

油库储罐区火灾爆炸多米诺效应风险分析

王朝旭（西安科技大学，陕西 西安 710054）

摘要：近年来，我国石油化工企业的发展速度不断加快，安全管理水平有所提升，但是由于石油产品属于易燃易爆危险化学品，石化工业爆炸事故和火灾事故时有发生，为群众生命安全和国家财产损失带来威胁。油库储罐区主要存储汽油和柴油，具有较大的易燃易爆、易扩散等危险特性，一旦发生安全事故很容易引发连带影响，将造成非常严重和巨大的危害，我们将其称之为多米诺效应。本文首先分析油库储罐区火灾爆炸特点，其次分析油库储罐区火灾爆炸多米诺效应风险分析，最后提出油库储罐区火灾爆炸的预防策略，有效维护石油化工企业的安全。

关键词：油库储罐区；火灾爆炸；多米诺效应；风险分析；预防策略

多米诺效应分析是定量风险评价的补充，通过多米诺效应分析，可以对危险源分布集中的区域进行评估后，优化各类装置之间的布置，以防引发周边危险源发生二次事故。本文就以石油化工企业内部汽油储罐区和柴油储罐区两处重大危险源为例，分析储罐装置失效发生大孔泄漏引发爆炸事故后能否会引发周边危险源发生二次事故的可能性和范围进行多米诺效应分析。在收集区域气象条件、危险源基本数据等基础资料后，再运用区域定量风险评价（QRA）模块对重大危险源进行多米诺效应模拟计算。

1 油库储罐区火灾爆炸危险性分析

1.1 易蒸发、易燃与低爆炸下限导致的火灾爆炸危险性

汽油和柴油均为易燃液体，依据《建筑设计防火规范（2018年版）》（GB50016-2014）、《石油库设计规范》（GB50074-2014）中油品的火灾危险性分类，汽油属于甲B；柴油属于乙B（闭闪点 $\leq 60^{\circ}\text{C}$ ）或丙（闭闪点 $\geq 60^{\circ}\text{C}$ ），具有相当的火灾危险性。汽、柴油两者的沸点较低，在室温下的蒸气压力很高，能挥发生成最小的可引起燃烧所需要的最低限度的挥发物质，增加了火灾的危险；另外，随着气温的升高，汽柴油的蒸气压力迅速增加，挥发的油蒸气将会向四周尤其是地面扩散，也容易在仓库或工作区的底层聚集，增加火灾和爆炸的风险。

1.2 热值大、热传播速度快导致的火灾危险性

汽、柴油的热能非常高，1kg汽油燃烧可以产生44000kJ的热量，1kg柴油燃烧可以产生46040kJ的热量，火焰在700~1100 $^{\circ}\text{C}$ 之间，中心温度在1200~1800 $^{\circ}\text{C}$ ，油罐壁温度超过1000 $^{\circ}\text{C}$ 。在液体表面上，火焰的热传递非常迅速，大约在40~90cm/h；若遇火不能及时降

温，可在5~8min之内将油罐罐壁加热至500 $^{\circ}\text{C}$ ，钢板强度降低50%；经过10min的燃烧，汽柴油储罐的钢结构温度达到了700 $^{\circ}\text{C}$ ，钢的强度下降了90%，基本上丧失了承载能力。

2 油库储罐区火灾爆炸多米诺效应风险分析

2.1 多米诺效应的分析程序

辨识主要事件；选择一个主要事件；辨识初级升级因素；分析每个评价对象的升级可能性；通过标准选择确定的二次事件；概率分析；评价结果；提出安全对策措施。

2.2 多米诺效应定量分析

2.2.1 确定可能的多米诺事故

确定可能的多米诺事故可以分3步：

在可能的事故的分析中考虑初始事故的辨识；逐步升级因素的辨别；根据相关标准选择可能的初级逐步升级事件。某石油企业罐区设置4具10000 m^3 储罐，分别储存汽油和柴油等易燃液体，汽油属于甲B；柴油属于乙B（闭闪点 $\leq 60^{\circ}\text{C}$ ）或丙（闭闪点 $\geq 60^{\circ}\text{C}$ ），具有相当的火灾危险性，一旦泄漏，如遇到点火源会引起火灾爆炸，极易导致次生灾害。发生事故主要为池火灾、蒸汽云爆炸，而可能引起二次事故的逐渐升级因素是热辐射、爆炸冲击波、碎片。

2.2.2 辨别初始事故和升级因素

事故的扩展向量可能导致的二次事故如下表：

表1 评价单元考虑的主要事故及二次事故因素

初始事故	扩展向量	可能发生的二次事故
池火灾（PF）	热辐射、火焰接触	PF、JF、BLEVE、毒物泄漏
喷射火（JF）	热辐射、火焰接触	PF、JF、BLEVE、毒物泄漏

