

石油石化火炬系统点火与防爆关键技术及工程应用研究

鲍家龙, 霍正卿

北京航化节能环保技术有限公司 北京

【摘要】石油石化火炬系统是处理生产、开停工及事故工况可燃气体排放的关键安全设施,其点火可靠性与防爆性能,直接关系到装置安全生产、人员生命安全以及周边环境稳定。本文结合 SH/T 3009-2013、GB 50160-2018 等现行标准及一线工程经验,本文梳理火炬点火装置选型、多重备份设计与火焰监测要点,分析爆炸危险区域划分、阻火密封、静电防护及防雷等防爆核心环节,依托实际工程案例验证技术落地效果,针对高含硫、低温、海上等特殊工况给出可落地优化方案,为火炬系统安全设计、运行维护提供实操参考。

【关键词】石油石化;火炬系统;点火技术;防爆设计;多重备份;特殊工况

【收稿日期】2026年4月15日 **【出刊日期】**2026年5月16日 **【DOI】**10.12208/j.sdr.20260049

Research on key technologies and engineering application of ignition and explosion protection for flare systems in petroleum and petrochemical industry

Jialong Bao, Zhengqing Huo

Beijing Aerospace Petrochemical EC and EP Technology Corporation Limited (BAEEC), Beijing

【Abstract】 Flare systems serve as key safety facilities for handling combustible gas emissions during normal operation, start-up/shutdown and accidents in petroleum and petrochemical plants. Their ignition stability and explosion prevention capability directly determine plant safety, personnel protection and environmental safety. Based on standards such as SH/T 3009-2013 and GB 50160-2018, combined with frontline engineering experience, this paper summarizes the selection, multi-backup design and flame monitoring of ignition devices, analyzes core explosion prevention measures including hazardous area classification, flame sealing, static electricity protection and lightning protection, verifies technical effects through practical cases, and provides implementable optimization schemes for high-sulfur, low-temperature and offshore conditions. The results offer practical reference for safe design, operation and maintenance of flare systems.

【Keywords】 Petroleum and petrochemical; Flare system; Ignition technology; Explosion prevention design; Multi-backup; Special working conditions

1 引言

根据 SH/T 3009-2013、GB 50160-2018 等现行标准^[1,2],在石油石化装置的日常生产运行中不可避免会持续产生可燃气体,这些气体如果要是若直接排放出去,很容易形成爆炸性混合物,如果遇火源极易引发火灾或爆炸事故,这是我们从事石油石化安全工作的人都清楚的潜在风险。火炬系统作为可燃气体无害化处置的终端设施,是装置安全的最后屏障。点火系统负责快速、稳定点燃火炬气,防爆系统

阻断回火、控制爆炸风险,二者协同保障系统本质安全。更重要的是火炬系统作为处理这些可燃气体的核心设施,通过燃烧的方式将其安全处置,相当于装置安全的“最后一道防线”半点马虎不得!

当前随着石油石化行业的发展,行业装置大型化、工况复杂化趋势明显,高含硫、低温、海上场景增多,火炬点火失效、回火冲击、腐蚀损坏等问题频发,优化点火与防爆技术与提升系统稳定运行能力,已成为行业共性需求。本文结合现行规范要求和一

作者简介:鲍家龙(1982-)男,汉族,硕士,安徽合肥人,副高级工程师,研究方向:采购及经营管理相关方向;霍正卿(1985-)男,汉族,硕士,山西阳泉人,副高级工程师,研究方向:控制理论与控制工程。

线工程实践经验, 深入探讨火炬系统点火与防爆的关键技术, 希望能为行业安全运行提供实实在在的支撑。

2 火炬系统概述

2.1 系统组成与功能

火炬系统的组成并不复杂, 主要包括排放管道、分液罐、水封罐/分子密封器、阻火器、火炬头、点火系统、火焰监测系统及控制系统这几个核心部分, 生产安全平时巡检与维护的主要就是围绕这几个部件展开。

