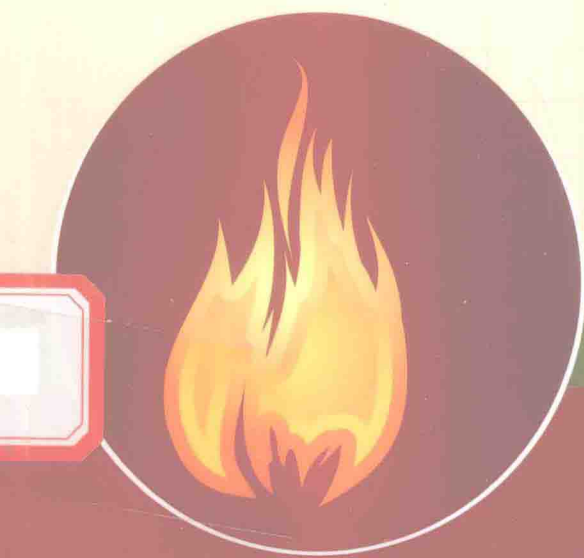


“十二五”国家科技支撑计划课题 (2011BAK03B08)

大型浮顶油罐区火灾风险 防范指南

李晋 任常兴 张网 王婕 编著



“十二五”国家科技支撑计划课题(2011BAK03B08)

大型浮顶油罐区火灾风险 防范指南

李晋 任常兴 张网 王婕/编著

内 容 提 要

随着石油战略储备的迅猛发展,我国大型浮顶油罐区容量和规模不断扩大,由此导致的火灾爆炸事故风险呈不断上升趋势,给火灾预防和扑救带来新的挑战。本书首先辨识了大型浮顶油罐区的火灾风险因素、火灾事故场景及扩展趋势,给出了大型浮顶油罐区火灾风险严重度指数和初起火灾扩展预测评估方法;介绍了大型浮顶油罐罐壁式泡沫系统冷喷试验和密封圈火灾泡沫系统灭火模拟试验,分析评估了罐区泡沫系统扑救低液位密封圈火灾的有效性。基于火灾事故风险特征,剖析了大型浮顶油罐区全过程火灾风险管理及应急扑救策略,针对具体火灾场景给出了火灾应急准备、应急物资供应、后勤保障、扑救策略及战术等要素内容;剖析了大型浮顶油罐区储罐局部或全液面火灾热辐射引发邻罐多米诺事故的概率函数计算模型以及着火罐得到控制的时间和邻罐受热辐射影响失效时间的确定方法,为大型浮顶油罐区灭火救援力量初步规划以及火灾事故风险防范提供了决策依据和技术支持,提高了大型浮顶油罐区应对灾难性多储罐火灾事故的处置能力。

本书可供石油罐区企业单位、消防安全工程师及消防安全从业人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

大型浮顶油罐区火灾风险防范指南/李晋等编著

—天津:天津大学出版社,2016.7

“十二五”国家科技支撑计划课题:2011BAK03B08

ISBN 978-7-5618-5602-4

I. ①大… II. ①李… III. ①浮顶油罐—火灾—安全风险—风险管理—指南 IV. ①TE972-62 ②TE687-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第173768号

出版发行 天津大学出版社

地 址 天津市卫津路92号天津大学内(邮编:300072)

电 话 发行部:022-27403647

网 址 publish.tju.edu.cn

印 刷 廊坊市海涛印刷有限公司

经 销 全国各地新华书店

开 本 169mm×239mm

印 张 13.5

字 数 275千

版 次 2016年7月第1版

印 次 2016年7月第1次

定 价 39.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

本书编委会

主 编:李 晋 公安部天津消防研究所,研究员
副主编:任常兴 公安部天津消防研究所,副研究员
张 网 公安部天津消防研究所,副研究员
王 婕 公安部天津消防研究所,助理研究员

其他参编人员:(按姓氏笔画为序)

