



液化石油气(LPG)码头消防设计探讨

林同强

(福建省交通规划设计院有限公司, 福建 福州 350400)

摘要: 针对液化石油气(LPG)码头消防系统设计工作中技术标准体系不完善、消防设施配置参数不统一等问题, 结合实际工程案例, 通过梳理国内外相关规范标准, 综合运用数值计算、比较分析、建立量化模型等方法, 重点突破消防冷却水炮设计流量优化、消防设施联动控制方法优选、炮塔高度适配性等关键技术。该研究阐明了冷却水炮设计流量与射程、覆盖面积以及风向的多元关系, 提出基于火灾场景消防设施控制方式, 并建立炮塔高度与船型空载时的吃水深度的动态量化关系模型。研究成果可以为液化石油气(LPG)码头消防系统标准化设计提供理论依据, 有效化解行业内长期存在的设计分歧, 对提升危化品码头的消防安全具有工程实践价值。

关键词: 液化石油气码头; 水炮设计流量; 炮塔高度; 探索思路

中图分类号: U656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)10-0064-06

Discussion on fire protection design for liquefied petroleum gas (LPG) terminals

LIN Tongqiang

(Fujian Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., Fuzhou 350400, China)

Abstract: To address issues such as the incomplete technical standard system and inconsistent configuration parameters of fire protection facilities in the design of fire protection systems for liquefied petroleum gas (LPG) terminals, this study combines practical engineering cases by reviewing domestic and international codes and standards. Through numerical calculations, comparative analysis, quantitative models, and other methods, it focuses on breakthroughs in key technologies including the optimization of design flow rates for fire-cooling water monitors, selection of integrated control methods for fire protection facilities, and adaptability of monitor tower heights. The research clarifies multivariate relationships between the design flow rate, range, coverage area, and wind direction of cooling water monitors. It proposes fire scenario-based control strategies for fire protection facilities and establishes a dynamic quantitative model between the monitor tower height and the draft depth of unloaded ship types. The research results provide theoretical basis for the standardized design of fire protection systems for LPG terminals, effectively resolve long-standing design differences in the industry, and have engineering practical value for enhancing the fire safety of hazardous chemical terminals.

Keywords: liquefied petroleum gas terminal; design flow rate of cooling water monitor; monitor tower height; exploratory approach

近年来, 随着我国经济持续高速发展, 能源问题已成为当前可持续发展的重中之重, 为了优化能源结构、缓解能源需求迅速增加与环境容量之间的矛盾, 从90年代开始, 各地已开始探讨引

进清洁能源的可能性^[1]。液化石油气(liquefied petroleum gas, LPG)作为一种清洁、高效的能源, 在能源转型中扮演着重要角色, 其消费需求呈增长态势。为保障国家能源安全、支撑经济社会发

收稿日期: 2025-02-10

作者简介: 林同强(1975—), 男, 高级工程师, 从事港口给排水、消防设计工作。

展,我国液化石油气(LPG)码头建设正进入新一轮快速发展周期。然而,伴随码头建设规模的持续扩大,消防风险防控压力与日俱增。统计显示,2024 年全球报告 85 起液化石油气(LPG)码头火灾事故,同比增长 27%,为近 10 年最高,而其特有的易燃易爆特性使得火灾事故极易引发连环爆炸,不仅会造成重大人员伤亡和巨额财产损失,还可能引发灾难性环境污染,对区域生态系统造成不可逆损害。在此背景下,消防设计作为火灾防控体系的基础环节,承担着衔接技术规范、工程实践与应急救援的关键职能,其科学性与前瞻性直接决定事故防控效能。当前,基于国家“安全发展”战略导向,兼具标准化、智能化的新一代消防系统设计已上升至国家公共安全战略层面,成为保障能源基础设施本质安全的核心课题。

