

石油化工厂区储罐区火灾防护系统的设计分析

张春雨 朱凯扬 陈 宇 (大庆中安安全风险评价有限公司, 黑龙江 大庆 163458)

摘要: 石油化工厂区储罐区是危险化学品储存的重要区域, 火灾将对人身安全、环境和经济造成严重影响。本文从火灾防护系统设计入手, 分析了其核心组成部分, 包括火灾探测与报警、灭火系统及安全监控与应急管理系统, 并探讨了泡沫灭火、冷却降温、火灾风险评估与应急疏散等关键技术。通过系统化设计分析, 提出有效防护措施和未来发展方向, 为石油化工储罐区的安全防护提供理论与技术支持。

关键词: 石油化工厂; 储罐区; 火灾防护系统

0 引言

石油化工行业是国民经济的重要支柱, 生产、储存和运输中涉及大量易燃易爆物质, 火灾防护尤为关键。储罐区作为核心区域, 储存大量易燃液体, 火灾易蔓延并引发爆炸, 严重威胁环境与社会安全。尽管火灾防护系统已有一定技术进展, 但面对复杂的火灾特性, 防护设计仍需优化升级。本文全面分析储罐区火灾防护系统的组成和关键技术, 提出防护策略, 以提升防护能力并降低火灾风险。

1 储罐区火灾防护系统的重要性

在储罐区, 由于储存介质易于燃烧、流动和挥发, 火灾发生时燃烧速度迅猛, 往往伴随着剧烈的爆炸, 一旦火势失控, 不仅可能导致设施遭到破坏, 还可能对周围数公里范围内的生命和财产安全构成严重威胁, 石油化工厂中, 储罐区域的防火措施是关键性的安全要素, 在火灾初期, 一套合理的防护系统能有效控制火势扩散, 为扑救工作赢得宝贵时间。在设计防护系统时, 应保证其拥有充足的自动化及智能化水平, 以此来应对火灾事件中那些复杂的环境和不可预知元素, 在火灾发生时, 通过完备的紧急响应和监控体系, 实现对资源、人员和财产的高效调度与保护, 确保安全^[1]。

2 火灾防护系统的核心组成部分

2.1 火灾探测与报警系统

储罐区内的火灾防护体系中, 火灾探测与报警系统扮演着至关重要的角色, 负责在火灾初期进行侦测并及时发出警报, 本设施的监测依赖于一系列探测手段, 诸如火焰、烟雾及温度感应器等, 均根据储罐区域的具体环境条件和存储物料的属性来定制选用, 在储存易燃液体燃料的区域内, 安装的火焰探测器可以迅速侦测到火焰并启动报警系统; 而对于存放挥发性物质的区域, 则配备有烟雾探测器, 其能够对微量的

烟雾粒子作出反应并触发警报机制。

提高防护效率的措施包括让探测系统与报警及灭火系统协同工作, 当探测到火灾信号时, 报警系统能够立即通知值班人员或激活灭火系统, 通过特定设计, 可以显著减少火灾初期扩散的可能性, 从而缩短紧急响应时间, 在某石油化工企业的储存设施区域内, 通过部署包括不同种类在内的探测设备, 有效防止了因机械故障而可能导致的大火灾难。设备过热时, 温度探测设备即刻激活预警机制, 随即, 值勤人员迅速执行应急程序, 从而成功预防了火灾的发生, 储罐区配备的火灾探测与报警系统, 扮演着关键角色, 是整个防火体系中最初级的保卫机制^[2]。

2.2 灭火系统设计

在火灾事件发生之后, 关键性的系统操作是灭火机制, 其目的在于有效地限制火焰蔓延, 特别是在石油化工储罐区, 泡沫灭火系统因能快速隔绝氧气、有效抑制大面积的液体火灾而普遍被采用, 喷水灭火系统亦作为常规配备, 借助泡沫灭火系统, 通过喷洒泡沫介质, 能够覆盖在燃烧物表面, 隔绝氧气接触, 达到有效控制火势蔓延的目的。

在一次火灾事件中, 一家大型石油化工公司的储藏区, 因泡沫灭火系统迅速启动, 火势在早期得到了控制, 防止了灾难的扩大, 为了预防储存容器因温度过高而发生爆炸, 通常会采用喷射水流的消防系统来对容器外壁进行降温, 在储罐区, 火灾的发生可能会使得罐体温度快速上升, 从而提升爆炸的可能性, 采用喷水系统, 对储罐表面进行冷却, 能够有效减缓火焰蔓延, 避免储罐发生爆炸。

在某化工厂发生意外事件时, 借助喷水灭火机制, 有效维持了罐体温度于安全水平, 防止了罐体破裂的潜在风险, 在储罐区, 需根据储罐的大小、储存物质以及火势蔓延路径来设计灭火系统, 以确保设备分布