马千里 天津市滨海新区公安消防支队生态城大队,高级工程师

吕 东 公安部天津消防研究所,助理研究员

伍 晗 公安部天津消防研究所,研究实习员

孙晓涛 公安部天津消防研究所,助理研究员

张 欣 公安部天津消防研究所,副研究员

果春盛 公安部天津消防研究所,副研究员

姜 楠 公安部天津消防研究所,助理研究员

慕洋洋 公安部天津消防研究所,研究实习员



第一章 概述	(1)
第一节 浮顶油罐分类及发展	(1)
第二节 浮顶油罐风险防范研究	(2)
第二章 浮顶油罐区消防设施设计	(9)
第一节 油罐区平面布置	(10)
一、防火间距	(10)
二、防火堤	(12)
三、罐区道路	(16)
第二节 油罐区消防给水	(17)
一、石油库罐区	(17)
二、石油储备库	(18)
三、冷却水比较	(18)
第三节 油罐区泡沫灭火系统	(19)
一、泡沫灭火系统设计要求	(19)
二、泡沫灭火系统泡沫液	(21)
第四节 油罐区其他消防设施	(23)
一、灭火器材配置	(23)
二、消防车配备	(23)
三、火灾自动报警系统	(24)
第三章 浮顶油罐区火灾风险因素识别与分析	(25)
第一节 油罐区火灾事故案例分析	(25)
一、国外典型案例	(25)
二、国内典型案例	(29)
三、火灾事故统计分析	(37)
第二节 油罐区火灾事故风险因素	(46)
一、物料火灾危险性	(46)
二、引火源风险因素	(47)
三、罐体结构风险因素	(48)
四、消防系统风险因素	(51)

五、气候环境风险因素	(56)
六、消防管理风险因素	(57)
第三节 油罐区火灾场景与事故模式	(57)
一、火灾事故场景	(57)
二、火灾事故阶段	(60)
三、火灾事故模式	(60)
四、初起火灾场景扩展	(62)
第四章 浮顶油罐区火灾风险评估方法	(67)
第一节 油罐区火灾风险评估概述	(67)
一、资料收集与现场考察	(67)
二、火灾事故场景分析	(68)
三、火灾事故场景频率分析	(68)
四、火灾事故后果分析	(69)
五、定性、定量风险评估	(69)
六、火灾风险防范对策措施	(70)
第二节 油罐区火灾场景发生频率	(70)
一、泄漏事故发生频率	(70)
二、罐区油料点火概率	(72)
三、火灾场景发生频率	(79)
四、邻罐多米诺火灾概率	(83)
第三节 油罐区火灾后果影响范围	(88)
一、油罐池火灾	(88)
二、火灾热辐射	(92)
三、原油储罐沸溢	(96)
第四节 油罐区泡沫灭火系统有效性试验	(102)
一、浮顶罐罐壁式泡沫系统冷喷试验	(103)
二、密封圈火灾泡沫系统灭火模拟试验	(107)
三、大型浮顶油罐泡沫系统有效性分析	(115)
第五节 浮顶油罐区火灾风险综合评估	(119)
一、罐区火灾危险源筛选	(119)
二、罐区重大危险源分级法	(121)
三、罐区火灾风险严重度指数法	(123)
四、罐区个人风险和社会风险计算	(127)
五、可接受风险标准	(130)

第五章 浮顶油罐区火灾风险防范措施	(136)
第一节 储罐区火灾预防措施	(136)
一、引火源的预防	(136)
二、泄漏油料的预防	(138)
三、设施设备及工艺控制	(139)
四、沸溢和沉盘预防	(140)
五、罐区灭火系统选择	(141)
六、罐区火灾探测系统	(144)
第二节 罐区新型消防装备	(145)
一、智能消防联动控制系统	(145)
二、大功率远程供水	(149)
三、超大功率泡沫炮	(149)
四、新型高效涡喷消防车	(151)
第三节 罐区防雷规范与技术措施	(153)
一、罐区防雷规范要求	(153)
二、罐区防雷技术措施	(165)
第四节 油罐区全过程火灾防范体系	(168)
一、罐区火灾风险防范程序	(168)
二、罐区全过程火灾风险防范体系	(171)
第六章 浮顶油罐区火灾事故应急处置管理	(174)
第一节 火灾事故应急预案	(174)
一、应急预案法规标准要求	(174)
二、应急预案体系分类	(175)
三、火灾事故应急管理	(176)
四、火灾事故应急预案编制	(178)
第二节 火灾事故应急准备	(183)
一、应急资源及灭火准备	(184)
二、火灾扑救后勤保障	(184)
三、相关人员培训	(188)
第三节 火灾事故扑救策略	(188)
一、主动策略	(188)
二、防御策略	(189)
三、保守策略	(190)
第四节 火灾事故处置程序	(190)

