



中国化学品安全协会

“化危为安”线上讲堂

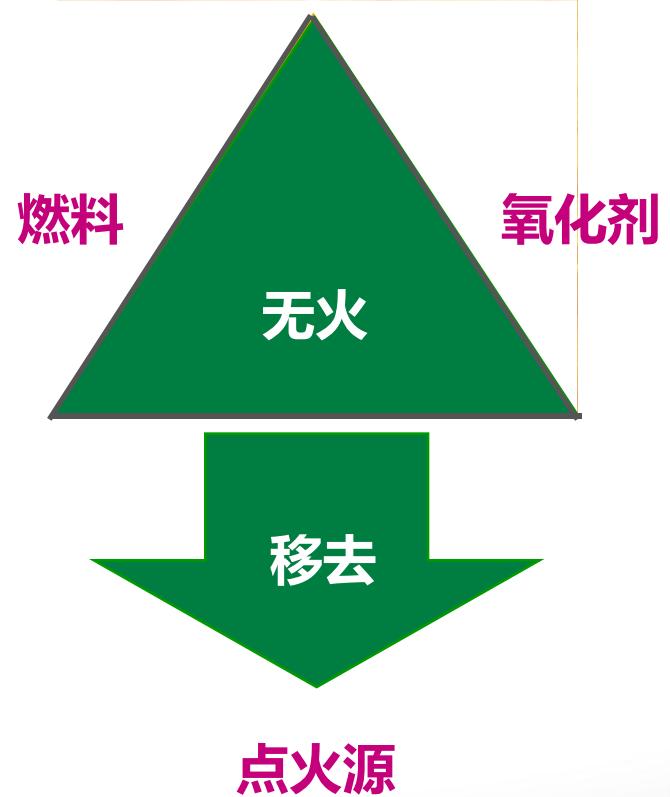
化工企业静电风险与防控

邓胤

DEKRA德凯 过程安全咨询师



- **燃料** –能被氧化的液体（蒸汽或雾）、气体或固体。燃烧通常在气相状态下发生；燃烧前，液体被挥发，固体分解为蒸汽。
- **氧化剂** –支持燃烧的物质,通常为空气中的氧气。
- **点火源** –能引发燃烧反应的能量源。

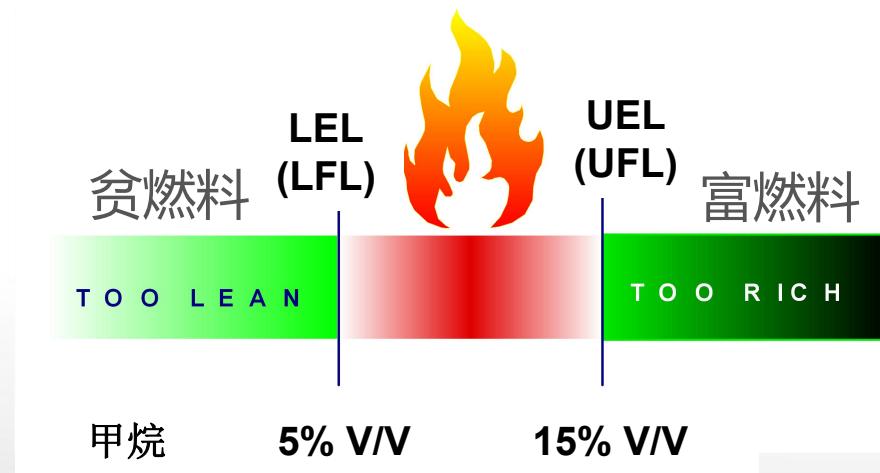


爆炸/燃烧极限

“化危为安”线上讲堂

► DEKRA

可燃物质(可燃气体、蒸气和粉尘)与空气(或氧气)必须在一定的浓度范围内均匀混合, 形成预混气, 遇着火源才会发生爆炸, 这个浓度范围称为爆炸极限。

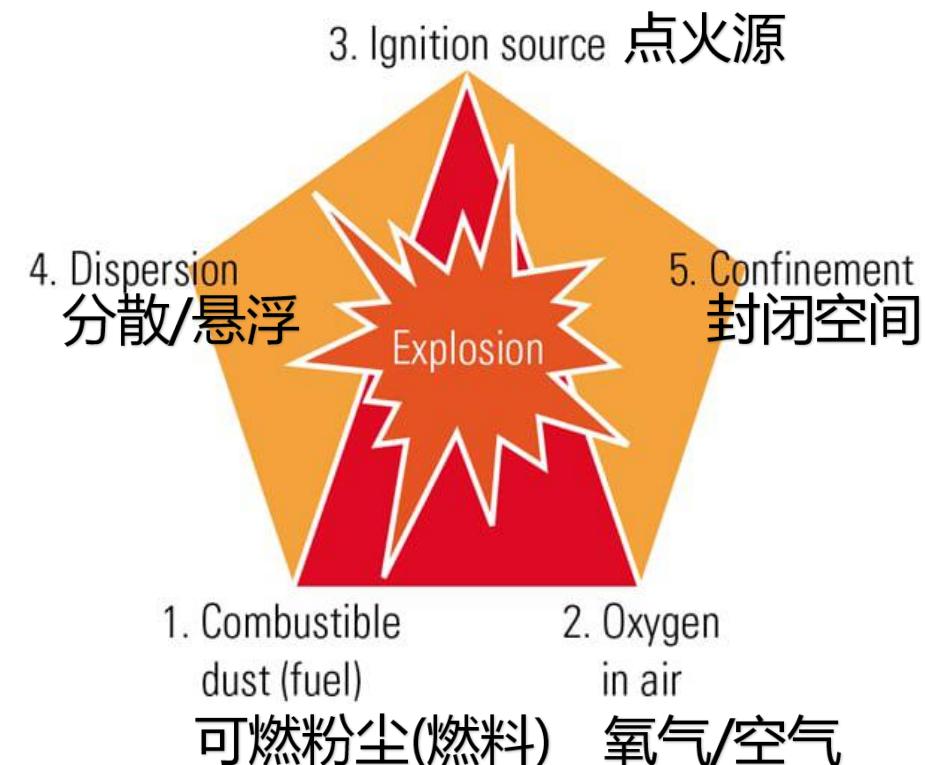


闪点

在规定的试验条件下, 液体挥发的蒸气与空气形成的混合物, 遇引火源能够闪燃的液体**最低温度**, 称为闪点。



- **粉尘爆炸** – 粉尘爆炸需满足五个条件（粉尘爆炸五角），如粉尘云在完全或部分封闭的空间内，封闭空间内的压力可能快速增加到破坏水平，这个过程称之为**粉尘爆炸**。如在一个开放空间，快速燃烧称之为**闪火**。
- **MEC** - Minimum Explosible Concentration, 最小可爆浓度，当空气中分散粉尘云浓度低于某一特定值 - 最小可爆浓度时，爆炸不会传播；反之，爆炸可能发生。

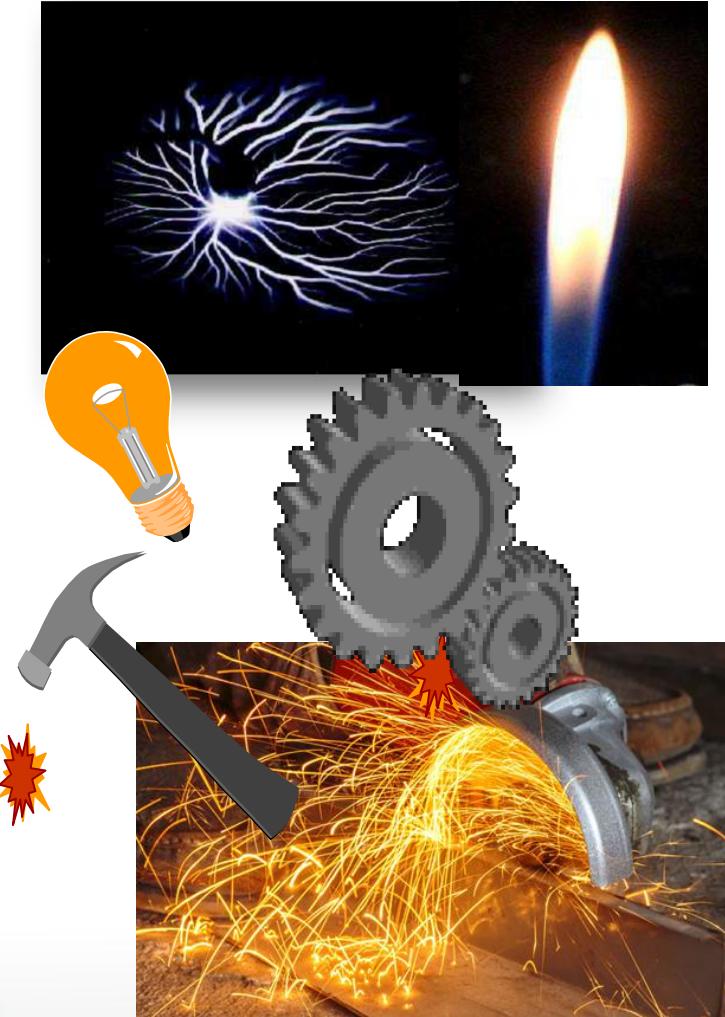


粉尘爆炸五要素

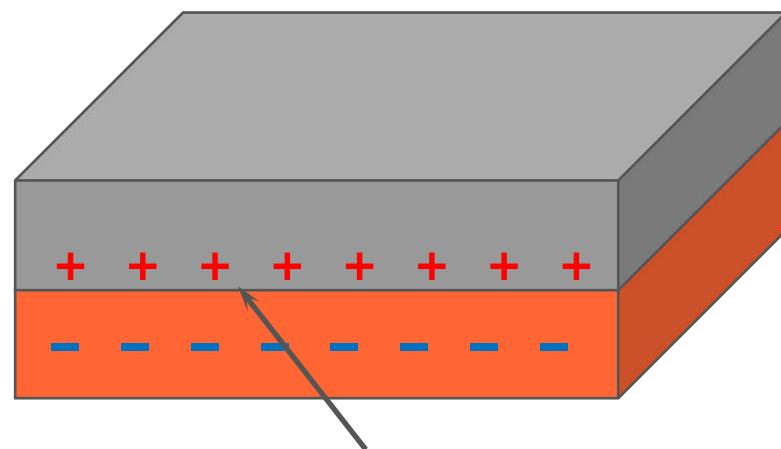
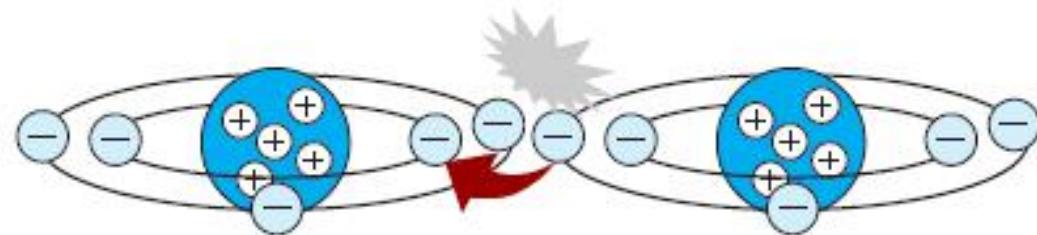
- 烟
- 明火
- 焊接
- 切割
- 研磨
- 热表面
- 摩擦生热
- 机械撞击

- 电火花
- 静电放电
- 雷击
- 放热失控化学反应
- 自热 / 自燃/ 分解

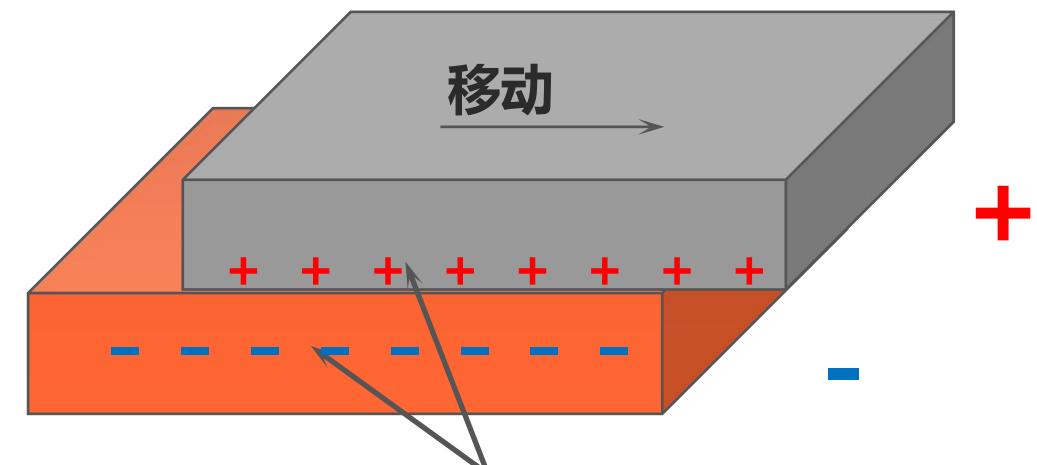
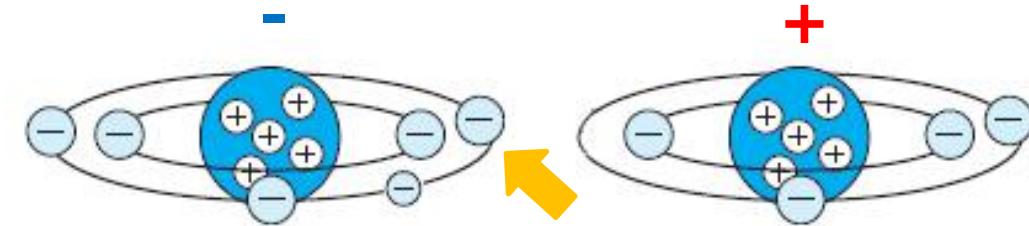
蓝色代表强点火源 (大于 100焦耳)