的合理性，并能在火灾初期快速灭火^[3]。

2.3 安全监控与应急管理系統

储罐区的实时监控系统，能够及时识别并预防潜在的火灾风险，在现代石油化工储罐区的监控中，普遍采用摄像头、传感器等设备的协同作用，以实现对整个储罐区的全面监控，储罐区域的温度和烟雾浓度等关键参数，被一家石油化工公司通过部署智能视频监控和先进的火灾预兆感应器实现了即时监测，在监测到任何异常时，该系统会立即发出警报，并且会将该信息自动发送至监管控制中心。

火灾事件应对过程中，核心在于建立一套高效的组织调度体系，该系统是事故处理的关键，企业可依托大数据分析成果及预警系统，构建出合理有效的应急响应计划，在某起涉及储罐的火灾事件中，监控设施检测到火险后，立刻激活了应急响应计划，现场工作人员随即启动了紧急疏散程序，并操控应急灭火装置对受影响的储罐实施冷却，有效阻止了火势的蔓延。有效的应急管理措施，成功将储罐区火灾造成的损失降至最低，并保障了人员的生命安全，系统融合了安全监控与应急管理功能，不仅能预防火患，亦能在火灾发生时迅速调动资源，高效执行救援与灭火作业，借助科学的管理方法和先进的技术措施，储罐区的防火安全性能得到了显著增强^[4]。

3 石油化工储罐区火灾防护设计中的关键技术

3.1 泡沫灭火系统技术

泡沫灭火系统在石油化工储罐区的火灾防护中占据关键地位，其基本原理是通过生成泡沫覆盖燃烧物质的表面，阻断空气中的氧气供应，并通过泡沫的冷却作用降低火源的温度，从而有效抑制燃烧。泡沫灭火系统的设计应结合储罐区的具体布局，确保泡沫灭火装置能够迅速、有效地覆盖所有易燃区域。依据NFPA 11《低、中、高倍数泡沫灭火系统标准》，泡沫液的应用速率通常应为每平方米0.1 ~ 0.16 L/min，这意味着对于一个直径30m、面积约为706m²的储罐，泡沫液的流量应达到每分钟70L以上。

在系统设计中，泡沫储罐通常布置在距离火灾易发区域较远且安全的地方，并且其容量必须满足至少90分钟的连续灭火需求。因此，泡沫储罐的容量应至少为最大泡沫需求量的3至4倍，以确保火灾持续燃烧期间，泡沫液体供应不会中断。喷射设备的布局必须确保所有易燃区域都能被覆盖，喷嘴间的距离一般不应超过储罐直径的50%。例如，一个直径40m的储

罐，需要布置8到10个喷嘴，以保证泡沫的均匀覆盖。

泡沫灭火剂的选择至关重要，根据储存物质的不同，应选择合适的泡沫类型。对于石油类火灾，AFFF(水成膜泡沫)因其迅速形成水膜、隔绝氧气和燃烧表面，常用于石油化工储罐区。根据NFPA标准，AFFF泡沫应用的设计流量通常为每平方米1.6L/min。氟蛋白泡沫(FP)由于其更高的耐热性和适应性，也在大面积储罐火灾中得到广泛应用。在设计中，供水系统的压力一般应保持在7到10 bar之间，确保泡沫流量充足且能够有效覆盖燃烧区域^[5]。如表1所示。

表1 泡沫灭火系统技术数据表

关键参数	数值
泡沫应用速率	0.1 到 0.16 L/min/m ²
30m 直径储罐的泡沫流量	≥ 70 L/min
泡沫储罐容量要求	最大需求的3至4倍
喷嘴间距(占储罐直径最大百分比)	≤ 50%
40m 直径储罐的喷嘴数量	8 到 10 个喷嘴
AFFF 泡沫流量	1.6 L/min/m ²
泡沫系统压力范围	7 到 10 bar

3.2 冷却降温技术

冷却降温技术在储罐火灾防护中至关重要，特别是对于防止储罐在高温环境下爆炸或结构失效。火灾发生时，火焰的高温会迅速增加储罐内的压力，导致爆炸风险急剧上升。因此，冷却系统的设计必须能够在火灾初期有效降低储罐的表面温度，防止火灾蔓延并维持储罐的结构完整性。根据NFPA 15《喷水灭火系统标准》，对于固定式储罐，冷却系统的水流量设计通常为每平方米10至12L/min。

例如，对于一个直径40m、高度20m的储罐，其表面积约为3,769m²，所需的冷却水流量应在每分钟37,690L至45,230L之间。这种高强度的冷却水流设计能够确保火焰不会导致储罐温度过高，从而避免罐体因温度升高而爆炸或失效。喷嘴的布置需均匀分布于储罐的关键部位，通常情况下，喷嘴的设计间距应不

