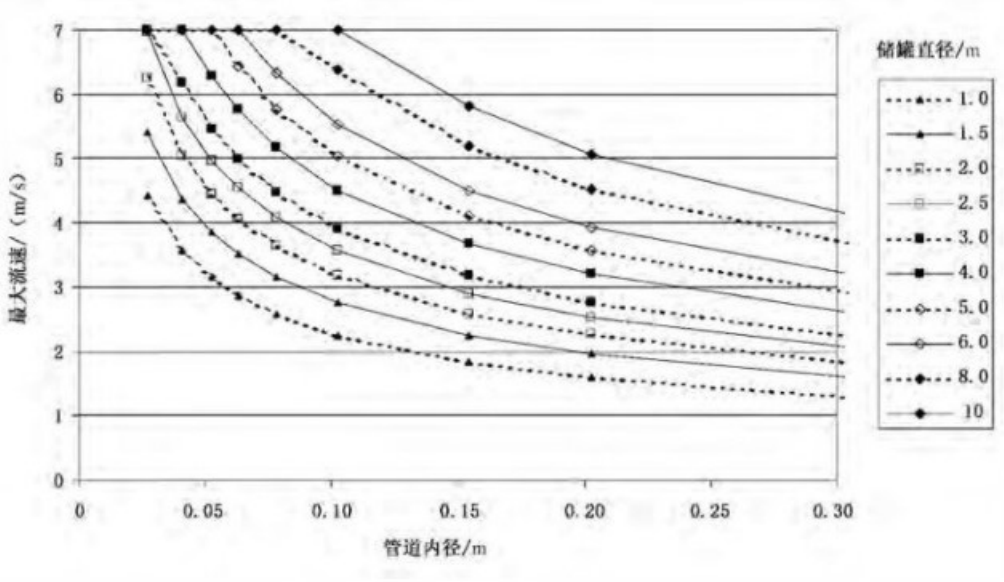


图 B.1　计算出中型储罐最大安全加注速度

（见 7.3.2.3.5.2）

B.3　粉末处理和存储过程产生的引燃放电

B.3.1　概述

除少数例外，包括片状和粒状的各种颗粒，在管道传输过程中都很容易产生电荷。在气动传输中，颗粒相互隔离，尤其如此。粉末或设备吸附的电荷，只要突然释放产生放电，局部产生很高的能量密度，就成为潜在点燃源。带电粉末和设备放电类型和引燃性差别很大（参见 A.3.2～A.3.7）。

B.3.2　散状粉末放电

当高度起电的颗粒散装在容器中，在该粉末和容器之间就会产生锥形放电（参见 A.3.7），如果有粉末悬浮在空气中，则可能引起点燃。

如果系统仅含有颗粒（颗粒尺寸＞500 μm），并且没有可燃性气体或细粉末（例如，未净化的树脂或含有残余溶剂的粉末或磨擦产生的细粉末），则系统内没有点燃危险。但是颗粒剂和细粉末的混合物具有潜在危险，因为它们还会产生刷形放电和引燃锥形放电。在没有粒状物的粉末中已经观察到这些类型的放电，但是出现的频率较低。

B.3.3　粉末云放电

原则上，如果带电荷的颗粒形成的电场强度足够高，则粉末云内部或者从粉末云到容器壁之间产生放电。实践中，例如，中型筒仓气动输送表明，这种放电是刷形放电或电晕发电。由粉末云产生火花和闪电状放电还没有发现。到目前为止有证据表明，粉末云放电的点燃危险非常低，敏感环境可能是例外。

B.3.4　绝缘容器和人体放电

绝缘容器内起电粉末，或靠近这样容器的人，也会放电引起点燃。粉末与绝缘容器内壁之间的放电可以导致容器壁极化。如果人体或导体接地并接触容器表面，则有产生传播型刷形放电刷的危险。传播型刷形放电不仅具有高度引燃性，而且会导致严重的静电电击。摩擦或其他电荷产生机理，例如，蒸

气冲击，也会使绝缘容器外部起电。这些电荷也可能有点燃危险。

B.3.5 粉末工艺中使用衬板

在一些操作中，尤其是桶内除了干燥粉末时，使用内衬如塑料袋防止污染非常方便。内衬用绝缘材料制成，在加注和排空过程中会被产生电荷。当从容器中去掉内衬时产生电荷分离，会引起引燃放电。然而，由于人接地不当产生的火花更危险。

在一些工艺中，例如，容器填充高度起电、高电阻率的粉末时，内衬甚至可能产生传播型刷形放电。这种放电非常具有引燃性，能够引起严重的静电电击，宜采取预防措施防止产生这种类型的放电。

