

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0202

乙烯储罐气体泄漏诱发蒸气云爆炸的数值模拟*

王秋红¹, 孙艺林¹, 李 鑫¹, 蒋军成^{2,3}, 张明广^{2,3}, 王刘兵¹

(1. 西安科技大学安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 南京工业大学安全科学与工程学院, 江苏 南京 210009;

3. 江苏省危险化学品本质安全与控制技术重点实验室, 江苏 南京 210009)

摘要: 储罐会因腐蚀或人为误操作等原因引发泄漏, 造成泄漏气体扩散或气云爆炸事故。为了揭示此种事故的发展过程及影响规律, 应用计算流体力学软件 FLACS, 研究了泄漏和环境风两个主要影响因素对乙烯气体扩散及爆炸的影响。结果表明: 气云扩散距离和体积随泄漏速率增加而增大; 当泄漏速率低于 6 kg/s 时, 不同泄漏方向上的气云扩散距离及体积相近; 当泄漏速率高于 6 kg/s 时, 气体泄漏扩散和气云形成过程因受到障碍物影响, 随阻塞率增大, 气云扩散距离减小, 气云体积增加。当泄漏方向垂直于储罐组中轴线, 泄漏速率为 18 kg/s 时, 气云扩散距离最大为 81.5 m; 当泄漏方向平行于储罐组中轴线, 泄漏速率为 24 kg/s 时, 气云体积最大达到 9 604 m³。爆炸波的冲击压力随泄漏速率升高而升高; 环境风会加快可燃气体稀释, 有效降低气云爆炸发生的概率, 降低爆炸强度, 达到爆炸压力峰值的时间更早, 可使高温在更短的时间内下降。泄漏速率为 24 kg/s 时, 与泄漏储罐紧邻的储罐表面上被冲击到的爆炸超压仅为 6.88 kPa, 但温度高达 2 384 K, 因此, 为避免事故发生时的二次灾害, 救援中对储罐组的冷却降温尤为重要。

关键词: FLACS; 泄漏扩散; 气云爆炸; 爆炸压力; 爆炸温度

中图分类号: O389; X932

国标学科代码: 13035; 62030

文献标志码: A

Numerical simulation on gas dispersions and vapor cloud explosions induced by gas released from an ethylene storage tank

WANG QiuHong¹, SUN Yilin¹, LI Xin¹, JIANG Juncheng^{2,3}, ZHANG Mingguang^{2,3}, WANG Liubing¹

(1. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology,

Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. College of Safety Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, Jiangsu, China;

3. Jiangsu Key Laboratory of Hazardous Chemicals Safety and Control, Nanjing 210009, Jiangsu, China)

Abstract: Storage tanks may leak due to corrosion or human error, resulting in released gas dispersion and vapor cloud explosion accidents. The computational fluid dynamics software FLACS was employed to reveal the development processes of explosion accidents and estimate their influences on the environment, focusing on the effect of the leakage and environmental wind as two dominant factors on the ethylene gas dispersion and gas explosion. The results show that gas cloud dispersion distance and gas cloud volume increase with the increasing leak rate. When the leak rate is less than 6 kg/s, the gas cloud dispersion distance and gas cloud volume are similar in different leak directions. When the leak rate is greater than 6 kg/s, the dispersion of released gas and formation of gas cloud are influenced by the obstacles. The gas cloud dispersion distance decreases and the gas cloud volume increases as the blockage rate of the geometric obstacles increases. When the leak direction is perpendicular to the central axis of the storage tank group and the leak rate is 18 kg/s, the gas cloud attains its maximum

* 收稿日期: 2020-01-14; 修回日期: 2020-09-11

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0800100); 国家自然科学基金(51504190)

第一作者: 王秋红(1984—), 女, 博士, 副教授, wangqh@xust.edu.cn

通信作者: 蒋军成(1967—), 男, 博士, 教授, jcjiang@njtech.edu.cn

dispersion distance of 81.5 m. When the leak direction is parallel to the central axis of the storage tank group and the leak rate is 24 kg/s, the gas cloud reaches its maximum volume of 9 604 m³. The impact pressure of the explosion wave increases with the increase in the leak rate. Under the influence of the environmental wind, the dilution of combustible gas is prominently accelerated and the combustible gas cloud volume is substantially lessened. Meanwhile, the probability of ignition of gas clouds and the intensity of the vapor cloud explosion are effectively reduced. Moreover, the time corresponding to achieve the peak explosion pressure is earlier and the decrease of the temperature is quicker than their counterparts under the condition without the environmental wind. When the leak rate is 24 kg/s, the explosion overpressure around the leakage location on the surface of the tank is only 6.88 kPa, but the temperature is 2 384 K. Therefore, when the explosion accident occurs, cooling the storage tanks is crucial in rescue in order to avoid the secondary disaster.

Keywords: FLACS; leakage and dispersion; gas cloud explosion; explosion pressure; explosion temperature

大型储罐作为化工生产环节中的重要组成部分,因占地面积大,收发作业频繁,设备检维修频次多等特点,常常会因不可预知的因素,导致物料泄漏^[1]。若泄漏物质具有可燃性,易引发生火灾、爆炸事故,造成严重的灾害后果^[1]。目前因气体泄漏导致的爆炸事故仍时有发生,例如:2014年台湾地理管线发生丙烯泄漏,导致严重的爆炸事故发生^[2];2018年神华宁煤烯烃二分公司罐区连接管线发生乙烯泄漏着火事故。研究大型储罐气体泄漏扩散和气云爆炸过程,对于认识事故本质和减轻事故后果具有重要意义。传统研究主要是依托现场试验建立理论模型^[3-4],而基于理论模型开展流体力学数值模拟计算,因具有交互友好、成本低、可重复性等诸多优点,被众多学者应用以解决工程问题。例如 Fluent^[5-7]、FDS^[8-9]和 FLACS 等计算流体力学 (computational fluid mechanics, CFD) 软件在事故后果预测的研究中有着广泛的应用。

其中,FLACS 软件是一款可以用于预测气体扩散和气云爆炸事故后果的专业软件,采用分布式多孔结构的思想在相对粗糙的网格上表现复杂几何形状是 FLACS 相比其他 CFD 软件的重要优势之一^[10],这种方法以亚网格模型呈现了局部的阻塞程度和受限情况,从而通过局部阻塞率影响模拟计算中的流体流动和湍流产生。该软件在四十余年发展过程中不断完善,其模拟结果的可靠性被诸多学者证实,例如: Middha 等^[11-13]、Hansen 等^[14]基于 BAM 和 NASA 液化氢气 (liquefied hydrogen, LH₂) 扩散实验, Maplin Sands 和 Burro 液化天然气 (liquefied natural gas, LNG) 扩散实验中的大量基础研究数据,证实了 FLACS 软件模拟计算的可靠性; Schleder 等^[15]和 Fiates 等^[16]使用 FLACS 软件分别验证了 H₂、CO₂ 等气体扩散过程; Wang 等^[17]和文虎等^[18]利用 FLACS 软件验证了天然气爆炸火焰传播过程和相关变化规律。此外,利用 FLACS 软件进行大尺度条件下事故后果预测研究也较广泛,例如: Li 等^[19-21]和 Huang 等^[22]利用该软件预测了安全间距和防爆墙措施影响下海上船舶 LNG 扩散及气云爆炸后果;王志寰等^[23]预测了大型 LNG 接收站泄漏事故产生的灾害效应。FLACS 软件对于事故预测和安全措施设计有重要作用,研究结论对工业场区的安全生产防护有一定的指导意义。