现行液化石油气(LPG)码头消防系统建设存在标准体系不完善、消防设施配置参数不统一等问题。究其根源,主要体现于两大技术矛盾:1) 现行 JTS158—2019《油气化工码头设计防火规范》^[2](简称《油气规范》)与 GB50974—2014《消防给水及消火栓系统技术规范》^[3](简称《消水规》)对 LPG 码头消防系统关键参数取值存在一定分歧;2) 现有规范体系存在消防设计参数缺项,导致各地消防主管部门与设计单位在各项技术要点上存在认知分歧,造成各单位对消防安全要求不一致。本文结合工程实例,对液化石油气(LPG)码头的消防设计进行探讨,以期为液化石油气(LPG)码头消防系统的标准化设计提供参考依据。

1 消防技术研究现状

液化石油气(LPG)码头因兼具易燃易爆与低温存储特性,其消防系统设计始终是国际安全工程领域的研究热点。如风险量化模型、高效灭火技术、泄漏监测与预警技术、智能化消防技术等相关研究,构建一定的研究发展脉络。这些成果为 LPG 码头消防工程设计奠定了理论基础。各国也都依据既有研究成果制定了相应的规范与标准体系,但随着工程实践的不断深入以及理论的继

续发展,现行消防系统中存在的问题也逐步被发现。

1.1 规范与标准体系

1.1.1 国内规范体系

1) 《油气规范》对 LPG 码头的防火等级界定、总体平面布置、消防设施配置及消防控制等进行规定。

2) 《消水规》对 LPG 码头设计流量、火灾延续时间等进行了规定。

3) GB50160—2008《石油化工企业设计防火标准》^[4]对液化烃罐区消防进行了规定,可作为 LPG 码头消防设计的参考依据。

1.1.2 国外规范体系

1) NFPA 59A *Standard for the Production, Storage, and Handling of Liquefied Natural Gas (LNG)*^[5]适用于 LPG 兼容设计,对 LPG 码头的选址、设计到运营的全生命周期进行规定,核心是通过技术规范和管理要求进行消防风险管控,侧重于民用。

2) API 2510 *Design and Construction of LPG Installations*^[6]对 LPG 码头的设备设计、冗余安全系统和风险管理等进行了规定。

1.2 存在的问题

虽然各国均已具有一定的规范体系对 LPG 码头的消防工程设计进行规范化管理,但在日常的工程实践中依旧可以发现如下问题:1) 部分老旧码头布局不合理、消防设施滞后;2) 针对极端事故的消防设计仍有技术瓶颈;3) 法规标准与技术创新脱节。

1.3 先进技术的应用

随着技术的不断进步,为提高 LPG 码头消防安全,各项先进技术也被陆续引入,其中包括:

1) 风险量化模型。采用 CFD (computational fluid dynamics, 计算流体力学) 模拟 LPG 泄漏后的蒸气云爆炸(vapor cloud explosion, VCE)和沸腾液体扩展蒸气爆炸(boiling liquid expanding vapor explosion, BLEVE)场景,优化消防分区设计^[7]。

2) 高效灭火技术。干粉灭火技术、高压细水雾技术以及压缩空气泡沫(compressed-air foam

systems, CAFS)等, 这些技术的发展为保障液化石油气码头(LPG)的安全提供了技术的支撑。

3) 泄漏监测与预警技术。通过数值模拟(如FLACS、FDS软件)研究LPG泄漏后的扩散规律, 优化码头布局和气体控制系统的布置。

4) 智能化消防系统技术。防爆型机器人搭载水炮、热成像仪进入高危区域执行灭火; 未来, 智能化消防技术将成为主流的消防技术发展方向。

国内外的研究均聚焦于风险量化、智能化和环保, 但国外在标准体系和技术应用上更加环保、技术应用上更加成熟。国外成熟的消防体系和技术, 可以为我国液化石油气(LPG)码头消防设计技术升级和法规标准完善提供参考路径和方向。

2 疑点、难点探讨

在液化石油气码头(LPG)的消防设计过程中, 面临的问题集中体现在标准体系不完善导致设计参数界定模糊, 针对这一制约行业发展的共性难题, 亟需通过系统性梳理标准框架与参数边界, 分析相关逻辑关系, 做出合理判断。本文对设计中常遇到的几个问题进行讨论和分析。