使用高度绝缘内衬还有一个后果是，即使外部容器导电并接地，也会使处理的物料绝缘。

B.3.6 粉末工艺火花放电

设备电隔离的导电部件起电、人或低电阻率粉末积聚都会产生火花放电。在多数情况下，几乎所有储存的静电能量在火花中耗散。可通过 $1/2CV^2$（参见 A.3.2）测得的储存能量与可燃性粉末的最小点燃能量（MIE）（参见 C.6）比较评定火花放电的引燃性，或者通过测量转移电荷与已知的阈值限值进行比较（见 6.3.9）。

注：对隔离导体静电危害进行评定时，MIE 的最相关值是使用无附加电感的电容电路测得的值（参见 C.6）。

B.3.7 粉末工艺刷形放电

在强电场中接地物体的尖端，例如，设备突出部分、测量探头、工作工具、人的指尖等，会产生刷形放电。高度起电的设备表面、包装材料或者散装或悬浮在空气中高度起电的绝缘粉末都会引起这样的电场。

目前根据实践经验的技术、试验证据及缺少事故案例都表明刷形放电不会引燃粉末云，但是粉尘云与可燃性气体和蒸气混合（参见 A.3.4）则能够引燃。

当处理溶剂加湿的粉末时，长时间内会释放易燃气体，其最小点燃能量比纯粉末低很多，宜特别注意。处理的介质或绝缘粉末量特别大时，无法避免产生对气体环境有引燃危险的刷形放电。

也宜考虑粉末的 MIE 小于 1 mJ 是否实际上是由产生的气体环境引起的，而不仅仅是粉末引起的。

注：在粉尘环境中使用绝缘材料时，污染物（例如，溶剂、油脂或湿气）的存在可能会影响潜在点燃危险。

B.3.8 粉末工艺电晕放电

非常小而尖的电极或者有尖锐边缘的电极，在电场非常强时产生电晕放电（参见 A.3.3）。电晕放电不足以点燃可燃性粉末。处理的介质或绝缘粉末量特别大时，无法避免产生电晕放电。

除非出现非常敏感的爆炸性环境，例如，由富氧、氢气或其他 MIE 非常低的气体引起，否则电晕放电不产生点燃危险。

B.3.9 粉末工艺产生传播型刷形放电

容器绝缘壁表面或设备涂层会产生传播刷形放电（参见 A.3.5）。当粉末颗粒撞击这样的表面时，能够形成很高的表面电荷密度，从而产生这种放电。例如，通过绝缘材料管道或通过带有绝缘衬层的金属管气动输送粉末过程中，会产生传播型刷形放电。在散状起电的绝缘粉末过程中，离子沉积也会形成很高的表面电荷密度。

粉末层起电通常不会产生传播型刷形放电，但是需要有一层介电强度很高的绝缘层。

假定（双极性）起电板像一个平行的板形电容器，板材作为绝缘体，可以计算传播型刷放电释放的能量。例如，板材相对介电常数 $\varepsilon=2$，表面电荷密度 $\sigma=1\times10^{-3}$ C/m^2，厚度 $d=150$ μm，面积 $A=0.25$ m^2，存储的能量 W 用下式计算：

$$W=\frac{1}{2}CV^2=\frac{Ad\sigma^2}{2\varepsilon\varepsilon_0}=1\ \mathrm{J}$$

通过设备壳壁和涂层仅使用导电性或耗散性材料，或者确保通过所有绝缘壁和涂层的击穿电压小于 4 kV，可以避免产生传播型刷形放电(参见 A.3.5)。

附 录 C
（资料性附录）
物质的可燃性

C.1 概述

工业中使用的大多数碳氢化合物和许多其他物质都具有可燃性。这些物质以气体、蒸气、液滴或粉末的形式与空气或其他氧化剂混合时，能够被静电放电点燃。被点燃的难易程度取决于许多因素，C.2～C.8 给出部分因素。

C.2 氧气浓度条件和环境条件的影响

氧气浓度、温度和大气压力对点燃性能影响很大。C.3～C.8 大部分描述和数值适用于正常大气条件，即温度－20 ℃～＋60 ℃，大气压力 80 kPa～110 kPa。

在非正常环境条件下，特别是高温或氧气浓度高于 21%的条件下操作，对可燃特性能够产生严重不利影响（尤其是 MIE）。

C.3 气体和液体的爆炸极限

每一种物质都有爆炸上限和下限，只有在爆炸界限范围内的混合物才能够被点燃。碳氢化合物的爆炸界限是，在空气中的体积比介于约 1%和 15%之间。爆炸界限范围更大的物质，例如，氢气、乙炔和二硫化碳，特别危险。

通风通常是降低混合物浓度低于爆炸下限，从而使其不能点燃的最有效方法。

C.4 惰化

惰性气体是不可燃气体，含氧少或不含氧，不支持燃烧。例如，氮、锅炉的烟道气、蒸气和二氧化碳。在可燃性环境中添加惰性气体，可以降低氧气浓度至任何浓度的可燃性物质都不可能点燃的水平。用氮气稀释限定氧气浓度（LOC），甲烷为 10%（体积分数），乙烯为 8%（体积分数）、氢气为 3%（体积分数）。这些值通常有安全系数，碳氢化合物规定的最大氧含量通常是 5%～6%（体积分数）。