目前对气体泄漏扩散及气云爆炸的研究大多集中在 CO₂、H₂、LNG 和 LPG (liquefied petroleum gas),但在化工生产中,因液化烃泄漏引起的火灾、爆炸事故占比较大^[1],关于此方面的研究较少。液化烃作为加工和储存的重要物料,因其蒸气压大于大多数液体的蒸气压,多数国家将此类物质列为最危险等级,并专项制定了储存和运输规范。其中,乙烯作为最常见的液化烃类物质,它的爆炸极限 (2.8%~36.0%) 相比其他液化烃的爆炸极限范围偏大,且乙烯气体密度相比其他液化烃气体密度偏小,在相同泄漏速率和泄漏面积下,泄漏口处乙烯气体流速大,易于形成可燃气云^[24];同时,乙烯相比其他液化烃的层流燃烧速度较高,气云被引燃后爆炸超压更高^[24-25],因此乙烯发生泄漏扩散和爆炸事故的危险性相比其他烃类更高,需进行重点研究。在实际事故中,气云往往呈现形状不规则和浓度不均匀的特点^[26],但是多数研究仅集中在储罐区气云扩散或爆炸危险性,对两者的综合性研究较少。因此,针对乙烯泄漏扩散后形成不规则气云的爆炸过程进行研究,以期揭示乙烯储罐区气体泄漏诱发蒸气云爆炸规律。

1 模型及参数设计

1.1 几何模型与网格划分

以西安市某能源化工厂中乙烯储罐组为研究对象, 罐区中有 8 台球制储罐 (编号 A~H) 和 2 间阀室。每个球罐体积为 $2\,000\text{ m}^3$ (球罐直径 15.7 m , 底部距地面 5.0 m), 球罐与球罐之间布置有扶梯和管道, 计算区域为整个乙烯储罐区, (坐标为: $X, -6\sim 106\text{ m}$; $Y, -6\sim 149\text{ m}$; $Z, 0\sim 40\text{ m}$), 模型如图 1 所示。

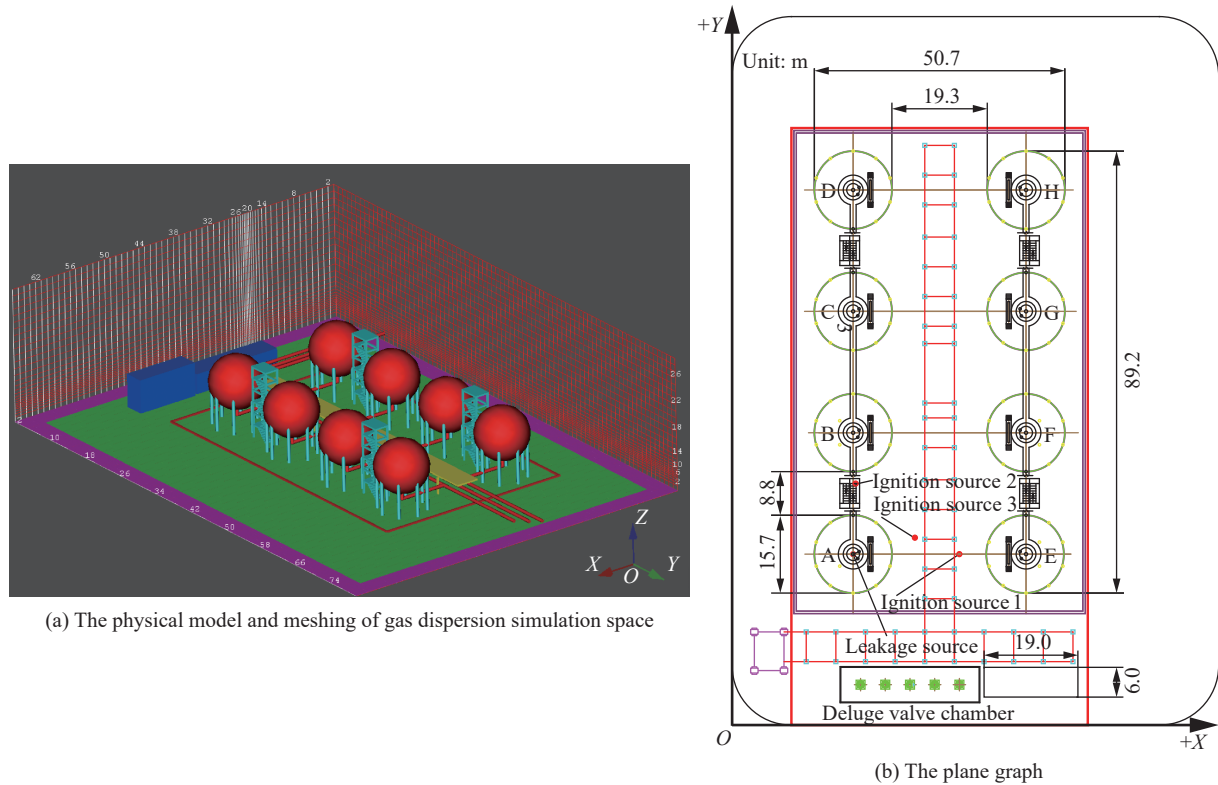


图 1 乙烯储罐区模型

Fig. 1 The model of the ethylene storage tank farm

对于乙烯气体泄漏扩散过程的数值模拟, 选择适用于亚声速流体流入及流出的 Nozzle 边界条件; 对于气体爆炸过程的数值模拟, 选择适用于爆炸场景的 Euler 边界条件。对于计算区域的网格划分, 网格尺寸过大或太小都会导致模拟结果出错或有偏差, 如求解器不收敛或泄漏气体被过度稀释。根据 FLACS 软件中网格划分的一般要求, 模拟计算中网格尺寸精度要达到有广泛实验验证的 $1.0\sim 1.5\text{ m}$ 范围内^[10], 数值模拟中设置网格尺寸为 1.333 m , 并在泄漏源附近进行网格加密, 以确保泄漏气体在泄漏初始阶段不会被过度稀释。

1.2 场景设置

影响气体扩散过程的主要因素包括泄漏速率、泄漏方向、泄漏位置、气体组成、环境风速和风向^[21]。调查该储罐区中储罐使用情况, 发现随储罐使用年限的增加, 储罐罐底钢板是最容易受到腐蚀而发生泄漏的地方, 因此泄漏位置设置在储罐 A 的罐底底部, 坐标为 $(24.5\text{ m}, 34.5\text{ m}, 4.5\text{ m})$, 平面位置如图 1(b) 所示。泄漏方向设置为水平 (+X、+Y) 和垂直于地面 (-Z) 等 3 种方向; 设置泄漏速率分别为 6 、 12 、 18 和 24 kg/s , 持续时间为 100 s 。统计得到该储罐区所在地气候情况, 掌握储罐区常年风向多为南风 (+Y)、西风 (+X) 和西南风 (+XY), 2019 年中无风天数为 188 d (风速 0 m/s), $3\sim 4$ 级风天数为 94 d (风速 $3.4\sim 7.9\text{ m/s}$)。根据全年环境风的特征, 考虑设定两种环境风速情况: 一种采用无风状态, 一种采用 $3\sim 4$ 级风的平均风速 5.65 m/s 。