其核心功能主要有三个: 一是安全燃烧事故、开停工及正常工况下产生的可燃气体, 尤其是像 H_2S 这类有毒有害气体, 如果未避免其扩散到空气中, 可能直接造成污染环境与危害人员健康; 二是通过阻火、密封与防爆等一系列措施, 防止火焰逆向传播到管网中而引发管网爆炸, 这是日常维护中最关键的防控点; 三是实现点火、监测、联锁控制一体化, 确保整个系统能稳定、持续运行, 避免出现突发故障。

其中, 点火系统负责点燃火炬气, 防爆系统负责防范爆炸风险, 这两个系统协同工作, 才能构成火炬系统安全运行的核心保障, 少了任何一方都不行。

2.2 分类与适用场景

火炬系统按燃烧形式来分, 主要有高架火炬和地面火炬两类, 这两种火炬在实际应用中各有侧重, 我们也会根据现场条件来选择。

高架火炬适用于大多数石油石化装置, 它通过高空燃烧的方式从而降低热辐射对地面人员和设备的影响, 平时我们在炼化厂区看到的高高的火炬, 基本都是这种类型; 地面火炬则主要适用于人口密集区域、高含硫或低温工况, 采用地面封闭式燃烧, 既能减少辐射热, 也能降低噪声污染, 更适合对环境要求较高的场景。

按照其排放介质来分, 火炬系统可分为烃类火炬、酸性火炬和低热值气体火炬, 不同类型的火炬, 因为处理的介质特性不一样所以点火与防爆设计也不能一概而论, 此时我们则需要结合其介质特性、排放负荷和环境条件, 进行差异化实施设计和维护, 这也是一线技术人员必须注意的细节。

3 火炬系统点火关键技术及工程应用

3.1 点火系统组成与选型要点

点火系统由点火器、长明灯、燃料气供给、控制单元和火焰监测装置组成, 选型坚持稳定优先、多重备份与适配工况原则。

3.1.1 点火器选型

针对不同类型的火炬, 点火器的选型也不一样, 我们结合现场经验总结了以下几点选型要求: 一是高架火炬, 优先选用高能量点火器, 点火能量要达到 $10J$ 以上, 点火频率控制在 $5-10$ 次/秒, 响应时间不能超过 2 秒, 毕竟高架火炬所处环境复杂, 要能适应强风暴雨等恶劣工况, 电极也得采用耐高温合金材质, 使用寿命至少要达到 10000 次点火, 这样才能减少维护频次从而降低现场工作量。二是地面火炬, 可选用电火花点火器或地面爆燃型点火器就可以, 点火能量 $\geq 5J$, 采用地面安装方式, 这样后续维护起来更方便, 不用高空作业, 降低维护风险, 也更适配封闭燃烧系统的需求。三是特殊工况, 比如高含硫、低温工况, 要优先选用抗腐蚀和抗低温的点火器, 海上工况则要选用防水与防盐雾腐蚀的型号, 不然在工作过程中很容易出现点火失效的情况而影响系统正常运行。

3.1.2 长明灯配置

长明灯作为持续点火源, 按火炬头直径合理布置: 直径 $\leq 1m$ 配置 $2-4$ 个, 直径 $> 1m$ 配置 $4-8$ 个。火焰长度控制在 $50-150mm$ 以及风速 $\leq 30m/s$ 条件下稳定燃烧; 燃料气选用天然气或液化石油气, 压力维持 $0.05-0.15$ 兆帕, 流量波动不超过 10% , 保障持续点火能力。

3.1.3 燃料气系统设计

配置稳压阀与分液罐, 分离燃料气中杂质与水分避免管路堵塞; 每路长明灯设立独立管线, 腐蚀环境采用 $316SS$ 材质; 设置双燃料气源, 主气源故障时自动切换备用气源防止供应中断。

3.2 多重备份设计与控制逻辑

具体的多重备份设计, 我们结合现场实际, 总结了三个方面:

