

## Quantitative analysis method and index response law of hydrogen sulfide leakage

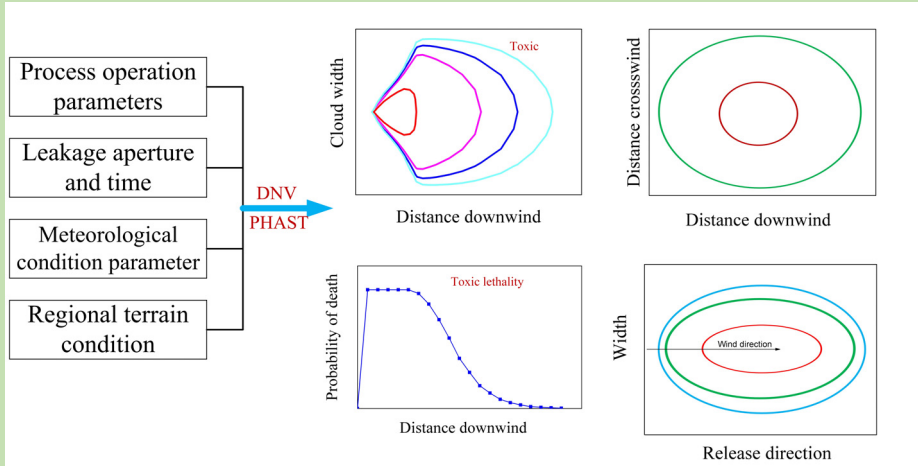
Baoquan XIN<sup>1,2\*</sup>, Wei LU<sup>1,2</sup>, Xiangjian ZHANG<sup>1,2</sup>, Lu WAN<sup>3</sup>

1. SINOPEC Qingdao Research Institute of Safety Engineering, Qingdao, Shandong 266101, China

2. State Key Laboratory of Safety and Control for Chemicals, Qingdao, Shandong 266101, China

3. Saifeite Engineering Technology Group Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266061, China

**Abstract:** It is to quantitatively analyze the influence range of hydrogen sulfide leakage under different scenarios and the response law of various parameters, and then provide quantitative data for hydrogen sulfide leakage protection. According to the unified diffusion model and the heavy gas diffusion theory, the diffusion characteristics,



concentration distribution and downwind distance of hydrogen sulfide under different leakage conditions were studied by means of Process Hazard Analysis Software Tool (PHAST) of DET NORSKE VERITAS (DNV). The results showed that the immediately dangerous to life or health (IDLH) concentration downwind distance from the 661 m to the 2404 m increased when the leakage persisted for 1 min. The downwind distance and maximum cloud width of IDLH and maximum allowable concentration (MAC) have increased by 3~4 times. Changes in durations of 5 and 30 min were similar. At the same leakage aperture, the IDLH downwind distance was shortened by 31.4%, 23.8%, and 24.7%, respectively, when the mesopore and large holes leaked and ruptured. Correspondingly, the maximum cloud width has increased by 1.4~1.7 times. At a wind speed of 4 m/s, the IDLH and MAC downwind distance of the atmospheric stability E were 2.8 and 3.8 times than that of B, respectively. The IDLH and MAC downwind distances for medium stability D and wind speed 8.5 m/s were 49.2% and 39.3%, respectively, in comparison with that at a wind speed of 1.5 m/s. The downwind distance and the maximum cloud group width showed a logarithmic relationship as the surface roughness increased. The main hazard that can be caused by hydrogen sulfide leakage were poisoning, followed by jet fire, flash fire and explosion. Quantitative analysis results can be used in leakage protection, considering both individual protection and safety isolation. The influence area of leakage can be used as the boundary of hydrogen sulfide safety isolation.

**Key words:** hydrogen sulfide; quantitative analysis; leakage diffusion; safety distance; DNV PHAST software

收稿: 2018-03-19, 修回: 2018-09-12, 网络发表: 2018-10-15, Received: 2018-03-19, Revised: 2018-09-12, Published online: 2018-10-15

基金项目: 四川省科技创新苗子工程资助项目(编号: 2017016)

作者简介: 辛保泉(1990-), 男, 山东省安丘市人, 硕士, 工程师, 主要从事石油化工定量风险评估和工程抗爆技术研究, E-mail: xinbq123@163.com.

**引用格式:** 辛保泉, 卢卫, 张相建, 等. 硫化氢泄漏后果定量分析及指标响应规律. 过程工程学报, 2018, 18(增刊 1): 82-88.  
Xin B Q, Lu W, Zhang X J, et al. Quantitative analysis method and index response law of hydrogen sulfide leakage (in Chinese).  
Chin. J. Process Eng., 2018, 18(S1): 82-88, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.20180084.