接触（摩擦）起电



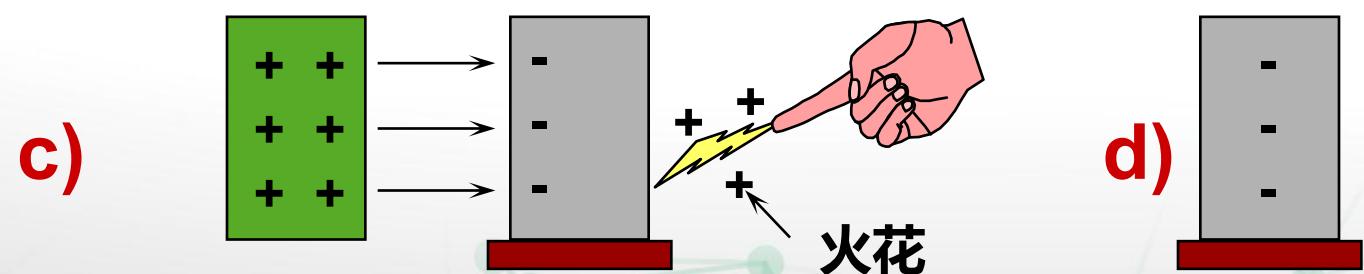
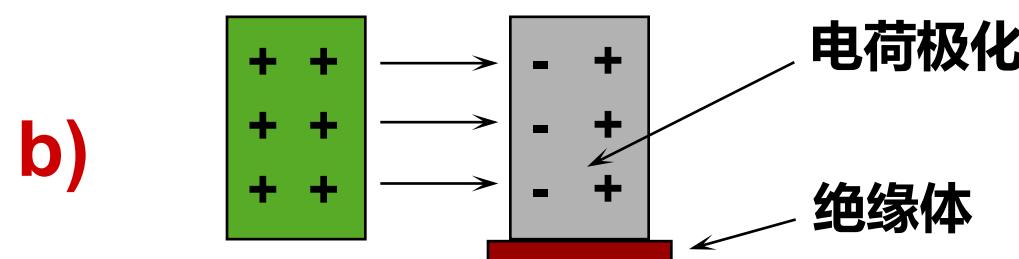
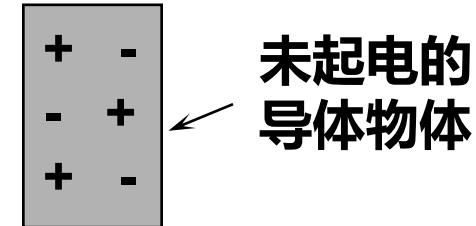
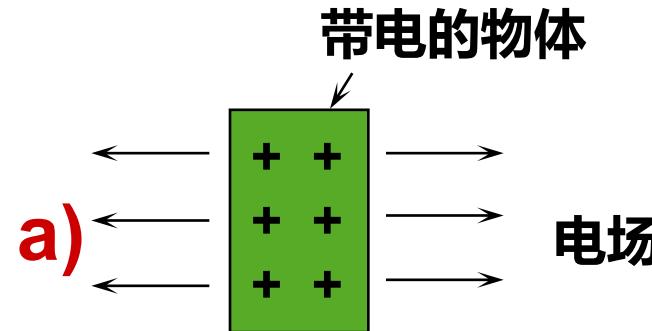
无净电荷的界面



材料上带的静电荷

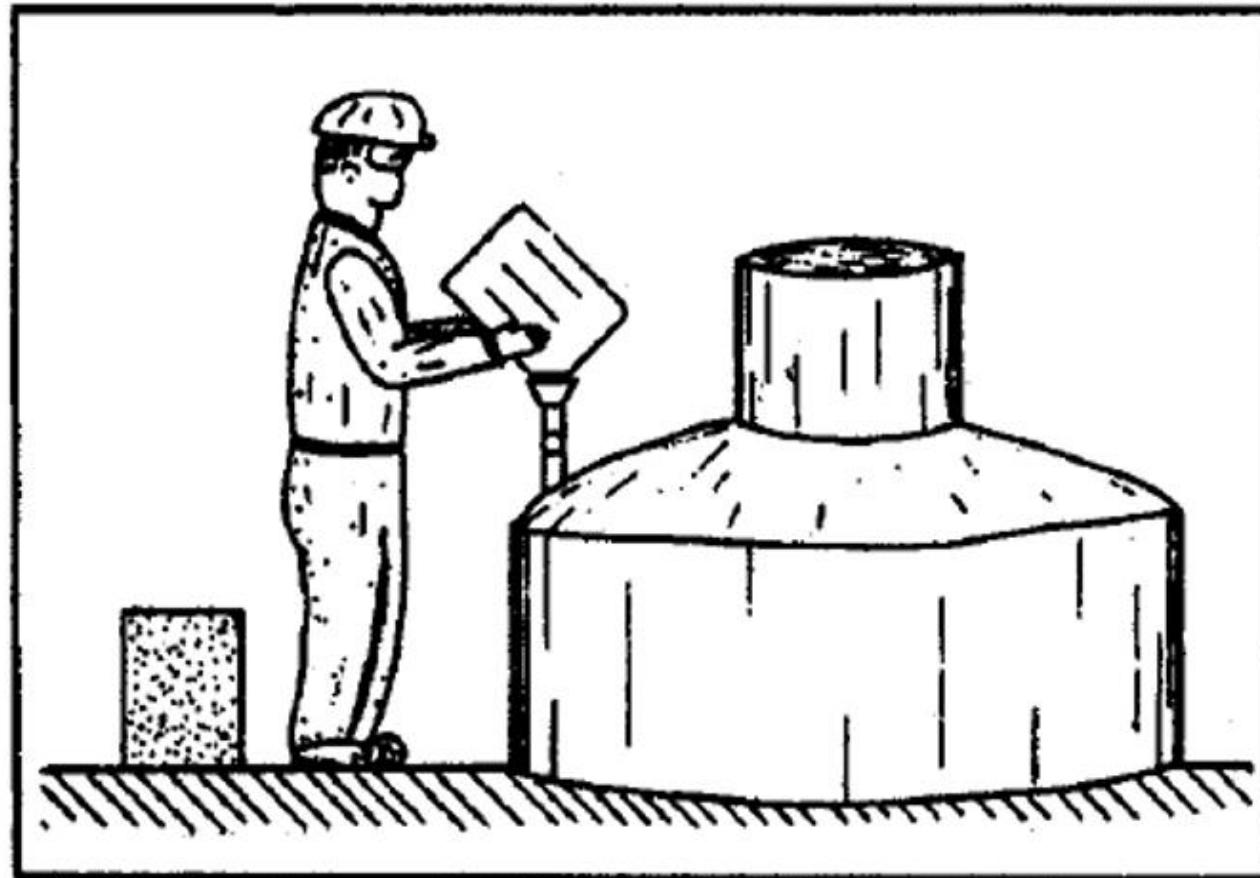
当两种材料接触然后分离时，接触面获得净电荷，一个带负电，另一个带正电

感应 (非接触) 起电



感应起电引发的火花放电事故

► DEKRA



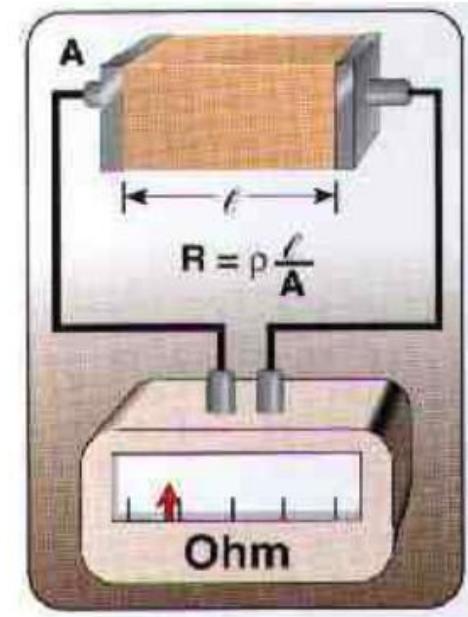
罐内温度40°C，内部形成爆炸气体环境，
并扩散至漏斗口

导电性易燃液体添加剂由玻璃桶包装，玻璃
桶从纸板箱从拿出分离时积累大量电荷

玻璃桶外表面积累电荷，导致桶内的液体感
应起电，并且无法导出

向漏斗内倒入添加剂时，感应起电的导电性
液体与漏斗火花放电点燃漏斗口可燃蒸汽

- **导电的** - 能允许电荷流动；液体导电率大于 10^4 pS/m （微微-西门子每米）或固体电阻率小于 $10^5 \Omega\text{m}$
- **亚导体/静电消散** - 能以可接受的速率消散静电电荷（电荷生成速率低于电荷消散速率）
- **绝缘的** - 能阻止电荷流动



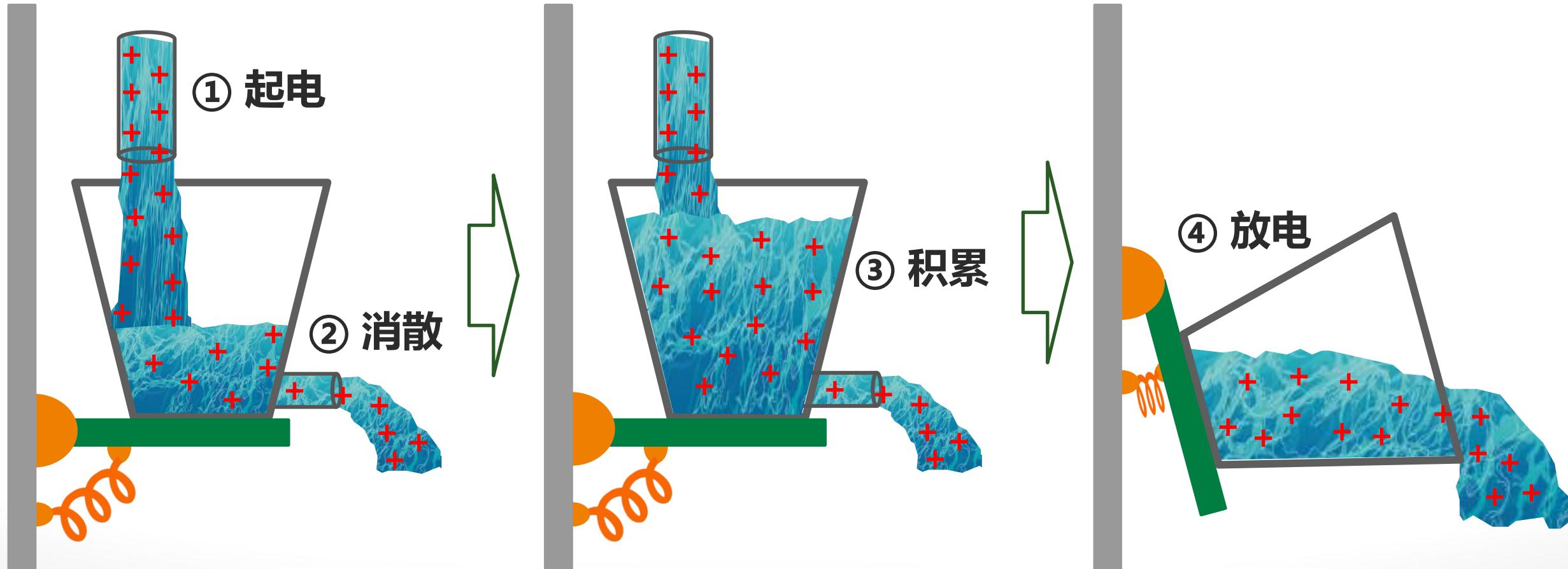
NFPA 77 – 2019

	导体	亚导体（静电消散）	绝缘体
液体	$> 10^4 \text{ pS/m}$	$10^2 \sim 10^4 \text{ pS/m}$	$< 10^2 \text{ pS/m}$
固体	$< 10^5 \Omega\text{m}$	$10^5 \sim 10^9 \Omega\text{m}$	$> 10^9 \Omega\text{m}$

静电放电的“水桶模型”

“化危为安”线上讲堂

▷ DEKRA



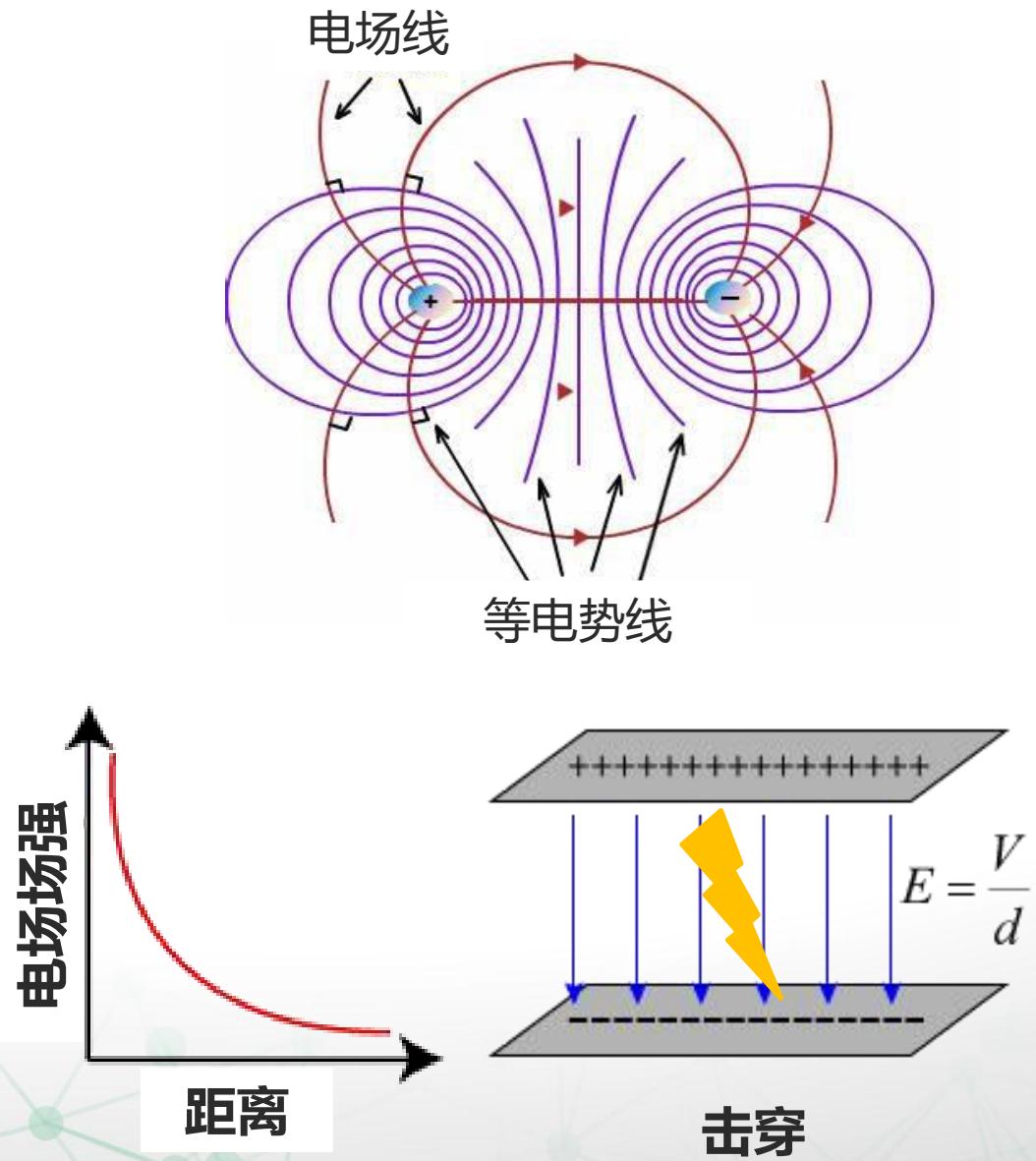
电荷的产生速率必须高于电荷的消散速率，才会导致电荷积累，
积累是引起静电放电的前提条件。