2 乙烯储罐区气体泄漏扩散过程

2.1 气体泄漏扩散评价参数

最远扩散距离 (D_{\max}) 和可燃气体云体积 (V_{flam} , V_{Q9}) 是用来定量评价气体泄漏危险性的重要参数, 这2个参数是厂区事故应急管理和安全设计的核心参考依据。 D_{\max} 定义为可燃气体云扩散最远位置到泄漏点的距离, 单位为 m。有2种应用较广泛的可燃气体云体积预测评价参数: 一种是 V_{flam} , 被定义为爆炸极限范围内的可燃气体云体积, 单位为 m^3 ; 另外一种是 V_{Q9} , 被定义为真实气云等效化学计量比的均匀气云体积, 单位为 m^3 ^[27]。 V_{flam} 和 V_{Q9} 可分别由下式计算得出:

$$V_{\text{flam}} = \sum V \quad (1)$$

$$V_{\text{Q9}} = \sum V \times S_1 \times E / (S_1 \times E)_{\text{stoich}} \quad (2)$$

式中: V 为爆炸极限范围内的可燃气体体积, S_1 为层流燃烧速度, E 为燃料在空气中恒压燃烧所产生的体积膨胀, 下标 stoich 代表了 S_1 和 E 在化学当量比浓度下的最大值。在这两者中, V_{Q9} 是一种非均匀蒸气云向更小的化学计量蒸气云的等效缩放, 综合考虑了可燃气体的火焰传播速度和体积膨胀, 在通风良好的情况下, V_{Q9} 能够给出与原始蒸气云相近的气体爆炸超压^[10]。以乙烯泄漏速率为 12 kg/s、泄漏方向为 +Y 向的工况为例, 该工况下气体扩散浓度分布如图 2(a) 所示, 图例中 F_v 为可燃气体在空气中的体积分数; 此工况下乙烯可燃气体云的 V_{flam} 和 V_{Q9} 两种评价参数随时间的变化曲线, 如图 2(b) 所示。

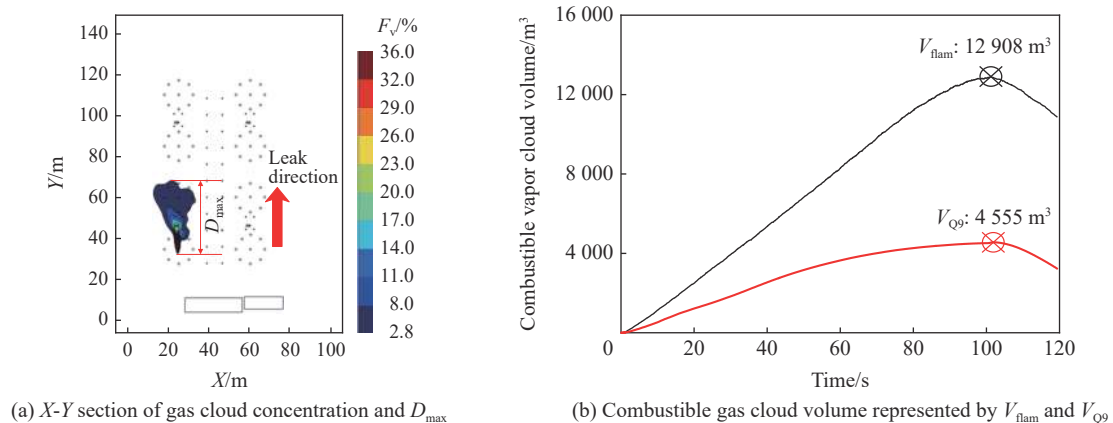


图2 气体泄漏扩散危险性评价参数

Fig. 2 Parameters for evaluation of the dispersion of released gas

从图 2(a) 可以看出乙烯气体泄漏扩散的浓度分布和 D_{\max} 值的选取。从图 2(b) 可以分析得到, 在相同泄漏工况下, V_{flam} 和 V_{Q9} 随时间变化的趋势相似, 峰值分别为 12 908 和 4 555 m^3 , V_{Q9} 峰值仅为 V_{flam} 峰值的 35.3%。当用 V_{flam} 表征可燃气体云体积时, 大部分气云的实际浓度低于化学当量浓度, 若基于 V_{flam} 定义化学当量比的气云, 会由于较大的气云体积, 高估气云爆炸压力, 导致气体泄漏扩散和气云爆炸危险性预测过于保守。而根据定义, V_{Q9} 则能给出与真实气云相当的爆炸超压, 能够合理预测事故后果。因此, 选择 V_{Q9} 作为气体泄漏扩散的危险性评价参数。从图 2(b) 中还可以得到 V_{Q9} 在 100 s 时刻泄漏停止后的数秒内达到峰值。这是因为在泄漏点附近射流核^[28]的气体浓度远高于爆炸上限, 当泄漏停止后, 初始动量使该部分气体继续扩散, 被大气不断稀释到爆炸极限范围内, 因而 V_{Q9} 会在泄漏停止后继续增大; 亦会导致当泄漏速率增大, 加快泄漏停止后的气云扩散, 更快达到气云体积峰值。

2.2 气体泄漏条件对乙烯泄漏气云扩散的影响

2.2.1 泄漏速率与方向对乙烯泄漏气云扩散距离的影响

针对 4 种泄漏速率和 3 种泄漏方向组合而成的 12 种工况进行气体泄漏扩散模拟, 不同泄漏方向上

泄漏速率与气云 D_{max} 的关系曲线如图 3 所示。其中+X 泄漏方向, 24 kg/s 泄漏速率工况下, 泄漏气云扩散到计算区域以外, 未绘制在图 3 中。

从图 3 可以看出, D_{max} 随气体泄漏速率的升高而增大。相同泄漏速率条件下, 泄漏方向对 D_{max} 的影响较大, 在+X 泄漏方向上, 6~18 kg/s 泄漏速率的范围内, D_{max} 最大值为 81.50 m。在+Y、-Z 两个泄漏方向上, 6~24 kg/s 泄漏速率范围内, D_{max} 最大值分别为 51.00 和 75.75 m。当泄漏方向水平为+X 和+Y 时, 不同泄漏速率下 D_{max} 随时间变化曲线如图 4 所示, 对应的拟合方程如表 1 所示, 拟合方程中 y 代表 D_{max} , 单位 m, x 代表泄漏持续时间, 单位 s。

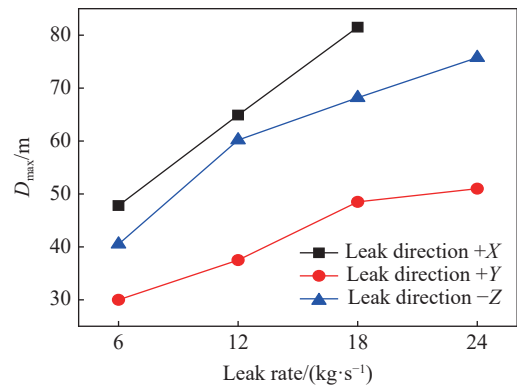
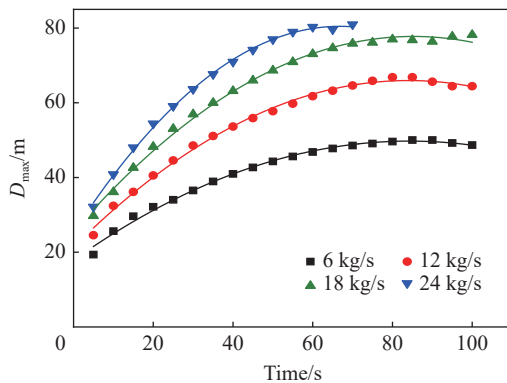
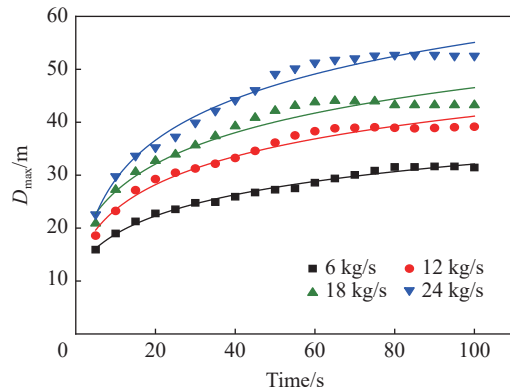


