

防爆电气设备在化工企业中的应用与安全管理

周 旭

国家管网集团天津液化天然气有限责任公司 天津 300450

摘 要：化工生产多存在易燃易爆介质，爆炸风险突出，防爆电气设备是企业安全生产的关键保障。本文依托国家防爆相关标准，介绍防爆电气设备的防爆原理、设备类型及危险区域划分规则，总结其在化工生产、储运、尾气处理环节的应用要点，剖析设备选型不当、安装不规范、运维老化等常见安全隐患，构建全生命周期安全管理体系，为化工企业防爆电气安全管控提供科学参考。

关键词：防爆电气设备；化工企业；应用；安全管理

引言：化工行业生产工况复杂，可燃气体、粉尘等危险介质分布广泛，电气火花、高温热源极易诱发爆炸事故，严重威胁生产与人员安全。防爆电气设备可有效阻断爆炸诱因，是高危化工环境的核心安全设施。现阶段，不少化工企业在设备选型安装、日常运维、风险防控等方面存在短板，安全隐患频发。为此，本文结合生产实际探究设备应用要点与管理策略，助力企业提升本质安全水平。

1 化工企业防爆电气设备基础理论与分类

1.1 防爆电气设备防爆原理

(1) 化工爆炸危险环境的爆炸成因与触发条件。化工爆炸需同时满足三要素：可燃性物质（气体/蒸气/粉尘）、助燃物（空气/氧气）及点火源（电气火花、电弧或高温表面）。触发条件为可燃物浓度处于爆炸极限内，且点火源能量超过最小点燃能量阈值。(2) 防爆电气设备核心防护机制，物理隔离、能量限制、密封防护等。物理隔离（隔爆型）通过坚固外壳承受内部爆炸并阻断火焰传播；能量限制（本安型）将电路能量降至点燃阈值以下；密封防护（增安型）防止外部爆炸性环境侵入设备内部，降低接触风险^[1]。(3) 防爆性能的核心影响参数，温度组别、气体组别、防爆等级。温度组别（T1~T6）界定设备最高表面温度，确保低于气体引燃温度；气体组别（IIA、IIB、IIC）按爆炸性气体传播能力划分，IIC 要求最严；防爆等级（Exd、Exi 等）综合定义设备防护形式与适用场景。

1.2 防爆电气设备主要类型及适用场景

(1) 隔爆型设备的结构特点与化工生产装置应用场景。外壳具备足够强度，接合面间隙可熄灭内部爆炸火焰，适用于大型反应釜、储罐区等存在显著爆炸风险的

固定式装置。(2) 增安型、本安型设备的性能优势与精细化化工场景适配范围。增安型强化绝缘与防护，适用于正常无火花设备（如加热器）；本安型以低能电路实现本质安全，广泛适配仪表、传感器等精密控制场景。(3) 其他防爆类型设备的特点及特殊化工环境应用要求。正压型（Exp）维持内部正压阻止可燃气体进入，适用于分析小屋；充油型（Exo）将电气部件浸入油中，用于高压开关等特殊需求环境。

1.3 化工爆炸危险区域划分标准

(1) 国标规范下化工危险区域分区依据与等级界定。依据 GB50058，按爆炸性环境出现的频率和持续时间划分：气体环境分为 0 区（连续存在）、1 区（正常可能）、2 区（异常时短暂）；粉尘环境分为 20 区（持续）、21 区（正常可能）、22 区（异常短暂）。(2) 0 区、1 区、2 区及 20/21/22 区的环境特征与风险差异。0 区风险最高（如储罐内部），1 区常见于释放源周边（如反应釜法兰），2 区为低概率区域；粉尘区中 20 区对应尘云环境，22 区风险最低。(3) 不同危险区域对应的防爆电气设备选型基本原则。0 区可选用：Ex da、Ex ia、Ex ma、Ex sa 等 Ga 级设备；1 区允许 Ex db、Ex ib、Ex eb 等 Gb 级设备。；2 区允许 Exn 等轻防护设备。粉尘区需选用对应粉尘防爆（Ext）设备，并按区域适配 A 型或 B 型外壳防护等级。

2 防爆电气设备在化工企业的实际应用与现存隐患

2.1 化工全流程防爆电气设备应用布局

(1) 生产反应车间作为防爆核心管控区，针对大型压缩机、搅拌电机等强电力设备优先选用隔爆型（Exd）或正压型（Exp）外壳，而精密检测仪表及控制回路宜采用本安型（Exia）并配接安全栅实现双重限能；