2.1 冷却水炮设计流量问题

冷却水炮设计流量是确保发生火灾时可以快速、有效进行灭火的关键环节, 其复杂性和多因素耦合特性导致以下问题需要关注和探讨。

2.1.1 冷却强度标准不统一

《消水规》第3.4.10条: 液化石油气船着火罐冷却水喷水强度为 $10 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$, 邻近罐冷却水喷水强度为 $5 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 。《油气规》第7.2.9条: 全冻式着火罐冷却水喷水强度为 $4 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$, 邻近罐冷却水喷水强度为 $4 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$; 全压式着火罐冷却水喷水强度为 $9 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$, 邻近罐冷却水喷水强度为 $9 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 。

显然, 冷却水喷水强度在这两本规范中的要求差异较大, 针对这种情况建议: 从规范的优先级角度分析, 《消水规》属于强制性国家标准, 《油气规范》属于强制性行业标准, 前者优先于后者; 从规范的内容和出处角度来分析, 《消水规》中该

条文的内容引用旧油气规范的内容, 《油气规范》于2019年进行修编, 修编后对该处的内容进行调整和修改, 《消水规》出版在前而无法及时更改, 导致参数要求不一致。通过综合分析, 液化石油气船着火罐冷却水喷水强度建议按《油气规范》标准执行。

2.1.2 流量、射程与覆盖面积的矛盾

在确定冷却水设计流量过程中, 需要综合考虑流量、射程与覆盖面积之间的矛盾关系: 射程越远, 选配的水炮规格越大, 其流量越大; 同时, 射程越远、单位面积的流量密度可能不足, 影响冷却效果。针对以上问题, 首先采用根据“射程-流量曲线表”, 优化冷却水炮选型。并考虑“重叠覆盖设计”, 确保相邻水炮覆盖区域约30%^[8]。

2.1.3 风向变化的影响

液化石油气大多位于沿海区域, 火灾时受风向影响严重, 强风导致水雾偏移, 实际覆盖面积小于理论值。在设计过程中, 可以引入修正系数, 按额定射程的90%计算。同时增加边界冗余, 充分考虑相应富余量, 以补偿风向变化的影响。

2.1.4 水力计算的影响

实际的压力工况与水炮的额定压力经常不一致, 导致水炮压力与水炮额定流量不一致。特别是长距离输水时, 水头损失如果没有精确计算, 往往会导致末端水压不足, 在设计过程中需要对管道的压力进行精确水力计算, 并根据水炮的“压力-流量曲线”进行校核, 同时还应在关键节点预留15%的压力富余值^[9]。

2.2 消防设施控制问题

消防设施控制是发生火灾时快速响应的核心环节, 但由于其复杂性和高风险性, 需进一步分析与探讨。

目前, 国内的规范没有具体规定液化石油气码头消防控制, 对新型的消防灭火技术的适用性也缺乏指导。针对这些情况, 基于液化石油气火灾场景, 通过不同控制方法的优缺点及适用条件进行比较分析; 还可以通过调研, 参考类似项目; 同时应与消防主管部门沟通, 获取技术认可。

在消防设施控制过程中，还会面临如何平衡智能化与高成本的矛盾。智能化消防控制是未来发展方向，但是投资成本大、定期维护设备、更新算法，对运维团队的专业水平要求高，在设计过程中，应与业主充分沟通，综合分析，在新技术与投资成本中寻找一个合适的平衡点。

2.3 消防炮塔高度确定

消防炮塔安装高度是确保消防水炮覆盖目标的重要要素，但在设计过程中涉及复杂的工程参数和实际限制，如何精确定义消防炮塔高度也值得探讨。设置太高，一方面增加造价，另一方面灭火效果不好；设置太低，又满足不了消防要求。根据《油气规范》第 7.5.2.5 条规定，消防炮塔的高度应能满足消防炮炮口高于设计高水位时船型空载时甲板面以上 3.0 m，由于船型空载时的吃水深度(T_{\min})规范没有规定，计算炮塔高度核心的问题如何确定 T_{\min} 值。

通过构建消防炮塔安装高度与船舶空载吃水深度间的动态耦合模型，明确二者间的量化关系，基于国际海事组织(IMO)《海上人命安全公约》(SOLAS)第 II-2 章规范要求，确定船型空载时的吃水深度应满足公式：

$$T_{\min} = 0.02L_{bp} + 2 \quad (1)$$

式中： T_{\min} 为空载时的吃水深度； L_{bp} 为船长。

提出炮塔高度的经验公式：

$$\Delta H \geq H - \Delta h - T_{\min} + 3 - L \quad (2)$$

式中： ΔH 为炮塔高度； H 为船型型深； Δh 为码头面与设计高水位的高差； L 为炮口与平台的高度差。

2.4 干粉灭火系统选取

干粉灭火系统做为液化石油气(LPG)码头消防灭火体系的核心组件，需要结合现有规范对其进行合理选取、科学设计，才能最大发挥其灭火效能。本文结合火灾的物理化学特性、干粉火灾机理等因素综合考虑，对干粉灭火系统进行选取分析。

2.4.1 火灾特性及灭火机理适配性

液化石油气(LPG)一旦发生火灾，形成以下

特点：1) 易扩散性。泄漏后快速气化，形成蒸气云，遇火源易引发爆炸。2) 燃烧强度高。火焰传播速度快，热辐射强，易导致二次爆炸。3) 复燃风险。灭火后若未阻断泄漏源，残余气体可能重新引燃。

针对以上火灾特点，选择的干粉应具备相应的特性与之适配：1) 化学抑制。干粉(如碳酸氢钾、磷酸铵盐)通过破坏燃烧链式反应，快速终止火焰。2) 窒息作用。干粉中的化学物质在高温环境下会产生 CO_2 并在燃烧物表面黏附燃烧残留物表面，隔绝氧气并降低温度^[10]。3) 适用场景。尤其适用于无封闭空间(如储罐区、装卸栈桥)的快速扑救。

2.4.2 灭火剂类型选择

ABC 类干粉(磷酸铵盐)：兼顾固体、液体、气体火灾，通用性强，但成本较高，会腐蚀金属设备；BC 类干粉(如碳酸氢钠、氯化钾等)：针对气体火灾(如 LPG)和液体火灾(烃类)高效，化学抑制能力强，抑制效率比 ABC 类高 20%~30%。建议优先选用 BC 类干粉，同时还应考虑抗复燃性能和环保性。

2.5 设计思路

由于液化石油气码头专业化、大型化的快速发展，以及消防科技产品的不断出现，对消防提出新的要求。规范很难同步、全面地适应新的需求，面对这种情况，核心设计思路：合规优先，在规范的框架内寻求解决，避免盲目突破规范边界；科学论证，在规范没有明确情况下，用数据、模拟以及计算的方法来支撑设计的合理性；追根溯源，在规范要求不一致的情况下，除了考虑优先级，更要考虑规范条文出处，做出合理判断；前瞻储备，判断未来规范方向、消防技术发展趋势，做前瞻性的选择。

3 工程实例

本文工程实例为液化石油气(LPG)码头，位于福州港江阴港区，建设 5 万吨级液体化工泊位一个，主要装卸货物为丙烯、丙烷、乙烯，装卸

货物属于易燃、易爆化学品，在装卸、输送过程中若操作不当、措施不足或管理不善均易引发火灾、爆炸事故发生，其物料特性见表 1。

表 1 货物物料特性
Tab. 1 Material characteristics of goods

物料名称	闪点/℃	爆炸极限上限/%	爆炸极限下限/%	灭火方法
丙烯	-108	11.7	2.0	泡沫、干粉
丙烷	-104	9.5	2.1	泡沫、干粉
乙烯	-125	36.0	2.7	泡沫、干粉

3.1 火灾危险性类别

码头设计以安全为前提，规范为依据，主动保护，立足自救的设计原则。《油气规范》第 3.0.1 条：装卸液化烃的火灾危险性类别为甲 A 类；第 3.0.2 条：船舶总吨 ≥ 1 万 GT 的海港码头为特级码头。依照上述规范条文，本工程火灾危险性类别为甲 A 类特级码头。

3.2 消防设施布设

为最大限度降低液化石油气码头的火灾风险，确保事故时快速控制火势，减少人员伤亡和环境污染，结合规范和火灾风险特点，在码头面上布设消防设施供消防灭火使用，消防设施清单见表 2。