图 3 不同泄漏方向上泄漏速率与气云 D_{max} 的关系曲线
Fig. 3 Relation curves between various leak rates and D_{max} along different leak directions



(a) Leak in the +X direction (perpendicular to the arrangement of tanks)



(b) Leak in the +Y direction (parallel to the arrangement of tanks)

图 4 不同泄漏速率下 D_{max} 随时间变化曲线

Fig. 4 Variation of D_{max} with time under different leak rates

表 1 不同泄漏速率下 D_{max} 和时间的拟合方程

Table 1 Fitting equations of D_{max} and time under different leak rates

泄漏速率/(kg·s ⁻¹)	+X 泄漏方向: $y=c+ax+bx^2$				+Y 泄漏方向: $y=b \ln(x-a)$		
	c	a	b	R^2	a	b	R^2
6	17.874	0.756	-0.004	0.994	-5.413	6.894	0.990
12	21.351	1.062	-0.006	0.996	-4.179	8.856	0.968
18	25.484	1.226	-0.007	0.996	-4.731	10.006	0.931
24	25.321	1.651	-0.012	0.998	-1.564	11.920	0.975

从图 4 可知, 在+X 和+Y 两个泄漏方向上, 泄漏初期 D_{max} 增长相对保持一致, D_{max} 的增长速率呈现先增大后减小的趋势, 约在 70 s 后逐渐趋于稳定。这是因为泄漏初期泄漏产生的射流气体动量较大, 而随着气云不断扩散, 动量迅速衰减。在+Y 泄漏方向上存在多个障碍物(储罐和扶梯等)的限制, 障碍物阻塞率较高, 对气体扩散产生了明显的阻碍作用, 射流气体不断碰撞到障碍物后, 动能有较大程度地损失, 因此 D_{max} 在 5 s 时的增长速率显著降低, 相比+X 泄漏方向, D_{max} 在+Y 泄漏方向上较小。综合图 3 和图 4, 因 -Z 泄漏方向上的射流气体在碰撞地面后损失了部分动能, -Z 泄漏方向上的 D_{max} 小于+X 泄漏方向上的 D_{max} 。结合上述研究, 可以发现在不同的泄漏方向上, 障碍物是影响 D_{max} 的主要因素, 随障碍物阻塞

率的增大,射流气体的动量损失越大,气云 D_{\max} 越小。

如表1所示,对 D_{\max} 随时间变化的散点进行非线性拟合,发现+X泄漏方向上的 D_{\max} 随时间变化曲线符合二次函数关系,+Y泄漏方向上的 D_{\max} 随时间变化曲线符合对数函数关系。通过现场监测和诊断技术,预先得到泄漏源的泄漏孔径,并结合下式可以计算得到储罐泄漏速率:

$$\dot{m} = \rho u A \quad (3)$$

式中: \dot{m} 为泄漏速率, ρ 为气体密度, u 为泄漏口处的气体流动速率, A 为泄漏口的面积。对于高压储罐, u 可近似取亚音速流动速率, 300 m/s。结合现场监测报警系统推知泄漏持续时间,可以通过表1预测 D_{\max} 的动态变化,从而为泄漏事故发生后设置隔离带等应急处置策略提供参考。

2.2.2 泄漏速率与方向对乙烯泄漏气云体积的影响

针对上述12种工况,分析不同泄漏方向上气体泄漏速率对 V_{Q9} 的影响,如图5所示。

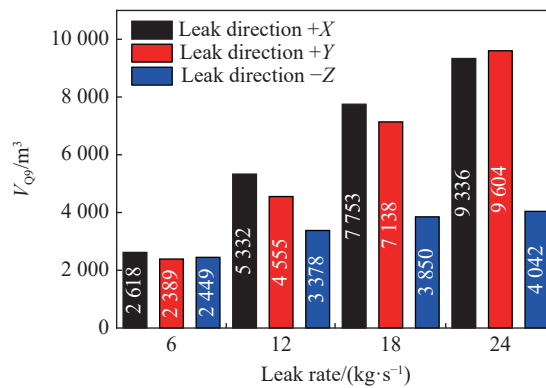


图5 不同泄漏速率和泄漏方向上的 V_{Q9}

Fig. 5 V_{Q9} at various leak rates and leak directions

从图5可知,3个泄漏方向上 V_{Q9} 都随泄漏速率的增加有不同程度增大,其中-Z泄漏方向上的 V_{Q9} 增幅明显偏低,这是因为泄漏方向垂直向下时,射流气体受到地面阻碍向四周扩散, V_{Q9} 的覆盖范围增大,气云边界被周围环境空气的稀释速率增大, V_{Q9} 整体较小。

随着泄漏速率增加,在不同泄漏方向上 V_{Q9} 的增大呈现不同的变化规律。在较小泄漏速率为6 kg/s时,3个泄漏方向上 V_{Q9} 较接近,这是因为环境中大气对泄漏气体的稀释占主导作用,不同泄漏方向上 V_{Q9} 差异较小。在6~18 kg/s泄漏速率范围内,沿+Y泄漏方向上存在数个2 000 m³的大型储罐,阻碍了气体扩散和气云形成,+X泄漏方向上的 V_{Q9} 大于+Y泄漏方向上的 V_{Q9} ;但是随着泄漏速率进一步升高至24 kg/s,使得泄漏气云覆盖范围更广,障碍物降低了气体流速,所以气云被大气稀释的速率更慢; D_{\max} 减小的同时, V_{Q9} 增大,这一现象随着泄漏速率的升高,障碍物的阻塞作用会更明显,且因+X泄漏方向上部分气云扩散到监测区域以外,+Y泄漏方向上的 V_{Q9} 比+X泄漏方向上的 V_{Q9} 更大。

2.3 环境风条件对乙烯泄漏气云扩散的影响

2.3.1 环境风对乙烯泄漏气云扩散距离的影响

针对无风和恒定风速5.65 m/s两种风速,西风(+X)、南风(+Y)和西南风(+XY)等3种风向,6、12、18和24 kg/s等4种不同泄漏速率组合设计的24种工况进行气体泄漏扩散模拟。不同泄漏方向上,泄漏速率与气云 D_{\max} 的关系曲线如图6所示。

从图6可知,环境风能够促进气云扩散,环境风向与水平泄漏方向一致为+X或+Y时,气云 D_{\max} 分别为80.65和71.34 m。+X泄漏方向时,气云在有风条件下 D_{\max} 均小于无风条件;+Y泄漏方向时,+Y风向增大了气云 D_{\max} ,其余风向则减小了气云 D_{\max} ; -Z泄漏方向时,气云 D_{\max} 整体增大。上述变化是因为:在+Y泄漏方向上阻塞率较高,气云扩散受限,+Y风向促进了气云扩散;在+X泄漏方向上阻塞率较低,风加速了气云扩散,大量气云体积分数降低到爆炸下限以下,因此气云 D_{\max} 减小;-Z泄漏方向时,在无风

条件下,射流气体碰撞地面后向周围均匀扩散,但环境风使得气云向单一方向扩散,且扩散更集中,因此 D_{\max} 比无风条件下更大,在泄漏速率为 24 kg/s 时,在环境风速 5.65 m/s 的影响下,气云 D_{\max} 从 75.75 m 增大到 108.00 m ,增长幅度达到 43% 。

