

doi: 10.11731/j.issn.1673-193x.2024.09.016

基于CFD模拟的带压火焰射流辐射热阻断效果评估*

王黎珣^{1,2,3}, 魏利军^{1,2,3}, 李晓云⁴, 栾婷婷⁴, 多英全^{2,3}, 王如君^{2,3}

(1. 中国矿业大学(北京)应急管理与安全工程学院, 北京 100083;

2. 中国安全生产科学研究院, 北京 100012;

3. 重大危险源与化工园区系统安全应急管理部重点实验室, 北京 100012;

4. 北京石油化工学院 安全工程学院, 北京 102617)

摘要:为评估防火墙作为安全屏障对带压火焰射流辐射热的阻断效果,结合CFD模拟和个人风险计算建立热阻断效果定量评估方法。以某化工企业乙烯反应塔泄漏产生的带压火焰为研究对象,利用FLACS软件模拟得到对于储罐表面受到热辐射影响相对最大的位置处(观测点1)原始场景和增加防火墙后,带压火焰作用于邻近储罐的热辐射强度,并计算多米诺效应概率和个人风险值。研究表明:原始场景下该位置热辐射强度为 310.69 kW/m^2 ,事故会扩展到邻近储罐,并产生多米诺效应,多米诺效应概率为 7.14×10^{-6} ;增加防火墙后该位置热辐射强度降低为 24.69 kW/m^2 ,约为原始场景热辐射的1/13,此时无多米诺效应产生;原始场景下个人风险值为 2.11×10^{-9} ,增加防火墙后为 6.33×10^{-13} ,减小4个数量级,表明防火墙对带压火焰射流辐射的热阻断效果显著。研究结果可为化工企业安全策略构建提供一定理论参考。

关键词:防火墙;带压火焰;热阻断效果;CFD模拟;个人风险

中图分类号:X937;X932

文献标志码:A

文章编号:1673-193X(2024)-09-0134-07

Evaluation on heat blocking effect of jet radiation by pressurized flame based on CFD simulation

WANG Lixun^{1,2,3}, WEI Lijun^{1,2,3}, LI Xiaoyun⁴, LUAN Tingting⁴, DUO Yingquan^{2,3}, WANG Rujun^{2,3}

(1. School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

2. China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100012, China;

3. Key Laboratory of Major Hazard Installations and Chemical Industry Park System Safety, MEM, Beijing 100012, China;

4. School of Safety Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

Abstract: In order to evaluate the heat blocking effect of firewall as a safety barrier on the jet radiant of pressurized flame, a quantitative evaluation method of heat blocking effect was established by combining CFD simulation and individual risk calculation. Taking the pressurized flame generated by the leakage of ethylene reaction tower in a chemical enterprise as the research object, the thermal radiation intensity of pressurized flame acting on the adjacent storage tank in the original scene and adding the firewall were simulated by FLACS software, and the probability of domino effect and individual risk were calculated. The results show that for the location where the surface of storage tank is relatively most affected by thermal radiation (observation point 1), the thermal radiation intensity in the original scene is 310.69 kW/m^2 , and the accident will spread to the neighboring tank and produce a domino effect, with the probability of domino effect as 7.14×10^{-6} . After the firewall is added, the thermal radiation intensity decreases to 24.69 kW/m^2 , which is about 1/13 of that in original scene, and no domino effect occurs at this time. In the original scenario, the personal risk is 2.11×10^{-9} , and 6.33×10^{-13} after adding the firewall, which is reduced by 4 orders of magnitude, indicating that the thermal blocking effect of firewall on the jet radiation of pressurized flame is significant. The research results can provide some theoretical reference for the construction of safety strategies

收稿日期: 2023-12-26

* 基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目(2021YFC3001201)

作者简介: 王黎珣, 硕士研究生, 主要研究方向为定量风险评估、三维事故后果模拟、可靠性研究等。

通信作者: 魏利军, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为重大工业事故预防与控制、重大危险源辨识评价与控制、定量风险与韧性评估、安全规划和应急管理。

in chemical enterprises.