静电场及放电

- **静电放电** - 随着带电物体的电荷密度增加（或距离靠近），静电场的场强增加，电场强度达到介质的击穿场强时，介质将被击穿，此时将形成一个非常低电阻的等离子通路，**电荷及能量**大量释放并且被中和。
- 空气的击穿场强E为 $3 \times 10^6 \text{ V/m}$
- 如静电放电时，可燃物与助燃物的浓度在燃爆浓度范围内，可能导致可燃物被点燃，并且传播爆炸，静电放电的点燃能力主要取决于以下因素：
 - 电荷量/电荷密度
 - 电容大小
 - 放电类型
 - 可燃物的**点火能量**

“化危为安”线上讲堂

DEKRA

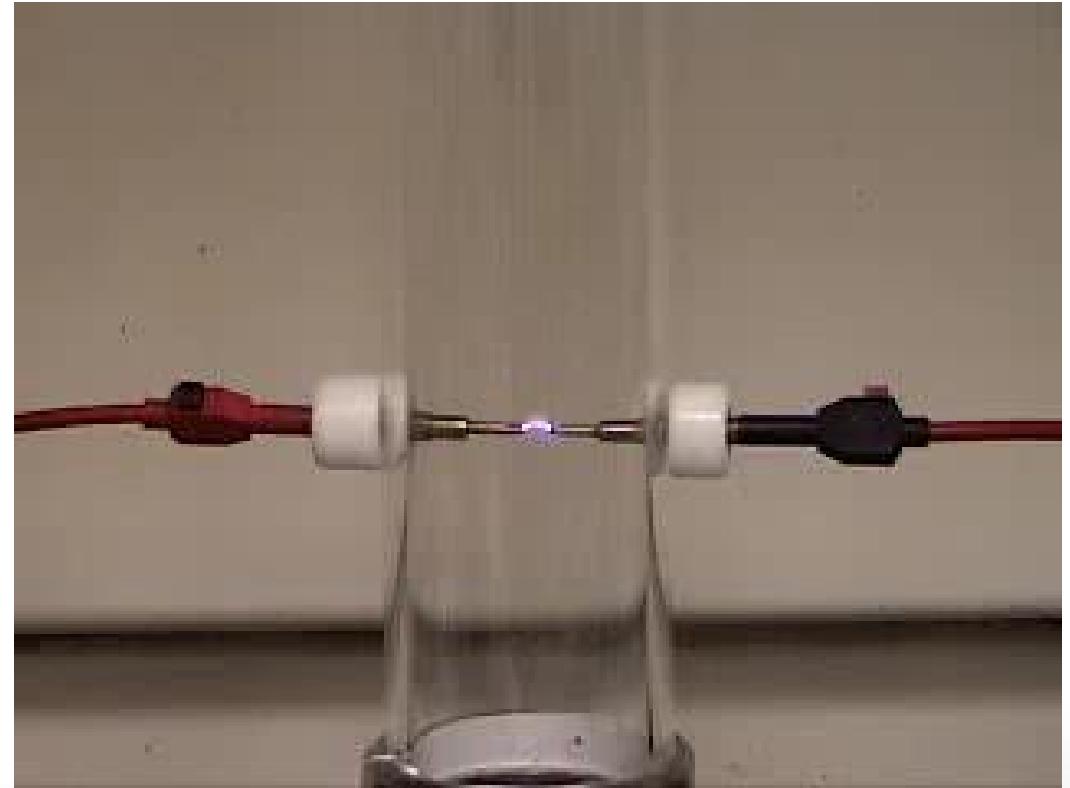
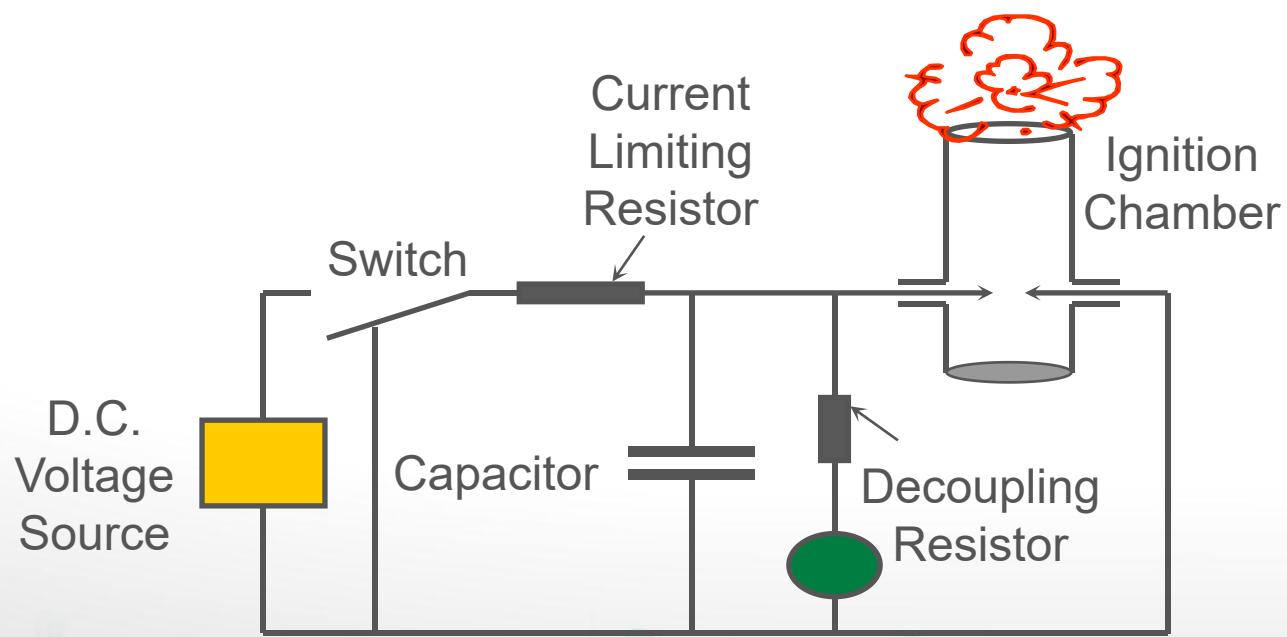


最小点火能

“化危为安”线上讲堂

DEKRA

- 可燃材料的最小点火能为理想条件下使用电容火花点燃具有**最佳浓度**的材料所需的最小点火能量



最小点火能列举

“化危为安”线上讲堂



Atmosphere 环境	Material 物质	Minimum Ignition Energy (mJ) 最小点火能
蒸汽 / 气体	丙醇	0.650
	乙酸乙酯	0.460
	甲烷	0.280
	甲醇	0.140
	乙炔	0.017
	氢	0.016
粉尘云	聚氯乙烯	1,500
	锌	200
	小麦粉	50
	糖	30
	硫	15
	铝	10
	镁	5

静电放电类型

“化危为安”线上讲堂

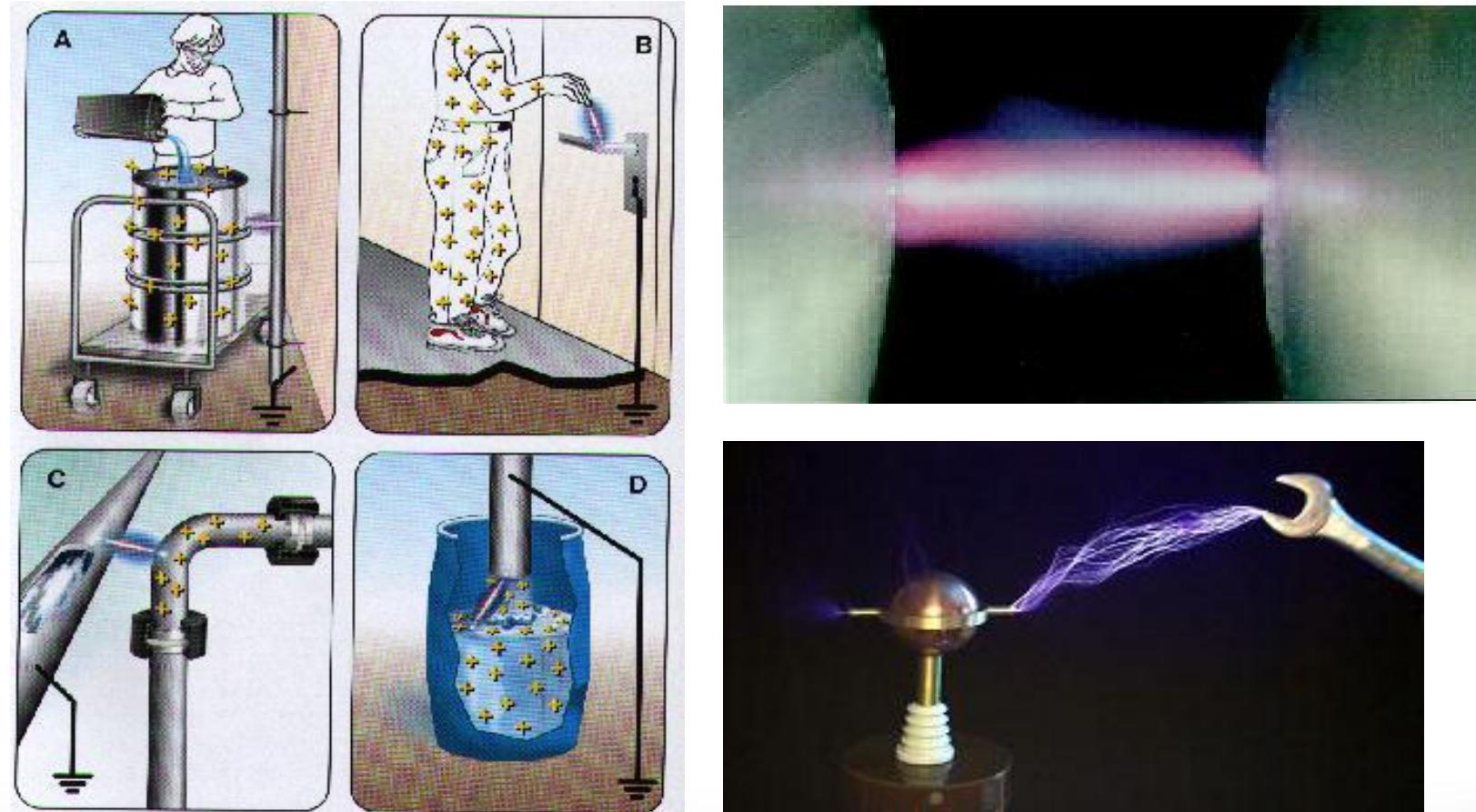


Discharge Type 放电类型	Origin 来源	Energy 能量	Incendivity 易燃性
火花	孤立导体	$E=0.5 CV^2$	蒸汽、气体&粉尘
刷形	固体绝缘子	< 4mJ	蒸汽、气体
锥 (散料)	散装粉体	< 25mJ	蒸汽、气体&一些粉尘
传播型刷形	具有金属垫板的绝缘子	高达数焦耳	蒸汽、气体&粉尘
电晕	导体或绝缘子	< ~0.2 mJ	高度敏感气体：氢气，二硫化碳

火花放电

“化危为安”线上讲堂

► DEKRA



导体之间的火花放电

火花放电

- 导体与导体之间的放电
- 带电物体的全部能量会被释放出来
- 能量：

$$W = 0.5 \times C \times V^2$$

或 $W = 0.5 \times Q \times V$

W 为能量，单位焦耳 J

C 为电容，单位法拉 F

V 为电容器上的电压，单位伏特 V

- 足够点燃气体、蒸汽及粉尘的爆炸性环境

带电物	电容 (pF)	储存能量 (mJ)
单个螺丝	1	0.01
法兰直径100毫米	10	0.50
铲	20	2.00
容器 (ca 50L)	50	2.00
漏斗	50	6.00
桶 (ca 200L)	200	40.00
人	300	15.00
公路槽车	1,000	100.00