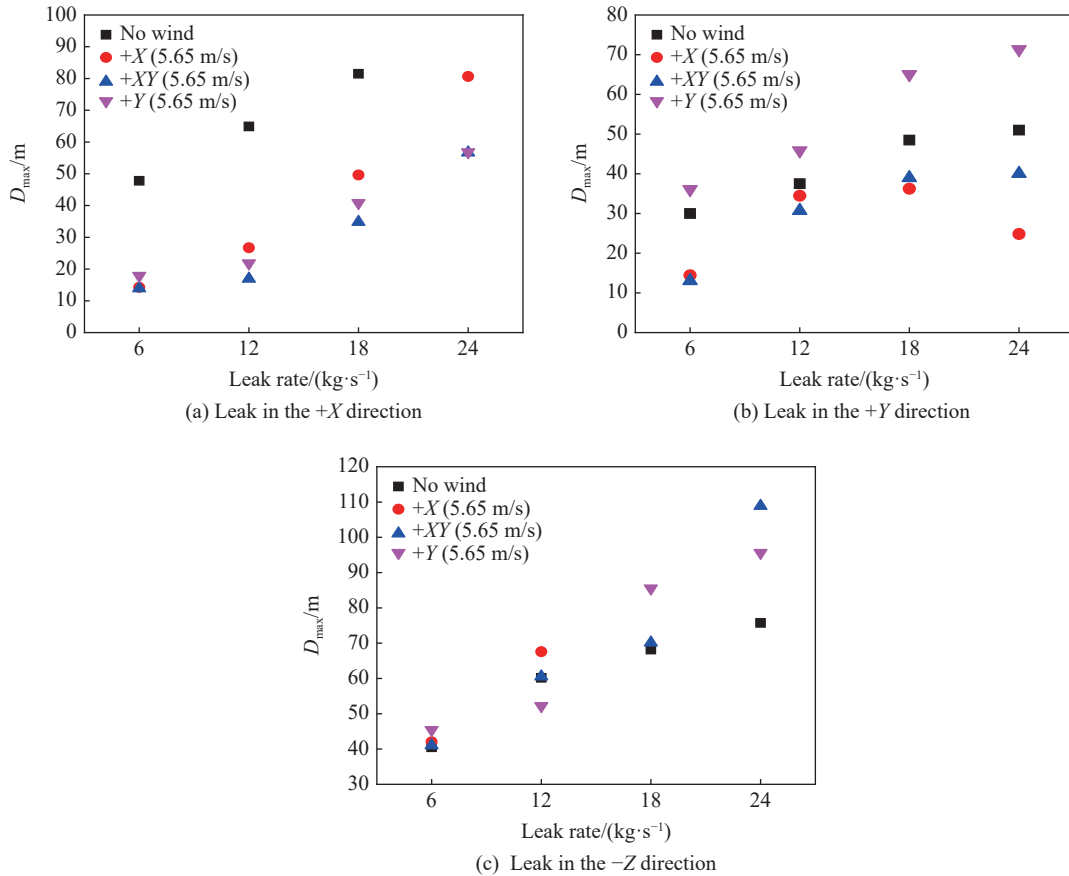


图 6 不同风速和风向向下可燃气云扩散最远位置到泄漏点的距离随泄漏速率的变化

Fig. 6 Distance from the farthest position of combustible gas cloud dispersion to its leakage source varying with leak rate at different wind speeds and directions

2.3.2 环境风对乙烯泄漏气云体积的影响

以+Y方向泄漏为例, V_{Q9} 随不同泄漏速率和风向变化的趋势如图 7 所示。

从图 7 可知,在无风条件下,泄漏速率分别为 6 、 12 、 18 和 24 kg/s 时,乙烯泄漏形成的 V_{Q9} 分别为 $2\,388$ 、 $4\,555$ 、 $7\,138$ 和 $9\,604 \text{ m}^3$ 。在有风条件下,环境风对乙烯泄漏扩散形成的气云有着较大的影响,会促进气云稀释,同时大幅度减小 V_{Q9} ,其结果与文献 [29] 中的结论一致。此外,当风向与泄漏方向同为+Y时,不同泄漏速率下 V_{Q9} 分别为 258 、 938 、 $1\,619$ 和 $2\,745 \text{ m}^3$,可以发现风向与泄漏方向相同时, V_{Q9} 明显高于其他两种风向条件,这是因为风向与泄漏方向不同时,除了泄漏射流的初始动量驱动气体扩散外,风会带来不同方向的动量加快其垂直泄漏方向上的气体扩散,使部分气云浓度降低到爆炸下限以下。

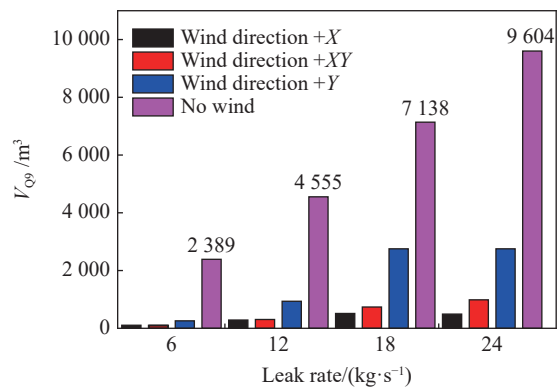


图 7 不同风向和泄漏速率条件下的 V_{Q9}

Fig. 7 V_{Q9} at different wind directions and leak rates

3 乙烯蒸气云爆炸过程

储罐区内常见的点火源主要有以下 5 种, 明火、静电火花、电气火花、金属撞击产生火花和雷击火花^[1]。依据罐区内常见的火源类型, 在储罐区设置 3 组点火源, 分别为点火源 1: 静电火花, 坐标为 (46.0 m, 34.5 m, 1.4 m); 点火源 2: 金属碰撞产生火花, 坐标为 (25.0 m, 48.5 m, 2.6 m); 点火源 3: 明火, 坐标为 (37.0 m, 37.8 m, 0.4 m), 点火源平面位置见图 1(b)。

对泄漏后的扩散气云进行爆炸模拟。在上述设计的 48 种气体泄漏工况中, 有 22 种工况点火源位置处于气云爆炸极限范围内, 乙烯气云发生了爆炸, 其中无风条件下的 12 种工况全部发生爆炸, 具体工况如表 2 所示, 有风条件下发生爆炸的 10 种工况如表 3 所示。以无风条件下泄漏速率 12 kg/s 为例, 说明泄漏后气云发生爆炸的超压分布及温度分布规律, 如图 8 所示。

表 2 无风条件下的爆炸工况

Table 2 Explosion cases without wind

泄漏方向	泄漏速率/(kg·s ⁻¹)	点火位置
+X	6、12、18、24	点火源1
+Y	6、12、18、24	点火源2
-Z	6、12、18、24	点火源3

表 3 有风条件下的爆炸工况

Table 3 Explosion cases with wind

泄漏方向	泄漏速率/(kg·s ⁻¹)	环境风向	点火位置
+X	24	西风 (+X)	点火源1
+Y	6、12、18、24	南风 (+Y)	点火源2
-Z	18、24	西风 (+X)	点火源3
-Z	12、18、24	西南风 (+XY)	点火源3