Key words: firewall; pressurized flame; heat blocking effect; CFD simulation; individual risk

0 引言

火灾事故是化工园区事故中较为常见的事故类型,2010—2019年我国化工企业较大及以上事故类型中,因火灾导致的死亡人数占总死亡人数的72%^[1]。相对于其他类型的事故,如爆炸和有毒气体泄漏扩散等,火灾发生的频率更高,易引发各种连锁反应,比如,火焰可能会直接造成人员伤亡,持续的热辐射还会引发多米诺效应^[2],进而引发更大规模的火灾、爆炸等事故。

在化工企业内部,火灾产生的热辐射主要作用于储罐、塔器和配套管道等设施。过量热辐射导致设备外壳直接烧穿,可燃物遇见点火源后引发火灾,使内部液体沸腾或气体体积膨胀造成压力迅速升高进而引发爆炸,内部高压引起设备破裂^[3]。因此,热辐射作用于管道时,管道可能出现蠕变松弛、强度下降,进而引发次生灾害事故^[4]。塔设备是化工企业生产中主要设备之一,本文将塔设备作为主要的探讨和研究对象,对其泄漏后产生的带压射流火焰情况展开研究。

火灾发生后,有效的安全屏障能够及时阻止和减小火灾蔓延。邱健^[5]将安全屏障定义为一切具有避免、预防、监测、控制和减缓有害因素对安全、环境、人员等构成危害作用的物理及工程系统的总称。Sklet^[6]认为安全屏障是计划用于预防、控制或减轻不希望发生的事件或事故的物理或非物理手段,并给出屏障功能和屏障系统的定义,认为屏障功能旨在预防、控制或减轻意外事件或事故。屏障系统是用以执行多个屏障功能的系统,屏障系统呈现屏障功能的具体实现方案。因此,安全屏障在减小火灾事故后果、预防火灾事故造成更大规模的破坏方面具有至关重要的意义。

安全屏障对于多米诺事故概率的影响也成为评估安全屏障效果的1种研究思路。徐安琦等^[7]以某蛋氨酸生产企业为例,分别计算设置水喷雾系统、消火栓和泡沫灭火系统3种安全屏障时,储罐发生火灾多米诺事故的概率,从而评估安全屏障的效果。伍壮等^[8]提出可用性和有效性2个概念,用以量化原油罐区的安全防护效果,以事件树方法分别计算出考虑安全防护时罐区各储罐单元的池火灾事故扩展概率与未考虑安全防护时罐区各储罐单元的池火灾事故扩展概率,将二者对比后发现安全防护时的池火灾事故概率降低了1个数量级,表明安全防护在预防火灾事故中具有重要作用。吴守治等^[9]基于事件树和贝叶斯网络方法对主动、被动、应急与响应3种安全屏障进行建模,分析不同安全屏障

对储油罐区池火灾多米诺效应概率的影响,发现被动安全屏障降低池火灾多米诺效应概率的效果更显著,并且多层安全屏障可使多米诺效应概率下降3~7个数量级。

防火墙是当前建筑中更常用、有效的安全屏障之一,张金伟等^[10]采用火灾动力学模拟软件FDS(fire dynamics simulator)对变压器火灾温度场进行数值模拟计算,分析有风和无风条件下防火墙对火灾温度分布的影响,结果表明有纵向风时,防火墙的设置能够使未着火变压器周围的温度明显降低,表明防火墙在火灾防护方面具备一定有效性。此外,还有学者根据实际应用场景,对防火墙设计进行系统阐述^[11]。

然而,以往研究中,较少开展以防火墙作为安全屏障对带压火焰射流辐射热阻断效果进行定量评估的研究。针对上述不足,本文提出1种结合计算流体力学CFD(computational fluid dynamics)软件模拟和定量风险评估的评估方法。CFD软件在相关火灾后果模拟领域发挥着重要作用,通过采用数值模拟计算方法,在短时间内精确模拟复杂的流动现象并给出模拟结果,使用该软件可以节省大量实验时间和资金投入。FLACS是目前相关领域内应用较为普遍的CFD软件之一^[12],其具备气体扩散、爆炸、火灾和通风等多个子模块,功能强大,在扩散、火灾等安全分析领域均有应用。Bai等^[13]、刘迪等^[14]、周亚薇等^[15]利用FLACS软件建立相关物理模型,模拟储罐、管道等设备设施发生泄漏后形成的喷射火场景,通过模拟,一方面分析确定喷射火事故后果的影响因素,另一方面根据模拟得到的温度场和热辐射场来评估火灾造成的伤害后果。

鉴于此,本文基于CFD模拟,使用FLACS软件建立乙烯反应塔泄漏场景模型,模拟得到原始场景和增加防火墙后泄漏产生带压火焰的热辐射值,进行事故扩展判别和多米诺效应概率计算,并依据定量风险评估方法计算出个人风险值。通过对比热辐射强度、多米诺效应概率以及受灾因子个人风险的变化情况,从而定量评估防火墙对带压火焰射流辐射热阻断效果。研究结果可为化工企业安全策略构建提供一定理论参考。