超过储罐直径的 20% 至 30%，以保证均匀的冷却效果。为了增强冷却效果，某些情况下会使用高压水雾系统。

高压水雾通过产生超细水滴，能够快速蒸发并吸收大量热量，降低储罐周围的空气温度。依据 NFPA 750《水雾灭火系统标准》，高压水雾系统的设计需保证每个喷嘴的覆盖面积不超过储罐表面积的 10%，且每平方米的喷水强度应达到 $6 \sim 8 \text{ L/min}$ 。该系统的水压通常要求在 12 到 15 bar 之间，能够有效在高温条件下迅速冷却储罐。

为了应对长时间的火灾扑救需求，冷却系统需具备持续至少 90 分钟的冷却能力。对于某些大型化工厂，冷却系统通常设计有两套独立供水网络，水源冗余应达到至少两倍，以确保在火灾扑救期间不出现供水中断的情况。这种设计能够在火灾扑救过程中提供长时间、连续的冷却保障，避免因冷却不足导致的罐体爆炸或其他灾难性后果。

3.3 火灾风险评估与建模

针对储罐区域的火灾防护设计，关键在于技术的评估和模型建立，此过程通过计算火灾发生概率、火势扩散速度及其影响范围，进而优化应对策略，储罐的尺寸、储存液体的燃烧属性以及环境状况，在遵循 API 521 标准及 NFPA 30《易燃液体规范》的框架下，均需纳入火灾风险评估的考量范畴，储罐的热释放速率和爆炸影响半径等关键指标，可通过定量风险评估结合火灾模式进行计算。

在直径达 40m 的圆形容器区域内，若发生火情，热能释放可达 3000MW，其引发的爆炸影响范围能扩大至 600m，此类风险评估数值，对防护系统布局的优化起到了关键作用，利用计算流体力学 (CFD) 工具对火灾动态进行仿真建模，能够对储罐区火灾的恶化程度及其对灭火系统反应效率进行有效评估，例如，采用火灾模拟技术，可以对防护系统的设计进行验证，诸如喷淋系统的有效覆盖区域、泡沫灭火系统的供应速率，以及压力分布的合理性。

日常安全管理可依赖风险评估的结果作为行动指南，通过监控潜在风险并及时执行预防行为，一家石化公司利用计算流体力学 (CFD) 的火灾模拟技术，对储罐区域的保护系统布局进行了优化，从而显著增强了火灾的防控效能。

3.4 应急疏散与安全逃生设计

在石油化工储罐区，火灾发生时的应急疏散和安全逃生设计是至关重要的，关系到人员能否在危险

中迅速而安全地撤离，依据《生命安全规范》和《易燃液体规范》的规定，储罐区域必须配备宽度不小于 1.2m 的至少两条独立疏散路径，以保障人员疏散的充分能力，在紧急疏散过程中，最长疏散距离被限定在 75m 以内，目的是保障人员能够迅速抵达指定的安全地带。

在火灾发生时，确保疏散通道沿线的显著位置安装逃生指示标识，配备能够持续至少 60min 的应急照明设备，以提升人员疏散的效率，在构建过程中，疏散通道的规划需重点考虑使用材料的耐高温与抗冲击性能，确保其在遭受 1000 °C 的高温持续至少两小时后仍能保持结构完整，这样做是为了防止火势蔓延或爆炸产生的冲击波对疏散通道造成损坏。针对储罐区这类特定环境，应急疏散通道所设置的防火门必须具备防止爆炸波及的能力，其抗冲击性能至少需达到 0.5MPa 的标准，以保障在爆炸事件中为逃生人员提供必要的逃生时间窗口，为了确保人员能够安全撤离，必须使安全逃生设计联动储罐区的监控系统，该智能系统能够根据实时火灾数据，如烟雾的扩散和火势的蔓延方向，动态调整疏散路线。

4 结论

通过分析石油化工储罐区火灾防护系统的设计，可见其是一个复杂的过程，涉及多项技术与设备的协调应用。火灾探测与报警系统、灭火系统以及安全监控与应急管理系统的综合运用，显著提升了储罐区的火灾防护能力。泡沫灭火、冷却降温、火灾风险评估与应急疏散等技术进一步完善了防护体系。随着智能化技术的发展，储罐区火灾防护系统将在自动化、智能化及环保性方面不断提升，更有效预防火灾事故，保障石油化工厂安全。

参考文献：

- [1] 张东锋. 石油化工火灾扑救难点和对策分析 [J]. 化纤与纺织技术, 2023, 52(10):131-133.
- [2] 赵江平, 赵亮. LNG 火灾事故下相邻储罐水喷淋热辐射防护研究 [J]. 工业安全与环保, 2023, 49(04):11-16.
- [3] 鲍颖伟. 高辐射热流条件下典型化工储罐传热过程模拟及应急防护研究 [D]. 青岛科技大学, 2023.
- [4] 王卓. 原油储罐池火灾数值模拟及安全防护距离研究 [D]. 东北石油大学, 2021.
- [5] 伍壮. 基于多米诺效应分析的大型原油储罐区火灾风险研究 [D]. 中国石油大学(北京), 2020.