# 硫化氢泄漏后果定量分析方法及指标响应规律

辛保泉<sup>1,2\*</sup>, 卢卫<sup>1,2</sup>, 张相建<sup>1,2</sup>, 万露<sup>3</sup>

1. 中国石油化工股份有限公司青岛安全工程研究院, 山东 青岛 266101

2. 化学品安全控制国家重点实验室, 山东 青岛 266101

3. 赛飞特工程技术集团有限公司, 山东 青岛 266061

**摘要:** 为了定量分析不同场景下 H<sub>2</sub>S 泄漏影响范围及各参数的响应规律, 为 H<sub>2</sub>S 的泄漏防护提供定量数据, 根据统一扩散模型和重气扩散理论, 应用挪威船级社的 PHAST 软件研究了 H<sub>2</sub>S 在不同泄漏条件下的扩散特征、浓度分布及顺风距离等。结果表明, 泄漏 1 min 时, 中孔、大孔泄漏和破裂时的立即威胁生命和健康(IDLH)浓度顺风距离从 661 m 增至 2404 m, IDLH 浓度和最高容许浓度(MAC)的顺风距离、最大云团宽度均增大了 3~4 倍, 持续 5 和 30 min 时变化类似; 相同泄漏孔径时, 中孔、大孔泄漏和破裂时, IDLH 顺风距离分别缩短了 31.4%, 23.8%和 24.7%, 最大云团宽度增加了 1.4~1.7 倍; 风速 4 m/s 时, 大气稳定度 E 的 IDLH 和 MAC 顺风距离分别是大气稳定度 B 的 2.8 倍和 3.8 倍; 大气稳定度 D、风速 8.5 m/s 时的 IDLH 和 MAC 顺风距离分别是风速 1.5 m/s 时的 49.2%和 39.3%; 顺风距离及最大云团宽度随地面粗糙度增大呈对数降低; H<sub>2</sub>S 泄漏后可能造成的主要危害是中毒, 其次是喷射火、闪火及爆炸。在进行泄漏防护时可参考定量分析结果, 从个体防护和安全隔离两方面考虑; 泄漏影响范围可作为 H<sub>2</sub>S 安全隔离的边界。

**关键词:** 硫化氢; 定量分析; 泄漏扩散; 安全距离; DNV PHAST 软件

**中图分类号:** X937      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-606X(2019)S1-0082-07

## 1 前言

硫化氢(H<sub>2</sub>S)是一种剧毒气体, 吸入少量高浓度 H<sub>2</sub>S 可短时间致命。H<sub>2</sub>S 中毒事故多具突发性和群体性, 且次生灾害影响大, 严重污染和破坏生态环境。此外, H<sub>2</sub>S 为易燃危险化学品, 还会引起火灾爆炸。影响 H<sub>2</sub>S 泄漏危害范围和程度的因素包括装置类型(储罐和钢瓶等)、存储参数(压力和温度等)、泄漏方式、环境条件(大气稳定度、风速、温度、湿度等)以及泄漏区域(罐区、油池、仓库等)等<sup>[1,2]</sup>。定量计算和分析众多影响因素对 H<sub>2</sub>S 泄漏事故的影响规律, 可为科学准确地防范和控制 H<sub>2</sub>S 事故提供借鉴。

H<sub>2</sub>S 扩散属于重气扩散, 目前国内外研究毒性重气扩散的理论主要有: 湍流统计理论、梯度输送理论和相似理论。分析评估 H<sub>2</sub>S 泄漏后果的模型主要有 BM 模型、FEM3 模型、高斯模型、三维现象传递模型、箱式模型和 UDM 模型等<sup>[3-5]</sup>。这些模型可用于气体的泄漏扩散, 但也有其局限性: BM 模型不适用于喷射或两相释放的近源区, 可用作基础筛选模型; FEM3 模型在模拟重气泄漏扩散时计算量过大, 模拟过程复杂; 高斯模型适用于中性气体, 模拟结果准确度不高; 三维现象传递模型建模过于复杂, 仅适用于重气扩散; 箱式模型常涉及不连续的界面, 扩散模拟时不稳定<sup>[6,7]</sup>。而 UDM 模型(Unified Dispersion Model)适用的泄漏方式和场景较广, 尤其在低风速场景时有更大的预测范围和更高的准确度, 且计算结果相对保守, 安全性更高<sup>[8]</sup>。挪威船级社

(DET NORSKE VERITAS, DNV)的工艺危险源分析软件工具(PHAST)即是根据 UDM 模型模拟气体泄漏扩散过程及后果影响的定量计算软件。

本工作在系统分析 H<sub>2</sub>S 危险特性及产生原因的基础上, 选定脱硫单元 H<sub>2</sub>S 泄漏这一典型场景为研究对象, 借助 PHAST 软件, 在一定压力、温度、质量(或容量)等存储参数、泄漏孔径等泄漏参数和气象条件下, 模拟得到一般泄漏场景下 H<sub>2</sub>S 的扩散过程和浓度分布特征; 改变参数条件, 研究相应的浓度扩散分布规律, 为 H<sub>2</sub>S 事故的防范和应急疏散提供参考。

## 2 硫化氢危险特性和模拟分析

### 2.1 硫化氢危险性

#### 2.1.1 毒性

H<sub>2</sub>S 是一种无色、剧毒的酸性气体, 其毒性仅次于氰化物, 是 CO 的 5~6 倍、SO<sub>2</sub> 的 7 倍。通常情况下, H<sub>2</sub>S 的最高容许浓度(MAC)为 10 mg/m<sup>3</sup>, 半数致死浓度(LC50)为 618 mg/m<sup>3</sup>, 人体致命浓度为 0.5%。

#### 2.1.2 可燃性

H<sub>2</sub>S 为易燃危化品, 燃点为 260 ℃(CH<sub>4</sub> 为 595 ℃), 燃烧时有蓝色火焰, 生成的 SO<sub>2</sub> 危害眼睛和肺部。

#### 2.1.3 爆炸性

H<sub>2</sub>S 的爆炸极限浓度为 4%~46%, 比 CH<sub>4</sub>(5%~15%)还广, 与空气混合可形成爆炸性混合物, 遇明火、高热源、浓硝酸或其它强氧化剂会发生剧烈反应, 引起爆炸。由于 H<sub>2</sub>S 比空气重, 能在较低位置扩散到很远处, 遇火

源发生着火回燃。

## 2.2 PHAST 软件模拟概述

根据  $\text{H}_2\text{S}$  事故原因统计分析, 石油化工工艺中脱硫单元原料气过滤分离器内  $\text{H}_2\text{S}$  含量高、压力大, 原料气中的  $\text{H}_2\text{S}$  长期与装置接触会生成硫化铁混合物, 在打开装置检修时易中毒, 甚至由于硫化铁的自燃而导致火灾、爆炸等重大事故<sup>[9]</sup>, 因此以原料气过滤分离器发生  $\text{H}_2\text{S}$  泄漏为例, 运用 PHAST 软件进行建模和定量计算。

PHAST 软件是 DNV 公司开发的一款专门用于计算石油化工和天然气领域事故后果的软件, 目前在全球同类软件中处于领先地位。软件内嵌了泄漏扩散、毒气扩散、燃烧和爆炸等多种计算模型, 其中泄漏扩散模块采用的是 UDM 模型, 可计算在某一时刻  $\text{H}_2\text{S}$  泄漏扩散后的浓度分布曲线和扩散范围等。UDM 模型包括准瞬时模型和有限时间修正模型两个子模型, 假定泄漏速度在一个有限时间内不变, 通过输入事故发生时含  $\text{H}_2\text{S}$  装置的真实场景, 如设备类型、物料种类、储存数量、操作温度、工艺压力、泄漏方式、气象条件等, 即可模拟该装置因泄漏而造成的事故后果<sup>[10]</sup>。

## 3 硫化氢泄漏扩散特征及后果评估

### 3.1 模拟条件分析及设定

#### 3.1.1 基本工艺参数

根据脱硫单元实际运行条件, 设定原料气过滤分离器压力为 2 MPa, 工作温度 30℃, 泄漏源高度 1.0 m。

#### 3.1.2 泄漏孔径及时间

根据标准推荐值<sup>[11]</sup>, 选取 5, 25, 100 和 150 mm 分别代表小孔、中孔、大孔泄漏及完全破裂 4 种泄漏场景。发生小孔泄漏时各工艺参数变化较慢, 系统在短时间内难以监测并作出反应, 取 30 min 模拟; 中孔泄漏时各工艺参数变化较快, 系统反应时间较短, 分别取 1, 5 和 30 min 模拟; 发生大孔泄漏和完全破裂时, 温度、压力和流量等工艺参数会发生突变, 现场  $\text{H}_2\text{S}$  报警器立即报警, 人员作出响应, 泄漏时间通常不超过 5 min, 分别取 0.5, 1 和 5 min 模拟<sup>[11,12]</sup>。

#### 3.1.3 气象条件分析

在 PHAST 软件中, 对气象条件的模拟主要考虑大气稳定度和风速。大气稳定度使用 Pasquill 分类法, 受风速和日照强度影响, 分为 A, B, C, D, E 和 F 六类, A 最不稳定, D 中等稳定, F 最稳定, 具体确定时还需考虑白天日照强度和夜间条件。日照强度根据天空云量、云层高度和日照角确定; 夜间条件根据天空云量确定。根据文献<sup>[11]</sup>要求, 计算扩散时选择 6 种天气类别(表 1)。