惰化环境中如果再加入空气，则能够再成为可燃性环境。因此，要认识到从惰性容器中散发到空气中的气体或蒸气也能够被点燃，这一点也至关重要。

防爆防护系统标准 NFPA 69 有防止形成可燃性环境的控制措施，并提供了依据 LOC 和所采用的氧气控制系统类型确定的爆炸预防安全系数。

注：在空气中添加惰性气体降低氧气含量对人具有潜在危险。处在氧含量 12%或以下的环境中，人会毫无征兆突然失去意识，不能帮助或保护自己。处在氧含量 12%～14%的环境中，人会产生下列物理反应：劳累呼吸增加，脉搏上升，协调性、感知能力和判断能力受损。处在氧含量 15%～19%的环境中会使人的协调性受损，并可能诱发冠心病、肺或循环系统早期症状问题。涉及具体行业或应用可能有国家法规和/或规范，可以参考。

已知二氧化碳在燃烧时有时会成为氧气源，因此，使用二氧化碳进行惰化时宜注意。

C.5 闪点

低于闪点的液体，液面上的蒸气/空气混合物通常不易点燃。为了避免点燃，建议液体的温度至少低于闪点 5 ℃，对于挥发性范围大的液体的混合物，至少低于闪点 11 ℃。一般情况下，最好用闪点高的溶剂。

注：对于闪点安全系数以及根据海拔修正的讨论，见 Britton 和 Smith(2012 年)。

宜当注意，可燃性液体在温度低于闪点时，其喷雾或细雾也能被点燃(例如，在燃油燃烧器中)。

C.6 最小点燃能量

可燃性气体、蒸气和粉尘通常按其最小点燃能量(MIE)分类。通常采用最易点燃的物质和空气混合物，使用电容火花放电测出这些参数。这有助于了解物质如何被静电放电点燃。对于多数气体和蒸气，最小点燃能量在 0.1 mJ 和 0.3 mJ 之间。粉尘的最小点燃能量一般在 10 mJ 以上，但也存在较低值(甚至 1 mJ 以下)的粉尘。

电路的电感、电阻和电容器类型不同，产生的火花放电引燃性不同。在一些情况下，电容性电路中比 MIE 低的能量也可能引起点燃。注意确保使用合适的电路测定危险评定需要的数据。在评定静电危害时，采用电容放电电路得出的数据，没有另加电感或电阻。对于气体混合物见 ASTM E 582 气体混合物最小点燃能量和熄火距离标准试验方法，对于粉尘云见 GB/T 3836.12 粉尘/空气混合物最小点燃能量确定方法和 ASTM E 2019-03 空气中粉尘最小点燃能量标准试验方法。

注 1：ASTM E 582 给出的复现性为±10%。

注 2：需要特别注意冷凝蒸气的液相导电。

碳氢化合物中甲烷 MIE 最高(0.28 mJ)。用乙烯(0.082 mJ)测试，与链烷烃试验气体(例如，丙烷)区分。氢气被用于测试与乙烯区分。不含有双键或三键或环的碳氢化合物中苯 MIE 最小(0.20 mJ)。由此可以把 MIE 分为几个区间如表 C.1 所示：

表 C.1 典型 MIE 区间及实例

能量	最低值	最高值	实例
高 MIE	>10 mJ	—	氨、二氯甲烷、三氯乙烯
较高 MIE	>0.28 mJ	10 mJ	卤代有机物
正常 MIE	0.20 mJ	0.28 mJ	芳香族和脂肪族碳氢化合物(无双键)
低 MIE	0.08 mJ	≤0.20 mJ	乙烯、丁二烯、环丙烷、乙醛、乙醚、苯
非常低 MIE	—	<0.08 mJ	氢、乙炔、砷化氢、氯硅烷、二硫化碳、环氧乙烷、燃料和氧气的混合物

喷雾剂或分散的液滴测得的 MIE 值较少(例如，闪点 38 ℃～150 ℃的有机溶剂静态云 7mJ，湍流云大于 150 mJ)。由于必须提供汽化热，这些数值比等效的蒸气/空气混合物数值高。

在 20 世纪 60 年代和 70 年代，液体产生的可燃性蒸气通常根据最大试验安全间隙(MESG)分类，因为按照点燃危险绘制 MESG 曲线时，有三个非常明显的数据群集。1978 年在 EN 50014 标准中这三个数据群集被命名为ⅡA、ⅡB 和ⅡC。

