

# Research on Static Electricity Hazard Analysis and Systematic Prevention and Control in the Production Process of Oil based Coatings

Chunrong Ni

COSCO Kansai Coatings (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai, 201512, China

## Abstract

The production of oil-based coatings involves a large amount of flammable organic solvents and powders, among which many materials with high electrical resistivity are prone to static electricity accumulation. Once the energy reaches the minimum ignition energy (MIE), it is highly likely to cause fire and explosion accidents. This article systematically analyzes the static electricity risk sources during the process based on relevant charging mechanisms and discharge theories; Deeply explored the impact of key parameters such as resistivity, relaxation time, and minimum ignition energy on risk level; Adopting four levels of systematic prevention and control, including engineering control (grounding, flow rate limitation, etc.), process optimization (feeding method optimization, etc.), online monitoring (static electric field strength, etc.), and safety management (risk assessment, operating standards, etc.). By analyzing case studies and applying quantitative risk assessment models, the effectiveness is verified, providing theoretical support and practical guidance for improving the intrinsic safety of oil-based coating production.

## Keywords

static electricity hazard; Oil based coatings; Minimum ignition energy (MIE); Fire and explosion; Electrostatic charging mechanism; Inert protection; Static dissipation; Antistatic agent; risk assessment

# 油性涂料生产过程中静电危害分析与系统性防控的研究

倪春荣

中远关西涂料(上海)有限公司, 中国·上海 201512

## 摘要

油性涂料生产涉及大量易燃有机溶剂和粉料等, 其中不乏高电阻率特性物料极易导致静电积累, 能量一旦达到最小点火能量(MIE), 极易引发火灾爆炸事故。本文基于相关起电机理与放电理论, 系统分析了过程中的静电风险源; 深入探讨了电阻率、弛豫时间、最小点火能量等关键参数对风险等级的影响; 采用工程控制(接地、限制流速等)、工艺优化(进料方式优化等)、在线监测(静电场强等)与安全管理(风险评估、操作规范等)的四层次、系统化防控。通过案例分析及定量风险评估模型应用, 验证有效性, 为油性涂料生产本质安全的提升提供理论支撑、实践指南。

## 关键词

静电危害; 油性涂料; 最小点火能量(MIE); 火灾爆炸; 静电起电机理; 惰化保护; 静电消散; 抗静电剂; 风险评估

## 1 引言

油性涂料凭借其优异的施工成膜性、防护性及装饰等, 在工业、建筑等领域得以广泛应用。其生产过程通常包含树脂溶解、颜料/填料分散、调漆、过滤灌装等。过程中经常会大量使用甲苯、二甲苯、酯类、酮类等有机溶剂, 以及钛白粉、有机颜料等粉料, 其中大多具有较高的体积电阻率( $> 10^{12} \Omega \cdot m$ ), 属于优良绝缘体。在管道输送、搅拌、研磨、过滤、灌装等一些环节中, 极易产生并积累静电。当能量积累到可燃性蒸汽/粉尘云的最小点火能量(通常 0.1 -

0.3 mJ) 并放电时, 极易成为点火源引发火灾甚至爆炸。

本文从静电产生的机理出发, 结合油性涂料生产特点, 深入剖析了各环节的静电风险特征, 并基于最新标准规范和工程实践, 建立一套科学、系统的静电防控体系, 为油性涂料生产的本质安全设计与管理提供专业性借鉴。

## 2 静电产生机理与风险理论

### 2.1 机理

接触-分离: 不同材质紧密接触时, 界面处发生电子或离子转移, 当两者快速分离时(如溶剂在流动中、粉体投料中), 部分电荷来不及回流, 导致各自带上等量异号电荷。尤其是在绝缘介质中。

流动电流(Streaming Current): 高电阻率液体(如溶

【作者简介】倪春荣(1972-), 男, 中国上海人, 本科, 从事化工管理研究。

剂、树脂等)在管道中流动,正负电层被破坏,随流体迁移形成流动电流( $I_s$ )。流速越快、管径越小、电导率越低,电流越大。

**感应起电:**带电体接近孤立导体时,导体在静电场作用下发生电荷变化,两端出现正负相反的感应电荷。

**粉体起电:**粉体颗粒在输送、研磨、筛分等过程中,颗粒与颗粒、颗粒与设备壁发生碰撞摩擦,导致电荷转移与积累。

## 2.2 静电积聚与放电

产生的静电荷若不能及时泄放(消散),会逐渐积聚,形成高电位,当达到击穿场强时,便会发生放电、产生火花。

## 2.3 关键风险评估参数

**电阻率( $\rho$ ):**是衡量物料导电情况的核心参数。液体的体积电阻率  $\rho_v > 10^{10} \Omega \cdot m$  时易积累静电;  $\rho_v < 10^6 \Omega \cdot m$  时电荷消散较快,风险较低。