一、一般处置程序	(190)
二、信息收集与火情评估	(191)
三、火灾扑救策略	(193)
四、现场清理及应急评估	(197)
参考文献	(198)

第一章

概 述

随着全球经济的迅速发展以及石油化工行业能源储备的战略需求,我国先后启动了国家石油战略储备基地一期、二期、三期工程建设,还推动两大石油公司兴建了多座大型商业石油储备库。其石油储罐的单罐容积和数量不断攀升,库区、罐区规模不断扩大,呈现出大型化、综合化、多种储罐形式并存的特点。目前,多数国家采用大型浮顶油罐进行原油的存储,我国石油储备基地(库)多为单罐容量 10 万 m^3 的外浮顶油罐,区域总容量已达或超过千万立方米。

由于单罐容积和库区规模的不断增大,区域火灾爆炸事故风险呈不断上升趋势,近年来灾难性事故多发,给当地消防部门和石化企业单位的火灾预防和扑救带来新的挑战。如 2010 年 1 月中石油兰州石化公司 303 厂 316 罐区火灾爆炸事故导致周边 11 座储罐连环爆燃,造成 12 人伤亡;2010 年 7 月大连中石油国际储运有限公司石油库输油管线发生爆炸起火,短时间形成多达 6 万 m^2 的地面流淌火,严重威胁相邻多个大型易燃易爆物品储存单位和海港码头的安全,此次火灾辽宁省共调动 14 个公安消防支队和 18 个企业专职消防队,出动了 348 辆消防车、2 380 余名消防员,共用消防水 6 万 t,泡沫灭火剂 1 000 t。可见,大型浮顶原油储罐一旦发生火灾事故不易扑救,可能引发区域多米诺连锁事故,后果十分严重,对地区环境及社会影响巨大。

第一节 浮顶油罐分类及发展

油罐种类繁多,通常可以根据形状、材质、安装位置等进行分类。按油罐的结构形状,可分为立式油罐、卧式油罐和特殊形状油罐(球形罐、扁球形罐、水滴形罐)。立式油罐较为常见,根据其结构不同,又可分为固定顶罐、外浮顶罐、内浮顶罐。随着时间的推移,目前主流罐型只有固定顶罐、外浮顶罐和内浮顶罐以及少量使用的卧式圆筒罐和球形罐,其他种类已经基本被淘汰。

浮顶油罐指的是顶盖漂浮在油面上的油罐,可分为内浮顶油罐和外浮顶油罐(见图 1-1 和图 1-2)。美国石油协会标准 API 650 附录 C 和 H 给出了关于内浮顶油

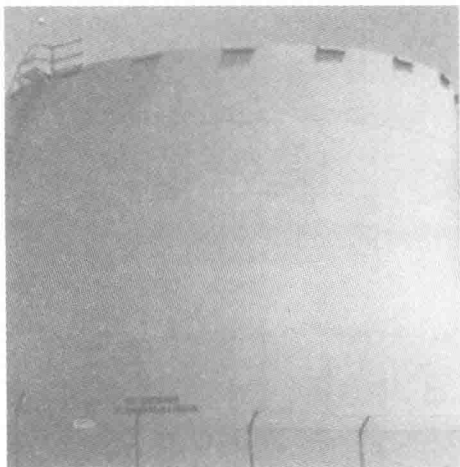


图 1-1 内浮顶油罐

罐的设计要求。内浮顶油罐指的是在油罐内设有浮盘的固定顶油罐,结构示意图见图 1-3。浅盘式内浮顶油罐指的是钢制浮盘不设浮仓且边缘板高度不大于 0.5 m 的内浮顶油罐。内浮顶油罐主要用于储存甲 B、乙 A 类油品,内浮顶覆盖在油面上,很大程度上抑制了油气挥发。

外浮顶油罐主要用于储存原油,浮顶覆盖在油面上,极大程度上抑制了油气挥发,仅在密封圈的一次、二次密封结构之间存在一个环形封闭空间,该封闭空间易积聚油气并有很大可能形成爆炸性混合气体。外浮顶油罐可分为敞口外浮顶油罐(见图 1-4)和带穹顶的外浮顶

油罐(见图 1-5)。

自 20 世纪 60 年代以来,储罐迅速向大型化发展,至今储罐大型化已成为一种发展趋势。国外大型浮顶油罐的建造历史较长、技术先进,有不断改进和完善的标准规范。1962 年美国首次建造了 10 万 m^3 浮顶油罐,1963—1964 年荷兰欧罗巴港建成 4 座 10 万 m^3 浮顶油罐,1967 年委内瑞拉建成 15 万 m^3 浮顶油罐,1971 年日本建成 16 万 m^3 浮顶油罐,随后沙特建成 20 万 m^3 浮顶油罐。