后来对 MESG 值进行验证发现多数值过高。因此一些ⅡA 类液体(乙醇、丙醇、丁醇、己醇、庚醇、1,2-乙二醇、乙苯，3-氧代丁酸乙基酯)归到ⅡB 类。1981 年这些液体重新划为ⅡA/ⅡB 类，表示虽然它们 MESG 属于ⅡB 类，但它们需要与ⅡA 液体有相同的安全预防措施。

2003 年这些液体重新划归ⅡB 类，但可与ⅡA 液体对照。然而，这种表达也有问题，已经有很多建议克服这个问题(例如，把 MESG 边界限值 0.90 mm 修改为 0.88 mm，采用了 MIE 边界限值 0.20 mJ 或 0.18 mJ)。由于 MIE 和 MESG 值只能采用较高的不确度测量，这些建议并不真正令人满意。所有以前列为ⅡA/ⅡB(见上文)的液体又简单地归为ⅡA 类。

表 C.2 列出的最佳混合物最小点燃能量 MIE 和最小点燃电荷 MIQ，是在 25 ℃和大气压力测出的，德国联邦物理技术研究院(PTB)于 2009 年出版的安全技术规程 TRBS 2153 附录中发布。要特别注意甲醇的 MIE 已被重新确定为 0.20 mJ，这与原来的外推值 0.14 mJ 不同。一些值已加入 NFPA 77 (2004)，这些值都标有上标 a。

表 C.2 最小点燃能量 MIE 和最小点燃电荷 MIQ

物质	MIE mJ	MIQ nC	最佳点燃浓度 (体积分数) %	符合 GB/T 3836.11 的 爆炸组别
乙醛	0.38	—	—	ⅡA
乙酸乙酯	0.46	120	5.2	ⅡA
丙酮	0.55	127	6.5	ⅡA
丙烯醛	0.13	—	—	ⅡB
丙烯腈	0.16	—	9.0	ⅡB
烯丙基氯	0.77	—	—	ⅡA
氨	14	1 500	20	ⅡA
苯	0.20	45	4.7	ⅡA
1,3-丁二烯	0.13	—	5.2	ⅡB
丁烷	0.25	60	4.7	ⅡA
2-丁酮	0.27	—	5.3	ⅡB
2-丁基氯	1.24	—	—	ⅡA
二硫化碳	0.009	—	7.8	ⅡC
环己烷	0.22	—	3.8	ⅡA
环丙烷	0.17	—	6.3	ⅡB
1,2-二氯乙烷	1.0	—	10.5	ⅡA
二氯甲烷	9 300	880 000	18	ⅡA
二乙基醚	0.19	40	5.1	ⅡB
乙醚氧气	0.001 2	—	—	—[b]
2,2-二甲基丁烷	0.25	70	3.4	ⅡA
乙烷	0.25	70	6.5	ⅡA
乙醇	0.28	60	6.4	ⅡB
乙烯	0.082	32	8.0	ⅡB
乙烯氧气	0.000 9	—	—	—[b]
乙炔(乙炔)	0.019	—	7.7	ⅡC

表 C.2（续）

物质	MIE mJ	MIQ nC	最佳点燃浓度 （体积分数） %	符合 GB/T 3836.11 的 爆炸组别
乙炔氧气	0.000 2	—	—	—[b]
乙炔氧化	0.061	—	10.8	ⅡB
庚烷	0.24	60	3.4	ⅡA
己烷	0.24	60	3.8	ⅡA
氢	0.016	12	22	ⅡC
氧气中的氢气	0.001 2	—	—	—[b]
甲烷	0.28	70	8.5	ⅡA
甲醇	0.20	50	14.7	ⅡA
2-甲基丁烷	0.21	63	3.8	ⅡA
甲基环己烷	0.27	70	3.5	ⅡA
戊烷	0.28	63	3.3	ⅡA
顺-2-戊烯	0.18	—	4.4	ⅡB
反-2-戊烯	0.18	—	4.4	ⅡB
丙烷	0.25	70	5.2	ⅡA
氧气中的丙烷	0.002 1	—	—	—[b]
1-丙炔（甲基乙炔）	0.11	—	6.5	ⅡB
氧化丙烯	0.13	—	7.5	ⅡB
四氟乙烯	4.1	—	—	ⅡA
丙烯酸氢糠酯-2H-二氢	0.22	60	4.7	ⅡA
甲苯[a]	0.24	—	—	ⅡA
1,1,1-三氯乙烷	4 800	700 000	12	ⅡA
三氯乙烯	510	150 000	26	ⅡA
三氯甲硅烷[a]	0.017	—	—	ⅡC
二甲苯[a]	0.20	—	—	ⅡA

[a] 来源于 NFPA 77.2007。

[b] 根据 GB/T 3836.11，MESG 值测定方法是爆炸组别分类的基础，仅适用于气体和蒸气与空气的混合物。

C.7 可燃性粉末

所有的固体可燃性材料，包括金属，当以粉尘云的形式在空气中均匀散布时，可能会产生可燃性环境。如果粉尘粒径小于 0.5 mm，并且粉尘浓度在爆炸界限范围内（多数有机粉末通常约 20 g/m^3 至几

g/m^3），粉尘存在爆炸危险。特定物质的爆炸危险（爆炸灵敏度和强度）取决于颗粒尺寸和许多其他因素。如果是非常细小的粉尘，则爆炸危险最高。

注：爆炸性粉末沉积在表面上比悬浮在空气中的 MIE 值低。因此，这样的爆炸性粉末在沉积时静电点燃危险比在空气中悬浮时高。

C.8 生物燃料

生物燃料是由再生生物系统制成的燃料。它们是按照自己的生物组分（E＝乙醇、M＝甲醇、B＝生物柴油）和在燃料中的含量（体积比）命名。

目前使用的生物柴油，由天然植物油脂和含有醇氧化生物量产生的乙醇制成。生物燃料并不仅限于乙醇/汽油混合物或植物油，未来也可能制成其他混合物。由于很难一概而论未来会出现什么，所以对生物乙醇/汽油混合物注意下列事项：

a) 如果汽油中加入乙醇，则往往清洗系统。这可能会导致在流动的燃料中增加水和固体含量，二者都会增加电荷率。

b) 汽油中加入的乙醇越多，导电性越高而电荷率越低。

c) 根据 a)和 b)，生物燃料电荷率按以下顺序增加：E100＜E10＜E0＜E5。

d) 在一定条件下，E50～E100 燃料可在储罐中产生爆炸性环境，尤其是储罐变空时。因此燃料车辆可能需要特殊的储罐设备，例如，灌装管中加阻火器。阻火器太细，可能会由于堵塞导致其他问题。

附 录 D
（资料性附录）
危险场所分类

D.1 分区的原理

因静电起电引起火灾或爆炸的危险程度（例如，可能性）不仅取决于起电产生引燃火花的概率，也取决于有可燃性环境出现的概率。可燃性环境经常出现的场所防止静电起电的措施，在可燃性环境不常出现的场所并不总是必需的。分区就是根据有危险的可燃性环境出现的概率把场所分为不同的区。

D.2 分类

根据 GB 3836.14 和 GB/T 12476.3 危险场所分为下列区：

a) 0 区：可燃性物质以气体、蒸气或薄雾的形式与空气混合形成的爆炸性环境连续出现、长期存在或频繁出现的场所。

b) 1 区：在正常运行时，可燃性物质以气体、蒸气或薄雾的形式与空气混合形成的爆炸性环境可能偶尔出现的场所。

c) 2 区：在正常运行时，可燃性物质以气体、蒸气或薄雾的形式与空气混合形成的爆炸性环境不可能出现，如果出现，也仅是短时间存在的场所。

d) 20 区：爆炸性粉尘环境以粉尘云的形式在空气中连续出现、长期存在或频繁出现的场所。

注：有粉尘堆积，但粉尘云不会连续出现、长期存在或频繁出现的地方，不属于 20 区。

e) 21 区：在正常运行时，爆炸性粉尘环境以粉尘云的形式在空气中可能出现的场所。

f) 22 区：在正常运行时，爆炸性粉尘环境以粉尘云的形式在空气中不可能出现，如果出现，也仅是短时间存在的场所。

D.3 爆炸类别

D.3.1 概述

根据 GB 3836.1，产生可燃性气体、蒸气和粉尘的物质分为 D.3.2～D.3.4 的爆炸类别。

D.3.2 Ⅰ类

Ⅰ类电气设备用于煤矿瓦斯气体环境。

注：Ⅰ类防爆型式考虑了瓦斯和煤粉的点燃以及地下用设备增加的物理保护措施。

用于煤矿的电气设备，当其环境中除甲烷外还可能含有其他爆炸性气体时，宜按照Ⅰ类和Ⅱ类相应可燃性气体的要求进行制造和试验。该类电气设备宜有相应的标志（例如："Ex d Ⅰ/ⅡB T3"或"Ex d Ⅰ/Ⅱ(NH_3)"）。

D.3.3 Ⅱ类

Ⅱ类电气设备用于除煤矿瓦斯气体之外的其他爆炸性气体环境。

Ⅱ类电气设备按照其拟使用的爆炸性环境的特性可进一步再分类。

Ⅱ类电气设备的再分类：

——ⅡA类：代表性气体是丙烷；

——ⅡB类：代表性气体是乙烯；

——ⅡC类：代表性气体是氢气。

注1：再分类的主要依据是可能安装设备的爆炸性气体环境的最大试验安全间隙（MESG）或最小点燃电流比（MICR）（见GB/T 3836.11）。

注2：标志ⅡB的设备可适用于ⅡA设备的使用条件，标志ⅡC类的设备可适用于ⅡA和ⅡB类设备的使用条件。

D.3.4 Ⅲ类

Ⅲ类电气设备用于除煤矿以外的爆炸性粉尘环境。

Ⅲ类电气设备按照其拟使用的爆炸性粉尘环境的特性可进一步再分类。

Ⅲ类电气设备的再分类：

——ⅢA类：可燃性飞絮；

——ⅢB类：非导电性粉尘；

——ⅢC类：导电性粉尘。

注：标志ⅢB的设备可适用于ⅢA设备的使用条件，标志ⅢC类的设备可适用于ⅢA或ⅢB类设备的使用条件。

附 录 E
（资料性附录）
设备保护级别分类

根据 GB 3836.1，爆炸性环境使用的设备分为以下设备保护级别（EPL）：

Ma 级（EPL Ma）

安装在煤矿甲烷爆炸性环境中的设备，具有“很高”的保护级别，该级别具有足够的安全性，使设备在正常运行、出现预期故障或罕见故障，甚至在气体突然出现设备仍带电的情况下均不可能成为点燃源。

Mb 级（EPL Mb）

安装在煤矿甲烷爆炸性环境中的设备，具有“高”的保护级别，该级别具有足够的安全性，使设备正常运行中或在气体突然出现和设备断电之间的时间内出现的预期故障条件下不可能成为点燃源。

Ga 级（EPL Ga）

爆炸性气体环境用设备，具有“很高”的保护级别，在正常运行、出现的预期故障或罕见故障时不点燃源。

Gb 级（EPL Gb）

爆炸性气体环境用设备，具有“高”的保护级别，在正常运行或预期故障条件下不是点燃源。

Gc 级（EPL Gc）

爆炸性气体环境用设备，具有“一般”的保护级别，在正常运行中不是点燃源，也可采取一些附加护措施，保证在点燃源预期经常出现的情况下（例如，灯具的故障）不会形成有效点燃。

Da 级（EPL Da）

爆炸性粉尘环境用设备，具有“很高”的保护级别，在正常运行、出现预期故障或罕见故障条件下不是点燃源。

Db 级（EPL Db）

爆炸性粉尘环境用设备，具有“高”的保护级别，在正常运行或出现的预期故障条件下不是点燃源。

Dc 级（EPL Dc）

爆炸性粉尘环境用设备，具有“一般”的保护级别，在正常运行过程中不是点燃源，也可采取一些附加保护措施，保证在点燃源预期经常出现的情况下（例如，灯具的故障）不会形成有效点燃。