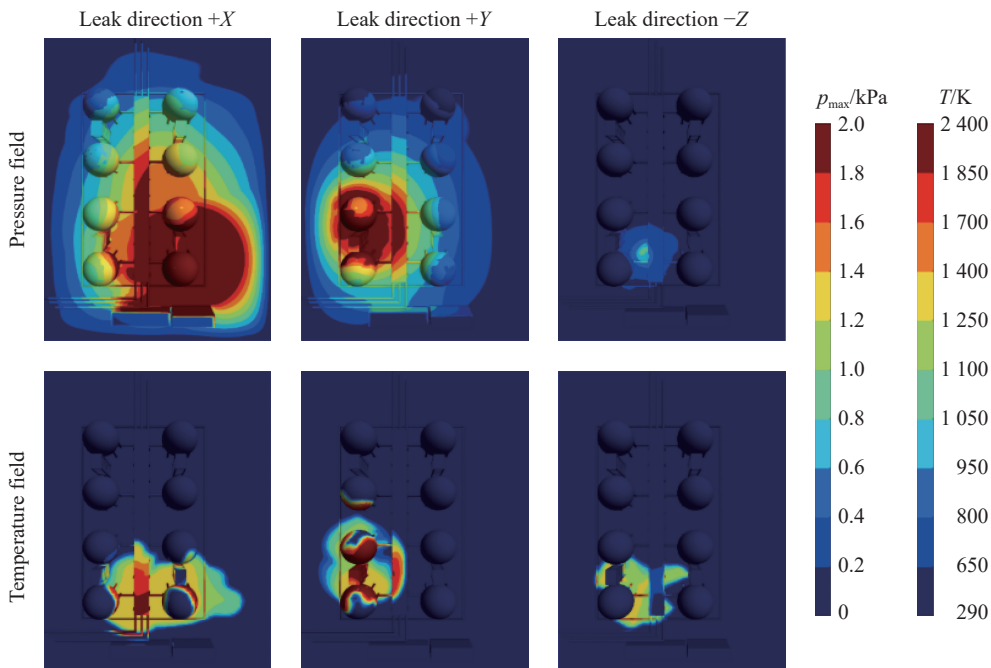


图 8 无风条件下乙烯气云爆炸压力场与温度场分布

Fig. 8 Pressure and temperature fields of ethylene vapor cloud explosion without wind

从图 8 可以看出, 爆炸压力波及范围内的大部分区域压力较小, 仅在点火源附近爆炸压力较大; 爆炸高温的影响范围相比压力波及范围偏小, 但大部分区域的温度均达到了 1 400 K 以上。相比于 +X、+Y 泄漏方向, -Z 泄漏方向上的爆炸强度较弱, 爆炸压力场及温度场影响范围最小, 这是因为泄漏所产生的可燃气体云大部分区域气体浓度较低, 且 V_{O_9} 较小。

3.1 气体泄漏条件对乙烯气云爆炸的影响

增大几何障碍物阻塞率和气云体积都会增强气云爆炸的危险性^[24], 在该模型中 +Y 泄漏方向上障碍物阻塞率最高, 气云体积相对较大。以 +Y 泄漏方向, 在不同泄漏速率、无风条件下所形成的气云发生爆炸为例, 说明储罐 A 和 B 表面的超压及温度变化, 如图 9~10 所示。

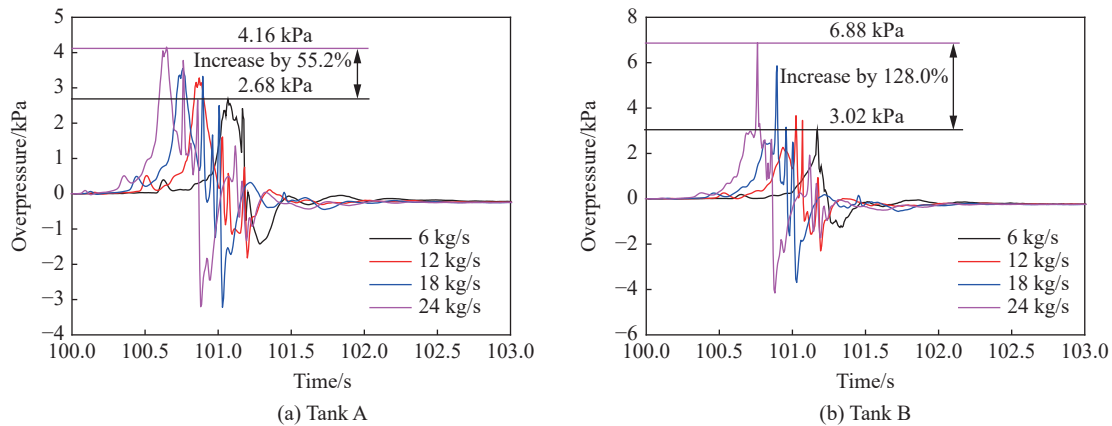


图 9 不同泄漏速率下储罐表面爆炸超压随时间的变化

Fig. 9 Explosion overpressure as a function of time on the surfaces of storage tanks at different leak rates

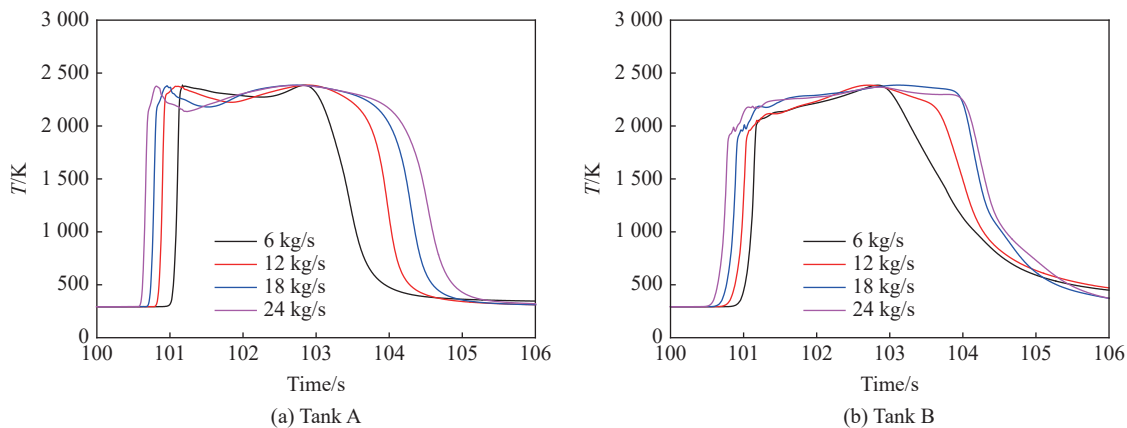


图 10 不同泄漏速率下储罐表面温度随时间的变化

Fig. 10 Temperature as a function of time on the surfaces of storage tanks at different leak rates

从图 9~10 可以看出, 泄漏速率分别为 6、12、18 和 24 kg/s 时, 储罐 A 表面最大爆炸超压 p_{\max} 分别为 2.68、3.28、3.55 和 4.16 kPa, 达到 p_{\max} 的时间 t_p 分别为 101.067 2、100.870 6、100.758 6 和 100.647 1 s; 同时, 储罐 B 表面 p_{\max} 分别为 3.03、3.66、5.86 和 6.88 kPa, t_p 分别为 101.170 7、101.024 8、100.894 9 和 100.761 4 s。结合气体泄漏扩散结果, 可以观察到 p_{\max} 与泄漏速率呈正相关关系, 主要是因为泄漏形成的气云体积增大, 在气云被引燃后爆炸超压增强, 且 t_p 越快^[30]。储罐表面的最高温度 T_{\max} 在各工况下均达到 2 300 K 以上, 受气体泄漏速率的变化影响较小, 但达到 T_{\max} 的时间 t_t 随泄漏速率升高而提前。但是, 气体泄漏速率越高, 高温对储罐的影响时间越长, 可以看到较高泄漏速率会产生体积更大的可燃气体云, 导致爆炸强度更大, 燃烧反应时间更长。