孤立导体引起的静电点火事故

“化危为安”线上讲堂

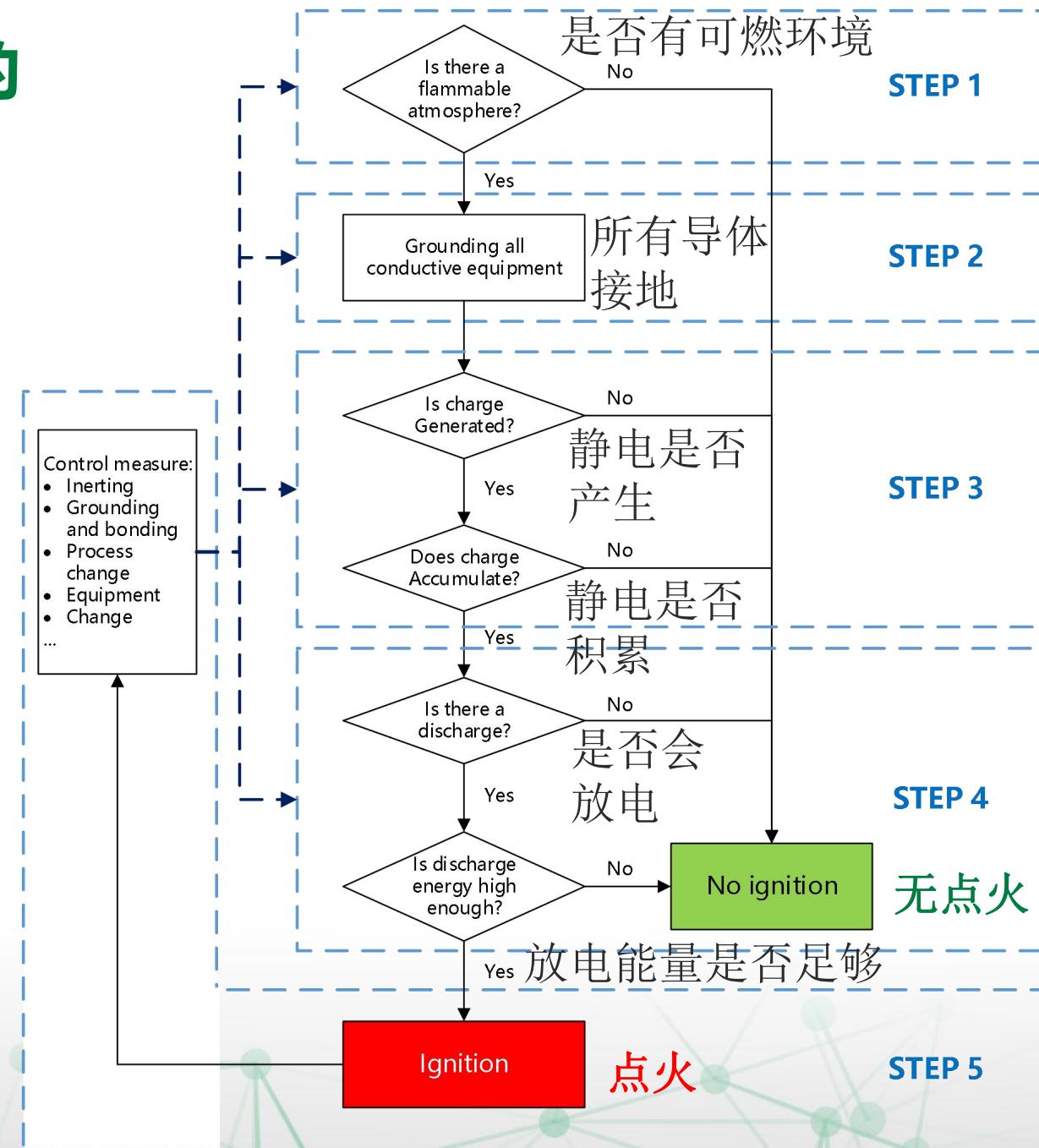
► DEKRA



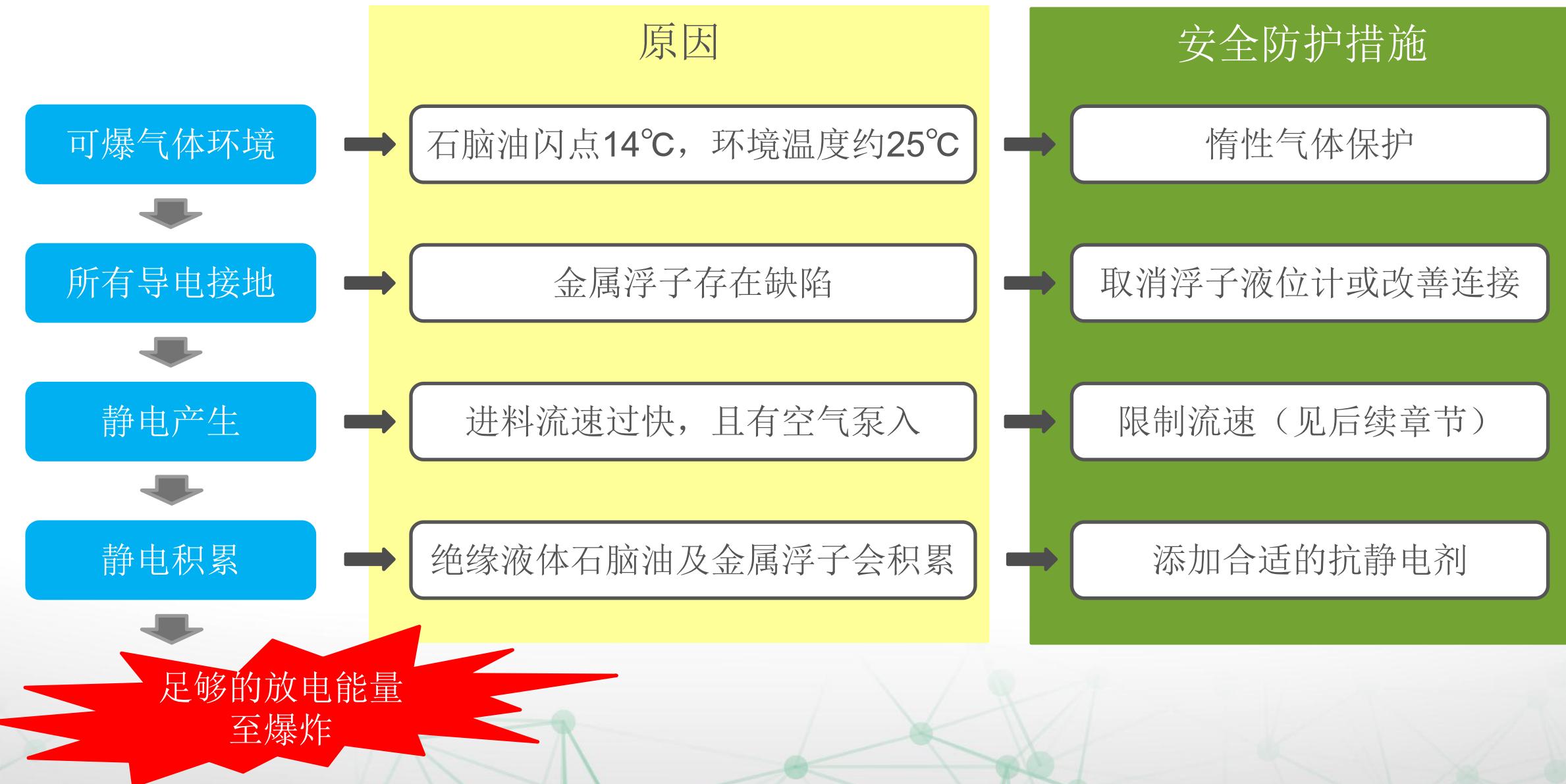
2007年美国巴顿溶剂公司石脑油储罐燃爆事故

评估静电危险的 系统方法

控制措施：
惰化保护
跨接&接地
工艺改进
设备设施改进



巴顿溶剂公司石脑油储罐燃爆事故分析



跨接及接地- 固定设备

“化危为安”线上讲堂

DEKRA

- 危险区域的金属导体应接地，接地电阻标准：

- 全金属连接： $< 10 \Omega$ (中国国标为 $< 100 \Omega$)
- 旋转，移动及导电性（塑料）材料连接的部位： $< 10^6 \Omega$ ($1M\Omega$)

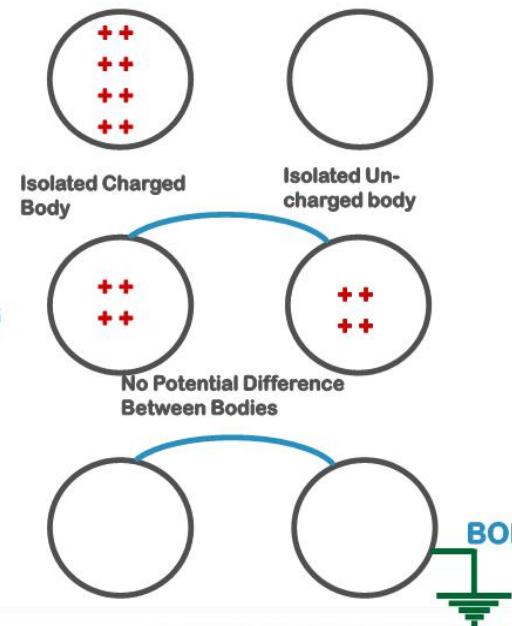
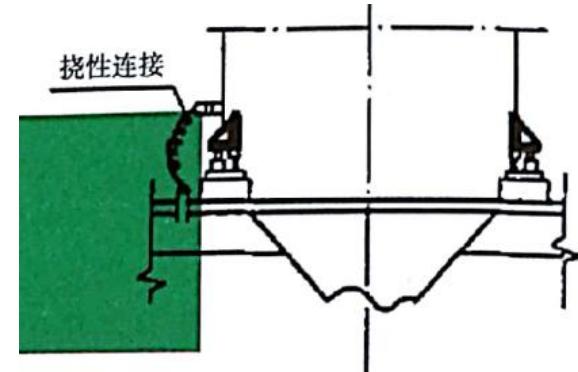
- 通常使用兆欧表 进行接地验证。

- 接地方式通常为对金属外壳或连接在外壳的金属支架上进行接地，直径大于或等于2.5m 及容积大于或等于50m³的设备，其接地点不应少于两处，接地点应沿设备外围均匀布置，其间距不应大于30m。

- 有振动性的固定设备，其振动部件应采用柔性的铜芯软绞线接地。

- 如设备上的金属部件与已经接地的金属外壳隔离，应通过跨接或接地的方式形成等电位

- 接地装置应清晰可见。

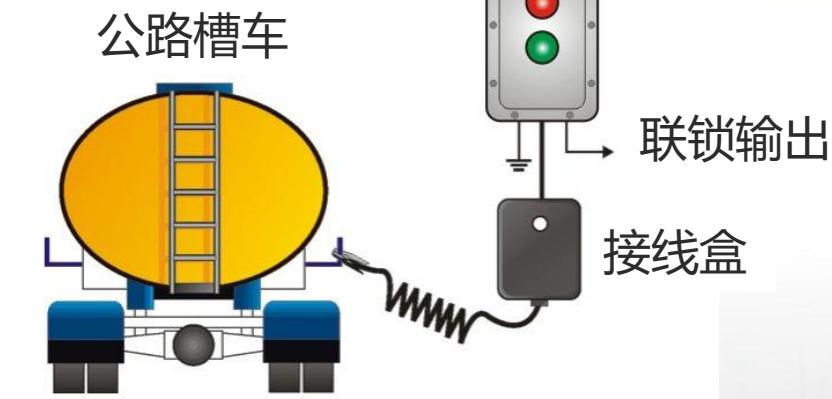


- 移动物体优先考虑“**被动接地**”，即采用金属碰金属的固定扣的方式连接实现接地（不依赖接地或跨接线）。
- 操作人员应知晓其目的，应在**操作移动装置前**连接接地线。
- 应使用一个可以穿透油漆、腐蚀产物与沉积物、具有硬化钢点的夹子完成固定。
- 对关键容器、部件等可以考虑采用**接地验证及联锁系统**。



接地夹

监测装置



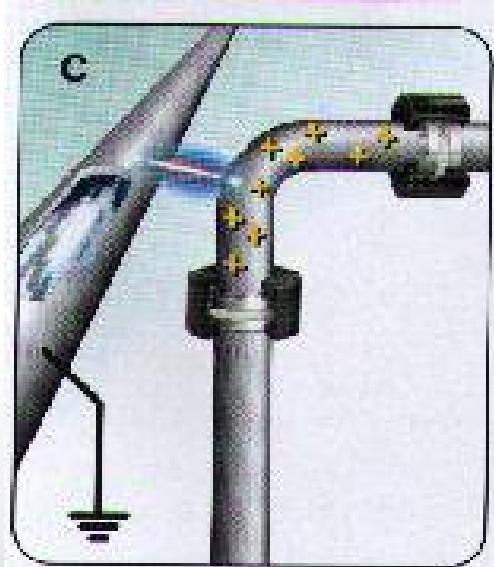
典型槽车接地验证及联锁

- 危险区域内的金属管道都应接地（通过金属连接或跨接）。
- 金属法兰采用金属螺栓或卡子相紧固时，一般情况可不必另装跨接线，在安装前需去锈和除油污（应保证至少有两个螺栓或卡子间的接触面），直接判定标准为**电阻值不超过 0.03Ω** ；辅助检验标准为管道系统的对地电阻值不超过 100Ω 。
- 对于静电接地及跨接线的**截面积大小没有要求**，但需考虑机械强度及腐蚀环境影响。
- 非强腐蚀环境，跨接线**不宜采用胶皮包裹**，防止断裂后不能及时发现。
- 当不少于5根螺栓连接时，在非腐蚀环境下可不跨接，但**应构成电气通路**。