附 录 F
（资料性附录）
静电系统评价流程图

本部分内容广泛，对于新的读者可能会比较复杂。为了使新读者或不经常用的读者便于理解，图 F.1 给出了流程图有助于找出系统程序用于产品或工艺的静电评价。

流程图分为两条路径：第一个评价所有导电性或耗散性材料、部件和凹槽，第二个评价所有绝缘部件。每一个路径结束时是“测试通过”或是在给定的条件下预期出现的放电类型。

这个流程图尽可能适用广泛用途。但是，也有可能不用的情况。对此情况，用户宜利用标准相关章节要求具体处理。

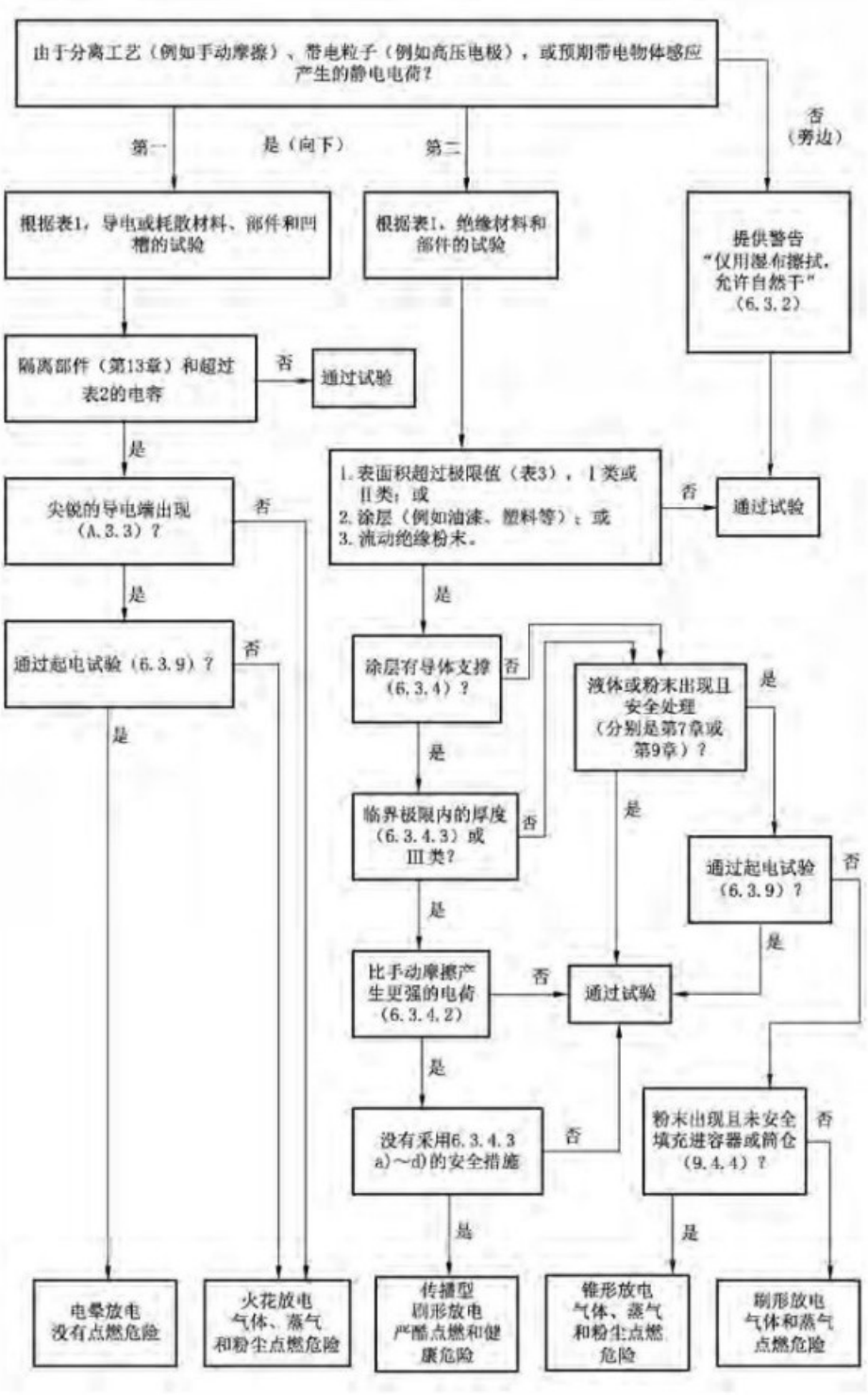


图 F.1　系统静电评价的流程图

参 考 文 献

[1] GB/T 3836.12 爆炸性环境 第12部分:可燃性粉尘物质特性 试验方法

[2] GB/T 5654 液体绝缘材料 相对电容率、介质损耗因数和直流电阻率的测量

[3] GB/T 7528 橡胶和塑料软管及软管组合件 术语

[4] GB/T 20097 防护服 一般要求

[5] GB/T 20991 个体防护装备 鞋的测试方法

[6] GB 21148 个体防护装备 安全鞋

[7] GB/T 22042 服装 防静电性能 表面电阻率试验方法

[8] GB/T 22043 服装 防静电性能 通过材料的电阻(垂直电阻)试验方法

[9] IEC 61340-2-1 Electrostatics—Part 2-1: Measurement methods—Ability of materials and products to dissipate static electric charge

[10] IEC 61340-4-5 Electrostatics—Part 4-5: Standard test methods for specific applications—Methods for characterizing the electrostatic protection of footwear and flooring in combination with a person

[11] IEC 61340-4-7 Electrostatics—Part 4-7: Standard test methods for specific applications—Ionization

[12] IEC TR 61340-1 Electrostatics—Part 1: Electrostatic phenomena—Principles and measurements

[13] API/IP RP 1540 Design, construction, operation and maintenance of aviation fuelling facilities

[14] ASTM D257 Standard test methods for DC resistance or conductance of insulating materials

[15] ASTM D2624-07a Standard test methods for electrical conductivity of aviation and distillate fuels

[16] ASTM D4308-95 Standard test method for electrical conductivity of liquid hydrocarbons by precision meter

[17] ASTM E582-88 Standard test method for minimum ignition energy and quenching distance in gaseous mixtures

[18] ASTM E2019-03 Standard test method for minimum ignition energy of a dust cloud in air

[19] BS 5958(all parts) Code of practice for control of undesirable static electricity

[20] BS 7506-2 Methods for measurements in electrostatics—Part 2: Test methods

[21] DIN 51412-1 Testing of petroleum products—Determination of the electrical conductivity—Part 1: Laboratory method

[22] DIN 51412-2 Testing of petroleum products—Determination of the electrical conductivity—Part 2: Field Method

[23] JNIOSH TR 42 Recommendations for requirements for avoiding electrostatic hazards in industry

[24] CENELEC TR 50404 Code of practice for the avoidance of hazards due to static electricity

[25] DIN 54345-5 Testing of textiles; electrostatic behavior; determination of electrical resistance of strips of textile fabrics

[26] EC Directive 99/92/EC Minimum requirements for improving the safety and health protection of workers potentially at risk from explosive atmospheres

[27] EN 12115 Rubber and thermoplastics hoses and hose assemblies for liquid or gaseous chemicals—Specification