气象统计资料应采用评价单元附近的实际气象

统计数据。为研究不同风速和大气稳定度对  $\text{H}_2\text{S}$  泄漏扩散的影响, 可选取不同类别中的代表性气象条件进行计算和分析。根据表 1 分类, 分别选择 B(4 m/s), D(1.5 m/s), D(4 m/s), D(8.5 m/s), E(4 m/s)和 F(1.5 m/s)进行模拟。为保证变量的唯一性和结果的可靠性, 计算不同场景的扩散过程时, 仅改变该场景的参数条件, 其它参数选择常见的某类(个)典型参数。

表 1 选择的天气类别

Table 1 Selected weather categories

Atmospheric stability	Wind speed/(m/s)
B	Middle: 3~5
D	Low: 1~2
D	Middle: 3~5
D	High: 8~9
E	Middle: 3~5
F	Low: 1~2

#### 3.1.4 区域地形条件

脱硫装置气体泄漏扩散的主要大气运动机理是微气象学, 石油化工企业内各种管道、塔、罐等设备设施和建筑物较多, 会显著影响装置所在区域的微气象学行为, 改变局部气体流向和泄漏介质的稀释速度<sup>[13]</sup>。各种建筑物和装置形成的拥挤区域增强了气体扩散和燃烧的湍流, 会加快扩散和燃烧速度, 并进一步产生显著的超压。地形条件复杂, 地面粗糙, 则扩散、燃烧湍流现象显著。在 PHAST 中用表面粗糙度参数  $z_r$  表征地面条件, 参考当前推荐做法<sup>[14]</sup>和化工厂实际运行条件,  $z_r$  取较适中的 0.5 m。

### 3.2 浓度变化特征分析

选择不同泄漏场景, 分别计算  $\text{H}_2\text{S}$  在不同条件下的扩散过程 and 变化特征。根据《工作场所有害因素职业接触限值》(GB Z2.1)等标准要求, 主要关注 MAC 和 IDLH。MAC 是指最高容许接触浓度, 为 10 mg/m<sup>3</sup>; IDLH 即立即威胁生命和健康浓度, 指人员暴露于有害气体环境 30 min 内, 不会造成致命、永久损害健康或让人立即丧失逃生能力等后果的最大容许浓度。国内对硫化氢 IDLH 的规定仍为 15 年前的 0.3%, 美国国家职业安全卫生研究所(NIOSH)已于 2014 年对 IDLH 值进行了修订, 将  $\text{H}_2\text{S}$  的 IDLH 值调整为 0.4%。鉴于  $\text{H}_2\text{S}$  的高度危害性, 研究  $\text{H}_2\text{S}$  在 IDLH 为 0.1%时的后果; 为了分析不同持续时间对扩散范围(主要是顺风距离和云团宽度)的影响, 计算 1, 5 和 30 min 内的泄漏结果<sup>[15]</sup>。

#### 3.2.1 泄漏孔径和时间影响

大气稳定度和风速中等的条件 D(4 m/s)是最常见的典型气象条件, 选择条件 D(4 m/s)分别模拟不同泄漏孔径和持续时间下  $\text{H}_2\text{S}$  的扩散过程, 结果见表 2。

表 2 不同泄漏孔径和时间计算结果  
Table 2 Calculated results for different leak apertures and times

Leakage aperture/mm	Duration time/min	IDLH downwind distance/m	IDLH maximum cloud width/m	MAC downwind distance/m	MAC maximum cloud width/m
5	30	80.6	9.7	385.3	31.9
25	1	661.0	38.8	3092.0	113.6
	5	553.9	49.1	2561.6	135.4
	30	453.4	64.2	2081.1	165.4
100	0.5	1670.8	76.9	8832.3	241.6
	1	1539.5	84.6	8082.1	259.3
	5	1272.3	106.8	6590.9	306.5
150	0.5	2618.7	115.5	14916.5	374.8
	1	2404.0	127.1	13584.0	401.0
	5	1973.0	160.7	10960.5	471.3

从表 2 可以看出，脱硫单元原料气过滤分离器中，如有足量的 H<sub>2</sub>S 持续泄漏(存储量不少于关注时间内的泄漏量)，泄漏孔径对顺风距离和云团宽度的影响最大，泄漏持续时间的影响次之，且孔径和持续时间对顺风距离的影响规律并不相同。

相同持续时间内，顺风距离和最大云团宽度均随泄漏孔径增大而显著增加。持续 1 min 时，中孔、大孔泄漏和破裂时的 IDLH 顺风距离从 661 m 增至 2404 m，最大云团宽度从 38.8 m 增至 127.1 m；MAC 顺风距离较远，从 3092 m 增至 13584 m，最大云团宽度从 113.6 m 增至 401 m。IDLH 和 MAC 的顺风距离、最大云团宽度均增大了 3~4 倍，持续 5 和 30 min 时变化类似。

一定泄漏孔径时，由于 H<sub>2</sub>S 随风扩散，IDLH 和 MAC 的顺风距离随持续时间逐渐缩短，而最大云团宽度逐渐增大。中孔、大孔泄漏和破裂时，IDLH 顺风距离分别缩短了 31.4%、23.8%和 24.7%，相应的最大云团宽度增加了 1.4~1.7 倍；MAC 顺风距离分别缩短了 32.7%、25.4%和 26.5%，最大云团宽度增加了 1.3~1.5 倍。

H<sub>2</sub>S 的泄漏过程满足式(1)，喷射状态为阻塞流动，

泄漏量根据式(2)计算<sup>[13]</sup>：

$$\frac{p}{p_0} > \left( \frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}}, \tag{1}$$

$$Q_0 = C_d A p \sqrt{k \left( \frac{M}{RT} \right) \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}, \tag{2}$$

式中， $p$  为原料气过滤分离器压力(Pa)， $p_0$  为大气压(Pa)， $k$  为气体绝热系数，通常取 1.3~1.4， $Q_0$  为泄漏量(kg/s)， $C_d$  为气体泄漏系数，通常为 0.2~1.0，圆形裂孔取 0.6， $A$  为裂孔面积(m<sup>2</sup>)， $M$  为摩尔质量(kg)， $R$  为气体常数 [J/(mol·K)]， $T$  为原料气温度(K)。

式(2)表明，在一定基本工艺条件下，泄漏量  $Q_0 \propto A$ ，对于圆形孔，即与孔径平方成正比，因此 H<sub>2</sub>S 泄漏后形成的 IDLH 和 MAC 顺风距离和最大云团宽度随泄漏孔径增大而显著增加。

3.2.2 气象条件影响

选择中孔(25 mm)，泄漏 5 min，分别模拟不同大气稳定性和风速下 H<sub>2</sub>S 的 IDLH 和 MAC，结果见表 3。

表 3 气象条件对扩散影响的计算结果  
Table 3 Calculated results of the effects of weather conditions on diffusion

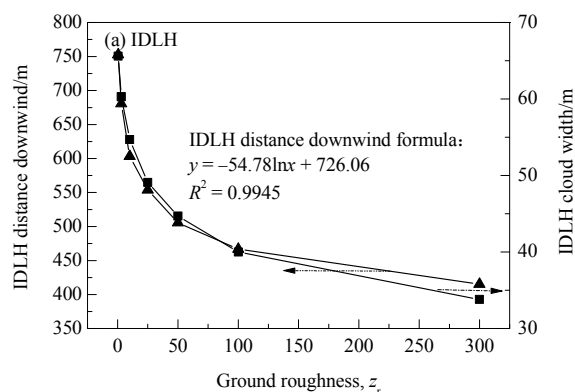
Atmospheric stability	Wind speed/(m/s)	IDLH downwind distance/m	IDLH maximum cloud width/m	MAC downwind distance/m	MAC maximum cloud width/m
B	4	289.1	44.1	1075.8	131.0
D	1.5	771.3	129.3	4266.4	250.1
	4	553.9	49.1	2561.8	135.5
	8.5	379.3	24.6	1676.0	85.6
E	4	809.5	55.6	4132.0	154.4
F	1.5	2267.4	206.0	16447.6	391.4

相同风速下大气稳定度越高，IDLH 和 MAC 顺风距离越远，最大云团宽度越大，稳定的大气条件不利于 H<sub>2</sub>S 及时消散。风速 1.5 m/s 时，IDLH 和 MAC 的顺风距离在最稳定的 F 条件下分别为中等稳定度 D 条件下的 2.9 倍和 3.9 倍，最大云团宽度约为 1.6 倍；风速 4 m/s 时，较稳定的 E 条件下的顺风距离分别为不稳定度 B 条件下的 2.8 倍和 3.8 倍，最大云团宽度约为 1.3 倍。

大气稳定度相同时，较高的风速有利于 H<sub>2</sub>S 泄漏后及时消散，风速越大，IDLH 和 MAC 的顺风距离及最大云团宽度越小。中等稳定度 D 和风速 8.5 m/s 时的 IDLH 和 MAC 顺风距离分别为风速 1.5 m/s 时的 49.2% 和 39.3%，对应的最大云团宽度分别为 19%和 34.2%。因此保持厂区和相关装置区域较好的通风条件，对降低 H<sub>2</sub>S 泄漏后果严重度有重要作用。