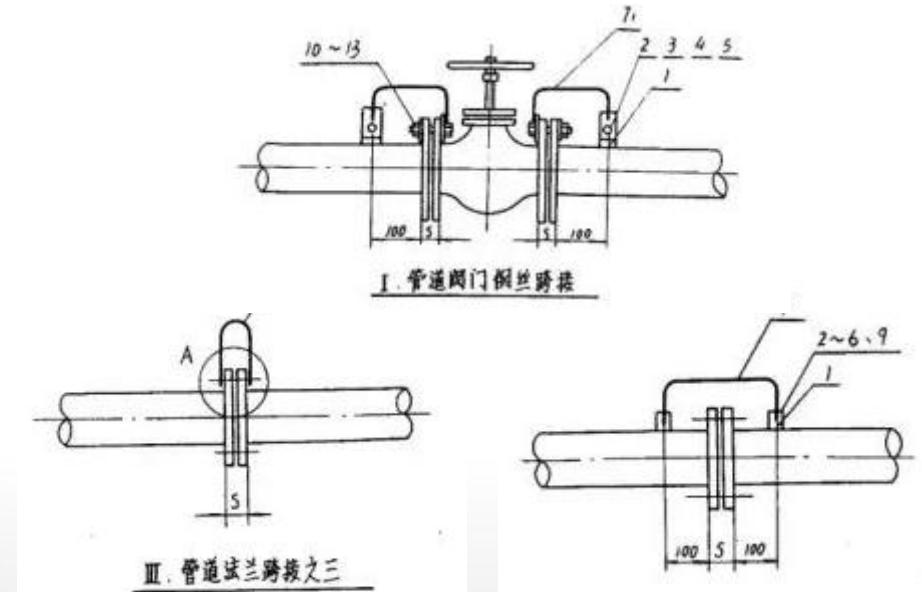


跨接线

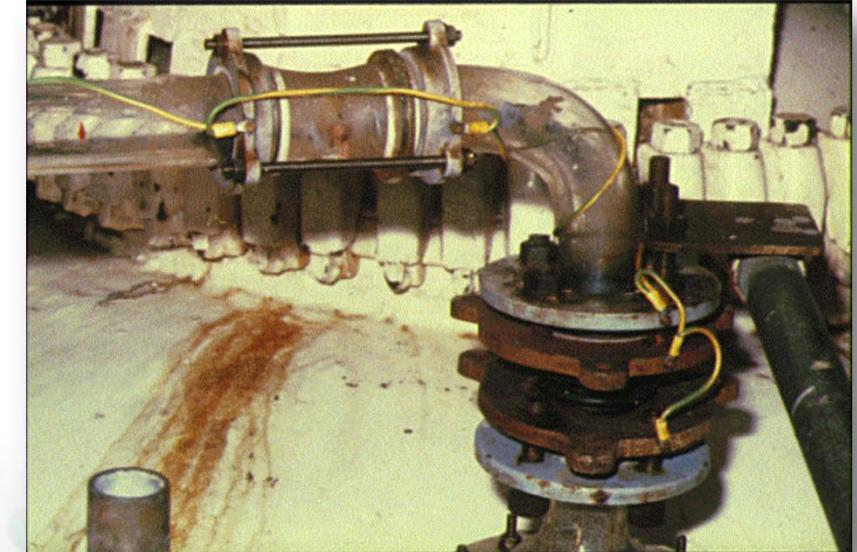
- 重复接地要求：长距离无分支管道应每隔100米接地一次。平行管道净距小于100毫米时，应每隔20米加跨接线，当管道交叉且净距离小于100毫米时，应加跨接线。
- 绝缘管道上的金属法兰、阀门等需接地。
- 接地需覆盖管道系统上的所有金属物体，防止形成孤立导体。



管道间的火花放电



跨接图示

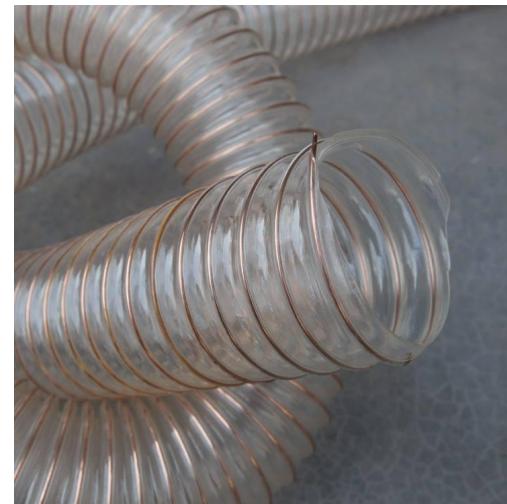
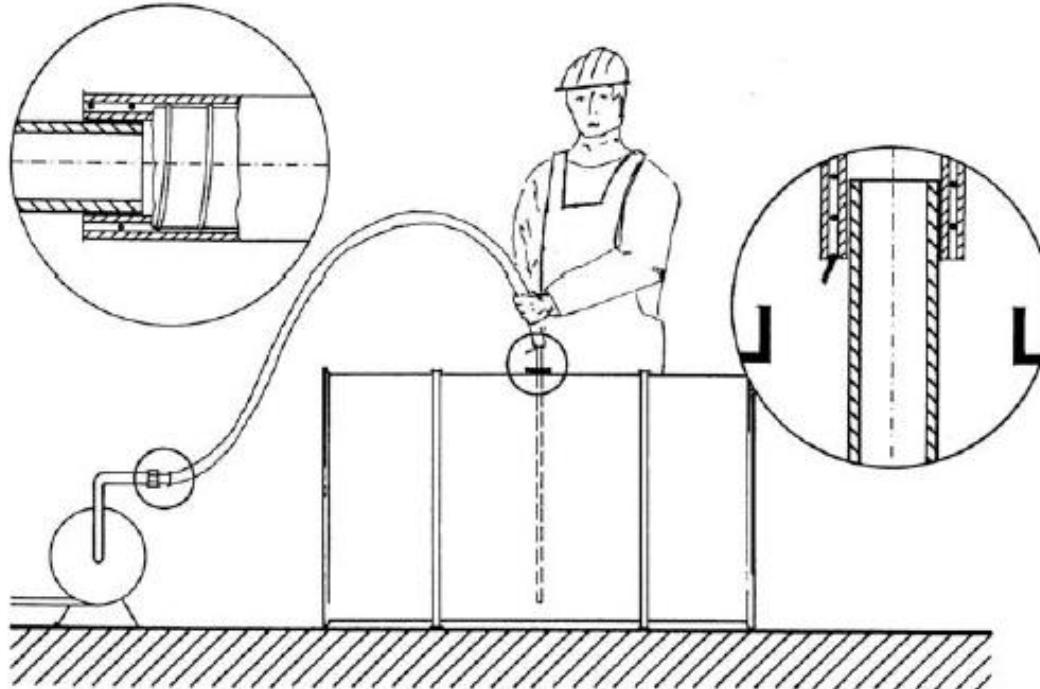


绝缘管道上的导体跨接

火花放电事故

“化危为安”线上讲堂

► DEKRA



一般波纹管



导静电软管

未接地的金属螺旋波纹管导致火花放电，点燃甲苯蒸气

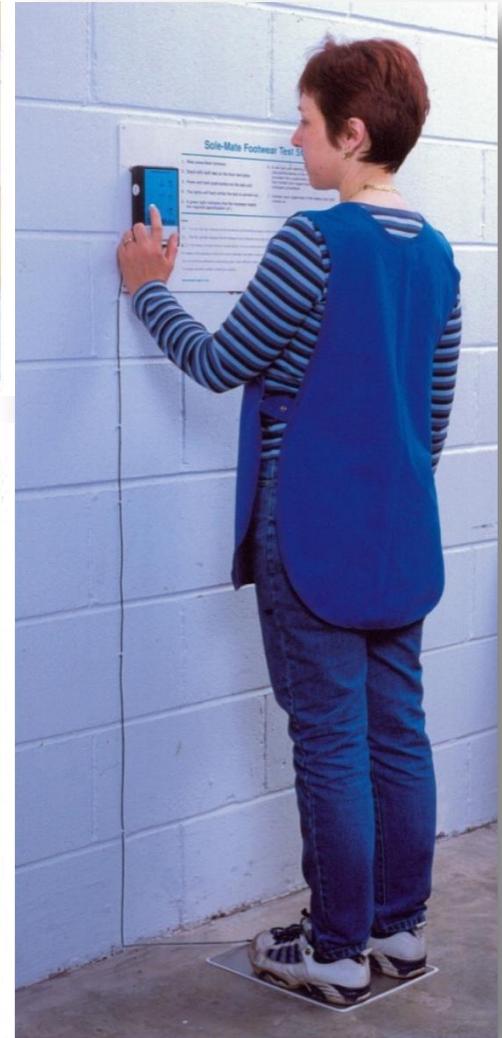
人体的静电危害及接地措施

“化危为安”线上讲堂

► DEKRA

- 正常活动时，人体所带的电势可达到10~15kV，且可能产生的火花能量可达到20~30mJ
- 可使用导静电鞋、鞋跟带或手环
- 操作人员站立处地板 / 表面的电阻也应小于 $10^8\Omega/m^2$
- 人体的对地电阻应在以下范围内：

$$1 \times 10^6 \Omega (1 M\Omega) < R < 1 \times 10^8 \Omega (100 M\Omega)$$



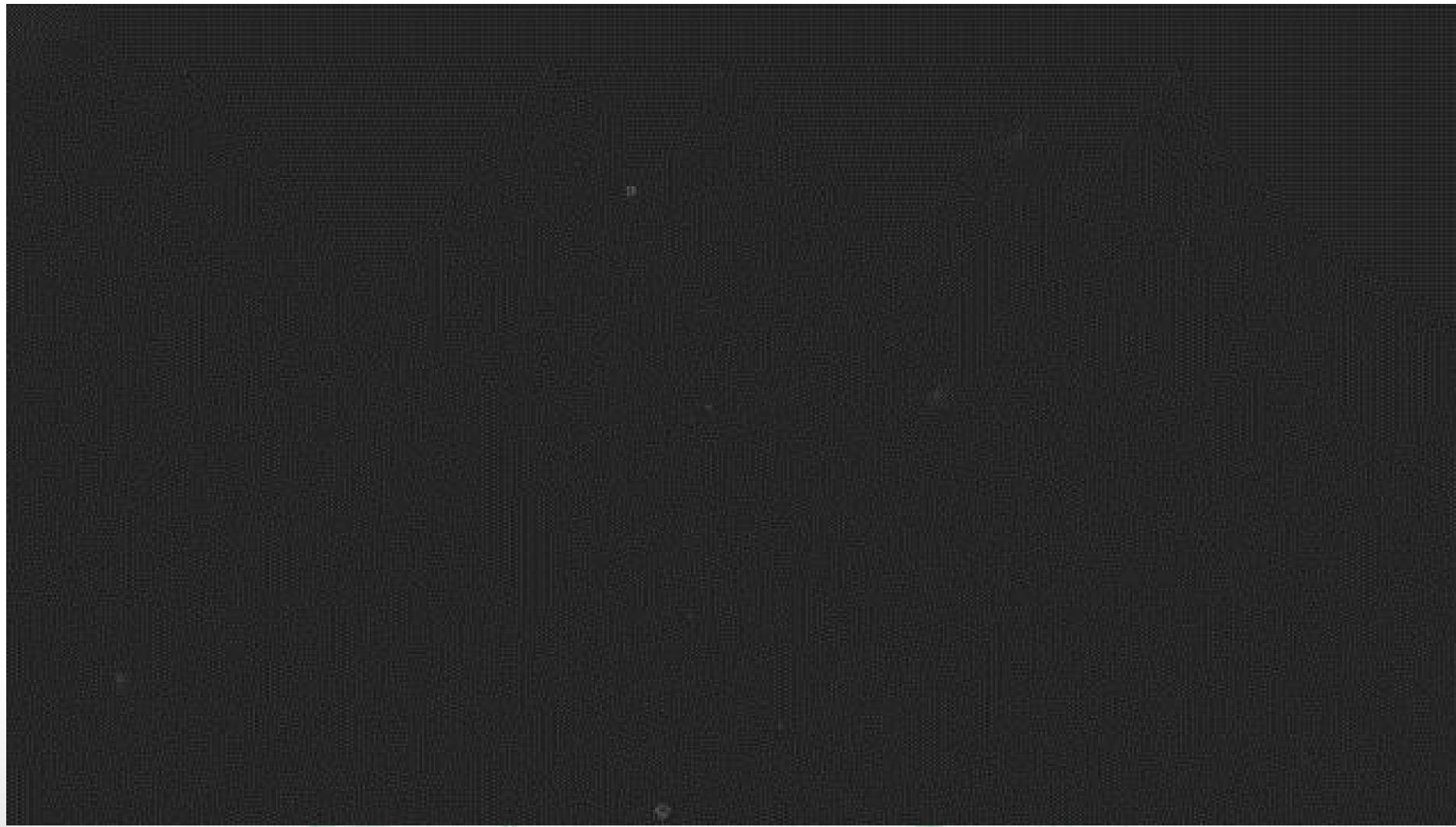


主要原因

- 极度易燃的丁烷气体作为珍珠棉发泡剂
- 可压缩的多层薄膜珍珠棉（聚乙烯）为绝缘体，在踩踏及撕扯时产生大量静电
- 人员踩踏时摩擦起电，并且通过带有大量净电荷珍珠棉感应起电
- 人员为接地导致静电积累
- 人员与车厢底发生火花或刷形放电

珍珠棉厂燃爆事故

“化危为安”线上讲堂



人体静电的检测及控制措施

“化危为安”线上讲堂

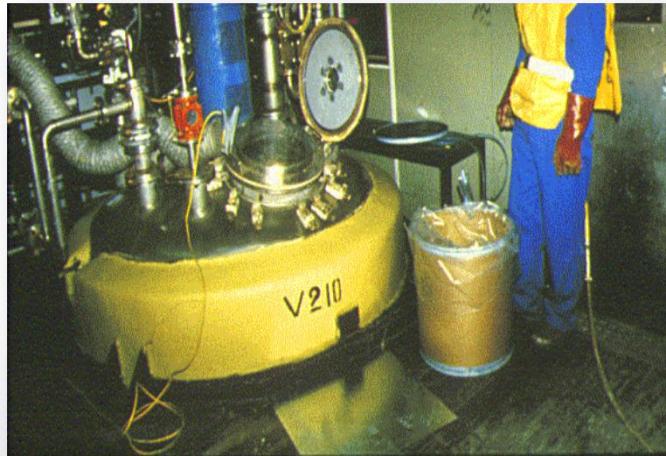
► DEKRA



地面表面电阻检测



人体对地电阻检测



导电金属板及地毯



需要特别关注的导电物体

“化危为安”线上讲堂

▷ DEKRA

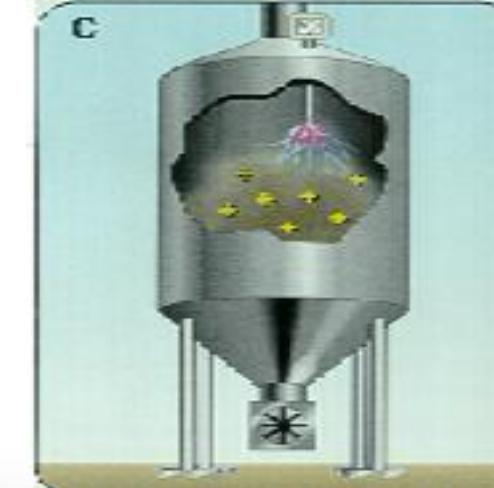
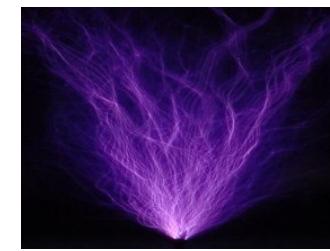
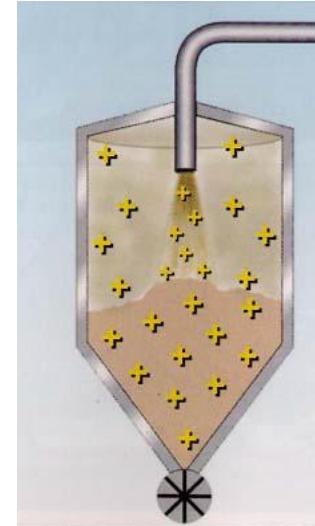


可移动(运动)的及软连接的物体!



