

危险化学品储运中的静电与泄爆风险控制

朱红星 (江西贝特利新材料有限公司, 江西 九江 332700)

摘要: 本文危险化学品储运中静电与泄爆风险控制, 涵盖风险识别、控制、监测预警等方面, 对保障化工行业安全生产意义重大。方法包括优化设备接地系统、升级抗静电材料、精准调控工艺参数等控制静电; 配置优化泄爆装置、强化密封系统等防控泄爆; 搭建多源传感监测网络, 开发智能预警算法, 提出多种针对性控制措施与防控手段, 实现动态监测与预警。可见, 综合运用这些措施可有效降低风险, 提升储运安全水平。

关键词: 危险化学品; 储运安全; 静电控制; 泄爆防控; 动态监测

中图分类号: TQ086.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 011-0145-03

Static Electricity and Explosion Relief Risk Control in the Storage and Transportation of Hazardous Chemicals

Zhu Hongxing (Jiangxi Betely New Materials Co., Ltd., Jiujiang Jiangxi 332700, China)

Abstract: This paper focuses on the risk control of static electricity and explosion-proofing in the storage and transportation of hazardous chemicals, covering aspects such as risk identification, control, monitoring, and early warning, which are of great significance for ensuring safe production in the chemical industry. The methods include optimizing the equipment grounding system, upgrading anti-static materials, and precisely regulating process parameters to control static electricity; configuring optimized explosion-proof devices, strengthening sealing systems, and implementing other preventive measures to mitigate explosion risks; establishing a multi-source sensing monitoring network, developing intelligent early warning algorithms, proposing various targeted control measures and preventive strategies, and achieving dynamic monitoring and early warning. It is evident that the comprehensive application of these measures can effectively reduce risks and enhance the safety level of storage and transportation.

Keywords: Hazardous chemicals; Storage and transportation safety; Static electricity control; Explosion venting prevention and control; Dynamic monitoring

危险化学品是化工产业核心生产资料, 其储运连接生产、流通与使用全链条, 涉及多操作单元, 作业环境复杂多变, 风险源多且耦合性强。静电在储运中易因物料流动、设备摩擦等累积, 达到临界值会引发泄爆事故; 泄爆风险是多种诱因下储运系统压力超结构承载极限的连锁风险, 二者相互关联。因此, 开展静电与泄爆风险的识别、控制及监测研究, 对提升储运安全、降低事故率有重要意义, 是化工安全研究热点。

1 危险化学品储运中静电与泄爆风险的核心识别

1.1 静电风险的关键来源与表现形式

危险化学品储运中, 静电风险来源多环节、多因素耦合, 核心来源有物料流动静电、设备摩擦静电、人体静电及环境诱导静电四类。物料流动时, 危险化学品与管道、储罐等内壁摩擦分离形成双电层, 电荷累积, 高粘度、高速充装时静电累积更快, 如汽油输送静电电位可达 10kV 以上。设备摩擦静电源于储运设备机械运动, 非金属设备因导电差, 静电累积风险高于金属设备, 部分塑料储罐静电电位可超 20kV。人体静电由衣物与人体、人体与设备摩擦分离产生, 电位 1-10kV。在有限环境中, 静电仍可成为点火源。

环境诱导静电受湿度、温度及粉尘浓度影响, 低湿度抑制静电消散, 高温增加可燃蒸气浓度, 提升静电点火风险。静电风险表现为火花放电、刷形放电及电晕放电三类。火花放电能量集中、点火能力强, 多发生于金属设备与介质间静电累积; 刷形放电多在非金属材料表面, 易形成高温区域; 电晕放电能量最低, 会加速介质氧化分解^[1]。

1.2 泄爆风险的核心诱因与影响因素

泄爆风险核心诱因以静电点火为首, 还包括设备结构缺陷、操作参数失控、安全装置失效及外部冲击等。静电点火通过火花放电点燃易燃易爆介质, 引发燃烧使系统内压力突破设备承载极限而泄爆; 设备结构缺陷如焊缝开裂等会降低抗压强度; 操作参数失控如超量充装等易引发泄爆; 安全装置失效会加速泄爆事故发生。泄爆风险影响因素包括介质特性、设备参数及环境条件。介质特性决定泄爆风险高低; 设备参数影响泄爆临界压力与破坏程度; 环境条件影响介质挥发与爆炸传播范围。

2 危险化学品储运中静电风险针对性控制措施

2.1 设备接地系统优化与长效管控

设备接地是控制静电风险的基础, 能将静电导入

大地，避免达到点火临界值。主流接地方式有直接、间接与跨接接地，不同储运设备需差异化接地。金属储罐、运输车辆应直接接地，接地电阻控制在 10Ω 以下；非金属设备（如FRP储罐）采用间接接地，确保涂层表面电阻率低于 $1 \times 10^6 \Omega \cdot m$ ；由多个金属部件组成的储运系统采用跨接接地，消除电位差。为保障接地长效性，要建立定期检测与维护机制，每月测接地电阻，超临界值时及时处理；在连接部位用防腐涂层，减少腐蚀影响。