国内大型浮顶油罐技术进步相对较晚,我国的大型浮顶油罐技术发展源自对日本技术的引进吸收。我国的大型浮顶油罐建造技术的发展开始于 20 世纪 80 年代,中国石油天然气管道局和管道设计院与日本大公司合作,于 1978 年在秦皇岛建成国内第一座 10 万 m^3 大型浮顶油罐。我国近 10 年来大型浮顶油罐的发展非常迅速,先后在黄岛、舟山、大连、镇海、铁岭、兰州等地建造了 500 余座 10 万 m^3 浮顶油罐。迄今,国内已建造了 1 000 多座 10 万 m^3 及以上大型浮顶油罐,其中最大的单罐容积为 15 万 m^3 ,已分别在仪征、大庆、兰州、福建和上海建成投产约 20 座。目前,国内已掌握了 20 万 m^3 大型浮顶油罐设计技术,具备了设计建设 20 万 m^3 大型浮顶油罐的技术能力。

第二节 浮顶油罐风险防范研究

由国际资源保护组织(RPI)负责,BP、Shell 等 16 家石油公司组织开展的 LAST-FIRE 项目表明每年发生 15~20 起大型石化储罐火灾事故。2004 年瑞典大型储罐

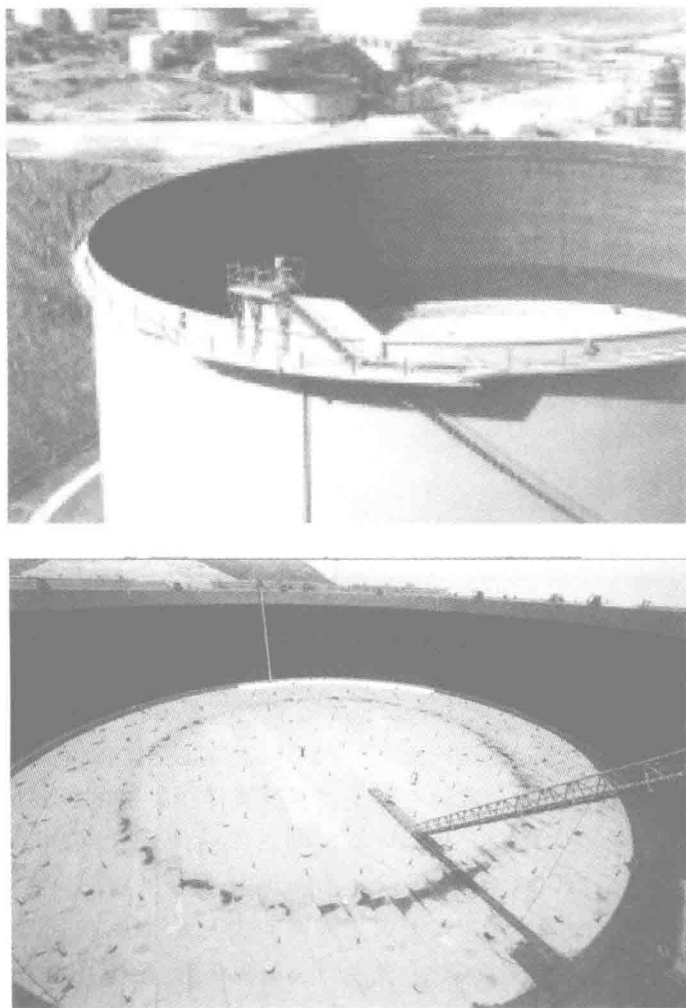


图 1-2 外浮顶油罐

火灾灭火模型预测 FOAMSPEX 项目组统计 1950 年至 2003 年 9 月的 480 起储罐火灾事故,涵盖区域及储罐类型最为全面,但也仅限于使用英文国家的事故资料。统计表明 50 多年来储罐火灾事故总量呈明显的上升趋势,尤其是大型储罐火灾事故比例增加。据国外的 529 起油罐火灾事故统计,从起火原因来看,雷击起火约为 32.5%;从燃烧介质来看,主要是原油,约为 32.5%,其次是汽油,约为 27.3%;从起火油罐类型来看,以浮顶油罐为主(占 29.5%),其次是拱顶油罐。可见,大型原油浮顶储罐是主要防范对象,起火频率高,灾害后果严重。我国 1982 年调查统计储罐年火灾概率为 0.448‰,但近年来随着储罐容量和数量的剧增,油罐火灾事故相对多发。为此,此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