刷形放电

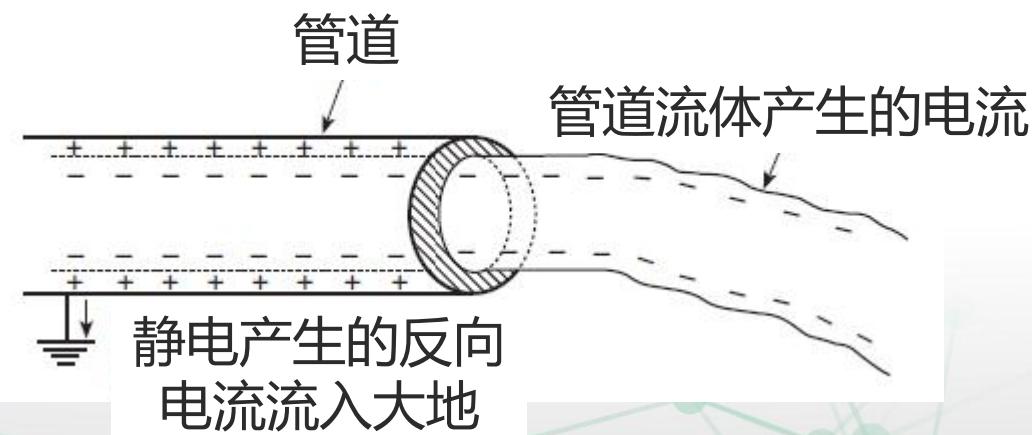
- 导体与绝缘体之间的放电
- 绝缘体需积累电荷，刷形放电可发生在绝缘体表面或存在电场的空间里
- 一般认为放电能量不超过4mJ
- 能够点燃蒸汽及气体，不能点燃可爆粉尘云（但可点燃异态混合物及富氧环境下的粉尘云）



静电危害在进行各种液体作业如装料、取样、过滤与混合时出现。液体的导电率显示其是否能保持静电电荷。

导电率的单位为西门子每米

	高电导率	中等电导率	低电导率
液体	$> 10^4 \text{ pS/m}$	$10^2 \sim 10^4 \text{ pS/m}$	$< 10^2 \text{ pS/m}$



典型液体的导电率

“化危为安”线上讲堂



Liquid 液体	Conductivity 导电率 ($\mu\text{S}/\text{m}$)	Comment 评述
丙酮	6×10^6	导电率高
乙酸	5.0×10^5	导电率高
乙酸乙酯	2.9×10^4	导电率高
甲醇	4.4×10^7	导电率高
乙酸丁酯	4300	导电率中等
异丙醚	500	导电率中等
甲苯	<1	导电率低
汽油 (无铅)	<50 (varies) 可变	导电率低
二甲苯	0.1	导电率低

以下减少静电点火危险的建议，针对所有电导率的液体

- 使用接地的导电装置

装置所有元件包括管道和容器应是导电的和 / 或具有静电消散功能并接地；操作人员也应接地

- 提高液体导电率

以很小的浓度使用抗静电添加剂以提高液体的导电（一般为ppm级的浓度）

- 避免形成飞溅进料

采用内插管并在初始的向容器进料的时间内，控制流速（1m/s）

液体的静电防护措施 – 移动容器进料

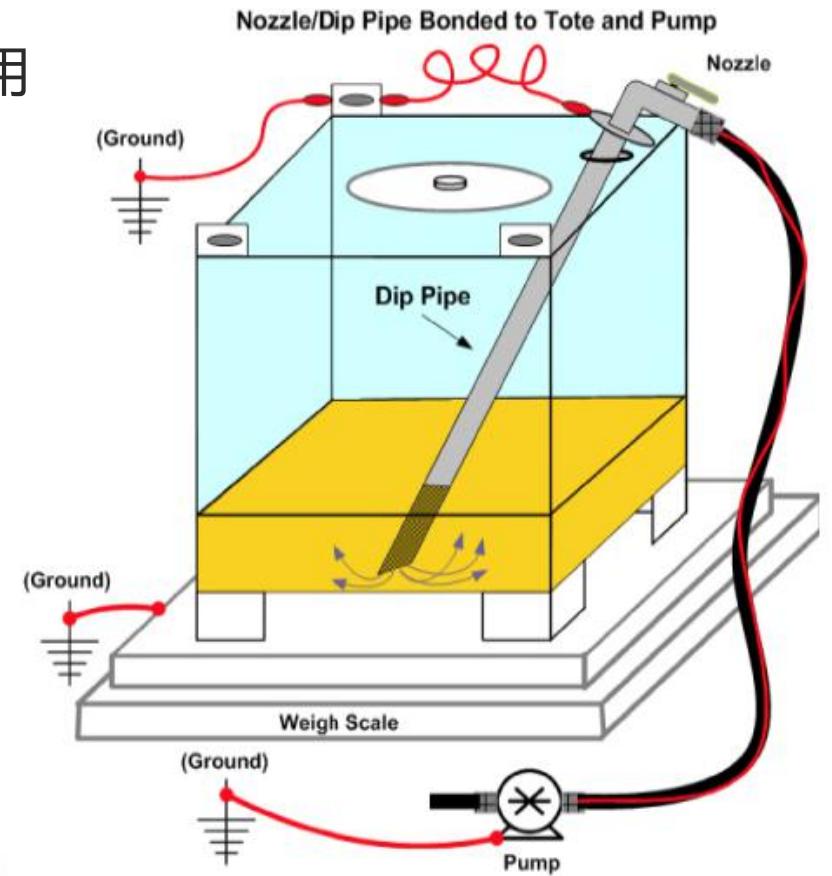


- 避免形成飞溅进料

- 将一根接地导电进料管一直延长到容器底部25mm处用于将液体输送到容器中，或从容器底部进料
- 进料口以大约45度方向切割进料管，且应将其一直保持在液面下直到容器充满
- 通过一根短进料喷嘴向下流入容器内壁

- 流速控制（针对导电金属容器）

- 导电率**大于**100pS/m的液体，无流速限制（需避免形成飞溅进料）
- 导电率**小于**100pS/m的液体，无不可混溶组分，流速应**小于**7 m/s（沿容器壁下流，流速小于2 m/s）
- 导电率**小于**100pS/m的液体，含不可混溶组分，流速应**小于**1 m/s



导体跨接，接地及进料管示意

因绝缘体导致的静电燃爆事故

“化危为安”线上讲堂

► DEKRA



金属导电材质的储罐及槽车，应采取以下通用安全措施：

- 评估容器内是否会形成爆炸性气体环境：
 - 通常中等蒸汽压的易燃液体在环境温度下容易到达爆炸极限（闪点低于38°C，38°C下蒸汽压低于31 kPa）。
 - 对于闭杯闪点高于环境温度5°C（11°C用于组分不明混合物）的液体，一般不需要特别的静电防控措施，但仍然需要避免飞溅进料，并考虑是否有升温过程。
 - 高蒸汽压的易燃液体（38°C下蒸汽压高于31 kPa）在容器内的蒸汽浓度通常超过了UEL，但需考虑初始进料、局部空间及降温过程的静电风险。
- 所有导体应接地，包括管道、泵、过滤器及仪表等。
- 避免形成飞溅进料
 - 采用内插管或底部进料并在初始的向容器进料的时间内，通常控制流速小于1m/s。
 - 进料管口处设计为倒“T”形弯头或45°斜角，以减少液面形成气泡及液滴。
 - 避免空气引入进料管及储罐内。

中等及高电导率的液体可通过管道迅速消散电荷，但低电导率的液体消散速度很慢，应通过限制流速抑制静电产生速率，减少静电积累，流速要求如下：

允许最高流速	固定顶储罐 & 槽车		浮顶储罐
	低电导率	中等及高电导率	
初始进料 1m/s	Y	Y	Y
持续进料 7m/s	Y ^a	N ^b	N

- a. 如含有两相不相溶液体，整个进料过程应低于1 m/s
槽车装料应低于 $0.5/d$ m/s；对于电导率低于10 pS/m的液体，建议低于 $0.25/d$ m/s
对于立式中型储罐 ($D < 10$ m)，流速应低于 $0.7(D/d)^{0.5}$ m/s
- b. 对于中型储罐及槽车，建议不超过7 m/s

D为储罐直径，单位 m； d为进料管内径，单位 m

绝缘体产生静电的对地消散速率较慢，应等待足够的时间，使绝缘体上的静电消散至安全范围：

- 在槽车进入灌区停止后，或液体进料结束后，将对槽车进行取样
- 在储罐、反应釜、桶等容器液体进料后，将对容器进行取样或伸入液面附近进行探测
- 在过滤、离心等固液分离工艺结束后，将打开设备进行人工操作时

等待时间要求：

- 槽车：最少**2分钟**；大型容器 ($>40\text{ m}^3$)：通常最长不超过**30分钟**
- 其它容器：**3倍**弛豫时间常数，通常不超过**5分钟**



注：此要求不适用于**高粘度**的液体或容器内有**大量雾滴**的场景，其等待时间可能更长；**缺少接地通路**的容器的等待时间也会更长。

槽车取样的静电点火事故

“化危为安”线上讲堂

► DEKRA



某化工企业，在甲苯装车的同时进行顶部取样，槽车发生燃爆

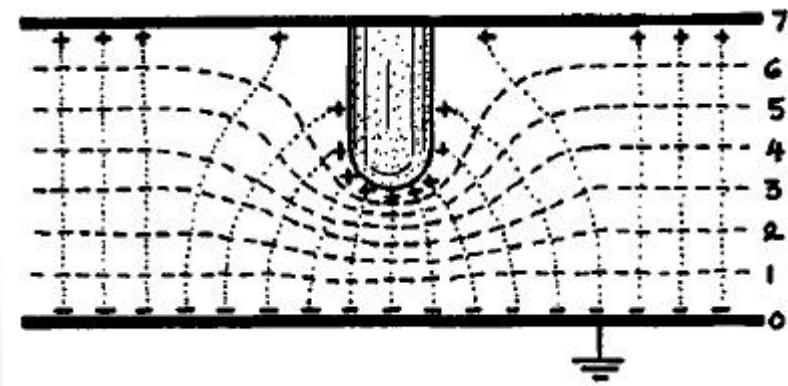
火花引发物

“化危为安”线上讲堂

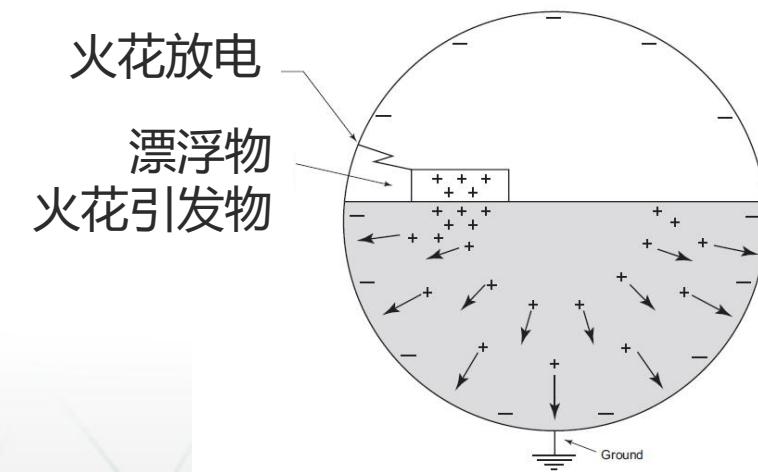
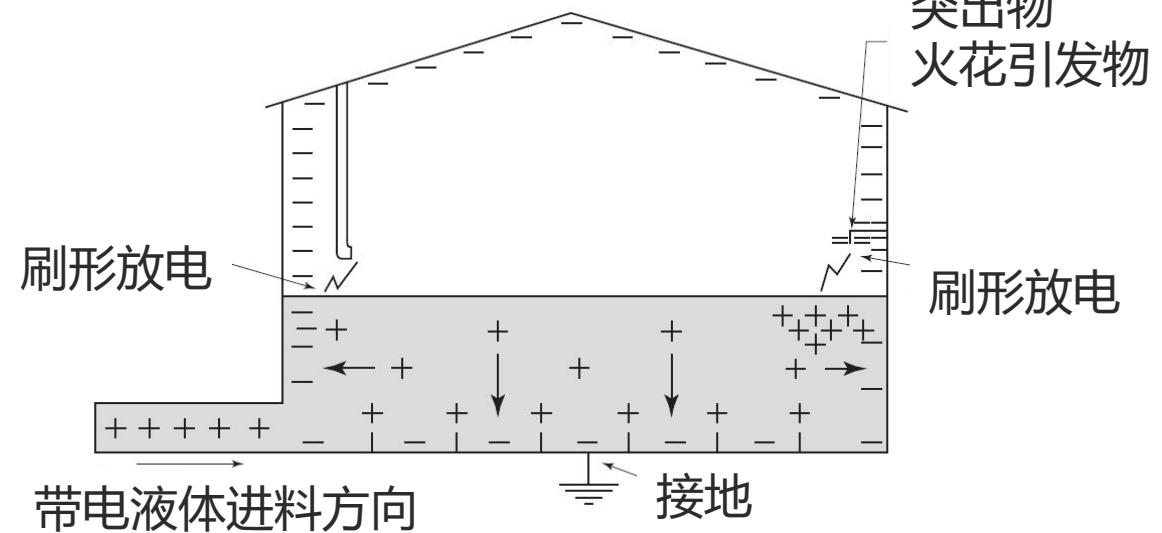
DEKRA