3.2 环境风条件对乙烯气云爆炸的影响

以+Y泄漏方向为例,有风及无风条件下泄漏气云发生爆炸时储罐 A 和 B 表面的超压及温度变化,如表 4~5 所示。

表 4 不同条件下储罐表面的最大爆炸超压以及达到最大爆炸超压的时间

Table 4 The maximum explosion overpressure on the tank surface and the time required to reach it under different conditions

泄漏速率/(kg·s ⁻¹)	储罐A表面				储罐B表面			
	无风条件		有风条件		无风条件		有风条件	
	p_{\max} /kPa	t_p /s	p_{\max} /kPa	t_p /s	p_{\max} /kPa	t_p /s	p_{\max} /kPa	t_p /s
6	2.68	101.067 2	0.03	99.997 8	3.02	101.170 7	0.02	99.997 8
12	3.28	100.870 6	1.46	100.617 6	3.66	101.024 8	1.14	100.603 3
18	3.55	100.758 6	2.46	100.555 8	5.86	100.894 6	2.98	100.584 3
24	4.16	100.647 1	4.03	100.539 1	6.88	100.761 4	3.50	100.545 4

表 5 不同条件下储罐表面的最高温度以及达到最高所需的时间

Table 5 The maximum temperature on the tank surface and the time required to reach it under different conditions

泄漏速率/(kg·s ⁻¹)	储罐A表面				储罐B表面			
	无风条件		有风条件		无风条件		有风条件	
	T_{\max} /K	t_f /s	T_{\max} /K	t_f /s	T_{\max} /K	t_f /s	T_{\max} /K	t_f /s
6	2 384	102.838 5	2 050	102.075 5	2 385	102.831 4	1 002	103.030 2
12	2 386	102.884 6	2 374	101.530 9	2 386	102.706 2	2 096	100.781 8
18	2 386	102.736 1	2 375	101.012 5	2 386	103.119 7	2 364	100.834 3
24	2 384	102.730 6	2 384	102.101 7	2 366	102.861 5	2 336	101.258 3

从表 4 中可以看出,有风条件下的 p_{\max} 均小于无风条件下的 p_{\max} ,且有风条件下的 t_p 更短。当泄漏速率分别为 6、12、18 和 24 kg/s 时,相比无风条件,有风条件下储罐 A 表面 p_{\max} 分别降低了 2.65、1.82、1.09 和 0.13 kPa,降幅分别达到 99%、55%、31% 和 3%;储罐 B 表面 p_{\max} 分别降低了 3.00、2.52、2.88 和 3.38 kPa,降幅分别达到 99%、69%、49% 和 49%,发现环境风的存在使得气云爆炸对障碍物的超压作用被显著减缓。

从表 5 中可以看出,相比无风条件下的储罐表面 T_{\max} ,有风条件下储罐表面 T_{\max} 会在更短的时间内下降,高温对储罐的影响时间缩短。结合图 10 可以看出,4 种泄漏速率下,储罐 A 表面爆炸温度高于 2 000 K 以上的持续时间在无风条件下分别为 2.11、2.83、3.22 和 3.50 s,有风条件下分别为 0.52、1.99、2.47 和 2.74 s,环境风使高温持续时间明显缩短。上述现象是因为在环境风的影响下,环境中的空气流动增强了湍流强度,火焰湍流燃烧反应速率更高^[24],同时又因环境风加速了大气稀释可燃气体的速率,使得大量可燃气云的体积分数降低到爆炸下限以下,从而降低了可燃气云体积,气云完全燃烧时间更短。

3.3 气云爆炸强度评估

爆炸超压是衡量爆炸强度的重要参数,爆炸超压的强弱能直观显示气云爆炸对各类建筑实物的破坏程度^[24],如表 6 所示。

经上述研究可得知,在 6、12、18 和 24 kg/s 泄漏速率下,+X 泄漏方向上气云爆炸超压分别为 1.63、6.36、5.85 和 5.99 kPa,+Y 泄漏方向上气云爆炸超压分别为 3.02、3.66、5.86 和 6.88 kPa。结合表 6,可以得知,气云爆炸的超压在 1.63~6.88 kPa 范围内,对各类型建筑物仅能造成轻度损坏及轻微损坏。但需要注意的是,由于建模精度的影响,实际储罐组的建筑结构会更加复杂,从而导致障碍物在空间内占比

更大, 当爆炸发生时, 湍流效应更显著, 储罐组间火焰会加速传播, 产生更强的爆炸超压^[31], 从而导致爆炸冲击波对罐区内管道和储罐的连锁破坏, 造成二次爆炸或火灾事故。

表 6 爆炸超压对建筑物的破坏作用

Table 6 Destructive effect of explosion overpressure on building surface

建筑类型	爆炸超压/kPa				
	完全毁坏	严重毁坏	中等毁坏	轻度毁坏	轻微毁坏
钢筋混凝土建筑	80~100	50~80	30~50	10~30	3~10
多层砖结构	20~40	20~30	10~20	5~10	3~5
少层砖结构	35~45	25~35	15~25	5~15	3~5
木建筑物	20~30	12~20	8~12	5~8	3~5
工业钢架建筑物	50~80	30~50	20~30	5~20	3~5

4 结 论

针对能源化工厂中的乙烯球罐区, 从泄漏方向、泄漏速率和环境风速、风向的角度, 对乙烯储罐气体泄漏诱发蒸气云爆炸进行了数值模拟, 得到以下结论:

(1) 泄漏速率和方向都影响气云的 D_{\max} 和 V_{Q9} 。当泄漏速率较低时, 大气对泄漏气体的稀释作用显著, 不同泄漏方向上气云 D_{\max} 和 V_{Q9} 相近; 但随着泄漏速率的升高, 不同泄漏方向上, 阻塞率升高导致气云 D_{\max} 减小, V_{Q9} 增大。+X 和 +Y 泄漏方向上 D_{\max} 随时间的变化分别符合二次函数和对数函数关系。 D_{\max} 在泄漏方向为 +X、泄漏速率为 18 kg/s 的条件下最大, 达到 81.5 m; V_{Q9} 在泄漏方向为 +Y、泄漏速率为 24 kg/s 的条件下最大, 达到 9 604 m³。

(2) 环境风速和风向对 D_{\max} 和 V_{Q9} 的影响较大。风能促进气云扩散, 加速可燃气体与大气的稀释, 从而有效降低 V_{Q9} 。4 种泄漏速率下, 5.65 m/s 的环境风速能够使 V_{Q9} 分别降低 89%、79%、77% 和 71%; 3 种风向条件下, 当 +Y 风向与 +Y 泄漏方向相同时, V_{Q9} 明显最高; 环境风和障碍物阻塞率共同影响 D_{\max} , 在障碍物阻塞率较低的正 X 泄漏方向上, 环境风的存在能够大幅度降低气云 D_{\max} , 在障碍物阻塞率较高的 +Y 泄漏方向上, 与泄漏方向相同的 +Y 风向可显著增大气云 D_{\max} 。

(3) 储罐气体向开敞空间泄漏的过程中, 气云爆炸产生的 p_{\max} 较低, 但 T_{\max} 较高。+Y 泄漏方向, 24 kg/s 泄漏速率最危险工况下, 储罐 B 表面 p_{\max} 为 6.88 kPa, 而 T_{\max} 高达 2 384 K。环境风作用能够降低 V_{Q9} , 减弱气云 p_{\max} , 缩短爆炸火焰的燃烧反应时间和高温对储罐的影响时间。

上述研究得到的可燃气云分布范围、气云体积大小及发生爆炸后超压、高温对储罐的影响规律, 对储罐区的风险评估、事故预防、安全管理及事故后的应急救援具有一定参考意义。

参考文献:

- [1] CHANG J I, LIN C C. A study of storage tank accidents [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2006, 19(1): 51-59. DOI: 10.1016/j.jlp.2005.05.015.
- [2] LIAW H J. Lessons in process safety management learned in the Kaohsiung gas explosion accident in Taiwan [J]. *Process Safety Progress*, 2016, 35(3): 228-232. DOI: 10.1002/prs.11818.
- [3] 朱红亚, 陈昊东, 王青松, 等. 多源重气泄漏扩散模拟研究 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2014, 44(8): 697-703. DOI: 10.3969/j.issn.0253-2778.2014.08.010.
ZHU H Y, CHEN H D, WANG Q S, et al. Simulation research on leakage and dispersion of multi-source heavy gas [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2014, 44(8): 697-703. DOI: 10.3969/j.issn.0253-2778.2014.08.010.
- [4] 李萍, 丁珩, 翁培奋. 两种颗粒湍流扩散模型数值模拟气液两相流泄漏扩散的比较 [J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(6): 541-546.