### 3.2.3 地形条件影响

选取泄漏孔径 25 mm、持续时间 5 min 和气象条件



D(4 m/s)下模拟计算  $\text{H}_2\text{S}$  在不同地形条件下的扩散过程, 结果如图 1 所示。

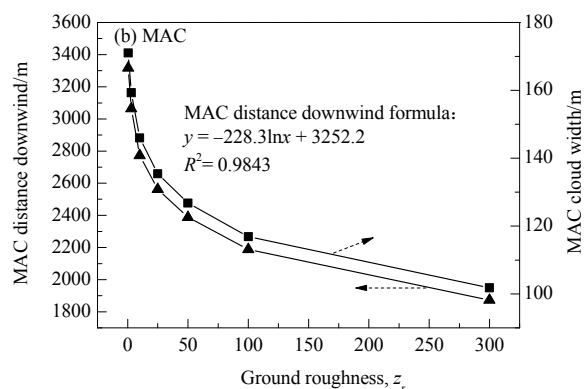


图 1 地形条件对  $\text{H}_2\text{S}$  扩散的影响

Fig.1 Effect of topography on  $\text{H}_2\text{S}$  diffusion

图 1 表明,  $\text{H}_2\text{S}$  泄漏后的顺风距离及最大云团宽度与厂区地面粗糙度近似呈对数关系, 且随粗糙度增大而降低。在几乎无障碍物时( $z_r=0.5$  cm), IDLH 顺风距离最大, 可达 753 m, 最大云团宽度为 65.6 m, MAC 顺风距离和最大云团宽度分别为 3317 和 171 m; 有分散的大障碍物时( $z_r=25$  cm), IDLH 顺风距离和最大云团宽度分别为 554 和 49 m, MAC 顺风距离和最大云团宽度分别为 2562 和 135 m; 在普遍覆盖有大的障碍物时( $z_r=100$  cm), IDLH 顺风距离和最大云团宽度分别为 467 和 40 m, MAC 顺风距离和最大云团宽度分别为 2188 和 117 m。地面障碍物的存在抑制了  $\text{H}_2\text{S}$  泄漏后的扩散, 降低了毒性的影响距离, 较多的障碍物会导致一定区域内  $\text{H}_2\text{S}$  浓度的升高, 同时增加爆炸风险, 需根据工艺装置合理布局, 且应尽量避免装置区过于阻塞。

### 3.3 泄漏后果定量分析

#### 3.3.1 毒性

根据  $\text{H}_2\text{S}$  常见泄漏场景, 选定泄漏孔径 25 mm, 泄漏时间 5 min, 气象条件 D(4 m/s), 地形粗糙度  $z_r=25$  cm,

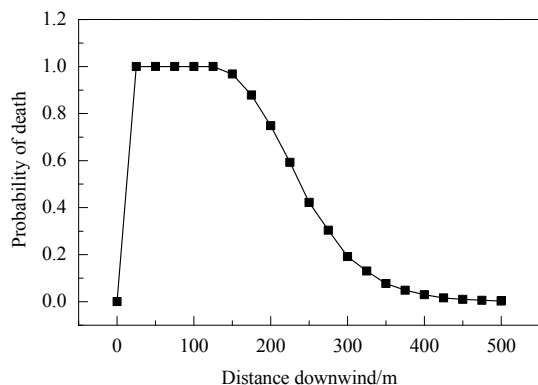


图 2 毒性死亡概率随距离的变化

Fig.2 Death probability from toxicity changes with distance

研究  $\text{H}_2\text{S}$  泄漏后的毒性致死概率及影响范围, 结果见图 2。由图可知, 在顺风距离 0~25 m 内, 毒性死亡概率急速上升至 1, 并持续至 125 m 处, 之后死亡概率逐渐降低, 在距离 450 m 后死亡概率降至 0.01 以下。

室外致死率( $L_p$ )俯视图见图 3。其中,  $L_p$  为 99% 时的顺风距离为 138.3 m, 最大云团宽度为 18.5 m;  $L_p$  为 10% 时的顺风距离为 338.5 m, 最大云团宽度为 45 m;  $L_p$  为 1% 时的顺风距离为 451.6 m, 最大云团宽度为 52.2 m;  $L_p$  为 0.1% 时的顺风距离为 559.6 m, 最大云团宽度为 57.4 m。

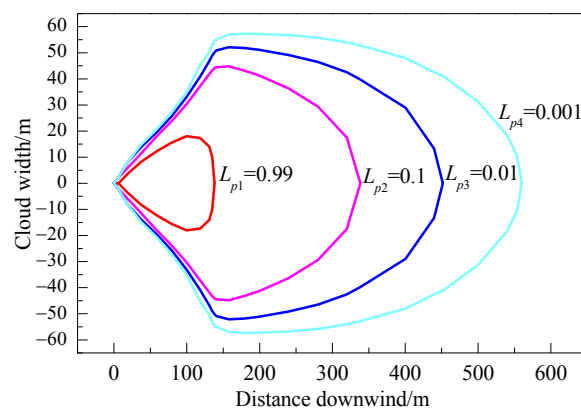


图 3 毒性室外致死率俯视图

Fig.3 Outdoor toxic lethality of top view

#### 3.3.2 火灾

$\text{H}_2\text{S}$  泄漏后可能造成的火灾主要包括喷射火和闪火, 其致死率半径如图 4 所示。图 4 表明, 发生喷射火时释放方向 5.3 m 半径内的致死率为 99%, 8.1 m 内为 10%, 8.7 m 时则降为 1%; 而发生闪火时, 在浓度 0.043 时的顺风距离为 9.1 m, 浓度 0.0215 时为 22.8 m。

#### 3.3.3 爆炸

$\text{H}_2\text{S}$  的爆炸极限为 4%~46%, 达到爆炸极限时如

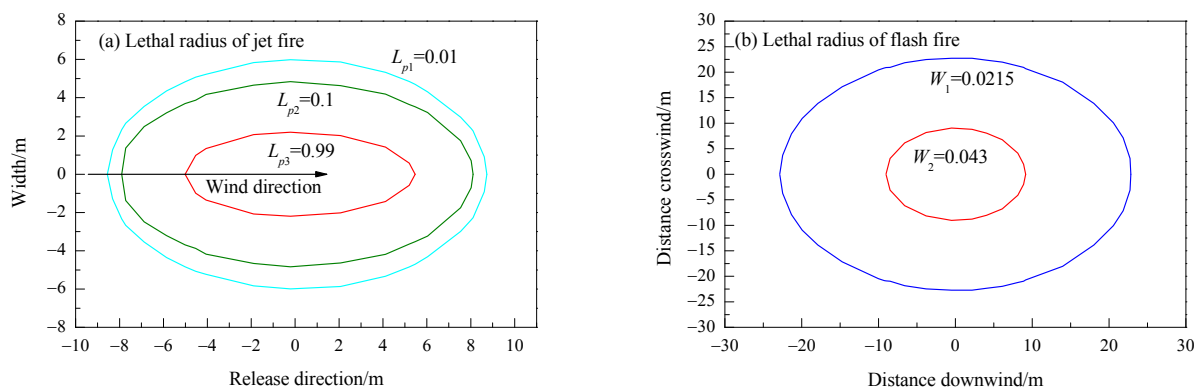


图4 H<sub>2</sub>S 泄漏火灾致死率计算结果  
Fig.4 Calculated results of H<sub>2</sub>S leak fire fatalities

遇明火或热源可能发生爆炸, 延迟爆炸的最坏情况计算结果如图 5 所示. 由图可知, 爆炸超压 20680 Pa 时的顺风距离为 43.1 m, 13790 Pa 时为 24.5 m, 2068 Pa 时为 23.4 m. 具体的定量评估时还需进一步考虑分析地点的地形条件、泄漏频率和爆炸概率等.

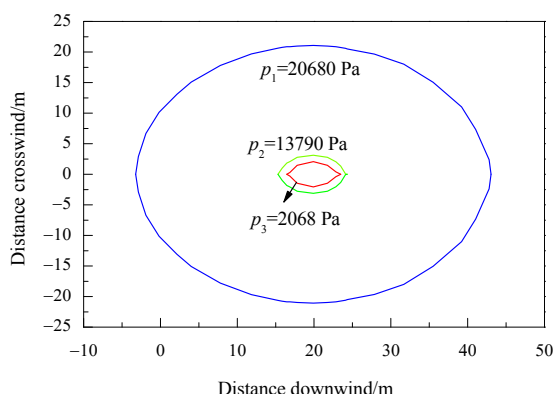


图5 延迟爆炸最坏情况影响半径  
Fig.5 Radius of worst-case in late explosion

## 4 结 论

通过对 H<sub>2</sub>S 泄漏扩散后果的模拟和分析, 得到如下结论:

(1) 影响 H<sub>2</sub>S 泄漏风险的指标主要包括基本工艺参数、泄漏孔径及持续时间、当地气象条件和厂区地形条件等. DNV PHAST 软件可较准确地计算和分析各泄漏参数对顺风距离和云团宽度的影响.

(2) 大量 H<sub>2</sub>S 泄漏后, 泄漏孔径对扩散范围的影响最大, 持续时间的影响次之, 且孔径和持续时间对顺风距离的影响规律不同. 大气稳定性和风速均对扩散范围有显著影响, 保持厂区和相关装置区域较好的通风条件, 对降低 H<sub>2</sub>S 泄漏后果严重度有重要作用. H<sub>2</sub>S 泄漏后的扩散范围与厂区地面粗糙度近似呈对数关系, 且随

粗糙度增大而对数降低, 需根据工艺装置合理布局.

(3) 硫化氢泄漏后可能造成的主要危害是中毒, 其次是喷射火、闪火及爆炸. 在进行泄漏防护时可参考定量分析结果, 从个体防护和安全隔离两方面考虑, 计算出的泄漏影响范围可作为硫化氢安全隔离的边界.