表 2 消防设施清单
Tab. 2 Fire facilities list

类别	参数(型号)	备注
冷却水炮	PSKD120	-
移动水枪	QD-1	-
水幕	ZSTMZ25	-
干粉灭火系统	ZFP3000	包含有干粉炮
高倍泡沫灭火系统	V=1 000 L	配 PHZ65 混合器
灭火器	MFT50/MF8	-

3.3 消防疑点、难点设计

液化石油气码头消防设计需围绕其高风险特性，实现“防爆抑爆、快速控灾”目标，通过消防设施配置、智能监控来降低火灾风险。针对消防设计过程中的疑点、难点问题，本文结合工程实例，对相关问题进行解析、计算。

3.3.1 冷却水炮设计流量的确定

冷却水炮的设计流量是消防冷却水系统中十分重要的设计要素，但在设计过程中，水炮流量

的取值不同，对水系统的设计影响很大。本文以福州港江阴港区 12# 泊位工程为例，探讨如何对冷却水炮设计流量进行合理取值。

1) 设计参数。以 5 万 GT 船为最不利消防对象，最大舱(罐)上表面积 $F = 884.3 \text{ m}^2$ ，着火舱(罐)冷却水供给强度为 $q_1 = 4 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ ，相邻舱(罐)冷却水供给强度为 $q_2 = 4 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ ，供给时间为 $T = 6.0 \text{ h}$ 。

2) 冷却水计算。流量 Q_1 ：

$$Q_1 = (Fq_1 + 0.5Fq_2 \cdot 2) \div 60 \quad (3)$$

式中： Q_1 为冷却水计算流量，L/s； F 为最大舱(罐)上表面积， m^2 ； q_1 为着火舱(罐)冷却水供给强度， $\text{L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ ； q_2 为相邻舱(罐)冷却水供给强度， $\text{L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 。代入数值，得出 Q_1 为 117.9 L/s。

3) 冷却水炮选型。工程采用 PSKDC120 型消防水炮，其参数为：额定工作压力 1.2 MPa，流量 120 L/s。

4) 校核冷却水的压力 $H_{\text{压}}$ 和流量 Q_2 。消防加压泵站设在后方库区，距码头最不利点的距离为 1 700 m，消防加压泵站设计流量为 2 200 m^3/h ，扬程 $H_{\text{总}} = 160 \text{ m}$ 。沿程水头损失 $h_f = 14 \text{ m}$ ，水炮距码头面的高度 h_1 为 12.5 m，则水炮处的水压 $H_{\text{压}} = 133.5 \text{ m}$ (约为 1.34 MPa)。根据图 1 可修正设计流量 $Q_2 = 125 \text{ L/s}$ 。

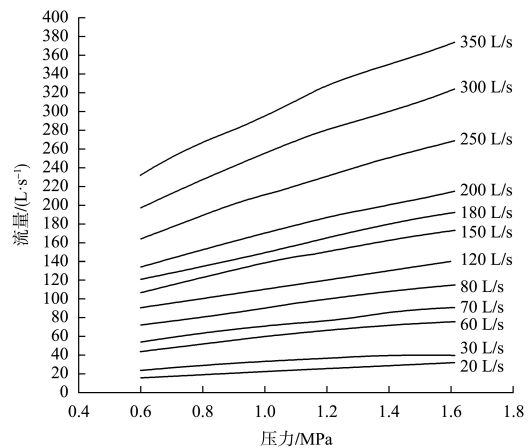


图 1 消防水炮压力-流量曲线
Fig. 1 Fire water monitor pressure-flow curve

很多设计将计算流量 117.9 L/s 作为设计流量，本文经过核算，设计流量取值为 125 L/s。

3.3.2 消防设施的控制

消防设施的控制主要针对冷却水系统、水幕系统、干粉系统和高倍数泡沫系统进行控制。现行的规范没有对液化石油气码头的消防设施控制方式做出明确的规定。目前国内大部分采用防爆气动阀门进行控制，而国外多采用雨淋阀控制。两种方案特点如下：

