

石油库储罐区池火灾多米诺效应研究

臧娜

中国人民武装警察部队学院消防工程系, 河北廊坊 065000

摘要 依据多米诺效应的特点,从多米诺效应发生的机制,阐述了石油库储罐区池火灾多米诺效应的分析过程。首先辨识石油库储罐区多米诺效应的事故场景,针对场景的复杂性和事故后果的严重性,运用烃类池火灾事故后果定量分析模型和概率分析对池火灾事故场景进行分析;然后根据初始事故的影响,运用设备损坏概率模型计算二次目标设备的损坏概率和场景后果;最后结合具体实例对石油库储罐区池火灾进行多米诺效应分析。通过石油库储罐区池火灾事故多米诺效应评价,得出石油库储罐区事故的升级因素和导致事故扩大的途径,并指出相应的多米诺效应控制措施,从而可以有针对性地采取相应的预防措施,预防池火灾事故多米诺效应,降低次生灾害的发生率,提高石油库储罐区的本质安全,为现行《石油库设计规范》的优化提供科学的依据。

关键词 石油库;多米诺效应;池火;热辐射

中图分类号 X93

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.08.007

Domino Effect Caused by Pool Fire in Petroleum Storage Tank District

ZANG Na

Department of Fire Protection Engineering, Chinese People's Armed Police Force Academy, Langfang 065000, Hebei Province, China

Abstract This paper presents a study of Domino effects, including the mechanism and characteristics. The Domino effect is a complex phenomenon, in which severe accidents may take place in chains. For example, in a petroleum storage tank, one accident may cause a secondary accident in other facility nearby. In this paper, the mathematical models of pool fire and the probability analysis are used for the assessment, including the vulnerability assessment of the consequence. The risk of the Domino effect is determined by using the quantitative risk analyses technique suggested in this paper. The probabilities of Domino events and their consequences are calculated. A systematic procedure for the quantitative assessment of risk caused by Domino effects is proposed for the risk analysis of petroleum storage pool fire accidents. The factors and the manners of the propagation and enhancement of the accident are analyzed by assessing the risk caused by Domino effect of pool fire. Safety measures to avoid Domino effect is thus suggested. This method can predict the secondary accident, the probability of the accident and the consequence. Therefore, the corresponding preventive measures can be taken so as to prevent Domino effect, reduce the probability of secondary disaster and enhance the inherent safety of the petroleum storage tank.

Keywords petroleum storage tank; Domino effect; pool fire; thermal radiation

0 引言

随着国民经济的持续快速发展,中国的经济逐年增长,石油进口量逐渐加大,对外依赖度不断提高。为保障国家能源安全,健全国家石油储备体系,中国从2003年开始筹建国家石油储备基地。现已建成了镇海基地、舟山基地、黄岛基地和大连基地。石油库作为接收、储存和发放油品的重要设施,安全生产是关键中的关键。石油库储罐区由于储罐数量集中

且盛装的介质种类不一,一旦某一储罐发生事故极有可能引发临近单元发生相应事故从而引发多米诺效应。2005年12月11日,英国邦斯菲尔德油库的912储罐发生故障,致使超过300t油料溢出罐外,体积巨大的油气混合物遇到点火源后发生了数次剧烈爆炸,并燃起大火,最剧烈的爆炸冲击波约为70~100kPa,周围建筑物的结构遭到严重破坏,英国邦斯菲尔德油库火灾爆炸事故是欧洲迄今为止最大的一次工业火

收稿日期:2010-08-06;修回日期:2011-02-17

基金项目:教育部高等学校特色专业建设点(消防工程)项目(TS10113)

作者简介:臧娜,讲师,研究方向为危险物质安全性分析与检测技术,电子邮箱:zangnaduoduo@163.com

灾爆炸事故,火灾共烧毁大型储罐 20 余座,事故造成直接经济损失约合 35 亿元人民币,此次事故给油库周围环境、商业和居民生活造成了极大的影响^[1]。因此,开展石油库储罐区池火灾事故多米诺效应分析具有重要的现实意义。

美国化学工程师学会化工过程安全中心(AIChE-CCPS)将多米诺效应定义为,事故发生并通过热辐射、爆炸和碎片等事故扩展参数的物理效应直接影响到邻近单元,从而增加了后果严重性或失效频率的事件^[2]。在欧洲,1996 年确定的赛维索(Seveso)法案^[3]是研究多米诺事故的重要参照标准,并在 2003 年对赛维索法案进行了修订,强调了对重大事故的风险分析与预防。加拿大的 Khan 和印度的 Abbasi 等^[4]指出了引发多米诺效应的事故类型和多米诺效应的典型模式,并提出了多米诺分析方法和相关概率模型,于 1998 年开发出了重大事故的多米诺效应分析软件 DOMIFTECT。J. Gledhill 等^[5]在 1998 年发表了关于重大事故的多米诺效应风险分析方法的发展报告。意大利的 Cozzani 等^[6-7]根据历史和试验数据建立设备的损坏概率模型,并结合人体脆弱性模型,建立了一套多米诺定量分析方法。比利时的 Delvosalle 等^[8]开发了 DOMINOXL210 软件,通过列举形式对厂区和工业区所有可能的内部和外部的多米诺效应进行风险分析和事故预测。Reniers^[9]从事事故预防的角度研究了多米诺效应,在 2007 年开发的 DomPrevPlanning(DPP)软件包可支持工厂和工业区的安全管理和多米诺效应的防范与决策。

火灾是石油库储罐区常见的事故。它是可燃物质在空气中剧烈氧化产生大量热的现象。火灾引发多米诺事故主要通过两种方式,一种是火焰直接包围或接触目标设备引发事故,另一种是火灾的热辐射造成目标设备失效而引发多米诺事故。常见的火灾事故场景为池火灾、闪火、火球及喷射火,其中对于罐区影响最大的是池火,且通过对 100 起多米诺事故分析表明,池火作为初始事故的情况占 44%^[10]。中国科学技术大学对池火进行了大量的实验研究,但在安全评价中应用实验研究周期长、费用高,不切合实际。中国对多米诺效应的研究起步较晚,并且在石油库储罐区安全评价中考虑的较少。目前,国内研究多米诺事故的主要有中国石油大学、石油研究院、北京理工大学和南开大学等。为此,本文以石油库储罐区池火灾多米诺效应为研究对象,具体阐述池火灾事故多米诺效应评价分析程序,依据分析计算结果提出相应的控制措施,为合理地设计罐区布局提供一定的依据。

1 石油库储罐区概况

武汉某罐区有 2 组共 4 个储罐,储罐类型均为竖直常压容器。每 2 个储罐处于同一防火堤内,防火堤面积均为 2 万 m²,防火堤高度为 2.0m。环境温度为 25℃,1.6m 高处风速为 4.5m/s。罐区分布见图 1,其中 1#、2# 储罐为汽油,3#、4# 储罐为柴油。储罐容量均为 3×10⁴m³,工作压力为 1.2MPa,充装系数为 0.85,均为常温储存。

根据危险化学品重大危险源辨识(GB 18218—2009)指

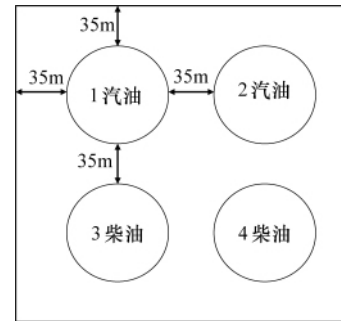


图 1 某储罐区示意图

Fig. 1 Storage tank

定各种物质的临界量^[11],分别对各储罐进行重大危险源辨识,选取危险性较大的汽油储罐进行分析。

2 池火灾引起的多米诺效应分析

池火灾是易燃液体形成液池后遇到火源而被点燃的火灾。池火灾引发多米诺事故有两种情况,一种是目标设备完全或部分包围在火焰内,大多数池火灾引发的多米诺事故是这种情况造成的,另一种情况是火焰不直接接触目标容器通过热辐射对目标设备造成影响。根据相关研究,当目标设备与火焰直接接触的情况,则大多会引发多米诺事故。根据罐区特点可以将池火分为 2 类:罐内池火灾和防火堤内池火灾。通过事故多米诺场景的预想,能更有针对性地对事故后果和多米诺效应的预防控制进行分析。笔者综合考虑罐区化学品的危险特性、储存条件和外部环境等因素得出池火灾多米诺效应分析过程,见图 2。