一是主备点火装置, 每只火炬配置 1 套高空点火装置(主用)、 1 套地面爆燃型点火装置(备用), 同时实现远程自动、远程手动与就地手动三种点火模式, 这样在日常工作过程中不管哪种模式出现问题, 都能通过其他方式点火, 而避免点火失效。二是长明灯, 每只火炬设置 4 只长明灯, 采用“ 2 选 1 ”表决机制, 简单来说, 就是如果单只长明灯故障, 并

不会影响整个系统的运行, 只有当两只长明灯同时熄灭时, 才会触发报警并自动启动备用点火装置, 这样能最大限度保证点火源的持续存在。三是控制系统多重备份设计, 采用双路 PLC 控制系统, 当主控制系统出现故障时, 系统能自动切换到备用系统, 避免因控制失效导致点火延误, 毕竟在事故工况下每一秒都很关键, 延误点火就可能引发严重后果^[3]。

点火系统绝不能孤立运行, 要与装置系统联动, 构建“监测-报警-点火-联锁”的闭环控制流程, 这样才能实现自动防控从而减少人为操作失误, 具体流程大致如下: 一.火焰监测装置实时监测长明灯状态, 一旦长明灯熄灭, 要在 2 秒内触发报警, 使操作人员可以第一时间知晓; 二.触发报警后, 系统立刻自动启动高空点火装置, 如果 5 秒内没有点燃, 就立即切换到地面爆燃型点火装置, 避免延误点火; 三.要是两次点火都失败, 就触发可燃气体供给联锁, 切断上游可燃气体排放管道, 从而防止可燃气体持续积聚, 引发爆炸风险; 四.在低温强风等极端工况下, 系统会自动提升点火能量或延长点火时间, 以此提升点火可靠性, 这也是现场操作人员根据现场极端天气的实际情况, 优化的控制逻辑^[4]。

3.3 常见故障与优化措施

在日常运行和维护中, 点火系统难免会出现一些故障, 以下是最常见的几种故障。第一种是点火失效, 这是最常见的问题, 主要原因有燃料气压力不稳定、点火器电极积碳、长明灯堵塞和控制系统信号故障; 第二种是火焰熄灭, 主要是强风导致火焰偏离、长明灯燃料气供应中断和蒸汽消烟系统故障引发火焰不稳定; 第三种是点火延迟, 主要是控制系统响应滞后、点火器绝缘性能下降与电源供应不稳定。

针对以上故障, 可采取了以下优化措施: 一是定期维护, 这是最基础也是最关键的一点, 每月清理点火器电极积碳, 每季度校验燃料气压力传感器与稳压阀, 每年更换长明灯密封件, 通过定期维护, 从而有效减少点火系统故障的发生率^[5]; 二是技术升级, 将传统的热电偶监测, 替换为声学监测技术, 通过火焰的声学信号判断长明灯状态, 避免了高温环境对监测结果的干扰, 并且监测精度更高, 响应也更快; 三是工况适配, 高含硫工况采用抗硫材质的长明灯, 低温工况对燃料气系统进行伴热, 防止燃料气冷凝堵塞。

3.4 工程案例验证

为了验证上述点火技术的有效性, 我们结合某高含硫气田火炬系统的实际案例, 和大家分享一下改造过程和效果。此含硫气田原火炬采用单一点火装置, 频繁出现点火失效、长明灯熄灭问题, 年经济损失超百万元。改造采用高空+地面+4 台长明灯三重备份方案, 配套双 PLC、声学监测与管线伴热及电极防积碳处理。运行一年后, 点火成功率达 100%, 报警响应时间 $\leq 1s$, 未再发生点火失效事故, 验证了多重备份设计的实用性^[6]。

4 火炬防爆关键技术及实施要点

4.1 爆炸危险区域划分

依据 GB 3836.14-2024, 结合可燃气体释放频率与浓度划分区域: 1 区 (火炬周边 30m 范围) 为正常释放区, 防爆等级不低于 Ex d IIB T4 Ga; 2 区 (1 区外 15m 范围为故障释放区, 防爆等级不低于 Ex d IIB T4 Gb; 非危险区采用普通电气设备, 兼顾安全与成本^[7]。

