

大型工业装置消防给水系统的可靠性设计与水力验算

郝杰

中国电子系统工程第四建设有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]随着我国社会经济的快速发展,城市化进程日益加快,城市消防负荷不断增大,消防问题愈发严重,重特大火灾频发。灾时消防给水系统无法及时自动启动或正常运行,是小火最终酿成重特大火灾的首要原因。大型工业装置工艺复杂、危险源集中、火灾荷载大,火灾易引发连锁反应,造成重大人员伤亡与财产损失。消防给水系统作为火灾扑救的主动核心系统是保障消防安全的最后一道防线。文中从“系统架构、设备配置、管网设计”等维度阐述大型工业装置消防给水系统可靠性设计要点,探讨水力计算参数确定方法、模型及验算流程,提出协同优化策略,为同类项目设计提供参考。

[关键词]大型工业装置;消防给水系统;可靠性设计;水力验算;管网优化

DOI: 10.33142/aem.v7i12.18646 中图分类号: TU991.41 文献标识码: A

Reliability Design and Hydraulic Verification of Fire Water Supply System for Large Industrial Plants

HAO Jie

The Fourth Construction Co., Ltd. of China Electronics System Engineering, Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: With the rapid development of Chinese social economy, the urbanization process is accelerating, the urban fire load is constantly increasing, the fire problems are becoming more and more serious, and major fires occur frequently. The inability of the fire water supply system to start automatically or operate normally in a timely manner during a disaster is the primary reason for small fires ultimately leading to major and catastrophic fires. Large industrial facilities have complex processes, concentrated hazards, and high fire loads, which can easily trigger chain reactions and cause significant casualties and property damage. The fire water supply system, as the active core system for fire fighting, is the last line of defense to ensure fire safety. The article elaborates on the key points of reliability design for large-scale industrial fire water supply systems from the dimensions of "system architecture, equipment configuration, and pipe network design", explores the methods, models, and verification processes for determining hydraulic calculation parameters, proposes collaborative optimization strategies, and provides reference for the design of similar projects.

Keywords: large industrial facilities; fire water supply system; reliability design; hydraulic verification; pipeline optimization

引言

大型工业装置广泛应用于煤化工、电力、石油化工等多行业^[1],其生产过程不仅涉及一些有毒有害的介质,而且存在大量的易燃易爆介质,具备极高的火灾爆炸风险。在大型工业装置火灾事故中,超30%因消防给水系统失效导致现场火势蔓延扩大,经济损失远超普通建筑火灾^[2]。消防给水系统是指为了应对火灾,通过设置在建筑物内的专用管道、泵房、水源和喷头等设施,将水输送到火灾现场的系统^[3]。消防给水系统的工作原理基于压力控制和水流分配,通过管网将水输送到各个防火区域,是保障工业装置安全运行的核心前提^[4]。可靠性设计通过科学的架构选型与合理的设备配置降低系统故障概率,水力验算则精准验证系统核心运行性能,二者

协同互补、相辅相成,共同支撑系统稳定发挥作用。因此,研究大型工业装置消防给水系统的可靠性设计与水力验算方法,对提升火灾防控能力、减少事故损失意义重大。

1 大型工业装置消防给水系统可靠性设计要点

1.1 系统架构选型设计

(1) 供水方式选择

大型工业装置消防给水系统供水方式主要包括稳压供水系统以及临时高压供水系统,不同供水方式的特性、可靠性与适用场景存在一定的差异,具体对比如表1:

由表1可知,稳高压供水系统可靠性高但成本大,用于高危险核心区;低压供水系统仅适用于辅助区,难满足核心装置灭火需求。

表1 系统架构选型

供水方式	核心特性	可靠性等级	投资成本	适用区域
稳高压供水	持续提供设计压力、流量,无需加压设备	高	高	原油储罐区、反应釜区等火灾危险性高区域
低压供水	仅满足消防车取水,需消防车加压	低	低	辅助办公区、仓库等火灾危险性低区域

(2) 管网布置设计

管网布置影响供水的可靠性,大型工业装置消防管网应环状布置,确保单段失效仍有其他供水路径。大型装置区可分多个独立环状管网,用连通管和阀门实现分段控制与冗余保障^[5]。同时,管网敷设时应避开高火灾危险区,无法避开的情况下则需采取防火保护干预策略。

1.2 关键设备可靠性配置

(1) 消防泵组设计

消防泵是消防给水系统的核心,其可靠性影响着系统的供水能力。消防泵与生活泵的运行工况存在显著差异:生活泵通常在流量-压力性能曲线的固定区间内稳定运行,而消防泵的实际运行工况点由火场用水量决定,可能是流量压力性能曲线上的任何一点^[6]。大型工业装置消防泵组应冗余配置,根据设计流量与压力要求确定主、备用泵数量,如设计流量>100L/s时,宜采用“两用一备”或“三用一备”配置,反之,设计流量≤100L/s时,可采用“一用一备”配置。备用泵需与主泵型号一致,具备自动启动功能,在主泵故障或系统压力不足时,能在30s内自动投入运行,确保供水连续性。泵型选型方面,应优先选用高效、抗气蚀性能优良的离心泵,同时需配备独立应急电源,保障火灾全程泵组稳定运行。

(2) 稳压设施设计

临时高压供水系统要设置稳压设施,核心作用是维持管网静压稳定,确保火灾初期消防设施能快速出水,为火情控制争取关键时间。稳压设施可选稳压泵或气压罐,稳压泵“一用一备”,流量满足管网泄漏(1-5L/s);气压罐容积根据稳压泵流量和启动时间计算,确保启动前管网压力稳定^[7]。

(3) 阀门及配件设计

阀门作为消防管网的控制核心,其运行可靠性直接影响管网分段控制效果与故障隔离能力,是保障系统局部故障不扩散的关键。大型工业装置消防管网要选带气压罐的消防稳压设备。环状管网干管设分段阀,间距不超100m,每段消火栓不超5个。阀门设置启闭标志,定期维护,确保启闭灵活。

1.3 管网材料与敷设设计

(1) 管材选择

消防给水及消火栓系统是大型工业装置消防的重要部分,能在火灾时通过消火栓供水,供消防水系统灭火。管网管材的选择需考虑系统工作压力、耐腐蚀性等因素对管网性能的影响。大型工业装置消防管网设计压力高(0.7~1.2MPa),且环境高温、具腐蚀性,宜优先选钢管(无缝、焊接)或球墨铸铁管。钢管强度高、耐高压、适应性强,用于高压及恶劣环境;球墨铸铁管耐腐蚀、水力优,用于中低压管网。腐蚀性强区域,管材表面应防腐(如涂塑、镀锌)。

(2) 管道敷设

管道敷设要避开火灾、爆炸危险区以及障碍物,无法避开时,则及时采取防火、防爆、防碰撞的干预措施。敷设方式分架空和地下,架空便于检修但要远离高温,且需设置支架进行固定;地下敷设可以节省空间,但是在敷设时需防腐、防渗,并设警示标志。管道连接宜采用焊接或沟槽,确保牢固。

1.4 安全保障系统设计

(1) 压力监测与报警系统

为实时掌控管网运行状态,需在管网干管、最不利点消防设施等关键位置设置压力监测点,实现压力数据实时采集。当管网压力低于设定值时,系统立即发出报警信号,并联动启动稳压泵或消防泵,保障供水稳定性。

(2) 应急排水系统

消防给水系统设置应急排水设施,配备排水泵及管路,排水能力满足管网最大的排水需求,防止积水损坏设备。

(3) 防雷与接地设计

消防给水设备及管网做好防雷接地。

3 大型工业装置消防给水系统水力验算

3.1 水力验算核心参数确定

(1) 设计流量确定

消防给水系统设计流量需综合考虑大型工业装置的火灾危险等级、保护的面积以及消防设施的类型等因素进行确定^[8]。依据相关规范,不同危险等级工业装置的消火栓、自动喷水灭火系统设计流量有明确规定,如消防给水系统依储罐类型、容积及保护面积情况计算。

(2) 设计压力确定

设计压力需满足最不利点消防设施的工作压力要求,包括最不利点与消防水池最低水位的高差、沿程水头损失与局部水头损失之和、最不利点水灭火设施所需的设计压力。

3.2 水力计算基本原理与方法

基本原理:消防给水系统水力计算以伯努利方程为依据,即管网内任意两断面总水头(位置、压力、流速水头)差等于该段水头损失。数学表达式为:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_w \quad (1)$$

式中: z_1 、 z_2 为断面位置水头 (m); p_1 、 p_2 为断面压水头 (mH_2O); v_1 、 v_2 为断面流速 (m/s); ρ 为水密度 (kg/m^3); g 为重力加速度 (m/s^2); h_w 为断面间水头损失 (mH_2O)。

水头损失计算:水头损失含沿程和局部水头损失两类。沿程水头损失是水流在管段内因黏滞力致能量损耗,可用哈森-威廉斯公式算:

$$h_f = 10.69 \frac{Q^{1.852} L}{C^{1.852} D^{4.8704}} \quad (2)$$

式中: h_f 为沿程水头损失 (m); Q 为管段流量 (m^3/s);

L 为管段长 (m); C 为管材粗糙系数 (钢管 100~130, 球墨铸铁管 120~140); D 为管道内径 (m)。

局部水头损失是水流经阀门、弯头等配件时, 因流向改变或流速变化产生的能量损耗, 可用局部阻力系数法计算:

$$h_j = \sum \xi \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

式中: h_j 为局部水头损失 (m); ξ 为局部阻力系数 (查规范手册); v 为水流速度 (m/s)。实际工程中, 局部水头损失可按沿程水头损失 10%~30% 估算, 管网复杂、配件多时可适当提高比例。

3.3 管网水力计算模型与流程

(1) 计算模型

大型工业装置消防管网多为环状, 水力计算复杂, 常用模型有哈迪-克罗斯法 (适用于简单管网, 迭代消除闭合差求流量和水头损失)、节点法 (复杂管网, 以节点流量平衡建方程组求解)、管段法 (以管段流量为变量建方程求解)。计算机发展下, EPANET、AutoCAD Civil 3D 等数值模拟软件可快速建模, 模拟不同工况, 提升计算效率与精度。

(2) 水头损失计算: 管网水头损失包括沿程水头损失和局部水头损失, 两者需分别计算后叠加得到总水头损失。

①沿程水头损失: 沿程水头损失是指水流在管段内流动时, 因水的黏滞力和管壁摩擦力产生的能量损失, 采用哈森-威廉斯公式计算, 该公式适用于消防给水管道的水力计算, 精度较高, 公式为:

$$h_f = 10.69 \frac{Q^{1.852} L}{C^{1.852} D^{4.8704}} \quad (4)$$

式中: h_f 为沿程水头损失 (m); Q 为管段流量 (m^3/s); L 为管段长度 (m); C 为管材粗糙系数 (钢管 $C = 100\sim130$, 球墨铸铁管 $C = 120\sim140$, 镀锌钢管 $C = 90\sim110$); D 为管道内径 (m)。

②局部水头损失: 局部水头损失是指水流通过阀门、弯头、三通、异径管等配件时, 因水流方向改变、流速变化产生的能量损失, 采用局部阻力系数法计算, 公式为:

$$h_j = \sum \xi \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

式中: h_j 为局部水头损失 (m); ξ 为局部阻力系数 (不同配件的阻力系数可查相关规范手册, v 为管道内水流速度 (m/s); g 为重力加速度 (m/s^2), 取 9.81m/s^2)。

在实际工程计算中, 为简化计算, 对于管网配件较少的管段, 局部水头损失可按沿程水头损失的 10% 估算; 对于管网复杂、配件较多的管段 (如阀门集中区域、节点处), 局部水头损失可按沿程水头损失的 15%~20% 估算, 确保计算结果偏于安全。

四 可靠性设计与水力验算的协同优化策略与方法

4.1 管网结构优化

管网结构决定水力性能与可靠性, 优化核心是调整拓扑结构与匹配管径, 保障供水连续性的同时最大限度降低水头损失。拓扑优化方面, 环状管网可靠性高, 但需优化节点布局减少水力盲区。在管径优化上, 长距离管段需采用变径设计, 依水力经济流速原理, 在流量较大的主干管段, 选用大管径, 从而降低沿程水头的损失, 在流量递减的支管段, 逐步减小管径, 从而控制成本, 可用水力计算软件模拟选择最优的管径组合。此外, 优化节点水力特性, 减少配件, 关键节点采用流线型管件, 降低局部水头损失。

4.2 设备参数优化

设备参数与管网水力特性的匹配度, 直接影响系统运行效率与可靠性, 优化核心是基于精准水力计算, 避免发生参数不匹配的现象。消防泵组选型除了依据设计流量和压力选主泵, 还要关注效率曲线特性, 结合水力计算得出的管网特性曲线使泵的工作点落在效率曲线的 70%~90% 区间内。稳压设施中, 稳压泵流量匹配管网正常泄漏量 (1~5L/s), 压力设定兼顾最不利点静压与消防泵启动值; 气压罐容积依公式 $V=\beta \times (Q_b \times T) / \Delta P$ 计算确定。此外, 优化设备的辅助参数, 规避泵体气蚀、超压等损坏风险。

4.3 冗余配置优化

冗余配置要基于可靠性分级与成本效益分析实现“精准冗余”。核心是借故障树分析 (FTA) 识别关键失效环节: 通过 FTA 明确顶事件, 拆解中间事件与底事件, 计算失效概率与最小割集, 锁定关键环节 (如核心区消防泵等); 高可靠性区 (如原油储罐区) 用“N+2”冗余及备用主干管段, 中可靠性区 (如普通生产装置区) 用“N+1”冗余配置, 低可靠性区 (如辅助办公区) 设基本备用设施。同时优化冗余切换逻辑, 运用自动监测与快速切换装置 (如消防泵组双电源自动切换开关, 切换 $\leq 15\text{s}$; 关键阀门电动控制)。此外, 用可靠性成本模型计算不同冗余配置生命周期成本, 选择成本最低方案。

4.4 优化效果评估指标

协同优化效果可从四方面指标评估: 可靠性指标 (系统失效概率、平均无故障工作时间、故障修复时间等); 水力性能指标 (最不利点流量和压力、管网最大流速、总水头损失等); 经济性指标 (系统总投资、年运行维护成本、投资回收期等); 实用性指标 (系统可维护性、施工难度、空间占用率等)。综合分析这些指标, 评估优化方案的可行性。

5 结论

本文深入研究了大型工业装置消防给水系统的可靠性设计与水力验算, 主要结论如下: 大型工业装置火灾特点对消防给水系统要求高, 可靠性设计应遵循冗余、分段、

适应性和标准化设计原则。系统架构选型等是可靠性设计关键环节,采取环状管网等措施可提升系统的可靠性。水力验算核心是确定设计流量和压力,用计算方法求解参数,重视特殊工况的验算。协同优化策略可降低成本,提升方案经济性和实用性。未来可引入智能化技术,开发智能监测与预警平台,提升系统智能化水平。

[参考文献]

- [1]中华人民共和国住房和城乡建设部.消防给水及消火栓系统技术规范:GB 50974—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.
- [2]韩刚,向杨.某电厂自动水消防管道连接方式探讨[J].信息记录材料,2018,19(11):203-204.
- [3]黄晓家,马恒.GB 50974-2014,消防给水及消火栓系统技

术规范[S].北京:中国计划出版社,2014.

[4]卢国建,宋波.GB 50261-2017,自动喷水灭火系统施工及验收规范[S].北京:中国计划出版社,2017.

[5]GB 50160—2008,石油化工企业设计防火规范[S](包括修订版报批稿).

[6]GB 50016—2014,建筑设计防火规范[S].

[7]GB 50974—2014,消防给水及消火栓系统技术规范[S].

[8]韩艳萍,张晋武.石油化工企业常见消防设计问题探讨[J].工业用水与废水,2014,45(2):78-82.

作者简介:郝杰(1986.1—),毕业院校:河北建筑工程学院,所学专业:给水排水工程,当前就职单位:中国电子系统工程第四建设有限公司,职务:给排水工程师,职称级别:副高级工程师。