应避免在液面上出现火花引发物：

- 插入容器内部的导电性探测管或进料管
- 漂浮的导电性物体
- 人为操作引入上面的导电性物体



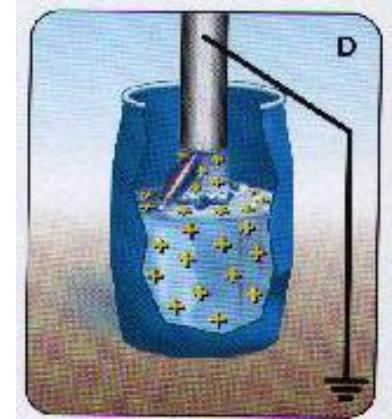
火花引发物改变电场分布



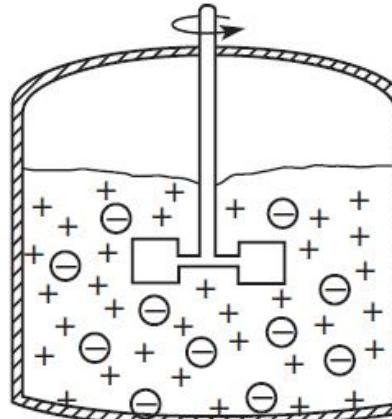
火花引发物

因为绝缘（塑料）容器不能接地，采用绝缘管道及容器的加工场景，如可能形成爆炸性气体氛围，建议进行详细的风险评估，以下为可供参考措施：

- 考虑导电性或亚导体材料。
- 涉及的导体全部接地，并且避免导体靠近液面或具有高电荷密度的绝缘表面（火花引发物）。
- 应在液体与地面之间设置导电消散路径。对于导电液体，此路径可能为接地金属进料管或几乎延长到容器底部的进料管。
- 对于导电率低的液体，需要辅助接地，这取决于容器的尺寸与液体的导电率。
- 如在进入接收容器前，没有任何对地消散静电的渠道，建议管道流速不高于 1 m/s。
- 容器内进行连续的惰性气体保护，以消除氧化剂。
- 在容器开口处设置局部排风（LEV），以减少可燃物的浓度。



导电液体与金属管道之间的火花放电



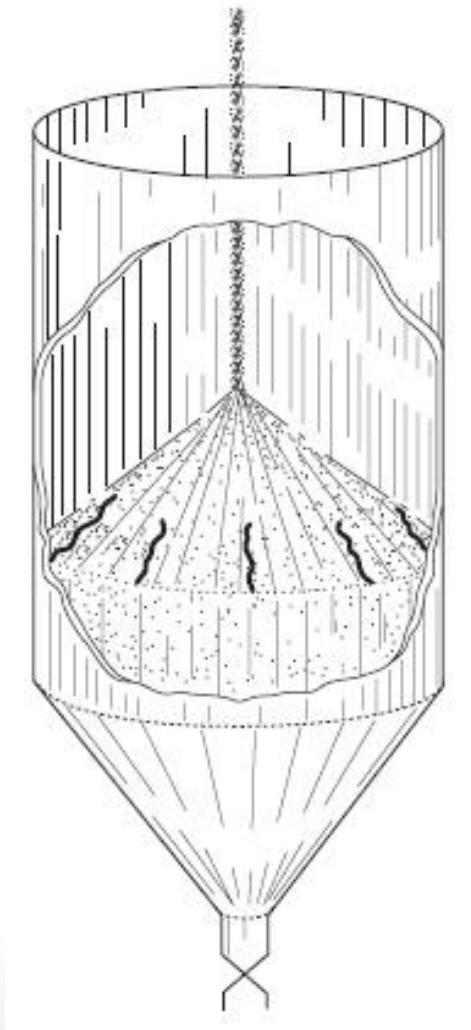
绝缘容器内因各种原因产生的电荷很难消散



绝缘物有关的事故场景

锥形(散料)放电

- 体积电阻率超过 $10^9 \Omega\text{m}$ 的绝缘性粉末装料时发生。
- 需要较快的充装速率，物料在容器内压缩，增加了电场强度，促使发生放电。
- 在直径小于1m的容器内发生的可能性很低，即使发生，能量也较低（约1 mJ）。
- 随着容器**直径**及颗粒的**粒径**增加，放电能量增加，但一般认为放电能量不超过25mJ。
- 能够点燃蒸汽、气体及MIE较低的粉尘云。



- 体积电阻率 $< 10^5 \Omega\text{m}$

可发生**火花放电**，避免工艺上出现绝缘体，导体接地。常见的为金属粉末。

- 体积电阻率 $10^5 \sim 10^9 \Omega\text{m}$

相对较安全，不会出现锥形放电，可能会出现刷形放电，在接地的导电性容器中，不需特别的安全措施。

- 体积电阻率 $> 10^9 \Omega\text{m}$

静电消散速率慢，在已接地的导电容器中，也会积累电荷，能引起**刷形放电**，及**锥形放电**。绝大多数的有机粉末为此类。

粉末导电性划分

	导体	亚导体（静电消散）	绝缘体
体积电阻率	$< 10^5 \Omega\text{m}$	$10^5 \sim 10^9 \Omega\text{m}$	$> 10^9 \Omega\text{m}$

- 体积电阻率 $> 10^9 \Omega\text{m}$, 最小点燃能 $< 25\text{mJ}$ 的粉体, 在容器进料时, 可出现锥形放电, 建议通过以下措施减少其风险:
 - 避免使用非导电容器
 - 限制进料速度:
 - 1.4 kg/s (对于中位粒径 $> 2 \text{ mm}$)
 - 5.6 kg/s (对于 $0.4 \text{ mm} <$ 中位粒径 $< 2 \text{ mm}$)
 - 8.3 kg/s (对于中位粒径 $< 0.4 \text{ mm}$)
 - 设置惰性气体保护
 - 安装爆炸保护装置

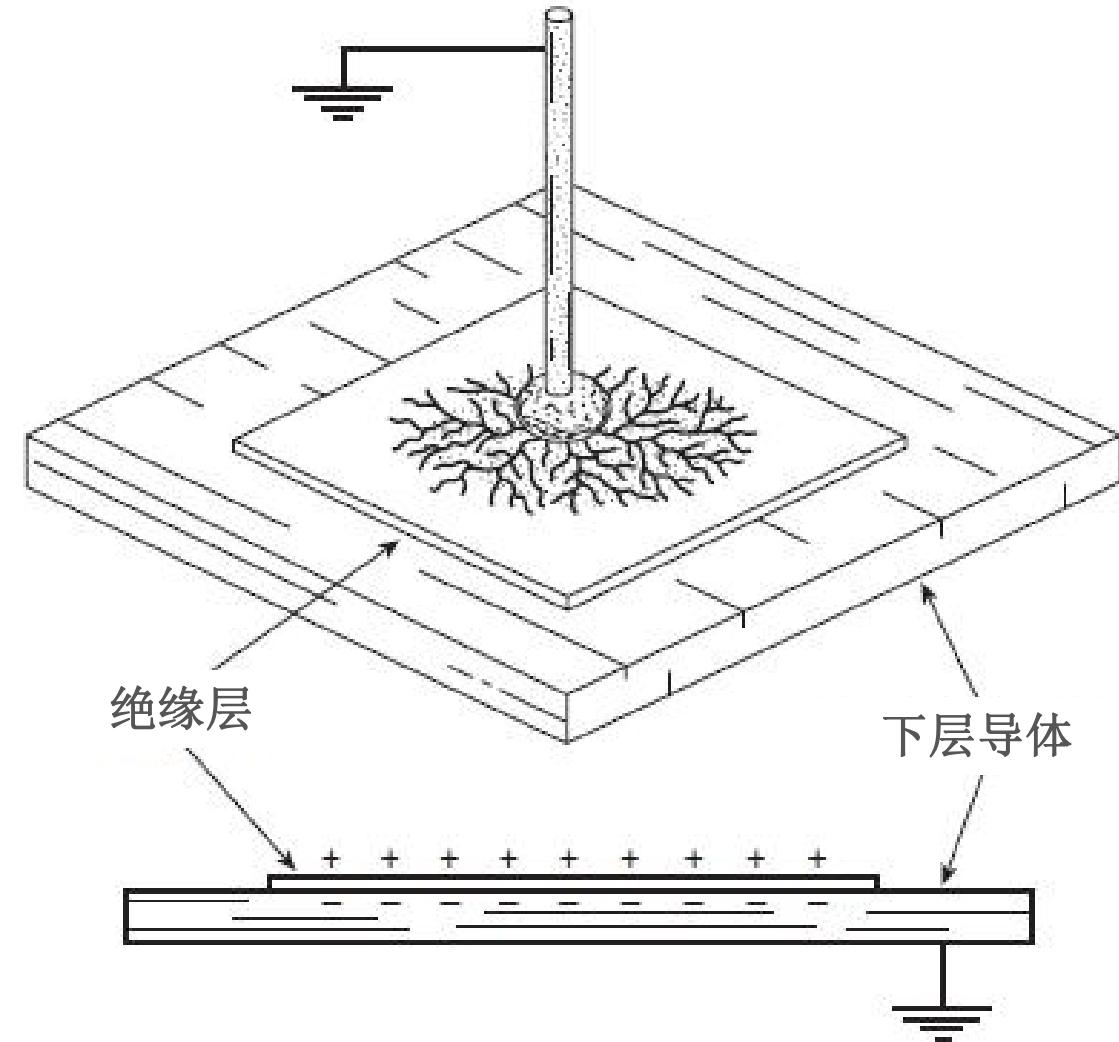
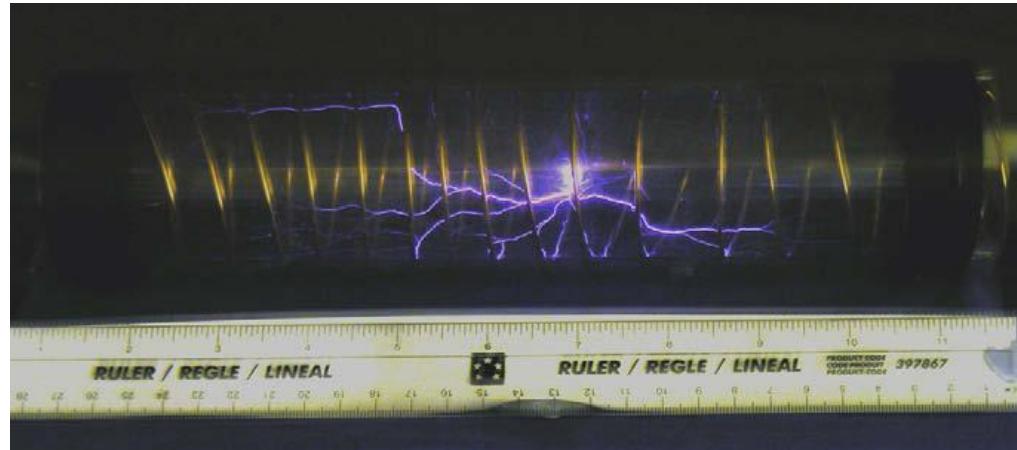


REMBE®

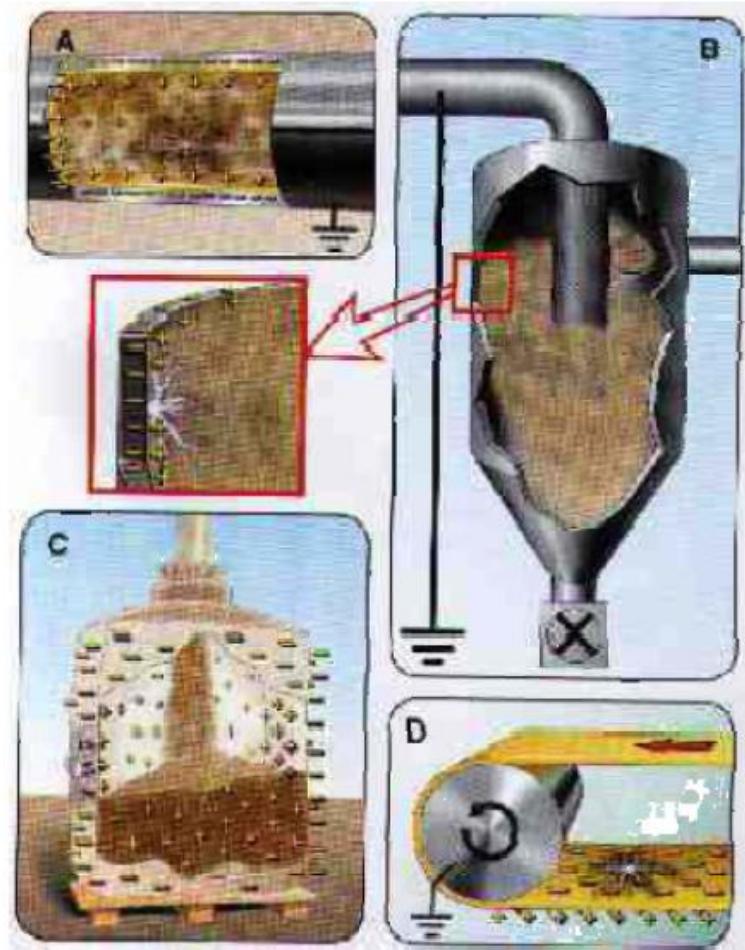
泄爆板

传播型刷形放电

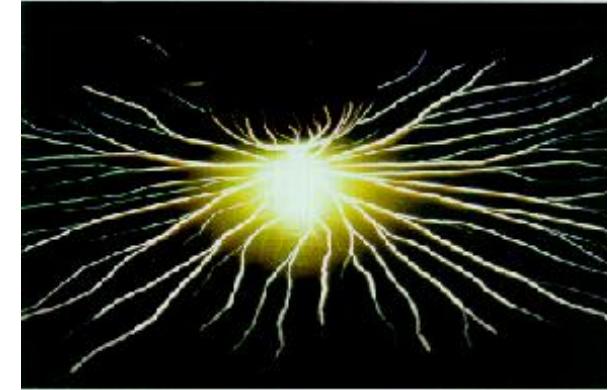
► DEKRA



- 金属表面涂有薄薄一层（小于8毫米）绝缘材料的表面（表面电阻率高于 $10^{11} \Omega\text{m}$ ）将作为一个电容器存储电荷。
- 内衬管道、容器或无内衬的管道、容器。在粉末与材料高速接触与分离时，可能出现传播型刷形放电。
- 点燃风险和由传播型刷型放电导致的生理性休克受以下因素影响：
 - 内衬厚度
 - 内衬电阻率
 - 处理步骤
- 发生传播型刷形放电需要很高的荷电密度 ($250\mu\text{C}/\text{m}^2$)，人工操作引发此类放电的可能性可忽略。
- 放电伴随较大的声响及电火花，传播距离可达数米，引燃能量一般认为100mJ至数个焦耳。