1) 方案 1。采用防爆气动阀门进行控制，可在消控室遥控或就地控制消防冷却水炮、水幕、干粉炮及集液池高倍数泡沫灭火系统上的各种防爆气动阀门，防爆气动阀门设在各种设备前端，安装的位置不影响生产作业和通行。

2) 方案 2。采用雨淋报警阀控制，在码头后沿或引桥处增设钢平台，雨淋报警阀组设置在钢平台上，各类消防设施(消防水炮、码头前沿的水幕、炮塔平台周边的水幕、集液池高倍数泡沫混合装置)分别从雨淋报警阀组的出口引出。

气动阀门与雨淋阀组各有侧重，其优缺点见表 3，气动阀门本质是安全的，适合易燃易爆场所；雨淋阀更适合常规火灾区域。综合考虑防爆需求、控制精度、运维成本及环境因素，尤其在消防的安全及管理方面，方案 1 值得推广。

表 3 控制方案比较

Tab. 3 Control scheme comparison

方案	优点	缺点
1	防爆性能优,响应快	维护成本高,初期投资大
2	安全可靠,运维成本低	管道布置复杂,占用空间大

3.3.3 消防炮塔高度的确定

根据《油气规范》第 7.5.2.5 条要求，消防炮塔的高度应能满足消防炮炮口高于设计高水位时船型空载时甲板面以上 3.0 m。根据国际海事组织的要求，压载船舶最小吃水深度 $T_{\min} = 0.02L_{bp} + 2 = 6.6$ m

根据两者之间的量化关系， $\Delta H \geq 14.15$ m，取 $\Delta H = 15$ m，炮塔总高度为 20 m。炮塔高度与最小吃水深度动态模型见图 2。

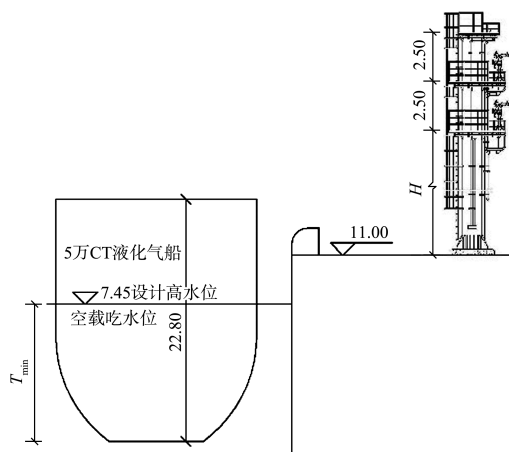


图 2 炮塔高度与最小吃水深度动态模型 (单位: m)

Fig. 2 Dynamic model of monitor tower height and minimum draft depth (unit: m)

目前，压载船舶最小吃水深度 T_{\min} ，在现行的规范没有统一的规定，取值没有依据，通过调研的数据差别较大，也导致炮塔设计高度差别也较大，本文根据国际海事组织的要求计算的压载船舶最小吃水深度跟实际船型较吻合，可供参考。

4 结论

1) 冷却水炮设计流量优化。冷却水炮设计流量应结合射程、覆盖面积以及风向的多元因素进行优化。采用“重叠覆盖设计”，相邻水炮覆盖区域重叠率 $\geq 30\%$ ，并考虑风向影响，射程按额定值的 90% 折减；并依据“压力-流量曲线”进行校核。

2) 消防设施联动控制方法优选。基于特定火灾场景，推荐采用防爆气动阀门作为核心控制装置，确保高风险环境下的操作安全性。

3) 消防炮塔高度确定。构建消防炮塔安装高度与船型空载时的吃水深度间的计算模型，明确两者之间的量化关系，并提出经验公式。

4) 随着物联网(internet of things, IoT)与人工智能(artificial intelligence, AI)技术的深度融合，LPG 码头消防系统未来发展趋向将从“被动灭火”转向“主动防火”，通过实时监测与预测分析实现火灾风险前置管控，消防设计从“合规性导向”升级为“性能化-智慧化-韧性化”三位一体模式。智能消防系统将整合多源数据，成为港口安全运维的核心枢纽，兼顾效率提升与可持续发展目标。

(下转第 78 页)