此外，移动储运设备（如槽罐车）用车载式接地监测装置，装卸前自动检测，合格才启动设备，避免静电累积^[2]。

2.2 抗静电材料升级与精准选型应用

抗静电材料应用是抑制静电产生的关键，能加速静电消散。常用材料有导电高分子、金属基复合及抗静电涂层材料，需根据化学品特性与储运工况精准选型。储运设备主体结构，强腐蚀性介质（如硫酸、盐酸）用聚四氟乙烯基导电复合材料；易燃易爆液体（如汽油、乙醇）用铝合金基复合材料。

储运包装材料（如桶装化学品包装桶）选用抗静电塑料材料，控制表面电阻率，避免摩擦生静电。提升抗静电材料应用效果，要建立材料性能检测标准，检测进场材料体积电阻率等指标，确保符合工况要求；同时，根据介质特性与环境参数建选型数据库，实现智能化精准选型。

2.3 储运工艺参数精准调控与优化

储运工艺参数调控是控静电关键，优化输送速度、充装方式、温度压力等可降静电累积、避风险升级。输送时，依介质粘度、导电率定速度，低导电率介质（如航空煤油）管道速度控 $1\text{--}2\text{m/s}$ 内，高粘度介质（如润滑油）可加热降粘；充装用底部充装，控流量，大型储罐设防冲击挡板；温度控在介质闪点下 $10\text{--}15^\circ\text{C}$ ，压力控在设备设计压力 80% 内。混存储运时，避免产生静电与氧化性介质混存。精准调控可使静电累积降超 40% ，提升安全性。

3 危险化学品储运中泄爆风险的专项防控手段

3.1 泄爆装置精准配置与性能优化

泄爆装置是泄爆风险防控核心设备，能在系统内压力达临界值时及时开启释压，避免破坏性泄爆，需依储运设备容积、介质特性及操作压力精准配置类型与参数。常用泄爆装置有安全阀、泄爆片、爆破帽及易熔合金塞。安全阀适用于压力波动大的储运系统，如液化石油气储罐，通过弹簧力控开启压力，超压时阀芯自动开启释压，降至回座压力自动关闭，可重复使用；泄爆片适用于介质有腐蚀性、粘性大或含颗粒

的储运系统，如硫磺储罐，通过金属薄片破裂释压，响应快但不可重复用，需定期换。参数配置上，安全阀开启压力设为设备设计压力的 $1.05\text{--}1.1$ 倍，回座与开启压力差值控在开启压力的 $5\%\text{--}10\%$ ；泄爆片爆破压力设为设备设计压力的 $1.1\text{--}1.2$ 倍，确保安全阀失效时仍能泄爆。为提升性能，采用智能化技术升级，如在安全阀装压力传感器与无线传输模块，实时监测并传数据至监控平台；对泄爆片用激光检测技术预判破裂风险^[3]。

3.2 储运设备密封系统强化与泄漏防控

设备密封系统泄漏是泄爆风险重要诱因，密封失效会使易燃易爆介质泄漏，与空气混合遇点火源爆炸，需通过密封材料升级、结构优化及泄漏监测强化密封系统。密封材料选择上，针对不同介质特性选耐腐蚀性、耐高低温、耐磨性能优的材料，如高温介质选柔性石墨密封材料，强腐蚀性介质选聚四氟乙烯密封材料。密封结构优化方面，用双端面机械密封替代传统单端面机械密封，通过注入隔离液形成压力屏障，防介质泄漏、冷却密封端面、降静电风险。对于管道连接部位，用焊接密封替代法兰密封，减少密封面以降低泄漏概率；必须用法兰密封处，选带颈对焊法兰并配缠绕式垫片提升密封性能^[4]。此外，建立泄漏监测机制，在密封部位装光纤传感器或超声波泄漏检测仪，超阈值即预警并切断介质输送，避免泄爆风险。强化密封系统可使设备泄漏率降 60% 以上，提升泄爆防控能力。

3.3 惰性化保护技术应用与浓度控制

惰性化保护技术是向危险化学品储运系统充入惰性气体（如氮气、二氧化碳），降低氧气浓度使可燃介质浓度在爆炸极限外，抑制爆炸反应，是防控泄爆风险的有效手段。该技术分静态、动态及置换惰性化三类，要据储运系统工况与介质特性选保护方式。静态适用于密闭储罐长期储存，充入惰性气体使氧气浓度降至规定值并保持微正压；动态适用于介质输送或装卸，持续通惰性气体稀释可燃蒸气；置换适用于新储罐投用或检修后，用惰性气体置换空气后通危险化学品。

氮气因来源广、成本低、稳定性好常用，含活泼金属的选氩气。为提升效果，精准控制惰性气体充入量与浓度，用氧气浓度分析仪监测、自动阀门调节，实现闭环控制；在排气口装可燃气体浓度检测仪，防介质泄漏与污染。大型储运系统采用分区惰性化保护，提升效果并降低消耗，平衡节能与安全。