1 评估方法介绍

本文基于CFD模拟和个人风险值的计算,定量评估防火墙对于带压火焰的辐射热阻断效果,研究方法框架如图1所示。首先,针对乙烯反应塔泄漏事件,分别建立原始场景和增加防火墙的三维物理模型,并划分网格;其次,在FLACS软件中模拟计算泄漏后带压火焰对

邻近储罐产生的热辐射强度;然后,进行火灾事故扩展判别,分别计算出原始场景和增加防火墙后的多米诺效应概率和个人风险;最后,对比分析防火墙增加前后的热辐射强度、多米诺效应概率和个人风险变化情况,评估防火墙对带压火焰射流辐射的热阻断效果。

1.1 多米诺效应概率计算

1) 事故扩展阈值

储罐泄漏引发的火灾可分为池火、喷射火、闪火和火球等,当火灾事故产生的物理效应强度在目标设备处的值达到扩展阈值时,可能发生火灾事故的扩展。对于压力容器,当其在喷射火作用下受到的热辐射强度超过 45 kW/m^2 时^[16],事故会发生进一步扩展。

2) 事故扩展概率

Cozzani 等^[17]基于经验数据和实验验证给出比较精确的火灾事故扩展概率计算方法,如式(1)所示。

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

式中: P 为事故扩展概率; Y 为概率单位值,其取值如表 1 所示。

1.2 定量风险计算

定量风险主要包括个人风险和社会风险,个人风险的计算步骤如下:

1) 选择 1 个泄漏场景 LOC ,确定每个 LOC 的失效频率 f_s ,根据《石化装置定量风险评估指南》^[18]得到不同

表 1 概率单位值 Y 的计算公式

Table 1 Calculation formula of probability unit value Y

物理效应	目标设备类型	概率单位值 Y
热辐射	常压力容器	$Y = 12.54 - 1.847 \ln (tf)$
	压力容器	$Y = 12.54 - 1.847 \ln (I) - 2.667 \times 10^{-5} V + 9.887$ $\ln (tf) = -0.947 \ln (I) + 8.835 V^{0.032}$

注: tf 为储罐失效时间,s; I 为热辐射强度, kW/m^2 ; V 为目标设备容积, m^3 。

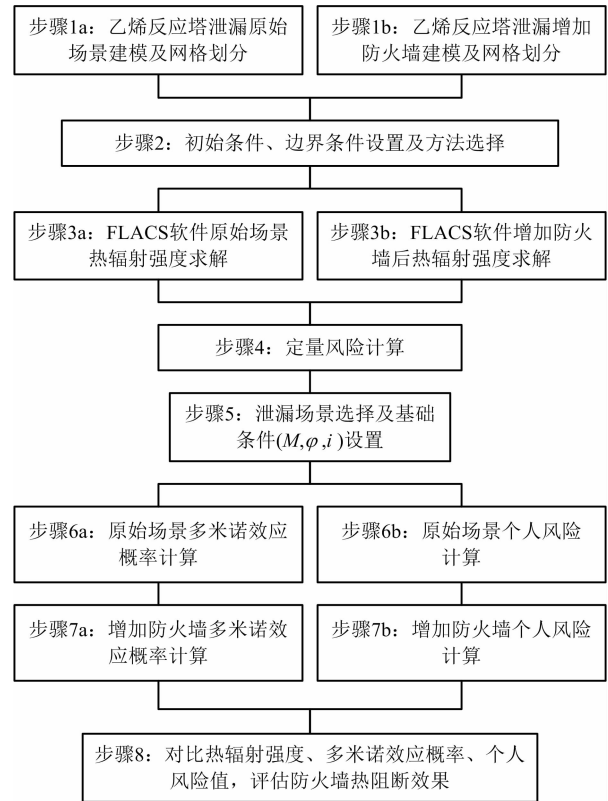
泄漏场景对应的失效频率,如表 2 所示。

表 2 泄漏场景及其失效频率

Table 2 Leakage scenes and annual failure frequencies

泄漏场景 LOC		失效频率
泄漏工况	孔径大小/mm	f_s/a^{-1}
小孔泄漏	5	4×10^{-5}
中孔泄漏	25	1×10^{-4}
大孔泄漏	100	1×10^{-5}
完全泄漏	整个设备的直径	6×10^{-6}

2) 选择 1 种概率为 P_M 的天气等级 M ,然后再选择 1 个概率为 P_φ 的风向 φ ,概率 P_φ 是在给定天气等级 M 下获得风向 φ 的概率,通常,同时获得天气等级 M 与风向 φ 的概率由 $P_M \times P_\varphi$ 给出。