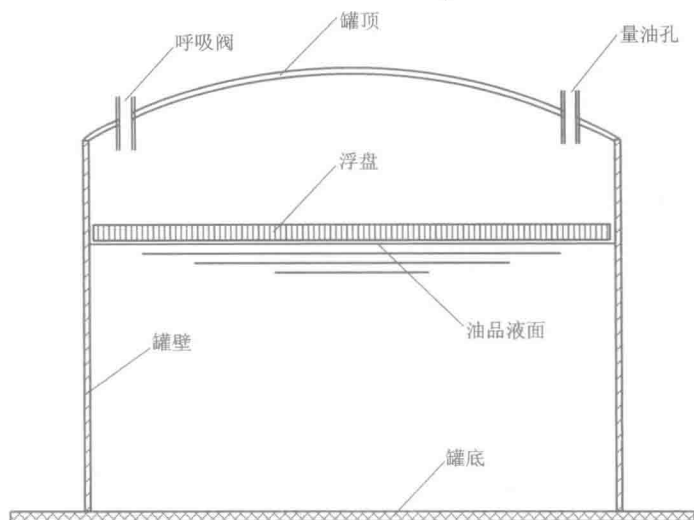


图 1-3 内浮顶油罐结构示意图

加强大型石油储罐火灾防控措施建设,提高对我国罐区重特大火灾事故风险防范水平和应急救援能力,是目前石油、石化企业及消防安全管理部门亟待解决的任务。

API 对 1951 年至 1995 年间 107 起大型储罐火灾事故的统计表明,在 81 起浮顶油罐单罐火灾中浮顶油罐全表面积火灾有 22 起,占浮顶油罐单罐火灾的 27%,若发生沸溢可能引发多罐事故。全液面火灾是大型原油浮顶储罐的主要风险之一,是原油储备库消防工作的重中之重。我国《石油储备库设计规范》(GB 50737—2011)、《石油库设计规范》(GB 50074—2014)等均按环形密封处的局部火灾设防,依据 NF-PA、API、BS 等国际标准规范配置了固定式或移动式灭火系统,仅适于扑救一般规模的火灾,如浮顶储罐的密封圈火灾、小规模防火堤池火等,缺少扑救大型储罐全液面火灾的消防能力。

油罐火灾是一种典型的油池火灾,大型储罐火灾与小型储罐火灾的最大区别是其着火面积,且大直径池火灾的燃烧特性与小直径池火灾的燃烧特性存在较大差别。大型储罐火灾特性的研究可以分为试验研究和火灾模型研究,前者是后者研究的基础和前提条件。大型储罐的火灾试验成本高、危险性大、环境问题严重,该类试验相对较少。最早的大直径储罐火灾试验是美国海军实验室(Naval Research Laboratory, NRL)1945 年实施的直径 28.4 m 的原油和汽油池火灾试验。最初试验的目的是研究大直径池火灾灭火措施的可行性,主要收集了扑灭大直径火灾的泡沫用量、灭火时间等参数。随后英国的 FRS(Fire Research Station)、美国的 ESSO 公司和 Angus 公司、加拿大的 Lorcon Inc. 等于 20 世纪 40 年代至 70 年代针对这一课题开展了不同燃料大直径池火灾的试验研究,其中 1967 年 ESSO 公司的试验规模最大,对直径 34.8 m、深 8.2 m 的敞口环己烷