池火灾后果分析主要包括火焰高度、火焰倾斜角、火灾总的热辐射通量以及目标接受的热辐射通量等。由于池火灾属于稳态火灾,因此选用热通量准则计算热辐射伤害半径(包括死亡半径、重伤半径、轻伤半径及财产损失半径)等。

2.1 液池直径

当池火灾类型为防火堤内火灾时,可根据防护堤所围液池面积计算液池直径:

$$D = \left(\frac{4S}{\pi} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中, D 为防火堤内池火直径,m; S 为防护堤所围液池面积,m²。

当池火灾类型为罐内池火灾时,其液池直径可近似取储罐直径。

2.2 燃烧速度

当液体沸点高于环境温度时,其单位面积燃烧速率可以应用式(2)计算:

$$\dot{m}'' = \frac{c\Delta H_c}{c_p(T_b - T_0) + H_v} \quad (2)$$

式中, c 为常数,0.001kg·m⁻²·s⁻¹; ΔH_c 为液体燃烧热,J·kg⁻¹; C_p 为液体恒压比热容,J·kg⁻¹·K⁻¹; T_b 为液体常压沸点,K; T_0 为环境温度,K; H_v 为液体在常压沸点下的蒸发热,J·kg⁻¹。

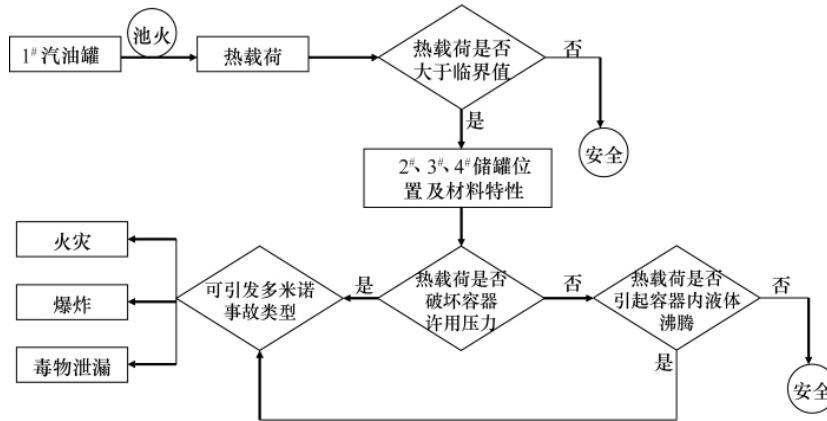


图2 储罐区池火灾多米诺效应分析程序

Fig. 2 Analysis program of Domino effect caused by pool fire in storage tank

当液体沸点低于环境温度时,其单位面积燃烧速率可以应用式(3)计算:

$$\dot{m}'' = \frac{c \Delta H_c}{H_V} \quad (3)$$

2.3 火焰高度

Thomas^[12]给出计算池火焰高度的经验公式已经广泛应用。

(1) 无风时湍流扩散火焰的平均可见火焰高度为

$$\frac{H}{D} = 42 \left(\frac{\dot{m}''}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{0.61} \quad (4)$$

式中, H 为池火火焰高度, m ; \dot{m}'' 为单位液池面积质量燃烧速率, $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$; ρ_a 为环境空气密度, $kg \cdot m^{-3}$; g 为重力加速度, $9.8 kg \cdot s^{-2}$; D 为等效液池直径, m 。

(2) 有风时湍流扩散火焰的平均可见火焰高度为

$$\frac{H}{D} = 55 \left(\frac{\dot{m}''}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{0.67} u^{*-0.21} \quad (5)$$