4.2 核心防爆技术措施

构建分液罐+阻火器+水封/分子密封器三级防护体系。分液罐分离液体杂质、双台备用并配紧急排液泵; 波纹型阻火器间隙 $\leq 6.35\text{ mm}$, 安装于总管及分支管来阻断回火; 水封罐隔离空气与可燃气体, 分子密封器适配高气速、低温工况, 密封间隙 $\leq 0.5\text{ mm}$ 。

防爆电气选用隔爆型或本安型 (等级 \geq IIB T4); 信号电缆采用屏蔽线、两端接地、防爆穿管敷设; 控制系统配置浪涌保护器 (防护等级 $\geq 20kA$)。静电防护: 设备管道接地电阻 $\leq 10\text{ 欧}$ 、法兰跨接电阻 $\leq 0.03\text{ 欧}$ 、操作区设人体静电释放器; 防雷设计: 火炬塔架按一类防雷标准建设、滚球半径 30m、环形接地网电阻 $\leq 4\text{ 欧}$ 。分液罐、总管设泄压装置, 配置氮气吹扫系统, 事故状态下保持微正压, 防止空气渗入形成爆炸性混合气。

5 特殊工况优化策略

5.1 高含硫工况 (H_2S 含量 $>20\%$)

点火侧: 选用抗硫材质点火器与长明灯、燃料气管线内衬聚四氟乙烯、配置 H_2S 浓度监测联锁; 防爆侧: 危险区域升级为 1 区、设备防爆等级提升至 Ex d IIC T4 Ga、增设硫化氢报警与防护设施; 燃烧侧: 采用三级蒸汽消烟系统, 提升燃烧效率、减少有毒有害排放。

5.2 低温工况 (温度 -20°C)

点火侧: 燃料气系统伴热 (电伴热/蒸汽伴热) 维持燃料气温度 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 选用耐低温合金电极; 防爆侧: 选用耐低温防爆设备、绝缘等级升级、水封罐采用乙二醇防冻; 密封侧: 优先采用分子密封器替代水封罐, 避免结冰导致回火风险^[8]。

5.3 海上工况

点火侧: 选用防水防盐雾点火器、电极陶瓷涂层防护、燃料气管线采用 316SS 材质; 防爆侧: 设备防护等级提升至 IP67 并在火炬头增设防风罩; 维护侧: 配置远程监测装置、减少高空作业、定期清理盐霜污垢从而延长设备使用寿命。

6 结语

石油石化火炬系统安全稳定运行, 离不开可靠的点火技术与完善的防爆体系支撑。点火系统需以稳定运行为核心, 通过高能点火器选型、长明灯多重备份配置及智能联锁控制, 显著提升点火成功率; 防爆系统需严格落实危险区域划分、阻火密封、静电防雷及泄压应急措施, 构建全链条防护屏障; 针对高含硫、低温、海上等特殊工况, 需采用差异化材质升级、系统伴热与防腐防护方案增强环境适应性。

参考文献

[1] SH/T 3009-2013, 石油化工可燃性气体排放系统设计规

范 [S]. 北京: 中国石化出版社, 2013.

- [2] GB 50160-2018, 石油化工企业设计防火标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [3] 王继光, 王鹏, 张雨, 等. 火炬自动控制系统隐患及改造 [J]. 油气储运, 2018, 37 (8): 952-955.
- [4] 于安峰, 党文义, 张广文, 等. 火炬点火控制系统优化及应用 [J]. 石油化工安全环保技术, 2020, 36 (2): 45-48.
- [5] 中国石油化工集团公司安全监管部. 石油化工安全技术手册 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2019.
- [6] 张磊, 李娟, 王浩. 高含硫火炬系统防爆设计要点及工程实践 [J]. 化工设计, 2021, 31 (3): 56-59.
- [7] GB 3836.14-2024, 爆炸性环境 第 14 部分: 电气装置的危险场所分类 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [8] 李刚, 刘阳, 陈峰. 低温环境火炬系统防冻与防爆技术优化 [J]. 化工安全与环境, 2022, 42 (5): 33-36.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS