

中文引用格式:李莎莎,崔铁军. 多储罐爆炸超压损伤演化过程研究[J]. 中国安全科学学报,2025,35(11):92-97.

英文引用格式:LI Shasha, CUI Tiejun. Research on evolution process of explosions-overpressure damage in multiple storage tank [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(11): 92-97.

多储罐爆炸超压损伤演化过程研究^{*}

李莎莎^{1,2}副教授, 崔铁军^{**1,2}教授

(1 沈阳理工大学 环境与化学工程学院, 辽宁 沈阳 110159;

2 沈阳理工大学 辽宁省安全工程产业学院, 辽宁 沈阳 110159)

中图分类号:X937

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.11.1175

基金项目:辽宁省属本科高校基本科研业务费专项资金资助(LJ212410144032);辽宁省科技计划联合计划项目(2025-MSLH-584)。

【摘要】 为探究化工园区多储罐同时爆炸引起的事故风险,提出多储罐爆炸超压损伤演化过程研究方法。首先,计算单一储罐爆炸损伤概率和单一储罐爆炸损伤概率;然后,考虑多储罐同时爆炸,研究多储罐爆炸超压损伤演化过程;最后,以某化工园区为例,验证多储罐同时爆炸的区域损伤概率分布。结果表明:演化结果以储罐 o_2 的区域损伤概率分布为主,后继区域损伤概率分布逐渐减小。研究得到最大损伤概率储罐爆炸顺序集合、对应损伤概率集合和储罐损伤概率分布集合,可计算多储罐同时爆炸的区域损伤概率。初始爆炸时提供的能量差异与储罐爆炸超压损伤演化过程的不同,造成化工园区储罐爆炸过程的复杂性。

【关键词】 多储罐爆炸; 损伤演化; 爆炸超压; 区域损伤; 概率分布

Research on evolution process of explosions-overpressure damage in multiple storage tank

LI Shasha^{1,2}, CUI Tiejun^{1,2}

(1 School of Environmental and Chemical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning 110159, China; 2 Liaoning Safety Engineering Industry School, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning 110159, China)

Abstract: In order to study the accident risks caused by the simultaneous explosions of multiple storage tanks in chemical industrial parks, a research method for the overpressure damage evolution process of multiple tank explosions was proposed. First, the explosion damage probability of a single storage tank and the explosion damage probability distribution of a single storage tank were calculated. Then, considering the simultaneous explosions of multiple storage tanks, the overpressure damage evolution process of multiple tank explosions was studied. Finally, the regional damage probability distribution of the simultaneous explosions of multiple storage tanks was obtained. The results show that the evolution result is mainly based on the regional damage probability distribution of Tank o_2 , and the subsequent regional damage probability distribution decreases gradually. Through the research, the tank explosion sequence set

* 文章编号:1003-3033(2025)11-0092-06; 收稿日期:2025-07-11; 修稿日期:2025-09-15

** 通信作者:崔铁军(1983—),男,辽宁沈阳人,博士,教授,主要从事系统可靠性及系统故障演化理论方面的研究。E-mail:ctj.159@163.com。

with the maximum damage probability, the corresponding damage probability set and the tank damage probability distribution set are obtained, and the calculation of the regional damage probability distribution of the simultaneous explosions of multiple storage tanks is realized. The complexity of the storage tank explosion process in chemical industrial parks is caused by the differences in the energy provided during the initial explosion and the differences in the overpressure damage evolution process of storage tank explosions.

Keywords: multi-tank explosion; damage evolution; explosion overpressure; regional damage; probability distribution

0 引言

随着化工产业和园区的不断建立与发展,出现诸多安全问题。化工园区可能发生多种类型的故障、事故和灾害,其中最严重的是与储罐相关的事故,包括火灾、爆炸、泄漏、扩散等。化工园区储罐的爆炸是破坏性最大的灾害,而且,化工园区储罐爆炸后,由于内部环境复杂、储罐种类多、管线交错等因素,给救援带来很大挑战,也对消防救援人员人身安全构成很大威胁。因此,研究化工园区储罐爆炸过程,特别是多储罐爆炸的相互影响,对于化工园区安全运行具有重要的现实意义。

对于化工园区储罐连锁爆炸的研究,国内最早由王艳华等^[1]在 2008 年提出,针对化工重大事故多米诺效应的严重后果,研究了重大事故多米诺效应发生特征。目前,相关成果包括开敞空间液化石油气储罐的蒸气爆炸模型建立^[2]、蒙特卡罗和动态事件树的储罐脆弱性分析^[3]、优化三硝基甲苯的液化石油气储罐爆炸冲击波预测^[4]、近 20 年重特大化工生产事故分析^[5]、危化品爆炸事故隐患关联与溯源^[6]、液化天然气储罐泄漏扩散模拟^[7]等。国外相关研究包括储罐爆炸火球分布特征及热辐射效应^[8]、储罐强点火条件下的爆炸损伤^[9]、高压储氢罐离地不同高度的爆炸分析^[10]、储罐蒸气爆炸多因素耦合分析^[11]、储罐爆炸事故情景特征模拟及应急预案^[12]等。这些成果从不同侧面研究了化工园区储罐爆炸过程、特征、现象等,也研究了对应的预测、预警、预防和治理方法。但是,化工园区储罐爆炸过程复杂,爆炸导致的储罐损伤作用相互影响,难以在系统层面实现储罐爆炸过程研究,特别是多储罐爆炸过程的复杂作用特征。

鉴于此,笔者拟提出多储罐爆炸超压损伤演化过程研究方法,研究多储罐同时爆炸对其余储罐损伤的影响,以期化工园区储罐安全运行提供一定的参考。

1 单一储罐爆炸的损伤概率分布

计算单一储罐爆炸的损伤概率分布先要计算单一储罐爆炸损伤概率。关于后者的数学模型是以储罐爆炸超压产生的冲击波为相互作用基础,建立的爆炸损伤演化过程。

步骤 1: 网格划分。以矩阵形式进行化工园区网格划分,将区域分割成小部分;使用网格化矩阵表示爆炸损伤概率分布,详见文献[13-14]。

步骤 2: 计算当量。用 TNT 当量 $W_{\text{TNT}} = 1.8\alpha W_f Q_f / Q_{\text{TNT}}$ 估算储罐蒸气云爆炸瞬间爆炸冲击波,其中, α 为蒸气云当量系数,一般取值为 0.02%~14.9%,文中取 4%; W_f 为蒸气云中燃料总质量,kg; Q_f 为可燃物燃烧热,kJ/kg; Q_{TNT} 为可燃物爆炸热,取 4 120~4 690 kJ/kg。

步骤 3: 计算超压。设 X 为化工园区宽边界,m; $x \in \{0, 1, \dots, X\}$ 为网格宽边坐标; Y 为化工园区高边界,m; $y \in \{0, 1, \dots, Y\}$ 为网格高边坐标; O 为储罐集, $O = \{o_1, o_2, \dots, o_N\}$, N 为储罐数量, $n \in [1, N]$, o_n 为第 n 个储罐; o_n 坐标为 (x_n, y_n) , 储罐 o_n 爆炸在化工园区 Z 区域的超压为 ΔP_{o_n} ; ΔP_{o_n} 为 o_n 爆炸引起的 r 处的爆炸超压峰值,Pa; P_0 为周围环境压力,Pa。

步骤 4: 计算损伤概率。设 o_n 的损伤概率表达式为 $q_{o_n} = F_q(x, y, L, \Delta P_{o_n})$, L 表示压力容器类型, $L=1$ 为常压, $L=2$ 为高压。根据损伤概率模型^[15-16], 常压容器且静超压峰值大于 22 kPa 时破坏; 高压容器且静超压峰值大于 17 kPa 时破坏。那么, 储罐 o_n 爆炸对 Z 区域中任意位置 (x, y) 产生冲击波导致该位置储罐损伤概率 q_{o_n} 。上述过程的具体实现参照文献[17]。