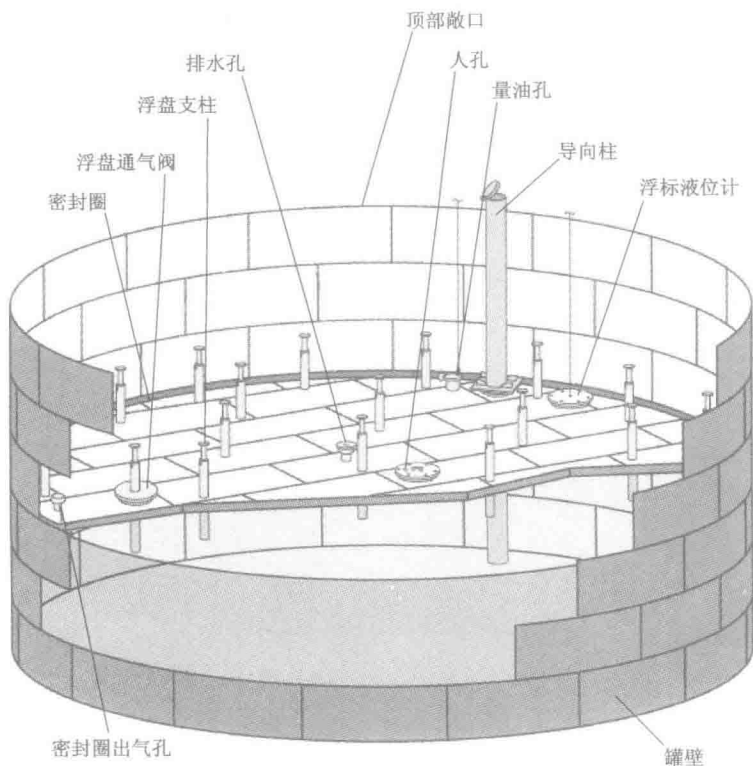


图 1-4 敞口外浮顶油罐结构

储罐开展了氟蛋白泡沫(FP)灭火能力试验,重点关注泡沫注入方式、火灾开始变弱时间和火灾得到控制时间。

1975 年日本开展了大型储罐火灾试验,主要用于大型储罐的消防演练和大直径池火灾辐射参数的测量。1978 年千叶县实施了直径为 5 m、10 m 和 30 m 的原油池火灾试验,1980 年占小牧工业港实施了直径为 60 m 的密封圈火灾试验,1981 年御殿场实施了直径 30 m、50 m 和 80 m 的柴油池火灾试验。该系列试验是目前世界上规模最大的油罐火灾试验,其中直径 80 m 的池火灾试验是在有风的条件下进行的,火焰有明显的倾角,燃烧区域没有覆盖整个液面;直径 30 m 和 50 m 的池火灾试验是在风速低于 0.9 m/s 的条件下进行的,试验中详细记录了大直径池火灾的燃烧特性参数,包括火焰温度、火焰表面辐射热通量、燃烧速率、烟气表面辐射热通量等。相关试验数据表明大直径池火灾向液面传导的热量大约为燃烧产生热量的 1%,超过 90% 的热量是通过上部火焰向外传播的,而对于直径 5 m 的池火灾火焰向外传播的热量仅为燃烧产生热量的 40%~60%,对于直径 30~50 m 的池火灾,其烟尘可高达几百

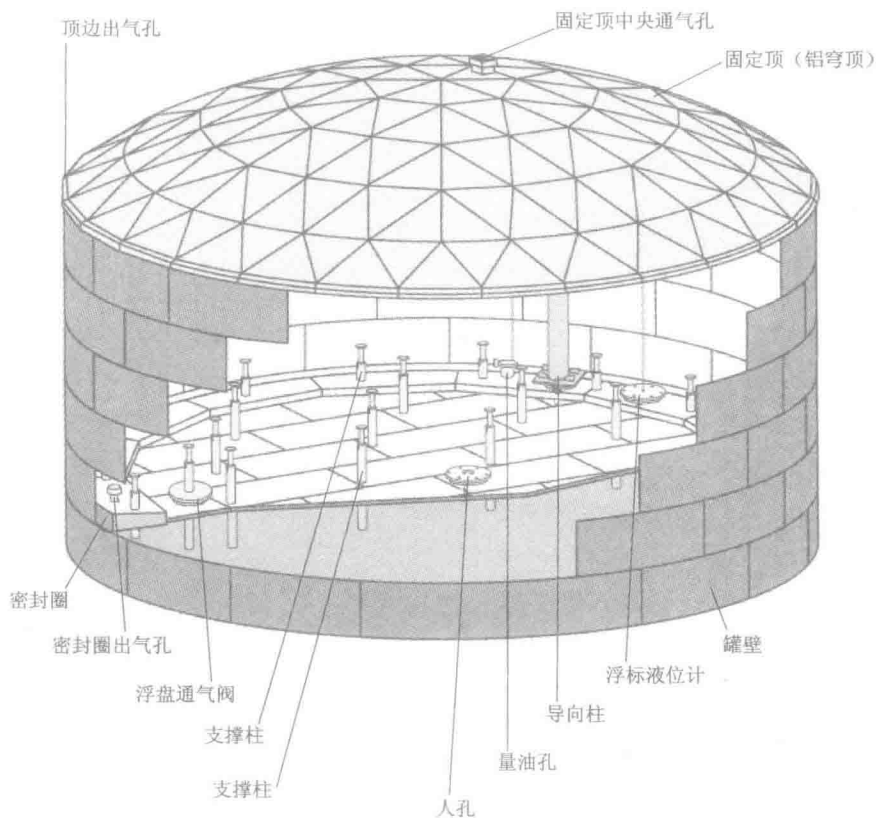


图 1-5 带穹顶的外浮顶油罐结构

米。试验也表明:基于小直径池火灾得出的火焰模型并不适用于直径超过 10 m 的池火灾的火焰特性计算。1998 年占小牧工业港进行了直径分别为 5 m、10 m 和 20 m 的原油池火灾试验,红外成像照相机记录显示:直径 20 m 的池火灾试验中火焰最高温度为 1 400 ℃,最高温度所在区域为 $H/D = 0.1$ 与 0.2 之间区域;池火灾试验中显示火焰根部向外辐射量占整个火焰向外辐射总量的 70%。

我国 1987 年 10 月在天津开展了直径 22 m 的汽油池火灾消防演练,重点关注了消防冷却水的用量、火焰辐射热通量等技术参数,为我国储罐区消防冷却水的配备标准的制定提供了宝贵资料。

在以上试验研究的基础上,众多学者对大直径池火灾火焰模型展开研究,并取得大量成果。在火焰几何外形方面,1963 年美国学者 Thomas 发现火焰高度与热羽流浮力相关,并通过基于浮力的火焰垂直速度记录和 Morton 模型,提出火焰高度与池直径的比值与弗劳德数的 $2/3$ 次方有直接关系。随后 Pipkin 和 Sliepcevich 利用小型

风洞试验建立了风速作用下火焰倾角模型。1965年 Welker 建立了风速作用下火焰拉伸系数模型。1974年美国气体协会(AGA)提出了适用于不同风速的火焰倾角模型,Beyler 和 Croce 认为该模型更加符合油池火的试验结果。目前对于罐区全液面油罐火,可计算评估其火灾辐射距离的模型主要有3种:点源模型(Point source model)、Shokri-Beyler 模型和 Mudan 模型。点源模型通常认为真实火焰是聚集在火焰中心的点源发出的,以此来预测其火焰热辐射值,这是最简单的火焰辐射源模型。Shokri-Beyler 模型可以预测池火的热辐射通量,与火焰对外部目标的辐射热试验数据相关联,依据火焰平均辐射功率确定。Mudan 模型也可用于预测池火热辐射,但没有考虑风速、风向对火焰高度和蔓延方式的影响。

大型油罐区火灾风险评价尤为重要,世界各国学者都开展了相关方面的研究,如个人风险、社会风险评价和 DOW、MOD 指数等。工业事故风险评估方法(Accidental Risk Assessment Methodology for Industries, ARAMIS)是在欧盟第五框架计划中为了响应 SEVESO II 指令而发展起来的一种方法。罐区火灾事故场景后果可以采用经验公式计算或数值模拟,进而确定其伤害、死亡半径及辐射损坏距离,如 FDS、SAFETI 和 ANSYS 等。韩钧、刘昶亚、任常兴、郎需庆等人对储油罐区的火灾风险进行分析,提出了油罐区重点防范的事故类型及防范措施,认为应加强罐区全过程风险管理,构建涉及罐区火灾征兆监测预警、安全监控以及应急管理 etc 基于事故风险的火灾防控体系,增强罐区火灾防控技术装备及应急物资,引进推广应用大流量泡沫炮扑救罐区全液面火灾。