## 参考文献

- [1] 章博, 王志刚, 王彦富. 高硫炼油装置硫化氢泄漏场景集定量分析 [J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(10): 73-78.  
Zhang B, Wang Z G, Wang Y F. Quantitative analysis of hydrogen sulfide leakage scene in high sulfur refining unit [J]. China Safety Production Science and Technology, 2015, 11(10): 73-78.
- [2] Mohtadi-Bonab M A, Eskandari M. Focus on different factors affecting hydrogen induced cracking on oil and natural gas pipeline steel [J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 79: 351-360.
- [3] 毛小虎, 郝永梅, 邢志祥, 等. 城市天然气管道动态泄漏扩散特性模拟分析 [J]. 油气储运, 2014, 33(4): 374-379.  
Mao X H, Hao Y M, Xing Z X, et al. Simulation and analysis of dynamic leakage and diffusion characteristics of urban natural gas pipeline [J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2014, 33(4): 374-379.
- [4] 邓海发, 陈国明, 朱渊, 等. 海洋钻井平台井喷硫化氢扩散规律研究 [J]. 安全与环境学报, 2010, 10(5): 177-180.  
Deng H F, Chen G M, Zhu Y, et al. Study on the diffusion of hydrogen sulfide in offshore drilling platform [J]. Journal of Safety and Environment, 2010, 10(5): 177-180.
- [5] 蒋军成, 潘旭海. 描述重气泄漏扩散过程的新型模型 [J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2002, (1): 41-46.  
Jiang J C, Pan X H. New model heavy gas releasing dispersion analysis [J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2002, (1): 41-46.
- [6] Wang Y, Zhang R, Zhang Z, et al. Leakage risk quantitative calculation model and its application for anaerobic reactor [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2017, 77: 152-160.
- [7] Liu D, Wei J. Modelling and simulation of continuous dense gas leakage for emergency response application [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 48: 14-20.
- [8] 袁景, 赵东风, 孟亦飞. 气体扩散数学模型对比及工程适用性分析 [J]. 石油化工安全环保技术, 2016, 32(1): 16-19, 5-6.  
Yuan J, Zhao D F, Meng Y F. Comparison of mathematical models

- for gas diffusion and engineering applicability analysis [J]. *Petrochemical Safety and Environmental Protection Technology*, 2016, 32(1): 16–19, 5–6.
- [9] 邱永年, 胡利明. 凝析油炼场所硫化氢事故爆炸风险分析 [J]. *石油化工安全环保技术*, 2014, 30(1): 42–46.
- Qiu Y N, Hu L M. Condensate oil refining hydrogen sulfide explosion accident risk analysis places [J]. *Petroleum and Chemical Safety and Environmental Protection Technology*, 2014, 30(1): 42–46.
- [10] Pandya N, Gabas N, Marsden E. Sensitivity analysis of phast's atmospheric dispersion model for three toxic materials (nitric oxide, ammonia, chlorine) [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2012, 25(1): 20–32.
- [11] 国家安全生产监督管理总局. 化工企业定量风险评价导则: AQ/T 3046-2013 [S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2013: 5.
- State Administration of Work Safety. Guidelines for quantitative risk assessment of chemical enterprises: AQ/T 3046-2013 [S]. Beijing: Coal Industry Publishing House, 2013: 5.
- [12] 敬加强, 李小明, 江漩涛, 等. 不同硫化氢浓度下的天然气管道泄漏扩散数值模拟 [J]. *当代化工*, 2015, (11): 2710–2713.
- Jing J Q, Li X M, Jiang X T, et al. Natural gas pipeline under different concentration of hydrogen sulfide leakage diffusion numerical simulation [J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2015, (11): 2710–2713.
- [13] 高少华, 邹兵, 严龙, 等. 含硫天然气净化厂硫化氢泄漏分析及对策 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2012, (2): 174–179.
- Gao S H, Zou B, Yan L, et al. Analysis and countermeasures of hydrogen sulfide leakage in sulfur containing natural gas purification plant [J]. *China Safety Production Science and Technology*, 2012, (2): 174–179.
- [14] 罗志云. 天然气管道泄漏  $H_2S$  扩散及影响区域的数值模拟与分析 [D]. 北京: 北京工业大学, 2008: 40–41.
- Luo Z Y. Numerical simulation and analysis of  $H_2S$  diffusion and influence area of natural gas pipeline leakage [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2008: 40–41.
- [15] 王龙, 马贵阳. 天然气管道泄漏后硫化氢和甲烷危险区域分析 [J]. *当代化工*, 2015, (4): 760–762, 765.
- Wang L, Ma G Y. Analysis of the hazardous area of hydrogen sulfide and methane after leakage of natural gas pipeline [J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2015, (4): 760–762, 765.