基于上述过程,实现单一储罐爆炸的损伤概率分布计算。设 q_{o_n} 是 o_n 爆炸对 (x, y) 位置产生的储罐损伤概率; Z 中对于 o_n 爆炸引起的所有网格位置 (x, y) 处的储罐损伤概率用网格矩阵表示,即损伤

概率分布 $\mathbf{P}_{o_n}$ 。 $\mathbf{P}_{o_n}$ 是 $X \times Y$ 阶矩阵, 矩阵中的元素值为 q_{o_n} , 对于所有位置 $\mathbf{P}_{o_n} = F_q(x, y, L, \Delta \mathbf{P}_{o_n})$ 。那么, N 个储罐 $\mathbf{P}_O = [\mathbf{P}_{o_1}, \mathbf{P}_{o_2}, \dots, \mathbf{P}_{o_N}]$ 是所有储罐在该区域中引起的损伤概率分布。

2 多储罐爆炸损伤的数学描述

设 O_Q 为所有起始爆炸储罐的集合, $O_Q \subset O$, 这些储罐为 $o_j \in O_Q, j = 1, 2, \dots, J, J$ 为起始同时爆炸的储罐数量; 后继爆炸的其他储罐 $o_i \in O$ 且 $o_i \notin O_Q, i = 1, 2, \dots, I, I + J = N$ 。

起始爆炸对其余所有储罐的损伤概率的最大值为 $\max\{q_{O_Q \rightarrow o_i}\}$, 其中, $q_{O_Q \rightarrow o_i}$ 代表储罐集合 O_Q 同时爆炸对 (x_i, y_i) 位置的储罐 o_i 造成的损伤概率。 $q_{O_Q \rightarrow o_i}$ 如下式:

$$q_{O_Q \rightarrow o_i} = 1 - \prod_{j=1}^J (1 - q_{o_j \rightarrow o_i}) \tag{1}$$

式中 o_i 为最有可能继续爆炸的储罐。设 $\bar{O} = O/O_n$ 表示 O 的集合中去掉 o_n , 即还未爆炸的储罐集合。 $\bar{O} = \bar{O} \cup o_n$ 表示 $\bar{O}$ 集合中按顺序增加对象 o_n , 即已经爆炸的储罐集合。

初始状态为 $O_Q = \{o_1, o_2, \dots, o_J\}, \bar{O} = \phi$; 发生初始爆炸后 $O = O/O_Q, \bar{O} = \bar{O} \cup O_Q$ 。第 1 次比较, O_Q 为起始爆炸储罐集合, 在 O_Q 影响下遍历其余储罐集合 O 中的储罐损伤概率, 则 $Q_1 = \max\{q_{O_Q \rightarrow o_i} \mid o_i \in O\}, \bar{O} = \bar{O} \cup o_i, O = O/O_i, n = i$; 第 2 次比较, 在 $\bar{O}$ 影响下遍历其余储罐集合 O 中的储罐损伤概率, $Q_2 = \max\{Q_1 + (1 - Q_1)q_{o_n \rightarrow o_i} \mid o_i \in O\}, \bar{O} = \bar{O} \cup o_i, O = O/O_i, n = i$; 中间比较过程略, 由于初始同时爆炸储罐数量为 J , 后继爆炸储罐数量为 I , 因此, 比较过程最多为 $I - 1$ 次; 第 $I - 1$ 次比较, $Q_{I-1} = \max\{Q_{I-2} + (1 - Q_{I-2})q_{o_n \rightarrow o_i} \mid o_i \in O\}, \bar{O} = \bar{O} \cup o_i, O = O/O_i$; 最后 $Q_I = Q_{I-1} + (1 - Q_{I-1})q_{o_n \rightarrow o_I}, O = \phi$ 。

最终得到的 $\bar{O} = [O_Q = \{o_1, o_2, \dots, o_J\}, \bar{O} = \{o_1, o_2, \dots, o_I\}]$ 是以 O_Q 为起始爆炸条件的最大损伤概率储罐爆炸顺序集合, $Q = [100\%, 100\%, \dots, 100\%, Q_1, Q_2, \dots, Q_I]$ 是对应的损伤概率。将不同储罐集合设置为起始爆炸储罐集合, 可比较这些爆炸顺序从而确定最不利爆炸顺序。

3 多储罐同时爆炸的区域损伤概率分布

以 $\bar{O}$ (注意这里是演化顺序)、 Q 和 $\mathbf{P}_O =$

$[\underbrace{\mathbf{P}_{o_1}, \mathbf{P}_{o_2}, \dots, \mathbf{P}_{o_J}}_{O_Q}, \underbrace{\mathbf{P}_{o_1}, \mathbf{P}_{o_2}, \dots, \mathbf{P}_{o_I}}_{\bar{O}}]$ 为基础, 设最不利

区域爆炸演化的区域损伤概率分布为 $\mathbf{P}_Z^{O_Q} = \sum_{i=1}^N Q_i \mathbf{P}_{o_i}$, 如下式:

$$\mathbf{P}_Z^{O_Q} = 1 - \prod_{j=1}^J (1 - \mathbf{P}_{o_j}) \cdot + \sum_{i=1}^I Q_i \mathbf{P}_{o_i} \tag{2}$$

式中 $\cdot$ 为矩阵点乘。进而矩阵对应位置相加则可表示为:

$$\mathbf{P}_Z^{O_Q}(x, y) = 1 - \prod_{j=1}^J (1 - \mathbf{P}_{o_j}(x, y)) + \sum_{i=1}^I Q_i \mathbf{P}_{o_i}(x, y),$$

$x \in \{0, 1, \dots, X\}, y \in \{0, 1, \dots, Y\} \tag{3}$

这就形成了最不利储罐爆炸损伤过程之后的区域损伤概率分布, 与以往单一储罐损伤研究的主要区别在于, 以往研究都是以单一储罐作为起始爆炸储罐进行的区域损伤概率分布计算和研究。当然实际情况中也多是单一储罐起始爆炸导致的化工园区其余储罐爆炸形成的储罐爆炸超压损伤演化过程。虽然多储罐同时爆炸的概率非常小, 但其结果比单一储罐爆炸结果要严重。因此, 提供一种能研究多个储罐同时爆炸导致的储罐爆炸超压损伤演化过程及其对应的区域损伤概率分布计算方法, 即多储罐爆炸超压损伤演化过程研究方法。

4 多储罐爆炸超压损伤演化过程实例分析

设某化工园区环境压力 $P_0 = 103 \text{ kPa}$, 蒸气云当量系数 $\alpha = 0.04$, 可燃物爆炸热 $T_{NT} = 4\,686 \text{ kJ/kg}$ 。设区域内有 4 个储罐 $O = \{o_1, o_2, o_3, o_4\}$, 各储罐物质参数和相对位置见表 1。化工园区为 $1\,000 \text{ m} \times 1\,000 \text{ m}$ 的区域, $x \in \{0, 1, \dots, 1\,000\} \text{ m}, y \in \{0, 1, \dots, 1\,000\} \text{ m}$ 。考虑汽油和乙醇需要提高存储效率、满足特定工艺需求确保园区安全, 使用高压储罐。

表 1 储罐中存放的物质参数

Table 1 Material parameters stored in storage tanks

储罐	物质	x/m	y/m	体积/ m ³	密度/ (kg·m ⁻³)	物体燃烧热 $Q_f/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	类型
o_1	汽油	200	800	1000	730	41868	高压
o_2	柴油	900	100	2000	850	40320	常压
o_3	乙醇	700	700	900	800	22890	高压
o_4	乙醇	500	450	1500	800	22890	高压

设爆炸场景为 o_1 和 o_2 为起始且同时爆炸的储罐, 即 $O_Q = \{o_1, o_2\}$; 后继爆炸储罐为 o_3 和 o_4 , 这时

$J = 2, I = 2$ 。这里以 o_1 为例给出储罐爆炸的损伤概率分布,如图 1 所示。

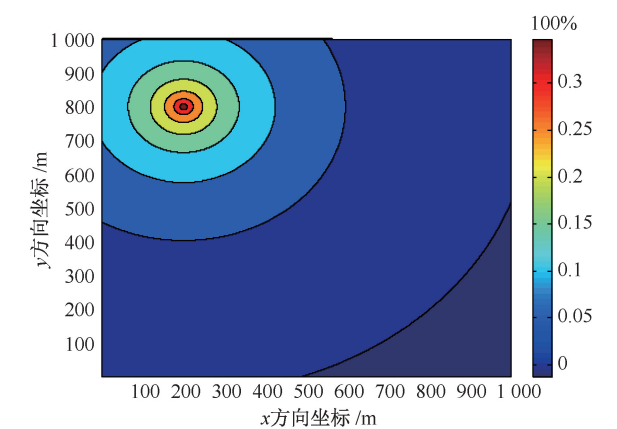


图 1 o_1 储罐爆炸的损伤概率分布/100%

Fig. 1 Damage probability distribution caused by explosion of each storage tank

根据式(1)得到 O_Q 中所有储罐同时爆炸时的区域损伤概率分布,如图 2 所示。

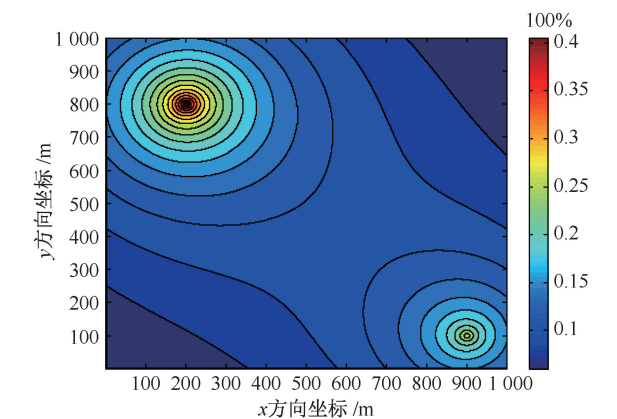


图 2 O_Q 中储罐同时爆炸时的区域损伤概率分布/100%

Fig. 2 Damage probability distribution caused by explosion of O_Q

根据图 2 显示进行第 1 次比较。图 2 是 o_1 和 o_2 同时爆炸得到的区域损伤概率分布,根据式(1)计算 $q_{o_1 \rightarrow o_3}$ 和 $q_{o_1 \rightarrow o_4}$,即为图 2 中 o_3 和 o_4 位置处的损伤概率。进一步得到 $Q_1 = \max \{q_{o_1 \rightarrow o_3} = 0.0987\%, q_{o_1 \rightarrow o_4} = 0.1190\%\} = 0.1190\%, \bar{O} = \bar{O} \cup o_4, O = O/o_4, n = 4$ 。这表明:在 O_Q 的爆炸作用下,储罐 o_4 的爆炸可能性更大,这时 $\bar{O} = \{o_1, o_2, o_4\}, O = \{o_3\}$ 。由于只剩下 o_3 一个储罐,因此,比较停止。 $Q_2 = Q_1 + (1 - Q_1)q_{o_1 \rightarrow o_3} = (0.1190 + (1 - 0.1190) \times 0.0987)\% = 0.2060\%$ 。对于后继 o_3 和 o_4 爆炸造成的区域损伤概率分布如图 3 所示。

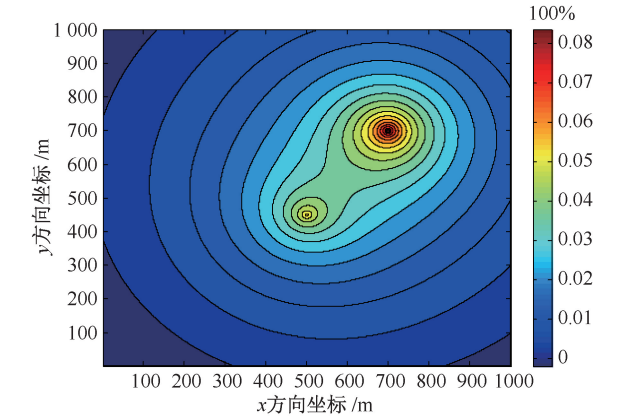


图 3 后继 o_3 和 o_4 爆炸造成的区域损伤概率分布
Fig. 3 Damage probability distribution caused by explosion of o_3 and o_4

得到该化工园区中由于 o_1 和 o_2 同时爆炸导致的多储罐起始爆炸的储罐爆炸超压损伤演化过程。最不利储罐爆炸顺序集合 $\bar{O} = [o_1, o_2, o_4, o_3]$,对应的损伤概率 $Q = [100\%, 100\%, 0.1190\%, 0.2060\%]$,所有储罐的损伤概率分布 $P_O = [P_{o_1}, P_{o_2}, P_{o_4}, P_{o_3}]$ 。根据式(2)和式(3)可得上述储罐爆炸损伤演化过程形成的区域损伤概率分布,如图 4a 所示。

图 4b 显示了以 o_2 为起始爆炸,炸储罐形成的储罐爆炸超压损伤演化过程的区域损伤概率分布,与图 4a 相比区别较大。在区域损伤概率数值方面,图 4a 中 o_1 和 o_2 先行同时爆炸,假设其必然发生的条件下影响 o_3 和 o_4 的结果。因此,后继 o_3 和 o_4 的区域损伤概率分布考虑了对这 2 个位置的损伤概率,其分布进一步被缩小,对比图 2 和图 3 的损伤概率缩小为 20%。因此,叠加图 2 和图 3 形成的图 4 中的区域损伤概率分布出现了较大变化。而图 4b 的爆炸顺序为 $\bar{O} = \{o_2, o_1, o_4, o_3\}$,以 o_2 为起始爆炸储罐,其余储罐依次爆炸。因此,以储罐 o_2 的区域损伤概率分布为主,后继储罐爆炸造成的区域损伤概率分布由于概率叠加逐渐减小。虽然图 4 在各储罐位置均有明显概率增高,但区域损伤概率分布和数值差别较大。总体上出现图 4 差异的原因在于:①初始爆炸时提供的能量不同;②储罐爆炸超压损伤演化过程不同。这也是造成化工园区储罐爆炸过程多样性的根本原因。按照上述算法和计算过程给出算法流程,如图 5 所示。

化工园区储罐爆炸过程是复杂的,在未发生实际爆炸过程之前得到的所有结论都是可能性,使用

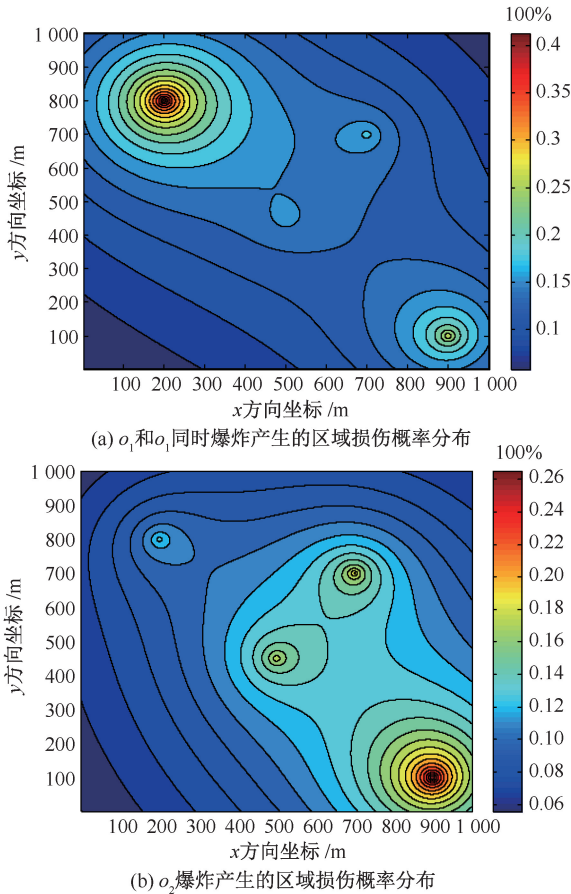


图4 储罐爆炸超压损伤演化过程形成的区域损伤概率分布

Fig. 4 Damage probability distribution caused by tank explosions-overpressure damage evolution

概率表示。这些储罐的爆炸可能是各自独立的、也可能是相互影响的。可能是同时爆炸,也可能是单独的依次爆炸。对于在爆炸之前只能得到发生概率或是严重程度,基于不同情况和不同顺序的储罐爆炸可能性,为化工园区设计、安全决策、消防应急措施等提供有利支持。

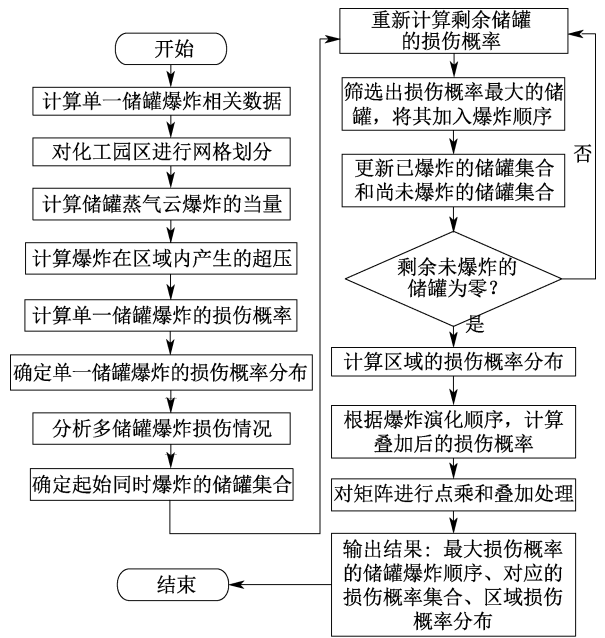


图5 算法流程

Fig. 5 Algorithm flow chart

5 结 论

1) 在前期研究基础上给出储罐爆炸损伤概率计算方法和单一储罐爆炸的损伤概率分布确定方法,并提出多储罐爆炸超压损伤演化过程分析方法。

2) 方法的核心在于将所有储罐分为起始爆炸储罐集合和后继爆炸储罐集合。给出起始爆炸储罐集合造成的损伤概率计算方法,得到最大损伤概率储罐爆炸顺序集合、对应的损伤概率集合和储罐损伤概率分布集合。从而实现多储罐同时爆炸的区域损伤概率分布计算。

3) 实例分析得到2个储罐作为同时爆炸的起始情况,计算结果表明:以储罐 o_2 的区域损伤概率分布为主,后继区域损伤概率分布由于概率叠加逐渐减小。这种差异原因在于初始爆炸能量不同和储罐爆炸超压损伤演化过程不同。

参 考 文 献

- [1] 王艳华,戴雪松,鲜鱼小东,等. 化学工业重大事故的多米诺效应分析[J]. 中国安全科学学报,2008,18(5): 129-136.
WANG Yanhua, DAI Xuesong, XIANYU Xiaodong, et al. Analysis on domino effect of major accidents in chemical industry[J]. China Safety Science Journal,2008,18(5): 129-136.
- [2] 段仁武,李展,颜海春,等. 火灾条件下开敞空间 LPG 储罐的 BLEVE 试验[J]. 爆炸与冲击,2023,43(12): 156-167.
DUAN Renwu, LI Zhan, YAN Haichun, et al. Experimental study of LPG storage tank BLEVE in unconfined space under fire[J]. Explosion and Shock Waves,2023,43(12): 156-167.
- [3] 赵景斌,王彦富,王涛,等. 基于蒙特卡洛模拟和动态事件树的储罐脆弱性评估[J]. 化工进展,2023,42(5):

2 751–2 759.

ZHAO Jingbin, WANG Yanfu, WANG Tao, et al. Vulnerability assessment of storage tanks based on Monte Carlo simulation and dynamic event tree[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(5): 2 751–2 759.

[4] 门金龙,亢方超,熊碧波,等. 基于优化 TNT 当量法的 LPG 储罐爆炸冲击波超压预测[J]. 消防科学与技术,2023, 42(5): 622–627.

MEN Jinlong, KANG Fangchao, XIONG Bibo, et al. Calculation of LPG storage tank explosion shock wave overpressure based on optimized TNT equivalent method[J]. Fire Science and Technology, 2023, 42(5): 622–627.

[5] 李敏,朱柏坚,谌庭苇,等. 近 20 年重特大化工生产事故统计分析 [J]. 中国安全科学学报, 2024, 34 (11): 43–50.

LI Min, ZHU Baiian, CHEN Tingwei, et al. Stalistical analysis of major chemical work safety accidents in recent 20 years[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(11): 43–50.

[6] 姜子建,周荣义,石云霄,等. 基于贝叶斯网络的危化品爆炸事故隐患关联与溯源分析 [J]. 中国安全科学学报, 2024, 34 (6): 173–180.

JIANG Zijian, ZHOU Rongyi, SHI Yunxiao, et al. Corelation and traceability analysis of hazardous chemical explosion accidents based on Bayesian network[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(6). 173–180.

[7] 游波,罗晓,施式亮,等. LNG 储罐泄漏扩散模拟分析 [J]. 中国安全科学学报, 2023, 33 (2): 125–131.

YOU Bo, LUO Xiao, SH Shiliang, et al. Simulation analysis of leakage and diffusion in LNG storage tank[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33 (2): 125–131.

[8] WANG Cheng, SONG Shixiang, GU Gongtian, et al. Fireball distribution characteristics and thermal radiation effects in the explosion of aviation kerosene storage tank [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 192: 707–718.

SONG Shixiang, WANG Cheng, QIAO Boyang, et al. Explosion damage effects of aviation kerosene storage tank under strong ignition [J]. Defence Technology, 2024, 37: 27–38.

[10] DINESH M, BO C O. Computational study of a high-pressure hydrogen storage tank explosion at different heights from the ground [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 50: 1 245–1 260.

LUO Weiye, BI Mingshu, ZHANG Yue, et al. Multi-factor coupling analysis and identification of tanks BLEVE [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 177: 880–890.

[12] JIAO Yu, CHEN Ran, WANG Kan, et al. Simulation of scenario characteristics of LPG tank explosion accident and its contribution to emergency planning: a case study [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2023, 83: DOI: 10. 1016/J. JLP. 2023. 105066.

WANG Hongde, CUI Tiejun. Superposition analysis of explosion risks in chemical industrial parks based on grid matrix method[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2012, 32(5): 1 143–1 150.

[14] 王洪德,崔铁军. 化工园区初始火灾爆炸引发连锁事故概率研究[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(4): 158–163.

WANG Hongde, CUI Tiejun. Probability of the chain-fire accidents originated from the explosion in chemical industry parks[J]. Journal of Safety and Environment, 2011, 11(4): 158–163.

[15] 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.

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(1/2/3): 14–30.

[17] 崔铁军,李莎莎. 基于储罐爆炸损伤演化的化工园区社会风险分布研究[J]. 灾害学, 2024, 39(3): 43–47.

CUI Tiejun, LI Shasha. Research on the social risk distribution of chemical industry parks based on tank explosion damage evolution[J]. Journal of Catastrophology, 2024, 39(3): 43–47.



作者简介： 李莎莎 （1988—）,女,辽宁盘锦人,博士,副教授,主要从事系统安全与安全管理等方面的研究。E-mail: lsslntu@ 163. com。