注: M 表示天气等级, φ 表示风向, i 表示起火事件。

图 1 研究方法框架

Fig. 1 Framework of research methods

3) 可燃物释放,选择条件概率为 P_i 的起火事件 i 。如果考虑物质毒性影响,则不考虑点火事件。

4) 计算在特定 LOC 、天气等级 M 、风向 φ 及点火事件 i (针对可燃物) 条件下,网格单元上的死亡概率 P_d ,如式(2)~(3)所示^[18],参考高度取 1 m。

$$P_d = 0.5 \times \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{P_r - 5}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (2)$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (3)$$

式中: P_d 为死亡概率; P_r 为死亡概率值; t 为暴露时间,s; e^{-x^2} 为被积函数。

其中,火球、池火及喷射火的死亡概率值计算如式(4)所示。需要说明的是,在计算热辐射暴露死亡概率时,处于火球、池火及喷射火热辐射强度 $\geq 37.5 \text{ kW/m}^2$

时,人员的死亡概率为 100%。

$$P_r = -36.38 + 2.56 \ln(Q^{4/3} \times t) \quad (4)$$

式中: P_r 为热辐射暴露下的死亡概率值; Q 为热辐射强度, W/m^2 ; t 为暴露时间,s,最大值为 20 s。

5)计算在 LOC 、 M 、 φ 、 i 条件下对网格单元个人风险的贡献,如式(5)所示:

$$\Delta IR_{s,M,\varphi,i} = f_s \times P_M \times P_\varphi \times P_i \times P_d \quad (5)$$

式中: P_i 为点火概率; $\Delta IR_{s,M,\varphi,i}$ 为在 LOC 、 M 、 φ 、 i 条件下对网格单元个人风险的贡献。

6)对所模拟的全部起火事件重复步骤 3)~5),对所模拟的全部天气等级和风向重复步骤 2)~5),对所模拟的全部泄漏场景重复步骤 1)~5),则网格单元处总的个人风险值计算如式(6)所示:

$$IR = \sum_s \sum_M \sum_\varphi \sum_i \Delta IR_{s,M,\varphi,i} \quad (6)$$

式中: IR 为网格单元处总的个人风险值。

2 泄漏场景建模及边界条件介绍

2.1 物理模型建立

喷射火可在短时间内产生较高热量,从而引发二次事故。本文以某化工企业储罐区乙烯反应塔泄漏发生喷射火为例,研究防火墙对带压火焰的热阻断效果,基于 CFD 软件 FLACS 的前处理软件 CASD 建立三维物理模型,如图 2 所示。泄漏位置及点火区域如图 3 所示,泄漏位置在图 3 中反应塔的塔顶侧边缘处,点火源区域为图 3 中长方体所示内部空间。乙烯反应塔高度为 17.5 m,反应塔与邻近储罐的距离为 4.475 m,储罐容积为 $1 \times 10^4 m^3$,高度为 16.5 m。

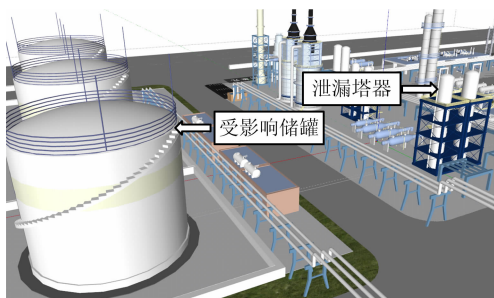


图 2 储罐区乙烯反应塔三维建模

Fig. 2 Three-dimensional model of ethylene reaction tower in storage tank area

2.2 CFD 计算边界条件设置

泄漏孔径设置为 0.1 m,全年平均风速为 2.8 m/s,大气温度为 20.0 °C,大气压力为 0.1 MPa,反应塔内部压力为 1.0 MPa,反应塔壁面温度为 20.0 °C,泄漏相对湍流强度为 0.1,泄漏后引发的火灾为稳态喷射火。

为得到与网格无关的模拟结果,使用网格 1,2,3 进

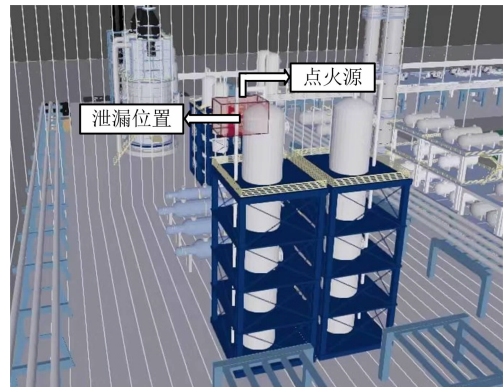


图 3 泄漏位置及点火区域

Fig. 3 Leakage location and ignition area

行网格独立性验证,其网格数分别为 251 379,179 968,1 117 800。在 3 种网格条件下选取增加防火墙后同一点,分别计算热辐射强度,通过分析结果可知,网格 1,2,3 的热辐射强度分别为 24.13,24.39,24.17 kW/m^2 ,网格 1 计算结果与网格 3 计算结果相差 0.17%,网格 2 计算结果与网格 3 计算结果相差 0.90%,网格 1 与网格 3 计算结果更为接近。为保证计算结果准确性同时提高计算机的运行速度,选择网格 1 进行模拟。同时,在进行喷射火模拟网格划分时分为核心区域和非核心区域。以乙烯反应塔周边设备所在区域为核心区域,核心区域网格选择平均划分,网格尺寸为 1.25,核心区域之外为非核心区域,拉伸系数为 1.917,最大网格尺寸为 8.41。

3 原始场景喷射火定量风险计算

3.1 场景设置

反应塔破裂后乙烯泄漏,泄漏时的风速为 2.8 m/s,风向为 NNE,大气稳定度为 F。乙烯泄漏 5 s 后被点燃发生喷射火,计算时间设为 300 s。火焰温度分布及对邻近储罐及管道产生的热辐射强度如图 4 所示,该喷射火热辐射范围较小,主要影响反应塔周围最近并在下风向的 1 个储罐。同时可以看出,储罐近火焰端上侧部位受到的热辐射强度较大。在受喷射火影响的储罐和管道表面处设置观测点,如图 5 所示,利用 FLACS 软件对各观测点受到的热辐射强度进行计算。

3.2 原始场景喷射火定量风险计算

由于观测点 1 处受到的热辐射强度最大,所以选择观测点 1 进行详细的多米诺效应概率和个人风险计算。乙烯泄漏后第 5 s 被点燃,热辐射在泄漏后第 5 s 开始产生。对于观测点 1,其受到的热辐射强度随时间的变化情况如图 6 所示。由图 6 可知,从第 5 s 点火开始,热辐射强度迅速增大到超过 $37.5 kW/m^2$,该热辐射强度下,热辐射半径以内的所有设备、设施均会被损坏,60 s 内

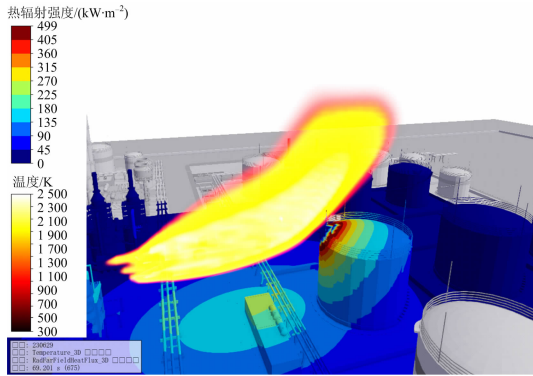


图 4 原始场景喷射火热辐射场和温度场分布
Fig. 4 Distribution of heat radiation field and temperature field of jet fire in original scene

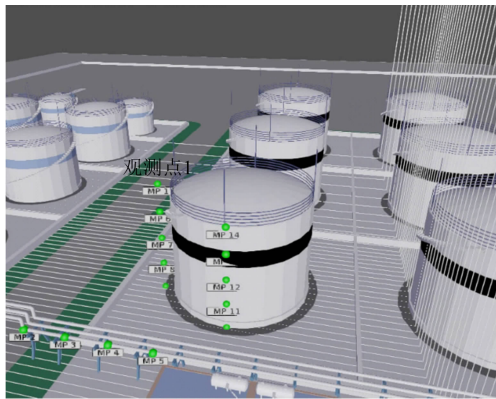


图 5 观测点布置
Fig. 5 Observation points layout

人员死亡概率达 100%^[14]。随着时间的推移,热辐射强度逐渐稳定在 300~360 kW/m²。由于人员的热辐射暴露时间最大不超过 20 s,因此以 140~160 s 间平均热辐射强度计算人员暴露 5 s 的个人风险值。第 140~160 s 间的热辐射强度平均值为 310.64 kW/m²。

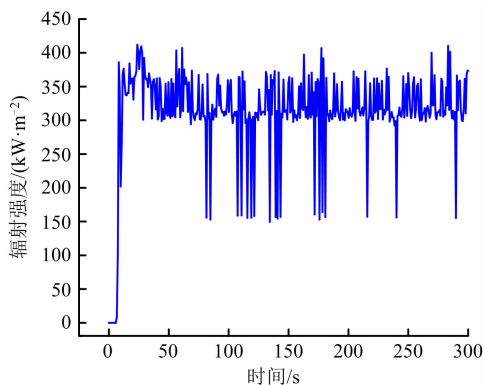


图 6 原始场景观测点 1 热辐射强度
Fig. 6 Heat radiation intensity at observation point 1 in original scene

1) 多米诺效应概率计算

① 事故扩展判别

反应塔和储罐均为压力容器,喷射火事故扩展的阈值 $I_0 = 45 \text{ kW/m}^2$,原始场景下反应塔对储罐产生的热辐射 $I = 310.64 \text{ kW/m}^2 > I_0$,事故扩展。

② 扩展概率计算

首先,计算储罐失效时间 utf , $\ln(utf) = 6.43$,则 $utf = 620.17 \text{ s}$ 。其次,计算 Y 值, $Y = 12.54 - 1.847 \ln(utf) = 0.66$ 。最后,计算扩展概率,代入式(1)得到 $P_d = 7.14 \times 10^{-6}$

2) 个人风险计算

① 泄漏口直径 $d = 0.1 \text{ m}$,为大孔泄漏场景,根据表 2 可知,失效频率为 $f_s = (1 \times 10^{-5})/a^{-1}$ 。

② 根据 FLACS 模拟时输入的气象条件,选择大气稳定为 F,风向为 NNE,相应的概率 $P_M \times P_\varphi = 10\% \times 3.7 \times 10^{-2} = 3.7 \times 10^{-3}$ 。

③ 乙烯泄漏后 5 s 点火,为延迟点火,点火事件 i 的延迟点火概率 P_i 按照《石化装置定量风险评估指南》^[19] 提出经验公式^[18] 计算,如式(7)~(8)所示。

$$P_{\text{gasdelign}} = (e^{-4.16} m^{0.642}) \times (e^{-2.995} m^{0.38}) \quad (7)$$

$$P_{\text{liqdelign}} = (e^{-4.333} m^{0.392}) \times (e^{-2.995} m^{0.38}) \quad (8)$$

式中: $P_{\text{gasdelign}}$ 为气体延迟点火概率; $P_{\text{liqdelign}}$ 为液体延迟点火概率; m 为质量泄漏速率, kg/s; e 为自然常数,取值约为 2.72。

其中,乙烯的质量泄漏速率为 $m = 66.59 \text{ kg/s}$, $P_i = 5.7 \times 10^{-2}$ 。

④ 人员暴露在热辐射下的时间 $t = 5 \text{ s}$,受到的热辐射强度 $I = 310.64 \text{ kW/m}^2 > 37.5 \text{ kW/m}^2$,所以 $P_d = 100\%$ 。

⑤ 根据式(5)计算得到 $\Delta IR_{s,M,\varphi,i} = 2.11 \times 10^{-9}$,由于只考虑单一泄漏场景、天气等级、风向以及点火事件,上述 $\Delta IR_{s,M,\varphi,i}$ 即为所求个人风险值。

4 增加防火墙后喷射火定量风险计算

4.1 防火墙增加后定量风险计算

在反应塔和储罐之间设置混凝土材质的防火墙,此时乙烯反应塔喷射火对储罐的热辐射影响如图 7 所示,观测点 1 受到的热辐射强度如图 8 所示。在火焰温度不变的情况下,由于防火墙的防护作用,储罐受到的热辐射影响显著减小。随着燃烧时间的推移,储罐受到的热辐射逐渐稳定在 25 kW/m² 左右,相较于原始场景,热辐射值减小约 91.95%。

选择 130~150 s 之间的平均热辐射强度计算出增加防火墙后的喷射火个人风险值,130~150 s 的热辐射强度平均值为 24.69 kW/m²。

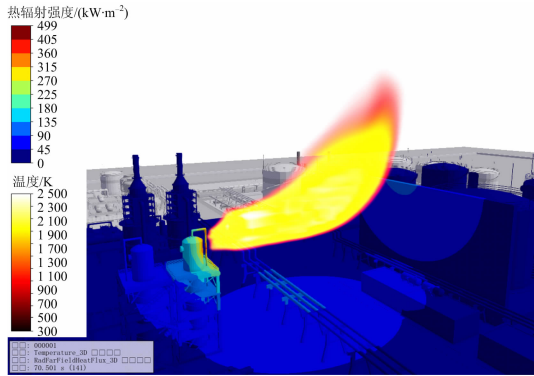


图7 增加防火墙后喷射火热辐射场和温度场分布
Fig.7 Distribution of heat radiation field and temperature field of jet fire after adding firewall

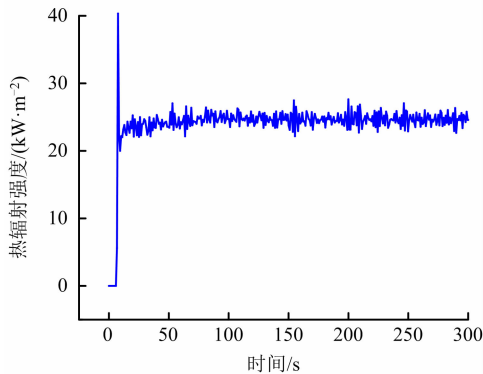


图8 增加防火墙后观测点1热辐射强度
Fig.8 Heat radiation intensity at observation point 1 after adding firewall

1) 多米诺概率计算

增加防火墙后反应塔对储罐产生的热辐射为 $I' = 24.69 \text{ kW/m}^2 < I_0$, 事故不发生扩展, 即无多米诺效应产生。

2) 个人风险计算

增加防火墙后基础条件不改变, 如泄漏孔径、天气等级、风向及点火事件等, 则可知 $f_s = (1 \times 10^{-5})/a^{-1}$, $P_M \times P_\varphi = 3.7 \times 10^{-3}$, $P_i = 5.7 \times 10^{-2}$ 。防火墙增加后, 热辐射强度减小为 $I' = Q' = 2.469 \times 10^4 \text{ W/m}^2$, 暴露时间仍为 5 s。带入式(4)得到 $P'_i = 2.26$, 算出 $P'_{id} = 0.03\%$ 。则增加防火墙后的个人风险 $\Delta IR'_{s,M,\varphi,i} = 6.33 \times 10^{-13}$ 。

4.2 防火墙增加前后相关参数对比

表3所示为观测点1原始场景和增加防火墙后的相关参数对比, 由表3可知:

1) 相同火焰温度下, 观测点1处受到的热辐射强度高达 310.64 kW/m^2 , 增加防火墙后观测点1处的热辐射强度相对于原始场景减小为 24.69 kW/m^2 , 约为原始场景热辐射的 1/13。

2) 原始场景下乙烯反应塔发生火灾会进一步扩展到邻近储罐, 事故扩展概率为 7.14×10^{-6} , 增加防火墙后储罐受到的热辐射小于扩展阈值, 无多米诺效应产生。

3) 相同暴露时间(5 s)下, 由于原始场景的热辐射强度较高, 其导致的死亡概率为 100%, 而增加防火墙后, 死亡率降低为 0.03%, 近似为 0。

从个人风险来看, 防火墙增加后观测点1处的个人风险值减小 4 个数量级。由于只考虑单一网格点、单一

表3 观测点1增加防火墙前后相关参数对比

Table 3 Comparison on relevant parameters of observation point 1 before and after adding firewall

情景	对比指标				
	储罐受到的热辐射强度/(kW·m ⁻²)	火灾扩展阈值/(kW·m ⁻²)	多米诺效应概率	死亡概率/%	个人风险值
原始场景	310.64	45	7.14×10^{-6}	100	2.11×10^{-9}
增加防火墙	24.69	45	无多米诺效应	0.03	6.33×10^{-13}

设备以及单一泄漏场景、天气等级、风向和点火事件情况, 致使求得的个人风险偏低, 小于个人风险可容许标准 3×10^{-7} , 但实际场景中的个人风险值为若干网格点上不同泄漏场景、天气等级和风向情况下个人风险的叠加, 其值大多会超过可容许标准。如文献[19]针对LPG储罐泄漏发生池火灾计算得到的个人风险介于 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 之间, 超过个人风险可容许标准。

综上, 针对喷射火火灾, 防火墙的设置对带压火焰射流辐射的热阻断效果显著, 有效降低火灾对邻近设备

以及人员的伤害。

5 结论

1) 本文方法首先基于 FLACS 软件建立有无防火墙情况下乙烯反应塔泄漏引发喷射火场景模型, 并通过模拟得到喷射出的带压火焰对邻近储罐产生的热辐射强度, 为定量计算防火墙对火焰辐射热阻断效果提供参考。

2) 增加防火墙后热辐射强度约为原始场景的 1/13,

未达到火灾事故扩展阈值,无多米诺效应产生,且增加防火墙后个人风险减小 4 个数量级。说明防火墙的设置能够有效减小火灾产生的热辐射,进而降低火灾对人员及设备的危害,防火墙对带压火焰射流辐射热阻断效果显著。

3) 使用 FLACS 仿真模拟塔器发生喷射火,将带压火焰造成的热辐射危害区域可视化,能够直接观测带压火焰的热辐射危害范围,可有效为化工企业应急救援过程中选择最优处置方案提供情景参考。