[28] EN 50050 Electrical apparatus for potentially explosive atmospheres—Electrostatic hand-held spraying equipment

[29] EN 50059 Specification for electrostatic hand-held spraying equipment for non-flammable material for painting and finishing

[30] EN 50176 Automatic electrostatic spraying installations for flammable liquid spraying material

[31] EN 50177 Automatic electrostatic spraying installations for flammable coating powder

[32] EN 50223 Automatic electrostatic spraying installations for flammable flock material

[33] (EU)2016/425 Personal protective equipment (PPE)—Regulation

[34] NFPA 69 Standard on explosion prevention systems

[35] NFPA 484 Standard for combustible metal

[36] TRBS 2153 Avoidance of ignition hazards due to static electricity. Editor: Berufsgenossenschaft der Chemischen Industrie, Heidelberg, Germany (available in German only)

[37] BIA-Report 12/97: Burning and explosion characteristics of dusts, 1997 (in German language only). Editor: Hauptverband der gewerblichen erufsgenossenschaften e.V., St. Augustin, Germany.

[38] G. L. Hearn, Electrostatic ignition hazards arising from fuel flow in plastic pipelines, J. Loss Prevention, 15, (2002), 105-109.

[39] H. L. Walmsley, The generation of electric currents by the turbulent flow of dielectric liquids: 1. Long pipes, J. Phys D Appl Phys, 15, (1982), 1907-1934.

[40] H. L. Walmsley and J. Mills, Electrostatic Ignition Hazard s in Road Tanker Loading: Part 1, Review and Experimental Measurements, J. Electrostatics, 28, (1992), 61-87.

[41] H. L. Walmsley, The electrostatic fields and potentials generated by the flow of liquid through plastic pipes. Journal of Electrostatics 38 (1996), 249-266.

[42] H. L. Walmsley, Electrostatic ignition hazards with plastic pipes at petrol stations, J. Loss Prevention 25 (2012) 263-273.

[43] I. Koszman and J. Gavis, Development of charge in low-conductivity liquids flowing past surfaces: Experimental verification and application of the theory developed for tube flow, Chem Engng Sci, 17, (1962), 1023-1040.

[44] K. Asano, Electrostatic potential and field in a cylindrical tank containing liquid, Proc IEE, 124, (1977), 1277-1281.

[45] L. G. Britton, Avoiding static Ignition Hazards in Chemical Operations, Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York 1999.

[46] L. G. Britton, and H. L. Walmsley, Static Electricity: New Guidance for Storage Tank Loading Rates, Process Safety Progress, 31 No. 3, (Sept 2012).

[47] L. G. Britton and J. A. Smith, Static hazards of drum filling, Plant/Operations Progress, 7 No.(1988), 53-62, 63-78.

[48] L. G. Britton and J. A. Smith, Static ignition hazards of 'conductive' liquids during container filling, Process Safety Progress, 29 No.2 (June 2010), 98-102.

[49] L. G. Britton, and J. A. Smith, Static Hazards of the VAST, J. Loss Prevention, 25 (2012), 309-328.

[50] L. Post, M. Glor, G. Lüttgens and B. Maurer, The avoidance of ignition hazards due to electrostatic charges occurring during the spraying of liquids under high pressure. J. Electrostatics 23 (1989), 99-109.

[51] M. Glor, Overview of the occurrence and incendivity of cone discharges with case studies from industrial practice. J. Loss Prevention 14 (2001) 123-128.

[52] M. Glor and K. Schwenzfeuer, Direct ignition tests with brush discharges. J. Electrostatics 63 (2005) 463-468.

[53] N. Gibson and F. C. Lloyd, Incendivity of discharges from electrostatically charged plastics.British J. Applied Physics 16 (1965), 1619-1631.

[54] Shell Safety Committee; 1988 Static Electricity, Technical and Safety Aspects Shell International Petroleum Maatschappij B.V., The Hague, the Netherlands, June 1988 (also available as J. Electrostatics, 27, parts 1&2).

[55] T. Langer, G. Gramse, D. Möckel, U. von Pidoll and M. Beyer, MIE experiments and simultaneous measuring of the transferred charge . 13th International Conference on Electrostatics April 10th to 14th 2011 Bangor, Wale s. 2011 J. Phys.: Conf. Ser. 301 012040.

[56] U. von Pidoll, Electrostatics requirements for Intermediate Bulk Containers Intended for Use in Explosive Atmospheres. J. Electrostatics 51-52 (2001) 387-394.

[57] U. von Pidoll, E. Brzostek and H.-R. Froechtenigt, Determining the incendivity of electrostatic discharges without explosive gas mixtures. IEEE Trans. Industry Applications, 40 (2004), 1467-1475.

[58] U. von Pidoll, Ignitability of spray clouds of organic solvents, solvent/water mixtures and water-based paints by electric sparks and open flames. IEEE Trans. Industry Applications, 44/1 (2008), 15-19.