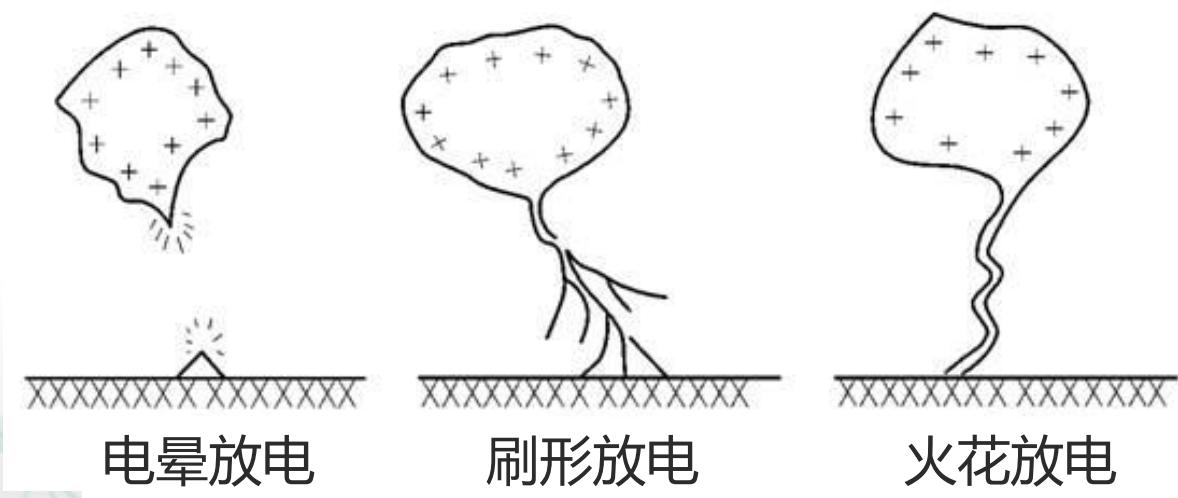
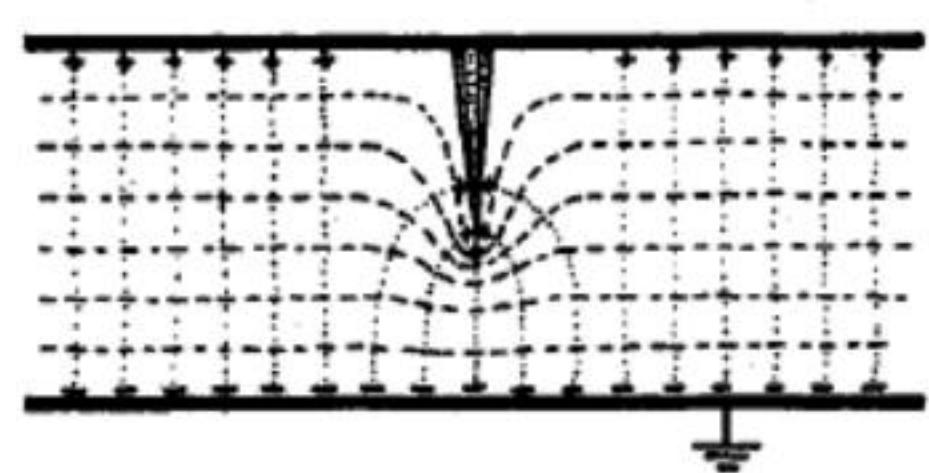
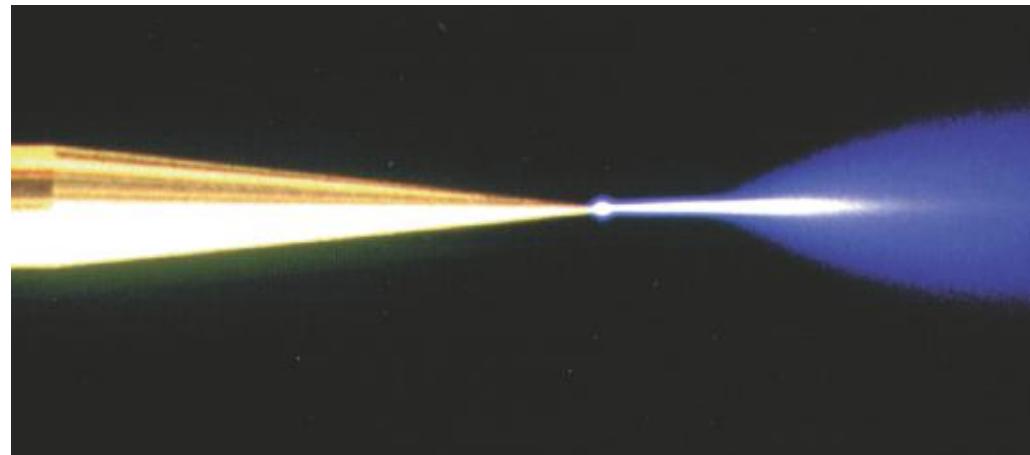
- 足够点燃气体、蒸汽及粉尘的爆炸性环境
- 建议考虑以下安全措施：
 - 采用导电型或静电消散型的表面材料
 - 增加材料的厚度至8 mm以上，但需要考虑锥形放电及刷形放电的风险
 - 材料的击穿电压小于 4kV
 - 限制速度，对于点火能低于2000 mJ的粉末，建议不超过 10 m/s (NFPA 652)
 - 设置惰性气体保护，或通过惰性气体输送粉末



电晕放电

“化危为安”线上讲堂

DEKRA

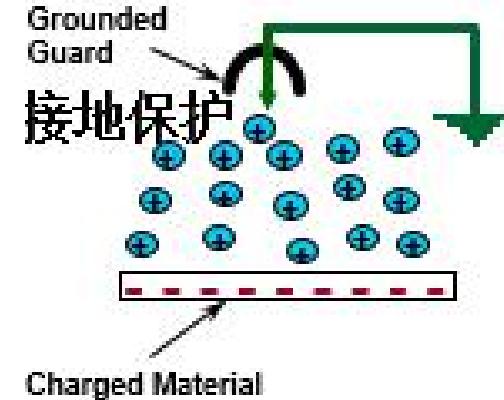


电晕放电

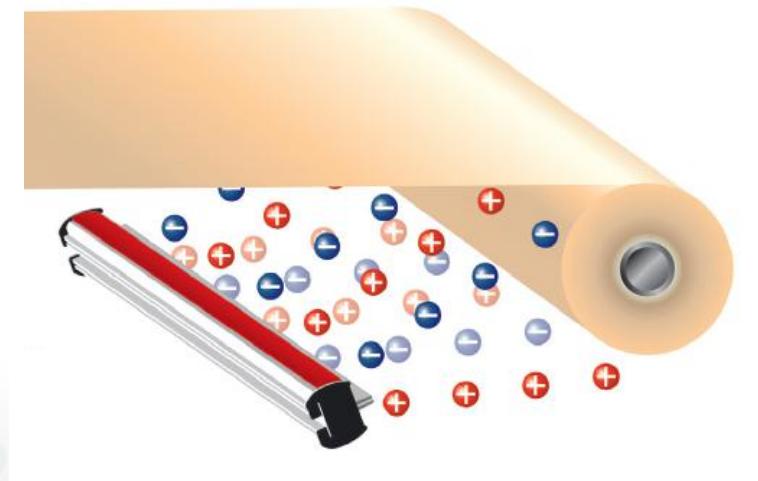
- 能量很低的放电
- 曲率半径非常小的导体 ($<1\text{mm}$) 易出现
- 点燃性：能力甚小，只有对一些非常敏感的气体（在存在氢气、乙炔和二硫化碳的环境），才考虑避免电晕放电的点燃风险
- 能量不超过 0.2mJ
- 仅能点燃IIC类高度敏感的气体：**氢气、乙炔和二硫化碳**
- 通常可将电晕放电作为安全措施，也是一类安全消散静电荷的渠道，如静电消除器/中和器

“化危为安”线上讲堂

► DEKRA



带有电荷的材料



静电消除器/中和器

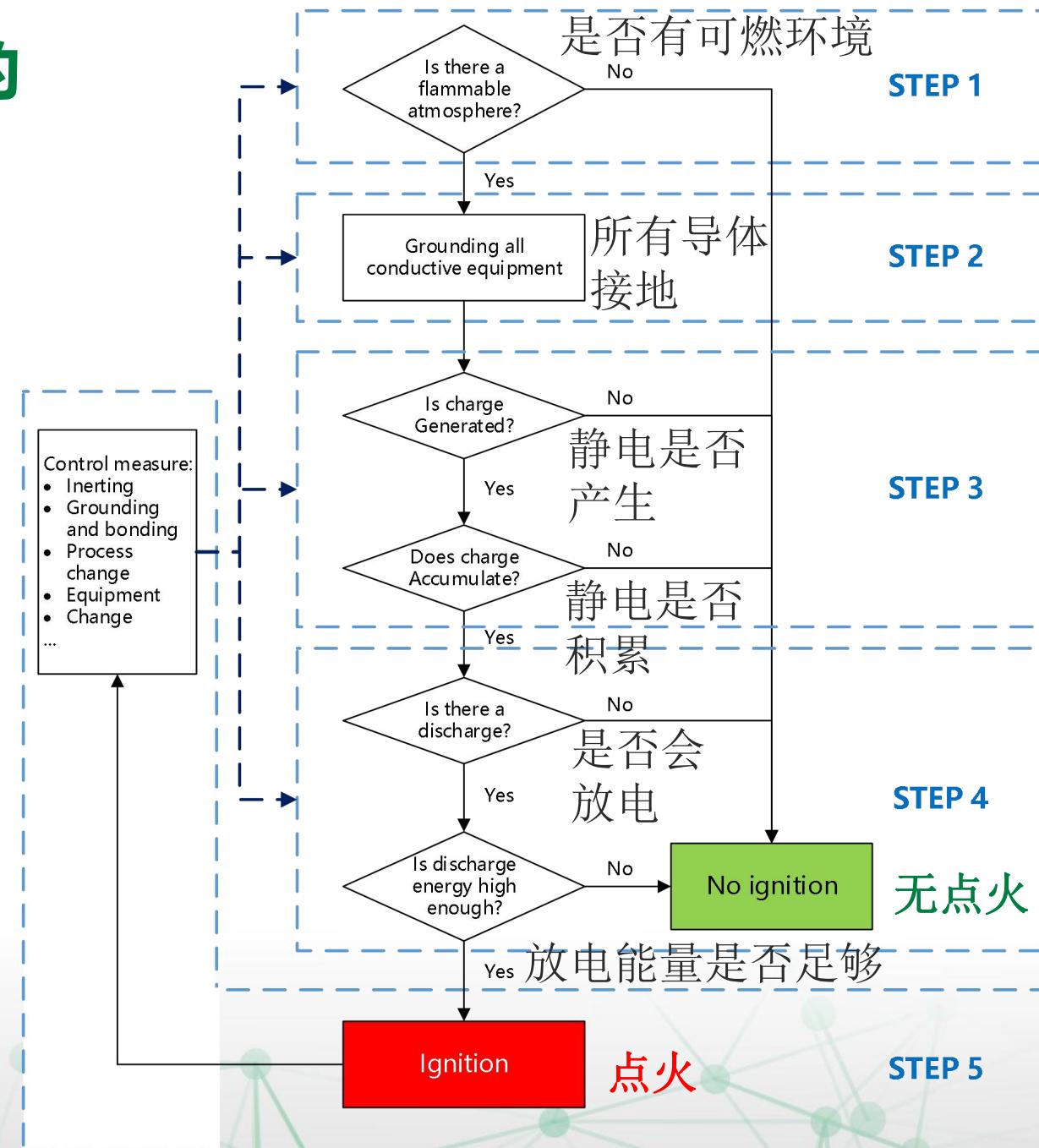
放电类型	点燃能力			能量
	气体, 蒸汽 MIE < 0.025 mJ	气体, 蒸汽 MIE > 0.025 mJ	粉尘	
火花	+	+	+	$E=0.5 \text{ CV}^2$
刷形	+	+	-	< 4mJ
锥 (散料)	+	+	+	< 25mJ
传播型刷形	+	+	+	> 1000 mJ
电晕	+	-	-	< ~0.2 mJ

+ 能点燃

- 不能点燃

评估静电危险的 系统方法

控制措施：
惰化保护
跨接&接地
工艺改进
设备设施改进



答疑时间

感谢您关注安全！