“十二五”期间,公安部天津消防研究所课题组开展了 10万 m^3 外浮顶油罐罐壁式泡沫系统冷喷实体试验和大型浮顶油罐密封圈火灾泡沫系统灭火模拟试验。通过实际测定罐顶泡沫喷射系统泡沫混合液的供给强度、泡沫的发泡倍数和析液时间、泡沫堰板外泡沫的损失量以及密封圈火灾的发展和扑救状况,以考察大型浮顶油罐罐壁式泡沫喷射系统扑救中低液位以下密封圈火灾的有效性,具有非常重要的工程应用价值,也可为大型浮顶油罐密封圈火灾扑救策略与泡沫灭火系统优化参数设计提供技术支持和理论指导,为相关规范的制修订提供参考数据。中国人民武装警察部队学院研究开发了扑灭油罐火灾的新型可膨胀灭火剂及其喷射系统、可节约冷却用水量的高效持水冷却剂及喷射装备,实现了超大型油罐火灾定点报警、快速固定管网泡沫灭火、高效登顶作战。

中国安全生产科学研究院通过定量风险评价方法,在综合考虑了最严重事故场景和事故发生概率的情况下确定了大型原油储罐防火间距为 $0.5D$,与基于事故后果法确定的防火间距相比,既缩小了罐组的占地面积,又保证了最严重事故场景导致火灾事故进一步升级的风险处于可容许风险范畴,为大型原油储罐防火间距的设定提供了良好的理论指导。

中国石油化工股份有限公司青岛安全工程研究院开展了大型罐区风险分析技术体系的研究和开发,试验分析了大型浮顶储罐导电片和等电位连接的作用,形成了大型浮顶储罐成套防雷技术。该技术依据典型地区雷击密度、雷电流强度等数据的实时监测,结合理论计算、软件仿真研发浮顶油罐雷电流泄放技术、雷击点检测手段和接地检测方法,提出大型浮顶油罐的电气、电子设备防雷保护方案;能够排除罐区生产运行中的不安全因素,如浮顶与罐壁在油气空间中放电引起储罐密封圈火灾、雷电感应造成罐区弱电系统过电压损坏、储罐接地装置与常规的接地检测方法不规范等,加强安全管理,从源头预防储罐雷击事故的发生,消除大型浮顶油罐重大火灾爆炸事故隐患,适用于石油、化工等行业原油罐区浮顶油罐的雷电风险预防与控制。部分成果在镇海国家石油储备基地等企业得到应用。

同时,国内的相关研究机构及大型企业单位也开展了远程大流量供水系统、新型灭火剂及灭火系统在大型储罐火灾扑救中的应用研究及推广,实现了可量测多维实景信息技术、光纤感温技术等在大石油储罐火灾预警及安全管理中的应用。

第二章

浮顶油罐区消防设施设计

我国《石油化工企业设计防火规范》(GB 50160—2008)、《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014)、《石油库设计规范》(GB 50074—2014)、《石油储备库设计规范》(GB 50737—2011)等详细规定了浮顶油罐区的总平面布置和消防设施,其消防设施主要包括消防给水、低倍数泡沫灭火系统、消防器材配置以及消防站设计和消防车设置等。

对于大型浮顶油罐区,我国《泡沫灭火系统设计规范》(GB 50151—2010)、《石油储备库设计规范》(GB 50737—2011)、《石油库设计规范》(GB 50074—2014)等均规定按环形密封处的局部火灾设防,依据美国消防协会(NFPA11、30、25、77、326、780等)、美国石油协会(API RP2003、RP2016、RP2021、Publ2026等)、英国标准学会(BS)等国际标准规范配置了固定式或移动式灭火系统,同时辅助消火栓、固定式消防水炮、泡沫栓和灭火器等进行灭火,大型浮顶油罐区主要消防系统流程图如图2-1所示。

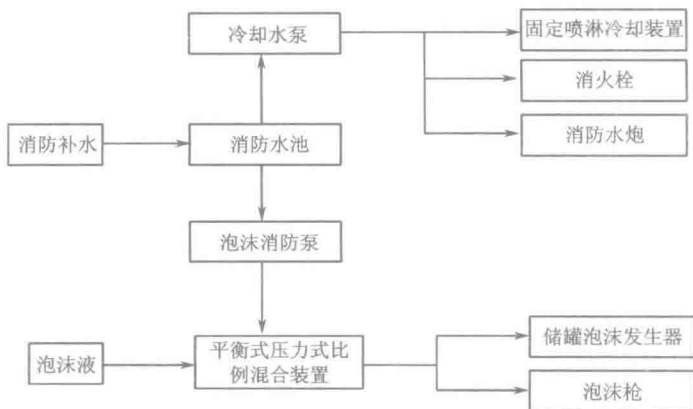


图 2-1 大型浮顶油罐区主要消防系统流程图