**弛豫时间( $\tau$ ):**表示电荷在材料中消散快慢的参数,  $\tau = \epsilon_r * \epsilon_0 / \sigma$  ( $\epsilon_r$ : 相对介电常数;  $\epsilon_0$ : 真空介电常数;  $\sigma$ : 电导率)。 $\tau$  越小,消散越快。由此设备/系统的弛豫时间远小于工艺操作时间才比较安全。最小点火能量(MIE):可燃性蒸气/粉尘云能被电火花点燃的最小能量。涂料用溶剂蒸气 MIE 多在 0.1-0.3 mJ 范围(如甲苯 ~0.24mJ, 二甲苯 ~0.2mJ); 炭黑、钛白粉等粉尘 MIE 约 5-15 mJ。只要静电火花能量超过 MIE 即构成有效点火源。燃烧爆炸极限范围(LEL/UEL):溶剂蒸气/粉尘浓度必须处于该范围内(下限 LEL 至上限 UEL)才能被点燃。通常 25%LEL 作为警戒值。

# 3 静电风险源分析

## 3.1 原料储存与投料

**储罐进料:**液面上部或高速进料、飞溅等极易产生高电荷。顶部空间蒸气浓度若处于爆炸极限范围内,极易引起燃烧甚至爆炸。

**粉体投料:**投料时,粉体颗粒与料袋、设备壁摩擦碰撞,极易产生大量静电,投料时附近易形成高浓度粉尘云极可能处于爆炸极限范围内,极易引发粉尘爆炸。

**溶剂树脂投料:**桶装倾倒时、管道进入生产釜时(尤其是悬空进料),同样极易产生静电积聚情况(若未采取有效措施)。

## 3.2 预混合与搅拌

**预混合:**树脂投入溶剂或多种溶剂混合搅拌时,接触分离起电显著。

**颜料/填料加入:**将粉体加入液体基料中及初期搅拌产生摩擦起电。高速分散(Dissolver):齿状分散盘高速旋转(线速度可达 20-30 m/s)产生强烈剪切力,使物料间、与盘/壁间剧烈摩擦,极易产生静电。

## 3.3 研磨(砂磨机/球磨机)

**物料高速循环:**浆料在泵驱动下高速通过管道、狭窄

研磨腔(珠磨机)或物料与研磨介质剧烈碰撞摩擦,产生流动电流和摩擦电荷。

**研磨腔体内部:**充满浆料和运动介质,是电荷产生和积聚的高风险区。但由于密闭,溶剂蒸气可能饱和。

## 3.4 调和(稀释、调粘、调色)

添加溶剂、树脂、色浆调整时,若快速倾倒、喷溅易产生静电。

## 3.5 过滤

涂料通过高比表面积滤材(如滤袋、滤芯)时,发生剧烈的固-液分离和摩擦,尤其滤材为绝缘材质(如聚丙烯、尼龙)时极易产生静电。

## 3.6 输送与转移

**管道:**液体原料、涂料通过管道(尤其非金属管道)输送时,流动电流会持续产生。如静电导除控制不力,极易在容器内积累电荷,并在容器间隙产生火花放电风险。

## 3.7 罐装

油性涂料从灌装头进入容器时,两者间存在电位差或灌装头由于液体电荷转移带电,间隙处极易引发火花放电。这是油性涂料灌装线最典型的风险点。

**液体罐装冲击:**液体下罐装冲击容器底面或液面,飞溅、气泡等会加剧电荷产生。

**人体静电:**人体带静电(可能因摩擦带高压静电 >10kV),触摸设备时亦易发生人体放电。

**薄膜等绝缘材料:**包装线上塑料薄膜等绝缘材料摩擦起电,也可能吸附粉尘或产生放电。

# 4 静电防控系统化策略

静电防控是一个系统工程,需采取综合的管控措施,宜采用“预防产生、促进消散、避免积聚、消除点火源、降低爆炸性环境”的多重防护(Layers of Protection)。