- DOI: 10.11883/1001-1455(2005)06-0541-06..
- LI P, DING J, WENG P F. A numerical simulation on liquid gas two phase leakage dispersion by using two particle turbulent models [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(6): 541–546. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)06-0541-06..
- [5] 邓小娇, 姚安林, 徐涛龙, 等. 城市综合管廊燃气舱室输气管道泄漏扩散规律研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2019, 15(11): 83–89. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2019.11.013.
- DENG X J, YAO A L, XU T L, et al. Study on leakage and diffusion laws of gas pipeline in gas cabin of urban utility tunnel [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2019, 15(11): 83–89. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2019.11.013.
- [6] LI X H, CHEN G M, ZHANG R R, et al. Simulation and assessment of underwater gas release and dispersion from subsea gas pipelines leak [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, 119: 46–57. DOI: 10.1016/j.psep.2018.07.015.
- [7] 任少云. 开敞空间液化天然气泄漏低温扩散及爆炸传播规律 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(4): 891–897. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0323.
- REN S Y. The leakage, low temperature diffusion and explosion of liquefied natural gas in open space [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(4): 891–897. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0323.
- [8] LOVREGLIO R, RONCHI E, MARAGKOS G, et al. A dynamic approach for the impact of a toxic gas dispersion hazard considering human behaviour and dispersion modelling [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 318: 758–771. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.06.015.
- [9] 黄有波, 董炳燕, 吕淑然, 等. 天然气管道泄漏孔形状对喷射火影响模拟研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2015, 25(7): 62–67. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2015.07.010.
- HUANG Y B, DONG B Y, LYU S R, et al. Simulation study on influence of natural gas pipeline leak hole shape on jet fire [J]. *China Safety Science Journal*, 2015, 25(7): 62–67. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2015.07.010.
- [10] GEXCON A S. FLACS V10.9 user's manual [M]. Norway: Gexcon, 2019.
- [11] MIDDHA P, ICHARD M, ARNTZEN B J. Validation of CFD modelling of LH₂ spread and evaporation against large-scale spill experiments [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(3): 2620–2627. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.03.122.
- [12] MIDDHA P, HANSEN O R. Using computational fluid dynamics as a tool for hydrogen safety studies [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2009, 22(3): 295–302. DOI: 10.1016/j.jlp.2008.10.006.
- [13] MIDDHA P, HANSEN O R, STORVIK I E. Validation of CFD-model for hydrogen dispersion [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2009, 22(6): 1034–1038. DOI: 10.1016/j.jlp.2009.07.020.
- [14] HANSEN O R, GAVELLI F, ICHARD M, et al. Validation of FLACS against experimental data sets from the model evaluation database for LNG vapor dispersion [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2010, 23(6): 857–877. DOI: 10.1016/j.jlp.2010.08.005.
- [15] SCHLEDER A M, MARTINS M R. Experimental data and CFD performance for CO₂ cloud dispersion analysis [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 43: 688–699. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.03.027.
- [16] FIATES J, SANTOS R R C, NETO F F, et al. An alternative CFD tool for gas dispersion modelling of heavy gas [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 44: 583–593. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.08.002.
- [17] WANG Q, SUN Y, LI X, et al. Process of natural gas explosion in linked vessels with three structures obtained using numerical simulation [J]. *Processes*, 2020, 8(1): 52. DOI: 10.3390/pr8010052.
- [18] 文虎, 高慧慧, 王秋红, 等. 泄爆口强度对管内天然气爆炸流场的影响仿真 [J]. *天然气工业*, 2019, 39(8): 126–136. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2019.08.016.
- WEN H, GAO H H, WANG Q H, et al. A simulation study on the influence of vent port strength on the natural gas explosion flow field in line pipes [J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(8): 126–136. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2019.08.016.
- [19] LI J D, MA G W, ABDEL-JAWAD M, et al. Gas dispersion risk analysis of safety gap effect on the innovating FLNG vessel with a cylindrical platform [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 40: 304–316. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.01.005.
- [20] LI J, MA G, HAO H, et al. Gas explosion analysis of safety gap effect on the innovating FLNG vessel with a cylindrical platform [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 44: 263–274. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.09.019.
- [21] LI J, MA G, HAO H, et al. Optimal blast wall layout design to mitigate gas dispersion and explosion on a cylindrical FLNG platform [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 49: 481–492. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.05.025.

- [22] HUANG Y, MA G, LI J. Multi-level explosion risk analysis (MLERA) for accidental gas explosion events in super-large FLNG facilities [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 45: 242–254. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.11.004.
- [23] 王志寰, 李成兵, 周宁. 大型 LNG 接收站泄漏事故灾害效应分析与预测 [J]. *天然气工业*, 2019, 39(5): 145–153. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2019.05.018.
WANG Z H, LI C B, ZHOU N. Analysis and prediction on the disaster effect of leakage accidents at large LNG receiving stations [J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(5): 145–153. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2019.05.018.
- [24] BJEKETVEDT D, BAKKE J R, Van WINGERDEN K. Gas explosion handbook [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1997, 52(1): 1–150. DOI: 10.1016/S0304-3894(97)81620-2.
- [25] 杨国刚, 丁信伟, 毕明树, 等. 燃料浓度对可燃蒸气云爆炸影响的实验研究与数值模拟 [J]. *石油学报 (石油加工)*, 2004, 20(5): 53–58. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8719.2004.05.010.
YANG G G, DING X W, BI M S, et al. Experimental and simulation study of the effect of fuel concentration on flammable vapor cloud explosion [J]. *Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section)*, 2004, 20(5): 53–58. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8719.2004.05.010.
- [26] ZHANG S H, ZHANG Q. Influence of geometrical shapes on unconfined vapor cloud explosion [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2018, 52: 29–39. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.01.004.
- [27] HANSEN O R, GAVELLI F, DAVIS S G, et al. Equivalent cloud methods used for explosion risk and consequence studies [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, 26(3): 511–527. DOI: 10.1016/j.jlp.2012.07.006.
- [28] 李炜, 槐文信. 浮力射流的理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [29] ATKINSON G, COWPE E, HALLIDAY J, et al. A review of very large vapour cloud explosions: cloud formation and explosion severity [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 48: 367–375. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.03.021.
- [30] LV D, TAN W, LIU L Y, et al. Research on maximum explosion overpressure in LNG storage tank areas [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 49: 162–170. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.06.010.
- [31] MA G W, LI J D, ABDEL-JAWAD M. Accuracy improvement in evaluation of gas explosion overpressures in congestions with safety gaps [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2014, 32: 358–366. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.10.007.

(责任编辑 张凌云)