式中, u^* 为无量纲风速, 可以应用式(6)计算:

$$u^* = \frac{u_w}{(g \dot{m}'' D / \rho_v)^{1/3}} \quad (6)$$

式中, u_w 为 1.6m 高处测量得到的风速, $m \cdot s^{-1}$; ρ_v 为可燃液体蒸气密度, $kg \cdot m^{-3}$ 。

2.4 池火火焰倾斜角

美国燃气协会(American Gas Association, AGA)^[12]建议应用式(7)计算有风时池火火焰倾斜角 θ :

$$\cos \theta = \begin{cases} 1 & u^* \leq 1 \\ 1/\sqrt{u^*} & u^* > 1 \end{cases} \quad (7)$$

2.5 目标接受到的热通量

Mudan^[12]提出估算池火热辐射通量 \dot{q}'' 的计算式为

$$\dot{q}'' = E F_{12} \tau \quad (8)$$

式中, \dot{q}'' 池火火焰对于距离池火中心 L 处的目标的热辐射通量, $kW \cdot m^{-2}$; E 为池火火焰表面平均热辐射通量, $kW \cdot m^{-2}$; F_{12} 为视角系数; τ 为大气透射系数。

(1) 池火火焰表面平均热辐射通量为

$$E = \frac{0.25 \pi D^2 \cdot \eta \cdot \dot{m}'' \cdot \Delta H_c}{0.25 \pi D^2 + \pi DL} \quad (9)$$

式中, η 为燃烧效率因子, 通常取 0.13~0.35。

(2) 视角系数为目标物所能接受的发热体辐射通量的分数, 其值取决于热量发射体和目标物的形状、距离和相对角度^[9]:

$$F_{12, \max} = \sqrt{F_{12, H}^2 + F_{12, V}^2} \quad (10)$$

式中, $F_{12, H}$ 为目标水平方向的视角系数; $F_{12, V}$ 为目标垂直方向的视角系数。

2.6 池火灾多米诺事故发生概率

初始事件引发的多米诺场景的频率为^[15]

$$f^{(k, m)} = f_{in} P^{(k, m)} \quad (11)$$

$$P^{(k, m)} = \prod_{i=1}^n [1 - P_i + C(i, J_m^k) (2P_i - 1)] \quad (12)$$

式中, $f^{(k, m)}$ 为含 k 个发生二次事件的设备同事发生第 m 种多米诺场景的期望频率; f_{in} 为初始事件的发生频率, 通常由历史资料或事件树分析得到; $P^{(k, m)}$ 为含 k 个设备同事发生事故的第 m 种多米诺场景的概率; P 为目标设备 i 发生事故的, 即设备损坏概率; $J_m^k = [\text{设备}_1, \text{设备}_2, \dots, \text{设备}_k]$, 表示包含 k 个设备同时发生事故的第 m 种多米诺场景, 其中 m 指的是第 m 个组合场景, k 指第 k 个设备 ($k \leq n$)。

初始事件产生的物理效应和设备 i 的位置以及事件等影响着目标设备的损坏概率 P_i 的值。对于 P_i 的计算通常采用 3 种方法: 基于概率函数法、基于经验数据和基于最坏的情况。通常采用经验数据上的概率函数法对设备损坏概率进行计算。

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (13)$$

式中, P 为发生的损坏概率; Y 为概率单位变量; x 为积分变量。热辐射对工艺设备的损坏概率可运用概率模型进行简化计算(表 1), 其中, I 为作用于目标设备的热辐射强度, kW/m^2 ; V 为设备的体积或容积, m^3 , t 为设备失效时间, s 。

表 1 常用设备损坏概率模型

Table 1 Damage probability model of common devices

物理影响因素	目标设备	阈值	扩大效应概率计算模型
热辐射	常压容器	15kW/m ² 超过 10min	$Y=12.54-1.847\ln t$
			$\ln t=-1.128\ln t-2.667\times 10^{-5}V+9.877$
热辐射	高压容器	50kW/m ² 超过 10min	$Y=12.54-1.847\ln t$
			$\ln t=-0.947\ln t+8.835V^{0.082}$

3 计算结果与讨论

由于本文讨论分析的储罐区对称布置,且柴油的危险性低于汽油,所以假设 1# 汽油罐发生防火堤内池火灾,通过计算得到其产生的后果以及对其他储罐的影响。根据式(1)~式(13)计算得出池火灾事故多米诺效应,具体计算结果汇总见表 2~表 3。1# 储罐池火灾事故,液池直径为 159.62m,燃烧速度为 0.057kg·m⁻²·s⁻¹,火焰高度为 138.47m,火灾表面平均热辐射通量为 20.276kW·m⁻²。

表 2 1# 罐池火灾热辐射作用时人员伤害和设备破坏距离

Table 2 Distance between human damage and devices caused by thermal effect of pool fire in No.1 storage tank

$q''/(kW\cdot m^{-2})$	人员伤害	设备破坏	目标受害距离/m
37.5	1min 时 100% 人员死亡;10s 时 1%人员死亡	设备严重损坏	103.12
	1min 时 100% 人员死亡;10s 时人员重伤	无火焰长时间热辐射点燃木材的最小能量,设备钢结构变形	145.27
12.5	1min 时 1%人员死亡;10s 时人员一度烧伤	有火焰时点燃木材的最小能量,物料融化最小能量	276.85
4.0	20s 以上时人员感觉疼痛,无人员死亡	30min 玻璃破裂	410.68
1.6	长时间人员无不适感觉		750.29

由以上计算结果可知,事故多米诺半径大于罐与罐之间的距离,即 35m,故存在较大的多米诺效应风险。

为防止以上事故的发生及扩大,首先必须在罐与罐之间设定合理的安全间距。对于储存原油的外浮顶罐,按照现行《石油库设计规范》^[3]的规定,油罐应成组布置且罐组不应大于 6×10⁴m³;油罐间距不应小于 0.4D(甲、乙_A类)。而上述计算结果表明,设备破坏时的临界距离以及多米诺半径都大于标

表 3 1# 罐发生池火灾引发的多米诺效应

Table 3 Domino effect caused by pool fire of No.1 storage tank

多米诺效应半径类型	多米诺半径/m	1# 罐可能引发的多米诺事故	多米诺事故概率
火焰高度	100.23	2# 罐发生事故	2.546×10 ⁻²
		3# 罐发生事故	7.86×10 ⁻³
		4# 罐发生事故	2.546×10 ⁻²
扩展半径	98.12	2# 罐与 3# 罐同时发生事故	1.5×10 ⁻⁴
		2# 罐与 4# 罐同时发生事故	4.58×10 ⁻⁴
		3# 罐与 4# 罐同时发生事故	1.5×10 ⁻⁴
		2,3,4 罐同时发生事故	2.8×10 ⁻⁷

准所规定的值,因此在现有的设定条件下很有可能导致多米诺事故的发生。其次,为减少热辐射对油罐的破坏,应合理设置保护措施。如设置防火隔热涂层和设置水冷却系统。在《石油库设计规范》中规定,“着火的浮顶罐应进行冷却”;满足地上储罐高度超过 15m,或单罐容积大于 2000m³ 时,应采用固定式水喷淋冷却系统。同时在油罐区周围设置一定数量的水炮。最后,设置固定灭火系统,将火灾消除在初级阶段。

4 结论

根据中国石油储备大型化的特点,储罐数量较多且存放的危险物质量较多,一旦发生事故如果扑救不及时会造成重大财产损失和人身伤亡,由于火灾导致的多米诺事故更是会造成灾难性的后果,笔者通过对石油库储罐区池火灾多米诺效应研究可知。

(1) 结合具体实例对其进行多米诺效应风险分析,阐明了事故多米诺效应的评价程序,得出了石油库储罐区池火灾事故的升级因素和导致事故扩大的途径,并给出了相应的多米诺效应的控制措施,预防事故多米诺效应,以提高大型石油库储罐区的安全,为现行《石油库设计规范》的优化提供科学的依据。

(2) 与传统的火灾爆炸事故后果定量分析方法相比,多米诺效应评价方法可以预测次生事故发生的情况,应用多米诺效应评价方法可以有效地预测次生灾害发生概率及后果,从而可以有针对性地发生次生事故概率较大的装置采取相应的预防措施,降低次生灾害的发生率。

(3) 将事故多米诺效应分析应用于大型石油库储罐区的安全评价中,有效地预防控制事故多米诺效应的发生,可以更加完善储罐区的安全评价,提高装置的本质安全。

参考文献 (References)

- [1] 郎需庆, 刘全桢. 英国邦斯菲尔德油库火灾爆炸事故引发的思考[J]. 石油化工安全环保技术, 2009, 25(6): 45-49.
Lang Xuqing, Liu Quanzhen. Petrochemical Safety and Environmental Protection Technology, 2009, 25(6): 45-49.

- [2] Center for Chemical Process Safety. Guidelines for chemical process quantitative risk analysis [M]. 2nd ed. New York: American Institute of Chemical Engineers, 2000.
- [3] OJEC. Council directive 96/82/EC of 9 December 1996 on the control of major 2 accident hazards involving dangerous substances [S]. Brussels: Official Journal of the European Communities, 1997: 97-107.
- [4] Khan F I, Abbasi S A. DOMIFFFECT (Domino effect): User-friendly software for domino effect analysis [J]. *Environmental Modelling and Software*, 1998, 13(2): 163-177.
- [5] Gledhill J, Lines I. Development of methods to assess the significance of domino effects from major hazard sites [R]. London: Health and Safety Executive, 1998: 2-8.
- [6] Cozzani V, Gubinelli G, Antonioni G, et al. The assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, 127: 14-30.
- [7] Cozzani V, Antonioni G, Sradom G. Quantitative assessment of domino scenarios by a GIS-based software tool [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2006, 19(5): 463-477.
- [8] Delvosalle C, Fievez C, Brohez S. A Methodology and a software (DOMINOXL) for studying domino effects [C]//Czech Society of Chemical Engineering. Proceedings of 15th International Congress of Chemical and Process Engineering. Praha: CHISA, 2002: 25-29.
- [9] Reniers G L L, Dullaert W. DomPrevPlanning[®]: User 2 friendly software for planning domino effects prevention [J]. *Safety Science*, 2007, 45(10): 1060-1081.
- [10] Cozzani V, Antonioni G, Spadoni G. The assessment of risk caused by domino effects in quantitative area risk analysis[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005(A127): 14-30.
- [11] GB 18218-2009, 危险化学品重大危险源辨识 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
GB 18218 -2009, Identification of major hazard installations for dangerous chemicals[S]. Beijing: China Standards Press, 2009.
- [12] Beyler C. Section 3 hazard calculations—chapter 11 fire hazard calculation for large, open hydrocarbon fires [M]//3rd ed. Ninenno P. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Quincy: National Fire Protection Association, Inc, 2002: 268-291.
- [13] GB 50074-2002, 石油库设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2002.
GB 18218-2009, Code design of oil depot [S]. Beijing: China Planning Press, 2002.

(责任编辑 岳臣)



首届中国药物毒理学年会（2011年）暨国际药物非临床安全性评价研究论坛

时间：2010年10月 地点：上海

主办：中国毒理学会、中国药学会、中国药理学会

会议主题：药物安全性评价研究中case by case原则的应用

征文内容：交流国内外药物毒理学研究的最新进展，围绕case by case原则，介绍生物药、化学药和中药非临床安全性评价的特点，阐述药物安全药理学、一般毒理学、毒代动力学、免疫药理学、生殖与遗传毒理学等研究的特点，介绍近几年药物毒理学研究的新技术和新方法、生物标记物、毒性病理学进展和新制订的安全性评价技术指导原则等。

地址：上海翔殷路800号第二军医大学药物安全性评价中心（200433）

电话：021-81871036，传真：021-81871036，电子信箱：Ybj74386@yahoo.com.cn

电话：010-64392995，传真：010-64392557，电子信箱：luqj66@yahoo.com.cn

电话：021-81871032，传真：021-81871032，电子信箱：newdrug@smmu.edu.cn