## 4.1 工程控制措施(Engineering Controls)

**可靠接地或等电位连接(Bonding & Grounding):**原则:所有金属设备(反应釜、砂磨机、过滤罐装壳体、管道、法兰等)必须通过低阻抗( $< 10 \Omega$ , 推荐 $< 1 \Omega$ )可靠连接到工厂接地网。严禁有游离导体在操作区域的存在,这是最基础、最重要的措施!设备材质与静电消散:设备主体及管线首选碳钢、不锈钢等金属材料,并确保良好联通和接地。不可避免使用非导体时(如视窗等):宜采用静电消散型材料( $\rho_v = 10^4 - 10^9 \Omega \cdot m$ ),使电荷能在毫秒至秒级安全泄放。对无法更换的绝缘管道/部件,可考虑缠绕金属丝并接地。流速控制:液体:推荐流速 $< 1 m/s$ ,管径增大可适当提高,但通常不超过 $7 m/s$ 。对于高电阻率溶剂( $\rho_v > 10^{10} \Omega \cdot m$ )和管道末端(如灌装口),需进一步降低(如 $< 1 m/s$ )。粉体(气流输送):对于粒径 $> 100\mu m$ 的粉体,建议速度 $< 20-25 m/s$ ;对于更细或易起电粉体,需更低(如 $< 15 m/s$ )。采用密相输送可有效降低速度和起电强度。惰化保护(Inerting):原理:向设备顶部空

间或粉体处理系统中充入惰性气体（常用 N<sub>2</sub>），降低氧气至极限浓度（LOC）以下（通常 < 8-10% v/v），可使爆炸性环境无法形成。但需注意惰性气体聚集操作工位，防人员窒息。

**环境湿度控制 (Humidification):** 增加空气相对湿度 (RH) 可显著加速电荷消散。通常 RH > 60-65% 但需考虑物料吸水性、腐蚀性，是否影响质量。设置防静电区：在灌装、可燃粉体投料等高危区域设置防静电工作区 (ESD Protected Area)。强制穿戴防静电服（面料电阻率  $10^5 - 10^9 \Omega$ ）、防静电鞋/靴（鞋底电阻 <  $10^9 \Omega$ ）。入口处设置人体综合电阻测试仪。严禁止在危险区穿脱衣物。

#### 4.2 工艺措施优化 (Process Optimization)

使用抗静电剂 (Antistatic Agents, ASA)：添加少量 (ppm 级) ASA（多为离子型或非离子型表面活性剂）到物料中，提高其电导率（降低  $\rho_v$  至  $10^6 - 10^8 \Omega \cdot m$ ），可显著加速电荷弛豫消散。

**优化进料方式:** 液体：储罐进料采用底部进料（浸没管），避免顶部喷溅。生产罐投料可采用沿管壁流入的方式。粉体采用大倾角锥形料斗、振动下料等，促进粉体密实流动，减少扬尘。真空上料机使用防静电软管和接地料斗，避免喷溅或湍流。合理设置静置时间：在过滤后、灌装前设置足够的静置时间（如 15-30 分钟），让液体内部积聚的电荷充分弛豫消散。设备避免使用高压蒸汽或空气，防止产生强静电和形成爆炸性混合物。推荐惰性气体吹扫或湿法清洗设备。

#### 4.3 监测与报警 (Monitoring & Alarming)

在关键设备（过滤罐装、粉体处理设备等）附近安装非接触式静电场强计或电位计，实时监测并设定报警阈值（如 > 10 kV/m 或 > 5 kV）。

在管道上安装在线电荷密度计或电流表，监测流动电流评估风险和控制流速。

在储罐区、灌装区等安装可燃气体探测器 (LEL%)，实时监测并联动通风或停机。

惰化区域必须配备在线分析仪，并具备报警和连锁功能。接地状态监测：在灌装点各设备安装静电导除监测连锁装置 (Grounded Circuit Monitor)，确保可靠接地且连接良好时才开启。

#### 4.4 安全管理措施 (Safety Management)

进行全面静电安全风险评估，确定风险等级（如 LOPA, HAZOP 分析），制定针对性的防控措施，并严格执行操作规程 (SOP)。全员进行静电危害与防控的强制性培训。设备维护与检验：建立接地系统、静电消散设备、连锁装置、监测仪表的定期检查、测试和维护制度。应急预案：对静电引发火灾爆炸的情况需制定专项应急预案，并定期演练。

### 5 案例分析和定量风险评估模型的应用

#### 5.1 案例：溶剂储罐进料火灾事故

某年产 5 万吨油性涂料公司通过顶部敞口方式，用泵

将甲苯 ( $\rho_v \sim 2.5 \times 10^{13} \Omega \cdot m$ , MIE  $\sim 0.24$  mJ) 快速打入储罐时，发生剧烈喷溅。罐内积聚的静电荷在释放发生火花放电，引燃了顶部空间的甲苯蒸气导致爆炸火灾。失效分析：风险源：顶部喷溅进料、未控制流速、罐体及管道可能接地不良、未用 N<sub>2</sub> 封。点火源：火花放电。爆炸环境：灌顶蒸气浓度进入爆炸范围。改进措施：改为底部进料管口浸没液面；控制进料流速 (< 1 m/s)；确认储罐及管道可靠接地；增设顶部空间氮封系统及氧含量监测；在进料管口安装防静电连锁装置（导电不良连锁停泵）。