3.4 压力动态调控与应急泄压系统构建

压力动态调控是实时监测储运系统压力变化，采

用主动与被动泄压结合方式控压控制压力在安全范围,防止超设备承载极限泄爆。压力动态调控采用智能压力控制系统,由压力传感器、智能控制器、调节阀及泄压阀组成。压力传感器采集数据传至智能控制器,控制器经PID算法计算偏差,自动调节调节阀开度控制介质流量,精准调控压力;若压力异常升高超调节阀能力,控制器开启泄压阀,释放部分介质降压。应急泄压系统是最后防线,含应急泄压阀、泄压管道及安全泄放区。

应急泄压阀泄放量依设备容积与最大压力升高速率确定,确保1min内将系统压力降至设计压力80%以下;泄压管道用大口径、低阻力管道,出口朝安全泄放区,远离人员密集区与明火作业点,防二次风险。为提升可靠性,定期调试与演练,模拟压力异常场景,检验应急泄压阀响应、泄放及管道通畅情况,及时解决问题;还将应急泄压系统与企业安全监控平台联动,实现实时报警、自动处置与远程监控,提升应急响应能力。

4 危险化学品储运中静电与泄爆风险的动态监测与预警

4.1 多源传感监测网络搭建与数据融合

动态监测是风险防控前提,搭建多源传感监测网络可监测静电与泄爆风险关键参数,为风险预警与处置提供数据支撑。监测网络核心是传感器选型与布局,针对静电风险,在关键部位安装静电电位、表面电阻等传感器,静电电位传感器测量范围0-30kV,精度 $\pm 1\%$;针对泄爆风险,安装压力、温度等传感器,压力传感器测量范围为设备设计压力0-1.5倍,精度 $\pm 0.5\%$,可燃气体浓度传感器测量范围0-100%爆炸极限,响应时间小于1s。传感器布局采用“点-线-面”结合方式。为有效利用监测数据,建立数据融合平台,用边缘计算技术处理数据,用5G或工业以太网技术传输数据至监控中心。

4.2 智能预警算法开发与阈值优化

智能预警算法是风险精准预警核心,分析监测数据可预判静电与泄爆风险趋势并预警。预警算法基于风险演化规律与历史数据,用人工智能技术构建多参数耦合预警模型。针对静电风险,构建随机森林预警模型,识别准确率超95%;针对泄爆风险,构建长短记忆网络(LSTM)预警模型,预测误差小于5%。预警阈值优化是提升预警准确性的关键,要根据介质特性等确定阈值,如汽油储运系统,设定不同风险等级的静电电位和可燃气体浓度预警阈值。

同时,建立阈值动态调整机制,定期校准优化。此外,在预警算法中融入设备故障诊断模块,避免预

警失真。

4.3 预警响应机制完善与联动处置

完善的预警响应机制是有效处置预警信号的关键,通过建立“分级预警、联动处置”机制,可快速精准处置风险。预警等级分四级:一级预警(低风险)参数安全但有小幅波动;二级预警(中风险)参数接近预警阈值;三级预警(高风险)参数超预警阈值但未达危险临界值四级预警(极高风险)参数达危险临界值,可能立即引发事故。

针对不同等级预警制定差异化响应措施:一级预警由现场操作人员密切监测并每小时记录参数;二级预警启动现场巡检排查隐患;三级预警启动局部应急响应,停止作业、切断介质输送、启动静电消除或惰性化保护系统;四级预警启动全面应急响应,疏散人员、启动应急泄压系统、切断电源火源,通知应急救援力量。

为提升响应效率,建立联动处置机制,将预警系统与储运设备控制系统、应急处置系统企业安全管理平台联动实现自动响应,如三级预警时系统自动操作,响应时间小于3s。同时,建立跨部门联动机制加强信息共享与协同配合^[5]。

5 结语

在化工产业蓬勃发展的当下,危险化学品储运安全至关重要。静电与泄爆风险作为影响储运安全的关键因素,其有效防控是保障化工生产稳定运行的核心环节。通过实施一系列针对性措施,从风险识别、精准控制到动态监测预警,构建起全方位、多层次的风险防控体系。这不仅有助于降低事故发生率,保障人员生命财产安全,减少环境污染,还能推动化工行业向更安全、高效、可持续发展的方向发展,为行业的长远进步奠定坚实基础。

参考文献:

- [1] 戴永生. 化工物料安全储运的风险识别与管控策略研究[J]. 中国轮胎资源综合利用, 2025,(11):159-161.
- [2] 胡小敏, 张欢. 化工企业危险化学品运输储存安全管理及事故应急管理措施[J]. 产品可靠性报告, 2025,(10):204-205.
- [3] 吕行, 王维栋, 李云坤. 危险化学品储运检测中智能化仪表的开发与应用研究[J]. 流程工业, 2025,(07):74-77.
- [4] 皇甫军红. 化工危险品储运安全管理探析——评《危险化学品储运》[J]. 应用化工, 2024,53(10):2520.
- [5] 张传刚. 油库危险化学品储运中自动化技术的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024,44(02):171-173.