参考文献

- [1] 万婧,容振乾,赵远飞,等. 2010—2019 年我国化工行业较大以上生产安全事故统计分析及其启示[J]. 工业安全与环保, 2021, 47(5):59-63.
WAN Jing, RONG Zhenqian, ZHAO Yuanfei, et al. Statistical analysis and lessons of major production safety accidents in chemical industry of China from 2010 to 2019[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2021, 47(5):59-63.
- [2] 吉安琪. 石油化工场所喷射火灾数值模拟研究[D]. 抚顺: 辽宁石油化工大学, 2021.
- [3] 石军花, 朱梅, 李进, 等. 化工园区储罐火灾热辐射模型仿真研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(增刊 1):79-83.
SHI Junhua, ZHU Mei, LI Jin, et al. Simulation study on thermal radiation model of storage tank fire in chemical industry[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(Supplement 1):79-83.
- [4] 周宁, 吴露露, 李雪, 等. 池火灾环境中石化管廊管道失效的规律[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2021, 43(2):150-158, 196.
ZHOU Ning, WU Lulu, LI Xue, et al. Failure law of petrochemical pipe rack under pool fire[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 43(2):150-158, 196.
- [5] 邱健. 储罐池火灾安全屏障性能评估及其应用研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2021.
- [6] SKLET S. Safety barriers: definition, classification, and performance[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2006, 19(5):494-506.
- [7] 徐安琦, 钱一潇, 钱瑜. 化工企业多米诺事故安全屏障优化布置[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(2):175-180.
XU Anqi, QIAN Yixiao, QIAN Yu. Study on optimal layout of barriers against domino effects in chemical enterprise[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(2):175-180.
- [8] 伍壮, 侯磊, 伍星光, 等. 安全防护对原油罐区多米诺火灾事故发生概率的影响[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(1):166-172.
WU Zhuang, HOU Lei, WU Xingguang, et al. The influence of safety protection on the probability of domino accident in tank area[J]. Safety and Environmental Engineering, 2020, 27(1):166-172.
- [9] 吴守志, 侯磊, 伍星光, 等. 安全屏障对储油罐区池火灾多米诺效应概率的影响[J]. 油气储运, 2022, 41(2):165-176.
WU Shouzhi, HOU Lei, WU Xingguang, et al. Influence of safety barriers on probability of domino effect triggered by pool fire in tank farm[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(2):165-176.
- [10] 张金伟, 许颖, 李栋梁, 等. 基于 BIM-CFD 的变压器防火墙火灾性能化设计[J]. 北京交通大学学报, 2021, 45(3):84-92.
ZHANG Jinwei, XU Ying, LI Dongliang, et al. Fire performance design of transformer firewall based on BIM and CFD[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2021, 45(3):84-92.
- [11] 罗业雄. 变电站装配式主变防火墙的设计与实践[J]. 科技与创新, 2018(14):133-134.
- [12] 杨灿. 原油库区泄漏与火灾风险场景集成风险分析[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2023.
- [13] BAI Y P, WU J S, SUN Y X, et al. BN & CFD-based quantitative risk assessment of the natural gas explosion in utility tunnels[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2022, 80:104883.
- [14] 刘迪, 党文义, 王溪舸, 等. 油氢合建站典型泄漏火灾热辐射后果模拟分析[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(6):851-854.
LIU Di, DANG Wenyi, WANG Xige, et al. Simulation analysis of thermal radiation consequences of typical leakage fire in oil and hydrogen refueling station[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(6):851-854.
- [15] 周亚薇, 匡卓伦, 冷雪, 等. 天然气管道全管径断裂喷射火对周边建筑物外立面热辐射分布研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(8):2668-2674.
ZHOU Yawei, KUANG Zhuolun, LENG Xue, et al. Research on the thermal radiation distribution of full bore rupture jet fire from natural gas pipeline on the surrounding building facades[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(8):2668-2674.
- [16] COZZANI V, GUBINELLI G, SALZANO E. Escalation thresholds in the assessment of domino accidental events[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 129(1-3):1-21.
- [17] COZZANI V, ANTONIONI G, SPADONI 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.
- [18] 中国石油化工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, 2007.
- [19] 秦宇毅, 吕品, 周朱晟, 等. 基于 LPG 储罐事故演化系统的个人风险分析[J]. 消防科学与技术, 2023, 42(5):615-621.
QIN Yuyi, LYU Pin, ZHOU Zhusheng, et al. Multi-scenario accident individual risk analysis based on LPG tank accident evolution system[J]. Fire Science and Technology, 2023, 42(5):615-621.

(责任编辑:陈玲)