#### 5.2 案例：某油性涂料公司灌装区人体静电起火事故

简述：某穿着化纤服和胶鞋的操作工在灌装聚氨酯清漆（含乙酸乙酯，MIE  $\sim 0.46$  mJ）的 200L 金属桶区域。当其手接近灌装枪头时，发生刷形放电，引燃了灌装口溶剂蒸气。失效分析：风险源：灌装口蒸气逸散浓度超过 LEL、人体活动摩擦起电。点火源：人体静电放电管理失效：未强制穿着防静电服/鞋；人员培训不到位。改进措施：防静电区域操作强制穿着防静电服、鞋；铺设防静电地板并可靠接地；人员进入时触摸静电导除装置导除人体静电；加强防静电安全培训和监督；减少蒸气逸散（如改进枪头密封、局部排风等）。

#### 5.3 应用定量风险评估模型的示例

以管道输送二甲苯溶剂 ( $\rho_v = 10^{13} \Omega \cdot m$ ) 至生产储罐为例：流动电流 ( $I_s$ )：假设流速  $v=5$  m/s，管径  $d=0.05$  m，得  $I_s$  量级约为  $10^{-6}$  A。储罐入口处电位 (V)： $V = I_s \cdot R$  (R 为储罐对地电阻)。若  $R=10^{10} \Omega$  (绝缘不良)，则 V 可达  $10^4$  V (10kV)！若  $R < 10 \Omega$  则 V 可忽略。评估放电风险：10kV 电位下，若存在游离导体（如未接地的取样勺、液位计浮球等）靠近罐壁，发生放电起火的能量 W 可估算为  $W = 0.5 \cdot C \cdot V^2$  (C 为游离导体电容，假设 50pF)。计算得  $W \sim 2.5$  mJ，远远大于二甲苯 MIE (0.2 mJ)，火灾风险极高！该风险评估模型的计算显示可靠接地（将 R 降至 < 10  $\Omega$ ）对限制电位、降低放电起火的重要作用，验证了控制流速的必要性，提示了游离导体存在的巨大风险。

### 6 结论与展望

静电危害是油性涂料生产中潜藏的重大安全风险，是一项涉及多学科（静电学、化学工程、材料科学、安全工程）的系统性防控工程。

展望：

**抗静电新型材料研发：**开发效率更高、适用性更宽（耐溶剂、耐温）、添加量更低、对涂料性能影响更小的 ASA。

**智能化监测与防控：**利用物联网、大数据及智能预警；发展基于大语言模型的预测性维护和自适应控制。

**深化设计本质安全：**在工艺和设备设计阶段更深入地融入防静电理念。

持续跟进国际先进标准，结合实践，推动防静电安全

标准（如 GB 12158）的不断完善、提升。

### 参考文献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 12158-2006 防止静电事故通用导则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [2] Robinson K. NFPA 77 Recommended Practice on Static Electricity Recommended Revisions - (ppt)[C]//AIMCAL R2R Conference USA 2018: Roll 2 Roll Web Coating and Finishing: With SPE s FlexPackCon, Phoenix, Arizona, USA, 28-31 October 2018, Volume 1 of 2.2019.
- [3] International Electrotechnical Commission (IEC). IEC 60079-32-1: Explosive atmospheres - Part 32-1: Electrostatic hazards, guidance[S]. Geneva: IEC, 2019.
- [4] Britton, L. G. Avoiding Static Ignition Hazards in Chemical Operations (2nd ed.). New York: Wiley-AIChE, 2012.
- [5] Glor, M. Electrostatic Hazards in Powder Handling. Letchworth: Research Studies Press Ltd, 1988.
- [6] Pratt, T. H. Electrostatic Ignitions of Fires and Explosions. New York: Wiley-AIChE, 2000.
- [7] Jones, T. B., & King, J. L. Powder Handling and Electrostatics: Understanding and Preventing Hazards. Boca Raton: CRC Press, 1991.
- [8] Lüttgens, G., & Wilson, N. Electrostatic Hazards (Revised ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997.
- [9] Cross, J. A. Electrostatics: Principles, Problems and Applications. Bristol: Adam Hilger, 1987.
- [10] Occupational Safety and Health Administration (OSHA). Hazard Communication Guidance for Combustible Dusts. OSHA 3371-08, 2009.