火球 (FB)	热辐射、火焰接触	火灾
闪火	火焰接触	火灾
物理爆炸	超压、碎片	PF、JF、BLEVE、毒物泄漏
受限爆炸	超压	PF、JF、BLEVE、毒物泄漏
沸腾液体扩展 蒸气云爆炸 (BLEVE)	热辐射、超压、碎片	PF、JF、BLEVE、毒物泄漏
蒸气云爆炸 (VCE)	超压、火焰接触	PF、JF、BLEVE、毒物泄漏

储罐区发生的初始事故及导致二次事故的升级因素如表 2 所示。

表 2 评价单元考虑的主要事故及二次事故的升级因素

评价单元	释放类型	释放量	事故类别	逐渐升级因素
汽油储罐	瞬间	总量	池火灾	热辐射
			VCE 爆炸	冲击波超压、碎片
柴油储罐	瞬间	总量	池火灾	热辐射
			VCE 爆炸	冲击波超压、碎片

2.3 逐步升级传播媒介的初步选择

确定二次事故，找到初步可能逐步升级事件，通常要分析事故对设备造成破坏的标准阈值。如果升级因素造成的物理作用低于指定的阈值，则事故逐步升级的可能性很小。各类“升级因素”多米诺效应阈值如下表。

表 3 各类初级事故场景下的多米诺效应阈值

事故场景	破坏方式	多米诺效应阈值
火球	火焰接触	火球半径
喷射火	火焰接触	必定发生
池火灾	热辐射	$I > 37.5\text{kW/m}^2$, 30min
云爆	冲击波超压	$P > 70\text{kPa}$
物理爆炸	冲击波超压	$P > 70\text{kPa}$
BLEVE	火焰接触	火球半径

2.4 罐区储罐失效概率

表 4 罐区储罐失效概率

设备名称	泄露场景	泄露频率
------	------	------

汽油 / 柴油储罐	小孔泄漏 0mm~5mm	4×10^{-5}
	中孔泄漏 5mm~50mm	1×10^{-4}
	大孔泄漏 50mm~150mm	1×10^{-5}
	完全破裂 > 150mm	2×10^{-5}

2.5 多米诺效应计算数据及结果

采用定量风险评价软件进行定量风险计算，根据储罐泄漏频率可以看出，其中造成危害最严重的泄露场景为中孔泄漏，因此选取中孔泄漏为最大可信事故场景。经定量计算，得出储罐区多米诺效应计算数据及结果如下表。

表 5 多米诺效应计算数据及结果

设备名称	主要危险物质	泄漏场景	事故类型	多米诺半径 (常压容器 / 压力容器 / 长型设备 / 小型设备) /m
储罐	柴油	中孔 泄露	池火灾 / VCE 爆炸	20.09/24.29/15.75/13.98
储罐	汽油	中孔 泄露	池火灾 / VCE 爆炸	24.36/29.46/19.12/16.97

通过计算，储罐区可燃物料泄漏扩散发生池火灾、蒸汽云爆炸 (VCE) 会造成冲击波超压、碎片，会对周边设备造成多米诺效应。通过模拟，分别计算出周边设备为常压容器、压力容器、长型设备、小型设备的多米诺半径，当目标装置类型为压力容器时，多米诺半径最大。

根据定量计算结果可得到如下结论：

储罐区可燃物料泄漏扩散发生池火灾、蒸汽云爆炸 (VCE) 会造成冲击波超压、碎片，会对周边设备造成多米诺效应。汽油储罐池火灾辐射热、蒸汽云爆炸 (VCE) 冲击波超压会对周边设备造成多米诺影响，最大影响半径为 20.09m。柴油储罐池火灾辐射热、蒸汽云爆炸 (VCE) 冲击波超压会对周边设备造成多米诺影响，最大影响半径为 29.46m。

3 针对多米诺计算结果的风险管控建议

3.1 设备平面布局防范对策措施

根据对油库储罐区发生大孔 (完全破裂) 泄漏发生爆炸事故后均可能引发一定区域范围内的重大危险源发生二次爆炸事故。因此，今后在条件许可的情况下，建议将各重大危险源涉及的储存设备和生产设备分散布置在多米诺效应波及范围之外，确保单个重大危险源区域发生事故时避免发生次生灾害事故。