设备表面涂层需满足耐高温、耐化学腐蚀要求,防止介质侵蚀导致壳体强度劣化。(2)物料储存与输送环节涵盖储罐区、装卸站及管廊,储罐顶部呼吸阀及采样口附近应按 1 区配置可燃气体探测器和防爆照明设施,输送泵组电机应依据介质蒸气密度确定安装高度以避免重气积聚层,管道法兰间必须安装铜质或镀锌静电跨接线,选型时需额外考虑户外日晒雨淋条件下的防护等级不低于 IP65。(3)污水处理及尾气处理系统常逸出硫化氢、甲烷及挥发性有机物,属于隐蔽性较高危险区域,其防爆电气应用需遵循通风不良场所按更高等级划分原则,鼓风机、循环泵电机及在线监测仪表的防爆等级不宜低于 IIBT4,且电气控制系统需与轴流风机进行启停联锁,确保爆炸性气体浓度积聚前强制换气稀释。

2.2 设备应用关键技术要点

(1)基于危险区域等级的精准选型技术须严格依据 GB50058 及 GB/T3836 系列标准,按释放源等级、通风有效性及区域范围综合核定分区结果,同时交叉核对设备的温度组别(确保设备温度组别对应的最高表面温度<介质引燃温度)与气体组别(IIC 类设备可向下兼容 IIB,但严禁逆向代用),杜绝经验主义选型错误。(2)规范化安装、接线与密封施工是防爆性能落地的决定性环节,电缆引入装置必须选用相应防爆等级的填料函并压实橡胶密封圈,多余进线口应用防爆堵头封堵且达到同等 IP 等级;隔爆型设备的隔爆面严禁涂抹油漆或刮伤,仅可涂覆防锈油脂,装配间隙必须严格控制为标准公差范围之内^[2]。(3)设备接地、防静电及防腐防护配套措施缺一不可,所有金属外壳应实施独立接地干线连接,接地电阻不大于 4Ω;装卸作业区铺设防静电地坪并定期检测接地有效性,设备本体针对含硫、含氯腐蚀环境优选 316L 不锈钢材质或重防腐氟碳涂层,防止电化学腐蚀渐进削弱壳体壁厚与机械强度。

2.3 现阶段应用与运维常见安全隐患

(1)选型不匹配是当前最突出的系统性隐患,典型表现为粉尘爆炸性环境违规使用气体防爆设备(以 Exd 替代 ExtD),或因成本控制将 IIC 级氢气、乙炔场所降级选用 IIB 级设备,致使隔爆间隙传爆及引燃风险急剧上升。(2)安装施工不规范直接导致防爆性能物理失效,例如电缆引入装置压紧螺母未拧到位、密封圈内径与电缆外径不匹配产生轴向间隙,或隔爆面在吊装过程中碰伤划痕长度超标,使得内部爆炸时高温火焰沿缺陷间隙向外传播,将外壳变为危险“引火通道”。(3)长期运维不当引发的老化腐蚀问题普遍存在,弹簧垫圈因设备振动松弛、橡胶密封圈经臭氧及化学蒸汽老化龟裂失去

弹性,同时工艺气体渗透凝结为酸性液滴腐蚀壳体薄壁造成隔爆参数超差,日常巡检中漏检密封性打压测试加剧了隐患隐蔽积累^[3]。(4)老旧设备超期服役、带病运行是化工老厂区的共性顽疾,部分服役超 15 年的配电箱存在绝缘层脆裂、触头接触电阻升高导致温升超标,且原厂备件停产后采用非标准件“拼凑式”维修,设备铭牌及防爆合格证编号腐蚀模糊,长期处于不可控潜在点火源状态,严重违背安全生产强制性淘汰更新要求。

3 防爆电气在化工企业安全管理体系构建与优化

3.1 全生命周期规范化管理体系搭建

(1)设备采购、验收、入库的合规管控流程。采购环节严格审查供应商防爆合格证、生产许可证及型式试验报告,确保设备铭牌参数与采购技术规格书一致,杜绝无证或过期产品;到货验收逐台核对防爆标志、温度组别、防护等级等关键参数,随机抽检委托第三方机构复核关键性能,验收合格后办理入库登记,系统录入设备信息、合格证编号及有效期,实现源头质量可追溯。(2)安装调试、竣工验收的标准化管控机制。安装工程编制专项施工方案并经技术负责人审批,作业前对安装人员进行技术交底;施工过程落实质量签验制度,重点管控电缆引入装置密封性、隔爆面间隙及接地连续性;竣工后由安全、设备、工艺多部门联合开展防爆性能专项验收,采用外壳抗压试验、气密检测及本安回路火花试验量化验证,不合格项须 100%整改复核后方可投运^[4]。(3)日常运行监测、定期检修、报废更新闭环管理。运行阶段依托 DCS 及智能巡检系统实时采集温升、电流及绝缘电阻数据,建立预警阈值触发报警;按季度执行外观巡检(紧固件、密封件、外壳完整性),按年度开展绝缘电阻、隔爆面参数及接地电阻检测;建立健康状态评估模型,依据使用寿命、故障率及检修成本综合判定报废周期,严格按强制报废年限更新替代,全过程留痕形成闭环管理档案。