3.2 设备本质安全防范对策措施

重大危险源储存设备和生产设备在设计、制造时

应按设计要求最大限度地提高安全系数。各类承压容器应符合国家压力容器管理的有关规定,投用前必须按照规范进行试压合格,其液位计、泄压阀、温度计、阻火器、压力表等附件应灵敏、准确可靠。储罐的安全附件等特种设备应选用具备有关规范规定资质的厂家、设备,并定期检验、检测合格,保证安全附件齐全有效。输油管道等特种设备应把好设计、安装、验收、试车等各环节的质量控制关。使用前应向特种设备主管部门申报办理使用登记证,领取《特种设备登记使用证》,做到一管一档。定期对重大危险源设备及附属设施进行维护保养,杜绝管道、设备、阀门连接点出现跑、冒、滴、漏。

3.3 自动化控制防范对策措施

重大危险源应采用DCS控制系统和SIS系统、GDS系统,实现对重大危险源工艺参数和运行情况的自动化监控、报警、联锁以及事故状态下的应急处置。

加强对安全仪表系统操作和维护管理。定期对安全仪表进行检定,编制安全仪表操作规程,定期维护仪表系统,保证安全仪表功能执行可靠、功能安全。

4 油库储罐区火灾爆炸预防策略

4.1 优化消防资源整合

根据油库储罐区火灾燃烧特点来实现对消防资源的优化整合。油库储罐区火灾的突出特点为蔓延速度较快,容易形成连锁火势,其主要原因在于油库储罐区设备冷却不均匀,导致爆炸的出现,爆炸又将促进燃烧效应,形成恶性循环。同时确保照明消防车、通信消防车、侦检消防车、救援消防车等辅助消防设备资源的及时到达,保证冷却设备装置与泡沫灭火装置的优先调配。在实施消防救援的过程中就必须考虑到各类资源的消耗问题,拟定科学的资源供给方案,确保水和灭火药剂保障的独立性。

4.2 合理选择消防救援战术

油库储罐区火灾的消防救援工作遵循“以固为主,固移结合”的战术指导思想,落实补位救援方案,优先向由于爆炸燃烧等造成固定消防设施损坏无法启用的地方部署重点消防力量,控制火势,防止由于现场消防设施损坏造成火势急速蔓延等问题的出现。遵循保证重点,兼顾一般的救援战术原则,坚持采用大流量消防设施与消防救援工艺相结合的消防战术,以控制石油成品与原材料的泄漏来防止火灾快速蔓延,以及及时冷却油库储罐区储存与生产装置来降低爆炸事故的发生,减少二次灾害的出现。

4.3 强化企业内防火宣传教育

石油化工企业内一线员工对于火灾事故预防需要有更为深刻、全面的认识,同时也要承担起在本职工作开展中积极进行火灾预防的责任。在企业文化建设中,核心管理层要强调火灾事故预防的必要性和重要性,对部门内员工进行防火相关教育,将防火意识根植于每一个员工的心中。

同时,加强隐患排查治理,第一时间发现火灾诱发因素或火灾隐患后,要求员工在本职工作迅速开展时要有意识地进行火灾预防,对员工进行灭火培训,增强员工在一些小型火灾事故处理中的应急处理能力,这也为以后应对大型火灾预防提供了一个有效演练。在火势较小时,通过企业内部消防设施扑灭起火点,抑或是对火势予以控制是对大型火灾事故予以的有效预防,石油化工企业也应当适度培养员工的火灾事故处理能力。

5 结束语

在石油化工企业发展过程中,人们越来越关注企业的安全,做好安全管理工作不仅可以为人们提供和谐与安全的生活环境,还能促进经济文化的建设水平。在实际发展过程中,石油化工企业具有较大危险性,一旦发生火灾并伴随爆炸,较易诱发事故多米诺效应,事故多米诺效应主要的发展模式为爆炸——火灾,泄漏—火灾—爆炸,火灾—爆炸,其发展模式还与容器形式、储存物质的物理化学性质有密切联系,对此做好石油化工园区事故预防与处理、缓解多米诺效应,能够有助于石油化工生产的健康发展。

参考文献:

- [1] AQ/T3046-2013. 化工企业定量风险评估导则[S]. 国家安全生产监督管理总局,2013.
- [2] 中国油库储罐区股份有限公司青岛安全工程研究院. 石化装置定量风险评估指南[M]. 北京:中国石化出版社,2022.
- [3] 胡灵慧. 化工园区喷射火灾热辐射模型及多米诺风险评估方法研究[D]. 浙江:浙江工业大学,2022.
- [4] 张苗. 化纤生产企业多米诺效应风险与消防应急能力评估方法研究[D]. 天津:天津工业大学,2021.
- [5] 曾楚楚. 基于鱼骨图分析的化工企业多米诺风险评估方法研究[D]. 南京:南京大学,2022.

作者简介:

王朝旭(1984-),男,汉族,陕西宝鸡人,本科,高级工程师,研究方向:油库安全管理和风险辨识等。