3.2 隐患排查与风险防控机制优化

(1)建立常态化防爆电气专项隐患排查制度,明确排查重点。制定月度自查、季度专项检查与年度专家诊断相结合的排查计划,重点锁定隔爆面完好性、密封元件老化程度、接地导通性能及防爆标志清晰度;针对夏季高温及冬季凝露等季节性环境变化制定附加排查清单,确保隐患发现无盲区、无死角。(2)运用在线监测、预防性试验等技术提升风险预判能力。部署无线温振传感器及红外热成像在线监测装置,对关键设备实施实时连续监测,结合历史数据趋势分析提前识别绝缘劣化、接触不良等潜在失效征兆;每年委托具备资质

的预防性试验机构对断路器、过载保护元件及隔离栅进行动作特性校验,以数据驱动从被动维修向主动预警转变。(3)隐患分级管控与闭环整改落实机制。依据隐患严重程度划分为重大、一般、轻微三级:重大隐患(如防爆壳体穿透性损伤)立即停机隔离并启动紧急抢修,一般隐患限期7日内整改并复查,轻微隐患纳入日常维修计划跟踪。所有隐患录入电子管理平台,实行“发现-登记-整改-验收-销号”全流程闭环,逾期未整改自动触发逐级督办与绩效考核问责^[5]。

3.3 人员管理与制度保障建设

(1)防爆电气作业人员持证上岗与常态化培训体系。所有安装、检修、维护人员必须取得特种作业操作证(防爆电气方向)方可上岗,证书每三年复审,逾期未审自动离岗;构建分层培训体系,管理层侧重标准规范解读与风险决策,作业层强化实操技能与事故案例复盘,新入职人员须经不少于72学时岗前专项培训并通过理论和实操双考核,年度复训不少于48学时,考核不合格暂停上岗。(2)健全岗位安全责任制,明确各岗位管理职责。按照“三管三必须”原则细化安全责任清单:设备主管对全生命周期合规性负直接管理责任,班组长承担每日点检首责,操作人员执行开机前外观检查与异常上报,维修人员落实检修质量自检并签字确认。各岗位职责上墙公示并纳入年度安全目标责任书,形成层层传导、全员覆盖的责任链条。(3)完善设备台账、技术档案、检修记录管理制度。实施一机一档精细化管理,电子与纸质档案同步保存,涵盖出厂合格证、安装验收记录、历次检修报告、检测报告及部件更换明细;每次检修完成后3个工作日内完成归档,涉及重大风险关键设备原始档案永存,确保事故追溯与责任判定有据可依,为设备状态评估与更新决策提供完整数据支撑。

3.4 应急管理 with 事故处置优化

(1)制定防爆电气故障、火灾爆炸专项应急预案。预案应明确应急指挥架构、报警处置流程、人员疏散路线及工艺应急处置操作卡,针对电气火灾严禁

用水灭火、防爆区域断电后方可处置等专项要求做出强制性规定;每两年根据设备变更或法规更新组织预案评审修订,确保其适用性与有效性。(2)定期开展应急演练,提升现场处置能力。每年至少组织一次综合实战演练及两次桌面推演,模拟隔爆壳体破裂电弧引燃、本安回路短路等典型场景,检验预案可操作性及人员反应速度;演练结束后开展效果评估,针对暴露问题修订预案、补充培训,并将评估报告纳入企业安全绩效考评。(3)应急物资配置与应急联动机制建设。按最大风险场景核算应急物资需求,配置防爆对讲机、应急照明、干粉灭火器、防爆堵漏工具及个人防护装备,定点存放并定期检查完好性;建立与园区消防队、周边企业及地方应急管理部门的信息通报与联动支援机制,明确联络方式和启动条件,确保事故扩大时外部力量可快速响应协同处置。

结束语

防爆电气设备的规范应用与科学管理,是化工企业规避爆炸事故的核心环节。本文系统梳理了防爆设备基础理论、现场应用技术要点及各类运维安全隐患,搭建了全方位的安全管理与隐患防控体系。企业需严格落实设备全流程管控、人员专项培训与应急保障工作,持续整改安全短板,依托标准化、智能化管理,筑牢化工生产防爆安全防线,保障企业稳定安全生产。

参考文献

- [1] 李庚波. 化工企业防爆电气设备安全管理探讨 [J]. 电气开关, 2025, 63(02): 108-113.
- [2] 郭皓. 防爆电气设备在危险环境中的应用及安全设计优化 [J]. 电气开关, 2025, 63(04): 108-110.
- [3] 蔡玉华. 石化工程建设过程中防爆电气质量的控制策略 [J]. 化工管理, 2025, 17(35): 153-156.
- [4] 亓宏图, 朱星宇, 陈福龙. 化工企业高温设备防火防爆技术应用策略 [J]. 化工安全与环境, 2025, 38(12): 75-78.
- [5] 张磊. 化工企业防爆电气设备隐患排查与运维管理优化 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(18): 92-94.